

技工学校、职业中专数控机床切削加工专业教材

数控机床编程与操作

主编 李长江

参编 冯小平 陆志宏 黄伟林

主审 周明虎



机械工业出版社

本书是根据原国家机械工业局制定的“机械类技工学校数控机床切削加工专业教学大纲”编写的。全书共五章，前三章概括性地介绍了数控机床的基本组成、工作原理及机床机械结构特点，后两章重点对数控加工工艺、数控编程方法技巧及数控机床的操作进行了分析。需要指出的是，由于数控技术的发展日新月异，加之各单位的教学设备不尽相同，使用本书时可根据各单位的具体情况对教材内容进行适当调整。

本书是技工学校、职业中专数控机床切削加工专业教材，也可作为中级数控机床操作人员技术培训和自学用书。

图书在版编目（CIP）数据

数控机床编程与操作/李长江主编. —北京：机械工业出版社，2001.12

技工学校、职业中专数控机床切削加工专业教材

ISBN 7-111-09475-1

C. 数... I. 李... P. 数控机床—程序设计—专业学校—教材 . . TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 073654 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：崔世荣 版式设计：张世琴 责任校对：李汝庚

封面设计：鞠 杨 责任印制：

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

890mm×1240mm A5·5.75 印张·166 千字

0 001— 册

定价： 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

前 言

本书根据原国家机械工业局制定的“机械类技工学校新专业教学方案”中“数控机床切削加工专业数控机床编程与操作”教学大纲编写的。本书适用于技工学校、职业中专学生学习数控加工技术之用，也可用作中级数控机床操作人员技术培训和自学用书。

本教材力求简明扼要，通俗易懂。前三章概括性地介绍了数控机床的基本组成、工作原理及机床机械结构特点；后两章重点对数控加工工艺、数控编程方法技巧以及数控机床的操作进行了分析。需要指出的是，由于数控技术的发展日新月异，加之各个教学、培训单位的教学设备也不尽相同，因此本书在编写过程中对大纲部分章节进行了适当的调整，教材的使用者也可根据本单位教学设备情况进行调整。

本教材由西安西电高级技术学校李长江担任主编，参加编写的有西安西电高级技术学校冯小平、东风汽车公司高级技工学校陆志宏和柳州高级技工学校黄伟林。其中，第一章、第三章及第四章的第九节由冯小平编写，第二章由李长江编写，第四章第一节至第八节由陆志宏编写，第五章由黄伟林编写。冯小平负责全书的统稿工作。承蒙南京工程学院周明虎老师主审，提出了许多宝贵的修改和补充意见，特此表示感射。

在本书的编写过程中，得到了许多教师的热心帮助和支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者的学识有限，教材中难免有不妥之处，恳请读者不吝指正。

编 者

目 录

前言	
第一章 数控机床的基本组成及其工作原理	1
第一节 数控技术概述	1
第二节 机床数控系统	10
第三节 数控机床的电气驱动系统	15
第四节 数控机床的检测装置	18
复习题	22
第二章 数控机床的结构	23
第一节 典型数控机床	23
第二节 数控机床的典型结构	30
复习题	45
第三章 数控机床坐标系	46
第一节 数控机床的坐标系和坐标轴	46
第二节 机床坐标系与工件坐标系	49
第三节 绝对坐标系与相对坐标系	52
复习题	55
第四章 数控机床编程	56
第一节 程序编制中的工艺分析	56
第二节 编程规则	62
第三节 G 指令	66
第四节 主轴速度指令和进给速度指令	83
第五节 辅助功能	87
第六节 子程序	91
第七节 手工编程	101
第八节 程序编制中的数值计算	126
第九节 自动编程简介	129

复习题	131
第五章 数控机床操作	141
第一节 控制面板	141
第二节 程序的输入、修改和插入	150
第三节 零偏及刀补的输入	152
第四节 程序模拟	162
第五节 自动加工	163
复习题	174
参考文献	175

第一章 数控机床的基本组成及其工作原理

第一节 数控技术概述

随着科学技术的迅速发展，机械制造技术发生了深刻的变化。传统的机械加工设备已很难适应市场对产品多样化、高质量的要求。而数控技术及其数控机床的应用，成功地解决了一些几何形状复杂，一致性要求较高的中、小批量零件自动化加工问题，大大提高了加工效率和加工精度，而且还减轻了工人的劳动强度，缩短了生产周期，提高了企业的竞争能力。

一、数控技术的基本概念

1. 数控 数控，即数字控制（Numerical Control，简称 NC），简称数控，就是用数字化的信息对机床的运动及其加工过程进行控制的一种方法。简单地说，数控就是采用计算机或专用计算机装置进行数字计算、分析处理、发出相应指令，对机床的各个动作及加工过程进行自动控制的一门技术。

由于早期数控系统功能全靠数字电路实现，因此称之为 NC 系统（硬件数控系统）。这种数控系统电路复杂，元器件数量较多，功能扩充难以实现，可靠性低，维修困难。现代数控系统都采用小型计算机或微型计算机系统实现，称之为计算机数控系统（即 Computer Numerical Control，简称 CNC）。计算机数控系统在控制功能、精度、可靠性等方面与硬件数控系统比较有很大的改善，而且其体积也大大缩小。所以，在本书中所出现的“数控”或“数控系统”都是指计算机数控系统。

2. 数控机床 所谓数控机床，就是装备有计算机数控系统的自动化机床。数控机床、数显机床和程控机床是完全不同的三种机床。数显机床只能显示机床工作台的位置坐标，而机床动作不是自动控制的。程控机床即可编程序控制器控制的机床，这种机床只能按照某种

特定的工艺要求编制出控制程序来控制机床的各个动作，而不能对其位置进行精确控制，一旦这种控制程序确定下来以后，机床的整个加工过程也就相应确定。数控车床可根据加工工件图样的不同随时改变其工件加工程序。因此，数控机床加工具有很好的灵活性，即所谓“柔性”。

3. 数控加工 数控加工，是指在数控机床上进行工件切削加工的一种工艺方法，即根据工件图样和工艺要求等原始条件编制工件数控加工程序（简称为数控加工程序）输入数控系统，控制机床刀具与工件的相对运动，从而实现工件的加工。例如，加工图 1-1 所示的工件，若在卧式车床上加工，刀具从

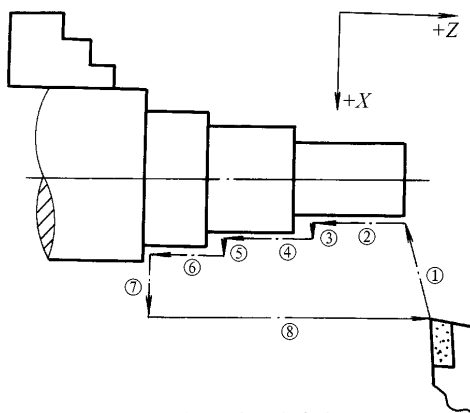


图 1-1 台阶轴的车削加工

起始位置快速接近工件、对待加工表面进行切削、快速退回等一系列的开机、停机、进给、主轴变速等操作都是由人工手动完成的。

在仿形机床或其他自动机床上加工时，上述的操作和运动参数是通过凸轮、靠模、挡块等装置确定的。它们虽然能加工比较复杂的工件，有一定的灵活性和通用性，但是工件的加工精度受凸轮、靠模制造精度的影响，工序准备时间也长，而且当工件的几何形状较为复杂时这类机床可能无法加工。若在数控车机上加工，如前所述，首先根据工件图样，按规定的代码，将加工内容、尺寸和加工操作步骤等编制成工件加工程序清单，然后将其输入机床数控装置，即可自动地加工出工件来。由此可见，数控加工就是用计算机及其执行机构代替人的大脑和双手，并且控制全部过程的加工。

二、数控机床的组成及工作原理

数控机床作为一种典型的机电一体化设备，其组成主要包括机床控制系统和机床本体两大部分。从机械的角度讲，其基本布局和普通

机床相似。因此，数控机床和普通机床相比，主要特征是后者具有功能强大的、智能化的电气控制系统，即计算机数控系统。一般的标准型数控机床组成如图 1-2 所示。

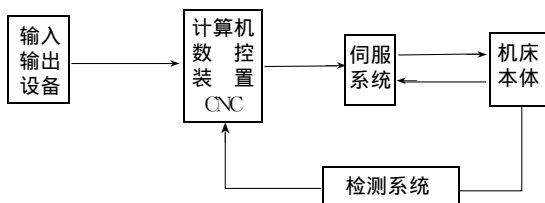


图 1-2 数控机床的基本组成

现将其各组成部分的功能和工作原理简述如下。

1. 输入、输出设备 输入设备的主要功能是将工件加工程序、机床参数及刀补值、间补值等数据输入到机床计算机数控装置。具体地说，数控机床上的输入设备主要有键盘、光电阅读机、磁盘及磁带接口、通信接口等。输出设备主要是将工件加工过程和机床运行状态等打印或显示输出，以便于工作人员操作。一般的数控机床输出设备主要有 CRT 显示器、LED 显示器、LCD 显示器以及各种信号指示灯、报警蜂鸣器等。RS-232 接口是一种标准串行的输入、输出接口。可实现工件加工程序的打印、数控机床之间或机床和计算机之间的数据通信等。

2. 计算机数控装置 计算机数控装置，简称数控装置或 CNC 装置。它是数控机床的控制核心，其作用类似人的大脑，它的主要功能是接收输入设备输入的加工信息，完成数据的存储、计算、逻辑判断、输入输出控制等，并向机床各驱动机构发出运动指令，指挥机床各部件协调、准确地执行工件加工程序。

3. 伺服系统 伺服系统是指数控机床的电气驱动部分，它接收计算机数控装置发来的各种动作命令，并精确地驱动机床进给轴或主轴运动。伺服系统的性能是影响数控机床加工精度和生产效率的主要因素之一。

4. 机床本体 机床本体是数控机床的主体，是用来完成各种切

削加工的机械部分。数控机床的机械结构，除了主运动系统、进给系统以及辅助部分，如液压、气动、冷却和润滑部分等一般部件外，还有些特殊部件，如刀库、自动换刀装置（ATC）、自动托盘交换装置等。

5. 位置检测装置 在数控机床中，检测装置的作用主要是对机床的转速及进给实际位置进行检测并反馈回计算机数控装置，进行补偿处理。运动部分通过传感器，将角位移或直线位移转换成电信号，输送给计算机数控装置，与给定位置进行比较，并由计算机数控装置通过计算，继续向伺服机构发出运动指令，对产生的误差进行补偿，使机床工作台精确地移动到要求的位置。

综上所述，数控机床的基本工作过程为：操作人员首先根据工件加工图样的要求确定工件加工的工艺过程、工艺参数和刀具位移数据，再按编程手册的有关规定编写工件加工程序，然后通过键盘、穿孔纸带、通信或 MDI（Manual Data Input 即手动数据输入）等方式，将加工工件程序输入到计算机数控装置。当加工程序输入到数控装置后，在数控系统内部的控制软件支持下，经过处理与计算后，发出相应的运动指令，通过伺服系统驱动机床工作台按预定的轨迹运动，以进行工件的自动切削加工。

三、数控机床的分类

数控机床经过几十年的发展，其品种越来越多，结构和功能也各具特色，从不同的技术和经济指标出发，可以对数控机床进行不同的分类。因此，数千种数控机床如何分类，目前国内外尚无统一规定。这里，我们从应用的角度出发，按工艺用途对数控机床进行分类。

1. 普通数控机床 这类数控机床主要有数控车床、数控铣床、数控钻床、数控镗床、数控磨床等。如图 1-3 为 CK7815 型数控车床，图 1-4 为 XK5040 型数控铣床。

2. 加工中心 数控加工中心机床，简称加工中心（Machining Centre，简称 MC），是功能较全并具有多种工艺手段的全功能型数控机床。最典型的加工中心是镗铣加工中心。图 1-5 为 TH5632 型立式加工中心，图 1-6 为 XH754 型卧式加工中心。

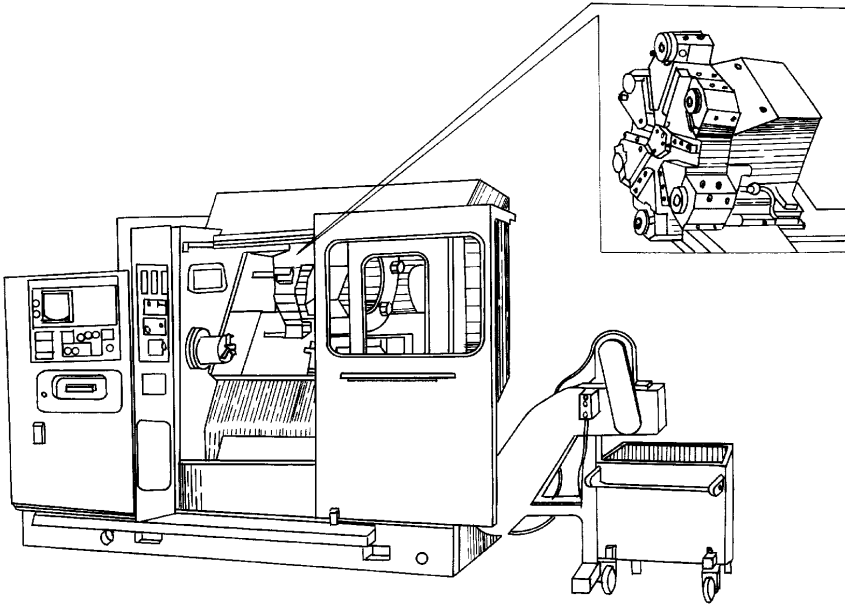


图 1-3 CK7815 型数控车床

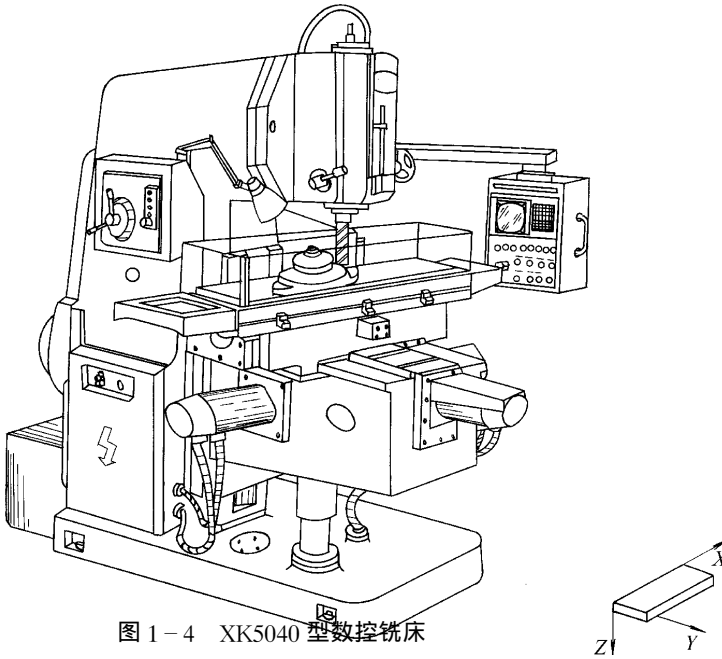


图 1-4 XK5040 型数控铣床

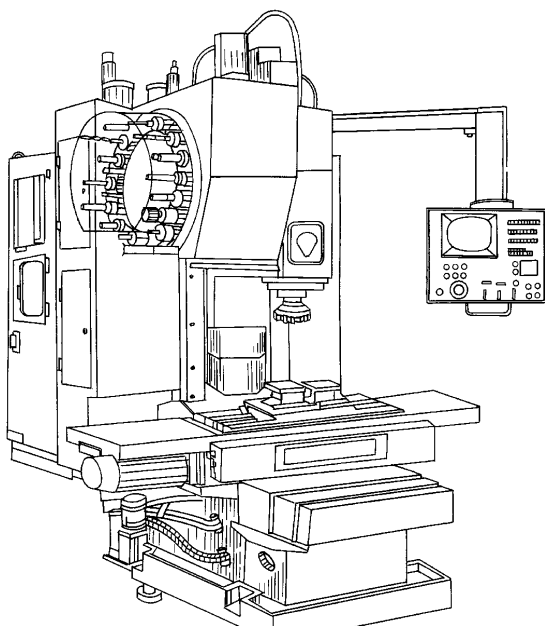


图 1-5 TH5032 立式加工中心

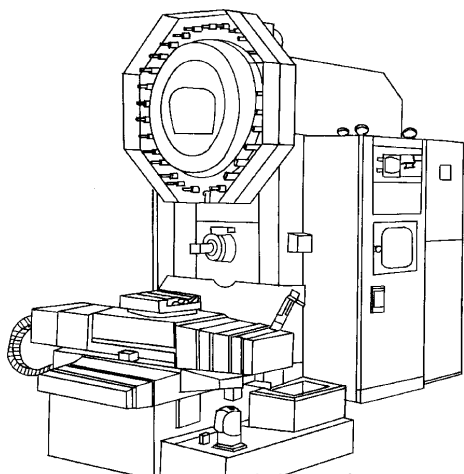


图 1-6 XH754 卧式加工中心

加工中心区别于普通数控机床的主要特征是：加工中心设置有刀库和相应的自动换刀机构（如换刀机械手）。其刀库中可存放几把、

几十把甚至几百把不同类型的刀具或检测工具，这些刀具或检测工具在加工过程中通过加工程序可自动进行选用及更换。

加工中心的主要特点是：工件经一次装夹后，能自动进行多工序的连续加工（如钻、铰、镗、铣及攻螺纹等），以省去较多的专用工装。其加工的典型工件以复杂、精密的箱体类居多。加工中心一般以镗铣加工中心居多，当然也有车削中心、磨削中心等。镗铣加工中心可划分为多种类别，除常见的卧式、立式、双柱（龙门式）加工中心外，还有单工作台、多工作台及复合（五面）加工中心等。

3. 特种数控机床 特种数控机床是配置有专用的计算机数控系统并自动进行特种加工的机床。特种加工的含义主要是指加工手段特殊，工件的加工部位特殊，加工的工艺性能要求特殊等。例如，数控电火花线切割机床，数控激光切割、打孔、焊接机床，数控火焰切割机床，数控弯管机床，数控冲床，数控剪板机床等。

四、数控机床的特点

1. 加工精度高 数控机床是高度综合的机电一体化设备。它由精密机械和自动化控制系统组成，机床的传动系统与机床的结构都有很高的刚度和热稳定性。在设计传动结构时，采取了一些减小误差的措施，并由计算机数控装置进行补偿，所以数控机床有较高的加工精度。数控机床加工不受工件复杂程度的限制，这一点是普通机床无法与之相比的。

2. 加工生产率高 数控机床具有良好的刚性，可以进行强力切削，而且空行程可采用快速进给，大大减少了空行程的时间；数控机床进给量和主轴转速范围都较大，可以选择最合理的切削用量；对工夹具要求低，机床不需要进行复杂的调整；数控机床有较高的重复定位精度，大大地缩短了生产准备周期，节省了测量和检测时间。

3. 产品质量稳定 由于数控机床是按所编程序自动进行加工的，消除了操作者的人为误差，保证了同批工件加工尺寸的一致性，工件质量稳定，产品合格率高。

4. 减轻工人的劳动强度和改善劳动条件 利用数控机床进行加工，操作人员要做的工作主要有程序的编制和调试，监视加工过程并装卸工件。除此而外，不需要进行繁重的重复性手工操作，劳动强度

和紧张程度均可大为减轻。

5. 良好的经济效益 在数控机床上改变加工对象时,只需重新编写加工程序,不需要制造更换许多工夹具和模具,节省了大量工艺装备费用;又由于加工精度高、质量稳定、减少了废品率,使生产成本下降。

6. 便于管理 采用数控机床加工,能准确地计算工件的加工工时,并有效地简化检验、工夹具和半成品的管理工作,易于构成柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)。

虽然数控机床有上述优点,但初期投资大、维修费用高、要求管理及操作人员的素质也较高。因此,应合理地选择及使用数控机床,提高企业经济效益和竞争力。

五、数控机床的应用范围

数控机床是一种高度自动化的机床,有一般机床所不具备的许多优点,所以数控机床的应用范围在不断扩大。但数控机床是一种高度机电一体化的高技术含量、高成本的设备,使用维修都有一定难度。若从最经济的角度出发,数控机床适用于加工以下工件:

- (1) 多品种小批量的工件。
- (2) 结构较复杂、精度要求较高的工件。
- (3) 需要频繁改型的工件。
- (4) 价格昂贵、不允许报废的关键工件。
- (5) 需要最小生产周期的急需工件。

六、数控机床的产生与发展

1. 数控机床的产生 1952年美国麻省理工学院研制成功了世界上第一台数控机床——三坐标立式铣床,其数控系统采用电子管电路组成。1959年3月,克耐·社列克公司开发出第一台加工中心。这是一种具有自动换刀装置的数控机床,它能实现一次装夹,进行多工序的加工,从而揭开了加工中心的序幕。从1960年开始,德国、日本等一些工业国家都陆续地开发、生产及使用了数控机床。

1974年微处理器开始直接用于数控机床,进一步促进了数控机床的普及应用和飞速发展。20世纪80年代初,国际上又出现了以1(或V03)台加工中心或车削中心为主体,再配上工件自动装卸和监

控检验装置的柔性制造单元 (Flexible Manufacturing Cell, 简称 FMC)。由于微电子和计算机技术的不断发展, 数控机床的数控系统也随着不断更新, 发展异常迅速, 几乎 3 年时间就更新换代一次。

2. 我国数控机床的发展简述 我国从 1958 年开始研究数控技术。几十年来, 经过了发展、停滞、引进技术等几个阶段。1958 年开始, 全国有上百所高等学校、研究机构和工厂开展数控机床研究和试制, 由于国产元器件不配套, 加之工艺和技术还不够成熟, 数控研究工作纷纷下马。从 20 世纪 80 年代开始, 随着改革和开放的贯彻实施, 国内一些单位从日本、德国、美国等国家引进了较先进的数控技术, 在消化国外技术的基础上, 对很多高档的数控系统进行了大量的开发工作, 并投入了批量生产, 一些较高档次的数控系统, 如五轴联动的数控系统、分辨力为 0.001mm 的高精度车床用数控系统、数字仿型的数控系统、为柔性制造单元配套的数控系统, 陆续开发出来, 并制造出了样机。

七、数控机床的发展趋势

随着微电子技术、计算机技术、精密制造技术及检测技术的发展, 数控机床性能日臻完善, 数控系统应用领域日益扩大。科学技术的发展推动了数控机床的发展, 各生产部门工艺要求的不断提高又从另一方面促进了数控机床的发展, 当今数控机床正不断采用最新技术成就, 朝着高速度、高精度、高可靠性、多功能、智能化、复合化等方向发展。

1. 高速度、高精度 速度和精度是数控系统的两个重要技术指标, 它直接关系到加工效率和产品质量。对于数控系统, 高速度化首先是要求计算机数控系统在读入加工指令数据后, 能高速度处理并计算出伺服电动机的位移量, 并要求伺服电动机高速度地作出反应。此外, 要实现生产系统的高速度化, 还必须谋求主轴、进给、刀具交换、托板交换等各种关键部分实现高速度化。现代数控机床主轴转速在 $12000\text{r}/\text{min}$ 以上的已较为普及, 高速加工中心的主轴转速高达 $100000\text{r}/\text{min}$; 快速进给速度一般机床都在每分钟几十米以上, 有的机床高达 $120\text{m}/\text{min}$ 。加工高精度比加工速度更为重要, 微米级精度的数控设备正在普及, 一些高精度机床的加工精度都达 $0.1\mu\text{m}$ 。

2. 高可靠性 新型的数控系统大量采用大规模或超大规模的集成电路,采用专用芯片及混合式集成电路,使线路的集成度提高,元器件数量减少,功耗降低,为提高可靠性提供了保证。

现代数控机床都装备有计算机数控系统(即 CNC 系统),只要改变软件控制程序,就可以适应各类机床的不同要求。实现数控系统的模块化、标准化和通用化。数控控制软件的功能更加丰富,具有自诊断及保护功能。为了防止超程,可以在系统内预先设定工作范围(即软极限),以避免由于限位开关的不可靠而造成轴端超程。数控系统还具有自动返回功能(即断点保护功能)。

3. 多功能 大多数数控机床都具有 CRT 图形显示功能,可以进行二维图形的加工轨迹动态模拟显示,有的还可以显示三维彩色动态图形;具有丰富的人机对话功能,“友好”的人机界面;借助 CRT 与键盘的配合,可以实现程序的输入、编辑、修改、删除等功能。现代数控系统,除了能与编程机、绘图机、打印机等外设通信外,还应能与其他 CNC 系统通信,或与上级计算机通信,以实现 FMS 的连接要求。

4. 智能化 数控系统应用高技术的重要目标是智能化。如引进自适应控制技术、人机会话自动编程、自动诊断并排除故障等智能化功能。

5. 复合化 复合化是近几年数控机床发展的模式,它将多种动力头集中在一台数控机床上,在一次的装夹中完成多种工序的加工。如立卧转换加工中心、车铣万能加工中心及四轴联动(X、Y、Z、C)的车削中心等。

第二节 机床数控系统

数控机床主要是由机床本体和控制系统(即计算机数控系统)两大部分组成的。数控机床所有工作都是在其数控系统的控制、管理和监督下进行的。因此,计算机数控系统的性能决定着数控机床整机的性能和档次。

一、计算机数控系统工作原理及分类

1. 计算机数控系统的组成 机床数控系统,由输入输出设备、

计算机数控装置、主轴驱动装置、进给驱动装置、位置检测系统和可编程序控制器（PLC）等模块组成。其组成框图如图 1-7 所示。

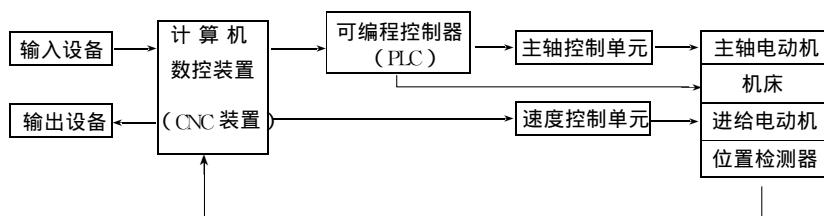


图 1-7 计算机数控系统组成框图

计算机数控装置是整个数控系统的控制核心，它通常由一台带有专门控制软件的工业计算机构成，数控装置采用数字信号形式指令控制机床运动部件的速度和轨迹，以实现对工件给定形状的加工。数控装置和通用计算机系统一样由硬件和软件系统组成。

数控系统的控制软件，一般由初始化模块、输入数据处理模块、插补运算处理模块、速度控制模块、系统管理模块和诊断模块等组成。当然不同档次的数控系统的控制软件有些差别，但其基本模块都有。

在这里我们要区分一下数控系统和数控装置的概念。数控系统是指整个数控机床的控制系统，而数控装置仅仅指计算机部分，数控装置是数控系统的一个最主要的组成部分，是数控机床的核心装置。

2. 机床数控系统的分类 由于计算机技术、微电子技术和数控技术的高速发展，每隔二三年，甚至一年左右，就有更新换代的新系统面世，故对数控系统的类别，至今也无严格的划分界限。对使用者而言，按其结构、功能及价格，大致可分为经济型、标准型和高档型等三大类数控系统。

（1）经济型数控系统，一般是指结构简单、具备基本功能、针对性强、精度适中、价格低廉的数控系统。这种数控系统特别适合于老设备技术改造和老产品的更新。由于经济型数控系统适合我国当前国情，因此得到了很广泛的应用。

不同驱动装置的经济型数控系统，由于采用不同种类的驱动执行元件，因此其精度和功能上也有差异。经济型数控系统中最常用的驱

动电动机为功率步进电动机，且为开环控制。早期的经济型数控系统还采用电液脉冲马达作为驱动电动机。在一些高档的经济型数控系统中有的还采用了闭环控制，这种系统具有良好的调速性能、过载能力及效率高等优点，其中以直流伺服电动机驱动的居多，国产的经济型数控系统大多属于这一种。

20 世纪 90 年代，出现了一些新型经济型数控系统，这类数控系统是指在其经济性指标基本保持不上升或略为上浮的前提下，进一步扩充某些功能的系统。如 20 世纪 90 年代后期西门子公司推出 802S 和 802D 系统、北京发那科公司推出的 Power Mate 0 系统及武汉华中数控股份有限公司开发的“世纪星”数控系统等都是经济型系统中档次较高的系统。

(2) 标准型数控系统又称为普及型数控系统。国产的这类数控系统绝大部分是引进国外技术国内组装生产的。这类系统的技术较为成熟，功能也比较丰富，如全闭环或半闭环控制、恒线速切削、全屏幕菜单式编程、彩色 CRT 实时动态图形显示及用户宏程序功能等。标准型数控系统多用于普及型数控机床，部分用于加工中心。代表性的标准型数控系统主要有日本 FANUC 0i 系列系统、德国 SINUMERIK 810 系统及西班牙 FAGOR 8025/30 系统等。这类数控系统早期一般采用直流伺服驱动系统，现在都采用全数字化交流伺服驱动系统。

(3) 高档型数控系统主要应用于全功能数控机床。这类系统功能分别有：

- 1) 多轴联动，包括各个主轴和多个进给坐标轴，现已达 20 轴以上。
- 2) 曲面直接插补。
- 3) 彩色显示，包括三维立体曲面的仿真、动态跟踪图形显示，以及在任意二维平面上进行离线（指生产线，即正在加工的过程）的进给轨迹显示。
- 4) 蓝图（几何图形）编程。
- 5) 高级语言编程。

代表性的数控系统有日本 FANUC 16i 和 SIMENSE 840D 等。