



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

电路与模拟电子技术

高玉良

▼
……
第3版
……
▲

 高等教育出版社



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

电路与模拟电子技术

Dianlu yu Moni Dianzi Jishu

高玉良

第3版



高等教育出版社·北京

HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是根据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制定的电工学课程教学基本要求,结合计算机、机械等专业的具体情况编写的。全书分为电路理论和模拟电子技术两部分,电路部分包括电路的基本概念和基本定律、电路的基本分析方法和电路定理、正弦交流电路、非正弦周期电流电路和电路的暂态分析等5章,模拟部分包括半导体二极管和三极管、放大电路初步、信号运算放大与处理电路、信号产生电路、直流稳压电源和三极管放大电路等6章,最后专门安排一章介绍了EDA技术、EWB和在系统可编程模拟器件的应用,并在每章后安排了一节EWB仿真的例题。

本书的最大特点是在模拟电子技术部分,将以三极管为主线的教学内容改为以集成运放为主线的教学内容,从实用的角度出发,较全面地介绍了各种功能的模拟集成电路。

本书电路部分注重基础,模拟电子技术部分注重应用,适合于普通高等学校工科非电类专业的本科教学,也可作为专科学生的教学参考书,对相关工程技术人员也是一本很好的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路与模拟电子技术/高玉良编著.--3版.--北京:高等教育出版社,2013.12
ISBN 978-7-04-038703-2

I. ①电… II. ①高… III. ①电路理论-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(2013)第 271376 号

策划编辑 杜 炜 责任编辑 曲文利 封面设计 赵 阳 版式设计 范晓红
插图绘制 黄建英 责任校对 刘 莉 责任印制 张福涛

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京市鑫霸印务有限公司		http://www.landaco.com.cn
开 本	787mm×1092mm 1/16	版 次	2004年7月第1版
印 张	23.75		2013年12月第3版
字 数	530千字	印 次	2013年12月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	34.60元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 38703-00

第3版前言

本着“保证基础,注重应用”的原则,本版尝试建立适合非电类工科学生的以集成运放为基本电路元件、注重应用的模拟电子技术的新框架。在保持电路部分教学内容基本不变的情况下,对模拟电子技术部分的教学内容和次序作了重大的调整,将以三极管为基本元件的教学内容改为以集成运放为基本元件的教学内容:一是突出各种功能的模拟电路的应用,而将各种三极管放大电路放在从属位置;二是减少分立元件放大电路的分析,丰富了各种模拟集成电路的介绍。

本版的编写得到了长江大学的支持。长江大学电信学院金波、刘焰、覃洪英、王昌杰等老师参加了编写大纲的讨论。大连理工大学唐介教授审阅了全稿,并提出了宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢。

本书的配套辅导书是《电路与模拟电子技术(第三版)学习指导》(刘焰、陈英芝、高玉良编,高等教育出版社出版),主要内容有:(1)基本教学要求,重点、难点;(2)典型例题分析;(3)思考与练习解答;(4)习题全解。

由于作者水平有限,书中定有错误和不足之处,衷心希望使用本教材的教师和学生来信提出意见,以便今后改进。

作者 E-mail:gao-yuliang@yangtzeu.edu.cn

编者

2013.7

第 2 版前言

本书自 2004 年出版后,已重印多次,在此首先对使用本教材的师生表示感谢。根据近几年的教学实践和部分高等院校使用本教材后提出的意见,本次修订主要做了以下几方面的工作:

1. 从第 2 章起,在每章后增加了一节 EWB 仿真的例题,把利用计算机辅助分析融合到教学内容中。

2. 调整了部分内容,主要有:第 1 章增加了“电路的工作状态”一节,第 6 章将“稳压二极管”一节调整为特殊二极管,删除了第 5 章“一阶电路的正弦响应”一节。

3. 调整了部分例题和习题。

修订后的教材在保留原书结构和特点的基础上,进一步强化了电路的基本概念,突出了集成电路的应用,并将计算机辅助分析融合到具体教学内容中。

本书的编写得到了长江大学的支持。长江大学电信学院刘焰、高秀娥编写了第 2 章至第 11 章中计算机仿真的内容。华南理工大学殷瑞祥教授审阅了全稿,并提出了宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者学识和能力有限,书中定有错误和不足之处,恳请使用本书的教师和学生提出意见和建议,以便今后不断改进。

作者 E-mail:gao-yuliang@yangtzeu.edu.cn

编者
2008.4

第 1 版前言

近几年来,随着各校教学计划的调整,越来越多的高校将计算机、机电等专业的“电路”和“模拟电路”两门课程合成一门——“电路与模拟电子技术”,调整了教学要求,教学时数也进行了压缩。本书就是在这个背景下根据计算机类、机电类专业新的课程体系和教学内容编写的。

本书分电路基础和模拟电子技术两部分,电路部分包括电路的基本概念和基本定律、电路的基本分析方法、正弦交流电路、非正弦周期电流电路和电路的暂态分析等五章,主要介绍电路的基本概念、基本理论和基本分析方法;模拟部分包括半导体二极管和晶体管、基本放大电路、放大电路的负反馈、信号的运算与处理、信号产生电路和直流稳压电路等六章,主要介绍各种应用电路的分析、设计,其中放大电路以分立元件电路为主,其他应用电路以集成电路为主。在教学要求的取舍上,强调基本概念、基本理论、基本的电子电路分析方法,并力图使两部分内容有机结合起来。考虑到教学时数的限制,有些内容安排为例题和习题的形式。

为了让学生了解电子技术的新发展,掌握最基本的 EDA 技术,本书最后一章介绍了 EDA 技术基础、EWB 软件、可编程模拟器件及应用。

本书按课程总学时 80 学时编写,各章参考学时如下:第 1 章为 4 学时;第 2 章为 8~10 学时;第 3 章为 10~12 学时;第 4 章为 2 学时;第 5 章为 4~6 学时;第 6 章为 4 学时;第 7 章为 10~14 学时;第 8 章为 4 学时;第 9 章为 4~6 学时;第 10 章为 4 学时;第 11 章为 4~6 学时;第 12 章为 2 学时。除理论教学外,还应安排一定数量的实验,包括应用 EWB 的设计、仿真实验。

华南理工大学殷瑞祥教授审阅了本书的全稿,提出了不少很好的修改意见,对此谨致以衷心的感谢。刘焰、付润江、易国华等同志参加了本书的部分编写工作,刘开健、刘畅同志为本书的编写提供了不少帮助,在此表示感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在缺点和错误,恳请使用本书的教师和学生提出意见和建议,以便今后不断改进。

编者

2004. 3

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	1	2.1.1 电路等效变换的概念	22
1.1 电路和电路模型	1	2.1.2 电阻的等效变换	23
1.1.1 电路	1	2.1.3 电源的等效变换	29
1.1.2 电路模型	2	2.2 电阻电路的一般分析方法	33
1.2 电路中的基本物理量	3	2.2.1 支路电流法	33
1.2.1 电流	3	2.2.2 网孔电流法	34
1.2.2 电压和电位	3	2.2.3 结点电压法	36
1.2.3 电功率和电能	5	2.3 电路定理	39
1.3 电阻、电感、电容元件	6	2.3.1 叠加定理	39
1.3.1 电阻元件	6	2.3.2 替代定理	42
1.3.2 电感元件	7	2.3.3 等效电源定理	43
1.3.3 电容元件	8	2.4 受控源及含受控源电路的分析	49
1.4 电源	10	2.4.1 受控源	49
1.4.1 电压源	10	2.4.2 含受控源电路的分析	50
1.4.2 电流源	11	2.5 用 EWB 分析直流电路	54
1.4.3 电源的功率	11	本章小结	57
1.5 基尔霍夫定律	13	习题	58
1.5.1 基尔霍夫电流定律	14	第 3 章 正弦交流电路	63
1.5.2 基尔霍夫电压定律	15	3.1 正弦交流电的基本概念	63
1.6 电路的工作状态	17	3.1.1 正弦交流电的三要素	63
1.6.1 开路	17	3.1.2 正弦交流电的有效值	64
1.6.2 短路	17	3.1.3 同频率正弦交流电的相位差	65
1.6.3 负载状态	18	3.2 正弦量的相量表示	66
本章小结	19	3.2.1 复数及其四则运算	67
习题	20	3.2.2 正弦量的相量表示法	68
第 2 章 电路的基本分析方法和电路定理	22	3.3 正弦交流电路中的电阻、电感、电容元件	71
2.1 电阻电路的等效变换	22	3.3.1 电阻元件的交流电路	71
		3.3.2 电感元件的交流电路	73

3.3.3 电容元件的交流电路	75	习题	135
3.4 基尔霍夫定律的相量形式	78	第5章 电路的暂态分析	136
3.5 阻抗与导纳	81	5.1 换路定则及初始值的计算	136
3.5.1 阻抗	81	5.1.1 换路定则	136
3.5.2 导纳	82	5.1.2 初始值的计算	137
3.5.3 阻抗与导纳的串并联	83	5.2 一阶电路的零输入响应	139
3.6 一般正弦交流电路的计算	85	5.2.1 RC 电路的零输入响应	139
3.7 正弦交流电路的功率	89	5.2.2 RL 电路的零输入响应	142
3.7.1 平均功率和功率因数	89	5.3 一阶电路的零状态响应	144
3.7.2 无功功率和视在功率	90	5.3.1 RC 电路的零状态响应	144
3.7.3 功率因数的提高	92	5.3.2 RL 电路的零状态响应	145
3.7.4 最大功率传输定理	94	5.4 一阶电路的全响应及三要素 分析法	147
3.8 谐振电路	94	5.5 二阶电路的零输入响应	151
3.8.1 串联谐振	95	5.6 用 EWB 分析电路的暂态	155
3.8.2 并联谐振	97	本章小结	156
3.9 互感电路	100	习题	156
3.9.1 耦合电感及其电压电流特性	100	第6章 半导体二极管和三极管	159
3.9.2 互感电路的计算	103	6.1 半导体基础知识	159
3.9.3 变压器	105	6.1.1 本征半导体	159
3.10 三相交流电路	108	6.1.2 杂质半导体	160
3.10.1 三相交流电源	108	6.1.3 PN 结	162
3.10.2 对称三相电路的计算	110	6.2 二极管	164
3.10.3 不对称三相电路的计算	114	6.2.1 二极管的结构与伏安特性	164
3.10.4 三相电路的功率	116	6.2.2 二极管的主要参数	165
3.11 用 EWB 分析正弦交流电路	118	6.3 特殊二极管	169
本章小结	120	6.3.1 稳压二极管	169
习题	122	6.3.2 变容二极管	171
第4章 非正弦周期电流电路	127	6.3.3 光电二极管	171
4.1 非正弦周期量的分解	127	6.3.4 发光二极管	172
4.2 非正弦周期量的有效值、平均 值和平均功率	130	6.4 晶体管	172
4.3 非正弦周期电流电路的计算	132	6.4.1 晶体管的结构与电流放大原理	173
4.4 用 EWB 分析非正弦交流电路	133	6.4.2 晶体管的特性曲线	175
本章小结	135		

6.4.3 晶体管的微变等效电路	176	8.2 模拟乘法器及其应用	223
6.4.4 晶体管的主要参数	179	8.2.1 模拟乘法器简介	223
6.5 场效晶体管	180	8.2.2 由模拟乘法器构成的运算电路	224
6.5.1 绝缘栅场效晶体管的结构和 特性曲线	180	8.2.3 模拟乘法器的其他应用	226
6.5.2 场效晶体管的主要参数	183	8.2.4 集成模拟乘法器	226
6.5.3 场效晶体管的微变等效电路 和开关电路	183	8.3 测量放大电路	228
6.6 用 EWB 分析二极管电路	185	8.3.1 仪用放大器	228
本章小结	186	8.3.2 跨导型放大器	230
习题	187	8.3.3 集成采样保持电路	231
第 7 章 放大电路初步	189	8.4 有源滤波电路	233
7.1 放大电路概述	189	8.4.1 滤波电路概述	233
7.1.1 放大电路的基本概念	189	8.4.2 低通滤波器	234
7.1.2 放大电路的常用技术指标	190	8.4.3 高通滤波器	237
7.2 集成运算放大器	193	8.4.4 带通滤波器	238
7.2.1 集成运放的电路模型	193	8.4.5 带阻滤波器	239
7.2.2 集成运放的主要参数与分类	195	8.5 电压比较器	240
7.2.3 理想运算放大器及特点	200	8.5.1 过零比较器	241
7.3 放大电路中的负反馈	202	8.5.2 单门限比较器	242
7.3.1 反馈的基本概念与分类	202	8.5.3 滞回比较器	242
7.3.2 负反馈对放大电路性能的影响	204	8.5.4 窗口比较器	245
7.3.3 负反馈的引入与深度负反馈 电路的估算	209	8.5.5 集成电压比较器	245
本章小结	211	8.6 用 EWB 分析信号处理电路	246
习题	212	本章小结	248
第 8 章 信号运算放大与处理电路	214	习题	248
8.1 基本运算放大电路	214	第 9 章 信号产生电路	254
8.1.1 比例运算电路	214	9.1 正弦振荡电路	254
8.1.2 加法运算电路	216	9.1.1 产生正弦振荡的条件	254
8.1.3 减法运算电路	217	9.1.2 RC 正弦振荡电路	255
8.1.4 积分和微分运算电路	220	9.2 非正弦波产生电路	259
8.1.5 对数和指数运算电路	222	9.2.1 矩形波产生电路	259
		9.2.2 三角波产生电路	261
		9.2.3 锯齿波产生电路	262
		9.2.4 压控振荡电路	263
		9.3 集成函数发生器	265

9.3.1 集成函数发生器 ICL8038	265	11.2.3 集成功率放大器	312
9.3.2 集成函数发生器 MAX038	266	11.3 差分放大电路	314
9.4 用 EWB 分析信号产生电路	268	11.3.1 差分放大电路的工作原理	314
本章小结	269	11.3.2 典型差分放大电路	315
习题	270	11.3.3 恒流源式的差分放大电路	316
第 10 章 直流稳压电源	272	11.4 场效应晶体管放大电路	319
10.1 单相整流滤波电路	272	11.4.1 共源放大电路	319
10.1.1 单相整流电路	272	11.4.2 共漏放大电路	321
10.1.2 滤波电路	274	11.5 多级放大电路	322
10.2 线性稳压电路	277	11.5.1 多级放大电路的耦合	323
10.2.1 串联型稳压电路	277	11.5.2 多级放大电路的动态分析	324
10.2.2 三端集成稳压器	279	11.5.3 集成运放的组成	326
10.2.3 新型低压差集成稳压器	281	11.6 用 EWB 分析晶体管放大电路	327
10.3 开关型稳压电路	282	本章小结	329
10.3.1 降压型开关稳压电路	283	习题	329
10.3.2 集成开关稳压器	284	第 12 章 EDA 技术基础	333
10.4 晶闸管及可控整流电路	286	12.1 EDA 技术概述	333
10.4.1 晶闸管	286	12.1.1 EDA 简介	333
10.4.2 可控整流电路	288	12.1.2 EDA 的设计方法	334
10.5 用 EWB 分析直流稳压电路	290	12.1.3 常用 EDA 软件简介	335
本章小结	292	12.2 EWB 及其应用	336
习题	292	12.2.1 EWB 简介	336
第 11 章 三极管放大电路	295	12.2.2 EWB 的软件菜单	338
11.1 晶体管单管放大电路	295	12.2.3 EWB 的虚拟仪器	343
11.1.1 共射放大电路的组成及工作 原理	295	12.2.4 EWB 应用举例	344
11.1.2 放大电路的静态分析	296	12.3 在系统可编程模拟器件 及其应用	349
11.1.3 放大电路的动态分析	297	12.3.1 ispPAC 概述	349
11.1.4 静态工作点的稳定	302	12.3.2 ispPAC 的结构及工作原理	349
11.1.5 共集放大电路	304	12.3.3 ispPAC 应用举例	352
11.2 功率放大电路	307	12.3.4 PAC-Designer 软件及开发实例	357
11.2.1 功率放大电路概述	307	部分习题参考答案	362
11.2.2 互补对称功率放大电路	308	参考文献	366

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

电路理论是电工技术和电子技术的基础,它的研究对象是电路模型。本章首先介绍电路和电路模型的概念,然后介绍电路的一些基本物理量,引入电流、电压参考方向的概念。在此基础上,介绍电阻、电感、电容、电压源和电流源等常用的电路元件及其电流与电压的关系,即伏安特性,最后给出电路的基本定律——基尔霍夫定律。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路

电路是指为了某种需要由若干电气器件按一定方式连接起来的电流的通路。

电路的结构形式及所具有的功能是多种多样的。按电路的功能,电路可分为两大类,第一类是实现电能的传输和转换的电路。最简单的电路就是手电筒电路,它由干电池、电珠、连接导线及开关组成,如图 1.1.1(a)所示。

干电池是一种电源,它将化学能转换成电能,在其正、负极间保持一定的电压,为电路提供电能。电珠由电阻丝制成,当电流流过电阻丝时,电阻丝会发热而使电珠发光,它是一种消耗电能的器件。通常把消耗电能的用电器件或设备称为负载。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,开关和导线是连接电源和负载的中间环节。

第二类电路是实现信号的传递和处理的电路。常见的电路如扩音机。扩音机由话筒、放大电路、扬声器组成。话筒将声音变成电信号,经过放大电路的放大,送到扬声器再变成声音输出。这里话筒是输出信号的设备,称为信号源,它相当于电源;扬声器是接收和转换信号的设备,也就是负载。由于话筒输出的电信号很微弱,不足以推动扬声器发声,需要采用中间环节对信号进行放大和处理。

由此可见,电路主要由电源、负载以及从电源到负载的中间环节三部分组成。电源是提供电能或电信号的设备,负载是用电或输出电信号的设备,中间环节用于传输电能或传输、处理电信

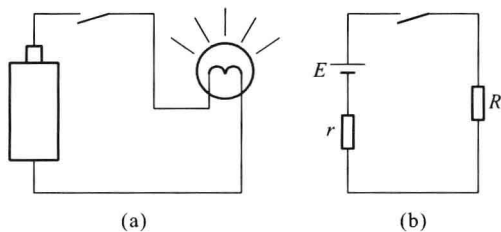


图 1.1.1 手电筒电路及其电路模型

号,一般来说,中间环节是电路中最复杂的部分。在电路分析中,为方便,常把信号源或电源输出的电压或电流称为激励,把由激励而在电路中产生的电压或电流称为响应。有时,根据激励和响应的因果关系,把激励称为输入,把响应称为输出。

1.1.2 电路模型

组成电路的实际器件,其电磁性能的表现往往是多方面交织在一起的。如常用的电阻器,它不仅有消耗电能的功能,还会在其周围产生一定的磁场;再如电容器,它不仅有储存电场能的功能,还会因其介质不是百分之百的绝缘体而产生漏电,从而消耗电能。这样用数学的方法来描述电阻器或电容器时就会很复杂,不利于对电路进行深入的分析。而人们在使用电阻器和电容器时,只利用电阻器消耗电能的功能,利用电容器储存电场能的功能,忽略其他次要的性能。

基于上述考虑,可以定义一些理想化的电路元件,每一种电路元件只体现一种基本电磁现象,具有精确和简单的数学定义,这些元件称为理想元件。电路分析中常用的理想元件有电阻、电感、电容、理想电压源和理想电流源等,将在后面几节中分别介绍。

定义了理想元件后,在一定条件下,电路中的实际器件就可以用理想元件及它们的组合来表示,这就是元件模型。一个实际器件可以有多个元件模型,视电路分析要求的精度和工作条件选择一种模型。一般来说,模型越复杂,精度就越高,分析就越困难。如一个电感线圈,一般情况下可以看做是理想电感(简称电感)。当通过的电流的频率较低时,就应考虑线圈的能量损耗,这时可把线圈看做是电感和电阻的串联,如图 1.1.2(b)所示。如果电流的频率很高,要求的精度也较高时,则应考虑电场的影响,电路模型如图 1.1.2(c)所示。

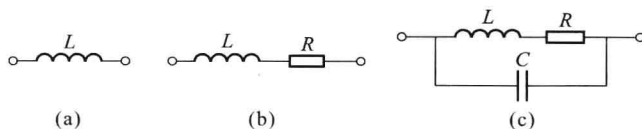


图 1.1.2 电感线圈模型

一个实际器件用元件模型来表示,总是在一定的假设条件下,即器件的尺寸远小于正常工作频率所对应的波长,这就是集总假设。因此理想元件也称为集总参数元件。工程上常用小于 10% 作为远小于的标准。举例说,我国电力用电的频率是 50 Hz,对应的波长为 6000 km,对以此为工作频率的电气设备来说,其尺寸与这波长相比可忽略不计,因而用集总参数的概念是完全可以的,但对超高压电力输电线来说,其传输距离常达到上千公里,这时就必须考虑电场、磁场沿电路分布的情况,不能用集总参数描述,而只能用分布参数描述,通过电磁场理论求解。

当电路中的实际器件都用理想元件或理想元件的组合表示后,由理想元件构成的电路图就称为实际电路的电路模型。在手电筒电路中,电珠用电阻表示,干电池用电压源表示,开关和导线可视理想导体,这样手电筒电路的电路模型如图 1.1.1(b)所示。

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意义的规

律和电路分析的一般方法。

思考与练习

- 1.1.1 电路的作用是什么？电路通常有哪几部分组成？
- 1.1.2 什么是理想元件？什么是电路模型？
- 1.1.3 举一个你熟悉的电路，指出其作用和各组成部分，试画出电路图。

1.2 电路中的基本物理量

电路中的基本物理量有电流、电压及功率。

1.2.1 电流

带电粒子有规律的运动形成电流。电流的大小定义为单位时间内通过导体截面的电荷量，用符号 i 表示电流，则表示式为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

如果电流不随时间变化，则表示式为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.2.2)$$

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的方向，电流的方向是客观存在的。

在简单的电路中，可以容易地直接确定电流的方向，但在较复杂的电路中，就很难预先判定电流的方向。特别是在交流电路中，电流的大小和方向均随时间变化，很难表示出实际方向。在这种情况下，可以事先任意假定某一方向为电流的参考方向，亦即正方向，并用箭头标出，根据假定的电流正方向进行计算，若求得的电流是正值，说明电流的实际方向与参考方向一致；若求得的电流是负值，则说明实际方向与参考方向相反，如图 1.2.1 所示。

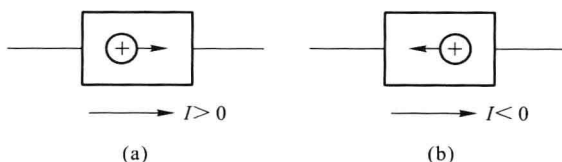


图 1.2.1 电流的实际方向与参考方向

1.2.2 电压和电位

电荷之所以能在电路中流动，是由于电荷在电路中受电场力的作用，即电场力对电荷作了

功。为了衡量电场力作功的本领,引入电压(u)这一物理量。单位正电荷从 a 点移到 b 点时电场力作的功称为 a、b 两点间的电压,表达式为

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1.2.3)$$

如果电压不随时间变化,则表达式为

$$U_{ab} = \frac{W}{Q} \quad (1.2.4)$$

在国际单位制中,电压的单位是伏[特](V)。

式(1.2.3)中, dW 为 dq 从 a 点移至 b 点时电场力作的功,也就是 dq 在运动过程中失去的电势能。按电磁学理论,电荷在电场中某一点的电势能等于该点的电位与电荷量的乘积。因此在 dq 为正值时,若 $dW > 0$,则表示 a 点的电位比 b 点高,故电压又称为电位差。

电压的实际方向由高电位点指向低电位点,即电位降低的方向。在电路分析中,由于往往难以事先判定元件两端电压的实际方向,因此也要像电流一样先任意设定某一方向为电压的正方向,即参考方向。若计算结果电压为正值,说明电压的实际方向与参考方向一致;若为负值,则说明实际方向与参考方向相反。电压的参考方向可采用极性表示,在元件两端标出正(+)、负(-)极性,从正极指向负极的方向就是电压的参考方向,也可采用箭头表示,在元件旁标上箭头,箭头的方向就是电压的参考方向,如图 1.2.2(a)所示。电压的参考方向还可用双下标表示,如 U_{ab} 表示电压的参考方向是由 a 指向 b,如 $U_{ab} > 0$,表示 a 点电位比 b 点电位高,如 $U_{ab} < 0$,表示 a 点电位比 b 点电位低。显然 $U_{ab} = -U_{ba}$ 。这里有一点需要特别指出,尽管电压和电流的参考方向可以任意指定,但一经确定,在整个分析计算过程中就不能变更,否则会引起混乱而导致计算错误。

电流和电压的参考方向可独立地设定,但为了分析方便,常采用关联参考方向,即把同一元件的电压参考方向和电流参考方向取为一致,电流从电压的正极流向负极,如图 1.2.2(b)所示。

在电路中任取一点 O 作为参考点,则由某点 a 到参考点的电压 U_{ao} 称为 a 点的电位,记为 V_a 。参考点的选择具有任意性,因此电位也具有任意性,但任意两点间的电压(电位差)是不变的。在一个连通的系统中,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集处,而且常常是电源的一个极,这条线虽不直接接地,但有时也称为地线,参考点用接地符号“ \perp ”表示。

有了电位的概念后,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电压数值和极性标出就可以了,如图 1.2.3 所示。

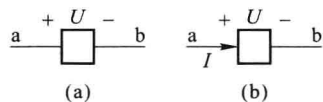


图 1.2.2 电压的参考方向和关联参考方向

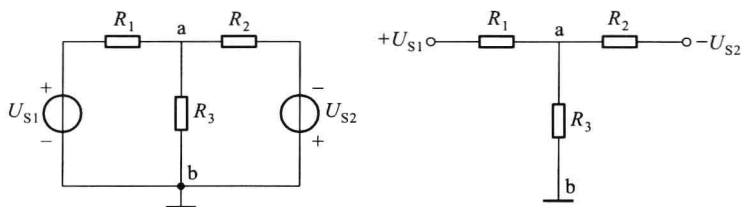


图 1.2.3 电子电路的习惯画法

1.2.3 电功率和电能

功率的定义为单位时间内能量的变化,即

$$p = \frac{dW}{dt}$$

在图 1.2.4 中,设正电荷 dq 从 a 点经元件 A 移到 b 点, a 、 b 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 的电功率为

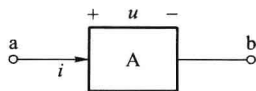


图 1.2.4 元件的电功率

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{udq}{dt} = ui \quad (1.2.5)$$

这里 u 为元件上的电压降, i 为元件中的电流, u 、 i 为关联参考方向。若计算结果表明 u 、 i 同为正值或同为负值,则 $p > 0$,表明元件吸收功率或消耗功率;若 u 、 i 互为异号,则 $p < 0$,表明元件释放功率或提供功率。若元件上的电压与电流为非关联参考方向,则功率的表达式为

$$p = -ui \quad (1.2.6)$$

此时,若求得 u 、 i 互为异号,则 $p > 0$,表明元件吸收功率;若 u 、 i 同为正值或同为负值,则 $p < 0$,元件释放功率。

对于直流电路,在关联参考方向下,功率的表达式为

$$P = UI \quad (1.2.7)$$

在国际单位制中,功率的单位是瓦[特](W)。

例 1.2.1 在图 1.2.5 所示电路中,已知 $I = 2 \text{ A}$, $U_1 = 4 \text{ V}$, $P_2 = 16 \text{ W}$, $U_3 = 6 \text{ V}$,求 P_1 、 P_3 、 U_2 及整个电路的总功率。

解: 元件 1 的电压、电流为关联参考方向,故

$$P_1 = U_1 I = 4 \times 2 \text{ W} = 8 \text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

元件 2 和元件 3 的电压和电流为非关联参考方向,故

$$P_3 = -U_3 I = -6 \times 2 \text{ W} = -12 \text{ W} \quad (\text{释放功率})$$

$$U_2 = -\frac{P_2}{I} = -\frac{16}{2} \text{ V} = -8 \text{ V}$$

整个电路的总功率为

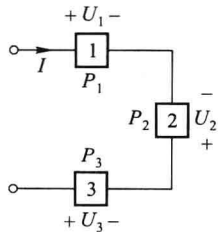


图 1.2.5 例 1.2.1 图

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = [8 + 16 + (-12)] \text{ W} = 12 \text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

根据式(1.2.5),在 t_0 到 t 时间内,元件 A 吸收(消耗)的电能为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1.2.8)$$

如 $p < 0$, 即 $W < 0$, 则表明元件释放电能。直流时为

$$W = P(t - t_0) \quad (1.2.9)$$

在国际单位制中,电能的单位是焦[耳](J),在实际中常采用千瓦·时(kW·h)作为电能的单位,俗称度。

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

思考与练习

1.2.1 求图 1.2.6 所示电路中开关 S 闭合和断开两种情况下, a、b、c 三点的电位。

1.2.2 求图 1.2.7 所示电路中的电流 I 。

1.2.3 求图 1.2.8 所示电路中通过电压源的电流 I_1 、 I_2 及电压源的功率,并说明是起电源作用还是起负载作用。

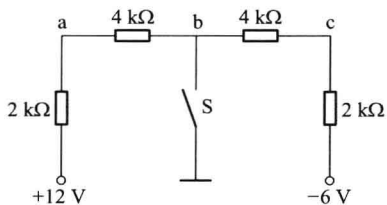


图 1.2.6 思考与练习 1.2.1 图

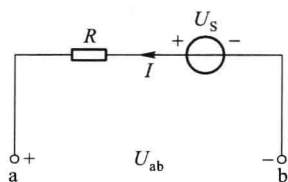


图 1.2.7 思考与练习 1.2.2 图

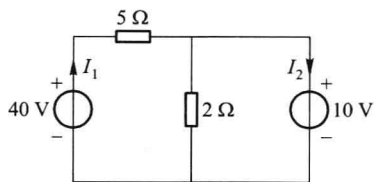


图 1.2.8 思考与练习 1.2.3 图

1.3 电阻、电感、电容元件

电路中的元件可分为有源元件和无源元件两大类。电压源、电流源称为有源元件,它们向电路提供电能。电阻元件只能消耗电能,电感和电容元件尽管能释放电能,但不能释放出多于它吸收或储存的电能,因此电阻、电感和电容元件称为无源元件。本节介绍电阻元件、电感元件和电容元件的基本电特性。

1.3.1 电阻元件

当元件上的电压 u 与电流 i 由代数关系联系时,这种元件就称为电阻元件。电阻元件的电压电流关系在 $u-i$ 平面上是一条曲线,这条曲线称为电阻元件的伏安特性曲线。当伏安特性曲线是一条过原点的直线时,这种电阻元件就称为线性电阻元件,简称电阻。否则,则称为非线性