

**GH**

中等专业学校 规划教材  
工科电子类

# 数控技术

林 东 编

北京理工大学出版社

# 数 控 技 术

林 东 编

北京理工大学出版社

(京)新登字 149 号

### 内 容 简 介

本书以数控机床为对象,较系统全面地介绍数字控制(NC)和计算机数控系统(CNC),以及数控加工程序的编制方法。内容包括:数控的基本概念、机床数控基础、数控加工程序编制、伺服系统(常用检测装置和驱动元件)原理、CNC 数控系统与实例等。内容构成上突出微机 CNC 系统的硬、软件组成原理和数控加工程序的编制方法。

本书适于中专应用电子技术、自动控制和机电技术应用及相关专业师生使用,也可供从事机床数控技术的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

数控技术/林东编. —北京:北京理工大学出版社,1995

ISBN 7-81045-013-1

I. 数… II. 林… III. 数控机床-数控系统-高等学校-教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 02288 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白塔桥路 7 号)

(邮政编码 100081)

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

\*

787×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 378 千字

1995 年 5 月第一版 1995 年 5 月第一次印刷

印数:1—4000 册 定价:14.00 元

※ 图书印装有误,可随时与我社退换 ※

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我公司承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1990年,已编审、出版了三轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,调动广大教师编写教材,依靠学校管理部门和有关出版社,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想。我公司所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的教材,以主要专业的主干课程教材及其辅助教材为主,并配置一些教学参考书等约300余种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委或教学指导委员会直接组织进行。

这批教材的书稿,其一是通过教学实践,师生反应较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的;其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的;其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会、教学指导委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

中国电子工业总公司教材办公室

## 前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由中专电子技术专业教学指导委员会征稿并推荐出版。责任编委为武汉无线电工业学校高级讲师陈继生。

本教材由福建电子工业学校高级讲师林东编写,福州大学李世弼副教授担任主审。

本教材以数控机床为对象,介绍数字控制(NC)和计算机(主要是微型机)数控系统(CNC)的组成与工作原理,以及数控加工程序的编制方法。本课程参考学时数为 80 学时,其主要内容与学时分配如下:绪论(数控的基本概念,4 学时)、机床数控基础(12 学时)、数控加工程序编制(18 学时)、伺服系统(16 学时)、计算机(微型机)数控系统(22 学时)、CNC 系统实例简介(8 学时)。其中打“\*”约 26 学时为选讲内容,对于已上过微型机原理和汇编语言程序设计课程的,§5-2 微型机简介与 §5-3 中汇编语言程序设计方法部分可以不讲授;第六章 CNC 实例可以选讲,也可以根据数控机床的发展和各地应用情况予以及时补充和更换。本教材为适应中专教学需要,力求文字上通俗易懂,阐述中注重物理概念,避免繁琐的数学推导或计算,内容构成上突出微机 CNC 系统的硬、软件组成原理及数控加工程序的编制方法,每章末均附有思考题和习题。

参加本教材审阅工作的还有福州大学薛昭武同志,他为本书提出了许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

一九九四年三月

# 目 录

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| 第一章 绪论 .....                    | (1)  |
| § 1-1 什么是数控 .....               | (1)  |
| 一、数控及数控机床 .....                 | (1)  |
| 二、数控机床的组成与原理 .....              | (2)  |
| 三、数控机床的特点与适用范围 .....            | (3)  |
| § 1-2 数控机床的发展 .....             | (5)  |
| 一、引言 .....                      | (5)  |
| 二、数控机床的种类 .....                 | (6)  |
| 三、数控机床的发展 .....                 | (8)  |
| 思考题与习题一 .....                   | (12) |
| 第二章 机床数控基础 .....                | (13) |
| § 2-1 点位/直线控制系统 .....           | (13) |
| 一、增量方式控制 .....                  | (13) |
| 二、绝对值方式控制 .....                 | (14) |
| § 2-2 轮廓控制系统 .....              | (14) |
| 一、逐点比较法插补原理 .....               | (15) |
| 二、数字积分法插补原理 .....               | (20) |
| § 2-3 插补速度及轨迹自动偏移计算 .....       | (25) |
| 一、插补进给速度计算 .....                | (25) |
| 二、刀具位置(长度)和半径补偿 .....           | (28) |
| 思考题与习题二 .....                   | (34) |
| 第三章 数控加工程序编制 .....              | (36) |
| § 3-1 加工程序编制的基本概念 .....         | (36) |
| 一、数控加工程序编制的一般步骤 .....           | (36) |
| 二、数控加工程序编制的方法 .....             | (37) |
| 三、加工程序结构和格式 .....               | (37) |
| 四、程序编制中的指令代码 .....              | (39) |
| § 3-2 常用准备功能指令的编程方法 .....       | (47) |
| 一、坐标系有关指令 .....                 | (47) |
| 二、快速点定位指令——G00 .....            | (49) |
| 三、直线插补指令——G01 .....             | (49) |
| 四、圆弧插补指令——G02、G03 .....         | (49) |
| 五、暂停指令——G04 .....               | (51) |
| 六、刀具半径自动补偿指令——G41、G42、G40 ..... | (51) |
| 七、刀具长度补偿指令——G43、G44、G49 .....   | (52) |
| 八、固定循环指令 .....                  | (52) |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| § 3-3 程序编制举例 .....            | (55)  |
| 一、点位、直线控制系统加工程序编制 .....       | (55)  |
| 二、轮廓控制系统加工程序编制 .....          | (60)  |
| § 3-4 计算机自动编程 .....           | (63)  |
| 一、引言 .....                    | (63)  |
| 二、ISO 数控编程语言 .....            | (65)  |
| * 三、EXAPT 工艺语言简介 .....        | (81)  |
| 思考题与习题三 .....                 | (86)  |
| <b>第四章 伺服系统</b> .....         | (88)  |
| 4-1 概述 .....                  | (88)  |
| 一、伺服系统的性能要求与组成 .....          | (88)  |
| 二、幅值和相位伺服系统 .....             | (89)  |
| 三、电气和液压伺服系统 .....             | (91)  |
| § 4-2 常用检测装置 .....            | (92)  |
| 一、引言 .....                    | (92)  |
| 二、光电盘与编码盘 .....               | (93)  |
| 三、光栅检测装置 .....                | (95)  |
| 四、电磁检测装置 .....                | (98)  |
| § 4-3 常用驱动(执行)元件 .....        | (105) |
| 一、引言 .....                    | (105) |
| 二、步进电机及驱动 .....               | (105) |
| 三、直流伺服电机及驱动 .....             | (112) |
| 四、交流伺服电机及驱动 .....             | (117) |
| § 4-4 机床与伺服系统的配合 .....        | (119) |
| 一、机床进给传动部件 .....              | (119) |
| 二、影响伺服性能的主要因素 .....           | (122) |
| 三、机械传动部分的传动比 .....            | (123) |
| 四、机电匹配 .....                  | (124) |
| 思考题与习题四 .....                 | (125) |
| <b>第五章 计算机数控(CNC)系统</b> ..... | (126) |
| § 5-1 概述 .....                | (126) |
| 一、微机数控系统的硬件结构 .....           | (126) |
| 二、微机数控系统的软件结构 .....           | (129) |
| 三、数控对微机的要求 .....              | (131) |
| * § 5-2 典型微机与接口 .....         | (133) |
| 一、Z80CPU 及指令系统 .....          | (133) |
| 二、RAM 与 CPU 的连接 .....         | (153) |
| 三、常用八位可编程接口及应用 .....          | (158) |
| § 5-3 微机数控系统控制软件设计 .....      | (172) |
| * 一、汇编语言程序设计简介 .....          | (172) |
| 二、数控软件设计举例 .....              | (179) |
| § 5-4 可编程序控制器 .....           | (187) |
| 一、PC 的基本结构原理 .....            | (188) |

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| 二、可编程序控制器举例 .....           | (191)        |
| 三、利用梯形图的编程方法 .....          | (206)        |
| 四、可编程序控制器应用举例 .....         | (209)        |
| § 5-5 微机数控系统外部设备 .....      | (211)        |
| 一、引言 .....                  | (211)        |
| 二、纸带阅读机 .....               | (211)        |
| 三、纸带穿孔机 .....               | (213)        |
| 思考题与习题五 .....               | (211)        |
| <b>第六章 CNC 系统实例简介 .....</b> | <b>(216)</b> |
| § 6-1 车床微机数控系统 .....        | (216)        |
| 一、CKL-6132 经济型数控车床 .....    | (216)        |
| 二、微机数控车床的系统结构 .....         | (217)        |
| 三、微机数控车床的软件 .....           | (218)        |
| 四、微机数控车床的硬件 .....           | (223)        |
| § 6-2 JCS-018 型立式加工中心 ..... | (229)        |
| 一、主要技术参数与性能 .....           | (230)        |
| 二、7CM 系统硬件结构简介 .....        | (232)        |
| 三、7CM 系统软件结构简介 .....        | (233)        |
| 四、系统程序的工作过程 .....           | (234)        |
| 五、零件的程序编制举例 .....           | (236)        |
| <b>参考文献 .....</b>           | <b>(240)</b> |

# 第一章 绪 论

## § 1-1 什么是数控

### 一、数控及数控机床

数字控制简称数控(Numerical Control 缩写为 NC),是指用数字指令来控制一台或一台以上机械的动作。它所控制的一般是位置、角度、速度等机械量,但也有温度、压力、流量等物理量。

数控是与机床的控制密切结合而发展起来的。因此,数控一词,一般是在“机床数控”这一狭义上使用的。当然,广义的数控也有用在例如造纸、化工、石油精炼等一类的流程工艺方面的,但这是另外一种类型的数字控制,其叫法也大多是采用别的名称。

由于科学技术和社会生产的迅速发展,使机械产品日趋精密、复杂而且改型频繁。这不仅给机床设备提出精度与效率的要求,也提出了通用性与灵活性的要求。尤其在造船、航天、航空、机床、重型机械以及军工生产部门,其需要加工的零件的特点是批量小、形状复杂、经常改型且精度要求高。使用普通机床加工,不仅劳动强度大、生产效率低,还难以保证精度甚至无法加工。

仿形机床使小批量、复杂零件的自动化加工得到了部分的解决。它借助靠模能加工出比较复杂的零件,有一定的灵活性。但靠模的制造、安装与调整要花费许多手工劳动,生产的准备时间较长,如批量很小甚至单件零件制造靠模也很不经济。另外,仿形机床加工出的零件精度受靠模制造误差的影响,不能满足一些高精度零件的加工要求。

大批量的零件加工使用专用自动机床、组合机床以及由它们组成的专用加工生产自动线,可以得到高的加工效率,但一般初投资大,对于约占机械加工总量 80% 的单件、小批量(10~100 件)零件的加工并不经济。同时,由于近年来市场竞争日趋激烈,为满足市场迅速变化的需要,还要求不断开发新品,缩短生产周期,因此这种不易变更的“刚性”自动化设备在大批量生产中也日益暴露其缺点。因而数控机床作为灵活通用,能够快速适应产品频繁变化的“柔性”自动化机床应运而生,且集微电子、计算机、自动控制、自动检测以及精密机械等技术的最新成果而迅速发展起来。

所谓数控机床就是将加工过程所需的各种操作(如主轴变速、松夹工件、进刀与退刀、开车与停车、选择工具、供给冷却液等)和步骤以及工件的形状尺寸用数字化的代码表示(称为数字信息),通过控制介质(如穿孔纸带或磁带等)将数字信息送入数控装置(专用的或通用的计算机),数控装置对输入的信息进行处理与运算,发出各种控制信号(或指令),来控制机床的伺服系统或其他驱动(执行)元件,使机床自动加工出所需要的工件。数控机床与其它自动机床的一个显著区别在于当被加工的工件改变时,除了重新装夹工件和更换刀具之外,只需要更换一条

新的“描写”该工件的穿孔纸带或磁带,而不需要对机床作任何调整。

## 二、数控机床的组成与原理

数控机床通常由以下几部分组成:控制介质、数控装置、伺服系统和机床,必要时还加上检测装置,如图 1-1 所示。

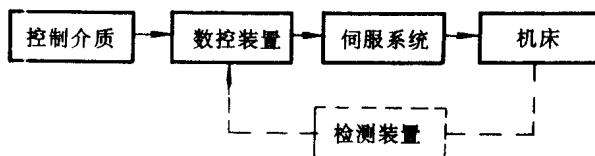


图 1-1 数控机床的组成

### (一) 控制介质

要对数控机床进行控制,就必须

在人与机床之间建立某种联系,这种联系的中间媒介物即称为控制介质,也称为信息载体。在控制介质上存储着加工零件所需要的全部操作信息和刀具相对工件的位移信息。控制介质可以是多种形式的,它随着数控装置的类型不同而异。常用的有穿孔带、穿孔卡和磁带。目前数控机床上使用最为普遍的是八单位标准穿孔带。它可以制成各种颜色的纸带、塑料带和金属带,目前使用最广的是黑色纸带。它的尺寸如图 1-2 所示,每一行共有九个孔,其中  $\phi 1.17$  的小孔为同步孔。

在使用穿孔纸带作信息载体时,零件加工指令及数据先用规定的文字、数字与符号书写在程序单上,即编制零件程序,再按一定的规则在纸带上穿出一排排的孔。纸带上孔的排列规定,称为代码,目前国际上通常使用 EIA (Electronic Industries Association) 代码和 ISO (International Organization for Standardization) 代码。我国规定 ISO 代码为标准代码。

纸带上的代码由读带机(如光电阅读机)逐行地转换为数控装置可以识别和处理的电信号。也有一些数控机床,常使用数码拨盘、数码插销或按键直接将程序或数据输入。

程序编制与穿孔纸带等控制介质的准备,在一定程度上影响了数控机床的使用效率。用通用计算机辅助,实现自

### (二) 数控装置

数控装置是数控机床的中心环节,它接受控制介质输入的信息,经处理与运算去控制机床的动作。对各种具体控制对象,数控装置处理运算的步骤都是预先安排好了的。这种“安排”可以用专用计算机固定接线的硬件结构来实现,称为硬线数控或硬联接数控;也可以用预先放在小型通用计算机或微型计算机内的系统程序来实现,称为软线数控或软联接数控。

硬线数控通常由输入装置、控制器、运算器和输出装置四大部分组成。如图 1-3 所示,虚线内包含的部分为数控装置。

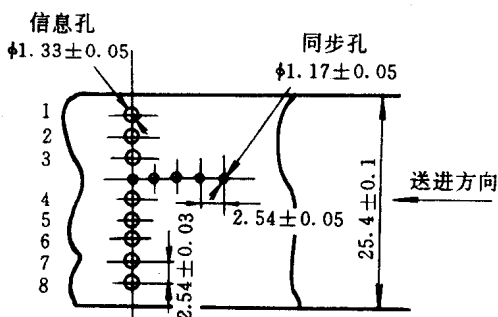


图 1-2 八单位标准穿孔带

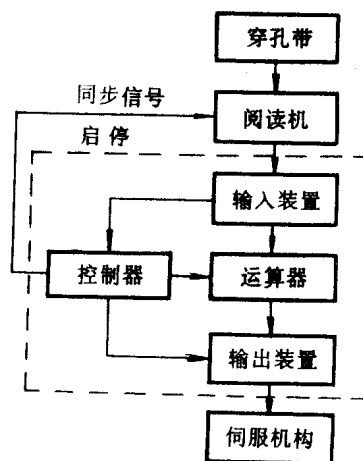


图 1-3 数控装置

输入装置接受由穿孔带阅读机输出的代码,经过识别与译码之后分别输送到各相应的寄存器,这些指令与数据将作为控制与运算的原始依据。

控制器接受输入装置的指令,根据指令控制运算器与输出装置,以实现机床的各种操作(例如控制工作台沿着某一坐标轴的运动,主轴变速或冷却液开关等)以及控制整机的工作循环(例如控制阅读机的启动、停止,控制运算器的运算,控制输出讯号等)。

运算器接受控制器的指令,将输入装置送来的数据进行某种运算,并不断向输出装置送出运算结果,使伺服系统执行所要求的运动。

输出装置根据控制器的指令将运算器送来的计算结果输送到伺服系统,经过功率放大,驱动相应的坐标轴,使机床完成刀具相对工件的运动。

软线数控目前常采用微型计算机作为数控装置。微型计算机的中央处理单元(CPU)又称为微处理器,是一种大规模集成电路,它将运算器、控制器等集成在一块集成电路芯片上。在微型计算机中,输入与输出电路即 I/O 接口也采用大规模集成电路;存储器采用高密度的存储介质,如半导体存储器,存储容量大。存储器分为只读存储器(ROM)和随机存取存储器(RAM),前者用于存放系统的控制程序,后者存放系统运行时的工作参数或用户的零件加工程序。

硬线数控与软线数控的工作原理基本相同,只是后者采用通用硬件,不同的功能通过改变软件来实现,因此更为灵活与经济。

### (三) 伺服系统

伺服系统接受来自数控装置的指令信息,严格按照指令信息的要求带动机床的移动部件,以加工出符合图纸要求的零件。它是数控机床的重要组成部分,它的伺服精度和动态响应是影响数控机床的加工精度、表面质量与生产率的重要因素之一。

伺服系统包括驱动装置和执行机构两大部分。目前大都采用直流伺服电机或交流伺服电机作为执行机构,这些电机常带有光电编码器等位置测量元件和测速发电机等速度测量元件。各种执行机构由相应的驱动装置来驱动。

### (四) 机床

与传统的手动机床相比。数控机床的结构强度、刚度和抗振性以及外部造型、整体布局,传动系统与刀具系统的部件结构和操作机构等方面都已发生了很大的变化,其目的是为了满足不同数控技术的要求和充分发挥数控机床的效能。

## 三、数控机床的特点与适用范围

综上所述数控机床具有以下特点:

(1) 对加工对象改型的适应性强。由于在数控机床上改变加工零件时,只需要重新编制程序,更换一条新的穿孔纸带或者手动输入程序就能实现对零件的加工。它不同于传统的机床,不需要制造、更换许多工具、夹具和模具,更不需要重新调整机床。因此数控机床可以很快速地从加工一种零件转变为加工另一种零件,这就为单件、小批以及试制新产品提供了极大的便利。它缩短了生产准备周期,而且节省了大量工艺装备费用。

(2) 加工精度高。数控机床是按以数字形式给出的指令进行加工的,由于目前数控装置每输出一个脉冲信号数控机床移动部件相应的移动量(称脉冲当量)可以达到  $0.001\text{mm}$ ,而且进给传动链的反向间隙与丝杠螺距误差等均可由数控装置进行补偿,因此,数控机床能达到比较

高的加工精度。对于中、小型数控机床,定位精度普遍可达到 0.03mm,重复定位精度为 0.01mm。因为数控机床的传动系统与机床结构都具有很高的刚度和热稳定性,而且提高了它的制造精度,特别是数控机床的自动加工方式避免了生产者的人为操作误差,因此,同一批加工零件的尺寸一致性好,产品合格率高,加工质量稳定。

(3) 加工生产率高。零件加工所需要的时间包括机动时间与辅助时间两部分。数控机床能够有效地减少这两部分时间,因而加工生产率比普通机床高得多。数控机床主轴转速和进给量的范围比普通机床的范围大,每一道工序都能选用最有利的切削用量,良好的结构刚性允许数控机床进行大切削用量的强力切削,有效地节省了机动时间。数控机床移动部件的快速移动和定位均采用了加速与减速措施,因而选用了很高的空行程运动速度,消耗在快进、快退和定位的时间要比一般机床的少得多。

数控机床在更换被加工零件时几乎不需要重新调整机床,而零件又都安装在简单的定位夹紧装置中,用于停机进行零件安装调整的时间可以节省不少。

数控机床的加工精度比较稳定,可以减少停机检验时间。因此数控机床的利用系数比一般机床的高得多。

在使用带有刀库和自动换刀装置的数控加工中心机床时,在一台机床上实现了多道工序的连续加工,减少了半成品的周转时间,生产效率的提高就更为明显。

(4) 减轻操作者的劳动强度。数控机床对零件的加工是按事先编好的程序自动完成的,操作者除了安放穿孔带或操作键盘,装卸零件、关键工序的中间测量以及观察机床的运行之外,不需要进行繁重的重复性手工操作,劳动强度与紧张程度均可大为减轻,劳动条件也得到相应的改善。

(5) 良好的经济效益。使用数控机床加工零件时,分摊在每个零件上的设备费用是较昂贵的。但在单件、小批量生产情况下,可以节省许多其它方面的费用,如:节省加工前的划线工时及零件安装到机床后调整、加工和检验时间,从而减少了直接生产费用;节省了手工制作模型、钻模板及其它工夹具的工艺装备费用;由于加工精度稳定,减少了废品率、使生产成本下降等等,因此能够获得良好的经济效益。

(6) 有利于生产管理的现代化。用数控机床加工零件,能准确地计算零件的加工工时,并有效地简化了检验和工夹具、半成品的管理工作,从而有利于生产管理的现代化。数控机床使用数字信息与标准代码输入,最适宜于与数字计算机联系,目前已成为计算机辅助设计、制造及管理一体化的基础。

数控机床确实存在一般机床所不具备的许多优点,因而逐渐得到了推广应用,但它还不能完全代替其它类型的机床,也还不能以最经济的方式解决机械加工中的所有问题。一般地说,数控机床适用于加工:

(1) 多品种小批量零件。图 1-4 表示了通用机床、专用机床与数控机床加工批量与综合费用的关系。从图中看出零件加工批量增大对于选用数控机床是不利的。这是因为数控机床设备费用高昂,与大批量生产采用的专用机床相比其效率还不够高。通常采用数控机床加工的合理生产批量在 10~100 件之间。

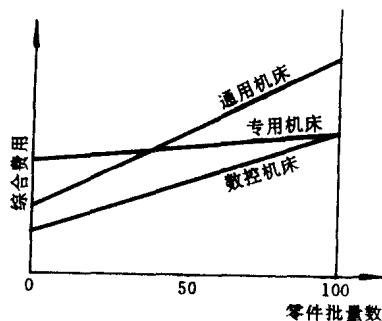


图 1-4 零件加工批量数与综合费用的关系

(2) 结构比较复杂的零件。图 1-5 表示了三类机床的被加工零件复杂程度及零件批量大小与机床的选用关系。通常数控机床适宜于加工结构比较复杂,在非数控机床上加工时需要有昂贵的工艺装备(工具、夹具、模具)的零件。

(3) 需要频繁改型的零件。

(4) 价值昂贵、不允许报废的关键零件。

(5) 需要最少生产周期的急需零件。

广泛推广数控机床的最大障碍是设备的初始投资大,且系统本身比较复杂,增加了维修困难与费用。同时数控机床加工需要编制程序,当加工零件形状不太复杂时,可以手工编程,但易出错且速度慢;当零件形状复杂时,则必须使用自动编程系统,这就需要配备专门的程序设计人员,并对穿孔纸带进行校验与试切削验证,从而增加了生产费用。

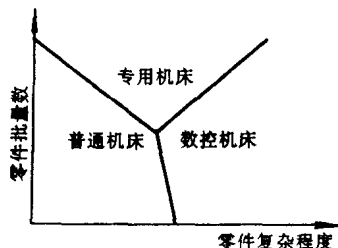


图 1-5 数控机床适用范围示意

因此,在决定选用数控机床加工时,需要进行反复对比和仔细的经济分析,使数控机床发挥它的最好经济效益。

## § 1-2 数控机床的发展

### 一、引言

数控机床是综合应用了微电子、计算机、自动控制、自动检测以及精密机械等技术的最新成果而发展起来的完全新型的机床,40年来,它经历了研究试制、工业应用和高速发展三个阶段,在品种、数量、加工范围与加工精度等方面有了惊人的发展。

1948年由美国帕森斯(Parsons)公司在研制加工直升飞机叶片轮廓检查用样板的机床时,首先提出数控机床设想,并与麻省理工学院合作,于1952年制作了世界上第一台数控机床样机,这是一台采用专用计算机进行运算与控制的直线插补连续控制的三坐标数控铣床,专用计算机采用电子管元件,逻辑运算与控制采用硬件联接电路。后又经过三年的改进与自动程序编制的研究,于1955年进入实用阶段。

其后,随着电子与计算机技术的发展,数控机床经历了几代变化:

第一代:1952~1959年,采用电子管元件;

第二代:从1959年开始,采用晶体管元件;

第三代:从1965年开始,采用集成电路;

第四代:从1970年开始,采用大规模集成电路及小型通用计算机;

第五代:从1974年开始,采用微处理器或微型计算机。

当然,这不是简单的取代,而是2~3代之间的渗透和共存。机床数控系统发展的基本目标是增强功能、方便使用、提高可靠性与降低价格。因而自70年代以来,由于大规模集成电路以及微型计算机的出现,数控系统的价格逐年下降,并大幅度提高了系统的精度与可靠性,使数控机床进入了高速发展阶段。以法国为例,从1974年到1984年的十年内,数控机床拥有量从3200台增加到31000台,共增长了近十倍,平均年增率高达25.5%。在国际上数控机床的产量也在不断提高。例如,世界上最大的数控机床生产国日本、美国和德国,1982年数控机床产值

占机床总产值的比率,日本已达 53.9%,美国达 37.4%,当时的联邦德国达 29.7%;到 1985 年又分别增长到日本为 66.9%,美国为 38.5%,联邦德国为 47.7%。1990 年日本拥有数控机床 115000 台,美国拥有 221000 台。

我国从 1958 年开始研制数控机床并取得一定成绩。近年来,随着工厂、企业技术改造的深入开展,各行各业对数控机床的需要量大幅度增长,同时由于引进了国外的数控系统与伺服系统的制造技术,使我国数控机床在品种、数量和质量方面得到了迅速的发展。目前已有几十家机床厂能够生产不同类型的数控机床和加工中心机床,我国与先进的工业国家在数控技术领域中的差距正在缩小,数控机床必然会在我国现代化建设中发挥越来越大的作用。

## 二、数控机床的种类

数控机床发展的重要方面是品种不断增加,通常可以从以下三个不同角度对数控机床的品种进行分类:

### (一) 按工艺用途分类

最普通的数控机床是钻床、车床、铣床、镗床、磨床与齿轮加工机床等等。除了切削加工的数控机床以外,数控技术也大量用于压力机、冲床、弯管机、折弯机、电火花切割机和火焰切割机金属成型机床与特种加工机床上。近年来在非加工设备中也大量采用了数控技术,其中较常见的有装配机、多坐标测量机、自动绘图机和工业机器人等。

加工中心机床是带有刀库和自动换刀装置的数控镗铣床,它的出现打破了一台机床只进行一种工艺加工的传统概念。以铣削加工中心为例,它在数控铣床上增加了一个刀库(一般为 20~120 把刀)和自动换刀装置,工件在一次装夹后,可以对其大部分加工面进行铣、镗、钻、扩、铰及攻丝等多工序加工。加工中心机床大多以镗铣为主,主要用于加工箱体零件或棱形零件。近来也出现了为数不少的车削加工中心,几乎可以完成回转体零件的所有加工工序。加工中心机床可以有效地避免由于多次安装造成的定位误差,减少了机床的台数和占地面积,大大提高了生产率和加工自动化程度。

### (二) 按运动方式分类

#### 1. 点位控制系统

点位控制数控机床的特点是只控制机床移动部件的终点位置,即控制移动部件由一个位置到另一个位置的精确定位,而对它们定位过程中的运动轨迹没有严格要求,在移动和定位过程中不进行任何加工。因此为了尽可能减少移动部件的运动与定位时间,通常先以快速移动到接近终点坐标,然后以低速准确移动到定位点,以保证良好的定位精度。

这类数控机床主要有数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控点焊机以及数控弯管机、数控测量机等。图 1-6 为数控钻床的工作原理图。

#### 2. 点位直线控制系统

点位直线控制数控机床的特点是机床移动部件不仅要实现由一个位置到另一个位置的精确移动,而且能够实现平行于坐标轴的直线切削加工运动。图 1

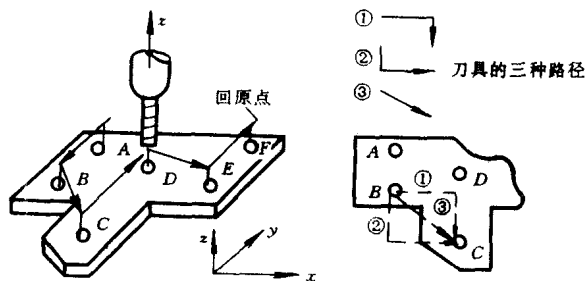


图 1-6 数控钻床的工作原理图

—7 是点位直线控制系统的加工原理图,它能够在一次安装中对箱体平面与台阶进行铣削、然后再进行钻孔、镗孔加工、有效地提高加工精度和生产率。但由于它只能作单坐标切削进给运动,因此不能加工比较复杂的平面与轮廓。

### 3. 轮廓控制系统

轮廓控制数控机床的特点是能够对两个或两个以上的坐标轴同时进行控制,它不仅要控制机床移动部件起点与终点坐标,而且要控制整个加工过程每一点的速度与位移量,即要控制移动轨迹,将工件加工成一定的轮廓形状。图 1—8 是两坐标轮廓控制系统的工作原理图,这种系统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。

数控铣床、数控车床和数控磨床是典型的轮廓控制数控机床。数控火焰切割机、数控线切割机及数控绘图机等也都采用轮廓控制系统。

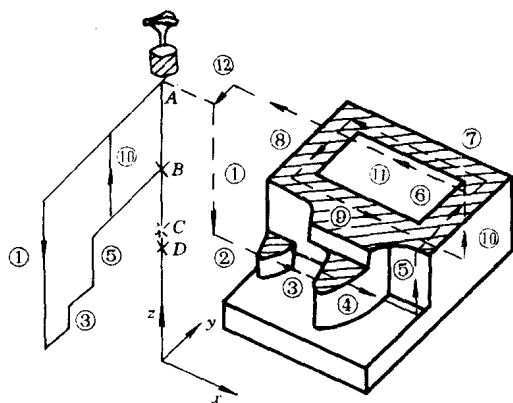


图 1—7 点位直线控制系统的加工原理图

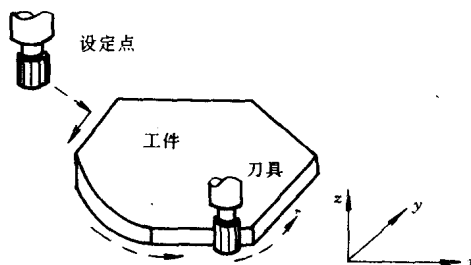


图 1—8 两坐标轮廓控制系统的工作原理图

## (三) 按控制方式分类

### 1. 开环控制系统

开环控制系统就是指不带反馈装置的控制系统,如图 1—1 实线所示。通常使用功率步进电机或电液脉冲马达作为执行机构。数控装置输出的脉冲通过环形分配器和驱动电路,使步进电机转过相应的步距角,再经过减速齿轮带动丝杠旋转,最后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和脉冲数所决定的。

开环控制系统具有结构简单,系统稳定,容易调试,成本较低等优点。但是系统对移动部件的实际位移量是不进行检测的,也不能进行误差校正。因此,步进电机的步距误差、齿轮与丝杠等的传动链误差都将反映到被加工零件的精度中去。目前开环控制系统已不能满足数控机床日益提高的精度要求。尽管如此,开环控制系统在数控机床的发展过程中占有相当重要的地位,许多采用开环步进系统的数控机床仍在生产中发挥作用。

### 2. 闭环控制系统

闭环控制系统是在机床移动部件位置上直接装有直线位置检测装置,将测量到的实际位移值反馈到数控装置中,如图 1—1 虚线所示,与输入的指令位移值进行比较,用偏差值进行控制,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定位。

从理论上说,闭环系统的控制精度主要取决于检测装置的精度,但这并不意味着可降低对机床的结构与传动链的要求,传动系统的刚性不足及间隙、导轨的爬行等各种因素将增加调试

的困难,严重时会使闭环控制系统的品质下降甚至引起振荡。

### 3. 半闭环控制系统

半闭环控制系统是在开环系统的丝杠上装有角位移检测装置(如感应同步器和光电编码器等),通过检测丝杠的转角间接地检测移动部件的位移,然后反馈至数控装置中。显然,半闭环控制系统的实际控制量是丝杠的转动,而由丝杠转动变换为工作台的移动,不受闭环的控制,这一部分的精度由丝杠—螺母(齿轮)副的传动精度来保证。因而半闭环控制系统的精度低于闭环控制系统。但由于角位移检测装置比直线位移检测装置的结构简单,安装方便,因此配有精密滚珠丝杠和齿轮的半闭环系统正在被广泛地采用,且由于惯性较大的机床移动部件不包括在闭环之内,系统的调试比较方便,并有很好的稳定性。目前已逐步将角位移检测装置和伺服电机设计成一个部件,使系统变得更加简单。

## 三、数控机床的发展

数控机床的发展不仅表现为数量的迅速增长,种类的不断增加,而且在质量与性能上也有显著提高。与早期数控机床相比,无论是机床结构还是数控装置或伺服系统都有了惊人的变化。

### 1. 机床结构的发展

机床的爬行、振动、热变形、刚度不足以及机床的制造与装配误差等都会直接或间接地影响被加工零件的精度。因此数控机床在机械结构上首先要求提高其静刚度与动刚度,减少热源的影响,提高其热稳定性,提高传动链的刚度并消除其中的间隙,消除爬行等,以保证加工精度稳定可靠。

60年代初期,在一般数控机床的基础上又开发了数控加工中心机床。前面数控机床分类中已介绍过它是在一般数控镗铣床上加装刀库和自动换刀装置,工件在一次装夹后,加工中心机床可自动更换刀具,连续地对零件的各加工面自动地完成铣、钻、铰、镗以及攻丝等多种工序。目前刀库的容量可多达120把左右,自动换刀装置的换刀时间仅为1~2秒钟。加工中心机床已被工业发达国家普遍采用。据统计,1985年仅在美国就有150家工厂生产加工中心机床。继加工中心机床出现之后,实现工序的高度集中仍然是数控机床当今的发展趋势。现已先后出现了带有工业机器人和工件交换系统(APC)的车削加工中心机床,可以自动更换电极的电火花加工中心机床等。这些工序集中的数控机床无论在结构上或外形上都与传统的机床不大相同。

为了实现工件的自动装卸,以镗铣床为基础的加工中心机床可以带有两个交换工作台。在交换工作台上由工人装夹好待加工的零件后,在数控系统的控制下,可以自动地把零件送上机床,并将已加工好的零件从机床上自动卸下。如果这种加工中心机床带有较多的交换工作台,便可实现无人看管加工。这种带有多个交换工作台的加工中心机床称为柔性制造单元(FMC)。

### 2. 数控系统的发展

目前,数控系统大都采用多个微处理器(CPU)组成的微型计算机作为数控装置(CNC)的核心。因此,高性能的计算机数控系统可以同时控制十几个轴,甚至几十个轴。而且,在机床上加工零件的同时,计算机数控系统还可以为其他待加工零件编制程序。有的还带有在屏幕上显示刀具轨迹的功能,在屏幕上模拟刀具运动,可使操作者及早发现程序的差错。

计算机数控系统还可带有可编程序控制器(PLC),它代替了传统的继电器逻辑控制,取消了庞大的强电控制箱。可编程序控制器可以通过编制程序来改变其控制逻辑,同样具有高度的柔性。数控技术和可编程序控制器的结合,可以有效地完成刀具管理和刀具寿命监控。

还有不少数控装置可与测量头相连,实现在线检测并自动修正零件的安装误差,检查工件的加工精度和刀具的实际位置,提高了加工质量和生产效率。

由于数控机床与计算机技术在机械制造行业的广泛应用和不断提高自动化水平的需要,70年代出现了一台计算机直接控制几台数控机床的加工过程的控制方式,形成了所谓计算机直接数控系统(Direct Numerical Control,简称DNC)。在此基础上还可以发展成为由几台数控机床组成的、带有工件自动运输系统和其它管理功能的柔性制造系统(Flexible Manufacturing System,简称FMS)。为适应这一需要,一些高性能的数控系统均带有“通讯模块”或DNC接口,通过它们可以使数控机床与上一级计算机联网通讯。德国西门子公司(SIEMENS)的850系统就具有这种功能。

由此可见,与早期数控装置相比,现代数控系统不仅控制的轴数大为增加,而且其功能也远远超出控制刀具轨迹与机床动作的范畴,且能够进行自动编程、自动测量、自身故障诊断与通讯联络。省去了庞大的强电控制箱之后,不仅提高了系统的可靠性,而且为实现机电一体化设计提供了极大的方便。

### 3. 伺服系统执行机构的发展

数控机床的伺服系统的执行机构也有其自身的发展过程。由于传统的直流伺服电机响应时间长,性能远远不能满足数控机床的要求,所以最早的数控机床采用步进电机和液压扭矩放大器。后来功率型步进电机问世,开始直接用它驱动机床。如今,由于开环系统的应用日趋减少,因而步进电机在数控机床上的应用受到限制,主要用在精度要求不高、功率较小的经济型数控机床上。

60年代初期与中期,美国和欧洲的一些国家采用液压伺服系统,如当时英国的纽沃尔(NEWALL)公司生产的数控坐标镗床就采用喷嘴挡板式电液伺服阀和油缸来驱动工作台和拖板。液压伺服系统与当时传统的伺服电机相比,响应时间短,驱动部件的外形尺寸小,低速时输出力矩较大。但液压伺服系统存在着发热大、效率低、易污染环境且不易维修等缺点。

日本首先研究成功了一种新型的小惯量直流伺服电机,其电气时间常数可以与液压伺服系统匹敌。特别是(1963年)大功率晶闸管(可控硅)整流器价格的大为下降,使得由价廉的晶闸管(可控硅)整流器驱动的小惯量直流伺服电机比液压伺服装置优越得多。于是60年代中期,不少机床制造厂在新设计的数控机床上普遍使用了小惯量直流伺服电机。

然而,小惯量直流伺服电机的瞬时输出力矩虽然可达额定值的十倍,但由于电机的热容量小,过载时间不能太长;而且其转速较高,高速运转时可达5000r/min,用于机床进给驱动时,必须使用齿轮减速箱。为了与移动部件的惯量匹配,每种不同规格的小惯量直流伺服电机要有与其相适应的专用齿轮减速器。不仅具有一定传动精度要求的齿轮减速器的价格超过了电机本身的价格,而且齿轮易磨损,从而增加传动间隙和影响传动精度。显然需要研制一种大扭矩、低转速的伺服电机,以便省去齿轮减速器。

70年代,美国盖梯斯(GETTYS)公司首先研制成功了大惯量直流伺服电机,即通常所指的宽调速直流伺服电机。这种电机的峰值扭矩为额定扭矩的10倍到15倍,由于具有大的扭矩/惯性比,大惯量直流伺服电机仍然具有与小惯量直流伺服电机相同的快速响应特性。这种电