



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

机械控制基础

(模具设计与制造专业)

武友德 主编



机械工业出版社

中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

机械控制基础

(模具设计与制造专业)

主 编 武友德
参 编 王明哲 向守兵 韩伟
责任主审 张世昌
审 稿 朱梦周 刘治平



机械工业出版社

本书是“中等职业教育国家规划教材”之一。它严格遵循本专业的培养目标和教学方案的要求；充分体现了中等职业教育的特点，着重培养学生的实际动手能力；加强了实践教学环节，强调机、电、液（气）控制技术的有机结合。

本书共九章，主要内容包括：电工技术，模拟电子技术，继电器-接触器控制技术，数字电子技术，电力电子技术，可编程控制器原理与应用技术，工厂供电与安全用电基本常识，液压与气动控制技术，机、电、液（气）联合控制技术的应用等。

本书是在对当前企业进行了大量调研、按照社会需求和人才知识结构的要求而制定的大纲的基础上编写的，有广泛的适应性。它不仅适应职高、技校、中专等职业学校的模具设计与制造专业的教学需要，也适合其他工程技术人員使用。

图书在版编目（CIP）数据

机械控制基础：模具设计与制造专业/武友德主编．—北京：
机械工业出版社，2002.1
中等职业教育国家规划教材
ISBN 7-111-09721-1

I. 机… II. 武… III. 机械工程-控制系统-专
业学校-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 096008 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
责任编辑：倪少秋 版式设计：张世琴 责任校对：程俊巧
封面设计：姚 毅 责任印制：郭景龙
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·15.5 印张·381 千字
0 001—5 000 册
定价：18.50 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68993821、68326677—2527

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

前 言

《机械控制基础》是教育部“中等职业教育国家规划教材”之一，是模具设计与制造专业的主干课教材。

本书是根据“面向 21 世纪机械职业教育国家规划教材”的要求编写的。它严格遵循本专业的培养目标和教学方案的要求；充分体现了中等职业教育的特点，着重培养学生的实际动手能力；加强了实践教学环节，强调理论与实际的有机结合，强调机、电、液（气）控制技术的综合应用能力的培养。

本书主要讲述交、直流电路的基本理论和基本知识，电子单元电路的基本原理，电气、液压与气动控制的基本知识，使学生掌握工厂供电和用电的基本常识，着重培养学生分析基本电路，使用常规电工、电子器件与设备，排除常规机械加工设备中常见电气、液压与气动控制系统故障的基本能力，掌握 PLC 的基本使用方法，为以后的工作实践打下基础。

本教材是按 140 学时（四年制）编写的，打“*”的章节为选学内容（三年制不要求）。为了加强实践教学环节，推荐开设 35 学时左右的实验并开设两周的实训专用周。

本教材把过去的《电工技术》、《电子技术》、《电气控制》、《液压与气动》等课程有机地结合起来，形成了一个完整的新型课程体系，克服了过去同样内容在几门课程中都讲和纯理论知识与工程实际应用联系不紧密的缺点。例如，本书在讲完“电工技术”和“模拟电子技术”后，接着讲述“继电器-接触器控制技术”，将过去《电工技术》中讲述的“电动机”和“常用低压电器”等内容直接编入“继电器-接触器控制技术”这一章，避免了内容的重复，同时“继电器-接触器控制技术”也正是前面所讲述知识的一个应用。同理，在讲完“数字电子技术”和“电力电子技术”后，讲述“可编程序控制器的原理与应用”。可编程序控制器本身就是电子技术应用的产物，这样做到了内容紧密的衔接。

本书绪论、第七、九章由四川工程职业技术学院武友德副教授编写；第一、二、四、五章由四川工程职业技术学院向守兵讲师编写；第三、六章由河北省机电学校韩伟讲师编写；第八章由陕西国防工业职业技术学院王明哲高级讲师编写。

本书由四川工程职业技术学院武友德副教授主编，由重庆大学机械传动国家重点实验室米林研究员担任主审。参加审稿的还有西安机电学校甄瑞麟高级讲师，重庆工业职业技术学院夏克坚高级讲师，福建职业技术学院翁其金副教授，贵州省机械工业学校刘易讲师等。

本书在编写过程中，四川工程职业技术学院的陈岚讲师，西安机电学校的孟凡增讲师作了大量的工作，在此表示感谢。另外，在编写过程中参考了大量的有关资料，在此也对这些资料的编者表示感谢。

本书虽然经过多次修改和审核，但由于编者水平有限，不妥和错误之处在所难免，恳切希望批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
第一节 电工和电子技术概述	2
第二节 设备电气控制概述	3
第三节 液压与气压传动概述	5
第四节 本课程的性质、任务及学习方法	6
第一章 电工技术	7
第一节 直流电路	7
第二节 正弦交流电路	18
第三节 三相交流电路	28
第四节 变压器	31
习题	34
第二章 模拟电子技术	38
第一节 半导体二极管及其应用	38
第二节 半导体三极管及其基本放大电路	41
第三节 集成运算放大器及其应用	49
习题	56
第三章 继电器-接触器控制技术	61
第一节 电动机	61
第二节 常用低压电器	67
第三节 继电器-接触器基本控制电路	78
第四节 典型机床电气控制	86
习题	98
第四章 数字电子技术	100
第一节 数字电路的特点	100
第二节 数制与码制	101
第三节 逻辑代数基础	103
第四节 分立元件门电路	105
第五节 TTL 集成与非门电路	107
第六节 组合逻辑电路的分析	108
第七节 典型组合逻辑电路	110
第八节 触发器	113
第九节 计数器	116
第十节 脉冲信号的产生与整形	117
* 第十一节 半导体存储器简介	120

* 第十二节 传感器简介	123
* 第十三节 数模和模数转换简介	126
* 第十四节 工业控制计算机简介	129
习题	130
第五章 电力电子技术	133
第一节 半导体二极管整流电路	133
第二节 滤波电路	135
第三节 稳压电路	137
第四节 晶闸管可控整流电路	138
* 第五节 变压变频调速简介	143
习题	145
第六章 可编程序控制器的原理与应用技术	148
第一节 可编程序控制器概述	148
第二节 可编程序控制器的结构和工作过程	149
第三节 可编程序控制器程序的表达方式	150
第四节 可编程序控制器的指令系统	151
第五节 编程器及其操作	157
第六节 可编程序控制器的应用	161
习题	165
第七章 工厂供电与用电基本常识	166
第一节 电能	166
第二节 合理用电和安全用电常识	168
习题	172
第八章 液压与气动控制技术	173
第一节 液压传动的基础知识	173
第二节 液压元件及辅助装置、液压基本回路	181
第三节 气压传动系统及组成元件	220
习题	230

第九章 机、电、液（气）联合控制

技术	233	制技术的应用	236
第一节 概述	233	习题	239
第二节 机、电、液（气）联合控		参考文献	240

绪 论

机械制造业中主要加工设备的质量、数量及自动化水平，直接影响整个机械工业的发展。设备的自动化水平对提高生产效率和产品质量，减轻体力劳动等方面都起到极为重要的作用。

设备控制技术对于现代加工设备的发展有着非常重要的作用。从广义上说，现代设备控制技术的重要标志是：自动调节技术、电子技术、检测技术、计算机技术、综合控制技术在设备中的应用。目前，不同的设备使用各种不同的动力装置，如液压装置、气压装置及电气控制装置等，但即使使用液压或气压装置做动力，也离不开电气控制，因此，机械、电气、液压（气压）联合控制装置的配置情况正是设备自动化水平的重要标志。在机械行业中，机、电、液（气）联合控制技术应用相当广，图 0-1、0-2 所示为液动力滑台的液压控制系统和具有一次工进和死挡铁停留的进给电气控制系统图。

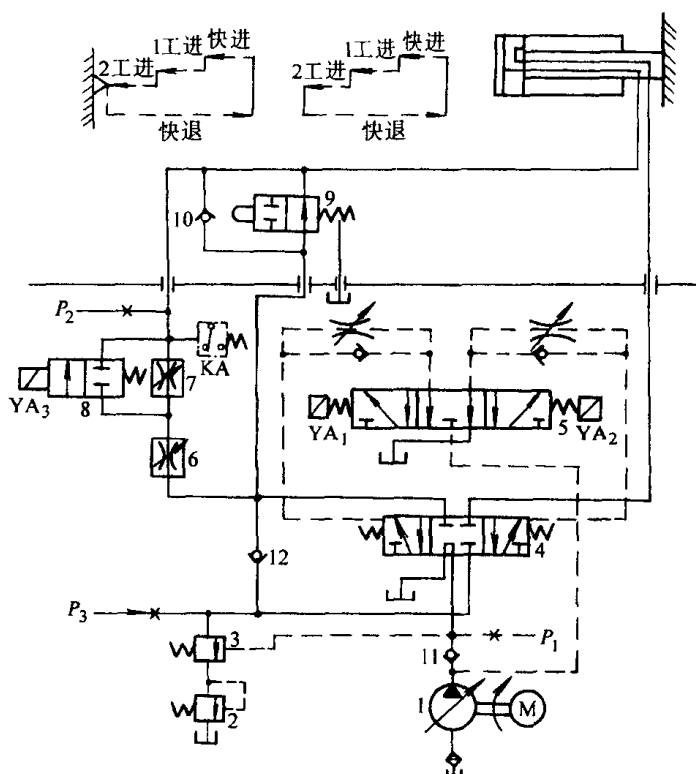


图 0-1 液压动力滑台液压系统图

图 0-1 所示液压装置中的电磁铁的动作是由电气系统来控制的，而电气系统中控制电磁铁得、失电往往是由机械行程开关来实现的。可见，这是由机械、电气、液压控制技术联合控制的一个典型设备。

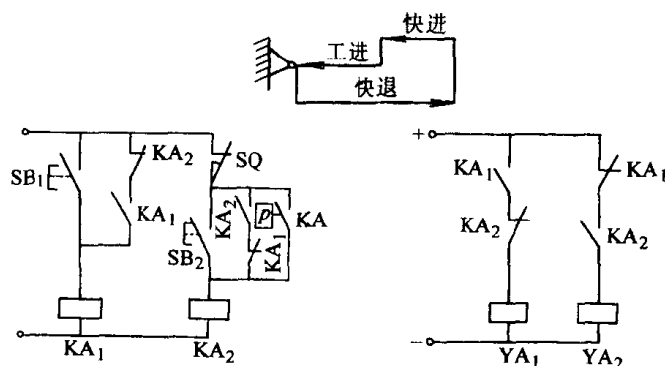


图 0-2 具有一次工进和死挡铁停留的进给电气控制线路

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最重要的作用。液压和气压传动装置是机械控制中最重要动力设备。

第一节 电工和电子技术概述

一、电能的应用及其与生产发展的关系

电工学是研究电能和技术领域中应用的技术基础课程。电能的应用范围是极其广泛的。现代一切新的科学技术的发展无不与电有着密切的关系。

电能的应用，在生产技术上曾引起了划时代的革命。在现代工业、农业及国民经济的其他各个部门中，逐渐以电力作为主要的动力来源。工业上的各种生产机械设备（如机床、起重机械、轧钢机、锻压和铸造设备等）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、电蚀加工、超声波加工、电子束和离子束加工等，都是电能的应用。对生产过程中所涉及的一些物理量（如长度、速度、压力、温度、水位、流量等），都可用电的方法来测量和进行自动调节，以实现生产过程的自动化。农业上将日益广泛地采用电力排灌设备、粮食和饲料的电力加工装置等。电也是现代物质、文化生活中所不可缺少的，如电灯、电话、电影、电视、无线电广播及X射线透视等都是电能的应用。

随着生产和科学技术发展的需要，电子技术得到高度发展和广泛应用（如空间电子技术、生物医学电子技术、信息处理和遥感技术、微波应用等），它对于社会生产力的发展也起着变革性的推动作用。电子水准是现代化的一个重要标志，电子工业是实现现代化的重要物质技术基础。电子工业的发展速度和技术水平，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，直接影响到工业、农业、科学技术和国防建设，关系着社会主义建设的发展速度和国家的安危，也直接影响到亿万人民的物质、文化生活，关系着广大群众的切身利益。

此外，工业生产中为了实现自动控制和调节，也可以利用传感器将非电量转换为电量（信号）。控制利用电能可以达到高度自动化。例如，能控制生产过程或设备，实现程序控制、数字控制或最佳状态控制；能检测生产过程的各种参数，并转换成一定的电信号，实现自动调节和管理自动化。利用电能还能实现巡回检测、分析数据、程序显示、处理故障等功能。所以，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。

二、电工和电子技术发展概况

现在，人们已经掌握了大量的电工技术方面的知识，而且电工技术还在不断地发展着。这些知识是人们长期劳动的结晶。

在18世纪末和19世纪初，由于生产发展的需要，在电磁现象方面的研究工作发展得很快。库仑（C. A. Coulomb）在1785年首先通过实验确定了电荷间的相互作用力，电荷的概念开始有了定量的意义。1820年，奥斯特（H. C. Oersted）在实验中发现了电流对磁针有力的作用，揭开了电学理论的新的一页。同年，安培（A. M. AmPere）确定了通有电流的线圈的作用与磁铁相似，这就指出了磁现象的本质问题。有名的欧姆定律是欧姆（G. S. Ohm）在1826年通过实验得出的。法拉第（M. Faraday）对电磁现象的研究有特殊贡献，他在1831年发现的电磁感应现象是以后电工技术的重要理论基础。在电磁现象的理论与实用问题的研究上，楞次（Э. Х. Ленц）发挥了巨大的作用，他在1833年建立了确定感应电流方向的定则（楞次定则）。其后，他致力于电机理论的研究，并阐明了电机可逆性的原理。楞次在1844年还与英

国物理学家焦耳 (J. P. Joule) 分别独立确定了电流热效应定律 (焦耳-楞次定律)。与楞次一道从事电磁现象研究工作的雅可比 (Б. С. Якоби) 在 1834 年制造出世界上第一台电动机, 从而证明了实际应用电能的可能性。电机工程得以飞跃地发展是与多里沃-多勃罗沃尔斯基 (М. О. Доливо, Доброльскій) 的工作分不开的。这位杰出的俄罗斯工程师是三相系统的创始者, 他发明和制造出三相异步电动机和三相变压器, 并首先采用了三相输电线。在法拉第的研究工作基础上, 麦克斯韦 (C. Maxwell) 在 1864 年~1873 年提出了电磁波理论。他从理论上推测出电磁波的存在, 为无线电技术的发展奠定了理论基础。1888 年, 赫兹 (Hertz) 通过实验获得电磁波, 证实了麦克斯韦的理论。但实际利用电磁波为人类服务的还应归功于马可尼 (Marconi) 和波波夫 (А. С. Попов)。大约在赫兹实验成功七年之后, 他们彼此独立地分别在意大利和俄国进行通信试验, 为无线电技术的发展开辟了道路。

1883 年, 美国发明家爱迪生 (Edison) 发现了热电子效应, 随后, 在 1904 年, 弗莱明 (Fleming) 利用这个效应制成了电子二极管, 并证实了电子管具有“阀门”作用, 它首先被用于无线电检波。1906 年, 美国的德福雷斯 (De · Forest) 在弗莱明的二极管中放进了第三个电极——栅极, 而发明了电子三极管, 从而建树了早期电子技术上最重要的里程碑。从 1948 年美国贝尔实验室的几位研究人员发明晶体管以来, 在大多数领域中已逐渐用晶体管来取代电子管。但是, 我们不能否定电子管的独特优点, 在有些装置中, 不论从稳定性、经济性还是从功率上考虑, 仍需要采用电子管。

集成电路的第一个样品是在 1958 年见诸于世的。它实现了材料、元件、电路三者之间的统一, 同传统的电子元件的设计与生产方式、电路的结构形式有着本质的不同。随着集成电路制造工艺的进步, 集成度越来越高, 出现了大规模和超大规模集成电路, 进一步显示出集成电路的优越性。

随着半导体技术的发展和科学研究、生产与管理等的需要, 电子计算机应时而兴起, 并且日臻完善。从 1946 年诞生第一台电子计算机以来, 已经历了电子管、晶体管、集成电路及大规模集成电路四代, 现在正向“第五代”(智能化) 进军。特别是从 20 世纪 70 年代微型计算机问世以来, 由于它价廉、方便、可靠、小巧, 大大加快了电子计算机的普及速度。

第二节 设备电气控制概述

一、设备电气拖动的发展

设备的拖动装置发展迅速, 变革很大。20 世纪初, 由于电动机的出现, 使设备的动力发生了根本改变。最初是由电动机直接代替蒸汽机, 来驱动一台设备, 后发展到由一台电动机拖动一组设备的成组拖动。

成组拖动是通过中间机构 (天轴) 实现能量分配与传递的, 机构复杂, 传递路径长, 损耗大, 生产灵活性小, 不适应现代化生产的需要。20 世纪 20 年代, 出现了单独拖动形式, 即由一台电动机拖动一台机床。由于生产发展的需要, 设备结构改变。床体增大, 运动增多, 各种辅助运动也要由同一台电动机拖动, 机械传动机构更变得十分复杂, 仍不能满足生产工艺上的要求, 于是出现由多台电动机分别拖动各运动机构的多电动机拖动。

多电动机拖动的被采用, 不但简化了设备本身的机械结构, 提高了传动效率, 而且使设备各运动部分能够选择最合理的运动速度, 缩短了工时, 也便于分别控制, 促进了设备的自

动化。

由于直流调速性能好，调速范围可相应扩大，调速精度高，平滑性强，在 20 世纪 30 年代出现了直流发电机-直流电动机组的调速系统，以及通过电机扩大机等元件实现控制的自动调速系统。由于晶闸管等大功率整流元件的出现，变流技术的发展，晶闸管-电动机直流调速系统在新的设备中已越来越多地被采用。

二、设备电气控制的基本概念

一般说来，电力拖动系统可分为两部分：即电力拖动部分（包括电动机以及使电动机和设备相互联系起来的传动机构）和电气自动控制部分。从图 0-3 示意图中，可清楚地看出普通车床电力拖动系统的两大部分。

电力拖动系统主要分为直流拖动和交流拖动两大类，直流拖动以直流电动机为动力，交流拖动以交流电动机为动力。电动机不同，其电气控制装置也就不同。因交流拖动系统的交流电动机有结构简单、制造容易、造价低及容易维护等许多特点，在普通设备中仍占主导地位。直流

电动机具有良好的起动、制动特性和调速性能，能在很宽的范围内进行平滑调速，因此对调速性能要求较高、对速度要求精确控制的设备都采用直流电动机拖动系统。

电动机以及与电动机有关联的传动机构合并称为“电力拖动”部分；把为满足加工工艺要求使电动机起动、制动、反向、调速等的电气控制和电气操纵部分称为“电气自动控制”部分，或称电气自动控制装置。

设备电气控制系统类型很多，按使用的电气设备分，主要有继电器-接触器控制系统、电机扩大机控制的直流调速系统、晶闸管-电动机直流调速系统、数字控制系统、计算机控制系统等。

三、设备电气控制的发展

设备电气控制，最初是采用手动控制，后来除了少数容量小、动作单一的机床（如小型台钻、砂轮机）使用手动控制电器外，多采用继电器-接触器自动控制方式。这种控制方式，可以实现对设备各种运动的控制，如起动、停止、反转、改变转速等。它的控制方法简单、直接，工作稳定，成本低，能在一定范围内适应单机和生产自动线的需要。

但继电器-接触器控制系统由于它的固定接线，使用的单一性，即一台控制装置只能针对某一种固定程序的设备，一旦工艺程序有所变动，就得重新配线，满足不了程序经常改变、控制要求比较复杂的系统的需要。

20 世纪 70 年代以来，随着电子技术的发展，一种新型的控制装置——可编程序控制器得到迅速发展，它把继电器-接触器控制的优点与计算机功能齐全、灵活性、通用性强的特点结合起来，用计算机的编程软件逻辑代替继电器——接触器控制的硬接线逻辑，实现对程序需要经常变动的控制要求，使设备控制系统具有更大的灵活性和通用性。其主要特点是：通用性强、程序可变、编程容易、可靠性较高、使用维护方便。它在机械制造业的应用，提高了设备的自动化水平。

但无论是有触点电器还是无触点逻辑元件，其输入和输出信号又有‘通’和‘断’两种

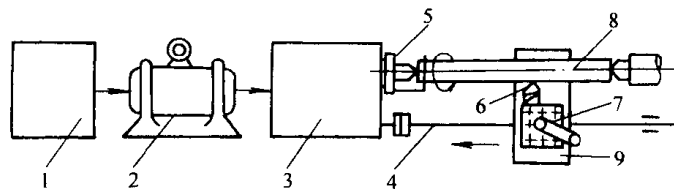


图 0-3 普通车床加工示意图

1—控制装置 2—电动机 3—机械变速装置 4—光杆
5—主轴 6—车刀 7—刀架 8—工件 9—拖板

状态,因而这种控制是断续的,不能连续地反映信号的变化,故称为断续控制。为了使控制系统获得更好的静态和动态特性,完成更为复杂的控制任务,现在广泛采用了反馈控制系统。反馈控制系统是由连续控制元件组成的,它不仅能反映信号的通或断,而且能反映信号的数值大小,这种由连续控制元件组成的反馈控制系统,叫作连续控制系统。

随着半导体器件和晶闸管的发展,越来越多地采用晶闸管作为控制元件,组成先进的、用途广泛的晶闸管控制系统。由于数控技术的发展和电子计算机的应用,电力拖动自动控制又发展到一个新的水平,即向着生产过程自动化的方向迈进。应用电子计算机可以不断地处理复杂生产过程中的大量数据,计算出最佳参数,然后通过自动控制设备及时调整各部分生产机械,使之保持最合理的运行状态,实现整个生产过程的自动化。这是今后电力拖动自动控制发展的方向。

第三节 液压与气压传动概述

一、液压传动概述

任何一台完整的机器,都可以归纳为由下列三个主要部分所组成,即原动部分、传动部分和工作部分。液压传动在机器中有时能兼起这三方面的作用。如作为原动部分的液压泵,作为工作部分的液压缸、液压马达,作为传动部分的液压阀,用来调节和控制工作机与原动机之间的联系。

传动的类型很多,有机械传动、电气传动、气压传动、液体传动和复合传动等。

那么,什么是液压传动呢?首先要知道什么是液体传动。用液体作为工作介质进行能量传递,称为液体传动。液体传动按其工作原理的不同,又可分为“容积式液体传动”和“动力式液体传动”两类。前者靠液体的压力能进行工作,后者除压力能外,还靠液体的动能进行工作。因此,一般将前者简称为“液压传动”,后者简称为“液力传动”,以资区别,本书只讨论前者。用液体(液压油)作为工作介质,并以压力能的形式,进行能量的传递或转换,这种传动方式,称为液压传动。

液压传动是根据17世纪帕斯卡指出的液体静压力传送原理(即帕斯卡原理),而发展起来的一门技术。1795年,英国人约瑟夫·布拉曼(Joseph Braman),在伦敦用水作为工作介质,以水压机的形式将其应用于工业上,发明世界上第一台水压机。1905年将工作介质水改为油。

我国液压技术在20世纪50年代刚刚兴起,20世纪60年代有较大的发展。1976年制订了元件型谱,设计了部分基型,近十年液压技术得到普遍应用。目前,应用范围已涉及到各个领域,不是在什么部门应用的问题,而是在什么部门不能应用的问题。

二、气压传动概述

气压传动是以压缩空气为工作介质进行能量传递的一种传动形式。由于气压传动具有省能、高效、价廉和无污染等优点,因此近年来在国内、外发展都较快。

气动技术在我国20世纪50年代开始应用于某些工业部门。20世纪60年代中期开始建立气动元件厂,生产气动产品。在此之后,又相继建立了一批新的气动元件生产厂,使生产能力大幅度提高,产量迅速增加。目前,我国生产的气动产品,品种、规格都很多。

最近几年,我国的气动行业,已成为一个初具规模,并有一定科研开发能力的新兴行业。

无论在老产品质量提高方面,还是在新产品开发方面,都取得了可喜的成绩,在提高工艺水平和研究能力方面,也有了新进展。今天,我国的气动技术已不再是原有概念上的气压传动技术,而是发展成为包括传动、控制与检测在内的自动化技术,并已广泛用于机械、电子、轻工、纺织、食品、医药、包装、冶金、石化、航空、交通运输等各个工业部门。气动机械手、组合机床、加工中心、生产自动线、自动检测和试验装置等已大量涌现,在提高生产效率、自动化程度、产品质量、工作可靠性和实现特殊工艺、机床配置等方面越来越显示出其优越性。

第四节 本课程的性质、任务及学习方法

本课程是模具专业的一门主干课程,它把以前先修课程“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结合起来,形成一个完整的课程体系。其任务是要求学生掌握学习设备电气控制系统(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(气)联合控制技术的基本概念。学生学完本课程后,应具有对设备电气控制系统进行分析、调试的能力;会使用可编程序控制器;会分析液压、气压传动系统及排除简单故障。

由于本课程与生产实际关系密切,因此,在教学及学习过程中,应多与实际结合,除学好基本理论知识外,还必须加强动手能力的训练,以巩固所学知识。

第一章 电工技术

本章主要介绍直流电路、单相交流电路、三相交流电路的基本分析方法和变压器的基本结构、工作原理与应用。

第一节 直流电路

本节首先讨论电路的基本概念，其中包括电路、电路模型、电路的基本物理量、电路的工作状态、电路的基本定律以及电压和电流的参考方向等。然后重点讨论电位的计算方法和如何应用基本定律分析一些简单的直流电路。这些内容是学习电工学知识的基础。

一、电路与电路模型

电路就是电流所通过的路径，它是为了完成某种任务由某些电工设备及元器件按照一定连接方式而构成的一个整体。

电路按其功能可以分为两类：一类是为了实现能量的传输和转换，这类电路称为电力电路；另一类是为了实现信号的传递和处理，这类电路称为信号电路。

电力电路的典型例子是电力系统，它包括电源、负载和中间环节三个重要组成部分。典型的电力系统如图 1-1a 所示。

电源是将非电能转换成电能的装置。例如，干电池和蓄电池是将化学能转化成电能，

而电力系统中的发电机是将热能、水的势能或原子能等转换成电能。因此，电源是电路中的能量来源，在它的内部进行着由非电能到电能的转换。

负载是将电能转换成非电能的装置。例如，电力系统中的电灯、电炉、电动机等负载分别是将电能转换成光能、热能和机械能。因此，负载是电路中取用电能的装置，在它的内部进行着由电能到非电能的转换。

中间环节是把电源与负载连接起来的部分，起传递和控制电能的作用。如电力系统中的变压器、输电线以及一些控制与保护电器。

信号电路的典型例子是电子技术中的信号放大器，如图 1-1b 所示。图中话筒的作用是将语言或音乐等声音振动信号转换成相应的电信号，这一信号即是放大器的信号源。由于话筒输出的电信号比较微弱，不足以推动作为负载的扬声器，所以中间必须用放大器来进行放大，最后通过扬声器将电信号还原成语言或音乐，而放大器所需的电能是由另外的直流电源提供的。

由此可见，对于一个完整的电路来说，电源（或信号源）、负载和中间环节是三个基本组成部分，它们是缺一不可的。

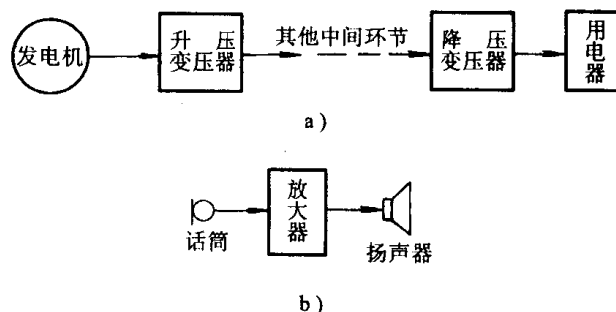


图 1-1 两种典型电路示意图

a) 电力系统 b) 扩音机

由实际元件组成的电路, 由于其电磁性能比较复杂, 这对电路进行定量的分析与计算带来了相当大的难度。通常是将实际的电路元件理想化(或模型化), 即在一定的条件下, 突出其起主导作用的电磁性能, 而忽略其次要因素, 把它近似地看作理想电路元件, 用一个理想电路元件或由几个理想元件的组合来代替实际的电路元件。如用“电阻”这个理想的电路元件来代替电阻炉、白炽灯等消耗电能的实际元件, 用内电阻 R_0 和电动势 E 相串联的理想元件的组合来代替实际的电压源等等。

用理想电路元件及其组合来代替实际的电路元件, 就构成了与实际电路相对应的电路模型。图 1-2 就是一个最简单的电路模型, 灯泡为理想电阻元件, 文字标注为 R ; 实际电源表示为理想电压源与内阻的串联组合; 导线和开关组成中间环节, 导线视为无阻的理想导体。我们以后在进行理论分析时所指的电路, 就是这种电路模型。根据对电路模型的分析所得出的结论, 有着广泛的实际指导意义。

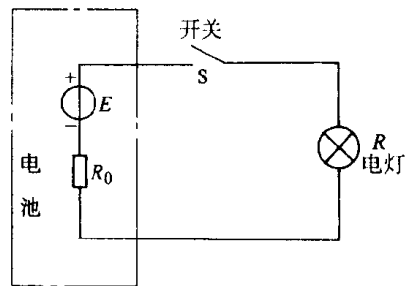


图 1-2 最简单的电路模型

二、电路的基本物理量

1. 电流

电流是一种物理现象, 是带电粒子有规律的定向运动形成的。

电流的强弱用电流强度来度量, 电流强度在数值上等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷量。设在时间 dt 内, 通过导体横截面的电荷量为 dq , 则通过该截面的电流强度为

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

上式表示, 在一般情况下, 电流强度是随时间而变化的, 是时间的函数。如果电流强度不随时间变化, 即 $dq/dt = \text{常数}$, 则这种电流就称为恒定电流, 简称直流。于是式 (1-1) 可写成

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

电流强度的单位用安培表示, 简称安 (A), $1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$ 。

习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向为电流的实际方向。电流的实际方向是客观存在的, 但在分析比较复杂的电路时, 往往难于事先判断某电路中电流的实际方向。如图 1-3 中流过 R_5 的电流是由 A 流向 B, 还是由 B 流向 A, 无法判断。为此, 在分析和计算电路时, 可先任意假设一个方向, 然后根据所假设的方向列出方程, 再求解方程。如果该电流计算结果为正值, 表示该电流的实际方向与所假设的方向相同; 如果该电流计算结果为负值, 表示该电流的实际方向与所假设的方向相反, 如图 1-4 所示。我们所假设的方向, 称为电流的参考方向, 或称为正方向。电流的正方向的选取, 原则上是任意的。

2. 电位与电压

电路中任意两点 (A、B) 间的电压等于这两点的电位之差, 即

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

电路中某点的电位就是该点到参考点之间的电压。电路中同一点由于参考点选择不同, 其电位值是不相等的, 但电路中任意两

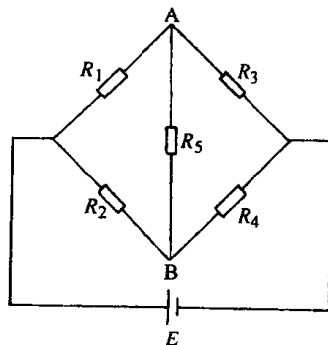


图 1-3 电桥电路

点之间的电压却与参考点的选取无关。

电位为标量，它有大小和正负，但无方向。电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点，即电压的方向为电位降低的方向。在复杂电路中，有时很难确定某两点间电压的实际方向，这时可以先选取一个参考方向。分析计算后根据计算结果的正负和电压的参考方向，便可确定两点间电压的实际方向。所以，只有在参考方向选定后，电压的正负才有实际意义。

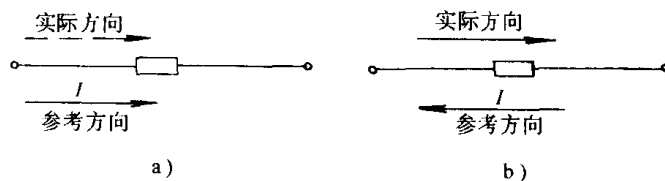


图 1-4 电流参考方向与实际方向的关系

a) $I > 0$ b) $I < 0$

电压和电位的单位都为伏特 (V)，其中， $1\text{kV} = 10^3\text{V} = 10^6\text{mV}$ 。

3. 电动势

在图 1-5 中，为了维持电流不断地在连接导体中流通，并保持恒定，则必须使电源两端 ab 间的电压 U_{ab} 保持恒定，受电场力作用经外电路移动到 b 并积累在负极板 b 上的正电荷，经电源内部重新回到正极板 a 。

电荷受到的电源力是一种非静电力，它可以克服电源内的电场力，使正电荷在电源内部的这种逆电场方向的移动成为可能，在干电池中电源力为化学力，在发电机中电源力为电磁力。

电动势是用来衡量电源力对电荷做功的能力的。电源的电动势 E_{ab} 在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位端 b 经电源内部移到高电位端 a 所做的功，也就是单位正电荷从 b 点移动到 a 点所获得的电位能。在电源力的作用下，电源不断地把其他形式的能量转换为电能。

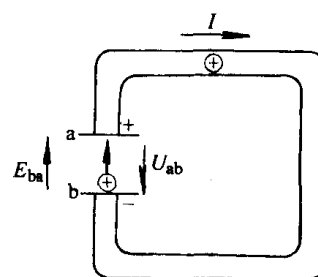


图 1-5 电荷在电路中的回路

电动势的实际方向规定为从低电位点指向高电位点，即电动势指向电位升的方向。电动势的参考方向，总是与电压的参考方向相反。电动势的单位与电位、电压的单位相同，都是伏特 (V)。

4. 电能和电功率

电能等于电压、电流和电流所持续时间的乘积，即

$$W = UI t \quad (1-4)$$

如果电压的单位为伏特 (V)、电流的单位为安培 (A)、时间的单位为秒 (s)，则电能的单位为焦耳 (J)。

单位时间内负载所消耗的电能，称为电功率，用 P 来表示，单位为瓦 (W) 或千瓦 (kW)。

$$P = \frac{W}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-5)$$

有时电能的单位可用千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 表示， $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 就是指功率为 1kW 的用电设备，正常使用 1h 所消耗的电能。如 100W 的灯泡，工作 10h ，其消耗的电能就是 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 俗称 1 度电。

三、电路的三种状态

本节以图 1-6 所示的简单电路来讨论电路的状态。

1. 空载状态

空载状态又称为断路或开路状态,图 1-6 在开关 S 断开时,电路就处于开路(空载)状态。此时外电路所呈现的电阻对于电源来说相当于无穷大,故电路具有如下特点:

- 1) 电路中的电流为零,即 $I=0$ 。
- 2) 电源内阻上的电压为零,故电源的端电压等于电源的电动势,即

$$U_{ab}=E-IR_0=E$$

此电压称为空载电压或开路电压。

- 3) 负载所吸收的功率 P 和电源的输出功率 P_0 都为零。这是因为电源对外不输出电流。

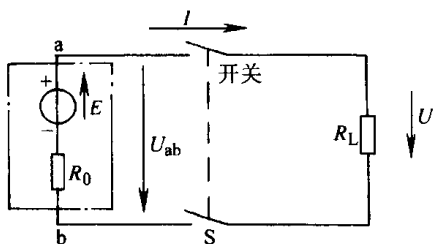


图 1-6 电路的开路状态

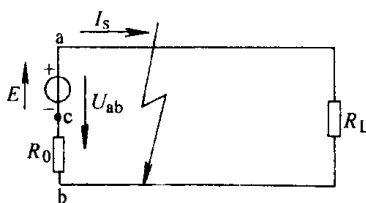


图 1-7 电路的短路状态

2. 短路状态

在图 1-6 中,当电源的两端 a 和 b 由于某种原因(如电源线绝缘损坏,操作不慎等)而连在一起时,会造成电源被直接短路的情况,如图 1-7 所示。当电源被短路时,外电路的电阻可视为零,故电路具有如下特点:

- 1) 通过电源中的电流最大,而输出电流为零。此时通过电源中的电流称为短路电流 I_s ,即

$$I_s = \frac{E}{R_0}$$

在一般的供电系统中,电源的内电阻 R_0 很小,故短路电流 I_s 很大。但对于外电路却无电流输出,即 $I=0$ 。

- 2) 电源和负载的端电压都为零,即

$$U_{ab}=E-I_sR_0=0$$

$$E=I_sR_0$$

上式表明电源的电动势全部加在电源的内阻上,因而无输出电压。

- 3) 由于电源所发出的功率全部被内阻所消耗,因此电源的输出功率和负载所吸收的功率均为零,即

$$P_0=P=0$$

电源被短路时,电源所发出的功率全部被内阻所消耗,这就使电源的温度迅速上升,有可能导致烧毁电源及其他电气设备,甚至引起火灾,或由于短路电流产生强大的电磁力而造成机械上的损坏。电源的短路通常是一种严重的事故,应该尽力预防。为此,通常在电路中接入熔断器(俗称保险丝)或自动断路器,以便发生短路时,能迅速切断故障电路,避免电源或电气设备的严重毁坏。但是,有时为了满足电路工作的某种需要,可以将局部电路(如某些电路元件或仪表等)短路(又称为短接)或按技术要求对电源设备进行短路实验,这些属于正常的现象。

3. 负载状态

在图 1-6 中当开关 S 闭合时,电路就处于负载状态,如图 1-8 所示。此时电路具有如下特