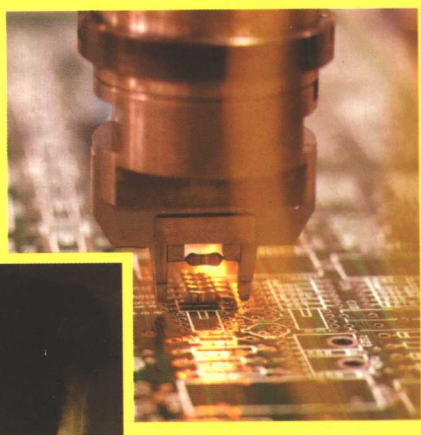
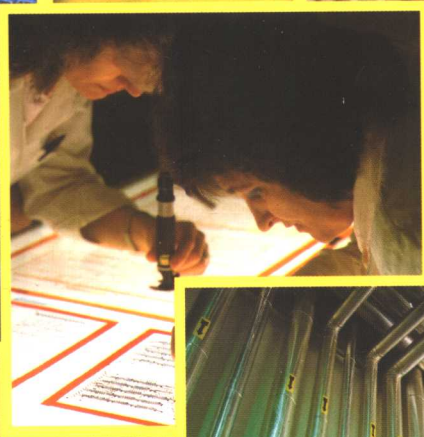
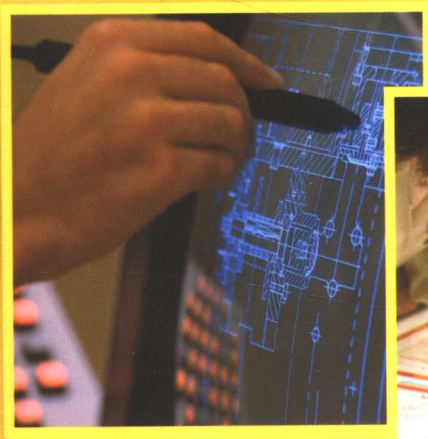




教育部高等职业教育示范专业规划教材

(机械制造及自动化专业)

数控机床编程



杜国臣 主编



教育部高等职业教育示范专业规划教材
(机械制造及自动化专业)

数控机床编程

主 编 杜国臣
副主编 李传军 李瑞斌
参 编 王 泉 王兰红 王宝龙
主 审 姜军生

机械工业出版社

本书是教育部高等职业教育机械制造及自动化示范专业规划教材。

本书是根据“高等职业教育机械类专业人才培养目标及基本规格”的要求编写的。本书内容全面、系统，重点突出，力求体现先进性、实用性。基础理论以“必需、够用、实用”为度，应用实例紧密结合生产实际。全书包括数控机床概述、数控加工编程基础、数控机床的加工工艺与图形的数学处理、数控车床编程、数控铣床编程、加工中心编程、自动编程等内容。

本书可作为高职、高专、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院机床数控技术及应用、机电一体化等专业教材，也可作为本科院校学生的实践教学和有关工厂技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床编程/杜国臣主编. —北京：机械工业出版社，2005.7

教育部高等职业教育示范专业规划教材(机械制造及自动化专业)

ISBN 7-111-16889-5

I. 数... II. 杜... III. 数控机床—程序设计—高等学校：技术学校—教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 075645 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：王世刚 宋学敏 责任编辑：崔占军 宋学敏

版式设计：霍永明 责任校对：张晓蓉

封面设计：鞠 杨 责任印制：洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷

2006 年 2 月第 1 版第 2 次印刷

787mm×1092mm/16·16.5 印张·385 千字

2001—6000 册

定价：25.00 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) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书为教育部高等职业教育示范专业规划教材，是根据“高等职业教育机械类专业人才培养目标及基本规格”的要求，并结合编者在数控机床方面的教学与实践经验编写的。

近年来，数控技术的迅速发展带动了机械加工技术的飞速发展，使传统的制造工艺发生了显著和本质的变化，许多企业逐步用数控机床替代了普通机床。这就要求工程技术人员具有自动控制、计算机等方面的知识，要求编程人员熟悉加工工艺和加工软件等基础知识，同时也要求机械加工技术人员能掌握数控机床的操作和编程知识。这种形势对高等职业教育在数控机床方面的教学也提出了新的要求，要求学生具备一定的数控机床编程及应用方面的基本知识和技能。

本书的编写指导思想是使读者通过学习了解数控机床的工作原理，掌握数控机床的加工工艺和编程方法，掌握数控机床的基本操作技能，并能把学到的知识应用到生产实际中。本书共分7章，内容包括：数控机床概述、数控加工编程基础、数控机床的加工工艺与图形的数学处理、数控车床编程、数控铣床编程、加工中心编程、自动编程等。

本书第1、2章由太原理工大学阳泉学院李瑞斌编写，第3、4章及附录由潍坊学院杜国臣编写，第5章由吉林工程技术师范学院王宝龙编写，第6章由潍坊职业学院王泉、王兰红编写，第7章由承德石油高等专科学校李传军编写。本书由杜国臣主编，由姜军生教授审稿。姜军生教授为本书的编写提出了不少宝贵的意见和建议，编者在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 数控机床概述 1

- 1.1 数控机床的基本概念 1
- 1.2 数控机床的分类 7
- 1.3 数控机床的产生与发展及技术
水平 12
- 思考题与习题 17

第 2 章 数控加工编程基础 18

- 2.1 概述 18
- 2.2 字符与代码 21
- 2.3 数控机床的坐标系 23
- 2.4 程序段与程序格式 27
- 思考题与习题 30

第 3 章 数控机床的加工工艺与图 形的数学处理 31

- 3.1 数控加工工艺分析 31
- 3.2 图形的数学处理 56
- 3.3 典型零件的数控加工工艺分析 66
- 思考题与习题 76

第 4 章 数控车床编程 79

- 4.1 概述 79
- 4.2 数控车削加工程序的编制 81
- 4.3 数控车床的操作面板及操作
简介 101

- 4.4 车削加工编程实例 109
- 思考题与习题 113

第 5 章 数控铣床编程 116

- 5.1 概述 116
- 5.2 数控铣削编程基础 118
- 5.3 数控铣床基本编程方法 123
- 5.4 数控铣床的操作面板及操作
简介 139
- 5.5 铣削加工编程实例 146
- 思考题与习题 149

第 6 章 加工中心编程 155

- 6.1 概述 155
- 6.2 加工中心加工程序的编制 159
- 6.3 加工中心操作面板简介 181
- 6.4 加工中心编程实例 183
- 思考题与习题 186

第 7 章 自动编程 189

- 7.1 概述 189
- 7.2 Master CAM 自动编程 191
- 7.3 Master CAM 综合应用实例 239
- 思考题与习题 249

附录 253

参考文献 258

第 1 章 数控机床概述

学习目标：数控机床是典型的机电一体化产品，是现代制造业的关键设备。本章主要讲述数控机床的基本概念和工作原理、数控机床的分类以及数控机床的技术与发展水平。本章要求理解并掌握数控机床的基本概念、工作原理及其分类，了解数控技术的发展趋势以及以数控机床为基础的自动化生产系统的发展。

1.1 数控机床的基本概念

1.1.1 什么是机床的数字控制

数控，即数字控制(Numerical Control,缩写为 NC)，在机床领域是指用数字化信号对机床运动及其加工过程进行控制的一种方法。数控机床是以数字指令方式控制机床各部件的相对运动和动作。例如，要求机床执行如下一条指令程序段

```
N003 G01 X90 Z-20 F0.2 S1000 T0101 M03
```

其含义为：第 3 个程序段，用 1 号刀具加工一条直线段，起点为坐标原点或上一程序段指令点，终点为程序段中给定的点(X90,Z-20)；坐标值的计算以坐标原点为基准；还指明机床主轴需正转且转速为 1 000r/min，进给部件的进给量为 0.2mm/r。从上面的程序段可以看出，指令由数字 0~9，字母 X、Z、S、F、T、M、…，符号“+”、“-”、“.”等组成，而这些都要转换成二进制数字代码输入机床的数字控制装置(即控制机床的专用计算机)中去，经过计算机的计算处理、伺服控制、驱动机床各部件运动，完成上述直线段的加工。由于指令运动过程是以二进制数字代码进行的，所以称这种控制为数字控制。数字控制是与机床控制密切结合而发展起来的，因此人们习惯把“机床数控”简称为“数控”或“NC”，用这种控制技术控制的机床就称为“数控机床(numerically controlled machine tool)”或“NC 机床”。数控装置和伺服控制部分统称为“数控系统”。机床的数字控制是近代发展起来的一种自动控制技术，是用数字化信号实现机床控制的一种方法。

1.1.2 数控机床的工作原理

数控机床的加工，首先要将被加工零件图样上的几何信息和工艺信息用规定的代码和格式编写成加工程序，然后将加工程序输入到数控装置，按照程序的要求，经过数控系统信息处理、分配，使各坐标轴移动若干个最小位移量，实现刀具与工件的相对运动，完成零件的加工。

通常把数控机床刀具运动轨迹是直线的加工，称为直线插补；刀具运动轨迹是圆弧的加工，称为圆弧插补。插补是指在被加工轨迹的起点和终点之间，插进许多中间点，进行数据点的细化工作，然后利用已知线形(如直线、圆弧等)逼近。

机床的数字控制是由数控系统完成的。数控系统包括数控装置、伺服驱动装置、可编程控制器和检测装置等。数控装置是控制机床运动的中枢系统，其功能是能够快速接受零件图样加工要求的信息，按照规定的控制算法进行插补运算，并将结果由输出装置送到各坐标控制伺服系统。伺服驱动装置是数控系统的执行部分，能快速响应数控装置发出的指令，驱动机床各坐标轴运动，同时能提供足够的功率和转矩。它包括驱动主轴运动的控制单元、主轴电动机、驱动进给运动的控制单元及进给电动机。可编程序控制器(Programmable Controller,缩写为 PC)，也称为可编程序逻辑控制器(PLC)，可对机床开关量控制，如主轴的起停、刀具更换、切削液开关、电磁铁的吸合、电磁阀启闭、离合器的开合、各种运动的互锁、联锁，运动行程的限位、急停、报警、进给保持、循环启动、程序停止、复位等。开关量仅有“0”和“1”两种状态，显然可以很方便地实现对机床各部件协调运动的数字控制。检测装置是采用闭环或半闭环控制系统的数控机床的重要组成部分，其作用是对数控机床各部件的实际位移和速度进行检测，将检测结果转化为电信号反馈给数控装置或伺服控制系统，实现闭环或半闭环控制。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。数控机床是一种高度自动化的机床，既可以进行大切削量的粗加工，也可以进行半精加工和精加工，这就要求数控机床具有大功率和高精度。数控机床的主轴转速和进给速度远高于同规格的普通机床。

1.1.3 数控机床的组成及特点

1. 数控机床的组成

数控机床的种类很多，但任何一种数控机床主要由控制介质、数控系统、伺服系统和机床主体 4 部分组成，如图 1-1 所示。此外数控机床还有许多辅助装置，如自动换刀装置(Automatic Tool Changer,缩写为 ATC)，自动工作台交换装置(Automatic Pallet Changer,缩写为 APC)，自动对刀仪，自动排屑装置及电、液、气、冷却、润滑、防护等装置。

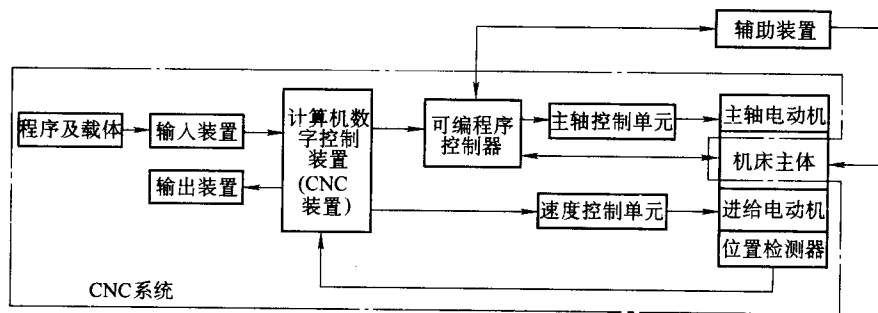


图 1-1 数控机床的基本组成

(1) 控制介质 控制介质是指将零件加工信息传送到控制装置中去的程序载体。控制介质有多种形式，随着数控装置的类型不同而不同，常用的有磁带和磁盘等。此外，有的数控机床还采用穿孔带将程序及数据输入到数控系统，或直接利用键盘输入。随着 CAD/CAM 技术的发展，有些计算机数控(Computer Numerical Control,CNC)设备利用 CAD/CAM 软

件先在个人计算机上进行编程,然后通过计算机与数控系统的接口进行通信,将程序和数据直接传送给数控装置。

(2) 数控系统 数控系统是数控机床的核心。现代数控系统由输入装置、控制运算器和输出装置构成。数控系统接受控制介质上的数字化信号,经过控制软件或逻辑电路进行编译、运算和逻辑处理后,输出各种信号和指令控制机床的各个部件,进行规定的、有序的动作。

(3) 伺服系统 伺服系统是数控系统的执行机构之一,执行由 CNC 装置输出的运动指令。其作用是把来自 CNC 装置的指令信号转换成机床部件的运动。数控机床的伺服驱动系统包括进给驱动、主轴驱动及位移控制等 3 部分。伺服控制按其工作原理可分 2 种控制方式:关断控制和调节控制。关断控制是将指令值与实测值在关断电路的比较器中进行比较,相等后发出信号,运动结束,这种方式用于点位控制。调节控制是数控装置发出运动的指令信号,伺服驱动装置快速响应跟踪指令信号。检测装置将坐标位移的实际值检测出来,反馈给数控装置调节电路中的比较器,有差值就发出运动控制信号,从而实现偏差控制;不断比较指令值与反馈的实际值,不断发出信号,直到差值为零,运动结束。这种方式适用于连续轨迹控制。伺服控制按其位置控制方法的不同可分为开环、闭环和半闭环 3 种方式。

常用伺服驱动元件有步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机等。步进电动机主要应用在开环控制方式,是机械式的数/模转换装置,将脉冲信号变成连续的角位移。每个指令脉冲使步进电动机转过一个固定的角度,称为步距角,常用步距角有 0.75° 、 0.9° 、 1.5° 等。控制输入步进电动机脉冲的频率,即可改变步进电动机的转速。直流伺服电动机与交流伺服电动机用于闭环或半闭环系统中。直流伺服电动机具有转矩大,抗过载能力强,调速特性好等优点。交流伺服电动机克服了直流伺服电动机一些固有的缺点(如电刷和换向器容易磨损、结构复杂、制造困难、制造成本高等),其转子惯量小,动态响应好,成本低,维护便宜,近年来得到重视并获得迅速发展。

(4) 机床主体 机床主体也称主机,包括机床的主运动部件、进给运动部件、执行部件和基础部件,如底座、立柱、滑鞍、工作台(刀架)、导轨等。数控机床与普通机床不同,其主运动、各个坐标轴的进给运动都是由单独的伺服电动机(无级变速)驱动,所以它的传动链短、结构比较简单。普通机床上各个传动链之间有复杂的齿轮联系,在数控机床上改由计算机来协调控制各个坐标轴之间的运动关系。为了保证数控机床的快速响应,在数控机床上普遍采用精密滚珠丝杠和直线滚动导轨副。为了保证数控机床高精度、高效率和高自动化加工,数控机床的机械结构应具有较高的动态特性、动态刚度、阻尼精度、耐磨性以及抗热变形性能。在加工中心上还具备刀库和能自动交换刀具的机械手。同时还需具备有一些良好的配套设施,如冷却、自动排屑、防护、可靠的润滑、编程机和对刀仪等,以利于充分发挥数控机床的功能。

(5) 辅助装置 数控机床在实现整机的自动化控制中,为了提高生产效率、加工精度、还需要配备许多辅助装置,如液压和气动装置、自动换刀装置、自动工作台交换装置、自动对刀装置、自动排屑装置等。

1) 自动换刀装置:带有自动换刀装置的数控机床(如加工中心),在对工件进行多工

序加工中,必须要自动更换刀具,以提高机床的生产率和加工精度。自动换刀装置的类型取决于机床的形式、工艺范围及其刀具的种类和数量,其基本类型有3种:①回转刀架换刀,数控车床常用这一类换刀方法;②多主轴转塔头换刀,常用于数控钻床、数控镗床等;③刀库自动换刀装置,典型应用这种换刀方式的是加工中心,这类换刀装置由刀库、选刀机构、刀具的自动装卸机构及刀具交换机构等部分组成。

2) 自动工作台交换装置:有的加工中心带有自动工作台交换装置,使工件的装卸时间大幅度减少。常用的有回转式工作台交换装置和往复式工作台交换装置。

3) 自动对刀装置:对刀装置是提高数控机床加工效率必不可少的辅助装置之一。把加工用的刀具预先校对好,测出刀具的有关几何尺寸和参数,使之装上机床即可使用,以节省机床的对刀时间。按检测对象的不同,对刀装置可分为数控车床对刀仪和数控镗铣床、加工中心对刀仪。

4) 自动排屑装置:数控机床单位时间内金属的切削量大大高于普通机床,而且数控机床可以实现长时间无人值守自动加工,因此迅速有效地排除切屑对数控机床加工来说十分重要。根据数控机床种类、规格、加工工艺特点等不同,可设计出各种类型的排屑装置,常用的有传送带排屑装置和螺旋式排屑装置。

2. 数控机床的特点

数控机床与普通机床加工零件的区别,在于数控机床是按照程序自动加工零件,而普通机床要求由工人手工操作来加工零件。在数控机床上加工零件只要改变控制机床动作的程序,就可以达到加工不同零件的目的。因此数控机床特别适用于加工小批量且形状复杂、精度要求高的零件。

由于数控加工是一种程序控制过程,使其相应形成了以下几个特点。

1) 采用数控机床可以提高零件的加工精度、稳定产品的质量。因为数控机床按照预定的加工程序进行加工,加工过程中消除了操作者人为的操作误差,所以零件加工的一致性好,而且加工精度还可以利用软件来进行校正补偿,因此可以获得比机床本身精度还要高的加工精度及重复精度。

2) 数控机床可以完成普通机床难以完成或根本不能加工的复杂曲面的零件加工。因此数控机床在宇航、造船、模具等行业中得到广泛应用。

3) 采用数控机床比普通机床可以提高生产效率2~3倍,尤其对于某些复杂零件的加工,生产效率可以提高十几倍甚至几十倍。

4) 可以实现一机多用。一些数控机床将几种普通机床的功能合一,配置刀具自动交换系统后构成加工中心,如果能配置数控转台或分度转台,则可以实现一次安装、多面加工。

5) 采用数控机床有利于向计算机控制与管理生产方面发展,为实现生产过程自动化创造了条件。

目前,在机械行业中,随着市场经济的发展,产品更新周期越来越短,中、小批量的生产所占有的比例越来越大,对机械产品的精度和质量要求也在不断地提高。所以,普通机床越来越难以满足加工的要求。同时,由于技术水平的提高,数控机床的价格在不断下降,因此,数控机床在机械行业中的应用越来越普遍。

1.1.4 数控机床的技术性能指标

1. 数控机床的精度指标

(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在确定的终点与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,会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0.015mm,重复定位精度为0.005mm。

(2) 分度精度 分度精度是指分度工作台在分度时,理论要求回转的角度值和实际回转的角度值的差值。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。

(3) 分辨率与脉冲当量 分辨率是指两个相邻分散细节之间可以分辨的最小间隔。对测量系统而言,分辨率是可以测量的最小增量;对控制系统而言,分辨率是可以控制的最小位移增量,即数控装置每发出一个脉冲信号,反映到机床移动部件上的移动量,一般称为脉冲当量。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0.0001mm。脉冲当量越小,数控机床的加工精度和加工表面质量越高。

2. 数控机床的可控轴数与联动轴数

数控机床的可控轴数是指机床数控装置能够控制的坐标轴数目。数控机床的可控轴数和数控装置的运算处理能力、运算速度及内存容量等有关。世界上最高级数控装置的可控轴数已达到24轴。

数控机床的联动轴数是指机床数控装置控制的坐标轴同时达到空间某一点的坐标轴数目,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、五轴联动数据机床可以加工宇航叶轮、螺旋桨等零件。

3. 数控机床的运动性能指标

数控机床的运动性能指标主要包括主轴转速、进给速度、坐标行程、摆角范围、刀库容量及换刀时间等。

(1) 主轴转速 数控机床的主轴一般均采用直流或交流调速主轴电动机驱动,选用高速精密轴承支承部件,保证主轴具有较宽的调整速度范围和足够高的回转精度、刚度及抗振性。目前,数控机床的主轴转速已普遍达到5 000~10 000r/min,甚至更高,这样对提高各种小孔的加工以及高精度零件的加工质量和加工表面质量极为有利。

(2) 进给速度 数控机床的进给速度是影响零件加工质量、生产效率以及刀具寿命的主要因素。它受数控装置的运算速度、机床动作特性及工艺系统刚度等因素的限制。目前

国内数控机床的进给速度可达 $10 \sim 15\text{m/min}$, 国外一般可达 $15 \sim 30\text{m/min}$ 。

(3) 行程 数控机床坐标轴 X 、 Y 、 Z 的行程大小, 构成数控机床的加工空间范围, 即加工零件的大小。行程是直接体现数控机床加工能力的指标参数。

(4) 摆角范围 具有主轴摆角坐标的数控机床, 其转角大小也直接影响到加工零件空间部位的能力。但转角太大又造成机床的刚度下降, 会给机床设计带来许多困难。

(5) 刀库容量和换刀时间 刀库容量和换刀时间对数控机床的生产率有直接影响。刀库容量是指刀库能存放加工所需要的刀具数量。目前常见的中小型加工中心多为 16 把, 大型加工中心达 100 把以上。换刀时间指带有自动交换刀具系统的数控机床, 将主轴上使用的刀具与装在刀库上的下一工序需要用的刀具进行交换所需要的时间。目前国内数控机床的换刀时间仅为 $4 \sim 5\text{s}$ 。

4. 数控系统的技术性能指标

(1) 数控系统的 CPU 数控系统的 CPU 从 20 世纪 70 年代开始的频率为 5MHz 的 8 位机, 发展到当今的频率为 14GHz 的 32 位机、64 位机、精简指令集 (RISC) 芯片的数控系统。CPU 芯片性能不断改进提高, 为采用个人计算机作为数控系统平台的开放式数控系统, 提供了很高的运算速度和丰富的软硬件资源。

(2) 数控系统的分辨率 现代数控系统能实现高精度、超精密加工, 系统分辨率通常都在 0.001mm , 速度可达到 $1\,000 \sim 240\,000\text{mm/min}$, 超精密加工时分辨率达 0.1 (甚至 0.01) μm , 速度达到 $24\,000\text{mm/min}$ 。

(3) 控制功能 控制轴数和同时控制轴 (联动轴) 数是数控系统功能的重要指标。FANUC—15 可控制 $2 \sim 15$ 根轴; SIEMENS 840D 最高可控制 31 根轴, 还具有多主轴控制功能。插补功能除了直线插补、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。

(4) 伺服驱动系统的性能 目前绝大多数数控系统都采用了对位置环、速度环、电流环等全部进行数字控制的交流伺服系统; 而且许多公司都开发了具有前馈控制、非线性控制、摩擦转矩补偿以及数字伺服自动调整等新功能的高性能伺服系统。

(5) 数控系统内置 PLC 功能 新型数控系统的 PLC 都有单独的 CPU, 除了逻辑控制外, 还具有轴控制功能; 基本指令执行时间是 $0.2\mu\text{s/step}$ 以上, 梯形图语言程序容量可为 $16\,000\text{step}$ 以上, 输入点数/输出点数为 $768/512$, 可扩展。PLC 的软件除用梯形图 (ladder diagram) 语言编写之外, 还可用 Pascal、C 语言等编写。

(6) 数控系统的通信接口功能 早期的数控系统仅有 RS232C 接口, 现在数控系统有了 DNC、RS422 (RS485) 等高速远距离传输接口。FANUC15、SIEMENS 840D 等系统还具有 MAP 接口板, 可连接到 MAP3.0 的局域网络 (LAN), 以适应 FMS 或 CIMS 的需要。

(7) 数控系统的开放性 目前, 以个人计算机为平台的开放式数控系统有了很大的发展, 数控系统生产厂家都在进行开放式数控系统的研究。SIEMENS 公司的 CNC 系统具有开放式“原始设备制造商 (Original Equipment manufacturer, OEM)”程序, FANUC 等公司都推出了人机通信功能 (Man Machine Communication, MMC) 或叫做人机控制功能 (Man Machine Controller, MMC)。MMC 由高性能的硬件和软件组成, 有很强的图形处理和数据功能, 采用

了在计算机上广为流行的“并行(concurrent)DOS”操作系统(Operation System, OS), 可支持多任务并行处理, 使用的开发语言有汇编语言、Basic 语言、C 语言以及 Fortran 语言等。另外提供数控系统的子程序, 使得机床厂家和用户能够开发自身专用的软件, 自动生成 NC 数据, 通过高速窗口传送到 CNC 系统。也可以利用 MMC 和 PLC 的高速窗口在机床操作和排序方法上加上最适合于该机床的新功能。而且还可同时并行处理有关 MMC 与 CNC 软件的功能。由此, CNC 系统变成了含有丰富的机床厂家(或用户)专利(或诀窍)特性的个性化系统。理想的开发系统为数控软、硬件均可选择、可重用、可添加, 这就要求具有统一的软、硬件规范化标准。目前美国、欧洲的一些国家、日本等几大国的数控系统开发计划正在执行中, 已有样机产品。

(8) 可靠性和故障自诊断 数控系统的可靠性是一个非常重要的指标, 一般都以平均无故障时间(MTBF)来衡量, 国外有的系统达到 10 000h, 而国内自主开发的数控系统仅能达到 3 000~5 000h。数控系统还应尽量缩短修复时间, 即维修性能要好, 要有自诊断功能, 良好的检测方法, 快速确定故障部位, 达到及时更换模块的效果。一般数控系统都具有软、硬件的故障自诊断程序。系统自诊断软件可由纸带、磁介质、EPROM 的形式提供; 有些数控系统还对 PLC 配有单独的诊断线路和诊断软件, 通过阴极射线管(Cathode Ray Tube, CRT)可显示 PLC 标志、定时器、计数器内容、输入信号及输出信号等。这样有助于快速确定故障部位。也有的数控系统具有远程诊断服务功能, 用户可通过远距离诊断接口和连网功能与远程维修服务中心联系取得支持, 以解决故障的疑难问题。

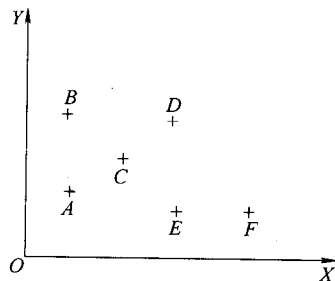
1.2 数控机床的分类

1.2.1 按运动控制的特点分类

按照数控机床运动部件的控制方式, 可分为如下几种。

1. 点位控制数控机床

对于一些加工孔用的数控机床, 如数控钻床、数控镗床、数控冲床、三坐标测量机、印制电路板钻床等, 只要求获得精确的孔距坐标定位精度, 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。具有这种运动控制的机床称为点位控制数控机床。点位控制数控机床加工平面内的孔距时, 控制平面内的两个坐标轴带动刀具与工件作相对运动, 运动停止后, 控制刀具进行钻、镗切削加工。为了提高效率和确保精确的定位精度, 系统先控制进给部件高速运行, 接近目标点时, 采用分级或连续降速, 低速趋近目标点, 从而减少运动部件的惯性过大和因此引起的定位误差。如图 1-2 所示是点位控制钻孔加工示意图。



2. 直线控制数控机床

直线控制数控机床是指控制机床工作台或刀具(刀架)

图 1-2 点位控制钻孔加工示意图

按要求的进给速度,沿着平行于坐标轴的方向进行直线移动和切削加工(一般还包括 45° 的斜线)的机床。如数控车床、某些数控镗床和加工中心等,都具有直线控制功能。这类数控机床不仅要求具有准确的定位功能,而且还要控制位移的速度。由于在移动过程中进行切削加工,所以对于不同的刀具和工件,需要选用不同的切削用量。一般情况下,这些数控机床有2~3个可控制的轴,但同时控制轴只有1个。为了能在刀具磨损或更换刀具后仍可加工出合格的零件,这类机床的数控系统常常要求它具有刀具半径和刀具长度的补偿功能,以及主轴转速的控制功能等。图1-3所示为直线控制切削加工示意图。

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. 轮廓控制数控机床

可以加工斜线、曲线、曲面的数控机床可称之为轮廓控制数控机床。如数控车床、数控铣床、加工中心等,它们都是具有同时控制2个或2个以上坐标轴进行联动(即进行插补)的数控机床。该类机床在整个加工过程中,对各坐标的位移轴和速度进行严格的不断控制,故称具有这种控制功能的机床为轮廓控制数控机床。现代数控机床绝大部分都具有2个坐标轴或2个坐标轴以上联动的功能、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所示为轮廓控制铣削加工示意图。

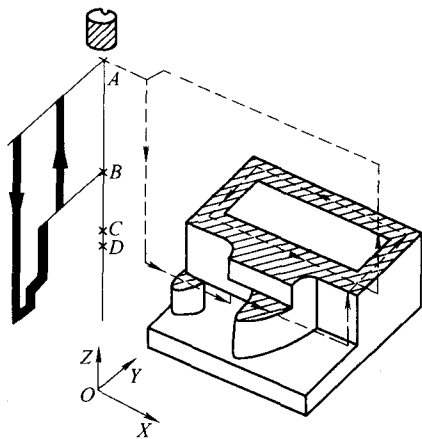


图 1-3 直线控制切削加工示意图

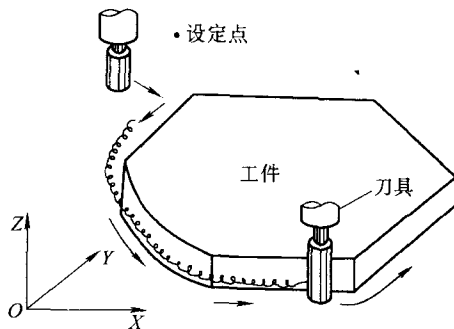


图 1-4 轮廓控制铣削加工示意图

轮廓控制数控机床的整个加工过程中,每一点的速度和位移是由轮廓控制中的插补功能来实现的。插补的任务就是在轮廓的起点到终点之间密集地计算出有限个坐标点,刀具沿着这些坐标点移动,逼近轮廓。直线和圆弧是构成工件轮廓形状的基本结构要素。因此大多数数控装置都具有直线和圆弧的插补功能。图1-5a所示为直线插补示意图,图1-5b所示为圆弧插补示意图。目前应用的插补算法有脉冲增量插补和数字增量插补。

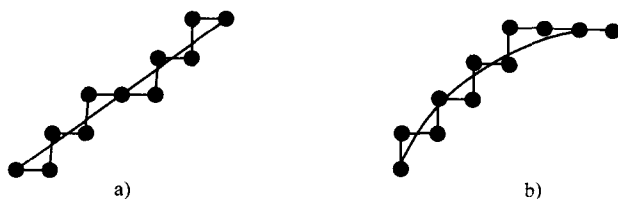


图 1-5 直线插补和圆弧插补示意图

a) 直线插补 b) 圆弧插补

1.2.2 按伺服系统的类型分类

按照数控机床中伺服系统的不同,可分为如下几种。

1. 开环控制数控机床

这类数控机床没有位置检测反馈装置,由数控装置发出的指令信号流程是单向的,其加工精度主要决定于驱动元器件和电动机(步进电动机)的性能。这种数控机床调试简单,系统也较容易稳定,成本低廉,但精度较低,多见于经济型的中小型数控机床和旧设备的技术改造中。如图 1-6 所示开环控制系统框图。由图 1-6 可见,指令信号单方向传送,并且指令发出后,不再反馈,故称开环控制。

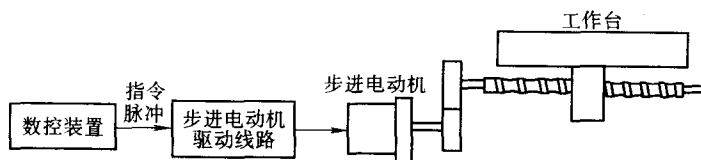


图 1-6 开环控制系统框图

2. 闭环控制数控机床

该类机床数控装置中插补器发出的位置指令信号会与工作台(或刀架)上检测到的实际位置反馈信号进行比较,根据其差值不断控制运动,进行误差修正,直至差值为零时停止运动。这种具有反馈控制的系统,在电气上称为闭环控制系统,如图 1-7 所示闭环控制系统框图。应该说,由于反馈的存在,可以消除系统中的机械传动部件产生的误差对加工精度带来的影响,从而可获得较高的加工精度。但是由于很多机械传动部件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,都是非线性的,直接影响系统的调节参

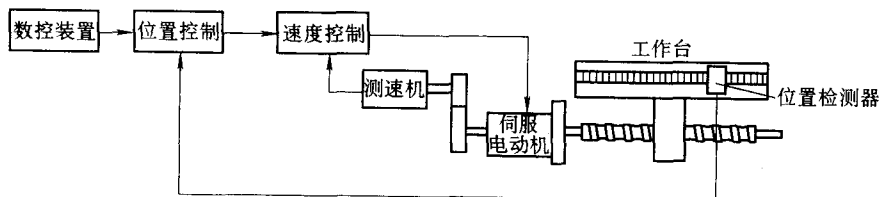


图 1-7 闭环控制系统框图

数。所以闭环控制系统的设计、调整都有较大的技术难度,如果设计、调整得不好,还很容易造成系统不稳定。由于这种位置检测信号取自机床工作台(传动系统的最末端执行件),所以包含了整个传动系统的全部误差,也称为全闭环系统。闭环控制数控机床,主要是一些对加工精度要求很高的镗铣床、超精磨床、大型数控机床等。

3. 半闭环控制数控机床

大多数数控机床采用半闭环控制系统,其检测元件装在电动机轴或丝杠轴的端部,这种系统的闭环控制环内不包括机械传动部件,因此可以获得稳定的控制特性,该系统反馈的只是进给传动系统部分的误差;一般电动机轴或丝杠轴的角位移、角速度,还要经过转换处理才是工作台(或刀架)的实际位移。但是,由于采用高分辨率的反馈检测元件,以及传动部分具有补偿功能,可以获得比较满意的加工精度与速度。所以,目前大多数中、小型数控机床都采用这种控制方式。图 1-8 所示为半闭环控制系统框图。

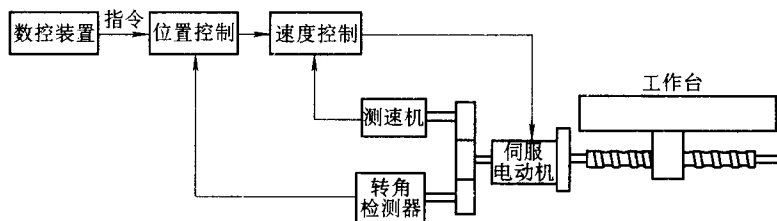


图 1-8 半闭环控制系统框图

4. 混合控制数控机床

将以上 3 类数控机床的特点结合起来,就形成了混合控制数控机床。混合控制数控机床特别适用于大型或重型数控机床,因为大型或重型数控机床需要较高的进给速度与相当高的加工精度,其传动链惯量与力矩大。如果只采用全闭环控制,机床传动链和工作台全部置于控制闭环中,闭环调试比较复杂。混合控制系统又分为以下 2 种形式。

(1) 开环补偿型 其特点是基本控制选用步进电动机的开环伺服机构,另外附加一个校正电路。通过装在工作台上的直线位移测量元件的反馈信号校正机械系统的误差。

(2) 半闭环补偿型 其特点是用半闭环控制方式取得高速度控制,再用装在工作台上的直线位移测量元件实现全闭环修正,以获得高速度与高精度的统一。

1.2.3 按加工工艺方法分类

按照数控机床的加工工艺方法的不同,可分为如下几种。

1. 金属切削类数控机床

这类机床和传统的普通机床品种一样,有数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床、数控镗床以及加工中心等。加工中心是一种带有自动换刀装置(刀库和自动交换刀具的机械手)能进行铣削、钻削、镗削加工的复合型数控机床。箱体类零件,在加工中心上一次定位装卡,即能在多个侧面上完成铣削、钻孔、扩孔、铰孔、镗孔、攻螺纹等工作,所以在生产上加工中心应用越来越多。加工中心还分为车削中心、磨削中心等。而且还出现了在加工中心上增加交换工作台,以及采用主轴或工作台进行立、卧转换的五面体加工

中心等。

2. 金属成形类及特种加工类数控机床

这类机床是指金属切削类以外的数控机床,有数控弯管机、数控线切割机床、数控电火花成形机床、数控激光切割机床、数控冲床、数控火焰切割机以及数控三坐标测量机等。

1.2.4 按功能水平分类

按功能水平,通常把数控机床分为高、中、低档(亦称经济型)3类。这种分类法目前并无确切的定义,但可以给人们一个较清晰的一般“水平”的概念,数控机床水平的高低主要指其主要技术参数、功能指标和关键部件的功能水平等内涵。其包括下面一些内容。

1. 中央处理单元(CPU)

低档数控一般采用8位CPU;而中档、高档数控已经由16位CPU,发展到32位或64位CPU,并使用具有精简指令集的(RISC)CPU。

2. 分辨率和进给速度

低档数控机床的分辨率为 $10\mu\text{m}$,进给速度为 $6\sim 15\text{m}/\text{min}$;中档数控机床的分辨率为 $1\mu\text{m}$,进给速度为 $12\sim 24\text{m}/\text{min}$;高档数控机床的分辨率为 $0.1\mu\text{m}$ 或更小,进给速度为 $24\sim 100\text{m}/\text{min}$ 或更高。

3. 多轴联动功能

低档数控机床多为2~3轴联动;中、高档数控机床则都是3~5轴联动或更多。

4. 显示功能

低档数控机床一般只有简单的数码显示或简单的CRT字符显示;中档数控机床有较齐全的CRT显示,不仅有字符,而且还有图形、人机对话、自诊断等功能显示;高档数控机床还有三维动态图形显示。

5. 通信功能

低档数控机床无通信功能;中档数控机床有RS-232C或DNC(直接数控,也称群控)等接口。高档数控机床有MAP(制造自动化协议)等高性能通信接口,且具有联网功能。

按数控系统的功能水平来分,有2种分法:一种是把数控机床分为高、中、低档(经济型)数控机床。这种分类方法,在我国应用较普遍。目前高、中、低档数控机床的界限还没有一个统一的界定标准,加之不同时期划分的标准也不同,故按照功能水平分类的指标限定仅供参考。另一种分法是将数控机床分为经济型(简易)、普及型(全功能)、和高档型数控机床。全功能型数控机床并不追求过多功能,以实用为准,也称为标准型数控机床。经济型数控机床的目的是根据实际机床的使用要求,合理地简化系统,降低价格。在我国,经济型数控机床是指装备了功能简单、价格低、使用方便的低档数控系统的机床,主要用于车床、线切割机及普通机床的数控化改造等。

1.2.5 按加工方式分类

大多数数控机床制造厂家都使用这种分类方法,它给厂家的宣传和用户的订货、造型带来了很大方便。按加工方式的不同,常将数控机床分为2种:一般数控机床和加工中心。

1. 一般数控机床

最常见的有数控车床、数控铣床、数控镗床、数控齿轮加工机床等。由于它不带刀库, 只能实现一道工序的自动化。当工序不同时, 仍需人工完成刀具的更换等工作, 阻碍了生产效率的进一步提高。

2. 加工中心(带刀库的数控机床)

在普通数控机床上加装一个刀库和自动换刀装置就成了加工中心。加工中心打破了一台机床只能进行单工序加工的传统, 实现了一次装夹, 完成多个工序的加工。如镗铣加工中心、钻削加工中心、车削加工中心等。在工件一次装夹后, 可以对大部分加工面进行铣、钻、镗、铰、扩、攻螺纹等多个工序加工, 特别适合箱体类零件的加工。

加工中心一次安装定位后可完成多工序加工, 避免了因多次安装工件造成的误差, 减少了机床的台数和占地面积, 缩短了辅助时间, 大大地提高了生产效率和加工质量, 降低了生产成本。

1.3 数控机床的产生与发展及技术水平

1.3.1 数控机床的产生与发展

随着电子技术的发展, 1946 年世界上第一台电子计算机问世, 由此掀开了信息自动化的新篇章。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飞机的转动机翼时, 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轴数控铣床。帕森斯公司的设想, 本身就考虑到刀具直径对加工路径的影响, 使得加工精度达到 $\pm 0.0015 \text{ in}$ (这在当时, 水平是相当高的, $1 \text{ in} = 25.4 \text{ mm}$), 因而帕森斯公司获得了专利。1954 年底, 美国本迪克斯公司(Bendix Co.)在帕森斯公司专利的基础上生产出了第一台工业用的数控机床。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普通机床难以加工的形状复杂的零件。这是第一代数控机床系统。

1959 年晶体管出现, 电子计算机应用晶体管元件和印制电路板, 从而使机床数控系统跨入了第二代。而且 1959 年克耐·杜列克公司(Keaney & Trecker Co., K&T 公司)在数控机床设置刀库, 并在刀库中装有丝锥、钻头、铰刀等刀具。可根据穿孔带的指令自动选择刀具, 并通过机械手将刀具装在主轴上, 以缩短刀具的装卸时间和减少零件的定位装卡时间。人们把这种带自动交换刀具的数控机床称为加工中心(Machining Center, MC)。加工中心的出现, 把数控机床的应用推上了一个更高的层次。加工中心一般都集铣、钻、镗于一身, 为以后立式加工中心、卧式加工中心、车削中心、磨削中心、五面体加工中心、板材加工中心等的发展打下基础。今天, 加工中心已成为市场上非常畅销的一个数控机床品种。目前, 美、日、德等工业发达国家的加工中心产量几乎占数控机床产量的 25% 以上。

20 世纪 60 年代, 出现了集成电路, 数控机床系统发展到第三代。以上三代, 都属于