



高等职业教育“十一五”规划教材
高职高专机电类教材系列

崔州平 刘海星 郭成操 / 主 编
陈传伟 / 主 审

数控机床

原理



科学出版社

www.sciencep.com

• 高等职业教育“十一五”规划教材

高职高专机电类教材系列

数控机床原理

崔州平 刘海星 郭成操 主编
陈传伟 主审

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共8章,主要内容有:数控机床的组成、分类及发展;数控机床的基本原理,即插补原理及刀具补偿原理;数控加工的程序编写;计算机数控装置的硬件和软件结构,故障诊断及可编程序控制器在数控系统中的应用;位置检测装置及典型进给伺服系统;数控机床特有的机械传动结构和数控加工中心的刀具交换装置,开放式数控系统和STEP-NC等。

本书可作为高职高专数控机电类相关专业的教材,也可作为有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床原理/崔州平,刘海星,郭成操主编. —北京:科学出版社,2007
高等职业教育“十一五”规划教材·高职高专机电类教材系列
ISBN 978-7-03-019258-5

I. 数… II. ①崔…②刘…③郭… III. 数控机床-高等学校:技术学校-教材 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第094141号

责任编辑:何舒民 张雪梅 / 责任校对:柏连海
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

信浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年7月第一版 开本:787×1092 1/16

2007年7月第一次印刷 印张:14 3/4

印数:1—3 000 字数:330 000

定价:20.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137154(VT03)

高等职业教育“十一五”规划教材

高职高专机电类教材系列

编 委 会

主任 李振格

委员 (按拼音排序)

崔州平	杜巧连	高汉华	黄晓红
蒋勇敏	李传军	李正峰	卢恩贵
卢相中	陆全龙	倪兆荣	盛继生
孙庆群	王宏启	王 军	王淑珍
魏增菊	吴东平	吴水萍	谢旭华
邢江勇	徐起贺	徐晓东	续永刚
于小喜	张洪涛	张晓娟	周宗明

前 言

数控机床是一种高效的自动化机床,它综合了计算机技术、自动化技术、伺服驱动技术、气动与液压传动技术、精密测量与检测技术、精密机械设计与制造技术等各个领域的新技术成果,是一门新兴的工业控制技术。数控机床以其高精度、高效率、高柔性所带来的巨大效益引起了世界各国科技界和工业界的广泛重视。

我国于1958年研制出第一台数控机床,在近50年间,数控机床的设计和制造技术有了很大提高,培养出一批设计、制造、使用和维护的人才;通过合作生产出先进数控机床,缩小了与世界先进技术的差距;利用国外先进元部件、数控系统配套,开始自行设计及制造高速、高性能、五面或五轴联动加工的数控机床,以满足国内市场需求。

随着我国数控机床的大量使用,急需培养一大批能够熟练掌握现代数控机床技术、编程、操作、维修及调试的工程技术人员。为适应高职数控专业及其他机电专业的学习需要,本书从数控机床原理出发,系统介绍了数控机床的基础知识。

本书由崔州平、刘海星、郭成操任主编,董庆华、罗刚、徐辉任副主编,参加编写的人员还有王显涛、江书勇、郑理、滕立国、丁凤琴。

在编写过程中,邱仕安教授、王科锋高级工程师和坎门机床厂张慧坚厂长对本书提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

限于编者水平,书中难免有不妥之处,敬请读者提出指正,不胜感谢。

目 录

前言

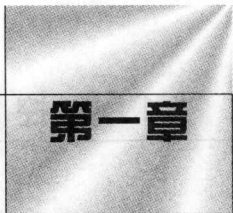
第一章 绪论	1
1.1 数控简介	2
1.1.1 数字控制的基本概念	2
1.1.2 数控机床的组成	3
1.1.3 计算机数控系统的工作过程	5
1.1.4 数控机床加工零件的操作过程	6
1.1.5 数控机床的精度	6
1.2 机床数控系统的分类	7
1.2.1 按机床的运动轨迹分类	7
1.2.2 按伺服系统的控制方式分类	8
1.2.3 按数控系统功能水平分类	10
1.3 数控系统的发展	11
1.3.1 数控系统的发展简史	11
1.3.2 国内外数控系统的发展概况	12
1.3.3 数控系统的发展趋势	14
思考题与习题	17
第二章 数控系统原理	18
2.1 插补原理	19
2.1.1 逐点比较法插补	19
2.1.2 数字积分法插补	25
2.1.3 数据采样插补法	32
2.2 刀具补偿原理	32
2.2.1 刀具长度补偿	33
2.2.2 刀具半径补偿	33
思考题与习题	41
第三章 微机数控装置的结构	42
3.1 概述	43

3.1.1	CNC 装置的工作原理	43
3.1.2	CNC 装置的特点	45
3.2	微型计算机数控系统的组成	47
3.2.1	数控系统硬件综述	48
3.2.2	数控装置硬件结构类型	49
3.3	数控系统的输入/输出接口及通信	54
3.3.1	数控装置的显示功能及其接口	54
3.3.2	数控系统的 I/O 接口	54
3.3.3	数控系统常用串行通信接口标准	55
3.3.4	DNC 通信接口技术	56
3.3.5	数控系统网络通信接口	56
3.4	PLC 在数控系统中的应用	57
3.4.1	内装型 PLC	57
3.4.2	独立型 PLC	58
3.4.3	M、S、T 功能的实现	59
3.4.4	数控机床 PLC 的控制对象	61
3.4.5	PLC 用户控制程序的编程方法	63
3.4.6	PLC 在数控机床中的应用实例	63
3.5	数控系统的软件结构	64
3.5.1	概述	64
3.5.2	零件程序的输入	67
3.5.3	数据处理程序	68
3.5.4	插补软件	69
3.5.5	位置控制软件	70
3.5.6	系统故障诊断软件	70
	思考题与习题	73
第四章	位置检测装置	74
4.1	检测装置的要求与分类	75
4.1.1	增量式和绝对式	75
4.1.2	数字式和模拟式	76
4.2	常用检测元件及电路	77
4.2.1	感应同步器	77
4.2.2	磁栅	81

4.2.3 旋转变压器	85
4.2.4 光栅	87
4.2.5 脉冲编码器	92
4.2.6 双频激光干涉仪	97
思考题与习题	102
第五章 伺服系统	103
5.1 概述	104
5.1.1 伺服系统的概念	104
5.1.2 伺服系统的组成	104
5.1.3 伺服系统的特点和要求	105
5.1.4 伺服系统的分类	107
5.2 步进电动机	111
5.2.1 步进电动机分类	111
5.2.2 反应式步进电动机的结构	112
5.2.3 步进电动机的工作原理	112
5.2.4 步进电动机的主要特性	114
5.2.5 步进电动机的驱动控制	116
5.3 伺服系统的速度和位置控制	117
5.3.1 伺服系统的速度控制	117
5.3.2 伺服系统的位置控制	123
5.4 主轴驱动的速度控制及定向控制	127
5.4.1 直流主轴驱动系统速度控制	127
5.4.2 交流主轴驱动系统速度控制	129
5.4.3 主轴定向控制	130
思考题与习题	134
第六章 数控加工的程序编制	135
6.1 概述	136
6.1.1 数控编程的定义	136
6.1.2 数控编程的步骤	136
6.1.3 数控编程的方法	139
6.2 数控机床的坐标系	140
6.2.1 数控机床的坐标系	141
6.2.2 坐标轴的运动方向及其命令	141

6.2.3	机床坐标系与工件坐标系	143
6.2.4	绝对坐标系与相对坐标系	144
6.3	程序格式	144
6.3.1	程序号	144
6.3.2	程序段的格式	145
6.4	常用数控指令的编程方法	146
6.4.1	准备性工艺指令	146
6.4.2	辅助性工艺指令	150
6.4.3	其他常用功能指令	151
6.5	程序编制中的工艺处理及实例	152
6.5.1	概述	152
6.5.2	数控加工工艺分析	153
6.5.3	数控加工的工艺路线设计	154
6.5.4	数控加工工序设计	156
6.5.5	工艺文件编制	163
	思考题与习题	174
第七章	数控机床机械结构	175
7.1	数控机床结构的特点及基本要求	176
7.1.1	数控机床机械结构的特点	176
7.1.2	数控机床对机械结构的基本要求	177
7.2	数控机床的主传动机构	178
7.2.1	数控机床的主传动形式	178
7.2.2	主轴部件结构	181
7.3	数控机床的进给传动机构	185
7.3.1	滚珠丝杠螺母副	185
7.3.2	进给传动系统的典型结构	189
7.3.3	数控机床的导轨	193
7.4	数控机床的自动换刀机构	196
7.4.1	刀库及选刀方式	196
7.4.2	刀具交换装置	200
7.5	数控机床的辅助装置	205
7.5.1	液压卡盘和尾座	206
7.5.2	回转工作台	207

思考题与习题	209
第八章 开放式数控系统和 STEP-NC 简介	210
8.1 开放式数控系统概述	211
8.1.1 开放式数控系统产生的历史背景	211
8.1.2 开放式数控系统的特征	211
8.1.3 国内外开放式数控系统的发展概况	213
8.2 STEP-NC 概述	216
8.2.1 ISO6983 与 ISO14649 的比较	217
8.2.2 STEP-NC 的数据模型	218
8.2.3 基于 STEP-NC 的数据程序结构	219
8.2.4 STEP-NC 为 CNC 提供的发展空间	219
8.2.5 STEP-NC 编程实例	220
思考题与习题	222
参考文献	223



第一章

绪 论

随着科学技术的飞速发展，生产自动化程度越来越高，产品质量要求越来越高，生产效率要求越来越高，市场竞争越来越激烈。数控技术作为现代制造技术的重要组成部分，在提高产品质量、降低生产成本、缩短生产周期等方面发挥着越来越重要的作用。数控技术广泛应用于机械制造、航空航天、汽车制造、模具制造、船舶制造、轻工纺织、食品医药、国防军工等领域。随着数控技术的不断发展，数控系统正朝着智能化、网络化、集成化方向发展。

◆ 知识点

1. 数控的基本概念。
2. 数控系统的分类及其工作过程。

◆ 要求

- 掌握：**
1. 数字控制的基本概念。
 2. 机床数控系统的分类。

- 了解：**
1. 数控机床的组成及数控系统的工作过程。
 2. 数控系统的发展状况。

1.1.1

1.1.1 数控系统的组成及数控系统的工作过程

数控系统（Numerical Control System, NCS）是指利用数字代码对机床及其他制造设备进行自动控制的一种制造技术。数控系统主要由数控装置、伺服驱动装置、检测反馈装置、机床本体等组成。数控装置接收来自计算机的数控程序，并将其转换为机床能够执行的指令。伺服驱动装置接收数控装置的指令，驱动机床的运动部件。检测反馈装置检测机床的实际位置、速度等信息，并将其反馈给数控装置，以实现闭环控制。机床本体是执行数控指令的机械部分，包括床身、主轴、进给系统等。

数控系统的工作过程如下：首先，将数控程序输入到数控装置中；然后，数控装置对程序进行译码和插补运算，生成机床的运动指令；接着，伺服驱动装置接收指令并驱动机床运动；最后，检测反馈装置检测机床的实际位置，并将信息反馈给数控装置，完成一个加工循环。

1.1 数控简介

科学技术和社会生产的不断发展,对机械产品的质量和生产率提出了越来越高的要求。采用机械加工工艺过程的自动化不仅能够提高产品的质量、提高生产效率、降低生产成本,还能够大大改善工人的劳动条件。

在机械制造业中,单件与小批生产的零件(批量在10~100件)约占机械加工总量的80%以上,尤其是在造船、航天、航空、机床、重型机械等行业以及国防部门,其产品的生产特点是加工批量小、改型频繁、零件的形状复杂而且精度要求高,采用专用化程度很高的自动化机床加工这类零件就显得很不合适,因为生产过程中需要经常改装与调整设备,对于专用生产线来说,这种改装与调整甚至是不可能实现的。近年来,由于市场竞争日趋激烈,为了在竞争中求得生存与发展,就必须频繁地改型,并缩短生产周期,满足市场上不断变化的需要。因此,即使是大批量生产,也改变了产品长期一成不变的做法,频繁地进行新产品开发。

已经使用的各类仿形加工机床部分地解决了小批量、复杂零件的加工,但在更换零件时,必须制造靠模和调整机床,不但要耗费大量的手工劳动,延长了生产准备周期,而且由于靠模误差的影响,加工零件的精度很难达到较高的要求。

为了解决上述这些问题,满足多品种、小批量的自动化生产,迫切需要一种灵活的、通用的、能够适应产品频繁变化的柔性自动化机床。

数字控制(或数控)机床就是在这样的背景下产生与发展起来的,它极其有效地为单件、小批生产的精密复杂零件的生产提供了自动化加工手段。

1.1.1 数字控制的基本概念

数字控制技术简称数控(numerical control,缩写为NC),是以数字或数字代码的形式来实现控制的一门技术,也就是把加工产品的整个过程的全部内容(如几何尺寸、加工顺序、运动规律、辅助功能等)进行代码化的数字处理,并把它记录在控制介质中(如穿孔带、磁带、磁盘、存储器等),加工时将它输入到专用的计算装置或计算机中,经过运算与处理,发出各种控制信号,控制数控设备自动进行加工。当被加工的产品变更时,只要改用另一种描写该产品的控制介质即可,而不需要对加工设备作复杂的调整工作,从而可使生产过程能在人不干预或少干预的情况下自动进行,实现生产过程的自动化。因此,数控技术是一种灵活的、高效性的控制技术。

数字控制是相对模拟量而言的，数字控制系统中的控制信息是数字量，而模拟控制系统中的信息是模拟量。

数字控制与模拟量控制相比有许多优点：可用不同的字长表示不同精度的信息，可对数字化信息进行逻辑运算、数学运算等复杂的信息处理工作，特别是可用软件来改变信息处理的方式或过程，而不用改变电路或机械结构，从而使机械设备具有很大的“柔性”。

数字控制的对象是多种多样的，但数控机床是最早应用数控技术的控制对象，也是最典型的数控化设备。

数控系统与被控机床本体的结合体称为数控机床。机床数控是具有高附加值的技术密集性产品，实现了高度的机电一体化。它集机械制造、计算机、微电子、现代控制及精密测量等多种技术为一体，使传统的机械加工工艺发生了质的变化。这个变化的本质就在于用数控系统实现了加工过程的自动化操作。

1.1.2 数控机床的组成

数控机床通常由以下几部分组成，其结构框图如图 1.1 所示。

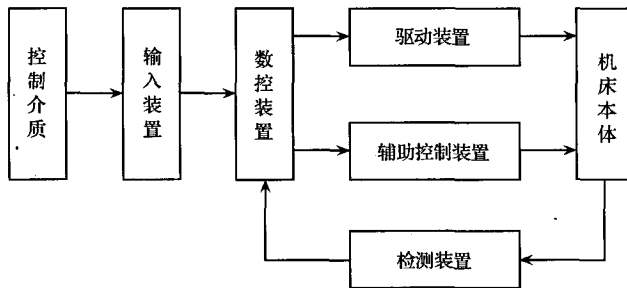


图 1.1 数控机床的基本结构

1. 控制介质

对数控机床进行控制，首先必须在人与机床之间建立某种联系，这种联系的中间媒介物称为控制介质（或称程序载体）。在控制介质上存储着加工零件所需要的全部几何信息和工艺信息。这些信息是在对加工工件进行工艺分析的基础上确定的，它包括工件在机床坐标系内的相对位置、刀具与工件相对运动的坐标参数、工件加工的工艺路线和顺序、主运动和进给运动的工艺参数以及各种辅助操作。然后用标准的由字母、数字和符号构成的代码，按规定的格式编制工件的加工程序单，再按程序单制作穿孔带、磁带等多种控制介质，常用手工直接输入方式将程序输入到数控系统中。编程工

作可以由人工进行，也可以由计算机辅助编程系统完成。

最早使用的程序载体是穿孔带，常用的是八单位标准穿孔带，它可以由各种颜色的纸带、塑料带或金属带制成。

2. 输入装置

输入装置的作用是将程序载体上的数控代码信息转换成相应的电脉冲信号传送到数控装置的内存存储器。输入装置最早使用光电阅读机对穿孔带进行阅读，以后大量使用磁记录原理的磁带机和软盘驱动器。还有通过数控装置控制面板上的输入键，按工件的程序清单用手工方式直接输入内存贮器（即 MDI 方式），也可以用通信方式由计算机直接传送给数控装置。

3. 数控装置

数控装置是数控机床的关键环节。首先接受输入装置送来的电脉冲信号，通过数控装置的逻辑电路或计算机数控的系统软件进行译码和寄存，这些指令和数据将作为控制与运算的原始依据。数控装置的控制单元接受相应的指令将有关数据进行运算和处理，输出各种信号和指令，控制机床各部分按程序的要求实现某一操作。

4. 伺服控制装置和检测装置

伺服控制装置接受来自数控装置的位置控制信息，将其转换成相应坐标轴的进给运动和精确定位运动。由于伺服控制装置是数控机床的最后控制环节，它的伺服精度和动态响应特性将直接影响数控机床的生产率、加工精度和表面加工质量。

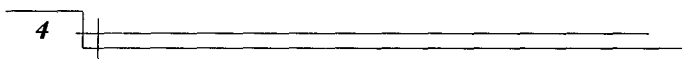
目前，常用的伺服驱动器件有功率步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机等。由于交流伺服电动机具有良好的性能价格比，正成为首选的伺服驱动器件。除了三大类电动机以外，伺服控制装置还必须包括相应的驱动电路。

检测装置将数控机床各坐标轴的实际位移和速度检测出来，经反馈系统输入到机床的数控装置中。数控装置将反馈回来的实际位移和速度与设定值进行比较，控制驱动装置按照指令设定值运动。

伺服电动机与脉冲编码器的组合构成了较理想的半闭环伺服系统，已被广泛采用。

5. 辅助控制装置

辅助控制装置的主要功能是接受数控装置所控制的内置式可编程控制器（PLC）输出的主轴变速、换向、启动或停止、刀具的选择和更换、分度工作台的转位和锁紧、工件的夹紧或松开、切削液的开或关等辅助操作的信号，经功率放大直接驱动相应的



执行元件，诸如接触器、电磁阀等，从而实现数控机床在加工过程中的全部自动操作。

6. 机床本体

机床本体是数控机床的主体，由基础件（如床身、底座）和运动件（如工作台、床鞍、主轴箱等）组成。

与普通机床相比，数控机床本体具有以下特点：

- 1) 采用了高性能主轴部件及传动系统，机械传动结构简单。
- 2) 机械结构具有较高刚度和耐磨性，热变形小。
- 3) 更多地采用了高效传动部件，如滚珠丝杠、静压导轨、滚动导轨等。

另外，不少数控机床还采用了刀库和自动换刀装置以提高机床工作效率。

1.1.3 计算机数控系统的工作过程

计算机数控系统完成程序的输入、译码、数据处理、插补、伺服控制和管理程序等工作。

1. 输入

输入给数控系统的有零件加工程序、控制参数和补偿数据等。

2. 译码

输入的程序段含有零件的轮廓信息（起点、终点、直线还是圆弧等）、要求的加工速度以及其他的辅助信息（换刀、换档、冷却液开关等）。计算机依靠译码程序来识别这些符号，将加工程序翻译成计算机内部能识别的语言。

3. 数据处理

数据处理程序有三个任务，即刀具半径补偿、速度计算和辅助功能的处理。

刀具半径补偿是把零件轮廓轨迹转化为刀具中心轨迹。速度计算是确定该加工数据段以什么样的速度运动。加工速度的确定是一个工艺问题，数控系统仅仅是保证这个编程速度的可靠实现。辅助功能处理是指换刀，主轴启动、停止，冷却液开、停等辅助功能的处理（即 M、S、T 功能的传送及其先后顺序的处理）。

4. 插补

所谓插补就是根据给定的曲线类型（如直线、圆弧或高次曲线）、起点、终点以及速度，在起点和终点之间进行数据点的密化。

计算机数控系统的插补功能主要由软件来实现，目前主要有两类插补方法，一是脉冲增量插补，它的特点是每次插补运算结束产生一个进给脉冲；二是数字增量插补，它的特点是插补运算在每个插补周期进行一次，根据指令进给速度计算出一个微小的直线数据段。

5. 伺服控制

将计算机送出的位置进给脉冲或进给速度指令，经变换和放大后转化为伺服电机（步进电动机或交、直流伺服电机）的转动，从而带动机床工作台移动。

6. 管理程序

当一个数据段开始插补时，管理程序即着手准备下一个数据段的读入、译码、数据处理，即由它调用各个功能子程序，且保证一个数据段加工过程中将下一个程序段推备就绪。一旦本数据段加工完成即开始下一个数据段的插补加工。整个零件加工就是在这种周而复始的过程中完成的。

1.1.4 数控机床加工零件的操作过程

(1) 数控程序的编制

先根据零件图纸的要求设计数控加工工艺过程，如工步、加工路线、切削用量、行程等，再按编程手册的有关规定编制数控加工程序单。

(2) 控制介质的制作与数控加工程序的输入

由加工程序单制作控制介质，如穿孔带、磁带、磁盘等，再将控制介质记录的加工信息通过输入装置输入到数控系统中。

(3) 加工信息的处理与计算和控制指令的发出

当加工程序输入到数控系统后，在控制系统内部的系统程序的支持下，对加工程序进行必要的处理与计算后，发出相应的控制指令。

(4) 控制指令的执行

运动部件按控制指令进行运动，从而实现零件的数控加工。

1.1.5 数控机床的精度

1. 定位精度和重复定位精度

定位精度是指数控机床工作台等移动部件实际运动位置与指令位置的一致程度，其不一致的差量即为定位误差。重复精度是指重复定位时，实际位置落在某一定范围内的精度。

2. 分辨率与脉冲当量

分辨率是指可以分辨的最小位移间隔。对测量系统而言，分辨率是可以测量的最小位移；对控制系统而言，分辨率是可以控制的最小位移增量。

脉冲当量就是单位脉冲下进给伺服系统驱动元件所给的最小位移。

3. 分度精度

分度精度是指分度工作台在分度时实际回转角度与指令回转角度的差值。分度精度既影响零件加工部位在空间的角度位置，也影响孔系加工的同轴度等。

4. 数控机床的加工精度

数控机床的加工精度由系统精度、数控伺服精度和机床精度三者组成。系统精度是指送到伺服系统的实际指令值，指令值的精度取决于数控系统插补算法不同而产生的误差值。零件加工精度不仅在加工过程中形成，而且形成在加工编程阶段。编程阶段的误差是不可避免的。在编程阶段，图纸上的信息转换成数控系统可以接受的形式，这时会产生近似计算误差、插补误差、尺寸圆整误差。伺服精度是指伺服系统的精度。机床精度是指由于机床热变形、受力变形以及振动所引起的各类误差。

1.2 机床数控系统的分类

1.2.1 按机床的运动轨迹分类

1. 点位控制的数控机床

点位控制只要求控制机床的移动部件从一点移动到另一点的准确定位，对于点与点之间的运动轨迹的要求并不严格。在移动过程中不进行加工，各坐标轴之间的运动是不相关的。

为了实现既快又精确的定位，两点间一般以快速移动，然后慢速趋近定位点，以保证定位精度。

具有点位控制功能的机床主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床等。图 1.2 所示为点位控制数控钻床的加工示意图。