



普通高等教育“十二五”规划教材


# 电工与电子技术学习指南

主编 吴建国 张军颖



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

 普通高等教育“十二五”规划教材

策划编辑：谢燕群  
责任编辑：熊 慧  
封面设计：阮志翔

ISBN 978-7-5609-8125-3



9 787560 981253 >

定价：24.80元

普通高等教育“十二五”规划教材

# 电工与电子技术 学习指南

主 编 吴建国 张军颖  
副主编 柳利军 李德芳 宋 慧

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书是根据“电工与电子技术”课程教学基本要求,结合编者多年教学、科研和生产实践经验而编写的一本学习指导书。书中包括电工与电子技术各章节的要点总结和例题解析,以及配套教材的习题解答。全书具有综合性、实用性,突出了对教材的补充和加深的作用。

本书为高等学校本科非电类各专业“电工与电子技术”课程的配套学习参考资料,可供相关专业的学生学习参考,也可供相应教师备课参考,同时可供相关工程技术人员自学参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术学习指南/吴建国 张军颖 主编. —武汉:华中科技大学出版社, 2012.8

ISBN 978-7-5609-8125-3

I. 电… II. ①吴… ②张… III. ①电工技术-高等学校-教学参考资料 ②电子技术-高等学校-教学参考资料 IV. ①TM ②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 131567 号

### 电工与电子技术学习指南

吴建国 张军颖 主编

策划编辑:谢燕群

责任编辑:熊 慧

封面设计:阮志翔

责任校对:代晓莺

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉佳年华科技有限公司

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:14.25

字 数:361千字

版 次:2012年8月第1版第1次印刷

定 价:24.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

## 前 言

“电工与电子技术”课程是高等学校工科类非电专业本科生必修的一门重要的技术基础课程。它的主要任务是通过各个教学环节,运用各种教学手段和方法,使学生掌握电工与电子技术的基本概念、基本理论、基本计算方法;培养学生分析、解决问题的能力 and 实验技能,为日后从事工程技术工作、教学科研及开拓新技术领域打下坚实的基础。

本书是根据教材《电工与电子技术》编写的一本学习指导书,是学习“电工与电子技术”课程的参考用书。其内容的深度、广度与教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新审定的“电工技术”、“电子技术”课程教学基本要求相符,而某些重点部分则有所加深和拓展。本书编排章节顺序、名词术语、公式和符号等与目前通用教材一致,以便读者学习。

全书逐章按“要点总结”、“例题解析”和“习题解答”三个方面加以论述。要点总结,便于学生加深理解、掌握本章主要内容及主要概念。例题解析部分将初学者容易混淆或较难理解的问题作一些比较详细的解释,既有利于读者掌握要点,又可供复习查证之用。本书例题是为巩固基本概念、基础知识、扩充基本内容所用,希望能起到提纲挈领的作用。同时,本书配有教材习题全解。

本书由吴建国、张军颖担任主编,柳利军、李德芳、宋慧担任副主编。第1、3、4、13章由张军颖编写,第5、6、8章由吴建国编写,第2、11章由柳利军编写,第7、9章由李德芳编写,第10、12章由宋慧编写。全书由吴建国策划并统稿。

本书体现了编者几十年从事电工学教学的丰富教学经验,内容简明扼要,明确指出本课程的重点和难点内容,以及学生在学习中的疑难之处与容易出错的概念。

由于编者水平有限,加上时间仓促,错误之处在所难免,希望广大读者提出宝贵意见,以便修改和提高。

编 者

2012.7

# 目 录

<b>第 1 章 电路的基本定律与基本分析方法</b>	(1)
1.1 要点总结	(1)
1.1.1 电路的基本物理量	(1)
1.1.2 电压、电动势和电流的实际方向、参考方向和关联参考方向	(1)
1.1.3 电路的基本定律	(1)
1.1.4 电压源、电流源及其等效变换	(2)
1.1.5 支路电流法	(2)
1.1.6 节点电压法	(2)
1.1.7 叠加原理	(3)
1.1.8 戴维南定理	(3)
1.2 例题解析	(3)
1.3 习题解答	(5)
1.3.1 填空题	(5)
1.3.2 选择题	(7)
1.3.3 计算题	(12)
<b>第 2 章 单相交流电路</b>	(20)
2.1 要点总结	(20)
2.1.1 正弦交流电的表示方法	(20)
2.1.2 基尔霍夫定律的相量形式	(21)
2.1.3 单一参数的正弦交流电路	(21)
2.1.4 正弦交流电路的分析	(21)
2.1.5 正弦交流电路的功率	(23)
2.1.6 功率因数的提高	(23)
2.2 例题解析	(23)
2.3 习题解答	(28)
2.3.1 填空题	(28)
2.3.2 选择题	(30)
2.3.3 计算题	(34)
<b>第 3 章 三相电路</b>	(41)
3.1 要点总结	(41)
3.1.1 三相电源	(41)
3.1.2 三相负载的连接	(41)
3.1.3 三相电路的功率	(42)
3.2 例题解析	(42)
3.3 习题解答	(44)





3.3.1 填空题 .....	(44)
3.3.2 选择题 .....	(45)
3.3.3 计算题 .....	(46)
<b>第4章 暂态电路 .....</b>	<b>(52)</b>
4.1 要点总结 .....	(52)
4.1.1 电路的换路定理 .....	(52)
4.1.2 RC电路的暂态分析 .....	(52)
4.1.3 微分电路和积分电路 .....	(53)
4.2 例题解析 .....	(53)
4.3 习题解答 .....	(56)
4.3.1 填空题 .....	(56)
4.3.2 选择题 .....	(57)
4.3.3 计算题 .....	(59)
<b>第5章 变压器和电动机 .....</b>	<b>(64)</b>
5.1 要点总结 .....	(64)
5.1.1 磁路与磁路的欧姆定律 .....	(64)
5.1.2 变压器 .....	(64)
5.1.3 电动机 .....	(66)
5.2 例题解析 .....	(68)
5.3 习题解答 .....	(73)
5.3.1 填空题 .....	(73)
5.3.2 选择题 .....	(74)
5.3.3 计算题 .....	(76)
<b>第6章 电气自动控制 .....</b>	<b>(81)</b>
6.1 要点总结 .....	(81)
6.1.1 常用低压电器 .....	(81)
6.1.2 电动机继电接触控制的基本电路 .....	(81)
6.1.3 可编程控制器 .....	(83)
6.2 例题解析 .....	(83)
6.3 习题解答 .....	(85)
6.3.1 填空题 .....	(85)
6.3.2 选择题 .....	(86)
6.3.3 分析题 .....	(88)
<b>第7章 半导体器件 .....</b>	<b>(96)</b>
7.1 要点总结 .....	(96)
7.1.1 N型半导体和P型半导体 .....	(96)
7.1.2 PN结的单向导电性 .....	(96)
7.1.3 半导体二极管及其应用 .....	(97)
7.1.4 稳压二极管 .....	(98)

7.1.5 晶体管 .....	(98)
7.1.6 场效应晶体管 .....	(100)
7.2 实例解析 .....	(100)
7.3 习题解答 .....	(103)
7.3.1 填空题 .....	(103)
7.3.2 选择题 .....	(104)
7.3.3 计算题 .....	(105)
<b>第8章 基本放大电路</b> .....	<b>(110)</b>
8.1 要点总结 .....	(110)
8.1.1 基本放大电路的组成 .....	(110)
8.1.2 放大电路图解法 .....	(110)
8.1.3 三种典型放大电路 .....	(111)
8.1.4 阻容耦合多级放大电路 .....	(115)
8.1.5 差动放大电路 .....	(116)
8.1.6 互补对称功率放大电路 .....	(117)
8.1.7 场效应管放大电路 .....	(117)
8.2 实例解析 .....	(119)
8.3 习题解答 .....	(124)
8.3.1 填空题 .....	(124)
8.3.2 选择题 .....	(125)
8.3.3 计算题 .....	(127)
<b>第9章 集成运算放大器及其应用</b> .....	<b>(138)</b>
9.1 要点总结 .....	(138)
9.1.1 集成运算放大器的两个工作区 .....	(138)
9.1.2 基本运算电路 .....	(138)
9.1.3 电压比较器 .....	(139)
9.2 例题解析 .....	(139)
9.3 习题解答 .....	(142)
9.3.1 填空题 .....	(142)
9.3.2 选择题 .....	(144)
9.3.3 计算题 .....	(146)
<b>第10章 直流稳压电源</b> .....	<b>(152)</b>
10.1 要点总结 .....	(152)
10.1.1 整流电路 .....	(152)
10.1.2 滤波电路 .....	(152)
10.1.3 直流稳压电路 .....	(153)
10.2 例题解析 .....	(155)
10.3 习题解答 .....	(158)
10.3.1 填空题 .....	(158)



10.3.2 选择题 .....	(160)
10.3.3 计算题 .....	(161)
<b>第 11 章 门电路与逻辑代数</b> .....	(168)
11.1 要点总结 .....	(168)
11.1.1 基本逻辑关系和逻辑门电路 .....	(168)
11.1.2 集成门电路 .....	(169)
11.1.3 逻辑代数 .....	(169)
11.2 例题解析 .....	(170)
11.3 习题解答 .....	(174)
11.3.1 填空题 .....	(174)
11.3.2 选择题 .....	(174)
11.3.3 分析题 .....	(176)
<b>第 12 章 组合逻辑电路</b> .....	(180)
12.1 要点总结 .....	(180)
12.1.1 组合逻辑电路的分析和设计 .....	(180)
12.1.2 加法器 .....	(180)
12.1.3 编码器 .....	(181)
12.1.4 译码器 .....	(181)
12.1.5 数据选择器和数据分配器 .....	(184)
12.2 例题解析 .....	(185)
12.3 习题解答 .....	(188)
12.3.1 填空题 .....	(188)
12.3.2 选择题 .....	(190)
12.3.3 计算题 .....	(192)
<b>第 13 章 触发器和时序逻辑电路</b> .....	(197)
13.1 要点总结 .....	(197)
13.1.1 双稳态触发器 .....	(197)
13.1.2 同步时序逻辑电路的分析 .....	(198)
13.1.3 典型的时序逻辑电路 .....	(198)
13.1.4 通用集成定时器 555 .....	(199)
13.2 例题解析 .....	(200)
13.3 习题解答 .....	(205)
13.3.1 填空题 .....	(205)
13.3.2 选择题 .....	(207)
13.3.3 计算题 .....	(208)
<b>参考文献</b> .....	(219)

# 第 1 章 电路的基本定律与基本分析方法

## 1.1 要点总结

### 1.1.1 电路的基本物理量

#### 1. 电流

电流表示电荷的定向运动。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的正方向。

#### 2. 电压

电路中任意两点的电位之差就是这两点之间的电压,是表示单位正电荷从起点移到终点时电场力所做的功。某点的电位就是该点与参考点之间的电压。

#### 3. 电动势

电动势是表示电源性质的物理量,表征电源中外力(又称非静电力)做功的能力。

#### 4. 电位

电位表示正电荷位于该点时所具有的电位能的大小。电位是一个相对的概念,是相对于参考点来说的。不确定参考点讨论电位是无意义的。

#### 5. 电功率

电功率是单位时间内电场力所做的功。

### 1.1.2 电压、电动势和电流的实际方向、参考方向和关联参考方向

#### 1. 实际方向的规定

电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点,表示电位降低的方向。

电动势的实际方向规定为自电源的负极,经过电源内部指向正极,是电位升高的方向。

电流的实际方向规定为正电荷运动的方向。

#### 2. 参考方向

参考方向又称为假定方向或正方向。参考方向的确定是分析与计算电路的一种方法。当物理量的真实方向和参考方向一致时,为正值;相反时为负值。

#### 3. 关联参考方向

电流的参考方向与电压的参考方向一致的,称为关联参考方向;电流的参考方向与电压的参考方向不一致的,称为非关联参考方向。

### 1.1.3 电路的基本定律

#### 1. 欧姆定律

欧姆定律表示一段线性纯电阻电路的端电压和电流的关系(伏安关系)。

在关联参考方向下:  $U = IR$ 。

在非关联参考方向下:  $U = -IR$ 。

注意: 欧姆定律只适用于线性电路。

## 2. 基尔霍夫定律

(1) 基尔霍夫电流定律(KCL): 适用于节点和任何封闭面。

$$\sum I = 0$$

(2) 基尔霍夫电压定律(KVL): 适用于闭合回路和回路的部分电路。

$$\sum U = 0$$

注意: 基尔霍夫定律不仅适用于线性电路, 而且也适用于非线性电路。

### 1.1.4 电压源、电流源及其等效变换

(1) 多个理想电压源串联向外部电路供电时, 可以用一个理想电压源等效代替。多个理想电流源并联向外部电路供电时, 可以用一个理想电流源等效代替。要注意电源极性不同时正、负号的确定。

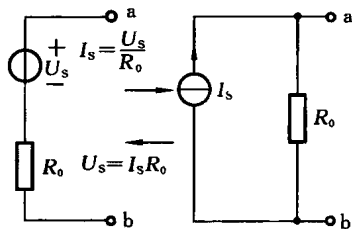


图 1.1 电压源与电流源的等效变换

(2) 凡与理想电压源并联的元件(如电阻、电流源)和与理想电流源串联的元件(如电阻、电压源)对外部电路来说不起作用, 均可取消, 即与理想电压源并联的元件相当于开路, 与理想电流源串联的元件相当于短路。

(3) 电压源和电流源的等效变换如图 1.1 所示。

(4) 理想电压源和理想电流源之间不能等效变换。

### 1.1.5 支路电流法

支路电流法是以支路电流作为待求量分析计算复杂电路的最基本的方法。步骤如下。

- (1) 在电路中标出各支路电流和电压的参考方向。
- (2) 纵观整个电路, 找出节点数  $n$  和支路数  $b$ 。
- (3) 根据基尔霍夫电流定律列电流方程, 方程数为  $n-1$ 。
- (4) 根据基尔霍夫电压定律列单孔回路电压方程, 方程数为  $b-(n-1)$ 。
- (5) 求解联立方程组, 得到各支路电流。
- (6) 用功率平衡关系验证计算结果。

### 1.1.6 节点电压法

节点电压法是以节点电压为待求量的电路分析方法。电路只有两个节点(a、b)时, 节点电压公式如下:

$$U_{ab} = \frac{\sum I_s + \sum \frac{1}{R} U_s}{\sum \frac{1}{R}} \quad (\text{密尔曼定理})$$

式中,  $\sum I_s$  为流入节点 a 的电流源电流的代数和, 流入节点 a 的电流源为正号, 流出节点 a

的电流源为负号;  $\sum \frac{1}{R}$  为与节点 a 和 b 相连电阻的倒数之和, 恒为正。

注意: 该节点电压公式仅适用于具有两个节点的电路。

### 1.1.7 叠加原理

在有多多个独立电源共同作用的线性电路中, 任一支路的电流(或电压)都可认为是由电路中各个理想电源单独作用时, 在该支路中所产生的电流(或电压)的代数和。

一个理想电源单独作用, 就是假设其他独立电源不作用, 即理想电压源短路, 电动势为零; 理想电流源开路, 电流为零。

叠加原理只适用于计算线性电路, 且只适用于计算电压和电流, 不适用于计算功率。

### 1.1.8 戴维南定理

任何一个线性有源二端网络都可用一个等效电压源代替。等效电压源的电压  $U_s$  就是有源二端网络 a、b 间的开路电压  $U_{ab0}$ , 等效电压源的内阻  $R_0$  等于有源二端网络中所有电源均除去后所得到的无源二端网络 a、b 两端之间的等效电阻。

戴维南定理只适用于线性二端网络, 且在只需要计算复杂电路中某一支路的电压或电流时, 应用戴维南定理十分简便。

## 1.2 例题解析

**例 1.1** 电路如图 1.2(a) 所示, 已知  $R_1 = 3 \Omega$ ,  $R_2 = 6 \Omega$ ,  $R_3 = 7 \Omega$ ,  $R_4 = 4 \Omega$ 。试用电源等效变换法求电流  $I_2$ 。

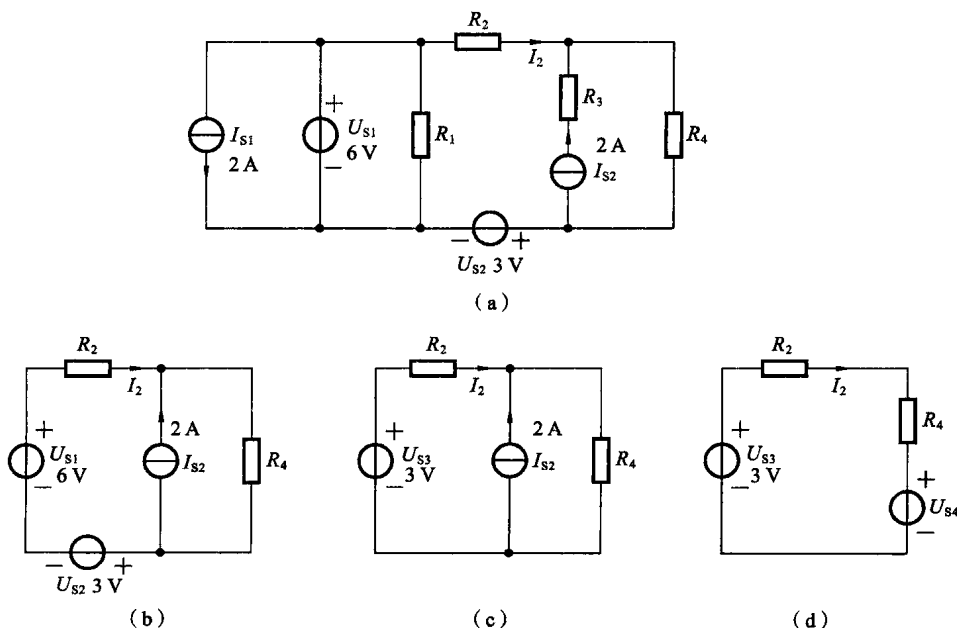


图 1.2

**解** 因与理想电压源  $U_{S1}$  并联的电阻  $R_1$  和理想电流源  $I_{S1}$  可除去(断开)、与理想电流源  $I_{S2}$  串联的电阻  $R_3$  可除去(短接),图 1.2(a)所示电路可等效为图 1.2(b)所示电路。

图 1.2(b)所示电路进一步等效为图 1.2(c)所示电路,  $U_{S3} = U_{S1} - U_{S2} = 3 \text{ V}$ 。

图 1.2(c)所示电路进一步等效为图 1.2(d)所示电路,  $U_{S4} = R_4 I_{S2} = 8 \text{ V}$ 。

在图 1.2(d)所示电路中,  $I_2 = \frac{U_{S3} - U_{S4}}{R_4 + R_2} = -0.5 \text{ A}$ 。

**例 1.2** 在图 1.3 所示电路中,已知  $U_{S1} = 24 \text{ V}$ ,  $U_{S2} = 12 \text{ V}$ ,  $I_{S1} = 2 \text{ A}$ ,  $I_{S2} = 1 \text{ A}$ ,  $R_1 = 8 \Omega$ ,  $R_2 = 6 \Omega$ ,  $R_3 = 6 \Omega$ 。用支路电流法求未知支路电流。

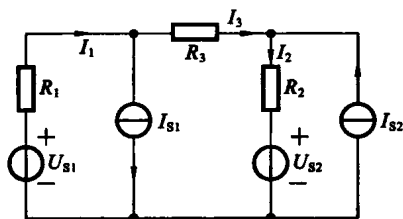


图 1.3

**解** 根据基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律列方程组:

$$\begin{cases} I_1 = I_3 + I_{S1} \\ I_2 = I_3 + I_{S2} \\ R_3 I_3 + R_2 I_2 + U_{S2} - U_{S1} + R_1 I_1 = 0 \end{cases}$$

代入数值,解方程组得

$$I_3 = -0.5 \text{ A}, I_2 = 0.5 \text{ A}, I_1 = 1.5 \text{ A}$$

**例 1.3** 求图 1.4(a)所示电路中电流  $I$ 。

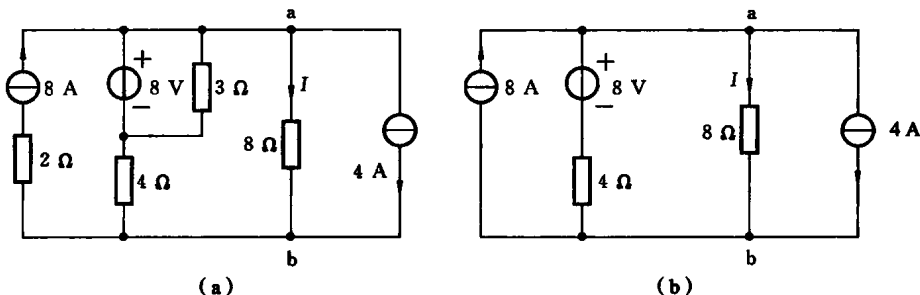


图 1.4

**解** 因与理想电压源并联的电阻可除去(断开)、与理想电流源串联的电阻可除去(短接),故图 1.4(a)所示电路的等效电路如图 1.4(b)所示。

利用节点电压公式,可得  $U_{ab}$  的节点电压为

$$U_{ab} = \frac{8 + \frac{8}{4} - 4}{\frac{1}{4} + \frac{1}{8}} \text{ V} = \frac{6}{\frac{3}{8}} \text{ V} = 16 \text{ V}$$

$$I = \frac{U_{ab}}{8} = \frac{16}{8} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

**例 1.4** 电路如图 1.5(a)所示,已知  $R_1 = 6 \Omega$ ,  $R_2 = 2 \Omega$ ,  $R_3 = 4 \Omega$ 。试用叠加原理求:开路电压  $U_{AB}$  是多少伏? 保持  $I_S$  不变,要求  $U_{AB} = 10 \text{ V}$  时,  $U_S$  需要变为多少伏?

**解** 当理想电压源  $U_S$  单独作用时,如图 1.5(b)所示,有

$$U'_{AB} = \frac{U_S(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3} = 4 \text{ V}$$

当理想电流源  $I_S$  单独作用时,如图 1.5(c)所示,有

## 第1章 电路的基本定律与基本分析方法

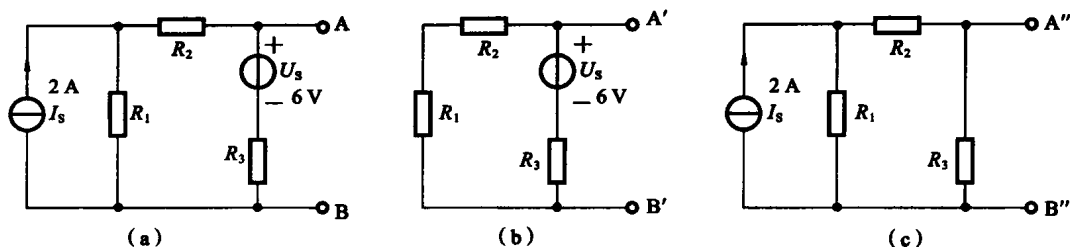


图 1.5

$$U''_{AB} = I_s \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} R_3 = 4 \text{ V}$$

由叠加原理可得

$$U_{AB} = U'_{AB} + U''_{AB} = 8 \text{ V}$$

**例 1.5** 电路如图 1.6(a)所示,有一个有源二端网络 N,测得 A、B 间的开路电压  $U_{AB0} = 18 \text{ V}$ 。当 A、B 两端间接一个  $9 \Omega$  电阻时,流过该电阻的电流为  $1.8 \text{ A}$ ;现将这个有源二端网络 N 连接成图示电路,求它的输出电流  $I$  是多少?

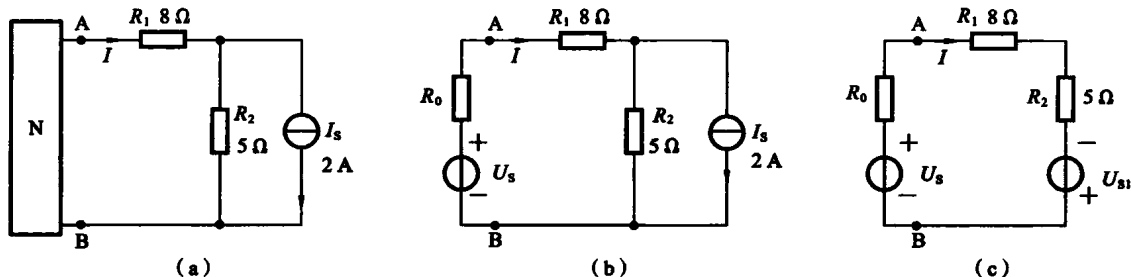


图 1.6

**解** 由题意知有源二端网络 N 的等效电压源的电压  $U_s = 18 \text{ V}$ , 有

$$1.8 = \frac{U_s}{9 + R_0} = \frac{18}{9 + R_0}$$

则

$$R_0 = 1 \Omega$$

图 1.6(a)所示电路的等效电路如图 1.6(b)所示,进一步等效为图 1.6(c)所示电路,其中  $U_{s1} = R_2 I_s = 10 \text{ V}$ 。

在图 1.5(c)所示电路中,  $I = \frac{U_s + U_{s1}}{R_0 + R_1 + R_2} = 2 \text{ A}$ 。

## 1.3 习题解答

## 1.3.1 填空题

1. 在电路分析计算中,必须先指定电流与电压的\_\_\_\_\_,电压的参考方向与电流的参考方向可以独立地\_\_\_\_\_。(参考方向,指定)

2. 若电流的计算值为负,则说明其实际方向与参考方向\_\_\_\_\_;若电流的计算值为正,则说明其实际方向与参考方向\_\_\_\_\_。(相反,相同)

3. 若电压与电流的参考方向为非关联的,则线性电阻的电压与电流关系式是\_\_\_\_\_;若电压与电流的参考方向为相关联的,则线性电阻的电压与电流关系式是\_\_\_\_\_. ( $u = -Ri$ ,  $u = Ri$ )
4. 电压源空载时应该\_\_\_\_\_放置;电流源空载时应该\_\_\_\_\_放置。(开路,短路)
5. 电路中某一部分被等效变换后,未被等效部分的电压与\_\_\_\_\_仍然保持不变,即电路的等效变换实质是\_\_\_\_\_等效。(电流,对外电路)
6. 电阻串联电路中,阻值较大的电阻上分压较\_\_\_\_\_,功率较\_\_\_\_\_. (大,大)
7. 电阻并联电路中,阻值较大的电阻上分流较\_\_\_\_\_,功率较\_\_\_\_\_. (小,小)
8.  $n$  个相同的电压源(其源电压为  $U_s$ ,内阻为  $R_0$ ),将它们并联起来,其等效电压源与等效内阻分别为\_\_\_\_\_与\_\_\_\_\_. ( $U_s, R_0/n$ )
9.  $n$  个相同的电流源(其源电流为  $I_s$ ,内阻为  $R_0$ ),将它们串联起来,其等效电流源与等效内阻分别为\_\_\_\_\_与\_\_\_\_\_. ( $I_s, nR_0$ )
10. 一个实际电源可用一个\_\_\_\_\_源与一个\_\_\_\_\_并联电路等效代替。(理想电流,电阻)
11. 一个实际电源可用一个\_\_\_\_\_源与一个\_\_\_\_\_串联电路等效代替。(理想电压,电阻)
12. 从外特性来看,任何一条电阻支路与理想电压源  $U_s$  直接\_\_\_\_\_联,其结果可用一个等效理想电压源替代,该等效电压源电压为\_\_\_\_\_. (并,  $U_s$ )
13. 从外特性来看,任何一条电阻支路与理想电流源  $I_s$  直接\_\_\_\_\_联,其结果可以用一个等效理想电流源替代,该等效电流源电流为\_\_\_\_\_. (串,  $I_s$ )
14. 一个具有  $b$  条支路和  $n$  个结点的平面电路,可编写\_\_\_\_\_个独立的 KCL 方程和\_\_\_\_\_个独立的 KVL 方程. ( $n-1, b-(n-1)$ )
15. 使用叠加定理求解电路时,不作用的独立理想电压源用\_\_\_\_\_代替,不作用的独立理想电流源用\_\_\_\_\_代替。(短路支路,开路支路)
16. 用叠加定理可计算线性电路中的电流和\_\_\_\_\_,但不能计算线性电路中的\_\_\_\_\_. (电压,功率)
17. 用理想电压源  $U_s$  与电阻  $R_i$  串联等效一个实际电源时,  $R_i$  为实际电源的\_\_\_\_\_与\_\_\_\_\_之比. (开路电压,短路电流)
18. 有源二端线性网络的开路电压为 10 V,短路电流为 2 A,等效电压源的内阻为\_\_\_\_\_;若外接  $5\ \Omega$  的电阻,则该电阻上的电压为\_\_\_\_\_. ( $5\ \Omega, 5\text{ V}$ )
19. 若电压  $u$  与电流  $i$  为关联参考方向,则  $p =$ \_\_\_\_\_;若电压  $u$  与电流  $i$  为非关联参考方向,则  $p =$ \_\_\_\_\_. ( $ui, -ui$ )
20. 若电路中某元件的功率为正值,则此元件在电路中作为\_\_\_\_\_;若电路中某元件的功率为负值,则此元件在电路中作为\_\_\_\_\_. (负载,电源)
21. 理想元件中,不是耗能元件而是储能元件的元件为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_. (电容,电感)
22. 电容和电感为线性元件,当电容中能量改变时,电容中的\_\_\_\_\_改变;当电感中能量改变时,电感中的\_\_\_\_\_改变. (电压,电流)
23. 若电源的外特性为  $U(\text{V}) = 10 - 2I$ ,电源的内阻为\_\_\_\_\_,则外接电阻  $R = 3\ \Omega$  后的



## 第 1 章 电路的基本定律与基本分析方法

电流为\_\_\_\_\_。(2  $\Omega$ , 2 A)

24. 若把电路中原来电位为 3 V 的一点改为电位参考点, 改后的电路中各点电位比原来\_\_\_\_\_, 电路中任意两点的电压\_\_\_\_\_。(升高, 不变)

25. 戴维南定理等效电压源的内阻  $R_0$  等于有源二端网络中将各个理想电压源\_\_\_\_\_, 各个理想电流源\_\_\_\_\_后所得到的无源二端网络两端之间的等效电阻。(短路, 开路)

26. 理想电压源和理想电流源间\_\_\_\_\_等效变换关系, 电压源和电流源间\_\_\_\_\_等效变换关系。(没有, 有)

27. 电路如图 1.7(a)所示, 发出功率的电源是\_\_\_\_\_; 电路如图 1.7(b)所示, 发出功率的电源是\_\_\_\_\_。(理想电流源, 理想电压源)

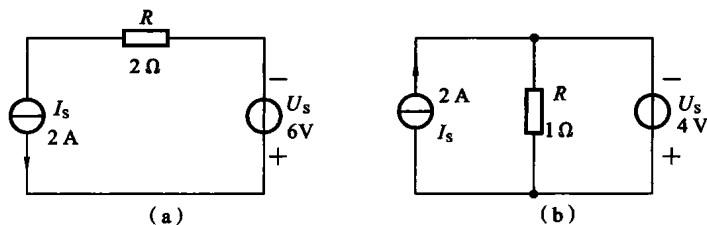


图 1.7

## 1.3.2 选择题

1. 电路如图 1.8 所示,  $R_{ab}$ 、 $R_{cd}$  分别为( )。(C)

A. 4.5  $\Omega$ 、4  $\Omega$       B. 4  $\Omega$ 、 $\infty$       C. 4  $\Omega$ 、4.5  $\Omega$       D. 4.5  $\Omega$ 、 $\infty$

2. 电路如图 1.9 所示, 电压  $U_{AB}$  为( )。(D)

A. -2 V      B. -1 V      C. 2 V      D. 1 V

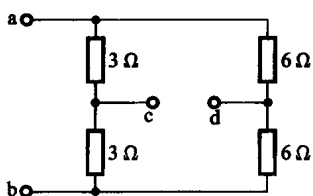


图 1.8

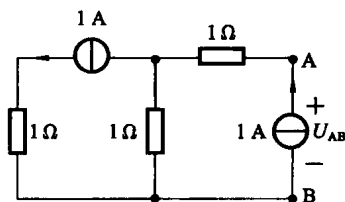


图 1.9

3. 电路如图 1.10 所示, 已知  $R_1$  消耗功率为 20 W, 则理想电压源  $U_s$  的功率为( )。(C)

A. -50 W      B. 50 W      C. 10 W      D. -10 W

4. 将图 1.11(a)所示电路等效为图 1.11(b)所示电路时, 应有( )。(A)

A.  $R_0=2 \Omega$ ,  $U_s=2 \text{ V}$     B.  $R_0=2 \Omega$ ,  $U_s=5 \text{ V}$     C.  $R_0=1 \Omega$ ,  $U_s=6 \text{ V}$     D.  $R_0=1 \Omega$ ,  $U_s=2 \text{ V}$

5. 电路如图 1.12 所示, 各电阻值和  $U_s$  值均已知。欲用支路电流法求解流过电压源的电流  $I$ , 列出独立的电流方程数和电压方程数分别为( )。(A)

A. 3 和 3      B. 4 和 3      C. 3 和 4      D. 4 和 4

6. 电路如图 1.13 所示, 电路中电流  $I_2$  为( )。(D)

A. 7 A      B. 3 A      C. -7 A      D. -3 A

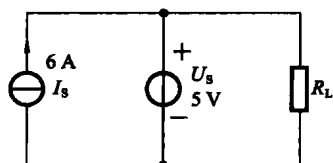
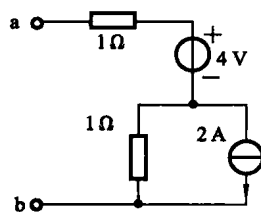
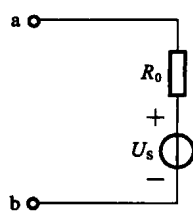


图 1.10



(a)



(b)

图 1.11

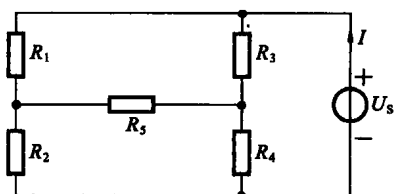


图 1.12

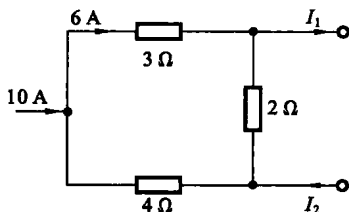


图 1.13

7. 电路如图 1.14 所示, 当  $R_1$  增加时, 电压  $U_2$  将( )。(B)

A. 变大 B. 不变 C. 变小 D. 可能变大, 可能变小

8. 电路如图 1.15 所示, 电压  $U=2\text{ V}$ , 若使电流  $I=3\text{ A}$ , 则电阻  $R$  值为( )。(A)

A.  $1\ \Omega$  B.  $2\ \Omega$  C.  $3\ \Omega$  D.  $4\ \Omega$

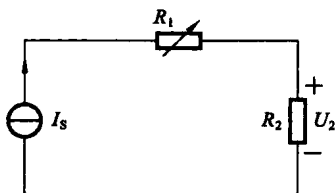


图 1.14

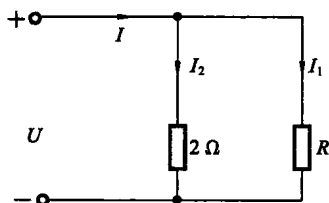


图 1.15

9. 电路如图 1.16 所示, 已知  $U_s=2\text{ V}$ ,  $I_s=2\text{ A}$ 。电流  $I$  为( )。(B)

A.  $2\text{ A}$  B.  $-2\text{ A}$  C.  $-4\text{ A}$  D.  $4\text{ A}$

10. 电路如图 1.17 所示, 开路电压  $U_{AB}$  为( )。(C)

A.  $9\text{ V}$  B.  $11\text{ V}$  C.  $-11\text{ V}$  D.  $-9\text{ V}$

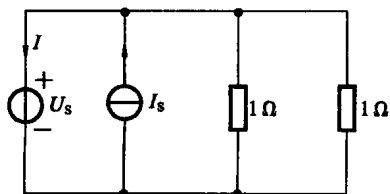


图 1.16

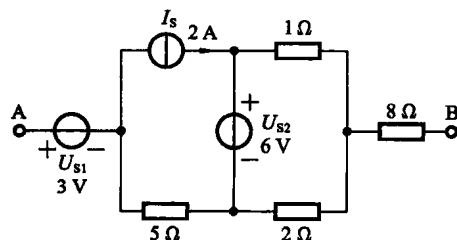


图 1.17

11. 电路如图 1.18 所示, 已知  $U_s=15\text{ V}$ , 当  $I_s$ 、 $U_s$  共同作用时,  $U_{AB}=12\text{ V}$ , 那么当电流源  $I_s$  单独作用时, 电压  $U_{AB}$  应为( )。(D)

## 第1章 电路的基本定律与基本分析方法

- A. 18 V      B. 9 V      C. -6 V      D. 6 V

12. 电路如图 1.19 所示, 电压  $U$  和电流  $I$  的关系式为( )。(C)

- A.  $U=25-I$       B.  $U=25+I$       C.  $U=-25-I$       D.  $U=-25+I$

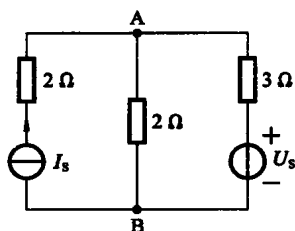


图 1.18

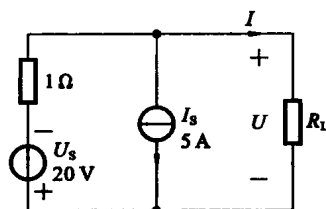


图 1.9

13. 电路如图 1.20 所示, 已知  $U_s=15\text{ V}$ ,  $I_s=5\text{ A}$ ,  $R_1=2\ \Omega$ 。当  $U_s$  单独作用时,  $R_1$  上消耗的电功率为 18 W。当  $U_s$  和  $I_s$  两个电源共同作用时, 电阻  $R_1$  上消耗的电功率为( )。(A)

- A. 72 W      B. 36 W      C. 0 W      D. 18 W

14. 电路如图 1.21 所示, A 点的电位  $V_A$  为( )。(B)

- A. -1 V      B. -2 V      C. 2 V      D. 6 V

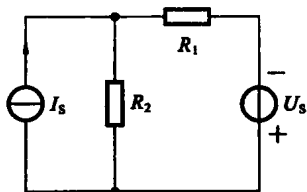


图 1.20

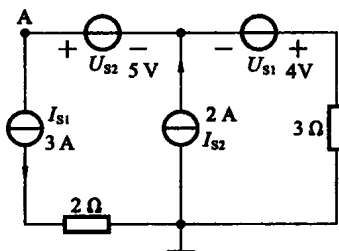


图 1.21

15. 电路如图 1.22 所示, A 点的电位  $V_A$  为( )。(A)

- A. -2 V      B. -4 V      C. 2 V      D. 4 V

16. 电路如图 1.23 所示, 图 1.23(b)所示电路是图 1.23(a)所示电路的戴维南等效电路。已知图 1.23(b)中  $U_s=6\text{ V}$ , 则图 1.23(a)中电压源  $U_{s2}$  的值应是( )。(D)

- A. 10 V      B. 6 V      C. 条件不足, 不能确定      D. 2 V

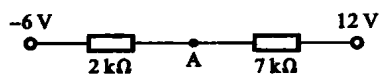


图 1.22

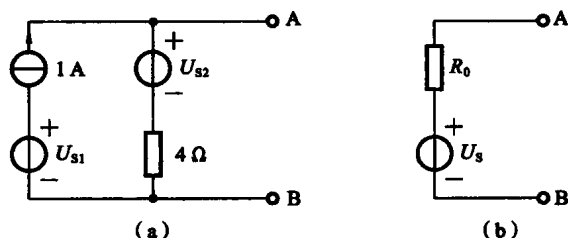


图 1.23

17. 把图 1.24(a)所示电路改为图 1.24(b)所示电路, 其负载电流  $I_1$  和  $I_2$  将( )。(B)

- A. 增大      B. 不变      C. 减小      D. 不确定

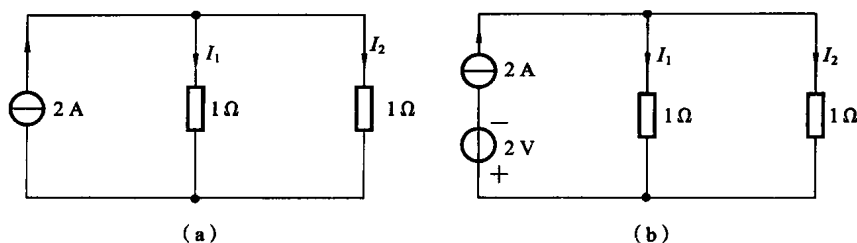


图 1.24

18. 实验测得某有源二端线性网络的开路电压为 10 V。当外接  $3\ \Omega$  电阻时,其端电压为 6 V,则该网络的等效电压源的参数为( )。(C)

- A.  $U_s=6\text{ V}, R_0=3\ \Omega$       B.  $U_s=10\text{ V}, R_0=3\ \Omega$   
C.  $U_s=10\text{ V}, R_0=2\ \Omega$       D.  $U_s=6\text{ V}, R_0=2\ \Omega$

19. 电路如图 1.25 所示,电路的等效电阻  $R_{ab}$  为( )。(C)

- A.  $19\ \Omega$       B.  $18\ \Omega$       C.  $16\ \Omega$       D.  $22\ \Omega$

20. 电路如图 1.26 所示,利用戴维南定理等效为电压源,则其中  $U_s$  和  $R_0$  的值是( )。(D)

- A.  $R_0=6\ \Omega, U_s=18\text{ V}$       B.  $R_0=2\ \Omega, U_s=30\text{ V}$   
C.  $R_0=2\ \Omega, U_s=18\text{ V}$       D.  $R_0=6\ \Omega, U_s=30\text{ V}$

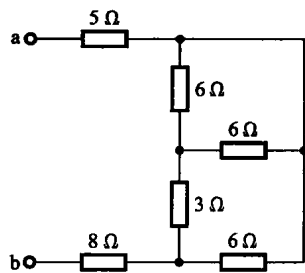


图 1.25

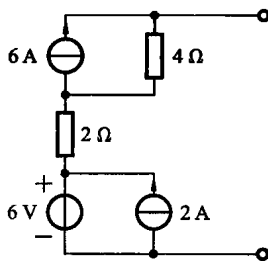


图 1.26

21. 电路如图 1.27 所示,节点电压公式为( )。(A)

- A.  $U = \frac{I_s + \frac{U_s}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}}$       B.  $U = \frac{I_s + \frac{U_s}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$       C.  $U = \frac{-I_s + \frac{U_s}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$       D.  $U = \frac{-I_s + \frac{U_s}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}}$

22. 电路如图 1.28 所示,A、B 间电压为 12 V,在将电流源移走后,测得有源二端线性网络的开路电压  $U_{AB}=8\text{ V}$ ,则该有源二端线性网络的等效电压源内阻值为( )。(B)

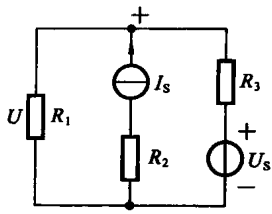


图 1.27

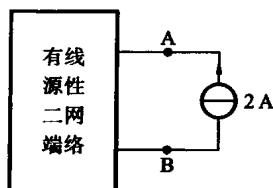


图 1.28

## 第1章 电路的基本定律与基本分析方法

- A.  $4\ \Omega$       B.  $2\ \Omega$       C.  $1\ \Omega$       D.  $3\ \Omega$

23. 电路如图 1.29 所示, 已知  $U_{S1}=100\text{ V}$ ,  $U_{S2}=80\text{ V}$ ,  $R_2=2\ \Omega$ ,  $I=4\text{ A}$ ,  $I_2=2\text{ A}$ , 则  $R_1$  为( )。(C)

- A.  $8\ \Omega$       B.  $16\ \Omega$       C.  $12\ \Omega$       D.  $24\ \Omega$

24. 电路如图 1.30 所示, 已知  $I_S=2\text{ A}$ ,  $U_S=4\text{ V}$ 。在开关 S 闭合后, 流过开关 S 的电流  $I$  为( )。(C)

- A.  $1.6\text{ A}$       B.  $-1.6\text{ A}$       C.  $0\text{ A}$       D.  $2\text{ A}$

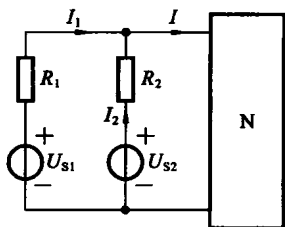


图 1.29

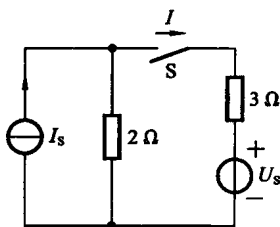


图 1.30

25. 电路如图 1.31 所示,  $I_{S1}$ 、 $I_{S2}$  和  $U_S$  均为正值, 且  $I_{S2} > I_{S1}$ , 则发出功率的电源是( )。(B)

- A. 电压源  $U_S$       B. 电流源  $I_{S2}$       C. 电流源  $I_{S1}$       D. 电流源  $I_{S2}$  和电压源  $U_S$

26. 电路如图 1.32 所示, 已知  $U_S=4\text{ V}$ ,  $R_1=10\ \Omega$ ,  $R_2=30\ \Omega$ ,  $R_3=60\ \Omega$ ,  $R_4=20\ \Omega$ 。a、b 两端电压  $U_{ab}=(\quad)$ 。(D)

- A.  $3\text{ V}$       B.  $2\text{ V}$       C.  $-1\text{ V}$       D.  $-2\text{ V}$

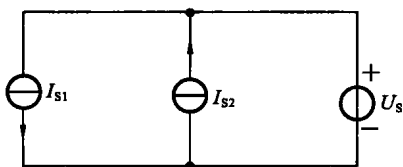


图 1.31

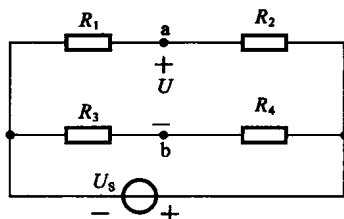
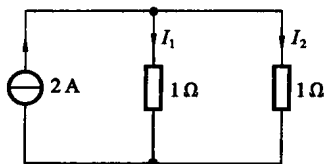


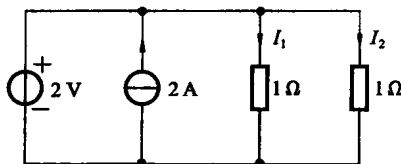
图 1.32

27. 把图 1.33(a)所示电路改为图 1.33(b)所示电路, 其负载电流  $I_1$  和  $I_2$  将( )。(A)

- A. 增大      B. 不变      C. 减小      D. 不确定



(a)



(b)

图 1.33

## 1.3.3 计算题

1. 电路如图 1.34 所示, 已知  $U_s = 5 \text{ V}$ ,  $I_1 = 1 \text{ A}$ 。求电流  $I_2$ 。

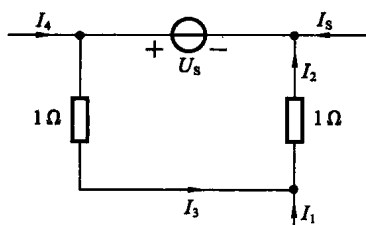


图 1.34

解 由基尔霍夫电压定律列方程有  $5 = 1 \times I_3 + 1 \times I_2$ , 则

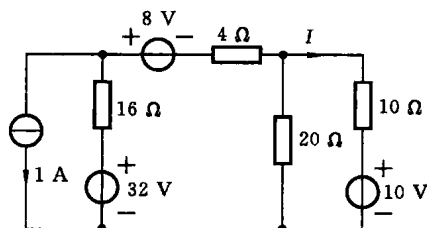
$$I_3 = 5 - I_2 \quad (1)$$

由基尔霍夫电流定律列方程有

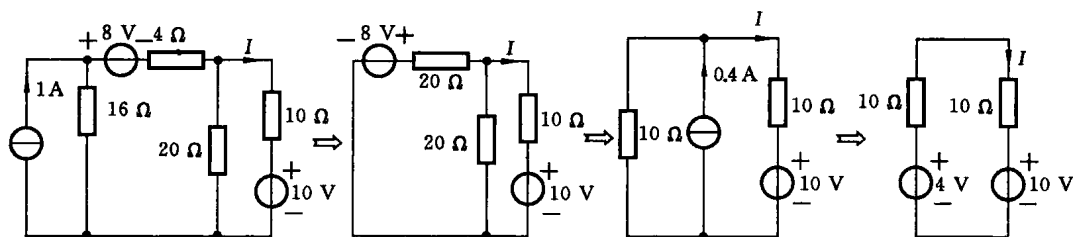
$$I_3 + 1 = I_2 \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)中解得  $I_2 = 3 \text{ A}$ 。

2. 电路如图 1.35(a)所示, 用电源等效变换法求电流  $I$ 。



(a)



(b)

图 1.35

解 等效变换过程如图 1.35(b)所示, 电流为

$$I = \frac{4 - 10}{10 + 10} \text{ A} = -0.3 \text{ A}$$

3. 试用电源等效变换法求图 1.36(a)中的电压  $U_{AB}$ 。

解 由电源等效变换法, 可知原电路的等效电路如图 1.36(b)所示, 最后求得

$$U_{AB} = 8 \times \frac{2}{2+6} \times 6 \text{ V} = 12 \text{ V}$$

4. 电路如图 1.37(a)所示, 已知  $U_s = 2 \text{ V}$ ,  $I_s = 1 \text{ A}$ ,  $R_1 = 8 \Omega$ ,  $R_2 = 6 \Omega$ ,  $R_3 = 4 \Omega$ ,  $R_4 = 3 \Omega$ , 用电源等效变换法求电流  $I$ 。

解  $R_1$  与理想电压源  $U_s$  并联, 不起作用, 可去掉;  $R_4$  与理想电流源  $I_s$  串联, 不起作用, 可短接。

其等效电路如图 1.37(b)所示, 有

$$I = -\frac{2}{R_2 + R_3} = -0.2 \text{ A}$$

# 第1章 电路的基本定律与基本分析方法

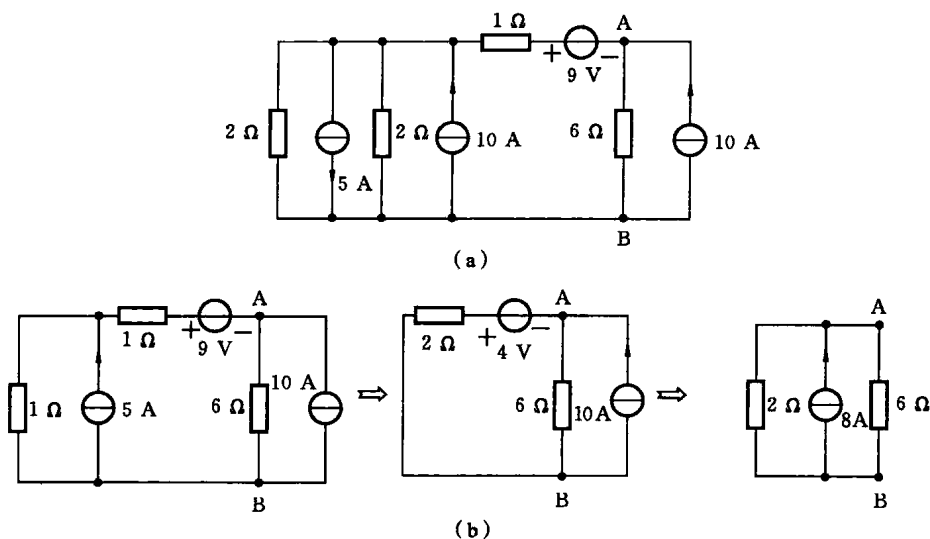


图 1.36

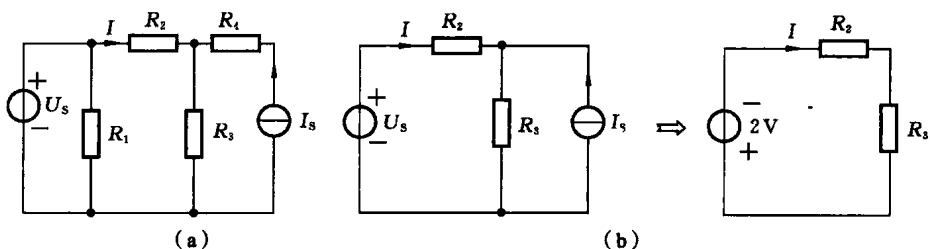


图 1.37

5. 电路如图 1.38 所示,用支路电流法求各未知支路电流。

解 由基尔霍夫定律列方程组:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = 1 \\ I_2 + I_3 = I \\ 2I - 10 + 4I_3 = 0 \\ 2I + 2I_2 - 2I_1 = 0 \end{cases}$$

代入数据,解方程组得

$$I_1 = 1.25 \text{ A}, \quad I_2 = -0.25 \text{ A}, \quad I_3 = 1.75 \text{ A}, \quad I = 1.5 \text{ A}$$

6. 电路如图 1.39 所示,已知  $U_{S1} = 38 \text{ V}$ ,  $U_{S2} = 12 \text{ V}$ ,  $I_{S1} = 2 \text{ A}$ ,  $I_{S2} = 1 \text{ A}$ ,  $R_1 = 6 \Omega$ ,  $R_2 = 4 \Omega$ 。用支路电流法求各支路电流,并计算出各理想电源吸收或发出的功率。

解 (1) 用支路电流法求各支路电流。由基尔霍夫定律列方程组:

$$\begin{cases} I_1 + I_{S2} = I_{S1} + I_2 \\ I_{S1} + I_2 + I_3 = 0 \\ I_2 R_2 + U_{S2} + I_1 R_1 - U_{S1} = 0 \end{cases}$$

代入数据,解方程组得

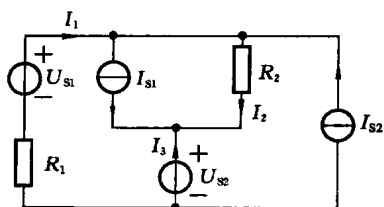


图 1.39

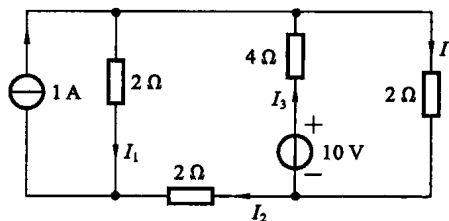


图 1.38





$$I_1 = 3 \text{ A}, \quad I_2 = 2 \text{ A}, \quad I_3 = -4 \text{ A}$$

(2) 计算出各理想电源吸收或发出的功率。

$$P_{U_{S1}} = -U_{S1} I_1 = -38 \times 3 \text{ W} = -114 \text{ W} \quad (\text{发出})$$

$$P_{U_{S2}} = -U_{S2} I_3 = -12 \times (-4) \text{ W} = 48 \text{ W} \quad (\text{吸收})$$

$$P_{I_{S1}} = R_2 I_2 I_{S1} = 2 \times 4 \times 2 \text{ W} = 16 \text{ W} \quad (\text{吸收})$$

$$P_{I_{S2}} = -I_{S2} \times (R_2 I_2 + U_{S2}) = -1 \times (4 \times 2 + 12) \text{ W} = -20 \text{ W} \quad (\text{发出})$$

7. 电路如图 1.40 所示, 已知  $U_{S1} = 224 \text{ V}$ ,  $U_{S2} = 220 \text{ V}$ ,  $U_{S3} = 216 \text{ V}$ ,  $R_1 = R_2 = R_3 = 50 \Omega$ 。

用节点电压法计算电压  $U_{NN}$  和电流  $I_1$ 。

解 由节点电压公式可得

$$\begin{aligned} U_{NN} &= \frac{(U_{S1}/R_1) + (U_{S2}/R_2) + (U_{S3}/R_3)}{(1/R_1) + (1/R_2) + (1/R_3)} \\ &= \frac{224 + 220 + 216}{3} \text{ V} = 220 \text{ V} \end{aligned}$$

$$I_1 = \frac{U_{S1} - U_{NN}}{R_1} = \frac{224 - 220}{50} \text{ A} = 80 \text{ mA}$$

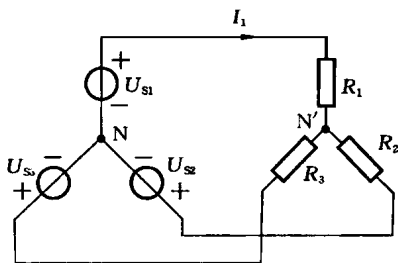
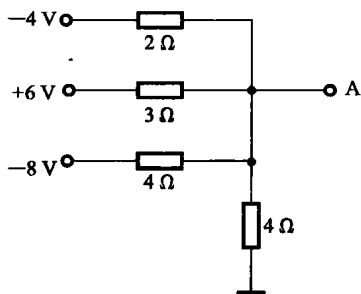
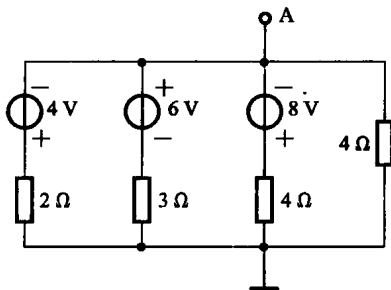


图 1.40

8. 电路如图 1.41(a)所示, 试求 A 点的电位  $V_A$ 。



(a)



(b)

图 1.41

解 其等效电路图如图 1.41(b)所示。由节点电压公式可得

$$V_A = \frac{-\frac{4}{2} + \frac{6}{3} - \frac{8}{4}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}} \text{ V} = -1.5 \text{ V}$$

9. 电路如图 1.42 所示, 已知  $U_{S1} = 10 \text{ V}$ ,  $U_{S2} = 30 \text{ V}$ ,  $U_{S3} = 18 \text{ V}$ ,  $I_S = 5 \text{ A}$ ,  $R_1 = R_2 = 6 \Omega$ ,  $R_3 = 12 \Omega$ 。用节点电压法计算电压  $U_{AB}$  和各未知支路电流。

解 由节点电压公式可得

$$U_{AB} = \frac{\frac{U_{S2}}{R_1} + \frac{U_{S3}}{R_2} - I_S}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = -7.2 \text{ V}$$

$$I_1 = \frac{U_{S2} - U_{AB}}{R_1} = 6.2 \text{ A}, \quad I_2 = \frac{U_{AB} + U_{S3}}{R_2} = 1.8 \text{ A}$$

$$I_3 = -\frac{U_{AB}}{R_3} = 0.6 \text{ A}$$

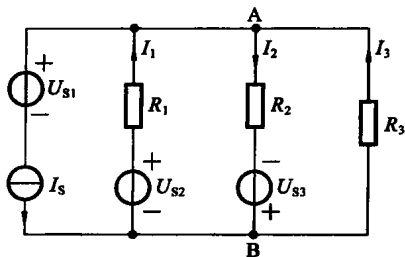


图 1.42

## 第 1 章 电路的基本定律与基本分析方法

10. 电路如图 1.43(a)所示, 已知  $I_S = 1 \text{ mA}$ ,  $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ , 求 A 点的电位及电流  $I_1$ 、 $I_2$ 。

解 其等效电路图如图 1.43(b)所示。

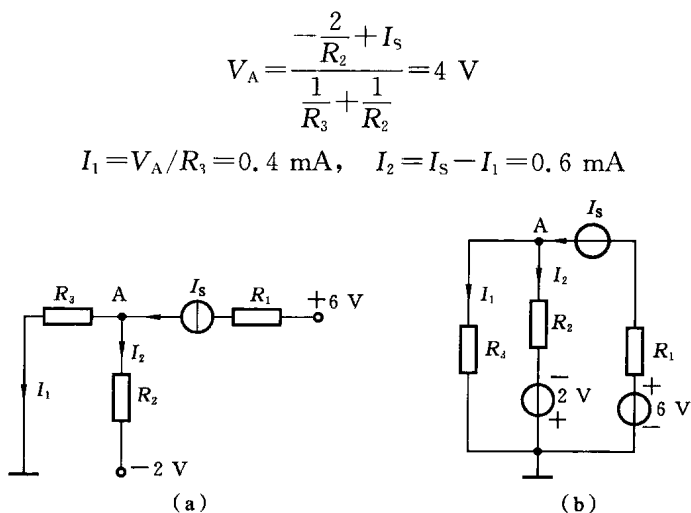


图 1.43

11. 电路如图 1.44(a)所示, 已知  $U_S = 16 \text{ V}$ ,  $I_S = 4 \text{ A}$ ,  $R = 1 \Omega$ ,  $R_1 = R_4 = 2 \Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 3 \Omega$ 。试用叠加原理求电压  $U_{AB}$  和  $U$ 。

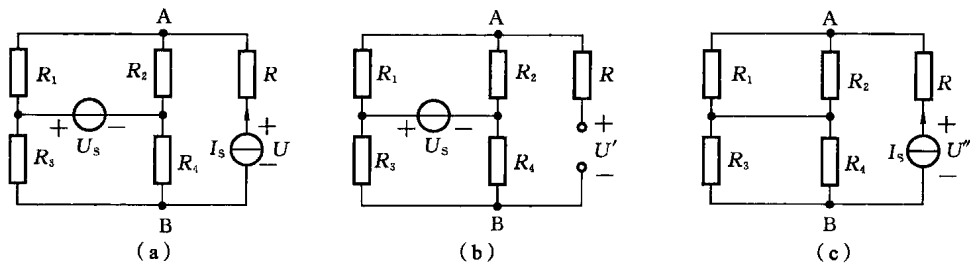


图 1.44

解 当理想电压源  $U_S$  单独作用时, 如图 1.44(b)所示, 则

$$U' = U'_{AB} = \frac{U_S R_2}{R_1 + R_2} - \frac{U_S R_4}{R_3 + R_4} = 3.2 \text{ V}$$

当理想电流源  $I_S$  单独作用时, 如图 1.44(c)所示, 则

$$U''_{AB} = \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) I_S = 9.6 \text{ V}, \quad U'' = R I_S + U''_{AB} = 13.6 \text{ V}$$

由叠加原理可得

$$U_{AB} = U'_{AB} + U''_{AB} = 12.8 \text{ V}, \quad U = U' + U'' = 16.8 \text{ V}$$

12. 电路如图 1.45(a)所示, 已知  $U_S = 2 \text{ V}$ ,  $I_S = 4 \text{ A}$ ,  $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \Omega$ 。试用叠加原理求  $U$  和  $I$ , 并说明哪个元件是电源。

解 当理想电压源  $U_S$  单独作用时, 电路如图 1.45(b)所示, 则

$$I' = \frac{U_S}{R_1 + R_2} = 1 \text{ A}, \quad U' = I' R_2 = 1 \text{ V}$$

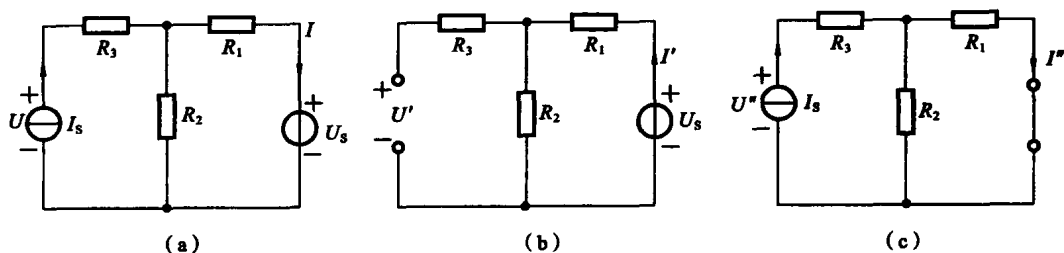


图 1.45

当理想电流源  $I_s$  单独作用时,电路如图 1.45(c)所示,则

$$I'' = I_s/2 = 2 \text{ A}, \quad U'' = I_s(R_3 + R_1 // R_2) = 6 \text{ V}$$

由叠加原理可得

$$U = U' + U'' = 7 \text{ V}, \quad I = -I' + I'' = 1 \text{ A}$$

理想电流源  $I_s$  的功率为  $P_{I_s} = -I_s U = -28 \text{ W} < 0$ , 则理想电流源  $I_s$  为电源。

理想电压源  $U_s$  的功率为  $P_{U_s} = I U_s = 2 \text{ W} > 0$ , 则理想电压源  $U_s$  为负载。

13. 电路如图 1.46(a)所示,已知:  $I_s = 10 \text{ A}$ ,  $R_2 = R_3$ , 当 S 断开时,  $I_1 = 2 \text{ A}$ ,  $I_2 = I_3 = 4 \text{ A}$ , 利用叠加原理求 S 闭合后的电流  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$ 。

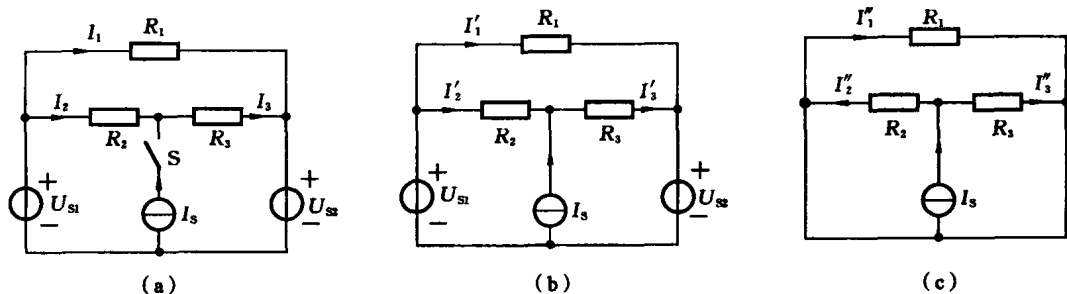


图 1.46

解 图 1.46(a)中开关 S 闭合后的等效电路如图 1.46(b)所示。

理想电压源  $U_{s1}$  和  $U_{s2}$  单独作用时,电路如图 1.46(a)所示,由已知得

$$I'_1 = 2 \text{ A}, \quad I'_2 = I'_3 = 4 \text{ A}$$

理想电流源  $I_s$  单独作用时,电路如图 1.46(c)所示,则

$$I''_3 = I''_2 = \frac{I_s}{2} = 5 \text{ A}, \quad I''_1 = 0$$

由叠加原理可得, S 闭合后的电流

$$I_1 = I'_1 + I''_1 = 2 \text{ A}, \quad I_2 = I'_2 - I''_2 = -1 \text{ A}, \quad I_3 = I'_3 + I''_3 = 9 \text{ A}$$

14. 电路如图 1.47(a)所示,  $R_1 = 8 \Omega$ ,  $R_2 = 5 \Omega$ ,  $R_3 = 8 \Omega$ ,  $R_4 = 6 \Omega$ ,  $R_5 = 12 \Omega$ 。用戴维南定理求电流  $I_3$ 。

解 等效电源的电压  $U_s$  可由图 1.47(b)求得

$$E = U_{ab0} = -I_s R_1 - \frac{U_{s1}}{R_4 + R_5} R_5 = \left( -2 \times 8 - \frac{36}{6 + 12} \times 12 \right) \text{ V} = -40 \text{ V}$$

等效电源的内阻  $R_0$  可由图 1.47(c)求得

## 第 1 章 电路的基本定律与基本分析方法

$$R_0 = R_1 + R_4 // R_5 = (8 + 6 // 12) \Omega = 12 \Omega$$

图 1.47(d)所示电路为图 1.47(a)所示电路的等效电路, 则

$$I_3 = \frac{U_s}{R_0 + R_3} = \frac{-40}{12 + 8} \text{ A} = -2 \text{ A}$$

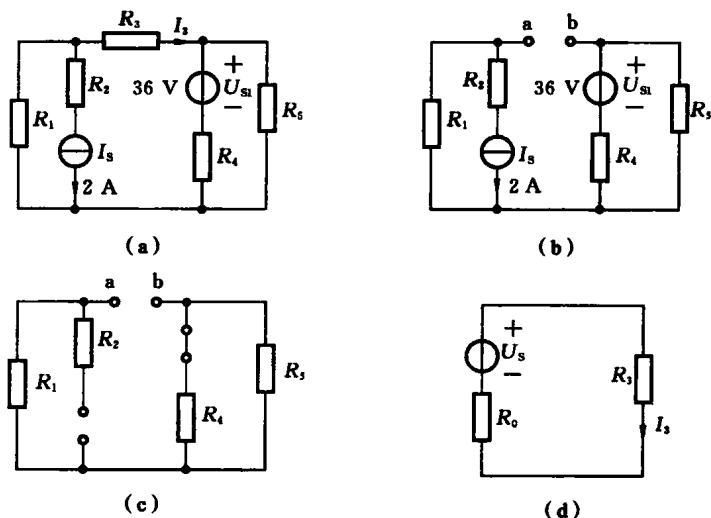


图 1.47

15. 电路如图 1.48(a)所示,  $U_{s1} = 20 \text{ V}$ ,  $I_s = 10 \text{ A}$ ,  $R_1 = 6 \Omega$ ,  $R_2 = 4 \Omega$ ,  $R_3 = 4 \Omega$ ,  $R_4 = 6 \Omega$ , 试用戴维南定理求  $R_4$  上的电压  $U$ 。

解 等效电源的电压  $U_s$  可由图 1.48(b)求得

$$U_s = U_{abo} = I_s R_2 + U_{s1} = 60 \text{ V}$$

等效电源的内阻  $R_0$  可由图 1.48(c)求得

$$R_0 = R_2 = 4 \Omega$$

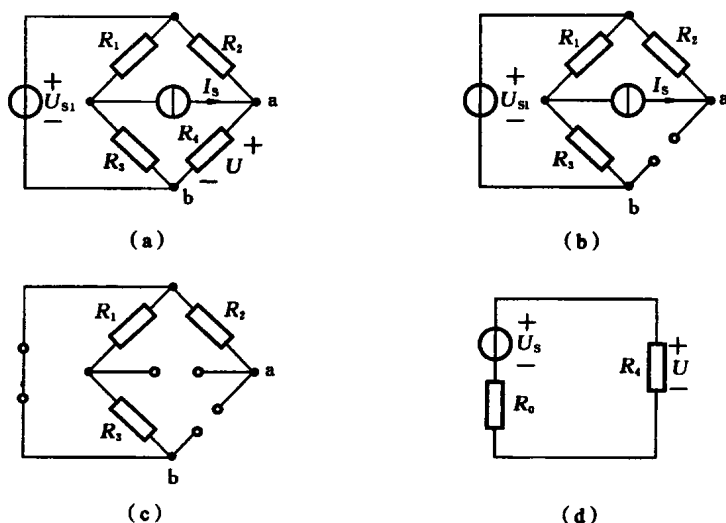


图 1.48

图 1.48(d) 所示电路为图 1.48(a) 所示电路的等效电路, 则

$$U = \frac{U_s}{R_0 + R_1} R_1 = 36 \text{ V}$$

16. 电路如图 1.49(a) 所示, 试用戴维南定理求支路 ab 的电流  $I$ 。

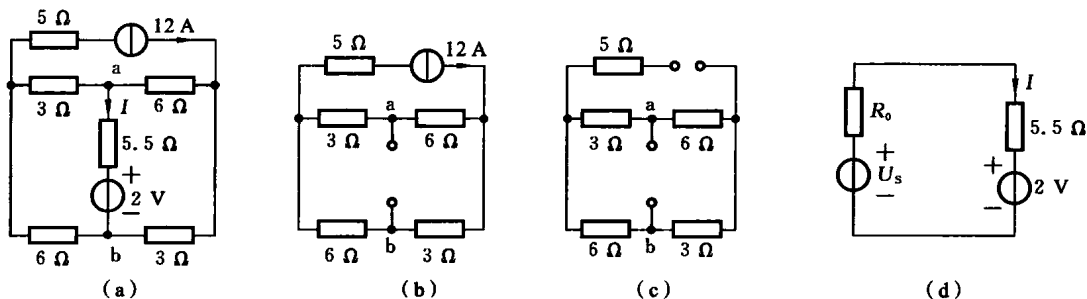


图 1.49

解 等效电源的电压  $U_s$  可由图 1.49(b) 求得

$$U_s = U_{abo} = \left( \frac{12}{2} \times 3 - \frac{12}{2} \times 6 \right) \text{ V} = -18 \text{ V}$$

等效电源的内阻  $R_0$  可由图 1.49(c) 求得

$$R_0 = R_{ab} = [(3+6) // (6+3)] \Omega = 4.5 \Omega$$

图 1.49(d) 所示电路为图 1.49(a) 所示电路的等效电路, 则

$$I = \frac{U_s - 2}{R_0 + 5.5} = \frac{-18 - 2}{4.5 + 5.5} \text{ A} = -2 \text{ A}$$

17. 电路如图 1.50(a) 所示, 已知  $I = 1 \text{ A}$ , 试求电阻  $R$  之值。

解 等效电源的电压  $U_s$  可由图 1.50(b) 求得

$$U_s = U_{abo} = (40 + 1 \times 10 - 20) \text{ V} = 30 \text{ V}$$

等效电源的内阻  $R_0$  可由图 1.50(c) 求得

$$R_0 = 10 \Omega$$

图 1.50(d) 所示电路为图 1.50(a) 所示电路的等效电路, 则

$$I = \frac{U_s}{R_0 + R} = 1 \text{ A}, \quad R = 20 \Omega$$

18. 电路如图 1.51 所示, 已知  $U_s = 36 \text{ V}$ ,  $I_s = 3 \text{ A}$ ,  $R_1 = 3 \Omega$ ,  $R_2 = 6 \Omega$ ,  $R_3 = 4 \Omega$ 。A、B 两点间的开路电压  $U_{AB0}$  是多少? 若用一导线将 A、B 连接起来, 用戴维南定理求该导线中的电流  $I_{AB}$ 。

解 A、B 两点间的开路电压  $U_{AB0}$  为

$$U_{AB0} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_s + I_s R_3 = \left( \frac{6}{3+6} \times 36 + 3 \times 4 \right) \text{ V} = 36 \text{ V}$$

A、B 两点间的无源二端网络等效电阻为

$$R_0 = R_{AB} = R_1 // R_2 + R_3 = (3 // 6 + 4) \Omega = 6 \Omega$$

若用一导线将 A、B 连接起来, 则

$$I_{AB} = \frac{U_{AB0}}{R_0} = 6 \text{ A}$$

## 第 1 章 电路的基本定律与基本分析方法

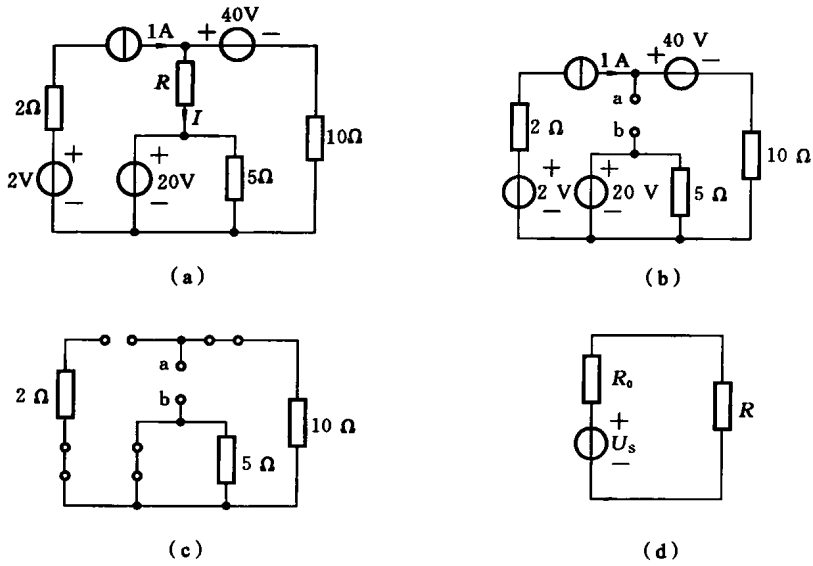


图 1.50

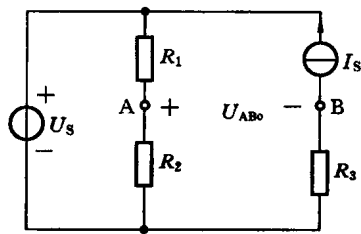


图 1.51

## 第 2 章 单相交流电路

### 2.1 要点总结

#### 2.1.1 正弦交流电的表示方法

##### 1. 三角函数式(瞬时值表达式)

正弦电流  $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$

(1) 三要素:幅值(最大值) $I_m$ 、角频率 $\omega$ 、初相位 $\varphi_i$ 。

(2) 基本参数间的关系:幅值与有效值  $I_m = \sqrt{2}I$ ,角频率、频率与周期  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ 。

(3) 相位差 $\varphi$ :同频率的两个正弦量初相角之差。

##### 2. 波形图

波形图直观地反映了正弦量随时间变化而变化的情况。对于正弦量的相位关系而言,在波形图上顺着时间轴向右,相位“滞后”,向左,相位“超前”。

##### 3. 相量式

在单一频率 $f$ 正弦量激励下的线性电路中,角频率 $\omega$ 由电源信号给定,有效值(或最大值)和初相位则采用相量法(即复数法)分析计算。正弦量的相量有两种相量式:最大值相量 $\dot{U}_m$ 、 $\dot{I}_m$ 和有效值相量 $\dot{U}$ 、 $\dot{I}$ ,并且有 $\dot{U}_m = \sqrt{2}\dot{U}$ , $\dot{I}_m = \sqrt{2}\dot{I}$ 。

若电压  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$ , 电流  $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$ , 相应的有效值相量形式如下。

##### 1) 代数式

$$\dot{U} = U \cos \varphi_u + jU \sin \varphi_u, \quad \dot{I} = I \cos \varphi_i + jI \sin \varphi_i$$

##### 2) 指数式

$$\dot{U} = U e^{j\varphi_u}, \quad \dot{I} = I e^{j\varphi_i}$$

##### 3) 极坐标式

$$\dot{U} = U \angle \varphi_u, \quad \dot{I} = I \angle \varphi_i$$

##### 4. 相量图

同频率的相量可以画在同一个相量图上。在相量图上,逆时针方向的相角,表示相位超前,顺时针方向的相角,表示相位滞后。虚单位  $j = \sqrt{-1}$ , 而  $\pm j = e^{\pm j90^\circ}$  是旋转  $90^\circ$  的旋转因子。若相量 $\dot{I}$ 乘以 $j$ ,则相量 $j\dot{I}$ 比 $\dot{I}$ 超前  $90^\circ$ ,相当于逆时针旋转  $90^\circ$ ;反之,若相量 $\dot{I}$ 除以 $j$ ,则相量 $-j\dot{I}$ 比 $\dot{I}$ 滞后  $90^\circ$ ,相当于顺时针旋转  $90^\circ$ 。



## 2.1.2 基尔霍夫定律的相量形式

### 1. 基尔霍夫定律的瞬时值形式

$$\sum i = i_1 + i_2 + \cdots + i_n = 0 \quad (\text{KCL}), \quad \sum u = u_1 + u_2 + \cdots + u_n = 0 \quad (\text{KVL})$$

### 2. 基尔霍夫定律的相量形式

用相量法分析交流电路时, 电路中各支路电压、电流仍然受到基尔霍夫定律的约束,

有

$$\sum \dot{i} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \cdots + \dot{i}_n = 0 \quad (\text{KCL}), \quad \sum \dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \cdots + \dot{U}_n = 0 \quad (\text{KVL})$$

## 2.1.3 单一参数的正弦交流电路

单一参数的  $R$ 、 $L$ 、 $C$  正弦交流电路的相量模型如图 2.1 所示。

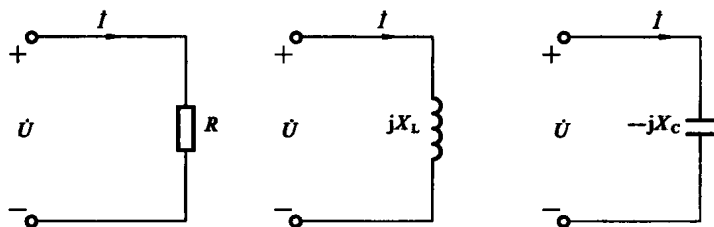


图 2.1

### 1. 纯电阻电路

电压、电流相量关系:  $\dot{U} = R \dot{I}$ , 电压、电流同相。

功率关系:  $P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$ 。

### 2. 纯电感电路

电压、电流相量关系:  $\dot{U} = jX_L \dot{I} = j\omega L \dot{I}$ , 电压超前电流  $90^\circ$ 。

功率关系: 感性无功功率  $Q_L = UI = I^2 X_L = \frac{U^2}{X_L}$ , 平均功率  $P_1 = 0$ 。

### 3. 纯电容电路

电压、电流相量关系:  $\dot{U} = -jX_C \dot{I} = \frac{1}{j\omega C} \dot{I}$ , 电压滞后电流  $90^\circ$ 。

容性无功功率  $Q_C = -UI = -I^2 X_C = -\frac{U^2}{X_C}$ , 平均功率  $P_C = 0$ 。

注意: 无功功率  $Q$  用来衡量储能元件与电源进行能量交换的规模, 其单位是 var。

## 2.1.4 正弦交流电路的分析

分析交流电路采用复数法(即相量法), 先画出电路的相量模型, 将电路负载元件用复数阻抗的形式表示, 将电压和电流用相量表示, 然后运用在前面直流电路中学习过的基本方法和基本定理(如欧姆定律、基尔霍夫定律、支路电流法、叠加原理、戴维南定理等)来分析计算交流电路。

### 1. RLC 串联电路

RLC 串联电路相量模型如图 2.2 所示,电压、电流取关联参考方向。

$$\dot{U} = R\dot{I} + jX_L\dot{I} - jX_C\dot{I} = [R + j(X_L - X_C)]\dot{I}$$

复数阻抗 
$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + j(X_L - X_C) = R + jX = |Z| \angle \phi$$

当  $X_L > X_C$  时,  $\phi > 0^\circ$ , 电路呈感性; 当  $X_L < X_C$  时,  $\phi < 0^\circ$ , 电路为容性; 当  $X_L = X_C$  时,  $\phi = 0^\circ$ , 电路为纯电阻性, 此时电路发生谐振。

电路中各元件电压相量与总电压相量形成电压三角形, 电阻、电抗与总阻抗形成阻抗三角形, 两者是相似三角形, 如图 2.3 所示。

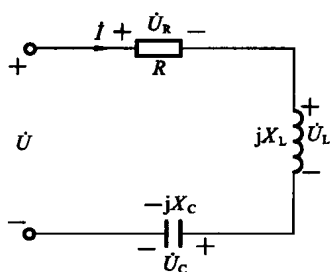


图 2.2

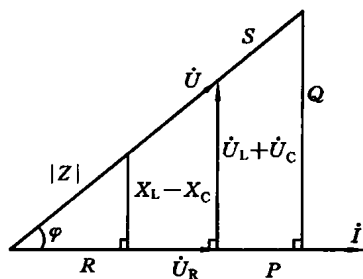


图 2.3

### 2. 复阻抗的串联

两个复阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$  串联, 等效复阻抗为

$$Z = Z_1 + Z_2 = (R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2)$$

串联阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$  的分压公式为

$$\dot{U}_1 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{U}, \quad \dot{U}_2 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{U}$$

### 3. 串联谐振(电压谐振)

(1) 串联谐振条件为

$$X_L = X_C \quad \text{或} \quad 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

(2) 串联谐振(角)频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{或} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

(3) 电路特征: ① 谐振时电路的阻抗最小, 电流最大; ② 电路中电感(电容)电压是电源电压的  $Q$  (品质因数) 倍, 即  $Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR}$ ; ③ 当  $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \gg R$  时,  $U_L = U_C \gg U$  (电源电压), 因此串联谐振称为电压谐振。

### 4. 复阻抗的并联

两个复阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$  并联, 等效复阻抗为  $Z$ , 则有

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$$

复阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$  并联分流公式为

$$\dot{I}_1 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{I}, \quad \dot{I}_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{I}$$

## 5. 并联谐振

(1) 谐振(角)频率为

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{或} \quad f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

(2) 电路特征:① 谐振时电路的阻抗最大,电流最小;② 电路中电感(电容)支路电流是电路总电流的  $Q$  倍,即  $Q = \frac{I_L}{I_0} = \frac{I_C}{I_0} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{\omega_0 L}{R}$ ;③ 支路电流比总电流大许多倍,并联谐振又称为电流谐振。

## 2.1.5 正弦交流电路的功率

### 1. 瞬时功率

$$p = ui$$

### 2. 平均功率(又称为有功功率)

$$P = UI \cos \varphi (= U_R I = I^2 R = \frac{U_R^2}{R})$$

### 3. 无功功率

$$Q = UI \sin \varphi \quad \text{或} \quad Q = Q_L + Q_C$$

### 4. 视在功率

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

注意:(1) 电路中有功功率守恒,无功功率守恒,但是视在功率不守恒,即

$$\sum P = P_1 + P_2 + \cdots + P_n, \quad \sum Q = Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_n$$

$$\sum S \neq S_1 + S_2 + \cdots + S_n \quad (\text{一般情况下})$$

(2) 有功功率、无功功率与视在功率形成功率三角形,它与电压三角形、阻抗三角形是相似关系,如图 2.3 所示。可见  $\varphi$  角既是阻抗角,又是电压、电流相位差,也是功率因数角。

## 2.1.6 功率因数的提高

### 1. 提高功率因数的意义

- (1) 提高发电设备的利用率。
- (2) 降低输电线路和发电机绕组的功率损耗。

### 2. 提高功率因数的方法

在感性负载两端并联合适的电容可以提高电路的功率因数,如图

2.4 所示,并接电容的大小为:  $C = \frac{P}{\omega U^2} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi)$ 。

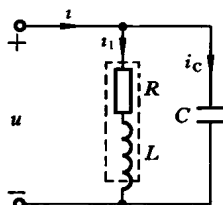


图 2.4

## 2.2 例题解析

例 2.1 电路如图 2.5(a)所示。已知总电压的有效值为  $U = 220 \text{ V}$ , 1 号、2 号电压表的读

数为  $U_1 = U_2 = 127 \text{ V}$ 。试求 3 号电压表的读数  $U_3$ ，并画出电压与电流的相量图。

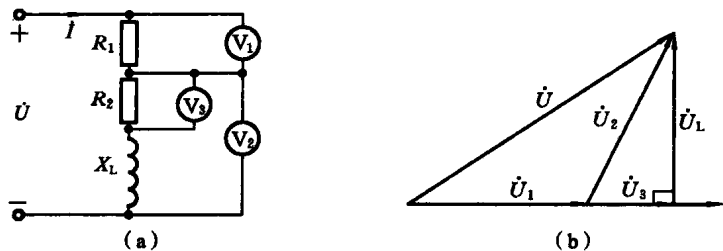


图 2.5

提示：电压表读出的都是有效值，在交流电路中有效值一般不满足基尔霍夫电压定律，必须借助于相量法或相量图求解。

解 以电流为参考相量，设  $\dot{I} = I \angle 0^\circ \text{ A}$ ，则可画出相量图，如图 2.5(b) 所示（电压与电流的参考方向一致）。从相量图可知

$$U_2^2 - U_3^2 = U_L^2, \quad U_L^2 = U^2 - (U_1 + U_3)^2$$

即

$$U_2^2 - U_3^2 = U^2 - (U_1 + U_3)^2$$

得

$$U_3 = \frac{U^2 - U_1^2 - U_2^2}{2U_1} = 63.6 \text{ V}$$

例 2.2 交流电路如图 2.6 所示，已知  $\dot{U} = 10 \angle 0^\circ \text{ V}$ ，各元件阻抗如图中所示，求：① A、B 间的等效阻抗  $Z_{AB}$ ；② 电压相量  $\dot{U}_{AF}$  和  $\dot{U}_{DF}$ ；③ 整个电路的有功功率和无功功率。

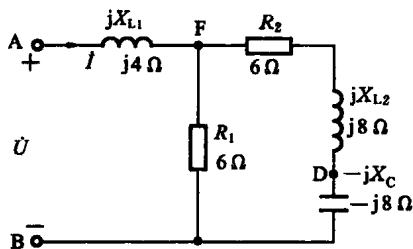


图 2.6

提示：复杂交流电路中求电路的总阻抗、各分段电压及支路电流的方法与直流电路的是相同的，但是运算中需采用复数计算法。

解 (1)  $Z_{AF} = j4 \Omega$

$$Z_{FB} = \frac{6 \times (6 + j8 - j8)}{6 + 6 + j8 - j8} \Omega = 3 \Omega$$

则总复阻抗  $Z_{AB} = Z_{AF} + Z_{FB} = (3 + j4) \Omega$

$$(2) \text{ 总电流 } \dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z_{AB}} = \frac{10 \angle 0^\circ}{3 + j4} \text{ A} = 2 \angle (-53.1^\circ) \text{ A}$$

所以

$$\dot{U}_{AF} = \dot{I} jX_{L1} = 2 \angle (-53.1^\circ) \times j4 \text{ V} = 8 \angle 36.9^\circ \text{ V}$$

$$\dot{U}_{FB} = \dot{I} Z_{FB} = 2 \angle (-53.1^\circ) \times 3 \text{ V} = 6 \angle (-53.1^\circ) \text{ V}$$

而

$$\dot{I}_{FD} = \frac{\dot{U}_{FB}}{6 + j8 - j8} = \frac{6 \angle (-53.1^\circ)}{6} \text{ A} = 1 \angle (-53.1^\circ) \text{ A}$$

所以

$$\dot{U}_{DF} = -\dot{I}_{FD}(R_2 + j8) = -1 \angle (-53.1^\circ) \times (6 + j8) \text{ V} = 10 \angle (-180^\circ) \text{ V}$$

(3)

$$P = UI \cos \varphi = 10 \times 2 \times \cos 53.1^\circ \text{ W} = 12 \text{ W}$$

$$Q = UI \sin \varphi = 10 \times 2 \times \sin 53.1^\circ \text{ var} = 16 \text{ var}$$

或由能量守恒，得

$$P = P_{R1} + P_{R2} = \frac{U_{FB}^2}{R_1} + I_{FD}^2 R_2 = \left( \frac{6^2}{6} + 1^2 \times 6 \right) \text{ W} = 12 \text{ W}$$

$$Q = Q_{L1} + Q_{L2} + Q_C = I^2 X_{L1} + I_{FD}^2 X_{L2} - I_{FD}^2 X_C = [2^2 \times 4 + 1^2 \times (8 - 8)] \text{ var} = 16 \text{ var}$$

**例 2.3** 在如图 2.7(a)所示的交流电路中,已知  $I_1 = I_2 = 10 \text{ A}$ ,  $U = 100 \text{ V}$ ,  $\dot{U}$  与  $\dot{I}$  同相,试求电流  $I$ , 以及各元件参数  $R$ ,  $X_C$  及  $X_L$ 。

**提示:** 本电路是纯电容与纯电阻并联, 然后与纯电感串联的, 要利用单一参数元件电压与电流的相量关系, 并且总电压与总电流同相。可以采用相量图辅助计算。

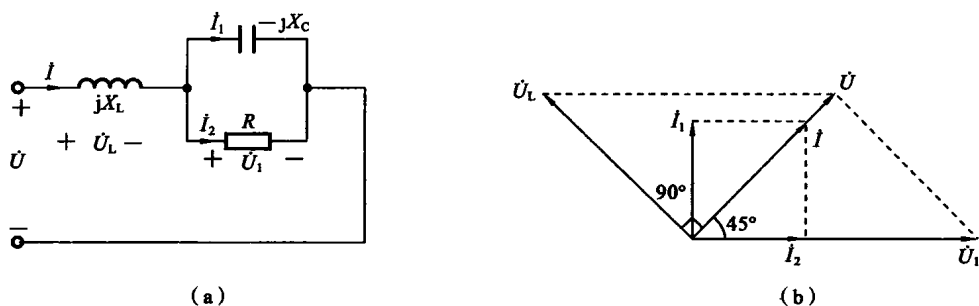


图 2.7

**解** 方法(一) 以并联部分的电压  $\dot{U}_1$  为参考相量, 则有

$$\dot{I}_2 = 10 \angle 0^\circ \text{ A}, \quad \dot{I}_1 = 10 \angle 90^\circ \text{ A}$$

所以 
$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = (10 \angle 0^\circ + 10 \angle 90^\circ) \text{ A} = 10\sqrt{2} \angle 45^\circ \text{ A}$$

即 
$$I = 10\sqrt{2} \text{ A}$$

又因为  $\dot{U}$  与  $\dot{I}$  同相, 所以

$$\dot{U} = 100 \angle 45^\circ \text{ V}, \quad \dot{U}_1 = \dot{I}_2 R = 10R$$

而 
$$\dot{U}_1 = \dot{I} \cdot jX_L = 10\sqrt{2} \angle 45^\circ \cdot jX_L = 10\sqrt{2} X_L \angle 135^\circ$$

根据 
$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_L = 10R + 10\sqrt{2} X_L \angle 135^\circ = (10R - 10X_L) + j10X_L$$

从而有 
$$(10R - 10X_L) + j10X_L = 100 \angle 45^\circ = 50\sqrt{2} + j50\sqrt{2}$$

所以 
$$10X_L = 50\sqrt{2}, \quad 10R - 10X_L = 50\sqrt{2}$$

得 
$$X_L = 5\sqrt{2} \Omega, \quad R = 10\sqrt{2} \Omega, \quad X_C = \frac{U_1}{I_1} = \frac{100\sqrt{2}}{10} \Omega = 10\sqrt{2} \Omega$$

方法(二) 以电压  $\dot{U}_1$  为参考相量, 作相量图, 如图 2.7(b)所示, 图中  $\dot{I}_2$  与  $\dot{U}_1$  同相, 而  $\dot{I}_1$  超前  $\dot{U}_1$   $90^\circ$ , 可得

$$\dot{I} = 10\sqrt{2} \angle 45^\circ \text{ A}$$

因为  $\dot{U}$  与  $\dot{I}$  同相, 则电压  $\dot{U}$  的初相位也是  $45^\circ$ , 电感上的电压  $\dot{U}_L$  超前电流  $\dot{I}$   $90^\circ$ , 也即超前电压  $\dot{U}$   $90^\circ$ 。

根据相量图中的关系, 有

$$U_1 = \sqrt{2}U = 100\sqrt{2} \text{ V}, \quad U_L = U = 100 \text{ V}$$

则有

$$X_L = \frac{U_L}{I} = \frac{100}{10\sqrt{2}} \Omega = 5\sqrt{2} \Omega, \quad R = \frac{U_1}{I_2} = \frac{100\sqrt{2}}{10} \Omega = 10\sqrt{2} \Omega, \quad X_C = \frac{U_1}{I_1} = \frac{100\sqrt{2}}{10} \Omega = 10\sqrt{2} \Omega$$

**例 2.4** 在图 2.8(a)所示的交流电路中, 已知外加电压  $U = 220 \text{ V}$ , 感性支路的功率因数

$\cos\varphi_1=0.6$ ,消耗的功率为 290.4 W;容性支路的电阻  $R_2=80\ \Omega$ ,容抗  $X_C=60\ \Omega$ 。试求:电流  $I$  和总功率  $P$ ;感性支路的  $R_1$  和  $X_L$ ;画出含  $\dot{U}$ 、 $\dot{I}$ 、 $\dot{I}_1$  和  $\dot{I}_2$  的相量图。

提示:分析并联交流电路时,通常以电压为参考相量。

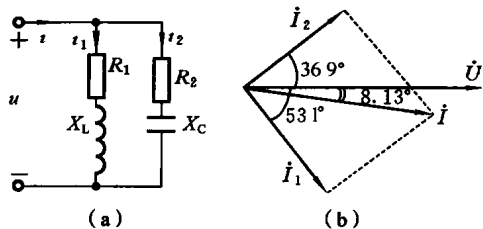


图 2.8

解 以电压为参考相量,设  $\dot{U}=220\angle 0^\circ\text{ V}$ ,则

$$(1) \quad I_1 = \frac{P_1}{U\cos\varphi_1} = \frac{290.4}{220 \times 0.6} \text{ A} = 2.2 \text{ A}$$

$$\varphi_1 = \arccos 0.6 = 53.1^\circ$$

所以  $\dot{I}_1 = 2.2\angle(-53.1^\circ) \text{ A}$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{R_2 - jX_C} = \frac{220\angle 0^\circ}{80 - j60} \text{ A} = 2.2\angle 36.9^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = [2.2\angle(-53.1^\circ) + 2.2\angle 36.9^\circ] \text{ A} = 3.11\angle(-8.13^\circ) \text{ A}$$

$$P = UI\cos\varphi = 220 \times 3.11\cos 8.13^\circ \text{ W} = 677.3 \text{ W}$$

$$(2) \quad Z_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_1} = \frac{220}{2.2\angle(-53.1^\circ)} \Omega = 100\angle 53.1^\circ \Omega = (60 + j80) \Omega$$

得

$$R_1 = 60\ \Omega, \quad X_L = 80\ \Omega$$

(3) 相量图如图 2.8(b)所示。

例 2.5 电路如图 2.9 所示,已知外加电压  $U=220\text{ V}$ ,  $R_1=30\ \Omega$ ,感抗  $X_L=40\ \Omega$ ,开关 S 接通后电路的总电流是 S 接通前的 2 倍。试求:  $R_2$  的值;开关 S 接通前、后电路的有功功率  $P$ 。

解 电压为参考相量,设  $\dot{U}=220\text{ V}\angle 0^\circ$ ,则

$$(1) \quad \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{R_1 + jX_L} = \frac{220\angle 0^\circ}{30 + j40} \text{ A} = \frac{220\angle 0^\circ}{50\angle 53.1^\circ} \text{ A} = 4.4\angle(-53.1^\circ) \text{ A}$$

开关 S 接通后

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 4.4\angle(-53.1^\circ) + \frac{\dot{U}}{R_2} = 2.64 - j3.52 + \frac{220}{R_2}$$

依题意,有

$$I = \sqrt{\left(2.64 + \frac{220}{R_2}\right)^2 + 3.52^2} = 2I_1 = 2 \times 4.4 \text{ A}$$

得

$$R_2 = 40.7\ \Omega$$

(2) 开关 S 接通前

$$P = I_1^2 R_1 = 4.4^2 \times 30 \text{ W} = 580.8 \text{ W}$$

开关 S 接通后

$$P = I_1^2 R_1 + \frac{U^2}{R_2} = \left(580.8 + \frac{220^2}{40.7}\right) \text{ W} = 1\,773 \text{ W}$$

例 2.6 某单相交流电源,其额定容量  $S_N=40\text{ kV}\cdot\text{A}$ ,额定电压  $U_N=220\text{ V}$ ,频率为 50 Hz,供给照明电路,若负载都是 40 W 的日光灯(可以认为是 RL 串联电路),其功率因数为 0.5,试求:

(1) 这样的日光灯最多可接多少只?

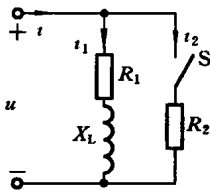


图 2.9

(2) 用补偿电容将功率因数提高到 1, 这时电路的总电流是多少? 需用多大的补偿电容?

(3) 功率因数提高到 1 后, 除供给以上日光灯照明外, 若保持电源在额定情况下工作, 还可以多接 40 W 的白炽灯多少只?

提示: 交流电路中的额定电压、额定电流指的是有效值, 而实际应用中也往往只对电压、电流的大小(即有效值)有要求。

解 (1) 电源的额定电流为

$$I_N = \frac{S_N}{U_N} = \frac{40 \times 10^3}{220} \text{ A} = 181.8 \text{ A}$$

每只日光灯的额定电流为

$$I_1 = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{40}{220 \times 0.5} \text{ A} = 0.364 \text{ A}$$

$$\text{可接日光灯数} = \frac{I_N}{I_1} = \frac{181.8}{0.364} = 500$$

(2) 如果  $\cos \varphi = 1$ , 则电路中的总电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{40 \times 500}{220} \text{ A} = 90.9 \text{ A}$$

已知  $\cos \varphi_1 = 0.5$ , 则

$$\varphi_1 = \arccos 0.5 = 60^\circ$$

$$\text{得 } C = \frac{P}{\omega U^2} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi) = \frac{40 \times 500}{314 \times 220^2} (\tan 60^\circ - \tan 0^\circ) \text{ F} = 2\,280 \mu\text{F}$$

(3) 若保持电源在额定情况下工作, 则还可提供的功率为  $[40 \times 10^3 - 40 \times 500] \text{ W} = 20\,000 \text{ W}$ , 即还可再接 40 W 白炽灯  $\frac{20\,000}{40} = 500$  个。

**例 2.7** 电路如图 2.10 所示。已知  $R = 25 \Omega$ ,  $R_1 = 24 \Omega$ ,  $X_L = 18 \Omega$ , 功率表的读数为 4 kW, 电流表的读数为 8 A, 并且  $\dot{I}$  与  $\dot{U}_{AB}$  同相。试求  $U_{AB}$  与  $X_C$  的值。

提示: 图中功率表的读数是电路的总有功功率,  $\dot{I}$  与  $\dot{U}_{AB}$  同相说明 RL 支路与电容支路发生了并联谐振。

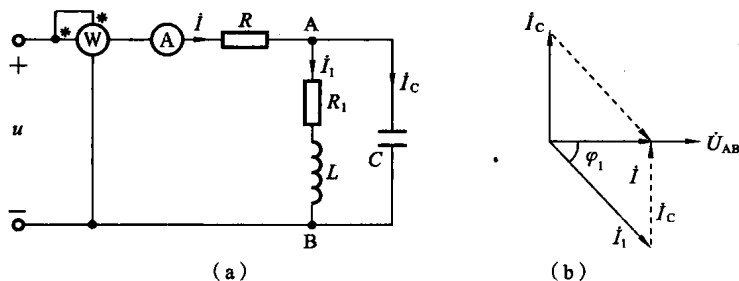


图 2.10

解 已知电路总的有功功率为 4 kW, 其中

$$P_R = I^2 R = 8^2 \times 25 \text{ W} = 1\,600 \text{ W}, \quad P_{R_1} = P - P_R = (4\,000 - 1\,600) \text{ W} = 2\,400 \text{ W}$$

所以

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_{R_1}}{R_1}} = \sqrt{\frac{2\,400}{24}} \text{ A} = 10 \text{ A}$$

$$U_{AB} = I_1 \sqrt{R_1^2 + X_L^2} = 10 \times \sqrt{24^2 + 18^2} \text{ V} = 10 \times 30 \text{ V} = 300 \text{ V}$$



因为  $\dot{I}$  与  $\dot{U}_{AB}$  同相, 参考如图 2.10(b) 所示相量图, 有

$$I_C = I_1 \sin \varphi_1 = I_1 \sin \left( \arctan \frac{X_L}{R_1} \right) = 10 \times \sin 36.9^\circ \text{ A} = 10 \times \frac{3}{5} \text{ A} = 6 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{U_{AB}}{R_1} = \frac{300}{6} \Omega = 50 \Omega$$

## 2.3 习题解答

### 2.3.1 填空题

1. 已知交流电压  $u = 100 \sin(314t - 45^\circ) \text{ V}$ , 则该交流电压的有效值  $U = \underline{\hspace{2cm}}$ , 周期  $T = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(70.7 V, 0.02 s)

2. 已知交流电压  $u = 200 \sin(500t - 30^\circ) \text{ V}$ , 当  $t = 0$  时, 电压  $u = \underline{\hspace{2cm}}$ ; 当  $t = \frac{T}{2}$  时, 电压  $u = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(−100 V, 173.2 V)

3. 已知两个正弦交流电流  $i_1 = 17 \sin(314t - 30^\circ) \text{ A}$ ,  $i_2 = 23 \sin(314t + 90^\circ) \text{ A}$ , 则  $i_1$  和  $i_2$  的相位差为  $\underline{\hspace{2cm}}$ , 在相位关系上,  $i_1$   $\underline{\hspace{2cm}}$   $i_2$ 。(−120°, 超前)

4. 把下列正弦量的时间函数用相量表示。(50  $\sqrt{2} \angle 0^\circ \text{ V}$ , 0.5  $\angle 120^\circ \text{ A}$ )

(1)  $u = 100 \sin(314t) \text{ V}$ , 则  $\dot{U} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

(2)  $i = -0.5 \sin(314t - 60^\circ) \text{ A}$ , 则  $\dot{I}_m = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

5. 某正弦交流电流的相量形式为  $\dot{I} = (4 + j3) \text{ A}$ , 其极坐标相量形式为  $\underline{\hspace{2cm}}$ , 若频率为 50 Hz, 则该正弦交流电流的瞬时值可写作  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(  $\dot{I} = 5 \angle 37^\circ \text{ A}$ ,  $i = 5\sqrt{2} \sin(314t + 37^\circ) \text{ A}$  )

6. 正弦交流电路如图 2.11 所示, 已知  $u_1 = 220 \sqrt{2} \sin(314t) \text{ V}$ ,  $u_2 = 220 \sqrt{2} \sin(314t - 120^\circ) \text{ V}$ , 则相量  $\dot{U}_a = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $\dot{U}_b = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(220  $\angle (-60^\circ) \text{ V}$ , 381  $\angle 30^\circ \text{ V}$ )

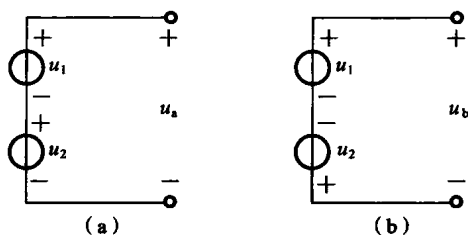


图 2.11

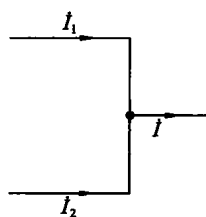


图 2.12

7. 正弦交流电路如图 2.12 所示, 已知:  $i = 5 \sqrt{2} \sin(\omega t + 45^\circ) \text{ A}$ ,  $i_1 = 5 \sqrt{2} \sin(\omega t - 45^\circ) \text{ A}$ , 则电流  $i_2$  的初相角  $\varphi$  为  $\underline{\hspace{2cm}}$ ,  $I_{2m} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$ 。(90°, 10)

8. 在纯电感正弦交流电路中, 若电源频率提高 1 倍, 而其他条件不变, 则电路中的电流将变  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。而在纯电容正弦交流电路中, 若电源频率提高 1 倍, 而其他条件不变, 则电路中的电流将变  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(为原来的  $\frac{1}{2}$ , 为原来的 2 倍)

9. 在正弦交流电路中, 已知流过纯电感元件的电流  $I = 5 \text{ A}$ , 电压  $u = 20 \sqrt{2} \sin(314t) \text{ V}$ ,

若  $u, i$  取关联参考方向, 则  $X_L = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $L = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(4  $\Omega$ , 12.7 mH)

10. 在纯电容正弦交流电路中, 已知电容两端电压  $U = 100$  V, 流过电容的电流  $i = 10\sqrt{2} \sin(314t)$  V, 则容抗  $X_C = \underline{\hspace{2cm}}$ , 电容  $C = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(10  $\Omega$ , 318  $\mu\text{F}$ )

11. 在电感元件的交流电路中, 已知电压的初相角为  $30^\circ$ , 则电流的初相角为  $\underline{\hspace{2cm}}$ ; 在电容元件的交流电路中, 已知电流的初相角为  $60^\circ$ , 则电压的初相角为  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(  $-60^\circ$ ,  $-30^\circ$  )

12. 在  $R, L$  串联的正弦交流电路中,  $R = 4 \Omega$ ,  $X_L = 3 \Omega$ , 电路的无功功率  $Q = 30$  var, 则电路中的电流有效值  $I = \underline{\hspace{2cm}}$ , 有功功率  $P = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(  $\sqrt{10}$  A, 40 W )

13. RLC 串联谐振电路的谐振角频率为  $\omega_0$ , 电路中电源信号的角频率为  $\omega$ 。当  $\omega = \omega_0$  时, 电路呈阻性, 发生串联谐振。当  $\omega > \omega_0$  时, 电路呈  $\underline{\hspace{2cm}}$  性; 当  $\omega < \omega_0$  时, 电路呈  $\underline{\hspace{2cm}}$  性。(感, 容)

14. RLC 串联电路中, 已知  $R = 8 \Omega$ ,  $X_L = 10 \Omega$ ,  $X_C = 4 \Omega$ , 当电路发生谐振时, 总阻抗  $Z = \underline{\hspace{2cm}}$ , 此时电路中电流最  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(8  $\Omega$ , 大)

15. 一个 RL 串联交流电路, 其复阻抗为  $Z = (4\sqrt{3} + j4) \Omega$ , 该电路的功率因数是  $\underline{\hspace{2cm}}$ , 电压与电流的相位差是  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(0.866,  $30^\circ$ )

16. 电路如图 2.13 所示,  $V_1$  和  $V$  的读数分别为 3 V、5 V, 当  $V_2$  的读数为 2 V 时, 方框中的元件为电容, 而当  $V_2$  的读数为 4 V 时, 方框中的元件为  $\underline{\hspace{2cm}}$ ; 当  $V_2$  的读数为 8 V 时, 方框中的元件为  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(电阻, 电感)

17. 正弦交流电路如图 2.14 所示, 已知  $U_1 = 40$  V,  $U_2 = 60$  V,  $U_3 = 30$  V, 则总电压  $U = \underline{\hspace{2cm}}$  V, 电路呈  $\underline{\hspace{2cm}}$  性。(50, 感)

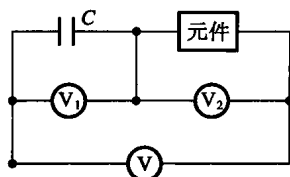


图 2.13

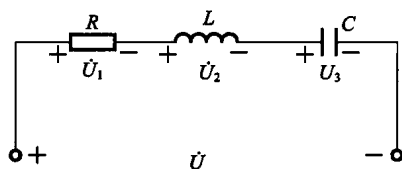


图 2.14

18. 正弦电路如图 2.15 所示, 已知相量  $\dot{I} = 5\angle 0^\circ$  A,  $\dot{U} = 25\sqrt{2}\angle \frac{\pi}{4}$  V, 电感电压有效值  $U_1 = 25$  V, 则电感电压的相量  $\dot{U}_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ , 阻抗  $Z$  上的电压  $\dot{U}_Z$  为  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(  $25\angle \frac{\pi}{2}$  V,  $25\angle 0^\circ$  V )

19. 正弦交流电路如图 2.16 所示, 若角频率  $\omega = 0$  rad/s, 则电路的总复阻抗  $Z_{ab} = \underline{\hspace{2cm}}$ ; 若角频率  $\omega = 2$  rad/s, 则电路的总复阻抗  $Z_{ab} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(4  $\Omega$ ,  $(3+j) \Omega$ )

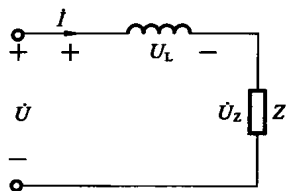


图 2.15

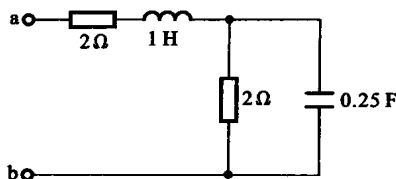


图 2.16

20. 已知复阻抗  $Z_1 = (5 + j9) \Omega$ ,  $Z_2 = (5 - j9) \Omega$ , 则两者的串联等效阻抗  $Z_1 + Z_2 =$  \_\_\_\_\_, 并联等效阻抗  $Z_1 // Z_2 =$  \_\_\_\_\_。(10  $\Omega$ , 0.75  $\angle(-16^\circ) \Omega$ )

21. 在 RL 并联交流电路中, 已知外加正弦电源电压有效值  $U = 100 \text{ V}$ , 总电流  $I = 5 \text{ A}$ , 电阻所在支路的电流  $I_R = 4 \text{ A}$ , 则电感所在支路的电流  $I_L =$  \_\_\_\_\_ A, 输入端等效阻抗  $Z$  的大小为 \_\_\_\_\_  $\Omega$ 。(3, 20)

22. RC 并联电路如图 2.17 所示,  $R = 10 \Omega$ ,  $X_C = 10 \Omega$ ;  $\dot{I}$  超前  $\dot{U}$  的角度  $\varphi$  应为 \_\_\_\_\_;  $\dot{U}/\dot{I}$  应为 \_\_\_\_\_。(45°, 5  $\sqrt{2} \angle(-45^\circ) \Omega$ )

23. 电路如图 2.18 所示, 已知  $R_1 = R_2 = 22 \Omega$ ,  $X_{L1} = X_{C1} = 10 \Omega$ ,  $X_{L2} = X_{C2} = 20 \Omega$ , 外加电压  $u = 220\sqrt{2}\sin(\omega t) \text{ V}$ , 则电路中的电流  $I_1 =$  \_\_\_\_\_ A;  $I_2 =$  \_\_\_\_\_ A。(0, 10)

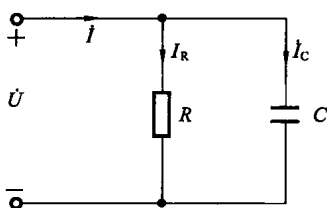


图 2.17

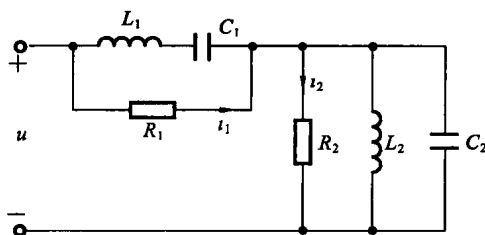


图 2.18

24. 在某正弦交流电路中, 若负载视在功率为 5 kV · A, 无功功率为 3 kvar, 则其有功功率  $P$  为 \_\_\_\_\_, 功率因数  $\cos\varphi =$  \_\_\_\_\_。(4 kW, 0.8)

25. 能量转换过程不可逆的电路功率常称为 \_\_\_\_\_ 功率; 能量转换过程可逆的电路功率称为 \_\_\_\_\_ 功率; 这两部分功率的总和称为视在功率。(有功, 无功)

26. 在 RLC 串联电路中, 已知电流为 5 A, 电阻为 30  $\Omega$ , 感抗为 40  $\Omega$ , 容抗为 80  $\Omega$ , 那么电路的阻抗为 \_\_\_\_\_, 电路中吸收的有功功率为 \_\_\_\_\_。(50  $\Omega$ , 750 W)

27. 已知某交流电路的电压相量  $\dot{U} = 141 \angle 45^\circ \text{ V}$ , 电流相量  $\dot{I} = 5 \angle (-45^\circ) \text{ A}$ , 则电路的有功功率  $P =$  \_\_\_\_\_, 无功功率  $Q =$  \_\_\_\_\_。(0 W, 70.5 var)

### 2.3.2 选择题

1. 已知正弦交流电压  $u = 100\sin(2\pi t + 60^\circ) \text{ V}$ , 其频率为( )。(C)

A. 50 Hz                      B. 2 Hz                      C. 1 Hz                      D. 2  $\pi$  Hz

2. 某正弦电压有效值为 380 V, 频率为 50 Hz, 计时开始数值等于 380 V, 其瞬时值表达式为( )。(B)

A.  $u = 380\sin(314t) \text{ V}$                       B.  $u = 537\sin(314t + 45^\circ) \text{ V}$

C.  $u = 380\sin(314t + 90^\circ) \text{ V}$                       D.  $u = 537\sin(314t) \text{ V}$

3. 已知  $i_1 = 10\sin(314t + 90^\circ) \text{ A}$ ,  $i_2 = 10\sin(628t + 30^\circ) \text{ A}$ , 则( )。(D)

A.  $i_1$  超前  $i_2 60^\circ$                       B.  $i_1$  滞后  $i_2 60^\circ$                       C.  $i_1$  滞后  $i_2 30^\circ$                       D. 相位差无法判断

4. 白炽灯的额定工作电压为 220 V, 它允许承受的最大电压为( )。(B)

A. 220 V                      B. 311 V                      C. 380 V                      D.  $u(t) = 220\sqrt{2}\sin 314 \text{ V}$

5. 已知相量  $\dot{A} = -j + 1$ , 则其辐角为( )。(B)

- A.  $\frac{\pi}{4}$                       B.  $-\frac{\pi}{4}$                       C.  $\frac{3\pi}{4}$                       D.  $-\frac{3\pi}{4}$

6. 已知正弦交流电压的有效值  $U = 220 \text{ V}$ , 初相角  $\varphi = 30^\circ$ , 下列各式中正确的是 ( )。(C)

- A.  $u = 220 \sin(2\omega t + 30^\circ) \text{ V}$                       B.  $U = 220 \angle 30^\circ \text{ V}$   
C.  $\dot{U} = 220 e^{j30^\circ} \text{ V}$                       D.  $u = 220 \sqrt{2} \angle 30^\circ \text{ V}$

7. 电容元件的正弦交流电路中, 电压有效值不变, 频率增大时, 电路中电流将 ( )。(A)

- A. 增大                      B. 减小                      C. 不变                      D. 无法确定

8. 加在一个感抗是  $20 \Omega$  的纯电感两端的电压是  $u = 10 \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ V}$ , 则通过它的电流瞬时值为 ( ) A。(C)

- A.  $i = 0.5 \sin(2\omega t - 30^\circ)$                       B.  $i = 0.5 \sin(\omega t + 60^\circ)$   
C.  $i = 0.5 \sin(\omega t - 60^\circ)$                       D.  $i = 0.5 \sin(2\omega t + 60^\circ)$

9. 若电路中某元件的端电压为  $u = 5 \sin(314t + 35^\circ) \text{ V}$ , 电流  $i = 2 \sin(314t + 125^\circ) \text{ A}$ ,  $u$ 、 $i$  为关联参考方向, 则该元件是 ( )。(C)

- A. 电阻                      B. 电感                      C. 电容                      D. 电源

10. 在交流电的相量法中, 不能称为相量的参数是 ( )。(D)

- A.  $\dot{U}$                       B.  $\dot{I}$                       C.  $\dot{E}$                       D.  $Z$

11. 已知某交流电路的复阻抗为  $Z = (3 - j4) \Omega$ , 则该电路的性质是 ( )。(A)

- A. 电容性                      B. 电感性                      C. 电阻性                      D. 组合性

12. 图 2.19 所示的为正弦交流电  $u$ 、 $i$  的相量图, 若  $\dot{I} = 10 \angle (-15^\circ)$ , 而  $U = 190 \text{ V}$ , 则可知  $u =$  ( )。(C)

- A.  $190 \sin(\omega t + 15^\circ) \text{ V}$                       B.  $190 \sin(\omega t - 30^\circ) \text{ V}$   
C.  $190 \sqrt{2} \sin(\omega t + 15^\circ) \text{ V}$                       D.  $190 \sqrt{2} \sin(\omega t - 30^\circ) \text{ V}$

13. 电路如图 2.20 所示, 已知  $R = X_L$ , 输入  $u_1 = 220 \sqrt{2} \sin(\omega t) \text{ V}$ , 则输出  $u_o$  为 ( )。(D)

- A.  $110 \sqrt{2} \sin(\omega t + 45^\circ) \text{ V}$                       B.  $110 \sqrt{2} \sin(\omega t - 45^\circ) \text{ V}$   
C.  $220 \sin(\omega t - 45^\circ) \text{ V}$                       D.  $220 \sin(\omega t + 45^\circ) \text{ V}$

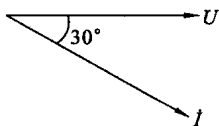


图 2.19

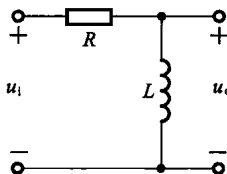


图 2.20

14. RLC 串联正弦交流电路相量图如图 2.21 所示, 取  $\dot{I}$  为参考相量, 电压、电流为关联参考方向, 当  $X_C > X_L$  时, 其相量图为图 2.21 ( ) 所示。(A)

- A. (a)                      B. (b)                      C. (c)                      D. (d)

15. 正弦稳态电路如图 2.22 所示, 若  $u_s = 10 \sin(2t + 30^\circ) \text{ V}$ ,  $R = 2 \Omega$ ,  $L = 1 \text{ H}$ , 则在正

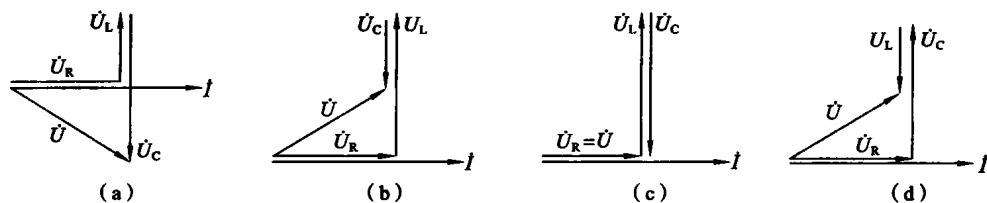


图 2.21

弦稳态时, 电流  $i$  的初相角为( )。(B)

- A.  $75^\circ$       B.  $-15^\circ$       C.  $15^\circ$       D.  $-75^\circ$

16. 电路如图 2.23 所示, 正处于谐振状态, 闭合开关 S 后, 电流表读数( )。(B)

- A. 变大      B. 变小      C. 不变      D. 不确定

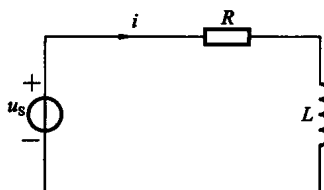


图 2.22

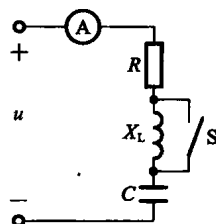


图 2.23

17. 在 RLC 串联正弦交流电路中, 当端电压与电流同相时, 频率与参数的关系满足( )。(A)

- A.  $\omega^2 LC = 1$       B.  $\omega L^2 C^2 = 1$       C.  $\omega LC = 1$       D.  $\omega = L^2 C$

18. RLC 串联电路处于谐振状态, 若电感  $L$  变为原来的  $\frac{1}{2}$ , 要使电路保持在原频率下串联谐振, 则电容应为原来的( )。(C)

- A.  $\frac{1}{4}$       B.  $\frac{1}{2}$       C. 2 倍      D. 4 倍

19. RLC 串联电路如图 2.24 所示, 若(复)阻抗  $Z = 10 \angle 0^\circ \Omega$ , 则正弦信号源  $u$  的角频率为( )。(B)

- A.  $100 \text{ rad/s}$       B.  $1\,000 \text{ rad/s}$       C.  $10^4 \text{ rad/s}$       D.  $10^6 \text{ rad/s}$

20. 正弦交流电路如图 2.25 所示,  $\dot{U}$  超前  $\dot{I}$  的角度  $\varphi$  为( )。(B)

- A.  $\varphi = \arctan \frac{-1}{\omega CR}$       B.  $\varphi = -\arctan(\omega CR)$   
C.  $\varphi = \arctan \frac{R}{\omega C}$       D.  $\varphi = \arctan \frac{\omega C}{-R}$

21. 正弦交流电路如图 2.26 所示, 已知电流  $i$  的有效值为  $5 \text{ A}$ ,  $i_1$  有效值为  $3 \text{ A}$ , 则  $i_2$  有效值为( )。(A)

- A.  $8 \text{ A}$       B.  $4 \text{ A}$       C.  $2 \text{ A}$       D.  $1 \text{ A}$

22. RLC 并联正弦交流电路如图 2.27 所示, 各支路电流有效值  $I_1 = I_2 = I_3 = 20 \text{ A}$ , 当电压频率减小为原来的  $\frac{1}{2}$  而保持其有效值不变时, 各电流有效值应变为( )。(D)

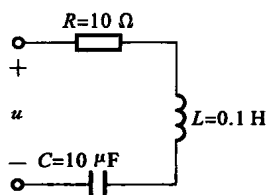


图 2.24

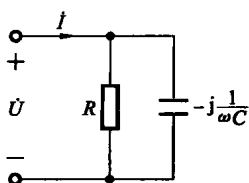


图 2.25

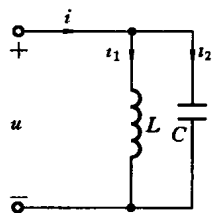


图 2.26

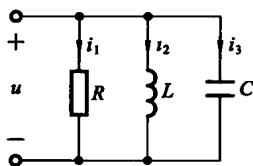


图 2.27

- A.  $I_1=40\text{ A}, I_2=40\text{ A}, I_3=40\text{ A}$       B.  $I_1=40\text{ A}, I_2=10\text{ A}, I_3=20\text{ A}$   
 C.  $I_1=20\text{ A}, I_2=10\text{ A}, I_3=40\text{ A}$       D.  $I_1=20\text{ A}, I_2=40\text{ A}, I_3=10\text{ A}$

23. 正弦电路如图 2.28 所示,  $R=X_C=5\ \Omega$ ,  $U_{AB}=U_{BC}$ , 且电路处于谐振状态, 则复阻抗  $Z$  为( )。(A)

- A.  $(2.5+j2.5)\ \Omega$       B.  $(2.5-j2.5)\ \Omega$       C.  $5\angle 45^\circ\ \Omega$       D.  $\angle 0^\circ\ \Omega$

24. 正弦交流电路如图 2.29 所示, 已知  $\dot{U}=100\angle(-30^\circ)\text{ V}$ ,  $Z=20\angle(-60^\circ)\ \Omega$ , 则其无功功率  $Q$  等于( )。(C)

- A. 500 var      B. -250 var      C. -433 var      D. 433 var

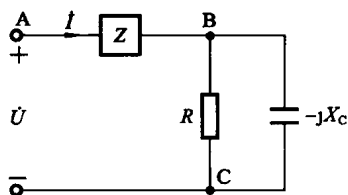


图 2.28

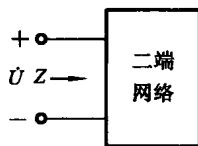


图 2.29

25. 在额定工作状态下时, 40 W 日光灯与 40 W 白炽灯比较, 所需视在功率( )。(A)

- A. 日光灯的比白炽灯的多      B. 日光灯的比白炽灯的少  
 C. 两者的相同      D. 没法比较, 白炽灯不需要视在功率

26. 采用并联电容的方式提高供电电路的功率因数, 下列说法正确的是( )。(D)

- A. 减少了用电设备中无用的无功功率  
 B. 减少了用电设备的有功功率, 提高了电源设备的容量  
 C. 可以节省电能  
 D. 可提高电源设备的利用率并减小输电线路中的功率损耗

27. 某电路元件中, 按关联参考方向电流  $i=10\sqrt{2}\sin(314t-90^\circ)\text{ A}$ , 两端电压  $u=$

$220\sqrt{2}\sin(314t)$  V, 则此元件的无功功率  $Q$  为( )。(C)

- A.  $-4\ 400$  W      B.  $-2\ 200$  var      C.  $2\ 200$  var      D.  $4\ 400$  W

### 2.3.3 计算题

1. 纯电容正弦交流电路如图 2.30 所示, 已知  $C = \frac{50}{\pi} \mu\text{F}$ ,  $f = 50$  Hz。

(1) 当  $u_c = 220\sqrt{2}\sin(\omega t - 20^\circ)$  V 时, 求电流  $i_c$ 。

(2) 当  $\dot{I}_c = 0.11\angle 60^\circ$  A 时, 求  $\dot{U}_c$ , 并画出相量图。

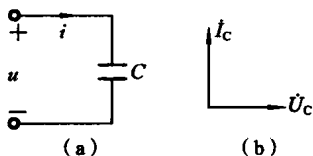


图 2.30

解 
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times \frac{50}{\pi} \times 10^{-6}} \Omega = 200 \Omega$$

(1) 当  $\dot{U} = 220\angle(-20^\circ)$  V 时, 有

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{-jX_C} = \frac{220\angle(-20^\circ)}{-j200} \text{ A} = 1.1\angle 70^\circ \text{ A}$$

$$i = 1.1\sqrt{2}\sin(\omega t + 70^\circ) \text{ A}$$

(2) 当  $\dot{I}_c = 0.11\angle 60^\circ$  A 时, 有

$$\dot{U}_c = -jX_C \dot{I}_c = 200\angle(-90^\circ) \times 0.11\angle 60^\circ \text{ V} = 22\angle(-30^\circ) \text{ V}$$

其相量图如图 2.30(b) 所示。

2. 纯电感的正弦电路如图 2.31(a) 所示, 已知  $L = \frac{10}{\pi}$  H,  $f = 50$  Hz。

(1) 当  $i_L = 0.22\sqrt{2}\sin(\omega t - 40^\circ)$  A 时, 求电压  $u_L$ 。

(2) 当  $\dot{U}_L = 127\angle 60^\circ$  V 时, 求  $\dot{I}_L$ , 并画出相量图。

解 
$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times \frac{10}{\pi} \Omega = 1\ 000 \Omega$$

(1) 当  $i_L = 0.22\sqrt{2}\sin(\omega t - 40^\circ)$  A 时, 有

$$\dot{U}_L = jX_L \dot{I}_L = 1\ 000\angle 90^\circ \times 0.22\angle(-40^\circ) \text{ V} = 220\angle 50^\circ \text{ V}$$

$$u_L = 220\sqrt{2}\sin(\omega t + 50^\circ) \text{ V}$$

(2) 当  $\dot{U}_L = 127\angle 60^\circ$  V 时, 有

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{U}_L}{jX_L} = \frac{127\angle 60^\circ}{1\ 000\angle 90^\circ} \text{ A} = 0.127\angle(-30^\circ) \text{ A}$$

其相量图如图 2.31(b) 所示。

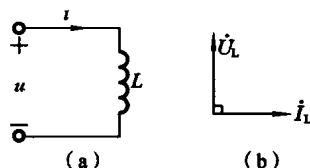


图 2.31

3. 有一线圈, 接在电压为 48 V 的直流电源上, 测得电流为 8 A。然后再将这个线圈改接到电压为 120 V、50 Hz 的交流电源上, 测得的电流为 12 A。试问线圈的电阻及电感各为多少?

解 在直流电路中线圈相当于导线, 只有电阻起作用, 则有

$$R = 48/8 \Omega = 6 \Omega$$

交流电路中, 总的阻抗  $|Z| = \frac{120}{12} \Omega = 10 \Omega = \sqrt{R^2 + X_L^2}$

所以

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{10^2 - 6^2} \Omega = 8 \Omega$$

则电感

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{8}{2\pi \times 50} \text{ H} = 25.5 \text{ mH}$$

4. 电路如图 2.32 所示, 已知  $U=100 \text{ V}$ ,  $I=5 \text{ A}$ , 且电压  $\dot{U}$  超前电流  $\dot{I}$   $53.1^\circ$ , 试求电阻  $R$  与感抗  $X_L$ 。

解 设  $\dot{I}=5\angle 0^\circ \text{ A}$ , 则

$$\dot{U}=100\angle 53.1^\circ \text{ V}$$

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{100\angle 53.1^\circ}{5\angle 0^\circ} \Omega = 20\angle 53.1^\circ \Omega$$

由图可知  $Z=R+jX_L=20\angle 53.1^\circ \Omega=(12+j16) \Omega$

所以

$$R=12 \Omega, \quad X_L=16 \Omega$$

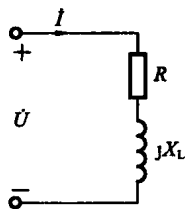


图 2.32

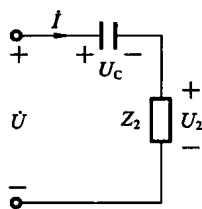


图 2.33

5. 电路如图 2.33 所示, 电流相量  $\dot{I}=5\angle 0^\circ \text{ A}$ , 电容电压  $U_C$  为  $25 \text{ V}$ , 总电压  $u=50\sqrt{2}\sin(\omega t+45^\circ) \text{ V}$ , 求总阻抗  $Z$  和阻抗  $Z_2$ 。

解  $\dot{U}_C=25\angle(-90^\circ) \text{ V}=-j25 \text{ V}$ ,  $\dot{U}=50\angle 45^\circ \text{ V}$

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{50\angle 45^\circ}{5\angle 0^\circ} \Omega = 10\angle 45^\circ \Omega, \quad X_C = \frac{U_C}{I} = \frac{25}{5} \Omega = 5 \Omega$$

所以  $Z_2=Z-Z_C=(10\angle 45^\circ+j5) \Omega=(7.07+j12.07) \Omega$

6. 在两个单一参数元件串联的电路中, 已知  $u=220\sqrt{2}\sin(314t+45^\circ) \text{ V}$ ,  $i=5\sqrt{2}\sin(314t-15^\circ) \text{ A}$ 。求此两元件的参数值, 写出这两个元件上电压的瞬时值表达式。

解 两个单一参数元件串联后的阻抗为

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{220\angle 45^\circ}{5\angle(-15^\circ)} \Omega = 44\angle 60^\circ \Omega = (22+j38.1) \Omega$$

由此可知, 这两个单一参数元件为电阻  $R$  和电感  $L$ , 且

$$R=22 \Omega, \quad L = \frac{38.1}{\omega} = 0.121 \text{ H}$$

$$\dot{U}_R=R\dot{I}=22\times 5\angle(-15^\circ) \text{ V}=110\angle(-15^\circ) \text{ V}, \quad \dot{U}_L=j\omega L\dot{I}=190.5\angle 75^\circ \text{ V}$$

所以两元件上电压的瞬时表达式分别为

$$u_R=110\sqrt{2}\sin(314t-15^\circ) \text{ V}, \quad u_L=190.5\sqrt{2}\sin(314t+75^\circ) \text{ V}$$

7. 电路如图 2.34 所示, 当外加电压为  $u=100\sin(1\,000t) \text{ V}$  时, 开关  $S$  断开与闭合两种情况都不会影响电路中电流的大小, 试求电容  $C$  的值。

解 据题意知, 开关  $S$  断开和闭合时, 电抗的模相等, 即  $X_L-X_C=-X_L$ , 所以

$$X_C=2X_L=2\times 1\,000 \Omega=2\,000 \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{1\,000 \times 2\,000} \text{ F} = 0.5 \mu\text{F}$$

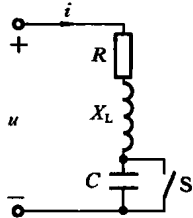


图 2.34

8. RLC 串联的交流电路如图 2.35(a) 所示, 已知  $R=30 \Omega$ ,  $L=127 \text{ mH}$ ,  $C=40 \mu\text{F}$ , 电源电压  $u=220\sqrt{2}\sin(314t+20^\circ) \text{ V}$ 。试求: 感抗、容抗和阻抗; 电流的有效值  $I$  与瞬时值  $i$  的表达式; 电路功率因数  $\cos\varphi$ ; 各部分电压的有效值; 作相量图。



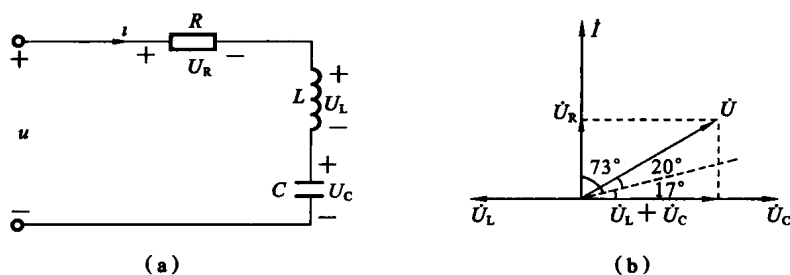


图 2.35

解 (1)  $X_L = \omega L = 314 \times 127 \times 10^{-3} \Omega = 40 \Omega$   
 $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \times 40 \times 10^{-6}} \Omega = 80 \Omega$   
 $|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{30^2 + (40 - 80)^2} \Omega = 50 \Omega$

(2)  $I = \frac{U}{|Z|} = \frac{220}{50} \text{ A} = 4.4 \text{ A}$   
 $\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R} = \arctan \frac{40 - 80}{30} = -53^\circ$   
 $i = 4.4 \sqrt{2} \sin(314t + 20^\circ + 53^\circ) \text{ A} = 4.4 \sqrt{2} \sin(314t + 73^\circ) \text{ A}$

(3)  $\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R} = \arctan \frac{40 - 80}{30} = -53^\circ$   
 $\cos \varphi = \cos(-53^\circ) = 0.6$

(4)  $U_R = IR = 4.4 \times 30 \text{ V} = 132 \text{ V}$   
 $U_L = IX_L = 4.4 \times 40 \text{ V} = 176 \text{ V}$   
 $U_C = IX_C = 4.4 \times 80 \text{ V} = 352 \text{ V}$

(5) 相量图如图 2.35(b) 所示。

9. 某收音机调谐等效电路如图 2.36 所示, 已知天线线圈的等效电阻  $R = 20 \Omega$ , 电感  $L = 250 \mu\text{H}$ , 作用于天线的各种频率信号的有效值均为  $10 \mu\text{V}$ 。试求: 当可变电容  $C = 150 \text{ pF}$  时, 可收到哪个频率的广播? 此信号下的  $I, U_C$  的值是多少? 若  $R, L, C$  不变, 当频率为  $f = 640 \text{ kHz}$  的信号作用时, 电路的电流  $I$  及  $U_C$  又为多少?

解 (1)  $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = 822 \times 10^3 \text{ Hz} = 822 \text{ kHz}$   
 $I = \frac{U}{R} = \frac{10 \times 10^{-6}}{20} \text{ A} = 0.5 \times 10^{-6} \text{ A} = 0.5 \mu\text{A}$   
 $U_C = IX_C = 0.5 \times 10^{-6} \times 2 \times 3.14 \times 822 \times 10^3 \text{ V} = 2.58 \text{ mV}$

(2) 当  $f = 640 \text{ kHz}$  时, 有  
 $Z = \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2} = 653.63 \Omega$   
 $I = \frac{10 \times 10^{-6}}{653.65} \text{ A} = 15.3 \times 10^{-9} \text{ A} = 15.3 \times 10^{-3} \mu\text{A}$   
 $U_C = IX_C = 25.38 \times 10^{-6} \text{ V} = 25.38 \mu\text{V}$

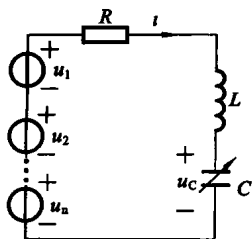


图 2.36

## 第2章 单相交流电路

10. 电路如图 2.37 所示, 已知  $Z_1 = Z_2 = 2120\sqrt{2}\angle 45^\circ \Omega$ ,  $\dot{I}_2$  超前  $\dot{I}_1$   $90^\circ$ , 电源频率  $f=50\text{ Hz}$ 。试求电容  $C$  的值。

解 据题意及参考方向可画出反映相位关系的相量图, 如图 2.37(b) 所示,  $Z_1$ 、 $Z_2$  为感性负载, 且  $Z_1 = Z_2 = R + jX_L = (2120 + j2120) \Omega$ 。 $Z_2$  与电容  $C$  串联后的等效阻抗为容抗, 阻抗角为  $-45^\circ$ , 即

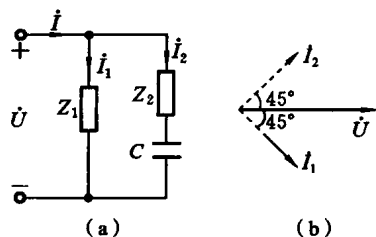


图 2.37

所以  $Z_2 - jX_C = R + j(X_L - X_C) = R - jX'_C = (2120 - j2120) \Omega = 2120\sqrt{2}\angle(-45^\circ) \Omega$   
 $X_C = 4240 \Omega$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{100\pi \times 4240} \text{ F} = 0.75 \mu\text{F}$$

11. 正弦交流电路如图 2.38 所示, 已知  $X_C = 50 \Omega$ ,  $X_L = 100 \Omega$ ,  $R = 100 \Omega$ , 电流  $\dot{I} = 2\angle 0^\circ \text{ A}$ , 求电阻上的电流  $\dot{I}_R$  和总电压  $\dot{U}$ 。

$$\begin{aligned} \text{解 } Z &= -jX_C + \frac{jX_L R}{R + jX_L} = (-j50 + \frac{j100 \times 100}{100 + j100}) \Omega = (-j50 + 50 + j50) \Omega = 50 \Omega \\ \dot{U} &= \dot{I} Z = 2\angle 0^\circ \times 50 \text{ V} = 100\angle 0^\circ \text{ V}, \quad \dot{U}_R = \dot{I} Z_R = 2\angle 0^\circ \times (50 + j50) \text{ V} = 141.4\angle 45^\circ \text{ V} \\ \dot{I} &= \frac{\dot{U}_R}{R} = \frac{141.4\angle 45^\circ}{100} \text{ A} = 1.41\angle 45^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

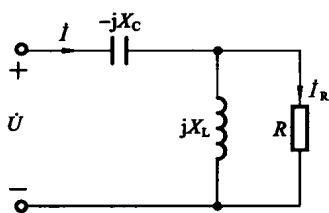


图 2.38

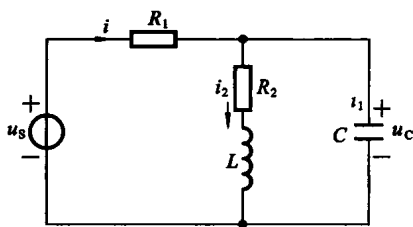


图 2.39

12. 电路如图 2.39 所示,  $u_s = 220\sqrt{2}\sin(\omega t) \text{ V}$ ,  $R_1 = 50 \Omega$ ,  $R_2 = 100 \Omega$ ,  $L = 637 \text{ mH}$ ,  $C = 7.96 \mu\text{F}$ , 求电流  $i$ 、 $i_1$ 、 $i_2$  和电压  $u_C$ 。

解

$$\omega = 314 \text{ rad/s}$$

$$X_L = \omega L = 314 \times 637 \times 10^{-3} \Omega = 200 \Omega, \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \times 7.96 \times 10^{-6}} \Omega = 400 \Omega$$

$$Z_1 = \frac{(R_2 + jX_L)(-jX_C)}{R_2 + jX_L - jX_C} = \frac{(100 + j200)(-j400)}{100 + j200 - j400} \Omega = (320 + j240) \Omega = 400\angle 37^\circ \Omega$$

$$Z = R_1 + Z_1 = (370 + j240) \Omega = 440\angle 33^\circ \Omega, \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}_s}{Z} = \frac{220\angle 0^\circ}{440\angle 33^\circ} \text{ A} = 0.5\angle(-33^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{U}_C = \dot{I} \times Z_1 = 0.5\angle(-33^\circ) \times 400\angle 37^\circ \text{ V} = 200\angle 4^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_C}{-jX_C} = \frac{200\angle 4^\circ}{-j400} \text{ A} = 0.5\angle 94^\circ \text{ A}, \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_C}{R_2 + jX_L} = \frac{200\angle 4^\circ}{100 + j200} \text{ A} = 0.89\angle(-59.6^\circ) \text{ A}$$

则

$$i = 0.5\sqrt{2}\sin(\omega t - 33^\circ) \text{ A}, \quad i_1 = 0.5\sqrt{2}\sin(\omega t + 94^\circ) \text{ A}$$

$$i_2 = 0.89\sqrt{2}\sin(\omega t - 59.6^\circ) \text{ A}, \quad u_C = 200\sqrt{2}\sin(\omega t + 4^\circ) \text{ V}$$

13. 正弦交流电路如图 2.40 所示, 电压  $\dot{U}=220\angle 53.1^\circ \text{ V}$ ,  $Z_1=(3+j4) \Omega$ ,  $Z_2=(6+j8) \Omega$ 。试求:  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ ; 电路的  $P$ 、 $Q$  及功率因数  $\cos\varphi$ 。说明电路呈何性质。

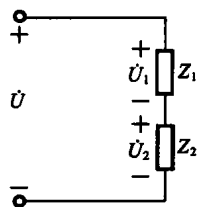


图 2.40

解 (1)  $Z=Z_1+Z_2=(3+j4+6+j8) \Omega=(9+j12) \Omega$

$$\dot{I}=\frac{\dot{U}}{Z}=\frac{220\angle 53.1^\circ}{9+j12} \text{ A}=14.7\angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\dot{U}_1=\dot{I} Z_1=14.7\angle 0^\circ \times (3+j4) \text{ V}=73.5\angle 53.1^\circ \text{ V}$$

$$\dot{U}_2=\dot{I} Z_2=14.7\angle 0^\circ \times (6+j8) \text{ V}=147\angle 53.1^\circ \text{ V}$$

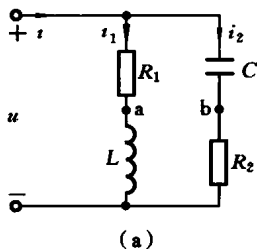
$$(2) \quad P=UI\cos\varphi=220\times 14.7\times 0.6 \text{ W}=1940 \text{ W}$$

$$Q=UI\sin\varphi=220\times 14.7\times 0.8 \text{ var}=2587 \text{ var}$$

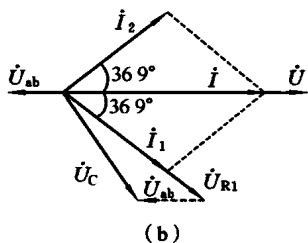
$$\cos\varphi=\cos 53.1^\circ=0.6$$

(3) 电路呈感性。

14. 电路如图 2.41(a)所示, 已知外加电压  $U=200 \text{ V}$ ,  $R_1=R_2=40 \Omega$ ,  $X_1=X_2=30 \Omega$ 。试求: 电流  $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ , 以及总电流  $\dot{I}$  和电压  $\dot{U}_{ab}$ ; 电路的功率因数  $\cos\varphi$  和功率  $P$ 。画出含  $\dot{U}$ 、 $\dot{U}_{ab}$ 、 $\dot{I}$ 、 $\dot{I}_1$  和  $\dot{I}_2$  的相量图。



(a)



(b)

图 2.41

解 (1) 设  $\dot{U}=220\angle 0^\circ \text{ V}$ , 则

$$\dot{I}_1=\frac{\dot{U}}{R_1+jX_L}=\frac{200\angle 0^\circ}{40+j30} \text{ A}=4.4\angle (-36.9^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_2=\frac{\dot{U}}{R_2-jX_C}=\frac{200\angle 0^\circ}{40-j30} \text{ A}=4\angle 36.9^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_2=[4.0\angle (-36.9^\circ)+4.0\angle 36.9^\circ] \text{ A}=6.4\angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\dot{U}_{ab}=-R_1 \dot{I}_1-jX_C \dot{I}_2=[-40\times 4.0\angle (-36.9^\circ)-j30\times 4.0\angle 36.9^\circ] \text{ V}=-56 \text{ V}$$

$$(2) \quad \cos\varphi=1$$

$$P=I_1^2 R_1+I_2^2 R_2=2I_1^2 R_1=2\times 4^2\times 40 \text{ W}=1280 \text{ W}$$

(3) 相量图如图 2.41(b)所示。

15. 日光灯等效电路如图 2.42 所示, 已知外加电压  $U=220 \text{ V}$ , 点燃后测得灯管两端的电压  $U_1=58 \text{ V}$ , 镇流器两端的电压为  $U_2=205 \text{ V}$ , 镇流器消耗的功率为  $4 \text{ W}$ , 电路中的电流为  $0.35 \text{ A}$ 。试求: 灯管的等效电阻  $R$  及其消耗的功率; 镇流器的等效电阻  $R_s$  和电感  $L$ ; 电路消耗的功率和功率因数。

解 (1) 灯管的等效电阻

$$R=\frac{U_1}{I}=\frac{58}{0.35} \Omega=165.7 \Omega$$

## 第2章 单相交流电路

灯管消耗的功率

$$P_R = I^2 R = 0.35^2 \times 165.7 \text{ W} = 20.3 \text{ W}$$

(2) 镇流器的电阻  $R_x = \frac{P_x}{I^2} = \frac{4}{0.35^2} \Omega = 32.7 \Omega$

镇流器的阻抗  $\sqrt{R_x^2 + X_L^2} = \frac{U_2}{I} = \frac{205}{0.35} \Omega = 585.7 \Omega$

所以  $X_L = \sqrt{585.7^2 - 32.7^2} \Omega = 584.8 \Omega$

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{584.8}{314} \text{ H} = 1.86 \text{ H}$$

(3) 电路消耗的总功率

$$P = P_R + P_L = (20.3 + 4) \text{ W} = 24.3 \text{ W}$$

电路的功率因数  $\cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{24.3}{220 \times 0.35} = 0.32$

16. 电路如图 2.43 所示, 已知  $u = 20\sqrt{2}\sin(314t) \text{ V}$ ,  $R = 1 \Omega$ ,  $X_L = \sqrt{3} \Omega$ , 当调节电容  $C$  使得电流  $I$  在开关  $S$  断开和闭合时大小相等, 试求此时电容值  $C$  为多大?

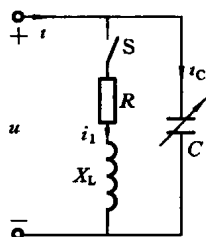


图 2.43

解 当开关  $S$  断开时, 有

$$\dot{I} = \dot{I}_C = \frac{\dot{U}}{-jX_C} = \frac{20}{-jX_C} \text{ A}$$

当开关  $S$  闭合时, 有

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{R + jX_L} = \frac{20}{1 + j\sqrt{3}} \text{ A} = 10 \angle (-60^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_C = 10 \angle (-60^\circ) + \frac{20}{-jX_C} = 5 - j8.66 + j \frac{20}{X_C}$$

开关  $S$  断开和闭合时电流  $I$  相等, 即

$$\frac{20}{X_C} = \sqrt{5^2 + \left(\frac{20}{X_C} - 8.66\right)^2}$$

得  $X_C = 3.464 \Omega$ ,  $C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{314 \times 3.464} \text{ F} = 920 \mu\text{F}$

17. 电路如图 2.44 所示, 已知  $R = R_1 = R_2 = 10 \Omega$ ,  $L = 31.8 \text{ mH}$ ,  $C = 318 \mu\text{F}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $U = 10 \text{ V}$ , 试求并联支路端电压  $U_{ab}$ , 以及电路的  $P$ 、 $Q$ 、 $S$  及功率因数  $\cos \varphi$ 。

解  $X_L = \omega L = 2\pi \times 50 \times 31.8 \times 10^{-3} \Omega = 10 \Omega$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 318 \times 10^{-6}} \Omega = 10 \Omega$$

$$Z_1 = \frac{(R_1 + jX_L)(R_2 - jX_C)}{(R_1 + jX_L) + (R_2 - jX_C)} = \frac{(10 + j10)(10 - j10)}{10 + j10 + 10 - j10} = 10 \Omega$$

$$Z = R + Z_1 = (10 + 10) \Omega = 20 \Omega, \quad I = \frac{U}{|Z|} = \frac{10}{20} \text{ A} = 0.5 \text{ A}$$

$$U_{ab} = I |Z_1| = 0.5 \times 10 \text{ V} = 5 \text{ V}$$

$$P = UI \cos \varphi = 10 \times 0.5 \times 1 \text{ W} = 5 \text{ W}$$

$$Q = 0 \text{ var}, \quad \cos \varphi = 1$$

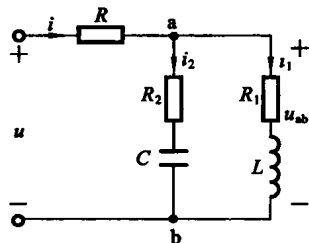


图 2.44

18. 电路如图 2.45(a)所示, 已知  $R=50\ \Omega$ ,  $X_L=40\ \Omega$ ,  $X_C=100\ \Omega$ ,  $\dot{I}_R=4\angle 0^\circ\text{ A}$ 。试求: 总电流  $\dot{I}$ ; 电路的功率  $P$  及功率因数  $\cos\varphi$ 。画出电流和电压的相量图。

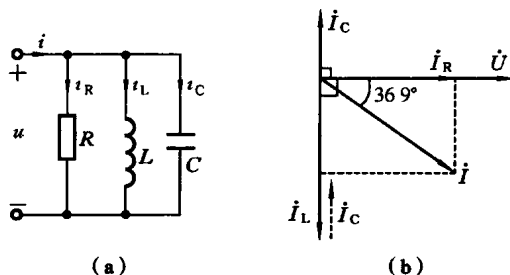


图 2.45

解 (1)  $\dot{U}_R = R \dot{I}_R = 50 \times 4 \angle 0^\circ\text{ V} = 200 \angle 0^\circ\text{ V}$

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{U}_L}{jX_L} = \frac{200}{j40}\text{ A} = -j5\text{ A}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{-jX_C} = \frac{200}{-j100}\text{ A} = j2\text{ A}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C = (4 - j5 + j2)\text{ A} = 5 \angle (-36.9^\circ)\text{ A}$$

(2)  $P = I_R^2 R = 4^2 \times 50\text{ W} = 800\text{ W}$

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI} = \frac{800}{200 \times 5} = 0.8 \quad \text{或} \quad \cos\varphi = \cos 36.9^\circ = 0.8$$

(3) 相量图如图 2.45(b)所示。

19. RL 串联电路如图 2.46 所示, 当外加电压为  $U=220\text{ V}$ ,  $f=50\text{ Hz}$  时, 消耗的功率为  $P=42\text{ W}$ ,  $I=0.4\text{ A}$ 。试求: 电路中的电阻  $R$  和感抗  $X_L$ , 功率因数  $\cos\varphi_1$ ; 欲将功率因数提高到  $\cos\varphi=0.9$ , 应并接多大的电容  $C$ ? 若并联  $4.75\ \mu\text{F}$  的电容, 则功率因数是多少?

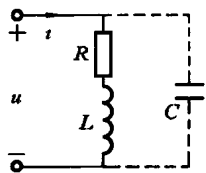


图 2.46

解 (1)  $|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.4}\ \Omega = 550\ \Omega$

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{42}{0.4^2}\ \Omega = 262.5\ \Omega$$

$$X_L = \sqrt{|Z|^2 - R^2} = \sqrt{550^2 - 262.5^2}\ \Omega = 483.3\ \Omega$$

(2)  $\cos\varphi_1 = \frac{P}{UI} = \frac{42}{220 \times 0.4} = 0.477$

(3)  $\cos\varphi_1 = 0.477, \quad \varphi_1 = 61.5^\circ; \quad \cos\varphi = 0.9, \quad \varphi = 25.8^\circ$

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\tan\varphi_1 - \tan\varphi) = \frac{40}{314 \times 220^2} (\tan 61.5^\circ - \tan 25.8^\circ)\text{ F} = 3.75\ \mu\text{F}$$

(4) 电感的无功功率

$$Q_L = UI \sin\varphi_1 = 220 \times 0.4 \times \sin 61.5^\circ = 773\text{ var}$$

并联  $4.75\ \mu\text{F}$  电容的容抗和无功功率分别为

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \times 4.75 \times 10^{-6}}\ \Omega = 670.5\ \Omega, \quad Q_C = \frac{U^2}{X_C} = \frac{220^2}{67.5}\text{ var} = 72.7\text{ var}$$

并联  $4.75\ \mu\text{F}$  电容后的视在功率为

$$S = \sqrt{P^2 - (Q_L - Q_C)^2} = \sqrt{42^2 - (77.3 - 72.2)^2}\text{ V} \cdot \text{A} = 42.3\text{ V} \cdot \text{A}$$

功率因数  $\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{42}{42.3} = 0.99$

## 第3章 三相电路

### 3.1 要点总结

#### 3.1.1 三相电源

##### 1. 特点

频率相同、幅值相等、相位互差  $120^\circ$  的三相正弦电动势  $e_A$ 、 $e_B$  和  $e_C$ , 这就是三相对称电源。

##### 2. 三相电源的星形连接

相电压  $U_p: \dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ 。

线电压  $U_l: \dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}, U_l = \sqrt{3}U_p$ 。

优势: 输出 4 根线、两种电压等级。

#### 3.1.2 三相负载的连接

##### 1. 三相负载的星形连接

特点: 负载电压等于相电压, 负载中的相电流等于线电流。

相电流: 
$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}, \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C}$$

$$I_l = I_p$$

中性线电流: 
$$\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

##### 2. 对称负载的星形连接

当负载对称(负载大小相等性质相同)时有

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_A \angle (-120^\circ), \quad \dot{I}_C = \dot{I}_A \angle 120^\circ$$

$$\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

中性线可以省略。电源只有 3 根火线, 但是若负载不对称, 则无中性线后相电压会发生偏移, 这属于故障状态。

##### 3. 三相负载的三角形连接

相电流: 
$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}, \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}}, \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}}$$

线电流: 
$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$$

负载对称:  $I_l = \sqrt{3}I_p$ , 线电流滞后所对应的相电流  $30^\circ$  角。

### 3.1.3 三相电路的功率

三相电路的有功功率  $P$  为各相有功功率之和;无功功率  $Q$  为各相无功功率的代数和,即

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\text{负载对称: } P = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi, \quad Q = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_l I_l$$

## 3.2 例题解析

**例 3.1** 三相交流发电机的三个绕组接成星形时,若线电压  $u_{\text{lk}} = 380\sqrt{2}\sin(\omega t)$  V,求其他相电压、线电压。

**解** 因为  $u_{\text{BC}} = 380\sqrt{2}\sin(\omega t)$  V,所以

$$u_{\text{AB}} = 380\sqrt{2}\sin(\omega t + 120^\circ) \text{ V}$$

$$u_{\text{CA}} = 380\sqrt{2}\sin(\omega t - 120^\circ) \text{ V}$$

则三个相电压分别滞后所对应的线电压  $30^\circ$  角,即

$$u_{\text{A}} = 220\sqrt{2}\sin(\omega t + 90^\circ) \text{ V}$$

$$u_{\text{B}} = 220\sqrt{2}\sin(\omega t - 30^\circ) \text{ V}$$

$$u_{\text{C}} = 220\sqrt{2}\sin(\omega t - 150^\circ) \text{ V}$$

**例 3.2** 电路如图 3.1 所示,三相对称负载  $R = 22 \Omega$ ,电源相电压 220 V,求:图中开关断开时各线电流;开关闭合时各线电流。

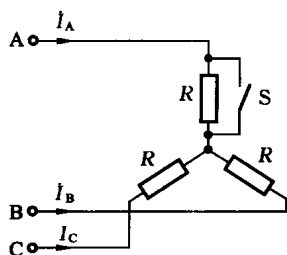


图 3.1

**解** (1) 由于负载对称,无中线,每相负载承受相电压,所以只求出其中一支路线电流就可以推出另外两个。

设电源电压  $\dot{U}_{\text{A}} = 220 \text{ V}$ ,  $\dot{U}_{\text{B}} = 220 \angle (-120^\circ) \text{ V}$ ,  $\dot{U}_{\text{C}} = 220 \angle 120^\circ \text{ V}$ ,则

$$\dot{I}_{\text{A}} = \frac{220}{22} \text{ A} = 10 \text{ A}, \quad \dot{I}_{\text{B}} = 10 \angle (-120^\circ) \text{ A}, \quad \dot{I}_{\text{C}} = 10 \angle 120^\circ \text{ A}$$

(2) 开关闭合时,A 相负载被短路,B 相和 C 相负载承受电压不是相电压,而是线电压。

$$\dot{U}_{\text{A}} = 220 \text{ V}$$

$$\dot{U}_{\text{AB}} = 380 \angle 30^\circ \text{ V}, \quad \dot{U}_{\text{CA}} = 380 \angle 150^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}_{\text{B}} = \frac{-\dot{U}_{\text{AB}}}{R} = \frac{380 \angle (-150^\circ)}{22} \text{ A} = 10\sqrt{3} \angle (-150^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_{\text{C}} = \frac{\dot{U}_{\text{CA}}}{R} = \frac{380 \angle 150^\circ}{22} \text{ A} = 10\sqrt{3} \angle 150^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{\text{A}} = \dot{I}_{\text{B}} + \dot{I}_{\text{C}} = [10\sqrt{3} \angle (-150^\circ) + 10\sqrt{3} \angle 150^\circ] \text{ A} = 30 \angle 180^\circ \text{ A}$$

**例 3.3** 电路如图 3.2(a)所示,电源相电压为 220 V,  $R=X_L=X_C=10\ \Omega$ 。试问三相负载是否对称? 求各线电流及中性线电流,并画相量图。

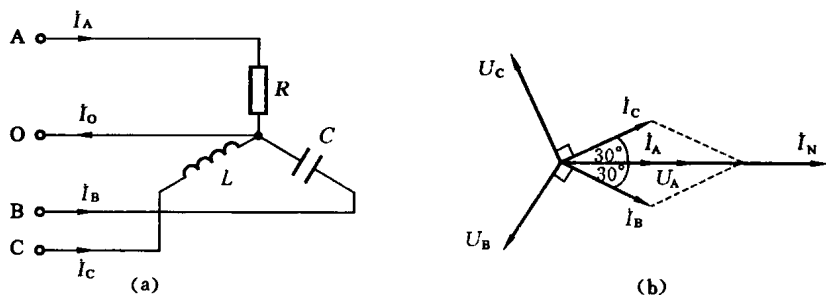


图 3.2

**解** (1) 负载不对称。三相负载对称是指三个负载大小相等、性质相同,本例中三个负载大小相等,但性质不相同。

(2) 设电源电压

$$\dot{U}_A = 220\text{ V}, \quad \dot{U}_B = 220\angle(-120^\circ)\text{ V}, \quad \dot{U}_C = 220\angle120^\circ\text{ V}$$

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{R} = \frac{220}{10}\text{ A} = 22\text{ A}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{-jX_C} = \frac{220\angle(-120^\circ)}{-j10}\text{ A} = 22\angle(-30^\circ)\text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{jX_L} = \frac{220\angle120^\circ}{j10}\text{ A} = 22\angle30^\circ\text{ A}$$

$$\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = [22 + 22\angle(-30^\circ) + 22\angle30^\circ]\text{ A} = 60.1\text{ A}$$

(3) 相量图如图 3.2(b)所示。

**例 3.4** 电路如图 3.3(a)所示,已知  $R=10\ \Omega$ ,  $U_p=220\text{ V}$ 。A 与 C 之间另有一复阻抗:  $R_1=8\ \Omega$ ,  $X_L=6\ \Omega$ 。试求图中各电流并画出它们的相量图。

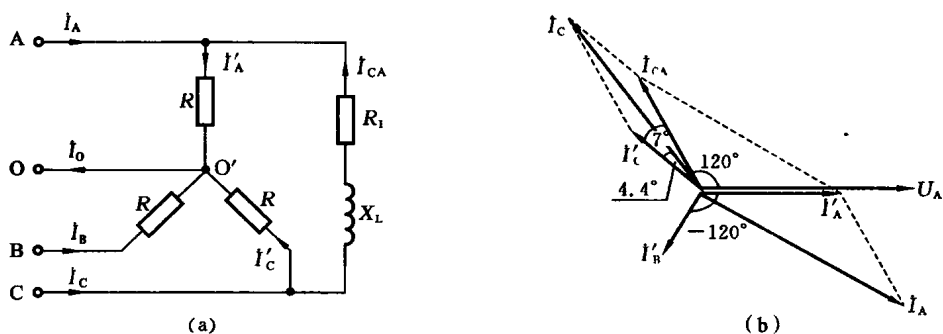


图 3.3

**解** 设电源电压  $\dot{U}_A = 220\angle0^\circ\text{ V}$ ,  $\dot{U}_B = 220\angle(-120^\circ)\text{ V}$ ,  $\dot{U}_C = 220\angle120^\circ\text{ V}$ , 那么

$$\dot{U}_{AB} = 380\angle30^\circ\text{ V}, \quad \dot{U}_{BC} = 380\angle(-90^\circ)\text{ V}, \quad \dot{U}_{CA} = 380\angle150^\circ\text{ V}$$

则  $\dot{I}'_A = \frac{\dot{U}_A}{R} = \frac{220\angle0^\circ}{10}\text{ A} = 22\text{ A}$ ,  $\dot{I}'_B = 22\angle(-120^\circ)\text{ A}$ ,  $\dot{I}'_C = 22\angle120^\circ\text{ A}$

$$\dot{I}_O = \dot{I}'_A + \dot{I}'_B + \dot{I}'_C = 0, \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{R_1 + jX_L} = \frac{380\angle150^\circ}{10\angle37^\circ}\text{ A} = 22\sqrt{3}\angle113^\circ\text{ A}$$



$$\dot{I}_A = \dot{I}'_A - \dot{I}_{CA} = (22 - 22\sqrt{3}\angle 113^\circ) \text{ A} = 50.8\angle(-43.5^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}'_C + \dot{I}_{CA} = (22\angle 120^\circ + 22\sqrt{3}\angle 113^\circ) \text{ A} = 60\angle 115.6^\circ \text{ A}$$

相量图如图 3.3(b)所示。

**例 3.5** 电路如图 3.4(a)所示,负载采用三角形接法,对称电源线电压为 380 V,  $R_1 = R_3 = 22 \Omega$ ,  $R_2 = 11 \Omega$ ,  $X_L = 11\sqrt{3} \Omega$ 。求:各线电流和相电流,画相量图;负载总有功功率、无功功率、视在功率。

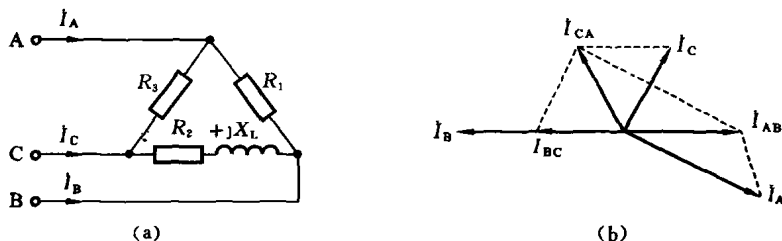


图 3.4

**解** (1) 因为是三角形接法,设线电压

$$\dot{U}_{AB} = 380\angle 0^\circ \text{ V}, \quad \dot{U}_{BC} = 380\angle(-120^\circ) \text{ V}, \quad \dot{U}_{CA} = 380\angle 120^\circ \text{ V}$$

先求相电流

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{R_1} = \frac{380\angle 0^\circ}{22} \text{ A} = 10\sqrt{3} \text{ A}$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{R_2 + jX_L} = \frac{380\angle(-120^\circ)}{11 + j11\sqrt{3}} \text{ A} = -10\sqrt{3} \text{ A}$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{R_3} = \frac{380\angle 120^\circ}{22} \text{ A} = 10\sqrt{3}\angle 120^\circ \text{ A}$$

再求线电流

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = (10\sqrt{3} - 10\sqrt{3}\angle 120^\circ) \text{ A} = 30\angle -30^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = (-10\sqrt{3} - 10\sqrt{3}) \text{ A} = -20\sqrt{3} \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = [10\sqrt{3}\angle 120^\circ - (-10\sqrt{3})] \text{ A} = 10\sqrt{3}\angle 60^\circ \text{ A}$$

相量图如图 3.4(b)所示。

(2) 有功功率:

$$P_{AB} = I_{AB}^2 R_1 = 6\,600 \text{ W}$$

所以

$$P_{BC} = 3\,300 \text{ W}, \quad P_{CA} = 6\,600 \text{ W}$$

总有功功率:

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = 16.5 \text{ kW}$$

无功功率:

$$Q = I_{BC}^2 X_L = 3\,300 \text{ var}$$

视在功率:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 16.8 \text{ kV} \cdot \text{A}$$

### 3.3 习题解答

#### 3.3.1 填空题

1. 对称三相电源的特征有各相电压、频率大小\_\_\_\_\_;相位\_\_\_\_\_。(相等,互差  $120^\circ$ )

2. 在三相供电系统中,2根相线之间的电压称作\_\_\_\_\_;相线与中性线之间的电压称作\_\_\_\_\_(线电压,相电压)
3. 若星形连接的对称三相电源  $\dot{U}_A = U \angle 0^\circ \text{ V}$ , 则线电压  $\dot{U}_{BC} = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $\dot{U}_{AB} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。  
( $\angle(-90^\circ) \text{ V}$ ,  $\angle 30^\circ \text{ V}$ )
4. 若对称负载是三角形连接,线电流  $\dot{I}_A = I \angle 0^\circ \text{ A}$ , 则相电流  $\dot{I}_{BC} = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $\dot{I}_{CA} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。  
( $\frac{1}{\sqrt{3}} I \angle(-90^\circ) \text{ A}$ ,  $\frac{1}{\sqrt{3}} I \angle 150^\circ \text{ A}$ )
5. 在不对称三相星形连接的电路中,中性线上不允许加\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。(开关,保险)
6. 三相星形连接负载的电压是\_\_\_\_\_,线电流\_\_\_\_\_相电流。(相电压,等于)
7. 三角形连接的对称负载,负载电压等于\_\_\_\_\_,线电流等于相电流的\_\_\_\_\_。(线电压,  $\sqrt{3}$ 倍)
8. 对称三相电路中  $P = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi$ , 式中  $\varphi$  是\_\_\_\_\_与\_\_\_\_\_的相位差。(相电压,相电流)
9. 对称三相电路的平均功率为  $P$ , 线电压为  $U_l$ , 线电流为  $I_l$ , 则视在功率  $S = \underline{\hspace{2cm}}$ , 功率因数  $\cos \varphi = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(  $\sqrt{3} U_l I_l$ ,  $P/S$  )
10. 触电电压为一定数值时,人体电阻愈小,通过人体的电流愈\_\_\_\_\_,触电危害性愈\_\_\_\_\_。(大,大)
11. 在中性线接地的三相四线制系统中,将电气设备的金属外壳接到中性线上的保护措施称为\_\_\_\_\_;电源中性点不接地的三相三线制系统中,把电气设备的金属外壳通过接地装置接地的保护措施称为\_\_\_\_\_。(保护接零,保护接地)
12. 工作接地电阻一般小于\_\_\_\_\_;防雷保护接地电阻一般小于\_\_\_\_\_。(4  $\Omega$ , 10  $\Omega$ )

### 3.3.2 选择题

1. 在三相四线制供电系统中,电源线电压与相电压的相位关系为( )。(D)
  - A. 线电压滞后于对应相电压  $120^\circ$
  - B. 线电压超前于对应相电压  $120^\circ$
  - C. 线电压滞后于对应相电压  $30^\circ$
  - D. 线电压超前于对应相电压  $30^\circ$
2. 某三相交流电源的三个电动势接成星形时线电压有效值为 6.3 kV, 若将它接成三角形, 则线电压有效值为( )。(C)
  - A. 6.3 kV
  - B. 10.9 kV
  - C. 3.64 kV
  - D. 4.46 kV
3. 当三相对称交流电源接成星形时,若线电压为 380 V, 则相电压为( )。(C)
  - A.  $380\sqrt{3} \text{ V}$
  - B.  $380\sqrt{2} \text{ V}$
  - C.  $380/\sqrt{3} \text{ V}$
  - D. 380 V
4. 对称三相电路中,线电压  $\dot{U}_{AB}$  与  $\dot{U}_{CB}$  之间的相位关系是( )。(B)
  - A.  $\dot{U}_{AB}$  超前  $\dot{U}_{CB} 60^\circ$
  - B.  $\dot{U}_{AB}$  落后  $\dot{U}_{CB} 60^\circ$
  - C.  $\dot{U}_{AB}$  超前  $\dot{U}_{CB} 120^\circ$
  - D.  $\dot{U}_{AB}$  落后  $\dot{U}_{CB} 120^\circ$
5. 对称三相负载为星形连接,电源线电压为 380 V, 负载电阻为 38  $\Omega$ , 则各线电流为( )。(C)
  - A. 10 A
  - B. 17.3 A
  - C. 5.77 A
  - D. 8.66 A
6. 对称三相负载为三角形连接,电源线电压为 380 V, 负载电阻为 38  $\Omega$ , 则各线电流为

( )。(B)

A. 10 A                      B. 17.3 A                      C. 5.77 A                      D. 8.66 A

7. 某对称星形连接三相电路中,线电压为 380 V,线电流为 5 A,各线电压分别与对应线电流同相位,则三相总功率  $P$  为( )。(A)

A. 3 300 W                      B. 2 850 W                      C. 1 900 W                      D. 1 100 W

8. 负载为三角形连接的三相电路,若每相负载的有功功率为 30 W,则三相有功功率为( )。(C)

A. 0 W                      B.  $30\sqrt{3}$  W                      C. 90 W                      D.  $90\sqrt{3}$  W

9. 三角形连接的三相对称电阻负载原来接于线电压为 220 V 的三相交流电源上,后改成星形接法接于线电压为 380 V 的三相电源上,设  $I_{\Delta 1}$  是三相负载三角形接法接于线电压为 220 V 的三相交流电源时的线电流,  $I_{Y1}$  是三相负载星形接法接于线电压为 380 V 的三相交流电源时的线电流,则该三相负载在这两种情况下的线电流的比值为  $I_{\Delta 1}/I_{Y1}=( )$ 。(A)

A. 1.7                      B. 1.4                      C. 0.6                      D. 0.7

10. 某三角形连接的纯电容负载接于三相对称电源上,已知各相容抗  $X_C=6\ \Omega$ ,线电流为 10 A,则三相视在功率( )。(B)

A. 1 800 V·A                      B. 600 V·A                      C. 600 W                      D. 1 800 W

11. 对称三相三线制电路如图 3.5 所示,线电压  $U_l=380$  V,若因故障相 B 相断路(相当于 S 打开),则电压表读数(有效值)为( )。(B)

A. 0 V                      B. 190 V                      C. 220 V                      D. 380 V

12. 对称负载三角形连接的三相电路如图 3.6 所示,原先电流表指示为  $\sqrt{3}$  A(有效值),后因故障一相断开(相当于 S 打开),则电流表的读数为( )。(D)

A.  $\sqrt{3}$  A                      B.  $0.5\sqrt{3}$  A                      C. 3 A                      D. 1 A

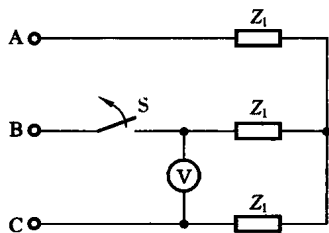


图 3.5

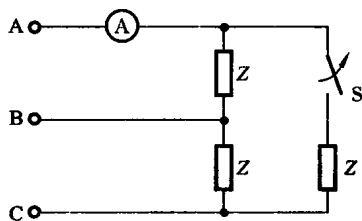


图 3.6

### 3.3.3 计算题

1. 有一星形连接的三相感性负载,每相的电阻  $R=80\ \Omega$ 、感抗  $X_L=60\ \Omega$ ,对称电源,设线电压为  $u_{AB}=380\sqrt{2}\sin(\omega t+30^\circ)$  V,试求各电流相量式。

解 
$$\dot{U}_A = \frac{\dot{U}_{AB}}{\sqrt{3}} \angle(-30^\circ) = \frac{380\angle 30^\circ}{\sqrt{3}} \angle(-30^\circ) \text{ V} = 220\angle 0^\circ \text{ V}$$

$$Z = R + jX_L = (80 + j60)\ \Omega = 100\angle 36.9^\circ\ \Omega$$

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z} = \frac{220\angle 0^\circ}{100\angle 36.9^\circ} \text{ A} = 2.2\angle(-36.9^\circ) \text{ A}$$

负载对称,各相电流也对称

$$\dot{I}_B = 2.2 \angle (-156.9^\circ) \text{ A}, \quad \dot{I}_C = 2.2 \angle 83.1^\circ \text{ A}$$

2. 负载星形连接,有中性线,其线电压、线电流相量关系如图 3.7 所示,已知  $\dot{U}_{AB} = 220\sqrt{3} \angle 0^\circ \text{ V}$ , 各相电流的大小为 10 A, 试求:各相电流  $i_A, i_B, i_C$  及中性线电流  $i_O$  的瞬时值表达式;三相负载复阻抗  $Z_A, Z_B, Z_C$  各为多少? 并说明其性质。

解 (1) 由相量图已知  $\dot{I}_A = 10 \angle (-120^\circ) \text{ A}$ ,  $\dot{I}_B = 10 \angle (-60^\circ) \text{ A}$ ,  $\dot{I}_C = 10 \angle 90^\circ \text{ A}$ , 则

$$i_A = 10\sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ A}, \quad i_B = 10\sqrt{2} \sin(\omega t - 60^\circ) \text{ A}, \quad i_C = 10\sqrt{2} \sin(\omega t + 90^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = [10 \angle (-120^\circ) + 10 \angle (-60^\circ) + 10 \angle 90^\circ] \text{ A} = -j10(\sqrt{3}-1) \text{ A} = -j7.32 \text{ A}$$

$$i_O = 7.32\sqrt{2} \sin(\omega t - 90^\circ) \text{ A}$$

$$(2) \dot{U}_A = \frac{\dot{U}_{AB}}{\sqrt{3} \angle 30^\circ} = \frac{220\sqrt{3} \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \angle 30^\circ} \text{ V} = 220 \angle (-30^\circ) \text{ V}$$

$$Z_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_A} = \frac{220 \angle (-30^\circ)}{10 \angle (-120^\circ)} \Omega = 22 \angle 90^\circ \Omega \quad (\text{纯电感})$$

$$Z_B = \frac{\dot{U}_B}{\dot{I}_B} = \frac{220 \angle (-150^\circ)}{10 \angle (-60^\circ)} \Omega = 22 \angle -90^\circ \Omega \quad (\text{纯电容})$$

$$Z_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{I}_C} = \frac{220 \angle 90^\circ}{10 \angle 90^\circ} \Omega = 22 \angle 0^\circ \Omega \quad (\text{电阻})$$

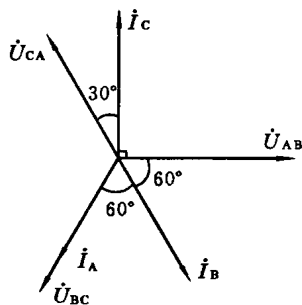


图 3.7

3. 在三相四线制电路中,已知线电压  $U_l = 380 \text{ V}$ , 星形连接三相阻抗的大小都是  $10 \Omega$ , A 相为电阻, B 相为电感, C 相为电容。试求各相电流及中性线电流,并画出电压与电流的相量图。

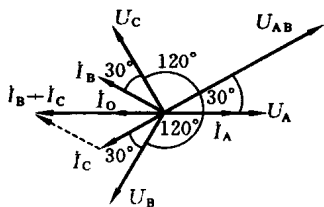


图 3.8

解 电源对称,  $U_p = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$ , 设  $\dot{U}_A = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$ , 则

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{R} = 22 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{jX_L} = \frac{220 \angle (-120^\circ)}{j10} \text{ A} = 22 \angle 150^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{-jX_C} = \frac{220 \angle 120^\circ}{-j10} \text{ A} = 22 \angle (-150^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = [22 + 22 \angle 150^\circ + 22 \angle (-150^\circ)] \text{ A} = -16.1 \text{ A}$$

其相量图如图 3.8 所示。

4. 电路如图 3.9(a)所示,已知  $R = 22 \Omega$ ,  $U_l = 380 \text{ V}$ 。试求图中各电流,并画出它们的相量图。

解 设  $\dot{U}_A = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$ , 则

$$\dot{U}_{AB} = 380 \angle 30^\circ \text{ V}, \quad \dot{U}_{CA} = 380 \angle 150^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}'_A = \frac{\dot{U}_A}{R} = \frac{220 \angle 0^\circ}{22} \text{ A} = 10 \text{ A}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}'_B = 10 \angle (-120^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_O = \dot{I}'_A + \dot{I}'_B + \dot{I}'_C = 0, \quad \dot{I}'_C = 10 \angle 120^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{R} = \frac{380 \angle 150^\circ}{22} \text{ A} = 10\sqrt{3} \angle 150^\circ \text{ A}$$

根据 KCL 可得

$$\dot{I}_A = \dot{I}'_A - \dot{I}_{CA} = (10 - 10\sqrt{3}\angle 150^\circ) \text{ A} = (10 + 15 - j5\sqrt{3}) \text{ A} = 26.5\angle(-19.1^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}'_C + \dot{I}_{CA} = (10\angle 120^\circ + 10\sqrt{3}\angle 150^\circ) \text{ A} = 26.5\angle 139.1^\circ \text{ A}$$

其相量图如图 3.9(b)所示。

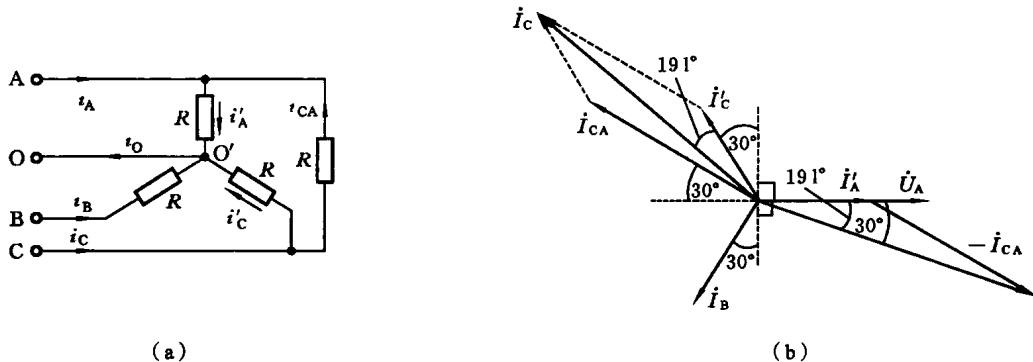


图 3.9

5. 对称感性负载作三角形连接, 已知线电压  $U_1 = 380 \text{ V}$ , 每相负载电阻  $R = 6 \Omega$ , 感抗  $X_L = 8 \Omega$ , 试求各相电流  $i_{AB}, i_{BC}, i_{CA}$  及线电流  $i_A, i_B, i_C$  的瞬时值表达式。

解 设  $\dot{U}_{AB} = 380\angle 0^\circ \text{ V}$ , 先求相电流。

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{380\angle 0^\circ}{6 + j8} \text{ A} = 38\angle(-53.1^\circ) \text{ A}, \quad i_{AB} = 38\sqrt{2}\sin(\omega t - 53.1^\circ) \text{ A}$$

推出其他两相:

$$i_{BC} = 38\sqrt{2}\sin(\omega t - 173.1^\circ) \text{ A}, \quad i_{CA} = 38\sqrt{2}\sin(\omega t + 66.9^\circ) \text{ A}$$

则线电流

$$\dot{I}_A = \sqrt{3}\dot{I}_{AB}\angle(-30^\circ) = 38\sqrt{3}\angle(-83.1^\circ) \text{ A} = 65.8\angle(-83.1^\circ) \text{ A}$$

$$i_A = 65.8\sqrt{2}\sin(\omega t - 83.1^\circ) \text{ A}$$

所以

$$i_B = 65.8\sqrt{2}\sin(\omega t - 203.1^\circ) \text{ A} = 65.8\sqrt{2}\sin(\omega t - 156.9^\circ) \text{ A}$$

$$i_C = 65.8\sqrt{2}\sin(\omega t + 36.9^\circ) \text{ A}$$

6. 对称负载三角形连接的三相电路中, 已知频率为 50 Hz 的电源线电压  $U_1 = 380 \text{ V}$ , 线电流为 10 A, 相电压超前相电流  $30^\circ$ , 试求各相负载阻抗的参数。

解 相电压  $U_p = U_1/\sqrt{3} = 220 \text{ V}$ , 相电流  $I_p = I_1/\sqrt{3} = 10/\sqrt{3} \text{ A}$

$$\text{设 } \dot{U}_{AB} = 220\angle 0^\circ \text{ V, 则 } \dot{I}_{AB} = \frac{10}{\sqrt{3}}\angle(-30^\circ) \text{ A}$$

相负载阻抗为

$$Z = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{I}_{AB}} = \frac{220\angle 0^\circ}{10\angle(-30^\circ)/\sqrt{3}} \Omega = 22\sqrt{3}\angle 30^\circ \Omega = (33 + j11\sqrt{3}) \Omega$$

即

$$R = 33 \Omega, \quad X_L = 11\sqrt{3} \Omega = 19 \Omega$$

7. 三相电路如图 3.10(a)所示, 已知电源的线电压  $U_1 = 380 \text{ V}$ , 负载电阻  $R = 22 \Omega$ 。试求图中各电流, 并画出其相量图。

解 设  $\dot{U}_{AB} = 380 \angle 0^\circ \text{ V}$ , 则

$$\dot{U}_A = 220 \angle (-30^\circ) \text{ V}, \quad \dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{R} = \frac{380 \angle 0^\circ}{22} \text{ A} = 10\sqrt{3} \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}'_A = \sqrt{3} \dot{I}_{AB} \angle (-30^\circ) = 30 \angle (-30^\circ) \text{ A}, \quad \dot{I}_B = 30 \angle (-150^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = 30 \angle 90^\circ \text{ A}, \quad \dot{I}_O = \frac{\dot{U}_A}{R} = \frac{220 \angle (-30^\circ)}{22} \text{ A} = 10 \angle (-30^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}'_A + \dot{I}_O = [30 \angle (-30^\circ) + 10 \angle (-30^\circ)] \text{ A} = 40 \angle (-30^\circ) \text{ A}$$

其相量图如图 3.10(b)所示。

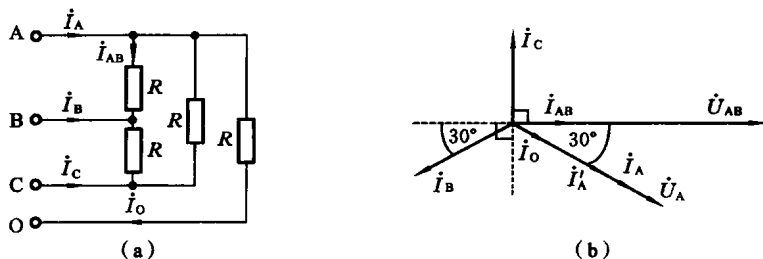


图 3.10

8. 负载三角形连接的三相电路如图 3.11(a)所示, 已知对称电源线电压  $U_1 = 380 \text{ V}$ , 相负载  $Z_{AB} = R = 10 \Omega$ ,  $Z_{BC} = jX_L = j10 \Omega$ ,  $Z_{CA} = -jX_C = -j10 \Omega$ 。试求各相电流  $i_{AB}$ 、 $i_{BC}$ 、 $i_{CA}$  及线电流  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  的相量表达式, 并画出含各电流的相量图。

解 设  $\dot{U}_{AB} = 380 \angle 0^\circ \text{ V}$ , 则

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{380 \angle 0^\circ}{10} \text{ A} = 38 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{380 \angle (-120^\circ)}{j10} \text{ A} = 38 \angle 150^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{380 \angle 120^\circ}{-j10} \text{ A} = 38 \angle (-150^\circ) \text{ A}$$

对应写出瞬时值:

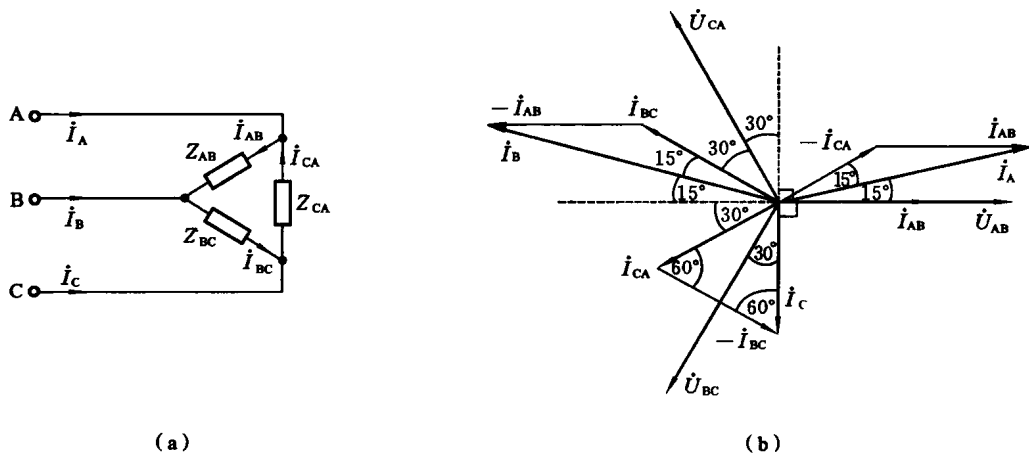


图 3.11

$$i_{AB}=38\sqrt{2}\sin(\omega t)\text{ A}, \quad i_{BC}=38\sqrt{2}\sin(\omega t+150^\circ)\text{ A}, \quad i_{CA}=38\sqrt{2}\sin(\omega t-150^\circ)\text{ A}$$

负载不对称, 据 KCL 求出各线电流:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = [38 - 38\angle(-150^\circ)]\text{ A} = 73.4\angle15^\circ\text{ A}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = (38\angle150^\circ - 38)\text{ A} = 73.4\angle165^\circ\text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = [38\angle(-150^\circ) - 38\angle150^\circ]\text{ A} = 38\angle(-90^\circ)\text{ A}$$

所以

$$i_A = 73.4\sqrt{2}\sin(\omega t + 15^\circ)\text{ A}, \quad i_B = 73.4\sqrt{2}\sin(\omega t + 165^\circ)\text{ A}, \quad i_C = 38\sqrt{2}\sin(\omega t - 90^\circ)\text{ A}$$

其相量图如图 3.11(b) 所示。

9. 三相四线制电路如图 3.12 所示, 已知线电压  $U_l = 380\text{ V}$ , 三相阻抗为  $Z_A = Z_B = Z_C = R = 22\ \Omega$ , 试分别求下列情况下的相电流及中性线电流: ① 电路正常工作; ② 中性线断开; ③ A 相断开; ④ A 相与中性线同时断开。

解 电源对称,  $U_p = U_l / \sqrt{3} = 220\text{ V}$ , 设  $\dot{U}_A = 220\angle0^\circ\text{ V}$ 。

$$(1) \quad \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} = \frac{220\angle0^\circ}{22}\text{ A} = 10\angle0^\circ\text{ A}, \quad \dot{I}_B = 10\angle(-120^\circ)\text{ A}$$

$$\dot{I}_C = 10\angle120^\circ\text{ A}, \quad \dot{I}_O = 0\text{ A}$$

(2) 由于负载对称, 电路的工作状态不变, 故各电流与(1)中的相同。

(3) 由于有中性线, B、C 相负载的相电压不变, 故 B、C 相负载电流与(1)中的相同。

$$\dot{I}_A = 0\text{ A}, \quad \dot{I}_O = \dot{I}_B + \dot{I}_C = [10\angle(-120^\circ) + 10\angle120^\circ]\text{ A} = -10\text{ A}$$

(4) 线电压  $\dot{U}_{BC}$  被两相负载  $Z_B$  和  $Z_C$  均分, 故

$$I_B = I_C = \frac{380}{2R} = 19\text{ A}, \quad I_A = I_O = 0\text{ A}$$

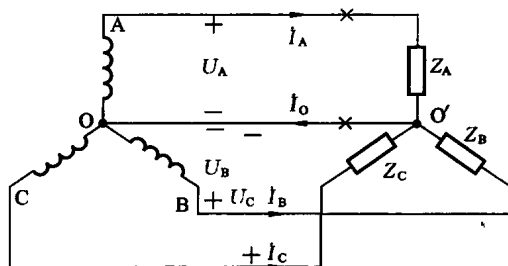


图 3.12

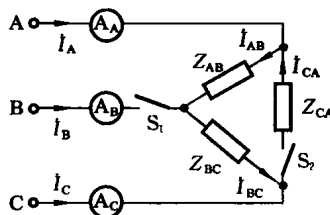


图 3.13

10. 三相电路如图 3.13 所示, 当开关  $S_1$ 、 $S_2$  都闭合时, 对称负载作三角形连接, 各电流表的读数都是  $10\text{ A}$ 。试求下列情况下各电流表的读数: ①  $S_1$  闭合、 $S_2$  断开; ②  $S_1$  断开、 $S_2$  闭合; ③  $S_1$ 、 $S_2$  都断开。

解 已经  $I_l = 10\text{ A}$ , 则

$$I_p = I_l / \sqrt{3} = \frac{10}{\sqrt{3}}\text{ A}$$

(1)  $S_1$  闭合、 $S_2$  断开时, 有

$$I_{AB} = I_{BC} = I_p = 10/\sqrt{3}\text{ A}, \quad I_B = 10\text{ A} \text{ 都不变。}$$

$$I_A = I_C = I_{AB} = 10/\sqrt{3}\text{ A}, \quad I_{CA} = 0\text{ A}$$

(2)  $S_1$  断开、 $S_2$  闭合时,有

$$I_B = 0 \text{ A}, \quad I_{CA} = I_p = 10/\sqrt{3} \text{ A}, \quad I_{AB} = I_{BC} = \frac{1}{2} I_p = \frac{10}{2\sqrt{3}} \text{ A}$$

$$I_A = I_C = \frac{3}{2} I_p = \frac{3}{2} \times \frac{10}{\sqrt{3}} \text{ A} = 5\sqrt{3} \text{ A}$$

(3)  $S_1$ 、 $S_2$  都断开时,有

$$I_{CA} = 0 \text{ A}, \quad I_B = 0 \text{ A}, \quad I_A = I_C = I_{AB} = I_{BC} = \frac{1}{2} I_p = \frac{10}{2\sqrt{3}} \text{ A} = 5/\sqrt{3} \text{ A}$$

11. 对称三相电路如图 3.14 所示,已知线电压  $U_l = 380 \text{ V}$ ,星形连接的负载阻抗  $Z_1 = (4+j3) \Omega$ ,三角形连接的负载阻抗  $Z_2 = 10 \Omega$ 。试求供电线上的电流  $\dot{I}_A$ ,以及全部负载的有功功率、无功功率和视在功率。

解 设  $\dot{U}_{AB} = 380 \angle 0^\circ \text{ V}$ , 则  $\dot{U}_A = 220 \angle (-30^\circ) \text{ A}$

三角形连接:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_2} = \frac{380 \angle 0^\circ}{10} \text{ A} = 38 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_{A_2} = \sqrt{3} \dot{I}_{AB} \angle (-30^\circ) \text{ A} = 38\sqrt{3} \angle (-30^\circ) \text{ A}$$

星形连接:

$$\dot{I}_{A_1} = \frac{\dot{U}_A}{Z_1} = \frac{220 \angle (-30^\circ)}{4+j3} \text{ A} = 44 \angle (-66.9^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A_1} + \dot{I}_{A_2} = [44 \angle (-66.9^\circ) + 38\sqrt{3} \angle (-30^\circ)] \text{ A} = 104.4 \angle (-44.7^\circ) \text{ A}$$

$$P = 3I_{AB}^2 R_2 + 3I_{A_1}^2 R_1 = [3 \times 38^2 \times 10 + 3 \times 44^2 \times 4] \text{ W} = 66\,552 \text{ W} = 66.6 \text{ kW}$$

$$Q = 3I_{A_1}^2 X_1 = 3 \times 44^2 \times 3 = 17\,424 \text{ var} = 17.4 \text{ kvar}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{66.6^2 + 17.4^2} \text{ kV} \cdot \text{A} = 68.8 \text{ kV} \cdot \text{A}$$

12. 三相对称电路如图 3.15 所示,已知电源线电压  $U_l = 380 \text{ V}$ ,负载  $Z = 50 \angle 30^\circ \Omega$ ,试求电流表和功率表的读数。

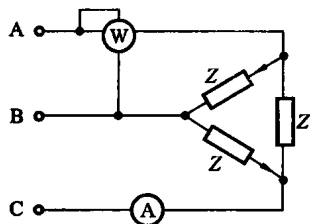


图 3.15

解 设  $\dot{U}_{AB} = 380 \angle 0^\circ \text{ V}$ , 则

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z} = \frac{380 \angle 0^\circ}{50 \angle 30^\circ} \text{ A} = 7.6 \angle (-30^\circ) \text{ A}$$

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{I}_{AB} \angle (-30^\circ) \text{ A} = 13.2 \angle (-60^\circ) \text{ A}$$

电流表的读数为  $13.2 \text{ A}$ 。

$$P = U_{AB} I_A \cos(\varphi_{\dot{U}_{AB}} - \varphi_{\dot{I}_A}) = 380 \times 13.2 \times \cos(0^\circ + 60^\circ) \text{ W} = 2.5 \text{ kW}$$

功率表的读数为  $2.5 \text{ kW}$ 。



## 第4章 暂态电路

### 4.1 要点总结

#### 4.1.1 电路的换路定理

##### 1. 换路定理

换路定理指的是： $u_C(0_+) = u_C(0_-)$ ,  $i_L(0_+) = i_L(0_-)$ 。

##### 2. 电路初始值的分析

初始值指的是电路中各电压和电流分别在  $t=0_+$  时的值。其中  $u_C(0_+)$  和  $i_L(0_+)$  为独立初始值,其他所有的初始值均为非独立初始值。

独立初始值的确定:在  $t=0_-$  的等效电路中,电容按开路处理,电感按短路处理,求出  $u_C(0_-)$ 、 $i_L(0_-)$ ,再根据换路定理,即可确定  $u_C(0_+)$  和  $i_L(0_+)$ 。

非独立初始值的确定,需经过下面几个步骤:

- (1) 由  $t=0_-$  的等效电路求出  $u_C(0_-)$ 、 $i_L(0_-)$ ;
- (2) 根据换路定理,即可确定  $u_C(0_+)$ 、 $i_L(0_+)$ ;
- (3) 在  $t=0_+$  的等效电路中确定电路中其他电压和电流的初始值。

#### 4.1.2 RC 电路的暂态分析

##### 1. RC 电路的零输入响应

零输入响应电路指的是换路后电路中没有外加电源,而动态元件上有初始储能的电路,故 RC 零输入响应电路研究的是电容放电规律。

##### 2. RC 电路的零状态响应

零状态响应电路指的是换路后电路中有外加电源,而动态元件上没有初始储能的电路,故 RC 零状态响应电路研究的是电容充电规律。

##### 3. RC 电路的全响应

全响应电路可以看成是零输入响应和零状态响应电路的叠加。

电路中任意电压、电流均可由三要素公式表示： $f(t) = f(\infty) + [f(0_+) - f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$ 。其中,  $f(\infty)$  是在  $t=\infty$  的电路(直流稳态电路,电容按开路处理,电感按短路处理)中求得的,  $f(0_+)$  是待求响应的初始值;  $\tau$  是电路的时间常数,反映过渡过程的长短。 $\tau$  越大,衰减越慢,过渡过程越长。RC 电路中  $\tau=RC$ , RL 电路中  $\tau=L/R$ ,其中,  $R$  为换路后电路从动态元件两端看进去的戴维南等效电阻。

### 4.1.3 微分电路和积分电路

#### 1. 微分电路

RC 微分电路必须满足两个条件:

- (1)  $\tau \ll t_p$ ;
- (2)  $u_o$  从电阻两端输出。

由于  $u_i = u_c + u_R \approx u_c$ , 而  $u_o = R i = RC \frac{du_c}{dt} \approx RC \frac{du_i}{dt}$ , 即输出电压与输入电压的微分成正比, 因此, 称之为微分电路。

#### 2. 积分电路

RC 积分电路必须满足两个条件:

- (1)  $\tau \gg t_p$ ;
- (2)  $u_o$  从电容两端输出。

由于  $u_i = u_c + u_R \approx u_R = Ri$ , 而  $u_o = u_c = \frac{1}{C} \int i dt \approx \frac{1}{RC} \int u_i dt$ , 即输出电压与输入电压的积分近似成正比, 因此这种电路称为积分电路。

## 4.2 例题解析

**例 4.1** 图 4.1(a) 所示电路原处于稳定, 已知  $U_s = 120 \text{ V}$ ,  $R_1 = 8 \Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 4 \Omega$ ,  $R_4 = 2 \Omega$ ,  $L = 1 \text{ mH}$ ,  $C = 1 \mu\text{F}$ 。  $t = 0$ , 开关 S 打开, 分别求电容上和电感上电流、电压的初始值。

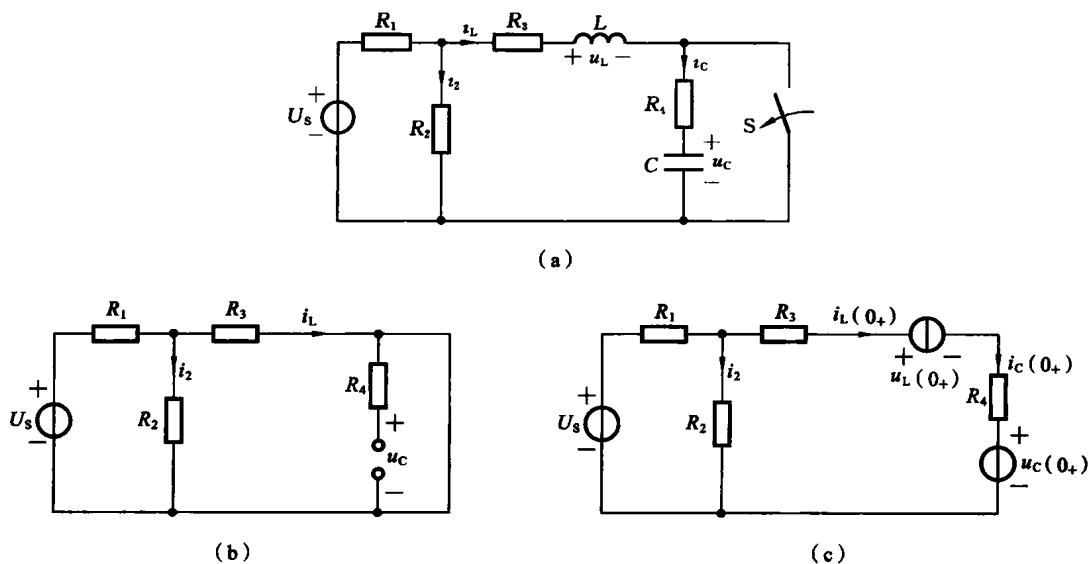


图 4.1

**解** 先求独立初始值  $i_L(0_+)$  和  $u_c(0_+)$ 。  $t = 0_-$  的等效电路如图 4.1(b) 所示, 电容按开路处理, 电感按短路处理, 可得

$$u_C(0_-) = 0 \text{ V}, \quad i_L(0_-) = \frac{U_S}{R_1 + R_2 // R_3} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 6 \text{ A}$$

也即

$$u_C(0_+) = 0 \text{ V}, \quad i_L(0_+) = 6 \text{ A}$$

再在  $t=0_+$  的等效电路中, 求非独立初始值  $u_L(0_+)$ 、 $i_C(0_+)$ 。 $t=0_+$  的等效电路如图 4.1(c) 所示(电容用电压源  $u_C(0_+)$  替代, 电感用电流源  $i_L(0_+)$  替代)。可得

$$i_C(0_+) = 6 \text{ A}, \quad U_{R_2} = \frac{\frac{U_S}{R_1} - i_L(0_+)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = 40 \text{ V}$$

所以

$$u_L(0_+) = U_{R_2} - (R_3 + R_4)i_L(0_+) - u_C(0_+) = 4 \text{ V}$$

**例 4.2** 图 4.2(a) 所示电路, 开关 S 原闭合, 电路处于稳定, 已知  $R_1 = 3 \Omega$ ,  $R_2 = 12 \Omega$ ,  $R_3 = 6 \Omega$ ,  $R_4 = 9 \Omega$ ,  $U_S = 36 \text{ V}$ 。 $t=0$ , 开关 S 打开, 分别求  $u_{C1}(0_+)$ 、 $u_{C2}(0_+)$ 、 $u_{C1}(\infty)$ 、 $u_{C2}(\infty)$ 。

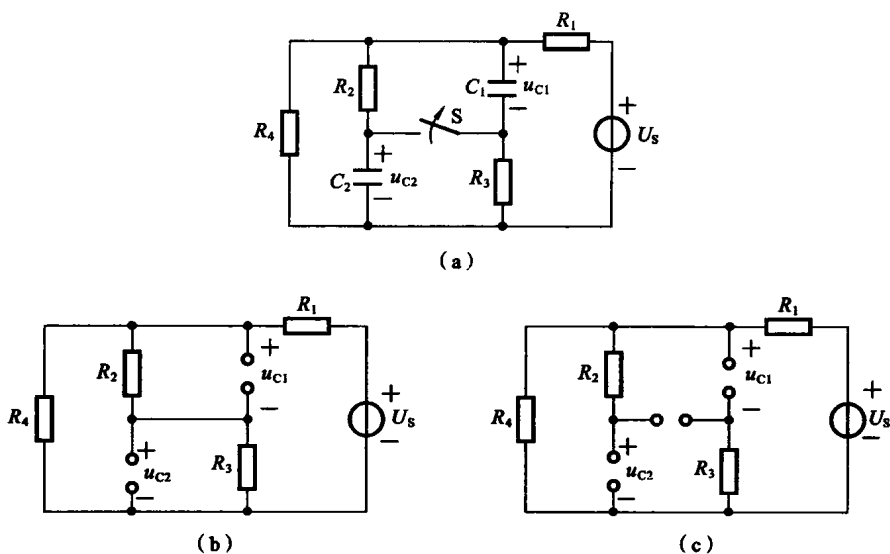


图 4.2

**解**  $t=0_-$  的等效电路如图 4.2(b) 所示, 电容按开路处理, 可得

$$u_{C1}(0_-) = \frac{U_S}{R_1 + R_4 // (R_2 + R_3)} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_2 + R_3} \cdot R_2 = 16 \text{ V} = u_{C1}(0_+)$$

$$u_{C2}(0_-) = \frac{U_S}{R_1 + R_4 // (R_2 + R_3)} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_2 + R_3} \cdot R_3 = 8 \text{ V} = u_{C2}(0_+)$$

$t=\infty$  的等效电路如图 4.2(c) 所示, 电容按开路处理, 可得

$$u_{C1}(\infty) = u_{C2}(\infty) = \frac{R_4}{R_1 + R_4} U_S = 27 \text{ V}$$

**例 4.3** 图 4.3(a) 所示电路原已稳定, 已知  $R_1 = 40 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$ ,  $R_3 = 20 \Omega$ ,  $L = 4 \text{ H}$ ,  $I_S = 2 \text{ A}$ ,  $t=0$  时将开关 S 闭合。求 S 闭合后通过开关的电流  $i(t)$ 。

**解** 用三要素法先分析电感电流  $i_L$ 。

$t=0_-$  的等效电路如图 4.3(b) 所示, 电感按短路处理, 可得

$$i_L(0_-) = I_S = 2 \text{ A} = i_L(0_+)$$

$t = \infty$  的等效电路如图 4.3(c) 所示, 电感按短路处理, 可得

$$i_L(\infty) = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I_S = 1 \text{ A}$$

$$\tau = \frac{L}{R_{eq}} = \frac{L}{R_2 + R_3} = 0.1 \text{ s}$$

故

$$i_1(t) = [1 + (2 - 1)e^{-10t}] \text{ A} = (1 + e^{-10t}) \text{ A}$$

回到换路后的电路中, 可得

$$i(t) = i_1(t) = (1 + e^{-10t}) \text{ A}$$

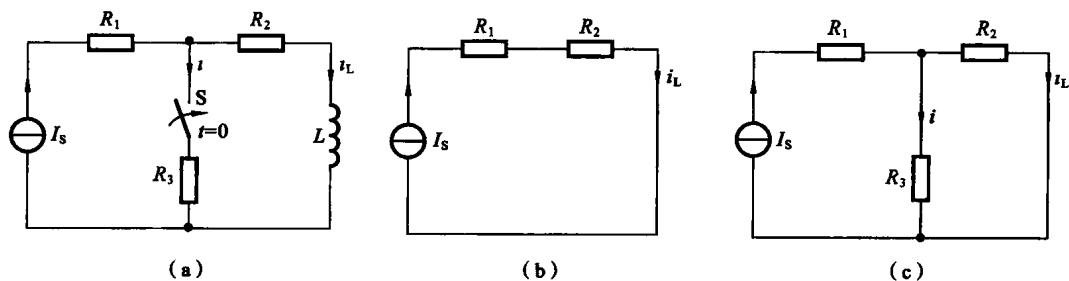


图 4.3

**例 4.4** 图 4.4(a) 所示电路中, 开关 S 原打开, 电路处于稳定, 已知  $U_S = 120 \text{ V}$ ,  $R_1 = 8 \Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 4 \Omega$ ,  $R_4 = 2 \Omega$ ,  $L = 1 \text{ mH}$ ,  $C = 1 \mu\text{F}$ 。  $t = 0$ , 开关 S 闭合, 分别求  $t \geq 0$  时的电容和电感上的电压和电流, 以及开关闭合后流过开关的电流  $i$ 。

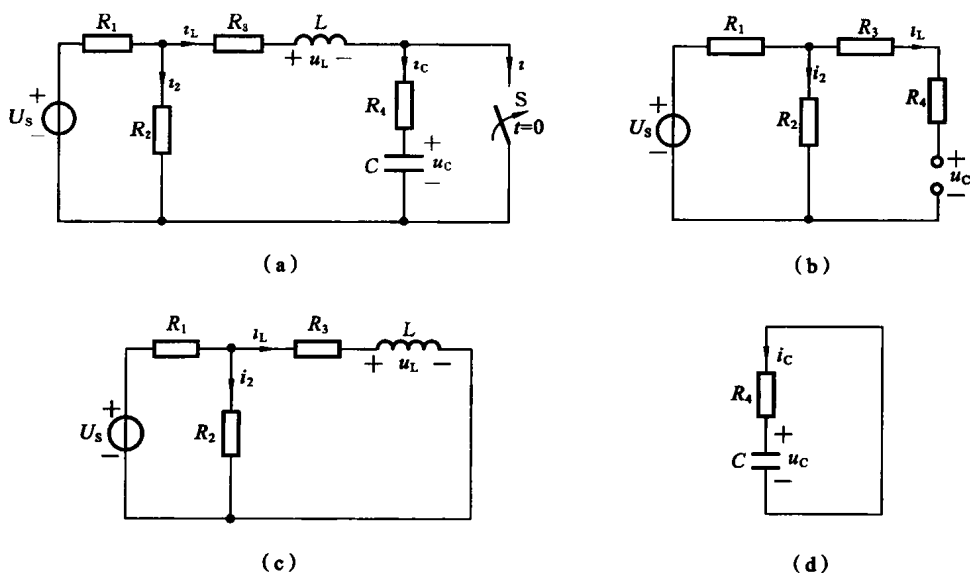


图 4.4

**解** 用三要素法求  $u_C$  和  $i_1$ 。

$t = 0_-$  的等效电路如图 4.4(b) 所示, 电容按开路处理, 电感按短路处理, 可得

$$u_C(0_-) = \frac{R_2 U_S}{R_1 + R_2} = 40 \text{ V}, \quad i_L(0_-) = 0 \text{ A}$$

也即

$$u_C(0_+) = 40 \text{ V}, \quad i_L(0_+) = 0 \text{ A}$$

$t > 0$  时, 电路可看成 RL 电路与 RC 电路的叠加, 如图 4.4(c) 和图 4.4(d) 所示。

在图 4.4(c) 中, 当  $t = \infty$  时, 电感按短路处理, 可得

$$i_L(\infty) = \frac{U_S}{R_1 + R_2 // R_3} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 6 \text{ A}$$

$$R_{eq} = R_3 + R_1 // R_2 = \frac{20}{3} \Omega$$

故  $\tau = \frac{L}{R_{eq}} = \frac{3}{20} \times 10^{-3} \text{ s}, \quad i_L(t) = 6(1 - e^{-\frac{2}{3} \times 10^4 t}) \text{ A}, \quad u_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = 40 e^{-\frac{2}{3} \times 10^4 t} \text{ V}$

在图 4.4(d) 中, 当  $t = \infty$  时, 电容按开路处理, 可得

$$u_C(\infty) = 0 \text{ V}, \quad R_{eq} = R_4 = 2 \Omega$$

故  $\tau = R_{eq}C = 2 \times 10^{-6} \text{ s}, \quad u_C(t) = 40e^{-5 \times 10^5 t} \text{ V}, \quad i_C = C \frac{du_C(t)}{dt} = -20e^{-5 \times 10^5 t} \text{ A}$

回到图 4.4(a) 所示的原电路中, 显然换路后有

$$i = i_L - i_C = [6(1 - e^{-\frac{2}{3} \times 10^4 t}) + 20e^{-5 \times 10^5 t}] \text{ A}$$

## 4.3 习题解答

### 4.3.1 填空题

1. 一般情况下, 电感上的\_\_\_\_\_不能跃变, 电容上的\_\_\_\_\_不能跃变。(电流, 电压)
2. 动态电路发生换路后, 从原来的稳定状态转变为另一稳定状态的过程称为\_\_\_\_\_过程。(过渡)
3. 若在  $t=0$  时刻电路发生换路, 则  $t=0_-$  表示\_\_\_\_\_,  $t=0_+$  表示\_\_\_\_\_。(换路前的最后一瞬间, 换路开始的一瞬间)
4. 换路定理指的是\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。(  $i_L(0_+) = i_L(0_-)$ ,  $u_C(0_+) = u_C(0_-)$  )
5. 直流电路处于稳态时, 电容作\_\_\_\_\_处理, 电感作\_\_\_\_\_处理。(开路, 短路)
6. 一阶 RC 电路的时间常数  $\tau =$ \_\_\_\_\_, 一阶 RL 电路的时间常数  $\tau =$ \_\_\_\_\_。(  $RC, L/R$  )
7. 一阶 RC 电路中, 若  $C$  不变,  $R$  增大, 该电路的过渡过程变\_\_\_\_\_; 若  $R$  不变,  $C$  减小, 该电路的过渡过程变\_\_\_\_\_。(慢, 快)
8. 一阶 RL 电路中, 若想缩短该电路的过渡过程, 则需\_\_\_\_\_  $R$  ( $L$  不变), 或者\_\_\_\_\_  $L$  ( $R$  不变)。(增大, 减小)
9. 一阶 RC 零输入响应下, 时间常数的意义是  $u_C$  从初始值  $U_0$  衰减到\_\_\_\_\_  $U_0$  的时间; 一阶 RC 零状态响应下, 时间常数的意义是  $u_C$  从初始值上升到稳态值的\_\_\_\_\_的时间。(0.368, 0.632)
10. 零输入响应是指在换路后电路中无\_\_\_\_\_, 换路后电路中的响应由\_\_\_\_\_产生的情况。(外加电源, 动态元件的初始能量)
11. 零状态响应是指在换路前电路的初始储能为\_\_\_\_\_, 换路后电路中的响应由\_\_\_\_\_

产生的情况。(零,外加电源)

12. 某电路的全响应  $i_L(t) = (2 + 10e^{-10t})$  A, 则该电路的时间常数  $\tau =$  \_\_\_\_\_ s,  $i_L$  的初始值  $i_L(0_+) =$  \_\_\_\_\_ A。(0.1, 12)

13. 一阶电路的全响应等于零状态响应与 \_\_\_\_\_ 的叠加, 三要素公式为 \_\_\_\_\_。(零输入响应,  $f(t) = f(\infty) + [f(0_+) - f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$ )

### 4.3.2 选择题

1. 电路如图 4.5 所示, 开关在  $t=0$  时闭合, 若已知  $u_C(0_-) = 0$  V, 则  $i_C(0_+)$  为( )。(A)

- A. 5 mA      B. 10 mA      C. 7.5 mA      D. 0 mA

2. 电路如图 4.6 所示, 开关在  $t=0$  时合到 2 上,  $i_C(0_+)$  为( )。(C)

- A. 0 mA      B. 1.5 mA      C. -1.5 mA      D. 10 mA

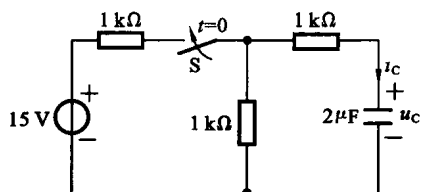


图 4.5

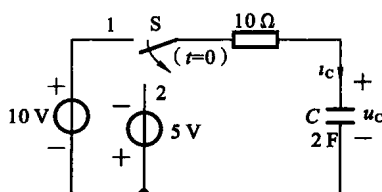


图 4.6

3. 电路如图 4.7 所示, 已知电容初始电压  $u_C(0_-) = 10$  V, 电感初始电流  $i_L(0_-) = 0$  A,  $C = 0.2$  F,  $L = 0.5$  H,  $R_1 = 30$  Ω,  $R_2 = 20$  Ω.  $t=0$  时开关 S 闭合, 则  $i_R(0_+) =$  ( )。(C)

- A. 0 A      B. 0.1 A      C. 0.2 A      D. 1/3 A

4. 电路如图 4.8 所示, 已知  $i_S = 2$  A,  $L = 1$  H,  $R_1 = 20$  Ω,  $R_2 = R_3 = 10$  Ω. 开关 S 打开之前电路稳定,  $t=0$  时 S 打开, 则  $u(0_+) =$  ( )。(D)

- A. 0 V      B. 20 V      C. 40/3 V      D. 40 V

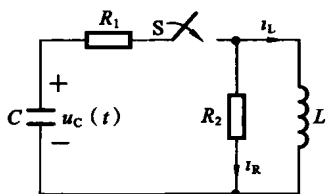


图 4.7

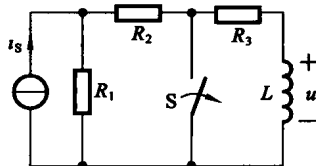


图 4.8

5. 电路如图 4.9 所示, 开关在  $t=0$  时合到 2 上,  $u_L(0_+)$  为( )。(D)

- A. 0 V      B. 5 V      C. 10 V      D. -5 V

6. 电路如图 4.10 所示,  $t=0$  时开关 S 闭合, 电容电压的初始值  $u_C(0_+)$  等于( )。(A)

- A. -2 V      B. 2 V      C. 6 V      D. 8 V

7. 电路如图 4.11 所示, 开关 S 闭合之前电路稳定,  $t=0$  时 S 闭合, 则  $u_R(0_+) =$  ( )。(D)

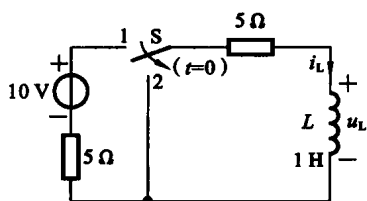


图 4.9

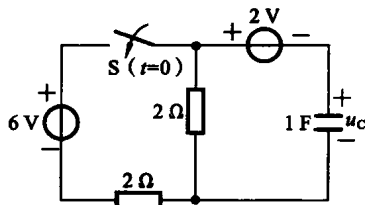


图 4.10

- A. 0 V      B. 10 V      C. -20 V      D. 20 V

8. 电路如图 4.12 所示,原处于稳态, $t=0$  时开关 S 打开, $u_s$  为直流电压源,则电路的初始储能( )。(B)

- A. 在 C 中      B. 在 L 中      C. 在 L 和 C 中      D. 在 R 和 C 中

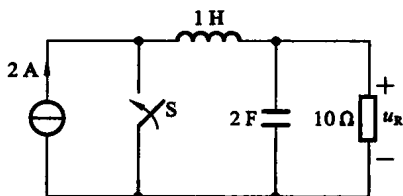


图 4.11

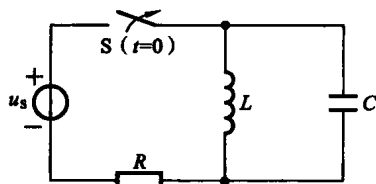
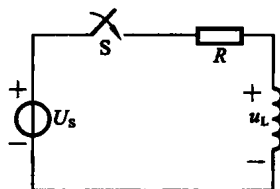


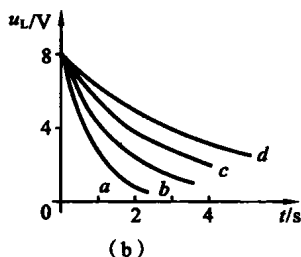
图 4.12

9. RL 串联电路与电压为 8 V 的恒压源接通,如图 4.13(a)所示。在  $t=0$  瞬间将开关 S 闭合,当电阻分别为  $10\ \Omega$ 、 $20\ \Omega$ 、 $30\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$  时所得到的 4 条  $u_L(t)$  曲线如图 4.13(b)所示。其中  $10\ \Omega$  电阻所对应的曲线是( )。(D)

- A. a      B. b      C. c      D. d



(a)



(b)

图 4.13

10. 电路如图 4.14 所示, $u_s=20\text{ V}$ , $C=100\ \mu\text{F}$ , $R_1=R_2=10\text{ k}\Omega$ 。换路前电路已处于稳态,开关 S 在  $t=0$  时刻打开,则  $t\geq 0$  时的电容电压  $u_C(t)=(\quad)$ 。(A)

- A.  $20e^{-t}\text{ V}$       B.  $10e^{-2t}\text{ V}$       C.  $10e^{-t}\text{ V}$       D.  $20e^{-2t}\text{ V}$

11. 电路如图 4.15 所示,开关 S 在位置 1 已久, $t=0$  时合向位置 2,则换路后的  $i(t)=(\quad)$ 。(C)

- A.  $2e^{-4t}\text{ A}$       B.  $2e^{-\frac{t}{8}}\text{ A}$       C.  $2e^{-8t}\text{ A}$       D.  $10e^{-4t}\text{ A}$

12. 已知某一阶电路换路后电容电压的稳态值为 10 V,初始值为 5 V,时间常数为 2 s,则电容电压为( )。(B)

- A.  $(10-5e^{-0.5t})\text{ V}$       B.  $(10-5e^{-2t})\text{ V}$       C.  $(10+5e^{-2t})\text{ V}$       D.  $(10+5e^{-0.5t})\text{ V}$

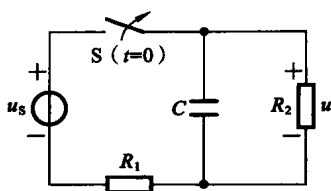


图 4.14

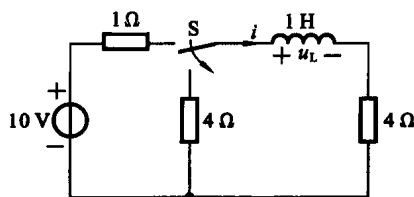


图 4.15

13. 构成积分电路的时间常数  $\tau$  要( )。(C)

A. 与输入矩形脉冲宽度相等

B. 远小于输入矩形脉冲宽度

C. 远大于输入矩形脉冲宽度

D. 随意取值

14. 微分电路具有以下作用( )。(A)

A. 把矩形脉冲转换成正、负尖脉冲

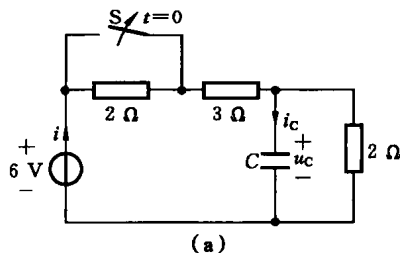
B. 把尖脉冲转换成矩形脉冲

C. 把矩形脉冲转换成三角形脉冲

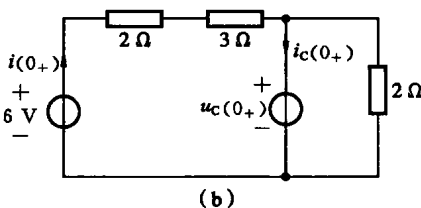
D. 把三角形脉冲转换成矩形脉冲

### 4.3.3 计算题

1. 电路如图 4.16(a)所示,电路换路前处于稳态,试求换路后电路中  $u_C$ 、 $i_C$ 、 $i$  的初始值。



(a)



(b)

图 4.16

解

$$u_C(0_-) = \frac{2}{2+3} \times 6 \text{ V} = 2.4 \text{ V} = u_C(0_+)$$

$t=0_+$  时的电路如图 4.16(b)所示。

$$(2+3)i(0_+) + u_C(0_+) = 6, \quad i(0_+) = \frac{6-2.4}{5} \text{ A} = 0.72 \text{ A}$$

$$i_C(0_+) = i(0_+) - \frac{u_C(0_+)}{2} = (0.72 - 1.2) \text{ A} = -0.48 \text{ A}$$

2. 电路如图 4.17(a)所示,开关 S 闭合前电路已处于稳态,试确定 S 闭合后电压  $u_C$ 、 $u_L$  和电流  $i_C$ 、 $i_L$ 、 $i_1$  的初始值。

解

$$u_C(0_-) = 0, \quad u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$$

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = \frac{U_s}{R_1 + R_2} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_s = 4 \text{ A}$$

$t=0_+$  时的电路如图 4.17(b)所示,由图可知

$$i_1 = \frac{U_s}{R_1} = 5 \text{ A}, \quad i_C = i_1 + I_s - i_L(0_+) = 6 \text{ A}, \quad u_L = -i_L(0_+)R_2 = -12 \text{ V}$$

3. 电路如图 4.18(a)所示,电路换路前已处于稳态,试求换路后的瞬间各支路中的电流



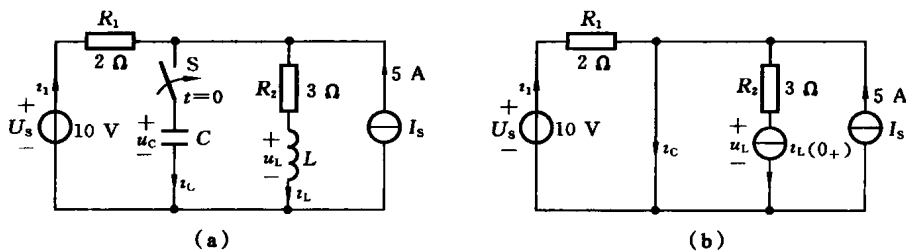


图 4.17

和各元件上的电压。已知  $U_s = 16 \text{ V}$ ,  $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 60 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = R_4 = 30 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 1 \mu\text{F}$ ,  $L = 1.5 \text{ mH}$ 。

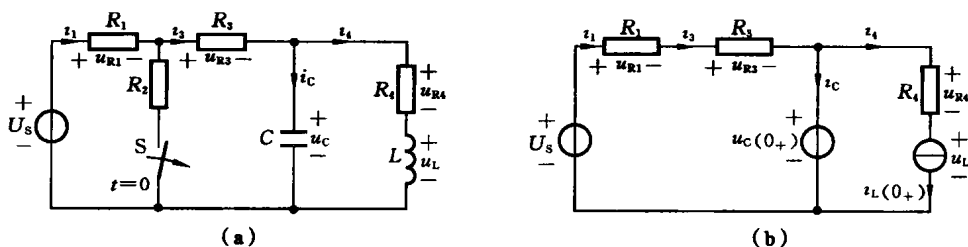


图 4.18

$$\begin{aligned} \text{解 } u_C(0_+) &= u_C(0_-) = \frac{U_s}{R_1 + R_2 // (R_3 + R_4)} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_4} \cdot R_4 \\ &= \frac{16}{20 + 60 // (30 + 30)} \times 15 \text{ V} = 2.4 \text{ V} \\ i_L(0_+) &= i_L(0_-) = \frac{u_C(0_-)}{R_4} = \frac{2.4}{30 \times 10^3} \text{ A} = 0.08 \times 10^{-3} \text{ A} \end{aligned}$$

$t = 0_+$  时的电路如图 4.18(b) 所示。

$$\begin{aligned} u_L(0_+) &= u_C(0_+) - R_4 i_L(0_+) = 0 \\ i_1 = i_3 &= \frac{U_s - u_C(0_+)}{R_1 + R_3} = \frac{16 - 2.4}{(20 + 30) \times 10^3} \text{ A} = 0.272 \times 10^{-3} \text{ A} \\ u_{R1} &= i_1 R_1 = 5.44 \text{ V}, \quad u_{R3} = i_3 R_3 = 8.16 \text{ V} \\ i_4 &= i_L(0_+) = 0.08 \times 10^{-3} \text{ A}, \quad i_C = i_3 - i_4 = 0.192 \times 10^{-3} \text{ A} \end{aligned}$$

4. 电路如图 4.19(a) 所示, 开关闭合已经很久, 在  $t = 0$  时开关 S 打开, 求  $i_L(0_+)$ 、 $u_L(0_+)$ 。

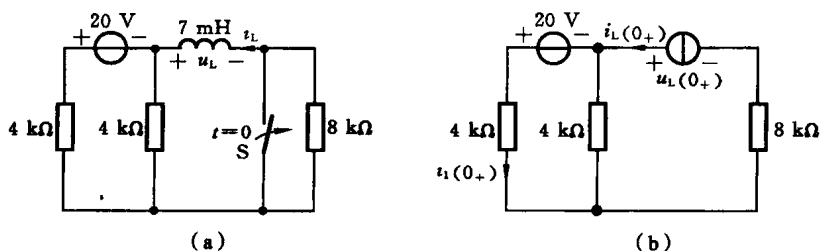


图 4.19

解 开关动作前,电路已达稳态,即

$$i_L(0_-) = \frac{20}{4 \times 10^3} \text{ A} = 5 \times 10^{-3} \text{ A}$$

由换路定理得

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = 5 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$t=0_+$  时的电路如图 4.19(b) 所示。

$$20 + 4 \times 10^3 \times [i_L(0_+) - i_1(0_+)] - 4 \times 10^3 \times i_1(0_+) = 0$$

$$i_1(0_+) = 5 \times 10^{-3} \text{ A}, \quad u_L(0_+) = 8 \times 10^3 i_L(0_+) = 40 \text{ V}$$

5. 电路如图 4.20 所示,开关接在 a 点已久, $t=0$  时开关接在 b 点,试求  $t \geq 0$  时的电容电压  $u_C$ 。

解  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 10 \text{ V}$ ,  $\tau = RC = (100 + 400) \times 2 \times 10^{-6} \text{ s} = 1 \times 10^{-3} \text{ s}$ ,  $u_C(\infty) = 0$

所以  $u_C(t) = u_C(0_+)e^{-\frac{t}{\tau}} = 10 e^{-1000t} \text{ V}$

6. 稳态电路如图 4.21 所示, $t=0$  时开关合向位置 2,求  $t \geq 0$  时的电容电压  $u_C$  和  $i$ 。

解  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = \frac{15}{200+100} \times 100 \text{ V} = 5 \text{ V}$

$$u_C(\infty) = 0 \text{ V}$$

$$\tau = RC = (100 // 100) \times 2 \times 10^{-3} \text{ s} = 0.1 \text{ s}$$

所以  $u_C(t) = u_C(0_+)e^{-\frac{t}{\tau}} = 5e^{-10t} \text{ V}$ ,  $i = \frac{u_C(t)}{100} = 0.05e^{-10t} \text{ A}$

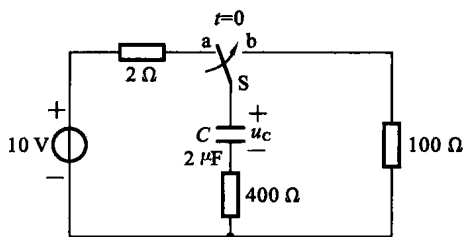


图 4.20

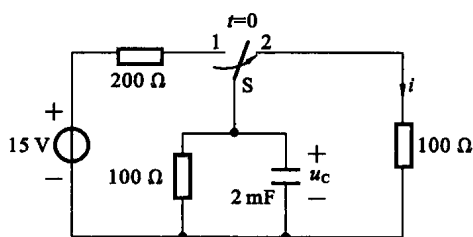


图 4.21

7. 电路如图 4.22 所示,开关 S 打开前电路已处于稳态。 $t=0$  开关 S 打开,求  $t \geq 0$  时的  $i_1(t)$ 、 $u_L(t)$  和电压源发出的功率。

解  $i_L(0_+) = i_L(0_-) = 0 \text{ A}$ ,  $i_L(\infty) = \frac{\frac{10}{2} + 2}{\frac{1}{2} + \frac{1}{8}} \times \frac{1}{8} \text{ A} = \frac{7}{5} \text{ A}$ ,  $\tau = \frac{0.2}{2+3+5} \text{ s} = 0.02 \text{ s}$

所以  $i_L(t) = \frac{7}{5}(1 - e^{-50t}) \text{ A}$ ,  $u_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = 14e^{-50t} \text{ V}$

$$i_{10V} = 2 - i_L(t) = \left( \frac{3}{5} + \frac{7}{5}e^{-50t} \right) \text{ A}, \quad p = 10i_{10V} = (6 + 14e^{-50t}) \text{ W}$$

8. 电路如图 4.23 所示,原已稳定,已知  $R_1 = R_4 = 300 \Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 600 \Omega$ ,  $C = 0.01 \text{ F}$ ,  $U_S = 12 \text{ V}$ ,  $t=0$  时将开关 S 闭合。求 S 闭合后的  $u_C(t)$ 。

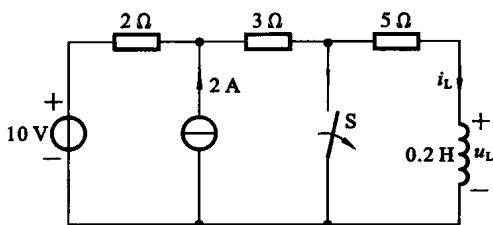


图 4.22

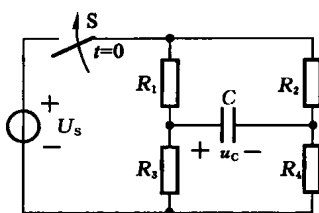


图 4.23

解

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0 \text{ V}$$

$$u_C(\infty) = \frac{R_3 U_s}{R_1 + R_3} - \frac{R_4 U_s}{R_2 + R_4} = 4 \text{ V}$$

$$\tau = RC = (R_1 // R_3 + R_2 // R_4) \times 10^{-6} \text{ s} = 0.4 \times 10^{-3} \text{ s}$$

所以

$$u_C = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} = 4(1 - e^{-2.5 \times 10^3 t}) \text{ V}$$

9. 电路如图 4.24 所示,原已处于稳态,试用三要素法求 S 闭合后的  $u_C$  及  $i_C$ 。

解

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = -R_2 I_S = -6 \text{ V}$$

$$u_C(\infty) = 18 \text{ V}$$

$$\tau = RC = 8 \times 50 \times 10^{-6} \text{ s} = 0.4 \times 10^{-3} \text{ s}$$

所以

$$u_C = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} = [18 + (-6 - 18)e^{-2.5 \times 10^3 t}] \text{ V} = (18 - 24e^{-2.5 \times 10^3 t}) \text{ V}$$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = 50 \times 10^{-6} \times (-24) \times (-2.5 \times 10^3) e^{-2.5 \times 10^3 t} \text{ A} = 3e^{-2.5 \times 10^3 t} \text{ A}$$

10. 电路如图 4.25 所示,原已处于稳态,试用三要素法求 S 闭合后的  $i_L$ 、 $i_1$ 、 $i_2$ 。

$$\text{解 } i_L(0_+) = i_L(0_-) = \frac{9}{6} \text{ A} = 1.5 \text{ A}, i_L(\infty) = \left(\frac{9}{3} + \frac{9}{6}\right) \text{ A} = 4.5 \text{ A}, \tau = \frac{1}{3//6} \text{ s} = 0.5 \text{ s}$$

$$i_L = i_L(\infty) + [i_L(0_+) - i_L(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} = [4.5 + (1.5 - 4.5)e^{-2t}] \text{ A} = (4.5 - 3e^{-2t}) \text{ A}$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = 3 \times 2e^{-2t} \text{ V} = 6e^{-2t} \text{ V}, i_1 = \frac{9 - u_L}{3} = \frac{9 - 6e^{-2t}}{3} \text{ A} = (3 - 2e^{-2t}) \text{ A}$$

$$i_2 = \frac{9 - u_L}{6} = \frac{9 - 6e^{-2t}}{6} \text{ A} = (1.5 - e^{-2t}) \text{ A}$$

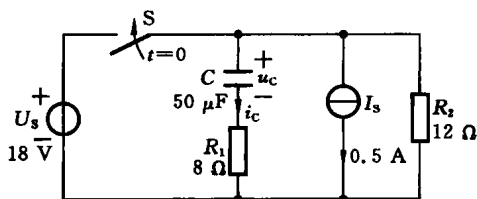


图 4.24

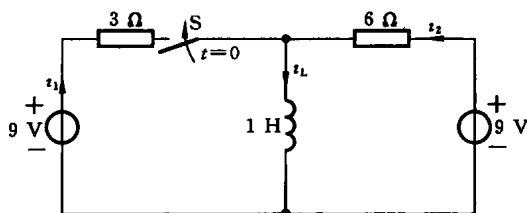


图 4.25

11. 电路如图 4.26 所示,求  $t \geq 0$  时的  $u$  和  $i$ 。已知换路前电路已处于稳态。

$$\text{解 } i_L(0_+) = i_L(0_-) = \frac{90}{(1.5 + 3//3) \times 10^3} \times \frac{1}{2} \text{ A} = 0.015 \text{ A}$$

$$i_L(\infty) = \frac{90}{1.5 \times 10^3} \text{ A} = 0.06 \text{ A}, \tau_1 = \frac{100 \times 10^{-3}}{(1.5//3) \times 10^3} \text{ s} = 0.1 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$i_1 = i_1(\infty) + [i_L(0_+) - i_L(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau_1}} = 0.06 + [0.015 - 0.06]e^{-10^4 t} \text{ A} = (0.06 - 0.045e^{-10^4 t}) \text{ A}$$

$$u = L \frac{di}{dt} = 100 \times 10^{-3} \times (-0.045) \times (-10^4) e^{-10^4 t} \text{ V} = 45e^{-10^4 t} \text{ V}$$

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 3 \times 10^3 \times i_L(0_-) = 3 \times 10^3 \times 0.015 \text{ V} = 45 \text{ V}$$

$$u_C(\infty) = 0 \text{ V}, \quad \tau_2 = 100 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$u_C = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau_2}} = [0 + (45 - 0)e^{-10t}] \text{ V} = 45e^{-10t} \text{ V}$$

$$i = C \frac{du_C}{dt} = 1 \times 10^{-6} \times 45 \times (-10) e^{-10t} \text{ A} = -0.45 \times 10^{-3} e^{-10t} \text{ A}$$

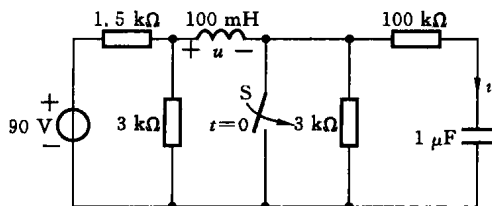


图 4.26

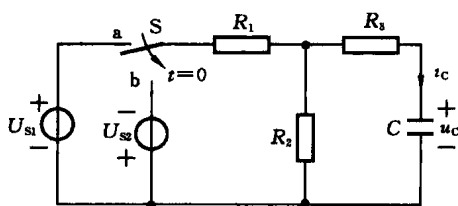


图 4.27

12. 电路如图 4.27 所示, 求当开关 S 由 a 转向 b 后的  $u_C$  及  $i_C$ 。已知  $U_{S1} = 10 \text{ V}$ ,  $U_{S2} = 5 \text{ V}$ ,  $R_1 = R_2 = 4 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 100 \mu\text{F}$ , 开关位于 a 时电路已处于稳态。

解 
$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = \frac{U_{S1}}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{10}{4 + 4} \times 4 \text{ V} = 5 \text{ V}$$

$$u_C(\infty) = \frac{-U_{S2}}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{-5}{4 + 4} \times 4 \text{ V} = -2.5 \text{ V}$$

$$\tau = RC = (R_3 + R_1 // R_2)C = (2 + 4 // 4) \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6} \text{ s} = 0.4 \text{ s}$$

$$u_C = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} = (-2.5 + 7.5e^{-2.5t}) \text{ V}$$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = 100 \times 10^{-6} \times 7.5 \times (-2.5) e^{-2.5t} \text{ A} = -1.875 \times 10^{-3} e^{-2.5t} \text{ A}$$

## 第 5 章 变压器和电动机

### 5.1 要点总结

#### 5.1.1 磁路与磁路的欧姆定律

(1) 电磁器件的磁路主要由铁芯构成,是磁通经过铁芯而形成的一个闭合通路。磁路中的物理量主要有磁感应强度( $B$ )、磁通( $\Phi$ )、磁场强度( $H$ )和磁导率( $\mu$ )。它们之间的关系为  $B=\Phi/S$  和  $H=B/\mu$ 。

磁性材料具有高导磁性、磁饱和性和磁滞性等磁性能。磁路的欧姆定律定性地确定了磁路的磁动势、磁通和磁阻三者之间的基本关系,即  $\Phi=F/R_m$ 。其中  $F=NI$  称为磁动势,  $R_m=l/(\mu S)$  称为磁阻,  $l$  为磁路的平均长度,  $S$  为磁路的截面积。由于磁性材料的磁导率  $\mu$  不是常数,故电磁器件的磁路是非线性的,即其  $B-H$  或  $\Phi-I$  关系具有非线性特性。一般不能直接应用磁路的欧姆定律和磁阻来进行定量计算,但在许多场合中磁路的欧姆定律通常都和铁芯磁性材料的磁化曲线一起,对电磁器件的运行状态作定性分析。

(2) 稳态下直流电磁器件线圈的电源电压是由线圈电阻压降平衡的,即  $U=RI$ 。器件正常运行时有如下特性。

① 具有恒磁势特性,即  $U$ 、 $R$  和  $N$  一定时,  $F$  (或  $I$ ) 不变,而  $\Phi$  (或  $B$ )  $\propto 1/R_m$ 。

② 只有铜损,没有铁损。铁芯可用整块软钢制成。

(3) 稳态下交流电磁器件线圈的电源电压,主要被主磁通在线圈中产生的主磁感应电动势所平衡,即  $U \approx E = 4.44 f N \Phi_m = 4.44 f N B_m S$ 。器件正常运行时有如下特性。

① 具有恒磁通特性,即  $U$ 、 $f$  和  $N$  一定时,则  $\Phi_m$  (或  $B_m$ ) 基本不变,而  $F_m$  (或  $I$ )  $\propto R_m$ 。

② 既有铜损,又有铁损。铁损除与磁性材料性能、电源频率和硅钢片厚度等有关外,还近似与  $B_m^2$  成正比。为了减小铁损,铁芯常采用硅钢片叠合制成。

#### 5.1.2 变压器

(1) 变压器是传递交流电能的一种电气设备,它通过磁路的耦合作用把交流电从一次绕组送到二次绕组,利用绕制在同一铁芯上的一、二次绕组匝数的不同,实现变换电压、变换电流和变换阻抗的功能。

单相变压器的额定容量  $S_N = U_{2N} I_{2N} \approx U_{1N} I_{1N}$ 。

① 变换电压:  $U_1/U_2 = N_1/N_2 = K$ 。

② 变换电流:在额定负载条件下,  $I_1/I_2 = N_2/N_1 = 1/K$ 。

③ 变换阻抗:一次绕组的等效阻抗的模为负载阻抗的模的  $K^2$ 。

(2) 磁动势平衡方程式 ( $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \approx 0$ ) 是变压器带负载分析时的一个极为重

要的方程式。变压器一次绕组电流的负载分量  $i_1' = -(N_2/N_1)i_2$ ,  $i_1'$  是变压器带负载后为弥补二次绕组电流  $i_2$  或磁动势  $i_2 N_2$  对主磁通的去磁效应, 维持主磁通的最大值  $\Phi_m$  基本不变, 一次绕组电流自动增加的电流分量。

(3) 变压器的外特性表示其带负载后二次绕组电压下降的程度, 可用电压调整率  $\Delta U\%$  来表示, 且  $\Delta U\%$  越小越好。

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\%$$

变压器的损耗包括铜损和铁损(磁滞损耗和涡流损耗)。铁损近似与磁感应强度的最大值  $B_m^2$  成正比。为了减小铁损中的涡流损耗, 变压器的铁芯一般由硅钢片叠装而成。

变压器的效率为其输出功率与输入功率之比, 通常表示为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}} \times 100\%$$

(4) 使用变压器时, 必须掌握其铭牌数据。铭牌上标注的额定值主要有额定电压、额定电流、额定容量、额定频率、额定温升等。

(5) 三相变压器各相的结构和参数相同, 各相负载也近似平衡。因此接在三相对称电源上的三相变压器在运行时, 各相的电磁量也是对称的。只要知道一相的运行情况即可知道另外两相的情况, 故单相变压器的结论同样适用于三相变压器。三相变压器的容量  $S_N = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N} \approx \sqrt{3}U_{1N}I_{1N}$ 。

三相变压器的额定电压为一次、二次绕组的线电压, 额定电流为一次、二次绕组的线电流。目前我国生产的三相电力变压器通常采用 Y/Y<sub>0</sub>、Y/Δ 和 Y<sub>0</sub>/Δ 三种接法。电压变比为一次、二次绕组线电压之比, 它不仅与一次、二次绕组每相的匝数比有关, 而且还与一次、二次绕组的连接方式有关。

当一次、二次三相绕组均为星形连接时

$$\frac{U_{1l}}{U_{12}} = \frac{\sqrt{3}U_{p1}}{\sqrt{3}U_{p2}} = \frac{U_{p1}}{U_{p2}} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

当一次、二次三相绕组分别为星形连接和三角形连接时

$$\frac{U_{1l}}{U_{12}} = \frac{\sqrt{3}U_{p1}}{U_{p2}} = \sqrt{3} \frac{U_{p1}}{U_{p2}} = \sqrt{3} \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{3}K$$

变压器的额定容量、额定电压和额定电流之间的关系如下。

单相变压器:  $S_N = U_{2N}I_{2N} \approx U_{1N}I_{1N}$

三相变压器:  $S_N = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N} \approx \sqrt{3}U_{1N}I_{1N}$

(6) 使用变压器时还必须了解绕组同名端的概念和判别方法, 以及绕组间正确连接的方法。当两个绕组串联时, 它们的异名端应相连; 当两个绕组并联时, 它们的同名端应相连。同名端的判别方法有直流感应法和交流感应法。

(7) 自耦变压器的工作原理, 以及一次、二次电压和电流的关系与双绕组变压器的相同, 但自耦变压器只适用于变比不大的场合, 且在使用时, 应注意一次、二次绕组的公共端接单相电源的零线, 同时一次、二次绕组不能对调使用。电压互感器和电流互感器用来扩大交流电压和交流电流的测量量程。为防止工作人员触及高压电路, 使用互感器时, 铁芯和二次

绕组一端必须可靠接地,且切记使用电压互感器时二次绕组不得短路,使用电流互感器时二次绕组不得开路。

### 5.1.3 电动机

(1) 三相异步电动机由定子和转子两部分组成。定子铁芯中放置三相定子绕组,通电后建立旋转磁场。转子根据结构的不同,分为笼形和绕线式两种。笼形异步电动机多用铸铝式转子,其结构简单、成本低,获得了广泛应用。绕线式异步电动机转子绕组接成星形,通过三个彼此独立的滑环与电刷与外电路相连,它的转子电阻可以通过外接变阻器调节,启动和调速性能较好。

(2) 三相定子绕组通入三相交流电后会产生磁极对数为  $p$  的旋转磁场,旋转磁场的转速即同步转速为  $n_1 = 60f/p$ ,其转向与电源相序一致,并且与电动机转速 ( $n < n_1$ ) 转向一致。旋转磁场切割转子导体,在转子导体中产生感应电动势、感应电流,转子上形成电磁转矩,使转子顺着旋转磁场方向转动。转子转速  $n$  总小于同步转速  $n_1$ ,有转速差  $n_1 - n$ 。电动机的转差率  $s = (n_1 - n)/n_1$ ,是电动机运行的主要物理量。

(3) 旋转磁场在每相定子绕组中产生的感应电动势  $E_1$ ,近似与绕组相电压相平衡,即  $U_1 \approx E_1 = 4.44K_1 f_1 N_1 F_m$ 。

转子里各项参数与  $s$  有着密切的关系,如  $f_2 = s f_1$ ,  $E_2 = s E_{20}$  ( $E_{20} = 4.44K_2 N_2 f_1 \Phi_m$ ),  $X_2 = s X_{20}$  ( $X_{20} = 2\pi s f_1 L_2$ ),  $I_2 = \frac{s E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{20})^2}}$ ,  $\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{20})^2}}$ 。

(4) 当电动机转速  $n$  变化时,转差率  $s$  变化,电动机的电磁转矩  $T$  随之变化,三相异步电动机电磁转矩  $T$ 、最大转矩  $T_m$  和临界转差率  $s_m$  公式如下。

电磁转矩  $T = K_M \frac{U_1^2 s R_2}{R_2^2 + (s X_{20})^2} = f(s)$ 。由于  $T$  与定子绕组的外加电压  $U_1$  的平方成正比,因此,电源电压对异步电动机的电磁转矩的影响是十分显著的,电源电压的波动将严重影响电磁转矩的大小。

最大转矩  $T_m = K_M \frac{U_1^2}{2 X_{20}}$ ,对应于  $T_m$  时的临界转差率  $s_m = \frac{R_2}{X_{20}}$ ,说明  $T_m$  与  $U_1$  的平方成正比,而与  $R_2$  无关,但  $s_m$  与  $R_2$  成正比。

电动机的额定转矩可由额定功率  $P_N$  (kW) 及额定转速  $n_N$  求得。

$$\text{额定转矩} \quad T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} < T_m$$

$$\text{启动转矩} \quad T_{st} = K_M U_1^2 \frac{R_2}{R_2^2 + X_{20}^2} \approx K_M U_1^2 \frac{R_2}{X_{20}^2}$$

$$\text{过载系数} \quad \lambda_m = \frac{T_m}{T_N} = 1.8 \sim 2.5$$

$$\text{启动能力} \quad \lambda_{st} = \frac{T_{st}}{T_N}$$

三相异步电动机能在  $0 < s < s_m$  情况下稳定运行,并具有较硬的固有机特性,若改变电源电压  $U_1$  或改变转子电路的电阻  $R_2$  可得出人为机械特性。笼形异步电动机具有硬的机

机械特性;绕线式异步电动机因转子电阻可调,具有软的机械特性,其稳定工作区为  $n_m < n < n_1$ ,  $0 < T < T_m$ ,在该区域运行时,它具有自动适应负载变化的能力。

(5) 异步电动机启动时启动电流大而启动转矩  $T_{st}$  不大的原因是启动时  $n=0$  ( $s=1$ ),旋转磁场与转子之间有最大的相对转速,转子电流和定子电流比正常运行时的大很多。同时,启动时转子功率因数很低,所以  $T_{st}$  并不大。一般容量较小、不频繁启动的电动机可采用直接启动(又称全压启动)。此外,也可用经验公式来确定,若满足下列公式,则电动机可以直接启动,否则应采用降压启动。

$$\frac{\text{直接启动的启动电流}}{\text{电动机的额定电流}} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{电源变压器容量(kV} \cdot \text{A)}}{4 \times \text{电动机功率(kW)}}$$

三相异步电动机直接启动时,启动电流大,电网电压下降。因此大容量的电动机常采用减压启动。为了限制启动电流,笼形异步电动机常采用 Y/ $\Delta$  换接降压启动和自耦变压器降压启动。Y/ $\Delta$  换接降压启动只适用于正常工作时接成三角形的电动机,而且此时启动电流和启动转矩都只有直接启动时的 1/3。正常工作时星形接法的笼形异步电动机可采用自耦变压器降压启动。以上两种降压启动,由于电磁转矩与电压的平方成正比,故降压启动在降低启动电流的同时,也降低了启动转矩,因此,降压启动只适用于空载或轻载启动的场合。绕线式电动机采用转子电路串电阻启动,有良好的启动特性,启动电流小,启动转矩大,可用于满载或重载下启动的机械。

(6) 要使电动机反转,只要改变电源的相序,即对调 3 根火线中的任意 2 根火线即可。

(7) 因为  $n = (1-s) \frac{60f}{p}$ , 所以,三相异步电动机的调速方法有下列三种。

① 变极调速:调速时只需改变定子绕组的接法,属于有级调速,只适用于笼形多速异步电动机。

② 变转差率调速:调速时只需改变转子电路的外接调速电阻,属于无级调速,只适用于绕线式异步电动机。

③ 变频调速:改变电源的频率可使电动机得到平滑无级调速,且频率变化较大时,调速范围也大。但在变频调速的同时要改变所加的电压以维持旋转磁场的大小不变,且变频调速需要配备一套独立的变频电源设备。

三相异步电动机的制动方法有三种:反接制动、能耗制动和发电反馈制动。

(8) 绕线式异步电动机的启动电阻不能兼作调速电阻使用,因为启动电阻是按短时工作设计的,而调速电阻是按长期工作设计的。调速时,它的转差率与调速电阻成正比。

(9) 单相异步电动机无启动转矩,常用的启动方法有分相式(电容分相法和电阻分相法)和罩极式。单相异步电动机有空间位置上相差  $90^\circ$  的两个绕组,其中一个绕组与电容器串联后,再与另一绕组并联接入单相电源,两绕组中流过相差近  $90^\circ$  的两电流,电动机就能产生旋转磁场而启动旋转。降低电源电压时可降低电动机的转速。将电容 C 串入不同的绕组,可以改变单相电动机的转向。

(10) 控制电动机应用于自动控制系统中,完成传递和转换控制信号的任务。伺服电动机又称执行电动机,分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类。步进电动机又称脉冲电动机,将电脉冲信号变换为直线的或相应的角位移,是数字控制中的执行元件。



## 5.2 例题解析

**例 5.1** 已知铁芯由铸钢制成, 截面积  $S_1 = 20 \text{ cm}^2$ , 平均长度  $l = 45 \text{ cm}$ , 衔铁截面积  $S_2 = 25 \text{ cm}^2$ , 平均长度  $l_2 = 15 \text{ cm}$ ,  $l_3 = 2 \text{ cm}$ , 空气隙  $\delta = 0.1 \text{ cm}$ , 线圈匝数  $N = 1\,000$ , 欲产生  $\Phi = 2.8 \times 10^{-3} \text{ Wb}$  的磁通量, 励磁电流为直流。求所需的磁通势  $F_m$  和所需的励磁电流。

**解** 这是没有分支的磁路, 闭合磁路内的磁通量相同, 因此首先应计算各段磁路的磁感应强度, 即

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{2.8 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1.4 \text{ T}, \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{2.8 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1.12 \text{ T}$$

$$B_0 = B_1 = 1.4 \text{ T}$$

其次, 查铸钢的磁化曲线, 得到相应的磁场强度值为

$$H_1 = 2.1 \times 10^3 \text{ A/m}, \quad H_2 = 1.1 \times 10^3 \text{ A/m}, \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1.4}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 11.14 \times 10^5 \text{ A/m}$$

再计算各段的磁压降为

$$H_1 l_1 = 2.1 \times 10^3 \times 0.45 \text{ A} = 0.945 \times 10^3 \text{ A}$$

$$H_2 l_2 = 1.1 \times 10^3 \times 0.15 \text{ A} = 0.165 \times 10^3 \text{ A}$$

$$2H_3 l_3 = 2 \times 1.1 \times 10^3 \times 0.02 \text{ A} = 0.044 \times 10^3 \text{ A}$$

$$2H_0 \delta = 2 \times 11.14 \times 10^5 \times 0.001 \text{ A} = 2.228 \times 10^3 \text{ A}$$

最后求得总的磁通势为

$$F_m = IN = H_1 l_1 + H_2 l_2 + 2H_3 l_3 + 2H_0 \delta = 3.382 \times 10^3 \text{ A}$$

所需的励磁直流电流为

$$I = \frac{F_m}{N} = \frac{3.382 \times 10^3}{1\,000} \text{ A} = 3.382 \text{ A}$$

从计算结果看出, 空气隙仅占总磁路平均长度的 0.31%, 而磁压降却占了总磁通势的 65.9%, 空气隙占磁压降的绝大部分。

**例 5.2** 试分析交流铁芯线圈铁芯中的磁感应强度和线圈中的电流怎样变化。

- (1) 电源电压和频率不变, 绕组匝数增加;
- (2) 电源电压不变, 匝数  $N$  不变, 频率减小;
- (3) 电源电压不变, 匝数  $N$  和频率  $f$  不变, 铁芯截面积减小;
- (4) 电源电压增大, 其他不变。

**解** 由公式  $U \approx 4.44 f N \Phi_m$  可知

- (1) 当式中  $U$ 、 $f$  不变时

$$N \uparrow \rightarrow \Phi_m \downarrow \rightarrow \text{由 } B_m = \frac{\Phi_m}{S} \rightarrow B_m \downarrow, \text{ 由 } \Phi_m = \frac{NI}{R_m} \rightarrow I \downarrow$$

- (2) 当  $U$  不变,  $N$  不变时

$$f \downarrow \rightarrow \Phi_m \uparrow \rightarrow \text{由 } B_m = \frac{\Phi_m}{S} \rightarrow B_m \uparrow, \text{ 由 } \Phi_m = \frac{NI}{R_m} \rightarrow I \uparrow$$

(3) 当  $U$  不变,  $N$  和  $f$  也不变时, 显然

$$\Phi_m \text{ 不变} \rightarrow \left(B_m = \frac{\Phi_m}{S}\right) \rightarrow S \downarrow \rightarrow B_m \uparrow, \Phi_m \text{ 不变} \rightarrow \Phi_m = \frac{NI}{R_m} \rightarrow R_m = \frac{l}{\mu S} \rightarrow S \downarrow \rightarrow R_m \uparrow \rightarrow I \downarrow$$

(4)  $N$  和  $f$  不变时

$$U \uparrow \rightarrow \Phi_m \uparrow \rightarrow B_m \downarrow, \Phi_m \uparrow \rightarrow I \uparrow$$

**例 5.3** 磁路如图 5.1 所示, 若  $N_1 = 3\,000$ , 线圈铜阻  $R_1 = 30\ \Omega$ ,  $N_2 = 4\,000$ , 线圈铜阻  $R_2 = 40\ \Omega$ 。两线圈以下列 4 种方式接到  $U = 115\text{ V}$  的直流电源上, 分别求出磁路的总磁通势和磁通  $\Phi$  的方向。

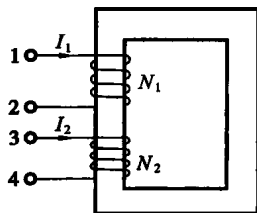


图 5.1

- (1) 将 2、3 点连接, 1、4 点接直流电源正、负极;
- (2) 将 1、3 点连接电源正极, 2、4 点接电源负极;
- (3) 将 2、4 点连接, 1 点接电源正极, 3 点接电源负极;
- (4) 将 1、4 点接电源正极, 2、3 点接电源负极。

**解** (1)  $F_m = I(N_1 + N_2) = \frac{U}{R_1 + R_2}(N_1 + N_2) = 11\,500\text{ A}$

磁通  $\Phi$  方向为顺时针沿铁芯闭合。

(2)  $F_m = I_1 N_1 + I_2 N_2 = \frac{U_1}{R_1} N_1 + \frac{U_2}{R_2} N_2 = 2\,300\text{ A}$

磁通  $\Phi$  方向为顺时针沿铁芯闭合。

(3)  $F_m = I N_1 - I N_2 = \frac{U}{R_1 + R_2}(N_1 - N_2) = -1\,643\text{ A}$

磁通  $\Phi$  方向为逆时针沿铁芯闭合。

(4)  $F_m = I_1 N_1 - I_2 N_2 = \frac{U}{R_1} N_1 - \frac{U}{R_2} N_2 = 0$

此种情况磁通势为零, 磁通  $\Phi = 0$ 。

**例 5.4** 变压器的额定电压为  $10\,000\text{ V}/230\text{ V}$ , 额定电流为  $5\text{ A}/215\text{ A}$ 。在空载时, 一次绕组从  $10\,000\text{ V}$  的电源取用功率  $340\text{ W}$ , 电流  $0.43\text{ A}$ 。求: 这台变压器的变比  $K$ ; 空载电流占额定电流的百分比; 空载时一次绕组的功率因数。

**解** 变压器的变比

$$K = \frac{10\,000}{230} = 43.5$$

空载电流占额定电流的百分比

$$\frac{I_0}{I_{1N}} = \frac{0.43}{5} = 8.6\%$$

空载时一次侧绕组的功率因数

$$\frac{P_0}{S_0} = \frac{340}{10\,000 \times 0.43} = 0.079$$

**例 5.5** 一台额定容量  $S_N = 10\text{ kV} \cdot \text{A}$  的变压器, 做空载和短路实验时分别测得铁损  $\Delta P_{Fe} = 300\text{ W}$ , 铜损  $\Delta P_{Cu} = 330\text{ W}$ , 若向功率因数  $\cos\varphi = 0.85$  的感性负载供电, 求变压器满载情况下的效率  $\eta$  和这台变压器的无功功率  $Q$ 。

**解** 输出有功功率

$$P_2 = S_N \cos \varphi = 10 \times 10^3 \times 0.85 \text{ W} = 8\,500 \text{ W}$$

输入有功功率

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu} = (8\,500 + 300 + 330) \text{ W} = 9\,130 \text{ W}$$

变压器满载时的效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{8\,500 \text{ W}}{9\,130 \text{ W}} = 93\%$$

变压器的无功功率

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 5\,300 \text{ var} \quad \text{或} \quad Q = S \sin \varphi = 5\,300 \text{ var}$$

变压器空载实验时测得的损耗即是变压器的铁损;变压器短路实验测得的损耗即是变压器满载时的铜损。

**例 5.6** 一台三相变压器,一次绕组每相匝数  $N_1 = 2\,050$ ,二次绕组每相匝数  $N_2 = 82$ ,如果一次绕组加线电压  $U_{11} = 6\,000 \text{ V}$ 。求:

(1) 在 Y/Y<sub>0</sub> 连接时,二次绕组的线电压和相电压;

(2) 在 Y/△连接时,二次绕组的线电压和相电压。

**解** (1) 变压器的变比

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{2\,050}{82} = 25$$

Y/Y<sub>0</sub> 连接时二次绕组线电压和相电压

$$U_{21} = \frac{U_{11}}{K} = \frac{6\,000}{25} \text{ V} = 240 \text{ V}, \quad U_{2p} = U_{21} / \sqrt{3} = 139 \text{ V}$$

(2) Y/△连接时一次绕组的相电压

$$U_{1p} = U_{11} / \sqrt{3} = 6\,000 / \sqrt{3} \text{ V} = 3\,464 \text{ V}$$

二次绕组的相电压和线电压

$$U_{2p} = \frac{U_{1p}}{K} = \frac{3\,464}{25} \text{ V} = 139 \text{ V}, \quad U_{21} = U_{2p} = 139 \text{ V}$$

**例 5.7** 已知 Y90S-4 型异步电动机的下列技术数据:  $P_N = 1.1 \text{ kW}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , 三角形连接,  $\eta_N = 0.78$ ,  $\cos \varphi_N = 0.78$ ,  $n_N = 1\,400 \text{ r/min}$ 。求:线电流和相电流的额定值;电磁转矩额定值;转差率和转子频率的额定值。

$$\text{解 (1)} \quad I_{1N} = \frac{P_{2N}}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi_N \eta_N} = \frac{1\,100}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.78 \times 0.78} \text{ A} = 2.747 \text{ A}$$

$$I_{pN} = I_{1N} / \sqrt{3} = 1.586 \text{ A}$$

$$(2) T_N = 9\,550 \frac{P_{1N}}{n_1} = 9\,550 \times \frac{P_{2N} / \eta_N}{n_1} = 9\,550 \times \frac{1.1}{1\,500 \times 0.78} \text{ N} \cdot \text{m} = 8.98 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$(3) \quad s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1\,500 - 1\,400}{1\,500} = 0.067$$

$$f_{2N} = s f_{1N} = 0.067 \times 50 \text{ Hz} = 3.35 \text{ Hz}$$

**例 5.8** 有一台 4 极、 $f = 50 \text{ Hz}$ 、 $n_N = 1\,425 \text{ r/min}$  的三相异步电动机,转子电阻  $R_2 = 0.02 \Omega$ ,感抗  $X_{2s} = 0.08 \Omega$ ,  $E_1 / E_{2s} = 10$ 。当  $E_1 = 200 \text{ V}$  时,求:

(1) 电动机启动初始瞬间 ( $n = 0, s = 1$ ) 转子每相电路的电动势  $E_{2s}$ 、电流  $I_{2s}$  和功率因

数  $\cos\varphi_{2s}$ 。

(2) 额定转速时的  $E_2$ 、电流  $I_2$  和功率因数  $\cos\varphi_2$ 。比较在上述两种情况下转子电路各物理量(电动势、频率、感抗、电流及功率因数)的大小。

解 (1)  $E_{2s} = E_1/10 = 20 \text{ V}$

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{20}{\sqrt{0.02^2 + 0.08^2}} \text{ A} = 242.5 \text{ A}$$

$$\cos\varphi_{2s} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{0.02}{\sqrt{0.02^2 + 0.08^2}} = 0.243$$

(2)  $s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1\,500 - 1\,425}{1\,500} = 0.05$

$$E_2 = s_N E_{2s} = 0.05 \times 20 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

$$I_2 = \frac{s_N E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + (s_N X_{2s})^2}} = \frac{0.05 \times 20}{\sqrt{0.02^2 + (0.05 \times 0.08)^2}} \text{ A} = 49 \text{ A}$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s_N X_{2s})^2}} = \frac{0.02}{\sqrt{0.02^2 + (0.05 \times 0.08)^2}} = 0.981$$

转子电路的电动势、频率和感抗都与转差率成正比,额定负载运行时  $s_N$  很小,所以上述三个物理量均很小;启动时电流  $I_{2s}$  很大、功率因数  $\cos\varphi_{2s}$  很低,额定负载运行时,  $I_2$  变小很多,  $\cos\varphi_2$  提高到近于 1。

**例 5.9** 一台 4 极三相异步电动机的额定功率为 30 kW,额定电压为 380 V,三角形连接,频率为 50 Hz。在额定负载下运行时其转差率为 0.02,效率为 90%,线电流为 57.5 A。求:转子旋转磁场对转子的转速(提示  $n_2 = 60f_2/p = sn_1$ );额定转矩;电动机的功率因数。

解 (1)  $n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} \text{ r/min} = 1\,500 \text{ r/min}$

$$n_2 = sn_1 = 0.02 \times 1\,500 \text{ r/min} = 30 \text{ r/min}$$

(2)  $T_{2N} = 9\,550 \frac{P_{2N}}{n_N} = 9\,550 \times \frac{30}{(1-0.02) \times 1\,500} \text{ N} \cdot \text{m} = 194.9 \text{ N} \cdot \text{m}$

(3)  $\cos\varphi_{1N} = \frac{P_{2N}}{\sqrt{3}U_N I_N \eta_N} = \frac{30\,000}{\sqrt{3} \times 380 \times 57.5 \times 0.9} = 0.88$

**例 5.10** 在例 5.9 中,如果电动机的  $T_{st}/T_N = 1.2$ ,  $I_{st}/I_N = 7$ 。

(1) 采用 Y/△ 换接启动时,试求启动电流和启动转矩;当负载转矩为额定转矩的 60% 和 25% 时,是否可以采用 Y/△ 转换启动?

(2) 若采用自耦降压启动,则当电动机的启动转矩为额定转矩的 85% 时,试求自耦变压器的变比、电动机每相启动电流和线路上的启动电流。

解 (1) 直接启动电流  $I_{st} = 7I_{1N} = 7 \times 57.5 \text{ A} = 402.5 \text{ A}$

Y/△ 转换启动时

$$I_{stY} = \frac{1}{3} I_{st\Delta} = \frac{1}{3} \times 402.5 \text{ A} = 134.17 \text{ A}$$

$$T_{stY} = \frac{1}{3} T_{st\Delta} = \frac{1}{3} \times (1.2 \times 194.9) \text{ N} \cdot \text{m} = 77.96 \text{ N} \cdot \text{m}$$

当负载转矩为额定转矩的 60% 时,  $0.6T_{2N}=0.6\times 194.9\text{ N}\cdot\text{m}=116.94\text{ N}\cdot\text{m}>T_{st}$ , 不可以采用 Y/△ 转换启动。

当负载转矩为额定转矩的 25% 时,  $0.25T_{2N}=0.25\times 194.9\text{ N}\cdot\text{m}=48.725\text{ N}\cdot\text{m}<T_{st}$ , 可采用 Y/△ 转换启动。

(2) 设变比为  $K$ , 则二次电压抽头比为  $1/K$ 。

自耦减压启动转矩  $T'_{st}=T_{st}/K^2=(1.2\times 194.9)/K^2=233.88/K^2\text{ N}\cdot\text{m}$

应有  $233.88/K^2=0.85T_{2N}=0.85\times 194.9\text{ N}\cdot\text{m}$

$$K=1.19, \quad 1/K=0.84$$

自耦减压(一次侧线路上)启动电流  $I'_{st}=I_{st}/K^2=402.5\times 0.84^2\text{ A}=284\text{ A}$

电动机定子(变压器二次绕组线电流)

$$I''_{st}=I_{st}/K=402.5\times 0.84\text{ A}=338.1\text{ A}$$

电动机的每相启动电流(三角形连接)

$$I'''_{st}=\frac{1}{\sqrt{3}}I''_{st}=\frac{1}{\sqrt{3}}\times 338.1\text{ A}=195.2\text{ A}$$

**例 5.11** 某三相异步电动机的电源频率为 50 Hz, 线电压为 380 V, 当电动机输出转矩为  $40\text{ N}\cdot\text{m}$  时, 测得其输入功率为 5 kW, 线电流为 11 A, 转速为 950 r/min。试求电动机的极数, 此时的功率因数、效率和转子电流频率各是多少?

**解** 由转速知,  $n_1=1\,000\text{ r/min}$ , 则  $p=3$ , 极数为 6

$$\cos\varphi=\frac{P}{\sqrt{3}UI}=0.69$$

$$P_2=nT/9\,550=3.98\text{ kW}$$

$$\eta_N=P_2/P_1=79.6\%$$

$$f_2=sf_1=\frac{n_1-n}{n_1}f_1=2.5\text{ Hz}$$

**例 5.12** 一台三相笼形异步电动机,  $P_{2N}=28\text{ kW}$ ,  $U_N=380\text{ V}$ ,  $I_{1N}=58\text{ A}$ ,  $\cos\varphi_{1N}=0.88$ ,  $n_N=1\,455\text{ r/min}$ , 三角形连接, 启动电流倍数为 6, 启动转矩倍数为 1.1, 过载系数为 2.3, 要求供电变压器启动电流不大于 150 A, 负载启动转矩为  $73.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 。试选择一种合适的降压启动方法。自耦变压器抽头有 55%、64%、73% 三挡。

**解** 选择降压启动方法时, 仅考虑 Y/△ 转换启动和自耦降压启动两种。方法能够适用的关键有两条: ① 启动电流不能超过要求; ② 启动转矩必须大于负载启动转矩。

(1) 采用 Y/△ 转换启动时, 启动电流为

$$I'_{st}=1/3I_{st}=1/3\times 6\times 58\text{ A}=116\text{ A}$$

该电流小于 150 A, 满足变压器对启动电流的要求。

启动转矩为

$$\begin{aligned} T'_{st} &= \frac{1}{3}T_{st} = \frac{1}{3}\times 1.1T_{2N} = \frac{1}{3}\times 1.1\times \left(9\,550\frac{P_{2N}}{n_N}\right) = \frac{1}{3}\times 1.1\times 9\,550\times \frac{28}{1\,455}\text{ N}\cdot\text{m} \\ &= 67.39\text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

这个启动转矩小于负载启动转矩( $73.5\text{ N}\cdot\text{m}$ ), 所以, 不能采用 Y/△ 转换启动的方法。

(2) 采用自耦降压启动时,对三个抽头挡位分别进行校核。

抽头为 55% 挡时

$$I'_{st} = 0.55^2 I_{st} = 0.55^2 \times 6 \times 58 \text{ A} = 105.27 \text{ A} < 150 \text{ A}$$

$$T'_{st} = 0.55^2 T_{st} = 0.55^2 \times 1.1 \times 183.8 \text{ N} \cdot \text{m} = 61.16 \text{ N} \cdot \text{m} < 73.5 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{不能采用})$$

抽头为 64% 挡时

$$I'_{st} = 0.64^2 I_{st} = 0.64^2 \times 6 \times 58 \text{ A} = 142.5 \text{ A} < 150 \text{ A}$$

$$T'_{st} = 0.64^2 T_{st} = 0.64^2 \times 1.1 \times 183.8 \text{ N} \cdot \text{m} = 82.8 \text{ N} \cdot \text{m} > 73.5 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{可以采用})$$

抽头为 73% 挡时

$$I'_{st} = 0.73^2 I_{st} = 0.73^2 \times 6 \times 58 \text{ A} = 185.45 \text{ A} > 150 \text{ A}$$

$$T'_{st} = 0.73^2 T_{st} = 0.73^2 \times 1.1 \times 183.8 \text{ N} \cdot \text{m} = 107.7 \text{ N} \cdot \text{m} > 73.5 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{不能采用})$$

## 5.3 习题解答

### 5.3.1 填空题

1. 磁路的欧姆定律是磁路的磁通等于\_\_\_\_\_与\_\_\_\_\_之比。(磁动势,磁阻)
2. 直流铁芯线圈,当线圈匝数  $N$  增加 1 倍时,磁通  $\Phi$  将\_\_\_\_\_,磁感应强度  $B$  将\_\_\_\_\_。(增大,增大)
3. 交流铁芯线圈,当线圈匝数  $N$  增大时,磁通  $\Phi$  将\_\_\_\_\_,磁感应强度  $B$  将\_\_\_\_\_。(减小,减小)
4. 交流铁芯线圈,当铁芯截面积  $S$  增大时,磁通  $\Phi$  将\_\_\_\_\_,磁感应强度  $B$  将\_\_\_\_\_。(不变,减小)
5. 交流铁芯线圈,如果励磁电压和频率均减半,则铜损  $P_{Cu}$  将\_\_\_\_\_,铁损  $P_{Fe}$  将\_\_\_\_\_。(不变,不变)
6. 变压器的铁损包含\_\_\_\_\_损耗和\_\_\_\_\_损耗,它们与电源的电压和频率有关。(磁滞,涡流)
7. 变压器空载实验时测得的损耗即是变压器的\_\_\_\_\_损;变压器短路实验测得的损耗即是变压器满载时的\_\_\_\_\_损。(铁,铜)
8. 变压器空载运行时,电源输入的功率等于\_\_\_\_\_损。变压器负载运行时的主磁通是由一次绕组和二次绕组的\_\_\_\_\_共同产生的。(铁,电流)
9. 单相变压器额定容量为  $50 \text{ V} \cdot \text{A}$ ,额定电压为  $220 \text{ V}/36 \text{ V}$ ,则  $I_{1N} =$ \_\_\_\_\_, $I_{2N} =$ \_\_\_\_\_。(0.23 A,1.39 A)
10. 三相变压器额定容量为  $800 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ,额定电压为  $6000 \text{ V}/400 \text{ V}$ ,二次绕组(低压边)带电阻电感性负载额定运行时,二次绕组电压为\_\_\_\_\_,二次绕组电流为\_\_\_\_\_。(400 V,1154.7 A)
11. 变压器的铭牌容量是用\_\_\_\_\_功率表示的。变压器的电压调整率  $\Delta U\%$  越\_\_\_\_\_越好。(视在,小)
12. 三相异步电动机的旋转方向由定子电流的\_\_\_\_\_决定,与电源电压大小\_\_\_\_\_。

(相序, 无关)

13. 异步电动机根据转子结构的不同分为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_两种。(笼形, 绕线式)
14. 笼形异步电动机的机械特性属于\_\_\_\_\_特性。绕线式异步电动机的机械特性属于\_\_\_\_\_特性。(硬, 软)
15. 三相笼形异步电动机在空载和满载两种情况下启动, 启动电流的大小关系是\_\_\_\_\_启动电流较大, \_\_\_\_\_启动电流较小。(满载, 空载)
16. 当电动机带有恒转矩负载运行时, 转子电路串入电阻后, 转速将\_\_\_\_\_, 定子电流将\_\_\_\_\_。(下降, 减小)
17. 笼形异步电动机采用降压启动时, 其启动转矩将\_\_\_\_\_; 绕线式异步电动机采用转子串电阻启动时, 启动转矩将\_\_\_\_\_。(减小, 增大)
18. 一台 Y/ $\Delta$ 接法、380 V/220 V 的三相异步电动机, 当电动机星形连接(电源电压 380 V)启动时和三角形连接(电源电压 220V)启动时, 启动电流\_\_\_\_\_, 启动转矩\_\_\_\_\_。(相同, 相同)
19. 三相异步电动机的转速越高, 其转子感应电动势\_\_\_\_\_, 其转差率\_\_\_\_\_。(越小, 越小)

### 5.3.2 选择题

1. 一个铁芯线圈, 接在直流电压不变的电源上, 当铁芯的横截面积变大而磁路的平均长度不变时, 励磁电流将( )。(C)
  - A. 增大
  - B. 减小
  - C. 不变
  - D. 不确定
2. 一个铁芯线圈, 接在交流电压不变的电源上, 当铁芯的横截面积变大而磁路的平均长度不变时, 励磁电流将( )。(B)
  - A. 增大
  - B. 减小
  - C. 不变
  - D. 不确定
3. 交流铁芯线圈, 如果励磁电压不变, 而频率减半, 铜损  $P_{Cu}$  将( )。(A)
  - A. 增大
  - B. 减小
  - C. 不变
  - D. 不确定
4. 两个直流铁芯线圈除了铁芯截面积不同( $S_1 = 2S_2$ )外, 其他参数都相同, 若两者的磁感应强度相等, 则两线圈的电流  $I_1$  和  $I_2$  的关系为( )。(B)
  - A.  $I_1 = 2I_2$
  - B.  $I_1 = I_2$
  - C.  $I_1 = 0.5I_2$
  - D. 不确定
5. 两个交流铁芯线圈除了匝数不同( $N_1 = 2N_2$ )外, 其他参数都相同, 若将这两个线圈接在同一交流电源上, 则它们的电流  $I_1$  和  $I_2$  的关系为( )。(B)
  - A.  $I_1 > I_2$
  - B.  $I_1 < I_2$
  - C.  $I_1 = I_2$
  - D. 不确定
6. 两个完全相同的交流铁芯线圈, 分别工作在电压相同而频率不同( $f_1 > f_2$ )的两电源下, 此时线圈磁通  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  的关系是( )。(B)
  - A.  $\Phi_1 > \Phi_2$
  - B.  $\Phi_1 < \Phi_2$
  - C.  $\Phi_1 = \Phi_2$
  - D. 不确定
7. 两个完全相同的交流铁芯线圈分别工作在电压相同而频率不同( $f_1 > f_2$ )的两电源下, 此时线圈的电流  $I_1$  和  $I_2$  的关系是( )。(B)
  - A.  $I_1 > I_2$
  - B.  $I_1 < I_2$
  - C.  $I_1 = I_2$
  - D. 不确定
8. 交流铁芯线圈中的功率损耗来源于( )。(C)

- A. 漏磁通      B. 铁芯的磁导率  $\mu$       C. 铜损和铁损      D. 不确定

9. 输出变压器一次绕组匝数为  $N_1$ , 二次绕组有匝数为  $N_2$  和  $N_3$  的两个抽头。将  $16\ \Omega$  的负载接匝数为  $N_2$  的抽头, 或将  $4\ \Omega$  的负载接匝数为  $N_3$  的抽头, 它们换算到一次绕组的阻抗相等, 均能达到阻抗匹配, 则  $N_2 : N_3$  应为( )。(D)

- A.  $4 : 1$       B.  $1 : 1$       C.  $1 : 2$       D.  $2 : 1$

10. 一台额定容量为  $100\ \text{kV} \cdot \text{A}$  的变压器, 其额定视在功率应该( )。(A)

- A. 等于  $100\ \text{kV} \cdot \text{A}$       B. 大于  $100\ \text{kV} \cdot \text{A}$       C. 小于  $100\ \text{kV} \cdot \text{A}$       D. 等于  $100\sqrt{2}\ \text{kV} \cdot \text{A}$

11. 一变压器, 负载是纯电阻, 忽略变压器的漏磁损耗, 输入功率为  $P_1$ , 输出功率为  $P_2$ , 有( )。(A)

- A.  $P_1 > P_2$       B.  $P_1 < P_2$       C.  $P_1 = P_2$       D.  $P_1 \geq P_2$

12. 一个负载  $R_L$  经理想变压器接到信号源上, 已知信号源的内阻  $R_0 = 800\ \Omega$ , 变压器的变比  $K = 10$ , 若该负载折算到一次侧的阻值  $R'_L$  正好与  $R_0$  达到阻抗匹配, 则负载  $R_L$  为( )。(D)

- A.  $800\ \Omega$       B.  $0.8\ \Omega$       C.  $10\ \Omega$       D.  $8\ \Omega$

13. 一个  $R_L = 8\ \Omega$  的负载, 经理想变压器接到信号源上。信号源的内阻  $R_0 = 800\ \Omega$ , 变压器一次绕组的匝数  $N_1 = 1\ 000$ , 若要通过阻抗匹配使负载得到最大功率, 则变压器二次绕组的匝数  $N_2$  应为( )。(D)

- A. 200      B. 1 000      C. 500      D. 100

14. 某单相变压器如图 5.2 所示, 两个一次绕组的额定电压均为  $110\ \text{V}$ , 二次绕组额定电压为  $6.3\ \text{V}$ , 若电源电压为  $220\ \text{V}$ , 则应将一次绕组的( )端相连接, 其余两端接电源。(A)

- A. 2 和 3      B. 1 和 3      C. 2 和 4      D. 1 和 4

15. 三相异步电动机当负载转矩从  $T_1$  增到  $T_2$  时, 将稳定运行在图 5.3 所示机械特性曲线的( )点。(B)

- A. a      B. b      C. c      D. d

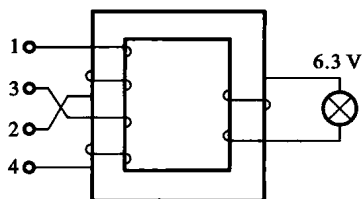


图 5.2

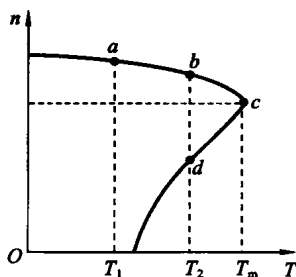


图 5.3

16. 一台  $30\ \text{kW}$  的电动机, 其输入有功功率应该( )。(B)

- A. 等于  $30\ \text{kW}$       B. 大于  $30\ \text{kW}$       C. 小于  $30\ \text{kW}$       D. 不确定

17. 三相异步电动机产生电磁转矩是由于( )。(C)

- A. 定子磁场与定子电流的相互作用      B. 转子磁场与转子电流的相互作用



C. 旋转磁场与转子电流的相互作用      D. 旋转磁场与定子电流的相互作用

18. 三相异步电动机的转速  $n$  越高,其转子电路的感应电动势  $E_2$  ( )。(B)

A. 越大      B. 越小      C. 不变      D. 不确定

19. 旋转磁场的转速  $n_1$  与磁极对数  $p$  和电源频率  $f$  的关系是( )。(A)

A.  $n_1 = 60 \frac{f}{p}$       B.  $n_1 = 60 \frac{f}{2p}$       C.  $n_1 = 60 \frac{p}{f}$       D.  $n_1 = \frac{p}{60f}$

20. 三相异步电动机在额定电压和额定频率下运行时,电动机由空载到额定负载的过程中,旋转磁场的每极磁通  $\Phi_m$  ( )。(C)

A. 变大      B. 变小      C. 基本不变      D. 变化趋势不定

21. 三相异步电动机在额定电压和额定频率下运行时,电动机由空载到额定负载的过程中,电动机产生的电磁转矩  $T$  ( )。(B)

A. 变大      B. 变小      C. 基本不变      D. 变化趋势不定

22. 三相异步电动机接在频率为 50 Hz,电压为额定值的电源上运行,电动机由空载到额定负载的过程中,异步电动机转速  $n$  ( )。(B)

A. 变大      B. 变小      C. 基本不变      D. 变化趋势不定

### 5.3.3 计算题

1. 铸钢制成的均匀螺线环如图 5.4 所示,已知其截面积  $S=2 \text{ cm}^2$ ,平均长度  $l=40 \text{ cm}$ ,线圈匝数  $N=800$ ,要求磁通  $\Phi=2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ,铸钢材料的  $B-H$  曲线数据见表 5.1。求线圈中的电流  $I$ 。

表 5.1 铸钢材料的  $B-H$  曲线数据

$B/\text{T}$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.4
$H/(\text{A/m})$	380	470	550	680	800	920	1 280	1 550	2 060

解 由已知条件可先求出环内的磁感应强度

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{2 \times 10^{-4}}{2 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1 \text{ T}$$

查铸钢  $B-H$  曲线数据表,当  $B=1 \text{ T}$  时,  $H=920 \text{ A/m}$ ,由  $Hl=IN$  得

$$I = \frac{Hl}{N} = \frac{920 \times 0.4}{800} \text{ A} = 0.46 \text{ A}$$

即线圈中需通入 0.46 A 电流。

2. 输出变压器如图 5.5 所示,二次绕组有中间抽头,以便接  $8 \Omega$  或  $3.5 \Omega$  的扬声器,两

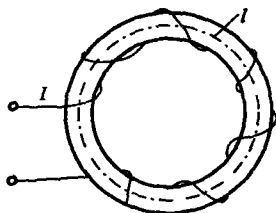


图 5.4

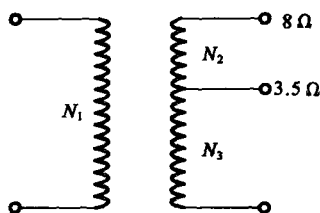


图 5.5

者都能达到阻抗匹配,试求二次绕组匝数比  $N_2 : N_3$ 。

解 由已知条件可得

$$\left(\frac{N_1}{N_2+N_3}\right)^2 \times 8 = \left(\frac{N_1}{N_3}\right)^2 \times 3.5, \quad N_2 : N_3 = 1 : 2$$

3. 一台容量  $S_N = 20 \text{ kV} \cdot \text{A}$  的照明变压器,它的电压为  $6\ 600 \text{ V}/220 \text{ V}$ ,问它能够正常供应  $220 \text{ V}$ 、 $40 \text{ W}$  的白炽灯多少盏?能供给  $\cos\varphi=0.6$ 、电压为  $220 \text{ V}$ 、功率为  $40 \text{ W}$  的荧光灯多少盏?

解 (1)

$$\text{白炽灯盏数} = 20 \times 10^3 / 40 = 500$$

(2)

$$\text{荧光灯盏数} = 20 \times 10^3 \cos\varphi / 40 = 300$$

4. 某单相照明变压器,容量为  $10 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ,电压为  $3\ 300 \text{ V}/220 \text{ V}$ ,今欲在二次绕组接上  $60 \text{ W}$ 、 $220 \text{ V}$  的白炽灯,变压器在额定情况下运行。这种电灯可接多少盏?一次、二次绕组的额定电流为多大?

解 (1) 白炽灯盏数

$$n = \frac{10 \times 10^3}{60} = 167$$

(2) 一次绕组额定电流

$$I_{1N} = \frac{P}{U_1} = 3.03 \text{ A}$$

二次绕组额定电流

$$I_{2N} = \frac{P}{U_2} = 45.46 \text{ A}$$

5. 有一个电动式扬声器的电阻  $R = 3.2 \Omega$ ,信号源的内电阻  $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ ,为了使扬声器获得最大的功率,匹配的变压器的变比应是多少?

解 扬声器折算到一次侧的等效电阻为

$$R_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R = K^2 R$$

当  $R_1 = R_0$ ,即  $10\ 000 \Omega = K^2 \times 3.2 \Omega$  时,扬声器获得最大功率,则

$$K = \sqrt{\frac{10\ 000}{3.2}} = 56$$

6. 某三相变压器,一次绕组每相匝数  $N_1 = 2\ 080$ ,二次绕组每相匝数  $N_2 = 80$ ,如果一次绕组加线电压  $U_1 = 6\ 000 \text{ V}$ 。求:

(1) 在  $Y/Y_0$  连接时,二次绕组的线电压和相电压;

(2) 在  $Y/\Delta$  连接时,二次绕组的线电压和相电压。

$$\text{解 (1)} \quad K = \frac{N_1}{N_2} = 26, \quad U_{21} = \frac{U_{11}}{K} = 230 \text{ V}, \quad U_{2p} = \frac{U_{21}}{\sqrt{3}} = 133 \text{ V}$$

$$(2) \quad U_{1p} = 3\ 468 \text{ V}, \quad U_{2p} = \frac{U_{1p}}{K} = 133 \text{ V}, \quad U_{21} = U_{2p} = 133 \text{ V}$$

7. 一台三相异步电动机的额定数据如下:  $U_N = 380 \text{ V}$ ,  $I_N = 4.9 \text{ A}$ ,  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ,  $\eta_N = 0.82$ ,  $n_N = 2\ 970 \text{ r/min}$ ,  $\cos\varphi_N = 0.83$ ,三角形连接。试问这是一台几极的电动机?在额定工

作状态下的转差率、转子电流的频率、输出功率和额定转矩各是多少?

解 由  $n_N = 2\,970\text{ r/min}$  可知,这是一台 2 极的电动机,即  $p=1, n_1=3\,000\text{ r/min}$ 。

在额定工作状态下的转差率、转子电流频率、输出功率和额定转矩分别为

$$s_N = (n_1 - n_N) / n_1 = 0.01, \quad f_{2N} = s_N f_{1N} = 0.5\text{ Hz}$$

$$P_N = \eta_N \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N = 2\,195\text{ W}, \quad T_N = 9\,550 \frac{P_N}{n_N} = 7.06\text{ N} \cdot \text{m}$$

8. 有 Y112M-2 型和 Y160M1-8 型异步电动机各一台,额定功率都是 4 kW,但前者转速为 2 890 r/min,后者转速为 720 r/min。试比较它们的额定转矩,并由此说明电动机的极数、转速及转矩三者之间的关系。

解 Y112M-2 的额定转矩为  $T_{2N} = 9\,550 \frac{4}{2\,890}\text{ N} \cdot \text{m} = 13.2\text{ N} \cdot \text{m}$

Y160M1-8 的额定转矩为  $T'_{2N} = 9\,550 \frac{4}{720}\text{ N} \cdot \text{m} = 53.1\text{ N} \cdot \text{m}$

可见,极数增加时,转速近于成比例下降,而转矩近于成比例增大。

9. 试说明三相异步电动机定子接额定电压,转子回路不串电阻的情况下,从空载启动到加上额定负载的过程中,其输出转矩、输出功率、电流、功率因数及效率等的变化规律。

解 空载启动时,输出转矩  $T_2 \approx 0$ ,转子电流  $I_2 \approx 0$ ,定子电流  $I_1 = I_0$  (励磁电流)很小,此时的功率因数  $\cos \varphi_1$  和效率  $\eta$  最低,输出功率  $P_2 = 0$ 。

随着负载增加直至额定负载的过程中,输出功率和输出转矩均越来越大,定子电流、转子电流也越来越大,  $I_1$  与  $I_2$  近似为正比关系;在接近额定负载时,功率因数及效率最高。

10. 已知 Y132S-4 型三相异步电动机的额定数据如表 5.2 所示。

表 5.2 Y132S-4 型异步电动机的额定数据

功率	转速	电压	效率	功率因数	$I_{st}/I_N$	$T_{st}/T_N$	$T_{max}/T_N$
5.5 kW	1 440 r/min	380 V	85.5%	0.84	7	2.2	2.2

电源频率为 50 Hz。求额定转差率  $s_N$ 、额定电流  $I_{1N}$ 、额定输出转矩  $T_{2N}$ 、启动电流  $I_{st}$ 、启动转矩  $T_{st}$ 、最大转矩  $T_{max}$ 。

解 (1)  $s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1\,500 - 1\,440}{1\,500} = 0.04$

(2)  $I_{1N} = \frac{P_{2N}}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi_N \eta_N} = \frac{5\,500}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.84 \times 0.855}\text{ A} = 11.64\text{ A}$

(3)  $T_N = 9\,550 \frac{P_{2N}}{n_N} = 9\,550 \frac{5.5}{1\,440}\text{ N} \cdot \text{m} = 36.48\text{ N} \cdot \text{m}$

(4)  $I_{st} = 7 I_{1N} = 7 \times 11.64\text{ A} = 81.48\text{ A}$

(5)  $T_{st} = 2.2 T_{2N} = 2.2 \times 36.48\text{ N} \cdot \text{m} = 80.26\text{ N} \cdot \text{m}$

(6)  $T_{max} = 2.2 T_{2N} = 80.26\text{ N} \cdot \text{m}$

11. Y180L-6 型电动机额定功率为 15 kW,额定转速为 970 r/min,频率为 50 Hz,最大转矩为 295.36 N·m。求电动机的过载系数。

解  $T_{2N} = 9\,550 \times \frac{P_{2N}}{n_N} = 9\,550 \times \frac{15}{970}\text{ N} \cdot \text{m} = 147.68\text{ N} \cdot \text{m}$

$$\lambda = \frac{T_{\max}}{T_{2N}} = \frac{295.36}{147.68} = 2.0$$

12. 有一带负载启动的短时运行的三相异步电动机, 折算到轴上的转矩为  $130 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 转速为  $730 \text{ r/min}$ , 试求电动机的功率(取过载系数  $\lambda=2$ )。

解 轴上转矩所对应的功率  $P_{\lambda} = \frac{T_{\lambda} n}{9550} = \frac{130 \times 730}{9550} \text{ kW} = 9.94 \text{ kW}$

电动机的实际铭牌功率  $P = P_{\lambda} / \lambda = 9.94 / 2 \text{ kW} = 4.97 \text{ kW}$  (理论值)

13. 已知一台三相异步电动机, 铭牌数据如下: 星形连接,  $P_N = 2.2 \text{ kW}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ ,  $n_N = 2970 \text{ r/min}$ ,  $\eta_N = 0.82$ ,  $\cos\varphi_N = 0.83$ 。试求此电动机的额定相电流、线电流及额定转矩, 并问这台电动机能否采用 Y/ $\Delta$  转换启动方法来减小启动电流? 为什么?

解  $I_1 = I_p = \frac{P_N}{\eta_N \sqrt{3} U_N \lambda_N} = 4.91 \text{ A}$

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 7.07 \text{ N} \cdot \text{m}$$

因为电动机在额定运行时的定子绕组为星形连接, 所以不能采用 Y/ $\Delta$  转换启动方法来降低启动电流。

14. 已知一台三相异步电动机, 铭牌数据如下: 三角形连接,  $P_N = 10 \text{ kW}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ ,  $I_N = 19.9 \text{ A}$ ,  $n_N = 1450 \text{ r/min}$ ,  $I_{st}/I_N = 7$ ,  $T_{st}/T_N = 1.4$ , 若负载转矩为  $25 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 电源允许最大电流为  $60 \text{ A}$ 。试问应采用直接启动还是 Y/ $\Delta$  转换启动?

解 由铭牌数据先求出额定转矩

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 65.86 \text{ N} \cdot \text{m}$$

直接启动:  $T_{st\Delta} = 1.4 T_N = 92.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,  $I_{st\Delta} = 7 I_N = 139.3 \text{ A}$

Y/ $\Delta$  转换启动:

$$T_{stY} = \frac{1}{3} T_{st\Delta} = 30.73 \text{ N} \cdot \text{m} > 25 \text{ N} \cdot \text{m}, \quad I_{stY} = \frac{1}{3} I_{st\Delta} = 46.4 \text{ A} < 60 \text{ A}$$

应采用 Y/ $\Delta$  转换启动。

15. 已知一台三相异步电动机, 其额定功率  $P_N = 7.5 \text{ kW}$ , 额定转速  $n_N = 1450 \text{ r/min}$ , 启动能力  $T_{st}/T_N = 1.4$ , 过载能力  $T_{\max}/T_N = 2$ , 试求该电动机的额定转矩、启动转矩和最大转矩。

解  $T_N = 9550 \times \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{7.5}{1450} \text{ N} \cdot \text{m} = 49.4 \text{ N} \cdot \text{m}$

$$T_{st} = 1.4 T_N = 1.4 \times 49.4 \text{ N} \cdot \text{m} = 69.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{\max} = 2 T_N = 2 \times 49.4 \text{ N} \cdot \text{m} = 98.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

16. 已知某台三相异步电动机在额定状态下运行, 转速  $n_N = 1430 \text{ r/min}$ , 电源频率  $f = 50 \text{ Hz}$ , 求磁极个数  $N$ 、额定转差率  $S_N$ 、额定运行时转子电动势的频率  $f_2$ 、额定运行时定子旋转磁场对转子的转速差。

解 因  $n_N = 1430 \text{ r/min}$ , 则  $n_1 = 1500 \text{ r/min}$ , 故磁极对数  $p=2$ , 磁极个数  $N=4$ 。

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1430}{1500} = 0.047$$

$$f_2 = s_N f_1 = 0.047 \times 50 \text{ Hz} = 2.35 \text{ Hz}$$

$$\Delta n = (1\,500 - 1\,430) \text{ r/min} = 70 \text{ r/min}$$

17. 已知一台三相异步电动机的转速  $n_N = 960 \text{ r/min}$ , 电源频率  $f = 50 \text{ Hz}$ , 转子电阻  $R_2 = 0.03 \, \Omega$ , 感抗  $X_{20} = 0.16 \, \Omega$ ,  $E_{20} = 25 \text{ V}$ , 试求额定转速下转子电路的  $E_2$ 、 $I_2$  及  $\cos\varphi_2$ 。

解 
$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1\,000 - 960}{1\,000} = 0.04, \quad E_2 = sE_{20} = 0.04 \times 25 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.03^2 + (0.04 \times 0.16)^2}} \text{ A} = 32.6 \text{ A}$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} = \frac{0.03}{\sqrt{0.03^2 + (0.04 \times 0.16)^2}} = 0.978$$

18. 已知一台三相异步电动机铭牌数据为:  $2.2 \text{ kW}$ ,  $220 \text{ V}/380 \text{ V}$ ,  $\Delta/\text{Y}$ ,  $1\,430 \text{ r/min}$ ,  $\cos\varphi = 0.81$ ,  $\eta_N = 0.80$ 。若额定负载时电网输入的电功率为  $2.75 \text{ kW}$ , 过载系数  $\lambda = 2.2$ , 试求: 两种接法时相电流和线电流的额定值及额定效率; 额定转矩和最大转矩。

解 (1) 
$$I_{1Y} = \frac{P_{2N}}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi_N \eta_N} = \frac{2\,200}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.81 \times 0.80} \text{ A} = 5.16 \text{ A}$$

$$I_{p\Delta} = 5.16 \text{ A}, \quad I_{l\Delta} = \sqrt{3}I_{p\Delta} = 5.16 \times \sqrt{3} \text{ A} = 8.94 \text{ A}$$

(2) 
$$T_N = 9\,550 \frac{P_{2N}}{n_N} = 9\,550 \times \frac{2.2}{1\,430} \text{ N} \cdot \text{m} = 14.7 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{\max} = 2.2T_N = 2.2 \times 14.7 \text{ N} \cdot \text{m} = 32.3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

19. 已知一台三相异步电动机, 部分额定数据如下:  $P_N = 10 \text{ kW}$ ,  $n_N = 1\,450 \text{ r/min}$ ,  $U_N = 380 \text{ V}$ ,  $\cos\varphi_N = 0.87$ ,  $\eta_N = 87.5\%$ ,  $I_{st}/I_N = 7$ ,  $T_{st}/T_N = 1.4$ ,  $T_m/T_N = 2$ , 试求: 额定转差率  $s_N$ ; 额定电流  $I_N$  和启动电流  $I_{st}$ ; 额定输入电功率  $P_1$ ; 额定转矩  $T_N$ 、最大转矩  $T_{\max}$  和启动转矩  $T_{st}$ ;  $\text{Y}/\Delta$  转换启动时的启动电流  $I_{stY}$  和启动转矩  $T_{stY}$ ; 负载转矩分别为额定转矩  $T_N$  的  $65\%$  和  $40\%$  时, 电动机能否启动?

解 (1) 
$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1\,500 - 1\,450}{1\,500} = 0.033$$

(2) 
$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi_N \eta_N} = \frac{10\,000}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.87 \times 0.875} \text{ A} = 20.0 \text{ A}$$

$$I_{st} = 7I_N = 7 \times 20.0 \text{ A} = 140.0 \text{ A}$$

(3) 
$$P_1 = P_N / \eta_N = 10 / 0.875 \text{ kW} = 11.43 \text{ kW}$$

(4) 
$$T_N = 9\,550 \frac{P_N}{n_N} = 9\,550 \times \frac{10}{1\,450} \text{ N} \cdot \text{m} = 65.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{st} = 1.4T_N = 1.4 \times 65.9 \text{ N} \cdot \text{m} = 92.3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{\max} = 2T_N = 131.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(5) 
$$I_{stY} = I_{st}/3 = 140.0/3 \text{ A} = 46.7 \text{ A}, \quad T_{stY} = T_{st}/3 = 92.3/3 \text{ N} \cdot \text{m} = 30.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(6) 
$$T_L = 0.65T_N = 0.65 \times 65.9 \text{ N} \cdot \text{m} = 42.84 \text{ N} \cdot \text{m} > T_{stY} \quad (\text{不能启动})$$

$$T_L = 0.40T_N = 0.40 \times 65.9 \text{ N} \cdot \text{m} = 26.36 \text{ N} \cdot \text{m} < T_{stY} \quad (\text{可以启动})$$

## 第6章 电气自动控制

### 6.1 要点总结

#### 6.1.1 常用低压电器

(1) 应用电动机去拖动各种机械设备,称为电力拖动,电力拖动控制主要是对电动机的启动、正反转、制动和调速等实行自动控制。

(2) 继电接触控制系统是采用继电器、接触器及按钮等电器实现对控制对象进行自动控制的系统,是传统的自动控制方式。

(3) 继电接触控制电路中常用的有触点的低压电器有刀开关、组合开关、行程开关、按钮、熔断器、接触器及各种用途的继电器,例如热继电器、中间继电器、时间继电器和速度继电器等。

熟悉常用控制电器的结构、原理、功能、图形与文字符号,达到灵活使用的目的。

#### 6.1.2 电动机继电接触控制的基本电路

(1) 三相异步电动机常用的基本控制电路有点动控制、直接启动单向连续运转控制、正反转控制和多地点控制等。任何复杂的电力拖动系统都是由一些简单的基本控制电路构成的。

(2) 继电接触控制电路中常用的基本保护功能有:用熔断器作短路保护,用热继电器作过载保护,用接触器作失压和欠压保护,也可用低压断路器同时作短路、过载、失压和欠压保护。

(3) 常用的控制原则(或方式)有行程控制、时间控制、速度控制和顺序控制。它们由相应参量的控制和保护电器实现自动控制、联锁控制或保护。

任何复杂的控制电路总是由简单的基本控制电路根据生产机械的控制要求按一定的控制原则(或方式)有机地组合而成的。因此,熟悉并掌握基本控制电路原理和各种控制原则(或方式),乃是提高阅读控制电路图的能力、设计简单控制电路的基础。

(4) 阅读控制电路电气原理图的基本方法和注意事项如下。

① 掌握电器元件的图形符号、文字符号和动作原理,是组成和分析控制电路的基础。有触点电器元件的触头动作顺序通常具有“先断后合”的特点,在分析控制电路时应充分注意这个特点。生产机械的技术说明书中,一般会给出该机械生产工艺流程、拖动电动机的工作顺序表、控制和保护要求等,这些资料对阅读控制电路图具有重要指导意义。若没有上述资料,则通过读图分析,搞清楚拖动电动机的动作顺序、控制和保护要求、控制电路功能和特点。这也是读图应解决的主要问题。

② 阅读时要搞清主电路电动机的数量,定子和转子线路的接线,控制和保护电器元件的名称、数量和接线,以初步搞清电动机的启动方法,有无正反转要求,有无调速或制动要求,具有哪些保护功能等。

③ 阅读控制电路时一般遵循自上而下的顺序,搞清各控制回路和控制功能和电动机的动作顺序。对控制系统的分析,先由主电路(控制目标)分析出主要控制目的;再由控制电路的启动按钮入手分析其控制过程;分析控制过程时,应以执行元件、继电器、接触器的工作状态为核心。

④ 控制电路主要由控制、保护电器的线圈和触头,按照电动机动作顺序、保护要求、控制原则(或方式)有机地组合而成。因此,读图的关键在于搞清线圈在什么条件下得电,在什么条件下失电,线圈得电或失电后,其触头是如何动作的(包括动作顺序和是否延时),对主电路电动机动作和其他控制回路电器线圈(包括自身线圈)得电或失电有何影响,对于没有线圈的电器元件,则应搞清其触头动作的原理和转换的条件。

⑤ 一个线圈得电的条件是其控制回路中所有串联的触头都闭合,失电的条件则是其控制回路中所有的串联触头最少有一个断开。若一个线圈得电需要同时满足两个或两个以上的条件,则可将有关的两个或两个以上的触头串联起来,执行与逻辑得电条件控制。若一个线圈得电需要满足两个或两个以上的条件中的一个条件就可以,则可将有关的两个或两个以上的触头并联起来,执行或逻辑得电条件控制。

⑥ 控制电路的第一个驱动信号,一般是由主令电器控制的。被控对象在完成第一个动作后,下一个动作的驱动可以是手控的,也可以是自控的,整个控制过程中,控制信号的传递是链式的。一般来说,一个接触器或继电器的线圈在整个控制过程中,可以多次得电和失电,但得电或失电必定是相间进行的,即线圈再次得电前,应先使它失电。

⑦ 中间继电器触头对数多,但其触头容量小,只有 1 kW 以下的电动机才允许用触点容量为 5 A 的中间继电器触头来直接控制。中间继电器一般用来作中间环节,对信号起放大作用。

⑧ 行程开关触头在控制电路原理图中是按“常态”画出的,但在实际工作时,其初始位置可能是压合的,即其常开触头实际是闭合的,而常闭触头是断开的,因而读图时应结合运动部件工位和其空间位置示意图来分析。

⑨ 一个复杂的控制电路通常都由多个基本控制电路组合而成,所以,读图时可采用先分解、后综合的分析方法。

⑩ 对于机电或液(或气)电或机液(或气)电配合较紧密的联合控制电路,只凭电气控制原理图往往还不能读懂其控制原理,此时还必须同时了解有关的机械传动或液(或气)压传动控制元件和系统的工作原理,将它们结合起来进行综合分析。

⑪ 对控制系统的设计问题,要先搞清控制要求(工艺要求),以确定电动机、接触器、继电器等主要设备、器件的数量;再设计主电路,主电路应考虑常规的短路、过载、零压与欠电压等保护措施;然后设计控制电路,控制电路图应基本按控制过程中动作的先后顺序,由左至右、由上至下平行绘制;最后应保证在出现常规事故和任意操作情况下,系统不会损坏。

以上读图方法和注意事项,同样适用于控制对象为其他类型用电设备的控制电路。

6.1.3 可编程控制器

可编程控制器(PLC)是以微处理器为核心,综合了计算机和自动控制等先进技术发展起来的一种工业控制器。它的应用深度和广度已成为一个国家工业自动化先进水平的重要标志。

PLC 的编程语言以梯形图语言和指令语句表最为常用。梯形图与继电器控制相似,是比较通用的编程语言,直观易懂。指令语句表是用指令助记符编制的程序语言,不同厂家生产的 PLC 的指令语句有差异。

6.2 例题解析

**例 6.1** 图 6.1 所示电路为某控制电路的一部分,其中时间继电器 KT(断电延时型)的动作时间整定为 7 s,SQ 为行程开关。试说明按下启动按钮 SB<sub>1</sub> 后接触器 KM<sub>1</sub> 何时通电动作?何时断电恢复常态?

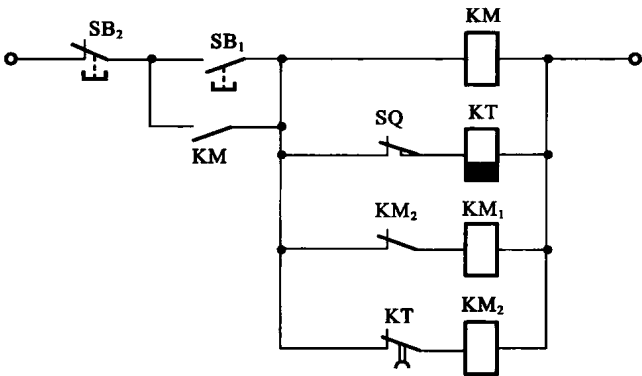


图 6.1

**解** 该题属于控制系统的分析问题,应从启动按钮 SB<sub>1</sub> 着手进行分析。

(1) 按下 SB<sub>1</sub> 后,KM 通电并自锁,同时 KT、KM<sub>1</sub> 通电动作。

(2) 在行程开关 SQ 断开后,KT 线圈断电,经 7 s 后 KT 延时触点闭合,接通 KM<sub>2</sub> 线圈,KM<sub>2</sub> 的常闭触点断开,KM<sub>1</sub> 断电恢复常态。

(3) SQ 再次闭合,KT 线圈再次被接通,其触点断开,KM<sub>2</sub> 断电,KM<sub>1</sub> 再次通电动作。

(4) KM<sub>1</sub> 如上述通、断交替运行,直至按 SB<sub>2</sub> 后全部断电。

该控制电路每当行程开关闭合时,KM<sub>1</sub> 就工作;SQ 断开经过 7 s 后,KM<sub>1</sub> 断电恢复常态。按停车按钮 SB<sub>2</sub> 停止工作。

**例 6.2** 试画出两台电动机顺序启停的控制电路,控制要求是:M<sub>1</sub> 启动后 M<sub>2</sub> 才能启动,M<sub>2</sub> 停车后 M<sub>1</sub> 才能停车,用接触器 KM<sub>1</sub> 控制 M<sub>1</sub>,KM<sub>2</sub> 控制 M<sub>2</sub>(不画主电路)。

**解** 该题属于三相异步电动机的控制系统的设计问题。按题中要求画出控制电路如图 6.2 所示。

**例 6.3** 图 6.3(a)所示的为一个不完整的起重电动机升降点动控制电路。该电路具有



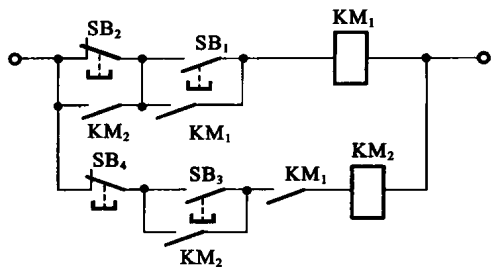


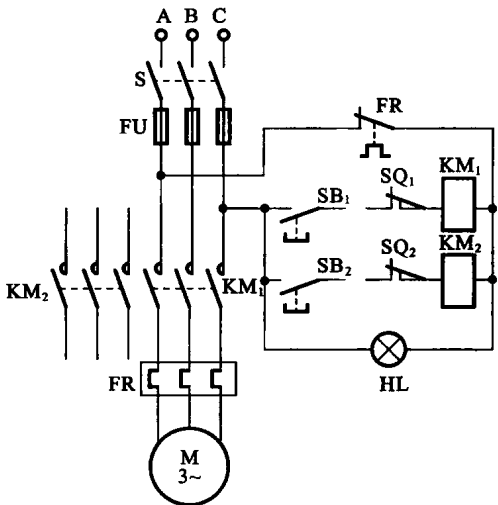
图 6.2

短路、过载和限位保护功能,且升降到位时能自动停车并有灯光显示。请将电路填补完整,并说明 SQ 元件的功能。

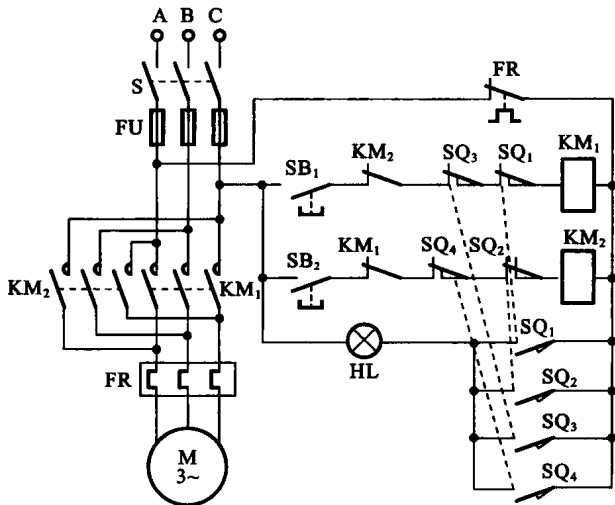
解 该题属于三相异步电动机控制系统的设计问题。

控制电路应具有正反转、限位、自动停车、灯光显示、互锁(联锁)等功能。完整的控制电路图如图 6.3(b)所示。

图中 SQ<sub>1</sub>、SQ<sub>2</sub> 为双向机械操作型的行程开关,作行程控制用,当起重机上升到位(设 SB<sub>1</sub> 为控制上升的按钮)时,将自动停止并使信号灯 HL 亮。SQ<sub>3</sub> 起限位保护作用,起重机一旦上升到该位置,就自动停止并使 HL 亮。SQ<sub>1</sub> 和 SQ<sub>3</sub> 实现双重限位保护作用。SB<sub>2</sub> 为下降按钮,下降过程由 SQ<sub>2</sub> 和 SQ<sub>4</sub> 双重限位。



(a)



(b)

图 6.3

例 6.4 图 6.4(a)所示的是三相异步电动机 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 按顺序启停的控制电路。要求 M<sub>1</sub> 启动后,隔一定时间 M<sub>2</sub> 自动投入运行,同时使 M<sub>1</sub> 停转,KT 断电。电路还应具有短路、过载、零压保护功能。请找出图中的错误,并画出正确的电路。

解 图中的错误:① 主电路缺熔断器、接触器的主触点和热继电器的热元件;② 控制电路缺热继电器的常闭触点;③ KM<sub>1</sub> 和 KM<sub>2</sub> 之间的联锁有错,KM<sub>2</sub> 缺自锁。

正确电路如图 6.4(b)所示。

例 6.5 设计一个异步电动机的控制电路,要求其具有如下功能:能实现正、反转长动控制;能实现正、反转点动控制;有过载、短路保护。

设定:SB<sub>1</sub>——正转长动;SB<sub>2</sub>——反转长动;SB<sub>3</sub>——正转点动;SB<sub>4</sub>——反转点动;SB<sub>5</sub>——停车。

解 答案示于图 6.5 中。

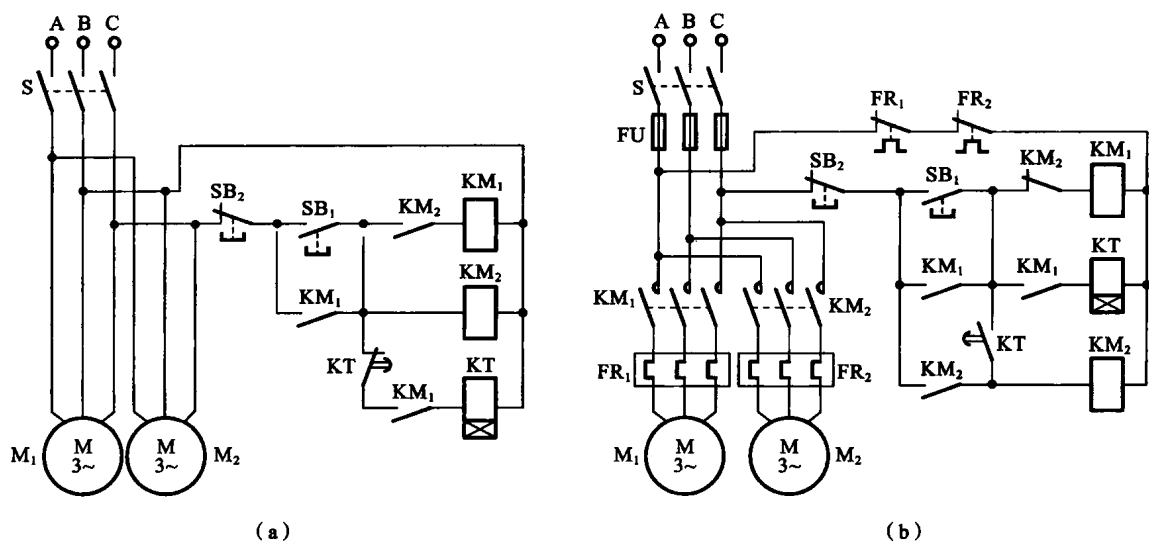


图 6.4

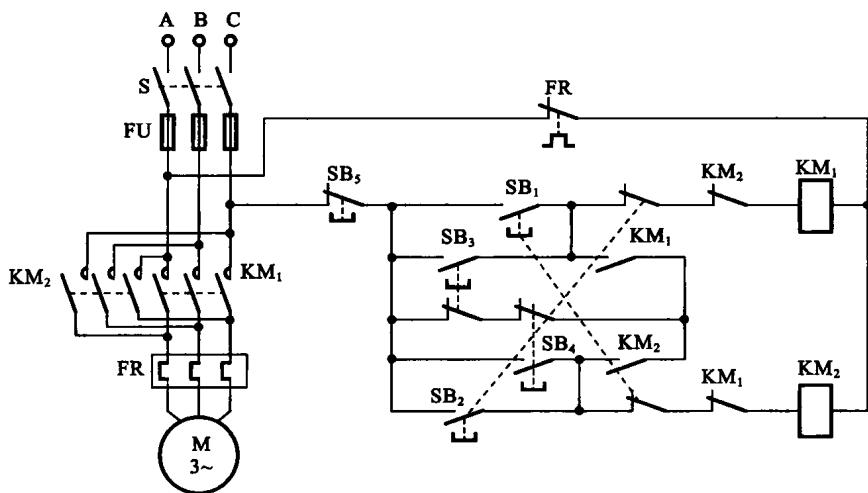


图 6.5

## 6.3 习题解答

### 6.3.1 填空题

1. 刀开关的文字符号是\_\_\_\_\_,刀开关具有隔离用电设备与\_\_\_\_\_的功能。(S, 电源)
2. 熔断器的文字符号是\_\_\_\_\_,熔断器具有\_\_\_\_\_保护的功能。(FU, 短路)
3. 按钮的文字符号是\_\_\_\_\_,按钮用于\_\_\_\_\_或实现电气联锁。(SB, 发布指令)
4. 交流接触器的文字符号是\_\_\_\_\_,是一种可频繁地接通和断开电路的\_\_\_\_\_电器。  
(KM, 控制)
5. 热继电器的文字符号是\_\_\_\_\_,热继电器具有\_\_\_\_\_保护的功能。(FR, 过载)

6. 中间继电器的文字符号是\_\_\_\_\_,在控制电路中起\_\_\_\_\_和传递信号的作用。  
(KA,扩展触点数量)

7. 时间继电器的文字符号是\_\_\_\_\_,时间继电器具有\_\_\_\_\_控制的功能。(KT,定时)

8. 速度继电器的文字符号是\_\_\_\_\_,通过速度继电器可实现\_\_\_\_\_控制。(KV,速度)

9. 行程开关的文字符号是\_\_\_\_\_,行程开关具有\_\_\_\_\_保护的功能。(SQ,限位)

10. 自锁环节应将 KM 的常开触点与\_\_\_\_\_按钮并联,位置控制不能缺少\_\_\_\_\_开关。  
(启动,行程)

11. 自锁环节应将 KM 的\_\_\_\_\_触点并联于启动按钮两端,自锁环节的功能是保证电动机控制系统启动后\_\_\_\_\_。(常开,连续运行)

12. 自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,利用控制装置对生产过程、\_\_\_\_\_,目标要求等进行\_\_\_\_\_控制,使之按照预定的方案达到要求的指标。(控制对象,检测)

13. PLC 一般由中央处理器、\_\_\_\_\_,输入/输出设备、电源及\_\_\_\_\_等组成。(存储器,编程器)

### 6.3.2 选择题

1. 采取适当措施降低三相笼形电动机的启动电流是为了( )。(B)

- A. 防止烧坏电动机                      B. 减小启动电流所引起的电网电压波动  
C. 防止烧断熔断丝                      D. 防止烧坏接触器

2. 在电动机的继电器接触器控制电路中,热继电器的功能是实现( )。(C)

- A. 短路保护              B. 零压保护              C. 过载保护              D. 时间控制

3. 在继电器接触器控制电路中,自锁环节触点的正确连接方法是( )。(A)

- A. 接触器的动合辅助触点与启动按钮并联  
B. 接触器的动合辅助触点与启动按钮串联  
C. 接触器的动断辅助触点与启动按钮并联  
D. 接触器的动断辅助触点与启动按钮串联

4. 在继电器、接触器控制电路中,自锁环节的功能是保证电动机控制系统( )。(B)

- A. 具有短路保护功能                      B. 保证启动后持续运行  
C. 具有点动功能                              D. 具有过载保护功能

5. 为使某工作台在固定的区间作往复运动,并能防止其冲出滑道,应当采用( )。  
(C)

- A. 时间控制                                      B. 速度控制或终端保护  
C. 行程控制或终端保护                      D. 安全保护

6. 当  $KM_1$  与  $KM_2$  形成互锁时,应将  $KM_1$  的( )触点串联于  $KM_2$  的控制回路中。  
(B)

- A. 常开                      B. 常闭                      C. 常开或常闭              D. 常开和常闭

7. 当  $KM_1$  与  $KM_2$  形成互锁时,应将  $KM_2$  的常闭触点串联于( )的控制回路中。  
(A)

- A.  $KM_1$                       B.  $KM_2$                       C. KT                              D. KA

8. 三相异步电动机的能耗制动控制电路必须有( )控制功能。(A)

A. 时间                      B. 位置                      C. 速度                      D. 过载保护

9. 控制电路如图 6.6 所示,控制电路的作用是( )。(A)

A.  $SB_1$  是点动按钮                      B. 按下  $SB_1$ ,接触器 KM 通电,并连续运行  
C.  $SB_2$  是点动按钮                      D. 当 KM 已经通电运行时,按  $SB_1$ ,KM 即断电

10. 控制电路如图 6.7 所示,控制电路在接通电源后将出现( )的现象。(B)

A. 按下  $SB_2$ ,接触器长期吸合                      B. 接触器线圈通断交替,造成触点不停地跳动  
C. 按下  $SB_1$ ,接触器长期吸合                      D. 按下  $SB_1$ ,接触器不能吸合

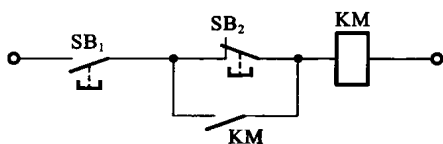


图 6.6

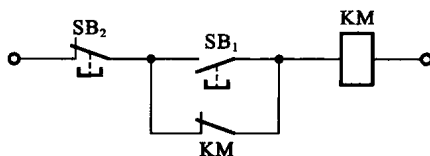


图 6.7

11. 控制电路如图 6.8 所示,接触器  $KM_1$  和  $KM_2$  均已通电。此时若按下  $SB_3$ ,试判断下面的结论哪个是正确的( )。(A)

A. 接触器  $KM_1$  和  $KM_2$  均断电停止运行  
B. 只有接触器  $KM_1$  断电停止运行  
C. 只有接触器  $KM_2$  断电停止运行  
D. 接触器  $KM_1$  和  $KM_2$  均不能断电停止运行

12. 控制电路如图 6.8 所示,接触器  $KM_1$  和  $KM_2$  均已通电动作。此时若按下  $SB_4$ ,试判断下面的结论哪个是正确的( )。(D)

A. 只有接触器  $KM_1$  断电停止运行                      B. 接触器  $KM_1$  和  $KM_2$  均断电停止运行  
C. 只有接触器  $KM_2$  断电停止运行                      D. 接触器  $KM_1$  和  $KM_2$  均不能断电停止运行

13. 控制电路如图 6.9 所示,接触器  $KM_1$  控制电动机  $M_1$ , $KM_2$  控制电动机  $M_2$ ,若要启动  $M_1$  和  $M_2$  运行,试判断下面的操作顺序哪个是正确的( )。(B)

A. 无限定操作顺序                      B. 先按  $SB_1$  启动  $M_1$ ,再按  $SB_2$  启动  $M_2$   
C. 先按  $SB_2$  启动  $M_2$ ,再按  $SB_1$  启动  $M_1$                       D. 先按  $SB_1$  启动  $M_2$ ,再按  $SB_2$  启动  $M_1$

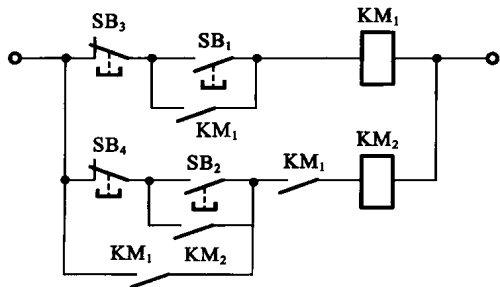


图 6.8

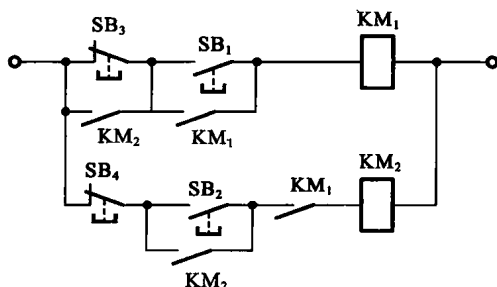


图 6.9

14. PLC 一般由主机、电源、编程器、扩展接口、( )和外部设备接口等组成。(A)

A. 输入/输出接口                      B. 串口                      C. 网卡                      D. 扫描仪

15. PLC 的扫描周期取决于( )。(D)

- A. CPU 执行指令的速度                      B. 每条指令占用的时间  
C. 指令程序的长短                            D. PLC 的扫描速度

16. PLC 通用的编程语言是( )。(A)

- A. 梯形图                                      B. 指令表(助记符)语言  
C. 布尔代数语言                              D. 流程图(SPC)语言

### 6.3.3 分析题

1. 什么是点动控制? 电动机的点动控制和单向连续运转在电路上有什么主要区别? 简述单向连续运转控制电路的工作过程。

答 (1) 点动控制: 当按下按钮时, 电动机通电运行; 松开按钮时, 电动机断电停转。

(2) 电动机的单向连续运转控制电路与点动控制电路比较, 该电路增加了接触器的一对动合辅助触点和一个停止按钮。

(3) 单向连续运转控制电路的工作过程: 先合上刀开关 S, 按下启动按钮  $SB_1$ , 接触器线圈通电, 其三对动合主触点闭合, 电动机运转, 同时其动合辅助触点也闭合, 这时即使松开启动按钮  $SB_1$ , 控制电路仍能通过动合辅助触点使线圈保持通电, 电动机可以连续运转。动合辅助触点的这种作用称为“自锁”, 动合辅助触点也称为“自锁触点”。需要停车时, 按下停止按钮  $SB_2$ , 即可切断控制电路, 使接触器的线圈断电, 主触点断开, 电动机断电停转。

2. 单向连续运转控制电路中有哪些保护? 这些保护作用由哪些电器实现? 用熔断器代替热继电器可否? 为什么?

答 单向连续运转控制电路中有过载保护, 由热继电器实现; 有短路保护, 由熔断器实现; 有失(或欠)电压保护, 由接触器实现。

不能用熔断器代替热继电器, 因为熔断器在电流达到一定值时瞬间熔断, 不能自行恢复。

3. 什么是自锁、互锁? 它们在控制电路中分别起什么作用?

答 (1) 自锁: 动合辅助触点在松开启动按钮时仍然保持线圈通电, 使电动机连续运转的功能称为自锁。

(2) 互锁: 两个接触器的动断辅助触点互相制约, 使两个接触器不能同时工作的功能称为互锁或联锁, 也称为电气互锁。

自锁是为了保持电动机连续运转, 互锁是为了防止两个接触器同时通电造成电源短路。

4. 怎样实现电动机的多地点控制?

答 只要把启动按钮并联, 停止按钮串联, 便可实现多地点控制。

5. 一个不完整的三相异步电动机正反转控制电路如图 6.10(a)所示, 该电路应具有短路、过载和正反转限位保护功能。主电路电压为 380 V, 控制电器的额定电压为 220 V。请将电路填补完整, 并注明图中文字符号所代表的元件名称。

解 完整的控制电路如图 6.10(b)所示。

元件名称: S 为刀开关; FU 为熔断器; KM 为交流接触器; FR 为热继电器; SQ 为行程开关; TC 为控制变压器; SB 为按钮。

6. 三相异步电动机  $M_1$  和  $M_2$  顺序启停控制电路如图 6.11(a)所示, 启停的顺序要求

第 6 章 电气自动控制

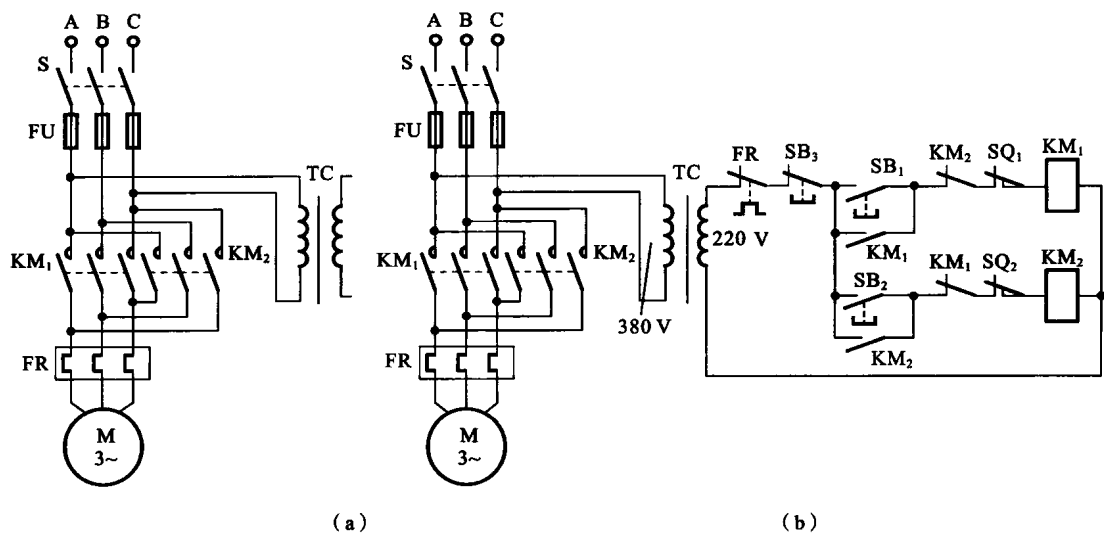


图 6.10

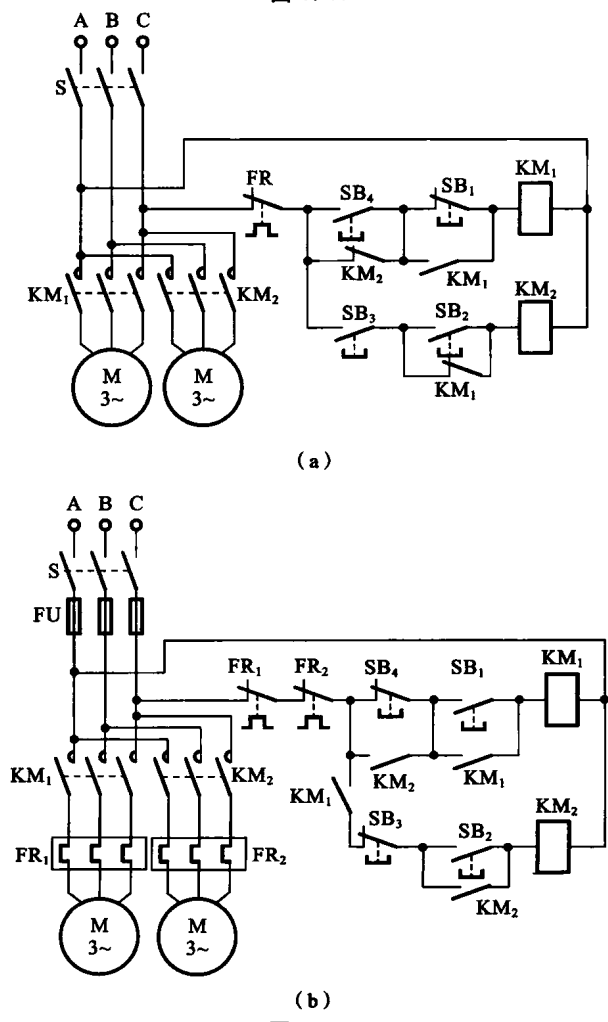


图 6.11

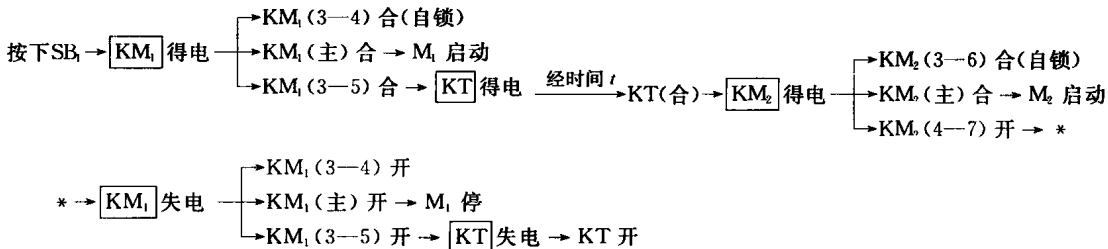
是： $M_1$  启动后才能启动  $M_2$ ，先停  $M_2$  才能停  $M_1$ ，还要求电路具有短路和过载保护功能。试检查电路中是否有错误，说明错在哪里，并画出正确的控制电路。

解 原图错误之处有：① 主电路中缺热继电器的发热元件；② 控制电路中应有  $FR_1$ 、 $FR_2$  两个常闭触点；③ 主电路中缺熔断器；④  $KM_1$ 、 $KM_2$  的自锁有错误；⑤ 缺少启动顺序联锁和停车顺序联锁；⑥  $SB_1$ 、 $SB_3$ 、 $SB_4$  的触点不对。

正确电路如图 6.11(b)所示。

7. 试分析图 6.12 所示电路的控制过程。

解 控制过程如下。



由上面的分析知， $M_1$  启动后经过一定时间  $t$  (由时间继电器整定时间)  $M_2$  自行启动， $M_2$  启动后  $M_1$  停转。

8. 图 6.13 所示电路为某控制电路的一部分，其中时间继电器  $KT$  的动作时间整定为 7 s，行程开关  $SQ_1$  和  $SQ_2$  联动，试说明按下  $SB_1$  后哪些电器通电，接触器  $KM_2$  何时通电动作，何时断电恢复常态。

解 (1) 按下  $SB_1$  后  $KT$ 、 $KM$ 、 $KM_2$  通电动作。

(2) 待  $SQ_1$  断开， $KT$  断电再经过 7 s 后， $KM_2$  断电恢复常态。

(3) 当  $SQ_1$  再闭合后  $KT$  和  $KM_2$  再次动作，并按上述情况  $KM_2$  通、断交替运行，直至按  $SB_2$  为止。

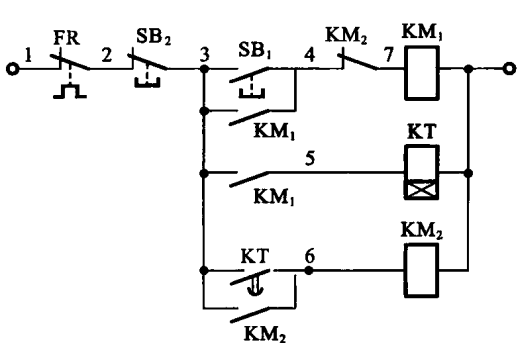


图 6.12

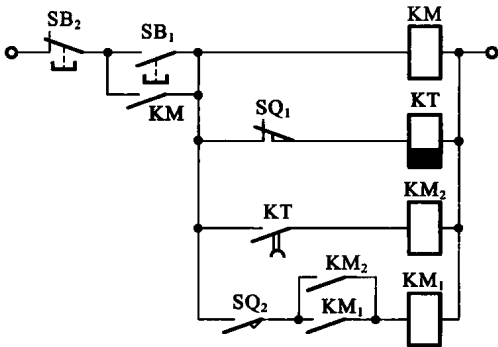


图 6.13

9. 图 6.14 所示的各电路有什么错误？会造成什么后果？应如何改正？

解 图 6.14(a)所示电路中自锁触点不能接在停止按钮上。这样接不能实现长动控制。改正办法是把  $KM$  辅助常开触点并接在启动按钮  $SB_1$  上。

图 6.14(b)所示电路中  $KM$  辅助触点不能跨接在  $SB_1$ 、 $SB_2$  两个按钮上，这种接法使停

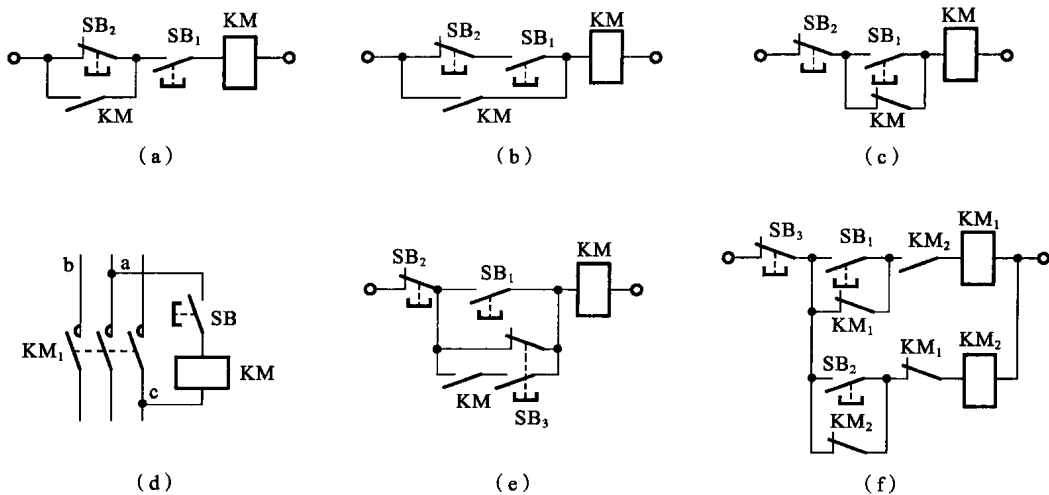


图 6.14

止按钮失去作用。改正办法是把 KM 辅助触点并接在启动按钮 SB<sub>1</sub> 上。

图 6.14(c)所示电路中自锁触点应是常开触点,不能用常闭触点,这样接会使 KM 线圈时而得电,时而失电,出现触点颤动现象。改正办法是把 KM 常闭触点换成 KM 常开触点。

图 6.14(d)所示电路中控制电路不能跨接在 KM 主触点上。如此接法,控制电路不能有电。改正办法是把 c 点改接到 b 点。

图 6.14(e)所示电路原本是一个既可长动,又可点动的控制电路。电路的错误是 KM 常开触点不应与 SB<sub>1</sub> 的常开触点串联,而应与 SB<sub>2</sub> 的常闭触点串联。这种接法使长动按钮 SB<sub>1</sub> 失去了作用。

图 6.14(f)所示电路的错误是接触器 KM<sub>1</sub> 支路中的互锁触点 KM<sub>2</sub> 用了常开触点,使得 KM<sub>1</sub> 线圈应得电时而不能得电。正确的接法是使用 KM<sub>2</sub> 的常闭触点。从另一个角度看,该控制电路是 KM<sub>2</sub>、KM<sub>1</sub> 顺序启动、运行,同时停止(失电)的控制电路。

10. 某机床自动间歇润滑油泵马达控制电路如图 6.15 所示,当接触器 KM 线圈得电时,油泵马达启动运转,失电时停转,KA 为中间继电器。在读懂控制电路工作原理基础上回答:

- (1) 延时触头 KT<sub>1</sub>、KT<sub>2</sub> 的名称是什么?
- (2) 油泵马达工作时间和休息时间各为多少?
- (3) 开关 S 和按钮 SB 的作用是什么?

解 (1) 延时触头 KT<sub>1</sub> 为延时断开的动合触头,延时触头 KT<sub>2</sub> 为延时闭合的动断触头。

(2) 油泵马达工作时间为 3 min、休息时间为 7 min。

(3) 开关 S 闭合后,油泵马达开始间歇工作;按住按钮 SB,油泵马达连续运转,否则间歇工作。

11. 试述图 6.16 所示控制电路的工作过程。

解 启动时,按 SB<sub>1</sub>,KM<sub>1</sub> 得电后,按 SB<sub>2</sub> 才能使 KM<sub>2</sub> 得电;停车时,按 SB<sub>3</sub>,KM<sub>1</sub>、KM<sub>2</sub> 都失电。



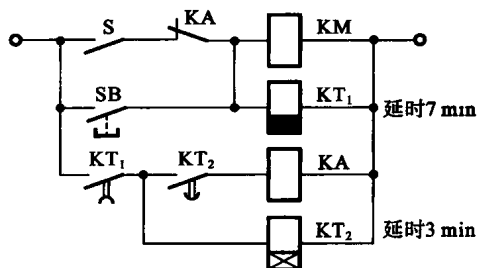


图 6.15

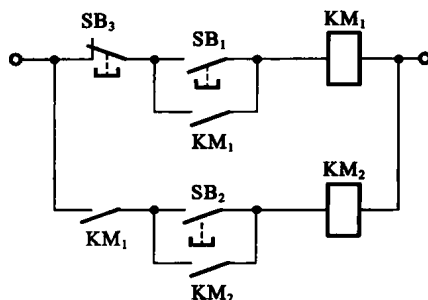


图 6.16

12. 三相异步电动机电磁抱闸控制电路如图 6.17 所示,图中 YA 是电磁抱闸的励磁线圈,通电后将闸瓦抱住电动机转轴,使电动机迅速停转。试分析该电路的工作过程。

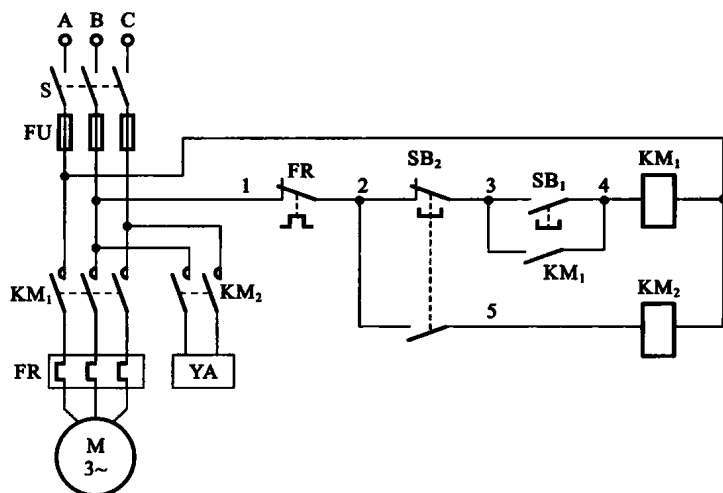


图 6.17

解 电动机的电磁抱闸制动属于机械制动,与电气制动(无机械摩擦)相比,它是靠机械摩擦使电动机停转的。其工作过程如下。

- (1) 启动:按下  $SB_1 \rightarrow [KM_1]$  得电
- $\rightarrow KM_1(3-4)$  合(自锁)
  - $\rightarrow KM_1(主)$  合  $\rightarrow M$  启动
- (2) 制动:按下  $SB_2$
- $\rightarrow SB_2(2-3)$  断  $\rightarrow [KM_1]$  失电
  - $\rightarrow KM_1(3-4)$  开
  - $\rightarrow KM_1(主)$  开  $\rightarrow M$  停(自由停车)
  - $\rightarrow SB_2(2-5)$  合  $\rightarrow [KM_2]$  得电  $\rightarrow KM_2(主)$  合  $\rightarrow [YA]$  得电  $\rightarrow$  对  $M$  产生机械制动

当松开  $SB_2$  时,  $KM_2$  失电,  $YA$  失电,制动结束。

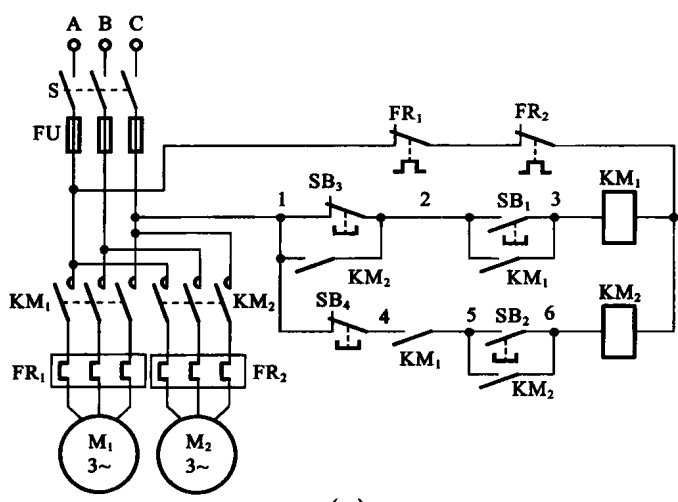
13. 试分析图 6.18(a)所示电路的控制功能,并说明电路的工作过程。

解 电路为顺序控制电路,按下  $SB_1$ ,电动机  $M_1$  先启动,再按  $SB_2$ ,电动机  $M_2$  后启动;按下  $SB_4$ ,电动机  $M_2$  先停车,再按  $SB_3$ ,电动机  $M_1$  后停车。

电路工作过程如图 6.18(b)所示。

14. 试画出小车可在  $a$ 、 $b$  两点之间往复运行(见图 6.19(a))的行程控制电路。

解 答案示于图 6.19(b)中。

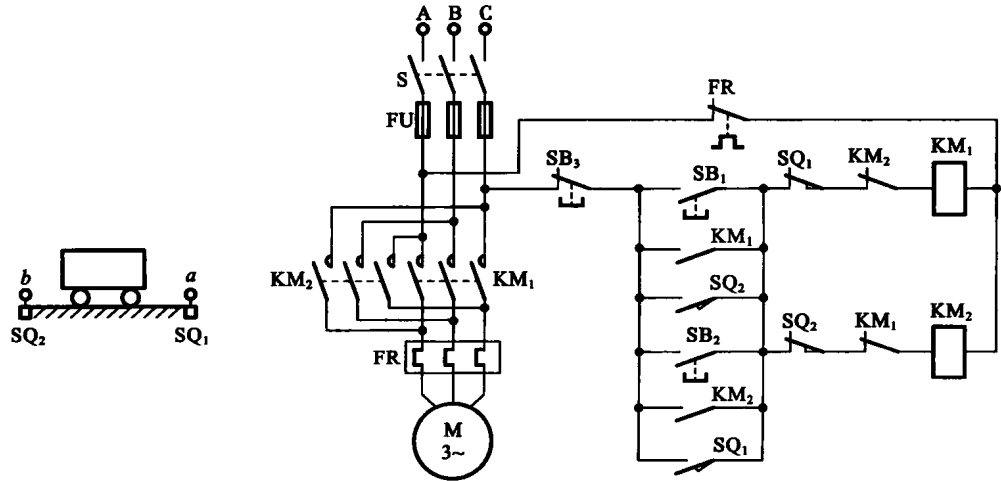


(a)

- (1) 启动:
- 按下SB<sub>1</sub> → KM<sub>1</sub> 得电
    - KM<sub>1</sub> (主) 合 → M<sub>1</sub>启动
    - KM<sub>1</sub> (2-3) 合 (自锁)
    - KM<sub>1</sub> (4-5) 合
  - 按下SB<sub>2</sub> → KM<sub>2</sub> 得电
    - KM<sub>2</sub> (主) 合 → M<sub>2</sub>启动
    - KM<sub>2</sub> (5-6) 合 (自锁)
    - KM<sub>2</sub> (1-2) 合
- (2) 停车:
- 按下SB<sub>4</sub> → KM<sub>2</sub> 失电
    - KM<sub>2</sub> (主) 开 → M<sub>2</sub>停
    - KM<sub>2</sub> (5-6) 开 (解除自锁)
    - KM<sub>2</sub> (1-2) 开
  - 按下SB<sub>3</sub> → KM<sub>1</sub> 失电
    - KM<sub>1</sub> (主) 开 → M<sub>1</sub>停
    - KM<sub>1</sub> (2-3) 开 (解除自锁)
    - KM<sub>1</sub> (4-5) 开

(b)

图 6.18



(a)

(b)

图 6.19

15. 试设计两台电动机顺序启动、同时停止的控制电路。

解 答案示于图 6.20 中。

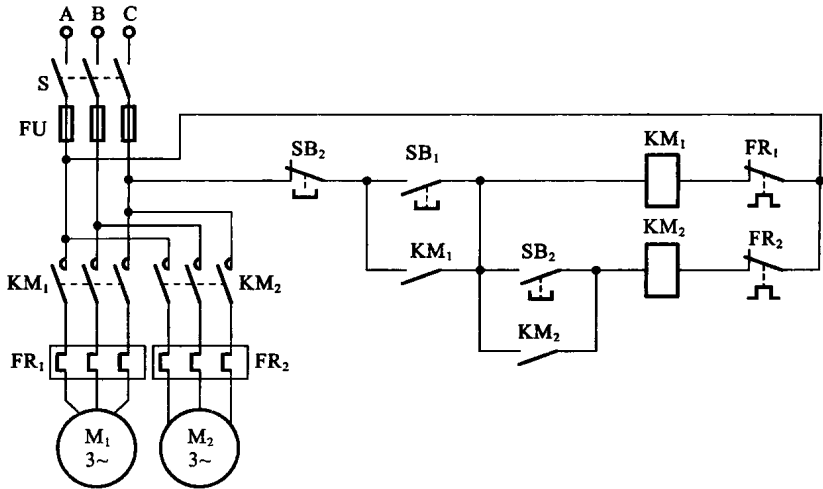


图 6.20

16. 比较 PLC 控制系统和继电接触控制系统的优缺点。

答 传统的继电接触控制系统在生产实践中得到广泛应用,但由于它是通过电器元件的固定接线来实现控制的,一旦生产过程改变,要改变控制作用必须重新设计电路并重新连接电路,因此,这种继电接触控制系统通用性、灵活性较差。

PLC 控制系统是从继电接触控制系统发展而来的,它将计算机和继电接触控制系统结合起来,用计算机的程序代替传统的继电接触控制系统的“硬”线连接,是一种专为工业环境应用而设计的专用计算机。

PLC 采用可以编制程序的存储器,用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作指令,并通过数字或模拟的输入和输出,控制各种类型的机械或生产过程。

17. 梯形图与传统的继电接触控制电气原理图相比,有何异同点?

答 梯形图是从继电接触控制系统电气原理图演变而来的图形语言。它用类似于继电器的动合触点、动断触点、线圈及串联与并联等术语和符号,根据控制要求连接而成,可以表示输入和输出之间的逻辑关系。

(1) 梯形图中的某些编程元件虽然沿用了继电器的名称,也有动合触点和动断触点,但它们不是“硬”继电器,而是 PLC 存储器的存储单元。也就是说,梯形图中与输入/输出设备相连的输入触点和输出线圈不是物理触点和线圈,它们的状态由 PLC 内部的输入/输出状态映像寄存器相应区的内容决定,与现场开关的实际状态有时并不相同(例如现场 PLC 输入端的停止按钮接成动断按钮时)。

(2) 梯形图中每个梯级流过的不是物理电流,而是“概念电流”,且其方向只能从左向右。这个“概念电流”只是用来形象地表示程序中线圈接通的条件。

(3) 输入继电器只接收外部输入信号(如按钮),不能由 PLC 内部其他继电器来驱动。因此梯形图中只出现输入继电器的触点,而不出现其线圈。输出继电器输出执行结果给外部设备。当输出继电器线圈接通时,就有信号输出,但不能直接驱动输出设备,而要通过输

出接口的“硬”继电器、电磁阀等实现。

18. 写出图 6.21 所示梯形图的指令语句表。

解 图 6.21 所示梯形图对应的指令语句表如表 6.1 所示。

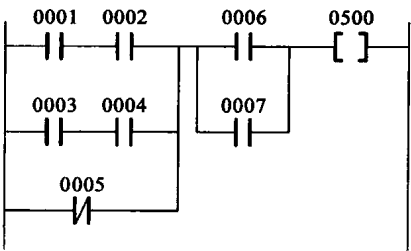


图 6.21

表 6.1 指令语句表

序号	指令	
0	LD	0001
1	AND	0002
2	LD	0003
3	AND	0004
4	OR LD	
5	OR NOT	0005
6	AND	0006
7	OR	0007
8	OUT	0500
9	END(01)	

19. 根据表 6.2 所列指令语句绘制梯形图。

解 根据表 6.2 所列指令语句绘制的梯形图如图 6.22 所示。

表 6.2 指令语句表

序号	指令		序号	指令	
0	LD	0001	7	OR	0006
1	AND NOT	0002	8	LD	0007
2	LD NOT	0003	9	OR	0008
3	AND	0004	10	AND LD	
4	OR LD		11	OUT	0501
5	OUT	0500	12	END(01)	
6	LD	0005			

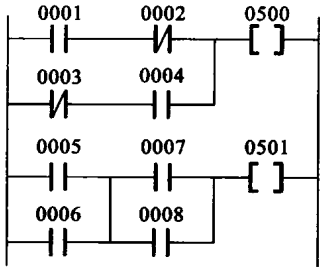


图 6.22

20. 绘制图 6.18 所示电路的梯形图。

解 根据图 6.18 所示电路,I/O 点分配表如表 6.3 所示,相应的梯形图如图 6.23 所示。

表 6.3 I/O 点分配

输入		输出	
启动按钮 SB <sub>1</sub>	0001	KM <sub>1</sub>	0500
启动按钮 SB <sub>2</sub>	0002	KM <sub>2</sub>	0501
停止按钮 SB <sub>3</sub>	0003		
停止按钮 SB <sub>4</sub>	0004		

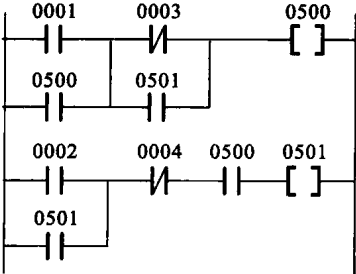


图 6.23

# 第 7 章 半导体器件

## 7.1 要点总结

### 7.1.1 N 型半导体和 P 型半导体

#### 1. 半导体

半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)等。它们都是四价元素。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。在外界温度升高、光照或掺入微量的杂质元素时,其导电性能显著增强。

#### 2. N 型半导体

在纯净半导体材料中掺入微量的磷、砷等五价元素,电子浓度大大增加,这种掺杂后的半导体主要靠自由电子导电,称为 N 型半导体,其中自由电子为多数载流子,激发形成的空穴为少数载流子。

#### 3. P 型半导体

在纯净半导体材料中掺入硼、铝等三价元素,空穴浓度大大增加,这类掺杂后的半导体主要靠空穴运动导电,称为 P 型半导体,其中空穴为多数载流子,激发形成的自由电子为少数载流子。

在两种半导体中多数载流子的数量取决于掺入杂质的浓度,少数载流子由本征激发产生,数量取决于外界温度。尽管杂质半导体中两种载流子的浓度不同,但是整体上电量平衡,整块杂质半导体仍呈电中性。

### 7.1.2 PN 结的单向导电性

#### 1. PN 结的形成

如果采取一定的工艺措施将两种杂质半导体紧密结合,则在交界处,由于载流子浓度不同,多数载流子扩散到对方并复合掉,使得交界处留下带电的正、负离子,在交界面两侧形成空间电荷区,称为 PN 结,如图 7.1(a)所示。PN 结及其内电场如图 7.1 所示。

内电场对多数载流子的扩散运动有阻碍作用,但有助于少数载流子的漂移运动。当扩

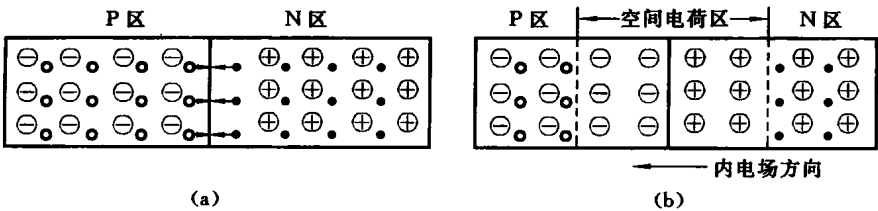


图 7.1

散运动与漂移运动达到动态平衡时,PN结的厚度一定,处于相对稳定的状态。

## 2. PN结的单向导电性

(1) 正向 在PN结两端加上正向电压,如图7.2(a)所示。外电场削弱了内电场,使空间电荷区变薄,扩散运动增强。PN结两侧的多数载流子能顺利地通过PN结,形成较大的正向电流,PN结呈现低阻状态,称为正向导通。

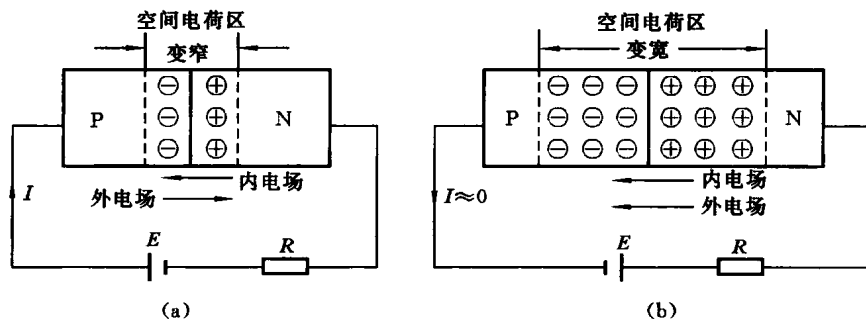


图 7.2

(2) 反向 在PN结两端加上反向电压,如图7.2(b)所示。外电场方向加强内电场,空间电荷区变宽,少数载流子的漂移运动增强。由于常温下少数载流子数量很少,能形成的反向电流很小,PN结呈高阻状态,称为反向截止。

## 7.1.3 半导体二极管及其应用

### 1. 伏安特性

二极管伏安特性曲线如图7.3所示。硅管的死区电压约为0.5V,锗管的约为0.1V。在正向电压超过死区电压后,内电场将大大削弱,电流迅速增大,二极管导通。导通后的二极管端电压变化很小,基本上是一个常量。硅管的正向压降为0.6~0.7V,锗管的为0.2~0.3V。

反向电流很小,且基本上不随反向电压变化而变化,常称为反向饱和电流。当外加反向电压增大超过反向击穿电压 $U_{BR}$ 时,发生击穿,二极管失去单向导电性。

### 2. 主要参数

最大整流电流 $I_{OM}$ :二极管长期使用时允许通过的最大正向平均电流。

反向工作峰值电压 $U_{RWM}$ :二极管使用时允许加的最大反向电压。通常取反向击穿电压 $U_{BR}$ 的1/2作为 $U_{RWM}$ 。

反向峰值电流 $I_{RM}$ :二极管加上反向工作峰值电压时的反向电流值,受温度的影响大。该值越小,二极管的单向导电性越好。

### 3. 二极管的应用

二极管的应用范围很广,主要都是利用它的单向导电性,可用于整流、检波、限幅、元件

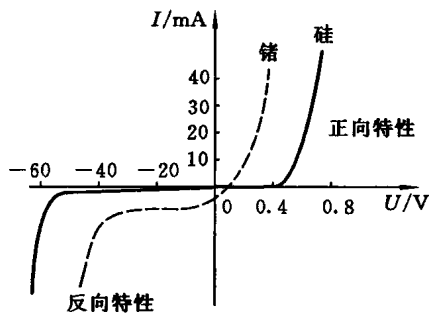


图 7.3

保护,也可在脉冲与数字电路中作为开关元件等。

### 7.1.4 稳压二极管

#### 1. 稳压管的伏安特性

稳压二极管是一种特殊的硅二极管,稳压管的伏安特性曲线与普通二极管的类似,如图 7.4(a)所示,反向特性曲线比较陡。稳压管正常工作于反向击穿区,它的反向击穿是可逆的。当稳压管工作于反向击穿区时,电流虽然在很大范围内变化,但稳压管两端的电压变化很小,它能起稳压的作用。稳压管的图形符号如图 7.4(b)所示。

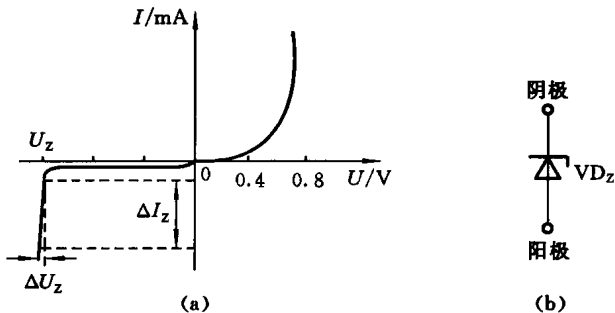


图 7.4

#### 2. 稳压管的主要参数

稳定电压  $U_Z$ :稳压管在正常工作时稳压管两端的电压,也就是它的反向击穿电压。

稳定电流  $I_Z$ :稳压管工作电压等于稳定电压  $U_Z$  时的电流。它是稳压管正常工作时的最小电流值,为使稳压管工作在稳压区,稳压管中的电流应大于  $I_Z$ ,小于最大稳定电流  $I_{ZM}$ 。

最大允许耗散功率  $P_{ZM}$ :稳压管不致发生热击穿的最大功率损耗,即

$$P_{ZM}=U_Z I_{ZM}$$

#### 3. 应用

稳压管在电路中的主要作用是稳压和限幅,也可和其他电路配合构成欠压或过压保护、报警环节等。

### 7.1.5 晶体管

#### 1. 晶体管的结构

晶体管分为 NPN 型和 PNP 型两种类型。

- (1) 发射区的掺杂浓度大,以保证有足够的载流子可供发射。
- (2) 集电区的面积大,以便收集从发射区发射来的载流子。
- (3) 基区做得很薄,且掺杂浓度低,以减小基极电流,即增强基极电流的控制作用。

#### 2. 晶体管的电流放大作用

为了实现电流放大作用,电源接法为:发射结正向偏置,集电结反向偏置。如图 7.5 所示的为 NPN 型晶体管的电源接法。晶体管 3 个电极的电位关系是  $V_C > V_B > V_E$ 。

由晶体管的结构特点决定了  $I_B$  远小于  $I_E$  和  $I_C$ ,控制基极回路的小电流  $I_B$  即能实现对

集电极回路的大电流  $I_C$  的控制,这就是晶体管的电流放大作用。

3. 晶体管的特性曲线

晶体管的输入特性曲线  $I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE}=\text{常数}}$  与二极管的正向特性曲线相似。晶体管输入特性也有死区,硅管死区电压约为 0.5 V,锗管的约为 0.1 V。晶体管导通时,NPN 型硅管发射结电压  $U_{BE}=0.6\sim 0.7\text{ V}$ ,PNP 型锗管的  $U_{BE}=-0.3\sim -0.2\text{ V}$ 。

输出特性曲线  $I_C = f(U_{CE})|_{I_B=\text{常数}}$  如图 7.6 所示。在不同的基极电流  $I_B$  值下,输出特性曲线是一簇曲线。通常把输出特性曲线分为放大区、截止区和饱和区三个工作区。

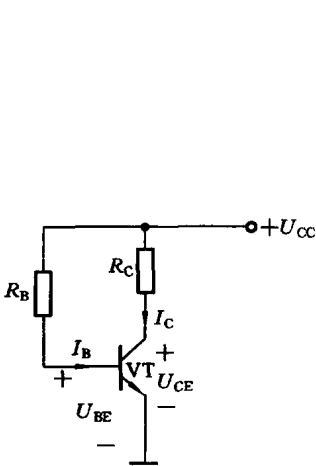


图 7.5

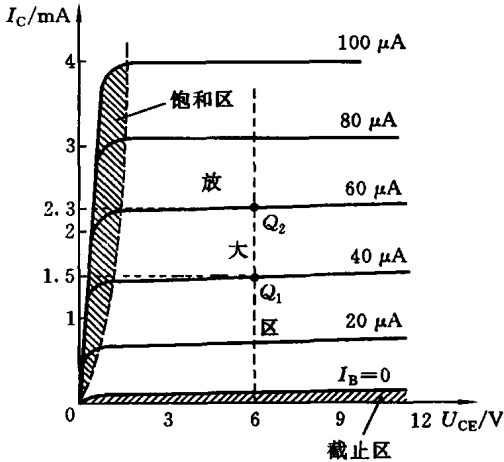


图 7.6

1) 放大区

输出特性曲线近于水平的部分是放大区。 $I_C = \bar{\beta}I_B$ ,当  $I_B$  固定时, $I_C$  基本不变,具有恒流的特性;当  $I_B$  变化时, $I_C$  也有相应的变化,表明  $I_C$  是受  $I_B$  控制的受控源。晶体管工作于放大状态时,发射结处于正向偏置,集电结处于反向偏置。

2) 截止区

$I_B=0$  这条曲线及以下的区域为截止区。 $I_B=0$  时, $I_C \approx 0, U_{CE} \approx U_{CC}$ 。对于 NPN 型管而言,当  $U_{BE} < 0.5\text{ V}$  时,即已开始截止,但是为了截止可靠,常使  $U_{BE} < 0$ ,此时两个 PN 结均为反向偏置。

3) 饱和区

靠近纵坐标,特性曲线的上升和弯曲部分所对应的区域称为饱和区。在饱和区, $U_{CE} < U_{BE}$ ,集电结处于正向偏置。在饱和区, $I_C$  不随  $I_B$  的增大而成比例地增大,晶体管失去了线性放大作用,故称为饱和。此时,发射结也处于正向偏置。

4. 晶体管的主要参数

1) 电流放大系数  $\bar{\beta}$  和  $\beta$

静态电流(直流)放大系数  $\bar{\beta} \approx \frac{I_C}{I_B}$

动态电流(交流)放大系数  $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$



2) 集-基极反向截止电流  $I_{\text{CBO}}$ 、集-射极反向截止电流  $I_{\text{CEO}}$

两者均随温度增高而增大,影响电路工作。其关系为

$$I_{\text{CEO}} = \beta I_{\text{CBO}} + I_{\text{CBO}} = (1 + \beta) I_{\text{CBO}}$$

3) 集电极最大允许电流  $I_{\text{CM}}$

在  $I_{\text{C}}$  的一个很大范围内,  $\beta$  基本不变, 在  $I_{\text{C}}$  超过一定数值之后,  $\beta$  将明显下降。  $\beta$  下降到正常数值的  $2/3$  时的集电极电流为集电极最大允许电流  $I_{\text{CM}}$ 。

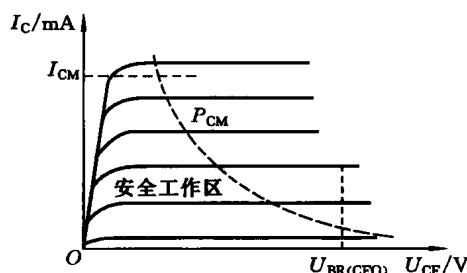


图 7.7

4) 集-射极反向击穿电压  $U_{(\text{BR})\text{CEO}}$

$U_{(\text{BR})\text{CEO}}$  是指基极开路时, 集电极与发射极之间的最大允许电压。

5) 集电极最大允许耗散功率  $P_{\text{CM}}$

$$P_{\text{CM}} = I_{\text{C}} U_{\text{CE}}$$

由  $I_{\text{CM}}$ 、 $U_{(\text{BR})\text{CEO}}$  和  $P_{\text{CM}}$  三个极限参数共同确定晶体管的安全工作区, 如图 7.7 所示。

## 7.1.6 场效应晶体管

### 1. 场效应晶体管的结构类型

场效应管分为结型和绝缘栅型两种。绝缘栅型场效应管便于集成, 又称为金属-氧化物-半导体场效应管, 简称 MOS 场效应管。MOS 场效应管可分为 N 沟道和 P 沟道两类, 每类又有增强型和耗尽型之分。N 沟道和 P 沟道的区别只是电源极性相反。

### 2. 场效应晶体管的特性

MOS 场效应管由  $U_{\text{GS}}$  来控制“感应电荷”的多少, 改变由这些“感应电荷”形成的导电沟道的状况, 以达到控制漏极电流  $I_{\text{D}}$  的目的。

$$I_{\text{D}} = I_{\text{DSS}} \left( 1 - \frac{U_{\text{GS}}}{U_{\text{GS(off)}}} \right)^2$$

## 7.2 实例解析

**例 7.1** 在如图 7.8(a) 所示的电路中,  $U_{\text{S1}} = U_{\text{S2}} = 12 \text{ V}$ , 二极管的正向压降为  $0.7 \text{ V}$ , 在下述条件下判断二极管的通断情况, 并求出二极管导通时流过的电流:

(1)  $R_1 = 4 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 6 \text{ k}\Omega$ ;

(2)  $R_1 = R_2 = 6 \text{ k}\Omega$ ;

(3)  $R_1 = 6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 4 \text{ k}\Omega$ 。

**解** (1) 用戴维南定理将电路化简为图 7.8(c) 所示等效电路。

等效电源的电动势  $E$  可由图 7.8(b) 求得

$$I_1 = \frac{U_{\text{S1}} + U_{\text{S2}}}{R_1 + R_2} = \frac{12 + 12}{4 + 6} \text{ mA} = 2.4 \text{ mA}$$

$$E = U_{\text{abo}} = U_{\text{S1}} - I_1 R_1 = (12 - 2.4 \times 4) \text{ V} = 2.4 \text{ V}$$

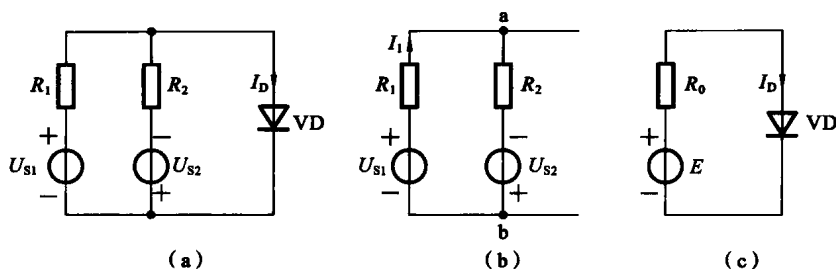


图 7.8

等效电源的内阻  $R_0$  为

$$R_0 = R_1 // R_2 = 2.4 \Omega$$

则二极管正偏, 导通,  $I_D = \frac{2.4 - 0.7}{2.4} \text{ mA} = 0.71 \text{ mA}$ 。

$$(2) \quad I_1 = \frac{U_{S1} + U_{S2}}{R_1 + R_2} = \frac{12 + 12}{6 + 6} \text{ mA} = 2 \text{ mA}$$

$$E = U_{abo} = U_{S1} - I_1 R_1 = (12 - 2 \times 6) \text{ V} = 0 \text{ V}$$

则二极管零偏, 不导通,  $I_D = 0$ 。

$$(3) \quad I_1 = \frac{U_{S1} + U_{S2}}{R_1 + R_2} = \frac{12 + 12}{6 + 4} \text{ mA} = 2.4 \text{ mA}$$

$$E = U_{abo} = U_{S1} - I_1 R_1 = (12 - 2.4 \times 6) \text{ V} = -2.4 \text{ V}$$

则二极管反偏, 不导通,  $I_D = 0$ 。

**例 7.2** 电路如图 7.9 所示, 二极管均为理想元件, 输出电压  $u_o$  为多少?

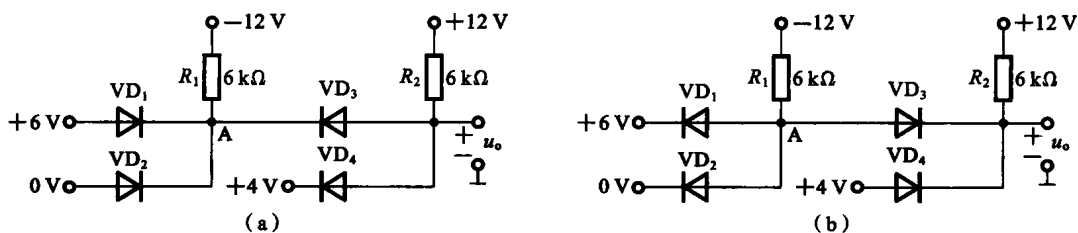


图 7.9

**解** (1) 图 7.9(a) 中二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$  为共阴极接法,  $VD_1$  阳极电位高, 优先导通,  $u_A = 6 \text{ V}$ ,  $VD_2$  截止。二极管  $VD_3$ 、 $VD_4$  为共阳极接法,  $VD_4$  阴极电位低, 优先导通,  $u_o = 4 \text{ V}$ ,  $VD_3$  截止。

(2) 图 7.9(b) 中二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$  为共阳极接法, 均承受反向电压,  $VD_1$ 、 $VD_2$  截止。二极管  $VD_3$ 、 $VD_4$  为共阴极接法, 均承受反向电压,  $VD_3$ 、 $VD_4$  截止,  $u_o = 12 \text{ V}$ 。

**例 7.3** 电路如图 7.10(a) 所示, 二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$  为理想元件,  $u_i = 10 \sin(\omega t) \text{ V}$ , 如图 7.10(b) 所示, 说明电路的工作情况, 绘出输出电压  $u_o$  的波形。

**解**  $u_i$  正半周:  $VD_2$  反偏, 截止。

当  $u_i < 5 \text{ V}$  时,  $VD_1$  截止,  $u_o = u_i$ 。

当  $u_i > 5 \text{ V}$  时,  $VD_1$  导通,  $u_o = U_{S1} = 5 \text{ V}$ ,  $VD_1$  正半周限幅。

$U_i$  负半周:  $VD_1$  截止。

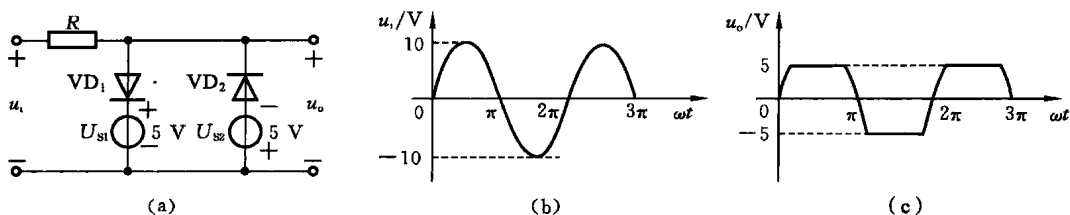


图 7.10

当  $u_i > -5 \text{ V}$  时,  $\text{VD}_2$  截止,  $u_o = u_i$ 。

当  $u_i < -5 \text{ V}$  时,  $\text{VD}_2$  导通,  $u_o = -U_{S2} = -5 \text{ V}$ ,  $\text{VD}_2$  负半周限幅。

输出电压  $u_o$  的波形如图 7.10(c) 所示。

**例 7.4** 稳压管电路如图 7.11 所示, 设  $\text{VD}_{Z1}$  的稳定电压为  $6 \text{ V}$ ,  $\text{VD}_{Z2}$  的稳定电压为  $8 \text{ V}$ , 设稳压管的正向压降为  $0 \text{ V}$ , 试分析输出电压  $U_o$  与输入电压  $U_i$  的关系, 画出  $-10 \text{ V} \leq U_i \leq 10 \text{ V}$  范围内的传输特性曲线  $U_o = f(U_i)$ 。

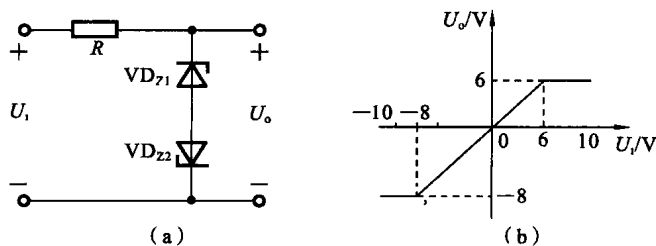


图 7.11

**解** 当  $U_i \geq 6 \text{ V}$  时,  $\text{VD}_{Z1}$  反向击穿,  $U_o = 6 \text{ V}$ 。

当  $U_i \leq -8 \text{ V}$  时,  $\text{VD}_{Z2}$  反向击穿,  $U_o = -8 \text{ V}$ 。

当  $-8 \text{ V} < U_i < 6 \text{ V}$  时,  $\text{VD}_{Z1}$  或  $\text{VD}_{Z2}$  反向截止,  $U_o = U_i$ 。

$U_o = f(U_i)$  曲线如图 7.11(b) 所示。

**例 7.5** 稳压管电路如图 7.12(a) 所示, 设  $\text{VD}_Z$  的稳定电压为  $6 \text{ V}$ , 稳压管的正向压降为  $0 \text{ V}$ , 试分析输出电压  $U_o$  与输入电压  $U_i$  的关系, 画出  $0 \text{ V} \leq U_i \leq 18 \text{ V}$  范围内的传输特性曲线  $U_o = f(U_i)$ 。

**解** 当  $U_i \geq 6 \text{ V}$  时,  $\text{VD}_Z$  反向击穿,  $U_o = U_i - 6 - 6 = U_i - 12$ 。

当  $0 \text{ V} < U_i < 6 \text{ V}$  时,  $\text{VD}_Z$  反向截止,  $U_o = -U_i$ 。

$U_o = f(U_i)$  曲线如图 7.12(b) 所示。

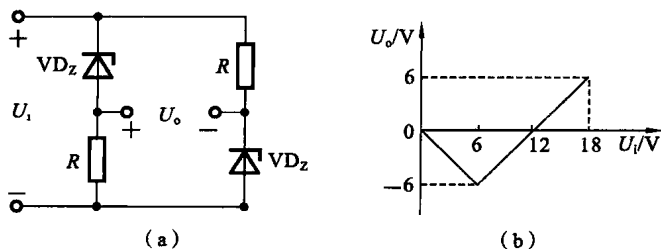


图 7.12

**例 7.6** 用直流电压表测得电路中工作在放大区的晶体管 3 个极的电位分别如下。  
 $VT_1$ : ① 5 V, ② -3.3 V, ③ -4 V。  $VT_2$ : ① 5 V, ② 4.7 V, ③ -5 V。试判定晶体管 3 个极的名称, 并说明是什么材料和类型的晶体管。

**解** 处于放大状态下的晶体管, 无论 PNP 型还是 NPN 型, 基极电位总是处于中间值, 首先可判断出基极。发射结正偏电压, 对硅管为 0.6~0.7 V, 对锗管为 0.2~0.3 V。集电结电压一般为若干伏数量级, 据此判断另外两电极哪个是集电极, 哪个是发射极。

对 NPN 型管, 集电极电位  $V_C$  最高, 且  $U_{BF} > 0$ , 即  $V_C > V_B > V_E$ 。对 PNP 型管, 集电极电位  $V_C$  最低, 且  $U_{BF} < 0$ , 即  $V_C < V_B < V_E$ 。

所以,  $VT_1$ : ① c 极 ② b 极 ③ e 极, NPN 型硅管。  $VT_2$ : ① e 极 ② b 极 ③ c 极, PNP 型锗管。

**例 7.7** 电路如图 7.13 所示, 晶体管  $U_{BE} = 0.6$  V,  $\beta = 50$ , 试分析晶体管工作在何种工作状态。

**解** 用戴维南定理将电路化简为等效电路, 如图 7.14 所示。

$$U_1 = \left( \frac{3+12}{7} \times 6 - 12 \right) \text{ V} = 0.857 \text{ V}, \quad R_B = 1 // 6 \Omega = 0.857 \Omega$$

晶体管的临界饱和电流为

$$I_{CS} = \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{12}{3} \text{ mA} = 4 \text{ mA}, \quad I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{4}{50} \text{ mA} = 0.08 \text{ mA}$$

$$I_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{R_B} = \frac{0.857 - 0.6}{0.857} \text{ mA} = 0.3 \text{ mA} > I_{BS}, \text{ 晶体管工作在饱和状态。}$$

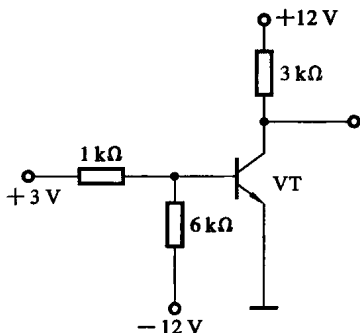


图 7.13

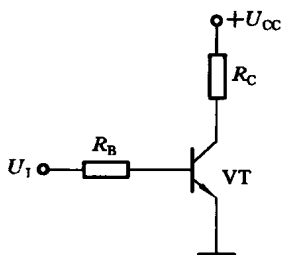


图 7.14

## 7.3 习题解答

### 7.3.1 填空题

1. 在杂质半导体中, 多数载流子的浓度主要取决于掺入的\_\_\_\_\_, 而少数载流子的浓度则与\_\_\_\_\_有很大关系。(杂质浓度, 温度)
2. 在 N 型半导体中, \_\_\_\_\_为多数载流子, \_\_\_\_\_为少数载流子。(电子, 空穴)
3. 利用硅 PN 结在某种掺杂条件下反向击穿特性陡直的特点而制成的二极管, 称为\_\_\_\_\_二极管; 稳压二极管稳压工作时, 是工作在其特性曲线的\_\_\_\_\_区。(稳压, 反向击

穿)

4. 半导体二极管具有\_\_\_\_\_性能,双极型晶体管是指它内部的\_\_\_\_\_有两种。(单向导电,参与导电载流子)

5. 双极型晶体管从结构上看可以分成\_\_\_\_\_两种类型。场效应管从结构上看可分成\_\_\_\_\_两大类型。(NPN型和PNP型,结型和绝缘栅型)

6. 晶体管的三个工作区域分别是饱和区、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。(放大区,截止区)

7. 晶体管工作在放大区时,它的发射结保持\_\_\_\_\_偏置,集电结保持\_\_\_\_\_偏置。(正向,反向)

8. 工作在放大区的某晶体管,如果基极电流  $I_B$  从  $12\ \mu\text{A}$  增大到  $22\ \mu\text{A}$ ,集电极电流  $I_C$  从  $1\ \text{mA}$  变为  $2\ \text{mA}$ ,那么它的  $\beta$  约为\_\_\_\_\_,它的发射极电流  $I_E$  变为\_\_\_\_\_。(100,2.022 mA)

9. 场效应管属于\_\_\_\_\_控制型器件,而晶体管则是\_\_\_\_\_控制型器件。(电压,电流)

10. 在常温下,发光二极管的正向导通电压为\_\_\_\_\_,考虑发光二极管的发光亮度和寿命,其工作电流一般控制在\_\_\_\_\_。(1.5~2.5 V,5~15 mA)

11. 某放大状态的晶体管,测得各管脚电位为:①脚电位  $V_1=2.3\ \text{V}$ ,②脚电位  $V_2=3\ \text{V}$ ,③脚电位  $V_3=-9\ \text{V}$ ,则可判定晶体管为\_\_\_\_\_管,\_\_\_\_\_脚为发射极。(PNP,②)

12. 某晶体管的极限参数  $P_{CM}=100\ \text{mW}$ ,  $I_{CM}=15\ \text{mA}$ ,  $U_{(BR)CEO}=30\ \text{V}$ ,若工作电压  $U_{CE}=10\ \text{V}$ ,则工作电流  $I_C$  不得超过\_\_\_\_\_,若工作电流  $I_C=5\ \text{mA}$ ,则工作电压不得超过\_\_\_\_\_。(10 mA,20 V)

13. 根据图 7.15 中标出的各晶体管的电极电位,判断晶体管处于放大状态的是\_\_\_\_\_,处于饱和状态的是\_\_\_\_\_。(c,a)

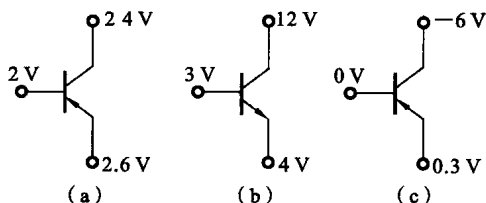


图 7.15

### 7.3.2 选择题

1. 要得到 P 型杂质半导体,在本征半导体硅或锗的晶体中,应掺入少量的( )。(A)

A. 三价元素      B. 四价元素      C. 五价元素      D. 六价元素

2. 二极管加正向电压时,其正向电流由( )。(A)

A. 多数载流子扩散形成      B. 多数载流子漂移形成  
C. 少数载流子漂移形成      D. 少数载流子扩散形成

3. PN 结反向偏置电压的数值增大,但小于击穿电压,( )。(C)

A. 其反向电流增大      B. 其反向电流减小  
C. 其反向电流基本不变      D. 其正向电流增大

4. 稳压二极管是利用 PN 的( )工作的。(D)

- A. 单向导电性      B. 反偏截止特性      C. 电容特性      D. 反向击穿特性
5. 测得晶体管 3 个电极的静态电流分别为 0.06 mA、3.66 mA 和 3.6 mA, 则该管的  $\beta$  为( )。(A)
- A. 60      B. 61      C. 0.98      D. 无法确定
6. 只用万用表判别晶体管 3 个电极, 最先判别出的应是( )。(B)
- A. e 极      B. b 极      C. c 极      D. 无法确定
7. 稳压管电路如图 7.16 所示, 稳压管  $VD_{Z1}$  的稳定电压  $U_{Z1}=12\text{ V}$ ,  $VD_{Z2}$  的稳定电压  $U_{Z2}=6\text{ V}$ , 则电压  $U_o$  等于( )。(C)
- A. 12 V      B. 20 V      C. 6 V      D. 0 V
8. 理想二极管构成的电路如图 7.17 所示, 则输出电压  $U_o$  等于( )。(A)
- A. 8 V      B. -6 V      C. 2 V      D. 14 V

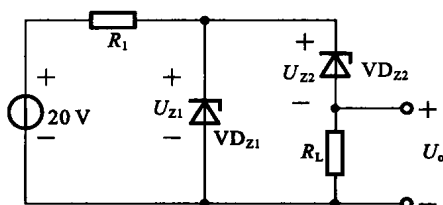


图 7.16

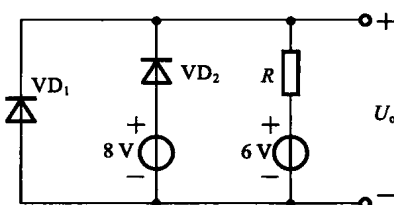


图 7.17

9. NPN 型晶体管, 处在饱和状态时有( )。(B)
- A.  $U_{BE} < 0, U_{BC} < 0$       B.  $U_{BE} > 0, U_{BC} > 0$   
 C.  $U_{BE} > 0, U_{BC} < 0$       D.  $U_{BE} < 0, U_{BC} > 0$
10. 工作在放大状态的晶体管, 各极的电位应满足( )。(A)
- A. 发射结正偏, 集电结反偏      B. 发射结反偏, 集电结正偏  
 C. 发射结、集电结均反偏      D. 发射结、集电结均正偏
11. 某晶体管工作在放大状态, 3 个极的电位分别为  $V_e = -1.7\text{ V}$ ,  $V_b = -1.4\text{ V}$ ,  $V_c = 5\text{ V}$ , 则该管类型为( )。(D)
- A. PNP 型硅管      B. PNP 型锗管  
 C. NPN 型硅管      D. NPN 型锗管
12. 图 7.18 中二极管为理想元件,  $u_i = 6\sin(\omega t)\text{ V}$ ,  $U = 3\text{ V}$ ,  $\omega t = \frac{\pi}{2}$  瞬间, 输出电压  $u_o$  等于( )。(B)
- A. 0 V      B. 6 V      C. 3 V      D.  $6\sin(\omega t)\text{ V}$

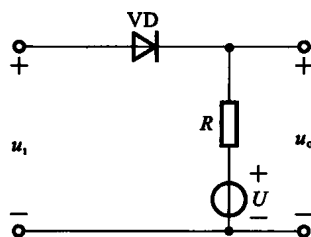


图 7.18

### 7.3.3 计算题

1. 在图 7.19 所示电路中, 设  $U_s = 6\text{ V}$ ,  $u_i = 12\sin(\omega t)\text{ V}$ , 二极管均为理想二极管(忽略正向导通压降), 试分别画出输出电压  $u_o$  的波形。

**解** 在图 7.19(a)所示电路中,  $u_i > U_s = 6\text{ V}$  时, VD 导通,  $u_o = U_s = 6\text{ V}$ ; 当  $u_i \leq U_s = 6\text{ V}$  时, VD 截止,  $u_o = u_i$ 。  $u_o$  波形如图 7.20(b)所示。

在图 7.19(b)所示电路中,  $u_i \geq U_s = 6\text{ V}$  时, VD 截止,  $u_o = u_i$ ; 当  $u_i < U_s = 6\text{ V}$  时, VD 导

通,  $u_o = U_s = 6\text{ V}$ 。  $u_o$  波形如图 7.20(c) 所示。

在图 7.19(c) 所示电路中,  $u_i \geq U_s = 6\text{ V}$  时, VD 截止,  $u_o = U_s = 6\text{ V}$ ; 当  $u_i < U_s = 6\text{ V}$  时, VD 导通,  $u_o = u_i$ 。  $u_o$  波形如图 7.20(b) 所示。

在图 7.19(d) 所示电路中,  $u_i > U_s = 6\text{ V}$  时, VD 导通,  $u_o = u_i$ ; 当  $u_i \leq U_s = 6\text{ V}$  时, VD 截止,  $u_o = U_s = 6\text{ V}$ 。  $u_o$  波形如图 7.20(c) 所示。

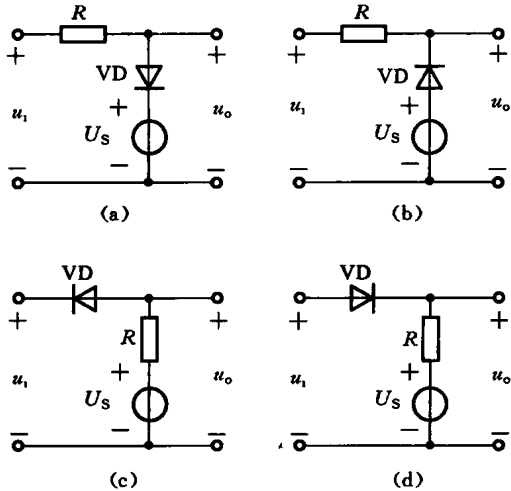


图 7.19

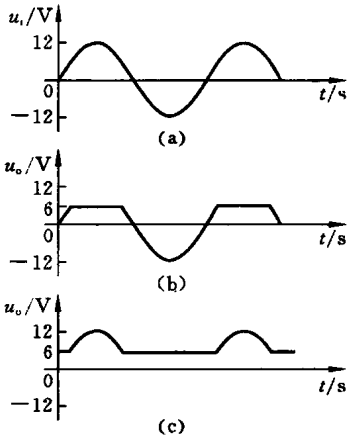


图 7.20

2. 在图 7.21 所示电路中, 已知  $R_1 = R_L$ , 二极管的正向压降可忽略不计,  $U_s = 5\text{ V}$ ,  $U_i = 8\text{ V}$ , 求  $U_o$  的值。

解 先设二极管 VD 截止, 因为  $R_1 = R_L$ , 则  $R_L$  上的电压为  $4\text{ V}$ , 故 D 处于正向偏置导通, 所以,  $U_o = U_s = 5\text{ V}$ 。

3. 由理想二极管组成的电路如图 7.22 所示, 试确定各电路的输出电压  $U_o$ 。

解 图 7.22(a) 中, 由于二极管  $VD_2$  所加正向电压最高, 故其优先导通, 当  $VD_2$  导通后, 输出电压被钳制在  $0\text{ V}$ ,  $VD_1$ 、 $VD_3$  均处于反向偏置而截止。  $U_o = 0\text{ V}$ 。

图 7.22(b) 中, 由于二极管  $VD_2$  所加正向电压最高, 故其优先导通, 当  $VD_2$  导通后, 输出电压被钳制在  $-6\text{ V}$ ,  $VD_1$ 、 $VD_3$  均处于反向偏置而截止。  $U_o = -6\text{ V}$ 。

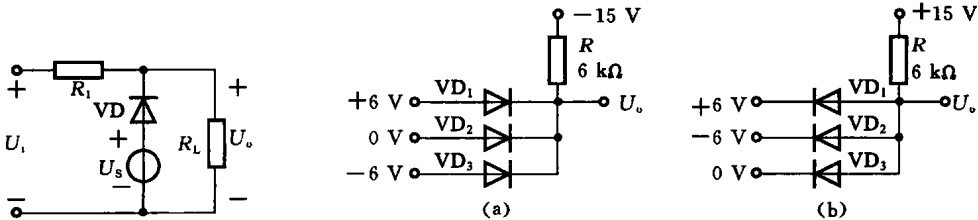


图 7.21

图 7.22

4. 有两个稳压管  $VD_{Z1}$  和  $VD_{Z2}$ , 其稳定电压分别为  $4.5\text{ V}$  和  $8.5\text{ V}$ , 正向压降都是  $0.5\text{ V}$ 。如果要得到  $0.5\text{ V}$ 、 $4\text{ V}$ 、 $5\text{ V}$ 、 $9\text{ V}$  和  $13\text{ V}$  几种稳定电压, 这两个稳压二极管 (还有限流电阻) 应该如何连接? 画出各个电路。

解 各电路图分别如图 7.23(a)、图 7.23(b)、图 7.23(c)、图 7.23(d)、图 7.23(e) 所示。

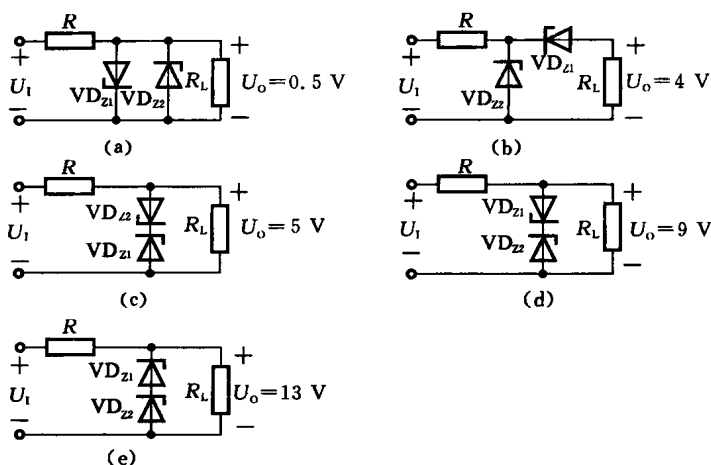


图 7.23

5. 在图 7.24 所示电路中,  $U_1 = 24 \text{ V}$ ,  $R = R_L = 100 \Omega$ , 稳压管  $\text{VD}_Z$  的稳定电压  $U_Z = 8 \text{ V}$ , 最大稳定电流  $I_{ZM} = 50 \text{ mA}$ 。试求通过稳压管的电流  $I_Z$  是否超过  $I_{ZM}$ ? 如果超过, 怎样才能使其不超过?

解 通过稳压管的电流  $I_Z = I_1 - I_2$

$$\text{所以 } I_Z = \frac{U_1 - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L} = \left( \frac{24 - 8}{0.1} - \frac{8}{0.1} \right) \text{ mA} \\ = 80 \text{ mA} > I_{ZM} = 50 \text{ mA}$$

稳压管通过的电流  $I_Z$  超过了  $I_{ZM}$ 。可以通过增大限流电阻  $R$  的办法减小  $I_Z$ 。

$$I_Z = \frac{U_1 - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L} = \left( \frac{24 - 8}{R} - \frac{8}{0.1} \right) \text{ mA} \leq I_{ZM} = 50 \text{ mA}$$

即  $R \geq 123 \Omega$  时, 可保证  $I_Z \leq I_{ZM}$ 。可取  $R = 130 \Omega$ 。

6. 在图 7.24 所示电路中,  $R = R_L = 500 \Omega$ , 稳压管  $\text{VD}_Z$  的稳定电压  $U_Z = 10 \text{ V}$ , 稳定电流  $I_Z = 5 \text{ mA}$ , 最大稳定电流  $I_{ZM} = 30 \text{ mA}$ 。试分析  $U_1$  在什么范围变化, 电路能正常工作?

解 当输入电压达到上限  $U_{1\max}$  时, 应保证流过稳压管的电流不超过  $I_{ZM}$ , 因此

$$I_Z = \frac{U_{1\max} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L} \leq I_{ZM} = 30 \text{ mA}$$

$$\text{即 } \frac{U_{1\max} - 10}{0.5} - \frac{10}{0.5} \leq 30, \quad U_{1\max} \leq 35 \text{ V}$$

当输入电压下降到  $U_{1\min}$  时, 流过稳压管的电流不应小于  $I_Z$ , 因此

$$I_{Z1} = \frac{U_{1\min} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L} \geq I_Z = 5 \text{ mA}$$

$$\text{即 } \frac{U_{1\min} - 10}{0.5} - \frac{10}{0.5} \geq 5, \quad U_{1\min} \geq 22.5 \text{ V}$$

所以,  $U_1$  为  $22.5 \sim 35 \text{ V}$  时, 电路能正常工作。

7. 在一放大电路中, 测得某晶体管 3 个电极的电位分别为  $-6 \text{ V}$ 、 $-3.4 \text{ V}$ 、 $-3.2 \text{ V}$ , 试判断该晶体管是 NPN 型还是 PNP 型, 锗管还是硅管, 并确定 3 个电极对应的管脚。

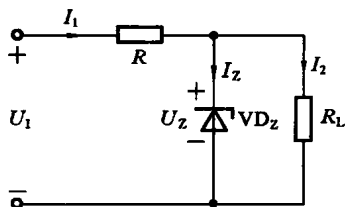


图 7.24



**解** 晶体管工作在放大状态时,  $|U_{BE}| = 0.2 \sim 0.3 \text{ V}$  (锗管),  $|U_{BE}| = 0.6 \sim 0.7 \text{ V}$  (硅管), 由此可见,  $-3.4 \text{ V}$  与  $-3.2 \text{ V}$  之间的电压为  $0.2 \text{ V}$ , 所以该晶体管为锗管; 不管 NPN 管还是 PNP 管, 基极电位总是居中的, 因此  $-3.4 \text{ V}$  的电极为基极,  $-3.2 \text{ V}$  的电极为发射极,  $-6 \text{ V}$  的电极为集电极。因为集电极的电位最低, 所以该晶体管为 PNP 管。

8. 如何用万用表(模拟型)判断出一个晶体管是 NPN 型还是 PNP 型? 如何判断出晶体管的 3 个管脚? 又如何通过实验来区分是锗管还是硅管?

**解** 用万用电表测电阻的“ $R \times 1k$ ”挡依次测量 3 个管脚之间的正、反向电阻, 若某一管脚对另 2 个管脚之间的正向和反向电阻分别相等, 则该管脚便是基极。若将电表红笔(电表正极, 表内电源负极)接触基极, 黑笔接触另 2 个管脚, 测得均为正向电阻, 则该管是 PNP 型。若将电表黑笔接触基极, 红笔接触另 2 个管脚, 测得均为正向电阻, 则该管便是 NPN 型。

找出基极后, 再用电表测量另 2 个管脚之间的正、反向电阻。对于锗管, 这两个电阻有明显差别; 对于 PNP 型锗管, 测得较小电阻(正向)时黑笔所接管脚为发射极, 红笔所接管脚为集电极。对于 NPN 型锗管(很少用), 黑笔所接管脚为集电极, 红笔所接管脚为发射极。对于硅管, 发射极与集电极之间正、反向电阻都很大, 没有明显差别。可在基极上接一个  $100 \text{ k}\Omega$  的电阻, 对于 NPN 型, 可将该电阻另一端接在黑笔上, 将晶体管另 2 个管脚在红笔和黑笔之间反复换接, 测得其中一个电阻值较小时, 黑笔所接为集电极, 红笔所接为发射极。若是 PNP 型, 则将电阻另一端接红笔, 将另 2 个管脚在红笔和黑笔之间反复换接, 测得电阻较小时, 红笔所接管脚为集电极, 黑笔所接管脚为发射极。用于判别硅管的发射极和集电极的方法也适用于锗管, 且  $100 \text{ k}\Omega$  电阻可用人体电阻代替。

判定 3 个管脚后, 为进一步确定它是硅管还是锗管, 可在基极和发射极之间加正向偏置电压(通过限流电阻), 测出  $U_{BE}$ 。若  $U_{BE} \geq 0.6 \text{ V}$ , 则为硅管; 若  $U_{BE} \leq 0.3 \text{ V}$ , 则为锗管。

9. 晶体管工作在放大区时, 要求发射结上加正向电压, 集电结上加反向电压。试就 NPN 型和 PNP 型两种情况讨论:

(1)  $V_C$  和  $V_B$  的电位哪个高?  $U_{CB}$  是正还是负?

(2)  $V_B$  和  $V_E$  的电位哪个高?  $U_{BE}$  是正还是负?

(3)  $V_C$  和  $V_E$  的电位哪个高?  $U_{CE}$  是正还是负?

**解** (1) NPN 管:  $V_C > V_B, U_{CB} > 0$ 。PNP 管:  $V_C < V_B, U_{CB} < 0$ 。

(2) NPN 管:  $V_B > V_E, U_{BE} > 0$ 。PNP 管:  $V_B < V_E, U_{BE} < 0$ 。

(3) NPN 管:  $V_C > V_E, U_{CE} > 0$ 。PNP 管:  $V_C < V_E, U_{CE} < 0$ 。

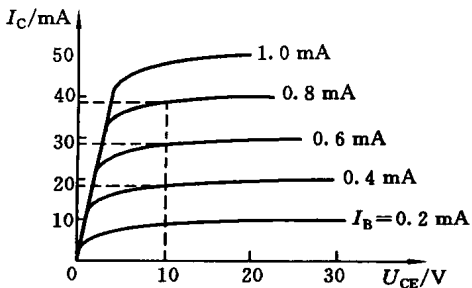


图 7.25

10. 某晶体管的输出特性曲线如图 7.25 所示, 试求:

(1)  $U_{CE} = 10 \text{ V}$  时,  $I_B$  分别从  $0.4 \text{ mA}$  变到  $0.8 \text{ mA}$  和从  $0.6 \text{ mA}$  变到  $0.8 \text{ mA}$  两种情况下的动态电流放大系数;

(2)  $I_B$  等于  $0.4 \text{ mA}$  和  $0.8 \text{ mA}$  两种情况下的静态电流放大系数。

**解** (1) 
$$\beta_1 = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{38 - 18}{0.8 - 0.4} = 50$$

$$\beta_2 = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{38-28}{0.8-0.6} = 50$$

$$(2) \quad \bar{\beta}_1 = \frac{I_C}{I_B} = \frac{18}{0.4} = 45, \quad \bar{\beta}_2 = \frac{I_C}{I_B} = \frac{38}{0.8} = 47.5$$

11. 有两个晶体管,一个晶体管的  $\beta=150$ ,  $I_{CFO}=20 \mu\text{A}$ ,另一个晶体管的  $\beta=50$ ,  $I_{CEO}=1 \mu\text{A}$ ,其他参数都一样,哪个的性能更好一些?为什么?

解 因为  $I_{CBO} = \frac{I_{CEO}}{1+\beta}$ , 故  $\beta=150$ ,  $I_{CEO}=20 \mu\text{A}$  的晶体管的  $I_{CBO} = \frac{20}{1+150} \mu\text{A} = 0.132 \mu\text{A}$ ; 而  $\beta=50$ ,  $I_{CEO}=1 \mu\text{A}$  的晶体管的  $I_{CBO} = \frac{1}{1+50} \mu\text{A} = 0.0196 \mu\text{A}$ 。

由于后者的  $I_{CBO}$  小,而且  $\beta$  值也在合适的范围内,故  $\beta=50$ ,  $I_{CEO}=1 \mu\text{A}$  的晶体管的性能更好一些。

12. 某晶体管的极限参数  $P_{CM}=100 \text{ mW}$ ,  $I_{CM}=15 \text{ mA}$ ,  $U_{(BR)CEO}=30 \text{ V}$ ,若它的工作电压  $U_{CE}=10 \text{ V}$ ,则工作电流  $I_C$  不得超过多大?若工作电流  $I_C=5 \text{ mA}$ ,则工作电压的极限值是多少?

解 当  $U_{CE}=10 \text{ V}$  时,由  $P_{CM}=100 \text{ mW}$ ,得到  $I_C = \frac{P_{CM}}{U_{CE}} = 10 \text{ mA}$ ,所以工作电流  $I_C$  不得超过  $10 \text{ mA}$ 。

当工作电流  $I_C=5 \text{ mA}$ ,由  $P_{CM}=100 \text{ mW}$ ,得到  $U_{CE} = \frac{P_{CM}}{I_C} = 20 \text{ V}$ ,所以工作电压的极限值是  $20 \text{ V}$ 。

13. 在图 7.26 所示电路中,已知  $R_B=10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C=1 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{CC}=10 \text{ V}$ ,晶体管  $\beta=50$ ,  $U_{BE}=0.6 \text{ V}$ 。试分析在下列情况下,晶体管工作在何种工作状态?

(1)  $U_1=0 \text{ V}$ ;

(2)  $U_1=2 \text{ V}$ ;

(3)  $U_1=3 \text{ V}$ 。

解 晶体管的临界饱和电流为

$$I_{CS} = \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{10}{1} \text{ mA} = 10 \text{ mA}, \quad I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{10}{50} \text{ mA} = 0.2 \text{ mA}$$

(1)  $U_1=0 \text{ V}$  时,  $I_B=0$ ,晶体管工作在截止状态。

(2)  $U_1=2 \text{ V}$  时,  $I_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{R_B} = \frac{2-0.6}{10} \text{ mA} = 0.14 \text{ mA} < I_{BS}$ ,晶体管工作在放大状态。

(3)  $U_1=3 \text{ V}$  时,  $I_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{R_B} = \frac{3-0.6}{10} \text{ mA} = 0.24 \text{ mA} > I_{BS}$ ,晶体管工作在饱和状态。

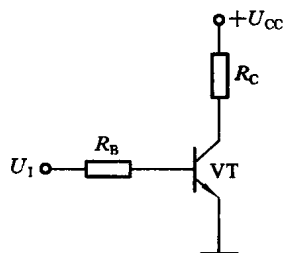


图 7.26

# 第 8 章 基本放大电路

## 8.1 要点总结

### 8.1.1 基本放大电路的组成

#### 1. 组成放大电路的原则

- (1) 外加直流电源必须使晶体管的发射结正向偏置,集电结反向偏置。
- (2) 信号源和输入电极之间应有交流通道,输出电极和负载之间应有交流通道。
- (3) 信号波形基本不失真。放大后的信号波形应与放大前的信号波形相似,要合理地设置放大电路的静态工作点。

#### 2. 电路中各元件的作用

共发射极基本放大电路如图 8.1 所示。

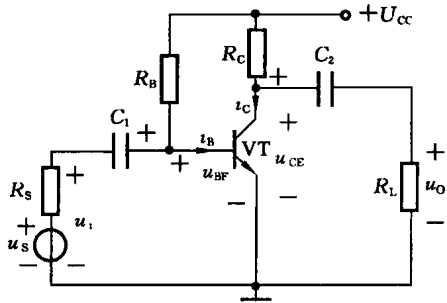


图 8.1

- (1) 晶体管 VT 是放大电路的核心,起电流放大作用。
- (2) 集电极电源  $U_{CC}$  保证晶体管的发射结正偏,集电结反偏,以使晶体管处在放大状态,同时  $U_{CC}$  也是放大电路的能量来源。
- (3) 集电极负载电阻  $R_C$  将集电极电流  $i_C$  的变化转换为电压  $u_{CE}$  的变化,以实现电压放大。
- (4) 基极偏置电阻  $R_B$  提供适当的基极偏置电流,使放大电路获得合适的静态工作点。

(5) 耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  起隔直流、通交流的作用。

### 8.1.2 放大电路图解法

#### 1. 静态分析

静态是指放大电路没有信号输入( $u_i=0$ )时的工作状态。

设晶体管的输出特性曲线如图 8.2 所示。图解步骤如下。

- (1) 用估算法求出基极电流  $I_B$  (如  $40\ \mu A$ )。在输出特性曲线中找到  $I_B$  对应的曲线。
- (2) 作直流负载线。根据集电极电流  $I_C$  与集、射间电压  $U_{CE}$  的关系式  $U_{CE}=U_{CC}-I_C R_C$

可以画出一条直线,其斜率为  $-\frac{1}{R_C}$ ,称为直流负载线。

(3) 求静态工作点 Q,并确定  $I_C$  和  $U_{CE}$  的值。输出特性曲线和直流负载线交点 Q 为静态工作点 Q。在对应的坐标上查得静态值  $I_C$  和  $U_{CE}$ ,如图 8.2 所示。

## 2. 动态分析

动态是指有输入信号( $u_i \neq 0$ )时的工作状态。

设输入信号  $u_i = U_m \sin(\omega t)$ , 如图 8.3 所示, 图解分析步骤如下。

(1) 根据静态分析方法, 求出静态工作点  $Q$  ( $I_B$ 、 $I_C$  和  $U_{CE}$ )。

(2) 根据  $u_i$ , 在输入特性曲线上求  $u_{BE}$  和  $i_B$ 。

$$u_{BE} = U_{BE} + u_i = U_{BE} + U_m \sin(\omega t)$$

$$i_B = I_B + i_b = I_B + I_{bm} \sin(\omega t)$$

(3) 作交流负载线: 通过静态工作点  $Q$ , 斜率为  $-\frac{1}{R'_l}$  (比直流负载线更陡) 的直线。

(4) 由输出特性曲线和交流负载线求  $i_C$  和  $u_{CE}$ 。

$$i_C = I_C + i_c = I_C + I_{cm} \sin(\omega t)$$

$$u_{CE} = U_{CE} + u_{ce} = U_{CE} - U_{cem} \sin(\omega t)$$

只有交流分量  $u_{ce}$  能通过  $C_2$  构成输出电压  $u_o$ 。电压放大倍数为

$$|A_u| = \frac{U_{om}}{U_{im}} = \frac{U_o}{U_i}$$

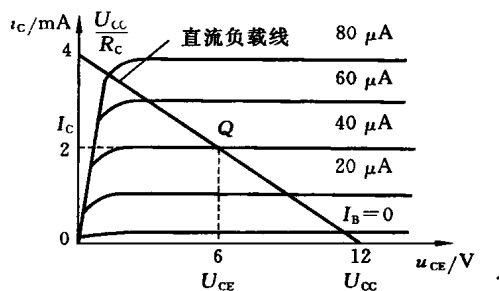


图 8.2

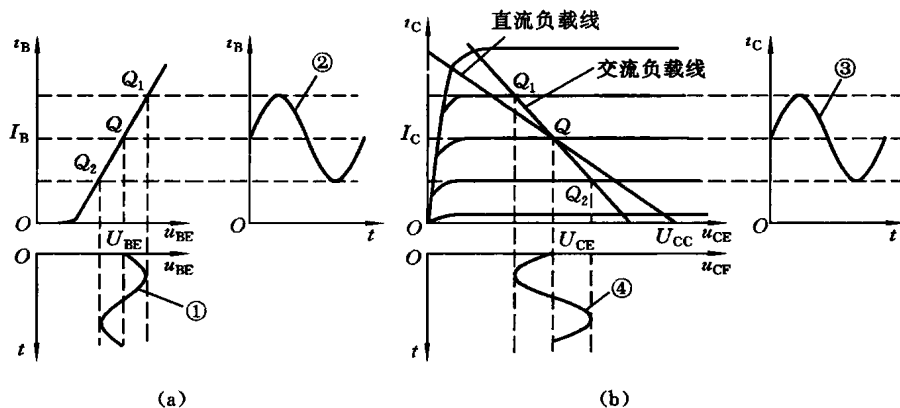


图 8.3

**结论** (1)  $i_b$ 、 $i_c$  与输入信号  $u_i$  同相位, 而  $u_o$  与输入信号  $u_i$  反相位。

(2) 若静态工作点  $Q$  位置合适, 则  $u_o$  与  $u_i$  波形相似。

若静态工作点  $Q$  太高, 则  $i_B$ 、 $i_C$  正半周进入截止区,  $u_o$  负半周产生饱和失真, 如图 8.4 (a) 所示。

若静态工作点  $Q$  太低, 则  $i_B$ 、 $i_C$  负半周进入截止区,  $u_o$  正半周产生截止失真, 如图 8.4 (b) 所示。

## 8.1.3 三种典型放大电路

## 1. 固定偏置放大电路

(1) 静态分析: 用直流通路来分析计算。在直流通路中, 据此可以画出图 8.1 所示放大

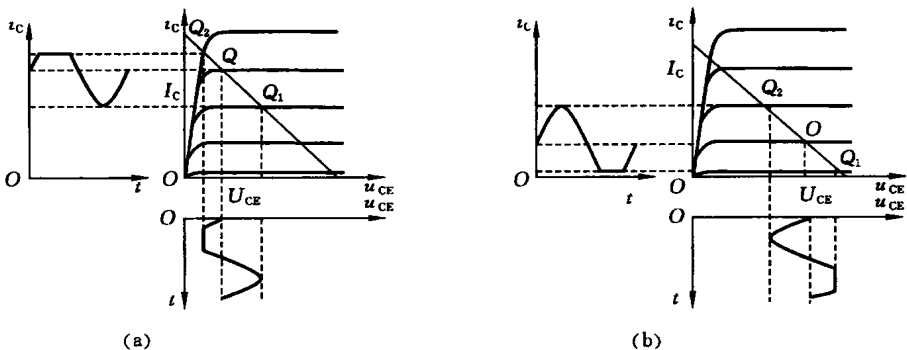


图 8.4

电路的直流通路,如图 8.5 所示。

基极电流

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{U_{CC}}{R_B}$$

式中,  $U_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$  (硅管), 可以忽略不计。

由  $I_B$  可求出集电极电流

$$I_C = \beta I_B$$

静态时集电极与发射极间的电压  $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$ 。

(2) 动态分析: 用交流通路来分析计算。

放大电路的交流通路是用来表示交流分量传递路径的。画出其交流通路的原则是: 耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  可视为短路; 直流电源可视为短路。据此可以画出图 8.1 所示放大电路的交流通路, 如图 8.6 所示。

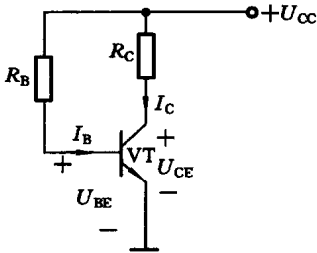


图 8.5

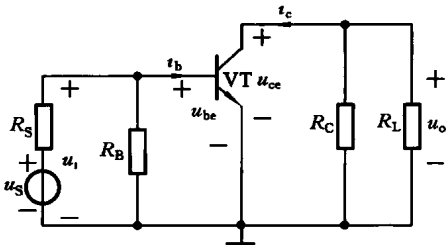


图 8.6

小信号情况下放大电路的动态分析, 往往采用微变等效电路法。

把非线性元件晶体管所组成的放大电路等效成一个线性电路, 用线性电路的分析方法来分析, 这种方法称为微变等效电路法。等效的条件是晶体管在小信号(微变量)情况下工作。这样就能在静态工作点附近的小范围内用直线段近似地代替晶体管的特性曲线。

图 8.7(a) 所示晶体管的微变等效电路如图 8.7(b) 所示。其中  $r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E}$ 。

(3) 放大电路的微变等效电路。

对于如图 8.1 所示的放大电路, 将其交流通路中的晶体管 VT 用其微变等效电路代替,

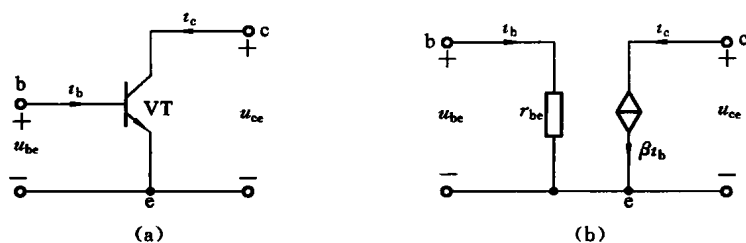


图 8.7

便可得到整个放大电路的微变等效电路,如图 8.8 所示。

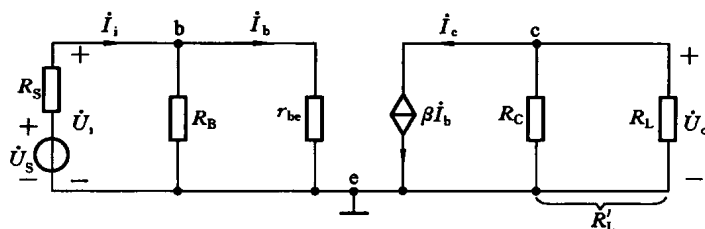


图 8.8

设输入电压  $u_i$  为正弦量,则电路中所有的电流、电压均可用相量表示。

(4) 分析计算。

$$\text{电压放大倍数} \quad A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta \dot{I}_b R'_L}{\dot{I}_b r_{be}} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} R'_L = R_C // R_L$$

输入电阻  $r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_B // r_{be}$ ,  $r_i$  近似等于  $r_{be}$ 。通常希望放大电路的输入电阻高一些。

输出电阻  $r_o \approx R_C$ , 共射放大电路的输出电阻较高。希望放大电路的输出电阻低一些。

## 2. 分压式偏置放大电路

固定偏置放大电路虽然简单且容易调整,但静态工作点  $Q$  极易受温度等因素的影响而上下移动,造成输出不失真动态范围减小或出现非线性失真。

如图 8.9(a)所示分压式偏置放大电路能稳定静态工作点,其中  $R_{B1}$  和  $R_{B2}$  构成偏置电路,这种电路可以根据温度的变化自动调节基极电流  $I_B$ ,以削弱温度对集电极电流  $I_C$  的影响,使静态工作点基本稳定。图 8.9(b)所示的为该电路的直流通路。

适当选择电阻  $R_{B1}$  和  $R_{B2}$  的值,使之满足  $I_2 \gg I_B$ , 则

$$I_1 \approx I_2 \approx \frac{U_{CC}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$V_B = R_{B2} I_2 \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

$V_B$  仅由  $R_{B1}$ 、 $R_{B2}$  对  $U_{CC}$  的分压决定,与晶体管的参数无关,不受温度影响。

若使  $V_B \gg U_{BE}$ , 则  $I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{V_B}{R_E}$ , 也可认为不受温度的影响,基本稳定。

根据经验,一般可按以下范围选取  $I_2$  和  $V_B$ , 即

$$I_2 = (5 \sim 10) I_B, \quad V_B = (5 \sim 10) U_{BE}$$

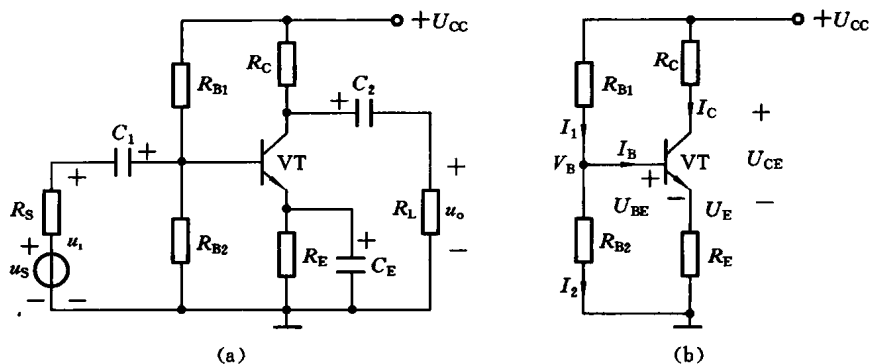


图 8.9

分压式偏置放大电路稳定静态工作点的过程如下：

$$\text{温度 } T \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow V_E (= I_E R_E) \uparrow \rightarrow U_{BE} (= V_B - I_E R_E) \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

$R_E$  越大, 调节效果越显著。但  $R_E$  的存在同样会对变化的交流信号产生影响, 使电压放大倍数下降。若将电容  $C_E$  与  $R_E$  并联, 对直流无影响, 但对交流信号而言,  $R_E$  被短路。  $C_E$  称为发射极交流旁路电容。

#### 1) 静态分析

用估算法计算静态工作点。

晶体管基极电位

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

集电极电流

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{V_B}{R_E}$$

基极电流

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

集电极与发射极之间的电压

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

#### 2) 动态分析

如图 8.10 所示电路为分压式偏置放大电路的交流通道和微变等效电路。

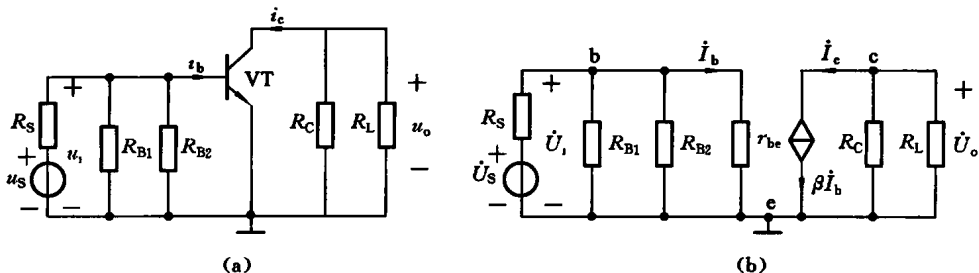


图 8.10

因为在交流通路中  $R_{B1}$  和  $R_{B2}$  并联, 可等效为电阻  $R_B$ , 所以固定偏置电路的动态分析结果对分压式偏置电路同样适用。

电压放大倍数

$$A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

输入电阻

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$$

输出电阻

$$r_o = R_C$$

### 3. 射极输出器

射极输出器是一种共集电极放大电路,如图 8.11(a)所示,其直流通路如图 8.11(b)所示。其特点如下。

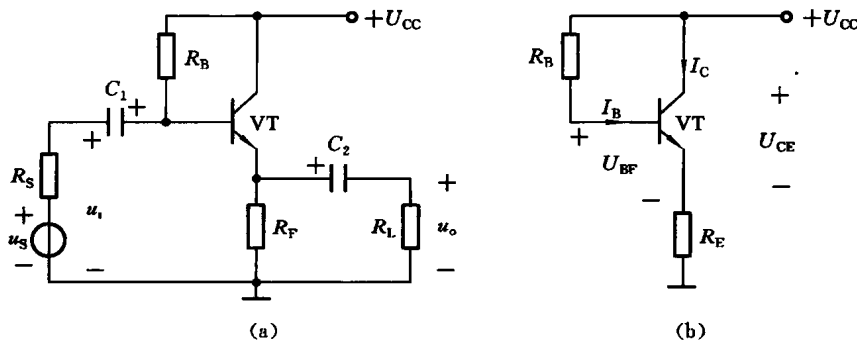


图 8.11

(1) 输出电压  $\dot{U}_o$  与输入电压  $\dot{U}_i$  同相,输出信号跟随输入信号变化而变化。

(2) 射极输出器的电压放大倍数接近于 1。

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1+\beta)R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R'_L}$$

式中:  $R'_L = R_E // R_L$ 。

(3) 输入电阻很大,信号损失小。

$$r_i = \frac{\dot{U}_i}{I_i} = R_B // [r_{be} + (1+\beta)R'_L]$$

(4) 输出电阻很小,带负载能力强。

$$r_o = \frac{\dot{U}}{I} = R_E // \frac{r_{be} + R'_S}{1+\beta}$$

式中:  $R'_S = R_S // R_B$ 。

通常  $R_E \gg \frac{r_{be} + R'_S}{1+\beta}$ ,  $\beta \gg 1$ , 所以  $r_o \approx \frac{r_{be} + R'_S}{1+\beta} \approx \frac{r_{be} + R'_S}{\beta}$ 。

射极输出器的应用:输入电阻高,用做多级放大电路的输入级,减小信号源的负担;输出电阻低,用做输出级,可以提高放大电路带负载的能力;利用它的输入电阻高、输出电阻低的特点,把它作为中间级,起阻抗变换作用,实现信号的最大功率传输。

## 8.1.4 阻容耦合多级放大电路

在多级放大电路中,每两个单级放大电路之间的连接方式称为耦合。阻容耦合和变压器耦合只能放大交流信号。直接耦合既能放大交流信号,又能放大直流信号。

### 1. 阻容耦合放大电路的特点

级间由电容隔开,静态电路互不影响,静态工作点各级分别计算。

多级放大电路的电压放大倍数等于各级电压放大倍数的乘积。



## 2. 阻容耦合放大电路的分析

图 8.12 所示的为两级阻容耦合放大电路。

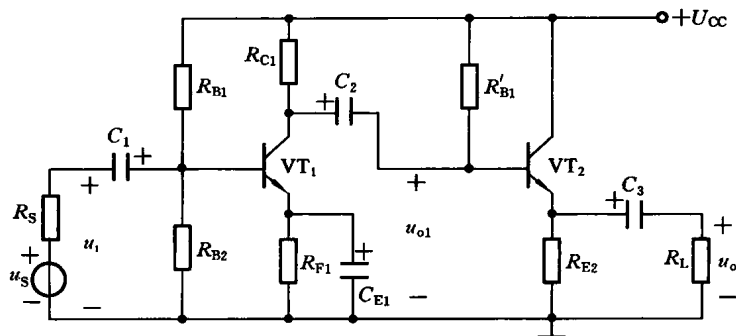


图 8.12

第一级输出电压  $\dot{U}_{o1}$  即为第二级的输入电压  $\dot{U}_{i2}$ ，两级放大电路的电压放大倍数为

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{o1}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{i2}} = A_{u1} A_{u2}$$

后级的输入电阻是前级的负载。计算第一级的电压放大倍数  $A_{u1}$  时，它的负载电阻就是第二级的输入电阻  $r_{i2}$ ，即  $R_{L1} = r_{i2}$ 。

多级放大电路的输入电阻就是第一级的输入电阻，输出电阻就是最后一级的输出电阻。

### 8.1.5 差动放大电路

#### 1. 直接耦合放大电路中的零点漂移问题

多级直接耦合放大电路中，前后级的静态工作点互相影响，互相牵制，前级的温度漂移被后级放大，所以要在第一级将温度漂移抑制，最有效的方法是，在多级直接耦合放大电路的第一级采用差动放大电路。

#### 2. 差动放大电路的对称性电路结构

差动放大电路具有对称的电路结构，利用两个相同的单管放大电路相互补偿，依靠电路的对称性来抑制零点漂移。

#### 3. 差动放大电路的输入信号

- (1) 共模输入。
- (2) 差模输入。
- (3) 比较输入。

#### 4. 典型差动放大电路的静态分析

- (1) 由于电路对称，所以只用计算其中一个晶体管的静态值。
- (2) 共模抑制电阻  $R_E$  的作用是进一步抑制温漂，在静态计算中注意流过  $R_E$  的电流应该是  $2I_E$ 。

#### 5. 典型差动放大电路的动态分析

- (1)  $R_E$  对差模信号不起作用，在差模信号通路中不出现。
- (2) 单端输出的差动放大电路的电压放大倍数只有双端输出差动放大电路的一半。

(3) 共模抑制比  $K_{CMR}$  用于衡量差动放大电路放大差模信号和抑制共模信号(也即抑制零漂)的能力。

### 8.1.6 互补对称功率放大电路

#### 1. 对功率放大电路的基本要求

(1) 输出功率大,这就要求功率放大电路不仅要有较高的输出电压,还要有较大的输出电流,晶体管通常工作在极限参数状态( $P_{CM}$ 、 $I_{CM}$ 、 $U_{(BR)CEO}$ )。

(2) 晶体管处在大信号极限运用状态,要尽可能减小非线性失真。

(3) 效率要高,减少电源的供应。

应采用甲乙类或乙类工作状态的互补对称功率放大电路。

#### 2. 互补对称功率放大电路

互补对称功率放大电路有两种基本形式:OCL 电路和 OTL 电路,分别如图 8.13 所示。

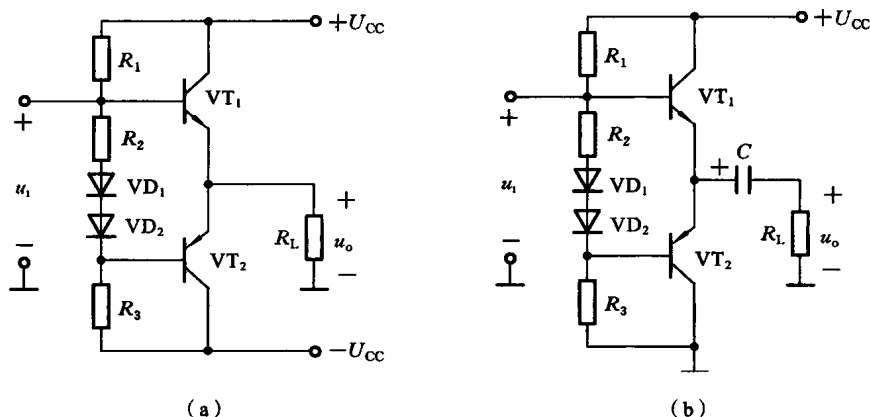


图 8.13

#### 1) 结构

两个电路结构不同,但都由两个工作于甲乙类状态或乙类状态的射级输出器对接组成。图中  $VT_1$  为 NPN 管,  $VT_2$  为 PNP 管,两管特性基本上相近。

#### 2) 工作原理

动态( $u_i \neq 0$ )时,在  $u_i$  的正半周  $VT_1$  导通而  $VT_2$  截止,在  $u_i$  的负半周  $VT_2$  导通而  $VT_1$  截止,  $VT_1$ 、 $VT_2$  两管轮流交替地工作,互相补充,使负载获得完整的信号波形,故称为互补对称电路。由于  $VT_1$ 、 $VT_2$  采用共集电极接法,输出电阻极小,可与低阻负载  $R_L$  直接匹配。

图 8.13 中二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$  用来提供适当的正向偏置电压,减小交越失真。

无输出电容的放大电路(简称 OCL 电路)需要正、负两个电源。这在有些功率放大电路里无法实现。可用一个大容量的电容器代替电路中的负电源,组成无输出变压器的放大电路,简称 OTL 电路。电容  $C$  起负电源的作用。为了使输出波形对称,必须保持电容  $C$  上的电压基本维持在  $U_{CC}/2$  不变,  $C$  的容量必须足够大。

### 8.1.7 场效应管放大电路

场效应管具有很高的输入电阻,通常用在多级放大电路的输入级。与晶体管相比,场效

应管的源极、漏极和栅极分别相当于晶体管的发射极、集电极和基极。两者的放大电路也相似。

### 1. 分压式偏置共源极放大电路

分压式偏置共源极放大电路如图 8.14 所示。

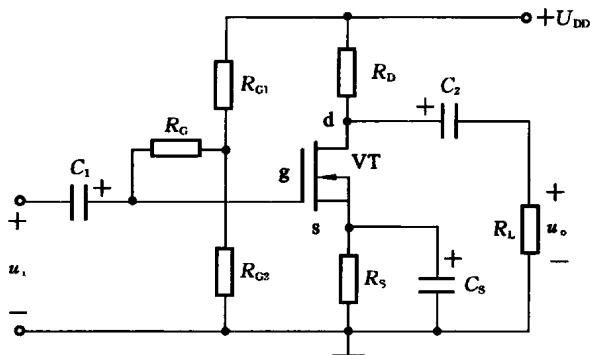


图 8.14

#### 1) 静态分析

求  $U_{GS}$ 、 $I_D$  和  $U_{DS}$ 。

由于栅极电流为零,电阻  $R_G$  中无电流通过,栅极电位

$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD}$$

栅-源电压

$$U_{GS} = V_G - V_S = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD} - I_S R_S = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD} - I_D R_S$$

耗尽型 MOS 场效应管的漏极电流

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2, \quad U_{GS(off)} \leq U_{GS} \leq 0$$

联立解上列两个方程,求出  $I_D$  和  $U_{GS}$ 。

漏-源电压

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D (R_D + R_S)$$

分压式偏置电路适用于耗尽型场效应管和增强型场效应管。对于耗尽型场效应管,应使  $U_{GS} < 0$ ; 对于增强型场效应管,应使  $U_{GS} > 0$ 。

#### 2) 动态分析

微变等效电路如图 8.15 所示。

$$\text{电压放大倍数 } A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_d R'_L}{\dot{U}_{gs}} = \frac{-g_m \dot{U}_{gs} R'_L}{\dot{U}_{gs}} = -g_m R'_L, \quad R'_L = R_D // R_L$$

输入电阻

$$r_i = R_G + R_{G1} // R_{G2}$$

输出电阻

$$r_o = R_D$$

### 2. 自偏压放大电路

耗尽型场效应管还可以采用自偏压、放大电路,如图 8.16 所示。

$$U_{GS} = V_G - V_S = -I_S R_S = -I_D R_S$$

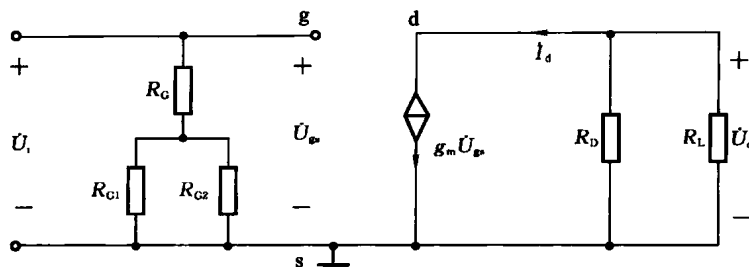


图 8.15

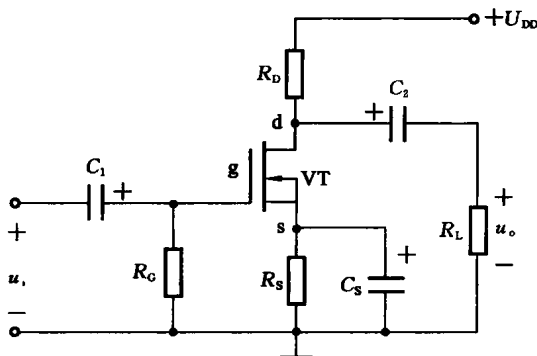


图 8.16

由  $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$ , 联立求解得

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D(R_D + R_S)$$

## 8.2 实例解析

**例 8.1** 固定偏置放大电路如图 8.17(a)所示, 已知  $U_{CC} = 12\text{ V}$ ,  $R_C = 3\text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 6\text{ k}\Omega$ ,  $R_B = 600\text{ k}\Omega$ ,  $U_{BE} = 0.6\text{ V}$ , 输入正弦电压幅值  $U_{im} = 16\text{ mV}$ , 晶体管输入、输出特性曲线如图 8.17(b)所示, 要求:

(1) 用图解法求电路的静态工作点  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $U_{CE}$ ;

(2) 计算放大电路的电压放大倍数  $A_u$ 。

**解** (1) 求出静态工作点  $Q(I_B$ 、 $I_C$  和  $U_{CE})$ 。

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0.6}{600}\text{ mA} = 0.019\text{ mA} \approx 20\text{ }\mu\text{A}$$

作直流负载线:  $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$ 。

该直线在纵轴上的截距为  $\frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{12}{3}\text{ mA} = 4\text{ mA}$ , 在横轴上的截距为  $U_{CC} = 12\text{ V}$ 。

$I_B = 20\text{ }\mu\text{A}$  对应的输出特性曲线与直流负载线的交点  $Q$  就是静态工作点。对应的坐标:  $I_C = 2\text{ mA}$ ,  $U_{CE} = 6\text{ V}$ 。

(2) 根据  $u_i$  在输入特性曲线上求  $u_{BE}$  和  $i_B$ , 其波形如图 8.17(b)中的曲线①和②所示。

根据  $i_B$  的变化情况, 可以确定工作点在输出特性曲线上的变化范围  $Q_1 \sim Q_2$ 。

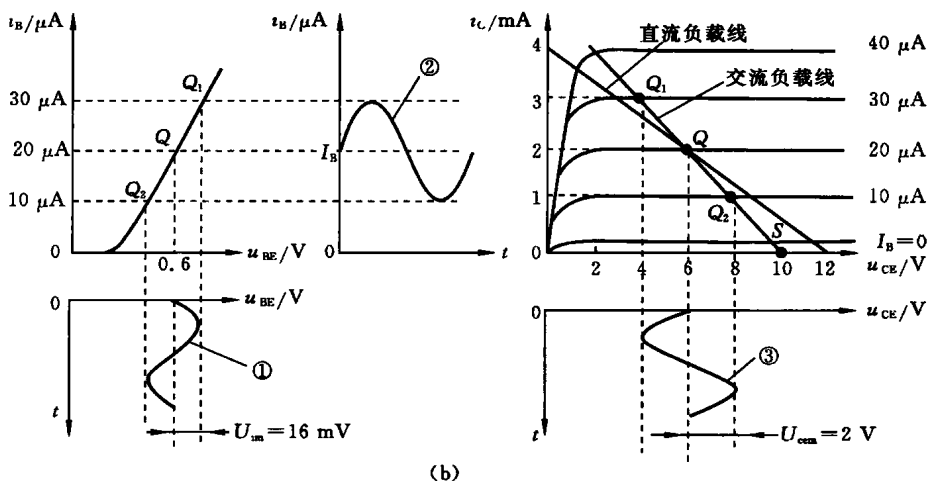
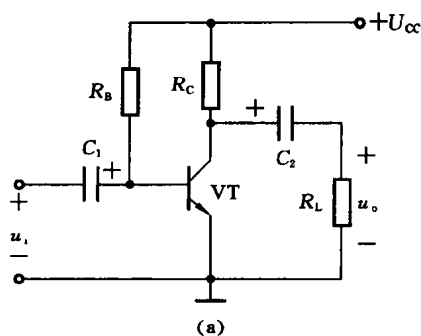


图 8.17

(3) 作交流负载线。放大电路的输出端接有负载电阻  $R_L$  时,由交流负载电阻  $R'_L = R_C // R_L$  决定的负载线称为交流负载线。它是一条通过静态工作点  $Q$ 、斜率为  $-\frac{1}{R'_L}$  的直线,交流负载线在横轴上的交点为  $S(U, 0)$ ,  $U = U_{CE} + I_C R'_L = (6 + 2 \times 3 // 6) \text{ V} = 10 \text{ V}$ 。连接  $Q$ 、 $S$  得交流负载线。

(4) 由输出特性曲线和交流负载线求  $u_{CE}$ 。在  $i_B$  的作用下,工作点  $Q$  随  $i_B$  的变化在交流负载线  $Q_1$  至  $Q_2$  之间移动。由  $i_B$  的波形作出  $u_{CE}$  的波形,如图 8.17(b) 中的曲线③所示。

$u_{CE}$  交流分量  $u_{ce}$  即输出电压  $u_o$ , 输出电压幅值  $U_{om} = U_{cem} = 8 \text{ V} - 6 \text{ V} = 2 \text{ V}$ ;

输出信号电压  $u_o$  与输入信号电压  $u_i$  的相位相反。

$$A_u = -\frac{U_{om}}{U_{im}} = -\frac{2}{0.016} = -125$$

**例 8.2** 在如图 8.18 所示的固定偏置放大电路中,已知输出特性曲线及交、直流负载线。

- (1) 用图解分析法求电路的参数  $R_B$ 、 $R_C$ 、 $R_L$  各为多少?
- (2) 最大不失真输出幅值为多少?
- (3) 若不断加大输入电压幅值  $U_{im}$ , 电路首先会出现何种性质的失真?

**解** (1) 作直流负载线:  $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$ 。

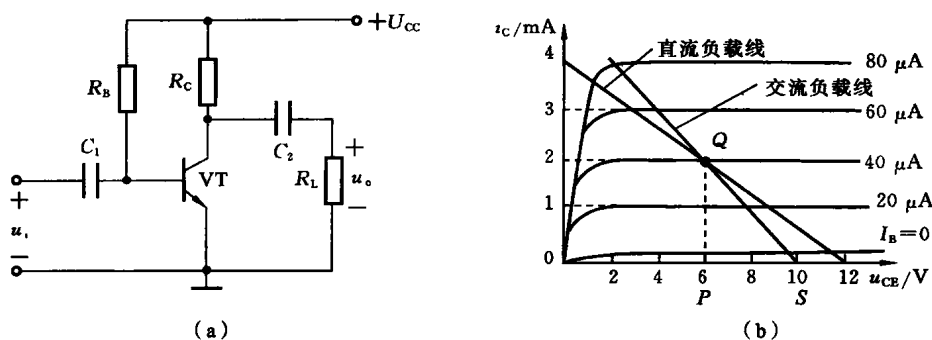


图 8.18

在纵轴上的截距为  $\frac{U_{CC}}{R_C} = 4 \text{ mA}$ , 在横轴上的截距为  $U_{CC} = 12 \text{ V}$ 。

所以 
$$R_C = \frac{12}{4} \text{ k}\Omega = 3 \text{ k}\Omega$$

静态工作点  $Q$  对应的 
$$I_B \approx \frac{U_{CC}}{R_B} = 40 \text{ }\mu\text{A}, \quad I_C = 2 \text{ mA}$$

所以 
$$R_B = \frac{12}{40} \text{ k}\Omega = 300 \text{ }\Omega$$

$$R'_L = R_L // R_C = \frac{PS}{I_C} = \frac{10-6}{2} \text{ k}\Omega = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 6 \text{ k}\Omega$$

(2) 交流负载线上  $P$  点两侧线段长短比较, 可得到最大不失真输出幅值  $U_{om} = PS = 4 \text{ V}$ 。

(3) 因  $P$  点右侧线段  $PS$  较短, 不断加大输入电压幅值  $U_m$ , 电路首先会出现截止失真, 反之若  $Q$  点偏高,  $P$  点左侧线段较短,  $(U_{CE} - U_{CES})$  值较小, 电路首先会出现饱和失真。

**例 8.3** 在如图 8.19 所示的电路中,  $U_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  $R_{B1} = 30 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{B2} = 15 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{E1} = 0.3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{E2} = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 50$ ,  $U_{BE} = 0.6 \text{ V}$ 。试求:

(1) 静态值  $I_B$ 、 $I_C$  和  $U_{CE}$ ;

(2) 电压放大倍数  $A_u$ 、输入电阻  $r_i$  和输出电阻  $r_o$ 。

**解** (1) 根据图 8.19(a) 可画出该放大电路的直流通路, 如图 8.19(b) 所示。可得基极电位

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{15}{30 + 15} \times 12 \text{ V} = 4 \text{ V}$$

集电极电流

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_{E1} + R_{E2}} = \frac{4 - 0.6}{0.3 + 2} \text{ mA} = 1.48 \text{ mA}$$

基极电流

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1.48}{50} \text{ mA} = 29.6 \text{ }\mu\text{A}$$

集-射极电压

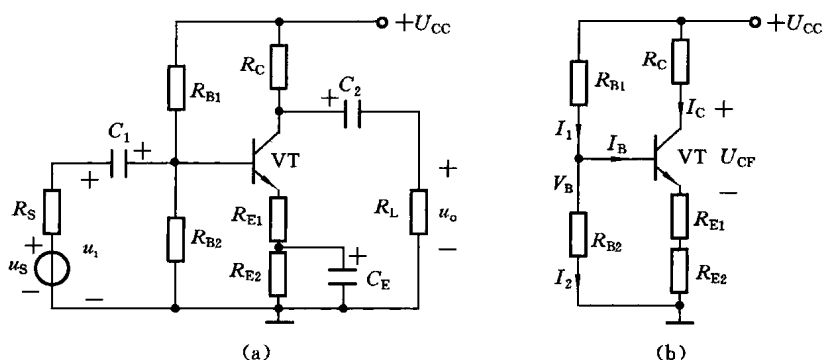


图 8.19

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C(R_C + R_{E1} + R_{E2}) = [12 - 1.48 \times (3 + 0.3 + 2)] \text{ V} = 4.2 \text{ V}$$

(2) 晶体管的输入电阻。

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = \left[ 200 + (1 + 50) \frac{26}{1.48} \right] \Omega = 1\,096 \Omega = 1.1 \text{ k}\Omega$$

根据图 8.19(a)可画出该放大电路的微变等效电路,如图 8.20 所示。

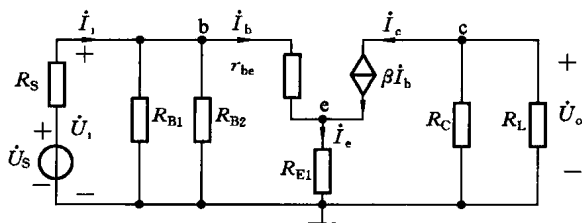


图 8.20

$$\dot{U}_i = r_{be} \dot{I}_b + R_{E1} \dot{I}_e = r_{be} \dot{I}_b + R_{E1} (1 + \beta) \dot{I}_b = [r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}] \dot{I}_b$$

$$\dot{U}_o = -\dot{I}_c R'_L = \beta \dot{I}_b R'_L$$

所以,电压放大倍数为

$$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}} = -\frac{50 \times \frac{3 \times 3}{3 + 3}}{1.1 + (1 + 50) \times 0.3} = -4.57$$

输入电阻

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}] = 30 // 15 // 16.4 \text{ k}\Omega = 6.21 \text{ k}\Omega$$

输出电阻

$$r_o \approx R_C = 3 \text{ k}\Omega$$

发射极电阻  $R_{E1}$  不接旁路电容,对电压放大倍数和输入电阻的影响很大。

**例 8.4** 两级阻容耦合放大电路如图 8.21 所示,前级为射极输出器,后级为分压式偏置放大电路。已知  $U_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  $R_{B1} = 150 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{E1} = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{B2} = 30 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{B3} = 15 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{E2} = 0.3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{E3} = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 3 \text{ k}\Omega$ ,各管的  $\beta = 50$ ,  $r_{be} = 1 \text{ k}\Omega$ 。

(1) 画出微变等效电路。

(2) 求各级电压放大倍数  $A_{u1}$ 、 $A_{u2}$  和总电压放大倍数  $A_u$ 。

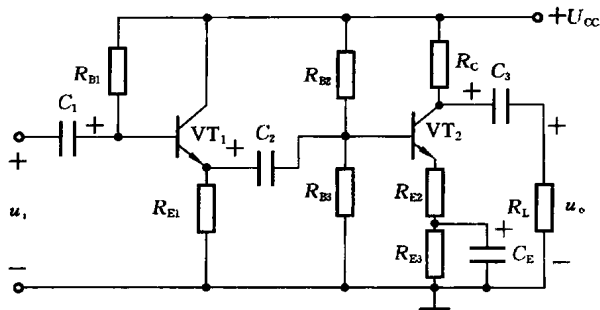


图 8.21

(3) 计算输入电阻  $r_i$  和输出电阻  $r_o$ 。

解 (1) 微变等效电路如图 8.22 所示。

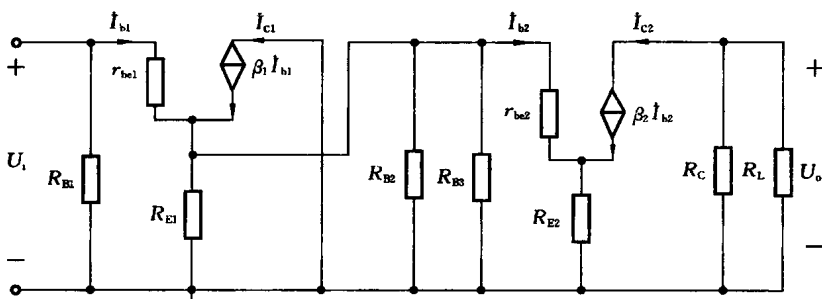


图 8.22

(2) 求电压放大倍数  $A_u$ 。

第二级输入电阻

$$r_{i2} = R_{B2} // R_{B3} // [r_{be2} + (1 + \beta) R_{E2}] = (30 // 15 // 16.3) \text{ k}\Omega = 6.2 \text{ k}\Omega$$

第一级等效负载电阻

$$R'_{L1} = R_{E1} // r_{i2} = (3.3 // 6.2) \text{ k}\Omega \approx 2.15 \text{ k}\Omega$$

第一级电压放大倍数为

$$A_{u1} = \frac{(1 + \beta) R'_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta) R'_{L1}} = \frac{(1 + 50) \times 2.15}{1 + (1 + 50) \times 2.15} = 0.99$$

第二级电压放大倍数

$$A_{u2} = -\frac{\beta R_C // R_L}{r_{be2} + (1 + \beta) R_{E2}} = -\frac{50 \times \frac{3 \times 3}{3 + 3}}{1 + (1 + 50) \times 0.3} = -4.6$$

两级总电压放大倍数为  $A_u = A_{u1} \times A_{u2} = -4.55$

(3) 求电路的输入电阻和输出电阻。

第一级输入电阻

$$r_i = R_{B1} // [r_{be1} + (1 + \beta) R'_{L1}] = \{150 // [1 + (1 + 50) \times 2.15]\} \text{ k}\Omega = 63.7 \text{ k}\Omega$$

第二级输出电阻

$$r_o \approx R_C = 3 \text{ k}\Omega$$

第一级的输入电阻就是两级放大电路输入电阻,第二级的输出电阻就是两级放大电路



的输出电阻。

**例 8.5** 差动放大电路如图 8.23 所示, 已知:  $U_{CC}=12\text{ V}$ ,  $U_{EE}=12\text{ V}$ ,  $R_B=2\text{ k}\Omega$ ,  $R_C=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_E=5.1\text{ k}\Omega$ ,  $R_P=100\text{ }\Omega$ ,  $R_L=20\text{ k}\Omega$ ,  $\beta_1=\beta_2=60$ , 晶体管的输入电阻  $r_{be1}=r_{be2}=1\text{ k}\Omega$ ,  $U_{BE}=0.6\text{ V}$ , 电位器  $R_P$  的滑动头在中间位置。

- (1) 计算电路的静态工作点;
- (2) 计算电路的差模电压放大倍数;
- (3) 计算电路的输入电阻和输出电阻。

**解** (1) 根据电路的静态通道对左边的基极回路列电压方程(注意: 这时流过  $R_F$  的电流为  $2I_E$ )。

$$R_B I_B + U_{BE} + \frac{1}{2} R_P I_E + 2R_E I_E = U_{EE}$$

$$I_B = \frac{U_{EE} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) \left( \frac{1}{2} R_P + 2R_E \right)}$$

$$= \frac{12 - 0.6}{2 + 61(0.05 + 10.2)} \text{ mA} = 18 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 60 \times 18 \text{ }\mu\text{A} = 1.08 \text{ mA}$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B = 61 \times 18 \text{ }\mu\text{A} = 1.1 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - U_{EE} - I_C R_C - \frac{1}{2} R_P I_E - 2I_E R_E$$

$$= (24 - 1.08 \times 10 - 0.05 \times 1.1 - 2 \times 1.1 \times 5.1) \text{ V} = 1.925 \text{ V}$$

(2) 差模电压放大倍数

$$A_d = \frac{U_o}{U_{id}} = \frac{-\beta R'_L}{R_B + r_{be} + \frac{1}{2} R_P (1 + \beta)} = \frac{-60 \times 10 // \frac{20}{2}}{2 + 1 + 0.05 \times 61} = -49.6$$

(3) 输入输出电阻

$$r_{id} = 2 \left[ R_B + r_{be} + (1 + \beta) \frac{1}{2} R_P \right] = 2(2 + 1 + 61 \times 0.5 \times 0.1) \text{ k}\Omega = 12.1 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = 2R_C = 20 \text{ k}\Omega$$

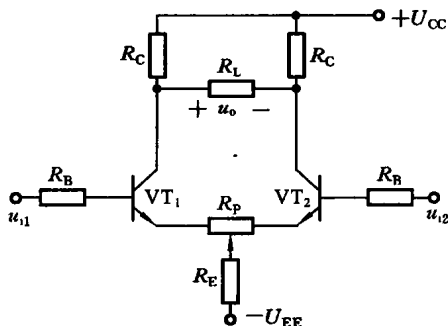


图 8.23

## 8.3 习题解答

### 8.3.1 填空题

1. 交流放大电路的静态是指\_\_\_\_\_的工作状态, 通常说的静态值(静态工作点)是  $I_B$ 、 $I_C$  和\_\_\_\_\_。(直流通路,  $U_{CE}$ )
2. 交流放大电路的静态分析法有\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_两种。(图解法, 估算法)
3. 固定偏置基本交流放大电路的偏置电阻  $R_B$  减小时, 静态值  $I_B$  随之\_\_\_\_\_, 导致静态工作点沿直流负载线向\_\_\_\_\_靠近。(增大, 左上方)

4. 基本交流放大电路的集电极负载电阻  $R_c$  减小时, 直流负载线变\_\_\_\_\_;  $R_c$  加大时, 直流负载线变\_\_\_\_\_. 两种情况都会使不失真的动态范围减小。(陡, 平缓)

5. 分析放大电路求静态值时须用\_\_\_\_\_, 求动态参数时应该用\_\_\_\_\_和其微变等效电路。(直流通路, 交流通路)

6. 若放大电路的信号源电动势  $E_s$  不变, 而内阻  $R_s$  减小, 则输出电压随之\_\_\_\_\_; 若放大电路的输入电压  $U_i$  不变, 而负载电阻  $R_L$  减小, 则输出电压随之\_\_\_\_\_。(增大, 减小)

7. 用示波器观察某功放在正弦信号驱动下负载上的波形, 如图 8.24 所示, 则可以判定: 该电路属于\_\_\_\_\_类功放, 其失真为\_\_\_\_\_失真。(乙, 交越)

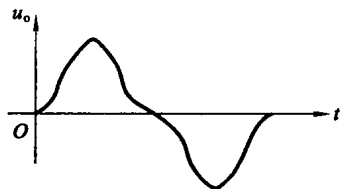


图 8.24

8. 射极输出器的三大特点是输入电阻高、\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_。(输出电阻低, 电压放大倍数等于 1 并且输出电压与输入电压同相位)

9. 射极输出器作为多级放大电路的输入级使用时有\_\_\_\_\_的好处; 作为多级放大电路的输出级使用时有\_\_\_\_\_的好处。(提高输入电阻、减少信号源负担, 降低输出电阻、提高带负载能力)

10. 多级放大电路的耦合方式有变压器耦合、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_三种。(阻容耦合, 直接耦合)

11. 多级放大电路的输入电阻是第一级的输入电阻, 可能与\_\_\_\_\_有关; 多级放大电路的输出电阻是最后一级的输出电阻, 可能与\_\_\_\_\_有关。(后级输入电阻, 前级输出电阻)

12. 多级放大电路的电压放大倍数等于\_\_\_\_\_的乘积, 计算前级的电压放大倍数时必须把\_\_\_\_\_作为前级的负载。(各级放大倍数, 后级输入电阻)

13. 差动放大电路的输入信号  $U_{i1} = 10 \text{ mV}$ ,  $U_{i2} = 2 \text{ mV}$ , 则其差模输入信号  $U_{id}$ \_\_\_\_\_, 共模输入信号  $U_{ic} =$ \_\_\_\_\_。(8 mV, 6 mV)

14. 差动放大电路中的共模反馈电阻阻值越\_\_\_\_\_, 表示抑制零点漂移的能力越\_\_\_\_\_。(大, 强)

15. 互补对称功率放大电路从电路结构上可分为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_两类。(OTL, OCL)

16. 在功率放大电路中, 效率最高的是\_\_\_\_\_类功率放大电路; 可以消除交越失真同时效率又高的是\_\_\_\_\_类功率放大电路。(乙, 甲乙)

### 8.3.2 选择题

1. 电路如图 8.25 所示,  $R_c = 3 \text{ k}\Omega$ , 晶体管的  $\beta = 50$ , 欲使晶体管工作在放大区,  $R_B$  应调至( )。(C)

- A.  $10 \text{ k}\Omega$                       B.  $100 \text{ k}\Omega$                       C.  $300 \text{ k}\Omega$                       D.  $\infty$

2. 某固定偏置单管放大电路的静态工作点  $Q$  如图 8.26 所示, 欲使工作点移至  $Q'$ , 需使( )。(C)

- A. 偏置电阻  $R_B$  增大                      B. 集电极电阻  $R_c$  增大  
C. 偏置电阻  $R_B$  减小                      D. 集电极电阻  $R_c$  减小

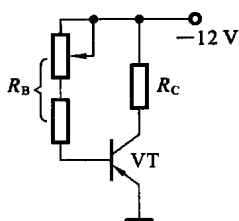


图 8.25

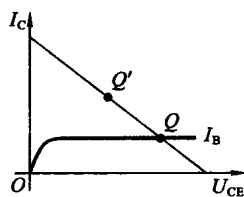


图 8.26

3. 基本共射放大电路如图 8.27 所示,该电路的输出电压  $u_o$  与输入电压  $u_i$  的相位相差为( )。(D)

- A.  $0^\circ$                       B.  $45^\circ$                       C.  $90^\circ$                       D.  $180^\circ$

4. 电路如图 8.27 所示,晶体管工作在放大区。如果将集电极电阻换成一个阻值较大的电阻(晶体管仍工作在放大区),则集电极电流将( )。(A)

- A. 不变                      B. 显著减小                      C. 显著增大                      D. 均不是

5. 在基本共射极放大电路中,基极电阻  $R_B$  的作用是( )。(B)

- A. 放大电流                      B. 调节偏流  $I_B$                       C. 把放大的电流转换成电压                      D. 均不是

6. 单级基本共发射极放大电路输出电压的波形如图 8.28 所示,此电路产生了( )。(C)

- A. 交越失真                      B. 截止失真                      C. 饱和失真                      D. 都不是

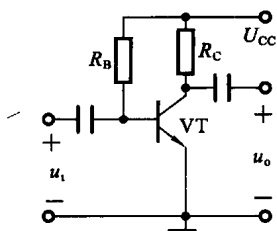


图 8.27

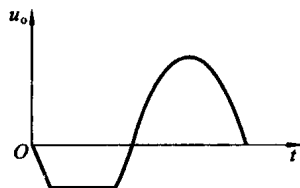


图 8.28

7. 射极输出器电路中,输出电压  $u_o$  与输入电压  $u_i$  之间的关系是( )。(B)

- A. 两者反相,输出电压大于输入电压                      B. 两者同相,输出电压近似等于输入电压  
C. 两者相位差  $90^\circ$ ,且大小相等                      D. 两者同相,输出电压大于输入电压

8. 在多级放大电路中,功率放大级常位于( )。(C)

- A. 第一级                      B. 中间级                      C. 末级或末前级                      D. 均不是

9. 阻容耦合放大电路能放大( )信号。(B)

- A. 直流                      B. 交流                      C. 交、直流                      D. 均不是

10. 已知两级放大电路的电压放大倍数分别是  $A_{u1} = -10$ ,  $A_{u2} = -20$ ,则此放大电路总的电压放大倍数应是( )。(D)

- A.  $A_u = -30$                       B.  $A_u = -10$                       C.  $A_u = 30$                       D.  $A_u = 200$

11. 差动放大电路如图 8.29 所示,其差模电压放大倍数  $A_d$  为( )。(C)

- A.  $A_d = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be} + (1 + \beta) R_F}$                       B.  $A_d = -\frac{\beta R_C}{R_B + r_{be} + (1 + \beta) 2R_E}$

$$C. A_d = -\frac{\beta R_c}{R_B + r_{be}}$$

$$D. A_d = -\frac{\beta R_c}{r_{be} + (1 + \beta) 2R_F}$$

12. 具有发射极电阻  $R_E$  的典型差动放大电路中,  $R_F$  的电阻值( ), 抑制零点漂移的效果将会更好。(A)

- A. 增加      B. 降低      C. 不变      D. 增加、降低都可以

13. 差动放大电路是为了( )而设置的。(C)

- A. 稳定电压放大倍数    B. 增加带负载能力    C. 抑制零点漂移    D. 稳定静态工作点

14. 某功率放大电路的工作波形如图 8.30 所示, 静态工作点  $Q$  靠近截止区, 这种情况称为( )。(C)

- A. 甲类工作状态      B. 乙类工作状态      C. 甲乙类工作状态      D. 均不是

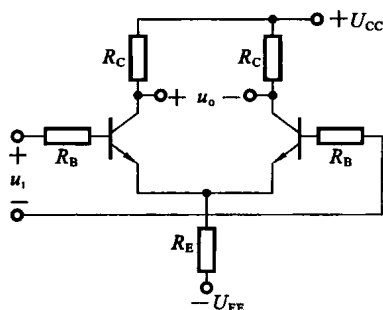


图 8.29

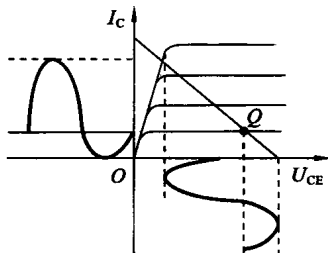


图 8.30

15. OCL 互补对称功率放大电路如图 8.31 所示,  $VT_1$ 、 $VT_2$  为硅管,  $u_i \leq 0.2 \sin(\omega t)$  V, 则理想状态下输出电压  $u_o$  等于( )。(C)

- A.  $12 \sin(\omega t)$  V      B.  $-0.2 \sin(\omega t)$  V      C. 0 V      D.  $+0.2 \sin(\omega t)$  V

16. 互补对称功率放大电路中, 若设置静态工作点使两管均工作在乙类状态, 将会出现( )。(C)

- A. 饱和失真      B. 频率失真      C. 交越失真      D. 截止失真

17. OCL 功率放大电路如图 8.32 所示, 当  $u_i$  为正半周时, ( )。(A)

- A.  $VT_1$  导通,  $VT_2$  截止    B.  $VT_1$  截止,  $VT_2$  导通    C.  $VT_1$ 、 $VT_2$  导通    D.  $VT_1$ 、 $VT_2$  截止

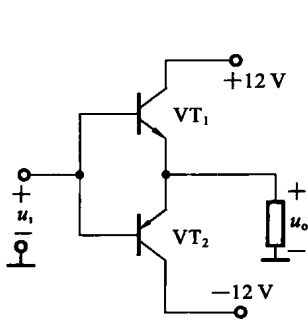


图 8.31

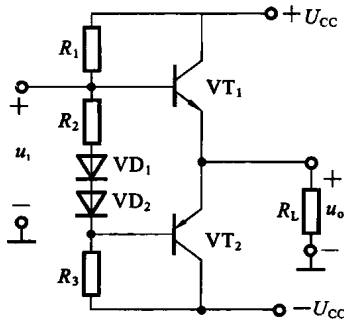


图 8.32

### 8.3.3 计算题

1. 放大电路如图 8.33 所示, 已知  $U_{CC} = 16$  V,  $R_B = 200$  k $\Omega$ ,  $R_C = 2$  k $\Omega$ ,  $\beta = 50$ , 试求: 静

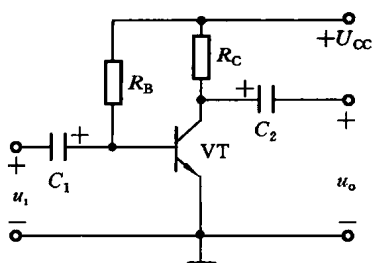


图 8.33

态工作点  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $U_{CE}$ 。

解 由  $I_B \approx \frac{U_{CC}}{R_B} = \frac{16}{200} \text{ mA} = 0.08 \text{ mA}$ , 可得

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 0.08 \text{ mA} = 4 \text{ mA}$$

所以  $U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = (16 - 4 \times 2) \text{ V} = 8 \text{ V}$

2. 在图 8.33 所示电路中, 已知  $U_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  $\beta = 50$ 。若要使  $U_{CE} = 6 \text{ V}$ ,  $I_C = 3 \text{ mA}$ , 试确定  $R_C$ 、 $R_B$  的值。

解 因为

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{I_C} = \frac{12 - 6}{3} \text{ k}\Omega = 2 \text{ k}\Omega$$

由  $I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{3}{50} \text{ mA} = 60 \mu\text{A}$ , 可得

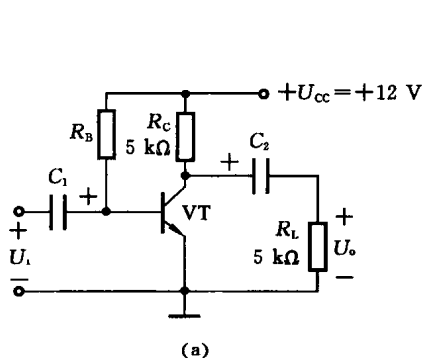
$$R_B = \frac{U_{CC}}{I_B} = \frac{12}{0.06} \text{ k}\Omega = 200 \text{ k}\Omega$$

3. 放大电路如图 8.34(a)所示, 晶体管的输出特性曲线如图 8.34(b)所示。

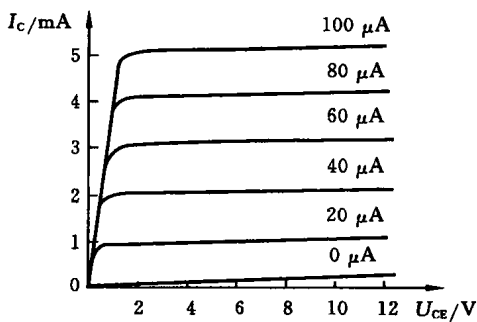
(1) 作出直流负载线。

(2) 确定  $R_B$  分别为  $10 \text{ M}\Omega$ 、 $560 \text{ k}\Omega$  和  $150 \text{ k}\Omega$  时的  $I_C$ 、 $U_{CE}$  值。

(3) 当  $R_B = 560 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C$  改为  $20 \text{ k}\Omega$  时,  $Q$  点将发生什么样的变化? 晶体管工作状态有无变化?



(a)



(b)

图 8.34

解 (1) 直流负载线如图 8.35(a)所示。

(2)  $R_B = 10 \text{ M}\Omega$  时, 由输出特性曲线得  $\beta = 50$ , 则

$$I_B \approx \frac{U_{CC}}{R_B} = \frac{12}{10} \mu\text{A} = 1.2 \mu\text{A}$$

所以

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 1.2 \mu\text{A} = 0.06 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = (12 - 0.06 \times 5) \text{ V} = 11.7 \text{ V}$$

工作点在图 8.35(a)的  $Q_1$  处。

$R_B = 560 \text{ k}\Omega$  时, 有

$$I_B \approx \frac{U_{CC}}{R_B} = \frac{12}{560} \text{ mA} \approx 20 \mu\text{A}$$

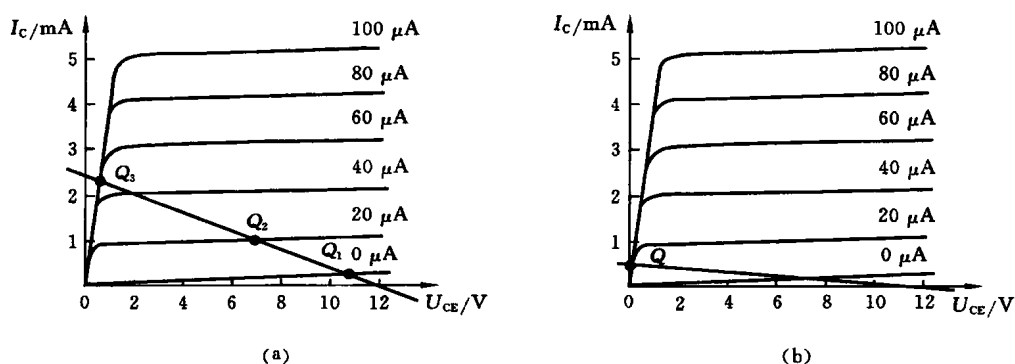


图 8.35

所以

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 20 \mu\text{A} = 1 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = (12 - 1 \times 5) \text{ V} = 7 \text{ V}$$

工作点在图 8.35(a) 的  $Q_2$  处。

$R_B = 150 \text{ k}\Omega$  时, 有

$$I_B \approx \frac{U_{CC}}{R_B} = \frac{12}{150} \text{ mA} = 80 \mu\text{A}$$

$$I_{CS} \approx \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{12}{5} \text{ mA} = 2.4 \text{ mA}$$

$I_{CS}/\beta = 48 \mu\text{A} < I_B$ , 晶体管饱和。

工作点在图 8.35(a) 的  $Q_3$ 。

(3) 当  $R_B = 560 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C$  改为  $20 \text{ k}\Omega$  时,  $I_B \approx 20 \mu\text{A}$ , 画出直流负载线如图 8.35(b) 所示, 由图可知,  $Q$  点在饱和区, 晶体管工作在饱和状态。

4. 利用微变等效电路计算图 8.33 所示的放大电路的电压放大倍数  $A_u$ 、输入电阻  $r_i$  和输出电阻  $r_o$ 。

解 其微变等效电路如图 8.36 所示。

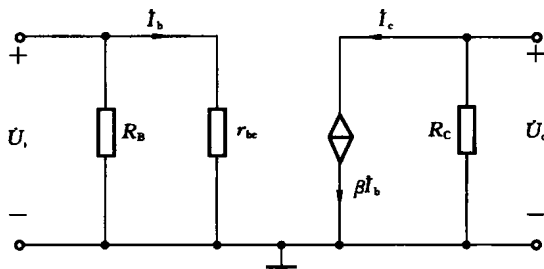


图 8.36

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = \left[ 200 + (1 + 50) \frac{26}{4} \right] \Omega = 532 \Omega$$

所以

$$A_u = \frac{-\beta R_C}{r_{be}} = \frac{-50 \times 2}{0.532} = -188$$

输入电阻

$$r_i = R_B // r_{be} \approx r_{be} = 0.532 \text{ k}\Omega$$

输出电阻

$$r_o \approx R_C = 2 \text{ k}\Omega$$

5. 在图 8.37 所示的放大电路中, 已知  $U_{CC}=12\text{ V}$ ,  $R_{B1}=60\text{ k}\Omega$ ,  $R_{B2}=20\text{ k}\Omega$ ,  $R_C=3\text{ k}\Omega$ ,  $R_E=3\text{ k}\Omega$ ,  $R_S=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_L=3\text{ k}\Omega$ ,  $\beta=100$ ,  $U_{BE}=0.6\text{ V}$ 。

- (1) 求静态值  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $U_{CE}$ ;
- (2) 画出微变等效电路;
- (3) 求输入电阻  $r_i$  和输出电阻  $r_o$ ;
- (4) 求电压放大倍数  $A_u$  和对信号源  $u_s$  的放大倍数  $A_{u_s}$ 。

解 (1) 由  $V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \times 12\text{ V} = 3\text{ V}$ , 得

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} = \frac{3 - 0.6}{3}\text{ mA} = 0.8\text{ mA}$$

所以  $I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0.8}{100}\text{ mA} = 8\text{ }\mu\text{A}$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C(R_C + R_E) = [12 - 0.8 \times (3 + 3)]\text{ V} = 7.2\text{ V}$$

(2) 其微变等效电路如图 8.38 所示。

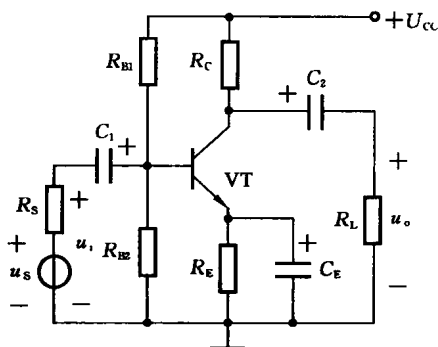


图 8.37

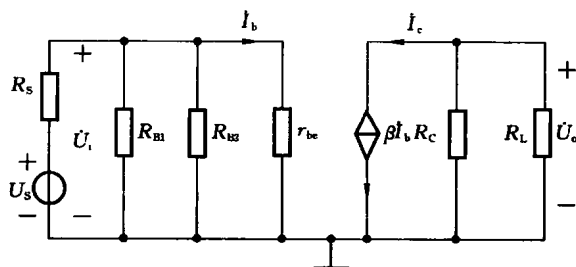


图 8.38

(3) 由  $r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = \left[ 200 + (1 + 100) \frac{26}{0.8} \right]\text{ }\Omega = 3.48\text{ k}\Omega$ , 得

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} = 20 // 60 // 3.48\text{ k}\Omega = 2.82\text{ k}\Omega, \quad r_o \approx R_C = 3\text{ k}\Omega$$

(4)  $A_u = \frac{-\beta R'_L}{r_{be}} = \frac{-100 \times (3 // 3)}{3.48} = -43.1$

$$A_{u_s} = \frac{r_i}{r_i + R_S} A_u = \frac{2.82}{2.82 + 1} \times (-43.1) = -31.8$$

6. 在图 8.39 所示的放大电路中, 已知  $U_{CC}=15\text{ V}$ ,  $R_{B1}=40\text{ k}\Omega$ ,  $R_{B2}=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_C=3\text{ k}\Omega$ ,  $R_E=1.5\text{ k}\Omega$ ,  $R_S=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_L=6\text{ k}\Omega$ ,  $\beta=50$ ,  $U_{BE}=0.6\text{ V}$ 。

- (1) 求静态值  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $U_{CE}$ ;
- (2) 画出微变等效电路;
- (3) 求输入电阻  $r_i$  和输出电阻  $r_o$ ;
- (4) 求电压放大倍数  $A_u$ 。

解 (1) 由  $V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \times 15\text{ V} = 3\text{ V}$ , 得

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_E} = \frac{3 - 0.6}{1.5} \text{ mA} = 1.6 \text{ mA}$$

所以

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1.6}{50} \text{ mA} = 32 \mu\text{A}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C(R_C + R_F) = [15 - 1.6 \times (3 + 1.5)] \text{ V} = 7.8 \text{ V}$$

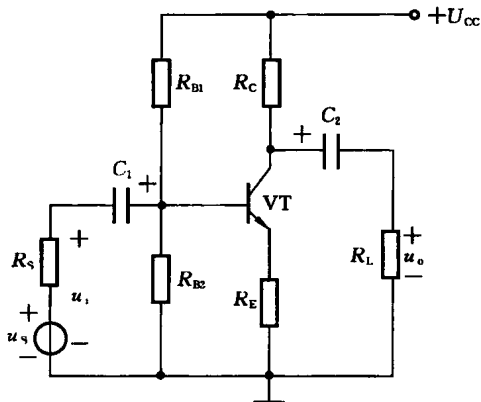


图 8.39

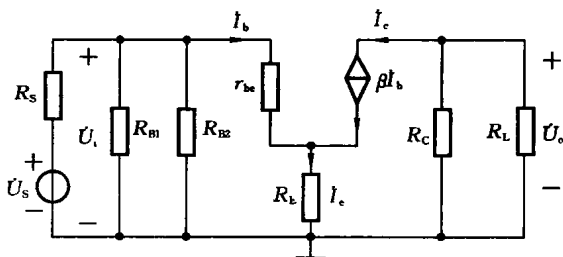


图 8.40

(2) 其微变等效电路如图 8.40 所示。

$$(3) \text{ 因为 } r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = \left[ 200 + (1 + 50) \frac{26}{1.6} \right] \Omega = 1.03 \text{ k}\Omega$$

$$\text{所以 } r_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_E] = 40 // 10 // (1.03 + 51 \times 1.5) \text{ k}\Omega = 7.25 \text{ k}\Omega$$

$$r_o \approx R_C = 3 \text{ k}\Omega$$

$$(4) \quad A_u = \frac{-\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_E} = \frac{-50 \times (3 // 6)}{1.03 + 51 \times 1.5} = -1.3$$

7. 在图 8.41 所示的放大电路中, 已知  $U_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  $R_{B1} = 120 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{B2} = 39 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{E1} = 1.3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{E2} = 100 \Omega$ ,  $R_S = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 3.9 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 40$ ,  $U_{BE} = 0.6 \text{ V}$ 。

(1) 求静态值  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $U_{CE}$ ;

(2) 画出微变等效电路;

(3) 求输入电阻  $r_i$  和输出电阻  $r_o$ ;

(4) 求电压放大倍数  $A_u$ 。

$$\text{解 (1) 由 } V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \times 12 \text{ V} = 2.94 \text{ V, 得}$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - U_{BE}}{R_{E1} + R_{E2}} = \frac{2.94 - 0.6}{1.3 + 0.1} \text{ mA} = 1.67 \text{ mA}$$

所以

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1.67}{40} \text{ mA} = 42 \mu\text{A}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C(R_C + R_{E1} + R_{E2}) = [12 - 1.67 \times (3 + 1.3 + 0.1)] \text{ V} = 4.65 \text{ V}$$

(2) 其微变等效电路如图 8.42 所示。

$$(3) \text{ 因为 } r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = \left[ 200 + (1 + 40) \frac{26}{1.67} \right] \Omega = 0.838 \text{ k}\Omega$$



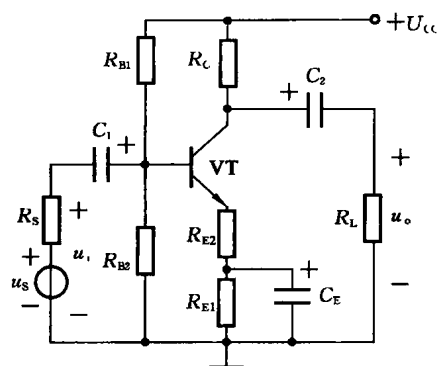


图 8.41

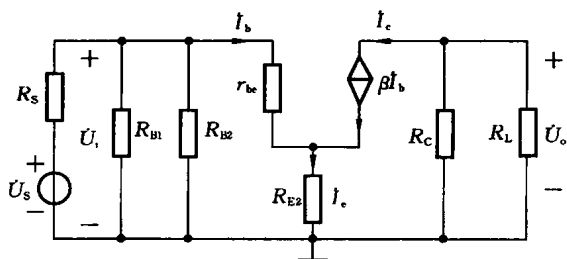


图 8.42

所以  $r_i = R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_{E2}] = 39 // 120 // (0.838 + 41 \times 0.1) \text{ k}\Omega = 4.23 \text{ k}\Omega$

$$r_o \approx R_C = 3 \text{ k}\Omega$$

$$(4) \quad A_u = \frac{-\beta R'_i}{r_{be} + (1 + \beta)R_{E2}} = \frac{-40 \times (3 // 3.9)}{0.838 + (1 + 40) \times 0.1} = -13.74$$

8. 放大电路如图 8.43 所示,  $U_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  $R_B = 75 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_S = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 50$ ,  $U_{BE} = 0.6 \text{ V}$ .

- (1) 求静态工作点;
- (2) 画出微变等效电路;
- (3) 求输入电阻  $r_i$ 、输出电阻  $r_o$  和电压放大倍数  $A_u$ 。

解 (1) 由 
$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E} = \frac{12 - 0.6}{75 + (1 + 50) \times 1} \text{ mA} = 90 \text{ }\mu\text{A}$$

得

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 90 \text{ }\mu\text{A} = 4.5 \text{ mA}$$

所以

$$U_{CE} \approx U_{CC} - I_C R_E = (12 - 4.5 \times 1) \text{ V} = 7.5 \text{ V}$$

- (2) 其微变等效电路如图 8.44 所示。

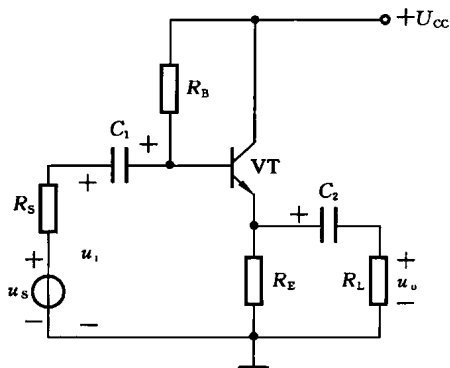


图 8.43

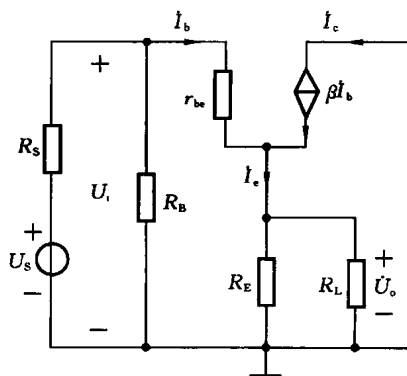


图 8.44

(3) 因为 
$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = \left[ 200 + (1 + 50) \frac{26}{4.5} \right] \Omega \approx 0.5 \text{ k}\Omega$$

$$R'_i = R_E // R_L = 0.5 \text{ k}\Omega$$

所以 
$$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R'_i] = 75 // (0.5 + 51 \times 0.5) \text{ k}\Omega = 19.3 \text{ k}\Omega$$

$$r_o \approx \frac{R'_s + r_{bc}}{\beta} = \frac{1 + 0.5}{50} \text{ k}\Omega = 30 \text{ }\Omega$$

$$A_u = \frac{(1 + \beta)R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L} = \frac{51 \times 0.5}{0.5 + 51 \times 0.5} = 0.98$$

9. 在如图 8.45 所示的两级阻容耦合放大电路中, 已知  $U_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  $R_{B1} = 30 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{B2} = 20 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{C1} = R_{F1} = 4 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{B3} = 130 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{F2} = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 1.5 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ,  $U_{BE1} = U_{BE2} = 0.6 \text{ V}$ 。

- (1) 求前、后级放大电路的静态值;
- (2) 画出微变等效电路;
- (3) 求各级电压放大倍数  $A_{u1}$ 、 $A_{u2}$  和总电压放大倍数  $A_u$ ;
- (4) 后级采用射极输出器有何好处?

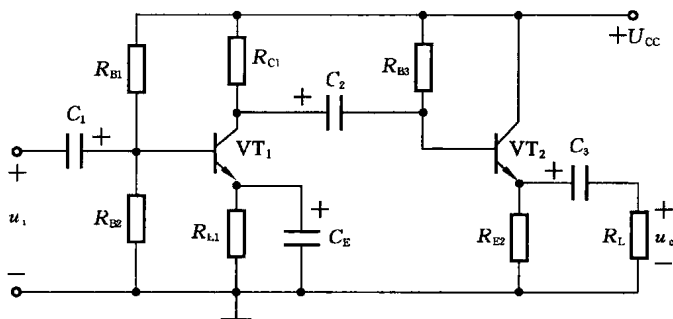


图 8.45

解 (1) 由 
$$V_{B1} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{20}{30 + 20} \times 12 \text{ V} = 4.8 \text{ V}$$

得

$$I_{C1} \approx I_{E1} = \frac{V_{B1} - U_{BE1}}{R_{E1}} = \frac{4.8 - 0.6}{4} \text{ mA} = 1.05 \text{ mA}$$

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_1} = \frac{1.05}{50} \text{ mA} = 21 \text{ }\mu\text{A}$$

$$U_{CE1} = U_{CC} - I_{C1}(R_{C1} + R_{E1}) = [12 - 1.05 \times (4 + 4)] \text{ V} = 3.6 \text{ V}$$

由

$$I_{B2} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_{B3} + (1 + \beta)R_{E2}} = \frac{12 - 0.6}{130 + 51 \times 3} \text{ mA} = 40 \text{ }\mu\text{A}$$

得

$$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = 50 \times 0.04 \text{ mA} = 2 \text{ mA}$$

$$U_{CE2} \approx U_{CC} - I_{C2}R_{E2} = (12 - 2 \times 3) \text{ V} = 6 \text{ V}$$

(2) 其微变等效电路如图 8.46 所示。

(3) 先求出

$$r_{be1} = 200 + (1 + \beta_1) \frac{26}{I_{E1}} = \left[ 200 + (1 + 50) \frac{26}{1.05} \right] \Omega \approx 1.46 \text{ k}\Omega$$

$$r_{be2} = 200 + (1 + \beta_2) \frac{26}{I_{E2}} = \left[ 200 + (1 + 50) \frac{26}{2} \right] \Omega \approx 0.86 \text{ k}\Omega$$

$$R'_1 = R_{E2} // R_L = (3 // 1.5) \text{ k}\Omega = 1 \text{ k}\Omega$$

得

$$r_{i2} = R_{B3} // [r_{be2} + (1 + \beta_2)R'_1] = 130 // (0.86 + 51 \times 1) \text{ k}\Omega = 37.1 \text{ k}\Omega$$

因为

$$R'_{L1} = R_{C1} // r_{i2} = 4 // 37.1 \text{ k}\Omega = 3.6 \text{ k}\Omega$$

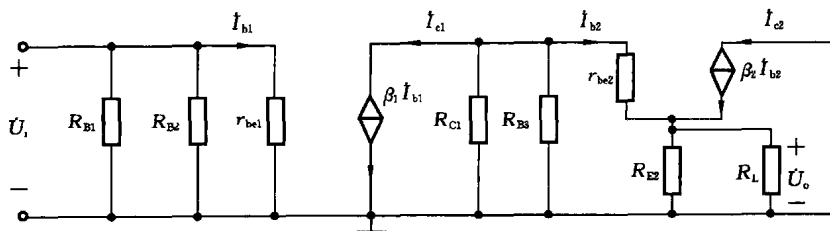


图 8.46

$$\text{所以 } A_{u1} = \frac{-\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1}} = \frac{-50 \times 3.6}{1.46} = -123.3, \quad A_{u2} = \frac{(1+\beta_2) R'_L}{r_{be2} + (1+\beta_2) R'_L} = \frac{51 \times 1}{0.86 + 51 \times 1} = 0.98$$

总电压放大倍数

$$A_u = A_{u1} A_{u2} = -120.8$$

(4) 输出电阻低,带负载能力强。输入电阻高,射级输出器作为第一级的负载,可提高电压放大倍数。

10. 在如图 8.47 所示的两级阻容耦合放大电路中,已知  $U_{CC} = 24 \text{ V}$ ,  $R_{B1} = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_{E1} = 27 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{B2} = 82 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{B3} = 43 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{E2} = 8.2 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ,  $U_{BE1} = U_{BE2} = 0.6 \text{ V}$ 。

- (1) 求前、后级放大电路的静态值;
- (2) 画出微变等效电路;
- (3) 求各级电压放大倍数  $A_{u1}$ 、 $A_{u2}$  和总电压放大倍数  $A_u$ ;
- (4) 前级采用射极输出器有何好处?

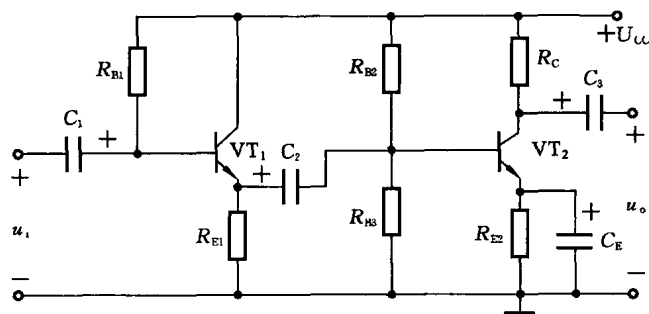


图 8.47

$$\text{解 (1) 由 } I_{B1} = \frac{U_{CC} - U_{BE1}}{R_{B1} + (1+\beta_1)R_{E1}} = \frac{24 - 0.6}{1000 + 51 \times 27} \text{ mA} = 9.8 \mu\text{A}$$

得

$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1} = 50 \times 9.8 \mu\text{A} = 0.49 \text{ mA}$$

$$U_{CE1} \approx U_{CC} - I_{C1} R_{E1} = (24 - 0.49 \times 27) \text{ V} = 10.8 \text{ V}$$

由

$$V_{B2} = \frac{R_{B3}}{R_{B2} + R_{B3}} \cdot U_{CC} = \frac{43}{82 + 43} \times 24 \text{ V} = 8.3 \text{ V}$$

得

$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{B2} - U_{BE2}}{R_{E2}} = \frac{8.3 - 0.6}{8.2} \text{ mA} = 0.94 \text{ mA}$$

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_2} = \frac{0.94}{50} \text{ mA} = 18.8 \mu\text{A}$$

$$U_{CE2} = U_{CC} - I_{C2} (R_C + R_{E2}) = [24 - 0.94 \times (10 + 8.2)] \text{ V} = 6.9 \text{ V}$$

(2) 其微变等效电路如图 8.48 所示。

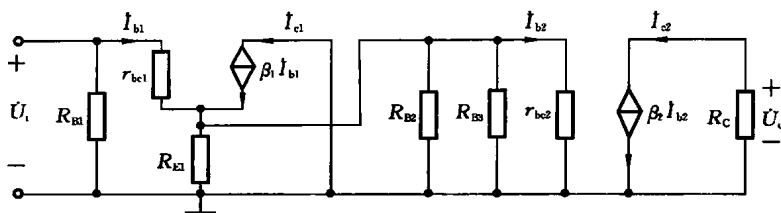


图 8.48

(3) 先求出

$$r_{be1} = 200 + (1 + \beta_1) \frac{26}{I_{E1}} = \left[ 200 + (1 + 50) \frac{26}{0.49} \right] \Omega \approx 2.9 \text{ k}\Omega$$

$$r_{be2} = 200 + (1 + \beta_2) \frac{26}{I_{E2}} = \left[ 200 + (1 + 50) \frac{26}{0.94} \right] \Omega \approx 1.61 \text{ k}\Omega$$

所以

$$r_{i2} = R_{B2} // R_{B3} // r_{be2} = 82 // 43 // 1.61 \text{ k}\Omega = 1.52 \text{ k}\Omega$$

由

$$R'_{i1} = R_{E1} // r_{i2} = 27 // 1.52 \text{ k}\Omega = 1.44 \text{ k}\Omega$$

$$\text{得 } A_{u1} = \frac{(1 + \beta_1) R'_{L1}}{r_{be1} + (1 + \beta_1) R'_{i1}} = \frac{51 \times 1.44}{2.9 + 51 \times 1.44} = 0.96, \quad A_{u2} = \frac{-\beta_2 R_C}{r_{be2}} = \frac{-50 \times 10}{1.61} = -310.6$$

所以

$$A_u = A_{u1} \times A_{u2} = -298.2$$

(4) 输入电阻高,从信号源里可以得到更大的输入电压。

11. 一个多级直接耦合放大器,电压放大倍数为 250,在温度为 25 °C 时,输入信号  $u_i$  为 0 V,输出端口的电压为 5 V,当温度升高到 35 °C 时,输出端口的电压为 5.1 V。试求放大电路折算到输入端的温度漂移(单位为  $\mu\text{V}/(^{\circ}\text{C})$ )。

解

$$u_{od} = (5.1 - 5) \text{ V} = 0.1 \text{ V} = 100 \text{ mV}$$

$$|A_u| = 250$$

$$T = (35 - 25) ^{\circ}\text{C} = 10 ^{\circ}\text{C}$$

$$u_{id} = \frac{u_{od}}{|A_u| T} = \frac{100}{250 \times 10} \text{ mV}/(^{\circ}\text{C}) = 40 \mu\text{V}/(^{\circ}\text{C})$$

12. 差动放大电路如图 8.49 所示。已知  $U_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  $R_B = R_C = R_L = R_E = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{EE} = 12 \text{ V}$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ,  $R_P$  忽略不计,  $r_{be1} = r_{be2} = 2.5 \text{ k}\Omega$ 。

(1) 试求差模电压放大倍数;

(2) 说明电路的输入输出方式。

解 (1) 单端输出的差模电压放大倍数

$$A_d = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}} = -\frac{u_{o2}}{2u_{i1}} = \frac{\beta(R_C // R_L)}{2(R_B + r_{be})} = \frac{50 \times \frac{10 \times 10}{10 + 10}}{2(10 + 2.5)} = 10$$

(2) 双端输入-单端输出方式。

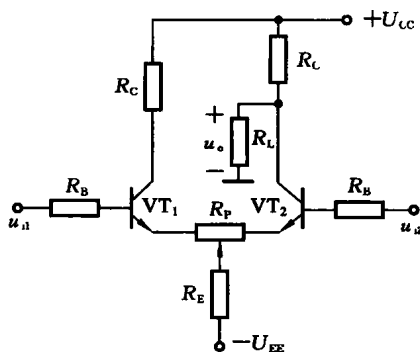


图 8.49

13. 图 8.50 所示的是单端输入-双端输出的差动放大电路,已知  $\beta_1 = \beta_2 = 50$ ,  $U_{BE} = 0.6 \text{ V}$ 。

(1) 计算电路的静态值;

(2) 试求差模电压放大倍数  $A_d = \frac{u_o}{u_i}$ 。

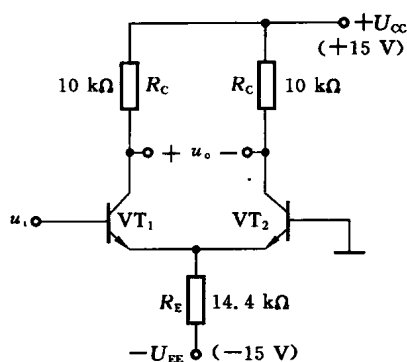


图 8.50

解 (1) 由直流通路列出晶体管  $VT_1$  的 KVL 方程, 可以得出

$$I_C \approx I_E = \frac{U_{EE} - U_{BE}}{2R_E} = \frac{15 - 0.6}{2 \times 14.4} \text{ mA} = 0.5 \text{ mA}$$

从而 
$$I_B = \frac{I_E}{\beta} = \frac{0.5}{50} \text{ mA} = 10 \mu\text{A}$$

所以 
$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - U_{BE} = (15 - 0.5 \times 10 + 0.6) \text{ V} = 10.6 \text{ V}$$

$$(2) r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} = \left[ 200 + (1 + 50) \frac{26}{0.5} \right] \Omega = 2.85 \text{ k}\Omega$$

$$A_d = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{\beta R_C}{r_{be}} = -\frac{50 \times 10}{2.85} = -175.4$$

14. 某场效应管输出特性曲线如图 8.51 所示。

(1) 试判断该管属于哪种类型? 画出其符号。

(2) 其夹断电压  $U_{GS(off)}$  约为多少? 漏极饱和电流  $I_{DSS}$  约为多少?

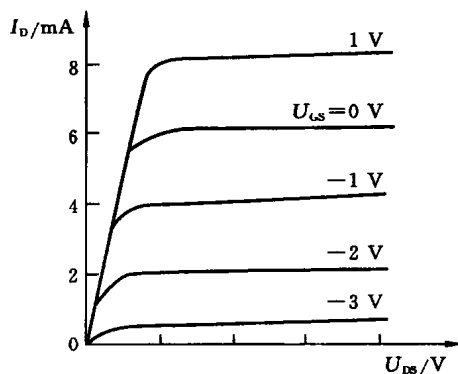


图 8.51

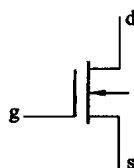


图 8.52

解 (1) 该场效应管属 N 沟道耗尽型绝缘栅型场效应管。其符号如图 8.52 所示。

(2)  $U_{DS(off)} \approx -3.5 \text{ V}$ ,  $I_{DSS} = 6 \text{ mA}$

15. 在如图 8.53 所示放大电路中, 已知  $U_{DD} = 18 \text{ V}$ ,  $R_{G1} = 250 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{G2} = 50 \text{ k}\Omega$ ,  $R_G = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_D = R_S = R_L = 5 \text{ k}\Omega$ , 场效应管  $U_{GS(off)} = -4 \text{ V}$ ,  $I_{DSS} = 4 \text{ mA}$ ,  $g_m = 1 \text{ mA/V}$ 。

(1) 求静态值  $I_D$ 、 $U_{DS}$ ;

(2) 画出微变等效电路;

(3) 求输入电阻  $r_i$  和输出电阻  $r_o$ ;

(4) 求电压放大倍数  $A_u$ 。

解 (1) 静态值

$$U_{GS} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \cdot U_{DD} - I_D R_S = \frac{50}{250 + 50} \times 18 - 5 I_D = 3 - 5 I_D$$

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 = 4 \times \left( 1 + \frac{U_{GS}}{4} \right)^2$$

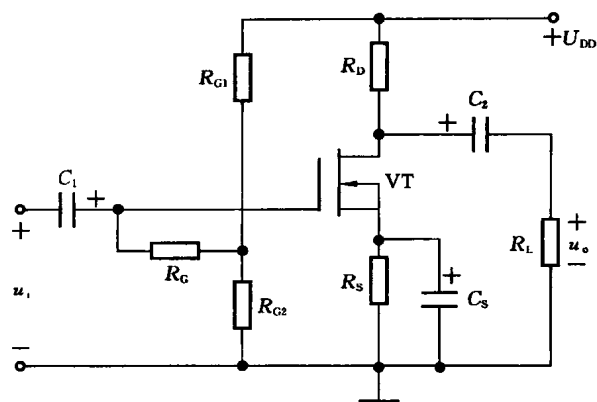


图 8.53

整理得

$$25I_D^2 - 74I_D + 49 = 0$$

解之,取合理根

$$I_D = 1 \text{ mA}, U_{DS} = U_{DD} - I_D(R_D + R_S) = [18 - 1 \times (5 + 5)] \text{ V} = 8 \text{ V}$$

(2) 其微变等效电路如题图 8.54 所示。

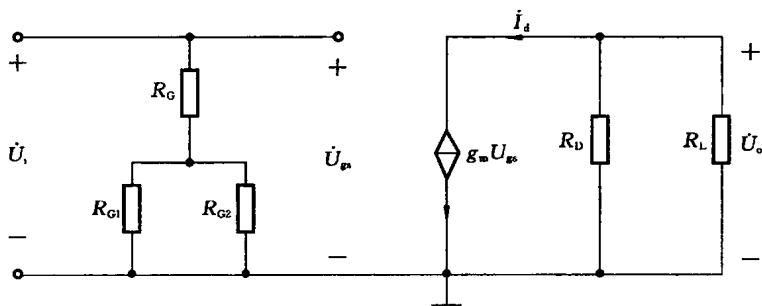


图 8.54

(3) 输入电阻和输出电阻为

$$r_i = R_G + R_{G1} // R_{G2} \approx R_G = 1 \text{ M}\Omega$$

$$r_o \approx R_D = 5 \text{ k}\Omega$$

(4) 由

$$R'_L = R_D // R_L = 5 // 5 \text{ k}\Omega = 2.5 \text{ k}\Omega$$

得电压放大倍数

$$A_u = -g_m R'_L = -1 \times (5 // 5) = -2.5$$

## 第9章 集成运算放大器及其应用

### 9.1 要点总结

#### 9.1.1 集成运算放大器的两个工作区

##### 1. 运算放大器工作在线性区的分析依据

(1) 虚断:由运算放大器的差模输入电阻  $r_{id} \rightarrow \infty$ ,从而得  $i_- = i_+ = 0$ ,即理想运算放大器两个输入端的输入电流为零。

(2) 虚短:由运算放大器的开环电压放大倍数  $A_{uo} \rightarrow \infty$ ,得  $u_+ \approx u_-$ ,理想运算放大器两个输入端的电位相等。如果信号从反相输入端输入,同相输入端接地, $u_- \approx u_+ \approx 0$ ,则反相输入端相当于接地,称“虚地”。

##### 2. 运算放大器工作在非线性区(饱和区)的分析依据

(1) 当  $u_+ > u_-$  时,  $u_o = +U_{o(\text{sat})}$ 。

(2) 当  $u_+ < u_-$  时,  $u_o = -U_{o(\text{sat})}$ 。

(3)  $i_+ = i_- = 0$ 。

#### 9.1.2 基本运算电路

##### 1. 反相比例运算电路

输入信号  $u_i$  经输入电阻  $R_1$  加在反相输入端,闭环电压放大倍数为

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1}$$

当  $R_F = R_1$  时,  $A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1} = -1$ ,称之为反相器。

##### 2. 同相比例运算电路

输入信号  $u_i$  从同相输入端引入,闭环电压放大倍数为

$$A_{uf} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

当  $R_1 \rightarrow \infty$  (断开)或  $R_F = 0$  时,则

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1$$

此即电压跟随器。

##### 3. 加法运算电路

将多个输入信号接到集成运算放大器的反相输入端,则构成反相加法运算电路。

#### 4. 减法运算电路

如果同相及反相两个输入端都有信号输入,则构成比较输入或减法运算电路。

#### 5. 积分运算电路

将反比例运算电路中的  $R_F$  用电容  $C_F$  代替,就构成积分运算电路。

#### 6. 微分运算电路

将积分运算电路中的电阻与电容互换位置,就可得到微分运算电路。

### 9.1.3 电压比较器

#### 1. 电路特点

电压比较器电路中的运算放大器工作在开环状态,输出与输入之间呈现非线性传输特性。在比较器的输入端将输入电压与参考电压进行比较,在输出端以高电平或低电平反映比较结果。

#### 2. 传输特性

电压比较器电路如图 9.1(a)所示,当参考电压  $U_R > 0$  时,其传输特性曲线如图 9.1(b)所示。

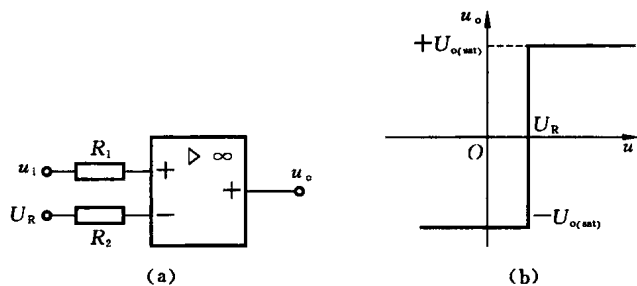


图 9.1

当参考电压  $U_R = 0$  时,称之为过零比较器,其电路和传输特性曲线如图 9.2(a)、图 9.2(b)所示。

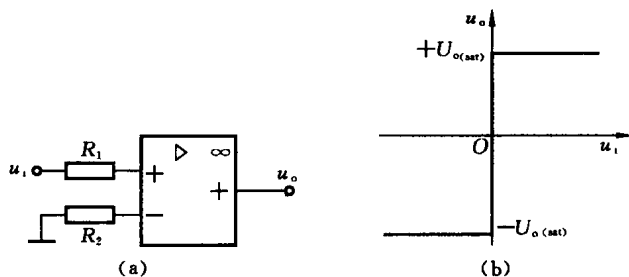


图 9.2

## 9.2 例题解析

**例 9.1** 电路如图 9.3 所示,试证明该电路为恒流源电路。



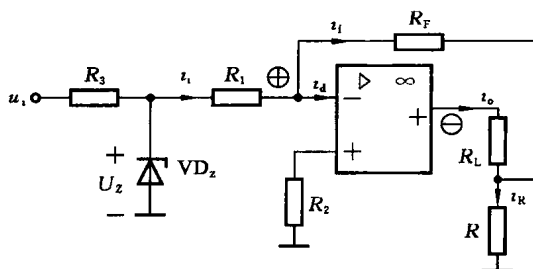


图 9.3

解 由理想运算放大器的“虚地”的概念,  $R_F$  与  $R$  相当于并联关系, 所以

$$-i_i = \frac{R}{R_F + R} i_o$$

又由理想运算放大器的“虚断”的概念,  $i_i = i_f$ , 即

$$i_f = \frac{U_Z}{R_1}$$

所以  $i_o = -\frac{R+R_F}{R \times R_1} U_Z$ , 即输出电流与负载无关, 该电路是恒流源, 证毕。

例 9.2 由理想运算放大器构成的电路如图 9.4 所示, 求该电路的输入电阻。

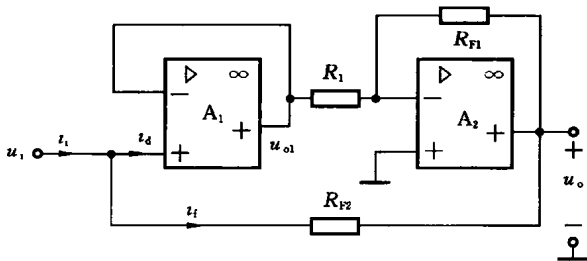


图 9.4

解 电路的输入电阻

$$R_i = \frac{u_i}{i_i}$$

第一级运算放大器  $A_1$  电路为电压跟随器, 所以

$$u_{o1} = u_i$$

第二级运算放大器  $A_2$  电路为反相比例运算电路, 所以

$$u_o = -\frac{R_{F1}}{R_1} u_{o1} = -\frac{R_{F1}}{R_1} u_i$$

由理想运算放大器的“虚断”概念,  $i_i = i_f = \frac{u_i - u_o}{R_{F2}}$ , 则

$$u_o = u_i - i_i R_{F2} = -\frac{R_{F1}}{R_1} u_i$$

所以输入电阻

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{R_1 R_{F2}}{R_1 + R_{F1}}$$

例 9.3 电路如图 9.5 所示, 计算输出电压  $u_o$ 。

解 第一级集成运算放大器  $A_1$ 、 $A_2$  都是同相跟随器, 所以

$$u_{o1} = u_{i1}, \quad u_{o2} = u_{i2}$$

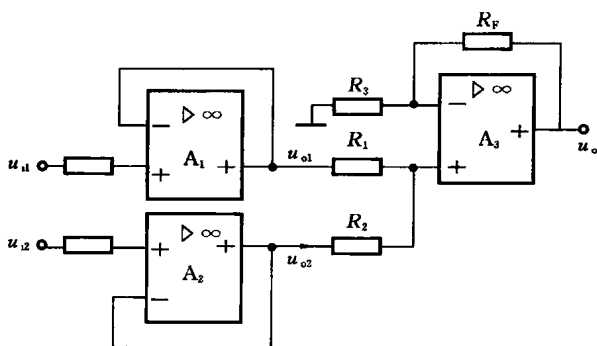


图 9.5

第二级集成运算放大器  $A_3$  接成同相的加法器,从而

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_3}\right) u_+$$

又因为

$$u_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{o1} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{o2}$$

所以

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_3}\right) \frac{R_2 u_{o1} + R_1 u_{o2}}{R_1 + R_2} = \left(1 + \frac{R_F}{R_3}\right) \frac{R_2 + u_{11} + R_1 u_{12}}{R_1 + R_2}$$

**例 9.4** 电路如图 9.6 所示,用 T 形反馈网络代替反馈电阻  $R_F$ ,从而以低值电阻实现高放大倍数,试证明输入输出关系:  $u_o = -\frac{R_{F1} + R_{F2} + R_{F1}R_{F2}/R_{F3}}{R_1} u_1$ 。

**解** 根据理想运算放大器的“虚地”概念,有  $u_- \approx u_+ \approx 0$ ,则

$$i_1 = \frac{u_1}{R_1}$$

并且  $R_{F1}$  与  $R_{F3}$  相当于并联关系,然后与  $R_{F2}$  串联。

又根据理想运算放大器的“虚断”概念,有

$$\begin{aligned} i_1 = i_f &= \frac{-u_o}{R_{F2} + R_{F1} // R_{F3}} \cdot \frac{R_{F3}}{R_{F1} + R_{F3}} \\ &= \frac{-u_o}{R_{F2} + R_{F1} + R_{F1}R_{F2}/R_{F3}} \end{aligned}$$

所以  $u_o = -\frac{R_{F1} + R_{F2} + R_{F1}R_{F2}/R_{F3}}{R_1} u_1$ , 证毕。

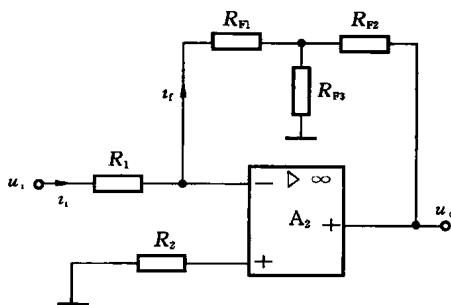


图 9.6

**例 9.5** 已知数学运算关系式为  $u_o = -2u_{11} + u_{12}$ , 画出一个运算放大器实现此运算关系的电路, 且反馈电阻  $R_F = 20 \text{ k}\Omega$ , 要求保持静态时两输入端电阻平衡, 计算并确定其余电阻。

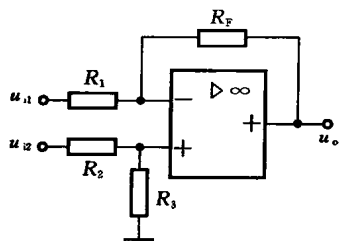


图 9.7

**解** 待设计的是一个减法运算电路, 如图 9.7 所示,

令

$$u_o = u'_o + u''_o = -2u_{11} + u_{12}$$

其中:

$$u'_o = -2u_{11} = -\frac{R_F}{R_1} u_{11}$$

注意到  $u_{12}$  的系数  $\leq 1$ , 故

$$u''_o = u_{12} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{12}$$

$$R_3 = R_1 = 10 \text{ k}\Omega, R_2 = R_F = 20 \text{ k}\Omega$$

这也满足静态时两输入端电阻平衡条件  $R_1 // R_F = R_2 // R_3$ 。

例 9.6 如图 9.8 所示运算放大器为理想元件, 求证:  $u_o$ 。

$$= \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_W}\right)(u_{i1} - u_{i2})。$$

解 对  $A_1$  有  $u_- \approx u_+ = u_{i1}$ ,  $i_{id1} \approx 0$

对  $A_2$  有  $u_- \approx u_+ = u_{i2}$ ,  $i_{id2} \approx 0$

有  $u_{i1} - u_{i2} = IR_W$ ,  $I$  流过  $R_1$ 、 $R_W$ 、 $R_2$ 。

$$\text{故} \quad \frac{u_{i1} - u_{i2}}{R_W}(R_1 + R_2 + R_W) = u_o$$

$$\text{则得} \quad u_o = \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_W}\right)(u_{i1} - u_{i2})$$

例 9.7 图 9.9 中运算放大器的最大输出电压  $U_{OPP} = \pm 18 \text{ V}$ , 已知稳压管稳压值为  $U_Z = 8.3 \text{ V}$ , 正向导通电压  $U_D = 0.7 \text{ V}$ , 比较电压  $U_R = 6 \text{ V}$ 。若输入电压  $u_i = 18\sin(\omega t) \text{ V}$  时, 画出输出电压的波形。

解 根据运算放大器的特点, 当  $u_i > 6 \text{ V}$  时有  $u'_o = -U_{O(sat)} = -18 \text{ V}$ , 此时

$$u_o = (-8.3 - 0.7) \text{ V} = -9 \text{ V}$$

当  $u_i < 6 \text{ V}$  时有  $u'_o = +U_{O(sat)} = +18 \text{ V}$ , 此时

$$u_o = (8.3 + 0.7) \text{ V} = 9 \text{ V}$$

由此得输出波形如图 9.10 所示。

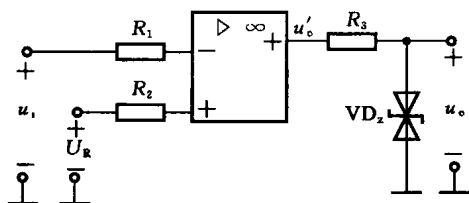


图 9.9

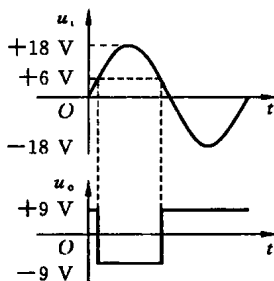


图 9.10

## 9.3 习题解答

### 9.3.1 填空题

1. 集成运算放大器作线性应用时, 一般工作在\_\_\_\_\_状态; 集成运算放大器作非线性应用时, 一般工作在\_\_\_\_\_状态。(闭环工作, 开环工作)

2. 集成运算放大器输入级是接收信号的, 通常对它的要求是有较高的\_\_\_\_\_电阻和很强的\_\_\_\_\_的能力。(输入, 抑制零漂)

3. 理想运算放大器的开环电压放大倍数  $A_{uo}$  的数值为\_\_\_\_\_, 差模输入电阻阻值为\_\_\_\_\_。(∞, ∞)

4. 集成运算放大器实质上是一个高增益的多级\_\_\_\_\_耦合放大电路。第一级常采用\_\_\_\_\_放大电路。(直接,差动)
5. 理想运算放大器工作在线性区时,其同相输入端与反相输入端的电位\_\_\_\_\_,也称为\_\_\_\_\_。(相等,虚短)
6. 理想运算放大器工作在线性区时,流进集成运算放大器的信号电流大小为\_\_\_\_\_,称此为\_\_\_\_\_。(为零,虚断)
7. 理想运算放大器开环输入电阻  $r_i =$  \_\_\_\_\_, 输出电阻  $r_o =$  \_\_\_\_\_。(∞, 0)
8. 理想运算放大器开环电压放大倍数  $A_{uo} =$  \_\_\_\_\_, 共模抑制比  $K_{CRM} =$  \_\_\_\_\_。(∞, ∞)
9. 如果理想运算放大器的同相输入端与反相输入端的电位不相等,则说明它工作在\_\_\_\_\_区。同相输入端与反相输入端的电位比较结果可以判断输出  $U_o$  的\_\_\_\_\_。(非线性,极性)
10. 集成运算放大器内部电路的输出级多采用\_\_\_\_\_电路;在集成运算放大器的输出端加一级互补对称功率放大电路可以扩大\_\_\_\_\_。(射极输出,输出电流)
11. 电压比较器当同相端输入  $U_+$  大于反相端输入  $U_-$  时,输出  $U_o$  极性为\_\_\_\_\_;同相端输入  $U_+$  小于反相端输入  $U_-$  时,输出  $U_o$  极性为\_\_\_\_\_。(正,负)
12. 某负反馈放大电路,已知  $A=10^4$ ,  $F=0.1$ , 则其  $A_f$  约为\_\_\_\_\_, 反馈深度为\_\_\_\_\_。(10, 1 001)
13. 为了稳定静态工作点,应引入\_\_\_\_\_;为了改善动态指标,应引入\_\_\_\_\_。(直流负反馈,交流负反馈)
14. 电压负反馈能够稳定输出\_\_\_\_\_,此时电路输出电阻\_\_\_\_\_。(电压,减小)
15. 电流负反馈能够稳定输出\_\_\_\_\_,此时电路输出电阻\_\_\_\_\_。(电流,增大)
16. 提高输入电阻需引入\_\_\_\_\_,减小输入电阻需引入\_\_\_\_\_。(串联负反馈,并联负反馈)
17. 负反馈有\_\_\_\_\_种组态,若要求输入电阻高,稳定输出电流,在放大电路中应引入交流\_\_\_\_\_负反馈。(4, 串联电流)
18. 若要将方波电压变换为尖脉冲电压,则可采用由运算放大器构成的\_\_\_\_\_电路实现。若要将方波电压变换为三角波电压,则可采用由运算放大器构成的\_\_\_\_\_电路实现。(微分运算,积分运算)
19. 由集成运算放大器构成的反相比例运算电路中,存在交流\_\_\_\_\_负反馈;同相比例运算电路从反馈的角度去看,它属于\_\_\_\_\_反馈电路。(并联电压,串联电压)
20. 电压跟随器的电压放大倍数  $A_{uf}$  等于\_\_\_\_\_,且输出电压与输入电压极性\_\_\_\_\_。(1, 相同)
21. 如将正弦波电压变换为同频率的具有正、负极性的方波电压,则可采用由运算放大器构成的\_\_\_\_\_实现;改变输出电压的大小可在其输出端连接\_\_\_\_\_电路。(过零电压比较器,稳压管限幅)
22. 微分运算电路可以用来将方波变为\_\_\_\_\_波形;积分运算电路可以用来将方波变为\_\_\_\_\_波形。(尖脉冲,三角波)

23. 某负反馈放大电路,  $A=10^3$ , 反馈系数  $F=0.099$ , 由于外部因素的影响,  $\frac{dA}{A}=10\%$ , 则  $\frac{dA_f}{A_f}=\underline{\hspace{2cm}}$ ; 通频带宽度  $BW_f=\underline{\hspace{2cm}}$ 。(0.1%, 100 BW)

24. 电路如图 9.11 所示, VD 为理想二极管,  $R_1=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=R_3=10\text{ k}\Omega$ , 若输入电压  $u_i=1\text{ V}$ , 则输出电压  $u_o$  为  $\underline{\hspace{2cm}}$ , 若输入电压  $u_i=-1\text{ V}$ , 则输出电压  $u_o$  为  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(−5 V, 10 V)

25. 电路如图 9.12 所示, 已知  $R=10\text{ k}\Omega$ ,  $C=100\text{ }\mu\text{F}$ ,  $u_i=1\text{ V}$ , 运算放大器电源电压为  $\pm 12\text{ V}$ , 当电路接通 1 s 后输出电压为  $\underline{\hspace{2cm}}$ , 经过 20 s 后, 输出电压为  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(−1 V, −12 V)

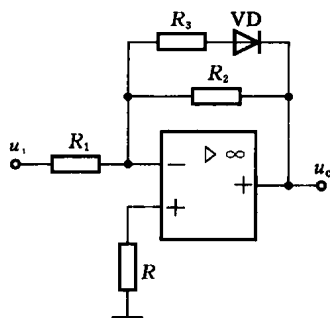


图 9.11

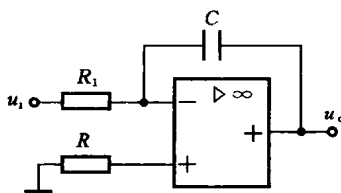


图 9.12

26. 含有运算放大器的滤波器称为  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。它是一种  $\underline{\hspace{2cm}}$  电路。(有源滤波器, 选频)

### 9.3.2 选择题

1. 理想运算放大器工作在线性区时的两个重要结论是( )。(B)

- A. 有虚短, 无虚断                      B. 有虚短, 有虚断  
C. 无虚短, 无虚断                      D. 无虚短, 有虚断

2. 理想运算放大器作放大信号使用时, 其放大倍数  $A_{uf}$  ( )。(C)

- A. 与信号大小有关                      B. 与信号极性有关  
C. 仅与外接电阻有关                      D. 与运算放大器型号有关

3. 在反比例运算电路中, 下列说法错误的是( )。(B)

- A. 同相端接地  $u_+=0$                       B.  $u_-=0$   
C. 共模输入  $u_c=0$                       D. 差模输出  $u_o=0$

4. 理想运算放大器的共模抑制比为( )。(D)

- A. 0                      B. 约 50 dB                      C. 约 100 dB                      D. 无穷大

5. 集成运算放大器的参数“输入失调电压  $U_{io}$ ”是指( )。(B)

- A. 使输入电压为零时的输出电压  
B. 使输出电压为零时, 在输入端应加的补偿电压  
C. 使输出电压出现失真时的输入电压  
D. 使输出电压饱和时的临界输入电压

6. 为避免集成运算放大器因输入电压过高造成输入级损坏,在两输入端间应采取的措施是( )。(D)
- A. 串联两个同向的二极管      B. 串联两个反向的二极管  
C. 并联两个同向的二极管      D. 并联两个反向的二极管
7. 要把输入的矩形波电压转换成同频率的三角波输出电压,应选( )。(B)
- A. 同相比例电路    B. 积分电路      C. 微分电路      D. 有源滤波电路
8. 放大电路中,直流反馈的作用是( )。(C)
- A. 提高增益稳定性    B. 提高输入电阻    C. 稳定静态工作点    D. 增强带负载能力
9. 负反馈放大器的  $A=10^3$ ,若要  $A_f=10^2$ ,则反馈系数  $F=( )$ 。(A)
- A. 0.009      B. 0.09      C. 0.9      D. 9
10. 在深度负反馈时,放大器的放大倍数( )。(B)
- A. 仅与基本放大器有关      B. 仅与反馈网络有关  
C. 与基本放大器和反馈网络密切相关    D. 与基本放大器和反馈网络均无关
11. 若要求放大电路输入电阻低,且稳定输出电压,放大电路中应引入的负反馈类型为( )。(D)
- A. 电流串联      B. 电流并联      C. 电压串联      D. 电压并联
12. 为使输入电阻提高,在放大电路中应引入交流( )。(D)
- A. 电压负反馈    B. 电流负反馈    C. 并联负反馈    D. 串联负反馈
13. 为稳定输出电流,在放大电路中应引入交流( )。(B)
- A. 电压负反馈    B. 电流负反馈    C. 并联负反馈    D. 串联负反馈
14. 由集成运算放大器构成的反相比例运算电路引入了以下何种负反馈?( ) (B)
- A. 电压串联    B. 电压并联    C. 电流串联    D. 电流并联
15. 下列集成器件中,不属于模拟集成器件的是( )。(C)
- A. 集成运算放大器      B. 集成功放  
C. 集成计数器      D. 集成稳压器
16. 为避免外接电阻给运算放大器带来附加输入电压,同相端和反相端的外接电阻应( )。(A)
- A. 反相端等于同相端      B. 同相端大于反相端  
C. 反相端大于同相端      D. 无特殊要求
17. 模拟集成电路的输入级一般采用( )。(B)
- A. 共发射极电路    B. 差动电路      C. 共集电极电路    D. 共基极电路
18. 能够把输入的正弦波信号转换成输出为矩形波信号的电路是( )。(D)
- A. 反相比例电路    B. 积分电路      C. 微分电路      D. 电压比较器电路
19. 微分运算电路的反馈元件是( )。(C)
- A. 电阻      B. 电感      C. 电容      D. 稳压管
20. 在同相比例运算电路中,下列说法正确的是( )。(C)
- A.  $u_+=u_-=0$ ,共模输入信号  $u_{ic}=0$     B.  $u_+=u_-=0$ ,共模输入信号  $u_{ic}=u_i$   
C.  $u_+=u_-=u_i$ ,共模输入信号  $u_{ic}=u_i$     D.  $u_+=u_-=u_i$ ,共模输入信号  $u_{ic}=0$

21. 为了使输出电阻降低,在放大电路中应引入交流( )。(D)  
 A. 串联负反馈 B. 并联负反馈 C. 电压负反馈 D. 电流负反馈
22. 集成运算放大器接成电压跟随器时,电路反馈形式应为( )。(A)  
 A. 电压串联负反馈 B. 电压并联负反馈 C. 电流串联负反馈 D. 电流并联负反馈
23. 要求放大电路取用信号源的电流小,而且输出电流稳定,应在放大电路中引入( )。(D)  
 A. 并联电流负反馈 B. 并联电压负反馈 C. 串联电压负反馈 D. 串联电流负反馈
24. 若要求放大电路输入电阻高,且稳定输出电压,在放大电路中应引入的负反馈组态为( )。(C)  
 A. 电流串联 B. 电流并联 C. 电压串联 D. 电压并联
25. 使低于  $\omega_0$  频率范围内的信号能顺利通过,衰减很小,高于此频率范围以外的信号不易通过,衰减很大,应选用( )。(A)  
 A. 低通滤波器 B. 高通滤波器 C. 带通滤波器 D. 带阻滤波器

### 9.3.3 计算题

1. 电路如图 9.13 所示,输入信号  $u_i = 20\sqrt{2}\sin(\omega t)$  V,求输出电压  $u_o$ 。

解 反比例运算电路,输出电压

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i = -\frac{10}{20} \times 28.28 \text{ mV} = 14.14 \text{ mV}$$

2. 理想运算放大器构成的电路如图 9.14 所示。

- (1) 指出集成运算放大器构成何种运算电路;  
 (2) 若  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_F = 30 \text{ k}\Omega$ ,  $u_i = 0.5 \text{ V}$ , 计算输出电压  $u_o$ ;  
 (3) 求共模输入电压  $u_{ic}$ 。

解 (1) 串联电压负反馈。

$$(2) \quad u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i = 2 \text{ V}$$

$$(3) \quad u_{ic} = 0.5 \text{ V}$$

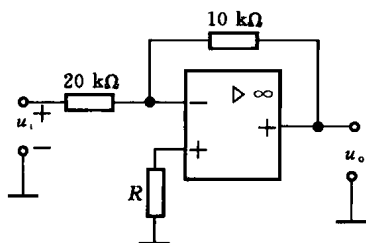


图 9.13

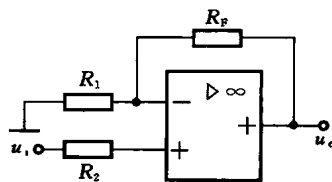


图 9.14

3. 集成运算放大器构成的电路如图 9.15 所示。

- (1) 指出图 9.15 所示电路为何种基本运算电路;  
 (2) 写出  $u_o$  与  $u_{i1}$  和  $u_{i2}$  的表达式;  
 (3) 计算平衡电阻  $R_3$ ;

(4) 指出该电路中存在的负反馈组态。

解 (1) 反相加法运算电路。

$$(2) \quad u_o = -(6u_{i1} + 3u_{i2})$$

$$(3) \quad R_3 = 30 // 60 // 180 \text{ k}\Omega = 18 \text{ k}\Omega$$

(4) 并联电压负反馈。

4. 电路如图 9.16 所示, 已知  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = R_4 = 5 \text{ k}\Omega$ 。

(1) 求  $u_o$  与  $u_{i1}$  和  $u_{i2}$  的关系式;

(2) 当  $u_{i1} = 0.5 \text{ V}$ ,  $u_{i2} = 0.1 \text{ V}$  时, 计算输出电压  $u_o$ , 运算放大器输入端电位  $V_N$ 、 $V_P$ 。

解 (1) 
$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_{i1}}u_{i1} + \frac{R_F}{R_{i2}}u_{i2}\right)$$

$$(2) \quad u_o = -\left(\frac{5}{1} \times 0.5 + \frac{5}{2} \times 0.1\right) \text{ V} = -2.75 \text{ V}, \quad V_N = V_P = 0 \text{ V}$$

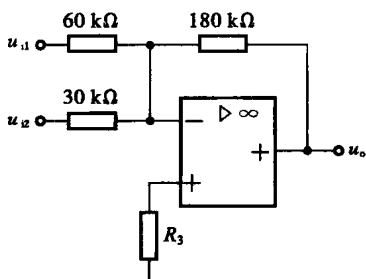


图 9.15

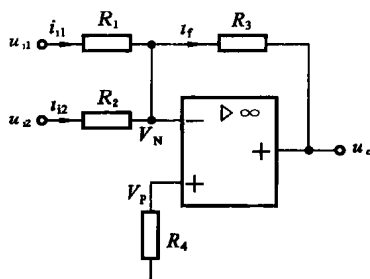


图 9.16

5. 理想运算放大器构成的电路如图 9.17 所示。

(1) 指出理想运算放大器构成何种运算电路;

(2) 写出  $u_o$  与  $u_{i1}$  和  $u_{i2}$  的关系式;

(3) 若  $u_{i1} = 1 \text{ V}$ ,  $u_{i2} = 3 \text{ V}$ , 求  $u_o$ ;

(4) 指出运算放大器反相输入端的电位  $V_-$  为多少。

解 (1) 减法运算电路。

$$(2) \quad u_o = \frac{R_F}{R_1}(u_{i2} - u_{i1})$$

$$(3) \quad u_o = \frac{R_F}{R_1}(u_{i2} - u_{i1}) = \frac{60}{30}(3 - 1) \text{ V} = 4 \text{ V}$$

$$(4) \quad V_- = 2 \text{ V}$$

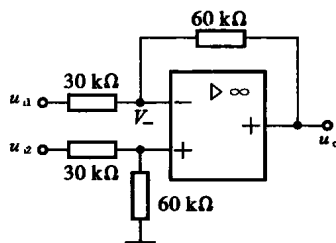


图 9.17

6. 如图 9.18 所示电路, 设  $A_1$ 、 $A_2$  为理想运算放大器。

(1) 求  $u_{o1}$  的表达式;

(2) 求  $u_{o2}$  的表达式;

(3) 求  $u_o$  的表达式;

(4)  $A_1$ 、 $A_2$  各构成什么电路?

解 (1) 
$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_2}{R_1}$$



$$(2) \quad u_{o2} = -\frac{R_3}{R_3} = -1$$

$$(3) \quad u_o = u_{o1} - u_{o2} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

(4)  $A_1$  构成同相比值运算电路,  $A_2$  构成反相比值运算电路。

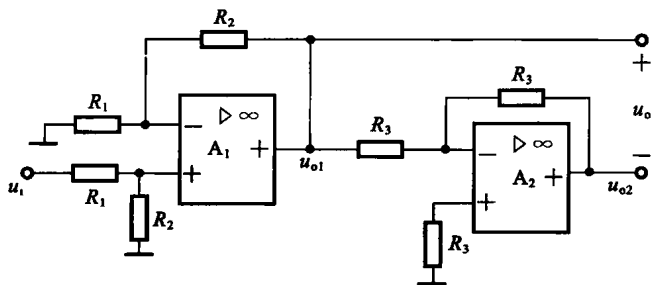


图 9.18

7. 运算放大器电路如图 9.19 所示, 已知  $u_{i1} = 10 \text{ mV}$ ,  $u_{i2} = 20 \text{ mV}$ ,  $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_F = 6 \text{ k}\Omega$ 。

(1) 写出输出电压  $u_o$  与输入电压  $u_{i1}$ 、 $u_{i2}$  之间的运算关系式;

(2) 计算  $u_{o1}$ 、 $u_o$ 、 $R_3$  的值。

$$\text{解 (1)} \quad u_o = -\left(\frac{R_F}{R_{11}}u_{o1} + \frac{R_F}{R_{12}}u_{i2}\right) = -\left(\frac{R_F}{R_{11}}u_{i1} + \frac{R_F}{R_{12}}u_{i2}\right)$$

$$(2) \quad u_{o1} = u_{i1} = 10 \text{ mV}$$

$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_{11}}u_{o1} + \frac{R_F}{R_{12}}u_{i2}\right) = -\left(\frac{R_F}{R_{11}}u_{i1} + \frac{R_F}{R_{12}}u_{i2}\right) = -50 \text{ mV}$$

$$R_3 = R_1 // R_2 // R_F = 1 \text{ k}\Omega$$

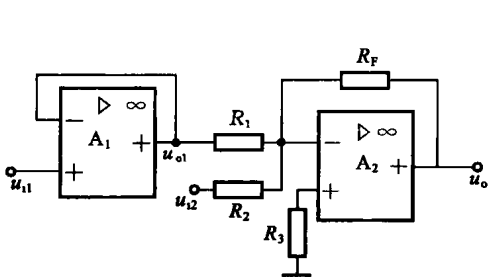


图 9.19

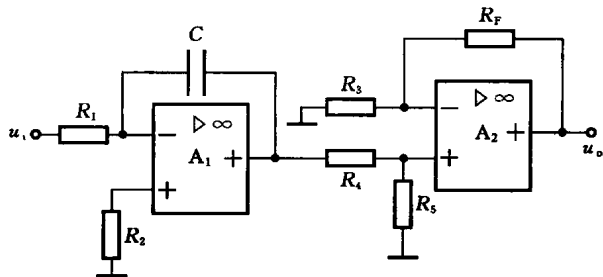


图 9.20

8. 运算放大电路如图 9.20 所示, 已知最大输出电压  $U_{OPP} = \pm 12 \text{ V}$ ,  $R_1 = R_2 = R_4 = R_F = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = R_5 = 200 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 1 \mu\text{F}$ 。

(1) 求输出电压和输入电压的关系式。

(2)  $u_i = 1 \text{ V}$ ,  $t = 1 \text{ s}$  时,  $u_o = ?$

(3)  $u_i = 1 \text{ V}$ ,  $t = 2 \text{ s}$  时,  $u_o = ?$

解 (1) 第一级为积分运算电路

$$u_{o1} = -\frac{1}{R_1 C} \int u_i dt = -\frac{1}{100 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6}} \int u_i dt = -10 \int u_i dt$$

第二级为同相比例运算电路

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_3}\right) \frac{R_5}{R_4 + R_5} u_{o1} = \left(1 + \frac{100}{200}\right) \frac{200}{100 + 200} \times (-10 \int u_i dt) = -10 \int u_i dt$$

(2)  $u_i = 1 \text{ V}$ , 输入为常量,  $u_o = -10u_i t$

$t = 1 \text{ s}$  时, 有  $u_o = -10 \text{ V}$

(3)  $u_i = 1 \text{ V}$ ,  $t = 2 \text{ s}$  时, 有

$$u_o = -10u_i t = -20 \text{ V} > U_{opp}$$

这显然不可能, 所以, 这时  $u_o = U_{opp} = -12 \text{ V}$ 。

9. 已知数学运算关系式  $u_o = -10 \int u_i dt$

(1) 画出用一个运算放大器实现此运算关系式的电路;

(2) 若积分电阻  $R_1 = 500 \text{ k}\Omega$ , 求积分电容的电容容量。

解 (1) 设计电路如图 9.21 所示。

(2)  $C_F = 0.2 \text{ }\mu\text{F}$

10. 用一个集成运算放大器设计一个电路, 满足  $u_o = -4u_{i1} - 6u_{i2}$  的关系, 要求电路的最大输入电阻为  $30 \text{ k}\Omega$ 。

(1) 画出设计的电路图;

(2) 计算电路的输入电阻  $R_1$  和  $R_2$  及反馈电阻  $R_F$ 。

解 (1) 设计电路如图 9.22 所示。

$$(2) \quad u_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} u_{i1} + \frac{R_F}{R_2} u_{i2}\right)$$

$$R_1 = 20 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 30 \text{ k}\Omega, \quad R_F = 120 \text{ k}\Omega$$

11. 运算放大电路如图 9.23 所示, 已知  $u_i > U_Z$ 。

(1) 写出  $u_o$  与  $U_Z$  的关系式。

(2) 说明此电路有何功能。

$$\text{解 (1)} \quad u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) U_Z$$

(2) 输出可调电压。

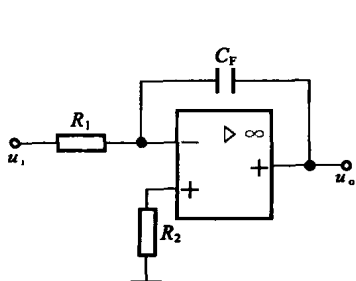


图 9.21

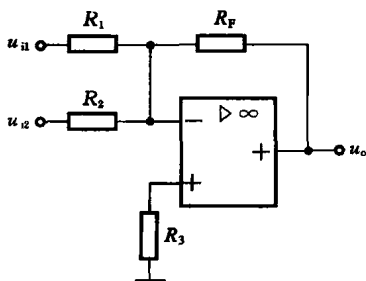


图 9.22

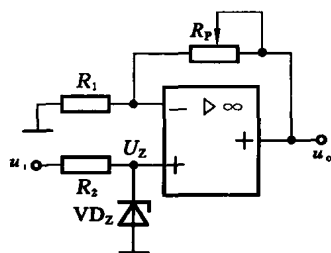


图 9.23

12. 运算放大电路如图 9.24 所示, 已知  $u_i > U_Z$ 。

(1) 写出  $u_o$  与  $U_Z$  的关系式。

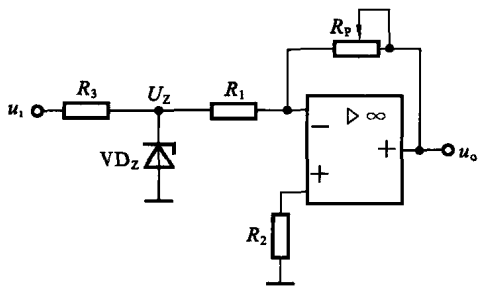


图 9.24

(2) 说明此电路有何功能。

解 (1) 
$$u_o = -\frac{R_P}{R_1} U_Z$$

(2) 反相可调恒压源。

13. 电路如图 9.25(a) 所示, 设输入信号  $u_i$  的幅值为 1 V, 运算放大器的饱和电压为  $\pm 12$  V。

(1) 说明此时运算放大器  $A_1$  和  $A_2$  分别工作在线性区还是非线性区。

(2) 在图 9.25(b) 中画出输出电压  $u_o$  的波形。

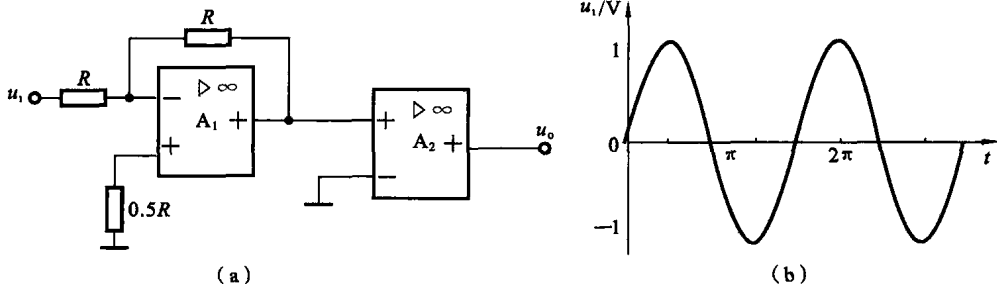


图 9.25

解 (1)  $A_1$  工作在线性区,  $A_2$  工作在非线性区。

(2) 输出电压  $u_o$  的波形如图 9.26 所示。

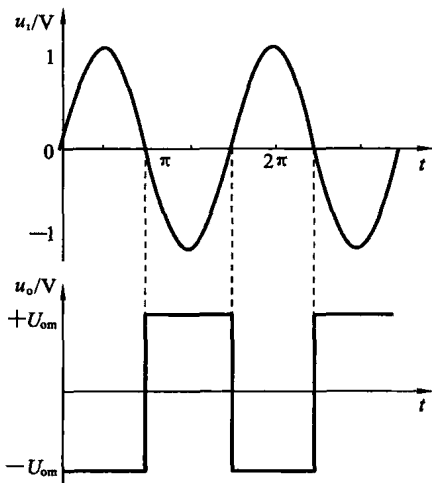


图 9.26

14. 电路如图 9.27(a) 所示, 设运算放大器的饱和电压为  $\pm 12$  V, 两个稳压管  $VD_{Z1}$  和  $VD_{Z2}$  的稳定电压均为 4.3 V, 正向导通电压均为 0.7 V。

(1) 判断此时运算放大器的工作状态。

(2) 在图 9.27(b) 中画出该结构电路的传输特性曲线(输入与输出关系)。

解 (1) 此时运算放大器工作在线性工作状态。

(2) 其传输特性曲线如图 9.28 所示,  $U_R = 3$  V,  $\pm U_Z = \pm 5$  V。

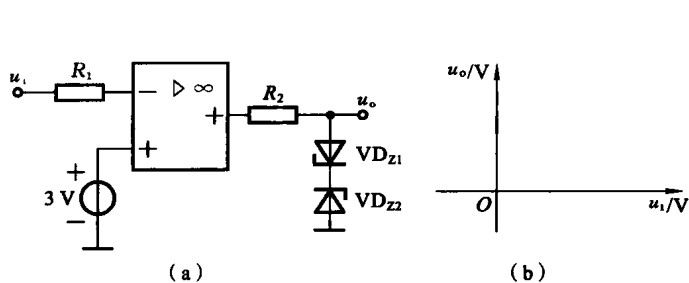


图 9.27

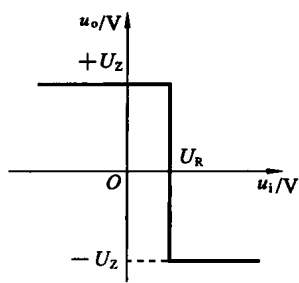


图 9.28

15. 电路如图 9.29(a)所示,  $U_z = \pm 6\text{ V}$ , 图 9.29(b)所示的为输入电压  $u_i$  的波形。

(1) 分析由  $A_1$ 、 $A_2$  组成电路的功能；

(2) 画出  $u_o$  的波形。

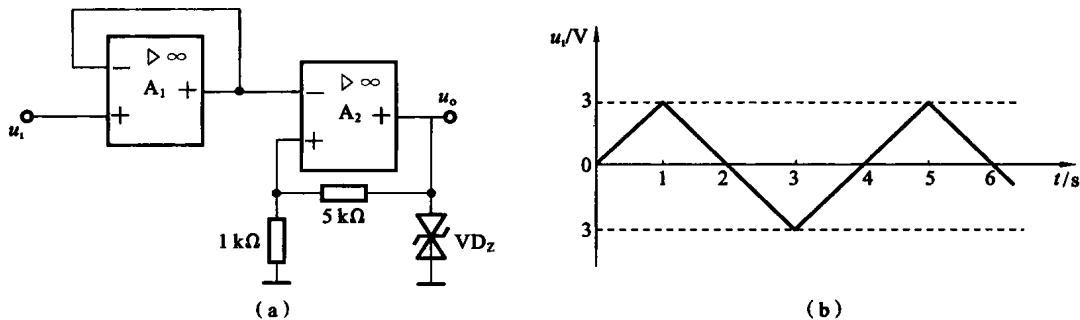


图 9.29

解 (1)  $A_1$  构成电压跟随器, 起隔离作用;  $A_2$  是滞回电压比较器, 起到波形转换作用。

(2) 输出波形如图 9.30 所示。

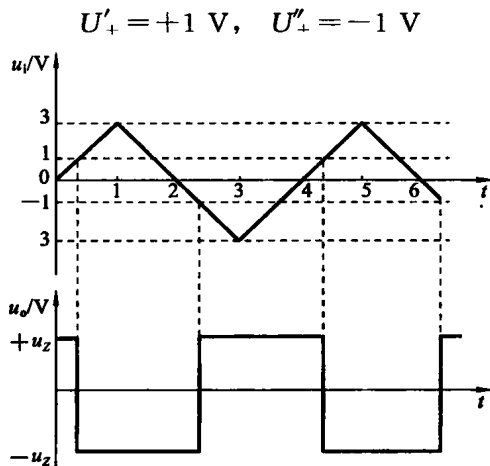


图 9.30

## 第 10 章 直流稳压电源

### 10.1 要点总结

#### 10.1.1 整流电路

整流电路是利用二极管的单向导电性,将交流电压变换为单向脉动的直流电压的电路。

##### 1. 单相半波整流电路

单相半波整流电压的平均值为  $U_O = 0.45U$

整流电流的平均值为  $I_O = \frac{U_O}{R_L} = 0.45 \frac{U}{R_L}$

通过二极管的平均电流为  $I_D = I_O$

二极管承受的最高反向电压为  $U_{DRM} = \sqrt{2}U$

##### 2. 单相桥式整流电路

单相桥式整流电压的平均值为  $U_O = 0.9U$

整流电流的平均值为  $I_O = \frac{U_O}{R_L} = 0.9 \frac{U}{R_L}$

通过二极管的平均电流为  $I_D = \frac{1}{2} I_O$

二极管承受的最高反向电压为  $U_{DRM} = \sqrt{2}U$

$I_D$  和  $U_{DRM}$  是选择整流二极管的依据。

#### 10.1.2 滤波电路

##### 1. 滤波原理

整流电路输出的是单向脉动电压,含有较高的谐波成分,滤波电路利用储能元件(与负载并联的电容  $C$  或与负载串联的电感  $L$ )滤掉输出波形中的交流分量,保留直流分量,使输出电压脉动减小。

##### 2. 电容滤波电路的特点

(1) 输出电压平均值取决于时间常数  $R_L C$ ,  $R_L C$  越大,脉动越小。一般当  $R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$  时,单相桥式整流电容滤波  $U_O = 1.2U$ ,单相半波整流带电容滤波时,  $U_O = U$ 。

(2) 二极管的导通时间短,二极管将承受较大的冲击电流,要选用电流允许值较大的整流二极管。

(3) 电容滤波输出电压平均值受负载  $R_L$  影响大,适用于负载电压较高、电流较小的

场合。

### 3. 电感滤波电路的特点

(1) 电感元件  $L$  对直流分量的感抗为零, 对谐波分量则随频率增加, 感抗增大, 从而使负载  $R_L$  上输出的电压脉动减小, 波形变得较为平滑。

(2) 由于负载电阻  $R_L$  越小(即负载电流越大), 电感的滤波作用越显著, 所以电感滤波适用于低电压、大电流的场合。

(3) 要取得更好的滤波效果, 可以采用  $\pi$  形滤波器。

## 10.1.3 直流稳压电路

### 1. 稳压管稳压电路

#### 1) 电路结构

由硅稳压管  $VD_Z$  和限流电阻  $R$  组成的稳压电路, 接在整流和滤波电路之后, 进一步稳定输出电压。

#### 2) 稳压原理

利用稳压管的反向击穿特性, 当电路的电源电压或负载电流发生变化时, 引起稳压管电流  $I_Z$  变化, 使通过限流电阻  $R$  上的电压发生变化来维持输出电压基本不变。

#### 3) 稳压管的选择

$$U_Z = U_O, \quad I_{ZM} = (1.5 \sim 3) I_{Omax}, \quad U_I = (2 \sim 3) U_O$$

### 2. 恒压源

恒压源由稳压管稳压电路和运算放大器组成, 有同相输入和反相输入两种恒压源, 分别如图 10.1 和图 10.2 所示。

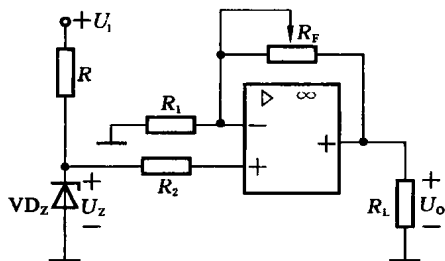


图 10.1

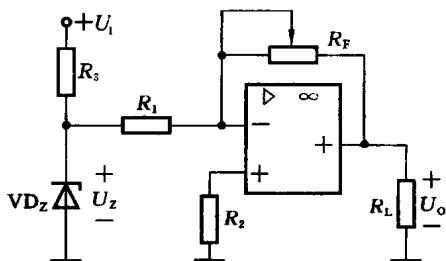


图 10.2

同相输入恒压源的输出电压  $U_O = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) U_Z$

反相输入恒压源的输出电压  $U_O = -\frac{R_F}{R_1} U_Z$

### 3. 串联型稳压电路

#### 1) 电路结构

由稳压管提供基准电压, 运算放大器的输出接在调整管 VT 的基极, 调整管 VT 构成射极输出器, 其射极输出通过采样电阻  $R_F$  和  $R_1$  引回至运算放大器的反相输入端, 构成电压串联负反馈, 使输出电压稳定, 如图 10.3 所示。

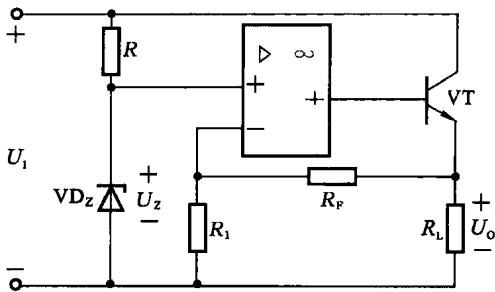


图 10.3

2) 输出稳定电压

$$U_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) U_z$$

4. 集成稳压器

三端固定式集成稳压器是应用比较广泛的产品，它具有体积小、使用方便、内部含有过流和过热保护电路等优点。

1) 基本电路

最常用的三端固定式输出电压集成稳压器是 W78×× 系列和 W79×× 系列。W78×× 系列是正压输出的，W79×× 系列是负压输出的。W78×× 系列外形如图 10.4(a) 所示，其基本应用电路如图 10.4(b) 所示。

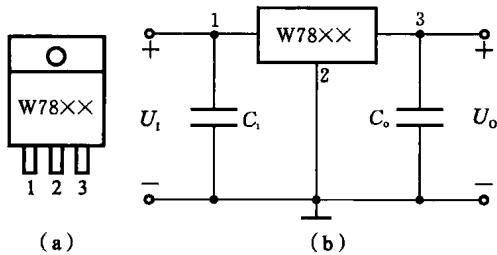


图 10.4

2) 正负电压同时输出的电路

用 W7815 和 W7915 设计的能同时输出 ±15 V 直流电压的电路如图 10.5 所示。

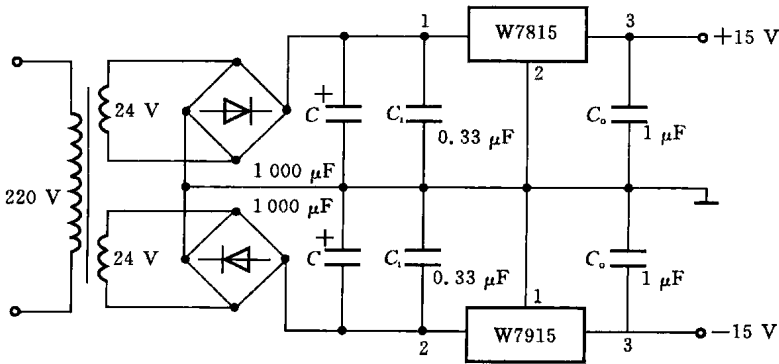


图 10.5

3) 输出电压可调的电路

输出电压可调的电路如图 10.6 所示。

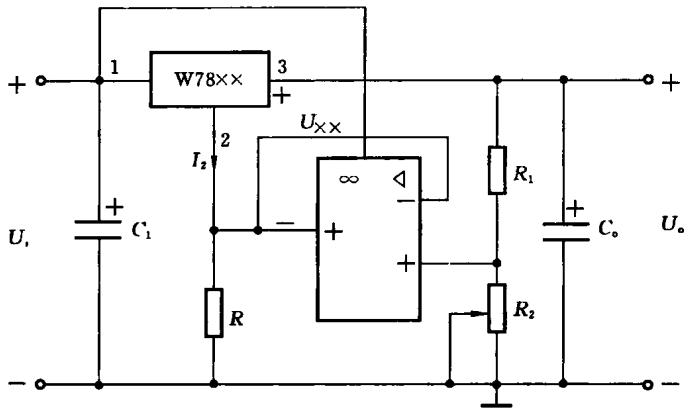


图 10.6

输出电压 
$$U_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_{xx}$$

调节电阻  $R_2$ , 可在较大范围内改变输出电压的大小。

10.2 例题解析

例 10.1 二倍压整流电路如图 10.7 所示,  $U_o = 2\sqrt{2}U$ , 简述其工作原理, 并标出  $u_o$  的极性。

解 当  $u$  在正半周时,  $VD_1$  导通,  $VD_2$  截止, 电压  $u$  通过  $VD_1$  对  $C_1$  充电, 最大值为  $\sqrt{2}U$  (极性左正右负)。当  $u$  为负半周时,  $VD_1$  截止,  $VD_2$  导通, 电压  $u_{C1} + u$  通过  $VD_2$  一方面供给  $R_L$  电流, 同时给  $C_2$  充电。由于  $C_1$  放电很慢, 其上电压近似为  $\sqrt{2}U$ , 因此,  $C_2$  两端电压最后接近  $2\sqrt{2}U$  (极性下正上负)。

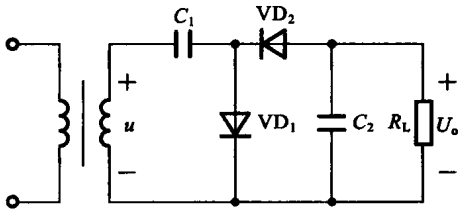


图 10.7

当  $VD_2$  截止时,  $C_2$  通过  $R_L$  放电, 由于  $R_L$  阻值较大, 即放电时间常数很大, 所以  $C_2$  两端电压  $U_o$  衰减很少, 基本维持在  $2\sqrt{2}U$ , 是变压器二次绕组电压最大值的 2 倍, 故称为二倍压整流电路。

二倍压整流电路中, 每个二极管所承受的最大反向电压为  $2\sqrt{2}U$ , 电容  $C_1$  的耐压应大于  $\sqrt{2}U$ ,  $C_2$  的耐压应大于  $2\sqrt{2}U$ 。

例 10.2 有一整流电路如图 10.8 所示。

- (1) 试指出输出电压  $U_{o1}$  和  $U_{o2}$  的极性, 并求出平均电压  $U_{o1}$  和  $U_{o2}$  的值。
- (2) 试求二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$ 、 $VD_3$  中的平均电流  $I_{VD1}$ 、 $I_{VD2}$ 、 $I_{VD3}$ 。
- (3) 求二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$ 、 $VD_3$  所承受的最高反向电压。

解 (1) 当输入电压为正半周时,  $VD_1$ 、 $VD_3$  截止,  $VD_2$  导通,  $R_{L2}$  上获得正半周波形; 当



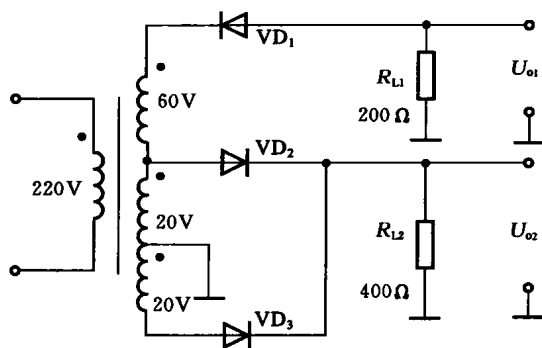


图 10.8

输入电压为负半周时,  $VD_1$ 、 $VD_3$  导通,  $VD_2$  截止, 此时  $R_{L1}$  上获得负半周波形,  $R_{L2}$  上还是获得正半周波形, 所以  $U_{o1}$  为负极性电压,  $U_{o2}$  为正极性电压。

$U_{o1}$  为半波整流输出电压, 其输入电压为

$$U'_2 = (60 + 20) \text{ V} = 80 \text{ V}$$

则

$$U_{o1} = 0.45U'_2 = 36 \text{ V}$$

$U_{o2}$  为全波整流输出电压, 其输入电压为  $U_2 = 20 \text{ V}$

所以

$$U_{o2} = 0.9U_2 = 18 \text{ V}$$

(2) 根据单相半波和单相全波整流电路的特点, 有

$$I_{D1} = \frac{U_{o1}}{R_{L1}} = \frac{36}{200} \text{ A} = 180 \text{ mA}$$

$$I_{D2} = I_{D3} = \frac{1}{2} \frac{U_{o2}}{R_{L2}} = \frac{1}{2} \times \frac{18}{400} \text{ A} = 22.5 \text{ mA}$$

(3) 二极管的最高反向电压为

$$U_{DRM1} = \sqrt{2} \times 80 \text{ V} = 113.1 \text{ V}$$

$$U_{DRM2} = U_{DRM3} = 2\sqrt{2} \times 20 \text{ V} = 56.6 \text{ V}$$

**例 10.3** 整流电路如图 10.9 所示, 二极管是理想元件,  $U_{21}$  和  $U_{22}$  的有效值分别为  $U_{21} = 10 \text{ V}$ ,  $U_{22} = 30 \text{ V}$ , 负载电阻  $R_{L1} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{L2} = 3 \text{ k}\Omega$ 。

(1) 求电流平均值  $I_{ab}$ 。

(2) 若  $VD'_1$  不慎断开, 则电流平均值  $I_{ab}$  是否有变化? 为什么?

**解** (1)  $U_{o1}$  为上面桥式整流电路的输出电压, 所以

$$U_{o1} = 0.9U_{21} = 9 \text{ V}$$

$U_{o2}$  为下面桥式整流电路的输出电压, 所以

$$U_{o2} = 0.9U_{22} = 27 \text{ V}$$

$$I_{o1} = \frac{U_{o1}}{R_{L1}} = 9 \text{ mA}, \quad I_{o2} = \frac{U_{o2}}{R_{L2}} = 9 \text{ mA}$$

所以根据 KCL:

$$I_{ab} = I_{o2} - I_{o1} = 0$$

(2) 若  $VD'_1$  断开, 上面的桥式整流电路变成了半波整流电路,  $U_{o1}$  减小, 则  $I_{o1}$  也减小, 从而  $I_{ab}$  增大。

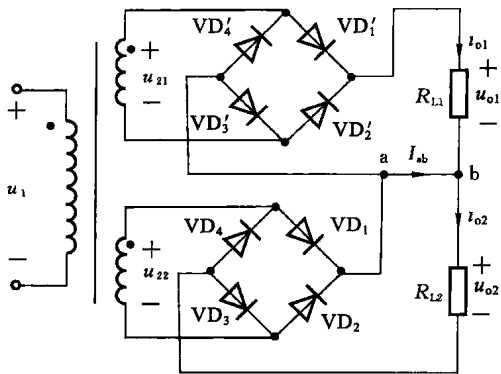


图 10.9

**例 10.4** 电路如图 10.10 所示,已知  $U_2=40\text{ V}$ ,稳压管的参数为:稳定电压  $U_Z=12\text{ V}$ ,最大稳定电流  $I_{ZM}=20\text{ mA}$ ,电阻  $R=1.2\text{ k}\Omega$ , $R_L=2.4\text{ k}\Omega$ 。

- (1) 求开关  $S_1$ 、 $S_2$  闭合, $S_3$  断开时的输出电压。
- (2) 开关  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  都闭合时,稳压管的电流是否合适?
- (3) 求开关  $S_1$  断开, $S_2$ 、 $S_3$  闭合时稳压管的电流。

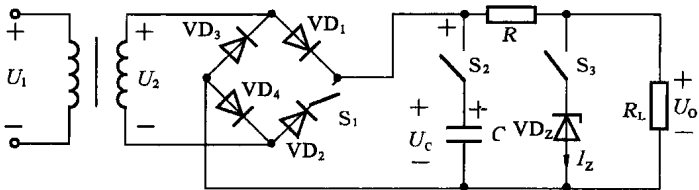


图 10.10

**解** (1) 开关  $S_1$ 、 $S_2$  闭合, $S_3$  断开时,电路为单相桥式整流带电容滤波的电路。此时电容  $C$  的电压为整流、滤波后的电压,即

$$U_C=1.2U_2=48\text{ V}$$

所以

$$U_O=\frac{R_L}{R+R_L}U_C=32\text{ V}$$

(2) 开关  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  都闭合时,电路为单相桥式整流带电容滤波及稳压的电路。

此时

$$U_C=1.2U_2=48\text{ V}$$

输出电压

$$U_O=U_Z=12\text{ V}$$

稳压管电流  $I_Z=\frac{U_C-U_O}{R}-\frac{U_Z}{R_L}=25\text{ mA}>I_{ZM}$ ,稳压管不合适,需要换容量大的稳压管。

(3) 若开关  $S_1$  断开, $S_2$ 、 $S_3$  闭合,电路为单相半波整流带电容滤波及稳压的电路。

此时

$$U_C=1.0U_2=40\text{ V}$$

输出电压

$$U_O=U_Z=12\text{ V}$$

稳压管电流  $I_Z=\frac{U_C-U_O}{R}-\frac{U_Z}{R_L}=18.3\text{ mA}<I_{ZM}$

**例 10.5** 串联型稳压电路如图 10.11 所示。已知  $U_Z=8\text{ V}$ , $R_1=2\text{ k}\Omega$ , $R_F=1.5\text{ k}\Omega$ , $U_1=$

30 V, 调整管 VT 的电流放大系数  $\beta=60$ 。

(1) 求输出电压的调整范围。

(2) 当  $U_O=12\text{ V}$ ,  $R_1=100\ \Omega$  时, 求运算放大器的输出电流(忽略  $R_1$ 、 $R_2$  中的电流)。

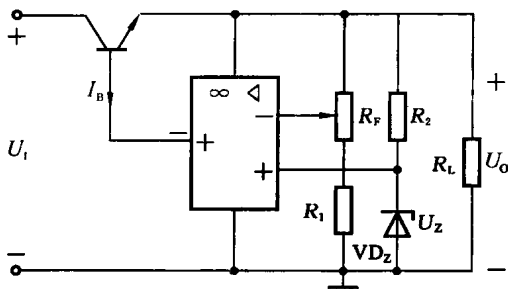


图 10.11

解 (1) 滑动端头移到  $R_F$  最上端时, 根据理想运算放大器的“虚短”, 可知

$$U_O = U_Z = 8\text{ V}$$

滑动端头移到  $R_F$  最下端时, 输出电压

$$U_O = \frac{U_Z}{R_1} (R_1 + R_F) = 14\text{ V}$$

所以输出电压的调整范围是  $8 \sim 14\text{ V}$ 。

(2) 由题意, 负载电流  $I_O = \frac{U_O}{R_1} = 120\text{ mA}$ , 此即调整管 VT 的发射极电流。

运算放大器的输出电流也就是调整管的基极电流  $I_B$ , 所以运算放大器的输出电流为

$$I_B = \frac{I_O}{\beta} = 2\text{ mA}$$

## 10.3 习题解答

### 10.3.1 填空题

1. 在电子线路和自动控制系统中, 常需要稳定的直流电压, 直流稳压电源主要由变压器、\_\_\_\_、\_\_\_\_和稳压电路四部分电路组成。(整流电路, 滤波电路)

2. 单相半波整流电路输出平均电压为  $18\text{ V}$ , 则变压器二次绕组电压有效值为\_\_\_\_ V, 单相桥式整流电路输出平均电压为  $18\text{ V}$ , 则变压器二次绕组电压有效值为\_\_\_\_ V。(40, 20)

3. 带电容滤波的单相半波整流电路中, 若变压器二次绕组电压有效值为  $U$ , 二极管承受的最高反向电压\_\_\_\_, 带电容滤波的单相桥式整流电路中, 二极管承受的最高反向电压\_\_\_\_。(  $U_{\text{DRM}} = 2\sqrt{2}U$ ,  $U_{\text{DRM}} = \sqrt{2}U$  )

4. 在电容滤波和电感滤波电路中, \_\_\_\_滤波适应于大电流负载, \_\_\_\_滤波的直流输出电压高。(电感, 电容)

5. 单相桥式整流电容滤波电路中, 变压器二次绕组电压有效值为  $U_2 = 20\text{ V}$ , 负载电压

的平均值  $U_o = \underline{\hspace{2cm}}$  V, 若滤波电容断开, 则  $U_o = \underline{\hspace{2cm}}$  V。(24, 18)

6. 电路如图 10.12 所示, 二极管为理想元件, 已知交流电压表  $V_1$  的读数为 100 V, 负载电阻  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ , 开关 S 断开时, 直流电压表  $V_2$  的读数为  $\underline{\hspace{2cm}}$ , 电流表 A 的读数为  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(45 V, 45 mA)

7. 电路如图 10.12 所示, 二极管为理想元件, 已知交流电压表  $V_1$  的读数为 100 V, 负载电阻  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ , 开关 S 闭合时, 直流电压表  $V_2$  的读数为  $\underline{\hspace{2cm}}$ , 电流表 A 的读数为  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(90 V, 90 mA)

8. 电路如图 10.13 所示, 稳压管  $VD_{Z1}$  的稳定电压  $U_{Z1} = 12 \text{ V}$ ,  $VD_{Z2}$  的稳定电压为  $U_{Z2} = 6 \text{ V}$ ,  $R_1$ 、 $R_L$  取值后, 可使稳压管  $VD_{Z1}$ 、 $VD_{Z2}$  起稳压作用, 则电压  $u_o$  等于  $\underline{\hspace{2cm}}$ ,  $u_1$  等于  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(6 V, 8 V)

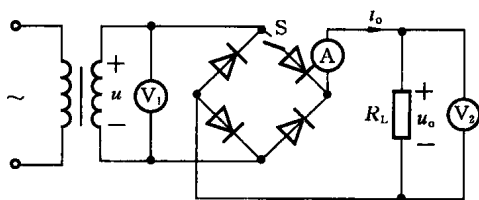


图 10.12

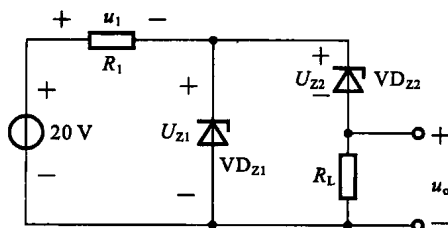


图 10.13

9. 单相半波整流滤波电路如图 10.14 所示, 假设二极管 VD 是理想元件, 负载电阻  $R_L = 500 \Omega$ , 电容  $C = 300 \mu\text{F}$ , 变电器二次绕组电压有效值  $U_2 = 20 \text{ V}$ , 若测得 a、b 两点电压分别为 9 V、28 V。试分析两种测量值对应的电路状态:  $\underline{\hspace{2cm}}$  和  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(电容开路, 负载开路)

10. 三端集成稳压器的应用电路如图 10.15 所示, 输出电压  $U_o = \underline{\hspace{2cm}}$ , 外加稳压管  $VD_Z$  的作用是  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(11 V, 提高输出电压)

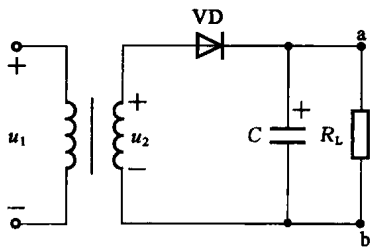


图 10.14

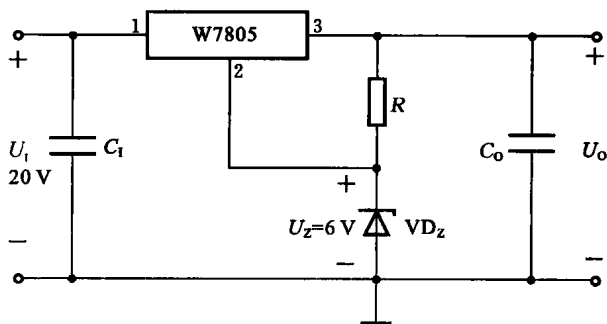


图 10.15

11. 电路如图 10.16 所示, 已知  $U_1 = 30 \text{ V}$ , 稳压管的参数为: 稳定电压  $U_Z = 14 \text{ V}$ , 最大稳定电流  $I_{ZM} = 15 \text{ mA}$ , 电阻  $R = 1.6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 2.8 \text{ k}\Omega$ 。试求各表的读数: 电压表(V)  $\underline{\hspace{2cm}}$ , 电流表(A)  $\underline{\hspace{2cm}}$  (设电流表内阻为零, 电压表内阻视为无穷大)。(14 V, 10 mA)

12. 电路如图 10.16 所示, 写出区段 II、IV 各部分电路的名称:  $\underline{\hspace{2cm}}$ 、 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。(整流电路, 稳压电路)

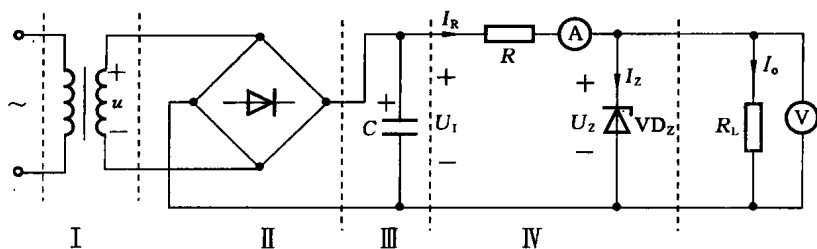


图 10.16

## 10.3.2 选择题

- 在整流电路中,设整流电路的输出电流平均值为  $I_o$ ,如果流过每个二极管的电流平均值  $I_D = I_o/2$ ,每个二极管的最高反向电压为  $\sqrt{2}U$ ,则这种电路是( )。(A)
  - 单相桥式整流电路
  - 单相全波整流电路
  - 单相半波整流电路
  - 单相半波整流电容滤波电路
- 已知一负载  $R_L = 40 \Omega$ ,采用单相桥式整流电路,负载平均电压为 30 V,则二极管的平均电流为( )。(A)
  - 0.375 A
  - 0.42 A
  - 0.75 A
  - 0.84 A
- 图 10.17 所示的为稳压管稳压电路。 $R = 100 \Omega$ ,当稳压管的电流  $I_Z$  变化范围为 5~40 mA 时, $R_L$  的变化范围为( )。(B)
  - 0~100  $\Omega$
  - 63~100  $\Omega$
  - 0~63  $\Omega$
  - 100~ $\infty \Omega$
- 整流电路如图 10.18 所示,输出电压平均值  $U_o$  是 18 V,若因故一个二极管损坏而断开,则输出电压平均值  $U_o$  是( )。(A)
  - 9 V
  - 20 V
  - 40 V
  - 10 V

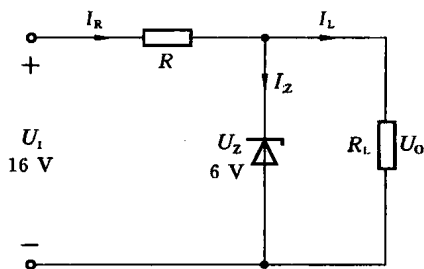


图 10.17

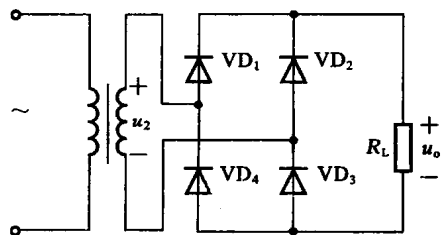


图 10.18

- 整流电路如图 10.19 所示,输入电压  $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t)$ ,输出电压  $u_o$  的波形是( )。(D)
- 带滤波器的桥式整流电路如图 10.20 所示, $U_2 = 20 \text{ V}$ ,现在用直流电压表测量  $R_L$  端电压  $U_o$ ,出现下列几种数据,试分析各属于什么情况。(C,D,A,B)
 

$U_o = 28 \text{ V}$  ( ),  $U_o = 18 \text{ V}$  ( ),  $U_o = 24 \text{ V}$  ( ),  $U_o = 9 \text{ V}$  ( )。

  - 正常
  - 电容及一个二极管开路
  - 负载开路
  - 电容开路
- 单相桥式整流滤波电路如图 10.20 所示,设二极管为理想元件,已知负载电阻  $R_L = 110 \Omega$ ,电路输出电压  $U_o = 150 \text{ V}$ ,试根据表 10.1 选择合适型号的二极管( )。(C)

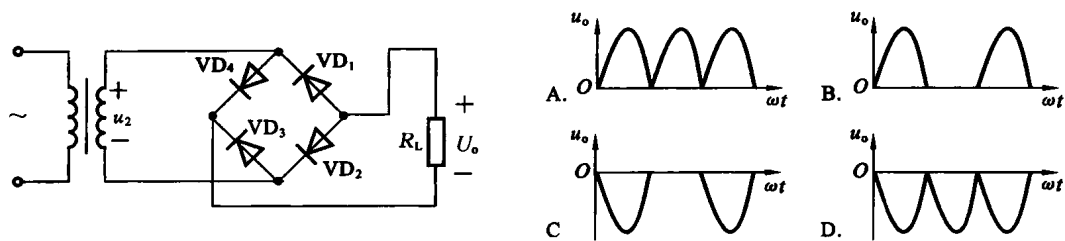


图 10.19

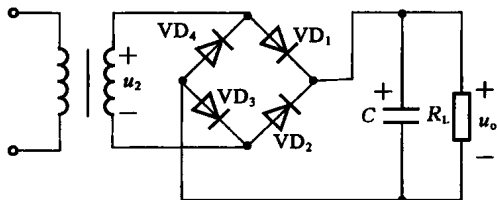


图 10.20

表 10.1 二极管型号及其参数

型号	最大整流电流平均值/mA	最高反向峰值电压/V
2CZ12C	3 000	200
2CZ11A	1 000	100
2CZ11B	1 000	200

- A. 2CZ11C      B. 2CZ11A      C. 2CZ11B      D. 都不合适
8. 稳压管正常工作的电流范围是( )。(B)
- A. 没有任何限制    B. 大于  $I_{Zmin}$ , 小于  $I_{Zmax}$     C. 大于  $I_{Zmax}$     D. 小于  $I_{Zmax}$
9. 三端集成稳压器 W7915 的输出电压为( )。(D)
- A. +15 V      B. -5 V      C. +5 V      D. -15 V
10. 在图 10.21 所示电路中,  $U_{AB}$  为( )。(C)
- A. +5 V      B. -5 V      C. +10 V      D. 0 V

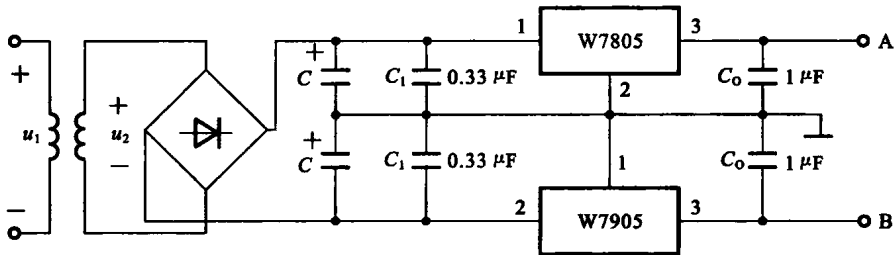


图 10.21

10.3.3 计算题

1. 整流电路如图 10.22(a)所示, 二极管为理想元件, 变压器二次绕组电压有效值  $U_2$  为

10 V, 负载电阻  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ 。

- (1) 变压器二次绕组电压  $u_2$  的波形如图 10.22(b) 所示, 试定性画出  $u_o$  的波形;
- (2) 求负载电阻  $R_L$  上电流的平均值  $I_o$ ;
- (3) 求变压器二次绕组电流的有效值  $I_2$ 。

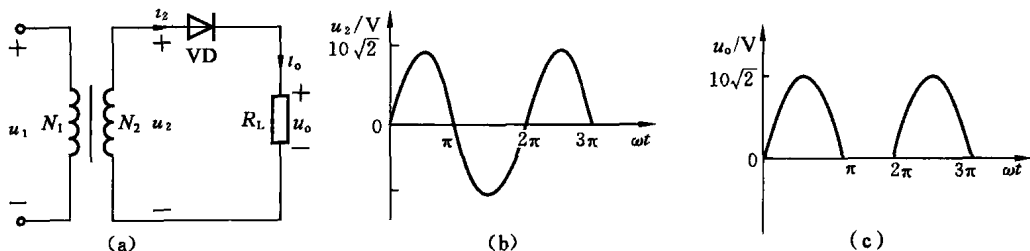


图 10.22

解 (1) 该电路为单相半波整流电路, 输出电压  $u_o$  的波形如图 10.22(c) 所示。

$$(2) \text{ 输出电压 } U_o = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.45 U_2 = (0.45 \times 10) \text{ V} = 4.5 \text{ V}$$

则

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = \frac{4.5}{2} \text{ mA} = 2.25 \text{ mA}$$

$$(3) \text{ 变压器二次绕组电流的有效值 } I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi [I_m \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} = I_m / 2$$

$$\text{输出电流的平均值 } I_o = \frac{U_o}{R_L} = \frac{U_m}{\pi R_L} = \frac{I_m}{\pi}$$

所以

$$I_2 = \frac{\pi}{2} I_o = 1.57 I_o = (1.57 \times 2.25) \text{ mA} = 3.53 \text{ mA}$$

2. 全波整流电路如图 10.23 所示。设  $u_2 = 10\sqrt{2} \sin(\omega t) \text{ V}$ ,  $R_L = 100 \Omega$ 。

- (1) 画出输出电压  $u_o$  的波形图, 指出  $u_2$  正半周和负半周时的导电回路;
- (2) 列出输出电压平均值  $U_o$  与变压器二次绕组电压有效值  $U_2$  之间的关系式;
- (3) 求负载电流的平均值  $I_o$  和每个二极管中的平均电流  $I_D$ ;
- (4) 求各管所承受的最高反向电压。

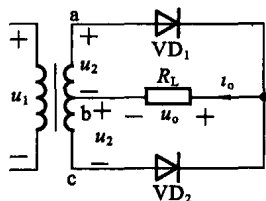


图 10.23

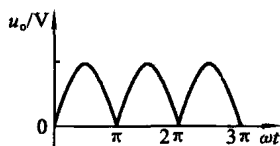


图 10.24

解 (1) 输出电压  $u_o$  的波形如图 10.24。  $u_2$  正半周时的导电回路:  $a \rightarrow \text{VD}_1 \rightarrow R_L \rightarrow b$ , 负载电阻  $R_L$  得到一个半波电压, 如图 10.24(b) 中的  $0 \sim \pi$  段所示。

$u_2$  负半周时的导电回路:  $c \rightarrow \text{VD}_2 \rightarrow R_L \rightarrow \text{VD}_4 \rightarrow b$ 。同样负载电阻  $R_L$  得到一个半波电压, 如图 10.24(b) 中的  $\pi \sim 2\pi$  段所示。

(2)  $u_o$  为全波脉动电压, 其平均值为

$$U_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.9 U_2$$

(3) 负载电流的平均值为  $I_o = \frac{U_o}{R_L} = 0.9 \frac{U}{R_L}$

由于  $u_2$  正半周  $VD_1$  导通, 负半周  $VD_2$  导通, 所以流过每个二极管的平均电流为负载电流的一半, 即

$$I_D = \frac{1}{2} I_o = 0.45 \frac{U}{R_L}$$

(4) 各管所承受的最高反向电压:  $u_2$  正半周时,  $VD_1$  导通后,  $VD_2$  反向连在变压器二次绕组及负载电阻  $R_L$  上; 同样,  $u_2$  负半周时,  $VD_1$  反向连在变压器二次绕组及负载电阻  $R_L$  上。由此可以看出, 每个二极管所承受的最高反向电压为变压器二次绕组电压  $u_2$  的最大值的 2 倍, 即  $U_{DRM} = 2\sqrt{2}U_2$ 。

3. 有一整流电路如图 10.25 所示。

(1) 试求负载电阻  $R_{L1}$  和  $R_{L2}$  上整流电压的平均值  $U_{o1}$  和  $U_{o2}$ , 并标出极性;

(2) 试求二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$ 、 $VD_3$  中的平均电流  $I_{D1}$ 、 $I_{D2}$ 、 $I_{D3}$  及各管所承受的最高反向电压。

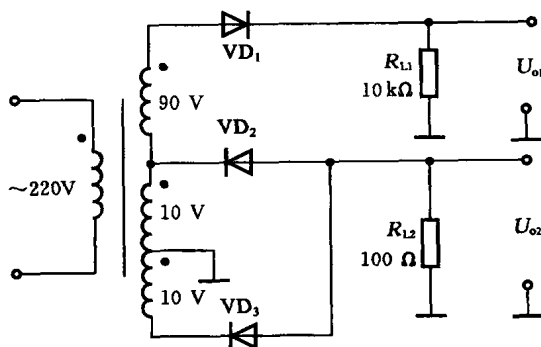


图 10.25

解 (1)  $U_{o1}$  为单相半波整流输出,  $U_{o2}$  为单相全波整流输出, 所以

$$U_{o1} = 0.45 \times (90 + 10) \text{ V} = 45 \text{ V}, \quad U_{o2} = 0.9 \times 10 \text{ V} = 9 \text{ V}$$

其中,  $U_{o1}$  上正下负,  $U_{o2}$  上负下正。

(2) 根据单相半波和单相全波整流电路的特点, 有

$$I_{D1} = \frac{U_{o1}}{R_{L1}} = \frac{45}{10} \text{ mA} = 4.5 \text{ mA}$$

$$I_{D2} = I_{D3} = \frac{1}{2} \frac{U_{o2}}{R_{L2}} = \frac{1}{2} \times \frac{9}{100} \text{ A} = 0.045 \text{ A} = 45 \text{ mA}$$

二极管的最高反向电压为

$$U_{DRM1} = \sqrt{2} \times 100 \text{ V} = 141.4 \text{ V}$$

$$U_{DRM2} = U_{DRM3} = 2\sqrt{2} \times 10 \text{ V} = 28.3 \text{ V}$$

4. 桥式整流电路如图 10.26 所示, 已知  $R_L = 30 \Omega$ , 交流电源电压为 220 V, 要求输出电压的平均值为 24 V。



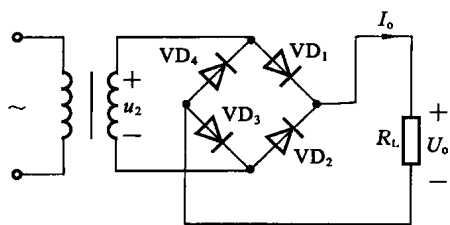


图 10.26

(1) 选择合适的二极管。

(2) 确定变压器的变比及容量。

解 (1) 负载电流。

$$I_o = U_o / R_L = 24 / 30 \text{ A} = 0.8 \text{ A}$$

流过每个二极管的平均电流为

$$I_D = 0.5 I_o = 0.5 \times 0.8 \text{ A} = 0.4 \text{ A}$$

变压器二次绕组电压的有效值为

$$U_2 = U_o / 0.9 = 24 / 0.9 \text{ V} = 26.67 \text{ V}$$

考虑到变压器二次绕组及二极管上的压降,变压器的二次绕组电压大约要高出 10%,即为

$$U_2 = 26.67 \times 1.1 \text{ V} = 29.3 \text{ V}$$

二极管承受的最高反向电压为

$$U_{\text{DRM}} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 29.3 \text{ V} = 41.4 \text{ V}$$

故应选用 2CZ55C(1 000 mA, 100 V) 二极管。

(2) 变压器的变比。

$$K = 220 / 29.3 = 7.5$$

变压器二次绕组电流的有效值为

$$I_2 = 1.11 I_o = 1.11 \times 0.8 \text{ A} = 0.9 \text{ A}$$

变压器容量为

$$S = U_2 I_2 = 29.3 \times 0.9 \text{ V} \cdot \text{A} = 26.4 \text{ V} \cdot \text{A}$$

5. 单相半波整流带滤波电路如图 10.27 所示,其中  $C = 100 \mu\text{F}$ ,当开关 S 闭合时,直流电压表 V 的读数是 10 V,开关断开后,电压表的读数是多少(设电压表的内阻为无穷大)?

解 单相半波整流电容滤波电路带负载时的负载平均电压  $U_o = U = 10 \text{ V}$ ,不带负载时  $U_o = \sqrt{2} U = 14.1 \text{ V}$ ,因此开关断开后电压表的读数为 14.1 V。

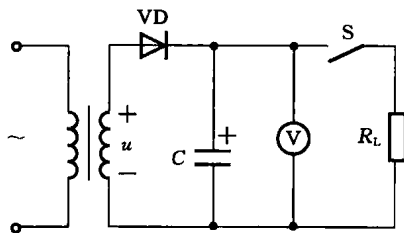


图 10.27

6. 设计一个桥式整流电容滤波电路,要求输出电压  $U_o = 20 \text{ V}$ ,输出电流  $I_o = 100 \text{ mA}$ 。交流电源电压为 220 V,频率为 50 Hz。试选用整流二极管和滤波电容器。

解 桥式整流电容滤波电路输出电压平均值  $U_o = 1.2 U_2$  ( $U_2$  为整流变压器二次绕组电压有效值)。每个二极管承受的最高反向电压为  $\sqrt{2} U_2$ ,通过每个二极管的电流为  $I_o / 2$ 。

(1) 选择二极管。流过二极管的电流

$$I_D = \frac{1}{2} I_o = \frac{1}{2} \times 100 \text{ mA} = 50 \text{ mA}$$

$$U_2 = \frac{U_o}{1.2} = \frac{20}{1.2} \text{ V} = 16.7 \text{ V}$$

所以

$$U_{\text{DRM}} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 16.7 \text{ V} = 23.6 \text{ V}$$

二极管可选用 2CZ52B(100 mA, 50 V)。

(2) 选择滤波电容器  $C$ 。

$$R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$$

现取  $R_L C = \frac{5T}{2}$

$$R_L = \frac{U_o}{I_o} = \frac{20}{0.1} \Omega = 200 \Omega$$

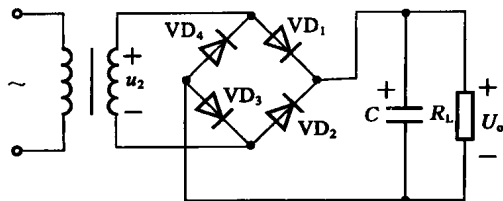


图 10.28

所以

$$C = \frac{5T}{2R_L} = \frac{5 \times \frac{1}{50}}{2 \times 200} \text{ F} = 250 \mu\text{F}$$

选用  $C = 250 \mu\text{F}$ , 耐压  $50 \text{ V}$  的电解电容。电路如图 10.28 所示。

7. 电路如图 10.29 所示, 已知电容电压  $U_C$  的平均值  $U_C = 24 \text{ V}$ , 稳压管的稳定电压  $U_Z = 6 \text{ V}$ , 限流电阻  $R = 200 \Omega$ , 假设电源电压是稳定的。当负载电阻  $R_L$  从  $100 \Omega$  变到  $600 \Omega$  时, 试计算:

- (1) 限流电阻  $R$  中的电流如何变化?
- (2) 稳压管  $\text{VD}_Z$  中流过的电流如何变化?
- (3) 变压器二次绕组电压有效值  $U_2$  为多少?

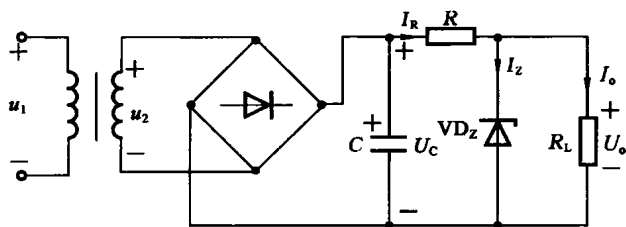


图 10.29

解 (1) 限流电阻  $R$  中的电流不变:  $I_R = \frac{U_C - U_Z}{R} = \frac{24 - 6}{200} \text{ A} = 90 \text{ mA}$

(2) 稳压管  $\text{VD}_Z$  中流过的电流  $I_Z = I_R - \frac{U_Z}{R_L}$ , 从  $30 \text{ mA}$  增加到  $80 \text{ mA}$ 。

(3)  $U_2 = \frac{U_C}{1.2} = \frac{24}{1.2} \text{ V} = 20 \text{ V}$

8. 电路如图 10.30 所示, 稳压电路由两个稳压管串联而成, 稳压管的稳定电压均为  $10 \text{ V}$ , 负载电流  $I_o = 10 \text{ mA}$ , 限流电阻  $R = 500 \Omega$ , 稳压管电流  $I_Z$  的范围是  $5 \sim 20 \text{ mA}$ 。

- (1) 试求允许的输入电压  $U_1$  变化范围;
- (2) 如果  $U_1 = 32 \text{ V}$ , 试求允许的负载电阻变化范围。

解 (1) 设限流电阻的电压为  $U_R$ , 与  $I_R$  取关联参考方向。

由 KVL 得

$$U_1 = U_R + U_o = (I_Z + I_o)R + 2U_Z$$

当  $I_Z = I_{Z\min} = 5 \text{ mA}$  时

$$U_1 = [(5 + 10) \times 0.5 + 2 \times 10] \text{ V} = 27.5 \text{ V}$$

当  $I_Z = I_{Z\max} = 20 \text{ mA}$  时

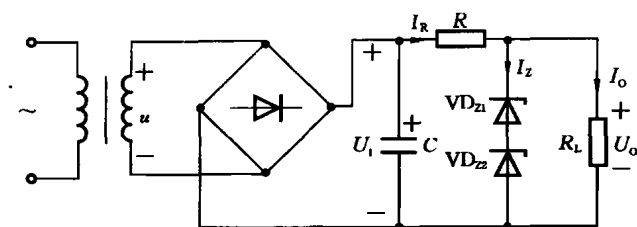


图 10.30

$$U_1 = [(20+10) \times 0.5 + 2 \times 10] \text{ V} = 35 \text{ V}$$

则允许的输入电压  $U_1$  的变化范围是 27.5~35 V。

(2) 若  $U_1 = 32 \text{ V}$ , 则

$$I_R = \frac{U_R}{R} = \frac{U_1 - U_O}{R} = \frac{32 - 20}{500} \text{ A} = 24 \text{ mA}$$

由 KCL

$$I_O = I_R - I_Z$$

当  $I_Z = I_{Z\max} = 20 \text{ mA}$  时,  $I_O = (24 - 20) \text{ mA} = 4 \text{ mA}$ , 则

$$R_L = \frac{U_O}{I_O} = \frac{20}{4} \text{ k}\Omega = 5 \text{ k}\Omega$$

当  $I_Z = I_{Z\min} = 5 \text{ mA}$  时,  $I_O = (24 - 5) \text{ mA} = 19 \text{ mA}$ , 则

$$R_L = \frac{U_O}{I_O} = \frac{20}{19} \text{ k}\Omega = 1.05 \text{ k}\Omega$$

故允许的负载电阻变化范围是 1.05~5 kΩ。

9. 在图 10.31 所示稳压电路中, 已知:  $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ , 求输出电压  $U_O$  的可调范围。

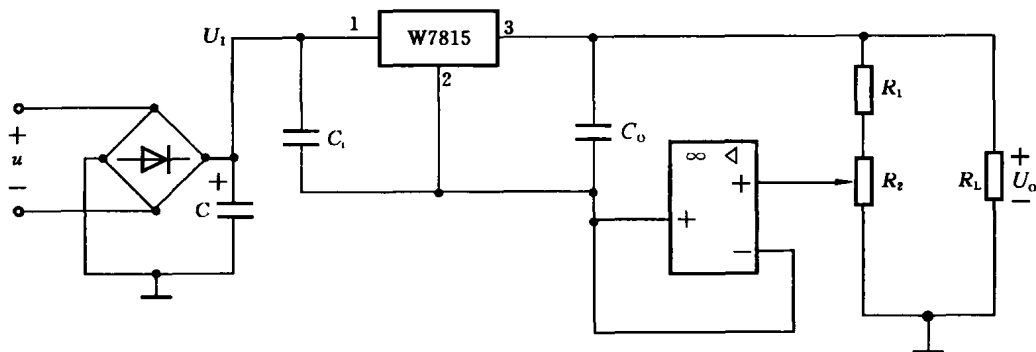


图 10.31

**解** 根据理想运算放大器的“虚短”概念, 稳压器 W7815 的公共端 2 与运算放大器的同相输入端(即可变电阻  $R_2$  的滑动头)电位相同。因为稳压器 W7815 的输出端 3 与公共端 2 之间的输出电压等于 15 V, 所以有

$$R_2 \text{ 的滑动头在最上方时 } U_{O\max} = \frac{15}{R_1} \cdot (R_1 + R_2) = \frac{15}{20} (20 + 10) \text{ V} = 22.5 \text{ V}$$

$$R_2 \text{ 滑动头在最下方时 } U_{O\min} = 15 \text{ V}$$

故输出电压  $U_O$  的可调范围为 15~22.5 V。

10. 串联型稳压电路如图 10.32 所示。已知  $U_Z = 10\text{ V}$ ,  $R_1 = 2\text{ k}\Omega$ ,  $R_F = 1\text{ k}\Omega$ ,  $U_1 = 30\text{ V}$ , 调整管 VT 的电流放大系数  $\beta = 80$ , 试求输出电压  $U_O$ 。

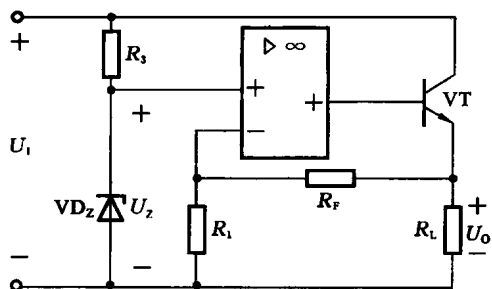


图 10.32

解

$$U_- = U_+ = U_Z = 10\text{ V}$$

此时输出电压

$$U_O = \frac{U_Z}{R_1} (R_1 + R_F) = 15\text{ V}$$

# 第 11 章 门电路与逻辑代数

## 11.1 要点总结

### 11.1.1 基本逻辑关系和逻辑门电路

门电路是一种在输入信号与输出信号之间存在一定逻辑关系的开关电路。逻辑关系就是条件与结果的关系。电路的输入信号反映条件,而输出信号反映结果。基本逻辑关系有与、或、非三种。

1. 与逻辑关系

逻辑表达式:  $Y=A \cdot B$

2. 或逻辑关系

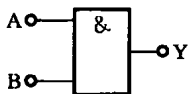
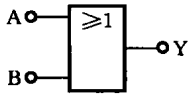
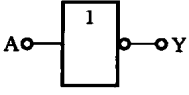
逻辑表达式:  $Y=A+B$

3. 非逻辑关系

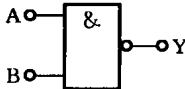
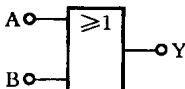
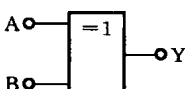
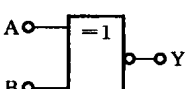
逻辑表达式:  $Y=\overline{A}$

与基本逻辑关系对应的门电路有与门、或门和非门。门电路可由分立元件组成,目前广泛使用的是集成门电路。一些常见门电路的逻辑符号、逻辑函数表达式和真值表如表 11.1 所示。

表 11.1 常见门电路

门电路	逻辑符号	逻辑函数表达式	真 值 表	记忆口诀															
与门		$Y=A \cdot B$	<table><tr><td>A</td><td>B</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	A	B	Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	有 0 出 0 全 1 出 1
A	B	Y																	
0	0	0																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	1																	
或门		$Y=A+B$	<table><tr><td>A</td><td>B</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	A	B	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	有 1 出 1 全 0 出 0
A	B	Y																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	1																	
非门		$Y=\bar{A}$	<table><tr><td>A</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	Y	0	1	1	0	1 出 0 0 出 1									
A	Y																		
0	1																		
1	0																		

续表

门电路	逻辑符号	逻辑函数表达式	真 值 表	记忆口诀															
与非门		$Y = \overline{A \cdot B}$	<table><tr><td>A</td><td>B</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	B	Y	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	有 0 出 1 全 1 出 0
A	B	Y																	
0	0	1																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	0																	
或非门		$Y = \overline{A + B}$	<table><tr><td>A</td><td>B</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	B	Y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	有 1 出 0 全 0 出 1
A	B	Y																	
0	0	1																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	0																	
异或门		$Y = A \oplus B$	<table><tr><td>A</td><td>B</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	B	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	相异出 1 相同出 0
A	B	Y																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	0																	
同或门		$Y = \overline{A \oplus B}$	<table><tr><td>A</td><td>B</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	A	B	Y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	相异出 0 相同出 1
A	B	Y																	
0	0	1																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	1																	

11.1.2 集成门电路

1. TTL 门电路

TTL 门电路是双极型集成电路,与分立元件相比,具有速度快、可靠性高和微型化等优点,目前分立元件电路已被集成电路替代。

2. 三态门

三态门输出有三种状态:0 态、1 态、高阻态。当使能端电平有效时,三态门处于工作状态;当使能端电平无效时,输出高阻态。挂在同一条总线上的三态门在任何时刻只有一个门处于工作状态。三态门的应用:可实现用一条总线分时传送几个不同的数据或控制信号。

3. 集电极开路与非门电路(OC 门)

OC 门在使用时,输出端应接上拉电阻和外接电源。OC 门的应用:输出端可直接驱动负载,且几个输出端可直接相连,实现线与功能。

11.1.3 逻辑代数

1. 逻辑代数运算法则

1) 基本运算法则

自等律

$A + 0 = A, \quad A \cdot 1 = A$



0-1 律	$A+1=1, \quad A \cdot 0=0$
重叠律	$A+A=A, \quad A \cdot A=A$
还原律	$\overline{\overline{A}}=A$
互补律	$A+\overline{A}=1, \quad A \cdot \overline{A}=0$

## 2) 基本定律

交换律	$A+B=B+A, \quad A \cdot B=B \cdot A$
结合律	$(A+B)+C=A+(B+C), \quad (A \cdot B) \cdot C=A \cdot (B \cdot C)$
分配律	$A \cdot (B+C)=A \cdot B+A \cdot C, \quad A+(B \cdot C)=(A+B) \cdot (A+C)$
反演律	$\overline{A+B}=\overline{A} \cdot \overline{B}, \quad \overline{A \cdot B}=\overline{A}+\overline{B}$
吸收律	$A+AB=A, \quad A(A+B)=A$

## 2. 逻辑函数的表示方法

表示方法主要有真值表法、逻辑式法、逻辑图法、卡诺图法。

## 3. 逻辑函数的化简

利用逻辑代数变换,可用不同的门电路实现相同的逻辑功能。化简方法主要有公式法和卡诺图法。

### 1) 公式法

公式法是运用逻辑代数定律对函数表达式进行变换,消去表达式中的多余项和多余变量,以获得最简表达式的方法。

### 2) 卡诺图法

卡诺图是与变量的最小项对应的按一定规则排列的方格图,每一小方格填入一个最小项。对于  $n$  个输入变量有  $2^n$  种组合,其相应的乘积项也有  $2^n$  个,则每一个乘积项就称为一个最小项。其特点是,每个输入变量均在其中以原变量和反变量形式出现一次,且仅出现一次。

用卡诺图化简逻辑代数的步骤:将函数表达式变换为基本的与或表达式,作出函数的卡诺图,画卡诺图,利用卡诺图中相邻项相加时“相同变量保留,相异变量相消”的特征对卡诺图中为“1”的方格进行合并化简,从而求出函数的最简与或表达式。

用卡诺图化简函数表达式遵循的原则如下:

- (1) 圈的个数应最少;
- (2) 每个圈要最大;
- (3) 每个圈至少要包含一个未被圈过的最小项。

## 11.2 例题解析

**例 11.1** 电路如图 11.1 所示,图中晶体管均工作在开关状态,即截止或饱和状态,试分析各电路的逻辑功能,列出真值表,并导出函数表达式。

**分析** 本题中已明确指出电路中的各晶体管均工作在开关状态,即不是工作在截止状态,就是工作在饱和状态。由于信号是从各晶体管的基极输入的,所以输入信号为低电平时,晶体管截止,为高电平时,晶体管饱和。

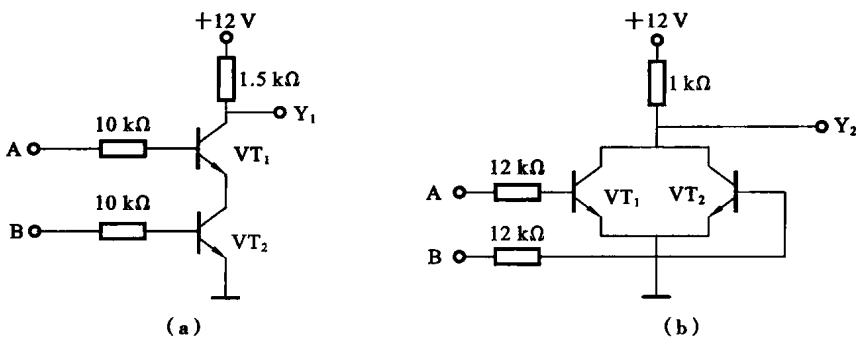


图 11.1

**解** 对图 11.1(a)所示电路,当输入信号 A、B 都为高电平时,两个晶体管均饱和,输出  $Y_1$  为低电平;当输入信号 A、B 中有低电平时,两个晶体管均截止,输出  $Y_1$  为高电平。设高电平用 1 表示,低电平用 0 表示,真值表如表 11.2 所示。由表 11.2 可知, $Y_1$  与 A、B 之间的关系是:只要 A、B 当中有 0, $Y_1$  就为 1,A、B 全为 1 时, $Y_1$  为 0,满足与非逻辑关系,其逻辑表达式表示为

$$Y_1 = \overline{AB}$$

对图 11.1(b)所示电路,当输入信号 A、B 都为低电平时,两个晶体管均截止,输出  $Y_2$  为高电平;当输入信号 A、B 中有高电平时,接高电平的晶体管饱和,输出  $Y_2$  为低电平。设高电平用 1 表示,低电平用 0 表示,真值表如表 11.3 所示。由表 11.3 可知, $Y_2$  与 A、B 之间的关系是:只有当 A、B 都是 0, $Y_2$  才为 1,A、B 当中有 1 时, $Y_2$  为 0,满足或非逻辑关系,其逻辑表达式表示为

$$Y_2 = \overline{A+B}$$

表 11.2 真值表 1

A	B	$Y_1$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

表 11.3 真值表 2

A	B	$Y_2$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

**例 11.2** 某逻辑函数的逻辑图如图 11.2 所示,试用其他 4 种方法表示该逻辑函数。

**分析** 逻辑函数的表示方法主要包括真值表法、逻辑式法、逻辑图法、卡诺图法。已知其中一种表达方式,就可以推理出其余几种表达方法。本题可根据逻辑图写出电路的逻辑表达式,并化简,列出真值表,然后根据真值表画出各输出信号的波形和卡诺图。根据逻辑图写逻辑表达式的方法是:从输入端到输出端,逐级写出各个门电路的逻辑表达式,最后写出各个输出端的逻辑表达式。

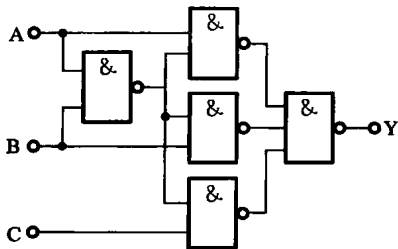


图 11.2



解 (1) 由逻辑图写出逻辑表达式

$$Y = \overline{A \overline{AB} \cdot B \overline{AB} \cdot C \overline{AB}} = A \overline{AB} + B \overline{AB} + C \overline{AB} = A\overline{B} + \overline{A}B + \overline{B}C + \overline{A}C$$

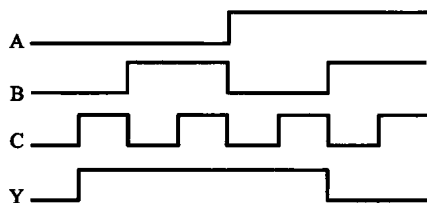
(2) 由逻辑表达式列出真值表, 如表 11.4 所示。

表 11.4 真值表 3

A	B	C	Y
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	0

(3) 由真值表画出波形图, 如图 11.3(a) 所示。

(4) 由真值表画出卡诺图, 如图 11.3(b) 所示。



(a)

A \ BC	00	01	11	10
0	0	1	1	1
1	1	1	0	0

(b)

图 11.3

例 11.3 用公式法将下列各逻辑函数化简。

(1)  $Y = A + A\overline{B}\overline{C} + \overline{A}CD + (\overline{C} + \overline{D})E$ ;

(2)  $Y = AB(C + D) + D + \overline{D}(A + B)(\overline{B} + \overline{C})$ ;

(3)  $Y = (AB + A\overline{B} + \overline{A}B)(A + B + D + \overline{A}\overline{B}\overline{D})$ 。

分析 公式化简法有并项法(应用  $A + \overline{A} = 1$ )、配项法(应用  $A = A(B + \overline{B})$ )、加项法(应用  $A + \overline{A} = 1$ )、吸收法(应用  $A + AB = A$ )等方法, 其关键在于熟练掌握逻辑代数的基本公式和定理。

解 (1)  $Y = A + \overline{A}CD + \overline{C}\overline{D}E = A + CD + \overline{C}\overline{D}E = A + CD + E$

(2)  $Y = ABC + ABD + D + \overline{D}(A\overline{B} + A\overline{C} + B\overline{C})$   
 $= ABC + D + A\overline{B} + A\overline{C} + B\overline{C} = ABC + A\overline{B}\overline{C} + B\overline{C} + D = A + \overline{B}\overline{C} + D$

(3)  $Y = (AB + A\overline{B} + \overline{A}B)(A + B + D + \overline{A}\overline{B}\overline{D}) = (A + B)(\overline{A}\overline{B}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{D}) = A + B$

例 11.4 用卡诺图法将下列各逻辑函数化简成为最简与或表达式。

(1)  $Y = A\overline{B} + B\overline{C}\overline{D} + ABD + \overline{A}B\overline{C}\overline{D}$ ;

(2)  $Y = AB\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}CD + A\overline{B} + A\overline{D} + A\overline{B}C$ ;

$$(3) Y = (\bar{A}\bar{B} + B\bar{D})\bar{C} + BD\bar{\bar{A}\bar{C}} + \bar{D}(\bar{A} + B)。$$

**分析** 采用卡诺图法画圈(并项)的原则是:圈内相邻小方格个数为  $2^n$  个,圈内小方格个数应尽可能多,圈的个数应最少,每个新圈必须至少包含一个在已圈过的圈中没有出现过的小方格,每个小方格可被圈多次,最后将代表每个圈的与项相加,即得所求函数的最简与或表达式。

**解** (1) 卡诺图如图 11.4 所示。

由卡诺图得化简后的逻辑表达式为  $Y = A\bar{B} + B\bar{C} + AD$ 。

(2) 卡诺图如图 11.5 所示。

由卡诺图得化简后的逻辑表达式为  $Y = A\bar{B} + A\bar{C} + A\bar{D}$ 。

CD \ AB	00	01	11	10
00	0	0	0	0
01	1	1	0	0
11	1	1	1	0
10	1	1	1	1

图 11.4

CD \ AB	00	01	11	10
00	0	0	0	0
01	0	0	0	0
11	1	1	0	1
10	1	1	1	1

图 11.5

(3) 将函数化为与或表达式。

$$Y = (\bar{A}\bar{B} + B\bar{D})\bar{C} + BD\bar{A}\bar{C} + \bar{D}(\bar{A} + B) = \bar{A}\bar{B}\bar{C} + B\bar{C}\bar{D} + ABD + BCD + A\bar{B}\bar{D}$$

卡诺图如图 11.6 所示。

由卡诺图得化简后的逻辑表达式为

$$Y = \bar{C}\bar{D} + \bar{A}\bar{B}\bar{C} + A\bar{B}\bar{D} + ABD + BCD$$

或

$$Y = \overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}\overline{D} + A\overline{B}\overline{C} + BCD$$

**例 11.5** 将下列逻辑函数转换为与非表达式,并画出相应的逻辑图。

AB \ CD	00	01	11	10
00	1	1	0	0
01	1	0	1	0
11	1	1	1	0
10	1	0	0	1

图 11.6

$$(1) Y = AC\bar{D} + AB\bar{D} + BC + \bar{A}CD + ABD;$$

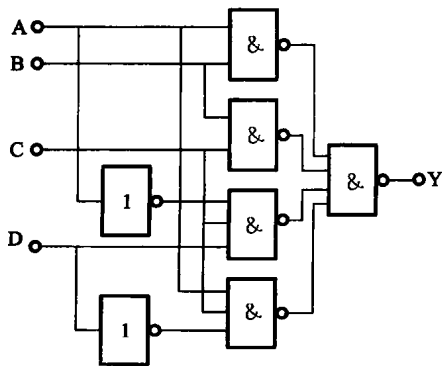


图 11.7

$$(2) Y = \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\overline{C}.$$

**分析** 首先将逻辑函数利用公式法或卡诺图法化简成最简与或表达式,再将与或表达式两次取反,应用摩根定理将其转换为与非表达式。

(1) 利用公式法对(1)式进行化简得

$$\begin{aligned} Y &= A\bar{C}\bar{D} + AB\bar{D} + BC + \bar{A}CD + ABD \\ &= A\bar{C}\bar{D} + AB(\bar{D} + D) + BC + \bar{A}CD \\ &= A\bar{C}\bar{D} + AB + BC + \bar{A}CD \end{aligned}$$

$$= \overline{A}CD + AB + BC + \overline{A}CD = \overline{A}B \cdot \overline{B}C \cdot \overline{A}CD \cdot \overline{A}CD$$

则其逻辑图如图 11.7 所示。

(2) 利用卡诺图法对(2)式进行化简。

由卡诺图(见图 11.8)得化简后的逻辑表达式为  $Y = AB + A\bar{C} + B\bar{C}$ 。

对化简的与或表达式两次取反,应用摩根定理将其转换为与非表达式

$$Y = AB + A\bar{C} + B\bar{C} = \overline{\overline{AB + A\bar{C} + B\bar{C}}} = \overline{\overline{AB} \cdot \overline{A\bar{C}} \cdot \overline{B\bar{C}}}$$

则其逻辑图如图 11.9 所示。

A \ BC	BC			
	00	01	11	10
0	0	0	0	1
1	1	0	1	1

图 11.8

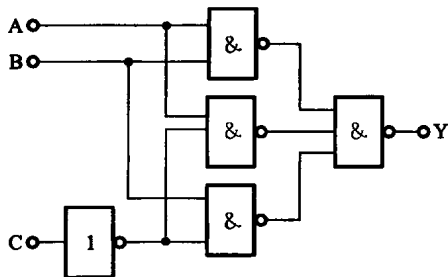


图 11.9

## 11.3 习题解答

### 11.3.1 填空题

1. 三种基本逻辑门电路是与门、\_\_\_\_、\_\_\_\_。(或门,非门)
2. 集电极开路的与非门也称\_\_\_\_,使用集电极开路的与非门时,其输出端应外接\_\_\_\_。(OC 门,电源和电阻)
3. 三态门的输出端有 1 态、\_\_\_\_、\_\_\_\_三种状态。(0 态,高阻态)
4. OC 门在使用时,输出端应接上\_\_\_\_和\_\_\_\_。(电源,电阻)
5. 集电极开路的与非门具有\_\_\_\_和\_\_\_\_功能。(直接驱动负载,线与)
6. 当使能端电平有效时,三态门处于\_\_\_\_;当使能端电平无效时,三态门处于\_\_\_\_。(工作状态,高阻态)
7. 逻辑函数的化简方法主要有\_\_\_\_和\_\_\_\_。(公式法,卡诺图法)
8. 卡诺图化简时,保留一个圈内最小项的\_\_\_\_,消去\_\_\_\_。(相同变量,相反变量)
9. 最小项的特点是每个输入变量均在其中以\_\_\_\_和\_\_\_\_的形式出现一次,且仅出现一次。(原变量,反变量)
10. 逻辑函数的表示方法主要有真值表法、逻辑图法、\_\_\_\_和\_\_\_\_。(表达式法,卡诺图法)
11. 在数字电路中,晶体管一般都工作在\_\_\_\_和\_\_\_\_。(饱和状态,截止状态)
12. 十进制数  $(56)_{10}$  转换成二进制数为\_\_\_\_,转换成 8421BCD 码为\_\_\_\_。  
(111000,01010110)

### 11.3.2 选择题

1. 如图 11.10 电路中,完成  $C=0, Y=\overline{AB}; C=1, Y$  为高阻态的电路是( )。(A)

## 第 11 章 门电路与逻辑代数

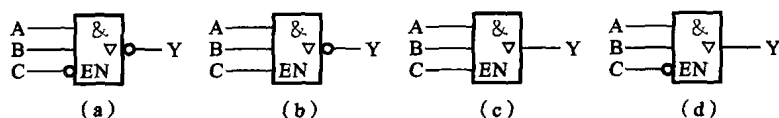


图 11.10

- A. a                      B. b                      C. c                      D. d
2. 在下列哪种情况下,与非运算的结果等于逻辑 0? ( ) (D)
- A. 全部输入为 0                      B. 任一输入为 0
- C. 仅有一个输入为 1                      D. 全部输入为 1
3. 逻辑函数  $Y = A \oplus (A \oplus B) = ( )$ 。(A)
- A. B                      B. A                      C.  $A \oplus B$                       D.  $AB + \bar{A}\bar{B}$
4. 逻辑函数  $Y = A + BC = ( )$ 。(C)
- A.  $A + B$                       B.  $A + C$                       C.  $(A + B)(A + C)$                       D.  $B + C$
5. 在下列哪种情况下,函数  $Y = \overline{AB + CD}$  的输出是逻辑 0? ( ) (B)
- A. 全部输入为 0                      B. 全部输入为 1
- C. A、B 同时为 0                      D. 任一输入为 1,其他输入是 0
6. 下面逻辑式中,错误的是( )。(B)
- A.  $\overline{A \cdot (B + C)} = (\bar{A} + \bar{B})(\bar{A} + \bar{C})$                       B.  $A \cdot (A + B) = B$
- C.  $(A + B) \cdot (A + C) = A + BC$                       D.  $\overline{A \cdot (B + C)} = \bar{A} + \bar{B}\bar{C}$
7. 最小项  $\bar{A}BCD$  的逻辑相邻项是( )。(A)
- A.  $\bar{A}\bar{B}CD$                       B.  $ABCD$                       C.  $ABC\bar{D}$                       D.  $A\bar{B}\bar{C}\bar{D}$
8. 图 11.11 所示门电路中,  $Y=1$  的是图( )。(C)

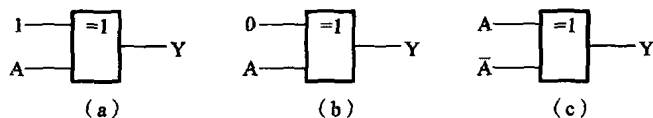


图 11.11

9. 图 11.12 所示组合电路的逻辑表达式为( )。(C)
- A.  $Y = A$                       B.  $Y = \bar{A}$                       C.  $Y = 1$                       D.  $Y = 0$
10. 图 11.13 所示组合电路的逻辑表达式为( )。(D)
- A.  $Y = \bar{A}\bar{B}$                       B.  $Y = \bar{A}B$                       C.  $Y = \bar{A}\bar{B}$                       D.  $Y = A\bar{B}$

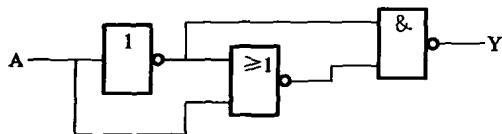


图 11.12

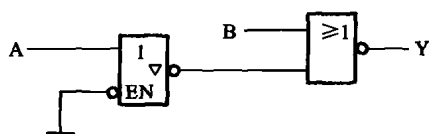


图 11.13

11. 图 11.14 所示组合电路的逻辑表达式为( )。(D)
- A.  $Y = \bar{A}\bar{B} + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{C}$                       B.  $Y = \bar{A}\bar{B} + \bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{C}$



(2) 某逻辑函数的逻辑图如图 11.17 所示, 试写出该逻辑图的最简与或表达式。

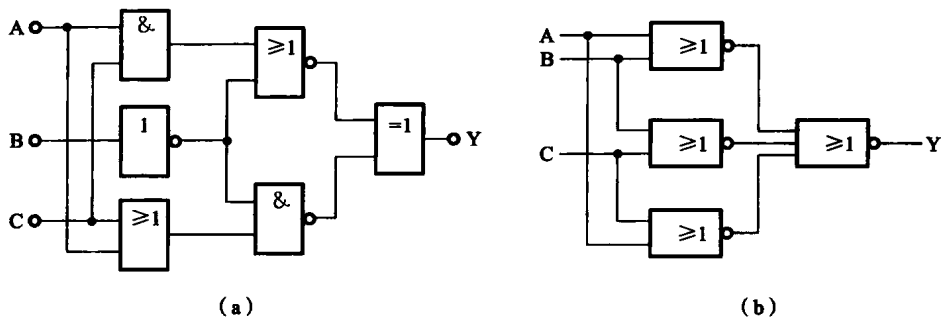


图 11.17

解 (1) 采用“横与竖或”, 由真值表列逻辑表达式

$$Y = \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\overline{C}$$

采用公式法对逻辑函数化简得

$$Y = \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} = \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} = (\overline{A}\overline{B} + \overline{A}B)C + \overline{A}B\overline{C} = \overline{A}C + \overline{A}B\overline{C}$$

(2) 由逻辑图(见图 11.17(a))列逻辑表达式

$$Y = ((\overline{A+C})\overline{B}) \oplus (\overline{AC+B})$$

采用公式法对逻辑函数化简得

$$\begin{aligned} Y &= ((\overline{A+C})\overline{B}) \oplus (\overline{AC+B}) = (\overline{A+C})\overline{B} \cdot \overline{\overline{AC+B}} + (\overline{AC+B}) \cdot \overline{(\overline{A+C})\overline{B}} \\ &= (\overline{A+C})\overline{B} \cdot (AC+B) + (\overline{AC+B}) \cdot \overline{(\overline{A+C})\overline{B}} \\ &= (\overline{A}\overline{C}+B)(\overline{A}C+\overline{B}) + (\overline{A+C})\overline{B} \overline{\overline{A}\overline{C}+B} = \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}\overline{B}\overline{C} \end{aligned}$$

由逻辑图(见图 11.17(b))列逻辑表达式

$$Y = \overline{\overline{A+B} \cdot \overline{B+C} \cdot \overline{A+C}}$$

采用公式法对逻辑函数化简得

$$Y = (A+B)(B+C)(A+C) = AB + AC + BC$$

3. 利用公式法将下列各逻辑函数化简成为最简与或表达式。

(1)  $Y = \overline{A}\overline{B} + \overline{B}\overline{C} + \overline{C}\overline{D} + \overline{D}\overline{A}$ ;

(2)  $Y = ABC + ABD + \overline{A}\overline{B}\overline{C} + CD + B\overline{D}$ ;

(3)  $Y = ABC + \overline{A}BC + A\overline{B}C$ ;

(4)  $Y = ABC + \overline{A}BC + A\overline{B}C + AB\overline{C}$ ;

(5)  $Y = BC(\overline{\overline{B} + AD + CE})$ 。

解 (1)  $Y = \overline{A}\overline{B} + \overline{B}\overline{C} + \overline{C}\overline{D} + \overline{D}\overline{A} = (\overline{A} + \overline{B})(\overline{B} + \overline{C})(\overline{C} + \overline{D})(\overline{D} + \overline{A})$   
 $= (\overline{A}\overline{B} + \overline{A}\overline{C} + \overline{B}\overline{C}) (\overline{C}\overline{D} + \overline{C}\overline{A} + \overline{D}\overline{A}) = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}$

(2)  $Y = ABC + \overline{A}\overline{B}\overline{C} + CD + AB + B\overline{D} = AB + \overline{A}\overline{B}\overline{C} + CD + B\overline{D}$   
 $= B(A + \overline{A}\overline{C}) + CD + B\overline{D} = AB + CD + B(\overline{C} + \overline{D})$   
 $= AB + CD + B\overline{C}\overline{D} = B + CD$

(3)  $Y = ABC + \overline{A}BC + A\overline{B}C = BC + A\overline{B}C = AC + BC$

$$(4) \quad Y = ABC + \overline{A}BC + A\overline{B}C + AB\overline{C} = ABC + \overline{A}BC + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC + ABC \\ = BC + AC + AB$$

$$(5) \quad Y = BC(\overline{B} + AD + CE) = BC(\overline{B} + AD)\overline{CE} = ABCD(\overline{C} + \overline{E}) = ABCD\overline{E}$$

4. 已知逻辑函数  $Y = \overline{AB}(\overline{AB} + C)$ , 求  $Y$  的最小项表达式。

解 将逻辑函数先转换为基本与或式, 再采用代数变换法求出最小项表达式(标准与或式)。

$$Y = \overline{AB}(\overline{AB} + C) = AB + \overline{(\overline{AB} + C)} = AB + (A + \overline{B})\overline{C} = AB + A\overline{C} + \overline{B}\overline{C} \\ Y = AB + A\overline{C} + \overline{B}\overline{C} = AB(C + \overline{C}) + A\overline{C}(B + \overline{B}) + (A + \overline{A})\overline{B}\overline{C} \\ = ABC + AB\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} + \overline{A}\overline{B}\overline{C} = \sum m(0, 4, 6, 7)$$

5. 用卡诺图法将下列各逻辑函数化简成为最简与或表达式。

$$(1) Y = AB\overline{C}D + A\overline{B}CD + A\overline{B} + A\overline{D} + A\overline{B}C;$$

$$(2) Y = A\overline{B}CD + \overline{B}CD + AB\overline{D} + BC\overline{D} + \overline{A}BC;$$

$$(3) Y = \overline{ABC} + BD(\overline{A} + C) + (B + D)AC;$$

$$(4) Y = \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}BC + A\overline{B}C;$$

$$(5) Y(A, B, C, D) = \sum m(0, 1, 2, 5, 8, 9, 10, 12, 14)。$$

解 (1) 其卡诺图如图 11.18 所示。

由卡诺图得化简后的逻辑表达式为

$$Y = A\overline{B} + A\overline{C} + A\overline{D}$$

(2) 其卡诺图如图 11.19 所示。

CD \ AB	00	01	11	10
00	0	0	0	0
01	0	0	0	0
11	1	1	0	1
10	1	1	1	1

图 11.18

CD \ AB	00	01	11	10
00	0	1	0	0
01	1	1	0	1
11	1	0	0	1
10	0	1	1	0

图 11.19

由卡诺图得化简后的逻辑表达式为

$$Y = B\overline{D} + \overline{A}CD + A\overline{B}D$$

(3) 先将逻辑函数变为与或非表达式

$$Y = \overline{ABC + BD(\overline{A} + C) + (B + D)AC} = \overline{ABC + \overline{A}BD + BCD + ABC + ACD}$$

其卡诺图如图 11.20 所示。

由卡诺图得化简后的逻辑表达式为

$$Y = \overline{AB} + A\overline{C} + \overline{A}\overline{D} + \overline{B}\overline{D}$$

(4) 其卡诺图如图 11.21 所示。

由卡诺图得化简后的逻辑表达式为

CD \ AB	00	01	11	10
00	1	1	1	1
01	1	0	0	1
11	1	1	0	0
10	1	1	0	1

图 11.20

A \ BC	00	01	11	10
0	0	0	0	1
1	1	0	1	1

图 11.21

$$Y = AB + A\bar{C} + \bar{B}C$$

(5) 其卡诺图如图 11.22 所示。

由卡诺图得化简后的逻辑表达式为

$$Y(A, B, C, D) = A\bar{D} + \bar{B}\bar{C} + \bar{B}D + \bar{A}\bar{C}D$$

6. 将逻辑函数  $Y = \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}BC + AB\bar{C} + ABC$  化简并转换为与非表达式, 画出相应的逻辑图。

**解** 首先将逻辑函数化简为与或表达式, 再将与或表达式两次取反, 并应用摩根定理转换为与非表达式, 画出相应的逻辑图。

$$Y = \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}BC + AB\bar{C} + ABC = \bar{A}C(\bar{B} + B) + AB(\bar{C} + C) = \bar{A}C + AB$$

$$Y = AB + \bar{A}C = \overline{\overline{AB} + \overline{\bar{A}C}} = \overline{\bar{A}\bar{B} \cdot \bar{A}\bar{C}}$$

相应的逻辑图如图 11.23 所示。

CD \ AB	00	01	11	10
00	1	1		1
01		1		
11	1			1
10	1	1		1

图 11.22

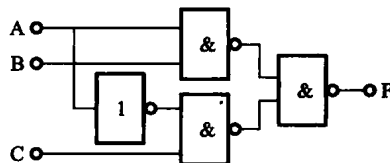


图 11.23



## 第 12 章 组合逻辑电路

### 12.1 要点总结

组合逻辑电路由门电路组成,信号单向传输,不存在任何反馈回路。任何一个组合逻辑电路,其功能均可用逻辑函数、真值表及波形图、卡诺图等来描述。

#### 12.1.1 组合逻辑电路的分析和设计

##### 1. 组合逻辑电路的分析

组合逻辑电路的分析是指按照某种方法去研究一个给定逻辑电路的工作性能,了解电路所实现的逻辑功能,并对设计方案作出评价的过程。

已知逻辑电路图→写出逻辑表达式→化简、变换→列真值表→分析电路的逻辑功能。

##### 2. 组合逻辑电路的设计

组合逻辑电路的设计是分析的逆过程,组合逻辑电路的设计是根据文字描述的设计要求和所选用的逻辑元件,构造出实现预定功能的、经济合理的逻辑电路的工作。逻辑设计的关键是如何将文字描述的实际问题抽象为逻辑问题。在列真值表前,对所设置的变量、函数进行定义,即对状态的赋值要先加以说明。

定义命题的逻辑关系→列出真值表→写出逻辑表达式→化简、变换→画出逻辑电路图。

#### 12.1.2 加法器

##### 1. 半加器

半加器是实现 1 位二进制加法的组合逻辑电路,特点是只管本位求和,不管低位的进位。逻辑符号如图 12.1 所示,逻辑表达式如下。

本位和数  $S = \bar{A}B + A\bar{B} = A \oplus B$

向高位进位数  $C = AB$

##### 2. 全加器

全加器也是实现 1 位二进制加法的组合逻辑电路,它与半加器不同之处在于,全加器不仅本位求和,还考虑低位来的进位数。逻辑符号如图 12.2 所示,逻辑表达式如下。

本位和数  $S_i = A_i \oplus B_i \oplus C_{i-1}$

向高位进位数  $C_i = (A_i \oplus B_i)C_{i-1} + A_i B_i = \bar{A}_i B_i C_{i-1} + A_i \bar{B}_i C_{i-1} + A_i B_i$

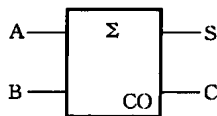


图 12.1

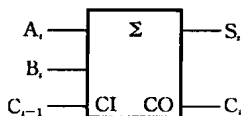


图 12.2

12.1.3 编码器

1. 定义

用数字(或文字)和符号对一组事件进行编号、排队的过程称为编码。  
具有编码功能的逻辑电路称为编码器,  $n$  位二进制代码可对  $2^n$  个输入信号编号。

2. 典型芯片分析

74147 是一个典型的 8421BCD 码优先编码器, 输入信号  $\bar{I}_1 \sim \bar{I}_9$  和输出信号  $\bar{Y}_3 \sim \bar{Y}_0$  均为低电平(0)有效。输入信号的优先次序为  $\bar{I}_9 \sim \bar{I}_1$ , 即  $\bar{I}_9$  优先级最高,  $\bar{I}_1$  优先级最低。输出为对应高优先级输入的 8421BCD 码的反码。74147 优先编码器真值表如表 12.1 所示, 其引脚图和逻辑符号如图 12.3 所示。

表 12.1 74147 优先编码器真值表

$\bar{I}_1$	$\bar{I}_2$	$\bar{I}_3$	$\bar{I}_4$	$\bar{I}_5$	$\bar{I}_6$	$\bar{I}_7$	$\bar{I}_8$	$\bar{I}_9$	$\bar{Y}_3$	$\bar{Y}_2$	$\bar{Y}_1$	$\bar{Y}_0$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
×	×	×	×	×	×	×	×	0	0	1	1	0
×	×	×	×	×	×	×	0	1	0	1	1	1
×	×	×	×	×	×	0	1	1	1	0	0	0
×	×	×	×	×	0	1	1	1	1	0	0	1
×	×	×	×	0	1	1	1	1	1	0	1	0
×	×	×	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
×	×	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
×	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

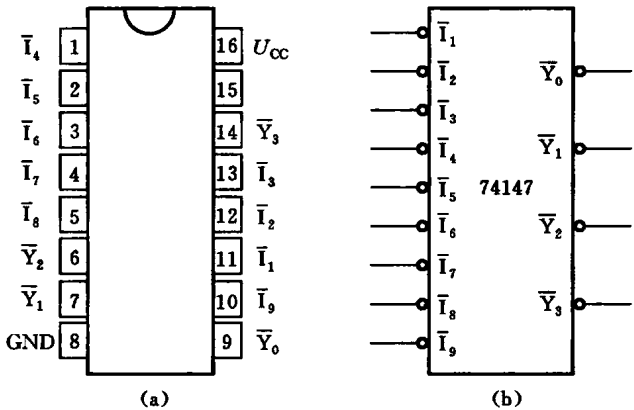


图 12.3

12.1.4 译码器

译码是编码的逆过程。译码器可将二进制代码转换成对应的输出信号。

1. 二进制译码器

二进制译码器将  $n$  个输入变量变换成  $2^n$  个输出函数,每个输出函数对应于  $n$  个输入变量的一个最小项。

3/8 线译码器 74LS138,输出线  $\bar{Y}_0 \sim \bar{Y}_7$  低电平有效,当控制端  $S_1, \bar{S}_2, \bar{S}_3$  满足  $S_1 = 1, \bar{S}_2 + \bar{S}_3 = 0$  时,译码器的输出与输入  $A_2 \sim A_0$  的逻辑关系为  $\bar{Y}_i = \overline{m_i}$ 。式中,  $m_i (i = 0 \sim 7)$  是由  $A_2, A_1, A_0$  构成的最小项。当  $S_1 = 0$  或  $\bar{S}_2 + \bar{S}_3 = 1$  时,译码器处于禁止状态,输出  $\bar{Y}_0 \sim \bar{Y}_7$  全为 1。

在译码器的输出端加一个与非门,即可实现给定的组合逻辑函数。

74LS138 译码器的真值表如表 12.2 示。

表 12.2 74LS138 译码器的真值表

输入					输出							
控制码		数码										
$S_1$	$\bar{S}_2 + \bar{S}_3$	$A_2$	$A_1$	$A_0$	$\bar{Y}_0$	$\bar{Y}_1$	$\bar{Y}_2$	$\bar{Y}_3$	$\bar{Y}_4$	$\bar{Y}_5$	$\bar{Y}_6$	$\bar{Y}_7$
×	1	×	×	×	1	1	1	1	1	1	1	1
0	×	×	×	×	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

74LS138 译码器引脚图和逻辑符号图如图 12.4 所示,图中小圆圈表示低电平有效。

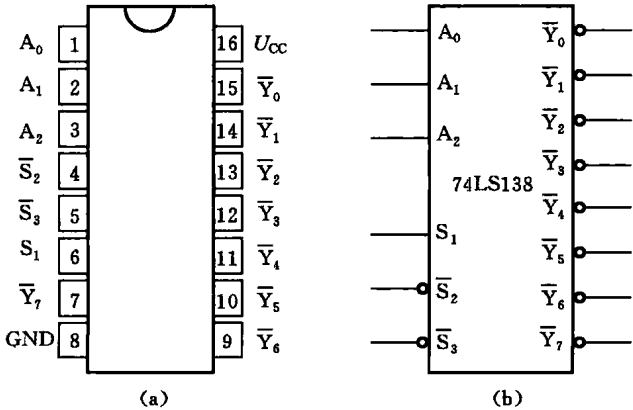


图 12.4

2. 数字显示译码器

数字显示译码器能将输入代码转换成数字显示器的驱动信号,使显示器显示出与输入

代码对应的数字。

七段共阴极显示译码器 7448 的输入线  $A_3 \sim A_0$  接收 4 位二进制码, 输出线分别提供七段数字显示器 a、b、c、d、e、f 和 g 七段的驱动信号, 输出高电平有效。

七段数字显示器共阴极 LED 引脚图、发光段组合图及 7448 引脚图如图 12.5 所示。

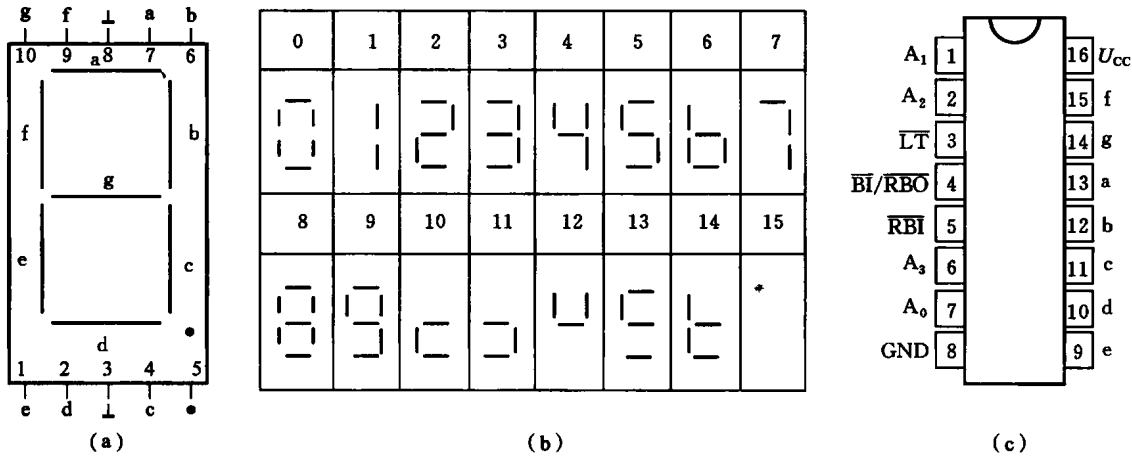


图 12.5

7448 功能表如表 12.3 所示。

表 12.3 7448 功能表

十进制数 或功能	输 入						$\overline{\text{BI}}/\overline{\text{RBO}}$	输 出						
	$\overline{\text{LT}}$	$\overline{\text{RBI}}$	$A_3$	$A_2$	$A_1$	$A_0$		a	b	c	d	e	f	g
0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	×	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
2	1	×	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1
3	1	×	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
4	1	×	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1
5	1	×	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1
6	1	×	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1
7	1	×	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8	1	×	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	×	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
10	1	×	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1
11	1	×	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1
12	1	×	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1
13	1	×	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1
14	1	×	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1
15	1	×	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
消隐	×	×	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0	0	0
动态灭零	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
灯测试	0	×	×	×	×	×	1	1	1	1	1	1	1	1

12.1.5 数据选择器和数据分配器

1. 数据选择器

数据选择器又称为多路数据选择器,它在选择控制信号作用下,选择多路数据输入中的某一路与输出端接通。集成数据选择器的种类很多,有 2 选 1、4 选 1、8 选 1 和 16 选 1 等。图 12.6 所示的为 74LS151 型 8 选 1 数据选择器的引脚分布和逻辑符号。74LS151 的功能表如表 12.4 所示。

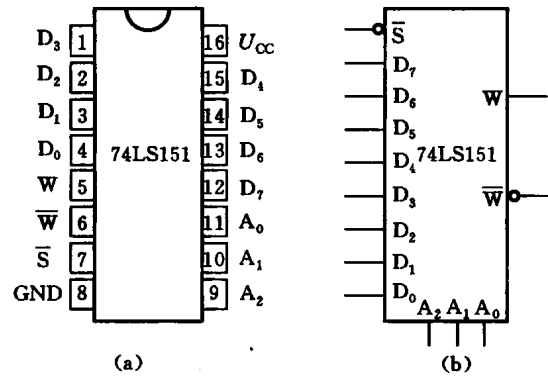


图 12.6

表 12.4 74LS151 的功能表

輸 入				輸 出	
使能	地 址				
$\bar{S}$	$A_2$	$A_1$	$A_0$	$W$	$\bar{W}$
1	×	×	×	0	1
0	0	0	0	$D_0$	$\bar{D}_0$
0	0	0	1	$D_1$	$\bar{D}_1$
0	0	1	0	$D_2$	$\bar{D}_2$
0	0	1	1	$D_3$	$\bar{D}_3$
0	1	0	0	$D_4$	$\bar{D}_4$
0	1	0	1	$D_5$	$\bar{D}_5$
0	1	1	0	$D_6$	$\bar{D}_6$
0	1	1	1	$D_7$	$\bar{D}_7$

输出 W 的表达式为

$$W = \sum_{i=0}^7 m_i D_i$$

式中: $m_i$  为  $A_2$ 、 $A_1$ 、 $A_0$  的最小项。

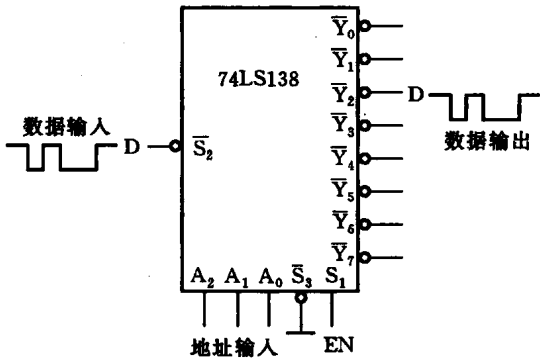


图 12.7

2. 数据分配器

数据分配器具有根据通道地址信号,将一个公共通道上的数据分时传送到多个不同的通道上去的功能。数据分配器可以采用二进制译码器实现。用 74LS138 作为数据分配器的逻辑原理图如图 12.7 所示。

74LS138 译码器作为数据分配器的功能表如表 12.5 所示。根据功能表可知,当  $S_1=1, \bar{S}_3=0, A_2 A_1 A_0=000 \sim 111$  时,  $\bar{S}_2$  端输入的数据 D 被分配到不同的输出端  $\bar{Y}_0 \sim \bar{Y}_7$ 。

表 12.5 74LS138 译码器作为数据分配器的功能表

输 入						输 出							
S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>	$\overline{Y}_0$	$\overline{Y}_1$	$\overline{Y}_2$	$\overline{Y}_3$	$\overline{Y}_4$	$\overline{Y}_5$	$\overline{Y}_6$	$\overline{Y}_7$
0	×	0	×	×	×	1	1	1	1	1	1	1	1
1	D	0	0	0	0	D	1	1	1	1	1	1	1
1	D	0	0	0	1	1	D	1	1	1	1	1	1
1	D	0	0	1	0	1	1	D	1	1	1	1	1
1	D	0	0	1	1	1	1	1	D	1	1	1	1
1	D	0	1	0	0	1	1	1	1	D	1	1	1
1	D	0	1	0	1	1	1	1	1	1	D	1	1
1	D	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	D	1
1	D	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	D

12.2 例题解析

例 12.1 分析如图 12.8 所示组合逻辑电路,说明该电路的功能。

解 按照组合逻辑电路分析的一般步骤,分析过程如下。

(1) 写出输出函数表达式。

$$Y_1 = A \oplus B \oplus C$$

$$Y_2 = \overline{\overline{A} \cdot \overline{B} \cdot \overline{C}} = \overline{A} \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} + \overline{A} \cdot B \cdot \overline{C} + \overline{A} \cdot \overline{B} \cdot C + A \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} + A \cdot B \cdot \overline{C} + A \cdot \overline{B} \cdot C + A \cdot B \cdot C$$

(2) 列真值表。根据输出逻辑函数 Y 和 G 的逻辑表达式,列出真值表,如表 12.6 所示。

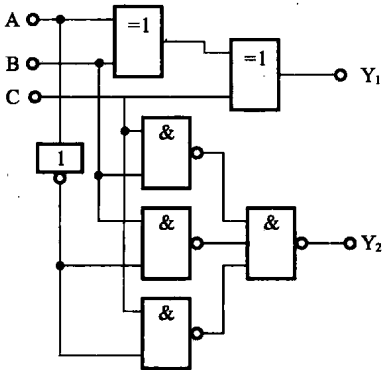


图 12.8

表 12.6 真值表 6

A	B	C	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	1	0	0	0
1	1	1	1	1

(3) 假定电路输入变量 A、B、C 和输出逻辑函数 Y、Y<sub>2</sub> 均为 1 位二进制数,由真值表可知,该电路实现了全减器的功能。其中,A 为被减数,B 为减数,C 为来自低位的借位,Y<sub>1</sub> 为本位差,Y<sub>2</sub> 为本位向高位的借位。

例 12.2 设 ABCD 是 8421BCD 码,用 x 表示此码的十进制数码,若 5≤x≤9,则输出

Y=1, 否则 Y=0。试用与非门组成逻辑图。

解 由题意可列出真值表如表 12.7 所示。表中未出现的 ABCD=1010~1111 的 6 个伪码既可为 0 也可为 1, 是任意数, 用×表示, 可参与逻辑函数化简而不影响逻辑结构, 使逻辑表达式和逻辑电路更加简单。

表 12.7 真值表 7

x	A	B	C	D	Y
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0
2	0	0	1	0	0
3	0	0	1	1	0
4	0	1	0	0	0
5	0	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1
7	0	1	1	1	1
8	1	0	0	0	1
9	1	0	0	1	1

与真值表对应的卡诺图如图 12.9 所示。

化简后

$$Y = A + BC + BD = \overline{\overline{A} \cdot \overline{BC} \cdot \overline{BD}}$$

用与非门组成的逻辑图如图 12.10 所示。

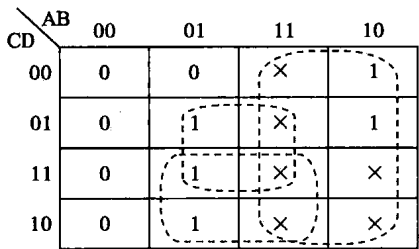


图 12.9

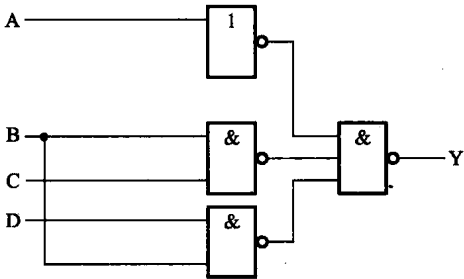


图 12.10

例 12.3 某工厂有三个用电量相同的车间和一大、一小两台自备发电机, 大发电机的供电量是小发电机的 2 倍。若只有一个车间开工, 小发电机便可满足供电要求; 若两个车间同时开工, 大发电机可满足供电要求。试用与非门设计一控制器, 以实现对两台发电机启动的控制。

解 (1) 列真值表。设 A、B、C 为三个车间开工情况(1 表示开工, 0 表示停工), Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub> 为大、小发电机的启动信号(1 表示启动, 0 表示关闭)。根据题意列出真值表如表 12.8 所示。

(2) 写逻辑表达式。由真值表可分别写出 Y<sub>1</sub> 和 Y<sub>2</sub> 的逻辑表达式:

$$Y_1(A,B,C) = \sum m(3,5,6,7)$$

$$Y_2(A,B,C) = \sum m(1,2,4,7)$$

(3) 化简、变换。由于电路要用与非门实现,因此,要把  $Y_1$ 、 $Y_2$  化简为最简与或表达式,然后对其两次求反变成与非式。

$$Y_1(A,B,C) = \sum m(3,5,6,7) = AB + AC + BC = \overline{\overline{AB} + \overline{AC} + \overline{BC}} = \overline{\overline{AB} \cdot \overline{AC} \cdot \overline{BC}}$$

$$\begin{aligned} Y_2(A,B,C) &= \sum m(1,2,4,7) = \overline{A}BC + \overline{A}\overline{B}C + A\overline{B}C + ABC \\ &= \overline{\overline{\overline{A}BC} + \overline{\overline{A}\overline{B}C} + \overline{A\overline{B}C} + \overline{ABC}} = \overline{\overline{\overline{A}BC} \cdot \overline{\overline{A}\overline{B}C} \cdot \overline{A\overline{B}C} \cdot \overline{ABC}} \end{aligned}$$

(4) 画出逻辑电路图,如图 12.11 所示。

表 12.8 真值表 8

A	B	C	$Y_1$	$Y_2$
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

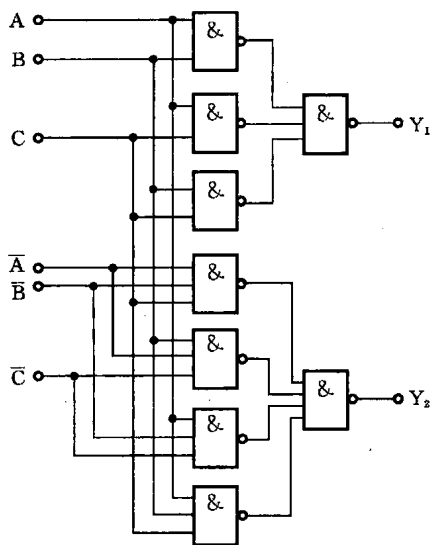


图 12.11

**例 12.4** 对于 74147 优先编码器,当输入  $\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_3 = \bar{I}_4 = 1, \bar{I}_5 = \bar{I}_6 = \bar{I}_7 = \bar{I}_8 = \bar{I}_9 = 0$  时,确定输出  $\bar{Y}_3 \bar{Y}_2 \bar{Y}_1 \bar{Y}_0$ 。

**解** 74147 的输入中,输入信号的优先次序为  $\bar{I}_9 \sim \bar{I}_1$ ,即  $\bar{I}_9$  优先级最高, $\bar{I}_1$  优先级最低。当输入中  $\bar{I}_9$  有效时,无论  $\bar{I}_1 \sim \bar{I}_8$  是否有效,编码器均按  $\bar{I}_9$  编码,使输出为对应 9 的 8421BCD 码的反码 0110,即  $\bar{Y}_3 \bar{Y}_2 \bar{Y}_1 \bar{Y}_0 = 0110$ 。

**例 12.5** 试画出用 3/8 线译码器 74LS138 和与非门实现如下逻辑函数的逻辑电路图。

$$Y(A,B,C) = AC$$

**解** 将逻辑表达式化为标准与或式并两次求反。

$$Y = AC = A\overline{B}C + AB\overline{C} = \overline{\overline{A\overline{B}C} + \overline{AB\overline{C}}} = \overline{\overline{A\overline{B}C} \cdot \overline{AB\overline{C}}} = \overline{\bar{Y}_5 \cdot \bar{Y}_7}$$

实现逻辑函数的逻辑电路图如图 12.12 所示。

**例 12.6** 试分别用 8 选 1 选择器 74LS151 和 4 选 1 选择器 74LS153 实现逻辑函数  $Y = A\bar{B} + \bar{A}B$

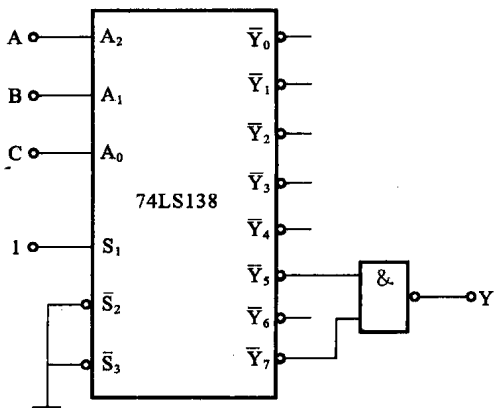


图 12.12



+BC。

解

$$\begin{aligned} Y &= A\bar{B} + \bar{A}B + BC = A\bar{B}(\bar{C} + C) + \bar{A}B(\bar{C} + C) + (\bar{A} + A)BC \\ &= \bar{A}B\bar{C} + \bar{A}BC + A\bar{B}\bar{C} + A\bar{B}C + ABC = m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_7 \\ &= \bar{A}\bar{B} \cdot 0 + \bar{A}\bar{B} \cdot 1 + \bar{A}\bar{B} \cdot 1 + AB \cdot C \end{aligned}$$

(1) 令  $A_2 = A, A_1 = B, A_0 = C; \bar{S}$  端接地, 使数据选择器 74LS151 处于使能状态。只要输入  $D_0 = D_1 = D_6 = 0, D_2 = D_3 = D_4 = D_5 = D_7 = 1$ , 即可实现逻辑函数  $Y = A\bar{B} + \bar{A}B + BC$  的功能。其电路如图 12.13(a) 所示。

(2) 令  $A_1 = A, A_0 = B; \bar{S}$  端接地, 数据选择器 74LS153 处于使能状态。根据公式  $W = \sum_{i=0}^3 m_i D_i$ , 只要输入  $D_0 = 0, D_1 = 1, D_2 = 1, D_3 = C$ , 即可实现逻辑函数  $Y = A\bar{B} + \bar{A}B + BC$  的功能。其电路如图 12.13(b) 所示。

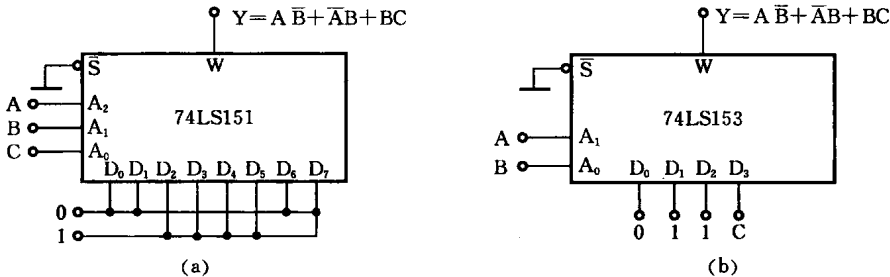


图 12.13

例 12.7 用 3/8 线译码器 74LS138 和 8 路数据选择器 74LS151 组成的 3 位数据比较器如图 12.14 所示。请按  $ABC = XYZ$  和  $ABC \neq XYZ$  的情况分析输出 W 的取值。

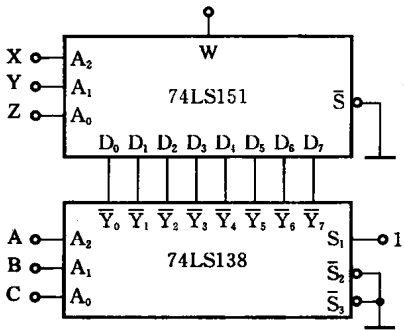


图 12.14

解 当  $ABC = XYZ = m_k$  时, 译码器有效输出  $\bar{Y}_k = 0$ , 其他无效输出为 1, 对应数据选择器的输入  $D_k = 0$ , 其他输入为 1, 若  $XYZ = m_k$ , 则数据选择器输出  $W = D_k$ , 由  $D_k = 0$ , 得到  $W = 0$ 。

当  $ABC = m_k$  与  $XYZ = m_q$  不等时, 74LS138 译码器有效输出  $\bar{Y}_k = 0$ , 其他无效输出为 1, 对应 74LS151 选择器的输入  $D_k = 0$ , 其他输入为 1, 因而  $D_q = 1$ , 由  $XYZ = m_q$  得到  $W = D_q = 1$ 。

### 12.3 习题解答

#### 12.3.1 填空题

1. 逻辑电路按输入、输出关系, 分为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_两大类。(组合逻辑电路, 时序逻辑电路)
2. 组合逻辑电路中不包含存储信号的\_\_\_\_\_元件, 它一般是由各种\_\_\_\_\_组合而成的。

(记忆,逻辑门电路)

3. 组合逻辑电路的设计是组合逻辑分析的\_\_\_\_\_,它根据课题的要求来实现某种逻辑功能,画出实现该功能的\_\_\_\_\_电路。(逆过程,逻辑)

4. 逻辑电路如图 12.15 所示。化简后  $Y_1$  和  $Y$  的逻辑表达式为  $Y_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $Y = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(( $A+B$ ) $D$ ,  $AD+BD+AC$ )

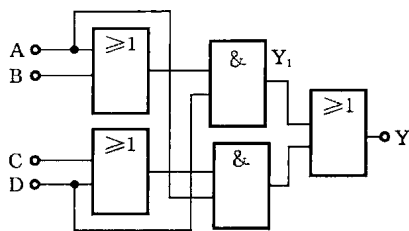


图 12.15

5. 设输入变量  $A, B, C$ , 判别三个变量中有奇数个 1 时, 函数  $Y=1$ , 否则  $Y=0$ , 实现它的标准函数  $Y(A, B, C) = \sum m(1, 2, \underline{\hspace{2cm}}, \underline{\hspace{2cm}})$ 。(4, 7)

6. 1 位加法器分为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_两种。(半加器, 全加器)

7. 1 位半加器的输出包括\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。(本位和数, 向高位进位数)

8. 全加器可用\_\_\_\_\_个半加器和 1 个\_\_\_\_\_门组成。(2, 或)

9. 多位二进制数相加, 可采用\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_的方式来完成, 称为串行加法器。(并行相加, 串行进位)

10. 将二进制数码按一定规律编排起来, 用来表示某种信息含义的一串符号称为\_\_\_\_\_, 具有这种功能的逻辑电路称为\_\_\_\_\_。(编码, 编码器)

11. 2 位二进制数可对\_\_\_\_\_个输入信号编码; 给 128 个字符编码至少需要\_\_\_\_\_位二进制数。(4, 7)

12. 4/2 线优先编码器的真值表如表 12.9 所示, 该电路输入高电平有效, 从真值表可以看出, 输入端优先级最高的是\_\_\_\_\_, 优先级最低的是\_\_\_\_\_。(I<sub>3</sub>, I<sub>0</sub>)

表 12.9 4/2 线优先编码器的真值表

I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>0</sub>
1	0	0	0	0	0
×	1	0	0	0	1
×	×	1	0	1	0
×	×	×	1	1	1

13. 74147 的输入端  $\bar{I}_9 \bar{I}_8 \bar{I}_7 \bar{I}_6 \bar{I}_5 \bar{I}_4 \bar{I}_3 \bar{I}_2 \bar{I}_1 = 001111111$ , 则有\_\_\_\_\_路输入信号有效, 输出  $\bar{Y}_3 \bar{Y}_2 \bar{Y}_1 \bar{Y}_0 = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(2, 0110)

14. 二进制译码器可将  $n$  位二进制代码译成电路的\_\_\_\_\_种输出状态, 如 2/\_\_\_\_\_线译码器。(2<sup>n</sup>, 4)

15. 74LS138 译码器当\_\_\_\_\_ = 0 或\_\_\_\_\_ = 1 时, 译码器处于禁止状态。(S<sub>1</sub>;  $\bar{S}_2 + \bar{S}_3$ )

16. 若七段共阴极显示译码器显示十进制数字“5”, 则显示译码器 7448 的输入 A<sub>3</sub> A<sub>2</sub> A<sub>1</sub> A<sub>0</sub> 应为\_\_\_\_\_, 输出应为\_\_\_\_\_。(0101, 1011011)

17. 数据选择器是一种多输入、\_\_\_\_\_输出的逻辑部件。数据分配器是一种\_\_\_\_\_输入、多输出的逻辑部件。(单, 单)

18. 4 选 1 数据选择器 74LS153 中, A<sub>1</sub> A<sub>0</sub> 为地址信号, D<sub>0</sub> = D<sub>3</sub> = 1, D<sub>1</sub> = C, D<sub>2</sub> =  $\bar{C}$ , 当

$A_1 A_0 = 00$  时, 输出  $Y = \underline{\hspace{1cm}}$ ; 当  $A_1 A_0 = \underline{\hspace{1cm}}$  时, 输出  $Y = C$ 。(1, 01)

### 12.3.2 选择题

1. 组合逻辑电路的特点是( )。(D)

- A. 含有记忆元件  
B. 输出、输入间有反馈通路  
C. 电路输出与以前状态有关  
D. 全部由门电路构成

2. 在下列逻辑电路中, 不是组合逻辑电路的有( )。(D)

- A. 译码器  
B. 编码器  
C. 全加器  
D. 寄存器

3. 在图 12.16 中, 逻辑电路完成( )功能。(A)

- A. 异或门  
B. 同或门  
C. 半加器  
D. 全加器

4. 设输入变量 A、B、C, 3 个变量中有偶数个 1 时, 函数  $Y=1$ , 否则  $Y=0$ , 实现它的标准函数  $Y(A, B, C) =$

( )。(D)

- A.  $\sum m(1, 2, 4, 7)$   
B.  $\sum m(1, 3, 5, 6)$

- C.  $\sum m(3, 5, 6, 7)$   
D.  $\sum m(0, 3, 5, 6)$

5. 逻辑电路如图 12.17 所示, 半加器为( )。(A)

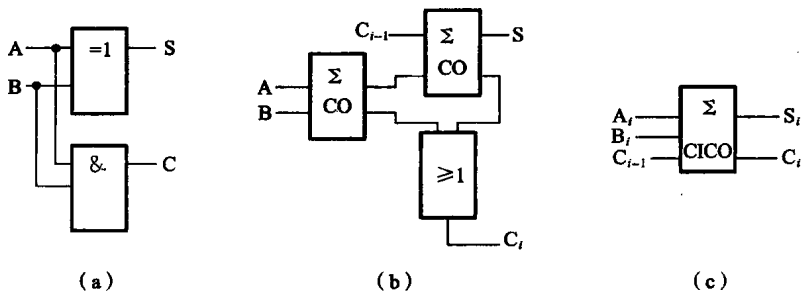


图 12.17

- A. a  
B. b  
C. c  
D. 以上都不是

6. 1 位全加器的输入信号和输出信号是( )。(A)

- A.  $A_i, B_i, C_{i-1}; S_i, C_i$   
B.  $A_i, B_i, C_i; S_i, C_{i-1}$   
C.  $1, 1, 1; S_i, C_i$   
D.  $0, 0, 0; S_i, C_{i-1}$

7. 串行加法器和并行加法器的进位信号分别采用( )传递。(B)

- A. 超前和逐位  
B. 逐位和超前  
C. 逐位和逐位  
D. 超前和超前

8. 设 74148 的工作状态如图 12.18 所示, 则输出  $\bar{Y}_2 \bar{Y}_1 \bar{Y}_0 =$  ( )。(D)

- A. 110  
B. 001  
C. 011  
D. 100

9. 74147 的输出  $\bar{Y}_3 \bar{Y}_2 \bar{Y}_1 \bar{Y}_0 = 1101$ , 则表示输入( )。(C)

- A.  $\bar{I}_1, \bar{I}_2$  都未进信号  
B.  $\bar{I}_1$  进信号,  $\bar{I}_2$  未进信号  
C.  $\bar{I}_2$  进信号,  $\bar{I}_1$  可能进信号  
D. 以上说法都不对

10. 要使 3/8 线译码器(74LS138)能正常工作, 使能控制端  $S_1, \bar{S}_2, \bar{S}_3$  的电平信号应是

( )。(A)

- A. 100                      B. 111                      C. 011                      D. 000

11. 3/8 线译码器(74LS138)的唯一输出有效电平是( )电平。(B)

- A. 高                      B. 低                      C. 三态                      D. 任意

12. 74LS138 的工作状态如图 12.19 所示,化简后逻辑关系为  $Y=(\quad)$ 。(A)

- A.  $B+\bar{A}C$                       B.  $AB+\bar{A}C$                       C.  $A+BC$                       D.  $\bar{A}+BC$

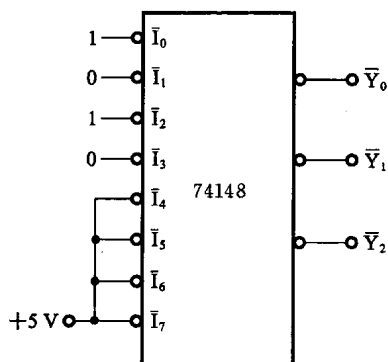


图 12.18

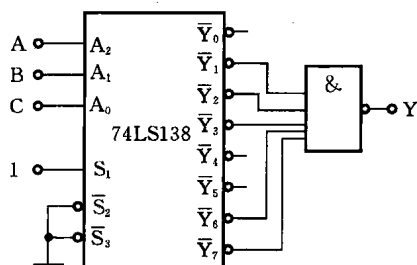


图 12.19

13. 显示译码器 7448 的输入  $\overline{LT}=0, \overline{BI}/\overline{RBO}=1$  输出  $a\sim g$  全为 1,则表示芯片工作在( )状态。(A)

- A. 灯测试                      B. 消隐                      C. 动态灭零                      D. 正常数码输出

14. 七段共阴极显示译码器显示数字“9”,则显示译码器 7448 的输出  $a\sim g$  应为( )。

(C)

- A. 0000100                      B. 1100000                      C. 1111011                      D. 0011111

15. 7448 若工作在消隐状态,输入显示器的字形应该是( )。(D)

- A. 0                      B. 8                      C. 1                      D. 黑屏

16. 一个 8 选 1 的数据选择器,其地址输入端有( )个。(B)

- A. 2                      B. 3                      C. 4                      D. 8

17. 4 路数据分配器,其地址输入端有( )个。(C)

- A. 4                      B. 3                      C. 2                      D. 1

18. 8 选 1 数据选择电路如图 12.20 所示,试写出它所实现逻辑函数  $Y$  的最小项表达式

( )。(B)

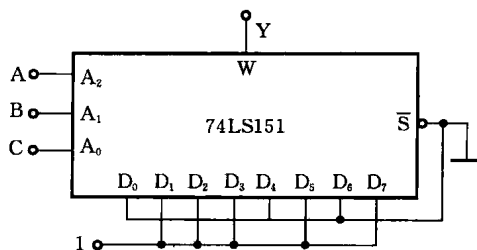


图 12.20

- A.  $\sum m(0,4,6)$       B.  $\sum m(1,2,3,5,7)$       C.  $C + \bar{A}B$       D.  $AB + BC$

### 12.3.3 计算题

1. 电路如图 12.21 所示, A、B 是数据输入端, C 是控制输入端, 试分析在  $C=0$  和  $C=1$  两种情况下, 数据输入 A、B 和输出 Y 之间的关系。

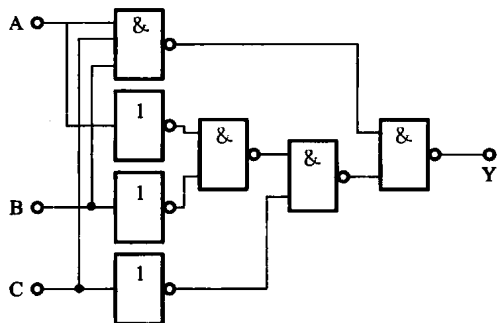


图 12.21

解  $Y = \overline{\overline{ABC} \cdot \overline{AB} \cdot \overline{C}} = ABC + (A+B)\overline{C}$   
 当  $C=1$  时,  $Y=AB$ , 电路起与门作用; 当  $C=$   
 $0$  时,  $Y=A+B$ , 电路起或门作用。

2. 电路如图 12.22 所示,分析电路的逻辑功能。

解  $Y = \overline{A}B + A\overline{B} = \overline{A}B + A\overline{B}$ 

这是异或的关系,输入 A、B 不同时,输出 Y

为 1, 否则 Y 为 0。

3. 逻辑电路如图 12.23 所示,试写出逻辑表达式,说明电路功能。

$$\begin{aligned} \text{解} \quad Y &= M \oplus ((M \oplus A) \oplus B \oplus C) = 0 \oplus (A \oplus B \oplus C) = A \oplus B \oplus C \\ G &= (M \oplus A)B + (M \oplus A)C + BC \end{aligned}$$

图 12.23 所示的逻辑电路为 1 位二进制加/减法器。

M=0 时,  $Y=A\oplus B\oplus C$ ,  $G=AB+AC+BC$ , 实现全加器功能; M=1 时,  $Y=A\oplus B\oplus C$ ,  $G=\overline{A}B+\overline{A}C+BC$ , 实现全减器功能。

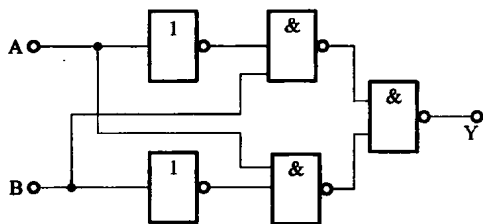


图 12.22

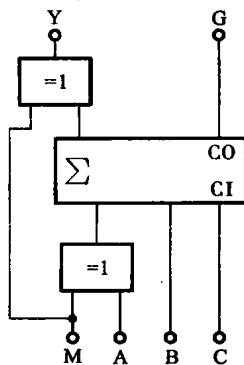


图 12.23

4. 设计一个组合逻辑电路,该电路输入端接收 2 个 2 位二进制数  $A=A_2A_1, B=B_2B_1$ 。当  $A \geq B$  时,输出  $Y=1$ ,否则  $Y=0$ 。

解 当  $A \geq B$  时, 输出  $Y=1$ ; 当  $A < B$  时,  $Y=0$ 。  $Y=0$  的情况易于分析, 所以输出定为  $\bar{Y}$ 。

分析  $A < B$  的情况:比较两数大小总是从高位开始进行比较的,仅当高位相同时才比较低位,而且二进制数只有 1 和 0 两种可能的取值,可分别用原变量和反变量表示,所以,可直

接写出该逻辑电路的输出函数的逻辑表达式

$$\bar{Y} = \bar{A}_2 B_2 + (\bar{A}_2 \bar{B}_2 + A_2 B_2) \bar{A}_1 B_1$$

化简得

$$\bar{Y} = \bar{A}_2 B_2 + \bar{A}_2 \bar{A}_1 B_1 + \bar{A}_1 B_2 B_1$$

若实现 Y 输出,则应将上式变成如下逻辑表达式:

$$\begin{aligned} Y &= \overline{\bar{A}_2 B_2 + \bar{A}_2 \bar{A}_1 B_1 + \bar{A}_1 B_2 B_1} \\ &= \overline{\bar{A}_2 B_2} \cdot \overline{\bar{A}_2 \bar{A}_1 B_1} \cdot \overline{\bar{A}_1 B_2 B_1} \end{aligned}$$

其逻辑电路图如图 12.24 所示。

5. 试用最少与非门设计一个 3 位多数表决电路(无弃权)。

解 设 3 位多数表决中,赞成就按电键,表示 1;不赞成则不按电键,表示 0。如果多数赞成, Y=1;反之, Y=0。真值表如表 12.10 所示。其逻辑图如图 12.25 所示。

$$\begin{aligned} Y &= AB\bar{C} + A\bar{B}C + \bar{A}BC + ABC = AB\bar{C} + A\bar{B}C + \bar{A}BC + ABC + ABC + ABC \\ &= AB(\bar{C} + C) + AC(\bar{B} + B) + BC(\bar{A} + A) = AB + BC + CA = \overline{\bar{A}\bar{B} + \bar{B}\bar{C} + \bar{C}\bar{A}} \\ &= \overline{\bar{A}\bar{B}} \cdot \overline{\bar{B}\bar{C}} \cdot \overline{\bar{C}\bar{A}} \end{aligned}$$

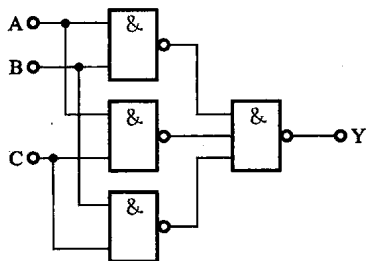


图 12.25

表 12.10 真值表 9

A	B	C	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

6. 某实验室有红、黄两个故障灯,用来表示三台设备的工作情况。当只有一台设备有故障时,黄灯亮;若有两台设备同时产生故障,红灯亮;而当三台设备都产生故障时,红灯、黄灯同时亮。试设计一个控制指示灯的逻辑电路。

解 设三台设备用 A、B、C 表示;设备有故障,状态为 1;指示灯亮,黄灯输出设为 Y<sub>1</sub>,红灯输出设为 Y<sub>2</sub>,列真值表如表 12.11 所示。

$$Y_1 = \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}B\bar{C} + A\bar{B}\bar{C} + ABC = A \oplus B \oplus C$$

$$Y_2 = \bar{A}BC + A\bar{B}C + AB\bar{C} + ABC$$

$$Y_2 = \overline{\bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{C} + \bar{A}\bar{B}} = \overline{\bar{B}\bar{C}} \cdot \overline{\bar{A}\bar{C}} \cdot \overline{\bar{A}\bar{B}}$$

可用全加器实现,如图 12.26 所示。

7. 假定 x=AB 代表一个 2 位二进制数,试设计满足 Y=x<sup>2</sup> 的逻辑电路。

解 2 位二进制数表示的最大十进制数为 3, 3<sup>2</sup>=9,表示十进制数 9 需要 4 位二进制数,设为 Y<sub>3</sub>Y<sub>2</sub>Y<sub>1</sub>Y<sub>0</sub>,由题意列出表 12.12 所示真值表。

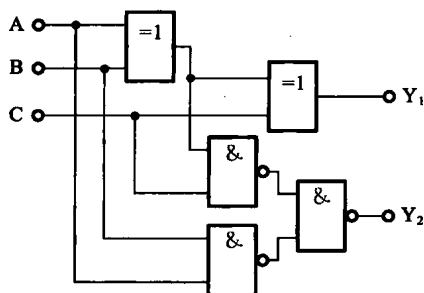


图 12.26

表 12.11 真值表 10

A	B	C	$Y_1$	$Y_2$
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

由真值表知  $Y_3 = AB, Y_2 = A\bar{B}, Y_1 = 0, Y_0 = \bar{A}B + AB = B$

其逻辑电路图如图 12.27 所示。

表 12.12 真值表 11

A	B	$Y_3$	$Y_2$	$Y_1$	$Y_0$
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	0	1

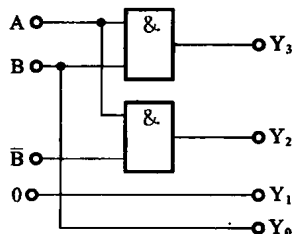


图 12.27

8. 密码锁控制电路如图 12.28 所示,开锁条件有二:钥匙插入锁眼闭合开关 S;拨对密码。若两个条件同时满足,开锁信号为 1,将锁打开。否则,报警信号为 1,接通警铃,试分析密码 ABCD 是多少?

解 开锁信号为  $Y = S \cdot \overline{ABCD} = S \cdot \bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}$

当 ABCD=0101, S=1 时, Y=1, 锁打开, 即开锁密码为 0101。

9. 3/8 线译码器电路如图 12.29 所示,试写出它能实现的逻辑函数 Y 的最简与或表达式。

解 将逻辑函数用最小项表示,然后两次求反。

$$Y = \overline{Y_0} \cdot \overline{Y_1} \cdot \overline{Y_5} \cdot \overline{Y_7} = \overline{m_0} \cdot \overline{m_1} \cdot \overline{m_5} \cdot \overline{m_7} = m_0 + m_1 + m_5 + m_7 = \bar{A}\bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C + A\bar{B}\bar{C} + ABC$$

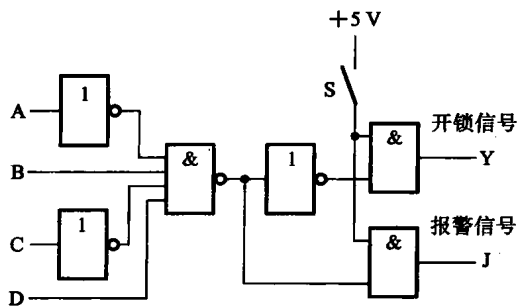


图 12.28

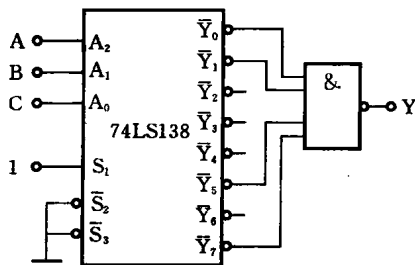


图 12.29

$$Y = \overline{A}\overline{B} + AC$$

10. 试画出用 3/8 线译码器 74LS138 和与非门实现如下逻辑函数的逻辑电路图。

$$Y = AB + BC + CA$$

解

$$\begin{aligned} Y &= AB + BC + CA = AB(C + \overline{C}) + (A + \overline{A})BC + A(B + \overline{B})C \\ &= \overline{A}BC + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC = m_3 + m_5 + m_6 + m_7 \\ &= \overline{m_3} \cdot \overline{m_5} \cdot \overline{m_6} \cdot \overline{m_7} = \overline{Y_3} \cdot \overline{Y_5} \cdot \overline{Y_6} \cdot \overline{Y_7} \end{aligned}$$

输入变量 A、B、C 分别接到 3/8 线译码器 74LS138 的输入端  $A_2$ 、 $A_1$ 、 $A_0$ ，输出端  $\overline{Y}_3$ 、 $\overline{Y}_5$ 、 $\overline{Y}_6$ 、 $\overline{Y}_7$  接到与非门的输入端，并令  $S_1 = 1$ ， $\overline{S}_2 = 0$ ， $\overline{S}_3 = 0$ ，实现逻辑函数 Y 的电路如图 12.30 所示。

11. 8 选 1 数据选择电路如图 12.31 所示，试写出它所实现的函数 Y 的最简与或表达式。

解

$$Y = \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + \overline{A}BC + A\overline{B}\overline{C} = \overline{A} + \overline{B}\overline{C}$$

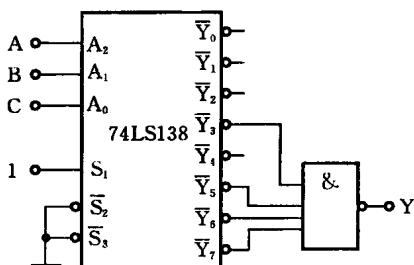


图 12.30

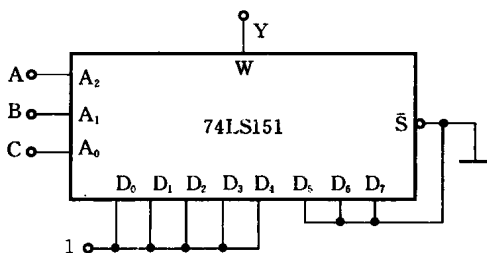


图 12.31

12. 试用 8 选 1 数据选择器 74LS151 实现函数  $Y = A \oplus B \oplus C$ 。

解

$$\begin{aligned} Y &= A \oplus B \oplus C = (AB + \overline{A}\overline{B}) \oplus C = (AB + \overline{A}\overline{B})C + \overline{(AB + \overline{A}\overline{B})C} \\ &= ABC + \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} = \sum m(1, 2, 4, 7) \end{aligned}$$

其电路如图 12.32 所示。

13. 双 4 选 1 数据选择器 74153 ( $W = \sum_{i=0}^7 m_i D_i$ ,  $m_i$  为  $A_1$ 、 $A_0$  组成的最小项)组成的电

路如图 12.33 所示，输入变量为 A、B、C，试写出输出函数  $Y_1$ 、 $Y_2$  的逻辑表达式，并分析电路的逻辑功能。

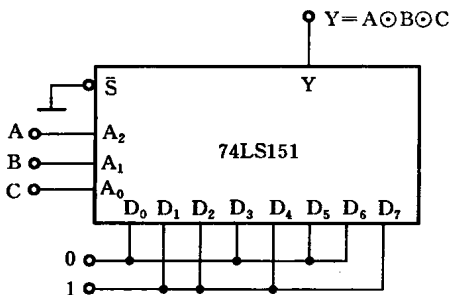


图 12.32

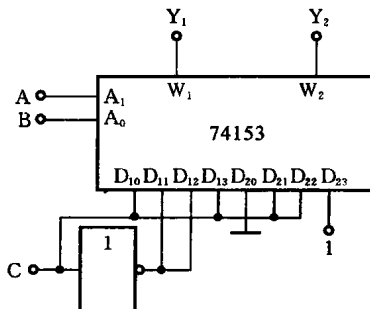


图 12.33



解

$$Y_1 = \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} + ABC = A \oplus B \oplus C$$

$$Y_2 = \overline{A}BC + A\overline{B}C + AB = (A \oplus B)C + AB$$

这是一个 1 位全加器, A、B、C 分别为被加数、加数和低位进位位,  $Y_1$  为本位和,  $Y_2$  为本位向高位的进位。

# 第 13 章 触发器和时序逻辑电路

## 13.1 要 点 总 结

时序逻辑电路由组合逻辑电路和具有记忆作用的触发器构成。时序逻辑电路的特点是：其输出不仅仅取决于电路的当前输入，而且还与电路的原来状态有关。

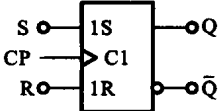
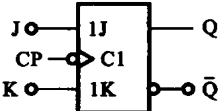
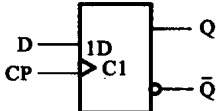
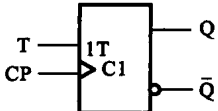
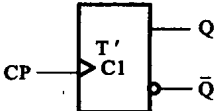
### 13.1.1 双稳态触发器

双稳态触发器的特点如下。

- (1) 有两个互补的输出端  $Q$  和  $\bar{Q}$ 。
- (2) 有两个稳定状态：1 态和 0 态。通常将  $Q=1$  和  $\bar{Q}=0$  称为 1 态，而把  $Q=0$  和  $\bar{Q}=1$  称为 0 态。
- (3) 当输入信号不发生变化时，触发器状态稳定不变。
- (4) 在一定输入信号作用下，触发器可以从一个稳定状态转移到另一个稳定状态。

按其逻辑功能，触发器可分为 RS 触发器、JK 触发器、D 触发器、T 触发器和 T' 触发器。各时钟控制触发器的逻辑符号和逻辑功能见表 13.1。

表 13.1 钟控制触发器的逻辑符号和逻辑功能

名 称	逻辑符号	次 态 方 程
RS 触发器		$Q^{n+1} = S + \bar{R}Q$ $R \cdot S = 0$ <p>(约束方程)</p>
JK 触发器		$Q^{n+1} = J \bar{Q}^n + \bar{K} Q^n$
D 触发器		$Q^{n+1} = D$
T 触发器		$Q^{n+1} = T \oplus Q^n$
T' 触发器		$Q^{n+1} = \bar{Q}^n$

一种已有的触发器加入转换逻辑电路,可以转换成为另一种功能的触发器。

### 13.1.2 同步时序逻辑电路的分析

同步时序逻辑电路的分析步骤如下。

(1) 由给定的逻辑电路图写出下列各逻辑方程式:各触发器的特性方程、各触发器的驱动方程、时序电路的输出方程。

(2) 将驱动方程代入相应触发器的特性方程,求得电路的状态方程(或次态方程)。

(3) 根据状态方程和输出方程,列出该时序电路的状态表,画出状态转换图或时序图。

(4) 根据电路的状态转换图说明该时序逻辑电路的逻辑功能。

### 13.1.3 典型的时序逻辑电路

在数字系统中,最典型的时序逻辑电路是寄存器和计数器。

#### 1. 寄存器

寄存器是用来存储数据或运算结果的一种常用逻辑部件。寄存器的主要组成部分是在双稳态触发器基础上加上一些逻辑门构成的。按功能分,寄存器分为数码寄存器和移位寄存器。移位寄存器是既能寄存数码,又能在时钟脉冲的作用下使数码向高位或向低位移动的逻辑功能部件,通常有左移寄存器、右移寄存器、双向移位寄存器和循环移位寄存器。移位寄存器可实现数据的串行、并行转换,数据的运算和数据的处理等。

#### 2. 计数器

计数器是一种能对输入脉冲数目进行计数的时序逻辑电路,被计数的脉冲信号称为计数脉冲。计数器除计数外,还可以实现定时、分频等功能,在计算机及数字系统中应用极广。

计数器种类很多,通常有如下不同的分类方法。

(1) 按逻辑功能可分为加法计数器、减法计数器和可逆计数器。

(2) 按计数进制可分为二进制计数器、十进制计数器和任意进制计数器等。

(3) 按工作方式可分为同步计数器和异步计数器。

##### 1) 集成电路 74161 型 4 位同步二进制计数器

图 13.1 所示的为 74161 型 4 位同步二进制可预置计数器的外引脚排列图及其逻辑符号,其中  $\bar{R}_D$  是异步清零端,  $\bar{LD}$  是预置数控制端,  $A_3$ 、 $A_2$ 、 $A_1$ 、 $A_0$  是预置数据输入端, EP 和 ET 是计数控制端,  $Q_3$ 、 $Q_2$ 、 $Q_1$ 、 $Q_0$  是计数输出端, RCO 是进位输出端。74161 型 4 位同步二进制计数器具有以下功能。

(1) 异步清零。  $\bar{R}_D=0$  时,计数器输出被直接清零,与其他输入端的状态无关。

(2) 同步并行预置数。在  $\bar{R}_D=1$  条件下,当  $\bar{LD}=0$  且有时钟脉冲 CP 的上升沿作用时,  $A_3$ 、 $A_2$ 、 $A_1$ 、 $A_0$  输入端的数据  $d_3$ 、 $d_2$ 、 $d_1$ 、 $d_0$  将分别被  $Q_3$ 、 $Q_2$ 、 $Q_1$ 、 $Q_0$  所接收。

(3) 保持。在  $\bar{R}_D=\bar{LD}=1$  条件下,当  $ET \cdot EP=0$  时,不管有无 CP 脉冲作用,计数器都将保持原有状态不变。需要说明的是,当  $EP=0$ 、 $ET=1$  时,进位输出 RCO 也保持不变;而当  $ET=0$  时,不管 EP 状态如何,进位输出  $RCO=0$ 。

(4) 计数。当  $\bar{R}_D=\bar{LD}=EP=ET=1$ ,且有时钟脉冲 CP 的上升沿作用时,74161 处于计数状态。

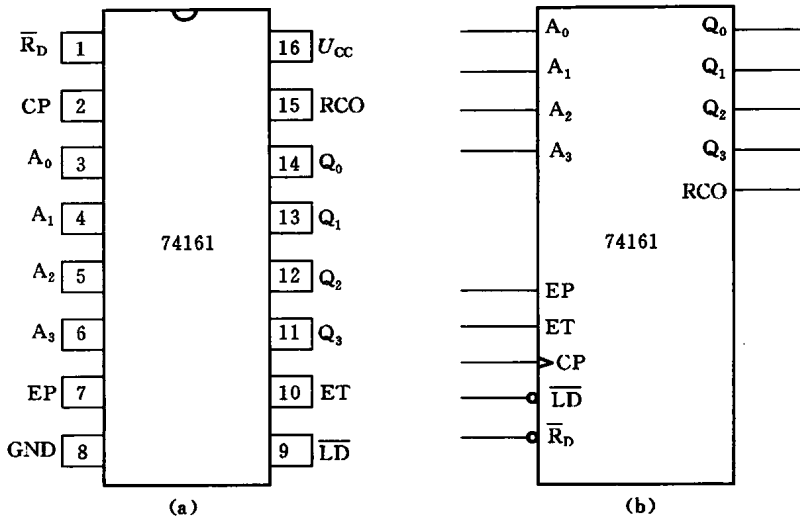


图 13.1

2) 集成电路 74LS290 异步十进制计数器

其外引脚排列图如图 13.2 所示。它由一个 1 位二进制计数器和一个异步五进制计数器组成。如果计数脉冲由  $CP_0$  端输入,输出由  $Q_0$  端引出,即得二进制计数器;如果计数脉冲由  $CP_1$  端输入,输出由  $Q_3$ 、 $Q_2$ 、 $Q_1$  引出,即是五进制计数器;如果将  $Q_0$  与  $CP_1$  相连,计数脉冲由  $CP_0$  输入,输出由  $Q_3$ 、 $Q_2$ 、 $Q_1$ 、 $Q_0$  引出,即得 8421BCD 码十进制计数器。因此,又称此电路为二-五-十进制计数器。当复位输入  $R_{0(1)} = R_{0(2)} = 1$ ,且置位输入  $S_{9(1)} \cdot S_{9(2)} = 0$  时,74LS290 的输出被直接清零;只要置位输入  $S_{9(1)} = S_{9(2)} = 1$ ,74LS290 的输出就将被直接置 9,即  $Q_3 Q_2 Q_1 Q_0 = 1001$ ;只有同时满足  $R_{0(1)} \cdot R_{0(2)} = 0$  和  $S_{9(1)} \cdot S_{9(2)} = 0$ ,才能在计数脉冲(下降沿)作用下实现二-五-十进制加法计数。

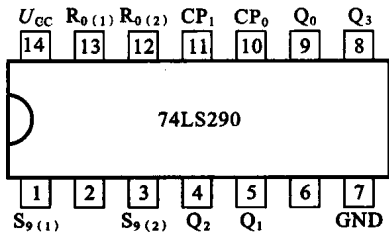


图 13.2

13.1.4 通用集成定时器 555

通用集成定时器 555 是一种将模拟电路和数字逻辑电路巧妙地组合在一起的中规模集成电路。通用集成定时器的内部逻辑电路图如图 13.3 所示,它由三个电阻值为 5 k $\Omega$  的电阻组成的分压器、两个比较器  $C_1$  和  $C_2$ 、基本 RS 触发器、输出级和放电管等五部分组成。

555 定时器功能如表 13.2 所示。



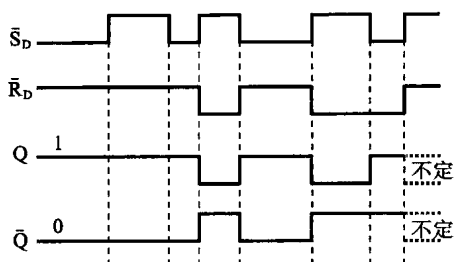


图 13.5

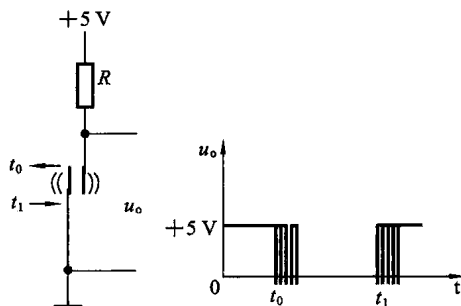


图 13.6

**解** 运用基本 SR 锁存器消除机械开关触点抖动引起的脉冲输出的电路如图 13.7 所示。

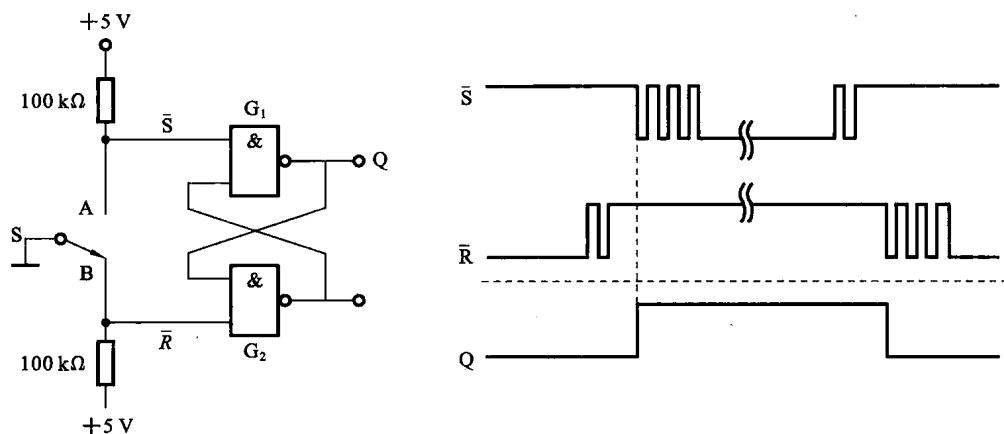


图 13.7

**例 13.3** 画出如图 13.8 所示的输入信号下, 钟控 RS 触发器  $Q$ 、 $\bar{Q}$  的输出波形(设  $Q$  的初始态为 0 态)。

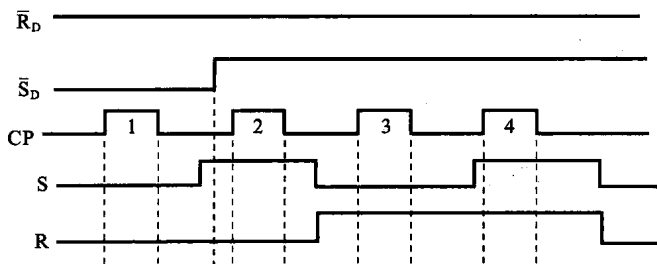


图 13.8

**解** CP 高电平时触发器状态由 R、S 确定。钟控 RS 触发器  $Q$ 、 $\bar{Q}$  的输出波形如图 13.9 所示。

**例 13.4** 设下降沿触发的 JK 触发器时钟脉冲和 J、K 信号的波形, 如图 13.10 所示, 试画出输出端  $Q$  的波形。设触发器的初始状态为 0。

**解** 输出端  $Q$  的波形如图 13.11 所示。

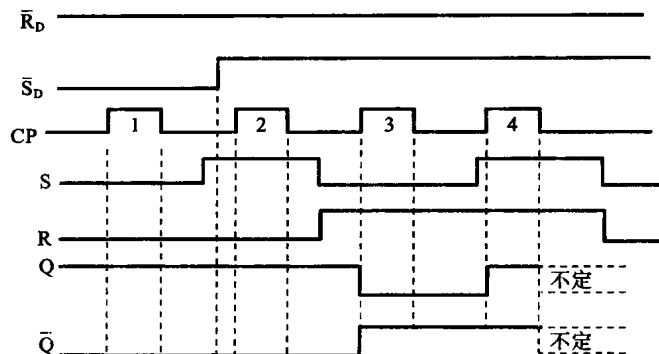


图 13.9

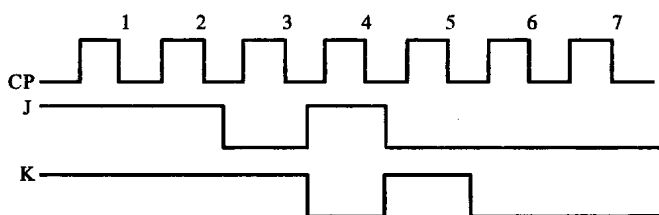


图 13.10

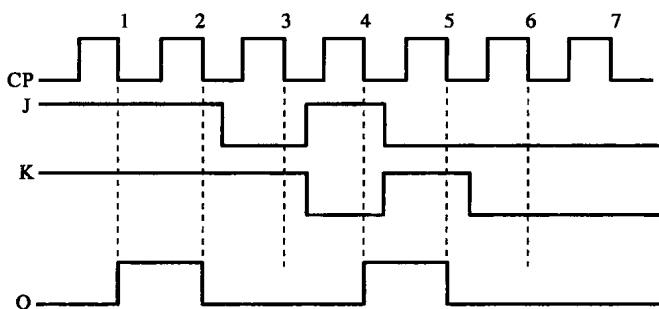


图 13.11

**例 13.5** 分析图 13.12 所示的同步时序逻辑电路的功能。

**解** 该电路的存储电路由 JK 触发器构成, 组合电路由门电路构成, 属于 Mealy 型时序逻辑电路。分析过程如下。

(1) 写出时序逻辑电路的各逻辑方程式。

这是一个同步时序逻辑电路, 故时钟方程可以不写。

时序逻辑电路的驱动方程为

$$J_1 = K_1 = 1, \quad J_2 = K_2 = X \oplus Q_1^n$$

时序电路的输出方程为

$$Z = \overline{XQ_1^n Q_2^n} \cdot \overline{XQ_1^n Q_2^n} = XQ_1^n Q_2^n + \overline{XQ_1^n Q_2^n}$$

(2) 将驱动方程代入 JK 触发器特性方程, 得到状态方程

$$Q_2^{n+1} = (X \oplus Q_1^n) Q_2^n + (\overline{X \oplus Q_1^n}) Q_2^n$$

$$Q_1^{n+1} = 1 \cdot \overline{Q_1^n} + \overline{1} \cdot Q_1^n = \overline{Q_1^n}$$

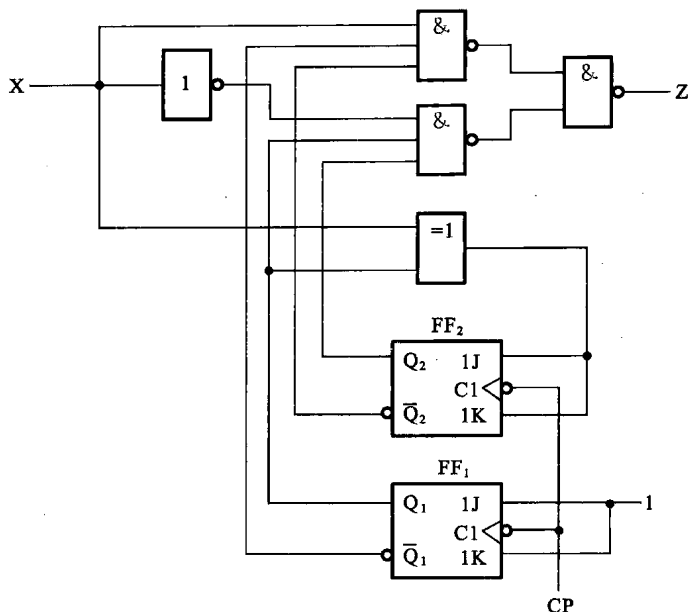


图 13.12

(3) 列出该时序逻辑电路的状态表,画出状态转换图和时序图。

状态表的列法是:先填入现态  $Q_2^n Q_1^n$  及输入  $X$  的所有取值组合,然后将每一种取值组合值分别代入输出方程及状态方程,求出相应的输出值  $Z$  和次态值  $Q_2^{n+1} Q_1^{n+1}$ 。由此可得到状态表,如表 13.3 所示。

表 13.3 例 13.5 的状态表

现态 $Q_2^n Q_1^n$	次态 $Q_2^{n+1} Q_1^{n+1}$ / 输出 Z	
	X=0	X=1
00	01/0	11/1
01	10/0	00/0
10	11/0	01/0
11	00/1	10/0

根据状态表可以画出状态图如图 13.13 所示,电路的工作波形如图 13.14 示。

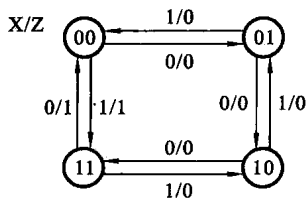


图 13.13

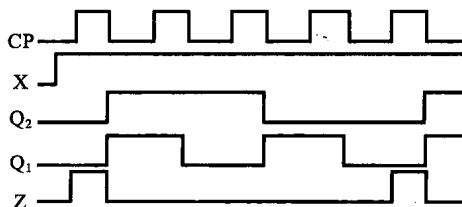


图 13.14

(4) 电路的逻辑功能分析。由状态图可知,例 13.5 中的逻辑电路是一个二进制可逆计数器。输入 X 为低电平(X=0)时,计数器将由初态 00 开始加计数。每来一个计数脉冲,计

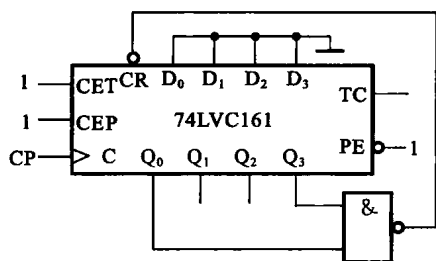


数器加 1, 依次为  $00 \rightarrow 01 \rightarrow 10 \rightarrow 11$ 。在计数器累加 4 个脉冲后, 其状态由 11 变为 00, 并产生一个进位脉冲 ( $Z=1$ )。当输入为高电平 ( $X=1$ ) 时, 计数器将由初态 11 开始减计数。每来一个脉冲, 计数器减 1, 依次为  $11 \rightarrow 10 \rightarrow 01 \rightarrow 00$ 。在计数器累减 4 个脉冲后, 其状态由 00 变为 11, 产生一个借位脉冲 ( $Z=1$ )。这样, 输入  $X$  称为加减控制信号,  $CP$  称为计数脉冲, 于是  $Z$  就是进位 ( $X=0$  时) 或者借位 ( $X=1$ ) 信号。因此, 图 13.12 所示的是一个在  $X$  控制下的对  $CP$  脉冲既能加计数又能减计数的模 4 可逆计数器。图 13.14 所示的是减计数情况下电路的工作波形。

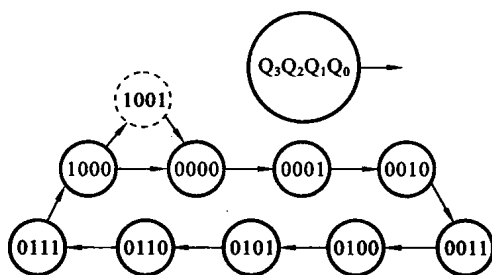
**例 13.6** 用 74LVC161 构成九进制加计数器。

**解** 九进制计数器应有 9 个状态, 而 74LVC161 在计数过程中有 16 个状态。如果设法跳过多余的 7 个状态, 则可实现模 9 计数器。

(1) 反馈清零法 用 74LVC161 构成九进制加计数器, 如图 13.15(a) 所示。其状态图如图 13.15(b) 所示。



(a)



(b)

图 13.15

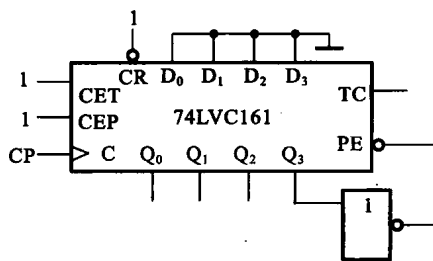
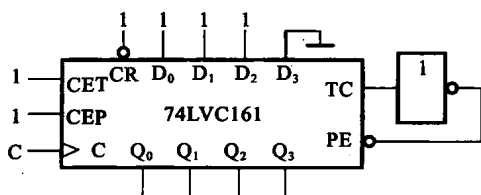


图 13.16

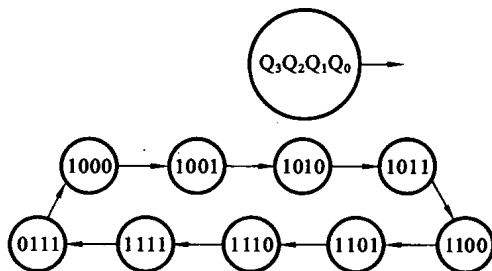
(2) 反馈置数法一 用 74LVC161 构成九进制加计数器, 如图 13.16 所示。

(3) 反馈置数法二 用 74LVC161 构成九进制加计数器, 如图 13.17 所示。

**例 13.7** 图 13.18 所示的为用 555 定时器组成的液位监控电路, 当液面低于正常值时, 监控器发声报警。



(a)



(b)

图 13.17

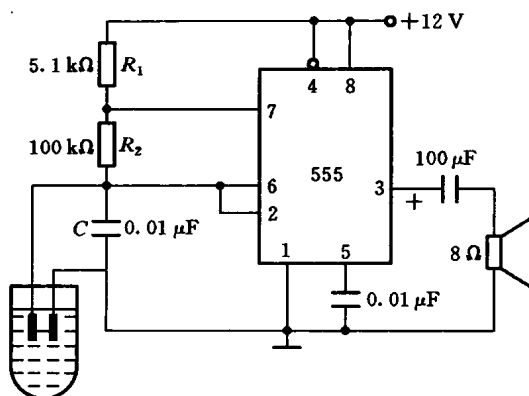


图 13.18

(1) 说明监控报警的原理。

(2) 计算扬声器发声的频率。

解 (1) 图 13.18 所示电路是由 555 定时器组成的多谐振荡器,其振荡频率由  $R_1$ 、 $R_2$  和  $C$  的值决定。电容两端引出两个探测电极插入液体内。液位正常时,探测电极被液体短路,振荡器不振荡,扬声器不发声。当液面下降到探测电极以下时,探测电极开路,电源通过  $R_1$ 、 $R_2$  给  $C$  充电,当  $u_C$  升至  $\frac{2}{3}U_{CC}$  时,振荡器开始振荡,振荡器发声报警。

(2) 扬声器的发声频率,即为多谐振荡器的频率。

$$f = \frac{1.43}{(R_1 + 2R_2)C} = \frac{1.43}{(5.1 + 2 \times 100) \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6}} \text{ Hz} = 697 \text{ Hz}$$

## 13.3 习题解答

### 13.3.1 填空题

- JK 触发器和 D 触发器的特性方程分别为\_\_\_\_、\_\_\_\_。(  $Q^{n+1} = J\overline{Q^n} + \overline{K}Q^n$ ,  $Q^{n+1} = D$  )
- 时序逻辑电路按其状态改变是否受同一定时信号控制,可将其分为\_\_\_\_和\_\_\_\_两种类型。(同步时序逻辑电路,异步时序逻辑电路)
- T 触发器的特性方程是\_\_\_\_;  $T'$  触发器的特性方程是\_\_\_\_。(  $Q^{n+1} = T\overline{Q^n} + \overline{T}Q^n$ ,  $Q^{n+1} = \overline{Q^n}$  )
- 时序逻辑电路是由\_\_\_\_和具有记忆作用的\_\_\_\_构成的。(组合逻辑电路,触发器)
- 全面描述一个时序逻辑电路的功能,必须使用三个方程式,它们是\_\_\_\_、\_\_\_\_和时序电路的输出方程。(触发器的驱动方程,触发器的特性方程)
- 某时序逻辑电路如图 13.19 所示,若在输出端得到 100 kHz 的矩形波,则该电路时钟脉冲 CP 的频率是\_\_\_\_。(400 kHz)
- 某时序逻辑电路设计过程中的最简状态图中的状态数为 10 个,设计该电路至少需



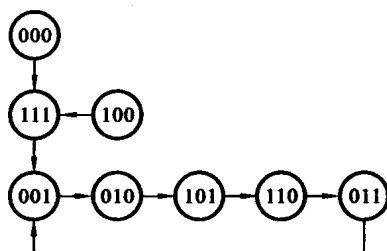


图 13.23

## 13.3.2 选择题

1. 下列通用集成电路中,( )属于时序逻辑电路。(B)

A. 译码器                      B. 计数器                      C. 编码器                      D. 加法器

2. 下列触发器中,抗干扰能力和可靠性最佳的是( )。(D)

A. 主从 RS 触发器                      B. 主从 JK 触发器  
C. 基本 RS 触发器                      D. 维持阻塞 D 触发器

3. 下列触发器中,有约束条件的是( )。(A)

A. 主从 RS 触发器                      B. 主从 JK 触发器  
C. 维持阻塞 JK 触发器                      D. 维持阻塞 D 触发器

4. 构成一个十进制计数器,需要触发器的个数至少为( )。(B)

A. 3 个                      B. 4 个                      C. 5 个                      D. 6 个

5. 若一单稳态触发器电路的输出脉宽  $t_w = 3 \mu s$ ,恢复时间  $t_{re} = 1 \mu s$ ,则输出信号的最高频率为( )。(A)

A.  $f_{\max} = 250 \text{ kHz}$     B.  $f_{\max} \geq 1 \text{ MHz}$     C.  $f_{\max} \leq 200 \text{ kHz}$     D.  $f_{\max} = 200 \text{ kHz}$

6. 若如图 13.24 所示单稳态触发器电路输出波形的脉冲宽度  $t_w = 5 \mu s$ ,恢复时间  $t_{re} = 1 \mu s$ ,则输出信号的最高频率为( )。(A)

A.  $166.7 \text{ kHz}$                       B.  $200 \text{ kHz}$                       C.  $250 \text{ kHz}$                       D.  $1 \text{ MHz}$

7. 某时序逻辑电路的状态图如图 13.25 所示,该电路为( )。(D)

A. 四进制加计数器    B. 四进制计数器    C. 五进制加计数器    D. 五进制计数器

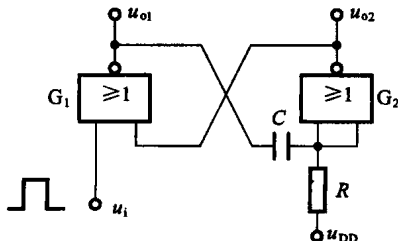


图 13.24

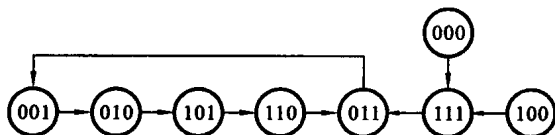


图 13.25

8. 设计一个九十九进制计数器的电路至少需要用( )个触发器。(C)

A. 1                      B. 4                      C. 7                      D. 10

9. 某时序逻辑电路如图 13.26 所示,若在输入端 CP 加入  $10 \text{ kHz}$  的脉冲波形,则该电

路输出端 Z 的频率为( )。(A)

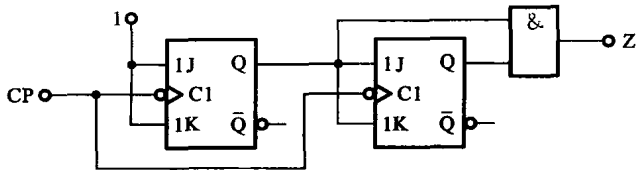


图 13.26

- A. 2.5 kHz      B. 5 kHz      C. 20 kHz      D. 40 kHz

10. 下列触发器中,有约束条件的是( )。(A)

- A. RS 触发器      B. JK 触发器      C. D 触发器      D. T 触发器

11. 下列中规模通用集成电路中,( )属于组合逻辑电路。(B)

- A. 4 位计数器 74161   B. 4 位加法器 74283   C. 4 位寄存器 74194   D. 4 位计数器 74290

12. 某时序逻辑电路设计过程中的最简状态图的状态数为 8 个,设计该电路至少需要用( )个触发器。(B)

- A. 4      B. 3      C. 2      D. 6

### 13.3.3 计算题

1. 逻辑电路如图 13.27(a)所示,输入 A、B、K 和时钟脉冲 CP 的波形如图 13.27(b)所示,试画出 J 和 Q 的波形(设 Q 的初始状态为 0)。

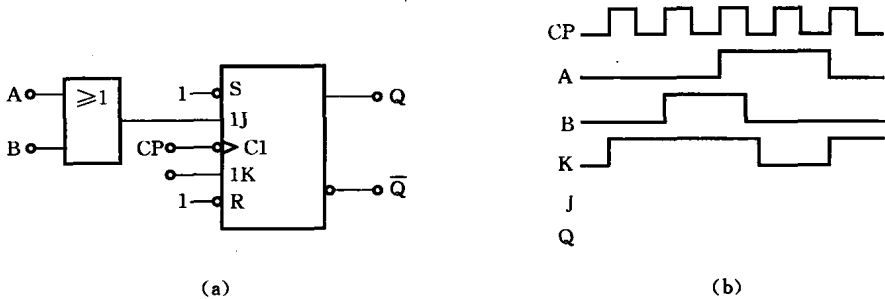


图 13.27

解 J 和 Q 的波形如图 13.28 所示。

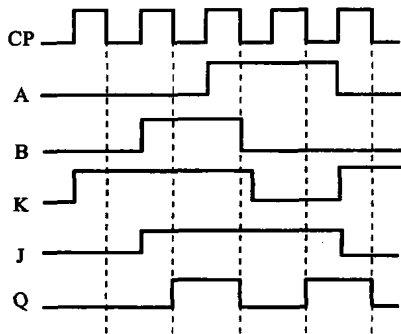


图 13.28

2. 同步时序逻辑电路和时钟脉冲 CP 的波形分别如图 13.29 所示。

(1) 画出在 CP 脉冲作用下  $Q_0$ 、 $Q_1$  的波形,设触发器初态均为 0 态。

(2) 说明这是几进制计数器。

解 (1)  $Q_0$  和  $Q_1$  的波形如图 13.30 所示。

(2) 这是四进制计数器。

3. 用二-五-十进制计数器 74LS290 构成如图 13.31 所示计数电路,试分析它们各为几进制计数器?

解 图 13.31(a)所示计数电路为六进制计数器。

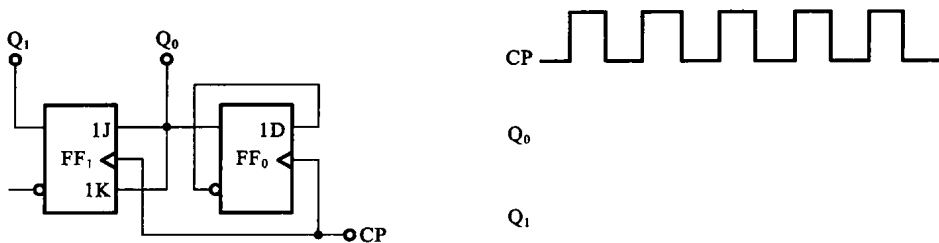


图 13.29

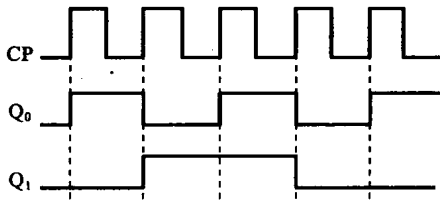


图 13.30

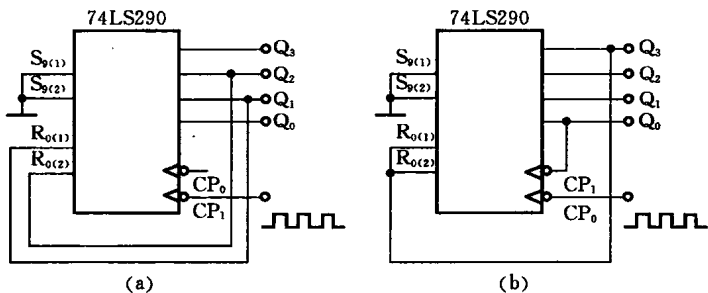


图 13.31

图 13.31(b)所示计数电路为八进制计数器。

4. 已知由与非门组成的基本 RS 触发器和输入端  $\bar{R}_D$ 、 $\bar{S}_D$  的波形如图 13.32 所示，试对应地画出 Q 和  $\bar{Q}$  的波形，并说明状态“不定”的含义。

解 Q 和  $\bar{Q}$  的波形如图 13.33 所示，状态“不定”的含义是： $\bar{R}_D$ 、 $\bar{S}_D=0,0$ 、 $Q$ 、 $\bar{Q}=1,1$ ，当  $\bar{R}_D$ 、 $\bar{S}_D=1,1$ ，Q 的状态不定。Q 的状态不定是指 Q 可能为“1”，也可能为“0”。

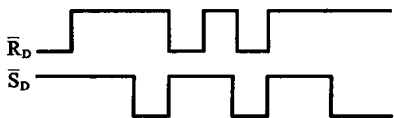


图 13.32

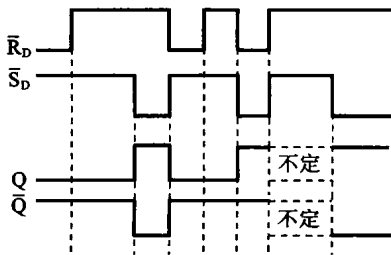


图 13.33

5. 已知钟控 RS 触发器 CP、R 和 S 的波形如图 13.34 所示，试画出输出 Q 的波形。设初始状态为 0 态。

解 钟控 RS 触发器输出 Q 的波形如图 13.35 所示。

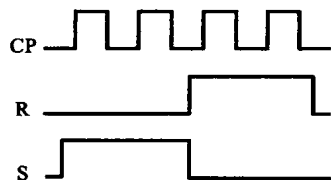


图 13.34

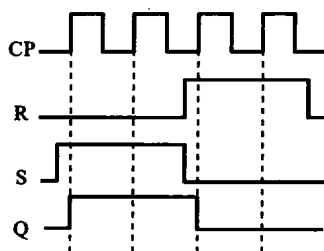


图 13.35

6. 在主从结构的 JK 触发器中,已知 CP、J、K 的波形如图 13.36 所示,试画出 Q 端的波形。设初始状态  $Q=0$ 。

解 主从结构的 JK 触发器输出端 Q 的波形如图 13.37 所示。

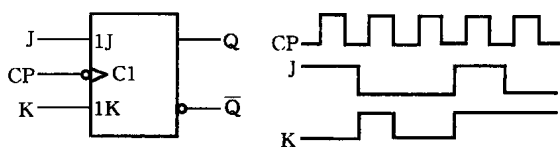


图 13.36

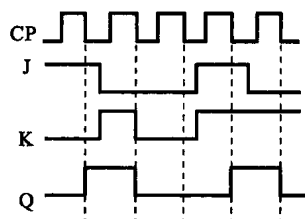


图 13.37

7. 维持阻塞 D 触发器的输入 D 和时钟脉冲 CP 的波形如图 13.38 所示,试画出 Q 端的波形。设初始状态  $Q=0$ 。

解 维持阻塞 D 触发器输出 Q 的波形如图 13.39 所示。

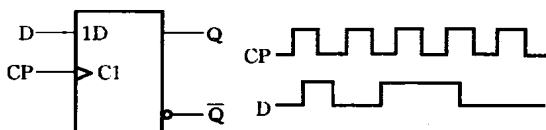


图 13.38

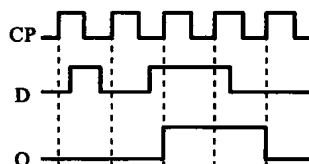


图 13.39

8. 在 T 触发器中,已知 T 和 CP 的波形如图 13.40 所示,试画出 Q 端的波形。设初始状态  $Q=0$ 。

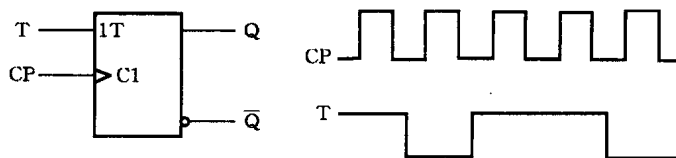


图 13.40

解 T 触发器输出 Q 的波形如图 13.41 所示。

9. 写出图 13.42 所示电路的逻辑关系式,说明其逻辑功能。

解 
$$D = A\bar{Q} + \bar{B}Q$$

根据 D 触发器的特性方程  $Q^{n+1} = D$ , 得

$$Q^{n+1} = A\bar{Q} + \bar{B}Q$$

## 第 13 章 触发器和时序逻辑电路

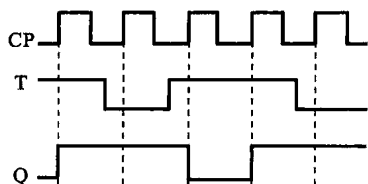


图 13.41

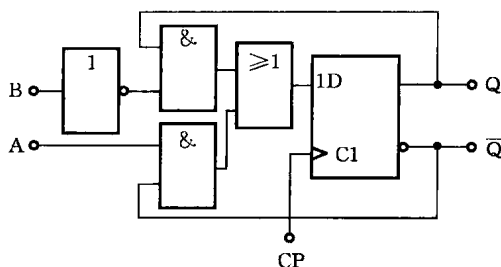


图 13.42

令  $A=J, K=B$ , 电路的功能与 JK 触发器的功能相同, 即该电路的功能就是将 D 触发器转换成了 JK 触发器。

10. 根据图 13.43 所示的电路和波形, 试画出 D 端和 Q 端的波形。设初始状态  $Q=0$ 。

解  $D=A \oplus B$ , D 和 Q 的波形如图 13.44 所示。

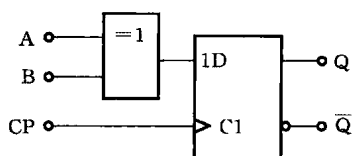


图 13.43

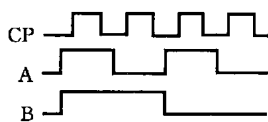


图 13.44

11. 电路如图 13.45 所示。画出  $Q_0$  端和  $Q_1$  端在 6 个时钟脉冲 CP 作用下的波形。设初态  $Q_1=Q_0=0$ 。

解

$$Q_0^{n+1} = D_0 = \overline{Q_0^n}$$

$$J_1 = 1, \quad K_1 = Q_0^n$$

$$Q_1^{n+1} = J_1 \overline{Q_1^n} + \overline{K_1} Q_1^n = \overline{Q_1^n} + \overline{Q_0^n} Q_1^n$$

CP、 $Q_0$ 、 $Q_1$  的波形如图 13.46 所示。

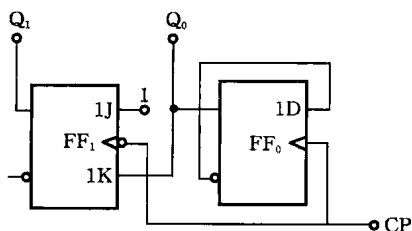


图 13.45

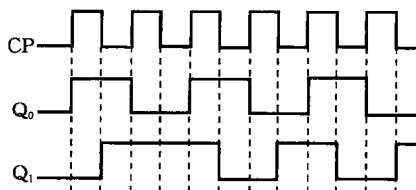


图 13.46

12. 用图 13.47(a)所给器件构成电路, 并在示波器上观察到如图 13.47(b)所示波形。试问电路是如何连接的? 请画出逻辑电路图。

解

$$Y = CP \cdot Q = \overline{CP \oplus Q} = \overline{CP \oplus \overline{Q}}$$

Q 为 CP 的二分频, 故逻辑电路图如图 13.48 所示。



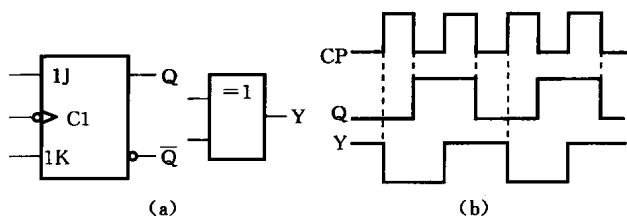


图 13.47

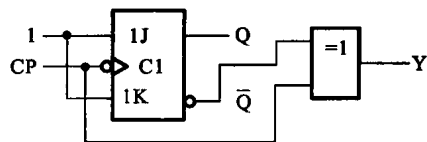


图 13.48

13. 已知如图 13.49(a)所示电路的各输入端信号如图 13.49(b)所示。试画出触发器输出端  $Q_0$  和  $Q_1$  的波形。设触发器的初态均为 0 态。

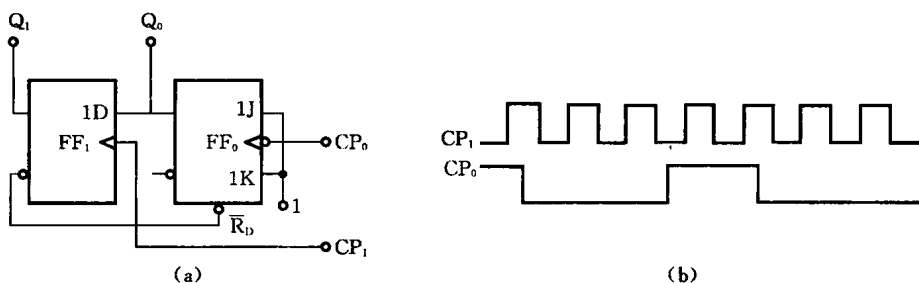


图 13.49

解 电路为异步时序电路,则

$$Q_0^{n+1} = Q_0^n, \quad \bar{R}_D = \bar{Q}_1^n$$

$$Q_1^{n+1} = D_1 = Q_0^n$$

触发器输出端  $Q_0$  和  $Q_1$  的波形如图 13.50 所示。

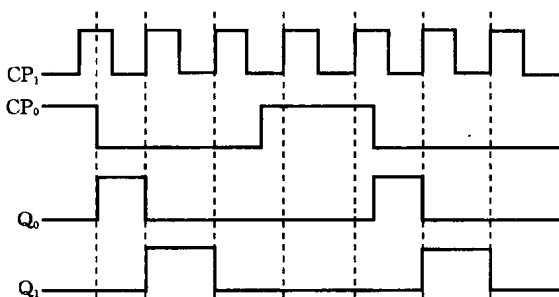


图 13.50

14. 已知电路和时钟脉冲 CP 及输入端 A 的波形如图 13.51 所示,试画出输出端  $Q_0$ 、 $Q_1$  的波形。假定各触发器初态为 1 态。

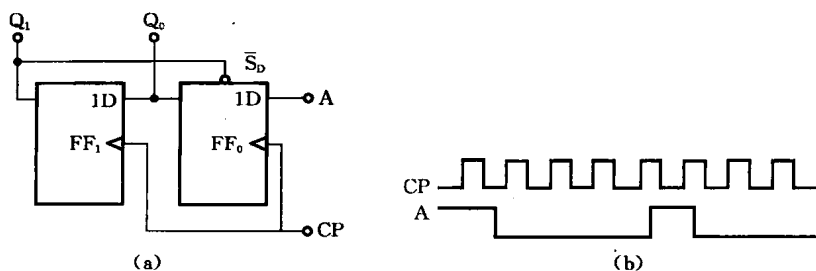


图 13.51

解 电路为异步时序电路,则

$$Q_0^{n+1} = A, \quad \bar{S}_D = Q_1^n$$

$$Q_1^{n+1} = D_1 = Q_0^n$$

触发器输出端  $Q_0$  和  $Q_1$  的波形如图 13.52 所示。

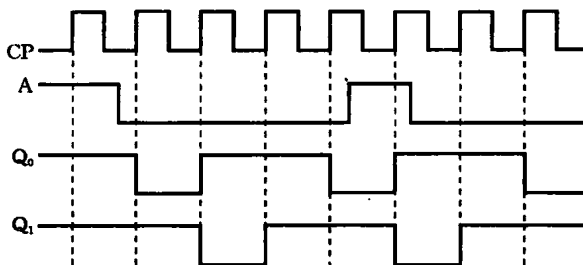


图 13.52

15. 已知图 13.53(a)所示电路中输入 A 及 CP 的波形如图 13.53(b)所示。试画出输出端  $Q_0$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$  的波形,设触发器初态均为 0 态。

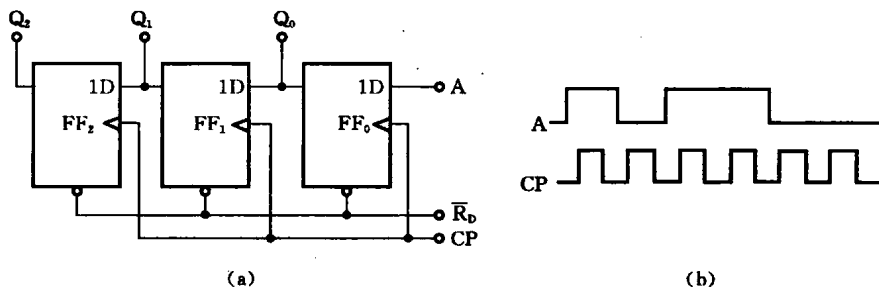


图 13.53

解 电路为同步时序电路,三个 D 触发器初态均为 0 态,上升沿触发,输出波形如图 13.54 所示。

从输出波形图中可看出,该电路为移位寄存器。

16. 电路如图 13.55 所示,已知时钟脉冲 CP 的频率为 2 kHz,试求  $Q_0$ 、 $Q_1$  的波形和频率。设触发器的初始状态为 0 态。

解 电路为异步时序逻辑电路,两个 D 触发器初态均为 0,上升沿触发,输出波形如图 13.56 所示。

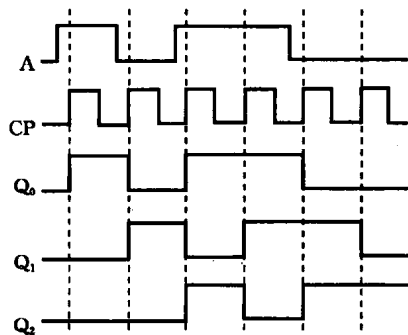


图 13.54

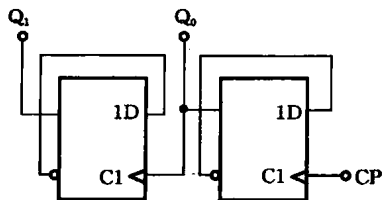


图 13.55

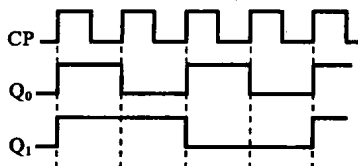


图 13.56

从输出波形图可看出,时钟脉冲 CP 的频率为 2 kHz,  $Q_0$  的频率为 1 kHz,  $Q_1$  的频率为 500 Hz。

17. 分析如图 13.57 所示电路的逻辑功能。

解 电路为同步时序逻辑电路,设两个 JK 触发器初态均为 0 态,下降沿触发,输出波形如图 13.58 所示。

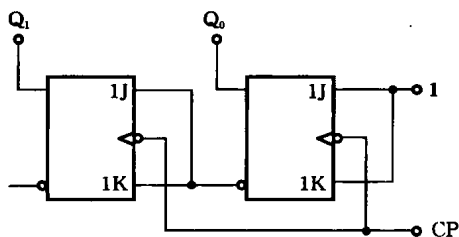


图 13.57

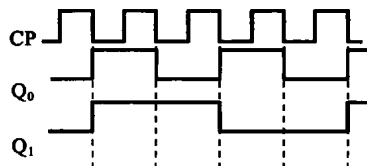


图 13.58

从输出波形图可看出,该电路为 2 位同步二进制减法计数器。

18. 某计数器波形如图 13.59 所示,试确定该计数器有几个独立状态,并画出状态图。

解 该计数器有 6 个独立状态,状态图如图 13.60 所示。

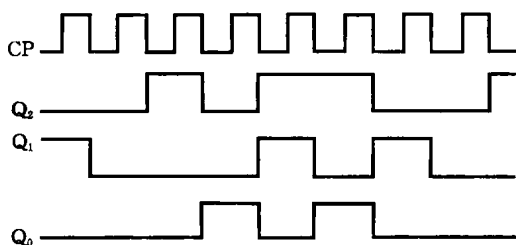


图 13.59

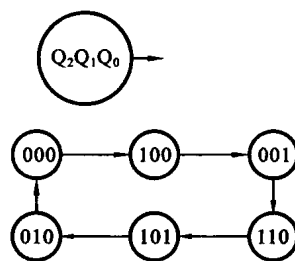


图 13.60

19. 电路如图 13.61 所示。假设初始状态  $Q_2 Q_1 Q_0 = 000$ 。试分析  $FF_2$ 、 $FF_1$  构成几进制计数器,整个电路为几进制计数器。画出 CP 作用下的输出波形。

解 电路为异步时序电路,有三个 JK 触发器,下降沿触发,各 JK 触发器驱动方程为

$$J_0 = K_0 = 1$$

$$J_1 = \bar{Q}_2^n, \quad K_1 = 1$$

$$J_2 = Q_1, \quad K_2 = 1$$

各 JK 触发器的状态方程为

$$Q_0^{n+1} = \bar{Q}_0^n$$

$$Q_1^{n+1} = \bar{Q}_2^n \bar{Q}_1^n$$

$$Q_2^{n+1} = \bar{Q}_2^n Q_1^n$$

各 JK 触发器的时钟方程为

$$CP_0 = CP$$

$$CP_1 = CP_2 = Q_0^n$$

CP 作用下的输出波形如图 13.62 所示。

从输出波形图可看出, 触发器  $FF_2$ 、 $FF_1$  构成同步三进制加法计数器, 整个电路为六进制加法计数器。

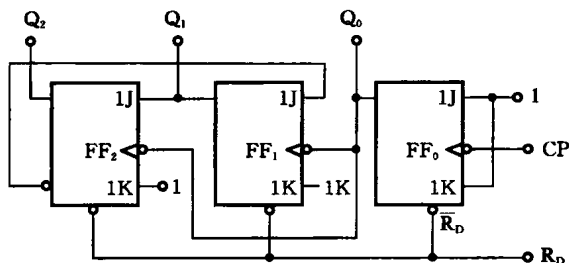


图 13.61

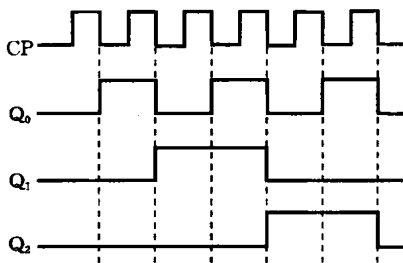


图 13.62

20. 分析图 13.63 所示计数器的逻辑功能, 确定该计数器是几进制的。

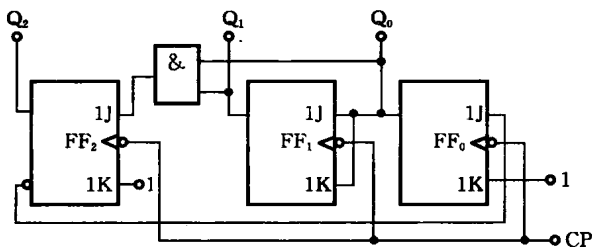


图 13.63

解 电路为同步时序逻辑电路, 有三个 JK 触发器, 下降沿触发, 各 JK 触发器驱动方程为

$$J_0 = \bar{Q}_2^n, \quad K_0 = 1$$

$$J_1 = K_1 = Q_0^n$$

$$J_2 = Q_0^n Q_1^n, \quad K_2 = 1$$

各 JK 触发器的状态方程为

$$Q_0^{n+1} = \bar{Q}_2^n \bar{Q}_0^n$$

$$Q_1^{n+1} = \bar{Q}_1^n Q_0^n + Q_1^n \bar{Q}_0^n$$

$$Q_2^{n+1} = \bar{Q}_2^n Q_1^n Q_0^n$$

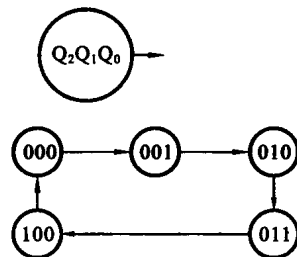


图 13.64

根据 JK 触发器的状态方程, 可列出电路的状态图, 如图 13.64 所示。

从电路的状态图可看出, 该电路为五进制加法计数器。

21. 同步时序逻辑电路如图 13.65 所示, 触发器为维持阻塞 D 触发器。其初态均为 0 态。试求: ① 在连续 7 个时钟脉冲 CP 作用下输出端  $Q_0$ 、 $Q_1$  和 Y 的波形; ② 输出端 Y 与时钟 CP 的关系。

解 (1) 电路为同步时序逻辑电路, 有两个 D 触发器, 上升沿触发。

$$Q_0^{n+1} = D_0 = \bar{Q}_1^n$$

$$Q_1^{n+1} = Q_0^n, \quad \bar{R}_D = Q_0^n (Q_0^n = 0, Q_1^n = 0)$$

$$Y = \overline{CP + Q_0^n}$$

CP 作用下的输出波形如图 13.66 所示。

(2) 输出 Y 为时钟 CP 的三分频。

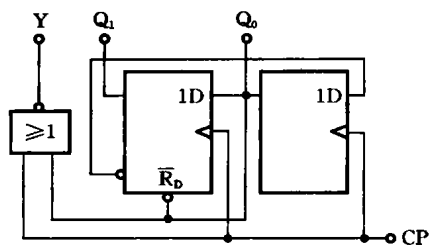


图 13.65

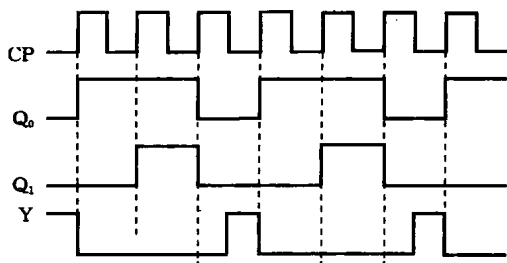


图 13.66

22. 用二-五-十进制计数器 74LS290 构成如图 13.67 所示计数电路, 试分析它们各为几进制计数器。

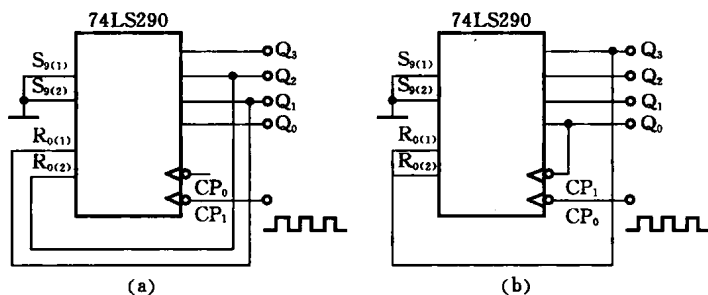


图 13.67

解 图 13.67(a)所示计数电路为三进制计数器。图 13.67(b)所示计数电路为八进制计数器。

23. 试分别分析图 13.68 所示电路, 说明它们各是多少进制的计数器。

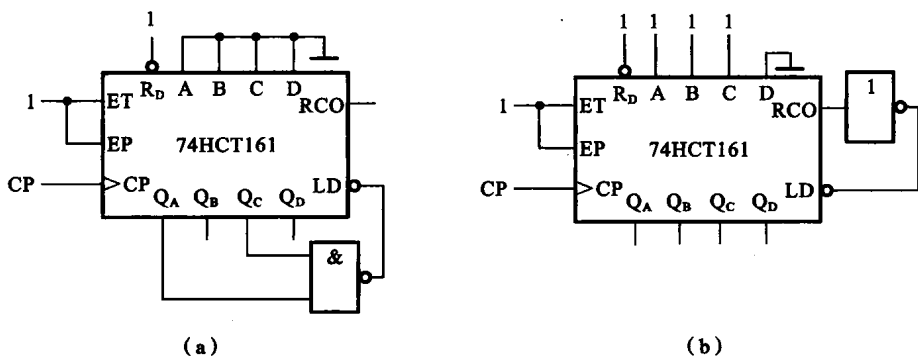


图 13.68

解 图 13.68(a)所示计数电路为六进制计数器。图 13.68(b)所示计数电路为九进制计数器。

24. 试用 74161 构成同步二十四进制计数器。

解 用两片 74161 加一个与非门可以构成同步二十四进制计数器。电路如图 13.69 所示。

25. 分析图 13.70 所示电路, 简述电路的组成及工作原理。若要求发光二极管 LED 在开关 SB 按下后, 持续亮 10 s, 试确定图中 R 的阻值。

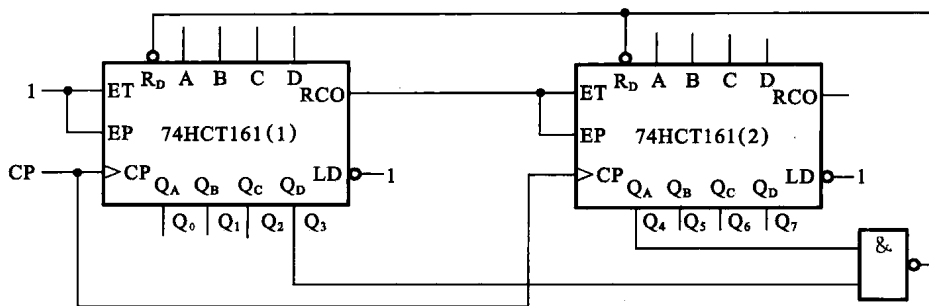


图 13.69

解 图 13.70 所示电路构成单稳态触发器,开关 SB 未按下时,单稳态触发器处于稳定状态,3 端输出低电平,发光二极管 LED 不亮,开关 SB 按下后,单稳态触发器处于暂稳状态,3 端输出高电平,发光二极管 LED 亮,若持续亮 10 s,则

$$t_p = RC \ln 3 \approx 1.1RC$$

$$R = \frac{t_p}{1.1C} = \frac{10}{1.1 \times 0.01 \times 10^{-6}} \Omega \approx 910 \text{ M}\Omega$$

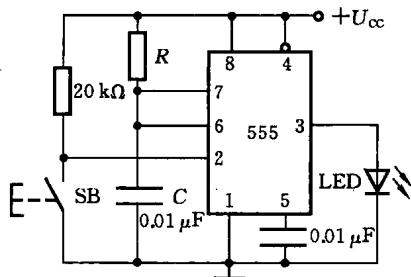


图 13.70

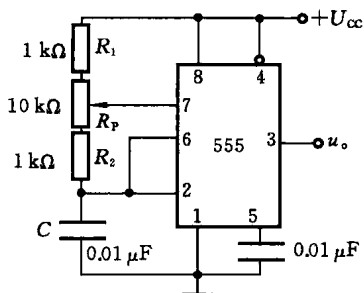


图 13.71

26. 用 555 定时器构成的多谐振荡器电路如图 13.71 所示,当电位器滑动臂移至上、下两端时,分别计算振荡频率和相应的占空比。

解 当电位器滑动臂移至上端时,振荡频率为

$$f_1 = \frac{1.43}{(R_1 + 2R_P + 2R_2)C} = 6.22 \text{ kHz}$$

占空比为

$$D_1 = \frac{R_1 + R_P + R_2}{R_1 + 2R_P + 2R_2} = 52.2\%$$

当电位器滑动臂移至下端时,振荡频率为

$$f_2 = \frac{1.43}{(R + R_P + 2R_2)C} = 11 \text{ kHz}$$

占空比为

$$D_2 = \frac{R_1 + R_P + R_2}{R_1 + R_P + 2R_2} = 92.3\%$$

27. 图 13.72 所示的是由 555 定时器组成的多谐振荡器电路。

(1) 计算振荡周期  $T$ 、脉冲宽度  $t_{PH}$ 、 $t_{PL}$  和占空比  $D$ ;

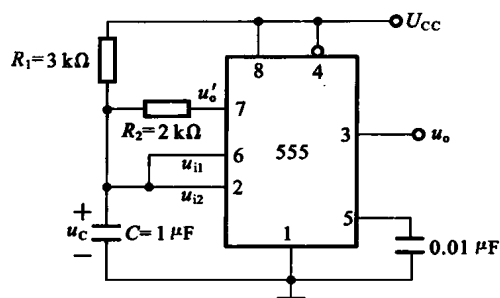


图 13.72

(2) 画出电容两端电压  $u_C$  和输出电压  $u_o$  的波形。

解 (1) 计算振荡周期  $T$ 、脉冲宽度  $t_{PH}$  和  $t_{PL}$ 、占空比。

$$t_{PH} = (R_1 + R_2)C \ln 2 = 3.5 \text{ ms}, \quad t_{PL} = R_2 C \ln 2 = 1.4 \text{ ms}$$

振荡周期

$$T = 4.9 \text{ ms}$$

占空比

$$D = \frac{t_{PH}}{T} = 71.4\%$$

(2) 电容两端电压  $u_C$  和输出电压  $u_o$  的波形如图 13.73 所示。

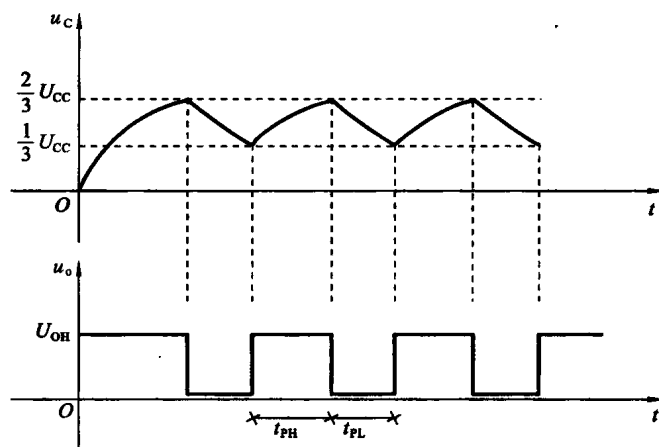


图 13.73

## 参 考 文 献

- [1] 邱关源. 电路[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 康华光. 电子技术基础(模拟部分)[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2005.
- [3] 康华光. 电子技术基础(数字部分)[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2005.
- [4] 秦曾煌. 电工学[M]. 6 版. 北京:高等教育出版社,2004.
- [5] 王槐斌,吴建国,周国平. 电路与电子简明教程[M]. 2 版. 武汉:华中科技大学出版社,2010.
- [6] 符磊,王久华. 电工技术与电子技术基础[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2011.
- [7] 焦阳. 电工与电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [8] 王槐斌,吴建国,周国平. 电路与电子学习指导[M]. 2 版. 武汉:华中科技大学出版社,2010.
- [9] 秦曾煌. 电工学学习辅导与习题选解[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [10] 高有华,袁宏. 电工技术试题题型精选汇编[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2011.



[zh.qitubk.com](http://zh.qitubk.com) 奇兔电子书下载 - 永久免费

需要什么电子书，联系站长

邮箱地址：[mike2025@foxmail.com](mailto:mike2025@foxmail.com)