

“十二五”国家重点图书出版规划项目

先进制造理论研究与工程技术系列

COMPUTER NUMERICAL CONTROL  
OF MACHINE TOOLS

# 机床数控技术

主 编 韩振宇 付云忠

副主编 李茂月 李 霞 刘 源 邵忠喜

主 审 王永章

哈尔滨工业大学出版社

014008296

“十二五”国家重点图书出版规划项目

先进制造理论研究与工程技术系列

TG659-43

145

COMPUTER NUMERICAL CONTROL  
OF MACHINE TOOLS

# 机床数控技术

主 编 韩振宇 付云忠

副主编 李茂月 李 霞 刘 源 邵忠喜

主 审 王永章



TG659-43

145

哈尔滨工业大学出版社



北航

C1695670

## 内容简介

本书全面系统地介绍了现代机床数字控制技术,详细分析和阐述了机床数字控制的最新原理与技术,从理论和实践两方面介绍了现代数控技术的基本内容。主要包括:数控编程、轨迹插补控制原理、计算机数控装置的软硬件结构、现代机床检测技术、伺服驱动与控制技术及现代机床机械结构及设计技术。全书共7章,内容全面、深入,各章之间相对独立,又相互联系。

本书既可作为高等工科院校机械制造及其自动化、机械电子等机械工程相关专业的本科生教材,又可作为研究设计单位、工厂的数控技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

机床数控技术/韩振宇,付云忠主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.8  
ISBN 978-7-5603-4109-5

I. ①机… II. ①韩… ②付… III. ①数控机床-高等学校-教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 122273 号

策划编辑 张秀华  
封面设计 卞秉利  
出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006  
传 真 0451-86414749  
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>  
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂  
开 本 787mm×960mm 1/16 印张 19.25 字数 445 千字  
版 次 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5603-4109-5  
定 价 36.00 元

---

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 前 言

机械制造业是国民经济的支柱产业之一,其发展规模和水平是反映国民经济实力和科学技术水平的重要标志之一。而数控技术是现代制造技术的基础,它的广泛应用使普通机械被数控机械所替代,导致了全球制造业的深刻变革。目前随着国内数控机床用量的剧增,急需培养一大批数控高级专业人才。为了适应我国高等教育发展及数控高级人才培养的需要,我们编写了本书。

本书是在1995年王永章教授编著的《机床的数字控制技术》的基础上重新编写的。我们根据近年来数控技术的发展对各章节内容进行了全面更新,力争较全面系统地介绍数控系统的基本组成,各部分的主要功能、特点及工作原理。在每一部分,都力争引入新技术,并用简练的语言介绍其原理,突出与应用相关的内容。例如,在数控编程一章引入高级编程指令与STEP-NC,在检测装置一章引入了激光位移测量,在伺服系统一章以交流调速技术作为重点。目的是力求使学生在掌握基本数控知识的基础上,对前沿数控技术有所了解。此外,为了让读者对数控机床有一个更加全面的认识,还增加了数控机床的机械结构一章,介绍机床布局、机械结构组成和辅助工艺装备。

本书可作为机械制造及其自动化、机械电子等机械工程相关专业本科生的教材,还可供从事数控机床编程、工艺、操作及维护的工程技术人员参考。

参加本书编写的有哈尔滨工业大学邵忠喜(第1章),哈尔滨理工大学李茂月(第2章),哈尔滨工业大学刘源(第3章),哈尔滨工程大学李霞(第4章),哈尔滨工业大学韩振宇(第5章、第6章),哈尔滨工业大学付云忠(第7章)。此外,哈尔滨工业大学的韩德东、张翔也分别参加了第2章、第6章部分内容的编写。全书由韩振宇、付云忠主编,并统稿。

本书由哈尔滨工业大学王永章教授主审,王老师对本书提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,且数控技术发展迅速,书中难免有疏漏之处,恳请广大读者、同仁批评指正。

编 者

2013年8月

# 目 录

第1章 概 论.....	1
1.1 基本概念 .....	1
1.2 数控机床的特点与应用 .....	2
1.3 数控机床的组成 .....	3
1.4 数控机床的分类 .....	5
1.4.1 按照加工工艺及机床用途分类 .....	5
1.4.2 按照机床运动的控制轨迹分类 .....	6
1.4.3 按照伺服控制方式分类 .....	7
1.4.4 按照数控系统的功能水平分类 .....	8
1.5 数控机床的发展 .....	9
1.5.1 数控技术的产生与发展 .....	9
1.5.2 现代数控机床的发展趋势 .....	10
复习题 .....	13
第2章 数控程序编制 .....	14
2.1 数控编程概述 .....	14
2.1.1 数控编程的基本概念 .....	14
2.1.2 数控编程的内容和步骤 .....	14
2.1.3 数控编程的方法 .....	15
2.2 数控编程工艺基础 .....	16
2.2.1 数控加工准备 .....	16
2.2.2 数控加工工艺设计 .....	19
2.2.3 数控编程误差及控制 .....	23
2.3 数控编程技术基础 .....	24
2.3.1 数控编程标准 .....	24
2.3.2 数控编程相关坐标系 .....	24
2.3.3 数控程序的结构与格式 .....	27
2.3.4 数控编程的指令代码 .....	30
2.4 数控编程常用 G 指令 .....	34
2.4.1 参考点有关的 G 指令 .....	34
2.4.2 与坐标系有关的 G 指令 .....	36
2.4.3 坐标值与尺寸 G 指令 .....	38
2.4.4 插补运动 G 指令 .....	39
2.4.5 进给功能和主运动 G 指令 .....	47
2.4.6 刀具补偿功能 G 指令 .....	48

2.4.7 固定循环 G 指令 .....	56
2.5 车铣对刀过程 .....	72
2.5.1 车削对刀过程 .....	72
2.5.2 铣削对刀过程 .....	74
2.6 数控手工编程举例 .....	76
2.6.1 数控车削加工程序编制 .....	76
2.6.2 数控铣削加工程序编制 .....	80
2.6.3 数控孔加工程序编制 .....	83
2.6.4 加工中心综合编程实例 .....	84
2.7 宏指令与宏程序 .....	89
2.7.1 变量 .....	89
2.7.2 运算指令 .....	90
2.7.3 控制指令 .....	91
2.7.4 用户宏程序调用指令 .....	93
2.7.5 用户宏程序实例 .....	94
2.8 STEP-NC 编程 .....	96
2.8.1 STEP-NC 的产生背景 .....	96
2.8.2 STEP-NC 数控系统 .....	99
2.9 自动编程 .....	102
2.9.1 自动编程概述 .....	102
2.9.2 自动编程 CAD/CAM 系统简介 .....	103
2.9.3 自动编程的主要过程 .....	103
复习题 .....	106
<b>第 3 章 数控插补原理</b> .....	<b>107</b>
3.1 概述 .....	107
3.1.1 插补的基本概念 .....	107
3.1.2 插补方法的分类 .....	107
3.1.3 插补算法的评价指标 .....	108
3.2 基准脉冲插补 .....	109
3.2.1 逐点比较法 .....	109
3.2.2 数字积分法 .....	113
3.3 数据采样插补 .....	118
3.3.1 数据采样插补的基本原理 .....	118
3.3.2 数据采样法直线插补 .....	120
3.3.3 数据采样法圆弧插补 .....	121
3.3.4 高速高精采样插补技术 .....	123
3.3.5 数据采样法样条插补 .....	124
3.4 加减速控制 .....	128
3.4.1 加减速控制分类 .....	128

---

3.4.2 常用加减速曲线 .....	129
3.4.3 前加减速控制算法 .....	130
复习题 .....	133
<b>第4章 计算机数控(CNC)装置 .....</b>	<b>134</b>
4.1 概 述 .....	134
4.1.1 计算机数控系统 .....	134
4.1.2 CNC 装置的构成 .....	134
4.1.3 CNC 装置的工作原理 .....	135
4.1.4 CNC 装置的主要功能和特点 .....	137
4.2 CNC 装置的硬件构成 .....	140
4.2.1 大板式结构和功能模块式结构 .....	140
4.2.2 单微处理器结构和多微处理器结构 .....	140
4.2.3 专用型和个人计算机式结构的 CNC 装置 .....	149
4.2.4 开放式 CNC 装置 .....	150
4.3 CNC 装置的软件构成 .....	152
4.3.1 CNC 装置中软硬件的功能划分 .....	152
4.3.2 CNC 软件的特点 .....	153
4.3.3 CNC 软件的设计方法 .....	153
4.3.4 CNC 软件的结构模式 .....	156
4.3.5 CNC 软件的工作过程 .....	163
4.3.6 故障诊断 .....	172
4.4 CNC 装置的接口电路 .....	173
4.4.1 机床开关量及其接口 .....	174
4.4.2 串行通信及接口 .....	178
4.4.3 网络通信接口 .....	178
4.5 典型的数控系统简介 .....	179
4.5.1 FANUC0i 系列数控系统 .....	179
4.5.2 SINUMERIK 840D 系列数控系统 .....	181
4.5.3 PA8000 数控系统 .....	184
复习题 .....	188
<b>第5章 数控检测装置 .....</b>	<b>189</b>
5.1 概 述 .....	189
5.1.1 数控检测装置的性能指标 .....	189
5.1.2 检测装置的分类 .....	190
5.2 旋转编码器 .....	190
5.2.1 旋转编码器的类型 .....	190
5.2.2 增量式光电脉冲编码器 .....	191
5.2.3 绝对编码器 .....	195
5.3 光栅尺 .....	199

5.3.1	光栅尺的分类 .....	199
5.3.2	增量式直线光栅尺 .....	199
5.3.3	绝对光栅尺 .....	203
5.3.4	圆光栅 .....	204
5.4	激光干涉法位移测量 .....	205
5.4.1	激光干涉法测距原理(单频干涉) .....	205
5.4.2	双频激光干涉测量位移 .....	206
5.4.3	激光干涉位移测量技术的应用 .....	208
5.5	霍尔检测装置 .....	209
	复习题 .....	211
<b>第6章</b>	<b>数控伺服系统</b> .....	<b>213</b>
6.1	概述 .....	213
6.1.1	伺服系统的组成 .....	213
6.1.2	对伺服系统的基本要求 .....	214
6.1.3	伺服系统的分类 .....	215
6.2	伺服电动机 .....	216
6.2.1	直流伺服电机 .....	217
6.2.2	交流伺服电机 .....	221
6.2.3	直驱伺服电机 .....	224
6.2.4	数控机床伺服电机总结 .....	232
6.3	直流调速系统 .....	232
6.3.1	直流电机的调速原理 .....	232
6.3.2	直流进给驱动的速度控制 .....	233
6.3.3	直流主轴驱动的速度控制 .....	238
6.4	交流调速系统 .....	239
6.4.1	交流伺服电机的调速方法 .....	239
6.4.2	变频调速系统 .....	241
6.4.3	正弦脉宽调制变压变频器 .....	244
6.4.4	转差频率控制变频调速系统 .....	246
6.4.5	交流感应伺服电机的矢量控制 .....	248
6.4.6	交流永磁伺服电机的矢量控制 .....	257
6.4.7	无速度传感器的矢量控制 .....	258
6.4.8	直接转矩控制方式 .....	259
6.4.9	交流电动机各种调速方法性能比较 .....	261
6.5	全数字控制伺服系统 .....	261
6.6	典型伺服系统介绍 .....	262
6.6.1	西门子(Siemens)伺服系统 .....	262
6.6.2	发那科(Fanuc)伺服系统 .....	264
	复习题 .....	266



---

第7章 数控机床的机械结构	267
7.1 数控机床机械机构的组成和特点	267
7.1.1 数控机床机械机构的组成	267
7.1.2 数控机床机械机构的特点	268
7.2 数控机床典型布局形式	268
7.2.1 数控车床的布局形式	268
7.2.2 加工中心的布局形式	269
7.3 数控机床主传动系统	272
7.3.1 主传动的要求	272
7.3.2 主传动系统配置方式	272
7.3.3 主轴部件	274
7.4 数控机床进给传动系统	277
7.4.1 滚珠丝杠螺母副	277
7.4.2 传动齿轮间隙消除机构	280
7.5 数控回转工作台	282
7.5.1 数控回转工作台	282
7.5.2 分度工作台	282
7.6 数控机床导轨	285
7.6.1 数控机床对导轨的基本要求	285
7.6.2 数控机床导轨的类型与特点	285
7.7 自动换刀装置	288
7.7.1 回转刀架自动换刀装置	288
7.7.2 转塔式自动换刀装置	290
7.7.3 刀库式自动换刀	290
复习题	295
参考文献	297

# 第1章 概 论

## 1.1 基本概念

在现代机械制造领域中,数控机床与机床数控技术已经成为最基本概念之一。数控是数字控制(Numerical Control, NC)技术的简称,是用数字化代码实现自动控制技术的总称。根据不同的控制对象,存在各种数字控制系统,其中产生最早、应用最广的是机械制造行业中的各种机床数控系统。数控机床是采用数字化代码程序控制、能完成自动化加工的通用机床。例如,要求机床执行如下一条指令程序段:

**N003 G90 G01 X+325.927 Y+279.346 Z-429.732 S1000 T02 F500 M07;**

其含义为:第三个程序段,用2号刀具加工一条空间直线段,起点为坐标原点或上一程序段指令点,终点为程序段中给定的点(+325.927, +279.346, -429.732)。坐标值的计算以坐标原点为基准。还指明机床主轴转速为1 000 r/m,进给部件的运动速度为500 mm/min,且需将冷却液打开。从上面的程序段可以看出,它由数字0~9,文字X、Y、Z、S、T、F、M...,符号“+”“-”“.”...等组成,而这些都是要转换成“二进制”数字代码输入机床的数字控制装置(即控制机床的专用计算机)中去,经过计算机的计算处理、伺服控制、驱动机床各部件运动,完成上述空间直线段的加工。

数控机床是一种典型的光机电液一体化加工设备,它集现代机械制造技术、自动控制技术及计算机信息技术于一体,采用数控装置或计算机来全部或部分地取代了一般通用机床在加工零件时的各种人工控制动作——启动、加工顺序、改变切削用量、主轴变速、刀具选择、冷却液开停以及停车等,是高效率、高精度、高柔性和高自动化的光机电液一体化的加工设备。数控加工技术是指高效、优质地实现产品零件,特别是复杂形状零件在数控机床上完成加工的技术,它是自动化、柔性化、敏捷化和数字化制造加工的基础与关键技术。数控加工过程包括由给定零件的加工要求(零件图纸、加工数据或实物模型)到完成加工的全过程,首先要将被加工零件图纸上的几何信息和工艺信息用规定的代码和格式编写成加工程序,然后将加工程序输入数控装置,按照程序的要求,经过数控系统信息处理、分配,使各坐标移动若干个最小位移量,实现刀具与工件的相对运动,完成零件的加工。对编程者来讲,其主要工作涉及数控机床加工工艺和数控编程技术两大方面。采用数控机床加工零件涉及的范围比较广,与相关的配套技术有着密切的关系,程序编制人员应该熟练地掌握工艺分析、工艺设计和切削用量的选择。能够正确地提出刀辅具和零件的装夹方案,懂得刀具的测量方法,了解数控机床的性能和特点,熟悉程序编制方法和程序的输入方式等。

数控加工与通用机床加工在方法与内容上有许多相似之处,不同点主要表现在控制方式上。以机械加工为例,用通用机床加工零件时,就某道工序而言,其工步的安排,机床运动

的先后次序、位移量、走刀路线及有关切削参数的选择等,都是由操作工人自行考虑和确定的,且采用手工操作方式进行控制。如果采用自动车床、仿形铣床加工,虽然也能达到对加工过程实现自动控制的目的,但其控制方式是通过预先配制的凸轮、挡块或靠模来实现的。而在数控机床上加工时情况完全不同,在数控机床进行加工前,把在通用机床加工时需要操作工人考量的操作内容及动作,如工步的划分与顺序、走刀路线、位移量和切削参数等,按规定的数码形式编排程序,记录在控制介质上。加工时,控制介质上的数码信息输入数控机床的控制系统后,控制系统对输入信息进行运算与控制,并不断地向直接指挥机床运动的机电功能转换部件——机床的伺服机构发送信号,伺服机构对信号进行转换与放大处理,然后由传动机构驱动机床按所编程序进行运动,就可以自动加工出所要求的零件形状。不难看出,实现数控加工的关键在于编程,还包括编程前必须要做的一系列准备工作及编程后的后续处理工作。一般来说,数控加工主要包括以下几个方面的内容:

- ① 选择并确定进行数控加工的零件及内容;
- ② 对零件图纸进行数控加工的工艺分析;
- ③ 数控加工的工艺设计;
- ④ 对零件图形的工艺处理;
- ⑤ 编写加工程序单(自动编程时由计算机自动生成目标程序——加工程序);
- ⑥ 程序的校验与修改;
- ⑦ 受监视加工与现场问题处理;
- ⑧ 数控加工工艺技术文件的定型与归档。

## 1.2 数控机床的特点与应用

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优点,适合多变、复杂、精密零件的高效、自动化加工。具体说来,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。因此能适应当前市场竞争中对产品不断更新换代的要求,解决了多品种和中、小批量生产的自动化问题。

### 2. 加工精度高,质量稳定

数控机床采用了提高加工精度和保证质量稳定性的多种技术措施:

第一,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;

第二,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,采用滚珠丝杠、滚动导轨等高精度传动部件,且有刚度大、热稳定性和抗振性能好的特点;

第三,伺服传动系统的脉冲当量或最小设定单位可以达到  $10\ \mu\text{m} \sim 0.1\ \mu\text{m}$ ,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

高精度和稳定性;

第四,数控加工中心具有刀库和自动换刀装置,可以在一次装夹后,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。

第一,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;

第二,良好的结构刚度和抗振性允许机床采用大切削用量和强力切削;

第三,一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;

第四,机床移动部件在定位中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,大大节约辅助运动时间;

第五,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,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;

第六,加工工序集中,减少零件的周转,减少设备台数及厂房面积,给生产调度管理带来极大的方便。

### 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复杂形状的空间曲面,能方便地完成如螺旋桨、汽轮机叶片、汽车外形冲压用模具等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,并且可以使一个人轻松地管理多台数控机床。

### 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、精确地计算出零件的加工工时或进行自动加工统计,能够精确地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力的目的。

## 1.3 数控机床的组成

现代数控机床即计算机数字控制(Computer Numerical Control, CNC)机床,其组成如图1.1所示。

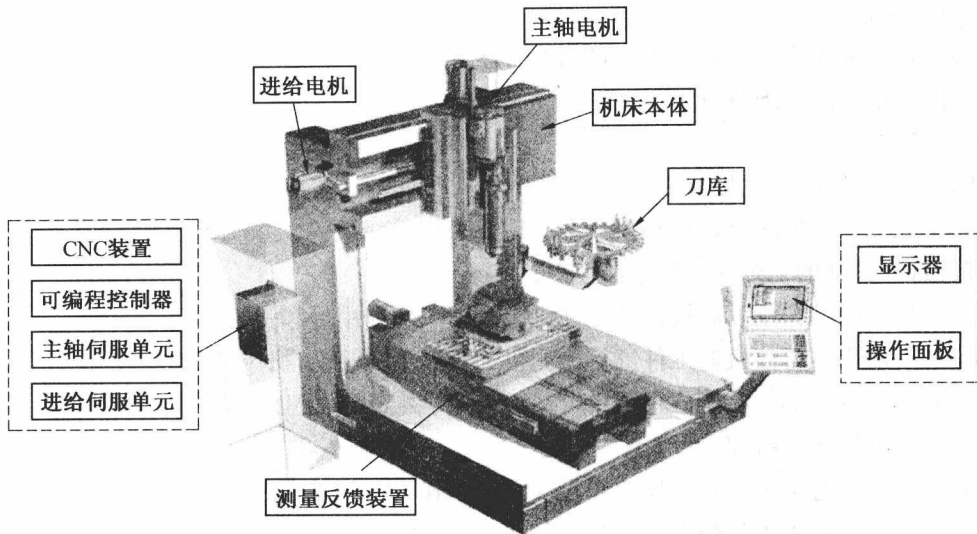


图 1.1 CNC 机床的组成

### 1. CNC 装置

CNC 装置是 CNC 系统的核心,由中央处理单元(CPU)、存储器、各种 I/O 接口及外围逻辑电路等组成,其主要作用是对输入的数控程序及有关数据进行存储与处理,通过插补运算等形成运动轨迹指令、控制伺服单元和驱动装置,实现刀具与工件的相对运动。对于离散的开关控制量,通过可编程逻辑控制器实现对机床电器的逻辑控制。

CNC 装置有单 CPU 和多 CPU 两种基本结构形式,随着 CPU 性能的不不断提高,CNC 装置的功能越来越丰富,性能越来越高,除了上述基本控制功能外,还有图形功能、通信功能、诊断功能、生产统计和管理功能等。

### 2. 可编程逻辑控制器

可编程逻辑控制器(Programmable Logical Controller, PLC)也是一种以微处理器为基础的通用型自动控制装置,又称为可编程控制器或可编程机床控制器,用于完成数控机床的各种逻辑运算和顺序控制,如机床启停、工件装夹、刀具更换、冷却液开关等辅助动作。PLC 还接受机床操作面板的指令,一方面直接控制机床的动作,另一方面将控制指令输送给 CNC,用于加工过程控制。

CNC 系统中的 PLC 有内置型和独立型。内置型 PLC 与 CNC 是综合在一起设计的,又称集成型,是 CNC 的一部分;独立型 PLC 由独立的专业厂生产,又称外装型。

### 3. 操作面板

数控机床的操作是通过人机操作面板实现的,人机操作面板由数控面板和机床面板组成。

数控面板是数控系统的操作面板,由显示器和手动数据输入(Manual Data Input, MDI)键盘组成,又称为 MDI 面板。显示器的下部常设有菜单选择键,用于选择菜单。键盘除各种符号键、数字键和功能键外,还设置用户定义键等。操作人员可以通过键盘和显示器实现系统管理,对数控程序及有关数据进行输入、存储和编辑。在加工中,屏幕动态地显示系统状态和故障诊断报警等。此外,数控程序及数据还可以通过磁盘或通信接口输入。

机床操作面板主要用于手动以及自动方式下对机床进行操作或干预。其上有各种按钮与选择开关,用于机床及辅助装置的启停、加工方式选择、速度倍率选择等;还有数码管及信号显示等。中、小型数控机床的操作面板常和数控面板做成一个整体,但二者之间有明显界限。数控系统的通信接口,如串行接口常设置在机床操作面板上。

#### 4. 进给伺服系统

进给伺服系统主要由进给伺服单元和伺服进给电机组成,对于闭环或半闭环控制的进给伺服系统,还包括位置检测反馈装置。进给伺服单元接收来自 CNC 装置的运动指令,经变换和放大后,驱动伺服电机运转,实现刀架或工作台的运动。CNC 装置每发出一个控制脉冲或最小控制量对应的机床刀架或工作台的移动距离称为数控机床的脉冲当量或最小设定单位,脉冲当量或最小设定单位的大小直接影响数控机床的加工精度。

在闭环或半闭环控制的伺服进给系统中,位置检测装置被安装在机床(闭环控制)或伺服电机(半闭环控制)上,其作用是将机床或伺服电机的实际位置信号反馈给 CNC 系统,以便与指令位移信号相比较,用其差值控制机床运动,达到消除运动误差、提高定位精度的目的。

一般说来,数控机床的功能主要取决于 CNC 装置,而数控机床的性能,如运动速度与精度等,则主要取决于伺服驱动系统。

#### 5. 主轴驱动系统

数控机床的主轴驱动与进给驱动的区别很大,主轴电机输出功率较大,一般为 2.2 ~ 250 kW;进给电机一般是恒转矩调速,而主电机除了有较大范围的恒转矩调速外,还要有较大范围的恒功率调速;对于数控车床,为了能够加工螺纹和实现恒线速控制,要求主轴和进给驱动能同步控制;对于加工中心,还要求主轴进行高精度准停和分度功能。因此,中、高档数控机床的主轴驱动都采用电机无级调速或伺服驱动,经济型数控机床的主传动系统与普通机床类似,仍需要手工机械变速,CNC 系统仅对主轴进行简单的启动或停止控制。

#### 6. 机床本体

数控机床机械结构的设计与制造要适应数控技术的发展,具有刚度大、精度高、抗振性强、热变形小等特点。由于普遍采用伺服电机无级调速技术,机床进给系统与主轴驱动系统的变速机构被大大简化,甚至取消;广泛地采用滚珠丝杠、滚动导轨等高效率、高精度的传动部件;采用机电一体化设计与布局,机床布局主要考虑有利于提高生产率,而不像传统机床那样,主要考虑操作方便;此外,还采用自动换刀装置、自动交换工作台和数控夹具等。

## 1.4 数控机床的分类

数控机床的品种、规格繁多,分类方法也很多,根据数控机床的功能和结构,一般按照以下四条原则进行分类。

### 1.4.1 按照加工工艺及机床用途分类

目前数控机床的品种规格已达五百多种,并且开发了一些特殊类型的数控机床,其加工用途、功能特点多种多样、五花八门。按照其基本用途,可以分为四大类。

#### 1. 金属切削类

这是数控机床的主要类型,它又可分为两类。

### (1) 普通数控机床

根据 GB/T 15375—1994 金属切削机床型号的编制方法,我国的金属切削机床划分为 11 大类,原则上每一类都可以配上数控系统,形成数控机床,如数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床等,其工艺用途与传统车床、铣床、钻床、磨床等基本相似。用通用特性代号“K”(读音为“控”)表示。

### (2) 加工中心

其主要特点是具有刀库和自动换刀装置,工件一次装夹后,可以进行多种工序加工,用通用特性代号“H”(读音为“换”)表示。主要有铣削加工中心、车削加工中心和磨削加工中心等。铣削加工中心出现得最早,一般简称加工中心,主要完成铣、镗、钻、攻丝等加工。车削加工中心以完成各种车削加工为主,还能利用自驱动刀具,完成铣平面、键槽及钻横孔等工序,一般简称车削中心。

## 2. 金属成形类

这类机床指使用挤、冲、压、拉等成形工艺的数控机床,如数控冲压机、剪板机、折弯机、弯管机和旋压机等。

## 3. 特种加工类

主要指数控电火花切割机床、电火花成形机床、火焰切割机床和激光加工机床等。

## 4. 测量绘图类

主要有三坐标测量机、绘图机和对刀仪等,其控制工作原理与数控机床基本相同。

### 1.4.2 按照机床运动的控制轨迹分类

根据数控机床刀具与工件相对运动轨迹的类型将数控机床划分为点位控制、直线控制和轮廓控制三种类型。

#### 1. 点位控制数控机床

这类机床主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床等,其特点是机床移动部件在移动中不进行加工,只要求以最快的速度从一点移动到另一点,并准确定位。至于点与点之间的移动轨迹(路径与方向),并无严格要求,各坐标轴之间的运动也不相关联。

#### 2. 直线控制数控机床

这类机床是在点位控制基础上,机床工作台或刀具(刀架)以要求的进给速度,沿着平行于坐标轴的方向进行直线移动和切削加工,能对单个机床坐标轴的移动速度进行控制,使数控车床、数控铣床和数控磨床等能完成简单的直线或 45° 斜线加工。直线控制也称单轴控制。

#### 3. 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床也称为连续控制数控机床,其特点是能够对两个或两个以上运动坐标的位移和速度同时进行连续控制,使刀具与工件间的相对运动符合工件加工轮廓的型面要求。轮廓加工控制(Contouring Control)包括加工平面曲线和空间曲线两种情况。对于平面(二维)的任意曲线的切削加工,将曲线分割成  $n$  个微线段,用直线(或圆弧)代替(逼近)这些微线段,当逼近误差相当小时,这些折线的连线就接近曲线。由数控机床的数控装置进行计算、分配,通过两个坐标最小单位量的单位运动( $\Delta x$ 、 $\Delta y$ )的合成,连续控制刀具运动,不偏离地走出直线(或圆弧),从而非常逼真地加工出平面曲线。对于空间(三维)曲线中的

$f(x, y, z)$ , 同样可用微小线段( $\Delta l_i$ )去逼近它, 只不过这时  $\Delta l_i$  的单位运动分量不仅是  $\Delta x$  和  $\Delta y$ , 还有一个  $\Delta z$ 。

这种在允许的误差范围内, 用沿曲线(精确地说, 是沿逼近函数)的最小单位移动量合成的分段运动代替给定曲线运动, 以得出所需要的运动, 是数字控制的基本构思之一。轮廓控制也称连续轨迹控制(Continuous Path Control), 它的特点是不仅对坐标的移动量进行控制, 而且对各坐标的速度及它们之间的比率都要严格控制, 以便加工出给定的轨迹。目前, 大多数金属切削机床的数控系统都是轮廓控制系统。

对于轮廓控制的数控机床, 根据同时控制坐标轴的数目, 还可以分为两轴联动、两轴半联动、三轴联动、四轴联动、五轴联动等, 如图 1.2 所示。

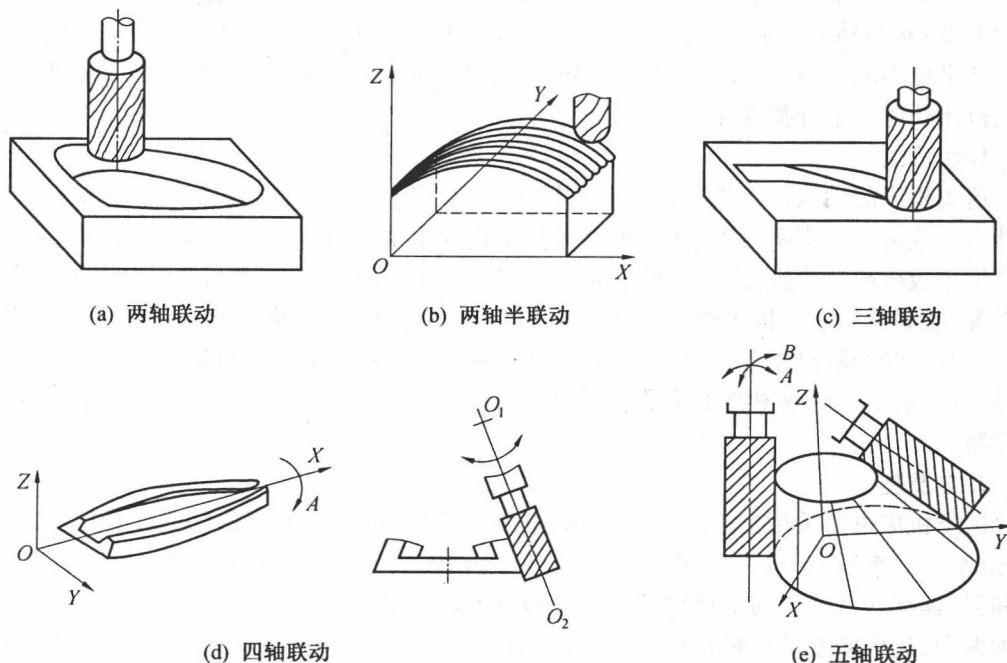


图 1.2 数控加工的联动坐标

### 1.4.3 按照伺服控制方式分类

数控机床伺服驱动控制方式很多, 主要有开环控制、闭环控制和半闭环控制三种类型, 此外, 还有开环补偿型和半闭环补偿型等混合控制。

#### 1. 开环控制数控机床

这类机床的伺服进给系统中, 没有位移检测反馈装置, 数控装置的控制指令直接通过驱动装置控制步进电机的运转, 然后通过机械传动系统转化成刀架或工作台的位移。这种控制系统由于没有检测反馈校正, 所以位移精度一般不高, 但其控制方便、结构简单、价格便宜, 在我国广泛用于经济型数控机床或旧设备的数控改造中。

#### 2. 闭环控制数控机床

闭环控制数控机床又称全闭环控制机床, 其检测装置被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(线位移或者角位移), 并将其与 CNC 装置的指令位置相比较, 用差值进行控制。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和机床工作台等这些大惯量环节放在闭环之内,因此,系统稳定性受各种因素影响较大,调试困难,且结构复杂、价格昂贵。

### 3. 半闭环控制数控机床

这类机床的位置检测元件被安装在伺服电机上,通过测量伺服电机的角位移,间接计算出机床工作台等执行部件的实际位置,再进行反馈控制。由于将丝杠螺母副和机床工作台等大惯量环节排除在闭环控制系统外,不补偿它们的运动误差,因此控制精度受到影响,但系统稳定性有所提高,调试比较方便,价格也较全闭环系统便宜。

#### 1.4.4 按照数控系统的功能水平分类

按照数控系统的功能水平,数控机床分为经济型(低档型或简易型)、普及型(中档型或全功能型)和高档型三种。这种分类方法没有明确的定义和确切的分类界限,不同国家分类的含义也不同,且数控技术在不断发展,不同时期的含义也在不断变化。以下论述仅作为数控机床功能水平分类的参考。

##### 1. 经济型

这类机床的伺服进给驱动是由步进电机实现的开环驱动,控制轴数为三轴或三轴以下,脉冲当量或进给分辨率为 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ ,快速进给速度小于 $10 \text{ m/min}$ 。系统的微机系统早期多为8位单板机或单片机,用数码管显示,一般不具备通信功能。这类机床结构比较简单、精度中等,能满足加工形状比较简单的直线、斜线、圆弧及螺纹,价格比较便宜。如经济型数控车床、铣床、线切割机床等,在我国应用比较普遍。其发展趋势已逐渐被16位或32位微处理器取代,采用字符或图形显示器,并采用低价位的交流伺服电机代替步进电机,实现半闭环控制。

##### 2. 普及型

这类机床进给采用交流或直流伺服电机实现半闭环驱动,实现四轴或四轴以下联动控制,进给分辨率为 $1 \mu\text{m}$ 左右,快速进给速度可达 $10 \sim 20 \text{ m/min}$ ,一般采用16位或32位微处理器,具有RS232等通信接口、图形显示功能及面向用户的宏程序功能。此类数控机床品种繁多,几乎覆盖了各种机床类别,其发展趋势为简单、实用,不追求过多功能,且价格适当。

##### 3. 高档型

这是指加工复杂形状的多轴联动的加工中心,功能强、工序集中、自动化程度高,具有高柔性。一般采用32位以上微处理器的多CPU结构,采用数字化交流伺服电机,进行闭环驱动控制,并开始使用直线伺服电机。具有主轴伺服功能,能实现五轴以上联动,最高分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$ ,最大驱动速度为 $100 \text{ m/min}$ 以上;具有三维动画功能,能进行加工仿真检验和友好的图形用户界面。同时具有多功能智能监控系统和面向用户的宏程序功能,有很强的智能诊断和智能工艺数据库,能实现加工条件的自动设定,且能实现计算机的网络通信,具有制造自动化协议等高性能通信接口。这类机床功能强大、价格昂贵,如五轴联动的数控机床,大、重型数控机床,五面体加工中心,车削中心和柔性加工单元等。