



项目一

汽车直流电路



内容提要

汽车直流电路是汽车电工电子技术的重要基础。本项目主要介绍电路的基本概念和基本物理量、电路的基本定律、汽车电路的基本元件及常用的电路分析方法等知识；引入电路基本物理量的测量、汽车电路基本元件的认识和测量、基尔霍夫定律及其验证、复杂直流电路的分析与验证四个学习任务。

任务一 电路基本物理量的测量



任务分析

测量是获取汽车电路信息的手段，电流、电压、电位、功率是电路的基本物理量，汽车电路基本物理量的测量是了解汽车电路工作状态的根。通过本任务相关知识的学习，掌握简单电路的搭接和电路基本物理量的测量方法，了解电路的组成及作用；掌握电流、电压、电位、功率的概念，理解电压、电流参考方向的意义；掌握使用万用表测量电路基本物理量的技能。



相关知识

一、电路和电路模型

电路就是将电气元件按照一定的需求连接起来，形成电流的通路。电路广泛应用于工业、农业、交通运输业、国防、科学研究及我们的日常生活中。你能列举几

个汽车上的应用电路吗?

1. 电路的组成及其作用

(1)电路的组成。电气装置种类繁多,如汽车电气设备、装配自动化设备、车联网系统等。实际电路的几何尺寸相差甚大,如通信网络系统或电力系统可能跨越省界、国界甚至是洲际的,而集成电路芯片有的则小如指甲。

电路不论大小和复杂程度如何,基本都是由电源、负载和中间环节组成的。图 1-1 为汽车倒车信号灯电路,它由电源(蓄电池)、负载(灯泡)和中间环节(导线、开关、熔断器)三部分组成。

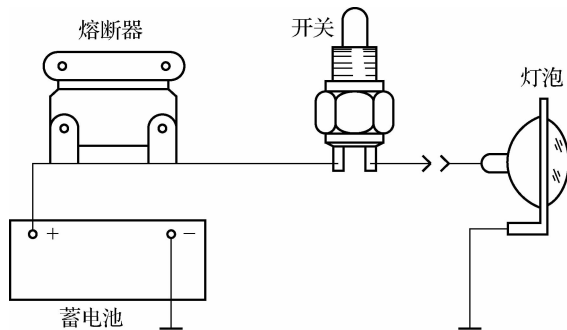


图 1-1 汽车倒车信号灯电路

①电源。电源将其他形式的能(如化学能、机械能等)转换为电能,是电路中提供电能或信号的设备。现代汽车上装有两个电源,即发电机和蓄电池,使得汽车发动机和各用电设备(负载)在不同情况下都能正常工作。

②负载。负载是将电能转换成非电能的用电设备。汽车的用电设备包括电磁阀、信号指示灯、仪表、电动机、传感器等。

③中间环节。中间环节将电源和负载连接,主要起传输、控制、分配与保护作用。最简单的中间环节是连接导线,汽车上的中间环节包括保护装置、各种开关、高低压导线等。

(2)电路的作用。电路如同人的神经一样分布在电气装置的各个部分,控制着各种机械器件有序地工作。电路的作用可分为两类:一类是实现电能的传输、分配和转换,如汽车发电机将机械能转换为电能,经过整流器和电压调节器后传输给传感器、ECU、执行器等用电设备;另一类是实现电信号的传递和处理,如车载电视可将接收到的信号经过处理,转换成图像和声音信号。

2. 电路模型

如图 1-1 所示的实际电路形象直观,但绘制麻烦,并且实际电路元件的电磁性质较为复杂,不便于进行理论分析。在实际工程中,将电路中的元件按照其主要物理性质分别用一个或几个理想电路元件去模拟,模拟后电路的电磁现象与实际电路的电磁现象十分接近,这个由理想电路元件组成的电路称为电路模型。

图 1-2 为图 1-1 的电路模型,建立电路模型给实际电路的分析带来了很大的方便,是研究电路问题的常用方法。图 1-3 为电路分析中常用的理想电路元件及图形符号。



视频
电路的组成



视频
不间断电源



视频
电路的工作
状态

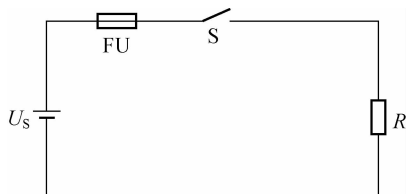


图 1-2 倒车信号灯电路模型

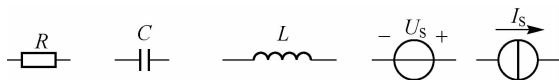


图 1-3 电路分析中常用的理想电路元件及图形符号

二、电路的基本物理量

1. 电流

(1) 电流概述。电流是电荷在电场力作用下定向运动而形成的,规定正电荷的移动方向为电流的实际方向。电流的大小用电流强度来表示,电流强度简称电流,其数值等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

大小和方向不随时间变化的电流称为恒定电流,简称直流(DC),用大写字母 I 表示;大小和方向随时间变化的电流称为交流电流,简称交流(AC),用小写字母 i 表示。

在国际单位制中,电流的单位为 A(安[培]),在 1 s 时间内通过导体横截面的电荷量为 1 C(库[仑])时,导体中的电流为 1 A。对于大电流和微小电流,电流的计量单位还有 kA、mA、 μ A,其换算关系为

$$1 \text{ A} = 10^{-3} \text{ kA} = 10^3 \text{ mA} = 10^6 \mu\text{A}$$

(2) 电流的参考方向。电流的方向是客观存在的,但对于复杂电路,如图 1-4 所示电路中 R_3 上电流的方向则很难判断。为了分析电路的需要,引入参考方向的概念,即先任意选定某一方向作为待求电流的参考方向,按此方向列写方程、进行计算。若计算得到的结果是正值,说明该段电流的实际方向与参考方向一致;若计算结果为负值,说明该段电流的实际方向与参考方向相反。

电流的参考方向可以用箭头表示,也可以用双下标表示,如 I_{ab} 表示电流的参考方向由 a 流向 b ,如图 1-5 所示。

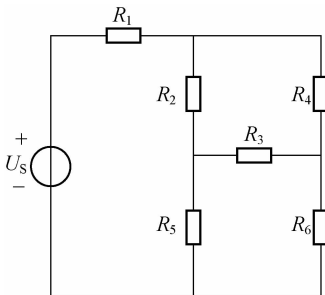


图 1-4 电流方向判断

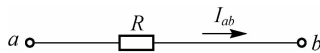


图 1-5 电流的参考方向



视频
电压



视频
电功率

2. 电压

(1)电压概述。电场力将单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功,定义为 a 、 b 间的电压,即

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

习惯上将电位降低的方向作为电压的实际方向。大小和方向不随时间变化的电压称为直流电压,用大写字母 U 表示;大小和方向随时间变化的电压称为交流电压,用小写字母 u 表示。

在国际单位制中,电压的单位为 V(伏[特])。若电场力将 1 C 的正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功为 1 J(焦[耳]),则 u_{ab} 为 1 V。对于较大电压和较小电压,电压的计量单位还有 kV、mV,其换算关系为

$$1 \text{ V} = 10^{-3} \text{ kV} = 10^3 \text{ mV}$$

(2)电压的参考方向。与电流的参考方向一样,在电路分析时,可先任意假设电压的参考方向,然后列方程求解,若计算得到的结果是正值,说明电压的实际方向与参考方向一致;若计算结果为负值,说明电压的实际方向与参考方向相反。

电压的参考方向可以用箭头或双下标表示,也可以用“+”“-”号表示。

在电路分析中,如不做说明,电路图上标出的电流、电压方向一般都是指参考方向,且参考方向一经选定,在分析、计算电路时就不能更改。

(3)关联参考方向。在进行电路分析时,电压和电流的参考方向原则上是任意选择的。但是为了方便,通常假定电流的参考方向从电压参考方向的高电位端流向低电位端[见图 1-6(a)],称为关联参考方向;反之,称为非关联参考方向,如图 1-6(b)所示。

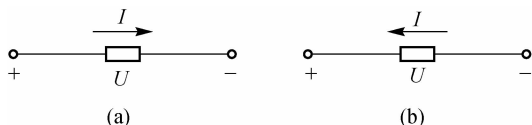


图 1-6 关联参考方向与非关联参考方向

3. 电位

在电路分析中,常选取电路的某一点作为电位的参考点(规定电位为零的点),并用符号“ $\perp$ ”表示,则电路中任意一点的电位就等于该点到参考点的电压。电位的单位与电压相同,也是 V(伏[特])。通常汽车中的搭铁点就是电位的参考点,电路中任意一点的电位就是它相对于搭铁点的电压。

参考点确定后,各点的电位就随之确定;参考点不同,各点的电位也不同。电路中任意两点间的电压与参考点的选择无关,两点间的电压也可用两点间的电位差来计算,即

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (1-3)$$

4. 电动势

在电路中要维持电荷的持续流动,除了电场力将正电荷从高电位端移动到低电位端外,还需要一种力量将正电荷从低电位端移动到高电位端,这个力量称为电源力。电源力将单

位正电荷从低电位端移动到高电位端所做的功称为电动势,用字母 $e(E)$ 表示。

$$e = \frac{dW}{dq} \quad (1-4)$$

电动势的单位也是 V(伏[特]),其实际方向与电压实际方向相反,即由电源的低电位端指向高电位端。电路中的电动势是由发电机、蓄电池、光电池等提供的。

5. 功率

(1) 功率概述。电场力在单位时间内所做的功称为电功率,简称功率,用符号 p (P) 表示,即

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-5)$$

在国际单位制中,功率的单位为 W(瓦[特]),若电场力在 1 s 时间内所做的功为 1 J(焦[耳]),则功率为 1 W。对于较大功率和较小功率,功率的计量单位还有 kW、mW,其换算关系为

$$1 \text{ W} = 10^{-3} \text{ kW} = 10^3 \text{ mW}$$

根据功率的定义,某段电路在时间 t 内吸收或放出的电能为

$$W = pt \quad (1-6)$$

电能的国际单位为 J(焦[耳]),也常用 kW·h(千瓦时)做单位,平时所说的 1 度电即为 1 kW·h,有

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1 \times 10^3 \times 3\,600 = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

(2) 功率的吸收与放出。实际电路中,同一设备或元件在不同情况下可能有不同的工作状态。例如,汽车蓄电池在供电时放出功率,但在充电时却消耗功率。根据功率的符号可以很方便地判断某一元件是吸收还是放出功率。

将式(1-5)等号右边分子、分母同乘以 dq 后,变为

$$p = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-7)$$

对于直流电路,元件上的电压和电流为关联参考方向时有 $P=UI$,非关联参考方向时有 $P=-UI$ 。经过计算,若 $P>0$,则元件吸收功率;若 $P<0$,则元件放出功率。根据功率的正负便可判断电路中哪个元件是电源($P<0$),哪个元件是负载($P>0$)。

【例 1-1】 判断图 1-7 中的元件是放出功率还是吸收功率。

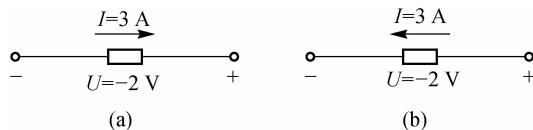


图 1-7 例 1-1 图

解 在图 1-7(a)中,因为电压和电流为非关联参考方向,所以 $P = -UI = -(-2) \times 3 = 6 \text{ W} > 0$,得出元件吸收功率。

在图 1-7(b)中,因为电压和电流为关联参考方向,所以 $P = UI = (-2) \times 3 = -6 \text{ W} < 0$,得出元件放出功率。



视频

电能和电功

三、万用表

万用表是一种多用途的电工仪表,型号较多,一般可以测量交流、直流电压,直流电流和电阻,有的万用表还可以测电感、电容、交流电流等。万用表的形式有很多,使用方法虽不完全相同,但基本原理是一样的。

1. 指针式万用表

指针式万用表主要由表头(测量机构)、测量线路和转换开关组成。MF-47 型万用表的外形如图 1-8 所示。下面以 MF-47 型万用表为例来说明指针式万用表的使用方法。



图 1-8 MF-47 型万用表的外形

(1)使用前的准备。在使用前应检查指针是否指在机械零位上,若不在机械零位上可旋转表盖的调零器使指针指示在零位上,此过程称为机械调零。

(2)直流电压的测量。首先估计一下被测电压的大小,然后将转换开关拨至适当的“V”量程,将红表笔接被测电压“+”端,黑表笔接被测电压“-”端。然后根据该挡量程数字与标直流符号“DC-”刻度线(第二条线)上的指针所指数字来读出被测电压的大小。若无法估计被测电压的大小,可先选择量程最大挡,然后根据表头指示再选择相应量程。若指针反偏,须将两表笔对调测量。

(3)直流电流的测量。测量 0.05~500 mA 直流电流时,转动开关至所需电流挡;测量 5 A 时,转动开关放在 500 mA 直流电流量限上,然后将表笔串接在被测电路中进行测量。

(4)交流电压的测量。测交流电压的方法与测量直流电压相似,所不同的是因为交流电压没有正、负之分,所以测量交流电压时,表笔也就无须分正、负极。

(5)电阻的测量。转动开关至所需电阻挡,将两表笔短接调零后进行测量。测量电路中的电阻时,应先切断电源,若电路中有电容,则应先行放电。当检查电解电容器漏电电阻时,可转动开关至 $R \times 1k$ 挡,红表笔必须接电容器负极,黑表笔接电容器正极。

2. 数字式万用表

与指针式万用表相比,数字式万用表不仅体积小,质量轻,便于携带,而且直接用数字显示测量结果(被测量值的大小),不但反应快,而且消除了视差,减少了人为误差。另外,它还具有使用方便、精确度和灵敏度高、测电压时的输入阻抗高等优点。下面以图 1-9 所示 UR89 系列数字式万用表为例来说明。

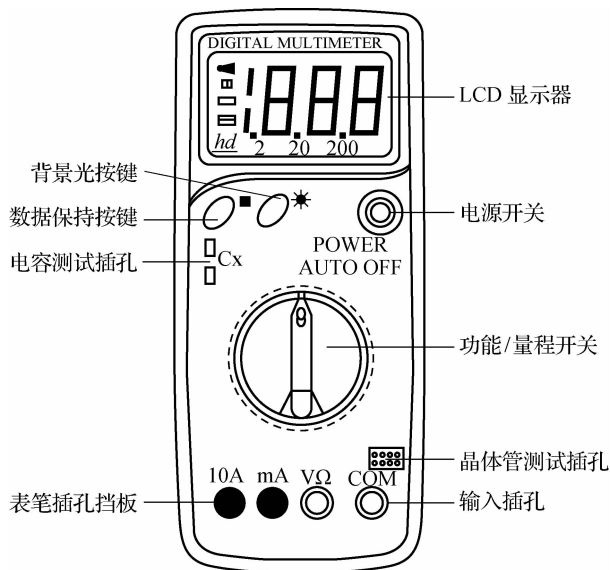


图 1-9 UR89 系列数字式万用表

(1) 直流电压的测量。将功能/量程开关旋到“V—”，根据被测电压选择合适量程。将黑表笔插入 COM 插孔，红表笔插入 VΩ 插孔，红表笔另一端接被测电压高电位端，黑表笔另一端搭铁或接电压低电位端，否则显示为负值。从 LCD 显示器读出被测电压值。

(2) 直流电流的测量。将功能/量程开关旋到“A—”，选择合适的量程，红表笔插入 mA 插孔或 10A 插孔，黑表笔插入 COM 插孔。将表笔串接在被测电路中。从 LCD 显示器读出被测电流值。

(3) 电阻的测量。将功能/量程开关旋到“Ω”，选择合适的量程。将红表笔插入 VΩ 插孔，黑表笔插入 COM 插孔，将测试表笔并接到被测电阻两端。

(4) 交流电压、电流的测量。将功能/量程开关旋到“V~”或“A~”，测量方法与直流电压、电流的测量方法相似。

(5) 电容的测量。将功能/量程开关旋到“F”，选择合适的量程。将红表笔插入 VΩ 插孔，黑表笔插入 COM 插孔，将表笔并接到被测电容两端。从 LCD 显示器读出电容值。

(6) 温度的测量。将功能/量程开关旋到“TEMP”，将热电偶的红表笔插入 VΩ 插孔，黑表笔插入 COM 插孔，热电偶测量端置于测温点，从 LCD 显示器读取温度值。

(7) 频率的测量。将功能/量程开关旋到“Hz”，选择合适的量程。将红表笔插入 VΩ 插孔，黑表笔插入 COM 插孔，将测量表笔接在被测信号源的两端。

3. 万用表使用注意事项

使用万用表时应注意以下事项：

(1) 在测量过程中，不能用手接触表笔的金属部分，一方面可以保证测量的准确性，另一方面也可以保证人身安全。

(2) 在测量过程中，不要换挡，尤其是在测量高电压或大电流时。否则，会使万用表损坏。如需换挡，应先断开表笔，换挡后再去测量。

(3) 在测量过程中要注意避免外界磁场对万用表的影响。

(4) 万用表使用完毕, 应将转换开关置于交流电压的最大挡。如果长期不使用, 还应将万用表内部的电池取出来, 以免电池腐蚀表内其他器件。

(5) 严禁带电测量电阻。

任务实施与评价

1. 任务实施器材

(1) 直流可调稳压电源。

(2) 万用表。

(3) 电阻器、导线若干。

(4) 电工工具。

2. 任务实施步骤

(1) 搭建如图 1-10 所示电路。

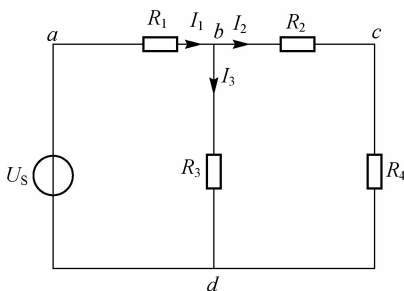


图 1-10 电路基本物理量测量电路

(2) 测量如图 1-10 所示电路中的直流电流 I_1 、 I_2 、 I_3 。

① 根据所选电阻阻值和直流电源值计算 I_1 、 I_2 、 I_3 的理论值。

② 根据计算值选择合适的电流量程。

③ 将万用表串接在相应的支路中。

④ 读出电流值, 填入表 1-1。

表 1-1 直流电流测量数据

被 测 量	I_1	I_2	I_3
理论计算值/mA			
所选量程			
测量值/mA			
电阻、电源参数	$R_1 = \quad \Omega \quad R_2 = \quad \Omega \quad R_3 = \quad \Omega \quad R_4 = \quad \Omega \quad U_S = \quad V$		

(3) 分别以图 1-10 中的 d 和 c 点为参考点, 测量表 1-2 中的各直流电压、电位值。

① 根据所选电阻阻值和直流电源值计算表 1-2 中所列电压、电位的理论值。

② 根据计算值选择合适的电压量程。

③ 将万用表并联在相应的两点间。

④ 读出测量数值, 填入表 1-2。

表 1-2 直流电压、电位测量数据

参 考 点	d			c		
被测量	U_{ab}	V_a	V_b	U_{ab}	V_a	V_b
理论计算值/V						
所选量程						
测量值/V						
电阻、电源参数	$R_1 = \quad \Omega \quad R_2 = \quad \Omega \quad R_3 = \quad \Omega \quad R_4 = \quad \Omega \quad U_S = \quad V$					

(4)根据表 1-2 所测数据验证电压与电位之间的关系,总结参考点对电压和电位的影响。

3. 注意事项

- (1)直流可调稳压电源的两个输出端不允许短路。
- (2)测量电压时须将万用表并联在被测元件上,测量电流时须将万用表串联在电路中。
- (3)使用指针式万用表时应注意极性。

4. 任务评价

任务评价如表 1-3 所示。

表 1-3 电路基本物理量的测量任务评价

项目	搭建电路 (20 分)	万用表使用 (20 分)	量程选择 (15 分)	规范操作 (15 分)	测量准确性 (20 分)	团队协作 (10 分)
评价						
总评		姓名		班级		专业

任务二 汽车电路基本元件的认识和测量

任务分析

电阻元件、电感元件、电容元件、电源元件广泛应用在汽车的传感器和执行器上,是构成汽车电路系统的基本元件。通过本任务的学习,掌握电阻、电感、电容及电源元件的基本知识和伏安特性,了解其在汽车中的应用;学会识别电阻、电感、电容及电源元件,掌握其参数的测量方法。

相关知识

一、电阻元件

电阻元件是电子线路中最常用的元件之一,主要用于控制和调节电路中的电流与电压,或用作消耗电能的负载。

1. 电阻概述

电阻是描述导体对电流阻碍作用的物理量,用 R 表示,单位为 Ω (欧姆)。对于大电阻,计量单位还有 $k\Omega$ 、 $M\Omega$,其换算关系为

$$1\ \Omega = 10^{-3}\ k\Omega = 10^{-6}\ M\Omega$$

除与导体材料的电阻率 ρ (成正比)、长度 l (成正比)和横截面积 S (成反比)有关外,导体的电阻还与温度的变化有关,有的随温度的升高电阻变大,有的随温度的升高电阻变小。这种电阻随温度变化而变化的现象称为电阻的热效应,汽车中的许多温度传感器都是利用电阻的热效应而制成的。

电阻按结构可分为固定电阻和可调电阻两类。固定电阻的阻值是固定不变的,而可调电阻的阻值在一定范围内可以调整;可调电阻又分为可变电阻和电位器。按材料可分为合金型、薄膜型和合成型三类;按用途可分为通用、高阻、精密、高频等。

2. 欧姆定律

在同一电路中,导体中的电流与导体两端的电压成正比,与导体的电阻成反比,这就是欧姆定律。当电压和电流为关联参考方向时,欧姆定律表示为

$$U = IR \quad (1-8)$$

当电压和电流为非关联参考方向时,欧姆定律表示为

$$U = -IR \quad (1-9)$$

在任何时刻都满足欧姆定律的电阻元件称为线性电阻元件。当电阻值一定时,线性电阻元件的伏安特性为过坐标原点的直线,如图 1-11 所示。

当电阻元件上的电压和电流关系不符合欧姆定律时,伏安特性曲线不是过原点的直线,而是不同形状的曲线(见图 1-12),电阻值不是常数,称为非线性电阻元件。

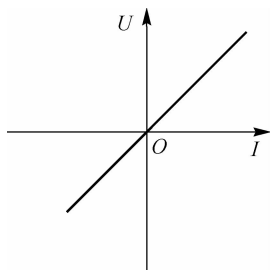


图 1-11 线性电阻元件的伏安特性

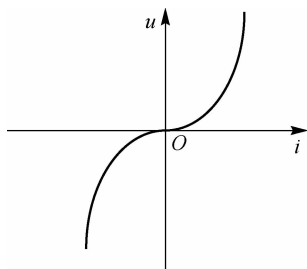


图 1-12 非线性电阻元件的伏安特性

3. 电阻在汽车中的应用

(1)热敏电阻的应用。热敏电阻是敏感元件的一类,其电阻值会随着热敏电阻本体温度的变化呈现出阶跃性的变化。热敏电阻包括正温度系数(PTC)和负温度系数(NTC)热敏电阻,以及临界温度热敏电阻(CTR)。

热敏电阻具有灵敏度较高,工作温度范围宽,能够测量其他温度计无法测量的空隙、腔体及生物体内血管的温度;体积小,使用方便,电阻值可在 $0.1 \sim 100\ k\Omega$ 任意选择;易加工成复杂的形状,可大批量生产;稳定性好、过载能力强等优点。因此,热敏电阻在汽车电控系统中应用广泛。

汽车电子控制电路中的温度传感器就是利用热敏电阻作为敏感元件的,如发动机进气



视频
电阻器的检测



视频
欧姆定律



视频
串联电路和并
联电路

温度传感器采用负温度系数的热敏电阻。其工作电路如图 1-13 所示,ECU 内部的 5 V 电压通过分压电阻 R 加在进气温度传感器内的热敏电阻上,再通过 ECU 内部搭铁构成回路,通过测量热敏电阻上的电压测得进气温度,据此进行混合气浓度的调节和点火提前角的控制等。

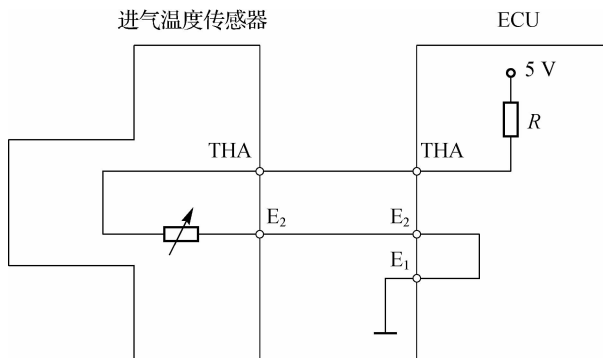


图 1-13 进气温度传感器的工作电路

(2)光敏电阻的应用。光敏电阻也是敏感元件的一类,它利用半导体的光电效应制成,对光线十分敏感。无光照射时,呈现高阻状态;有光线照射时,光敏电阻的阻值会随着光照强弱的变化而变化。光照强,光敏电阻的阻值就小;光照弱,光敏电阻的阻值就大。

光敏电阻具有光谱响应范围宽,可从紫外光、可见光、近红外扩展到远红外,尤其对红光和红外辐射有较高的响应度;工作电流大,可达数毫安;所测光强范围宽,既可测强光,又可测弱光;灵敏度高,光导电增益大于 1;偏置电压低,无极性之分,使用方便等优点。

汽车灯光控制器上所使用的光电式光量传感器如图 1-14 所示,其内装有半导体元件硫化镉。硫化镉为多晶硅结构,在传感器中把硫化镉做成曲线形状,目的是增大与电极的接触面积,从而提高该传感器的灵敏度。它的特性是当周围较暗时,其阻值较大;当周围环境较亮时,它的阻值又会变小。光电式光量传感器安装在仪表板的上方,将周围光照的变化转换为电阻的变化,并将变化的电信号送入控制器,自动控制尾灯及前照灯的亮灭,当对方来车时,还具有变光功能。

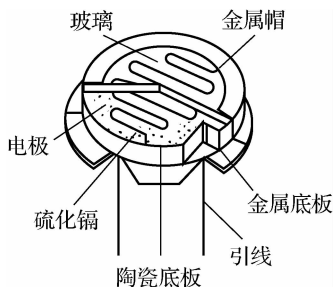


图 1-14 光电式光量传感器

二、电容元件

电容元件是电子电路中常用的元件之一,具有隔直流、通交流及储能的作用,常用于耦合、滤波、振荡等电路中。

1. 电容概述

将两个金属片(或导体)用绝缘介质隔开,即构成一个能储存电量的电器,称为电容器,用符号 C 表示,其电路符号如图 1-15 所示。对任何一个电容器而言,两极板的电压都随所带电荷量的增加而增加,并且电荷量与电压成正比,即

$$q=Cu \quad (1-10)$$

在国际单位制中,电容的单位为 F(法[拉]),由于法拉的单位在工程应用中显得太大,一般常用 μF (微法)和 pF (皮法)等较小的单位。它们的换算关系为

$$1\text{ F}=10^6\ \mu\text{F}=10^{12}\ \text{pF}$$

电容的电容量是由本身的介质、几何尺寸决定的。介质的介电常数越大,极板正对面积越大,极板间的距离越小,电容的容量越大。若电容量为正实常数,则为线性电容,其库伏特性为通过原点的一条直线,如图 1-16 所示;若电容量不为常数,则为非线性电容。



视频
电容器的充电
和放电

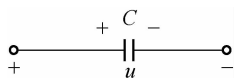


图 1-15 电容元件电路符号

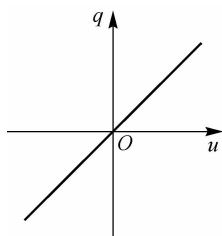


图 1-16 线性电容的库伏特性

电容的种类很多,根据容量可分为固定电容和可调电容;根据材料可分为电解电容、云母电容、涤纶电容、瓷片电容、钽电容等;根据有无极性可分为无极性电容与有极性电容,如电解电容是有极性的,更换此类型电容时应注意极性,若极性错误会导致电容损坏。

2. 电容元件的电压、电流关系

当给电容加上交流电压 u 时,其极板上的电荷量随之变化,电路中便出现了电荷的移动,形成电流 i 。若 u 、 i 为关联参考方向,则有

$$i=\frac{dq}{dt}=C\frac{du}{dt} \quad (1-11)$$

式(1-11)表明,电容上的电流与其电压的变化率成正比,当电压恒定时,电容上的电流为零。因此,电容对直流可视为断路,即具有隔直流作用;当电压为交流电压时,电容上会有电流通过,电压变化越快,产生的电流越大,即电容的通交流作用。

电容器是一种储能元件,当两端的电压增加时,电容元件就将电能储存在电场中,相当于被充电;当电压降低时,电容元件释放储存的能量,相当于放电。 $0\sim t$ 的时间内电容元件储存的能量为

$$W_C = \int_0^t p dt = \int_0^t ui dt = C \int_0^t u \frac{du}{dt} dt = C \int_{u(0)}^{u(t)} u du = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(0) \quad (1-12)$$

3. 电容元件在汽车中的应用

(1) 电容式闪光器。当汽车要转向时,驾驶员打开相应的转向灯开关,转向信号灯按一定的频率闪亮,以告知前后车辆驾驶员、行人和交通警察。电容式闪光器由于工作频率稳定,灯光亮暗明显,且可兼做危险报警闪光器,通过在电路中添加少量元件,可以对闪光器灯

泡损坏情况做出监视,故使用广泛。图 1-17 为电流型电容式闪光器电路,它主要是利用电容元件的充电和放电来控制转向信号灯的闪烁频率。

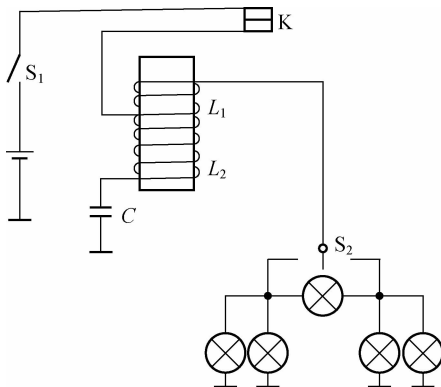


图 1-17 电流型电容式闪光器电路

(2)安全气囊备用电源。汽车安全气囊系统有两个电源:一个是汽车电源(蓄电池和交流发电机),另一个是备用电源(backup power)。备用电源电路由电源控制电路和若干电容器组成。点火开关接通 10 s 之后,如果汽车电源电压高于安全气囊(SRS)ECU 的最低工作电压,那么安全气囊备用电源中的电容进行储能;当汽车遭受碰撞而导致蓄电池和交流发电机与 SRS ECU 之间的电路切断时,备用电源能在 6 s 之内向 SRS ECU 供给电能,保持 ECU 测出碰撞、发出点火指令、引爆点火剂,使充气剂受热分解给气囊充气,保护乘员。

三、电感元件

电感元件也是电子电路中常用的元件之一,与电阻、电容等元器件组合构成各种功能的电子电路,具有通直流、阻交流及储能的作用。

1. 电感概述

电感元件是将导线一圈一圈绕在绝缘骨架上,装上磁芯或铁心,外面罩上屏蔽罩制成的。图 1-18 为一个具有 N 匝的实际电感线圈,忽略线圈导线中的电阻,当有电流 i 通过线圈时,在线圈内部产生磁通 Φ ,并与 N 匝线圈交链,则磁链(总磁通)为

$$\Psi = N\Phi \quad (1-13)$$

电感元件是实际电感线圈的一种理想化模型,在电路中一般用图 1-19 所示的符号来表示图 1-18 所示的实际线圈,用字母 L 表示,它反映了电流产生磁通和磁场能量储存这一物理现象。当磁通 Φ 的参考方向与电流 i 的参考方向之间满足右手螺旋定则时,则有

$$\Psi = Li \quad (1-14)$$

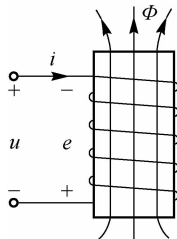


图 1-18 实际电感线圈

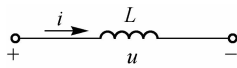


图 1-19 电感元件电路符号



视频
电感器工作
原理

在国际单位制中,电感的单位为 H(亨[利]),对于较小电感,一般用 mH(毫亨)和 μH (微亨)等较小的单位。它们的换算关系为

$$1\text{ H}=10^3\text{ mH}=10^6\text{ }\mu\text{H}$$

当电感值 L 是正实常数时,称为线性电感元件,其韦安特性是通过原点的一条直线,如图 1-20 所示;若电感值不为常数,则为非线性电感元件。

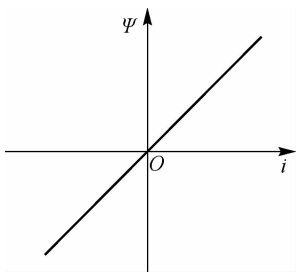


图 1-20 线性电感的韦安特性



视频

电感器的检测

2. 电感元件的电压、电流关系

当通过电感元件的电流发生变化时,由于穿过电感线圈的磁通也相应地发生变化,因此在电感线圈两端产生感应电压,电感元件两端的电压和通过电感元件的电流为关联参考方向时,根据电磁感应定律,有

$$u=\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \quad (1-15)$$

式(1-15)反映了电感元件两端电压与其中电流之间的约束关系,它表明某一时刻电感元件两端的电压只取决于该时刻电流的变化率,而与该时刻电流的大小无关。电流变化越快,则其两端的电压也就越大。当电流变化率为零时,即通入直流电流时,电感元件两端的电压为零,可见,电感元件对直流电流没有阻力,可视为短路。

电感元件也是一种储能元件,当电路电流增大时,电感把吸收的电能转化为磁场能量储存起来;当电流减小时,将储存于磁场中的能量释放出来。 $0\sim t$ 的时间内电感元件储存的能量为

$$W_L=\int_0^t p\mathrm{d}t=\int_0^t ui\mathrm{d}t=L\int_0^t i\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t=L\int_{i(0)}^{i(t)} i\mathrm{d}i=\frac{1}{2}Li^2(t)-\frac{1}{2}Li^2(0) \quad (1-16)$$

3. 电感元件在汽车中的应用

(1)电感储能式电控点火系统。电感储能式电控点火系统利用电感元件的储能作用实现点火。点火线圈的初级电路被接通后,点火线圈开始储存能量,初级电流所能达到的值与初级电路接通的时间长短有关。初级线圈储存的能量决定着点火电压的高低。

(2)电流传感器。汽车牌照灯、尾灯及停车灯的灯丝是否断开是利用电流传感器来检测的。图 1-21 为笛簧开关式电流传感器的原理图。当开关闭合时,若白炽灯工作正常,则电流线圈中有足够的电流通过,所形成的电磁力使笛簧开关闭合;当有灯丝断开时,电流线圈中的电流减少,电磁力减弱,不足以使笛簧开关闭合。因此,利用笛簧开关的通断即可判断出灯丝工作是否正常。

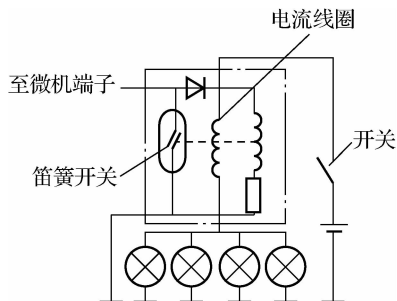


图 1-21 笛簧开关式电流传感器的原理

四、电源元件

电源是电气系统的核心。实际电源种类繁多,如干电池、稳压电源、汽车上使用的蓄电池及发电机、人造卫星上使用的太阳能电池等。在进行电路分析时,一般用电压源模型或电流源模型来表示实际的电源。

1. 电压源

发电机、蓄电池等实际电源都是含有电动势和内阻的,在电路分析时,为了直观和方便,往往用电动势 E (常用 U_s 表示) 和内阻 R_0 串联的电路模型去表示,即为实际电压源,如图 1-22 中点画线方框内所示。接上负载电阻 R 形成回路后,输出电压与输出电流的关系为

$$U = U_s - IR_0 \quad (1-17)$$

式中, U 为电源输出电压,随负载电流的变化而变化,其伏安特性曲线如图 1-23 中实线所示。

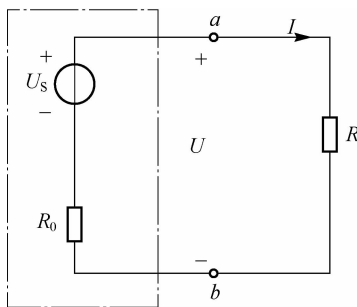


图 1-22 实际电压源

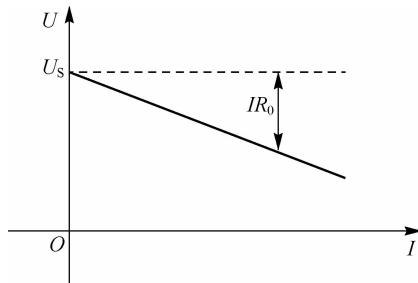


图 1-23 电压源伏安特性曲线

从图 1-23 中可以看出,其端电压 U 将随负载电流的增大而下降,下降的快慢由内阻 R_0 决定。 R_0 越大, U 下降得越快,表明带负载的能力差; R_0 越小, U 下降得越慢,曲线越平缓,表明带负载的能力强。

当 $R_0 = 0$ 时, $U = U_s$, 电压源输出的电压是恒定不变的,与通过它的电流无关,如图 1-23 中虚线所示,为一条与横轴平行的直线。这种内阻为零的电压源被称为理想电压源或恒压源,其电路符号如图 1-24 所示。其特点是:电压源两端的电压不随外电路的改变而改变,输出的电流则随外电路的改变而改变。

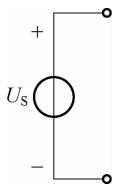


图 1-24 理想电压源电路符号

严格地说,理想电压源并不存在,因为实际电压源的内部总存在一定的内阻。当实际电压源的内阻远远小于负载电阻时, $U \approx U_s$,可视为理想电压源,如稳压电源。实际电压源可以看成是由理想电压源和内阻串联而成的。

2. 电流源

电流源也是实际电源的电路模型。变换式(1-17)得到

$$I = \frac{U_s}{R_0} - \frac{U}{R_0} = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1-18)$$

式(1-18)表明可用一个电流 I_s 和内阻的并联模型来表示一个电源,即实际电流源,如图 1-25 中点画线方框内所示。其伏安特性曲线如图 1-26 中实线所示。

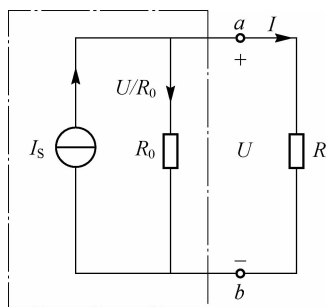


图 1-25 实际电流源

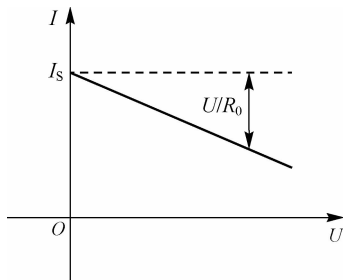


图 1-26 电流源伏安特性曲线

从图 1-26 中可以看出,伏安特性曲线的斜率取决于电流源内阻 R_0 的大小。内阻越小,分流作用越大,电流下降得越快;内阻越大,分流作用越小,曲线越平缓,输出电流越稳定。

当 $R_0 = \infty$ 时, $I = I_s$, 电流源输出的电流是恒定不变的,与外电路无关,如图 1-26 中虚线所示,为一条与横轴平行的直线。这种内阻为无穷大的电流源被称为理想电流源或恒流源,其电路符号如图 1-27 所示。其特点是:电流源输出的电流不随外电路的改变而改变,但电流源两端的电压则随外电路的改变而改变。

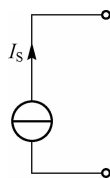


图 1-27 理想电流源电路符号

同样,理想电流源实际上也是不存在的,当实际电流源的内阻远远大于负载电阻时, $I \approx I_s$, 可视为理想电流源,如工作在放大区的晶体管可近似认为是一理想电流源。实际电流源可以看成是由理想电流源和内阻并联而成的。

3. 电压源与电流源的等效变换

电压源模型和电流源模型都可作为同一实际电源的电路模型,可以有相同的外特性。因此,两者相互之间可以进行等效变换,如图 1-28 所示。电路的等效变换有时能使复杂的

电路变得简单,便于分析计算。

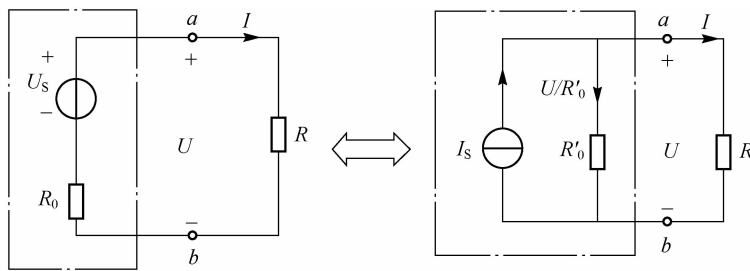


图 1-28 实际电压源与实际电流源的等效变换

两种实际电源进行等效变换的前提是两电源模型接相同负载时,在负载上产生的电压和电流一样。将电流源和电压源内阻的表示符号进行区分,电压源内阻仍用 R_0 ,电流源内阻用 R'_0 ,变换式(1-18)得

$$U = I_s R'_0 - I R'_0 \quad (1-19)$$

在满足等效变换原则的前提下,比较式(1-19)和式(1-17)可得等效变换的条件为

$$\begin{cases} R_0 = R'_0 \\ U_s = I_s R'_0 \text{ 或 } I_s = U_s / R_0 \end{cases} \quad (1-20)$$

变换时需要注意以下几点:

- (1) I_s 的参考方向与 U_s 电位升高的方向一致。
- (2) 理想电压源与理想电流源之间不能进行等效变换。
- (3) 等效变换仅对外电路适用,其电源内部是不等效的。

【例 1-2】 试将图 1-29(a)、(b)中的电源进行等效变换。

解 如图 1-29(a)所示电压源,利用式(1-20)得

$$\begin{cases} R'_0 = R_0 = 1 \, \Omega \\ I_s = U_s / R_0 = 3 / 1 = 3 \, \text{A} \end{cases}$$

按照 I_s 的参考方向与 U_s 电位升高的方向一致,对应的等效电流源如图 1-29(c)所示。同理,如图 1-29(b)所示电流源,利用式(1-20)得

$$\begin{cases} R_0 = R'_0 = 2 \, \Omega \\ U_s = I_s R'_0 = 3 \times 2 = 6 \, \text{V} \end{cases}$$

对应的等效电压源如图 1-29(d)所示。

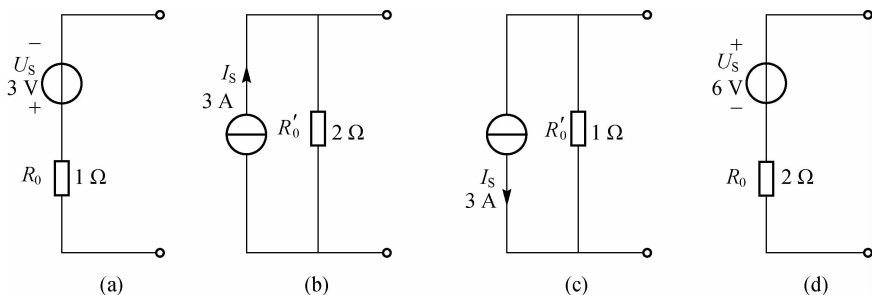


图 1-29 例 1-2 图

任务实施与评价

1. 任务实施器材

- (1) 直流可调稳压电源。
- (2) 直流可调恒流源。
- (3) 万用表。
- (4) 电阻、电容、电感元件若干,导线若干。
- (5) 电工工具。

2. 任务实施步骤

- (1) 识别实验室中的电阻、电容、电感元件。
- (2) 电阻元件的测量。
 - ① 选择两个电阻元件 R_1 和 R_2 ,使用万用表合适的量程测量其电阻值,填入表 1-4。
 - ② 搭建图 1-30 所示电路。

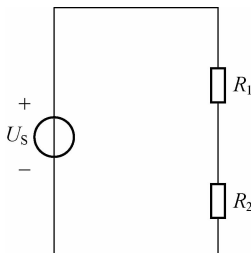


图 1-30 电阻测量电路

- ③ 使用万用表测量图 1-30 所示电路中 R_1 、 R_2 两电阻上的电压 U_1 、 U_2 ,填入表 1-4。
- ④ 根据测量值和选择的电源电压值,总结串联电阻的分压特性,填入表 1-4。
- ⑤ 设计并联电阻分流电路。

表 1-4 电阻元件的测量数据

R_1	R_2	U_1	U_2	$R_1/(R_1+R_2)$	$R_2/(R_1+R_2)$	U_s	U_1/U_s	U_2/U_s
结论								

(3) 电容元件的测量。

① 利用万用表在提供的电容元件中挑选出一个 $0.01 \mu\text{F}$ 以上的电解电容,一个 $0.01 \mu\text{F}$ 以下的无极性电容,并将编号填入表 1-5 中(教师提前在电容上编号)。

② 检测电容元件的好坏。

- 对于挑选出的 $0.01 \mu\text{F}$ 以下的无极性电容,选用万用表 $R \times 10\text{k}$ 挡,用两表笔分别任意接电容的两个引脚,阻值应为无穷大,若测出阻值(指针向右摆动)为零,则说明电容漏电损坏或内部击穿。

- 对于挑选出的 $0.01 \mu\text{F}$ 以上的电解电容,选用万用表 $R \times 100$ 挡或 $R \times 1\text{k}$ 挡,红、黑表笔分别接电容器的负极与正极(每次测试前,需将电容器先放电),由表针的偏摆来判断电

容器的好坏。若表针迅速向右摆起,然后慢慢向左退回原位,一般来说电容器是好的;若表针摆起后不再回转,说明电容器已经击穿;若表针摆起后逐渐退回到某一位置停住,则说明电容器已经漏电;若表针摆不起来,说明电容器电解质已经干涸导致失去容量。

- 任意挑选某一编号电容,根据上述方法进行测试,将测试结果填入表 1-5。

表 1-5 电容元件的测量数据

0.01 μF 以上编号	0.01 μF 以下编号	电容编号()
		好()
		坏()

(4)电感元件的测量。

①电感质量判断。

使用万用表的电阻挡,大多数电感线圈的直流电阻不会超过 $1\ \Omega$,所以可用指针式万用表测试。选用万用表 $R\times 1$ 挡测量电感线圈两端的电阻,应近似为零,如指针不动或指向较大的读数,表明电感线圈已断路或损坏。对于匝数较多、线径较细的线圈,须选择大一些的量程进行测试。

- 外观判断,若电感器损坏,表现为发烫或电感磁环明显损坏。
- 任意挑选两个电感元件,根据上述方法进行判断,将结果填入表 1-6。

②电感量测量。任意选择两个电感元件,采用具有电感挡的数字万用表,将量程开关拨至合适的电感挡来测量电感值,测量结果填入表 1-6。

表 1-6 电感元件的测量数据

电感编号()		电感编号()		电感值 编号()	电感值 编号()
外观判断	万用表判断	外观判断	万用表判断		
好()坏()	好()坏()	好()坏()	好()坏()		

(5)实际电压源伏安特性的测量。

- 搭建如图 1-31 所示电路,图中 U_s 为直流稳压电源, R_0 为其模拟内阻。
- 调节负载电阻 R_2 阻值在 $0\sim 680\ \Omega$ 变化,测量 U 与 I 的值。
- 将测得的 U 与 I 的值绘成伏安特性曲线。

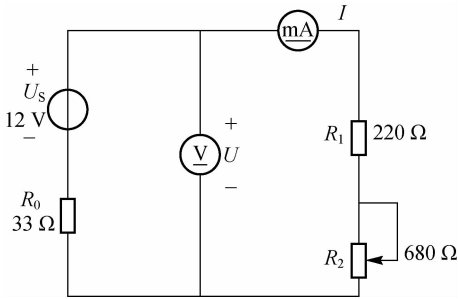


图 1-31 实际电压源伏安特性测量电路

(6)实际电流源伏安特性的测量。

①搭建如图 1-32 所示电路,图中 I_s 为直流恒流源, R_0 为其模拟内阻。

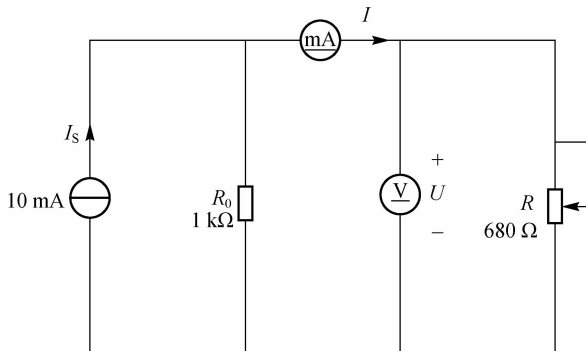


图 1-32 实际电流源伏安特性测量电路

②调节负载电阻 R 阻值在 $0 \sim 680 \Omega$ 变化,测量 U 与 I 的值。

③将测得的 U 与 I 的值绘成伏安特性曲线。

3. 注意事项

- (1)直流可调稳压电源的两个输出端不允许短路。
- (2)测量时须先估算量程,合理选择万用表的量程,勿超量程。
- (3)严禁带电测量电阻值。
- (4)使用指针式万用表时应注意极性。

4. 任务评价

任务评价如表 1-7 所示。

表 1-7 汽车电路基本元件的认识和测量任务评价

项目	电阻元件测量(10分)	电容元件测量(10分)	电感元件测量(10分)	电压源伏安特性测量(15分)	电流源伏安特性测量(15分)	规范操作(15分)	测量准确性(15分)	团队协作(10分)
评价								
总评		姓名		班级		专业		

任务三 基尔霍夫定律及其验证

任务分析

基尔霍夫定律(Kirchhoff laws)是电路中电压和电流所遵循的基本规律,是分析和计算较为复杂电路的基础。基尔霍夫(电路)定律包括基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL)。通过本任务的学习,应理解基尔霍夫定律的内容,掌握基尔霍夫定律方程式列

写的方法;掌握 Multisim 13 软件的使用方法;学会利用 Multisim 13 软件验证基尔霍夫定律。

相关知识

基尔霍夫定律既可用于直流电路的分析,也可用于交流电路的分析,还可用于含有电子元件的非线性电路的分析。基尔霍夫电流定律用于电路的节点分析,基尔霍夫电压定律用于电路的回路分析。为了更好地掌握该定律,先介绍电路分析中常用的几个名词术语。

(1)支路。支路是无分支的一段电路,流过同一支路上元件的电流处处相等(同一支路上各元件的关系是串联),如图 1-33 所示电路中有 3 条支路,即 U_{S1} - R_1 支路、 R_2 支路和 U_{S2} - R_3 支路。其中,含有电源的支路称为有源支路,不含电源的支路称为无源支路。

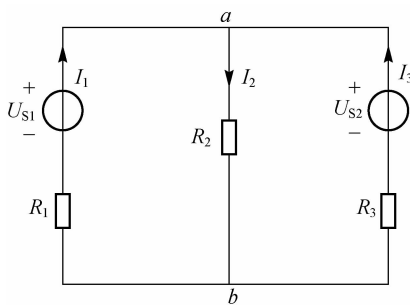


图 1-33 电路名词术语示意

(2)节点。电路中三条或三条以上支路的连接点称为节点。如图 1-33 所示的电路中有两个节点,即节点 a 和节点 b 。

(3)回路。电路中任何一条闭合的路径称为回路。如图 1-33 所示的电路中有三条回路,即 a - R_2 - R_1 - U_{S1} - a 回路、 a - U_{S2} - R_3 - R_2 - a 回路和 a - U_{S2} - R_3 - R_1 - U_{S1} - a 回路。

(4)网孔。内部不包含任何支路的回路称为网孔。如图 1-33 所示的电路中有两个网孔,即 a - R_2 - R_1 - U_{S1} - a 网孔和 a - U_{S2} - R_3 - R_2 - a 网孔。网孔一定是回路,但回路不一定是网孔。

一、基尔霍夫电流定律

1. 定律内容

基尔霍夫电流定律(KCL)也称基尔霍夫第一定律,用以确定连接在同一节点上的各支路电流之间的关系。其内容表述为:对于电路中的任一节点,在任一时刻,流入该节点的电流之和恒等于流出该节点的电流之和。即

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad (1-21)$$

若规定流入节点的电流为正,流出节点的电流为负,则电路中任一节点上电流的代数和恒等于零。即



视频
基尔霍夫电流定律

$$\sum I = 0 \quad (1-22)$$

对于图 1-33 中的节点 a , 有

$$I_1 + I_3 = I_2$$

对于节点 b , 有

$$I_2 = I_1 + I_3$$

显然, 对于节点 a 和节点 b 所列的 KCL 方程只有一个独立的, 一般来说, 对于有 n 个节点的电路, 可以列写出 $(n-1)$ 个彼此独立的节点电流方程。



视频
验证基尔霍夫
定律

【例 1-3】 在如图 1-34 所示电路中, 已知 $I_1 = 5 \text{ A}$, $I_3 = 3 \text{ A}$, $I_4 = 3 \text{ A}$, 试求 I_2 。

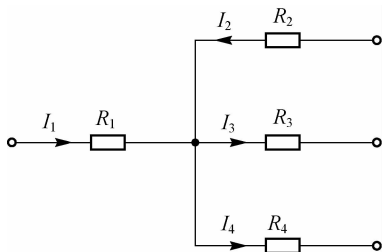


图 1-34 例 1-3 图

解 由基尔霍夫电流定律可列出

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

代入数据得 $I_2 = I_3 + I_4 - I_1 = 3 + 3 - 5 = 1 \text{ A}$ 。

【例 1-4】 在如图 1-35 所示电路中, 已知 $I_1 = 3 \text{ A}$, $I_2 = 2 \text{ A}$, $I_5 = 3 \text{ A}$, 试求 I_4 。

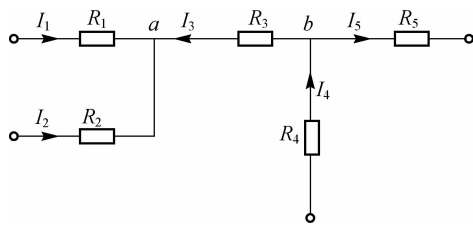


图 1-35 例 1-4 图

解 对节点 a 由基尔霍夫电流定律可列出

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

代入数据得 $I_3 = -(I_1 + I_2) = -(3 + 2) = -5 \text{ A}$ 。

对节点 b 由基尔霍夫电流定律可列出

$$I_4 = I_3 + I_5$$

代入数据得 $I_4 = I_3 + I_5 = -5 + 3 = -2 \text{ A}$ 。

2. 推广应用

对如图 1-36 所示的闭合面, 应用基尔霍夫电流定律列写节点 a 、 b 、 c 的电流方程。

节点 a : $I_a + I_{ca} = I_{ab}$

节点 b : $I_b + I_{ab} = I_{bc}$

节点 c : $I_c + I_{bc} = I_{ca}$

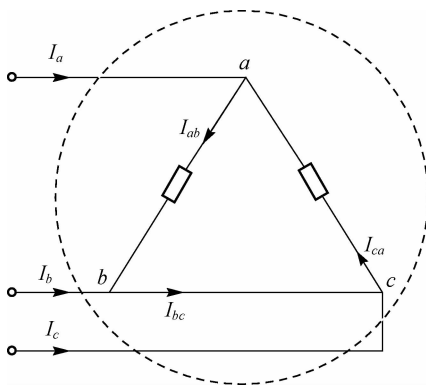


图 1-36 KCL 的推广应用

把节点 a 、 b 、 c 的电流方程相加,得

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

可见,基尔霍夫电流定律不仅适用于电路中的任一节点,而且适用于电路中的任一封闭面,即在任一时刻,流进封闭面的电流等于流出封闭面的电流。

二、基尔霍夫电压定律

1. 定律内容

基尔霍夫电压定律(KVL)也称基尔霍夫第二定律,是用来确定回路中各部分电压之间关系的定律。其内容表述为:在电路中,任一时刻,沿任一闭合回路绕行一周,所有元件上电压的代数和恒等于零。即

$$\sum U = 0 \quad (1-23)$$

应用基尔霍夫电压定律列写回路方程时,首先必须假定回路的绕行方向,各元件上电压参考方向与假定回路绕行方向一致时,取正号;相反时,取负号。对于电阻元件,可以只假定其上的电流参考方向,默认电压与电流为关联参考方向。这样,当电阻元件的电流参考方向与回路绕行方向一致时,其上的电压 RI 前取正号,否则取负号。

如图 1-33 所示电路,假定三条回路的绕行方向如图 1-37 所示,应用 KVL 如下:

$$\text{回路 1} \quad R_1 I_1 - U_{S1} + R_2 I_2 = 0$$

$$\text{回路 2} \quad U_{S2} - R_3 I_3 - R_2 I_2 = 0$$

$$\text{回路 3} \quad U_{S2} - R_3 I_3 + R_1 I_1 - U_{S1} = 0$$

观察这三个回路方程发现,其中任意一个方程都能由另外两个方程推算出,只有两个为独立方程。对于一个具有 n 个节点, m 条支路的电路,独立的 KVL 方程数为 $m - (n - 1)$,等于网孔数,故按网孔列写的 KVL 方程均为独立方程。

【例 1-5】 在如图 1-38(a) 所示电路中,已知 $U_{S1} = 5 \text{ V}$, $U_{S2} = 7 \text{ V}$, $U_{S3} = 3 \text{ V}$,试求 U_1 。

解 选定回路 1 的参考方向如图 1-38(b) 所示,应用基尔霍夫电压定律可列出

$$U_1 + U_{S3} - U_{S2} - U_{S1} = 0$$

代入数据得 $U_1 = U_{S2} + U_{S1} - U_{S3} = 7 + 5 - 3 = 9 \text{ V}$ 。

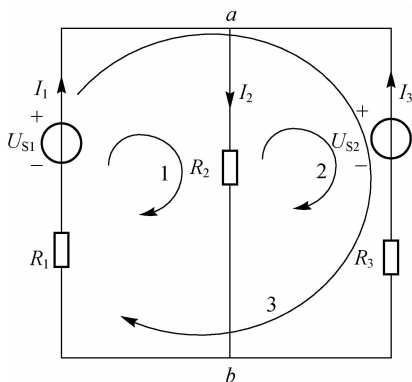


图 1-37 KVL 电路图

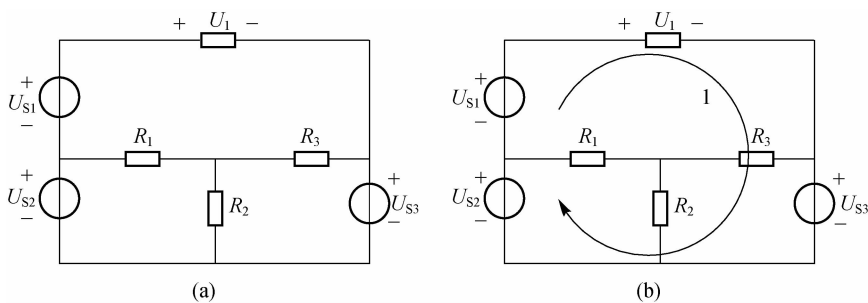


图 1-38 例 1-5 图

2. 推广应用

基尔霍夫电压定律不仅适用于闭合回路,也可以推广应用到回路的部分电路(或开口电路),在开口处假设电压,假想成一闭合回路。在如图 1-39 所示电路中, ab 间为开路,假设开口处电压为 U_{ab} ,应用基尔霍夫电压定律的推广应用,得

$$U_{ab} + U_{S3} - U_{S2} - U_{S1} = 0$$

$$U_{ab} = U_{S2} + U_{S1} - U_{S3}$$

从而求得开口处电压 U_{ab} 。

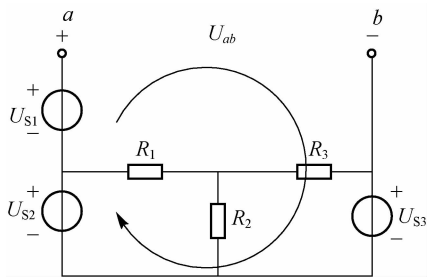


图 1-39 KVL 的推广应用

【例 1-6】求如图 1-40(a)所示电路的开路电压 U_{ab} 。

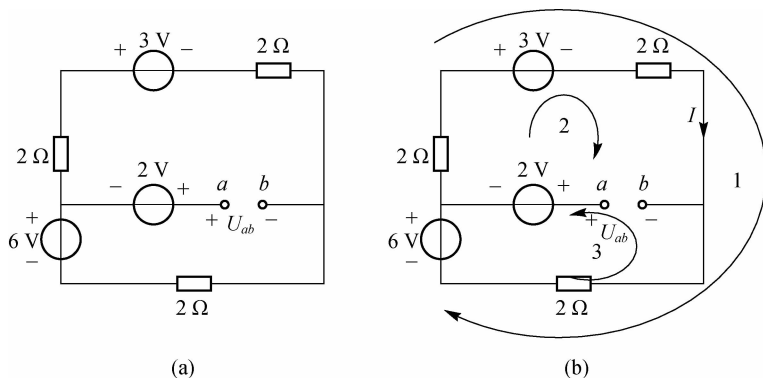


图 1-40 例 1-6 图

解 假定电流 I 的参考方向如图 1-40(b)所示,对于回路 1,应用基尔霍夫电压定律有

$$3 + 2I + 2I - 6 + 2I = 0$$

$$I = 0.5 \text{ A}$$

对于回路 2,应用基尔霍夫电压定律的推广应用有

$$2 + 2I + 3 + 2I - U_{ab} = 0$$

代入 I 值得得

$$U_{ab} = 7 \text{ V}$$

对于开路电压 U_{ab} ,应用另一条假想回路 3 计算,同样可以得出 $U_{ab} = 7 \text{ V}$,因此应用基尔霍夫电压定律求解开路电压时可任意选择连接开口的路径。

三、Multisim 的使用

Multisim 是 Electronics Workbench 公司推出的以 Windows 为基础的仿真工具,适用于板级的模拟/数字电路板的设计工作。它包含电路原理图的图形输入、电路硬件描述语言输入方式,具有丰富的仿真分析能力。为适应不同的应用场合,Multisim 推出了许多版本,用户可以根据自己的需要加以选择。本书以 Multisim 13 为例进行介绍,其启动界面如图 1-41 所示。

1. Multisim 的主窗口界面

启动 Multisim 13 后,将出现图 1-42 所示的主窗口界面。界面由多个区域构成,包括菜单栏、各种工具栏、电路输入窗口、状态条和列表框等。通过对各部分的操作可以实现电路图的输入、编辑,并根据需要对电路进行相应的观测和分析。用户可以通过菜单栏或工具栏改变主窗口的视图内容。

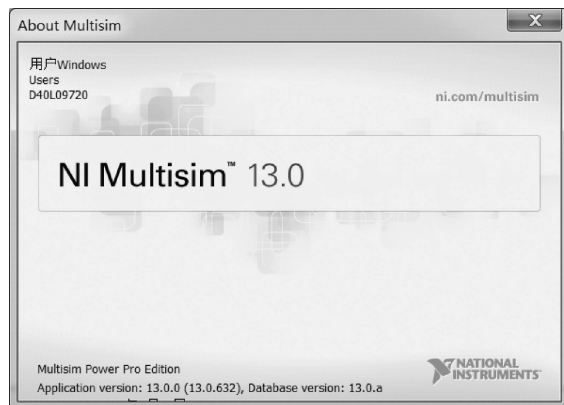


图 1-41 Multisim 13 启动界面

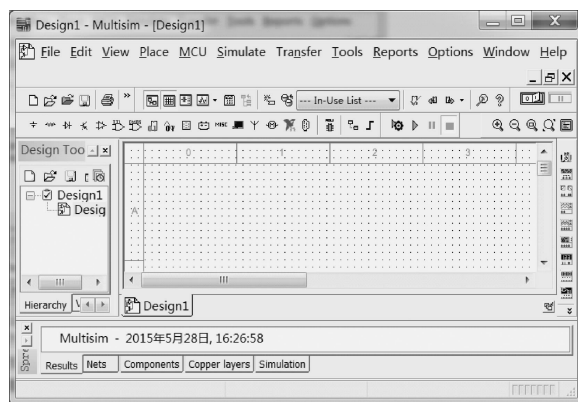


图 1-42 主窗口界面

(1)菜单栏。菜单栏位于主窗口界面的上方(见图 1-43),通过菜单可以对 Multisim 的所有功能进行操作。

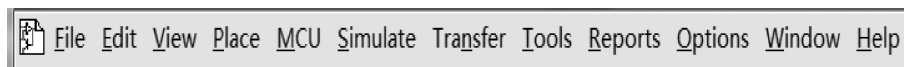


图 1-43 菜单栏

不难看出,菜单中有一些与大多数 Windows 平台上的应用软件一致的功能选项,如 File、Edit、View、Options、Help。此外,还有一些 EDA 软件专用的选项,如 Place、Simulate、Transfer 及 Tools 等。

(2)工具栏。Multisim 13 提供了多种工具栏,并以层次化的模式加以管理,用户可以通过 View 菜单中的选项方便地将这些工具栏打开或关闭。通过工具栏,用户可以方便地使用软件的各项功能。

顶层的工具栏有 Standard 工具栏、Main 工具栏、Component 工具栏、Instruments 工具栏、View 工具栏和 Simulation 工具栏。

①Standard 工具栏包含了常见的文件操作和编辑操作,如图 1-44 所示。



图 1-44 Standard 工具栏

②如图 1-45 所示, Main 工具栏作为设计工具栏是 Multisim 的核心工具栏, 通过对该工作栏按钮的操作可以完成对电路从设计到分析的全部工作。



图 1-45 Main 工具栏

③Component 工具栏中有 20 个按钮(见图 1-46), 每个按钮都对应一类元器件, 其分类和 Multisim 元器件数据库中的分类相对应。当光标移动到某个按钮时, 光标下端会显示该元件库类型。



图 1-46 Component 工具栏

单击 Component 工具栏中任意一个按钮, 便可打开该类元件的选择对话框。以第一个按钮为例, 通过这个按钮可以打开电源和信号源类的 Sources 对话框, 如图 1-47 所示。

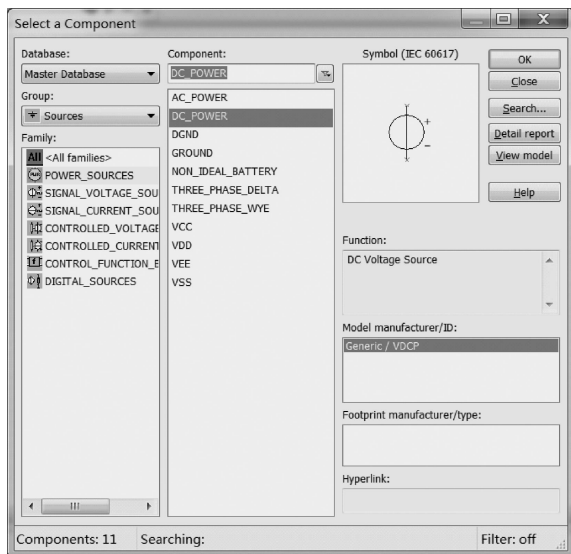


图 1-47 电源和信号源类的 Sources 对话框

可先选择正确的 Family 类型, 然后选择相应的 Component。

④Instruments 工具栏集中了 Multisim 为用户提供的虚拟仪器仪表, 用户可以通过按钮选择自己需要的仪器对电路进行观测, 如图 1-48 所示。



图 1-48 Instruments 工具栏

⑤用户可以通过 View 工具栏方便地调整所编辑电路的视图大小,如图 1-49 所示。

⑥Simulation 工具栏可以控制电路仿真的开始、结束和暂停,如图 1-50 所示。



图 1-49 View 工具栏



图 1-50 Simulation 工具栏

2. 输入并编辑电路

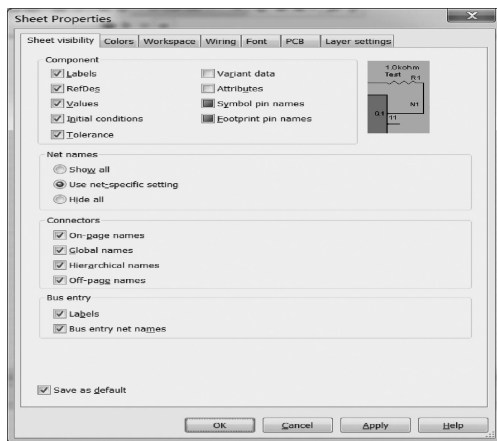
输入电路图是分析和设计工作的第一步,用户从元器件库中选择需要的元器件放置在电路图中并连接起来,为分析和仿真做准备。

(1)设置 Multisim 的通用环境变量。为了适应不同的需求和用户习惯,用户可以执行“Options→Sheet Properties”菜单命令打开 Sheet Properties 对话框,如图 1-51(a)所示。通过该对话框的七个选项卡,用户可以对编辑界面颜色、电路尺寸、缩放比例、字体、线宽、可见性等内容进行相应的设置。

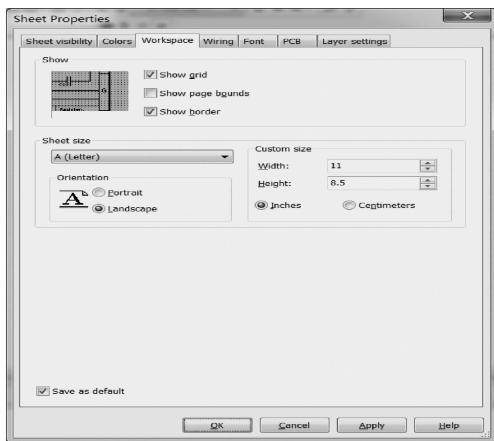
以 Workspace 选项卡为例,当选中时,如图 1-51(b)所示的 Sheet Properties 对话框,在该对话框的 Show 选项区中有以下三个复选框:

- ①Show grid:设置是否显示网格。
- ②Show page bounds:设置电路图页面界限。
- ③Show border:设置电路页面边界。

其余选项在此不再详述。



(a)



(b)

图 1-51 Sheet Properties 对话框

(2)取用元器件。取用元器件的方法有两种:从工具栏取用和从菜单取用。下面以 74LS00 为例说明这两种方法。

(1)从工具栏取用。在 Main 工具栏单击 TTL 按钮,弹出 Select a Component 对话框,如图 1-52 所示。在 Family 列表框中选择 74LS,在 Component 列表框中选择 74LS00D,即可取用 74LS00。

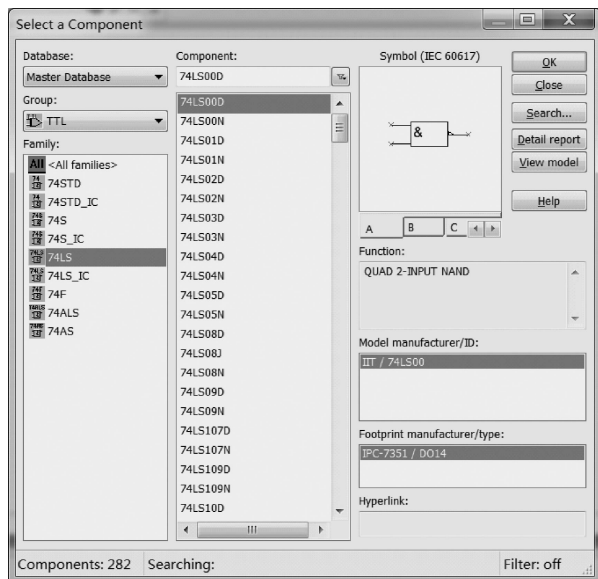


图 1-52 Main 工具栏取用元器件示例图

(2)从菜单取用。执行“Place→Place Component”菜单命令打开 Select a Component 对话框,以下操作方法同上。

3. 将元器件连接成电路

将电路需要的元器件放置在电路编辑窗口后,用鼠标就可以方便地将器件连接起来,即单击连线的起点并拖动至连线的终点。在 Multisim 中,连线的起点和终点不能悬空。

4. 电路仿真

单击 Simulation 工具栏的“仿真开关”按钮即可启动仿真。



任务实施与评价

1. 任务实施器材

- (1)计算机数台。
- (2)Multisim 13 软件。

2. 任务实施步骤

(1)运行 Multisim 13 软件,在 Component 工具栏中单击 Source 按钮,选择两个电压源 DC_POWER。分别双击选择的两个电压源,在弹出的对话框的 Label 选项卡的 RefDes 文本框中分别设置为 V1、V2, Value 选项卡的 Voltage 文本框中分别设置电压源的电压值为 4 V、12 V。

(2)在 Component 工具栏中单击 Basic 按钮,选择 3 个电阻 RESISTOR。分别双击选择的三个电阻,在弹出的对话框的 Label 选项卡的 RefDes 文本框中分别设置为 R1、R2、R3,

Value 选项卡的 Resistance 文本框中分别设置电阻的阻值为 $2\ \Omega$ 、 $6\ \Omega$ 、 $3\ \Omega$ 。

(3)在 Component 工具栏中单击 Indicator 按钮,选择三个电流表 AMMETER_H。分别双击选择的三个电流表,在弹出的对话框的 Label 选项卡的 RefDes 文本框中分别设置为 I1、I2、I3;继续在 Indicator 中选择三个电压表 VOLTMETER_H,分别双击选择的三个电压表,在弹出的对话框的 Label 选项卡的 RefDes 文本框中分别设置为 U1、U2、U3。

(4)用所选元器件按图 1-53 搭建仿真电路。

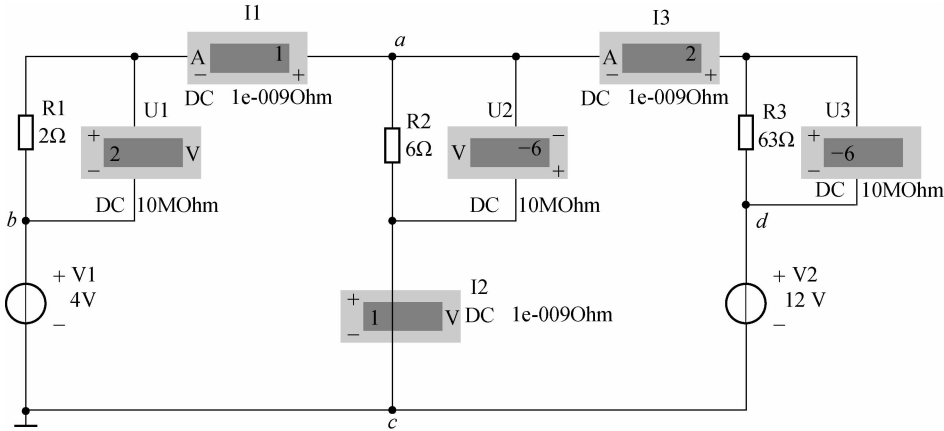


图 1-53 验证基尔霍夫定律的仿真电路

(5)启动仿真开关,将各电流表的读数填入表 1-8 中的仿真测量值栏内,并验证节点 a 电流的代数和 $\sum I=0$ 。

表 1-8 电流数据

电流/A	I_1	I_2	I_3	节点 a 电流的代数和 $\sum I=0?$
理论计算值				
仿真测量值				

(6)将各电压表的读数填入表 1-9 中的仿真测量值栏内,并验证回路 $abca$ 及 $adca$ 的电压代数和 $\sum U=0$ 。

表 1-9 电压数据

电压/V	U_1	U_2	U_3	V_1	V_2	回路 $abca$ $\sum U=0?$	回路 $adca$ $\sum U=0?$
理论计算值							
仿真测量值							

(7)按照步骤(1)、(2)、(3)的方法选取两个电阻、三个电压源和一个电压表,按照图 1-54 选择参数并进行电路的搭建。

(8)启动仿真开关,用电压表测量 ab 开路处的电压 U ,将测量值填入表 1-10,并与理论计算值比较,写出结论。

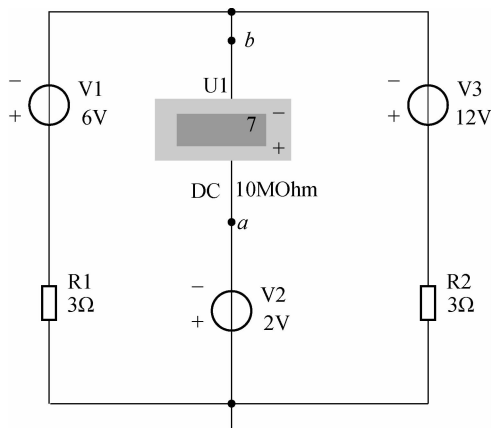


图 1-54 验证基尔霍夫电压定律扩展应用的电路

表 1-10 基尔霍夫电压定律扩展应用的验证数据

U 的理论计算值/V		验证结论:
U 的仿真测量值/V		

3. 注意事项

- (1) 读电压表、电流表的测量数据时,要将正负号一起读出,填入相应表中。
- (2) 分清电源正负极。
- (3) 运行完要按停止键。

4. 任务评价

任务评价如表 1-11 所示。

表 1-11 基尔霍夫定律及其验证任务评价

项目	正确选择元器件 (15 分)	搭建电路 (30 分)	正确读数 (15 分)	验证结论 (20 分)	规范操作 (10 分)	团队协作 (10 分)
评价						
总评	姓名	班级	专业			

任务四 复杂直流电路的分析与验证

任务分析

汽车电路的结构和功能多种多样,对其电路的分析就是在已知电路结构和元件参数的条件下,确定各部分电压与电流之间的关系。对于具有一定结构形式而且比较简单的电路,可以利用电阻的串并联进行分析。但对于较复杂的电路,必须寻求其他的分析方法。本任务介绍支路电流法、叠加定理、戴维南定理等复杂电路常用的分析方法。通过本任务的学

习,掌握支路电流法、叠加定理、戴维南定理和电源等效变换分析复杂电路的方法;学会根据电路结构和特点选择最佳求解电路的方法;掌握运用 Multisim 13 验证电路分析方法的技能。

相关知识

一、支路电流法

支路电流法是以支路电流为待求量,应用基尔霍夫电流定律列出节点电流方程,应用基尔霍夫电压定律列出回路电压方程,从而解出支路电流的方法。

现以图 1-55(a)所示的汽车发电机、蓄电池和负载并联的电路为例来说明支路电流法的应用。

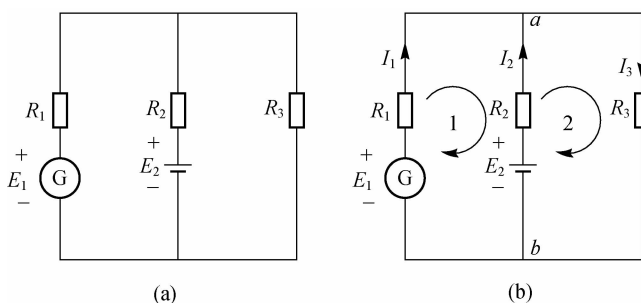


图 1-55 支路电流法示例电路

首先对电路进行分析。该电路共有三条支路、两个节点,需要列写三个方程才可以求解出三条支路电流。

(1)应用 KCL 列写独立节点的电流方程。该电路有两个节点,根据独立节点电流方程个数 $(n-1)$ 可知,本电路能够列写一个独立节点电流方程。将图 1-55(a)所示电路的三条支路标上电流的参考方向,如图 1-55(b)所示。选定节点 a 为独立节点,其 KCL 方程为

$$I_1 + I_2 = I_3$$

(2)应用 KVL 列写独立回路的电压方程。根据独立电压方程数的计算规则可知,本电路能够列写两个独立回路电压方程。选取图中的两个网孔,标上绕行方向,如图 1-55(b)所示,则 KVL 方程如下:

$$\text{回路 1} \quad R_1 I_1 - R_2 I_2 + E_2 - E_1 = 0$$

$$\text{回路 2} \quad R_2 I_2 + R_3 I_3 - E_2 = 0$$

联立以上三个方程可解得三条支路的电流 I_1 、 I_2 和 I_3 。

通过以上分析,可总结支路电流法分析电路的步骤如下:

- (1)标出各支路电流的参考方向及回路的绕行方向。
- (2)根据基尔霍夫电流定律列出各节点的电流方程。如果电路中有 n 个节点,则列出 $(n-1)$ 个独立节点电流方程。
- (3)根据基尔霍夫电压定律列出回路的电压方程。如果电路中有 m 个回路、 n 个节点,则列出 $m-(n-1)$ 个独立回路电压方程。通常选取电路中的网孔来列写回路电压方程。

(4)联立方程组,代入已知数据,求出各支路电流。根据需要还可以求出电路中各元件的电压及功率。

【例 1-7】 求如图 1-56(a)所示电路的各支路电流。

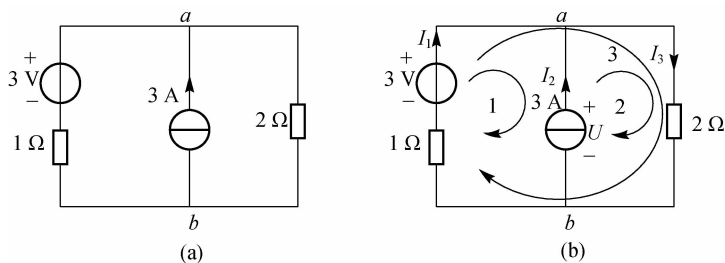


图 1-56 例 1-7 图

解 1 (1)标出各支路电流的参考方向及回路的绕行方向,如图 1-56(b)所示。

(2)根据 KCL 得节点 a 电流方程 $I_1 + I_2 = I_3$ 。

(3)假设电流源上的电压为 U ,根据 KVL 列写回路 1 和回路 2 的电压方程。

$$\text{回路 1} \quad I_1 - 3 + U = 0$$

$$\text{回路 2} \quad 2I_3 - U = 0$$

I_2 已知,联立 3 个方程,解得 $I_1 = -1 \text{ A}$, $I_3 = 2 \text{ A}$, $U = 4 \text{ V}$ 。

解 2 由于 I_2 已知,因此只有两条支路电流需要求解,故只要列写两个方程即可。

(1)根据 KCL 得节点 a 电流方程 $I_1 + 3 = I_3$ 。

(2)避开含有电流源的回路,根据 KVL 列写回路 3 的电压方程。

$$\text{回路 3} \quad I_1 - 3 + 2I_3 = 0$$

联立方程,解得 $I_1 = -1 \text{ A}$, $I_3 = 2 \text{ A}$,与解 1 相同。

此例说明对含有理想电流源的电路列写支路电流方程时,可以采取增设电流源两端电压的方法列写方程,或者是避开电流源所在支路列写方程。

【例 1-8】 图 1-57(a)为汽车传感器中广泛使用的惠斯通电桥电路,若测量发动机进气量的热线(或热膜)式空气流量计或测量发动机进气压力的进气压力传感器等都是根据惠斯通电桥原理制成的。试运用支路电流法求检流计中流过的电流 I_G ,并分析电桥平衡的条件。

解 (1)标出惠斯通电桥各支路电流的参考方向及回路的绕行方向,如图 1-57(b)所示。

(2)根据 KCL 列写节点 b 、 d 、 c 的电流方程。

$$\text{节点 } b \quad I_1 = I_G + I_2$$

$$\text{节点 } d \quad I_2 + I_4 = I$$

$$\text{节点 } c \quad I_3 + I_G = I_4$$

(3)根据 KVL 列写回路 1、回路 2 和回路 3 的电压方程。

$$\text{回路 1} \quad R_1 I_1 + R_G I_G - R_3 I_3 = 0$$

$$\text{回路 2} \quad R_2 I_2 - R_4 I_4 - R_G I_G = 0$$

$$\text{回路 3} \quad R_3 I_3 + R_4 I_4 - U_S = 0$$

联立上述六个方程,解得

$$I_G = \frac{U_S (R_2 R_3 - R_1 R_4)}{R_G (R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}$$

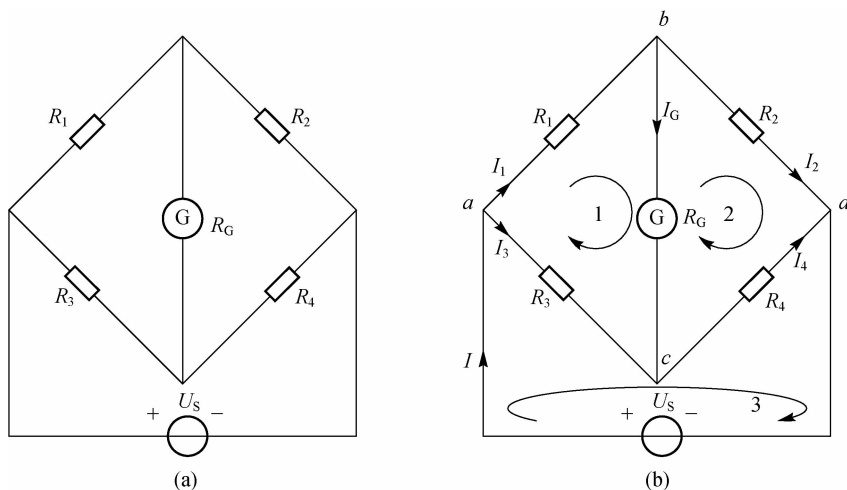


图 1-57 例 1-8 图

由解得的 I_G 可知,当 $R_2 R_3 = R_1 R_4$ (或对臂电阻乘积相等) 时,惠斯通电桥平衡。当电桥平衡时, $I_G = 0$, $U_{bc} = 0$, 此时 bc 间可视为短路、开路或接入任意阻值电阻,都不会影响整个电路的分析结果。因此,以后在分析桥式电路时,应首先判断其是否满足电桥平衡的条件。若满足,电路的分析计算就简单了。

二、叠加定理

叠加定理是线性电路的一个重要定理。不论是进行电路分析还是推导电路中的其他电路定理,它都起着十分重要的作用。叠加定理可表述为:在线性电路中,如果有多个独立电源同时作用,在任何一条支路产生的电压或电流,等于电路中各个独立电源单独作用时,在该支路所产生的电压或电流的代数和。

当某独立源单独作用于电路时,其他独立源应该除去,称为“零值处理”。即对电压源来说,令其电源电压为零,相当于“短路”;对电流源来说,令其电源电流为零,相当于“开路”。

使用叠加定理需注意以下几点:

- (1) 叠加定理只适用于线性电路。
- (2) 叠加定理只能叠加电路中的电流或电压,不能对能量和功率进行叠加。
- (3) 不作用的电压源短接,电流源断开,但电源的内阻都要保留在原处。

现以图 1-58(a) 所示电路中电流 I 的求解为例来说明叠加定理的应用。

图 1-58(a) 所示电路含有两个独立电源,先由电压源单独作用,电流源开路, R_1 保留,画出分电路,标上分电路中电流 I' 的参考方向[见图 1-58(b)], 可得电压源单独作用时的 I' 为

$$I' = \frac{U_s}{R_1 + R_3}$$

再由电流源单独作用,电压源短路,画出分电路,标上分电路中电流 I'' 的参考方向,如图 1-58(c) 所示。图 1-58(c) 中与电压源并联的电阻 R_2 因为电压源的短路也被短路掉了。电流源单独作用时的 I'' 利用并联电阻的分流公式计算为

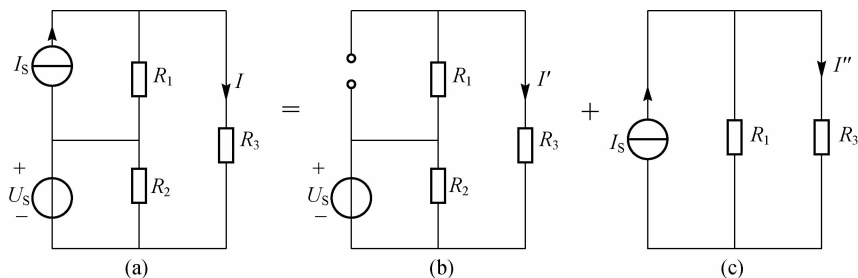


图 1-58 叠加定理示例电路

$$I'' = \frac{R_1 I_s}{R_1 + R_3}$$

叠加后得到 I 为

$$I = I' + I'' = \frac{U_s}{R_1 + R_3} + \frac{R_1 I_s}{R_1 + R_3}$$

通过以上分析,可总结叠加定理的解题步骤如下:

(1)画出各独立电源单独作用时的分电路图,标出分电路图中各支路电流或电压的参考方向。不作用的独立电压源视为短路,不作用的独立电流源视为开路。

(2)分别求出各分电路图中的各支路电流或电压。

(3)对各分电路图中同一支路电流或电压进行叠加求代数,参考方向与原图中参考方向相同的取正号,反之取负号。

【例 1-9】 试用叠加定理求解如图 1-59(a)所示电路中的电流 I 。

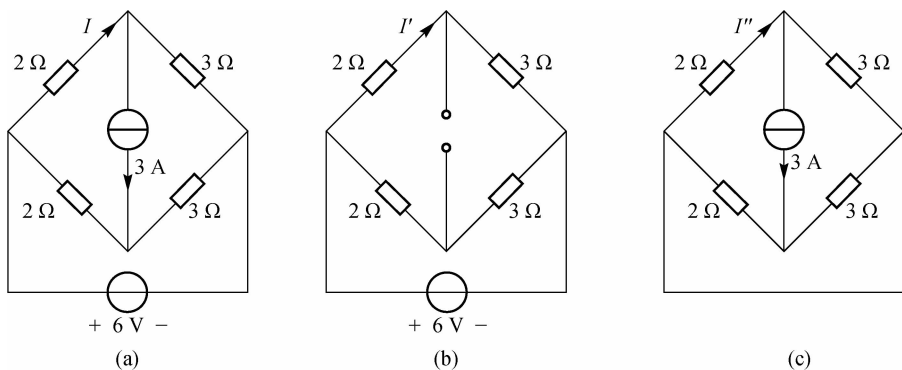


图 1-59 例 1-9 图

解 (1)画出 6 V 电压源和 3 A 电流源单独作用时的分电路图,如图 1-59(b)、(c)所示,在图中标出分电流的参考方向。

(2)计算 6 V 电压源单独作用时的 I' ,有

$$I' = \frac{6}{2+3} = 1.2 \text{ A}$$

(3)计算 3 A 电流源单独作用时的 I'' ,有

$$I'' = \frac{3 \times 3}{2+3} = 1.8 \text{ A}$$

(4)叠加得 I 为

$$I = I' + I'' = 1.2 + 1.8 = 3 \text{ A}$$

三、戴维南定理

在电路的分析和计算中,有时只需要计算其中某一条支路的电流或电压,若还是用支路电流法则显得烦琐,很不方便。此时,可将待求支路和其余电路分开为两个二端网络。其中一个为假想的负载,另一个相当于电源,把复杂的电路化为简单的电路进行求解。

戴维南定理是一个有关二端网络的定理。若一个电路只通过两个输出端与外电路相连,则该电路称为二端网络。如果二端网络内有电源存在,则称为有源二端网络[见图 1-60(a)],有源二端网络可以等效为一个电源;若二端网络内没有电源,则称为无源二端网络[见图 1-60(b)],无源二端网络可以等效为一个电阻。

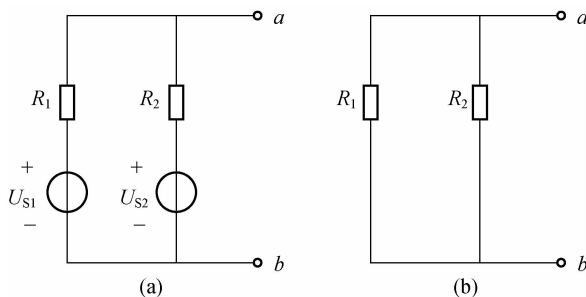


图 1-60 二端网络

戴维南定理的内容为:任何一个线性有源二端网络都可以用一条含源支路即一个电压源和电阻的串联组合来等效代替,其中电阻等于把此有源二端网络化成无源二端网络(电压源短路,电流源开路)时从两个端子看进去的等效电阻,电压源的电压等于有源二端网络两个端子间的开路电压。戴维南定理图示如图 1-61 所示。

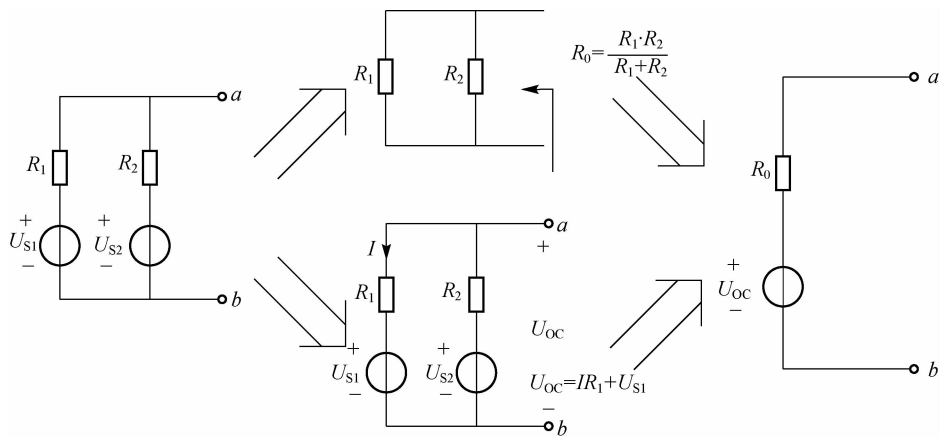


图 1-61 戴维南定理图示

【例 1-10】 试用戴维南定理求解如图 1-62(a)所示电路中的电流 I 。

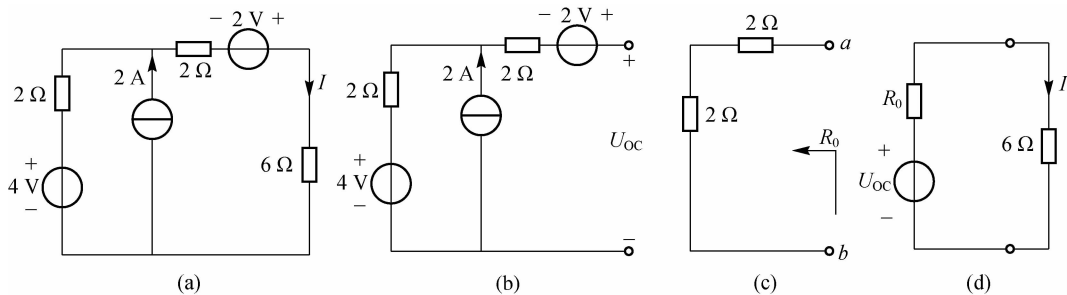


图 1-62 例 1-10 图

解 (1) 将待求支路断开[见图 1-62(b)], 求有源二端网络的开路电压。

$$U_{OC} = 2 + 2 \times 2 + 4 = 10 \text{ V}$$

(2) 将如图 1-62(b) 所示电路中电压源短路、电流源开路, 如图 1-62(c) 所示。求从 a 、 b 两端看进去的等效电阻 R_0 。

$$R_0 = 2 + 2 = 4 \text{ } \Omega$$

(3) 画出戴维南等效电路, 接入待求支路[见图 1-62(d)], 计算电流 I 。

$$I = \frac{U_{OC}}{R_0 + 6} = \frac{10}{4 + 6} = 1 \text{ A}$$

通过上例分析, 可总结戴维南定理的解题步骤如下:

(1) 断开待求支路, 求有源二端网络的开路电压 U_{OC} 。

(2) 将有源二端网络变为无源二端网络求等效电阻。

(3) 根据戴维南定理画出等效电压源电路, 接入待求支路, 计算待求量。

【例 1-11】 试用戴维南定理理解如图 1-63(a) 所示惠斯通电桥中检流计的电流 I 。

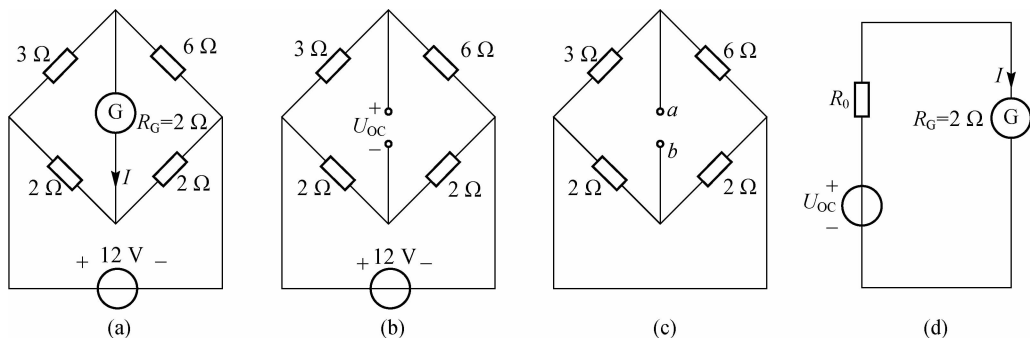


图 1-63 例 1-11 图

解 (1) 将检流计支路断开[见图 1-63(b)], 求有源二端网络的开路电压。

$$U_{OC} = 6 \times \frac{12}{3+6} - 2 \times \frac{12}{2+2} = 2 \text{ V}$$

(2) 将图 1-63(b) 所示电路中电压源短路[见图 1-63(c)], 求从 a 、 b 两端看进去的等效电阻 R_0 。

$$R_0 = 3 // 6 + 2 // 2 = 3 \text{ } \Omega$$

(3) 画出戴维南等效电路, 接入检流计支路[见图 1-63(d)], 计算电流 I 。

$$I = \frac{U_{oc}}{R_0 + R_G} = \frac{2}{3+2} = 0.4 \text{ A}$$

四、电源等效变换法

电压源与电流源的等效变换非常简便,它可以使一些复杂电路的计算简化,故在工程上常用电源等效变换法进行电路分析,这是一种很实用的电路变换方法。

n 个电压源串联,其等效电压源的电压为 n 个电压源电压的代数和,内阻为 n 个电压源内阻的串联,如图 1-64 所示。

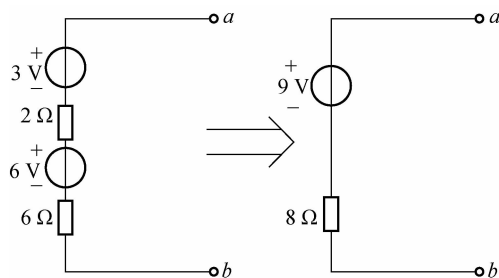


图 1-64 电压源串联

n 个电流源并联,其等效电流源的电流为 n 个电流源电流的代数和,内阻为 n 个电流源内阻的并联,如图 1-65 所示。

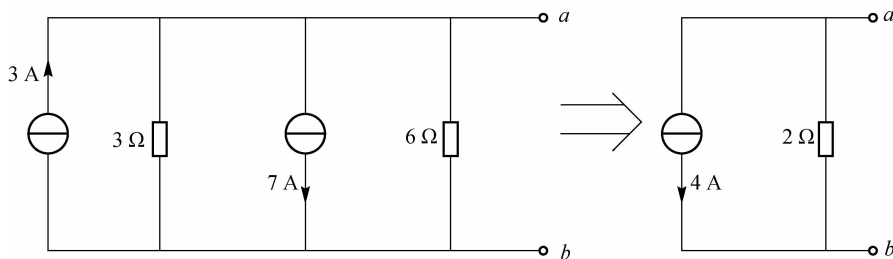


图 1-65 电流源并联

利用电源等效变换法分析复杂电路时,根据简化需要可选择电压源等效变换为电流源,或电流源等效变换为电压源,或者是进行多个串联电压源合并变换、多个并联电流源合并变换。进行变换时需注意极性必须一致。

【例 1-12】 试用电源等效变换法求解如图 1-66(a)所示的电流 I 。

解 (1) 将电压源变换为电流源,如图 1-66(b)所示。等效的电流源电流、内阻为

$$I_s = \frac{3}{1} = 3 \text{ A}$$

$$R_0 = 1 \Omega$$

(2) 将图 1-66(b)中的两并联电流源合并,如图 1-66(c)所示。电流源总电流、总内阻为

$$I_{s\text{总}} = 3 + 3 = 6 \text{ A}$$

$$R_{0\text{总}} = 1 \Omega$$

(3) 在图 1-66(c)中利用并联电阻分流公式得

$$I = \frac{1}{1+2} \times 6 = 2 \text{ A}$$

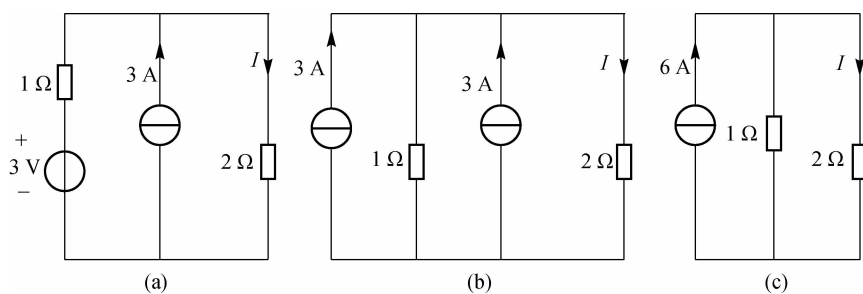


图 1-66 例 1-12 图

【例 1-13】 试用电源等效变换法求解图 1-67(a)所示的电流 I 。

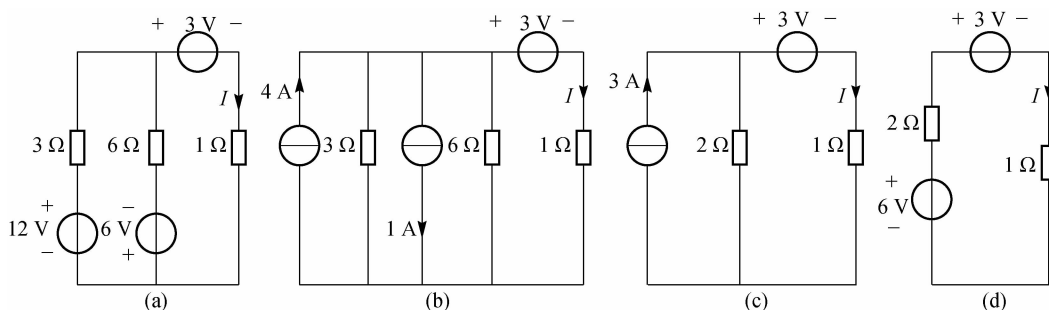


图 1-67 例 1-13 图

解 (1) 将 12 V 与 6 V 电压源变换为电流源, 如图 1-67(b)所示。等效的电流源电流、内阻为

$$I_{S1} = \frac{12}{3} = 4 \text{ A}$$

$$I_{S2} = \frac{6}{6} = 1 \text{ A}$$

$$R_{01} = 3 \Omega$$

$$R_{02} = 6 \Omega$$

(2) 将图 1-67(b)中的两并联电流源合并, 如图 1-67(c)所示。电流源总电流、总内阻为

$$I_{S\text{总}} = 4 - 1 = 3 \text{ A}$$

$$R_{0\text{总}} = 3 // 6 = 2 \Omega$$

(3) 将图 1-67(c)中电流源变换为电压源, 如图 1-67(d)所示。等效的电压源电压、内阻为

$$U_S = 2 \times 3 = 6 \text{ V}$$

$$R_0 = 2 \Omega$$

由图 1-67(d)得

$$I = \frac{6-3}{2+1} = 1 \text{ A}$$

任务实施与评价

1. 任务实施器材

- (1) 计算机数台。
- (2) Multisim 13 软件。

2. 任务实施步骤

- (1) 复习叠加定理的内容和使用注意事项。
- (2) 运行 Multisim 13 软件, 在 Component 工具栏中单击 Source 按钮, 选择电压源 DC_POWER。双击选择的电压源, 在弹出的对话框的 Label 选项卡的 RefDes 文本框中设置为 V1, Value 选项卡的 Voltage 文本框中设置电压源的电压值为 18 V。
- (3) 在 Component 工具栏中单击 Source 按钮, 选择电流源 DC_CURRENT。双击选择的电流源, 在弹出的对话框的 Value 选项卡的 Current 文本框中设置电流源的电流值为 9 A。
- (4) 在 Component 工具栏中单击 Basic 按钮, 选择四个电阻 RESISTOR。分别双击选择的四个电阻, 在弹出的对话框的 Value 选项卡的 Resistance 文本框中分别设置电阻的阻值为 $4\ \Omega$ 、 $3\ \Omega$ 、 $2\ \Omega$ 、 $4\ \Omega$ 。
- (5) 在 Component 工具栏中单击 Indicator 按钮, 选择一个电压表 VOLTMETER_H 和一个电流表 AMMETER_H。
- (6) 将所选元器件按照如图 1-68 所示的电路搭建。

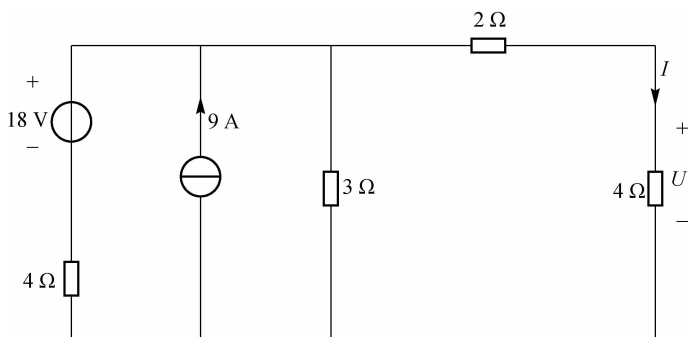


图 1-68 叠加定理验证电路

- (7) 将电流源开路, 测量电压源单独起作用时待求电阻上的电压 U 和电流 I , 如图 1-69 所示。启动仿真开关, 将电压表和电流表读数填入表 1-12。
- (8) 将电压源短路, 测量电流源单独起作用时待求电阻上的电压 U 和电流 I , 如图 1-70 所示。启动仿真开关, 将电压表和电流表读数填入表 1-12。
- (9) 测量两个电源共同作用时待求电阻上的电压 U 和电流 I , 如图 1-71 所示。启动仿真开关, 将电压表和电流表读数填入表 1-12。
- (10) 根据表 1-12 的测量数据, 计算待求电阻上的功率, 并根据测量和计算数据验证叠加定理, 将验证结论填入表 1-12。

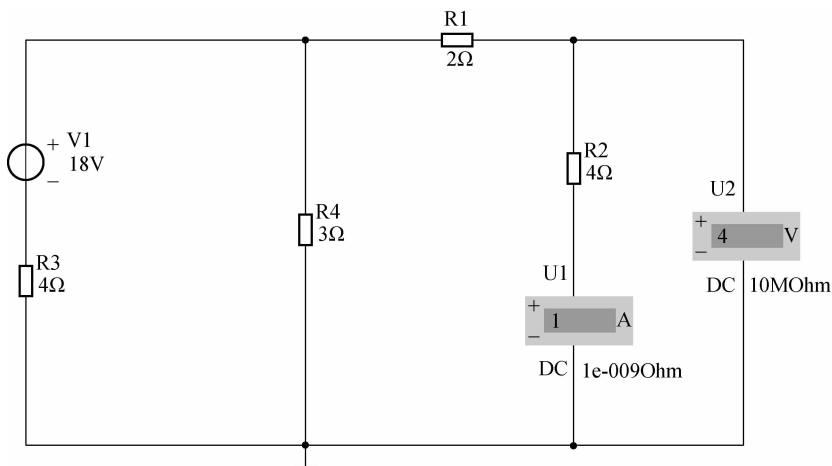


图 1-69 电压源单独起作用仿真电路

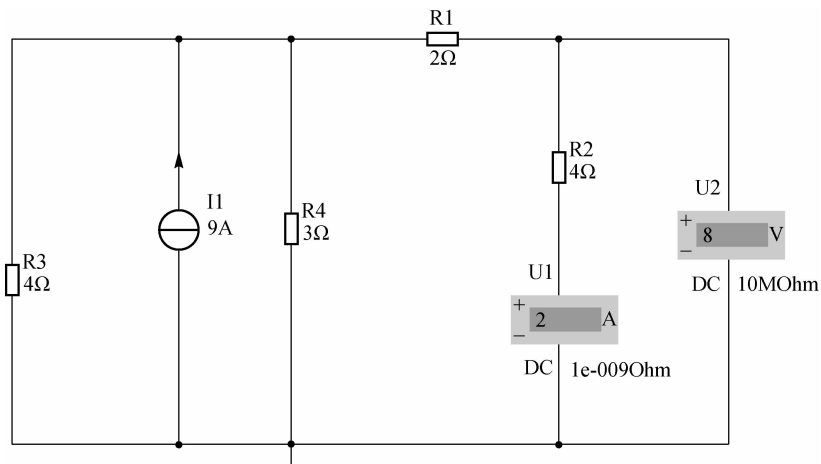


图 1-70 电流源单独起作用仿真电路

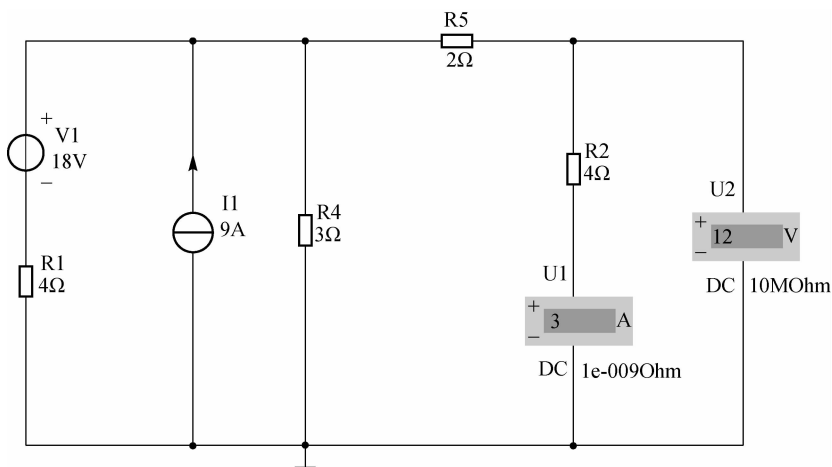


图 1-71 两个电源共同作用仿真电路

表 1-12 叠加定理验证数据

项目数据	U/V	I/A	P/W	验证结论:
电压源单独起作用				
电流源单独起作用				
两个电源共同作用				

3. 注意事项

- (1) 电路必须接地。
- (2) 分清电源正负极。
- (3) 运行完要按停止键。

4. 任务评价

任务评价如表 1-13 所示。

表 1-13 复杂直流电路的分析与验证任务评价

项目	正确选择元器件 (15 分)		搭建电路 (30 分)		正确读数 (15 分)	验证结论 (20 分)	规范操作 (10 分)	团队协作 (10 分)
评价								
总评		姓名		班级		专业		



- 1-1 简述电路的组成及各部分的功能。
- 1-2 电压与电位的区别和联系是什么？
- 1-3 什么是关联参考方向？什么是非关联参考方向？
- 1-4 如何使用万用表测量直流电压、电流？
- 1-5 万用表使用的注意事项有哪些？
- 1-6 简述电容元件和电感元件的特点。
- 1-7 分别计算图 1-72(a)、(b)中的电流 I 及 A 、 B 之间的电压。

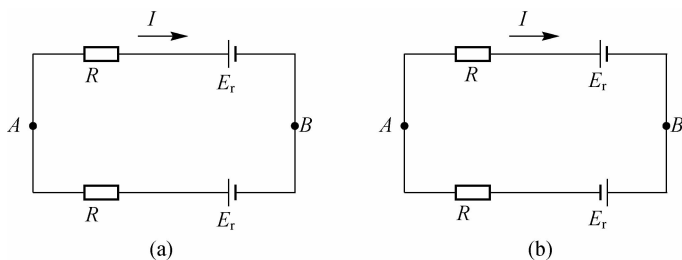


图 1-72 题 1-7 图

- 1-8 在如图 1-73 所示的电路中,已知 $U_1=20\text{ V}$, $I_1=1\text{ A}$, $U_2=-15\text{ V}$, $I_4=-3\text{ A}$, $U_4=5\text{ V}$, $I_3=-4\text{ A}$,试求图中各元件的功率,并说明哪些元件是吸收功率,哪些元件是放出功率。

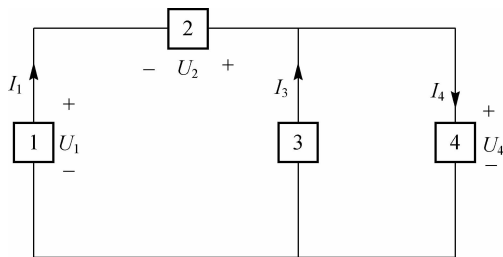


图 1-73 题 1-8 图

1-9 分别计算图 1-74 中的等效电阻 R_{ab} 。

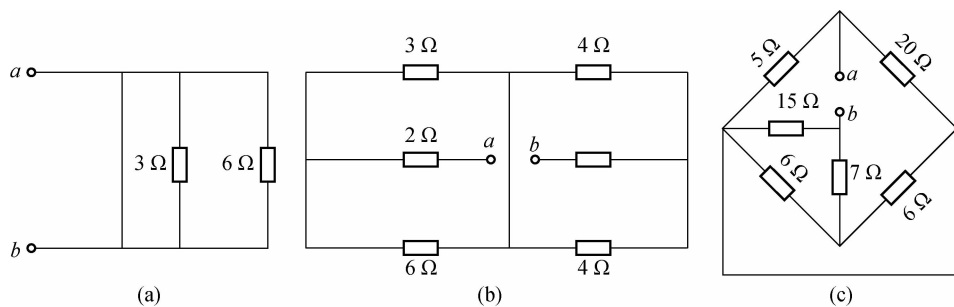


图 1-74 题 1-9 图

1-10 在如图 1-75 所示电路中, 已知 $E_1=2\text{ V}$, $E_2=4\text{ V}$, $E_3=6\text{ V}$, $R_1=6\ \Omega$, $R_2=4\ \Omega$, $R_3=2\ \Omega$, 若电源内阻忽略不计, 求各支路电流。

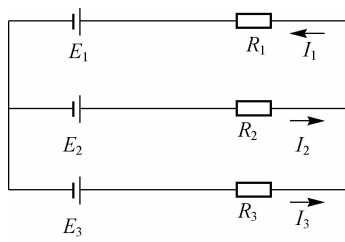


图 1-75 题 1-10 图

1-11 利用基尔霍夫电流定律计算图 1-76 中的电流 I 。

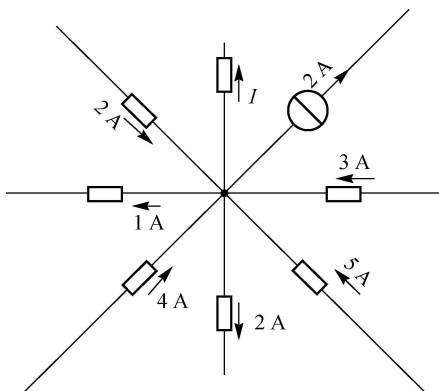


图 1-76 题 1-11 图

1-12 在如图 1-77 所示电路中, U_{ab} 和 I 各等于多少?

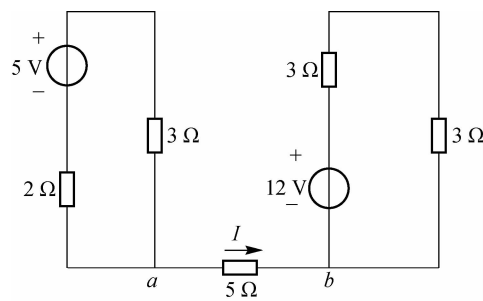


图 1-77 题 1-12 图

1-13 试利用叠加定理计算如图 1-78 所示电路中的电压 U 。

1-14 在如图 1-79 所示电路中, 利用叠加定理计算未知电流 I_1 和 I_2 。

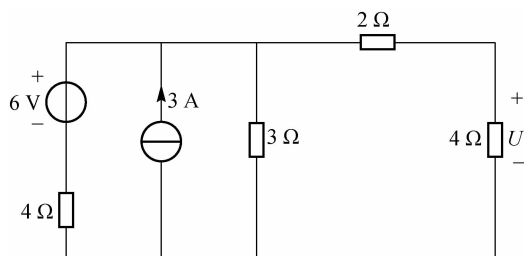


图 1-78 题 1-13 图

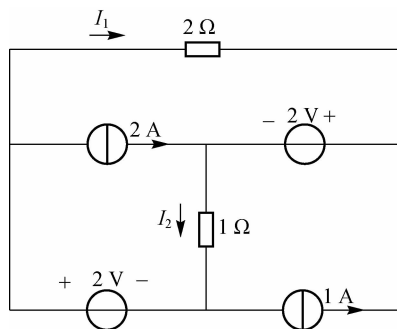


图 1-79 题 1-14 图

1-15 利用叠加定理计算如图 1-80 所示电路中 U_o 。

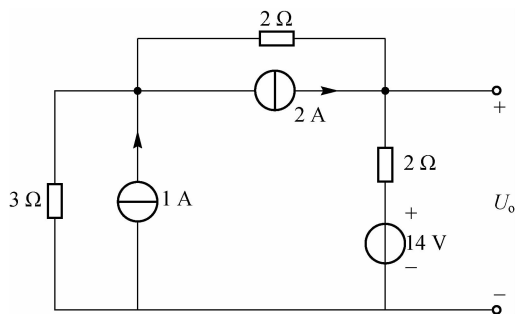


图 1-80 题 1-15 图

1-16 在如图 1-81 所示电路中, 用戴维南定理求电压 U_L 。

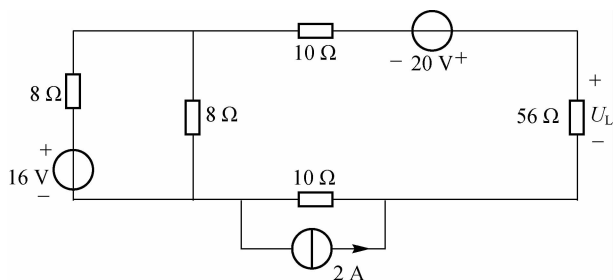


图 1-81 题 1-16 图

1-17 在如图 1-82 所示电路中,用戴维南定理求电流 I_L 。

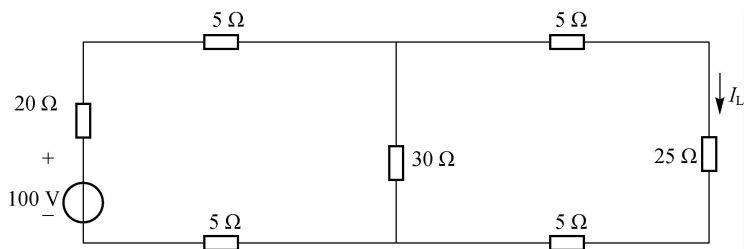


图 1-82 题 1-17 图

1-18 试用戴维南定理求如图 1-83 所示电路中的电流 I 。

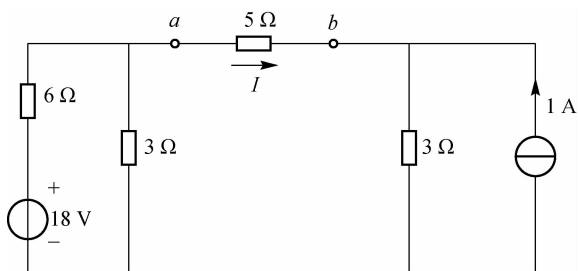


图 1-83 题 1-18 图

1-19 利用电源等效变换法计算如图 1-84 所示电路中的电流 I 。

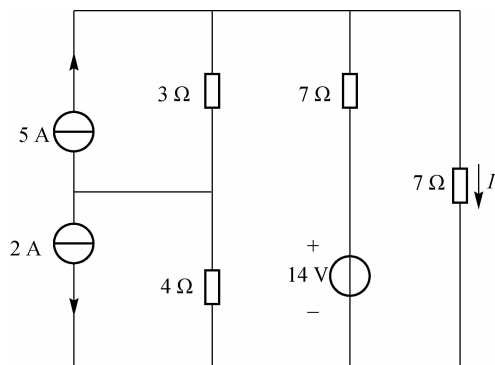


图 1-84 题 1-19 图

1-20 利用电源等效变换法计算如图 1-85 所示电路中的电压 U 。

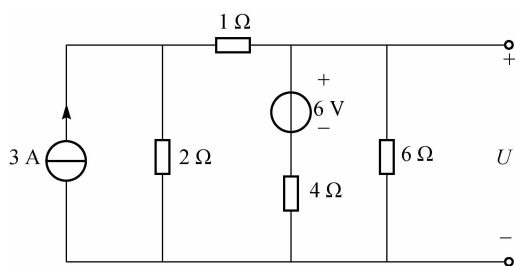


图 1-85 题 1-20 图



项目二

正弦交流电路



内容提要

交流电路是电工学的重点内容之一,本项目主要介绍正弦交流电的基本概念和正弦交流电路的基本分析方法,正弦交流电路功率因数的提高及谐振现象,三相交流电路的工作原理与分析方法,以及安全用电等知识;引入交流电路参数的测量、日光灯电路及功率因数的提高、三相交流电路电量的测量三个学习任务。

任务一 交流电路参数的测量



任务分析

大小和方向随时间做周期性变化的电压或电流称为交流电。若交流电的大小与方向均随时间按正弦规律变化,称为正弦交流电。另外还有三角波、梯形波等。正弦交流电在生活、工农业生产中得到广泛的应用,汽车发电机输出的电能为正弦交流电。在本任务中应准确理解正弦交流电的三要素及其表达方法;掌握单一元件交流电路中电压与电流的关系及功率的计算;能够正确使用汽车示波器。



相关知识

一、正弦交流电的三要素

正弦交流电的大小和方向均随时间不断变化,每个瞬间电压(电动势)或电流的数值都不相同,如图 2-1 所示。在分析和计算正弦交流电路时,参考方向为其正

半周的实际方向。

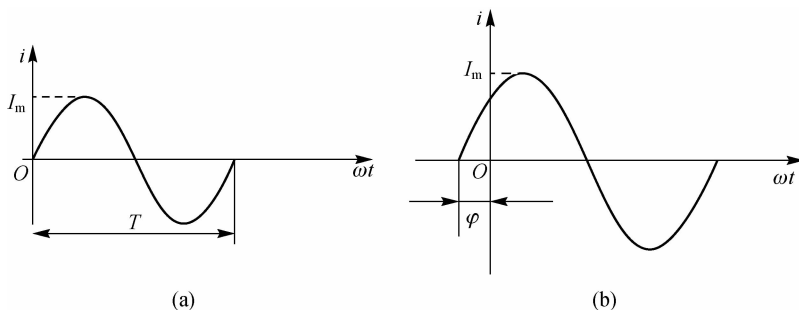


图 2-1 正弦交流电的波形
(a)初相位为零 (b)初相位为 φ

正弦交流电的一般数学表达式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2-1)$$

式中, i 为瞬时值; I_m 为振幅; ω 为角频率; φ 为初相位。

正弦量的大小、变化快慢和初始值分别取决于以上三个量,所以通常把振幅、角频率和初相位称为正弦量的三要素。

1. 周期、频率、角频率

正弦交流电完整变化一周所需的时间称为周期,用 T 表示,单位为秒(s),如图 2-1 所示。

正弦交流电在单位时间内变化的周数称为频率,用 f 表示,单位为赫兹(Hz)。周期与频率互为倒数,即

$$T = \frac{1}{f}$$

我国和大多数国家都采用 50 Hz 作为电力标准频率,简称工频。美国、日本等国家采用 60 Hz 的频率。中频加热炉的频率为 500~8 000 Hz,高频加热炉的频率为 200~300 kHz。无线电通信频率为 30 kHz~ 3×10^4 MHz。

角频率(ω)是指正弦交流电在单位时间内变化的弧度数,单位是弧度/秒(rad/s)。正弦交流电一周期内经历 2π 弧度。角频率与频率、周期之间的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2-2)$$

周期、频率和角频率三个量都反映了正弦交流电变化的快慢。实际应用中,频率用得比较广,即频率越高,正弦交流电变化的速度越快。

2. 瞬时值、振幅、有效值

瞬时值是指正弦交流电在任一瞬间的值,用小写字母表示,如 i 、 u 、 e ,分别表示电流、电压、电动势的瞬时值。瞬时值中的最大值称为振幅,即正弦交流电在一个周期内所能达到的最大数值,又称峰值,用大写字母加下标 m 来表示,如 U_m 、 I_m 。

正弦交流电的瞬时值是随时间变化的,振幅在一个周期内只出现两次,两者均不能表示正弦量的大小,计量时通常用有效值来表示。有效值是根据电流的热效应来定义的,正弦交

流电流 i 和直流电流 I 分别通过两个同样大小的电阻 R , 如果经过一个交流周期的时间, 两个电阻上产生的热量相等, 则把这个直流电流 I 的值定义为该正弦交流电流 i 的有效值, 如图 2-2 所示。简单地说, 正弦交流电的有效值等于在相同时间内产生相同热量的直流电量值。有效值用大写字母表示, 如 I 、 U 、 E 。

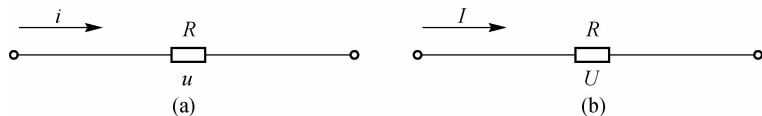


图 2-2 正弦交流电流的有效值

(a) 交流电路 (b) 直流电路

图 2-2 中两个电阻消耗的电能相等, 则有

$$W_1 = \int_0^T Ri^2 dt, W_1 = RI^2 T$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

式中, I 为正弦交流电流 i 的有效值, 又称方均根值。

对于正弦交流电 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ (令 $\varphi = 0$), 则

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{I_m^2}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_m = \sqrt{2} I \quad (2-3)$$

同理, 正弦交流电压的有效值与最大值的关系为

$$U_m = \sqrt{2} U \quad (2-4)$$

由上述计算可知, 正弦交流电量的振幅(最大值)为有效值的 $\sqrt{2}$ 倍, 通常交流电的大小都是指有效值, 在测量交流电路时仪表所测的数值为交流电的有效值, 各种交流电气设备上的额定电压和额定电流也都指的是有效值, 但各种电气设备的绝缘耐压值为最大值。

3. 相位、初相、相位差

式(2-1)中的 $(\omega t + \varphi)$ 是反映正弦交流电变化过程的电角度, 根据 $(\omega t + \varphi)$ 可确定任一时刻正弦交流电的瞬时值, 这个随时间变化的电角度称为正弦交流电的相位角, 简称相位。当 $t=0$ 时, $\omega t + \varphi = \varphi$, 称为初相, 是正弦交流电起始时刻的状态。

相位差为两个同频率正弦量的相位之差, 其值等于它们的初相之差。设任意两个同频率的正弦量 u 、 i , 其表达式为

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$$

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

它们之间的相位差为

$$\varphi = (\omega t + \varphi_u) - (\omega t + \varphi_i) = \varphi_u - \varphi_i$$

若 $\varphi > 0$, 表明电压 u 超前电流 i 一个角度 φ , 或电流 i 滞后电压 u 一个角度 φ , 如图 2-3(a) 所示。

若 $\varphi = 0$, 表明电压 u 和电流 i 同相位, 如图 2-3(b) 所示。

若 $\varphi = \frac{\pi}{2}$, 表明电压 u 和电流 i 正交, 如图 2-3(c) 所示。

若 $\varphi = \pi$, 表明电压 u 和电流 i 反相, 如图 2-3(d) 所示。

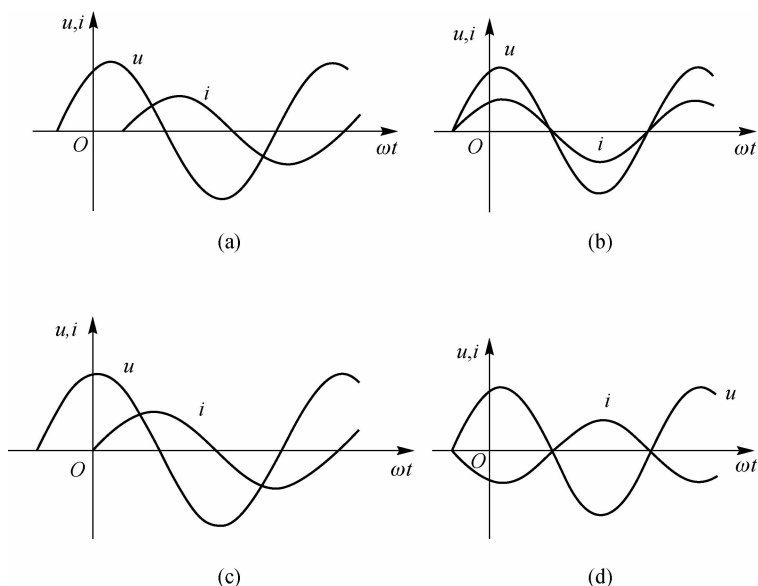


图 2-3 正弦交流电的相位差

二、正弦量的相量表示法

上述内容中, 正弦量是采用三角函数式和波形图(曲线)的表示方法, 而在分析交流电路过程中, 经常需要同频率正弦量的加、减等运算, 用这两种方法进行分析计算是非常烦琐的。为简化计算, 可采用相量来表示对应的正弦量, 称为相量表示法。相量表示法的基础是复数。

1. 复数及其运算

设 A 为一复数, 其可用多种形式来表示, 用代数式表示为

$$A = a + jb$$

式中, a 为实部; b 为虚部; $j = \sqrt{-1}$ 为虚数单位(电工中为区别于电流 i 的符号, 虚数单位常用 j 表示)。

复数也可以用复平面上的有向线段来表示, 如图 2-4 所示。图中横轴表示实轴, 纵轴表示虚轴。复数 A 的长度记为 $|A|$, 称为复数 A 的模。有向线段 OA 与实轴的夹角称为复数 A 的辐角 φ 。

复数 A 用三角函数式表示, 根据图 2-4 可得

$$A = r(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (2-5)$$

欧拉公式为

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi \quad (2-6)$$

复数 A 的三角函数式变换为指数形式, 即

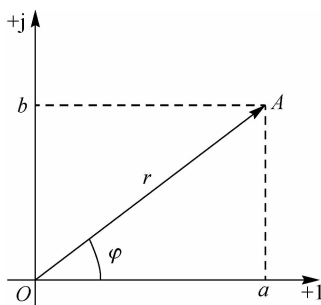


图 2-4 复数的相量表示

$$A = r e^{j\varphi} \quad (2-7)$$

通常也把复数写成极坐标形式,即

$$A = r \angle \varphi \quad (2-8)$$

上述四种表达形式可以相互转换,其 r 和 φ 与 a 和 b 之间的关系为

$$r = \sqrt{a^2 + b^2} \quad a = r \cos \varphi$$

$$\tan \varphi = \frac{b}{a} \quad b = r \sin \varphi$$

一般情况下,复数的加减运算采用代数式进行,即两复数实部相加减,虚部相加减。设复数为

$$A_1 = a_1 + j b_1, A_2 = a_2 + j b_2$$

则有

$$A_1 \pm A_2 = (a_1 \pm a_2) + j(b_1 \pm b_2) \quad (2-9)$$

复数的加减运算也可以按平行四边形法在复平面上作图完成,如图 2-5 所示。

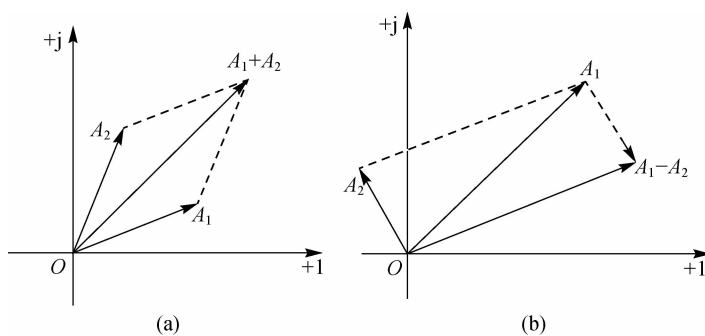


图 2-5 复数的加减法运算

复数的乘除常用指数形式或极坐标形式进行。设复数为

$$A_1 = a_1 + j b_1 = r_1 e^{j\varphi_1} = r_1 \angle \varphi_1$$

$$A_2 = a_2 + j b_2 = r_2 e^{j\varphi_2} = r_2 \angle \varphi_2$$

则有

$$A_1 \cdot A_2 = r_1 e^{j\varphi_1} \cdot r_2 e^{j\varphi_2} = r_1 r_2 e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} \quad (2-10)$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1 e^{j\varphi_1}}{r_2 e^{j\varphi_2}} = \frac{r_1}{r_2} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (2-11)$$

或

$$A_1 \cdot A_2 = r_1 \angle \varphi_1 \cdot r_2 \angle \varphi_2 = r_1 r_2 \angle (\varphi_1 + \varphi_2) \quad (2-12)$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1 \angle \varphi_1}{r_2 \angle \varphi_2} = \frac{r_1}{r_2} \angle (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2-13)$$

复数的乘除运算,其模相乘除,辐角相加减。

2. 正弦量的相量表示法

正弦量除了用表达式及波形图表示外,还可用一个与之对应的复数表示,即用一个旋转且具有方向的线段来表示,如图 2-6 所示。这个表示正弦量的复数称为相量。相量用大写字母上加一点来表示,用于与一般复数的区别,如 $\dot{I}_m$ 、 $\dot{U}_m$ 分别表示电流、电压的最大值相量或幅值相量; $\dot{I}$ 、 $\dot{U}$ 分别表示电流、电压的有效值相量。

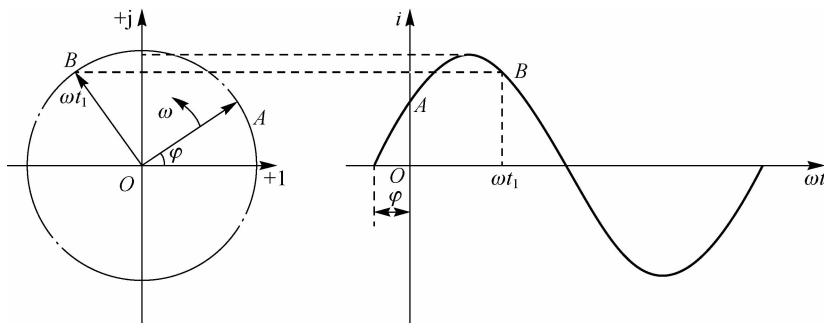


图 2-6 正弦量的相量表示法

在如图 2-6 所示的直角坐标系中,有向线段 OA 的长度等于正弦量的幅值 I_m ,初始位置与横轴正方向的夹角等于正弦量的初相位 φ ,并以正弦量的角频率 ω 做逆时针方向旋转。图中,设正弦交流电流 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$,其对应的最大值相量表示为 $\dot{I}_m = I_m e^{j\varphi} = I_m \angle \varphi$,有效值相量表示为 $\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \angle \varphi$ 。通常应用中,多采用有效值相量表示,它包含了最大值、相位的信息。

相量图是指几个同频率的正弦量在复平面上画出其相量对应的图形。利用相量图分析交流电路,能够清晰地反映出各正弦量的大小和相互间的相位关系。如 $u_1 = \sqrt{2}U_1(\omega t + \varphi_1)$, $u_2 = \sqrt{2}U_2(\omega t + \varphi_2)$,其相量如图 2-7 所示。

注意:①相量只是表示正弦量,而不等于正弦量,二者不能用等号表示相等关系,可用双箭头符号“ $\leftrightarrow$ ”说明。

②只有正弦量才能用相量表示,也只有同频率的正弦量才能画在同一张相量图上。

【例 2-1】 已知正弦交流电压 $u = 220\sqrt{2}\sin(314t + 60^\circ)$ V,求最大值、有效值、角频率、频率、周期与初相位,并写出其相量表达式。

解 最大值为 $U_m = 220\sqrt{2} = 311$ V。

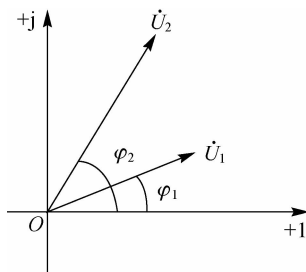


图 2-7 电压相量图

有效值为 $U=220 \text{ V}$ 。

角频率为 $\omega=314 \text{ rad/s}$ 。

频率为 $f=\frac{\omega}{2\pi}=50 \text{ Hz}$ 。

周期为 $T=\frac{1}{f}=0.02 \text{ s}$ 。

初相位为 $\varphi=60^\circ$ 。

电压相量为 $\dot{U}=\frac{220\sqrt{2}}{\sqrt{2}}e^{j60^\circ}=220e^{j60^\circ}=220\angle 60^\circ \text{ V}$ 。

【例 2-2】 已知 $u_1=8\sqrt{2}\sin(\omega t+60^\circ) \text{ V}$, $u_2=6\sqrt{2}\sin(\omega t-30^\circ) \text{ V}$, 求 $u=u_1+u_2$ 。

解 用有效值相量 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 来表示 u_1 、 u_2 。

$$\dot{U}_1=8\angle 60^\circ=(4+j6.9) \text{ V}$$

$$\dot{U}_2=6\angle -30^\circ=(5.2-j3) \text{ V}$$

用相量法求电压的有效值相量。

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = (4+j6.9) + (5.2-j3) \\ &= 9.2+j3.9 \\ &= 10\angle 23^\circ \text{ V}\end{aligned}$$

转换为瞬时值表示, 即

$$u=u_1+u_2=10\sqrt{2}\sin(\omega t+23^\circ) \text{ V}$$

相量图如图 2-8 所示。

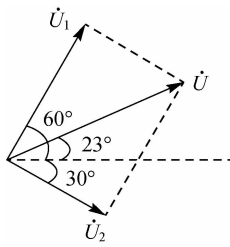


图 2-8 例 2-2 相量图

三、单一元件的交流电路

1. 纯电阻电路

纯电阻电路是指交流电路中只有电阻性负载,如图 2-9 所示。电炉、电烙铁、电阻器等都属于电阻性负载。

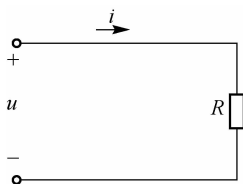


图 2-9 纯电阻交流电路

(1)电压与电流的关系。设图 2-9 中交流电压表达式为 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ V,由欧姆定律有

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin(\omega t + \varphi)}{R} = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2-14)$$

式(2-14)表明,纯电阻交流电路中,流过电阻的电流与加到电阻两端的电压频率相等、相位相同,其波形图与相量图如图 2-10 所示。

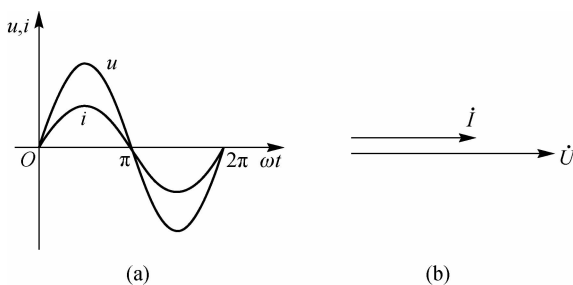


图 2-10 纯电阻交流电路波形图、相量图
(a)波形图 (b)相量图

其电压与电流的有效值关系为

$$U = IR \quad (2-15)$$

相量形式为

$$\dot{U} = \dot{I} R \quad (2-16)$$

(2)功率。

①瞬时功率。任一瞬间,电压瞬时值 u 和电流瞬时值 i 的乘积,即电阻在任一瞬间所吸收的功率,称为瞬时功率,用小写字母 p 表示,即

$$p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t = UI \quad (2-17)$$

由于纯电阻交流电路中 u 与 i 同相,它们同时为正,同时为负,因此瞬时功率总是正

值,说明电阻元件从电源吸收电能转换为热能,所以称电阻为耗能元件,波形如图 2-11 所示。

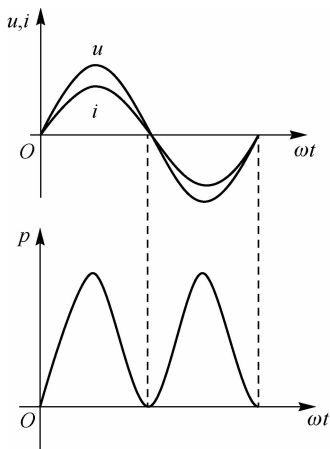


图 2-11 纯电阻电路瞬时功率波形

②平均功率。瞬时功率在一个周期内的平均值称为平均功率,或称为有功功率,用大写字母 P 表示。在工程中所说的功率均指有功功率,如铭牌数据或测量的功率。

纯电阻电路的平均功率为

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI(1 - \cos 2\omega t) dt \\ &= UI = I^2 R \end{aligned} \quad (2-18)$$

2. 纯电感电路

把只含有电感性负载的交流电路称为纯电感电路,电动机、变压器的绕组都属于电感性负载,如图 2-12 所示。

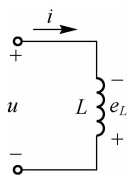


图 2-12 纯电感交流电路

(1)电压与电流的关系。设流过电感线圈 L 的交流电流为 $i = I_m \sin \omega t$, L 产生的感应电动势为

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

则电感元件两端的电压为

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt}$$

即

$$u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (2-19)$$

由式(2-19)可知,纯电感电路中 u 与 i 频率相等,电压相位超前电流相位 90° ,如图 2-13 所示。式中各量的计算式为

$$\begin{aligned} U_m &= I_m \omega L = I_m X_L \\ X_L &= \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = \omega L = 2\pi f L \end{aligned} \quad (2-20)$$

X_L 称为感抗,单位为欧姆(Ω),反映电感元件对交流电流阻碍作用的大小。感抗的值不是固定的,电感量越大,感抗越大;频率越高,感抗越大。所以通过直流电流时,感抗为零,因此线圈具有通直流,阻交流的特性。

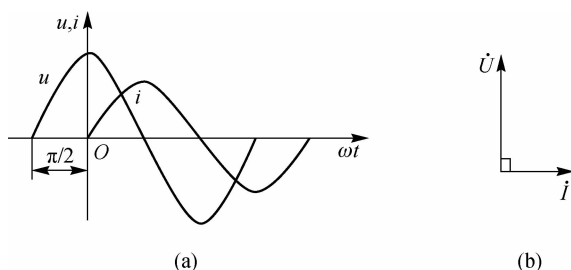


图 2-13 纯电感电路波形图、相量图
(a)波形图 (b)相量图

(2)功率。

①瞬时功率与平均功率。瞬时功率为

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \cdot I_m \sin \omega t \\ &= U_m I_m \cos \omega t \sin \omega t = UI \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (2-21)$$

可见,瞬时功率 p 是以角频率随时间交替变化的正弦量,如图 2-14 所示。当 u 、 i 同为正值或负值时, $p > 0$,说明电感线圈从电源吸收电能转换为磁场能储存起来;当 u 、 i 为一正一负时, $p < 0$,说明电感线圈将储存的磁场能转换成电能,向电源释放。

纯电感电路的平均功率(有功功率)为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0 \quad (2-22)$$

式(2-22)说明,纯电感元件的电路不消耗有功功率,只是不断地与电源进行能量交换,而且在一个周期内,电感元件储存的能量和释放的能量相等,所以电感属于储能元件。

②无功功率。为反映电感元件与电源进行能量交换的规模,用瞬时功率的最大值来衡量,称为无功功率(Q),即

$$Q = UI = I^2 X_L \quad (2-23)$$

无功功率的单位是乏(Var)或千乏(kVar)。

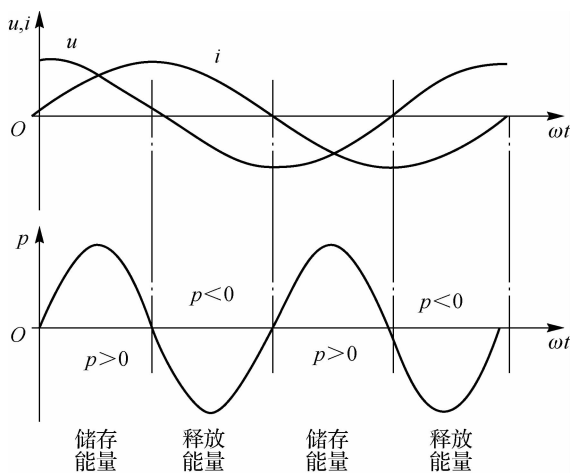


图 2-14 纯电感电路瞬时功率波形图

3. 纯电容电路

只含有电容性负载的交流电路称为纯电容电路,如图 2-15 所示。在电力系统和电子设备中,电容电路也比较广泛,如电力系统中采用电容改善系统的功率因数,电子电路中利用电容进行滤波、选频和隔直等。

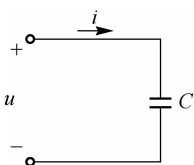


图 2-15 纯电容交流电路

(1) 电压与电流的关系。设图 2-15 中交流电压为 $u = U_m \sin \omega t$, 则通过电容 C 的电流为

$$i = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m \omega C \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (2-24)$$

式(2-24)表明,在纯电容电路中,电流与电压频率相等,电流超前电压 90° ,如图 2-16 所示。

式(2-24)中,有

$$I_m = U_m \omega C = \frac{U_m}{X_C}$$

$$X_C = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2-25)$$

X_C 表示容抗,单位为欧姆(Ω),它反映电容元件对交流电流阻碍作用的大小。容抗的值也不是固定的,容量越小,容抗越大;频率越低,容抗越大。所以通过直流电流时,容抗为无穷大,因此电容具有阻直流,通交流的特性。

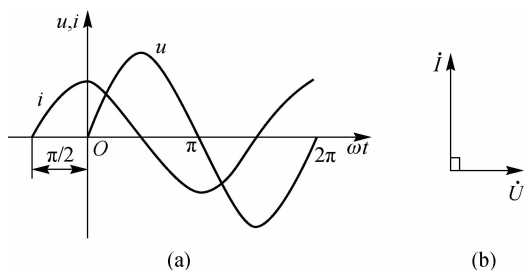


图 2-16 纯电容电路波形图、相量图

(a) 波形图 (b) 相量图

(2) 功率。

① 瞬时功率与平均功率。瞬时功率为

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \\ &= U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = UI \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (2-26)$$

可见,瞬时功率 p 也是以角频率随时间交替变化的正弦量,如图 2-17 所示。当 u, i 同为正值或负值时, $p > 0$,说明电容从电源吸收电能转换为电场能储存起来;当 u, i 为一正一负时, $p < 0$,说明电容将储存的电场能转换成电能,向电源释放。

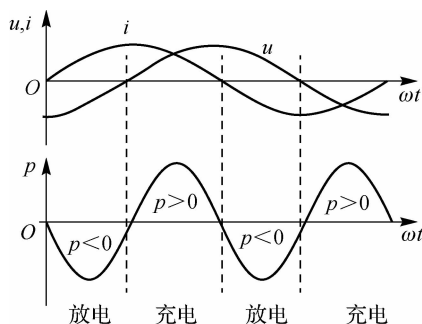


图 2-17 纯电容电路瞬时功率波形图

纯电容电路的平均功率(有功功率)为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0 \quad (2-27)$$

式(2-27)说明,纯电容元件的电路不消耗有功功率,只是不断地与电源进行能量交换,而且在一个周期内,电容元件储存的能量和释放的能量相等,所以电容也属于储能元件。

② 无功功率。同电感元件一样,用瞬时功率的最大值来衡量,即无功功率为

$$Q = UI = I^2 X_C \quad (2-28)$$

四、汽车示波器

1. 示波器概述

汽车电子设备中的有些信号的变化速率非常快,其变化周期达到千分之一秒,而许多故障信号是间歇性的,时有时无,这就需要仪器的测试速度高于故障信号的速度。通常要求测

试仪器的扫描速度是被测信号的 5~10 倍。

示波器是一种观察电信号波形的电子仪器,通过在显示器上同时提供电量和时间测量,解决了测量快速变化信号的难题。它可以定性观察电信号的动态过程,并测量出各种电信号的参数,如波形、幅值、频率和相位差等。数字示波器不仅可以快速捕捉电路信号,还可以用较慢的速度来显示这些波形,以便可以一面观察,一面分析。它还可以用存储的方式记录信号波形,可以倒回来观察已经发生过的快速信号,这就为分析故障提供了极大方便。无论是高速信号(如喷油器信号及间歇性故障信号)还是慢速信号(如节气门位置变化及氧传感器信号),用数字示波器观察都可以得到想要得到的波形结果。

示波器分为模拟式和数字式两类。模拟式示波器的波形轨迹不是由计算机产生的,所以示波器无法记忆;数字式示波器采集模拟的电压信号,然后将其转变为数字信息记录下来,再通过显示屏将其重现。相比于模拟式示波器,该信息具有以下特性:可暂停显示,保存、打印或记录某个波形;可显示、捕捉慢速变化且周期不稳的单一脉冲信号波形。

2. 示波器的操作

下面以 K81W18 型汽车专用示波器为例介绍数字示波器的操作方法。

(1)主机端口。K81W18 型示波器主机的端口位于头部和尾部,如图 2-18 所示。

(2)按键功能说明。

- ①ENTER 键:确认键,其功能主要是进入菜单、确认所选项目。
- ②▲、▼、►、◄ 四个方向键:用于上下左右移动选择所需的项目。
- ③EXIT 键:其功能主要是返回上级菜单、退出。
- ④F1、F2 键:辅助键,根据操作提示使用。

(3)操作方法。



视频
示波器的使用
方法

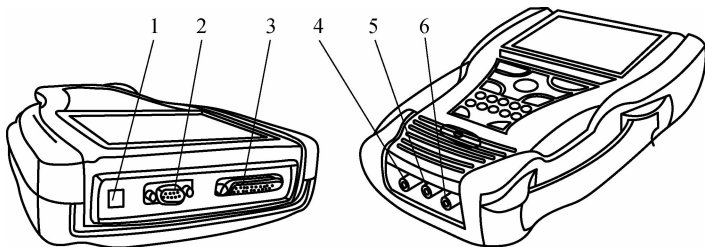


图 2-18 K81W18 型示波器主机端口图

1—DC 12 V 电源; 2—RS-232 串口; 3—诊断测试口;
4—示波 CH1; 5—触发 CH3; 6—示波 CH2

①汽车检测项目操作。如图 2-19 所示,在 K81W18 的菜单里按上下方向键选择需要检测的项目;按 ENTER 键可以进入下一级菜单,直到选择需要的测试项目;按 EXIT 键可以返回上级菜单。

②通用型示波器的调整方法。一般情况下,汽车专用检测项目的波形不需要调整,当要做超出汽车专用示波器标准菜单以外的测试内容时,可以选择通用示波器功能。在汽车专用示波器测试过程中如果有相似菜单,调整方法也相同。

• 选择通用示波器。按 ENTER 键确认(见图 2-20),在屏幕的下方有八个选项,即通道、周期、电平、幅值、位置、启停、存储和载入,按左右方向键可以对选项进行选择。

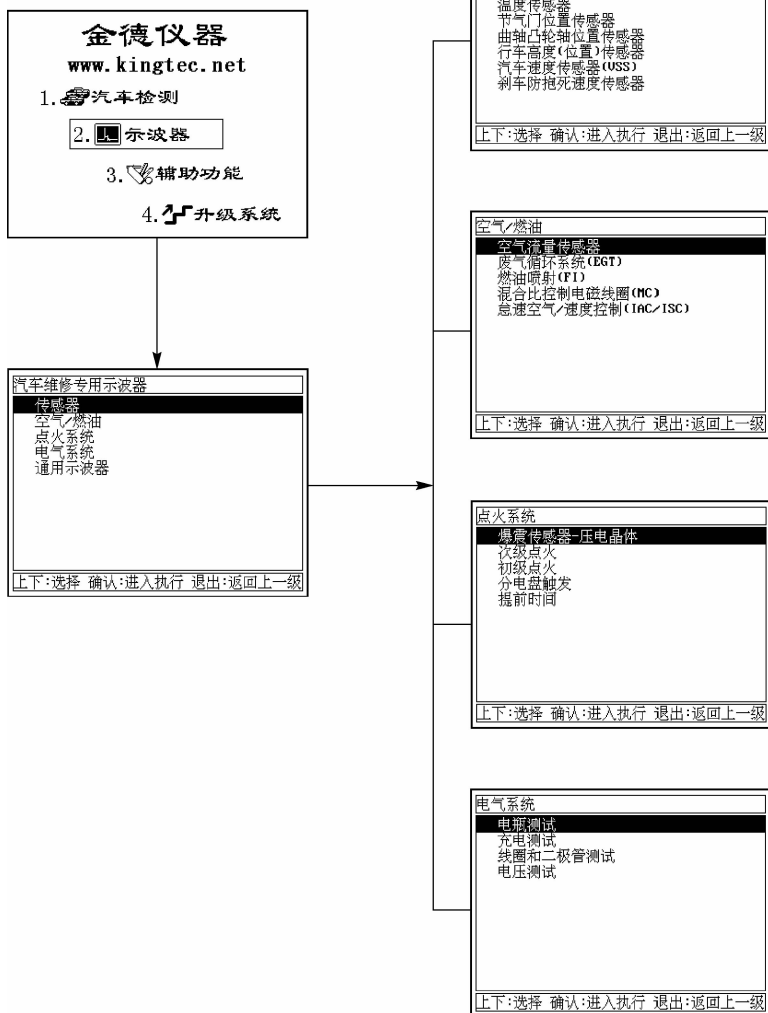


图 2-19 汽车检测项目主菜单

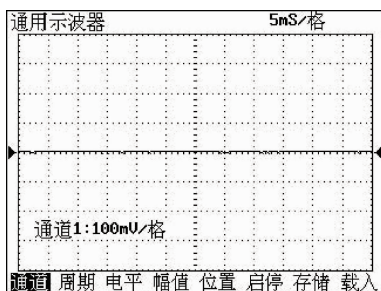


图 2-20 通用示波器主界面

• 通道调整。按上下方向键可以选择通道 1(CH1)、通道 2(CH2)和双通道方式三种形式,双通道方式如图 2-21 所示。

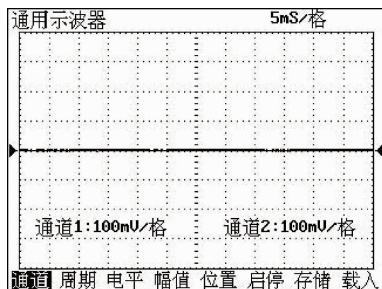


图 2-21 双通道方式

• 周期调整。选择周期调整,按上下方向键可以改变每单格时间的长短,如果开机时设定的是 10 ms/格,按向下键则会变为 5 ms/格,波形就会变稀;按向上键则会变为 20 ms/格,波形就会变密。

• 电平调整。对纵轴的触发电平进行调整,对于同一波形,选择不同的触发电平,波形在显示屏上的位置就会跟着变化。如果触发电平的数值超出波形的最大最小范围时,波形将产生游动,在屏幕上不能稳定住。

• 幅值调整。按上下方向键可以调整纵向波形幅值的大小,K81W18 可以选择 1 : 100、1 : 200、1 : 0.5、1 : 1、1 : 2.5 和 1 : 5。

• 位置调整。选择位置调整可以对波形的上下显示位置进行调整,按向上方向键,波形就会上移;按向下方向键,波形就会下移。

• 波形的存储和载入。在选择通用示波器时,如果要存储当前波形,必须先选择启停,按 ENTER 键冻结当前波形,然后选择存储,按 ENTER 键确认,按左右方向键选择存储区,每个界面可以存储两个波形,再次选择启停,按 ENTER 键确认,重新显示当前波形。若要载入波形,则选择载入,按 ENTER 键确认,左右方向键选择存储的区间,然后按 ENTER 键确认,就可以载入存在当前区间的波形。



任务实施与评价

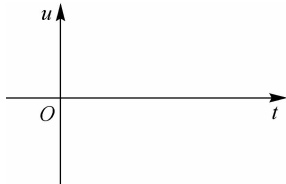
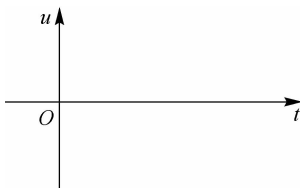
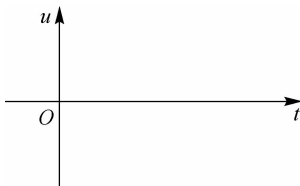
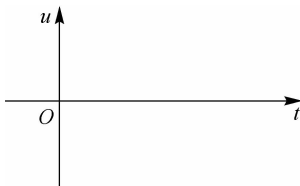
1. 任务实施器材

- (1) 信号发生器。
- (2) 示波器。

2. 任务实施步骤

- (1) 设定信号发生器输出交流信号。
- (2) 开启示波器并校准,做提前准备。
- (3) 使用示波器观察交流信号的波形、幅值,计算出频率,填入表 2-1,并画出信号波形。
- (4) 进行多次设定测量,能够熟练应用。

表 2-1 交流信号测量数据记录

次 数	信号发生器读数			示波器测量值		
	波形	幅值/V	频率/Hz	幅值/V	频率/Hz	波形图
1						
2						
3						
4						

3. 注意事项

(1) 不要频繁开关机,显示屏上光点(扫描线)亮度不可调得过亮,并且不可长时间将光点(或亮线)固定在显示屏上某一点,以免损坏显示屏。如果暂时不用,可以把辉度降到最低。

(2) 双踪示波器的两路输入端 CH1、CH2 有一公共接地端,使用 CH1 和 CH2 时,接线应防止将外电路短接。

(3) 使用旋钮和按键时不要强行旋转、死拉硬拧,以免损坏旋钮、按键和示波器。

4. 任务评价

任务评价如表 2-2 所示。

表 2-2 交流电路参数的测量任务评价

项目	测量前准备 (20 分)		示波器使用 (35 分)		规范操作 (15 分)	测量准确性 (20 分)		团队协作 (10 分)
评价								
总评		姓名		班级		专业		

任务二 日光灯电路及功率因数的提高

任务分析

功率因数是电力系统的一个重要的技术数据,它是指在交流电路中,电压与电流之间的相位差的 φ 余弦,用 $\cos \varphi$ 表示。其物理意义是电力线路的视在功率供给有功功率的消耗所占百分数,即

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2-29)$$

功率因数的高低,对于电力系统发电、供电、用电设备的充分利用有着显著的影响,如两只同为 100 W、额定电压为 220 V 的白炽灯与日光灯,白炽灯的功率因数 $\cos \varphi = 1$,日光灯的功率因数 $\cos \varphi = 0.5$,根据 $P = UI \cos \varphi$,则白炽灯的电流为

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{100}{220 \times 1} = 0.45 \text{ A}$$

日光灯的电流为

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{100}{220 \times 0.5} = 0.9 \text{ A}$$

可见,功率因数 $\cos \varphi$ 的大小与电路的负载性质有关,白炽灯属于电阻性负载,日光灯则属于电感性负载,所以功率因数低的根本原因是电感性负载的存在,而一般实际负载电路多为感性,如电动机、电焊机变压器等,所以提高功率因数,节约电能,对整个电力系统,乃至国民经济有着非常重要的意义。怎样在不改变负载的性能下,提高功率因数,将在本任务中讲述。首先要了解 RLC 电路的特性,掌握 RLC 谐振现象与条件,最终掌握提高功率因数的方法。

相关知识

一、电阻、电感、电容元件的串联电路

电阻、电感、电容元件的串联电路如图 2-22 所示,设电路中电流为 $i = I_m \sin \omega t$,为参考正弦相量。

电阻元件上的电压 u_R 与电流 i 同相,则

$$u_R = RI_m \sin \omega t = U_{Rm} \sin \omega t$$

电容元件上的电压 u_C 比电流 i 滞后 90° ,则

$$u_C = X_C I_m \sin(\omega t - 90^\circ) = U_{Cm} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

电感元件上的电压 u_L 比电流 i 超前 90° ,则

$$u_L = X_L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

根据 KVL 有

$$u = u_R + u_C + u_L$$

转换为对应的相量形式,如图 2-23 所示,表达式为

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C + \dot{U}_L = R \dot{I} + j\omega L \dot{I} + \frac{1}{j\omega C} \dot{I} = \left[R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \right] \dot{I} \quad (2-30)$$

$$\dot{U} = Z \dot{I} \quad (2-31)$$

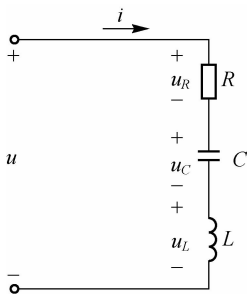


图 2-22 电阻、电感、电容元件的串联电路

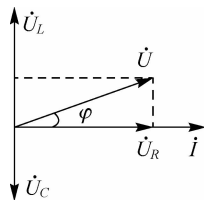


图 2-23 相量图

已知相量,可由此三个电压相量组成一个直角三角形,称为电压三角形,如图 2-24 所示。由电压三角形可得

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{(RI)^2 + (X_L I - X_C I)^2} \\ = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2-32)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2-33)$$

式中, Z 称为电路总阻抗(Ω); X 称为电抗(Ω)。 Z 、 X 、 R 也可用一个直角三角形来表示,称为阻抗三角形,如图 2-25 所示。

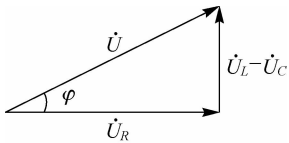


图 2-24 电压三角形

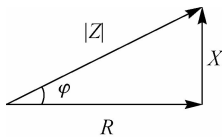


图 2-25 阻抗三角形

由图 2-24 和图 2-25 可知

$$\tan \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{X}{R} = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (2-34)$$

得到如下结论:

当 $X_L = X_C$ 时, $\varphi = 0$, $Z = R$, 电路呈电阻性;

当 $X_L > X_C$ 时, $\varphi > 0$, 电路呈电感性;

当 $X_L < X_C$ 时, $\varphi < 0$, 电路呈电容性。

二、阻抗的串联与并联

1. 阻抗的串联

两个阻抗 Z_1 和 Z_2 的串联电路如图 2-26(a) 所示。

电路电压为

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = \dot{I} Z$$

等效阻抗为

$$Z = Z_1 + Z_2 = \sum R + j(\sum X_L - \sum X_C) \quad (2-35)$$

等效电路如图 2-26(b) 所示。若有 n 个阻抗串联, 等效阻抗 Z 等于 n 个串联的阻抗之和。

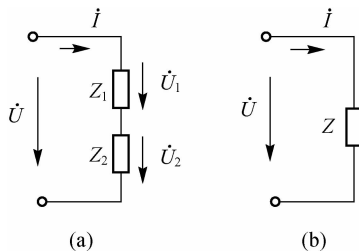


图 2-26 阻抗串联与等效电路

(a) 阻抗串联电路 (b) 等效电路

2. 阻抗的并联

两个阻抗 Z_1 和 Z_2 的并联电路如图 2-27(a) 所示。

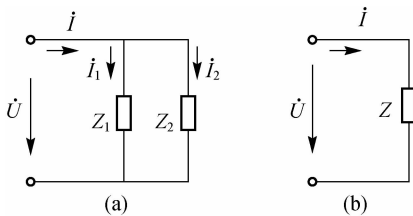


图 2-27 阻抗并联与等效电路

(a) 阻抗并联电路 (b) 等效电路

电路总电流为

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

等效阻抗为

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2-36)$$

电流分配关系为
$$\dot{I}_1 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{I}, \dot{I}_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{I}$$

等效电路如图 2-27(b) 所示。若有 n 个阻抗并联, 等效阻抗 Z 的倒数等于 n 个并联阻抗的倒数之和。

三、正弦交流电路的功率

通过以上讨论可知, 当正弦交流电路中出现电感或电容时, 其电压 u 和电流 i 具有一定的相位差。

图 2-28 为无源二端网络。设正弦电压为

$$u = \sqrt{2}U \sin \omega t$$

正弦电流为

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi)$$

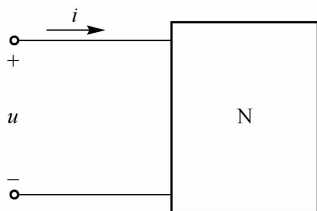


图 2-28 无源二端网络

1. 有功功率

瞬时功率为

$$\begin{aligned} p &= ui = \sqrt{2}U \sin \omega t \cdot \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \\ &= UI [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] \end{aligned}$$

有功功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi$$

令 $\lambda = \cos \varphi$, 则

$$P = UI \lambda \quad (2-37)$$

λ 称为功率因数。式(2-37)说明, 正弦交流电路有功功率的大小, 不但与电压、电流的有效值有关, 还与电压与电流相位差 φ 的余弦成正比。

2. 无功功率

正弦交流电路的无功功率为

$$Q = Q_L - Q_C = (U_L - U_C)I = UI \sin \varphi \quad (2-38)$$

3. 视在功率

视在功率为正弦交流电路电压的有效值与电流的有效值的乘积, 用 S 表示, 单位为伏安(VA), 即

$$S=UI \quad (2-39)$$

交流电气设备是按照规定的额定电压 U_N 和额定电流 I_N 设计使用的,把 $S_N=U_N I_N$ 称为额定视在功率,又称额定容量。

有功功率 P 、无功功率 Q 、视在功率 S 也可以用直角三角形来表示,称为功率三角形(见图 2-29),通过此图也可得

$$S^2=P^2+Q^2 \quad (2-40)$$

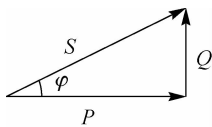


图 2-29 功率三角形

【例 2-3】 图 2-30 为日光灯等效电路,已知 $P=40\text{ W}$,接在 220 V 、 50 Hz 的交流电源上,测得电流为 $I=0.4\text{ A}$ 。

(1)求日光灯的功率因数。

(2)若在电路两端并联一只 $C=3.88\text{ }\mu\text{F}$ 的电容器(见图 2-31),电路的功率因数为多少?

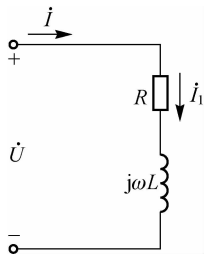


图 2-30 日光灯等效电路

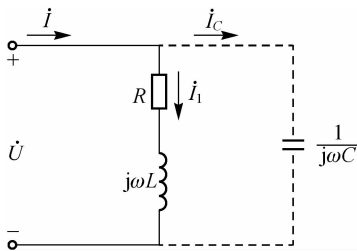


图 2-31 并联电容后的等效电路

解 (1)由 $P=UI\cos\varphi$ 得

$$\cos\varphi=\frac{P}{UI}=\frac{40}{220\times 0.4}=0.455$$

即日光灯的功率因数为 0.455。

(2)并联电容后, $\dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_C$,设电压为参考相量,可画出电流相量图,如图 2-32 所示。

图 2-32 中, $\dot{U}$ 为电源电压, $\dot{I}_1$ 为日光灯支路电流, $\dot{I}_C$ 为电容支路电流, $\dot{I}$ 为补偿后的电流, φ 为补偿前电路的电压与电流间相位角, φ_1 为补偿后电路的电压与电流间相位角。

由图 2-32 分析可得

$$I_C=\frac{U}{X_C}=\omega CU=314\times 3.88\times 10^{-6}\times 220=0.268\text{ A}$$

$$I_L=0.4\times \sin 63^\circ=0.356\text{ A}$$

$$I_R=0.4\times \cos 63^\circ=0.182\text{ A}$$

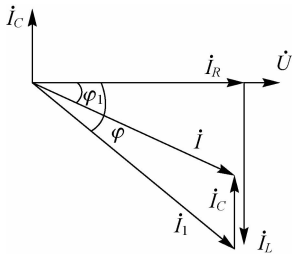


图 2-32 电流相量图

$$\tan \varphi_1 = \frac{I_L - I_C}{I_R} = 0.484, \varphi_1 = 25.8^\circ$$

$$\cos \varphi_1 = \cos 25.8^\circ = 0.9$$

由以上分析可知,若功率因数过低,会引起电源设备的容量不能够充分地利用,增大输电线路和发电机变压器上的能量损耗与电压降,因此提高功率因数是很有必要的。

提高功率因数的方法有两种:一是提高用电设备本身的功率因数,如改进电动机的运行条件;二是给感性负载并联容性负载,这种采用并联电容提高功率因数的方法,称为无功补偿,在电感性电路中得到广泛的应用。

四、正弦交流电路的谐振

在含有电感和电容的交流电路中,当感抗与容抗相等,电路呈电阻性,电源电压与电路电流的相位差为零时的电路状态称为谐振。谐振电路在无线电工程、电子测量技术等许多电路中应用非常广泛,如汽车内部收音机选择频道时使用的谐振电路。但在电力系统中发生谐振,则有可能造成系统不能正常工作,应尽量避免。谐振分为串联谐振和并联谐振。

1. 串联谐振

在 RLC 串联电路中,如图 2-33 所示,当 $X_L = X_C$ 时,电路的电压与电流同相,电路呈电阻性,此时电路中产生串联谐振。所以产生串联谐振的条件是 $X_L = X_C$ 。

串联谐振电路中 $Z = R + j(X_L - X_C) = R$,根据 $X_L = 2\pi fL$, $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$,可得

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (2-41)$$

角频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-42)$$

谐振频率由电路的 L 、 C 的参数确定,所以调节 L 或 C 可使 RLC 电路发生谐振,汽车收音机通常是采用调节电容值 C 来实现谐振的。

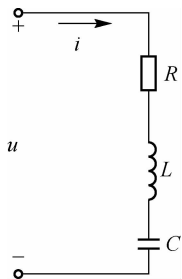


图 2-33 串联谐振电路

通过以上分析可知,串联谐振电路有如下特征:

(1)电压与电流同相($\varphi=0$),电路呈电阻性。

(2)电路的阻抗最小,电流最大。

电路阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$$

电流为

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R}$$

(3)电感、电容两端的电压比电源电压大许多倍。

当电路发生谐振时,电感两端电压为

$$U_L = IX_L = \frac{U}{R} X_L$$

电容两端电压为

$$U_C = IX_C = \frac{U}{R} X_C$$

因为 $X_L = X_C \geq R$, 所以 U_L 、 U_C 都高于电源电压 U 。

U_L 或 U_C 与电源电压 U 的比值,称为品质因数,用大写字母 Q 表示,即

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR}$$

2. 并联谐振

在并联电路中发生的谐振称为并联谐振,如图 2-34 所示,图中 R 表示线圈的电阻, L 表示电感, C 表示电容。

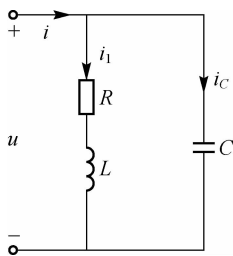


图 2-34 并联谐振电路

其线圈的阻抗为

$$Z_1 = R + j\omega L$$

电容的阻抗为

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

电路的等效阻抗为

$$Z = \frac{\frac{(R + j\omega L) \times 1}{j\omega C}}{(R + j\omega L) + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R + j\omega L}{1 + j\omega RC - \omega^2 LC}$$

实际应用中,线圈的电阻很小,可以忽略,而且在谐振时, $\omega L \gg R$, 所以有

$$Z = \frac{j\omega L}{1 + j\omega RC - \omega^2 LC} = \frac{1}{\frac{RC}{L} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)}$$

当发生谐振时,电路呈电阻性,所以

$$\omega C - \frac{1}{\omega L} = 0$$

谐振频率与角频率同样为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

并联谐振电路有如下特征:

- (1) 电压与电流同相($\varphi=0$), 电路呈电阻性。
- (2) 电路的阻抗最大, 电流最小。

电路阻抗为

$$Z = \frac{1}{\frac{RC}{L} + j\left(\omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L}\right)} = \frac{L}{RC}$$

电流为

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\frac{L}{RC}} = \frac{URC}{L}$$

- (3) 发生谐振时, 当 $\omega_0 L \gg R$ 时, 并联支路电流大于电路总电流。

各并联支路电流为

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega_0 L)^2}} \approx \frac{U}{\omega_0 L}$$

$$I_C = U\omega_0 C$$

$$Z_0 = \frac{L}{RC} = \frac{\omega_0 L}{R\omega_0 C} = \frac{(\omega_0 L)^2}{R}$$

当 $\omega_0 L \gg R$ 时, $\omega_0 L \approx \frac{1}{\omega_0 C} \ll \left(\frac{\omega_0 L}{R}\right)^2$, 所以 $I_1 \approx I_C \gg I$ 。

品质因数 Q 为

$$Q = \frac{I_L}{I} = \frac{I_C}{I} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R\omega_0 C} \quad (2-43)$$

任务实施与评价

1. 任务实施器材

- (1) 日光灯电路组件实验板。
- (2) 可调电容器。
- (3) 功率表。
- (4) 交流电压表、电流表。
- (5) 导线若干。
- (6) 万用表, 电工工具一套。

2. 任务实施步骤

- (1) 按照图 2-35 连接日光灯基本电路。

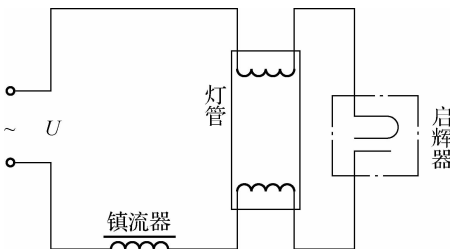


图 2-35 日光灯基本电路

- (2) 将可调电容器、交流电压表、电流表及功率表接入电路, 如图 2-36 所示。

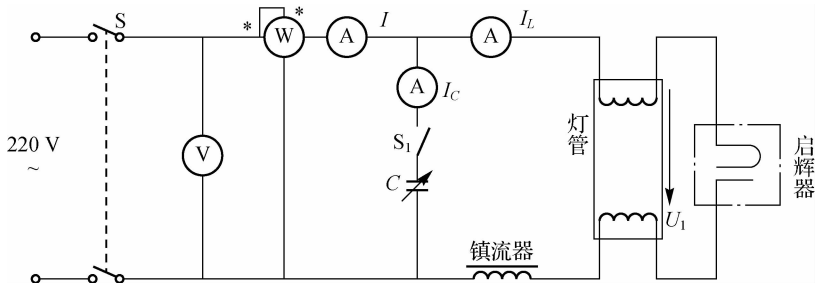


图 2-36 提高日光灯电路功率因数的实验电路

(3) 首先将 S_1 断开, 切断电容, 闭合开关 S 。用万用表测量灯管两端的电压 U_1 、镇流器两端的电压 U_L , 并记录功率表与电流表数值, 计算功率因数 $\cos \varphi$, 填入表 2-3。

(4) 调节电容器, 闭合 S_1 。分别记录电压表、功率表读数, 电路总电流 I , 流过电容 C 的电流 I_C , 流过灯管的电流 I_L , 以及灯管两端的电压 U_1 与镇流器两端的电压 U_L , 并计算功率因数 $\cos \varphi$, 填入表 2-3。

(5) 多次调节电容器, 记录上步中的各个数据。

(6)根据表 2-3 所测量数据,确定日光灯电路提高功率因数的电容 C 的取值范围。

表 2-3 提高日光灯电路功率因数记录表

序号	$C/\mu\text{F}$	I/A	I_L/A	I_C/A	U/V	U_1/V	U_L/V	P/W	$\cos \varphi$
1									
2									
3									
4									
5									

3. 注意事项

- (1)安全用电,通电时不允许接、拆线,调节电容器。
- (2)日光灯额定电压为 220 V。
- (3)功率表要正确接线。
- (4)若出现任何异常情况,首先要迅速切断电源。

4. 任务评价

任务评价如表 2-4 所示。

表 2-4 日光灯电路及功率因数的提高任务评价

项目	搭建电路 (10 分)	仪表使用(20 分)	规范操作 (20 分)	数据记录与分析 (30 分)	团队协作 (20 分)
评价					
总评	姓名	班级	专业		

任务三 三相交流电路电量的测量

任务分析

世界各国的电力系统中电能的生产、输送和供电方式几乎都是采用三相交流供电系统。这是因为三相交流电在各环节有许多优点,三相交流发电机比同功率的单相交流发电机具有性能好、体积小、成本低的优点;在距离相同、电压相同、输送功率相同的情况下,三相输电比单相输电节省材料。汽车发电机发出的电能也是三相交流电。通过本任务的学习,要掌握三相交流电与三相负载的连接方法,三相交流参数的测量与计算方法,牢记安全用电规范。



相关知识

一、汽车三相交流电的产生与连接

1. 汽车三相交流电的产生

三相交流电是三个振幅相等、频率相同、相位互差 120° 的正弦交流电的组合。汽车的三相交流电是由三相发电机产生的,其结构图示如图 2-37 所示。在定子铁心槽内嵌放三组匝数相等、形状相同、空间位置互差 120° 的定子绕组 U_1U_2 、 V_1V_2 、 W_1W_2 ,如图 2-38 所示。

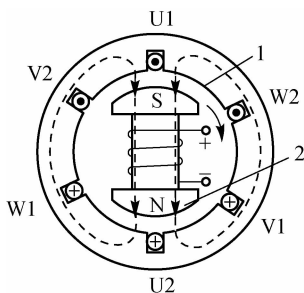


图 2-37 汽车三相发电机结构图示

1—定子; 2—转子

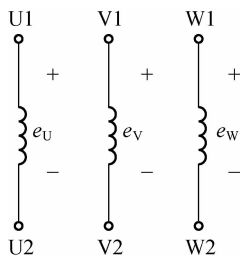


图 2-38 三相绕组示意图

转子绕组通入直流电产生磁场,当转子恒速旋转时,磁场在空间按正弦规律分布,三相对称定子绕组将感应出三相对称正弦电动势 e_U 、 e_V 、 e_W ,三相正弦电动势也相差 120° 。以 U 相为参考正弦量,则三相电动势的瞬时值表达式为

$$e_U = E_m \sin \omega t$$

$$e_V = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_W = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

相量表达式为

$$\dot{E}_U = E \angle 0^\circ$$

$$\dot{E}_V = E \angle -120^\circ$$

$$\dot{E}_W = E \angle 120^\circ$$

三相对称正弦交流电的波形图和相量图如图 2-39 所示。

三相电源的瞬时电压之和为 0,即

$$e_U + e_V + e_W = 0$$

$$\dot{E}_U + \dot{E}_V + \dot{E}_W = 0$$

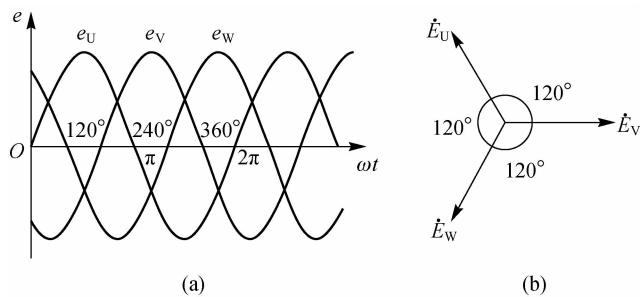


图 2-39 三相正弦交流电的波形图和相量图
(a) 波形图 (b) 相量图

2. 三相交流电源的接法

三相发电机定子绕组的连接方式有两种：一种是星形(Y)接法，另一种是三角形(Δ)接法。

(1) 三相交流电源的星形接法。将三相绕组的尾端 U2、V2、W2 连接在一起，将首端 U1、V1、W1 作为电源输出端(见图 2-40)，这种连接方式称为星形连接。

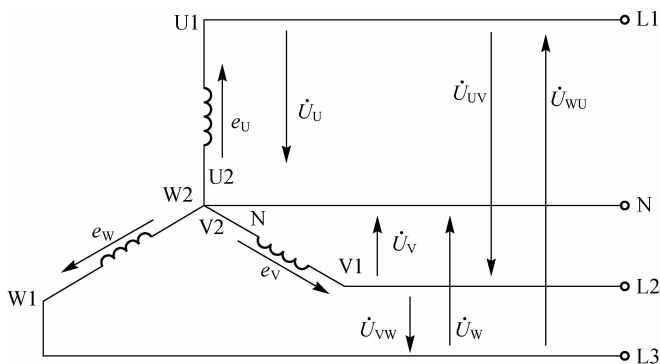


图 2-40 三相交流电源的星形连接

图 2-40 中，从三相绕组首端引出的导线称为相线或火线，用 L1、L2、L3 表示，颜色分别为黄、绿、红。三相绕组末端的连接点称为中性点，用 N 表示，从中性点引出的导线称为中性线或零线，颜色为蓝色。把有三根相线与一根中性线的供电形式称为三相四线制，把只有三根相线的供电形式称为三相三线制。

三相电源中，相线与中性线之间的电压称为相电压，用 $\dot{U}_U$ 、 $\dot{U}_V$ 、 $\dot{U}_W$ 表示，有效值用 U_P 表示；相线之间的电压称为线电压，用 $\dot{U}_{UV}$ 、 $\dot{U}_{VW}$ 、 $\dot{U}_{WU}$ 表示，有效值用 U_L 表示。

当三相交流电源采用星形连接时，其线电压与相电压的关系为

$$\begin{aligned}\dot{U}_{UV} &= \dot{U}_U - \dot{U}_V \\ \dot{U}_{VW} &= \dot{U}_V - \dot{U}_W \\ \dot{U}_{WU} &= \dot{U}_W - \dot{U}_U\end{aligned}$$

线电压与相电压的相量图如图 2-41 所示,从图中可得

$$\dot{U}_{UV} = \sqrt{3}\dot{U}_U \angle 30^\circ$$

$$\dot{U}_{VW} = \sqrt{3}\dot{U}_V \angle 30^\circ$$

$$\dot{U}_{WU} = \sqrt{3}\dot{U}_W \angle 30^\circ$$

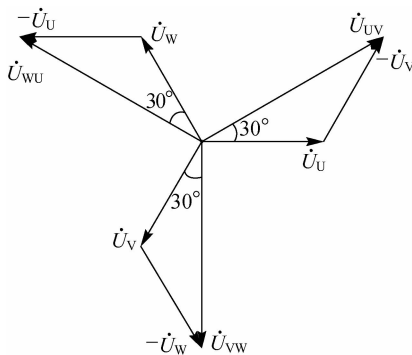


图 2-41 线电压与相电压的相量图

即三相交流电源做星形连接时,线电压也是对称的,线电压 U_L 是相电压 U_P 的 $\sqrt{3}$ 倍,线电压超前对应相电压 30° 。在低压供电系统中,相电压为 220 V,线电压为 380 V。

(2)三相交流电源的三角形接法。将三相绕组的首尾端依次相连,再从三个端点处引出三根电源线 L1、L2、L3,此连接方式称为三角形连接,如图 2-42 所示。

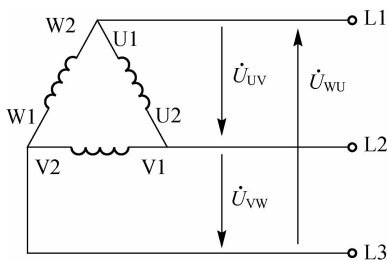


图 2-42 三相交流电源的三角形连接

该连接方式没有中性点,所以线电压 U_L 等于相电压 U_P ,其 $\dot{U}_{UV} + \dot{U}_{VW} + \dot{U}_{WU} = 0$,必须注意每相绕组的首尾端不能接反,否则在电路中将形成很大的回路电流,甚至会损坏电源。

在实际应用中,发电机绕组很少用三角形连接方式,但作为电源用的三相变压器绕组会有三角形或者星形连接。

二、三相负载的连接

三相负载一般分为两类。当每相负载的复阻抗角相等时,称为对称负载,如三相异步电动机,否则称为不对称负载。若三相电源对称,三相负载也对称,组成的供电电路称为对称三相电路。三相负载的连接形式也分为两种,即星形连接和三角形连接。

1. 星形连接

图 2-43 为对称负载星形连接的三相四线制电路,把三相负载的末端连接在一起,用 N' 表示,称为负载的中性点,与电源中性点 N 相连。三相负载的另一端连接到电源的三根相线上。

每相负载上的电流称为相电流,如 $\dot{I}_a$ 、 $\dot{I}_b$ 、 $\dot{I}_c$,有效值用 I_P 表示;每相相线上的电流称为线电流,如 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_3$,有效值用 I_L 表示。

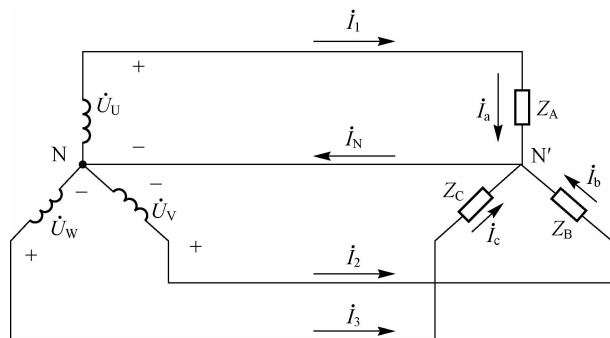


图 2-43 对称负载星形连接的三相四线制电路

在三相对称负载星形连接电路中,每相负载的相电压等于电源相电压,负载的线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍, $U_L = \sqrt{3}U_P$ 。流过负载的相电流等于对应的线电流, $I_L = I_P$,即

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_a, \dot{I}_2 = \dot{I}_b, \dot{I}_3 = \dot{I}_c$$

每相负载电流为

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_U}{Z_A}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_V}{Z_B}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_W}{Z_C}$$

则中性线电流为

$$\dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$$

由于三相电压对称,三相负载也对称,因此中性线电流为零,即

$$\dot{I}_N = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0$$

对于三相对称负载星形连接电路,中性线电流为零,则可以省去中性线,变为三相三线制供电,如三相异步电动机三相绕组做星形连接时采用三相三线制供电,只需计算出其中一相电流,便可推出其他两相电流。

对于三相不对称负载,中性线电流不为零,则中性线绝不能断开。中性线的作用是保证负载的相电压对称,使各相负载成为相互独立的工作回路,所以中性线上不允许安装开关或熔断器。

2. 三角形连接

分别将三相负载的首尾相接,再把三个端点与电源的三根相线相连,这种连接方式称为负载的三角形连接,如图 2-44 所示。

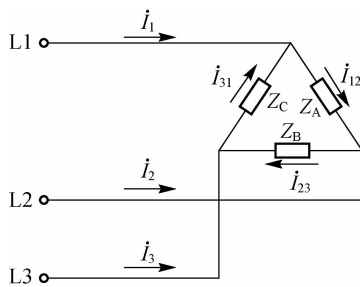


图 2-44 三相负载的三角形连接

每相负载接在两相电源之间,所以每相负载承受的电压均为电源的线电压,即 $\dot{U}_P = \dot{U}_L$ 。流过每相负载的相电流为 $\dot{i}_{12}$ 、 $\dot{i}_{23}$ 、 $\dot{i}_{31}$,其有效值为 I_P 。线电流为 $\dot{i}_1$ 、 $\dot{i}_2$ 、 $\dot{i}_3$,有效值用 I_L 表示。其关系为

$$\dot{i}_1 = \dot{i}_{12} - \dot{i}_{31}$$

$$\dot{i}_2 = \dot{i}_{23} - \dot{i}_{12}$$

$$\dot{i}_3 = \dot{i}_{31} - \dot{i}_{23}$$

图 2-45 为其相量图,若负载对称,则通过相量图可得

$$\dot{i}_1 = \sqrt{3} \dot{i}_{12} \angle -30^\circ$$

$$\dot{i}_2 = \sqrt{3} \dot{i}_{23} \angle -30^\circ$$

$$\dot{i}_3 = \sqrt{3} \dot{i}_{31} \angle -30^\circ$$

当三相对称负载做三角形连接时,线电流 I_L 是相电流 I_P 的 $\sqrt{3}$ 倍, $I_L = \sqrt{3} I_P$,并且相位上线电流滞后相应相电流 30° 。线电压 U_L 等于相电压 U_P , $U_L = U_P$ 。

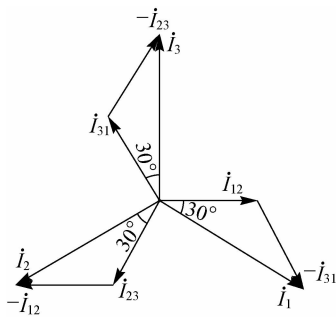


图 2-45 三相负载的三角形连接相量图

三、三相电路的功率

三相电路的功率与单相电路相同,也分有功功率、无功功率和视在功率。

1. 有功功率

三相电路的有功功率等于各相有功功率之和,即

$$\begin{aligned} P &= P_1 + P_2 + P_3 \\ &= U_{P1} I_{P1} \cos \varphi_1 + U_{P2} I_{P2} \cos \varphi_2 + U_{P3} I_{P3} \cos \varphi_3 \end{aligned} \quad (2-44)$$

三相对称负载的总有功功率为

$$P = 3U_P I_P \cos \varphi \quad (2-45)$$

在三相对称负载的星形连接中,有

$$U_L = \sqrt{3}U_P, I_L = I_P \quad (2-46)$$

在三相对称负载的三角形连接中,有

$$U_L = U_P, I_L = \sqrt{3}I_P \quad (2-47)$$

所以三相对称电路中,无论负载是星形连接还是三角形连接,其总的有功功率均为

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi \quad (2-48)$$

三相用电设备铭牌上标注的额定电压、额定电流都指线电压、线电流,所以功率的计算公式常用线电压和线电流表示。

2. 无功功率

三相电路的无功功率等于各相无功功率之和,即

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 + Q_3 \\ &= U_{P1} I_{P1} \sin \varphi_1 + U_{P2} I_{P2} \sin \varphi_2 + U_{P3} I_{P3} \sin \varphi_3 \end{aligned} \quad (2-49)$$

同样在三相对称电路中,无论负载是星形连接还是三角形连接,其总的无功功率均为

$$Q = 3U_P I_P \sin \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi \quad (2-50)$$

3. 视在功率

三相电路的视在功率为

$$S = 3U_P I_P = \sqrt{3}U_L I_L = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2-51)$$

【例 2-4】 现有三相对称负载,接入三相三线制电源,线电压 U_L 为 380 V,每相负载阻抗为 $Z = 10 \angle 53.1^\circ$ 。求负载分别为星形连接和三角形连接时的三相功率。

解 功率因数 $\lambda = \cos \varphi = \cos 53.1^\circ = 0.6$

(1) 负载为星形连接时。

$$\text{相电压为 } U_{YP} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V。}$$

$$\text{相电流为 } I_{YP} = \frac{U_{YP}}{Z} = \frac{220}{10} = 22 \text{ A。}$$

$$\text{线电流为 } I_{YL} = I_{YP} = 22 \text{ A。}$$

$$\text{三相功率为 } P_Y = \sqrt{3}U_{YL} I_{YL} \cos \varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 22 \times 0.6 = 8\,687.7 \text{ W} \approx 8.7 \text{ kW。}$$

(2)负载为三角形连接时。

相电压 $U_{\Delta P}=U_{\Delta L}=380 \text{ V}$ 。

相电流为 $I_{\Delta P}=\frac{U_{\Delta P}}{Z}=\frac{380}{10}=38 \text{ A}$ 。

线电流为 $I_{\Delta L}=\sqrt{3}I_{\Delta P}=66 \text{ A}$ 。

三相功率为 $P_{\Delta}=\sqrt{3}U_{\Delta L}I_{\Delta L}\cos\varphi=\sqrt{3}\times 380\times 66\times 0.6=26\ 063 \text{ W}\approx 26 \text{ kW}$ 。

由以上例题可知,同一三相负载在同一电源下,三角形接法的功率是星形接法功率的3倍,所以通常对三相负载的连接形式都要有明确的规定。

四、安全用电

随着社会的发展和科学技术的进步,无论是汽车制造维修业,还是工农生产和日常生活,电与人们的关系日益密切,但在使用中不注意安全用电,违反电气操作规程等,轻则使人受伤,重则致人死亡,或造成大面积停电事故。近年来由电引起的重大电气火灾事故屡见不鲜,给生产和生活造成巨大影响,使国家财产遭受严重损失。因此,必须重视和掌握安全用电常识与安全用电措施,正确使用各种电气设备,始终坚持“安全第一,预防为主”的方针。

1. 触电

当电流流过人体时对人体产生生理和病理伤害的现象称为触电。根据电流对人体的伤害分为电击和电伤。

电击是由于电流通过人体而造成的内部器官在生理上的反应和病变,绝大部分触电死亡事故都是由电击造成的。电击分为直接电击和间接电击两种。当人体直接接触及正常运行的带电体所发生的电击称为直接电击;间接电击则是指电气设备发生故障后,人体触及意外带电部分所发生的电击。

电伤是电流的热效应、化学效应、光效应或机械效应对人体外表造成的伤害,常常与电击同时发生。电伤会在人体上留下明显伤痕,最常见的有电灼伤、电烙印和皮肤金属化三种类型。

电击和电伤的特征与危害如表 2-5 所示。

表 2-5 电击和电伤的特征与危害

名 称	特 征	危 害
电击	常会给人体留下较明显的特征:电标、电纹、电流斑	电击是触电事故中最危险的一种。例如,致使人体产生痉挛、刺痛、灼热感、昏迷、心室颤动、呼吸困难、心跳停止等现象



视频
触电急救



视频
单相触电

(续表)

名 称		特 征	危 害
电 伤	电灼伤	接触灼伤:发生在高压触电事故时,电流通过人体皮肤的进出口造成的灼伤。 电弧灼伤:发生在误操作或过分接近高压带电体,当其产生电弧放电时,出现高温电弧	高温电弧会把皮肤烧伤,致使皮肤发红、起泡或烧焦和组织破坏;电弧还会使眼睛受到严重伤害
	电烙印	由电流的化学效应和机械效应引起,通常在人体与带电体有良好接触的情况下发生。电烙印有时在触电后并不立即出现,而是相隔一段时间后才出现	皮肤表面将留下与被接触带电体形状相似的肿块痕迹。电烙印一般不发炎或化脓,但往往造成局部麻木和失去知觉
	皮肤金属化	由于极高的电弧温度使周围的金属熔化、蒸发并飞溅到皮肤表层,令皮肤表面变得粗糙坚硬,其色泽与金属种类有关,如灰黄色(铅)、绿色(紫铜)、蓝绿色(黄铜)等	金属化后的皮肤经过一段时间后会自行脱落,一般不会留下不良后果

2. 影响人体触电伤害程度的因素

(1)电流的大小。通过人体的电流越大,人体的生理反应亦越大。根据人体反应,可将电流划分为三级:感知电流、摆脱电流和致命电流(见表 2-6)。

表 2-6 对人体作用电流的类型

类 型	定 义	交流电(工频)		直流电 (平均值)
		成年男性	成年女性	
感知电流	引起人的感觉的最小电流	$I < 1.1 \text{ mA}$	$I < 0.7 \text{ mA}$	$I < 5 \text{ mA}$
摆脱电流	人体触电后能自主摆脱电源的最大电流	$1.1 \text{ mA} \leq I < 16 \text{ mA}$	$0.7 \text{ mA} \leq I < 10 \text{ mA}$	$5 \text{ mA} \leq I < 50 \text{ mA}$
致命电流	在较短时间内,危及人体生命的最小电流	$I \geq 16 \text{ mA}$	$I \geq 10 \text{ mA}$	$I \geq 50 \text{ mA}$

(2)触电时间。人体触电时间越长,对人体的伤害程度就越严重。人的心脏在每次收缩扩张周期中间的时间称为易损伤期,当电流在这一瞬间通过时,引起心室颤动的可能性最大,危险性也最大。不同电流值和时间对人体的影响如表 2-7 所示。

表 2-7 不同电流值和时间对人体的影响

电流/mA	通电时间	交流电(工频)	直流电
		人体反应	人体反应
0~0.5	连续通电	没有感觉	没有感觉
0.5~5	连续通电	有痛觉,无痉挛	没有感觉
5~10	数分钟内	痉挛、剧痛,可摆脱电源	有灼热感和刺痛
10~30	数分钟内	迅速麻痹、呼吸困难、血压升高,不能摆脱电源	刺痛、灼热感增强,肌肉开始痉挛
30~50	数秒至数分钟	心跳不规则、昏迷、血压升高、强烈痉挛	强烈灼痛,手肌肉痉挛,呼吸困难
50~数百	低于心脏搏动周期	受强烈冲击,但未发生心室颤动	剧痛、强烈痉挛,呼吸困难
	超过心脏搏动周期	昏迷、心室颤动、呼吸麻痹、心跳停止	
500 以上	1 s 以上	有死亡危险	呼吸麻痹,心室颤动,心跳停止

(3)电流的途径。电流通过心脏、呼吸系统和中枢神经系统,危险性最大。电流通过心脏会引起心室颤动甚至心脏停止跳动;电流通过中枢神经系统的呼吸控制中心可使呼吸停止;电流通过大脑,会对大脑造成严重损伤。电流从人体的手到脚是最危险的一条路径,因为要通过的重要器官最多。

(4)电流的频率。资料表明,25~300 Hz的交流电对人体伤害程度最为严重。低于20 Hz时,危险性相对减小;在高频情况下,人体能够承受更大的电流作用,死亡危险性降低。

(5)人体电阻。人体电阻的大小是影响触电后果的另一因素,而影响人体电阻的因素很多。当人体的皮肤处于干燥、清洁和无损的情况下,人体电阻可达4~10 k Ω ;当处于潮湿、受到损伤或沾有金属或其他导电粉尘时,人体电阻只有1 k Ω 。另外,人体电阻也随电源频率的增大而降低。从人身安全的角度考虑,人体电阻可按1~2 k Ω 考虑。

(6)人体状况。人体不同,对电流的敏感程度也不一样。一般来讲,儿童较成年人敏感,女性较男性敏感。患有心脏病、精神病或醉酒的人,触电后果更为严重。

3. 安全电压

国家标准 GB/T 3805—2008《特低电压(ELV)限值》规定,我国安全电压额定值的等级为42 V、36 V、24 V、12 V和6 V,应根据作业场所、操作人员条件、使用方式、供电方式、线路状况等因素选用相应等级的安全电压,是防止发生触电伤亡事故的根本性措施。例如,在干燥而触电危险性较大的环境下,安全电压规定为36 V;对于潮湿而触电危险性较大的环境则安全电压规定为12 V。汽车电源用电为24 V或12 V。



视频
家庭安全用电



视频
跨步电压触电