

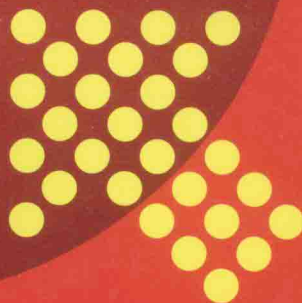
21世纪高等学校规划教材



DIANGONG DIANZI JISHU

电工电子技术

薛太林 主 编
王早兰 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

014062188

TM-43
217

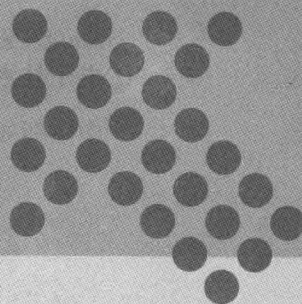
21世纪高等学校规划教材



DIANGONG DIANZI JISHU

电工电子技术

主 编 薛太林
副主编 王早兰
编 写 夏 琰 谢茂林 张玉华
主 审 渠云田



TM-43
217



北航

C1749190



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

881S30210

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分八章，主要包括直流电路、正弦交流电路、变压器电动机及其控制电路、电气安全技术、半导体器件及放大电路、集成运算放大器及负反馈、直流稳压电源、逻辑代数及实用逻辑电路，每章均配有相关实训项目。

本书主要作为普通高等院校工科非电类电工电子技术及相关课程的教材，也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子技术/薛太林主编. —北京: 中国电力出版社, 2014. 9

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5123-6136-2

I. ①电… II. ①薛… III. ①电工技术-高等学校-教材
②电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 144108 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 9 月第一版 2014 年 9 月北京第四次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 16 印张 386 千字

定价 32.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开图层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

“电工电子技术”是高等学校工科非电类专业的一门重要的专业基础课，既有一定的理论性，又有很强的实用性。本书基于“学训一体”人才培养理念，采用理论铺垫、实操项目训练相结合的方式，注重实用性、可操作性，突出学生实操能力的培养。

理论铺垫部分以“实用、够用”为度，知识点简练，减少了不必要的论证及数学推导，突出实用，强化学生的实践意识，便于学习掌握。例如，在电子技术部分，对放大电路的认识重点放在集成运算放大器的应用上，而对分立元件放大电路的结构和工作原理仅作简单的介绍；对数字电路的认识重点在一些实用的集成逻辑电路的应用，如编码器、译码器、数据选择器、寄存器、计数器、555 定时器等。通过学习使学生能基本掌握常用集成电路的应用。实操项目选择上紧密结合电力生产、传输、用电管理和日常生活。例如，第二章中，设置了两个实操项目，一个是“日光灯电路的安装及功率因数的提高”，另一个是“三相电路的测量”。通过这两个项目的实训，使学生能够基本掌握单相和三相交流电的基本用法和特点。在电动机及其基本控制线路中，设置了实操项目“三相异步电动机正反转控制线路的装接”，为将来学生能够在工作岗位正确使用电动机奠定了基础。在电子技术部分除了一些基本的实操项目外，专门设置了一个综合性的实操项目——多音频门铃的制作，使学生在理论的指导下，能够制作出一个实用的产品。另外，考虑到用电过程中的安全问题，本书增加了“电气安全技术”的内容，使学生能够掌握基本的安全用电常识。此外，在教学过程中有些内容可以采用理论与实训相结合的方式教学，如低压电器和电动机的基本控制线路部分可在实训基地对照实物来教学，这样更便于学生理解和掌握。总之，本书的特点在于培养学生的实践能力、应用能力和创新能力。

本书第一章由山西大学张玉华编写；第二、三章由山西大学王早兰编写；第四、七章由山西大学薛太林编写；第五、六章由山西大学夏琰编写；第八章由山西大学谢茂林编写。全书由薛太林担任主编，王早兰担任副主编。

本书在编写过程中参考了一些经典教材和文献，在此谨向相关作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2014 年 4 月

目 录

前言	1
第一章 直流电路	1
第一节 电路模型及基本物理量	1
第二节 电源模型及三种工作状态	3
第三节 基尔霍夫定律	5
第四节 电路的基本分析方法	8
第五节 电工测试仪表的分类及误差分析	13
习题	16
相关知识链接：磁电系仪表	18
实操项目一 基尔霍夫定律的验证	20
第二章 正弦交流电路	22
第一节 正弦量的基本概念	22
第二节 正弦量的相量表示法	25
第三节 电阻、电感、电容元件及其正弦交流特性	28
第四节 基尔霍夫定律的相量形式	36
第五节 电阻、电感和电容串联的正弦交流电路	37
第六节 功率因数的提高	42
第七节 电路的谐振	43
第八节 三相电路	47
习题	55
相关知识链接：电磁系、电动系仪表	57
实操项目二 日光灯电路的安装及功率因数的提高	62
实操项目三 三相电路的测量	63
第三章 变压器电动机及其控制电路	66
第一节 交流铁芯线圈及电磁铁	66
第二节 变压器	70
第三节 电动机	77
第四节 常用低压电器	88
第五节 三相交流异步电动机的基本控制线路	105
习题	113
实操项目四 三相异步电动机正反转控制线路的装接	114
第四章 电气安全技术	116
第一节 发电、输电、配电概述	116
第二节 安全用电技术	118

第三节 安全用具.....	131
习题.....	138
第五章 半导体器件及放大电路.....	140
第一节 半导体基础知识与 PN 结.....	140
第二节 二极管.....	142
第三节 三极管.....	147
第四节 基本放大电路.....	151
习题.....	160
第六章 集成运算放大器及负反馈.....	163
第一节 集成运算放大器介绍.....	163
第二节 放大电路中的负反馈.....	165
第三节 集成运放的线性应用电路.....	170
第四节 集成运放的非线性应用电路.....	174
习题.....	177
实操项目五 运算放大器的线性应用.....	179
第七章 直流稳压电源.....	182
第一节 整流电路.....	182
第二节 滤波电路.....	189
第三节 稳压电路.....	192
习题.....	201
第八章 逻辑代数及实用逻辑电路.....	205
第一节 逻辑代数的基础知识.....	205
第二节 分立元件逻辑门电路及门电路的组合.....	209
第三节 集成门电路.....	212
第四节 简单组合逻辑电路的分析及设计.....	215
第五节 实用逻辑电路.....	217
第六节 集成 555 定时器及其应用.....	236
习题.....	239
实操项目六 集成逻辑电路测试.....	240
实操项目七 计数器及译码显示.....	243
实操项目八 多音频门铃的制作.....	246
参考文献.....	247

第一章 直流电路

第一节 电路模型及基本物理量

一、电路

电在日常生活、生产和科学研究等工作中得到了广泛的应用。在计算机、通信和电力系统中都可以看到各种各样的电路,应用这些电路可以完成各种各样的任务。

电路是由各种电气设备和元器件按一定方式连接起来组成的整体,它可以实现某种功能,是电流流过的路径。电路可分为电源、负载和中间环节三个部分,如图 1-1 所示。

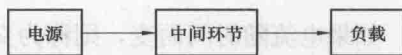


图 1-1 电路的基本组成

电源是提供电能的设备,是电路工作的能源。电源的作用是将非电能转换成电能,如发电机、蓄电池、干电池等。

负载是用电设备,是电路中的主要耗电器件。负载的作用是将电能转换成非电能,如电动机将电能转变成机械能,日光灯将电能转变成光能等。

中间环节是指电路中除电源和负载之外其他部分的总称。中间环节的作用是在电路中传输、分配和控制电能,如连接导线、开关、控制电器等。

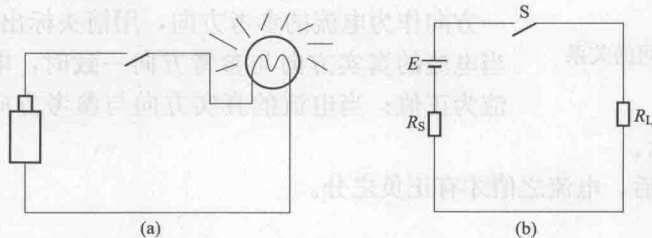


图 1-2 手电筒电路及其电路模型

(a) 手电筒电路; (b) 手电筒电路模型

举个实例,最简单的电路之一是手电筒电路,如图 1-2 (a) 所示。在图中,干电池是一种电源,它将化学能转换成电能,是一种产生电能的元件;电珠是由电阻丝组成的,它将电能转换成光能,是一种消耗电能的元件,称为负载;开关是控制元件,控制电路的接通与断开,开关和导线是连接电源和负载的中间环节。

电路按其功能可分为两大类,第一类是进行电能的传输和转换,例如,电力网络可将电能从发电厂输送到各个工厂和千家万户,供各种电气设备使用;第二类是实现电信号的传输、处理和存储,如通信系统、计算机网络等。

二、电路模型

组成电路的实际器件,其电磁性能的表现往往是各方面交织在一起。例如,白炽灯泡不仅消耗电能,还会在其周围产生一定的磁场。为了便于对实际电路进行分析和数学描述,在使用灯泡时,一般只考虑其消耗电能的功能,忽略其他次要的性能。基于这些考虑,将定义一些理想化的电路元件,每种电路元件只体现一种基本的电磁现象,这些元件就称为理想元件。在电路分析中,常用的理想元件有电阻、电容、电感、理想电压源和理想电流源等,这些元件分别由相应的参数来表征。

将实际电路中的各个部件用理想元件表示,由理想元件组成的电路就称为实际电路的电路模型。在手电筒电路中,干电池用电压源表示,其参数为电动势 E 和内阻 R_S ;电珠用电阻表示,其参数为电阻 R_L ;开关和导线可视为理想导体,这样手电筒电路的电路模型如图 1-2 (b) 所示。

三、电路的基本物理量

电路的基本物理量有电流、电压及功率。

1. 电流

带电粒子有规则的运动形成电流,定义为单位时间内通过导体截面的电荷量,用符号 i 表示,表示式为

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

如果电流随时间而变,则称为交流电流;如果电流不随时间而变,则称为直流电流。直流电流用大写字母 I 表示,表示式为

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

在国际单位制中,电流的单位是安培 (A),习惯上将正电荷运动的方向规定为电流方向。

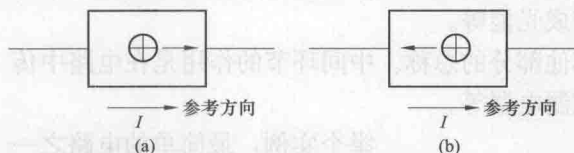


图 1-3 电流的实际方向与参考方向间的关系

(a) $I > 0$; (b) $I < 0$

电流的方向是客观存在的,在简单电路中,可以很容易地确定电流的方向;但在较复杂电路中,往往很难判断电流的真实方向,在这种情况下,可以任意假定某一方向作为电流的参考方向,用箭头标出。当电流的真实方向与参考方向一致时,电流为正值;当电流的真实方向与参考方向

相反时,电流为负值,如图 1-3 所示。

需要注意的是,在选定参考方向后,电流之值才有正负之分。

2. 电压

在电场中,电荷在电场力的作用下,从一点移到另一点时,它所具有的能量(电动势能)的改变量(即电场力所做的功)只和两点的位置有关,而与移动的路径无关。由此引出电压这个物理量,用来衡量电场力对电荷做功的能力。

电路中任意两点间的电压在数值上等于单位正电荷在电场力的作用下,由 a 点移动到 b 点电场力所做的功,即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

在国际单位制中,电压的单位为 V (伏特)。

与电流一样,电压也有自己的参考方向,其参考方向也是任意指定的。在电路中,电压的参考方向用正 (+)、负 (-) 极性来表示,正极指向负极的方向就是电压的参考方向。如图 1-4 所示。

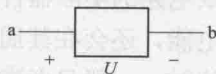


图 1-4 电压的参考方向

电压的参考方向还可用双下标表示,如在图 1-4 中用 U_{ab} 表示电压的参考方向是由 a 指向 b 。若 $U_{ab} > 0$,则表示 a 点的电位比 b 点电位高;反之若 $U_{ab} < 0$,则表示 a 点的电位比 b

点电位低。

3. 功率

功率定义为单位时间内能量的变化, 即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-3)$$

在图 1-5 中, 设正电荷 dq 从 a 点经元件 A 移到 b 点, ab 间的电压为 u , 则 dq 从 a 移到 b 减少的电能为 udq , 这就是被元件 A 吸收的能量 dw , 这样元件 A 的功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{udq}{dt} = ui \quad (1-4)$$

电流从电压的正端流向负端称电压、电流为关联参考方向; 电流从电压的负端流向正端称电压、电流为非关联参考方向。当电压和电流为关联参考方向时, 有 $p = ui$, 如果 $p > 0$, 则表明元件吸收功率或消耗功率; 反之若 $p < 0$, 则表明元件释放功率或提供功率。当电压和电流为非关联参考方向时, 功率的表达式为 $p = -ui$, 仍规定元件消耗功率时 p 为正, 元件提供功率时 p 为负。

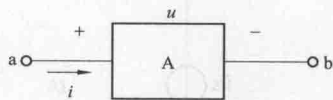


图 1-5 元件的功率

在国际单位制中, 功率的单位是 W (瓦特)。

在电路分析时, 如果电压与电流为关联参考方向, 如图 1-6 (a) 所示, 欧姆定律的表达式为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-5)$$

如果电压与电流为非关联参考方向, 如图 1-6 (b)、(c) 所示, 欧姆定律的表达式为

$$I = -\frac{U}{R} \quad (1-6)$$

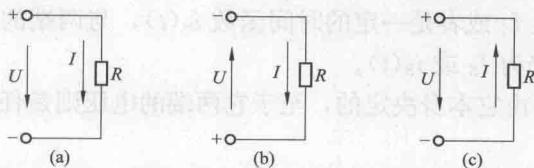


图 1-6 欧姆定律与电压、电流参考方向的关系

(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向; (c) 非关联参考方向

第二节 电源模型及三种工作状态

电源是电路中提供能量的电工设备, 理想电源元件有电压源和电流源两种形式。

一、电压源

如果电源的端电压与流过的电流无关, 则称这种电源为理想电压源, 其图形符号如图 1-7 (a) 所示。 U_s 为电压源的电压, “+”、“-”号是参考极性, 其伏安特性是一条不通过原点且与电流轴并行的直线, 如图 1-7 (b) 所示。

理想电压源是从实际电源抽象出来的一种模型, 具有以下两个基本特性。

(1) 其端电压是定值 U_s 或者是一定时间的函数 $u_s(t)$, 与流过的电流无关。当流过的电

流为零时, 其端电压仍为 U_S 或 $u_S(t)$ 。

(2) 电压源的电压是由它本身决定的, 流过理想电压源的电流与电压值无关, 由外电路决定。

实际的电压源由于电源内部有电能的消耗, 即有内电阻的存在, 其端电压会随着通过它的电流而发生变化, 因此一个实际电压源可以看成是一个理想电压源 U_S 和一个电阻 R_S 的串联。 U_S 为电源的开路电压, R_S 为电源的内阻, 这种电源模型为实际电压源模型, 简称电压源, 如图 1-8 所示, 其电压大小为

$$U = U_S - R_S I \quad (1-7)$$

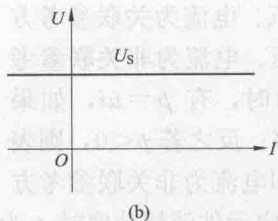
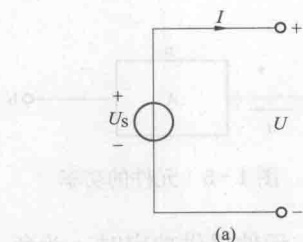


图 1-7 理想电压源的图形符号及其伏安特性

(a) 理想电压源的符号; (b) 理想电压源的伏安特性

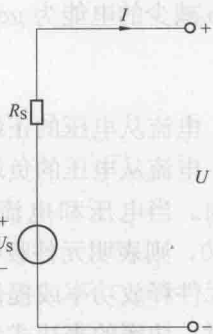


图 1-8 电压源

二、电流源

如果从电源流出的电流与电源两端的电压大小无关, 则称这种电源为理想电流源, 其图形符号如图 1-9 (a) 所示, I_S 为电流源的电流, 箭头是参考方向, 其伏安特性是一条不通过原点且与电压轴并行的直线, 如图 1-9 (b) 所示。

理想电流源是从实际电源抽象出来的一种模型, 具有以下两个基本特性。

(1) 其端电流是定值 I_S 或者是一定的时间函数 $i_S(t)$, 与两端的电压无关。当其端电压为零时, 它流出的电流仍为 I_S 或 $i_S(t)$ 。

(2) 电流源的电流是由它本身决定的, 至于它两端的电压则是任意的, 其大小取决于所连接的外电路。

理想电流源在实际中是不存在的, 它的输出电流通常会随着其端电压的增大而减小, 所以一个实际电源可以看成是一个理想电流源 I_S 和一个电阻 R_S 的并联, I_S 为电源的短路电流, R_S 称为电源的内阻, 这种电源模型为实际电流源模型, 简称电流源, 如图 1-10 所示。

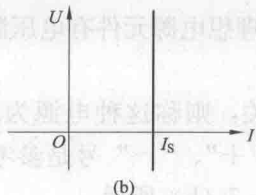
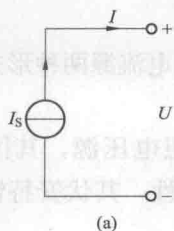


图 1-9 理想电流源的符号及伏安特性

(a) 理想电流源的图形符号; (b) 理想电流源的伏安特性

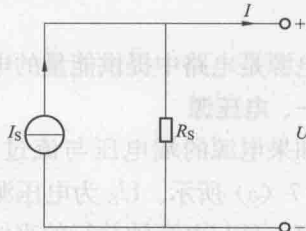


图 1-10 电流源

当电流源与外电路相连，电源的端电压为 U 时，电流源的输出电流为

$$I = I_s - \frac{U}{R_s} \quad (1-8)$$

三、电路的三种工作状态

电路的工作状态一般有三种：有载状态、短路状态和开路状态，分别如图 1-11 (a)、(b)、(c) 所示。

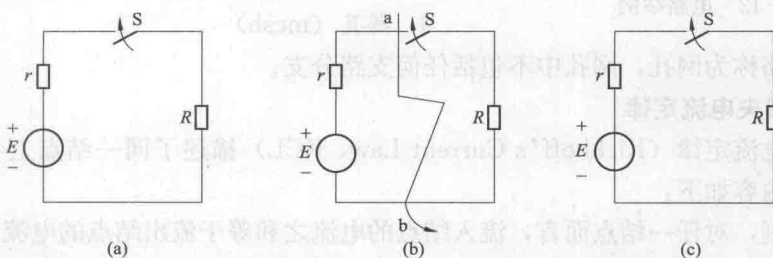


图 1-11 电路的工作状态

(a) 有载状态；(b) 短路状态；(c) 开路状态

1. 有载状态

在图 1-11 (a) 所示的电路中，当开关 S 闭合后，电源与负载形成闭合回路，电路中有电流流过，电源处于有载工作状态。

2. 短路状态

在图 1-11 (b) 所示电路中，当 a、b 两点接通，电源的两端就连接在一起，此时，电源被短路。电源短路时，外电路的电阻可视为零，电流由捷径通过，不再流过负载。电源被短路往往会造成严重的后果，如导致电源因发热过甚而损坏，或是因电流过大而引起电气设备的机械损伤，因此要绝对避免电源被短路。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。此外，还应在电路中接入熔断器等保护装置，以便发生短路事故能及时切断电源，达到保护电路的目的。

3. 开路状态

在图 1-11 (c) 所示电路中，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，电路处于开路状态，开路又叫断路。

第三节 基尔霍夫定律

电路的基本定律，除了欧姆定律外，还有基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律，基尔霍夫电流定律应用于结点，电压定律应用于回路。

一、电路中的几个常用概念

1. 支路 (branch)

电路中通过同一电流的每个分支称为支路。通过支路的电流称为支路电流，不同支路流过不同的电流，在图 1-12 所示电路中，有三条支路：ab、acb、adb。

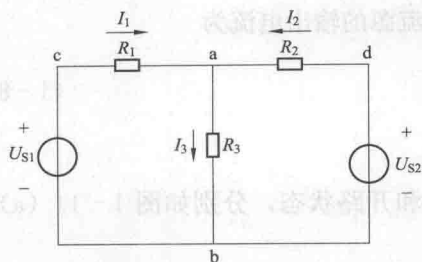


图 1-12 电路举例

2. 结点 (node)

电路中三条或三条以上的支路连接的点称为结点, 图 1-12 所示电路中有两个结点 a 和 b, c、d 两点一般不称为结点。

3. 回路 (loop)

电路中的任一闭合路径称为回路, 在图 1-12 所示电路中有三个回路: abca、abda 和 adbca。

4. 网孔 (mesh)

最小的回路称为网孔, 网孔中不包括任何支路分支。

二、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (Kichhoff's Current Law, KCL) 描述了同一结点上各支路电流之间的关系, 其内容如下:

在任何时刻, 对任一结点而言, 流入结点的电流之和等于流出结点的电流之和。

该定律体现了电流的连续性, 因为结点只是理想导体的汇合点, 不可能积累电荷, 所以在结点处的电荷既不能产生, 也不能消失, 满足电荷守恒定律。

在图 1-12 所示电路中, 对结点 a 有

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1-9)$$

此式又可写成

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1-10)$$

即

$$\sum I = 0$$

因此, 基尔霍夫电流定律又可表达成: 在任何时刻, 流入任一结点的电流的代数和恒为零。这里规定流入结点的电流取正号, 流出结点的电流取负号。

在应用基尔霍夫电流定律时, 有两点需要注意。

(1) 应用 KCL 计算时, 首先应设定各支路电流的参考方向。

(2) KCL 不仅适用于结点, 而且还可以推广适用于电路中的任意假想封闭面。例在图 1-13 所示电路中, 有 $I_c = I_b + I_c$ 。

【例 1-1】 在图 1-14 所示电路中, $I_1 = 2\text{A}$, $I_2 = -3\text{A}$, $I_3 = -3\text{A}$, 试求 I_4 。

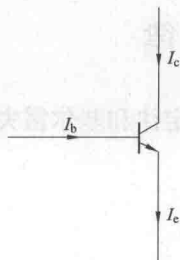


图 1-13 广义结点

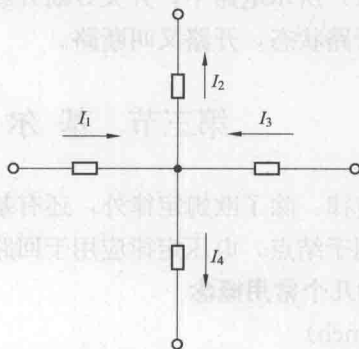


图 1-14 电路举例

解 根据 KCL, 规定流入电流为正, 流出电流为负, 则有

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

代入数据, 得

$$2 - (-3) + (-3) - I_4 = 0$$

最后, 得

$$I_4 = 2A$$

由 [例 1-1] 可见, 在应用 KCL 时, 会遇到两种正负号, 一种是 I 前的正负号, 它是由 KCL 根据电流的参考方向确定的, 另一种是电流数值本身的正负号, 它是由参考方向相对实际方向确定, 表示了电流本身数值的正负, 两种符号不能混淆。

三、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (Kichhoff's Voltage Law, KVL) 描述了同一回路中各元件电压之间的关系, 其内容如下:

在任何时刻, 对任一回路而言, 沿着该回路的各个元件的电压降的和等于电压升的和。

在图 1-12 所示电路中, 标注电源电动势、电流和各段电压的参考方向, 如图 1-15 所示, 选取回路 cadbc 的绕行方向为顺时针方向, 则有:

$$U_3 + U_2 = U_1 + U_4 \quad (1-11)$$

$$\text{又可写成} \quad U_1 - U_2 - U_3 + U_4 = 0 \quad (1-12)$$

$$\text{即} \quad \sum U = 0 \quad (1-13)$$

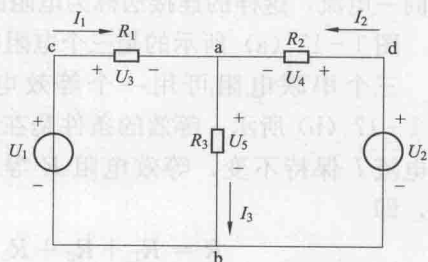


图 1-15 电路举例

因此, 基尔霍夫电压定律又可表达成: 在任何时刻, 沿某一回路绕行方向, 任一回路中各元件上电压降的代数和恒为零。

“沿一定方向绕行”既可以是顺时针, 也可以是逆时针。“代数和”表示有正有负, 绕行方向与经过电阻的电流方向相同, 是电压降取正号, 绕行方向与经过电阻的电流方向相反, 是电压升, 取负号, 绕行方向经过理想电压源时, 从+到-, 是电压降, 取正号, 从-到+, 是电压升取负号。

在图 1-15 所示电路中, 运用 KVL, 可列出方程式:

$$\text{回路 cabc:} \quad U_3 + U_5 - U_1 = 0 \quad (1-14)$$

$$\text{回路 adba:} \quad -U_4 + U_2 - U_5 = 0 \quad (1-15)$$

$$\text{回路 cadbc:} \quad U_3 - U_4 + U_2 - U_1 = 0 \quad (1-16)$$

从以上三式关系来看, 由式 (1-14)、式 (1-15) 可得到式 (1-16), 这说明方程中有两个是独立的, 其独立方程个数等于网孔个数。

在 KVL 方程中, 也能以电流形式出现, 如回路 cabc, KVL 方程可改写为

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 - U_1 = 0$$

因此, 在应用 KVL 分析电路时, 应先选路径, 然后再确定元件的电压和电流。

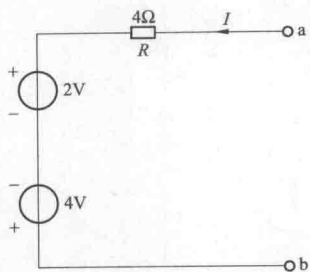


图 1-16 电路举例

【例 1-2】在图 1-16 所示电路中, 已知 $I=2\text{A}$, 求 U_{ab} 。

解 先选定回路的绕行方向, 沿顺时针方向, 根据 KVL, 可得

$$-IR + U_{ab} + 4 - 2 = 0$$

代入 $I=2\text{A}$, 得

$$-2 \times 4 + U_{ab} + 4 - 2 = 0$$

最后, 得

$$U_{ab} = 6\text{V}$$

第四节 电路的基本分析方法

一、电阻串并连接的等效变换

1. 电阻的串联

如果电路中有两个或更多个电阻是按一个接一个的顺序相连, 并且在这些电阻中通过的是同一电流, 这样的连接法称为电阻的串联。

图 1-17 (a) 所示的是三个电阻串联的电路。

三个串联电阻可用一个等效电阻 R 来代替, 如图 1-17 (b) 所示, 等效的条件是在同一电压 U 的作用下电流 I 保持不变, 等效电阻 R 等于各个串联电阻之和, 即

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1-17)$$

三个串联电阻上的电压分别为

$$U_1 = R_1 I = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} U \quad (1-18)$$

$$U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} U \quad (1-19)$$

$$U_3 = R_3 I = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} U \quad (1-20)$$

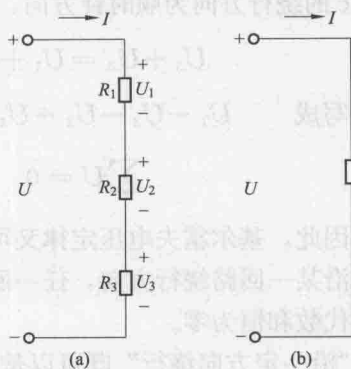


图 1-17 电阻的串联

(a) 串联电阻; (b) 等效电阻

这就是串联电阻的分压公式, 显然电阻越大, 分得的电压也就越大。有时为了限制负载中通过过大的电流, 也可以与负载串联一个限流电阻。

2. 电阻的并联

如果电路中有两个或更多个电阻连接在两个公共的结点之间, 这样的连接法就称为电阻的并联, 各个并联电阻电压相同。图 1-18 (a) 所示是三个电阻并联的电路。

三个并联电阻可用一个等效电阻 R 来代替, 如图 1-18 (b) 所示, 等效电阻 R 的倒数等于各个电阻的倒数之和, 即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (1-21)$$

三个并联电阻上的电流分别为

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{R}{R_1} I \quad (1-22)$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{R}{R_2} I \quad (1-23)$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{R}{R_3} I \quad (1-24)$$

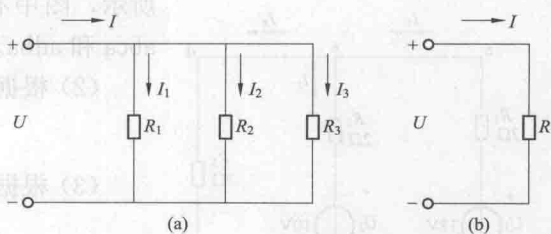


图 1-18 电阻的并联
(a) 并联电阻; (b) 等效电阻

这就是并联电阻的分流公式, 电阻越大, 分得的电流就越小。电源发出的总电流等于各并联电阻电流之和, 即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1-25)$$

如果两个电阻并联, 通常记作 $R_1 // R_2$, 等效电阻 R 为

$$R = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-26)$$

分流公式为

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \quad (1-27)$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \quad (1-28)$$

在实际电路中, 负载一般都是并联运行的。当负载并联时, 它们处于同一电压之下, 任何一个负载的工作情况基本上不受其他负载的影响。

当电阻的连接既有串联, 又有并联时, 称为电阻的串并联, 简称混联。求混联电路等效电路的方法是用串并联电阻的公式逐步简化。

【例 1-3】 求图 1-19 所示电路的等效电阻 R_{ab} 。

解

$$R_{ab} = R_1 + R_4 // [(R_2 // R_3) + R_5 + R_6] = 8\Omega$$

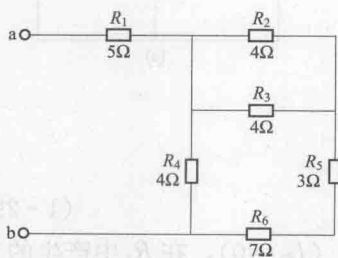


图 1-19 电路举例

二、支路电流法

凡不能用电阻串并联等效变换化简的电路, 一般称为复杂电路。在计算复杂电路的各种方法中, 支路电流法是最基本的。它是以各支路电流为求解对象, 根据基尔霍夫电流定律, 列出各独立结点的电流方程, 然后再根据元件的伏安特性和基尔霍夫电压定律, 列出各独立回路的电压方程, 最后联立求解各未知电流, 从而求出所需的物理量。

支路电流法解题步骤如下。

(1) 选择各支路电流的参考方向, 标出独立结点, 选定独立回路及绕行方向。

(2) 根据 KCL, 列出 $n-1$ 个独立结点的电流方程。(n 为电路中结点的个数)

(3) 根据 KVL, 列出独立回路的电压方程。(注: 独立回路的个数等于网孔数)

(4) 联立方程组, 求出各支路电流。

【例 1-4】 求图 1-20 所示电路中的 I_1 、 I_2 和 I_3 。

解 应用支路电流法求解该电路。

(1) 在图 1-20 所示电路中, 有 3 条支路, 选取支路电流 I_1 、 I_2 和 I_3 的参考方向如图中

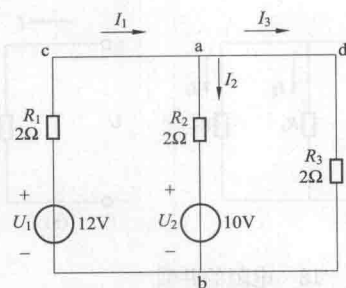


图 1-20 电路举例

所示, 图中有两个结点 a、b, 选取两个独立回路分别为 abca 和 adba。

(2) 根据 KCL, 对结点 a 有

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

(3) 根据 KVL, 有两个独立电压方程

$$I_2 R_2 + U_2 - U_1 + I_1 R_1 = 0$$

$$I_3 R_3 - U_2 - I_2 R_2 = 0$$

(4) 联立方程组, 带入参数, 求得

$$I_1 = \frac{7}{8} \text{ A}, \quad I_2 = -\frac{4}{3} \text{ A}, \quad I_3 = \frac{11}{3} \text{ A}$$

三、叠加定理

叠加定理是线性电路中的一个基本定理, 它体现了线性电路最基本的性质——叠加性, 其内容如下: 在线性电路中, 当有两个或两个以上独立电源 (多电源) 共同作用时, 任一支路中的电流或电压等于电路中各独立源单独作用时在该支路产生的电流或电压的代数和。

一个独立源单独作用, 意味着其他独立源不作用, 不作用的电压源的电压为零, 可用短路代替; 不作用的电流源的电流为零, 可用开路代替。下面以图 1-21 所示电路为例, 说明叠加定理。

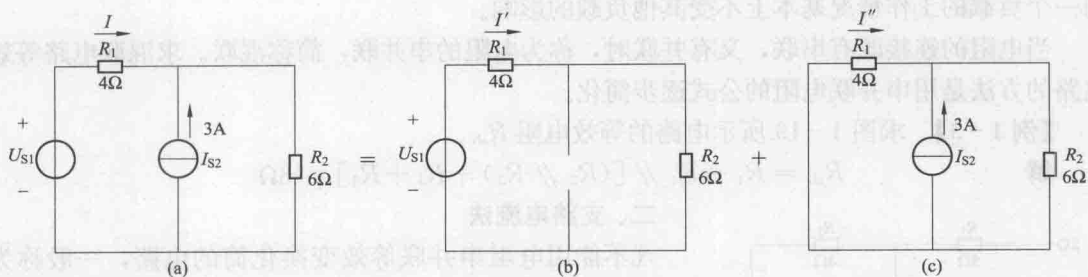


图 1-21 电路举例

以图 1-21 中支路电流 I 为例, 则有

$$I = I' + I'' \quad (1-29)$$

式 (1-29) 中, I' 是当电路中只有电压源 U_{S1} 单独作用时 ($I_{S2} = 0$), 在 R_1 中产生的支路电流, 如图 1-21 (b) 所示, 可得

$$I' = \frac{U_{S1}}{R_1 + R_2} \quad (1-30)$$

I'' 是当电路中只有电流源 I_{S2} 单独作用时 ($U_{S1} = 0$), 在 R_1 中产生的支路电流, 如图 1-21 (c) 所示, 可得

$$I'' = -\frac{I_{S2}}{R_1 + R_2} \times R_2 \quad (1-31)$$

电流 I 为两者的代数和。

应用叠加定理计算复杂电路时, 就是把一个多电源的复杂电路化为几个单电源电路来

计算。

【例 1-5】 用叠加定理计算图 1-22 所示电路中的支路电流 I_3 。

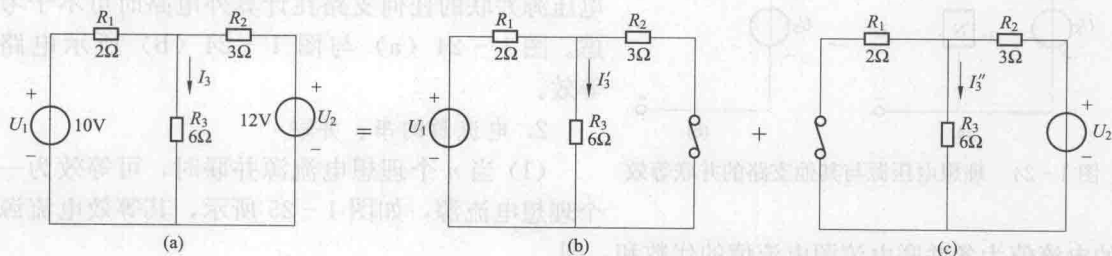


图 1-22 电路举例

解 图 1-22 所示电路中的支路电流 I_3 可以看成是由图 1-22 (b) 的支路电流 I'_3 和图 1-22 (c) 的支路电流 I''_3 的叠加之和。

因此, 当 10V 电压源独立作用时, 如图 1-22 (b) 所示, 有

$$I'_3 = \frac{U_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} \times \frac{R_2}{R_2 + R_3} = \frac{10}{2 + \frac{3 \times 6}{3 + 6}} \times \frac{3}{3 + 6} = \frac{5}{6} \text{ A}$$

当 12V 电压源单独作用时, 如图 1-22 (c) 所示, 有

$$I''_3 = \frac{U_2}{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} \times \frac{R_1}{R_1 + R_3} = \frac{12}{3 + \frac{2 \times 6}{2 + 6}} \times \frac{2}{2 + 6} = \frac{2}{3} \text{ A}$$

因此, 可得 I_3 为

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = \frac{5}{6} + \frac{2}{3} = \frac{3}{2} \text{ A}$$

在线性电路中, 不仅电流可以叠加, 电压也可以叠加。在图 1-22 中, 电阻 R_3 两端的电压为 $U_3 = I_3 R_3 = R_3 (I'_3 + I''_3) = R_3 I'_3 + R_3 I''_3$ 。但功率的计算不能用叠加定理, 例如电阻 R_3 的消耗功率 $P_3 = R_3 I_3^2 = R_3 (I'_3 + I''_3)^2 \neq R_3 (I'_3)^2 + R_3 (I''_3)^2$, 这是因为电流与功率不成正比, 它们之间不是线性关系。

四、电源的等效变换

1. 电压源的串、并联

(1) 当 n 个理想电压源串联时, 可等效为一个理想电压源, 如图 1-23 所示, 其电压值为各串联电压源电压值的代数和, 即

$$U_S = \sum_{k=1}^n U_{S_k} \quad (1-32)$$

当 n 个实际电压源串联时, 则等效电源的电压值仍为 U_S , 等效内阻为

$$R_S = \sum_{k=1}^n R_{S_k}$$

(2) 不同电压值的理想电压源不能并联, 只有电压值相同的理想电压源才能并联。

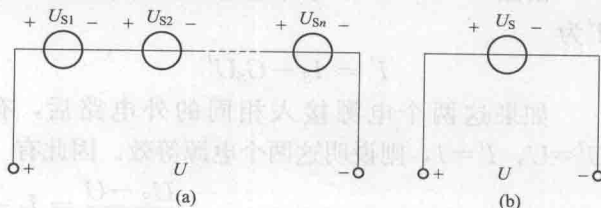


图 1-23 理想电压源的串联等效