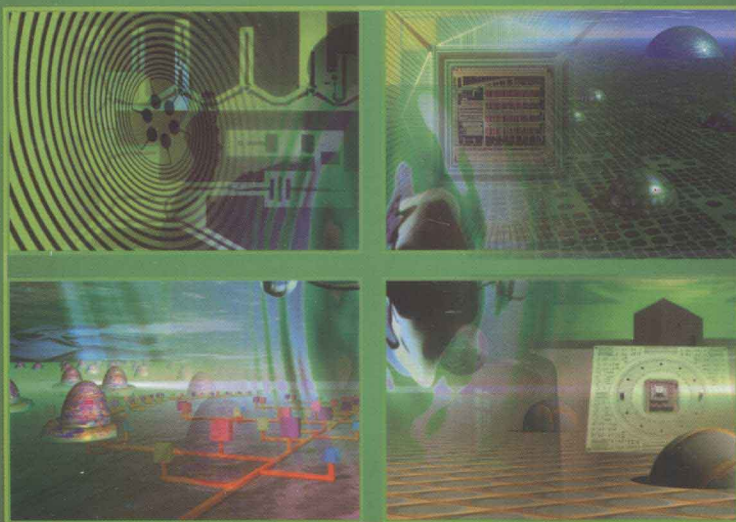


❖ 普通高等教育电子信息类规划教材 ❖

# 电路与电子学基础

ELECTRIC CIRCUIT  
AND ELECTRONICS BASIS



陈利永 林丹阳 郑忠楷 等编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



本书赠送电子教案  
[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

本书将电路分析、模拟电路和通信电路三门课程的内容有机地整合起来,形成电路与电子学基础新的教材,本教材可以用周学时为4的两个学期完成原来要三个学期才能完成的教学内容。

本书的主要内容有:电路分析基础,正弦稳态电路的分析,RLC电路的特性,二端口网络,半导体二极管及其应用,晶体管和场效应晶体管及其应用,负反馈放大器,集成运算放大器和信号处理电路,波形产生和变换电路,调制与解调及频率变换电路,功率放大器,直流稳压电源。此外,在有关章节部分还介绍了MATLAB和Multisim软件的简单使用方法,帮助学生掌握用Multisim软件进行实验验证和用MATLAB软件进行解题的技巧。

本书适合作为电子信息类专业本科生学习电路与电子学基础课程的教材,也可以作为电子信息类学生考研的复习参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路与电子学基础/陈利永,林丹阳,郑忠楷等编著. —北京:机械工业出版社,2012.8

普通高等教育电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-38850-0

I. ①电… II. ①陈…②林… III. ①电路理论-高等学校-教材②电子学-高等学校-教材 IV. ①TM13②TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第167339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:李馨馨 责任编辑:李馨馨 版式设计:纪敬

责任校对:申春香 封面设计:鞠杨 责任印制:张楠

北京双青印刷厂印刷

2012年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·26.25印张·651千字

0 001—3 500册

标准书号:ISBN 978-7-111-38850-0

定价:49.00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

# 前 言

随着信息技术的发展，电子信息专业产生了许多新的专业课，为了帮助学生学好这些专业课，有必要理顺基础课与专业课内容衔接的关系。在学时比较少的情况下，如何保证基础课的教学既符合教学大纲的要求，又可以满足后续专业课的需要，是当前教学改革面临的具体问题。

传统的电子信息类专业必修的专业基础课主要有电路分析、模拟电路和通信电路三门课。为了解决这三门课内容多、课时数少的矛盾，我们根据这三门课知识的关联性强、交叉重复内容多的特点，将这三门课原来的教学体系打乱，形成电路与电子学基础的教材，力求用比较少的学时数，上好电路与电子学基础课程的内容。本教材的主要特点表现在以下几个方面。

1. 将电路分析、模拟电路和通信电路三门课程的内容有机地整合起来，为了保证本书所叙述内容的深度和广度，本书在归并交叉重复的内容时不是采用简单删除的方法，而是采用前后呼应的整合方法，将被归并掉的内容以基本原理、实际应用的例题等形式出现在相关的章节中。这样做的目的既可以保证基础知识的完整性和连贯性，又可以增加学生习作的机会，加深学生对所学知识的理解，也有时间对某些重点的课题进行深入讨论，使学生的知识更加系统化。

2. 将三门课程的内容整合成电路与电子学基础一门课程，用周学时为 4 的两个学期上完。这种整合不仅解决了在在大一下学期开设电路分析课程时，因学生的数学知识不够，无法提高电路分析课程教学质量的矛盾，又可以保证在大三的教学开始之前完成电路分析、模拟电路和通信电路三门课程的教学工作，为后续专业课的开设留出课时。

3. 根据电路与电子学基础课程是理论和实践相联系的特点，特别是通信电路课程的内容中有一些学生不容易理解的知识，结合通信电路的产品用集成电路替代分立元件电路的趋势，结合模拟乘法器的应用来介绍调制-解调的概念，并借助 Multisim 仿真软件的演示帮助学生理解这些知识点。

另外本书在叙述的过程中注意引导学生对物理概念的理解，强化理论的推理过程，培养学生用数学工具来研究各种电路的问题，注意引导学生开放性的思维方法，有意识地培养学生从不同的渠道、利用不同的方法对同一个问题进行讨论，让学生掌握一题多解的方法，以加深学生对基本概念和基础知识的理解，培养学生分析问题和解决问题的能力，提高学生的综合素质。在解题的过程中，要求学生用 MATLAB 软件编程进行数值的运算，引导学生通过实际应用学会 MATLAB 软件的编程技术。并向学生介绍 Multisim 仿真软件的使用方法，引导学生用仿真软件对理论知识进行验证，做到理论联系实际，以加深感性认识，提高学习的效率。

本书由陈利永教授根据授课讲义整理而成，参加本书编写工作的还有闽江学院的林丹阳、郑忠楷和林海英老师。本书的编写得到了教育部电子科学与技术专业教学指导分委会立项项目“电子技术基础课程改革的实践”（项目编号 C51）的支持，并得到福建省本科院校

“电路与系统”重点学科建设项目的支持。感谢闽江学院的院长助理兼教务处处长黄高宪教授和物理与电子信息工程系的主任李玉良教授对作者在闽江学院所从事教学改革的支持，感谢福建师范大学协和学院信息技术系的吴子文教授对作者在福建师范大学工作期间所从事教学改革的支持，感谢福建师范大学计算机科学系的陈家楨和叶锋老师为作者使用 MATLAB 软件所提供的帮助，感谢福建师范大学协和学院的蔡银河老师为作者使用 Multisim 软件所提供的帮助，感谢福建师范大学协和学院的陈清华老师和闽江学院的张红老师认真校对本书的习题答案，感谢福建师范大学协和学院的陈昕老师为作者画电路图所提供的帮助。

限于作者的水平，书中的错误疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

# 目 录

## 前言

## 第一部分 电路分析基础

<b>第 1 章 直流电路分析基础</b> .....	1	1.8.3 负载获得最大功率的条件 .....	35
1.1 引言 .....	1	1.9 电路分析综合练习 .....	36
1.1.1 电路与电子学基础课程所研究的问题 .....	1	1.10 图论知识在电路分析中的应用 .....	42
1.1.2 电路和电路模型 .....	2	1.11 小结和讨论 .....	46
1.1.3 描述电路工作状态的几个物理量 .....	3	1.12 习题和思考题 .....	47
1.1.4 电流、电压和电动势的参考方向 .....	6	<b>第 2 章 正弦稳态电路的分析</b> .....	50
1.1.5 欧姆定律 .....	7	2.1 正弦交流电路 .....	50
1.1.6 电功率、电源和负载的判断 .....	8	2.1.1 正弦交流电量的参考方向 .....	50
1.2 电器设备的额定值和电路的三种工作状态 .....	9	2.1.2 正弦交流电量的三要素 .....	51
1.2.1 电器设备的额定值 .....	9	2.1.3 相位差的计算 .....	52
1.2.2 电路的三种工作状态 .....	9	2.1.4 正弦交流电量的有效值 .....	55
1.3 基尔霍夫定律和支路电流法 .....	11	2.1.5 正弦交流电的表示法 .....	56
1.3.1 名词术语 .....	11	2.2 单一参数的正弦交流电路 .....	62
1.3.2 基尔霍夫电流定律 .....	12	2.2.1 纯电阻元件的交流电路 .....	62
1.3.3 基尔霍夫电压定律 .....	12	2.2.2 纯电感元件的交流电路 .....	64
1.3.4 支路电流法 .....	13	2.2.3 纯电容元件的交流电路 .....	68
1.4 电阻电路的等效变换法 .....	17	2.3 电阻、电容、电感串联的交流电路 .....	71
1.4.1 电阻的串联 .....	17	2.3.1 $RLC$ 串联电路电流和电压的关系 .....	71
1.4.2 电阻的并联 .....	17	2.3.2 $RLC$ 串联电路阻抗的关系 .....	71
1.4.3 电阻的混联 .....	18	2.3.3 $RLC$ 串联电路功率的关系 .....	72
1.4.4 电阻 Y 形连接和 $\Delta$ 形连接的等效变换 .....	18	2.4 正弦稳态电路分析法 .....	73
1.4.5 输入电阻的计算 .....	22	2.4.1 相量形式的电路定理 .....	73
1.5 电压源和电流源的等效变换 .....	23	2.4.2 正弦稳态电路分析法综合例题 .....	74
1.5.1 电压源 .....	23	2.5 互感和变压器 .....	82
1.5.2 电流源 .....	24	2.5.1 互感和变压器概述 .....	82
1.5.3 电压源和电流源的等效变换 .....	25	2.5.2 传输线变压器 .....	84
1.6 叠加定理 .....	26	2.5.3 互感和变压器问题的综合例题 .....	86
1.7 节点电位法 .....	30	2.6 正弦交流电路的谐振 .....	89
1.8 戴维南定理和诺顿定理 .....	31	2.6.1 $RLC$ 串联谐振 .....	89
1.8.1 戴维南定理 .....	31	2.6.2 $RLC$ 并联谐振 .....	93
1.8.2 诺顿定理 .....	34	2.6.3 负载和电源内阻对谐振电路的影响 .....	94
		2.6.4 石英晶体谐振器 .....	99

*2.7 三相交流电路 .....	101	3.3.5 集中滤波器 .....	136
*2.7.1 三相电路的负载连接 .....	101	3.3.6 巴特沃斯和切比雪夫滤波器 .....	137
*2.7.2 三相电路分析 .....	102	3.4 小结和讨论 .....	138
*2.7.3 安全用电常识 .....	106	3.5 习题和思考题 .....	138
2.8 小结和讨论 .....	108	<b>第4章 二端口网络</b> .....	141
2.9 习题和思考题 .....	110	4.1 二端口网络的方程 .....	141
<b>第3章 RLC 电路的特性</b> .....	115	4.1.1 $Z$ 参数方程 .....	141
3.1 动态电路的方程及其初始条件 .....	115	4.1.2 $Y$ 参数方程 .....	142
3.1.1 动态电路的方程 .....	115	4.1.3 $A$ 参数方程 .....	143
3.1.2 换路定则及初始值的确定 .....	117	*4.1.4 $B$ 参数方程 .....	143
3.1.3 动态电路求解的三要素法 .....	121	4.1.5 $H$ 参数方程 .....	144
3.2 $RC$ 一阶电路在脉冲电压作用下的 响应 .....	123	*4.1.6 $G$ 参数方程 .....	144
3.2.1 微分电路 .....	124	4.2 二端口网络参数方程的转换 .....	145
3.2.2 $RC$ 耦合电路 .....	125	4.3 二端口网络的级联 .....	151
3.2.3 积分电路 .....	125	4.4 二端口的策动点函数和转移函数 .....	154
3.3 $RC$ 一阶电路在正弦信号激励下的 响应 .....	126	4.4.1 策动点函数 .....	154
3.3.1 $RC$ 低通滤波器 .....	127	4.4.2 转移函数 .....	158
3.3.2 $RC$ 高通滤波器 .....	129	4.5 二端口网络的反馈 .....	163
3.3.3 $RC$ 带通滤波器 .....	132	4.6 回转器和负阻变换器 .....	164
3.3.4 $LC$ 滤波器 .....	135	4.7 小结和讨论 .....	165
		4.8 习题和思考题 .....	167
		<b>电路分析基础复习题</b> .....	167

## 第二部分 电子学基础

<b>第5章 半导体二极管及其应用</b> .....	170	5.4.1 稳压管的结构和特性曲线 .....	183
5.1 半导体基础知识 .....	170	5.4.2 稳压管的主要参数 .....	184
5.1.1 本征半导体 .....	170	5.5 其他类型的二极管 .....	185
5.1.2 本征激发和两种载流子 .....	171	5.6 小结和讨论 .....	186
5.1.3 杂质半导体 .....	172	5.7 习题和思考题 .....	186
5.1.4 PN 结 .....	173	<b>第6章 半导体晶体管和场效应晶体管   及其应用</b> .....	188
5.2 半导体二极管 .....	176	6.1 半导体晶体管的基本结构 .....	188
5.2.1 半导体二极管的结构 .....	176	6.1.1 晶体管内部结构 .....	188
5.2.2 二极管的伏安特性曲线 .....	176	6.1.2 晶体管的电流放大作用 .....	189
5.2.3 二极管的主要参数 .....	177	6.1.3 晶体管的共射特性曲线 .....	191
5.2.4 二极管的等效电路 .....	177	6.1.4 晶体管的主要参数 .....	192
5.3 二极管应用 .....	178	6.2 共发射极电压放大器 .....	194
5.3.1 二极管整流和检波电路 .....	178	6.2.1 电路的组成 .....	194
5.3.2 桥式整流电路 .....	178	6.2.2 共发射极电路图解分析法 .....	194
5.3.3 倍压整流电路 .....	180	6.2.3 微变等效电路分析法 .....	198
5.3.4 限幅电路 .....	180	6.3 电压放大器工作点的稳定 .....	204
5.3.5 与门电路 .....	181	6.3.1 工作点稳定的典型电路 .....	205
5.4 稳压管 .....	183		

6.3.2	复合管放大电路	209	7.4.3	放大器引入负反馈的一般原则	270
6.4	共集电极电压放大器	210	7.5	小结和讨论	273
6.5	共基极电压放大器	212	7.6	习题和思考题	273
6.6	多级放大器	214	<b>第8章 集成运算放大器和信号处理</b>		
6.6.1	阻容耦合电压放大器	215	<b>电路</b>		276
6.6.2	共射-共基极放大器	215	8.1	概述	276
6.6.3	直接耦合电压放大器	218	8.1.1	集成运放电路的内部结构	276
6.7	差动放大器	220	8.1.2	集成运放电路的组成框图	276
6.7.1	电路组成	220	8.2	电流源电路	277
6.7.2	静态分析	222	8.2.1	镜像电流源电路	277
6.7.3	动态分析	223	8.2.2	比例电流源电路	277
6.7.4	差动放大器输入、输出的4种组态	224	8.2.3	多路电流源电路	278
6.8	放大器的频响特性	228	8.2.4	以电流源为有源负载的放大器	278
6.8.1	晶体管高频等效模型	228	8.3	集成运放内部电路简介	279
6.8.2	晶体管电流放大倍数 $\beta$ 的频率响应	230	8.3.1	集成运放的符号	280
6.8.3	单管共发射极放大电路的频响特性	231	8.3.2	集成运放的主要参数	281
6.8.4	高频小信号选频放大器	235	8.3.3	理想集成运放的参数和工作区	282
6.9	场效应晶体管电压放大器	238	8.3.4	理想运放在不同工作区的特征	282
6.9.1	结型场效应晶体管的类型和构造	238	8.3.5	集成运放工作在线性区的电路特征	283
6.9.2	绝缘栅型场效应晶体管的类型和构造	241	8.4	基本运算电路	284
6.9.3	场效应晶体管主要参数	245	8.4.1	比例运算电路	284
6.9.4	场效应晶体管放大电路	245	8.4.2	加减运算电路	289
6.9.5	场效应晶体管与晶体管的比较	250	8.4.3	积分和微分运算电路	293
6.10	小结和讨论	251	8.4.4	对数和指数(反对数)运算电路	293
6.11	习题和思考题	252	8.4.5	乘法和除法运算电路	295
<b>第7章 负反馈放大器</b>		258	8.5	有源滤波器	298
7.1	负反馈的基本概念	258	8.5.1	有源低通滤波器	298
7.1.1	反馈的类型	258	8.5.2	其他形式的滤波电路	303
7.1.2	反馈的判断	258	8.6	小结与讨论	313
7.2	负反馈放大器的表达式	259	8.7	习题和思考题	314
7.2.1	负反馈放大器的基本关系式	259	<b>第9章 波形产生和变换电路</b>		318
7.2.2	4种反馈组态的反馈系数和闭环电压放大倍数的分析计算	260	9.1	正弦波产生电路	318
7.3	自动增益控制电路	268	9.1.1	正弦波振荡器电路的组成	318
7.4	负反馈对放大电路性能的改善	269	9.1.2	RC正弦波振荡电路	319
7.4.1	稳定放大倍数	269	9.1.3	LC正弦波振荡器	321
7.4.2	对输入电阻和输出电阻的影响	269	9.1.4	石英晶体正弦波振荡电路	324
			9.1.5	压控振荡器	324
			9.2	电压比较器	328
			9.2.1	电压比较器的电压传输特性	328
			9.2.2	单门限电压比较器	329

9.2.3	滞回电压比较器	331	11.1.1	功率放大电路的特殊问题	371
9.2.4	窗口电压比较器	333	11.1.2	功率放大器的工作状态	372
9.3	非正弦波信号发生电路	334	11.2	乙类互补对称功率放大器	374
9.3.1	矩形波信号发生电路	334	11.2.1	OCL 功放电路的组成	375
9.3.2	三角波信号发生电路	336	11.2.2	交越失真的消除方法	375
9.3.3	锯齿波信号发生器	337	11.2.3	OCL 功放电路晶体管的选择	376
9.4	小结与讨论	339	11.2.4	OTL 功放电路的组成和工作原理	377
9.5	习题和思考题	339	11.3	集成功率放大电路	378
<b>第 10 章 调制与解调及频率变换电路</b>		343	11.3.1	DG4100 型集成功率放大器的内部结构	379
10.1	概述	343	11.3.2	DG4100 型集成功率放大器的使用方法	379
10.2	幅度调制电路	344	11.4	丙类(高频)功率放大器	380
10.2.1	调幅波电路	344	11.4.1	高频功率放大器的电路组成	380
10.2.2	双边带调制	346	11.4.2	谐振功率放大器余弦脉冲电流的分解	381
10.2.3	单边带调制和残留边带调制	347	11.4.3	谐振功率放大器的输出功率与效率	383
10.2.4	相移法单边带调幅电路	348	10.4.4	谐振功率放大器的工作状态与负载特性	384
10.2.5	正交调制电路	349	11.4.5	谐振功率放大器的应用电路	386
10.2.6	二极管平衡调制电路	350	11.5	功率合成电路	388
10.3	解调器	351	11.6	集成电路高频功率放大器	389
10.3.1	同步解调器	351	11.7	小结和讨论	390
10.3.2	正交解调电路	352	11.8	习题和思考题	391
10.4	调幅广播和变频电路	353	<b>第 12 章 直流稳压电源</b>		393
10.4.1	调幅广播发射系统	353	12.1	直流稳压电源的组成	393
10.4.2	变频电路	353	12.1.1	直流稳压电源的组成框图	393
10.4.3	分立元件收音机的变频电路	354	12.1.2	串联型稳压电源电路	394
10.5	调频和鉴频电路	355	12.1.3	稳压电源的主要指标	395
10.5.1	调频和调相信号波形的特征	355	12.2	串联型集成稳压电路	396
10.5.2	直接调频电路	356	12.2.1	串联型集成稳压电路的组成	396
10.5.3	鉴频电路	357	12.2.2	三端稳压器的基本应用电路	397
10.5.4	集成调频电路	358	12.3	开关型稳压电路	398
10.5.5	集成鉴频电路	358	12.3.1	直流/直流变换器	398
10.6	锁相环电路及其应用	359	12.3.2	开关稳压电源的组成框图	399
10.6.1	锁相环的组成和工作原理	359	12.4	小结和讨论	401
10.6.2	锁相环在调频和鉴频电路中的应用	361	12.5	习题和思考题	402
10.6.3	锁相环在频率合成电路中的应用	363	<b>电子学基础复习题</b>		403
10.6.4	调频广播系统的发射和接收	363	<b>附录</b>		406
10.7	数字调制电路简介	365	附录 A	矩阵基础	406
10.8	通信系统的组成	367	附录 B	模拟电子电路读图常识	408
10.9	小结与讨论	369	<b>参考文献</b>		412
10.10	习题和思考题	369			
<b>第 11 章 功率放大器</b>		371			
11.1	功率放大器的特点	371			



# 第一部分 电路分析基础

## 第 1 章 直流电路分析基础

### 学习要点:

- 描述电路工作状态的几个物理量是物理课程的相关知识在本课程中的应用，注意参考方向的概念，并熟练地使用它。

- 描述电路电流和电压约束关系的方程是节点电流定律 (KCL) 和回路电压定律 (KVL)，在求解电路问题的时候不仅要掌握含有独立电压源和电流源的电路，还要熟练掌握含有受控电压源和受控电流源的电路。

- 用 KCL 和 KVL 理论上可以对所有的电路问题进行求解，但在某些场合用叠加定理、戴维南定理或节点电位法等方法更简便，注意通过一题多解的练习来体会用不同的方法求解同一个问题的思路 and 技巧。

### 1.1 引言

电子技术是 19 世纪末发展起来的新兴学科，在 20 世纪取得了惊人的进步。由于电子技术的发展，带动了其他高新技术的飞速发展，使人们的社会生活和工业、农业、科技及国防等领域都发生了令人瞩目的变革。

进入 21 世纪以后，随着信息时代的到来，支撑电子信息技术飞速发展的电子技术得到进一步的发展。支撑电子信息技术发展的专业课有许多，电路与电子学基础是其中最重要的一门基础课。

#### 1.1.1 电路与电子学基础课程所研究的问题

电路与电子学基础课程所研究的问题是：处理各类信号的电子系统的基本组成和工作原理。该课程除了向学生介绍电路与电子学基础的基本理论和概念外，还要对电子信息类专业学生的学习方法进行训练。

在电路与电子学基础课程中，信号与信息的关系是：信号是信息的载体，是信息的表现形式。描述信号的基本方法是写出它的数学表达式，该表达式通常是时间的函数，根据该函数绘制的图像称为信号的波形。按照时间函数取值的连续性与离散性可将信号分为连续时间信号和离散时间信号。

连续时间信号幅度的变化可以是连续的，也可以是不连续的。在电路与电子学基础课程中，将幅度的变化是连续的连续时间信号称为模拟信号。如大家熟悉的正弦交流电信号和广

广播电台发射的无线电信号都是模拟信号。将幅度的变化是离散的离散时间信号称为数字信号。如计算机处理的信号就是数字信号，模拟信号和数字信号的波形如图 1-1 所示。

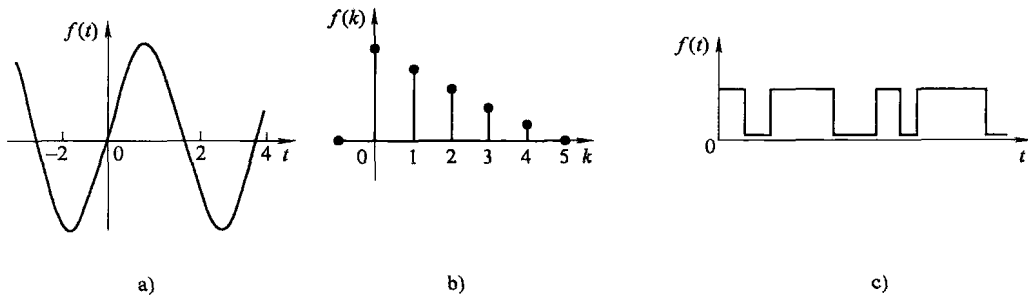


图 1-1 模拟信号和数字信号的波形图

图 1-1a 是模拟信号的波形，图 1-1b 是数字信号的函数图形，图 1-1c 是数字信号在电路中所出现的波形。

处理模拟信号电路的问题是电路与电子学基础课程要介绍的主要内容，处理数字信号电路的问题在数字电路与逻辑设计课程中介绍。

处理模拟信号电路的问题主要有分析电路和设计电路两大类，不管是分析电路还是设计电路，都需要对描述电路工作状态的几个物理量（电流、电压、电荷、磁链、功率等）进行分析和计算。

### 1.1.2 电路和电路模型

将多个电器设备或元器件，按其所要完成的功能用一定的方式连接起来的总体称为电路，电路是电流流通的路径。电路通常由电源、负载和中间环节三部分组成。

电源是指电路中可将化学能、机械能、原子能等其他形式的能量转换成电能，并向电路提供能量的那些设备，如干电池、发电机等。

在电路分析课程中电源有两大类，一类为电压源（为电路提供电压的器件），另一类为电流源（为电路提供电流的器件）。电压源和电流源除了有独立对外供电的常规电源外，还有受控电压源（输出电压受外界输入信号控制的电压源）和受控电流源（输出电流受外界输入信号控制的电流源），各种电源在电路中所用的符号如图 1-2 所示。

其中，图 1-2a 和图 1-2b 是电压源的符号，图 1-2c 是电流源的符号，图 1-2d 是受控电压源的符号，图 1-2e 是受控电流源的符号。

负载是指电路中能将电能转换为其他形式的能量并对外做功的用电器，如电灯、电动机、电热器等，负载在电路中通常用电阻  $R$  来表示，电阻在电路中常用的符号为  $\square$ 。

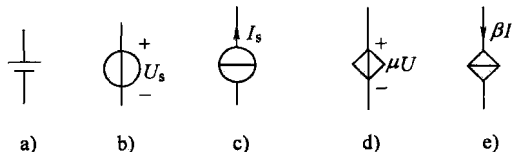


图 1-2 电路中常用的各种电源的符号

中间环节是指将电源与负载连接成闭合电路的导线、开关、保护设备，以及测量仪表等。

任何实际的电路都是由多种电气元器件根据不同的用途搭建的，不管是简单的手电筒电

路，还是复杂的计算机电路。电路中各种元器件所表征的电磁现象和能量转换的关系一般都比较复杂，若按实际电气元器件来做电路图将比较困难和繁杂，因此，在分析和计算实际电路问题时必须用理想的电路元器件及其组合来近似代替实际电气元器件所组成的实际电路。这种由理想元器件所组成的与实际电气元器件相对应，并用统一规定的符号来表示而构成的电路，就是实际电路的模型，通常称为模型电路。手电筒的实际电路和模型电路如图 1-3 所示。

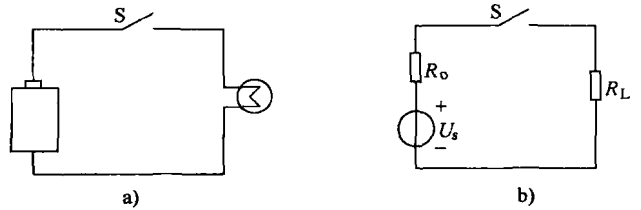


图 1-3 手电筒的实际电路和模型电路

搭建各种电路都有一定的目的，尽管电路的结构千差万别，但它们的功能大致可概括为两大类：一是作为能量的传输或转换，如照明和动力电路等；二是作为信号的传递和处理，如计算机和通信电路等。

### 1.1.3 描述电路工作状态的几个物理量

#### 1. 电流

电荷的定向运动形成电流，习惯上将正电荷运动的方向规定为电流的流动方向。计量电流大小的物理量称为电流强度，简称电流，用  $I$  来表示。

电流的定义为：单位时间内通过导体横截面的电量。如果任一瞬间，通过导体横截面的电量是大小和方向均不随时间变化的  $Q$ ，则电流  $I$  的表达式为

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

根据国家标准，不随时间变化的物理量用大写字母来表示，随时间变化的物理量用小写字母来表示，所以，式 (1-1) 就是直流电流的表达式，交流电流的表达式为

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

在国际单位制 (SI) 中，电流的单位为安培，简称安 (A)。大型电力变压器中的电流可达几百到上千安培，而晶体管电路中的电流往往只有千分之几安培，对于很小的电流可用毫安 (mA) 或微安 ( $\mu\text{A}$ ) 来计量，它们之间的换算关系为

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

#### 2. 电压

根据物理学课程的知识可知，电荷在电场中移动时，电场力将对电荷做功。为了描述电场力对电荷做功能力的大小，引入物理量电压的概念。

电场中 a、b 两点间电压  $U_{ab}$  的定义为： $U_{ab}$  在数值上等于把单位正电荷从 a 点移到 b 点时，电场力所做的功。电压的定义式为

$$U_{ab} = \frac{W}{Q} \quad (1-3)$$

电压也常写成电位差的形式，即

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (1-4)$$

式中,  $U_a$  和  $U_b$  分别表示电场中 a、b 两点对零电压点的电压, 当  $U_{ab}$  大于零时, 说明 a 点的电压比 b 点高, 当  $U_{ab}$  小于零时, 说明 a 点的电压比 b 点低。

在电路分析基础课程中, 通常将处在高电压的 a 端用 “+” 号来表示, 而用 “-” 号来表示处在低电压的 b 端, 电压的方向是由高电压点指向低电压点。即由 a 指向 b, 如图 1-4 所示。

随时间变化的电压表达式为

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-5)$$

在国际单位制中, 电压的单位为伏特 (V), 简称伏。1V 电压在数值上等于将 1C 的正电荷从 a 点移到 b 点, 电场力做了 1J 的功。

### 3. 电动势

电动势是表征电源特征的物理量。在图 1-4 中, 正电荷在电场力的作用下, 从高电压的 a 点经过负载 (灯泡) 向低电压的 b 点移动, 形成电流 I。正电荷由 a 移到 b 时, 就要与 b 极板上的负电荷中和, 使两极板上的电荷逐渐减少, 两极板间的电场也逐步减小, 相应的电流也将逐渐减小到中断。为了使电路中的电流能够持续不断, 在 a、b 两极板之间必须有一种非电场力, 该力可以将正电荷从低电压点的 b 极板通过电源内部推向高电压点的 a 极板, 使 a、b 两电极间始终保持一定的电压, 电源是靠非电场力来完成这个任务的。

在图 1-4 中, 电源是一个电池, 其内部化学反应所产生的非电场力将正电荷从低电压点的 b 电极, 通过电源内部推向高电压点的 a 电极, 并在电源内部建立起电场, 使电源的正、负两极维持一定的电压。

非静电力在电源内部不断地把正电荷从低电压点移向高电压点就要克服电场力做功, 电源的电动势就是表征电源内部非静电力对电荷做功能力大小的物理量, 用符号  $E$  来表示。

综上所述, 电源的电动势在数值上等于非静电力把单位正电荷从电源的低电压点 b 经电源内部移到高电压点 a 时所做的功, 用公式表示为

$$E_{ba} = \frac{W}{Q} \quad (1-6)$$

式中,  $Q$  是电源内部由非静电力移动的电量;  $W$  是非静电力所做的功。比较式 (1-4) 与式 (1-6) 可见, 电动势与电压具有相同的量纲, 所以, 电动势和电压具有相同的单位——伏特 (V)。电动势与电压虽然单位相同, 但两者的物理概念却不同。

电动势是描述电源的非电场力对电荷做功能力大小的物理量。在电源内部, 非静电力将正电荷从电源负极移到正极做功, 将非电能转化为电能。电动势的作用是使正电荷获得电能而电压升高, 所以, 电动势的实际方向是从电源内部的负极指向电源的正极, 即电压升高的方向。

电压是描述电源的电场力对电荷做功能力大小的物理量, 在电源外部, 电场力将正电荷从电源正极移到负极做功, 将电能转化为其他形式的能量。电压的作用是使正电荷的电压降低, 对外做功, 所以, 电压的实际方向是从电源的正极指向负极, 即电压降低的方向。电源电动势和电压的实际方向刚好相反。

综合图 1-4 可得, 在电源内部非静电力做功, 将非电能转化为电能, 并建立电动势以维

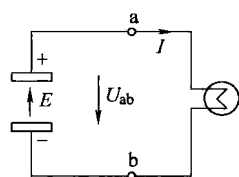


图 1-4 电压和电动势方向的示意图

持电源两极板间的电压保持不变；而在外电路中，电场力做功，负载将电能转化为非电能。由于电源两极间存在着电压，只要电路一接通，电流就持续不断。在电源内部，由于电动势的作用使电流从负极流向正极，即从低电压点流向高电压点；而在外电路中，因电压的作用，电流从高电压点流向低电压点，即电压降低的方向。

#### 4. 电位

电位又称电势，它是描述电场中某一点与零电位参考点之间电位差的物理量。计算电场中某一点（例如 a 点）电位的方法是：先指定电场中的一个点（例如 b 点）为参考点，用符号  $\perp$  来表示，并规定参考点的电位为零。电路中任一点与参考点之间的电压就是该点的电位。

电位是电路分析课程的重要概念，在电路分析基础课程中，常用电位的概念来分析电路中元器件的工作状态。应用电位的概念还可以简化电路图的画法，以便于分析计算，如图 1-5 所示。

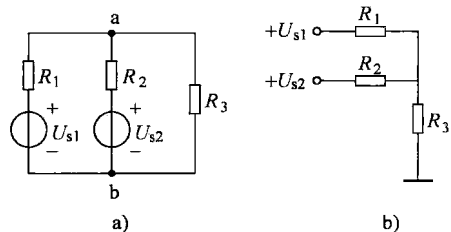


图 1-5 同一个电路不同的画法

图 1-5a 是电路的经典画法，也是大家比较熟悉的画法；图 1-5b 是以 b 点为零电位点的画法。

图 1-5b 的画法是后续课程中常用的画法，要熟悉这种画法，并掌握这两种画法之间的转换关系，并记住图 1-5b 的正电位点与接地点之间接有电压源，构成电流的通路。

#### 5. 电荷

电荷是物质的一种属性。它描述了带电荷的物体具有吸引轻小物体的性质。电荷在电路与电子学基础课程中用符号  $Q$  来表示。某带电体在  $t$  时刻所带的电荷量  $q(t)$  为

$$q(t) = \int_0^t i(t) dt + q(0) \quad (1-7)$$

电路中用来储存电荷的容器称为电容器，根据物理课程的知识已知，电容器由电介质隔开的两金属电极片组成，电容器在电路中常用的符号是  $\text{—}| \text{—}$ 。

表征电容器性质的物理量称为电容器的电容，用字母  $C$  来表示。电容  $C$  的定义为：电容器上所储存的电荷量  $Q$  与两极板的电位差  $U_{ab}$  之比，即

$$C = \frac{Q}{U_{ab}} \quad (1-8)$$

电容在国际单位制中的单位为法拉，简称法 (F)，法拉的单位太大了，在电路与电子学基础课程中常接触到的电容单位为微法 ( $\mu\text{F}$ ) 和皮法 (pF)，它们之间的换算关系为

$$1\text{F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{pF}$$

电容器在电路中是一个储能元件，电容器内所储存的电能  $W_C$  为

$$W_C = \frac{1}{2} CU^2 \quad (1-9)$$

式中， $U$  是电容器两极板之间的电压。

#### 6. 电感

根据物理学课程的知识已知，将导线绕制成  $N$  匝螺线管，就构成一个电感线圈。没有铁磁物质的线圈称为线性电感线圈，线性电感线圈在电路中常用的符号是  $\text{—} \text{—} \text{—}$ 。

当线圈中通有电流  $I$  时，线圈内部就会产生磁通  $\Phi$ 。对于  $N$  匝线圈，乘积  $N\Phi$  称为线圈

的磁通匝链数，简称磁链，用字母  $\Psi$  来表示。实验表明，线性电感线圈的磁链  $\Psi$  与流过线圈中的电流  $I$  成正比的关系，其比值为

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N\Phi}{I} \quad (1-10)$$

式中， $L$  称为线圈的自感系数，简称电感。它是表征线圈性质的物理量，表示单位电流在线圈中所产生磁链数的大小。在国际单位制中，电感的单位是亨利，简称亨（H）。在电路分析基础课程中经常接触到的电感单位是毫亨（mH）、微亨（ $\mu\text{H}$ ），它们之间的换算关系为

$$1\text{H} = 10^3\text{mH} = 10^6\mu\text{H}$$

电感线圈在电路中也是一个储能元件，电感线圈内所储存的电能  $W_L$  为

$$W_L = \frac{1}{2}LI^2 \quad (1-11)$$

### 1.1.4 电流、电压和电动势的参考方向

中学物理在分析和计算电路问题的时候，电流、电压和电动势的方向是统一约定的。即，电流  $I$  在外电路中从电源的正极出发，流向负极；在内电路中从电源的负极出发流向正极。电压  $U$  的方向是从电源的正极指向负极，电动势  $E$  的方向是从电源的负极指向正极。这种约定的方向与电路中电流、电压和电动势的实际方向相一致，在分析、计算简单电路（单电源电路）的问题时是可行的，但在分析、计算如图 1-6 所示的复杂电路问题时却有困难。

在分析和计算复杂电路问题的时候，电路中电流和电压的实际方向往往事先无法确定，在电流、电压的方向无法确定的情况下，没有办法对电路进行分析和计算。为了解决这一问题，引入电流、电压和电动势参考方向的概念。

电流、电压和电动势的参考方向指的是：在分析和计算复杂电路的问题之前，为了分析和计算的需要而假设的电流、电压和电动势的方向，这些方向通常用如图 1-6 所示的箭头来表示。

在图 1-6 中  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$  旁边的箭头表示电流  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$  的参考方向， $U_1$ 、 $U_2$  和  $U_3$  旁边的箭头表示电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  两端电压的参考方向， $E_1$  和  $E_2$  旁边的箭头表示电源  $E_1$  和  $E_2$  电动势的参考方向， $U_{s1}$  和  $U_{s2}$  上下的正、负号表示电压源输出电压的参考方向。

参考方向的假设是任意的，任意假设的参考方向与电流、电压和电动势的实际方向之间存在着差别，这种差别体现在，在某些电路中参考方向与实际的方向相一致，而在另一些电路中，参考方向与实际的方向则相反，但不论属于哪种情况，都不会影响电路分析和计算结论的正确性。这是因为按参考方向求解得出的电压和电流的值有大于零和小于零两种可能。大于零，为正值，说明该参考方向与实际的方向相一致；小于零，为负值，说明该参考方向与实际的方向相反。

顺便指出，进行电路分析和计算的时候，在没有标明电流或电压参考方向的前提下就讨论电流或电压的正、负值是没有意义的。

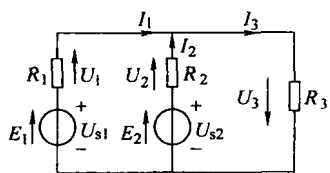


图 1-6 电压和电流的参考方向

电压的参考方向除了用箭头表示之外，还可以用正、负号或下标 a、b、c 来表示，如图 1-7 所示。

图中的符号  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$  不仅表示电压  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$  值的大小，也表示该电压的参考方向是从 a 指向 b，从 b 指向 c。

在用电位表示电路中某一点的电压值时，该电压的参考方向是确定的，都是从该点指向零电位点。

参考方向的假设是任意的，在电路的分析计算中，将两个相同方向的参考方向称为关联参考方向；反之称为非关联参考方向。

虽然参考方向的假设是任意的，但为了分析计算的方便，通常将同一个电路的无源器件（如电阻元件等）上电流和电压的参考方向设定成相关联的，而将电源电动势和电源两端电压的参考方向设定成非关联的。

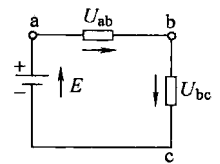


图 1-7 电压的参考方向

### 1.1.5 欧姆定律

欧姆定律是电路的基本定律之一，它说明流过电阻的电流与该电阻两端电压之间的关系，反映了电阻元件的特性。

对于一段仅含电阻  $R$  的电路，欧姆定律表示流过电阻  $R$  的电流  $I$  与电阻两端的电压  $U$  成正比的关系，其数学表达式为

$$U = IR \quad (1-12)$$

注意，式 (1-12) 成立的条件是电流和电压的参考方向为相关联。当电压和电流的参考方向为非关联时，式 (1-12) 等式的左边必须加上一个负号。即

$$U = -IR \quad (1-13)$$

注意，欧姆定律仅适用于阻值不随通过的电流或两端电压的变化而变化的电阻电路，满足欧姆定律的电路称为线性电路。对于非线性电路，欧姆定律不适用，在讨论非线性电路问题时，电流和电压之间的关系用函数来表示，该函数通常表示成  $U-I$  平面上的曲线，该曲线称为伏 (V)-安 (A) 特性曲线。

【例 1-1】 求图 1-8 所示 4 段电路电压  $U_{ab}$  的大小，并说明电压的实际方向，已知电阻  $R = 5\Omega$ 。

解 图 1-8a 和图 1-8b 电路中电流和电压的参考方向为相关联，欧姆定律的形式为式 (1-12)，根据式 (1-12) 可得

图 1-8a 中 
$$U_{ab} = IR = 1 \times 5V = 5V$$

因为  $U_{ab}$  为正，说明  $U_{ab}$  的实际方向和参考方向相同，从 a 指向 b。

图 1-8b 中 
$$U_{ab} = IR = (-1) \times 5V = -5V$$

因为  $U_{ab}$  为负，说明  $U_{ab}$  的实际方向和参考方向相反，从 b 指向 a。

图 1-8c 和图 1-8d 电路中电流和电压的参考方向为非关联，欧姆定律的形式为式 (1-13)，根据式 (1-13) 可得

图 1-8c 中 
$$U_{ab} = -IR = -1 \times 5V = -5V$$

因为  $U_{ab}$  为负，说明  $U_{ab}$  的实际方向和参考方向相反，从 b 指向 a。

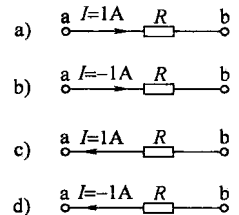


图 1-8 例 1-1 图

图 1-8d 中

$$U_{ab} = -IR = -(-1) \times 5V = 5V$$

因为  $U_{ab}$  为正, 说明  $U_{ab}$  的实际方向和参考方向相同, 从 a 指向 b。

### 1.1.6 电功率、电源和负载的判断

电流在电路中流动, 用电器要吸收电场的能量, 并将其转换成其他形式的能量, 如图 1-9 所示, 研究电路能量转换的问题, 也是对电路进行分析和计算的一个重要内容。

在图 1-9 所示的电路中, 电源电动势  $E$  为电路提供电能, 在忽略电源内阻的情况下, 负载电阻  $R_L$  上消耗的电能可根据电压的定义式来计算。

根据电压的定义式, 正电荷  $Q$  在电场力的作用下, 从 a 点通过负载  $R_L$  移动到 b 点的过程中, 电场力所做的功  $W$  为

$$W = QU = IUt \quad (1-14)$$

$W$  就是负载在时间  $t$  内所消耗的电场能量。当负载是纯电阻器件时, 可将欧姆定律代入式 (1-14) 中, 得到纯电阻  $R_L$  所消耗的电场能量  $W_R$  为

$$W_R = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (1-15)$$

在国际单位制中, 电能的单位为焦耳, 简称焦 (J)。单位时间内负载所吸收的电能称为电功率, 简称功率, 用字母  $P$  来表示, 在国际单位制中, 功率的单位是瓦特, 简称瓦 (W)。

功率  $P$  的表达式为

$$P = \frac{W}{t} = IU \quad (1-16)$$

对于线性电阻电路, 功率  $P$  的表达式为

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-17)$$

注意, 当电流和电压的参考方向为相关联时, 式 (1-14) 和式 (1-16) 对任何器件均适用, 而式 (1-15) 和式 (1-17) 仅适用于线性电阻电路。当电流和电压的参考方向为非关联时, 式 (1-14) 和式 (1-16) 等式的右边需加一负号。即

$$P = -IU \quad (1-18)$$

在图 1-9 中, 电阻  $R_L$  上电流和电压的参考方向是关联的, 根据式 (1-16) 计算得到的功率  $P$  为正数, 说明电阻  $R_L$  吸收电场的能量, 并将其转换成其他形式的能量, 是电路的负载; 电源  $E$  上的电流和电压的参考方向为非关联, 计算电源  $E$  的功率必须用式 (1-18), 计算出来的结果为负值, 说明该器件不是消耗电路的能量, 而是向电路提供能量, 是电路的电源。

根据上面的讨论可知, 利用  $P$  大于零或小于零的特点, 可以判断某一个器件在电路中是承担负载或电源的角色。

**【例 1-2】** 图 1-10 电路中的 A、B、C 为三个不同性质的电子器件, 各器件上电流、电压参考方向的设定如图所示。已知  $I_1 = 2A$ ,  $I_2 = I_3 = -2A$ ,  $U_1 = 20V$ ,  $U_2 = 5V$ ,  $U_3 = -15V$ , 计算各器件的功率,

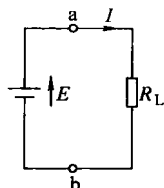


图 1-9 电路能量转换的关系

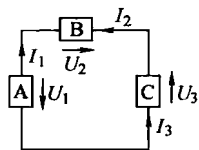


图 1-10 例 1-2 图



并根据计算结果判断各器件的性质。

解 因为器件 A、B 上电流和电压的参考方向为非关联，而器件 C 上电流和电压的参考方向为关联，根据式 (1-18) 和式 (1-16) 可得

$$P_A = -IU = -2A \times 20V = -40W < 0$$

$$P_B = -IU = -(-2A) \times 5V = 10W > 0$$

$$P_C = IU = (-2A) \times (-15A) = 30W > 0$$

根据  $P_A$  小于零的计算结果，可得器件 A 的性质是电源；根据  $P_B$  和  $P_C$  大于零的计算结果，可得器件 B 和器件 C 的性质是负载。

当电路的电流和电压均是时间的函数时，功率也是时间的函数，在电流和电压的参考方向相关联时，计算功率的表达式为

$$p(t) = i(t)u(t) \quad (1-19)$$

## 1.2 电器设备的额定值和电路的三种工作状态

电器设备在出厂时，生产厂家会根据设计、材料及制造工艺等因素，给出电器设备的各项性能指标和技术数据的参数，这些参数称为电器设备的额定值。

### 1.2.1 电器设备的额定值

电器设备的额定值用字母加下标 N 来表示。电器设备的额定值包括额定功率  $P_N$ 、额定电压  $U_N$ 、额定电流  $I_N$ 、额定温升等。铭牌上往往只给出主要的额定值，其他的可根据公式来计算。例如一个标有 1W、400Ω 的电阻，表示该电阻的阻值为 400Ω，额定功率为 1W，由  $P = I^2R$  的关系，可求得它的额定电流为 0.05A。

额定值是规定设备运行时所允许的上限值。超过额定值运行，设备将会毁坏或缩短使用的寿命。例如，当流过上述电阻中的电流值超过 0.05A 时，电阻就会因电流太大而过热，严重时损坏该电阻。在低于额定值下使用设备也是不可取的，如 220V、100W 的电烙铁，在低于 220V 电压下使用时，不能充分发挥电烙铁的作用，既不经济也不合理。

按额定值使用电器设备最为安全可靠、经济合理。额定值往往标在设备的铭牌上或由说明书来提供，所以在使用电器设备之前必须仔细阅读铭牌或说明书的内容。

### 1.2.2 电路的三种工作状态

当电源与负载通过中间环节连接成电路后，电路可能处于图 1-11 所示的通路、开路或

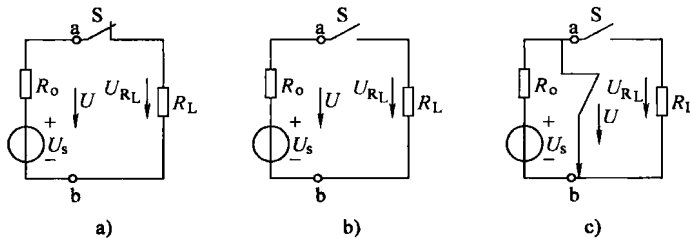


图 1-11 电路的三种工作状态