



高职高专“十一五”规划教材

SHUKONG BIANCHENG YU CAOZUO

数控编程



操作

汪荣青 邱建忠 主 编
王怀奥 黄兴红 主 审



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

数控编程与操作

汪荣青	邱建忠	主 编
刘正平 胡	茜 戴乃昌	副主编
王怀奥	黄兴红	主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书根据高等职业教育教学要求编写,内容包括数控机床、数控编程原理、加工工艺、数控车床、铣床、加工中心、线切割机床的编程与操作、参数编程、CAD/CAM 软件应用及数控仿真软件的使用等。本书实用性强,图文并茂,并且有丰富的实例,内容安排由易到难,便于理解和掌握。

本书可作为各类职业院校机电类专业的理论实训一体化教材,也可作为各类数控加工技术的培训教材,并可供机械制造业有关工程技术人员参考。

数控编程与操作

汪荣青 邱建忠 主编
王 珏 陈 颖 副主编
王 珏 陈 颖 主审

图书在版编目 (CIP) 数据

数控编程与操作/汪荣青,邱建忠主编. —北京:化学工业出版社,2009.1
高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-04254-5

I. 数… II. ①汪…②邱… III. ①数控机床-程序设计-高等学校:技术学院-教材②数控机床-操作-高等学校:技术学院-教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 186282 号

责任编辑:韩庆利 鲍晓娟
责任校对:宋 玮

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张12 字数300千字 2009年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:23.00 元

版权所有 违者必究

本书编审人员名单

- | | | |
|------|-----|------------|
| 主 编： | 汪荣青 | 浙江机电职业技术学院 |
| | 邱建忠 | 温州机电技师学院 |
| 副主编： | 刘正平 | 浙江工商职业技术学院 |
| | 胡 茜 | 浙江机电职业技术学院 |
| | 戴乃昌 | 浙江工贸职业技术学院 |
| 参 编： | 李国强 | 浙江机电职业技术学院 |
| | 许 倩 | 嘉兴市高级技工学校 |
| | 温长胜 | 浙江机电职业技术学院 |
| | 牟华洪 | 黄岩第二职业技术学校 |
| 主 审： | 王怀奥 | 浙江工商职业技术学院 |
| | 黄兴红 | 浙江机电职业技术学院 |

前 言

本书是高等职业技术教育机电类专业教学用书。在编写时，我们从高职教育的实际出发，以应用为目的，以必需、够用为原则，以讲清编程中的概念、注重实用为重点，加强针对性和实用性作为编写本教材的指导思想。

主要内容包括数控机床、数控编程原理、加工工艺、数控车床、数控铣床、加工中心编程等。从手工编程和自动编程两部分出发，在重点内容上安排了一定数量的习题，在编写方式上，力求通俗易懂、图文并茂，使学习者容易理解和练习。

本书共分十一章，第一、二、三章介绍了数控机床的基础知识，数控编程原理和数控加工工艺；第四、五章讲述了 FANUC 和华中 HNC-21T 系统数控车床的程序编制；第六、七章讲解了数控铣床、加工中心的程序编制；第八章讲解了数控线切割机床的程序编制；第九章介绍了数控宏程序编制；第十章介绍了 CAD/CAM 软件的应用；第十一章介绍了数控仿真软件的使用等。

本书由浙江机电职业技术学院汪荣青、温州机电技师学院邱建忠担任主编，浙江工商职业技术学院刘正平、浙江机电职业技术学院胡茜、浙江工贸职业技术学院戴乃昌担任副主编，参加编写的还有李国强、许倩、温长胜、牟华洪等。

本书由浙江工商职业技术学院王怀奥教授和浙江机电职业技术学院黄兴红主任任主审，他们为本书提供了许多宝贵的意见和建议。本书在编写过程中参阅了国内同行的相关文献资料，得到了许多专家和同行的支持与帮助，在此一并表示衷心的感谢。

本书是编者多年从事数控编程教学与实训工作的总结，但由于水平和经验有限，书中难免存在一些不足之处，敬请读者批评指正。

编者
2008 年 10 月

目 录

第一章 数控机床概述	1	二、刀具半径补偿	36
第一节 数控机床的插补原理	1	三、补偿向量及补偿值	36
一、插补方法的分类	1	四、平面选择	36
二、逐点比较法插补原理	2	第三章 数控加工工艺	37
第二节 刀具半径补偿原理	6	第一节 工艺准备	37
一、刀具半径补偿	6	一、工艺的设计	37
二、刀具半径补偿的建立	6	二、定位基准与夹紧方式的确定	39
三、刀具半径补偿实例	7	三、换刀点位置的确定	39
第三节 数控机床的种类	8	四、确定走刀路线	40
一、按运动方式分类	8	五、刀具的选择	41
二、按工艺用途分类	9	六、确定合理的切削用量	42
三、按控制方式分类	9	第二节 编制程序	42
四、按数控机床的性能分类	10	一、数据处理	42
第四节 常见数控机床的组成及工作		二、填写零件的加工程序单（程序的	
原理	10	编制）	43
一、几种常见数控机床	10	三、程序检验	46
二、数控机床的组成	12	第三节 工件检测	47
三、数控机床的工作原理	14	一、常用测量仪器	47
第五节 数控机床的伺服系统	15	二、特殊测量仪器	51
一、伺服系统的概念	15	第四节 图形的数学处理	52
二、伺服系统的分类	16	一、两平行铣削平面的数学处理	52
三、伺服系统的驱动元件	17	二、两相交铣削平面的数学处理	53
四、伺服系统中的检测元件	19	三、空间曲面的数学处理	54
第二章 数控机床编程原理	23	第四章 FANUC 系统数控车床的	
第一节 数控机床编程基本原理	23	程序编制	57
一、数控编程的基本概念	23	第一节 FANUC 系统数控车床程序	
二、数控机床的编程方法	23	编制的基础	57
三、程序编制的指令代码	24	一、数控车床的工艺装备	57
四、准备功能	24	二、数控车床的编程特点	57
五、辅助功能（M、T、S、F 代码）	27	第二节 数控车床的基本编程方法	58
第二节 参考点和坐标系	28	一、S 功能	58
一、机床坐标系	28	二、F 功能	59
二、工件坐标系介绍	31	三、T 功能	59
第三节 程序结构	33	四、M 功能	59
一、程序构成	33	五、加工坐标系设置	59
二、程序正文结构	33	六、倒角、倒圆编程	59
第四节 刀具补偿功能	35	七、螺纹切削指令（G32）	60
一、刀具长度补偿（G43，G44，G49）	35	八、刀尖圆弧自动补偿功能	62

九、单一固定循环	63	三、其他功能指令	115
十、复合固定循环	65	四、固定循环指令	115
十一、深孔钻循环	69	第四节 典型零件编程与加工实例	119
十二、外径切槽循环	70	第八章 数控线切割机床的程序编制	124
十三、螺纹切削指令	70	第一节 数控线切割工艺过程	124
第三节 综合实例	72	一、模坯准备	124
一、工艺分析	72	二、工件的装夹与调整	125
二、编程	73	三、电极丝的选择和调整	126
思考与练习	75	四、切削参数的选择	127
第五章 华中 HNC-T 数控车床编程	78	第二节 数控线切割机床的基本编程	
第一节 G 代码命令	78	方法	129
一、G 代码组及含义	78	一、3B 格式编制程序	130
二、华中系统 G 代码格式及含义	78	二、ISO 代码数控程序编制	133
第二节 辅助功能 (M 功能)	87	第三节 计算机自动编制程序	136
第三节 综合实例	87	一、CAD 绘图功能	136
思考与练习	90	二、CAM 系统参数	137
第六章 数控铣床的程序编制	92	三、CAM 的三个 F 功能	138
第一节 数控铣床程序编制的基础	92	第四节 数控线切割加工综合应用	139
一、数控铣床的主要功能	92	思考与练习	142
二、数控铣床的加工工艺范围	92	第九章 宏程序编程	143
三、数控铣削的工艺性分析	94	第一节 变量的表示和使用	143
第二节 数控铣床程序编制的基本方法	98	第二节 数控铣削实例	146
一、坐标系旋转功能 G68、G69	98	一、椭圆宏程序	146
二、子程序调用	99	二、锥度宏程序	147
三、比例及镜向功能	100	第三节 数控车削实例	148
第三节 数控铣削加工综合举例	102	思考与练习	153
思考与练习	105	第十章 CAD/CAM 软件应用	155
第七章 加工中心的程序编制	107	第一节 CAD/CAM 软件分类	155
第一节 零件程序的格式	107	第二节 CAD/CAM 技术的发展趋势	156
第二节 华中 (HNC-21/22M) 系统		第三节 典型 CAD/CAM 软件介绍	157
功能	107	一、UG 的 CAD 功能	157
一、准备功能	107	二、MasterCAM 的应用	158
二、辅助功能	107	思考与练习	167
三、进给功能	110	第十一章 数控仿真软件的使用	169
第三节 华中 (HNC-21/22M) 系统基本		第一节 FANUC 数控车床	169
编程指令	110	第二节 FANUC 数控铣床	175
一、G 指令	110	参考文献	183
二、简化编程指令	112		

第一章 数控机床概述

数控机床是一种高效的自动化加工设备，它严格按照加工程序，自动地对被加工工件进行加工，集高精度、高刚性、高速度、自动化、柔性化和智能化于一身。

为了使数控机床根据零件加工的要求进行动作，必须将这些要求以机床数控系统能识别的指令形式告知数控系统，这种数控系统可以识别的指令称为程序。制作程序的过程称为数控编程。

数控编程的过程不仅只是单一的编写程序的过程，其中还要了解运行程序的原理、运行程序的机床、数控加工工艺和数控机床的种类等。

第一节 数控机床的插补原理

插补在数控加工过程中起着非常重要的作用，它是指在轮廓控制加工中，刀具的轨迹必须严格按零件轮廓曲线运动。插补运算的作用是按一定的关系向机床各个坐标轴的驱动控制器分配进给脉冲，从而使得伺服电动机驱动工作台相对主轴的运动轨迹，以一定的精度要求逼近于所加工零件的外形轮廓尺寸。所谓插补就是在每一个插补周期（极短时间，一般为毫秒级）内，根据指令、进给速度计算出一个微小直线段运动经过若干个行插补周期后，刀具从起点运动到终点，完成这段轮廓的加工。

一、插补方法的分类

1. 插补的基本原理

由工程数学可知，微积分对研究变量问题的基本方法是：“无限分割，以直代曲，以不变代变，得微元再无限积累，对近似取极限，求得精确值。”而对于机床运动轨迹控制的插补运算也正是按这一原理来解决的。概括起来可描述为：“以脉冲当量为单位，进行有限分段，以折代直，以直代曲，分段逼近，相连成轨迹。”需要说明的是这个脉冲当量与基坐标显示分辨率是一致的，它与加工精度有关，它表示插补器每发出一个脉冲，使执行电动机驱动丝杠所走的行程，单位通常为 $0.01 \sim 0.001\text{mm/脉冲}$ 。

2. 插补方法的分类

插补器的形式很多，按实现的方法来说，它既可分为由硬件逻辑电路或计算机执行软件程序来完成两种，又可分为硬件插补和软件插补。在硬件数控（NC）系统中，插补是由硬件实现的；在计算机数控（CNC）系统中，插补则是由软件全部或部分实现插补功能的。由于软件实现的插补运算比硬件插补运算的速度慢，在 CNC 系统中插补功能常分为粗插补和精插补两步完成。粗插补用软件来实现，把一个程序段分割成若干个微小直线段；精插补在伺服驱动模块中，把各个微小直线段再进行密化处理，使加工轨迹满足允许的主要技术性指标。因此插补软件是 CNC 系统的核心软件。

根据插补采用的原理和计算方法的不同，已有的许多插补方法一般被分为两大类。

（1）基准脉冲插补 它又称为行程标量插补或脉冲增量插补。其插补运算的特点是每次插补结束，数控装置向每个运动坐标输出基准脉冲序列，每个脉冲代表了最小位移，脉冲序

列的频率代表了坐标运动速度，而脉冲的数量表示移动量。基准脉冲插补中最常用的方法是逐点比较插补法。

(2) 数字采样插补 它又称为时间标量插补或数字增量插补。其插补运算的特点是数控装置产生的不是单个脉冲，而是标准二进制字。插补运算分为粗插补和精插补两步来完成。粗插补用软件来实现，把一个程序段分割成若干个微小直线段来逼近给定的曲线；精插补在伺服驱动模块中，把各个微小直线段再进行密化处理。

随着科学技术的发展，插补的方法很多，本节只对常用的逐点比较插补法作具体的介绍。

二、逐点比较法插补原理

逐点比较插补法是一种逐点计算、判别偏差并纠正，以逼近理论轨迹的方法，在插补过程中每走一步要完成以下四个节拍。

偏差判别：判别当前动点偏离理想曲线的位置。

进给控制：确定进给坐标及进给方向。

新偏差判别：进给后动点到达新位置，计算出新偏差值，作为一步判别的依据。

终点判别：查询一次，判别是否到达终点。若到达终点，则发出插补完成信息；若未到达终点，返回去再进行偏差判别，再重复上述的循环步骤。

(一) 逐点比较法直线插补

1. 第一象限直线插补

如图 1-1 所示第一象限直线 OA 。取直线起点为坐标原点，直线终点坐标 $A(X_e, Y_e)$ 是已知的。 $I(X_i, Y_i)$ 若每运动一步在 X 或 Y 方向进给一个脉冲当量，插补过程如下。

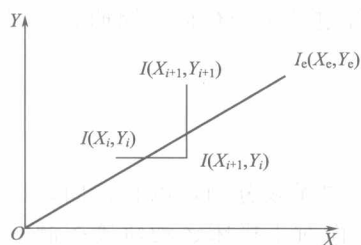


图 1-1 直线插补

(1) 偏差判别 直线的一般表达式为：

$$Y/X = Y_e/X_e$$

则动点 I 的判别方程 F_i 写为：

$$F_i = Y_i X_e - X_i Y_e$$

① 若 I 点在 OA 上，

则 $Y_i/X_i = Y_e/X_e$

所以 $X_i Y_e = X_e Y_i$

$$X_i Y_e - X_e Y_i = 0 \quad \text{即} \quad F_i = 0$$

② 若 I 点在 OA 上方，则 $Y_i/X_i > Y_e/X_e$

$$X_e Y_i - X_i Y_e > 0 \quad \text{即} \quad F_i > 0$$

③ 若 I 点在 OA 的下方，则 $Y_i/X_i < Y_e/X_e$

$$X_e Y_i - X_i Y_e < 0 \quad \text{即} \quad F_i < 0$$

其中 F_i 称为偏差函数。

即 $F_i = 0$ ，动点 I 恰好在直线 OA 上；

$F_i > 0$ ，动点 I 在直线 OA 上方；

$F_i < 0$ ，动点 I 在直线 OA 下方。

(2) 进给控制 进给控制原则是向减小误差的方向前进。

直线在第一象限，其终点坐标 X, Y 均为正值，则动点的一步进给也应该是 $+\Delta X$ 或 $+\Delta Y$ ，其他象限可类推出。

- ① 当 $F_i=0$ 规定刀具向 $+X$ 方向前进一步, 即 $\Delta X=1$;
- ② $F_i>0$ 控制刀具向 $+X$ 方向前进一步, 即 $\Delta X=1$;
- ③ $F_i<0$ 控制刀具向 $+Y$ 方向前进一步, 即 $\Delta Y=1$ 。

(3) 新偏差计算

- ① 若 $F_i \geq 0$ 沿 X 轴进给了一步 $+X$, 到 I_{i+1} 点 (X_{i+1}, Y_{i+1}) , 则

$$Y_{i+1}=Y_i$$

$$X_{i+1}=X_i+1$$

则

$$F_{i+1}=Y_i X_e - Y_e X_{i+1}$$

$$=Y_i X_e - Y_e X_i - Y_e$$

$$=F_i - Y_e$$

- ② 同理, 若 $F_i < 0$ 沿 Y 轴进给了一步 $+Y$, 则有 $F_{i+1}=F_i + X_e$ 。

(4) 终点判别 终点判别有三种方法。

① 单向计数: 把 X_e 或 Y_e 中数值较大的坐标值作为计数长度。例如: 当 $|X_e| > |Y_e|$, 计 X 值, X 走一步, 计数长度减 1, 直到计分长度时, 插补停止。这种方法到达终点位置的误差为一个脉冲当量。

② 双向计数: 把 $|X_e| + |Y_e|$ 作为计数长度。计数寄存器的长度设置增加, 运算量也增加。

③ 分别计数: 既计 X , 又计 Y 。只有当 X 减到 0, Y 也减到 0 量, 才停止插补。这种方法的插补精度较高, 但要设置两个计数器, 而用软件插补要增加微机判别时间。

例 1-1 插补如图 1-2 所示直线, 起点 $O(0,0)$, 终点 $A(3,5)$, 脉冲当量为 1, 以单一坐标为计算长度。

解: $|Y_e| > |X_e|$, 定计数长度 $M = |X_e| = 5$

$F_0 = Y_0 X_e - X_0 Y_e = 0$ 插补自原点开始, 过程见表 1-1。

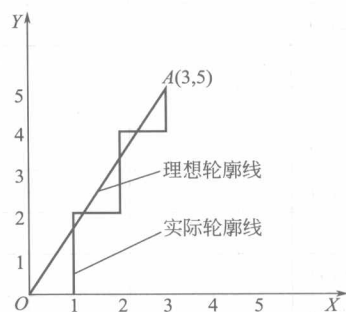


图 1-2 直线插补实例

表 1-1 直线插补过程

序号	偏差判别	进给控制	新偏差计算	终点判别
1	$F_0=0$	$+\Delta X$	$F_1=F_0-Y=0-5=-5$	$M=5$
2	$F_1<0$	$+\Delta Y$	$F_2=F_1+X=-5+3=-2$	$M=5-1=4$
3	$F_2<0$	$+\Delta Y$	$F_3=F_2+X=-2+3=1$	$M=4-1=3$
4	$F_3>0$	$+\Delta X$	$F_4=F_3-Y=1-5=-4$	$M=3$
5	$F_4<0$	$+\Delta Y$	$F_5=F_4+X=-4+3=-1$	$M=3-1=2$
6	$F_5<0$	$+\Delta Y$	$F_6=F_5+X=-1+3=2$	$M=2-1=1$
7	$F_6>0$	$+\Delta X$	$F_7=F_6-Y=2-5=-3$	$M=1$
8	$F_7<0$	$+\Delta Y$	$F_8=F_7-Y=-3+3=0$	$M=1-1=0$

例 1-2 插补如图 1-3 直线, 起点 $O(0,0)$, 终点 $A(10,6)$, 脉冲当量为 1, 以分别计数为计算长度。

解: 定计数长度 $M = |X_e| = 10$, 定计数长度 $N = |Y_e| = 6$, 其插补过程如表 1-2 所示。

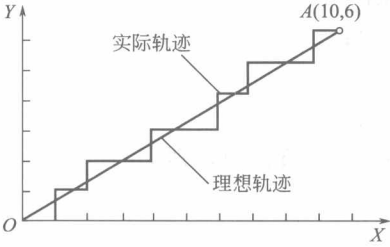


图 1-3 直线插补实例

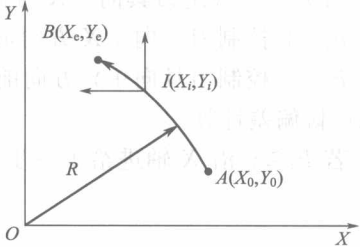


图 1-4 圆弧插补

表 1-2 直线插补过程

(i, j)	F_{ij}	$F_{ij} \geq 0$				$F_{ij} < 0$			
		$F_{i+1, j}$	ΔX	$X_i = X_{i+1}$	$M = X_{i+1} + X_e$	$F_{i, j+1}$	ΔY	$Y_{j+1} = Y_{i+1}$	$N = Y_{i+1} + Y_e$
(0, 0)	0	$0 - 6 = -6$	1	$0 + 1 = 1$	$1 - 10 = -9$				
(1, 0)	-6					$6 + 10 = 4$	1	$0 + 1 = 1$	$1 - 6 = -5$
(1, 1)	4	$4 - 6 = -2$	1	$1 + 1 = 2$	$2 - 10 = -8$				
(2, 1)	-2					$2 + 10 = 8$	1	$1 + 1 = 2$	$2 - 6 = -4$
(2, 2)	8	$8 - 6 = 2$	1	$2 + 1 = 3$	$3 - 10 = -7$				
(3, 2)	2	$2 - 6 = -4$	1	$3 + 1 = 4$	$4 - 10 = -6$				
(4, 2)	-4					$4 + 10 = 6$	1	$2 + 1 = 3$	$3 - 6 = -3$
(4, 3)	6	$6 - 6 = 0$	1	$4 + 1 = 5$	$5 - 10 = -5$				
(5, 3)	0	$0 - 6 = -6$	1	$5 + 1 = 6$	$6 - 10 = -4$				
(6, 3)	-6					$6 + 10 = 4$	1	$3 + 1 = 4$	$4 - 6 = -2$
(6, 4)	4	$4 - 6 = -2$	1	$6 + 1 = 7$	$7 - 10 = -3$				
(7, 4)	2					$2 + 10 = 8$	1	$4 + 1 = 5$	$5 - 6 = -1$
(7, 5)	8	$8 - 6 = 2$	1	$7 + 1 = 8$	$8 - 10 = -2$				
(8, 5)	2	$2 - 6 = -2$	1	$8 + 1 = 9$	$9 - 10 = -1$				
(9, 5)	4					$4 + 10 = 6$	1	$5 + 1 = 6$	$6 - 6 = 0$
(9, 6)	6	$6 - 6 = 0$	1	$9 + 1 = 10$	$10 - 10 = 0$				

2. 各象限直线插补方法

四个不同象限直线插补的进给方向，如表 1-3 所示是其对应的偏差函数。

表 1-3 四个象限插补进给方向及偏差函数

$F_i \geq 0$			$F_i < 0$		
象 限	进 给	偏差函数	象 限	进 给	偏差函数
I IV	$+\Delta X$	$F_{i+1} = F_i - Y_e $	I II	$+\Delta Y$	$F_{i+1} = F_i + X_e $
II III	$-\Delta X$		III IV	$-\Delta Y$	

(二) 逐点比较法圆弧插补

1. 第一象限圆弧插补

圆弧插补有顺时针圆弧插补和逆时针圆弧插补。现以逆时针圆弧插补为例。如图 1-4 所

示, 圆弧的圆心为坐标原点, 圆弧的起点 $A(X_0, Y_0)$, 终点 $B(X_e, Y_e)$, 动点 $I(X_i, Y_i)$ 。若每运动一步在 X 或 Y 方向进给一个当量, 插补过程如下。

(1) 偏差判别 圆的一般表达式为

$$X^2 + Y^2 = R^2$$

则动点 I 的判别方程 F_i 写为

$$F_i = X^2 + Y^2 - R^2$$

① 若 I 点恰好在圆弧 $\widehat{AB}$ 上, 则 $X^2 + Y^2 = R^2$

$$X^2 + Y^2 - R^2 = 0 \quad \text{即 } F_i = 0$$

② 若 I 点在圆弧 $\widehat{AB}$ 外侧, 则 $X^2 + Y^2 > R^2$

$$X^2 + Y^2 - R^2 > 0 \quad \text{即 } F_i > 0$$

③ 若 I 点在圆弧 $\widehat{AB}$ 内侧, 则 $X^2 + Y^2 < R^2$

$$X^2 + Y^2 - R^2 < 0 \quad \text{即 } F_i < 0$$

其中 F_i 称为偏差函数。

即 $F_i = 0$, 动点 I 恰好在圆弧上;

$F_i > 0$, 动点 I 在圆弧外侧;

$F_i < 0$, 动点 I 在圆弧内侧。

(2) 进给控制 原则是向减小误差的方向前进。

在第一象限, 逆时针圆弧插补的进给方向为 $+\Delta Y$ 和 $+\Delta X$, 则:

① 当 $F_i = 0$, 动点恰好在圆弧上, 即 $\Delta X = -1$;

② $F_i > 0$, 控制刀具向 $-X$ 方向前进一步, 即 $\Delta X = -1$;

③ $F_i < 0$, 控制刀具向 $+Y$ 方向前进一步, 即 $\Delta Y = 1$ 。

(3) 新偏差计算

若 $F_i \geq 0$ 沿 X 轴进给了一步 ΔX 到 I_{i+1} 点 (X_{i+1}, Y_{i+1}) 。

$$Y_{i+1} = Y_i, \quad X_{i+1} = X_{i-1}$$

$$\text{则 } F_{i+1} = X_{i+1}^2 + Y_{i+1}^2 - R^2$$

$$= (X_{i-1})^2 + Y_i^2 - R^2$$

$$= X_i^2 + Y_i^2 + 2Y_{i+1} - R^2$$

$$= F_i + 2Y_{i+1}$$

(4) 终点判别 终点判别仍用计数长度, 计算比较复杂, 特别是跨越多个象限的圆弧。

① 单向计数: 把 X_e 或 Y_e 中数值较小的坐标值作为计数长度。

例如当 $|X_e| > |Y_e|$, 计 Y 值, Y 走一步, 计数长度减 1, 直到计分长度时, 插补停止。

② 双向计数: 把 $M = |X_e - X_0| + |Y_e - Y_0|$ 作为计数长度。计数寄存器的长度设置增加, 运算量也增加, 计算比较复杂。

例 1-3 逆时针插补如图 1-5 所示圆弧, 起点 $A(0, 5)$, 终点 $B(4, 3)$, 脉冲当量为 1, 以双向计算为计数长度。

解: 定计数长度为 $M = |X_e - X_0| + |Y_e - Y_0| = |4 - 0| + |3 - 5| = 6$

令 $F_0 = 0$ 插补自原点开始, 过程见表 1-4。

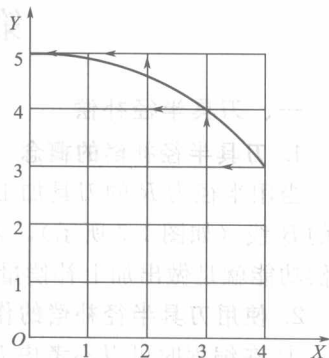


图 1-5 逆时针插补实例

表 1-4 逆时针圆弧插补实例过程

序号	偏差判别	进给	新偏差计算	终点判别
0			$F_0=0 \quad X=4 \quad Y=3$	$M=6$
1	$F_0=0$	-1	$F_1=F_0-2X_{i+1}=0-2\times 4+1=-7$ $X=3 \quad Y=3$	$M=6-1=5$
2	$F_1=-7<0$	1	$F_2=F_1+2Y_{i+1}=-7+2\times 3+1=0$ $X=3 \quad Y=4$	$M=5-1=4$
3	$F_2=0$	-1	$F_3=F_2-2X_{i+1}=0-2\times 3+1=-5$ $X=2 \quad Y=4$	$M=4-1=3$
4	$F_3=-5<0$	1	$F_4=F_3+2Y_{i+1}=-5+2\times 4+1=4$ $X=2 \quad Y=5$	$M=3-1=2$
5	$F_4=4>0$	-1	$F_5=F_4-2X_{i+1}=4-2\times 2+1=1$ $X=1 \quad Y=5$	$M=2-1=1$
6	$F_5=1>0$	-1	$F_6=F_5-2X_{i+1}=1-2\times 1+1=0$ $X=0 \quad Y=5$	$M=1-1=0$

2. 其它各象限圆弧插补

四个不同象限圆弧插补的进给方向，如图 1-6 所示。

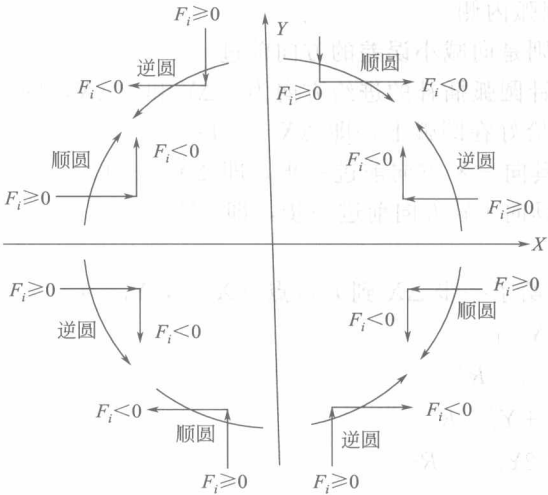


图 1-6 不同象限圆弧插补的进给方向

第二节 刀具半径补偿原理

一、刀具半径补偿

1. 刀具半径补偿的概念

当用半径为 R 的刀具加工工件时，刀具的中心轨迹应是与工件的外轮廓线 A 偏移 R 距离的 B 线（如图 1-7 所示），刀具的中心偏移的量叫做补偿量（也称偏置量）。所谓刀具半径补偿功能就是做出加上补偿量以后的刀具轨迹的功能，用 $G40$ 、 $G41$ 、 $G42$ 来实现。

2. 使用刀具半径补偿的作用

① 在编程时可以不考虑刀具的半径，直接按图样所给尺寸进行编程，只要在实际加工时输入刀具的半径补偿值即可。

② 刀具磨损引起刀具半径的变化, 可以用刀具半径补偿值来修正。

二、刀具半径补偿的建立

在实际轮廓加工过程中, 刀具半径补偿执行过程一般分为三步: 刀具的半径补偿的建立、执行和取消。

(1) 刀具补偿启动阶段 刀具由起刀点 (START POINT, 位于零件轮廓毛坯之外, 距离加工零件轮廓切入点较近且偏置于零件轮廓延长线上的一点), 以进给速度接近工件, 刀具半径补偿偏置方向由 G41 或 G42 来确定 (如图 1-8 所示)。

(2) 刀具半径补偿执行阶段 一旦建立了刀具半径补偿状态, 则一直维持该状态, 直到取消半径补偿为止。在刀具半径补偿执行期间, 刀具中心轨迹始终偏离零件轮廓一个刀具半径值的距离。

(3) 刀具半径补偿取消阶段 刀具撤离工件, 回到退刀点, 必须取消刀具半径补偿。与建立刀具半径补偿过程类似, 退刀点也应位于工件轮廓之外, 距离加工工件轮廓退刀点较近且偏置于工件轮廓延长线上, 可与起刀点相同, 也可以不相同。

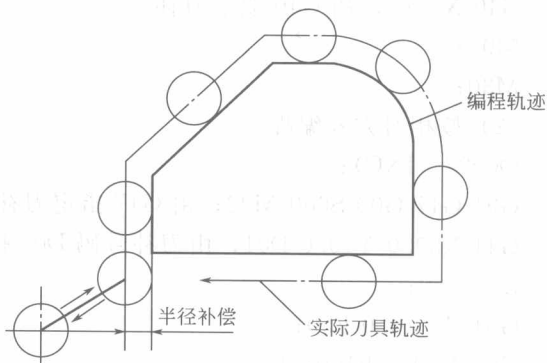


图 1-7 刀具半径补偿功能

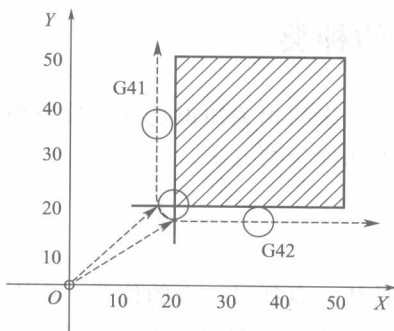


图 1-8 刀具的半径补偿的建立

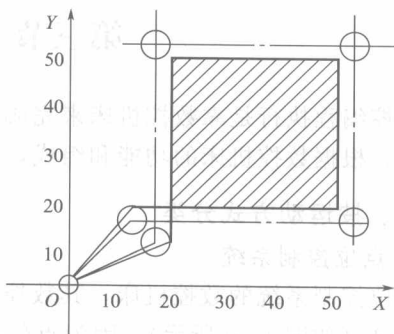


图 1-9 刀具半径补偿实例

三、刀具半径补偿实例

例 1-4 加工如图 1-9 所示的工件, 切深 10mm。

(1) 按绝对方式编程

O0001 (ABS);

G90 G54 G17 G00 S600 M03; 由 G17 指定刀补平面

G41 X20.0 Y10.0 D01; 由刀补号码 D01 指定刀补 (刀补启动)

Z2.0;

G01 Z-10.0 F50;

G01 Y50.0 F100;

X50.0;

Y20.0;

X10.0;

G00 Z100.0;

} 刀补状态



G40 X0 Y0; 用 G40 取消刀补

M05;

M30;

(2) 按相对方式编程

O0002 (INC);

G91 G17 G00 S600 M03; 由 G17 指定刀补平面

G41 X20.0 Y10.0 D01; 由刀补号码 D01 指定刀补 (刀补启动)

Z-98.0;

G01 Z-10.0 F50;

G01 Y40.0 F100;

X30.0;

Y-30.0;

X-40.0;

G00 Z110.0;

G40 X-10.0 Y-20.0; 用 G40 取消刀补

M05;

M30;

刀补状态

第三节 数控机床的种类

数控编程执行是靠数控机床来完成, 所以了解数控机床的相关知识是进行数控编程的基础之一。根据数控机床的功能和组成, 一般可以有以下几种分类方法。

一、按运动方式分类

1. 点位控制系统

点位控制系统的数控机床, 其数控装置只控制刀具从一点到另一点的位置, 而不控制移动的轨迹 (如图 1-10 所示)。因为点位控制数控机床只要求获得准确的加工坐标点的位置。由于数控机床只是在刀具或工件到达指定的位置后才开始加工, 刀具在工件固定时执行切削任务, 在运动过程中不进行加工。为了在精确定位的基础上有尽可能高的生产率, 两相关点之间的移动先快速移动接近定位点时再降低速度, 以保证定位精度。例如数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床等均采用点位控制系统。

2. 直线控制系统

直线控制系统不但要求刀具或机床工作台从起点坐标到终点坐标, 还要求刀具或工作台以给定的速度沿平行于某坐标轴方向运动的过程中进行切削加工 (如图 1-11 所示)。

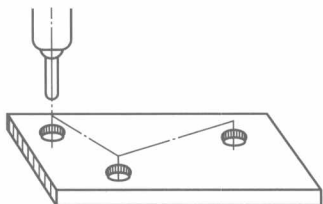


图 1-10 点位控制系统

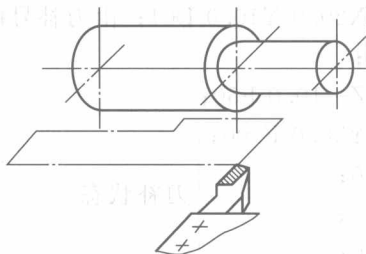


图 1-11 直线控制系统

3. 轮廓控制系统

轮廓控制系统的数控机床能够对两个或两个以上的坐标轴同时进行控制，它不仅能够控制机床移动部件的起点与终点坐标值，而且能控制整个加工过程中每一个点的速度与位移量，既要控制加工的轨迹，又要加工出要求的轮廓（如图 1-12 所示）。其被加工工件的轮廓线可以是任意形式的曲线，且可以用直线插补或圆弧插补的方法进行切削加工。

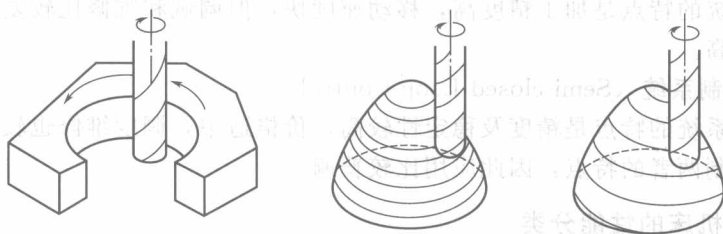


图 1-12 轮廓控制系统

二、按工艺用途分类

1. 一般数控机床

一般数控机床是在普通机床的基础上发展起来的。这种类型的数控机床和工艺用途与普通机床相似，不同的是它适合加工单件、小批量和形状复杂的零件，它的生产率和自动化程度比传统机床高，而且这类机床的控制轴数一般不超过三坐标。其种类如下：

- ① 数控车床 (NC Lathe);
- ② 数控铣床 (NC Milling Machine);
- ③ 数控钻床 (NC Drilling Machine);
- ④ 数控平面磨床 (NC Surface Grinding Machine);
- ⑤ 数控镗床 (NC Boring Machine);
- ⑥ 数控外圆磨床 (NC External Cylindrical Grinding Machine);
- ⑦ 数控工具磨床 (NC Tool Grinding Machine);
- ⑧ 数控轮廓磨床 (NC Cantor Grinding Machine);
- ⑨ 数控坐标磨床 (NC Jig Grinding Machine);
- ⑩ 数控齿轮加工机床 (NC Gear Holing Machine);
- ⑪ 数控冲床 (NC Punching Press)。

2. 数控加工中心 (Machining Center)

数控加工中心机床是在数控机床的基础上发展起来的，它是数控机床发展到一定阶段的产物。它有一个自动刀具交换装置 (ATC)，在刀具和主轴之间有一换刀机械手，工件一次装夹后，可自动连续进行铣、镗、钻、扩、铰、攻螺纹等多种工序的加工。加工中心又分为立式加工中心、卧式加工中心和复合式加工中心。

3. 特种加工机床

- ① 数控电火花成型机床 (NC Jig Grinding Machine);
- ② 数控电火花线切割机床 (NC Wire Electric Discharge Machine);
- ③ 数控激光加工机床 (NC Laser Beam Machine);
- ④ 数控超声波加工机床 (NC Ultrasonic Machine)。

三、按控制方式分类

数控机床按照被控量有无检测反馈装置可分为开环控制系统和闭环控制系统两种。在闭

环控制系统中, 根据测量装置安放部位又分为全闭环控制和半闭环控制两种。

1. 开环控制系统 (Open Loop Control)

开环控制系统的特点是速度和精度都低, 但其反应迅速, 调度方便, 工作比较稳定, 维修简便, 成本也较低。

2. 闭环控制系统 (Closed Loop Control)

闭环控制系统的特点是加工精度高, 移动速度快, 但调试和维修比较复杂, 稳定性难以控制, 成本也较高。

3. 半闭环控制系统 (Semi-closed Loop Control)

半闭环控制系统的特点是精度及稳定性较高, 价格适中, 调度维修也较容易, 兼顾了开环控制和闭环控制两者的特点, 因此应用比较普遍。

四、按数控机床的性能分类

1. 低档数控机床

低档数控机床也称经济型数控机床。其特点是根据实际的使用要求, 合理地简化系统, 以降低价格。这类机床的技术指标通常为: 脉冲当量为 $0.01 \sim 0.005\text{mm}$, 快速进给 $4 \sim 10\text{m/min}$, 驱动元件为开环步进电动机, 联动轴数为 2 轴。

2. 中档数控系统

中档数控机床的技术指标通常为: 脉冲当量为 $0.005 \sim 0.001\text{mm}$, 快速进给为 $15 \sim 24\text{m/min}$, 伺服系统为半闭环直流或交流伺服系统, 联动轴数为 3 轴。

3. 高档数控机床

高档数控机床的技术指标通常为: 脉冲当量为 $0.001 \sim 0.0001\text{mm}$, 快速进给为 $15 \sim 100\text{m/min}$, 伺服系统为闭环直流或交流伺服系统, 联动轴数为多轴。

第四节 常见数控机床的组成及工作原理

数控机床是一种利用信息处理技术进行自动加工控制和金属切削机床, 是数控技术运用的典范。熟悉数控机床的组成, 不仅能掌握数控机床的工作原理, 同时掌握了数控技术在其他行业的应用。

一、几种常见数控机床

1. 数控车床

图 1-13 所示为数控车床外观图。数控车床一般为两轴联动功能, Z 轴是与主轴方向平行的运动轴, X 轴是在水平内与主轴方向垂直的运动轴。在车铣加工中心上还多了一个 C 轴, 用于实现工件的分度功能, 在刀架中可安放铣刀, 对工件进行铣削加工。

2. 数控铣床

数控铣床适用于加工三维复杂曲面, 在汽车、航空航天、模具等行业被广泛采用, 如图 1-14 所示。数控铣床可分为数控立式铣床、数控卧式铣床、数控仿形铣床等。

3. 加工中心

数控加工中心是具有自动刀具交换装置, 并能进行多种工序加工的数控机床。加工中心上可在工件一次装夹中进行铣、镗、钻、扩、铰、攻螺纹等多工序的加工。一般的加工中心常常是指能完成上述工序内容的镗铣加工中心, 可分为立式加工中心和卧式加工中心。立式加工中心的主轴是垂直的, 卧式加工中心的主轴是水平方向的, 如图 1-15 所示。

在加工中心上, 一个工件可以通过夹具安放在回转工作台或交换托盘上, 通过工作台的