

第一篇 基础篇

第一章 数控机床概论



教学目标

1. 了解数控机床的工作原理、组成、分类。
2. 了解数控机床产生和发展趋势。
3. 掌握数控机床坐标系命名原则及坐标方向规定。



教学方法

数控基地现场讲解和视频多媒体课件讲解。



课时安排

理论 4 学时，现场教学 4 学时。

第一节 数控机床的工作原理和组成

一、数控机床的工作原理

1. 数控机床

采用数字化信号对机床的运动及加工过程进行控制的机床，称为数控机床。

2. 计算机数控（CNC）

采用存储程序的专用计算机来实现部分或全部基本数控功能，则称为计算机数控。

3. 数控机床零件加工的步骤

- (1) 分析零件图，确定加工方案，用规定代码编程；
- (2) 输入数控装置；
- (3) 数控装置对程序进行译码、运算，向机床各伺服机构和辅助控制装置发信号—驱动—执行—加工零件。

二、数控机床的组成

数控机床主要由以下部分组成，图 1.1 为数控机床的系统组成，图 1.2 为数控机床的主要结构。

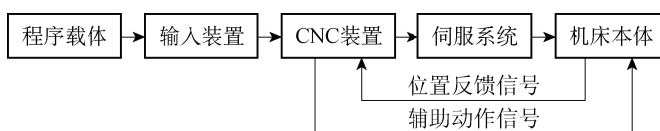


图 1.1 数控机床的系统组成

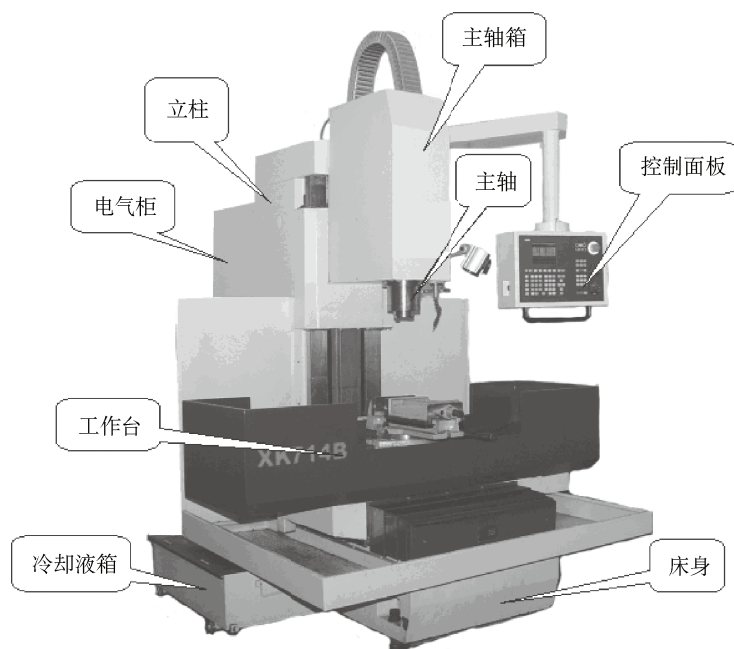


图 1.2 数控机床结构

1. 程序载体

程序：包括加工零件所需的全部信息和刀具相对工件的位移信息。

载体：穿孔纸带、磁带、磁盘（软盘、硬盘、内存 RAM）。

2. 输入装置

作用：将程序载体内有关加工的信息读入 CNC 装置。

穿孔纸带——光电阅读机。

磁带——录放机。

磁盘——驱动器和驱动卡。

MDI——手动输入装置。

3. CNC 装置

作用：接收输入装置输入的加工信息，完成数值计算、逻辑判断、输入输出控制等功能。

4. 伺服系统

作用：将数控装置发来的各种动作指令，转化成机床移动部件的运动，包括电动机、速度控制单元、测量反馈单元、位置控制单元。

5. 位置反馈系统

作用：将其准确测得的角位移或直线位移数据迅速反馈给数控装置，以便与加工程序给定的指令值进行比较和处理。

6. 机床本体

包括主运动系统、进给运动系统和辅助部分（液压、气动、冷却、润滑）。

第二节 数控机床的分类

一、按加工工艺方法分类

1. 金属切削类数控机床

与传统的车、铣、钻、磨、齿轮加工相对应的数控机床有数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床、数控齿轮加工机床等。尽管这些数控机床在加工工艺方法上存在很大差别，具体的控制方式也各不相同，但机床的动作和运动都是数字化控制的，具有较高的生产率和自动化程度。

在普通数控机床加装一个刀库和换刀装置就成为数控加工中心机床。加工中心机床进一步提高了普通数控机床的自动化程度和生产效率。例如铣、镗、钻加工中心，它是在数控铣床基础上增加了一个容量较大的刀库和自动换刀装置形成的，工件一次装夹后，可以对箱体零件的四面甚至五面大部分加工工序进行铣、镗、钻、扩、铰以及攻螺纹等多工序加工，特别适合箱体类零件的加工。加工中心机床可以有效地避免由于工件多次安装造成的定位误差，减少了机床的台数和占地面积，缩短了辅助时间，大大提高了生产效率和加工质量。

2. 特种加工类数控机床

除了切削加工数控机床以外，数控技术也大量用于数控电火花线切割机床、数控电火花成型机床、数控等离子弧切割机床、数控火焰切割机床以及数控激光加工机床等。

3. 板材加工类数控机床

常见的应用于金属板材加工的数控机床有数控压力机、数控剪板机和数控折弯机等。近年来，其他机械设备中也大量采用了数控技术，如数控多坐标测量机、自动绘图机

及工业机器人等。

二、按控制运动轨迹分类

1. 点位控制数控机床

点位控制数控机床的特点是机床移动部件只能实现由一个位置到另一个位置的精确定位，在移动和定位过程中不进行任何加工。机床数控系统只控制行程终点的坐标值，不控制点与点之间的运动轨迹，因此几个坐标轴之间的运动无任何联系。可以几个坐标同时向目标点运动，也可以各个坐标单独依次运动。

这类数控机床主要有数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控点焊机等。点位控制数控机床的数控装置称为点位数控装置。

2. 直线控制数控机床

直线控制数控机床可控制刀具或工作台以适当的进给速度，沿着平行于坐标轴的方向进行直线移动和切削加工，进给速度根据切削条件可在一定范围内变化。

直线控制的简易数控车床，只有两个坐标轴，可加工阶梯轴。直线控制的数控铣床，有三个坐标轴，可用于平面的铣削加工。现代组合机床采用数控进给伺服系统，驱动动力头带有多个轴的轴向进给进行钻镗加工，它也可算是一种直线控制数控机床。

数控镗铣床、加工中心等机床，它的各个坐标方向的进给运动的速度能在一定范围内进行调整，兼有点位和直线控制加工的功能，这类机床应该称为点位/直线控制的数控机床。

3. 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床能够对两个或两个以上运动的位移及速度进行连续相关的控制，使合成的平面或空间的运动轨迹能满足零件轮廓的要求。它不仅能控制机床移动部件的起点与终点坐标，而且能控制整个加工轮廓每一点的速度和位移，将工件加工成要求的轮廓形状。

常用的数控车床、数控铣床、数控磨床就是典型的轮廓控制数控机床。数控火焰切割机、电火花加工机床以及数控绘图机等也采用了轮廓控制系统。轮廓控制系统的结构要比点位/直线控系统更为复杂，在加工过程中需要不断进行插补运算，然后进行相应的速度与位移控制。

现在计算机数控装置的控制功能均由软件实现，增加轮廓控制功能不会带来成本的增加。因此，除少数专用控制系统外，现代计算机数控装置都具有轮廓控制功能。

三、按驱动装置的特点分类

1. 开环控制数控机床

这类控制的数控机床是其控制系统没有位置检测元件，伺服驱动部件通常为反应式步进电动机或混合式伺服步进电动机。数控系统每发出一个进给指令，经驱动电路功率放大后，驱动步进电机旋转一个角度，再经过齿轮减速装置带动丝杠旋转，通过丝杠螺母机构转换为移动部件的直线位移。移动部件的移动速度与位移量是由输入脉冲的频率与脉冲数所决定的。此类数控机床的信息流是单向的，即进给脉冲发出去后，实际移动值不再反馈

回来，所以称为开环控制数控机床。

开环控制系统的数控机床结构简单，成本较低。但是，系统对移动部件的实际位移量不进行监测，也不能进行误差校正。因此，步进电动机的失步、步距角误差、齿轮与丝杠等传动误差都将影响被加工零件的精度。开环控制系统仅适用于加工精度要求不很高的中小型数控机床，特别是简易经济型数控机床。

2. 闭环控制数控机床

闭环控制数控机床是在机床移动部件上直接安装直线位移检测装置，直接对工作台的实际位移进行检测，将测量的实际位移值反馈到数控装置中，与输入的指令位移值进行比较，用差值对机床进行控制，使移动部件按照实际需要的位移量运动，最终实现移动部件的精确运动和定位。从理论上讲，闭环系统的运动精度主要取决于检测装置的检测精度，也与传动链的误差无关，因此其控制精度高。这类控制的数控机床，因把机床工作台纳入了控制环节，故称为闭环控制数控机床。

闭环控制数控机床的定位精度高，但调试和维修都较困难，系统复杂，成本高。

3. 半闭环控制数控机床

半闭环控制数控机床是在伺服电动机的轴或数控机床的传动丝杠上装有角位移电流检测装置（如光电编码器等），通过检测丝杠的转角间接地检测移动部件的实际位移，然后反馈到数控装置中去，并对误差进行修正。通过测速元件和光电编码盘可间接检测出伺服电动机的转速，从而推算出工作台的实际位移量，将此值与指令值进行比较，用差值来实现控制。由于工作台没有包括在控制回路中，因而称为半闭环控制数控机床。

半闭环控制数控系统的调试比较方便，并且具有很好的稳定性。目前大多将角度检测装置和伺服电动机设计成一体，这样使结构更加紧凑。

4. 混合控制数控机床

将以上三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两种形式：

(1) 开环补偿型。它的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。用装在工作台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。它是用半闭环控制方式取得高精度控制，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。

第三节 数控机床的坐标系统

一、数控机床坐标系命名原则

数控机床的进给运动，有的由主轴带动刀具运动来实现，有的由工作台带着工件运动

来实现。命名原则是假定工件不动，刀具相对于工件做进给运动，增大工件与刀具之间距离的方向是机床运动的正方向，以刀具的运动轨迹来编程。

二、数控机床坐标系

常见车床的坐标如图 1.3~图 1.6 所示。

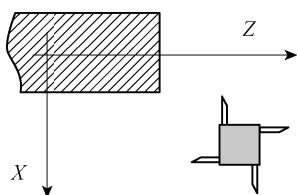


图 1.3 前置刀架车床坐标系

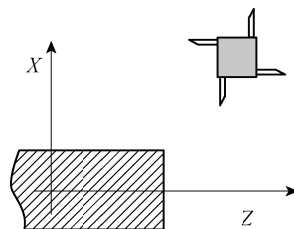


图 1.4 后置刀架车床坐标系

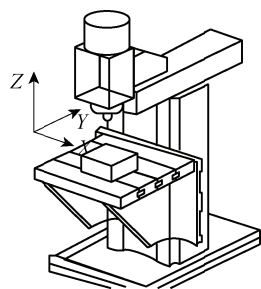


图 1.5 立式铣床坐标系

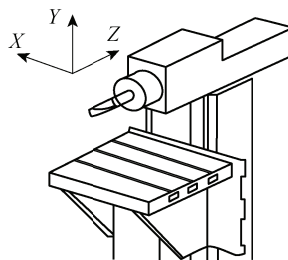


图 1.6 卧式铣床坐标系

三、坐标方向规定

为简化编程和保证程序的通用性，对数控机床的坐标轴和方向命名制定了统一的标准，规定直线进给坐标轴用 X ， Y ， Z 表示，常称基本坐标轴。 X ， Y ， Z 坐标轴的相互关系用右手定则决定，如图 1.7 所示，图中大拇指的指向为 X 轴的正方向，食指指向为 Y 轴的正方向，中指指向为 Z 轴的正方向（站在机床前面，右手中指从主轴进给方向伸出）。

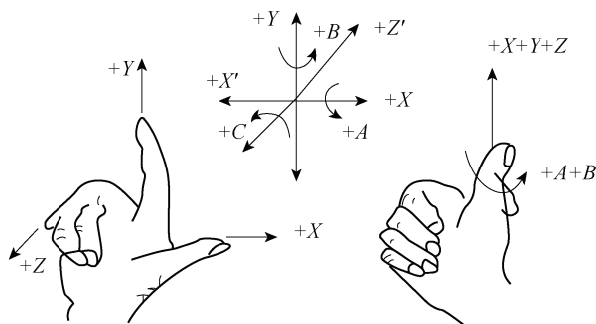


图 1.7 数控机床坐标系的确定法则

围绕 X ， Y ， Z 轴旋转的圆周进给坐标轴分别用 A ， B ， C 表示，根据右手螺旋定则，如

图 1.7 所示, 以大拇指指向 $+X$, $+Y$, $+Z$ 方向, 则食指、中指等的指向是圆周进给运动的 $+A$, $+B$, $+C$ 方向。机床坐标轴的方向取决于机床的类型和各组成部分的布局。

1) Z 轴坐标

Z 轴: 平行于机床主轴的坐标轴。

正方向: 为从工作台到刀具夹持的方向, 即刀具远离工作台的运动方向。

2) X 轴坐标

(1) 对工件旋转机床 (车、磨)。

X 轴在工件径向上, 平行于横滑座。X 轴正方向: 为刀具离开工件旋转中心的方向。

(2) 对刀具旋转机床 (铣、钻)。

① 立式: X 轴为水平的、平行于工件装夹面的坐标轴。正方向: 从主轴向立柱看, 立柱右方为正。

② 卧式: X 轴为水平的、平行于工件装夹平面的坐标轴。正方向: 从主轴向工件看, 工件右方为正。

3) Y 轴坐标

Y 轴的正方向则根据 X 和 Z 轴按右手法则确定。

四、坐标原点

在 NC 机床上可以确定不同的原点和参考点位置, 机床坐标系如图 1-8 所示, 这些参考点的作用:

- (1) 用于机床定位;
- (2) 对工件尺寸进行编程。它们是:

① 机床原点 (M) (Machine Origin 或 home position) 是建立测量机床运动坐标的起始点。机床原点位置的确定: 数控车床的原点一般设在主轴前端面的中心, 数控铣床的原点位置设在机床工作台中心或者设在进给行程范围的终点。

② 机床参考点 (R) (Reference point) 用挡铁和行程开关设置的一个物理位置, 与机床原点的相对位置是固定的, 机床出厂之前由机床制造商精密测量确定, 一般来说, 加工中心的参考点为机床的自动换刀位置。

(3) 工件坐标系与工件零点

● 工件坐标系的概念: 工件坐标系是用于确定工件几何图形上各几何要素 (点、直线、圆弧等) 的位置而建立的坐标系。

● 工件坐标系位置的确定: 工件坐标系的原点即是工件零点, 选择工件零点的原则是便于将工件图的尺寸方便地转化为编程的坐标值和提高加工精度, 故一般选在工件图样的尺寸基准上, 能使工件方便地装卡、测量和检验的位置, 尺寸精度和光洁度比较高的工件表面上, 对称几何图形的对称中心上。

● 车削工件零点的确定: 一般放在工件的右端面或左端面, 且与主轴中心线重合的地方。

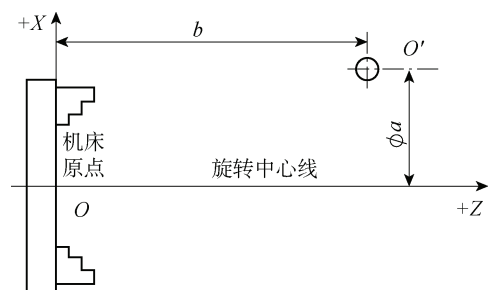


图 1.8 机床坐标系

● 铣削工件零点的确定：一般设在工件外轮廓的某一角上，进刀深度方向的工件零点大多取在工件表面。

● 程序原点：即工件原点（Part Origin）。

● 工件坐标系：以工件原点为坐标原点建立起来的直角坐标系，由程序员在数控编程过程中定义在工件上。

在车床上，工件坐标系原点一般设定在：

① 把坐标系原点设在卡盘面上，如图 1.9 和图 1.10 所示。

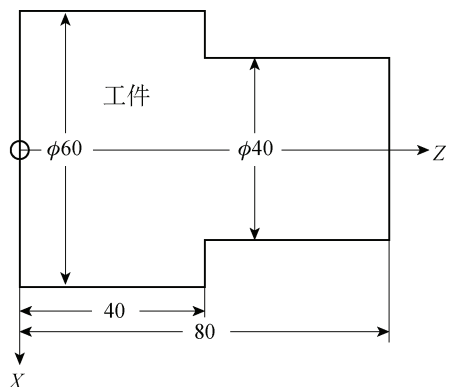


图 1.9 加工图纸上的坐标和尺寸
(坐标原点设在卡盘端面上)

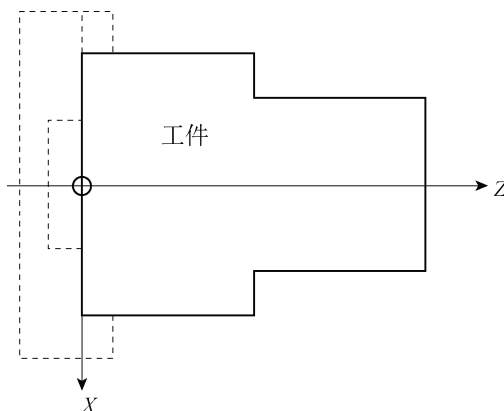


图 1.10 车床上 CNC 指令的坐标
(同图 1.9 所示加工图纸上的坐标系)

② 把坐标系原点设在零件端面上，如图 1.11 和图 1.12 所示。

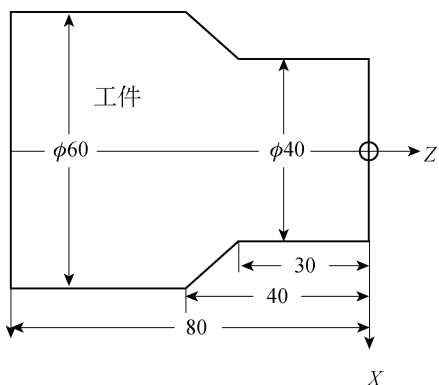


图 1.11 加工图纸上的坐标和尺寸
(坐标原点设在零件端面上)

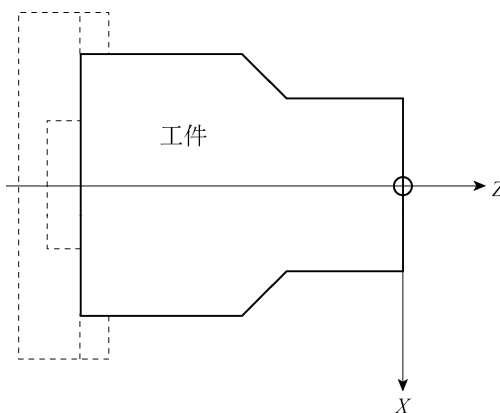


图 1.12 车床上 CNC 指令的坐标
(同图 1.11 所示加工图纸上的坐标系)

五、绝对坐标和相对坐标

1. 绝对坐标表示法

将刀具运动位置的坐标值表示为相对于坐标原点的距离，这种坐标的表示法称之为绝

对坐标表示法，如图 1.13 所示。大多数的数控系统都以 G90 指令表示使用绝对坐标编程。

2. 相对坐标表示法

将刀具运动位置的坐标值表示为相对于前一位置坐标的增量，即为目标点绝对坐标值与当前点绝对坐标值的差值，这种坐标的表示法称之为相对坐标表示法，如图 1.14 所示。大多数的数控系统都以 G91 指令表示使用相对坐标编程，有的数控系统用 X、Y、Z 表示绝对坐标代码，用 U、V、W 表示相对坐标代码。在一个加工程序中可以混合使用这两种坐标表示法编程。

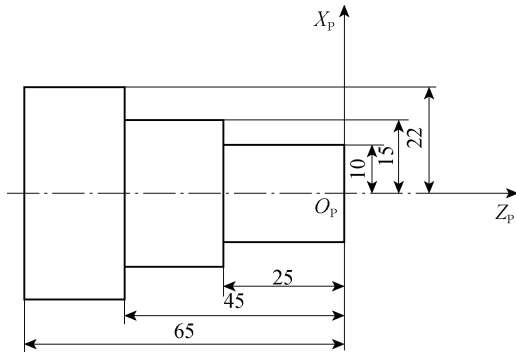


图 1.13 绝对坐标表示法

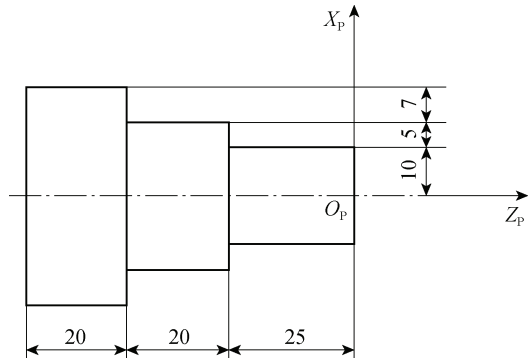


图 1.14 相对坐标表示法

第四节 数控技术的发展趋势

一、数控技术发展方向

随着计算机、微电子、信息、自动控制、精密检测及机械制造等技术的高速发展，机床数控技术也得到长足进步。世界上，数控技术及其设备的发展方向主要体现在以下几个方面。

1. 数控装置

高速化，标准化、模块化、通用化、网络化、宜人化、高可靠性、开放化。

2. 进给伺服驱动系统

- ① 永磁同步交流伺服电机逐渐取代直流伺服电机。
- ② 位置、速度、电流控制数字化。
- ③ 采用高速和高分辨率的位置检测装置。
- ④ 通过伺服系统进行各种误差补偿。

3. 程序编制

- ① 由语言编程发展到图形、实物、语音编程。
- ② 由脱机编程到在线编程。
- ③ 由处理几何信息到处理工艺信息。

4. 数控机床的工况检测、监控和故障诊断

- ① 工件尺寸超差检测。
- ② 刀具工况监控。
- ③ 故障开机诊断、运行诊断、通信诊断、专家诊断。

5. 采用功能很强的可编程控制器

- ① 抗干扰能力更强，可靠性极高。
- ② 编程、使用、维修更加方便。
- ③ 更易实现机电一体化。

6. 机床的主轴

主轴部件高速化、电气化。

二、以数控机床为基础的先进制造系统

数控机床的产生和发展，有力地推动了机械制造自动化技术水平的发展和提高。以数控机床为基础，不断产生出以自动化为特征的先进制造系统，至今乃至将来，都是制造自动化发展的方向。

1. 直接数字控制（DNC）系统

用一台通用计算机直接控制和管理一群数控机床进行加工和装配的系统。机床的 CNC 系统与 DNC 的中央计算机组成计算机网络，实现分级控制管理。

2. 间接控制型系统

由已有的数控机床，配上集中管理和控制的中央计算机，并在中央计算机和数控装置之间加上通信接口所组成。

中央计算机负责自动编制数控加工程序，并对加工程序进行编辑和修改。中央计算机配有大容量的外存贮器，存放每台机床的零件加工计划和数控加工程序。适时将加工程序调入内存，顺次扫描查询每台数控机床的请求信号，并根据加工计划，以中断方式向发出请求的某台数控机床的通信接口传送加工程序。

间接型 DNC 系统，各机床的数控功能仍由数控装置实现，中央计算机起原纸带阅读机的作用。

间接型 DNC 系统容易建立，当中央计算机有故障时，各数控机床可独立工作。

3. 直接控制型系统

组成直接型 DNC 系统的数控机床不在配备普通的数控装置，其插补运算等数控功能全部或部分由中央计算机完成。各台数控机床只配一个简单的的机床控制器，用于数据传递、驱动控制和手动操作。

插补运算控制方法有三种：

- ① 中央计算机完成各台机床的插补运算，由接口分时经 MCU 向各机床传送进给指令。
- ② 由接口电路完成各机床的插补运算，进给指令经 MCU 送至各机床。

③ 由中央计算机完成粗插补，接口电路或 MCU 完成精插补。

4. 柔性制造单元 (FMC)

一台数控机床，配置自动输送或上下料装置、自动检测和工况自动监控装置，就组成一个柔性制造单元。柔性制造单元可实现长时间连续的多品种小批量自动加工。

5. 柔性制造系统 (FMS)

(1) FMS 的特征

① 具有多台制造设备。一般认为有 5 台以上数控设备或自动化设备。

② 系统由物料运输系统将所有设备连接起来，可进行没有固定加工顺序和无节拍的随机制造。

③ 由计算机进行高度自动的分级控制和管理，对一定范围内的多品种、中小批量的零部件进行制造。

(2) FMS 组成

FMS 由加工、物流、信息流三个子系统组成，每个子系统可以有分系统。

① 加工系统：可以由 FMC 组成，大多由数控机床按 DNC 的控制方式组成。可自动更换刀具和工件并自动加工。由互补和互配两种配置原则，也可混合配置。

- 互补：配置完成不同工序的机床，互相补充而不能互相代替，一个工件依次通过这些机床进行加工。

- 互替：配置有相同的机床，一台机床有故障，则空闲的一台可以代替加工。

② 物流系统：包括工件和刀具两个物流系统，在机床和装夹工位之间输送零件和刀具。刀具物流系统包括中央刀库、工业机器人。由机器人在中央刀库和各机床刀库之间输送和交换刀具。

③ 信息流系统：加工系统和物流系统的自动控制，在线状态监控及信号处理，在线检测及处理。

6. 计算机集成制造系统 (CIMS)

(1) 自动化子系统

在制造方面有：CNC、FMC、DNC、FMS 等加工设备，PLC、AGV、RC 等控制设备。

在工程设计方面有：CAD/CAPP/CAM、ATP、GT、CTD 设计系统。

在经营管理方面有：MRP、MRPII、MIS 等管理系统。

(2) CIMS 的形成

1974 年美国约瑟夫·哈林顿首先提出了计算机集成制造系统的概念。CIMS 的两个基本观点是：第一，企业的生产经营是一个整体，要用系统的观点来统一考虑和解决产品从市场分析、经营管理和售后服务，产品工程设计和加工制造的全过程的问题；第二，整个生产过程实际上是一个数据采集、传递和加工处理的过程，最终形成的产品，可以看成是信息和数据的物质体现。

根据上述观点，将上述的各自动化子系统集成在一起，构成计算机集成制造系统。CIMS 不仅是生产设备的集成，更主要是以信息为特征的技术集成和功能集成。计算机是集成的工具。计算机辅助的自动化单元技术是集成的基础。信息、数据的交换和共享是集成的桥梁。

(3) CIMS 结构的一种方案

按 CIMS 的概念，系统是一个五层（工厂层、区间层、单元层、工作站层、设备层）递阶控制结构。

由于需要集成在一起的多种单元自动化技术多为异构的硬件和软件，在集成为一个系统时，必须解决一些关键技术问题——集成技术问题，即产品信息（数据）模型技术、网络技术、分布式数据管理技术等问题。

三、机床的自适应控制 (Adaptive Control)

切削加工中，表示切削条件、切削过程、切削状态和切削效果的参数如下。

切削条件（因数和参数）：毛坯、材料、刀具等。

切削（输入）参数：进给速度、切削速度、切削裕量。

切削状态参数：切削力、扭矩、功率、主轴变位、振动、热变形。

切削效果：生产率、生产成本、加工质量。

通常加工，是根据切削条件，选择切削参数，使切削过程在一定的切削状态下进行，从而达到一定的切削效果。对应于切削条件，选择的切削参数越合理，切削状态就越佳，得到的切削效果就越好。由于切削过程是个动态过程，切削条件是变化的，如毛坯的裕量不匀、材料的硬度不一、刀具在磨损、刀刃积屑瘤等，这将引起切削状态改变，因此，须要调整切削参数才能保持切削过程在最佳状态。

如何根据切削条件的变化来及时调整（修正）切削参数，使切削过程保持在最佳状态？为了解决这一问题，在 20 世纪六十年代产生了自适应控制这一控制技术。自适应控制以切削过程为调解控制对象，在切削过程中，实时检测某些状态参数，然后，根据预定的评价指标（函数）或约束条件，及时自动修正切削参数，使切削过程达到最佳状态，获得最优的切削效益。

评价指标：最大生产率、最低加工成本、最好加工质量。

约束条件：恒切削力、恒切削速度、恒切削功率。图 1.15 给出了机床自适应控制的原理图。它是在数控机床上增加适应控制反馈回路而构成的，适应反馈回路检测状态参数，在适应控制单元与给定评价指标（函数）或约束条件比较，输出校正信号，反馈给数控装置。数控装置则自动修正输入的切削参数（进给速度），使切削过程向预定的指标和条件转变，达到最佳状态。

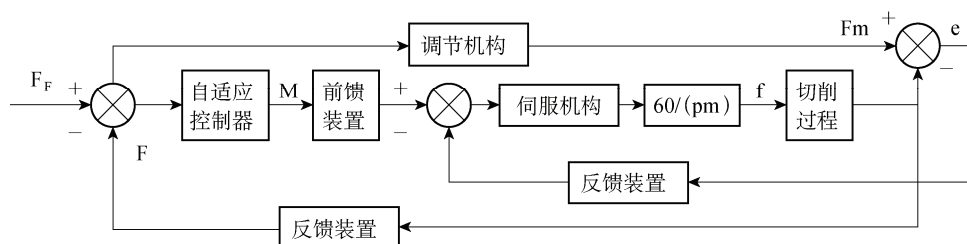


图 1.15 机床自适应控制的原理图



实训自测题一

1. 数控机床由哪几部分组成？各有何功能？
2. 简述数控机床的分类形式。
3. 简述数控机床坐标系命名原则及坐标轴方向确定方法。
4. 坐标系原点如何选取？绝对坐标表示法和相对坐标表示法有何区别？
5. 简述数控机床发展趋势及方向。