

第 1 章 数控机床概述及数控编程简介

1.1 数控机床的发展、组成及工作原理

1.1.1 基本概念

1. 数控技术

数控技术，即数字控制技术，是用数字指令对一台或多台机械设备动作进行自动控制的技术，简称数控（Numerical Control，NC）。

2. 数控系统

数控系统是计算机数字控制装置、可编程序控制器、进给驱动与主轴驱动装置等相关设备的总称。随着科学技术的发展，数控系统也采用专用或通用计算机及控制软件与相关的电气元部件一起来实现数控功能，称为计算机数控（CNC）系统。

3. 机床与数控机床

机床（Machine Tool）是用以制造机器的机器，亦称工作母机或工具机，习惯上简称机床。现代机械制造中凡属精度要求较高和表面粗糙度要求较细的零件，一般都需在机床上用切削的方法进行最终加工。

采用了数控技术进行控制的机床，称为数控机床（Numerical Control Machine Tools）。数控机床在计算机控制系统的控制下按照一定的加工指令控制主轴系统、进给系统、刀具系统和冷却系统等辅助设备工作。

4. 数控编程

数控编程（NC Programming）就是生成用数控机床进行零件加工的数控程序的过程。

数控机床是数控加工的硬件基础，其性能对加工效率、精度等方面具有决定性的影响。零件加工程序的编制（数控编程）是实现数控加工的重要环节，特别是对于复杂零件的加工，其编程工作的重要性甚至超过数控机床本身。数控编程技术涉及制造工艺、计算机技术、计算机几何、微分几何、人工智能等众多领域，它的目标是更有效地获得满足各种零件加工要求的高质量数控加工程序，以便充分地发挥数控机床的性能，获得更高的加工效率与加工质量。

1.1.2 机床与数控机床的产生与发展

1. 机床的产生

15 世纪,由于制造钟表和武器的需要,出现了钟表匠用的螺纹车床和齿轮加工机床,以及水力驱动的炮筒镗床。1501 年前后,意大利人列奥纳多·达芬奇曾绘制过车床、镗床、螺纹加工机床和内圆磨床的构想草图,其中已有曲柄、飞轮、顶尖和轴承等。中国明朝时期,宋应星编著的《天工开物》中也载有磨床的结构,其用脚踏的方法使铁盘旋转,加上沙子和水来剖切玉石。

18 世纪的工业革命推动了机床的发展。1774 年,英国人约翰·威尔金森发明了较精密的炮筒镗床。次年,他用这台炮筒镗床镗出的汽缸,满足了瓦特蒸汽机的要求。为了镗制更大的汽缸,他又于 1775 年制造了一台水轮驱动的汽缸镗床,进一步促进了蒸汽机的发展。从此,机床开始用蒸汽机通过曲轴驱动。

1797 年,英国人莫兹利创制成的车床由丝杠传动刀架,能实现机动进给和车削螺纹,这是机床结构的一次重大变革。莫兹利也因此被称为“车床之父”和“英国机床工业之父”。

19 世纪,由于纺织、动力、交通运输机械和军火生产的推动,各种类型的机床相继出现。1817 年,英国人罗伯茨创制龙门刨床;1818 年,美国人惠特尼(全名伊莱·惠特尼)制成卧式铣床;1876 年,美国制成万能外圆磨床;1835 和 1897 年又先后发明滚齿机和插齿机。

工业技术发展的中心,从 19 世纪起就逐渐从英国移向美国。在把英国的技术声望夺过去的人中,惠特尼堪称佼佼者。惠特尼聪颖过人,具有远见卓识,他率先研究出了作为大规模生产的可更换部件的系统。至今还很活跃的惠特尼工程公司,早在 19 世纪 40 年代就研制成功了一种转塔式六角车床。这种车床是为了满足工件制作的复杂化和精细化而问世的,在这种车床中,装有一个绞盘,各种需要的刀具都安装在绞盘上,这样,通过旋转固定工具的转塔,就可以把工具转到所需的位置上。

随着电动机的问世,机床先开始采用电动机集中驱动,后又广泛使用单独电动机驱动。

20 世纪初,为了加工精度更高的工件、夹具和螺纹加工工具,相继创制出坐标镗床和螺纹磨床。同时为了适应汽车和轴承等工业大量生产的需要,又研制出各种自动机床、仿形机床、组合机床和自动生产线。

19 世纪末到 20 世纪初,机床的发展进入精密化时期。单一的车床已逐渐演化出了铣床、刨床、磨床、钻床等,这些主要机床已经基本定型,这样就为 20 世纪前期的精密机床和生产机械化与半自动化创造了条件。

在 20 世纪的前 20 年,工业制造主要是围绕铣床、磨床和流水装配线展开的。由于汽车、飞机及其发动机生产的要求,在大批加工形状复杂、高精度及高光洁度的零件时,迫切需要精密的、自动的铣床和磨床。多螺旋线刀刃铣刀的问世,基本解决了单刃铣刀所产生的振动和光洁度不高的问题,使铣床成为加工复杂零件的重要设备。

被世人誉为“汽车大王”的福特提出,汽车应该是“轻巧的、结实的、可靠的和便宜的”。为了实现这一目标,必须研制高效率的磨床。为此,美国人诺顿于 1900 年用金刚砂和刚玉石制成直径大而宽的砂轮,以及刚度大而牢固的重型磨床。磨床的发展,使机械制造技术进入了精密化的新阶段。

在 1920 年以后的 30 年中,机械制造技术进入了半自动化时期,液压和电气元件在机床

和其他机械上逐渐得到了应用。1938 年，液压系统和电磁控制不但促进了新型铣床的发明，而且也广泛应用于龙门刨床等机床。20 世纪 30 年代以后，行程开关—电磁阀系统几乎用到各种机床的自动控制上了。

2. 数控机床的产生

数控机床最早产生于美国，从 1952 年世界上第一台数控三坐标镗铣床问世后，数控系统先后经历了两个阶段共六代的发展。

1948 年，美国帕森斯公司接受美国空军委托，研制飞机螺旋桨叶片轮廓样板的加工设备，由于样板形状复杂多样，精度要求高，一般加工设备难以适应，于是利用计算机控制机床的设想被提出。1949 年，该公司在美国麻省理工学院（MIT）伺服机构研究室的协助下，开始数控机床研究，并于 1952 年试制成功第一台由大型立式仿形铣床改装而成的三坐标数控铣床，不久即开始正式生产，于 1957 年正式投入使用，这是制造技术发展过程中的一个重大突破，标志着制造领域数控加工时代的开始。数控加工是现代制造技术的基础，这一发明对于制造行业具有划时代的意义和深远的影响。世界上主要工业发达国家都十分重视数控加工技术的研究和发展，当时的数控装置也就是第一代数控系统采用电子管元件，体积大、可靠性低、价格高、产量低，主要用于军工部门和航空工业等少数有特殊需要的部门用来加工复杂形状零件，应用并不广泛。1959 年，晶体管元件和印刷电路板的问世，使数控装置进入了第二代，其可靠性有所提高，体积大为减小，成本有所下降；1960 年以后，较为简单和经济的点位控制数控钻床和直线控制数控铣床得到较快发展，使数控机床在机械制造业各领域逐步获得推广。第三代是 1965 年商品化的集成电路数控系统，它大大缩小了数控装置的体积，其可靠性得到实质性的提高，从而为一般用户所接受，数控机床的产量和品种均得到较大的发展。以上三代数控系统实质上是一种专用的计算机系统，主要靠硬件来实现各种控制功能，为第一阶段，称作数字控制系统，简称数控系统。1968 年，小型计算机在数控系统中得到应用，称为第四代数控系统。1974 年，微处理器在数控系统中得到应用，称为第五代数控系统。1990 年，基于 PC（个人计算机）控制的开放型数控系统成为第六代数控系统。后三代数控系统为第二阶段，称作计算机数控系统，也称 CNC 系统。

数控系统近七十年来经历了两个阶段六代的发展，只是发展到了第五代以后，才从根本上解决了可靠性低、价格极为昂贵、应用很不方便等极为关键的问题。因此，即使在工业发达的国家，数控系统大规模地得到应用和普及，也是在 20 世纪七十年代末八十年代初以后，即数控技术经过了近三十年的发展才走向普及应用的。

3. 我国数控机床的发展概况

我国数控机床的研制始于 1958 年，发展过程大致分为三个阶段。

第一阶段为 1958—1979 年，在这一阶段中国内对数控机床的特点、发展条件没有足够的了解，发展基础不牢靠、配套件质量不稳定，导致很多产品最终无法用于生产。

第二阶段为 1980—1994 年，国内成功推出了一系列数控机床品种。但由于较西方国家起步晚，该时期所推出的数控机床技术还不够成熟。

第三阶段（1995—），国内数控机床主机厂得到了快速发展，生产水平也有明显提高，国家数控机床产业进入了快速发展的新时期。我国的数控机床在技术水平、质量、品种等方面有了新的发展，一些较高层次的数控机床，如五轴联动数控机床，也已经投放市场应用，如

广数、华中数控等国产厂商均拥有了五轴联动 NC 系统，大连科德更是异军突起，将五轴加工中心出口到了德国和日本。现在，我国机床经历了几十年的发展之后，在中低端机床已经有了自己的机床产业体系，在高端机床方面也有了质的进步。

目前，我国已成为数控机床的最大生产国及消费国。2013—2017 年我国国产数控机床的年平均产量为 24.16 万台，其中出口平均为 2.31 万台/年，金额为 6.12 亿美元/年；2013—2017 年我国的进口数控机床平均为 1.17 万台/年，金额为 26.15 亿美元/年。我国进口数控机床的单价平均为 22.4 万美元/台，出口的数控机床的单价平均为 2.9 万美元/台，显然处于进口高档数控机床、出口中低档数控机床的阶段，也说明我国数控机床行业在高档与大型数控机床制造方面与国外的差距明显。目前国内常用的数控系统有 FANUC、SIEMENS、FAGOR、广州数控、华中数控和航天数控系统等。我国约 70% 的中高档数控系统被外资品牌占据，所以我们应当看清形势，充分认识国产数控机床的不足，借鉴其他国家数控机床的优点，努力发展技术，加大创新与培训力度，来缩短与发达国家之间的距离。

4. 数控技术的发展趋势

随着时代的进步，高新技术发展应用范围不断扩大，因而数控技术发展趋势主要体现在以下几方面：

(1) 加工技术发展呈现高速化与高精度化。数控技术发展过程中，高速与高精度是重要发展方向，在一定程度上，高速化使得机械加工生产效率得到提升，而高精度则能够提升产品制造质量，减小生产周期，为企业节省生产成本，增强企业综合市场竞争能力。

(2) 柔性化发展。其主要指数控系统自身具有一定的柔性特点。目前，数控系统朝向模块化设计方向发展，系统升级更加便捷，且功能覆盖范围日益扩大，不同用户需求得到满足；同时，群控系统柔性化特点突出，可依照实际生产情境，同一群控系统实现自动调整，确保系统应用效能得到了充分发挥。

(3) 开放化发展。传统数控系统兼容性不好，不同数控技术差异明显，各种系统相互独立。随着现代科技水平的提高，数控技术标准呈现统一化趋势，开放化数控系统平台对传统数控系统不足进行弥补，数控系统朝向标准化方向发展，引导用户自由选用不同厂家生产的数控产品。

(4) 多轴化发展。随着时代的进步，机械加工自动化水平日益提升，数控系统呈现一机多能发展趋势。采用多轴联动技术，进行自动换刀、旋转工作台与主轴等工序的发展目标得以实现，数控自动化发展水平与生产加工效率得到明显提升，产品加工光洁度更高，有效提高了产品加工质量。

(5) 智能化发展。信息技术发展水平的提升，促使数控技术朝着自动、智能、模糊与神经网络控制等方向发展，网络数控技术推动机械加工实现智能化大规模生产，将成为数控技术发展的新方向。

1.1.3 数控机床的结构及工作过程

1. 数控机床的组成

如图 1-1 所示，数控机床主要由输入输出装置、计算机数控（CNC）系统、伺服系统和机床本体等四部分组成。

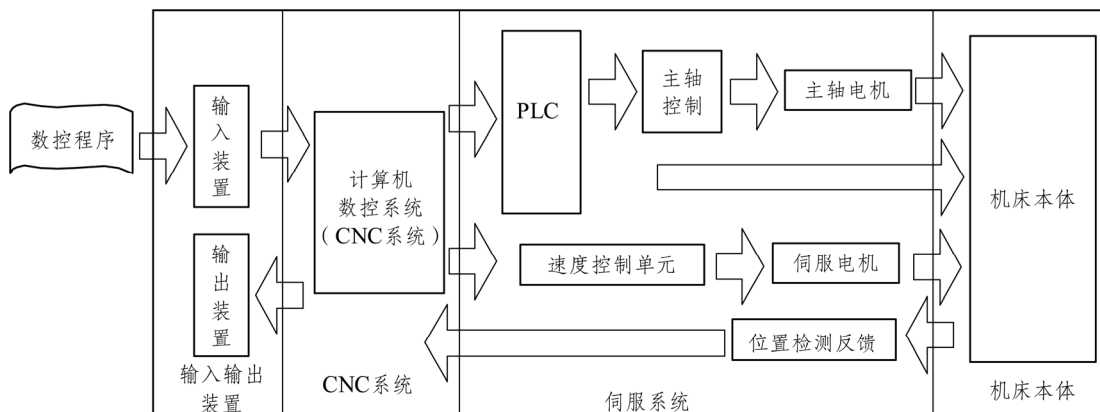


图 1-1 数控机床的基本结构框图

1) 输入输出装置

输入输出设备主要用于实现编制程序、输入程序、输入数据以及显示、存储和打印等功能。常用的输入输出设备有键盘、软盘、显示器等，高级的数控机床还配有一套自动编程机或 CAD/CAM 系统。

2) 计算机数控系统

计算机数控系统是数控机床的“大脑”和“核心”。它的功能是根据输入的程序和数据，经数控系统中的系统软件或逻辑电路进行译码、运算和逻辑处理后，发出相应的各种信号和指令给伺服系统。数控系统通常由一台通用或专用计算机、输入输出接口以及辅助控制装置等部分组成。

辅助控制装置主要完成与逻辑运算有关的动作，包括完成程序中的 M、S、T 等辅助功能所规定的动作（如主轴电机的启停、冷却泵的开关等），对机床的状态进行监视（如检测是否超行程、电动机是否过热等）以及对操作面板的开关、按键和按钮的状态进行扫描。辅助控制装置的这些工作通常与机床的强电部分有关，控制对象是继电器、交流接触器、电磁阀等执行元件，控制的往往是开关量信号。

由于可编程程序控制器（PLC）具有响应快、性能可靠、易于编程和修改等优点，并可直接驱动机床电器，目前已普遍用作辅助控制装置。CNC 和 PLC 协调配合，共同完成对数控机床的控制。用于数控机床的 PLC 一般分为两类：一类是 CNC 的生产厂家为实现数控机床的顺序控制，而将 CNC 和 PLC 综合起来设计，称为内装型（或集成型）PLC，它是 CNC 装置的一部分；另一类是以独立专业化的 PLC 生产厂家的产品来实现顺序控制功能，称为独立型（或外装型）PLC。

3) 伺服系统

伺服系统是机床工作的动力装置，包括伺服单元和驱动装置两大部分。伺服系统接收来自数控系统的指令信息，并按照指令信息的要求带动机床的移动部件运动或使执行部分运动，以加工出符合要求的零件。指令信息是以脉冲信息体现的，每一脉冲使机床移动部件产生的位移量叫作脉冲当量。

伺服系统有开环、半闭环和闭环之分。在半闭环和闭环伺服系统中，还需配有位置检测装置，直接或间接测量执行部件的实际位移量，并将其转变成电信号反馈给 CNC 装置，供

CNC 装置与指令值比较产生误差信号，以控制机床向消除该误差的方向移动。

4) 机床本体

机床本体是数控机床完成加工运动的机械部件，它是在原普通机床的基础上改进而得到的，具有以下特点：

- (1) 采用了高性能的主轴及伺服传动系统，机械传动结构简化，传动链较短。
- (2) 机械结构具有较高的刚度、阻尼精度及耐磨性，热变形小。
- (3) 更多地采用高效传动部件，如滚珠丝杠、直线滚动导轨等。

此外还有一些辅助装置，如冷却、润滑、转位和夹紧等。对于加工中心类数控机床，还有存放刀具的刀库、交换刀具的机械手等部件。

由于现代数控机床的数控系统都采用模块化结构，伺服系统中的伺服单元和驱动装置为数控系统中的一个子系统，输入、输出装置也为数控系统中的一个模块，所以，现在也可以认为数控机床主要由数控系统和机床本体组成。

2. 数控机床的工作过程

普通金属切削机床加工零件的过程，是操作者根据图纸要求，手动控制机床操作系统，不断改变刀具与工件相对运动参数（位置、速度等），使刀具从工件上切除多余材料，最终获得符合质量要求的合格的零件。

在数控机床上加工零件的过程如图 1-2 所示。

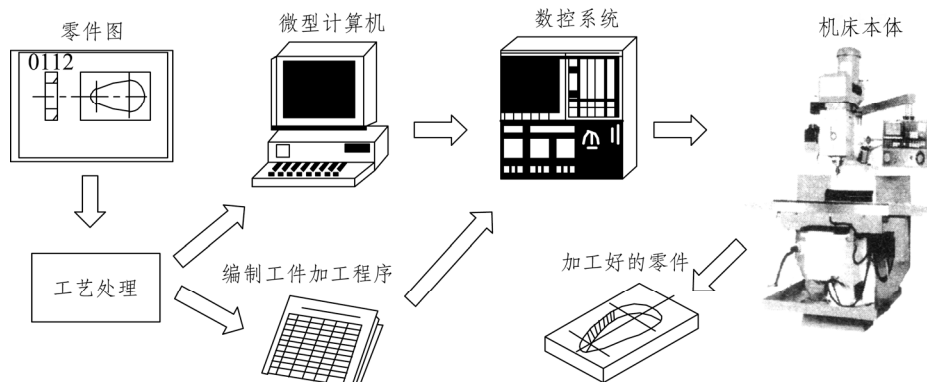


图 1-2 数控机床的工作过程

1) 准备阶段

根据加工零件的图纸，确定有关加工数据（刀具轨迹坐标点、加工的切削用量、刀具尺寸信息等），根据工艺方案、夹具选用、刀具类型选择等确定其他有关的辅助信息。

2) 编程阶段

根据加工工艺信息，用机床数控系统能识别的语言编写数控加工程序，并填写程序单。程序就是对加工工艺过程的描述。

3) 准备信息载体

根据已编好的程序单，将程序存放在信息载体（如磁盘等）上，信息载体上存储着零件加工所需要的全部信息。目前，随着计算机网络技术的发展，可直接由计算机通过网络与机床数控系统通信。

4) 加工阶段

当执行程序时，机床 NC 系统将进行程序译码、寄存和运算，向机床伺服机构发出运动指令，以驱动机床的各运动部件，自动完成对工件的加工。

1.2 数控机床的分类及特点

1.2.1 数控机床的分类

1. 按工艺用途分类

(1) 金属切削类数控机床。这类数控机床包括数控车床、数控铣床、数控镗床、数控磨床、数控钻床、数控切断机床以及加工中心等。据调查，在金属切削机床中，除插床外，国内外都开发了数控机床，而且品种越来越多。

(2) 金属成型类数控机床。这类数控机床包括数控板料折弯机、数控直角剪板机、数控冲床、数控弯管机、数控压力机等。这类机床起步较晚，但目前发展很快。

(3) 特种加工类数控机床。这类数控机床包括数控线（电极）切割机床、数控电火花切割机床、数控电火花成型机床、带有自动换电极的电加工中心、数控激光切割机床、数控激光板材成型机床、数控等离子切割机床、数控火焰切割机等。

(4) 其他类型的数控机床。其他类型的数控机床包括数控三坐标测量机等。

2. 按控制的运动轨迹分类

1) 点位控制数控机床

这类数控机床只控制运动部件进行从一点移动到另一点的准确定位，即只保证行程终点的坐标值。而其对点到点之间的移动速度和运动轨迹没有严格要求，可以沿多个坐标同时移动，也可以沿各个坐标先后移动。在移动过程中，刀具也不进行切削加工，如图 1-3 所示。这类数控机床的代表有数控钻床、数控冲床、数控坐标镗床和数控测量机等。

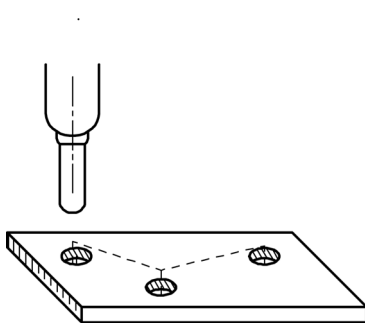


图 1-3 点位控制数控钻床加工示意图

2) 直线控制数控机床

这类数控机床不仅要控制点到点的准确定位，而且要保证两点之间的移动轨迹是一条直线，且在运动过程中，刀具按规定的进给速度进行切削，如图 1-4 所示。这类机床的代表有简易数控车床、数控镗铣床和数控磨床等。

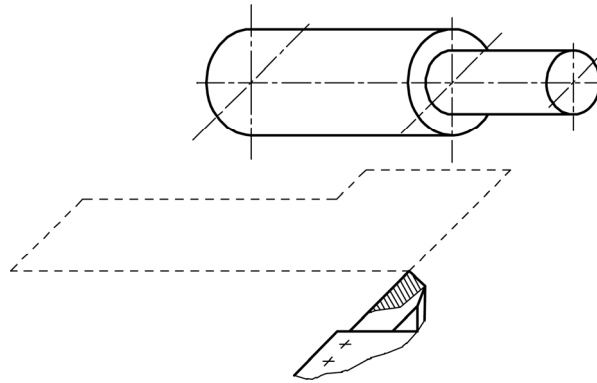


图 1-4 车削直线控制加工示意图

3) 轮廓控制数控机床

这类机床又叫作连续控制或多坐标联动数控机床，其特点是能够对两个或两个以上的运动坐标轴的位移及速度进行连续相关的控制，使刀具和工件按规定的平面或空间轮廓轨迹进行相对运动，从而加工出合格的产品。这类机床的数控装置一般要求有直线和圆弧插补功能，并具有较高速度的数字运算和信息处理功能，以便加工出形状复杂的零件，如图 1-5 所示。目前，大多数数控机床，如数控车床、铣床、磨床、加工中心机床以及其他数控设备（如数控绘图机、测量机等）均具有轮廓控制功能。

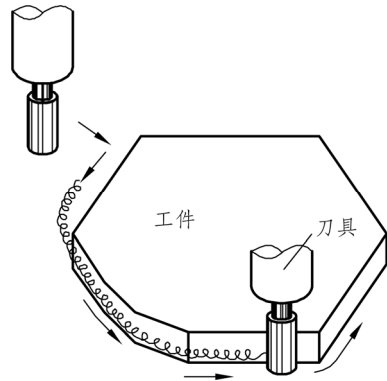


图 1-5 轮廓控制数控铣床加工示意图

3. 按驱动伺服系统类型分类

1) 开环控制系统

开环控制系统没有位置检测元件，其驱动元件通常是功率步进电机或混合式步进电机，如图 1-6 所示。数控系统每发出一个指令脉冲，经驱动电路放大后，驱动电机旋转一个角度，再经传动机构带动工作台移动。这类机床控制的信息流是单向的，脉冲信号发出后，实际位移值不反馈回来，所以被称为开环控制，其精度主要取决于驱动元件和步进电机的性能。

开环控制的优点是结构简单，调试和维修方便，成本较低；缺点是精度较低，进给速度也受步进电机工作频率的限制。开环控制系统一般适用于中、小型经济型数控机床，以及普通机床的数控化改造。

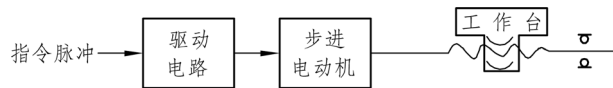


图 1-6 开环控制系统框图

2) 闭环控制系统

这类系统带有直线位置检测装置，可直接对工作台的实际位移量进行检测，如图 1-7 所示。加工过程中，闭环控制系统将测量到的实际值反馈到数控装置中（即速度反馈信号送到

速度控制电路,工作台实际位移量反馈到位置比较电路),与数控装置发出的指令值进行比较,用比较后的差值去控制工作台的运动,直到差值为零为止,即实现移动部件的最终精确定位。从理论上讲,闭环控制系统的控制精度主要取决于检测装置的精度,它可以消除包括工作台传动链在内的传动误差给工件加工带来的影响,因而定位精度高、调节速度快。但由于机床工作台惯量大,对系统的稳定性会带来不利影响,使调试、维修困难,且控制系统复杂成本高,故一般对要求很高的数控机床才采用这种控制方式,如数控精密镗铣床、超精车床等。在闭环进给系统中,早期多用电液伺服阀—液压电机与小惯量电机,20世纪70年中期以后多用宽调速直流伺服电机。以后交流伺服电机的研究取得显著进展,交流伺服电机得到广泛应用,占据了绝对的优势。

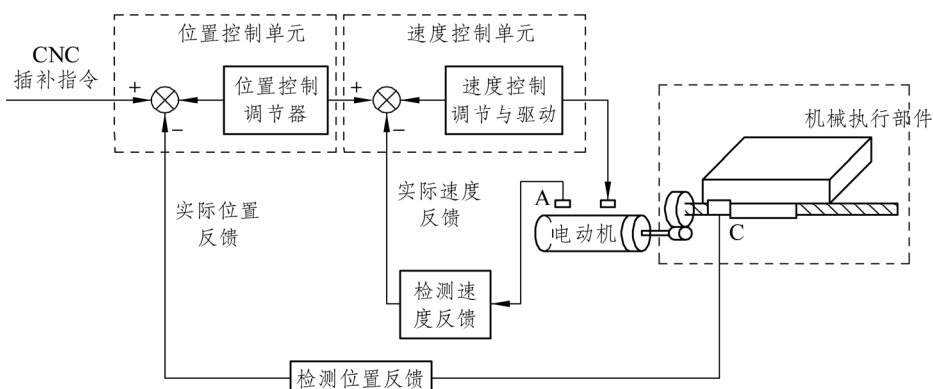


图 1-7 闭环控制系统框图

3) 半闭环控制系统

这类系统与闭环控制系统的区别在于检测反馈信号不是来自安装在工作台上的直线位移测量元件,而是来自安装在电机轴或丝杆轴上的角位移测量元件,如图 1-8 所示。通过测量电机转角或丝杆转角推算出工作台的位移量,并将此值与指令值进行比较,用差值来进行控制。从图 1-8 中可以看出,由于工作台未包括在控制回路中,因而称半闭环控制。这种控制方式由于排除了惯量很大的机床工作台部分,使整个系统的稳定性得以保证。目前已普遍将角位移检测元件与伺服电机做成一个部件,使系统结构简单、调试和维护也方便。半闭环控制数控机床的性能介于开环和闭环控制数控机床之间,精度虽比闭环低,但调试和维护维修却比闭环方便得多,因而得到了广泛的应用。

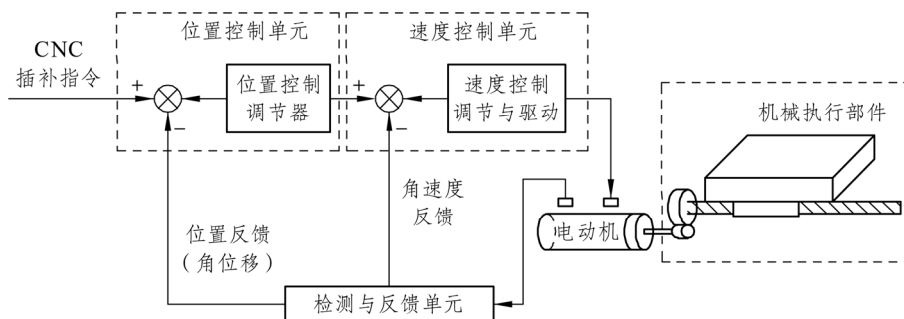


图 1-8 半闭环控制系统框图

4. 按功能水平分类

按功能水平分类，可以把数控机床分为高、中、低档三类。该种分法没有一个确切的定义，但可以给人们一个清晰的概念。

(1) 低档型数控机床。低档型数控机床又称为经济型数控机床或简易型数控机床。经济型数控机床的一般含义指的是用单板机或单片机进行控制，机械部分是在普通机床的基础上改进设计的机床。它结构简单，成本较低，但自动化程度和功能都比较差，仅能满足一般精度要求的加工，能加工形状较简单的零件。不同时期、不同国家对经济型数控的定义是不一样的。经济型数控是根据实际机床的使用要求，合理地简化系统功能、降低成本的产物。

(2) 中档型数控机床。区别于经济型数控机床，功能较齐全、价格适中的数控机床被称为中档型数控机床，通常也被称为普及型数控机床、全功能型数控机床或标准型数控机床。

(3) 高档型数控机床。高档型数控机床指加工复杂形状的多轴控制或工序集中、自动化程度高、高度柔性化的数控机床。

5. 按可控轴数与联动轴数分类

控制轴用来实现与工件成形有关的运动，如某数控铣床的工作台作 X 、 Y 向的直线运动和主轴箱沿 Z 向的运动等。机床上的运动越多，控制轴数就越多，功能就越强，机床的复杂程度和技术含量也就越高。在许多情况下，需要对机床的多个运动同时、协调地进行控制，才能达到加工要求，即同时控制多个轴，这就是所谓的联动轴。联动轴数越多，机床控制和编程难度就越大。控制轴数和联动轴数是表达机床加工能力的重要参数。

按照控制轴数，数控机床可分为：两轴数控机床、三轴数控机床以及多轴数控机床。控制轴数有时也称为坐标数，因此也称为两坐标数控机床、三坐标数控机床以及多坐标数控机床。按照联动轴数，数控机床可分为：2 轴联动、2.5 轴联动、3 轴联动以及多轴联动等。2.5 轴联动是指三个主要控制轴 (X 、 Y 、 Z 轴) 中，任意两个轴联动，另一个是点位或直线控制。一般数控机床的联动轴数少于控制轴数。

1.2.2 数控机床的特点和应用范围

1. 数控机床的特点

从宏观上看，同工艺类型的数控机床加工与普通机床加工并没有本质的区别，但数控机床本身具有高精度、高速度、高性能、自动化、柔性化、智能化等一系列特征，因此必然在加工使用中表现出一些新的特点。

1) 具有复杂形状加工的能力

复杂形状零件在飞机、汽车、造船、模具、动力设备和国防军工等制造部门具有重要地位，其加工质量直接影响整机产品的性能。数控加工运动的任意可控性使其能完成普通加工方法难以完成或者无法进行的复杂型面加工。

2) 高质量

数控加工是用数字程序控制实现自动加工，排除了人为误差因素，且加工误差还可以由数控系统通过软件技术进行补偿校正。因此，采用数控加工可以提高零件加工精度和产品质量。

3) 高效率

数控机床可有效地减少零件的加工时间和辅助时间，数控机床的主轴转速和进给量的范围大，允许机床进行大切削量的强力切削。数控机床目前正进入高速加工时代，数控机床移动部件的快速移动和定位及高速切削加工，减少了半成品的工序间周转时间，提高了生产率。与采用普通机床加工相比，采用数控加工一般可提高生产率 2~3 倍，在加工复杂零件时生产率可提高十几倍甚至几十倍。特别是五面体加工中心和柔性制造单元等设备，零件一次装夹后能完成几乎所有表面的加工，不仅可消除多次装夹引起的定位误差，还可大大减少加工辅助操作，使加工效率进一步提高。

4) 高柔性

只需改变零件程序即可适应不同品种的零件加工，且几乎不需要制造专用工装夹具，因而加工柔性好，有利于缩短产品的研制与生产周期，适应多品种、中小批量的现代生产需要。

5) 改善劳动条件

数控机床加工前经调整后，输入程序并启动，机床就能自动连续地进行加工，直至加工结束。操作者主要负责程序的输入、编辑，装卸零件，刀具准备，加工状态的观测，零件的检验，等工作，不需要进行繁重的重复手工操作，劳动强度和紧张程度大为改善，劳动条件也相应得到改善，机床操作者的劳动趋于智力型工作。另外，机床一般是封闭式加工，清洁又安全。

6) 有利于生产管理现代化

数控机床的加工，可预先精确估计加工时间，所使用的刀具、夹具可进行规范化、现代化管理。数控机床使用数字信号与标准代码为控制信息，易于实现加工信息的标准化。数控加工技术的应用，使机械加工的大量前期准备工作与机械加工过程连为一体，使零件的计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助工艺规划 (Computer Aided Process Design, CAPD) 和计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing, CAM) 的一体化成为现实，有利于实现现代化的生产管理。

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，但数控机床是一种高度机电一体化产品，技术含量高，成本高，使用维修都有一定难度，若从最经济的方面出发，数控机床适用于加工：

- (1) 多品种小批量零件。
- (2) 形状复杂 (如用数学方法定义的复杂曲线、曲面轮廓)、加工精度要求高的零件。
- (3) 需频繁发型的零件。
- (4) 价值高的零件。
- (5) 需最小生产周期的急需零件。

1.2.3 数控机床的主要性能指标

1. 运动性能指标

数控机床的运动性能指标主要包括：

(1) 主轴转速。数控机床的主轴一般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, 保证主轴具有较宽的调速范围和足够高的回转精度、刚度及抗震性。目前, 数控机床的主轴转速已普遍达到 5 000 ~ 10 000 r/min, 甚至更高, 这样对各种小孔加工以及提高零件加工质量和表面质量都极为有利。

(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、机床动特性及工艺系统刚度等因素的限制。目前高速数控机床的进给速度一般可达 15 ~ 30 m/min。

(3) 坐标行程。数控机床坐标轴的行程大小, 构成数控机床的空间加工范围, 即加工零件的大小。坐标行程是直接体现机床加工能力的指标参数。

(4) 摆角范围。具有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, 因此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, 目前常见的中小型数控加工中心刀库容量多为 16 ~ 60 把刀具, 大型数控加工中心的刀库容量达 100 把刀具。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的刀具进行交换所需要的时间。有些先进的数控机床的换刀时间仅为 4 ~ 5 s。

2. 精度指标

(1) 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, 即实际位置与指令位置的一致程度, 不一致量表现为误差, 因此移动部件实际位置与指令位置之间的误差称为定位误差。被控制的机床坐标误差即定位误差, 包括驱动此坐标的控制系统(伺服系统、检测系统、进给系统等)的误差在内, 也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。

(2) 重复定位精度是指在同一条件下, 用相同的方法, 重复进行同一动作时, 控制对象位置的一致程度。即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, 也称为精密度。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, 重复定位精度是呈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。

(3) 分度的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, 也影响孔隙加工的同轴度等。

(4) 分辨率与脉冲当量分辨率是指两个相邻的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。数控装置发出的每个脉冲信号, 机床移动部件的位移量叫作脉冲当量。坐标计算单位是一个脉冲当量, 它标志着数控机床的精度分辨率。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表面质量。目前普通精度级的数控机床的脉冲当量一般采用 0.001 mm/脉冲, 简易数控机床的脉冲当量一般采用 0.01 mm/脉冲, 精密或超精密数控机床的脉冲当量采用 0.0001 mm/脉冲。脉冲当量越小, 数控机床的加工精度和加工表面质量越高。

1.3 数控机床机械部件

机床本体是数控系统的被控制对象，是实现零件加工运动的执行部件。主要由主运动部件（主轴、主运动传动机构）、进给运动部件（工作台、滑板及相应的传动机构）、支承件（立柱、床身等）以及自动工作台交换（APC）系统、自动刀具交换（ATC）系统和辅助装置（如冷却、润滑、排屑、转位和夹紧装置等）等组成。

数控机床本体结构相对普通机床，主要有以下几个特点：

- (1) 采用高性能的主轴及进给伺服驱动装置，机械传动装置得到了简化，传动链较短。
- (2) 数控机床的机械结构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。
- (3) 较多地采用滚珠丝杠螺母副、直线滚动导轨等高效传动部件。

1.3.1 数控车床本体结构组成

从机械结构上看，数控车床没有脱离卧式车床的结构形式，即由床身、主轴箱、刀架进给系统、液压系统、冷却系统、润滑系统等组成。与卧式车床所不同的是，数控车床的进给系统通过滚珠丝杠螺母副驱动溜板以及安装在其上的刀具，实现进给运动，从而大大简化了进给系统的结构。

数控车床一般具有两轴联动功能， Z 轴是与主轴平行方向的运动轴， X 轴是在水平面内与主轴垂直的运动轴。在最新的车铣加工中心上，增加了一个 C 轴，可用于工件的分度功能，可在刀架中安放铣刀，对工件进行铣削加工。数控车床的本体组成如图 1-9 所示。

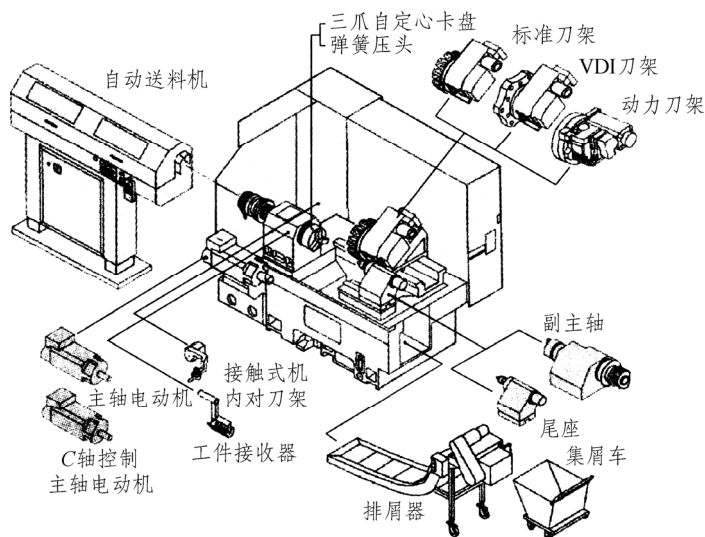


图 1-9 数控车床的本体组成

数控车床本体结构的布局特点主要是：采用自动回转刀架，刀架工位数量有限；数控车削中心一般具有 C 轴控制；床身结构有水平床身水平滑板、倾斜床身水平滑板、水平床身斜滑板和立式床身等。

1.3.2 数控铣床本体结构组成

数控铣床具有铣床、镗床、钻床的功能，使工序高度集中，在更换工件时只需调用存储于数控装置中的加工程序、装夹工具和调整刀具数据即可，因而大大缩短了生产周期，提高了生产效率。数控铣床形式多样，按主轴的位置分类有立式、卧式、立卧两用式三类，其中立式数控铣床占据大多数，应用范围也最广。

数控铣床的机械结构，除铣床基础部件外，由以下几部分组成：

- (1) 主传动系统：由有级变速箱和铣头两个部件组成。
- (2) 进给系统：包括工作台的纵向进给、横向进给系统以及升降台的升降系统。
- (3) 实现工件回转、定位的装置和附件。
- (4) 实现某些部件动作和辅助功能的系统和装置，如液压、气动、润滑、冷却等系统和排屑、防护等装置。

数控铣床结构如图 1-10 所示。

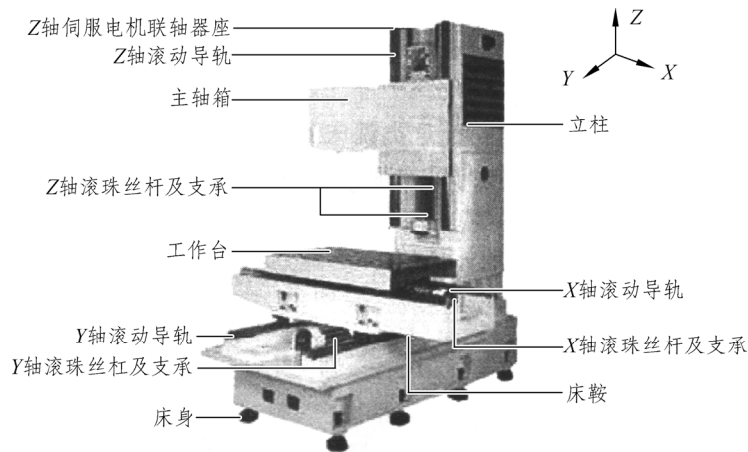


图 1-10 数控铣床的结构

铣床基础件称为铣床大件，通常是指床身、底座、立柱、横梁、滑座、工作台等。它是整台铣床的基础和框架。铣床的其他零部件，或固定在基础件上，或工作时在它的导轨上运动。

1.3.3 加工中心本体结构组成

加工中心是带有刀库和自动换刀装置的一种高度自动化的多功能数控机床。工件在加工中心上经一次装夹后，数字控制系统能控制机床按不同工序，自动选择和更换刀具，自动改变机床主轴转速、进给量和刀具相对工件的运动轨迹及其他辅助机能，依次完成工件几个面上多工序的加工，并且有多种换刀或选刀功能，从而使生产效率大大提高。

加工中心按主轴的位置分类有立式、卧式、立卧两用式三类；按运动坐标数和同时控制的坐标数分，有三轴两联动、三轴三联动、四轴三联动、五轴四联动、六轴五联动等。三轴、四轴是指加工中心具有的运动坐标数，联运是指控制系统可以同时控制运动的坐标数，从而

实现刀具与工件的相对位置和速度控制。

按加工精度分,有普通加工中心和高精度加工中心。普通加工中心,分辨率为 $1\ \mu\text{m}$,最大进给速度为 $15\sim 25\ \text{m/min}$,定位精度为 $10\ \mu\text{m}$ 左右。高精度加工中心,分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$,最大进给速度为 $15\sim 100\ \text{m/min}$,定位精度为 $2\ \mu\text{m}$ 左右。一般精密级加工中心定位精度为 $2\sim 10\ \mu\text{m}$,以 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 居多。

加工中心主要由以下几大部分组成,如图 1-11 所示。

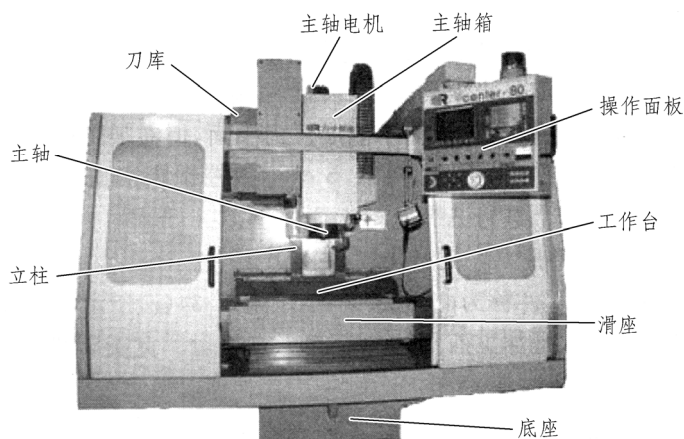


图 1-11 加工中心的结构组成

1) 基础部件

基础部件是加工中心的基础结构,由床身、立柱和工作台等组成,它们主要承受加工中心的静载荷以及在加工时产生的切削负载,因此必须要有足够的刚度。这些大件可以是铸件,也可以是焊接而成的钢结构件,它们是加工中心中体积和质量最大的部件。

2) 主轴部件

主轴部件由主轴箱、主轴电动机、主轴和主轴轴承等零件组成。主轴的启、停和变速等动作均由数控系统控制,并且通过装在主轴上的刀具参与切削运动,是切削加工的功率输出部件。

3) 数控系统

加工中心的数控部分是由 CNC 装置、可编程控制器、伺服驱动装置以及操作面板等组成。它是执行顺序控制动作和完成加工过程的控制中心。

4) 自动换刀系统

自动换刀系统由刀库、机械手等部件组成。当需要换刀时,数控系统发出指令,由机械手(或通过其他方式)将刀具从刀库内取出装入主轴孔中。

5) 辅助装置

辅助装置包括润滑、冷却、排屑、防护、液压、气动和检测系统等部分。这些装置虽然不直接参与切削运动,但对加工中心的加工效率、加工精度和可靠性起着保障作用,因此也是加工中心中不可缺少的部分。