

数控加工 实用手册

◎ 数控加工实用手册编委会 编

Shukong Jiagong
Shiyong Shouce



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

数控加工实用手册

数控加工实用手册编委会 编



机械工业出版社

数控加工涉及数控机床加工工艺、数控编程技术及数控机床的操作三大方面,根据目前我国数控机床的应用情况,为了满足广大从事数控加工的编程与操作人员的需要,我们组织数控加工领域的专家编写了本手册。本手册内容全面,包含大量的编程技巧和编程实例,并且所列加工实例大多都来自生产一线,有较强的实用性和参考价值。本手册主要内容包括:数控机床及其使用、数控加工工艺、数控编程基础、FANUC 系统数控机床的编程与操作、SIEMENS 系统数控机床的编程与操作、常见数控系统的特殊编程方法、电加工机床与特种加工机床的编程、数控机床的间隙补偿。

本手册可供从事数控加工的编程人员与操作人员使用,也可供高等院校、职业院校和技工学校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

数控加工实用手册/数控加工实用手册编委会编. —北京:机械工业出版社, 2014. 2

ISBN 978-7-111-44875-4

I. ①数… II. ①数… III. ①数控机床—加工—技术手册
IV. ①TG659-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 279404 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:荆宏智 赵磊磊 责任编辑:赵磊磊 宋亚东 张振勇

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 37.5 印张 · 1050 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-44875-4

定价:89.80 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

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

数控加工实用手册编委会

主任委员：张秀玲 韩鸿鸾

副主任委员：于国强 刘友显 韩中华

委 员：毕毓杰 朱国文 李书伟 鲁凤莲 刘海燕 高小林
丛军滋 姜兴道

主 编：韩鸿鸾 张秀玲

副 主 编：毕毓杰 韩中华 朱晓华

参 编：于国强 刘友显 沙玉豪 鲁凤莲 林荣俊 刘德成
范玉成 房德涛 马述秀 崔汝麦 高小林 姜兴道
刘辉峰 丛培兰 王常义 李书伟 刘海燕 王学智
卢 超 蔡艳辉 安丽敏

主 审：张玉东

特 约 审 稿：周维泉

前言

制造技术的发展日新月异，尤其是以计算机、信息技术为代表的高新技术的发展，使制造技术的内涵和外延发生了革命性的变化。传统制造技术不断吸收信息、材料、能源及管理领域的现代成果，综合应用于产品的设计、制造、检测、生产管理和售后服务，许多新的思想和概念不断涌现，不同学科之间相互渗透、交叉融合，衍生出新的研究领域，令数控技术在机械制造领域中得到广泛使用。

数控加工涉及数控机床加工工艺、数控编程技术及数控机床的操作三大方面。由于数控系统种类繁多，使用复杂，现在数控机床的“使用难、维修难”等问题，已经严重影响了数控机床的有效利用。根据目前我国数控机床的应用情况，为了满足广大从事数控加工的编程与操作人员的需要，我们组织数控加工领域的专家编写了本手册。

本手册对数控车床/车削中心、数控铣床/铣削中心、数控电加工机床、数控压力机等机床的加工工艺及操作方法进行了介绍，并对常用数控系统的指令用法、编程技巧进行了重点讲解，此外还介绍了非G代码编程。本手册主要包括：数控加工技术概述、数控加工工艺、数控编程基础、FANUC系统数控机床的编程与操作、SIEMENS系统数控机床的编程与操作、常见数控系统的特殊编程方法、电加工机床与特种加工机床的编程、数控机床的间隙补偿。

本手册是一本专业性手册，其编写宗旨是实用性、科学性、先进性相结合，便于读者查询和学习。本手册可供从事数控加工的编程人员、操作人员使用，还可供高等院校、职业院校和技工学校师生参考。

本手册在编写过程中，得到了山东省、河南省、上海市等省市人力资源和社会保障厅的大力支持，威海、烟台、淄博、太原、上海、广州、济南等地数控设备的生产厂家提供了大量的资料，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，编者水平有限，书中缺陷及错误之处在所难免，望广大读者给予批评、指正。

数控加工实用手册编委会

目 录

前言

第1章 数控机床及其使用	1
1.1 数控机床概述	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 数控机床技术的发展	1
1.1.3 机床数控技术及其组成	4
1.1.4 数控机床的组成	5
1.1.5 数控机床的分类	9
1.2 数控机床的使用	14
1.2.1 数控加工人员的分工	14
1.2.2 数控机床的维护与保养	15
1.2.3 安全文明生产	32
第2章 数控加工工艺	35
2.1 数控加工用刀具	35
2.1.1 数控车削刀具系统的形式	35
2.1.2 数控铣削刀具系统	37
2.1.3 机夹可转位刀片	42
2.2 数控加工用夹具	51
2.2.1 数控车削用夹具	51
2.2.2 数控铣削用夹具	53
2.2.3 数控电加工用夹具	64
2.3 数控加工工艺的制订	68
2.3.1 加工余量的确定	68
2.3.2 工序尺寸及其公差确定	69
2.3.3 数控车削工艺的制订	71
2.3.4 典型零件的数控铣削工艺	77
2.3.5 数控电加工工艺的制订	91
2.4 数控加工精度控制	107
2.4.1 数控加工用精密量具	107
2.4.2 几何误差的检测	112
第3章 数控编程基础	114
3.1 数控程序	114
3.2 数控机床坐标系	116
3.3 数控机床上的有关点	123
3.4 数控机床的有关功能	127

3.5 程序段格式	134
第4章 FANUC 系统数控机床的编程与操作	137
4.1 FANUC 系统数控车床与车削中心的编程	137
4.1.1 常用指令的介绍	137
4.1.2 角度编程与蓝图编程	165
4.1.3 用户宏程序与车削中心的编程	170
4.2 FANUC 系统数控铣床与铣削中心的编程	201
4.2.1 常用指令的介绍	201
4.2.2 一般零件的编程加工实例	232
4.2.3 特殊零件加工实例	244
4.2.4 其他程序的编制	258
4.3 FANUC 系统数控磨削加工的程序编制	265
4.3.1 数控磨削加工的程序编制基础	265
4.3.2 FANUC 系统数控磨削加工的程序编制方法	267
4.4 FANUC 系统数控压力机的编程	281
4.5 FANUC 系统数控机床的操作	287
4.5.1 数控铣床/加工中心的手动操作	287
4.5.2 调整与参数设置	298
4.5.3 程序编辑与自动加工	311
4.5.4 存储卡的应用	319
第5章 SIEMENS 系统数控机床的编程与操作	325
5.1 SIEMENS 系统数控车床与车削中心的编程	325
5.1.1 常用指令的介绍	325
5.1.2 基本指令与编程规则简介	333
5.1.3 循环指令简介	347
5.1.4 蓝图编程	367
5.1.5 R 参数编程	369
5.1.6 车削中心编程	374
5.1.7 SIEMENS 802S/C 与 SIEMENS 802D 系统不同指令介绍	376
5.2 SIEMENS 系统数控铣床与铣削中心的编程	381
5.2.1 常用指令的介绍	381
5.2.2 基本指令简介	383
5.2.3 循环指令简介	392
5.2.4 蓝图编程	411
5.2.5 加工实例	413
5.2.6 SIEMENS 802S/C 与 SIEMENS 802D 数控铣削不同指令介绍	419
5.3 SIEMENS 802D 系统数控磨床的编程	424
5.3.1 SIEMENS 802D 系统数控磨床的编程特有指令	424
5.3.2 SIEMENS 802D 系统数控磨床的编程实例	427
5.4 SIEMENS 系统数控压力机的编程	453
5.4.1 SIEMENS 数控压力机特有指令表	453
5.4.2 SIEMENS 系统数控压力机的编程实例	456

5.5 SIEMENS 802D 系统数控机床的操作	462
5.5.1 SIEMENS 802D 系统数控车床操作面板简介与程序编辑	462
5.5.2 对刀与参数的设定	483
5.5.3 数控车床的操作	495
第6章 常见数控系统的特殊编程方法	504
6.1 探针编程	504
6.2 会话编程	524
第7章 电加工机床与特种加工机床的编程	541
7.1 电加工机床的编程	541
7.1.1 数控线切割机床的编程	541
7.1.2 数控电火花成形机床的编程	549
7.2 数控特种加工	555
第8章 数控机床的间隙补偿	564
8.1 位置精度补偿	564
8.2 温度补偿	583
8.3 数控机床的垂度补偿	583
8.4 跟随误差补偿	585
8.5 摩擦补偿	586
参考文献	589

第 1 章 数控机床及其使用

1.1 数控机床概述

1.1.1 基本概念（表 1-1）

表 1-1 基本概念

概 念	英 文	解 释
数字控制	Numerical Control	简称数控（NC），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）进行可编程序控制的自动化方法
数控技术	Numerical Control Technology	指用数字量及字符发出指令并实现自动控制的技术，它已经成为制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础技术
数控系统	Numerical Control System	指采用数字控制技术的控制系统
计算机数控系统	Computer Numerical Control	以计算机为核心的数控系统
数控机床	Numerical Control Machine Tools	指采用数字控制技术对机床的加工过程进行自动控制的一类机床。国际信息处理联盟（IFIP）第五技术委员会对数控机床定义如下：数控机床是一个装有程序控制系统的机床，该系统能够逻辑地处理具有使用号码或其他符号编码指令规定的程序。这个定义中所说的程序控制系统即数控系统

1.1.2 数控机床技术的发展

1. 高速加工

目前主轴转速在 8000r/min 以上，有的高达 40000r/min，切削速度达 2000m/min，加工铝件时的金属切除率为 1000cm²/min。超高速切削的研究已取得成果，并已用于飞机制造上。目前难以对超高速切削给以确切的定义，其速度范围见表 1-2。

表 1-2 超高速切削

工艺类别	切削速度/（m/min）	工艺类别	切削速度/（m/min）
车削	700 ~ 7000	铰削	10 ~ 500
铣削	200 ~ 6000	锯削	50 ~ 500
钻削	100 ~ 1100	磨削	5000 ~ 10000
拉削	25 ~ 75		

2. 减少辅助时间

减少辅助时间的措施见表 1-3。

表 1-3 减少辅助时间的措施

措 施	说 明
工序高度集中（追求完整加工或全部加工）	可将工件换装到副主轴上的车削中心（刀盘上有自动驱动式刀具），可完成零件所有部位的加工；加工中心追求五面加工

(续)

措 施	说 明
缩短或重合工件装夹时间	采用快速定位，自动夹紧的夹具；加工中心使用交换工作台（交换时间约为6s）；采用双工作台立式钻床，工作台固定，一个工作台上加工，另一个工作台上装下一个工件并进行多件换装或多面换装加工；卧式机床采用绕水平轴转动的分度装置，从工件一侧加工，另一侧装夹工件
缩短换刀时间	换刀时间与加工时间重合；采用全机械式联动换刀机械手
减少机床调整占机时间	机外调刀（对刀）；夹具在机床上快速定位，自动夹紧；使用测头，利用自动测量循环找正夹具，测量工件原点
缩短程序输入、修改时间及参数设置时间	前台加工，后台输入、修改程序及相应参数；使用 DNC 直接通信方式

3. 提高加工精度

提高加工精度可减少废品，加工中心的精度已达到坐标镗床的精度，以车代磨已成现实。提高加工精度的措施见表 1-4。

表 1-4 提高加工精度的措施

措 施	说 明
减少装夹次数	完整加工或全部加工能保证工件的位置精度
减少热变形，提高热稳定性	对发热部件进行冷却，使整台机床各部件热平衡；用温度传感器通过计算机进行热补偿
抑制和减少振动	对机床高速旋转件进行动平衡；提高刀具、工件夹具等机床受力件的刚度和接触刚度；用充分的切削液润滑，减少刀具与工件的摩擦；利用振动传感器或声传感器监测振动情况
减少切削力引起的变形	切削力会引发刀具、工件、夹具、机床系统的变形，直接影响工件的尺寸精度和形状精度，采取的措施包括：对工件选取适当的夹紧点；对刀具、夹具、机床提高其刚性；对薄壁工件，粗、精加工时变换夹紧力；必要时用力传感器监控力的变化
刀具磨损、破损监控	及时发现，避免出废品和返工
自动测量、控制尺寸公差	磨床每个主要加工表面都进行自动测量。其他机床可按经验，加工数件后进行自动测量
机床设计制造中注意提高机床精度的持续性	设计结构合理，高刚度，高强度，接触变形小，磨损小；重要件消除内应力；基础件采用抗振吸振（高阻压）材料
提高和改进数控系统	使用 32 位机，最小设定单位可达 0.01 μm ，甚至 0.001 μm ；伺服系统使用前控制，减少跟踪滞后，提高加工精度；采用非线性控制，采用摩擦力矩补偿以减少机床反向时摩擦力矩产生的跟踪滞后。使用“单刀控制”，当跟踪第一个周期指令时产生伺服滞后误差，系统经过“学习”记住了这一误差，在以后重复执行这一指令时加以补偿，使位置误差减少到原来的 1/100

4. 提高可靠性

使用数控机床来提高市场竞争能力，其可靠性非常重要，提高可靠性是个系统工程。目前数控系统平均无故障时间已达 30000 ~ 36000h。提高可靠性必须抓好设计、生产、采购、调试、包装、运输、售后服务（含人员培训）等全过程，其中有技术工作，更多的是管理工作。

5. 高新技术的集成（表 1-5）

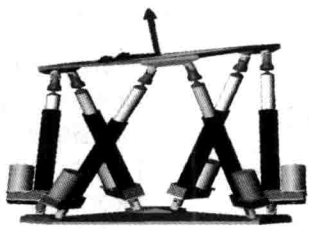
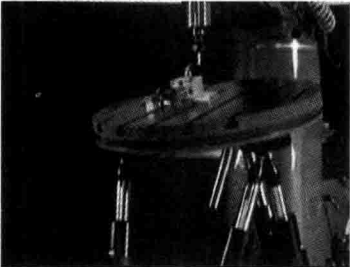
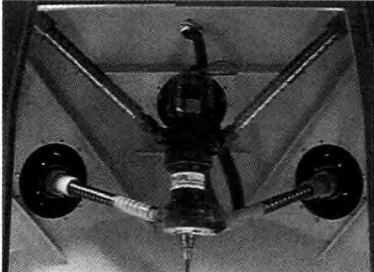
表 1-5 高新技术的集成

数控系统方面	机床方面
标准化，模块化，小型化，简约化 软件替代硬件 软、硬件分离供货，便于机床制造厂将自己的专用技术体现出来 数字替代模拟，成为全数字化的数控系统 交流伺服取代直流伺服 扩展功能，如联网通信功能、无人值守功能 提高实时控制速度，使用 32 位 CPU（甚至 64 位 CPU）及使用多 CPU 硬件使用表面安装技术制成功能模板，组成体积更小、结构紧凑的各种数控装置 彩色液晶显示器代替 CRT 使用数字交流电主轴，结构简单，消除了齿轮、带传动产生的噪声 使用丝杠贯通型伺服电动机，电动机转子即滚珠丝杠的螺母取消联轴器等环节 使用直线式伺服电动机驱动进给运动，取消滚珠丝杠螺母副 使用新型电源，取消笨重的电源变压器 使用无绳手拖脉冲发生器，手动遥控调整机床 使用 100000 脉冲/r 的高精度脉冲编码器，提高分辨率 使用触摸屏，取消键盘 使用通信光缆替代普通电缆，提高抗干扰能力 使用多媒体技术，例如用扫描仪输入图样、实物、语言对话等，进行自动编程 用户可用高级语言开发自己的应用软件，形成个性化的数控系统 使用自适应技术，建立多种专家系统组成智能化的具有自诊断、自修复功能的数控机床 使用卫星电话、互联网，通过向海外机床发送诊断软件，检测机床故障，指导用户及时进行维修 具有多种通信接口，机械接口向 DNC、FMS、CIM 集成	高速，高精度，高效，高度自动化，高可靠性，促使人们寻求新材料、新方法、新结构 零件“全部加工”的机床发展迅速，继加工中心、车削中心之后磨削中心、电火花加工中心、齿轮加工中心等相继出现，实现工序高度集中 虚拟坐标轴机床吸收了联动机器人研究的成果，并已进入实用阶段，是对传统机床结构的彻底改革。在六杆机床之后又出现了三杆机床，见表 1-6 超高速切削与常速切削相比，切削力小，工件吸收热量少，因而工件精度更高，特别适合薄壁零件和难加工材料 无人值守，对机床可靠性、自动化提出了更高的要求。已有 24h 甚至 72h 无人值守的机床，是面向 FMS、CIMS 的机床 刀具材料的研究特别是多层涂层刀具（交替涂敷最多达 13 层）的研究，提高了刀具的切削用量及寿命。立方氮化硼砂轮，线速度已达 250m/s HSK（中空锥柄）刀具系统适应高速切削，定位精度更高 激光铣床切削力小，切削温度低，适合特殊的零件加工

表 1-6 虚拟数控机床

	Hexapod 系列	G 系 列	Mikromat 系列
结构图			

(续)

	示意图	加工图
实例		
		

6. 面向计算机集成制造的数控机床

在一个工厂内，能完成某种功能的自动化子系统，其在职能上是分布的，地理上是分散的，时间上是分割的。例如：数控（CNC）机床、直接数控（DNC）、柔性制造系统（FMS）、计算机辅助设计/辅助制造（CAD/CAM）、计算机辅助工艺设计（CAPP）、制造资源计划（MRP）、决策支持系统、专家系统、质量管理体系等都是自动化孤岛（Islands of Automation）。

1.1.3 机床数控技术及其组成

机床数控技术是现代制造技术、设计技术、材料技术、信息技术、绘图技术、控制技术、检测技术及相关的外围支持技术的集成，其由机床附属装置、数控系统逐步形成外围技术组成，见图 1-1。

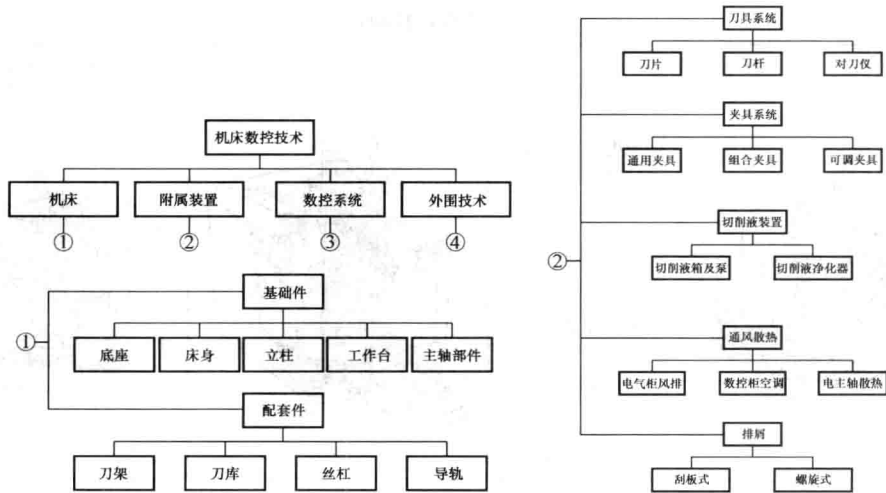


图 1-1 机床数控技术的组成

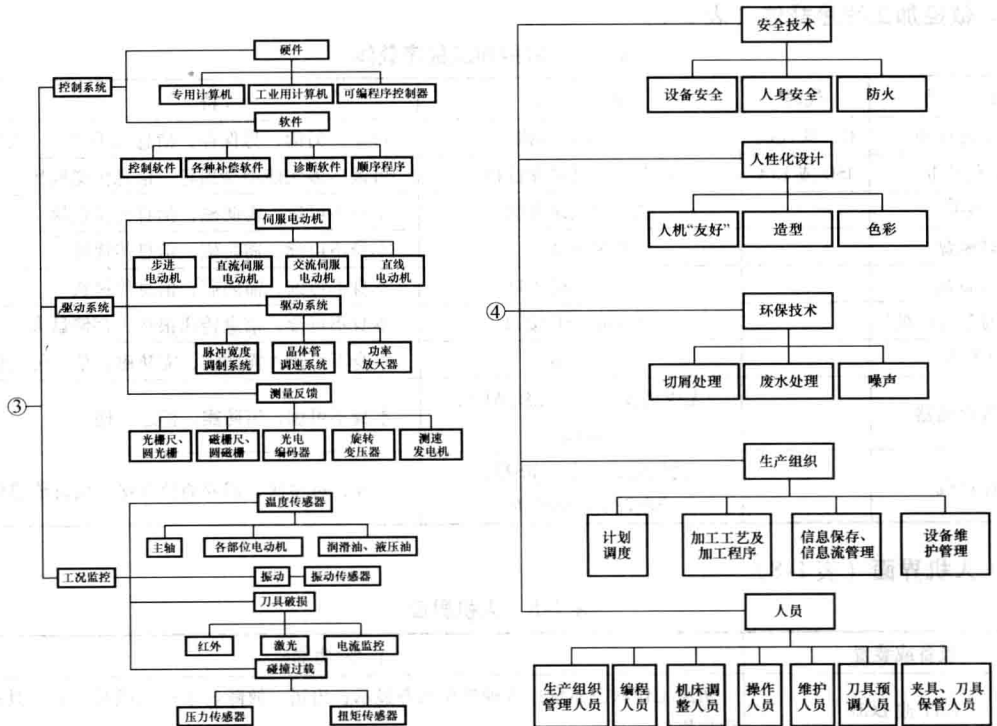


图 1-1 机床数控技术的组成 (续)

1.1.4 数控机床的组成 (图 1-2)

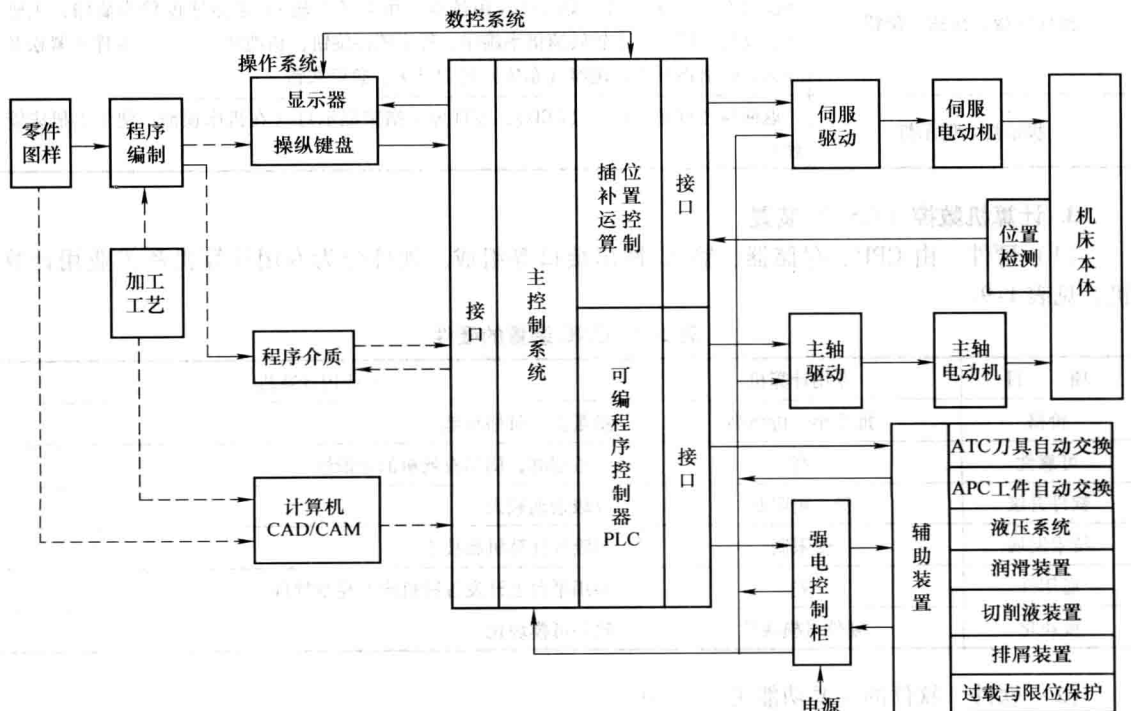


图 1-2 数控机床的组成示意框图

6 数控加工实用手册

1. 数控加工程序载体（表 1-7）

表 1-7 数控加工程序载体

种 类	代 码	设 备	特 点
加工程序单	G、M 代码	手写或打印机	可见，另读，另保存，信息用手输入，太易出错
穿孔纸带	ISO 或 EIA	穿孔机、纸带阅读机	可读，多次使用会损坏，信息传递较快
磁带		磁带机或录音机	本身不可读，需防磁，信息传递较快
软磁盘		磁盘驱动器	本身不可读，需防磁，信息传递快
硬磁盘		相应计算机接口	本身不可读，需防震，信息传递快
Flash 闪存（U 盘）		计算机 USB 接口	本身不可读，信息传递很快，存储量大
CF 卡		读卡器	本身不可读，需防震，需防磁，信息传递快
无线存储器		无线接收装置（无线 AP）、智能终端	本身不可读，需防震，信息传递快
计算机		通信装置（如：RS232、RS422、RS485 等）	可读，可多次，需要通信连接，信息传递快

2. 人机界面（表 1-8）

表 1-8 人机界面

设备或装置	主 要 功 能
CRT 或 LCD	机床工作状态显示；各种操作状态显示；出错、故障显示；人机对话的工具；加工程序模拟
键盘	手动数据输入，程序手动输入，修改，删除，更名；零件原点输入；刀具半径、长度补偿量设置；特定工艺参数设置；用户机床参数设置；机床制造厂机床参数设置
操作面板、按钮、旋钮	接通电源，关断电源；手动返回参考点；程序启动、程序停止、程序暂停，跳过程序段（/）；各坐标轴手动运行（用按键、用电子手轮）；进给速度倍率旋钮；主轴正、反转，停止；主轴转速倍率旋钮；程序锁存旋钮；切削液开、关；零件夹紧松开开关；排屑器开关；尾座（车床）进退开关；急停按钮
提示灯、警示灯	返回参考点完成提示（LED）；零件加工结束提示灯（在机床顶部，便于多机床管理）

3. 计算机数控（CNC）装置

（1）硬件 由 CPU、存储器、输入/输出接口等组成。硬件分为专用计算机和工业用计算机，见表 1-9。

表 1-9 CNC 装置的硬件

项 目	专用计算机	工业用计算机
价格	批量小，价格高	批量大，价格较低
可靠性	高	一般很高，偶尔有死机的可能性
软件升级	受一定限制	升级余地较大
技术发展	受限制	能吸收计算机新技术
通用性	差	共用平台上开发各种机床的控制软件
模块化	硬件可模块化	软件可模块化

（2）软件 软件的主要功能见表 1-10。

表 1-10 软件的主要功能

控 制 类 别	主 要 功 能
程序管理	接收存储加工程序，列程序清单，调出程序进行加工或进行修改、删除、更名等
参数管理	机床参数：参考点、机床原点、极限位置、刀架相关点、零件参数、零件原点 刀具参数：刀号、刀具半径、长度补偿 机床特征参数
程序执行	译码，数据处理，插补运算，进给速度计算，位置控制
机床状态监控	接收处理各传感器反馈信息
诊断	开机自诊，配合离线诊断、遥测诊断
图形模拟	验证加工程序，实时跟踪模拟
补偿	热变形补偿、运动精度补偿等

4. 进给伺服系统

- 1) 精度高。一般为 10μm，稍高为 1μm，高的为 0.1μm，甚至更高。
- 2) 快速。一般为 200ms，短的为几十毫秒。
- 3) 调速范围宽。在脉冲当量为 1μm 的情况下有的系统达到 0 ~ 240m/min 连续可调。
- 4) 低速大转矩。

5. 主轴驱动系统

用直流伺服电动机或交流伺服电动机驱动。对主轴驱动系统的要求及传动方式见表 1-11。

表 1-11 对主轴驱动系统的要求及传动方式

对主轴驱动系统的要求	传 动 方 式
输出功率大（有 2.2 ~ 250kW），主轴结构简单；1: 100 ~ 1: 1000 范围内恒转矩调速，1: 10 范围恒功率调速；正、反向加减速时间短；恒切削速度控制；准停（换刀时）控制；与进给驱动同步（攻螺纹）控制；角度分度控制（C 轴）	电动机→传动带→主轴 电动机→齿轮→主轴 电主轴（电动机主轴一体化）

6. 检测元件

- (1) 要求与种类 检测元件用于反馈信息，要求与种类见表 1-12。

表 1-12 检测元件的要求与种类

要 求	种 类	用 途
高可靠性，高抗干扰性；适应精度和速度的要求；符合机床使用条件；安装维护方便；成本低	位置检测元件 速度检测元件 电流检测元件 电压检测元件 转矩检测元件 振动检测元件 红外检测元件 激光检测元件	伺服系统位置控制 伺服系统速度控制 伺服系统电流环及过载控制 切削力控制 保护性控制，切削力控制 切削状态监控 信号传递 刀具磨损，尺寸跳动监控

- (2) 位置检测元件的分类（表 1-13）

表 1-13 位置检测元件

类 型	增 量 式	绝 对 式
回转型	脉冲编码器、旋转变压器、圆感应同步器、圆光栅、圆磁栅	多速旋转变压器、绝对脉冲编码器、三速圆感应同步器
直线型	直线感应同步器、计量光栅、磁尺、激光干涉仪	三速感应同步器、绝对式磁尺

8 数控加工实用手册

7. 位置控制（表 1-14）

表 1-14 位置控制

种 类	特 点
开环控制	用步进电动机，无位置检测元件
反馈补偿型开环控制	用步进电动机，反馈用位置检测元件装在丝杠上或工作台上
半闭环控制	用伺服电动机，位置检测元件装在电动机上或丝杠上
反馈补偿型半闭环控制	用伺服电动机，位置检测元件装在电动机上或丝杠上，反馈用位置检测元件装在工作台上
闭环控制	用伺服电动机，位置检测元件装在工作台上

8. 辅助装置及其控制

辅助装置包括：刀库、转塔刀架，换刀机械手，零件夹具，交换工作台，自动上料装置，液压、气动系统，润滑系统，切削液系统，排屑装置，通风制冷装置，超程保护装置，安全防护装置，过载保护装置，油雾分离器，清洗视窗（将溅落的切削液从视窗上清除）。

9. 机床本体

为满足高效、高精度、高可靠性地连续工作，对机床本体的要求见表 1-15。

表 1-15 对机床本体的要求

名 称	要 求	措 施
床身底座	抗振、高刚度、热稳定性、内应力小	使用新材料：树脂混凝土（弹性模量接近 60kN/mm^2 ）；聚合混凝土（抗压强度为 $90 \sim 150\text{N/mm}^2$ ）；聚丙烯基体混凝土；花岗岩颗粒与其他矿物质混合用环氧树脂做粘结剂合理的结构设计：足够的抗弯转矩；使热变形均匀的对称结构
导轨	动摩擦因数小；动、静摩擦因数差值小；不爬行；抗振性好；黏度保持性好；寿命长	贴型（注塑）导轨（聚四氟乙烯、环氧树脂等）；滚动导轨（预加载荷）；液体静压导轨（重型机床）；气体静压导轨（数控坐标磨床、三坐标测量机）
滚珠丝杠螺母副及其安装	拉伸变形小；热变形小；抗扭刚度高	设计时合理地选择尺寸；与电动机连接时选用扭转变形小的机械结构，FANUC 采用的是贯通式伺服电动机，即电动机转子与滚珠丝杠螺母副采用一体化结构；高刚度的支承结构；高刚度的支座结构，甚至与床身连在一起；必要时用中空丝杠进行冷却散热；预拉伸抵消热胀伸长
主轴部件	高速 10000r/min 左右，有的在 100000r/min 以上；高刚度；抗振性好；回转黏度高；热变形小；换刀、刀具夹紧可靠（加工中心）	陶瓷滚动体球轴承，油雾润滑适当预载；电主轴内冷却；采用三点支承提高刚度及抗振性；高黏度轴承用跳动量抵消装配法；主轴孔吹屑
换刀系统	车床转塔刀架：定位精度高，换刀速度快	定位用多齿盘：分双齿盘和三齿盘结构，脱齿、分度、合齿（夹紧）机构联锁可靠，信号传递准确
	加工中心刀库（机械手）选刀、换刀平稳准确、快捷	刀库（机械手）种类繁多，要求结构设计合理，定位夹持准确，动作互锁，信号传递准确；采取冲洗、吹屑等措施，保证刀柄上无切屑、污物

1.1.5 数控机床的分类

1. 分类方法 (表 1-16)

表 1-16 数控机床的分类方法

分类方法	特点、说明			
按控制系统特点分类	点位控制数控机床：只要求刀具准确定位，如数控钻床、数控坐标镗床、数控压力机等，定位原则为先快后慢；直线控制数控机床：因为同时仅控制一个轴，所以刀具平行于坐标轴做直线运动，如数控车床、数控铣床、数控磨床等；轮廓控制数控机床：刀具相对零件的运动，可实现两个或多个坐标轴同时进行控制，可加工平面曲线轮廓或空间曲面轮廓，如数控车床、数控铣床、数控磨床、加工中心等			
按轮廓控制数控机床中同时控制轴数分类	①两轴同时控制（2D）；②三轴控制，任意两轴同时控制（ $2\frac{1}{2}D$ ）；③三轴同时控制（3D）；④四轴、五轴等，多轴同时控制（4D、5D……）			
按位置控制方式分类	可分为开环控制、反馈补偿型开环控制、半闭环控制、反馈补偿型半闭环控制、闭环控制			
按数控装置类别分类	①硬件数控机床：控制功能全由硬件实现，通用性差，已不用；②软件数控机床：以硬件为平台，用软件程序实现控制，通用性强，目前广泛采用			
按加工方式分类	①金属切削数控机床：数控车、铣、钻镗床，数控磨床、数控齿轮机床等；②无屑加工数控机床：数控剪板、折弯机床，数控压力机等；③特种加工数控机床：数控电火花加工机床、数控线（电极）切割机床等；④其他：数控火焰切割机床、数控等离子体切割机床、数控三坐标测量机等			
按功能水平分类	项目	高档数控机床	中档数控机床	低档数控机床
	高脉冲当量/mm	0.0001	0.001	0.01
	进给速度/（m/min）	15～100m/min	15～24m/min	8～15m/min
	位置控制	直、交流伺服电动机，闭环、半闭环		步进电动机，开环
	联动轴数	3～5轴及以上		2、3轴
	通信功能	RS232接口、MAP通信接口，具有联网功能	RS232接口，DNC接口	一般无
	显示功能	除中档功能外，还可能有三维图形	CRT功能齐全，可以显示字符、图形；能实现人机对话和自诊断等功能	数码管、液晶或简单的CRT
	内装PLC	有，功能更强，有轴控制扩展功能	有	无
经济型数控机床和标准型数控机床	主CPU	由16位向32位过渡，已有64位机出现，并选用具有精简指令集的RISC中央处理单元		8位
	经济型数控机床是低档数控机床的一种，用单片机控制步进电动机，价格低。区别于经济型数控机床，称功能较全的数控机床为全功能数控机床或标准型数控机床			

2. 常用的数控机床

常用的数控机床几乎涵盖了所有的金属加工机床，由于使用自动换刀装置及其他措施，还发