



21世纪高职高专系列教材

数控技术

中国机械工业教育协会 组编



机械工业出版社
China Machine Press

21 世纪高职高专系列教材

数 控 技 术

主 编 洛阳工学院 彭晓南
副主编 金华职业技术学院 徐向纮
河北工业大学 刘丽冰
参 编 洛阳工学院 颀潭成 任小中
河北工业大学 刘瑞素 郑志敏
天津理工大学 王 洪
天津大学 邓广敏
金华职业技术学院 俞鸿斌
主 审 甘肃工业大学 胡赤兵



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据高等职业技术教学要求编写的。全书共6章,内容包括数控加工编程、数控系统、伺服系统、数控机床的机械结构、数控设备的选型、安装、调试及常见故障排除。每章均有一定数量的习题。取材注重了新颖及实用性、针对性,特别对经济型数控机床的改造设计主要内容做了较详细的阐述。

本书可作为高职、高专、职大、函大、业余大学及成人教育机电类专业的数控技术教材,也可作为广大自学者及工程技术人员自学数控技术用书。

图书在版编目(CIP)数据

数控技术/中国机械工业教育协会组织编写. —北京:机械工业出版社, 2001.6

21世纪高职高专系列教材

ISBN 7-111-08375-X

I. 数... II. 中... III. 数控机床-高等学校:技术学校-教材 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第046338号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:吴天培 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年9月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm¹/16·17.75印张·2插页·437千字

0 001—4 000册

定价:27.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

21 世纪高职高专系列教材编委会名单

编委会主任 中国机械工业教育协会 郝广发

编委会副主任 (单位按笔画排)

山东工程学院 仪垂杰

大连理工大学 唐志宏

天津大学 周志刚

甘肃工业大学 路文江

江苏理工大学 杨继昌

成都航空职业技术学院 陈玉华

机械工业出版社 陈瑞藻 (常务)

沈阳工业大学 李荣德

河北工业大学 檀润华

武汉船舶职业技术学院 郭江平

金华职业技术学院 余党军

编委会委员 (单位按笔画排)

广东白云职业技术学院 谢瀚华

山东省职业技术教育师资培训中心 邹培明

上海电机技术高等专科学校 徐余法

天津中德职业技术学院 李大卫

天津理工学院职业技术学院 沙洪均

日照职业技术学院 李连业

北方交通大学职业技术学院 佟立本

辽宁工学院职业技术学院 李居参

包头职业技术学院 郑刚

北京科技大学职业技术学院 马德青

北京建设职工大学 常莲

北京海淀走读大学 成运花

江苏理工大学 吴向阳

合肥联合大学 杨久志

同济大学 孙章

机械工业出版社 李超群 余茂祚 (常务)

沈阳建筑工程学院 王宝金

佳木斯大学职业技术学院 王跃国

河北工业大学 范顺成

哈尔滨理工大学工业技术学院 线恒录

洛阳大学 吴锐

洛阳工学院职业技术学院 李德顺

南昌大学 肖玉梅

厦门大学 朱立秒

湖北工学院高等职业技术学院 吴振彪

彭城职业大学 陈嘉莉

燕山大学 刘德有

序

1996年6月中共中央国务院召开第三次全国教育工作会议，作出了“关于深化教育改革、全面推进素质教育的决定”的重大决策，强调教育在综合国力的形成中处于基础地位，坚持实施科教兴国的战略。决定中明确提出要大力发展高等职业教育，培养一大批具有必备的理论知识和较强的实践能力、适应生产、建设、管理、服务第一线急需的高等技术应用型专门人才。为此，教育部召开了关于加强高职高专教学工作会议，进一步明确了高职高专是以培养技术应用型专门人才为根本任务；以适应社会需要为目标；以培养技术应用能力为主线设计学生的知识、能力、素质结构和培养方案；以“应用”为主旨和特征来构建课程体系和教育内容体系；高职市场的专业设置要体现地区、行业经济和社会发展的需要，即用人的需求；教材可以“一纲多本”，形成有特色的高职高专教材系列。

“教书育人，教材先行”，教育离不开教材。为了贯彻中共中央国务院以及教育部关于高职高专人才培养目标及教材建设的总体要求，中国机械工业教育协会、机械工业出版社组织全国部分高职高专教学经验的职业技术学院、普通高等学校编写了这套《21世纪高职高专系列教材》。教材首批80余本（书目附书后）已陆续出版发行。

本套教材是根据高中毕业3年制（总学时1600~1800）、兼顾2年制（总学时1100~1200）的高职高专教学计划需要编写的。在内容上突出了基础理论知识的应用和实践能力的培养。基础理论课以应用为目的，以必需、够用为度，以讲清概念、强化应用为重点；专业课加强了针对性和实用性，强化了实践教学。为了扩大使用面，在内容的取舍上也考虑到电大、职大、业大、函大等教育的教学、自学需要。

每类专业的教材在内容安排和体系上是有机联系、相互衔接的，但每本教材又有各自的独立性。因此各地区院校可根据自己的教学特点进行选择使用。

为了提高质量，真正编写出有显著特色的21世纪高职高专系列教材，组织编写队伍时，采取专门办高职的院校与办高职的普通高等院校相互协作编写并交叉审稿，以便实践教学和理论教学能相互渗透。

机械工业出版社是我国成立最早、规模最大的科技出版社之一，在教材编辑出版方面有雄厚的实力和丰富的经验，出版了一大批适用于全国研究生、大学本科、专科、中专、职工培训等各种层次的成套系列教材，在国内享有很高的声誉。我们相信这套教材也一定能成为具有我国特色的、适合21世纪高职高专教育特点的系列教材。

中国机械工业教育协会

前 言

本书是高等职业技术教育机电类专业教学用书。在编写时,我们从高职教育的实际出发,以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为重点,加强针对性和实用性作为编写本教材的指导思想。具体为:

1. 不过多地编写不必要的理论推导,以讲清概念、原理、结论为主。为了加强针对性和实用性,本书对经济型数控机床的改造设计的主要内容;加工中心编程;数控机床的选型、安装及故障排除等内容均做了较详尽的阐述。对日本FANUC7M系统也做了介绍。

2. 编写时力求适用面宽,力求全面阐述数控技术的基本内容,加大信息量,渗透数控技术的最新成果,同时,又注重以大专层次的难易程度取材,本书除可作为高职机电类专业教学用书外,也可作为成人高校、高专、职大、业大、函大等大专层次的教学用书和广大自学者及工程技术人员自学用书。

全书共6章,总课时为100学时,各院校可根据实际情况决定内容的取舍。

参加编写的单位及人员有:

第1章 洛阳工学院 彭晓南;第2章 天津理工大学 王洪、天津大学 邓广敏;第3章 河北工业大学 刘瑞素、刘丽冰、郑志敏;第4章 洛阳工学院 顾潭成、彭晓南;第5章 金华职业技术学院 徐向炫、俞鸿斌;第6章 洛阳工学院 任小中。

本书由洛阳工学院彭晓南任主编,他提出了全书的总体构思、编写大纲及编写的指导思想。徐向炫、刘丽冰为副主编。由彭晓南、顾潭成二人统稿。

本书由甘肃工业大学胡赤兵教授主审,他认真、仔细地审阅了全稿,并提出了许多宝贵的修改意见,对此表示衷心感谢。

在本书的编写过程中得到洛阳工学院成人教育学院及机电系的大力支持,在此也表示感谢。同时感谢第一拖拉机股份有限公司技术部董超峰同志在本书统稿中所做的大量工作。

限于作者的水平,加之时间仓促,书中难免有缺点和不当之处,敬请专家、同仁和广大读者批评指正。

编者

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪 论	1
1.1 数控系统的组成及工作 原理	1
1.1.1 数字控制技术	1
1.1.2 数控机床的组成及工作原理	1
1.2 数控机床的特点及分类	2
1.2.1 数控机床的特点	2
1.2.2 数控机床的分类	4
1.3 数字控制技术的发展	11
1.3.1 数字控制技术的产生和发展	11
1.3.2 我国数控机床发展情况	12
1.3.3 数控机床的发展水平和趋势	12
1.3.4 柔性制造系统及 CIMS 简介	14
1.4 经济型数控机床	18
复习思考题	19
第 2 章 数控加工编程	20
2.1 数控加工编程的基础知识	20
2.1.1 数控加工的特点	20
2.1.2 数控编程的内容和步骤	20
2.1.3 数控编程的方法	22
2.1.4 数控编程的标准规定和代码	22
2.1.5 常用基本指令	31
2.2 手工程序编制	36
2.2.1 数控编程的工艺处理	36
2.2.2 数控编程的数学处理	38
2.2.3 孔加工的程序编制	41
2.2.4 轮廓铣削加工的程序编制	45
2.2.5 车削加工的程序编制	48
2.2.6 加工中心编程	57
2.3 自动编程系统	66
2.3.1 自动编程的发展历程	66
2.3.2 自动编程的特点	67
2.3.3 自动编程系统的信息处理过 程	68
2.3.4 APT 语言简介	69
复习思考题	71
第 3 章 数控系统	72
3.1 CNC 系统的总体结构及各部分 功能	72
3.1.1 CNC 系统的总体结构	72
3.1.2 数控系统各部分的功能	72
3.2 数控系统的硬件	74
3.2.1 CNC 系统中计算机的组成	74
3.2.2 CNC 系统中计算机的实现	76
3.2.3 数控系统开环的位置控制 实例	82
3.3 数控系统的软件功能及其 实现	86
3.3.1 数控系统的软件功能	86
3.3.2 数控系统软件功能的实现	87
3.3.3 数控系统控制软件的结构	90
3.4 数控装置的插补原理	92
3.4.1 插补的基本概念	92
3.4.2 插补方法的分类	92
3.5 数控装置刀具半径补偿	104
3.5.1 刀具半径补偿的基本概念	104
3.5.2 刀具半径补偿计算	105
3.5.3 C 功能刀具半径补偿	106
3.5.4 程序段间转换情况	108
3.5.5 接转交点矢量的计算	112
3.5.6 C 功能刀具半径补偿的实例	113
3.6 数控机床的辅助功能与可编 程序控制器	113
3.6.1 数控机床的辅助功能及其 控制	113
3.6.2 可编程序控制器	114
复习思考题	116

第4章 数控伺服系统 117

4.1 概述 117

4.1.1 伺服系统的基本要求 117

4.1.2 数控机床伺服驱动系统的分类 118

4.1.3 伺服电动机的种类、特点和选用原则 121

4.2 开环进给伺服系统 122

4.2.1 步进电动机 122

4.2.2 步进电动机驱动电源 126

4.2.3 步进电动机的选用 130

4.2.4 步进电动机的微机控制 133

4.3 检测元件 134

4.3.1 概述 134

4.3.2 脉冲编码器 136

4.3.3 光栅位置检测装置 138

4.3.4 旋转变压器位置检测装置 143

4.3.5 感应同步器位置检测装置 145

4.4 闭环进给伺服系统 152

4.4.1 闭环进给伺服系统的组成及工作原理 152

4.4.2 直流伺服电动机及速度控制单元 153

4.4.3 交流伺服电动机及速度控制单元 163

4.4.4 主轴驱动简介 168

4.5 位置控制 169

4.5.1 数字脉冲比较伺服系统 169

4.5.2 相位比较伺服系统 171

4.5.3 幅值比较伺服系统 175

4.6 伺服系统的性能分析 178

4.6.1 进给伺服系统的数学模型 179

4.6.2 进给伺服系统的动、静态性能分析 180

4.7 直线电动机进给系统 181

复习思考题 183

第5章 数控机床机械结构 185

5.1 数控机床的结构特点及要求 185

5.2 数控机床的进给运动及传动

机构 187

5.2.1 数控机床对进给系统机械部分的要求 187

5.2.2 进给传动系统的典型结构 188

5.2.3 机床导轨 194

5.2.4 滚动导轨 195

5.2.5 滚珠丝杠螺母副及选型 197

5.2.6 齿轮传动装置及齿轮间隙的消除 208

5.2.7 普通机床的数控化改造 210

5.3 数控机床的主传动及主轴

部件 219

5.3.1 数控机床主传动装置 219

5.3.2 主轴部件结构 220

5.3.3 数控机床主传动系统及主轴部件结构实例 221

5.4 自动换刀机构 224

5.4.1 自动换刀装置的类型 224

5.4.2 刀库 229

5.4.3 刀具交换装置 230

5.5 等效转动惯量和等效力矩的

计算 231

5.5.1 齿轮传动比的计算 231

5.5.2 负载惯量的计算 232

5.5.3 电动机力矩的计算 234

5.5.4 步进电动机计算及选型实例 236

复习思考题 238

第6章 数控机床的选型、安装及故障排除 239

6.1 数控机床的选用 239

6.1.1 概述 239

6.1.2 数控机床的选用 239

6.2 数控机床的安装、调试和

验收 243

6.2.1 数控机床的安装、调试 243

6.2.2 数控机床验收 246

6.3 数控机床维修基础 251

6.3.1 数控机床维修概述 251

6.3.2 数控机床的维护保养 253

6.3.3 数控系统的使用与维护 256

6.3.4 数控机床的现场维修工作	258	6.4.3 数控机床机械故障分析与排除	267
6.4 数控机床常见的故障与排除	260	6.4.4 数控系统故障分析与维修实例	270
6.4.1 概述	260	复习思考题.....	272
6.4.2 数控机床故障诊断及排除方法	260	参考文献	273

第1章 绪 论

1.1 数控系统的组成及工作原理

1.1.1 数字控制技术

数字控制 (Numerical Control), 简称 NC, 是近代发展起来的用数字化信息进行控制的自动控制技术。数字控制系统有如下特点:

- 1) 可用不同的字长表示不同的精度的信息, 表达信息准确。
- 2) 可进行逻辑、算术运算, 也可以进行复杂的信息处理。
- 3) 可不用改动电路或机械机构, 通过改变软件来改变信息处理的方式过程, 具有柔性化。

由于数字控制系统具有上述特点, 故被广泛应用于机械运动的轨迹控制。例如数控机床、工业机器人、数控线切割机、数控火花切割机、坐标测量机、绘图仪、编织机和剪裁机等。

数控系统的硬件基础是数字逻辑电路。最初的数控系统是由数字逻辑电路构成的, 因而被称之为硬件数控系统。硬件数控系统经历了采用电子管、晶体管、集成电路的过程。随着计算机, 特别是微型计算机的发展, 数控系统中引入了微型计算机。采用了计算机或微型计算机的数控系统称之为计算机数控系统 (Computer Numerical Control), 简称 CNC。CNC 柔性好, 功能强、可靠性高、经济性好及易于实现机电一体化, 使数控在质的方面完成了一次飞跃。故硬件数控系统已逐渐被淘汰, 计算机数控系统取而代之。当前微机技术发展很快, 性能提高, 价格降低, 所以微机在数字控制系统中得到广泛应用。

1.1.2 数控机床的组成及工作原理

1. 数控机床的组成 采用数控技术控制的机床, 或者说装备了数控系统的机床, 称之为数控机床。现代数控机床都采用计算机 (微型计算机) 作为控制系统, 其组成如图 1-1 所示。

(1) 程序载体 数控机床是按照输入的工件加工程序运行的。工件加工程序中, 包括机床上刀具和工件的相对运动轨迹、工艺参数 (进给量、主轴转速等) 和辅助运动等加工所需的全部信息。程序载体就是存储工件加工程序的媒介物。数控机床中, 常用的程序载体有穿孔纸带、穿孔卡片、磁带和磁盘等。

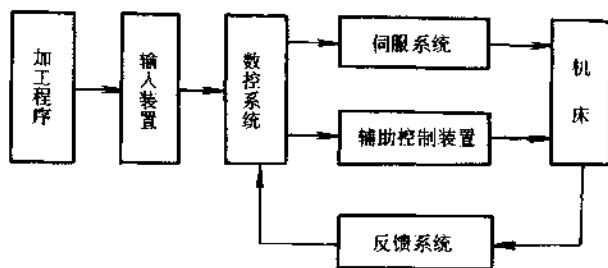


图 1-1 数控机床组成框图

(2) 输入装置 输入装置的作用是将程序载体内有关加工的信息读入 CNC 单元。根据程序载体的不同, 相应有不同的输入装置。例如, 对于穿孔纸带, 配用光电阅读机; 对于盒式磁带, 配用录放机; 对于软磁盘, 配用软盘驱动器和驱动卡等。有时为了用户方便, 数控机床可以同时具备几种输入装置。

现代数控机床, 还可以通过手动方式 (MDI 方式), 将工件加工程序, 用数控系统的操作面板上的按键, 直接键入 CNC 单元; 或者用与上级机通信方式直接将加工程序输入 CNC 单元。

(3) CNC 单元 CNC 单元是数控机床的核心。它包括微型计算机 (CPU、存储器、各种 I/O 接口)、通用输入输出 (I/O) 外围设备 (如 CRT/LED 显示器、键盘、操作控制面板等) 以及相应的软件。它具备的主要功能有: 多坐标控制和多种函数的插补 (如直线、圆弧等); 多种程序输入功能以及编辑和修改功能; 信息转换功能; 补偿功能; 多种加工方法选择; 显示功能, 用数码显示器 LED 可显示刀具在各坐标轴上的位置, 用 CRT (阴极射线管) 显示器可显示字符、轨迹、平面图形和动态三维图形; 自诊断功能; 通讯和联网功能。

(4) 伺服系统 伺服系统是数控系统的执行部分。它接受来自 CNC 单元的指令信息, 经功率放大后, 严格按照指令信息的要求驱动机床的运动部件, 完成指令规定的运动。伺服系统由伺服电动机以及驱动控制单元组成。它与数控机床的进给机械部件构成进给伺服系统, 一般来说数控机床的伺服系统, 要求有好的快速响应性能和灵敏而准确地跟踪指令功能。

(5) 位置测量反馈系统 位置测量反馈分为数控机床执行部件的转角位移反馈和直线位移反馈两种。运动部分通过传感器将上述角位移或直线位移转换成电信号, 输送给 CNC 单元, 与指令位置进行比较, 并由 CNC 单元发出指令, 纠正所产生的误差。

(6) 辅助控制装置 辅助控制装置的主要作用是接收 CNC 单元输出的主运动换向、变速、启停、刀具的选择和交换, 以及其它辅助装置动作等指令信号, 经过必要的编译、逻辑判别、运算和功率放大后直接驱动相应的电器, 带动机床机械部件、液压气动等辅助装置完成指令规定的动作。而机床上的限位开关等开关信号经辅助控制装置处理后送 CNC 单元进行处理。

由于可编程控制器 (PLC) 具有响应快、性能可靠、易于使用、编程和修改, 并可直接驱动机床电器, 现已广泛作为数控机床的辅助控制装置。

(7) 机床的机械部件 数控机床的机械结构, 除了主运动系统、进给系统以及辅助部分, 如液压、气动、冷却和润滑部分等一般部件外, 尚有些特殊部件, 如储备刀具的刀库、自动换刀装置 (ATC)、自动托盘交换装置等。与普通机床相比, 数控机床的传动系统更为简单, 但机床的静态和动态刚度要求更高, 传动装置的间隙要求尽可能小, 滑动面的摩擦因数要小, 并要有恰当的阻尼, 以适应对数控机床高定位精度和良好的控制性能的要求。

2. 数控机床的工作原理 数控机床与普通机床相比, 工作原理不同处在于数控机床是按数字形式给出的指令进行加工的。

数控机床加工工件, 首先要将被加工工件图上的几何信息和工艺信息数字化, 用规定的代码程序格式编写加工程序, 并存储到程序载体内, 然后用相应的输入装置将所编的程序指令输入到 CNC 单元。CNC 单元将程序 (代码) 进行译码、运算之后, 向机床各个坐标的伺服系统和辅助控制装置发出信号, 以驱动机床的各运动部件, 并控制所需要的辅助动作, 最后加工出合格的工件。

1.2 数控机床的特点及分类

1.2.1 数控机床的特点

1. 数控机床的加工特点

(1) 加工精度高 目前, 数控机床控制的刀具或工作台最小移动量 (脉冲当量) 普遍达到了 0.001mm , 而且进给传动链的反向间隙与丝杆螺距误差等均可由数控系统进行补偿, 因此, 数控机床能达到很高的加工精度。对于中、小型数控机床, 定位精度普遍可达 0.03mm , 重复定位精度为 0.01mm 。此外, 数控机床的传动系统与机床结构都具有很高的刚度和热稳定

性，制造精度高，数控机床的自动加工方式避免了人为的干扰因素，同一批工件的尺寸一致性好，产品合格率高，加工质量十分稳定。

(2) 生产效率高 工件加工所需的时间主要包括(机动)切削时间和辅助时间两部分。由于数控机床结构刚性好，允许进行大切削用量的强力切削；数控机床主轴转速和进给量的变化范围比普通机床大，因此每一道工序都可选用最佳的切削用量，这就提高了数控机床的切削效率，节省了机动时间。数控机床的移动部件空行程运动速度快(一般在15m/min以上，有些甚至达到240m/min)，工件装夹时间短，对刀、换刀快，更换被加工工件时几乎不需要重新调整机床，节省了工件安装调整时间。数控机床加工质量稳定，一般只作首件检验和工序间关键尺寸的抽样检验，因此节省了停机检验时间。数控机床加工工件一般不需制作专用工装夹具，节省了工艺装备的设计、制造等准备工作的时间。由上述而知，数控机床的辅助时间比一般机床少，生产率高。在数控加工中心上加工时，一台机床实现了多道工序的连续加工，生产效率的提高更为明显。与普通机床相比，数控机床的生产率可提高2~3倍，有些可提高几十倍。

(3) 对加工对象的适应性强 在同一台机床上可适应不同品种及尺寸规格工件的自动加工，改变加工工件时，只需更换加工程序，就可改变加工工件的品种，这就为复杂结构的单件、小批量生产以及试制新产品提供了极大的便利。特别是对那些普通机床很难加工或无法加工的精密复杂表面(例如螺旋表面)，数控机床也能实现自动加工。

(4) 良好的经济效益 数控机床虽然设备昂贵，加工时分摊到每个工件上的设备折旧费较高，但在单件、小批量生产情况下，使用数控机床加工，可节省划线工时，减少调整、加工和检验时间，节省直接生产费用；同时还节省了工艺装备费用；数控机床加工精度稳定、减少了废品率，使生产成本进一步下降。此外，数控机床可实现一机多用，节省厂房面积、节省建厂投资。因此，使用数控机床仍可获得良好的经济效益。

(5) 自动化程度高 可大大减轻工人的劳动强度，减少操作人员的人数。同时有利于现代化管理，可向更高级的制造系统发展。

2. 数控机床的使用特点

(1) 数控机床对操作、维修人员的要求较高 数控机床采用计算机控制，伺服系统的技术复杂、机床精度要求很高，其操作和维修均较复杂，故要求操作、维修及管理人员具有较高的文化水平和技术素质。

数控机床按程序进行加工。加工程序的编制直接关系到数控机床的功能的开发和使用，既有一定的技术理论，又有一定的技巧；加工程序的编制还直接影响数控机床的加工精度。因此，数控机床的操作人员除了应具有一定的工艺知识外，还应对数控机床的结构特点、工作原理以及程序编制进行专门的技术理论培训和操作训练，经考核合格者才能上机操作，以防止操作使用时人为的事故发生，同时也才能正确编写或快速理解程序，并对数控加工各种情况做出正确的综合判断和处理。

正确的维护和有效的维修是提高数控机床效率的基本保证。数控机床的维修人员应有较高的理论知识和维修技术，其中机修人员要懂得一些数控机床的电气维护知识，电修人员要了解数控机床的结构和程序编制。维修人员应有比较宽的机、电、液专业知识，才能综合分析，判断故障根源，实现高效维修，以便尽可能地缩短故障停机时间。因此，数控机床维修人员和操作人员一样，必须进行专门的培训。

数控机床的使用,不但要对从事数控加工和维修人员进行培训,而且与数控机床有关的工作人员都应进行数控加工技术知识的普及,以利于数控机床高效能的发挥。

(2) 数控机床对夹具和刀具的要求 单件生产时,一般采用通用夹具;如果批量生产,为节省加工工时,应使用专用夹具,并要求夹具定位可靠,能自动夹紧或松开工件,还应具有良好的排屑、冷却结构。

数控机床的刀具应该具有以下特点:1) 较高的精度、寿命和几何尺寸稳定、变化小;2) 通常是可转位式刀具,能实现机外预调、快速换刀;3) 能很好地控制切屑的折断、卷曲和排出;4) 具有良好的可冷却性能。

3. 数控机床的应用范围 数控机床存在一般机床所不具备的许多优点,数控机床的应用范围正在不断扩大,但目前它并不能完全代替普通机床,也还不能以最经济的方式解决机械加工中的所有问题。数控机床最适合加工具有以下特点的工件:1) 多品种小批量生产的工件;2) 形状结构比较复杂的工件;3) 需要频繁改型的工件;4) 价值昂贵,不允许报废的关键工件;5) 需要最少周期的急需工件;6) 批量较大精度要求高的工件。

由于数控机床的自动化加工可减少操作工人,生产效率高,因此,大批量生产的工件采用数控机床加工,在经济上也是可行的。

广泛推广数控机床的最大障碍是设备的初始投资大。由于系统本身的复杂性,又增加了维修的技术难度和维修费用。

考虑到上述种种原因,在决定选用数控机床加工时,需要进行科学的技术经济分析,使数控机床能发挥它的最好经济效益。

1.2.2 数控机床的分类

数控机床的种类很多,为了便于了解和研究,可以从不同的角度对其进行分类。

1. 按工艺用途划分 可分为以下类型:

(1) 金属切削类数控机床 和传统的通用机床品种相适应的数控机床有数控车床、铣床、镗床、钻床、磨床、齿轮加工机床等。装有刀库和自动换刀机械手,在一次装夹后,可以进行多种工序加工的数控机床,称为数控加工中心。数控加工中心目前主要有两类:一类是在镗、铣床基础上发展起来的,称为铣削加工中心;另一类是在车床基础上发展起来的,称为车削加工中心,图 1-2a 所示为数控车床,图 1-2b 所示为五坐标铣削加工中心示意图。

(2) 金属成型类数控机床 如数控折弯机、数控弯管机、数控转头压力机等。

(3) 特种加工及其它类型数控机床 如数控线切割机床(见图 1-3)、数控电火花加工机床(见图 1-4)、数控激光切割机床、数控火焰切割机、数控三坐标测量机见图 1-5 等。

2. 按控制系统的特点划分 可分为点位控制、点位直线控制和轮廓(连续轨迹)切削控制数控机床。

3. 按伺服系统的类型划分 可分为开环、闭环和半闭环系统。

4. 按数控机床的功能水平划分 可分为高、中、低(经济型)三类。

1.2.2.1 点位、点位直线与轮廓切削控制

(1) 点位控制数控机床 这类数控机床的数控装置只要求精确地控制刀具相对于工件从一个坐标点到另一个坐标点的定位精度,而与轨迹运动无关。如图 1-6 所示。在加工控制中,要求刀具中心从 P 点移动到 Q 点,但对刀具的轨迹却没有限制。可以先使刀具沿 X 坐标从 P 点移动到 R 点,然后再使刀具沿 Y 坐标轴从 R 点移动到 Q 点。也可以两个坐标同时以相同的

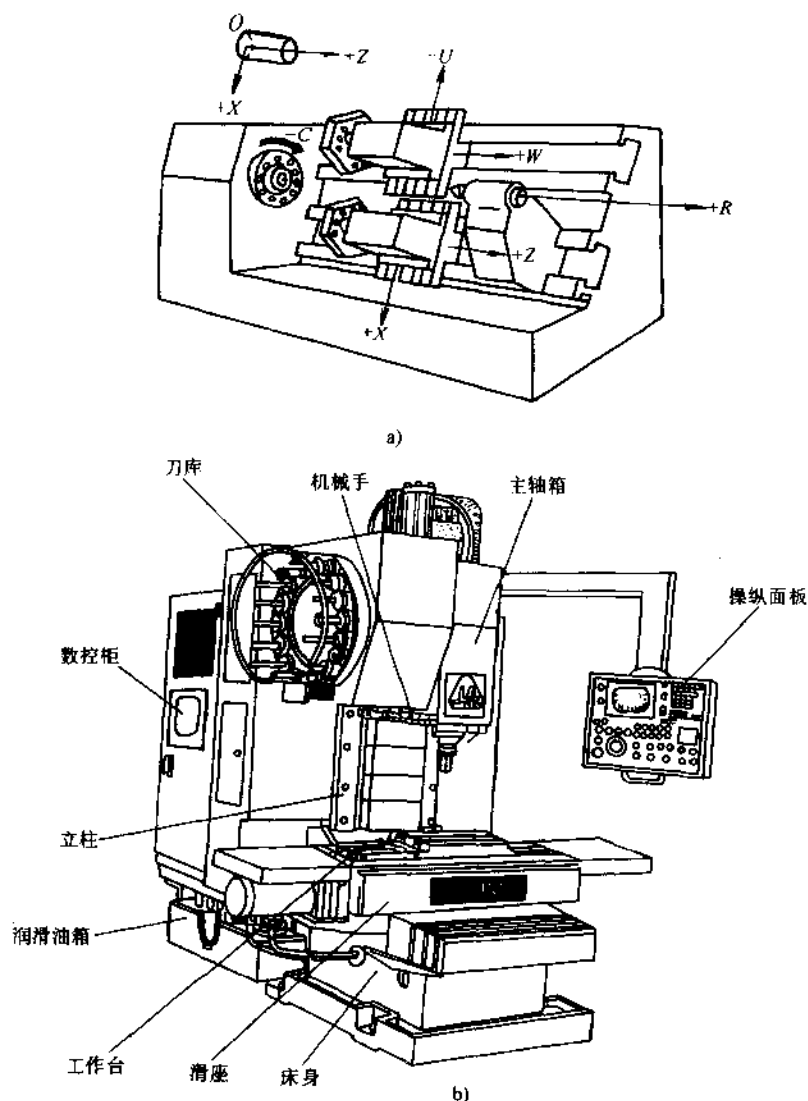


图 1-2 数控机床

a) 数控车床 b) 五坐标铣削加工中心

速度（或一定比例的速度），使刀具移动到 K 点。这时 Y 坐标值（或 X 坐标值）达到规定的位移量，然后刀具沿 X 坐标（或 Y 坐标）方向由 K 点移动到 Q 点。点位控制的特点是严格控制用最小位移量（即脉冲当量）表示的两点间的距离。为了精确定位和提高生产率，首先让刀具（或工作台）高速运行，然后进行 1~3 级减速，使之慢速趋近定位点，减小定位误差。这类数控机床主要有数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床和数控测量机等。

（2）点位直线控制数控机床 这类数控机床不仅要求具有准确的定位功能，而且要求从一点到另一点按直线运动进行切削加工。其路线一般是由和各轴线平行的直线段组成。运动时的速度是可以控制的，对于不同的刀具和工件，可以选择不同的切削用量。这一类数控机床包括：数控车床、数控镗床、加工中心等。一般情况下，这些机床有两个到三个可控轴。但同时控制轴只有一个。

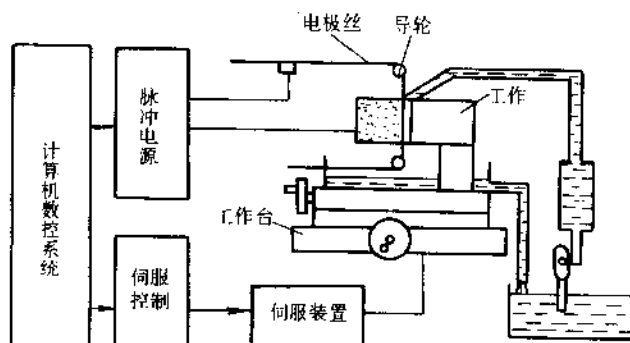


图 1-3 数控线切割机床

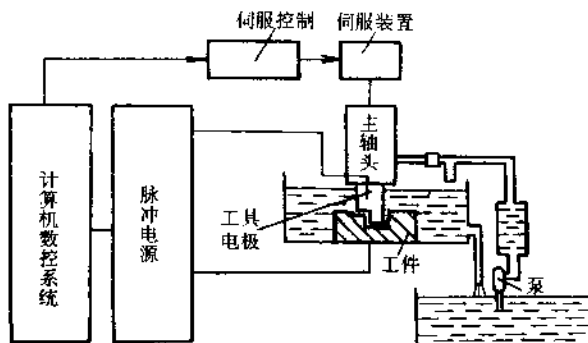


图 1-4 数控电火花加工机床

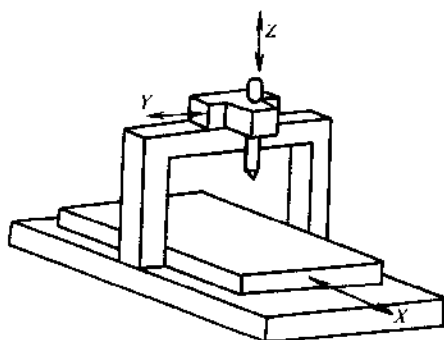


图 1-5 数控三坐标测量机床

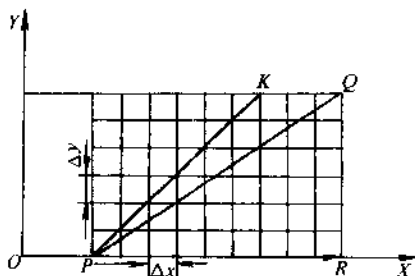


图 1-6 点位控制示意图

(3) 轮廓切削控制数控机床 这类数控机床能够对两个或两个以上坐标轴同时进行切削加工控制，它不仅能控制机床移动部件的起点与终点坐标，而且能按需要严格控制刀具移动轨迹，以加工任意斜率的直线、圆弧、抛物线及其它函数关系的曲线或曲面。数控系统控制几个坐标按需要的函数关系同时协调运动，称之为坐标联动。按照联动轴数分，可以分为2轴联动、2.5轴联动、3轴联动、4轴联动、5轴联动等数控机床。2.5轴联动是三个主要坐标控制轴（X、Y、Z）中，任意两个轴联动，而另一轴是点位或点位直线控制。图 1-7 为两坐标轮廓控制数控铣床的工作原理图。

轮廓控制要求控制整个加工过程中每一点的速度和位移，这是由轮廓控制中的插补功能来实现的。插补的任务就是对轮廓线的起点到终点之间再密集的计算出有限个坐标点，刀具沿着这些坐标点移动，来逼近轮廓。由于数控系统不能将坐标轴无限细分，只能按最小设定

单位（或脉冲当量）移动，故加工后工件的圆弧或直线实际上是由许多折线构成的。用折线代替规定的曲线或直线，会带来一定误差，此误差应在容许范围内，否则只能选取更小的设定单位的数控机床。图 1-8a 所示为直线插补，图 1-8b 所示为圆弧插补。

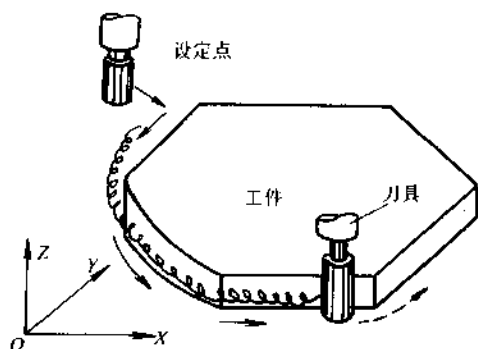


图 1-7 两坐标轮廓控制工作原理图

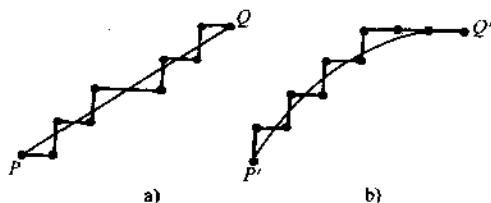


图 1-8 直线与圆弧插补
a) 直线插补 b) 圆弧插补

轮廓控制必须同时精确地控制两个以上的坐标轴运动，而最小设定单位又小，有时仅为 $0.1\mu\text{m}$ ，因此轮廓控制系统处理数据的速度比点位控制系统要高出上千倍，由于计算机技术的发展，这样的处理速度，CNC 系统是能够达到的，现有的 CNC 系统的机床都具备轮廓控制系统的功能。

1.2.2.2 开环、闭环和半闭环数控系统

(1) 开环控制数控机床 这类数控机床不带位置检测反馈装置，CNC 单元发出的指令信号流是单向的。这种系统一般用功率步进电动机做伺服驱动元件，当插补结果需要某个轴运动一个单位长度（即一个脉冲当量）时，向该轴伺服电路输出一个脉冲，经环形分配和功率放大后驱动步进电动机转动一步，通过丝杆转动使机床运动部件运动一个单位长度。开环数控系统结构如图 1-9 所示。

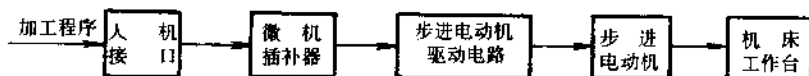


图 1-9 开环数控系统结构

开环数控系统具有工作稳定、调试方便、维修简单等优点。在精度和速度要求不高、驱动力矩不大的场合得到广泛应用。在我国，经济型数控机床一般都采用开环数控系统。

(2) 闭环控制数控机床 这类数控机床的特点是装有位置测量反馈装置。加工中，直接安装在机床移动部件上的位移测量装置，随时、不断地测量机床移动部件的实际位移，并将测量到的实际位移值反馈到 CNC 单元中。插补得出的指令位移与反馈的实际位移相比较，根据其差值控制电动机的转速，进行误差修正，直到位移误差消除为止，如图 1-10 所示。

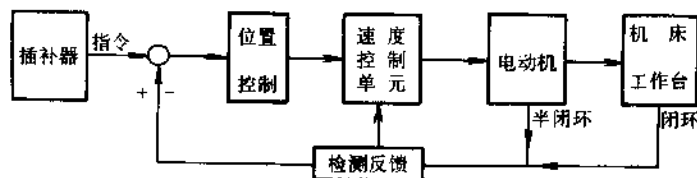


图 1-10 闭环系统结构

采用闭环系统可以消除由于机械传动部件的精度误差给加工精度带来的影响,所以可以获得很高的精度。从理论上讲,闭环系统的运动精度主要取决于测量装置的位移测量精度,而与传动链的误差无关。闭环系统主要用于精度要求很高的数控镗铣床,数控车床,数控磨床等。

闭环控制系统一般采用直流或交流伺服电动机做伺服驱动元件。由于交流伺服电动机具有结构简单,动态响应好,输出功率大,价格低等优点,同时近年来新型功率开关器件、专用集成电路和新的控制算法的发展,使交流伺服电动机在闭环控制系统中得到了广泛的应用,交流伺服电动机正在逐步取代直流伺服电动机。闭环控制系统的工作特点对机床的结构以及传动链仍然提出了比较严格的要求,传动系统的刚性不足及间隙的存在、导轨的爬行等各种因素将增加调试的困难,甚至会使数控机床的伺服系统工作时产生振荡。

(3) 半闭环控制数控机床 由于机械传动环节的摩擦特性、刚性和间隙都是非线性的,它们包含在闭环控制的位置环内,故很容易造成系统的不稳定,使闭环系统和调整都相当困难。为了排除机械传动环节的非线性对系统稳定性的影响,半闭环数控系统的位置测量装置安装在伺服电动机转动轴上或丝杆的端部,也就是说反馈信号取自电动机轴或丝杆上,而不是机床的最终运动部件,如图 1-10 所示。这种系统闭环环路内不包括机械传动环节,机械传动的精度的误差将反映到被加工工件的精度中去。但由于半闭环控制系统可获得稳定的控制,而机械传动环节带来的误差,可用补偿的办法消除。仍可获得满意的精度。因此,大多数数控机床采用半闭环系统。

1.2.2.3 高档、中档、低档(经济型)数控机床

按照控制系统的功能水平可把数控机床分为高、中、低(经济型)三种。但是,这种分类由于没有一个确切的定义,所以涵义不明确。但可以给人们一个清晰的一般水平概念。数控机床水平的高低由主要技术参数、功能指标和关键部件的功能水平来决定。我们试图从以下几方面对高、中、低档数控机床进行分类:

(1) 主轴功能 主轴不能自动变速的为低档,可以自动无级变速的,甚至具有 C 轴功能的数控机床(如数控车床)为中、高档。

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

(3) 伺服进给类型 采用开环、步进电动机进给系统为低档;采用半闭环的直流伺服系统为中档;采用闭环控制的直流或交流伺服系统为高档。

(4) 联动轴数 低档数控机床联动轴数为 $2\sim 3$ 轴,中高档的则为 $3\sim 5$ 轴以上。

(5) 通信功能 低档数控机床一般无通信功能;中档可有 RS232C、RS485 等通信接口;高档的还有制造自动化协议 MAP(manufacturing automation protocol) 通信接口,具有联网功能。

(6) 主 CPU 低档数控一般采用 8 位 CPU,中高档的数控已由 16 位 CPU 向 32 位 CPU 过渡,国外最新的数控已有选用 64 位 CPU,以提高运算速度。

(7) 显示功能 低档数控一般只有简单的数码显示或简单的 CRT 字符显示,而中档数控则具有较齐全的 CRT 显示,不仅有字符,而且有图形,人机对话,自诊断功能;高档数控还可以有三维图形显示。