

电机与控制技术

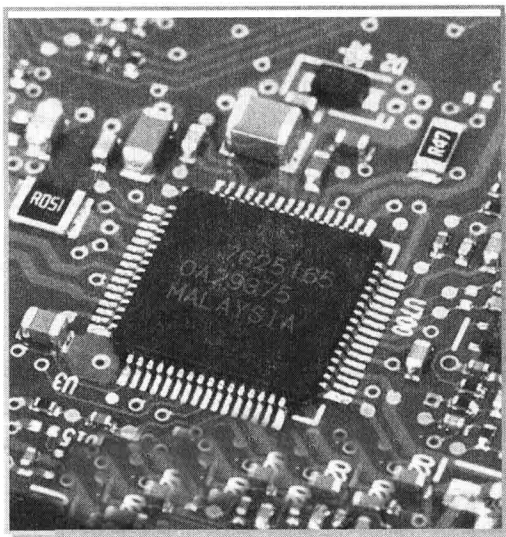
姚永刚 主 编
张智先 吴建远 副主编
田 坤 主 审



DIANJIYUKONGZHISHU

电机与控制技术

	姚永刚	主 编
张智先	吴建远	副主编
范 峰	张士磊	参 编
	田 坤	主 审



DIANJIYUKONGZHISHU

内 容 简 介

本书内容共分六章：第一章“绪论”，介绍机电控制系统的发展历史、基本含义、有关概念和基本要求；第二章“机电控制系统的驱动电动机”，集中介绍常用电动机的结构、工作原理及运行特性；第三章“自动控制基础”，简述自动控制的基本概念、原理及控制系统的常用分析方法；第四章“常用低压电器”，介绍电气控制系统中常用低压电器元件的工作原理、技术指标、图形和文字符号及用途；第五章“机电控制系统”，介绍常规电气线路的基本控制原则和典型生产机械的常规电气控制线路，并结合实例着重分析直流电动机、交流电动机控制系统和步进电动机驱动系统；第六章“可编程序控制器”，介绍可编程控制器的发展历史和工作原理，并重点介绍了西门子S7-200系列可编程序控制器程序的常用指令及控制系统的设计方法。

本书的特点：本着专业技术课程切合工程应用的教学原则，层次清晰地构建了电气控制技术从常规继电器-接触器控制到可编程控制器控制的完整体系，并把所涉及的电机与电气控制技术等方面的专业知识用一种新的体系组织起来；注重理论联系实际，突出现代电气控制的新技术和新产品；各章均有丰富的设计实例和习题，有利于学生掌握现代机电控制原理和工程设计方法。

本书适合作为高职高专院校电气自动化技术、机电一体化技术、生产过程自动化技术、数控技术，以及相关专业的电机与拖动控制技术、电气控制技术、可编程控制器应用等课程教材，还可以作为成人教育、机电行业的工程技术人员的参考书或培训教材。

图书在版编目（CIP）数据

电机与控制技术 / 姚永刚主编. —北京：中国铁道出版社，2010.9

（全国高职高专院校机电类专业规划教材·教育部高职高专自动化技术类专业教学指导委员会推荐教材）

ISBN 978-7-113-11739-9

I. ①电… II. ①姚… III. ①电机—控制系统—高等学校：技术学校—教材 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第146182号

书 名：电机与控制技术

作 者：姚永刚 主编

策划编辑：秦绪好 何红艳

责任编辑：秦绪好

特邀编辑：陈金琦

封面设计：付 巍

版式设计：于 洋

读者热线电话：400-668-0820

编辑助理：陈 庆

封面制作：李 路

责任印制：李 佳

出版发行：中国铁道出版社（北京市宣武区右安门西街8号 邮政编码：100054）

印 刷：北京市彩桥印刷有限责任公司

版 次：2010年9月第1版 2010年9月第1次印刷

开 本：787mm×1092mm 1/16 印张：14.25 字数：340千

印 数：3 000册

书 号：ISBN 978-7-113-11739-9

定 价：24.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书，如有印制质量问题，请与本社计算机图书批销部联系调换。

全国高职高专院校机电类专业规划教材

编审委员会

主任：吕景泉

副主任：严晓舟 史丽萍

委员：（按姓氏笔画排序）

王文义	刘建超	肖方晨	李向东	狄建雄
汪敏生	宋淑海	张耀	明立军	陈铁牛
钟江生	胡学同	凌艺春	秦绪好	钱逸秋
梁荣新	常晓玲	程周	谭有广	

王立	王龙义	王建明	牛云陞	关健
朱凤芝	牟志华	汤晓华	刘薇娥	李文
李军	张文明	张永花	陆建国	陈丽
林嵩	金卫国	宝爱群	姚吉	姚永刚
祝瑞花	徐国林	秦益霖	韩丽	曾照香

随着我国高等职业教育改革的不断深入,我国高等职业教育的发展进入了一个新的阶段。教育部下发的《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》教高[2006]16号文件,旨在阐述社会发展对高素质技能型人才的需求,以及如何推进高职人才培养模式改革,提高人才培养质量。

教材的出版工作是整个高等职业院校教育教学工作中的重要组成部分,教材是课程内容和课程体系的载体,对课程改革和建设具有推动作用,所以提高课程教学水平和教学质量的关键在于出版高水平、高质量的教材。

出版面向高等职业教育的“以就业为导向,以能力为本位”的优质教材一直是中国铁道出版社的一项重要工作。我社本着“依靠专家、研究先行、服务为本、打造精品”的出版理念,于2007年成立了“中国铁道出版社高职机电类课程建设研究组”,并经过两年的充分调查研究,策划编写、出版了本系列教材。

本系列教材主要涵盖高职高专机电类的公共课、专业基础课,以及电气自动化专业、机电一体化专业、生产过程自动化专业、数控技术专业、模具设计与制造专业、数控设备应用与维护专业等六个专业的专业课。本系列教材作者包括高职高专自动化教指委委员、国家级教学名师、国家级和省级精品课负责人、知名专家教授、职教专家、一线骨干教师。他们针对相关专业的课程,结合多年教学中的实践经验,同时吸取了高等职业教育改革的最新成果,因此无论教学理念的导向、教学标准的开发、教学体系的确立、教材内容的筛选、教材结构的设计,还是教材素材的选择都极具特色和先进性。

本系列教材的特点归纳如下:

(1) 围绕培养学生的职业技能这条主线设计教材的结构,理论联系实际,从应用的角度组织编写内容,突出实用性,并同时注意将新技术、新成果纳入教材。

(2) 根据机电类课程的特点,对基本理论和方法的讲述力求简单、易于理解,以缓解繁多的知识内容与偏少的学时之间的矛盾。同时,增加了相关技术在实际生产、生活中的应用实例,从而激发学生的学习热情。

(3) 将“问题引导式”、“案例式”、“任务驱动式”、“项目驱动式”等多种教学方法引入教材体例的设计中,融入启发式的教学方法,力求好教、好学、爱学。

(4) 注重立体化教材的建设。本系列教材通过主教材、配套光盘、电子教案等教学资源的有机结合,来提高教学服务水平。

总之,本系列教材在策划出版过程中得到了教育部高职高专自动化技术专业教学指导委员会以及广大专家的指导和帮助,在此表示深深的感谢。希望本系列丛书的出版能为我国高等职业院校教育改革起到良好的推动作用,欢迎使用本系列教材的老师和同学们提出宝贵的意见和建议。书中如有不妥之处,敬请批评指正。

中国铁道出版社

2010年8月

为适应高等职业技术教育的需要,以培养高等技术应用型专门人才为目标,用电子技术改造传统产业,促进国民经济发展,这就需要一批机电一体化的复合型人才。为适应机电一体化专业及非电子类专业学生尽快掌握电方面的综合知识,我们编写了这本《电机与控制技术》。本书从机电控制技术需要出发,集电机、电机拖动、自动控制技术、电气控制技术与可编程控制器于一体,涉及的基础理论和实际知识面广,是电学、磁学、电磁学、动力学等学科知识的综合。在用相关理论分析各种电机的实际问题时,采用了工程观点和工程分析方法,并结合电机的具体结构,结合具体案例。通过本课程的学习,学生能掌握电机拖动控制等必备的基础理论知识,掌握常用的开环、闭环控制系统的工作原理、特点及应用场所,具备一定的分析及处理机电控制系统的实际能力,并了解最新控制技术在机电设备中的应用。

根据编者多年的实践和教学经验,发现由于受学时的限制,电气自动化、机电一体化、数控等相关专业学生开设的机械类课程较多,而电类专业课程较少并且不系统。本书从工业电气控制设备制造及系统安装、调试、维护及技术管理工作的实际需要出发,独自建立了比较全面的内容体系,以培养高等技术应用型专门人才为目标,编者在编写中注重内容和体系的改革,针对机电类专业对职业技术人员的知识和能力要求,经过对课程改革方案认真地讨论和研究,最终确定以机电装置原动机驱动系统为主线,着重于机电结合、机电控制,把“电机与电机拖动”、“自动控制原理”、“可编程序控制器应用”、“机电控制系统”等多门课程的内容用一种新的体系组织起来,在讲述机电控制所需要的最基本、最适用的电学知识的基础上,力图以掌握基本概念、强化实际应用为重点,使学生在规定的学时内掌握机电控制所需要的最基本、最适用的电学知识,以培养学生专业实践适应能力和应变能力。

本书适合作为高职高专院校电气自动化技术、机电一体化技术、生产过程自动化技术、数控技术,以及相关专业的电机与拖动控制技术、电气控制技术、可编程控制器应用等课程教材,还可以作为成人教育、机电行业的工程技术人员的参考书或培训教材。

本书由姚永刚教授担任主编,张智先、吴建远担任副主编,具体编写分工:姚永刚编写了第一、三章,张智先编写了第二章,吴建远编写了第五章,范峥编写了第六章,张士磊编写了第四章。

全书由田坤教授主审,提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢。此外,在本书的编写过程中参阅了多种同类教材和其他相关著作,特向其作者、出版者致谢。

限于编者知识水平,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2010年8月

第一章 绪论	1
第一节 机电控制系统的发展概况	1
第二节 控制系统的基本概念	2
一、系统及控制系统	2
二、控制系统的分类	3
第三节 本课程的性质、任务和学习方法	4
第二章 机电控制系统的驱动电动机	5
第一节 直流电动机	5
一、直流电动机工作原理	5
二、直流电动机运行特性	6
三、他励直流电动机的机械特性	8
四、他励直流电动机的起动、调速、制动运行特性	11
第二节 交流异步电动机	22
一、三相异步电动机的工作原理	22
二、三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	23
三、三相异步电动机的工作特性	28
四、三相异步电动机的起动、调速和制动的运行控制	29
五、三相交流电动机的选择	39
第三节 伺服电动机	41
一、直流伺服电动机	41
二、交流伺服电动机	42
第四节 步进电动机	45
一、步进电动机的基本结构与工作原理	46
二、步进电动机的起动和高速运行	50
小结	51
思考题	51
第三章 自动控制基础	54
第一节 概述	54
一、自动控制的基本概念	54
二、自动控制理论的内容	56
三、自动控制系统的基本构成	57
四、控制系统的分类	58



第二节 自动控制系统性能及评价	60
一、自动控制系统的基本要求	60
二、自动控制系统性能指标	61
第三节 控制系统的数学模型	63
一、建立系统微分方程的一般步骤	63
二、传递函数	64
三、动态结构图	64
第四节 控制系统的时域分析	65
一、典型输入信号	65
二、一阶系统分析	66
三、二阶系统分析	67
小结	70
思考题	70
第四章 常用低压电器	72
第一节 低压电器的基本知识	72
一、低压电器的分类	72
二、低压电器的基本结构	73
第二节 主电路中常用的低压电器元件	75
一、刀开关	75
二、组合开关	76
三、低压断路器	76
四、熔断器	78
第三节 控制电路中常用的低压电器元件	85
一、电磁式继电器	85
二、时间继电器	86
三、热继电器	89
四、速度继电器	91
五、干簧继电器	91
六、固态继电器	92
七、主令电器	94
八、信号灯	100
小结	100
思考题	101
第五章 机电控制系统	103
第一节 继电器—接触器控制系统	103
一、电气控制系统图及有关规定	103
二、三相异步电动机起动控制电路	106
三、三相异步电动机正反转控制线路	109

四、三相异步电动机制动控制电路	112
五、其他基本控制电路	116
六、三相异步电动机有级调速控制电路	119
第二节 直流电动机控制系统	121
一、直流电动机调速的分类	121
二、直流调速系统的方案选择	122
三、直流电动机闭环调速系统	124
第三节 交流电动机控制系统	130
一、交流调速的原理和分类	130
二、异步电动机的调压调速系统	130
三、异步电动机变频调速系统	131
第四节 步进电动机控制系统	139
一、步进电动机的驱动方式	139
二、步进电动机的驱动电路	142
三、步进电动机的运行特性及影响因素	144
四、步进电动机的选用原则	146
五、步进电动机应用举例	148
小结	149
思考题	150
第六章 可编程序控制器	152
第一节 可编程序控制器概述	152
一、可编程序控制器的产生与发展	152
二、可编程序控制器的应用与特点	153
三、可编程序控制器的分类	155
第二节 可编程序控制器的结构和工作原理	156
一、可编程序控制器的结构	156
二、可编程序控制器的工作原理	160
三、可编程序控制器的编程语言	161
四、可编程序控制器控制与继电器控制的区别	162
第三节 S7 系列可编程序控制器简介	164
一、S7-200 系列 PLC 的组成	164
二、S7 系列 PLC 的寻址方式	167
三、S7-200 系列 PLC 内部元器件	169
四、S7-200 PLC 有效编程范围	172
第四节 S7 系列可编程序控制器的指令系统	173
一、基本逻辑指令	173
二、定时器计数器指令	180
三、算术及增减指令	184

四、传送移位类指令	187
五、逻辑操作指令	190
六、程序控制指令	192
第五节 典型电路的可编程控制器程序设计	195
一、延时脉冲产生电路	195
二、瞬时接通/延时断开电路	196
三、延时接通/延时断开电路	197
四、脉冲宽度可调电路	197
五、计数器的扩展	198
六、长定时电路	198
七、闪烁电路	199
八、报警电路	200
第六节 可编程序控制器控制系统的设计及应用	201
一、可编程序控制器应用系统设计的内容和原则	202
二、可编程序控制器系统设计步骤	204
三、可编程序控制器应用举例	205
小结	209
思考题	209
附录 A 电气图常用新旧图形符号和文字符号对照表	212
附录 B S7-200 系列 PLC 有效编程范围	215
参考文献	217



本课程是一门实践性较强的专业课程,电机及其控制技术在生产过程、科学研究以及其他各个领域的应用十分广泛。其主要内容是以电动机或其他执行电器为控制对象,介绍电气控制的基本原理与电路、机电传动系统中的传感技术、构成机电控制系统的控制器、典型机电传动控制系统等。机电控制技术涉及面很广,各种控制设备种类繁多,功能各异。本课程从应用角度出发,讲述上述几方面内容,以培养学生对机电控制系统的分析、应用和设计的基本能力。

本章作为本课程的入门引导,主要介绍各类电动机及其控制系统的发展历史、基本含义、有关概念和基本要求,使学生了解机电传动控制的一般知识,掌握常用的开环、闭环控制系统的工作原理、特点、特性及应用场合,了解最新控制技术在机械设备中的应用。

第一节 机电控制系统的发展概况

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出现,设备的性能不断提高,工作机构、传动机构的结构大为简化。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,对电动机的起动、制动、反转、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,继电器—接触器控制属于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。直流电动机具有起动转矩大、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所提供的。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。目前龙门刨床、轧钢机和造纸机等仍在应用这种控制方式。但是,由于这种方式存在需要电机数量多、占地面积大、噪声大和效率低等缺点,20世纪60年代后出现了晶闸管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,所以得到了普遍应用。

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。交流电动机有许多优点,它的单机容量和转速可大大高于直流电动机,而且它没有电刷与换向器,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地应用于工业中。

为了适应工业自动化和生产过程变动节奏快的要求,电气控制逐步采用顺序控制技术。所谓顺序控制,就是对机械设备的动作和生产过程按预先设定的逻辑顺序自动进行的一种控制。20世纪60年代末发展起来的用以实现顺序控制的通用电气控制装置,称为顺序控制器(也称程序控制器),它一般具有逻辑运算、顺序操作、定时、计数、程序转移、程序分支和程序循环等功能,有的还具有算术运算和数值比较等功能。它不仅可用于单机控制,而且还可用于多机群控和生产线的自动控制等。其主要特点是:编制程序和改变程序方便、通用性和灵活性强、原理简单易懂、工作比较稳定可靠、使用维修方便、装置体积小、设计和制造周期短等,用它可代替大量的继电器。

近年来,可编程序控制器在工业过程自动化系统中的应用日益广泛。可编程序控制器从它一问世就是以最基层、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。它采用可编程序的存储器,用来在其内部存储和执行逻辑运算、顺序控制、定时和算术运算等面向用户的指令,并通过数字式或者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,都按易于用工业控制系统连成一体,又易于扩充其功能的原则设计。近年来,可编程序控制器的一个发展方向是向微型、简易、价廉方面发展,以图占领一向以继电器系统为主流的(诸如一般机床、包装机、传输带等)控制领域;另一发展方向是向大型高性能方面延伸。

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、大功率和低成本控制系统提出的要求,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,根据各自的特点,在不同的行业得到了相应的应用。

由于现代控制技术,电子、计算机技术与液压、气动技术的结合,使液压、气动控制也在不断创新,并大大地提高了它的综合技术指标。

自20世纪70年代以来,单片机发展很快。由于单片机的结构和指令系统都是针对工业控制的要求而设计的,所以其成本低、集成度高,可灵活地组成各种智能控制装置,以解决从简单到复杂的各种任务,实现较佳的性价比。而且从单片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,在机电传动与控制中也有许多应用。

第二节 控制系统的基本概念

一、系统及控制系统

系统是由相互制约的各个部分组织成的具有一定功能的整体。在机电传动与控制中,将与控制设备的运动、动作等参数有关的部分组成的具有控制功能的整体称为系统。对于用控制信号(输入量)通过系统诸环节来控制被控变量(输出量),使被控制量按规定的方式和要求变化,这样的系统称为控制系统。

二、控制系统的分类

控制系统的分类方式很多,但机械设备的控制系统常按系统的组成原理来划分,可分为开环控制系统、半闭环控制系统和闭环控制系统。

输出量只受输入量控制的系统称为开环控制系统。在任何开环控制系统中,系统的输出量都不与参考输入量进行比较。对应于每个参考输入量,都有一个相应的固定工作状态与之相对应。系统中没有反馈回路(反馈是把一个系统的输出量不断直接或间接变换后,全部或部分地返回到输入量,再输入到系统中去的过程)。用步进电动机作为执行元件的经济简易型数控机床,其控制系统就是一个开环系统。因为机床的坐标进给控制信号,是直接通过控制装置和驱动装置推动工作台运动到指定位置,坐标信号不再反馈。当控制系统出现扰动时,输出量便会出现偏差,因此开环控制系统缺乏精确性和适应性。但它是最简单、最经济的一类控制系统,一般使用在对精度要求不高的机械设备中(如旧机床的改造)。开环控制系统组成框图如图 1-1 所示。

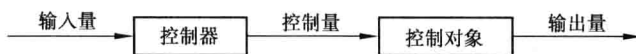


图 1-1 开环控制系统框图

输出量同时受输入量和输出量控制,即输出量对系统有控制作用,这种存在反馈回路的系统称为闭环控制系统。现有的全功能型数控机床(CNC)机器人和 CNC 机床的坐标驱动系统等都属闭环控制系统。但是在 CNC 机床的坐标驱动系统中只有以坐标位置量为直接输出量,即在工作台上安装长光栅等位移测量元件作为反馈元件的系统才称为闭环系统。那些以交、直流伺服电动机的角位移作为输出量,用圆光栅作为反馈元件的系统则称为半闭环系统。目前使用中的 CNC 机床绝大多数均为半闭环控制系统。采用半闭环控制系统的优点在于没有将伺服电动机与工作台之间的传动机构和工作台本身包括在控制系统内,系统易调整、稳定性好且整体造价低。闭环控制系统、数控机床半/全闭环控制系统框图分别如图 1-2、图 1-3 和图 1-4 所示。

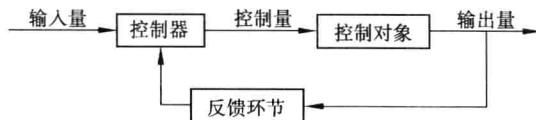


图 1-2 闭环控制系统框图

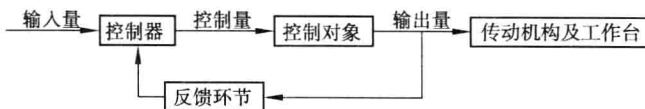


图 1-3 数控机床半闭环控制系统框图

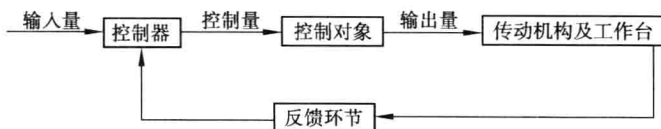


图 1-4 数控机床全闭环控制系统框图

第三节 本课程的性质、任务和学习方法

本课程是电气自动化、工业自动化、机电一体化、生产过程自动化、数控技术等专业的一门实用性很强的专业课，是电机学、电力拖动基础和电气控制三门学科的有机结合。它涉及面较广，既有理论又有实际技术问题；既有从应用角度出发对一般原理和运行特性的论述，又有依据工程观念对实际问题进行简化、抓住主要因素进行讨论的工程方法。

本课程的主要任务是使学生熟悉各种电机和常用低压电器的基本结构、工作原理和主要特性，并掌握各种电动机起动、调速、制动、反转的原理、方法和控制线路，了解各种电机及控制方法的优缺点和适用场合；培养学生在电机与电气控制方面独立分析问题和解决实际问题的能力；掌握连接常用电气控制线路的基本方法，进行实验实训技能的训练，为学习后续课程和今后的工作创造必要的条件。

学习《电机与控制技术》的方法是：

(1) 对于初学者来说，会感到本课程较为复杂、抽象，故应该从应用、实用、使用的角度出发，从实际应用的例子中体会学习电机与电气控制技术的必要性，提高学习兴趣。

(2) 本课程的学习过程中要特别强调理论联系实际。学习各种电机、低压电器的结构时，可以结合实物，弄清各部件的组成和作用，以增强感性认识。在实验、实习中要多动脑、多动手，将所学知识用于分析电机与电气控制线路的常见故障及检修。

(3) 学习中应注意各种电机的共性和特殊性，善于归纳总结，加深理解。

(4) 熟悉常用控制电器的结构、原理、用途，了解其型号、规格和应用场合。

(5) 熟练掌握电气控制电路的分析方法。根据生产工艺的不同要求，设计和连接各种电气控制线路。

第二章

机电控制系统的驱动电动机



学习目标

- 了解直流电动机的工作原理及机械特性。
- 熟悉交流电动机的工作原理及机械特性，重点掌握三相异步电动机的起动、正反转、制动和调速运行控制。
- 了解伺服电动机的工作原理、特性及应用特点。
- 熟悉步进电动机的基本结构与工作原理，重点掌握其起动及运行特性。

电动机俗称马达，是一种将电能转化成机械能，并可再使用机械能产生动能，用来驱动其他装置的电气设备。电动机按使用电源不同分为直流电动机、交流电动机、伺服电动机以及步进电动机，电力系统中的电动机大部分是交流电动机。电动机主要由定子与转子组成。通电导线在磁场中受力运动的方向跟电流方向和磁场方向有关。电动机的工作原理是磁场对电流受力的作用，使电动机转动或直线运动。

第一节 直流电动机

直流电动机能将直流电能转换为机械能，由于它具有良好的调速性能和起动转矩大等优点，所以它被广泛用于对调速要求较高、正反转和起动制动频繁或多单元同步协调运转的生产机械、运输起重机械和自动化武器中作为拖动电动机。如轧钢机、落地龙门铣床、镗床、电力牵引设备和自动火炮传动等设备，多数仍采用直流电动机拖动。

本节在讨论直流电动机的工作原理和基本结构的基础上，讨论直流电动机的机械特性及起动、反转、调速的基本原理。

一、直流电动机工作原理

直流电动机的工作原理是基于电磁力定律。如图 2-1 所示，在 A、B 电刷上接入直流电源 U ，电流从正电刷 A 经线圈 ab 、 cd ，由负电刷 B 流出。根据电磁力定律，在载流导体与磁力线垂直的条件下，线圈每一个有效边将受到一电磁力的作用。电磁力方向可用左手定则判断，即伸开左手，掌心向着 N 极，四指指向电流的方向，与四指垂直的拇指方向就是电磁力的方向。在图示瞬间，导线 ab 与 cd 中所受的电磁力为逆时针方向，在这个电磁力的作用下，转子将逆时针旋转，即图中 n 的方向。随着转子的转动，线圈边相对磁极的位置互换，这时要使转子连续转动，则应使线圈边中的电流方向也加以改变，即要进行换向。由于换向

器与静止电刷的相互合作用, 线圈不论转到何处, 电刷 A 始终与运动到 N 极下的线圈边相接触, 而电刷 B 始终与运动到 S 极下的线圈边相接触, 这就保证了电流总是由电刷 A 经 N 极下的导体流入, 再沿 S 极下的导体经电刷 B 流出。因而电磁力和电磁转矩的方向始终保持不变, 使电动机沿逆时针方向连续转动。

在图 2-1 所示的电动机中, 转子线圈中流过电流时, 受电磁力作用而产生的电磁转矩可表示为

$$T = K_T \Phi I_a$$

式中: T 为电磁转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$); I_a 为电枢电流 (A); K_T 为与电动机结构有关的常数, 称为转矩常数, $K_T = 9.55 K_E$

当线圈在磁场中转动时, 线圈的有效边也切割磁力线, 根据电磁感应原理在有效边中产生感应电动势, 它的方向用右手法则确定, 且总是与其中的电流方向相反, 故该感应电动势又常称为电枢反电动势, 可表示为

$$E_a = K_E \Phi n$$

式中: E_a 为电枢电动势 (V); Φ 为主磁通量 (Wb); n 为电枢转速 (r/min); K_E 为与电动机结构有关的常数, 称为电动势常数。

这时电动机将电能转换成了轴上输出的机械能, 向外输出机械功率, 电动机运行在电动状态。

二、直流电动机运行特性

从原理上讲, 一台直流电机在某种条件下作为发电机运行, 而在另一种条件下作为电动机运行, 且两种运行状态可以相互转换, 这就是所谓电机的可逆原理。直流电动机按励磁方式可分为他励、并励、串励和复励四类, 其中以他励电动机和复励电动机在传动控制系统中更为常用, 所以下面以他励直流电动机为例介绍其运行特性。

(一) 他励直流电动机稳态运行

他励直流电动机稳态运行的基本方程是指电磁系统中的电动势平衡方程、机械系统中的转矩平衡方程以及能量转换过程中的功率平衡方程。

1. 电动势平衡方程

按照图 2-2 所标注的电压、电流及电动势的正方向, 根据基尔霍夫第二定律, 可知电枢回路的电动势平衡方程式为

$$E_a = U - I_a R_a \quad (2-1)$$

$$\text{或} \quad U = E_a + I_a R_a, \quad I_a = \frac{U - E_a}{R_a}, \quad E_a = K_E \Phi n \quad (2-2)$$

励磁回路方程为

$$I_f = U_f / R_f$$

相关量

$$\Phi = f(I_f, I_a) \quad (2-3)$$

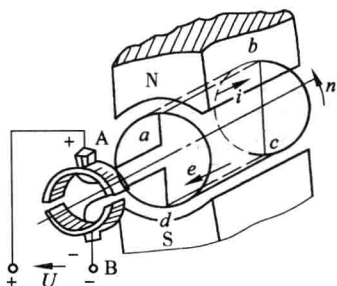


图 2-1 直流电动机工作原理

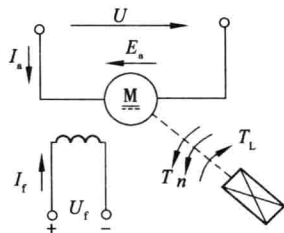


图 2-2 他励直流电动机

式中: U 为电动机外加直流电压; E_a 为反电动势; I_a 为电枢电流; U_f 为励磁电压; I_f 为励磁电流; Φ 为主磁通量。

2. 转矩平衡方程

直流电动机稳态运行时, 作用于电动机轴上的转矩共有三个: 起驱动作用的电磁转矩 T ; 生产机械的阻转矩 T_2 (即电动机轴上输出转矩); 和空载转矩 T_0 , 它也是阻转矩。按图 2-2 标注转矩与转速的正方向, 根据牛顿定律, 驱动转矩应与负载转矩 $T_L = T_2 + T_0$ 平衡, 即

$$T = T_2 + T_0 = T_L \quad (2-4)$$

式中: $T = K_T \Phi I_a$ 。

3. 功率平衡方程

将式 (2-1) 两边都乘以电枢电流 I_a 得到

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a \quad (2-5)$$

可改写成

$$P_1 = P_e + P_{Cu,a} \quad (2-6)$$

式中: $P_1 = UI_a$ 为电源对电动机输入的功率; $P_e = E_a I_a$ 为电动机向机械负载输出的电磁功率, 即电枢反电动势从电源吸收的电功率; $P_{Cu,a} = I_a^2 R_a$ 为电枢回路总的铜损耗。

将式 (2-4) 两边同乘以机械角速度 Ω , 得

$$T\Omega = T_2\Omega + T_0\Omega$$

改写成

$$P_e = P_2 + P_0$$

式中: $P_e = T\Omega$ 为电磁功率; $P_2 = T_2\Omega$ 为转轴输出的机械功率; $P_0 = T_0\Omega$ 为包括机械摩擦损耗 P_m 和铁损耗 P_{Fe} 在内的空载损耗。

他励直流电动机稳态运行时的功率关系如图 2-3 的流程图所示, 图中 $P_{Cu,f}$ 为励磁回路损耗, 由同一直流电源供给。他励时总损耗为

$$P_{\Sigma} = P_{Cu,a} + P_0 + P_s = P_{Cu,a} + P_m + P_{Fe} + P_s$$

如为并励直流电动机, 总损耗中还应包括励磁损耗 $P_{Cu,f}$, 式中 P_s 为附加损耗。电动机效率为

$$\eta = 1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_2 + P_{\Sigma}}$$

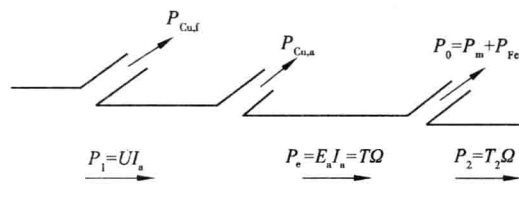


图 2-3 他励直流电动机的功率流程图

(二) 直流电动机的工作特性

直流电动机的工作特性是指 $U = U_N = \text{常值}$, 电枢回路不串入附加电阻, 励磁电流 $I_f = I_{fN}$ 时, 电动机的转速 n 、电磁转矩 T 和效率 η 与输出功率 P_2 之间的关系, 即 $n = f(P_2)$, $T = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ 。在实际运行中由于 I_a 较易测到, 且 I_a 随着 P_2 的增加而增大, 故亦可将工作特性表示为 $n = f(I_a)$, $T = f(I_a)$, $\eta = f(I_a)$ 。