



教育部世行贷款21世纪初高等教育教学改革项目研究成果

北京市高等教育精品教材立项项目

电工电子技术

第三版

叶 淬 主编



化学工业出版社



教育部世行贷款21世纪初高等教育教学改革项目研究成果

北京市高等教育精品教材立项项目

电工电子技术

第三版

叶 淬 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

“电工电子技术”是国家级教改项目的研究成果之一，是2002年高等教育北京市精品教材立项项目。第三版是在第二版使用的基础上修订而成的。

“电工电子技术”（第三版）共分十四章。前七章为“电工技术”部分，包括直流电路、单相和三相交流电路、电路的瞬变过程、磁路与变压器、异步电动机及控制、可编程序控制器。后七章为“电子技术”部分，包括二极管及整流电路、三极管及放大电路、集成运放、电力电子技术和数字电子技术。

该书配有思考题、复习提示、习题，帮助学生深入思考、融会贯通，有利于学生能力的培养。

该书内容精简、篇幅适中，尤其适合教改形势下学时少目标高的工科非电类专业本科、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

电工电子技术/叶淬主编. —3版. —北京: 化学工业出版社, 2009.5

教育部世行贷款21世纪初高等教育教学改革项目研究成果. 北京市高等教育精品教材立项项目

ISBN 978-7-122-05468-5

I. 电… II. 叶… III. ①电工技术-高等学校-教材
②电子技术-高等学校-教材 IV. TM TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 065576 号

责任编辑: 唐旭华
责任校对: 蒋 宇

文字编辑: 郝英华
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18 字数467千字 2009年7月北京第3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: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

《电工电子技术》教程以它优化整合的内容、精简的篇幅、注重能力培养的特色得到了众多师生的肯定，自2000年8月出版了第一版到第二版，至目前的第三版修订。在第三版出版前，我谨代表全体参编人员对大家的厚爱表示衷心的感谢！

《电工电子技术》（第一版）是1998~2000年北京市教改立项《探求“电工技术”、“电子技术”课程体系新模式》成果的体现。集中了参编老师多年来的教学心得。主要有以下特色。

1. 更新教学内容

本教材轻解题技巧、重基本概念，轻内部结构、重外部特性，轻原理分析、重应用技术，力求基本理论完整、信息量大、实践性强，以提高工科非电类专业“电工技术”和“电子技术”课程内容的知识层次，扩大知识范围。

本教材在“电工技术”部分主要增加了PLC，压缩了交流电路计算分析的内容；在“电子技术”部分主要精简了分立元件电路等非基本内容，加强了集成运放的应用，电力电子技术，特别是扩展和加深了数字电子技术的有关内容，以中规模集成电路为主展开内容的讲述。以便使学生在有限的学时内受益最大，为继续学习打下良好的基础。

2. 注重学生能力的培养

教材编写注意将培养学生能力的要求贯穿于整个教学之中。本教材通过“思考题”、“习题”、“复习提示”等多种途径帮助学生建立本课程学习的正确思路，引导他们深入地思考问题，锻炼分析问题的能力。

3. 精选内容缩减篇幅、适应少学时高目标的要求

随着教学改革的不深入，在对“电工技术”和“电子技术”内容和要求不断提高的同时，却对它的学时多有精简和压缩。本教材顺应了这一形势，将“电工技术”和“电子技术”合成“电工电子技术”；对课程的内容在选材上注意整体优化教学内容；精心组织内容的结构，对有些内容进行了有机地整合，缩短了篇幅；叙述中注意掌握内容展开的层次，力求简洁明了。

本书第一版由北京工商大学叶淬（编写第二、九、十章）担任主编。北京工商大学黎明编写第一、三、四、五章，乔继红编写第六、七章，陈岩编写第八、十一章，肖青编写第十二、十三、十四章。由北京工商大学孙骆生教授审核。教材的出版还得到了北京理工大学刘蕴陶教授、北京化工大学吕砚山教授、北京服装学院李慧副教授的众多帮助和指正；第一版的顺利出版受到北京工商大学有关领导及化学工业出版社的大力支持，在此一并表示感谢。

《电工电子技术》（第二版）是在第一版三年使用的基础上修订而成的，融入了国家级教改项目（世行贷款）《21世纪初一般院校工科人才培养模式改革的研究与实践》的研究成果，也是2002年高等教育北京市精品教材建设立项项目《电工学课程系列教材》中的主要部分。

第二版保持了第一版的特色，在结构和内容上未做大的改动。第二版的修订思想主要依据是：教材是教学信息的载体，教材是为学习者编写的，不应以教师的讲授为中心。充分考

考虑非电类学生的学习基础，注意学生的接受能力，叙述中加强了重点和难点的处理，充实了部分习题和思考题，由浅入深，循序渐进以适应不同的教学要求。

2009年在广泛听取使用单位意见的基础上又对《电工电子技术》进行了第三版的修订。修订后的第三版将弥补原《电工电子技术》编写时的一些不足，将更有利于学生的自学，使其更加好用好学。同时也增加了选用的“控制电机”章节，反映了最新的教改成果。

第三版的修订工作由叶淬、李慧负责完成。

《电工电子技术》是适应新世纪新要求的立体化教材，包括《电工学课程系列教材》中的一部分。目前《电工学课程系列教材》已经完成了《电工电子技术》、《电工电子技术实践教程》及《电工电子技术多媒体课件》三个部分，关于《电工电子技术学习指导》也正在酝酿中，预计2009年秋季可以完稿出版。《电工学课程系列教材》包括了该课程从理论教学到实践教学各个环节的教学教材，它们之间的配套使用，形成了理论教学和实践教学的相互配合和补充，加上教学手段的现代化一定会使得“电工学”整体教学质量明显提高。

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，如有需要可发送邮件至 txh@cip.com.cn 索取。

由于编者水平有限，书中缺点和错误难免，恳请广大师生提出批评和指正。

编 者
2009年3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、电路模型和理想的电路元件	1
三、电流和电压的方向	2
四、电气设备的额定值和电路的几种 状态	3
五、电功率和电能	3
第二节 电压源、电流源及其等效变换	4
一、电压源	4
二、电流源	5
三、电压源及电流源的等效互换	6
第三节 基尔霍夫定律	7
一、基尔霍夫电流定律 (KCL)	7
二、基尔霍夫电压定律 (KVL)	8
三、基尔霍夫定律的运用小结	9
第四节 支路电流法	10
第五节 结点电压法	12
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
第六节 叠加原理	13
第七节 戴维宁定理	16
第八节 非线性电阻简介	18
第九节 电路中电位的概念	19
习题	20
第二章 单相交流电路	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
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	26
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	30
第四节 正弦交流电路的分析	31
一、欧姆定律的相量形式和阻抗	31
二、阻抗的串并联	32
三、交流电路计算的原则	32
四、电压和电流相位差角 φ	34
第五节 正弦交流电路中的功率	34
一、瞬时功率	34
二、有功功率	35
三、无功功率	35
四、视在功率	36
第六节 提高功率因数	36
一、提高功率因数的意义	36
二、提高功率因数的方法	37
第七节 电路中的串联谐振	39
一、串联谐振条件	39
二、串联谐振的特点	39
三、串联谐振曲线	40
第八节 非正弦周期电流电路	40
一、非正弦周期量的分解	40
二、非正弦周期电流线性电路的分析 计算	41
三、非正弦周期电流电路中有有效值及平均 功率的计算	43
习题	44
第三章 三相电路	47
第一节 三相电源	47
一、三相电动势的产生	47

二、对称三相电源	48	第四节 安全用电常识	57
三、三相电源的联结方式	48	一、触电	57
第二节 三相电路的计算	50	二、电器设备的接地与接零保护	58
一、概述	50	三、静电防护	59
二、三相负载的星形联结	50	四、防火与防爆	59
三、三相负载的三角形联结	54	习题	60
第三节 三相负载的功率	56		
第四章 电路的瞬变过程	62		
第一节 电路瞬变过程的概述	62	方法	68
一、瞬变过程	62	第四节 RL 电路的瞬变过程	69
二、换路定律及瞬变过程的初始值	62	一、 RL 电路的瞬变过程	69
第二节 RC 电路的瞬变过程	64	二、 RL 电路的“放电”	72
一、 RC 电路瞬变过程	64	第五节 微分和积分电路	73
二、瞬变过程的三种类型	66	一、微分电路	73
三、时间常数 τ 的物理意义	67	二、积分电路	74
第三节 一阶线性电路瞬变过程的一般求解		习题	75
第五章 磁路与变压器	78		
第一节 磁路概述	78	一、绕组的极性与正确接线	85
一、磁场的基本物理量	78	二、同名端的测定方法	86
二、磁路的基本定律	78	第五节 三相变压器	86
三、直流磁路的工作特点	79	第六节 变压器的额定值	87
四、交流磁路的工作特点	79	一、额定电压 U_{1N} 和 U_{2N}	87
第二节 变压器的基本结构	80	二、额定电流 I_{1N} 和 I_{2N}	87
一、铁芯	80	三、额定容量 S_N	87
二、绕组	81	四、额定频率 f_N	87
第三节 变压器工作原理	81	第七节 自耦变压器	87
一、空载运行	81	第八节 仪用互感器	88
二、负载运行	82	一、电压互感器	88
三、阻抗变换	84	二、电流互感器	88
第四节 变压器绕组的极性	85	习题	89
第六章 异步电动机及其控制	91		
第一节 三相异步电动机的结构	91	一、型号	98
一、定子	91	二、额定功率 P_N	98
二、转子	91	三、额定电压 U_N	98
第二节 三相异步电动机的转动原理	92	四、额定电流 I_N	99
一、旋转磁场	92	五、额定转速 n_N	99
二、三相异步电动机的转动原理	94	六、绝缘等级	99
第三节 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	95	七、工作方式	99
一、电磁转矩	95	八、功率因数	99
二、机械特性	96	九、效率	99
第四节 三相异步电动机的铭牌和技术数据	98	第五节 三相异步电动机的启动和调速	100
		一、三相异步电动机的启动	100
		二、三相异步电动机的调速	101

第六节 单相异步电动机	102	一、三相异步电动机的直接启动控制	
一、电容分相式异步电动机	102	电路	107
二、罩极式异步电动机	103	二、三相异步电动机的正反转控制	108
第七节 常用低压控制电器	103	三、三相异步电动机的 Y- Δ 启动控制	
一、闸刀开关	103	电路	109
二、自动空气断路器	104	四、顺序控制电路	109
三、交流接触器	104	五、行程控制电路	110
四、按钮	105	* 第九节 控制电动机	111
五、热继电器	105	一、伺服电动机	111
六、时间继电器	105	二、测速发电机	112
七、行程开关	106	三、力矩式自整角机	113
八、熔断器	107	四、步进电动机	114
第八节 三相异步电动机的继电接触器		习题	116
控制	107		
* 第七章 可程序控制器	118		
第一节 PC 的特点与基本结构	118	第三节 PC 的编程语言	122
一、PC 的特点	118	一、两种常用的编程语言	122
二、PC 控制系统的组成	118	二、PC 的基本指令	123
三、可程序控制器的组成	119	第四节 可程序控制器的应用举例	125
第二节 可程序控制器的工作原理	121	一、三相异步电动机直接启动控制	125
一、输入采样阶段	122	二、异步电动机的正反转控制	126
二、程序执行阶段	122	三、异步电动机的 Y- Δ 启动控制	127
三、输出刷新阶段	122	习题	128
第八章 半导体二极管及整流电路	129		
第一节 半导体导电特性及 PN 结	129	一、电容滤波	140
一、半导体的导电特性	129	二、复式滤波	142
二、PN 结及其单向导电性	130	第四节 稳压管及稳压电路	142
三、半导体二极管	131	一、稳压管	143
第二节 二极管整流电路	134	二、稳压管的简单稳压电路	143
一、单相整流电路	134	三、其他稳压电路	144
* 二、三相桥式整流电路	137	习题	146
第三节 滤波电路	140		
第九章 半导体三极管和放大电路	150		
第一节 半导体三极管	150	二、分压式偏置电路的微变等效电路	159
一、三极管的结构	150	三、分压式偏置电路的性能指标	159
二、三极管的电流控制作用	150	第四节 射极输出器	161
三、三极管的特性曲线	151	一、电路的构成	161
四、三极管的主要参数	152	二、电路的分析	161
第二节 交流放大电路	153	三、射极输出器的应用	163
一、直流偏置电路	153	第五节 放大电路中的负反馈	165
二、交流通道及放大原理	155	一、放大电路中的负反馈	165
第三节 微变等效电路分析法	158	二、负反馈类型	166
一、三极管的微变等效电路	158	三、反馈电路举例分析	166

四、负反馈对放大电路工作性能的影响	167	一、什么叫零点漂移?	172
第六节 功率放大电路	169	二、差动放大电路抑制零点漂移的原理	172
一、功率放大电路的概述	169	三、差动放大电路的工作原理	172
二、互补对称功率放大电路	170	四、差动放大电路的输入输出方式	174
三、功率放大电路中的复合管	171	习题	175
第七节 差动放大电路	172		
第十章 集成运算放大器	179		
第一节 集成运算放大器的概述	179	第四节 集成运算放大器在信号测量方面的应用	186
一、集成运算放大器的组成	179	一、电压测量	186
二、集成运算放大器的主要参数	180	二、微电流的测量	186
三、理想集成运算放大器	180	三、测量放大器	187
第二节 集成运算放大器的输入方式	181	第五节 集成运放的非线性应用	188
一、反相输入	181	一、单限电压比较器	188
二、同相输入	182	二、迟滞电压比较器	189
三、差动输入	183	第六节 集成运算放大器在信号产生方面的应用	190
第三节 集成运算放大器在信号运算方面的应用	184	一、正弦信号发生器	191
一、比例运算	184	二、方波信号发生器	192
二、加法运算	184	三、三角波信号发生器	193
三、减法运算	185	习题	195
四、积分运算	185		
五、微分运算	185		
第十一章 电力电子技术及应用	199		
第一节 晶闸管的工作原理及参数	199	一、相控整流电路	202
一、普通晶闸管的结构与工作原理	199	二、单相桥式逆变器	204
二、普通晶闸管的特性与参数	200	* 第三节 新型电力电子开关器件	205
三、普通晶闸管的触发电路	201	一、功率 MOSFET	205
四、可关断晶闸管 (GTO)	202	二、绝缘栅双极晶体管	206
第二节 晶闸管的应用举例	202	习题	208
第十二章 逻辑门和常用组合逻辑电路	209		
第一节 数字电路的基本单元——逻辑门	209	第三节 逻辑代数及其化简	215
一、与运算和与门	209	一、逻辑代数的基本定律	216
二、或运算和或门	210	二、利用布尔代数化简逻辑函数	216
三、非运算和非门	210	第四节 组合逻辑	218
四、其他逻辑运算和复合门	210	一、组合逻辑的分析	218
第二节 集成门电路	211	二、组合逻辑的设计	218
一、TTL 与非门电路	212	三、常用组合逻辑电路	220
二、三态输出门电路	213	习题	227
三、CMOS 集成逻辑门	214		
第十三章 触发器、时序电路及其他集成器件	231		
第一节 双稳态触发器	231	二、基本 RS 触发器	231
一、双稳态触发器的基本性能	231	三、钟控 RS 触发器	232

四、边沿触发器	233	一、集成 555 定时器	244
五、触发器逻辑功能的转换	234	二、用 555 定时器构成施密特触发器	245
第二节 寄存器与移位寄存器	235	三、用 555 定时器构成单稳态触发器	246
一、寄存器	235	四、用 555 定时器构成多谐振荡器	247
二、移位寄存器	236	五、555 定时器的应用举例	249
第三节 计数器	237	* 第五节 可编程逻辑器件 (PLD)	250
一、同步计数器	238	一、概述	250
二、异步计数器	239	二、PLD 的两种基本类型	251
三、中规模集成计数器	240	三、PLD 器件的应用举例	255
第四节 集成 555 定时器的原理及应用	244	习题	259
第十四章 数模、模数转换电路	263		
第一节 数模转换电路	263	一、集成 ADC 的电路形式和工作原理	266
一、DAC 的电路形式和工作原理	263	二、逐次渐近型 A/D 转换器	266
二、集成 DAC 及主要参数	264	三、集成 ADC 及主要参数	267
第二节 模数转换电路	266	习题	268
附录	270		
部分习题参考答案	274		
参考文献	278		

第一章 直流电路

本章主要介绍电路的基本概念、电压源与电流源及其等效变换、基尔霍夫定律、支路电流法、结点电压法、叠加原理、戴维宁定理。

直流电路中的很多概念、定理及解题方法也适用于正弦交流电路及其他各种线性电路。故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

电路是为了实现某种功能，由各种电气设备和器件按一定方式联接，为电流提供通路的整体。为不同目的而设计的实际电路种类繁多，但其作用主要可以分为两大类：其一为电能的传输和转换，如发电、供电系统、电力拖动、电气照明等；其二为传递和处理信号，如各种电信号的产生、放大、整形、数字信号的运算、存储等。一般而言，第二类电路中也伴随着能量的传输和转换，但数量及能耗相对较小。

二、电路模型和理想的电路元件

功能各异的实际电路，需要的元件及器件各不相同。电源、变压器、电动机、电灯、半导体器件、电阻、电感、电容等均为电路中常见的器件，如图 1-1(a) 所示手电筒电路和图 1-1(b) 所示 H 形日光灯电路。对于某一具体器件来说，其电磁性质可能较为复杂。就以最简单的白炽灯为例，它通电后能将电能转化为光能和热能，这种消耗电能的性质可看做具有电阻的性质，与此同时由于有电流的通过，在其周围还会产生电场和磁场，储存电场能和磁场能，所以还具有电容和电感的性质，但在所有这些性质中占主导地位的是电阻性质，其他性质对电路研究影响甚微，由此可将白炽灯看做是一电阻元件。

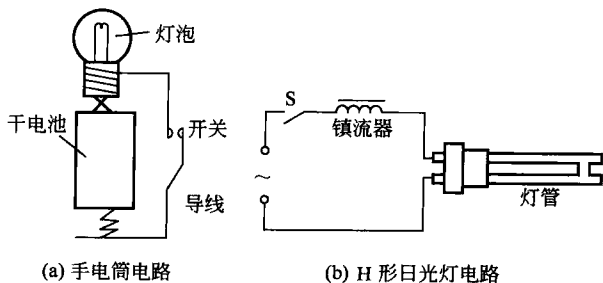


图 1-1 电路举例

在实际电路分析中必须抓住其主要电磁特性，忽略其次要因素，这样才能避免将问题复杂化，使电路分析切实可行。首先需将实际元件理想化（或称模型化），例如将白炽灯看做理想电阻，将含有内阻的干电池看做由理想的直流电压源和一理想电阻 R_0 的串联，将低频下的电感看做理想电感与电阻的串联。将实际电路理想化后用一些理想电路元件等效替代各实际电路元件，由此而产生的电路称为电路模型。对图 1-1 所示电路，其电路模型如图 1-2 所示。今后所画的电路图都是电路模型。

后面所讲的电路元件均指理想电路元件，简称电路元件。常用的电路元件有电压源、电

流源、电阻元件、电感元件和电容元件。前两种元件是电路中提供电能的元件，故称为**有源元件**；后三种均不产生电能，故称为**无源元件**。无源元件中又分为**耗能元件**和**储能元件**两类。前者如电阻器，后者如电感元件和电容元件，这两种元件分别可将电能转化为磁场能和电场能储存起来。常用电路元件符号如图 1-3 所示。在直流电路中，电路达稳态时，电感元件上的感应电动势为零，电容元件的充电电流为零，因此只涉及电阻元件。

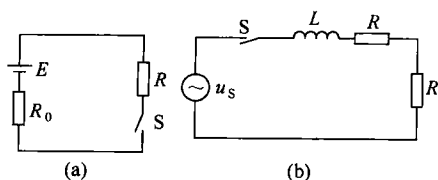


图 1-2 图 1-1 的电路模型

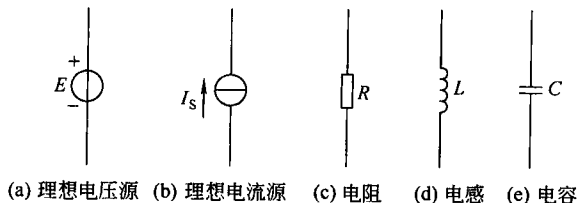


图 1-3 理想电路元件

三、电流和电压的方向

1. 电流

习惯上规定以正电荷移动的方向，即负电荷（电子）移动的相反方向为电流的方向（实际方向），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；对于交流电路，其电流的实际方向是随时间交变的，也无法用一个箭头来表示其实际方向。为分析方便，总是任意选择一个方向作为电流的**参考方向**（在电路图中用箭头表示）。注意，电流的参考方向是人为任意规定的，在分析和计算电路时，参考方向一旦选定，就不再变动。而参考方向有可能与实际方向一致，也可能与实际方向相反，于是今后电流用代数表示。若电流的实际方向和所选的电流参考方向一致，则此电流为正值；若与所选电流参考方向相反，则电流为负值。

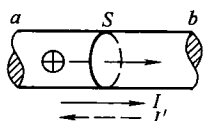


图 1-4 导体中的电流

例如在图 1-4 所示导体 ab 中，每秒钟有 1C （库仑）正电荷由 a 移到 b ，如选实箭标所示方向为参考方向，则 $I=1\text{A}$ ；如选定虚箭标所示方向为参考方向，则 $I'=-1\text{A}$ （安培）。本书中电路图上所标的电流方向均为参考方向。根据电流 I 的参考方向及其数值的正负可确定电流的实际方向。如果电路中没有给定电流的参考方向，在解题时可自行任意给定电流参考方向，并标明在电路图中。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。

2. 电压

习惯上规定电压的实际方向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，通常人为的任意对电压规定一方向，这种人为规定的电压方向称为**电压参考方向**。其方向可以是任意的，因此参考方向可能与实际方向相同，也可能相反。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，其值为负。只有在标明电压参考方向的前提下才可能根据电压值的正负确定电压的实际方向。

在电路中，电压的参考方向通常用正（+）、负（-）极性来表示，称为**参考极性**。代表着参考方向的箭头从正（+）极性端指向负（-）极性端。例如图 1-5 所示，电压的参考极性为 B （+）， A （-）， $U=3\text{V}$ （伏特）说明电压的实际方向与参考方向一致，大小为 3V ；如 $U=-3\text{V}$ 则说明电压的实际方向与参考方向相反（即实际是 A 为+， B 为-），大小为 3V 。

此外电压的参考方向还可以用双下标表示，如 U_{AB} 表示 A 和 B 之间的电压的参考方向

由 A 指向 B。

3. 关联参考方向

对一段电路或一个元件而言, 其电压的参考方向和电流的参考方向可以各自独立地加以任意规定。而对电源以外的电路, 一般电流从高电位流向低电位。如果在规定电压、电流参考方向时遵循这一习惯, 规定电流的参考方向从标以电压“+”极性的一端流向标以“-”极性的一端, 即电流的参考方向与电压的参考方向一致, 则把电流和电压的这种参考方向称为**关联参考方向** (如图 1-6 所示), 否则称为**非关联参考方向** (如图 1-7 所示)。在关联参考方向下, 欧姆定律可写为 $U=RI$; 而在非关联参考方向下欧姆定律应写为 $U=-RI$ 。

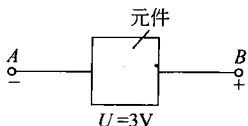


图 1-5 电压及其参考方向

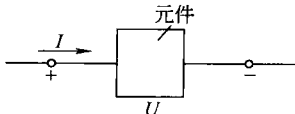


图 1-6 电压和电流的关联参考方向

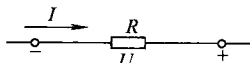


图 1-7 电压和电流的非关联参考方向

四、电气设备的额定值和电路的几种状态

1. 额定值

接在电路中的电气设备及元件, 其工作电流、电压和功率等都有一个规定的限额值, 这个数值称为**额定值**。按照额定值使用电气设备及元件可以保证安全可靠, 充分发挥其效能, 并且保证正常的使用寿命。额定值通常用 I_N , U_N , P_N 等表示, 这些额定值常标记在设备的铭牌上。电气设备和器件应尽量工作在额定状态, 这种状态称为**满载**。当电流和功率低于额定值的工作状态叫**轻载**; 高于额定值的工作状态叫**过载**。

2. 有载工作状态

将图 1-8 所示电路中的开关 S 闭合, 电源与负载接通, 电路中有电流流过, 这种工作状态叫**有载工作状态**。电流大小为

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

R 愈小, I 愈大。值得注意的是, 负载大小指的是电流 I 的大小, 并不是电阻的大小。如当 $I < I_N$ 时为轻载, $I > I_N$ 时为过载。

3. 开路

当图 1-8 所示电路中的开关 S 断开时, 电路处于开路状态, 电路无电流流过, $I=0$ 。这种状态又叫**空载**。开路时可认为外电路电阻为无穷大。

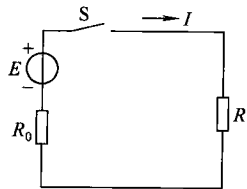


图 1-8 简单电路

4. 短路状态

在图 1-9 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 cd 等电位。电流 I 全部从导线流过 I_R 为 0, 这种情况称为 cd 处短路。此时 $I = \frac{E}{R_0}$, 由于电源内阻 R_0 很小, 故 I 很大, 这会引起电源或导线绝缘的损坏。

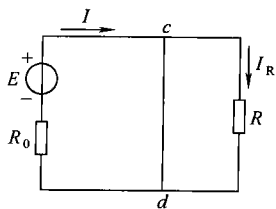


图 1-9 短路

五、电功率和电能

消耗电能的电气设备及器件被称为**负载**。例如, 电灯、电炉、电动机等。而负载所谓消耗电能是将电能转换为其他形式的能量, 如光能、热能、机械能等。对电源来说 (如电压源、电流源), 在

电路中通常是提供（或释放）电能的，如发电机将机械能转换为电能，电池将化学能转换为电能等。无论是负载还是电源，在电路模型（电路图）中都可看做电路元件。电路元件在单位时间内吸收或释放的电能称为电功率。或者说电能对时间的变化率为电功率。在电工学中，电功率简称功率，用 P 表示，单位为瓦（W）。在直流电路中电功率的计算公式为

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

式(1-1)在关联参考方向下，若电压和电流的实际方向一致，则电功率 P 为正，反之为负。 P 为正，表示该部分电路吸收电功率（如电阻消耗电功率，其端电压及电流的实际方向总是一致的）； P 为负则表示该部分电路输出电功率（如供电电源）。

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。

$$A=Pt=UI t \quad (1-2)$$

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）。

思考题

- 1-1-1 简述电路三种状态的特征及额定值的含义。
 1-1-2 有一台直流发电机，其铭牌上标有 220V，53.8A。试问什么是发电机的空载运行、轻载运行、满载运行和过载运行？负载的大小，一般指什么而言？
 1-1-3 额定电压 220V，额定功率为 60W 的灯泡，它的额定电流是多少？如果接到 380V 和 127V 电源上使用，各有什么问题？
 1-1-4 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 100Ω 、1W 的电阻，它允许流过的最大电流是多少？

第二节 电压源、电流源及其等效变换

一个实际电源可以用两种不同的电路模型来表示。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

任何一个电源，例如发电机，电池或各种信号源，都含有电动势 E 和内阻 R_0 。在电压

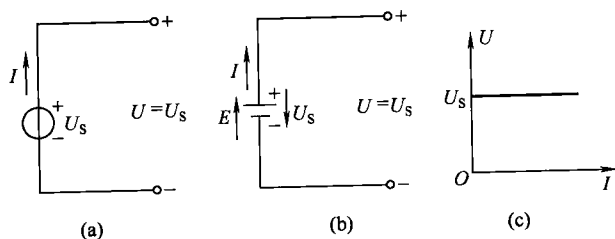


图 1-10 理想电压源

源模型中往往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。所谓理想电压源在直流电路中是指它的端钮电压总能保持某一恒定值，而与通过它的电流无关（简称恒压源）。图 1-10(a) 为理想电压源的一般电路符号，图 1-10(b) 是电池符号，专指理想直流电压源。注意理想电压源端电压 U_s 的

方向与电动势 E 之间的关系是：方向相反，大小相等，如图 1-10(b) 中 $E=U_s$ 电动势的方向指电位升的方向，而 U_s 的方向指电位降的方向。理想电压源元件的伏安特性可写为

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

图 1-10(c) 为理想直流电压源的外特性曲线。

实际电源的电压源模型如图 1-11 所示。其伏安特性为

$$U = U_S - R_0 I \quad (1-4)$$

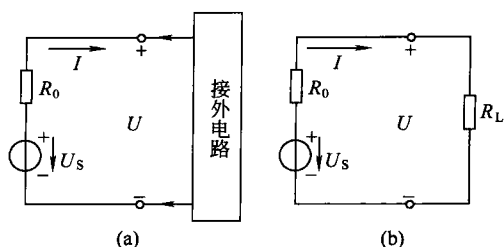


图 1-11 电压源电路

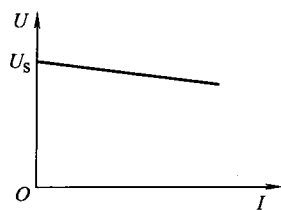


图 1-12 电压源的伏安特性

其特性曲线如图 1-12 所示, 当 $I=0$ 时 $U=U_S$, 随着电流 I 的增大 U 减小, 是一条始于 U_S 向下倾斜的直线。如所带负载为电阻 R_L , 则负载端的伏安特性为

$$U = R_L I \quad (1-5)$$

$$I = \frac{U_S}{R_0 + R_L} \quad (1-6)$$

式中, U_S , R_0 均为定值。电流 I 的大小取决于负载电阻, R_L 愈大, 电流 I 愈小, R_L 愈小, I 愈大。

二、电流源

在直流电路中, 电流源也是实际电源的一种模型。理想电流源的电路符号如图 1-13(a) 所示, 电流用大写字母 I_S 表示。其外特性是

$$I = I_S$$

图 1-13(b) 给出的是理想电流源的外特性曲线。理想电流源输出的电流是恒定的, 故称恒流源。它的端电压值取决于外电路的情况。

如果用电流源来模拟实际电源, 应采用理想电流源与内部损耗电阻的并联组合, 如图 1-14(a) 所示。此时, 电路中电压、电流的约束关系为

$$I = I_S - \frac{U}{R'_0} \quad (1-7)$$

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

其特性曲线如图 1-14(b) 所示。

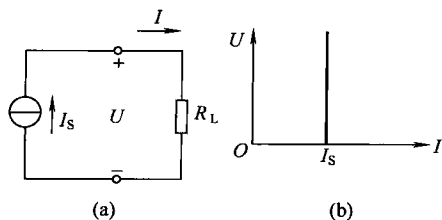


图 1-13 理想电流源

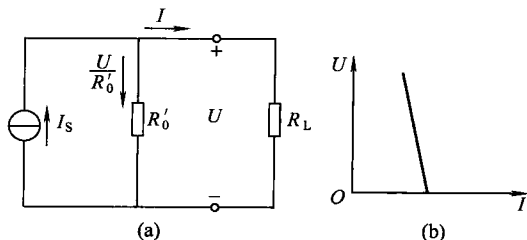


图 1-14 电流源

【例 1-1】 图 1-15 所示电路, 已知开路电压 $U_0 = 110\text{V}$, 又负载电阻为 10Ω 时, $I = 10\text{A}$ 。求 (1) 理想电压源电压 U_S 及内阻 R_0 各为多大? (2) 负载电阻 R_L 为多大值时负载 I 为 5A ?

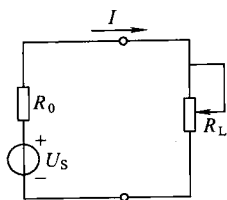


图 1-15 例 1-1 电路

解 (1) 因为开路时电压 $I=0$

所以 $U_S = U_0 = 110\text{V}$

又 $U_S = (R_0 + R_L) I$ (1-9)

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

(2) 由式(1-9)可得

$$R_L = \frac{U_S}{I} - R_0 = \frac{110}{5} - 1 = 21\Omega$$

【例 1-2】有一电流源，当输出端短路时，短路电流 $I=5\text{A}$ ；当负载为 5Ω 时，负载电流 $I=4\text{A}$ 。求 (1) 理想电流源电流 I_S 及内阻 R'_0 ；(2) 欲使负载电流 $I=2\text{A}$ ，负载电阻 R_L 等于多少？(如图 1-16 所示)

解 (1) 当输出端短路时 $I_S = I = 5\text{A}$

又 $R_L = 5\Omega$ 时

$$U = R_L I = 5 \times 4 = 20\text{V}$$

$$I_0 = I_S - I = 5 - 4 = 1\text{A}$$

$$R'_0 = \frac{U}{I_0} = \frac{20}{1} = 20\Omega$$

(2) $R_L I = R'_0 I_0 = R'_0 (I_S - I)$

$$R_L = \frac{R'_0 (I_S - I)}{I} = \frac{20 \times (5 - 2)}{2} = 30\Omega$$

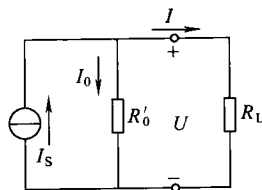


图 1-16 例 1-2 电路

三、电压源及电流源的等效互换

前面讲过，电压源及电流源是电源的两种表示形式，这两种形式实际上是可以等效互换的。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

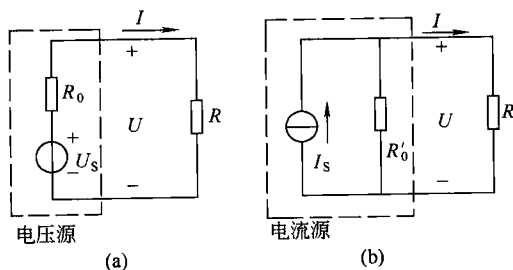


图 1-17 电源的两种模型

$$\text{电压源模型 } I = \frac{U_S}{R_0} - \frac{U}{R_0} \quad (1-10)$$

$$\text{电流源模型 } I = I_S - \frac{U}{R'_0} \quad (1-11)$$

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

$$\left. \begin{aligned} R'_0 &= R_0 \\ I_S &= \frac{U_S}{R_0} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

实际上凡是理想电压源 U_S 与电阻串联的电路都可与理想电流源 I_S 与电阻并联的电路等效互换，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。

值得注意的两点如下。

(1) 等效变换时对外电路的电压和电流的大小和方向都不变。电流源的电流流出端应与电压源的正极性端相对应。

(2) 等效变换是对外电路等效，对电源内部并不等效。例如当外电路开路时电压源模型中无电流，而电流源模型中仍有内部电流。此时，恒压源既不发出功率，电阻也不吸收功率，而在等效的电流源中，恒流源

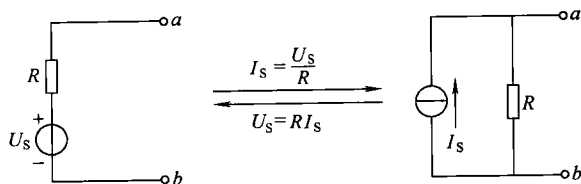


图 1-18 电压源与电流源的等效交换

发出功率，并且全部为并联电阻所吸收。

【例 1-3】 求图 1-19(a) 中的电流 I 。

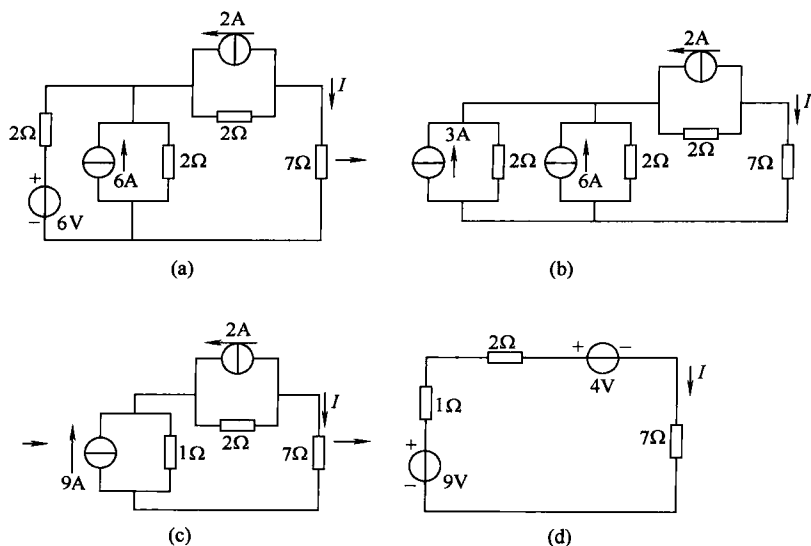


图 1-19 例 1-3 图

解 利用电源等效变换，将图 1-19(a) 的电路简化成如图 1-19(d) 的单回路电路。变换过程如图 1-19(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 3V 电池可否与 1.5V 电池并联使用？为什么？

1-2-2 实验测得某直流电源的开路电压 $U_0 = 16\text{V}$ ，内阻 $R_0 = 1\Omega$ ，试在 $U-I$ 平面上绘出此电源的外特性曲线，并作出此电源的两种电路模型。

第三节 基尔霍夫定律

由若干电路元件按一定的联接方式构成电路后，电路中各部分的电压、电流必然受到两类约束，其中一类的约束来自元件的本身性质，即元件的电压电流关系；另一类约束来自元件的相互联接方式，即基尔霍夫定律。基尔霍夫定律又分为基尔霍夫电流定律和电压定律，它是分析电路的根据。

电路中每一个含有电路元件的分支称为支路。同一支路上的各元件流过相同的电流，即支路电流。电路中三条或三条以上支路的联接点称为结点。例如图 1-20 所示电路有三条支路，两个结点，即结点 a 和 b 。

一、基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律 (简写 KCL) 指出，电路中任一结点，在任一瞬间，流入结点的电流总和等于流出该结点的电流总和。也就是说电荷在结点处，不会消失，也不会

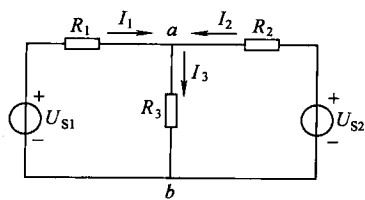


图 1-20 电路示例