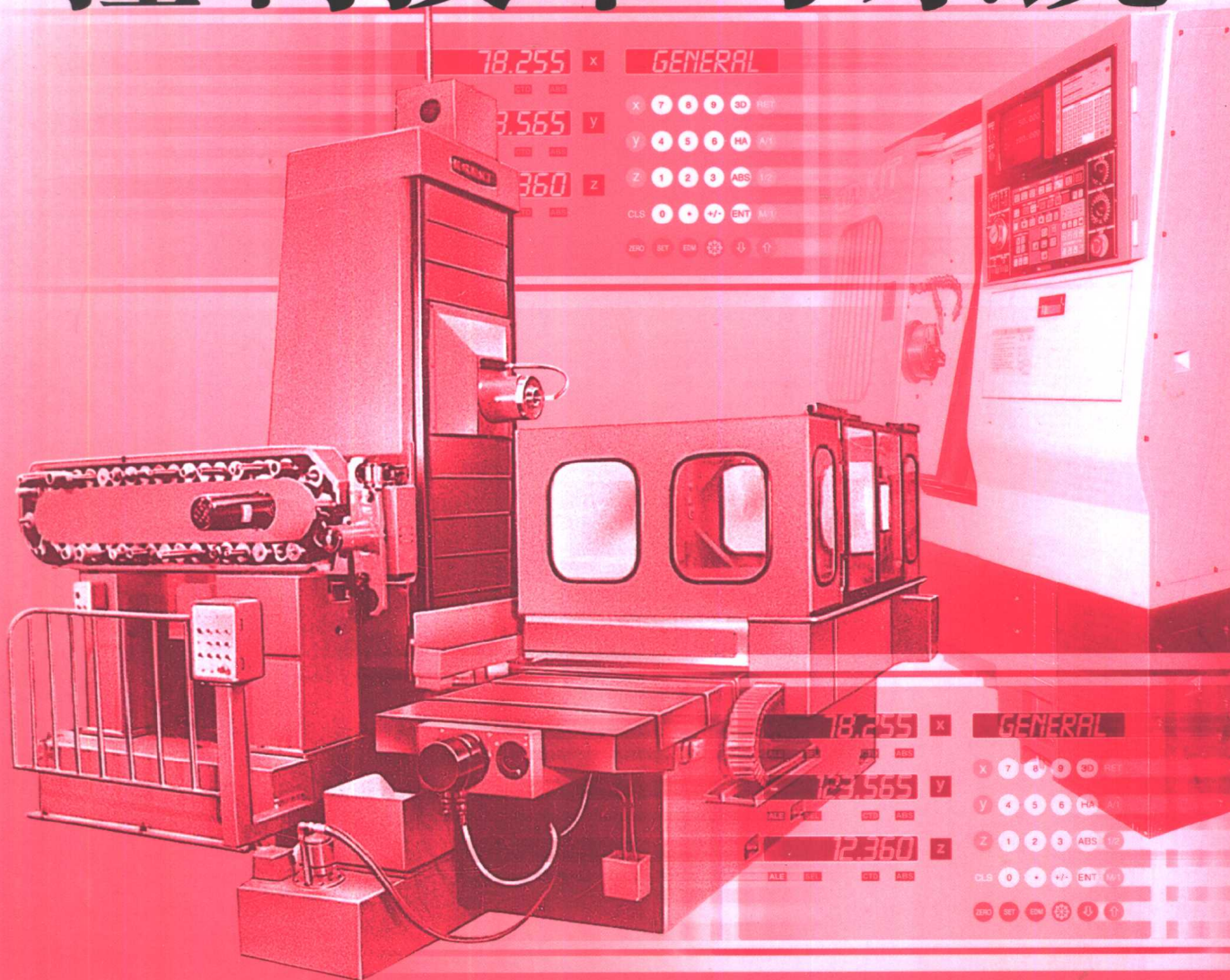


职业技术教育教材

机电一体化——数控机床加工技术专业

数控机床 控制技术与系统



机械工业出版社
China Machine Press

职业技术教育教材

机电一体化——数控机床加工技术专业

数控机床控制技术与系统

上海市职业技术教育课程改革与教材建设委员会 组编



机械工业出版社

本书是职业技术教育数控加工技术规划教材之一。本书系统地介绍了数控机床的基本组成、数控机床位置检测装置、驱动电机、驱动装置、伺服系统及参数、数控系统组成、典型数控系统介绍、数控机床的 PLC 及应用、柔性制造系统等方面的基础知识,并提供应用实例,便于读者将所学知识综合化,且具有一定的应用性。

本书内容丰富,层次清晰,重点突出,重视实践技能的培养。在取材上,通过大量实例的介绍,理论联系实际,兼顾新技术、新知识在该领域中的应用,同时注意了本教材与系列教材的衔接。本书每章均有小结并附有复习思考题。

本书可作为职业技术教育、高职高专及职大数控技术应用专业、机电一体化专业的教材,也可作为从事数控机床工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床控制技术与系统/上海市职业技术教育课程改革与教材建设委员会组编. —北京:机械工业出版社, 2001.9

职业技术教育教材. 机电一体化——数控机床加工技术专业

ISBN 7-111-09213-9

I. 数… II. 上… III. 数控机床-控制系统-专业学校-教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 051748 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:吴天培 版式设计:张世琴 责任校对:李汝庚

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·14.75 印张·362 千字

0 001—5 000 册

定价:23.00 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

上海市职业技术教育机械专业 教材编审委员会名单

主 任 夏毓灼

副 主 任 徐韵发 吴志清

委 员 (按姓氏笔画排列)

吉广镜 刘际远 金瑞樑

徐孝远 高奇玲 谢卫华

秘 书 相雅蓉

本书主编 王侃夫

本书参编 刘 军 汪 烨 唐兹民

本书主审 茅祖相

序

我国的现代化建设不但需要高级科学技术专家，而且迫切需要职业技术人才、管理人员和技术工人，而这类人才的培养主要是通过职业技术教育来实现的，所以党和国家非常重视职业技术教育的改革和发展。努力培养出各行各业所需的职业人才，是社会、经济发展对职业技术教育提出的迫切要求。我国的职业技术教育长期实行的是“学科本位”的教学模式，这种模式重理论轻实践，重知识轻技能，培养出的学生不适应社会、经济发展的要求。因此，职业技术教育要深化改革，办出特色，为社会培养出既有理论又有技能，德、智、体全面发展的一代新人。

职业技术教育要办出自己的特色，关键在于课程改革与教材建设。为此，1996年上海市教委启动了职业技术教育课程改革与教材建设工程（简称“10181”工程），即用5年左右的时间，完成10门普通文化课程的改革及示范教材的编写工作；完成18个典型专业（工种）的课程改革以及同步编写出部分典型示范性教材；经过10年左右的改革实践，基本形成一个具有职教特色的课程结构和教材体系。

这次课程改革与教材建设是以社会和经济发展的需要为出发点，以职业（岗位）需求为直接依据，以现行职业技术教育课程、教材的弊端为突破口，积极学习并借鉴国外职业技术教育课程、教材改革的有益经验，以实现办出职教特色的根本目的。在充分研究和广泛征求意见的基础上，确立了“能力为本位”的改革指导思想。目的是为了克服职教长期存在的重理论轻实践、重知识轻技能的倾向，真正培养出经济和社会发展所需要的职业技术人才。

在各方面的共同努力下，新的教材终于与广大师生见面了。这些新的教材并不是职业技术教育课程改革和教材建设的全部，它只是典型的示范性教材，因为职业技术教育的专业门类繁多，不可能在较短的时间内，依靠少数编写人员解决职教中全部的课程、教材问题。职业技术教育的课程改革和教材建设是一项系统的长期的工作，只有充分发挥广大教师的改革积极性，在教学过程中不断用“能力本位”的教育思想，主动进行课程与教材的改革，我们的课程、教材改革才能全面、持续而深入，才可能真正全面提高教学质量和效益，以不断适应社会、经济发展的需要。

新的教材代表新的思想、新的教法和学法。希望通过这些教材给大家一些启迪，同时也希望大家对新教材提出宝贵的意见。

在课程改革与教材建设过程中，得到了各方面的大力支持，特别是广大编审人员为此付出了辛勤的劳动。在此，向他们表示衷心的感谢！

上海市教育委员会副主任

上海市职业技术教育课程改革与教材建设委员会主任

薛喜民

前 言

“机电一体化——数控机床加工技术专业”教材，全套共14本，经过5年的努力，终于付梓出版了。这套教材是上海市教委组织的“10181”课程改革和教材建设工程的重要组成部分，也是机械专业课程改革和教材建设的可喜成果。

随着科学技术的高速发展，传统的机械工业呈现出了新的技术发展趋势，进入了智能化领域。机电一体化的迅猛发展和数控机床加工技术在企业的普遍应用，对生产一线操作人员的知识和能力要求越来越高，客观上要求一线操作人员应由经验型向智能型转变。这套新教材正是为顺应这一发展趋势而组织编写的。

近5年来，我们机械专业教材编审委员会为此付出了辛勤的劳动。首先组织了长达半年的调查研究，并且参照加拿大CBE经验，制作了DACOM表，就数控机床加工技术专业职业技术人员的知识、能力要求，在五大行业、72个企业中问卷调查了780人次，从而明确了该专业的知识和能力结构。其次，认真进行了课程改革方案的讨论和研究，确定了机电结合，“以机为主，以电为辅”；在课程安排中“以机为主，突出工艺”、“以电为辅，够用为度”的原则。然后对传统的课程体系进行重组优化，如对陈旧老化的知识予以删除，对烦琐的内容予以简化，对某些课程进行重新组合，针对新知识，特别是新的能力需求，设置了新课程。最后，我们按照教材的编写要求，组织了14个编写组，实施主编负责制。所聘的编写人员都是具有改革创新精神、有丰富教学经验、熟悉专业技术的专业人才；同时聘请了有较高造诣的高校教授任主审。为了确保教材质量，对每本教材的编写提纲都组织有关专家进行了逐一论证，从而保证了这套教材的科学性、针对性、实用性。

在这里，我觉得有必要对本专业的设计作一概要介绍。

专业学习期限：4年。

培养目标是德、智、体、美全面发展，具有相当于高中的文化基础知识，掌握数控机床加工技术的理论和职业技能，面向生产第一线的工艺实施和智能型操作人员。

本专业强调实务能力，学生通过本专业的学习后，可具有中级水平的数控机床操作能力；具有编制中等复杂程度零件数控加工程序的能力；具有数控机床的刀具选用、调整、工件装夹等技能；具有数控机床维护、保养，并能排除简单故障的能力；具有正确解决零件在数控机床加工过程中质量问题的能力。

这套教材能得以顺利出版，无疑是集体智慧的结晶，是团队合作的成果。在此，我要感谢上海市职业技术教育课程改革与教材建设委员会的正确领导和指导；要感谢上海工业系统各行业、企业的支持和通力合作；要感谢为此呕心沥血、伏案疾书的近百名编审人员；最后还要感谢机械工业出版社的同志们。

当今，我们正处在改革的年代，正是这个年代催生了这套具有改革精神、时代特色和专业个性的新教材。愿随着这套教材的教学实施，能造就一批又一批新的职业技术人才，以服务于国家、造福于企业。

上海市职业技术教育机械专业教材编审委员会副主任 徐韵发

编 者 的 话

本书是根据上海市教育委员会职业教育课程改革及示范教材的编写要求,于1998年10月制定通过的编写大纲编写的,是数控加工类专业系列教材之一。

数控机床是机电一体化的典型产品,综合了计算机、自动控制、电机与拖动、电子和电力、自动检测、气液压及精密机械等方面的技术。数控机床的高精度、高效率及高柔性决定了发展数控机床是当前我国机械制造业技术改造的必由之路,是未来工厂自动化的基础。随着数控机床的大量使用,在职业教育数控专业和其他机电专业中普及数控机床控制技术及系统的基础知识就显得尤为重要。同时,通过机床数控技术基础的学习,对提高学生的知识综合能力有很大的帮助。

本书根据编者的实践和教学经验,从数控机床组成这一角度出发,系统地介绍了数控机床控制技术及系统的基础知识。在深度和广度上,一方面注意知识面和知识点的掌握程度;另一方面注意本教材与系列教材中其他课程的衔接,同时兼顾新技术和新知识在机床数控技术中的应用。通过大量实例介绍,强调知识的实际应用,以适应职业教育的教学特点。

本书共分十章,每章均附有小结、复习思考题。第一章介绍了数控机床控制系统的基本组成及控制原理;第二章介绍了数控机床常用位置检测装置的种类、作用、安装及信号形式;第三、四章介绍了数控机床中主轴及进给驱动电机的种类及相应驱动装置的控制方式;第五章综合了第二、三和四章的基础知识,突出数控机床位置控制的实质及数控机床运行、调试中所涉及到的一些基本参数;第六、七章介绍了数控系统软、硬件的基本组成及功能,典型数控系统的组成和控制特点;第八章介绍了数控机床开关量控制及可编程控制器(PLC)在数控机床中的应用;第九章介绍了以数控机床为基础的柔性制造系统(FMS)的物流、信息流及质量控制等方面的基本知识;第十章以上述内容为基础,通过具体工程实例,突出数控机床控制技术及系统的综合应用,具有一定的实践性和操作性。

本教材参考学时范围为90~96课时,有关章节内容可根据专业要求及学时情况酌情调整。本教材在使用过程中应注意以下几方面的问题:

1) 由于本课程涉及的知识面较广,因此,对有关问题的阐述应从整体上加以考虑,注意数控机床控制系统各部分之间的联系;信号的输入、输出,信号性质及信号的处理方式。同时,本着“够用”、“必需”的原则,根据实际情况,突出重点,注意知识点和知识面的结合。

2) 本教材在编写过程中,适当将有关知识点的介绍放入习题中,因此,在做这类习题时,应注意背景资料的介绍。

3) 教材的内容组织是以数控机床组成为依据的,编写第十章的目的就是要将有关章节内容综合起来,因此,第十章的内容既可在最后学习时参考,也可穿插在有关章节中作为参考。

本书可作为职业技术教育、高职高专及职大数控技术应用专业、机电一体化专业的教材,也可作为从事数控机床的工程技术人员参考书。

本书由王侃夫（第一、二、三、四、五章和第十章第一节），刘军（第六、七章和第十章第二节），汪焯（第八章），唐兹民（第九章）编写。王侃夫任主编，茅祖相任主审。

本书在编写过程中得到了以下单位的大力支持和帮助：上海开通数控有限公司、中国纺织机械股份有限公司上海第一纺织机械厂、上海重型机床厂、上海汽轮机有限公司、上海重型机器厂、上海第二机床厂、上海第四机床厂、上海三菱电梯有限公司和上海日立电动工具有限公司等。上海电机技术高等专科学校的机床数控实验室、CAD/CAM 实训基地为本书中的有关数据进行了验证，该校杨卫平老师为本书提供了有关资料并提出了很多宝贵意见，编者在此一并致谢。

限于编者的水平，书中定有许多错误与不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

序	
前言	
编者的话	
第一章 概论	1
第一节 数控机床控制系统的构成	1
第二节 数控机床的分类	5
第三节 现代数控技术及发展	6
复习思考题	9
第二章 位置检测装置	10
第一节 概述	10
第二节 旋转编码器	10
第三节 光栅尺	15
第四节 旋转变压器和感应同步器	18
第五节 磁栅	22
复习思考题	24
第三章 驱动电机	25
第一节 步进电动机	25
第二节 伺服电动机	28
第三节 主轴电动机	31
复习思考题	32
第四章 驱动装置	34
第一节 概述	34
第二节 步进驱动装置	35
第三节 晶闸管直流驱动装置	39
第四节 晶体管直流脉宽调制驱动装置	47
第五节 交流异步电动机驱动装置	52
第六节 交流伺服电动机驱动装置	63
复习思考题	67
第五章 数控机床伺服系统	68
第一节 概述	68
第二节 位置控制	69
第三节 主轴定向控制	79
第四节 伺服系统性能及参数	81
第五节 全数字式伺服系统	88
复习思考题	90
第六章 数控系统的组成	92
第一节 经济型数控系统	92
第二节 标准型数控系统	96
第三节 数控系统中的通信接口	105
复习思考题	107
第七章 典型数控系统介绍	109
第一节 FANUC 数控系统	109
第二节 SIEMENS 数控系统	114
第三节 其他数控系统介绍	125
第四节 开放式数控系统	127
复习思考题	132
第八章 数控机床的可编程控制器	133
第一节 概述	133
第二节 数控机床 PLC	139
第三节 FANUC PLC 指令系统	145
第四节 PLC 在数控机床控制中的应用	154
第五节 SIMATIC S5 系列可编程 控制器简介	162
第六节 PLC 位置控制	170
复习思考题	173
第九章 柔性制造系统	178
第一节 概述	178
第二节 FMS 中的物流	181
第三节 FMS 中的信息流	189
第四节 FMS 中的质量控制	198
第五节 FMS 实例	203
第六节 计算机集成制造系统	206
复习思考题	207
第十章 数控机床控制技术应用实例	208
第一节 车床数控改造	208
第二节 XH714 立式加工中心电气 控制	215
复习思考题	225
参考文献	226

第一章 概 论

随着科学技术和社会生产的不断发展，机械制造技术有了深刻的变化。由于社会对产品多样化的需求更加强烈，多品种、中小批量生产的比重明显增加，采用传统的普通加工设备已难于适应高效率、高质量、多样化的加工要求。机床数控技术的应用，一方面促使机械加工的大量前期准备工作与机械加工过程连为一体；另一方面，促使机械加工的全过程与柔性自动化水平不断提高，即提高了制造系统适应各种生产条件变化的能力。数控技术同时又是柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）的技术基础之一，是机电一体化的重要组成部分。

第一节 数控机床控制系统的构成

一、数控机床的组成

数字控制（Numerical Control，简称 NC）技术是用数字化信息进行控制的自动控制技术，采用数控技术控制的机床，或者说装备了数控系统的机床，称之为数控机床。数控机床是机电一体化的典型产品，是集机床、计算机、电机及拖动、自动控制、检测等技术为一体的自动化设备。现代数控系统都为计算机数控系统（Computer Numerical Control，简称 CNC）。

数控机床的基本组成包括加工程序、输入装置、数控系统、伺服系统、辅助控制装置、反馈系统及机床本体，如图 1-1 所示。

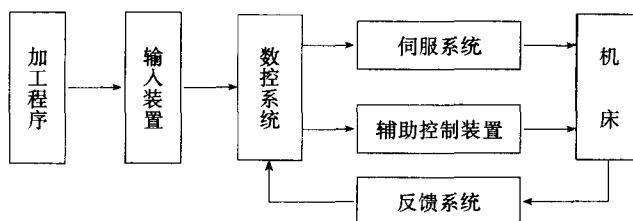


图 1-1 数控机床的基本组成

图 1-2a 所示为卧式车床的传动系统图，图 1-2b 为数控车床的传动系统，图 1-3 为数控机床电气控制柜示意图，图 1-4 为数控车床外观图。

从图 1-2a 和图 1-2b 中可以看出，数控机床的传动链简单明了，主传动和进给运动分工明确，分别由主轴电动机和进给电动机来驱动。在图 1-4 中，主轴卡盘的松紧和尾座顶尖的伸缩由脚踏开关通过数控系统中的 PLC 来控制液压系统的执行元件，如液压缸等，回转刀架的选刀经 M 指令和 T 指令同样由数控系统中的 PLC 功能指令来完成。

二、数控机床基本工作原理及控制对象

数控机床进行加工，首先必须将工件的几何数据和工艺数据按规定的代码和格式编制成数控加工程序，并用适当的方法将加工程序输入数控系统。数控系统对输入的加工程序进行

数据处理, 输出各种信息和指令, 控制机床各部分按规定有序地动作。这些信息和指令最基本的包括: 各坐标轴的进给速度、进给方向和进给位移量, 各状态控制的 I/O 信号等。伺服系统的作用就是将进给位移量等信息转换成机床的进给运动, 数控系统要求伺服系统正确、快速地跟随控制信息, 执行机械运动, 同时, 位置反馈系统将机械运动的实际位移信息反馈至数控系统, 以保证位置控制精度。

总之, 数控机床的运行在数控系统的控制下, 处于不断地计算、输出、反馈等控制过程中, 从而保证刀具和工件之间相对位置的准确性。与其他加工方法相比, 数控机床有以下优点:

1) 数控系统取代了普通机床的手工操纵, 具有充分的柔性, 只要编制成零件程序就能加工出零件。

2) 零件加工精度一致性好, 避免了普通机床加工时人为因素的影响。

3) 生产周期较短, 特别适合小批量、单件的加工。

4) 可加工复杂形状的零件, 如二维轮廓或三维轮廓加工。

5) 易于调整机床, 与其他制造方法(如自动机床、自动生产线)相比, 所需调整时间较少。

从数控机床最终要完成的任务看, 主要有以下三个方面内容:

1. 主轴运动 和普通机床一样, 主运动主要完成切削任务, 其动力约占整台机床动力的 70%~80%。基本控制是主轴的正、反转和停止, 可自动换档及无级调速; 对加工中心和有些数控车床还必须具有定向控制和 C 轴控制。

2. 进给运动 这是数控机床区别于普通机床最根本的地方, 即用电气驱动替代了机械驱动, 数控机床的进给运动是由进给伺服系统完成的。伺服系统包括伺服驱动装置、伺服电动机、进给传动链及位置检测装置, 如图 1-5 所示。

伺服控制的最终目的就是机床工作台或刀具的位置控制, 伺服系统中所采取的一切措施, 都是为了保证进给运动的位置精度。如对机械传动链进行预紧和反向间隙调整; 采用高精度的位置检测装置; 采用高性能的伺服驱动装置和伺服电动机, 提高数控系统的运算速度等。

3. 输入/输出 (I/O) 数控系统对加工程序处理后输出的控制信号除了对进给运动轨迹进行连续控制外, 还要对机床的各种状态进行控制, 这些状态包括主轴的变速控制, 主轴

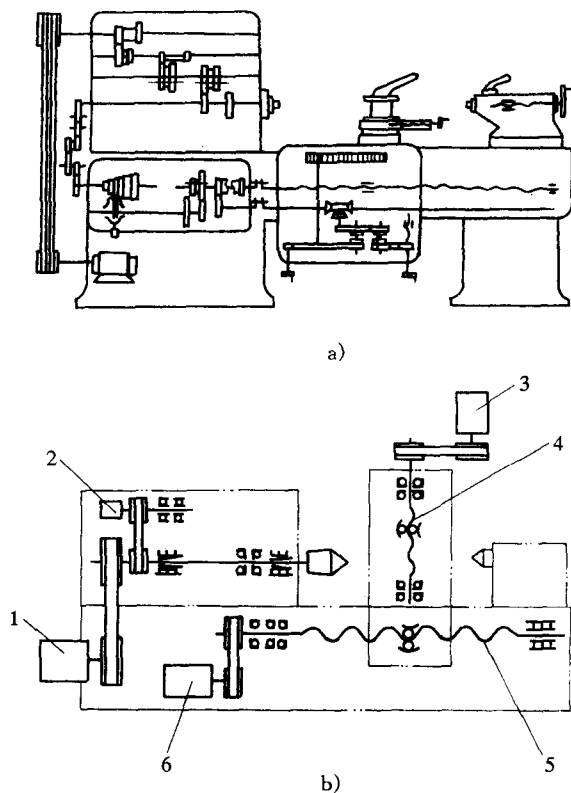


图 1-2 卧式车床和数控车床传动示意图

a) 卧式车床 b) 数控车床

- 1—主轴电动机 2—主轴编码器 3—X 轴进给电动机
4—X 轴滚珠丝杠螺母副 5—Z 轴滚珠丝杠螺母副
6—Z 轴进给电动机

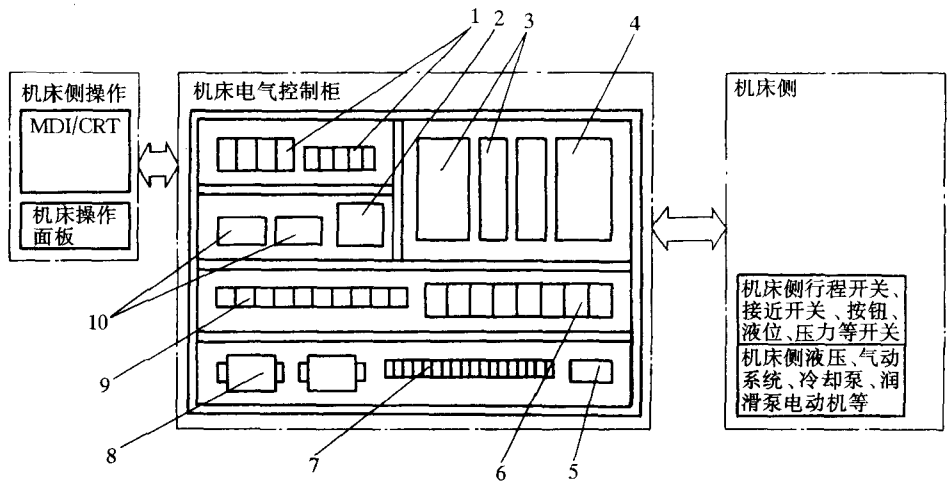


图 1-3 数控车床电气控制柜示意图

- 1—熔断器及断路器 2—开关电源 3—主轴及进给驱动装置 4—CNC 装置 5—接地排
6—接触器 7—接线排 8—机床控制变压器 9—中间继电器
10—输入输出（I/O）端子排

的正、反转及停止，冷却和润滑装置的起动和停止，刀具自动交换，工件夹紧和放松及分度工作台转位等。例如，通过对机床程序中的 M 指令、机床操作面板上的控制开关及分布在机床各部位的行程开关、接近开关、压力开关等输入元件的检测，由数控系统内的可编程控制器（PLC）进行逻辑运算，输出控制信号驱动中间继电器、接触器、电磁阀及电磁制动器输出元件，对冷却泵、润滑泵、液压系统和气动系统进行控制。

根据国际标准《ISO4336—1981（E）机床数字控制——数控装置和数控机床电气设备之间的接口规范》的规定，接口分为四类。图 1-6 所示为数控装置、数控设备和机床间的连接关系。

第Ⅰ类：与驱动命令有关的连接电路，主要是指与坐标轴进给驱动和主轴驱动的连接电路。

第Ⅱ类：数控装置与测量系统和测量传感器之间的连接电路。

第Ⅲ类：电源及保护电路。

第Ⅳ类：开/关信号和代码信号连接电路。

第Ⅰ类和第Ⅱ类接口传送的信息是数控装置与伺服驱动单元、伺服电动机、位置检测和速度检测之间的控制信息及

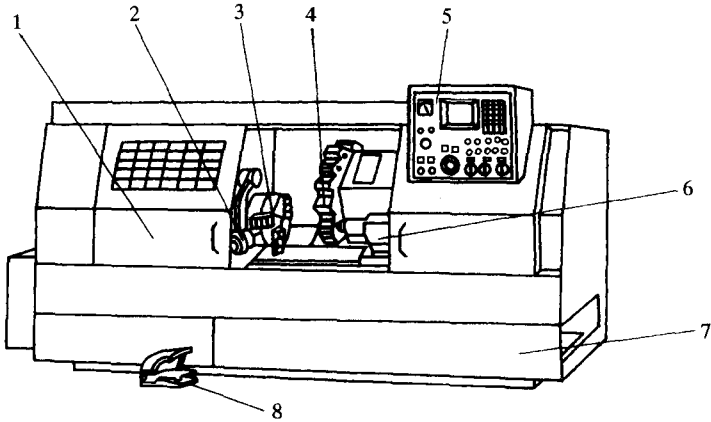


图 1-4 数控车床外观示意图

- 1—机床防护门 2—对刀仪 3—主轴卡盘 4—回转刀架
5—手动数据输入/显示终端（MDI/CRT）
6—尾座 7—床身 8—脚踏开关

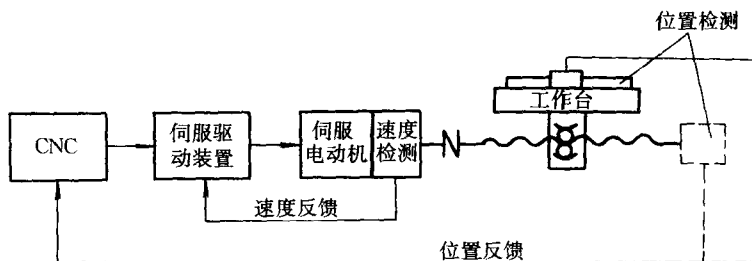


图 1-5 数控机床的进给伺服系统

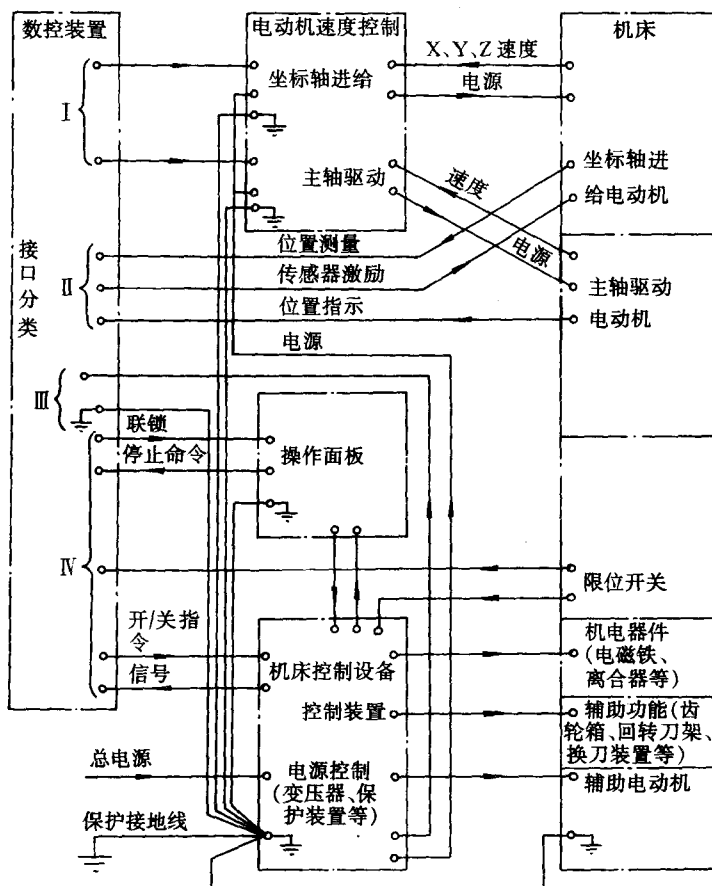


图 1-6 数控装置、数控设备和机床间的连接

反馈信息，它们属于数字控制及伺服控制。

第Ⅲ类电源及保护电路由数控机床强电线路中的电源控制电路构成。强电线路由电源变压器、控制变压器、各种断路器、保护开关、接触器、熔断器等连接而成，以便为辅助交流电动机（如冷却泵电动机、润滑油泵电动机等）、电磁铁、离合器、电磁阀等功率执行元件供电。强电线路不能与低压下工作的控制电路或弱电线路直接连接，只有通过断路器、中间继电器等器件，转换成在直流低电压下工作的触点的开合动作，才能成为继电器逻辑电路和

PLC 可接收的电信号,反之亦然。

第Ⅳ类开/关信号和代码信号是数控装置与外部传送的输入、输出控制信号。当数控机床不带 PLC 时,这些信号直接在数控装置和机床间传送。当数控装置带有 PLC 时,这些信号除极少数的高速信号外,均通过 PLC 传送。

第二节 数控机床的分类

一、按用途分类

1. 金属切削类数控机床 金属切削类数控机床有数控车床、数控铣床、数控钻床、数控镗床、数控磨床、数控镗铣床等。

加工中心 MC (Machine Center) 是带有刀库和自动换刀装置的数控机床。它将数控铣床、数控镗床、数控钻床的功能组合在一起,工件在一次装夹后,可对其进行铣、镗、钻、扩、铰及攻螺纹等多工序加工,主要用来加工箱体类零件。近年来又出现了许多车削加工中心,几乎可以完成回转体零件的所有加工工序,车削加工中心除了基本的 X、Z 轴外,还有回转轴 C 轴和附带的 Y 轴。加工中心实现了一次装夹,一机多工序的加工方式,有效地避免了零件多次装夹造成的定位误差,大大提高了加工精度、生产效率和自动化程度,是实现柔性制造系统 (FMS) 的必要装备之一。

2. 金属成型类数控机床 金属成型类数控机床有数控折弯机、数控弯管机和数控压力机等。

3. 数控特种加工机床 数控特种加工机床有数控线切割机、数控电火花加工机床、数控激光加工机床等。

二、按运动方式分类

1. 点位控制系统 点位控制系统的特点是刀具或工作台只能实现从一个位置到另一个位置的精确移动,在移动和定位过程中不进行任何加工,数控系统只需控制行程终点的坐标值。为了尽可能地减少移动部件的运动和定位时间,一般先快速移动到终点坐标附近,然后再减速移动到定位点,以保证良好的定位精度。使用这类控制系统的数控机床主要有数控镗床、数控钻床、数控冲床及数控弯管机等。图 1-7a 所示为数控钻床点位控制加工示意图。

2. 点位直线控制系统 点位直线控制系统的特点是刀具或工作台不但能实现从一个位置到另一个位置的精确移动,而且能实现平行于坐标轴的直线加工运动或沿与坐标轴成 45°

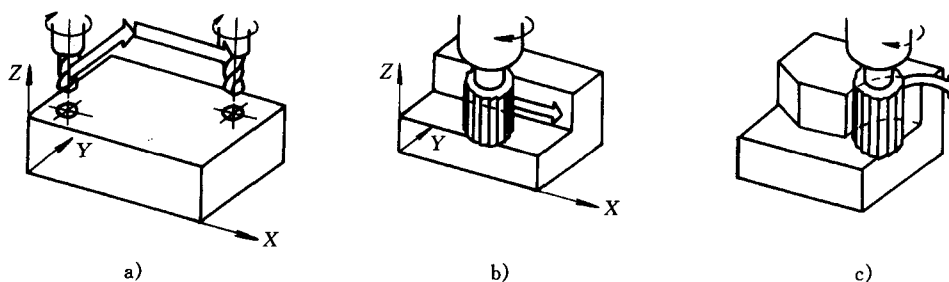


图 1-7 数控机床的运动方式

a) 点位控制 b) 点位直线控制 c) 轮廓控制

斜线进行直线切削加工,但不能沿任意斜率的直线进行加工。应用这类控制系统的数控机床有数控车床、数控镗铣床和加工中心等。图 1-7b 为点位直线控制示意图。

3. 轮廓控制系统 轮廓控制系统也称连续控制系统,其特点是数控系统能够对两个或两个以上的坐标轴同时进行连续控制,在加工中,需要不断进行插补运算,然后进行相应的速度和位移控制,将工件加工成一定的轮廓形状。应用这类控制系统的数控机床有功能完善的数控车床、数控铣床、数控磨床、数控火焰切割机及数控线切割机等。图 1-7c 为数控铣床轮廓加工示意图。轮廓控制系统可兼容点位直线控制系统和点位控制系统。

三、按控制方式分类

1. 闭环控制系统 闭环控制系统是在机床移动部件,如工作台上直接装有直线位置检测装置,将检测到的实际位置反馈到数控系统中,与系统中的位置指令值进行比较,用比较后的差值控制移动部件移动,直到差值消除时才停止移动。图 1-5 中用实线表示的位置反馈即组成闭环控制系统。位置检测的装置有光栅、感应同步器和磁栅等。

由于闭环系统的位置检测包含了进给传动链的全部误差。如滚珠丝杠螺母副、导轨副的间隙等,因而可达到很高的控制精度,定位精度可在 $\pm 0.001\text{mm}$ 以内;另外,由于位置检测反馈过程中包含的各种不稳定因素较多,因此调试工作较困难,若各种参数匹配不适当,会引起系统振荡,造成机床工作不稳定。

2. 半闭环控制系统 半闭环控制系统可参见图 1-5 中用虚线表示的位置反馈。半闭环控制系统是在伺服电动机上同轴安装,或在滚珠丝杠轴端安装有角位移检测装置,通过测量角位移间接地测量出移动部件的直线位移,然后反馈至数控系统中,控制方式同闭环控制系统。能实现角位移检测的装置有光电编码器、旋转变压器等。

由于在半闭环控制系统中,进给传动链的滚珠丝杠螺母副、导轨副的误差不全部包括在位置反馈内,所以传动机构的误差仍然会影响到移动部件的位置精度,但因为反馈过程中不稳定因素的减少,因此调试较方便,稳定性好,目前应用比较广泛。至于传动链误差,如反向间隙、丝杠螺距累积误差可通过数控系统的参数设置来进行补偿,以提高机床的定位精度。

3. 开环控制系统 开环控制系统是指不带位置反馈的控制系统。这种系统通常使用步进电动机作为执行元件。由于没有位置反馈,进给传动链的误差不能进行校正补偿,所以控制精度较低,位置精度通常为 $\pm 0.01 \sim \pm 0.02\text{mm}$ 。但开环系统结构简单、运行平稳、成本低、使用维修方便,可应用于精度要求不高的经济型数控系统中(参见图 10-1)。

第三节 现代数控技术及发展

一、从 NC 到 CNC

数控系统实质上是一台专门用于机床信息处理的计算机。20 世纪五六十年代的通用计算机在处理速度和结构上满足不了机床加工的要求,不得不用电子元件来构成专门的逻辑部件,组成专用计算机来实现机床加工的要求,故称之为 Hard-Wired NC (硬线连接数控),一般简称为 NC。到 60 年代后期,小型计算机走向成熟并被引入数控,从此 NC 进化为 CNC,NC 部分功能开始改由软件来实现。到 70 年代初,由于微电子技术的发展,由大规模集成电路构成的微处理器引入数控并取代了小型计算机。但由于当时 CPU 的位数少,速度低(4 位、8 位,到 70 年代末才有 16 位,时钟频率 16 位也只有 4.77M),数控系统一些

实时性很强的功能，如插补运算、位置控制等不得不仍旧依靠硬件来实现，故当时硬件品质的高低，就决定了 CNC 品质的高低，进入 80 年代中期及以后，由于微电子技术的飞跃发展，数控系统在高速化、多功能化、智能化、高精度化和高可靠性等方面得到了提高。现在所说的 CNC 系统实际上就是微机数控系统（MNC）。CNC 系统从价格、功能、使用等综合性指标考虑有标准型数控系统和经济型数控系统。标准型数控系统也称全功能数控系统，功能齐全，控制精度和运行精度都比较高，基本上都是闭环或半闭环控制系统；经济型数控系统功能比较简单，在我国，经济型数控通常和步进驱动组成开环控制系统。

随着微机技术的发展，用通用微机技术开发数控系统可以得到强有力的硬件和软件支持，这些软件和硬件技术是开放式的，此时的通用微机除了具备本身的功能外，还具备了全功能数控系统的所有功能，这是一条发展数控技术的途径。当前全功能数控系统的特点有：

1. 选用高速微处理器 微处理器是现代数控系统的核心部件，担负着运算、存储和控制等多重任务。其位数和运行速度直接关系到加工效率和加工精度。高速 32 位微处理器的采用，使得数控系统的输入、译码、计算和输出等环节都在高速下进行，同时提高了多轴联动、进给速度和分辨力等指标。现代数控系统控制轴数为 3~15 轴，有的多达 20~24 轴，同时控制轴数（联动）为 3~6 轴。快速进给速度及切削进给速度已达到 100m/min（1 μ m 分辨力）和 24m/min（0.1 μ m 分辨力）。

2. 配置高速、功能强的可编程序控制器（PLC） 数控系统除了对位置进行信息控制外，还要对 I/O 状态量进行控制，数控系统中高速和强功能的可编程控制器能满足数控机床这方面的需要。同时，PLC 输入/输出点数和 PLC 容量的增加可满足直接数字控制系统（DNC）和柔性制造单元（FMC）的控制要求。

3. CRT 图形显示、人机对话功能及自诊断功能 大多数现代数控系统采用 CRT 与手动键盘配合，实现程序的输入、编辑、修改和删除等功能，具有前台操作、后台编辑的功能及用户宏程序等；可以有二维图形轨迹显示，有的还可实现三维彩色动态图形的显示。由于采用菜单选择操作方式，操作简单明了。系统具有硬件、软件及机床故障的自诊断功能，提高了可维修性。

4. 具有多种监控、检测及补偿功能 为了提高数控机床的效率及加工精度，有些数控机床配置了各种测量装置，如刀具磨损的检测、机床精度及热变形的检测等，与之相适应，数控系统则具有刀具寿命管理、刀具参数补偿、反向间隙及丝杠螺距误差补偿、热变形补偿等功能。

5. CNC 的智能化 在现代数控系统中，引进了自适应控制技术。数控系统能检测对机床本身有影响的信息，并自动连续调整有关参数，以达到系统运行的最优化。如测量工件状态、调整刀具切削用量、进行尺寸控制，以满足加工精度及表面粗糙度的要求等。在有的 CNC 系统中，还建立了切削率的数据库及切削用量的专家系统等。大多数现代数控系统都具有学习及示教功能。

6. 通信功能 一般数控系统都有简单的通信功能，如采用 RS-232C 串行接口与编程机、微机等外设通信。现代数控系统还要与其他数控系统或者上级计算机通信，所以除了 RS-232C 接口外，还有 RS-422 和 DNC（直接数控）等多种通信接口。数控系统要单机进入柔性制造系统（FMS）进而形成计算机集成制造系统（CIMS），就要求数控系统具有更高的通信功能，为此，有的数控系统开发了符合 ISO 开放系统互联七层网络模型的通信规约，如

MAP (制造自动化协议), 为自动化技术发展创造了条件。

7. 标准化、通用化和模块化 现代数控系统的性能越来越完善, 功能越来越多样, 促使数控系统的硬件和软件结构实现标准化, 通用化和模块化。选择不同的标准化模块可组成各种数控机床的控制系统, 能方便地移植计算机行业或自动化领域的成果, 也便于现有的数控系统进一步扩展及升级。

8. 开放性 基于 PC 的开放式数控系统已成为数控技术发展的重要方向, 通过制定必要的技术规范, 在通用 PC 机的基础上, 一方面使硬件的体系结构和功能模块具有兼容性; 另一方面使软件、接口等技术规范化和标准化, 为机床制造厂或用户提供一个良好的开放性和开发环境。

9. 高可靠性 这是一项硬指标, 现代数控系统的平均无故障时间 (MIBF) 已达到 30000h 以上。数控系统与微机只是专用机和通用机及生产批量大小的区别, 其制造过程, 包括元器件筛选、印制电路板、焊接和贴附、生产过程及最终产品的检测和出厂前整机的考机等措施保证了数控系统有很高的可靠性。

二、数控伺服系统的发展

伺服系统是数控系统的重要组成部分, 伺服系统的静态和动态性能直接影响数控机床的定位精度、加工精度和位移速度。当前伺服系统的发展趋势是:

1. 全数字式控制系统 伺服系统传统的位置控制是将位置控制信号反馈至数控系统, 与位置指令比较后输出速度控制模拟信号至伺服驱动装置, 而全数字式数控系统的位置比较是在伺服驱动装置中完成的, 数控系统仅输出位置指令的数字信号至伺服驱动装置。

另外, 直流伺服系统逐渐被交流数字伺服系统所代替。在全数字式控制系统中, 位置环、速度环和电流环等参数均实现了数字化, 实现了几乎不受负载变化影响的高速响应的伺服系统。

2. 采用高分辨力的位置检测装置 现代数控机床的位置检测大多采用高分辨力的光栅和光电编码器, 必要时采用细分电路, 进一步提高分辨力。

3. 软件补偿 现代数控机床利用数控系统的补偿功能, 通过参数设置对伺服系统进行多种补偿, 如位置环增益、轴向运动误差补偿、反向间隙补偿及丝杠螺距累积误差补偿等。

4. 前馈控制 传统的伺服系统是将指令位置和实际位置的偏差乘以位置环增益作为速度指令, 经伺服驱动装置拖动伺服电动机, 这种方式总是存在着位置跟踪滞后误差, 使得在加工拐角及圆弧时加工情况恶化。通过前馈控制, 使跟踪滞后误差大为减小, 提高了位置控制精度。

5. 机械静、动摩擦的非线性控制技术 机床的动、静摩擦的非线性会导致爬行现象。除采取降低静摩擦的措施外, 新型的伺服系统还具有自动补偿机械系统静、动摩擦非线性的控制功能。

三、以数控机床为基础的自动化生产系统

加工中心、网络控制技术、信息技术的发展, 为单机数控向计算机控制的多机控制系统发展创造了必要的条件。已经出现的计算机直接数控系统 (DNC)、柔性制造系统 (FMS) 及计算机集成制造系统 (CIMS), 就是以数控机床为基础的自动化生产系统。

1. 计算机直接数控系统 (DNC) 计算机直接数控系统就是用一台中央计算机直接控制和管理一群数控设备进行零件加工或装配的系统, 因此, 也称它为计算机群控系统。在 DNC 系统中, 各台数控机床都各自有独立的数控系统, 并与中央计算机组成计算机网络,