



# 数控机床 原理与结构

■ 熊军 主编 ■ 陈红江 祝红芳 张武奎 副主编



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



高等职业教育  
机电系列教材

公差配合与检测技术	陈舒拉
公差配合与测量技术	刘 华
液压与气动技术	谢仁明
AutoCAD 2006 实用教程	郑 金
PLC及其在数控机床中的应用	祝红芳
数控机床维修与调整	熊 军
<b>数控机床原理与结构</b>	熊 军
数控加工与编程	顾 晔
数控加工技术及编程	杨 洋

封面设计：董志栋

人民邮电出版社网址：[www.ptpress.com.cn](http://www.ptpress.com.cn)

ISBN 978-7-115-16218-2



9 787115 162182 >

ISBN 978-7-115-16218-2/TN

定价：29.00 元

高等职业教育机电系列教材

# 数控机床原理与结构

熊 军 主 编

陈红江 祝红芳 张武奎 副主编

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床原理与结构/熊军主编; 陈红江, 祝红芳, 张武奎副主编. —北京: 人民邮电出版社, 2007.9

(高等职业教育机电系列教材)

ISBN 978-7-115-16218-2

I. 数... II. ①熊...②陈...③祝...④张... III. ①数控机床—理论—高等学校: 技术学校—教材 ②数控机床—结构—高等学校: 技术学校—教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 100264 号

### 内 容 提 要

本书在简要说明数控技术的基本概念、轨迹控制(插补)原理的基础上,介绍了数控装置的硬件结构、组成、工作原理,数控机床各组成部分的结构原理,数控系统中的检测技术和伺服控制技术以及数控机床机械部件的构成特点、调整方法等。利用电气控制系统这条主线,把数控机床各组成部分有机地串连起来,并通过“数控机床设计入门”这一章的说明,使初学者建立一个数控机床控制的整体概念,以便较快地掌握数控机床各组成部分的结构原理。

本书适合高职高专院校、高级技校、机电、数控、电气类各专业使用,也可供相关领域工程技术人员参考。

高等职业教育机电系列教材

### 数控机床原理与结构

- 
- ◆ 主 编 熊 军  
副 主 编 陈红江 祝红芳 张武奎  
责任编辑 潘新文
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 [315@ptpress.com.cn](mailto:315@ptpress.com.cn)  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷  
新华书店总店北京发行所经销
  - ◆ 开本 787×1092 1/16  
印张 19.5  
字数 473 千字 2007 年 9 月第 1 版  
印数 1—3 000 册 2007 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-16218-2/TN

定价: 29.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223

# 前 言

制造自动化是先进制造技术的重要组成部分，其核心技术是数控技术。随着数控技术的发展，我国的机械制造行业发生了日新月异的变化，国内数控机床的用量迅速增加。因此，亟须培养一大批熟悉并掌握数控加工工艺、数控机床原理、操作和维护的应用型高级技术人才。为深化教育改革，推动高等教育的发展，培养与我国现代化建设相适应的、在制造领域中从事技术应用的应用型人才，我们在总结机械类专业技术人才培养模式的基础上编写了本教材。

本书以实际应用为出发点，以全面学习掌握数控原理与应用为目的，系统阐述了数控技术的基本概念、轨迹控制（插补）原理；数控装置的硬件结构、组成、工作原理；数控机床各组成部分的结构原理；数控系统中的检测技术和速度位移的伺服控制技术，并通过电气控制系统把数控机床各组成部分有机地串连起来，注重实际应用，通俗易懂，使读者更容易接受与理解，易于自学。

本书注重培养读者应用多学科知识分析问题的能力及机电系统综合设计应用能力，从而提高解决实际问题 and 自主分析问题的能力。在本书最后一章介绍数控系统设计，以便于读者在读完全书之后，对于数控设备的控制有一个更为深刻而又统筹全局的理解。

本书的读者对象为高等职业院校机电类专业中数控技术应用、CAD/CAM 技术应用和模具设计与制造专业的学生，以及数控加工技术人员。

本书第 1 章由江西工业职业技术学院祝红芳编写，第 2 章由江铃拖拉机有限公司涂晓金编写，第 3、6 章由江西科技师范学院陈红江编写，第 9 章由江西科技师范学院王广庆编写，第 4 章由山西综合职业技术学院张武奎编写，其余章节均由熊军编写，全书由熊军统稿。本书在编写的过程中参考并引用了有关文献资料和插图等，在此对其作者表示由衷的感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者和各位同仁提出宝贵意见并批评指正。

编 者  
2007 年 8 月

# 目 录

<b>第 1 章 数控技术原理</b> .....	1
1.1 数控装置加工原理.....	1
1.1.1 数控加工技术基础.....	1
1.1.2 数控装置的插补原理.....	2
1.1.3 插补方法的分类.....	5
1.1.4 评价插补算法的指标.....	7
1.1.5 刀具半径补偿.....	8
1.2 数控系统的硬件组成.....	12
1.2.1 数控系统的硬件结构.....	12
1.2.2 辅助控制接口模块.....	16
1.2.3 数控系统的 PLC.....	17
1.2.4 位置控制模块（伺服系统）.....	19
1.2.5 功能接口模块.....	21
1.3 数控装置的技术特征.....	21
1.3.1 CNC 装置.....	21
1.3.2 NC、CNC、SV 与 PLC.....	23
1.3.3 现代数控技术的特征.....	24
复习与思考题.....	26
<b>第 2 章 数控机床基础</b> .....	27
2.1 数控机床的组成及分类.....	27
2.1.1 数控机床的组成.....	27
2.1.2 数控机床的分类.....	30
2.2 数控机床的电气控制系统.....	38
2.2.1 数控系统的电气控制.....	39
2.2.2 数控机床的电气控制.....	40
2.3 国内外数控机床的现状.....	45
2.3.1 国外数控机床的发展与现状.....	45
2.3.2 我国数控机床的现状.....	46
2.4 数控机床的发展趋势.....	47
2.4.1 高速、高效、高精度与高可靠性.....	48
2.4.2 复合化、多轴化、柔性化、网络化、智能化与绿色化.....	49
2.4.3 新型功能部件.....	52

2.4.4 重视新技术标准、规范的建立	52
复习与思考题	53
<b>第3章 数控机床的主体结构</b>	<b>54</b>
3.1 数控机床的特点	54
3.1.1 数控机床的加工特点	54
3.1.2 数控机床的结构特点	55
3.2 数控机床的结构要求	55
3.2.1 较高的结构刚度	55
3.2.2 良好的抗振性能	60
3.2.3 低速进给运动的平稳性和运动精度	62
3.2.4 减小机床的热变形	64
3.3 床身	65
3.3.1 床身结构	65
3.3.2 床身截面形状	66
3.3.3 床身的刚度	67
3.4 导轨副	68
3.4.1 数控机床对导轨的要求	68
3.4.2 数控机床上导轨的种类	69
3.5 数控机床的总体布局	74
3.5.1 总布局与工件形状、尺寸和质量的关系	75
3.5.2 运动分配与部件的布局	76
3.5.3 总体布局与机床结构性能	77
3.5.4 自动换刀数控卧式镗铣床(加工中心)的总布局	79
3.5.5 机床的使用要求与总布局	80
3.5.6 数控机床总布局的其他趋向	81
复习与思考题	82
<b>第4章 数控机床的主传动系统</b>	<b>83</b>
4.1 主传动系统的要求	83
4.1.1 主传动系统的要求	83
4.1.2 主传动变速的配置	84
4.2 主轴部件结构	87
4.2.1 主轴本体	87
4.2.2 主轴部件的支承	88
4.2.3 刀具自动夹紧和吹屑装置	91
4.2.4 主轴的润滑与密封	92
4.2.5 主轴准停装置	95
4.3 典型机床主轴的结构	100

4.3.1 数控车床的主轴部件	100
4.3.2 自动换刀数控铣床的主轴部件	102
复习与思考题	105
<b>第5章 数控机床的进给系统</b>	<b>106</b>
5.1 进给系统的要求	106
5.2 齿轮与联轴器传动	108
5.2.1 齿轮传动	108
5.2.2 齿轮传动结构间隙的消除	108
5.2.3 联轴器传动	111
5.3 滚珠丝杠螺母副	115
5.3.1 滚动螺旋副的工作原理与特点	115
5.3.2 滚珠的循环方式	116
5.3.3 滚珠丝杠的选定	118
5.3.4 滚珠丝杠的支承结构	120
5.3.5 垂直安装滚珠丝杠的制动	125
5.3.6 滚珠丝杠副的防护及润滑	125
5.3.7 滚珠丝杠安装示例	126
5.4 静压丝杠螺母副	129
5.4.1 工作特点和原理	129
5.4.2 结构	130
5.4.3 控制方式	131
5.5 双导程蜗杆蜗轮副	131
5.5.1 双导程蜗杆蜗轮副的特点	132
5.5.2 双导程蜗杆蜗轮副的工作原理	132
5.5.3 双导程蜗杆蜗轮副的间隙调整结构	133
5.5.4 双导程渐开线蜗杆齿轮传动	133
5.6 静压蜗杆蜗条副	133
5.6.1 静压蜗杆蜗条副的工作原理	134
5.6.2 静压蜗杆蜗轮条副的特点	134
5.6.3 静压蜗杆蜗轮条副的材料	135
5.6.4 传动方案	135
5.7 直线电动机驱动	136
5.7.1 直线电动机的工作原理	136
5.7.2 直线电动机的分类	137
5.7.3 结构与工作方式	139
复习与思考题	140



<b>第 6 章 工作台与自动换刀系统</b> .....	141
6.1 分度工作台.....	141
6.1.1 插销定位的分度工作台.....	141
6.1.2 齿盘定位的分度工作台.....	142
6.1.3 多齿盘分度工作台.....	144
6.1.4 带有交换托盘的分度工作台.....	146
6.2 数控回转工作台.....	148
6.2.1 开环数控回转工作台.....	148
6.2.2 闭环数控回转工作台.....	150
6.2.3 双导程蜗杆传动.....	150
6.3 刀架换刀装置.....	152
6.3.1 自动换刀装置的形式.....	152
6.3.2 回转刀架换刀装置.....	152
6.3.3 多主轴转塔头换刀装置.....	156
6.3.4 排刀式刀架.....	158
6.4 刀库自动换刀系统.....	159
6.4.1 刀库的形式.....	159
6.4.2 刀具选择形式.....	165
6.4.3 刀具交换装置.....	167
6.4.4 机械手结构原理.....	169
6.4.5 动力刀具的结构.....	173
6.5 辅助机构.....	174
6.5.1 润滑系统.....	174
6.5.2 冷却系统.....	174
6.5.3 排屑装置.....	174
6.5.4 过载保护、超程限位和回机床参考点装置.....	176
复习与思考题.....	176
<b>第 7 章 数控机床的伺服系统</b> .....	177
7.1 进给伺服系统.....	177
7.1.1 进给伺服系统的技术要求.....	177
7.1.2 按系统结构分类的伺服系统.....	179
7.1.3 按驱动方式分类的伺服系统.....	181
7.2 步进伺服驱动系统.....	183
7.2.1 步进电动机的结构类型.....	183
7.2.2 步进电动机的工作原理.....	185
7.2.3 反应式步进电机的主要性能指标.....	187
7.2.4 驱动控制系统组成.....	190

7.2.5 步进电动机驱动控制技术	191
7.2.6 步进电机的应用	195
7.3 直流伺服驱动系统	196
7.3.1 SCR 速度控制系统	197
7.3.2 PWM 速度控制系统	198
7.4 交流伺服驱动系统	200
7.4.1 交流伺服系统的特点	201
7.4.2 模拟式交流伺服控制系统	202
7.4.3 数字式交流伺服系统	203
7.5 主轴驱动系统	206
7.5.1 直流主轴驱动系统	206
7.5.2 交流主轴驱动系统	207
7.5.3 主轴定向准停的控制	209
复习与思考题	210
<b>第 8 章 位置检测装置</b>	<b>211</b>
8.1 位置检测装置的要求和分类	211
8.1.1 对检测装置的要求	211
8.1.2 检测装置的类型	211
8.2 常用位置检测装置	213
8.2.1 旋转变压器	213
8.2.2 感应同步器	217
8.2.3 脉冲编码器	226
8.2.4 光栅	231
8.2.5 磁栅	235
复习与思考题	239
<b>第 9 章 数控机床液压与气动系统</b>	<b>240</b>
9.1 液压系统的组成	240
9.1.1 能源部分	240
9.1.2 执行机构部分	241
9.1.3 控制部分	242
9.1.4 辅件部分	242
9.2 数控机床典型的液压回路分析	242
9.2.1 MJ-50 数控车床液压系统	242
9.2.2 CK3225 数控车床液压系统	244
9.2.3 VP1050 加工中心液压系统	246
9.2.4 TH6350 卧式加工中心液压系统	248
9.3 数控机床上液压系统的维护	251

9.3.1 液压系统的维护要点	251
9.3.2 维护、保养计划的安排	252
9.4 数控机床上典型气压回路的分析	254
9.4.1 H400型卧式加工中心气动系统	254
9.4.2 数控车床用真空卡盘	258
9.4.3 HT6350卧式加工中心气压系统	259
9.4.4 数控加工中心气动换刀系统	260
复习与思考题	261
<b>第十章 数控机床设计入门</b>	<b>263</b>
10.1 数控机床的结构设计	263
10.2 数控系统设计	263
10.2.1 数控系统的结构特点	264
10.2.2 微机系统	266
10.2.3 数控系统的软件设计	267
10.2.4 数控系统的硬件设计	274
10.3 步进电机驱动电路设计	275
10.3.1 输入/输出通道	276
10.3.2 进给驱动电路设计	277
10.3.3 单片机系统与步进电机驱动器之间的接口方法及方向控制	278
10.3.4 步进电机的速度控制	280
10.3.5 步进电机的点位控制	281
10.3.6 步进电机的加减速控制	282
10.4 主轴驱动电路设计	286
10.4.1 系统设计方案	286
10.4.2 主轴准停(M19)	292
10.4.3 自动换刀	293
10.5 电气控制电路设计	294
10.5.1 CK6142数控车床的电气控制要求	294
10.5.2 CK6142数控车床的电气控制方案设计	294
<b>参考文献</b>	<b>302</b>

# 第 1 章 数控技术原理

数控技术，简称数控（Numerical Control, NC），是利用数字化信息对机械运动及加工过程进行控制的一种方法。由于现代数控都采用了计算机进行控制，因此，也可以称为计算数控（Computerized Numerical Control, CNC）。

为了对机械运动及加工过程进行数字化信息控制，必须具备相应的硬件和软件。用来实现数字化信息控制的硬件和软件的整体称为数控系统（Numerical Control System），数控系统的核心是数控装置（Numerical Controller）。

## 1.1 数控装置加工原理

数控装置是一种控制系统，它自动阅读输入载体上预先给定的数字值，对其译码、运算，并据此而控制刀具与工件的相对运动，从而加工出所需要的零件。数控装置工作原理如图 1-0 所示。

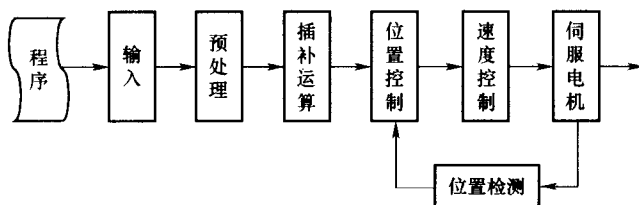


图 1-0 数控装置工作原理

金属切削机床依据加工程序，不断改变刀具与工件之间相对运动的参数（位置、速度等），用刀具对工件进行切削加工，最终得到所需要的合格零件。机床数字控制的核心问题，是如何控制刀具或工作台正确运动从而加工出合格的产品。

### 1.1.1 数控加工技术基础

在数控机床上，加工过程中的人工操作均被数控装置所取代。其工作过程如下：数控装置首先要将被加工零件图上的几何信息和工艺信息数字化，即将刀具与工件的相对运动轨迹用代码按规定的规则和格式编成加工程序，然后发出控制命令，使各进给轴、主轴以及辅助机构相互协调运动，实现刀具与工件的相对运动，自动完成零件的加工。

例如加工如图 1-1 所示的零件，其形状用曲线  $L$  描述。加工该零件时，就要控制刀具  $T$  相对于该零件按轨迹曲线  $L$  运动。数控装置运算和处理的核心过程有以下 3 步。

#### 1. 逼近处理

首先对曲线  $L$  进行逼近处理，即按系统的插补时间  $\Delta t$  和加工所要求的进给速度  $F$ ，将  $L$

分割成若干短直线  $\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_i, \dots$ , 这里:

$$\Delta L_i = F\Delta t \quad (i = 1, 2, \dots)$$

则当  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 折线段之和接近曲线  $L$ , 即:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=0}^{\infty} \Delta L_i = L$$

当  $F$  为常数时, 由于  $\Delta t$  对于一个数控装置而言恒为常数, 故  $\Delta L_i$  的长度也为常数, 只不过其斜率与在  $L$  上的位置有关。

### 2. 插补运算

在计算出  $\Delta L_i$  后, 必须将其分解为  $X$  轴及  $Y$  轴移动分量  $\Delta X_i$  和  $\Delta Y_i$  (在  $\Delta t_i$  时间内), 它们将随着  $\Delta L_i$  在  $L$  上位置的不断变化而变化, 但它们满足:

$$\Delta L_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$$

且有:  $F_x = \Delta x_i / \Delta t$        $F_y = \Delta y_i / \Delta t$

由于  $\Delta L_i$  的斜率是不断变化的, 因此进给速度在  $X$  方向及  $Y$  方向的分量  $F_x$  与  $F_y$  以及它们之间的比值都在不断变化。

### 3. 指令输出

将计算出的  $\Delta t$  时间内的  $\Delta X_i$  和  $\Delta Y_i$  作为指令输出给  $X$  轴和  $Y$  轴, 以控制它们联动。由此可知, 只要能连续地控制  $X$ 、 $Y$  两个进给轴在  $\Delta t$  时间内的移动量, 就可以实现曲线轮廓零件的加工。

## 1.1.2 数控装置的插补原理

从自动控制的角度来看, 数控系统是一种轨迹控制系统, 即其本质上是以多个执行部件 (各运动轴) 的位移量为控制对象并使其协调运动的自动控制系统, 是一种配有专用操作系统的计算机控制系统。

组成零件轮廓的基本线型是直线和圆弧, 一些复杂的曲线、曲面经过适当处理后, 也可以用直线和圆弧去逼近、拟合。因此在数控加工时, 数控系统根据加工程序中的相关数据信息 (如零件上几何要素的起点坐标、终点坐标、圆心坐标、圆弧半径等), 把刀具与工件的运动坐标分割成一些最小的单位量, 即最小位移量, 由数控系统按照零件程序的要求, 使坐标移动若干个最小位移量 (即控制刀具运动轨迹), 从而实现刀具与工件的相对运动, 完成对零件加工。刀具沿各坐标轴的相对运动, 是以脉冲当量  $\delta$  为单位的 (毫米/脉冲—最小位移量)。同时, 通过系统内规定的运算, 把拟合后的轮廓轨迹计算出来, 并且一边计算, 一边根据计算结果向有关坐标轴分配脉冲等指令信号, 伺服机构则将这些指令信号进行放大后驱动执行电机, 使刀具或工作台沿着有关坐标轴运动, 逐步加工出既定的轮廓形状来。

对于轮廓控制系统来说, 最重要的功能便是插补功能, 这是由于插补运算是在机床运动过程中实时进行的, 即在有限的时间内, 必须对各坐标轴实时地分配相应的位置控制信息和速度控制信息。轮廓控制系统正是因为有了插补功能, 才能加工出各种形状复杂的零件。可

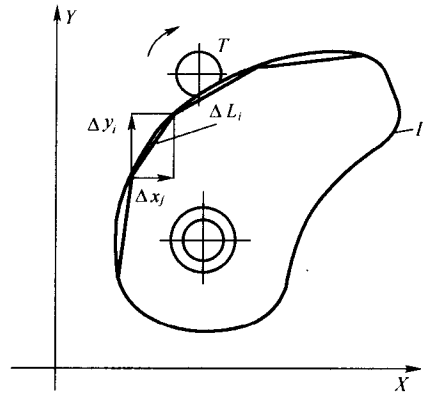


图 1-1 数控加工过程

以说,插补功能是轮廓控制系统的本质特征。因此,插补算法的优劣,将直接影响 CNC 系统的性能指标。

### 1. 插补的基本概念

当走刀轨迹为直线或圆弧时,数控装置则在线段的起点和终点坐标值之间进行“数据点的密化”,求出一系列中间点的坐标值,然后按中间的坐标值,向各坐标输出脉冲数,保证加工出需要的直线或圆弧轮廓。

数控装置进行的这种“数据点的密化”称作插补,一般数控装置都具有对基本函数(如直线函数和圆函数)进行插补的功能。对任意曲面零件的加工,必须使刀具运动的轨迹与该曲面完全吻合,才能加工出所需的零件。例如,欲加工如图 1-1 所示的轮廓为任意曲线  $L$  的零件,可将曲线  $L$  分成  $\Delta L_0, \Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_{0i}$  等线段,设切削  $\Delta L_i$  的时间为  $\Delta t_i$ ,当  $\Delta L_i \rightarrow 0$ ,即把曲线划分的段数越小,刀具运动的轨迹越逼近曲线  $L$ ,即

$$\lim_{\Delta L_i \rightarrow 0} \sum \Delta L_i = L$$

在  $\Delta t_i$  时间内,刀具在各坐标的位移量为  $\Delta X_i$  和  $\Delta Y_i$ , 因此有:

$$\Delta L_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2}$$

进给速度:

$$v_i = \sqrt{\left(\frac{\Delta X_i}{\Delta t_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y_i}{\Delta t_i}\right)^2} = \sqrt{\Delta v_{X_i}^2 + \Delta v_{Y_i}^2}$$

当加工直线时,  $\Delta L_i$  的斜率不变,各坐标轴的速度分量的比值  $\Delta v_{X_i}^2 / \Delta v_{Y_i}^2$  不变,因此进给速度  $v_i$  可持常量。

当加工任意曲线时,  $\Delta L_i$  的斜率不断变化,  $\Delta v_{X_i}^2 / \Delta v_{Y_i}^2$  的比值也不断变化。只要能连续地自动控制两个坐标方向上运动速度的比值,便可实现任意曲线零件的加工。

实际上,在数控机床上加工任意曲线  $L$  的零件,是由该数控装置所能处理的基本数学函数来逼近的,例如用直线、圆等。当然,逼近误差必须满足零件图样的要求。

图 1-2 所示为用直线逼近一任意曲线  $L$  的情况。只要求出节点  $a, b, c, \dots$  的坐标值,按节点写出直线插补程序,数控装置则进行节点间“数据点的密化”,并向各坐标轴分配脉冲数,控制刀具完成该直线段的加工。逼近误差应满足零件公差要求,即  $\delta_{\min} < \delta$ 。

按加工工艺,机械零件的加工可分为两大类:旋转体零件加工和箱体零件加工。通常,刀具相对工件的切削运动是按照零件图样编排加工程序,依照工艺规程中的工件装夹方式和机床刀具相对于工件的切削运动予以保证的。旋转体(图 1-3 (a))多在车床、磨床上加工。箱体零件(图 1-3 (b))则在铣、镗、钻等机床上加工。当零件被加工面含有斜、锥或曲面时,数控机床则依靠预先编排好的程序指令,以数值计算方法密化起始点至终止点间给出的数学特征方程式或离散点之间的小线段,以插值方法完成刀具应走的轨迹,从而达到工艺要求。这个过程叫做“插补”,完成“插补”功能的装置叫做“插补器”。

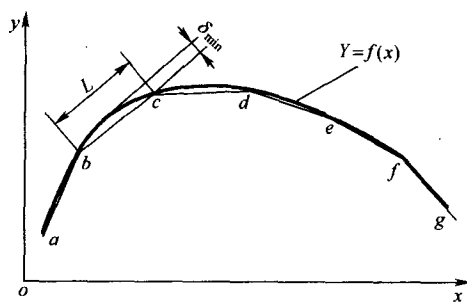


图 1-2 用直线逼近曲线

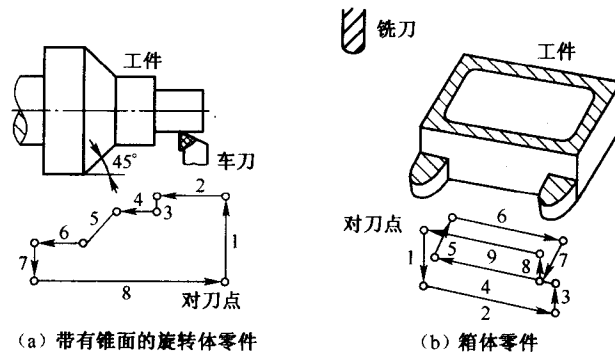


图 1-3 机械零件分类图

## 2. 加工运动轨迹的形成

在车削时，通过两个轴联合行动则可形成斜面或曲面，但在加工箱体零件曲面时，至少要有 3 个坐标相配合运动，如图 1-4 (a) 的零件，为  $X$ - $Y$  两坐标联动在车床上形成曲面回转体，而图 1-4 (b) 零件除在  $X$ - $Y$  两个坐标上联动外，还要  $Z$  轴配合才可能加工出马鞍形。由此可见，有些曲面可以用两轴联动而第 3 轴控制加工出来，有些则要三轴联动或三轴以上联动。

从数学的观点来看，有些曲线或曲面可以用特征方程式表达，如圆、双曲线、摆线、渐开线、抛物线、悬链线等方程式可以很准确地将曲线描述出来。但是，有些随机曲线、曲面只能给出一些离散点的坐标值，而无法用特征方程式描述。这时，就采用牛顿-莱布尼兹数值算法或样条法插值，以求得定义域之间的密化点。

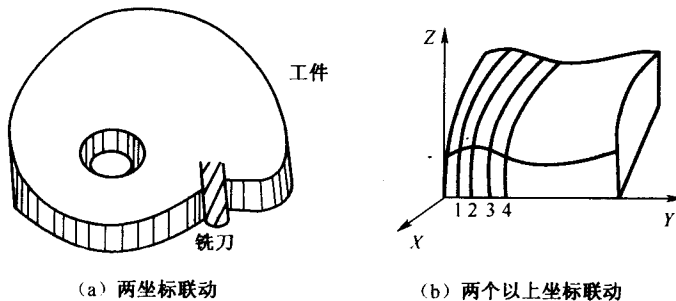


图 1-4 多轴联动加工图

从数控的观点来看，无论上述哪类曲线或曲面，都要以二进制的逻辑代数为基础，以开关电路为依托，实现全过程控制。也就是说，开关电路的“闭合”或“开启”两种状态可以用“0”或“1”代表。这些开关电路被称为“门”电路，是一系列的开关晶体管组成各类触发器进而构成集成电路来完成的，诸如十翻二的运算、加“1”运算、译码及逻辑推理运算等功能。软件应能完成输入数据的处理功能，包括数据输入、校验、换码、十进制/二进制数转换、绝对值/增量值转换、插补和速度控制前的预备性运算以及插补运算和速度运算等。

例如：加工某一有任意曲线  $L$  的零件，见图 1-5，其加工过程如下。

刀具在  $X$ - $Y$  平面内沿  $L$  曲线（即零件的轮廓线）而运动，刀具中心对零件被加工后表面的垂直距离应为刀具半径与吃刀深度  $t$  之和，显然，刀具沿  $L$  工作进给一周后，即可得到符合图

样要求的零件。如果把  $L$  曲线用点 1、2、3、 $\dots$ 、 $n$  分隔成  $\Delta l_0$ 、 $\Delta l_1$ 、 $\Delta l_2$ 、 $\dots$ 、 $\Delta l_n$  等小线段时，设  $\Delta t_n$  为加工  $\Delta l_n$  总和线段的切削时间，显然， $\Delta t \rightarrow 0$  时，折线线段之总和将逼近  $L$  曲线，即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \Delta l_i = L$$

式中， $n$ ——给定的切削用量中的某一进给速度。

当  $v_n = \text{常数}$  (const) 时， $v_n$  的  $X$ 、 $Y$  两个坐标的分量，即  $\Delta X_n$  与  $\Delta Y_n$  的比率随曲线斜率而变化。换言之，必须控制  $\Delta X_n$  与  $\Delta Y_n$  的比率，使它符合于曲线  $L$  每点的斜率即可。

由此可推知，若  $\Delta v_n = \sqrt{\left(\frac{\Delta X_n}{t_n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y_n}{t_n}\right)^2} = \text{Const}$  时，则插补轨迹为一固定斜率的直线，

我们称之为直线插补。

在曲线加工时，则因  $\Delta l_i/\Delta t$  之比率不断变化，因此，只要能连续地自动控制  $X$ 、 $Y$  两个坐标方向上运动速度的比值，就可以加工出曲线零件的轮廓来。

有些更为复杂的零件，如汽轮机叶片或机翼浆叶等变截面曲面的加工则要控制多轴联动，使刀具的刀尖按数学规律导向。显然，所有的数学规律计算处理均要转化为计算机所能接受的计算程序，由微处理器去处理，获得的结果输出给伺服系统，就完成了这种复杂曲面的加工。

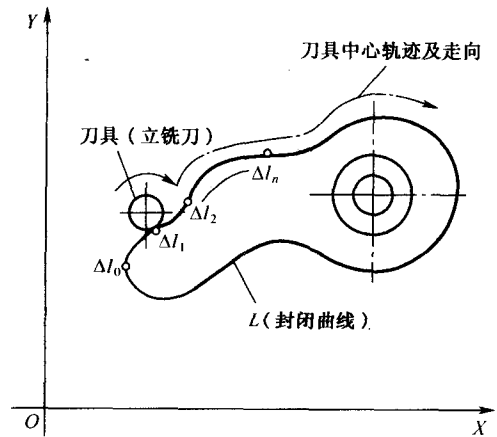


图 1-5 数控加工基本原理图

以上所述是能够完成连续轮廓成型加工的数控系统，但也有些零件只需要对点或直线准确定位和移动。这时数控装置可以简化。

### 3. 插补模块

插补模块是整个数控系统中一个极其重要的功能模块之一。其算法的选择将直接影响到整个系统的精度、速度及加工能力范围等。

在早期的硬件数控装置中，插补过程是由专门的数字逻辑电路完成的，而在计算机数控系统中，既可全部由软件实现，也可由软、硬件结合完成。通常，第一种方法速度快，但电路复杂，并且调整和修改都相当困难，缺乏柔性；而第二种方法虽然速度慢一些，但调整很方便，特别是目前计算机处理速度的不断提高，为实现高速插补创造了有利条件。

由于直线和圆弧是构成零件轮廓的基本线型，因此一般的计算机数控系统都具有直线和圆弧插补功能。而某些高档的数控系统还具有椭圆、抛物线、螺旋线等复杂线型的插补功能。

#### 1.1.3 插补方法的分类

由于插补的速度和精度直接影响到整个数控系统的速度和精度，而插补速度与插补精度之间往往是互相制约、互相矛盾的。因此，人们一直在努力探求计算速度快并且精度又高的插补方法。到目前为止，已涌现出了大量的插补算法，可将其归纳为基准脉冲插补和数据采样插补两大类。



### 1. 基准脉冲插补（也称脉冲增量插补）

基准脉冲插补就是通过向各个运动轴分配脉冲，控制机床坐标轴作相互协调的运动，从而加工出规定轮廓形状零件的算法。因为这类插补算法的输出是脉冲形式，并且每次仅产生一个单位的行程增量，故称之为脉冲增量插补。而每个单位脉冲对应坐标轴的位移量大小，称为脉冲当量，一般用 $\delta$ 表示。脉冲当量是脉冲分配的基本单位，也对应于内部数据处理的一个二进制位，它决定了数控机床的加工精度，对于普通数控机床，一般 $\delta$ 在 $0.01\text{mm}\sim 0.005\text{mm}$ 之间，对于较为精密的数控机床， $\delta$ 可为 $1\mu\text{m}$ 或 $0.1\mu\text{m}$ ，甚至更高。

由于脉冲增量插补误差不大于一个脉冲当量，并且其输出的脉冲速率主要受插补程序所用时间的限制，因此，数控系统精度与切削速度之间是相互影响的。譬如，实现某脉冲增量插补算法大约需要 $50\mu\text{s}$ 的处理时间，当系统脉冲当量为 $0.001\text{mm}$ 时，则可求得单个运动坐标轴的极限速度约为 $1.2\text{m}/\text{min}$ 。当要求控制两个或两个以上坐标轴时，所获得的轮廓速度还将进一步降低。反之，如果将系统单轴极限速度提高到 $12\text{m}/\text{min}$ ，则要求将脉冲当量增大到 $0.01\text{mm}$ 。可见，数控系统中这种制约关系就限制了其精度和速度的提高。

实现脉冲增量插补的算法比较简单，通常仅需几次加法和移位操作就可完成，比较容易用硬件实现，这也正是硬件数控系统较多采用这类算法的主要原因。当然，也可用软件来模拟硬件实现这类插补运算。基准脉冲插补有许多种方法，最常用的是逐点比较法、数字积分法、目标点跟踪法以及一些相应的改进算法等。由于这种插补方法的控制精度和进给速度较低，因此主要适用于以步进电机为驱动装置的开环数控系统。

逐点比较法是这类算法最典型的代表，它是一种最早的插补算法，该法的原理是：数控系统在控制过程中，能逐点地计算和判别运动轨迹与给定轨迹的偏差，并根据偏差控制进给轴向给定轮廓靠近，缩小偏差，使加工轮廓逼近给定轮廓。

逐点比较法是以折线来逼近直线或圆弧曲线的，它与规定的直线或圆弧之间的最大误差不超过一个脉冲当量，因此，只要将脉冲当量（每走一步的距离）取得足够小，就可达到加工精度的要求。

### 2. 数据采样插补（又称时间分割插补）

数据采样插补采用时间分割法，按照用户程序的进给速度，将零件轮廓曲线按插补周期分割为一系列微小直线段（轮廓步长），即用弦线或割线逼近轮廓轨迹。然后将这些微小直线段对应的位置增量数据进行输出用以控制伺服系统实现坐标轴的进给。显然，这种插补的结果就不再是单个脉冲，而是一个数字量。使用数据采样插补法的数控系统，其位置伺服通过计算机及测量装置构成闭环。计算机定时地对反馈回路采样，采样的数据与插补程序所产生的指令数据相比较，用其误差信号输出去驱动伺服电动机。采样周期一般为 $10\text{ms}$ 左右。这种插补方法可以实现高速、高精度控制，因此适用于以直流伺服电动机或交流伺服电动机为驱动装置的半闭环或闭环数控系统。

在这类数控系统中，每调用一次插补程序，就计算出坐标轴在每个插补周期中的位置增量，然后求得坐标轴的相应的位置给定值，再与采样所获得的实际位置反馈值相比较，求得相应的位置跟踪误差。数控系统就根据当前的位置误差计算出进给坐标轴的速度给定值，并将其输出给驱动装置，然后通过电动机带动丝杠和工作台朝着减小误差的方向运动，从而保证了整个系统的加工精度。

数据采样插补法采用的是时间分割的思想。由于插补频率较低，大约在 $50\text{Hz}\sim 125\text{Hz}$