



“十四五”职业教育国家规划教材

“十四五”职业教育江苏省规划教材

电工电子

(第二版)

主 编 杨润贤



扫描二维码
共享立体资源

电工电子
(第二版)

主 编 杨润贤

北京出版集团
北京出版社

北京出版集团
北京出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子 / 杨润贤主编. —2 版. —北京: 北京出版社, 2020.9 (2023 重印)

高职十二五规划教材: 2014 版

ISBN 978-7-200-15918-9

I. ①电… II. ①杨… III. ①电工技术—高等职业教育—教材②电子技术—高等职业教育—教材 IV. ① TM
② TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 197353 号

电工电子 (第二版)

DIANGONG DIANZI (DI-ER BAN)

主 编: 杨润贤

出 版: 北京出版集团

北京出版社

地 址: 北京北三环中路 6 号

邮 编: 100120

网 址: www.bph.com.cn

总 发 行: 北京出版集团

经 销: 新华书店

印 刷: 定州启航印刷有限公司

版 印 次: 2020 年 9 月第 2 版 2023 年 7 月修订 2023 年 7 月第 3 次印刷

成品尺寸: 185 毫米 × 260 毫米

印 张: 19

字 数: 427 千字

书 号: ISBN 978-7-200-15918-9

定 价: 59.00 元

教材意见建议接收方式: 010-58572162 邮箱: jiaocai@bphg.com.cn

如有印装质量问题, 由本社负责调换

质量监督电话: 010-82685218 010-58572162 010-58572393

目 录

模块一 直流电路模型建立与分析	1
任务一 认识直流电路	2
任务二 熟悉直流电源	13
任务三 熟悉直流电路中的负载	18
任务四 进行电阻电路的连接	27
任务五 了解电路的工作状态	35
任务六 熟悉直流电路的分析方法	38
拓展案例 集成稳压电路创新设计	47
实验项目 验证直流电路中电位与电压的关系	48
模块小结	50
职业技能知识点考核	50
模块二 正弦交流电路及其应用	55
任务一 认识交流电路	56
任务二 了解单一参数元件的单相交流电路	67
任务三 分析计算交流电路	75
任务四 功率因数的计算与分析	87
任务五 了解实际交流电路的应用	93
任务六 三相交流电路的认识、分析与应用	95
拓展案例 正负电压输出功能电路创新设计	108
实验项目 RLC 串联谐振电路测量	109
模块小结	111
职业技能知识点考核	112

模块三 工业企业供电及安全用电常识 115

任务一 了解工业企业供电	115
任务二 熟悉安全用电知识	124
任务三 熟悉防止触电的保护措施	133
任务四 熟悉节约用电常识	135
实验项目 人体的安全接触电压测量	138
模块小结	138
职业技能知识点考核	139

模块四 变压器及其应用 140

任务一 熟悉变压器	140
任务二 应用常用变压器	150
拓展案例 变压器电路创新设计	154
实验项目 单相变压器测定	155
模块小结	157
职业技能知识点考核	158

模块五 电动机的电气控制电路安装与调试 159

任务一 认识三相异步电动机	159
任务二 熟悉常用低压电器	175
任务三 三相异步电动机的基本控制电路设计	182
拓展案例 三相异步电动机异地控制电路创新设计	191
实验项目 三相异步电动机正反转控制	192
模块小结	193
职业技能知识点考核	194

模块六 半导体器件及其应用 195

任务一 熟悉二极管	195
任务二 熟悉三极管	208
任务三 熟悉单管共射放大电路	216

任务四 了解功率放大电路	225
任务五 了解集成运算放大器	232
拓展案例 OTL 功率放大电路创新设计	238
实验项目 晶体管共射极单管放大电路测量	239
模块小结	244
职业技能知识点考核	245
模块七 直流稳压电源的分析与应用	248
任务一 熟悉直流稳压电源	248
任务二 熟悉稳压电路	257
拓展案例 桥式整流电路创新设计	263
实验项目 集成直流稳压电路测试	263
模块小结	266
职业技能知识点考核	267
模块八 数字电子电路及其应用	268
任务一 了解数字电路	268
任务二 逻辑电路的组成与应用	272
拓展案例 表决器电路创新设计	290
实验项目 计数器设计与应用测试	290
模块小结	294
职业技能知识点考核	294
参考文献	296

模块一

直流电路模型建立与分析

电流是按照一定的路径（电路）进行传输和运行的，电路是电流流通的路径。电路按电源不同分为直流电路和交流电路，而直流电路是电路的最基本形式，直流电路的分析方法是分析其他电路的基础。本模块主要包括认识直流电路、熟悉直流电源、熟悉直流电路中的负载、进行电阻电路的连接、了解电路的工作状态、熟悉直流电路的分析方法等六个任务。通过学习会进行直流电路模型建立，会进行直流电路分析。

学习目标

1. 会画简单的电路图。
2. 会标注电压、电流方向，会根据电压、电流参考方向及数值判断实际方向，会判断元件或电路是产生功率还是消耗功率。
3. 会选择电压表和电流表量程，会连接电压表和电流表，会进行电压和电流测量。
4. 会识别电阻、电容、电感，会读取电阻值、电容量、电感量，会判断电阻、电容和电感的好坏。
5. 会计算串联、并联和混联电路的电压、电流、电阻和电功率等。
6. 会计算电路不同工作状态下的电压和电流等。
7. 会结合欧姆定律、基尔霍夫定律分析电路，会利用实际的电压源与电流源等效变换分析电路，会利用戴维南定理分析电路。
8. 能够用细心、严谨的科学态度进行直流电路模型分析；在直流电路模型搭建中具备安全责任意识，在学习中坚持践行新发展理念。

任务安排

表 1.0 本模块学习任务

序号	任务名称	任务主要内容
任务一	认识直流电路	电路的概念、分类、组成和电路原理图
任务二	熟悉直流电源	实际电源与理想电源、类型、特性分析
任务三	熟悉直流电路中的负载	电阻、电容、电感元件的类型、特点
任务四	进行电阻电路的连接	电阻电路的串联、并联、混联等连接方式
任务五	了解电路的工作状态	通路、开路、短路工作状态特点
任务六	熟悉直流电路的分析方法	基尔霍夫定律、支路电流法、电压源与电流源的等效变换、戴维南定律

任务一

认识直流电路

任务描述

1. 搭建如图 1.1.1 所示电路。
2. 观察如下现象并记录。
 - (1) 合上开关 S, 观测电压表的指示值、电流表的指示值和方向及灯泡的亮度。
 - (2) 改变电源 E 的极性, 观测电压表的指示值、电流表的指示值和方向及灯泡的亮度。
 - (3) 改变电阻 R 的阻值, 再观测电压表的指示值、电流表的指示值和方向及灯泡的亮度。
3. 现象分析和总结。

对上述现象进行分析, 可得出哪些结论?

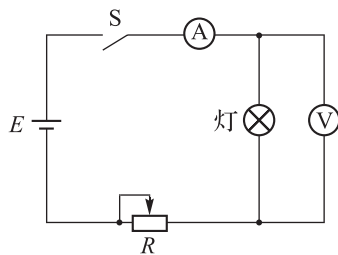


图 1.1.1 照明用直流电路

任务目标

1. 能根据实际电路绘制简单的理想电路。
2. 能辨识电路的基本组成元件。
3. 能进行电路基本物理量参考方向的标注和简单计算。
4. 能运用常用工具进行电路基本量的测量, 在测量时切记“失之毫厘, 谬以千里”。

任务实施

一、电路作用

在我们的日常生产、生活中广泛应用着各种各样的电路。电路是由各种元器件为实现某种应用目的, 按一定方式连接而成的整体, 其特征是提供了电流流动的通道。由于电的应用非常广泛, 所以电路的形式也是多种多样、千变万化的, 有长达数千千米的电力线路, 也有短到只有几微米的集成电路。

实际应用的电路种类繁多, 形式和结构也各不相同, 但其作用大体可分为两大类: 一类是用于实现电能的传输、分配和转换。例如, 照明电路将电能由电源传输到照明灯, 照明灯将电能转换为光能; 动力电路将电能由电源传输到电动机, 电动机将电能转换为机械能。将电能转换为其他形式的能量的元器件或设备统称为负载, 因此, 电路都是由电源、负载和导线等三个基本部分组成的。此类电路的电压较高, 电流和功率较大, 习惯称之为“强电”电路。另一类是用于进行电信号的传递和处理。通过电路把施

加的信号(称为激励)转换成所需要的输出信号(称为响应)。例如收音机中的调谐电路,它可以从发射台发出的不同信号中选出所需要的信号。此类电路的电压较低,电流和功率较小,习惯称之为“弱电”电路。

根据电源提供的电流不同,电路可分为直流电路和交流电路两种。

二、电路模型

用于组成电路的电工电子设备或元器件统称为实际电路元件,用实际电路元件组成的电路称为实际电路。日常生活中使用的手电筒的电路是一个简单的直流电路,其实际电路如图 1.1.2 所示。

干电池作为电源提供电能,灯泡作为负载消耗电能(将电能转换成光能),导线将相关电气设备或元器件连接起来,以满足某种需要,开关控制电源与负载之间的接通和断开。当开关闭合后,电路中就有直流电流流过,干电池将化学能转换成电能输出,灯泡则发光、发热消耗电能,将电能转换成光能和热能。当开关断开后,电路被切断,电流不通,灯泡则不亮。



不同的电路

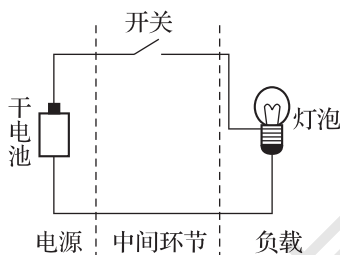


图 1.1.2 手电筒实际电路

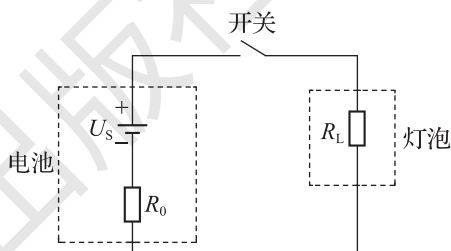


图 1.1.3 手电筒电路模型

一个实际元件往往呈现出多种物理性质,如一个用导线绕成的线圈,当有电流通过时不仅产生磁通,形成磁场,而且还会消耗电能。可以看出,线圈不仅具有电感性质,而且具有电阻性质。不仅如此,线圈的匝与匝之间还存在分布电容,具有电容性质。因此直接分析由实际元件组成的电路是比较复杂的。为了便于分析和数学描述,常常在一定条件下将实际元件理想化,即从实际元件中抽象出一些理想化的电路元件。如用电阻器来表征将电能转换成热能的电路元件,用电容器来表征电场储能现象,用电感器来表征磁场储能现象等。

某一种实际元件在一定条件下,常忽略其次要作用而只考虑其主要作用的电磁现象,也就是用理想元件来替代实际元件的模型,这种模型称为电路元件,又称理想电路元件。它实际是一种数学模型。例如,上面所述的线圈,如果忽略其电阻和电容性质,就成为具有电感性质的元件,称为理想电感元件。

图 1.1.2 所示手电筒实际直流电路在分析器件的接法和原理时是很有用的,但要用它对电路进行定量分析和计算,则非常困难(很不方便)。所以通常用一些简单但却能够表征电路主要电磁性能的理想元件来代替实际部件,如图 1.1.3 所示。电路中常见的理想元件有理想电阻元件、理想电容元件、理想电感元件、理想电压源、理想电流源和理

导线等。这样一个实际电路就可以用多个理想元件的组合来模拟,这样的电路称为电路模型或电路原理图,即由理想电路元件组成的电路模型与实际电路是等效的,因此又称为等效电路。

建立电路模型的意义十分重要。实际电路中电气设备和器件的种类繁多,但理想电路元件只有有限的几种,因此建立电路模型可以使电路的分析大大简化。需要注意的是电路模型反映了电路的主要性能,而忽略了它的次要性能,因而电路模型只是实际电路的近似,二者不能等同。

关于实际部件的模型概念,还需要强调说明以下几个方面。

(1) 理想电路元件是具有某种确定的电磁性能的元件,是一种理想的模型,实际中并不存在,但其在电路理论分析与研究中充当着重要角色。

(2) 不同的实际电路部件,只要具有相同的主要电磁性能,在一定条件下可用同一模型表示。如只表示消耗电能理想电阻元件 R (电灯、电阻炉、电烙铁等),只表示存储电场能量的理想电容元件 C (各种类型的电容器),只表示存储磁场能量的理想电感元件 L (各种电感线圈)。这三种最基本的理想元件可以代表种类繁多的各种负载。

(3) 同一个实际电路部件在不同的应用条件下,它的模型也可以有不同的形式。如实际电感器应用在低频电路里,可以用理想电感元件 L 代替;应用在较高频率电路中,可以用理想电感元件 L 与理想电阻元件 R 串联代替;应用在更高频率电路中,则可以用理想电感元件 L 与理想电阻元件 R 串联后,再与理想电容元件 C 并联代替。

如何建立一个实际电路的模型是较复杂的问题,本书主要分析研究已经建立起来的电路模型。

三、电路的组成

图 1.1.2 所示的手电筒电路由于电池、灯泡、开关和连接导线组成,即由以下三个部分组成。

(1) 电源:电源是提供电能的设备,它可将其他形式的能量(化学能、光能、机械能等)转换为电能,如蓄电池、干电池、发电机等。

(2) 负载:负载是电路中的用电设备,它可将电能转换成其他形式的能量,如电灯、电炉、电动机等。

(3) 中间环节:中间环节是连接电源和负载的部分,用来传输、分配和控制电能,最简单的中间环节是连接导线、开关。也可由多元件或电气设备组成较为复杂的中间环节。

综上所述,电路主要由电源、负载和中间环节三部分组成。电源是提供电能或信号的设备,负载是消耗电能或输出信号的设备,电源与负载之间通过中间环节相连接。

在日常生活和工作中用到的许多电气设备和元器件,一方面电磁性能很复杂,另一方面形状、大小等特征各不相同,所以分析时,要抓住它们的主要电磁性能和特征,而忽略其次要的性能和特征。在画电路图时,往往要化繁就简,不需要画出构成实际电路的各种元器件的形状、大小等,而将其抽象为理想电路元件,搭建电路模型。

四、电路物理量

电路中物理量主要包括电流、电压、电位、电功率、电功等，它们的符号及单位见表 1.1.1。

表 1.1.1 电路中主要物理量的符号及单位

物理量的名称	符号	单位名称	符号
电流	I	安【培】	A
电压	U	伏【特】	V
电位	V	伏【特】	V
电功率	P	瓦【特】	W
电功	W	焦【耳】或千瓦时	J 或 kW · h

(一) 电流

电荷有规则地定向运动形成电流。电流的大小用电流强度（简称电流）来衡量，数值上等于单位时间内通过某横截面的电荷量。即

$$i = \frac{dq}{dt} \tag{1-1-1}$$

若为直流电，则

$$I = \frac{Q}{t}$$

在国际单位中，电流 $I(i)$ 的单位为安培 (A)，电荷量 $Q(q)$ 的单位为库伦 (C)，时间 t 的单位为秒 (s)。

电流单位还有千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA)，它们之间的换算关系是 $1\text{ kA}=10^3\text{ A}$ ， $1\text{ A}=10^3\text{ mA}$ ， $1\text{ mA}=10^3\text{ }\mu\text{A}$ 。

直流电 (DC)，是指大小和方向都不随时间变化的电流。交流电 (AC)，是指大小和方向都随时间变化的电流。

规定电流的方向为正电荷运动的方向。对于一个简单直流电路如图 1.1.4 所示，在电源的作用下，电源内部的电流由负极流向正极，而电源外部，电流从电源正极经电阻（负载）流向电源负极。

在如图 1.1.4 所示的简单直流电路中，电流的实际方向可根据电源的极性直接确定。而对于复杂电路，在进行电路分析计算时，往往电流的实际方向难以确定，为了便于分析计算，便引入电流参考方向的概念。

所谓电流参考方向，是在分析计算电路时，先任意选定某一方向，并在电路中用箭头标出，作为待求电流的方向，称为电流参考方向，然后根据假定的参考方向进行电路

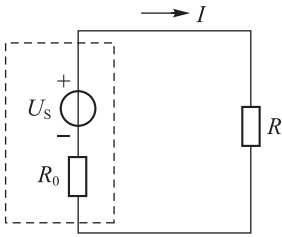


图 1.1.4 简单直流电路

计算。若电流计算值为正值,表示电流实际方向与参考方向相同;若电流计算值为负值,表示电流实际方向与参考方向相反。在电路计算中,一定要先标出参考方向,参考方向任意选定,然后进行计算,否则计算值无意义。图 1.1.5 表示了电流的参考方向(图中实线所示)与实际方向(图中虚线所示)之间的关系。

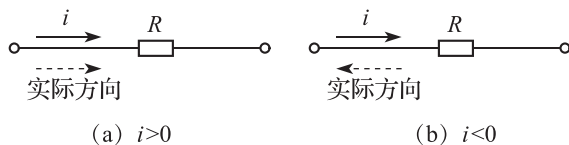


图 1.1.5 电流参考方向与实际方向

例 1-1 如图 1.1.6 所示,电流的参考方向已标出,并已知 $I_1 = -1\text{ A}$, $I_2 = 1\text{ A}$,试指出电流的实际方向。

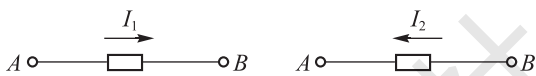


图 1.1.6 例 1-1 图

解:根据如图 1.1.6 所示的电流参考方向和已知电流的大小,

$I_1 = -1\text{ A} < 0$, 则 I_1 的实际方向与参考方向相反,应由点 B 流向点 A 。

$I_2 = 1\text{ A} > 0$, 则 I_2 的实际方向与参考方向相同,由点 B 流向点 A 。

测量电流的仪表称为电流表。电流表使用时必须串联在电路中。而使用直流电流表时要注意极性,电流应从电流表的“+”端流入,“-”端流出。

(二) 电压

电荷移动需要力,推动电荷移动的这种力称为电场力。在如图 1.1.7 所示电源的两个极板 A 和 B 上分别带有正、负电荷,这两个极板间就存在一个电场,其方向是由 A 指向 B 。当用导线和负载将电源的正负极连接成为一个闭合电路时,正电荷在电场力的作用下由正极 A 经导线和负载流向负极 B (实际上是自由电子由负极经导线和负载流向正极),从而形成电流。电压是衡量电场力做功能力的物理量。

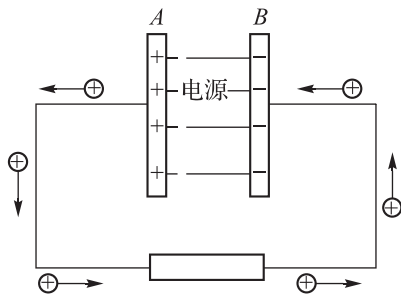


图 1.1.7 电场力对电荷做功

在电路中,电场力把单位正电荷(q)从电场中的 A 点移动到 B 点所做的功(W)就称为 A 、 B 两点间的电压 u_{AB} (U_{AB}) (双下标表示),也称电位差,即

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

若为直流电, 则

$$U_{AB} = \frac{W}{q}$$

在国际单位中, 电压 u (U) 的单位为伏特 (V), 电功 W 的单位为焦耳 (J), 电荷量 q 的单位为库仑 (C), 即当电荷量的单位为 C (库仑), 功的单位为 J (焦耳) 时, 电压的单位为 V (伏特), 简称伏, 即 $1 \text{ V} = 1 \text{ J}/1 \text{ C}$ 。

由式 (1-1-2) 可看出, 电场力做功越多, 电压就越多, 即电路中的电压反映了电场力。

在工程中还可使用千伏 (kV)、毫伏 (mV) 和微伏 (μV) 为计量单位。它们之间的换算关系是 $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$, $1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV}$, $1 \text{ mV} = 10^3 \mu\text{V}$ 。

规定电压的实际方向为从高电位指向低电位, 其方向可用箭头表示, 也可用“+”“-”极性表示, 如图 1.1.8 所示。若用双下标表示, 如 U_{AB} 表示 A 指向 B 。显然 $U_{AB} = -U_{BA}$ 。

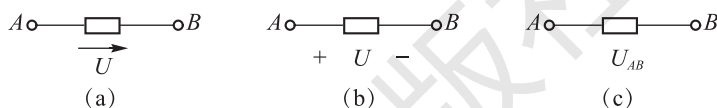


图 1.1.8 电压的实际方向表示法

与电流相同, 电压也需设定其参考方向。若电压计算值为正, 则表示电压参考方向与实际方向一致; 若计算值为负, 表示电压的实际方向与参考方向相反。

在分析电路时, 一段电路或一个元件上的电压参考方向与电流参考方向可以独立地任意设置。但为了运算方便, 电压、电流的参考方向尽量取一致, 当电压、电流参考方向一致时, 称为关联参考方向; 若电压、电流参考方向不一致时, 称为非关联参考方向。

例 1-2 如图 1.1.9 所示, 电压的参考方向已标出, 并已知 $U_1 = 1 \text{ V}$, $U_2 = -1 \text{ V}$, 试指出电压的实际方向。

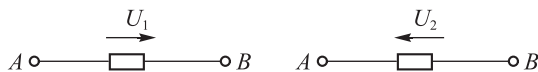


图 1.1.9 例 1-2 图

解: $U_1 = 1 \text{ V} > 0$, 则 U_1 的实际方向与参考方向相同, 由 A 指向 B 。

$U_2 = -1 \text{ V} < 0$, 则 U_2 的实际方向与参考方向相反, 应由 A 指向 B 。

(三) 电位

电压是对电路中某两点而言的, 有时在电路中选某点作为参考点 (如大地、仪器设备的外壳), 把其他各点相对于参考点的电压称为该点的电位。规定参考点在电路中电位为零, 又称为零电位点, 在电路图中参考点用符号 $\perp$ (或 $\frac{\perp}{\text{—}}$) 表示。在电路计算时, 参考点可以任意设定, 在电力系统中常以大地为参考点, 在电子设备中常以外壳为

参考点。

如图 1.1.10 所示。电位用符号 V 表示, A 点电位记作 V_A 。

当选择 O 点为参考点时, 则

$$V_A = U_{AO} \quad (1-1-3)$$

如果 A 点、 B 点的电位分别为 V_A 、 V_B , 则

$$U_{AB} = U_{AO} + U_{OB} = U_{AO} - U_{BO} = V_A - V_B \quad (1-1-4)$$

所以, 两点间的电压就是该两点电位之差, 电压的实际方向是由高电位点指向低电位点, 有时也将电压称为电压降。

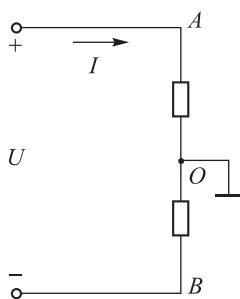


图 1.1.10 电位示意图

电路中各点的电位值与参考点的选择有关, 当所选的参考点变动时, 各点的电位值将随之变动。因此, 参考点一经选定, 在电路分析和计算过程中, 不能随意更改; 在电路中不指定参考点而谈论各点的电位值是没有意义的。

由电压与电位的概念可知, 电位就是电压, 是对参考点的电压, 电位随参考点的变化而变化; 而电压就是电位差, 与参考点的选择无关。

有了电位的概念后, 电压也可用电位来表示, 即

$$\left. \begin{aligned} U_{AB} &= V_A - V_B \\ u_{AB} &= u_A - u_B \end{aligned} \right\} \quad (1-1-5)$$

因此, 电压也称为电位差。

还需指出, 电路中任意两点间的电压与参考点的选择无关。即对于不同的参考点, 虽然各点的电位不同, 但任意两点间的电压始终不变。

例 1-3 图 1.1.11 所示的电路中, 已知各元件的电压为: $U_1=10\text{ V}$, $U_2=5\text{ V}$, $U_3=8\text{ V}$, $U_4=-23\text{ V}$ 。若分别选 B 点与 C 点为参考点, 试求电路中各点的电位。

解: 选 B 点为参考点, 则 $V_B=0$

$$V_A = U_{AB} = -U_1 = -10\text{ V}$$

$$V_C = U_{CB} = U_2 = 5\text{ V}$$

$$V_D = U_{DB} = U_3 + U_2 = 8\text{ V} + 5\text{ V} = 13\text{ V}$$

选 C 点为参考点, 则 $V_C=0$

$$V_A = U_{AC} = -U_1 - U_2 = -10\text{ V} - 5\text{ V} = -15\text{ V}$$

$$\text{或 } V_A = U_{AC} = U_4 + U_3 = -23\text{ V} + 8\text{ V} = -15\text{ V}$$

$$V_B = U_{BC} = -U_2 = -5\text{ V}$$

$$V_D = U_{DC} = U_3 = 8\text{ V}$$

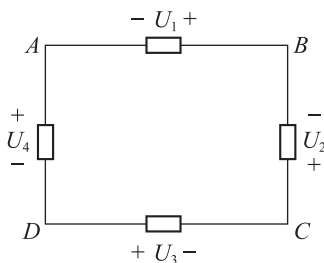


图 1.1.11 例 1-3 图

(四) 电动势

在电路中, 正电荷在电场力的作用下, 由高电位移到低电位, 形成电流。要维持电流, 还必须要有非电场力把单位正电荷从低电位推到高电位。这非电场力就是电源力

(在各类电源内部存在着这种力,例如干电池中的化学力,发动机内部的电磁力等),电源力把单位正电荷由低电位经电源内部移到高电位克服电场力所做的功,称为电源的电动势。电动势用 e 或 E 表示。即

$$e = \frac{d\omega}{dq}$$

若为直流电,则

$$E = \frac{W}{Q}$$

电动势 E 的单位为伏特 (V)。

电动势与电压的物理意义不同。电压是衡量电场力做功的能力,而电动势是衡量电源力做功的能力。电动势与电压的实际方向不同,电动势的方向是从低电位指向高电位,即由“-”极指向“+”极,而电压的方向则从高电位指向低电位,即由“+”极指向“-”极。此外,电动势只存在于电源的内部。

(五) 电功率和电能

电功率和电能是电路中的重要物理量,也是电器元件、电气设备在用电或供电中的重要技术数据。

电功率表示单位时间内该电路所吸收(或产生)的能量。即

$$p = \frac{d\omega}{dt} \quad (1-1-6)$$

在直流电路中,当电压、电流为关联参考方向时

$$P = \frac{W}{t} = UI \quad (1-1-7)$$

使用式(1-1-7)计算功率时,若功率计算值 $P > 0$,则该元件吸收功率,此时该元件为负载;若 $P < 0$,则该元件产生功率,此时该元件为电源。

当电压、电流为非关联参考方向时,则功率 $P = -UI$,若功率计算值 $P > 0$,则该元件吸收功率,此时该元件为负载;若 $P < 0$,则该元件产生功率,此时该元件为电源。

在国际单位制中,功率的单位为瓦(W)或千瓦(kW)。

当已知设备的功率为 P 时,则 t s 内消耗(或产生)的电能为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt$$

在直流电路中

$$W = Pt \quad (1-1-8)$$

在国际单位制中,电能的单位为焦耳(J)。而在日常用电及工程上,常用千瓦时(kW·h)

作单位,生活中称1千瓦时为“1度电”。

如前所述,由于电压、电流皆为代数量,因此,由式(1-1-7)所计算的功率也是代数量。

当电流、电压为关联参考方向时,式(1-1-8)表示元件消耗能量。若计算结果为正,说明电路确实消耗功率,为耗能元件;若计算结果为负,说明电路实际产生功率,为供能元件。

当电流、电压为非关联参考方向时,则式(1-1-8)表示元件产生能量。若计算结果为正,说明电路确实产生功率,为供能元件;若计算结果为负,说明电路实际消耗功率,为耗能元件。

例1-4 (1)在图1.1.12中,若电流均为2A, $U_1=1\text{V}$, $U_2=-1\text{V}$,求该两元件消耗或产生的功率。(2)在图1.1.12(b)中,若元件产生的功率为4W,求电流 I 。

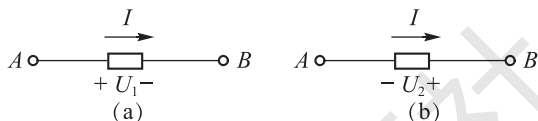


图1.1.12 例1-4图

解:(1)对图1.1.12(a),电流、电压为关联参考方向,元件消耗的功率为

$$P = U_1 I = 1 \times 2 \text{ W} = 2 \text{ W} > 0$$

表明元件消耗功率,为负载。

对图1.1.12(b),电流、电压为非关联参考方向,元件产生的功率为

$$P = U_2 I = (-1) \times 2 \text{ W} = -2 \text{ W} < 0$$

表明元件产生功率,为电源。

(2)因图1.1.12(b)中电流、电压为非关联参考方向,且是产生功率,故

$$P = U_2 I = 4 \text{ W}$$

$$I = \frac{4}{U_2} = \frac{4}{-1} \text{ A} = -4 \text{ A}$$

负号表示电流的实际方向与参考方向相反。

例1-5 有一只 $P=60\text{W}$, $U=220\text{V}$ 的白炽灯,接在220V电源上,求流过白炽灯的电流。若该白炽灯一天使用4h,则30天消耗多少电能?

解:
$$I = \frac{P}{U} = \frac{60}{220} \text{ A} \approx 0.27 \text{ A}$$

$$W = Pt = 60 \times 10^{-3} \times 4 \times 30 \text{ kW} \cdot \text{h} = 7.2 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

五、电路基本参数的测量

(一) 电路基本参数的测量

电压、电流和功率是表征电信号能量大小的三个基本参数，它们都可以直接用直读仪表（指针式或数字式）来测量。测量直流量通常采用磁电系仪表，测量交流量主要采用电磁系仪表，比较精密的测量可以使用电动系仪表。

测量电流时安培表应与负载串联，仪表内阻 R_A 应远小于负载阻抗，否则仪表的串入将改变被测支路的电流值；测量电压时伏特表应与负载并联，要求仪表内阻 R_V 远大于负载阻抗。所以用这种方法测量电压、电流的误差主要取决于仪表的准确度以及仪表内阻。其误差范围通常为 $0.1\% \sim 2.5\%$ ，只有个别的数字式电压表，测量电压的误差可以降低到 0.1% 以下。

直流功率 $P=UI$ ，即 P 等于电压 U 和电流 I 的乘积，所以可采用电压表与电流表间接测量，接线如图 1.1.13 所示，接法不同，其结果也有所差别。由于电流表内阻上的压降很小，所以一般情况下采用如图 1.1.13 (a) 所示的接法。在低压大电流的特殊场合，如果电流表上的压降比较显著，可以采用如图 1.1.13 (b) 所示的接法。

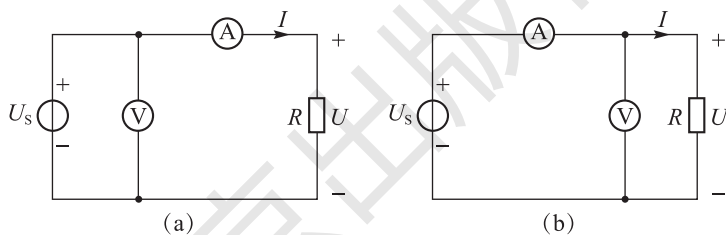


图 1.1.13 测量电路

(二) 常用测量仪表的使用

1. 500 型指针万用表的使用。

直流电压的测量：将万用表的一个转换开关置于交、直流电压挡，另一个转换开关置于直流电压的合适量程上，且“+”表笔（红表笔）接到高电位处，“-”表笔（黑表笔）接到低电位处，即让电流从“+”表笔流入，从“-”表笔流出。若表笔接反，表头指针会反方向偏转，容易撞弯指针。记录相关数据。

直流电流的测量：测量直流电流时，将万用表的一个转换开关置于直流电流挡，另一个转换开关置于 $50\ \mu\text{A}$ 到 $500\ \text{mA}$ 的合适量程上，电流的量程选择和读数方法与电压一样。测量时必须先断开电路，然后按照电流从“+”到“-”的方向，将万用表串联到被测电路中，即电流从红表笔流入，从黑表笔流出。如果误将万用表与负载并联，则因表头的内阻很小，会造成短路烧毁仪表。其读数方法如下：实际值 = 指示值 $\times$ 量程 / 满偏。

电阻的测量：用万用表测量电阻时，应按下列方法操作。

(1) 选择合适的倍率挡。万用表欧姆挡的刻度线是不均匀的，所以倍率挡的选择应使指针停留在刻度线较稀的部分为宜，且指针越接近刻度尺的中间，读数越准确。一般

情况下,应使指针指在刻度尺的 $1/3 \sim 2/3$ 间。

(2) 欧姆调零。测量电阻之前,应将 2 个表笔短接,同时调节“欧姆(电气)调零旋钮”,使指针刚好指在欧姆刻度线右边的零位。如果指针不能调到零位,说明电池电压不足或仪表内部有问题。并且每换一次倍率挡,都要再次进行欧姆调零,以保证测量准确。

(3) 读数:表头的读数乘倍率,就是所测电阻的电阻值。

注意事项:

- ①在测电流、电压时,不能带电换量程;
- ②选择量程时,要先选大的,后选小的,尽量使被测值接近于量程;
- ③测电阻时,不能带电测量。因为测量电阻时,万用表由内部电池供电,如果带电测量,则相当于接入一个额外的电源,可能损坏表头;
- ④万用表使用完毕后,应使转换开关在交流电压最大挡位或空挡上。

2. VC9802 数字万用表的使用。

直流电压的测量:根据需要量程开关拨至 DCV(直流)的合适量程,红表笔插入 V/ Ω 孔,黑表笔插入 COM 孔,并将表笔与被测线路并联,读数即显示。

直流电流的测量:将量程开关拨至 DCA(直流)的合适量程,红表笔插入 mA 孔 (<200 mA 时)或 10 A 孔 (>200 mA 时),黑表笔插入 COM 孔,并将万用表串联在被测电路中即可。测量直流量时,数字万用表能自动显示极性。

电阻的测量:将量程开关拨至 Ω 的合适量程,红表笔插入 V/ Ω 孔,黑表笔插入 COM 孔。如果被测电阻值超出所选择量程的最大值,万用表将显示“1”,这时应选择更高的量程。测量电阻时,红表笔为正极,黑表笔为负极,这与指针式万用表正好相反。

任务测试

1. 以下不属于电路基本组成的是()。
 - A. 电源
 - B. 负载
 - C. 测量工具
 - D. 中间环节
2. 以下不属于电路物理量的是()。
 - A. 电流
 - B. 电位
 - C. 电能量
 - D. 电量
3. 下列选项中说法正确的是()。
 - A. 规定电流的方向为正电荷运动的方向
 - B. 参考方向可根据电源的极性直接确定
 - C. 电压就是电位差,与参考点的选择无关
 - D. 测量电流时安倍表应与负载串联
4. 电路中各点的电位值与()有关。
 - A. 电动势
 - B. 元件
 - C. 参考点的选择
 - D. 接线方式
5. 当电压与电流为非关联参考方向时,功率 $P = -UI$,若 $P = 200$ W,则该元件()功率。
 - A. 产生
 - B. 吸收
 - C. 转化
 - D. 视在

素质拓展阅读

直流电在行业应用的挑战与未来

直流电应用技术诞生于 19 世纪, 为人类文明的发展做出了巨大贡献, 并在半导体、工业等领域占有一席之地。随着时代的变化, 直流电走进更多行业, 这既带来了挑战, 也产生了机遇。

在新兴的发电侧 - 光伏储能的行业应用。光伏行业作为新型能源的“主力军”, 既有电站式光伏, 也有分布式光伏。过去, 光伏尚未“崭露头角”, 光伏电站内各发电单元的控制系統对电流的承受能力都较有限, 且由于地处偏远郊外, 用户不易进行人工维护和远程操控。现在, 光伏发电在生产 and 生活中开始扮演越来越重要的角色, 这也加大了高电压、多节点以及电流的不稳定等问题的出现, 让行业用户对用电安全和维护有了更高的要求。

在活跃的用电侧 - 数据中心的行业应用。目前, 国内大部分数据中心采用直流电, 且规模较恒定, 对电流电压的承载能力也较有限。为了保护数据资产, 数据中心通常会采用冗余设计提高处理能力, 但无法避免高能耗和高运维成本支出。如何在庞大的系统能耗下实现高电流低成本的多选项, 是困扰数据中心用户的一大难题。

在稳重的用电侧 - 轨道交通的行业应用。轨道交通行业分属复杂又相似, 从属于其中的地铁、轻轨、高铁各自拥有着截然不同的供电体系。以牵引或推送铁路车辆运行的铁路机车为例, 机车运行中需要不断为列车的关键负载提供 110 V 的直流电压, 但由于铁路运行环境严酷多变, 满载车辆人流密集, 国家对轨道交通行业的设备标准要求极为严格。在长时间处于振动状态的列车上, 电压不稳、不同温湿度、冲击振动、电磁干扰、浪涌等问题, 都考验着轨道交通行业的安全性 with 可靠性。

我们要及时关注这些行业应用的最新要求、技术难题等, 努力夯实直流电路相关专业知识, 迎接直流电在国家新能源快速崛起与发展中的挑战。

任务二 ··· 熟悉直流电源

电源是将其他形式的能量 (如化学能、机械能、太阳能、风能等) 转换成电能后提供供给电路的设备, 常用的电源有干电池、太阳能电池、火力发电机组、水力发电机组、核发电机组等。电源有交流电源和直流电源之分, 并可分为独立电源和受控电源。我们常见的干电池、蓄电池、稳压电源等是能够独立向电路提供电压、电流的器件、设备或装置, 属于独立直流电源。

任务描述

对日常生活中的电源进行仔细观察,并查阅相关资料,并进行思考和分析。

1. 手电筒用的干电池,电子计算器、电子手表使用的纽扣电池。
2. 智能手机、电瓶车、笔记本电脑使用的蓄电池。
3. 电工类实验室用的电源发生器、振荡器。
4. 插座电源、便携式发电机。

以上这些电源的类型是什么?理想电路元件是什么?这些电源是如何进行应用的?

任务目标

1. 能区分直流电源的基本形式。
2. 会直流电源特性分析。
3. 会连接直流电源与负载电路。
4. 会计算直流电源负载电流/电压。
5. “凡事以理想为因,以实行为果”,在实际应用中,能够使用实际直流电源进行电路分析。

任务实施

发电机、电池等都是实际的电源,它们是具有不变的电动势和较低内阻的电源。在电路分析中,常用等效电路来代替实际的元器件。电源的等效电路有两种表示形式,一种是电压源,一种是电流源。

一、直流电压源

直流电压源是一种以直流电压形式表示电源的电路模型。它有理想电压源和实际电压源两种形式。

理想电压源是指内阻为零,且电源两端的端电压值恒定不变,如图 1.2.1 所示。

理想电压源的特点是电压的大小取决于电压源本身的特性,与流过的电流无关。流过电压源的电流大小与电压源外部电路有关,由外部负载决定。因此,它被称为独立电压源。

一般电压源的电压与电流的方向是非关联的。也就是说,电压源的端电压方向与流过电流的方向相反。

电压为 U_s 的理想电压源的伏安特性曲线,是一条平行于横坐标轴的直线,如图 1.2.2 所示,特性方程为

$$U = U_s \quad (1-2-1)$$

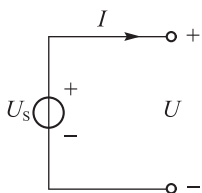


图 1.2.1 理想电压源

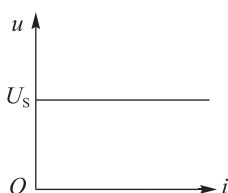


图 1.2.2 理想电压源的伏安特性曲线

实际运用时，电源并不是我们前面分析的理想模型，所有的电源都有内阻。实际的电压源的端电压不是一个恒定值；同样，实际的电流源输出的电流也不是一个恒定值。实际电压源可以用一个理想电压源 U_s 与一个理想电阻 R_i 串联组合成一个电路来表示，如图 1.2.3 所示。图 1.2.3 中 U_s 为实际电压源的电压， R_i 为实际电压源的内阻， U 为实际电压源的开路电压。

实际电压源的伏安特性曲线如图 1.2.4 所示，特征方程为

$$U = U_s - IR_i \quad (1-2-2)$$

可见，实际电压源输出的电压随负载电流的增加而减小。实际电压源，如铅蓄电池及一般直流发电机等，在电源工作时，其端电压会随着电流的变化而变化。

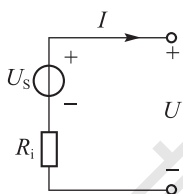


图 1.2.3 实际电压源

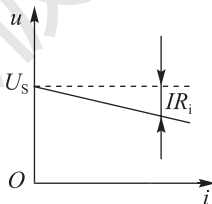


图 1.2.4 实际电压源的伏安特性曲线

实际电压源能否看成理想电压源视内阻 R_i 和电源的负载 R_L 大小而定，当 $R_L \gg R_i$ 时，可将实际电压源视为理想电压源，如图 1.2.5 所示。例如，在电力供电网中，对于任何一个用电器（如一盏灯）而言，整个电力网除了该用电器

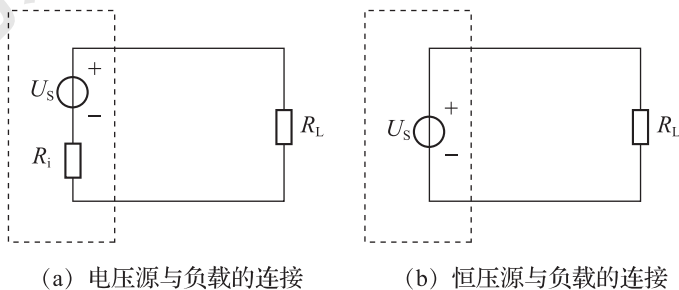


图 1.2.5 电压源

以外的部分，就可以近似地看成是一个理想电压源。当该理想电压源与外电路接通时，其端电压 $U = E$ ，端电压不随电流变化而变化，电压源的伏安特性曲线是一条水平线。

二、直流电流源

电流源是用电流的形式表示电源的一种模型。电流源也分为理想电流源和实际电流源两种。

理想电流源是能够向外电路提供稳定电流的一种电源,即内阻为无限大、输出恒定电流 I_s 的电源(对外总能提供出一个恒定的电流,此电流与它两端的电压无关),如图 1.2.6 所示。它的特点是电流的大小取决于电流源本身的特性,与电流源的端电压无关。端电压的大小与电流源外部电路有关,由外部负载决定。因此,也称之为独立电流源。

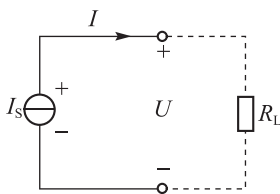


图 1.2.6 理想电流源

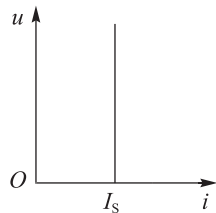


图 1.2.7 理想电流源的伏安特性曲线

一般电流源的电压与电流的方向也是非关联的。也就是说,电流源流出的电流方向与电流源的端电压方向相反。

电流为 I_s 的理想电流源的伏安特性曲线,是一条垂直于横坐标轴的直线,如图 1.2.7 所示,特性方程为

$$I = I_s \quad (1-2-3)$$

实际电流源可看成是由理想电流源 I_s 与电阻 R_i 并联而成的,如图 1.2.8 所示。图中 I_s 为电流源的最大输出电流, R_i 为电流源的内阻, U 为电流源的开路电压。

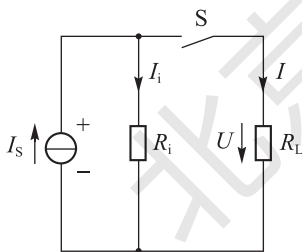


图 1.2.8 实际电流源

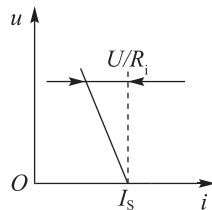


图 1.2.9 实际电流源的伏安特性曲线

实际电流源的伏安特性曲线如图 1.2.9 所示,特征方程为

$$I = I_s - \frac{U}{R_i} \quad (1-2-4)$$

电流源的内阻 R_i 越大, I_s 在 R_i 上的分流越小,输出电流 I 越接近 I_s 。当 $R_i \rightarrow \infty$ 时, $I = I_s$, 输出电流与端电压无关,即为理想电流源或恒流源。

电流源可以说是一种能“产生”电流的装置。例如,光电池在一定强度的光线照射下,就能激发出电流。光电池若接上负载 R_L 就能够向负载提供一定量的电流。

一个实际电源,除了用电压源模型等效外,还可以用电流源模型来等效。实际的电源即使没有与外电路接通,其内部也有电流流动;与负载接通后,电源内部仍有一部分电流流动,另一部分电流则通过负载。

三、直流电源应用计算

例 1-6 在图 1.2.5 (a) 中, 设 $U_s = 20 \text{ V}$, $R_i = 1 \Omega$, 外接电阻 $R_L = 4 \Omega$, 求电阻 R_L 上的电流 I 。

解: 根据公式 (1-2-2), $U = U_s - IR_i = IR_L$

$$\text{则有} \quad I = \frac{U_s}{R_L + R_i} = \frac{20}{4 + 1} \text{ A} = 4 \text{ A}$$

例 1-7 在图 1.2.8 中, 设 $I_s = 5 \text{ A}$, $R_i = 1 \Omega$, 外接电阻 $R_L = 9 \Omega$, 求电阻 R_L 上的电压 U 。

解: 根据公式 (1-2-4), $I = I_s - \frac{U}{R_i} = \frac{U}{R_L}$

$$\text{则有} \quad U = \frac{R_i R_L}{R_i + R_L} I_s = \frac{1 \times 9}{1 + 9} \times 5 \text{ V} = 4.5 \text{ V}$$

任务测试

判断:

1. 理想电源就是实际电源。()
2. 所有的实际电源都有内阻。()
3. 当 $R_L \gg R_i$ 时, 可将实际电压源视为理想电压源。()
4. 实际电源, 既可以用电压源模型等效, 又可以用电流源模型来等效。()
5. 实际电流源的内阻是无穷大的。()

素质拓展阅读

电路模型中引入理想电源和实际电源的意义

学习直流电源时, 往往都涉及了理想电压源 / 电流源、实际电压源 / 电流源, 在具体应用中, 我们应该如何来理解? 这里需要关注“理想”与“源”。

在实际电路中存在非常多的非理想情况, 而且有时候这种情况可能是非常复杂的。而学习者的学习过程则是由浅至深, 不建议刚开始就对一个非常复杂的电路模型学习。对直流电源的学习, 我们需要先建立一个尽可能简单且包含该理论知识的模型来理解分析, 而理想电压源 / 电流源就是要去除一些不必要的干扰项, 简化模型, 方便分析。

源的引入是用来提供能量或者一种参考。有能量提供, 某些器件才能运作; 有参考输入, 某些器件才能实现特定的功能。所以, 理想电压、电流源是一种简化了的、可以作用于元器件, 使其产生各种效应的物理存在。理想电压源内阻为 0, 可以提供无穷的

能量,而实际的电压源内阻不为 0,能提供的能量有限;理想电流源内阻无穷大,可以提供无穷大的能量,实际的电流源内阻则有限,能提供的能量有限。

使用理想电压电流源建立电路模型,虽然不能完全表征实际情况,但是能简化分析,帮助学习者理解消化电路理论,为以后的实战打下坚实的理论基础。

在直流电压的学习过程中,我们要循序渐进,从理想电压源/电流源的分析与学习,再到实际电压源/电流源的实践应用,一步一个脚印,打牢基础。

“凡事以理想为因,实行为果”,鲁迅先生这句话告诉我们,明确目标、树立理想是我们走向成功的第一步,没有行动的理想只能是空中楼阁,而理想和目标的实现必须落在行动中。

任务三 ··· 熟悉直流电路中的负载

任务描述

直流电路中常用负载主要有电阻、电容和电感等元器件,通过任务学习,查阅相关资料,了解常用电阻、电容、电感的种类、特点和用途等。

1. 常用电阻知识。

电阻的种类较多,按制作材料的不同,可分为绕线电阻和非绕线电阻两大类。非绕线电阻因制造材料的不同,有碳膜电阻、金属膜电阻、金属氧化膜电阻、实心碳质电阻等。另外还有一类特殊用途的电阻,如热敏电阻、压敏电阻等。如图 1.3.1 所示为常用电阻实物图。



图 1.3.1 常用电阻实物图

2. 常用电容知识。

电容器基本上分为固定的和可变的两大类。固定电容器按介质来分,有云母电容器、瓷介电容器、纸介电容器、薄膜电容器(包括塑料、涤纶等)、玻璃釉电容器、漆膜电容器和电解电容器等。可变电容器有空气可变电容器、密封可变电容器两类。半可变电容器又分为瓷介微调、塑料薄膜微调 and 线绕微调电容器等。如图 1.3.2 所示为常用电容器实物图。

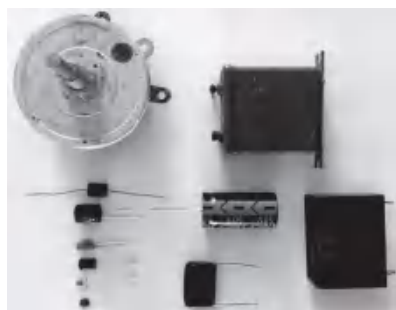


图 1.3.2 常用电容器实物图

3. 常用电感知识。

电感元件概括起来可分两大类:一类为自感式线圈,如天线线圈、调谐线圈、阻流线圈、提升线圈、稳频线圈、偏转线圈等;另一类为互感式变压器,如电源变压器、音频变压器、振荡变压器、中频变压器(中周)等。如图 1.3.3 所示为常用电感实物图。

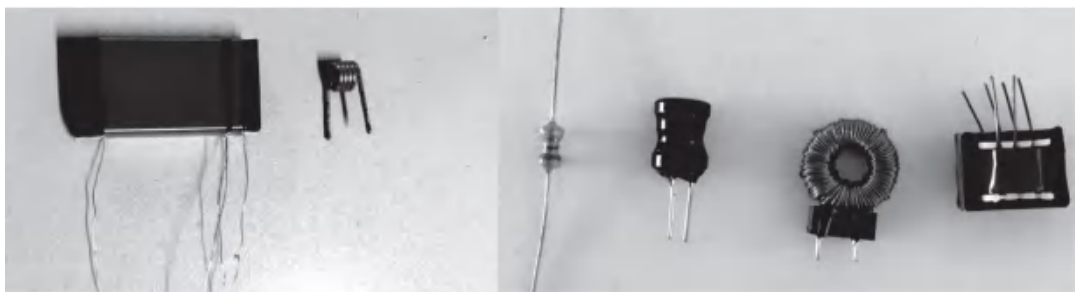


图 1.3.3 常用电感实物图

任务目标

1. 会正确进行欧姆定律描述，能正确计算电功率。
2. 会电路模型分析，能正确计算电容吸收功率和电功。
3. 能理解电感磁场效应，会计算磁场吸收功率和能量。
4. 能有效运用电阻、电容、电感元件的特点于电路应用中。

任务实施

一、电阻元件

(一) 认识电阻元件

电阻是电路中不可缺少的元件，是反映消耗电能这一物理现象的一个二端电路元件。它是在不考虑其他电磁现象的情况下，仅考虑其电阻性质的理想元件。

电阻元件的性质可分为线性、非线性两种。在任何时刻，对于线性电阻元件，它两端的电压与其电流的关系服从欧姆定律，图形符号见图 1.3.4。



图 1.3.4 电压电流参考方向的关系

当电压与电流为关联参考方向时，如图 1.3.4 (a) 所示，欧姆定律描述为

$$U = IR \quad (1-3-1)$$

当电压与电流为非关联参考方向时，如图 1.3.4 (b) 所示，欧姆定律描述为

$$U = -IR \quad (1-3-2)$$

根据国际单位制 (SI)，式中 R 被称为电阻，单位为欧姆 (Ω)。

非线性电阻元件的电流与其两端的电压是非线性关系。

导体的电阻不仅和导体的材质有关,而且还和导体的尺寸有关。实验证明,同一材料导体的电阻和导体的截面积成反比,而和导体的长度成正比。也就是说,导体的截面积越大,电阻就越小;导体越长,电阻就越大。

为了方便计算,我们常常把电阻的倒数用电导 G 来表示,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-3-3)$$

根据国际单位制(SI),电导 G 的单位为西门子(S)。

(二) 电阻元件的伏安特性

对于线性电阻元件,其电路模型如图 1.3.5 所示。

如果把电阻元件的电压取为纵坐标(或横坐标),电流取为横坐标(或纵坐标),画出电压和电流的关系曲线,这条曲线称为该电阻元件的伏安特性曲线。

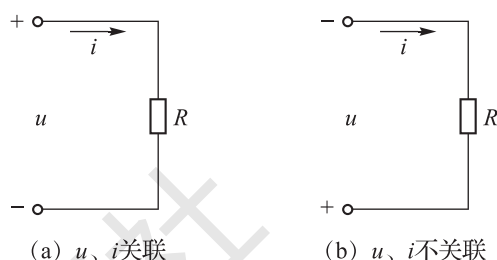


图 1.3.5 线性电阻的电路模型

根据公式(1-3-1)和(1-3-2)可知,线性电阻元件的伏安特性曲线是一条过原点的直线,元件上电压与元件中电流成正比,如图 1.3.6 所示。一般的电阻元件,均为线性电阻元件。

如果电阻元件电压的参考方向与电流的参考方向相同,则式(1-3-1)变为 $I = GU$;如果电阻元件电压的参考方向与电流的参考方向相反,则式(1-3-2)变为 $I = -GU$ 。所以,在运用公式时必须注意参考方向。

与线性电阻元件不同,非线性电阻元件的伏安特性不是一条通过原点的直线,由图 1.3.7 可以看出,非线性电阻元件的伏安特性曲线是一条曲线,例如二极管就是一个典型的非线性电阻元件。所以非线性电阻元件上电压和电流之间不服从欧姆定律,且元件的电阻将随电压或电流的改变而改变。今后,为了叙述方便,把线性电阻元件简称为电阻。这样,“电阻”这个术语以及它相应的符号,一方面表示一个电阻元件,另一方面表示这个元件的参数。

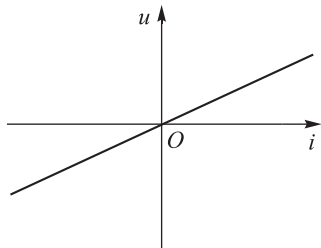


图 1.3.6 线性电阻元件的伏安特性曲线

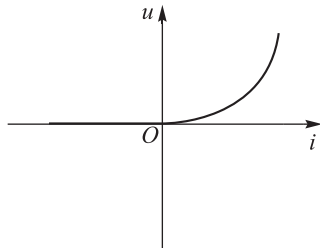


图 1.3.7 非线性电阻元件的伏安特性曲线

由线性元件组成的电路称为线性电路,由非线性元件组成的电路称为非线性电路。

(三) 电阻元件的电功率

电阻元件在通电过程中要消耗电能，是一个耗能元件。电阻所吸收的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1-3-4)$$

在直流电路中

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1-3-5)$$

在直流电路中，电阻 R 是一个与电压 U 、电流 I 无关的正实常数，由式 (1-3-5) 可知，功率 P 恒为非负值。这说明任何时刻电阻元件绝不可能发出电能，也就是说它吸取的电能全部转换成其他非电能量而被消耗掉或作为其他用途。所以，线性电阻元件不仅是无源元件，而且还是耗能元件，它总是消耗功率的。

则 t_1 到 t_2 时间内，电阻元件吸收的能量 W 全部转化为热能。

$$W = \int_{t_1}^{t_2} Ri^2 dt \quad (1-3-6)$$

在直流电路中

$$W = Pt \quad (1-3-7)$$

根据国际单位制 (SI)，电能的单位是焦 [耳] (J)，或千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$)，简称为度。

1 千瓦时是指功率为 1 kW 的电源 (负载) 在 1 h 内所输出 (消耗) 的电能。电功率用瓦特表测量，电能用瓦时表 (电度表) 测量。

我们日常用的电度表就是用来测量电能的，电度表每走一个数字，就是消耗了一度电或 1 千瓦时的电能。

例 1-8 在 220 V 的电源上，接一个电加热器，已知通过电加热器的电流是 3.5 A，问 4 h 内，该电加热器用了多少度电？

解：电加热器的功率是

$$P = UI = 220 \times 3.5 \text{ W} = 770 \text{ W} = 0.77 \text{ kW}$$

4 h 内电加热器消耗的电能是

$$W = Pt = 0.77 \times 4 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.08 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

即该电加热器用了 3.08 度电。

二、电容元件

(一) 认识电容元件

工程中，电容器应用极为广泛。电容器虽然品种和规格很多，但都是由两块金属极板间隔以不同的介质 (如云母、绝缘纸、电解质等) 组成的。

(二) 电容元件的工作原理

当电容器两端接上电源时，电容器的两块金属极板上将各自聚集等量的异性电荷，

极板间建立起电场并储存了电场能量;当切断电源时,电容器极板上聚集的电荷仍然存在,这就是电容器充电的过程。所以电容器是一种能够储存电场能量的实际电路元件,忽略介质损耗和漏电流的电容器称为理想电容元件。这样就可以用一个只储存电场能量的理想元件——电容元件作为模型。

线性电容元件是一个理想无源二端元件,它在电路中的图形符号如图 1.3.8 所示, C 称为电容元件的电容,单位是法拉(F), u 为两端变化的电压, i 为两端变化的电流,即交流电压电流的瞬时值。

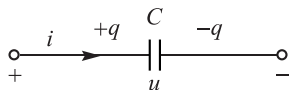


图 1.3.8 线性电容元件的图形符号

当电容器两端通上电压 U , 电容器两极板上的电荷量分别为 $+q$ 、 $-q$, 如果电荷量 q 和电压之间是线性关系, 则称为线性电容; 如果电荷量 q 和电压之间是非线性关系, 则称为非线性电容。

当电容为线性时, 电容极板上的电荷量 q 与其两端的电压 u 有以下关系

$$q = Cu \quad (1-3-8)$$

当 $q=1\text{ C}$, $u=1\text{ V}$ 时, $C=1\text{ F}$ 。实际电容器的电容往往比 1 F 小得多, 因此通常采用微法(μF)和皮法(pF)作为电容的单位, 它们之间的关系是

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

(三) 电容元件的电路模型

电容元件作为储能元件能够储存电场能量, 其电路模型如图 1.3.9 所示。

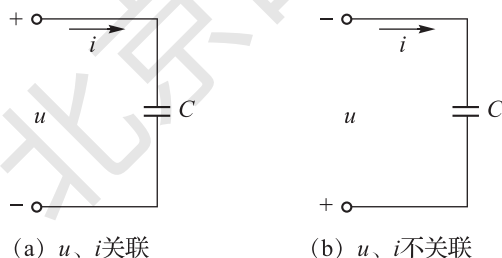


图 1.3.9 电容元件的电路模型

当电容元件极板间的电压 u 变化时, 极板上的电荷量 q 也随着改变, 于是电容元件电路中出现电流 i 。如指定电流参考方向为流进正极板, 即与电压 u 的参考方向一致, 如图 1.3.9(a) 所示, 则电流

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (\text{设 } u、i \text{ 关联}) \quad (1-3-9)$$

式(1-3-9)指出: 任何时刻, 线性电容元件中的电流与该时刻电压的变化率成正比。由于设 $u、i$ 关联,

(1) 当 $\frac{du}{dt} > 0$ 时, 则 $i_c > 0$, 电流的实际方向与参考方向一致, 电流从电容的正极流入, 给电容增加电荷, 电容处于充电状态;

(2) 当 $\frac{du}{dt} < 0$ 时, 则 $i_c < 0$, 电流的实际方向与参考方向相反, 电流从电容的正极流出, 使电容减少电荷, 电容处于放电状态;

(3) 当 $\frac{du}{dt} = 0$ 时, 则 $i_c = 0$, 说明电容元件的两端电压恒定不变, 通过电容的电流为零, 电容处于开路状态。在直流电路中, 电容上即使有电压, 但 $i = 0$, 相当于开路(电路工作状态), 故电容元件有隔断直流(简称隔直)的作用。

(四) 电容元件的电场能量

从电容的充、放电的过程可知, 电容是一个储能元件, 在充电过程中吸收能量, 在放电过程中释放能量。在电压和电流的关联参考方向下, 线性电容元件吸收的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-3-10)$$

从 t_0 到 t 时间内, 电容元件吸收的电能为

$$W_C = \int_{t_0}^t p du = \int_{t_0}^t u i dt = \int_{t_0}^t C \frac{du}{dt} u dt = \int_{u(t_0)}^{u(t)} C u du = \frac{1}{2} C u^2(t) - \frac{1}{2} C u^2(t_0) \quad (1-3-11)$$

电容元件储存的电场能量等于电容元件在任意时刻 t 和起始时刻 t_0 的电场能量之差。

选取 t_0 为电压等于零的时刻, 即有 $u(t_0) = 0$, 电容处于未充电状态, 电场能量为零, 则从 t_0 到 t 时间内, 电容元件储存的电场能量为

$$W_C = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-3-12)$$

从上式中可以看出, 电容元件在某一时刻的储能只与当时的电压值有关。

电容元件充电时, $|u(t)| > |u(t_0)|$, $W_C(t) > W_C(t_0)$, $W_C > 0$, 电容元件吸收能量, 并全部转换成电场能量; 电容元件放电时, $|u(t)| < |u(t_0)|$, $W_C(t) < W_C(t_0)$, $W_C < 0$, 电容元件释放电场能量。由上可知, 若电容元件原先没有充电, 则它在充电时吸取并储存起来的能量一定又在放电完毕时全部释放, 它并不消耗能量。所以, 电容元件是一种储能元件。同时, 电容元件也不会释放出多于它所吸收或储存的能量, 因此它又是一种无源元件。

为了叙述方便, 把线性电容元件简称为电容。所以, “电容”这个术语以及它的相应符号 C , 一方面表示一个电容元件, 另一方面表示这个元件的参数。

(五) 电容元件的电容效应

电容器是为了获得一定大小的电容而特意制成的元件。但是, 电容的效应在许多场合也存在。如一对架空输电线之间就有电容, 因为一对输电线可视作电容的两个极板, 输电线之间的空气则为电容极板间的介质, 这就相当于电容器的作用。又如晶体三极管的发射极、基极和集电极之间也存在着电容。就是一只电感线圈, 各线匝之间也都有电容, 不过这种所谓的匝间电容是很小的, 当线圈中电流和电压随时间变化不快时, 其电容效应可略去不计。

三、电感元件

(一) 认识电感元件

由导线绕制而成线圈或把导线绕在铁芯或磁芯上就构成一个常用的电感器, 电感线圈在空调制冷行业应用极为广泛, 如互感器、变压器等。

(二) 电感元件的磁场效应

电感元件作为储能元件能够储存磁场能量, 其电路模型如图 1.3.10 所示。

线圈中通以电流 i 后, 就会在线圈内部产生磁场, 产生磁通 Φ_L , 设线圈匝数为 N , 若磁通 Φ_L 与线圈 N 匝都交链, 则产生磁通链 $\Psi_L = N\Phi_L$, 见图 1.3.11 (该图中同时画出了线性

电感元件在电路中的图形符号)。电感线圈不仅有磁场, 线圈本身还有电阻损耗, 在忽略电阻损耗的条件下, 我们可以把电感线圈当作电感元件, 即在一定条件下, 可以把电感元件看作理想的电感元件。当电感元件的磁通和电流之间是线性关系时, 称该电感元件为线性电感元件; 当电感元件的磁通和电流之间是非线性关系时, 称该电感元件为非线性电感元件。

Φ_L 和 Ψ_L 都是由线圈本身的电流产生的, 分别叫作自感磁通和自感磁通链。我们规定磁通 Φ_L 和磁通链 Ψ_L 的参考方向与电流 i_L 的参考方向之间满足右螺旋关系, 如图 1.3.12 所示。

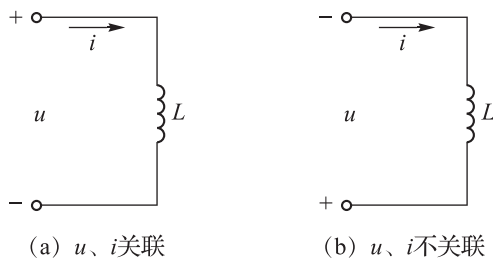


图 1.3.10 电感元件的电路模型

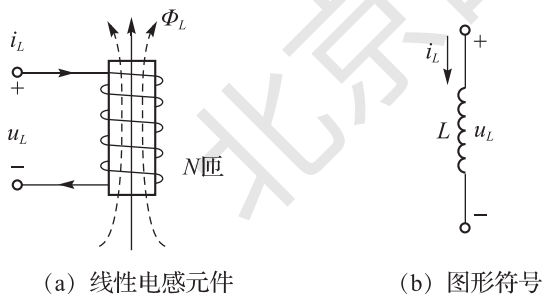


图 1.3.11 线性电感元件及其图形符号

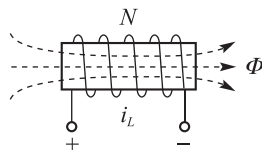


图 1.3.12 电感线圈

当电感元件为线性电感元件时, 电感元件的特性方程为

$$N\Phi = Li \quad (1-3-13)$$

式中, L 为电感元件的电感系数 (简称电感), 是一个与电感元件本身有关, 与电感元件的磁通、电流无关的常数, 又叫作自感, 在国际单位制 (SI) 中, 其单位为亨 [利] (H), 有时也用毫亨 (mH)、微亨 (μH), 其关系是 $1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}$, $1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$ 。磁通 Φ 的单位是韦 [伯] (Wb)。

在电感元件中电流 i 随时间变化时, 磁通链 Ψ_L 也随之改变, 元件两端感应有电压, 此感应电压等于磁通链的变化率。在电压和电流的关联参考方向下, 电压的参考方向与磁

通链的参考方向之间满足右螺旋关系,如图 1.3.11 (a) 所示,根据楞次定律,感应电压

$$u_L = \frac{d\Psi_L}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1-3-14)$$

由式 (1-3-14) 可知:任何时刻,线性电感元件上的电压与该时刻电流的变化率成正比。在一定的时间内,电流变化越快,感应电压越大;电流变化越慢,感应电压越小;若电流变化为零时(即当电流不随时间变化时,直流电流),则感应电压为零,电感元件相当于短路。故电感元件在直流电路中相当于短路(电路工作状态)。

(三) 电感元件的磁场能量

电感是一个储能元件,是因为当电感中电流增加时,电感吸收能量,并全部转换成磁场能量储存在电感中;当电流减少时,电感又将磁场能量释放。在此过程中电感元件没有消耗能量,只是储存能量。

在电压和电流的关联参考方向下,线性电感元件吸收的功率为

$$p = u_L i_L = L i_L \frac{di_L}{dt} \quad (1-3-15)$$

从 t_0 到 t 时间内,电感元件吸收的磁场能量为

$$W_L = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t u_L i_L dt = L \int_{i_L(t_0)}^{i_L(t)} i_L di_L = \frac{1}{2} L i_L^2(t) - \frac{1}{2} L i_L^2(t_0) \quad (1-3-16)$$

电感元件吸收的磁场能量等于电感元件在任意时刻 t 和起始时刻 t_0 的磁场能量之差。

选取 t_0 为电流等于零的时刻,即有 $i_L(t_0) = 0$, 此时电感元件没有磁通链,其磁场能量为零。因此在上述条件下,电感元件在任何时刻 t 所储存的磁场能量 $W_L(t)$ 等于它所吸收的能量,即

$$W_L(t) = \frac{1}{2} L i_L^2(t) \quad (1-3-17)$$

当电流 $|i_L|$ 增加时, $W_L(t) > W_L(t_0)$, $W_L > 0$, 电感元件吸收能量,并全部转换成磁场能量;当电流 $|i_L|$ 减少时, $W_L(t) < W_L(t_0)$, $W_L < 0$, 电感元件释放磁场能量。可见,电感元件不是把吸取的能量消耗掉,而是以磁场能量的形式储存在磁场中。所以,电感元件也是一种储能元件。同时,电感元件也不会释放出多于它所吸收或储存的能量,因此它又是一种无源元件。

当流过电感元件的电流为 i 时,它所储存的能量为

$$W_L = \frac{1}{2} L i^2 \quad (1-3-18)$$

从上式可以看出,电感元件在某一时刻的储能仅与当时的电流值有关。

四、电路元件的实际模型

上述三种典型直流电路负载元件都是理想状态下的特性元件,在实际运用中,不论是电感元件,还是电容元件,元件本身都有损耗,具有电阻值。在实际电路分析时,常常以元件的主要物理量为分析对象,在一定条件下,忽略了其他次要物理量,从而将电路分析简单化。

(1)实际的电阻器是一个耗能元件,在电路中来分配电压、限制电流,用作负载电阻和阻抗匹配等。实际的电阻器种类很多,有金属膜电阻器、绕线电阻、碳膜电阻等,有实验用的可调式电阻器等,也有电动机启动用的降压电阻器等。

(2)实际的电容器具有使直流隔断、交流导通的能力。它在电路中可实现滤波旁路、耦合和振荡等功能。电容器通常由绝缘介质隔开的金属极板组成。其种类也很多,有云母电容器、纸介电容器、瓷介电容器、电解电容器等。值得注意的是,电解电容器只能用在直流电路中,使用时要注意其正、负极性,不能接反。

(3)实际的电感器具有使直流电导通、交流电阻挡的能力。它在电路中可实现滤波、耦合、匹配、振荡、补偿、调谐、均衡、延迟等功能。电感器实际用的有电流互感器、电压互感器、变压器线圈等。

(4)电阻、电容、电感这三个名词,有时指元件本身,有时指电路参数,因此在实际应用时,应注意其应用场合,并判断其实际意义。



任务测试

判断:

1. 导体的电阻仅和导体的材质有关。()
2. 电阻是耗能元件。()
3. 电容器能够储存电场能量。()
4. 任何时刻,线性电容元件的电流与电压成正比。()
5. 电容器具有直流导通交流隔断、电感器具有直流隔断交流导通的能力。()



素质拓展阅读

电路元件与绿色制造

2021年1月29日,工业和信息化部关于印发《基础电子元器件产业发展行动计划(2021—2023年)》的通知(工信部电子[2021]5号),推广绿色制造是其中一项重要工作。提出建设绿色工厂、生产绿色产品、发展绿色园区、搭建绿色供应链,为绿色制造提升行动。

在通知的重点工作中,将电路类元器件作为重点产品高端提升行动专栏的主要工作

之一,即重点发展微型化、片式化阻容感元件,高频率、高精度频率元器件,耐高温、耐高压、低损耗、高可靠半导体分立器件及模块,小型化、高可靠、高灵敏度电子防护器件,高性能、多功能、高密度混合集成电路;将生产绿色产品作为绿色制造提升行动专栏的主要内容,即严格执行《电器电子产品有害物质限制使用管理办法》等政策,鼓励骨干企业开展产品全生命周期的绿色化设计,加快轻量化、模块化、集成化、高可靠、长寿命、易回收的新型电子元器件产品应用。

我国作为全球最大的电器电子产品生产国、消费国和出口国,随着电子产品绿色制造时代的快速发展,推动电器电子行业按照全生命周期理念,开展产品绿色设计,开发绿色产品,提升产品的绿色制造水平,从源头减少资源能源消耗,降低环境负荷等是我们学习电路元件的重要目标之一,需要学习者秉持绿色制造理念,将节约、环保意识等贯穿于日常学习全过程,致力于我国电路元件绿色制造技术的不断提升。

任务四 进行电阻电路的连接

任务描述

电路中电阻元件可按各种不同要求进行各种不同方式的连接,其中最简单的是串联和并联,图 1.4.1 给出了直流电路中电阻元件的典型连接方式,通过资料查阅、分析和任务学习,掌握电阻电路的基本连接方式。

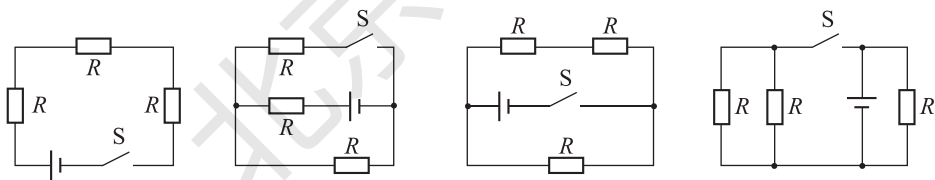


图 1.4.1 电阻电路的基本连接方式

本任务以电阻串联、并联、混联、Y- Δ 方式进行直流电路模型搭建和电路分析。

任务目标

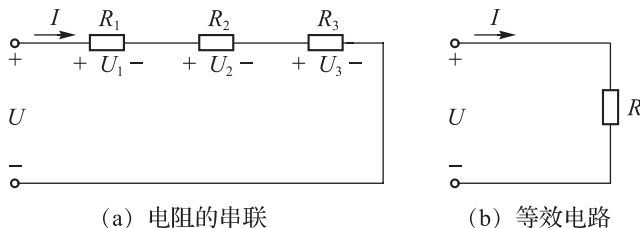
1. 会电阻串联、并联等电路等效电路的绘制。
2. 能灵活应用电阻串联、并联等电路特点进行电路分析。
3. 会电阻串联、并联等电路等效电阻阻值等参数计算。
4. 会电阻 Y- Δ 连接等效变化与参数计算。
5. “山重水复疑无路,柳暗花明又一村。”看似杂乱的电路连接方式,转化成等效电路就易理清了。

任务实施

一、电阻的串联电路

(一) 电阻串联的电路模型

在电路中,若干个电阻元件依次相连,在各连接点都无分支,这种连接方式称为串联。图 1.4.2 给出了三个电阻的串联电路。



(a) 电阻的串联

(b) 等效电路

图 1.4.2 电阻的串联

(二) 电阻串联的电路特点

- (1) 电流相等: 通过各电阻的电流相等, 即 $I_1 = I_2 = I_3 = I$ 。
- (2) 分压作用: 总电压等于各电阻上电压之和, 即 $U = U_1 + U_2 + U_3$ 。
- (3) 等效电阻: 等效电阻 [总电阻, 是指如果用一个电阻 R 代替串联的所有电阻接到同一电源上, 电路中的电流是相同的, 如图 1.4.2 (b) 所示的等效电路], 即 $R = R_1 + R_2 + R_3$ 。
- (4) 分压系数: 在直流电路中, 常用电阻的串联来达到分压的目的。各串联电阻两端的电压与总电压间的关系为

$$\begin{cases} U_1 = R_1 I = \frac{R_1}{R} U \\ U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R} U \\ U_3 = R_3 I = \frac{R_3}{R} U \end{cases} \quad (1-4-1)$$

式中 $\frac{R_1}{R}$ 、 $\frac{R_2}{R}$ 、 $\frac{R_3}{R}$ 称为分压系数, 由分压系数可直接求得各串联电阻两端的电压。

- (5) 电压电阻: 由式 (1-4-1) 还可知, 电阻串联时, 各电阻两端的电压与电阻的大小成正比, 即 $U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3$ 。

- (6) 功率电阻: 各电阻消耗的功率与电阻成正比, 即 $P_1 : P_2 : P_3 = R_1 : R_2 : R_3$ 。

例 1-9 现有一表头, 满刻度电流 $I_G = 50 \mu\text{A}$, 表头的电阻 $R_G = 3 \text{ k}\Omega$, 若要改装成量程为 10 V 的电压表, 如图 1.4.3 所示, 试问应串联一个多大的电阻?

解: 当表头满刻度时, 它的端电压为 $U_G = 50 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^3 \text{ V} = 0.15 \text{ V}$ 。设量程扩大到 10 V 时所需串联的电阻为 R , 则 R 上分得的电压为

$U_R = 10 \text{ V} - 0.15 \text{ V} = 9.85 \text{ V}$, 故

$$R = \frac{U_R R_G}{U_G} = \frac{9.85 \times 3 \times 10^3}{0.15} \Omega = 197 \text{ k}\Omega$$

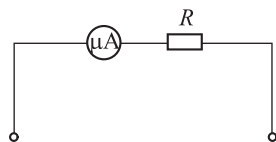


图 1.4.3 例 1-9 图

即应串联 $197\text{ k}\Omega$ 的电阻，方能将表头改装成量程为 10 V 的电压表。

二、电阻的并联电路

(一) 电阻并联的电路模型

在电路中，若干个电阻一端连在一起，另一端也连在一起，使电阻所承受的电压相同，这种连接方式称为电阻的并联。图 1.4.4 (a) 所示为三个电阻的并联电路。

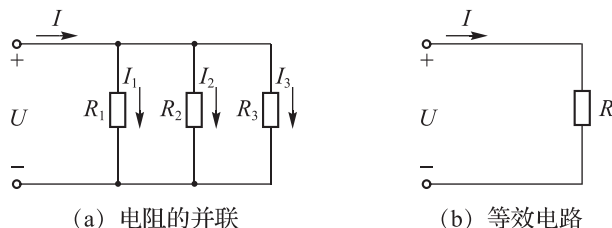


图 1.4.4 电阻的并联电路

(二) 电阻并联的电路特点

(1) 电压相等：各并联电阻两端的电压相等，即 $U = U_1 = U_2 = U_3$ 。

(2) 分流作用：总电流等于各电阻支路的电流之和，即 $I = I_1 + I_2 + I_3$ 。

(3) 等效电阻：等效电阻 R 的倒数等于各并联电阻倒数之和，即 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$ ，或者并联电路的电导等于各支路电导之和，即 $G = G_1 + G_2 + G_3$ 。

只有两个电阻 R_1 及 R_2 并联时，等效电阻 $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 。

(4) 分流系数：在电路中，常用电阻的并联来达到分流的目的。各并联电阻支路的电流与总电流的关系为

$$\begin{cases} I_1 = G_1 U = \frac{G_1}{G} I \\ I_2 = G_2 U = \frac{G_2}{G} I \\ I_3 = G_3 U = \frac{G_3}{G} I \end{cases} \quad (1-4-2)$$

式中 $\frac{G_1}{G}$ 、 $\frac{G_2}{G}$ 、 $\frac{G_3}{G}$ 称为分流系数，由分流系数可直接求得各并联电阻支路的电流。

(5) 电流电导：由式 (1-4-2) 还可知 $I_1 : I_2 : I_3 = G_1 : G_2 : G_3$ ，即电阻并联时，各电阻支路的电流与电导的大小成正比。也就是说电阻越大，分流作用就越小。

当两个电阻并联时

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

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

(6) 功率电导：各电阻消耗的功率与电导成正比，即 $P_1 : P_2 : P_3 = G_1 : G_2 : G_3$ 。

利用电阻并联的分流作用,可扩大电流表的量程。在实际应用中,用电器在电路中通常都是并联运行的,属于相同电压等级的用电器必须并联在同一电路中,这样,才能保证它们都在规定的电压下正常工作。

例 1-10 有三盏电灯接在 110 V 电源上,其额定值分别为 110 V、100 W, 110 V、60 W, 110 V、40 W,求总功率 P 、总电流 I 以及通过各灯泡的电流及等效电阻。

解:(1)因外接电源符合各灯泡额定值,各灯泡正常发光,故总功率为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = (100 + 60 + 40) \text{ W} = 200 \text{ W}$$

(2)总电流与各灯泡电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200}{110} \text{ A} \approx 1.818 \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{100}{110} \text{ A} \approx 0.909 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{60}{110} \text{ A} \approx 0.545 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{P_3}{U_3} = \frac{40}{110} \text{ A} \approx 0.364 \text{ A}$$

(3)等效电阻为

$$R = \frac{U}{I} \approx \frac{110}{1.818} \Omega \approx 60.5 \Omega$$

三、电阻的混联

实际应用中经常会遇到既有电阻串联又有电阻并联的电路,称为电阻的混联电路,如图 1.4.5 所示。

求解电阻的混联电路时,首先应从电路结构入手,根据电阻串并联的特征,分清哪些电阻是串联的,哪些电阻是并联的,然后应用欧姆定律、分压和分流的关系求解。

由图 1.4.5 可知, R_3 与 R_4 串联,然后与 R_2 并联,再与 R_1 串联,即等效电阻 $R = R_1 + R_2 // (R_3 + R_4)$,符号“//”表示并联。

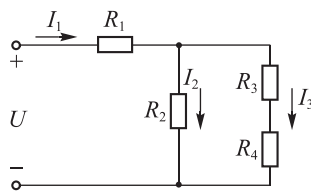


图 1.4.5 电阻的混联

则

$$I = I_1 = \frac{U}{R}$$

$$I_2 = \frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4} I$$

$$I_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_4} I$$

各电阻两端的电压的计算由读者自行完成。

四、电阻的 Y- Δ 连接

在电路中，有时电阻的连接既非串联又非并联，如图 1.4.6 所示电路，等效电阻经过电阻的串并联运算不能直接求出，须经过电阻的星形连接和三角形连接等效变换才能分析与计算。

(一) 电阻的星形连接方式

三个电阻元件的一端连接在一起，另一端分别连接到电路的三个节点。图 1.4.6 中 R_1 、 R_3 、 R_4 和 R_2 、 R_3 、 R_5 就是星形连接。

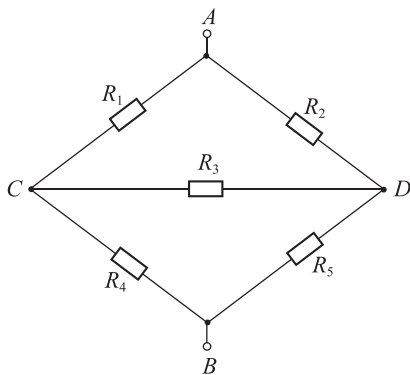


图 1.4.6 电阻的星形连接

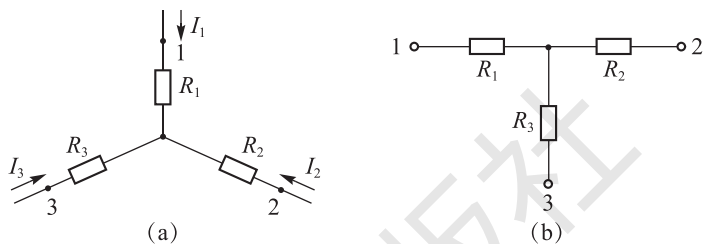


图 1.4.7 电阻的 (Y) 或 (T) 连接

星形连接形状像“Y”形，如图 1.4.7 (a) 所示，叫 Y 形连接，也叫 T 形连接，如图 1.4.7 (b) 所示。

(二) 电阻的三角形连接方式

三个电阻元件首尾相接构成一个三角形。图 1.4.6 中 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_3 、 R_4 、 R_5 就是三角形连接。

三角形连接形状像“ Δ ”形，如图 1.4.8 (a) 所示，叫 Δ 形连接，也叫 Π 形连接，如图 1.4.8 (b) 所示。

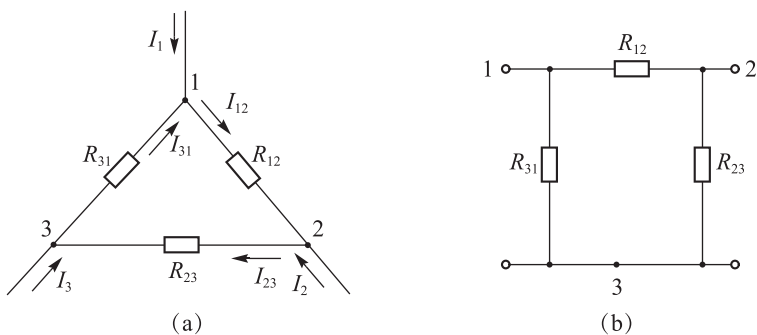


图 1.4.8 电阻的 (Δ) 或 (Π) 连接

(三) 电阻的 Y- Δ 连接的等效变换

为了简化电路，便于将复杂的星形、三角形连接方式转换为电阻串并联的简单形

式, 需要将电阻的星形连接和三角形连接进行等效变换。星形网络和三角形网络的等效互换在三相电路中有着十分重要的应用。

星形连接和三角形连接都是通过三个端钮与外部相连。它们之间的等效互换要求外部性能相同, 亦即当它们对应端钮间的电压相同时, 流入对应端钮的电流也必须分别相等。图 1.4.9 (a) (b) 分别示出了接到端钮 1、2、3 的星形连接和三角形连接的三个电阻。这两个网络是与电路的其他部分连接的, 图中未画出其他部分。设在它们对应端钮间的电压为 U_{12} 、 U_{23} 和 U_{31} , 流入对应端钮的电流为 I_1 、 I_2 、 I_3 , 如果它们彼此等效, 则必须分别相等, 在此条件下推导出如下等效变换公式, 且等效化简示意图如图 1.4.10 所示。

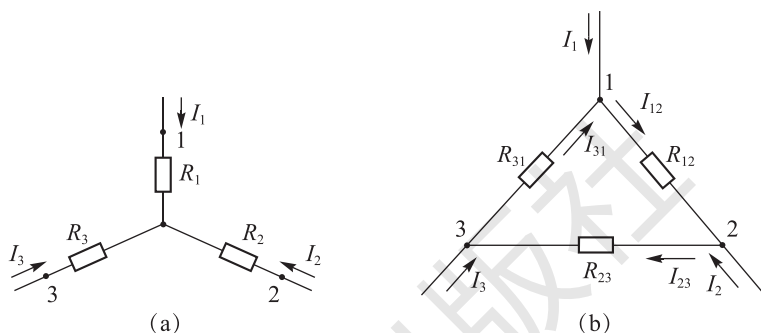


图 1.4.9 电阻的 Y- Δ 等效变换

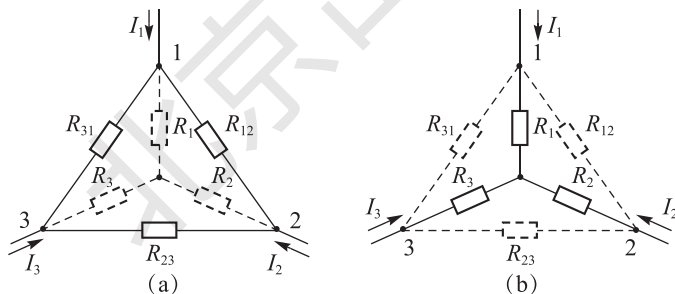


图 1.4.10 等效化简示意图

从已知的三角形网络的电阻来确定等效星形网络的各电阻的关系式

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 &= \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 &= \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{aligned} \right\} \quad (1-4-3)$$

从已知的星形网络的电阻来确定等效三角形网络的各电阻的关系式

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3} \\ R_{23} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} \\ R_{31} &= \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-4-4)$$

若星形网络的三个电阻相等, 即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_Y$, 则等效的三角形网络的电阻亦相等, 即

$$R_{\Delta} = R_{12} = R_{23} = R_{31} = 3R_Y \quad (1-4-5)$$

反之, 则

$$R_Y = \frac{1}{3} R_{\Delta} \quad (1-4-6)$$

例 1-11 图 1.4.11 (a) 所示电路中, 已知 $U_S = 100 \text{ V}$, $R_0 = 25 \Omega$, $R_1 = 50 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$, $R_3 = 10 \Omega$, $R_4 = 36 \Omega$, $R_5 = 40 \Omega$, 求 I_1 , I_2 。

解: 将 Δ 形连接的 R_1 、 R_3 、 R_5 等效变换为 Y 形连接的 R_A 、 R_C 、 R_D , 如图 1.4.11 (b) 所示, 根据式 (1-4-3) 求得

$$R_A = \frac{R_3 R_1}{R_5 + R_3 + R_1} = \frac{10 \times 50}{40 + 10 + 50} \Omega = 5 \Omega$$

$$R_C = \frac{R_1 R_5}{R_5 + R_3 + R_1} = \frac{50 \times 40}{40 + 10 + 50} \Omega = 20 \Omega$$

$$R_D = \frac{R_3 R_5}{R_5 + R_3 + R_1} = \frac{10 \times 40}{40 + 10 + 50} \Omega = 4 \Omega$$

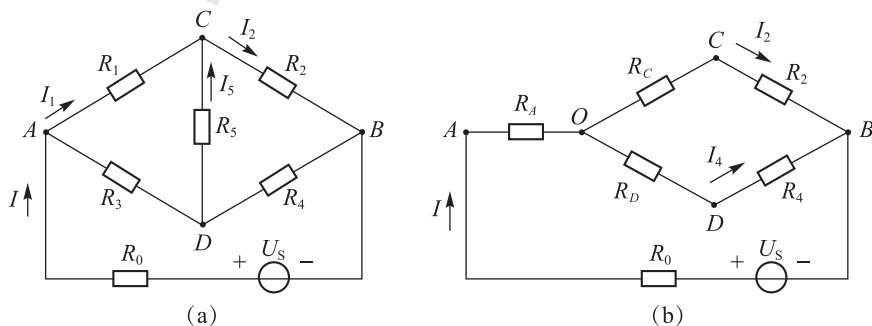


图 1.4.11 例 1-11 图

A 、 B 之间的电阻为

$$R_{AB} = R_A + \frac{(R_C + R_2) \times (R_D + R_4)}{R_C + R_2 + R_D + R_4} = \left[5 + \frac{(20 + 20) \times (4 + 36)}{20 + 20 + 4 + 36} \right] \Omega = 25 \Omega$$

$$\text{则总电流 } I = \frac{U_s}{R_{AB} + R_0} = \frac{100}{25 + 25} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

$$\text{而 } O、B \text{ 两点间的电压 } U_{OB} = U_s - (R_0 + R_A) \times I = [100 - (25 + 5) \times 2] \text{ V} = 40 \text{ V}$$

$$I_2 = \frac{U_{OB}}{R_C + R_2} = \frac{40}{20 + 20} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

$$\text{在 } B \text{ 点, 根据 KCL 有 } I_2 + I_4 = I \Rightarrow I_4 = I - I_2 = (2 - 1) \text{ A} = 1 \text{ A}$$

在 CBD 回路中, 根据 KVL 有

$$R_2 I_2 - R_4 I_4 + R_5 I_5 = 0 \Rightarrow I_5 = \frac{R_4 I_4 - R_2 I_2}{R_5} = \frac{36 \times 1 - 20 \times 1}{40} \text{ A} = 0.4 \text{ A}$$

$$\text{在 } C \text{ 点, 根据 KCL 有 } I_1 + I_5 = I_2 \Rightarrow I_1 = I_2 - I_5 = (1 - 0.4) \text{ A} = 0.6 \text{ A}$$

本例也可以先把 C 点处的星形换成三角形计算, 结果相同。

任务测试

1. 两完全相同的电阻, 串联后的总电阻是并联的总电阻的_____。
2. 某灯泡的额定电压是 24 V , 正常发光时灯丝的电阻为 16Ω , 若想该灯泡在电源电压为 36 V 的电路中正常发光, 可在电路中串联一个阻值为_____ Ω 的电阻。
3. 星形连接和三角形连接的等效互换要求, 当它们对应端钮间的电压相同时, 流入对应端钮的_____也必须分别相等。

素质拓展阅读

学会将电阻电路化繁为简

电阻是一种限流元件, 由于电阻对直流电、交流电、高频、低频等电信号所呈现的阻值特效是一样的, 所以在分析电阻电路时侧重于分析电阻阻值大小对电流大小的影响。电阻在电路中的典型作用主要有为三极管提供偏置电压、降低电路中某一点电压、将电路中的两分子电路隔离、将电流转化成电压、分压作用、分流作用、限流保护作用、退耦作用、消振作用、阻尼作用、负反馈作用及 RC 电路等。因此, 其在电路的连接方式也是非常复杂的, 如串联、并联、混联、 $Y-\Delta$ 连接等。在实际应用中, 需要对复杂的电阻电路做简化, 即电阻电路的等效变换, 方便进行电路分析。

看似杂乱的电阻电路连接方式, 转换成等效电路就容易理清电路的分析思路了, 即化繁为简, 体现了“山重水复疑无路, 柳暗花明又一村”的学习境界。这种等效方法为我们分析和解决学习、生活、工作中的难题提供了帮助, 也让我们清晰地认识到探索、求知、换位的重要性, 因为把握关键, 化繁为简才是真正的大智慧。

任务五 ··· 了解电路的工作状态

任务描述

浏览新闻、查阅资料，了解由于电路发生短路、断路故障造成的危害，思考电路在通路、短路与断路下的电路特征。

1. 电线短路引起室内液化气爆炸事故。
2. 汽车线路短路引起自燃事故。
3. 变压器短路引起电网事故。
4. 电线短路引起可燃物自燃事故。
5. 断路频繁引起设备故障。

任务目标

1. 会辨识电路通路、开路和短路工作状态。
2. 会根据电路工作状态进行电路分析。
3. 会计算电路不同工作状态下的电压和电流等参数。

任务实施

一、电路的工作状态

电路在不同的工作条件下，会处于不同的状态，并具有不同的特点。电路的工作状态有三种：开路状态、负载状态（通路状态）和短路状态。这里以灯泡电路为案例进行讲解。

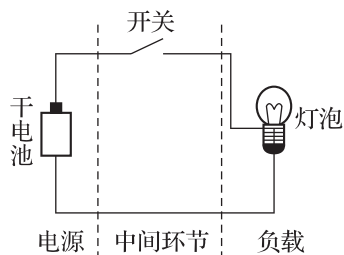


图 1.5.1 手电筒灯泡电路

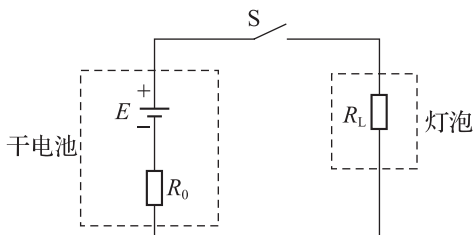


图 1.5.2 灯泡负载工作状态

灯泡是否发光显示了它所处电路的工作状态，电炉是否发热也显示了它所处电路的工作状态，还有一些电路没有明显的标志显示其工作状态，但是我们可以通过对电路有关电学量的测量分析判断电路的工作状态，我们还经常在很多用电器上看到诸如“警告”“WARNING”等标志，禁止电路处于某些工作状态。

(一) 通路状态(负载状态)——灯泡点亮

当开关 S 闭合后,干电池 U_s (内阻为 R_0) 与负载(灯泡电阻 R_L) 接成闭合回路,电路中有电流 I 流过,称为负载状态,如图 1.5.3 所示。

当开关接通时,灯泡发光,表明电路处于导通状态。

负载的大小(灯泡电阻 R_L) 是以消耗功率的大小来衡量的。当电压一定时,流过负载的电流越大,则消耗的功率越大,负载也就越大。

(二) 开路状态(空载状态)——灯泡熄灭

开关 S 断开或电路中某处断开,被切断的电路中没有电流流过,称为开路状态(断路状态、空载状态),如图 1.5.4 所示。

当开关断开或电线断裂、接头松脱时,灯泡不发光,表明电路处于断开状态。

(三) 短路状态——灯泡损坏

如图 1.5.5 所示,当 A、B 两点接通时,电源被短路,此时电源的两个极性端直接相连。电源被短路往往会造成严重后果,如导致电源因发热过甚而损坏,或因电流过大而引起电气设备的机械损伤,因而要绝对避免电源被短路。

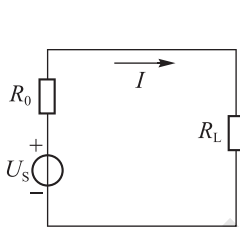


图 1.5.3 通路状态

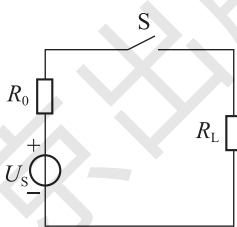


图 1.5.4 开路状态

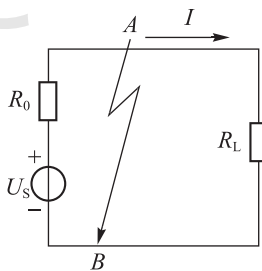
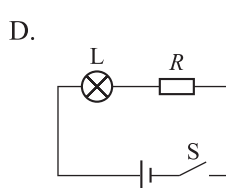
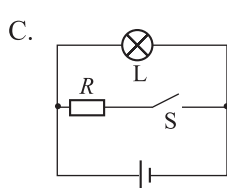
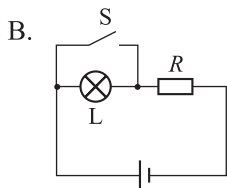
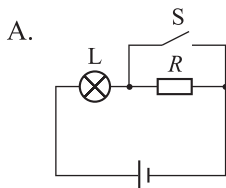


图 1.5.5 短路状态

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,以防止发生电压源短路事故。此外,还应在电路中接入熔断器等保护装置,以便在发生短路事故能及时切断电路,达到保护电源及电路元器件的目的。

例 1-12 新交通法规对驾驶人未按规定使用安全带,除了罚款还要扣分。汽车上设置了“安全带指示灯”,提醒驾驶员系好安全带。当安全带系好时,相当于闭合开关,安全带指示灯不亮;安全带未系好时,相当于断开开关,安全带指示灯发光。下列选项中符合上述要求的电路图是()。



解析：进行电路工作状态分析，未系好安全带时指示灯亮，系好安全带时指示灯不亮，也就是说，开关断开指示灯亮，开关闭合指示灯不亮，即指示灯被短路了。综合选项，符合题目设计要求的是 B，指示灯 L 与开关 S 并联，但电路不会出现短路（仅指示灯 L 被开关 S 闭合短路），因为电路中串联有保护电阻 R ，可保证电路的整体通路状态。

二、电气设备的额定值

（一）额定工作状态

任何电气设备在使用时，若电流过大，温升过高，则会导致绝缘的损坏，甚至烧坏设备或元器件。为了保证电气设备正常工作，制造厂对产品的电压、电流和功率都规定其使用限额，称为额定值。通常标在产品的铭牌或说明书上，以此作为使用依据，使用时必须遵守。例如，一盏日光灯，标有“220 V 60 W”的字样，表示该灯在 220 V 电压下使用，消耗功率为 60 W。若将该灯接在 380 V 的电源上，则会因电流过大将灯丝烧毁；反之，若电源电压低于额定值，虽能发光，但灯光暗淡。

电气设备的额定值通常有如下几项。

（1）额定电流 (I_N)：电气设备在工作时对温度都有一定的限度。使电气设备连续工作时的稳定温度达到最高允许温度时的电流，称为额定电流。

（2）额定电压 (U_N)：电气设备的绝缘材料并不是绝对不导电的，如果作用在绝缘材料上的电压过高，绝缘材料就会被击穿。所谓击穿，就是指绝缘材料失去了绝缘性能而变成了导体。为了限制电气设备中的电流和保证绝缘材料的绝缘性能，对电气设备规定了工作电压，即额定电压。

（3）额定功率 (P_N)：在直流电路中，额定电压与额定电流的乘积就是额定功率，即 $P_N = U_N I_N$ 。

（4）额定容量 $S_N = U_N I_N$ ，表征了电源最大允许的输出功率，但电源设备工作时不一定总是输出规定的最大允许电流和功率，究竟输出多大还取决于所连接的负载。

（二）超载、满载、轻载

电气设备工作在额定值情况下的状态称为额定工作状态（又称“满载”）。这时电气设备的使用是最经济合理和安全可靠的，不仅能充分发挥设备的作用，而且能够保证电气设备的设计寿命。若电气设备超过额定值工作，则称为“过载”。由于温度升高需要一定时间，因此电气设备短时间过载不会立即损坏。但过载时间较长，就会大大缩短电气设备的使用寿命，甚至会使电气设备损坏。若电气设备低于额定值工作，则称为“轻载”。在严重的轻载下，电气设备就不能正常、合理地工作或者不能充分发挥其工作能力。过载和严重轻载都是在实际工作中应避免的。

任务测试

判断:

1. 电路开路时, 负载电流为 0。()
2. 电路通路时, 负载电压为 0。()
3. 电路短路时, 电源被短路。()

素质拓展阅读

电气火灾事故的警示

案例 1 2022 年 3 月 23 日, 印度特伦甘纳邦首府海得拉巴一仓库发生火灾, 导致 11 名工人死亡。

案例 2 2022 年 3 月 18 日, 巴基斯坦卡拉奇联邦乌尔都语大学附近的贫民区发生火灾, 同一家庭的 5 名 4 岁至 12 岁的孩子死亡。

案例 3 2021 年 2 月 05 日, 深圳市一自建楼发生一起火灾事故, 造成 1 人死亡、3 人受伤。

案例 4 2017 年 11 月 18 日, 北京市大兴区西红门镇新建二村新康东路 8 号的一处集储存、生产、居住功能为一体的“三合一”场所发生火灾, 共造成 19 人死亡, 8 人受伤及重大经济损失。

.....

在我们的身边, 因电线短路、电气线路故障(如漏电)、过负荷、接触电阻过大等引发的电气线路火灾事故时有发生, 这些事故警示我们要安全用电, 做到四个预防, 即线路铺设要合理、线路设备勤检查、电器使用要谨慎、防湿防潮要做好。

任务六 ··· 熟悉直流电路的分析方法

任务描述

通过前述任务的学习, 对直流电路的电阻、电容、电感、电源元件组成的电路模型、电路特点、元件连接方式、电路工作状态等都有了整体的认识和把握, 直流电路的应用非常广泛, 面对众多复杂的电路如何进行分析, 就需要对直流电路的分析方法进行系统性学习。

电路有简单电路和复杂电路之分。简单电路可用欧姆定律和元件串并联特点进行电路分析, 而复杂电路则要应用基尔霍夫定律、电压源电流源等效变换、节点等方法进行

分析。

下面先介绍几个相关的电路名词。

1. 支路。

电路中通过同一个电流的每一个分支。图 1.6.1 中有三条支路，分别是 BAF 、 BCD 和 BE 。支路 BAF 、 BCD 中含有电源，称为含源支路。支路 BE 中不含电源，称为无源支路。

2. 节点。

电路中三条或三条以上支路的连接点。图 1.6.1 中有两个节点，为 B 和 E 。

3. 回路。

电路中的任一闭合路径。图 1.6.1 中有三个回路，分别是 $ABEFA$ 、 $BCDEB$ 、 $ABCDEF$ 。

4. 网孔。

内部不含支路的回路。图 1.6.1 中 $ABEFA$ 和 $BCDEB$ 都是网孔，而 $ABCDEF$ 则不是网孔。

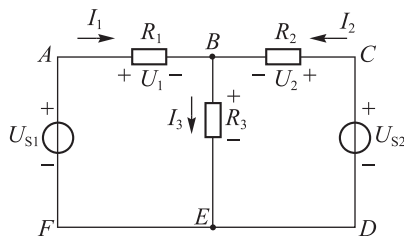


图 1.6.1 复杂电路

任务目标

1. 会电路的基尔霍夫定律 (KVL 和 KCL) 分析与计算。
2. 会利用支路电流法对电路进行分析与计算。
3. 会利用电源变换法对电路进行分析与计算。
4. 会利用戴维南定理对电路进行分析与计算。

任务实施

一、基尔霍夫定律

基尔霍夫定律既适用于简单电路，又适用于复杂电路，是电路分析、计算最常用的一个定律，是求解复杂电路的基本方法。基尔霍夫定律反映的是任何电路（直流或交流）、任何元件（线性或非线性）之间的电压和电流关系，是反映电路中电压和电流的普遍规律，是计算任意电路（简单或复杂）的基本依据。基尔霍夫定律分为电流定律和电压定律。基尔霍夫电流定律应用于节点，基尔霍夫电压定律应用于回路。



基尔霍夫定律实验

(一) 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律简称 KCL，是用来确定电路中连接在同一个节点上的各条支路电流间的关系的。基本内容是：任何时刻，对于电路中的任一节点，流进流出节点所有支路电流的代数和恒等于零。其数学表达式为

$$\sum I = 0 \quad (1-6-1)$$

式(1-6-1)中,流出节点的电流前面取“+”号,流入节点的电流前面取“-”号。例如,对图 1.6.1 中的节点 B,应用 KCL,在这些支路电流的参考方向下,有

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

上式可以改写成

$$I_1 + I_2 = I_3$$

即

$$\sum I_{\lambda} = \sum I_{\text{出}} \quad (1-6-2)$$

式(1-6-2)表明:任何时刻,流入任一节点的支路电流之和必定等于流出该节点的支路电流之和。

KCL 中电流的流向本来是指它们的实际方向,但由于采用了参考方向,所以式(1-6-2)中是按电流的参考方向来判断电流是流出节点还是流入节点的。其次,式中的正、负号仅由电流是流出节点还是流入节点来决定,与电流本身的正、负无关。

KCL 通常用于节点,但对包围几个节点的闭合面(也称广义节点)也是适用的。如图 1.6.2 所示的电路中,闭合面内有三个节点 A、B、C。用 KCL 可列出

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

即

$$\sum I = 0 \quad (1-6-3)$$

可见,在任一瞬间,通过任一闭合面的电流的代数和也总是等于零,或者说,流出闭合面的电流等于流入该闭合面的电流,这叫作电流连续性。所以,基尔霍夫电流定律是电流连续性的体现。

例 1-13 图 1.6.3 所示电路中,电流的参考方向已标明。若已知 $I_1 = 2 \text{ A}$, $I_2 = -4 \text{ A}$, $I_3 = -8 \text{ A}$, 试求 I_4 。

解:根据 KCL 可得

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

$$I_4 = I_1 - I_2 + I_3 = [2 - (-4) + (-8)] \text{ A} = -2 \text{ A}$$

(二) 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电流定律是对电路中任意节点而言的,而基尔霍夫电压定律是对电路中任意回路而言的。

基尔霍夫电压定律简称 KVL,是用来确定回路中各部分电压之间的关系的。基本内

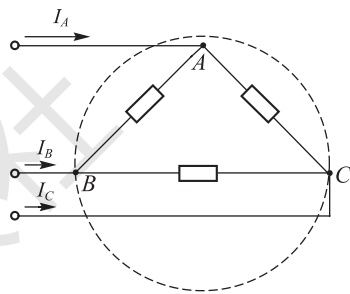


图 1.6.2 KCL 的推广

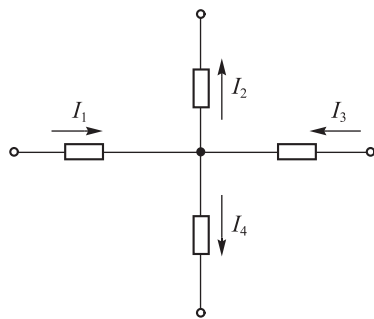


图 1.6.3 例 1-13 图

容是：任何时刻，沿任一回路内所有支路或元件电压的代数和恒等于零，即

$$\sum U = 0 \quad (1-6-4)$$

在写式(1-6-4)时，首先需要指定一个绕行回路的方向。凡电压的参考方向与回路绕行方向一致者，在式中该电压前面取“+”号；电压参考方向与回路绕行方向相反者，则前面取“-”号。

同理，KVL 中电压的方向本应指它的实际方向，但由于采用了参考方向，所以式(1-6-4)中的代数和是按电压的参考方向来判断的。

如图 1.6.4 所示电路，沿回路 1 和回路 2 绕一周，有

回路 1：

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 - U_{S1} = 0 \text{ 或 } I_1 R_1 + I_3 R_3 = U_{S1}$$

回路 2：

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 - U_{S2} = 0 \text{ 或 } I_2 R_2 + I_3 R_3 = U_{S2}$$

即 KVL 也可以写为

$$\sum R_K I_K = \sum U_{SK} \quad (1-6-5)$$

式(1-6-5)指出：沿任一回路绕行一圈，电阻上电压的代数和等于电压源电压的代数和。其中，在关联参考方向下，电流参考方向与回路绕行方向一致者， $R_K I_K$ 前取“+”号，相反者， $R_K I_K$ 前取“-”号；电压源电压 U_{SK} 的参考极性与回路绕行方向一致者， U_{SK} 前取“-”号，相反者， U_{SK} 前取“+”号。

KVL 通常用于闭合回路，但也可推广应用到任一不闭合的电路上。图 1.6.5 所示电路虽然不是闭合回路，但当假设开口处的电压为 U_{AB} 时，可以将电路想象成一个虚拟的回路，用 KVL 列写方程为

$$U_{AB} + U_{S3} + I_3 R_3 - I_2 R_2 - U_{S2} - I_1 R_1 - U_{S1} = 0$$

KCL 规定了电路中任一节点处电流必须服从的约束关系，而 KVL 则规定了电路中任一回路内电压必须服从的约束关系。这两个定律仅与元件的连接有关，而与元件本身无关。不论元件是线性的还是非线性的，时变的还是非时变的，KCL 和 KVL 总是成立的。

例 1-14 图 1.6.6 所示电路中，已知 $U_1 = 5 \text{ V}$ ， $U_3 = 3 \text{ V}$ ， $I = 2 \text{ A}$ ，求 U_2 、 I_2 、 R_1 、 R_2 和 U_S 。

解：(1) 已知 2Ω 电阻两端电压 $U_3 = 3 \text{ V}$

$$\text{故} \quad I_2 = \frac{U_3}{2} = \frac{3}{2} \text{ A} = 1.5 \text{ A}$$

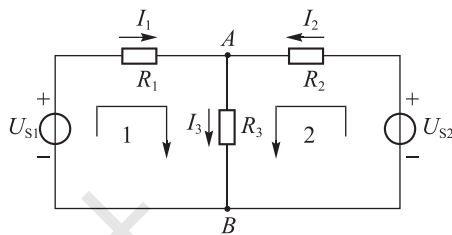


图 1.6.4 基尔霍夫电压定律示意图

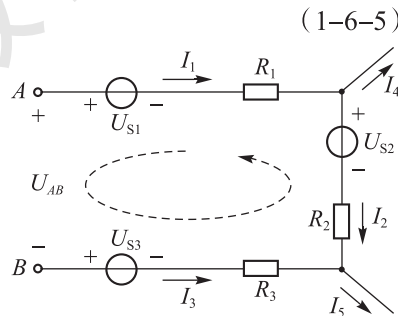


图 1.6.5 基尔霍夫电压定律的推广

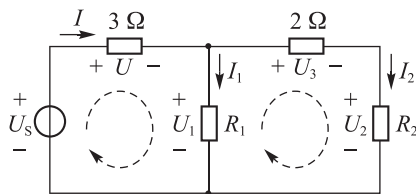


图 1.6.6 例 1-14 图

(2) 在由 R_2 、 R_1 和 $2\ \Omega$ 电阻组成的闭合回路中, 根据 KVL 得

$$U_3 + U_2 - U_1 = 0$$

即

$$U_2 = U_1 - U_3 = (5 - 3)\text{ V} = 2\text{ V}$$

(3) 由欧姆定律得 $R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{2}{1.5}\ \Omega \approx 1.33\ \Omega$

(4) 由 KCL 得 $I_1 = I - I_2 = (2 - 1.5)\text{ A} = 0.5\text{ A}$

故

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{5}{0.5}\ \Omega = 10\ \Omega$$

(5) 在由 U_S 、 $3\ \Omega$ 电阻和 R_1 组成的闭合回路中, 根据 KVL 得

$$U_S = U + U_1 = (2 \times 3 + 5)\text{ V} = 11\text{ V}$$

例 1-15 图 1.6.7 所示电路中, 已知 $U_{S1} = 12\text{ V}$, $U_{S2} = 3\text{ V}$, $R_1 = 3\ \Omega$, $R_2 = 9\ \Omega$, $R_3 = 10\ \Omega$, 求 U_{AB} 。

解: (1) 由 KCL 得

$$I_3 = 0 \quad I_1 = I_2 + I_3 = I_2 + 0 = I_2$$

由 KVL 在回路 I 中有 $I_1 R_1 + I_2 R_2 = U_{S1}$

解得

$$I_1 = I_2 = \frac{U_{S1}}{R_1 + R_2} = \frac{12}{3 + 9}\text{ A} = 1\text{ A}$$

(2) 在回路 II 中, 根据 KVL 得

$$U_{AB} - I_2 R_2 + I_3 R_3 - U_{S2} = 0$$

解得

$$U_{AB} = I_2 R_2 - I_3 R_3 + U_{S2} = (1 \times 9 - 0 \times 10 + 3)\text{ V} = 12\text{ V}$$

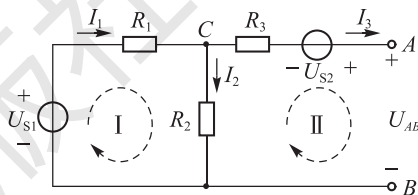


图 1.6.7 例 1-15 图

二、基尔霍夫定律的应用——支路电流法

前面分析的电路都是简单电路, 它可以应用于串、并联的等效变换化简电路, 但实际电路常为复杂电路, 而在计算复杂电路的各种方法中, 支路电流法是最基本的分析方法。支路电流法是以支路电流为未知量, 应用基尔霍夫定律列出与支路电流数目相等的独立方程式, 再联立求解。支路电流法求解电路的步骤为 (假定某电路有 m 条支路, n 个节点):

- (1) 标出支路电流参考方向和回路绕行方向;
- (2) 根据 KCL 列写 $(n - 1)$ 个节点电流方程式;
- (3) 根据 KVL 列写 $[m - (n - 1)]$ 个独立回路电压方程式;
- (4) 解联立方程组, 求取未知量。

例 1-16 图 1.6.8 所示电路为两台发电机并联运行共同向负载 R_L 供电。已知 $E_1=130\text{ V}$, $E_2=117\text{ V}$, $R_1=1\ \Omega$, $R_2=0.6\ \Omega$, $R_L=24\ \Omega$, 求各支路的电流及发电机两端的电压。

解: (1) 选各支路电流参考方向如图所示, 回路绕行方向均为顺时针方向。

(2) 列写 KCL 方程

节点 A $I_1 + I_2 = I$

(3) 列写 KVL 方程

ABCD 回路 $E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2$

AEFBA 回路 $E_2 = R_2 I_2 + R_L I$

其基尔霍夫定律方程组为

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I \\ E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2 \\ E_2 = R_2 I_2 + R_L I \end{cases}$$

将数据代入各式后得

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I \\ 130 - 117 = I_1 - 0.6 I_2 \\ 117 = 0.6 I_2 + 24 I \end{cases}$$

解此方程组得

$$I_1 = 10\text{ A} \quad I_2 = -5\text{ A} \quad I = 5\text{ A}$$

发电机两端电压

$$U = R_L I = 24 \times 5\text{ V} = 120\text{ V}$$

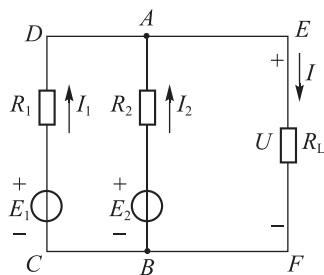


图 1.6.8 例 1-16 图

从该例的计算数据可知, I_2 为负值, 表示电流的实际方向与参考方向相反。由此可得第一台发电机的产生功率及第二台发电机的消耗 (或吸收) 功率。

三、电压源与电流源的等效变换

电路计算中, 有时要求用电流源、电阻的并联组合来等效替代电压源、电阻的串联组合, 或者用电压源、电阻的串联组合来等效替代电流源、电阻的并联组合。

对于外电路而言, 如果电源的外特性相同, 即负载上的 U 和 I 相同, 那么一个实际的电源, 既可以用理想电压源与内阻串联来表示, 又可以用理想电流源与内阻并联来表示。故对外电路而言, 两种电源模型是可以等效变换的。试做对比如表 1.6.1 所示。

表 1.6.1 电压源模型和电流源模型的参数对比

电压源模型	电流源模型
$U = E - IR_0$	$U = (I_S - I)R_i = I_S R_i - IR_i$
$I = \frac{E - U}{R_0} = \frac{E}{R_0} - \frac{U}{R_0}$	$I = I_S - \frac{U}{R_i}$

由以上比较可知,当满足下列关系时,两种电源模型可以互换

$$R_i = R_0 \quad E = I_S R_i \quad I_S = \frac{E}{R_i}$$

电压源与电流源的等效变换电路如图 1.6.9 所示。

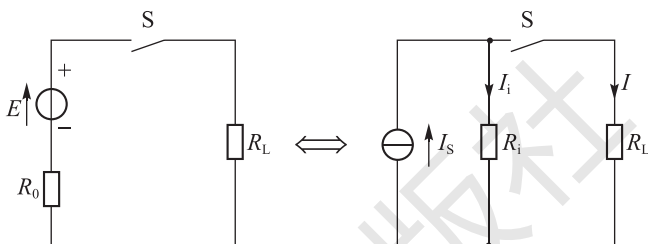


图 1.6.9 电压源与电流源的等效变换

关于两者的等效变换,有如下结论。

- (1) 电压源与电流源的等效变换只对外电路等效,对内电路不等效。
- (2) 把电压源变换为电流源时,电流源中的 I_S 等于电压源输出端短路电流, I_S 方向与电压源对外电路输出电流方向相同,电流源中的并联电阻 R_i 与电压源中的内阻 R_0 相等。
- (3) 把电流源变换为电压源时,电压源中的电动势 E 等于电流源输出端断路时的端电压, E 的方向与电流源对外输出电流的方向相同,电压源中的内阻 R_0 与电流源中的并联电阻 R_i 相等。
- (4) 理想电压源与理想电流源之间不能进行等效变换。

例 1-17 图 1.6.10 所示电路中,已知 $U_{S1}=10\text{ V}$, $U_{S2}=6\text{ V}$, $R_1=1\ \Omega$, $R_2=3\ \Omega$, $R=6\ \Omega$ 。求 R 支路的电流。

解:先把每个电压源、电阻串联支路变换为电流源、电阻并联支路。变换后的电路如图 1.6.11 (a) 所示,其中

$$I_{S1} = \frac{U_{S1}}{R_1} = \frac{10}{1}\text{ A} = 10\text{ A}$$

$$I_{S2} = \frac{U_{S2}}{R_2} = \frac{6}{3}\text{ A} = 2\text{ A}$$

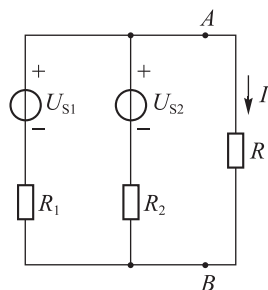


图 1.6.10 例 1-17 图

图 1.6.11 (a) 中两个并联电流源可以用一个电流源代替

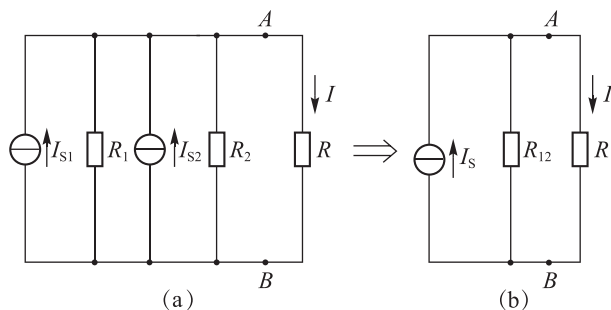


图 1.6.11 例 1-17 解图

$$I_S = I_{S1} + I_{S2} = (10 + 2) \text{ A} = 12 \text{ A}$$

并联 R_1 、 R_2 的等效电阻为

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1 \times 3}{1 + 3} \Omega = \frac{3}{4} \Omega$$

电路简化如图 1.6.11 (b) 所示, 根据分流关系求得 R 支路的电流 I 为

$$I = \frac{R_{12}}{R_{12} + R} \times I_S = \frac{\frac{3}{4}}{\frac{3}{4} + 6} \times 12 \text{ A} = \frac{4}{3} \text{ A} \approx 1.333 \text{ A}$$

注意: 用电源变换法分析电路时, 待求支路保持不变。

四、戴维南定理

在复杂电路中, 有时只需计算出某一支路的电流, 此时再采用支路电流法将所有支路中的未知电流都求出, 既麻烦也没有必要。简便的做法是: 把电路划分为两部分, 一部分为待求支路, 另一部分看成是一个有源两端网络 (具有两个端的网络称为两端网络)。有源两端网络部分用戴维南定理化简为一个等效电压源, 则电路就变成一个等效电压源和待求支路相串联的简单电路, 如图 1.6.12 所示。负载 R 中的电流就可以由下式求出

$$I = \frac{E}{R + R_0}$$

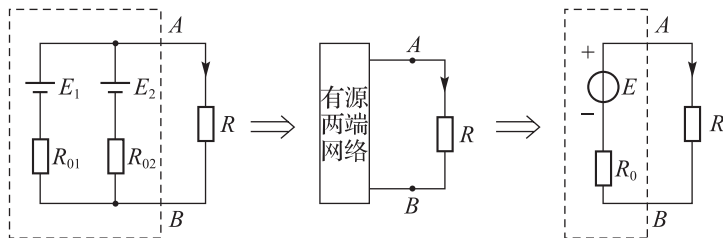


图 1.6.12 有源电路等效变换



戴维南定理

戴维南定理可用图 1.6.12 所示框图表示。

戴维南定理指出：任何一个有源两端线性网络都可以用一个等效的电压源来代替，这个等效电压源的电动势 E 就是有源两端网络开路电压 U_{AB} ，它的内阻 R_0 等于从有源两端网络看进去的电阻 R_{AB} （网络中电压源短路，电流源断路）。

图 1.6.12 中，电压源串电阻支路称为戴维南等效电路，所串电阻则称为戴维南等效内阻，也称输出电阻。

应该注意的是：用一个等效电源代替有源二端网络，只是等效它们对外电路的作用，对内电路的电流、电压、功率并不等值。

用戴维南定理求解复杂电路中某一条支路电流的一般步骤如下。

- (1) 断开待求电流的支路，得到一个有源二端网络，并画出电路图。
- (2) 求有源二端网络的开路电压 U_{AB} ，即得到等效电源的电动势 $E = U_{AB}$ 。
- (3) 将有源二端网络中的所有电压源短路，电流源开路，画出所得无源二端网络的电路图，并计算其等效电阻 R_{AB} ，即得到等效电源的内阻 $R_0 = R_{AB}$ 。
- (4) 画出由等效电源和待求支路组成的简单电路，用全电路欧姆定律计算待求电流。等效电阻的计算方法有以下三种。

(1) 设网络内所有电源为零，用电阻串并联或三角形与星形网络变换加以化简，计算端口 A 、 B 的等效电阻。

(2) 设网络内所有电源为零，在端口 A 、 B 处施加一电压 U ，计算或测量输入端口的电流 I ，则等效电阻 $R_{AB} = \frac{U}{I}$ 。

(3) 用实验方法测量，或用计算方法求得该有源二端网络开路电压 U_{AB} 和短路电流 I ，则等效电阻 $R_{AB} = \frac{U_{AB}}{I}$ 。

例 1-18 如图 1.6.12 所示，已知 $E_1=8\text{ V}$ ， $E_2=2.6\text{ V}$ ， $R_{01}=0.6\ \Omega$ ， $R_{02}=0.3\ \Omega$ ， $R=9.8\ \Omega$ ，用戴维南定理求通过 R 的电流 I 。

解：由图 1.6.12，计算等效电压源的电动势 E

$$I' = \frac{E_1 - E_2}{R_{01} + R_{02}} = \frac{8 - 2.6}{0.6 + 0.3} \text{ A} = 6 \text{ A}$$

$$E = E_1 - R_{01} I' = (8 - 0.6 \times 6) \text{ V} = 4.4 \text{ V}$$

A 、 B 两点之间的等效电阻为

$$R_0 = \frac{R_{01} \times R_{02}}{R_{01} + R_{02}} = \frac{0.6 \times 0.3}{0.6 + 0.3} \ \Omega = 0.2 \ \Omega$$

最后,求得通过电阻 R 的电流为

$$I = \frac{E}{R + R_0} = \frac{4.4}{9.8 + 0.2} \text{ A} = 0.44 \text{ A}$$

任务测试

1. 基尔霍夫电流定律 (KCL) 说明在集总参数电路中, 在任一时刻, 流出 (或流入) 任一节点或封闭面的各支路_____为零。

2. 基尔霍夫电压定律 (KVL) 说明在集总参数电路中, 在任一时刻, 沿任一回路绕行一周, 各元件的_____为零。

判断:

3. 从物理意义来说, KCL 应对电流的实际方向说才是正确的, 但对电流的参考方向来说也必然是对的。()

4. 任何一个含源二端网络, 都可以用一个电压源模型来等效替代。()

5. 用戴维南定理对线性二端网络进行等效替代时, 仅对外电路等效, 而对网路内电路是不等效的。()

素质拓展阅读

戴维南定理的启示

戴维南定理 (又译为戴维宁定理) 又称等效电压源定律, 是由法国科学家 L.C. 戴维南于 1883 年提出的一个电学定理。由于早在 1853 年, 亥姆霍兹也提出过本定理, 所以又称为亥姆霍兹—戴维南定理。

通过戴维南定理的学习, 我们发现, 它是化简复杂电路的一个很有用的工具, 在用于分析复杂电路的任一支路电流时, 特别方便。

戴维南定理给我们的启示是——透过现象看本质。戴维南定理可以把任何一个线性有源二端网络等效为理想电流源与电阻串联的模型。这也启迪我们, 在面对难题时, 要开阔思路, 充分利用所学知识, 层层剥茧, 既要化繁为简、又要透过现象看到本质。

拓展案例 集成稳压电路创新设计

设计并制作固定式三端集成稳压电路, 利用 LM317 芯片实现 9 V 直流输入, 5 V 直流输出, 基本设计电路如图 1.0 所示。



实验项目 验证直流电路中电位与电压的关系

1. 验证电路中电位与电压的关系。
2. 掌握电路电位图的绘制方法。

在一个闭合电路中,各点电位的高低视所选的电位参考点的不同而改变,但任意两点间的电位差(即电压)则是绝对的,它不因参考点的变动而改变。据此性质,我们可用一只电压表来测量出电路中各点的电位及任意两点间的电压。

在作电位图或实验测量时必须正确区分电位和电压的高低，按照惯例，是以电流方向上的电压降为正，所以，在用电压表测时，若仪表指针正向偏转，则说明电表正极的电位高于负极的电位。

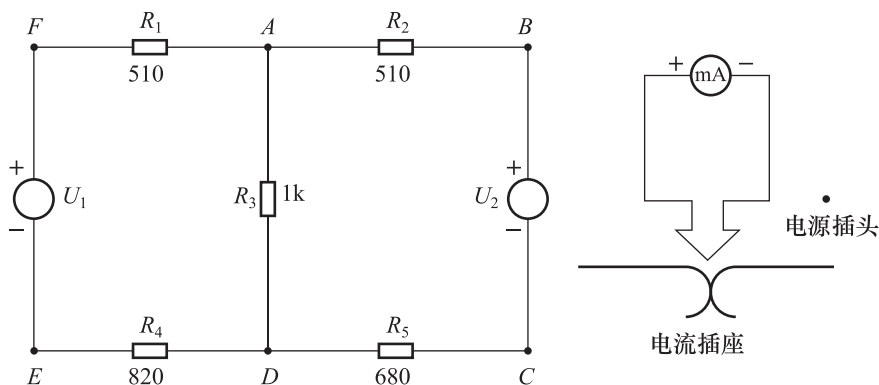


图 1.1 直流电路实验参考图

三、实验设备

表 1.1 实验设备清单

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 或 0 ~ 12 V	1	
2	直流稳压电源	6V、12 V	各 1	
3	万用表	MF500B 或其他	1	
4	直流数字毫安表		1	
5	直流数字电压表		1	

四、实验内容

1. 分别将两路直流稳压电源接入电路，令 $U_1=6\text{ V}$ ， $U_2=12\text{ V}$ 。（先调整输出电压值，再接入实验线路中。电压应该用万用表测）
2. 以图 1.1 中的 A 点作为电位的参考点，分别测量 B 、 C 、 D 、 E 、 F 各点的电位值 φ 及相邻两点之间的电压值 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CD} 、 U_{DE} 、 U_{EF} 及 U_{FA} ，数据列于表 1.2 中。
3. 以 D 点作为参考点，重复实验内容 2 的测量，测得数据填入表 1.2 中。

表 1.2 实验数据表

电位参考点	φ 与 U	φ_A	φ_B	φ_C	φ_D	φ_E	φ_F	U_{AB}	U_{BC}	U_{CD}	U_{DE}	U_{EF}	U_{FA}
A	计算值												
	测量值												
	相对误差												
D	计算值												
	测量值												
	相对误差												

五、实验注意事项

1. 本实验电路单元可设计多个实验,在做实验时根据给出的电路图选择开关位置,连成实验电路。

2. 测量电位时,用万用表的直流电压档或用数字直流电压表测量时,用负表棒(黑色)接参考电位点,用正表棒(红色)接被测点,若指针正向偏转或显示正值,则表明该点电位为正(即高于参考点电位);若指针反向偏转或显示负值,应调换万用表的表棒,然后读出数值,此时在电位值之前应加一负号(表明该点电位低于参考点电位)。

六、思考题

若以 F 点为参考电位点,实验测得各点的电位值,现今 E 点作为参考电位点,试问此时各点的电位值应有何变化?

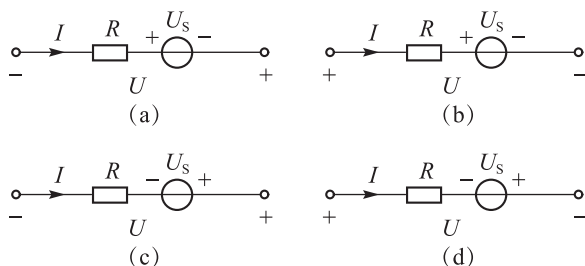
模块小结

本模块基于直流电路模型建立与分析,主要学习了直流电路的模型、组成与电路原理,理想与实际直流电压源的结构与性能特点,常见直流电路中线性电阻、电容和电感等负载的基本知识,电阻串联、并联、混联等电阻电路连接方法与分析方法,电路通路、断路和短路的三种常见工作状态特点,以及基于基尔霍夫定律、戴维南定理,采用支路电流法和直流电源等效变换法进行直流电路分析的方法。本模块学习的重难点是:

1. 基于不同参考方向下的负载元件分析与参数计算;
2. 电路基本参数测量的工具选择与测量方法;
3. 不同电阻电路连接方式的直流电路模型分析;
4. KCL、KVL 以及戴维南定理在直流电路分析中的应用。

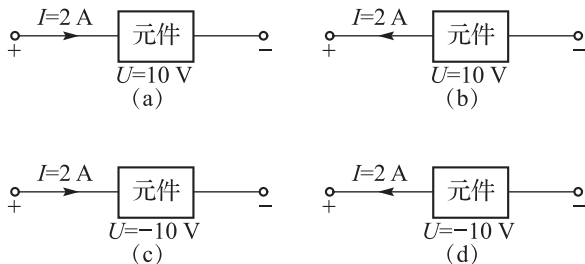
职业技能知识点考核

1.1 已知各支路的电流、电阻和电压源电压,如题 1.1 图所示,试写出各支路电压 U 的表达式。



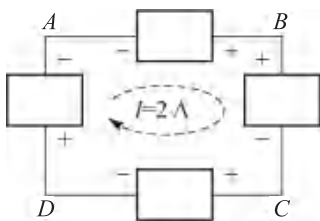
题 1.1 图

1.2 分别求题 1.2 图中各电路元件的功率, 并指出它们是吸收功率还是发出功率。

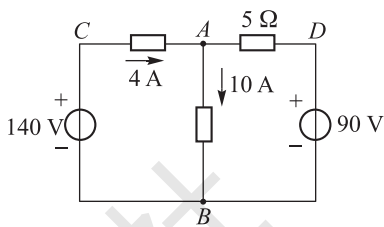


题 1.2 图

1.3 在题 1.3 图中, 已知 AB 段电路产生的功率为 500 W , BC 、 CD 、 DA 三段电路消耗的功率分别为 50 W 、 400 W 和 50 W 。试根据图中所示电流方向和大小, 标出各段电压的真实极性, 并计算电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{DC} 、 U_{DA} 。



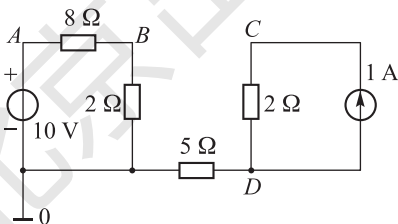
题 1.3 图



题 1.4 图

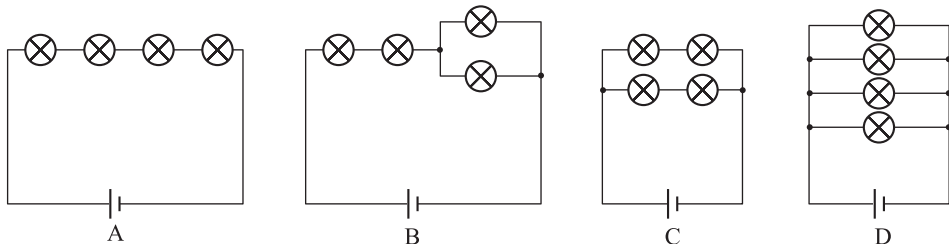
1.4 题 1.4 图所示电路, 若以 B 点为参考点, 求 A 、 C 、 D 三点的电位及 U_{AC} 、 U_{AD} 、 U_{CD} 。若改以 C 点为参考点, 再求 A 、 C 、 D 三点的电位及 U_{AC} 、 U_{AD} 、 U_{CD} 。

1.5 电路如题 1.5 图所示, 计算各点电位。



题 1.5 图

1.6 在题 1.6 图所示电路中, 电源电压是 12 V , 四只功率相同的白炽灯工作电压都是 6 V , 要使白炽灯正常工作, 接法正确的是 ()。

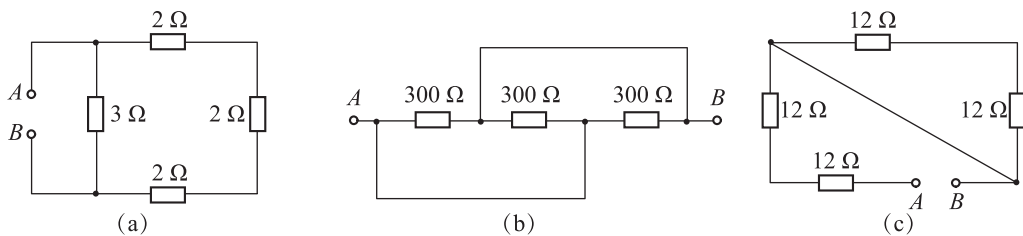


题 1.6 图

1.7 现有 220 V 、 40 W 和 220 V 、 100 W 的灯泡各一只, 将它们并联在 220 V 的电

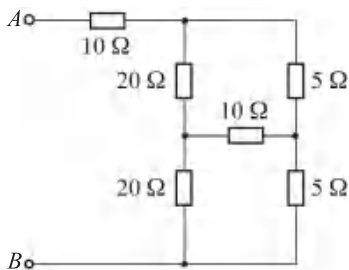
源上, 哪个更亮? 为什么? 若串联后再接到 220 V 的电源上, 哪个更亮? 为什么?

1.8 据题 1.8 图求 R_{ab} 。

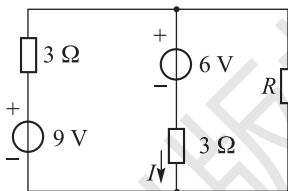


题 1.8 图

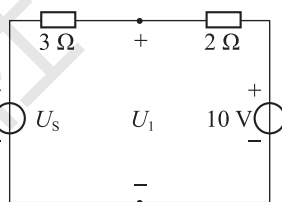
1.9 据题 1.9 图求电路中 a 、 b 两点间的等效电阻 R_{ab} 。



题 1.9 图



题 1.10 图

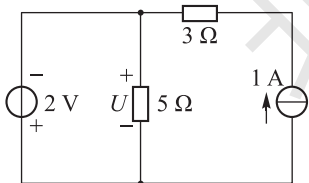


题 1.11 图

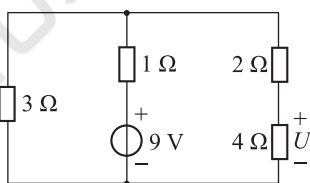
1.10 如题 1.10 图所示, 已知 $I=0$, 求电阻 R 。

1.11 如题 1.11 图所示, 已知 $U_1=14\text{ V}$, 求 U_s 。

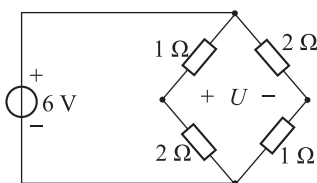
1.12 如题 1.12 图所示, 求 (a) (b) (c) 图中的电压 U 。



(a)



(b)

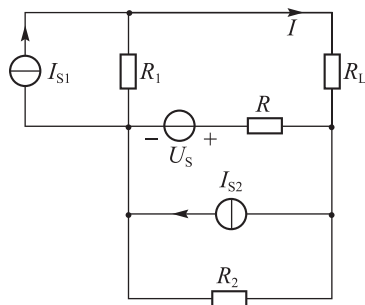


(c)

题 1.12 图

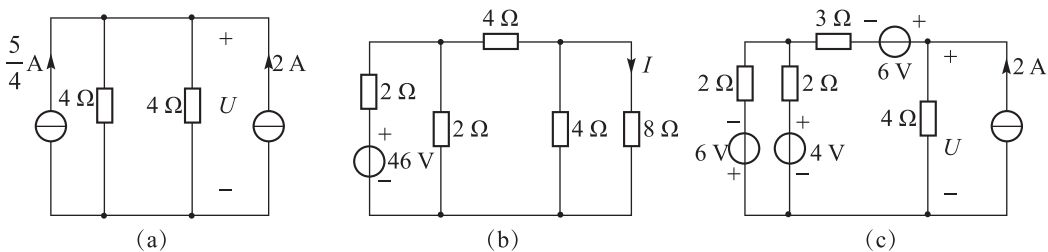
1.13 两个电阻串联接到 120 V 的电源上, 电流为 3 A; 这两个电阻并联接到同样的电源上时, 电流为 16 A, 试求这两个电阻的阻值。

1.14 如题 1.14 图所示电路中, 已知: $U_s=12\text{ V}$, $I_{s1}=0.75\text{ A}$, $I_{s2}=5\text{ A}$, $R_1=8\ \Omega$, $R_2=6\ \Omega$, $R=6\ \Omega$, $R_L=9\ \Omega$ 。用电源等效变换法求电流 I 。



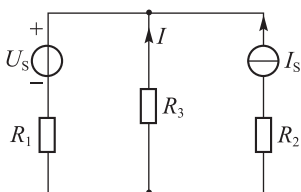
题 1.14 图

1.15 用电源等效变换的方法求题 1.15 图中标出的电压 U 和电流 I 。

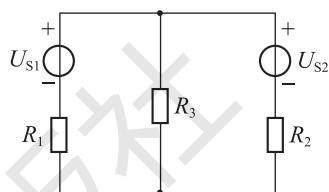


题 1.15 图

1.16 如题 1.16 图所示，已知 $U_s=10\text{ V}$ ， $I_s=6\text{ A}$ ， $R_1=5\ \Omega$ ， $R_2=3\ \Omega$ ， $R_3=5\ \Omega$ ，用支路电流法求 R_3 中电流 I 。



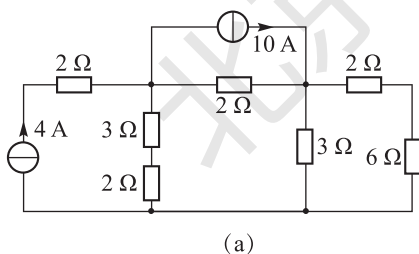
题 1.16 图



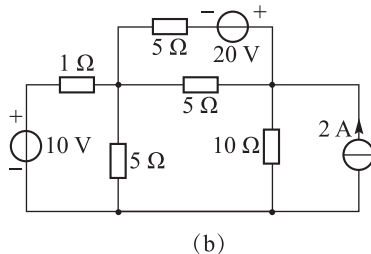
题 1.17 图

1.17 如题 1.17 图所示电路中，已知 $U_{s1}=9\text{ V}$ ， $U_{s2}=4\text{ V}$ ，电源内阻不计。电阻 $R_1=1\ \Omega$ ， $R_2=2\ \Omega$ ， $R_3=3\ \Omega$ 。用支路电流法求各支路电流。

1.18 列出题 1.18 图 (a) (b) 中的节点电流方程。



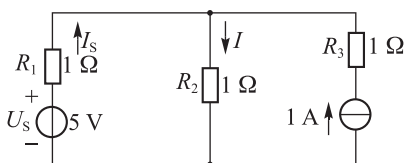
(a)



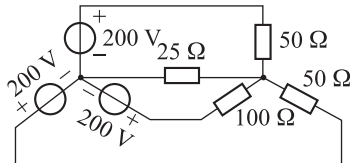
(b)

题 1.18 图

1.19 如题 1.19 图所示电路，用节点法求出 I ，并求电源电流 I_s 。



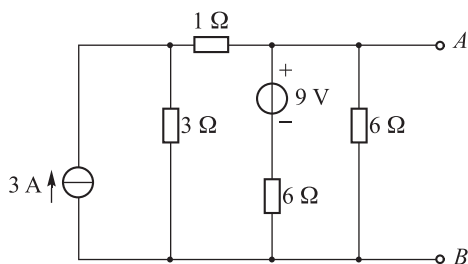
题 1.19 图



题 1.20 图

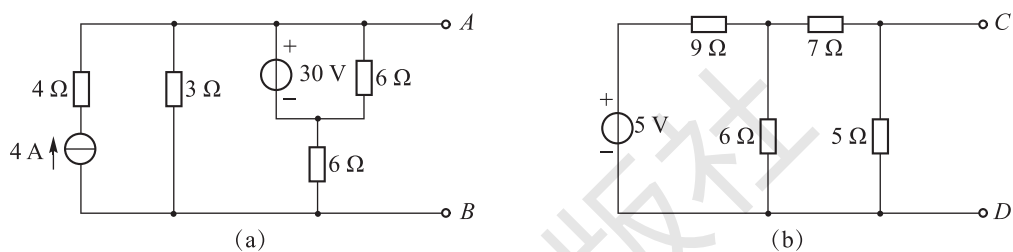
1.20 用节点电流法求题 1.20 图所示电路中的各支路电流。

1.21 用叠加定理求题 1.21 图所示电路中的电压 U_{AB} 。



题 1.21 图

1.22 在题 1.22 图所示电路中, 求其戴维南等效电路。



题 1.22 图