

普通高等教育电气信息类“十二五”规划教材

电路与电子技术 简明教程

叶 淬 主编



化学工业出版社

普通高等教育电气信息类“十二五”规划教材

电路与电子技术 简明教程

叶 淬 主编



化学工业出版社
北京

本书以现代化电工学的新理念,突出基本概念、基本运用,有机整合电路及电子技术的有关内容。全书共分七章。前二章为“电路”部分,包括直流电路、单相和三相交流电路;后五章为“电子技术”部分,包括二极管及三极管的基本工作原理、集成运放和数字电子技术。

本书配有思考题、复习提示、习题、部分习题参考答案,帮助学生深入思考、融会贯通,有利于学生能力的培养,也有利于相关工程技术人员自学和参考。

本书每个章节后面还附有实验指导内容,既是配合教学的实验环节,又是学习者深入学习的一种检测。希望这一独到之处,可以给学习者带来更多的学习乐趣,对提高能力有所帮助。

本书内容精简、系统完整、深入浅出,尤其适合教改形势下少学时的非电专业本科、高职高专院校的教学需求,也可供相关工程技术人员自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

· 电路与电子技术简明教程/叶淬主编. —北京:化学工业出版社, 2011.4
普通高等教育电气信息类“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-10653-7

I. 电… II. 叶… III. ①电路-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM13②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 033437 号

责任编辑:郝英华 唐旭华
责任校对:郑捷

文字编辑:徐卿华
装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张12½ 字数333千字 2011年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 23.00 元

版权所有 违者必究

前言

信息化的时代中,“电工学”作为一门非电类专业的电类技术基础课,其学习意义不言而喻。多数院校面对日益减少了教学时数的“电工学”,该如何进行有效的教学,是一个新的课题。在少学时教学中如果沿用多学时的课本,容易造成教学内容的凌乱,学生的学习形不成系统。《电路与电子技术简明教程》是以现代化电工学的新理念,专门针对部分非电类专业中,40~60学时的“电工学”教学而编写的。

具体编写思路和特点如下。

(1) 针对少学时和非电类这两大特点,突出“基本”两字。

电路部分着重基本概念,不强调基本分析方法,摒弃解题技巧等非基本内容。比如,支路电流法就不再作为专门的一节,而是在基尔霍夫定律介绍完后举例运用中提及。在电子技术部分着重器件的基本原理和运用,摒弃电子电路的内部电路、内部原理分析。

(2) 以现代化电工学的新理念,有机整合内容,力求体系完整。

内容的精简绝不是简单的删删减减、七拼八凑。整本教程编写逻辑完整、注意前后知识的衔接,形成了自己的特色和体系。

如在电路部分叠加原理、戴维宁定理的介绍,着重于线性电路的基本性质,而非强调分析电路的方法。又如在电子技术部分完全舍去了各种分立元件电路的分析与计算,舍去集成内部电路的剖析,着重讲述器件的运用。既是突出“基本”的需要,更是为了突显现代化电工学的教学趋势。考虑到数字电子技术的发展与运用,数字电路部分讲述简洁、全面,为进一步学习留下了空间。

(3) 增加实验部分,将理论课和实验课糅在一起。

本教程增加实验部分,既可以在使用中减少一本实验教程,更是为了强调实践环节在“电工学”中的教学地位。

电工学课程和许多工科类课程一样,是一门技术应用的课程,学生的参与性学习必不可少。要想在如此少的学时下,让课程的效益达到最高,就应该让学生动起来,参与进来。因此将实验和理论教学合编在一起,是本教材的又一特色。实验部分的内容紧扣教学的基本要求,又是拓展能力的极好训练。教师可以根据情况选择其中的某一些,要求学生在实验室中完成。学生也可作为一种综合练习独立思考,提高对学习的兴趣和理解。

(4) 非电专业的范围很广,除个别机械类专业对电机知识有一定要求外,多数专业并不要求电机有关常识。为此本教程将电机、磁路、瞬变过程等内容整体删除,将有限的学时用在刀刃上。

全书在各个章节配以适量的思考题,启迪学生的思维,加深学生对讲授内容的理解,同时引导学生正确思维。这样学生在抓住最基本要求的同时,又有了一定的拓展余地,为今后的学习和工作打下自学的基础。打*号部分为拓展加深内容,可以视学时数和教学要求选择讲述。

本书配有电子课件,可免费提供给采用本书作为教材的大专院校使用,如有需要请登录教学资源网(www.cipedu.com.cn)。

参与本书编写工作的还有李慧、胡秀芳和黄大树,在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请批评指正。

叶淬

2011年2月

目 录

第一章 直流电路	1
第一节 电路的基本概念	1
一、电路的组成和作用	1
二、电路中的基本物理量和方向	2
三、电路的三种工作状态	3
四、电功率和电能	4
思考题	4
第二节 电压源、电流源及其等效变换	5
一、电压源	5
二、电流源	6
三、电压源及电流源的等效互换	7
思考题	8
第三节 基尔霍夫定律	8
一、基尔霍夫电流定律	8
二、基尔霍夫电压定律	9
三、基尔霍夫定律的运用	10
思考题	11
第四节 结点电压法	11
一、两结点间电压和部分电压的关系	12
二、两个结点电路的结点电压法公式推导	12
思考题	13
第五节 叠加原理	14
思考题	15
第六节 戴维宁定理	15
思考题	16
复习提示	16
习题	17
实验一 验证叠加原理和基尔霍夫定律	19
实验二 等效变换	21
第二章 正弦交流电路	24
第一节 正弦交流电的基本概念	24
一、周期和频率	24
二、瞬时值、幅值、有效值	24
三、初相位、相位、相位差	25
思考题	25
第二节 正弦量的相量表示法	26
一、正弦量和复数的关系	26
二、正弦量的相量表示法	26
三、正弦量的相量运算	27
思考题	28
第三节 单一参数的正弦交流电路	28
一、电阻元件电路	28
二、电感元件电路	29
三、电容元件电路	31
思考题	32
第四节 正弦交流电路的分析	33
一、欧姆定律的相量形式和阻抗	33
二、阻抗的串并联	33
三、交流电路计算的原则	34
四、电压和电流相位差角 φ	36
思考题	36
第五节 正弦交流电路中的功率	37
一、瞬时功率	37
二、有功功率	37
三、无功功率	37
四、视在功率	38
思考题	39
第六节 提高功率因数	39
一、提高功率因数的意义	39
二、提高功率因数的方法	40
思考题	42
第七节 电路中的串联谐振	42
一、串联谐振条件	42
二、串联谐振的特点	42
三、串联谐振曲线	43
思考题	43
第八节 三相电路	43
一、三相电源	44
二、三相负载	46
三、三相负载的功率	51
思考题	52
复习提示	52
习题	53
实验一 功率因数的提高	55
实验二 R 、 L 、 C 串联谐振	57
* 实验三 电感元件的参数测试	59

第三章 半导体器件基本性能及应用	61
第一节 二极管性能及原理	61
一、PN 结单向导电特性	61
二、半导体二极管	63
思考题	65
第二节 二极管的应用	66
一、整流与滤波	66
二、稳压管原理及应用	71
* 三、集成稳压电路	73
思考题	74
第三节 三极管的原理及应用	74
一、三极管的电流放大作用	74
二、三极管的特性曲线及主要参数	76
三、三极管组成的基本交流放大电路	77
思考题	80
复习提示	80
习题	81
实验一 整流、滤波、稳压电路	83
* 实验二 集成稳压电路的应用	85
第四章 集成运算放大器	88
第一节 集成运放的概述	88
一、集成运放的组成	88
二、集成运放的主要参数	89
三、理想集成运算放大器	90
思考题	91
第二节 集成运放的输入方式	91
一、放大电路中的负反馈	91
二、集成运放的输入方式	93
思考题	96
第三节 集成运放的基本运算电路	96
一、比例运算	96
二、加法运算	96
三、减法运算	97
四、积分运算	97
五、微分运算	98
思考题	98
第四节 集成运放的非线性应用	98
一、单限电压比较器	98
二、迟滞电压比较器	99
思考题	100
第五节 集成运放的信号发生电路	101
一、正弦信号发生器	101
二、方波信号发生器	102
三、三角波信号发生器	103
思考题	104
复习提示	104
习题	105
实验一 集成运算放大器的信号运算	107
实验二 集成运算放大器在波形产生方面的运用	108
实验三 集成运算放大器的非线性运用	110
第五章 常用组合逻辑电路	112
第一节 逻辑代数	112
一、逻辑代数的基本运算	112
二、逻辑代数的基本定律	114
三、化简逻辑函数	115
思考题	116
第二节 逻辑门电路	116
一、基本门电路	116
二、复合门电路	116
思考题	117
第三节 组合逻辑电路的分析与设计	117
一、组合逻辑电路的分析	117
二、组合逻辑电路的设计	118
思考题	120
第四节 常用组合逻辑电路	120
一、加法器	121
二、编码器	121
三、译码器及显示译码器	125
四、数据选择器	127
思考题	128
复习提示	128
习题	129
实验一 组合逻辑电路	130
* 实验二 组合逻辑电路设计	133
第六章 时序逻辑电路	136
第一节 双稳态触发器	136
一、基本 RS 触发器	136
二、钟控 RS 触发器	137
三、边沿触发器	138

第二节 寄存器与移位寄存器	139	一、集成 555 定时器简介	149
一、寄存器	140	二、集成 555 定时器的应用	150
二、移位寄存器	140	思考题	153
第三节 计数器	142	复习提示	153
一、同步计数器	142	习题	154
二、异步计数器	144	实验一 时序逻辑电路	158
三、中规模集成计数器	144	* 实验二 时序逻辑电路设计	162
思考题	148	实验三 555 定时器	165
第四节 集成 555 定时器	149		
第七章 数模、模数转换电路	168		
第一节 数模转换电路	168	二、ADC0804 原理及引脚使用	173
一、 $R-2R$ 倒 T 形电阻网络	168	三、ADC 主要性能指标	174
二、DAC0832 原理及引脚使用	169	四、ADC 的应用举例	175
三、DAC 主要性能指标	170	思考题	175
四、DAC 的应用举例	171	复习提示	175
思考题	171	习题	175
第二节 模数转换电路	172	实验一 A/D、D/A 转换器	176
一、逐次渐近型 ADC	172	* 实验二 数字电路应用实验	179
附录 A 常用电子器件主要参数	181		
附录 B 常用仪器仪表	184		
附录 C 部分习题参考答案	192		
参考文献	194		

第一章 直流电路

本章通过对直流电路基本定律、基本分析方法的介绍，着重建立起电路的基本概念和基本分析思路，因此本章的内容是学习电工学课程的重要基础。

第一节 电路的基本概念

一、电路的组成和作用

电路就是电流所经之路，是为了实现某种功能，将各种电源设备、电路器件连接为电流提供通路的整体。一般均由图 1-1 所示电源、负载、中间环节三部分组成。电源在电路中提供电能，它是将非电能转换为电能的装置；负载在电路中吸收电能，是将电能转换为非电能或消耗电能的器件；其余一些控制、连接、测量、保护等设备为中间环节。大到一个电力系统，小到一个手电筒，电路都是由这三部分组成。

电路的作用主要可以分为以下两大类。

① 对电能的传输和转换，如发电、供电系统，电力拖动，电气照明等，也被称为“强电”系统。

② 传递和处理信号，如日常接触的音响系统、卡拉 OK、电视机、计算机等，俗称“弱电”系统，又称信号电路。其中涉及各种电信号的传输、放大、整形、数字信号的运算、存储等。

信号电路中的电源称为信号源。电源和信号源在电路中都是激励电路工作，各处产生的电压和电流就称为对电源激励的响应。电路分析就是研究电路中电源、信号源激励和各元件响应之间的关系。

在电路分析中，需要将实际电路中各元件理想化，抽象成一个电路模型。理想化的电路元件，简称电路元件。常用的电路元件中提供电能的元件为有源元件，如电压源、电流源。相对于有源元件还有不产生电能的无源元件，如电阻元件、电感元件和电容元件。其中电阻为耗能元件，电感和电容分别将电能转化为磁场能和电场能储存起来，称为储能元件。图 1-2 列出了常用的理想电路元件符号。实际中的一些电路元件往往并非具有单一特性，在电路模型中往往突出主要特性，忽略次要因素，用理想元件取代，或者用理想元件的组合来表示。



图 1-1 电路的组成

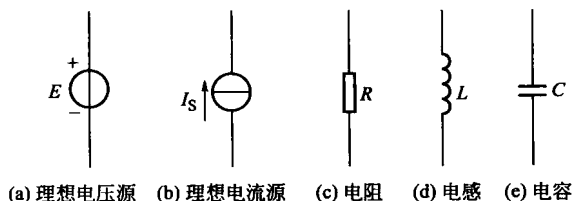


图 1-2 理想电路元件

图 1-3 为手电筒电路模型。其中电珠、干电池、导线、外壳，都无需画出它的具体外形，而被抽象成电路元件。电珠主要特性就是消耗电能，用电阻元件替代；干电池的特性就是提供直流电，电路中用一个含有内阻的电压源表示；手电筒中其余部分都是起连接作用的，在电路中用导线、开关等表示。今后所画的电路图都是电路模型。

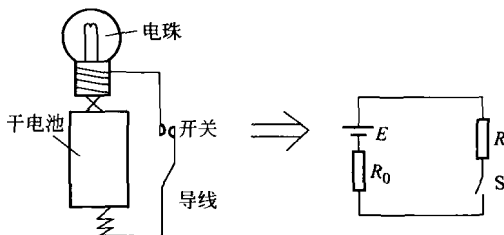


图 1-3 手电筒电路模型

二、电路中的基本物理量和方向

1. 电流

电流的实际方向规定为正电荷移动的方向。对于比较复杂的直流电路，往往事先不能确定电流的实际方向，而对于随时间交变的交流电更无法用一个箭标来表示其实际方向。在电路分析中，总是首先任意假设一个方向作为电流的参考方向（在电路图中用箭标表示）。既然是任意假设的，参考方向有可能与实际方向一致，也可能与实际方向相反。当计算结果电流为正值时，表示电流的实际方向和所选的电流参考方向一致；反之，若计算结果电流为负值，表示电流的实际方向和所选电流参考方向相反。注意电流参考方向一旦选定，在分析计算过程中不得更动，而且物理量电流是一代数量。

例如，在图 1-4 所示电路中， $I_1 = 1\text{A}$ ，表示选定的箭标所示方向为电流参考方向，而且此时 ab 支路中电流的实际方向同参考方向。 $I_2 = -2\text{A}$ ，表示选定的箭标所示方向为电流参考方向，而且此时 cd 支路中电流的实际方向同参考方向相反。也就是说，可根据电流 I 的参考方向及其数值的正负确定电流的实际方向。本书中电路图上所标的电流方向均为参考方向，也只有在标明电流 I 的参考方向后，电流 I 的代数值才有意义。

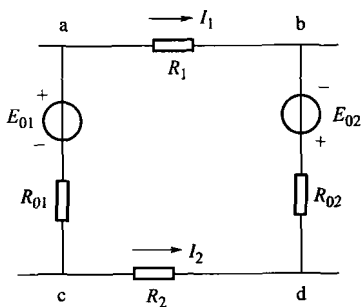


图 1-4 电流参考方向

参考方向可以用箭标表示，也可以用加注文字双下标来表示。如图 1-4 中， I_1 可以写作 I_{ab} ， I_2 可以写作 I_{cd} 。

显然， $I_{ab} = -I_{ba}$ ， $I_{cd} = -I_{dc}$ 。

2. 电位及电压

电位即电场中某点的电势，数值上等于电场力将单位正电荷从电场中某点移到无限远处所做的功。电场无限远处的电位为零，也是电场中各点的电位参考点。工程中常以与大地连接点为参考点。在电路分析中常以公共结点或电源的负端为参考点，也可以任选一点为参考点。参考点一旦选定，在电路分析过程中就不能再变，参考点的电位为零。

电场中任意两点间的电位差就是这两点间的电压。电位文字符号为 V ，电压文字符号为 U 。a、b 两点间的电压 $U_{ab} = V_a - V_b$ 。知道两点各自的电位，就能求出两点间的电压；同样，任意一点对参考点的电压，就是这点的电位。

电压的实际方向规定是从高电位点指向低电位点，是电位降的方向。同电流一样，在分析计算电路时，通常首先需要对电压人为假设一方向，这种假设方向称为电压参考方向。当实际方向与参考方向一致时，电压值为正，当实际方向与参考方向相反时，电压值为负。电

压的参考方向除和电流参考方向一样用箭标或双下标表示外, 电压的参考方向通常用正 (+)、负 (-) 极性来表示, 称为**参考极性**。当然, 在一个电路图中, 参考极性和参考方向都要一致, 标上参考极性的支路代表着电压参考方向的箭标从正 (+) 极性端指向负 (-) 极性端。

如图 1-5 所示, 电压的参考极性为 A (+), B (-); $U=5\text{V}$, 说明电压的实际方向与参考方向一致, 大小为 5V; 如 $U=-5\text{V}$, 则说明电压的实际方向与参考方向相反 (即实际是 B 为 +, A 为 -), 大小为 5V。

无论是电压或电流只有和参考方向连在一起, 其值才有意义。

3. 电动势

电动势 E 描述电源其外力做功的能力 (电流源用 I_s 来描述)。外力做功是指: 外力克服电场力将单位正电荷从负极搬到正极所做的功。因此电动势 E 的实际方向是从负极指向正极。在电路分析时, 一般电源的极性都是已知的, 因此设电动势的参考方向时往往与实际方向同, 这样可以减少不必要的负值物理量。

4. 关联参考方向

在任意假设电压参考方向和电流参考方向的同时, 通常将元件或无源支路两端的电流参考方向与电压参考方向设为同一方向, 该参考方向称为**关联参考方向**。在关联参考方向下分析电路, 会带来诸多的方便。因为, 无论是元件或是无源支路两端, 其电压和电流的实际方向是一致的, 电流总是从电压的高端流向低端。在关联参考方向下, 可以避免一些无端的负号或负值的产生。图 1-6 所示电路中在关联参考方向下, 欧姆定律可写为 $U=IR$; 而在非关联参考方向下欧姆定律应写为 $U=-I'R$ 。

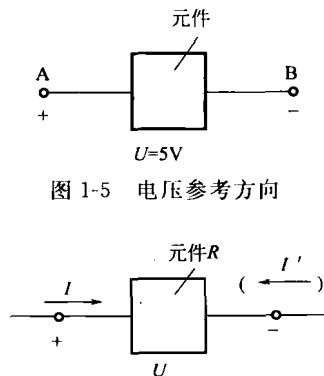


图 1-5 电压参考方向

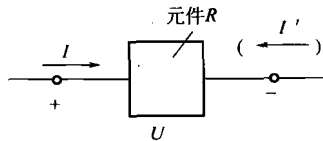


图 1-6 关联参考方向

三、电路的三种工作状态

1. 有载工作状态

图 1-7 所示电路中, 当开关 S 闭合时电源与负载接通, 电路中电流流通, 将这种状态称为**有载工作状态**。

$$\text{电流大小: } I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1-1)$$

$$\text{电源两端电压: } U = E - IR_0 \quad (1-2)$$

有载工作状态时, 从式(1-1)中可见, 负载电阻 R_L 愈小, 输出电流 I 愈大。输出电流大, 对电源的负担大, 一般说负载重。输出电流小, 对电源的负担小, 一般说负载轻。也就是说电源负载的轻重和负载电阻的阻值大小正好相反。当 $I < I_N$ (电源输出的额定电流) 时, 电源为轻载, $I > I_N$ 时, 电源为过载。从式(1-2)中还可见, 电源两端电压 U 会随着输出电流的增大而减小。

2. 开路状态

当图 1-7 所示电路中的开关 S 断开时, 电路中无电流流过, 电流 $I=0$, 电路处于**开路状态**。开路时可认为负载电阻为无穷大, 式(1-1)也成立, 这种状态又叫**空载**。电路处在开路状态时, 电路的端电压称为开路电压 U_{oc} , $U_{oc} \equiv E$ 。

3. 短路状态

在图 1-8 中, 如将 cd 间用一导线连接, 因导线电阻极小, 可忽略不计, 所以式(1-1)中 $R_L=0$, 此时 $I = \frac{E}{R_0} = I_{sc}$ 。 I_{sc} 称为电源短路电流, 由于电源内阻 R_0 很小, 故 I_{sc} 很大。这

种短路状态会引起电源或导线绝缘的损坏,要尽力避免。

四、电功率和电能

电路元件在单位时间内吸收或释放的电能为电功率。电路元件包含消耗电能的负载和提供电能的电源两大类。在电工学中,电功率简称功率。用 P 表示,单位为瓦 (W)。在直流电路中,当电压、电流采用关联参考方向时,电功率的计算公式为

$$P=UI \quad (1-3)$$

式(1-3)的计算结果中,若 $P>0$,则表示该部分电路吸收电功率,元件是负载。 $P<0$,则表示该部分电路输出电功率,元件是供电电源。因为在关联参考方向下,消耗电功率的负载元件,其端电压及电流的实际方向总是一致的,一致的参考方向,必定使电压或电流物理量同为负值或正值,反映电压和电流乘积的 P 也必定大于零。反之,若电压和电流在关联参考方向下的乘积为负,表示其实际方向不一致,电压和电流只有在供电电源两端其方向才不一致,因此 $P<0$,则该元件为供电电源。此处一直强调供电电源,是因为作为一个实际电源,当它在充电时,也被看作是负载。

如电压和电流参考方向相反时,电功率的计算公式为

$$P=-UI \quad (1-4)$$

在不同的参考方向前提下,对式(1-3)和式(1-4)计算结果的结论是一样的。

电路元件在一段时间内消耗或释放的能量为电能,用 A 表示,即

$$A=Pt=UI t \quad (1-5)$$

电压的单位为伏 (V),电流单位为安培 (A),时间单位为秒 (s),功率单位为瓦 (W),能量的单位是焦耳 (J)。

在实际生活和工作中,一般接触到的电气设备及元件,铭牌上都标有其工作电流、电压和功率等参数,称为额定值。额定值是电气设备及元件在正常条件下允许长期工作的限额值。额定值通常用 I_N 、 U_N 、 P_N 等表示。额定电压为 220V 的灯泡接到 380V 电源上使用,灯泡会烧坏;接到 127V 电源上则不能正常发光。

额定值和实际值不同,下面看例 1-1。

【例 1-1】 有一台直流发电机,其铭牌上标有 220V、53.8A,电源内阻为 0.2Ω 。当外接负载为 10Ω 时,电源输出电流为多少?该电源最大能带动的负载电阻为多大?

解 电路如图 1-9 示。由式(1-1)可知外接负载为 10Ω 时,电源输出电流为

$$I=\frac{E}{R_0+R_L}=\frac{220}{0.2+10}=21.57\text{A}$$

$$\text{该电源最大能带动的负载电阻为 } R_{L\text{MAX}}=\frac{E-I_N R_0}{I_N}=\frac{220-53.8\times 0.2}{53.8}=3.89\Omega.$$

21.57A 为外接负载为 10Ω 时的实际电流,当负载电阻较轻时,实际电流小于额定值。实际值决定于电源实际所带的负载大小,和额定值无关。

思考题

1-1-1 经常听有人这样说:“这点的电压是多少?”这种说法对吗?

1-1-2 电阻元件和电位器的规格用阻值和最大容许功率的瓦数表示,今有 200Ω 、1W 的电阻,它允许流过的最大电流是多少?

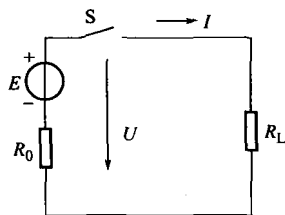


图 1-7 有载工作状态

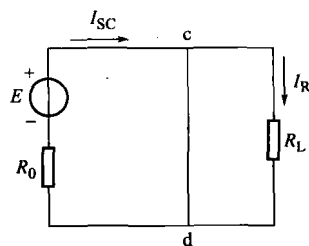


图 1-8 短路状态

1-1-3 电压、电流如图 1-10 所示。试判断图 (a)、(b) 电路中的元件是电源还是负载？

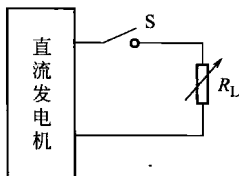


图 1-9 例 1-1 图

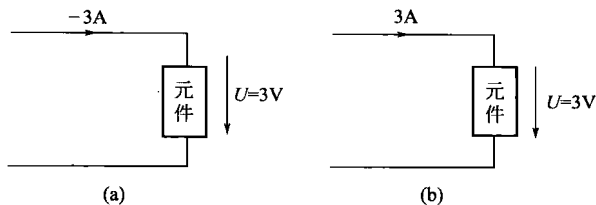


图 1-10 思考题 1-1-3 图

第二节 电压源、电流源及其等效变换

实际电源可以用两种不同的电路模型来描述。一种是用电压源模型，简称为**电压源**；一种是用电流源模型，简称为**电流源**。

一、电压源

在电压源模型中用一个不含内阻的理想电压源和电阻 R_0 串联来等效一实际电源，如图 1-11 所示。

1. 理想电压源

当图 1-11 中 R_0 为零时，电压源被称为**理想电压源**，其模型如图 1-12(a)、(b) 所示。理想电压源有以下特性。

- ① $U \equiv U_S$ ，电源端电压为恒值，不受外接电阻的影响（因此理想电压源又称恒压源）。
- ② 电流 $I = \frac{E}{R_L}$ ，输出电流大小完全由外电路决定。
- ③ 理想电压源的伏安特性为一条与横轴平行的水平线，见图 1-12(c)。

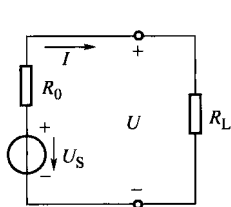


图 1-11 电压源电路模型

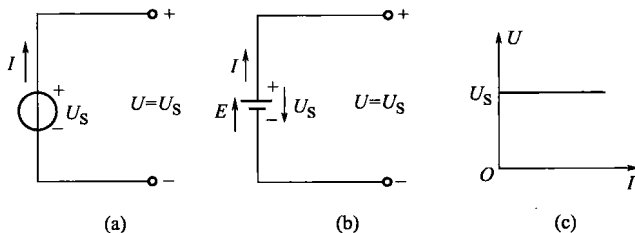


图 1-12 理想电压源

由前所述，电动势 E 的方向指电位升的方向，而 U_S 的方向指电位降的方向，因此理想电压源 U_S 的方向与电动势 E 的方向相反，大小相等。如图 1-12(b) 中 $E = U_S$ 。

2. 实际电压源

实际电压源简称电压源，模型如图 1-11 所示。其电流和电压由式(1-1)和式(1-2)知为：

① $I = \frac{E}{R_0 + R_L} = \frac{U_S}{R_0 + R_L}$ ，实际电压源的电流 I 由电源内阻和外电路负载电阻共同决定；

② $U = E - IR_0 = U_S - IR_0 = IR_L$ ，实际电压源的端电压不再恒定，负载电阻不同，流出电流不同。端电压将随电流的增大而减小，其伏安特性如图 1-13 所示。

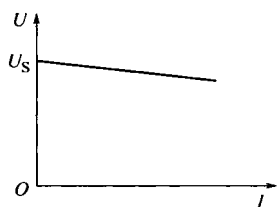
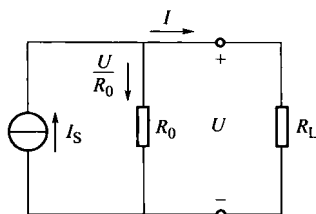
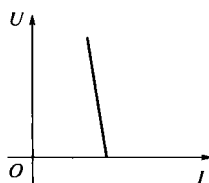


图 1-13 电压源伏安特性



(a) 电流源电路模型



(b) 电流源伏安特性

图 1-14 电流源

二、电流源

在直流电路中，电流源也是实际电源的一种模型，采用电激流与内部损耗电阻 R_0 的并联组合，如图 1-14(a) 所示（电激流用大写字母 I_s 表示）。

1. 理想电流源

理想电流源的电路符号如图 1-15(a) 所示，相比图 1-14(a) 的实际电流源其内阻 $R_0 = \infty$ 。其特性如下。

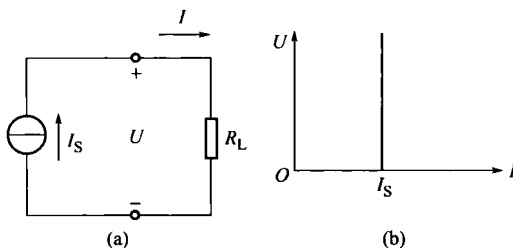


图 1-15 理想电流源

① $I \equiv I_s$ ，输出电流恒定不变，故称恒流源。

② 电源端电压值 $U = I_s R_L$ ，完全由外电路决定。

③ 理想电流源的外特性曲线，为一条与纵轴平行的直线，见图 1-15(b)。

2. 实际电流源

实际电流源简称电流源。由图 1-14(a) 电路中电压、电流的关系如下。

$$\textcircled{1} \quad U = I_s \cdot R_0 // R_L \quad (1-6)$$

实际电流源的电压由电源内阻和外电路负载电阻共同决定。

$$\textcircled{2} \quad I = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1-7)$$

实际电流源的输出电流 I 不再恒定，将随输出电压的下降而增大。其特性曲线如图 1-14(b) 所示。

【例 1-2】 图 1-16 所示电路，已知开路电压 $U_{OC} = 110\text{V}$ ，又接上 10Ω 的负载电阻时， $I = 10\text{A}$ ，求：① 电源为电压源模型时，电压 U_s 及内阻 R_0 各为多大？② 电源为电流源模型时，电激流 I_s 及内阻 R_0 各为多大？

解 ① 开路时 $I = 0$ ，由电压源模型图 1-11 知，开路电压 $U_{OC} = E = U_s$ ，所以 $U_s = U_{OC} = 110\text{V}$ 。

又由式(1-1) 转化可得

$$R_0 = \frac{U_s}{I} - R_L = \frac{110}{10} - 10 = 1\Omega$$

② 由图 1-14(a) 电流源电路模型可知，开路电压

$$U_{OC} = I_s R_0 \Rightarrow 110 = I_s R_0 \quad (1-8)$$

接上负载 10Ω 时，电流 10A ，此时电源端电压 $U = IR_L = 10 \times 10 = 100\text{V}$ ，由式(1-7) 知

$$I = I_s - \frac{U}{R_0} \Rightarrow 10 = I_s - \frac{100}{R_0} \quad (1-9)$$

联立式(1-8)、式(1-9) 可解得 $R_0 = 1\Omega$ ， $I_s = 110\text{A}$ 。

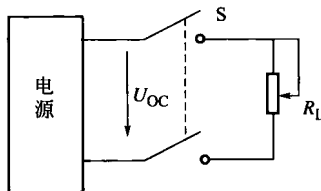


图 1-16 例 1-2 图

三、电压源及电流源的等效互换

既然电压源及电流源是电源的两种表示形式，这两种形式是否可以等效互换呢？从例 1-2 可以看到同样的电源模型既可以用电压源来表示，也可以用电压源来表示，其作用对外电路都是一样的。从电压源伏安特性图 1-13 和电流源伏安特性图 1-14(b) 比较看，两个电源模型的伏安特性完全相同，都是随着输出电流的增大而端电压下降。因此电压源和电流源可以进行等效变换，现在来讨论等效变换的条件。

在图 1-17 所示的两种电源模型中有以下关系。

电压源模型

$$I = \frac{U_S}{R_0} - \frac{U}{R_0} \quad (1-10)$$

电流源模型

$$I = I_S - \frac{U}{R_0'} \quad (1-11)$$

可见，欲使两种模型的表达式能代表同一个实际电源，只要满足以下条件

$$\left. \begin{aligned} R_0' &= R_0 \\ I_S &= \frac{U_S}{R_0} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

值得注意的有以下几点。

① 电压源和电流源的等效变换只是对外电路而言的，即用电压源和电流源等效变换后，外电路的电压和电流的大小和方向都不变。而等效变换对于电源内部而言并不等效。例如当外电路开路时，电压源模型中无电流，恒压源既不发出功率，内阻也不吸收功率；而电流源模型中仍有内部电流，此时恒流源发出功率，并且全部为内阻所吸收。

② 等效变换时，电压源的 U_S 方向和电流源的 I_S 方向相反（当然电压源的 E 方向和电流源的 I_S 方向相同）。

③ 理想电压源和理想电流源之间不能等效变换。看图 1-12(c) 和图 1-15(b) 便可知，两条伏安特性完全不可能等效。

④ 电压源和电流源的等效变换可以推广到任意一个理想电压源 U_S 与电阻串联的支路与理想电流源 I_S 与电阻并联的电路之间进行。如图 1-18 所示。电路的等效互换有时能使复杂的电路变得简单，以简化电路计算。

【例 1-3】 求图 1-19(a) 中的电流 I 。

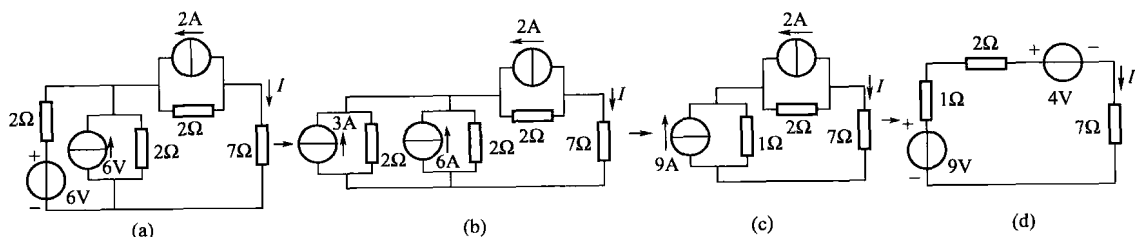


图 1-19 例 1-3 图

解 利用电源等效变换, 将图 1-19(a) 的电路简化成如图 (d) 的单回路电路。变换过程如同图 (b)、(c)、(d) 所示。从化简后的电路, 求得电流

$$I = \frac{9-4}{1+2+7} = 0.5 \text{ A}$$

思考题

1-2-1 思考图 1-20 中, 各电路的电压 $U=?$

1-2-2 实验测得某直流电源的开路电压 $U_{OC}=16\text{V}$, 内阻 $R_0=1\Omega$, 试绘出此电源的伏安特性曲线, 并作出此电源的两种电路模型。

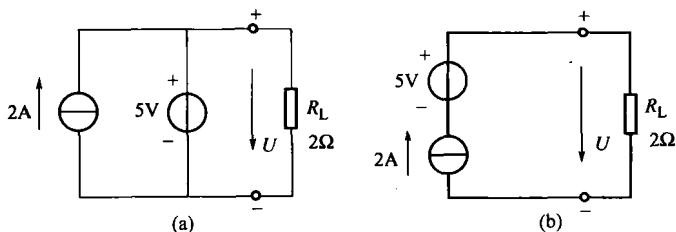


图 1-20 思考题 1-2-1 图

第三节 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律包含基尔霍夫电流定律 (KCL) 和电压定律 (KVL), 它是电路中各处电压和电流都必须遵循的最最基本的定律, 是分析电路的基本依据。在介绍基尔霍夫定律前先明确几个名词的概念。

支路——电路中每一个含有电路元件的分支称为支路。

结点——三条以上支路的汇集点称为结点。

回路——电路中任意一个闭合路径都称为回路。

图 1-21 中有两个结点 c 和 d。有三条支路, 分别流过 I_1 、 I_2 、 I_3 三个支路电流。电路中有三个回路 acdba、cefdc、aefba。

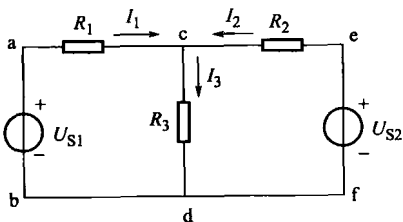


图 1-21 电路示例

一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (简写 KCL) 指出: 在任一瞬间, 对任一结点, 电路中流入某结点的电流总和等于流出该结点的电流总和, 即

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad (1-13)$$

式(1-13) 也可写成电流的代数和形式:

$$\sum I = 0 \quad (1-14)$$

式(1-14) 一般规定流入结点的电流在代数和中取正, 流出结点的电流在代数和中取负。当然也可以反之, 这并不影响定律的正确性。

图 1-21 中, 流入结点 c 的电流为 I_1 和 I_2 , 流出结点 c 的电流为 I_3 , 对于 c 点就有, $I_1 + I_2 = I_3$ 或 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ 。

基尔霍夫电流定律可以从一个结点推广至一个闭合面。如图 1-22 所示, 对闭合面 S 有

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0。$$

【例 1-4】 图 1-23 所示电路中已知: $I_{S1}=3\text{A}$, $I_{S2}=2\text{A}$, $I_{S3}=1\text{A}$ 。求电流 I_1 、 I_2 、 I_3 。

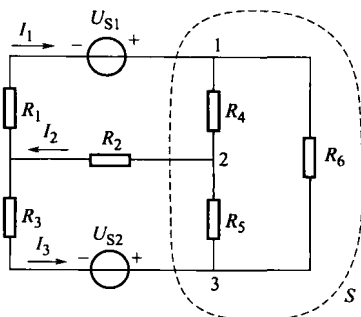


图 1-22 KCL 推广应用举例

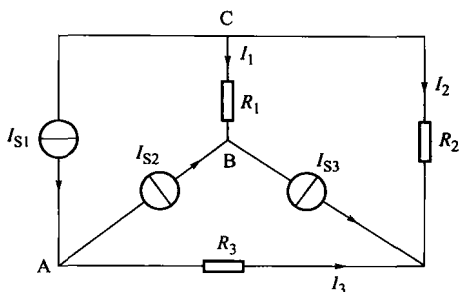


图 1-23 例 1-4 图

解 由结点 A 可得

$$I_{S1} - I_{S2} - I_3 = 0 \Rightarrow I_3 = I_{S1} - I_{S2} = 3 - 2 = 1 \text{ A}$$

由结点 B 可得

$$I_1 + I_{S2} - I_{S3} = 0 \Rightarrow I_1 = I_{S3} - I_{S2} = 1 - 2 = -1 \text{ A}$$

由结点 C 可得

$$-I_1 - I_2 - I_{S1} = 0 \Rightarrow I_2 = -I_1 - I_{S1} = -(-1) - 3 = -2 \text{ A}$$

由例 1-4 可以看出, 在基尔霍夫电流定律的运用中必须要清楚“两套符号”的问题。所谓“两套符号”就是指在运用基尔霍夫电流定律列方程时有物理量本身的正负值和代数和方程式中的正负号两套“+”、“-”符号。具体为: 物理量本身的正负值是由参考方向与实际方向的关系来决定的。当参考方向和实际方向相同时, 物理量本身为正值, 反之则为负值。列代数和方程式中的正负号是当电流参考方向指向结点取正, 流出结点取负。这两套符号不能混淆, 也不能互相替代, 具体看例 1-4 中 I_2 的求解。

二、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (简写 KVL) 指出: 在任一瞬时, 沿闭合回路绕行一周, 在绕行方向上的电位升之和等于电位降之和, 即

$$\sum U_{\text{升}} = \sum U_{\text{降}} \quad (1-15)$$

基尔霍夫电压定律也可叙述为: 在任一瞬时, 沿任一闭合回路绕行一周, 回路中各部分电压的代数和恒等于零。式(1-15)也可写成电压的代数和形式

$$\sum U = 0 \quad (1-16)$$

式(1-16)中当电压参考方向同循行方向时取正, 反之取负。循行方向的标注可以用虚线箭头在图中标出, 也可以以字母串的顺序表示方向。

例如在图 1-21 中, 按顺时针方向沿着回路 aefba 绕行一周, 在绕行方向上 U_{S1} 、 $I_2 R_2$ 为电位升, U_{S2} 、 $I_1 R_1$ 为电位降, 应用 KVL 有

$$U_{S1} + I_2 R_2 = U_{S2} + I_1 R_1$$

应用式(1-16)可写成 $U_{S2} - U_{S1} + I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0$, 对比两式完全是等同的。

由前所述, 电源两端电动势和端电压大小相等, 方向相反, 图 1-21 中电源两端若用电动势 E 来代替, 则上式可写成

$$E_2 - E_1 + I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0 \Rightarrow E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

由此推得

$$\sum E = \sum IR \quad (1-17)$$

式(1-17)为基尔霍夫电压定律的另一种常用形式。其中, 恒压源两端电压用 E 表示, 电阻两端电压用 IR 表示。代数和的正负号取值为: 电动势和电流方向同循行方向取正, 反之取负。

基尔霍夫电压定律可以由闭合回路推广到任意一个开口电路中（非闭合回路），开口电路的开口处由电压将其闭合即可。

如图 1-24 电路中 acdba 回路为一开口电路，其中 U_{cd} 电压，由式(1-16) 可得

$$\sum U = -U_{S1} + I_1 R_1 + U_{cd} = 0 \Rightarrow U_{cd} = U_{S1} - I_1 R_1$$

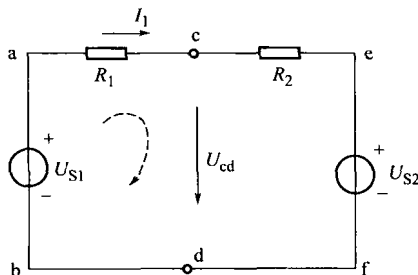


图 1-24 KVL 在开口电路中的应用

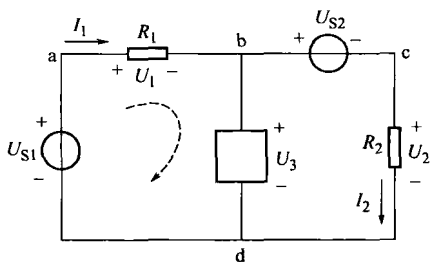


图 1-25 例 1-5 图

【例 1-5】 图 1-25 所示电路，设已知 $U_{S1} = 7V$ ， $U_{S2} = 4V$ ， $I_1 = 1A$ ， $R_1 = R_2 = 2\Omega$ ，求电压 U_3 和电流 I_2 。

解 各电流、电压的参考方向如图示，对回路 abda 按式(1-16) 有

$$U_1 + U_3 - U_{S1} = 0$$

$$U_1 = R_1 I_1 = 2 \times 1 = 2V$$

$$I_1 R_1 + U_3 - U_{S1} = 0 \Rightarrow U_3 = U_{S1} - I_1 R_1 = 7 - 1 \times 2 = 5V$$

对回路 abcda 列 KVL 方程有

$$I_1 R_1 + U_{S2} + I_2 R_2 - U_{S1} = 0$$

故

$$I_2 = \frac{U_{S1} - I_1 R_1 - U_{S2}}{R_2} = \frac{7 - 2 - 4}{2} = 0.5A$$

在基尔霍夫电压定律的运用中除要清楚“两套符号”外，还要弄清“两个方向”的问题。物理量本身的正值是由参考方向与实际方向的关系来决定的。当参考方向与实际方向相同时，物理量本身为正值，反之则为负值。在基尔霍夫电压定律中代数和方程式中的正负号和电压的参考方向和循行方向有关。电压参考方向和循行方向一致时取正，反之取负。所谓“两个方向”就是指参考方向和循行方向这两个方向。这两个方向都是人为任意设定的，初学者容易在运用基尔霍夫电压定律列方程时将它们混为一谈。

三、基尔霍夫定律的运用

基尔霍夫定律是制约电路中电压和电流的最基本定律，运用基尔霍夫定律分析电路也是电路分析中最基本的方法。

【例 1-6】 已知 $U_{S1} = 3V$ ， $U_{S2} = 5V$ ， $R_1 = R_2 = R_3 = 1\Omega$ ，分析图 1-26 所示电路各支路电流。

对图 1-26 所示电路，有两个结点，列 KCL 方程有

$$\text{结点 a:} \quad I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1-18)$$

$$\text{结点 b:} \quad -I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad (1-19)$$

比较式(1-18)和式(1-19)可知为同一个方程。所以对于两个结点的电路只能有一个独立方程，同样可以证明：对于具有 n 个结点的电路只能列出 $n-1$ 个独立的 KCL 方程。

对图 1-26 所示电路，有三个回路：

$$\text{回路 cabc} \quad R_1 I_1 + R_3 I_3 - U_{S1} = 0 \quad (1-20)$$

$$\text{回路 adba} \quad -R_2 I_2 + U_{S2} - R_3 I_3 = 0 \quad (1-21)$$

$$\text{回路 cadbc} \quad -U_{S1} + I_1 R_1 - I_2 R_2 + U_{S2} = 0 \quad (1-22)$$