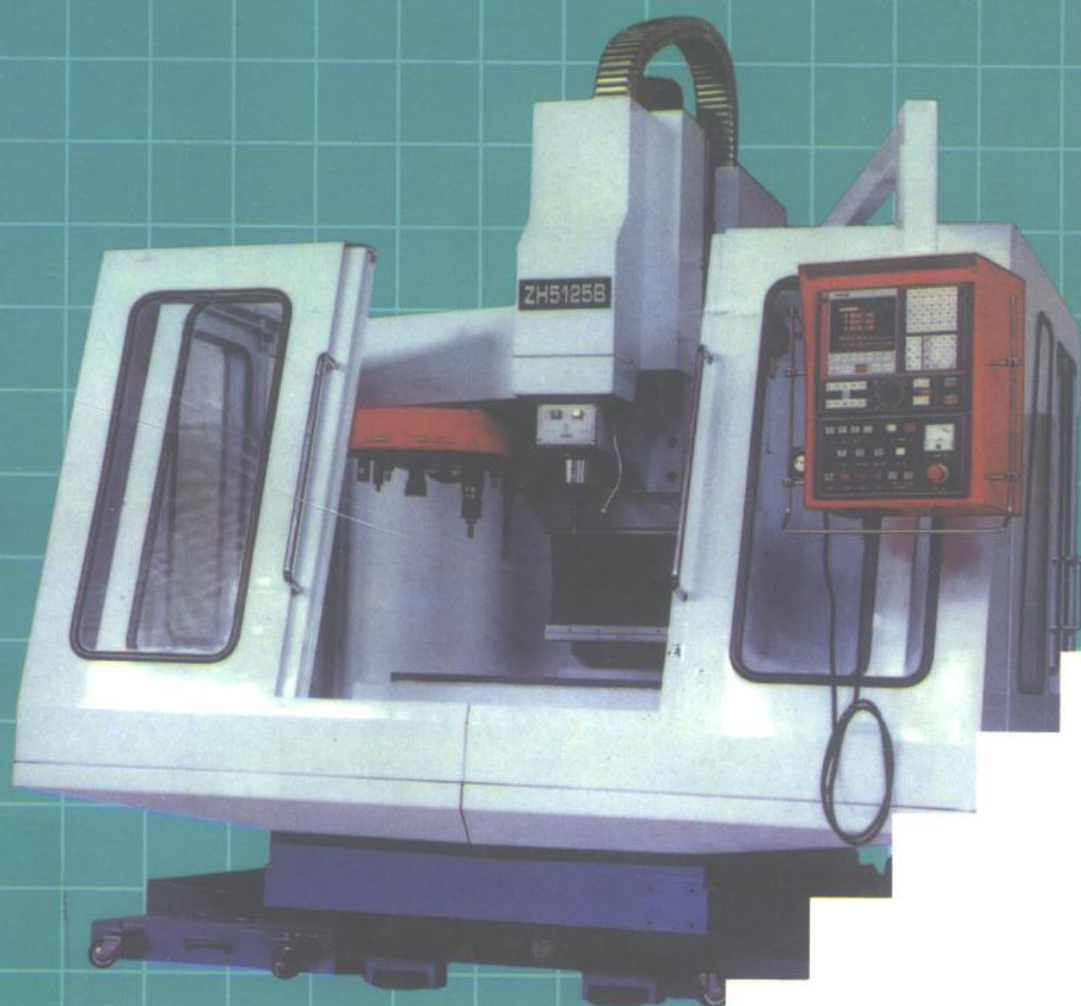


# 数控机床及其使用与维修

李峻勤 费仁元 主编



国防工业出版社

# 数控机床及其使用与维修

李峻勤 费仁元 主编

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

数控机床及其使用与维修/李峻勤,费仁元主编.  
—北京:国防工业出版社,2000.10  
ISBN 7-118-02233-0

I. 数… II. ①李… ②费… III. 数控机床  
IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 29421 号

110/50  
11

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

三河市腾飞胶印厂

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 23<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 548 千字

2000 年 10 月第 1 版 2000 年 10 月北京第 1 次印刷

印数:1-3000 册 定价:32.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

# 前 言

数控机床是一种高科技的机电一体化产品,是综合应用计算机技术、自动控制技术、精密测量及现代机械制造技术等各种先进技术相结合的产物。数控机床作为实现柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)和未来工厂自动化(FA)的基础已成为现代制造技术中不可缺少的生产手段,是机电一体化技术的重要组成部分。

随着科学技术的迅速发展,数控技术的应用范围日益扩大。近年来国内已引进和自行制造了相当数量的数控机床,各机械制造业中广泛应用数控技术,使数控机床在国内已经进入实用化阶段,成为现代机械制造业中的主要技术装备。为了引导国内广大用户掌握正确使用、保养和维修数控设备,充分发挥数控机床的经济效益,本书在介绍数控机床基本工作原理的同时,对如何正确使用数控机床及维修方法、故障排除方法进行论述。

本书既可作为高等工科院校机械类专业教材和教学参考书使用,也可为数控机床的使用工作者及有关工程技术人员提供参考。

本书共七章。第一章、第二章由李峻勤编写,第三章由邬学礼编写,第四章由杨建武、吴有仙编写第五章、第七章由费仁元编写,第六章由俞圣梅编写。黄旭东、康存峰为第二章提供资料并参加部分内容编写。本书由北京工业大学李峻勤教授、费仁元教授任主编。全书由北京机床研究所中国机电一体化协会俞圣梅教授级高级工程师担任主审。刘燕军也参加了审稿工作,并提出宝贵意见,在此表示衷心感谢。

全书编写过程中参考了近年来在数控技术方面的诸多论著和教材,本书编者对参考文献中的各位作者深表谢意。

由于编者水平有限,经验不足,对书中疏漏甚至错误之处,恳请读者不吝指正,以便修正和补充。

编 者

1999年9月于北京

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第一章 数控机床概述           | 1  |
| 第一节 数控机床的基本概念        | 1  |
| 一、数控机床的构成及基本工作原理     | 1  |
| 二、数控机床的适用范围          | 4  |
| 三、数控机床的特点            | 5  |
| 第二节 数控机床的基本类型        | 5  |
| 一、按运动轨迹分类            | 6  |
| 二、按伺服系统控制方式分类        | 7  |
| 三、按功能水平分类            | 8  |
| 四、按工艺用途分类            | 9  |
| 第三节 数控机床的发展趋势        | 9  |
| 一、高速度、高精度化           | 10 |
| 二、智能化                | 10 |
| 三、多功能化               | 10 |
| 四、高可靠性               | 11 |
| 五、适应以数控机床为基础的综合自动化系统 | 11 |
| 第二章 数控机床的程序编制        | 12 |
| 第一节 程序编制的内容和步骤       | 12 |
| 一、工艺处理阶段             | 13 |
| 二、数值计算               | 16 |
| 三、编写零件加工程序单及制作控制介质   | 20 |
| 第二节 手工程序编制           | 21 |
| 一、穿孔纸带及标准代码          | 21 |
| 二、数控机床的坐标轴及运动方向      | 23 |
| 三、数控机床坐标系            | 25 |
| 四、程序结构和程序段格式         | 25 |
| 五、常用的程序编制指令          | 28 |
| 六、加工中心的程序编制          | 35 |
| 七、数控车床的程序编制          | 43 |
| 第三节 数控自动化程序编制        | 53 |
| 一、数控自动化程序编制系统的组成及其特点 | 53 |
| 二、APT 语言简介           | 55 |

|                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| 三、数控自动化程序编制实例 .....                                            | 66         |
| <b>第三章 计算机数控系统 .....</b>                                       | <b>69</b>  |
| 第一节 概述 .....                                                   | 69         |
| 一、数控(NC)及计算机数控(CNC) .....                                      | 69         |
| 二、CNC 的内部工作过程 .....                                            | 70         |
| 三、数控的类型 .....                                                  | 71         |
| 四、CNC 的功能 .....                                                | 72         |
| 五、CNC 的性能 .....                                                | 74         |
| 第二节 CNC 的体系结构 .....                                            | 75         |
| 一、开放式体系结构是当前 CNC 发展的主流 .....                                   | 75         |
| 二、美国的开放系统体系结构标准(SOSAS)和欧共体的自动化系统控制装置的开放<br>系统体系结构(OSACA) ..... | 77         |
| 三、CNC 的硬件结构 .....                                              | 81         |
| 四、CNC 的软件结构 .....                                              | 91         |
| 第三节 CNC 中常用的插补方法 .....                                         | 108        |
| 一、直线插补算法 .....                                                 | 108        |
| 二、平面内圆弧插补算法 .....                                              | 110        |
| 第四节 CNC 的刀具半径补偿技术 .....                                        | 118        |
| 一、平面加工直线与直线转接时刀具中心轨迹交点坐标的计算 .....                              | 120        |
| 二、平面加工圆弧—圆弧转接时刀具中心轨迹交点坐标的计算 .....                              | 124        |
| 三、平面加工直线—圆弧或圆弧—直线转接时转接矢量的计算 .....                              | 127        |
| 四、刀具半径补偿的建立和撤消 .....                                           | 129        |
| 第五节 CNC 的加/减速控制 .....                                          | 132        |
| 一、前加/减速控制 .....                                                | 133        |
| 二、后加/减速控制 .....                                                | 134        |
| 第六节 可编程逻辑控制器(PLC)在 CNC 中的应用 .....                              | 136        |
| 一、可编程逻辑控制器(PLC)的结构和工作原理 .....                                  | 138        |
| 二、PLC 用户程序(顺序程序)的设计 .....                                      | 147        |
| <b>第四章 数控伺服系统 .....</b>                                        | <b>155</b> |
| 第一节 概述 .....                                                   | 155        |
| 一、数控机床对伺服驱动系统的要求 .....                                         | 155        |
| 二、伺服系统的分类 .....                                                | 156        |
| 三、新技术发展前景 .....                                                | 160        |
| 第二节 检测元件 .....                                                 | 162        |
| 一、概述 .....                                                     | 162        |
| 二、旋转变压器 .....                                                  | 163        |
| 三、感应同步器 .....                                                  | 164        |
| 四、光电编码器 .....                                                  | 167        |
| 五、光栅 .....                                                     | 168        |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第三节 伺服电机               | 170 |
| 一、直流伺服电机               | 172 |
| 二、交流伺服电机               | 181 |
| 三、步进电机                 | 189 |
| 第四节 伺服驱动器              | 195 |
| 一、伺服电机的驱动器装置           | 195 |
| 二、典型的直流伺服驱动电路          | 205 |
| 三、典型的交流伺服驱动电路          | 209 |
| 第五节 数控系统的位置控制          | 211 |
| 一、数控系统对位置伺服系统的基本要求     | 211 |
| 二、位置伺服系统的构成            | 213 |
| 三、一个实用的数控机床位置伺服系统设计及实现 | 219 |
| 第五章 数控机床机械结构           | 225 |
| 第一节 数控机床机械结构的主要特点与基本要求 | 225 |
| 一、数控机床加工特点对机械结构的要求     | 225 |
| 二、数控机床机械结构构成           | 225 |
| 三、提高数控机床机械结构性能的措施      | 226 |
| 第二节 数控机床主传动系统          | 232 |
| 一、基本要求和主要参数            | 232 |
| 二、数控机床主传动系统结构特点        | 234 |
| 三、主轴部件的结构              | 234 |
| 四、主传动系统常用元件            | 236 |
| 第三节 数控机床进给系统及常用元件      | 238 |
| 一、基本要求                 | 238 |
| 二、典型结构                 | 240 |
| 三、进给系统机械结构的关键元件        | 240 |
| 第四节 回转工作台              | 249 |
| 一、基本要求                 | 249 |
| 二、典型结构                 | 249 |
| 第五节 自动换刀装置             | 254 |
| 一、概述                   | 254 |
| 二、刀库                   | 255 |
| 三、机械手                  | 258 |
| 四、标准刀具系统               | 258 |
| 第六节 其他功能元件             | 263 |
| 一、排屑                   | 263 |
| 二、加工过程的检测装置            | 263 |
| 第六章 数控机床的选用与维修及故障排除方法  | 267 |
| 第一节 数控机床的选择与使用         | 267 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 一、数控机床的选择 .....               | 267 |
| 二、数控机床的使用 .....               | 280 |
| 第二节 数控机床的安装调试与验收 .....        | 292 |
| 一、数控机床的安装调试 .....             | 292 |
| 二、数控机床的试车验收 .....             | 295 |
| 第三节 数控机床的维修 .....             | 306 |
| 一、机床维修的一些基本概念 .....           | 307 |
| 二、机床的预防性维修与保养 .....           | 308 |
| 三、加工中心的基本组成及各主要部件易发生的故障 ..... | 311 |
| 第四节 数控系统的故障诊断及排除方法 .....      | 337 |
| 一、CNC 装置的维修 .....             | 338 |
| 二、数控系统现场维修基本条件和实施步骤 .....     | 341 |
| 第七章 柔性制造系统 .....              | 348 |
| 第一节 柔性制造系统概述 .....            | 348 |
| 一、什么是柔性制造系统 .....             | 348 |
| 二、典型柔性制造系统的工作流程 .....         | 350 |
| 三、中小批量零件生产自动化的途径 .....        | 350 |
| 四、柔性制造技术发展状况 .....            | 353 |
| 第二节 工作站 .....                 | 354 |
| 一、机加工工作站 .....                | 354 |
| 二、工件装卸站 .....                 | 355 |
| 三、控制站 .....                   | 355 |
| 四、清洗站 .....                   | 355 |
| 第三节 运储网络及物流 .....             | 355 |
| 一、物料传送形式 .....                | 355 |
| 二、自动运输小车 .....                | 357 |
| 三、驱动滚道输送 .....                | 360 |
| 四、机器人搬运 .....                 | 361 |
| 第四节 信息流及控制系统软件 .....          | 363 |
| 一、控制系统结构 .....                | 363 |
| 二、系统的故障诊断和预报 .....            | 365 |
| 第五节 实例介绍 .....                | 366 |
| 一、AMRF .....                  | 366 |
| 二、FFS500-2 柔性制造系统 .....       | 368 |
| 参考文献 .....                    | 369 |

# 第一章

## 数控机床概述

### 第一节 数控机床的基本概念

数控机床是一种用数字和符号构成的数值信息控制的自动化机床,简称 NC 机床 (Numerical Control Machine Tools)。数控机床是一个装有数字式程序控制系统的机床,该数控系统能够逻辑地处理号码或其他符号编码指令所规定的程序,这种程序控制系统(即数控系统)能自动地阅读输入载体上事先给定的数字指令,并将其译码和数据进行处理,从而使机床完成规定的动作。该指令是以数码和文字码的形式记录在控制介质(如程序纸带)上,控制介质上的信息代码输入数控装置后,经运算处理由数控装置发出一系列数字控制指令来实现对机床的自动控制。它是一种典型的机电一体化产品。

#### 一、数控机床的构成及基本工作原理

数控机床加工工件的过程如图 1-1 所示。

在数控机床上加工工件时,首先要根据零件图纸制订出加工方案,然后把图纸上的要求变成数控装置能够接受的信息代码,按一定的格式编写成程序并且记录在控制介质上,如纸带(也称穿孔纸带)、磁带等,即成为零件程序,这就是程序编制的过程。

把纸带(或磁带)送到数控系统的输入装置(如光电阅读机),输入装置把记录在控制介质上的信息读出,也可用手动数据输入方式(MDI 方式),用键盘直接将指令或设定参数输入数控装置,数控装置对信息代码进行译码、寄存,经处理和运算,把结果以数字信号的形式分配给机床各坐标的伺服机构。

由数控装置发出的脉冲信号,通过伺服机构(如步进电机、直流伺服电机、交流伺服电机),经传动装置(如滚珠丝杠螺母副等),驱动机床各运动部件,使机床按规定的顺序、速度和位移量进行工作,从而制造出符合图纸要求的零件。

由上述数控机床的工作过程可知,数控机床主要由数控装置、伺服驱动装置、机床主体和其他辅助装置构成(见图 1-1)。下面分别对各组成部分的基本工作原理进行概要说明。

#### (一) 数控装置

数控装置是数控机床的核心。

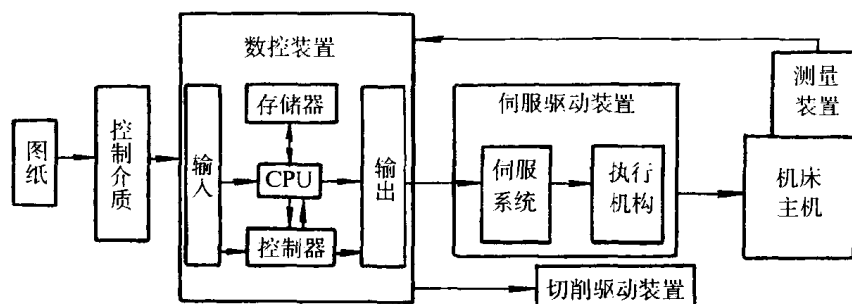


图 1-1 数控机床的工作过程及基本构成

现代数控装置均采用 CNC (Computer Numerical Control) 形式, 这种 CNC 装置一般使用多个微处理器, 以程序化的软件形式实现数控功能, 因此又称软件数控 (Software NC)。CNC 系统是一种位置控制系统, 它是根据输入数据插补出理想的运动轨迹, 然后输出到执行部件加工出所需要的零件。因此, 数控装置主要由输入装置、运算控制器、输出装置三个基本部分构成, 即 CNC 系统的输入——决策——输出三个方面。而所有这些工作都由计算机的系统程序进行合理地组织, 使整个系统协调地进行工作。

### 1. 输入装置

将数控指令输入给数控装置, 目前主要有键盘输入、磁盘输入和连接上级计算机的 DNC (直接数控) 输入, 但仍有不少系统还保留有光电阅读机的纸带输入形式。将数控指令输入给数控装置通常采用以下几种方式:

(1) 纸带输入方式。可用纸带光电阅读机读入零件程序, 直接控制机床运动, 也可以将纸带内容读入存储器, 用存储器中储存的零件程序控制机床运动。

(2) 手动输入方式。操作者可利用操作面板上的键盘输入加工程序的指令。常用的方法有: MDI 手动数据输入方法, 它适用于比较短的程序, 只能使用一次, 机床动作后程序即消失。

在控制装置编辑状态 (EDIT) 下, 用软件输入加工程序, 并存入控制装置的存储器中, 这种输入方法可重复使用程序。一般手工编程均采用这种方法。

在具有会话编程功能的数控装置上, 可按照显示器上提示的问题, 选择不同的菜单, 用人机对话的方法, 输入有关的尺寸数字, 就可自动生成加工程序。

(3) 采用 DNC 直接数控输入方式。把零件程序保存在上级计算机中, CNC 系统一边加工一边接收来自上级计算机的后续程序段。DNC 方式多用于采用 CAD/CAM 软件设计的复杂工件并直接生成零件程序的情况。

### 2. 运算器与控制器

运算处理主要是由主处理器来进行的。经过输入装置的工作, 已经将数据段送入零件程序缓冲器, 下一步工作是进行数据处理。数据处理的目的是完成插补运算前的准备工作。CNC 系统的输入数据段包括: 零件的轮廓信息 (起点、终点、直线、圆弧等)、加工速度及其他辅助加工信息 (如换刀、变速、冷却液开关等)。对这些数据和符号, 由计算机依靠译码程序进行识别。译码程序的任务是把零件中各数据段翻译成计算机内部能识别的语言, 这是数据处理的第一步。

数据处理程序还包括刀具半径补偿、速度计算及辅助功能的处理等。刀具半径补偿

是把零件轮廓轨迹转化成刀具中心的运动轨迹。速度计算是解决该加工数据段以什么样的速度运动,使程序速度能可靠地实现。零件程序经过译码程序、数据处理程序后,即可进行插补运算。

各数据段中的输入数据只输入某一段运动轨迹的起点、终点等坐标值。插补运算的任务是在某一段运动轨迹上进行“数据点的密化”工作,把起点与终点之间的空白补全。CNC 系统插补程序中有一个采样周期,即处理周期,每一次处理形成一个微小数据段,若干次处理周期后即完成一个数据段的加工,使该数据段从起点走到终点。

一个数据段插补前,必须先完成如换刀、变速、主轴启动停止、冷却液开关等辅助功能,只有在辅助功能完成后才开始插补运算。

因此,运算器是按照控制器的指令信号,对输入装置的输入数据进行运算,并按控制器的控制信号向输出装置发出进给脉冲。而控制器则是按信息代码去控制运算器、输入装置、输出装置,使机床按规定要求进行工作。

### 3. 输出装置

输出装置与伺服机构相联。输出装置根据控制器的命令接受运算器的输出脉冲,并把它送到各坐标的伺服控制系统,经过功率放大,驱动伺服系统,从而控制机床按规定要求运动。

#### (二) 伺服驱动装置

伺服驱动装置是数控装置与机床的联接环节,是数控机床执行机构的驱动部件。伺服驱动装置的作用是把接受来自数控装置发出的脉冲信号,经功率放大、整形处理后,转换成机床执行部件的直线位移或角位移运动。

伺服驱动装置包括驱动装置和执行机构两大部分。驱动装置由主轴驱动单元、进给驱动单元和主轴伺服电机、进给伺服电机组成。步进电机、直流伺服电机和交流伺服电机是常用的伺服元件。执行机构由相应的驱动装置来驱动。

数控机床中的主轴系统和进给系统是由数控装置发出的指令信号,并分别通过主轴驱动单元和进给驱动单元对主轴的旋转运动与坐标轴的进给运动进行控制。

由于伺服装置是数控机床的最后环节,伺服驱动装置的性能将直接影响数控机床的精度和速度等技术指标,因此,对数控机床的伺服驱动装置,要求具有良好的快速反应性能,准确而灵敏地跟踪数控装置发出的数字指令信号,并能忠实地执行来自数控装置的指令,提高系统的动态跟随特性和静态跟踪精度。

#### (三) 机床主体

机床主机是数控机床的主体。它包括床身、底座、立柱、横梁、滑座、工作台、主轴箱、进给机构、刀架及自动换刀装置等机械部件。它是在数控机床上自动地完成各种切削加工的机械部分。

数控机床主机的主要结构特点如下。

(1) 采用具有高刚度、高抗震性及较小热变形的机床新结构。通常用提高结构系统的静刚度、增加阻尼、调整结构件质量和固有频率等方法来提高机床主机的刚度和抗震性,使机床主机能适应数控机床连续自动地进行切削加工的需要。采取改善机床结构布局、减少发热、控制温升及采用热位移补偿等措施,可减少热变形对机床主机的影响。

(2) 现代数控机床广泛采用高性能的主轴伺服驱动和进给伺服驱动装置,使数控机床

的传动链缩短,可简化机床机械传动系统的结构。

(3)采用高传动效率、高精度、无间隙的传动装置和传动元件,如滚珠丝杠螺母副、塑料滑动导轨、直线滚动导轨、静压导轨等传动元件。

#### (四)数控机床的辅助装置

辅助装置作为数控机床的配套部件,是保证充分发挥数控机床功能所必需的配套装置。常用的辅助装置包括:气动、液压装置,排屑装置,冷却、润滑装置,回转工作台和数控分度头,防护,照明等各种辅助装置。

气动和液压装置是应用气动、液压系统,使机床完成自动换刀所需的动作,实现运动部件的制动和滑移齿轮变速移动,完成工作台的自动夹紧、松开、工件、刀具定位表面的自动吹屑等辅助功能。

排屑装置的作用是将切屑从加工区域排出。迅速有效地排除切屑是保证数控机床高效率地自动进行切削加工的一种必备的辅助装置。

回转工作台和数控分度头,能按照数控装置发出的指令信号作连续的回转进给运动或回转分度运动,是加工中心、数控铣床中常用的辅助装置。

## 二、数控机床的适用范围

现代大工业生产中已广泛采用刚性自动化装置,如汽车工业中大量采用的组合机床自动线。这类专用化的自动机床、自动生产线及自动车间等所谓“刚性制造系统”适用于大批量零件的生产。其生产效率高,经济效益好。但是,这种刚性制造系统很难改变已定的加工对象,适应产品变化的范围小。

数控机床是一种可编程的通用加工设备,但是因设备投资费用较高,还不能用数控机床完全替代其他类型的设备,因此,数控机床的选用有其一定的适用范围。数控机床最适宜加工结构比较复杂、精度要求高的零件,以及产品更新频繁、生产周期要求短的多品种小批量零件的生产。

图 1-2 可粗略的表示数控机床的适用范围。从图 1-2(a)可看出,通用机床多适用于零件结构不太复杂、生产批量较小的场合;专用机床适用于生产批量很大的零件;数控机床对于形状复杂的零件尽管批量小也同样适用。随着数控机床的普及,数控机床的适用范围也愈来愈广,对一些形状不太复杂而重复工作量很大的零件,如印制电路板的钻孔加工等,由于数控机床生产率高,也已大量使用。因而,数控机床的适用范围已扩展到图

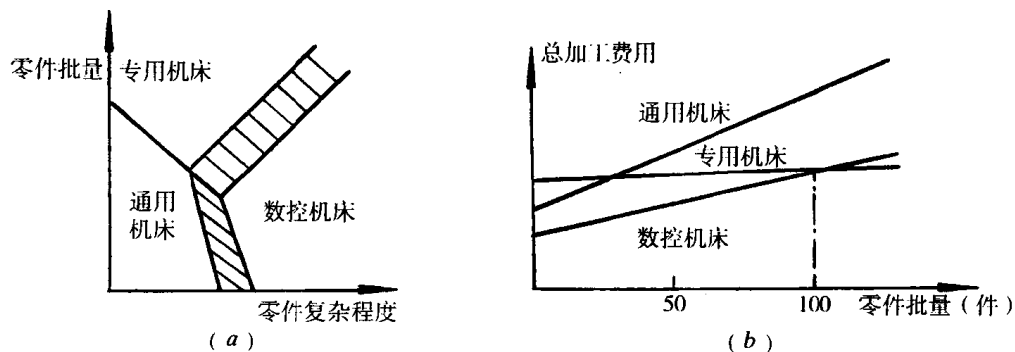


图 1-2 数控机床适用范围

1-2(a)中阴影所示的范围。

图 1-2(b)表示当采用通用机床、专用机床及数控机床加工时,零件生产批量与零件总加工费用之间的关系。据有关资料统计,当生产批量在 100 件以下,用数控机床加工具有一定复杂程度零件时,加工费用最低,能获得较高的经济效益。

由此可见,数控机床最适宜加工以下类型的零件:

- (1)生产批量小的零件(100 件以下);
- (2)需要进行多次改型设计的零件;
- (3)加工精度要求高、结构形状复杂的零件,如箱体类,曲线、曲面类零件;
- (4)需要精确复制和尺寸一致性要求高的零件;
- (5)价值昂贵的零件,这种零件虽然生产量不大,但是如果加工中因出现差错而报废,将产生巨大的经济损失。

### 三、数控机床的特点

与通用机床和专用机床相比,数控机床具有以下主要特点:

- (1)提高加工零件的精度,稳定产品的质量。
- (2)能完成普通机床难以完成或根本不能加工的复杂零件加工。例如,采用二轴联动或二轴以上联动的数控机床,可加工母线为曲线的旋转体曲面零件、凸轮零件和各种复杂空间曲面类零件。
- (3)生产率高。与普通机床相比,采用数控机床可提高生产率 2~3 倍,尤其对某些复杂零件的加工,如果采用带有自动换刀装置的数控加工中心,可实现在一次装夹下进行多工序的连续加工,生产率可提高十几倍甚至几十倍。
- (4)对产品改型设计的适应性强。当被加工零件改型设计后,在数控机床上只需要重新编写新零件的加工程序,更换一条新的穿孔纸带,或者用手动输入新零件的程序,就能实现对改型设计后零件的加工。因此,数控机床可以很快地从加工一种零件转换为加工另一种改型设计后的零件,这就为单件、小批量新试制产品的加工,为产品结构的频繁更新提供了极大的方便。
- (5)有利于制造技术向综合自动化方向发展。数控机床是机械加工自动化的基本设备,是新一代生产技术柔性制造单元(Flexible Manufacturing Cell—FMC)、柔性制造系统(Flexible Manufacturing System—FMS)、计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System—CIMS)的基本工作单元。以数控机床为基础建立起来的 FMC、FMS、CIMS 等综合自动化系统使机械制造的集成化、智能化和自动化得以实现。这是由于数控机床控制系统采用数字信息与标准化代码输入、并具有通信接口,容易实现数控机床之间的数据通信,最适宜计算机之间的联接,组成工业控制网络,实现自动化生产过程的计算、管理和控制。
- (6)减轻工人劳动强度、改善劳动条件。

## 第二节 数控机床的基本类型

数控机床的种类繁多,根据数控机床的功能和组成的不同,可以从多种角度对数控机床进行分类。

## 一、按运动轨迹分类

### (一) 点位控制系统

这类控制系统的特点是只控制刀具相对于工件定位点的位置精度,不控制点与点之间的运动轨迹,在移动过程中刀具不进行切削。为了既提高生产效率又保证定位精度,机床工作台(或由刀架)移动时采用机床设定的最高进给速度快速移动,在接近终点前进行分级或连续降速,达到低速趋近定位点,减少因运动部件惯性引起的定位误差。例如数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床、数控点焊机及数控测量机等,就可采用简单而价格低廉的点位控制系统,如图 1-3(a)所示。

### (二) 直线控制系统

这类控制系统的特点是除了控制起点与终点之间的准确位置外,而且要求刀具由一点到另一点之间的运动轨迹为一条直线,并能控制位移的速度,因为这类数控机床的刀具在移动过程中要进行切削加工。直线控制系统的刀具切削路径只沿着平行于某一坐标轴方向运动,或者沿着与坐标轴成一定角度的斜线方向进行直线切削加工。采用这类控制系统的机床有数控车床、数控铣床等。

同时具有点位控制功能和直线控制功能的点位/直线控制系统,主要应用在数控镗铣床、加工中心机床上。

为了在刀具磨损后在调整重磨后的刀具或更换刀具时能比较方便地得到合格的零件,这类机床的数控系统常具有刀具半径补偿功能、刀具长度补偿功能和主轴转速控制功能等,如图 1-3(b)所示。

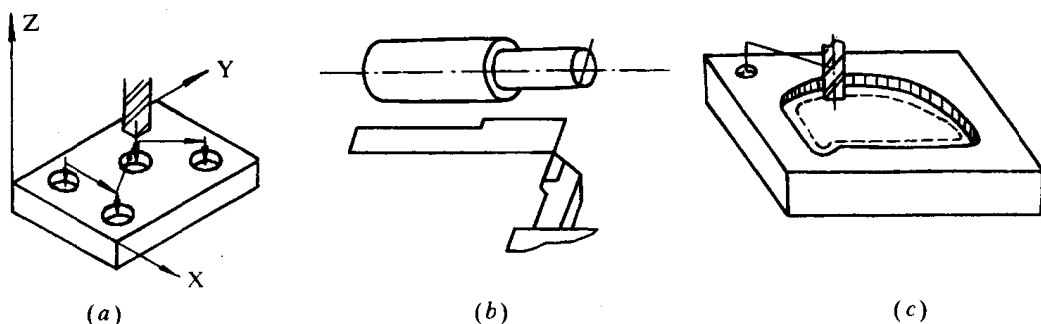


图 1-3 数控系统控制方式

### (三) 轮廓控制系统

轮廓控制又称连续控制。它的特点是能够对两个或两个以上的坐标轴方向同时进行连续控制,并能对位移和速度进行严格的不间断的控制。这类数控机床需要控制刀尖整个运动轨迹,使它严格地按加工表面的轮廓形状连续地运动,并在移动时进行切削加工,可以加工任意斜率的直线、圆弧和其他函数关系曲线。采用这类控制系统的机床有数控铣床、数控车床、数控磨床、加工中心及数控绘图机等。

这类数控机床绝大多数具有两坐标或两坐标以上的联动功能,不仅有刀具半径补偿、刀具长度补偿功能,而且还具有机床轴向运动误差补偿,丝杠、齿轮的间隙补偿等一系列功能,如图 1-3(c)所示。

按照可联动轴数,即同时控制的轴数,可以有 2 轴控制、2.5 轴控制、3~5 轴控制等。

2 轴控制即二坐标数控机床,能实现二坐标轴的连续控制。如数控车床的  $X$ 、 $Z$  方向可同时控制,为二维控制。

2.5 轴控制是指两个轴能连续控制,第三轴为点位或直线控制。它能实现三个坐标方向( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ )的二维控制。

3 轴控制是三个坐标方向( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ )都能同时控制,是三维控制。

5 轴控制为三个坐标方向( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ )与转台的转动  $B$  和刀具的摆动  $A$  同时联动。这种 5 轴同时控制的数控系统,可实现使刀具垂直于任何双曲线平面,特别适用于加工汽轮机叶片、机翼等形状复杂的曲面零件。

## 二、按伺服系统控制方式分类

### (一)开环伺服系统

这种控制方式不带位置测量元件。数控装置根据控制介质上的指令信号,经控制运算发出指令脉冲,使伺服驱动元件转过一定的角度,并通过传动齿轮、滚珠丝杠螺母副,使执行机构(如工作台)移动或转动。图 1-4 为开环控制系统的框图。这种控制方式没有来自位置测量元件的反馈信号,对执行机构的动作情况不进行检查,指令流向为单向,因此被称为开环控制系统。

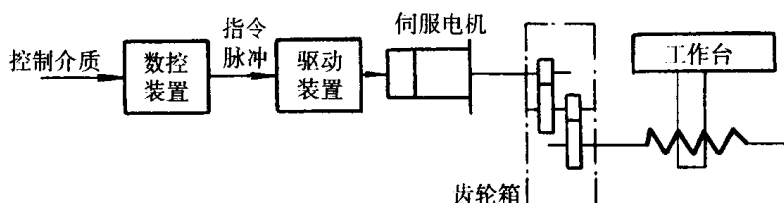


图 1-4 开环控制系统框图

步进电机伺服系统是最典型的开环控制系统。这种控制系统的特点是系统简单,调试维修方便,工作稳定,成本较低。由于开环系统的精度主要取决于伺服元件和机床传动元件的精度、刚度和动态特性,因此控制精度较低。目前国内多用于经济型数控机床,以及对旧机床的改造。

### (二)闭环伺服系统

这是一种自动控制系统,其中包含功率放大和反馈,使输出变量的值响应输入变量的值。数控装置发出指令脉冲后,当指令值送到位置比较电路时,此时若工作台没有移动,即没有位置反馈量信号时,指令值使伺服驱动电机转动,经过齿轮、滚珠丝杠螺母副等传动元件带动机床工作台移动。装在机床直线运动部件工作台上的位置测量元件,测出工作台的实际移动量后,反馈到数控装置的比较器中与指令脉冲信号进行比较,并用比较后的差值进行控制。若两者存在差值,经放大器放大后,再控制伺服驱动电机转动,直至差值为零时,工作台才停止移动。这种系统被称为闭环控制系统。图 1-5 为闭环控制系统框图。

从理论上讲,闭环控制系统中机床工作精度主要取决于测量元件的精度,并不取决于传动系统精度。因此,采用高精度测量元件可以使闭环控制系统达到很高工作精度。但是由于许多机械传动环节都包含在反馈环路内,而各种反馈环节具有丝杠与螺母、工作台

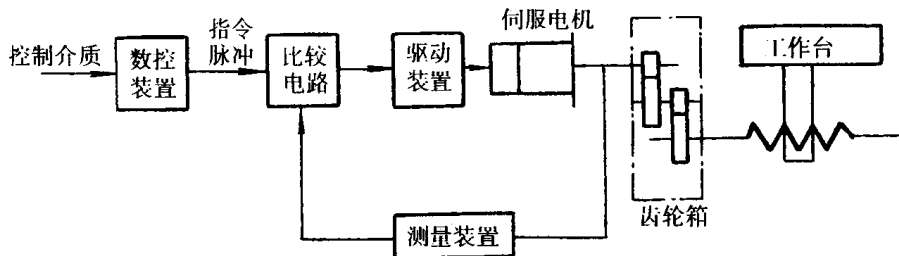


图 1-5 闭环控制系统框图

与导轨的摩擦,且各部件的刚性、传动链的间隙等都是可变的,因此机床的谐振频率、爬行、运动死区等造成的运动失步,可能会引起振荡,系统不易稳定,调试和维修比较复杂。闭环系统的检测精度和伺服传动链能够实现的补偿精度相匹配。

闭环伺服系统的优点是精度高、速度快。主要用在精度要求较高的数控镗铣床、数控超精车床、数控超精镗床等机床上。

### (三)半闭环伺服系统

目前,大多数数控机床采用半闭环伺服控制系统。这种控制系统不是直接测量工作台的位移量,而是通过旋转变压器、光电编码盘或分解器等角位移测量元件,间接测量伺服机构中执行元件的转角。如把测量元件安装在伺服电机端部或丝杠端部上,通过计算换算出工作台的实际位移量,再将计算值与指令值进行比较,用比较后的差值进行控制,使机床作补充位移,直到差值消除为止。这种系统中滚珠丝杠螺母副和工作台部件均在反馈环路之外,其传动误差等仍然会影响工作台的位置精度,故称为半闭环伺服控制系统。图 1-6 为半闭环伺服系统的框图。

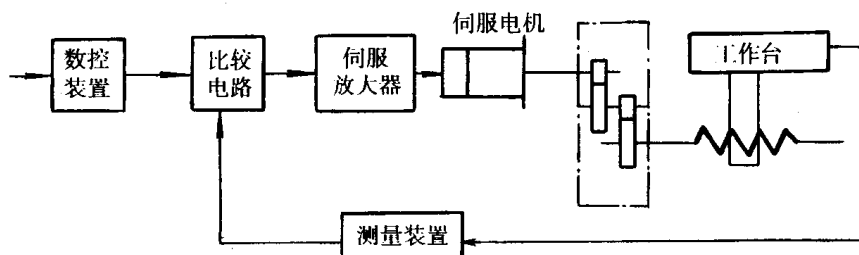


图 1-6 半闭环伺服系统框图

半闭环伺服系统介于开环和闭环之间,由于角位移测量元件比直线位移测量元件结构简单,因此装有精密滚珠丝杠螺母副和精密齿轮的半闭环系统被广泛地采用。目前已经把角位移测量元件与伺服电机设计成一个部件,使用起来更为方便。半闭环伺服系统的加工精度显然没有闭环系统高,但是由于采用了高分辨率的测量元件,这种控制方式仍可获得比较满意的精度和速度。系统调试比闭环系统方便,稳定性好,成本也比闭环系统低,是一般数控机床常用的伺服控制系统。

### 三、按功能水平分类

按功能水平不同可以把数控机床分为经济型、普及型和高级型三类。

### (一)经济型数控机床

经济型数控机床的控制系统比较简单,通常采用以步进电机作为伺服驱动元件的开环控制系统,分辨率为 $0.01\text{mm}$ ,进给速度在 $8\sim 15\text{m/min}$ 之间,最多能控制3个轴,可实现3轴三联动以下的控制,一般只有简单的CRT字符显示或简单数码管显示。数控系统多采用8位CPU控制。程序编制方便,操作人员通过控制台上的键盘手动输入指令与数据,或直接进行操作。经济型数控机床通常采用单板机或单片机数控系统,功能较简单,价格低廉,主要用于车床、线切割机床及旧机床的改造。

### (二)普及型和高级型数控机床

普及型和高级型数控机床采用全功能数控系统,控制功能比较齐全,属于中、高档数控系统。通常采用半闭环的直流伺服系统或交流伺服系统,也采用闭环伺服系统。

普及型数控机床采用16位或32位微处理机的数控系统,机床进给系统中采用半闭环的交流伺服或直流伺服驱动,能实现4轴四联动以下的控制,分辨率为 $1\mu\text{m}$ ,进给速度为 $15\sim 20\text{m/min}$ ,有齐全的CRT显示,能显示字符、图形和具有人机对话功能,具有DNC(Direct Numerical Control)直接数字控制通信接口。

高级型数控机床在数控系统中采用32位或64位微处理机,进给系统中采用高响应特性的伺服驱动,可控制5个轴,能实现5轴五联动以上控制,分辨率可达到 $0.1\mu\text{m}$ ,进给速度为 $15\sim 100\text{m/min}$ ,能显示三维图形,具有MAP(Manufacturing Automation Protocol)制造自动化通信接口,具有联网功能。

## 四、按工艺用途分类

数控机床按不同工艺用途分类有数控的车床、铣床、磨床与齿轮加工机床等。在数控金属成型机床中,有数控的冲压机、弯管机、裁剪机等。在特种加工机床中有数控的电火花切割机、火焰切割机、点焊机、激光加工机等。近年来在非加工设备中也大量采用数控技术,如数控测量机、自动绘图机、装配机、工业机器人等。

加工中心是一种带有自动换刀装置的数控机床,它的出现突破了一台机床只能进行一种工艺加工的传统模式。它是以工件为中心,能实现工件在一次装夹后自动地完成多种工序的加工。常见的有以加工箱体类零件为主的镗铣类加工中心和几乎能够完成各种回转体类零件所有工序加工的车削中心。

近年来一些复合加工的数控机床也开始出现,其基本特点是集中多工序、多刀刃、复合工艺加工在一台设备中完成。

## 第三节 数控机床的发展趋势

为了进一步提高劳动生产率,降低生产成本,缩短产品的研制和生产周期,加速产品更新换代,以适应社会对产品多样化的需求,近年来,人们把自动化生产技术的发展重点转移到中、小批量生产领域中,这就要求加速数控机床的发展速度,使其成为一种高效率、高柔性和低成本的制造设备,以满足市场的需求。

数控机床是柔性制造单元(FMC)、柔性制造系统(FMS)以及计算机集成制造系统(CIMS)和敏捷制造(Agile Mfg)的基础,是国民经济的重要基础装备。随着微电子技术和