

●●普通高等教育规划教材

# 机床数控技术

胡占齐 杨莉 编

59-43

机械工业出版社  
China Machine Press

117

TG659-43  
H53

普通高等教育规划教材

# 机床数控技术

胡占齐 杨 莉 编著



机械工业出版社

本书详细地介绍了数控系统的组成、插补原理、刀具补偿原理、伺服系统的工作原理以及常用的数控加工编程方法。书中包含了作者在数控系统的开发和应用方面所做的工作,在图形编程、数控装置硬件和开放式数控系统方面具有特色。

本书可作为大专院校机械类专业的教材和教学参考书,也可供从事数控系统选型、开发和应用的工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机床数控技术/胡占齐,杨莉编著. --北京:机械工业出版社,2002.2

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-09699-1

I. 机… II. ①胡…②杨… III. 数控机床-高等学校-教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 092667 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:贡克勤 版式设计:张世琴 责任校对:姚培新

封面设计:鞠杨 责任印制:郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002年2月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm<sup>1/16</sup>·11.25印张·276千字

0 001—5 000册

定价:17.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页、由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

# 前 言

数控技术是20世纪制造技术的重大成就之一,是一个综合了计算机技术、自动控制技术、检测技术和机械加工技术的交叉和综合技术领域。计算机数控技术的核心是由计算机(主要是软件)实现对加工过程中的信息进行处理和控制,实现加工过程自动化。随着微电子技术、计算机技术、传感器技术和机械加工技术的发展,从20世纪70年代以后,计算机数控技术获得了突飞猛进的发展,数控机床和其他数控装备在实际生产当中获得了越来越广泛的应用。同时,计算机数控技术的发展又极大地推动了计算机辅助设计和辅助制造(CAD/CAM)、柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造技术(CIMS)的发展,成为先进制造技术的技术基础和重要组成部分。

中国的机械制造业正面临着前所未有的机遇与挑战——参与国际市场的竞争。用以数控技术为基础的先进制造技术武装机械制造业,是在这场竞争中获胜的重要条件之一。因此,在中国推广应用数控技术有着特别重要的意义。

在这样的背景下,为了适应机械类专业的主干课程“数控技术”的教学需要,我们编写了本书。书中写进了我们对数控技术的理解,也写进了我们自己所做的部分工作。

本书第一、二、四章由胡占齐编写,第三、五、六章由杨莉编写。书中用到的图形编程软件,有需要者可与作者联系。通讯地址:秦皇岛市燕山大学机械工程学院,邮编:066004。

我们向本书中所用到的参考文献的作者们表示感谢,他们的工作推动了数控技术的发展。我们希望加入到这一行列中来。

由于作者水平所限,书中难免会有疏漏之处,我们期待着读者的批评指正。

作 者

# 目 录

## 前言

<b>第一章 概述</b> .....	1	第二节 数控装置的硬件结构	102
第一节 数字控制和数控机床	1	第三节 数控软件	107
第二节 数控机床的组成与分类	5	第四节 数控装置的输入/输出接口	114
第三节 数控技术的发展	8	第五节 PLC 控制	118
复习思考题	12	复习思考题	127
<b>第二章 数控加工程序的编制</b> .....	13	<b>第五章 位置检测装置</b> .....	128
第一节 数控编程的基本知识	13	第一节 旋转变压器	129
第二节 手工编程	17	第二节 感应同步器	131
第三节 数控语言编程	41	第三节 脉冲编码器	136
第四节 图形编程	54	第四节 光栅	139
第五节 数控加工过程仿真	62	第五节 磁尺	143
复习思考题	63	复习思考题	145
<b>第三章 数控系统的加工控制原理</b> .....	64	<b>第六章 数控机床的伺服系统</b> .....	146
第一节 数控装置的工作过程	64	第一节 概述	146
第二节 插补原理	65	第二节 步进电动机及其驱动装置	149
第三节 刀具补偿原理	89	第三节 直流伺服系统	154
第四节 进给速度控制原理	95	第四节 交流伺服系统	159
复习思考题	99	第五节 机床进给伺服系统设计	166
<b>第四章 数控装置</b> .....	101	复习思考题	173
第一节 概述	101	<b>参考文献</b> .....	174

# 第一章 概 述

## 第一节 数字控制和数控机床

### 一、数控与计算机数控

数字控制 (Numerical Control, NC) 简称数控, 是指用数字化信号对机床或加工过程进行控制的技术, 包括对机床工作台运动的控制和各种开关量的控制。实现数字控制技术的设备就叫做数控系统, 装备了数控系统的机床就叫做数控机床。用数控机床加工一个零件的过程见图 1-1。

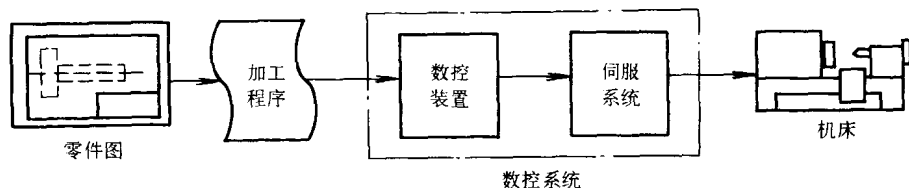


图 1-1 数控机床的加工过程

用数控机床加工工件时, 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并记录在介质上。常用的记录加工程序的介质有纸带、磁带和磁盘等。数控系统首先读入记录在介质上的加工程序, 由数控装置将其翻译成机器能够理解的控制指令, 再由伺服系统将其变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, 实现加工过程。由图 1-1 可见, 数控系统实质上是完成了手工加工中操作者的部分工作。

建立了数控技术的基本概念后, 我们发现数控装置是实现数控技术的关键。数控装置完成了数控程序的读入、解释, 并根据数控程序的要求对机床进行运动和逻辑控制。在早期的数控装置中, 所有这些工作都是由数字逻辑电路实现的, 现在我们称之为硬件数控。现代数控技术中, 数控装置的大部分工作都是由计算机系统来完成的。以计算机系统为主构成的数控装置称为计算机数控系统 (Computer Numerical Control, CNC)。CNC 装置中的数字信息处理功能主要由软件实现, 因而十分灵活, 并可以处理逻辑电路难以处理的复杂信息, 使数控装置的功能大大提高。我们现在看到的数控装置, 几乎都是计算机数控装置。

数控技术最早是被应用到金属切削机床上的, 所以说到数控技术总是和数控机床联系在一起, 其实数控技术可以用于各种机械设备。我们也可以把这里所说的机床理解成广义的, 可以是冶金机械、锻压机械、轻工机械、纺织机械等等。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, 但所有的内容都可以用于其他机器中。

### 二、数控机床的特点

和普通机床相比, 用数控机床有下列一些优点:

### 1. 适应性强

由于市场对产品的需求逐渐趋向于多样化，实现单件、小批量产品的生产自动化是制造业的当务之急。传统机床要更换产品，往往要更换许多工装，费时费力。由于数控机床的零件制造信息是记录在介质上的加工程序，所以更换被加工零件时只要改变加工程序就可以在短时间内加工出新的零件。因而用数控机床生产准备周期短，灵活性强，为多品种小批量生产和新产品的研制提供了方便条件。

### 2. 加工精度高、质量稳定

普通机床是靠人工控制切削用量，靠不断地测量来保证加工精度的，因此工件的加工精度和操作者的技术水平有很大的关系。数控机床的切削用量是由加工程序指定，并且是由数控系统自动控制机床实现的，避免了人为的经验不足和操作失误以及每一次加工过程中参数控制的不一致。因此，数控机床能够达到较高的加工精度，特别是加工精度的一致性。现代数控系统还可以利用控制软件补偿机床本身的系统误差、利用自适应控制消除各种随机误差，获得更高的加工精度。

### 3. 生产效率高、经济效益好

数控机床的主轴转速和进给量的变化范围较大，因而在每道工序中都能选用最佳的切削用量。另外，数控机床结构简单，刚性通常较大，可以使用较大的切削用量，因而获得较高的生产率。数控机床的生产率高还因为它可以减少加工过程的辅助时间。对于复杂的零件可以用计算机辅助编程软件迅速编制加工程序；数控机床加工中通常使用较简单的夹具，减少了生产准备时间和装夹时间；尤其是使用带有刀具库和自动换刀装置的加工中心时，工件往往一次装夹就能完成多道工序的加工，减少了半成品的周转时间，生产率的提高更加明显。同时由于减少了样板、靠模和钻模板等专用工装的制造，也使生产成本降低了。

### 4. 减轻操作者的劳动强度、操作简单

数控机床是由程序控制机床工作的，操作者一般只需装卸零件和更换刀具并监督机床的运行，因而大大减轻了操作者的劳动强度，减少了对熟练技术工人的需求。

### 5. 有利于生产管理的现代化

用数控机床加工零件时，能准确计算零件的加工工时，并简化了检验、工装和半成品的管理工作，这些特点都有利于生产管理的现代化。

### 6. 具有故障诊断和监控能力

CNC 系统一般具有用软件查找故障的功能，数控系统的故障可以通过诊断程序自动查找出来并显示在屏幕上，而且可以诊断出故障的种类，极大地提高了检修的效率。现代 CNC 系统还可以通过网络将数控机床的工作状态和故障信息传给远方的数控机床维修中心或生产厂家，帮助诊断一些疑难故障，在维修中心或生产厂家的指导下更快地修复数控机床。

但另一方面，数控机床在使用中也暴露出一些问题，主要有：

- 1) 造价较高，很多企业特别是小企业还无法接受；
- 2) 调试和维修比较复杂，需要专门的技术人员；
- 3) 对编程人员的技术水平要求较高。

分析这些问题，我们认为，数控机床的造价将随着数控技术的进步逐渐下降，最终会达到人们能够接受的程度。而后两个问题告诉我们，数控系统的售后服务、操作人员的培训是数控技术推广应用中的重要环节，是需要我们共同努力来解决的问题。只有真正解决了这些

问题，数控技术才能真正起到降低企业成本，提高经济效益和企业竞争能力的作用，数控技术本身才具有更广阔的发展前景。

### 三、数控装置的主要技术指标

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. 控制轴数和联动轴数

控制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  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  表示三个相互垂直的移动坐标轴， $A$ 、 $B$ 、 $C$  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的规律同时控制其运动的坐标轴数，联动轴数和控制轴数是不同的概念。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，当然编程也越复杂。

#### 2. 插补功能

插补功能表示数控装置能够按照什么样的规律协调控制多个坐标轴的运动。简单的数控装置只能实现直线和圆弧插补，高档的数控装置除直线和圆弧外还可能具有抛物线、螺旋线、样条函数等复杂曲线的插补功能。插补坐标系也从直角坐标系扩展到极坐标系、圆柱坐标系等。

#### 3. 脉冲当量（分辨率）

脉冲当量反映了数控装置的运动控制精度，有两层含义，一是表示机床坐标轴可以达到的控制精度，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，称为实际脉冲当量或外部脉冲当量；二是指数控装置内部运算的最小单位，称为内部脉冲当量。一般内部脉冲当量比实际脉冲当量要小，为的是在运算当中不损失精度。数控装置在输出运动控制量之前，自动将内部脉冲当量转换为外部脉冲当量。

#### 4. 定位精度和重复精度

定位精度指实际位置与指令位置的一致程度，定位误差是指系统稳定以后实际位置和指令位置之差；重复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，其最大不一致量为重复定位误差。

#### 5. 行程

行程表示数控装置的控制范围和加工范围，例如  $\pm 9999.999\text{mm}$  表示数控装置的控制范围为  $-9999.999\text{mm} \sim +9999.999\text{mm}$ ，控制范围的大小反映了数控装置内部数据位数的多少。

#### 6. 主轴转速和调节范围

主轴转速以每分钟转速的形式指定。机床面板上通常设有主轴转速倍率旋钮，倍率旋钮可以在不改变程序的情况下调整主轴转速，例如调节范围为  $50\% \sim 120\%$  时，可以将程序设定的转速在  $50\% \sim 120\%$  的范围内调节。具有恒线速功能的数控装置可以保证数控车床在端面切削时获得恒定的切削速度。

#### 7. 进给速度和调节范围

刀具的进给速度以每分钟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；连续  $1\text{mm}$  直线段加工速度表示连续进给  $1\text{mm}$  直线段所能达到的最大速度，它是评价数控装置实时性和高速加工能力的标志。最大快进速度表



示工作台快速进给时所能达到的最大速度。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。

#### 8. 准备功能（G 功能）

准备功能用来指示机床的动作方式，包括移动功能、程序暂停、平面选择、坐标设定、返回参考点、固定循环、公英制转换等。准备功能的数量越多，一般说明数控装置的功能越强。

#### 9. 辅助功能（M 功能）

辅助功能用来指示机床执行主轴的起停、方向变换、切削液的开关、刀库的起停等动作。它也是衡量数控装置功能的一个重要指标。M 功能有立即型和段后型两种，立即型 M 指令在程序段开始动作时立即执行，段后型指令在程序段完成时才起作用。

#### 10. 刀具的管理和补偿功能

用来选择刀具的指令，以 T 为字地址。数控装置应根据 T 指令从一定容量的刀库中选择加工时所需的刀具。现代数控装置还可以进行刀具半径补偿、长度补偿和刀具寿命管理、刀具的自动测量等。

#### 11. 零件程序的管理

零件程序管理功能反映在数控装置中可同时存储的零件加工程序的个数和可存储零件加工程序的长度。零件程序的长度有两种表示方法，一种是给出程序的字节数，如 64KB、128KB，另一种是给出可存储纸带的长度，如 120m，两种表示方法可以换算，每 1KB 程序大约可存储在 2.6m 长的纸带上。

#### 12. 零件程序结构和编辑

零件程序的结构包括程序名的位数、段序号位数、是否可以调用子程序、子程序的嵌套层数、是否允许使用用户宏程序等。数控装置提供的零件程序结构越灵活，用户用起来就越方便，编出的零件程序越简单。

零件程序的编辑指数控装置的程序输入方式，通常包括手动输入（MDI）方式、数控语言输入方式和图形输入方式，其中图形输入方式最为方便。

#### 13. 程序控制功能

数控装置通常能控制程序段的执行方式，包括程序段的跳步、机械运动屏蔽、辅助功能屏蔽、单段运行、加工仿真、示教功能等。一般地说，程序控制功能越丰富，用户使用越方便。

#### 14. 误差补偿功能

加工过程中，机械传动链中往往存在反向间隙和螺距误差，导致实际加工出的零件尺寸和程序指定的尺寸不一样，造成加工误差。现代数控装置中一般具有反向间隙补偿和螺距误差补偿功能，把误差补偿量输入数控装置的存储器中，数控装置按补偿量修正刀具的位置坐标，加工出符合要求的零件。

#### 15. 自动加减速功能

为保证伺服电动机在启动、停止或速度改变时不产生冲击、丢步、超程或振荡，必须对送到伺服电动机的进给脉冲频率或电压进行控制。在电动机启动、停止或速度大幅度变化时，控制加在伺服电动机上的进给脉冲频率或电压逐渐地变化。具有加减速控制功能的数控机床能够平稳地实现较高的进给速度。

#### 16. 开关量接口

数控装置要通过开关量接口接受来自机床的信息，辅助功能、速度功能和刀具功能的处理结果，要以 BCD 码的形式输出后，才能控制机床的动作。一般 BCD 码的位数越多，系统的功能越强。

#### 17. 机床的逻辑控制功能

现代数控装置往往具有内装型 PLC。PLC 的性能包括输入/输出点数、编程语言、指令条数、程序容量等。无内装 PLC 的数控装置，对复杂的顺序控制要借助于外部的 PLC 来完成。

#### 18. 字符/图形显示

数控装置可配置彩色显示器，通过软件接口实现字符和图形显示。显示器可显示零件加工程序、加工参数、各种补偿量、坐标位置、故障信号、零件图形、刀具轨迹等。显示的内容越丰富、清晰，用户使用越方便。

#### 19. 通信与通信协议

数控装置一般备有 RS232 接口，有的还配有 DNC 接口，并设有缓冲区，进行高速传输，高档数控装置还可以与 MAP 相连，接入工厂的通信网络，以适应 FMS、CIMS 的要求。

#### 20. 自诊断功能

数控装置中设置有各种诊断程序，在故障发生后可迅速查明故障类型和部位，以便及时排除故障，减少停机时间和防止故障的扩大。诊断程序可以镶嵌在系统程序中、也可以是服务性程序。

以上性能指标可以作为选择数控装置时参考，随着数控技术的发展，数控装置的性能指标也在不断地丰富和提高。一般来说，性能越高的数控装置，价格也越贵，所以对用户来说并不一定一味地追求高性能，而应该根据自己的实际需要，综合考虑性能和价格，作出最经济实用的选择。

## 第二节 数控机床的组成与分类

### 一、数控机床的组成

图 1-2 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。除了机床本体以外的部分统称为数控系统，数控装置是数控系统的核心。下面分别简要介绍各组成部分。

#### 1. 输入/输出设备

数控机床加工前，必须读入操作人员编好的零件加工程序，在加工过程中，要把加工状态，包括刀具的位置、各种报警信息等，告诉操作人员，以便操作人员了解机床的工作情况，及时解决加工中出现的各种问题。这就是输入输出设备的作用。最常用的

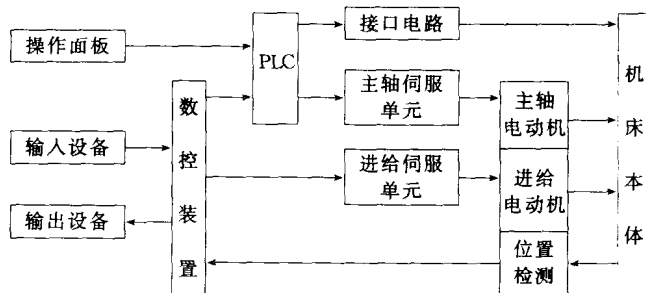


图1-2 数控机床的组成

输入设备是键盘，操作人员可以通过键盘输入、编辑和修改零件加工程序或输入控制指令。常见的输入设备还有纸带阅读机和串行输入输出接口，纸带阅读机用来读入记录在纸带上的加工程序，串行输入输出接口用来以串行通信的方式与上级计算机或其他数控机床间传递加工

程序。随着计算机技术的发展，一些计算机通用技术逐渐融入数控系统，计算机中的所有输入手段都将出现在数控系统中。

目前常见的输出设备是显示器，数控系统通过显示器为操作人员提供必要的信息，一般显示的信息包括正在编辑或运行的程序、当前的切削用量、刀具位置、各种故障信息、操作提示等。高档数控系统还可以用图形方式显示刀具的位置，看起来更加直观。简单的数控系统的显示装置可能只是几个数码管，只能显示很有限的信息。

随着计算机网络技术在数控系统中的应用，某些数控系统还可以通过局域网或 Internet 读入或输出零件加工程序或传递各种信息。

## 2. 数控装置

数控装置是数控系统的核心，数控装置由硬件和软件两大部分组成。现代数控系统普遍采用通用计算机作为数控装置的主要硬件，包括了微型机系统的基本组成部分，CPU、存储器、局部总线以及输入输出接口等；软件部分就是我们通常所说的数控系统软件。数控装置的基本功能是，读入零件加工程序，根据加工程序所指定的零件形状，计算出刀具中心的移动轨迹，并按照程序指定的进给速度，求出每个微小的时间段（插补周期）内刀具应该移动的距离，在每个时间段结束前，把下一个时间段内刀具应该移动的距离送给进给伺服单元。数控装置的工作原理将在第四章里详细介绍。

## 3. 伺服单元

伺服单元包括主轴伺服单元和进给伺服单元两部分。主轴伺服单元接收来自 PLC 的转向和转速指令，经过功率放大后驱动主轴电动机转动。进给伺服单元在每个插补周期内接受数控装置的位移指令，经过功率放大后驱动进给电动机转动，同时完成速度控制和反馈控制功能。根据所选电动机的不同，伺服单元的控制对象可以是步进电动机、直流伺服电动机或交流伺服电动机，每种伺服电动机的性能和工作原理都不同。步进电动机是最简单的伺服电动机，随着交流电动机调速技术的发展，交流伺服系统用得越来越普遍。

## 4. 可编程逻辑控制器（PLC）

PLC 和数控装置配合共同完成数控机床的控制，数控装置主要完成与数字运算和管理等有关的功能，如零件程序的编辑、译码、插补运算、位置控制等。PLC 主要完成与逻辑运算有关的动作，将零件加工程序中的 M 代码、S 代码、T 代码等顺序动作信息，译码后转换成对应的控制信号，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、切削液的开关等一些辅助功能；它接受机床操作面板和来自数控装置的指令，一方面通过接口电路直接控制机床的动作，另一方面通过伺服单元控制主轴电动机的转动。

用于数控机床的 PLC 一般分为两类：一类是数控系统生产厂家为实现数控机床的顺序控制，而将数控装置和 PLC 综合起来设计，成为内装型（或集成型）PLC，内装型 PLC 是数控装置的一部分；另一种是用 PLC 专业化生产厂家的独立的 PLC 产品来实现顺序控制功能，称为独立型（或外置型）PLC。

## 5. 机床本体

数控机床的本体可以在普通机床的基础上改装，也可以单独设计。和普通机床比较，数控机床的机械部分有以下一些特点：

- 1) 数控机床的切削用量通常较普通机床大，所以要求机械部分有更大的刚度；
- 2) 数控机床的导轨要采取防止爬行的措施，如采用滚动导轨或塑料涂层导轨；

3) 数控机床的机械传动链要尽量地短, 齿轮传动副和丝杠螺母副要采取消除间隙措施, 一般采用滚珠丝杠以获得较好的动态性能;

4) 对要求加工精度较高的数控机床还应采取减小热变形、提高精度的措施。

## 6. 位置检测装置

也称反馈元件, 通常安装在机床的工作台上或丝杠上, 用来检测工作台的实际位移或丝杠的实际转角。在闭环数控系统中这个实际的位移或转角要反馈给数控装置, 由数控装置计算出实际位置和指令位置之间的差值, 并根据这个差值的方向和大小, 控制机床, 使之朝着减小误差的方向移动。位置检测装置的精度直接决定了数控机床的加工精度。

## 二、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:

### (一) 按控制轨迹的特点分类

#### 1. 点位控制数控机床

点位控制数控机床的数控装置只要求能够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, 系统首先高速运行, 然后按 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

直线控制数控机床一般要在两点间移动的同时进行切削加工, 所以不仅要求具有准确的定位功能, 还要求从一点到另一点之间按直线规律运动, 而且对运动的速度也要进行控制, 对于不同的刀具和工件, 可以选择不同的进给速度。这一类机床包括简易数控车床、数控铣床等。一般情况下, 这些机床可以有两到三个可控轴, 但一般同时控制轴数只有两个。

#### 3. 轮廓控制数控机床

这类机床的数控装置能同时控制两个或两个以上坐标轴, 具有直线和圆弧或高次曲线插补功能, 对位移和速度进行严格地不间断地控制, 具有轮廓加工功能, 即可以加工曲线或者曲面形状的零件。轮廓控制数控机床的例子有两坐标及两坐标以上的数控铣床、可以加工回转曲面的数控车床、加工中心等。

按联动轴数分, 可以分为 2 轴联动、2.5 轴联动、3 轴联动、4 轴联动和 5 轴联动的数控机床, 2.5 轴联动是指三个控制轴中只有两个轴具有联动功能。

### (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流程是单向的, 其精度主要决定于驱动元件和伺服电动机的性能, 开环数控机床所用的电动机主要是步进电动机。这类机床性能比较稳定, 调试方便, 适用于经济型、中小型机床。图 1-3 为开环数控系统的示意图。

#### 2. 闭环控制数控机床

这类机床的数控装置将插补器发出的指令信号与测得的工作台实

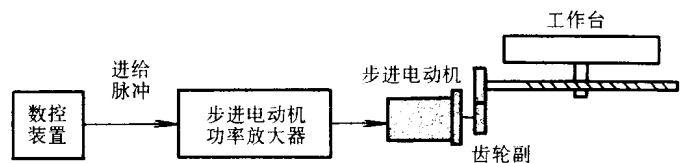


图 1-3 开环数控系统的示意图

际位置的反馈信号进行比较, 根据其差值不断控制机床运动, 进行误差修正, 直至差值消除为止。采用闭环控制的数控机床可以消除传动部件制造中存在的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, 设计或调整得不好, 很容易造成系统的不稳定。所以闭环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。图 1-4 为闭环数控系统的示意图。

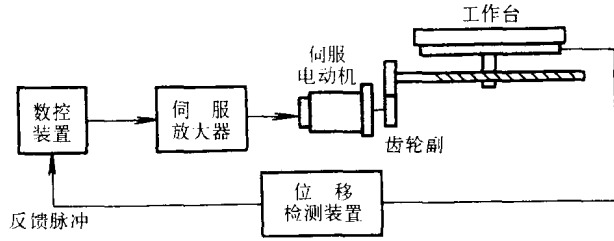


图 1-4 闭环数控系统的示意图

### 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动机或丝杠的端部。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。如果采用高分辨率的检测元件, 可以获得比较满意的精度与速度。图 1-5 为半闭环数控系统的示意图。

#### (三) 按功能水平分类

按功能水平又可以把数控系统分为高级型、普及型和经济型三种。这种分类方法没有明确的定义和确切的界限。通常可以用下列指标作为评价数控系统档次的参考条件: 主 CPU 档次, 分辨率和进给速度, 联动轴数, 伺服水平, 通信功能, 人机界面等。

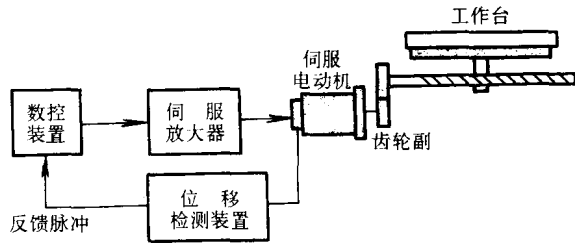


图 1-5 半闭环数控系统的示意图

#### 1. 高级型数控系统

高级型数控系统一般采用 32 位或更高性能的 CPU, 联动轴数在 5 轴以上, 分辨率  $\leq 0.1\mu\text{m}$ , 进给速度一般  $\geq 24\text{m}/\text{min}$  ( $1\mu\text{m}$  时) 或  $\geq 10\text{m}/\text{min}$  ( $0.1\mu\text{m}$  时), 采用数字化交流伺服驱动, 具有 MAP 等高性能通信接口, 有联网功能, 具有三维动态图形显示功能。

#### 2. 普及型数控系统

普及型数控系统一般采用 16 位或更高性能的 CPU, 联动轴数在 5 轴以下, 分辨率为  $1\mu\text{m}$ , 进给速度  $\leq 24\text{m}/\text{min}$ , 采用交、直流伺服驱动, 具有 RS232 或 DNC 通信接口, 有 CRT 字符显示和图形显示功能。

#### 3. 经济型数控系统

经济型数控系统一般采用 8 位 CPU 单片机, 联动轴数在三轴以下, 分辨率  $0.01\text{mm}$ , 进给速度在  $6\sim 8\text{m}/\text{min}$ , 采用步进电动机驱动, 具有简单的 RS232 通信功能, 用数码管或简单 CRT 显示字符。我国现阶段的经济型数控系统大多数是开环数控系统。

## 第三节 数控技术的发展

### 一、数控技术与数控机床的产生与发展

1949 年, 为了解决飞机框架和直升飞机叶片加工过程中所用样板的制造问题, 美国密执

安州的帕森公司(Parsons Corp.)、美国空军后勤司令部和麻省理工学院伺服机构研究所共同合作,尝试用电子控制的方法来解决复杂轮廓的加工问题,于1952年在麻省理工学院研制成功一套三坐标联动,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。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,这是世界上第一台数控机床,标志着数字控制时代的开始。

数控技术是机械技术和电子技术结合的产物,因此机械技术、电子技术特别是计算机技术的每一点进步都在推动数控技术向前发展。

1959年,晶体管元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,1959年3月,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,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。由于它体积小、功耗低,使数控系统的可靠性得以进一步提高,这是第三代数控系统。1967年,英国首先把几台数控机床连接成具有柔性的加工系统,这就是最初的FMS。在这之后,美国、日本和欧洲也相继进行了柔性制造系统方面的研究。在这以前的数控系统中,所有功能都是靠硬件实现的,现在我们称之为普通数控(NC)。

1970年,在美国芝加哥国际机床展览会上,首次展出了一台以通用小型计算机作为数控装置的数控系统,被人们称为第四代数控系统,这种数控系统的最大特征是,许多数控功能可以由软件来实现,系统变得灵活、通用性好,价格也低多了。这就是我们现在说的计算机数控系统(CNC)。

1974年开始出现的以微处理器为核心的数控系统被人们誉为第五代数控系统,近30年来,装备微处理机数控系统的数控机床得到飞速发展和广泛应用。

数控技术经过50多年的发展,从控制单机到生产线以至整个车间、整个工厂。目前数控系统的故障率已经下降到0.01次/月台。无故障时间已达到100个月,数控系统的性能大大提高。以FANUC公司为例,1991年开发的FS220系统与1971年开发成功的FS15系统相比,体积减小了90%,加工精度提高了10倍,加工效率提高了20倍,可靠性提高了30倍以上。数控技术的发展推动了数控机床的发展,目前全世界约有100万台数控机床,占机床总数的7%。数控技术的水平和机床的数控化率已经成为衡量一个国家制造业水平的标志,数控技术已经成为先进制造技术的基础和关键技术。与此同时,人们已经在构思和开发下一代数控技术产品。

## 二、中国的数控技术与数控机床

我国从1958年开始数控技术的研究,1966年研制成功晶体管数控系统,1972年研制成功集成电路数控系统,并出现了线切割机、非圆齿轮插齿机、数控铣床等代表性产品。其中数控线切割机由于模具加工的迫切需要,以其价格低廉、技术简单、使用方便等特点保持了发展的局面,年产量约在600~700台。但其他数控机床由于元件、工艺等方面的原因推广很慢。1973~1979年间,我国共生产数控机床4108台,其中数控线切割机占86%。与此同时,我国每年用一亿元从国外进口数控机床,由于技术消化、售后服务跟不上,这些机床也没有很好地发挥作用。

20世纪80年代开始,在改革开放方针的指引下,相继引进了日本具有20世纪70年代末期水平的微处理器数控系统和直流伺服拖动技术,并于1981年开始生产,到1988年共生产各种数控系统1300多套,满足了国内市场的部分需求。1985年又引进了美国GE公司和DUNAPATH公司的数控系统和拖动技术,在上海市机床研究所和辽宁省精密仪器厂组织生产。

1985年开始,我国的数控机床在引进、消化国外技术的基础上,进行了大量的开发工作。到1989年底,我国数控机床可供产品已超过300种,其中车床占40%,加工中心占27%,其他品种有重型机床、镗铣床、电加工机床、磨床、齿轮加工机床等。

一些高档次的数控系统,如五坐标联动的数控系统、分辨率为 $0.02\mu\text{m}$ 的高精度车床用数控系统、数字仿形的数控系统、为柔性制造单元配套的数控系统,也相继开发出来并制造出样机。

### 三、数控技术的发展趋势

随着微电子技术和计算机技术的发展,数控系统的性能日益完善,数控技术的应用领域日益扩大;不同的应用领域对数控技术提出新的使用要求,又促进了数控技术的发展。总的发展趋势可以归纳为高速高精度、多功能、智能化、开放式和可靠性的提高。

#### 1. 高速高精度

数控系统的高速度表现为在相同的最小移动量的情况下可以获得较高的移动速度。高速度主要取决于数控装置数据处理的速度,采用高速CPU是提高数控装置速度的最有效手段。如FANUC公司在所有最新型号的数控系统中都使用32位微处理器技术。该公司的FS15数控系统可以实现最小移动单位为 $0.1\mu\text{m}$ 情况下达到了最大进给速度为 $100\text{m}/\text{min}$ 。FS16和FS18数控系统还采用了精简指令计算机(Reduced Instruction Set Computer RISC)它能进行高速数据处理,指令速度达到 $20\sim 30\text{MIPS}$ 。一个程序段的处理时间可以达到 $0.5\text{ms}$ ,在连续 $1\text{mm}$ 的移动指令下实现的最大进给速度可达 $120\text{m}/\text{min}$ 。

提高数控机床的加工精度,一般是通过减少数控系统的误差和采取误差补偿技术来实现的。在减小数控系统误差方面,一般采取提高数控系统分辨率、以微小的程序段实现连续进给、提高位置检测精度以及位置伺服系统采用前馈控制与非线性控制等方法;在采用补偿技术方面,除采用间隙补偿、丝杠螺距补偿和刀具补偿等传统误差补偿技术外,还采用了热变形补偿。电动机、回转主轴和传动丝杠副的发热变形会产生加工误差,为减少热变形,一方面减少发热量,如采用流动油液对内装主轴电动机和主轴进行冷却,另一方面则采取热补偿技术。

#### 2. 智能化

数控系统的智能化主要体现在以下几个方面:

(1) 应用自适应控制技术 通常的数控系统是按照预先编好的程序工作的。考虑到加工过程中的不确定因素,如毛坯硬度的变化、刀具的磨损状态变化等,编程中一般采用比较保守的切削用量,从而降低了加工效率。具备自适应控制功能的数控系统可以在加工过程中随时测量主轴转矩、功率、切削力、切削温度、刀具磨损等参数,并根据测量结果,调整主轴转速和进给量的大小,确保加工过程处于最佳状态。

(2) 自动编程技术 有了高性能的数控机床以后,高质量、高效率地编制零件加工程序就成了提高数控加工效率的关键问题。数控编程技术经历了手工编程、数控语言编程和图形

编程几个阶段，编程的效率和质量不断提高，同时也降低了对操作人员技术水平要求。现代数控系统通常会附带人机会话自动编程软件，帮助用户提高编程效率，

(3) 具有故障自动诊断功能 数控系统出了故障，控制系统应能够自动诊断，并自动采取排除故障的措施，以适应长期无人工作的要求。

(4) 应用模式识别技术 应用图像识别和声控技术，使机器能够根据零件的图像信息，按图样自动加工，或按照自然语言指令进行加工，这是数控编程技术发展的最新动向。

### 3. 开放式数控系统

随着数控技术的发展，数控系统变得越来越复杂，暴露出许多自身固有的缺陷。最大的问题是，这些数控系统都是专门设计的，它们具有不同的编程语言、非标准的人机接口、多种实时操作系统、非标准的硬件接口等，这些缺陷造成了数控系统使用和维护的不便，也限制了数控技术的进一步发展。为了解决这些问题，人们提出了“开放式数控系统”的概念。这个概念最早见于1987年美国的NGC (Next Generation Controller) 计划，NGC计划的目的是为了推动美国工业界形成一个广泛的工作伙伴，以利于世界范围内的技术竞争。NGC控制技术通过实现基于相互操作和分级式软件模块的“开放式系统体系结构标准规范(SOSAS)”找到解决问题的办法。一个开放式的系统体系结构能够使供应商为实现专门的最佳方案去配置系统。由于这样一个富有哲理的概念作为NGC计划的奠基石，NGC代表了下一代控制技术。

1996年，美国HP公司在东京日本国际机床展览会上展出了开放式数控系统OAC500；HP公司对开放式数控系统提出了12个方面的判别准则：

- 1) 是否基于工业标准硬件平台和总线结构；
- 2) 运动控制软件是否采用工业标准的开放操作系统；
- 3) 能否采用流行的硬件和软件与工厂的网络相连接；
- 4) 能否运行流行的软件而不降低机床的性能；
- 5) 能否安装从不同商家得到的流行硬件；
- 6) 设计或第三方开发者能否应用标准工具和文件格式、编程接口建立用户实时的应用；
- 7) 能否修改所有级别的控制软件；
- 8) 控制商家能否提供文件格式的开发工具，允许访问系统的所有级别？
- 9) 对于I/O接口，控制器是否使用了标准的现场总线？
- 10) 是否可以把控制器与不同厂家的伺服装置相连接？
- 11) 控制器是否可以与多用户控制的网络相连接？
- 12) 所有的编程(GUI、运动、PLC)是否采用了标准的流行的编程工具？

### 4. 基于网络的数控系统

网络的任务主要是进行通信，共享信息。数控机床作为车间的基本设备，它的通信范围是：

- 1) 数控系统内部的CNC装置与数字伺服间的通信，主要通过SERCOS链式网络传送数字伺服控制信息。
- 2) 数控系统与上级主计算机间的通信。
- 3) 与车间现场设备及I/O装置的通信，主要通过现场总线，如PROFIBUS等进行通信。
- 4) 通过因特网与服务中心的通信，传递维修数据。



5) 通过因特网与另一个工厂交换制造数据。

#### 5. 提高数控系统的可靠性

可靠性是数控机床用户最为关注的问题，提高可靠性通常可采取下列一些措施：

1) 提高线路的集成度。采用大规模集成电路、专用芯片及混合式集成电路，以减少元器件数量，精简外部连线 and 降低功耗。

2) 建立由设计、试制到生产的完整质量保证体系。例如采取防电源干扰，输入输出隔离；使数控系统模块化、通用化及标准化，以便组织批量生产和维修；在安装制造时注意严格筛选元器件；对系统可靠性进行全面检查考核等。

3) 增强故障自诊断功能和保护功能。由于元器件失效、编程及人为操作失误等原因，数控系统也会出现故障。数控系统一般具有故障预报和自恢复功能。此外，应注意增强监控和保护功能，例如有的系统设有刀具破损检测、行程范围保护和断电保护等功能，以避免损坏机床或报废工件。由于采用了各种有效的增强可靠性的措施，现代数控系统的平均无故障时间可达到  $MTBF = 10000 \sim 36000h$ 。

#### 6. 数字制造

1995年12月，美国SME主席G. Olling提出，“数字制造”（“digital manufacturing”）将会是我们的主要工作。什么是“数字制造”呢？简单地说，就是用数字的方式来存储、管理和传递制造过程中的所有信息。在计算机世界里，可以产生各种各样的信息，并把物理过程虚拟化；DNC还可以对CAD/CAPP/CAM以及CNC的程序进行传送和分级管理。DNC技术使CNC与通信网络联系在一起还可以传送维修数据，使用户与数控生产厂家直接通信；进而把制造厂家联系在一起，构成虚拟制造网络。现在的问题是，如何把这些信息从计算机“下载”到生产线，在生产过程中利用这些信息控制机器，生产出合格产品；这个全过程就是数字制造。在这个过程中，数控机械是生产核心，它把各种专门技术积聚在一起，并与生产过程的信息相联系，成为生产系统的主导。从制造系统的角度看数字制造，也可以说，这是一个开放的制造系统。

### 复习思考题

1. 什么是数字控制机床？简述数控机床产生的背景。
2. 数控（NC）和计算机数控（CNC）的联系和区别是什么？
3. 简述闭环数控系统的控制原理，它与开环数控系统有什么区别？
4. 数控技术的发展阶段是根据什么划分的？
5. 数控技术的发展趋势表现在哪几个方面？
6. 开放式数控系统与传统数控系统有何区别？