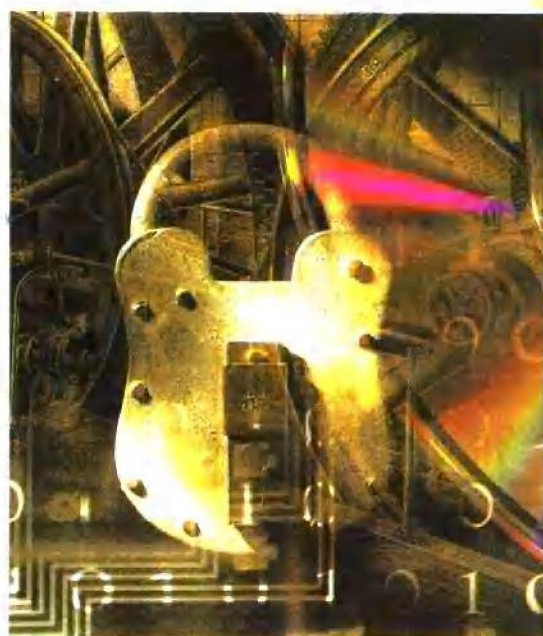
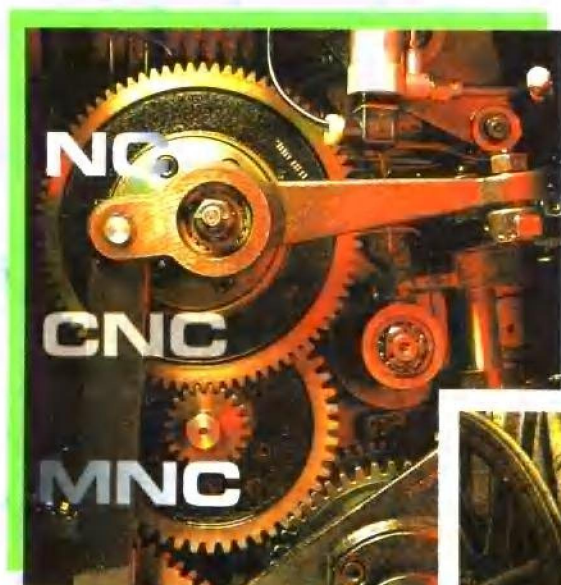


JI CHUANG DE SHU ZI  
KONG ZHI JI SHU

# 机床的数字控制技术

王永章 等编著



哈尔滨工业大学出版社

# 机床的数字控制技术

王永章 等编著

1013/24

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

## 前 言

机床的数字控制技术(简称数控技术)使电子技术与机械制造结合起来,它是根据机械加工工艺的要求,使用电子计算机对整个加工过程进行信息处理与控制,达到生产过程自动化的一门技术。随着电子元器件、微型计算机、传感器、信息处理和自动控制等技术的发展,机床的数字控制技术也得到了迅速发展。应用数字控制技术的数控机床和数控设备在生产中使用的越来越普遍。

发展现代数控机床是当前机械制造业技术改造、技术更新的必由之路,是未来工厂自动化的基础。数控技术是柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)的技术基础之一,所以,它是机电一体化高新技术的重要组成部分。

为了发展数控机床以及更好地使用数控机床,必须了解数控技术。为此,我们编写了“机床的数字控制技术”一书。本书着眼于国内外最新技术成果,力求先进性。该书主要介绍数控技术所涉及到的几个重要方面的内容,集中、深入地进行论述。

参加本书编写工作的有王永章、富宏亚、路华、苏红涛、王海昉、那海涛和王春香,此外,赵宏校、韩德东也参加了工作。全书由王永章主编,李国伟教授主审。在本书的编写过程中得到哈尔滨工业大学机床教研室和数控缠绕机研究所同志们的大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,经验不足,书中难免存在疏漏之处,恳切希望读者提出宝贵意见。

编者

1995年2月26日

# 目 录

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 第一章 概论 .....              | (1)  |
| § 1.1 机床数字控制的基本概念 .....   | (1)  |
| 一、什么是机床的数字控制技术 .....      | (1)  |
| 二、机床数字控制的原理 .....         | (1)  |
| 三、数控机床及加工特点 .....         | (3)  |
| § 1.2 数控机床的组成及分类 .....    | (4)  |
| 一、数控机床的组成 .....           | (4)  |
| 二、数控机床的分类 .....           | (5)  |
| § 1.3 机床数控技术的发展 .....     | (7)  |
| 一、数字控制技术与数控机床的产生和发展 ..... | (7)  |
| 二、我国数控机床发展情况 .....        | (8)  |
| 三、数控技术的发展水平和趋势 .....      | (9)  |
| 第二章 数控机床的程序编制 .....       | (12) |
| § 2.1 概述 .....            | (12) |
| 一、程序编制的内容和步骤 .....        | (12) |
| 二、程序编制的方法 .....           | (13) |
| § 2.2 手工程序编制 .....        | (14) |
| 一、数控标准 .....              | (14) |
| 二、程序编制的标准规定和代码 .....      | (16) |
| 三、孔加工的程序编制 .....          | (41) |
| 四、车削加工的程序编制 .....         | (45) |
| 五、轮廓铣削加工的程序编制 .....       | (47) |
| § 2.3 自动编程系统 .....        | (52) |
| 一、自动编程概述 .....            | (52) |
| 二、APT 自动编程系统 .....        | (56) |
| 三、APT 零件源程序的编制 .....      | (70) |
| 四、其它数控自动编程语言系统 .....      | (76) |
| § 2.4 程序编制中的数学处理 .....    | (78) |
| 一、数学处理的概念 .....           | (78) |

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| 二、线性逼近的基本方法            | (78)         |
| 三、已知平面零件轮廓方程式的数学处理     | (81)         |
| 四、列表曲线平面轮廓的数学处理        | (88)         |
| 五、立体曲面零件的数学处理方法        | (96)         |
| 六、刀具中心轨迹的数学计算          | (98)         |
| <b>第三章 机床数控装置的插补原理</b> | <b>(99)</b>  |
| § 3.1 概述               | (99)         |
| 一、插补的基本概念              | (99)         |
| 二、对插补器的基本要求            | (99)         |
| 三、插补方法的分类              | (100)        |
| § 3.2 基准脉冲插补           | (101)        |
| 一、数字脉冲乘法器              | (101)        |
| 二、逐点比较法                | (108)        |
| 三、数字积分法                | (115)        |
| § 3.3 数据采样插补           | (124)        |
| 一、概述                   | (125)        |
| 二、直线函数法                | (127)        |
| 三、扩展 DDA 数据采样插补        | (129)        |
| 四、其它插补方法简介             | (133)        |
| <b>第四章 计算机数字控制装置</b>   | <b>(141)</b> |
| § 4.1 概述               | (141)        |
| 一、计算机数控系统的组成           | (141)        |
| 二、CNC 装置的结构            | (141)        |
| 三、CNC 装置是怎样工作的         | (142)        |
| 四、CNC 装置的功能            | (144)        |
| 五、CNC 装置的特点            | (147)        |
| § 4.2 计算机数控装置的硬件结构     | (147)        |
| 一、单微处理机数控装置的结构         | (148)        |
| 二、多微处理机数控装置的结构         | (160)        |
| 三、点位直线控制的数控装置的结构       | (166)        |
| § 4.3 计算机数控装置的软件结构     | (168)        |
| 一、CNC 装置软件结构的特点        | (168)        |
| 二、输入和数据处理程序            | (173)        |
| 三、进给速度的计算和加减速控制        | (181)        |
| 四、插补程序                 | (191)        |
| 五、位置控制软件               | (192)        |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 六、故障诊断 .....                    | (192) |
| § 4.4 数控机床用可编程序控制器 .....        | (194) |
| 一、概述 .....                      | (194) |
| 二、PC 的结构和编程方法 .....             | (195) |
| 三、PC 的工作过程及其特点 .....            | (199) |
| 四、数控机床中的 PC 功能 .....            | (202) |
| 五、典型 PC 的指令和程序编制 .....          | (203) |
| § 4.5 CNC 装置数据输入输出和通讯功能 .....   | (215) |
| 一、与 CNC 装置进行数据传送和通讯的设备和接口 ..... | (215) |
| 二、异步串行通讯接口 .....                | (216) |
| 三、网络通讯接口 .....                  | (217) |
| <b>第五章 位置检测装置</b> .....         | (220) |
| § 5.1 概述 .....                  | (220) |
| 一、对检测装置的要求 .....                | (220) |
| 二、检测装置的分类 .....                 | (220) |
| § 5.2 旋转变压器 .....               | (221) |
| 一、旋转变压器的结构和工作原理 .....           | (221) |
| 二、旋转变压器的应用 .....                | (222) |
| § 5.3 感应同步器 .....               | (224) |
| 一、感应同步器的结构和工作原理 .....           | (224) |
| 二、感应同步器的应用 .....                | (226) |
| 三、感应同步器检测装置的优点 .....            | (227) |
| § 5.4 脉冲编码器 .....               | (228) |
| 一、脉冲编码器的分类与结构 .....             | (228) |
| 二、光电脉冲编码器的工作原理 .....            | (229) |
| 三、光电脉冲编码器的应用 .....              | (229) |
| § 5.5 绝对值编码器 .....              | (232) |
| 一、绝对值编码器的种类和工作原理 .....          | (232) |
| 二、混合式绝对值编码器 .....               | (233) |
| § 5.6 光栅 .....                  | (233) |
| 一、光栅的结构 .....                   | (233) |
| 二、工作原理 .....                    | (234) |
| 三、光栅位移-数字变换电路 .....             | (235) |
| § 5.7 磁栅(磁尺) .....              | (237) |
| 一、磁栅的结构和工作原理 .....              | (237) |
| 二、磁栅的检测电路 .....                 | (238) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 第六章 数控机床的伺服系统·····      | (240) |
| § 6.1 概述 ·····          | (240) |
| 一、伺服系统的组成 ·····         | (240) |
| 二、对伺服系统的基本要求 ·····      | (240) |
| 三、伺服系统的分类 ·····         | (242) |
| § 6.2 速度控制 ·····        | (245) |
| 一、进给运动的速度控制 ·····       | (246) |
| 二、主轴驱动的速度控制 ·····       | (266) |
| § 6.3 位置控制 ·····        | (274) |
| 一、开环控制系统 ·····          | (274) |
| 二、相位伺服系统 ·····          | (279) |
| 三、幅值伺服系统 ·····          | (285) |
| 四、数字、脉冲比较伺服系统·····      | (293) |
| 五、数字伺服系统的概述 ·····       | (296) |
| 附录一 准备功能 G 代码及其意义 ····· | (297) |
| 附录二 辅助功能 M 代码及其意义 ····· | (301) |
| 参考文献·····               | (305) |

# 第一章 概 论

## § 1.1 机床数字控制的基本概念

### 一、什么是机床的数字控制技术

数字控制 (numerical control) 是近代发展起来的一种自动控制技术, 是用数字化的信息实现机床控制的一种方法。数字控制机床 (Numerically Controlled Machine Tool) 是采用了数字控制技术的机床, 简称数控 (NC) 机床。数控机床是一种装有数控系统的机床, 该系统能逻辑地处理具有使用号码, 或者其它符号编码指令规定的程序。数控系统是一种控制系统, 它能自动完成信息的输入、译码、运算, 从而控制机床的运动和加工过程。

数控机床是近代发展起来的具有广阔发展前景的新型自动化机床, 是高度机电一体化产品。

### 二、机床数字控制的原理

数控机床的加工, 首先要将被加工零件图上的几何信息和工艺信息数字化, 按规定的代码和格式编成加工程序。信息数字化就是把刀具与工件的运动坐标分割成一些最小单位量, 即最小位移量。数控系统按照程序的要求, 经过信息处理、分配, 使坐标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。

在钻削、镗削或攻丝等孔加工中 (见图 1.1.1(a)), 是使刀具在一定时间内, 刀具中心从  $P$  点移动到  $Q$  点, 即刀具在  $x$  坐标,  $y$  坐标移动规定量的最小单位量, 它们的合成量为  $P$  点和  $Q$  点间的距离。但是, 刀具轨迹没有严格控制, 可以先使刀具在  $x$  坐标上由  $P$  点向  $R$  点移动, 然后再使刀具沿  $y$  坐标从  $R$  点移动到  $Q$  点。也可以两个坐标以相同的速度, 使刀具移动到  $K$  点。这时,  $y$  坐标值达到规定的位移量, 然后刀具沿  $x$  坐标方向由  $K$  点移动到  $Q$  点。这样的控制称为点到点的控制 (point to point control), 其特点是严格控制用最小位移量表示的二点间的距离。

在轮廓加工中, 如图 1.1.1. (b) 所示的任意曲线  $L$ , 要求刀具  $T$  沿曲线轨迹运动, 进行切削加工。

可以将曲线  $L$  分割为:  $l_0, l_1, l_2, \dots, l_i$  等线段。用直线 (或圆弧) 代替 (逼近) 这些线段, 当逼近误差  $\delta$  相当小时, 这些折线段之和就接近了曲线。数控系统通过最小单位量的单位运动合成, 不断地连续地控制刀具运动。不偏离地走出直线 (或圆弧), 从而非常逼真地加工出曲线轮廓。这种在允许误差范围内, 用沿曲线 (精确地说, 是沿逼近函数) 的最小单位移动量合成的分段运动代替任意曲线运动, 以得出所需要的运动, 是数



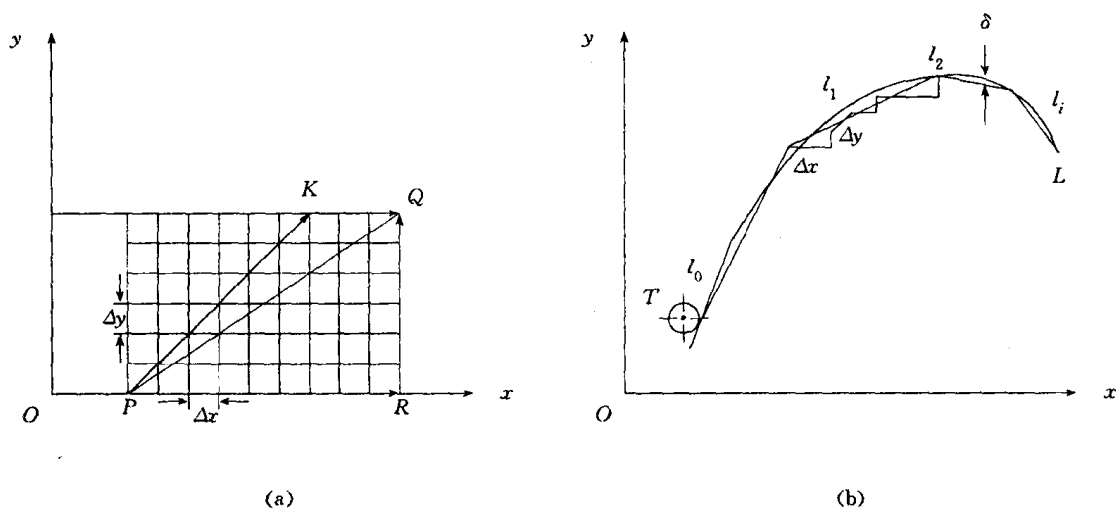


图1.1.1 用单位运动来合成任意运动

控的基本构思之一。上述的这种控制方法称为轮廓控制或连续轨迹控制 (Contouring 或 Continuous Path Control)。轮廓控制的特点是不但对坐标的移动量进行控制, 对各坐标的速度及它们之间的比率也进行控制。

在进行曲线加工时, 可以用给定的数学函数来模拟曲线上分割出的线段  $l_i$ 。根据给定的已知函数, 如直线、圆弧或高次曲线, 在被加工轨迹或轮廓上的已知点之间, 进行数据点的密化, 确定一些中间点的方法, 称为插补 (Interpolation)。用直线来模拟被加工零件轮廓曲线称为直线插补; 用圆弧来模拟被加工零件轮廓曲线称为圆弧插补; 用其它二次曲线或高次函数模拟被加工轨迹轮廓称为二次曲线插补 (如抛物线插补) 或高次函数插补 (如螺旋线插补) 等。这些插补的算法, 称为插补运算。

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。数控装置是用于机床数字控制的特殊用途的电子计算机, 它能接收零件图纸加工要求的信息, 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。伺服驱动装置能快速响应数控装置发出的指令带动机床各坐标轴运动, 同时能提供足够的功率和扭矩。伺服驱动装置按其工作原理可分为两种控制方式: 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, 控制结束。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。检测装置将位移的实际值检测出来, 反馈给数控装置中调节电路比较器, 有差值就发出信号, 不断比较指令值与反馈的实测值, 不断地发出信号, 直到差值为零, 运动结束。这种方式用于连续轨迹控制。

可编程控制器用于开关量控制, 如主轴的启停、刀具更换和冷却液开关等信号。检测装置用在调节控制中, 检测运动的实际值, 并反馈给数控装置, 从而实现差值控制。从理论上讲, 它的检测精度决定了数控机床的加工精度。

### 三、数控机床及加工特点

近代，大工业生产大量采用了刚性自动化。在汽车工业、拖拉机以及轻工业消费品生产方面，采用了大量的组合机床自动线、流水线；在标准件生产中采用了凸轮控制的专用机床和自动机床。这类机床适合于大批量生产，但是建立制造过程很难，所以更换产品，修改工艺要较长的时间和比较多的费用。

由于产品多样化和产品更新，解决单件，小批量生产自动化迫在眉睫。航空、宇航、造船、电子等工业对解决复杂型零件加工和高精度零件加工要求越来越高。这就使刚性自动化不能满足要求，柔性加工和柔性自动化也就迅速发展起来。

数控机床是新型的自动化机床，它具有广泛通用性和很高的自动化程度。数控机床是实现柔性自动化最重要的装置，是发展柔性生产的基础。数控机床在下面一些零件的加工中，更能显示出它的优越性。它们是：①批量小而又多次生产的零件；②几何形状复杂的零件；③在加工过程中必须进行多种加工的零件；④切削余量大的零件；⑤必须控制公差（即公差带范围小）的零件；⑥工艺设计会变化的零件；⑦加工过程中的错误会造成严重浪费的贵重零件；⑧需全部检测的零件，等等。

数控机床的优点：

1. 提高生产率。数控机床能缩短生产准备时间，增加切削加工时间的比率。采用最佳切削参数和最佳走刀路线能缩短加工时间，从而提高生产率。

2. 稳定产品质量。采用数控机床可以提高零件的加工精度，稳定产品质量。它是按照程序自动加工不需要人工干预，而且加工精度还可以利用软件进行校正及补偿，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。

3. 有广泛的适应性和较大的灵活性。通过改变程序，就可以加工新品种的零件。能够完成很多普通机床难以完成，或者根本不能加工的复杂型面的零件的加工。

4. 可以实现一机多用。一些数控机床，例如加工中心，可以自动换刀。一次装卡后，几乎能完成零件的全部加工部位的加工，节省了设备和厂房面积。

5. 提高经济效益。可以进行精确的成本计算和生产进度安排，减少在制品，加速资金周转，提高经济效益。

6. 不需要专用夹具。采用普通的通用夹具就能满足数控加工的要求，节省了专用夹具设计制造和存放的费用。

7. 大大地减轻了工人的劳动强度。

数控机床是具有广泛的通用性而又具有很高自动化程度的全新型机床。它的控制系统不仅能控制机床各种动作的先后顺序，还能控制机床运动部件的运动速度，以及刀具相对工件的运动轨迹。数控机床是计算机辅助设计与制造（CAD/CAM），群控（DNC），柔性制造系统（FMS），计算机集成制造系统（CIMS）等柔性加工和柔性制造系统的基础。

但是，数控机床的初投资及维修技术等费用较高，要求管理及操作人员的素质也较高。合理地选择及使用数控机床，可以降低企业的生产成本，提高经济效益和竞争能力。

## § 1.2 数控机床的组成及分类

### 一、数控机床的组成

数控机床一般由控制介质、数控装置、伺服系统、测量反馈装置和机床主机组成（见图 1.2.1）。现将各组成部分简介如下：

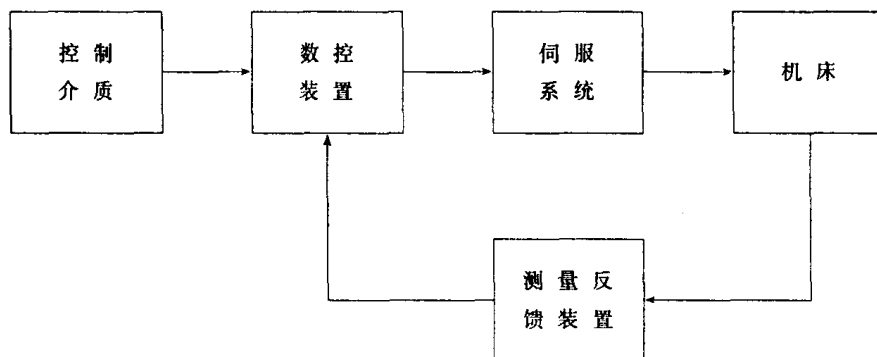


图1.2.1 数控机床的组成

#### 1. 控制介质

控制介质是存贮数控加工所需要的全部动作和刀具相对于工件位置信息的媒介物，它记载着零件的加工程序。数控机床中，常用的控制介质有穿孔带（也称数控带）、穿孔卡片、磁带和磁盘等。早期时，使用的是 8 单位（8 孔）穿孔纸带，并规定了标准信息代码 ISO（国际标准化组织制定）和 EIA（美国电子工业协会制定）两种代码。尽管穿孔纸带趋于淘汰，但是规定的标准信息代码仍然是数控程序编制、制备控制介质唯一遵守的标准。

#### 2. 数控装置

数控装置是数控机床的核心。现代数控机床都采用计算机数控装置，即 CNC（computerized numerical control）装置。它包括微型计算机的电路、各种接口电路、CRT 显示器、键盘等硬件以及相应的软件。数控装置能完成信息的输入、存储、变换、插补运算以及实现各种控制功能。它具备的主要功能如下：

- （1）多坐标控制（多轴联动）。
- （2）实现多种函数的插补（直线、圆弧、抛物线等）。
- （3）多种程序输入功能（人机对话、手动数据输入、由上级计算机及其它计算机输入设备的程序输入），以及编辑和修改功能。
- （4）信息转换功能：EIA/ISO 代码转换，英制/公制转换，坐标转换，绝对值/增量值转换，计数制转换等。
- （5）补偿功能：刀具半径补偿，刀具长度补偿，传动间隙补偿，螺距误差补偿等。
- （6）多种加工方式选择。可以实现各种加工循环，重复加工，凹凸模加工和镜像加

工等。

(7) 具有故障自诊断功能。

(8) 显示功能。用 CRT 可以显示字符、轨迹、平面图形和动态三维图形。

(9) 通讯和联网功能。

### 3. 伺服系统

伺服系统是接收数控装置的指令，驱动机床执行机构运动的驱动部件。包括主轴驱动单元（主要是速度控制）、进给驱动单元（主要有速度控制和位置控制）、主轴电机和进给电机等。一般来说，数控机床的伺服驱动系统，要求有好的快速响应性能，以及能灵敏而准确地跟踪指令功能。现在常用的是直流伺服系统和交流伺服系统，而交流伺服系统正在取代直流伺服系统。

### 4. 测量反馈装置

该装置可以包括在伺服系统中，它由检测元件和相应的电路组成，其作用是检测速度和位移，并将信息反馈回来，构成闭环控制。没有测量反馈装置的系统称为开环系统。常用的测量元件有脉冲编码器、旋转变压器、感应同步器、光栅和磁尺等。

### 5. 机床主机

主机是数控机床的主体，包括床身、主轴、进给机构等机械部件。数控机床的主机结构有下面几个特点：

(1) 由于采用了高性能的主轴及进给伺服驱动装置，数控机床的机械传动结构得到了简化，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。适应连续地自动化加工。

(3) 较多地采用高效传动件，如滚珠丝杠副直线滚动导轨等。

为了保证数控机床功能的充分发挥，还有一些配套部件（如冷却、排屑、防护、润滑、照明、储运等一系列装置）和附属设备（程编机和对刀仪等）。

## 二、数控机床的分类

目前，数控机床品种齐全，规格繁多。为了研究数控机床，可以从不同的角度和按照多种原则来进行分类。

### （一）按控制系统的特点分类

1. 点位控制数控机床 这类数控机床的数控装置只要求精确地控制一个坐标点到另一个坐标点的定位精度，而不管从一点到另一点是按照什么轨迹运动。在移动过程中不进行任何加工。为了精确定位和提高生产率，首先系统高速运行，然后进行 1~3 级减速，使之慢速趋近定位点，减小定位误差。这类数控机床主要有数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床和数控测量机等。

2. 直线控制数控机床 这类数控机床不仅要求具有准确的定位功能，而且要求从一点到另一点之间按直线运动进行切削加工。其路线一般是由和各轴线平行的直线段组成（也包括 45 度的斜线）。运动时的速度是可以控制的，对于不同的刀具和工件，可以选择不同的切削用量。这一类数控机床包括：数控车床、数控镗铣床、加工中心等。一

般情况下，这些机床有二个到三个可控轴，但同时控制轴只有一个。

3. 轮廓控制的数控机床 这类数控机床的数控装置能同时控制两个或两个以上坐标轴，具有插补功能。对位移和速度进行严格的不断的控制。具有轮廓控制功能，即可以加工曲线或者曲面零件。轮廓控制数控机床有二坐标及二坐标以上的数控铣床，可加工曲面的数控车床、加工中心等。现代数控机床绝大部分都具有两坐标或两坐标以上联动的功能。

按照联动（同时控制）轴数分，可以分为2轴联动、2.5轴联动、3轴联动、4轴联动、5轴联动等数控机床。2.5轴联动是三个主要控制轴（ $x, y, z$ ）中，任意两个轴联动，另一个是点位或直线控制。

## （二）按伺服系统的类型分类

1. 开环控制数控机床 这类数控机床没有检测反馈装置，数控装置发出的指令信号的流程是单向的，其精度主要决定于驱动元器件和电机（如步进电机）的性能。这类机床比较稳定，调试方便，适用经济型、中小型机床。

2. 闭环控制数控机床 这类机床数控装置中插补器发出的指令信号与工作台端测得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，直至差值消除时为止。采用闭环控制的数控机床（见图1.2.2，虚线部分是闭环控制的反馈信号路线）可以消除由于传动部件制造中存在的精度误差给工件加工带来的影响，从而得到很高的精度。但是，由于很多机械传动环节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量，直接影响伺服系统的调节参数。因此，闭环系统的设计和调整都有较大的难度，设计和调整得不好，很容易造成系统的不稳定。

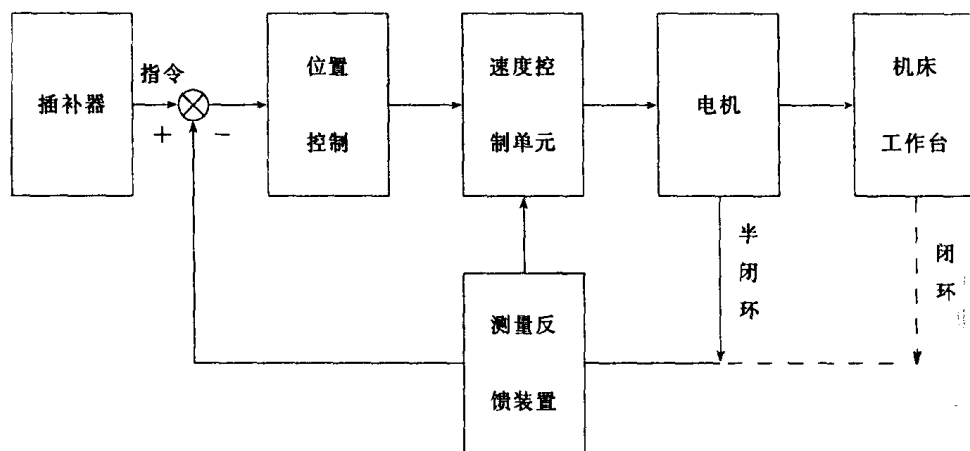


图1.2.2 闭环和半闭环

所以，闭环控制数控机床主要用于一些精度要求很高的镗铣床、超精车床、超精磨床等。

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，它的检测元件装在电机或丝杠的端头。图1.2.2中，实线部分为半闭环反馈信号路线。这种系统的闭环环路内不包括机械传动环节，因此可以获得稳定的控制特性。由于采用高分辨率的测量

元件（如脉冲编码器），又可以获得比较满意的精度与速度。

### （三）按工艺用途分类

1. 金属切削类数控机床 这类机床和传统的通用机床品种一样，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机床等。数控加工中心机床是带有自动换刀装置，在一次装卡后，可以进行多种工序加工的数控机床。

2. 金属成型类数控机床 如数控折弯机、数控弯管机、数控回转头压力机等。

3. 数控特种加工及其它类型数控机床 如数控线切割机床、数控电火花加工机床、数控激光切割机床、数控火焰切割机、数控三坐标测量机等。

（四）按照功能水平分类 可以把数控机床分为高、中、低档（经济型）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一般水平概念。数控机床水平的高低由主要技术参数、功能指标和关键部件的功能水平来决定。下述几个方面可作为评价数控机床档次的参考条件。

1. 分辨率和进给速度 分辨率为  $10\mu\text{m}$ ，进给速度为  $8\sim 15\text{m}/\text{min}$  为低档；分辨率为  $1\mu\text{m}$ ，进给速度为  $15\sim 24\text{m}/\text{min}$  为中档；分辨率为  $0.1\mu\text{m}$ ，进给速度为  $15\sim 100\text{m}/\text{min}$  为高档。

2. 多坐标联动功能 低档数控机床最多联动轴数为  $2\sim 3$  轴，中、高档则为  $3\sim 5$  轴以上。

3. 显示功能 低档数控一般只有简单的数码管显示或简单的 CRT 字符显示（Cathode Ray Tube 阴极射线管）。中档数控有较齐全的 CRT 显示，不仅有字符，而且还有图形，人机对话、自诊断等功能。高档数控还有三维动态图形显示。

4. 通讯功能 低档数控无通讯功能。中档数控有 RS232 或 DNC（direct numerical control 直接数控，也称群控）接口。高档数控有 MAP（manufacturing automatiom protocol 制造自动化协议）等高性能通讯接口，具有联网功能。

5. 主 CPU（central processing unit 中央处理单元） 低档数控一般采用 8 位 CPU，中、高档数控已经由 16 位 CPU 发展到 32 位、64 位 CPU，并用具有精简指令集的 RISC 中央处理单元。

此外，进给伺服水平以及 PC（programable controller 可编程控制器）功能也是衡量数控档次的标准。

经济型数控是相对于标准数控而言，在不同时期、不同国家含义是不一样的。根据实际机床的使用要求，合理地简化系统，降低成本。区别于经济型数控，把功能比较齐全的数控系统称为全功能数控，或称为标准型数控。

## § 1.3 机床数控技术的发展

### 一、数字控制技术与数控机床的产生和发展

随着微电子技术、自动信息处理、数据处理以及电子计算机的发展，给自动化技术带来了新的概念，推动了机械制造自动化的发展。

采用数字控制技术进行机械加工的思想,最早是在 40 年代初提出的。当时,美国北密执安的一个小型飞机工业承包商帕尔森兹公司 (Parsons Corporation) 在制造飞机框架及直升飞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,使得加工精度达到较高的程度。

1952 年,美国麻省理工学院成功地研制出一套三坐标联动,利用脉冲乘法器原理的试验性数字控制系统,并把它装在一台立式铣床上,当时用的电子元器件是电子管,这就是第一代,世界上第一台数控机床。

1959 年,计算机行业研制出晶体管元器件,因而数控系统中广泛采用晶体管和印刷电路板,从而跨入第二代。1959 年 3 月,由克耐·杜列克公司 (Keaney&Trecker corp) 发明了带有自动换刀装置的数控机床,称为“加工中心”。

从 1960 年开始,其它一些工业国家,如德国、日本都陆续开发、生产及使用了数控机床。

1965 年,出现了小规模集成电路。由于它的体积小,功耗低,使数控系统的可靠性得以进一步提高,数控系统发展到第三代。

以上三代,都是采用专用控制计算机的硬逻辑数控系统,装有这类数控系统的机床为普通数控机床 (简称 NC 机床)。

1967 年,英国首先把几台数控机床联接成具有柔性的加工系统,这就是最初的 FMS (Flexible Manufacturing System 柔性制造系统)。之后美、欧、日也相继进行开发和应用。

随着计算机技术的发展,小型计算机的价格急剧下降。小型计算机开始取代专用数控计算机,数控的许多功能由软件程序实现。这样组成的数控系统称为计算机数控系统 (CNC)。1970 年,在美国芝加哥国际机床展览会上,首次展出了这种系统,称为第四代系统。

1970 年前后,美国英特尔公司开发和使用微处理器。1974 年,美、日等国首先研制出以微处理器为核心的数控系统,近 20 年来,微处理机数控系统的数控机床得到飞速发展和广泛的应用,这就是第五代数控 (MNC)。

80 年代初,国际上又出现了柔性制造单元 FMC (Flexible Manufacturing Cell)。

FMC 和 FMS 被认为是实现 CIMS (Computer Integrated Manufacturing System 计算机集成制造系统) 的必经阶段和基础。

## 二、我国数控机床发展情况

我国从 1958 年开始研究数控技术,一直到 60 年代中期处于研制、开发时期。当时,一些高等院校、科研单位研制出试验性样机,开始也是从电子管着手的。

1965 年,国内开始研制晶体管数控系统。60 年代末至 70 年代初研制成了劈锥数控铣床、数控非圆齿轮插齿机、CJK-18 晶体管数控系统及 X53K-1G 立式数控铣床。

从 70 年代开始,数控技术在车、铣、钻、镗、磨、齿轮加工、电加工等领域全面展开,数控加工中心在上海、北京研制成功。但由于电子元器件的质量和制造工艺水平差。致使数控系统的可靠性、稳定性未得到解决,因此未能广泛推广。在这一时期,数控线切割机床由于结构简单、使用方便、价格低廉,在模具加工中得到了推广。

80 年代,我国从日本发那科 (FANUC) 公司引进了 5, 7, 3 等系列的数控系统和直流伺服电机, 直流主轴电机技术, 以及从美国、德国等国引进了一些新技术。并进行了商品化生产, 这些系统可靠性高, 功能齐全。推动了我国数控机床稳定的发展, 使我国的数控机床在性能和质量上产生了一个质的飞跃。

1985 年,我国数控机床的品种有了新的发展。数控机床品种不断增多, 规格齐全。许多技术复杂的大型数控机床、重型数控机床都相继研制出来。为了跟踪国外技术的发展, 北京机床研究所研制出了 JCS-FM-1、2 型的柔性制造单元和柔性制造系统。这个时期,我国在引进、消化国外技术的基础上, 进行了大量开发工作。一些较高档次的数控系统(五轴联动)、分辨率为  $0.02\mu\text{m}$  的高精度数控系统、数字仿型数控系统, 为柔性单元配套的数控系统都开发出来了, 并造出样机。

现在,我国已经建立了以中、低档数控机床为主的产业体系。90 年代将向高档数控机床发展。

### 三、数控技术的发展水平和趋势

随着科学技术的发展, 制造技术的进步, 以及社会对产品质量和品种多样化的要求越来越强烈。中、小批量生产的比重明显增加, 要求现代数控机床成为一种高效率、高质量、高柔性和低成本的新一代制造设备。同时, 为了满足制造业向更高层次发展, 为柔性制造单元 (FMC), 柔性制造系统 (FMS), 以及计算机集成制造系统 (CIMS) 提供基础设备, 也要求数控机床向更高水平发展。这些要求主要由数字控制技术的发展来实现。数控技术体现在数控装置、伺服驱动系统、程序编制、机床主机和检测监控系统等方面。

#### (一) 数控装置

推动数控技术发展的关键因素是数控装置。由于微电子技术的发展, 当今占绝对优势的微型计算机数控系统发展非常快, 其技术发展概况如下:

1. 数控装置的微处理器已经由 8 位 CPU 过渡到 16 位和 32 位 CPU, 频率由原来的 5MHz, 提高到 16MHz, 20MHz 和 32MHz, 并且开始采用精简指令集运算芯片 RISC 作为主 CPU, 进一步提高了运算速度。采用大规模和超大规模集成电路和多个微处理器, 使结构模块化、标准化和通用化, 使其数控功能根据用户需要进行任意组合和扩展。

2. 具有强功能的内装式机床可编程控制器, 用梯形图语言, C 语言或 Pascal 语言进行编程。在 CNC 和 PC 之间有高速窗口, 它们有机地结合起来。除能完成开关量的逻辑控制外, 还有监控功能和轴控制功能等。

3. 配备多种遥控接口和智能接口。系统除配有 RS232C 串行接口, 光纤和 20mA 电流回路等外, 还有 DNC 接口。可以实现几台数控机床之间的数据通讯, 也可以直接对几台数控机床进行控制。

现代数控机床, 为了适应自动化技术的进一步发展, 适应工厂自动化规模越来越大的要求, 纷纷采用 MAP 等高级工业控制网络, 实现不同厂家和不同类型机床的联网要求。

4. 具有很好的操作性能。系统具有“友好”的人机界面, 普遍采用薄膜软按钮的操



作面板,减少指示灯和按钮数量,使操作一目了然。大量采用菜单选择操作方法,使操作越来越方便。CRT 显示技术大大提高,彩色图像显示已很普遍。不仅能显示字符,平面图形,还能显示三维动态立体图形。

5. 数控系统的可靠性大大提高。大量采用高集成度的芯片、专用芯片及混合式集成电路,提高了硬件质量,减少了元器件数量。这样降低了功耗,提高了可靠性。新型大规模集成电路,采用了表面安装技术(SMT),实现了三维高密度安装工艺。元器件经过严格筛选,建立由设计、试制到生产的一整套质量保证体系,使得数控装置的平均无故障时间  $MTBF=10\ 000\sim 36\ 000$  小时。

## (二) 伺服驱动系统

伺服系统是数控机床的重要组成部分。与数控装置相配合,伺服系统的静态和动态特性直接影响机床的定位精度、加工精度和位移速度。现在,直流伺服系统被交流数字伺服系统代替。伺服电机的位置、速度及电流环都实现了数字化。并采用了新的控制理论,实现了不受机械负荷变动影响的高速响应系统。其发展的技术如下:

1. 前馈控制技术。过去的伺服系统,是把检测器信号与位置指令的差值乘以位置环增益作为速度指令。这种控制方式总是存在着追踪滞后误差,这使得在拐角加工及圆弧加工时精度恶化。所谓前馈控制就是在原来的控制系统上加上速度指令的控制,这样使追踪滞后误差大大减小。

2. 机械静止摩擦的非线性控制技术。对于一些具有较大静止摩擦的数控机床,新型的数字伺服系统具有补偿机床驱动系统静摩擦的非线性控制功能。

3. 伺服系统的位置环和速度环,均采用软件控制。为适应不同类型的机床,不同精度和不同速度的要求,预先调整加、减速性能。

4. 采用高分辨率的位置检测装置。如高分辨率的脉冲编码器,内有微处理器组成的细分电路,使得分辨率大大提高。增量位置检测为  $10\ 000\text{P/r}$ ;绝对位置检测为  $1\ 000\ 000\text{P/r}$ 。

5. 补偿技术得到发展和广泛应用。现代数控机床利用 CNC 数控系统的补偿功能,对伺服系统进行了多种补偿,有轴向运动误差补偿、丝杠螺距误差补偿、齿轮间隙补偿、热补偿和空间误差补偿。

## (三) 程序编制

数控机床的零件程序编制是实现数控加工的主要环节。编程技术的发展有以下几方面的特点:

1. 脱机编程发展到在线编程。传统的编程是脱机进行的。由手工、电子计算机以及专用编程机来完成,然后再输入给数控装置。现代的 CNC 装置有很强的存储和运算能力,把很多自动编程机具有的功能,植入到数控装置里,使零件的程序编制工作可以在数控系统上在线进行,实现了人机对话。在手工操作键和彩色显示器配合下,实现程序输入、编辑、修改、删除。数控系统具有了前台操作、后台编辑的前后台功能。

2. 具有机械加工技术中的特殊工艺方法和组合工艺方法的程序编制功能。除了具有圆切削、固定循环和图形循环外,还有宏程序设计功能、会话式自动编程、蓝图编程和实物编程功能。