



教育部高职高专规划教材

机电控制基础

第二版

► 周四六 主编



化学工业出版社

教育部高职高专规划教材

机电控制基础

第二版

周四六 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍了电工基础知识、常用低压电器及交直流电机、模拟电子、数字电子、可编程控制器、液压传动等方面的内容,并简要介绍了典型机电控制系统应用实例。

本书是高职高专高分子材料加工技术专业的教材,也可作为其他非电类专业的教学用书,还可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电控制基础/周四六主编. —2版. —北京:化学工业出版社,2009.5

教育部高职高专规划教材

ISBN 978-7-122-05021-2

I. 机… II. 周… III. 机电一体化-控制系统-高等学校:技术学院-教材 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 032633 号

责任编辑:于 卉

文字编辑:张绪瑞

责任校对:陶燕华

装帧设计:于 兵

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张17 字数437千字 2009年6月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:30.00 元

版权所有 违者必究

高职高专高分子材料加工技术专业规划教材 编审委员会

顾问	陶国良					
主任委员	王荣成					
副主任委员	陈滨楠	陈炳和	金万祥	冉新成	王慧桂	杨宗伟
委员	周大农					
	(按姓名汉语拼音排序)					
	卜建新	蔡广新	陈滨楠	陈炳和	陈改荣	陈华堂
	陈健	陈庆文	丛后罗	戴伟民	邸九生	付建伟
	高朝祥	郭建民	侯文顺	侯亚合	胡芳	金万祥
	孔萍	李光荣	李建钢	李跃文	刘巨源	刘青山
	刘琼琼	刘少波	刘希春	罗成杰	罗承友	麻丽华
	聂恒凯	潘文群	潘玉琴	庞思勤	戚亚光	冉新成
	桑永	王国志	王红春	王慧桂	王加龙	王玫瑰
	王荣成	王艳秋	王颖	王玉溪	王祖俊	翁国文
	吴清鹤	肖由炜	谢晖	徐应林	薛叙明	严义章
	杨印安	杨中文	杨宗伟	张芳	张金兴	张晓黎
	张岩梅	张裕玲	张治平	赵继永	郑家房	郑式光
	周大农	周健	周四六	朱卫华	朱雯	朱信明
	邹一明					

前 言

《机电控制基础》自出版发行以来,受到广大读者的普遍欢迎,在不到五年的时间内已多次重印,这与使用本教材的兄弟院校师生对该书的编写工作给予的支持和关注是密不可分的。在历次重印过程中,各位同行不吝赐教,提出了很多宝贵的修改意见,从而使本书逐步完善至今。

通过几年来的教学实践,我们总结了本教材的成功之处,更发现了存在的诸多问题。应广大师生的要求,我们组织实施了本次再版编写工作,其主要内容有如下几个特点。

1. 调整完善

原教材第二章正弦交流电路中,充实了正弦交流电路功率因素及RLC串联电路等内容,从而完善了正弦交流电的理论知识体系,使得教材前后章节更为连贯。

2. 删繁就简

(1) 对机电控制技术中所涉及的各种元器件,重点讲述它们的外部特性,淡化其内部机理。如教材第七章中有关二极管的内容,只强调“单向导电性”及其实际应用,而对“载流子”等理论知识未提及。

(2) 原教材第十一章中,半导体存储器和单片机原理及应用两节,由于涵盖的内容过于庞大,教学可操作性差,本次再版将其完全删除。

(3) 随着便携式电脑的日益普及,手持式编程器(HPP)已较少使用。对于教材十二章有关HPP等实用性不强的内容也一并删除。

3. 知识更新

机电控制技术的发展异常迅猛,本书在内容的编排及机电产品的选型上,紧密跟踪工程实际。以第十二章可编程控制器(PLC)为例,我们选择了目前工控领域最为流行的新型FX_{2N}系列PLC作为参考机型,取代了原教材中早期FX2系列PLC产品相关内容。

4. 图文规范

原有教材中第十三、十四、十五章有关液压传动的部分内容,各种液压元件及其职能符号,都沿用了较早的标准,本次再版对此作了大量修改工作,并尽可能统一使用最新的相关国家标准。

本书由周四六任主编。郑雄、赵继永、袁立云、朱卫华、严义章、邓宏明、吴建华、陈昌松老师参加了本书的编写工作。刘少波副教授担任主审。

有关高职院校的师生提出了很多建设性意见,从而为提高本书的编写质量起到了至关重要的作用。编者在此表示诚挚的谢意。

编者

2009年3月

第一版前言

本书是教育部高职高专规划教材,是根据教育部对高职高专人才培养工作的指导思想,在广泛吸收近年来高职高专教改工作成功经验的基础上组织编写的。全书力求体现以综合素质为基础,以能力为本位的思想,在内容的编排上主要注意了如下几个方面。

1. 《机电控制基础》是一门涉及面广、整合力度大、教学时段较长的课程,教材内容极易形成“压缩拼盘”式格局,教材编写为突出其整体性,尽量注意电工技术、电子技术、液压技术、可编程控制器及计算机工业控制技术等内容的相互衔接,通过典型运用实例,将以上内容紧密地联系在一起。如本书第十一章中的 CMOS 电路数字钟、第十六章的数显时间继电器、微电脑时间控制器及 PLC 时间控制系统,就是围绕同一时间控制主题,将电子技术、单片机及可编程控制器等技术有机地融为一体。

2. 教材编写突出了先进性和典型性。随着计算机工业控制等机电控制技术的飞速发展,各种新型高分子材料加工设备不断出现,教材用适当的篇幅讲述了变频调速、可编程控制器、计算机控制及电液比例控制等新技术在上述设备中的具体运用。而对市场拥有量较大,具有典型代表意义的传统设备,其控制原理也作了详细的介绍。

3. 教材突出职业针对性和实用性。注意实际岗位需要,不强调体系的完整性。围绕典型机电控制系统实例,有序展开电工、电子、液压、可编程控制器等基本内容。详略则根据机电设备中应用以上技术的实际情况适当安排。“宽”教材内容尽可能涵盖设备中所涉及的控制原理,“浅”但力求满足生产实际中设备的使用及一般维护的需要。本教材不仅可作为高职高专类高分子材料加工专业教学用书,也可作为其他非电类专业的教学用书。

教材内容共分为电工技术、电子技术、可编程控制器、液压传动、典型设备控制系统五大块,教学时数建议不少于 120 学时。

本书第一章~第四章由常州轻工职业技术学院黄美琴编写,第五章、第六章、第十二章及第十六章第一节、第五节、第六节、第七节由常州轻工职业技术学院赵继永编写,第十三章~第十五章由湖南工业科技职工大学朱卫华编写,第七章~第十一章、第十六章第二节、第三节、第四节由江汉石油学院高职部周四六编写,思考题与习题部分由江汉石油学院高职部陈昌松、吴建华、龚敬杰、严义章编写。全书由周四六任主编,湖北大学刘少波副教授任主审。

本书在编写过程中经过多次修改和审核,由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请使用本书的师生和读者提出批评和修改意见。

编者

2004 年 4 月

目 录

绪论	1	三、RLC 串联电路的两个特例	25
一、电工及电子技术概述	1	四、RLC 串联电路的功率	27
二、机电控制系统概述	1	五、功率因数	28
三、本课程的性质、任务和学习方法	2	思考题与习题	28
第一章 直流电路	3	第三章 三相交流电路	30
第一节 电路及其基本物理量	3	第一节 三相交流电源	30
一、电路的组成及作用	3	一、三相交流电动势的产生	30
二、电路的基本物理量	3	二、三相四线制电源	31
第二节 欧姆定律	6	第二节 三相负载的连接	31
一、部分电路欧姆定律	6	一、三相不对称负载的星形连接	32
二、全电路欧姆定律	6	二、对称负载的星形连接	33
第三节 电路的有载状态、空载与短路	7	三、三相负载的三角形连接	34
一、有载工作状态	7	思考题与习题	35
二、空载状态	7	第四章 变压器	36
三、短路状态	7	一、变压器的用途和结构	36
第四节 基尔霍夫定律	8	二、变压器的工作原理	36
一、基尔霍夫电流定律	8	思考题与习题	38
二、基尔霍夫电压定律	8	第五章 电动机	39
三、支路电流法	9	第一节 三相异步电动机	39
第五节 电压源与电流源	9	一、交流电动机的结构及工作原理	39
一、电压源	9	二、电动机的铭牌	41
二、电流源	10	三、常用的交流电动机调速方式	
第六节 叠加原理	10	及性能比较	42
第七节 戴维南定理	11	第二节 单相异步电动机	43
思考题与习题	12	一、单相异步电动机的旋转原理	43
第二章 正弦交流电路	15	二、单相异步电动机的正反转控制	43
第一节 正弦电压与电流	15	第三节 直流电动机	44
一、频率与周期	15	一、直流电动机的工作原理	44
二、幅值与有效值	16	二、直流电机的基本结构	45
三、初相位	16	三、他励直流电动机的启动、	
第二节 旋转相量与相量	17	调速和制动	47
第三节 单一参数电路元件的正弦		思考题与习题	48
交流电路	18	第六章 常用低压电器控制及继	
一、纯电阻电路	19	电-接触器控制回路	49
二、纯电感电路	20	第一节 常用低压电器	49
三、纯电容电路	22	一、开关电器	49
第四节 RLC 串联正弦电路	23	二、信号控制开关	51
一、RLC 串联电路中电压与电流		三、接触器	53
的相位关系	24	四、继电器	54
二、RLC 串联电路中电压与电流		第二节 继电器-接触器基本控制回路	56
的大小关系	24		

一、三相笼型异步电动机的全压启动	57	第三节 集成运算放大器的应用	89
二、三相笼型异步电动机的减压启动	59	一、负反馈放大器概述	89
三、三相异步电动机的制动	61	二、比例运算电路	89
思考题与习题	62	三、加法及减法运算电路	91
第七章 半导体二极管及整流电路	63	四、积分及微分运算电路	92
第一节 半导体二极管	63	五、集成运算放大器的非线性应用	93
一、半导体二极管	63	第四节 集成运算放大器的使用常识	
二、二极管的伏安特性	63	及应用实例	94
三、二极管的主要参数	64	一、集成运算放大器的使用常识	94
四、二极管的应用	64	二、应用实例分析	95
第二节 单相整流电路	65	思考题与习题	96
一、单相半波整流电路	65	第十章 晶闸管及其应用	97
二、单向桥式全波整流电路	66	第一节 单向晶闸管及其可控整流电路	97
第三节 滤波电路	68	一、单向晶闸管	97
一、电容滤波电路	68	二、单相桥式可控整流电路	98
二、电感滤波电路	68	三、晶闸管触发电路	99
三、滤波电路的选择	69	第二节 双向晶闸管交流调压电路	101
第四节 其他二极管及其应用	69	一、双向晶闸管	101
一、稳压二极管	69	二、交流调压电路	101
二、发光二极管	70	第三节 变频器及变频调速简介	102
三、光敏二极管及光电耦合器	70	一、变频原理	103
思考题与习题	71	二、变频器的基本结构	103
第八章 晶体管及其基本放大电路	72	思考题与习题	104
第一节 晶体三极管	72	第十一章 数字电路	105
一、三极管的结构	72	第一节 概述	105
二、三极管的工作原理	72	一、模拟电路与数字电路	105
三、三极管的伏安特性	74	二、脉冲信号波形与参数	105
四、三极管的主要参数	75	第二节 门电路	106
第二节 单管低频小信号放大器	75	一、分立元件门电路	106
一、共发射极放大电路	75	二、集成门电路	109
二、共集电极放大电路	79	第三节 组合逻辑电路	110
第三节 直流稳压电源	80	一、加法器	110
一、并联稳压电路	81	二、编码器	111
二、串联调整型晶体管稳压电路	82	三、译码和数字显示电路	112
三、三端式集成稳压电源	83	第四节 触发器	114
四、开关调整型直流稳压电源	83	一、RS 触发器	114
思考题与习题	84	二、JK 触发器	115
第九章 集成运算放大器及其应用	86	三、D 触发器	117
第一节 概述	86	四、应用实例	117
一、集成运算放大器的组成及特点	86	第五节 计数器	118
二、集成运算放大器的外形及电路符号	86	一、二进制计数器	118
第二节 集成运算放大器的主要参数		二、十进制计数器	118
和分析准则	87	三、集成计数器——74HC4518	
一、主要参数	87	(或 CC4518)	119
二、集成运算放大器的理想特性	88	第六节 实用 CMOS 电路数字钟	120
三、集成运算放大器的分析准则	88	一、时基信号的产生	120

二、校时电路	120	三、流量控制阀	189
三、计数电路	120	四、二通插装阀	190
四、显示及供电电路	122	第四节 液压辅助元件	193
思考题与习题	122	一、滤油器	193
第十二章 FX_{2N}系列 PLC 原理及应用 ..	125	二、油箱与热交换器	194
第一节 FX _{2N} 系列可编程控制器	125	三、蓄能器	195
一、FX _{2N} 系列 PLC 的基本结构	125	四、压力继电器	196
二、可编程控制器的工作原理	127	思考题与习题	197
三、PLC 的两种常用编程语言		第十五章 液压基本回路	199
及编程工具	129	第一节 压力控制回路	199
四、FX _{2N} 系列 PLC 的编程元件	133	一、调压回路	199
第二节 FX 系列 PLC 的基本指		二、减压回路	199
令及应用	136	三、卸荷回路	200
一、FX _{2N} 系列 PLC 的基本逻辑指令	136	第二节 速度控制回路	201
二、编程注意事项	146	一、节流调速回路	202
第三节 三相异步电动机的 PLC 控制	147	二、容积式调速回路	203
一、三相异步电动机点动-长动		三、有级容积调速回路	204
控制回路	147	四、充液式快速回路	205
二、三相异步电动机正转-反转		第三节 多缸工作控制回路	206
控制回路	148	一、顺序动作回路	206
三、三相异步电动机顺序启动控		二、同步回路	207
制回路	150	三、多缸快慢速互不干扰回路	207
四、三相异步电动机星形-三角形启		第四节 比例阀及比例控制回路	208
动控制回路	152	一、比例阀	208
思考题与习题	155	二、比例控制回路	209
第十三章 液压传动基础	157	思考题与习题	209
第一节 液压传动概述	157	第十六章 典型机电控制系统及	
一、静压力和帕斯卡定律	157	其应用	212
二、液压传动原理及其基本参数	158	第一节 控制参数的检测方法 & 传感器	212
三、液压系统的组成	160	一、注塑机压力的检测	212
四、液压传动的特点	161	二、注塑机的位移检测	215
第二节 液压油	163	三、注塑机的扭矩检测	216
思考题与习题	166	四、注塑机的温度检测	217
第十四章 液压元件	167	第二节 温度控制系统	219
第一节 液压泵和液压马达	167	一、温度控制系统的组成及工作原理	219
一、齿轮泵及齿轮液压马达	167	二、控制温度的方法	220
二、叶片泵及叶片液压马达	169	三、常见温度控制装置原理分析	222
三、轴向柱塞泵及轴向柱塞液压马达	171	第三节 速度控制系统	226
第二节 液压缸	174	一、电磁调速异步电动机调速系统	226
一、液压缸的分类和特点	174	二、可控硅——直流电机调速系统	229
二、活塞缸	174	三、变频——交流电机调速	234
三、柱塞缸	176	第四节 时间控制系统	234
四、其他液压缸	176	一、JS _{11S} 晶体管时间继电器	234
第三节 液压控制元件	177	二、微电脑时间控制器	236
一、方向控制阀	178	三、PLC 时间顺序控制电路实例	238
二、压力控制阀	184	第五节 典型机电液一体化控制系统	240

一、机电设备继电器线路分析	240	四、状态转移图	250
二、液压系统	241	五、参考语句表程序	253
三、电控系统	244	第七节 微机控制系统	254
第六节 可编程序控制器控制	249	一、微机控制系统的特点	254
一、注塑机可编程序控制器 PLC		二、微机控制系统整体结构	254
控制的特点	249	三、电脑控制全自动精密注塑机电气	
二、PLC 点数的确定和输出方式		控制系统示例	257
的选择	250	思考题与习题	258
三、PLC 的外部连线与电控装置		参考文献	260
操作面板	250		

绪 论

机电控制技术对于现代加工设备的发展有着非常重要的作用。目前,种类繁多的工业设备中采用了各种不同的动力装置,如液压装置、气压装置及电力拖动装置等,但从所采用的控制技术来说,其控制原理、基本线路及分析方法是类似的。从广义上说,现代设备控制技术的重要标志是:在各类机电产品及设备中广泛应用了自动调节技术、电子技术、检测技术、计算机技术及各种综合控制技术。本课程结合工业生产设备实例,尤其是高分子材料加工典型成型设备控制系统实例,讲述了以上各种机电控制技术的有关内容,以培养读者对机电控制系统的选择、使用和分析的基本能力。

一、电工及电子技术概述

电工和电子技术是电气控制的基础,电气控制在机械控制中起着重要的作用。

电工学是研究电能在技术领域中的应用的技术基础课程。电能的应用是极其广泛的,现代一切新的科学技术的发展无不与电有着密切的关系。在现代工业、农业及国民经济其他各个领域,电能是最主要的动力来源。工业上的各种生产机械设备都是用电动机来驱动的。机械制造工艺,如电镀、电焊、高频淬火、电炉冶炼金属等都是电能的应用;高分子材料加工工艺,如加热、塑化、挤出成型、压延、混炼等也都离不开电能的应用。电能的应用对劳动生产率的提高和社会生产力的发展起着巨大的作用。

随着生产和科学技术发展的需要,电子技术也得到了空前的发展。电子技术特别是电子计算机的高度发展及其在生产领域中的广泛应用,已经使人们的生活发生了深刻的变化。

电子技术包含模拟电路和数字电路两大组成部分。处理和传输模拟信号的电路称为模拟电路,如扩音机中的前级集成运算放大电路、末级功率放大电路等。处理和传输数字信号的电路称为数字电路,如计算器电路、表决器电路等。模拟电路和数字电路统称电子电路,或电子线路。早期的工业测量和控制仪表一般都由模拟电路构成,而后越来越多地采用数字电路。随着电子技术的发展,单片机以其强大的功能、简捷的硬件结构等优势,正逐步成为各种电子线路中的主体部分。

由于单片微机控制的结构和指令系统都是针对工业控制的要求而设计的,其成本低、集成度高,可灵活地组成各种智能控制装置,解决从简单到复杂的各种任务,实现较好的性能价格比。而且从单片微机芯片的设计制造开始,就考虑了工业控制环境的适应性,因而它的抗干扰能力较强,特别适合于在机电一体化产品中应用。

二、机电控制系统概述

原始的机械设备由工作机构、传动机构和原动机组成,其控制方式由工作机构和传动机构的机械配合实现。随着以电气元件为主的自动控制系统的的应用,设备的性能不断提高,工作机构、传动机构的结构大大简化。主要由继电器、接触器、按钮、开关等元件组成的机械设备的电气控制系统称为继电器-接触器控制系统,其主要控制对象是三相交流异步电动机,对电动机的启动、制动、反转、有级调速和降压等进行控制。这种控制所用的电器一般不是“接通”就是“断开”,控制是断续的,所以从控制性质上看,这种继电器-接触器控制属断续控制或开关量控制。因其简单、易掌握、价格低、易维修,许多通用机械设备至今仍采用这种控制系统。但是,它也存在功耗大、体积大、控制方式完全固定、不灵活的缺点。

开关量控制不能满足对调速性能要求较高的生产机械。因此,出现了直流发电机-电动

机调速系统。直流电动机具有启动转矩大、容易进行无级调速的特点。但它需要直流电源,直流电源是由一台交流电动机拖动一台直流发电机提供的。这种直流发电机-电动机调速系统中的电压和电流可以连续变化,属于连续控制,可实现无级调速。但是,由于这种方式存在所用的电机数量多、占地面积大、噪声大和调速效率低等缺点,20世纪60年代后出现了晶闸管(即可控硅)电动机自动调速系统。这种系统中的直流电源由晶闸管组成的可控整流电路提供,具有体积小、重量轻、效率高和控制灵敏等许多优点,得到了普遍应用。此外,以晶闸管为控制核心的交流电动机电磁调速系统,也被广泛运用于各种中小功率场合。

20世纪80年代以后,由于半导体技术的应用与发展,使得交流电动机调速系统有了突破性进展。交流调速有许多优点,单机容量和转速可大大高于直流电动机,交流电动机无电刷与换向器,易于维护,可靠性高,能用于带有腐蚀性、易爆性、含尘气体等特殊环境中。与直流电动机相比,交流电动机还具有体积小、重量轻、制造简单、坚固耐用等优点。交流调速已突破关键性技术,从实用阶段进入扩大应用、系列化的新阶段。以笼型交流伺服电动机为对象的矢量控制技术,是近年来新兴的控制技术,它能使交流调速具有直流调速的优越调速性能,交流变频调速器、矢量控制伺服单元及交流伺服电动机已日益广泛应用于工业生产中。

近年来,可编程序控制器(PLC)被广泛运用于各种工业过程自动化系统。可编程序控制器从它一问世就是以最基层、最第一线的工业自动化环境及任务为前提的,它具有硬件结构简单、安装维修方便、抗强电磁干扰、梯形图编程、工作可靠等优点,工程技术人员能很快地熟悉它、使用它。可编程序控制器是一种数字运算操作的电子系统,是专门为在工业环境下应用而设计的。它采用一类可编程序的存储器,用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时和算术运算等面向用户的指令,并通过数字式或模拟式的输入和输出,控制各种类型的机械或生产过程。可编程序控制器及其有关外部设备都按既易于工业控制系统连成整体,也易于扩充其功能的原则设计。近年来,PLC趋于向微型、简易、价廉方面发展,逐渐占领以继电器系统为主流的一般机械控制领域;另一发展方向是向大型高功能方面延伸,以满足各种控制对象及场合的需要。

上述的各种控制系统均为电气控制系统。近些年来,许多工业部门和技术领域对高响应、高精度、高功率-重量比、大功率和低成本控制系统提出了要求,促使了液压、气动控制系统的迅速发展。液压、气动控制系统和电气控制系统一样,由于各自的特点,在不同的行业得到了相应的应用。

由于现代控制技术、电子技术、计算机技术与液压、气动技术的结合,使液压、气动控制系统不断创新,其综合性能指标大大提高。各种机电液一体化控制系统应运而生,它充分发挥了电气控制技术和液压、气动控制技术两者的优势,从而得到了广泛的运用。

三、本课程的性质、任务和学习方法

本课程是高分子材料加工专业的一门主干课程,它把“电工学与工业电子学”、“电气控制”和“液压与气动”等几门课程的内容有机地融合起来,形成一个完整的课程体系。其任务是要求学生掌握电气控制系统(继电器-接触器控制、可编程序控制器控制)所必备的电工学与工业电子学的基础理论和基本知识,掌握设备电气控制、液压与气动控制系统的结构、组成、工作原理和应用的基础理论和基本知识,以及机、电、液联合控制技术的基本概念。学完本课程后,应具备对一般机电设备、典型高分子材料成型加工设备控制系统进行分析、调试及排除简单故障的能力。

由于本课程与生产实际关系密切,为突出教材的实用性,对典型设备控制系统原理做了较为详尽的分析讨论。限于篇幅,基础理论部分较为简要,因此,在教学过程中,应多与实际结合,并注意参考其他书目的有关内容。

第一章 直流电路

学习目标 通过本章的学习，掌握电路的组成和作用，电路的基本物理量，电路的三种状态等，掌握欧姆定律、基尔霍夫定律等常用的电路分析方法。

第一节 电路及其基本物理量

一、电路的组成及作用

实际电路是由电工设备和器件按某种方式相互连接而成的。这里所谓的电工设备和器件包括人们日常生活中所看到的电阻（如灯泡、电炉等）、电容、变压器、镇流器等。

图 1-1 所示为一最简单的常见电路，由以下 3 部分组成：

① 提供电能的能源，简称电源，它的作用是将其他形式的能转化为电能（图中的电源是电池组）；

② 用电装置，统称为负载，它将电能转化为其他形式的能（图中负载是电灯）；

③ 连接电源与负载传输电能的金属导线，简称导线。为了节约电能，有时在电路中装上控制开关，如图中的 S。这类电路的主要作用是传输和转换能量，电力电路都属于这种类型，例如，发电、输电、配电、电力拖动、电热、电气照明电路等。

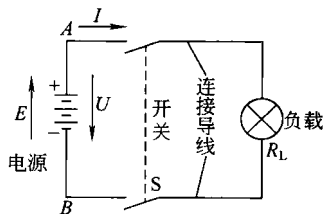


图 1-1 最简单的电路

另有一类电路，其主要作用不在于传输和转换能量，而是传递和处理信号。例如，收音机、电视机电路等。通常把这类电路的输入信号称为“激励”，把输出信号称为“响应”。电信系统进行的也是类似的处理，它也是一个较为复杂的实际电路。

综上所述，电路的作用有两个方面：一是电能的输送和变换；二是信号的传递和处理。

二、电路的基本物理量

1. 电流

在电场作用下，电荷有规则的移动形成电流。金属导体中的电流和电解液中的电流属于传导电流。通常，人们所说的电流大多是传导电流。电流是一种客观的物理现象，通过它的各种效应，如热效应、磁效应、机械效应等可以感觉到它的存在。为了表示电流的强弱，引入了电流强度这个物理量。

电流强度简称为电流，用符号 I 表示，在数值上定义为单位时间内通过导体横截面的电量，即

$$I = Q/t \quad (1-1)$$

电流的单位用安培表示，简称安（A）。如果 1s 内通过导体横截面的电量是 1 库仑（C），则此导体中的电流为 1A。计量微小电流时，电流的单位用毫安（mA）或微安（ μA ）表示，它们的换算关系为

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

在简单电路中, 电流的实际方向可由电源的极性确定, 即从电源正极流出, 负极流入。例如, 在图 1-1 所示的电路中, 电流的实际方向是由正极 A 经过负载指向负极 B ; 在内电路中, 则由 B 经过电源内部指向 A 。但是在一些复杂电路中, 电流的实际方向有时难以事先确定。

为了分析电路的需要, 引入了电流参考方向的概念。电流的参考方向又称为正值方向, 简称“正方向”。在进行电路计算时, 先任意选定某一方向作为待求电流的正方向, 并根据此正方向进行计算。若算得的结果为正值, 说明电流的实际方向与正方向相同。电流的正负值与正方向及实际方向之间的关系, 如图 1-2 所示。

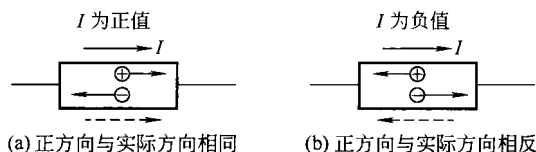


图 1-2 电流的正方向

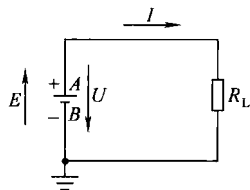


图 1-3 B 点为参考点的电路

2. 电位与电压

正电荷在电路的某一点上具有一定的电位能, 要确定电位能的大小, 必须在电路上选择一参考点作为基准点。在图 1-3 所示的电路中, 把 B 点作为参考点, 则正电荷在 A 点所具有的电位能就等于电场力把正电荷从 A 点经负载 R_L 移到 B 点 (基准点) 所做的功。

正电荷在 A 点所具有的电位能 W_A 与正电荷所带电量 Q 的比值, 称为电路中 A 点的电位, 用 V_A 表示, 即

$$V_A = W_A / Q \quad (1-2)$$

由式 (1-2) 可知, 电路中某点相对于参考点电位的大小, 在数值上就等于单位正电荷在该点所具有的电位能。

电位的单位是焦耳 (J)/库仑 (C), 称为伏特, 简称伏 (V)。电路中某点电位的高低是相对于参考点而言的, 参考点不同, 则各点电位的大小也不同。但参考点一经选定, 则电路中各点的电位就是一定值。参考点的电位设为零, 所以参考点又称为零电位点。在电路中电位比参考点高出的一些点, 它们的电位为正值, 用 “+” 表示; 电位比参考点低的一些点, 它们的电位为负值, 用 “-” 表示。

电路中任意两点间的电位差, 称为这两点间的电压, 用字母 U 表示。例如, A 、 B 两点间的电压为

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1-3)$$

电压是衡量电场力做功能力的物理量, 它在数值上等于单位正电荷受电场力作用从电路的某一点移到另一点所做的功。

电压的单位也用伏特 (V) 表示。计量较大的电压用千伏特 (kV); 计量较小的电压用毫伏 (mV)。

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}; 1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$$

电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点, 即由 “+” 极性指向 “-” 极性。因此, 在电压的方向上电位是逐点降低的。

在分析复杂电路时, 也需先选择参考方向, 方法类似于电流实际方向的判定。当电压的参考方向与实际一致时, 电压为正, 反之为负。

3. 电动势

在闭合电路中, 要维持连续不断的电流, 必须要有电源。电源内有一种外力 (非静电力), 它能把由“+”极经负载流回到“-”极的正电荷搬运到电源的“+”极, 从而使正电荷沿电路不断地循环。

在发电机中, 这种外力由导体切割磁力线时导体中的正、负电荷受电磁力的作用而产生; 在电池中, 则由电极与电解液接触处的化学反应而产生。

外力克服电场力把正电荷从“-”极移到“+”极所做的功 W_{BA} , 与被搬运的电量 Q 的比值, 称为 B 与 A 两点间的电动势, 用 E_{BA} 表示, 即

$$E_{BA} = W_{BA} / Q \quad (1-4)$$

电动势是衡量外力做功的物理量, 它在数值上等于单位正电荷受外力作用从电路的某一点移动到另一点所做的功。

电动势的单位也用伏特 (V) 表示。

电动势的实际方向规定为从低电位点指向高电位点, 即由“-”极性指向“+”极性。因此, 在电动势的方向上电位是逐点升高的。

4. 理想电压源

理想电压源是从实际电源中抽象出来的一种理想电路元件。以电池为例, 在理想情况下, 如电池本身没有能量损耗, 则每库的正电荷由电池的负极转移到正极时, 就获得该转移能量的全部。这时, 电池的端电压 (用 U_S 表示) 将是一个确定的数值。由此, 定义一个理想电路元件, 使其两端电压保持定值, 而不管通过它的电流是多少, 把这种元件称作“理想电压源”, 用图 1-4 表示。

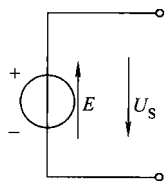


图 1-4 理想电压源

对应图中所表示的方向, 可以写出 $U_S = E$ 。这里的 E 就是上面所讲的电动势。通常情况下, 理想电压源用 U_S 表示。因为电压源不仅仅是电池、发电机之类, 电压源也可由电子线路来实现, 如半导体稳压电源等。

5. 电能

电流能使电灯发光、发动机转动、电炉发热……这些都是电流做功的表现。在电场力作用下, 电荷定向运动的电流所做的功称为电能。电流做功的过程就是将电能转化为其他形式的能的过程。

如果加在导体两端的电压为 U , 在 t 时间内通过导体横截面的电荷量为 q , 导体中的电流 $I = q/t$, 根据电压的定义式

$$U = W/q$$

可知电流所做的功, 即电能为

$$W = Uq = UI t \quad (1-5)$$

式中 U ——加在导体两端的电压, V;

I ——导体中的电流, A;

t ——通电时间, s;

W ——电能, J。

6. 电功率

电功率是描述电流做功快慢程度的物理量。电流在单位时间内所做的功叫做电功率。如果在时间 t 内, 电流通过导体所做的功为 W , 那么电功率为

$$P = W/t \quad (1-6)$$

式中 P ——电功率, W。

第二节 欧姆定律

欧姆定律是电路分析中的一个重要定律，在物理学中对它已有了初步认识，在此基础上需要深化对它的理解。另外，通过对欧姆定律的进一步论述，使之对正方向的重要性有更深刻的体会。

一、部分电路欧姆定律

在图 1-3 所示的电阻电路中，电路中的电流 I 与电阻两端的电压 U 成正比，与电阻 R_L 成反比。这个从实验中得到的结论叫做部分电路欧姆定律。图中电阻 R_L 上的电压参考方向与电流参考方向是一致的，即电流从电压的正极性端流入元件，而从它的负极性端流出，称为关联参考方向。部分电路欧姆定律可以用公式表示为

$$I = U/R \quad (1-7)$$

【例 1-1】 某段电路的电压是一定的，当接上 5Ω 的电阻时，电路中产生的电流是 1A ；若用 10Ω 的电阻，电路中的电流是多少？

解 电路中电阻为 5Ω 时，由部分电路欧姆定律得

$$U = IR = 1 \times 5 = 5\text{V}$$

用 10Ω 的电阻代替 5Ω 的电阻，电路中电流 I' 为

$$I' = U/R' = 5/10 = 0.5\text{A}$$

二、全电路欧姆定律

一个由实际电源和负载组成的闭合电路叫做全电路，如图 1-5 所示。 R 为负载的电阻， E 为电源电动势， r 为电源的内阻。电路闭合时，电路中有电流 I 。根据电压平衡方程得

$$E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$$

若略去导线电阻不计，则加在负载电阻两端的电压就等于电源的端电压，其值为

$$U_{\text{外}} = RI$$

电源内电阻上的电压降为

$$U_{\text{内}} = rI$$

故
或

$$E = RI + rI$$

$$I = E/(R + r) \quad (1-8)$$

式 (1-8) 就是全电路欧姆定律，其意义是：电路中流过的电流，其大小与电动势成正比，而与电路的全部电阻值成反比。

【例 1-2】 有一闭合电路，电源电动势 $E = 12\text{V}$ ，其内阻 $r = 2\Omega$ ，负载电阻 $R = 10\Omega$ ，试求：电路中的电流、负载两端的电压、电源内阻上的电压降。

解 根据全电路欧姆定律

$$I = E/(R + r) = 12/(10 + 2) = 1\text{A}$$

由部分电路欧姆定律，可求负载两端电压

$$U_R = IR = 1 \times 10 = 10\text{V}$$

电源内阻上的电压降为

$$U_r = Ir = 1 \times 2 = 2\text{V}$$

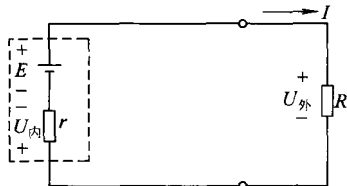


图 1-5 全电路欧姆定律

第三节 电路的有载状态、空载与短路

一、有载工作状态

图 1-6 所示为直流电源对负载（用电器）供电的电路。把开关 S 接通，电路便处于有载工作状态。此时电源输出的电流 I 取决于外电路中并联的用电器数量。电路中所接的用电器常常是变动的，当并联的用电器数量增多时，它的等效电阻减小，而电源的电动势 E 通常为一恒定值，且电源的内阻 R_0 很小，电源的端电压 U 变化很小，这时电源输出的电流和功率将随之增大，这种情况称为电路的负载增大。反之，当并联的用电器数量减少时，它的等效电阻增大，电源输出的电流和功率将随之减小，这种情况称为电路的负载减小。电路在负载状态下具有如下特征。

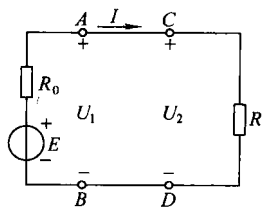


图 1-6 负载状态

1. 电路中的电流

$$I = E / (R + R_0) \quad (1-9)$$

当 E 、 R_0 一定时，电流由负载电阻 R 的大小决定。

2. 电源的端电压

$$U_1 = E - R_0 I \quad (1-10)$$

电源的端电压总是小于电源的电动势，这是因为电源的电动势 E 减去内阻压降 $R_0 I$ 后，才是电源的输出电压 U_1 。

若忽略线路上的压降，则负载的端电压 U_2 等于电源的端电压 U_1 。

3. 电源的输出功率

$$P_1 = U_1 I = (E - R_0 I) I = EI - R_0 I^2$$

上式表明，电源电动势发出的功率 EI 减去内阻上消耗的 $R_0 I^2$ 才是供给外电路的功率，即电源发出的功率等于电路各部分所消耗的功率。由此可见，整个电路中功率是平衡的。

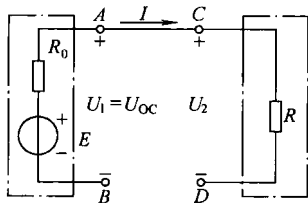


图 1-7 空载状态

二、空载状态

空载状态又称断路或开路状态，如图 1-7 所示，当开关断开或连接导线折断，就会发生这种状态。电路空载时，外电路所呈现的电阻可视为无穷大，故电路具有下列特征。

① 电路中的电流为零，即 $I = 0$ 。

② 电源的端电压等于电源的电动势。即

$$U_1 = E - R_0 I = E$$

此电压称空载电压或开路电压，用 U_{OC} 表示。由此可以得出测量电源电动势的方法。

③ 电源的输出功率 P_1 和负载所吸收的功率 P_2 均为零。

三、短路状态

当电源的两输出端钮由于某种原因（如电源线绝缘损坏，操作不慎等）相接触时，会造成电源被直接短路的情况，如图 1-8 所示。当电源直接短路时，外电路所呈现的电阻可视为零，故电路具有下列特征。

① 电源中的电流最大，外电路输出电流为零。此时电源中的

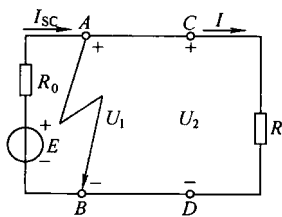


图 1-8 短路状态