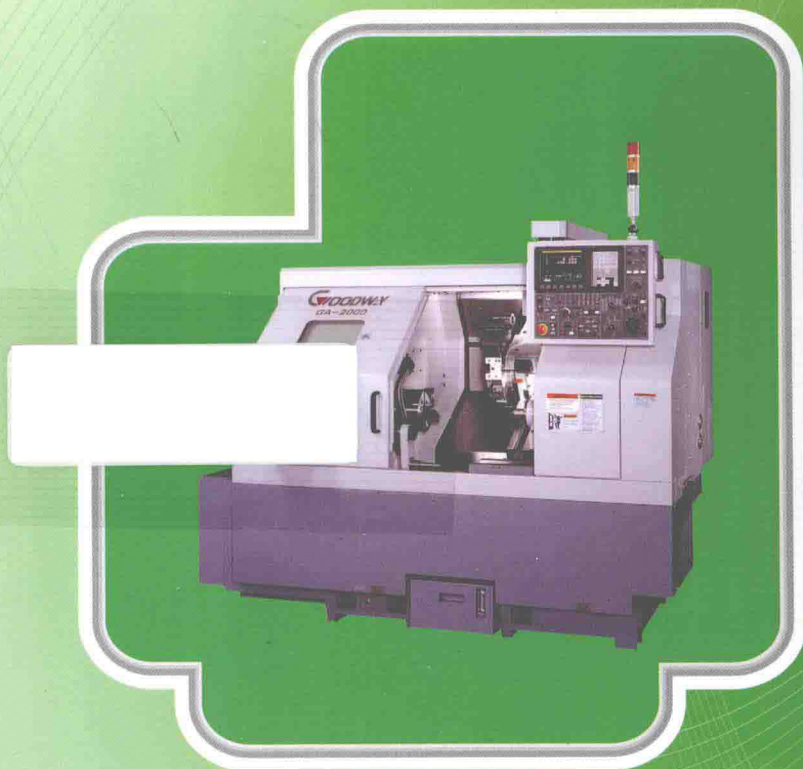




全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

数控技术与编程

主编 程广振 卢建湘



教材预览、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

数控技术与编程

主 编 程广振 卢建湘
副主编 葛守峰



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书以数控机床为研究对象, 主要内容包括数控技术简介、数控插补原理与控制、CNC 装置、位置检测技术、数控机床的机械结构与传动、数控机床的伺服系统、数控程序编制基本知识、镗铣类数控机床与加工中心编程、数控车床程序编制、Mastercam X 数控编程基础。全书共 10 章, 各章既相对独立, 又相互联系, 注重理论联系实际。

本书可作为高等院校机械类和机电类专业本科教材, 也可供机械工程领域设计研究单位、机械制造企业从事数控技术开发应用工作的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

数控技术与编程/程广振, 卢建湘主编. —北京: 北京大学出版社, 2015. 8

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-26028-9

I. ①数… II. ①程… ②卢… III. ①数控机床—程序设计—高等学校—教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 152902 号

书 名 数控技术与编程

著作责任者 程广振 卢建湘 主编

策划编辑 童君鑫

责任编辑 黄红珍

标准书号 ISBN 978-7-301-26028-9

出版发行 北京大学出版社

地 址 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址 <http://www.pup.cn> 新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱 pup_6@163.com

电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667

印刷者 北京大学印刷厂

经 销 者 新华书店

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 16.5 印张 380 千字

2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题, 请与出版部联系, 电话: 010-62756370

前 言

随着计算机技术、自动控制技术、传感器技术、精密机械技术的快速发展,数控技术已广泛应用于工业控制的各个领域,尤其是机械制造业,普通机床正逐步被高度自动化的数控机床取代,计算机辅助设计与制造、柔性制造单元、柔性制造系统、计算机集成制造系统突飞猛进向前发展。数控技术的发展水平,数控机床的拥有量和普及率已成为衡量一个国家综合国力和工业现代化水平的重要标志。近年来我国经济高速发展,对机械专业人才的需求逐年递增,尤其是有一定理论基础、实践能力强的数控技术人才的需求缺口很大,故需要培养大量具有数控专业技术知识的工程技术人员。

本书针对高等学校机械类创新型应用人才培养要求,充分体现应用型本科课程教学基本要求,具有如下特点:

(1) 突出应用型本科特色,面向机械制造企业,着力培养具有一定理论基础、实践能力强的数控技术应用型人才。以必需、够用为尺度,以掌握基本概念、基本原理为重点,做到理论少而精,理论与实际应用相统一。

(2) 精选教材内容,把数控技术基础和数控加工编程两方面的内容整合在一门课程内讲授。突出数控加工编程能力,强化数控技术最新科技成果应用,增加 Mastercam X 内容,利用三维模型自动生成数控加工程序。精简理论推导,适当缩减插补与数控装置的理论分析。

(3) 突出案例教学,数控系统以国内应用最广泛的 FANUC 系列数控装置为主,紧贴生产实际,手工编程、自动编程通过案例教学讲授编程方法,通俗易懂。

(4) 面向生产一线,着重于应用,教材中的插图与实物相一致,所分析的案例也大多来源于生产实际,使课程更接近于工程背景,突出工程能力的培养。

本书由程广振、卢建湘担任主编,葛守峰担任副主编,具体编写分工如下:湖州师范学院方明辉编写第 1、8 章,李兵编写第 2、3 章,程广振编写第 4、5 章,河南职业技术学院葛守峰编写第 6、9 章,龙岩学院卢建湘编写第 7、10 章。全书由程广振统稿定稿。

在本书的编写过程中,我们得到了湖州师范学院工学院和龙岩学院物理与机电工程学院领导的大力支持,在此表示诚挚的谢意;同时参阅了大量的文献资料,使本书内容丰富充实,在此一并向诸位原作者致以衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 3 月

目 录

第1章 数控技术简介	1
1.1 概述	3
1.1.1 数控机床的产生	3
1.1.2 数控技术的特点	4
1.1.3 数控技术的发展趋势	5
1.2 数控技术的基本原理	9
1.2.1 数控机床的组成	9
1.2.2 数控基本原理和工作过程	10
1.3 数控机床的分类	11
1.3.1 按工艺用途分类	11
1.3.2 按伺服控制方式分类	12
1.3.3 按轨迹运动方式分类	12
1.3.4 按功能水平分类	13
思考与练习	14
第2章 数控插补原理与控制	15
2.1 插补原理	17
2.1.1 插补的基本概念	17
2.1.2 逐点比较法	17
2.1.3 数字积分法	24
2.1.4 数字增量插补	27
2.2 进给速度与加减速控制	28
2.2.1 进给速度控制	28
2.2.2 加减速控制	29
思考与练习	33
第3章 CNC装置	34
3.1 CNC装置的组成及功能特点	35
3.1.1 CNC装置的组成	35
3.1.2 CNC装置的主要功能	37
3.1.3 CNC装置的特点	39
3.1.4 CNC装置的软硬件分工	39
3.1.5 CNC装置的多任务并行处理	40
3.2 CNC装置的硬件结构	42
3.2.1 单微处理器结构	43
3.2.2 多微处理器结构	43
3.3 CNC装置的软件结构	45
3.3.1 前后台型软件结构	45
3.3.2 中断型软件结构	48
3.3.3 功能模块结构模式	49
思考与练习	49
第4章 位置检测技术	50
4.1 位置伺服控制	52
4.1.1 位置伺服控制分类	52
4.1.2 幅值伺服控制	53
4.1.3 相位伺服控制	54
4.2 光电编码器	55
4.2.1 增量式编码器	55
4.2.2 绝对式编码器	56
4.2.3 编码器在数控机床中的应用	57
4.3 光栅尺和磁栅尺	58
4.3.1 光栅尺的结构及工作原理	58
4.3.2 光栅尺位移数字变换系统	60
4.3.3 磁栅尺的结构及工作原理	61
4.3.4 磁栅尺的检测电路	62
4.4 旋转变压器和感应同步器	65
4.4.1 旋转变压器的结构和工作原理	65
4.4.2 感应同步器的结构和工作原理	66
思考与练习	69



第5章 数控机床的机械结构与传动

5.1 概述	72
5.1.1 数控机床机械结构的特点	72
5.1.2 数控机床对机械结构的基本要求	72
5.2 数控机床的典型机械结构	73
5.2.1 滚珠丝杠螺母结构	73
5.2.2 齿轮传动间隙消除结构	78
5.2.3 机床导轨	80
5.2.4 刀库与自动换刀装置	83
5.2.5 回转工作台与分度工作台	86
5.3 数控机床的主传动系统	90
5.3.1 主传动的要求和变速方式	90
5.3.2 主轴部件的结构	91
5.3.3 电主轴与高速主轴系统	96
5.4 数控机床的进给传动系统	97
5.4.1 数控机床对进给传动系统的基本要求	97
5.4.2 数控机床进给传动系统的基本形式	98
5.4.3 直线电动机与高速进给单元	100
思考与练习	101

第6章 数控机床的伺服系统

6.1 概述	103
6.1.1 伺服系统的基本要求	104
6.1.2 伺服系统的分类	105
6.2 步进电动机伺服系统	109
6.2.1 步进电动机结构及工作原理	109
6.2.2 步进电动机的运行特性及性能指标	110
6.2.3 步进电动机驱动模块及应用	113

6.3 交流电动机伺服系统	115
6.3.1 交流伺服电动机的分类	115
6.3.2 永磁式交流同步电动机	116
6.3.3 交流感应式伺服电动机	117
6.3.4 交流伺服电动机驱动模块应用	118
6.4 直流电动机伺服系统	123
6.4.1 直流伺服电动机的分类	123
6.4.2 普通型永磁直流伺服电动机	124
6.4.3 直流主轴伺服电动机	126
6.4.4 晶闸管直流调速	127
6.4.5 晶体管直流脉宽调速	130
思考与练习	134

第7章 数控程序编制基本知识

7.1 程序编制的内容与方法	137
7.1.1 数控机床编程的内容与步骤	137
7.1.2 数控机床程序编制方法	138
7.2 数控机床坐标系	139
7.2.1 标准坐标系	139
7.2.2 数控机床的两种坐标系	141
7.2.3 绝对指令与增量指令	148
7.3 数控加工程序格式与代码	149
7.3.1 数控加工程序格式	149
7.3.2 程序字的功能	150
思考与练习	158

第8章 镗铣类数控机床与加工中心编程

8.1 数控镗铣加工概述	161
8.1.1 数控镗铣削加工的工艺特点	162

8.1.2 数控镗铣刀具对刀	164	9.2.1 快速定位直线插补与圆弧 插补指令(G00、G01、 G02、G03)	208
8.1.3 数控镗铣床的编程 特点	165	9.2.2 进给速度与主轴转速控制指令 (G98、G99、G50)	210
8.2 数控镗铣床的特殊编程指令	165	9.2.3 英制和公制与程序延时指令 (G20、G21、G04)	210
8.2.1 极坐标编程 (G16、G15)	165	9.2.4 螺纹车削指令 (G32)	211
8.2.2 可编程镜像功能 (G51.1、G50.1)	166	9.3 数控车床加工循环指令	214
8.2.3 比例缩放功能 (G50、G51)	168	9.3.1 单一外形固定循环指令 (G90、G92、G94)	214
8.2.4 旋转变换功能 (G68、G69)	169	9.3.2 多重循环指令(G71、G72、 G73、G70)	218
8.3 数控铣床常用编程指令	170	9.4 刀具补偿功能	221
8.3.1 快速定位和直线插补 (G00、G01)	171	9.4.1 刀具长度补偿	221
8.3.2 圆弧插补(G02、G03) ...	171	9.4.2 刀尖圆弧半径补偿 (G41、G42、G40)	223
8.3.3 刀具半径补偿 (G40、G41、G42)	175	思考与练习	229
8.3.4 刀具长度补偿 (G43、G44、G49)	177	第 10 章 Mastercam X 数控编程	
8.4 数控铣床编程实例	179	基础	231
8.5 孔加工固定循环指令	181	10.1 Mastercam X 简介	232
8.5.1 固定循环指令格式	181	10.1.1 Mastercam X 主要 功能	233
8.5.2 固定循环指令简介	182	10.1.2 刀具路径	233
8.6 数控钻镗床编程实例	189	10.1.3 Mastercam X 数控编程 内容与步骤	235
8.7 数控加工中心编程的特点	192	10.1.4 工作界面	237
8.7.1 数控加工中心的主要功能及 加工对象	192	10.2 Mastercam X 数控编程实例	238
8.7.2 数控加工中心的分类	192	10.2.1 进入 Mastercam X 加工模块	238
8.7.3 数控加工中心常用指令 代码	194	10.2.2 设置毛坯	240
思考与练习	200	10.2.3 选择加工方法	241
第 9 章 数控车床程序编制	204	10.2.4 选择加工刀具	242
9.1 数控车床加工概述	205	10.2.5 设置加工参数	246
9.1.1 数控车床的分类与编程 特点	205	10.2.6 加工仿真生成 NC 程序	247
9.1.2 数控车床工件坐标系的 设定	207	思考与练习	250
9.2 数控车床的常用编程指令	208	参考文献	251

第 1 章

数控技术简介



本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
概述	了解数控机床的产生； 掌握数控技术的特点； 了解数控技术的发展趋势	空间曲面加工； 集成电路与计算机的发展； FMC、FMS、CIMS
数控技术的基本原理	掌握数控机床的组成； 掌握数控基本原理和工作过程	硬件数控； 软件数控； 插补运算
数控机床的分类	了解按工艺用途分类； 熟悉按伺服控制方式分类； 掌握按轨迹运动方式分类； 了解按功能水平分类	金属切削机床分类方法； 伺服原理； 机床精度； 计算机分类



导入案例

第一台数控机床的诞生

20 世纪 40 年代, 由于航空航天技术的飞速发展, 人们对于各种飞行器的加工提出了更高的要求, 这些零件大多形状非常复杂, 材料多为难加工的合金。用传统的机床和工艺方法进行加工, 不能保证精度, 也很难提高生产效率。为了解决零件复杂形状表面的加工问题, 1952 年, 美国帕森斯(Parsons)公司和麻省理工学院(MIT)研制成功了世界上第一台数控机床。

制造业是一个国家国民经济的支柱产业。工业化国家 70%~80% 的物质财富来自制造业, 约有 1/4 的人口从事各种形式的制造活动, 制造业对一个国家的经济地位和政治地位具有至关重要的影响。由于现代科学技术的迅猛发展, 机电产品日趋精密和复杂, 且更新换代速度加快, 改型频繁, 用户的需求也日趋多样化和个性化, 中小批量的零件生产越来越多。这对制造业的高精度、高效率和高柔性提出了更高的要求, 希望市场能提供满足不同加工需求、迅速高效、低成本地构筑面向用户的生产制造系统, 并大幅度地降低维护和使用的成本。同时还要求新一代制造系统具有方便的网络功能, 以适应未来车间面向任务和订单的生产组织及管理模式。

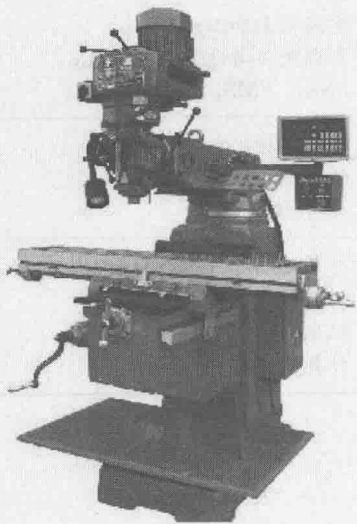


图 1.01 数控机床

基于上述原因, 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。数控机床(图 1.01)的发展至今已经历了两个阶段和六代产品。

1952—1970 年的 NC 数控机床, 1952 年的第一代电子管数控机床, 1959 年的第二代晶体管数控机床, 1965 年的第三代集成电路数控机床。1970 年至今的 CNC 数控机床, 1970 年, 通用小型计算机已出现并投入成批生产, 人们将它移植过来作为数控系统的核心部件, 从此数控系统进入计算机数控阶段, 1970 年的第四代小型计算机数控机床, 1974 年的第五代微型计算机数控机床, 1990 年的第六代基于 PC 的数控机床。

随着微电子技术和计算机技术的不断发展, 数控技术也随之不断更新, 发展非常迅速, 几乎每 5 年更新换代一次。数控系统方面, 目前世界上几个著名的数控装置生产厂家, 如日本的 FANUC、德国的 SIEMENS 和美国的 AB 公司产品都在向系列化、模块化、高性能和成套性方向发展。它们的数控系统都采用了 16 位、32 位甚至 64 位微处理器、标准总线及软件模块和硬件模块结构, 内存容量扩大到了数十兆字节以上, 机床分辨率可达 $0.1\mu\text{m}$, 高速进给可达 $100\text{m}/\text{min}$ 以上, 一般控制轴数在 3~15 轴, 最多可达 24 轴, 并采用先进的电装工艺。驱动系统方面, 交流驱动系统发展迅速。交流传动系统已由模拟式向数字式方向发展, 以运算放大器等模拟器件为主的控制器正在被以微处理器为主的数字集成元件所取代, 从而克服了零点漂移、温度漂移等弱点。

1.1 概 述

1.1.1 数控机床的产生

数控机床是在机械制造技术和控制技术基础上发展起来的。第一台电子计算机叫作 ENIAC (电子数字积分计算机的简称, 英文全称为 Electronic Numerical Integrator and Computer), 于 1946 年 2 月 15 日在美国宣告诞生。计算机的研制成功为产品制造由刚性自动化朝着柔性自动化方向发展奠定了基础。自 20 世纪 40 年代以来, 航空航天技术的发展对各种飞行器的加工提出了更高的要求, 这类零件形状复杂, 材料多为难加工合金。为了提高强度、减轻质量, 通常将整体材料铣成蜂窝式结构, 这用传统的机床和工艺方法加工不能保证精度, 也很难提高生产率。1948 年, 美国帕森斯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。后来, 受美国空军的委托, 与麻省理工学院合作, 在 1952 年研制成功了世界上第一台三坐标数控铣床, 其控制装置由 2000 多个电子管组成, 伺服驱动采用一台控制用的小型伺服电动机改变液压马达斜盘角度, 以控制液动机速度, 插补装置采用脉冲乘法器。这台数控机床的诞生, 标志着机械制造数字控制时代的开始。

数控系统的发展历程见表 1-1, 由最初的电子管式起步, 经历了分离式晶体管式、小规模集成电路式、大规模集成电路式、小型计算机式、超大规模集成电路、微机式的数控系统等几个发展阶段。

表 1-1 数控系统的发展历程

数控装置	发展阶段	国际	国内
硬件数控	第一代电子管数控系统	1952 年	1958 年
	第二代晶体管数控系统	1961 年	1964 年
	第三代集成电路数控系统	1965 年	1972 年
软件数控	第四代小型计算机数控系统	1968 年	1978 年
	第五代微处理器数控系统	1974 年	1981 年
	第六代基于工控 PC 的通用 CNC 数控系统	1990 年	1992 年

1952 年, 第一代数控机床的数控装置采用了电子管、继电器等元件构成模拟电路。1959 年, 出现了晶体管, 数控装置中广泛采用晶体管和印制电路板, 构成晶体管数字电路, 使体积缩小, 进入第二代。1965 年, 出现了小规模集成电路, 用它构成集成数字电路作为数控装置, 使体积更小, 功率更低, 系统可靠性进一步提高, 发展到第三代。以上三代数控系统主要是由硬件和连接电路组成, 所以称为接线逻辑数控系统或硬数控系统, 简称 NC 系统。它的特点是硬件电路和连接结点多, 电路复杂, 可靠性不高, 这是数控系统发展的第一阶段。

20 世纪 60 年代末, 小型计算机逐渐普及并被应用于数控系统, 数控系统中的许多功能可由软件实现, 简化了系统设计, 并增加了系统的灵活性和可靠性, CNC 技术从此问世, 数控系统发展到第四代。1974 年, 以微处理器为基础的 CNC 系统问世, 标志着数控系统进入第五代。1977 年, 麦道飞机公司推出了多处理器的分布式 CNC 系统。到 1981



年, CNC 达到全功能的技术特征, 其体系结构朝着柔性模块化方向发展。1986 年以后, 32 位 CPU 在 CNC 中得到应用, CNC 系统进入面向高速、高精度、柔性制造系统和自动化工厂的发展阶段。20 世纪 90 年代以来, 受通用微机技术高速发展的影响, 数控系统朝着以通用微机为基础、体系结构开放和智能化的方向发展。1994 年基于 PC 的 NC 控制器首先出现在美国市场, 此后得到迅速发展。由于可以充分利用通用微机丰富的硬件、软件资源和适用于通用微机的各种先进技术, 基于 PC 的开放式数控系统已经成为数控技术发展的潮流和趋势。后两代数控系统是数控系统发展的第二阶段, 其数控系统主要由计算机硬件和软件组成, 称为 CNC 系统。其最大特点是利用存储在存储器里的软件控制系统工作, 因此也被称为软数控系统, 这种系统容易扩大功能, 柔性好, 可靠性高。

数控技术的发展极大地推动了数控机床的发展。数控系统经过 60 多年的不断发展, 从控制单机到生产线以至整个车间和整个工厂。近年来, 微电子和计算机技术日益成熟, 其成果正在不断地渗透到机械制造的各个领域, 先后出现了计算机直接数控系统、柔性制造系统和计算机集成制造系统。这些高级的自动化生产系统均是以数控机床为基础, 它们代表着数控机床今后的发展趋势。目前, CNC 的故障率已达 0.01 次/(月×台), 即平均无故障时间为 100 个月, 数控性能大大提高。

1.1.2 数控技术的特点

数控机床综合了微电子技术、计算机应用技术、自动控制技术及精密机床设计与制造技术, 具有专用机床的高效率、精密机床的高精度和通用机床的高柔性等显著特点, 适合多变、复杂、精密零件的高效、自动化加工。具体可以概括为以下几个方面。

(1) 柔性自动化, 具有广泛的适应性。由于采用数控程序控制, 加工中多采用通用型工装, 只要改变数控程序, 便可以实现对新零件的自动化加工, 能适应当前市场竞争中对产品不断更新换代的要求, 解决了多品种中、小批量生产自动化问题。

(2) 加工精度高, 质量稳定。数控机床集中采用了提高加工精度和保证质量稳定性的多种技术措施。

① 数控机床由数控程序自动控制进行加工, 在工作过程中, 一般不需要人工干预, 这就消除了操作者人为产生的失误或误差。

② 数控机床的机械结构是按照精密机床的要求进行设计和制造的, 采用了滚珠丝杠、滚动导轨等高精度传动部件, 而且刚度大、热稳定性和抗振性能好。

③ 伺服传动系统的脉冲当量可以达到 $10 \sim 0.5 \mu\text{m}$, 同时, 工作中还大多采用具有检测反馈的闭环或半闭环控制, 具有误差修正或补偿功能, 可以进一步提高刚度和稳定性。

④ 数控加工中心具有刀库和自动换刀装置, 可以在一次装夹中, 完成工件的多面和多工序加工, 最大限度地减少了装夹误差的影响。

(3) 生产效率高。数控机床能最大限度地减少零件加工所需的机动时间与辅助时间, 显著提高生产效率。

① 数控机床的进给运动和多数主运动都采用无级调速, 而且调速范围大, 因此, 每一道工序都能选择最佳的切削速度和进给速度。

② 良好的结构刚度和抗振性允许机床采用大切削用量和进行强力切削。

③ 一般不需要停机对工件进行检测,从而有效地减少了机床加工中的停机时间。

④ 机床移动部件在定位中都采用自动加减速措施,因此可以选用很高的空行程运动速度,大大节约了辅助运动时间。

⑤ 加工中心可以采用自动换刀和自动交换工作台等措施,工件一次装夹,可以进行多面和多工序加工,大大减少了工件装夹、对刀等辅助时间。

⑥ 加工工序集中,可以减少零件的周转,减少了设备台数及厂房面积,给生产调度管理带来极大方便。

(4) 能实现复杂零件的加工。由于数控机床采用计算机插补和多坐标联动控制技术,所以可以实现任意的轨迹运动和加工出任何复杂形状的空间曲面,可以方便地完成如螺旋桨、汽轮机叶片、汽车外形冲压用模具等具有各种复杂曲面类零件的加工。

(5) 减轻劳动强度,改善劳动条件。由于数控机床的操作者主要利用操作面板对机床的自动加工进行操作,因此,大大减轻了操作者的劳动强度,改善了生产条件,并且可以一个人轻松地管理多台机床。

(6) 有利于现代化生产与管理。采用数控机床进行加工,能够方便、精确计算出零件的加工工时或进行自动加工统计,能够精确计算生产和加工费用,有利于生产过程的科学管理。数控机床是计算机辅助设计与制造、群控或分布式控制、柔性制造系统、计算机集成制造系统等先进制造系统的基础。但是,与普通机床相比,数控机床的初始投资及维护费用较高,对操作人员与管理人员的素质要求较高。所以只有从生产实际出发,合理地选择与使用数控机床,并且要循序渐进,培养人才,积累经验,才能达到降低生产成本、提高企业经济效益和市场竞争能力的目的。

1.1.3 数控技术的发展趋势

1. 高精度化

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,以适应现代科学技术的发展,是现代数控机床的发展方向之一。其精度已经从微米级发展到亚微米级乃至纳米级。提高数控机床的加工精度,一般可以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。在减少 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,除采用齿轮间隙补偿、丝杠螺距误差补偿和刀具补偿等技术外,还可以对设备热变形进行误差补偿。近十多年来,普通级数控机床的加工精度已经由 $\pm 10\mu\text{m}$ 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

提高生产率是机床技术追求的基本目标之一。数控机床高速化可以充分发挥现代刀具材料的性能,不但可以大幅度提高加工效率、降低加工成本,而且可以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做出反应,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 年代初期,以电主轴(实现主轴高转速)和直线电动机(实现直线移动高速度)的应用为特征,使得主轴转速大大提高,进给速度可达 $60\sim 120\text{m/min}$ 。车削和铣削的切削速度已经达到 $5000\sim 8000\text{m/min}$ 甚至更高;主轴转速达到 $30000\sim 100000\text{r/min}$;工作台的移动速度,当分辨率为 $1\mu\text{m}$ 时,可以达到 100m/min 以上,当分辨率为 $0.1\mu\text{m}$ 时,可以达到 24m/min ;自动换刀时间在 1s 以内;小线段插补进给速度可达到 12m/min 。例如,日本生产的某型超高速数控立式铣床主轴最高转速高达 100000r/min ,中等规格加工中心的快速进给速度从过去的 $8\sim 12\text{m/min}$ 提高到 60m/min 。加工中心换刀时间从 $5\sim 10\text{s}$ 减少到小于 1s ,而工作台交换时间也由过去的 $12\sim 20\text{s}$ 减少到 2.5s 以内。

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能力的有效手段。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。如出现了可编程控制器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、柔性制造系统及介于传统自动线与柔性制造系统之间的柔性制造线。

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,自动地完成规定的任务。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经从“点”(数控单机、加工中心和数控复合加工机床)、“线”(FMC、FMS、柔性加工线、柔性自动线)向“面”(工段车间独立制造岛、自动化工厂)、“体”(CIMS、分布式网络集成制造系统)的方向发展。数控机床的自动化除了进一步提高其自动编程、上下料、加工等自动化程度外,还要在自动检索、监控、诊断等方面进一步发展。

5. 智能化

为适应制造业生产柔性化、自动化的发展需要,智能化正成为数控设备研究及发展的热点。它不仅贯穿在生产加工的全过程(如智能编程、智能数据库和智能监控),而且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。自适应控制可以根据切削条件的变化,自动调节工作参数,使加工过程中能够保持最佳工作状态,从而得到较高的加工精度和较小的表面粗糙度,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。例如,日本牧野公司在电火花数控系统 MAKINO-MCE20 中,用带自学习功能的神经网络专家系统代替操作人员进行加工监视。

(3) 故障自诊断、自修复技术。在整个工作状态中,系统要随时对 CNC 系统本身及与其相连的各种设备进行诊断、检查,一旦出现故障,立即采取停机等措施,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,使故障模块自动脱机,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。目前已开始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,使机器自己辨认图样,按照自然语音命令进行加工。

6. 复合化

复合化包含工序复合化和功能复合化。数控机床的发展已经模糊了粗、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,可以最大限度地提高设备利用率。为了进一步提高加工效率,现代数控机床采用多主轴、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,现代数控系统的控制轴数也在不断增加,其同时联动的轴数已达6轴。沈阳机床股份有限公司开发的五轴车铣中心(图1.1),刀库容量16把,可以控制X、Y、Z、B、C五个轴,具有车削中心和铣削中心的特点;上海重型机床厂开发的双主轴倒顺立式车削中心,第一主轴正置、第二主轴倒置,具有C轴功能,采用12工位动力刀架,具有自动上下料装置和全封闭等多道防护装置,可以一次上料完成零件的正反面加工,包括车削、镗孔、钻孔、攻螺纹等多道工序,适用于大批量轮毂、盘类零件的加工。



图1.1 沈阳机床 HTM63150iy 五轴车铣复合机床

7. 高可靠性

数控机床的可靠性一直是用户最关心的指标。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,同时采用机床本体的模块化、标准化、通用化和系列化,使得既提高生产批量,又便于组织生产和质量把关。还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与报警。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,以实现故障功能的自恢复;利用各种测试、监控技术,当发生超程、刀具磨损、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及进一步联网组成CIMS的要求,先进的CNC系统为用户提供强大的联网能力,除带有RS232串行接口、RS422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。为了适应自动化技术的进一步发展和工厂自动化规模越来越大的要求,满足不同厂家不同类型数控机床联网的需要,现代数控机床已经配备与工业局域网通信的功能及制造自动化协议(Manufacturing Automation Protocol, MAP)接口,为现代数控机床进入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。这不仅有利于数控系统生产厂对其产品的监控和维修,而且适用于大规模现代化生产的无人化车间实行网络管理,还适用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了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家利用 PC 机丰富的硬件、软件资源开发了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。新一代数控系统的硬件、软件和总线规范都是对外开放的,由于有充足的硬件、软件资源可供利用。这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。既可以通过升档或剪裁构成各种档次的数控系统,也可以通过扩展构成不同类型数控机床的数控系统,大大缩短了开发生产周期。这种数控系统可以随着 CPU 升级而升级,结构上不必变动,使数控系统有更好的通用性、柔性、适应性和扩展性,并朝着智能化、网络化方向发展。许多国家纷纷研究、开发这种系统,如美国科学制造中心与空军共同领导的“下一代工作站机床控制器体系结构”、欧共体的“自动化系统中开放式体系结构”、日本的 OSEC 计划等,开发、研究成果已经得到应用,如 Cincinnati Milacron 公司从 1995 年开始在其生产的加工中心、数控铣床、数控车床等产品中采用开放式体系结构的 A2100 系统。



阅读材料 1-1

并行工程

并行工程(Concurrent Engineering, CE)产生之前,产品功能设计、生产工艺设计、生产准备等步骤以串行生产方式进行。串行生产方式的缺陷在于后面的工序是在前一道工序结束后才参与到生产链中,它对前一道工序的反馈信息具有滞后性。一旦发现前面的工作中含有较大的失误,就需要对设计进行重新修改、对半成品进行重新加工,于是会延长产品的生产周期,增加产品的生产成本,造成不必要的浪费。产品的质量也不可避免地受到影响。1986 年,美国国防工程系统首次提出了“并行工程”的概念,初衷是为了改进国防武器和军用产品的生产,缩短生产周期,降低成本。由于该方法的有效性,各国的企业界和学术界都纷纷研究它,并行工程方法也从军用品生产领域扩展到民用品生产领域。并行工程有很多定义,至今得到公认的是 1986 年美国国防分析研究所在其 R-338 研究报告中提出的定义:并行工程是对产品及其相关过程(包括制造过程和支持过程)进行并行的一体化设计的一种系统化的工作模式。这种工作模式力图使开发者们从一开始就考虑到产品全生命周期(从概念形成到产品报废)中的所有因素,包括质量、成本、进度和用户需求。简单来讲,并行工程是集成地、并行地设计产品及其零部件和相关各种过程(包括制造过程和相关过程)的一种系统方法。换句话说,就是融合公司的一切资源,在设计新产品时,就前瞻性地考虑和设计产品的全生命周期有关的过程。在设计阶段就预见到产品的制造、装配、质量检测、可靠性、成本等各种因素。

1.2 数控技术的基本原理

1.2.1 数控机床的组成

数控系统一般由控制介质、输入装置、数控装置、伺服系统、执行部件和测量反馈装置组成，如图 1.2 所示。

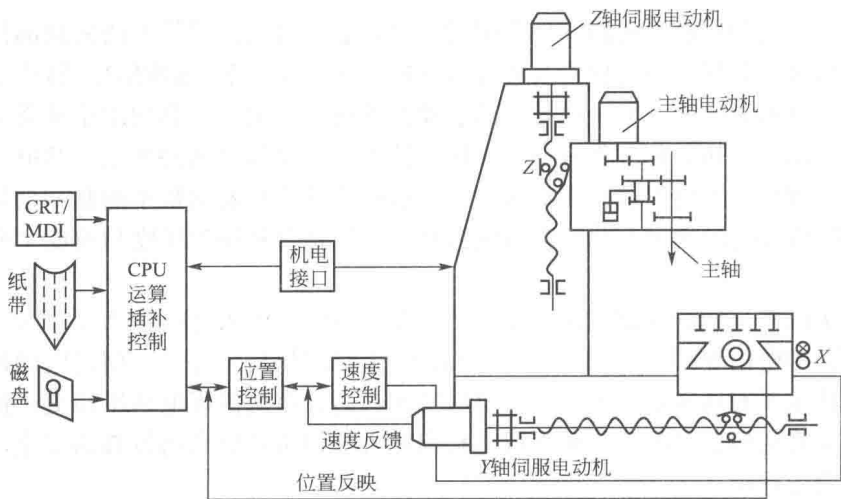


图 1.2 数控系统组成框图

1. 控制介质

数控设备工作时，不需要操作者直接进行手工加工，但设备必须按操作者的意图进行工作，这就必须在操作者与设备间建立某种联系，将这种联系的中间媒介物称为控制介质。控制介质也称为信息载体，它可以是穿孔带、穿孔卡、磁带、软磁盘等。控制介质上存储着加工零件所需要的全部操作信息，它是数控系统用来指挥和控制设备进行加工运动的唯一指令信息。

2. 输入装置

输入装置的作用是将控制介质上的程序代码变成相应的电脉冲信号，传送并存入数控装置中。根据不同的控制介质，输入装置可以是光电读带机、磁盘驱动器等。也可以将数控加工程序单上的内容通过数控装置上的键盘直接输入给数控装置，称为 MDI 方式。或者将数控加工程序由编程计算机用通信方式传送给数控装置。

3. 数控装置

数控装置是数控设备的核心，它接收输入装置送来的脉冲信号，经过数控装置的控制软件和逻辑电路进行编译、运算和逻辑处理，然后将各种信息指令输出给伺服系统，使设备各部分进行规范而有序的动作。这些指令主要是经插补运算决定的各坐标



轴的进给速度、进给方向和位移量；主运动部件的变速、换向和启停信号；选择和交换刀具的指令信号；切削液的开停信号；工件的松夹、分度工作台的转位等辅助指令信号。

介于数控装置与被控设备之间的强电控制装置的主要作用是接收数控装置输出的主运动变速、刀具选择交换、辅助装置动作等指令信号，经过必要的编译、逻辑判断和功率放大后，直接驱动相应的电器、液压、气动和机械部件等，完成指令所规定的各种动作。

4. 伺服系统

伺服系统包括伺服驱动电路和伺服驱动元件，它们与执行部件上的机械部件组成数控设备的进给系统。其作用是把数控装置发来的速度和位移指令(脉冲信号)转换成执行部件的进给速度、方向和位移。每个执行进给运动的部件，都配有一套伺服驱动系统，而相对于每一个脉冲信号，执行部件都有一个相应的位移量，又称为脉冲当量，其值越小，加工精度就越高。数控装置可以以很高的速度和精度进行计算并发出很小的脉冲信号，关键在于伺服系统能以多高的速度与精度去响应执行。所以整个系统的精度与速度主要取决于伺服系统。

在伺服系统中，伺服驱动电路要把数控装置发出的微弱电信号(5V左右，毫安级)放大成强电的驱动电信号(几十至上百伏，安培级)去驱动执行元件——伺服电动机。伺服系统的执行元件主要有功率步进电动机、电液脉冲马达、直流伺服电动机和交流伺服电动机等，其作用是将电控信号的变化转换成电动机输出轴的角速度和角位移的变化，从而带动执行部件作进给运动。

5. 执行部件

数控系统的执行部件是加工运动的实际执行部件，主要包括主运动部件、进给运动执行部件、工作台、拖板及其部件和床身立柱等支承部件，此外还有冷却、润滑和夹紧等辅助装置，存放刀具的刀架、刀库及交换刀具的自动换刀机构等。执行部件应有足够的刚度和抗振性，还要有足够的强度，传动系统结构要简单，便于实现自动控制。

6. 测量反馈装置

测量反馈装置是将运动部件的实际位移、速度及当时的环境(如温度、振动、摩擦和切削力等因素的变化)参数加以检测，转变为电信号后反馈给数控装置，通过比较，得出实际运动与指令运动的误差，并发出误差指令，纠正所产生的误差。测量反馈装置的引入，有效地改善了系统的动态特性，大大提高了零件的加工精度。

1.2.2 数控基本原理和工作过程

1. 数控基本原理

在传统的金属切削机床上，加工零件时，操作者根据图样的要求，通过不断改变刀具的运动轨迹和运动速度等参数，使刀具对工件进行切削加工，最终加工出合格零件。数控机床的加工，实质上是应用了“微分”原理，其工作原理如图1.3所示。

(1) 数控装置根据加工程序要求的刀具轨迹，将轨迹按机床对应的坐标轴，以最小移