

# 实用 数控技术

SHIYONG SHUKONG JISHU

樊军庆 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 实用数控技术

主 编 樊军庆  
副主编 张宝珍 张小芹



机械工业出版社

本书可作为高等学校机械工程及其自动化（机械设计制造及其自动化）专业教材。本书以现代数控机床为基础，从理论和实践两方面全面系统地讲述了现代数控机床的基本原理与控制技术。全书共分8部分，在绪论中介绍了数控机床的组成、特点、分类及其产生和发展过程，第1~6章围绕数控机床的各个组成部分，介绍数控机床加工工艺及编程技术、数控机床的机械结构、计算机数控（CNC）装置、数控检测装置、数控伺服系统及计算机数控中的可编程序控制器（PLC），第7章介绍数控技术的发展趋势。

本书内容清晰，结构紧凑，实用性强，可作为高等学校机械工程及其自动化（机械设计制造及其自动化）专业的教材，也可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校相关专业的教材，还可供研究单位、工厂的技术人员作为参考用书。

## 图书在版编目（CIP）数据

实用数控技术/樊军庆主编. —北京：机械工业出版社，2009.4  
ISBN 978-7-111-26521-4

I. 实… II. 樊… III. 数控机床 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字（2009）第033865号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：吉玲 责任编辑：闫洪庆

版式设计：霍永明 责任校对：陈立辉

封面设计：马精明 责任印制：乔宇

北京京丰印刷厂印刷

2009年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·22.75印张·565千字

0 001—3 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-26521-4

定价：39.80元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：（010）68326294

购书热线电话：（010）88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：（010）88379768

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书可作为高等学校机械工程及其自动化（机械设计制造及其自动化）专业教材。

数控技术是现代制造技术的基础，现已被世界各国列为优先发展的关键工业技术，成为当代国际间科技竞争的重点。数控技术对现代制造业有着极为重大的影响。现代数控技术是综合运用了计算机、自动控制、电气传动、精密测量、机械制造等多门技术而发展起来的，它是自动化机械系统、机器人、柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）等高新技术的基础，同时也是21世纪机械制造业进行技术更新与改造、向机电一体化方向发展的主要途径和重要手段。

全书结构严谨，内容取材新颖，注重系统性与实用性相结合。在编写中力求反映目前大中企业中普遍应用的数控技术，注重工程实践能力的培养，并对数控机床的基础知识、核心技术和最新成果给予全面的阐述。全书共分8部分，在绪论中介绍了数控机床的组成、特点、分类及其产生和发展过程；第1章数控加工工艺与编程中介绍了数控编程基础知识，对数控车削、数控铣削及加工中心的加工工艺进行了讲述，并结合实例介绍了其编程技术，还介绍了自动编程技术；第2章数控机床的机械结构中主要介绍数控机床的机械结构，对数控机床机械结构的各组成部分：主传动系统、进给传动系统、基础支撑件（导轨）、辅助装置（自动换刀装置、回转工作台）等结构原理进行讲述；第3章计算机数控（CNC）装置中主要介绍了数控装置的软硬件结构、接口电路、插补原理及CNC装置的刀具补偿；第4章数控检测装置中主要介绍数控机床伺服系统中常用的几种检测装置，并对每种检测装置的结构、工作原理及应用进行了介绍；第5章数控伺服系统中介绍数控机床对伺服系统的要求及伺服系统的分类、各种伺服电动机的结构及其调速原理，并介绍速度控制环及位置控制环的组成及工作原理；第6章数控系统中的PLC主要介绍可编程序控制器（PLC）的工作原理及其在数控系统中的应用；第7章数控机床及数控技术的发展趋势介绍数控机床的发展展望以及数控技术向柔性制造系统（FMS）、直接数字控制（DNC）和计算机集成制造系统（CIMS）几个方向的发展趋势。

本书由海南大学樊军庆任主编并统稿，海南大学张宝珍和河北科技师范学院张小芹任副主编。参加本书编写的老师有河北科技师范学院伦翠芬、樊华（绪论），张小芹、孙磊（第1章），宜宾职业技术学院张信禹（第2章部分内容），海南大学张宝珍（第3章），樊军庆（第4章、第5章、第2章部分内容），朱冬云（第6章、第7章）。

本书由内蒙古农业大学杨晓晴博士任主审，参加审稿的老师还有云南大学赵越、天津科技大学呼英俊，审稿人对本书提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢！

由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

# 目 录

|                       |     |  |
|-----------------------|-----|--|
| 前言                    |     |  |
| 绪论                    | 1   |  |
| 0.1 数控机床              | 1   |  |
| 0.2 数控机床的分类           | 5   |  |
| 0.3 数控机床的产生和发展        | 9   |  |
| 复习题                   | 14  |  |
| 第1章 数控加工工艺与编程         | 15  |  |
| 1.1 数控编程基础            | 15  |  |
| 1.2 数控车削加工工艺与编程       | 23  |  |
| 1.3 数控铣削加工工艺与编程       | 61  |  |
| 1.4 自动编程              | 112 |  |
| 1.5 MasterCAM X2 自动编程 | 116 |  |
| 复习题                   | 153 |  |
| 第2章 数控机床的机械结构         | 155 |  |
| 2.1 概述                | 155 |  |
| 2.2 数控机床的总体布局         | 158 |  |
| 2.3 数控机床的主传动系统        | 164 |  |
| 2.4 数控机床的进给传动系统       | 172 |  |
| 2.5 数控机床的导轨           | 182 |  |
| 2.6 数控机床的自动换刀装置       | 187 |  |
| 2.7 数控机床的回转工作台        | 199 |  |
| 复习题                   | 204 |  |
| 第3章 计算机数控 (CNC) 装置    | 205 |  |
| 3.1 概述                | 205 |  |
| 3.2 CNC 装置的硬件结构       | 209 |  |
| 3.3 CNC 装置的软件结构       | 214 |  |
| 3.4 CNC 装置的插补原理       | 216 |  |
| 3.5 CNC 装置的刀具补偿与加减速控制 | 234 |  |
| 3.6 CNC 系统的接口电路       | 243 |  |
| 复习题                   | 246 |  |
| 第4章 数控检测装置            | 247 |  |
| 4.1 概述                | 247 |  |
| 4.2 旋转变压器             | 248 |  |
| 4.3 感应同步器             | 250 |  |
| 4.4 光栅                | 252 |  |
| 4.5 磁栅                | 255 |  |
| 4.6 光电脉冲编码器           | 257 |  |
| 4.7 编码器               | 259 |  |
| 4.8 霍尔检测装置            | 267 |  |
| 复习题                   | 268 |  |
| 第5章 数控伺服系统            | 269 |  |
| 5.1 概述                | 269 |  |
| 5.2 伺服电动机             | 274 |  |
| 5.3 速度控制              | 289 |  |
| 5.4 位置控制              | 309 |  |
| 复习题                   | 311 |  |
| 第6章 数控系统中的 PLC        | 313 |  |
| 6.1 概述                | 313 |  |
| 6.2 PLC 基本结构和工作过程     | 315 |  |
| 6.3 PLC 在数控机床上的应用     | 318 |  |
| 6.4 PLC 在数控机床控制中的应用   | 334 |  |
| 复习题                   | 341 |  |
| 第7章 数控机床及数控技术的发展趋势    | 342 |  |
| 7.1 数控机床的发展展望         | 342 |  |
| 7.2 柔性制造系统 (FMS)      | 345 |  |
| 7.3 直接数字控制 (DNC)      | 349 |  |
| 7.4 计算机集成制造系统 (CIMS)  | 355 |  |
| 复习题                   | 359 |  |
| 参考文献                  | 360 |  |

# 绪 论

## 0.1 数控机床

### 0.1.1 数控技术与数控机床

数控是数字控制（Numerical Control）的简称，是近代发展起来的用数字化信息进行控制的自动控制技术。在机床领域是指用数字化信号对机床运动及其加工过程进行控制的一种方法。定义中的“机床”不仅指金属切削机床，还包括其他各类机床，如线切割机床、三坐标测量机等。为了说明方便，本书仍以金属切削机床为例来介绍数控技术，所有内容均适用于其他机床。

采用数字控制技术的控制系统称为数控系统，装备了数控系统的机床称为“数控机床”或“NC 机床”。以前数控机床的数控功能是用专用计算机的硬件结构来实现，所以称为硬件数控，简称 NC。现在主要以计算机的系统控制程序来实现部分或全部数控功能，所以称为软件数控或计算机数控，简称 CNC。国际信息处理联盟第五技术委员会对数控机床作了如下定义：数控机床是一个装有程序控制系统的机床，该系统能够逻辑地处理具有控制编码或其他符号指令规定的程序，并将其译码，从而使机床动作并加工零件。

### 0.1.2 数控机床的组成

在讲述数控机床组成之前，先了解一下数控机床加工过程。

数控机床在加工零件时，首先由编程人员按照零件的几何形状和加工工艺要求将加工过程编成加工程序，然后将数控程序输入到数控系统，数控系统读入加工程序后，将其翻译成机器能够理解的控制指令，再由伺服系统将其转换和放大后驱动机床上的主轴电动机和进给伺服电动机转动，并带动机床的工作台移动，从而加工出形状、尺寸与精度符合要求的零件，实现加工过程。从图 0-1 看，数控机床实质上是完成了手工加工中操作者的部分工作。

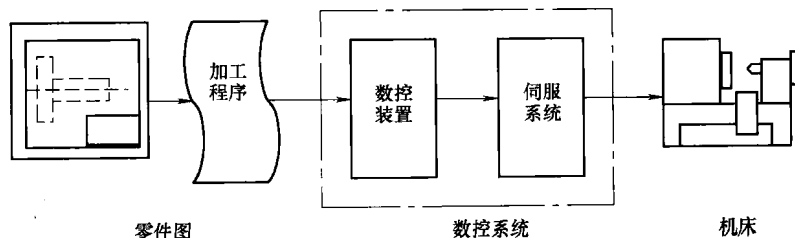


图 0-1 数控机床加工过程

现在都采用微型计算机作为控制系统，图 0-2 是数控机床的组成框图。数控机床一般由输入/输出设备、数控装置、主轴和进给伺服单元、位置检测装置、PLC 及其接口电路和机床本体等几部分组成。图中除机床本体以外的部分构成了数控系统，其中数控装置是其核心部分。

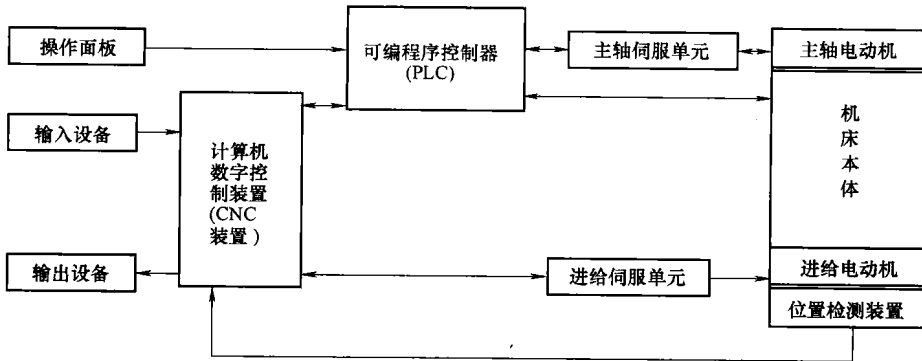


图 0-2 数控机床组成框图

### 1. 输入/输出装置

数控机床在进行加工前，必须接受由操作人员输入的零件加工程序，然后才能根据输入的程序进行加工。在加工过程中，操作人员要向机床数控装置输入操作命令，数控装置要为操作人员显示必要的信息，如坐标值、报警信号等。此外，输入的程序并非全部正确，有时需要编辑、修改和调试。以上工作都是机床数控系统和操作人员信息交换的过程，要进行信息交换必须具备输入/输出装置。数控程序的输入可采用以下几种方式：

#### (1) 控制介质输入

主要有两种输入方式：一种方式是通过纸带输入，即在特制的纸带上穿孔，用孔的不同位置的组合构成不同的数控代码，通过纸带阅读机将指令输入。穿孔纸带使用 ISO（国际标准化组织）和 EIA（美国电子工业协会）制定的两种标准信息代码，现在的数控系统两种代码都可以识别应用。另一种方式是对配置有计算机软盘驱动器的数控机床，可以将存储在磁盘上的程序通过软驱输入系统。尽管穿孔纸带已逐渐被淘汰，但是规定的标准信息代码仍然是数控程序编制、制备控制介质所遵守的标准。

#### (2) 手动输入

操作者可以利用机床上的显示屏及键盘输入加工程序指令，控制机床的运动。一种是手动数据输入（MDI），它适用于一些比较短的程序，只能使用一次，机床动作后程序就消失。当给定对刀时的主轴转速、一般手动进行简单加工时的自动换刀等场合常使用这种方式。另一种是在控制装置的编辑（EDIT）状态下，用键盘输入加工程序，存入控制装置的内存中。用这种方式可以对程序进行编辑，程序可重复使用。一般手工编制的程序采用这种方式。此外，在具有会话编辑功能的数控装置上，可以按照显示屏上提出的问题，选择不同的菜单，只需将图样上指定的有关尺寸数字等输入，就可自动生成加工程序。这种输入方式虽然是手动输入，但应属于自动编程方式。

输出设备主要的功能为显示、打印、输出加工程序、控制参数、补偿参数等。

现代的数控系统除采用输入输出设备进行信息交换外，一般都具有用通信方式进行信息

交换的能力，它们是实现 CAD/CAM 的集成、FMS 和 CIMS 的基本技术。采用的方式有：串行通信（RS232 等串口）、自动控制专用接口和规范 [直接数字控制（DNC）方式、MAP 协议等]、网络技术（Internet、LAN 等）。

## 2. 数控装置

数控装置是由 CPU、存储器、总线、功能部件和相应软件组成的专用计算机。其基本功能是根据输入的零件加工程序进行相应的处理（如运动轨迹处理、机床输入输出处理等），然后输出控制命令到相应的执行部件（伺服单元、驱动装置和 PLC 等），所有这些工作是由 CNC 装置内硬件和软件协调配合，合理组织，使整个系统有条不紊地进行工作的。CNC 装置是 CNC 系统的核心，其工作原理将在以后的章节中详细介绍。

## 3. 伺服系统

伺服系统包括主轴伺服单元和进给伺服系统两部分，伺服系统由伺服放大器和伺服电动机组成。主轴伺服单元主要接收来自 PLC 的转向和转速指令，驱动主轴电动机转动。进给伺服系统的作用，是把来自数控装置的位置控制移动指令转变成机床工作部件的运动，使工作台按规定轨迹移动或精确定位，加工出符合图样要求的工件，即把数控装置送来的微弱指令信号，放大成能驱动伺服电动机的大功率信号。

在数控机床的进给伺服驱动机构中，常用的驱动元件有步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机，后两者都带有感应同步器、编码器等位置检测元件。

## 4. 位置检测装置

位置检测装置将机床移动的实际位置、速度参数检测出来，转换成电信号，并反馈到 CNC 装置中，使 CNC 能随时判断机床的实际位置、速度是否与指令一致，并发出相应指令，纠正所产生的误差。对于一个设计完善的闭环数控系统，其定位精度和加工精度主要由位置检测装置的精度决定。

## 5. 可编程序控制器

PLC 控制辅助装置完成机床的相应开关动作，如工件的装夹、刀具的更换、切削液的开关等。即用 PLC 程序替代继电器控制电路，实现数控设备的辅助功能、主轴转速功能、刀具功能的译码和控制。

数控机床用 PLC 有内装型和独立型两种。内装型 PLC 从属于 CNC 装置，PLC 硬件电路可与 CNC 装置其他电路制作在同一块印制板上，也可以做成独立的电路板。独立型 PLC 独立于 CNC 装置，本身具有完备的硬、软件功能，可以独立完成所规定的控制任务。

## 6. 机床本体

数控机床的机械部件包括：主运动部件（如主轴部件、变速箱等）、进给运动执行部件（如工作台、床鞍等）和支承部件（如床身、立柱等），此外，还有冷却、润滑、排屑、转位和夹紧等辅助装置。对于加工中心类的数控机床，还有自动换刀装置、自动交换工作台装置等部件。

数控机床是高精度和高生产率的自动化加工机床，机械部件的组成与普通机床相似，但其传动结构要求更为简单，在精度、刚度、抗振性、耐磨性、耐热性等方面要求更高，而且其传动和变速系统要便于实现自动数控加工的特点及应用。要求相对运动面的摩擦系数要小，进给传动部分之间的间隙要小。所以其设计要求比通用机床更严格，加工制造要求更精密，并采用加强刚性、减小热变形、提高精度的设计措施。



### 0.1.3 数控机床加工特点

数控机床是典型的机电一体化产品，是一种高效能自动加工机床。与普通机床相比具有如下优点：

#### 1. 柔性好

所谓的柔性即适应性，是指数控机床随生产对象变化而变化的适应能力。数控系统取代了通用机床的手工操作，具有充分的柔性，只要重新编制零件程序，更换相应工装，就能加工出新的零件。因而用数控机床生产，准备周期短，灵活性强，特别适合小批量、单件零件的加工，有利于产品的升级和新产品的试制。

#### 2. 零件加工精度高，加工质量稳定

数控机床有较高的加工精度，而且数控机床的加工精度不受零件形状复杂程度的影响。这对于一些用普通机床难以保证精度甚至无法加工的复杂零件来说是非常重要的。另外，数控机床是按预先编制好的加工程序进行工作的，加工过程中无需人的参与与调整，消除了操作者的人为误差，提高了同批零件加工的一致性，使产品加工质量稳定。另外，数控机床可以通过在线自动补偿（实时补偿）技术消除或减少热变形、力变形和刀具磨损的影响，使加工精度的一致性得到了保证。

#### 3. 可加工复杂形状的零件

数控机床可以完成普通机床难以完成或根本不能加工的复杂零件的加工，如二维轮廓或三维轮廓加工，因此在宇航、造船、模具等加工业中得到广泛应用。

#### 4. 生产率高

数控机床的加工效率一般比普通机床高2~3倍，尤其在加工复杂零件时，生产率可提高到普通机床的十几倍甚至几十倍。一方面是其自动化程度高，具有自动换刀和其他辅助操作自动化功能，而且工序集中，在一次安装中能完成较多表面的加工。另一方面数控加工可以采用较大的切削用量，有效地减少了加工切削时间。

#### 5. 易于建立计算机通信网络

由于数控机床是使用数字信息的，易于与计算机辅助设计和制造系统连接，形成与计算机辅助设计和制造紧密结合的一体化系统。数控机床还可以与远程网络进行调度和控制，进行异地管理。

当然数控机床在某些方面也有不足之处：

1. 数控机床价格较贵，设备初期投资大，加工成本高；
2. 技术复杂，增加了电子设备的维护成本，维修困难；
3. 对工艺和编程要求较高，加工中难以调整，对操作人员的技术水平要求较高。

由于数控机床的上述特点，数控机床最适合加工以下零件：

1. 几何形状复杂的零件，特别是形状复杂、加工精度要求高或用数学方法定义的复杂曲线、曲面轮廓；
2. 多品种、小批量生产的零件，用通用机床加工时，要求设计制造复杂的专用工装或需很长调整时间；
3. 必须严格控制公差的零件；
4. 贵重的、不允许报废的关键零件。

当对以上零件采用数控加工时，才能最大限度地发挥出数控加工的优势。

### 0.1.4 数控机床的主要性能指标

数控装置的性能指标反映了数控系统的基本性能，是选择数控系统的主要依据，概括起来如下：

#### 1. 精度指标

**分辨率（脉冲当量）：**反映了数控装置的运动控制精度，表示数控装置每发一个控制脉冲，机床的移动部件所移动的距离，即机床坐标轴可以达到的控制精度。

**定位精度：**指实际位置与指令位置的一致程度，定位误差指系统稳定以后实际位置和指令位置之差。

**重复定位精度：**指在相同的条件下，操作方法不变，进行规定次数的操作所得到的实际位置的一致程度，其最大不一致量称为重复定位误差。

#### 2. 可控轴数与联动轴数

可控轴数说明数控装置最多可以控制多少个坐标轴，其中包括移动坐标轴和回转坐标轴。通常用 X、Y、Z 表示三个互相垂直的移动坐标轴，A、B、C 分别表示绕 X、Y、Z 回转的坐标轴。联动轴数表示数控装置可按一定规律同时控制其运动的坐标轴数，联动轴数和坐标轴数是不同的概念，联动轴数越多，说明数控装置加工复杂空间曲面的能力越强。

#### 3. 运动性能指标

**行程：**表示数控装置的控制范围和加工范围，例如  $\pm 9999.999$  表示数控装置的控制范围为  $-9999.999 \sim 9999.999\text{mm}$ ，行程的大小反映了机床的加工能力。

**主轴转速：**以每分钟转数的形式给定，是影响零件表面加工质量、生产率、刀具寿命的主要因素。机床面板上设有主轴转速倍率旋钮，可以在不改变程序的情况下调节主轴转速。

**进给速度：**刀具的进给速度以每分钟或每转的进给距离的形式给定。其中最大进给速度表示数控装置在给定的定位精度下所能达到的最大进给速度，最高快移速度指进给轴在非加工状态下的最高移动速度。和主轴转速一样，进给速度可以用机床控制面板上倍率旋钮在一定范围内调节。进给速度也是影响零件表面加工质量、生产率、刀具寿命的主要因素。

## 0.2 数控机床的分类

目前，数控机床的品种齐全，规格繁多。为了研究方便起见，可以从不同的角度对数控机床进行分类，常见的有以下几种分类方法：

### 0.2.1 按工艺用途分类

按加工方式的不同，数控机床可分为以下几类：

#### 1. 金属切削类机床

包括数控车床、数控钻床、数控铣床、数控磨床、数控镗床及加工中心。

加工中心是带有刀库及自动换刀装置的数控机床，它可以在一台机床上实现多种加工。工件一次装夹，可完成多种加工，既节省辅助工时，又提高加工精度。加工中心特别适用于箱体、壳体的加工。车削加工中心可以完成所有回转体零件的加工。

## 2. 金属成形类机床

这类机床包括数控折弯机、数控组合冲床、数控弯管机、数控回转头压力机等。

## 3. 特种加工机床

这类机床包括数控线切割机床、数控电火花加工机床、数控火焰切割机、数控激光切割机床、专用组合机床等。

## 4. 其他类型的数控设备

非加工设备采用数控技术，如自动装配机、三坐标测量机、自动绘图机和工业机器人等。

### 0.2.2 按功能水平分类

按照数控机床的功能水平对数控机床进行分类，一般可以把数控机床分为高档、中档、低档三类。这种分类方式，在我国用的较多。低、中、高三档的界限是相对的，不同时期，划分标准也会不同。其中，中、高档一般称为全功能数控或标准型数控。在我国还有经济型数控的提法。经济型数控属于低档数控，是指由单片机和步进电动机组成的数控系统，或其他功能简单、价格低的数控系统。经济型数控主要用于车床、线切割机床以及旧机床改造等。就目前的发展水平看，可以根据以下功能指标，将各种类型的数控系统分为低、中、高档三类。

#### 1. 分辨率和进给速度

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

#### 2. 伺服进给类型

采用开环、步进电动机进给系统为低档；中高档则采用半闭环或闭环的直流伺服系统或交流伺服系统。

#### 3. 联动轴数

低档数控机床最多联动轴数为  $2 \sim 3$  轴，而中、高档则为  $3 \sim 5$  轴以上。

#### 4. 通信功能

低档数控机床一般无通信功能。中档可以有 RS 232 或 DNC (Direct Numerical Control) 接口。高档的还可以有 MAP (Manufacturing Automation Protocol) 通信接口，具有联网功能。

#### 5. 显示功能

低档的数控机床一般只有简单的数码管显示或简单的 CRT 字符显示。而中档数控机床则具有较齐全的 CRT 显示，不仅有字符显示，而且有图形显示、人机对话及自诊断等功能。高档数控机床还有三维图形显示。

#### 6. 内置 PLC

低档数控机床一般无内置 PLC，中高档都有内置 PLC。高档数控机床具有功能强大的内置 PLC，并具有轴控制的扩展功能。

#### 7. 主 CPU

低档数控一般采用 8 位 CPU，中档及高档已经逐步由 16 位 CPU 向 32 位 CPU 过渡。国外的一些新的数控系统已经选用了 64 位 CPU，并选用具有精简指令集的 RISC 中央处理单元，以提高系统的运算速度。

### 0.2.3 按机床控制的运动轨迹分类

#### 1. 点位控制数控机床

机床的运动部件只能够实现从一个位置到另一个位置的精确运动，在运动和定位过程中不进行任何加工工序。如数控钻床（见图 0-3 所示）、数控冲剪床等。

#### 2. 点位直线控制数控机床

除控制点到点的准确位置之外，还要保证两点之间移动的轨迹是直线，而且对移动的速度也要进行控制，以便适应随工艺因素变化的不同需要。

这类机床有简易数控车床、数控镗铣床，一般有 2~3 个可控坐标轴，但同时控制的坐标轴只有一个。

#### 3. 轮廓控制数控机床

这类数控机床的特点是能够对两个或两个以上运动坐标的位移及速度进行连续相关的控制，因而可进行曲线或曲面的加工，如图 0-4 所示。

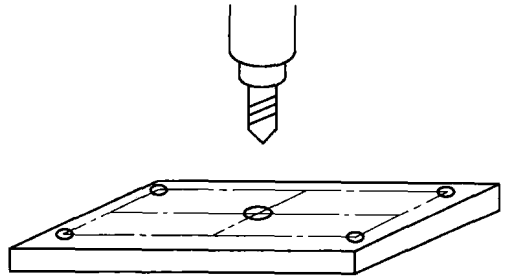


图 0-3 点位控制示意图

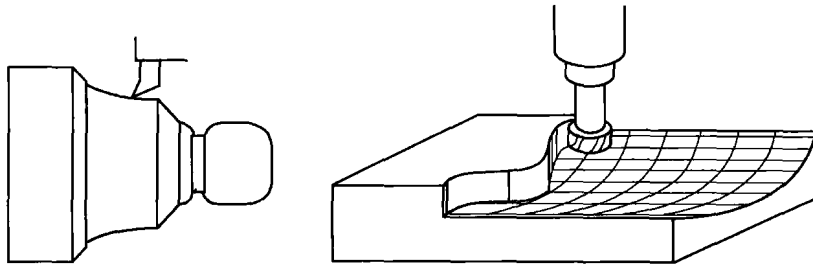


图 0-4 轮廓控制示意图

轮廓控制数控机床主要有数控车床、数控铣床、数控磨床、加工中心等。

### 0.2.4 按伺服系统的控制方式分类

#### 1. 开环控制数控机床

这类数控机床不带位置检测反馈装置。CNC 装置输出的指令脉冲经驱动电路的功率放大，驱动步进电动机转动，再经传动机构带动工作台移动。图 0-5 为开环控制系统组成框图。

开环控制的数控机床调试方便，维修简单，但控制精度低，这类数控机床多为经济型。

#### 2. 闭环控制数控机床

闭环控制数控机床的进给伺服驱动是按闭环反馈控制方式工作的，其驱动电动机可采用直流或交流两种伺服电动机，并需要配置位置反馈和速度反馈，在加工中随时检测移动部件的实际位移量，并及时反馈给数控系统中的比较器进行比较，其差值又作为伺服驱动的控制信号，进而带动位移部件以消除位移误差。按位置反馈检测元件的安装部位和所作用的反馈

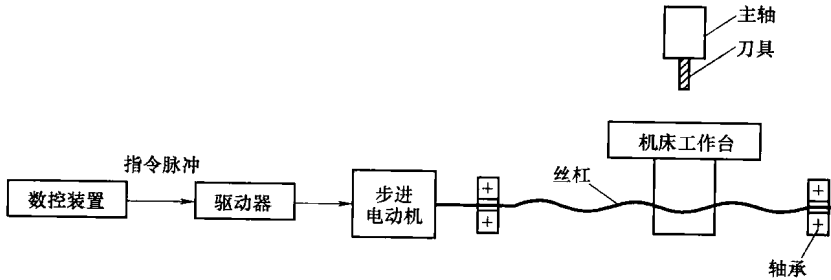


图 0-5 数控机床开环控制示意图

装置的不同，它又分为全闭环和半闭环两种控制方式。

### (1) 全闭环控制

其位置反馈装置采用直线位移检测元件（目前一般采用光栅尺），安装在机床的床鞍部位，即直接检测机床坐标的直线位移量。

该类机床数控装置中插补器发出的位置指令信号与工作台上检测到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，直至差值为零停止运动。其控制框图如图 0-6 所示。

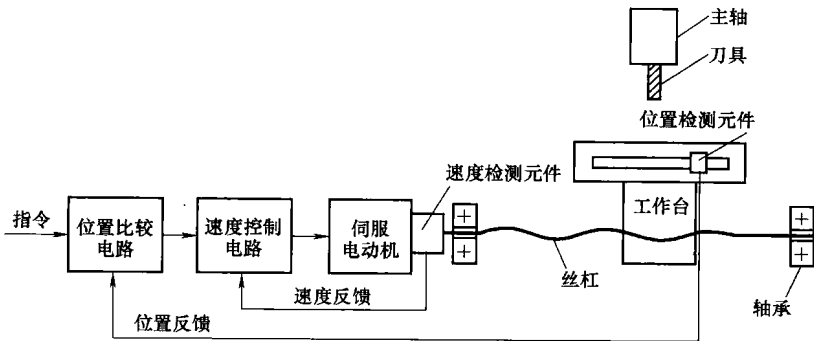


图 0-6 数控机床全闭环控制示意图

通过反馈可以消除从电动机到机床床鞍的整个机械传动链中的传动误差，得到很高的机床静态定位精度。由于在整个控制环内包含了很多机械传动环节，而许多机械传动环节的摩擦特性、刚性和间隙均为非线性，并且整个机械传动链的动态响应时间与电气响应时间相比又非常大，直接影响系统的调节参数。这为整个闭环系统的稳定性校正带来很大困难，系统的设计和调整也都相当复杂。

全闭环控制方式主要用于精度要求很高的数控坐标镗床、数控精密磨床和大型数控机床等。

### (2) 半闭环控制

其位置反馈采用转角检测元件（目前主要采用编码器等），直接安装在伺服电动机或丝杠端部，检测转角位移。其控制框图如图 0-7 所示。

由于大部分机械传动环节未包括在系统闭环环路内，因此可获得较稳定的控制特性。丝

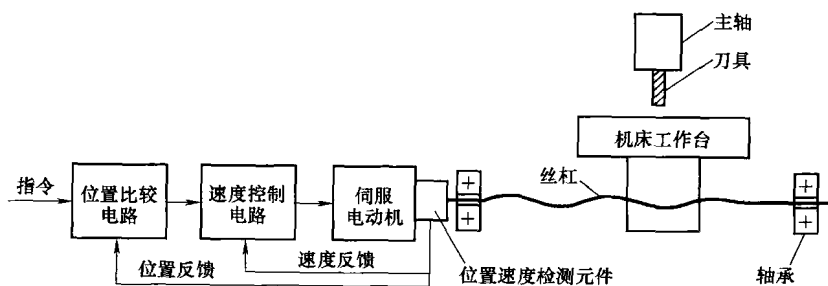


图 0-7 数控机床半闭环控制示意图

杠等机械传动误差不能通过反馈来随时校正，但是可采用软件定值补偿方法来适当提高其精度。目前，大部分数控机床采用半闭环控制方式。

## 0.3 数控机床的产生和发展

### 0.3.1 数控机床的产生和发展

数控机床是在普通机床的基础上发展起来的，军事工业需求是数控机床发展的原始动力，军事工业的发展不断促进数控机床升级，而民用工业对高精度、高效率、柔性化及批量生产的要求，随着市场竞争的加剧，对数控机床的产业化要求更加迫切。这是数控机床产生和发展的内在动力。电子技术和计算机技术的飞速发展则为数控机床的进步提供了坚实的技术基础，数控技术正是在这种背景下诞生和发展起来的。

促进数控技术发展的动力是第二次世界大战后的军备竞赛。1948年，美国帕森（Parsons）公司在研制加工直升机螺旋桨叶片轮廓用检查样板的机床时，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，于是首先提出计算机控制机床的设计。1949年在麻省理工学院（MIT）伺服机构研究室的协助下开始数控机床的研究，于1952年研制成功了世界上第一台三坐标直线插补且连续控制的立式数控铣床。这是第一代数控系统，即电子管时代，它的控制装置由大约2000个电子管组成，体积约有一间普通实验室那么大。尽管现在看来这套控制系统体积庞大、功能简单，但它在制造技术的发展史上却有着划时代的意义。从那时起，随着自动控制技术、微电子技术、计算机技术、精密测量技术及机械制造技术的发展，数控机床得到了迅速发展，不断地更新换代。

1959年，晶体管器件的出现使电子设备的体积大大减小，数控系统中广泛采用晶体管和印制电路板，数控技术的发展进入第二代——晶体管时代。1959年，美国克耐·杜利克公司（Keaney & Trecker）首次成功开发了带有自动换刀装置的数控机床，称为“加工中心”（Machining Center）。从1960年开始，数控技术进入实用阶段，工业发达国家如美国、德国、日本等开始开发、生产和使用数控机床。

1965年，出现了小规模集成电路。由于其体积小，功耗低，使数控系统可靠性得到进一步提高，数控系统从而发展到第三代——集成电路时代。

以上三代数控机床的控制系统，所有功能都是靠硬件实现的，是数控系统发展的第一阶段，称之为普通数控系统（NC）。

1970 年小型计算机开始用于数控系统，人们称之为第四代，数控系统的发展进入第二阶段，即计算机数字控制（CNC）阶段，数控系统主要是由计算机硬件和软件组成，其突出特点是许多数控功能可以由软件来实现，系统变得灵活、通用性好。

从 1974 年微处理器开始用于数控系统，数控系统发展到第五代，即微型机数控（MNC）系统。

自 20 世纪 70 年代末到 80 年代，数控技术在全世界得到了大规模的发展和应用。从 20 世纪 90 年代开始，PC 的发展日新月异，基于个人计算机（PC）平台的数控系统（称为 PC 数控系统）应运而生，数控系统的发展进入第六代。现在市场上流行和企业普遍使用的仍然是第五代数控系统，其典型代表是日本的 FANUC-0 系列和德国的 SINUMERIK810 系列数控系统。

### 0.3.2 我国数控机床的发展概况

我国的数控机床行业起步于 1958 年，由清华大学和北京第一机床厂合作研制了我国第一台数控铣床。1966 年研制成功晶体管并用于数控系统，1972 年研制成功集成电路数控系统，并出现了线切割机、数控铣床等代表性产品。但由于历史的原因，一直没有取得实质性成果。数控机床的品质和数量都很少，稳定性和可靠性也比较差，只在一些复杂的、特殊的零件加工中使用。

20 世纪 80 年代初，国内先后从日本、德国、美国等国引进了一些 CNC 装置及主轴、伺服系统的生产技术，并陆续投入了批量生产，这些数控系统性能比较完善，稳定性和可靠性都比较好，在数控机床上采用后，得到了用户的认可，从而结束了数控机床发展徘徊不前的局面，推动了数控机床的发展。到 20 世纪 90 年代初，国内的数控机床及数控系统的生产具有了一定的规模。2003 年开始，我国已成为全球最大的机床消费国，也是世界上最大的数控机床进口国。

从产值上看，机床行业数控化率呈现稳步攀升的态势，2005 年数控化率为 36.3%，但仍远低于同期日本（88%）、韩国（89%）、德国和美国（均为 75% 左右），同时，2004 年和 2005 年我国机床的数控化率连续两年保持在 13% 左右，远低于同期的日本（75.5%），德国和美国（均为 60%）的水平。这意味着我国数控机床的发展空间很大。近年来数控机床无论从产量、消费量还是进口量上都加快了增长速度，但进口量增长率始终大于产量增长率，国外数控产品始终对国产数控机床保持着压力。虽然增长率差额由 3.3% 减小到了 0.9%，但简单的经济型数控机床占到近 70%，高中档数控机床几乎全部依赖进口，结构矛盾依然突出。

#### 1. 国产数控机床与国际先进水平差距逐渐缩小

数控机床是当代机械制造业的主流装备，国产数控机床的发展经历了 30 年，目前已经由成长期进入了成熟期，覆盖超重型机床、高精度机床、特种加工机床、锻压设备、前沿高技术机床等领域，产品种类可与日、德、意、美等国并驾齐驱。特别是在五轴联动数控机床、超重型数控机床、立式和卧式加工中心、数控车床、数控齿轮加工机床领域，部分技术已经达到世界先进水平。其中，五轴（坐标）联动数控机床是数控机床技术的制高点标志

之一。它集计算机控制、高性能伺服驱动和精密加工技术于一体，应用于复杂曲面的高效、精密、自动化加工，是发电、船舶、航天航空、模具、高精精密仪器等民用工业和军工部门迫切需要的关键加工设备。五轴联动数控机床的应用，其加工效率相当于两台三轴机床，甚至可以完全省去某些大型自动化生产线的投资，大大节约了占地空间和工作在不同制造单元之间的周转运输时间及费用。国产五轴联动数控机床品种日趋增多，改变了国际强手对数控机床产业的垄断局面。

## 2. 国产数控机床存在的问题

由于国内技术水平和工业基础还比较落后，数控机床的性能、水平和可靠性与工业发达国家相比，差距还是很大，尤其是数控系统的控制可靠性还较差，数控产业尚未真正形成，核心技术严重缺乏。统计数据表明，数控机床的核心技术——数控系统，包括显示器、伺服控制器、伺服电动机和各种开关、传感器，90%需要从国外进口。如在上海设厂的德国吉特迈集团和意大利利雅路机床集团，在烟台建厂的韩国大宇综合机械株式会社，所有的核心技术都被外方掌握。国内能做的中、高端数控机床，更多处于组装和制造环节，普遍未掌握核心技术。国产数控机床的关键零部件和关键技术主要依赖进口，国内真正大而强的企业并不多。目前世界最大的3家厂商是：日本发那科、德国西门子、日本三菱；其余还有法国扭姆、西班牙凡高等。国内有华中数控、航天数控、广州数控等。国内的数控系统刚刚开始产业化，高档次的系统全都依赖进口。

数控功能部件是另外一个薄弱环节。某种意义上说，功能部件将构筑21世纪现代数控机床。功能部件的性能和价格决定了数控机床的性能和价格。功能部件不是机床附件，它是数控机床的核心代表。国产数控机床的主要故障大多出在功能部件上，它是影响国产数控机床使用的主要根源。从国产数控机床的开发和使用来看，功能部件急需技术攻关，特别是数控刀具滞后现象相当明显。国产数控刀具在寿命、可靠性等方面差距明显，无论在品种、性能和质量上都远远不能满足用户要求。由于国产刀具品种少、寿命低，严重影响了数控机床效率的发挥。

### 0.3.3 数控技术的发展趋势及研究方向

当今的数控机床已经在机械加工部门占有非常重要的地位，是柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）、自动化工厂（FA）的基本构成单元。

进入21世纪，军事技术和民用工业的发展对数控机床的要求越来越高，应用现代设计技术、测量技术、工序集约化、新一代功能部件以及软件技术，使数控机床的加工范围、动态性能、加工精度和可靠性有了极大提高。科学技术特别是信息技术的迅猛发展，高速高精控制技术、多通道开放式体系结构、多轴控制技术、智能控制技术、网络化技术、CAD/CAM与CNC的综合集成，使数控机床技术进入了智能化、网络化、敏捷制造、虚拟制造的更高阶段。

#### 1. 高速高精加工技术

高速高精度控制是数控技术发展的永恒主题。速度和精度是数控机床的两个重要指标，直接关系到加工效率和产品的质量，特别是在超高速切削、超精密加工技术的实施中，提出了更高的要求。由于机构各组件分工的专业化，在专业主轴厂的开发下，主轴高速化日益普及。过去只用于汽车工业高速化的机种（1.5万r/min以上的机种），现在已成为必备的机械产品要件。进给速度和快速进给速度已达100~240m/min。数控金切机床的加工精度已从



原来的丝级 (0.01mm) 提升到目前的微米级 (0.001mm), 有些品种已达到  $0.05\mu\text{m}$  左右。超精密数控机床的微细切削和磨削加工, 精度可稳定达到  $0.05\mu\text{m}$  左右, 形状精度可达  $0.01\mu\text{m}$  左右。采用光、电、化学等能源的特种加工精度可达到纳米级 ( $0.001\mu\text{m}$ )。通过机床结构设计优化、机床零部件的超精加工和精密装配、采用高精度的全闭环控制及温度、振动等动态误差补偿技术, 提高机床加工的几何精度, 降低形位误差、表面粗糙度等, 从而进入亚微米、纳米级超精加工时代。

## 2. 复合加工

随着数控机床技术的进步, 复合加工技术日趋成熟, 复合加工的精度和效率大大提高。“一台机床就是一个加工厂”、“一次装卡, 完全加工”等理念正在被更多人接受, 复合加工机床发展正呈现多样化的态势。

多功能复合加工数控机床简称复合机床, 或称为多功能加工或完全加工机床。复合机床的含义是在一台机床上实现或尽可能完成从毛坯至成品的全部加工。如在一台机床上可以进行车加工、铣加工等, 比如, 一个圆柱体要进行圆柱表面的车削, 还要求在圆柱面上铣沟槽, 这些加工都要求在同一台数控机床床上完成, 这样就能大大提高生产率。从 20 世纪 70 年代以来, 出现了以旋转刀具做主切削运动的主要用于镗铣加工的加工中心和以工件旋转做主运动的主要用于车加工的车削中心, 这两类多功能的数控机床在推进数控机床的工序集中的工艺方法上发挥了重要的作用。但对于较复杂的零件, 它的功能范围尚不足以完成从毛坯至成品的全部工序加工, 因而还不能充分提高在单件和中小批量生产条件下的生产率, 且由于工件在多台机床间的转移增加了安装误差, 也不利于加工精度的稳定性。

为此, 加快复合数控机床的发展步伐, 提高工序的集中度, 使加工过程链集约化, 可以提高多品种单件和中小批量加工的工效。复合数控机床可以减少在不同数控机床间进行工序的转换而引起的待工以及多次上下料等时间。通常这些时间占零件整个生产周期的 40% ~ 60%, 即使在信息管理良好的情况下, 仍将占 20% 左右。因此, 复合数控机床具有明显的技术效果。

## 3. 可靠性

数控机床的故障率一直是影响数控机床品质的一个重要问题。尤其是用于批量生产的自动生产线上, 对数控机床的可靠性更为重视, 通常用平均无故障时间 (以 MTBF 表示) 的长短来衡量它的可靠性。

数控机床与传统机床相比, 由于增加了数控系统、伺服控制单元以及自动化功能部件和相应的监控装置等, 应用了大量的电气、液压、气动元件和机电装置。由于元器件和装置数量的增多, 易于导致失效概率的增大。

因此, 为了保证数控机床有高的可靠性, 设计时不仅要考虑其功能和力学特性, 还要进行可靠性设计, 根据可靠性要求合理分配各组成件的可靠性指标, 在配套件采购和制造过程中重视质量要求, 加强全面质量管理以求可靠性的不断提高。

## 4. 智能化、开放式、网络化成为当代数控系统发展的主要趋势

### (1) 智能化

由于数控加工过程是一个具有多变量控制和加工工艺综合作用的复杂过程, 包含诸如加工尺寸、形状、振动、噪声、温度和热变形等各种变化因素, 为实现加工过程的多目标优化, 数控机床应根据切削条件的变化, 基于多信息融合下的重构优化、智能决策, 实时动态调节工