

数控机床及加工技术

■ 主 编 崔元刚

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

数控机床及加工技术

◎ 主编 崔元刚



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床及加工技术 / 崔元刚主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 8

ISBN 978 - 7 - 5682 - 2896 - 1

I. ①数… II. ①崔… III. ①数控机床 - 加工 - 高等学校 - 教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 199496 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 天津紫阳印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 21

字 数 / 490 千字

版 次 / 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 58.00 元

责任编辑 / 赵 岩

文案编辑 / 梁 潇

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 马振武



前言

Qianyan

本教材根据企业实践应用需求，按其知识体系将本书知识分为七章：

第一章引导学生了解什么是数控？数控机床是什么？用通俗易懂的介绍把学生领进门。

第二章主要就进给轨迹运动控制、主轴旋转运动控制两个重点，说明数控机床运动控制的基本原理，满足学生对数控原理好奇心，激发学生的学习兴趣。

第三章介绍加工程序，学习与数控系统交流的语言，学会用加工程序表达加工运动规律，学习人与计算机交互控制机床的方法。引导学生欣赏加工程序简洁、准确、严谨的表达技巧。

第四章引导学生去探索如何设计更合理的加工运动规律，满足保质、高效、低成本、安全方便的加工追求。

第五、六、七章分别从数控车、数控铣、加工中心应用角度具体介绍数控机床的实用技术，培养学生的专业实践能力。

虽然学习的是同一门课程，但不同群体的学习目标和需要是不同的。一些初学者，不需要学得很深入，内容应浅显，容易引起兴趣；对于想深入掌握实用技术的学生，教材应能提供比较实用的，有一定的深度的应用技术。教材力求做到满足这两方面的需求，目录中打了“*”号的内容，是满足深入学习的需求，“各取所需”，是本教材特点之一。

本版教材由崔元刚编写，编写过程中得到张兴旺、姜爱国、马健等老师的大力协助，在此表示感谢！

由于编写时间有限，难免有误，不足之处敬请批评指正。

编者

第一章 数控机床概述	001
1.1 认识数控机床	002
1.1.1 数控机床概念	002
1.1.2 数控概念	002
1.1.3 数控机床基本组成	004
1.1.4 数控加工一般过程	006
1.1.5 数控加工特点	007
1.2 认识各种类别的数控机床	009
1.2.1 普通数控机床	009
1.2.2 加工中心机床 (MC)	011
1.2.3 柔性制造	013
1.2.4 计算机集成制造系统 (CIMS)	013
1.3 数控机床的坐标系规定	014
1.3.1 进给运动与坐标系	014
1.3.2 数控机床标准坐标系规定	014
1.3.3 典型的数控机床坐标系规定	016
1.3.4 参考点及回参考点操作	018
1.3.5 设定工件坐标系	019
1.4 认识机床数控系统	019
1.4.1 数控系统概述	019
1.4.2 数控系统硬件体系结构	019
1.4.3 数控系统软件的功能结构	022
1.4.4 计算机数控系统的控制功能	022
第二章 数控机床运动控制	026
2.1 进给插补	026
2.1.1 插补的概述	026
2.1.2 插补方法举例——逐点比较法	028
2.2 进给伺服系统	030
2.2.1 进给伺服系统的概念	030

目 录

Contents

2.2.2	开环进给伺服系统	031
2.2.3	闭环进给伺服系统	033
2.3	进给系统机械	037
2.3.1	进给机械简介	037
2.3.2	典型的进给机械部分	038
2.4	数控机床主轴驱动	041
2.4.1	数控机床主轴驱动要求	041
2.4.2	主轴驱动装置及驱动特性	041
2.4.3	主轴传动	044
2.4.4	主轴自动控制功能	045
※2.5	数控机床主轴支承	048
2.5.1	主轴的回转精度	048
2.5.2	数控机床上常用主轴轴承	048
2.5.3	主轴的轴承配置形式	050
第三章	数控加工程序	054
3.1	加工程序基本规定	055
3.1.1	加工程序概述	055
3.1.2	加工程序指令字格式	055
3.1.3	加工程序指令字的种类	057
3.1.4	FANUC 系统常用 G 指令格式及应用	060
3.1.5	FANUC 铣削系统常用 M 指令	066
3.1.6	其他指令应用说明	067
3.1.7	加工程序格式	068
3.1.8	编制数控加工程序举例	069
3.2	刀具补偿指令及其应用	070
3.2.1	刀具半径补偿	070
3.2.2	刀具长度补偿	076
第四章	数控加工工艺设计知识	082
4.1	数控加工工艺设计过程	083

4.1.1	零件机械加工工艺总规划	083
4.1.2	数控加工工序设计	086
4.2	数控加工装夹设计	090
4.2.1	工件的定位	090
4.2.2	工件夹紧	096
4.2.3	数控车削装夹	097
4.2.4	数控铣、加工中心常用夹具	100
4.2.5	夹具选用	101
4.3	熟悉数控刀具及选用	103
4.3.1	数控刀具要求	103
4.3.2	了解刀具类型及选用	104
4.3.3	刀具基本几何参数及选用	105
4.3.4	刀具材料选择	107
※4.3.5	可转位刀具	110
※4.3.6	数控工具系统	113
4.4	数控加工刀具路径拟定	115
4.4.1	规划安全的刀具路径	116
4.4.2	规划保证加工质量的刀具路径	118
4.4.3	规划高效率的刀具路径	121
4.5	切削用量选用一般方法	122
4.5.1	刀具切削用量的概念	122
4.5.2	切削用量选择原则	124
4.5.2	切削用量选用方法	126
4.6	先导案例的解决	127
4.6.1	壳体零件加工工艺规程	127
4.6.2	壳体加工中心工序工艺设计	128
第五章	数控车床应用	133
5.1	数控车床概述	134
5.1.1	数控车床类型	134
5.1.2	典型的数控车床组成	134

目 录

Contents

5.1.3 数控车削的主要加工对象	137
5.2 数控车床对刀与偏置、补偿应用	137
5.2.1 数控车床坐标系及机床各点	137
5.2.2 数控车床的零点偏置与长度补偿	140
5.2.3 刀具磨损偏置及应用	142
5.2.4 FANUC 车削系统刀具 T 指令	144
5.3 FANUC 系统数控车床编程简介	144
5.3.1 FANUC 数控车床指令	144
5.3.2 部分 FANUC 数控车削指令应用说明	146
5.4 外圆车削工艺及编程	149
5.4.1 车削外圆表面工艺	149
5.4.2 G01 车削外圆	150
5.4.3 G90 单一循环车削圆柱面	151
5.4.4 G90 单一循环车削圆锥面	152
5.4.5 G71 多重复合循环粗车外径	154
5.4.6 精车固定循环 G70	156
5.4.7 G73 成型加工复合循环粗车外径	157
5.5 端面车削工艺及编程	159
5.5.1 车削端面	159
5.5.2 G01 单次车削端面	160
5.5.3 G94 单一循环切削端面	160
5.5.4 G94 单一循环切削端锥面	162
5.5.5 G72 复合循环切削端锥面	163
※5.6 可转位车刀片的刀尖圆弧及半径补偿应用	165
5.6.1 可转位车刀片的刀尖圆弧及选用	165
5.6.2 带刀尖圆弧可转位刀片的应用	166
5.7 内孔加工工艺及编程	170
5.7.1 数控车床上孔加工工艺概述	170
5.7.2 数控车床上孔加工编程	172
5.7.3 数控车床上孔加工工艺及编程实例	174
5.8 切槽、切断工艺及编程	176

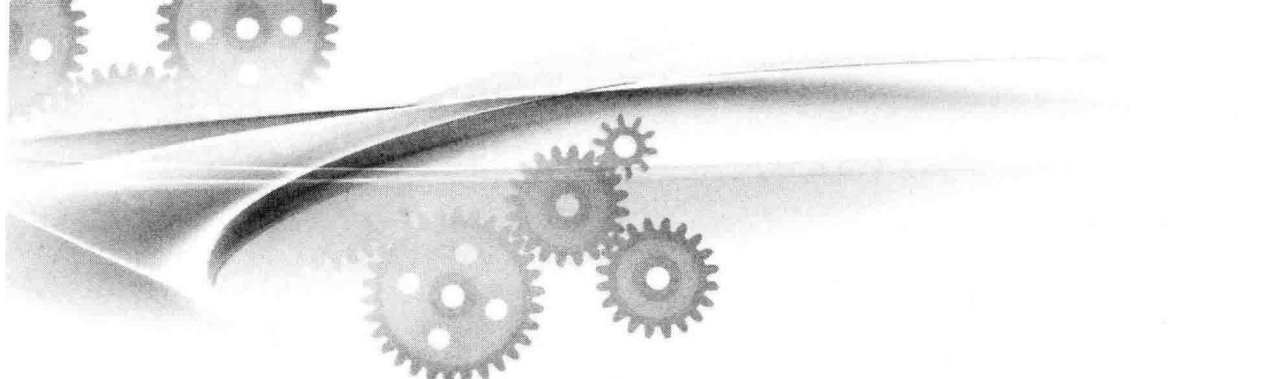
5.8.1	凹槽加工工艺要点	176
5.8.2	简单凹槽切削工艺编程	178
※5.8.3	精确凹槽加工技术	179
5.8.4	G75 沟槽复合循环	181
※5.8.5	子程序在多槽加工中的应用实例	184
5.8.6	切断	185
5.9	螺纹车削加工工艺及编程	187
5.9.1	螺纹加工概念及加工工艺	187
5.9.2	G32 螺纹切削指令应用	190
5.9.3	螺纹切削单一固定循环 G92	192
5.9.4	螺纹切削复合循环 G76	193
5.9.5	内螺纹切削编程示例	195
5.10	先导案例解决	196
5.10.1	加工工艺分析	196
5.10.2	加工程序	198
第六章	数控铣削加工	205
6.1	数控铣床及选用	206
6.1.1	认识数控铣床	206
6.1.2	数控铣床或加工中心选用	207
6.1.3	数控铣削加工对象	208
6.2	CNC 铣床零点偏置和长度补偿	209
6.2.1	数控铣床零点偏置	209
6.2.2	基于零点偏置的 X、Y 向对刀方法	211
6.2.3	数控铣床 Z 向对刀	213
6.3	平面铣削工艺编程	215
6.3.1	平面铣削加工的内容、要求	215
6.3.2	平面铣削方法	215
6.3.3	面铣刀及选用	216
6.3.4	平面铣削的路线设计	217
6.3.5	平面铣削用量	218

目 录

Contents

6.3.6	单次面铣的加工实例	219
6.3.7	大平面铣削时的刀具路线	221
6.4	立铣刀及铣削工艺选择	221
6.4.1	立铣刀及选用	222
6.4.2	立铣刀切削用量选用	225
6.4.3	顺铣与逆铣方式选用	226
6.5	轮廓铣削工艺及编程	227
6.5.1	轮廓铣削实例	227
6.5.2	子程序在分层铣削中的应用	229
6.5.3	正六边形轮廓铣削实例	231
6.6	槽铣削工艺及编程	233
6.6.1	铣槽加工工艺简介	233
6.6.2	半开放窄槽加工实例	236
6.6.3	封闭窄槽加工工艺实例	237
6.7	型腔铣削工艺及编程	238
6.7.1	型腔铣削加工的内容、要求	238
6.7.2	型腔铣削方法	239
6.7.3	型腔铣削加工实例	240
※6.8	简化的编程方法	244
6.8.1	极坐标编程	244
6.8.2	比例缩放指令及应用	246
6.8.3	坐标系旋转指令应用	247
6.9	先导案例解决	249
6.9.1	工件工艺设计先导案例	249
6.9.2	编写加工程序	252
第七章	加工中心应用	257
7.1	加工中心自动换刀	257
7.1.1	刀库形式	258
7.1.2	刀具选择方式及 ATC 换刀的特点	259
7.1.3	刀具换刀装置和交换方式	261

7.1.4	换刀程序的编制	263
7.1.5	加工中心自动换刀程序	265
7.2	孔加工要求及孔加工固定循环	267
7.2.1	孔加工概述	267
7.2.2	孔加工固定循环格式	267
7.2.3	钻孔加工循环及应用	270
7.3	钻孔、扩孔、铰孔加工工艺及编程	274
7.3.1	实体上钻孔加工	274
7.3.2	扩孔加工	278
7.3.3	铰孔加工	279
7.3.4	孔加工工艺编程实例	280
7.4	攻丝工艺及编程	283
7.4.1	攻丝加工的内容、要求	283
7.4.2	丝锥及选用	284
7.4.3	CNC 机床攻丝工艺与编程	286
7.4.4	攻内螺纹工艺编程实例	289
7.5	铰孔工艺及编程	291
7.5.1	铰孔加工工艺	291
7.5.2	铰孔工艺编程实例	294
7.6	镗孔工艺及编程	296
7.6.1	镗孔加工概述	296
7.6.2	镗刀及选用	297
7.6.3	镗孔循环	298
7.6.4	镗孔工艺和编程实例	300
※7.7	加工中心 Z 向对刀方案设计	304
7.7.1	机床、刀具、工件的位置点及 Z 向对刀问题	304
7.7.2	机床、刀具、工件在 Z 方向相对位置值及寄存	305
7.7.3	典型 Z 向对刀方案设计	306
7.8	先导案例解决	309
7.8.1	刀具编号及程序结构设计	309
7.8.2	自动换刀多刀加工程序	309



目 录

Contents

附表	315
附表 1 硬质合金外圆车刀切削速度参考值	315
附表 2 硬质合金车刀粗车外圆、端面的进给量	316
附表 3 按工件表面粗糙度选择车削进给量的参考值	316
附表 4 成量集团公司数控刀具硬质合金铣刀切削用量选用参考	317
附表 5 硬质合金内孔钻削、扩削切削用量选用参考	318
附表 6 高速钢铰刀切削用量选用参考	318
附表 7 镗削用量选用参考	319
附表 8 内螺纹攻丝切削速度选用参考	319
参考文献	321

第一章 数控机床概述

本章知识点

1. 认识数控及数控机床。
2. 了解数控加工过程及特点。
3. 了解各种类别的数控机床和现代制造技术。
4. 熟悉 CNC 机床坐标系的规定。
5. 认识机床数控系统。

先导案例

自动控制加工运动，从而解放人力，是现代制造业的发展趋势。数控机床是越来越普及的自动化加工设备，熟悉机床数控技术及应用技术，有助于用好数控机床。另一方面，把数控机床作为一个典型的机电一体化产品来学习、研究，有助于举一反三熟悉其他的现代机电设备。

图 1-1 所示的是一台数控车床，如何理解数控？数控机床如何组成？相对传统机床加工，数控机床加工有什么特点？

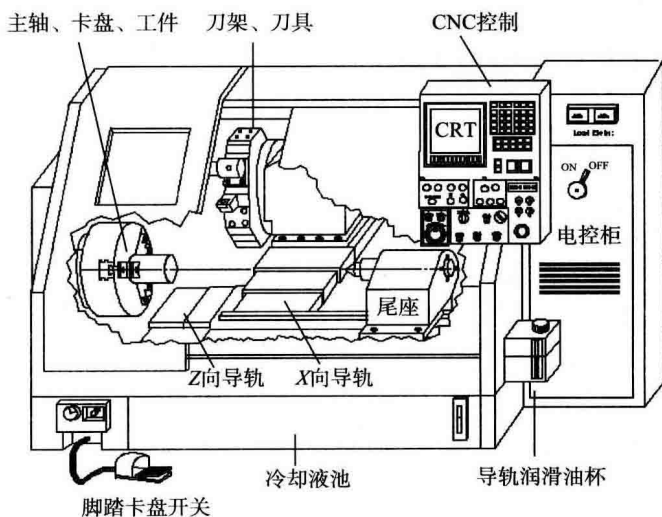


图 1-1 数控车床



1.1 认识数控机床

1.1.1 数控机床概念

为了满足多品种、小批量、特别是复杂型面零件加工的生产要求，人们一直在寻找更通用、更灵活、更高精度、更高效率的自动化加工工具，用数控技术控制机械加工的数控机床就是这样的生产工具。数控机床（Numerical Control Machine Tools）是采用了数字控制技术的机床。

从1952年第一台数控机床问世到现在（美国PARSONS公司与麻省理工学院（MIT）合作研制了第一台三坐标数控铣床），数控技术的发展非常迅速，几乎所有品种的机床都实现了数控化，机械制造业的发展也进入了一个新的阶段——数字控制机床制造阶段。

现代数控机床是一种具有高质、高效、高度自动化、高度灵活性的加工工具，具有良好的零件加工功能，适合精度要求更高及形状复杂零件的加工。它是将电子、计算机等技术与传统机床技术相融合，将精密机械技术、计算机技术、微电子技术、检测传感技术、自动控制技术、接口技术等在系统工程的基础上有机结合，是优化的、典型的机电一体化产品。

“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代码，或其他符号编码指令规定的程序。”（国际信息处理联盟第五技术委员会定义）

1.1.2 数控概念

1. 计算机数控

“用数字化信号对机床运动及其加工过程进行控制的一种方法，简称数控。”（国家标准GB8129~1987）

数控功能由计算机实现，称为“计算机数控”（Computerized Numerical Control，缩写CNC）。

现代数控机床多是计算机控制，计算机是数控机床的“大脑”，它负责有序指挥控制机床的一切加工运动并符合人的加工意图。可以这样简单认为：人把加工意图告诉计算机，委托计算机指挥控制，实现机床加工动作。即：“人的意图→计算机→机床加工运动”要理解“人的意图→计算机→机床加工运动”的数控加工过程，应解决如下问题：

①计算机控制的加工运动要符合人的加工意图，那么人的加工意图如何能被计算机理解？即“人的意图→计算机”的问题。

②计算机在理解人的加工意后，又是如何指挥机床的运动部件实现加工动作？即“计算机→机床加工运动”的问题。

下面将解决这两个问题。

2. 人的意图输入到计算机

在“人的意图→计算机”的信息传输过程中，信息的输入应符合计算机的识别与运算

特点。因为计算机内部的电路是典型的数字脉冲电路，信息输入到计算机前应转化为数字化电脉冲信号，二进制数码信息很容易简单、准确地转化成数字化电脉冲信号，因此，“加工意图”信息在计算机接受前的形式是一种二进制数码信息，即数字化信号。

加工意图的描述形式，不仅应容易地转变成二进制数码信号方便计算机接收，又应方便人加工意图的表达。

为方便行业内人员交流，国家标准统一规定加工程序格式指令来表达加工运动及过程。例如：

```
.....
M03 S1000;
G01 X100 Y50 F200;
.....
```

其中：“M03”指令主轴正转；“S1000”表示指令主轴转速每分钟 1000 转；“G01”指令刀具从当前起点直线进到终点；“X100 Y50”指令进给终点坐标；“F200”指令进给速度是 200 mm/min；“；”表示一段指令的结束。以上程序表达了机床加工主运动及进给运动的一个片段。

可见，用 CNC 机床可接收和处理的规定格式指令，可以清楚方便地表达机床一系列的加工动作，形成表达加工运动及过程的加工程序。

“人的意图→计算机”的信息传输过程中，加工程序是连接计算机与人之间的桥梁，信息传输过程可表示成：

人的意图→加工程序→二进制数字码→数字化电脉冲信号→计算机。

3. 计算机对加工运动控制

为了能通俗易懂地介绍计算机对机床加工运动控制原理，现以人对某一个动作的控制来类比计算机对机床加工运动控制。人与计算机对运动控制的相似性比较如图 1-2 所示。

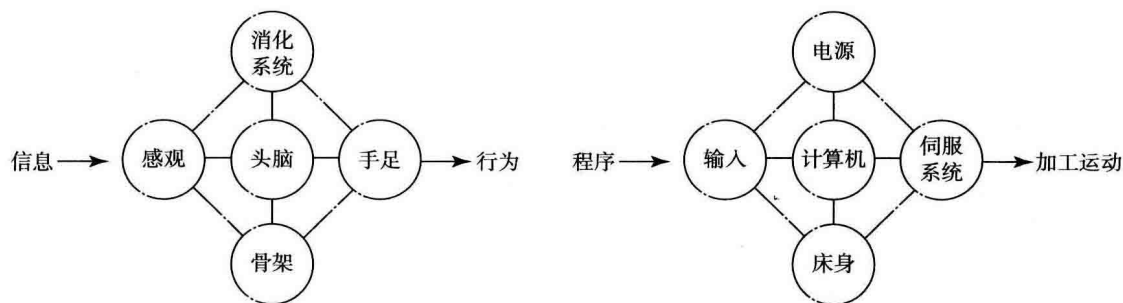


图 1-2 人与计算机对运动控制的相似性比较

(1) 人对运动控制

人的动作是大脑思维控制的结果。当人有了一个动作意图，经大脑内存贮的经验处理，得到控制身体各部协同动作的命令，该命令通过神经传输，由肌肉伸缩牵动四肢手足等来完成动作，一切机构由骨干、关节等支撑起来，一切能量是由消化系统、血液循环系统提供。同时，在控制过程中，人的感官不断监视动作过程的正确性，并且把当前动作状况反馈大脑，以便修正动作控制。大脑之所以能正确合理控制人的动作，是因为大脑是存贮了相应经



验的大脑。

(2) 计算机对运动控制

如同人的大脑，计算机之所以能有序地指挥机床的加工动作，使加工运动结果符合程序描述，是因为它具有“专业的领导经验”——存贮于“电脑”内部的程序控制系统，对于数控机床来说，是专用于处理机床加工运动信息和有序控制机床加工运动的软件——数控系统软件，相当于人存贮于大脑皮层的经验。

当加工程序输入到计算机，数控系统软件对其进行识别，理解输入的加工程序，然后进行逻辑计算、判断，处理成指挥机床各部运动的命令信息。

指令信息通过输出线路（相当于人的神经）输出，由伺服系统（相当于人的四肢）执行，检测反馈装置（相当于人的感官）向数控装置反馈指令实际执行情况，以便随时获得当前运动与目标运动的误差，并据此修正控制指令，直到保证加工运动过程准确。

1.1.3 数控机床基本组成

数控机床是在普通机床的基础上发展起来的机床，因此与同类的普通机床在机械结构上有相似性，具有主运动装置，进给运动装置，辅助运动装置。数控机床又是由计算机自动控制的机床，相对普通机床，数控机床增加了数字控制部分和伺服执行部分。

如图 1-3 所示，数控机床一般由数控系统、伺服系统、强电控制柜、机床本体和各类辅助装置组成。

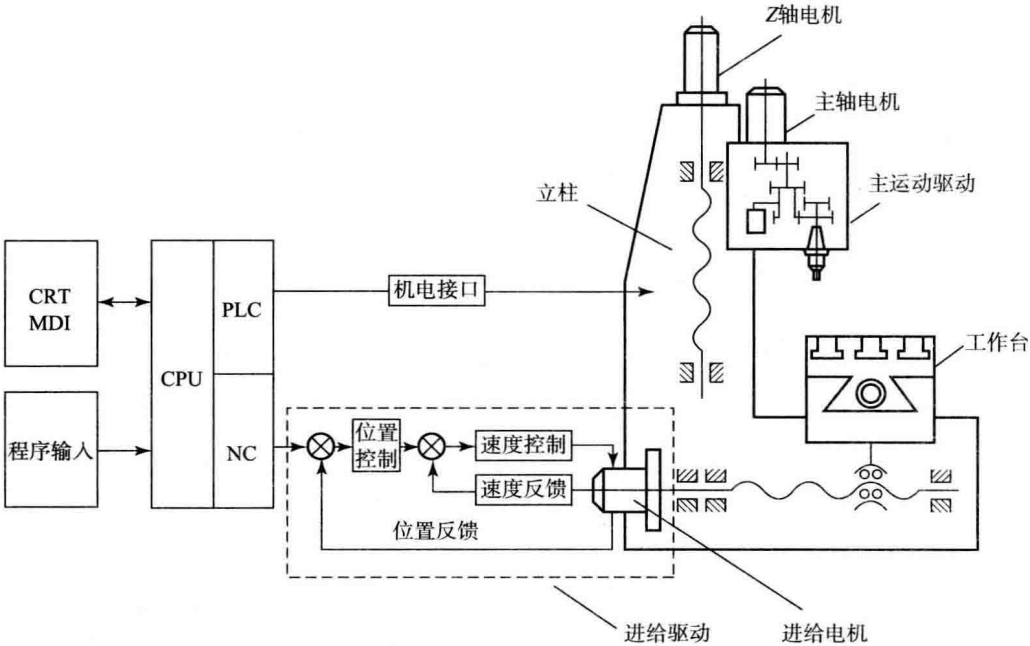


图 1-3 数控机床组成各部分

1. 数控系统

数控系统是机床实现自动加工的核心，是整个数控机床的灵魂所在。主要由输入装置、

监视器、计算机数字控制系统、可编程控制器、各类输入/输出接口等组成。

(1) 程序输入装置及人机交互设备

将编写好的数控加工程序输入到数控装置的方法很多，常见的有：通过使用 MDI 键盘输入；在个人计算机编辑好的程序通过通信方式输入；加工程序以数字代码的形式记录在控制介质，再通过某些输入设备，如手持移动硬盘、磁盘、磁带、穿孔纸带等输入。

数控机床正式加工前，需要对输入的加工程序进行编辑、修改和调试。加工运行时，操作人员需要对数控系统加工状态监控观察，干预机床加工需要输入操作指令。人机交流需要通过相应的设备实现，在数控机床上，这些实现人机联系的功能设备统称为人机交互设备。

与计算机一样，键盘和显示器是数控系统不可缺少的人机交互设备。如图 1-4 所示，为典型 FANUC 车床的 CRT、MDI 键盘、操作面板。

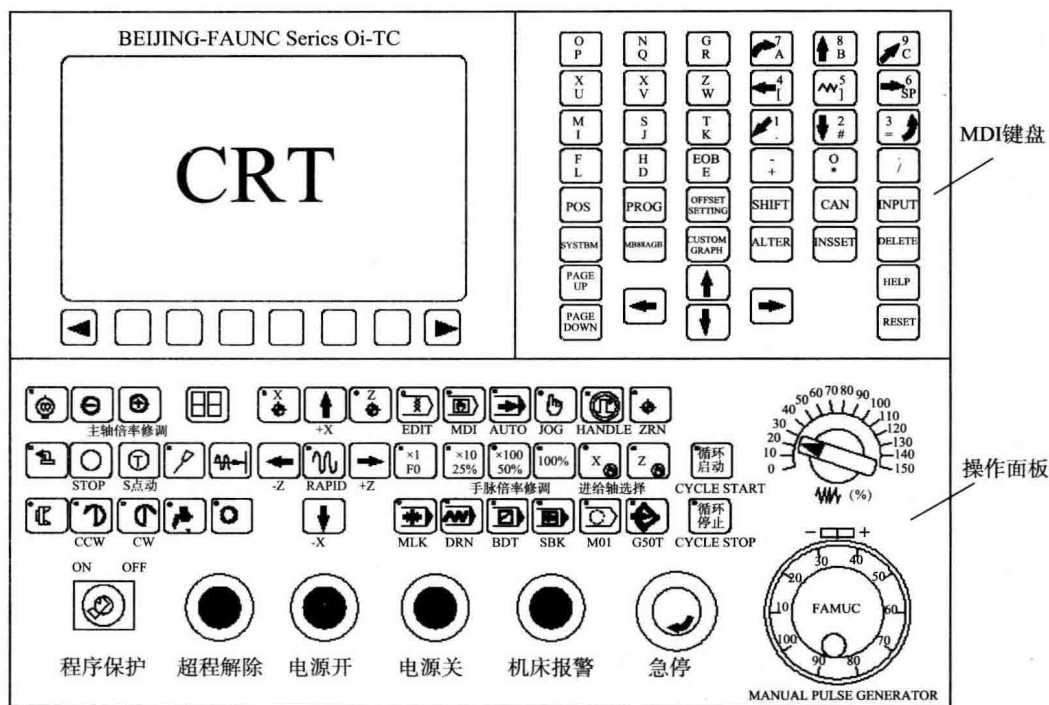


图 1-4 典型人机交互设备

(2) 计算机数控装置 (CNC)

计算机数控装置是整个数控系统的核心部分，它控制接收输入的加工程序信息，并对接收到的数据进行编译、运算和逻辑处理后，然后输出各种信息指令控制主运动、进给运动、辅助运动设备按规定进行精确有序的加工动作。

(3) 可编程控制器 (PLC)

可编程控制器接受计算机送来的辅助控制指令，经可编程控制器处理，通过辅助接口电路转换成强电信号，用来控制数控机床辅助动作。它与数控装置共同完成对数控机床的控制。

2. 伺服系统

伺服系统是数控系统和机床本体之间的电传动联系环节，主要有两种：一种是进给伺服