

高等院校机电类 工程教育 系列规划教材

电工电子技术

■ 主 编 芮延年

→ **电工电子技术：**本书根据国家教育部21世纪教育教学改革目标，针对机械类“电工电子技术”课程的教学要求编写而成。在编写过程中，遵循“理论简洁清晰、内容合理安排、理论与应用结合”的原则，以专业目标培养为主线，培养学生理论联系实际的能力。详细内容请见目录>>>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

013046193

TM-43
193

高等院校机电类工程教育系列规划教材

电工电子技术

芮延年 主编

王耿芳 张柏生 刘鑫培 副主编

翁桂荣 主审



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING



北航

01652913

TM-43
193

内 容 简 介

本书是根据国家教育部面向 21 世纪教育教学改革目标,以及电工学课程指导组拟定的机械类电工、电子技术系列课程教学而编写的用于机械类专业的配套教材。在编写过程中遵循“理论简洁清晰、内容合理安排、理论与应用结合”的原则,内容主要包括电路基础、变压器与电动机、继电接触器控制与可编程控制器控制、模拟电子电路与数字电子电路、综合应用举例等。每章有简明的小结,例题、习题、思考题较多,内容阐述由浅入深,便于教学。

本书可作为高等工科院校机械类等专业的本科生、大专生教材,也可作为函授大学相应专业的教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术 / 芮延年主编. — 北京: 电子工业出版社, 2013.5

高等院校机电类工程教育系列规划教材

ISBN 978-7-121-20230-8

I. ①电… II. ①芮… III. ①电工技术—高等学校—教材 ②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM ②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 081236 号

策划编辑: 余 义

责任编辑: 余 义

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18.5 字数: 498 千字

印 次: 2013 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

序

2008年7月间,电子工业出版社邀请全国20多所高校几十位机电领域的老师,研讨符合“工程教育”要求的教材的编写方案。大家认为,这适应了目前我国高等院校工科教育发展的趋势,特别是对工科本科生实践能力的提高和创新精神的培养,都会起到积极的推动作用。

教育部于2007年1月22日颁布了教高(2007)1号文件《教育部财政部关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》。同年2月17日,紧接着又颁布了教高(2007)2号文件《教育部关于进一步深化本科教学改革全面提高教学质量的若干意见》。由这两份文件,可以看到国家教育部已经决定并将逐步实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称质量工程),而质量工程的核心思想就在于培养学生的实践能力和创新精神,提高教师队伍整体素质,以及进一步转变人才培养模式、教学内容和教学方法。

教学改革和教材建设从来都是相辅相成的。经过近两年的教改实践,不少老师都积累了一定的教学经验,借此机会,编写、出版符合“工程教育”要求的教材,不仅能够满足许多学校对此类教材的需求,而且将进一步促进质量工程的深化。

近一年来,电子工业出版社选派了骨干人员与参加编写的各位教授、专家和老师进行了深入的交流和研究。不仅在教学内容上进行了优化,而且根据不同课程的需要开辟了许多实践性、经验性和工程性较强的栏目,如“经验总结”、“应用点评”、“一般步骤”、“工程实例”、“经典案例”、“工程背景”、“设计者思维”、“学习方法”等,从而将工程中注重的理念与理论教学更有机地结合起来。此外,部分教材还融入了实验指导书和课程设计方案,这样一方面可以满足某些课程对实践教学的需要,另一方面也为教师更深入地开展实践教学提供丰富的素材。

随着我国经济建设的发展,普通高等教育也将随之发展,并培养出适合经济建设需要的人才。“高等院校机电类工程教育系列规划教材”就站在这个发展过程的源头,将最新的教改成果推而广之,并与之共进,协调发展。希望这套教材对更多学校的教学有所裨益,对学生的理论与实践的结合发挥一定的作用。

最后,预祝“高等院校机电类工程教育系列规划教材”项目取得成功。同时,也恳请读者对教材中的不当、不贴切、不足之处提出意见与建议,以便重印和再版时更正。



中国工程院院士、西安交通大学教授

教材编写委员会

主任委员 赵升吨(西安交通大学)

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

芮延年(苏州大学)

胡大超(上海应用技术学院)

钱瑞明(东南大学)

袁清珂(广东工业大学)

参编院校

(按拼音排序)

※ 安徽工业大学

※ 沈阳工业大学

※ 长安大学

※ 苏州大学

※ 东南大学

※ 苏州科技学院

※ 广东工业大学

※ 同济大学

※ 华南理工大学

※ 五邑大学

※ 华南农业大学

※ 武汉科技学院

※ 淮海工学院

※ 西安电子科技大学

※ 吉林师范大学

※ 西安工程大学

※ 南通大学

※ 西安工业大学

※ 山东建筑大学

※ 西安交通大学

※ 陕西科技大学

※ 西安科技大学

※ 上海应用技术学院

※ 西安理工大学

※ 深圳大学

※ 西安文理学院

前 言

近年来,为适应新时代的发展,我国高等教育事业经历了一场巨大的变革,这使我国高校无论从硬件建设还是师资培养都上了一个新的台阶。但是,由于多方面的原因,许多高校的基础课程教材还未跟上发展的步伐,有些还在沿用 10 年前,甚至 20 年前的教材。因此,为了使我国培养的新一代大学生能适应 21 世纪科技飞速发展的要求,根据国家教育部面向 21 世纪课程改革的要求,结合我校电工电子系列课程建设与改革实践,本着“更新内容、侧重应用、培养能力”的原则编写了这本适合机械工程及自动化专业的电工电子技术教材。

电工电子技术是机械工程及自动化专业及其他相关专业的一门重要技术基础课,其任务是使学生掌握机电类专业必备的电工、电子基础知识;熟悉常用的电工、电子应用技术;了解机械领域中相关的电工、电子技术的新进展。为此,本书在编写过程中遵循“理论简洁清晰、内容合理安排、理论与应用结合”的原则,力求以理论知识为基础,以专业目标培养为主线,培养学生理论联系实际的能力。

本教材参考学时为 90 学时,其中电工部分 45 学时(其中理论课程 36 学时,实验课程 9 学时);电子技术 45 学时(其中理论课程 36 学时,实验课程 9 学时)。各学校可根据情况适当调整。

本书由芮延年担任主编,由王耿芳、张柏生、刘鑫培担任副主编。撰稿人具体分工如下:第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 15 章由芮延年编写;第 6 章、第 7 章、第 8 章由王耿芳编写;第 9 章、第 10 章、第 11 章由张柏生编写;第 12 章、第 13 章、第 14 章由刘鑫培编写。全书由苏州大学芮延年组织编写、统稿,翁桂荣主审。

由于电工与电子技术学科发展迅速,课程的改革日益深入,虽然我们精心组织编写,但是,由于时间仓促和编者水平有限,书中错误和欠妥之处在所难免,恳请广大读者不吝指教。

编 者

2013 年 1 月于苏大后庄

目 录

第 1 章 直流电路	1	2.3 单一元件正弦交流电路	33
1.1 电路和电路模型	1	2.3.1 电阻元件交流电路	33
1.1.1 电路的组成	1	2.3.2 电感元件交流电路	35
1.1.2 电路模型	1	2.3.3 电容元件交流电路	36
1.2 电路的基本物理量	2	2.4 RLC 串联电路	38
1.2.1 电位和电压	2	2.4.1 电压与电流的关系	38
1.2.2 电流参考方向	3	2.4.2 功率	39
1.2.3 电压参考方向	3	2.4.3 串联谐振	41
1.2.4 电功率	4	2.5 RLC 并联电路	42
1.3 电路元件	5	2.5.1 电压与电流的关系	42
1.3.1 电阻元件	5	2.5.2 并联谐振	43
1.3.2 电感元件	6	2.6 功率因数的提高	44
1.3.3 电容元件	7	2.7 三相交流电路	45
1.3.4 电路元件的串并联	8	2.7.1 三相电源	45
1.4 有源电源	9	2.7.2 负载的星形连接	48
1.4.1 独立电源	9	2.7.3 负载的三角形连接	49
1.4.2 独立电源的等效变换	10	2.7.4 三相功率	50
1.4.3 受控源	12	2.8 本章小结	51
1.5 基尔霍夫定律	13	2.9 习题	53
1.5.1 基尔霍夫电流定律	13	第 3 章 电路的过渡过程	56
1.5.2 基尔霍夫电压定律	14	3.1 电路的过渡过程及换路定律	56
1.6 电路的基本工作状态	15	3.1.1 电路的暂态	56
1.7 电路分析基础	18	3.1.2 换路定律	56
1.7.1 支路电流法	18	3.2 RC 电路的过渡过程及三要素法	57
1.7.2 叠加原理	19	3.2.1 分析一阶电路过渡过程的 三要素法	57
1.7.3 等效电源定理	21	3.2.2 RC 电路的充电过程	59
1.8 本章小结	23	3.2.3 RC 电路的放电过程	60
1.9 习题	25	3.2.4 RC 电路的时间常数	61
第 2 章 正弦交流电路	27	3.3 微分电路和积分电路	61
2.1 正弦交流电的基本物理量	27	3.3.1 微分电路	61
2.1.1 周期、频率和角频率	28	3.3.2 积分电路	63
2.1.2 瞬时值、幅值和有效值	28	3.4 RL 电路的过渡过程	64
2.1.3 相位、初相位和相位差	29	3.4.1 RL 电路与直流电压的接通	64
2.2 正弦交流电的相量表示法	31		

3.4.2	RL 电路的短接	65	5.3.4	步进电动机的选用	103
3.4.3	电感电路突然断开、过电压的 产生及防止	66	5.4	直线电动机	104
3.5	本章小结	66	5.5	伺服电动机	107
3.6	习题	67	5.6	常用低压电器	108
第 4 章	电磁铁和变压器	69	5.6.1	刀开关与熔断器	108
4.1	磁路	69	5.6.2	主令电器	110
4.1.1	磁场的基本物理量	69	5.6.3	交流接触器、中间继电器、 热继电器、时间继电器	111
4.1.2	铁磁性材料的主要性能	70	5.7	三相异步电动机的基本控制	113
4.1.3	磁路的欧姆定律	71	5.7.1	点动控制	113
4.2	电磁铁	71	5.7.2	连续运转控制	114
4.2.1	直流电磁铁	72	5.7.3	电动机的正反转控制	114
4.2.2	交流电磁铁	72	5.7.4	电动机的开关自动控制	115
4.2.3	交流接触器	73	5.7.5	电动机的顺序控制	117
4.2.4	电磁阀	74	5.8	本章小结	118
4.2.5	交流铁心线圈电路	74	5.9	习题	120
4.3	变压器	76	第 6 章	可编程控制器	123
4.3.1	变压器工作原理	76	6.1	概述	123
4.3.2	变压器的额定值	79	6.1.1	PLC 产生和发展	123
4.3.3	特殊变压器	80	6.1.2	PLC 的基本功能	124
4.4	本章小结	82	6.1.3	PLC 与继电器控制及微机的 区别	125
4.5	习题	83	6.2	PLC 的基本构成	126
第 5 章	电动机及其基本控制	85	6.2.1	PLC 的硬件组成	126
5.1	三相异步电动机	85	6.2.2	PLC 的工作过程	127
5.1.1	三相异步电动机的基本结构	85	6.2.3	PLC 的软件系统	128
5.1.2	三相异步电动机工作原理	87	6.3	FX 系列 PLC 概述	128
5.1.3	三相异步电动机的定子、 转子电路	90	6.4	FX 系列 PLC 基本指令及编程	129
5.1.4	三相异步电动机的机械特性	92	6.5	PLC 应用举例	137
5.1.5	三相异步电动机的选型	94	6.5.1	电动机控制	137
5.1.6	三相异步电动机的启动	96	6.5.2	PLC 综合应用	139
5.1.7	三相异步电动机的反转与制动	98	6.6	本章小结	140
5.1.8	三相异步电动机的调速	99	6.7	习题	141
5.2	单相异步电动机	100	第 7 章	常用半导体器件	142
5.2.1	电容分相式电动机	100	7.1	半导体的基本知识	142
5.2.2	罩极式电动机	101	7.1.1	本征半导体和掺杂半导体	142
5.3	步进电动机	102	7.1.2	PN 结	143
5.3.1	步进电动机基本原理	102	7.2	半导体二极管	144
5.3.2	步进电动机基本特点	103	7.2.1	基本结构	144
5.3.3	步进电动机的驱动控制	103	7.2.2	伏安特性	145

7.2.3	主要参数	145	第 9 章	集成运算放大器	178
7.2.4	特殊二极管	146	9.1	集成运算放大器的组成	178
7.3	晶体管	147	9.1.1	基本组成及其主要技术参数	178
7.3.1	基本结构	148	9.1.2	主要技术指标	179
7.3.2	放大作用	148	9.2	集成运放的理想电路模型	180
7.3.3	晶体三极管的特性曲线	149	9.3	基本运算电路	181
7.3.4	晶体三极管的主要参数	151	9.3.1	比例运算电路	181
7.4	绝缘栅场效应管	151	9.3.2	加减法运算电路	183
7.4.1	基本结构	152	9.3.3	积分微分运算电路	184
7.4.2	工作原理	152	9.4	正弦波振荡电路	187
7.4.3	特性曲线	153	9.4.1	正弦波振荡器的基本概念	187
7.4.4	主要参数	154	9.4.2	RC 振荡器	188
7.5	晶闸管	154	9.5	本章小结	191
7.5.1	晶闸管的结构	154	9.6	习题	191
7.5.2	晶闸管的工作原理	154	第 10 章	直流稳压电路	194
7.5.3	晶闸管的伏安特性	155	10.1	半导体整流电源	194
7.5.4	晶闸管的主要参数	156	10.1.1	单相半波整流电路	194
7.6	本章小结	156	10.1.2	单相桥式整流电路	195
7.7	习题	157	10.2	滤波电路	197
第 8 章	基本放大电路	159	10.3	稳压电路	198
8.1	电压放大电路的工作原理	159	10.3.1	稳压管和稳压电路	198
8.2	静态分析	160	10.3.2	串联型稳压电路	199
8.2.1	估算法	160	10.3.3	集成稳压电路	200
8.2.2	图解法	161	10.3.4	可控整流电路	202
8.3	动态分析	162	10.4	本章小结	204
8.3.1	放大电路的主要性能指标	162	10.5	习题	204
8.3.2	放大电路的微变等效电路	163	第 11 章	数字电路基础	206
8.4	分压偏置共射放大电路	165	11.1	数字电路概述	206
8.5	射极输出器	167	11.1.1	数字信号与数字电路	206
8.6	多级放大电路	168	11.1.2	数字电路的特点	206
8.7	差动放大电路	169	11.1.3	数字电路的分类	207
8.7.1	工作原理	170	11.1.4	数字电路的分析方法和测试技术	207
8.7.2	输入和输出形式	171	11.2	数值与编码	207
8.8	功率放大电路	172	11.2.1	数制	207
8.8.1	对功率放大电路的基本要求	173	11.2.2	数制转换	208
8.8.2	放大电路的三种工作状态	173	11.2.3	编码	210
8.8.3	互补对称功率放大电路	173	11.3	逻辑代数基础	210
8.9	本章小结	175	11.3.1	逻辑代数的基本概念	210
8.10	习题	175			

11.3.2	逻辑函数的表示	213	13.4.1	二进制计数器	247
11.3.3	逻辑代数的基本定律	213	13.4.2	N 进制计数器	248
11.3.4	逻辑函数的化简	214	13.4.3	集成计数器	250
11.4	基本逻辑门电路	215	13.5	集成定时器	251
11.4.1	基本概念	215	13.5.1	555 定时器	252
11.4.2	与门电路	216	13.5.2	CC7555 定时器组成	253
11.4.3	或门电路	216	13.6	单稳态触发器	254
11.4.4	非门电路	217	13.6.1	CC7555 定时器构成单稳态 触发器	255
11.5	集成门电路	217	13.6.2	单稳态触发器的应用举例	256
11.5.1	典型 TTL 与非门电路	218	13.7	多谐振荡器	256
11.5.2	其他类型的 TTL 与非门电路	220	13.7.1	用 CC7555 定时器构成多谐 振荡器	256
11.5.3	CMOS 集成逻辑门电路	222	13.7.2	多谐振荡器的应用举例	257
11.6	本章小结	224	13.8	本章小结	258
11.7	习题	224	13.9	习题	259
第 12 章	组合逻辑电路	226	第 14 章	模拟量与数字量的转换	261
12.1	组合逻辑电路的分析与设计	226	14.1	概述	261
12.1.1	组合逻辑电路的分析	226	14.2	数模转换器	261
12.1.2	组合逻辑电路的设计方法	227	14.3	模数转换的原理	264
12.2	常用组合逻辑功能器件	228	14.4	模数转换器的主要技术指标	267
12.2.1	编码器	228	14.5	集成 ADC 芯片的选用	267
12.2.2	译码器和数码显示	230	14.6	数模接口电路的应用	269
12.2.3	加法器	233	14.7	本章小结	271
12.2.4	数据选择器和数值比较器	234	14.8	习题	271
12.3	本章小结	237	第 15 章	综合应用举例	273
12.4	习题	238	15.1	概述	273
第 13 章	时序逻辑电路	239	15.1.1	电气控制系统的设计与调试	273
13.1	概述	239	15.1.2	设计过程中应注意的几个 问题	274
13.2	触发器	239	15.2	机械手自动控制系统设计	275
13.2.1	RS 触发器	239	15.3	水温检测电路设计	279
13.2.2	JK 触发器	242	15.4	步进电动机控制系统设计	281
13.2.3	维持-阻塞式 D 触发器	243	15.5	本章小结	285
13.3	寄存器	244	参考文献		286
13.3.1	数码寄存器	244			
13.3.2	移位寄存器	245			
13.3.3	集成寄存器	246			
13.4	计数器	246			

第1章 直流电路

【内容提要】

本章主要介绍电路的组成、电路模型、电路的基本物理量、电路元件（电阻、电感、电容）、电路元件的串并联、有源电源、基尔霍夫定律、电路的基本工作状态、电路分析基础等内容。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路的组成

电路是电流通过的路径，它由电源、负载、中间环节三部分组成。人们在生产和生活中使用的电气设备，如电动机、电视机、计算机等都是由实际电路构成的。

电源是将非电能转换成电能的装置，作用是为电路提供能量，如发电机就是将机械能或核能转化为电能，蓄电池就是将化学能转化为电能，光电池就是将光能转化为电能等；负载则是将电能转化为其他形式能量加以利用的电器元件或设备，如电动机将电能转化为机械能，电炉将电能转化为热能等；中间环节是指用做电源和负载的连接体，包括导线、开关、控制线路中的保护设备等。

根据实际电路的功能和作用，大致可将电路分为以下两类。

(1) 实现电能的传输和转换，图 1-1 所示的是一个简单的照明电路，电池作为电源，灯作为负载，导线和开关作为中间环节，将灯和电池连接起来。电池通过导线将电能传递给灯，灯将电能转化为光能和热能。

(2) 实现信号的传递和处理，图 1-2 所示的是一个扩音器电路，传声器将声音的振动信号转换为电信号即相应的电压和电流，经过放大处理后，通过电路传递给扬声器，再由扬声器还原为声音。

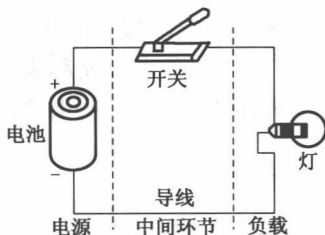


图 1-1 照明电路

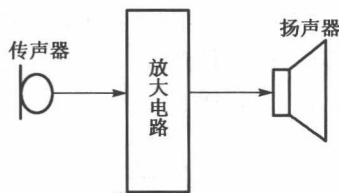


图 1-2 扩音器电路

1.1.2 电路模型

实际电路由各种作用不同的电路元件或器件组成。实际电路元件种类繁多，且电磁性质较为复杂。图 1-1 中的灯除了具有消耗电能的性质外，当电流通过时，还具有电感性。为便于对实际电路进行分析和数学描述，需要将实际电路元件用能代表其主要电磁特性的理想元件或它们

的组合来表示,称为实际电路元件的模型。反映具有单一电磁性质的实际元件的模型称为理想元件,包括电阻、电感、电容、电源等。图 1-3 所示的是电工技术中经常用到的几种理想元件的电路符号。

由理想元件组成的电路称为实际电路的电路模型,简称电路。将实际电路模型化是研究电路问题的常用方法。在图 1-1 中,电池对外提供电压的同时,内部也有电阻消耗能量,所以电池用其电动势 E 和内阻 R_0 的串联表示。灯除了具有消耗电能的性质(电阻性)外,通电时还会产生磁场,具有电感性。通常,由于电感微弱,可忽略不计,于是可以认为灯是一个电阻元件,用 R 表示。图 1-4 为图 1-1 的电路模型。



图 1-3 理想元件的电路符号

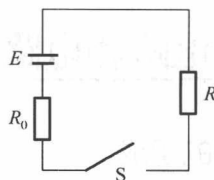


图 1-4 图 1-1 的电路模型

将实际电路元件抽象为一种或几种理想元件的组合,需要丰富的电路知识和专业知识。一个实际电路在不同条件下可化为若干个从简单到复杂的模型。如一个电感线圈,在直流电路中,可看做一个小电阻;在低频交流情况下,可看做一个电感和这个电阻的串联;在高频交流情况下,还需要考虑线圈的匝间分布电容和层间分布电容。所建立的电路模型应能反映电路的真实情况,即采用电路模型计算结果与实际电路测量结果的误差应在允许范围之内。

1.2 电路的基本物理量

电路中有许多物理量,其中电源的电动势 E 、电路中的电流 I 、电压 U 及电功率 P 是电路的基本物理量。下面通过对电位和电压、电流和电压参考方向及电功率的讨论,为各种电路的计算提供方便条件。

1.2.1 电位和电压

电位在物理学中称为电动势。电位是一个相对物理量,即某点电位的极性和大小是相对参考点而言的。参考点的电位称为参考电位,通常设参考电位为零,所以参考点又称为零电位点。参考点在电路中可以任意选取,用“接地”符号表示,如图 1-5(a)中的点 c 。所谓“接地”,则并不一定真与大地相接。

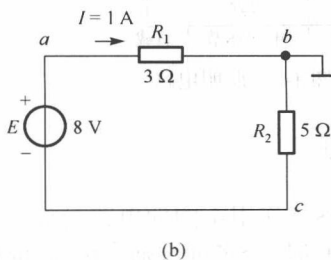
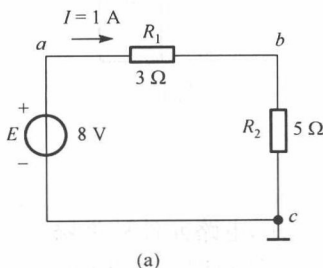


图 1-5 参考点与电位

在图 1-5(a)中, 根据需要, 如果选点 c 为参考点, 即 $V_c = 0 \text{ V}$, 则点 a 、 b 的电位等于点 a 、 b 与参考点之间的电压, 即

$$V_a = E = 8 \text{ V}, \quad V_b = IR_2 = 1 \times 5 = 5 \text{ V}$$

如果选点 b 为参考点, 即 $V_b = 0 \text{ V}$, 如图 1-5(b)所示, 此时, 点 a 、 c 的电位为

$$V_a = IR_2 = 1 \times 3 = 3 \text{ V}, \quad V_c = -IR_2 = -1 \times 5 = -5 \text{ V}$$

由以上分析可见: 电路中某一点的电位等于该点与参考点之间的电压; 参考点选得不同, 电路中各点相应的电位也不同。但是参考点一经选定, 则电路中各点的电位就被唯一地确定了。所以, 电路中某点电位的高低是相对的。

电路中任意两点电位之差称为电位差, 又称为电压。在图 1-5(a)中, a 、 b 两点间的电压为

$$U_{ab} = V_a - V_b = 8 - 5 = 3 \text{ V} \quad (\text{点 } c \text{ 为参考点})$$

在图 1-5(b)中, a 、 b 两点间的电压为

$$U_{ab} = V_a - V_b = 3 - 0 = 3 \text{ V} \quad (\text{点 } b \text{ 为参考点})$$

由此可见, 电路中两点间的电压值不会因选取不同的参考点而改变, 电压是一个绝对量。

电位虽是对某一点而言, 但实质上还是指两点间的电位差, 只是其中一点(参考点)的电位预先被指定为零而已。

1.2.2 电流参考方向

习惯上称固定正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向为电流的实际方向。但在分析计算较为复杂的电路时, 往往难以事先判定某一支路中电流的实际方向, 故在分析和计算电路时, 可任意选定某一方向作为电流的参考方向。所选电流的参考方向是任意假定的, 并不一定与电流的实际方向一致。当电流的实际方向与所选定的参考方向一致时, 则电流为正值 ($I > 0$), 如图 1-6(a)所示; 当电流的实际方向与所选定参考方向相反时, 则电流为负值 ($I < 0$), 如图 1-6(b)所示。图中实线代表电流的参考方向, 虚线代表电流的实际方向。电流的参考方向也可以用箭头 (“→”) 表示。因此, 分析和计算电路时, 在参考方向选定后, 电流的值才有正负之分。

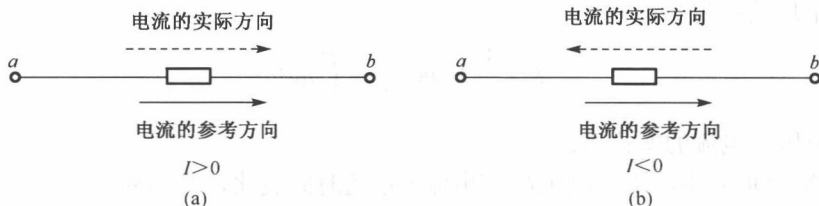


图 1-6 电流参考方向与实际方向

在国际单位制中, 电流的单位为安培 (A), 简称安。对于较小的电流, 可以用毫安 (mA) 或微安 (μA) 为单位。其关系为

$$\begin{cases} 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A} \\ 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A} \end{cases}$$

1.2.3 电压参考方向

电压和电动势都是标量, 但在分析和计算电路时, 它们和电流一样也具有方向。通常, 规定电压的方向从高电位 (“+” 极性) 端指向低电位 (“-” 极性) 端, 即电位降低的方向。电源

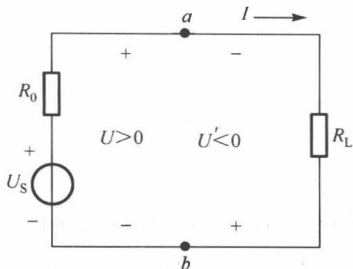


图 1-7 电压参考方向

电动势的方向规定在电源内部由低电位（“-”极性）端指向高电位（“+”极性）端，即为电位升高的方向。

在电路的分析和计算时，所标的电流、电压和电动势的方向，通常都是指参考方向，至于它们是正值还是负值，要根据选定的参考方向而定。例如，在图 1-7 所示的电路中，如果 a 、 b 两点间电压 U 的参考方向与实际方向一致，则为正值，即 $U > 0$ ；如果 b 、 a 两点间电压 U 的参考方向与实际方向相反，则为负值，即 $U < 0$ 。两者间关系为 $U = U'$ 。

电压的参考方向也可用双下标表示。如 a 、 b 两点间的电压可表示为 U_{ab} ，说明电压的参考方向是由点 a 指向点 b ；点 a 的参考极性为“+”，点 b 的参考极性为“-”，即 $U_{ab} = U$ 。反之，电压可表示为 U_{ba} ，说明电压的参考方向由点 b 指向点 a ，即 $U_{ab} = U'$ 。同样，电流的参考方向也可用双下标表示。

电压、电位和电动势的单位为伏特（V），简称伏。当电压、电位和电动势的数值较大时，可用千伏（kV）为单位；当数值较小时，可用毫伏（mV）和微伏（ μV ）为单位。其关系为

$$\begin{cases} 1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V} \\ 1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V} \\ 1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V} \end{cases}$$

1.2.4 电功率

根据物理学中功率的定义，电路中某元件的电功率（简称功率）为

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

式中 u ——电路元件的端电压；

i ——流经电路元件中的电流。

在正弦交流电路（AC）中，由于电压 u 和电流 i 随时间变化，则功率 p 也随时间变化，在一个周期内的平均功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \quad (1-2)$$

式中 T ——电压、电流的变化周期。

在直流电路（DC）中，由于电压 U 和电流 I 不随时间变化，则功率为

$$P = UI \quad (1-3)$$

功率的单位为瓦特（W），简称瓦。较小功率的单位用毫瓦（mW），较大功率的单位用千瓦（kW）。 $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$ ， $1 \text{ W} = 10^3 \text{ mW}$ 。

通常，电业部门用千瓦时测量用户消耗的电能。1 千瓦时（俗称 1 度电）是功率为 1 千瓦的元件在 1 小时内消耗的电能。

$$1 \text{ 度电} = 3.6 \times 10^6 \text{ 焦}, \text{ 即 } 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

如果通过实际元件的电流过大，会由于温度升高使元件的绝缘材料损坏，甚至使导体熔化；如果电压过大，会使绝缘击穿，所以必须加以限制。

电气设备或元件长期正常运行的电流容许值称为额定电流，其长期正常运行的电压容许值

称为额定电压；额定电压和额定电流的乘积为额定功率。通常，电气设备或元件的额定值标在产品的铭牌上。例如，一个白炽灯标有 220 V、40 W，表示它的额定电压为 220 V，额定功率为 40 W。

在分析计算电路中，不仅要计算功率的大小，有时还要判断功率的性质，即根据电压和电流的实际方向确定电路元件是电源，还是负载。在电路中电流、电压实际方向未知的情况下，通常均以电压、电流的参考方向为准。

若电路元件上的端电压 U 和电流 I 的参考方向一致（关联），则电路元件上的功率为

$$P = UI \quad (1-4)$$

若电路元件上的端电压 U 和电流 I 的参考方向相反（非关联），则电路元件上的功率为

$$P = -UI \quad (1-5)$$

在上述两种情况下，如果计算出的功率为正值，则表示该元件消耗功率，并表示该元件在电路中的作用为负载；如果计算出的功率为负值，则表示该元件输出功率，并表示该元件在电路中的作用为电源。

需要注意的是，电路中电流、电压的参考方向可任意选取，一旦选取了恰当的参考方向，应在电路的分析计算中始终遵守，相对于参考方向所得的结果不受电流和电压实际方向的影响；无论采用哪一种形式表示功率，在判定元件功率的性质时，其实质都是依据电流和电压的实际方向进行判定的。上述的分析不仅适用于电路中某一电路元件，而且适用于电路中的某一部分电路。

例 1-1 图 1-8 所示的电路是一个含有电压源和负载的闭合电路。电压源的电压 $U_s = 24 \text{ V}$ ，内阻 $R_s = 0.5 \Omega$ ，负载电阻 $R = 7.5 \Omega$ 。求：(1) 电路中的电流；(2) 负载端电压；(3) 各元件的功率。

解：

(1) 电路中的电流为

$$I = \frac{U_s}{R_s + R} = \frac{24}{0.5 + 7.5} \text{ A} = 3 \text{ A}$$

(2) 负载端电压为

$$U = IR = 3 \text{ A} \times 7.5 \Omega = 22.5 \text{ V}$$

(3) 各元件的功率为

$$P_s = -U_s I = -24 \text{ V} \times 3 \text{ A} = -72 \text{ W} \quad (\text{电源产生的功率})$$

$$P = UI = 22.5 \text{ V} \times 3 \text{ A} = 67.5 \text{ W} \quad (\text{负载消耗的功率})$$

$$\Delta P = I^2 R_s = 3^2 \times 0.5 \text{ W} = 4.5 \text{ W} \quad (\text{电源内阻消耗的功率})$$

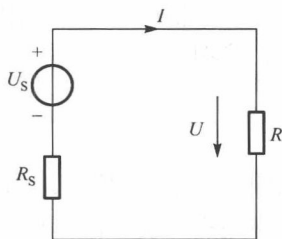


图 1-8 电路初步计算

1.3 电路元件

理想电路元件简称电路元件，其是组成电路的基本要素。在电路分析计算中，可由电路元件两端的电压和流过的电流间关系，判断元件在电路中的性质。根据电路元件的等效电路中是否含有电源，可分为无源电路元件和有源电路元件。本节主要讨论电阻、电感、电容的概念和相关特性。

1.3.1 电阻元件

电阻是用于反映电流热效应的电路元件。实际电路中的白炽灯、电阻炉、电烙铁等均可视为电阻元件。依据电阻的伏安特性 $u = f(i)$ 是线性还是非线性，可将电阻分为线性电阻和非线性电阻两类。线性电阻的端电压和电流间关系遵循欧姆定律，即电压与电流间的关系成正比。

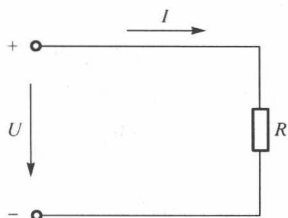


图 1-9 欧姆定律

当电阻端电压 u 与经过电流 i 方向一致（即关联参考方向）时，如图 1-9 所示。流经电阻的电流与端电压成正比。在交流电路中，其伏安特性为

$$u = Ri \quad (1-6)$$

而在直流电路中，其伏安特性为

$$U = RI \quad (1-7)$$

式(1-6)和式(1-7)就是欧姆定律。电阻的单位是欧姆（ Ω ），简称欧。电阻数值很大时，以千欧（ $k\Omega$ ）或兆欧（ $M\Omega$ ）为单位，即

$$\begin{cases} 1 k\Omega = 10^3 \Omega \\ 1 M\Omega = 10^6 \Omega \end{cases}$$

电阻器分固定式和可调式两种，大多数电阻器是固定式的，其电阻值为常数。固定式电阻器一般分为绕线式和化合物式，如图 1-10(a)、(b)所示，其中化合物式一般用于大电阻的制造。可调式电阻器也称为电位器，如图 1-10(c)所示。



图 1-10 电阻器的外形结构

实验证明，导体电阻的大小决定于导体材料的成分、几何尺寸和导体的温度等因素。对于一根材料均匀、截面积为 S （ mm^2 ）、长度为 l （m）的导体来说，它的电阻 R （ Ω ）按下式计算。即

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-8)$$

式中 ρ ——材料的电阻率，单位为 $\Omega \cdot mm^2/m$ 。

还有一类电阻元件，称为非线性电阻元件。当流过不同的电流或加上不同的电压时，它们就有不同的电阻值（电阻不为定值）。

非线性电阻元件中的电流和端电压不是直线关系，不遵循欧姆定律，因而不能应用式(1-6)或式(1-7)，通常表示成 $I = f(U)$ 的形式。半导体二极管可认为是非线性电阻元件。

1.3.2 电感元件

当任何导体有电流通过时，导体周围就会产生磁场；如果电流发生变化，磁场也随着变化，而磁场的变化又引起感应电动势的产生。这种感应电动势是由导体本身电流的变化而引起的，所以称为自感。

自感电动势的方向可由楞次定律确定：当电感器中电流增大时，自感电动势的方向和电感器中电流方向相反，以阻止电流的增大；当电感器中电流减小时，自感电动势的方向和电感器中电流的方向相同，以阻止电流的减小。总之，当电感器中电流发生变化时，自感电动势总是阻止电流的变化。电感常用字母 L 表示。各种电感器的图形符号如图 1-11 所示。

自感电动势的大小，一方面决定于导体中电流变化的快慢，另一方面还与电感器的形状、尺寸、圈数及电感器中的介质情况等有关。

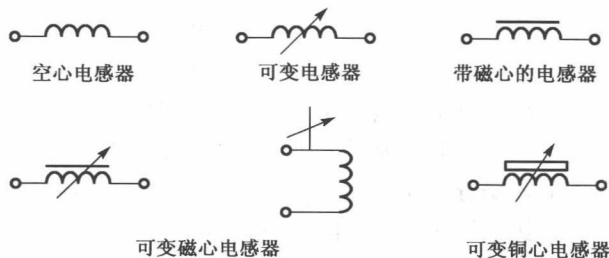


图 1-11 各种电感器的图形符号

电感器的自感现象使其具有一个重要特性,即“通过电感器的电流不能突变”。也就是说,它具有延缓电流变化的特性,对变化的电流呈现一种特殊的阻力,因而在电路中起着“阻交流、通直流”的作用。

电感在电路中的符号如图 1-12 所示。当在有 N 匝线圈的电感中通过电流 i 时,在电感周围产生磁场。如果用磁通 Φ 表示磁场的强弱,则磁通 Φ 和电流 i 的线性关系为

$$N\Phi = Li \quad (1-9)$$

式中 N ——电感的线圈匝数;

L ——电感量,单位为亨利(H)或毫亨(mH), $1\text{H} = 10^3\text{mH}$;

Φ ——磁通,单位为韦伯(Wb);

i ——通过电感的电流,单位为安(A)。

当电感中的电流 i 发生变化时,将在电感线圈中产生自感应电动势 e_L 及电压 u 。当规定 e_L 与 i 的参考方向一致时,根据电磁感应定律,有

$$e_L = -N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1-10)$$

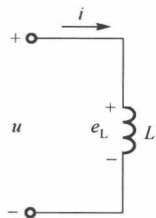


图 1-12 电感元件

电感的伏安特性为

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-11)$$

可见,电感的端电压 u 与电流 i 的变化率 $\frac{di}{dt}$ 成正比,而与电流 i 的大小和方向无关。如果将电感

接入直流电路,由于 $\frac{di}{dt} = 0$ 、 $u = 0$,因此在直流电路中电感相当于短路元件。

理想电感是一个存储磁场能元件。其存储的能量 W_L 为

$$W_L = \int_0^t u i dt = \int_0^t L i di = \frac{1}{2} L i^2 \quad (1-12)$$

1.3.3 电容元件

任何两块金属导体在中间隔以绝缘介质,就构成一个电容器。忽略很小的漏电损失,可以认为电容器是只具有电容参数的理想电容元件。当电容器两端加上电压后,它的两块金属板上就会聚集起等量而异号的电荷,如图 1-13 所示。

通常,电压越高,聚集的电荷越多,产生的电场越强,存储的电场能量越多。为了衡量电容器存储电荷的能力,取电容器存储电荷量与电压的比值,即