

上海市本科教育高地建设  
机械制造及其自动化系列教材

# 数控技术

主 编 王明红  
副主编 王 越 何法江

59-43

清华大学出版社

29

上海市本科教育高地建设  
机械制造及其自动化系列教材

# 数控技术

主 编 王明红  
副主编 王 越 何法江

TG6594

w282

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书内容以数控加工信息流为主线顺序展开,全书共分6章。第1章介绍数控技术的概念、产生和发展概况及数控机床的特点和分类;第2章介绍数控加工工艺及数学处理,包括工艺设计、工具系统、数控编程中的数值计算;第3章介绍数控加工程序编制,包括程序编制的内容与方法、坐标系统、指令代码与程序结构、编程实例以及自动编程系统介绍等;第4章介绍计算机数字控制系统的软硬件结构、轨迹控制方法及若干插补算法、刀具补偿和进给速度以及加减速控制;第5章介绍数控机床的伺服驱动系统,主要讲述由步进电机构成的开环伺服系统、以直流伺服电动机或交流伺服电动机为控制对象的闭环伺服系统以及构成反馈控制的核心器件——检测装置等内容;第6章介绍数控机床的机械结构,主要讲述主动系统、进给传动系统、自动换刀装置、工作台等方面的内容。

本书内容较全面,体系较完整,既可以作为普通高等院校机电类专业的本专科生教材,也可以作为机电工程类人员的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

数控技术/王明红主编. —北京:清华大学出版社,2009.10

(上海市本科教育高地建设机械制造及其自动化系列教材)

ISBN 978-7-302-21063-4

I. 数… II. 王… 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(2009)第 168090 号

责任编辑:庄红权 洪 英

责任校对:赵丽敏

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:18.25 字 数:436千字

版 次:2009年10月第1版 印 次:2009年10月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:32.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:032785-01

上海市本科教育高地建设  
机械制造及其自动化系列教材编写委员会

顾 问 陈关龙

主 任 程武山

副主任 何法江

编 委 王明红 蔡颖玲 陆 宁 陆 文

秘 书 周玉凤

# 序言

进入 21 世纪以来,我国制造业得到了飞速发展。中国已成为世界制造业大国,正面临从制造业大国向制造业强国转型的关键时期。培养大批适应中国机械工业发展的优秀工程技术人才,是实现这一重大转变的关键。

遵循高等教育、人才培养和社会主义市场经济的规律,围绕《上海优先发展先进制造业行动方案》,紧贴区域和社会需求的发展,上海工程技术大学机械工程学院抓住“上海市机械制造及其自动化本科教育高地建设”这一机遇,把握先进制造业和现代服务业互补、融合的趋势,把打造工程本位的复合应用型人才培养基地作为高地建设的核心,把培养具有深厚的科学理论基础和一定的工程实践能力及创新能力的优秀的复合应用型人才——生产一线工程师,作为高地建设的战略发展目标。

正是基于上述考虑,本编写委员会联合清华大学出版社推出“上海市本科教育高地建设机械制造及其自动化系列教材”,希望根据“以生为本,以师为重,以教为基,以训为媒,突出工程实践”的教育思想理念和当前的科技水平及社会发展的需求,精心策划和编写本系列教材,培养出更多视野宽、基础厚、素质高、能力强和富于创造性的工程技术人才。

本系列教材的编写,注重文字通顺,深入浅出,图文并茂,表格清晰,符合国家与部门标准。在编写时,作者重视基础性知识,精选传统内容,使传统内容与新知识之间建立起良好的知识构架;重视处理好教材各章节间的内部逻辑关系,力求符合学生的认识规律,使学习过程变得顺理成章;重视工程实践与教学实验,改变原教材过于偏重理论知识的倾向,力图引导学生通过实践训练,发展自己的工程实践能力;倡导创新实践训练,引导学生发现问题、提出问题、分析问题和解决问题,培养创新思维能力和团队协作能力。

本系列教材的编写和出版,是上海市本科教育高地建设课程和教材改革中的一种尝试,教材中一定会存在不足之处,希望全国同行和广大读者不断提出宝贵意见,使我们编写出的教材能更好地为教育教学改革服务,更好地为培养高质量的人才服务。

陈关龙

2008 年 12 月

# 前言

随着科学技术的发展和社会对产品多样化需求的增强,现代机械制造要求产品的形状和结构不断改进,对零件加工质量的要求也越来越高,产品品种增多,产品更新换代加速。这就要求数控机床成为一种具有高效率、高质量、高柔性和低成本的新一代制造设备。现代数控技术正向着更高的速度、更高的精度、更高的可靠性及更完善的功能发展。

自1952年美国第1台数控铣床问世至今,数控技术已经走过了50多年的历程。20世纪90年代以来,随着国际上计算机技术突飞猛进的发展,数控技术不断采用计算机、控制理论等领域的最新技术成就,并成功地带动了机械制造设备的重大技术进步,推动了装备制造业的发展。数控技术正向着智能化、网络化、集成化、数字化的方向发展,机床制造技术向着高速化、高精度化、复合化、智能化、开放化、并联驱动化、网络化、极端化、绿色化的方向发展。数控技术已成为制造技术发展的基础,在机械制造业中占有重要的地位。高档数控机床与基础制造装备是实现制造技术和装备现代化的基石,其性能、质量和拥有量成为衡量一个国家工业化水平、国防建设水平、综合国力的重要标志,对机械制造业的产品结构、生产方式、管理机制和产业结构,乃至对其他各行各业的生产方式都会产生巨大的影响。

在这种形势下,我们根据专业调整与课程体系的更新,针对本科学生的特点,适应机械类本科专业“数控技术”课程的教学,编写了本教材,以满足教学的需要。本书的编写既注重应用性,又考虑到理论基础,同时还考虑到最新技术。

全书以数控加工信息流为主线顺序展开,先后阐述了数控加工工艺及数学处理方法、数控加工编程的基础及方法、计算机数控系统的软硬件结构、数控装置的轨迹控制原理、数控机床的伺服驱动系统工作原理,同时,还叙述了数控技术的基本概念、数控机床的检测装置、数控机床的机械结构、数控自动编程以及数控技术的发展等内容。

参加本书编写的有王明红、王越、何法江等,王明红任主编,王越与何法江任副主编。本书在编写过程中参阅了大量相关文献,得到了许多同仁的大力支持和帮助,在此向有关作者一并表示感谢。

由于时间仓促,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者和专家批评指正。

编者

2009年10月

# 目录

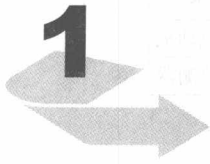
<b>1</b>	<b>绪论</b> .....	1
1.1	数控技术和数控机床的概念 .....	1
1.2	数控机床的发展趋势 .....	4
1.3	数控机床的特点及应用范围 .....	8
1.4	数控机床的分类 .....	10
1.5	习题及思考题 .....	15
<b>2</b>	<b>数控加工工艺及数学处理</b> .....	16
2.1	数控加工的工艺设计 .....	16
2.1.1	数控加工的定义、特点和基本内容 .....	16
2.1.2	机床及工艺装备的合理选用 .....	18
2.1.3	工艺路线的制定 .....	19
2.1.4	数控加工工艺路线设计举例 .....	27
2.1.5	数控加工专用技术文件的编写 .....	34
2.2	数控加工的工具系统 .....	38
2.2.1	刀具的选择 .....	38
2.2.2	数控刀具系统 .....	40
2.2.3	刀具预调 .....	44
2.3	数控编程中的数值计算 .....	46
2.3.1	基点坐标的计算 .....	46
2.3.2	非圆曲线节点坐标的计算 .....	47
2.3.3	列表曲线的数学处理 .....	51
2.4	习题及思考题 .....	51
<b>3</b>	<b>数控加工的程序编制</b> .....	52
3.1	零件程序编制的内容与方法 .....	52

3.1.1	零件程序编制的内容与步骤 .....	52
3.1.2	零件程序编制的方法 .....	55
3.2	数控机床的坐标系统 .....	57
3.2.1	数控机床的坐标系 .....	57
3.2.2	数控机床上的有关点 .....	61
3.3	零件加工程序的指令代码与程序结构 .....	62
3.3.1	零件加工程序的有关功能指令及其代码 .....	63
3.3.2	零件加工程序的格式与组成 .....	81
3.4	数控加工编程实例 .....	83
3.4.1	数控车床编程实例 .....	83
3.4.2	数控加工中心编程实例 .....	88
3.5	自动编程简介 .....	97
3.5.1	自动编程方法的分类 .....	97
3.5.2	自动编程系统的信息处理过程 .....	99
3.5.3	典型 CAD/CAM 软件介绍 .....	102
3.6	习题及思考题 .....	107
<b>4</b>	<b>计算机数控系统 .....</b>	<b>109</b>
4.1	概述 .....	109
4.1.1	CNC 系统的组成与特点 .....	109
4.1.2	常规式 CNC 系统的硬件结构 .....	114
4.1.3	常规式 CNC 系统的软件结构 .....	118
4.1.4	开放式 CNC 系统的结构 .....	126
4.2	CNC 的轨迹控制方法 .....	132
4.2.1	插补的基本概念 .....	132
4.2.2	轨迹控制算法的要求和类别 .....	132
4.3	逐点比较法插补 .....	134
4.3.1	逐点比较法直线插补 .....	134
4.3.2	逐点比较法圆弧插补 .....	137
4.4	数字积分法插补 .....	141
4.4.1	数字积分法的基本原理 .....	141
4.4.2	DDA 直线插补 .....	141
4.4.3	DDA 圆弧插补 .....	144
4.5	比较积分法 .....	149
4.5.1	比较积分法直线插补 .....	149
4.5.2	比较积分法圆弧插补 .....	151
4.5.3	直线及一般二次曲线的插补算法 .....	151
4.6	数据采样法插补 .....	152
4.6.1	数据采样法插补的基本原理 .....	153



4.6.2	数据采样法直线插补	154
4.6.3	数据采样(时间分割)法圆弧插补	154
4.6.4	螺旋线插补原理	157
4.7	刀具半径补偿	159
4.7.1	刀具补偿的基本原理	159
4.7.2	C功能刀具半径补偿	160
4.8	进给速度与加减速控制	166
4.8.1	进给速度控制	166
4.8.2	加减速控制	167
4.9	习题及思考题	172
<b>5</b>	<b>数控机床的伺服驱动系统</b>	<b>173</b>
5.1	概述	173
5.1.1	伺服系统的组成及基本性能要求	173
5.1.2	伺服系统的分类	175
5.2	步进电动机伺服系统	177
5.2.1	步进电动机的分类、结构和工作原理	177
5.2.2	步进电动机的主要特性	180
5.2.3	步进电动机的控制方法	182
5.2.4	步进电动机伺服系统的功率驱动	183
5.2.5	提高步进伺服系统精度的措施	184
5.3	直流电机伺服系统	185
5.3.1	直流伺服电机的结构和工作原理	185
5.3.2	直流伺服电机的调速原理和常用的调速方法	188
5.3.3	晶闸管直流调速系统	190
5.3.4	PWM晶体管脉宽调制器直流速度控制单元	194
5.3.5	直流伺服系统的位置控制	197
5.3.6	直流主轴驱动系统	199
5.4	交流电机伺服系统	201
5.4.1	永磁式同步交流伺服电机的工作原理和性能	202
5.4.2	交流主轴电动机的结构与性能	203
5.4.3	交流伺服电动机的调速原理和方法	205
5.4.4	交流伺服电动机调速主回路	206
5.4.5	交流伺服系统的控制回路	207
5.4.6	主轴交流电动机的调速	210
5.4.7	感应式异步电动机的矢量控制	212
5.5	直线电动机	214
5.6	数控机床的位置检测装置	216
5.6.1	旋转变压器	216

5.6.2	感应同步器	219
5.6.3	脉冲编码器	221
5.6.4	绝对式编码器	222
5.6.5	光栅	224
5.6.6	磁栅	226
5.7	习题及思考题	228
<b>6</b>	<b>数控机床的机械结构</b>	<b>229</b>
6.1	概述	229
6.2	数控机床的主传动系统	230
6.2.1	对主传动系统的要求	230
6.2.2	主传动的变速方式	230
6.2.3	数控机床主轴轴承的配置形式	232
6.2.4	数控机床主轴的结构	233
6.2.5	刀具自动装卸及切屑清除装置	233
6.2.6	主轴准停装置	235
6.2.7	电主轴单元	236
6.3	数控机床的进给传动系统	238
6.3.1	数控机床对进给传动系统的要求	238
6.3.2	滚珠丝杠螺母副进给传动机构	239
6.3.3	齿轮传动间隙的消除措施	249
6.3.4	导轨副	251
6.4	数控机床的自动换刀系统	254
6.4.1	回转形式的自动换刀装置	254
6.4.2	带刀库的自动换刀系统	259
6.4.3	刀具交换装置	264
6.4.4	机械手的形式	266
6.5	数控机床的辅助装置	267
6.5.1	分度工作台	268
6.5.2	数控回转工作台	272
6.5.3	排屑装置	275
6.5.4	APC 托盘自动交换系统	276
6.6	习题及思考题	277
	<b>参考文献</b>	<b>278</b>



# 绪 论

## 学习目的与要求

本章着重介绍数控技术的基本概念、数控机床的组成及作用、数控系统的分类以及数控技术的最新发展趋势。通过学习数控技术的基本概念,应对数控系统的组成及各部分的作用有较完整的认识,并掌握点位、点位直线和轮廓控制系统以及开环、半闭环和闭环控制系统的组成与特点。

## 1.1 数控技术和数控机床的概念

数控技术是指利用数字或数字化信息构成的程序对控制对象的工作过程实现自动控制的一门技术,简称数控(numerical control, NC),是一种将数字计算技术应用于机床的控制技术。数控系统(numerical control system, NCS)是指利用数控技术实现自动控制的系统。

数控技术综合运用机械制造技术、信息处理技术、加工技术、传输技术、自动控制技术、伺服驱动技术、传感器技术和软件技术等方面的最新成果,具有动作顺序自动控制,位移和相对位置坐标自动控制,速度、转速及各种辅助功能自动控制等功能。

数控机床即数字控制的机床,其工作过程为: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、选择刀具、供给冷却液等)和步骤以及刀具与工件之间的相对位移量都用数字化的代码来表示,通过各种输入方式将数字化信息送入专用或通用的计算机(数控装置),计算机对输入的信息进行处理与运算,发出各种指令来控制机床的伺服系统或其他执行元件,使机床按图纸要求的形状和尺寸自动加工出所需要的工件。简单地说,数控机床就是由通用计算机或专用计算机装置控制的一种柔性的、高效能的自动化机床。数控机床是一种典型的机电一体化产品,较好地解决了复杂、精密、小批量、多品种的零件加工问题。

数控机床是数控设备的典型代表,其他数控设备包括数控雕刻机、数控火焰切割机、数控测量机、数控绘图机、数控插件机、电脑绣花机、工业机器人等。它们都是采用数控系统进行控制的机械设备,其操作命令也是用数字或数字化信息的形式来描述,其工作过程按照规定格式的指令程序自动地进行。

数控机床加工工件的过程如图 1.1 所示,具体分为以下几方面。

(1) 在数控机床上加工工件时,首先要根据加工零件的图样与工艺方案,用规定的格式编写程序单;

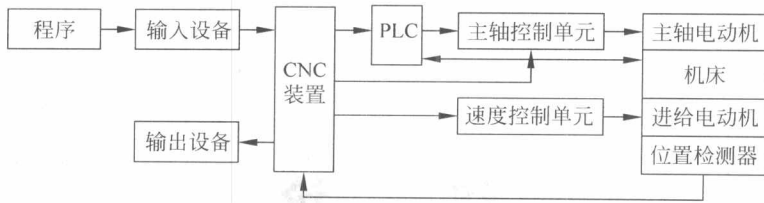


图 1.1 数控机床的加工过程

- (2) 将编好的程序通过输入装置输入到数控装置；
- (3) 数控装置将输入的程序经过运算处理后，向机床各个坐标的伺服系统发出信号；
- (4) 伺服系统根据数控装置发出的信号，通过伺服执行机构（如步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机），经传动装置（如滚珠丝杠螺母副等），驱动机床各运动部件，使机床按规定的动作顺序、速度和位移量进行工作，从而加工出符合图样要求的零件。

由上述数控机床的工作过程可知，数控机床的基本组成包括加工程序、数控装置、伺服驱动装置、机床本体和其他辅助装置。下面分别对各组成部分的基本工作原理进行概要说明。

### 1. 输入输出装置

在加工过程中，操作人员要向机床数控装置输入操作命令，数控装置则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进行信息交流的过程。要进行信息交流，数控机床中必须具备必要的交互设备，即输入输出装置。

键盘和显示器是数控系统不可缺少的人机交互设备，操作人员可通过键盘和显示器输入程序、编辑修改程序和发送操作命令，即进行手动数据输入（MDI），因而键盘是 MDI 最主要的输入设备。数控系统通过显示器为操作人员提供必要的信息，根据系统所处的状态和操作命令的不同，显示的信息可以是正在编辑的程序，或是机床的加工信息。系统一般配有 CRT 显示器或点阵式液晶显示器，显示的信息较丰富。

数控加工程序编制好后，一般存放在便于输入到数控装置的一种控制介质上。传统的方式是将编制好的程序记录在穿孔纸带或磁带上，然后由纸带阅读器或磁带机输入数控系统。纸带机和磁带机是早期数控机床的典型输入设备。后来，随着计算机技术的发展，一些计算机中的通用技术也融入数控系统，如磁盘也作为信息的介质引入数控系统。与纸带相比，磁盘存储密度大，存取速度快，存取方便。现在采用的 U 盘存储容量更大，速度更快。

数控机床程序输入的方法除上述的键盘、U 盘、磁盘、磁带和穿孔纸带外，现在主要用串行通信的方式输入。采用 DNC（distributed numerical control）直接数控输入方式，把零件程序保存在上级计算机中，CNC（computer numerical control）系统一边加工一边接收来自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。随着 CAD、CAM、CIMS 技术的发展，机床数控系统与计算机的通信显得越来越重要。

输出装置与伺服机构相连。输出装置根据控制器的命令接收运算器的输出脉冲，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。

## 2. 数控装置

数控装置是数控系统的核心,其主要功能是将输入装置传送的数控加工程序,经数控装置系统软件进行译码、插补运算和速度预处理,产生位置和速度指令以及辅助控制功能信息等。CNC 系统的输入数据包括: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),数据处理的目的完成插补运算前的准备工作。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。系统进行数控加工程序译码时,将其区分成几何数据、工艺数据和开关功能。几何数据是刀具相对于工件运动路径的数据,利用这些数据可加工出要求的工件几何形状;工艺数据是主轴转速  $S$  和进给速度  $F$  等功能的数据;开关功能是对机床电器的开关命令,如主轴启/停、刀具选择和交换、切削液的开/关等。

数控装置的插补器根据曲线段已知的几何数据以及相应工艺数据中的速度信息,计算出曲线段起点、终点之间的一系列中间点,分别向机床各个坐标轴发出速度和位移信号,通过各个轴运动的合成,形成符合数控加工程序要求的工件轮廓的刀具运动轨迹。

由数控装置发出的开关命令在系统程序控制下,输出给机床控制器。在机床控制器中,开关命令和由机床反馈的回答信号一起被处理和转换为对机床开关设备的控制命令。现代数控系统中,绝大多数机床控制器都采用可编程序控制器(PLC)实现开关控制。

数控装置控制机床的动作可概括如下。

- (1) 机床主运动,包括主轴的启/停、转向和速度选择。
- (2) 机床的进给运动,如点位、直线、圆弧、循环进给的选择,坐标方向和进给速度的选择等。
- (3) 刀具的选择和刀具的长度、半径补偿。
- (4) 其他辅助运动,如各种辅助操作、工作台的锁紧和松开、工作台的旋转与分度、工件的夹紧与松开以及切削液的开/关等。

## 3. 伺服驱动装置

伺服系统是数控机床的重要组成部分,伺服驱动装置包括主轴伺服驱动装置和进给伺服驱动装置两部分,用于实现数控机床的主轴伺服控制和进给伺服控制。伺服驱动装置由驱动电路和伺服电动机组成,并与机床上的机械传动部件组成数控机床的主传动系统和进给传动系统。主轴伺服驱动装置接收来自 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。进给伺服驱动装置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,伺服驱动装置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等。伺服驱动装置有开环、半闭环和闭环之分。

## 4. 辅助控制装置

辅助控制装置是介于数控装置和机床机械、液压部件之间的控制装置,通过 PLC 来实现。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程序管理等有关的功能,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,如零件加工程序中的 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,另一方面通过伺服驱动装置控制主轴电动机的转动。

### 5. 位置检测装置

位置检测装置与伺服驱动装置配套组成半闭环或闭环伺服驱动系统。位置检测装置通过直接或间接测量将执行部件的实际进给位移量检测出来,反馈到数控装置并与指令位移量进行比较,将其误差转换放大后控制执行部件的进给运动,以提高机床加工精度。

### 6. 机床的机械部件

数控机床的机械部件包括主运动部件、进给运动部件(如机床工作台、滑板及其传动部件)和床身立柱等支承部件;此外,还有转位、夹紧、润滑、冷却、排屑等辅助装置。对于加工中心类的数控机床,还有存放刀具的刀库、交换工作台、机械手或机器人等部件。数控机床机械部件的组成与普通机床相似,但传动结构要求更为简单,在精度、刚度、摩擦、抗振性等方面要求更高,而且传动和变速系统要便于实现自动化。

## 1.2 数控机床的发展趋势

科学技术的发展以及世界先进制造技术的兴起和不断成熟,对数控加工技术提出了更高的要求;超高速切削、超精密加工等技术的应用,对数控机床的数控系统、伺服性能、主轴驱动、机床结构等提出了更高的性能指标;FMS(flexible manufacture system)的迅速发展和 CIMS 的不断成熟,又将对数控机床的可靠性、通信功能、人工智能和自适应控制等技术提出更高的要求。随着微电子和计算机技术的发展,数控系统的性能日臻完善,数控技术的应用领域日益扩大。当今数控机床正在不断采用最新技术,朝着高速化、高精度化、多功能化、智能化、模块化、系统化与高可靠性等方向发展。

### 1. 数控机床的产生和发展历程

数控机床是在机械制造技术和控制技术的基础上发展起来的。1948年,美国帕森斯公司(Parsons Co.)在研制加工直升机叶片轮廓检验用样板的机床时,首先提出了应用电子计算机控制机床来加工样板曲线的设想。后来受美国空军委托,帕森斯公司与麻省理工学院伺服机构研究所合作进行研制工作。1952年试制成功世界上第一台三坐标立式数控铣床。后来,又经过改进并开展自动编程技术的研究,数控机床于1955年进入实用阶段,这对于加工复杂曲面和促进美国飞机制造业的发展起到了重要作用。

我国从1958年开始研制数控机床,在研制与推广使用数控机床方面取得了一定成绩。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发展。我国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。随着工厂、企业技术改造的深入,各行各业对数控机床的需求量大大幅度地增长,这将有力地促进数控机床的发展。

关于数控机床的发展,可以从电子工业的发展角度来看。在第一台数控机床问世至今的50多年中,先后经历了电子管(1952年)、晶体管和印刷电路板(1960年)、小规模集成电路(1965年)、小型计算机(1970年)、微处理器或微型计算机(1974年)和基于PC+CNC的

智能数控系统(20世纪90年代后)等六代数控系统。以PC机为控制系统的硬件部分,Windows NT为PC机的操作系统平台,在PC机上安装NC软件系统,即为加工中心的控制系统。其优点有:

- (1) 与PC机硬件完全通用,使数控系统随着PC技术的升级而升级,系统维护方便;
- (2) 充分共享PC的软件资源;
- (3) 由于PC机有标准化的接口,便于连入局域网及Internet,易于实现网络化制造。

## 2. 数控机床的发展趋势

### 1) 高精度化

高精度包括高进给分辨率、高定位精度和重复定位精度、高动态刚度、高性能闭环交流数字伺服系统等。现代科学技术的发展、新材料及新零件的出现,对精密加工技术不断提出新的要求,提高加工精度,发展新型超精密加工机床,完善精密加工技术,适应现代科技的发展,已经成为数控机床的发展方向之一。其精度已从微米级到亚微米级,乃至纳米级。提高数控机床的加工精度,一般可通过减少数控系统的误差和采用机床误差补偿技术来实现。在减小CNC系统控制误差方面,通常采取提高数控系统的分辨率、提高位置检测精度、在位置伺服系统中采用前馈控制与非线性控制等方法。在机床误差补偿技术方面,除采用齿隙补偿、丝杠螺距误差补偿和刀具补偿等技术外,还可对设备热变形进行误差补偿。近十几年来,普通级数控机床的加工精度已由 $\pm 10\mu\text{m}$ 提高到 $\pm 5\mu\text{m}$ ,精密级加工中心的加工精度则从 $\pm (3\sim 5)\mu\text{m}$ 提高到 $\pm (1\sim 1.5)\mu\text{m}$ 。

### 2) 高速化

高速化指数控机床的高速切削和高速插补进给,目标是在保证加工精度的前提下,提高加工速度。这不仅要求数控系统的处理速度快,同时还要求数控机床具有大功率和大转矩的高速主轴、高速进给电动机、高性能的刀具、稳定的高频动态刚度。数控机床高速化可充分发挥现代刀具材料的性能,不但可大幅度提高加工效率,降低加工成本,而且还可提高零件的表面加工质量和精度,对制造业实现高效、优质、低成本生产具有广泛的适用性。要实现数控设备高速化,首先要求数控系统能对由微小程序段构成的加工程序进行高速处理,以计算出伺服电动机的移动量,同时要求伺服电动机能高速度地作出反应。采用32位及64位微处理器,是提高数控系统高速处理能力的有效手段。实现数控设备高速化的关键是提高切削速度、进给速度和减少辅助时间。高速数控加工源于20世纪90年代初,以电主轴(实现高主轴转速)和直线电动机(实现高直线移动速度)的应用为特征,使得主轴转速大大提高,进给速度可达 $60\sim 120\text{m}/\text{min}$ ,进给的加速度达到 $1\sim 2\text{m}/\text{s}^2$ 。目前车削和铣削的切削速度已达到 $5000\sim 8000\text{m}/\text{min}$ 以上,主轴转速达到 $30\ 000\sim 100\ 000\text{r}/\text{min}$ 。工作台的移动速度,当分辨率为 $1\mu\text{m}$ 时,达到 $100\text{m}/\text{min}$ (有的达到 $200\text{m}/\text{min}$ )以上;当分辨率为 $0.1\mu\text{m}$ 时,达到 $24\text{m}/\text{min}$ 以上。自动换刀速度在1s以内,小线段插补进给速度达到 $12\text{m}/\text{min}$ 。

### 3) 高柔性化

采用柔性自动化设备或系统,是提高加工精度和效率、缩短生产周期、适应市场变化需求和提高竞争力的有效手段。数控机床在提高单机柔性化的同时,朝着单元柔性化和系统柔性化方向发展。如出现了PLC控制的可调组合机床、数控多轴加工中心、换刀换箱式加工中心、数控三坐标动力单元等具有柔性的高效加工设备、柔性加工单元(FMC)、柔性制造



系统(FMS)以及介于传统自动线与 FMS 之间的柔性制造线(FML)。

#### 4) 高自动化

高自动化是指在全部加工过程中尽量减少人的介入而自动完成规定的任务,它包括物料流和信息流的自动化。自 20 世纪 80 年代中期以来,以数控机床为主体的加工自动化已从“点”(数控单机、加工中心和数控复合加工机床)、“线”(FMC、FMS、FTL、FML)向“面”(工段车间独立制造岛,FA)和“体”(分布式网络集成制造系统,CIMS)的方向发展。尽管这种高自动化的技术还不够完备,投资过大,回收期较长,但数控机床的高自动化并向着 FMC、FMS 集成方向发展的总趋势仍然是机械制造业发展的主流。数控机床的自动化除进一步提高其自动编程、上下料、加工等自动化程度外,还在自动检索、监控、诊断等方面进一步发展。

#### 5) 智能化

智能数控系统通过对影响加工精度和效率的物理量进行检测、建模、提取特征,自动感知加工系统的内部状态及外部环境,快速作出实现最佳目标的智能决策,对进给速度、切削深度、坐标移动、主轴转速等工艺参数进行实时控制,使机床的加工过程处于最佳状态。随着人工智能在计算机领域的不断渗透与发展,为适应制造业生产柔性化、自动化发展需要,智能化正成为数控机床研究及发展的热点,它不仅贯穿在生产加工的全过程(如智能编程、智能数据库、智能监控),还贯穿在产品的售后服务和维修中。目前采取的主要技术措施包括以下几个方面。

(1) 自适应控制技术。数控机床中因工件毛坯余量不匀、材料硬度不一致、刀具磨损、工件变形、润滑或冷却液等因素的变化会直接或间接影响加工效果。自适应控制技术可根据切削条件的变化,自动调节工作参数,在加工过程中能保持最佳工作状态,从而得到较高的加工精度和较低的表面粗糙度,同时也能提高刀具的使用寿命和设备的生产效率,达到改进系统运行状态的目的。如通过监控加工过程中某些能代表加工状态的参数(如切削力、切削温度等),通过评价函数计算和最佳化处理,对主轴转速、刀具(或工作台)进给速度等切削用量参数进行校正,使数控机床能够始终在最佳的切削状态下工作。监控切削过程中的刀具磨损、破损、切屑形态、切削力及零件的加工质量等,向制造系统反馈信息,通过将过程控制、过程监控、过程优化结合在一起,实现自适应调节。

(2) 专家系统技术。将专家经验和切削加工一般规律与特殊规律存入计算机中,以加工工艺参数数据库为支撑,建立具有人工智能的专家系统,提供经过优化的切削参数,使加工系统始终处于最优和最经济的工作状态,从而提高编程效率和降低对操作人员的技术要求,缩短生产准备时间。

(3) 故障自诊断、自修复技术。在整个工作状态中,系统随时对 CNC 系统本身以及与其相连的各种设备进行自诊断和检查。出现故障时,立即采用停机等措施,进行故障报警,提示发生故障的部位、原因等,并利用“冗余”技术,自动使故障模块脱机,而接通备用模块,以确保无人化工作环境的要求。

(4) 智能化交流伺服驱动技术。研究能自动识别负载并自动调整参数的智能化伺服系统,包括智能化主轴交流驱动装置和智能化进给伺服装置,使驱动系统获得最佳运行。

(5) 模式识别技术。应用图像识别和声控技术,由机床自己辨别图样,并自动地进行数控加工的智能化技术和根据人的语言声音对数控机床进行自动控制的智能化技术。



#### 6) 复合化

复合化包含工序复合化和功能复合化。数控机床的发展已模糊了粗、精加工工序的概念。加工中心的出现,又把车、铣、镗等工序集中到一台机床来完成,打破了传统的工序界限和分开加工的工艺规程,可最大限度地提高设备利用率。为了进一步提高工效,数控机床又采用了多主轴、多面体切削,即同时对一个零件的不同部位进行不同方式的切削加工,如各类五面体加工中心。另外,数控系统的控制轴数也在不断增加,有的多达 16 轴,其同时联动的轴数已达 6 轴。

#### 7) 高可靠性

高可靠性的数控系统是提高数控机床可靠性的关键。数控系统将采用更高集成度的电路芯片,利用大规模或超大规模的专用及混合式集成电路,以减少元器件的数量,提高可靠性。通过硬件功能软件化,以适应各种控制功能的要求,同时利用硬件结构机床本体的模块化、标准化、通用化及系列化,提高硬件生产批量,以便于组织生产和质量把关。通过自动运行启动诊断、在线诊断、离线诊断等多种诊断程序,实现对系统内硬件、软件和各种外部设备进行故障诊断和报警。利用报警提示,及时排除故障;利用容错技术,对重要部件采用“冗余”设计,以实现故障自恢复;利用各种测试、监控技术,当发生生产超程、刀损、干扰、断电等各种意外时,自动进行相应的保护。

#### 8) 网络化

为了适应 FMC、FMS 以及进一步联网组成 CIMS 的要求,先进的 CNC 系统为用户提供了强大的联网能力,除有 RS-232 串行接口、RS-422 等接口外,还带有远程缓冲功能的 DNC 接口,可以实现几台数控机床之间的数据通信和直接对几台数控机床进行控制。数控机床为了适应自动化技术的进一步发展,满足工厂自动化规模越来越大的要求和不同厂家、不同类型数控机床联网的需要,已配备与工业局域网(LAN)通信的功能以及 MAP(manufacturing automation protocol, 制造自动化协议)接口,为数控机床进入 FMS 及 CIMS 创造了条件,促进了系统集成化和信息综合化,使远程操作和监控、遥控及远程故障诊断成为可能。所有这些功能不仅利于数控系统生产厂对其产品的监控和维修,也适于大规模现代化生产的无人化车间实行网络管理,还适于在操作人员不宜到现场的环境(如对环境要求很高的超精密加工和对人体有害的环境)中工作。

#### 9) 开放式体系结构

20 世纪 90 年代以后,计算机技术的飞速发展推动数控机床技术更快地更新换代,世界上许多数控系统生产厂利用 PC 机丰富的软硬件资源开发开放式体系结构的新一代数控系统。开放式体系结构可以大量采用通用微机的先进技术,如多媒体技术,实现声控自动编程、图形扫描自动编程等。其新一代数控系统的硬件、软件和总线规范都是对外开放的,由于有充足的软、硬件资源可供利用,不仅使数控系统制造商和用户进行系统集成得到有力的支持,而且也为用户的二次开发带来极大方便,促进了数控系统多档次、多品种的开发和广泛应用。用户和制造商既可通过升档或剪裁构成各种档次的数控系统,又可通过扩展构成不同类型数控机床的数控系统,开发生产周期大大缩短。这种数控系统可随 CPU 升级而升级,结构上不必变动,从而使数控系统有更好的通用性、柔性、适应性、扩展性,并向智能化、网络化方向发展。

因此,随着电子、信息等高新技术的不断发展,随着市场需求的个性化与多样化,未来先