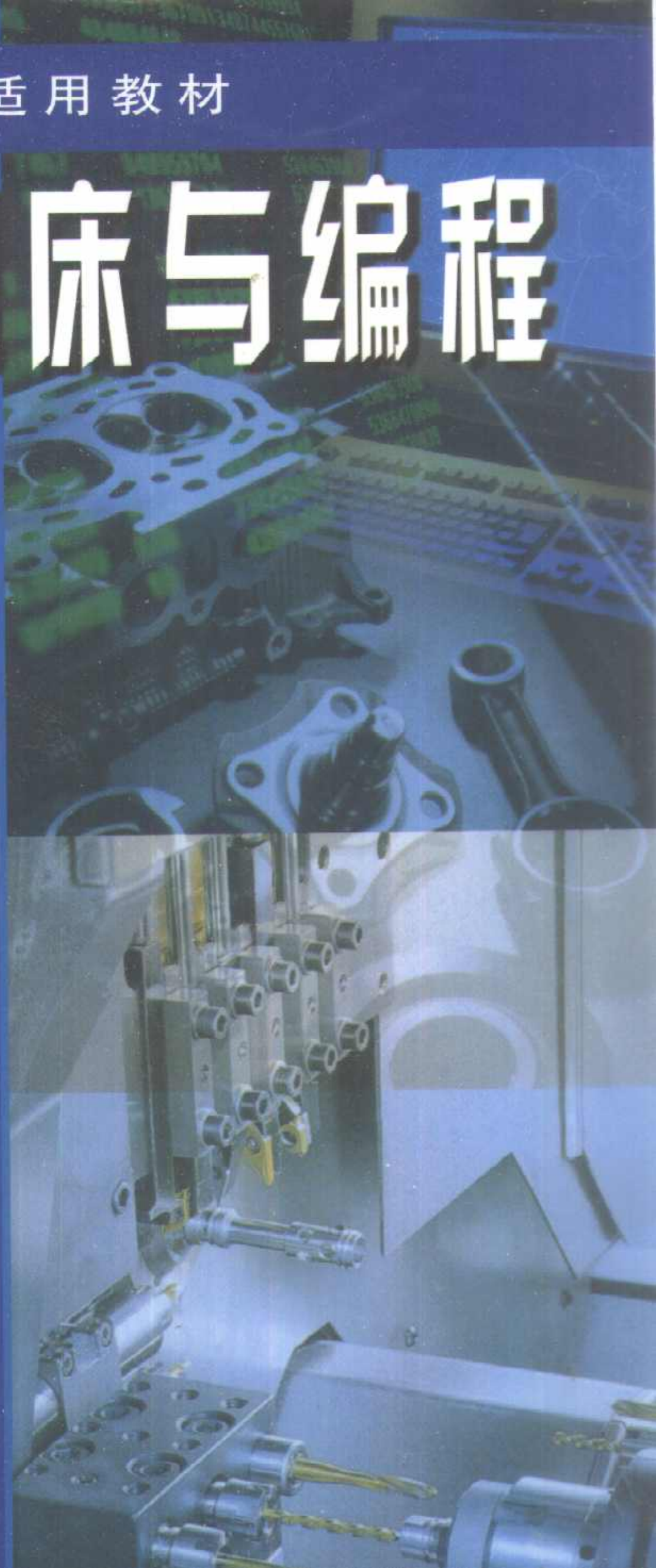


高等工科院校适用教材

# 数控机床与编程

刘书华 主编



9-43

机械工业出版社  
China Machine Press

本书主要介绍数控技术、数控机床的结构和数控编程三部分知识,内容包括:数控系统的基本概念、控制软件的结构和硬件的组成,伺服系统及检测装置;数控机床的机械结构,液、气压传动,数控加工工艺装备;数控加工工艺设计,编程基础及数控车床、加工中心的编程知识及编程实例。本书内容取材新颖,由浅入深,循序渐进,理论与实际相结合,反映了当今数控机床的技术发展前沿。本书为机械制造、机电一体化、数控技术和模具设计与制造等专业的教材,也可作为机械制造业有关工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床与编程/刘书华主编. —北京:机械工业出版社, 2001.8

高等工科院校适用教材

ISBN 7-111-09029-2

I. 数… II. 刘… III. ①数控机床-高等学校-教材  
②数控机床-程序设计-高等学校-教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 035594 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:邓海平 版式设计:张世琴 责任校对:吴美英

封面设计:方芬 责任印制:郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年8月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·16.75印张·410千字

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

# 前 言

随着计算机、通信、电子、检测、控制和机械等各相关技术的发展，特别是计算机控制在机床上的应用，使机床本身产生了革命性的变化。数控机床加工的全部运动都由微机控制，不但提高了加工精度和生产率，还可以完成手工操作无法完成的工作。数控机床作为一种精密、高效的加工设备，越来越成为机械制造业技术改造的首选设备，并对国民经济的发展起到了重要的作用。

现代数控技术的发展日新月异，机床的新结构、新技术不断出现，本书力图能够反应这些新内容，体现实用技术，减少繁杂的数学推导，力求作到先进性与实用性相结合。我们借鉴了国内外的先进资料和经验，结合多年来的教学实践经验编著了这本教材。

本教材共分为八章，包括三部分内容：第一部分为数控技术知识，介绍了数控系统的基本构成、控制软件的功能和结构，重点介绍了应用广泛的经济型系统，以及伺服驱动系统和位置检测装置。第二部分为数控机床机械结构和工艺装备知识，介绍了数控机床机械结构的基本要求、主传动系统、进给传动系统、液压与气压传动系统以及机床的支承件与导轨。第三部分介绍数控加工工艺基础知识，加工的工艺分析和工艺方案设计，数控编程的基础知识，数控车床的编程，加工中心的编程及宏程序的编制。

本教材由温州大学刘书华担任主编，并编写了第一章、第四章、第五章、第六章和第七章，文良起编写了第二章和第三章，瞿建武编写了第八章，傅培红对全书的插图作了校对。同济大学诸乃雄教授任主审，并提出了许多宝贵的修改和补充意见，特此表示感谢。

在本教材编写过程中，得到了许多教师的关心、支持和帮助，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

限于作者的水平和学识，教材中难免还存在错误和不妥之处，恳请读者不吝指正。

作者  
于温州

# 目 录

前言	
<b>第一章 数控机床概述</b> .....	1
<b>第一节 数控机床的产生和发展</b> .....	1
一、数控机床的产生 .....	1
二、计算机数控 .....	2
三、数控机床和数控系统的发展 .....	2
四、机械制造系统的发展 .....	4
<b>第二节 数控机床的特点及应用</b>	
范围 .....	7
一、数控机床的优点 .....	7
二、数控机床的应用范围 .....	8
<b>第三节 数控机床的组成和工作</b>	
原理 .....	9
一、数控机床的组成 .....	9
二、数控机床的工作原理 .....	9
三、数控系统的主要工作过程 .....	11
<b>第四节 数控机床的分类</b> .....	12
一、按控制系统的特点分类 .....	12
二、按执行机构的伺服系统类型	
分类 .....	14
三、按加工方式分类 .....	15
四、按照功能水平分类 .....	15
习题 .....	15
<b>第二章 数控系统及其应用</b> .....	17
<b>第一节 数控系统的基本硬件</b>	
结构 .....	17
一、基本硬件构成 .....	17
二、微机基本系统 .....	17
三、接口 .....	18
<b>第二节 数控系统控制软件的功能与</b>	
结构 .....	20
一、控制软件的结构 .....	20
二、数控系统的功能 .....	20
<b>第三节 经济型数控系统的构成</b> .....	24
一、经济型数控系统概述 .....	24
二、数控系统的硬件组成 .....	24
三、数控系统的软件组成 .....	26
<b>第四节 数控系统的选用</b> .....	31
一、数控系统和机床的配合 .....	31
二、数控机床的精度 .....	32
习题 .....	35
<b>第三章 数控机床的伺服系统</b> .....	36
<b>第一节 概述</b> .....	36
一、数控机床对伺服系统的要求 .....	36
二、伺服系统常用的驱动元件 .....	36
<b>第二节 步进电动机驱动系统</b> .....	36
一、步进电动机及其工作原理 .....	36
二、步进电动机的特性参数及选择 .....	38
三、步进电动机的控制与驱动 .....	39
<b>第三节 直流伺服电动机及其速度</b>	
控制 .....	43
一、直流伺服电动机及其特性 .....	43
二、直流伺服电动机常用计算公式 .....	45
三、直流伺服电动机的速度控制 .....	46
四、晶体管脉宽调制 (PWM) 系统及其	
工作原理 .....	47
<b>第四节 交流伺服电动机</b> .....	48
一、概述 .....	48
二、交流伺服电动机及其特性 .....	48
三、SPWM 变频控制器 .....	50
四、进给系统交流电动机速度控制 .....	51
五、矢量控制原理 .....	52
六、矢量控制原理框图 .....	54
习题 .....	55
<b>第四章 数控机床的位置检测</b>	
<b>装置</b> .....	56
<b>第一节 概述</b> .....	56
一、开环、闭环、半闭环系统 .....	56
二、数控机床对检测装置的要求 .....	56
三、检测装置的常用类型 .....	57
<b>第二节 编码器和编码盘</b> .....	58
一、增量式光电编码器 .....	58

二、编码盘测量装置 .....	61	系统 .....	104
第三节 光栅测量装置 .....	61	一、滚珠丝杠传动 .....	104
一、光栅测量的工作原理 .....	62	二、静压丝杠螺母副 .....	110
二、光栅测量装置的数字变换线路 .....	62	三、双导程蜗杆蜗轮副 .....	113
三、读数头 .....	64	四、齿轮传动副 .....	115
四、等倍透镜系统 .....	64	五、直线电动机系统 .....	117
第四节 磁栅测量装置 .....	64	第六节 数控机床的液压与气压传动	
一、磁栅测量装置的组成 .....	64	系统 .....	120
二、磁头 .....	65	一、电动系统与液压系统的比较 .....	120
三、检测电路 .....	66	二、气压系统与液压系统的比较 .....	121
第五节 旋转变压器测量装置 .....	68	三、液压传动系统 .....	121
一、旋转变压器的结构 .....	68	四、气压传动系统 .....	126
二、旋转变压器的组成及工作原理 .....	68	第七节 机床支承件 .....	127
三、相位工作方式 .....	69	一、机床支承件及其功用 .....	127
四、幅值工作方式 .....	69	二、对机床支承件的基本要求 .....	128
第六节 感应同步器测量装置 .....	70	三、数控机床支承件的结构特点 .....	128
一、感应同步器的结构 .....	70	四、床身 .....	128
二、感应同步器的工作原理 .....	71	五、立柱 .....	131
习题 .....	72	第八节 数控机床导轨 .....	133
第五章 数控机床的机械结构 .....	74	一、机床导轨的功用 .....	133
第一节 数控机床总体结构 .....	74	二、导轨的基本要求 .....	133
一、数控机床机械结构的组成 .....	74	三、导轨基本类型及特点 .....	134
二、数控机床的总体布局 .....	75	四、数控机床常用的滑动导轨 .....	134
第二节 数控机床机械结构要求 .....	79	五、滚动导轨 .....	135
一、高刚度 .....	79	习题 .....	139
二、高抗振性 .....	82	第六章 数控加工系统的工艺	
三、高的低速运动平稳性 .....	84	装备 .....	141
四、高的定位精度 .....	85	第一节 数控刀具系统 .....	141
五、热变形对加工精度的影响小 .....	87	一、数控机床对刀具的要求 .....	141
六、人机关系要求 .....	88	二、数控机床所用刀具材料的类型及	
第三节 数控机床的主传动系统 .....	88	选择 .....	142
一、对主传动系统的要求 .....	88	三、数控车床刀具 .....	147
二、数控机床主轴的调速方法 .....	89	四、加工中心的刀具系统 .....	148
三、分级变速系统的设计 .....	90	五、刀具的预调 .....	149
四、无级变速传动链的设计 .....	95	第二节 自动换刀系统 .....	152
五、主轴部件及主轴箱 .....	96	一、转塔式自动换刀装置 .....	152
六、高速主轴的设计 .....	99	二、刀库式自动换刀装置 .....	157
第四节 同步带传动 .....	102	第三节 数控夹具系统 .....	165
一、同步带传动的特点 .....	102	一、数控夹具的要求 .....	165
二、同步带的结构和规格 .....	102	二、数控夹具的选用方法 .....	165
三、带轮的结构 .....	102	三、各类数控夹具的典型结构 .....	165
第五节 数控机床的进给传动		第四节 回转工作台 .....	172

一、数控回转工作台 .....	172	四、数控系统的指令功能 .....	198
二、分度工作台 .....	174	第二节 数控车床编程基础 .....	201
习题 .....	175	一、数控车床的编程特点 .....	201
<b>第七章 数控加工工艺基础</b> .....	176	二、编程规则 .....	201
第一节 数控加工技术概述 .....	176	三、数控车床的坐标系和运动方向 .....	202
一、数控加工工艺的概念 .....	176	四、数控车床的常用指令 .....	202
二、数控加工工艺的主要内容 .....	176	第三节 数控车床编程实例 .....	218
三、数控加工的工艺特点 .....	176	第四节 加工中心程序的编制 .....	229
四、数控加工的特点 .....	177	一、基本代码的使用 .....	229
五、数控加工的工艺适应性 .....	178	二、刀具半径补偿 .....	231
第二节 数控加工的工艺设计 .....	179	三、子程序 .....	235
一、数控加工工艺设计的主要内容 .....	179	四、孔加工固定循环 .....	236
二、数控加工工艺的设计 .....	179	五、镜像指令 .....	238
三、数控加工零件的工艺性分析 .....	181	六、自动回归原点 .....	239
四、数控加工的工艺路线设计 .....	182	七、刀具长度补偿 .....	240
五、数控加工工序的设计 .....	183	第五节 宏程序编制 .....	241
六、数控加工专用技术文件的编写 .....	185	一、概述 .....	241
第三节 零件的结构设计与数控加工		二、变量 .....	243
工艺性 .....	189	三、运算指令 .....	245
习题 .....	191	四、控制指令 .....	246
<b>第八章 数控编程</b> .....	192	五、宏程序体编制 .....	246
第一节 程序编制的基础 .....	192	第六节 加工中心的编程实例 .....	248
一、程序编制的基本概念 .....	192	习题 .....	255
二、程序结构与格式 .....	193	<b>参考文献</b> .....	259
三、数控机床的坐标系 .....	195		

# 第一章 数控机床概述

## 第一节 数控机床的产生和发展

### 一、数控机床的产生

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。机械加工工艺过程的自动化是实现上述要求的最重要措施之一。它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。

许多生产企业(例如汽车、拖拉机、家用电器等制造厂)已经采用了自动机床、组合机床和专用自动生产线。采用这种高度自动化和高效率的设备,尽管需要很大的初始投资以及较长的生产准备时间,但在大批大量的生产条件下,由于分摊在每一个工件上的费用很少,经济效益仍然是非常显著的。

但是,在机械制造业中并不是所有的产品零件都具有很大的批量,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、重型机械以及国防部门,其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。频繁地开发新产品,使“刚性”的自动化设备在大批生产中也日益暴露其缺点。

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(Numerical Control,简称NC或数控)机床,就是在这样的背景下诞生与发展起来的。它极其有效地解决了上述一系列矛盾,为单件、小批生产的精密复杂零件提供了自动化加工手段。

数控机床就是将加工过程所需的各种操作(如主轴变速、松夹工件、进刀与退刀、开车与停车、选择刀具、供给切削液等)和步骤,以及刀具与工件之间的相对位移量都用数字化的代码来表示,通过控制介质(如穿孔纸带或磁带)将数字信息送入专用的或通用的计算机,计算机对输入的信息进行处理与运算,发出各种指令来控制机床的伺服系统或其它执行元件,使机床自动加工出所需要的工件。数控机床与其它自动机床的一个显著区别在于当加工对象改变时,除了重新装夹工件和更换刀具之外,只需要更换加工程序,不需要对机床作任何调

整。

1952年美国帕森斯公司(Parsons)和麻省理工学院(MIT)合作研制成功世界上第一台三坐标数控铣床,用于加工直升飞机叶片轮廓检查用样板。这是一台采用专用计算机进行运算与控制的直线插补轮廓控制数控铣床,专用计算机采用电子管元件,逻辑运算与控制采用硬件联接的电路。1955年,该类机床进入实用化阶段,在复杂曲面的加工中发挥了重要作用。

我国从1958年开始研制数控机床,在研制与推广使用数控机床方面取得了一定成绩。近年来,由于引进了国外的数控系统与伺服系统的制造技术,使我国数控机床在品种、数量和质量方面得到了迅速发展。目前,我国已有几十家机床厂能够生产不同类型的数控机床和加工中心。我国经济型数控机床的研究、生产和推广工作也取得了较大的进展,它必将对我国各行业的技术改造起到积极的推动作用。

目前,在数控技术领域,我国和先进的工业国家之间还存在着不小的差距,但这种差距正在缩小。随着工厂、企业技术改造的深入开展,各行各业对数控机床的需要量将会有大幅度的增长,这将有力地促进数控机床的发展。

## 二、计算机数控

随着电子技术和计算机技术的不断发展,数控系统经历了采用电子管、晶体管、集成电路,直到将计算机引入数控系统的过程。数控系统中引入了微型计算机(简称微机),使它在质的方面完成了一次飞跃。计算机数控(Computer Numerical Control,简称CNC)系统有许多优点:

(1) 柔性好 以往数控系统的许多功能是靠硬件电路来实现的。若想改变系统的功能,必须重新布线,但计算机数控系统能利用控制软件灵活地增加或改变数控系统的功能,更能适应生产发展的需要。

(2) 功能强 可利用计算机技术及其外围设备,增强数控系统及数控机床的功能。例如,利用计算机图形显示功能,检查编程的刀具轨迹,纠正编程错误,还可检查刀具与机床、夹具碰撞的可能性等;利用计算机网络通信的功能,便于数控机床组成生产线。

(3) 可靠性高 计算机数控系统可使用磁带、软盘等许多输入装置,避免了以往数控机床由于频繁地开启光电阅读机而造成的信息出错的缺点。与硬件数控相比,计算机数控尽量减少硬件电路,显著地减少了焊点、接插件和外部连线,提高了可靠性。此外,计算机数控系统一般都具备自诊断功能,可及时指出故障原因,便于维修或预防操作失误,减少停机时间。这一切使得现代数控系统的无故障运行时间大为提高。

(4) 易于实现机电一体化 由于计算机电路板上采用大规模集成电路和先进的印制电路排版技术,只要采用数块印制电路板即可构成整个控制系统,而将数控装置连同操作面板装入一个不大的数控箱内,有力地促进了机电一体化。

(5) 经济性好 采用微机数控系统后,系统的性能价格比大为提高。现在不但大型企业,就是中小型企业也逐渐采用微机数控系统了。

## 三、数控机床和数控系统的发展

现代数控机床及其数控系统,目前大致向以下几个方面发展。

### (一) 高速、高精度化

要提高机械加工的生产率,其中最主要的方法是提高速度,但是这样做会降低加工精度。现代数控机床在提高加工速度的同时,也在进行高精度化。目前已可在 $0.1\mu\text{m}$ 的最小设定单



位时，进给速度达 24m/min。要做到这一点，就对机械和数控系统提出更高的要求。

### 1. 机械方面

例如机床主轴要高速化，就要提高主轴和机床机械结构的动、静态刚度；采用能承受高速的机械零件，如采用陶瓷球的滚珠轴承等。

### 2. 数控系统方面

主要是提高计算机的运算速度。现代数控系统已从 16 位的 CPU，发展到普遍采用 32 位的 CPU，并向 64 位的 CPU 发展。主机频率由 5MHz 提高到 20~33MHz。有的系统还制造了插补器的专用芯片，以提高插补速度；有的采用多 CPU 系统，减轻主 CPU 负担，进一步提高控制速度。

### 3. 伺服系统方面

(1) 采用数字伺服系统 使伺服电动机的位置环、速度环的控制都实现数字化。FANUC 15 系列开发出专用的数字信号处理器，位置指令输入后，它与从脉冲编码器来的位置信息，以及检测出的电动机电流信息一起，在专用的微处理器芯片内，进行控制位置、速度和电动机电流的运算，最后向功率放大器发出指令，以达到对电动机的高速、高精度控制。

(2) 采用现代控制理论提高跟随精度 当数控系统发出位置指令后，由于机械部分不能很快响应而会产生滞后现象，影响了加工精度。现代控制理论中有各种算法能够实现高速和高精度的伺服控制，但是，由于它们的计算方法太复杂，以往的计算机运算速度不够，很难实现。现在计算机的运算速度和存储容量都加大很多，有时还可采用专用芯片的办法，使复杂的计算能够在线实现，使得滞后量减少很多，提高了跟随精度。

(3) 采用高分辨率的位置编码器 一般交流伺服电动机轴上装有回转编码器（脉冲发生器）用来检测电动机的角位移。显然，编码器的分辨率越高，则电动机转动角位移就越精确。现代高分辨率位置编码器绝对位置的测量可达 163840 脉冲/转。

(4) 实现多种补偿功能 数控系统能实现多种补偿功能，提高数控机床的加工精度和动态特性。数控系统的补偿功能主要用来补偿机械系统带来的误差。例如：

- 1) 直线度的补偿。随着某一轴的运动，对另一轴加以补偿，提高工作台运动的直线度；
- 2) 采用新的丝杠导程误差补偿方法。用几条近似线表示导程误差，仅对其中几个点进行补偿。此法可减少补偿数据的设定点数，使补偿方法大为简化；
- 3) 丝杠、齿轮间隙补偿；
- 4) 热变形误差补偿，用来补偿由于机床热变形而产生机床几何位置变化引起的加工误差；
- 5) 刀具长度、半径等补偿；
- 6) 存储型补偿。这种补偿方法，可根据机床使用时的实际情况（如机床零件的磨损情况等）适时地修订补偿值。

### (二) 提高数控系统的可靠性

提高数控系统的可靠性，可大大降低数控机床的故障率。新型数控系统大量使用大规模和超大规模集成电路，还采用专用芯片提高集成度以及使用表面封装技术等方法，减少了元器件数量和它们之间的连线和焊点数目，从而大幅度降低系统的故障率。

此外，现代数控系统还具有人工智能（AI）故障诊断系统，用它来诊断数控系统及机床的故障，把专家们所掌握的对于各种故障原因及其处置方法作为知识库储存到计算机的存储器中，以知识库为依据来开发软件，分析查找故障原因。只要通过回答显示器提出的简单问

题，就能和专家一样诊断出机床的故障原因以及提出排除故障的方法。

### （三）CNC 系统的智能化

由于 CNC 系统使用的计算机容量越来越大，运算速度越来越快，使得 CNC 系统不仅能完成机床的数字控制功能，而且还可以充分利用软件技术，使系统智能化，给使用者以更大的帮助。例如，将迄今为止必须由程序员决定的零件的加工部位、加工工序、加工顺序等也可由 CNC 系统自动地决定。操作者只要将加工形状和必要的毛坯形状输进 CNC 系统，就能自动生成加工程序。这样，NC 加工的编程时间大为缩短，即使经验不足的操作者也能进行操作。

CNC 系统如何与人工智能技术相结合，尚待发展。除了上述在故障诊断和编程方面的应用外，还有更大的领域留待我们去探索。

### （四）具有更高的通信功能

越来越多的工厂希望将多台数控机床组成各种类型的生产线或者 DNC (Direct Numerical Control 直接数字控制) 系统。这就要求 CNC 系统提高联网能力。一般 CNC 系统都具有 RS232 远距离串行接口，可以按照用户的格式要求，与同一级计算机进行多种数据交换。

为了满足不同厂家、不同类型数控机床联网功能要求，现代数控系统大都具有 MAP (制造自动化协议) 接口，现在已实现了 MAP3.0 版本，并采用光缆通信，以提高数据传送速度和可靠性。

## 四、机械制造系统的发展

在现代生产中，为了满足多品种、小批量、产品更新换代周期快的要求，原来以单功能组成机床为主体的生产线，已不能适应机械制造业日益提高的要求，因而具有多功能和一定柔性的设备和生产系统相继出现，促使数控技术向更高层次发展。现代生产系统主要有柔性制造单元 FMC (Flexible Manufacturing Cell)、柔性制造系统 FMS (Flexible Manufacturing System) 和计算机集成制造系统 CIMS (Computer Integrated Manufacturing System)。以下简要介绍这三种生产系统。

### （一）柔性制造单元 (FMC)

柔性制造单元是在制造单元的基础上发展起来的，又具有一定的柔性。所谓柔性是指能够较容易地适应多品种、小批量的生产功能，通过编程或稍加调整就可同时加工几种不同的工件。FMC 可由一台或少数几台设备组成，具有独立自动加工的功能，又部分具有自动传送和监控管理功能，可实现某些种类的多品种小批量的加工。有些 FMC 还可实现 24h 无人运转。由于它的投资较柔性制造系统 FMS 少很多，技术上又容易实现，因而深受用户欢迎。

FMC 可以作为 FMS 中的基本单元，若干个 FMC 可以发展组成 FMS，因而 FMC 可看作企业发展过程中的一个阶段。

FMC 有两大类，一类是数控机床配上机器人，另一类是加工中心配上托盘交换系统。

#### 1. 配有机器人的 FMC

图 1-1 中，加工中心 3 上的工件 2，由机器人 1 来装卸，加工完毕的工件放在工件架上。监控器 4 协调加工中心和机器人的动作。

#### 2. 配有托盘交换系统构成的 FMC

图 1-2 是由加工中心和托盘交换系统构成的 FMC。托盘上装夹有工件，当工件加工完毕后，托盘转位，加工另一新工件，托盘支承在圆柱环形导轨上，由内侧的环链拖动而回转，链

轮由电动机驱动。托盘的选择和定位，由可编程序控制器（PLC）来实现。一般的 FMC，它的托盘数在 5 个以上。

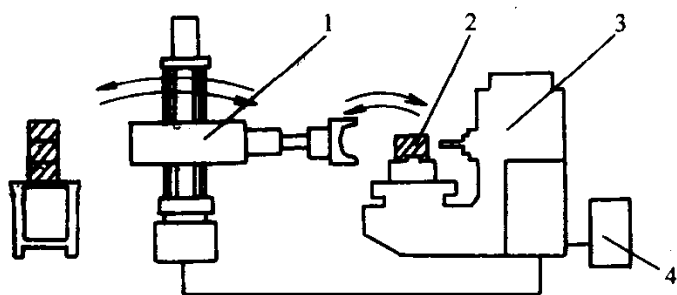


图 1-1 有机器人的 FMC

1—机器人 2—工件 3—加工中心 4—监控器

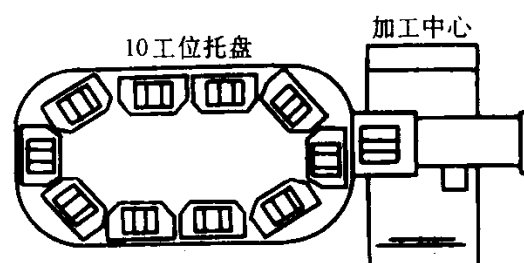


图 1-2 有托盘交换系统构成的 FMC

如果在托盘的另一端设置托盘工作站，则这种托盘系统可通过工作站与其它 FMC 发生联系。

## （二）柔性制造系统（FMS）

柔性制造系统是一个由中央计算机控制的自动化制造系统，是由一个传输系统联系起来的一些设备（通常是具有换刀装置的数控机床或加工中心）。传输装置把工件放在托盘或其它连接装置上送到各加工设备，使工件加工准确、迅速和自动。

采用柔性制造系统后，可显著提高劳动生产率，大大缩短制造周期和提高机床利用率，减少操作人员数量，压缩在制品数量和库存量，从而使成本大为降低，缩小了生产场地和提高了技术经济效益。

柔性制造系统由加工系统、物料输送系统和信息系统组成。现分别介绍如下：

### 1. 加工系统

加工系统中的自动化加工设备通常由 5~10 台数控机床和加工中心组成，它们都带有刀具库，并具有自动换刀装置。为了达到工件的自动更换，数控机床还带有自动的托盘更换装置，这样既能实现工件装卸自动化，又能实现夜间无人化操作。

### 2. 物料输送系统

物料输送系统主要是工件和刀具的输送。分三个方面来说明：

（1）输送方式 工件输送方式常用的有环型和直线型两种。刀具输送方式也广泛采用直线型和环型，因为这两种输送方式容易实现柔性，便于控制和成本较低。

（2）输送设备 在 FMS 中使用的输送设备主要有传送带、有轨输送车、无轨输送车、堆装起重机、行走机器人等，其中以传送带、有轨输送车用得最多。

（3）输送系统结构 一般情况下，FMS 的输送系统由一种输送方式和一种输送设备构成，但也有用两种或三种输送方式和两种或三种输送设备组合而成的。通常在以 FMC 为模块组合而成的 FMS 中，单元间的外部输送设备和单元内的输送设备往往是不同类型的，单元内部使用的机器人，单元间是采用传送带。

### 3. 信息系统

信息控制系统的主要功能是：识别进入系统的工件，选择相应的数控加工程序，根据不同工件和不同的加工内容，使工件按不同顺序通过相应的机床进行加工；当工件改变时，上述内容又能自动地作相应地改变。

FMS 的控制方式大多采用中央计算机的集中控制，而控制系统则以扩展的 DNC 系统为

基础。DNC 控制由过程控制机通过其外围设备直接控制多台机床和检测设备，以及实现管理（存储）、维护（检验、修正、改变）及自动分配各机床的信息。DNC 控制系统还可完成直接控制物料流、刀具流、检测数据处理、运行数据的采集、处理、传送或打印等功能。

计算机依靠存储在文件中的各种数据，对整个 FMS 实行有效的控制。一般需要下述文件数据：零件加工程序文件、工艺路线文件、零件生产文件、托盘参考文件、工位中刀具文件和刀具寿命文件等。

### （三）计算机集成制造系统（CIMS）

计算机集成制造系统，简单地说，就是用计算机通过信息集成实现现代化的生产制造，以求得企业的总体效益。采用 CIMS 有以下好处：

（1）工程设计自动化方面 可采用现代化工程设计手段，如 CAD/CAPP/CAM（计算机辅助设计/计算机辅助工艺规划/计算机辅助制造），提高产品的研制和生产能力，保证产品设计和工艺设计质量，缩短设计周期，从而加快产品更新换代速度，满足用户要求。

（2）加工制造方面 可采用诸如 FMC、FMS、DNC 等先进技术，提高制造质量，增加制造过程的柔性；提高设备利用率，缩短产品制造周期，增强生产能力。

（3）经营管理方面 使企业的经营决策科学化。在市场竞争中，可使产品报价快速、准确和及时；在生产过程中，可有效地解决生产“瓶颈”，减少在制品，使库存量压到最低水平，减少制造过程中占用的资金，减少仓库面积，从而可降低生产成本，加速企业的资金周转。

总之，计算机集成制造系统，是通过计算机、网络、数据库等硬、软件将企业的产品设计、加工制造、经营管理等方面的所有活动集成起来，使企业的产品质量大幅度提高，缩短产品开发和生产周期，提高生产效率，降低生产成本。

CIMS 通常由管理信息系统、产品设计与制造工程设计自动化系统、制造自动化系统、质量保证系统以及计算机网络和数据库系统等六个分系统组成，它们之间的关系，如图 1-3 所示。以下分别介绍这几个分系统：

（1）管理信息系统 这个系统包括预测、经营决策、各级生产计划、生产技术准备、销售、供应、财务、成本、设备、工具、人力资源等管理信息功能，通过信息的集成，以达到缩短产品生产周期、减少占用的流动资金、提高企业的应变能力的目的。

（2）产品设计与制造工程设计自动化系统 它是用计算机来辅助产品设计、制造准备和产品性能测试等阶段的工作，就是 CAD/CAPP/CAM 系统。其目的使产品的开发更高效、优质、自动化地进行。

（3）制造自动化系统 常用的是 FMS 系统。这个系统根据产品的工程技术信息、车间层的加工指令，完成对零件毛坯加工的作业调度、制造等工作。

（4）质量保证系统 包括质量决策、质量检测与数据采集、质量评估、控制与跟踪等功能。系统保证从产品设计、制造、检验到售后服务的整个过程。

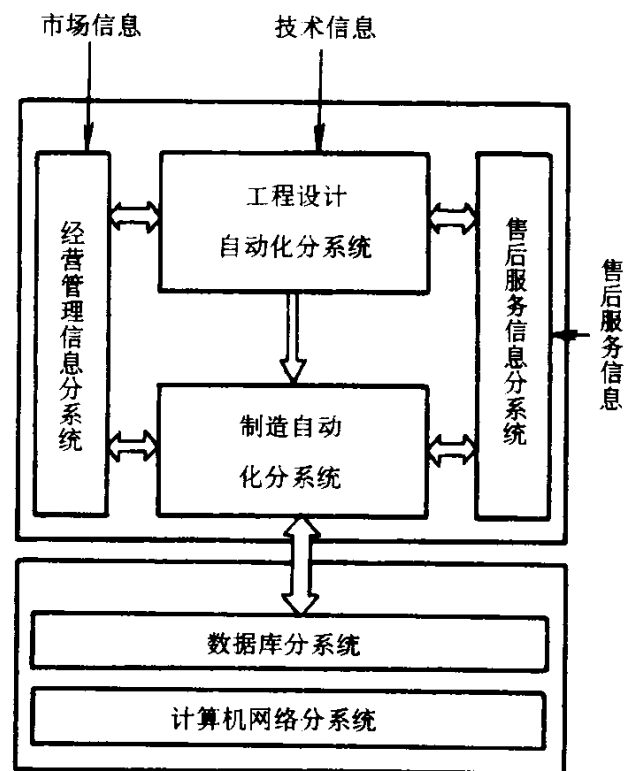


图 1-3 CIMS 的组成图

(5) 计算机网络系统 它是支持 CIMS 各个分系统的开放型网络通信系统, 采用国际标准和工业标准规定的网络协议进行互联, 以分布方式, 满足各应用分系统对网络支持服务的不同需求, 支持资源共享、分布处理、分布数据库和实时控制。

(6) 数据库系统 它是支持 CIMS 各分系统的数据库, 以实现企业数据的共享和信息集成。

由上述可知, CIMS 是建立在多项先进技术基础上的高技术制造系统, 是面向 21 世纪的生产制造技术。

## 第二节 数控机床的特点及应用范围

### 一、数控机床的优点

#### 1. 对加工对象改型的适应性强

由于在数控机床上改变加工零件时, 只需要重新编制程序就能实现对零件的加工, 它不同于传统的机床, 不需要制造、更换许多工具、夹具和检具, 更不需要重新调整机床。因此, 数控机床可以快速地由加工一种零件转变为加工另一种零件, 这就为单件、小批以及试制新产品提供了极大的便利。它不仅缩短了生产准备周期, 而且节省了大量工艺装备费用。

#### 2. 加工精度高

数控机床是按以数字形式给出的指令进行加工的, 由于目前数控装置的脉冲当量 (即每输出一个脉冲后数控机床移动部件相应的移动量) 一般达到了  $0.001\text{mm}$ , 而且进给传动链的反向间隙与丝杠螺距误差等均可由数控装置进行补偿, 因此, 数控机床能达到比较高的加工精度。对于中、小型数控机床, 定位精度普遍可达到  $0.03\text{mm}$ , 重复定位精度为  $0.01\text{mm}$ 。因为数控机床的传动系统与机床结构都具有很高的刚度和热稳定性, 而且提高了它的制造精度, 特别是数控机床的自动加工方式避免了生产者的人为操作误差, 因此, 同一批加工零件的尺寸一致性好, 产品合格率高, 加工质量十分稳定。

在采用点位控制系统的钻孔加工中, 由于不需要使用钻模板与钻套, 钻模板的坐标误差造成的影响也不复存在。又由于加工中排除切屑的条件得以改善, 可以进行有效地冷却, 被加工孔的精度及表面质量都有所提高。对于复杂零件的轮廓加工, 在编制程序时已考虑到对进给速度的控制, 可以做到在曲率变化时, 刀具沿轮廓的切向进给速度基本不变, 被加工表面就可获得较高的精度和表面质量。

#### 3. 加工生产率高

零件加工所需要的时间包括机动时间与辅助时间两部分。数控机床能够有效地减少这两部分时间, 因而加工生产率比一般机床高得多。数控机床主轴转速和进给量的范围比普通机床的范围大, 每一道工序都能选用最有利的切削用量, 良好的结构刚性允许数控机床进行大切削用量的强力切削, 有效地节省了机动时间。数控机床移动部件的快速移动和定位均采用了加速与减速措施, 因而选用了很高的空行程运动速度, 消耗在快进、快退和定位的时间要比一般机床的少得多。

数控机床在更换被加工零件时几乎不需要重新调整机床, 而零件又都安装在简单的定位夹紧装置中, 可以节省用于停机进行零件安装调整的时间。

数控机床的加工精度比较稳定, 一般只做首件检验或工序间关键尺寸的抽样检验, 因而可以减少停机检验的时间。因此, 数控机床的利用系数比一般机床的高得多。

在使用带有刀库和自动换刀装置的数控加工中心机床时，在一台机床上实现了多道工序的连续加工，减少了半成品的周转时间，生产效率的提高就更为明显。

#### 4. 减轻操作者的劳动强度

数控机床对零件的加工是按事先编好的程序自动完成的，操作者除了操作面板、装卸零件、关键工序的中间测量以及观察机床的运行之外，不需要进行繁重的重复性手工操作，劳动强度与紧张程度均可大为减轻，劳动条件也得到相应的改善。

#### 5. 良好的经济效益

使用数控机床加工零件时，分摊在每个零件上的设备费用是较昂贵的。但在单件、小批生产情况下，可以节省工艺装备费用、辅助生产工时、生产管理费用及降低废品率等，因此能够获得良好的经济效益。

#### 6. 有利于生产管理的现代化

用数控机床加工零件，能准确地计算零件的加工工时，并有效地简化了检验和工夹具、半成品的管理工作。这些特点都有利于使生产管理现代化。

数控机床在应用中也有不利的一面，如提高了起始阶段的投资，对设备维护的要求较高，对操作人员的技术水平要求较高等。

### 二、数控机床的应用范围

数控机床确实存在一般机床所不具备的许多优点，但是这些优点都是以一定条件为前提的。数控机床的应用范围正在不断扩大，但它并不能完全代替其它类型的机床，也还不能以最经济的方式解决机械加工中的所有问题。数控机床通常最适合加工具有以下特点的零件：

(1) 多品种小批量生产的零件 图 1-4 表示了三类机床的零件加工批量数与综合费用的关系。从图中看出零件加工批量的增大对于选用数控机床是不利的。原因在于数控机床设备费用高昂，与大批量生产采用的专用机床相比其效率还不够高的缘故。通常，采用数控机床加工的合理生产批量在 10~200 件之间。目前有向中批量发展的趋势。

(2) 结构比较复杂的零件 图 1-5 表示了三类机床的被加工零件复杂程度与零件批量大小的关系。通常数控机床适宜于加工结构比较复杂，在非数控机床上加工时需要昂贵的工艺装备的零件。

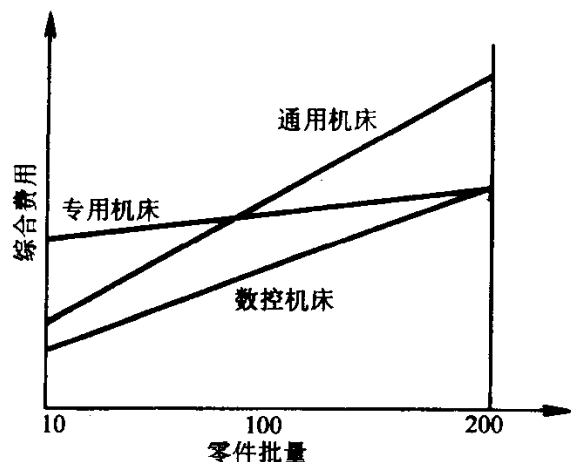


图 1-4 零件加工批量数与综合费用的关系

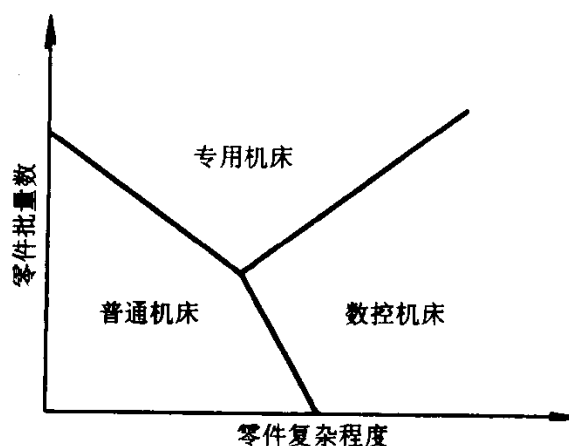


图 1-5 零件复杂程度与批量数的关系

(3) 需要频繁改型的零件 它节省了大量的工艺装备费用，使综合费用下降。

(4) 价值昂贵、不允许报废的关键零件。

(5) 需要最短生产周期的急需零件 广泛推广数控机床的最大障碍是设备的初始投资

大，由于系统本身的复杂性，又增加了维修费用。如果缺少完善的售后服务，往往不能及时排除设备故障，将会在一定程度上影响机床的利用率，这些因素都会增加综合生产费用。

考虑到以上所述的种种原因，在决定选用数控机床加工时，需要进行反复对比和仔细的经济分析，使数控机床发挥它的最好经济效益。

### 第三节 数控机床的组成和工作原理

#### 一、数控机床的组成

数控机床是一种利用数控技术，按照事先编好的程序实现动作的机床。它由程序载体、输入装置、CNC单元、伺服系统、位置反馈系统和机床机械部件构成（图 1-6、图 1-7）。

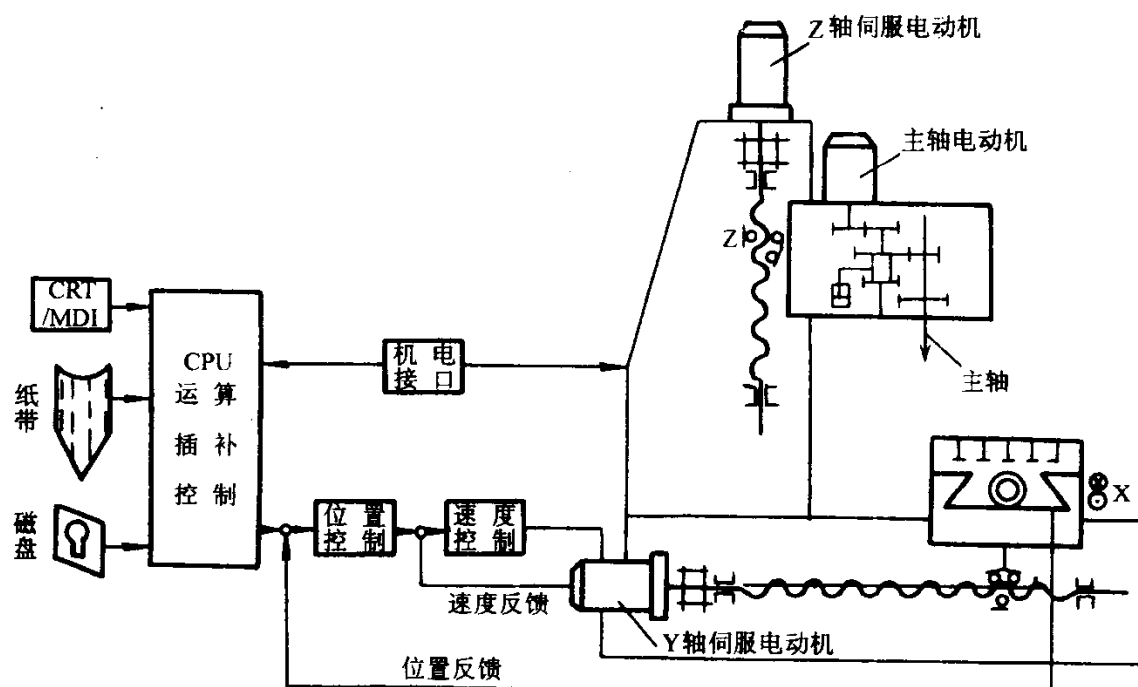


图 1-6 数控机床的组成

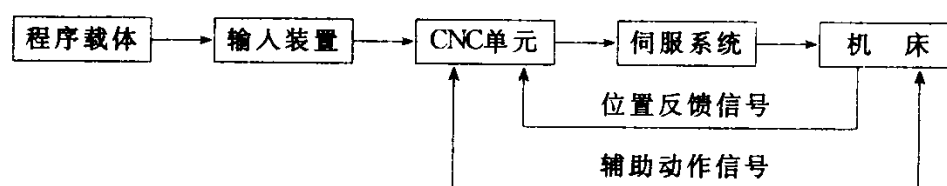


图 1-7 数控机床的组成框图

#### 二、数控机床的工作原理

在数控机床上加工零件通常经过以下几个步骤（见图 1-7）：

- 1) 根据加工零件的图样与工艺方案，用规定的代码和程序格式编写程序单，并把它记录在载体上；
- 2) 把程序载体上的程序通过输入装置输入到 CNC 单元中去；
- 3) CNC 单元将输入的程序经过处理之后，向机床各个坐标的伺服系统发出信号；
- 4) 伺服系统根据 CNC 单元发出的信号，驱动机床的运动部件，并控制必要的辅助操作；
- 5) 通过机床机械部件带动刀具与工件的相对运动，加工出要求的工件；
- 6) 检测机床的运动，并通过反馈装置反馈给 CNC 单元，以减小加工误差。当然，对于

开环数控机床来说是没有检测、反馈系统的。

现将各部分分述如下：

#### 1. 程序载体

数控机床是按照输入的零件加工程序运行的。零件加工程序中，包括机床上刀具和工件的相对运动轨迹、工艺参数（进给量、主轴转数等）和辅助运动等。将零件加工程序用一定的格式和代码，存储在一种载体上，如穿孔纸带、盒式磁带或软磁盘等，通过数控机床的输入装置，将程序信息输入到 CNC 单元内。

#### 2. 输入装置

输入装置的作用是将程序载体内有关加工的信息读入 CNC 单元。根据程序载体的不同，相应有不同的输入装置。例如：对于穿孔纸带，配用光电阅读机；对于盒式磁带，配用录放机；对于软磁盘，配用软盘驱动器和驱动卡。有时为了用户方便，数控机床可以同时具备两种输入装置。

现代数控机床，还可以通过手动方式（MDI 方式），将零件加工程序，用数控系统的操作面板上的按键，直接键入 CNC 单元；或者采用与上级机通信方式直接将加工程序输入 CNC 单元。

#### 3. CNC 单元

CNC 单元由信息的输入、处理和输出三个部分组成。程序载体通过输入装置将加工信息传给 CNC 单元，编译成计算机能识别的信息，由信息处理部分按照控制程序的规定，逐步存储并进行处理后，通过输出单元发出位置和速度指令给伺服系统和主运动控制部分。

数控机床的辅助动作，如刀具的选择与更换、切削液的启停等能够用可编程序控制器（PLC）进行控制。现代数控系统中，一般备有 PLC 附加电路板，这种结构形式可省去 CNC 与 PLC 之间的连线，结构紧凑，可靠性好，操作方便，无论从技术上或经济上都是有利的。

#### 4. 伺服系统

伺服系统是数控机床的一个重要组成部分。它和一般机床进给系统的根本区别是：一般进给系统只能稳定地传递所需的力和速度，但不能接受随机的输入信息，不能控制执行部件的位移和轨迹；而伺服系统则不然，它能将数控装置送来的指令信息加以放大，经功率放大后，通过机床进给传动元件（如齿轮减速箱和滚珠丝杠螺母等），去驱动机床移动部件（工作台或刀架），以便精确定位或按照规定的轨迹和速度运动，使机床加工出符合图样要求的零件。

伺服系统直接影响数控机床加工的速度、位置、精度、表面粗糙度等，它是数控机床的关键部件。

伺服系统中常用的驱动装置，随控制系统的不同而不同。开环伺服系统常用步进电动机，闭环伺服系统常用脉宽调速直流电动机和交流伺服电机等。

#### 5. 位置反馈系统

位置反馈分为伺服电动机的转角位移反馈和数控机床执行机构（工作台）的位移反馈两种，运动部分通过传感器将上述角位移或直线位移转换成电信号，输送给 CNC 单元，与指令位置进行比较，并由 CNC 单元发出指令，纠正所产生的误差。

#### 6. 机床的机械部件

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，尚有些特殊部件，如储备刀具的刀库、自动换刀装置（ATC）、自动托盘交换装置等。与普通机床相比，数控机床的传动系统更为简单，但机床的静态和动态刚度要求更高，传动装置的间隙要尽可能小，滑动面的摩擦系数要小，并要有合适的阻尼，以适应对数控机床高定位精度和良好控制性能的要求。

### 三、数控系统的主要工作过程

数控系统的主要任务是进行刀具和工件之间相对运动的控制，图 1-8 初步描绘了数控系统的主要工作过程。

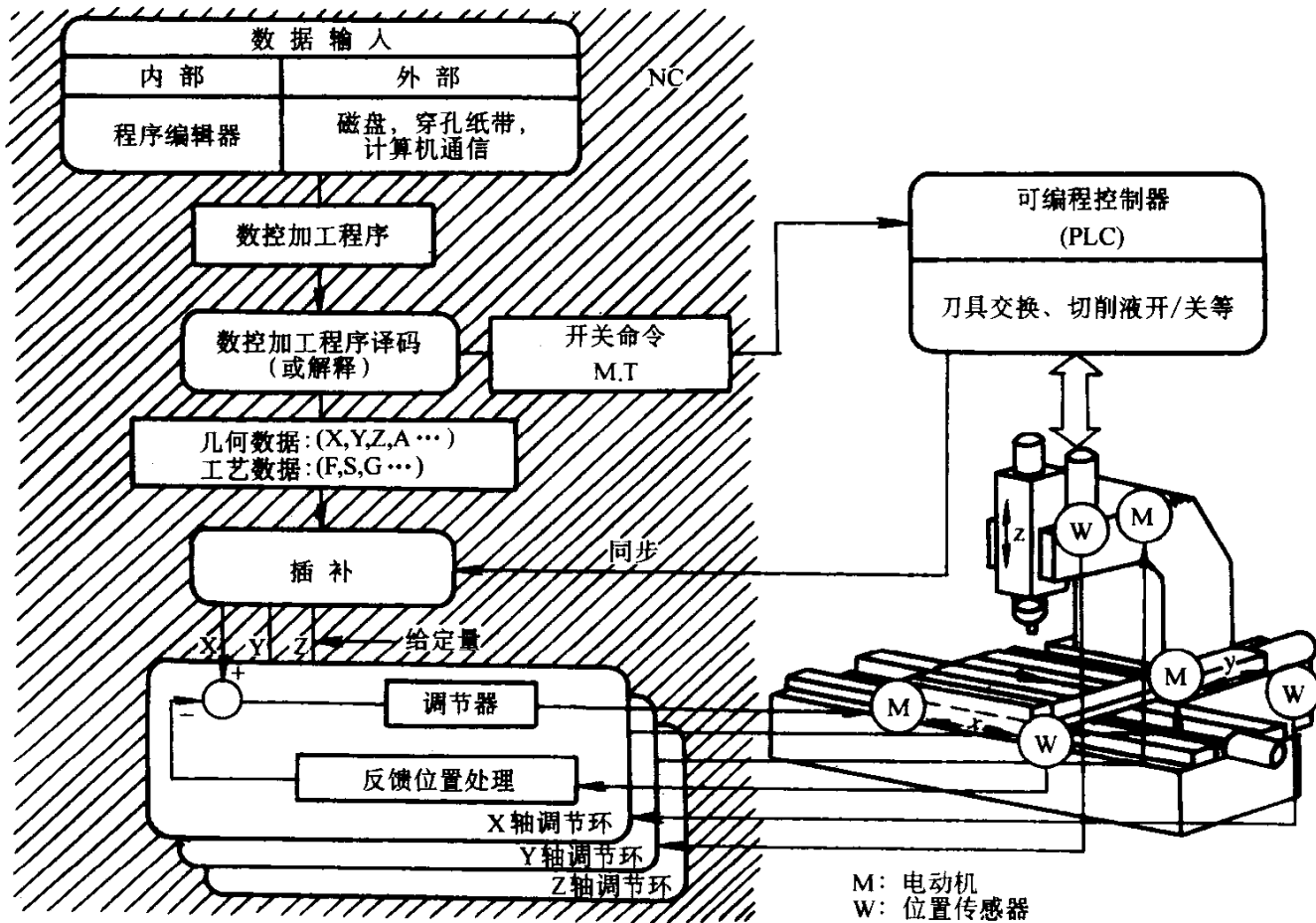


图 1-8 数控系统的主要工作过程

在接通电源后，微机数控装置和可编程控制器都将对数控系统各组成部分的工作状态进行检查和诊断，并设置初态。

当数控系统具备了正常工作的条件时，开始进行加工控制信息的输入。

工件在数控机床上的加工过程由数控加工程序来描述。按管理形式不同，编程工作可以在专门的编程场所进行，也可在机床前进行。对前一种情况，数控加工程序在加工准备阶段利用专门的编程系统产生，保存到控制介质（如纸带、磁带或磁盘）上，再输入数控装置，或者采用通信方式直接传输到数控装置，操作员可按需要，通过数控面板对读入的数控加工程序进行修改；对后一种情况，操作员直接利用数控装置本身的编辑器进行数控加工程序的编写和修改。

输入给数控装置的加工程序必须适应实际的工件和刀具位置，因此在加工前还要输入实际使用刀具的刀具参数，及实际工件原点相对机床原点的坐标位置。

加工控制信息输入后，可选择一种加工方式（手动方式或自动方式的单段方式和连续方式），启动加工运行，此时，数控装置在系统控制程序的作用下，对输入的加工控制信息进行