

# 学习情境一

## 直流电路



### 情境导入

在日常的生产、生活中，人们广泛应用着各种各样的电路。这些电路都是根据人的某种需要将实际元器件按一定方式连接起来的。图 1-1 所示是生活中常见的手电筒，拨动按钮，它就会发光。那么手电筒为什么会发光呢？它主要由哪几部分组成？每一部分的作用分别是什么？



图 1-1 手电筒



### 学习导航

在实际应用中，电流总是按照一定的路径（电路）传输。电流按其性质不同分成直流电和交流电，相应的电路分成直流电路和交流电路。

本情境主要学习直流电路的基本概念、基本定律及电路分析与计算的主要方法，练习电路中电流、电压的测量。

## 单元一 电路的基本概念

### 知识目标

了解电路的概念、作用和组成等，理解电路的基本物理量的含义，理解参考方向的含义及其与实际方向的关系。

### 技能目标

能用万用表测量电路中的电流、电压等基本物理量。

### 基础知识



#### 一、电路的组成及作用

##### (一) 电路的概念

电路，简单地说就是电流流通的路径，是为了实现某种功能，由一些电气设备和元器件按一定规律连接而成。

##### (二) 电路的组成

实际电路的种类有很多，但是不论电路的具体形式和复杂程度如何不同，每一个完整的电路都是由电源、负载和中间环节三个部分按照一定方式连接起来的闭合回路。

图 1-2 所示为手电筒结构与照明电路。

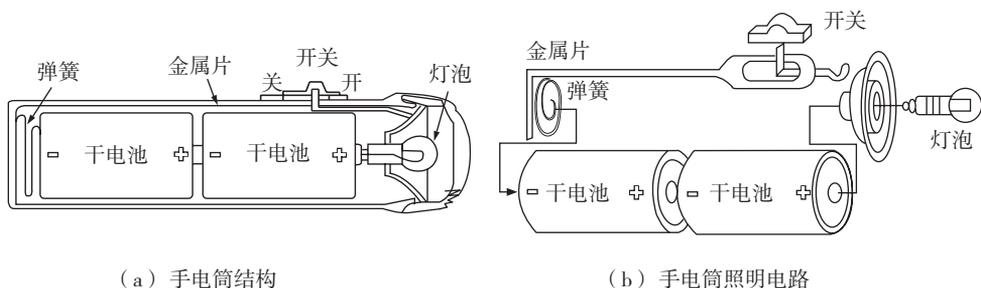


图 1-2 手电筒结构与照明电路

##### (1) 电源。

电源是指产生电能或电信号的装置。如各种发电机、电池、传感器、稳压电源、信号源等。

##### (2) 负载。

负载是取用电能的设备，它将电能转换为其他形式的能量。例如，白炽灯将电能转换为热能和光能，电动机将电能转换为机械能、热能，扬声器将电能转换为声能等。

##### (3) 中间环节。

中间环节是指传输、控制电能的装置。如连接导线、变压器、开关、保护电器等。

### （三）电路的作用

电路的种类很多，用途各异，但其基本作用可以概括为以下两大类。

（1）实现电能的传输、分配和转换。例如，电厂的发电机把机械能、热能、原子能等非电能形式的能量转换为电能，通过变压器、输电线等送至用户，并通过白炽灯、电动机、电炉等负载把电能转换成光能、机械能、热能等其他形式的能量，如图 1-3a 所示。再如，手电筒照明电路，当开关闭合时，电路中有电流通过，灯泡发光，干电池向电路提供电能；灯泡是耗能元件，它把电能转化为热能和光能，如图 1-3b 所示。

（2）实现信号的传递、存储和处理。例如，电视机、计算机、电话机、手机等将接收到的信号进行处理，转换成声音或图像等。实现信号的传递、存储和处理的电路称为信号电路或电子电路。如图 1-3c 所示扩音机扩大电路，其工作原理是话筒将语音信号转换为电信号，经放大器进行放大处理传递给扬声器，以驱动扬声器发声。

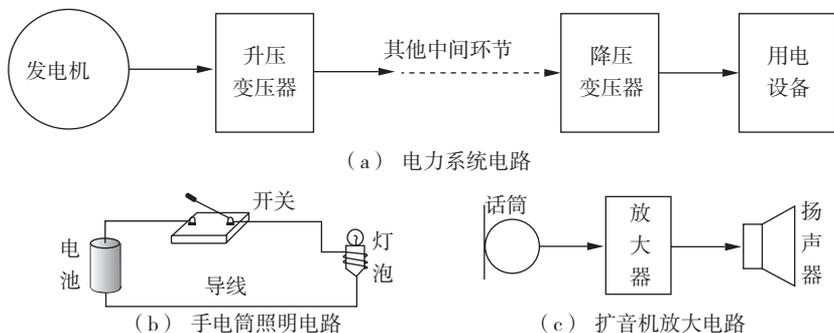


图 1-3 两种典型的电路示意图

### （四）理想电路元件与电路模型

#### 1. 理想电路元件

各种实际电路都是由电阻器、电容器、线圈、半导体管、变压器等实际元器件组成的。由于实际电路元件在工作时都与电磁现象有关，其电磁性质比较复杂，给分析电路带来一定的困难。因此，必须在一定的条件下对实际元件加以近似化，忽略它的次要性质，用一个足以表征其主要性能的元素模型来表示，借此把它们看成理想电路元件。

在电工技术中，常用的基本理想电路元件有以下五种。

① 电阻元件：表示消耗电能，将电能转换为其他形式能的元件，如电阻器、灯泡、电炉等。可用理想电阻来反映其在电路中消耗电能这一主要特征。

② 电容元件：表示产生电场、储存电场能量的元件，如各种电容器。可用理想电容来反映其储存电能的特征。

③ 电感元件：表示产生磁场、储存磁场能量的元件，如各种电感线圈。可用理想电感来反映其储存磁能的特征。

④ 电源元件：表示能将其他形式的能量转换为电能的元件。电源元件有两种类型，

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08chapter  
09chapter  
10

即理想电压源和理想电流源。

以上这些理想元件可以用来表征千万种实际部件，通常用国家统一规定的标准图形符号和文字符号表示，如图 1-4 所示。

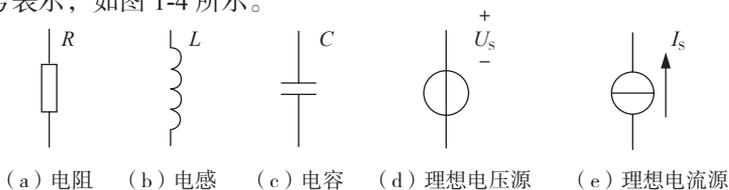


图 1-4 理想电路元件

## 2. 电路模型

为了在电路分析中简化分析和计算，可用理想电路元件（或其某种组合）来代替实际的电路元件。这种由理想电路元件构成的电路称为电路模型。图 1-5 是手电筒的实际电路与电路模型。今后我们研究的电路都是这种由理想元件构成的电路模型。

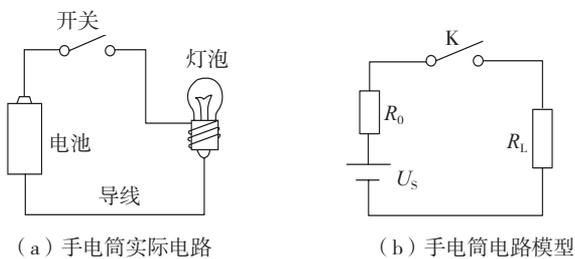


图 1-5 手电筒实际电路与电路模型

## 二、电路的主要物理量

电路的工作状态往往由电路的一些物理量来反映，下面介绍电路的一些主要物理量。

### （一）电流

#### 1. 电流的概念和大小

电荷在电场力（外电路）或其他力（内电路中化学力、电磁力等）的作用下，在电路中有规则地定向运动，就形成了电流。

电流的大小（即强弱）用电流强度来表示。电流强度通常简称为电流，用符号  $i(t)$  或  $i$  表示。设在  $dt$  时间内通过导体某一横截面的电荷量为  $dq$ ，则通过该横截面的电流为

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

我国法定计量单位是以国际单位制(SI)为基础的。它规定电流的单位是 A(安[培])。当每 1 s(秒)内通过导体截面的电荷量为 1 C(库[仑])时，则通过该截面的电流为 1 A，故 1 A=1 C/s。计量微小电流时，以 mA(毫安)或  $\mu$ A(微安)为单位。它们之间的换算关系为

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

## 2. 电流的方向

习惯上，人们规定正电荷移动的方向或负电荷移动的反方向为电流的实际方向，如图 1-6 所示。

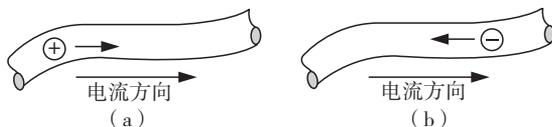


图 1-6 电流的方向

在一般情况下，电流是随时间而变的。如果电流不随时间而变，满足  $dq/dt = \text{常数}$ ，即大小和方向都不随时间而变化，则这种电流称为直流电流，用符号  $I$  表示，它所通过的路径就是直流电路。直流电流用公式表示为：

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

电流的方向是客观存在的。在简单电路中，人们很容易判断出电流的实际方向，如图 1-7a 中的  $I_1$ 、 $I_2$ 。倘若在图中  $A$ 、 $B$  点之间再接入一个电阻  $R$ ，如图 1-7b 所示，那么该电阻中电流的实际方向就很难直观判定了。另外，在交流电路中，电流是随时间变化的，在图上也无法表示其实际方向。为了解决这一问题，需引入电流的参考方向这一概念。对于电流这种具有两种可能方向的物理量，可以任意选定一个方向作为某支路电流的参考方向，用箭头表示在电路图上，以此参考方向作为计算的依据。计算完毕后，对于某一条支路，若在设定的参考方向下算出  $I > 0$ ，表明电流的实际方向与设定的参考方向一致；反之，若算出  $I < 0$ ，则表明电流的实际方向与所选的参考方向相反。

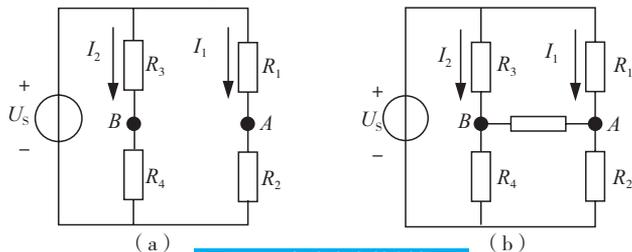


图 1-7 电流方向的判断图

### 小提示

#### 电流实际方向与参考方向的关系

采用了电流的参考方向以后，电流就变为代数量了（有正负之分）。在选定的参考方向下，根据电流的正、负，就可以确定电流的实际方向，如图 1-8 所示。此后，本书电路图上所标出的电流方向都是参考方向。

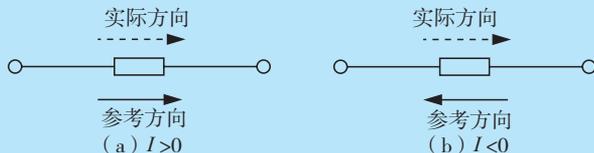


图 1-8 电流的参考方向与实际方向

chapter  
01

chapter  
02

chapter  
03

chapter  
04

chapter  
05

chapter  
06

chapter  
07

chapter  
08

chapter  
09

chapter  
10

## (二) 电压

### 1. 电压的概念和大小

电压就像水压，水压能使静止的水按一定的方向流动，那么电压就是能使导体中电荷按一定方向运动的一个物理量。

$a$ 、 $b$  两点之间的电压  $u_{ab}$  在数值上等于单位正电荷在电场力作用下由  $a$  点经外电路移动到  $b$  点，电场力所做的功。若电场力移动电荷  $q$  所做的功为  $W$ ，则移动单位电荷所做的功为

$$u_{ab} = \frac{dW_{ab}}{dq} \quad (1-3)$$

在国际单位制中，电压的单位是 V（伏 [特]）。当电场力把 1 C（库 [仑]）的电荷从一点移到另一点所做的功为 1 J（焦 [耳]）时，该两点间的电压为 1 V。计量微小电压时，则以 mV（毫伏）或  $\mu$ V（微伏）为单位。计量高电压时，则以 kV（千伏）为单位。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV} = 10^6 \mu\text{V}, \quad 1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

### 2. 电压的方向

习惯上规定电压的实际方向为从高电位点指向低电位点，即电位降低的方向。

电压的方向有 3 种表示方法，如图 1-9 所示。图 1-9a 所示为用箭头的指向表示，箭头由高电位端指向低电位端；图 1-9b 所示为用“+”、“-”标号分别表示高电位端和低电位端；图 1-9c 所示为用双下标来表示，如  $U_{ab}$  表示  $a$ 、 $b$  两点间电压的方向是从  $a$  指向  $b$  的。以上 3 种表示方法，其意义是相同的，只需任选一种标出即可。

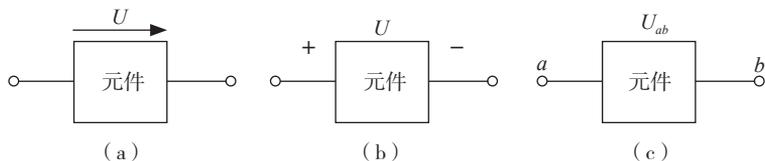


图 1-9 电压的方向的三种表示方法

一般情况下，电压是随时间而变的，如果电压不随时间而变，满足  $dW_{ab}/dq = \text{常数}$ ，即大小和方向都不随时间而变化，则这种电压称为直流电压，用符号  $U$  表示。直流电压用公式表示为

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{q} \quad (1-4)$$

在电路分析时，电压的实际方向有时很难确定，因此同样可以任意选定电路电压的参考方向。在标定了电压的参考方向之后，电压的数值就有了正、负之分。当电压为正（ $U > 0$ ）时，电压的实际方向与参考方向一致；电压为负（ $U < 0$ ）时，电压的实际方向与参考方向相反，如图 1-10 所示。

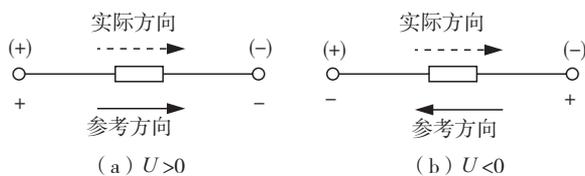


图 1-10 电压的参考方向与实际方向

小提示

电压实际方向与参考方向的关系

采用了电压的参考方向以后，电压就变为代数量了（有正负之分）。在选定的参考方向下，根据电压的正、负，就可以确定电压的实际方向，如图 1-10 所示。此后，本书电路图上所标出的电压方向都是参考方向。

小提示

电压、电流的关联参考方向

在分析和计算电路时，电压和电流参考方向的假定，原则上是任意的。但为了方便起见，元件上的电压和电流常取一致的参考方向，即电流从正极性端流入该元件，从负极性端流出。这样选择的某一段电路的电流与电压的参考方向称为关联的参考方向，否则为非关联参考方向。图 1-11a 所示的  $U$  与  $I$  参考方向一致，为关联参考方向，则其电压与电流的关系是  $U = IR$ ；而图 1-11b 所示的  $U$  与  $I$  参考方向不一致，称为非关联参考方向，则电压与电流的关系是： $U = -IR$ 。可见，在列写电压与电流的关系式时，式中的正、负号由它们的参考方向是否一致来决定。后面计算电路时，一般先标出电流和电压的参考方向再进行计算。参考方向可以任意选定，但一经选定，在电路的分析计算过程中不应改变。

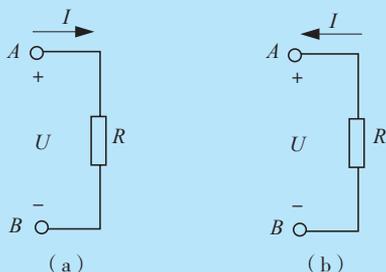


图 1-11 关联参考方向与非关联参考方向

课堂讨论

为什么要在电路图上规定电压、电流的参考方向？在分析电路时，电压和电流的参考方向能否随意改变？为什么？

(三) 电位

1. 电位与电压的关系

在电路中任选一点作为参考点（记作  $O$ ），则该电路中  $a$  点到参考点  $O$  的电压就叫

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08
- chapter 09
- chapter 10

做  $a$  点的电位，也就是电场力把单位正电荷从  $a$  点移到参考点  $O$  所做的功。电位的符号用字母  $V$  加单下标的方法来表示，如  $V_a$ 、 $V_b$ ，分别表示  $a$  点、 $b$  点的电位。

对照电位与电压的定义，不难理解电路中任意一点的电位，实质就是该点与参考点之间的电压，而电路中任意两点之间的电压，则等于这两点电位之差，即

$$V_a = U_{ao} \quad (1-5)$$

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-6)$$

电位的单位与电压相同，也是 V（伏）。

参考点不同，电路中各点的电位也不同。因为各点的电位高低是相对于参考点而言的，但任意两点间的电位差不变，即两点间的电压值与参考点的选择无关。因此，计算电路中各点电位时，必须先选定电路中某一点作为电位参考点，它的电位称为参考电位，并设参考电位为零。其他各点的电位，比参考点电位高的电位为正，比参考点电位低的电位为负。电位参考点的选取，原则上是任意的，但实际中常选大地为参考点，在电路图中用图形符号“ $\perp$ ”表示。有些设备的外壳是接地的，凡与机壳相连的各点，均是零电位点。有些设备的机壳不接地，则选择许多导线的公共点（通常是机壳或底板）作参考点，电路中用图形符号“ $\perp$ ”或“ $\perp$ ”表示。

## 2. 电位的计算

根据电位的概念，要计算电路中某一点的电位，就是从参考点出发，沿着任选的一条路径“走”到该点，遇到电位升高取正值，遇到电位降低取负值，累计其代数和就是该点的电位。

例 1-1 在图 1-12 中，若分别以  $a$  点、 $b$  点为参考点，已知  $R_1=20 \Omega$ ， $R_2=6 \Omega$ ， $R_3=5 \Omega$ ， $U_{S1}=140 \text{ V}$ ， $U_{S2}=90 \text{ V}$ ，求  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  各点电位和  $U_{ab}$ 、 $U_{ac}$  之值。

解：① 以  $a$  点为参考点时，有  $V_a=0$ ，则

$$V_b = U_{ba} = -10 \times 6 = -60 \text{ (V)}$$

$$V_c = U_{ca} = 4 \times 20 = 80 \text{ (V)}$$

$$V_d = U_{da} = 6 \times 5 = 30 \text{ (V)}$$

$$U_{ab} = V_a - V_b = 60 \text{ (V)}$$

$$U_{ac} = V_a - V_c = -80 \text{ (V)}$$

② 以  $b$  点为参考点时，有  $V_b=0$ ，则

$$V_a = U_{ab} = 10 \times 6 = 60 \text{ (V)}$$

$$V_c = U_{cb} = U_{S1} = 140 \text{ (V)}$$

$$V_d = U_{db} = U_{S2} = 90 \text{ (V)}$$

$$U_{ab} = 60 \text{ (V)}$$

$$U_{ac} = V_a - V_c = -80 \text{ (V)}$$

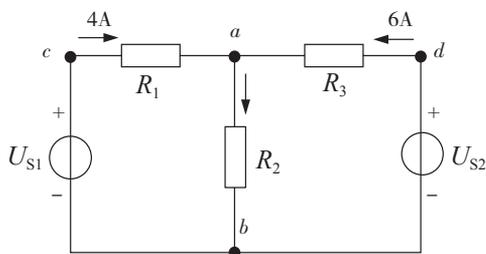


图 1-12 例 1-1 图

由以上结果可见：电路中各点电位值的大小是相对的，随参考点的改变而改变；而

两点间的电压值是绝对的，与参考点的选取无关。

知识延伸

等电位的概念

如果电路中某两点间电压的计算结果为零，则表示该两点等电位。若两等电位点之间原无导线连结，则用导线连结这两点后，此导线中不会有电流通过。高压带电作业时，要求人体与高压电线等电位，这样即使人体碰到高压电线也不会有电流通过，可以保证人身安全。

注意：电路中用短线连结的两点，对于同一参考点的电位应该相等。两点间连结有正常工作的元器件，就应该有一定的电压。

(四) 电动势

1. 电动势的概念和大小

在图 1-13 所示的电路中，正电荷在电场力作用下不断从 A 极板经负载流向 B 极板，如果没有一种外力作用，A 极板因正电荷的减少电位逐渐降低，B 极板则因正电荷的增多电位逐渐升高，这样 A、B 两点之间的电位差就会减小，最后减为零。连结导线上的电流也会减小，最后为零。为了维持导线中的电流，必须使 A、B 两极板间保持一定的电压，这就要借助外力使移动到 B 极板的正电荷经过另一路径回到 A 极板，在这过程中外力要克服电场力做功，这种外力是非电场力，称为电源力。为了衡量电源力对电荷做功的能力，引出电动势这个物理量。

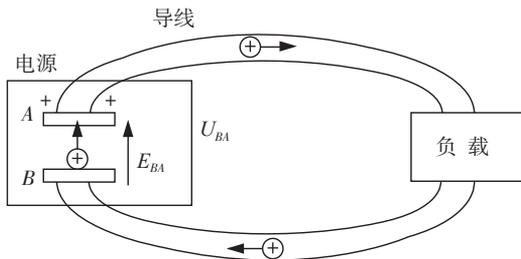


图 1-13 电压与电动势

电动势在数值上等于电源力将单位正电荷从电源负极 (B 点) 移到电源正极 (A 点) 所做的功，电动势用  $E$ ，即

$$E = \frac{W_{\text{外}}}{q} \quad (1-7)$$

电动势的单位与电压相同，也是 V (伏)。

2. 电动势的方向

电动势的实际方向规定为在电源内部由低电位 (负极) 指向高电位 (正极)，即电位升高的方向，与电源电压的实际方向相反，标注如图 1-14 所示，参考方向也可用箭头、双下标或“+”、“-”极性表示。

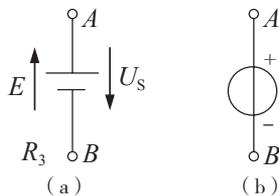


图 1-14 电动势标注方法

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08
- chapter 09
- chapter 10

### 3. 电源端电压与电动势关系

(1) 电源端电压  $U_s$  反映的是电场力在外电路将正电荷由高电位点（正极）移向低电位点（负极）做功的能力。电动势  $E$  反映的是电源力将电源内部的正电荷从低电位点（负极）移向高电位点（正极）做功的能力。

(2) 若不考虑电源内损耗，则电源电动势在数值上与它的端电压相等，但实际方向相反，即  $E = -U_s$ ，如图 1-14 所示。

(3) 电源对电路的作用效果可以用电动势来表示，也可以用电压来表示，电动势  $E$  和电压  $U_s$  反映的是同一件事。所以，在很多情况下，常常不用电动势  $E$  而是用电源正负极之间的电压来表示电源的作用效果。

## (五) 电功和电功率

### 1. 电功

电功，简单地说就是电流所做的功（本质上是电场所做的功）。电流在经过电气设备时会发生能量的转换，能量转换的大小就是电流所做功的大小，用符号  $W$  表示，国际单位为焦耳（J），常用单位为千瓦时（ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ）， $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ 。

在图 1-15 所示的电路中， $a$ 、 $b$  两点间的电压为  $U$ ，流过的电流为  $I$ 。根据电压的定义可知，当正电荷  $q$  在电场的作用下通过电阻  $R$  从  $a$  点移到  $b$  点，电场力所做的功为

$$W = qU = UI t \quad (1-8)$$

这个功也就是电阻  $R$  在  $t$  时间内所吸收的电能。对于电阻来说，吸收的电能全部转换成热能，其大小为

$$W_R = UI t = I^2 R t \quad (1-9)$$

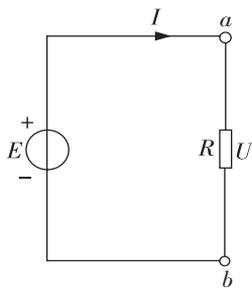


图 1-15 电功与电功率

### 2. 电功率

电功率就是能量转换的速率，即单位时间内电气设备能量转换的大小，简称功率。电功率用符号  $p$  或  $P$  表示，在电流、电压关联参考方向下，电功率的计算公式为

$$P = \frac{dW}{dt} = ui \quad (1-10)$$

在直流电路中，电功率的计算公式为

$$P = \frac{W}{t} = UI \quad (1-11)$$

这说明，当电流、电压取相关联的参考方向时，某电路消耗的功率等于  $U$  与  $I$  两者的乘积。由于电压和电流都是代数量，故功率也是代数量，有正有负。当  $U$  与  $I$  参考方向一致时，若求得  $P > 0$ ，则电路实际消耗功率；若  $P < 0$ ，则电路消耗负功率，即电路实际提供功率。当  $U$  与  $I$  参考方向不一致时，则电路消耗的功率为  $P = -UI$ 。

在国际单位制中, 功率的单位是 W (瓦)。此外, 功率的单位还有 kW (千瓦) 和 mW (毫瓦)。它们之间的关系为

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W} = 10^6 \text{ mW}$$

当电路接通后, 电路中就有了电能和非电能的转换。根据能量转换和守恒定律, 电路中电源供出的电能应等于负载消耗或吸收的电能的总和。

### 三、电路的工作状态

实际电路在使用过程中, 可能处于有载、开路或短路三种基本工作状态。如图 1-16 所示。用  $U_1$  表示电源的端电压 ( $U_{AB}$ ), 用  $U_2$  表示负载的端电压 ( $U_{CD}$ ), 下面来讨论电路的状态。

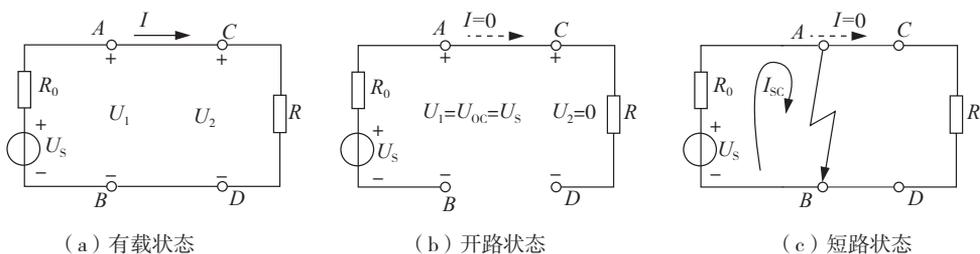


图 1-16 电路的三种基本工作状态

#### (一) 有载状态

有载状态是电路的一般工作状态, 如图 1-16a 所示。此时电路有下列特征:

(1) 电路中的电流为

$$I = \frac{U_s}{R_0 + R} \quad (1-12)$$

当电源的  $U_s$ 、 $R_0$  一定时, 电流由负载电阻  $R$  的大小来决定。

(2) 电源的端电压为

$$U_1 = U_s - IR_0 \quad (1-13)$$

上述表明, 电源的端电压总是小于电源的电压。这是因为电源的电压  $U_s$  减去内阻电压降  $IR_0$  后, 才是电源的输出电压  $U_1$ 。若忽略线路上的压降, 则负载的端电压  $U_2$  等于电源的端电压  $U_1$ 。

(3) 电源的输出功率为

$$P_1 = U_1 I_1 = (U_s - IR_0)I = U_s I - I^2 R_0 \quad (1-14)$$

上式表明, 电源电压发出的功率  $U_s I$  减去内阻上的消耗  $I^2 R_0$  才是供给外电路的功率  $P_1$ , 即电源发出的功率等于电路各部分所消耗的功率和。由此可见, 整个电路中功率是平衡的。



知识链接

电器的额定值

在实际电路中,所有电气设备和元器件,其工作电流、电压和功率等都有一定的使用限额,这种限额称为额定值。额定值是制造厂商综合考虑产品的可靠性、经济性和使用寿命等因素而制定的,它是使用者使用电气设备和元器件的依据。例如,某白炽灯标明的 220 V、100 W,就是它的额定值,即额定电压为 220 V、额定功率为 100 W。它告诉使用者,该白炽灯在 220 V 电压下才能正常工作,这时消耗功率为 100 W。通过计算还可求得该白炽灯在 220 V 电压下流过的电流为  $I = P/U = (100/220) \text{ A} \approx 0.5 \text{ A}$ ,这便是该白炽灯的额定电流。如果使用值超过额定值较多,则会使电气设备和元器件损伤,影响寿命,甚至烧毁;如果使用值低于额定值较多,则不能正常工作,有时也会造成设备的损坏。例如,电压过低时,白炽灯发光不足,电动机因无法带动生产机械而发热。因此,电气设备和元器件在使用值等于额定值时工作是最合理的,既保证能可靠工作,充分发挥其效能,又保证有足够的使用寿命。额定值用带有下标“N”的字母来表示。例如,额定电压和额定电流分别用  $U_N$  和  $I_N$  表示,额定功率用  $P_N$  表示,这些额定值常标记在设备的铭牌上。

通常,当实际使用值等于额定值时,电气设备的工作状态称为额定状态(或满载);当实际功率或电流大于额定值时,电气设备工作在过载(或超载)状态;当实际功率和电流小于额定值时,电气设备工作在轻载(或欠载)状态。

(二) 开路状态

开路状态又称为断路(或空载)状态,如图 1-16b 所示。当开关断开(控制性断路)或联结导线松脱(故障性断路)时,都会发生这种状态。电路空载时,外电路所呈现的电阻可视为无穷大,故电路具有下列特征:

(1) 电路中的电流为零,即

$$I=0 \tag{1-15}$$

(2) 电源的端电压等于电源的电压,即

$$U_1=U_s - IR_0=U_s \tag{1-16}$$

此电压称为空载电压或开路电压,用  $U_{oc}$  表示,其值等于电源电动势。由此可以得出测量电源电动势的方法。

(3) 电源的输出功率  $P_1$  和负载所吸收的功率  $P_2$  均为零。这是因为,电源对外不输出电流,故

$$\begin{aligned} P_1 &= U_1 I_1 = 0 \\ P_2 &= U_2 I_2 = 0 \end{aligned} \tag{1-17}$$

(三) 短路状态

当电源的两个输出端(A、B)由于某种原因(如电源线绝缘损坏、操作不慎等)相接触时,会造成电源被直接短路的情况,如图 1-16c 所示。

当电源短路时,电路具有下列特征:

(1) 电源中的电流最大, 但对负载输出的电流为零。

此时电源中的电流为

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

此电流称为短路电流。在一般的供电系统中, 电源的内电阻  $R_0$  很小, 故短路电流  $I_{sc}$  很大。但对外电路无电流输出, 即  $I = 0$ 。

(2) 电源和负载的端电压均为零, 即

$$U_1 = U_s - I_{sc}R_0 = 0$$

$$U_2 = U_1 = 0$$

上式表明, 电源的电压全部降落在电源的内阻上, 因而无输出电压。

(3) 电源对外输出功率  $P_1$  和负载所吸收的功率  $P_2$  均为零。这是因为, 电源对外电路既不输出电压, 也不输出电流, 即

$$\begin{cases} P_1 = U_1 I = 0 \\ P_2 = U_2 I = 0 \end{cases} \quad (1-19)$$

而这时电源所发出的功率为

$$P_E = U_s I_{sc} = \frac{U_s^2}{R_0} = I_{sc}^2 R_0 \quad (1-20)$$



### 课堂讨论

短路通常是严重的事故。如果发生短路会产生什么后果? 可采取什么措施防止短路事故的发生?

例 1-2 图 1-17 所示电路中, 电源的电动势  $U_s$  为 12 V, 内阻  $R_0$  为 0.2  $\Omega$ , 求开关 S 分别与 1、2、3、4 端相接时电路中的电流和电源的端电压。

解: ① S 与 1 端相接时:

$$I_{R_1} = \frac{U_s}{R_0 + R_1} = \frac{12}{0.2 + 2.2} = 5(\text{A})$$

$$U = U_s - I_{R_1} R_0 = 12 - 5 \times 0.2 = 11(\text{V})$$

② S 与 2 端相接时:

$$I_{R_2} = \frac{U_s}{R_0 + R_2} = \frac{12}{0.2 + 0.1} = 40(\text{A})$$

$$U = U_s - I_{R_2} R_0 = 12 - 40 \times 0.2 = 4(\text{V})$$

③ S 与 3 端相接时 (开路状态):

$$I_{R_3} = 0, \quad U = U_s = 12(\text{V})$$

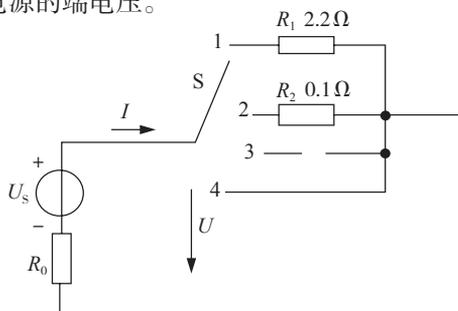


图 1-17 例 1-2 的图

chapter  
01

chapter  
02

chapter  
03

chapter  
04

chapter  
05

chapter  
06

chapter  
07

chapter  
08

chapter  
09

chapter  
10

④ S 与 4 端相接时（短路状态）：

$$I_{R_4} = I_S = \frac{U_S}{R_0} = \frac{12}{0.2} = 60(\text{A})$$

$$U = U_S - I_S R_0 = 12 - 60 \times 0.2 = 0(\text{V})$$

注：这时由于输出电压为零，故电源对外电路不做功，电源内阻上消耗的功率

$$P_0 = I_S^2 R_0 = 60^2 \times 0.2 = 720(\text{W})$$

即电源发出的功率  $P_S = U_S I_S = 12 \times 60 = 720(\text{W})$  全部消耗在电源内阻上了。

### 学习案例

2012 年 11 月 14 日 10 时 43 分，上海一老式居民住宅楼发生火灾，着火面积约 400 平方米，火灾造成 15 户居民住宅不同程度的烧损。起火建筑为砖木结构三层，底楼 9 个房间，二楼 7 个房间，三楼 5 个房间。事故过程中，整栋建筑除底楼东南侧和西南侧两个房间未发生燃烧外，其余房间均过火燃烧，二楼、三楼楼板部分被烧穿，三楼屋顶局部坍塌。火灾造成 1 人死亡，直接财产损失 110 万元。

### 案例分析

经过调查分析，火灾原因为底楼西侧后门过道内南墙配电板上的电气线路发生短路，引燃导线绝缘层和周边的可燃物。

电气线路由于敷设不正确或安装和使用违反安全规程，极易形成短路、导线过负荷或局部接触电阻过大，以致产生电火花或高温，造成电气线路火灾。

### 知识拓展

#### 指针万用表的使用方法

##### 1. 准备工作

由于万用表种类、型号很多，因此在使用前要做好测量的准备工作。

(1) 熟悉转换开关、旋钮、插孔等结构的作用，检查表盘符号，如“ $\square$ ”表示水平放置，“ $\perp$ ”表示垂直使用。

(2) 了解刻度盘上每条刻度线所对应的被测电量。

(3) 检查红色和黑色两根表笔所接的位置是否正确，红表笔插入“+”插孔，黑表笔插入“-”插孔。如用交、直流 2 500 V 测量端，在测量时黑表笔不动，将红表笔插入高压插口。

(4) 进行机械调零，旋动万用表面板上的机械零位调整螺钉，使指针对准刻度盘左端的“0”位置。

##### 2. 测量直流电流

(1) 把转换开关拨到直流电流挡，选择合适的量程。

(2) 将被测电路断开, 将万用表串接于被测电路中。务必注意正、负极性, 应使电流从红表笔流入、从黑表笔流出, 不可接反。

(3) 根据指针稳定时的位置及所选量程正确读数。电流表指示的读数方法是: 满度值(刻度线最右边)等于所选量程挡位数, 根据表针指示位置折算出测量结果。在图 1-18 的示例中, 当测量选择开关位于“0.05 mA”挡时, 指示值为  $35 \mu\text{A}$ ; 选择开关位于“5 mA”挡时, 指示值为 3.5 mA; 选择开关位于“500 mA”挡时, 指示值为 350 mA; 依此类推。

### 3. 测量直流电压

(1) 把转换开关拨到直流电压挡, 并选择合适的量程。当被测电压数值范围不清楚时, 可先选用较高的测量范围挡, 再逐步选用低挡, 测量的读数最好选在满刻度的  $2/3$  处附近。

(2) 把万用表并接到被测电路上, 红表笔接到被测电压的正极, 黑表笔接到被测电压的负极, 不能接反。

(3) 根据指针稳定时的位置及所选量程正确读数。电压表指示的读数方法是: 满度值(刻度线最右边)等于所选量程挡位数, 根据表针指示位置折算出测量结果。图 1-19 示例中, 当测量选择开关位于“10 V”挡时, 指示值为 7 V; 当选择开关位于“50 V”挡时, 指示值为 35 V; 当选择开关位于“250 V”挡时, 指示值为 175 V; 依此类推。

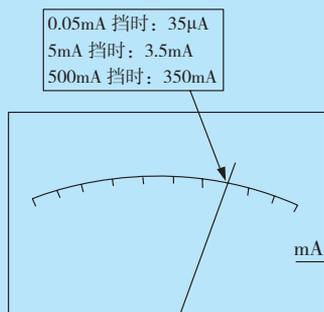


图 1-18 电流表指示的读数方法

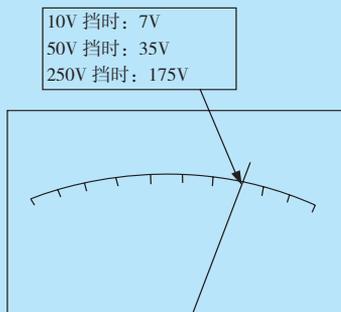


图 1-19 电压表指示的读数方法

### 4. 测量交流电压

(1) 把转换开关拨到交流电压挡, 选择合适的量程。

(2) 将万用表两表笔并联在被测电路的两端, 不分正、负极。

(3) 根据指针稳定时的位置及所选量程正确读数, 读数方法与测量直流电压时相同, 但需注意的是其读数为交流电压的有效值。

用万用表测量电压或电流时的注意事项如下:

(1) 测量时, 不能用手触摸表笔的金属部分, 以保证安全和测量的准确性。

(2) 测直流量时要注意被测电量的极性, 避免指针反打而损坏表头。

chapter  
01

chapter  
02

chapter  
03

chapter  
04

chapter  
05

chapter  
06

chapter  
07

chapter  
08

chapter  
09

chapter  
10

(3) 不能带电调整挡位或量程, 避免转换开关的触点因产生电弧而被损坏。

(4) 测量完毕后, 将转换开关置于交流电压最高挡或空挡 (OFF)。

### 5. 测量电阻

(1) 把转换开关拨到欧姆挡, 合理选择量程。

(2) 两表笔短接, 调节欧姆挡调零旋钮, 使指针对准刻度右端的“0 Ω”处。

(3) 使被测电阻脱离电源, 用两表笔接触电阻两端, 用表头指针显示的读数乘以所选量程的倍率数即为所测电阻的阻值。欧姆表刻度盘的特点是: 刻度盘右端为“0 Ω”, 左端为“∞”, 且

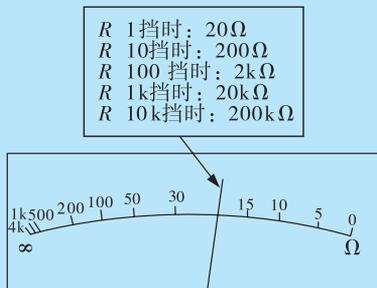


图 1-20 欧姆表指示的读数方法

为非线性刻度。图 1-20 示例中, 当测量选择开关位于“ $R \times 1$ ”挡时, 指示值为 20 Ω; 当选择开关位于“ $R \times 10$ ”挡时, 指示值为 200 Ω; 当选择开关位于“ $R \times 100$ ”挡时, 指示值为 2 kΩ; 当选择开关位于“ $R \times 1 \text{ k}$ ”挡时, 指示值为 20 kΩ; 当选择开关位于“ $R \times 10 \text{ k}$ ”挡时, 指示值为 200 kΩ, 依此类推。

用万用表测量电阻时的注意事项如下:

(1) 不允许带电测量电阻, 否则会烧坏万用表。

(2) 万用表内干电池的正极与面板上的“-”号插孔相连, 干电池的负极与面板上的“+”号插孔相连。在测量电解电容和晶体管等器件的电阻时要注意极性。

(3) 每换一次倍率挡, 要重新进行欧姆调零。

(4) 不允许用万用表欧姆挡直接测量高灵敏度表头内阻, 以免烧坏表头。

(5) 不准用两只手捏住表笔的金属部分测电阻, 否则会将人体电阻并接于被测电阻而引起测量误差。

(6) 测量完毕后, 将转换开关置于交流电压最高挡或空挡 (OFF)。

### 6. 测量电容

测量电容时, 采用 10 V、50 Hz 的交流电压作为信号源, 万用表应置于“交流电压 10 V”挡。应该注意的是 10 V、50 Hz 的交流电压必须准确, 否则会影响测量的准确性。测量时, 将被测电容  $C$  与任一表笔串联后, 再串接于 10 V 交流电压回路中, 如图 1-21 所示, 万用表即指示出被测电容  $C$  的容量。

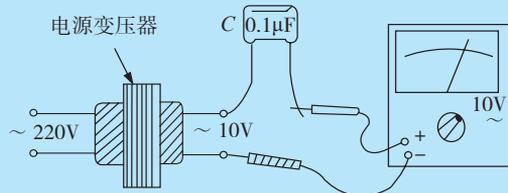


图 1-21 万用表测量电容

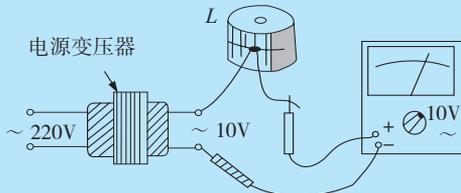


图 1-22 万用表测量电感

## 7. 测量电感

测量电感与测量电容方法相同,将被测电感 $L$ 与任一表笔串联后,再串接于10 V 交流电压回路中,如图 1-22 所示,万用表即指示出被测电感 $L$ 的电感量。

## 8. 测量晶体管的直流电流放大倍数

将万用表上的挡位转换开关转动至“ADJ(校准)”挡位,两表笔短接,调节欧姆挡调零旋钮,使表针对准 $h_{FE}$  刻度线的“300”处。然后分开两表笔,将转换开关拨至“ $h_{FE}$ ”挡位即可插入晶体管进行测量。万用表上的晶体管插孔,左半边用于测量 NPN 型晶体管,右半边用于测量 PNP 型晶体管,表针所指示的数值即为晶体管的直流放大倍数。

## 实训一 直流电路中电压、电流的测量

### 实训目的

- (1) 掌握万用表的使用方法。
- (2) 能正确使用万用表进行直流电压、直流电流、电阻的测量。
- (3) 掌握直流电源的使用方法。

### 实训要求

- (1) 根据给定电路图正确布线,使电路正常运行。
- (2) 通过对电路中电流和电压的测量,学会正确使用测量仪表。
- (3) 正确测量电压和电流等相关数据并进行数据分析。
- (4) 撰写安装与测试报告。

### 实训设备

- (1) 电工电路综合实训台:一套;
- (2) 直流稳压电源:1台;
- (3) 电阻:若干;
- (4) 万用表:1块。

### 测试电路

测试电路如图 1-23 所示。

### 测试内容

- (1) 调节稳压电源使其输出电压 $U_S=10\text{ V}$ 。
- (2) 选取两组负载电阻:  
第一组: $R_1=200\ \Omega$ 、 $R_2=300\ \Omega$ 、 $R_3=600\ \Omega$ ;

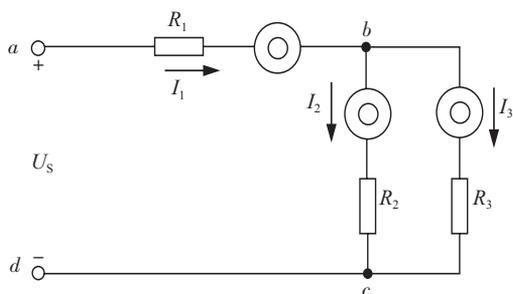


图 1-23 测量电压、电流的实验电路

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06chapter  
07chapter  
08chapter  
09chapter  
10

第二组： $R_1=400\ \Omega$ 、 $R_2=600\ \Omega$ 、 $R_3=1000\ \Omega$ 。

先用万用表的欧姆挡测量上述电阻的阻值，检验其是否与标称值一致。测量时，应先根据电阻上的标称阻值选择适当的欧姆倍率挡位，如“ $\times 100$ ”或“ $\times 1\text{ k}$ ”等，然后把两根表笔短接，调节调零旋钮，使指针对准刻度右端的“ $0\ \Omega$ ”处，此时的电阻阻值为0。

注意：每次变换倍率挡位时都必须重新调零。

这里必须强调：在通电时绝对不能用万用表来测量电阻的阻值。

(3) 按图 1-23 所示的实验电路接线，图中“ $\text{—}\odot\text{—}$ ”为电流测量插口，平时为接通状态，当电流表的插头插入时，该处电路自行断开，电流表经过插头串联接入电路，电流表的读数就是该支路流过的电流大小。

(4) 用直流电流表测量电路中的电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ，用直流电压表测量电路中的电压  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$ 、 $U_{cd}$ 、 $U_{bd}$ ，并将读数填入表 1-1。

因为电路中连接导线有一定的电阻值，测量电流、电压的插口也可能有一定的接触电阻，同时电阻上标明的标称值与实际值有一定范围的误差，因此累加起来会导致测量得到的电压、电流数值与理论计算数值有一定的误差，该误差可以用相对误差来表示。一般来说，相对误差是较小的，如果过大则必须检查测量仪表在测量前是否经过调零或是否已损坏。

$$\text{相对误差 } \delta = \frac{|\text{测量值} - \text{实际值}|}{\text{实际值}} \times 100\%$$

表 1-1 电压、电流的测量数据

	$I_1/\text{A}$		$I_2/\text{A}$		$I_3/\text{A}$		$U_{ab}/\text{V}$		$U_{bc}/\text{V}$		$U_{bd}/\text{V}$		$U_{cd}/\text{V}$	
	计算	测量	计算	测量	计算	测量	计算	测量	计算	测量	计算	测量	计算	测量
$R_1=200\ \Omega$														
$R_2=300\ \Omega$														
$R_3=600\ \Omega$														
相对误差														
$R_1=400\ \Omega$														
$R_2=600\ \Omega$														
$R_3=1000\ \Omega$														
相对误差														

### 实训分析、思考

(1) 写出“计算值”的计算过程及求得相对误差的计算过程。

---



---

(2) 分析产生相对误差的大致原因。

\_\_\_\_\_

(3) 实验体会。

\_\_\_\_\_

### 教学检测



#### 填空题

1. 在图 1-24a 所示电路中, 从  $a$  点到  $c$  点的电压  $U_{ac} =$  \_\_\_\_\_ V, 从  $a$  点至  $b$  点的电压  $U_{ab} =$  \_\_\_\_\_ V, 从  $b$  点至  $c$  点的电压  $U_{bc} =$  \_\_\_\_\_ V。在图 1-24b 电路中, 元件 B 的电压、电流的参考方向是关联的, 而对于元件 A, 则是 \_\_\_\_\_。图 1-24c 电路中,  $U_{ab} = -5$  V, 则  $V_a$  \_\_\_\_\_  $V_b$ 。

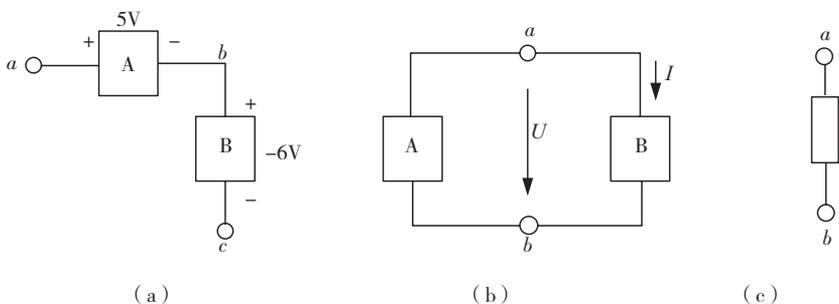


图 1-24 填空题 1 电路图

2. 指出图 1-25 所示电路中 A、B、C 三点的电位。

- (a) \_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_;
- (b) \_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_;
- (c) \_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_;
- (d) \_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_;
- (e) \_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。

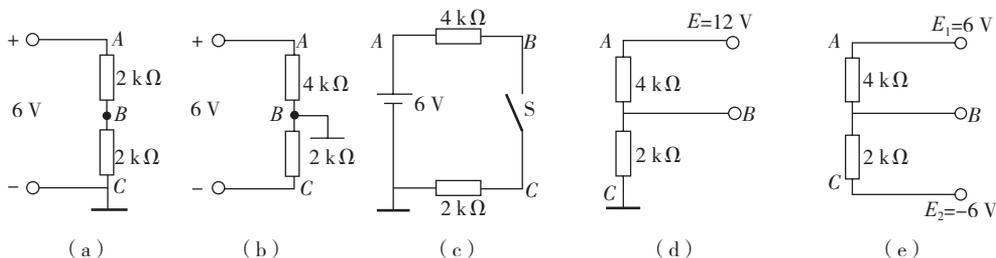


图 1-25 填空题 2 电路图

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08
- chapter 09
- chapter 10



**判断题**

1.  $U_{ab}$  表示  $a$  点的电位高于  $b$  点电位。 ( )
2. 可以任意选定电路中电压、电流的参考方向。 ( )



**简答题**

1. 图 1-26 所示为电流或电压的参考方向，试判别其实际方向。

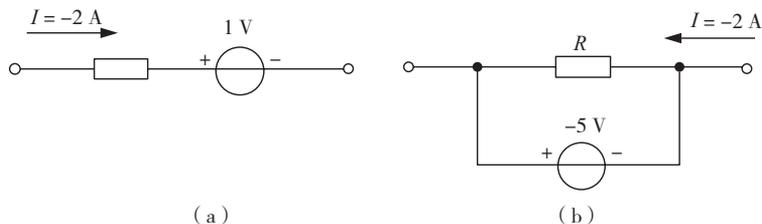


图 1-26 简答题 1 电路图

2. 在图 1-27 所示电路中，已知  $U = -10\text{ V}$ ， $I = 2\text{ A}$ ，试问  $A$ 、 $B$  两点哪点电位高？元件  $P$  是电源还是负载？

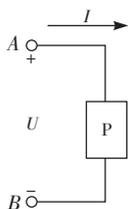


图 1-27 简答题 2 电路图

3. 在图 1-28 中，在开关  $S$  断开和闭合的两种情况下，试求  $A$  点的电位。

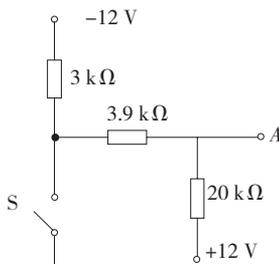


图 1-28 简答题 3 电路图

4. 一个电热器从  $220\text{ V}$  的电源上取用的功率是  $1\ 000\text{ W}$ ，如果将它接到  $110\text{ V}$  的电源上，则取用的功率为多少？

## 单元二 电阻电路的分析



**知识目标**

掌握电阻串、并联电路的特点，掌握并学会应用串联电路分压公式、并联电路分流公式。



**技能目标**

学会连接电阻串联、并联、混联电路，并会使用万用表测量不同电路的阻值。

## 基础知识

在电路中元器件的连接形式是多种多样的，其中最基本的是串联、并联和混联。

### 一、电阻的串联

如果在电路中有若干个电阻按照顺序首尾相连，各电阻通过同一电流，这样的连接称为电阻的串联。为了方便起见，下面以两个电阻为例讨论，所得结论同样适用于多个电阻的情况。

图 1-29a 所示是两个电阻串联的电路，它可以用一个等效电阻（也可称为这两个电阻的总电阻）来代替，如图 1-29b 所示。等效的条件是在同一电压  $U$  的作用下电流  $I$  保持不变。

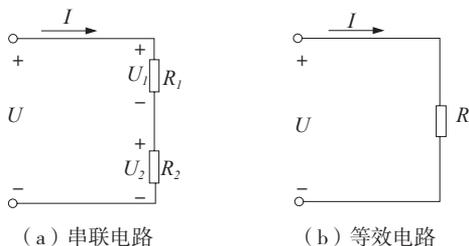


图 1-29 两个电阻的串联

串联电阻电路的特点如下：

(1) 各串联电阻中流过的电流相同，即

$$I = I_1 = I_2 \quad (1-21)$$

(2) 两端总电压等于各个电阻上的电压之和，即

$$U = U_1 + U_2 \quad (1-22)$$

(3) 总电阻（等效电阻）等于各个串联电阻之和，即

$$R = R_1 + R_2 \quad (1-23)$$

上式表明，串联电路的等效电阻比每个电阻都大。

(4) 串联电阻上电压的分配与其阻值成正比，电阻越大，分得的电压越高，即

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{IR_1}{IR_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad \text{或} \quad \begin{cases} U_1 = IR_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \\ U_2 = IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \end{cases} \quad (1-24)$$

$$(1-25)$$

(5) 串联电路消耗的总功率等于各电阻消耗的功率之和，即

$$P = P_1 + P_2 \quad (1-26)$$

## 课堂讨论

有一个电动玩具车，现在它动不了了，经检查，发现是里面一个  $6\Omega$  的电阻坏了，可是

chapter 01

chapter 02

chapter 03

chapter 04

chapter 05

chapter 06

chapter 07

chapter 08

chapter 09

chapter 10

手上只有  $1\ \Omega$ 、 $5\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $12\ \Omega$ 、 $15\ \Omega$  的电阻多个，没有  $6\ \Omega$  的，怎样才能利用这些电阻来得到一个  $6\ \Omega$  的电阻呢？

## 二、电阻的并联

如果在电路中有若干个电阻的首、尾分别相连，并承受同一电压，这样的连接称为电阻的并联。图 1-30a 所示是两个电阻并联的电路，它也可以用一个等效电阻（也称为这两个电阻的总电阻）来代替，如图 1-30b 所示。

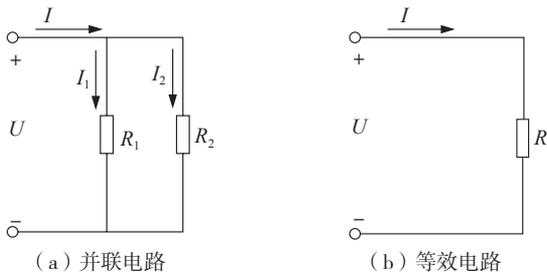


图 1-30 两个电阻的并联

并联电阻电路的特点如下：

(1) 各并联电阻两端的电压相等，即

$$U = U_1 = U_2 \quad (1-27)$$

(2) 电路总电流等于各个并联电阻上的电流之和，即

$$I = I_1 + I_2 \quad (1-28)$$

(3) 并联电阻的总电阻（等效电阻）的倒数等于各个并联电阻的倒数之和，即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

两个电阻并联时，有

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-29)$$

上式表明，并联电路的等效电阻比每个电阻都小。

(4) 并联各电阻上电流的分配与电阻的大小成反比，电阻越大，电流越小，即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U}{R_1}}{\frac{U}{R_2}} = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{或} \quad \begin{cases} I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{IR}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{IR}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{cases} \quad (1-30)$$

$$(1-31)$$

(5) 并联电路消耗的总功率等于并联各电阻消耗的功率之和，即

$$P = P_1 + P_2 \quad (1-32)$$

## 三、电阻的混联

实际应用的电路大多包含串联电路和并联电路。既有电阻的串联又有电阻的并联的

电路叫电阻的混联，如图 1-31a 所示。混联电路的串联部分具有串联的性质，并联部分具有并联的性质。计算混联电路的等效电阻时，一般采用电阻逐步合并的方法，关键在于认清总电流的输入端与输出端以及公共连接端点，由此来分清各电阻的连接关系；再根据串、并联电路的基本性质，对电路进行等效简化，画出等效电路图；最后计算出电路的等效电阻。

图 1-31a 中电阻  $R_2$  和  $R_3$  并联后与电阻  $R_1$  串联，图 1-31b 为电阻  $R_2$  和  $R_3$  并联后的等效电路，图 1-31c 为混联电路的等效电路，其等效电阻为

$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

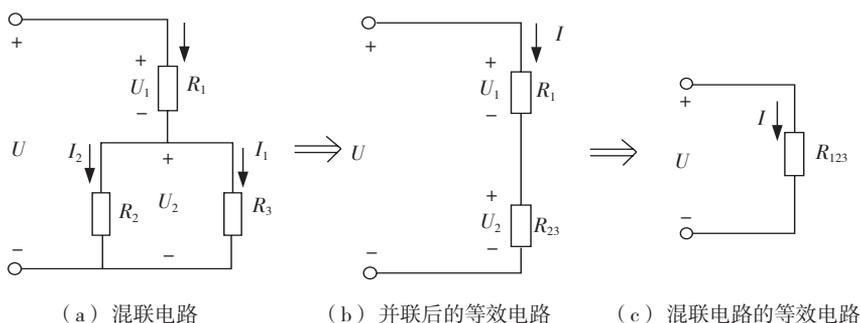


图 1-31 电阻的混联电路

## 学习案例

### 电表的改装

串联电阻分压和并联电阻分流这一思想方法的应用非常广泛，电表的改装就是一个常见的例子。

现实生活中，人们要测量不同范围的电压值或电流值，也就是说需要有各种不同量程的电压表和电流表。但在实际应用中，通常只提供某一规格的灵敏电流计（俗称表头），如何用它改装成不同量程的电压表和电流表呢？它们的内部结构又是怎样的呢？表头即灵敏电流计，是用来测量微小电流的，电路图中用符号 G 表示。它有两个重要的参数，一个是其内阻，通常用  $R_g$  表示；当指针指到最大刻度时，所通过的电流叫满偏电流，通常用符号  $I_g$  表示。此时加在表头两端的电压叫满偏电压。它表示了此表头两端允许加载的最大电压，通常用  $U_g$  表示。满偏电压与满偏电流的关系由欧姆定律得： $U_g = I_g \cdot R_g$ 。

### 案例分析

(1) 一表头的内阻  $R_g$  为  $100 \Omega$ ，满偏电流  $I_g$  为  $5 \text{ mA}$ ，求此表头的满偏电压  $U_g$ 。

此表头满偏电压为  $0.5 \text{ V}$ ，即此表头两端允许加载的最大电压为  $0.5 \text{ V}$ 。生产生活当中如果遇到需要测量的电压比  $0.5 \text{ V}$  大，如何用所给的表头来测量呢？

chapter  
01

chapter  
02

chapter  
03

chapter  
04

chapter  
05

chapter  
06

chapter  
07

chapter  
08

chapter  
09

chapter  
10

在表头串联一个电阻后，由于串联电阻的分压作用，表头和串联电阻允许加载的最大总电压比表头上允许加载的最大电压大。此时，我们再用塑料外壳把表头和串联电阻包装起来，就得到了量程扩大后的电压表。

把表头改装成一个大量程的电压表，到底需要串联多大的一个电阻呢？如何计算这个电阻的阻值呢？

(2) 有一个表头，内阻  $R_g = 120 \Omega$ ，满偏电流  $I_g = 3 \text{ mA}$ ，如何把它改成量程为  $6 \text{ V}$  的电压表？

$$R = 6 \text{ V} / 0.003 \text{ A} - 120 \Omega = 1880 \Omega$$

由刚才的计算，我们还可以推导出一个一般的表达式：

$$R = (n - 1) R_g$$

其中， $n$  表示的是电压表的量程和表头的量程的比值，即量程扩大的倍数。改装后电压表两端的电压和通过表头两端的电流的关系为：

$$U_x = I_x (R + R_g)$$

继续刚才例题的分析：

(3) 满偏电流  $3 \text{ mA}$  的表头，已知  $R_g = 120 \Omega$ ，串联  $1880 \Omega$  电阻改装成电压表后，指针分别指向刻度 1、2、3 时：

① 通过观察，求通过表头的电流和通过电压表的电流。

② 求加在表头两端电压和加在电压表两端的电压。

答：① 由于表头和电阻是串联的，所以通过表头的电流和通过电压表的电流分别是  $1 \text{ mA}$ 、 $2 \text{ mA}$ 、 $3 \text{ mA}$ 。

② 加在表头的电压分别是  $0.12 \text{ V}$ 、 $0.24 \text{ V}$ 、 $0.36 \text{ V}$ 。改装成电压表后，加载电压表分别是  $2 \text{ V}$ 、 $4 \text{ V}$ 、 $6 \text{ V}$ 。

由此可以看出，改装后的电压表的刻度是在表头原来的刻度基础上按改装量程重新均分得来的。

### 小提示

表头改装为大量程电压表时并没有改变表头 G 的满偏电流  $I_g$ 、满偏电压  $U_g$ 、内阻  $R_g$ ，即改装后电表达到满量程时，表头的电流、电压仍为  $I_g$ 、 $U_g$ ，电阻  $R_g$  也未改变，只是表头与分压电阻总的电压比表头分得的电压大了。

### 知识拓展

#### 电阻星形和三角形的等效变换

这里介绍一个关于网络变形的办法，利用这一方法有时能简化电路的计算，这就是星形 (Y) 网络和三角形 ( $\Delta$ ) 网络的等效变换。

Y 连接和 $\Delta$ 连接都是通过 3 个端子与外部相连,如图 1-32a、b 所示, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_{31}$ 、 $R_{12}$ 、 $R_{23}$  分别接于端子 1、2、3 的 Y 形连接和 $\Delta$ 形连接中。端子 1、2、3 与电路的其他部分相连,图中没有画出电路的其他部分。当两种连接的电阻之间满足一定关系时,它们在端子 1、2、3 以外的特性可以相同,就是说它们可以互等效变换。如果在它们的对应端子之间具有相同的电压  $u_{12}$ 、 $u_{23}$  和  $u_{31}$ , 而流入对应端子的电流分别相等,即  $i_1 = i'_1$ 、 $i_2 = i'_2$  和  $i_3 = i'_3$ , 在这种条件下,它们彼此等效,这就是 Y- $\Delta$  等效变换的条件。

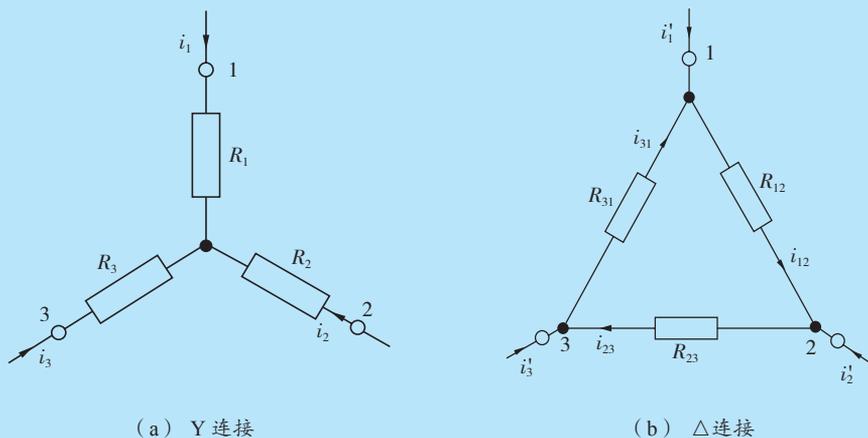


图 1-32 Y 连接和 $\Delta$ 连接的等效变换

可以证明:当满足如下条件时,Y 连接和 $\Delta$ 连接“对外”可以互等效变换。

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{12} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3} \\ R_{23} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1} \\ R_{31} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2} \end{array} \right. \quad \text{或} \quad \left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 = \frac{R_{23} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 = \frac{R_{31} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{array} \right. \quad (1-33)$$

例如:求图 1-33a 所示桥形电路的总电阻  $R_{ab}$ 。

分析将节点  $c$ 、 $e$ 、 $d$  内的 $\Delta$ 形电路用等效 Y 形电路替代,得到图 1-33b 电路,其中

$$R_2 = \frac{2 \times 2}{2 + 2 + 1} \Omega = 0.8 \Omega \quad R_3 = \frac{2 \times 1}{2 + 2 + 1} \Omega = 0.4 \Omega \quad R_4 = \frac{2 \times 1}{2 + 2 + 1} \Omega = 0.4 \Omega$$

然后用串、并联的方法,得到图 1-33c、d、e 电路,从而得到  $R_{ab} = 2.684 \Omega$ 。

chapter  
01

chapter  
02

chapter  
03

chapter  
04

chapter  
05

chapter  
06

chapter  
07

chapter  
08

chapter  
09

chapter  
10

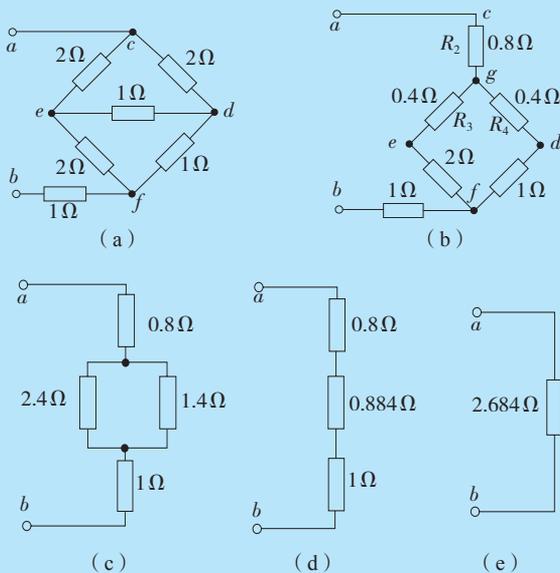


图 1-33 桥形电路一

另一种方法是用 $\Delta$ 形电路替代节点 $c$ 、 $e$ 、 $f$ 内的Y形电路（以节点 $e$ 为Y形的公共点），如图1-34b所示，求解过程见图1-34c、d、e。

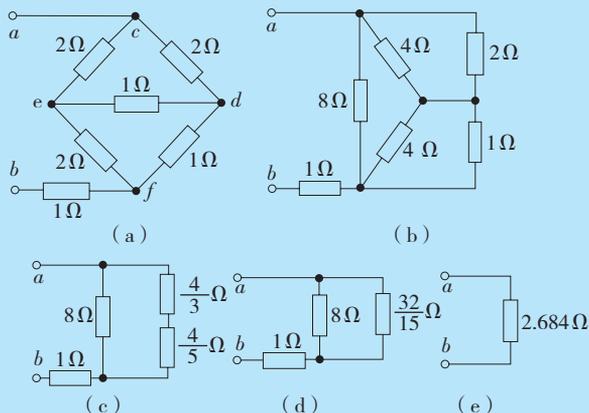


图 1-34 桥形电路二

## 实训二 电阻串联、并联和混联测试

### 实训目的

- (1) 学会用接线端子连接电阻的串联、并联和混联电路。
- (2) 用万用表测量串联、并联和混联电路中 $R$ 的阻值。

### 实训要求

- (1) 根据给定电路图正确布线，使电路正常运行。
- (2) 通过对电路中电阻测量的学习，能正确使用测量仪表。

- (3) 正确测试不同电路中电阻并进行数据分析。
- (4) 撰写安装与测试报告。

### 实训设备

- (1) 电工电路综合实训台：一套；
- (2) 电阻：若干；
- (3) 万用表：1块；
- (4) 接线端子，钳子，螺钉旋具。

### 测试电路

电路 1：电阻的串联（图 1-35）。

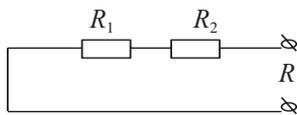


图 1-35 电阻的串联

电路 2：电阻的并联（图 1-36）。

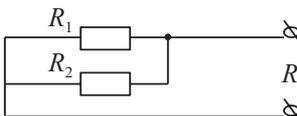


图 1-36 电阻的并联

电路 3：电阻的串并联（图 1-37）。

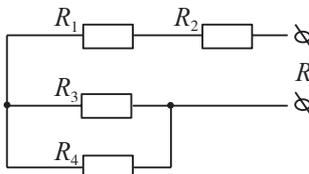


图 1-37 电阻的串并联

电路 4：电阻的混联（图 1-38）。

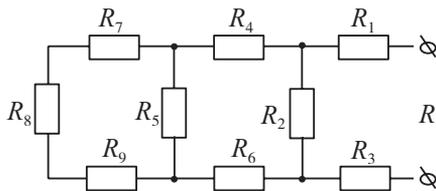


图 1-38 电阻的混联

### 测试内容

- (1) 按图连接电路。
- (2) 计算出  $R$  的理论值（表 1-2）。

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08
- chapter 09
- chapter 10

表 1-2 计算  $R$  的理论值

电路	电路 1	电路 2	电路 3	电路 4
计算公式	$R = R_1 + R_2$	$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$	$R = R_1 + R_2 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$	$R_{11} = (R_7 + R_8 + R_9) // R_5$ $R_{21} = (R_{11} + R_4 + R_6) // R_2$ $R = R_{21} + R_1 + R_3$
$R$ 的理论值				

(3) 用万用表测量出  $R$  的数值 (表 1-3)。

表 1-3 测量  $R$  的数值

电路	电路 1	电路 2	电路 3	电路 4
$R$ 的实测值				

### 实验分析、思考

(1) 分析  $R$  的理论值和实测值误差产生的原因。

---



---

(2) 举例说明我们生活中哪些地方能用到串联电路和并联电路。

---



---

### 教学检测

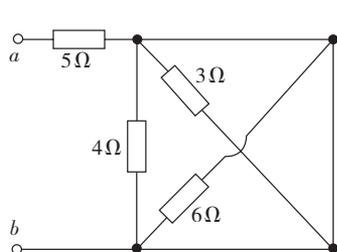


#### 填空题

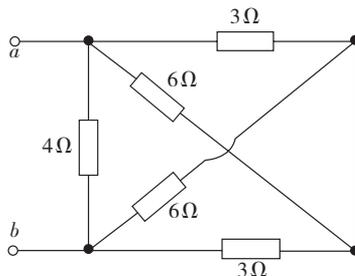
1. 有一标定 110 V、8 W 的指示灯, 现若将其接在 220 V 电源上, 则应串接的电阻为 \_\_\_\_\_, 电阻的功率是 \_\_\_\_\_。

2. 写出图 1-39 所示各电路  $a$ 、 $b$  两端的等效电阻  $R_{ab}$ 。

(a)  $R_{ab} =$  \_\_\_\_\_; (b)  $R_{ab} =$  \_\_\_\_\_。



(a)



(b)

图 1-39 填空题 2 图

3. 计算图 1-40 所示电路中  $a$ 、 $b$  间的等效电阻  $R_{ab}$ 。

(a)  $R_{ab} =$  \_\_\_\_\_; (b)  $R_{ab} =$  \_\_\_\_\_; (c)  $R_{ab} =$  \_\_\_\_\_。

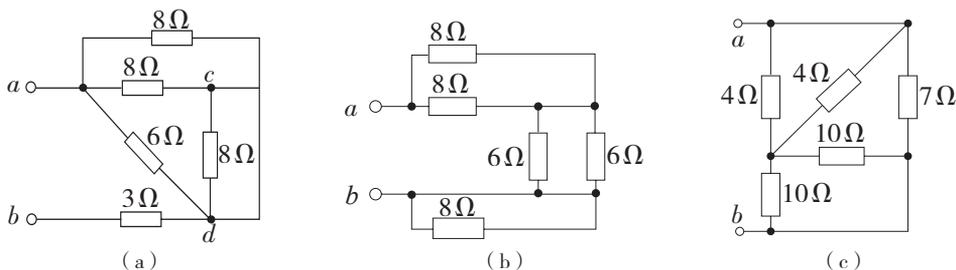


图 1-40 填空题 3 图

**判断题**

1. 串联电阻电路中, 各电阻中流过的电流相同。 ( )
2. 混联电路的串联部分具有串联的性质, 并联部分具有并联的性质。计算混联电路的等效电阻时, 一般采用电阻同时合并的方法。 ( )

**简答题**

1. 一只标定 220 V、40 W 的白炽灯与一只标定 220 V、100 W 的白炽灯并联接于 220 V 的电源上, 哪个亮? 若串联接于 220 V 的电源上, 哪个亮? 为什么?
2. 采用串联电阻的分压作用实现音量调节的电路如图 1-41 所示。设信号输入电压  $U_1=2\text{ V}$ , 电阻  $R=510\ \Omega$ , 电位器的阻值  $R_p$  可在  $0 \sim 5.1\text{ k}\Omega$  范围内连续调节, 试计算输出电压  $U_2$  的调节范围。
3. 已知某电路如图 1-42 所示, 求: ①开关  $K_1$  关闭后, 电流  $I$  的大小; ②开关  $K_1$  和  $K_2$  都关闭时, 电流  $I$  的大小。

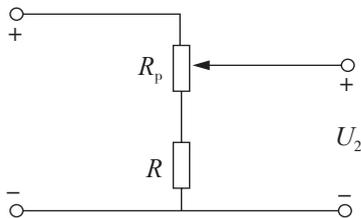


图 1-41 简答题 2 电路图

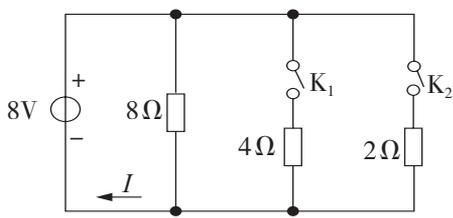


图 1-42 简答题 3 电路图

4. 串联电阻分压器如图 1-43 所示, 已知输入电压  $U_1=36\text{ V}$ , 要求输出电压  $U_2=12\text{ V}$ , 这时  $R_1$  和  $R_2$  的阻值应满足什么关系? 如果  $R_2=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_1$  的阻值是多少?

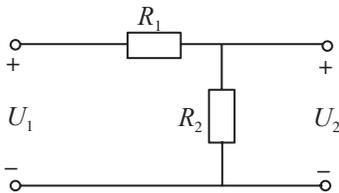


图 1-43 简答题 4 电路图

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08
- chapter 09
- chapter 10

## 单元三 电压源、电流源及其等效变换

### 知识目标

了解电压源和电流源的概念和特性,理解实际电压源与实际电流源等效变换的条件,并能进行简单计算。

### 技能目标

掌握电源外特性的测试方法。

### 基础知识

#### 一、电压源模型

##### (一) 理想电压源

当电源两端的电压恒定,且与流过它的电流无关(即与外部负载的大小无关)时,则该电源称为理想电压源,又称为恒压源。它相当于一个只产生电动势而没有内部能量损耗的电源。图 1-44 是理想电压源电路图及其伏安特性曲线,图中点画线框内是理想电压源的符号。 $U_S$  为理想电压源的电压。理想电压源的端电压为

$$U = U_S \quad (1-34)$$

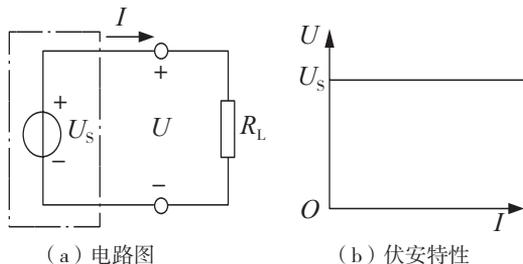


图 1-44 理想电压源

##### (二) 实际电压源

一个实际的电源(无论是发电机、电池还是各种信号源)可以用一个理想电压源和一个内阻相串联的理想电路元件的组合来代替。这种电源的电路模型称为实际电源的电压源模型。图 1-45a 所示的电路是电压源模型与外电路的连接。

使用电源时,人们最关心的是当负载变化时,电路中的电流  $I$  与电源的端电压  $U$  将如何变化。 $U$  与  $I$  之间的关系,称为电源的外特性。

直流电压源模型的外特性方程为

$$U = U_S - IR_0 \quad (1-35)$$

式中  $U_S$  和  $R_0$  是常数。 $U$  与  $I$  之间的关系是线性关系, $I=0$  时,  $U=U_S$ ;  $U=0$  时,  $I=U_S/R_0$ 。由这两个特殊点即可作出外特性曲线,如图 1-45b 所示。

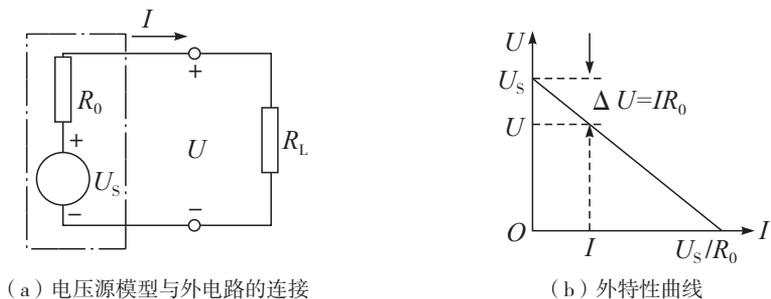


图 1-45 电压源模型

从电压源模型的外特性可以看出，内阻越小，输出电流变化时输出电压的变化就越小，即输出电压越稳定，外特性曲线越平。在理想情况下，内阻  $R_0=0$ ， $U$  为定值，即成为理想电压源，它的外特性曲线是一条平行于  $I$  轴的直线，如图 1-44b 所示。

## 二、电流源模型

### (一) 理想电流源

若电源输出的电流恒定，与外电路负载的大小无关，则该电源称为理想电流源，又称为恒流源。它相当于一个只产生电流而没有内部能量损耗的电源。图 1-46 是理想电流源电路图及其伏安特性，图中点画线框内是理想电流源的符号， $I_s$  为理想电流源的电流。理想电流源的输出电流为

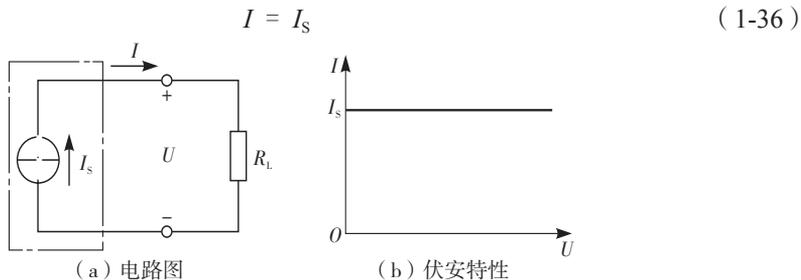


图 1-46 理想电流源

理想电流源的端电压  $U$  取决于外电路。同样，理想电流源实际上也是不存在的，但如果一个实际电源的内阻远大于负载电阻，则电流基本恒定，也可近似地认为是理想电流源。通常，恒流电源（或称恒流器）、光电池和在一定条件下工作的晶体管都可近似地认为是理想电流源。

### (二) 实际电流源

直流电压源模型的外特性方程  $U = U_s - IR_0$  可改写为

$$I = \frac{U_s}{R_0} - \frac{U}{R_0} = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1-37)$$

式中， $I_s$  是电源的短路电流， $I_s = U_s/R_0$ ； $I$  是电源的输出电流； $U$  是电源的端电压； $R_0$

chapter  
01

chapter  
02

chapter  
03

chapter  
04

chapter  
05

chapter  
06

chapter  
07

chapter  
08

chapter  
09

chapter  
10

为电源内阻。式(1-37)表明,一个实际电源也可以用一个理想电流源  $I_s$  和电阻  $R_0$  相并联的电路模型来表示,如图 1-47a 所示。这种电源的电路模型称为电流源模型。

式(1-37)是直流电流源模型的外特性方程。式中,  $I_s$  和  $R_0$  是常数,  $I$  和  $U$  之间的关系是线性关系,  $U=0$  时,  $I=I_s$ ;  $I=0$  时,  $U=I_s R_0$ 。由这两点可作外特性曲线,如图 1-47b 所示。

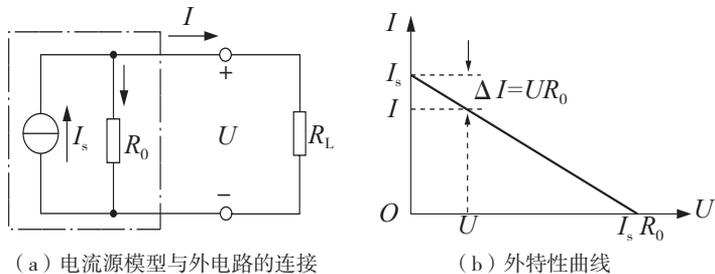


图 1-47 电流源模型

从电流源模型的外特性可以看出,内阻越大,输出电压变化时输出电流的变化就越小,即输出电流越稳定,直线越平。在理想情况下,内阻无穷大,  $I$  为定值,即成为理想电流源,它的外特性曲线是一条平行于  $U$  轴的直线,如图 1-46b 所示。

### 三、实际电压源模型和实际电流源模型的等效变换

图 1-45a 所示的电压源模型和图 1-47a 所示的电流源模型都可作为同一个实际电源的电路模型,可以有相同的外特性,因此,相互之间可以进行等效变换。

如果已知  $U_s$  与  $R_0$  串联的电压源模型,则与其等效的电流源模型为  $I_s$  与  $R_0$  并联,  $I_s=U_s/R_0$ ;

如果已知  $I_s$  与  $R_0$  并联的电流源模型,则与之等效的电压源模型为  $U_s$  与  $R_0$  串联,  $U_s=I_s R_0$ 。

实际上,凡是理想电压源  $U_s$  与电阻串联的电路都可与理想电流源  $I_s$  与电阻并联的电路作等效变换,如图 1-48 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。

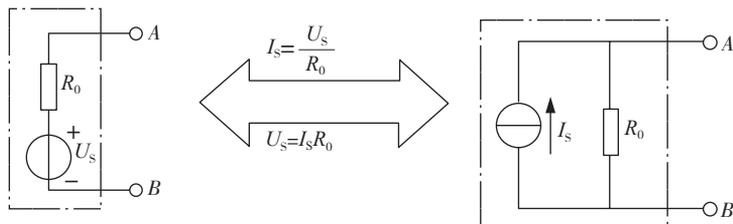


图 1-48 实际电压源模型和实际电流源模型的等效变换示意图

在进行电压源模型和电流源模型的等效变换时需注意:

(1) 等效变换是对外电路等效,对电源内部并不等效。当外电路开路时,电压源模型中无电流,内电阻不消耗功率;而电流源模型中仍有内部电流,内电阻要消耗一定的功率。

(2) 等效变换时两种电路模型的极性必须一致, 即电流源模型流出电流的一端与电压源模型的正极性端相对应。

(3) 理想电压源和理想电流源不能进行这种等效变换。因为理想电压源的内阻  $R_0 = 0$ , 而理想电流源的内阻  $R_0 = \infty$ , 两者不满足等效变换条件。再者, 理想电压源的电压恒定不变, 电流随外电路而变; 而理想电流源的电流恒定, 电压随外电路而变。故两者不能等效。

### 学习案例

某工厂为防止突然断电, 购买了两台发电机供电。某天厂内停电, 两台直流发电机并联工作, 共同供电给照明电器, 照明电器阻值  $R = 24 \Omega$ 。其中一台发电机的电动势为  $130 \text{ V}$ , 内阻为  $1 \Omega$ ; 另一台发电机的电动势为  $117 \text{ V}$ , 内阻为  $0.6 \Omega$ 。为防止发生短路事故, 必须知道流经负载的电流大小, 从而确定控制电路中熔断器的额定值。

### 案例分析

先将两台直流发电机用电压源模型代替并画出电路, 如图 1-49a 所示。图中

$$U_{S_1} = 130 \text{ V}, R_1 = 1 \Omega$$

$$U_{S_2} = 117 \text{ V}, R_2 = 0.6 \Omega$$

再利用电压源模型与电流源模型的等效变换关系, 将电压源模型变换成电流源模型, 如图 1-49b 所示。图中

$$I_{S_1} = \frac{U_{S_1}}{R_1} = \frac{130}{1} = 130(\text{A})$$

$$I_{S_2} = \frac{U_{S_2}}{R_2} = \frac{117}{0.6} = 195(\text{A})$$

然后将两个并联的电流源模型合并成一个等效电流源模型, 如图 1-49c 所示。图中

$$I_S = I_{S_1} + I_{S_2} = 130 + 195 = 325(\text{A})$$

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1 \times 0.6}{1 + 0.6} = 0.375(\Omega)$$

所以负载电流

$$I = \frac{R_0 R}{R_0 + R} I_S = \frac{0.375 \times 24}{0.375 + 24} \times 325 = 5(\text{A})$$

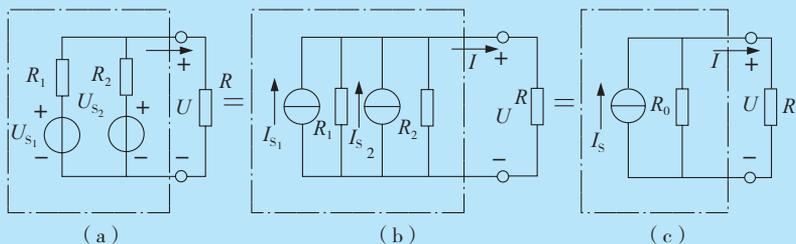


图 1-49 案例电路及其等效变换

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06
- chapter 07
- chapter 08
- chapter 09
- chapter 10

### 实训三 验证电压源与电流源的等效变换

#### 实训目的

- (1) 掌握电源外特性的测试方法。
- (2) 验证电压源与电流源等效变换的条件。

#### 实训要求

- (1) 根据给定电路正确布线，使电路正常运行。
- (2) 能正确使用测量仪表对电路中电阻进行测量。
- (3) 正确测试不同电路中电阻并进行数据分析。
- (4) 撰写安装与测试报告。

#### 实训设备

实训所需设备如表 1-4 所示。

表 1-4 实训设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	可调直流稳压电源	0 ~ 30 V	1	—
2	可调直流恒流源	0 ~ 500 mA	1	—
3	直流数字电压表	0 ~ 300 V	1	—
4	直流数字毫安表	0 ~ 500 mA	1	—
5	万用表	MF47	1	自备
6	电阻器	120 Ω, 200 Ω 300 Ω, 1 kΩ	2	HE-11
7	可调电阻箱	0 ~ 99 999.9 Ω	1	HE-11

#### 测试内容

- (1) 测定直流稳压电源（理想电压源）与实际电压源的外特性。

① 利用实验台上的模块按图 1-50 接线。 $U_s$  为 +12 V 直流稳压电源。调节  $R_2$ ，令其阻值由大至小变化，记录两表的读数（表 1-5）。

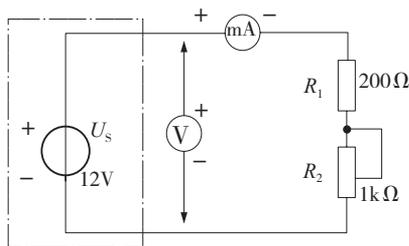


图 1-50 理想电压源模型

表 1-5 理想电压源下数据记录

$U/V$							
$I/mA$							

② 按图 1-51 接线，虚线框可模拟为一个实际的电压源。调节  $R_2$ ，令其阻值由大至小变化，记录两表的读数（表 1-6）。

表 1-6 实际电压源下数据记录

$U/V$							
$I/mA$							

(2) 测定电流源的外特性。

按图 1-52 接线， $I_s$  为直流恒流源，调节其输出为 10 mA，令  $R_0$  分别为  $1\text{ k}\Omega$  和  $\infty$ （即接入和断开），调节电位器  $R_L$ （从  $0 \sim 1\text{ k}\Omega$ ），测出这两种情况下的电压表和电流表的读数。自拟数据表格，记录实验数据。

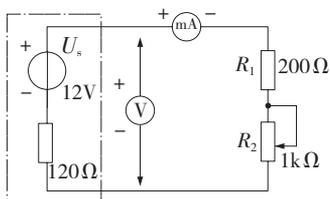


图 1-51 实际电压源模块

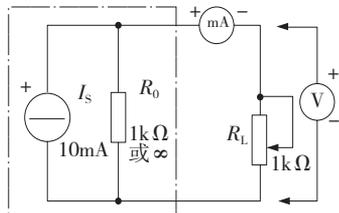
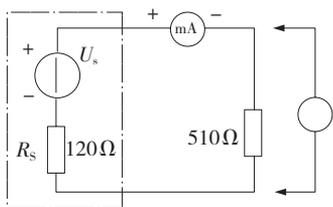


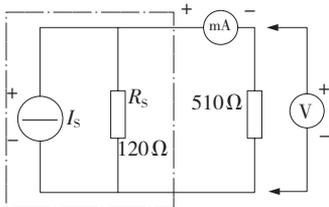
图 1-52 测定电流源的外特性

(3) 测定电源等效变换的条件。

先按图 1-53a 线路接线，记录线路中两表的读数。然后利用图 1-53a 中右侧的元件和仪表，按图 1-53b 接线。调节恒流源的输出电流  $I_s$ ，使两表的读数与图 1-53a 中的数值相等，记录  $I_s$  之值，验证等效变换条件的正确性。



(a)



(b)

图 1-53 电流源等效变换

### 实训分析、思考

(1) 根据实验数据绘出电源的四条外特性曲线，并总结、归纳各类电源的特性。

---



---

(2) 根据实验结果, 验证电源等效变换的条件。

---



---

 教学检测



填空题

1. 当电源两端的电压恒定, 与流过它的电流无关时, 该电源称为 \_\_\_\_\_, 又称为 \_\_\_\_\_。
2. 从电流源模型的外特性可以看出, 内阻 \_\_\_\_\_, 输出电压变化时输出电流的变化就 \_\_\_\_\_, 即输出电流 \_\_\_\_\_, 直线 \_\_\_\_\_。



判断题

1. 凡是理想电压源  $U_s$  与电阻串联的电路都可与理想电流源  $I_s$  与电阻并联的电路等效变换。 ( )
2. 等效变换是对外电路等效, 对电源内部并不等效。 ( )



简答题

1. 图 1-54 所示各电路中的电压  $U$  或电流  $I$  是多少?

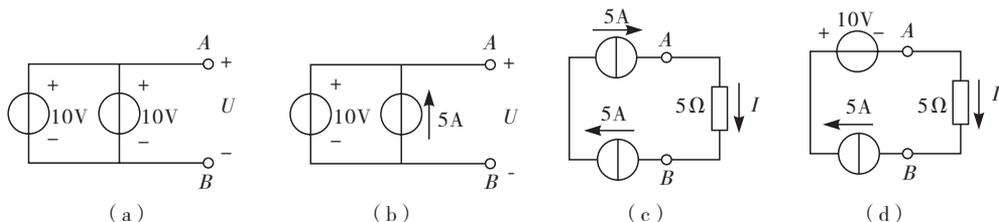


图 1-54 简答题 1 电路图

2. 某实际电源的伏安特性如图 1-55 所示, 试求它的电压源模型, 并将其等效变换为电流源模型。
3. 求图 1-56 中的电流  $I$ 。

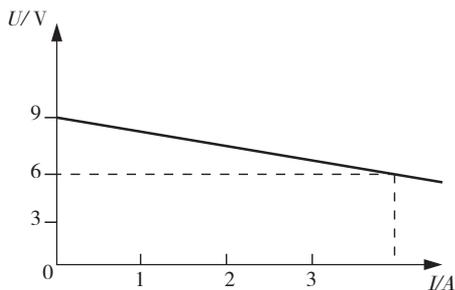


图 1-55 简答题 2 图

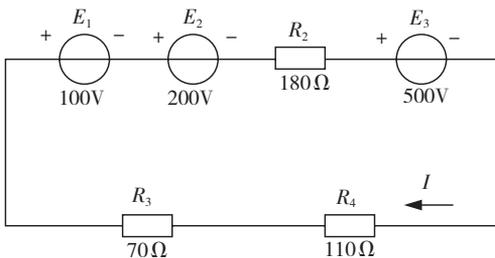


图 1-56 简答题 3 图