

工程背景

制造业是各种产业的支柱，直接影响一个国家的经济发展和综合国力，关系到一个国家的战略地位。数控技术是集计算机技术、现代控制技术、传感检测技术、信息处理技术、网络通信技术及机电技术于一体的一门交叉学科，是现代制造技术的基础。数控技术的应用已成为衡量一个国家工业化程度和技术水平的重要标志。发展数控技术是当前制造工业技术改造、技术更新的必由之路。

内容提要

课程以制造自动化底层设备——数控机床为主要研究对象，研究数控系统的工作原理、组成、关键技术及应用，使学生掌握本专业所必需的数控技术方面的知识和基本技能，为今后从事数控机床的安装、调试、使用和维护保养及设备改造打下良好的基础。本章介绍数控相关的基本概念、组成及基本原理、分类和发展趋势。

学习方法

课程不仅具有较强的理论性，同时具有较强的实用性。建议在学习过程中，紧密结合课程进行上机、实验或者参加实践环节，以加深对数控系统关键技术和功能的认识和理解。

1.1 概述

1.1.1 机床数字控制的基本概念

数字控制（Numerical Control, NC）是近代发展起来的一种自动控制技术。数字控制相对于模拟控制而言，其控制信息是数字量。数字控制系统有如下特点：

- （1）可用不同字长表示不同的精度信息，表达信息准确；
- （2）可进行逻辑运算、数字运算，也可进行复杂的信息处理；
- （3）具有逻辑处理功能，可根据不同的指令进行不同方式的信息处理，从而可用软件来改变信息处理的方式或过程，而不用改动电路或机械机构，因而具有柔性化。

由于数字控制系统具有上述优点，故被广泛应用于机械运动的轨迹控制。轨迹控制是机床数控系统和工业机器人的主要控制内容。此外，数字控制系统的逻辑处理功能可方便地用于机械系统的开关量控制。

数字控制系统的硬件基础是数字逻辑电路。最初的数控系统是由数字逻辑电路构成的，因而被称为硬件数控系统。随着微型计算机的发展，硬件数控系统已逐渐被淘汰，取而代之的是计算机数字数控（Computer Numerical Control, CNC）。由于计算机可完全由软件来确定数字信息的处理过程，从而具有真正的“柔性”，并可以处理硬件逻辑电路难以处理的复杂信息，使数字控制系统的性能大大提高。

数字控制机床（简称数控机床）是一种将数字计算技术应用于机床的控制技术，是一种典型的机电一体化产品。数控机床较好地解决了复杂、精密、小批量、多品种的零件加工问题，是一种柔性的、高效能的自动化机床，代表了现代机床控制技术的发展方向。

1.1.2 数控加工原理

传统金属切削机床加工是操作者根据图纸要求，手动控制机床，不断改变刀具与工件相对运动参数（位置、速度等），从工件上切除多余材料，最终获得符合技术要求的尺寸、形状、位置和表面质量的零件。

数控加工的基本工作原理则是将加工过程所需的各种操作（如主轴变速、工件夹紧、进给、启停、刀具选择、冷却液供给等）步骤及工件的形状尺寸，用程序——数字化代码来表示，再由计算机数控装置对这些输入的信息进行处理和运算。将刀具与工件的运动坐标分割成一些最小位移量，然后由数控系统按照零件程序的要求控制机床伺服驱动系统，使坐标移动若干个最小位移量，从而实现刀具与工件的相对运动，以完成零件的加工。当被加工工件改变时，除了重新装夹工件和更换刀具之外，只需更换程序。

在数控加工中，使数控机床动作的是数控装置给数控机床传递运动命令的脉冲群，每一个脉冲对应于机床的单位位移量。

在进行曲线加工时，可以用一给定的数字函数来模拟线段 ΔL ，即知道了一个曲线的种类、起点、终点和速度后，根据给定的数字函数，如线性函数、圆函数或高次曲线函数，在理想的轨迹或轮廓上的已知点之间，进行数据点的密化，确定一些中间点，这种方法称为插补。处理这些插补的算法，称为插补运算。

由此可见，要实现数控加工，必须有一台能达到下述要求的数控设备：

- (1) 数控装置能接收零件图样加工要求的信息，并按照一定的数学模型进行插补运算，实时地向各坐标轴发出速度控制指令及切削用量的数字控制计算机；
- (2) 驱动装置可快速响应，并具有足够功率的驱动装置；
- (3) 为实现数控加工，还必须要有能满足上述加工方式要求的机床本体、刀具、辅助设备以及各种加工所需的辅助功能。

综上所述，只要具备了机床本体、数控装置、驱动装置及相应的配套设备，就可以组成一台数控机床，完成各种零件的数控加工了。

1.1.3 数控机床的组成

数控机床一般由程序载体、数控装置、伺服驱动系统、机床本体和其他辅助装置组成，如图1-1所示。

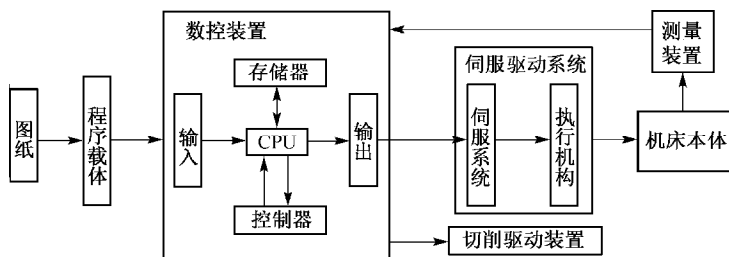


图 1-1 数控机床的加工过程

1. 程序载体

数控机床工作时，不需要人直接操作机床，但若要对数控机床进行控制，则必须编制加工程序。零件加工程序包括机床上刀具和工件的相对运动轨迹、工艺参数（进给量、主轴转速等）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程序载体上，如穿孔纸带、盒式磁带、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。

2. 数控装置

计算机数控装置是数控机床的核心部分，也是区别于普通机床最重要的特征之一。数控装置完成加工程序的输入、编辑及修改，实现信息存储、数据转换、代码交换、插补运算及各种控制功能。

输入装置将数控指令输入给数控装置。根据程序载体的不同，相应地有不同的输入装置，如纸带输入、键盘输入、磁盘输入、CAD/CAM 系统直接通信方式输入、连接上级计算机的 DNC(直接数控)输入及网络化远程输入等。在柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)或计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)中，生产具有较高的灵活性，要求能够充分利用制造设备资源，因此目前大多数 CNC 装置具有网络通信功能，可以实现加工程序的高速、可靠传输和加工状态的实时反馈，以保证加工资源和加工信息的共享。

信息处理功能将包含输入零件的轮廓（起点、终点、直线、圆弧等）、加工速度及其他辅助加工（如换刀、变速、冷却液开关等）等信息的加工代码编译成计算机能识别的数据，并进行刀具半径补偿、速度计算及辅助功能的处理，然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。

输出装置与伺服机构相连，根据控制器的命令接收运算器的输出脉冲，送到各坐标的伺服控制系统，经过功率放大，驱动伺服系统，从而控制机床按规定要求运动。

3. 伺服驱动系统

伺服驱动系统是数控机床的必备部件，其接收数控装置发出的指令信息，经功率放大、整形处理后，驱动相应电动机实现数控机床的主轴和进给运动控制。当几个进给轴实现联动时，就可以完成具有点位、直线、平面曲线，甚至空间曲线特征的复杂零件加工。

伺服驱动系统的性能直接影响数控机床的加工精度和生产率，因此，要求伺服驱动系统具有良好的快速响应性能，准确而稳定地跟踪和执行数控装置发出的数字指令信号，提高系统的稳态跟踪精度和瞬态跟随特性。

伺服驱动系统包括驱动装置和执行机构两大部分。驱动装置由主轴驱动单元、进给驱动单元和主轴伺服电动机、进给伺服电动机组成。步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机是常用的驱动装置。

测量元件将数控机床各坐标轴的实际位移值检测出来并经反馈系统输入到机床的数控装置中，数控装置对反馈回来的实际位移值与指令值进行比较，并向伺服驱动系统输出达到设定值所需的位移量指令。

4. 机床本体

机床本体包括床身、主轴、进给机构、刀架及自动换刀装置等，是在数控机床上自动地完成各种切削加工的机械部分。与传统的机床相比，数控机床在本体设计上已有重大变化，其结构特点如下。

(1) 采用具有高刚度、高抗震性及较小热变形的机床新结构。通常用提高结构系统的静刚度、增加阻尼、调整结构件质量和固有频率等方法来提高机床本体的刚度和抗震性，使机床本体能适应数控机床连续自动地进行切削加工的需要。采取改善机床结构布局、减小发热量、控制温升及采用热位移补偿等措施，可减小热变形对机床本体的影响。

(2) 广泛采用高性能的主轴伺服驱动和进给伺服驱动装置，使数控机床的传动链缩短，简化了机床机械传动系统的结构。

(3) 采用高传动效率、高精度、无间隙的传动装置和运动部件，如滚珠丝杠螺母副、塑料滑动导轨、直线滚动导轨和静压导轨等。

5. 数控机床的辅助装置

辅助装置是保证充分发挥数控机床功能所必需的配套装置。常用的辅助装置包括：气动、液压装置，排屑装置，冷却、润滑装置，回转工作台和数控分度头，防护和照明等各种辅助装置。

1.1.4 数控机床的特点

数控机床是一种高效能的自动加工机床，与普通机床相比，其具有如下优点。

(1) 能加工普通机床难以完成或不能加工的复杂零件。采用二轴或二轴以上联动的数控机床，可加工母线为曲线的旋转体曲面零件、凸轮零件和各种复杂空间曲面类零件，如整体涡轮、发动机叶片和螺旋桨叶片等复杂零件。

(2) 数控加工可以获得更高的加工精度和质量。数控机床是按照预定的程序自动加工的,加工质量由机床保证,无人为干扰,而且加工精度还可以利用软件来进行校正和补偿,因此可以获得比机床本身精度更高的加工精度和重复精度。

(3) 具有更高的生产效率。数控机床的主轴转速和进给量范围比普通机床的范围大,良好的结构刚性允许数控机床采用大的切削用量,从而有效地节省机动时间;采用带有自动换刀装置的数控加工中心,可一次装夹完成多工序的连续加工,实现一机多用,大大缩短工件周转时间,生产率的提高更为明显,也节省了厂房面积。与普通机床相比,可以提高生产率 2~3 倍,尤其对某些复杂零件的加工,生产率可提高十几倍甚至几十倍。

(4) 具有广泛的适用性和较大的灵活性。可以适应不同尺寸规格的零件,一般借助通用工夹具,只需更换程序即可适应不同工件的加工,从而为单件、小批量新试制产品加工和产品结构频繁更新提供了极大的方便。

(5) 监控功能强,具有故障诊断的能力。CNC 系统不仅控制机床的运动,而且可对机床进行全面监控。例如,可对一些引起故障的因素提前报警,进行故障诊断等,从而极大地提高了检修的效率。

(6) 可实现较精确的成本核算和生产进度安排。以数控机床为基础建立起来的 FMC、FMS、CIMS 等综合自动化系统使机械制造的集成化、智能化和自动化得以实现。采用数字信息与标准化代码输入并具有通信接口的数控机床之间可实现网络通信,构建工业控制网络,从而实现自动化生产过程的计算、管理和控制。

1.1.5 数控机床的适用范围

一般来说,数控机床特别适合于加工零件较复杂、精度要求高、产品更新频繁、生产周期要求短的场合。实际中,还要考虑设备投资费用较高,以及对操作、维护和编程人员素质要求高等问题。图 1-2 可粗略地表示数控机床的适用范围。图 1-2(a)所示的是当零件复杂度和生产批量不同时三种机床应用范围的变化。通用机床多适用于零件结构不太复杂、生产批量较小的场合;专用机床适用于生产批量很大的零件;数控机床对于形状复杂的零件尽管批量小也同样适用。随着数控机床的普及,数控机床的适用范围也越来越广,对一些形状不太复杂而重复工作量很大的零件,如印制电路板的钻孔加工等,由于数控机床生产率高,也已大量使用。因而,数控机床的适用范围已扩展到图 1-2(a)中阴影所示的范围。

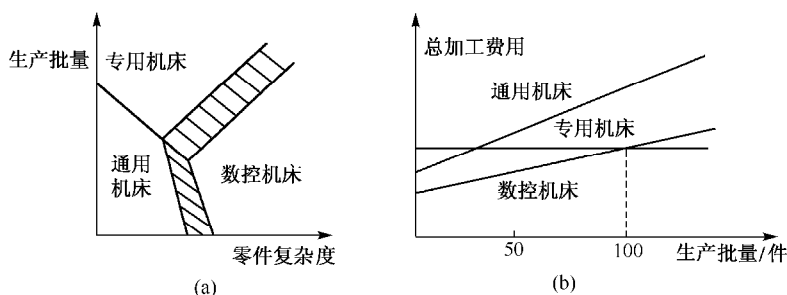


图 1-2 数控机床的适用范围

图 1-2(b)表示当采用通用机床、专用机床及数控机床加工时,零件生产批量与总加工费用之间的关系。据有关资料统计,当生产批量在 100 件以下、加工具有一定复杂度的零件时,

数控机床的加工费用最低,能获得较高的经济效益。由此可见,数控机床最适宜加工以下类型的零件:

- (1) 生产批量小的零件;
- (2) 需要进行多次改型设计的零件;
- (3) 加工精度要求高、结构形状复杂的零件,如箱体类零件,曲线、曲面类零件;
- (4) 需要精确复制和尺寸一致性要求高的零件;
- (5) 价值昂贵的零件,即虽然生产量不大,但若出现加工差错则会产生巨大经济损失的零件。

1.2 数控机床的分类

数控技术现已广泛应用于各类机床及非金属切削机床,如绘图仪、弯管机等,品种繁多。根据数控机床的功能和组成的不同,可以从多种角度对数控机床进行分类。

- (1) 按运动轨迹分类,有点位控制、直线控制与轮廓(连续轨迹)控制。
- (2) 按伺服驱动系统控制方式分类,可分为开环、闭环和半闭环伺服驱动系统。
- (3) 按功能水平分类,可分为高、中、低(经济型)三类。
- (4) 按工艺用途分类,有金属切削类、金属成形类、特种加工类等数控机床。

1.2.1 按运动轨迹分类

1. 点位控制系统

一些孔加工数控机床只要求获得准确的孔系坐标位置,对刀具相对工件的移动定位过程中的运动轨迹没有严格要求,可以采用点位控制系统。如数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控点焊机和数控测量机等都采用此类系统,如图1-3(a)所示。

2. 直线控制系统

除了控制起点与终点之间的准确位置外,加工过程要求刀具由一点到另一点之间的运动轨迹为一条直线,并能控制位移的速度,此时可以采用直线控制系统。直线控制系统的刀具切削路径只沿着平行于某一坐标轴方向运动,或者沿着与坐标轴成一定角度的斜线方向进行直线切削加工,如图1-3(b)所示。采用这类控制系统的机床有数控车床、数控铣床等。

同时具有点位控制和直线控制功能的点位/直线控制系统,主要应用在数控镗铣床、加工中心机床上。

3. 轮廓控制系统

轮廓控制系统能够同时对两个或两个以上的坐标轴进行连续控制,也称为连续控制系统。加工时不仅要控制起点和终点位置,而且要控制两点之间每一点的位置和速度,使机床加工出符合图纸要求的复杂形状(任意形状的曲线或曲面)的零件。CNC装置一般都具有直线插补和圆弧插补功能。如数控车床、数控铣床、数控磨床、数控加工中心、数控电加工机床、数控绘图机等,都采用此类控制系统。

这类数控机床绝大多数具有二坐标或二坐标以上的联动功能,不仅有刀具半径补偿、刀

具长度补偿功能，而且还具有机床轴向运动误差补偿，丝杠、齿轮的间隙补偿等一系列功能，如图1-3(c)所示。

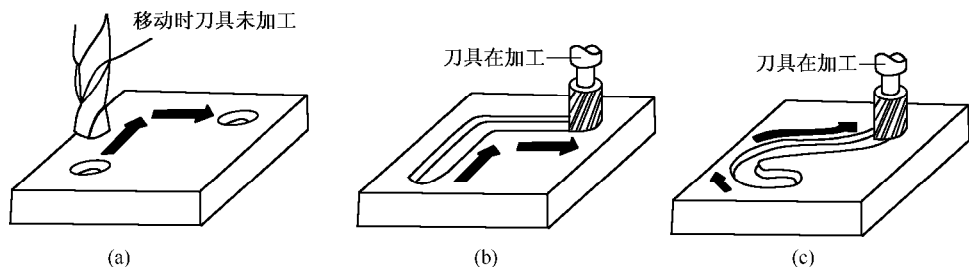


图 1-3 数控系统控制方式

1.2.2 按伺服驱动系统控制方式分类

1. 开环伺服驱动系统

开环伺服驱动系统是早期及当前一些经济型数控机床采用的伺服驱动系统。其特点是不带位置检测元件，采用的伺服驱动元件为步进电动机或电液脉冲马达。数控系统将零件程序处理后，发出指令脉冲信号，使伺服驱动元件转过一定的角度，并通过传动齿轮、滚珠丝杠螺母副，使执行机构（如工作台）移动或转动。图1-4为开环控制系统的框图。此控制方式没有来自位置测量元件的反馈信号，对执行机构的动作情况不进行检测，指令流向为单向，被称为开环控制系统。

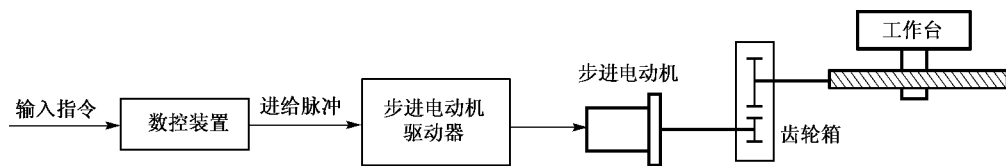


图 1-4 开环控制系统框图

步进电动机伺服系统是最典型的开环控制系统。其优点是结构简单，调试维修方便，成本较低。但是，开环系统的精度主要取决于伺服元件和机床传动元件的精度、刚度和动态特性，因此控制精度较低。目前，该系统多用于经济型数控机床或对旧机床的改造。

2. 闭环伺服驱动系统

伺服驱动系统不仅接收数控系统的驱动指令，还同时接收由工作台上检测元件测出的实际位置反馈信息，可进行比较，并根据其差值及时进行修正。此类伺服控制系统可以消除因传动系统误差而引起的误差，也称为闭环控制系统。

图1-5为闭环控制系统框图。数控装置发出指令脉冲后，若工作台没有移动，即无位置反馈信号时，伺服电机转动，经过齿轮副、滚珠丝杠螺母副等传动元件带动机床工作台移动。装在机床工作台上的位置测量元件将测量所得工作台的实际位移值进行反馈，位置比较环节实现实际位移与指令位移比较，若二者存在差值，经放大器放大后，再控制伺服驱动电动机转动，直至差值为零时，工作台才停止移动。

采用闭环伺服控制系统可以获得很高的加工精度，但是由于系统包含很多机械环节，如

丝杠副、导轨副的摩擦特性、各部件刚度及传动精度等都是可变因素，直接影响伺服驱动系统的调节参数。因此，闭环系统的设计和调整存在较大困难，处理不当会导致系统不稳定。

闭环伺服驱动系统主要用在精度要求较高的数控镗铣床、数控超精车床、数控超精镗床等机床上。

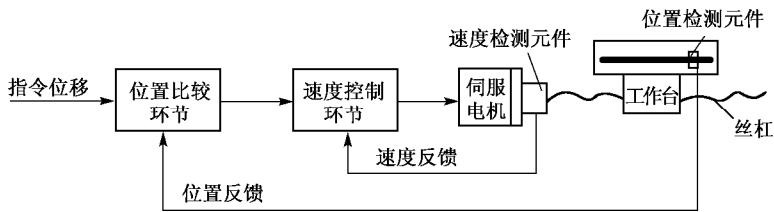


图 1-5 闭环控制系统框图

3. 半闭环伺服驱动系统

将测量元件安装在丝杠副端或电动机轴端，测量伺服机构中电动机或丝杠的转角，来间接测量工作台的位移，就构成了半闭环伺服驱动系统。常用的测量元件有旋转变压器、感应同步器、光电编码盘或分解器等。系统中滚珠丝杠螺母副和工作台均在反馈环路之外，环路短，刚性好，容易获得稳定的控制特性，因此，目前大多数数控机床都采用半闭环伺服驱动系统。图1-6为半闭环控制系统框图。

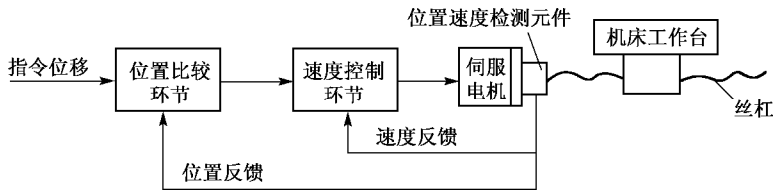


图 1-6 半闭环控制系统框图

1.2.3 按功能水平分类

数控机床按数控系统的功能水平可分为低、中、高三档。低、中、高档的界限是相对的，尚没有一个确切的定义，不同时期的划分标准有所不同。从目前的发展水平来看，大体可从表 1-1 所列的几个方面来区分。

表 1-1 当前机床功能水平区分点

项 目	低 档	中 档	高 档
分辨率和进给速度	10 μm、8~15 m/min	1 μm、15~24 m/min	0.1 μm、15~100 m/min
伺服进给类型	开环、步进电动机系统	半闭环直流或交流伺服驱动系统	闭环直流或交流伺服驱动系统
联动轴数	2 轴	3~5 轴	3~5 轴
主轴功能	不能自动变速	自动无级变速	自动无级变速、C 轴功能
通信能力	无	RS-232C 或 DNC 接口	MAP 通信接口、联网功能
显示功能	数码管显示、CRT 字符	CRT 显示字符、图形	三维图形显示、图形编程
内装 PLC	无	有	有
主 CPU	8 位 CPU	16 或 32 位 CPU	64 位 CPU

1.2.4 按工艺用途分类

数控机床可按不同工艺用途分类。在金属切削类机床中有数控的车床、铣床、磨床与齿轮加工机床等；在金属成形类机床中有数控的冲压机、弯管机、裁剪机等；在特种加工类机床中有数控的电火花切割机、火焰切割机、点焊机、激光加工机等。近年来，在非加工设备中也大量采用数控技术，如数控测量机、自动绘图机、装配机、工业机器人等。

加工中心是一种带有自动换刀装置的数控机床，其突破了一台机床只能进行一种工艺加工的传统模式，能以工件为中心，实现一次装夹后多种工序的自动加工。常见的有以加工箱体类零件为主的镗铣类加工中心和几乎能够完成各种回转体类零件所有工序加工的车削中心。

近年来，一些复合加工的数控机床也开始出现，其基本特点是集中多工序、多刀刃、复合工艺加工在一台设备中完成。

1.3 数控技术的应用与发展

1.3.1 数控技术的发展历程及趋势

从1947年美国帕森(John C. Parson)提出用电子装置控制坐标镗床来精确制作直升机叶片样板的方案，并于1952年与麻省理工学院合作研制成功世界上第一台三坐标数控铣床开始，在电子、计算机等技术的推动下，半个多世纪以来数控技术发展迅速。在体系结构上，数控系统经历了NC(硬线数控)、CNC(计算机数控)和目前的PC-NC(PC数控)三个阶段，如图1-7所示。从硬件角度看，数控系统经历了八代发展，NC阶段以电子管、晶体管和小规模集成电路应用为标志，经历了三代，特点是完全由硬件逻辑电路构成的专用硬件数控系统；CNC阶段是以小型计算机、微机、超大规模集成电路、32位微机应用于数控系统为标志，经历了四代；而PC-NC阶段是借助PC丰富的软硬件资源，构建基于PC的数控系统。

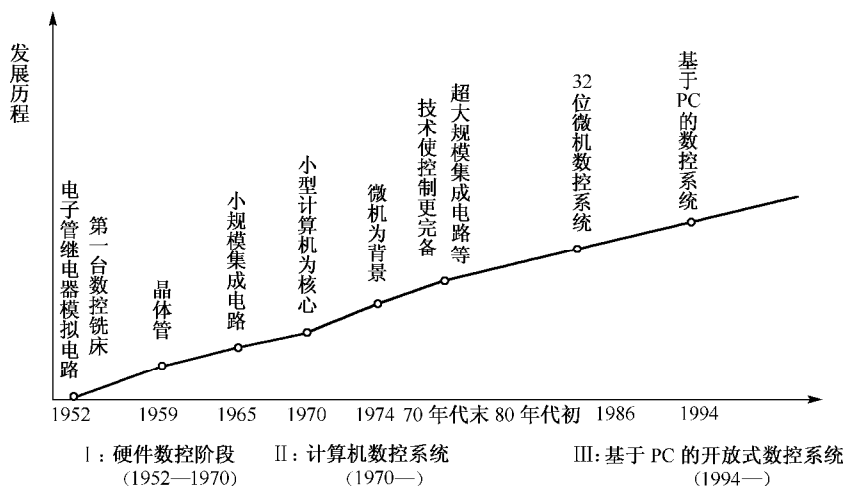


图 1-7 数控系统的发展历程

随着先进生产技术的发展，要求现代数控机床向高速度、高精度、高可靠性、智能化、开放式和更完善的功能方向发展。

1) 高速度、高精度化

数控机床高速切削和高速进给的目标是在保证加工精度的前提下,提高加工速度。这不仅要求数控系统的处理速度快,同时还要求数控机床具有大功率和大转矩的高速主轴、高速进给电动机、高性能的刀具和稳定的高频动态刚度。

高精度包括高进给分辨率、高定位精度和重复定位精度、高动态刚度、高性能闭环交流数字伺服驱动系统等。数控机床由于装备有新型的数控系统和伺服驱动系统,使机床的分辨率和进给速度达到 $0.1\ \mu\text{m}$ ($24\ \text{m/min}$), $1\ \mu\text{m}$ ($100\sim 240\ \text{m/min}$),现代数控系统已经逐步由16位CPU过渡到32位CPU。日本产的FANUCI5系统开发出64位CPU系统,能达到当最小移动单位 $0.1\ \mu\text{m}$ 时,最大进给速度为 $100\ \text{m/min}$ 。FANUCI6和FANUCI8采用简化与减少控制基本指令的RISC(Reduced Instruction Set Computer)精简指令计算机,能进行更高速度的数据处理,使一个程序段的处理时间缩短到 $0.5\ \text{ms}$,连续 $1\ \text{mm}$ 移动指令的最大进给速度可达到 $120\ \text{m/min}$ 。

日本交流伺服电机安装了每转可产生100万个脉冲的位置传感器,其位置检测精度可达到 $0.01\ \text{mm/脉冲}$,并在位置伺服驱动系统中采用前馈控制与非线性控制等方法。在补偿技术方面,除采用齿隙补偿、丝杠螺距误差补偿、刀具补偿等技术外,还开发了热补偿技术,以减小由热变形引起的加工误差。

2) 开放式

新一代数控机床的控制系统应该是一种开放式、模块化的体系结构,即系统的构成要素应是模块化的,同时各模块之间的接口必须是标准化的;系统的软件、硬件构造应是“透明的”、“可移植的”;系统应具有“连续升级”的能力。

为满足现代机械加工的多样化需求,新一代数控机床机械结构更趋向于“开放式”。机床结构按模块化、系列化原则进行设计与制造,以缩短供货周期,最大限度地满足用户的工艺需求。数控机床机械部件的品种规格逐渐增加,质量指标不断提高,机电一体化内容更加丰富,且各种功能部件已实现商品化。

3) 智能化

智能化数控系统是指具有拟人智能特征的数控系统。智能数控系统可通过对影响加工精度和效率的物理量进行检测、建模、提取特征,从而自动感知加工系统的内部状态及外部环境,快速地做出实现最佳目标的智能决策,对进给速度、切削深度、坐标移动、主轴转速等工艺参数进行实时控制,使机床的加工过程处于最佳状态。

在数控系统中引进自适应控制技术。数控机床中因工件毛坯余量不匀、材料硬度不一致、刀具磨损、工件变形、润滑或冷却液等因素的变化将直接或间接影响加工效果。通过在加工过程中不断检查某些能代表加工状态的参数,如切削力、切削温度等,进行评价函数计算和最佳化处理,对主轴转速、刀具(或工作台)进给速度等切削用量参数进行校正,使数控机床能够始终在最佳的切削状态下工作。

可设置故障自诊断功能。当数控机床工作过程中出现故障时,控制系统能自动诊断,并立即采取措施排除故障,以适应长时间在无人环境下的正常运行要求。

可应用图像识别和声控技术。该技术使机床自己辨别图样,并自动地运用数控加工的智能化技术和根据人的语言声音对数控机床进行自动控制的智能化技术。

4) 复合化

复合化加工指在一台机床上一次装夹便可以完成多工种、多工序的加工。通过缩短装卸刀具、装卸工件、调整机床的辅助时间,实现一机多能,从而最大限度地提高机床的开机率和利用率。

20世纪60年代初期,在一般数控机床的基础上开发了带刀库可自动换刀的数控加工中心(MC),实现工件一次装夹,后连续地对工件的各加工面进行多种工序加工。目前,加工中心的刀库容量可多达120把左右,自动换刀装置的换刀时间为1~2s。在加工中心中,除了镗铣类加工中心和车削类车削中心外,还出现了集成型车/铣加工中心、自动更换电极的电火花加工中心和带有自动更换砂轮装置的内圆磨削加工中心等。

随着数控技术的不断发展,打破了原有机械分类的工艺划分界限,出现了相互兼容、扩大工艺范围的趋势。复合加工技术不仅是加工中心、车削中心等在同类技术领域内的复合,而且正向不同类技术领域内的复合方向发展。

5) 高可靠性

高可靠性的数控系统是提高数控机床可靠性的关键。选用高质量的印制电路和元器件,对元器件进行严格的筛选,建立稳定的制造工艺及产品性能测试等一整套质量保证体系。在新型的数控系统中采用大规模、超大规模集成电路,进一步将典型的硬件结构集成化,制成专用芯片,提高系统的可靠性。

现代数控机床均采用CNC系统,数控系统的硬件由多种功能模块制成,对于不同功能的模块可根据机床数控功能的需要选用,并可自行扩展,组成满意的数控系统。在CNC系统中,只要改变一下软件或控制程序,就能制成适应各类机床不同要求的数控系统。

现代数控机床都装备有各种类型的监控、检测装置,并且具有故障自动诊断与保护功能。能够对工件和刀具进行监测,当发现工件超差、刀具磨损或破裂时,能及时报警,给予补偿,或对刀具进行调换,具有故障预报和自恢复功能,以保证数控机床长期可靠地工作。数控系统一般能够对软件、硬件进行故障自诊断,能自动显示故障部位及类型,以便快速排除故障。此外,系统还具有增强保护功能,如行程范围保护功能、断电保护功能等,以避免损坏机床和报废工件。

6) 多种插补功能

数控机床除具有直线插补、圆弧插补功能外,有的还具有样条插补、渐开线插补、螺旋线插补、极坐标插补、指数曲线插补和圆柱插补等。

7) 友好的人机界面

现代数控机床具有丰富的显示功能,大多数系统都具有实时图形显示、PLC梯形图显示和多窗口的其他显示功能;丰富的编程功能,像会话式自动编程功能、图形输入自动编程功能,有的还具有CAD/CAM功能;方便的操作,有引导对话方式帮助操作者很快熟悉操作,设有自动工作手动参与功能;根据加工的要求,各系统都设置了多种便于编程的固定循环;伺服驱动系统数据和波形的显示,参数的自动设定;系统具有多种管理功能,刀具及其寿命的管理、故障记录、工作记录等;PLC程序编制方法增加,目前有梯形图编程(Ladder Language Program)方法和步进顺序流程图编程(Step Sequence Program)方法,现在越来越广泛地用C语言编写PLC程序;帮助功能,系统不但显示报警内容,而且能指出解决问题的方法。

1.3.2 数控技术与现代制造系统

1. 现代制造系统的发展趋势

随着市场需求个性化与多样化,现代制造系统正向精密化、柔性化、网络化、虚拟化、智能化、清洁化、集成化、全球化的方向发展。当前先进制造技术的发展大致有以下特点。

1) 信息技术、管理技术与工艺技术紧密结合

信息技术正促进着制造技术不断发展。信息使制造系统的技术含量提高,促进了加工制造的精密化、快速化,自动化技术的柔性化、智能化,整个制造过程的网络化、全球化。相继出现的各种先进制造模式,如 CIMS、并行工程、精益生产、敏捷制造、虚拟企业与虚拟制造等,均以信息技术的发展为支撑。

2) 计算机辅助设计、辅助制造、辅助工程分析(CAD/CAM/CAE)

制造信息的数字化,将实现 CAD/CAPP/CAM/CAE 的一体化,使产品向无图纸制造方向发展。在发达国家的大型企业中,已广泛使用 CAD/CAM,实现 100%数字化设计。将数字化技术注入产品设计开发,提高了企业产品自主开发能力和产品档次,同时也提高了企业对市场的应变能力和快速响应能力。通过局域网实现企业内部并行工程,通过 Internet 建立跨地区的虚拟企业,实现资源共享,优化配置,也使制造业向互联网辅助制造方向发展。

3) 加工制造技术向着超精密、超高速和发展新一代制造装备的方向发展

超精密加工技术是为了获得被加工件的形状、尺寸精度和表面粗糙度均优于亚微米级的一门高新技术。超精加工技术的加工精度由红外波段向可见光和不可见光的紫外波段发展,目前加工精度达到 $0.025\ \mu\text{m}$,表面粗糙度达 $0.045\ \mu\text{m}$,已进入纳米级加工时代。美国为了适应航空、航天等尖端技术的发展,已研制出多种数控超精密加工车床,最大的加工直径可达 $1.63\ \text{m}$,定位精度为 $28\ \text{nm}$ ($10^{-9}\ \text{m}$)。

目前铝合金超高速切削的切削速度已超过 $1600\ \text{m/min}$,铸铁为 $1500\ \text{m/min}$,超耐热镍合金为 $300\ \text{m/min}$,钛合金 $200\ \text{m/min}$ 。超高速切削的发展已转移到一些难加工材料的切削加工。现代数控机床主轴的最高转速可达到 $10\ 000\sim 20\ 000\ \text{r/min}$,采用高速内装式主轴电动机后,使主轴直接与电动机连接成一体,可将主轴转速提高到 $40\ 000\sim 50\ 000\ \text{r/min}$ 。

市场竞争和新产品、新技术、新材料的发展推动着新型加工设备的研究与开发,如并联桁架式结构数控机床(俗称“六腿”机床),突破了传统机床的结构方案,采用可以伸缩的六条“腿”连接定平台和动平台,每条“腿”均由各自的伺服电动机和精密滚珠丝杠驱动,控制这六条“腿”的伸缩就可以控制装有主轴头的动平台的空间位置和姿势,从而满足刀具运动轨迹的要求。

4) 工艺研究由经验判断走向定量分析

先进制造技术的一个重要发展趋势是通过计算机技术和模拟技术的应用,使工艺研究由经验判断走向定量分析,加工工艺由技艺发展为工程科学。

5) 虚拟现实技术在制造业中获得越来越多的应用

虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术主要包括虚拟制造技术和虚拟企业两个部分。前者从根本上改变了设计、试制、修改设计、规模生产的传统制造模式,后者实现了产品的全球化制造。

在产品真正制造出之前，首先在虚拟制造环境中生成了软产品原型（Soft Prototype）代替传统的硬样品（Hard Prototype）进行试验，对其性能和可制造性进行预测和评价，从而缩短产品的设计与制造周期，降低产品的开发成本。虚拟企业通过信息高速公路，将产品涉及的不同企业临时组建成为一个没有围墙、超越空间约束、靠计算机网络联系、统一指挥的合作经济实体，从而快速响应市场的需求。

2. 从单机数控加工到计算机集成制造系统

在所有品种的机床实现单机数控化的同时，现代制造系统进一步加快了向柔性制造系统、柔性制造单元及计算机集成制造系统全面发展的步伐。20世纪50年代末，出现了用于箱体类零件的数控加工中心并得到迅速发展。随着CNC技术、信息技术、网络控制技术的发展，为单机数控化向计算机控制的多机制造系统自动化方向发展创造了必要的条件。20世纪60年代末出现的直接数控（DNC）系统正是这一发展趋向的具体体现，即用一台计算机控制和管理多台数控机床和加工中心。

1) 柔性制造技术

1967年英国莫林斯（Molins）公司提出的柔性自动化制造技术（简称柔性制造技术），强调管理技术和制造技术的有机集合。经过多年的发展，柔性制造技术已成为现代先进制造技术的统称，其以数控技术为核心，集自动化技术、信息技术和制作加工技术于一体，把以往工厂企业中相互孤立的工程设计、制造、经营管理等过程，在计算机及其软件和数据库的支持下，构成了一个覆盖整个企业的有机系统。

柔性制造技术的应用，既解决了近百年来中小批量和中大批量多品种加工自动化的问题，也很好地适应了产品不断迅速更新的需求。高效、灵活的特性使柔性制造技术成为实施敏捷制造、并行工程、精益生产和智能制造系统的基础，被世界各国所重视，并在发达国家的制造业中得到了广泛的应用。

柔性制造技术是技术密集型的技术群，一般认为凡是侧重于柔性，适应于多品种、中小批量（包括单件产品）的加工技术都属于柔性制造技术。目前，按规模大小可进行如下划分：

（1）柔性制造系统（FMS）

关于柔性制造系统（Flexible Manufacturing System, FMS）的定义很多，权威性的定义有如下几个。美国国家标准局把FMS定义为：“由一个传输系统联系起来的一些设备，传输装置把工件放在其他联结装置上送到各加工设备，使工件加工准确、迅速和自动化。中央计算机控制机床和传输系统，柔性制造系统有时可同时加工几种不同的零件。”国际生产工程研究协会指出“柔性制造系统是一个自动化的生产制造系统，在最少人的干预下，能够生产任何范围的产品族，系统的柔性通常受到系统设计时所考虑的产品族的限制”。而我国国家军用标准定义为：“柔性制造系统是由数控加工设备、物料运储装置和计算机控制系统组成的自动化制造系统，它包括多个柔性制造单元，能根据制造任务或生产环境的变化迅速进行调整，适用于多品种、中小批量生产。”简单地说，FMS是由若干数控设备、物料运储装置和计算机控制系统组成的，并能根据制造任务和生产品种变化而迅速进行调整的自动化制造系统。

目前，常见的组成通常包括4台或更多台全自动数控机床（加工中心与车削中心等），由集中的控制系统及物料搬运系统连接起来，在不停机的情况下实现多品种、中小批量的加工及管理。

(2) 柔性制造单元 (FMC)

FMC (Flexible Manufacturing Cell) 的问世并在生产中使用约比 FMS 晚 6~8 年。FMC 可视为一个规模最小的 FMS, 是 FMS 向廉价化及小型化方向发展的一种产物。它由 1~2 台加工中心、工业机器人、数控机床及物料运送存储设备构成, 其特点是实现单机柔性化及自动化, 具有适应加工多品种产品的灵活性。迄今, FMC 已进入普及应用阶段。

(3) 柔性制造线 (FML)

FML (Flexible Manufacturing Line) 是处于单一或少品种、大批量、非柔性自动线与中小批量、多品种 FMS 之间的生产线, 其加工设备可以是通用的加工中心、CNC 机床, 也可采用专用机床或 NC 专用机床, 对物料搬运系统柔性的要求低于 FMS, 但生产率更高。FML 以离散型生产中的柔性制造系统和连续生过程中的分散型控制系统 (DCS) 为代表, 其特点是实现生产线柔性化及自动化, 其技术已日臻成熟, 迄今已进入实用化阶段。

(4) 柔性制造工厂 (FMF)

FMF (Flexible Manufacturing Factory) 是将多条 FMS 连接起来, 配以自动化立体仓库, 并用计算机系统进行联系, 采用从订货、设计、加工、装配、检验、运送至发货的完整 FMF。它包括了 CAD/CADM, 并使计算机集成制造系统 (CIMS) 投入实际, 实现生产系统柔性化及自动化, 进而实现全厂范围的生产管理、产品加工及物料储运进程的全盘化。

FMF 是自动化生产的最高水平, 反映出世界上最先进的自动化应用技术。它将制造、产品开发及经营管理的自动化连成一个整体, 以信息流控制物质流的智能制造系统 (Intelligent Manufacturing System, IMS) 为代表, 其特点是实现工厂柔性化及自动化。

2) 计算机集成制造系统

计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing System, CIMS) 是自动化制造技术发展的更高阶段, CIMS 概念是由美国的 J. Harrington 于 1973 年首次提出的。自动化制造技术不仅需要发展车间制造过程的自动化, 而且要全面实现从生产决策、产品设计、市场预测直到销售的整个生产活动的自动化。CIMS 正是在计算机网络和分布式数据库的支持下, 将上述要求综合成一个完整的生产制造系统, 从而获得更高的整体效益, 缩短产品开发制造周期, 提高产品质量, 提高生产率, 提高企业的应变能力, 以赢得竞争。CIMS 是工厂自动化的发展方向和未来制造业工厂的模式。

CIMS 一般可以划分为如下四个功能子系统和两个支撑子系统, 其构成框图如图 1-8 所示。

四个功能子系统包括:

(1) 管理信息子系统, 以 MRPII 为核心, 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、人力资源的管理信息功能。

(2) 产品设计过程自动化子系统, 通过计算机来辅助产品设计、制造准备及产品测试, 即 CAD/CAPP/CAM 阶段。

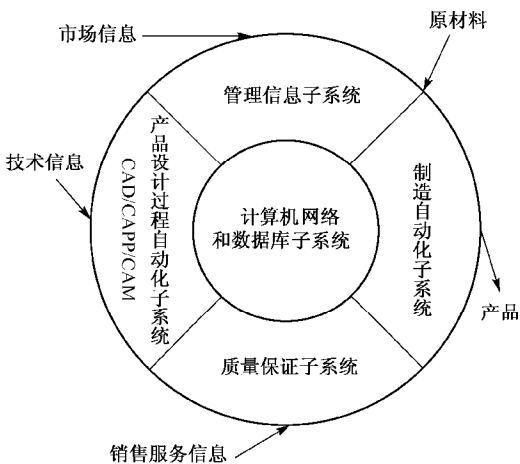


图 1-8 CIMS 的构成框图

(3) 制造自动化或柔性制造子系统, 是 CIMS 信息流和物料流的结合点, 是 CIMS 最终产生经济效益的聚集地, 由数控机床、加工中心、清洗机、测量机、运输小车、立体仓库、多级分布式控制计算机等设备及相应的支持软件组成。根据产品工程技术信息、车间层加工指令, 完成对零件毛坯的作业调度及加工制造。

(4) 质量保证子系统, 包括质量决策、质量检测、产品数据的采集、质量评价、生产加工过程中的质量控制与跟踪功能。系统保证从产品设计、产品制造、产品检测到售后服务全过程的质量监控。

两个辅助子系统指计算机网络和数据库子系统。

(1) 计算机网络子系统, 即企业内部的局域网, 支持 CIMS 各子系统的开放型网络通信系统。采用标准协议可以实现异机互联、异构局域网和多种网络的互联。系统满足不同子系统对网络服务提出的不同需求, 支持资源共享、分布处理、分布数据库和适时控制。

(2) 数据库子系统, 支持 CIMS 各子系统的数据共享和信息集成, 覆盖了企业全部数据信息, 在逻辑上是统一的, 在物理上是分布式的数据管理系统。公用数据库是 CIMS 的核心, 对信息资源进行存储与管理, 并对各个计算机系统进行通信, 实现企业数据的共享和信息集成。

CIMS 是建立在多项先进制造技术基础上的高技术制造系统。为赶上工业先进国家的机械制造水平, 我国 863 计划将 CIMS 作为自动化领域中的一个主题项目进行研究, 开展了关键技术的攻关工作, 确定了若干试点工厂, 取得了一批重要的研究成果。在 CIMS 的实施过程中, 要实现工程设计、制造过程、信息管理、工厂生产等技术和功能的集成, 这种集成不是现有生产系统的计算机化, 而原有的生产系统集成很困难, 独立的自动化系统异构同化非常复杂, 所以要考虑在实施 CIMS 计划时的收益和支出。

1.4 习题与思考题

1. 数控机床由哪些部分组成? 各有什么作用?
2. 数控机床适合加工什么样的零件?
3. 加工中心与普通数控机床的区别是什么?
4. 什么是点位控制、直线控制、轮廓控制数控机床? 有何特点及应用?
5. 简述开环、闭环、半闭环伺服驱动系统的区别。
6. 现代制造系统的发展与数控技术的关系如何?
7. FMC 有什么特点? 有哪些类型?
8. 什么是 FMS? 由哪几部分组成?
9. 什么是 CIMS 系统?