



模块一

电路基本概念与定律的认知

引言

生活中各种用电设备都离不开电路。电路基本概念是学习电路的基础,电路基本定律是电路分析的重要依据。学好本模块的内容和技能将为后续电路学习打下基础。本模块主要内容有电压和电位测量、电流测量、电路连接、基尔霍夫定律、电源等效变换等。

任务一 测量电路的电位和电压

任务导入

要掌握电路的特性,必须了解电路的一些基本物理量,本任务主要讨论电路的基本概念、电路中的电位和电压。

任务目标

了解电路和电路模型、电压、电位的定义;掌握电压和电位的计算方法,会对电路的电压进行测量。



相关知识

一、电路的概念

1. 电路及其组成

简单地讲,电路是电流通过的路径。实际电路通常由各种电路实体部件(如电源、电阻器、电感线圈、电容器、变压器、仪表、二极管、三极管等)组成,每种电路实体部件都具有各自不同的电磁特性和功能。按照人们的需要,把相关电路实体部件按一定方式进行组合,就构成了电路。

手电筒电路、单个照明灯电路是实际应用中较为简单的电路,而电动机电



视频
电路的组成



路、雷达导航设备电路、计算机电路、电视机电路是较为复杂的电路,但不管简单还是复杂,电路的组成都离不开三个基本环节:电源、负载和中间环节(导线、开关)。

图 1-1 所示的手电筒照明电路中,电池做电源,灯泡做负载,导线和开关作为中间环节将灯泡和电池连接起来。

2. 电路的种类及功能

工程应用中的实际电路,按照功能的不同可概括为两大类:一是完成能量的传输、分配和转换的电路,这类电路的特点是功率大、电流大,如家中的照明电路,电能传递给灯泡,灯泡将电能转换为光能和热能。二是实现对电信号的传递、变换和储存的电路,这类电路的特点是功率小、电流小。图 1-2 所示为扩音器电路,话筒将声音的振动信号转换为电信号即相应的电压和电流,经过放大处理后,通过电路传递给扬声器,再由扬声器还原为声音。

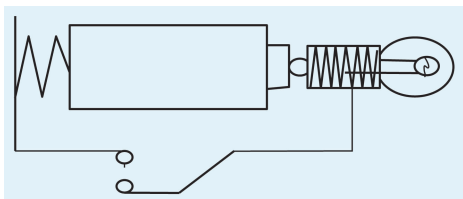


图 1-1 手电筒照明电路

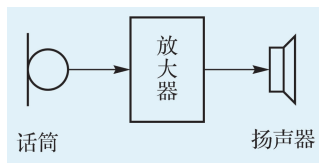


图 1-2 扩音器电路

3. 电路模型

在电路理论中,为了方便实际电路的分析和计算,通常在工程实际允许的条件下对实际电路进行模型化处理。我们将实际电路器件理想化而得到的只具有某种单一电磁性质的元件称为理想电路元件,简称电路元件。每种电路元件体现某种基本现象,具有某种确定的电磁性质和精确的数学定义。常用的电路元件有表示将电能转换为热能的电阻元件、表示电场性质的电容元件、表示磁场性质的电感元件,以及电压源元件和电流源元件等(本书中的电路图没有特别说明一般指模型图)。

由理想电路元件相互连接组成的电路称为电路模型。例如,图 1-1 所示电路,电源对外提供电压的同时,内部也有电阻消耗能量,所以电源 U_S 可以用其电动势 E 和内阻 R_0 的串联表示。灯泡除了具有消耗电能的性质(电阻性)外,通电时还会产生磁场,具有电感性;但电感微弱,可忽略不计,于是可认为灯泡是一个电阻元件,用 R_L 表示。图 1-3 是图 1-1 所示电路的电路模型。

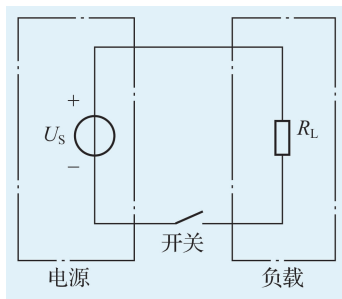


图 1-3 手电筒照明电路的电路模型



微课
三种理想电路
元件

二、电位、电压和电动势

1. 电位

正电荷在电路中某点所具有的能量与电荷所带电量的比值称为该点的电位。讨论电位问题时,首先要选定参考点(假定该点电位为零),其他点的电位等于该点与参考点间的电压。比参考点高的电位为正,反之为负。可见,电路中各点的电位是相对的,与参考点的选择有关。如果用符号 V_a 表示 a 点电位, V_b 表示 b 点电位,而 a 点电位高于 b 点电位,若选取 a 点为参考点,即 $V_a=0$,则 $V_b<0$;若选取 b 点为参考点,即 $V_b=0$,则 $V_a>0$ 。

2. 电压

两点间的电压即两点的电位差。在电路中, a 、 b 两点的电压等于 a 、 b 两点间的电位之差,即

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

U_{ab} 在数值上等于电场力把单位电荷由 a 点移动到 b 点所做的功 W_{ab} 与被移动电荷电荷量 q 的比值,则电压定义式为

$$U_{ab}=\frac{W_{ab}}{q} \quad (1-2)$$

由此可见,电场力对正电荷做功的方向就是电位降低的方向。因此,规定电压的方向由高电位指向低电位,即电位降低的方向。电压的方向可以用从高电位指向低电位的箭头表示,也可以用高电位标“+”、低电位标“-”来表示。

如果电压的大小及方向都不随时间变化,则称之为直流电压(又称稳恒电压或恒定电压),用大写字母 U 表示。在电路分析中更为重要的是变动电压,如正弦交流电压(简称交流电压),其大小及方向均随时间按正弦规律做周期性变化。交流电压的瞬时值要用小写字母 u 或 $u(t)$ 来表示。在电路中,提供电压的装置是电源。

电压在国际单位制中的主单位是伏特,简称伏,用符号 V 表示。强电压常用千伏(kV)为单位,弱电压的单位可以用毫伏(mV)或微伏(μV)。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ kV}=10^3 \text{ V}=10^6 \text{ mV}=10^9 \mu \text{ V}$$

在电路计算时,若事先无法确定电压的真实方向,通常任意选定参考方向,用“+”“-”标在电路图中。如果电压的计算结果为正值,那么电压的实际方向与参考方向一致;如果电压的计算结果为负值,那么电压的实际方向与参考方向相反。

例 1-1 在电场中有 a 、 b 、 c 三点,某电荷电荷量 $q=5 \times 10^{-2} \text{ C}$,电荷由 a 移动到 b 电场力做功 2 J ,由 b 移动到 c 电场力做功 3 J ,以 b 点为参考点,求 a 点和 c 点电位。

解 以 b 点为参考点,则 $V_b=0 \text{ V}$,根据式(1-2)有

$$U_{ab}=\frac{W_{ab}}{q}=\frac{2}{5 \times 10^{-2}}=40 \text{ V}$$

又因为
得

$$U_{ab}=V_a-V_b \\ V_a=40 \text{ V}$$

同理

$$U_{bc}=\frac{W_{bc}}{q}=\frac{3}{5 \times 10^{-2}}=60 \text{ V}$$

$$V_c = V_b - U_{bc} = -60 \text{ V}$$

3. 电动势

电动势是用来表征电源生产电能本领大小的物理量。在电源内部,把正电荷从低电位点(负极板)移动到高电位点(正极板)反抗电场力所做的功与被移动电荷的电荷量之比,称为电源的电动势。电源电动势的定义式为

$$E = \frac{W}{q} \quad (1-3)$$

式中, E 为电源电动势,V; W 为电源力移动正电荷所做的功,J; q 为被移动电荷的电荷量,C。

电源电动势的方向规定为由电源的负极(低电位点)指向正极(高电位点)。在电源内部电路中,电源力移动正电荷形成电流,电流的方向是从负极指向正极;在电源外部电路中,电场力移动正电荷形成电流,电流方向是从电源正极流向电源负极。

实践操作 测量电路的电位和电压

实践要求

先按照图 1-4 所示连接电路,再分别测试 A、B、C 各点的电位,以及相互间的电压,并做好记录。

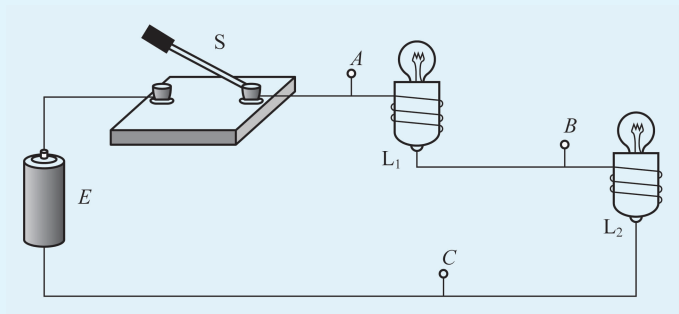


图 1-4 测试电路图

实践器材

电池 1 节,开关 1 个,小灯泡 2 个,导线若干,指针式万用表 1 块。

实践步骤

1. 选择量程

将万用表的红、黑表笔插入对应的插孔中,将选择开关旋至直流电压挡相应量程进行测

量,如图 1-5 所示。如果不知道被测电压的大致数值,须将选择开关旋至直流电压挡最高量程上试测,然后逐渐旋至直流电压挡合适量程上进行测量。

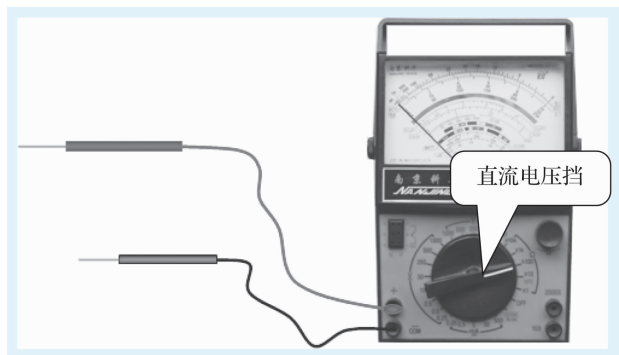


图 1-5 万用表表笔接入与量程选择示意图

2. 测量电位

电路中某点相对于参考点的电压称为该点的电位。此处选择 C 点为电位参考点,将万用表与被测电路并联,黑表笔接参考点,红表笔接被测量点(A 点),如图 1-6 所示。用同样方法测出 B 点电位。

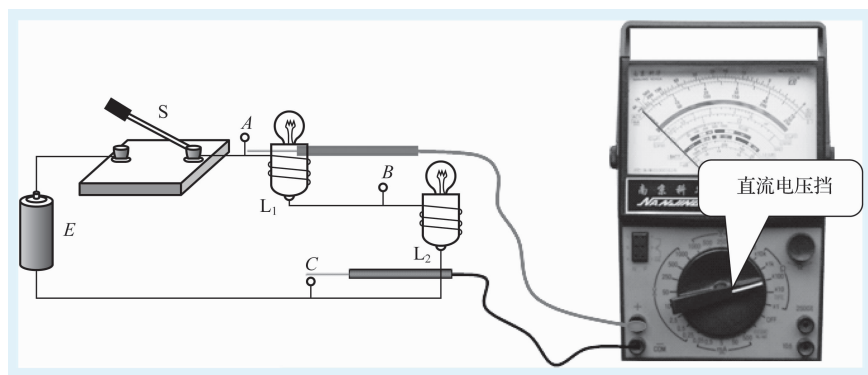


图 1-6 测量 A 点电位示意图

3. 读数

要根据所选择的量程来选择刻度读数。

4. 挡位复位

将选择开关打在 OFF 位置或打在交流电压 1 000 V 挡。

5. 电位测量

将测量的 A 、 B 、 C 三点的电位值记入表 1-1 中。

表 1-1 测量电位记录表

测量对象	V_A	V_B	V_C
测量电位值			

6. 电压测量

电压测量时,红表笔接高电位,黑表笔接低电位(不清楚电位高低的情况下,可以先接好



其中任意一支表笔,另一支表笔轻轻碰一下测量点,看表针的偏转情况,如果反偏则表示接反)。将 AB 、 BC 、 AC 两端电压的测量结果记录于表 1-2 中。

表 1-2 测量电压记录表

测量对象	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}
测量电压值			



思考与练习

1-1-1 任何一个完整的电路都必须有_____、_____和_____三个基本部分。具有单一电磁特性的电路元件称为_____电路元件,由它们组成的电路称为_____。电路的作用是对电能进行_____、_____和_____,对电信号进行_____、_____和_____。

1-1-2 什么是电路模型?

1-1-3 U_{ab} 是否表示 a 点的电位高于 b 点的电位?

1-1-4 图 1-7(a) 所示是一电池电路,当 $U=3\text{ V}$, $E=5\text{ V}$ 时,该电池做电源还是做负载用? 图 1-7(b) 所示也是一电池电路,当 $U=5\text{ V}$, $E=3\text{ V}$ 时,则又如何?

1-1-5 求图 1-8 中 b 、 c 两点间的电压 U_{bc} 。

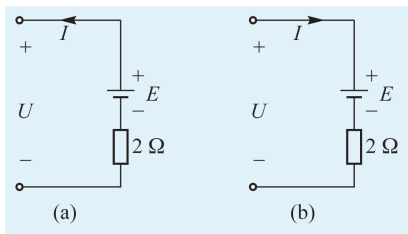


图 1-7 题 1-1-4 图

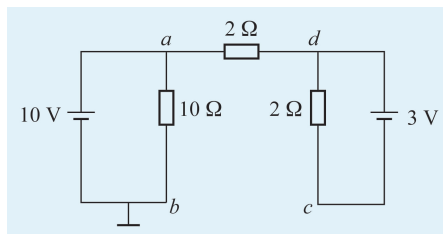


图 1-8 题 1-1-5 图

1-1-6 电路如图 1-9 所示。

(1) 选 d 为参考点,求 V_a 、 V_b 和 V_c 。

(2) 选 c 为参考点,求 V_a 、 V_b 和 V_d 。

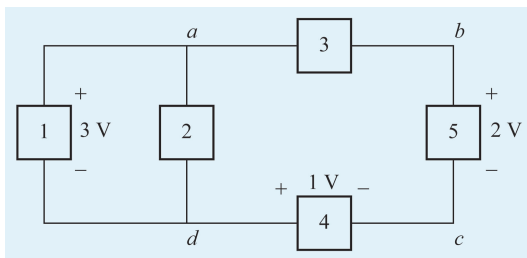


图 1-9 题 1-1-6 图

1-1-7 求图 1-10 所示电路的 a 点电位和 b 点电位。

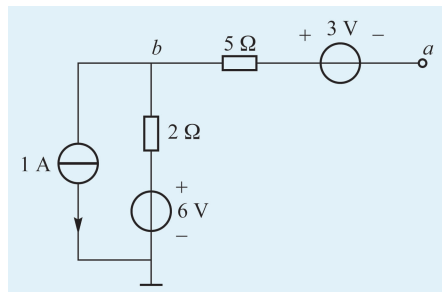


图 1-10 题 1-1-7 图

1-1-8 求图 1-11 所示电路的节点电压 V_a 。

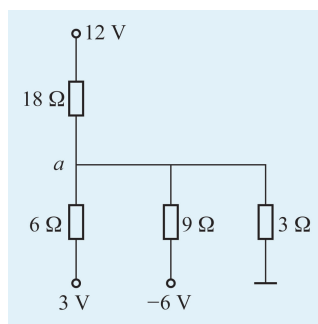


图 1-11 题 1-1-8 图

任务二 测量电路的电流

任务导入

电流是电路工作时的一种重要的物理量,所有电气设备都利用电流工作。本任务主要讨论电流的定义、电压与电流的参考方向、电路的工作状态以及电功和电功率的相关知识。

任务目标

了解电流的定义,掌握电路的工作状态,会利用参考方向对电路进行分析,会计算电功和电功率,会判断输入与输出功率。



相关知识

一、电流

1. 电流的基本概念

电路中电荷沿着导体定向运动形成电流,其方向规定为正电荷流动的方向(或负电荷流动的反方向),其大小等于在单位时间内通过导体横截面的电量。电流用符号 i 或 $i(t)$ 表示,讨论一般电流时可用符号 i 。

设在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 时间内,通过导体横截面的电荷量为 $\Delta q = q_2 - q_1$,则在 Δt 时间内的电流可表示为

$$i(t) = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (1-4)$$

式中, $i(t)$ 的单位为 A; Δq 的单位为 C; Δt 为很小的时间间隔, s。

常用的电流单位还有毫安(mA)、微安(μA)、千安(kA)等,它们之间的换算关系为

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A} = 10^6 \text{ mA} = 10^9 \mu\text{A}$$

2. 直流电流

如果电流的大小及方向都不随时间变化,即在单位时间内通过导体横截面的电量相等,则称该电流为稳恒电流或恒定电流,简称为直流(direct current),记为 DC 或 dc。直流电流用大写字母 I 表示。

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{Q}{t} = \text{常数}$$

直流电流 I 与时间 t 的关系在 $I-t$ 坐标系中为一条与时间轴平行的直线。

3. 交流电流

如果电流的大小及方向均随时间变化,则称之为变动电流。对电路分析来说,最为重要的一种变动电流是正弦交流电流,其大小随时间按正弦规律做周期性变化。变动电流(交变电流)简称为交流(alternating current),记为 AC 或 ac。交流电流的瞬时值用小写字母 i 或 $i(t)$ 表示。

二、参考方向

电路中的主要物理量有电流、电压、电荷量、磁链、能量和电功率等,在线性电路分析中人们主要关心的物理量是电流、电压和电功率。

1. 电流的参考方向

电流即带电粒子有规则的定向运动,规定正电荷的运动方向为电流的实际方向。元件(导线)中电流流动的实际方向只有两种可能,如图 1-12 所示。



微课
电流、电压



视频
电流

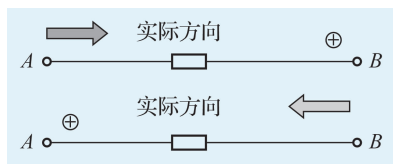


图 1-12 电流流动的实际方向

复杂电路中的电流随时间变化时,电流的实际方向往往很难事先判断,因而规定一个参考方向,即任意假定一个正电荷运动的方向为电流的参考方向。电流的参考方向与实际方向的关系如图 1-13 所示。

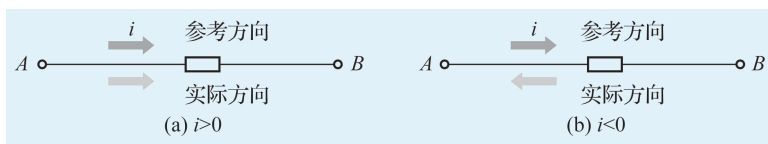


图 1-13 电流的参考方向与实际方向的关系

电流的参考方向有两种表示方法。

- (1)用箭头表示。箭头的指向为电流的参考方向,如图 1-14(a)所示。
- (2)用双下标表示。如 i_{AB} , 电流的参考方向由 A 指向 B,如图 1-14(b)所示。

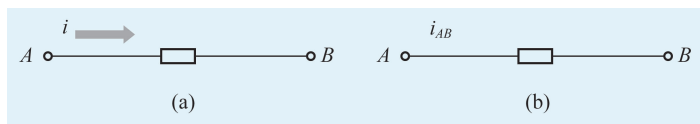


图 1-14 电流参考方向的表示方法

2. 电压的参考方向

电压(降)的参考方向即假设的电位降低的方向,电压实际方向与参考方向的关系如图 1-15 所示。

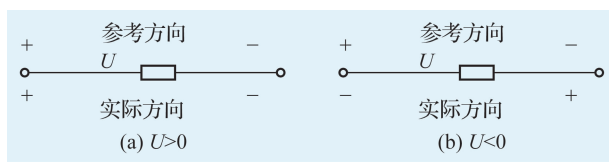


图 1-15 电压的实际方向与参考方向的关系

电压的参考方向有三种表示方式,分别是用箭头表示、用正负极性表示和用双下标表示,如图 1-16 所示。

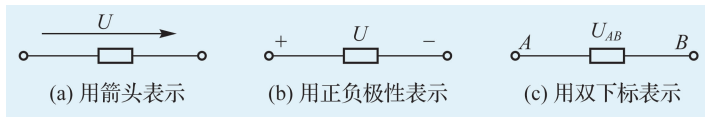


图 1-16 电压参考方向的表示方法

3. 关联与非关联参考方向

元件或支路的 u 、 i 采用相同的参考方向称为关联参考方向,反之则称为非关联参考方向,如图 1-17 所示。

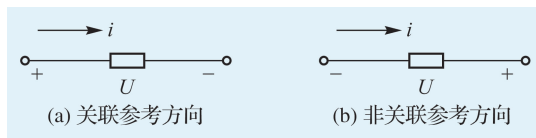


图 1-17 关联参考方向与非关联参考方向

例 1-2 电压、电流参考方向如图 1-18 所示,对 A、B 两部分电路,电压、电流参考方向是否关联?

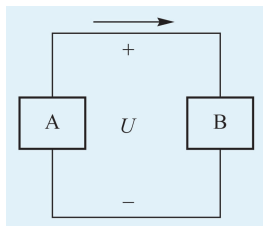


图 1-18 例 1-2 图

解 对 A 部分电路而言,电压、电流参考方向非关联;对 B 部分电路而言,电压、电流参考方向关联。

说明:(1)分析电路前必须选定电压和电流的参考方向。

(2)参考方向一经选定,必须在图中相应位置标注(包括方向和符号),在计算过程中不得任意改变。

(3)参考方向不同时,其表达式相差一个负号,但实际方向不变。

三、电路的工作状态

一个电路正常工作时,需要将电源与负载连接起来。电源与负载连接时,根据所接负载的情况,电路有三种工作状态:空载状态、短路状态和有载状态。为了说明这三种工作状态,现以图 1-19 所示简单直流电路为例来进行分析。

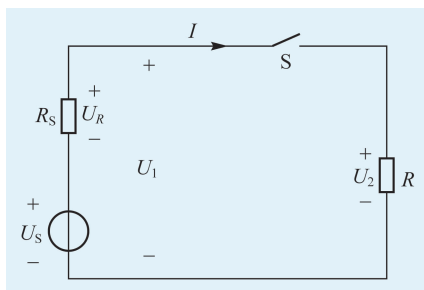


图 1-19 简单直流电路

1. 空载状态

空载状态又称断路或开路状态,如图 1-19 所示。当开关 S 断开或连接导线折断时,电路就处于空载状态,此时电源和负载未构成通路,外电路所呈现的电阻可视为无穷大,电路具有下列特征。

(1)电路中电流为零。

(2)电源的端电压等于电源电压。此电压称为空载电压或开路电压,用 U_{OC} 表示。因

此,要想测量电源电压,只要用电压表测量电源的开路电压即可。

(3)电源的输出功率和负载所吸收的功率均为零。

2. 短路状态

当电源两端的导线由于某种事故而直接相连时,电源输出的电流不经过负载,只经连接导线直接流回电源,这种状态称为短路状态,简称短路,如图 1-20 所示。

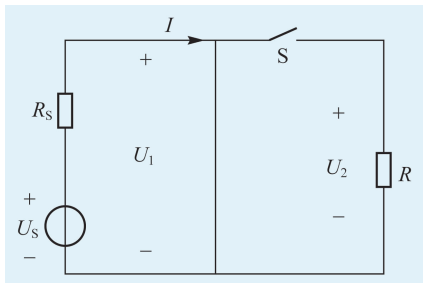


图 1-20 短路的电路模型

短路时外电路所呈现的电阻可视为零,电路具有下列特征。

$$U_1 = 0, I = \frac{U_s}{R_s} = I_s$$

在一般供电系统中,电源的内电阻很小,故短路电流很大。电源所发出的功率全部消耗在内电阻上,因而会使电源发热以致损坏。所以在实际工作中,应经常检查电气设备和线路的绝缘情况,以防止电源被短路事故的发生。此外,通常还在电路中接入熔断器等保护装置,以便在发生短路时能迅速切断电路,达到保护电源及电路器件的目的。

3. 有载状态

当开关闭合时,电路中有电流流过,电源输出功率,负载吸收功率,这称为电路的有载状态。此时电路具有下列特征:电路中有电流流过负载,负载消耗能量,电源两端的电压大小是电路中其他元件两端电压之和。

有些电气设备应尽量工作在额定状态,这种状态又称为满载状态。电流和功率低于额定值的工作状态称为轻载,高于额定值的工作状态称为过载。在一般情况下,设备不应过载运行。在电路中常装设自动开关、热继电器等,用来在过载时自动切断电源,确保设备安全。

四、电功和电功率

在日常生活中,电灯发光、电炉发热、电动机运转都是电流通过用电器做了功,将电能转换成了光能、热能和机械能。

1. 电功

电路中电场力对定向移动的电荷所做的功,简称电功,通常也说成是电流的功。其实质是能量的转换与守恒定律在电路中的体现,电能通过电流做功转化为其他形式的能。电功的计算式为

$$W = UI t \quad (1-5)$$

电流单位为安培(A),电压单位为伏(V),时间单位为秒(s),则电功的单位为焦耳(J)。

说明:(1)表达式的物理意义:电流在一段电路上做的功,与这段电路两端电压、电路中电流和通电时间成正比。

(2)适用条件: I 、 U 不随时间 t 变化。

2. 电功率

电功率用来衡量电路做功的快慢,即单位时间内电流所做的功。一段电路上的功率,与这段电路两端电压和电路中的电流成正比,计算式为

$$P=UI \quad (1-6)$$

功的单位为焦耳(J),时间单位为秒(s),功率单位为瓦特(W),则 $1\text{ W}=1\text{ J/s}$ 。导体有电流流过时会发热,电能转换为内能,这就是电流的热效应,描述它的定量规律是焦耳定律。

一个电路最终的目的是电源将一定的电功率传送给负载,负载将电能转换成工作所需要的一定形式的能量,即电路中存在发出功率的元件(供能元件)和吸收功率的元件(耗能元件)。习惯上,通常把耗能元件吸收的功率写成正数,把供能元件吸收的功率写成负数,而储能元件(如理想电容、电感元件)既不吸收功率也不发出功率,即其功率 $P=0$ 。通常所说的功率 P 又称为有功功率或平均功率。

3. 额定功率和实际功率

为了使用电器安全、正常地工作,用电器的额定电压和功率都有规定数值。

(1)额定功率。用电器正常工作时所需电压为额定电压,在这个电压下消耗的功率称为额定功率。一般来说,用电器电压不能超过额定电压,当电压低于额定电压时,用电器功率不是额定功率,而是实际功率。

(2)实际功率。实际功率 $P=UI$, U 、 I 分别为用电器两端的实际电压和通过用电器的实际电流。



视频
电功率

实践操作 测量电路中的电流

实践要求

如图 1-21 所示,将数字万用表串联在被测回路中,测量某一条支路的电流,并做好记录。

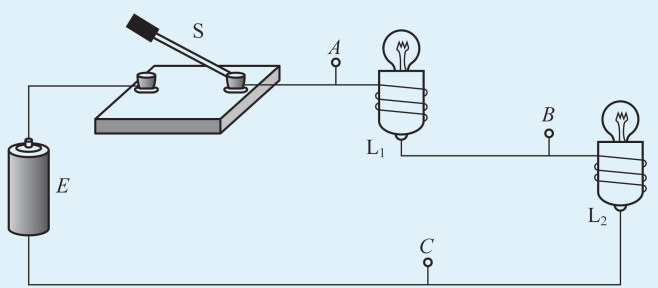


图 1-21 测试电路图

实践器材

电池 1 节, 开关 1 个, 小灯泡 2 个, 导线若干, 数字万用表 1 块。

实践步骤

(1) 按下数字万用表的电源开关, 如图 1-22 所示。

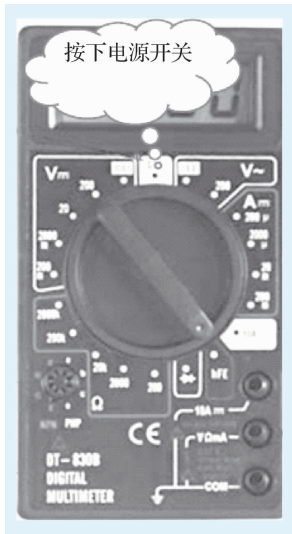


图 1-22 电源开启示意图

(2) 将转换开关拨到“DCA”或“mA”范围内的合适量程位置, 如图 1-23 所示。

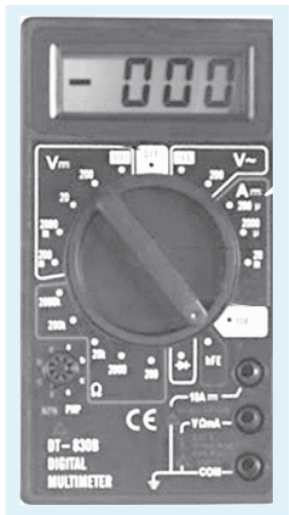


图 1-23 转换开关选择示意图

(3) 红表笔插入“mA”插孔, 黑表笔插入“COM”插孔, 如图 1-24 所示。测试时注意, 若被测电流超过“mA—COM”输入端口的测量范围, 则应将转换开关拨至“20 mA/10 A”挡, 并将红表笔插入“10 A”插孔。

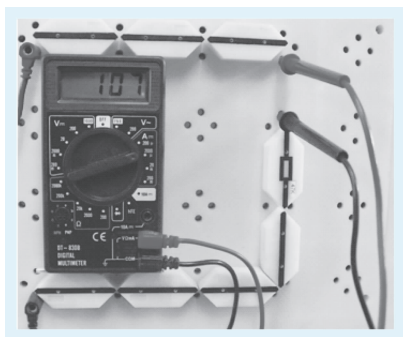


图 1-24 表笔插入示意图

(4)将图 1-21 所示电路中的开关闭合,将万用表串联接入开关两端,并将测量结果记入表 1-3 中。

表 1-3 测量电流记录表

测量对象			
测量电流值			



思考与练习

1-2-1 电路图上标示的电流、电压方向称为_____，假定某元件是负载时，该元件两端的电压和通过元件的电流方向应为_____方向。

1-2-2 电路有_____、_____和_____三种工作状态。当电路中电流 $I = \frac{U_S}{R_0}$ 、端电压 $U=0$ 时，此种状态称为_____，这种情况下电源产生的功率全部消耗在_____上。

1-2-3 什么是电流和电压的参考方向？

1-2-4 根据日常观察，电灯在深夜时要比黄昏时亮一些，为什么？

1-2-5 电路如图 1-25 所示，选 d 为参考点，求 U_{ab} 、 U_{bc} 和 U_{cd} 。

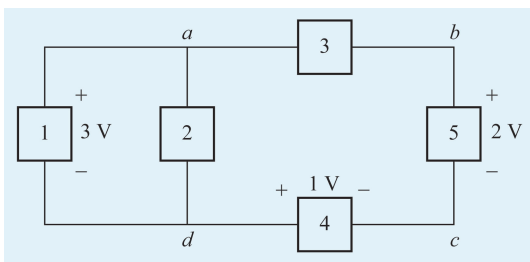


图 1-25 题 1-2-5 图

1-2-6 求图 1-26 中各元件的功率，并指出每个元件起电源作用还是起负载作用。

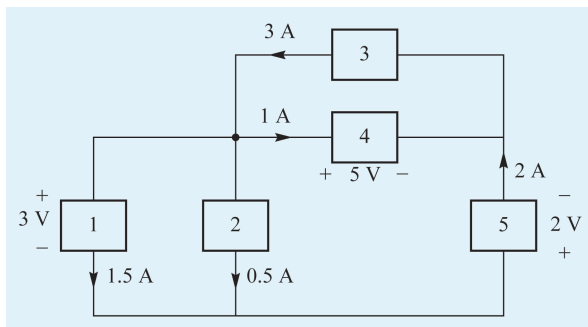


图 1-26 题 1-2-6 图

1-2-7 求图 1-27 中的电流 I 、电压 U 及电压源和电流源的功率。

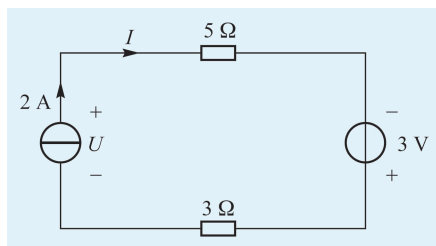


图 1-27 题 1-2-7 图

1-2-8 试求图 1-28 所示电路的电压 U_{ab} 和 U_{ba} 。

1-2-9 根据图 1-29 所示的参考方向和电压、电流的数值确定各元件电流和电压的实际方向,并计算各元件的功率,说明元件是吸收功率还是输出功率。

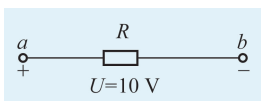


图 1-28 题 1-2-8 图

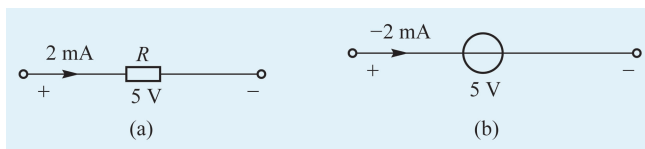


图 1-29 题 1-2-9 图

任务三 电路连接

任务导入

电路中电压、电流是否存在某种联系? 电子元件的不同组合方式有何特点? 如何有效利用电路连接发挥较大作用? 本任务主要讨论欧姆定律、串联电路、并联电路、混联电路的相关知识。

任务目标

掌握电路的欧姆定律,掌握串联、并联电路的定义和电路特点,了解混联电路的定义和特点,了解电阻的三角形联结与星形联结的转换,会根据电路连接特点与欧姆定律对电路进行分析。



相关知识

一、欧姆定律

欧姆定律是关于导体两端电压与导体中电流关系的定律,是电学的基本实验定律之一,由德国物理学家欧姆于 1827 年首先通过实验发现。

1. 部分电路的欧姆定律

欧姆定律的表述:通过导体的电流 I 与其两端之间的电压 U 成正比,其表达式为

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-7)$$

其中, I 、 U 、 R 是属于同一部分电路中同一时刻的电流、电压和电阻。 R 的数值取决于导体的材料、形状、长度、粗细及温度等,当这些因素不变时, R 为常数,在此条件下才可以说 I 与 U 成正比。欧姆定律适用于金属,也适用于导电的酸、碱、盐水溶液。

为了描述元件的电流与电压的关系,可以分别以电压、电流为横、纵坐标画出函数曲线,称为元件的伏安特性曲线。满足欧姆定律的元件的伏安特性曲线是一条过原点的直线,如图 1-30 所示。

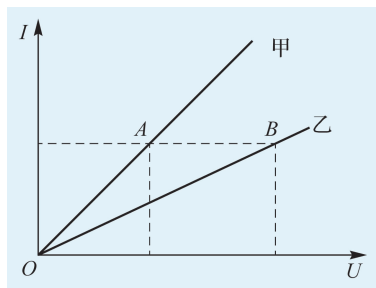


图 1-30 伏安特性曲线

2. 全电路欧姆定律

全电路欧姆定律即闭合电路(见图 1-31)欧姆定律。电源的路端电压是指电源加在外电路两端的电压,是静电力把单位正电荷从正极经外电路移到负极所做的功。电源的电动势对一个固定电源来说是不变的,而电源的路端电压却是随外电路的负载而变化的。



视频
欧姆定律

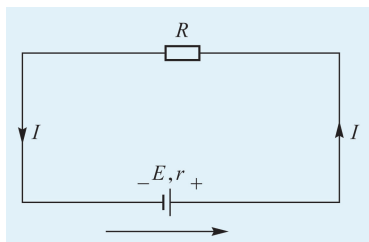


图 1-31 闭合电路图

路端电压的变化服从含源电路的欧姆定律,其数学表达式为

$$U = E - Ir \quad (1-8)$$

式中, U 为路端电压; Ir 为电源的内电压。对于确定的电源来说, 电动势 E 和内电阻 r 都是一定的。从式(1-8)可以看出, 路端电压 U 与电路中的电流 I 有关系。电流 I 增大时, 内电压 Ir 增大, 路端电压 U 减小; 反之, 电流 I 减小时, 路端电压 U 就增大。

二、串联电路

如图 1-32 所示, 串联是连接电路元件的基本方式之一, 即将电路元件(如电阻、电容、电感等)逐个顺次首尾相连接。串联电路中通过各用电器的电流都相等。

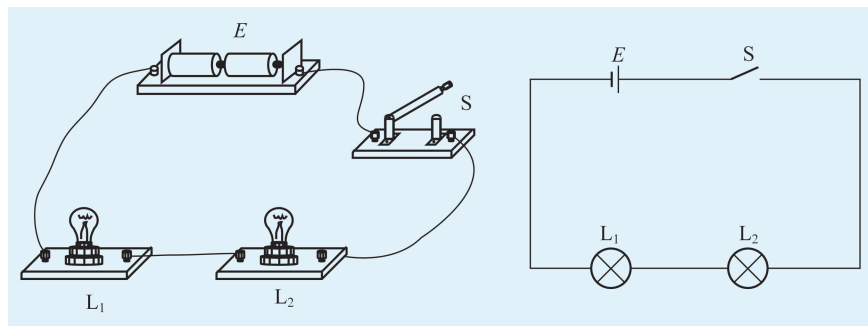


图 1-32 串联电路

串联电路的特点如下。

(1) 串联电路电流处处相等, 即

$$I_{\text{总}} = I_1 = I_2 = I_3 = \cdots = I_n \quad (1-9)$$

(2) 串联电路总电压等于各处电压之和, 即

$$U_{\text{总}} = U_1 + U_2 + U_3 + \cdots + U_n \quad (1-10)$$

(3) 串联电路的等效电阻等于各电阻之和, 即

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n \quad (1-11)$$

(4) 串联电路总功率等于各功率之和, 即

$$P_{\text{总}} = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n \quad (1-12)$$

三、并联电路

并联是指将 2 个及以上同类或不同类元件、器件等首首相接, 同时尾尾也相连的一种连接方式, 如图 1-33 所示。

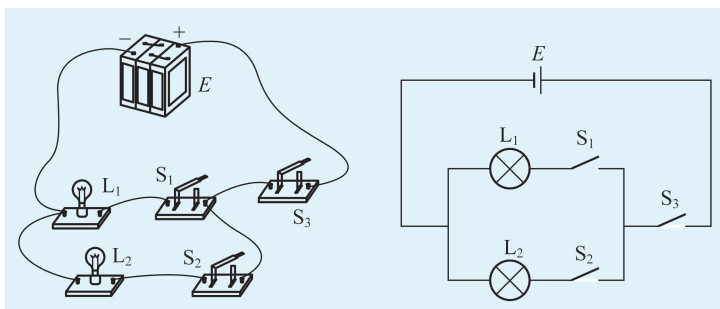


图 1-33 并联电路

并联电路的特点如下。

(1) 并联电路中,干路电流等于各支路电流之和,即

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (1-13)$$

(2) 并联电路中,各并联支路两端的电压相等,且等于并联电路两端的总电压,即

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (1-14)$$

(3) 并联电路总电阻的倒数等于各并联电阻的倒数之和,即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (1-15)$$

四、混联电路

1. 混联电路的定义与特点

既有串联又有并联的电路称为混联电路,如图 1-34 所示。

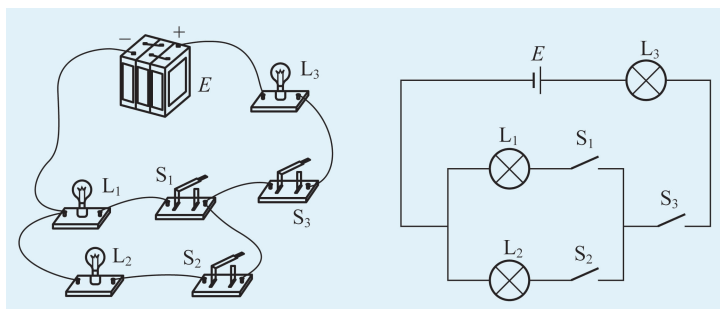


图 1-34 混联电路

混联电路是由串联电路和并联电路组合在一起的特殊电路。混联电路的优点是可以单独使某个用电器工作或不工作,缺点是干路上有一个用电器损坏或断路会导致整个电路无效。

2. 电阻星形联结与三角形联结的等效变换

电阻混联中有两种特殊的连接方式,即电阻星形(Y)联结和三角形(Δ)联结。电阻的星形联结就是将三个电阻的一端连在一起,另一端分别与外电路的三个节点相连,如图 1-35(a)所示;电阻的三角形联结就是将三个电阻首尾相连,形成一个三角形,三角形的三个顶点分别与外电路的三个节点相连,如图 1-35(b)所示。



微课

电阻的星形与三角形联结及网络的等效变换

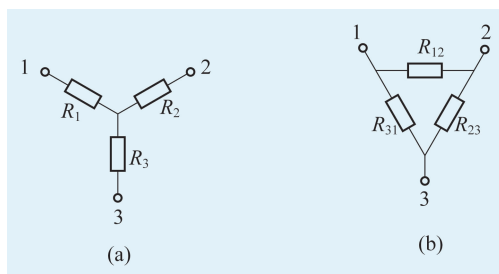


图 1-35 电阻的星形联结与三角形联结

电阻的三角形联结等效变换为星形联结的公式为

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{31}R_{12}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}} \\ R_2 &= \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}} \\ R_3 &= \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}} \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

电阻的三角形联结等效变换为星形联结的公式为

$$R_i = \frac{\text{接于 } i \text{ 两端电阻之乘积}}{\Delta \text{ 电阻之和}} \quad (1-17)$$

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

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

由式(1-16)可解得

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= \frac{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}{R_3} \\ R_{23} &= \frac{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}{R_1} \\ R_{31} &= \frac{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}{R_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

电阻的星形联结等效变换为三角形联结的公式为

$$R_{mn} = \frac{Y \text{ 电阻两两乘积之和}}{\text{不与 } mn \text{ 端相连的电阻}} \quad (1-19)$$

当 $R_1=R_2=R_3=R_Y$ 时,有

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

在复杂的电阻网络中,利用电阻星形联结与三角形联结网络的等效变换,可以简化电路分析。

例 1-3 求图 1-36 所示电路中的电流 I 。

解 将 $3\ \Omega$ 、 $5\ \Omega$ 和 $2\ \Omega$ 三个电阻构成的三角形网络等效变换为星形网络,如图 1-37 所示。其电阻值由式(1-16)求得。

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

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

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



再用电阻串联和并联公式,求出连接到电压源两端口的等效电阻,即

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

最后求得

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

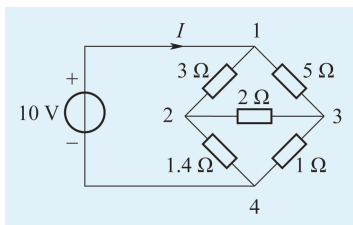


图 1-36 例 1-3 图

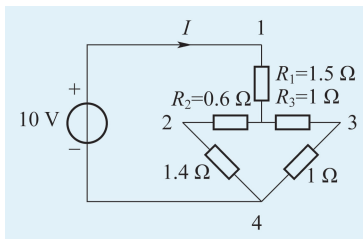


图 1-37 等效电路图

实践操作 验证电路的电压和电流关系

实践目的

验证电路的欧姆定律,验证串联电路的电压电流关系,验证并联电路的电压电流关系。

实践器材

干电池 2 节,电压表 1 块,电流表 1 块,开关 1 个,1 kΩ 电阻若干,10 kΩ 滑线变阻器 1 个。

实践步骤

(1)按照图 1-38 所示连接电路。

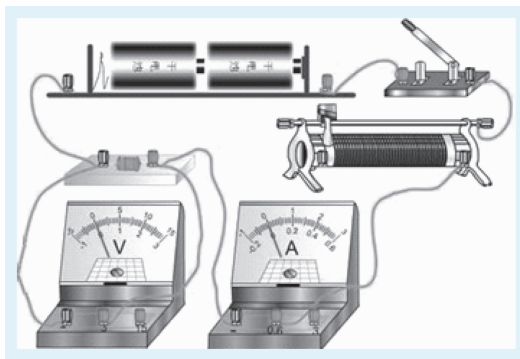


图 1-38 验证欧姆定律的电路

(2) 已知电阻不变, 改变滑线变阻器的阻值大小, 观察电压表和电流表的变化情况, 并将结果记录于表 1-4 中。

表 1-4 已知电阻不变验证欧姆定律测试记录表

测量次数	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
电压值/V					
电流值/A					
计算电阻/ Ω					

(3) 滑线变阻器阻值不变($R_P = 200 \Omega$), 改变已知电阻的值, 观察电压表和电流表的变化情况, 并将结果记录于表 1-5 中。

表 1-5 滑线变阻器不变验证欧姆定律测试记录表

已知电阻/ Ω	100	200	300	400	500
电压值/V					
电流值/A					
计算电阻/ Ω					

思考与练习

- 1-3-1 全电路欧姆定律的含义是什么?
- 1-3-2 串联电路有何特点? 并联电路有何特点?
- 1-3-3 电路如图 1-39 所示, 试计算 a 、 b 两端的电阻。

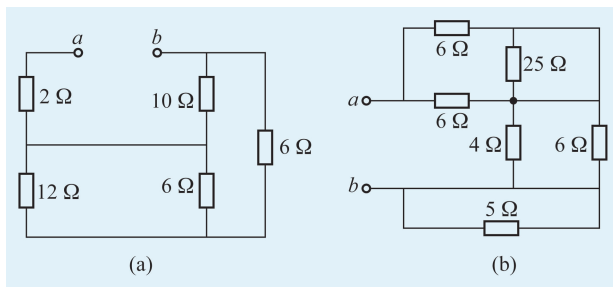


图 1-39 题 1-3-3 图

1-3-4 图 1-40(a) 所示电路, 当 $U = 3 \text{ V}$, $E = 5 \text{ V}$ 时, 流过电阻的电流是多少? 图 1-40(b) 所示电路, 当 $U = 5 \text{ V}$, $E = 3 \text{ V}$ 时, 则又如何?

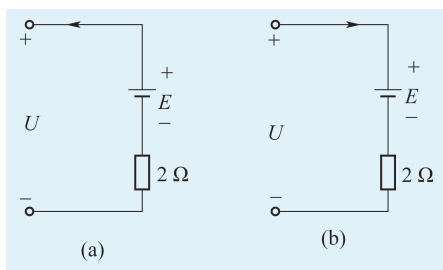


图 1-40 题 1-3-4 图

1-3-5 一个理想电压源向外电路供电时,若再并联一个电阻,这个电阻是否会影响原来外电路的响应情况? 而一个理想电流源向外电路供电时,若再串联一个电阻,这个电阻是否会影响原来外电路的响应情况?

1-3-6 图 1-41 所示电路是用变阻器 R_P 调节直流电机励磁电流 I_f 的电路。设电机励磁绕组的电阻为 315Ω ,其额定电压为 220 V ,如果要求励磁电流在 $0.35 \sim 0.7 \text{ A}$ 变动,试从下列 4 个电阻中选用一个合适的变阻器。

- ① $1\,000 \Omega, 0.5 \text{ A}$; ② $350 \Omega, 0.5 \text{ A}$; ③ $200 \Omega, 1 \text{ A}$; ④ $350 \Omega, 1 \text{ A}$ 。

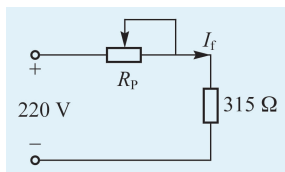


图 1-41 题 1-3-6 图

1-3-7 电路如图 1-42 所示。

- (1) 求图 1-42(a) 中的 ab 端等效电阻。
 (2) 求图 1-42(b) 中的电阻 R 。

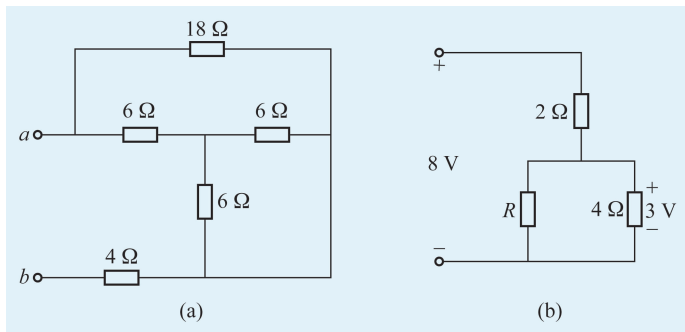


图 1-42 题 1-3-7 图

1-3-8 电路如图 1-43 所示。

- (1) 求图 1-43 (a) 中的电压 U_S 和 U 。
 (2) 求图 1-43 (b) 中的电压 U_S 和 U 。

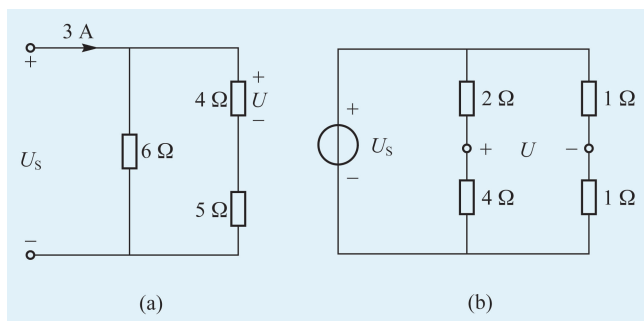


图 1-43 题 1-3-8 图

任务四 认识基尔霍夫定律

任务导入

基尔霍夫定律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。本任务主要讨论常用电路术语、基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律的概念与应用。

任务目标

掌握电路中的支路、节点、回路、网孔的定义,掌握基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律的概念,会利用基尔霍夫定律对电路进行分析。



相关知识

一、常用电路术语

基尔霍夫定律是与电路结构有关的定律,在研究基尔霍夫定律之前,先介绍几个有关的常用电路术语。

(1)支路。任意两个节点之间无分叉的分支电路称为支路,如图 1-44 中的 $bafe$ 支路、 be 支路、 $bcde$ 支路。

(2)节点。电路中,三条或三条以上支路的交汇点称为节点,如图 1-44 中的 b 点、 e 点。

(3)回路。电路中由若干条支路构成的任一闭合路径称为回路,如图 1-44 中的 $abefa$ 回路、 $bcdeb$ 回路、 $abcdefa$ 回路。

(4)网孔。不包围任何支路的单孔回路称网孔,图 1-44 中 $abefa$ 回路和 $bcdeb$ 回路都是网孔,而 $abcdefa$ 回路则不是网孔。网孔一定是回路,而回路不一定是网孔。

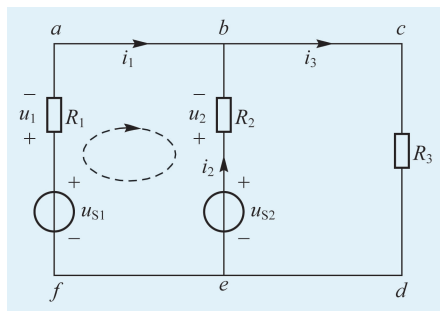


图 1-44 举例电路

二、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(KCL)是反映电路中任意节点上各支路电流之间关系的定律。其内容为:对于任何电路中的任意节点,在任意时刻,流过该节点的电流之和恒等于零。其数学表达式为

$$\sum i = 0 \quad (1-20)$$

如果选定电流流出节点为正,流入节点为负,以图 1-44 中的 b 节点为例,有

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

变换得

$$i_1 + i_2 = i_3$$

所以,基尔霍夫电流定律还可以表述为:对于电路中的任意节点,在任意时刻,流入该节点的电流总和等于从该节点流出的电流总和。即

$$\sum i_i = \sum i_o \quad (1-21)$$

KCL 不仅适用于电路中的任意节点,也可推广应用于广义节点,即包围部分电路的任意闭合面。可以证明,流入或流出任意闭合面电流的代数和为零。在图 1-45 中,对于点画线所包围的闭合面,可以证明其关系为

$$I_a - (I_b + I_c) = 0$$

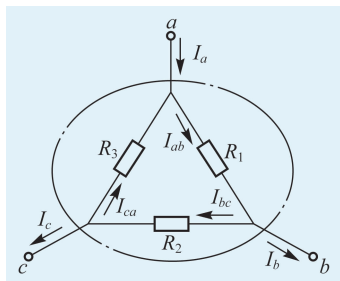


图 1-45 广义节点

基尔霍夫电流定律是电路中连接到任意节点的各支路电流必须遵循的约束关系,而与各支路上的元件性质无关。这一定律对于任何电路都普遍适用。



微课

基尔霍夫定律
及其分析方法

三、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(KVL)是反映电路中各支路电压之间关系的定律,可表述为:对于任何电路中的任意回路,在任意时刻,沿着一定的循行方向(顺时针方向或逆时针方向)绕行一周,各段电压的代数和恒为零。其数学表达式为

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

如图 1-44 所示闭合回路,沿 $abef a$ 顺序绕行一周,电压的方向与选定的回路方向一致,前面符号为正,反之为负,则有

$$-u_{S1} + u_1 - u_2 + u_{S2} = 0 \quad (1-23)$$

另外,各电压本身还存在数值的正负问题,这是需要注意的。

由于 $u_1 = R_1 i_1$ 和 $u_2 = R_2 i_2$,代入式(1-23)有

$$-u_{S1} + R_1 i_1 - R_2 i_2 + u_{S2} = 0 \text{ 或 } R_1 i_1 - R_2 i_2 = u_{S1} - u_{S2}$$

这时,基尔霍夫电压定律可表述为:对于电路中任意回路,在任意时刻,沿着一定的循行方向(顺时针方向或逆时针方向)绕行一周,电阻元件上电压降之和恒等于电源电压升之和。其表达式为

$$\sum Ri = \sum E_s \quad (1-24)$$

式中, E_s 表示电源电动势,方向为由负到正。按式(1-24)列回路电压平衡方程式时,当循行方向与电流方向一致时,则该电阻上的电压取“+”,否则取“-”;当从电源负极循行到正极时,该电源参数取“+”,否则取“-”。

应用 KVL 时,首先要标出电路各部分的电流、电压或电动势的参考方向。列电压方程时,一般约定电阻的电流方向和电压方向一致。

KVL 不仅适用于闭合电路,也可推广到开口电路。图 1-46 所示电路中,有

$$U = 2I + 4$$

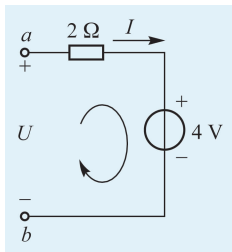


图 1-46 开口电路

例 1-4 在图 1-47 所示电路中, $I_1 = 3 \text{ mA}$, $I_2 = 1 \text{ mA}$ 。试确定电路元件 Z 中的电流 I_3 和其两端电压 U_Z ,并说明它是电源还是负载。

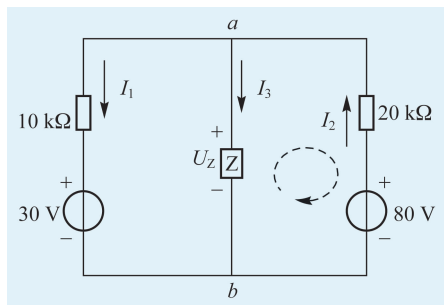


图 1-47 例 1-4 图

解 根据 KCL, 对于节点 a 有

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

代入数值得

$$(3-1) + I_3 = 0$$

$$I_3 = -2 \text{ mA}$$

I_3 为负值, 故其实际方向为从 b 到 a , 电压方向为从 a 到 b , 实际电压方向与电流方向相反, 是产生功率的元件, 即元件 Z 为电源。

根据 KVL 和图 1-47 右侧网孔所示绕行方向, 可列写回路的电压平衡方程式为

$$-U_Z - 20I_2 + 80 = 0$$

代入数值, 得

$$U_Z = 60 \text{ V}$$

显然, 元件 Z 两端电压和流过它的电流实际方向相反, 是产生功率的元件。

实践操作 验证基尔霍夫定律

实践目的

验证基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

实践器材

6 V 和 12 V 的稳压电源各 1 台, 200 Ω 和 150 Ω 电阻各 2 个, 100 Ω 电阻 1 个, 导线若干, 开关 2 个。

实践步骤

(1) 在面包板上按照图 1-48 所示连接电路图。

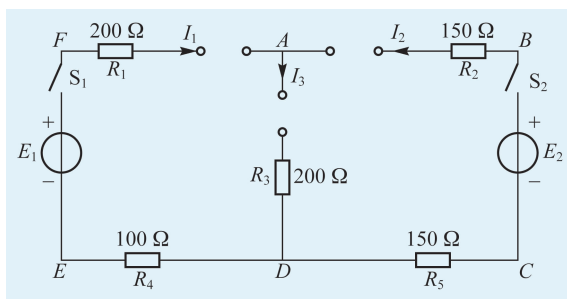


图 1-48 验证基尔霍夫定律电路图

(2)先任意设定三条支路的电流参考方向,如图中的 I_1 、 I_2 、 I_3 所示,并熟悉线路结构,掌握各开关的操作使用方法。

(3)分别将两路直流稳压电源接入电路,令 $E_1 = 6\text{ V}$, $E_2 = 12\text{ V}$,其数值要用电压表监测,记录于表 1-6 中。

(4)熟悉电流插头和插孔的结构,先将电流插头的红、黑两接线笔接至电流表的“+”“-”极,再将电流插头分别插入三条支路的三个电流插孔中,读出相应的电流值,记入表 1-6 中。

表 1-6 基尔霍夫电流定律的验证

内 容	电源电压/V		支路电流/mA			
	E_1	E_2	I_1	I_2	I_3	$\sum I$
计算值						
测量值						
相对误差						

(5)用直流数字电压表分别测量两路电源及电阻元件上的电压,数据记入表 1-7 中。

表 1-7 基尔霍夫电压定律的验证

内 容	回路电压/V					
	U_{FA}	U_{AB}	U_{CD}	U_{DE}	U_{AD}	$\sum U$
计算值						
测量值						
相对误差						

思考与练习

- 1-4-1 常用的电路术语有哪些?
- 1-4-2 如何表述基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律?
- 1-4-3 根据基尔霍夫定律,求图 1-49 所示电路中的电流 I_1 和 I_2 。

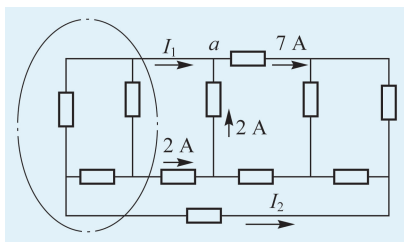


图 1-49 题 1-4-3 图

1-4-4 根据基尔霍夫定律求图 1-50 所示电路中的电压 U_1 、 U_2 和 U_3 。

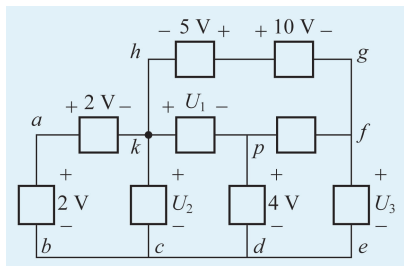


图 1-50 题 1-4-4 图

1-4-5 计算图 1-51 中各支路电流。

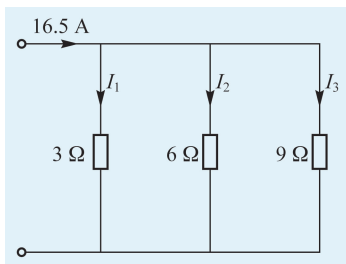


图 1-51 题 1-4-5 图

1-4-6 在图 1-52 所示电路中,若 $I_1=4\text{ A}$, $I_2=5\text{ A}$, 请计算 I_3 、 U_2 的值;若 $I_1=4\text{ A}$, $I_2=3\text{ A}$, 请计算 I_3 、 U_2 、 U_1 的值,判断哪些元件是电源,哪些元件是负载,并验证功率是否平衡。

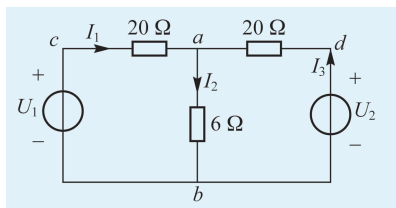


图 1-52 题 1-4-6 图

1-4-7 图 1-53 所示电路中,已知 $I=4\text{ A}$, $I_1=1\text{ A}$, $I_4=2\text{ A}$, 试求电流 I_2 、 I_3 、 I_5 和 I_6 。

1-4-8 求图 1-54 所示电路中通过电压源的电流 I_2 、电流源两端的电压及电压源和电流源的功率。

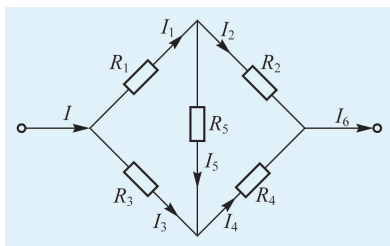


图 1-53 题 1-4-7 图

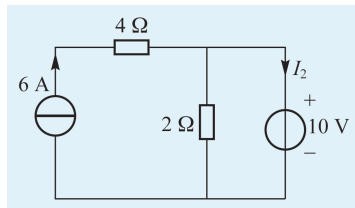


图 1-54 题 1-4-8 图

任务五 电源等效变换

任务导入

电路能正常连续运行离不开电能提供装置(即电源),本任务主要讨论电压源、电流源和受控源的基本概念和特点,电压源与电流源的连接方式与等效变换,以及负载获得最大功率的条件。

任务目标

掌握电压源、电流源和受控源的基本概念和特点,掌握电压源与电流源的连接方式与等效变换,了解负载获得最大功率的条件,会灵活进行电源的等效变换。



相关知识

一、电源及等效变换

一个电源可以用两种不同的电路模型来表示。一种是用电压的形式来表示,称为电压源;一种是用电流的形式来表示,称为电流源。

1. 电压源

电源电压 U 恒等于 U_s , 而其中的电流 I 是任意的, 由负载电阻 R_L 及电压 U_s 本身确定, 这样的电源称为理想电压源或恒压源。理想电压源的输出电压与输出电流的关系(外特性)如图 1-55 所示。



微课

两种电源模型的等效变换——独立电源概述

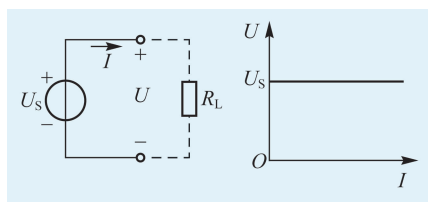


图 1-55 理想电压源的外特性

电压源的特点是端电压始终恒定,等于直流电压;输出电流是任意的,即随负载(外电路)的改变而改变。

2. 电流源

电源电流 I 恒等于 I_s ,而其两端的电压 U 则是任意的,由负载电阻 R_L 及电流 I_s 本身确定,这样的电源称为理想电流源或恒流源。理想电流源的外特性如图 1-56 所示。

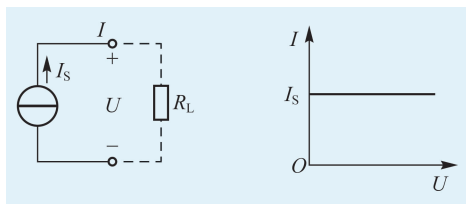


图 1-56 理想电流源的外特性

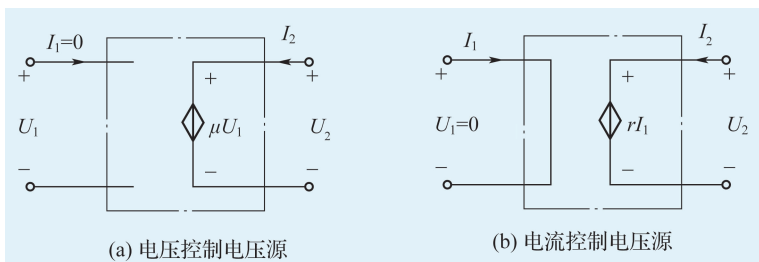
电流源的特点是输出电流恒定不变;端电压是任意的,即随负载不同而不同。

3. 受控源

电压或电流受电路中其他部分的电压或电流控制的电压源或电流源,称为受控源。

受控源是一种四端元件,它含有两条支路,一条是控制支路,另一条是受控支路。受控支路为一个电压源或一个电流源,它的输出电压或输出电流(称为受控量)受另外一条支路的电压或电流(称为控制量)的控制,该电压源和电流源分别称为受控电压源和受控电流源,统称为受控源。

根据控制支路的控制量的不同,受控源分为四种:电压控制电压源(VCVS)、电流控制电压源(CCVS)、电压控制电流源(VCCS)和电流控制电流源(CCCS),它们在电路中的符号如图 1-57 所示。为了与独立源相区别,受控源采用了菱形符号表示,图中控制支路为开路或短路,分别对应于受控源的控制量是电压或电流。



微课
受控源概述

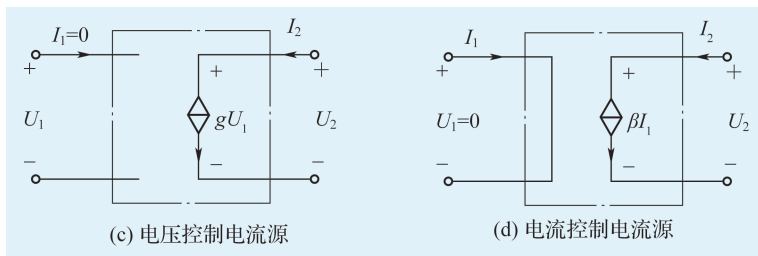


图 1-57 受控源的类型

4. 电压源、电流源的串联和并联

电压源、电流源的串联和并联问题的分析是以电压源和电流源的定义及外特性为基础，结合电路等效的概念进行的。

1) 理想电压源的串联和并联

(1) 理想电压源串联等效如图 1-58 所示。

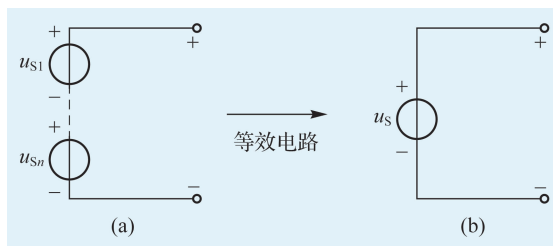


图 1-58 理想电压源串联等效

图 1-58 所示为 n 个电压源的串联，根据 KVL 得总电压为

$$u_S = u_{S1} + u_{S2} + \cdots + u_{Sn} = \sum_{k=1}^n u_{Sk}$$

注意：式中，当 u_{Sk} 的参考方向与 u_S 的参考方向一致时， u_{Sk} 在式中取“+”号，当 u_{Sk} 的参考方向与 u_S 的参考方向不一致时， u_{Sk} 取“-”号。根据电路等效的概念，可以用图 1-58(b)所示电压为 u_S 的单个电压源等效替代图 1-58(a)中的 n 个串联的电压源。通过电压源的串联可以得到一个高的输出电压。

(2) 理想电压源并联等效如图 1-59 所示。

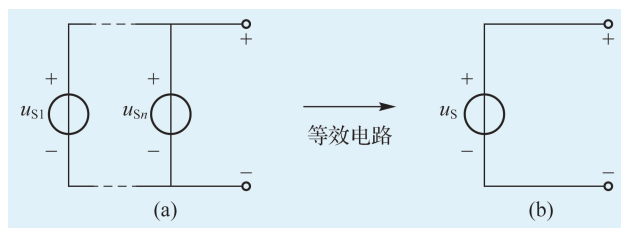


图 1-59 理想电压源并联等效

图 1-59 中为 n 个电压源的并联，根据 KVL 得

$$u_S = u_{S1} = u_{S2} = \cdots = u_{Sn}$$

上式说明只有电压相等且极性一致的电压源才能并联，此时并联电压源的对外特性与单

个电压源一样。根据电路等效概念,可以用图 1-59(b)的单个电压源电路替代图 1-59(a)的电压源并联电路。

注意:不同值或不同极性的电压源是不允许并联的,否则违反 KVL;电压源并联时,每个电压源中的电流都是不确定的。

2)电压源与支路的串、并联等效

(1)电压源与支路的串联等效电路如图 1-60 所示。

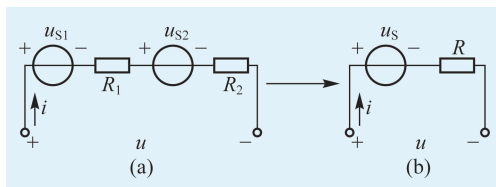


图 1-60 电压源与支路的串联等效电路

图 1-60(a)所示为 n 个电压源和电阻支路的串联,根据 KVL 得端口电压、电流关系为

$$u = u_{s1} + R_1 i + u_{s2} + R_2 i = (u_{s1} + u_{s2}) + (R_1 + R_2) i = u_s + R i$$

根据电路等效的概念,图 1-60(a)所示电路可以用图 1-60(b)所示电压为 u_s 的单个电压源和电阻为 R 的单个电阻的串联组合等效替代,其中

$$u_s = u_{s1} + u_{s2}, R = R_1 + R_2$$

(2)电压源与支路的并联等效电路如图 1-61 所示。

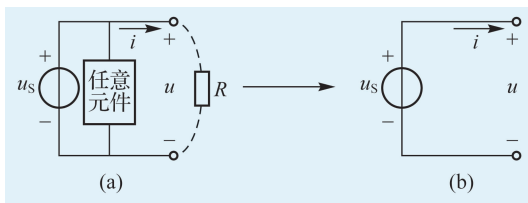


图 1-61 电压源与支路的并联等效电路

图 1-61(a)所示为电压源和任意元件的并联,设外电路接电阻 R ,根据 KVL 和欧姆定律得端口电压、电流为

$$u = u_s, i = u/R$$

即端口电压、电流只由电压源和外电路决定,与并联的元件无关,对外特性与图 1-61(b)所示电压为 u_s 的单个电压源一样。因此,电压源和任意元件并联就等效为电压源本身。

3)理想电流源的串联和并联

(1)理想电流源的并联等效如图 1-62 所示。

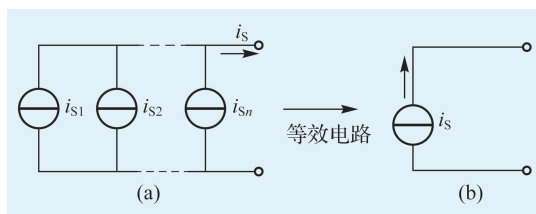


图 1-62 理想电流源的并联等效

图 1-62 所示为 n 个电流源的并联, 根据 KCL 得总电流为

$$i_S = i_{S1} + i_{S2} + \cdots + i_{Sn} = \sum_{k=1}^n i_{Sk}$$

注意: 式中, i_{Sk} 与 i_S 的参考方向一致时, i_{Sk} 在式中取“+”号, 不一致时取“-”号。根据电路等效的概念, 可以用图 1-62(b) 所示电流为 i_S 的单个电流源等效替代图 1-62(a) 中的 n 个并联的电流源, 通过电流源的并联可以得到一个大的输出电流。

(2) 理想电流源的串联等效如图 1-63 所示。

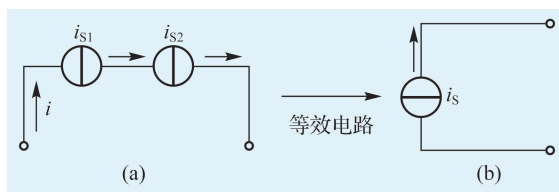


图 1-63 理想电流源的串联等效

图 1-63 所示为两个电流源的串联, 根据 KCL 得

$$i_S = i_{S1} = i_{S2}$$

上式说明只有电流相等且输出电流方向一致的电流源才能串联, 此时串联电流源的对外特性与单个电流源一样。根据电路等效概念, 可以用图 1-63(b) 所示的单个电流源替代图 1-63(a) 所示的电流源串联电路。

注意: 不同值或不同流向的电流源是不允许串联的, 否则违反 KCL; 电流源串联时, 每个电流源上的电压是不确定的。

4) 电流源与支路的串、并联等效

(1) 电流源与支路的并联等效电路如图 1-64 所示。图 1-64(a) 所示为两个电流源和电阻支路的并联, 根据 KCL 得端口电压、电流关系为

$$i = i_{S1} + u/R_1 + i_{S2} + u/R_2 = i_{S1} + i_{S2} + (1/R_1 + 1/R_2)u = i_S + u/R$$

上式说明图 1-64(a) 所示电路的对外特性与图 1-64(b) 所示电流为 i_S 的单个电流源和电阻为 R 的单个电阻的并联组合一样。因此, 图 1-64(a) 可以用图 1-64(b) 等效替代, 其中

$$i_S = i_{S1} + i_{S2}, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

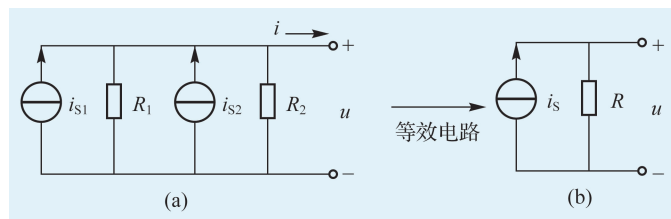


图 1-64 电流源与支路的并联等效电路

(2) 电流源与支路的串联等效电路如图 1-65 所示。



图 1-65(a)所示为电流源和任意元件的串联,设外电路接电阻 R ,根据 KVL 和欧姆定律得端口电压、电流为

$$u = u_s, i = u/R$$

即端口电压、电流只由电流源和外电路决定,与串联的元件无关,对外特性与图 1-65(b)所示电流为 i_s 的单个电流源一样。因此,电流源和任意元件串联就等效为电流源本身。

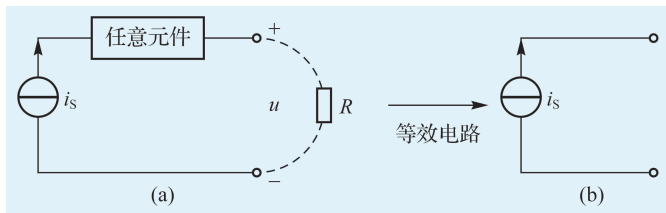


图 1-65 电流源与支路的串联等效电路

5. 实际电压源和电流源的等效变换

图 1-66 所示为实际电压源、实际电流源的模型,它们之间可以进行等效变换。

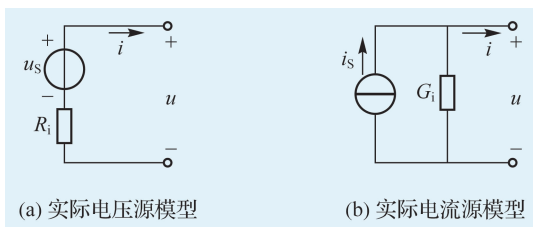


图 1-66 实际电压源和实际电流源的模型

由实际电压源模型得输出电压 u 和输出电流 i 的关系为

$$u = u_s - R_i i$$

由实际电流源模型得输出电压 u 和输出电流 i 的关系为

$$i = i_s - G_i u$$

比较以上两式,若令

$$u_s = R_i i_s, R_i = \frac{1}{G_i}$$

则实际电压源和实际电流源的输出特性将完全相同。因此,根据电路等效的概念,当上述两式满足时,实际电压源和实际电流源可以等效变换。变换的过程如下。

(1)电压源变换为电流源如图 1-67 所示。

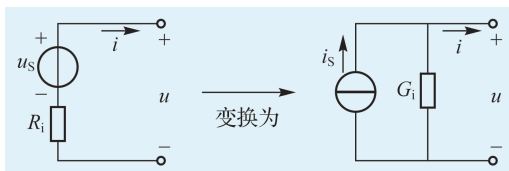


图 1-67 电压源变换为电流源

其中,

$$i_s = \frac{u_s}{R_i}, G_i = \frac{1}{R_i}$$

(2) 电流源变换为电压源如图 1-68 所示。

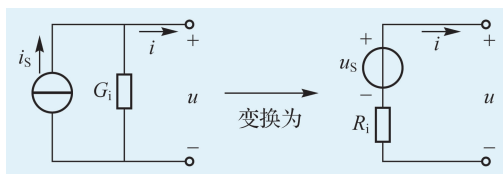


图 1-68 电流源变换为电压源

其中,

$$u_s = \frac{i_s}{G_i}, R_i = \frac{1}{G_i}$$

注意: (1) 变换关系,既要满足上述参数间的关系,还要满足方向关系:电流源电流方向与电压源电压方向相反。

(2) 电源等效变换是电路等效变换的一种方法。这种等效是对电源以外部分的电路等效,对电源内部电路是不等效的,如图 1-69 所示。

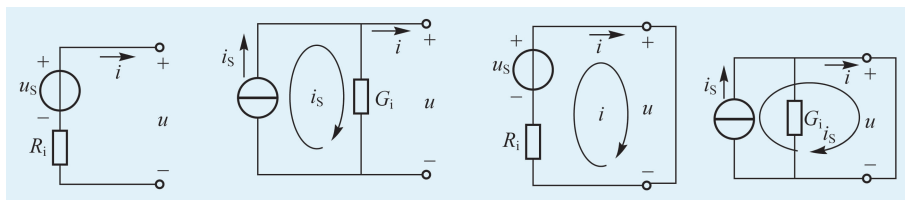


图 1-69 电源内部电路是不等效的情况

开路的电压源中无电流流过 R_i ; 开路的电流源可以有电流流过并联电导 G_i 。电压源短路时,电阻 R_i 中有电流; 电流源短路时,并联电导 G_i 中无电流。

(3) 理想电压源与理想电流源不能相互转换,因为两者的定义本身是相互矛盾的,不会有相同的电压电流关系(voltage current relation, VCR)。

(4) 电源等效变换的方法可以推广应用,如把理想电压源与外电阻的串联等效变换成理想电流源与外电导的并联,同样可把理想电流源与外电阻的并联等效变换为电压源形式。

例 1-5 利用电源等效变换计算图 1-70 所示电路中的电流 I 。

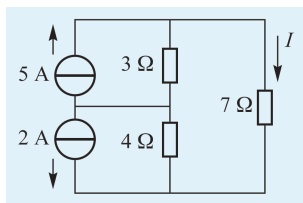


图 1-70 例 1-5 图

解 把图 1-70 中电流源和电阻的并联组合变换为电压源和电阻的串联组合,如

图 1-71 所示(注意电压源的极性)。

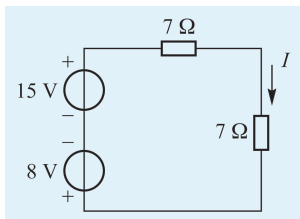


图 1-71 等效变换后电路

由图 1-71 解得

$$I = \frac{15 - 8}{14} = 0.5 \text{ A}$$

例 1-6 利用电源等效变换计算图 1-72 所示电路中的电压 U 。

解 把 5Ω 电阻作为外电路, 10 V 电压源和 5Ω 电阻的串联变换为 2 A 电流源和 5Ω 电阻的并联, 6 A 电流源和 10 V 电压源的串联等效为 6 A 电流源, 如图 1-73 所示, 则有

$$U = (2 + 6) \times (5 // 5) = 20 \text{ V}$$

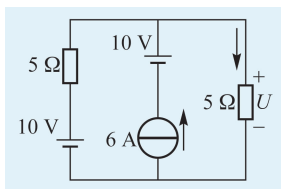


图 1-72 例 1-6 电路

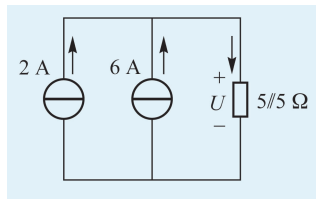


图 1-73 等效变换后电路

二、负载获得最大功率的条件

在一定的电源下, 负载电阻的大小与电源提供的功率有无关系? 或者说, 什么条件下电源才能提供最大功率、使负载获得最大功率? 下面进行分析, 电路如图 1-74 所示。

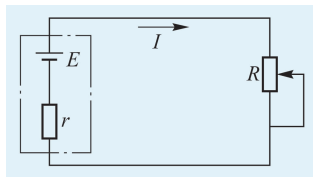


图 1-74 负载获得最大功率条件测试电路

根据功率的计算式, 负载 R 获得的功率为

$$\begin{aligned} P &= I^2 R = \left(\frac{E}{R+r} \right)^2 R = \frac{E^2 R}{(R+r)^2} = \frac{E^2 R}{R^2 + 2Rr + r^2} = \frac{E^2 R}{R^2 - 2Rr + r^2 + 4Rr} \\ &= \frac{E^2 R}{(R-r)^2 + 4Rr} = \frac{E^2}{\frac{(R-r)^2}{R} + 4r} \end{aligned}$$



微课
负载获得最大
功率的条件

由于式中 E 、 r 都可近似地看成常量,则分母中的 $\frac{(R-r)^2}{R}$ 为最小值,即 $R=r$ 时, P 取最大值,即 $P_{\max} = \frac{E^2}{4R} = \frac{E^2}{4r}$,即负载获得最大功率的条件是负载电阻等于电源内电阻。由于负载获得最大功率就是电源输出最大功率,因而这一条件也是电源输出最大功率的条件。

当负载获得最大功率时,由于 $R=r$,因而内阻消耗的功率和负载消耗的功率相等,这时效率只有 50%。在电子技术中,主要考虑负载获得最大功率,效率是次要问题。所以电路总是工作在 $R=r$ 附近,这种工作状态称为匹配状态。而在电力系统中效率是主要问题,所以电路尽量工作在 $r \ll R$ 的状态。

负载电阻与输出功率的关系如图 1-75 所示。

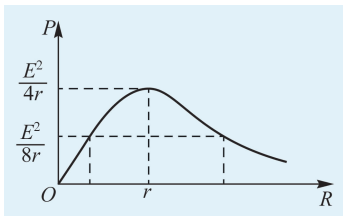


图 1-75 负载电阻与输出功率的关系

实践操作 验证电源等效变换



实践目的

掌握电源外特性的测试方法,验证电压源与电流源等效变换的条件。



实践器材

12 V 电压源 1 台,电流源 1 台,万用表 2 块,1 k Ω 、510 Ω 、200 Ω 和 120 Ω 电阻各 1 个,1 k Ω 电位器 1 个,导线若干。



实践步骤

1. 测定直流稳压电源与实际电压源的外特性

(1)按图 1-76 接线。 U_s 为 12 V 直流稳压电源(将 R_0 短接)。调节 R_2 ,令其阻值由大至小变化,将两电表的读数记录于表 1-8 中。

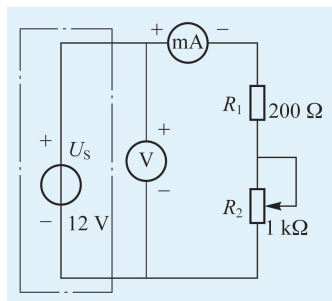


图 1-76 直流稳压电源测试电路

表 1-8 直流稳压电源的测试记录 1

U/V							
I/mA							

(2)按图 1-77 接线,点画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,将两电表的读数记录于表 1-9 中。

表 1-9 实际稳压电源的测试记录 2

U/V							
I/mA							

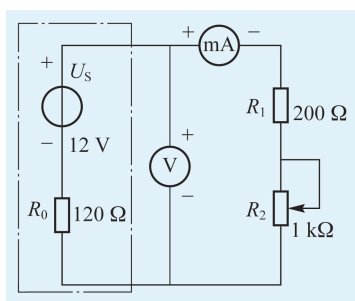


图 1-77 实际稳压电源测试电路

2. 测定电流源的外特性

按图 1-78 接线, I_s 为直流电流源, 调节其输出为 10 mA。令 R_0 分别为 1 kΩ 和 ∞ (接入和断开), 调节电位器 R_L (0~1 kΩ), 测出这两种情况下电压表和电流表的读数, 将结果记录于表 1-10 中。

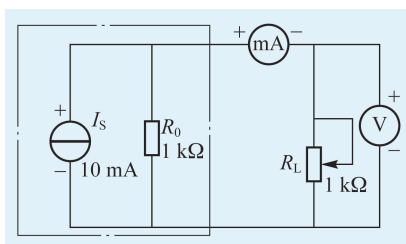


图 1-78 电流源外特性测试电路图

表 1-10 实际稳压电源的测试记录

电阻 R_0 情况	$R_0 = 1 \text{ k}\Omega$				R_0 断开时			
U/V								
I/mA								

3. 测定电源等效变换的条件

先按图 1-79(a)所示电路接线,记录两电表的读数。然后利用图 1-79(a)中右侧的元件和仪表,按图 1-79(b)所示电路接线。调节恒流源的输出电流 I_S ,使两电表的读数与图 1-79(a) 时的数值相等,记录 I_S 的值,验证等效变换条件的正确性。将测试结果记录于表 1-11 中。

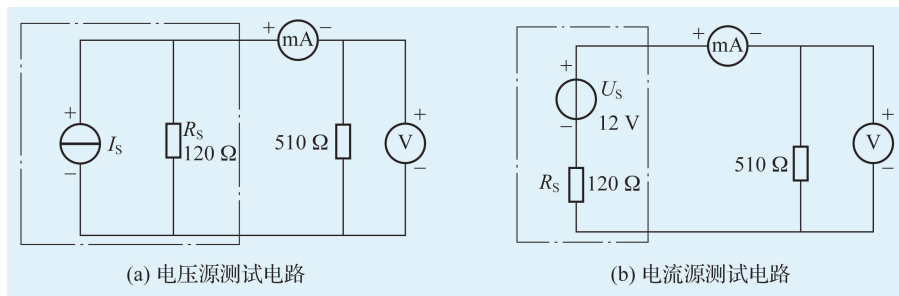


图 1-79 电源等效变换测试电路图

表 1-11 电源等效变换测试记录

电源类型	电压源	电流源
U/V		
I/mA		

思考与练习

1-5-1 将图 1-80 所示电路化为最简形式。

1-5-2 用电源等效变换求图 1-81 所示电路中的电流 I 。

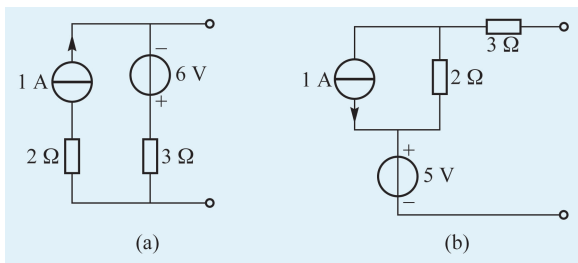


图 1-80 题 1-5-1 图

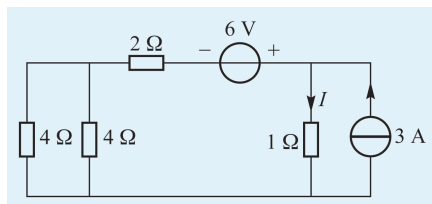


图 1-81 题 1-5-2 图



1-5-3 有一直流电压源,其额定功率 $P_N = 200 \text{ W}$,额定电压 $U_N = 50 \text{ V}$,内阻 $R_0 = 0.5 \Omega$,负载电阻 R_L 可以调节,其电路如图 1-82 所示。

(1)求额定工作状态下的电流及负载电阻 R_L 。

(2)求开路状态下的电源端电压。

1-5-4 一只 110 V 、 8 W 的指示灯,现在要接在 220 V 的电源上,要串接多大阻值的电阻?该电阻的功率是多少?

1-5-5 某电流源的电流 $I_s = 10 \text{ A}$,内阻为 200Ω ,求负载电阻为 20Ω 时的端电压;若负载电阻为 200Ω ,则端电压又为多少?

1-5-6 图 1-83 所示电路中,求 U_1 、 U_2 及电流源、电压源各自的功率。

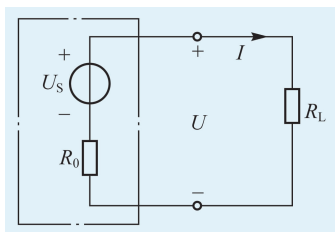


图 1-82 题 1-5-3 图

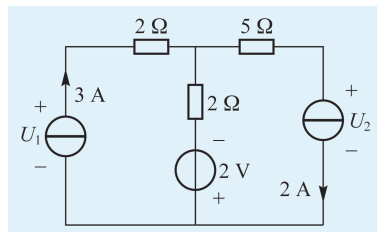


图 1-83 题 1-5-6 图

1-5-7 用等效变换法求图 1-84 所示电路的等效电源。

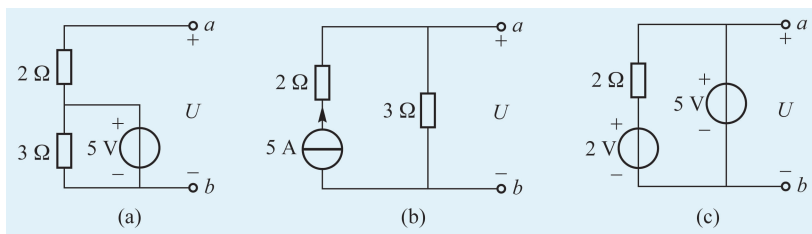


图 1-84 题 1-5-7 图

1-5-8 电路如图 1-85 所示,试用电压源和电流源等效变换的方法计算电流 I 。

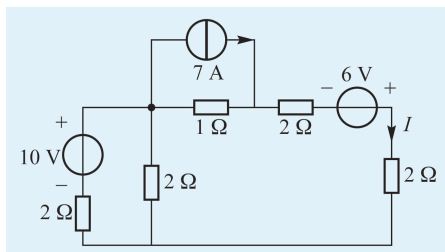


图 1-85 题 1-5-8 图

1-5-9 在图 1-86 所示电路中,求 a 、 b 两点的电位。如果将 a 、 b 两点直接短接,则电路的工作状态是否改变?

1-5-10 图 1-87 所示电路中,已知 $U_1 = U_2 = 12 \text{ V}$, $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 4 \Omega$, $R_3 = 10 \Omega$ 。以 b

点为电位参考点,画出其简化电路并求 a 点电位 V_a 。

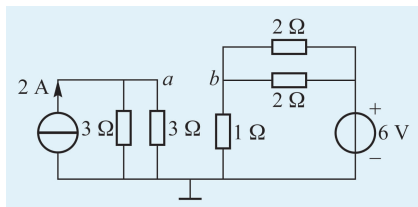


图 1-86 题 1-5-9 图

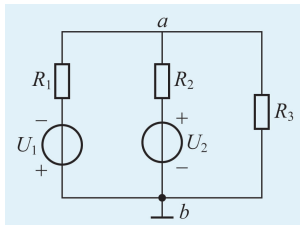


图 1-87 题 1-5-10 图

模块小结

(1) 电路的组成都离不开三个基本环节:电源、负载和中间环节。

(2) a 、 b 两点间的电压在数值上等于电场力把单位电荷由 a 点移动到 b 点所做的功,与被移动电荷电荷量 q 的比值,即 $U_{ab} = W_{ab}/q$ 。在电路中, a 、 b 两点间的电压等于 a 、 b 两点间的电位之差,即 $U_{ab} = V_a - V_b$ 。

(3) 电动势用来表征电源生产电能本领的大小,其定义式为 $E = W/q$ 。

(4) 电流的方向规定为正电荷流动的方向(或负电荷流动的反方向),其大小等于在单位时间内通过导体横截面的电量。电流用符号 I 或 i 表示。

(5) 电路有三种工作状态:空载工作状态、短路工作状态和有载工作状态。

(6) 电路中电场力对定向移动的电荷所做的功,简称电功,其表达式为 $W = UI t$ 。

(7) 基尔霍夫电流定律(KCL)是指对于任何电路中的任意节点,在任意时刻,流过该节点的电流之和恒等于零。基尔霍夫电压定律(KVL)是指对于任何电路中的任意回路,在任意时刻,沿着一定的方向(顺时针方向或逆时针方向)绕行一周,各段电压的代数和恒为零。

(8) 一个电压源与一个电流源等效变换的条件为: $I_S = U_S/R_i$, $G_i = 1/R_i$ 或 $U_S = I_S R_i$, $R_i = 1/G_i$ 。

(9) $R = r$ 时 P 达到最大值,且 $P_{\max} = \frac{E^2}{4R} = \frac{E^2}{4r}$ 。