

机电类专业应用型人才培养特色教材

数控技术

王伟◎主 编

路敦民 王殿君◎副主编

- ▶ 北京高等教育精品教材
- ▶ 教育部卓越工程师教育培养计划推荐教材
- ▶ 教育部高等院校特色专业教材
- ▶ 国家工程教育认证专业教材
- ▶ “机电测控技术基础课程群北京市优秀教学团队”项目资助



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机电类专业应用型人才培养特色教材

数 控 技 术

主 编 王 伟

副主编 路敦民 王殿君

参 编 田 野 申爱明 张宝生

主 审 王振华

机 械 工 业 出 版 社

本书结合编者多年来的教学实践经验,以加强学生素质教育和能力培养为目标,并结合教学改革以及我国数控工业发展的需要编写而成。

全书共分为五章,第1章为绪论,第2章为数控编程基础,第3章为开环伺服系统及轮廓轨迹形成,第4章为闭环伺服系统及轨迹实现,第5章在前四章的基础上搭建激光雕刻机实验平台,以实例的形式对数控技术在现实中的应用进行了介绍,以加深读者理解。

本书主要作为高等院校的教材,也可供其他工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控技术/王伟主编. —北京:机械工业出版社,2017.8

机电类专业应用型人才培养特色教材

ISBN 978-7-111-57434-7

I. ①数… II. ①王… III. ①数控机床—教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第167682号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吕德齐 责任编辑:吕德齐 雷云辉

责任校对:潘蕊 封面设计:陈沛

责任印制:常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2017年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12印张·290千字

标准书号:ISBN 978-7-111-57434-7

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

自从20世纪50年代世界上第一台数控机床问世以来,数控技术已成为提高产品质量、提高劳动生产率必不可少的技术手段。它的广泛使用给机械制造业的生产方式、产业结构、管理方式带来了深刻的变化,它的关联效益和辐射能力更是难以估量。数控技术是制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础,离开了数控技术,先进制造技术就成了无本之木,而采用数控技术的典型产品——数控机床是机电工业的重要基础装备。因此,数控技术及数控装备是关系到国家战略地位和体现国家综合国力的重要基础性产业,其水平的高低是衡量一个国家制造业现代化程度的核心标志,实现加工机床及生产过程数控化,已经成为当今制造业的发展方向。

我国数控技术及产业尽管在改革开放后取得了显著的成就,但是,与发达国家相比仍有较大的差距,其原因是多方面的,但最主要的是数控人才匮乏。为了适应我国高等职业技术教育的发展及数控应用型人才、操作技能型人才培养的需要,笔者参考了大量国内外资料,并结合自身多年来的教学实践经验,编写了这一本数控技术教材。本书取材新颖,内容由浅入深、循序渐进,图文并茂,实例丰富,兼顾理论与实际,力求涵盖数控技术与数控机床系统的基础知识、核心技术与较新的科技成果。

全书共分为五章。第1章绪论主要介绍了数控机床的组成、工作原理、分类、特点和应用,以及数控机床的产生和发展,并列举了典型的数控系统;第2章主要介绍了数控编程基础,包括常用的功能指令、数控编程的工艺处理等;第3章主要介绍了开环伺服系统及轮廓轨迹的形成,包括步进电动机及其驱动控制、步进电动机的运行性能、开环系统的轮廓轨迹形成,以及提高开环伺服系统精度的措施;第4章介绍了闭环伺服系统及轨迹实现,包括交流伺服电动机原理及其变频调速、闭环伺服系统常用检测装置以及数据采样插补;第5章综合前四章知识,以激光雕刻机为例,给出了激光雕刻机的设计与加工。

参加本书编写的有北京石油化工学院的王伟、王殿君、张宝生、申爱民,北京林业大学的路敦民、田野等人;其中第1章由张宝生、申爱民编写,第2章由田野编写,第3章由路敦民编写,第4章由路敦民、申爱民、王伟编写,第5章由王伟、王殿君编写,全书由王伟担任主编、王振华担任主审,研究生嵇钟辉、魏辉和李欢欢等参与了本书的校核工作。同时在本书的编写过程中,参阅了以往其他版本的同类教材,并得到了许多同行专家的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促及笔者水平有限,对书中可能存在疏漏之处,敬请广大师生及读者朋友批评指正!

编 者
2016年9月

目 录

前 言

第1章 绪论..... 1

1.1 数控技术概述..... 1

1.2 数控机床的组成及工作原理..... 1

1.2.1 数控机床的组成..... 1

1.2.2 数控机床的工作原理..... 3

1.2.3 数控系统的工作过程..... 3

1.3 数控机床的分类、特点和应用..... 4

1.3.1 数控机床的分类..... 4

1.3.2 数控机床的特点..... 6

1.3.3 数控机床的应用..... 7

1.4 数控机床的产生和发展..... 7

1.4.1 数控机床的产生..... 7

1.4.2 数控机床的发展历程..... 7

1.4.3 数控机床的发展趋势..... 8

1.4.4 数控机床在我国的发展情况..... 10

1.5 典型数控系统..... 12

1.5.1 FANUC 数控系统..... 12

1.5.2 SIEMENS 数控系统..... 15

1.5.3 开放式数控系统..... 18

习题..... 20

第2章 数控编程基础..... 21

2.1 概述..... 21

2.1.1 数控编程的基本概念..... 21

2.1.2 数控编程的内容和步骤..... 21

2.1.3 数控编程的方法..... 22

2.2 编程的基础知识..... 22

2.2.1 零件加工程序的结构..... 22

2.2.2 数控机床的坐标系..... 24

2.2.3 功能代码简介..... 29

2.3 常用准备功能指令的编程方法..... 33

2.3.1 与坐标系相关的指令..... 33

2.3.2 运动控制指令..... 35

2.3.3 刀具补偿指令..... 39

2.3.4 固定循环指令..... 41

2.3.5 车削固定循环指令..... 48

2.4 数控编程的工艺处理..... 51

2.4.1 合理确定零件的加工路线..... 51

2.4.2 合理选择对刀点、换刀点..... 52

2.4.3 合理选择工件的装夹方法、刀具和切削用量..... 53

2.5 手工编程..... 53

2.5.1 孔的加工程序编制..... 54

2.5.2 数控车削程序的编制..... 56

2.5.3 数控铣削加工程序的编制..... 59

2.6 发展中的 STEP-NC 标准..... 61

2.6.1 STEP-NC 标准的提出..... 61

2.6.2 STEP-NC 标准与 STEP 标准..... 62

2.6.3 STEP-NC 的数据模型..... 62

2.6.4 STEP-NC 数控程序结构..... 63

2.6.5 STEP-NC 标准的发展..... 64

习题..... 64

第3章 开环伺服系统及轮廓轨迹形成..... 66

3.1 概述..... 66

3.2 步进电动机及其驱动控制..... 66

3.2.1 步进电动机的工作原理..... 66

3.2.2 永磁式步进电动机..... 69

3.2.3 混合式步进电动机..... 69

3.3 步进电动机的运行..... 70

3.3.1 步进电动机的运行性能..... 70

3.3.2 步进电动机的驱动电源..... 74

3.3.3 步进电动机的选用..... 77

3.4 开环系统的轮廓轨迹形成..... 78

3.4.1 逐点比较法..... 79

3.4.2 数字积分法..... 88

3.5 提高开环伺服系统精度的措施..... 97

3.5.1 传动间隙补偿..... 97

3.5.2 螺距误差补偿..... 97

3.5.3 细分线路..... 98

习题..... 99

第4章 闭环伺服系统及轨迹实现..... 100

4.1 概述..... 100

4.1.1 伺服系统组成..... 100

4.1.2 对伺服系统的基本要求..... 101

4.1.3 伺服系统的分类	102	5.1.2 激光雕刻机加工的优势	131
4.2 交流伺服电动机原理	102	5.2 激光雕刻机机械系统设计	132
4.2.1 交流伺服电动机的类型	102	5.2.1 激光雕刻机的总体方案设计	132
4.2.2 永磁交流同步伺服电动机	103	5.2.2 激光雕刻机部件选型	134
4.3 交流伺服电动机的变频调速	105	5.2.3 激光雕刻机三维建模	145
4.3.1 交-直-交变频调速	105	5.3 激光雕刻机硬件控制系统设计	147
4.3.2 正弦脉宽调制	108	5.3.1 控制系统总体方案设计	147
4.4 闭环伺服系统常用检测装置	109	5.3.2 控制系统硬件设计	149
4.4.1 光栅	110	5.3.3 激光雕刻机的 PID 参数整定	157
4.4.2 脉冲编码器	111	5.4 激光雕刻机软件控制系统设计	164
4.4.3 旋转变压器	115	5.4.1 激光雕刻机软件控制系统总体 结构	164
4.4.4 感应同步器	117	5.4.2 矢量字库中字体的存储格式及 矢量字体的提取	164
4.5 数据采样插补	120	5.4.3 截取 BMP 图像并对其进行镜像 处理	170
4.5.1 插补周期与采样周期	121	5.4.4 提取汉字“龙”轮廓	171
4.5.2 插补周期与精度、速度之间的 关系	121	5.4.5 输出汉字“龙”轮廓 G 代码和 实心 G 代码	173
4.5.3 直线函数法	122	5.5 激光雕刻机误差补偿	178
4.5.4 扩展数字积分法	124	5.5.1 激光跟踪仪原理	178
4.5.5 数据采样插补算法的速度控制	127	5.5.2 双向螺距误差补偿原理和实现	180
习题	129	参考文献	184
第 5 章 激光雕刻机实验平台	131		
5.1 概述	131		
5.1.1 数控雕刻机平台简介	131		

第 1 章 绪 论

1.1 数控技术概述

数控 (Numerical Control, NC) 技术是一种借助数字字符或其他符号对某一工作过程 (如加工、测量、装配等) 进行可编程控制的自动化方法, 简称数控。数控技术综合运用了微电子、计算机、自动控制、精密检测、机械设计和机械制造等技术的最新成果, 通过程序来实现设备运动过程和先后顺序的自动控制, 位移和相对坐标的自动控制, 以及速度、转速和各种辅助功能的自动控制。

计算机数控 (Computerized Numerical Control, CNC) 是用计算机实现数控所需的所有运算、控制功能和其他辅助功能的方法。

数控系统是指利用数控技术实现自动控制的系统。

用数控技术实现自动控制的机床称为数控机床。数控机床通过数字化的代码将零件加工过程中所需的各种操作和步骤, 以及刀具加工轨迹等信息记录在程序介质上送入数控系统进行译码、运算及处理, 控制机床的刀具与工件的相对运动, 最终加工出所需要的零件。

1.2 数控机床的组成及工作原理

1.2.1 数控机床的组成

数控机床一般由程序载体、输入装置、数控装置、主轴控制单元、主轴电动机、可编程逻辑控制器、强电控制装置、伺服系统、位置检测装置、机床本体 (主运动机构、进给运动机构、辅助动作机构) 和输出装置等组成, 如图 1-1 所示。

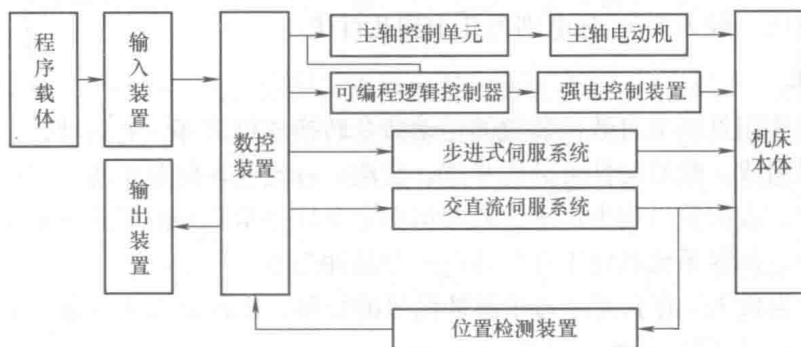


图 1-1 数控机床的组成

1. 程序载体

程序载体是联系人和数控机床的媒介物, 也称为程序介质、输入介质、信息载体, 根据待加工零件的图样获得数控加工需要的运动、尺寸、工艺参数等数据信息, 再把这些数据写

入程序中并通过载体存储起来,从而实现人机交流。载体可以是磁盘、电子闪存盘(Flash)或者其他可以存储代码的介质,有些直接集成在CAD/CAM等相关软件中,如华中数控的程序载体为电子闪存盘。

2. 输入装置

输入装置将数控代码转换成相应的电脉冲信号,传递并存入数控装置内。输入方式包括通过手工(Manual Data Input, MDI)用键盘直接输入,或者通过网络通信的方式传入。目前,编写小程序一般在数控系统操作面板上的键盘直接输入,比较复杂的零件加工一般用CAD/CAM软件自动生成程序,然后用电子闪存盘或网络通信传入。

3. 数控装置

数控装置是数控机床的数据信息处理中心,相当于计算机的中央处理器(Central Processing Unit, CPU)。只不过数控装置是在数控系统上运行,其主要完成运算和控制功能。数控装置接收程序载体的信息,并将其代码加以识别、存储、运算,输出相应的指令脉冲以驱动伺服系统,进而控制机床动作。在计算机数控机床中,由于计算机本身含有运算器、控制器等单元,因此其数控装置的功能由一台计算机来完成。

4. 主轴控制单元

主轴控制单元主要接收数控装置、可编程逻辑控制器的开关指令,对主轴的工作状态进行控制,如主轴的起动、加速、换向和停止等。

5. 可编程逻辑控制器

在数控机床中,利用可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)的逻辑运算功能可实现各种开关量的控制,以代替传统继电器的工作。

6. 强电控制装置

强电控制装置的主要功能是接受数控装置所控制的内置式PLC输出的主轴起停、变速、换向,刀具的选择和更换,分度工作台的转位和锁紧,工件的夹紧或松开,切削液的开关等指令信号,经功率放大直接驱动相应的执行元件,如接触器、电磁阀等,从而实现数控机床在加工过程中的全自动操作。强电控制装置是相对于数控装置输出的低电压脉冲信号而言的,脉冲信号电压一般为5V,强电则为几十到几百伏。

7. 伺服系统

伺服系统的作用是把来自数控装置的运动命令转换成机床部件的运动,一般由功率放大器和伺服电动机组成。按照特性可分为步进、交流、直流三种伺服系统。其性能的好坏直接决定着加工精度、表面质量和生产率。通常运动命令以进给脉冲的形式表示,数控装置每输出一个进给脉冲,伺服系统就使工作台移动一个脉冲当量。

脉冲当量 δ 为机床工作台对于每个脉冲信号的位移,也称为机床的分辨率。常见的脉冲当量 δ 有0.01mm、0.001mm。

8. 位置检测装置

位置检测装置运用各种灵敏的位移、速度传感器检测机床工作台的运动方向、速率、距离等参数,并将位移、速度等物理量转换成对应的电信号显示出来,送到机床数控装置中进行处理和计算,实现数控系统工作的反馈控制,使数控装置能够校核机床的理论位置与实际

位置是否一致。数控系统利用理论位置与实际位置的差值,并通过数控装置发出指令,修正理论位置与实际位置的误差。

9. 机床本体

机床本体主要由床身、立柱、导轨、工作台等基础件和刀架、刀库等配套件组成。

10. 输出装置

输出装置指数控系统的显示器,一般采用液晶屏显示加工过程的信息,是人机对话的平台。

1.2.2 数控机床的工作原理

数控机床加工零件,首先要将被加工零件的图样及工艺信息数字化,再用规定的代码和程序格式编写加工程序,然后将编写的程序输入机床的数控装置中,数控装置再将程序进行存储、译码、运算,向机床各个坐标的伺服机构输出进给脉冲信号和向辅助控制装置发出开关信号,以驱动机床各运动部件,达到所需要的运动效果,最后加工出合格的零件。

从外部特征来看,计算机数控系统由硬件(通用硬件和专用硬件)和软件(数控操作系统)两大部分组成,数控机床的加工操作由系统硬件和软件共同完成。

从自动控制的角度来看,计算机数控系统是一种位置(轨迹)、速度控制系统,其本质是以多执行部件(各运动轴)的位移量、速度为控制对象并使其协调运动的自动控制系统,是一种配有专用操作系统的计算机控制系统。

1.2.3 数控系统的工作过程

数控系统的工作过程分为以下三步。

1) 接收数控程序(NC代码)。由数控系统接收输入装置发来的数控程序。数控程序由数控编程人员手工编制或者运用CAD/CAM软件自动生成,以文本格式存储和传输。它的表达比较直观,较容易被编程人员直接理解,因此便于编辑和修改,但却无法被硬件直接识别。

2) 将数控程序“翻译”为机器码。由数控系统将数控程序“翻译”为计算机能识别的机器码。机器码是一种由“0”和“1”组成的二进制文件,对一般的编程人员而言,它是难以理解的,但却可以直接被硬件所理解和使用。简单地讲,这一过程即是把人能识别的信息转换成硬件能识别的信息的过程。

3) 将机器码转换为控制信号。数控系统将机器码转换为控制工作台和主轴进给运动的电脉冲信号及其他辅助处理信号。机器码中包含了数控程序的各种指令信息,包括主轴的转动及工作台的平动信息和其他辅助信息(如切削液的开关等),必须将这些信息进行分解并分别传送到相应的执行元器件中才能获得所需要的动作。例如,普通数控铣床,进给信号为X、Y、Z坐标轴三个运动方向的电脉冲信号,伺服系统接收到进给脉冲信号后执行相应的运动,并通过丝杠、螺母等传动机构将伺服电动机的转动转变为机床主轴的转动和工作台的平动,从而完成加工操作。

1.3 数控机床的分类、特点和应用

1.3.1 数控机床的分类

数控机床规格繁多,据不完全统计,目前已有 400 多个品种规格,可按照多种原则对其分类。归纳起来,常见的有按运动轨迹分类、按工艺用途分类、按伺服系统的控制方式分类和按数控装置分类。

1. 按运动轨迹分类

点位控制数控机床:只能精确控制点位置,在移动过程中不进行任何加工,而且运动部件的运动路线并不影响加工孔距的精度。为提高效率,以慢—快—慢的方式运动,靠近和离开工件时慢,中间移动时速度快。钻床、冲床和测量机等都属于点位控制数控机床。点位控制钻孔加工如图 1-2 所示。

直线控制数控机床:有位置、速度和简单路线控制功能。此机床除了控制点定位外,还能控制刀具沿某个与坐标轴平行的方向或者与坐标轴成 45° 夹角的方向切削加工,但不能加工任意斜率的直线。阶梯车削的数控车床、磨削加工的数控磨床都属于直线控制数控机床。直线控制切削加工如图 1-3 所示。

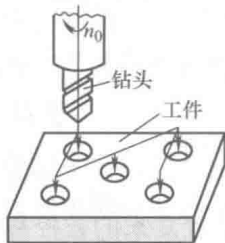


图 1-2 点位控制钻孔加工

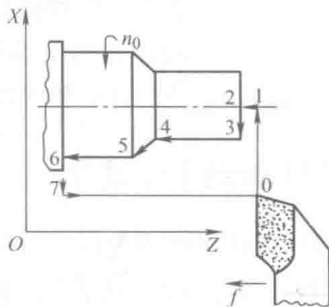


图 1-3 直线控制切削加工

轮廓控制数控机床:有每点的位置、速度、路线控制功能,可对两坐标或两坐标以上坐标轴进行控制,能加工曲线和曲面。在加工过程中,需不断地进行插补运算及相应的速度和位移控制。目前的普通数控车床、数控铣床都属于轮廓控制数控机床。轮廓控制切削加工如图 1-4 所示。

2. 按工艺用途分类

一般数控机床,如车床、铣床、镗床、钻床、磨床等,功能与通用机床相似,可以加工复杂形状的零件,但加工复杂曲面时的表面质量没有多坐标数控机床好。

数控加工中心:在数控铣床、镗床、钻床的基础上增加了自动换刀装置和刀库,一次装夹后可完成多工序加工,自动化程度高。

多坐标数控机床:坐标轴大于 3,能加工复杂形状的零件,如螺旋桨、飞机曲面零件

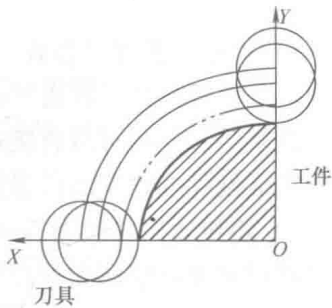


图 1-4 轮廓控制切削加工

等。其特点是数控装置控制的轴数较多，机床结构也比较复杂，其坐标轴数通常取决于加工零件的工艺要求。现在常用的是4、5、6坐标轴联动的数控机床，其X、Y、Z3个坐标轴与转台的回转、刀具的摆动可以实现联动，可加工机翼等复杂零件。

3. 按伺服系统的控制方式分类

开环控制数控机床：该机床无位置反馈检测装置，其伺服电动机一般采用步进电动机，加工精度不是很高，但控制很方便，如图1-5所示。



图1-5 开环控制系统框图

闭环控制数控机床：该类机床有位置反馈检测装置和位置比较电路，位置反馈检测装置安装在工作台导轨上，能实时检测机床工作台的实际位置，并能把检测得到的位置信息反馈回数控系统，数控系统再将程序指定的理论位置与实际位置进行比较，实现机床的闭环控制。该类机床的加工精度很高，但是因其反馈信息考虑了丝杠等的影响，所以稳定性较差、系统较复杂、调试也不方便。闭环控制系统框图如图1-6所示。

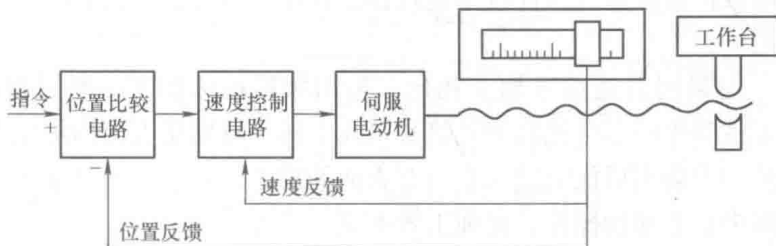


图1-6 闭环控制系统框图

半闭环控制数控机床：该类机床的位置反馈检测装置一般装在伺服电动机上，通过实时检测伺服电动机的转速和转数来间接反映机床的位置信息，并反馈到数控系统中，因此常称为半闭环控制数控机床。该类机床把丝杠等的影响排除在反馈之外，因此，稳定性较好、调试较方便。半闭环控制系统框图如图1-7所示。

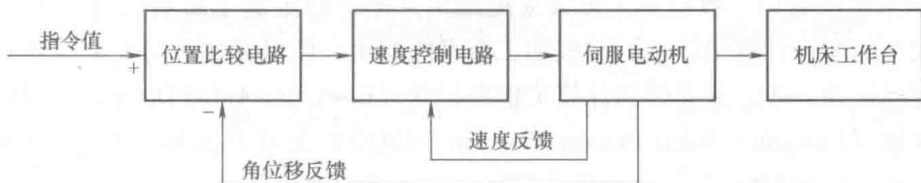


图1-7 半闭环控制系统框图

4. 按数控装置分类

按数控装置可将数控机床分为硬件数控机床和软件控制数控机床。硬件数控机床速度快，但功能扩展性和灵活性差，软件控制数控机床的主要功能由软件实现，软件模块化，便于扩展。

1.3.2 数控机床的特点

1. 数控机床的特点

- 1) 采用了高性能的主轴及伺服传动系统,机械结构得到简化,传动链较短。
- 2) 为了可靠地实现连续性自动化加工,机械结构具有较高的动态刚度及耐磨性,热变形小。
- 3) 更多地采用高效率、高精度的传动部件,如滚珠丝杠、直线滚动导轨等。
- 4) 加工中心带有刀库、自动换刀装置。
- 5) 广泛采用冷却、排屑、防护、润滑、储运等辅助装置。

2. 数控机床的优点

(1) 具有复杂形状加工能力 复杂形状零件在飞机、汽车、船舶、模具、动力设备和国防军工等领域具有重要地位,其加工质量直接影响着整机产品的性能。数控加工运动的任意可控性使其能完成普通加工方法难以完成或者无法进行的复杂型面的加工。

(2) 高质量 数控加工是用数字程序控制实现自动加工的,排除了人为误差因素,且加工误差还可以由数控系统通过软件技术进行补偿校正。因此,采用数控加工可以提高零件加工精度和产品质量。

(3) 高效率 与采用普通机床加工相比,采用数控机床加工一般可提高生产率2~3倍,在加工复杂零件时生产率可提高十几倍甚至几十倍。特别是五面体加工中心和柔性制造单元等设备,零件一次装夹后能完成几乎所有表面的加工,不仅可消除多次装夹引起的定位误差,还可大大减少加工辅助操作,使加工效率进一步提高。

(4) 高柔性 只需改变零件程序即可适应不同品种零件的加工,且几乎不需要制造专用工装夹具,因而加工柔性好,有利于缩短产品的研制与生产周期,适应多品种、中小批量的现代化生产需要。

(5) 可以减轻劳动强度,改善劳动条件 数控加工是按事先编好的程序自动完成的,操作者不需要进行繁重的重复手工操作,劳动强度和紧张程度大大降低,劳动条件也相应得到改善。

(6) 利于生产管理 数控加工可大大提高生产率、稳定加工质量、缩短加工周期且易于在工厂或车间实行计算机管理。数控加工技术的应用,使机械加工的大量前期准备工作与机械加工过程连为一体,使零件的计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助工艺规划(Computer Aided Process Planning, CAPP)和计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)的一体化成为现实,易于实现现代化的生产管理。

3. 数控机床的缺点

数控机床是一种高度自动化的机床,必须配有数控装置或计算机,因机床加工精度受切削用量大、连续加工发热多等影响,其设计要求比通用机床更严格,制造要求更精密,因此数控机床的制造成本较高。此外,由于数控机床的控制系统比较复杂,一些精密度较高的元件、部件及一些进口机床的技术开发受到条件的限制,因此对数控机床的调试和维修都比较困难。

1.3.3 数控机床的应用

经过多年的发展数控机床种类日益繁多,应用范围也日益广泛,主要应用于:

- 1) 金属切削,如数控车床、铣床。
- 2) 金属成形,如数控折弯机。
- 3) 特种加工,如数控电火花切割机床、数控线切割机床。
- 4) 其他方面。

1.4 数控机床的产生和发展

1.4.1 数控机床的产生

数控机床出现之前,在汽车、拖拉机等大量生产的工业领域,大都采用自动机床、组合机床和自动化生产线。但这些设备的第一次投资费用大,生产准备时间长,这与改型频繁、精度要求高、零件形状复杂的舰船、航空航天及其他国防工业的要求不相适应。如果采用仿形机床,则要制造靠模,不仅生产周期长,精度亦受限制。

第二次世界大战以后,美国为了加速飞机工业的发展,要求革新一种样板加工的设备。1948年,美国 Parsons 公司在研制加工直升机叶片轮廓检查用样板的机床时,提出了数控机床的初始设想。1952年,美国 Parsons 公司和麻省理工学院研制成功了世界上第一台数控机床。半个世纪以来,数控技术得到了迅猛的发展,加工精度和生产效率不断提高。归结起来,数控机床的发展至今已经历了两个阶段共六代的发展历程。

1.4.2 数控机床的发展历程

伴随着电子技术、信息技术的发展,数控机床的发展经历了硬件数控阶段和计算机数控阶段。

1. 硬件数控阶段

1952年,麻省理工学院研制的三坐标联动,插补运算采用脉冲乘法器的数控机床为第一代数控机床。

1959年,晶体管以其体积小,性能稳定取代以前的电子管,晶体管数控机床为第二代数控机床。

1959年3月,美国 Keane Y&Trecker 公司发明了带有自动换刀装置和刀库的数控机床,称为加工中心。

1965年,集成电路的出现大大缩小了电路的体积,并且功耗低、可靠性高,集成电路数控机床为第三代数控机床。

2. 计算机数控阶段

1970年,小型计算机取代硬件逻辑控制电路,小型计算机控制的数控机床为第四代数控机床。

1974年前后,美国 Intel 公司开发和使用微处理器,微处理器数控机床为第五代数控机床。

1990年后,基于个人计算机(Personal Computer, PC)的数控机床为第六代数控机床。

1.4.3 数控机床的发展趋势

随着计算机技术的发展,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使其朝着以下几个方向发展。

1. 加工高速化、高精度化

速度和精度是数控机床的两个重要指标,直接关系到产品的加工效率和质量。但是速度和精度这两项技术指标是相互制约的,当位移速度要求越高时,定位精度就越难得到保证。

加工高速化要求对系统硬件进行相应的配置:如采用高速CPU芯片;主轴要求高速化,采用电主轴;采用全数字交流伺服驱动器;改善机床动、静态性能等。现代数控系统的位移分辨率与进给速度的对应关系是:在分辨率为 $1\mu\text{m}$ 时,快进速度达 $240\text{m}/\text{min}$;在分辨率为 $0.1\mu\text{m}$ 时,快进速度达 $24\text{m}/\text{min}$;在分辨率为 $0.01\mu\text{m}$ 时,快进速度达 $400\sim 800\text{mm}/\text{min}$ 。另外,在加工高速化的基础上要求完成复杂型面的精确加工,加速度已达到 $2g$,主轴转速已达 $200000\text{r}/\text{min}$,换刀时间少于 1s 。

保证或提高精度可采取以下措施:提高部件的制造和装配精度;采用高速插补技术,以微小程序段实现连续进给,使CNC控制单位精细化;采用高分辨率位置检测装置,提高位置检测精度(日本生产的交流伺服电动机安装了 1000000 脉冲/ r 的内藏位置检测器,其位置检测精度能达到 $0.01\mu\text{m}/\text{脉冲}$);位置伺服系统采用前馈控制与非线性控制等方法;采用反向间隙补偿、丝杠螺距误差补偿和刀具误差补偿等技术;采用设备的热变形误差补偿和空间误差的综合补偿技术,研究表明综合误差补偿技术的应用可将加工误差减少 $60\%\sim 80\%$ 。

2. 控制智能化

随着人工智能技术的不断发展,为满足制造业生产柔性化、制造自动化的发展需求,数控技术智能化程度不断提高。发展智能加工的目的是要解决加工过程中众多结果不确定的、要求人工干预的操作,其最终目标是由计算机取代或延伸加工过程中人的参与,实现加工过程中监测、决策与控制的自动化。控制智能化体现在以下几个方面。

(1) 加工过程自适应控制技术 通过监测主轴和进给电动机的功率、电流、电压等信息辨识刀具的受力、磨损及破损状态,以及机床加工的稳定性状态,并实时修调加工参数(主轴转速、进给速度)和加工指令,使设备处于最佳运行状态,以提高加工精度、降低工件表面粗糙度,以及保证设备运行的安全性。

(2) 加工参数的智能优化 总结零件加工的一般规律、特殊工艺经验,用现代智能方法,构造基于专家系统或基于模型的“加工参数的智能优化与选择”,获得优化的加工参数,提高编程效率和加工工艺水平,缩短生产准备时间,使加工系统始终处于较合理和较经济的工作状态。

(3) 智能化交流伺服驱动装置 能自动识别负载、自动调整控制参数,包括智能主轴和智能化进给伺服驱动装置,使驱动系统获得最佳运行。

(4) 智能故障诊断技术 根据已有的故障信息,应用现代智能方法实现故障的快速准确定位。

(5) 智能故障自修复技术 根据故障诊断出的原因和部位,可自动排除故障或指导故

障的排除,集故障自诊断、自排除、自恢复、自调节于一体,贯穿于全生命周期。智能故障诊断技术在某些数控系统中已有应用,智能故障自修复技术还在研究之中。

3. 加工网络化

数控系统网络化是先进制造模式的要求,数控机床作为网络中的一个节点,有助于解决自动化孤岛问题。其关键技术涉及几个方面:支持网络通信协议,既能满足单机分布式数控(Distributed Numerical Control, DNC)需要,又能满足柔性加工单元(Flexible Manufacturing Cell, FMC)、柔性加工系统(Flexible Manufacturing System, FMS)、计算机/现代集成制造系统(Computer/Contemporary Integrated Manufacturing Systems, CIMS)、敏捷制造对基层设备集成的要求;网络资源共享;远程(网络)控制;数控机床故障的远程(网络)诊断;数控机床的远程(网络)培训与教学(网络数控)。

数控系统中采用网络与光纤通信技术实现运动和I/O的控制是数控技术的发展方向。由于技术封锁等原因,各系统中光纤通信采用的协议没有兼容性和互换性,要求伺服驱动器及I/O模块必须具有相应协议的光纤通信接口,这样的系统软硬件开放性较差,而且系统的成本也较高。

网络通信协议有德国 Intramat 的 SERCOS、美国 DELTATAU 的 Mero - Link、日本 FANUC 的 SERVO - Link、日本三菱的 Tro - Link,还有 ARCNET、CAN Bus、Profibus、USB、IEEE1394 等。

4. 数控系统的开放化

传统数控系统的特点如下:

- 1) 由生产厂家支配价格和结构,各种接口不能通用。
- 2) 功能集成停止在微电子技术的应用上,而不是针对开放式的生产环境和功能。
- 3) 对于不同的产品,操作、维护方法都必须进行相应的培训。
- 4) 对于使用者,控制器成为黑盒子无法自行修改更新。

由于传统数控系统的局限性,为满足现代化生产的要求,数控系统需要具备以下特点:

- 1) 开放性:可重构性、可维护性、允许用户进行二次开发。
- 2) 模块化:具有平台无关性。
- 3) 接口协议:可传递性、可移植性。
- 4) 可进化性:智能化。

5) 语言统一化:中性语言(Neutral Manufacturing Language, NML)包括工厂自动化描述语言(Factory Automation Description Language, FADL)、开放系统环境下的语言(Open System Environment Language, OSEL)。

5. 并联机床

1) 机床结构技术上的突破性进展当属 20 世纪 90 年代中期间世的并联机床。并联机床是机器人技术、机床结构技术、现代伺服驱动技术和数控技术相结合的产物,被称为“21 世纪的机床”。并联机床相对于传统机床,其在传动原理、结构和布局上均有较大的突破,由于是并联结构,其控制更加灵活,可避免悬臂部件产生的大弯矩和扭矩对机床的影响。

2) 传统机床基本上是在遵循笛卡儿直角坐标系的运动原理的基础上设计制造出来的,

其结构为串联结构,存在悬臂部件,承受着很大的弯矩和扭矩,不容易获得高的结构刚度。另外,传统机床组成环节多,结构复杂,形成误差叠加,限制了加工精度和速度的提高。

6. STEP-NC

(1) 目前 CNC 系统的局限 数控代码只定义了机床的运动和动作,丢失了尺寸公差、精度要求、表面粗糙度等大量信息,生成 G 代码的过程单向不可逆,在加工车间做出的修改无法反馈到设计部门。

各厂商开发的宏和扩展美国电子工业协会 (Electronic Industries Association, EIA) 代码,使系统间语言不具通用性,对 G、M 代码的解释也不尽相同。不支持 5 轴铣、样条数据、高速切削等功能。

(2) STEP-NC 的出现 STEP (Standard for The Exchange of Product Model Data) 即产品模型数据转换标准。STEP-NC 是 STEP 向数控领域的扩展,它在 STEP 的基础上以面向对象的形式将产品的设计信息与制造信息联系起来,摒弃了传统数控程序中直接对坐标轴和刀具动作进行编码的做法,采用了新的数据格式和面向特征的编程原则。

1.4.4 数控机床在我国的发展情况

我国从 1958 年开始研究数控技术,同年研制出第一代数控系统产品。20 世纪 60 年代,针对壁锥、非圆齿轮等复杂形状的工件研制出了数控壁锥铣床、数控非圆齿轮插齿机等设备,保证了加工质量,减少了废品,提高了效率,取得了良好的效果,并于 1966 年研制出第二代数控系统产品。20 世纪 70 年代,我国针对航空工业等加工复杂形状零件的迫切需求,于 1972 年研制出了第三代数控系统产品。从 1973 年开始,相关部门组织了数控机床攻关会战,经过 3 年努力,到 1975 年已试制生产了 40 多个品种 300 多台数控机床,为第四代数控系统产品。1975 年之后进一步研制成功第五代数控系统产品。从技术水平来说,大致已达到国外 20 世纪 60 年代后期的技术水平。为了扬长避短,解决用户急需,并争取打入国际市场,1980 年前后我国采取了暂时从国外 (主要是从日本和美国) 引进数控装置和伺服驱动系统,为国产主机配套的方针,几年内大见成效。1981 年,我国从日本 FANUC 引进了 5、7、3 等系列的数控系统和直流伺服电动机、直流主轴电动机技术,并在北京机床研究所建立了数控设备厂,当年年底开始验收投产,1982 年生产了约 40 套系统,1983 年生产了约 100 套系统,1985 年生产了约 400 套系统。伺服电动机与主轴电动机也配套生产,这些系统是国外 20 世纪 70 年代的水平,功能较全,可靠性比较高,这样就使机床行业发展数控机床有了可靠的基础,使我国的主机品种与技术水平都有了较大的发展与提高。1982 年青海第一机床厂生产的 XHK754 卧式加工中心,长城机床厂生产的 CK7815 数控车床,北京机床研究所生产的 JCS018 立式加工中心,上海机床厂生产的 H160 数控端面外圆磨床等,都能可靠地进行工作并陆续批量生产。1984 年仅机械工业部门就生产数控机床 650 台,全国当年总产量为 1620 台,已有少数产品开始进入国际市场,还有几种合作生产的数控机床返销国外。1985 年我国数控机床的品种已有了新的发展,除了各类数控线切割机床以外,其他各种金属切削机床 (如各种规格的立式、卧式加工中心、数控车床、数控铣床、数控磨床等) 也都有了极大的发展,新品种总计 45 种。到 1989 年底,我国数控机床的可供品种已超过 300 种,其中数控车床占 40%,加工中心占 27%。

“八五”至“十五”期间,国内数控系统企业通过自主创新不断缩小与国外的差距。形

成了“中华 I 型”“航天 I 型”“蓝天 I 型”“华中 I 型”4 个自主知识产权的数控系统。在激烈的市场竞争中,这些品牌的产品争得了一席之地,销量逐年增加,市场占有率不断提高。在产业化方面,数控系统行业形成了“东南西北中”(东:华星数控、南:广州数控、西:广泰数控、北:凯恩帝数控、中:华中数控)的行业格局。2010 年,国产数控系统的年产销量达到 16 万台以上,中国市场占有率达到 60% 左右。

但是,这一期间国内数控系统企业由于受到自身规模、技术水平、人才队伍和财力投入的局限,国产数控系统产品的 90% 以上主要还是定位在中、低档市场。高档型、标准型数控系统,无论在技术还是产业化水平上,与国外都存在较大差距。

2009 年,国家科技重大专项(04 专项)支持武汉华中数控股份有限公司、广州数控设备有限公司、大连光洋科技集团有限公司、沈阳高精数控技术有限公司和北京航天数控系统有限公司 5 家数控系统企业,自主研发高档数控系统关键技术。经过两年多的努力,5 家企业攻克了数控系统软硬件平台、高速高精、多轴联动、总线技术、纳米插补等一批高档数控系统关键技术,研制出全数字总线式高档数控系统产品样机,实现了从模拟接口、脉冲接口到全数字总线控制、高速高精的技术跨越。同时,5 家企业联合研制出具有自主知识产权的 NCUC-Bus 现场总线技术。

2015 年 2 月,中国机械工业联合会组织行业内知名专家对大连光洋科技集团有限公司“光纤总线开放式高档数控系统、伺服驱动、测量系统及电动机成套系统”课题成果进行了鉴定。鉴定委员会认为,大连光洋科技集团有限公司 GNC61 光纤总线开放式高档数控系统在控制功能、控制精度、加工效率等方面达到国际先进水平。

2016 年 4 月,中国机械工业联合会组织行业内知名专家,对武汉华中数控股份有限公司的“高性能数控系统关键技术及应用”成果进行了鉴定。鉴定委员会认为,武汉华中数控股份有限公司开发的以华中 8 型为代表的自主可控的数控系统,全面达到国际先进水平,可替代进口。该企业为高档数控机床重大专项做出了突出贡献,构建了平台化、网络化、有创新的智能数控系统,为中国智能制造提供了智能平台。

2016 年 5 月,在中国机床工具工业协会的领导下,武汉华中数控股份有限公司、广州数控设备有限公司、沈阳高精数控技术有限公司等国产数控系统企业联合大连机床集团有限责任公司、四川普什宁江机床有限公司等机床企业,成立了数控机床互联通信协议标准联盟。7 月初,联盟所申报的智能制造综合标准化项目获得了工信部的立项支持。为了推动国产数控系统的应用示范和产业化,“04 专项”立项支持了一批航空航天、汽车、发电装备和船舶制造企业应用国产数控机床和数控系统。武汉华中数控股份有限公司、广州数控设备有限公司、大连光洋科技集团有限公司、沈阳高精数控技术有限公司所研制的高档型数控系统与 10 余类 600 多台高速、精密、5 轴联动的高档数控机床实现配套。这些设备包括高速精密车削中心、高速立式加工中心、精密立式加工中心、车铣复合加工中心、高速卧式加工中心、精密卧式加工中心、九轴六联动数控砂带磨床、数控工具磨床等高档数控机床。

沈阳机床(集团)有限责任公司组建了自己的研究院,从底层技术源代码算法做起,历时 5 年,研制成功 i5 数控系统。通过充分利用自身市场优势和 i5 数控系统的技术创新,支撑了融资租赁商业模式创新,带动了 i5 数控系统的产业化。

大连机床集团有限责任公司自主开发了 DMTG 数控系统,近年来,累计销售近万台套,