



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

# 电路与模拟电子技术

高玉良

▼  
……  
(第2版)  
……  
▲



高等教育出版社



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

# 电路与模拟电子技术

高玉良

第2版



高等教育出版社

## 内容简介

本书根据计算机、机电等专业新的课程体系和教学内容编写。全书分电路理论和模拟电子技术两部分,电路理论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五章;模拟电子技术部分包括半导体二极管和晶体管、基本放大电路、放大电路中的负反馈、信号的运算与处理电路、信号产生电路和直流稳压电源六章。为了让读者了解电子技术的最新发展,初步掌握电子电路的计算机辅助设计方法,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。

本书注重基础,兼顾应用,适合于普通高等学校计算机、机械类及相关专业的本科教学,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/高玉良主编. —2版. —北京:  
高等教育出版社,2008.11

ISBN 978-7-04-024887-6

I. 电… II. 高… III. ①电路理论—高等学校—教材  
②模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TM13  
TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第451770号

策划编辑 刘激扬 责任编辑 李葛平 封面设计 赵阳 责任绘图 吴文信  
版式设计 范晓红 责任校对 王超 责任印制 韩刚

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
总 机 010-58581000  
经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京宏信印刷厂

开 本 787×1092 1/16  
印 张 22.75  
字 数 510 000

购书热线 010-58581118  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2004年7月第1版  
2008年11月第2版  
印 次 2008年11月第1次印刷  
定 价 26.20元

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 24887-00

# 总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要,满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转变阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求,探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系,全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,组织全国100余所培养应用型人才为主的高等院校,进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索,在高等院校应用型人才培养的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果,并在高等教育出版社的支持和配合下,推出了一批适应应用型人才培养需要的立体化教材,冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月,教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项,为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台,整体设计立项研究计划,明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式,分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现,组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后,教研中心组织了首批课题立项申报,有63所高校申报了近450项课题。2003年1月,在黑龙江工程学院进行了项目评审,经过课题领导小组严格的把关,确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月,各子课题相继召开了工作会议,交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题,确定了项目分工,并全面开始研究工作。计划先集中力量,用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和 in 研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才培养特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是,“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才培养探索与实践成果基础上,紧密结合经济全球化时代高校应用型人才培养工作的实际需要,努力实践,大胆创新,采取边研究、边探索、边实践的方式,推进高校应用型本科人才培养工作,突出重点目标,并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础,作为体现教学内容和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的

任务。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才培养的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施,具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

## 第二版前言

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@yangtzen.edu.cn

编者

2008.4

# 第一版前言

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

# 目 录

<b>第 1 章 电路的基本概念和基本定律</b> .....	1
1.1 电路和电路模型 .....	1
1.1.1 电路 .....	1
1.1.2 电路模型 .....	2
1.2 电路中的基本物理量 .....	3
1.2.1 电流 .....	3
1.2.2 电压和电位 .....	4
1.2.3 电功率和电能 .....	5
1.3 电阻、电感、电容元件 .....	6
1.3.1 电阻元件 .....	6
1.3.2 电感元件 .....	7
1.3.3 电容元件 .....	8
1.4 电压源与电流源 .....	9
1.4.1 电压源 .....	9
1.4.2 电流源 .....	10
1.4.3 电源的功率 .....	11
1.5 基尔霍夫定律 .....	13
1.5.1 基尔霍夫电流定律 .....	13
1.5.2 基尔霍夫电压定律 .....	14
1.6 电路的工作状态 .....	17
1.6.1 开路 .....	17
1.6.2 短路 .....	17
1.6.3 负载状态 .....	17
习题 .....	18
<b>第 2 章 电路的基本分析方法和</b>	
<b>电路定理</b> .....	21
2.1 电阻电路的等效变换 .....	21
2.1.1 电路等效变换的概念 .....	21
2.1.2 电阻的等效变换 .....	22
2.1.3 电源的等效变换 .....	28
2.2 电阻电路的一般分析方法 .....	32
2.2.1 支路电流法 .....	32
2.2.2 网孔电流法 .....	33
2.2.3 结点电压法 .....	35
2.3 电路定理 .....	38
2.3.1 叠加定理 .....	38
2.3.2 替代定理 .....	41
2.3.3 等效电源定理 .....	42
2.4 受控源及含受控源电路的分析 .....	48
2.4.1 受控源 .....	48
2.4.2 含受控源电路的分析 .....	49
2.5 用 EWB 分析直流电路 .....	52
习题 .....	55
<b>第 3 章 正弦交流电路</b> .....	61
3.1 正弦交流电的基本概念 .....	61
3.1.1 正弦交流电的三要素 .....	61
3.1.2 正弦交流电的有效值 .....	62
3.1.3 同频率正弦交流电的相位差 .....	63
3.2 正弦量的相量表示 .....	64
3.2.1 复数及其四则运算 .....	65
3.2.2 正弦量的相量表示法 .....	66
3.3 正弦交流电路中的电阻、电感、 电容元件 .....	69
3.3.1 电阻元件的交流电路 .....	69
3.3.2 电感元件的交流电路 .....	71
3.3.3 电容元件的交流电路 .....	73
3.4 基尔霍夫定律的相量形式 .....	75



3.5 阻抗与导纳 .....	78	5.2 一阶电路的零输入响应 .....	134
3.5.1 阻抗 .....	78	5.2.1 RC 电路的零输入响应 .....	134
3.5.2 导纳 .....	80	5.2.2 RL 电路的零输入响应 .....	137
3.5.3 阻抗与导纳的串并联 .....	80	5.3 一阶电路的零状态响应 .....	138
3.5.4 阻抗与导纳的等效变换 .....	82	5.3.1 RC 电路的零状态响应 .....	138
3.6 一般正弦交流电路的计算 .....	84	5.3.2 RL 电路的零状态响应 .....	139
3.7 正弦交流电路的功率 .....	88	5.4 一阶电路的全响应及三要素 分析法 .....	142
3.7.1 平均功率和功率因数 .....	88	5.5 一阶电路的阶跃响应 .....	146
3.7.2 无功功率和视在功率 .....	89	5.5.1 阶跃函数 .....	146
3.7.3 功率因数的提高 .....	91	5.5.2 阶跃响应 .....	147
3.8 谐振电路 .....	93	5.6 二阶电路的零输入响应 .....	148
3.8.1 串联谐振 .....	93	5.7 用 EWB 分析电路的暂态 习题 .....	151 153
3.8.2 并联谐振 .....	96	<b>第 6 章 半导体二极管和晶体管</b> .....	<b>156</b>
3.9 互感电路 .....	98	6.1 半导体基础知识 .....	156
3.9.1 耦合电感及其伏安特性 .....	98	6.1.1 本征半导体 .....	156
3.9.2 互感电路的计算 .....	101	6.1.2 杂质半导体 .....	157
3.9.3 变压器 .....	103	6.1.3 PN 结 .....	158
3.10 三相交流电路 .....	105	6.2 二极管 .....	160
3.10.1 三相交流电源 .....	106	6.2.1 二极管的结构与伏安特性 .....	160
3.10.2 对称三相电路的计算 .....	107	6.2.2 二极管的主要参数 .....	161
3.10.3 不对称三相电路的计算 .....	111	6.3 特殊二极管 .....	163
3.10.4 三相电路的功率 .....	113	6.3.1 稳压二极管 .....	163
3.11 用 EWB 分析正弦交流电路 .....	115	6.3.2 变容二极管 .....	165
习题 .....	117	6.3.3 光电二极管 .....	165
<b>第 4 章 非正弦周期电流电路</b> .....	<b>123</b>	6.3.4 发光二极管 .....	166
4.1 非正弦周期量的分解 .....	123	6.4 晶体管 .....	166
4.2 非正弦周期量的有效值、 平均值和平均功率 .....	126	6.4.1 晶体管的结构与电流放大原理 .....	166
4.3 非正弦周期电流电路的计算 .....	128	6.4.2 晶体管的特性曲线 .....	168
4.4 用 EWB 分析非正弦交流电路 .....	129	6.4.3 晶体管的微变等效电路 .....	170
习题 .....	130	6.4.4 晶体管的主要参数 .....	173
<b>第 5 章 电路的暂态分析</b> .....	<b>132</b>	6.5 用 EWB 分析二极管电路 .....	174
5.1 换路定则及初始值的计算 .....	132	习题 .....	175
5.1.1 换路定则 .....	132	<b>第 7 章 基本放大电路</b> .....	<b>177</b>
5.1.2 初始值的计算 .....	133	7.1 共射放大电路 .....	177

7.1.1 放大电路的基本概念 .....	177	8.2.1 提高放大倍数的稳定性 .....	232
7.1.2 共射放大电路的组成及工作 原理 .....	180	8.2.2 减小非线性失真和抑制干扰 .....	233
7.2 放大电路的基本分析方法 .....	181	8.2.3 展宽频带 .....	234
7.2.1 放大电路的静态分析 .....	181	8.2.4 改变输入、输出电阻 .....	235
7.2.2 放大电路的动态分析 .....	182	8.3 负反馈放大电路的分析计算 .....	237
7.3 静态工作点的稳定 .....	188	8.4 用 EWB 分析负反馈对放大 电路的影响 .....	241
7.4 共集放大电路 .....	191	习题 .....	243
7.5 功率放大电路 .....	194	<b>第 9 章 信号的运算与处理电路</b> .....	246
7.5.1 功率放大电路概述 .....	194	9.1 运算电路 .....	246
7.5.2 互补对称功率放大电路 .....	195	9.1.1 比例运算电路 .....	246
7.6 多级放大电路 .....	199	9.1.2 加法运算电路 .....	248
7.6.1 多级放大电路的耦合 .....	200	9.1.3 减法运算电路 .....	249
7.6.2 多级放大电路的动态分析 .....	201	9.1.4 积分和微分运算电路 .....	252
7.7 差分放大电路 .....	203	9.1.5 对数和指数运算电路 .....	254
7.7.1 差分放大电路的工作原理 .....	203	9.1.6 乘法和除法运算电路 .....	255
7.7.2 典型差分放大电路 .....	204	9.2 有源滤波电路 .....	257
7.7.3 恒流源式的差分放大电路 .....	206	9.2.1 滤波电路概述 .....	257
7.8 场效应晶体管及其放大电路 .....	209	9.2.2 低通滤波器 .....	258
7.8.1 绝缘栅场效应晶体管 .....	209	9.2.3 高通滤波器 .....	261
7.8.2 场效应晶体管的主要参数及微变 等效电路 .....	211	9.2.4 带通滤波器 .....	262
7.8.3 场效应晶体管放大电路 .....	213	9.2.5 带阻滤波器 .....	263
7.9 集成运算放大器 .....	216	9.3 电压比较器 .....	265
7.9.1 集成运放的组成 .....	216	9.3.1 过零比较器 .....	265
7.9.2 集成运放的主要参数与分类 .....	218	9.3.2 单门限比较器 .....	266
7.9.3 理想运放及其特点 .....	221	9.3.3 滞回比较器 .....	267
7.10 用 EWB 分析晶体管放大电路 .....	222	9.3.4 窗口比较器 .....	269
习题 .....	224	9.4 用 EWB 分析信号处理电路 .....	270
<b>第 8 章 放大电路中的负反馈</b> .....	228	习题 .....	271
8.1 反馈的基本概念与分类 .....	228	<b>第 10 章 信号产生电路</b> .....	277
8.1.1 反馈的基本概念 .....	228	10.1 产生正弦振荡的条件 .....	277
8.1.2 反馈的分类 .....	229	10.2 RC 正弦振荡电路 .....	278
8.1.3 负反馈的四种组态 .....	230	10.3 LC 正弦振荡电路 .....	281
8.1.4 负反馈放大电路的基本方程 .....	231	10.3.1 变压器反馈式 LC 振荡电路 .....	282
8.2 负反馈对放大电路性能的影响 .....	232	10.3.2 三点式 LC 振荡电路 .....	282

10.3.3 石英晶体振荡电路 .....	283	11.6 用 EWB 分析直流稳压电路 .....	306
10.4 非正弦波产生电路 .....	285	习题 .....	308
10.4.1 矩形波产生电路 .....	285	<b>第 12 章 EDA 技术基础</b> .....	<b>311</b>
10.4.2 三角波产生电路 .....	287	12.1 EDA 技术概述 .....	311
10.4.3 锯齿波产生电路 .....	288	12.1.1 EDA 简介 .....	311
10.4.4 压控振荡电路 .....	289	12.1.2 EDA 的设计方法 .....	312
10.4.5 集成函数发生器 .....	290	12.1.3 常用 EDA 软件简介 .....	313
10.5 用 EWB 分析信号产生电路 .....	291	12.2 EWB 及其应用 .....	314
习题 .....	293	12.2.1 EWB 简介 .....	314
<b>第 11 章 直流稳压电源</b> .....	<b>296</b>	12.2.2 EWB 的软件菜单 .....	317
11.1 单相整流电路 .....	296	12.2.3 EWB 的虚拟仪器 .....	321
11.1.1 单相半波整流电路 .....	296	12.2.4 EWB 应用举例 .....	322
11.1.2 单相桥式整流电路 .....	297	12.3 在系统可编程模拟器件及 其应用 .....	326
11.2 滤波电路 .....	298	12.3.1 ispPAC 概述 .....	326
11.2.1 电容滤波电路 .....	298	12.3.2 ispPAC 的结构及工作原理 .....	327
11.2.2 电感滤波电路 .....	300	12.3.3 ispPAC 应用举例 .....	330
11.3 串联型稳压电路 .....	300	12.3.4 PAC - Designer 软件及开发 实例 .....	334
11.3.1 电路的组成及工作原理 .....	300	<b>习题参考答案</b> .....	<b>340</b>
11.3.2 输出电压的调节范围 .....	301	<b>名词索引</b> .....	<b>344</b>
11.3.3 保护电路 .....	301	<b>参考文献</b> .....	<b>351</b>
11.3.4 技术指标 .....	302		
11.4 集成稳压器 .....	303		
11.5 开关型稳压电路 .....	305		

# 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。

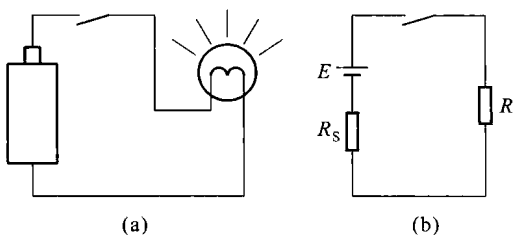


图 1.1.1 手电筒电路及其电路模型

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;扬声器是接受和转换信号的设备,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、恒压源和恒流源等,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。

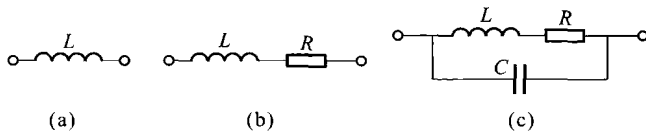


图 1.1.2 电感线圈模型

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。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实验室设备来说,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,但对远距离的输电线来说,就必须考

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,开关和导线可视为理想导体,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。

## 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。电流的大小用电流强度(简称电流)表示,其定义为:单位时间内通过导体截面的电荷量。用符号  $i$  表示电流强度,则表示式为

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

如果电流强度不随时间变化,则表示式为

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

在国际单位制中,电流强度的单位是安[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正方向,亦即参考方向,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。

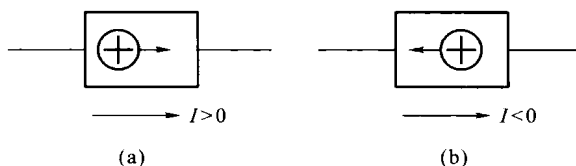


图 1.2.1 电流的实际方向与参考方向

### 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,即为  $V_a$ 。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

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

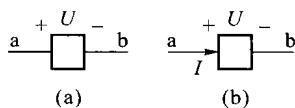


图 1.2.2 电压的参考方向和关联参考方向

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。

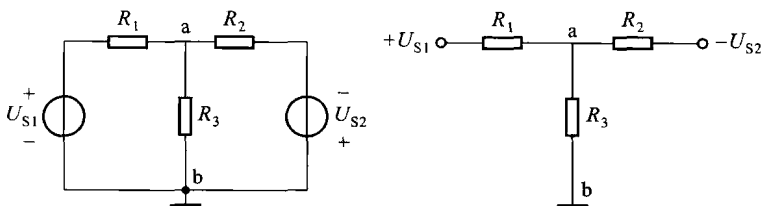


图 1.2.3 电子电路的习惯画法

### 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

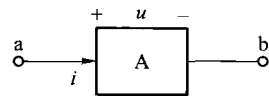


图 1.2.4 元件的电功率

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

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。若电路中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

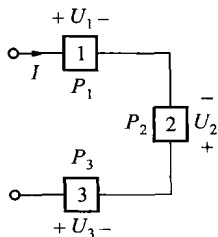


图 1.2.5 例 1.2.1 图



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

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

整个电路的总功率为

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

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( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )作为电能的单位,俗称度。

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

### 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,称为非线性电阻,如图 1.3.1 所示。电路中的电阻通常是指线性电阻,用  $R$  表示。

当在电阻上加上电压或通以电流时,在关联参考方向下,电阻上的电压和电流满足关系:

$$u = Ri \quad (1.3.1)$$

这就是欧姆定律。 $R$  称为线性电阻元件的电阻值,简称电阻。显然这是一常数,与电流、电压的大小无关。在国际单位制中,电阻的单位是欧[姆]( $\Omega$ )。

当电压与电流为非关联参考方向时,电阻上的电压与电流的关系则为

$$u = -Ri \quad (1.3.2)$$

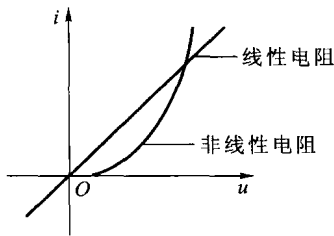


图 1.3.1 电阻元件的伏安特性