

CONTENTS 目录

第一章 数控加工概述 1

第一节 数控加工总论 1

第二节 数控机床的组成 12

第三节 数控机床的分类 18

第二章 数控加工工艺基础 23

第一节 数控加工工艺的特点 23

第二节 机械加工精度 26

第三节 机械加工表面质量 30

第四节 数控加工工艺分析 34

第五节 数控加工文件的编写与归档 64

第三章 数控机床检测装置研究 73

第一节 数控机床检测装置概述 73

第二节 编码器 75

第三节 光栅尺 85

第四节 旋转变压器 91

第五节 感应同步器 95

第六节 激活动干涉仪 102

第七节 霍尔检测装置 107

第四章 数控车削技术分析	112
第一节 数控车削加工工艺的制订	112
第二节 数控车床坐标系	129
第三节 数控车床的对刀方法	131
第四节 数控车削编程	132
第五章 数控铣削技术分析	148
第一节 数控铣床简介	148
第二节 数控铣削加工概述	150
第三节 铣削工具系统	152
第四节 数控铣削工艺性分析	174
第五节 数控铣操纵实践	179
第六章 数控电火花加工方法分析	192
第一节 数控电火花加工方法的概述	192
第二节 数控电火花线切割机床操作	196
参考文献	208

第一章 数控加工概述

第一节 数控加工总论

一、数控技术的产生

随着科学技术和社会生产的不断发展，机械产品的结构越来越复杂，产品更新越来越快，因此对加工机械产品的生产设备提出了更高（高性能、高精度和高自动化）的要求。传统的普通机床、专用机床、仿形机床已经不再满足加工需要。为此，一种新型的数字程序控制机床应运而生，它极其有效地解决了上述一系列矛盾，为单件、小批量生产，特别是复杂型面零件的生产提供了自动化加工手段。数字控制技术（简称数控技术）于 20 世纪中期在美国率先开始研究，是为了适应航空工业制造复杂零件的需要而产生的。1948 年，美国帕森斯公司（ParsonsCo.）接受美国空军委托，研制直升机叶片轮廓用样板的加工设备。在制造飞机框架及直升机叶片轮廓用样板时，利用全数字电子计算机对轮廓路径进行数据处理，并考虑了刀具直径对加工路径的影响，提高了加工精度。1949 年，帕森斯公司在麻省理工学院（MIT）伺服机构试验室的协助下开始从事数控机床的研制工作，经过三年时间的研究，于 1952 年试制成功世界第一台数控机床试验性样机。这是一台采用脉冲乘法器原理的直线插补三坐标连续控制铣床，即数控机床的第一代。1955 年，美国空军花费巨额经费订购了大约 100 台数控机床，此后两年，数控机床在美国进入迅速发展阶段，市场上出现了商品化数控机床。1958 年，美国克耐·杜列克公司（Keaney&Trecker）在世界上首先研制成功带自动换刀装置的数控机床，称为“加工中心”（MachiningCenter，MC）。数控技术的发展过程见表 1-1。



表 1-1 数控技术的发展过程

发展阶段		时间	特点
硬件数控 (NC)	第 1 代	1952 年	采用电子管
	第 2 代	1959 年	采用晶体管元件和印制电路板
	第 3 代	1965 年	采用小规模集成电路
软件数控 (CNC)	第 4 代	1970 年	采用小型计算机
	第 5 代	1974 年	采用微处理器和半导体存储器的微型计算机数控装置 (MNC)
	第 6 代	20 世纪 90 年代	采用 PC+CNC 的数控系统

二、数控加工的基本概念

(一) 基本术语

现代的机械加工装备已经广泛采用数控设备,为了讨论方便,下面给出几个重要的概念。

数控(NC)是数字控制(NumericalControl)的简称,是借助数字、字符或其他符号对某一个工作过程(如加工、测量或者装配等)进行可编程控制的自动化方法。目前数控一般是采用通用或专用计算机来实现数字程序控制,因此数控也称为计算机数控(ComputerNumericalControl,CNC)。

数控技术(NumericalControlTechnology)是指采用数字控制的方法对某一个工作过程实现自动控制的技术。在机械加工过程中使用数控机床时,可将其运行过程数字化,这些数字信息包含了机床刀具的运动轨迹、运行速度及其他工艺参数等,而这些数据可以根据要求很方便地实现编辑修改,满足了柔性化的要求。它所控制的通常是位移、角度、速度等机械量或与机械能量流向有关的开关量。数控的产生依赖于数据载体及二进制形式数据运算的出现,数控技术的发展与计算机技术的发展是紧密相连的。

数控系统(NumericalControlSystem)是实现数控技术相关功能的软、硬件模块的有机集成系统。相对于模拟控制而言,数字控制系统中的控制信息是数字量,模拟控制系统中的控制信息是模拟量,数字控制系统是数控技术的载体。其特点是可以由不同的字长表示不同精度的信息,可以进行算术运算、逻辑运算等,也可以进行复杂的信息处理,还可以通过软件改变信息处理的方式和过程,因而具有较大的柔性。数字控制系统已经广泛用于机床、自动生产线、机器人、雷达跟踪系统等自动化设备。

数字设备是指某一设备（机床、工业机器人等）实现其自动工作过程的控制信息采用的是数字化信息。数控设备是目前设备制造的方向，特别是数控机床，其是集光、机、电、液等的高技术加工设备，价格较高，维修、维护困难，加工中的编程和机床调整复杂，因此需要具有数控技术基础知识的技能型人才来操作和维护。

数控机床（NumericalControlMachineTools）是采用数字控制技术对机床的加工过程进行自动控制的一类机床，是数控设备的一种。数控机床是机电一体化的典型产品，是集机床、计算机、电机及拖动、自动控制、检测等技术为一体的自动化设备，使输入数据的存储、处理、运算、逻辑判断等控制机能的实现均可通过计算机软件来完成。从外观及布局看，数控机床除了具有与其对应的普通机床的床身、导轨、主轴、工作台及刀架等相同或相似的机床主体外，还具有普通机床所不可能配置的两大部分，即对机床进行指挥、控制的计算机数控装置和驱动机床运动的机构，包括机床主轴伺服驱动及进给机构实施位移的进给伺服系统。

（二）数控加工与传统加工

在普通机床上进行零件加工时，操作者根据工序卡的要求操作机床，并同步地不断调整刀具与工件的相对运动轨迹和加工参数，完成切削加工，获得合格的产品，整个加工过程完全取决于操作者的习惯和技术水平。

在数控机床上加工零件时，首先要将刀具和工件的相对运动轨迹，以及加工过程中的主轴速度和进给速度的变换、切削液的开关、工件的夹紧和松开、刀具的交换等几何信息和工艺信息数字化，通过计算机按规定的代码和格式编写成加工程序，然后将程序送入数控系统，数控系统按照程序的要求进行相应的运算、处理，输出控制命令，使各坐标轴、主轴以及辅助动作协调运动，实现刀具与工件的相对运动及零件的自动加工，其加工过程绝大部分是由数控系统的自动控制实现的。

（三）数控加工过程信息的处理和流程

数控加工过程信息的处理和流程如图 1-1 所示。

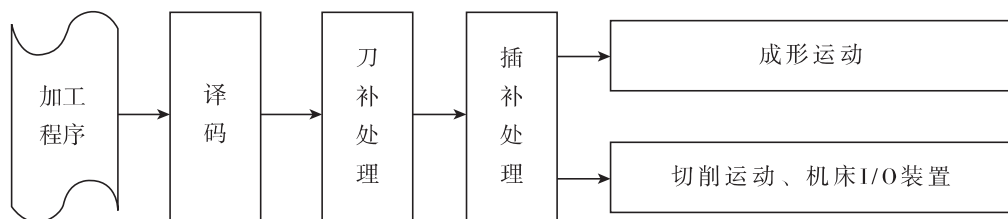


图 1-1 数控加工过程信息的处理和流程

数控加工时，首先要对数控加工程序进行解释（译码），以程序段为单位转换成刀补处理程序所要求的数据结构（格式），该数据结构用来描述一个程序段解释后的数据信息，主要包括：X、Y、Z 坐标值；进给速度；主轴转速；G 代码；M 代码；刀具信息；子程序处理和循环调用处理等数据或标志的存放顺序和格式。另外，数控加工程序一般是按照零件轮廓编写的，而数控机床在加工过程中控制的是刀具中心或者假想刀尖点的运动轨迹，因此加工前必须将零件轮廓转换成刀具中心或刀尖点的运动轨迹，即要先进行刀具补偿的处理，然后以系统规定的插补周期进行定时运动，将零件的各种线型（直线或圆弧等）组成的零件轮廓，按照程序给定的进给速度，实时计算出各个坐标轴在插补周期内的位移指令，并送给伺服系统，实现成形运动。同时逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）以 CNC 内部或机床各行程开关、传感器、继电器等开关量信号为条件，按照预先设定的逻辑顺序对诸如主轴的启停、换向，刀具的交换，工件的夹紧、松开，液压、冷却、润滑系统的运行等进行逻辑控制。

三、数控加工的原理

数控加工的原理可通过数控加工的执行过程予以阐述。数控机床是实现数控加工的载体，零件的数控加工利用它来完成，其过程为：数控机床通过输入装置（一般为人机交互界面）读取预先编制好的数控加工程序；数控系统调用译码模块，以程序段为基本单位，由系统程序对其逐条处理，按照给定的语法规则将其转换为系统可读可理解的数据格式；在此基础上，通过插补运算，计算出每个周期应发送的控制指令，并分配至各个运动轴的驱动电路，经过转换、放大去驱动电动机，带动各个轴运动，随后利用反馈装置检测执行状态，据此完成闭环控制，使各坐标轴、主轴以及辅助动作相互协调，实现刀具与工件的相对运动，进而自动加工出零件的全部轮廓。上述过程如图 1-2 所示。

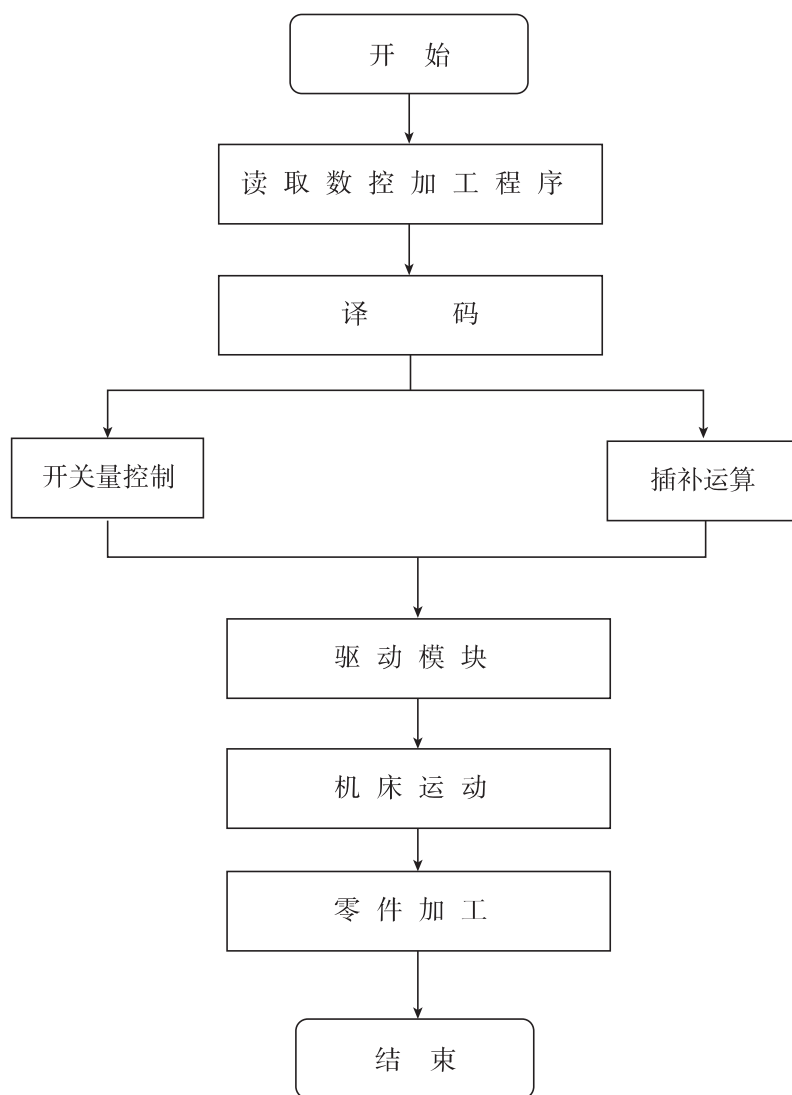


图 1-2 数控加工原理示意图

下面对该过程中涉及的关键功能以及装置进行详细说明。

（一）数控加工程序及其编制

数控加工程序指明了数控机床在加工时的动作。现阶段，可依据 ISO6983 国际标准（即 G/M 代码）给定的格式规范完成数控加工程序的编写。对于简单零件的加工，手工编程即可实现。复杂零件（如叶片）一般需要借助 CAM 软件完成，如 UG、Power-MILL 等。除此之外，某些数控机床也会自带与之配套的编程软件，利用此软件可以显著提高编程效率，但往往成本相对较高。

（二）输入装置

输入装置的主要功能是完成数控加工程序的录入或读取。对于外形轮廓简单的零件，

其数控加工程序较为简短，可在操作面板或人机交互界面上采用直接录入的方式将数控加工程序输入。而对于复杂零件，其加工程序行数较多，直接录入耗时耗力且容易出错，此时利用串口和网口通信完成加工程序传输的方式较为理想。现阶段，传统的纸带阅读机、磁带和软盘输入加工程序的办法已不多见。

（三）伺服系统

伺服系统是数控机床的关键部件，用于实现机床加工过程中的进给运动和主运动。一般情况下，伺服系统主要用于控制机床的进给轴以完成进给运动精确的定位。对于主轴，有的数控机床不需要实现精确定位功能，可以采用三相异步交流电动机驱动；有的数控机床的主轴需要实现精确定位，可以采用伺服电动机驱动主轴回转。伺服系统包括伺服驱动器和伺服电动机两部分，伺服驱动器用于接收来自数控系统的指令，并经过功率放大整形处理之后，控制伺服电动机的运转，伺服电动机则拖动工作台的运动，完成指令给定的目标。

显然，伺服系统位于数控系统的末端，是指令的执行机构，其性能的优劣与否将直接影响数控机床的性能以及数控加工的质量。因此，要求数控机床的伺服系统具有快速响应的能力，能够忠实地执行来自数控系统的指令。

（四）机床本体

机床本体是数控机床的机械部分，它包括床身、底座、立柱、横梁、工作台、进给机构、刀库和刀架等部件。与普通机床相比，数控机床的床身具有如下特点：

（1）床身结构刚度高、抗震性强且热变形小。一般通过提高床身结构的静刚度、增大阻尼、调整结构件质量和固有频率的方法来提升机床床身的刚度和抗震性，从而使得床身能够适应数控加工连续切削的生产模式。通过改善床身结构布局、减少发热、控制温升和热补偿等措施，减少床身热变形对加工质量和加工精度的影响。

（2）伺服驱动系统作为机床本体的驱动装置。利用伺服系统可有效缩短机床传动链，简化机床机械传动系统的结构，降低传动链导致的误差，提高数控加工的精度。

（3）采用高传动效率、高精度、无间隙的传动装置和部件，如滚珠丝杠螺母副、直线导轨、静压丝杠和静压导轨等。

（五）插补运算

在数控加工程序段中只给出了当前程序段所给定线段的起点和终点等信息，插补运

算是在已知起点和终点的线段间进行“数据点密化”工作。插补运算是数控系统或数控机床的核心功能，它完成了数控加工代码向机床控制指令之间的转换。数控加工程序给出了零件加工时机床应运行的轨迹，但无法指明完成该轨迹具体的控制指令，插补的目的便是根据译码后的数控加工程序，周期性地计算出当前周期的控制指令，逐步完成刀具与零件按照给定轨迹的相对运动，直至零件加工完成。

（六）位置控制

通过插补运算，可以输出一个插补周期内的控制指令。为了令机床各个运动轴准确行进到规定位置，还需要利用位置检测装置（编码器、光栅尺等）将执行机构的位置反馈至数控系统，利用指定位置与实际位置的差值控制伺服电动机运转。

（七）辅助装置

辅助装置在数控加工过程中起到辅助作用，但往往也是必不可少的装置，如液压装置和气动装置。该装置一般用来实现零件的夹紧、刀具的自动更换、冷却、润滑、主轴启动和停止等开关指令。

四、数控加工的特点

与传统机床加工相比，数控加工具有以下特点。

（一）零件的加工能力强，适应性好

数控加工可通过多轴联动完成复杂型面的加工，且不需要复杂的工装夹具。另外，随着 CAD/CAPP/CAM/CNC 集成技术的发展，零件的自动化编程逐渐简易，数控加工程序的生成越来越方便，数控加工的适应性也随之提高。

（二）加工精度高，加工质量稳定

数控加工是一种自动化的加工方式，且利用数字指令实现加工时，一般定位精度可达 $\pm 0.005\text{mm}$ ，重复定位精度可达 $\pm 0.002\text{mm}$ 。另外，利用数控系统的补偿功能，可对机床传动链误差进行补偿，进一步提高加工精度。

数控加工过程避免了人为因素的干扰，不会因为操作者的个人水平、负面情绪等原因造成加工质量的下降，零件合格率高且稳定。

（三）生产效率高

数控加工可较为容易地实现工艺集成，在同一个工位上完成多个工序，配合自动换刀装置的使用，可有效缩短加工时间，提高生产加工效率。相比于传统机床，数控机床具有更高的主轴转速和进给量，在机床刚性和刀具寿命允许的前提下，可以采用较大的切削参数完成材料的去除，从而有效提高加工效率。

（四）降低劳动强度

因为数控加工是自动进行的，操作者除去完成必要的步骤之外，无须重复繁杂的手工操作，使得劳动强度降低，改善了劳动条件。

（五）加工过程柔性好

数控加工非常适合于多品种、小批量生产和产品开发试制，对不同的复杂工件只需要重新编制加工程序即可。尤其对于需要多次改型的零件而言，其数控加工程序往往不会一次性地出现较大改动，或者仅仅依靠调整刀具参数即可完成程序的修正，大幅缩短了生产准备周期，增强了加工过程的柔性，提高了加工效率。

（六）能完成传统机床难以完成或根本不能加工的复杂零件

复杂零件一般包含曲线曲面，至少需要两轴或两轴以上联动才能完成加工，采用传统机床利用人工的方式难度非常大，而采用数控加工的方式，可以通过数控系统计算出所需指令，较为轻易地实现其加工。

（七）具有监控功能和一定的故障诊断能力

随着数控系统的发展，其功能不仅局限于普通的运动控制，借助传感器技术和相关的通信协议，可以实时采集加工过程中的数据，进而实现对加工的监控。另外，在人工智能技术的支持下，可对采集到的数据进行分析，挖掘机床运行状态中的隐含信息，对机床故障进行一定程度的判断，即具有故障诊断能力。

（八）易于集成化管理

数控加工过程基于数控系统实现。现阶段，数控系统的开放性正在逐步增强，开放式数控已经成为主流发展趋势，这使得数控加工过程中的信息采集越来越简单方便，从而令基于此的制造车间透明化程度增强，易于企业上层对其管理。

五、数控加工的适应范围

随着数控技术的发展，数控机床的功能、性能不断增加和提高，数控加工的范围不断扩大，但目前还不能完全取代普通机床。根据数控加工的特点和国内外的大量使用实践，一般可按照数控加工适用程度将零件分成以下三类。

（一）最适合数控加工的零件

形状复杂，用数学模型描述的复杂曲线和曲面轮廓零件，且加工精度要求高；具有难测量、难控制进给、难控制尺寸的不开敞内腔的壳体和盒形零件；必须在一次装夹中完成铣、镗、铰、钻和攻螺纹的多工序零件。上述零件在普通机床上无法加工或者虽然能加工但需要的工时多，难以保证质量，更难保证零件的一致性，但在数控机床上较易加工。

（二）较适合数控加工的零件

在普通机床上加工时易受人为因素（如情绪波动、体力强弱和技术水平等）干扰，且价值较高，一旦质量失控造成的经济损失重大的零件；在普通机床上加工必须专门设计复杂工艺装备的零件；需要多次更改设计后才能定型的零件；在普通机床上加工需要长时间调整的零件；在普通机床上加工生产率很低和体力劳动强度较大的零件。这几类零件在分析完可加工性之后，还要在提高生产率和经济效率方面做综合衡量，一般可以把它们作为数控加工的主要选择对象。

（三）暂不适合数控加工的零件

对于批量大，加工余量很不稳定，必须用特定的工艺装备协调加工的零件，采用数控加工后在加工效率和经济效率方面无明显改善的暂不适合数控加工，但随着数控加工技术的发展、数控机床品种的增加、数控加工功能的改善、数控加工效率的提高、数控机床成本的下降，特别是数控自动生产线（FMS）的出现和应用，不适合数控加工的零件会越来越少。

六、现代制造对数控加工技术的要求

进入 21 世纪后，数控加工技术出现了一些新的特征：产品绿色化，提供的产品在全寿命周期资源消耗低，无污染或少污染，以及可回收或可重用；参数极端化，产品向高效、高参数、大型化或微型化、成套化的方向发展；生产过程自动化，并向信息化、柔性

化方向发展；需求个性化，用户对产品的需求多样化、分散化和个性化，未来的市场需求更加趋于动态多变；产业集群化，同类企业或相近企业在同一地区高度聚集，形成集群化的竞争优势；业务服务化，服务在价值链中的比重大幅上升，制造业不仅要为客户提供有形的装备，还要提供越来越好的服务。为此，对数控加工技术提出了更高的要求。

（一）提高运行速度，缩短加工时间

实现高效的高速加工已经成为现代加工技术的重要发展趋势。运行高速化是指：进给率、主轴转速、刀具交换速度、托盘交换速度等实现高速化，并具有高加（减）速率。高速加工不仅是指加工设备，而是机床、刀具、夹具、数控系统和编程技术的高度集成，机床的高速化需要新的数控系统、高速主轴和高速伺服进给驱动，以及机床结构的优化和轻量化。

（二）加工高精化

近半个世纪以来，加工精度几乎每 8 年提高 1 倍，普通加工精度已由 0.03mm 提升至 0.003mm，精密加工精度由 $3\mu\text{m}$ 提升至 $0.03\mu\text{m}$ ，超精密加工则由 $0.3\mu\text{m}$ 提升至 $0.003\mu\text{m}$ ，目前的轮廓控制和定位精度已经达到了纳米级。

为了提高加工精度，数控机床不仅要有很高的几何精度，而且还必须有很高的运动轨迹精度。对数控机床的精度要求已经不仅仅局限于静态的几何精度、运动精度，热变形与振动的监测和补偿也越来越受到重视。数控机床的定位精度普遍能达到 0.007mm 左右，亚微米级机床能达到 0.0005mm，纳米级机床能达到 $0.005\sim 0.01\mu\text{m}$ ，最小分辨率为 1nm 的数控机床也问世并逐渐被使用。除提高数控机床的制造和装配精度外，误差补偿技术的应用也大大减少了数控机床的运动误差。在减少 CNC 数控系统控制误差方面，通常提高控制系统的分辨率，以微小程序段实现连续进给，使 CNC 控制单位精细化。提高位置检测精度和位置伺服系统精度可采用前馈控制和非线性控制等方法。在采用补偿技术方面，除采用齿隙补偿、丝杠螺距误差补偿和刀具误差补偿等方法以外，近年来对设备的热变形误差补偿与空间误差的综合补偿技术的研究和应用也越来越被重视。有研究表明，综合误差补偿技术的应用可将加工误差减少 60%~80%。

（三）加工复合化

加工复合化是指工件在一台设备上一次装夹后，通过自动换刀等多种措施，完成多工序、多表面的加工，从而打破了传统的工序界限和分开加工的工艺规程。复合加工包括

工序复合（车、铣、镗、钻和攻螺纹等）、不同工艺复合（集车、铣、滚齿、磨、淬火等不同工艺的复合加工机床可对大直径、短长度回转体类零件进行复合加工）、切削与非切削工序复合（如铣削与激光淬火装置的复合、冲压与激光切割的复合、金属烧结与镜面切削的复合、加工与清洗融于一台机床的复合等）。复合加工不仅提高了工艺的有效性，而且零件在整个加工过程中只有一次装夹，大大缩短了生产过程链，工序间的加工余量大为减少，既减少了装卸时间、省去了工件搬运、减少了半成品库存，又能保证和提高形位精度。

（四）加工过程智能化

随着人工智能技术的不断发展，数控加工技术智能化程度不断提高，主要表现在以下几方面。

1. 加工过程自适应控制技术

通过监测加工过程中的刀具磨损、破损、切削力、主轴功率等信息的变化并将其反馈，利用数控系统运算，实时调节加工参数和加工指令，使数控机床始终处于最佳状态，以提高加工精度、降低表面粗糙度以及提高设备运行安全性。

2. 加工参数的智能优化和选择

将加工专家和技工的经验、切削加工的一般规律和特殊规律等，按照人工智能中知识的表达方式建立知识智能库存入计算机中，以加工工艺参数数据库为支撑，建立专家系统，并通过它提供的通过优化的切削参数，使加工系统始终处于最优、最经济的工作状态，从而达到提高编程效率和加工工艺水平、缩短生产准备周期的目的。

3. 故障自诊断技术

故障诊断专家系统是诊断装置发展的最新动向，其为数控设备提供了一个包括二次监测、故障诊断、安全保障和经济策略等方面在内的智能诊断和维护决策的信息集成系统。采用智能混合技术，可以在故障诊断中实现以下功能：故障分类、信号提取和特征提取、故障诊断、维护管理。

（五）加工过程网络化

随着信息技术和数字计算机技术的发展，尤其是计算机网络技术的发展，在以网络化、数字化为基本特征的时代，网络化、数字化以及新的制造理念深刻地影响着 21 世纪的制造模式和制造观念。现代加工技术，必须满足网络环境下制造集成系统的要求。具有

网络功能的加工技术，可以满足诸如加工过程远程故障诊断、远程状态监测、远程加工信息共享、远程操作（如危险环境加工）和远程培训等。

第二节 数控机床的组成

数控机床是机电一体化的高技术产品，集合了机械制造、计算机技术、伺服驱动及检测技术、可编程控制技术、气动液压等技术。其组成一般包括：输入输出设备、数控装置（CNC）、可编程控制器（PLC）、伺服驱动及检测反馈、辅助装置、机床主体等。数控机床的构成如图 1-3 所示。

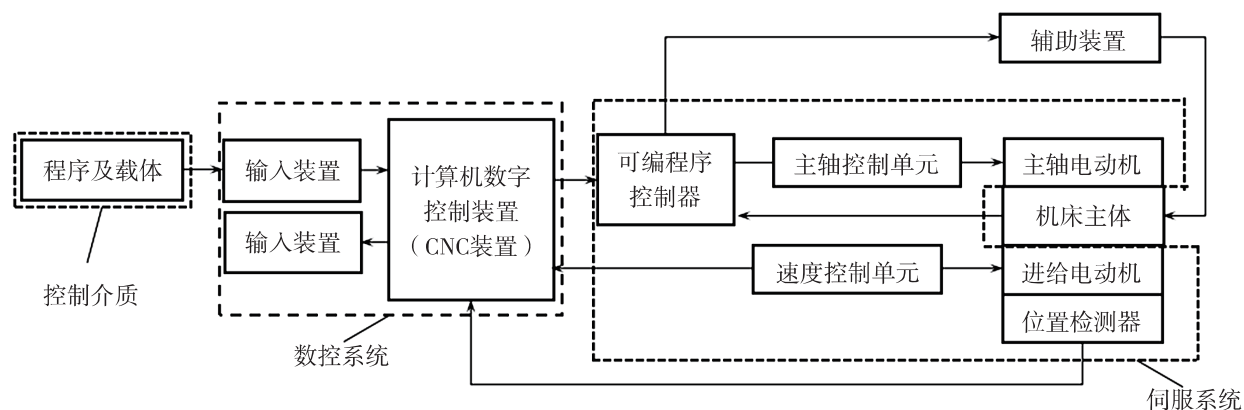


图 1-3 数控机床的构成

一、输入 / 输出设备及接口

数控设备操作人员与数控系统之间的信息交流过程是通过输入 / 输出设备或接口来完成的，输入设备的作用是将程序载体（信息载体）上的数控代码传递并存入数控系统内。根据控制存储介质的不同，输入设备包括光电阅读机、磁带机或软盘驱动器等。目前数控机床加工程序主要通过键盘用手工方式直接输入数控系统或由编程计算机把零件图通过软件自动转换成加工的程序，然后再传送到数控系统中。

通常采用的通信方式有：

- （1）串行通信（RS232 等串行通信接口）；
- （2）自动控制专用接口和规范（DNC、MAP 等）；（3）网络技术（Internet、LAN 等）。

零件加工程序输入过程有两种方式：一种是边读入边加工（数控系统内存较小时）；另一种是一次将零件加工程序全部读入数控装置内部的存储器，加工时再从内部存储器中逐段调出进行加工。

输出设备的作用是通过显示器把加工过程中必要的信息，如坐标值、报警信号等显示。

二、数控装置

计算机数控装置（CNC）是机床数控系统的核心，它主要由计算机系统、位置控制、PLC 接口、通信接口、扩展功能模块以及相应的控制软件等模块组成。CNC 系统的主要任务是将零件加工程序表达的加工信息（几何信息和工艺信息）进行相应的处理（运动轨迹处理、信息输入/输出处理等），然后变换成各进给轴的位移指令、主轴速度指令和辅助动作指令，控制相应的执行部件（伺服单元、驱动装置和 PLC 等），加工出符合要求的零件，所有这些工作都是通过 CNC 装置内的硬件和软件协调配合，合理组织，使数控机床有条不紊地工作而实现的。

计算机数控系统（CNC）硬件结构形式较多，按 CNC 装置中各印制电路板的插接方式可分为大板式结构和功能模板式结构；按 CNC 装置中微处理器的个数可以分为单微处理器和多微处理器结构等，但总的来说，CNC 装置与通用计算机一样，都是由中央处理器（CPU）及存储数据与程序的存储器组成。存储器分为系统控制软件程序存储器（ROM），加工程序存储器（RAM）及工作区存储器（RAM）。ROM 中的系统控制软件程序是由数控系统生产厂家写入，用来完成 CNC 系统的各项功能的，数控机床操作者将各自的加工程序存储在 RAM 中，供数控系统控制机床来加工零件。工作区存储器是系统程序执行过程的活动场所，用于堆栈、参数保存、中间运算结果保存等。中央处理器（CPU）执行系统程序并读取加工程序，经过加工程序段的译码和预处理计算后，再根据加工程序段指令进行实时插补，并通过与各坐标伺服系统的位置、速度反馈信号进行比较，从而控制机床各坐标轴的位移。同时将辅助动作指令通过可编程序控制器（PLC）发往机床，并接收通过可编程序控制器（PLC）返回的机床的各部分信息，以决定下一步操作。

三、伺服系统

伺服系统是数控设备的驱动执行机构，分为主轴伺服系统和进给伺服系统两大类，驱动系统接收来自数控装置的指令信息，经功率放大后，严格按照指令信息的要求驱动机

床移动部件，以加工出符合图样要求的零件。因此，它的伺服精度和动态响应性能是影响数控机床加工精度、表面质量和生产率的重要因素之一。

主轴伺服系统是指机床上带动刀具与工件旋转，产生切削运动且消耗功率最大的运动系统。主轴伺服系统除了控制主轴转速之外，还有一些特殊的控制，如主轴定向控制、恒线速度切削控制以及同步控制和 C 轴控制等。主轴定向控制是指实现主轴在某一固定位置的准确定位功能。同步控制是实现主轴转角和某一进给轴进给量保持某种关系的控制功能；C 轴控制功能是实现主轴转向任意位置的控制功能，如用于车削螺纹。恒线速度控制是指实现切削点（刀具与工件的接触点）的线速度为恒值的控制功能。

进给伺服系统包括进给驱动装置和进给电动机，主要作用是实现零件加工的成形运动，其控制量是速度和位置。它执行由 CNC 发出的进给指令，经变换、放大后，通过驱动装置精确控制执行部件的运动方向、进给速度和位移量，提供切削过程中各坐标轴所需要的转矩。进给电动机有步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机。

进给伺服系统通常由位置控制单元、速度控制单元、驱动单元和机械执行部件等几部分组成，如图 1-4 所示。进给伺服系统是一种精密的位置跟踪与定位系统，按照其位置环路的开放与否，可以分为开环和闭环两种，其中闭环系统按照位置检测元件的安装部位不同可以分为全闭环和半闭环两种。全闭环的位置检测元件安装在进给传动链的末端，半闭环的位置检测元件安装在进给传动链的某个传动元件上。

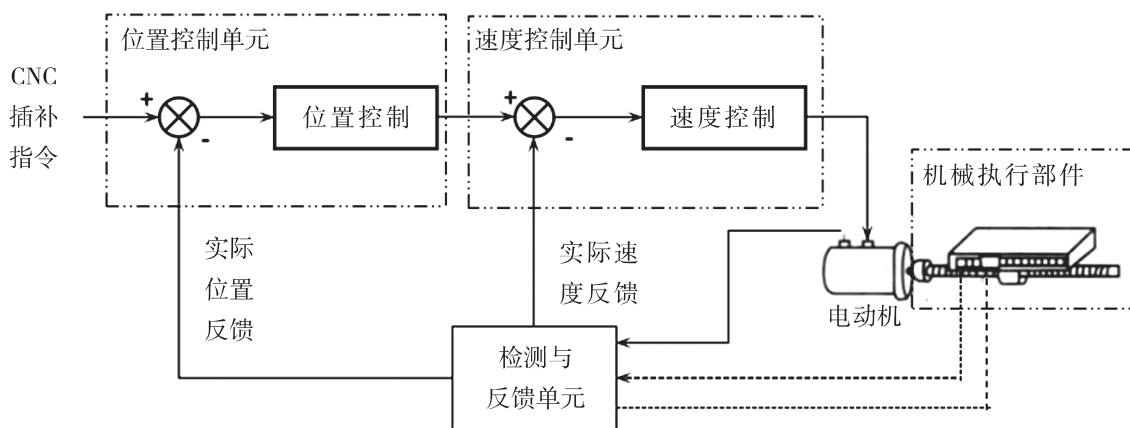


图 1-4 进给伺服系统原理图

（1）开环进给伺服系统。

图 1-5 所示为开环进给伺服系统工作简图。开环伺服系统的伺服驱动装置主要是步进电动机、功率步进电动机和电液脉冲电动机等。由数控系统送出的进给指令脉冲，通过环形分配器，按步进电动机的通电方式进行分配，并经功率放大后送给步进电动机的各相绕组，使之按规定的方式通、断电，从而驱动步进电动机旋转，再经同步齿形带、滚珠丝杠

螺母副驱动执行部件。每给一脉冲信号，步进电动机就转过一定的角度，工作台就走过一个脉冲当量的距离。数控装置按程序加工要求控制指令脉冲的数量、频率和通电顺序，达到控制执行部件运动的位移量、速度和运动方向的目的。由于它没有检测和反馈系统，故称为开环。其特点是结构简单，维护方便，成本较低。但加工精度不高，如果采取螺距误差补偿和传动间隙补偿等措施，定位精度可稍有提高。

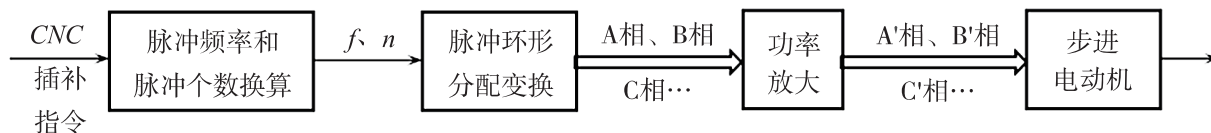


图 1-5 开环进给伺服系统工作简图

(2) 半闭环进给伺服系统。

图 1-6 所示为半闭环进给伺服系统工作简图。半闭环伺服系统具有检测和反馈系统。测量元件(脉冲编码器、旋转变压器和圆感应同步器等)装在丝杠或伺服电动机的轴端部，通过测量元件检测丝杠或电动机的回转角，间接测出机床运动部件的位移，经反馈回路送回控制系统和伺服系统，并与控制指令值相比较。如果二者存在偏差，便将此差值信号进行放大，继续控制电动机带动移动部件向着减小偏差的方向移动，直至偏差为零。由于只对中间环节进行反馈控制，丝杠和螺母副部分还在控制环节之外，故称半闭环。对丝杠螺母副的机械误差，需要在数控装置中用间隙补偿和螺距误差补偿来减小。

(3) 全闭环进给伺服系统。

图 1-7 所示为全闭环进给伺服系统工作简图。它的工作原理和半闭环伺服系统相同，但测量元件(直线感应同步器、长光栅等)装在工作台上，可直接测出工作台的实际位置。该系统将所有部分都包含在控制环之内，可消除机械系统引起的误差，精度高于半闭环伺服系统，但系统结构较复杂，控制稳定性较难保证，成本高，调试、维修困难。

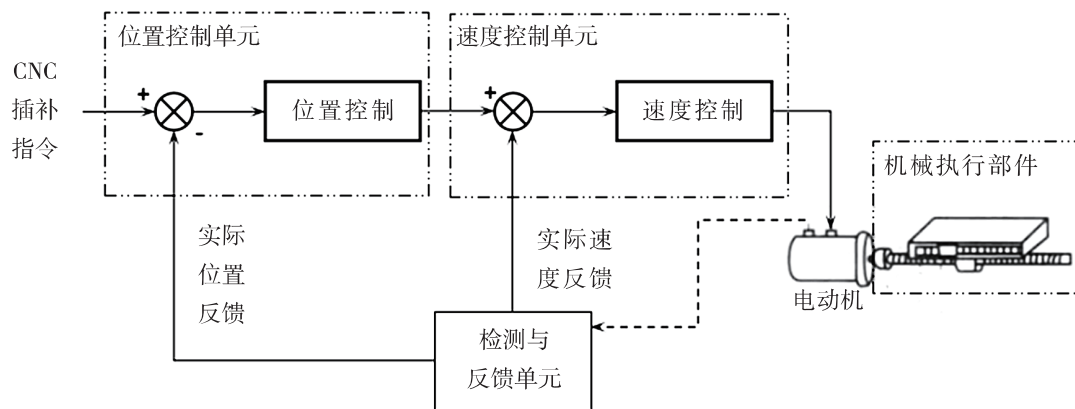


图 1-6 半闭环进给伺服系统工作简图

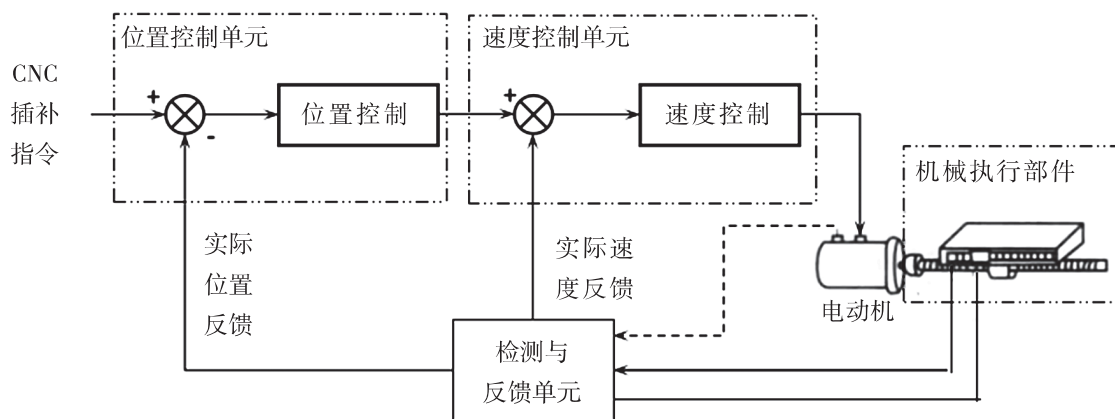


图 1-7 全闭环进给伺服系统工作简图

四、检测反馈装置

检测反馈装置是高性能数控设备中的重要组成部分。检测反馈装置主要有以下两种安装方式：

- (1) 安装在机床的工作台或丝杠的直线位移检测元件；
- (2) 安装在伺服电动机上的角位移检测元件。

检测反馈装置的作用是，将检测元件准确测出的直线位移或角位移迅速反馈给数控装置，以便与加工程序给定的指令进行比较。如果比较出误差，数控装置将向伺服系统发出新的修正命令，以控制机床有关机构向消除误差的方向进行补偿位移，并如此反复进行，以达到消除其误差的目的。

数控设备通常按有、无反馈检测装置及反馈方式将伺服系统分为开环、全闭环、半闭环及混合闭环系统，开环系统无检测反馈装置，其控制精度主要取决于系统的机械传动链和步进电动机运行的精度，而闭环系统的控制精度则主要取决于检测反馈装置的精度。

五、可编程序控制器

可编程序控制器（PLC）是一种专为在工业环境下应用而设计的数字运算操作的电子系统。它采用可编程序控制器，用来执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作指令，并通过数字式、模拟式的输入和输出，控制各种类型的机械设备和生产过程。按其控制的对象不同，分为可编程序逻辑控制器（PLC）及用于控制机床顺序动作的可编程序机床控制器（PMC），可编程序机床控制器（PMC）在数控装置（CNC）中接收来自操作面板，机床上各行程开关、传感器、按钮，强电柜中的继电器以及主轴控制、刀库控

制的有关信号，经处理后输出有关信号，控制相应的器件运行。

CNC 装置和 PLC 协调配合共同完成数控机床的控制，其中 CNC 装置主要完成与数字运算和管理有关的功能，如零件程序的编辑、插补运算、译码、位置伺服控制等；PLC 主要完成与逻辑运算有关的一些动作，没有轨迹上的具体要求，接受 CNC 装置的控制代码辅助功能 M 指令、主轴功能 S 指令、刀具功能 T 指令等顺序动作信息，对其进行译码，转换成对应的控制信号，控制辅助装置完成机床相应的开关动作，如工件的装夹、刀具的更换、冷却液的开与关等一些辅助动作；它还接受机床操作面板的指令，一方面直接控制机床的动作，另一方面将一部分指令送往 CNC 装置，用于加工过程的控制。

六、机床主体

数控机床是数控系统的被控制对象，是实现加工零件的执行部件。它主要由主轴传动装置、进给传动装置、支撑床身以及特殊装置，如刀具自动交换系统 ATC (Automatic Tools Changer)、自动工件交换系统 (Automatic Pallet Changer) 和辅助装置 (如液压气动系统、润滑系统、冷却装置、转位和夹紧装置、回转工作台和数控分度头等) 组成。与普通机床相比，数控机床在整体布局、外观造型、传动系统、刀具系统的结构以及操作机构等方面都有很大的变化，这种变化的目的是满足数控机床的要求和充分发挥数控机床的特点。数控机床的主要性能指标如下：

(1) 数控机床的基本能力指标。

数控机床的基本能力指标主要包括：行程范围、工作台尺寸、承载能力、主轴功率和进给轴转矩、可控轴数和联动轴数等。

(2) 数控机床的精度指标。

数控机床的精度指标主要包括：几何精度和位置精度。其中位置精度又包括定位精度、重复定位精度、分度精度和回零精度等。

(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、快速移动和进给速度、坐标轴行程、摆角范围、刀库容量和换刀时间、分辨率和脉冲当量等。

(4) 数控机床的可靠性能指标。

数控机床的可靠性能指标主要包括：平均无故障工作时间 (MTBF) 和平均修复时间 (MTTR)。

平均无故障工作时间是指数控机床在可修复的相邻两次故障间正常工作的时间的平



均值，它与机床部件和数控系统的质量有关。MTPF 的值越大越好。

平均修复时间是指数控机床从出现故障开始到能正常工作所用的平均修复时间。MTTR 的值越小越好。

第三节 数控机床的分类

从不同的角度出发，数控机床有不同的分类方式，本节列举了几种常见的分类方式，如图 1-8 所示。

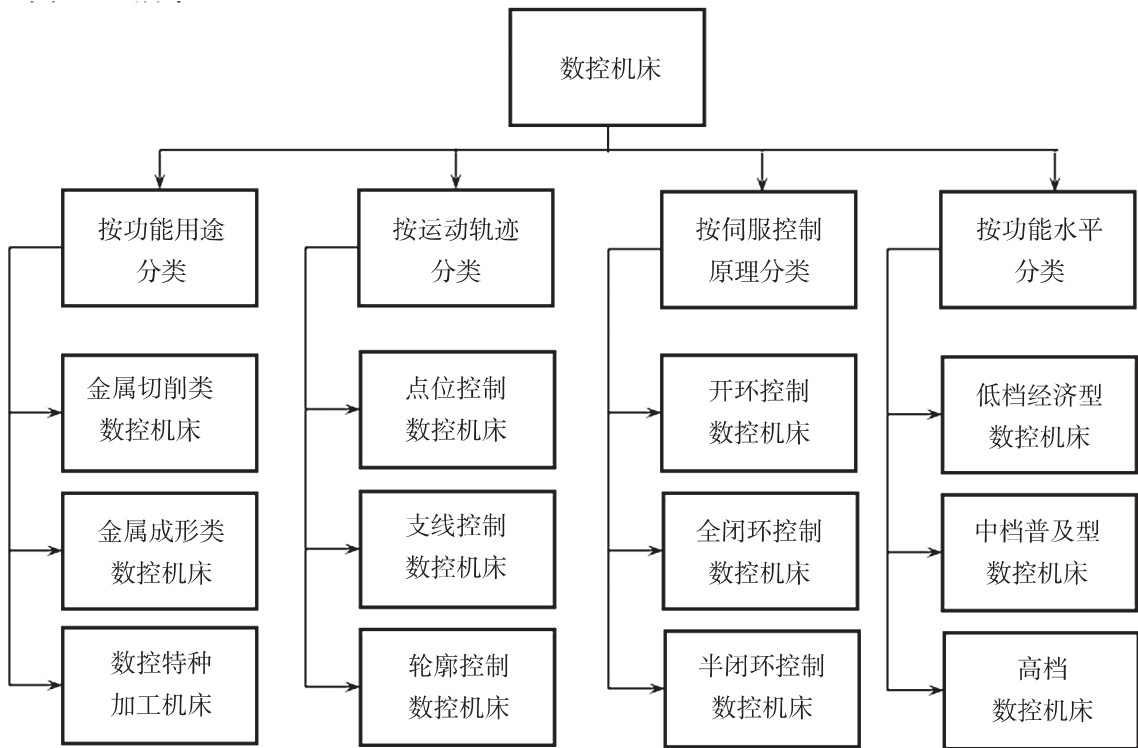


图 1-8 数控机床分类

一、按功能用途分类

(1) 金属切削类数控机床、最为常见的一类数控机床，根据其完成加工工艺的不同，可分为数控车床、数控铣床和数控加工中心等。

数控加工中心最初是由数控铣床发展而来的，它与数控铣床的最大区别在于加工中心具有自动交换加工刀具的能力。数控加工中心的出现改变了一台机床只能完成一种加工

工艺的模式，实现了零件一次装夹、自动完成多种工序加工的功能。最为常见的加工中心是立式加工中心，其实质为安装有自动换刀装置及刀库的数控铣床。

(2) 金属成型类数控机床、金属成型类数控机床是对传统金属成型机床数控化后获得的机床，其工作原理不变，均是通过其配套的模具对金属施加强大作用力使其发生物理变形，从而得到想要的几何形状。与传统成型机床相比，金属成型类数控机床通过数控系统完成上述动作。这类数控机床有数控折弯机、数控弯管机和数控压力机等。

(3) 数控特种加工机床利用数控系统完成特种加工的数控机床，如数控线切割机、数控电火花成形机和数控激光切割机等。

二、按运动轨迹分类

(1) 点位控制数控机床、点位控制数控机床侧重于点定位，即需要实现刀具或工作台从当前点到目标点的准确移动，且移动过程中不进行切削运动，对运动的轨迹也不存在严格要求。常见的此类数控机床有数控钻床、数控镗床和数控压力机等。该类数控机床的运动轨迹如图 1-9 (a) 所示，图中虚线箭头表示机床并未切削工件。

(2) 直线控制数控机床、相对于点位控制数控机床，直线控制数控机床不但需要具有定位功能，还必须实现点到点直线运动时的切削加工。该类数控机床一般有 2~3 个运动轴，但是无法联动，仅能完成单轴控制。该类数控机床的运动轨迹如图 1-9 (b) 所示，图中实线箭头表示机床在切削工件。

(3) 轮廓控制数控机床、这种机床能对两个或两个以上的坐标轴进行联动切削加工控制，具有直线、圆弧、抛物线以及其他函数关系的插补功能。该数控机床在加工时，不但要控制起点和终点的位置，还需要通过插补方法准确控制两点之间轮廓任意一点的位置和速度，从而使得机床加工出符合图样要求的复杂形状。常见的轮廓控制数控机床有数控车床、数控铣床、数控线切割机和加工中心等，这类数控机床一般具有较为完善的辅助功能以保证轮廓加工过程顺利、高效地进行。图 1-3-2 (c) 所示为该类数控机床的运动轨迹。

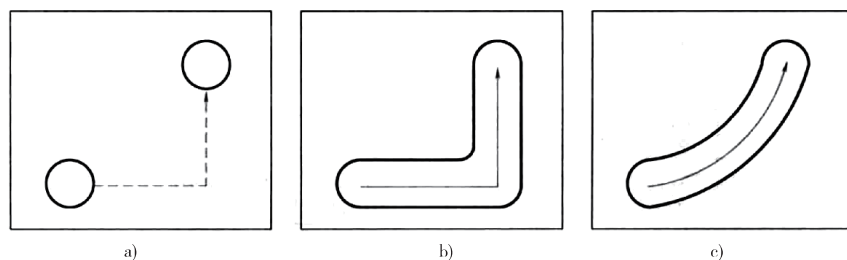


图 1-9 三种运动轨迹

三、按伺服控制原理分类

(1) 开环控制数控机床对于开环控制数控机床, 机床本体不安装位置检测装置, 其控制仅依靠数控系统发出的指令予以实现。这种控制方式无法采集末端执行器的反馈信号, 不检测其运行状况, 指令单向流动, 因此称之为开环控制。此类数控机床成本低、调试维修方便, 但精度往往不高, 适用于加工质量要求较低的场合。另外, 在对普通机床数控化改造时可考虑此种类型的系统。

如图 1-10 所示, 基于步进电动机是实现开环控制数控系统最为常用的一种方式。数控系统根据控制指令, 计算出进给脉冲, 发送至步进电动机驱动器, 随后控制步进电动机转过一定的角度, 并通过齿轮传动、滚珠丝杠螺母副驱动工作台运动。

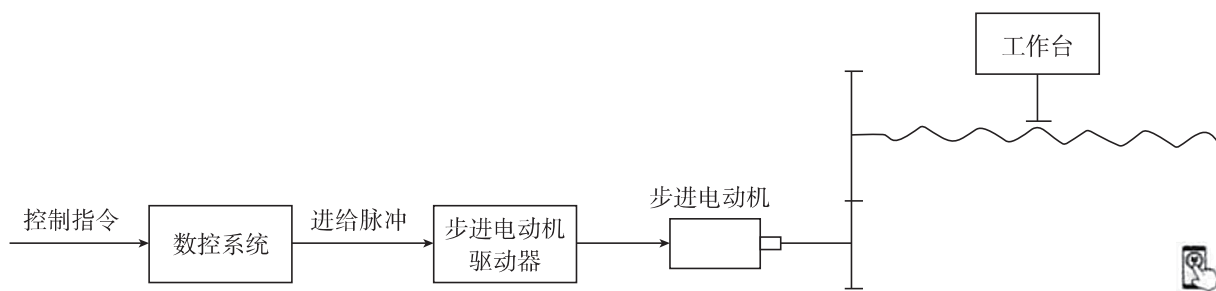


图 1-10 开环控制数控机床示意图

(2) 闭环控制数控机床、相对于开环控制数控机床, 闭环控制数控机床指的是安装了位置检测装置的数控机床。此类机床在运行时, 可以测量出机床进给运动的实际值, 并反馈到数控系统, 从而获得指令值与实际值的差值, 利用差值对运动进行控制, 直至差值为零, 以实现运动部件的精确控制。

根据位置检测装置安装位置的不同, 可进一步将闭环控制数控机床分为全闭环控制数控机床和半闭环控制数控机床。前者一般采用光栅尺作为位置检测装置, 该装置可以安装在机

床工作台处, 从而直接将工作台的位移反馈至数控系统, 完成基于误差的控制。显然, 全闭环控制数控机床的精度高, 主要用于加工质量要求较高的场合。而对于后者, 则使用编码器作为位置检测装置, 即测定丝杠的角位移, 进而间接获得工作台位移, 因为工作台并未包括在控制环中, 因此将其称为半闭环控制数控机床。相比开环控制数控机床和全闭环控制数控机床, 此类机床是一种折中的数控机床, 其结构简单, 调试安装方便, 成本不高, 控制精度介于以上两类数控机床之间。

图 1-11 和图 1-12 分别给出了闭环控制数控机床和半闭环控制数控机床的示意图。

在图 1-11 中, 数控系统接收给定的位置指令, 经过运算将其转换成控制指令传送给伺服驱动器, 并传递给伺服电动机。对于不同的数控机床, 可能会通过齿轮传动机构减速增扭, 也有可能去除齿轮传动机构, 直接与滚珠丝杠螺母副相连, 进而控制工作台的移动。一旦工作台的移动发生, 位置检测装置立刻反馈其位移信息, 并与给定的位置指令比较, 将差值输送给数控系统, 一般将此差值放大后对伺服电动机进行控制, 直至此差值为零才终止。

对于图 1-12 所示的半闭环控制数控机床, 其工作过程与图 1-11 所示基本一致, 不同之处在于检测装置安装在伺服电动机处或者丝杠端部, 检测的变量是角位移, 经过一定运算后再与位置指令求得差值, 进而完成控制。

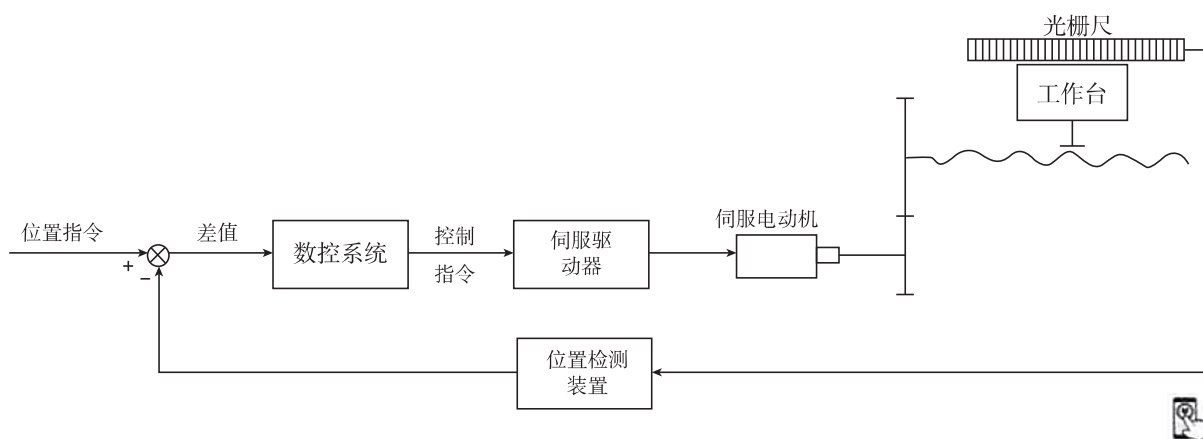


图 1-11 闭环控制数控机床

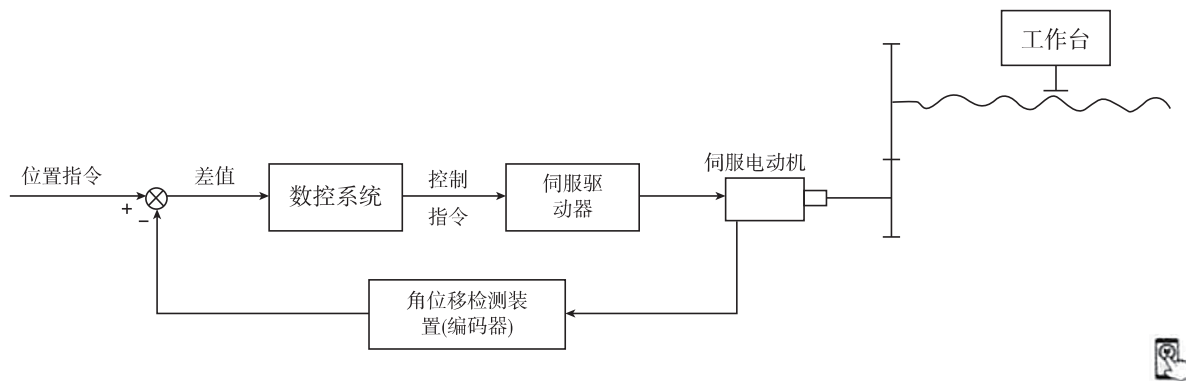


图 1-12 半闭环控制数控机床

四、按功能水平分类

数控机床可按照功能水平进行分类, 一般分为高档、中档和低档三类, 但这种分类方式是相对而言的, 早些时候的高档数控机床现阶段可能是低档机床。此处列举几项档次

分类的指标：机床进给分辨率和进给速度、伺服系统类型、联动轴数、通信能力、显示功能和 CPU 能力等，具体见表 1-2。

表 1-2 数控机床按功能水平分类

档次分类	低档	中档	高档
指标机床进给分辨率	10 μm	1 μm	0.1 μm
进给速度	8~15m/min	>15m/min 且 $\leq$ 24m/min	>24m/min 且 $\leq$ 100m/min 或更高
伺服系统类型	步进电动机开环控制	伺服电动机半闭环控制	伺服电动机闭环控制
联动轴数	$\leq$ 3 轴	4 轴	5 轴或更高
通信能力	无	R232 或 DNC 直接数控等接口	MAP (制造自动化协议) 等高性能通信接口, 且具有联网功能
显示功能	简单的数码显示或 CRT 字符显示	较齐全的 CRT 显示, 有图形、人机对话、自诊断等功能显示	齐全的 CRT 显示, 有图形、人机对话、自诊断等功能显示及三维动态图形显示
CPU 能力	8 位单板机或单片机	16 位或 32 位处理器	32 位以上处理器

第二章 数控加工工艺基础

第一节 数控加工工艺的特点

一、数控机床加工的特点

（一）加工的一致性好、加工质量稳定

数控机床是按数字形式给出的指令进行加工的，一般情况下工作过程不需要人工干预，这就消除了操作者人为产生的误差。在设计制造数控机床时，采取了许多措施，使得数控机床的定位精度和重复定位精度都很高，较容易保证一批零件尺寸的一致性，只要工艺设计和程序正确合理，加之精心操作，就可以生产出合格率高、加工质量稳定的零件。

（二）生产效率高

数控机床加工能在一次装夹中实现多道工序的连续加工；数控机床的主轴转速、进给速度范围大且为无级变速，定位速度高，通过合理选择切削参数，充分发挥刀具的加工性能，减少切削时间，不仅能保证高精度，而且加工过程稳定；一般只做首件检验和工序间关键尺寸的抽样检验，不需要在加工过程中进行中间测量，就能连续完成整个加工过程，减少了辅助动作时间和停机时间；更换数控机床被加工零件时几乎不需要重新调整机床，节省了零件安装调整时间。因此，数控机床的生产效率高。