

项

目 3

直流电路的测量

总体学习目标

- 能掌握全电路欧姆定律
- 能正确区分电路的三种工作状态
- 能掌握电阻的串联、并联和混联
- 能掌握基尔霍夫定律
- 能利用叠加定理、支路电流法等方法分析计算复杂直流电路
- 能正确使用锡焊工具
- 能正确使用仪器仪表调试电路
- 能自检、互检,判断产品是否合格
- 能按照生产现场管理标准,进行安全文明生产

任务 1 串、并联电路测量

学习目标

- 能按照任务要求完成相关元器件的检测
- 能按照锡焊工艺完成电阻串、并联的安装
- 能理解、测量、计算电阻串、并联电路中电压、电流关系

子任务 1 元器件清单的制定

要求:我们以灯泡为例(便于现象观察),根据电阻串、并联电路原理图(图 3.1),在印制电路板焊接和产品安装前,应正确无误地填写完成元件清单表 3.1。

表 3.1 电阻串、并联元器件清单

序号	元件名称	规格或型号	编号或作用	数量	配分	评分标准	得分
1	灯座				5	填错规格扣 2 分,填错编号扣 2 分,填错数量扣 1 分	
2	灯泡				5	填错规格扣 2 分,填错编号扣 2 分,填错数量扣 1 分	

续表

序号	元件名称	规格或型号	编号或作用	数量	配分	评分标准	得分
3	开关				5	填错规格扣 2 分,填错编号扣 2 分,填错数量扣 1 分	
4	印制电路板				5	填错规格扣 2 分,填错编号扣 2 分,填错数量扣 1 分	
5	电池片				5	规格记录错误,该项不得分	
6	塑壳				5	规格记录错误,该项不得分	
子任务 1 得分							

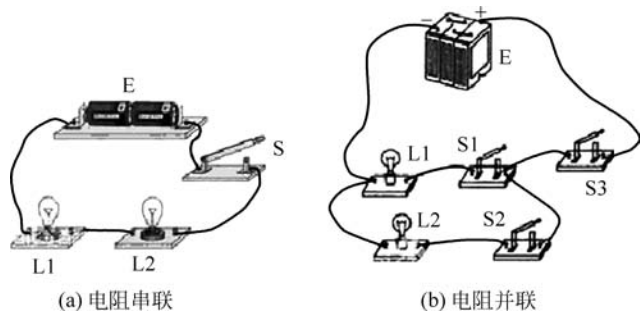


图 3.1 电阻串、并联

子任务 2 元器件的检测

要求: 根据元件清单表,按照电子元器件检验标准,正确检测元器件,把检测结果填入表 3.2 中。

表 3.2 元器件检测明细表

元 器 件		识别及检测内容			配 分	评分标准	得 分
灯泡		额定功率值	额定电压值	电阻值	每支 3 分 共计 6 分	错 1 项,扣 1 分	
	灯泡 1						
	灯泡 2						
拨 动 开 关		左挡位	右挡位	质量判断	共计 4 分	测试错误该项不得分	
子任务 2 得分							

子任务 3 电阻串、并联的装配

要求: 根据给出的装配图,将检测好的元器件准确地焊接在提供的印制电路板上。在印制电路板上所焊接的元器件的焊点大小适中、光滑、圆润、干净、无毛刺,无漏、假、虚、连

焊,引脚加工尺寸及成形符合工艺要求;导线长度、剥线头长度符合工艺要求,芯线完好,捻线头镀锡。装配完成后,对照表 3.3 进行简易助听器成品的外观检查。

表 3.3 外观检测表

内容	考核要求	配分	评分标准	得分
元器件	元器件应无裂纹、变形、脱漆、损坏。元器件上标识能清晰辨认。	3 分	一个元器件不符合扣 0.5 分	
电路板	应无堆锡过多,渗到反面,产生短路现象。 线路板不能出现焊盘脱落。 同一类元件,在印制电路板上高度应一致。	2 分	一处不合格扣 0.5 分	
焊接	不能出现剪坏的焊点。 不能出现错焊、虚焊、脱焊、漏焊、焊锡搭接、焊接点拉尖。 元器件应按照装配图正确安装在焊盘上。 接线牢固、规范。	5 分	一处不合格扣 0.5 分	

子任务 3 得分

子任务 4 电阻串、并联电压值、电流值测量

电阻串联电路的测量,该项计 25 分,测量正确 1 个指标计 3 分,结论写对一处计 2 分。计算灯泡电阻值,调万用表 DCV2.5V 挡位,测量灯泡两端电压,调万用表 DCA200mA 挡位,测流经灯泡电流。将数据记录在表 3.4 中。

表 3.4 电阻串联电路测量

	阻值	电压	电流
灯泡 1			
灯泡 2			
电源	——		——

结论 1: 串联电路电压关系

结论 2: 串联电路电流关系

电阻并联电路的测量,该项计 25 分,测量正确 1 个指标计 3 分,结论写对一处计 2 分。计算灯泡电阻值,调万用表 DCV2.5V 挡位,测量灯泡两端电压,调万用表 DCA200mA 挡位,测流经灯泡电流。将数据记录在表 3.5 中。

表 3.5 电阻并联电路测量

	阻值	电压	电流
灯泡 1			
灯泡 2			
电源	——		——

结论 1: 并联电路电压关系

结论 2: 并联电路电流关系

任务 2 基尔霍夫电路制作与测量

学习目标

- 能验证基尔霍夫电流定律
- 能验证基尔霍夫电压定律
- 熟练使用各仪器和仪表

子任务 1 元器件清单的制定

要求: 根据基尔霍夫定律原理图(图 3.2), 在印制电路板焊接和产品安装前, 应正确无误地填写完成元件清单表 3.6。

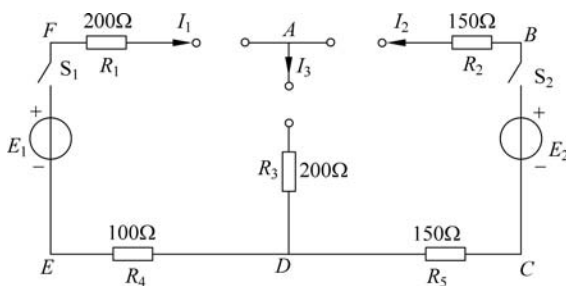


图 3.2 验证基尔霍夫定律电路图 I1

表 3.6 基尔霍夫定律元器件清单

序号	元件名称	规格或型号	编号或作用	数量	配分	评分标准	得分
1	电阻器 1				5	填错规格扣 2 分, 填错编号扣 2 分, 填错数量扣 1 分	
2	电阻器 2				5	填错规格扣 2 分, 填错编号扣 2 分, 填错数量扣 1 分	
3	电阻器 3				5	填错规格扣 2 分, 填错编号扣 2 分, 填错数量扣 1 分	
4	印制电路板				3	规格记录错误, 该项不得分	
5	电源 1				3	规格记录错误, 该项不得分	
6	电源 2				3	规格记录错误, 该项不得分	
7	开关				2	规格记录错误, 该项不得分	

子任务 1 得分

子任务 2 元器件的检测

要求：根据元件清单表,按照电子元器件检验标准,正确检测元器件,把检测结果填入表 3.7 中。

表 3.7 元器件检测明细表

元 器 件		识别及检测内容			配 分	评分标准	得分
电 阻 器		额定功率值	额定电压值	电阻值	每支 3 分 共计 6 分	错 1 项,扣一分	
	电阻器 1						
	电阻器 2						
	电阻器 3						
电 源		额定功率值	额定电压值		共计 4 分	错 1 项,扣一分	
	电源 1						
	电源 2						
拨动开关		左挡位	右挡位	质量判断	共计 4 分	测试错误该项不得分	
子任务 2 得分							

子任务 3 基尔霍夫电路装配

要求：根据给出的装配图,将检测好的元器件准确地焊接在提供的印制电路板上。在印制电路板上所焊接的元器件的焊点大小适中、光滑、圆润、干净、无毛刺,无漏、假、虚、连焊,引脚加工尺寸及成形符合工艺要求；导线长度、剥线头长度符合工艺要求,芯线完好,捻线头镀锡。装配完成后,对照表 3.8 进行简易助听器成品的外观检查。

表 3.8 外观检测表

内 容	考 核 要 求	配 分	评 分 标 准	得 分
元 器 件	元器件应无裂纹、变形、脱漆、损坏。 元器件上标识能清晰辨认。	3 分	一个元器件不符合扣 0.5 分	
电 路 板	应无堆锡过多,渗到反面,产生短路现象。 线路板不能出现焊盘脱落。 同一类元件,在印制电路板上高度应一致。	2 分	一处不合格扣 0.5 分	
焊 接	不能出现剪坏的焊点。 不能出现错焊、虚焊、脱焊、漏焊、焊锡搭接、焊接点拉尖。 元器件应按照装配图正确安装在焊盘上。 接线牢固、规范。	5 分	一处不合格扣 0.5 分	
子任务 3 得分				

子任务 4 基尔霍夫定律测量

先任意设定三条支路的电流参考方向,如图 3.2 中的 I_1 、 I_2 、 I_3 所示,并熟悉线路结构,

掌握各开关的操作使用方法。

基尔霍夫电流定律的测量,该项计 25 分,测量正确 1 个指标计 1 分,结论写对一处 7 分。分别将两路直流稳压电源接入电路,令 $E_1 = 6\text{V}$, $E_2 = 12\text{V}$ 其数值要用电压表监测,记录于表 3.9 中。熟悉电流插头和插孔的结构,先将电流插头的红黑两接线笔接至电流表的“+”“-”极;再将电流插头分别插入三条支路的三个电流插孔中,读出相应的电流值,记入表 3.9 中。

表 3.9 基尔霍夫电流定律的验证

内容	电源电压/V		支路电流/mA			
	E_1	E_2	I_1	I_2	I_3	I
计算值						
测量值						
相对误差						

结论:

基尔霍夫电压定律的测量,该项计 25 分,测量正确 1 个指标计 1 分,结论写对一处 7 分。用直流数字电压表分别测量两路电源及电阻元件上的电压值,数据记入表 3.10 中。

表 3.10 基尔霍夫电压定律的验证

内容	回路电压/V					
	U_{FA}	U_{AB}	U_{CD}	U_{DE}	U_{AD}	U
计算值						
测量值						
相对误差						

结论:

任务 3 叠加定理实验板制作与测量

学习目标

- 能验证线性电路叠加定理的正确性
- 能加深对线性电路的叠加性和齐次性的认识与理解
- 熟练使用各仪器和仪表

子任务 1 元器件清单的制定

要求: 根据叠加定理原理图(图 3.3),在印制电路板焊接和产品安装前,应正确无误地

子任务 3 叠加定理电路装配

要求：根据给出的装配图，将检测好的元器件准确地焊接在提供的印制电路板上。在印制电路板上所焊接的元器件的焊点大小适中、光滑、圆润、干净、无毛刺，无漏、假、虚、连焊，引脚加工尺寸及成形符合工艺要求；导线长度、剥线头长度符合工艺要求，芯线完好，捻线头镀锡。装配完成后，对照表 3.13 进行简易助听器成品的外观检查。

表 3.13 外观检测表

内容	考核要求	配分	评分标准	得分
元器件	元器件应无裂纹、变形、脱漆、损坏。 元器件上标识能清晰辨认。	3 分	一个元器件不符合扣 0.5 分	
电路板	应无堆锡过多，渗到反面，产生短路现象。 线路板不能出现焊盘脱落。 同一类元件，在印制电路板上高度应一致。	2 分	一处不合格扣 0.5 分	
焊接	不能出现剪坏的焊点。 不能出现错焊、虚焊、脱焊、漏焊、焊锡搭接、焊接点拉尖。 元器件应按照装配图正确安装在焊盘上。 接线牢固、规范。	5 分	一处不合格扣 0.5 分	
子任务 3 得分				

子任务 4 叠加定理测量

该项计 50 分，测量正确 1 个指标计 1.5 分，结论写对一处 5 分。

(1) 令电源 E_1 单独作用(开关 S_1 投向 E_1 侧，开关 S_2 投向导线 2 侧)，用直流数字电压表和毫安表(接电流插头)测量各支路电流及各电阻元件两端的电压，数据记入表 3.14 中。

(2) 令电源 E_2 单独作用(开关 S_1 投向导线 1 侧，开关 S_2 投向 E_2 侧)，重复步骤(2)的测量并记录。

(3) 令电源 E_1 和 E_2 共同作用(开关 S_1 和 S_2 分别投向 E_1 和 E_2 侧)，重复上述的测量和记录。

表 3.14 线性电路叠加定理的验证

内容	测量项目									
	E_1	E_2	I_1	I_2	I_3	U_{FA}	U_{AB}	U_{CD}	U_{DE}	U_{AD}
E_1 作用										
E_2 作用										
同时作用										

(4) 根据实验数据验证线性电路的叠加性。

知识链接

1. 电路的三种状态

通路(闭路): 电源与负载接通, 电路中有电流通过, 电气设备或元器件获得一定的电压和电功率, 进行能量转换。

开路(断路): 电路中没有电流通过, 又称为空载状态。

短路(捷路): 电源两端的导线直接相连接, 输出电流过大对电源来说属于严重过载, 如没有保护措施, 电源或电器会被烧毁或发生火灾, 所以通常要在电路或电气设备中安装熔断器、保险丝等保险装置, 以避免发生短路时出现不良后果。

2. 电阻的串联、并联与混联

1) 电阻的串联

(1) 定义。如图 3.4 所示, 在电路中, 把几个电阻元件依次一个首尾连接起来, 中间没有分支, 在电源的作用下流过各电阻的是同一电流, 这种连接方式叫作电阻的串联。

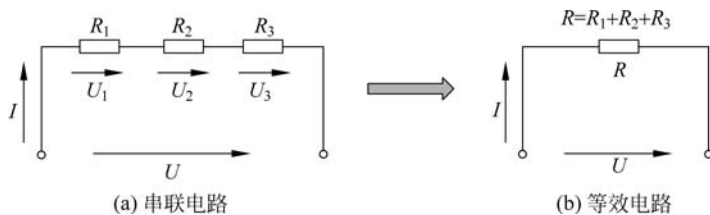


图 3.4 电阻的串联电路

(2) 电阻串联的特点。

等效电阻:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$$

分压关系:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \cdots = \frac{U_n}{R_n}$$

功率分配:

$$\frac{P_1}{R_1} = \frac{P_2}{R_2} = \frac{P_3}{R_3} = \cdots = \frac{P_n}{R_n} = I^2$$

特例: 两只电阻 R_1 、 R_2 串联时, 等效电阻 $R = R_1 + R_2$, 则有分压公式

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$$

【例 3-1】 有一盏额定电压为 $U_1 = 40\text{V}$ 、额定电流为 $I = 5\text{A}$ 的电灯, 应该怎样把它接入电压 $U = 220\text{V}$ 照明电路中。

解: 将电灯(设电阻为 R_1)与一只分压电阻 R_2 串联后, 接入 $U = 220\text{V}$ 电源上, 如图 3.5 所示。

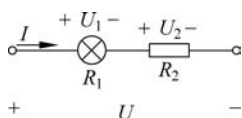


图 3.5 例 3-1 图

解法一：分压电阻 R_2 上的电压为 $U_2 = U - U_1 = 220 - 40 = 180\text{V}$ ，且 $U_2 = R_2 I$ ，则

$$R_2 = \frac{U_2}{I} = \frac{180}{5} = 36\Omega$$

解法二：利用两只电阻串联的分压公式

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$$

$$R_1 = \frac{U_1}{I} = 8\Omega$$

可得

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U = 36\Omega$$

即将电灯与一只 36Ω 分压电阻串联后，接入 $U = 220\text{V}$ 电源上即可。

2) 电阻的并联

(1) 定义。如图 3.6 所示，一个电路中，若干个电阻的首端、尾端分别相联在一起，这种连接方式称为电阻的并联。

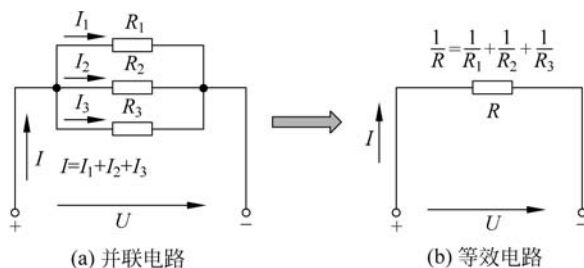


图 3.6 电阻的并联电路

(2) 电阻并联电路的特点。

等效电导：

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_n$$

即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

分流关系：

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = \cdots = I_n R_n = U$$

功率分配：

$$P_1 R_1 = P_2 R_2 = P_3 R_3 = \cdots = P_n R_n = U^2$$

特例：两只电阻 R_1 、 R_2 并联时，等效电阻

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

则有分流公式

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

【例 3-2】 如图 3.7 所示,电源供电电压 $U=220\text{V}$,每根输电导线的电阻均为 $R_1=1\Omega$,电路中一共并联 100 盏额定电压 220V 、功率 40W 的电灯。假设电灯在工作(发光)时电阻值为常数。试求:①当只有 10 盏电灯工作时,每盏电灯的电压 U_L 和功率 P_L ;②当 100 盏电灯全部工作时,每盏电灯的电压 U_L 和功率 P_L 。

解: 每盏电灯的电阻为

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{40} \Omega = 1210 \Omega$$

n 盏电灯并联后的等效电阻为 $R_n = R/n$ 。根据分压公式,可得每盏电灯的电压。

$$U_L = \frac{R_n}{2R_1 + R_n} U$$

$$P_L = \frac{U_L^2}{R}$$

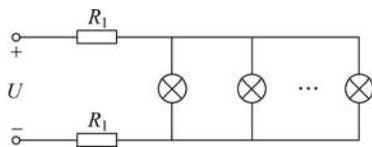


图 3.7 例 3-2 图

当只有 10 盏电灯工作时,即 $n=10$,

则 $R_n = R/n = 121\Omega$,因此

$$U_L = \frac{R_n}{2R_1 + R_n} U \approx 216\text{V}$$

$$P_L = \frac{U_L^2}{R} \approx 39\text{W}$$

(2) 当 100 盏电灯全部工作时,即 $n=100$,则 $R_n = R/n = 12.1\Omega$

$$U_L = \frac{R_n}{2R_1 + R_n} U \approx 189\text{V}$$

$$P_L = \frac{U_L^2}{R} \approx 29\text{W}$$

3) 电阻的混联

(1) 定义。电路中既有电阻的串联关系又有电阻的并联关系,则称为电阻的混联。

(2) 分析方法。先把电阻的混联电路分解为若干个串联和并联关系的电路,再根据电阻串、并联的关系逐一化简,计算出等效电阻,算出总电压(或总电流),最后用分压、分流的办法计算出原电路中各电阻的电压(或电流),再计算出功率。

首先整理清楚电路中电阻串、并联关系,必要时重新画出串、并联关系明确的电路图;

利用串、并联等效电阻公式计算出电路中总的等效电阻;

利用已知条件进行计算,确定电路的总电压与总电流;

根据电阻分压关系和分流关系,逐步推算出各支路的电流或电压。

【例 3-3】 如图 3.8 所示,已知 $R_1 = R_2 = 8\Omega$, $R_3 = R_4 = 6\Omega$, $R_5 = R_6 = 4\Omega$, $R_7 = R_8 = 24\Omega$, $R_9 = 16\Omega$; 电压 $U=224\text{V}$ 。试求:

① 电路总的等效电阻 R_{AB} 与总电流 I_Σ ;

② 电阻 R_9 两端的电压 U_9 与通过它的电流 I_9 。

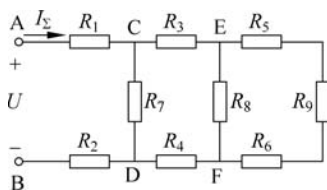


图 3.8 例 2-9

解：① R_5 、 R_6 、 R_9 三者串联后，再与 R_8 并联，E、F 两端等效电阻为 $R_{EF} = (R_5 + R_6 + R_9) // R_8 = 24\Omega // 24\Omega = 12\Omega$

R_{EF} 、 R_3 、 R_4 三者电阻串联后，再与 R_7 并联，C、D 两端等效电阻为 $R_{CD} = (R_3 + R_{EF} + R_4) // R_7 = 24\Omega // 24\Omega = 12\Omega$

总的等效电阻： $R_{AB} = R_1 + R_{CD} + R_2 = 28\Omega$

总电流： $I_\Sigma = U/R_{AB} = 224/28 = 8A$

② 利用分压关系求各部分电压：

$$U_{CD} = R_{CD} I_\Sigma = 96V$$

$$U_{EF} = \frac{R_{EF}}{R_3 + R_{EF} + R_4} U_{CD} = \frac{12}{24} \times 96 = 48V$$

$$I_9 = \frac{U_{EF}}{R_5 + R_6 + R_9} = 2A$$

$$U_9 = R_9 I_9 = 32V$$

4) 电阻星形联接与三角形联接的等效变换

既有电阻串联又有电阻并联的电路称为电阻混联电路。电阻混联中有两种特殊的连接方式，电阻 Y 形联接和 Δ 形联接。所谓电阻的星形联接就是将三个电阻的一端连在一起，另一端分别与外电路的三个结点相连，就构成星形联接，又称为 Y 形联接，如图 3.9(a) 所示；所谓电阻的三角形联接：将三个电阻首尾相连，形成一个三角形，三角形的三个顶点分别与外电路的三个结点相连，就构成三角形联接，又称为 Δ 形联接，如图 3.9(b) 所示。

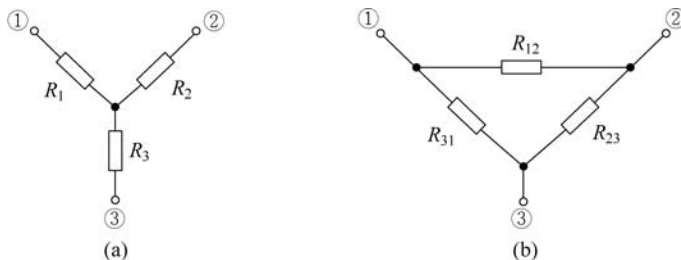


图 3.9 电阻的 Y 形和 Δ 形联接

电阻 Y 形联接转化 Δ 形联接时，对应的转化关系如：

$$\begin{cases} R_1 = \frac{R_{31} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 = \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 = \frac{R_{23} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{cases} \quad (3-1)$$

电阻三角形联接等效变换为电阻星形联接的公式为

$$R_i = \frac{\text{接于 } i \text{ 端两电阻之乘积}}{\triangle \text{ 形三电阻之和}}$$

当 $R_{12}=R_{23}=R_{31}=R_{\triangle}$ 时,有

$$R_1=R_2=R_3=R_Y=\frac{1}{3}R_{\triangle}$$

由式(3-1)可解得:

$$\begin{cases} R_{12} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3} \\ R_{23} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1} \\ R_{31} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2} \end{cases} \quad (3-2)$$

电阻星形联接等效变换为电阻三角形联接的公式为

$$R_{mn} = \frac{\text{Y 形电阻两两乘积之和}}{\text{不与 } mn \text{ 端相连的电阻}}$$

当 $R_1=R_2=R_3=R_Y$ 时,有

$$R_{12}=R_{23}=R_{31}=R_{\triangle}=3R_Y$$

在复杂的电阻网络中,利用电阻星形联接与电阻三角形联接网络的等效变换,可以简化电路分析。

【例 3-4】 求图 3.10 电路中电流 I 。

解: 将 3Ω 、 5Ω 和 2Ω 三个电阻构成的三角形网络等效变换为星形网络(如图 3.11 所示)。其电阻值由式(3-1)求得

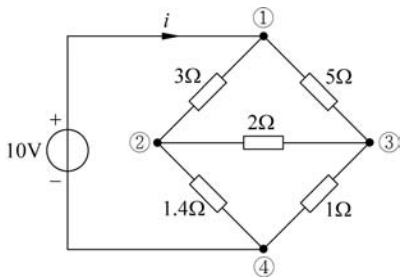


图 3.10 例 3-4 电路图

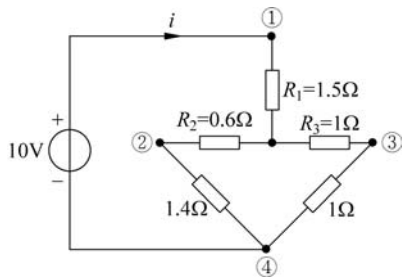


图 3.11 等效电路图

$$R_1 = \frac{3 \times 5}{3 + 2 + 5} \Omega = 1.5 \Omega$$

$$R_2 = \frac{3 \times 2}{3 + 2 + 5} \Omega = 0.6 \Omega$$

$$R_3 = \frac{2 \times 5}{3 + 2 + 5} \Omega = 1 \Omega$$

再用电阻串联和并联公式,求出联接到电压源两端单口的等效电阻

$$R = 1.5 \Omega + \frac{(0.6 + 1.4)(1 + 1)}{0.6 + 1.4 + 1 + 1} \Omega = 2.5 \Omega$$

最后求得

$$I = \frac{10\text{V}}{R} = \frac{10\text{V}}{2.5\Omega} = 4\text{A}$$

3. 基尔霍夫定律

1) 几个电路术语

(1) 支路：电路中流过同一电流的一个分支称为一条支路。

(2) 节点：三条或三条以上支路的联接点称为节点。

(3) 回路：由若干支路组成的闭合路径,其中每个节点只经过一次,这条闭合路径称为回路。

(4) 网孔：网孔是回路的一种。将电路画在平面上,在回路内部不另含有支路的回路称为网孔。

(5) 支路电流和支路电压：电路中的各条支路中的电流和支路的端电压。

如图 3.12 所示,试分析图中所示电路共有支路、节点、回路、网孔各多少?

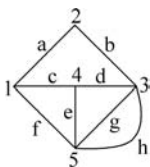


图 3.12 电路分析

2) 基尔霍夫电流定律

(1) 定义：基尔霍夫电流定律又叫节点电流定律,简称 KCL。电路中任意一个节点上,在任一时刻,流入节点的电流之和,等于流出节点的电流之和。或：在任一电路的任一节点上,电流的代数和永远等于零。基尔霍夫电流定律依据的是电流的连续性原理。

(2) 公式表达

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}}$$

或

$$\sum i = 0$$

如图 3.13 所示,根据基尔霍夫电路定律公式可知:

$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4$$

或

$$i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$$

(3) 广义节点：基尔霍夫电流定律可以推广应用于任意假定的封闭面。对内部电路所包围的闭合面可视为一个节点,该节点称为广义节点。即流进封闭面的电流等于流出封闭面的电流。

如图 3.14 所示电路,电流 i_1 、 i_2 、 i_3 三者关系应为:

$$i_1 + i_2 = i_3$$

3) 基尔霍夫电压定律

(1) 定义：基尔霍夫电压定律又叫回路电压定律,简称

KVL。在任一瞬间沿任一回路绕行一周,回路中各个元件上电压的代数和等于零。或各段电阻上电压降的代数和等于各电源电动势的代数和。

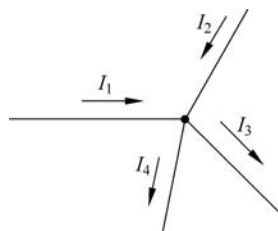


图 3.13 基尔霍夫电流定律

(2) 公式表达

$$\sum u = 0$$

(3) 列上式方程时电压正负确定。

先设定一个回路的绕行方向和电流的参考方向。沿回路的绕行方向顺次求电阻的电压降,当绕行方向与电阻上的电流参考方向一致时,该电压方向取正号,相反取负号。当回路的绕行方向从电源的正极指向负极时,电源电压取正,否则取负。

【例 3-5】 在图 3.15 所示回路中, $I_1 = 3\text{mA}$, $I_2 = 5\text{mA}$, $I_3 = 2\text{mA}$, $R_1 = 5\text{k}\Omega$, $R_2 = 7\text{k}\Omega$, $R_3 = 10\text{k}\Omega$, $E_1 = 10\text{V}$, 试确定电路中 E_2 的值。



图 3.14 广义节点

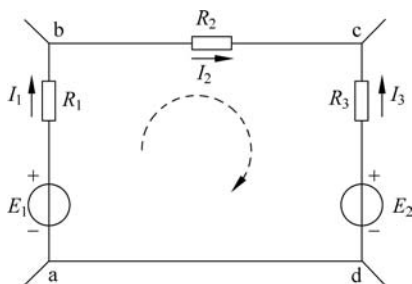


图 3.15 例 3-5 图

解：根据 KVL 和回路绕行方向,可列回路电压平衡方程式为:

$$i_1 R_1 + i_2 R_2 - i_3 R_3 + E_2 - E_1 = 0$$

代入数值,得

$$E_2 = -20\text{V}$$

4. 支路电流法

1) 支路电流法

对于一个复杂的直流电路,在已知电路中各电源及电阻参数前提下,设支路电流为未知量,直接应用 KCL 和 KVL,分别对节点和回路列出所需的方程式,然后联立求解出各未知电流。

2) 电路方程的独立性

(1) 为了完成一定的电路功能,在一个实际电路中,将元件组合连接成一定的结构形式,即支路、节点、回路和网孔。

(2) 设电路的节点数为 n ,则独立的 KCL 方程为 $n-1$ 个,且为任意的 $n-1$ 个。

(3) 给定一个平面电路(可以画在一个平面上而不使任意两条支路交叉的电路称为平面电路),该电路有 n 个节点, b 条支路,则该电路有 $b-(n-1)$ 个网孔,这些网孔 KVL 方程是独立的。

(4) 由 KCL 及 KVL 可以得到的独立方程总数是 b 个(能提供独立的 KCL 方程的节点称为独立节点;能提供独立的 KVL 方程的回路称为独立回路)。

3) 支路电流法解题方法

如图 3.16 所示电路,试求各支路电流。

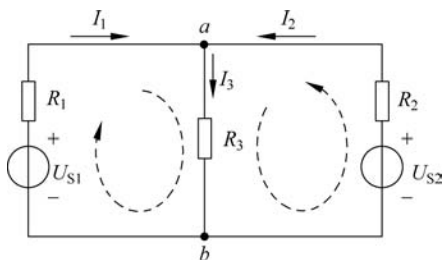


图 3.16 支路电流法电路

回路 I

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = U_{S1}$$

回路 II

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = U_{S2}$$

(4) 联立方程组,代入数据求解未知量

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

支路电流法的特点是列写的是 KCL 和 KVL 方程,所以方程列写方便、直观,但方程数较多,宜于在支路数不多的情况下使用。

【例 3-6】 在如图 3.17 所示电路中,试求各支路电流。

解: 设各支路电流的参考方向,选取独立回路绕行方向,如图 3.17 所示。

节点①

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

回路 1

$$4I_1 + 8I_3 = -5 - 3 = -8$$

回路 2

$$2I_2 - 8I_3 = 3$$

联立方程组,解得:

$$I_1 = -1\text{A}$$

$$I_2 = -0.5\text{A}$$

$$I_3 = -0.5\text{A}$$

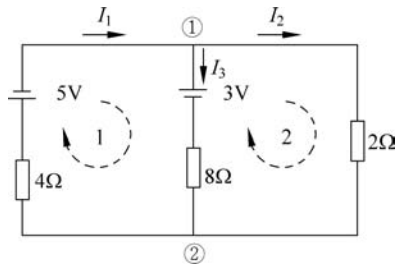


图 3.17 例 3-6 图

5. 等效变换

电路中的电源既提供电压,也提供电流。将电源看作是电压源或是电流源,主要是依据电源内阻的大小。为了分析电路的方便,在一定条件下电压源和电流源可以等效变换。

1) 电压源

(1) 电压源的组成及特性。具有较低内阻的电源输出的电压较为恒定,常用电压源来表征。电压源可分为直流电压源和交流电压源。

实际电压源可以用恒定电动势 E 和内阻 r 串联起来表示。其电路图如图 3.18 所示。

实际电压源以输出电压的形式向负载供电,输出电压(端电压)的大小为 $U = E - Ir$,在输出相同电流的条件下,电源内阻 r 越大,输出电压越小。若电源内阻 $r = 0$,则端电压 $U = E$,而与输出电流的大小无关。

我们把内阻为零的电压源称为理想电压源,或称恒压源。其电路图如图 3.19 所示。

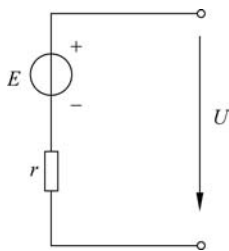


图 3.18 实际电压源

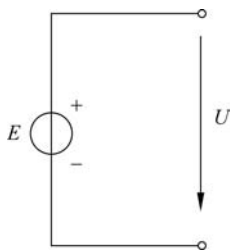


图 3.19 恒压源

一般用电设备所需的电源,多数是需要它输出较为稳定的电压,这要求电源的内阻越小越好,也就是要求实际电源的特性与理想电压源尽量接近。

(2) 等效电压源。电压源串联等效:当 n 个电压源串联时,可以合并为一个等效电压源,如图 3.20 所示,等效电压源的 U_S 等于各个电压源的(电动势)代数和,即:

$$U_S = U_{S1} + U_{S2} + U_{S3} + \cdots + U_{Sn}$$

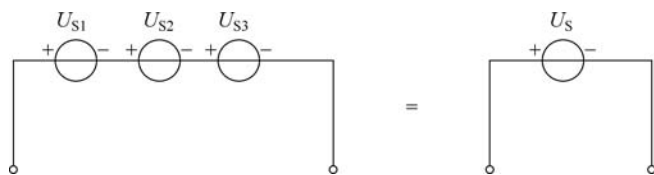


图 3.20 电压源串联等效电路

在上式中,凡方向与 U_S 相同的取正号,反之取负号。等效电压源的内阻等于各个串联电压源内阻之和,即:

$$r_S = r_{S1} + r_{S2} + r_{S3} + \cdots + r_{Sn}$$

电压源并联等效:根据 KVL 得,只有在电压相等且极性一致的电压源才能并联,此时并联电压源对外特性与单个电压源一样。不同值或不同极性电压源不允许并联,否则违反 KVL,电压源并联时,每个电压源中的电流都是不确定的。

2) 电流源

(1) 电流源的组成及特性。具有较高内阻的电源输出的电流较为恒定,常用电流源来表征。内阻无穷大的电源称为理想电流源,又称恒流源。实际使用的稳流电源、光电池等可视为电流源(图 3.21)。

实际电流源简称电流源。电流源以输出电流的形式向负载供电,电源输出电流 I_S 在内阻上分流为 I_O ,在负载 R_L 上的分流为 I_L 。

(2) 等效电流源。电流源并联等效:当 n 个电流源并联时,可以合并为一个等效电流源。等效电流源的电流 I_S 等于各个电流源的电流的代数和,即:

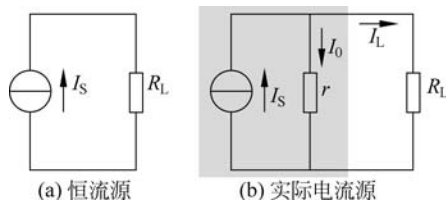


图 3.21 电流源

$$I_S = I_{S1} + I_{S2} + I_{S3} + \cdots + I_{Sn}$$

在上式中,凡方向与 I_S 相同的取正号,反之取负号。等效内阻的倒数等于各个并联电流源内阻的倒数之和,即:

$$1/r_s = 1/r_{S1} + 1/r_{S2} + 1/r_{S3} + \cdots + 1/r_{Sn}$$

电流源串联等效(图 3.22): 根据 KCL 得,只有在电流相等且极性一致的电流源才能串联,此时串联电流源对外特性与单个电流源一样。不同值或不同极性电流源不允许串联,否则违反 KCL,电流源串联时,每个电流源上的分得的电压都是不确定的。

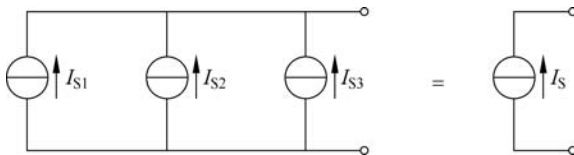


图 3.22 电流源并联等效电路

3) 电压源与电流源的等效变换

实际电源既可用电压源表示,也可用电流源表示。在满足一定条件时,电压源与电流源可以等效变换。

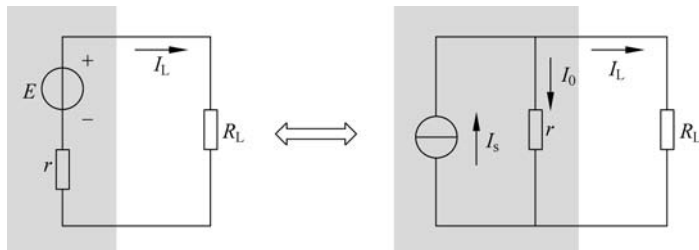


图 3.23 电压源与电流源的等效变换

实际电源可用一个理想电压源 E 和一个电阻 r_0 串联的电路模型表示,其输出电压 U 与输出电流之间关系为:

$$U = E - I r_0$$

实际电源也可用一个理想电流源 I_S 和一个电阻 r_s 并联的电路模型表示,其输出电压 U 与输出电流 I 之间关系为

$$U = I_s r_s - I r_s$$

对外电路来说,实际电压源和实际电流源是相互等效的,等效变换条件是 $r_0 = r_s$, $E = I_s r_s$ 。

【例 3-7】在如图 3.24 所示电路中,试用电源变换的方法求 R_3 支路的电流。

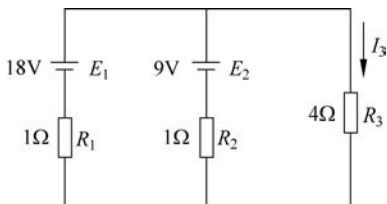


图 3.24 例 3-7 图

解: 将两个电压源分别等效变换成电流源,如图 3.25 所示。

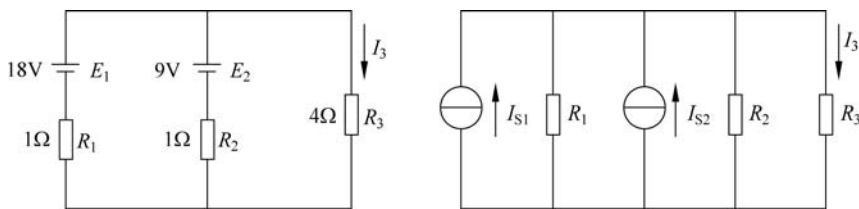


图 3.25 等效变换图

$$I_{S1} = \frac{E_1}{R_1} = \frac{18}{1} = 18 \text{ A}$$

$$I_{S2} = \frac{E_2}{R_2} = \frac{9}{1} = 9 \text{ A}$$

将两个电流源合并成一个电流源(图 3.26)。

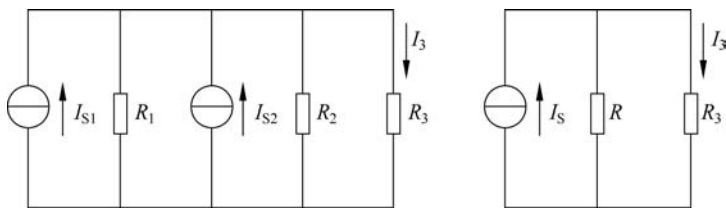


图 3.26 电流源合并

其等效电流和内阻分别为:

$$I_S = I_{S1} + I_{S2} = 27 \text{ A}$$

$$R = R_1 // R_2 = 0.5 \Omega$$

最后可求得 R_3 上的电流为:

$$I_3 = \frac{R}{R + R_3} I_S = 3 \text{ A}$$

4) 受控源

(1) 定义。输出电压或电流受电路其他部分电压或电流的控制,这种元件称为“受控源”。受控源又称为非独立源,也是有源器件。

(2) 分类。根据控制量是电压还是电流,受控的是电压源还是电流源,理想受控源有四种基本形式。它们是:电压控制电压源(VCVS),电压控制电流源(VCCS),电流控制电压

源(CCVS), 电流控制电流源(CCCS), 如图 3.27 所示。

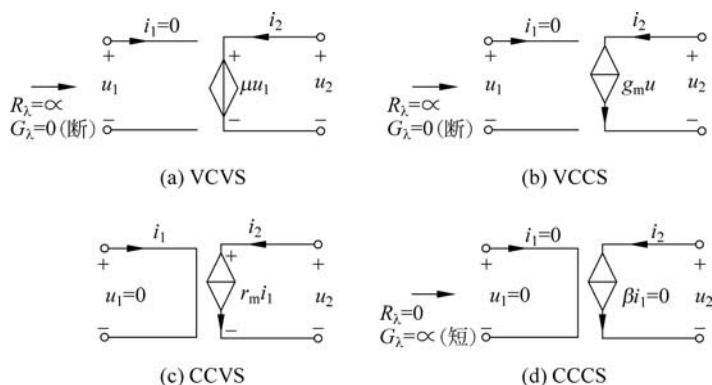


图 3.27 受控源

其中:

$\mu = U_2/U_1$, 称为转移电压比;

$g = I_2/U_1$, 称为转移电导;

$\gamma = U_2/I_1$, 称为转移电阻;

$\beta = I_2/I_1$, 称为转移电流比。

以上四种受控源均指理想受控源。所谓理想, 其含义有二: 一是指受控电压源的输出电阻为零, 受控电流源的输出电阻为无穷大; 二是指电流控制的受控源, 其输入电阻为零, 呈短路状态, 电压控制的受控源, 其输入电阻为无穷大, 呈开路状态。

5) 受控源与独立源比较

(1) 在同一线性电路中可以同时含有独立电源和受控源。但由于受控源与独立电源的特性完全不同, 因此它们在电路中所起的作用也完全不同。独立电源是电路的输入或激励, 它为电路提供按给定时间函数变化的电压和电流, 从而在电路中产生电压和电流。受控源则描述电路中两条支路电压和电流间的一种约束关系, 它的存在可以改变电路中的电压和电流, 使电路特性发生变化。假如电路中不含独立电源, 不能为控制支路提供电压或电流, 则受控源以及整个电路的电压和电流将全部为零。

(2) 受控源也具有独立源的一般性质, 但必须以控制量的存在为前提条件。在电路分析中对受控源的处理与独立电源并无原则区别, 唯一要注意的是, 对含有受控源的电路进行化简时, 若受控源还被保留, 则不要把受控电源的控制量消除掉。

【例 3-8】 在如图 3.28 所示的电路中, 试求 u_2 的值。

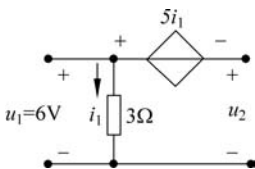


图 3.28 例 3-8 图

解:

$$i_1 = 6\text{V}/3\Omega = 2\text{A}$$

$$u_2 = -5i_1 + 6\text{V} = -10\text{V} + 6\text{V} = -4\text{V}$$

6. 叠加定理及应用

1) 叠加定理的定义

叠加定理是线性电路分析的基本方法, 其具体内容是: 在线性电路中, 任一支路的电流

(或电压)等于各个电源单独作用时,在此支路中所产生的电流(或电压)的代数和。也就是说,在线性电路中,任意一处的电流(或电压)响应,恒等于各个独立电源单独作用时在该处产生响应的叠加。叠加定理电路如图 3.29 所示,线性电路任意支路电流 I 的值[图 3.29(a)]等于电压源单独作用该支路所产生的电流 I' 的值[图 3.29(b)]和电流源单独作用该支路所产生的电流 I'' 的值[图 3.29(c)]的代数和。叠加时需注意电流和电压的参考方向,求其代数和。

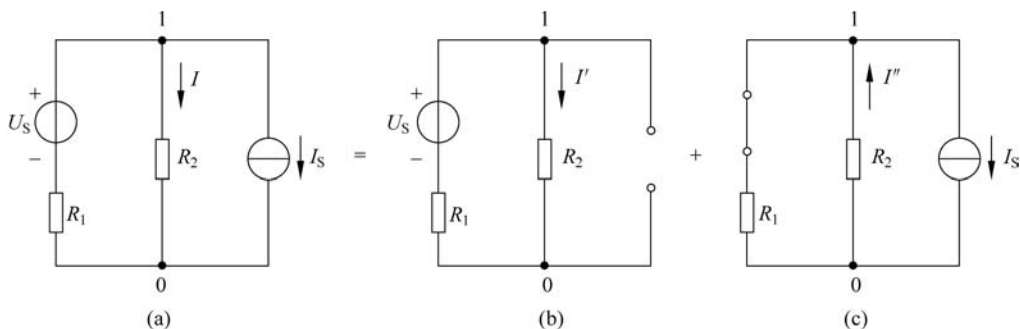


图 3.29 叠加定理电路

2) 叠加定理的解题方法

应用叠加定理求解复杂电路,可将电路等效变换成几个简单电路,然后将计算结果叠加,求得原来电路的电流(或电压)。在等效变换过程中,保持电路中所有电阻不变,假定电路中只有一个电源作用,而将其他电源去掉(置零),即应将多余电压源视为短路,将多余电流源视为开路。

另外,在使用叠加定理时,应注意以下几点。

- (1) 该定理只用于线性电路。
- (2) 功率不可叠加。
- (3) 叠加时,应注意电源单独作用时电路各处电压、电流的参考方向与各电源共同作用时的参考方向是否一致。
- (4) 该定理包含“叠加性”和“齐次性”两重含义。“齐次性”是指某一独立电源扩大或缩小 K 倍时,该电源单独作用所产生的响应分量亦扩大或缩小 K 倍。
- (5) 叠加时只对独立电源产生的响应叠加,受控源在每个独立电源单独作用时都应在相应的电路中保留,即应用叠加定理时,受控源要与负载一样看待。

【例 3-9】 在如图 3.30 所示的电路中,试用叠加定理求电流 I_1 。

解: U_{S1} 单独作用时,电路如图 3.31 所示。

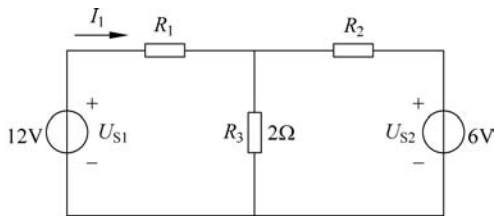
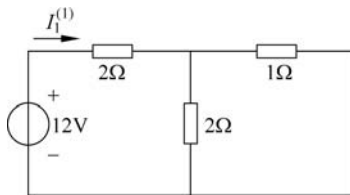
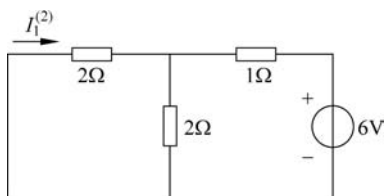


图 3.30 例 3-9 图

图 3.31 U_{S1} 单独作用时的电路

$$I_1^{(1)} = \frac{U_{S1}}{R_1 + \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{12}{2 + \frac{2 \times 1}{2 + 1}} \text{A} = 4.5 \text{A}$$

图 3.32 U_{S2} 单独作用时的电路

U_{S2} 单独作用时, 电路如图 3.32 所示。

$$I_2^{(2)} = \frac{U_{S2}}{R_2 + \frac{R_1 \times R_3}{R_1 + R_3}} = \frac{6}{2 + \frac{2 \times 2}{2 + 2}} \text{A} = 3 \text{A}$$

由分流公式可得

$$I_1^{(2)} = 0.5 I_2^{(2)} = 1.5 \text{A}$$

$$I_1 = I_1^{(1)} + I_1^{(2)} = 4.5 \text{A} - 1.5 \text{A} = 3 \text{A}$$

7. 节点电压法

用支路电流法计算复杂电路时, 如果电路的支路数越多, 则需要列出求解的联立方程越多, 这样不便于求解, 有时复杂电路中虽然支路数多, 网孔数多, 但节点数较少, 对于这种电路能否有新的方法去求解电路呢? 这就是本节所要讲的节点电压法。

节点电压法: 定义电路中各个节点的节点电压为未知量, 根据 KCL 定律列节点的电流方程, 求解电流方程后得到各个节点的节点电压, 再利用节点电压求各元件的电压、电流。

1) 无纯电压源支路的节点电压方程

在如图 3.33 所示的电路中, 选取电路的参考点, 假设各支路电流的参考方向。

节点①KCL 方程:

$$I_S + I_{S5} + I_2 + I_5 = 0$$

节点②KCL 方程:

$$-I_2 + I_3 + I_6 = 0$$

节点③KCL 方程:

$$-I_5 - I_{S5} - I_6 + I_4 + I_{S4} = 0$$

用节点电压 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 表示各支路电流:

$$I_2 = U_2/R_2 = (\varphi_2 - \varphi_1)/R_2 = (\varphi_2 - \varphi_1)G_2$$

$$I_3 = -\varphi_2 G_3$$

$$I_4 = -\varphi_3 G_4$$

$$I_5 = (\varphi_3 - \varphi_1)G_5$$

$$I_6 = (\varphi_3 - \varphi_2)G_6$$

代入节点方程得:

节点①

$$(G_2 + G_5)\varphi_1 - G_2\varphi_2 - G_5\varphi_3 = I_S + I_{S5}$$

节点②

$$-G_2\varphi_1 + (G_2 + G_3 + G_6)\varphi_2 - G_6\varphi_3 = 0$$

节点③

$$-G_5\varphi_1 - G_6\varphi_2 + (G_4 + G_5 + G_6)\varphi_3 = I_{S4} - I_{S5}$$

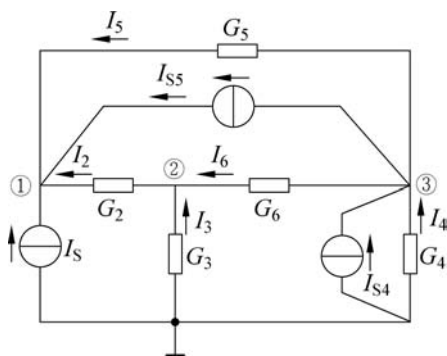


图 3.33 无纯电压源支路的节点电压

方程的规律:

(1) 方程的左边是无源元件电流的代数和。

自电导: 连接于本节点上的所有支路的电导之和, 恒为正值。

互电导: 相邻节点与本节点之间公共支路上连接的电导, 恒为负值。

(2) 方程式右边则为汇集到本节点上的所有已知电流的代数和约定指向节点的电流取正, 背离节点的电流取负。

自电导 $\times$ 本节点电压 $-\sum$ 互电导 $\times$ 相邻节点电压 = 流入该节点的所有电源的电流之和。

(3) 节点电压法解题的步骤:

① 选定参考节点, 并给其余 $(n-1)$ 个节点编号。

② 将电路中所含的电压源支路等效变换为动力源支路。

③ 建立节点电压方程。一般可先算出各节点的自电导、互电导及汇集到本节点的已知电流代数和, 然后直接代入节点电流方程。

④ 对方程式联立求解, 得出各节点电压。

⑤ 选取各支路电流的参考方向, 根据欧姆定律找出它们与各节点电压的关系进而求解各支路电流。

【例 3-10】 在如图 3.34 所示的电路中, 试用节点电压法求电路中的各支路电流。

解: 取节点 0 为参考节点, 节点 1、2 的节点电压方程分别为:

$$\begin{aligned}(1/1 + 1/2)U_1 - 1/2U_2 &= 3 \\ -1/2U_1 + (1/2 + 1/3)U_2 &= 7\end{aligned}$$

解得:

$$U_1 = 6\text{V}, \quad U_2 = 12\text{V}$$

各支路电流分别为:

$$\begin{aligned}I_1 &= U_1/1 = 6\text{A} \\ I_2 &= (U_1 - U_2)/2 = -3\text{A} \\ I_3 &= U_2/3 = 4\text{A}\end{aligned}$$

2) 含纯电压源支路的节点电压方程

在如图 3.35 所示的电路中, 选取电路的参考点, 在电压源支路增设一个支路电流 I 。

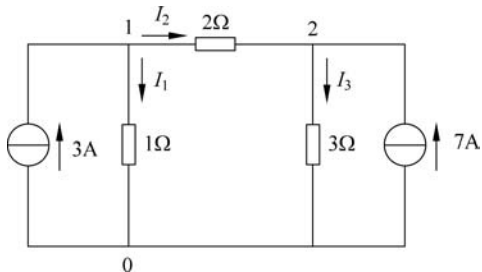


图 3.34 例 3-10 图

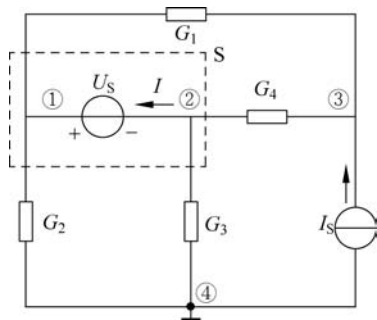


图 3.35 含纯电压源支路的节点电压

节点①

$$(G_1 + G_2)\varphi_1 - G_1\varphi_3 = I$$

节点②

$$(G_3 + G_4)\varphi_2 - G_4\varphi_3 = -I$$

节点③

$$-G_1\varphi_1 - G_4\varphi_2 + (G_1 + G_4)\varphi_3 = I_S$$

三个方程四个未知数,可增加一个辅助方程:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_S$$

习题

1. 填空题

(1) 支路电流法是以_____为未知量,依据_____列出方程式,然后解联立方程得到_____的数值。

(2) 用支路电流法解复杂直流电路时,应先列出_____个独立节点电流方程,然后再列出_____个回路电压方程(假设电路有 n 条支路, m 个节点,且 $n > m$)。

(3) 根据支路电流法解得的电流为正值时,说明电流的参考方向与实际方向_____;电流为负值时,说明电流的参考方向与实际方向_____。

(4) 以_____为解变量的分析方法称为节点电压法。

(5) 与某个节点相连接的各支路电导之和,称为该节点的_____。

(6) 两个节点间各支路电导之和,称为这两个节点间的_____。

(7) 在具有几个电源的_____电路中,各支路电流等于各电源单独作用时所产生的电流_____,这一定理称为叠加定理。

(8) 所谓 U_{S1} 单独作用 U_{S2} 不起作用,含义是使 U_{S2} 等于_____,但仍接在电路中。

(9) 两个并联电阻,其中 $R_1 = 200\Omega$,通过 R_1 的电流为 $I_1 = 0.2A$,通过整个并联电路的电流为 $I = 0.8A$,则 $R_2 =$ _____ Ω , $I_2 =$ _____ A 。

(10) 有两个白炽灯,A 为 $220V$ 、 $40W$,B 为 $220V$ 、 $100W$,则它们正常工作时的电阻值之比 $R_A:R_B =$ _____,电流之比 $I_A:I_B =$ _____。若将它们串联后接在 $220V$ 的电源上,则它们的电压之比 $U_A:U_B =$ _____。

2. 判断题

(1) 运用支路电流法解复杂直流电路时,不一定以支路电流为未知量。()

(2) 用支路电流法解出的电流为正数,则解题正确;否则,就是解题错误。()

(3) 用支路电流法解题时,各支路电流的参考方向可以任意假定。()

(4) 互阻值有时为正有时为负。()

(5) 由于节点电压都一律假定电压降,因而各互电导都是负值。()

(6) 几个电阻并联后的总阻值一定小于其中任何一个电阻的阻值。()

(7) 在电阻分压电路中,电阻值越大,其两端的电压就越高。()

(8) 在电阻分流电路中,电阻值越大,流过它的电流也就越大。()

3. 计算题

(1) 在如图 3.36 所示的电路中,用支路电流法求各支路电流。

(2) 在如图 3.37 所示的电路中,用支路电流法求电压 U_0 。

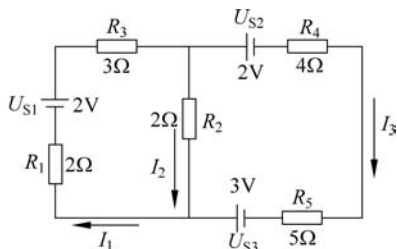


图 3.36 计算题(1)图

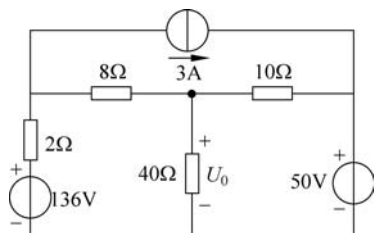


图 3.37 计算题(2)图

(3) 在如图 3.38 所示的电路中,列出节点电压方程。

(4) 在如图 3.39 所示的电路中,用节点电压法求电压 U 。

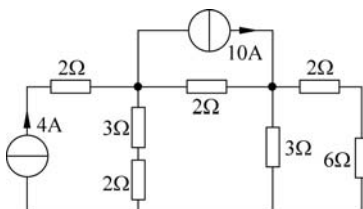


图 3.38 计算题(3)图

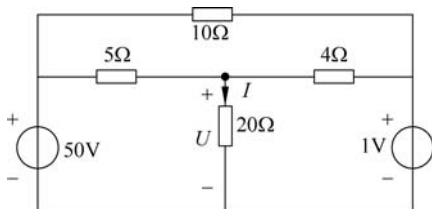


图 3.39 计算题(4)图

(5) 在如图 3.40 所示的电路中,用叠加定理求电压 U_2 。

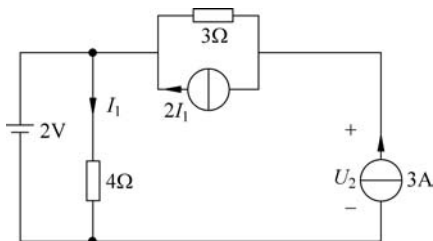


图 3.40 计算题 5 图