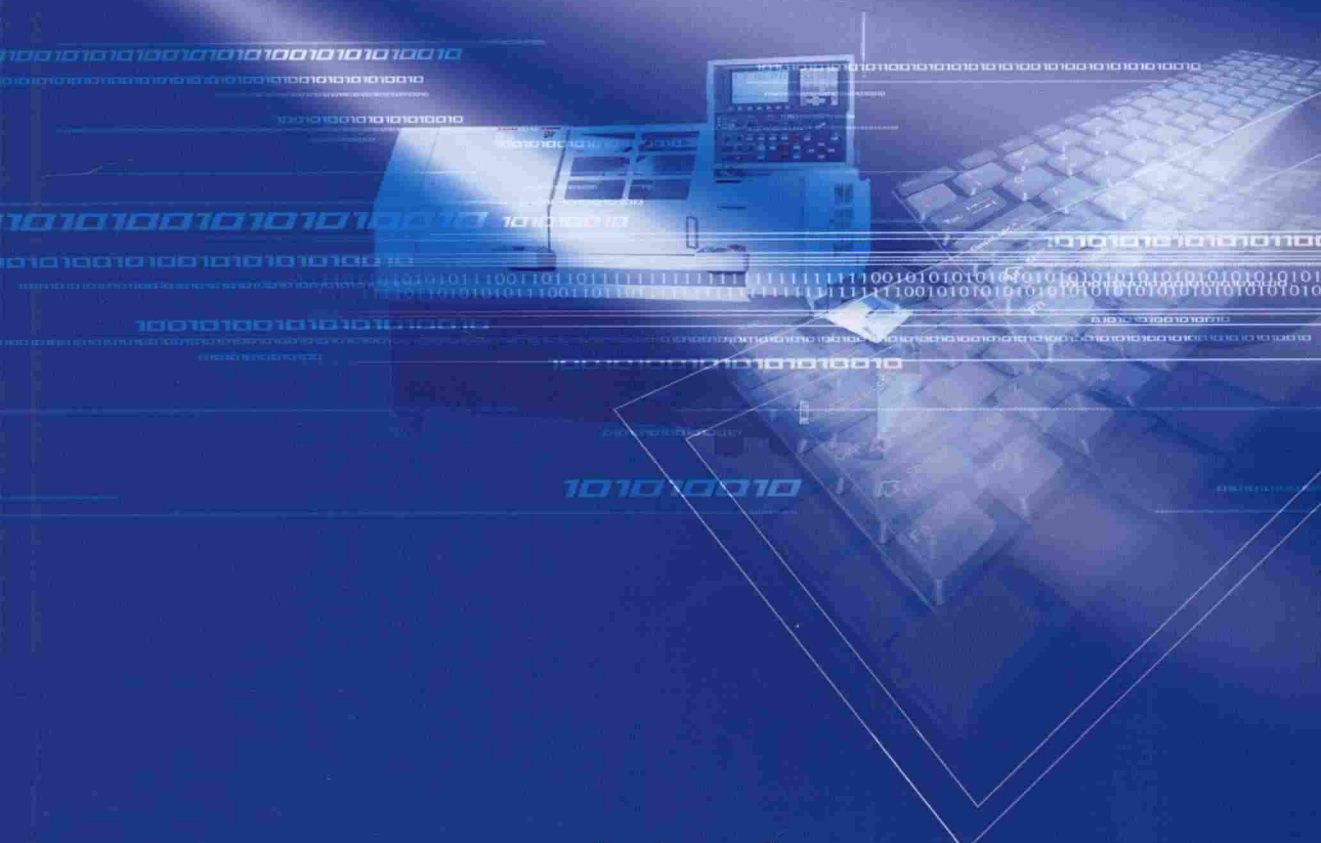


数控编程与操作

SHUKONG BIANCHENG YU CAOZUO

(第2版)

主编 陈向荣



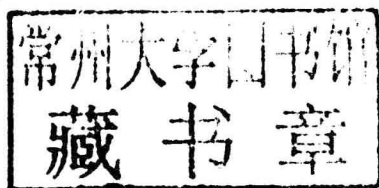
国防工业出版社

National Defense Industry Press

数控编程与操作

(第2版)

主 编 陈向荣
副主编 谷长峰 朱晓波 雷云进
参 编 张报山 何春生 谭赞良



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

全书共分为六章,第一章简述了数控机床的组成与基本原理、数控机床的特点与发展方向、数控机床的伺服系统与坐标系统;第二章介绍数控车床的结构,FANUC-0i(发那科)系统数控车床的操作及编程方法;第三章介绍数控镗铣床和加工中心的结构,详细介绍了FANUC(发那科)、SIEMENS(西门子)系统数控铣床的操作及其编程方法;第四章介绍数控快走丝线切割机床的结构、操作与数控线切割加工及其编程方法;第五章介绍应用MasterCAM系统进行数控编程和加工的方法;第六章介绍数控机床的使用和维护。在各章中配有一些思考练习题。

图书在版编目(CIP)数据

数控编程与操作 / 陈向荣主编. —2版. —北京:
国防工业出版社, 2012. 1
ISBN 978-7-118-07743-8

I. ①数... II. ①陈... III. ①数控机床-程序设计-高等职业教育-教材 ②数控机床-操作-高等职业教育-教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 234839 号

※

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 100048)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16¼ 字数 371 千字
2012 年 1 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

近年来,数控技术的发展十分迅速,数控机床的普及率越来越高,在机械制造业中得到了广泛的应用。数控制造技术是集机械制造技术、计算机技术、微电子技术、现代控制技术、网络信息技术、机电一体化技术于一身的多学科高新制造技术。数控技术水平的高低、数控机床的拥有量已经成为衡量一个国家制造业现代化的标志。

本书选用了技术先进、占市场份额最大的 FANUC(发那科)、SIEMENS(西门子)系统作为典型进行剖析。本课程注重学生操作能力的培养,在保证课程内容体系的相对完整和系统的基础上,以企业和社会对数控机床加工操作工的要求为依据,以培养学生的数控加工实训能力为目的,结合目前高职类学校开展的技能抽查进行编写,以项目训练为主,力求突出针对性和实用性,使学生逐步形成一定的职业能力。本书适用于高职模具、数控等专业的教学。

由于编者水平有限,欠妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2011 年 6 月

目 录

第一章 数控机床概述	1
第一节 数控技术的基本概念	1
第二节 数控机床的组成	1
第三节 数控机床的分类	4
第四节 数控机床加工的特点和应用范围	7
第五节 数控机床的发展	8
思考与练习	13
第二章 数控车削加工及其编程	14
第一节 数控车床简介	14
第二节 数控车床操作安全规则及操作步骤	16
第三节 数控车床的操作	18
第四节 数控车床编程基础	28
第五节 常用编程指令	33
第六节 基本加工程序的编制	39
第七节 螺纹加工	44
第八节 循环加工	51
第九节 钻孔固定循环	66
第十节 刀具补偿功能	71
第十一节 车削加工编程实例	74
思考与练习	94
第三章 数控镗铣床的操作与编程	98
第一节 数控镗铣床与镗铣加工中心简介	98
第二节 数控镗铣床操作安全规则及操作步骤	104
第三节 数控镗铣床编程基础	106
第四节 FANUC Oi Mate - MB 系统数控铣床基本操作	113
第五节 SIEMENS - 802S 系统数控铣床基本操作	120
第六节 数控铣床编程基础	129
第七节 数控铣床旋转指令、镜像指令、平移指令	154

第八节 数控铣床宏程序.....	172
思考与练习.....	182
第四章 数控快走丝线切割加工及其编程	188
第一节 数控快走丝线切割机床的操作.....	188
第二节 数控快走丝线切割加工及其编程操作.....	197
第三节 AUTOP 绘图编程	203
第四节 3B 系统编程	210
第五节 G 指令编程.....	213
思考与练习.....	217
第五章 应用 MasterCAM 系统进行数控编程加工	218
第一节 MasterCAM 系统数控编程加工的基本内容与步骤	218
第二节 MasterCAM 系统的基础知识	219
第三节 MasterCAM 系统进行 NC 程序联机传送	233
思考与练习.....	237
第六章 数控机床的使用与维护	238
第一节 数控机床的选型.....	238
第二节 数控机床的维护与保养.....	239
思考与练习.....	246
附录	247
附 1 数控车床 FANUC Oi - TC 数控系统准备功能 G 指令	247
附 2 数控车床 FANUC Oi - MB 数控系统辅助功能 M 指令	247
附 3 数控铣床 FANUC Oi - MB 数控系统准备功能 G 指令	248
附 4 数控铣床 FANUC Oi - MB 数控系统辅助功能 M 指令	249
附 5 数控铣床 SIEMENS - 802S 数控系统准备功能 G 指令	250
附 6 数控铣床 SIEMENS - 802S 数控系统辅助功能 M 指令	251
参考文献	252

第一章 数控机床概述

第一节 数控技术的基本概念

数控技术是 20 世纪中期发展起来的机床控制技术。现代计算机数控技术是综合了计算机、自动控制、电机、电气传动、测量、监控、机械制造等技术学科领域最新成果而形成的一门边缘科学技术。数控技术是柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)、计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)和工厂自动化(Factory Automation, FA)的基础技术之一,是现代机械制造业中的高新技术之一。

数控技术包含许多基本概念,了解这些基本概念,对于学习和掌握数控技术和数控机床的操作与编程具有重要意义。

数字控制(Numerical Control, NC)是一种自动控制技术,是用数字化信号对机床的运动及其加工过程进行控制的一种方法。

数控机床(NC Machine)就是采用了数控技术的机床,或者说是装备了数控系统的机床。

数控系统(NC System)是数字控制系统的简称,它能逻辑地处理输入到系统中具有特定代码的程序,并将其译码,从而使机床运动并加工零件。

计算机数控系统(Computerized Numerical Control System)由装有数控系统程序的专用计算机、输入输出设备、可编程序控制器(PLC)、存储器、主轴驱动及进给驱动装置等部分组成,习惯上称为 CNC 系统。目前通常所说的数控系统,一般均指计算机数控系统。

输入数控系统中的、使数控机床执行一个确定的加工任务的、具有特定代码和其他符号编码的一系列指令,称为数控程序(NC Program)或零件程序(Part Program)。

生成用数控机床进行零件加工的数控程序的过程,称为数控编程(NC Program)。

根据零件图样及工艺要求等原始条件编制零件数控加工程序,输入数控系统,控制数控机床中刀具与工件的相对运动,从而完成零件的加工,称为数控加工。

第二节 数控机床的组成

数控机床一般由 CNC 系统、伺服系统和机械系统三大部分组成。图 1.1 是数控机床的组成框图。

一、CNC 系统

这是数控机床的核心,主要功能如下:

- (1) 多坐标控制(多轴联动)同时控制数控机床的各坐标轴的进给运动。
- (2) 准备功能(G 功能)用来指定机床的运动方式。

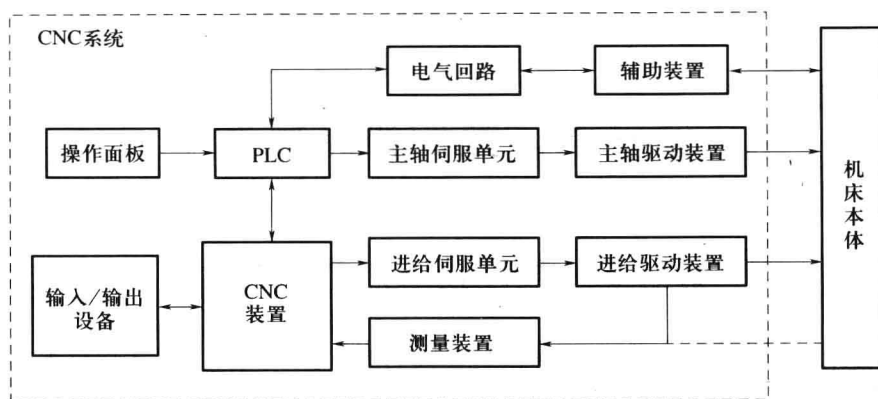


图 1.1 数控机床的组成

(3) 多种函数的插补(直线、圆弧、抛物线及螺旋线插补等)用于刀具进给运动轨迹插补。

(4) 可编程偏置设定 用于设置程序原点、刀具长度和刀具半径补偿值。

(5) 代码转换 包括 EIA/ISO 代码转换、英制/公制转换、二—十进制转换、绝对坐标/相对坐标(增量坐标)转换等。

(6) 固定循环加工 将一些典型的循环加工过程,如钻孔、攻螺纹、镗孔、切螺纹等,预先编制好程序并存放在存储器中,用 G 代码进行指定,从而简化零件的加工编程。

(7) 进给功能 指定进给速度或进给率。

(8) 主轴功能 指定主轴转速。

(9) 辅助功能 规定主轴的启动、停止、转向及冷却液的打开和关闭等。

(10) 刀具功能 选择刀具和换刀。

(11) 辅助编程功能 包括图形缩放和平移、坐标旋转、极坐标、镜像等功能,减少了手工编程的工作量和难度。

(12) 各种补偿功能 包括刀具半径、刀具长度、传动间隙、螺距误差的补偿。

(13) 子程序功能 调用子程序,使编程灵活,并简化编程。

(14) 宏程序功能 通过编辑子程序中的变量来改变刀具路径与刀具位置。

(15) 人机对话编程功能 包括数据及加工程序的输入、编辑及修改。

(16) 字符图形显示功能 在 CRT 上显示数控程序、各种参数、各种补偿值、坐标位置、故障信息、人机对话编程菜单、零件图形、动态刀具运动轨迹等。

(17) 故障的自诊断功能 设置各种诊断程序,防止故障的发生及扩大。

(18) 通信及联网功能 用于实现程序的传输、计算机直接数控(Directed NC, DNC)、分布式(Distributed)计算机数控和制造自动化协议(Manufacturing Automation Protocol, MAP)。

二、伺服系统

数控机床的伺服系统(驱动系统)是数控机床的重要组成部分,用于实现数控机床的进给伺服控制和主轴伺服控制。

(1) 进给伺服系统 是数控机床的进给运动执行部分,包括位置控制单元、速度控制单元、执行电动机、测量反馈单元等部分,它接受计算机发来的各种动作命令,驱动执行电动机运动。执行电动机可以是步进电动机、电液马达、直流伺服电动机或交流伺服电动机。进给伺服系统的组成如图 1.1 所示,其性能的好坏将直接影响数控机床加工精度和生产效率。

(2) 主轴伺服系统 是数控机床主轴运动的控制部分,包括主轴控制单元、主轴电动机、测量反馈单元等部分。

三、机械系统

根据加工工艺进行分类,可将数控机床分为数控车床、数控铣床、数控镗床、数控磨床、数控冲压机床、数控电加工机床、数控测量机床等,这种分类方法主要是针对数控机床的机械结构进行的。

近 20 年来,由于进给驱动、主轴驱动和数控技术的发展,数控机床的机械结构已从初期对普通机床局部结构的改进,逐步发展到形成数控机床的独特机械结构。尽管如此,普通机床的构成模式仍适用于现代数控机床,其零部件的设计方法仍基于普通机床设计的理论和计算方法,但数控机床零部件的性能指标要求较高。

数控机床的机械系统,除机械基础件以外,由下列各部分组成:

(1) 主轴部分:包括主轴电动机和主轴传动系统。

(2) 进给系统:包括进给执行电动机和进给传动系统。

(3) 实现工件回转、定位的装置和附件。

(4) 实现某些部件动作和辅助功能的系统和装置。如液压、气动、润滑、冷却等系统和排屑、防护等装置。

(5) 刀库和自动换刀装置(Automatic Tools Changer,ATC)。

(6) 自动托盘交换装置(Automatic Pallet Changer,APC)。

机床基础件或称机床大件,通常是指床身(或底座)、立柱、横梁、滑台和工作台等,它是整台机床的基础和框架。机床的其他零部件,或者固定在基础件上,或者工作时在它的导轨上运动。其他机械结构组成则按机床的功能需要选用,如一般的数控机床除基础件以外,还有主轴部件、进给系统以及液压、润滑、冷却等辅助装置,这是数控机床机械系统的基本构成。

加工中心则至少还应有 ATC,有的还有双工位 APC 等。柔性制造单元除 ATC 外还带有工位较多的 APC,有的甚至还配有用于上下料的工业机器人。数控机床还可根据自动化程度、可靠性要求和特殊功能需要,选用各种类型的刀具破损监控、机床和工件精度检测、补偿装置和附件等。有些特种加工数控机床,如电加工数控机床和激光切割机,其主轴部件不同于一般数控金属切削机床,但采用伺服电动机驱动机床运动部件实现进给运动,则是所有数控机床的共同特性。

与普通机床不同的是,数控机床的机械结构具有如下特点:

(1) 由于大多数数控机床采用了高性能的主轴部件及进给伺服驱动系统,因此,数控机床的机械传动结构大大简化,传动链较短。

(2) 为了适应数控机床连续地自动化加工,数控机床的机械结构具有较高的动态刚

度、阻尼精度及耐磨性,热变形较小。

(3) 更多地采用高效、高精度传动部件,如滚珠丝杆副、直线滚动导轨等。

第三节 数控机床的分类

数控机床可以根据不同的方法进行分类,常用的分类方法有按数控机床运动轨迹进行分类、按进给伺服系统控制方式进行分类、按加工工艺类型分类、按数控系统功能水平进行分类。

一、按数控机床运动轨迹进行分类

1. 点位控制数控机床

点位控制(Positioning Control)又称为点到点控制(Point to Point Control)。刀具从某一位置向另一位置移动时,不管中间的移动轨迹如何,只要最后刀具能正确到达目标位置的控制方式称为点位控制。这类控制在移动过程中不进行加工,对两点间的移动速度及运动轨迹没有严格要求,可以先沿一个坐标移动完毕,再沿另一个坐标移动,也可以沿多个坐标同时移动。这类数控机床主要有数控钻床、数控坐标镗床和数控冲床等,相应的数控系统称为点位数控系统。

2. 直线控制数控机床

直线切削控制(Straight Cut Control)又称为平行切削控制(Parallel Cut Control)。这类数控机床除了控制点对点的准确位置之外,还要保证两点之间移动的轨迹是一条直线,而且对移动的速度也要进行控制,因为这一类数控机床在两点之间移动时要进行切削加工。这一类数控机床包括简易数控车床、数控镗铣床等。一般情况下,这些数控机床有2或3个可控坐标轴,但同时控制的坐标轴只有一个。

为了在刀具磨损或更换刀具后仍可得到合格的零件,这类机床的数控系统常常具有刀具半径补偿、刀具长度补偿和主轴转速控制功能。

3. 轮廓控制的数控机床

轮廓控制又称连续轨迹控制。这类数控机床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,因而可以进行曲线或曲面的切削加工。这类机床有两坐标及两坐标以上的数控镗铣床、加工中心等。

现代数控机床绝大多数具有两坐标及两坐标以上联动的功能,而且具有刀具半径补偿、丝杆和齿轮的间隙补偿等功能。

按同时控制且相互独立的轴数,可以有2、3、4、5轴控制等。

二、按进给伺服系统控制方式进行分类

1. 开环伺服系统数控机床

这是一种比较原始的数控机床。这类机床的数控系统将零件的程序处理后,输出数据指令给伺服系统,驱动机床运动,没有来自位置传感器的反馈信号。最典型的系统就是采用步进电动机的伺服系统,如图1.2所示。它一般由步进电动机驱动器、步进电动机、

配速齿轮和丝杆螺母传动副等组成。数控系统每发出一个指令脉冲,经驱动器功率放大后,驱动步进电动机旋转一个固定角度(即步距角),再经传动机构带动工作台移动。这类系统的信息流是单向的,即进给脉冲发出去以后,实际移动值不再反馈回来,所以称为开环控制。这类机床较为经济,但加工速度和加工精度较低。

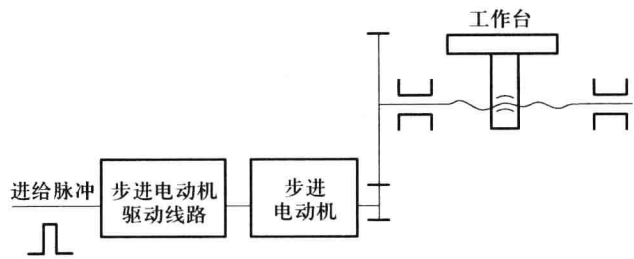


图 1.2 开环控制数控机床的工作原理

2. 闭环伺服系统数控机床

这类机床带有检测装置,直接对工作台的移动量进行检测,其原理如图 1.3 所示。当数控系统发出位移指令脉冲,经电动机和机械传动装置使机床工作台移动时,安装在工作台上的位置检测器把机械位移转换成电信号,反馈到输入端与输入信号进行比较,得到的差值经过放大和变换,最后驱动工作台向减少误差的方向移动,直到差值等于零为止。这类控制系统,因为把机床工作台纳入了位置控制环,故称为闭环控制系统。该系统可以消除包括工作台传动链在内的运动误差,因而定位精度高、调节速度快。但由于该系统受进给丝杆的拉压刚度、摩擦阻尼特性和间隙等非线性因素的影响,给调试工作造成较大的困难。如果各种参数匹配不当,将会引起系统振荡,造成系统不稳定,影响定位精度。由于闭环伺服系统复杂和成本高,故适应于精度要求很高的数控机床,如精密数控镗铣床、超精密数控车床等。

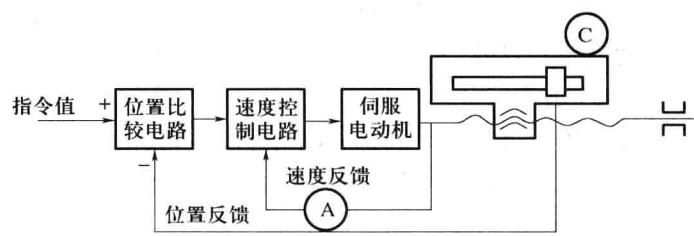


图 1.3 闭环控制数控机床的工作原理
A—速度传感器；C—直线位移传感器。

3. 半闭环伺服系统数控机床

大多数数控机床是半闭环伺服系统,这类系统用安装在进给电动机轴端的角位移测量元件(如旋转变压器、脉冲编码器、圆光栅等)来代替安装在机床工作台上的直线测量元件,用测量电动机轴的旋转角位移来代替测量工作台直线位移,其原理如图 1.4 所示。因这种系统未将丝杆螺母副、齿轮传动副等传动装置包含在闭环反馈系统中,因而称之为半闭环控制系统,它不能补偿传动装置的传动误差,但却可以获得稳定的控制特性。这类系统介于开环与闭环之间,精度没有闭环高,调试却比闭环方便,因而得到了广泛应用。

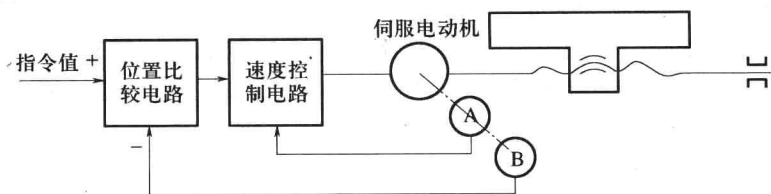


图 1.4 半闭环控制数控机床的工作原理

A—速度传感器；B—角度传感器。

三、按加工工艺类型进行分类

(1) 普通数控机床 这类数控机床和传统的通用机床一样,有车、铣、钻、镗、磨床等,而且每一类又包含很多品种,例如数控铣床中就有立铣、卧铣、工具铣等,这类机床的工艺性能和通用机床相似。

(2) 加工中心机床 这是一种在普通数控机床上加装一个刀具库和自动换刀装置而构成的数控机床。它和普通数控机床的区别是:工件一次装夹后,数控系统能控制机床自动地更换刀具,自动连续地对工件各加工面进行铣(车)、镗、钻、铰、攻螺纹等多工序加工。

(3) 金属成型类数控机床 数控冲床、数控折弯机、数控回转头压力机等。

(4) 数控特种加工机床 如数控线切割机床、数控电火花加工机床、数控激光切割机床等。

(5) 其他类型的数控机床 如数控火焰切割机、数控三坐标测量机等,

四、按数控系统功能水平进行分类

数控机床按数控系统的功能水平可分为低、中、高三档,这种分类方式在我国用得很多。低、中、高三档的界线是相对的,不同时期的划分标准有所不同。就目前的发展水平来看,大体可以从以下几个方面区分:

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

(2) 伺服进给类型 采用开环、步进电动机进给系统为低档;中、高档的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 低档数控机床联动轴数一般不超过 2 轴;中、高档的则为 3 轴~5 轴。

(4) 通信能力 低档数控系统一般无通信能力;中档的可以有 RS-232C 或直接数控(Direct Numerical Control, DNC)接口;高档的还可以有制造自动化协议(Manufacturing Automation Protocol, MAP)通信接口,具有联网功能。

(5) 显示功能 低档数控系统一般只有简单的数码管显示或单色 CRT 字符显示;中档的则具有较齐全的 CRT 显示,不仅有字符,而且有二维图形、人机对话、状态和自诊断功能等;高档的还可以有三维图形显示、图形编程等功能。

(6) 内装 PLC 低档数控系统一般无 PLC,中、高档的都内装 PLC。

(7) 主 CPU 低档数控系统一般采用 8bitCPU, 中、高档的已经逐步由 16bitCPU 向 32bitCPU 过渡, 国外一些新的数控系统甚至已选用了 64bitCPU。

在我国还有经济型数控的提法。所谓经济型数控, 一般均属低档数控系统, 是指由单板机、单片机和步进电动机组成的数控系统以及其他功能简单、价格低的数控系统。它主要用于车床、线切割机床以及旧机床的改造等。

第四节 数控机床加工的特点和应用范围

1. 数控机床的特点

1) 提高加工零件的精度, 稳定产品的质量

数控机床是按预定的程序自动加工, 工作过程一般不需要人工干预, 这就消除了操作者人为产生的误差。在设计制造设备时, 通常采取许多措施, 使数控机床达到较高的精度。

2) 可实现高柔性生产, 适应性强

数控机床加工由指令信息控制, 当加工对象改变时, 只需重新编制程序, 产生新的指令信息, 便可对其进行加工。它能完成普通机床难加工或根本不能加工的复杂曲线或曲面。

3) 加工工序相对集中, 生产率高

由于数控机床可采用较大的切削用量, 有效地减少了加工中的切削时间。数控机床还具有自动换刀、自动调速和其他辅助操作自动化功能, 因此与普通机床相比, 其生产效率可提高十几倍甚至几十倍。

4) 减轻工人劳动强度, 改善劳动条件

利用数控机床进行加工, 只需按图纸要求编制零件的加工程序清单, 输入并调试程序, 然后安装坯件进行加工, 监督加工过程并装卸零件。这就大大减轻了操作者的劳动强度和紧张程度, 减少了对熟练技术工人的需求, 劳动条件也得到了相应改善。

5) 有利于生产管理的现代化

用数控机床加工零件, 能准确地计算产品生产的工时, 并有效地简化检验、工夹具和半成品的管理工作; 采用数控信息的标准代码输入, 有利于与计算机连接, 构成由计算机控制和管理的生产系统, 从而实现制造和生产管理的现代化。

2. 数控机床的应用范围

随着数控技术的不断发展, 数控机床的应用范围也在不断扩大。由于计算机技术的高速发展, 计算机的性能日益提高而价格却不断下调, 因而促使数控机床的价格也不断下降, 原来由于价格因素不能采用数控机床的部门, 现在也开始大量采用数控机床了。

长期以来, 人们传统的观念认为数控机床只有用于加工多品种、小批量及结构复杂的零件时才能获得良好的经济效益。然而, 目前人们的观念正在发生变化, 一些大批量以及结构形状不太复杂的零件在使用数控机床以后, 同样也能获得很好的效益。最典型的为大批量生产的汽车工业, 目前已普遍使用数控机床和设备进行流水线生产。

正确的做法应该是在进行工艺分析和成本分析的基础上, 认真做好综合经济效益的评估和对比, 然后决定是否选用带数控系统的机床设备。

尽管如此,数控机床对于多品种、中小批量及结构形状复杂的零件以及那些需要频繁改型的产品零件更具有选用价值。

第五节 数控机床的发展

机电一体化是发展和振兴机械工业的必由之路,数控技术又是机电一体化的核心技术。数控机床既是国民经济的重要基础装备,又是各项支柱产业和基础产业实现生产现代化的重要手段,也是关系到国家战略地位和提高国家综合国力水平的基础产业,其技术水平的高低和拥有量是衡量一个国家工业化的重要标志。

由于其重要性,数控技术的发展一直受到世界各国的高度重视,一些工业发达国家在不同的发展阶段竞相制定相应的产业倾斜政策,推动数控机床得以迅速发展。

一、数控机床的发展史

采用数字控制技术进行机械加工的思想,最早是在 20 世纪 40 年代初提出的。1949 年,美国帕森斯公司(Parsons Co.)正式受美国空军委托,在麻省理工学院伺服机构实验室的协助下,开始从事数控机床的研制工作。其目的是为了制造出飞机框架及直升机叶片轮廓等形状复杂、加工精度要求高的零件。

经过三年的研究,于 1952 年成功试制世界第一台 3 坐标连续控制数控铣床,这便是数控机床的第一代。它综合应用了计算机、自动控制、伺服驱动、精密检测与新型机械结构等多方面的技术成果,可以用来加工复杂曲面零件。

1953 年,美国空军与麻省理工学院协作,开始从事计算机自动编程的研究,这就是创制 APT 自动编程系统的开始。

1955 年,美国空军花费巨资订购了大约 100 台数控机床,此后两年,数控机床在美国进入迅速发展阶段,市场上出现了商品化数控机床。

1958 年,美国克耐·杜列克公司首先成功研制世界上第一台带自动换刀装置的数控机床,称为“加工中心”。

1959 年,计算机行业研制出晶体管元器件,因而数控装置中广泛采用晶体管和印制电路板,从而跨入第二代数控时代,其体积较第一代大为减少。同时美国航空协会(AIA)和麻省理工学院使 APT 程序语言得到进一步发展。

1960 年以后,点位控制机床在美国得到迅速发展,数控技术不仅在机床上得到了实际应用,而且逐步推广到冲压机、绕线机、焊接机、火焰切割机、包装机和坐标测量机等,在程序编制方面,已由手工编程逐步发展到计算机自动编程。除了 APT 数控语言外,又发展了许多自动编程语言。

1965 年,出现小规模集成电路。由于体积小、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件逻辑数控系统。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连接成具有柔性的加工系统,这就是最初的柔性制造系统(FMS)。在此之后,美、欧、日也相继对柔性制造系统进行开发与应用。

随着计算机技术的发展以及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控制系统(NCN)。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,称为第四代数控。而由计算机直接对许多机床进行控制的控制系统,称为直接数控系统(DNC)。

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,微处理器数控系统的数控机床得到飞速发展和广泛应用,这就是第五代数控系统(MNC)。

20世纪80年代初,国际上又出现了柔性制造单元FMC。FMC和FMS被认为是实现CIMS(计算机集成制造系统)的必经阶段和基础。

二、中国数控机床发展情况

中国从1958年开始研究数控机床,一直到20世纪60年代中期还处于研制开发时期。当时,一些高等院校、科研单位研制出的试验性样机是从电子管起步的。

1965年,国内开始研制晶体管数控系统。20世纪60年代末至70年代初研制成了立式数控铣床、数控非圆齿轮插齿机等。

从20世纪70年代开始,数控技术在车削、铣削、镗削、磨削、齿轮加工和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。在这一时期,由于数控线切割机结构简单、使用方便、价格低廉,在模具加工中得到了推广。数控车削加工、点位加工和加工中心及3坐标数控加工的自动编程系统和语言也研制成功,有的已在生产和应用。

20世纪80年代,中国从日本发那科公司引进了3、5、6、7等系列的数控系统和直流伺服电机、直流主轴电机等制造技术,以及引进美国GE公司的MCI系统和交流伺服系统,德国西门子VS系列可控硅调速装置,并进行了商品化生产。这些系统可靠性高,功能齐全。与此同时,还自行开发了3、4、5轴联动的数控系统以及双电机驱动的同步数控系统(用于火焰切割机)和新品种的伺服电机,推动了中国数控机床稳定发展,使中国数控机床在性能和质量上产生了一个质的飞跃。

1985年,中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。为了跟踪国外现代制造技术的发展,北京机床研究所研制出了JCS-FMS-1型和JCS-FMS-2型的柔性制造单元和柔性制造系统。

三、数控机床发展的新趋势

数控机床作为高新技术产品,集现代制造技术、计算机、通信、控制、气液电等新技术为一体,它始终伴随着这些新技术的发展而发展。数控机床无论在提高其单机自动化水平,还是在以数控机床为核心的系统自动控制方面都呈现出蓬勃发展的势头。作为单机的发展,目前有如下几种趋势:

1. 高精度化

(1) 定位精度。近十年来机床的几何精度已取得明显的提高,普通中等级加工中心的定位精度已由80年代初期的 $\pm 0.012\text{mm}/300\text{mm}$,提高到80年代后期的 $\pm (0.005 \sim 0.008)\text{mm}/\text{全程}$;90年代初期又提高到 $\pm (0.002 \sim 0.005)\text{mm}/\text{全程}$ 。

国家	公司名称	机床型号	机床性能	定位精度
日本	Kitamura	Sonic - mill - 2	$n = 20000\text{r/min}$ 快进为 24m/min	$\pm 3\mu\text{m}/\text{全程}$
美国	Boston Digital	Vector 系列	$n = 10000\text{r/min}$	$\pm 2\mu\text{m}/\text{双向}$
日本	三井精机	VG45 加工中心		$\pm 3\mu\text{m}$

(2) 加工精度。由于数控机床基础大件结构特性和热稳定性的提高,加上采用各种补偿技术和辅助措施,因而使机床加工精度有很大的提高。

机床类型	原来精度	提高精度到
普通级	$\pm 10\mu\text{m}$	$\pm 5\mu\text{m}$ 和 $\pm 2\mu\text{m}$
精密级	$\pm 5\mu\text{m}$	$\pm 1.5\mu\text{m}$

2. 高速度化

(1) 高速主轴的发展。数控加工中心的主轴转速近十年翻了几翻,80年代中期为 $4000\text{r/min} \sim 6000\text{r/min}$,80年代后期为 $8000\text{r/min} \sim 12000\text{r/min}$,90年代发展到 $1.5 \times 10^4\text{r/min}$ 、 $2 \times 10^4\text{r/min}$ 、 $3 \times 10^4\text{r/min}$ 、 $5 \times 10^4\text{r/min}$,现在已达 $1.2 \times 10^5\text{r/min}$ 。例如:日本新泻铁工所生产的 VZ40 型加工中心转速为 $5 \times 10^4\text{r/min}$,该公司生产的 VHS10 型加工中心转速为 $1 \times 10^5\text{r/min}$;美国生产的 SC40/120 型加工中心转速为 $1.2 \times 10^5\text{r/min}$ 。

主轴转速的提高可以极大地提高生产率。日本新泻铁工所加工一个 NAC55 钢模具,在普通机床上加工需要 9h,用 VZ40 型加工中心加工只要 12min ~ 13min。

(2) 进给速度的发展。据统计表明,在加工中心上,纯切削时间约为总工作时间的 55%,所以加快进给速度和减少辅助时间也是提高生产率的重要途径。现在各坐标轴的快速移动已从十年前的 $8\text{m/min} \sim 12\text{m/min}$ 提高到 $30\text{m/min} \sim 40\text{m/min}$ 。美国福特 (FORD) 公司与机床巨头 Ingersoll 公司合作,经过 8 年努力研制的 HVM800 型卧式加工中心,其进给速度高达 76.2m/min ,机床工作起来已不像切削,而像跑空行程一样,瞬间即走完一个行程,达到了惊人的高速。

(3) 辅助时间的缩短。加工中的辅助时间主要指换刀及工作台交换的时间。以“刀一刀”的时间而言,从原先的 5s ~ 10s 减少到 2.5s 以内;以“切削一切削”的换刀时间来考核,也可以控制在 6s 以内。使辅助时间大大缩短。

3. 高柔性化

“柔性化”是指机床适应加工对象变化的能力。在数控机床发展中,一个主导思想就是“柔性”。因此,体现柔性化的柔性制造单元 (FMC) 和柔性制造系统 (FMS) 的拥有量的发展更为迅速,美国 FMC 安装的平均增长率达到 73%,日本 FMS 安装的平均增长率达到 24%,全世界 FMS 安装的平均增长率达到 29%。

4. 高自动化

这里指的自动化是包括物料流和信息流的自动化。数控机床的自动化除进一步提高其自动编程、自动换刀、自动上下料、自动加工等自动化程度外,在自动检测、自动监控、自动诊断、自动对刀、自动传输、自动调度、自动管理等方面也进一步得到发展,现已达到 72h 以上“无人化”管理正常生产的目的。

自适应控制系统的发展也是提高自动化水平的具体表现。所谓自适应控制系统就是

能对机床加工过程中的各种随机变量(毛坯余量的变化、工件与刀具材质的变化、切削温度的变化、电机磨损等)连续地进行监控,并对机床主轴转速、进给速度、刀具补偿等参数进行及时地调控,使切削过程总是处于最佳状态之下。这就是自适应控制系统(Adaptive Control System)的概念,简称为 AC 系统。上面所述的最佳状态是指:最佳表面质量、最大生产率或最低生产成本等。

5. 复合化

复合化包括工序复合化和功能复合化。数控加工中心是目前发展的一个趋势。所谓数控加工中心,就是将多种数控机床(一般是数控铣床、数控车床、数控钻床)的功能组合起来,再附加一个自动换刀装置和一个有一定容量的刀库,对零件进行多道工序连续加工的复合数控机床。继加工中心之后又相继出现了车铣镗钻复合机床、车铣磨复合机床,还有把冲孔、成型与激光切割复合的机床,或将等离子加工与冲压复合的机床等。这些多功能复合机床,打破了传统的工序界限,使工序高度集中,可进一步提高生产率。

6. 高可靠性

数控机床的可靠性是一项关键指标。衡量可靠性的量化指标是平均无故障工作时间,简称为 MTBF。数控系统的 MTBF 在 20 世纪 70 年代大于 3000h,80 年代是大于 10000h,90 年代是大于 30000h,日本发那科公司的 CNC 系统达到 125 个月。整机的 MTBF 在 80 年代初是 100h~200h,目前一般是 500h~800h。

7. 宜人化

宜人化是将功能设计与美学设计有机地结合起来。目前,国外机床生产厂家普遍采用计算机辅助工艺造型设计系统(CAID),使机床的品种、类型、造型、色彩发生了日新月异的变化。

8. 设计 CAD/CAM 化

随着计算机应用的普及和软件技术的发展,CAD/CAM 技术得到广泛的应用。它不仅可以替代人工绘图,更重要的是采用 CAD/CAM 技术进行设计方案选择和对大件整机进行的静动态特性的分析、计算预测和优化设计,并对整机各工作部件进行仿真,使机床的设计达到一个更高的水平。CAD/CAM 市场也异常活跃,有关报道,1982 年全世界 CAD/CAM 产品销售额为 12 亿美元,1985 年为 52.5 亿美元,1989 年为 118 亿美元,1990 年为 150 亿美元,1993 年为 168 亿美元,年平均增长率为 37.1%。

四、开放式数控系统简介

1. 数控系统的发展现状

随着现代制造业生产方式的发展,生产设备正朝着灵活、多功能、网络化的方向发展,它希望控制器的功能能够重新配置、修改、扩充和改装甚至重新生成,这样就对控制器产生了“开放”的要求。控制器制造商希望开放式控制器具有更高的性能价格比,具有较高的产品竞争力。制造信息的集成化、生产系统的分散化也促进了控制器的开放。日新月异的互联网技术为控制器的开放奠定了物质基础。

开放式体系结构 CNC 的研究始于 1987 年美国政府资助下的 NGC(Next Generation Controller)项目,其目的是实现基于互操作和分级式软件模块的“开放体系结构的标准规范”SOSAS(Specification for an Open System Architecture Standard)。1994 年由美国 Chrys-