



21st CENTURY
十一五规划

21世纪全国应用型本科 **大机械系列** 实用规划教材



机床电气控制技术

主 编 张万奎
副主编 徐祖华 孙 晓 罗雪莲
主 审 黎福海

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材

机床电气控制技术

主 编	张万奎	
副主编	徐祖华	孙 晓
	罗雪莲	
参 编	杨福合	毛美姣
	陈 飞	
主 审	黎福海	

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

全书共分 8 章, 内容包括电动机的工作原理及特性、电动机的基本电气控制线路、金属切削机床电气控制线路、继电器-接触器控制线路设计基础、可编程控制器、变流技术基础、直流调速系统和交流调速系统。

本书从电动机的工作原理和基本特性入手, 介绍了电气元件在电力拖动自动控制系统中的应用, 课程体系新, 内容实用, 重点突出。

本书可作为机械设计制造及其自动化专业、机械电子工程专业本科生的教材, 也可作为高职高专相关专业的教材, 还可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机床电气控制技术/张万奎主编. —北京: 中国林业出版社; 北京大学出版社, 2006.8

(21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材)

ISBN 7-5038-4433-7

I. 机… II. 张… III. 数控机床—电气控制—高等学校—教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 076942 号

书 名: 机床电气控制技术

著作责任者: 张万奎 主编

策划编辑: 李昱涛

责任编辑: 郭穗娟 杜建玲

标准书号: ISBN 7-5038-4433-7

出 版 者: 中国林业出版社(地址: 北京市西城区德内大街刘海胡同 7 号 邮编: 100009)

<http://www.cfph.com.cn> E-mail: cfphz@public.bta.net.cn

电话: 编辑部 66170109 营销中心: 66187711

北京大学出版社(地址: 北京市海淀区成府路 205 号 邮编: 100871)

<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com> E-mail: pup_6@163.com

电话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

发 行 者: 北京大学出版社 中国林业出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 417 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 26.00 元

《21世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材》

专家编审委员会

名誉主任 胡正寰*

主任委员 殷国富

副主任委员 (按拼音排序)

戴冠军 江征风 李郝林 梅 宁 任乃飞

王述洋 杨化仁 张成忠 张新义

顾问 (按拼音排序)

傅水根 姜继海 孔祥东 陆国栋

陆启建 孙建东 张 金 赵松年

委 员 (按拼音排序)

方 新 郭秀云 韩健海 洪 波

侯书林 胡如风 胡亚民 胡志勇

华 林 姜军生 李自光 刘仲国

柳舟通 毛 磊 孟宪颐 任建平

陶健民 田 勇 王亮申 王守城

魏 建 魏修亭 杨振中 袁根福

曾 忠 张伟强 郑竹林 周晓福

*胡正寰：北京科技大学教授，中国工程院机械与运载工程学部院士

丛书总序

殷国富*

机械是人类生产和生活的基本工具要素之一，是人类物质文明最重要的一个组成部分。机械工业担负着向国民经济各部门，包括工业、农业和社会生活各个方面提供各种性能先进、使用安全可靠的技术装备的任务，在国家现代化建设中占有举足轻重的地位。20 世纪 80 年代以来，以微电子、信息、新材料、系统科学等为代表的新一代科学技术的发展及其在机械工程领域中的广泛渗透、应用和衍生，极大地拓展了机械产品设计制造活动的深度和广度，改变了现代制造业的产品设计方法、产品结构、生产方式、生产工艺和设备以及生产组织模式，产生了一大批新的机械设计制造方法和制造系统。这些机械方面的新方法和系统的主要技术特征表现在以下几个方面：

(1) 信息技术在机械行业的广泛渗透和应用，使得现代机电产品已不再是单纯的机械构件，而是由机械、电子、信息、计算机与自动控制等集成的机电一体化产品，其功能不仅限于加强、延伸或取代人的体力劳动，而且扩大到加强、延伸或取代人的某些感官功能与大脑功能。

(2) 随着设计手段的计算机化和数字化，CAD/CAM/CAE/PDM 集成技术和软件系统得到广泛使用，促进了产品创新设计、并行设计、快速设计、虚拟设计、智能设计、反求设计、广义优化设计、绿色产品设计、面向全寿命周期设计等现代设计理论和技术方法的不断发展。机械产品的设计不只是单纯追求某项性能指标的先进和高低，而是注重综合考虑质量、市场、价格、安全、美学、资源、环境等方面的影响。

(3) 传统机械制造技术在不断吸收电子、信息、材料、能源和现代管理等方面成果的基础上形成了先进制造技术，并将其综合应用于机械产品设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务的机械产品制造全过程，以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产，提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力。

(4) 机械产品加工制造的精密化、快速化，制造过程的网络化、全球化得到很大的发展，涌现出 CIMS、并行工程、敏捷制造、绿色制造、网络制造、虚拟制造、智能制造、大规模定制等先进生产模式，制造装备和制造系统的柔性及可重组已成为 21 世纪制造技术的显著特征。

(5) 机械工程的理论基础不再局限于力学，制造过程的基础也不只是设计与制造经验及技艺的总结。今天的机械工程学科比以往任何时候都更紧密地依赖诸如现代数学、材料科学、微电子技术、计算机信息科学、生命科学、系统论与控制论等多门学科及其最新成就。

上述机械科学与工程特征和发展趋势表明，现代机械工程学科越来越多地体现着知识经济的特征。因此，加快培养适应我国国民经济建设所需要的高综合素质、机械工程专业人才的意义十分重大、任务十分繁重。我们必须通过各种层次和形式的教育，培养出适应世界机械工业发展潮流与我国机械制造业实际需要的技术人才与管理人才，不断推动我国机械科学与工程技术的进步。

为使机械工程学科毕业生的知识结构由较专、较深、适应性差向较通用、较广泛、适

*殷国富教授：现为教育部机械学科教学指导委员会委员，现任四川大学制造科学与工程学院院长

应性强方向转化,在教育部的领导与组织下,1998年对本科专业目录进行了第3次大的修订。调整后的机械大类专业变成4类8个专业,它们是:机械类4个专业(机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、过程装备与控制、工业设计);仪器仪表类1个专业(测控技术与仪器);能源动力类2个专业(热能与动力工程、核工程与核技术);工程力学类1个专业(工程力学)。此外还提出了面向更宽的引导性专业,即机械工程及自动化。因此,建立现代“大机械、全过程、多学科”的观点,探讨机械科学与工程技术学科专业创新人才的培养模式,是高校从事制造学科教学的教育工作者的责任;建立培养富有创新能力人才的教学体系和教材资源环境,是我们努力的目标。

要达到这一目标,进行适应现代机械学科发展要求的教材建设是十分重要的基础工作之一。因此,组织编写出版面向大机械学科的系列教材就显得很有意义和十分必要。北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们通过对国内大学机械工程学科教材实际情况的调研,在与众多专家学者讨论的基础上,决定面向机械工程学科类专业的学生出版一套系列教材,这是促进高校教学改革发展的重要决策。按照教材编审委员会的规划,本系列教材将逐步出版。

本系列教材是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,合理定位,由长期在教学第一线从事教学工作的教师立足于21世纪机械工程学科发展的需要,以科学性、先进性、系统性和实用性为目标进行编写,以适应不同类型、不同层次的学校结合学校实际情况的需要。本系列教材编写的特色体现在以下几个方面:

(1) 关注全球机械科学与工程技术学科发展的大背景,建立现代大机械工程学科的新理念,拓宽理论基础和专业知识,特别是突出创造能力和创新意识。

(2) 重视强基础与宽专业知识面的要求。在保持较宽学科专业知识的前提下,在强化产品设计、制造、管理、市场、环境等基础理论方面,突出重点,进一步密切学科内各专业知识面之间的综合内在联系,尽快建立起系统性的知识体系结构。

(3) 学科交叉与综合的观念。现代力学、信息科学、生命科学、材料科学、系统科学等新兴学科与机械学科结合的内容在系列教材编写中得到一定的体现。

(4) 注重能力的培养,力求做到不断强化自我的自学能力、思维能力、创造性地解决问题的能力以及不断自我更新知识的能力,促进学生向着富有鲜明个性的方向发展。

总之,本系列教材注意了调整课程结构,加强学科基础,反映系列教材各门课程之间的联系和衔接,内容合理分配,既相互联系又避免不必要的重复,努力拓宽知识面,在培养学生的创新能力方面进行了初步的探索。当然,本系列教材还需要在内容的精选、音像电子课件、网络多媒体教学等方面进一步加强,使之能满足普通高等院校本科教学的需要,在众多的机械类教材中形成自己的特色。

最后,我要感谢参加本系列教材编著和审稿的各位老师所付出的大量卓有成效的辛勤劳动,也要感谢北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们对本系列教材的支持和编审工作。由于编写的时间紧、相互协调难度大等原因,本系列教材还存在一些不足和错漏。我相信,在使用本系列教材的教师和学生的关心和帮助下,不断改进和完善这套教材,使之在我国机械工程类学科专业的教学改革和课程体系建设中起到应有的促进作用。

前 言

本书在内容安排上,突出应用特点,强化工程背景,体现专业特色。单独设置第1章介绍电动机的工作原理、机械特性及其工程应用;将可编程控制器提到自动调速系统之前介绍,在第7章、第8章增加了基于单片机或基于PLC的自动调速系统。本课程教学学时约50学时,各个学校和专业可根据具体情况自行确定学时。各章教学学时分配如下表,仅供参考。

序号	课题	建议学时
0	概述	1
1	电动机的工作原理及特性	5
2	电动机的基本电气控制线路	6
3	金属切削机床的电气控制线路	6
4	继电器-接触器控制线路设计基础	4
5	可编程控制器	6
6	变流技术基础	6
7	直流调速控制系统	8
8	交流调速控制系统	8

本书由张万奎教授任主编,徐祖华、孙晓和罗雪莲任副主编。张万奎教授提出了编写大纲并进行了统稿。参加本书编写工作的有湖南理工学院张万奎(概述、第2章、第6章)、湘潭大学毛美姣(第1章)、湖南工业大学孙晓(第3章)、中南林业科技大学陈飞(第4章)、中北大学杨福合(第5章)、南华大学徐祖华(第7章)、湖南工学院罗雪莲(第8章)。

本书由湖南大学黎福海教授主审。主审审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的修改意见,编者在此深表谢意。本书在编写过程中,参考了大量相关教材和资料,在此对这些教材和资料的作者谨致深切的感谢。在本书的出版过程中,还得到了北京大学出版社和中国林业出版社的大力支持和帮助,在此也一并表示衷心的感谢。

由于编者水平、时间有限,书中定然存在欠妥之处,恳请读者批评指正。

编 者
2006年2月

《21世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材》

参编学校名单 (按拼音排序)

- | | |
|-------------|---------------|
| 1 安徽建筑工业学院 | 30 黄石理工学院 |
| 2 安徽科技学院 | 31 吉林工程技术师范学院 |
| 3 安徽农业大学 | 32 江苏大学 |
| 4 北华大学 | 33 九江学院 |
| 5 北京建筑工程学院 | 34 军事交通学院 |
| 6 北京联合大学 | 35 兰州理工大学 |
| 7 长春大学 | 36 辽宁工程技术大学 |
| 8 长沙理工大学 | 37 鲁东大学 |
| 9 重庆工学院 | 38 内蒙古工业大学 |
| 10 重庆交通学院 | 39 南华大学 |
| 11 德州学院 | 40 南昌航空工业学院 |
| 12 东北林业大学 | 41 青岛科技大学 |
| 13 东华理工学院 | 42 山东理工大学 |
| 14 福建工程学院 | 43 上海工程技术大学 |
| 15 甘肃农业大学 | 44 上海水产大学 |
| 16 桂林工学院 | 45 上海理工大学 |
| 17 河北大学 | 46 沈阳大学 |
| 18 河北建筑工程学院 | 47 四川农业大学 |
| 19 河北农业大学 | 48 潍坊学院 |
| 20 河南工业大学 | 49 武汉工业学院 |
| 21 河南科技学院 | 50 武汉科技大学 |
| 22 湖北汽车工业学院 | 51 武汉理工大学 |
| 23 湖南工程学院 | 52 湘潭大学 |
| 24 湖南工学院 | 53 徐州师范大学 |
| 25 湖南工业大学 | 54 郑州航空工业管理学院 |
| 26 湖南理工学院 | 55 中北大学 |
| 27 江西理工大学 | 56 中国农业大学 |
| 28 华北水利水电学院 | 57 中南林业科技大学 |
| 29 华东交通大学 | |

目 录

概述.....	1	2.1.2 电气控制图	45
第 1 章 电动机的工作原理及特性.....	4	2.2 电动机的启动控制线路	47
1.1 直流电动机的工作原理及特征	4	2.3 电动机的启动控制线路	48
1.1.1 直流电动机的结构及 工作原理.....	4	2.3.1 电动机直接启动控制线路	48
1.1.2 直流电动机的分类.....	7	2.3.2 电动机降压启动控制线路	54
1.1.3 直流电动机的机械特性.....	7	2.4 电动机的制动控制线路	56
1.1.4 他励电动机的启动特性.....	12	2.4.1 电动机能耗制动控制线路	56
1.1.5 他励电动机的制动特性.....	13	2.4.2 电动机反接制动控制线路	57
1.1.6 他励电动机的调速特性.....	16	2.5 电动机变磁极对数的调速控制线路 ...	58
1.2 三相异步电动机的工作原理及特征 ...	18	2.5.1 双速电动机的连接方法	58
1.2.1 三相异步电动机的结构.....	18	2.5.2 双速电动机的控制线路	59
1.2.2 三相异步电动机的 工作原理.....	20	2.6 液压力滑台的电气控制线路	59
1.2.3 三相异步电动机的 电路分析.....	22	2.6.1 动力滑台的工作循环	59
1.2.4 三相异步电动机的 机械特性.....	26	2.6.2 具有一次工作进给的液压 动力滑台的电气控制线路	60
1.2.5 三相异步电动机的 启动特性.....	29	2.6.3 具有带延时的一次工作 进给的液压动力滑台	63
1.2.6 三相异步电动机的 制动特性.....	33	思考题与习题	63
1.2.7 三相异步电动机的 调速特性.....	35	第 3 章 金属切削机床的电气 控制线路.....	66
1.3 控制电动机简介	37	3.1 卧式车床的电气控制线路	66
1.3.1 伺服电动机.....	37	3.1.1 卧式车床主要结构及运动 形式	66
1.3.2 步进电动机.....	39	3.1.2 卧式车床的工作特性	67
1.3.3 测速发电机.....	41	3.1.3 CM6132 型卧式车床电气 控制线路	68
思考题与习题	43	3.2 摇臂钻床的电气控制线路	70
第 2 章 电动机的基本电气控制线路	45	3.2.1 摇臂钻床主要结构及运动 形式	70
2.1 电气元件符号与电气图	45	3.2.2 摇臂钻床电气控制特点	71
2.1.1 电气符号.....	45	3.2.3 Z3040 型摇臂钻床电气 控制线路	73
		3.3 万能铣床的电气控制线路	75

3.3.1	铣床结构和运动方式.....	76	4.3.3	熔断器的选用	112
3.3.2	铣床的工作特点和要求.....	76	4.3.4	接触器的选用	113
3.3.3	X62W 型万能铣床的电气 控制线路.....	77	4.3.5	继电器的选用	114
3.3.4	X52K 型立式铣床电气控制 线路.....	81	4.3.6	控制变压器的选择	116
3.4	龙门刨床的电气控制线路	83	4.3.7	电动机的选择	116
3.4.1	龙门刨床工作特点和对电气 系统的要求.....	83	4.4	机床电气控制线路设计举例	119
3.4.2	龙门刨床的主传动系统.....	83		思考题与习题	123
3.4.3	工作台的控制线路.....	83	第 5 章	可编程控制器	125
3.4.4	横梁升降的控制线路.....	88	5.1	可编程控制器的产生、特点和 发展.....	125
3.4.5	刀架的电气控制.....	90	5.1.1	可编程控制器的产生和 定义	125
3.5	组合机床的电气控制线路	91	5.1.2	可编程控制器的特点和 分类	126
3.5.1	组合机床结构与工作循环.....	92	5.1.3	可编程控制器的应用范围 及其发展	128
3.5.2	液压动力滑台系统.....	93	5.1.4	可编程控制器与其他工业 控制系统的比较	130
3.5.3	两面加工组合机床电气 控制电路.....	94	5.2	可编程控制器的组成及工作原理	133
	思考题与习题	96	5.2.1	可编程控制器系统的组成	133
第 4 章	继电器-接触器控制线路 设计基础.....	98	5.2.2	可编程控制器的工作过程 与工作原理	139
4.1	电气设计的一般原则	98	5.2.3	可编程控制器的编程语言	141
4.1.1	机床电气设计的基本要求.....	98	5.3	可编程控制器内部等效继电器 电路.....	142
4.1.2	机床电气设计的基本内容.....	98	5.3.1	FX2N 系列可编程控制 器简介	142
4.1.3	电气设计的技术条件.....	99	5.3.2	FX2N 系列可编程控制器 的编程元件	145
4.1.4	电气传动形式的确定.....	99	5.4	可编程控制器编程和指令系统	150
4.1.5	控制方案的确定.....	101	5.4.1	FX2N 系列的基本逻辑 指令	150
4.2	电气控制线路设计	102	5.4.2	梯形图编程注意事项	157
4.2.1	电气控制线路设计遵循的 原则.....	102	5.4.3	FX2N 系列的步进梯形图 指令及编程方法	159
4.2.2	控制线路电源的选择及 动力线路设计.....	102	5.4.4	编程实例	162
4.2.3	控制线路的经验设计法.....	103	5.5	可编程控制器的应用	165
4.2.4	控制线路的逻辑设计法.....	105	5.5.1	可编程控制器控制系统设计	
4.2.5	电器布置图的绘制.....	106			
4.3	低压电器及电动机的选择	107			
4.3.1	电气元件选择的基本原则.....	107			
4.3.2	按钮、低压开关的选用.....	108			

的主要内容与方法.....	165	7.2.6 单闭环无静差调速系统	214
5.5.2 可编程控制器控制系统		7.3 电压负反馈和电流正反馈自动	
应用实例.....	166	调速系统	216
思考题与习题	169	7.3.1 带电流正反馈的电压负反馈	
第 6 章 变流技术基础	171	调速系统的组成	216
6.1 电力电子元件	171	7.3.2 带电流正反馈的电压负反馈	
6.1.1 晶闸管(SCR)	171	调速静特性	218
6.1.2 功率晶体管(GTR).....	174	7.4 直流电动机双闭环调速系统	220
6.1.3 绝缘栅双极晶体管(IGBT).....	174	7.4.1 双闭环调速系统的组成	220
6.1.4 电力电子器件的保护.....	175	7.4.2 双闭环调速系统的静态	
6.2 晶闸管可控整流电路	176	特性	221
6.2.1 单相半波可控整流电路.....	176	7.4.3 双闭环调速系统的动态	
6.2.2 单相桥式可控整流电路.....	178	特性	222
6.2.3 三相半波可控整流电路.....	181	7.5 直流电动机可逆调速系统	225
6.2.4 三相桥式可控整流电路.....	183	7.5.1 直流电动机可逆有环流	
6.3 晶闸管触发电路	184	调速系统	225
6.3.1 晶闸管对触发电路的要求.....	184	7.5.2 逻辑无环流可逆调速系统	227
6.3.2 单结晶体管移相触发电路.....	185	7.6 直流电动机的脉宽调制调速系统	230
6.4 逆变器	188	7.6.1 直流脉宽调制电路的工作	
6.4.1 有源逆变电路.....	189	原理	230
6.4.2 无源逆变电路.....	190	7.6.2 可逆脉宽调制调速系统	232
思考题与习题	194	7.6.3 双闭环控制的脉宽调制调速	
第 7 章 直流调速控制系统	197	系统	233
7.1 机床的速度调节	197	7.7 直流调速的应用	234
7.1.1 现代机床调速系统.....	197	7.7.1 不可逆双闭环直流调速	
7.1.2 现代机床控制技术.....	198	系统	235
7.1.3 直流调速简介.....	200	7.7.2 直流调速的微机控制系统	238
7.1.4 直流调速的发展趋势.....	203	思考题与习题	241
7.2 转速负反馈自动调速系统	203	第 8 章 交流调速控制系统	243
7.2.1 转速负反馈自动调速系统		8.1 电磁转差离合器调速系统	243
组成.....	204	8.1.1 电磁转差离合器调速系统	
7.2.2 直流调速系统的静态特性.....	205	的组成和工作原理	243
7.2.3 直流调速系统的动态特性.....	208	8.1.2 电磁转差离合器调速系统	
7.2.4 转速闭环调速系统的基本		的机械特性	244
特性.....	211	8.1.3 自动换极电磁转差离合器	
7.2.5 带电流截止负反馈的单闭		调速系统	245
环调速系统.....	211	8.2 绕线转子异步电动机串级调速	
		系统.....	246

8.2.1 串级调速的基本原理.....	246	变频调速应用举例	262
8.2.2 串级调速系统的基本类型.....	248	8.3.5 矢量控制简介	263
8.2.3 双闭环控制的串级 调速系统.....	250	8.3.6 PLC 控制交流异步电动机 变频调速应用举例	267
8.3 笼型异步电动机变频调速系统	251	思考题与习题	272
8.3.1 交流异步电动机变频调速 基本原理.....	251	附录一 电气图形符号	273
8.3.2 变频与变压的实现 ——SPWM 调制波.....	253	附录二 电气文字符号	276
8.3.3 SPWM 脉冲的生成方法及 专用集成芯片 SA8282	257	参考文献	278
8.3.4 单片机控制交流异步电动机			

概 述

机床是制造业中的主要设备，机床的数量、质量及自动化水平直接影响到整个制造业的发展。20 世纪初电动机的发明，使机床的动力得到了根本的改变。在现代制造业中，为了实现机床生产过程自动化的要求，机床电气控制不仅包括拖动机床的电动机，而且包括一套电动机的控制系统。随着生产工艺的不断发展，对机床电气控制技术提出了越来越高的要求。比如，一些精密机床要求加工精度达百分之几毫米，甚至几微米；重型镗床为保证加工精度和控制粗糙度，要求在极慢的稳速下进给，也就是要求在很宽的范围内调速；为了提高效率，由数台或数十台机床组成的生产自动线，要求统一控制和管理。诸如此类的要求，都是通过电动机及其控制系统和机械传动装置来实现的。

1. 机床电力拖动系统的发展概况

机床是由电动机拖动运行的，这种拖动方式称为电力拖动。电力拖动系统可以分为两个部分：一个是电力拖动部分，包括电动机以及使电动机和机床相互联系起来的传动机构；另一个是电动机的电气控制部分。电力拖动系统主要分为直流拖动和交流拖动两大类。直流拖动是以直流电动机为动力，交流拖动是以交流电动机为动力。早在 19 世纪 30 年代就开始使用直流电动机拖动机床。直流电动机由于调速和启动性能优良，在机床调速领域直流拖动系统长期居于首位。但是，直流电动机结构复杂、维护困难，制造大容量、高转速和高电压的直流电动机也受到限制。交流电动机出现后，其中的三相异步电动机因结构简单、运行可靠、使用维护方便和价格便宜而被广泛应用于各种机床。随着电力电子技术的飞跃发展，交流调速技术迅速发展。三相笼型异步电动机的变频调速、三相绕线转子异步电动机的串级调速和无换向器电动机的调速技术在机床中获得了广泛应用。由于电动机不同，它们的控制系统也就不同。目前，交流拖动系统在机床中占主导地位。机床电力拖动系统的发展经历了成组拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。

1) 成组拖动

最初的拖动是由电动机直接代替蒸汽机，即由一台电动机拖动一组机床，称为成组拖动。所谓成组拖动，就是由一台电动机拖动一根天轴，然后再由天轴通过带轮和传送带分别拖动各台机床。这种拖动方式机构复杂，传递路径长，损耗大，生产效率低，劳动条件差，一旦电动机发生故障，将造成成组的机床停车，不适于现代化生产的需要。

2) 单电动机拖动

所谓单电动机拖动，就是用一台电动机拖动一台机床。这种拖动方式比成组拖动前进了一步，但是当一台机床的运动部件较多时，机械传动机构会十分复杂，而且还往往满足不了生产工艺上的要求，仍然不适于现代化生产的需要。

3) 多电动机拖动

所谓多电动机拖动，就是一台机床的每一个运动部件分别由一台专门的电动机拖动。例如，龙门刨床的刨台、左右垂直刀架、侧刀架、横梁及其夹紧机构，均分别由一台电动

机拖动。多电动机拖动方式不仅大大简化了机床的传动机构，而且控制灵活，为机床的自动化提供了有利条件。所以，现代化生产基本上都采用这种拖动方式。

2. 机床电气控制系统的发展概况

电气控制系统伴随着控制器件的发展而发展。大功率半导体器件、大规模集成电路、计算机控制技术、检测技术以及现代控制理论的发展，推动了机床电气控制技术的发展。主要表现为：在控制方法上，从手动操纵发展到自动控制；在控制功能上，从单一功能发展为多种功能；在实际操作上，从紧张繁重发展到轻松自如。机床电气控制系统的发展日新月异，它主要经历了以下四个阶段。

1) 继电器-接触器控制系统

最初的机床电气控制采用手动控制，如小型台钻等少数容量小、动作单一的机床，使用手动控制电器直接控制。后来由于切削工具、机床机构的改进，切削功率的增大，机床运动的增多，手动控制已不能满足要求，于是出现了以继电器-接触器为主的控制电器所组成的控制装置和控制系统。这种控制系统，可实现对机床的各种运动的控制，如启动、正反转、调速等的控制。这种控制方法简单直接，工作稳定可靠；但控制速度慢，控制精度差。

2) 连续控制方式及自动控制系统

20 世纪 30 年代在龙门刨床上出现了电动机放大机控制，它使控制系统从继电器—接触器控制这种断续控制发展到连续控制，连续控制系统可随时检查控制对象的工作状态，并根据输出量与给定量的偏差对控制对象进行自动调整，它的快速性和控制精度都大大超过了最初的断续控制，并简化了控制系统，减少了电路中的触点，提高了工作的可靠性，使生产效率大为提高。40 年代出现了磁放大器控制的自动控制系统，50 年代又出现了水银整流器控制的自动控制系统。1958 年美国通用电气公司生产出世界上第一支晶闸管(额定电流 16A)，出现了晶闸管一直流电动机无级调速系统。晶闸管具有效率高、控制特性好、反应快、寿命长、可靠性高、维护容易、体积小、质量轻等优点，并正在向大容量方向发展。其后由于逆变技术的出现，高压大功率晶体管(GTR)、绝缘栅双极半导体管(IGBT)等新型电力电子器件的出现，从 80 年代开始，交流电动机无级调速系统有了迅速的发展。由于交流电动机无电刷与换向器，较之直流电动机易于维护，而且寿命长，因此，交流调速系统很有发展前途，用大功率晶体管逆变技术和脉宽调制技术(PWM)改变交流电的频率等实现电动机无级调速的系统在工业上正在得到广泛的应用。目前已出现了多种以多用芯片或 DSP 为核心的变频器调速系统，它使交流电动机的控制变得更简单，可靠性更高，拖动系统的性能更好。它们的出现为机床自动控制系统开辟了新纪元。

3) 可编程控制器(PLC)

随着数控技术和微型计算机的发展，出现了具有运算功能和较大功率输出能力的 PLC，用它代替大量的继电器，可使硬件软件化。PLC 技术是以硬接线的继电器接触控制为基础的，是继电器常规控制技术与微型计算机技术相结合的产物。它逐步发展为既有逻辑控制、计时、计数，又有运算、数据处理、模拟量调节、联网通信等功能控制装置。PLC 实际上是一台按开关量输入的工业控制用微型计算机。用它来替代继电器-接触器控制系统，提高了系统的可靠性和柔性，使控制技术产生了一个质的飞跃。20 世纪 90 年代的大型 PLC 已

发展成不仅具有开关型逻辑控制、定时/计数、逻辑运算功能，还具有处理模拟量的 I/O、数字运算功能、通信功能，可构成分布式控制系统的控制器。因此，PLC 的应用越来越普及，越来越广泛。

PLC 可以通过数字量或者模拟量的输入和输出，满足各种类型生产机械控制的需要。PLC 及有关外部设备，都按照既易于与工业控制系统联成一体，又易于扩充其功能的原则设计。PLC 将成为包括机床在内的机械设备中开关量控制的主要电气控制装置。

4) 计算机数字控制系统

1952 年，美国麻省理工学院根据 John T. Prosons 的设想，首先把机械和电子技术结合在一起，制造出了具有信息存储和处理功能的新型机床——数控铣床。当时的计算机是第一代电子计算机，无法装入机床，只能是“灵魂”与“躯体”分家的数控机床。1958 年，Kerneg 公司和 Trecker 公司研制出了带有自动换刀机构的加工中心。1957 年集成触发器诞生，1958 年 RC 移相式振荡器集成电路面世，1964 年小规模集成电路出现，1966 年进入大规模集成电路的阶段，1977 年又跨进超大规模集成电路的新领域。单片机的出现，有力地推动了机电一体化的进程与实用化，真正实现了“灵魂”进入数控机床的“躯体”。

20 世纪 70 年代初，计算机数字控制(CNC)系统被应用于数控机床和加工中心，这不仅提高了自动化程度，而且提高了机床的通用性和加工效率，在生产上得到了广泛的应用。工业机器人的诞生，为实现机械加工全盘自动化创造了物质基础。20 世纪 80 年代以来，出现了由数控机床、工业机器人、自动搬运车等组成的统一由中心计算机控制的机械加工自动线——柔性制造系统(FMS)，它是实现自动化车间和自动化工厂的重要组成部分。机械制造自动化高级阶段是走向设计、制造一体化，即利用计算机辅助设计(CAD)与计算机辅助制造(CAM)形成产品设计和制造过程的完整系统，从产品构思和设计直至装配、试验和质量管理这一全过程实现自动化。为了实现制造过程的高效率、高柔性、高质量，研制计算机集成生产系统(CIMS)是人们今后的任务。

3. 课程的性质和任务

“机床电气控制技术”课程是机械设计制造及自动化专业、机械电子工程专业的一门必修的专业基础课，它是机电一体化人才知识结构的基础。

由于电力拖动控制装置和机床是一个不可分割的整体，所以“机床电气控制技术”课程的任务是使学生了解电力拖动的一般知识；熟悉电动机、低压电器的工作原理、特性、应用和选用方法；掌握机床电气原理图的读图方法，能够在生产现场分析和排除机床电气故障；掌握 PLC 用户程序的编程方法及其在机床上的应用；掌握常用的开环、闭环控制系统的工作原理、特点、性能及应用场所；了解最新电气控制技术在机床上的应用。

第 1 章 电动机的工作原理及特性

教学提示：本章从直流电动机的结构和工作原理入手，主要讨论他励直流电动机的固有机械特性及人为机械特性、启动特性、制动特性、调速特性。从交流电动机的工作原理和等效电路入手，主要讨论三相异步电动机的机械特性、启动特性、制动特性、调速特性。最后简单介绍了伺服电动机、步进电动机、测速发电机等控制电动机。

教学要求：要求掌握他励直流电动机和三相异步电动机的机械特性，特别是人工机械特性；它们启动、调速和制动的各种方法以及各种方法的优缺点和应用场合。了解异步电动机的基本结构和旋转磁场的产生，了解几种控制电动机的基本工作原理、主要运行特性及特点，以便正确地选用和使用。

1.1 直流电动机的工作原理及特征

直流电动机具有良好的启动性能和调速性能。到目前为止，虽然交流电动机的调速问题已经解决，但是在速度调节要求较高、正反转和启动制动频繁、多单元同步协调运转的机械设备上，仍然采用直流电动机拖动。

1.1.1 直流电动机的结构及工作原理

1. 直流电动机的结构

直流电动机有固定不动的部分和旋转的部分两部分组成，固定部分称为定子(磁极)，旋转部分称为转子(电枢)。其结构简图如图 1.1 所示。在直流电动机中，磁极部分被放在定子上，电枢部分被放在转子上。下面将介绍直流电动机的具体构造。

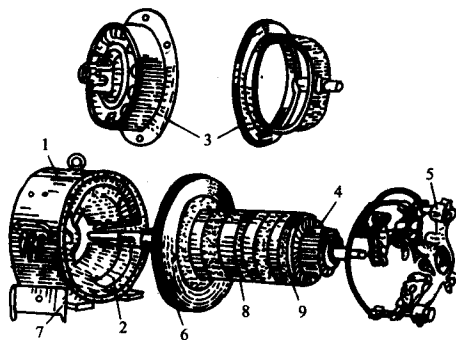


图 1.1 直流电动机结构简图

- 1—机座；2—励磁绕组；3—轴承端盖；4—换向器；5—电刷架；
6—风扇；7—主磁极；8—电枢铁心；9—电枢绕组

1) 定子

定子是电动机固定不动的部分。直流电动机的定子由主磁极、换向磁极、机座和轴承等组成。

(1) 主磁极。磁极是用来在电动机中产生磁场的。它分成极心和极掌两部分。极心上放置励磁绕组，极掌的作用是使电动机空气隙中磁感应强度的分布最为合适，并用来挡住励磁绕组。磁极是用钢片叠成的，固定在机座上。改变励磁电流的方向就可以改变主磁极的极性，也就改变了磁场的方向。

在小型直流电动机中，也有用永久磁铁作为磁极的。

(2) 换向磁极。简称换向极，它是位于主磁极之间的比较小的磁极，主要用于换向。

(3) 机座。用于固定主磁极和换向磁极，也是磁路的一部分。

(4) 轴承。用来支撑转子的转轴。

2) 转子

直流电动机的转子，它包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、风扇等几部分。

(1) 电枢铁心。由硅钢片叠成，表面有许多均匀分布的槽。

(2) 电枢绕组。是由许多线圈按一定的规则连接起来的。绕组安放在电枢铁心槽内，线圈的端部与换向片的楔形铜片相连接。

(3) 换向器。由许多换向片组成，外表呈圆柱形，片与片之间用云母绝缘。

(4) 风扇等。

2. 直流电动机的工作原理

图 1.2 所示为直流电动机最简单的模型，电动机具有一对固定的磁极 N 和 S，通常是电磁铁，在两个磁极 N 和 S 之间，有一个可以转动的圆柱形铁心电枢，在电枢上缠有电枢绕组，为简单起见，假设绕组只有一匝线圈 $abcd$ 。线圈两端分别连在相互绝缘的换向片 A_1 和 A_2 上，换向片组成的圆柱体称为换向器，换向器跟随电枢转动。电刷 B_1 和 B_2 固定不动，紧紧压在换向片上，与外部电路相连。

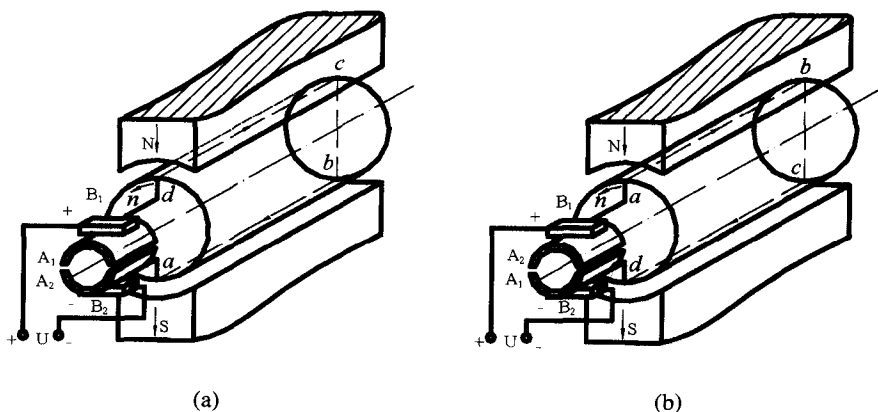


图 1.2 直流电动机工作原理图

直流电动机的工作原理如图 1.2(a)所示，将直流电源接入电刷 B_1 和 B_2 之间，在 N 极下的导体电流方向为 $d \rightarrow c$ ，在 S 极上的导体电流方向为 $b \rightarrow a$ 。对于导体 dc 来说，通电导