

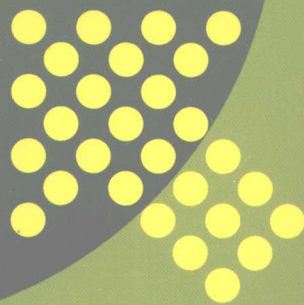
21世纪高等学校规划教材



SHUKONG BIANCHENG YU JIAGONG JISHU

数控编程与加工技术

曾国民 黄勇刚 主 编
梁志坚 何 苗 副主编
徐九南 主 审



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

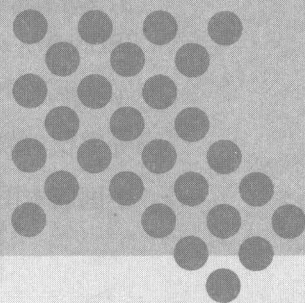
21世纪高等学校规划教材



SHUKONG BIANCHENG YU JIAGONG JISHU

数控编程与加工技术

主 编 曾国民 黄勇刚
副主编 梁志坚 何 苗 梅丽荣
编 写 胡凤娇 董 燕 姜 毅
主 审 徐九南



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书根据高职高专教育专业培养目标及规格的要求,立足高职学生实际,遵循“理论知识够用为度”的原则,本书共分 9 章,介绍了数控技术概述、数控加工过程和工艺规程,数控加工编程基础、数控车床的编程与加工、数控铣床编程、加工中心编程、数控线切割机床的编程与加工、电火花机床的编程与加工和自动编程技术。本书注重与实际相结合,通俗易懂,由浅入深,并力求全面、系统和重点突出,具有较强的针对性和实用性。

本书可作为高职高专院校数控技术专业、模具设计与制造专业、机械制造与自动化专业、计算机辅助设计与制造专业的教材,也可供从事数控加工技术工作的相关工程技术人员参考,还可作为职业技能鉴定的培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

数控编程与加工技术/曾国民,黄勇刚主编. —北京:中国电力出版社,2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8162 - 6

I. 数… II. ①曾… ②黄… III. ①数控机床—程序设计—高等学校—教材②数控机床—加工—高等学校—教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 001148 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 2 月第一版 2009 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 279 千字

定价 18.40 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

数控技术是一种集机械、电气、光学、计算机及测量技术等为一体的知识密集型技术，它是制造业实现现代化、柔性化、集成化生产的基础，同时也是提高产品质量，提高生产效率必不可少的物质手段。数控技术的广泛应用给传统制造业的生产方式、产品结构、产业结构带来深刻的变化，也给传统的机械、机电专业的人才带来新的机遇和挑战。

数控技术在机械制造业的广泛应用，已成为国民经济发展的强大动力。专家们预言“21世纪机械制造业是竞争的时代，其实质是数控技术的竞争”。

随着教育的不断深入，高等职业教育迅速发展，进入到一个新的历史阶段。本书根据高职高专教育专业培养目标及规格的要求，结合教育部“高职高专教育机电类专业人才培养规格和课程体系改革与实践的研究与实践”课题的研究成果，并结合编者多年来在数控编程与数控技术应用领域的教学和生产实践的丰富经验编写而成。

本书的主要内容包括：数控技术概述，数控编程基础知识，数控加工工艺规程，数控车床的编程与加工，数控铣床的编程与加工，加工中心的编程与加工，数控线切割机床编程与加工，电火花机床的编程与加工，CAD/CAM自动编程系统简介等。

本书在内容的选择上，根据高等职业教育教学要求，立足高职学生实际，遵循“理论知识够用为度”的原则，突出实用性、综合性、先进性；在编写方式上，以“讲清概念，强调应用”为目的，通俗易懂，由浅入深，并力求全面、系统和重点突出。

全书共9章，其中第1章、第9章由江西赣江职业技术学院曾国民编写，第2章由江西赣江职业技术学院胡凤娇编写，第3章由江西赣江职业技术学院何苗编写，第4章由江西赣江职业技术学院姜毅编写，第5章由江西赣江职业技术学院梅丽荣编写，第6章由江西城市学院黄勇刚编写，第7章由江西赣江职业技术学院董燕编写，第8章由江西旅游商贸职业学院梁志坚编写。全书由江西赣江职业技术学院曾国民统稿，江西赣江职业技术学院徐九南教授主审。

本书可作为高职高专院校数控技术专业、模具设计与制造专业、机电一体化专业、计算机辅助设计与制造专业的教材，也可供从事数控加工技术工作的相关工程技术人员参考，或作为职业技能鉴定的培训教材。

由于编者的能力和水平有限，书中难免有不足或错误之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2008年12月

目 录

前言	
第1章 数控技术概述	1
1.1 概述	1
1.2 数控机床的分类	6
1.3 数控机床的特点和应用范围	9
1.4 数控机床的发展趋势与作用	10
思考题与习题	13
第2章 数控加工过程和工艺规程	14
2.1 基本概念	14
2.2 机械加工工艺规程概述	17
2.3 零件图的研究和工艺分析	23
2.4 毛坯的选择	24
2.5 定位基准的选择	26
2.6 工艺路线的拟订	28
2.7 工序内容的设计	32
2.8 数控机床的加工特点	37
思考题与习题	40
第3章 数控加工编程基础	42
3.1 数控编程概论	42
3.2 数控机床坐标系	48
3.3 常用数控编程指令	52
3.4 数控编程中的数学处理	56
思考题与习题	60
第4章 数控车床的编程与加工	61
4.1 数控车床加工的基础知识	61
4.2 数控车床编程的基础知识	62
4.3 数控车床编程的基本方法	67
4.4 数控车床加工实例	77
思考题与习题	82
第5章 数控铣床编程	84
5.1 典型数控铣床的性能和参数	84
5.2 数控铣床编程基础	85
5.3 数控铣床编程指令	89
5.4 宏程序	102

思考题与习题	112
第 6 章 加工中心编程	113
6.1 加工中心概述	113
6.2 加工中心的分类	115
6.3 加工中心编程基础	115
6.4 孔加工固定循环指令	116
思考题与习题	123
第 7 章 数控线切割机床的编程与加工	124
7.1 数控电火花线切割加工概述	124
7.2 数控电火花线切割的加工工艺	127
7.3 数控电火花线切割机床编程	133
7.4 数控电火花线切割加工实例	138
思考题与习题	141
第 8 章 电火花机床的编程与加工	142
8.1 电火花概述	142
8.2 数控电火花机床的编程	148
8.3 电火花加工实例和模具加工实例	151
思考题与习题	154
第 9 章 自动编程技术	155
9.1 自动编程简介	155
9.2 MasterCAM 的特点与功能	159
9.3 CAD/CAM 技术的发展趋势	176
思考题与习题	177
参考文献	178

第1章 数控技术概述

本章要点

- ▶ 数控的概念
- ▶ 数控机床的概念与组成
- ▶ 数控机床的分类
- ▶ 数控机床的发展趋势
- ▶ 数控技术在先进制造技术中的作用

1.1 概 述

1.1.1 什么是数控机床

数控即数字控制，是指用数字信号形成的控制程序对一台或一台以上机械设备的运动及其加工过程进行控制的一种自动化技术，简称 NC (Numerical Control)。

数控机床，简单地说，就是采用了数控技术的机床或者说装备了数控系统的机床。即将机床的各种动作、工件的形状、尺寸以及机床的其他功能用一些数字代码表示，把这些数字代码通过信息载体输入给数控系统，数控系统经过译码、运算以及处理，发出相应的动作指令，自动地控制机床的刀具与工件的相对运动，从而加工出所需要工件。

实际上，数控机床就是一种具有数控系统的自动化机床，所以说数控机床是最典型的机电一体化产品。

1.1.2 数控技术的产生与发展

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，在机械制造工业中并不是所有的产品零件都需要进行大批量生产，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，这种改装与调整是不可能实现的。

为了解决这些问题，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。它极其有效地解决了上述一系列矛盾，为单件、小批量生产的精密复杂零件提供了自动化加工手段。

随着电子技术的发展，1946年世界上第一台电子计算机问世，由此掀开了自动化技术的新篇章。1948年美国北密支安的一个小型飞机工业承包商帕森斯公司（Parsons Co.）在制造飞机的框架及直升机的转动机翼时，提出了采用电子计算机对加工轨迹进行控制和数据处理的设想，后来得到美国空军的支持，并与美国麻省理工学院（MIT）合作，于1952年研制出第一台三坐标数控铣床，用于加工直升机叶片轮廓的检查样板。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，专用计算机采用的是电子管元件，逻辑运算与控制采用硬件连接的电路，是公认的世界第一台数控机床。

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。这时数控机床的控制系统（专用电子计算机）采用的是电子管，其体积庞大，功耗高，仅在一些军事部门中承担加工普通机床难以加工的形状复杂零件的任务。这是第一代数控系统。

1959年晶体管出现，电子计算机应用晶体管元件和印刷电路板，从而使机床数控系统跨入了第二代。

1965年，数控装置开始采用小规模集成电路，使数控装置的体积减小、功耗降低及可靠性提高，但仍然是硬件逻辑数控系统。数控系统发展到第三代。

以上三代，都属于硬件逻辑数控系统（称为NC）。由于点位控制的数控系统比轮廓控制的数控系统要简单得多，在该阶段，点位控制的数控机床得到大发展，有资料统计到1966年，实际使用的6000台数控机床中，85%是点位控制的数控机床。

1970年，美国芝加哥国际机床展览会首次展出用小型计算机控制的数控机床，这是世界上第一台计算机数字控制（CNC）的数控机床。数控系统进入第四代。

20世纪70年代初，微处理机出现，美、日、德等国都迅速推出了以微处理机为核心的数控系统，这样组成的数控系统，称为第五代数控系统（MNC）。

在近20多年内，在生产中实际使用的数控系统大多为第五代数控系统，其性能和可靠性随着技术的发展得到了根本性的提高。

从20世纪90年代开始，微电子技术和计算机技术的发展突飞猛进，PC微机的发展尤为突出，无论是系统软硬件还是外围器件进展日新月异，计算机采用的芯片集成化程度越来越高，功能越来越强，而成本却越来越低，原来在大、中型机上才能实现的功能现在在微型机上就可以实现。在美国首先推出了基于PC微机的数控系统，即PCNC系统，它被划入了所谓的第六代数控系统。

目前，世界主要工业发达国家的数控机床已进入批量生产阶段，如美国、日本、德国、法国等，其中日本发展最快。1977年时，日本年产数控机床5400多台，到1985年，日本年产数控机床约为50000台，数控化率约为70%，居世界第一位。

我国从1958年开始研制数控机床，并试制成功第一台电子管数控机床，如图1.1所示。

1965年开始研制晶体管数控系统，直到20世纪60年代末至70年代初才研制成功。曾研究出数控劈锥铣床、非圆插齿机、数控立铣床，以及数控车床、数控镗床、数控磨床、加工中心等。这一时期国产数控系统的稳定性、可靠性尚未得到很好的解决，因而也限制了国

产数控机床的发展。而数控线切割机床由于其结构简单,价格低廉,使用方便,得到了较快的发展。据资料统计,1973—1979年期间,我国共生产数控机床4108台,其中数控线切割机床占86%左右。

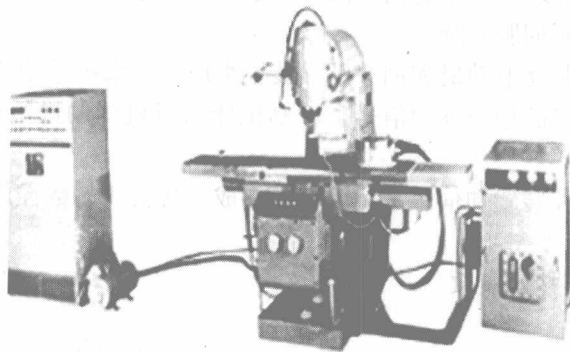


图 1.1 我国第一台数控机床

20世纪80年代初随着改革开放政策的实施,我国从国外引进技术。在引进、消化、吸收国外先进技术的基础上,进行了大量的开发工作,进而推动了我国数控机床新的发展高潮,使我国数控机床在品种上、性能上以及水平上均有了新的飞跃。2005年,我国机床市场消费额达109亿美元,位居世界第一。

我国2004年的统计数据如下:

- 数控机床厂家: 100
- 数控系统厂家: 50
- 数控机床配套厂家: 300
- 年产量: 14 053 台
- 数控机床品种: 1 300
- 产量数控化率: 8% (1995年为3.6%)

总的来说,我国数控机床总量供给能力不凡,产品品种无重要缺门空白,数控机床进入成熟期。但与先进国家相比尚有20~40年的差距,机床数控化率 $<10\%$,数控机床应用水平较低。在现有数控机床中,还有待于进一步提高其利用率。随着我国加入WTO,日益成为世界制造业中心,各行各业对数控机床的需要将会很大,数控机床也必然在国家建设中发挥更大的作用。

1.1.3 数控机床的组成及特点

数控机床主要由程序介质、数控装置、伺服系统、机床本体4部分组成,如图1.2所示。

其中,程序介质用于记载机床加工零件的全部信息,如零件加工的工艺过程、工艺参数、位移数据、切削速度等。常用的有磁带、磁盘等。也有一些数控机床采用操作面板上的按钮和键盘将加工程序直接输入或通

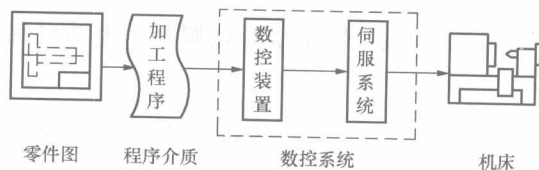


图 1.2 数控机床的组成

过串行口将计算机上编写的加工程序输入到数控系统。在 CAD/CAM 集成系统中,其加工程序可不需任何载体直接输入到数控系统。

数控装置是控制机床运动的中枢系统,它的基本任务是接收程序介质送来的信息,按照规定的控制算法进行插补运算,把它们转换为伺服系统能够接受的指令信号,然后将结果由输出装置送到各坐标控制伺服系统。

伺服系统是由伺服驱动电动机和伺服驱动装置组成,是数控系统的执行部件。它的基本作用是接收数控装置发来的指令脉冲信号,控制机床执行机构的进给速度、方向和位移量,以完成零件的自动加工。

通常数控系统由数控装置和伺服系统两部分组成,各公司的数控产品也是将两者作为一体的。

1.1.4 数控机床的主要技术参数

1. 主要规格尺寸

数控车床主要有床身上最大工件回转直径、刀架上最大工件回转直径、加工最大工件长度、最大车削直径等规格尺寸;数控铣床主要有工作台面尺寸、工作台 T 形槽、工作行程等规格尺寸。

2. 主轴系统

数控机床主轴采用直流或交流电动机驱动,具有较宽调速范围和较高回转精度,主轴本身刚度与抗振性比较好。现在数控机床主轴普遍达到 5000~10 000r/min,甚至更高的转速,对提高加工质量和各种小孔加工极为有利;主轴可以通过操作面板上的转速倍率开关直接改变转速;在加工端面时主轴具有恒定切削速度(恒线速单位: mm/min)。

3. 进给系统

有进给速度范围、快进(空行程)速度范围、运动分辨率(最小移动增量)、定位精度和螺距范围等主要技术参数。

(1) 进给速度。是影响加工质量、生产效率和刀具寿命的主要因素,直接受到数控装置运算速度、机床动特性和工艺系统刚度限制。其中,最大进给速度为加工的最大速度,最大快进速度为不加工时移动的最快速度。进给速度可通过操作面板上的进给倍率开关调整。

(2) 脉冲当量(分辨率)。指两个相邻分散细节之间可以分辨的最小间隔,是重要的精度指标。其有两个方面的内容:一是机床坐标轴可达到的控制精度(可以控制的最小位移增量),表示数控装置每发出一个脉冲时坐标轴移动的距离,称为实际脉冲当量或外部脉冲当量;二是内部运算的最小单位,称之为内部脉冲当量,一般内部脉冲当量比实际脉冲当量设置得要小,为的是在运算过程中不损失精度,数控系统在输出位移量之前,自动将内部脉冲当量转换成外部脉冲当量。

实际脉冲当量决定于丝杠螺距、电动机每转脉冲数及机械传动链的传动比,其计算公式为

$$\text{实际脉冲当量} = \text{传动比} \times \frac{\text{丝杠螺距}}{\text{电动机每转脉冲数}}$$

脉冲当量是设计数控机床的原始数据之一,其数值的大小决定数控机床的加工精度和加工表面质量。目前普通数控机床的脉冲当量一般采用 0.001mm,精密或超精密数控机

床的脉冲当量采用 0.000 1mm。脉冲当量越小，数控机床的加工精度和加工表面质量越高。

(3) 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在确定的终点所达到的实际位置的精度。因此移动部件实际位置与理想位置之间的误差称为定位误差。定位误差包括伺服系统、检测系统、进给系统等误差，还包括移动部件导轨的几何误差等。定位误差将直接影响零件加工的位置精度。

重复定位精度是指在同一台数控机床上，应用相同程序、相同代码加工一批零件，所得到的连续结果的一致程度。重复定位精度受伺服系统特性、进给系统的间隙与刚性以及摩擦特性等因素的影响。一般情况下，重复定位精度是成正态分布的偶然性误差，它影响一批零件加工的一致性，是一项非常重要的性能指标。对于中小型数控机床，定位精度普遍可达士 0.01mm，重复定位精度为士 0.005mm。

4. 刀具系统

数控车床包括刀架工位数、工具孔直径、刀杆尺寸、换刀时间、重复定位精度各项内容。加工中心刀库容量与换刀时间直接影响其生产率，通常中小型加工中心的刀库容量为 16~60 把，大型加工中心可达 100 把以上。

换刀时间是指自动换刀系统将主轴上的刀具与刀库刀具进行交换所需要的时间。

1.1.5 数控装置的主要功能

(1) 控制轴数与联动轴数。控制轴数说明数控系统最多可以控制多少坐标轴，其中包括移动轴和回转轴。基本坐标轴是 X、Y、Z 轴，当多于 3 个轴时，往往是 X、Y、Z 的平行辅助轴或回转轴。

联动轴数是指数控系统按加工要求控制同时运动的坐标轴数，目前有两轴联动、三轴联动、四轴联动、五轴联动等。三轴联动数控机床可以加工空间复杂曲面；四轴联动、五轴联动数控机床可以加工宇航叶轮、螺旋桨等零件。

如某数控机床具有 X、Y、Z 三个坐标轴运动方向，而数控系统只能同时控制两个坐标 (XY、YZ 或 XZ) 方向的运动，则该机床的控制轴数为三轴，而联动轴数为两轴。

(2) 插补功能。指数控机床能够实现的线型能力。插补功能除了直线、圆弧插补外，许多数控系统增加了螺旋线插补、极坐标插补、圆柱面插补、抛物线插补、指数函数插补、渐开线插补、样条插补、假想轴插补以及曲面直接插补等功能。机床插补功能越强，说明能够加工的轮廓种类越多。

(3) 进给功能。包括快速进给 (空行程)、切削进给、手动连续进给、点动进给、进给率修调 (倍率开关)、自动加减速等功能。

(4) 主轴功能。可实现恒转速、恒线速、定向停止及转速修调 (倍率开关)。

恒线速即主轴自动变速，使刀具对工件切削点的线速度保持不变。

主轴定向停止即换刀、精镗后退刀前，主轴在其轴向准确定位。

(5) 刀具功能。指刀具的自动选择和自动换刀。

(6) 刀具补偿。包括刀具位置补偿、半径补偿和长度补偿功能。

半径补偿如车刀的刀尖半径、铣刀半径的补偿；长度补偿如铣床、加工中心沿加工深度方向对刀具长度变化的补偿。

(7) 机械误差补偿。指系统可自动补偿机械传动部件因间隙产生的误差。

(8) 操作功能。数控机床通常有单程序段的执行和跳段执行、试运行、图形模拟、机械锁住、暂停和急停等功能,有的还有软键操作功能。

(9) 程序管理功能。指对加工程序的检索、编制、修改、插入、删除、更名、锁住、在线编辑即后台编辑(在执行自动加工的同时进行编辑)以及程序的存储通信等。

(10) 图形显示功能。利用监视器(CRT)进行二维或三维、单色或彩色、图形可缩放、坐标可旋转的刀具轨迹动态显示。

(11) 辅助编程功能。如固定循环、镜像、图形缩放、子程序、宏程序、坐标旋转、极坐标等功能,可减少手工编程的工作量和难度,尤为适合三维复杂零件和大工作量零件。

(12) 自诊断报警功能。指数控系统对其软、硬件故障的自我诊断能力,该功能用于监视整个加工过程是否正常,并及时报警。

(13) 通信与通信协议。数控系统都配有RS232C或DNC接口,为进行高速传输设有缓冲区。高档数控系统还可与MAP相连,能够适应FMS、CIMS的要求。

1.2 数控机床的分类

数控机床种类很多,规格不一,人们从不同的角度对其进行了分类。

1.2.1 按机械运动轨迹分类

数控机床按其刀具与工件相对运动的方式,可以分为点位控制、直线控制和轮廓控制。

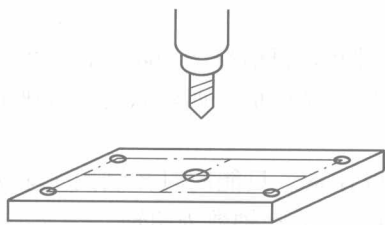


图 1.3 点位控制钻孔加工示意图

1. 点位控制数控机床

这类数控机床的特点是要求保证点与点之间的准确定位。它只控制行程的终点坐标值,而不管从一个孔到另一个孔是按照什么轨迹运动,在刀具运动过程中,不进行切削加工,如图 1.3 所示。

此类数控机床有数控钻床、数控镗床、数控冲床、三坐标测量机、印刷电路板钻床等。

2. 直线控制数控机床

这类数控机床的特点是不仅要控制行程的终点坐标值,还要保证在两点之间机床的刀具走的是一条直线,而且在走直线的过程中往往要进行切削,如图 1.4 所示。

此类数控机床有数控车床、数控铣床、数控磨床、数控镗床和加工中心等。

现代组合机床采用数控技术,驱动各种动力头、多轴箱轴向进给钻、镗、铣等加工,也算是一种直线控制数控机床。直线控制也称为单轴数控。

3. 轮廓控制的数控机床

这类数控机床的特点是不仅要控制行程的终点坐标值,还要保证两点之间的轨迹要按一定的曲线进行。即这种系统必须能够对两个或两个以上坐标方向的同时运动进行严格的连续控制,如图 1.5 所示。

现代数控机床绝大部分都具有两坐标或两坐标以上联动、刀具半径补偿、刀具长度补偿、机床轴向运动误差补偿、丝杠螺距误差补偿、齿侧间隙误差补偿等一系列功能。

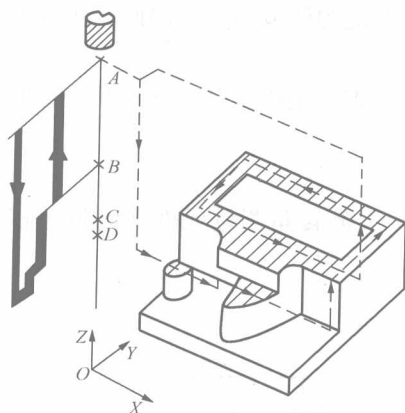


图 1.4 直线控制切削加工示意图

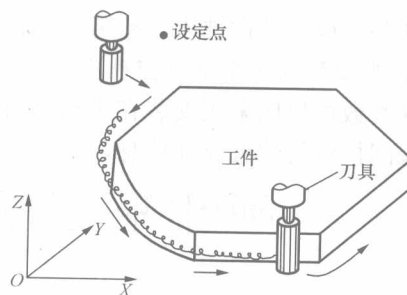


图 1.5 轮廓控制切削加工

1.2.2 按伺服系统的类型分类

1. 开环伺服系统数控机床

这类机床没有来自位置传感器的反馈信号，数控系统将零件程序处理后，输出数字指令信号给伺服系统，驱动机床运动。采用步进电动机的伺服系统就是一个开环系统，如图 1.6 所示。

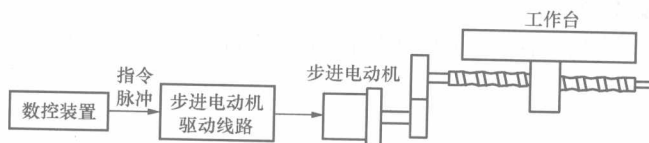


图 1.6 开环伺服系统

这类机床的优点是结构简单，较为经济，维护维修方便。但是速度及精度低，适于精度要求不高的中小型机床，多用于对旧机床的数控化改造。

2. 闭环伺服系统数控机床

这类机床上装有位置检测装置，直接对工作台的位移量进行测量。数控装置发出进给信号后，经伺服驱动使工作台移动；位置检测装置检测出工作台的实际位移，并反馈到输入端，与指令信号进行比较，驱使工作台向其差值减小的方向运动，直到差值等于零为止。如图 1.7 所示。

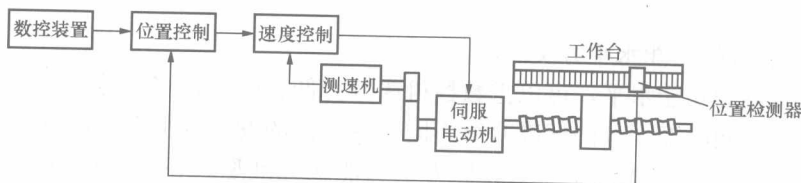


图 1.7 闭环伺服系统

这类数控机床可以消除由于传动部件制造中存在的精度误差给工件加工带来的影响，从而达到很高的精度。但是由于很多机械传动环节包括在闭环控制的环路内，各部件的摩擦特

性、刚性以及间隙等都是非线性量，直接影响到伺服系统的调节参数。因此，闭环系统的设计和调整都非常困难。

闭环系统的优点是精度高，但其系统设计和调整困难、结构复杂、成本高，主要用于一些精度要求很高的镗铣床、超精车床、超精铣床等。

3. 半闭环伺服系统数控机床

这类数控机床采用安装在进给丝杠或电动机端头上的转角测量元件来测量丝杠旋转角度，来间接获得位置反馈信息，如图 1.8 所示。

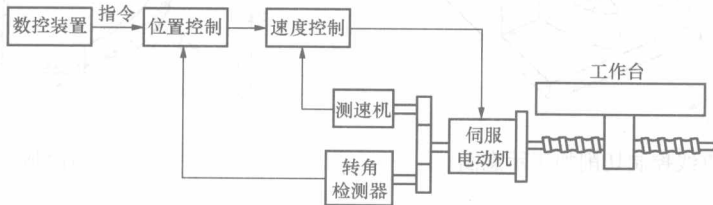


图 1.8 半闭环伺服系统

这种系统的闭环环路内不包括丝杠、螺母副及工作台，因此可以获得稳定的控制特性；而且由于采用了高分辨率的测量元件，可以获得比较满意的精度及速度。大多数数控机床采用半闭环伺服系统。

1.2.3 按控制坐标数分类

控制轴数目和联动轴数目决定了机床所能加工零件形状的复杂程度，按机床的控制轴数目分类如下：

1. 两坐标轴数控机床

两坐标数控机床有两个控制轴，可控制机床作两个坐标方向的移动。这两个坐标轴可以是联动的，如加工平面直线或曲线轮廓零件的数控铣床、数控线切割机、加工轴类零件的数控车床等。也可以是不联动的，如各类点位控制的钻床。

2. 三坐标轴数控机床

三坐标数控机床有三个控制轴，根据它不同的控制方式可有两类形式：一类在 X 、 Y 、 Z 三个移动坐标中可控制任意两个坐标联动，常称为 2.5 轴；另一类是可实现三坐标联动，用于加工空间直线或螺旋线轮廓件。

3. 多坐标数控机床

可以控制四个以上坐标轴，结构复杂、精度要求高、程序编制复杂，主要应用于加工形状复杂的零件。

1.2.4 按数控装置的功能水平分类

按照数控装置的功能水平，可以把数控机床分为低、中、高档三类，低、中、高三档的界限是相对的，不同时期划分的标准有所不同。就目前的发展水平看，可以根据表 1.1 的一些功能指标来划分，其中高、中档一般称为全功能或标准型。在我国还有经济型数控的提法，经济型数控属于低档数控，是指由单板机、单片机和步进电动机组成的数控系统和其他功能简单、价格低的数控系统，主要用于数控车床、线切割机以及旧机床的数控化改造等。随着生产水平的提高和制造业的发展，经济型数控机床已经没有什么经济价值，逐步被市场淘汰。

表 1.1 不同档次数控功能及指标

功 能	低 档	中 档	高 档
系统分辨率 (μm)	10	1	0.1
进给速度 (m/min)	8~15	15~24	24~100
伺服进给类型	开环及步进电动机系统	半闭环及直、交流伺服	闭环及直、交流伺服
联动轴数	2~3 轴	2~4 轴	5 轴或 5 轴以上
通信功能	无	RS-323C 或 DNC	RS-323C、DNC、MAP
显示功能	数码管显示	CRT、图形、人机对话	CRT、三维图形、自诊断
内装 PLC	无	有	强功能内装 PLC
主 CPU	8 位	16 位、32 位	32 位、64 位

1.2.5 按加工方式分类

(1) 金属切削类数控机床：如数控车床、加工中心、数控钻床、数控磨床、数控铣床、齿轮加工机床等。

(2) 金属成型类数控机床：如数控折弯机、数控弯管机、数控回转头压力机等。

(3) 数控特种加工机床：如数控线切割机床、数控电火花加工机床、数控激光切割机等。

(4) 其他类型的数控机床：如火焰切割机、数控三坐标测量机等。

1.3 数控机床的特点和应用范围

1.3.1 数控机床的特点

1. 加工精度高

数控机床是精密机械和自动化技术的综合，是集机械、电气、光学、计算机及测量技术等为一体的精密加工设备，机床的数控装置可以对机床运动中产生的位移、热变形等导致的误差通过测量系统进行有效补偿，具有较高的和稳定的加工精度。另外，由于数控机床是受数字信息指令控制，并且自动进行加工，所以减少了操作人员因技术水平的高低差别而产生的人为误差，提高了同批零件加工尺寸的一致性，使加工质量稳定，产品合格率提高。

2. 适应性强

数控机床灵活、通用，适应性强，可加工不同形状的工件，当加工对象的尺寸或形状发生变化时，只需对程序进行修改或重新编制即可。

3. 生产效率高

由于数控机床自动化程度高，并且综合应用了现代科学生产技术成果，与普通机床相比可提高生产效率 3~5 倍。对于复杂成形面的加工，生产效率可提高十倍，甚至几十倍。同时，数控机床能完成多种加工，如钻、铣、攻、镗等加工，粗、精加工也可利用一次装夹完成，节约了大量的生产辅助时间。对于新零件的加工很大部分工作是针对零

件进行数控程序编制,并且编程工作不需占用数控机床时间,还可以利用 CAD/CAM 软件进行自动编程,大大缩短了生产准备时间。因此,十分有利于企业产品的升级换代和新产品的开发。

4. 减轻劳动强度

操作数控机床要依靠操作者更多的智力劳动,在机床工作中特别是大批量加工中,机床是自动加工,一般操作者只需要做装夹及测量等工作,降低了操作者的劳动强度,操作者甚至可以一人同时操作多台数控机床。

5. 改善劳动条件

操作数控机床,大多数时间是操作控制键盘、观察机床加工过程中机床的运行状态,数控机床大多具有全封闭防护罩,不会有水、油和切屑溅出,可以保持工作环境的整洁,劳动条件得到改善。

6. 有利于生产管理

在数控机床上加工零件,能准确地计算加工工时和费用,工序高度集中,节省工装夹具,减少了中间检验环节和半成品的管理环节,有利于实施现代化的生产管理模式。

数控机床使用数字信息与标准代码处理、传递信息,易于建立与计算机间的通信联系,从而形成由计算机控制与管理的产品研发、设计、制造、管理及销售一体化系统。

1.3.2 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,但数控机床的技术含量高、成本高,使用维护都有一定难度,若从经济角度考虑,数控机床适用于加工:

- (1) 多品种小批量零件(合理生产批量为 10~100 件之间)。
- (2) 结构较复杂,精度要求较高或必须用数学方法确定的复杂曲线、曲面等零件。
- (3) 需要频繁改型的零件。
- (4) 钻、镗、铰、攻螺纹及铣削等工序联合的零件,如箱体、壳体等。
- (5) 价格昂贵,不允许报废的零件。

1.4 数控机床的发展趋势与作用

1.4.1 数控机床的发展趋势

随着计算机、微电子、信息、自动控制、精密检测及机械制造技术的高速发展,机床数控技术也得到了长足进步。近几年一些相关技术的发展,如刀具及新材料的发展,主轴伺服和进给伺服、超高速切削等技术的发展,以及对机械产品质量的要求愈来愈高等,加速了数控机床的发展。目前数控机床正朝着高速度、高精度、高工序集中度、高复合化和高可靠性等方向发展。世界数控技术及其装备发展趋势主要体现在以下几个方面。

1. 高速、高精、高效化

高生产率。由于数控装置及伺服系统功能的改进,其主轴转速和进给速度大大提高,减少了切削时间和非切削时间。加工中心的进给速度已达到 80~120m/min,进给加速度达 1g~2g,换刀时间小于 1s。

高加工精度。以前汽车零件精度的数量级通常为 10 μ m,对精密零件要求为 1 μ m,随着

精密产品的出现,对精度要求提到 $0.1\mu\text{m}$,有些零件甚至已达到 $0.01\mu\text{m}$,高精密零件要求提高机床加工精度,包括采用温度补偿。

对于微机电的加工,其尺寸大小一般在 1mm 以下,表面粗糙度为纳米数量级,要求数控系统能直接控制纳米机床。

2. 柔性化

包括两个方面的柔性:一是数控系统本身的柔性,数控系统采用模块化设计,功能覆盖面大,便于不同用户的需求;二是DNC系统的柔性,同一DNC系统能够依据不同生产流程的要求,使物料流和信息流自动进行动态调整,从而最大限度地发挥DNC系统的效能。

3. 工艺复合化和多轴化

数控机床的工艺复合化,是指工件在一台机床上装夹后,通过自动换刀、旋转主轴头或旋转工作台等各种措施,完成多工序、多表面的复合加工。已经出现了集钻、镗、铣功能于一身的数控机床,可完成钻、镗、铣、扩孔、铰孔、攻螺丝等工序的数控加工中心,以及车削加工中心,钻削、磨削加工中心,电火花加工中心等。数控技术的进步提供了多轴和多轴联动控制功能,如FANUC 15系统的可控轴数和联动轴数均达到24轴。

4. 实时智能化

早期的实时系统通常针对相对简单的理想环境,其作用是如何调度任务,以确保任务在规定时间内完成。而人工智能,则试图用计算模型实现人类的各种智能行为。科学发展到今天,实时系统与人工智能相互结合,人工智能正向着具有实时响应的更加复杂的应用发展,由此产生了实时智能控制这一新的领域。在数控技术领域,实时智能控制的研究和应用正沿着几个主要分支发展:自适应控制、模糊控制、神经网络控制、专家控制、学习控制、前馈控制等。例如,在数控系统中配置编程专家系统、故障诊断专家系统、参数自动设定和刀具自动管理及补偿等自适应调节系统;在高速加工时的综合运动控制中引入提前预测和预算功能、动态前馈功能;在压力、温度、位置、速度控制等方面采用模糊控制,使数控系统的控制性能大大提高,从而达到最佳控制的目的。

5. 结构新型化

一种完全不同于原来数控机床结构的新型数控机床,近年被开发成功。这种被称为“6条腿”的加工中心或虚拟轴机床(有的称并联机床),在没有任何导轨和滑台,采用能够伸缩的“6条腿”(伺服轴)支撑并联,并与安装主轴头的上平台和安装工件的下平台相连。它可实现多坐标联动加工,其控制系统结构复杂,加工精度、加工效率较普通加工中心高2~10倍。这种数控机床的出现将给数控机床技术带来重大变革和创新。

6. 编程技术自动化

随着数控加工技术的迅速发展,设备类型的增多,零件品种的增加以及形状的日益复杂,迫切需要速度快、精度高的编程技术,以便于直观检查。为弥补手工编程和NC语言编程的不足,近年来开发出多种自动编程系统,如图形交互式编程系统、数字化自动编程系统、会话式自动编程系统、语音数控编程系统等,其中图形交互式编程系统的应用尤为广泛。图形交互式编程系统是以计算机辅助设计(CAD)软件为基础,首先形成零件的图形文件,然后再调用数控编程模块,自动编制加工程序,同时可动态显示刀具的加工轨迹。其特点是速度快、精度高、直观性好、使用简便,已成为国内外先进的CAD/CAM软件所采