

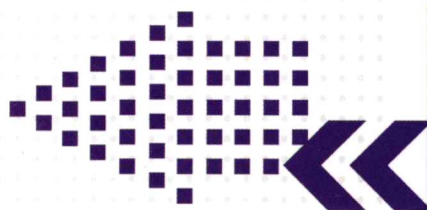


普通高等教育“十二五”计算机类规划教材

# 电路与电子技术基础

第2版

© 李心广 王金矿 张晶 等编著



免费电子课件



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”计算机类规划教材

# 电路与电子技术基础

第 2 版

李心广 王金矿 张 晶 等编著  
赖声礼 主审



机械工业出版社

本书是省级精品课程配套教材。本书将“电路基础”、“模拟电子技术”及“数字电子技术”有机地融为一体。在保证必要的经典内容的同时,力求反映近代理论和先进技术;在理论与应用关系上,力求实用,以应用为主。

本书共分3篇:第1篇为电路分析基础,内容包括电路的基本概念和定律、电阻电路分析、动态电路分析和正弦电路分析。第2篇为模拟电子技术,内容包括放大器件、基本放大电路分析、负反馈放大电路、集成运算放大电路功率放大与直流电源。第3篇为数字电子技术,内容包括数字逻辑基础、集成逻辑门电路、组合逻辑电路分析与设计、触发器、时序逻辑电路分析与设计、脉冲波形的产生与整形以及现代电子电路分析与设计技术介绍。

本书可作为高等学校计算机类、自动控制及电子技术应用等专业的本科生、专科生教材;也可作为其他理工科各专业教材;还可供从事相关专业的工程技术人员参考。为方便教师教学,本书配有教学课件,欢迎选用本书作为教材的老师索取,索取邮箱:llm7785@sina.com。

### 图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术基础/李心广,王金矿,张晶等编著. —2版.

—北京:机械工业出版社,2012.8

普通高等教育“十二五”计算机类规划教材

ISBN 978-7-111-38848-7

I. ①电… II. ①李…②王…③张… 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(2012)第129698号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘丽敏 责任编辑:刘丽敏 关晓飞

版式设计:纪敬 责任校对:张晓蓉

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2012年9月第2版第1次印刷

184mm×260mm·26.75印张·663千字

标准书号:ISBN 978-7-111-38848-7

定价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

## 第2版前言

《电路与电子技术基础》于2008年3月由机械工业出版社出版,作为一本主要面向高等学校计算机类、自动控制及电子技术应用等专业的本科生、专科生的教材,得到全国各兄弟院校的支持。该教材作为省级精品课程,主要体现在教学内容的改革上,内容选材与编排上应配合该课程进一步深化改革。经过4年的教学实践,听取选用教材教师的意见后,编写组特对此教材进行修订。

本教材第2版内容总体结构不变,即分为电路分析、模拟电路与数字电路3篇。电路分析内容选材思路是让学生学习电路分析的基础,为后续模拟电子电路部分的学习提供分析的理论。模拟电路的内容选材思路主要有三:其一是为数字电路提供电子学基础,让学生了解半导体知识、二极管与晶体管的线性与非线性应用;其二是让学生了解放大的基本原理、反馈及集成放大器;其三是让学生了解功率放大与直流电源。数字电路的内容选材思路也主要有三:其一是让学生掌握数字电路的组合逻辑电路与时序逻辑电路的两大组成部分;其二是组合逻辑电路中强调计算机中核心部件加法器、三态门内容的学习,时序逻辑电路中强调计数器、寄存器等的学习;其三是让学生了解现代电子电路设计的思想与方法。

在本版编写中增加了新的一章“功率放大电路与直流稳压电源”,增加的理由是本章内容很实用,电子产品中无处不存在功率放大电路与直流稳压电源相关电路,而且学生在参加全国大学生电子设计竞赛中也要用到这方面的知识。增加这部分内容,各学校根据课时可进行选用。

本版编写中我们对部分章节内容进行了调整,这有利于缩短课内时数及组织教学。如第12章集成逻辑门电路与第13章组合逻辑电路的分析与设计的内容进行了调整;以及第14、15两章触发器与时序逻辑电路的内容进行了适当调整;另外,对第6章的内容进行了调整。

本书第2版修订工作由李心广、王金矿、张晶主持进行,李心广负责修订思路的提出及负责新增第10章的编写、模拟电路部分的审稿工作,王金矿负责电路分析部分、第11章、第16章的审稿工作及全书插图检查。张晶负责第12章、第13章、第14章、第15章及第17章的审稿工作与全书版式检查。

编者

# 第1版前言

随着科学技术的不断发展,各学科在教学过程中,都会将本学科最新技术发展成果增加到教学体系之中,近年来计算机技术的飞速发展,导致了与之相关学科教学内容做较大幅度的调整;其次,考虑到以加强学生自主学习、提高学生创新能力为目的的素质教育,减少了课堂教学,为此,在编写教材时,必须适应当前的教学需要。本教材就是为适应这一形势发展要求的一个大胆尝试的结果,即将弱电类(诸如计算机、自动控制及理工电气信息等)专业的三门核心基础课程“电路分析基础”、“模拟电子技术基础”、“数字电子技术基础”有机地合并为一门课程——“电路与电子技术基础”。

针对计算机类专业的特点,本书在选材上采取了“强化数字、优化模拟、夯实基础、拓展新技术”的策略,内容上全书分为3篇:

第1篇为电路分析基础。主要讲述电路的基本概念、基本定律(定理)和基本分析方法。内容涉及电阻电路、动态电路和正弦稳态交流电路分析。本篇主要要求学生掌握纯电阻性电路分析方法、含有动态元件电路的过渡过程分析以及正弦稳态电路分析的一般方法。通过这一部分的学习,既让学生掌握基本电路的分析方法,也为学习电子技术及以后的相关课程奠定基础。

第2篇为模拟电子技术基础。主要讲述半导体器件的原理、基本放大电路分析基础、负反馈放大电路和集成运算放大器及应用。本篇要求学生掌握基本半导体器件的工作原理并可以分析基本的放大电路,了解和掌握负反馈在电路中的作用和熟练运用运算放大器设计应用电路。

第3篇为数字电子技术基础。主要内容包括逻辑代数基础、集成门电路介绍、组合逻辑电路分析与设计、触发器电路介绍、时序电路的分析与设计、脉冲波形的产生与整形电路,以及现代电子电路分析与设计技术介绍。本篇内容是学习后续课程——计算机组成原理、计算机接口电路等的基础,也是本课程的重点。随着数字电子技术的发展,特别是计算机技术的发展,各种电器设备都有向数字化过渡的趋势,掌握数字电路的分析和设计的方法显得越来越重要,特别是现代数字系统的设计方法的学习为后续课程的教学改革打下基础。

在具体编写过程中,体现了如下思想:

1. 处理好迅速更新的新技术与有限篇幅之间的矛盾。在保留基本概念、基本原理和基本分析方法的基础上,精简了当前实际中应用较少或陈旧的内容,重点放在数字电路的分析上,加强了中、大规模集成电路的应用介绍。

2. 突出电子技术基础课程的实践性。在讨论各器件时,重点放在器件的基本工作原理以及与实际应用有着密切关系的器件外特性和主要参数上。在讨论具体电路时,突出构成电路的思路、电路特点以及重要技术指标的计算。

3. 在选材编排上,力求做到由浅入深,循序渐进。首先介绍电路分析的基本理论和基本方法;在此基础上引入模拟电子技术的概念,通过介绍模拟电路的基本理论和应用,为数字电路的分析作必要的知识储备;最后介绍数字电路的分析理论和方法以及集成电路的



应用。

4. 限于篇幅, 本教材主要讲授基本概念、基本理论和基本应用, 具体的应用可根据各专业的应用方向在后续课程中加以介绍。如: A-D、D-A 转换可以在后续课“计算机组成原理”或“计算机接口技术”中介绍。这样也避免了各教材内容的重复。

本书适合用作高等学校计算机科学与技术、软件工程、网络工程等计算机类专业、自动控制专业以及其他相关专业本科生、专科生教材, 也可供从事相关专业的工程技术人员和科研人员参考。

本教材的参考教学时数为 90 学时左右, 可根据各自学校的具体情况增删部分教学内容。例如: 三部分内容均讲, 可按 35%、25% 及 40% 安排电路、模拟电子技术及数字逻辑电路的教学时数。时数少的学校也可只讲数字部分, 其他部分内容可让学生自学。

本书编写分工如下: 李心广编写第 1、2、16 章、罗海涛编写第 3、4、5 章、王金矿编写第 6、7、8、9 章、马文华编写第 10、11、12 章、张晶编写第 13、14、15 章。由王金矿、李心广、张晶通读全稿, 对文字、图表进行校正, 并集体讨论决定最终内容的取舍。由王金矿、李心广负责全书的修改、统稿、定稿, 由张晶负责全书版式的检查, 由华南理工大学赖声礼教授主持全书的审稿工作。

电子技术日新月异, 教学改革任重道远, 编者的能力与这两方面所提出的要求相比, 还有很大差距。恳请同行及使用者批评指正, 以便再版时修正。

全书附有部分习题参考答案, 相关资料可与作者联系, 联系邮箱: [lxgu@163.com](mailto:lxgu@163.com) 或 [jkwang@mail.gdufs.edu.cn](mailto:jkwang@mail.gdufs.edu.cn)。为方便教师教学, 本书配有教学课件, 欢迎选用本书作为教材的老师索取, 索取邮箱: [llm7785@sina.com](mailto:llm7785@sina.com)。

编 者

# 目 录

第2版前言	
第1版前言	
第1篇 电路分析基础	1
第1章 电路的基本概念及基本定律	2
1.1 电路模型	2
1.2 电路分析的基本变量	3
1.2.1 电流	3
1.2.2 电压	4
1.2.3 能量和功率	5
1.3 基尔霍夫定律	7
1.4 电路元件	9
1.4.1 耗能元件——电阻元件	9
1.4.2 供能元件——独立电源	12
1.4.3 储能元件——动态元件	16
1.4.4 控能元件——受控电源	25
习题	27
第2章 电阻电路的一般分析方法	29
2.1 电阻的串联和并联	29
2.1.1 电阻的串联	29
2.1.2 电阻的并联	30
2.1.3 电阻的混联及 $Y$ - $\Delta$ 等效变换	31
2.2 电阻电路功率及负载获得最大功率的条件	34
2.3 电路中各点电位的计算	35
2.4 应用基尔霍夫定律计算线性网络	37
2.5 网孔分析法	38
2.6 节点分析法	41
2.7 弥尔曼定理	45
习题	47
第3章 电路分析的几个定理	49
3.1 叠加定理	49
3.2 置换定理	51
3.3 戴维南定理	52
3.4 诺顿定理	54
3.5 应用戴维南定理分析受控源电路	55
习题	58
第4章 动态电路的分析方法	61
4.1 一阶电路的分析	61
4.1.1 一阶电路的零输入响应	61
4.1.2 一阶电路的零状态响应	65
4.1.3 一阶电路的完全响应	69
4.2 二阶电路的分析	72
4.2.1 $LC$ 电路中的自由振荡	72
4.2.2 二阶电路的零输入响应描述	74
4.2.3 二阶电路的零输入响应(非振荡情况)	76
4.2.4 二阶电路的零输入响应(振荡情况)	78
习题	80
第5章 正弦稳态电路分析	82
5.1 正弦信号的基本概念	82
5.1.1 正弦信号的三要素	82
5.1.2 正弦信号的相位差	83
5.1.3 正弦信号的有效值	84
5.2 正弦信号的相量表示	85
5.2.1 复数及其运算	86
5.2.2 用相量表示正弦信号	87
5.3 基本元件的伏安特性和基尔霍夫定律的相量形式	89
5.3.1 基本元件伏安特性的相量形式	89
5.3.2 基尔霍夫电流定律和电压定律的相量形式	92
5.4 相量模型	94
5.4.1 阻抗与导纳	94
5.4.2 正弦稳态电路的相量模型	96
5.4.3 阻抗和导纳的串、并联	97
5.5 相量法分析	99
5.6 电路的谐振	102
5.6.1 串联谐振	102
5.6.2 并联谐振	105
习题	107
第2篇 模拟电子技术基础	111





第 6 章 半导体器件的基本特性 .....	112	8.3.1 提高放大倍数的稳定性 .....	168
6.1 半导体基础知识 .....	112	8.3.2 减小非线性失真和抑制干扰、 噪声 .....	169
6.1.1 本征半导体 .....	112	8.3.3 负反馈对输入电阻的影响 .....	170
6.1.2 杂质半导体 .....	113	8.3.4 负反馈对输出电阻的影响 .....	171
6.2 PN 结及半导体二极管 .....	114	8.4 负反馈放大电路的计算 .....	173
6.2.1 异型半导体的接触现象 .....	115	8.4.1 深度负反馈放大电路的近似 估算 .....	173
6.2.2 PN 结的单向导电特性 .....	115	8.4.2 串联电压负反馈 .....	174
6.2.3 半导体二极管 .....	118	8.4.3 串联电流负反馈 .....	174
6.2.4 半导体二极管的应用 .....	123	8.4.4 并联电压负反馈 .....	175
6.3 半导体晶体管 .....	124	8.4.5 并联电流负反馈 .....	176
6.3.1 晶体管的结构及类型 .....	124	习题 .....	177
6.3.2 晶体管的放大作用 .....	125	第 9 章 集成运算放大器基础 .....	179
6.3.3 晶体管的特性曲线 .....	127	9.1 零点漂移 .....	180
6.3.4 晶体管的主要参数 .....	129	9.2 差动放大电路 .....	181
习题 .....	130	9.2.1 基本形式 .....	181
第 7 章 晶体管基本放大电路 .....	132	9.2.2 长尾式差动放大电路 .....	182
7.1 放大电路的组成 .....	132	9.2.3 恒流源差动放大电路 .....	187
7.1.1 放大电路的组成原则 .....	132	9.3 集成运放的主要参数与选择 .....	188
7.1.2 直流通路和交流通路 .....	133	9.3.1 集成运放的主要参数 .....	188
7.2 放大电路的静态分析 .....	134	9.3.2 集成运放的选择 .....	190
7.2.1 图解法确定静态工作点 .....	134	9.4 集成运放的应用 .....	191
7.2.2 解析法确定静态工作点 .....	136	9.4.1 集成运放的使用 .....	192
7.2.3 电路参数对静态工作点的 影响 .....	136	9.4.2 信号运算电路 .....	195
7.3 放大电路的动态分析 .....	137	9.4.3 有源滤波器 .....	199
7.3.1 图解法分析动态特性 .....	137	习题 .....	203
7.3.2 放大电路的非线性失真 .....	140	第 10 章 功率放大电路与直流稳压 电源 .....	205
7.3.3 晶体管的微变等效电路 .....	141	10.1 功率放大电路 .....	205
7.3.4 3 种基本组态放大电路的分析 .....	145	10.1.1 功率放大电路的分类 .....	205
7.4 静态工作点的稳定及其偏置电路 .....	152	10.1.2 功率放大器的特点 .....	206
习题 .....	158	10.1.3 提高输出功率的方法 .....	206
第 8 章 负反馈放大电路 .....	161	10.1.4 乙类互补推挽功率放大电路 .....	207
8.1 反馈的基本概念 .....	161	10.1.5 甲乙类互补对称功率放大 电路 .....	208
8.1.1 反馈的定义 .....	161	10.2 直流稳压电源 .....	211
8.1.2 反馈的分类和判断 .....	162	10.2.1 整流电路 .....	212
8.2 负反馈的 4 种组态 .....	164	10.2.2 滤波电路 .....	213
8.2.1 反馈的一般表达式 .....	164	10.2.3 直流稳压电路 .....	215
8.2.2 串联电压负反馈 .....	164	习题 .....	219
8.2.3 串联电流负反馈 .....	165	第 3 篇 数字逻辑电路基础 .....	224
8.2.4 并联电压负反馈 .....	166		
8.2.5 并联电流负反馈 .....	167		
8.3 负反馈对放大电路性能的影响 .....	168		





第 11 章 数制、编码与逻辑代数 .....	225	12.3.2 NMOS 反相器 .....	279
11.1 数制与数制转换 .....	225	12.3.3 CMOS 逻辑门电路 .....	280
11.1.1 数制 .....	225	12.4 正逻辑与负逻辑 .....	283
11.1.2 数制间的转换 .....	227	12.4.1 正负逻辑的基本概念 .....	284
11.2 二进制数的编码 .....	230	12.4.2 正负逻辑变换规则 .....	284
11.2.1 二—十进制(BCD)码 .....	230	习题 .....	286
11.2.2 字符编码 .....	232	第 13 章 组合逻辑电路的分析与	
11.2.3 奇偶校验码 .....	234	设计 .....	287
11.3 逻辑代数 .....	235	13.1 组合逻辑电路的分析 .....	288
11.3.1 基本逻辑 .....	235	13.1.1 组合逻辑电路的一般分析	
11.3.2 基本逻辑运算 .....	237	方法 .....	288
11.3.3 逻辑函数与真值表 .....	241	13.1.2 加法器电路分析 .....	289
11.3.4 逻辑函数的基本定理 .....	242	13.1.3 编码器电路分析 .....	293
11.3.5 3 个规则 .....	244	13.1.4 译码器电路分析 .....	296
11.3.6 常用公式 .....	245	13.2 组合逻辑设计 .....	303
11.3.7 逻辑函数的标准形式 .....	246	13.2.1 组合逻辑电路设计的基本	
11.4 逻辑函数的化简 .....	249	思想 .....	303
11.4.1 代数化简法 .....	250	13.2.2 组合逻辑电路的一般设计	
11.4.2 图解法(卡诺图法) .....	251	方法 .....	304
11.4.3 卡诺图化简法 .....	253	13.2.3 组合逻辑电路的设计举例 .....	305
11.4.4 具有约束条件的逻辑函数		13.3 组合逻辑电路中的竞争-冒险	
化简 .....	255	现象 .....	307
习题 .....	256	13.3.1 竞争-冒险现象的产生 .....	307
第 12 章 集成逻辑门电路 .....	258	13.3.2 竞争-冒险现象的判断 .....	308
12.1 半导体二极管和晶体管的开关		13.3.3 冒险现象的消除 .....	310
特性 .....	258	习题 .....	311
12.1.1 晶体二极管的开关特性 .....	258	第 14 章 触发器 .....	314
12.1.2 晶体管的开关特性 .....	262	14.1 基本触发器 .....	314
12.1.3 由二极管与晶体管组成的		14.1.1 基本触发器的逻辑结构和	
基本逻辑门电路 .....	264	工作原理 .....	314
12.2 TTL “与非” 门电路 .....	267	14.1.2 基本触发器功能的描述 .....	315
12.2.1 典型 TTL “与非” 门电路 .....	267	14.2 同步触发器 .....	317
12.2.2 TTL “与非” 门的电压传输		14.2.1 同步 RS 触发器 .....	317
特性 .....	269	14.2.2 同步 D 触发器 .....	318
12.2.3 TTL “与非” 门的主要		14.2.3 同步触发器的触发方式和	
参数 .....	270	空翻问题 .....	319
12.2.4 TTL 门电路的改进 .....	271	14.3 主从触发器 .....	319
12.2.5 集电极开路 TTL 电路		14.3.1 主从触发器的基本原理 .....	319
(OC 门) .....	273	14.3.2 主从 JK 触发器及其一次	
12.2.6 三态 TTL 门(TSL 门) .....	274	翻转现象 .....	320
12.3 场效应晶体管与 MOS 逻辑门 .....	275	14.4 边沿触发器 .....	322
12.3.1 N 沟道增强型 MOS 管的开关		14.4.1 维持阻塞 D 触发器 .....	322
特性 .....	276		



14.4.2 边沿 JK 触发器 .....	323	16.2.1 用门电路组成的单稳态触 发器 .....	370
14.5 触发器的类型及转换 .....	324	16.2.2 集成单稳态触发器 .....	372
14.5.1 T 触发器和 T' 触发器 .....	324	16.2.3 单稳态触发器的应用 .....	374
14.5.2 触发器类型转换的方法 .....	324	16.3 多谐振荡器 .....	376
14.6 集成触发器的脉冲工作特性和 动态参数 .....	326	16.3.1 自激多谐振荡器 .....	376
习题 .....	327	16.3.2 环形振荡器 .....	378
第 15 章 时序逻辑电路的分析与 设计 .....	329	16.3.3 石英晶体多谐振荡器 .....	380
15.1 时序逻辑电路概述 .....	329	16.4 施密特触发器 .....	381
15.1.1 时序逻辑电路的特点 .....	329	16.4.1 用门电路组成的施密特 触发器 .....	381
15.1.2 时序逻辑电路的功能 描述方法 .....	329	16.4.2 集成施密特触发器 .....	382
15.1.3 时序逻辑电路的分类 .....	330	16.4.3 施密特触发器的应用 .....	383
15.2 时序逻辑电路的分析 .....	330	16.5 555 定时器及其应用 .....	385
15.3 计数器 .....	332	16.5.1 555 定时器的电路结构与工作 原理 .....	385
15.3.1 异步计数器 .....	333	16.5.2 555 定时器的典型应用 .....	387
15.3.2 同步计数器 .....	337	习题 .....	391
15.4 寄存器和移位寄存器 .....	344	第 17 章 现代电子电路系统分析 与设计简介 .....	393
15.4.1 寄存器 .....	344	17.1 电路仿真软件 Multisim .....	393
15.4.2 移位寄存器 .....	345	17.1.1 Multisim 的功能简介 .....	393
15.5 时序逻辑电路的设计 .....	350	17.1.2 Multisim 的界面及主要元素 .....	394
15.5.1 采用小规模集成电路设计 同步时序逻辑电路 .....	351	17.1.3 用 Multisim 进行虚拟实验的 方法 .....	395
15.5.2 采用小规模集成电路设计 异步时序逻辑电路 .....	356	17.1.4 基于 Multisim 的电路分析 .....	396
15.5.3 采用中规模集成电路实现 任意模值计数(分频)器 .....	358	17.2 现代数字系统的分析与设计 .....	400
习题 .....	362	17.2.1 设计项目输入 .....	401
第 16 章 脉冲波形的产生和整形 .....	365	17.2.2 设计项目处理 .....	405
16.1 概述 .....	365	17.2.3 设计项目校验 .....	406
16.1.1 脉冲电路的分析 .....	366	17.2.4 器件编程 .....	408
16.1.2 RC 电路的应用 .....	367	习题 .....	410
16.2 单稳态触发器 .....	370	附录 部分习题参考答案 .....	411
		参考文献 .....	418

# 第 1 篇 电路分析基础

电被广泛地应用到日常生活、工农业生产、科学研究以及国防建设等各个方面，当今社会，人们几乎无时无刻不在与电打交道。因此，如何认识电路、分析电路以及设计实用电路就显得尤为重要。

在实际的电器设备中，电路器件种类繁多、电路连接五花八门，为了能对电路进行分析、计算，必须把实际的电路器件加以近似化、理想化，用一个足以表征其主要特性的“模型”来表示。将实际的电路器件抽象后的模型有纯电阻、纯电容、纯电感等理想元件，这样，就可作出由这些理想元件构成的电路图，然后根据电路的基本规律对其进行分析研究。

许多电路器件在一定的条件下可以用电阻性模型(即静态模型)来表示。最简单的可以看做纯电阻的器件有电阻器(碳膜电阻、线绕电阻、金属膜电阻等)以及白炽灯、电烙铁等。作用于电阻性电路的电源可以是直流、交流或者是随时间作不规则变化(注意交流电源是随时间大小和方向周期变化的电源)的电源，只要电源的频率不太高，上述部件就可以用电阻性模型来表示，这样在处理方法上就可以采用直流电路的方法来进行。为了简化分析方法，本篇的学习内容主要以线性电阻性电路为主。所谓线性电阻就是电阻值不随电压或电流变化的电阻。至于非线性电阻电路、含电容或电感的电路，可以通过对一个直流线性电阻性电路进行一系列重复的计算得到解答，或利用其他数学手段将含电容、电感的电路转换后用直流线性电阻性电路的分析方法进行计算(如相量分析法)。

# 第 1 章 电路的基本概念及基本定律

## 1.1 电路模型

电路模型(Circuit Model)就是把实际电路器件构成的电路进行抽象得出来的模型, 俗称电路图(Circuit Diagram)。电路中的电路器件通过导线按一定方式连接, 由于实际电路不便于分析计算, 故有必要对实际的器件进行理想化后转化成电路模型。比如, 常见的白炽灯利用灯丝的电阻(Resistance)特性消耗电能, 将其转化成热能, 加热后的灯丝再将热能转化为光能。但是, 一旦有电流流过白炽灯时还会产生磁场, 因而还兼有电感(Inductance)的性质; 再比如导线(Current Lead)是用来提供电能通道的, 但导线必然存在电阻, 且在有变化电流流过时, 在导线的周围还会产生变化的磁场, 等等。这样, 给分析电路带来一定困难。所谓对实际的部件进行理想化就是在一定的条件下将其近似化, 忽略其次要性质, 用一个足以表征其主要性能的模式来表示。在上面提到的白炽灯可以看做一个理想的电阻元件, 连接导线在长度较短时可以忽略导线内的电阻等。在建立器件模型时应注意以下两点:

1) 在一定的条件下, 不同的器件可以具有同一种模型。如: 电阻器、白炽灯、电炉等, 这些器件在电路中或者设置工作点、或者采样、或者消耗电能, 但都可用理想的电阻元件作为它们的模型。

2) 对于同一器件, 在不同的应用条件下, 可以采用不同形式的模型。比如, 一个线圈在工作频率较低时, 用理想的电感元件作为模型, 若要考虑线圈的能耗, 可以使用理想的电阻元件和理想的电感元件的串联形式作为模型; 而在工作频率较高时, 则应考虑线圈绕线之间相对位置的影响, 这时的模型中还应包含理想的电容(Capacitance)元件。

实际电路器件的运用都和电磁现象有关。按元件的端子来分, 可以把理想元件分为二端元件(Two-Terminal Element)和四端元件(Coupling Element)。常用的二端理想元件有: 表示消耗电能并转换为其他形式能量的电阻元件; 表示存储电场能量的电容元件; 表示存储磁场能量的电感元件; 表示提供能量的电压源、电流源等两种理想电源元件。常见的理想四端元件(也叫耦合元件)有实现控制能量的受控源(理想变压器、互感器、理想晶体管等)。可以用这些理想元件来表示实际电路器件的模型。

实际器件用模型表示以后, 就可以绘出由理想元件组成的电路图, 各理想元件都用一定的符号表示。

图 1-1 所示手电筒实物电路的电路模型如图 1-2 所示, 图 1-1 中的干电池用电压源  $U_s$  和内阻  $R_s$ (S—Source)表示, 灯泡用电阻  $R_L$ (L—Load)表示, S(Switch)为开关, 当连接导线的电阻值很小时, 一般忽略不计, 用理想的导线表示。

对实际电路进行模型化处理的前提是: 假设电路中的基本电磁现象可以分别研究, 并且相应的电磁过程都集中在各理想元件内部进行。即所谓的电路理论的集中化假设。满足集中化假设的理想元件称为集中(参数)元件, 由这类元件构成的电路称为集中(参数)电路。

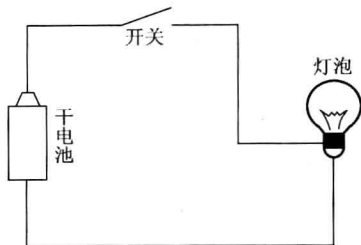


图 1-1 手电筒实物电路

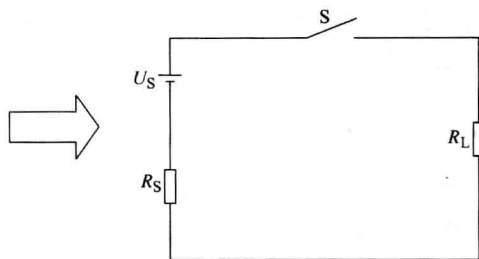


图 1-2 图 1-1 的电路模型

集中参数电路(Lumped Circuit)是由集中参数元件(Lumped Elements)构成的电路。集中参数元件的主要特点是：元件外形尺寸与其正常工作频率所对应的波长相较而言很小。同理，集中参数电路要求实际电路的几何尺寸必须远小于工作电磁波的波长，如果不满足此条件，就不能采用集中参数电路模型来描述。

为了理解集中参数电路与工作电磁波波长之间的关系，对以下几种情况作以下说明：①对于音频电路，其最高频率可为25kHz，对应的波长是 $\lambda = (3 \times 10^8) / (25 \times 10^3) \text{m} = 12\text{km}$ ，这尺寸远大于实验室中电路的尺寸，属于集中参数电路；②对于计算机电路，其工作频率目前已高于1000MHz，此时 $\lambda = (3 \times 10^8) / (1 \times 10^9) \text{m} = 0.3\text{m}$ ，此时用集中参数电路来描述就难以准确表达；③对于微波电路，其 $\lambda$ 介于1mm~10cm之间，不可以用集中参数电路的分析方法。

## 1.2 电路分析的基本变量

电路的变量是描述电路特性的物理量，常用的电路变量有电流、电压和功率。

### 1.2.1 电流

在物理中我们已经知道，电子和质子都是带电粒子，电子带负电荷，质子带正电荷。电荷有规则的移动形成电流(Current)。计量电流大小的物理量是电流，电流的定义是：单位时间内通过导体路径中某一横截面的电荷，即

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

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。式(1-1)中，电荷 $q$ 的单位是库[仑](C)，时间 $t$ 的单位是秒(s)时，电流 $i$ 的单位为安[培](A)。常用的其他电流单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安( $\mu\text{A}$ )。它们之间的关系是

$$\begin{aligned} 1\text{kA} &= 10^3\text{A} \\ 1\text{A} &= 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A} \end{aligned}$$

如果在任一瞬间通过导体横截面的电荷都是相等的，而且方向也不随时间变化，则这种电流叫做恒定电流，简称直流(Direct Current, 简称为dc或DC)。它的电流用符号 $I$ 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化，则称之为交变电流，简称交流(Alternating Current, 简称为ac或AC)，它的电流用符号 $i$ 表示。

尽管规定正电荷运动方向为电流方向，但在求解较复杂的电路时，往往很难事先判断电流的真实方向，为分析电路方便，引入了参考方向(Reference Direction)的概念。参考方向就是在分析电路时可以先任意假定一个电流方向，如果电流的真实方向与参考方向一致时，电



流为正值，否则为负值。这样，在指定参考方向的前提下，结合电流的正负值就能够确定电流的实际方向。电流参考方向一般直接用箭头标记在电流通过的路径上。

### 1.2.2 电压

电荷在电路中流动，就必然有能量交换的发生。电荷在电路中的一些部分(电源处)获得电能，而在另一些部分(如电阻处)失去电能。为了计量电荷得到或失去能量的大小，我们引入电压(Voltage)这一物理量，记为  $u(t)$  或  $u$ 。其定义是：电路中 a、b 两点之间的电压表明了单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或失去的能量，即

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1-2)$$

式中， $dq(t)$  为由 a 点转移到 b 点的电荷，单位为库[仑](C)； $dw(t)$  为转移过程中，电荷  $dq(t)$  所获得或失去的能量，单位为焦[耳](J)；电压的单位为伏[特](V)。常用的其他电压单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)。

电压也可用电位差表示，即

$$u = u_a - u_b \quad (1-3)$$

式中， $u_a$  和  $u_b$  分别为 a、b 两点的电位。

电位是描述电路中电位能分布的物理量。如果正电荷由 a 点转移到 b 点时获得能量，则 a 点为低电位(即负极)，b 点为高电位(即正极)；反之亦然。正电荷在电路中转移时电能的得到或失去体现为电位的升高或降低。

根据电压随时间变化的情况，电压可分为恒定电压与交变电压。如果电压的大小和极性都不随时间而变动，这样的电压称之为恒定电压或直流电压，用符号  $U$  表示。

根据定义，电压也是代数量。与电流类似，分析计算电压时，也需要指定一个参考方向(又称为参考极性)。同时规定，当参考方向与实际方向一致时，记电压为正值；否则，记电压为负值。这样，在指定电压参考方向以后，在对电路进行分析计算后，依据电压的正负，就可以确定电压的实际方向。

在进行电路分析时，既要为通过元件的电流指定参考方向，也要为该元件两端的电压指定参考方向，彼此是完全独立的。但为了方便起见，常采用关联的(Associated)参考方向：即对于某一电路元件而言，电流的参考方向与电压的参考方向的“+”极到“-”极的方向一致，换句话说，电流与电压的参考方向一致，如图 1-3a 所示，这样在电路图上就只需

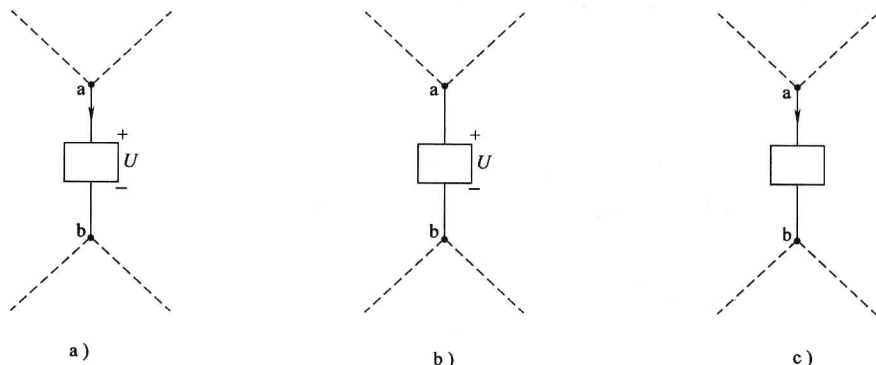


图 1-3 关联的参考方向

标出电流的参考方向或电压的参考方向中任何一种即可，如图 1-3b、c 所示。

**例 1-1** 电路如图 1-4a 所示，图中标出了电流参考方向。已知电流  $I_1 = -1\text{A}$ ， $I_2 = 6\text{A}$ ， $I_3 = -3\text{A}$ ；若以 d 为参考点，则电位  $U_a = 2\text{V}$ ， $U_b = -1\text{V}$ ， $U_c = 1\text{V}$ 。求：

- (1) 电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  的实际方向和电压  $U_{ab}$ 、 $U_{bd}$ 、 $U_{cd}$  的实际极性。
- (2) 若欲测量电流  $I_1$  和电压  $U_{cd}$  的数值，则电流表和电压表应如何接入电路？

**解** (1) 在指定了电流参考方向后，结合电流值的正负就可判断其实际方向。已知  $I_2$  为正值，表明该电流的实际方向与它的参考方向一致；而  $I_1$  和  $I_3$  为负值，表明它的实际方向与指定的参考方向相反。

同理，根据

$$U_{ab} = U_a - U_b = 2\text{V} - (-1)\text{V} = 3\text{V}$$

$$U_{bd} = U_b - U_d = (-1)\text{V} - 0\text{V} = -1\text{V}$$

$$U_{cd} = U_c - U_d = 1\text{V} - 0\text{V} = 1\text{V}$$

可知  $U_{ab} > 0$ ，电压实际方向由 a 指向 b，或者 a 为高电位端，b 为低电位端； $U_{bd} < 0$ ，表明电压实际方向与参考方向相反，即 d 为高电位端，b 为低电位端；同理， $U_{cd} > 0$ ，c 点为高电位，d 点为低电位。

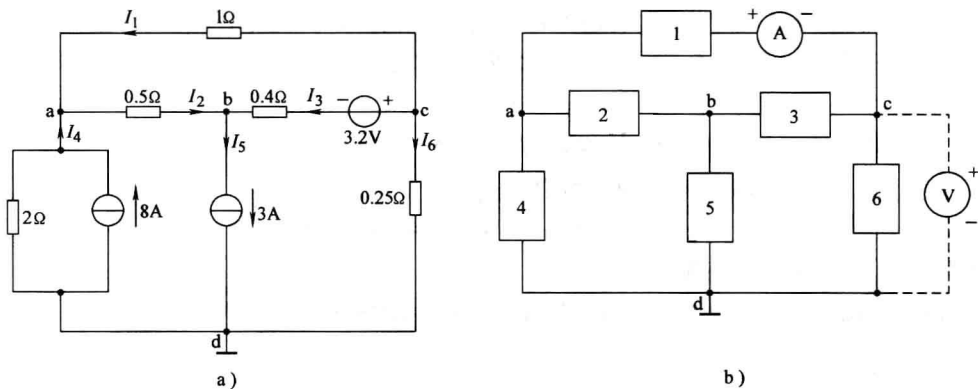


图 1-4 例 1-1 电路图

(2) 测量直流电流时，应将电流表串联接入被测支路，使实际电流从电流表的“+”极流入，“-”极流出。测量直流电压时，应把电压表并联接入被测电路，使电压表“+”极与被测电压的高电位端连接，“-”极与低电位端连接，如图 1-4b 所示。

### 1.2.3 能量和功率

某一简单电路如图 1-5 所示，若将电流  $I$  和电压  $U$  的实际方向指定为参考方向，则电阻元件上的电流、电压为关联参考方向，而电压源元件的电流电压就为非关联参考方向。

正电荷从高电位端 a，经过电阻  $R$  移到低电位端 b，是电场力对电荷做功的结果，电场力做功所消耗电能被电阻吸收。正电荷由 b 端经电压源移至 a 端，是外力对

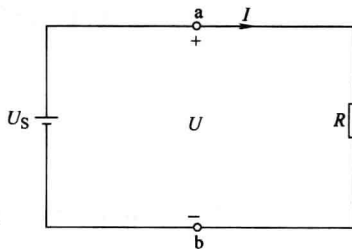


图 1-5 简单电路





电荷做功，通过做功将其他形式的能量转换为电能，从而使电源具有向外电路提供电能特性。

单位时间内消耗的电能即为电功率，记为  $p(t)$  或  $p$ ，表达式为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1-4)$$

根据式(1-2)有  $dw(t) = u(t)dq(t)$ ，则

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = u(t) \frac{dq(t)}{dt}$$

再根据式(1-1)，则有

$$p(t) = u(t)i(t) \quad \text{或} \quad p = ui \quad (1-5)$$

在直流的情况下，有

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

若元件的电压、电流取非关联参考方向，只需在上述公式中冠以负号，即

$$p = -ui \quad \text{或} \quad P = -UI$$

综合以上两种情况，将元件吸收功率的计算公式统一表示为

$$p = \pm ui \quad (1-7)$$

当  $p > 0$  时，表示在  $dt$  时间内电场力对电荷  $dq$  做功  $dw$ ，这部分能量被元件吸收，所以  $p$  是元件的吸收功率；在  $p < 0$  时，表示元件吸收负功率，换句话说，就是元件向外部电路提供功率。

**例 1-2** 在图 1-6 中，已知  $U = -7\text{V}$ ， $I = -4\text{A}$ ，试求元件 A 的吸收功率。

**解** 由于  $U$ 、 $I$  为关联参考方向，所以有

$$P = UI = (-7)\text{V} \times (-4)\text{A} = 28\text{W}$$

说明元件 A 吸收功率 28W。

**例 1-3** 在图 1-7 中，已知元件 B 产生的功率为 120mW， $U = 40\text{V}$ ，求  $I$ 。

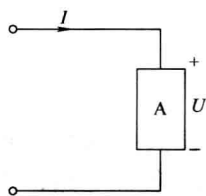


图 1-6 例 1-2

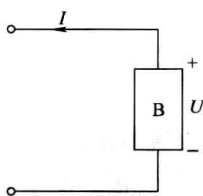


图 1-7 例 1-3

**解** 元件 B 产生的功率为 120mW，即吸收功率为 -120mW，且考虑到元件上  $U$  与  $I$  为非关联参考方向，由式(1-7)可得

$$P = -UI = -120\text{mW}$$

从而有

$$I = -\frac{P}{U} = -\frac{(-120)\text{mW}}{40\text{V}} = 3\text{mA}$$

表明元件 B 上电压、电流的实际方向在非关联参考方向下均为正，所以 B 向外部电路提供功率。

### 1.3 基尔霍夫定律

电路模型是由电路元件组成的。每一个二端元件可以构成一条支路(Branch)(见图 1-8 中的  $R_1$  或  $U_{S1}$ )。两条或两条以上支路的连接点叫做节点(Node)(见图 1-8 中的 a、b、c、d 点)。为分析电路的方便,可以把由若干个元件串联、具有两个端点组成的电路看做一条支路。图 1-8 中的  $R_1$  和  $U_{S1}$  可看做一条支路,这样 d 点可不算为节点。

电路中的任一闭合路径叫做回路(Loop),如图 1-8 中的 dabcd、 $aR_3cba$ 、 $daR_3cd$  都是回路,该电路共有 3 个回路。显然,电路至少有一个回路。

在回路内部不含有支路的回路叫做网孔(Mesh),如图 1-8 中的回路 dabcd、 $aR_3cba$  就是网孔,而回路  $daR_3cd$  则不是网孔。网孔由哪些元件组成与电路的画法有关,将图 1-8 改成图 1-9 后,回路 dabcd 就不是网孔,而回路  $aR_3cba$ 、 $daR_3cd$  则是网孔。

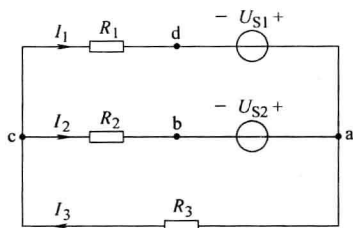


图 1-8 电路名词定义用图

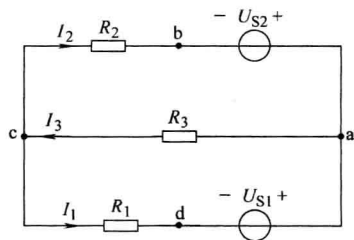


图 1-9 图 1-8 的另一画法

一般把含元件较多的电路称为网络(Network)。实际上,电路和网络这两个名词并无明确区别。

基尔霍夫定律(Kirchhoff's Law)有两条:一是电流定律,另一是电压定律。

基尔霍夫电流定律(KCL):在任一时刻,流入一个节点的电流总和等于从这个节点流出电流的总和。这个定律是电流连续性的表现。

对于图 1-10,根据基尔霍夫定律可得出

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 \quad (1-8)$$

这个定律也可换另一种说法:流出节点电流的代数和为零。如果将流出电流定义为正,则流入电流为负。式(1-8)就可以写为

$$-I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 = 0 \quad (1-9a)$$

用电流的代数形式表示,可把这个定律写成一般形式,得

$$\sum I = 0 \quad (1-9b)$$

即:在电路中任一节点上,各支路电流的代数和总等于零。这一结论与各支路上接什么样的元件无关,不论是线性电路还是非线性电路,它都是普遍适用的。

KCL 是运用于电路中节点的,也可以将其推广运用到电路中的一个封闭面。如图 1-11 中,点画线所包围的电路,有 3 条支

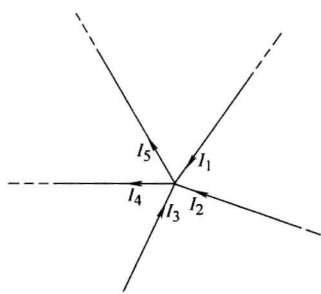


图 1-10 电路中一个节点

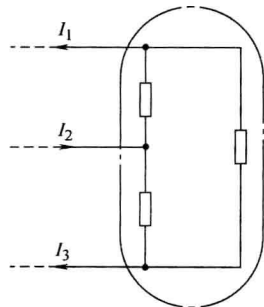


图 1-11 电流定律应用于一个封闭面