



普通高等教育“十一五”规划教材

电工学

行小帅 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”规划教材

电 工 学

主 编	行小帅	
参 编	张清泉	杨培林
	李 竹	曳永芳
主 审	段新文	蒋天发



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据高等学校电工课程教学指导委员会“关于面向 21 世纪电工电子系列课程和教学内容改革的几点建议”并结合高等学校特点和我们多年来的教学实践经验编写而成的。主要特点：加强基础，精选内容，注重应用，引导创新，讲清概念，注重能力培养，利于教学，便于自学。

全书共分 11 章，内容包括：直流电路分析、电路暂态分析、正弦交流电路、三相交流电路、变压器、电动机、电气自动控制、半导体器件及特性、基本放大电路、集成运算放大电路、直流稳压电源等。

本书编写力求结构合理，思路清楚，概念清晰，深入浅出，通俗易懂，注意各章节之间、本教材和相关教材之间的衔接和联系。书中的思考题与习题难易度适中，附有习题答案，大部分章末都用 Multisim 7 软件对典型电路做了仿真分析。

本书可作为全国高等学校、高等师范院校和综合院校的非电类各专业的电工学教材，也可供有关科技人员学习参考。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载或发邮件到 Edmondyan@sina.com Edmondyan@hotmail.com 索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工学/行小帅主编. —北京：机械工业出版社，2009.3

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-111-26182-7

I. 电… II. 行… III. 电工学—高等学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 014275 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：贡克勤 版式设计：霍永明 责任校对：陈延翔

封面设计：王伟光 责任印制：杨 曦

唐山丰电印务有限公司印刷

2009 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.25 印张 · 424 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-26182-7

定价：30.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010)68326294

购书热线电话：(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010)88379727

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着高等教育发展和改革的不断深入, 各校的教学计划都在不断地调整和完善。我们根据教育部高等学校工科电工课程教学指导委员会“关于面向 21 世纪电工电子系列课程和教学内容改革的几点建议”和新的课程体系与教学要求, 总结了多年从事电路和电子技术教学工作的经验, 编写了本教材。本书将非电类专业的“电路”、“电机”与“模拟电路”合并成一门课程, 以适应不同专业的教学计划, 较大地压缩了教学时数。编写的指导思想是: 加强基础, 精选内容, 注重应用, 引导创新, 讲清概念, 注重能力的培养, 利于教学, 便于自学。

“电工学”是高等学校非电类专业的技术基础课程。通过本课程的学习, 使学生能够掌握电工技术必要的基本理论、基本知识、基本技能和基本分析方法; 能够了解电工技术的发展概况; 具有独立分析问题和解决问题的能力; 为后续课程学习以及毕业后从事有关电工技术工作、科学研究和教学工作打下坚实的基础; 书中通过实例、例题和习题说明理论的实际应用, 使学生对所学的理论更好的联系实际, 学以致用。

电路和电机部分(第 1~7 章), 根据各专业的需要, 选出最基本的教学内容重点阐述, 减少复杂的数学推导, 以保证学生掌握电路的基本工作原理及其基本的分析方法。同时, 在第 1 章中讨论了惠斯登电桥问题的一题多解和一题多变; 在第 3 章中讨论了正弦交流电路的分析方法; 在第 7 章中讨论了可编程控制, 这种讨论有益于拓宽学生的思路, 启迪思维, 贯穿所学的知识和方法, 培养分析问题和解决问题的能力。

模拟电路基础部分(第 8~11 章), 采用精选教学内容, 注重应用的原则。第 8 章集中讲述了半导体器件; 第 9 章重点讲述了基本放大电路, 包括三种基本放大电路、场效应晶体管放大电路、多级放大电路、差动放大电路、功率放大电路; 第 10 章主要讲述了集成运算放大电路, 包括负反馈放大电路、集成运算放大电路、正弦振荡电路; 第 11 章讲述了直流稳压电源。

建议本课程学时数为 54 学时。由于本课程涉及的内容较多, 有些内容不必全在课堂上讲授, 可在老师的指导下让学生通过自学掌握, 并建议配套使用现代化教学手段, 以提高教学效率。

书中的例题和习题与教材的内容紧密配合, 难易适当。书末附有部分习题答案, 以供读者参考。同时大部分章节都用 Multisim 7 软件对典型电路做了仿真分析。

全书共分 11 章, 行小帅编写第 1、4 章; 杨培林编写第 2、5 章和附录; 曳永芳编写第 3 章; 李竹编写第 6、7 章; 张清泉编写第 8、9、10、11 章; 由行小帅担任主编, 负责全书的组织、修改和定稿工作。本书的编写得到山西师范大学质量工程项目(SD2008KCZ-16)资助。

本书由青海师范大学段新文教授、中南民族大学蒋天发教授担任主审, 对全书的审定提出了许多建设性的意见; 参加审稿的还有皖西学院张晓东教授、绥化学院齐吉泰教授、运城学院王金来教授、合肥师范学院胡庆华副教授、长治学院琚爱堂副教授、大同大学孙祝副教授。

授、包头师范学院孙秀萍副教授、山西大学工程学院赵巧娥副教授、吕梁高专甄利玲副教授、忻州学院王爱珍讲师、晋中学院刘秀军讲师。本书的编写工作得到了机械工业出版社贡克勤编审的大力支持和帮助，编者在此一并致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限及编写时间仓促，书中难免存在错误和不妥之处，诚恳地希望使用本书的老师 and 读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 电路的基本分析方法	1
1.1 电路的组成与模型	1
1.1.1 电路的组成	1
1.1.2 电路模型	2
1.2 电路中的基本物理量	2
1.2.1 电流及其正方向	2
1.2.2 电压及其正方向	3
1.2.3 电位	4
1.2.4 电动势	5
1.2.5 电功率	5
1.3 基尔霍夫定律	6
1.3.1 基尔霍夫电流定律	6
1.3.2 基尔霍夫电压定律	7
1.4 电路的一般分析方法	8
1.4.1 支路电流法	8
1.4.2 网孔电流法	11
1.4.3 节点电压法	13
1.5 电路的等效变换	16
1.5.1 电压源、电流源及其等效变换	16
1.5.2 电阻的星形联结与三角形联结的等效变换	19
1.6 电路定理	23
1.6.1 叠加定理	23
1.6.2 替代定理	25
1.6.3 戴维南定理和诺顿定理	26
1.7 惠斯登电桥问题的讨论	30
1.7.1 惠斯登电桥	30
1.7.2 惠斯登电桥问题的一题多解	31
1.7.3 惠斯登电桥问题的一题多变	34
1.8 用 Multisim 7 对电路进行仿真	37
本章小结	38
思考题与习题	39
第 2 章 电路的暂态分析	46
2.1 基本概念	46
2.1.1 动态电路和暂态分析	46
2.1.2 激励和响应	46

2.2 电容与电感	47
2.2.1 电容	47
2.2.2 电感	49
2.3 RC 电路的暂态分析	51
2.3.1 RC 电路的零输入响应	51
2.3.2 RC 电路的零状态响应	52
2.3.3 RC 电路的完全响应	52
2.4 RL 电路的暂态分析	53
2.4.1 RL 电路的零输入响应	54
2.4.2 RL 电路的零状态响应	54
2.4.3 RL 电路的完全响应	55
2.5 一阶电路的三要素分析法	55
2.6 Multisim 7 在电路暂态过程中的应用	57
本章小结	59
思考题与习题	59
第 3 章 单相正弦交流电路	62
3.1 正弦交流电路的基本概念	62
3.1.1 正弦量的三要素	62
3.1.2 正弦交流电的有效值	63
3.2 正弦交流电的相量表示法	64
3.2.1 正弦量的相量表示法	64
3.2.2 基尔霍夫定律的相量形式	68
3.3 单一参数交流电路	68
3.3.1 纯电阻电路	68
3.3.2 纯电感电路	69
3.3.3 纯电容电路	70
3.4 RLC 串、并联交流电路	71
3.4.1 相量模型	71
3.4.2 RLC 串联交流电路	71
3.4.3 RLC 并联交流电路	74
3.5 正弦交流电路的分析计算	76
3.6 正弦交流电路的功率及功率因数的提高	82
3.6.1 瞬时功率	82
3.6.2 有功功率	83
3.6.3 无功功率	83

3.6.4 视在功率、复功率	83	5.4 变压器的工作原理	125
3.6.5 功率因数的提高	85	5.4.1 电压变换	125
3.7 电路中的谐振	87	5.4.2 电流变换	127
3.7.1 串联谐振	87	5.4.3 阻抗变换	128
3.7.2 并联谐振	90	5.4.4 功率传递	129
3.8 非正弦周期交流电路	91	5.4.5 变压器的同名端	130
3.8.1 非正弦周期量的分解	91	5.5 三相变压器	131
3.8.2 非正弦周期信号电路的分析	92	本章小结	133
3.9 Multisim 7 在正弦交流电路中应用	94	思考题与习题	133
本章小结	95	第 6 章 电动机	135
思考题与习题	95	6.1 概述	135
第 4 章 三相交流电路与安全用电	99	6.1.1 电机的分类	135
4.1 三相电源	99	6.1.2 异步电动机的结构	135
4.2 三相电源的连接	100	6.2 三相异步电动机的工作原理	137
4.2.1 电源绕组的星形 (Y 形) 联结	100	6.2.1 旋转磁场	137
4.2.2 电源绕组的三角形 (Δ 形) 联结	102	6.2.2 转子的转动原理	141
4.3 三相负载的连接	102	6.3 三相异步电动机的转矩特性与 机械特性	142
4.3.1 负载的星形联结	103	6.3.1 电磁转矩及其特性	142
4.3.2 负载的三角形联结	106	6.3.2 机械特性	145
4.4 三相负载的功率	107	6.3.3 异步电动机的功率和效率	146
4.4.1 对称三相电路的功率	107	6.4 三相异步电动机的起动与调速	148
4.4.2 不对称三相电路的功率	109	6.4.1 三相异步电动机的起动	148
4.4.3 三相电路有功功率的测量	109	6.4.2 三相异步电动机的调速	151
4.5 安全用电	110	6.5 单相异步电动机	153
4.5.1 电流对人体的危害	110	6.5.1 单相异步电动机的工作原理	153
4.5.2 触电方式	111	6.5.2 单相异步电动机的起动	155
4.5.3 防止触电的保护措施	111	6.6 交流伺服电动机	156
4.5.4 触电急救常识	115	6.6.1 交流伺服电动机的结构特点	156
本章小结	115	6.6.2 交流伺服电动机的工作原理	156
思考题与习题	116	6.7 步进电动机	156
第 5 章 变压器	119	6.7.1 反应式步进电动机结构	157
5.1 磁路	119	6.7.2 反应式步进电动机的工作原理	157
5.1.1 磁路的基本物理量	119	6.8 同步电动机	159
5.1.2 物质的导磁性质	119	6.9 电动机的选用	159
5.1.3 磁路欧姆定律	121	6.9.1 铭牌	160
5.2 电磁铁	121	6.9.2 电动机的选择	161
5.2.1 直流电磁铁	122	本章小结	163
5.2.2 交流电磁铁	122	思考题与习题	164
5.3 变压器的结构和分类	124	第 7 章 电气自动控制	166
5.3.1 变压器的结构	124	7.1 常用低压控制电器	166
5.3.2 变压器的分类	124	7.2 正、反转控制	173
		7.3 顺序联锁控制	174

7.4 行程控制	175	9.4.2 放大电路的微变等效电路	206
7.5 时间控制	176	9.4.3 用微变等效电路求动态指标	207
7.6 可编程序控制器	177	9.5 基极分压式射极偏置电路	208
7.6.1 可编程序控制器基础	177	9.5.1 稳定工作点的原理	208
7.6.2 PLC 程序的编制	179	9.5.2 静态分析	209
本章小结	180	9.5.3 动态分析	209
思考题与习题	181	9.6 共集电极电路	210
第 8 章 半导体器件及特性	183	9.6.1 静态分析	210
8.1 半导体基础知识	183	9.6.2 动态分析	210
8.1.1 本征半导体	183	9.7 共基极电路	212
8.1.2 杂质半导体	184	9.7.1 静态分析	213
8.1.3 PN 结	185	9.7.2 动态分析	213
8.2 晶体二极管	186	9.8 场效应晶体管放大电路	213
8.2.1 晶体二极管的结构	186	9.8.1 场效应晶体管放大电路	
8.2.2 二极管的伏安特性	187	的静态分析	214
8.2.3 二极管的主要参数	187	9.8.2 场效应晶体管放大电路的等效	
8.2.4 二极管的主要应用	188	电路及动态分析	214
8.2.5 稳压二极管	189	9.9 多级放大电路	215
8.3 晶体管	190	9.9.1 4 种耦合方式简介	215
8.3.1 晶体管的结构及类型	190	9.9.2 多级放大器的性能指标计算	216
8.3.2 放大状态下晶体管中载流子的		9.10 差分放大电路	216
传输过程	190	9.10.1 静态分析	216
8.3.3 晶体管伏安特性曲线	192	9.10.2 动态分析	217
8.3.4 晶体管的主要参数	194	9.11 功率放大器	219
8.4 场效应晶体管	195	9.11.1 功率放大器的主要指标	219
8.4.1 结型场效应晶体管的结构及		9.11.2 功率放大器的分类	219
工作原理	195	9.11.3 乙类互补对称功率放大器	220
8.4.2 结型场效应晶体管的		9.12 Multisim 7 在分压式偏置基本	
特性曲线	196	放大电路中的应用	221
8.4.3 场效应晶体管的参数	197	本章小结	222
8.5 晶闸管	197	思考题与习题	223
8.5.1 基本结构	198	第 10 章 集成运算放大电路	227
8.5.2 工作原理	198	10.1 反馈的基本概念	227
本章小结	199	10.1.1 正反馈和负反馈	227
思考题与习题	199	10.1.2 直流反馈和交流反馈	228
第 9 章 基本放大电路	202	10.1.3 负反馈放大器的基本类型与	
9.1 基本共射极放大电路的组成	202	判断	228
9.2 放大器的主要性能指标	202	10.1.4 负反馈对放大器性能的影响	229
9.3 放大电路分析	203	10.2 集成运算放大电路概述	231
9.3.1 静态分析	203	10.2.1 集成运放电路的组成	231
9.3.2 动态分析	204	10.2.2 理想运算放大器	231
9.4 微变等效电路	205	10.3 基本运算电路	232
9.4.1 晶体管微变等效电路	206	10.3.1 反相比例运算电路	232

10.3.2 同相比例运算电路	233	11.3 滤波电路	246
10.3.3 加减运算电路	233	11.4 稳压电路	248
10.3.4 积分和微分运算电路	235	11.4.1 串联型稳压电路简介	248
10.4 单限电压比较器	236	11.4.2 集成稳压器	249
10.5 正弦波振荡电路	237	11.5 开关型稳压电源	250
10.5.1 产生正弦波振荡的条件	237	11.5.1 开关型稳压电源的基本原理	250
10.5.2 RC 桥式正弦波振荡电路	238	11.5.2 串联型脉宽调制式开关 稳压电路	251
10.6 Multisim 7 在集成运算放大电路中的 应用	239	11.5.3 并联型脉宽调制式开关 稳压电路	251
本章小结	240	11.6 Multisim 7 在直流稳压电源中的 应用	252
思考题与习题	240	本章小结	253
第 11 章 直流稳压电源	244	思考题与习题	253
11.1 直流稳压电源组成及各部分的 作用	244	附录 Multisim 7 简介及使用入门	257
11.2 整流电路	245	部分习题参考答案	262
11.2.1 全波整流电路	245	参考文献	266
11.2.2 单相桥式整流电路	246		

第 1 章 电路的基本分析方法

本章首先介绍电路的基本概念和基本定律，然后着重介绍直流线性电路的分析和计算方法，包括网孔电流法、节点电压法、等效电源定理、叠加原理等。最后对惠斯登电桥问题进行讨论并简单介绍用 Multisim 7 对电路进行仿真。这些内容不仅适用于直流电路，而且也适用（或稍加扩展）于交流电路，因此学好本章内容，将对以后的学习起着重要的作用。

1.1 电路的组成与模型

1.1.1 电路的组成

电路就是电流流通的路径。它是由若干电气元、器件按一定的方式连接起来的电流的通路。

按电路的功能分类，可分为两类：一类是实现能量的输送和转换；另一类是实现信号的传递和处理。

最简单的电路之一是手电筒电路，它是由干电池、电珠、连接导线及开关组成，如图 1-1a 所示。干电池是一种电源，它将化学能转换成电能，为电路提供电能；电珠是一种负载，它由电阻丝制成，当电流流过电阻丝时，就会发热而使电珠发光，它是一种消耗电能的器件；连接导线构成电流的通路；开关则起控制电路接通和断开的作用，所以开关和导线是连接电源和负载的中间环节。这一类电路实现了能量的输送和转换，一般要求它应有较小的能量损耗和较高的效率。

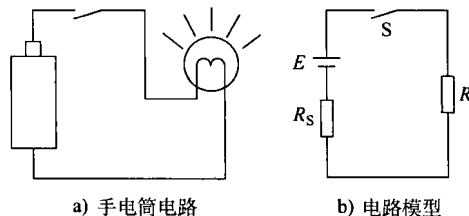


图 1-1 手电筒电路及其电路模型

另一类是以传递和处理信号为主要目的电路，如图 1-2 所示的扩音机电路。扩音机由话筒、放大电路、扬声器组成。话筒将声音转化成电信号，经过放大电路放大，送到扬声器再转化成声音输出。这里，话筒是产生信号的设备，称为信号源，它相当于电源；扬声器是转化和接收

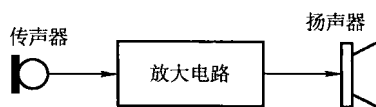


图 1-2 扩音机电路框图

信号的设备，也就是负载；放大器是中间环节，它将话筒输出的微弱电信号放大到足以推动扬声器发声。在这类电路中，所关注的是如何准确而迅速地传递和处理信号等问题。

在现代生活和生产实践中，有各种电路，如：照明电路、电力传输电路、通信电路、计算机电路等。尽管电路的种类繁多、用途各异，但所有电路都可看作由三部分组成，即：电源、负载、中间环节。电源是提供电能的装置，它把其他形式的能量转化成电能。如发电机将机械能转化为电能，电池将化学能转化为电能等；负载是取用电能的装置，它将电能转换成其他形式的能量，如灯泡将电能转化成光能、电动机将电能转化成机械能、电炉将电能转

化成热能等；中间环节主要是起连接、控制和保护电路等作用。

1.1.2 电路模型

实际上电路都是由一些按需要起不同作用的实际电路元件或器件组成，如发电机、变压器、电动机、电池、晶体管以及各种电阻器、电感器和电容器等，通常它们的电性质较为复杂。例如一盏白炽灯，它除具备消耗电能的性质（电阻性）外，当通有电流时还会在其周围产生磁场，也就是说它还具有电感性；再如电容器，它不仅可以储存电场能，还会因其介质不是理想的绝缘体而产生漏电，从而消耗电能。这样在分析电路时，如果将电路元件的全部性质都考虑进去，势必会带来极大的困难，不利于对电路进行深入研究，而且在工程设计上也没这种必要。因此，在分析实际电路时，只需考虑其主要性质，在一定的条件下将它近似化和理想化。常用的几种理想电路元件有：只表示消耗电能的理想电阻元件；只表示存储磁场能量的理想电感元件；只表示存储电场能量的理想电容元件；表示具有恒定电压的理想电压源；表示具有恒定电流的理想电流源和受控源等。由这些理想元件构成的电路，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，电珠用电阻表示，开关和导线可视为理想导体，这样手电筒电路模型见图 1-1b。

电路理论研究的对象是由理想元件构成的电路模型，目的是找出电路中具有普遍的规律和电路分析的一般方法。

1.2 电路中的基本物理量

在电路理论中，基本的物理量主要是电流、电压、电动势和电功率，这些物理量是分析和计算电路的基础。

1.2.1 电流及其正方向

电路在工作或运行的时候，基本的物理现象之一是电路中存在电流。电流就是电荷的定向移动。习惯上把正电荷移动的正方向规定为电流的实际方向。电流的大小是指单位时间内通过导体横截面积的电荷量。

大小和方向均不随时间改变的电流叫恒定电流，简称直流，用 I 表示，如图 1-3a 所示。如果电流的大小和方向随时间变化，则称为时变电流。最常见的时变电流就是正弦电流，用符号 i 表示。如图 1-3b 所示。

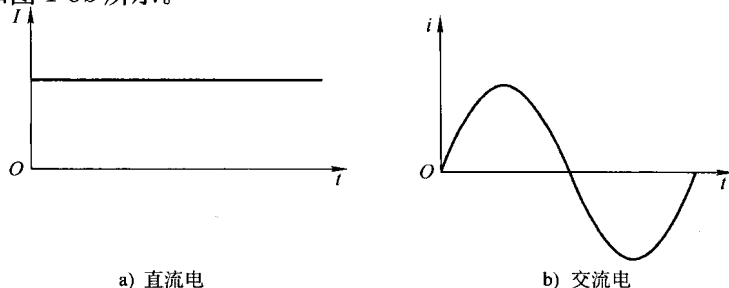


图 1-3 直流电和交流电

对于直流电来讲,假设在时间 t 内通过导体横截面的电荷量为 q ,用大写字母 I 表示直流电流,则电流的表示式为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-1)$$

对于交流电来讲,设在极短的时间内通过导体横截面的电量为 dq ,用符号 i 表示交流电流,则电流表示式为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

在国际单位制中,电流的单位是安培(A)。当1秒(s)内通过导体横截面的电荷量为1库仑(C)时,则电流为1安培(A),常用的电流单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA),它们的关系是

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}$$

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

习惯上总是把正电荷的移动方向作为电流的方向。但在分析较为复杂的直流电路时,很难事先判断某支路中电流的实际方向;对交流电来讲,其方向随时间而变,在电路图上也无法用一个箭头来表示它的实际方向。为此,在分析和计算电路时,常引入电流参考方向的概念,参考方向又叫假定正方向,简称正方向。电流的正方向可以任意选定,所选定的方向可能与电流的实际方向一致,也可能相反,如图1-4所示。

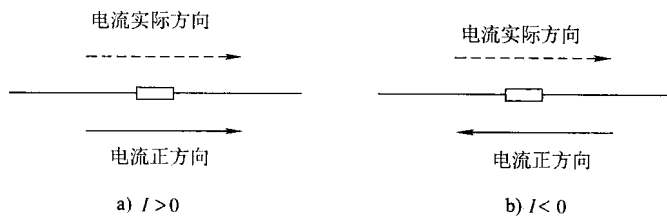


图 1-4 电流的方向和实际方向

在分析电路时,可事先任意假定某一方向为电流的正方向,并用箭头标出,根据假定的电流方向进行计算,若求得电流是正值(即 $I > 0$),则说明电流的实际方向与选定的电流正方向一致;若求得电流为负值(即 $I < 0$),则说明电流的实际方向与选定的正方向相反。这样就可以在选定的电流正方向的情况下,根据电流的正、负值确定某一时刻电流的实际方向。

1.2.2 电压及其正方向

在一段电路中,正电荷由于受到电场力的作用而移动形成电流,电场力推动电荷做功,从而把电能转变成其他形式的能。为了衡量电场力对电荷作功的能力,我们引入电压这一物理量。直流电压用 U 表示,交流电压用符号 u 表示。

如图1-5所示,若电场力将电荷 q 从A点移到B点,所作的功为 W_{AB} ,则A、B两点间的电压 U_{AB} 为

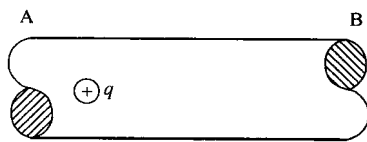


图 1-5 电压的定义

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (1-3)$$

式(1-3)表明,电场中任意两点 A、B 间的电压,在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 点移到 B 点时所作的功。 $U_{AB} > 0$,表示电场力作正功; $U_{AB} < 0$,则表示电场力作负功,即外力做功。

在国际单位制中,电压的单位是伏特(V)。当电场力把 1 库仑(C)的电荷量从一点移到另一点所作的功为 1 焦耳(J)时,则该两点间的电压为 1 伏特(V)。常用电压单位有千伏(kV),毫伏(mV)和微伏(μV),它们的关系是

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}$$

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

与前面讨论的电流方向一样,电压方向也有实际方向与正方向(参考方向)之分。通常规定电路中两点之间电压的实际方向是由高电位点指向低电位点的,也就是说沿着电压的实际方向,电位是逐渐降低的。电压的正方向可以任意选定,如图 1-6 所示。当电压的实际方向与它的正方向一致时,电压为正值,即 $U > 0$;反之,当电压的实际方向与正方向相反时,电压为负值,即 $U < 0$ 。这样,在分析电路时,根据电压的正方向及电压的正、负值,可很容易确定电压的实际方向。

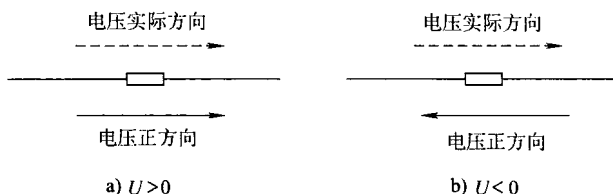


图 1-6 电压的正方向和实际方向

正方向在电路分析中起着十分重要的作用。关于电流和电压的正方向,还有以下两点需要说明:

1) 电流和电压的正方向可以任意选定。但一经选定,那么在电路分析和计算过程中,则不应改变。

2) 一般来说,同一段电路的电流和电压的参考方向可以各自指定,不必强求一致。但在分析电路时,为方便起见,常将电流和电压二者的正方向指定为相关联的正方向,即把同一元件的电流的正方向与电压正方向选为一致,如图 1-7 所示。

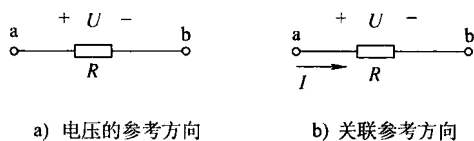


图 1-7 电压的参考方向和关联参考方向

1.2.3 电位

在电路中任取一点 0 作为参考点,则由某点 a 到参考点的电压 U_{a0} 称为 a 的电位,即 V_a 。选择参考点是任意的,因此电位也具有任意性,而任意两点之间电压(电位)是不变的。在一个电路系统中,只能选择一个参考点,参考点的电位等于零。在电子电路中,常选

定一条特定的公共线作为参考点。这条公共线一般是很多元件的汇合处，而且通常是电源的一个极，这条线虽不直接接地，但也称为地线，参考点可用接地符号“⊥”表示。电路中任意两点之间的电压可以用它们之间的电位差表示，如

$$U_{ab} = V_a - V_b$$

在电子电路中，通常采用一种习惯画法，当电源有一端与参考点相连时，电源不再用电源符号表示，只需将电源另一端相对参考点的数值和极性标出即可，如图 1-8 所示。

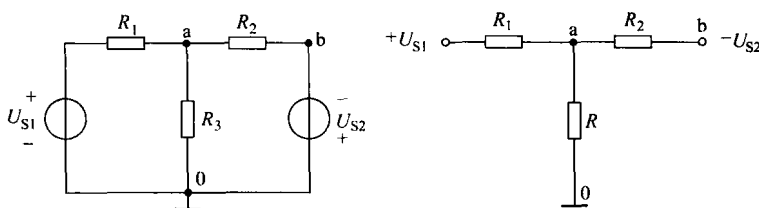


图 1-8 电子电路的习惯画法

1.2.4 电动势

在物理学中，我们已经学过，在电源内部存在着一种非静电力。这种非静电力在电源内部克服电场力使正电荷从电源负极移动到电源正极，从而把其他形式的能量转换为电能。为了衡量电源内部非静电力对正电荷做功的能力，我们引入电动势这一物理量。如果在电源内部，非静电力将电量为 q 的正电荷由负极移动到正极所作的功为 W_{not} ，则电源的电动势为

$$E = \frac{W_{\text{not}}}{q} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明：电动势在数值上等于非静电力把单位正电荷由负极经电源内部移动到正极时所作的功。显然，电动势的单位也是伏特 (V)。

通常规定电动势的实际方向是由电源的负极经电源内部指向正极的方向，所以电动势的实际方向为电位升高的方向，这一点刚好与电压相反。

1.2.5 电功率

电功率是表示电场力作功快慢的物理量，电场力在单位时间内所作的功叫电功率，对直流电路而言，电功率用符号 P 表示，即

$$P = \frac{W}{t} \quad (1-5)$$

而 $W = qU = IUt$ ，所以

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

式 (1-6) 是计算部分电路中电功率的普遍公式，对交流电路而言，电功率可表示为 $p = iu$ 。

在国际单位制中，电压的单位是伏特 (V)，电流的单位是安培 (A)，功率的单位是瓦特 (W)，常用的单位还有千瓦 (kW) 和毫瓦 (mW)：

$$1\text{kW} = 10^3\text{W} \quad 1\text{W} = 10^3\text{mW}$$

为分析和计算电路的方便，电压和电流通常采用彼此关联的正方向。在这种条件下，若

计算出功率 $P > 0$ ，则表示这段电路实际上在吸收电能，该电路上的元件为负载或起负载作用；若 $P < 0$ ，则表示这段电路实际上在释放电能，该电路上的元件为电源或起电源作用。

1.3 基尔霍夫定律

在物理学中，我们学习了欧姆定律。它表明了电路中某一局部电压与电流之间的关系，但是，在阐明整体电路的各部分电压、电流之间所必须遵循的规律时，就得运用基尔霍夫定律。它是由德国物理学家基尔霍夫（1824~1887）于 1847 年提出的。该定律适用于直流电路、交流电路，对于含有电子元件的非线性电路也适用。因此，它是分析、计算电路的基本定律。

为了便于描述基尔霍夫定律，先以图 1-9 所示的电路为例，介绍几个名词。

(1) 节点 二条或三条以上支路的连接点称为节点，如图 1-9 所示电路中只有两个节点，即节点 a 和节点 b。

(2) 支路 两个节点之间每一条电路称为支路。如图中 acb、ab、adb 都是支路、支路中含有电源的叫含源支路，不含电源的叫无源支路。

(3) 回路 电路中任意一个闭合路径叫回路。图 1-9 电路中 acba、abda、acbda 都是回路。

(4) 网孔 在电路中，电路内部不含有支路的回路叫网孔。图 1-9 中 acba 和 abda 是网孔，而 acbda 则不是网孔。

(5) 网络 一般把包含元件较多的电路称为网络。实际上电路和网络两个名词经常通用。

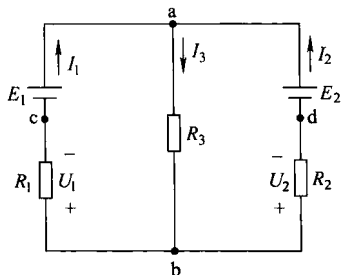


图 1-9 电路例举

1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫第一定律也称为基尔霍夫电流定律（Kirchhoff's Current Law, KCL），用来描述电路中任何一个节点上各部分电流之间的相互关系。由于电流的连续性，流入任一节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。在图 1-9 所示电路中，对节点 a 有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

即

$$\sum I_{\text{in}} = \sum I_{\text{out}} \quad (1-7)$$

式 (1-7) 又可写为

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

即

$$\sum I = 0 \quad (1-8)$$

这就是说，如果规定流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，那么，对于电路任一节点而言，电流的代数和恒等于零。式 (1-7) 和式 (1-8) 是同一定律的两种表达形式。这一结论适用于任何电路的任一节点，不仅适用于直流电流，而且适用于交流电流。因此基尔霍夫电流定律可表述为：在电路的任何一个节点中，同一瞬间电流的代数和等于零。可用下式表示：

$$\sum i = 0 \quad (1-9)$$

显然，KCL 与各支路所连接的元件性质无关，无论是线性电路还是非线性电路，汇集

到节点的电流都应服从 KCL。

在应用 KCL 定律时, 需注意以下两点:

- 1) 首先应假定各支路电流的参考方向。
- 2) KCL 不仅适用于节点, 还可以推广应用于电路各任意假定的封闭面。例如如图 1-10 所示常见的晶体管放大电路, 其中 e、b、c 分别为晶体管的发射极、基极和集电极, 其电流的正方向如图 1-10 所示。假设我们用一封闭面把晶体管包围起来, 应用 KCL 可得

$$I_e = I_b + I_c$$

例 1-1 在图 1-11 中给定的正方向下, 已知 $I_1 = 2\text{A}$, $I_2 = -3\text{A}$, $I_3 = -2\text{A}$, 试求 I_4 。

解: 由 KCL 可列出

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

将已知数代入 (数值方程, 后面类似的均同)

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

得

$$I_4 = 3\text{A}$$

I_4 为正值说明实际方向与所给定的正方向一致。

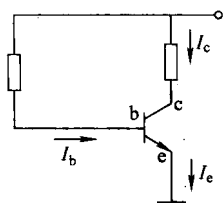


图 1-10 KCL 的推广

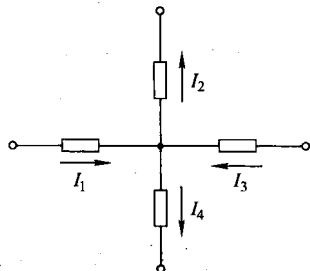


图 1-11 例 1-1 的电路

1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫第二定律也称为基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, KVL), 用来描述同一回路中各元件电压之间的关系, 其内容为: 在任一瞬时, 沿任一指定的回路绕行方向, 各元件上电压降的和等于电压升的和。

在图 1-9 所示的电路中, 选取回路 adbca 的绕向方向为顺时针方向, 则有

$$E_2 + U_1 = E_1 + U_2$$

上式又可写为

$$E_2 + U_1 - E_1 - U_2 = 0$$

上式说明, 凡是支路电压正方向与绕行方向一致时, 电压前取正号, 反之取负号, 那么该回路中电压的代数和应等于零。这一结论适用于任何电路的任一回路, 不仅适用于直流电压, 而且适用于交流电压。因此基尔霍夫电压定律可表述为: 在电路的任何一个回路中, 沿同一方向循行, 同一瞬间电压的代数和等于零。可用下式表示:

$$\sum u = 0 \quad (1-10)$$

在直流电路中

$$\sum U = 0 \quad (1-11)$$

显然, KVL 也与各支路所连接的元件性质无关, 无论是线性电路还是非线性电路, 回路的各部分电压都服从 KVL。

图 1-12 所示的回路是由电动势和电阻构成的, 由图可知

$$\begin{aligned} U_{ab} &= I_3 R_3 & U_{bc} &= E_2 & U_{cd} &= -I_2 R_2 \\ U_{de} &= I_1 R_1 & U_{ea} &= -E_1 \end{aligned}$$

根据 KVL 可得

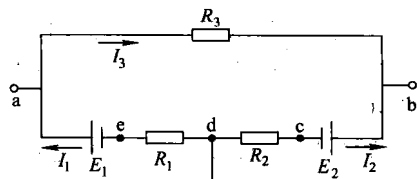


图 1-12 回路

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 - I_2 R_2 = E_1 - E_2$$

写成一般形式

$$\sum IR = \sum E \quad (1-12)$$

此为基尔霍夫第二定律在电阻电路中的另一种表达式,就是在任一回路绕行方向下,回路中各电阻上电压降的代数和等于各电动势的代数和。式中,凡电阻中的电流方向与绕行方向一致时,该电阻的电压取正,反之取负;凡电动势方向与绕行方向一致时,该电动势取正,反之取负。

KVL 不仅可用于任一实际的闭合回路,还可推广到任一不闭合的电路中,但要将在开口处的电压列入方程。图 1-13 为某电路中的部分电路。a、b 两节点处没有闭合,若选顺时针方向为绕行方向,则可得

$$U_{ab} + I_3 R_3 + I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2 - E_3$$

$$U_{ab} = (E_1 - E_2 - E_3) + (I_2 R_2 - I_1 R_1 - I_3 R_3)$$

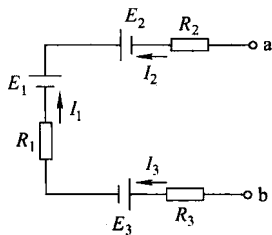


图 1-13 KVL 的推广

1.4 电路的一般分析方法

本节介绍几种常用的求解复杂电路的方法,包括支路电流法、网孔电流法、节点电压法等,这些方法都是基于基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

1.4.1 支路电流法

在分析和计算复杂电路时,一般是在已知电路各元件参数的条件下,求解各支路电流、各元件两端的电压和功率等。直接用基尔霍夫第一定律和第二定律,列出电路中节点电流方程和回路电压方程,然后联立求解,即可得出各支路电流、电压和功率等物理量。这种直接求解支路电流的方法也叫支路电流法。

一个有 b 条支路、 n 个节点的电路,具有 $n-1$ 个独立节点电流方程,因此在列写电流方程时,可先选定一个节点为参考点,剩下的 $n-1$ 个节点就是独立节点。列写电压方程时,由于平面电路的网孔数刚好就是 $b-(n-1)$ 个,故对所有网孔列出的回路电压方程一定是相互独立的。这样就有 $n-1+b-n+1=b$ 个独立方程,刚好可求解出 b 个未知电流。

应用支路电流法求解电路的步骤可概括如下:

- 1) 选取电路中支路的电流正方向及独立回路绕行方向。
- 2) 运用基尔霍夫电流定律列出 $(n-1)$ 个独立节点电流方程。
- 3) 运用基尔霍夫电压定律列出 $m=b-(n-1)$ 独立回路电压方程。为方便起见,常选取电路的网孔作为独立回路。
- 4) 将已知条件代入上述方程,联立求解,可得出各支路电流。
- 5) 当支路电流为正值时,表明该支路电流的实际方向与正方向同向;反之,则表明该支路电流实际方向与正方向反向。

例 1-2 在图 1-14 所示的电路中,已知电动势 $E_1=130\text{V}$ 、内阻 $R_1=1\Omega$;电动势 $E_2=117\text{V}$ 、内阻 $R_2=0.6\Omega$,负载电阻 $R_3=24\Omega$ 。求:(1) 各支路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 。(2) a、b 两点间的电压。