

数控机床编程方法、 技巧与实例

霍亮生 聂学俊 冯玉强 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



数控机床编程方法、 技巧与实例

霍亮生 聂学俊 冯玉强 编著



机械工业出版社

本书对不同的数控设备编程格式与编程方法进行了介绍,数控设备覆盖常用的车、铣、钻、镗、电加工、加工中心等机床,编程方法包括常用传统的手工编程方法和计算机辅助编程方法。全书共 9 章:第 1 章为数控机床编程基础,第 2 章为手工编程基础,第 3 章为数控车床手工编程、第 4 章为数控铣床手工编程,第 5 章为数控钻床、镗床手工编程、第 6 章为数控线切割、电火花机床手工编程,第 7 章为数控加工中心手工编程。第 8 章为 APT 语言数控自动编程,第 9 章为计算机辅助数控编程。本书条理清楚,中心明确,思路清晰,既适用于数控机床操作人员使用,也可作为大学、高职高专机械工程与自动化等相关专业高年级学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床编程方法、技巧与实例/霍亮生等编著.

—北京:机械工业出版社,2006.1

ISBN 7-111-17732-0

I. 数… II. 霍… III. 数控机床—程序设计

IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 126122 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:周国萍 版式设计:霍永明 责任校对:魏俊云

封面设计:陈 沛 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

890mm×1240mm A5·8.625 印张·251 千字

0 001—5 000 册

定价:20.00 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) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

现代制造技术是当今我国大力发展的领域，数控技术是现代制造技术的主力军。在现代机械制造工厂中，数控设备的应用越来越多，但使用者的水平不能令人满意。因为有加工经验的老工程师往往对计算机技术不太熟悉，而新毕业的大学生由于缺乏实际工作经验，对现场加工设备、加工手段、加工工艺不了解，对一个具体加工对象不知如何下手，严重妨碍了数控技术设备性能的有效发挥。

为了解决目前在数控设备应用上出现的问题，快速培养数控设备使用人才，本书精心介绍了常用数控设备，如车、铣、钻、镗、电加工、加工中心等机床的使用和编程方法，编程方法包括常用传统的手工编程方法和计算机辅助编程方法。

本书旨在通过提供不同类型数控设备的数控编程方法及大量实例，使具有不同文化水平和编程能力的读者学到不同零件数控加工程序的编制特点和方法，掌握实用的经验和知识，为初学者能够迅速学会数控设备的加工编程提供一个平台，为已有经验的数控设备使用者提供总结、提高、借鉴的机会。

霍亮生教授编写了本书的第1章、第2章和第3章；聂学俊副教授编写了第4章、第5章和第6章；冯玉强副教授编写了第7章、第8章和第9章。研究生于洪涛和吴亚玲在本书编写过程中作了很多工作，在此表示衷心感谢。

笔者多年从事数控技术方面的教学和科研工作，从自身的科研工作和生产一线积累了较多素材。如本书有不当之处，敬请批评指正。

编著者

目 录

前言

第 1 章 数控机床编程基础	1
1.1 数控机床概述	1
1.1.1 数控机床的特点	1
1.1.2 数控机床的组成	3
1.1.3 数控机床的分类	5
1.1.4 数控机床的发展	9
1.2 数控机床编程基础	11
1.2.1 数控机床编程内容与步骤	11
1.2.2 数控机床坐标系的建立	13
1.2.3 工件坐标系的建立	17
1.2.4 数控编程的工艺处理	17
1.2.5 数控编程的数学处理	21
第 2 章 手工编程基础	27
2.1 常用 G 代码指令	27
2.1.1 与坐标系有关的 G 代码	27
2.1.2 坐标值尺寸 G 代码	28
2.1.3 关于参考点的 G 代码	29
2.1.4 插补功能 G 代码	30
2.1.5 进给功能 G 代码	32
2.1.6 主运动速度 G 代码	33
2.2 常用 M 代码指令	34
2.3 刀具补偿与 T 代码	36
2.3.1 刀具半径补偿指令 G40、G41、G42	37
2.3.2 刀具长度补偿指令 G43、G44	38
2.4 FANUC 数控系统指令	39
2.4.1 FANUC—OT 系统 G、M 代码指令集	39
2.4.2 FANUC—OM 系统 G、M 代码指令集	42

2.5 SIMENS 数控系统指令	46
2.5.1 SINUMERIK 802DT 系统程序段结构	46
2.5.2 SINUMERIK 802DT 系统程序字符集	47
2.5.3 SINUMERIK 802DT 系统程序指令表	48
第3章 数控车床手工编程	63
3.1 数控车床编程特点	63
3.1.1 数控车床坐标系	63
3.1.2 数控车床常用指令	66
3.2 数控车床编程实例	77
3.2.1 轴类零件编程	77
3.2.2 盘类零件编程	79
第4章 数控铣床手工编程	86
4.1 数控铣床编程特点	86
4.1.1 数控铣床的主要加工对象、加工方法与加工刀具	86
4.1.2 数控铣床坐标系	90
4.1.3 数控铣床常用指令	92
4.2 数控铣床编程实例	107
4.2.1 轮廓类零件编程	107
4.2.2 孔类零件编程	112
4.3 数控铣床编程技巧	117
4.3.1 子程序应用	117
4.3.2 镜像加工	119
4.3.3 循环应用	121
第5章 数控钻床、镗床手工编程	128
5.1 数控钻床、镗床编程特点	128
5.1.1 数控钻床、镗床坐标系	128
5.1.2 数控钻床、镗床常用指令	128
5.2 数控钻床、镗床编程实例	132
5.3 数控钻床、镗床编程技巧	133
5.3.1 子程序的应用	133
5.3.2 循环的应用	136
第6章 数控线切割、电火花机床手工编程	139
6.1 数控线切割机床编程特点	139
6.1.1 数控线切割机床坐标系	140

6.1.2 数控线切割机床常用指令	141
6.2 数控线切割机床编程技巧	145
6.3 数控线切割机床编程实例	147
6.4 数控电火花成形机床编程	155
6.4.1 数控电火花成形机床	155
6.4.2 数控电火花成形机床电极材料及加工特性	157
6.4.3 数控电火花成形机床加工条件及加工特性	158
6.5 数控电火花成形机床加工编程实例	159
第7章 数控加工中心手工编程	161
7.1 加工中心	161
7.1.1 加工中心的特点	161
7.1.2 加工中心的分类	162
7.1.3 加工中心的主要加工对象	164
7.2 加工中心的加工工艺	167
7.2.1 零件工艺可行性分析	167
7.2.2 零件工艺设计	168
7.2.3 加工中心工步的设计原则	170
7.2.4 加工中心工件的定位	171
7.3 加工中心的坐标系	172
7.3.1 加工中心的坐标系统	172
7.3.2 编程零点与工件坐标系	173
7.3.3 用 G92 设定的工件坐标系与工件偏置坐标系	174
7.4 加工中心的编程实例	175
7.4.1 凸轮槽的加工	175
7.4.2 端盖加工程序	177
7.4.3 轴套类零件的加工	181
第8章 APT 语言数控自动编程	188
8.1 自动编程基本原理	188
8.1.1 自动编程原理	188
8.1.2 自动编程基本步骤	190
8.2 自动编程语言	191
8.2.1 APT 语言的组成	191
8.2.2 APT 语言的语句	194
8.3 自动编程实例	212

第9章 计算机辅助数控编程	220
9.1 计算机辅助数控编程	220
9.1.1 计算机辅助数控编程特点	220
9.1.2 计算机辅助数控编程步骤	221
9.1.3 计算机辅助数控编程软件介绍	223
9.2 计算机辅助数控编程的加工工艺	223
9.2.1 加工工艺与规划	223
9.2.2 CAM 自动编程的参数设置	226
9.2.3 高速铣数控编程	237
9.3 MASTERCAM8.0 数控自动编程	240
9.3.1 MASTERCAM8.0 数控车削自动编程	240
9.3.2 MASTERCAM8.0 二维铣削自动编程	247
9.3.3 MASTERCAM8.0 曲面铣削自动编程	250
9.4 计算机辅助数控编程举例	253
9.5 数控加工程序的仿真	259
9.5.1 引言	259
9.5.2 数控加工仿真系统结构	260
9.5.3 数控加工程序的检验	262
9.5.4 数控加工程序的仿真	263
参考文献	265

第 1 章 数控机床编程基础

1.1 数控机床概述

最早的机床数控系统是由数字逻辑电路构成的，因此称为硬件数控系统。随着计算机技术的发展，硬件数控系统已被淘汰，取而代之的是计算机数控（Computer Numerical Control，简称 CNC）系统。机床的 CNC 系统是采用存储程序的计算机来完成部分或全部基本数控功能，主要由计算机程序，即软件来对各类控制信息进行处理，不仅具有真正的柔性，而且可处理逻辑电路难以处理的各种复杂信息，因此使数控系统的功能大大提高，而且还在向更高水平发展。现在的数控机床都是计算机数控机床。

1.1.1 数控机床的特点

由于数控机床综合了微电子技术、计算机应用技术、自动控制技术以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，具体说来可包括以下几个方面：

（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，便可实现对新零件的自动化加工，因此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）精度高、质量稳定。在数控机床中集中了众多提高加工精度和保证质量稳定性的技术措施。首先数控机床是根据数控程序自动工作，一般在工作过程中不需要人工干预，这就消除了操作者人为产生的失误或误差；其次数控机床的机械结构是按照精密机床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，抗干扰性能好；再次伺服传动系统的脉冲当量或最小设定单位

可以达到 $0.0005 \sim 0.01\text{mm}$ ，同时工作中还大多采用具有检测反馈的闭环控制，并且有误差修正或补偿功能，可进一步提高精度和稳定性；最后数控加工中心具有刀库和自动换刀装置，工件可在一次装夹后完成工件的多面和多工序加工，最大限度地减小了装夹误差的影响等。

(3) 生产效率高。数控机床能最大限度地减小零件加工所需的机动时间与辅助时间，使生产效率显著提高。数控机床的进给运动和多数主运动都采用无级调速，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；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；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；机床移动部件在定位中都采用自动加减速措施，因此可选用很高的空行程运动速度，大大节约了辅助运动时间；加工中心可采用自动换刀和自动交换工作台等措施，工件一次装夹，可进行多面和多工序加工，大大减少工件装夹、对刀等辅助时间，而且加工工序集中，可减少零件周转，并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技术和多坐标联动控制，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；可方便地完成各种复杂曲面，如螺旋桨、汽轮机叶片、汽车外形冲压用模具等类零件的加工。

(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是利用操作面板对机床的自动加工进行操作，大大减轻了操作者的劳动强度，改善了生产条件，并且可以实现一个人轻松管理多台机床。

(6) 有利于现代化生产与管理。采用数控机床加工能方便精确计算零件的加工工时或进行自动加工统计，能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 (CAD/CAM)、群控或分布式控制 (DNC)、柔性制造系统 (FMS)、计算机集成制造系统 (CIMS) 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，对操作与管理人员的素质要求较高，必须从生产实际出发，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。

1.1.2 数控机床的组成

数控机床一般由数控系统、包含伺服电动机和检测反馈装置的伺服系统、强电控制柜、机床本体和各类辅助装置组成，如图 1-1 所示。

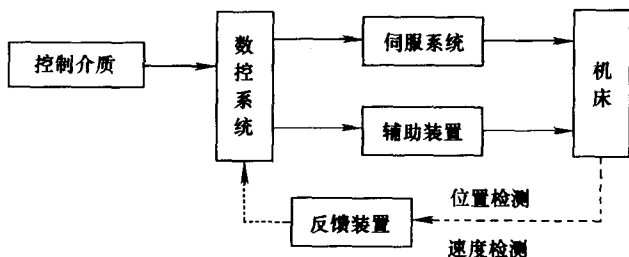


图 1-1 数控机床的组成

(1) 控制介质。控制介质又称信息载体，是人与数控机床之间联系的中间媒介物质，反映了数控加工中全部信息。

(2) 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、主控制系统、可编程序控制器、各类输入/输出接口等组成。主控制系统主要由 CPU、存储器、控制器等组成。数控系统的主要控制对象是位置、角度、速度等机械量，以及温度、压力、流量等物理量，其控制方式又可分为数据运算处理控制和时序逻辑控制两大类。其中主控制器内的插补模块就是根据所读入的零件程序，通过译码、编译等处理后，进行相应的刀具轨迹插补运算，并通过与各坐标伺服系统的位置、速度反馈信号的比较，从而控制机床各坐标轴的位移。而时序逻辑控制通常由可编程序控制器（PLC）来完成，它根据机床加工过程中各个动作要求进行协调，按各检测信号进行逻辑判别，从而控制机床各个部件有条不紊地工作。

(3) 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。主要由伺服电动机、驱动控制系统和位置检测与反馈装置等

组成。伺服电动机是系统的执行元件，驱动控制系统则是伺服电动机的动力源。数控系统发出的指令信号与位置反馈信号比较后作为位移指令，再经过驱动系统的功率放大后，驱动电动机运转，通过机械传动装置拖动工作台或刀架运动。

(4) 强电控制柜。强电控制柜主要用来安装机床强电控制的各种电气元器件，除了提供数控、伺服等一类弱电控制系统的输入电源以及各种短路、过载、欠压等电气保护外，主要在 PLC 的输出接口与机床各类辅助装置的电气执行元件之间起桥梁连接作用，控制机床辅助装置的各种交流电动机、液压系统电磁阀或电磁离合器等。此外，它也与机床操作台有关手动按钮连接。强电控制柜由各种中间继电器、接触器、变压器、电源开关、接线端子和各类电气保护元器件等构成。它与一般普通机床的电气类似，但为了提高对弱电控制系统的抗干扰性，要求各类频繁起动或切换的电动机、接触器等电磁感应器件中均必须接 RC 阻容吸收器；对各种检测信号的输入均要求用屏蔽电缆连接。

(5) 机床本体。数控机床的本体指其机械结构实体。它与传统的普通机床相比较，同样由主传动系统、进给传动机构、工作台、床身以及立柱等部分组成，但数控机床的整体布局、外观造型、传动机构、工具系统及操作机构等方面都发生了很大变化。为了满足数控技术的要求和充分发挥数控机床的特点，归纳起来包括以下几个方面的变化：

1) 采用高性能主传动及主轴部件。具有传递功率大、刚度高、抗振性好及热变形小等优点。

2) 进给传动采用高效传动件。具有传动链短、结构简单、传动精度高等特点，一般采用滚珠丝杠副、直线滚动导轨副等。

3) 具有完善的刀具自动交换和管理系统。

4) 在加工中心上一般具有工件自动交换、工件夹紧和放松机构。

5) 机床本身具有很高的动、静刚度。

6) 采用全封闭罩壳。由于数控机床是自动完成加工，为了操作安全等，一般采用移动门结构的全封闭罩壳，对机床的加工部件进行全封闭。

(6) 辅助装置。辅助装置主要包括自动换刀装置 ATC (Automatic Tool Changer)、自动交换工作台机构 APC (Automatic Pallet Changer)、工件夹紧放松机构、回转工作台、液压控制系统、润滑装置、切削装置、排屑装置、过载和保护装置等。

1.1.3 数控机床的分类

1. 按加工工艺方式分类

(1) 切削机床类。属于此类的有数控车床、铣床、镗床、钻床和加工中心等。

(2) 成形机床类。有数控冲压机、弯管机、折弯机等。

(3) 特种加工机床类。有数控电火花、线切割、激光加工机床等。

(4) 其他机床类。有数控等离子切割、火焰切割、点焊机、三坐标测量机等。

2. 按控制系统功能特点分类

(1) 点位控制 (Point to Point Control, PTP)。这种类型的机床只能控制刀具、工作台等移动部件的目的位置, 即只可实现刀具、工作台等移动部件从一个位置到另一个位置的精确定位, 而对移动轨迹没有严格要求, 并且在移动和定位过程中不进行任何加工, 如图 1-2 所示。

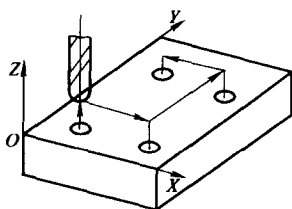


图 1-2 点位控制

数控钻床、冲压机、点焊机、弯管机等

机床的运动控制方式就属此类。为了精确定位和提高定位速度, 机床起动后, 移动部件首先高速运行, 然后减速以实现慢速接近定位点并最后准确定位。三个以上的多位置 (点) 先后定位, 应选择刀具运动次序 (加工次序), 以保证加工质量、提高刀具寿命, 并缩短运动路线, 节省时间。需要注意的是, 选择运动次序时, 要防止刀架或刀具在运动过程与工件、夹具或机床部件相碰。

(2) 点位直线控制 (Straight Line Control or Paraxial Control)。点位直线控制简称直线控制。这种类型的数控机床控制系统, 不仅可以控

制刀具或工作台由一个位置点到另一个位置点的精确移动，还可以控制它们以给定的速度沿着平行于某一坐标轴方向移动和在移动过程进行加工；该类系统也可控制刀具或工作台同时在两个轴向以相同的速度运动，从而沿着与坐标轴成 45° 的斜线进行加工，如图 1-3 所示。

(3) 轮廓控制 (Contour Control)。轮廓控制也称连续控制。这类机床的控制系统可使刀具或工作台在几个坐标轴方向以各轴向的速度同时协调联动，不仅能控制运动部件的起点与终点，还可以控制其运动轨迹及轨迹上每一点的速度和位移，如图 1-4 所示。用于加工空间曲线和曲面的数控车床、数控铣床及加工中心的控制系统，都应有轮廓控制的功能。能进行轮廓控制的数控机床，一般也能进行点位控制和点位直线控制。

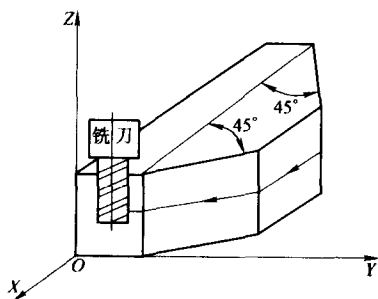


图 1-3 点位直线控制

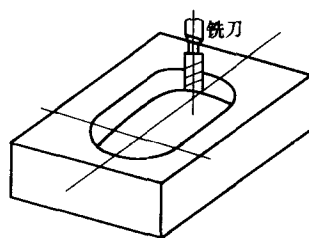


图 1-4 轮廓控制

3. 按伺服系统控制原理分类

这种分类方法是根据伺服系统测量反馈形式来分的，如图 1-5 所示。

(1) 开环控制。开环控制是指伺服系统不带测量反馈装置的控制方式，如图 1-5a 所示。驱动装置一般采用步进电动机。机床的工作精度取决于步进电动机的转动精度及变速机构、丝杠等机械传动部件的精度。

(2) 闭环控制。其检测装置安装在机床刀架或工作台等执行部件上，用以直接检测这些执行部件的实际运行位置（直线位移），并将

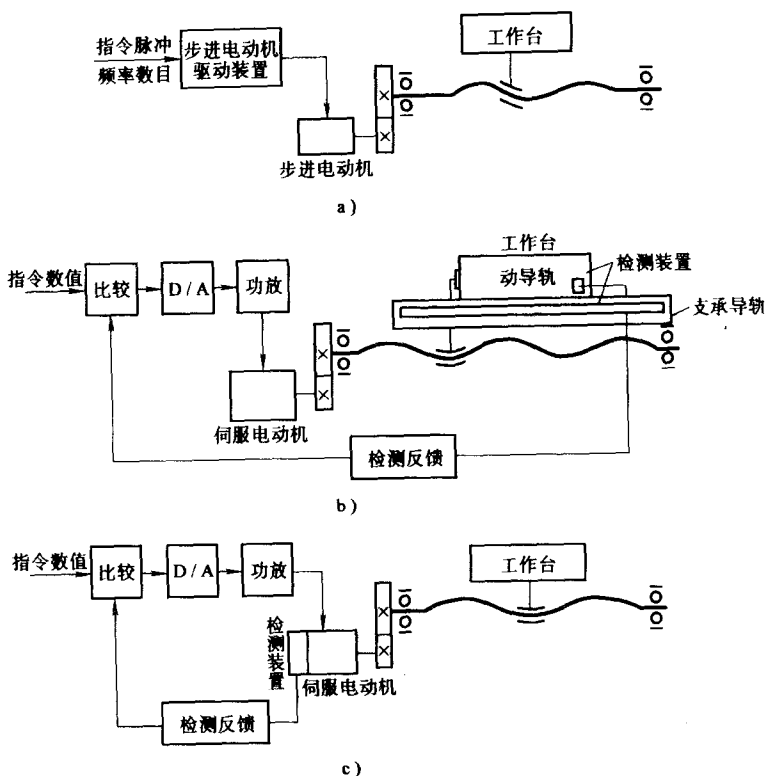


图 1-5 数控机床伺服系统的开环系统、闭环系统和半闭环系统

a) 开环系统 b) 闭环系统 c) 半闭环系统

其与 CNC 装置的指令位置（或位移）相比较，用差值进行控制，如图 1-5b 所示。这种控制方式是直接检测校正，位置控制精度很高，但由于它将丝杠螺母副及机床工作台这些大惯量环节放在闭环之内，系统稳定性受到影响，调试困难，且结构复杂、价格昂贵。

(3) 半闭环控制。这种控制方式是将检测装置安装在伺服电动机或滚珠丝杠轴端，检测它们的角位移（转角）和转速并反馈到数控装置，由角位移间接推算出工作台或刀具的位移和移动速度，如图 1-5c 所示。这种伺服系统比较简单，造价较低，同时由于滚珠丝杠制造精

度的提高,丝杠、螺母之间侧隙采用了补偿方法,因此半闭环控制方式在中等精度以上的数控机床中得到了广泛应用。

4. 按控制系统功能水平分类

按控制系统的主要技术参数、功能指标和关键部件的功能水平,数控机床可分为低、中、高三个档次。国内还分为全功能数控机床、普及型数控机床和经济型数控机床。这些分类方法虽然没有明确的定义和标准,但比较直观。以下几方面通常作为分类评价的主要依据。

(1) 控制系统 CPU 的档次。低档数控系统一般采用 8 位 CPU,中、高档数控系统采用 16 位或 32 位的 CPU,现在有些 CNC 装置已采用 64 位的 CPU。

(2) 分辨率和进给速度。分辨率为位移检测装置所能检测到的最小位移单位,分辨率越小,则检测精度越高。它取决于检测装置的类型和制造精度。一般认为,分辨率 $10\mu\text{m}$,进给速度 $8\sim 10\text{m}/\text{min}$ 为低档 NC 机床;分辨率 $1\mu\text{m}$,进给速度 $10\sim 20\text{m}/\text{min}$ 为中档;分辨率 $0.1\mu\text{m}$,进给速度 $15\sim 20\text{m}/\text{min}$ 为高档。通常分辨率应比机床所要求的加工精度高一个数量级。

(3) 坐标联动功能。数控机床联动轴数也常是区分机床档次的一个标志。按同时控制的联动轴数,可分为 2 轴联动、3 轴联动、3 轴 2 联动(任一时刻,三轴中只能实现两轴联动,另一轴则是点位或直线控制;常写成 $2\frac{1}{2}$ 轴)、4 轴联动、5 轴联动等。一般情况下,同一厂家,同等规格、同等精度的数控机床,增加一个联动坐标轴,价格约增加 30%,这是在选择机床时应考虑的因素。

(4) 通信功能。低档数控系统一般无通信功能;中档的有 RS232C 或可供 DNC(直接数控)的通信接口;高档系统有 RS422A 或支持 MAP(自动化协议)的高性能通信接口,具有联网功能。

一般来说,不同档次的数控机床在显示功能方面也有所区别,因此在评判数控机床档次时,习惯上也常将显示功能作为评判因素之一。低档数控机床一般只有 LED(Light Emitting Diode,发光二极管)显示器或单色 LCD(Liquid Crystal,液晶)显示器或仅有字符显示功能的 CRT(Cathode-ray Tube,阴极射线管)显示器;中、高档的数控

机床 CRT 显示器或 LCD 显示器有彩色图形显示功能或图形动态显示功能。

1.1.4 数控机床的发展

随着生产技术的发展,对数控技术及其产品的性能要求越来越高。产品的改型频繁,多品种,中、小批量生产方式的企业越来越多。这就要求现代数控机床具有高效率、高柔性、低成本等优点,以满足生产发展的需要。另一方面,以数控机床和数控系统的发展作为基础,也促进了机械制造业向着高技术集成系统等更高层次发展,例如近年来相继出现的柔性制造系统、计算机集成制造系统等,使机械制造业的技术水平提高到一个崭新的阶段。

现代数控机床及其数控系统,目前大致向以下几个方面发展:

1. 高速、高精度化

要提高机械加工的生产率,其中最主要的方法是提高速度,但是这样做会降低加工精度。现代数控机床在提高加工速度的同时,也在进行高精度化。目前已可在 0.0001mm 最小设定单位时,进给速度达 24m/min 。要做到这一点,应对机械和数控系统等提出更高的要求。

(1) 机械方面。例如机床主轴要高速化,提高主轴和机床机械结构的动、静态刚度。采用能承受高速的机械零件,如采用陶瓷球的滚珠轴承等。

(2) 数控系统方面。主要是提高计算机的运算速度。现代数控系统已从 16 位的 CPU,普遍采用 32 位的 CPU。主机频率由 5MHz 提高到 $20\sim 33\text{MHz}$ 。有的系统还采用了插补器的专用芯片,以提高插补速度;有的采用多 CPU 系统,减轻主 CPU 的负担,进一步提高控制速度。

(3) 伺服系统方面。

1) 采用数字伺服系统。使伺服电动机的位置环、速度环的控制都实现数字化。FANUC15 系列开发出专用的数字、信号处理器。位置指令输入后,它与从脉冲编码器来的位置信息,以及检测出的电动机电流信息一起,在专用的微处理器芯片内,进行控制位置、速度和电动机电流的运算,最后向功率放大器发出指令,以达到对电动机的