



石油高等院校特色教材

数控编程与加工技术

杨松山 刘洪波 主编
朱 君 主审



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

石油高等院校特色教材

数控编程与加工技术

杨松山 刘洪波 主编
朱 君 主审

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是一本数控编程与加工技术相结合的教材。它是以刀具运动轨迹和线段特征点为编程要素,将轨迹与特征点用规定的代码和数字组成具有一定格式的程序段,再由若干程序段构成一个完整的加工程序。

本书可作为高等院校机械设计制造及其自动化、机电一体化、数控技术等专业的教材,也可作为相关高职院校机械类专业以及厂矿企业职工的数控培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

数控编程与加工技术/杨松山,刘洪波主编.

北京:石油工业出版社,2009.6

石油高等院校特色教材

ISBN 978-7-5021-7106-3

I. 数…

II. ①杨…②刘…

III. 数控机床—程序设计—高等学校—教材

IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 056106 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523574 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12.25

字数: 310 千字

定价: 20.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

制造业是现代社会文明的标志，是一个国家国民经济收入的支柱产业。所以，制造业也被专家们誉为是永远不落的太阳。而数控技术是制造业诸如自动加工生产线、柔性制造系统 FMS、计算机集成制造系统 CIMS 等技术不可或缺的重要组成部分。当前，我国制造业发展很快，随之而来的是制造设备大规模的数控化，企业每年都需要大批的数控技术人才。为了适应社会的发展和需要，使我国更多的制造企业能够参与世界制造业的竞争，高等工科学校应该承担起培养数控人才的社会责任。

如何正确快速地掌握、提高数控编程技术，是摆在每个初识数控的学生与亟待提高数控编程水平的工程技术人员面前的一道难题。如何解开这道难题，科学的教学方法和适用的教学参考书尤为重要。本书是一本数控编程与加工技术相结合的教材，它是以刀具运动轨迹和线段特征点为编程要素，将这些轨迹与特征点用规定的代码和数字组成具有一定格式的程序段，再由若干程序段构成一个完整的加工程序。书中这种独特的编程方法会使读者耳目一新，豁然开朗，如对常量数控铣削编程来说，从直线、曲线、圆弧及平面入手，总结出工件表面切对刀、程序设计以及上机加工操作的一套系统方法。突出了由浅入深、由易到难、循序渐进的教学理念；对变量宏程序的编程，重点叙述了如何进行教学模型的变量定义、变量赋值、函数转换、微小变量插补以及程序循环的全部过程，这部分内容是数控铣削加工的提高部分。而数控车削重点讲述了轴类零件轮廓的基本编程与上机加工实例，通过对外圆、端圆的编程，使读者能够牢固掌握轴类零件的右端面与外圆试切对刀法以及轨迹编程法。数控车的重点是复合循环，书中对具有典型性的 G71 指令及其 4 种编程模式给出了较多加工实例。

读者应该特别注重对数控基本原理和基本编程方法的掌握，再通过对书中实例的学习，可收到举一反三、事半功倍的学习效果。同时也建议读者自行设计构造零件图，并独立编程，再上机操作，这样可提高读者的综合能力。作者力图使读者从抽象的、难以理解的概念和冗长的论述中解脱出来，对书中的内容不求多，不求全，但求能用、实用，以读者早日会用为原则。作者相信，您通过对本书的学习，很快会成为数控编程的能手和高手。

本书由大庆石油学院杨松山、刘洪波主编，朱君教授主审，王金东教授为本书提出了很多宝贵意见，刘洪波、赵航博、薛志生、常宝平等为本书部分章节内容的编写、资料搜集、文稿录入等做了大量工作，在这里一并表示谢意。

编 者
2009 年 3 月

目 录

第 1 章 数控技术	1
1.1 数控机床	1
1.2 数控插补	5
复习思考题	9
第 2 章 数控铣削编程基础	10
2.1 数控铣床坐标系	10
2.2 程序段格式与指令字	12
2.3 准备功能 G 代码	14
2.4 辅助功能 M 代码	16
2.5 子程序指令 M98、M99	17
复习思考题	18
第 3 章 数控铣削编程原理	19
3.1 数控铣床坐标系指令	19
3.2 刀具运动控制指令	22
3.3 刀具补偿功能指令	26
3.4 数控铣简化编程指令	27
复习思考题	31
第 4 章 数控铣削编程方法	32
4.1 特征点编程方法	32
4.2 直线组合轨迹编程方法	49
4.3 圆弧与整圆轨迹编程方法	51
4.4 线段与圆弧组合轨迹编程方法	56
4.5 子程序及加工中心编程方法	59
复习思考题	62
第 5 章 数控铣削宏程序编程方法	63
5.1 宏程序基本知识	63
5.2 直线宏程序编程方法	65
5.3 曲线宏程序编程方法	69
5.4 平面宏程序编程方法	78
5.5 曲面宏程序编程方法	84
复习思考题	100
第 6 章 数控车削基本编程	101
6.1 数控车指令系统	101
6.2 数控车基本编程方法	108

6.3 典型轮廓车削编程方法	121
复习思考题.....	125
第7章 数控车固定循环切削	126
7.1 G80 固定循环切削	126
7.2 G81 固定循环切削	128
7.3 G82 螺纹固定循环切削	130
7.4 G32 螺纹切削	133
复习思考题.....	135
第8章 数控车复合循环加工	136
8.1 G71 复合循环	136
8.2 G72 复合循环	137
8.3 G73 复合循环	138
8.4 G76 复合循环	139
8.5 复合循环编程	139
8.6 子程序循环编程	152
复习思考题.....	160
第9章 数控车削自动编程方法	161
9.1 CAXA 数控车参数设置	161
9.2 CAXA 数控车代码生成与仿真	175
复习思考题.....	188
参考文献	189

第1章 数控技术

1.1 数控机床

计算机数字控制 (Computer Numerical Control, CNC) 简称数控, 是利用数字化信息或程序对运动执行机构及加工过程进行自动控制的一门技术。相对于模拟控制而言, 数字控制信息是数字量、开关量或逻辑量。因此, 数字控制可以用不同的字长来表示不同精度的控制信息, 可对数字化信息进行数学运算、逻辑运算以及应用程序控制等。数控设备可在不改变或较少改变机械结构或硬件电路的情况下, 只要改变应用软件就可以改变信息处理的方法和过程, 也就是说相应地改变应用软件就可以改变控制过程或控制目标, 这就使得机械设备具有很大的“柔性”。实现数字控制的核心设备称为数控系统。

数控技术最先应用于数字控制机床, 其基本原理是: CNC 根据工件几何信息控制刀具与工件间的相对运动 (运动轨迹坐标控制), 以及机床完成加工运动所必需的辅助工艺信息控制 (机床运动开关量、逻辑量控制), 如机床启动停止、主轴转向以及刀具选择和切削液开关等。装备了数控系统的机床称为数控机床 (Numerical Control Machine)。因为, 数控机床是按照数控程序进行加工的, 所以, 在数控加工之前必须事先按照工件轮廓尺寸及工艺要求编写数控程序。数控程序的编写, 主要有两种形式: 一种是手工编程, 另一种是自动编程。手工编程是由人工手动将加工零件的几何信息和工艺信息进行数字化处理, 即将整个加工过程利用数控代码编写成数控程序, 并将程序下载到数控系统中, 数控系统读入加工程序后, 将其翻译成机器能够理解的控制指令, 再由伺服系统将其变换和放大后驱动机床上的主轴电动机和进给伺服电动机运动, 实现坐标轴与刀具的相对运动, 同时刀具将剥离工件上的待加工余量, 实现数控加工; 自动编程是计算机把人们输入的零件图纸信息进行编译和后置处理, 然后生成数控加工代码, 转换为数控机床能够接受的数控加工程序, 自动编程的工作主要由计算机来完成。

数字控制原理主要是依据坐标插补技术, 即 CNC 将各坐标轴的运动分割成为有限的最小设定单位或最小位移量, 以数字形式给出相应的脉冲指令, 通过步进或伺服系统将这些脉冲指令转换为工作台的进给脉冲当量, 一个脉冲当量对应刀具或坐标轴的一个最小位移量。CNC 指令各坐标轴进行运动, 并以此运动来控制刀具的合成轨迹, 这就是数控插补控制。图 1-1 为数控插补加工的一般过程。

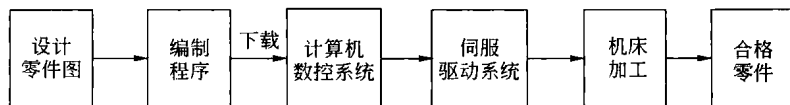


图 1-1 数控插补加工的一般过程

数控插补加工具有较高的加工精度和很好的重复加工精度。如果要想进一步提高加工精度, 有效的做法是: 减小步进电动机的步距角或脉冲当量; 提高伺服系统或滚珠丝杠的传动

精度；提高主轴转速；降低进给速度；减少进给量；最好将零件图纸加工尺寸的上下偏差平均值作为编程尺寸。但不能无限制提高加工精度，这样会引起机床的爬行以及导致提高设备投资。

1.1.1 数控机床的组成

数控机床一般由 6 个部分组成，即输入/输出装置、计算机数控系统、伺服驱动系统（或步进驱动系统）、强电控制装置、位置和速度反馈系统、机床本体，如图 1-2 所示。

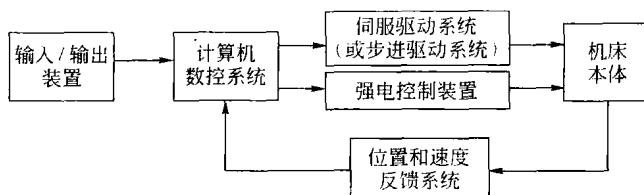


图 1-2 数控机床组成

1. 输入/输出装置

输入装置的作用是将信息载体中的数控加工信息读入 CNC 的内存中，并送入 CPU 进行处理。输出装置的作用是为操作人员提供信息，如代码显示、程序显示、系统仿真、坐标偏置值、对刀数据、切削余量、刀具运动位置、故障报警等。

2. 计算机数控系统

计算机数控系统（CNC）是数控机床实现自动加工的核心部分，它由硬件和软件两部分组成。现代数控机床一般由内嵌的计算机与硬件插补模块作为主要的硬件部分，包括 CPU、存储器（ROM、RAM）、系统总线以及输入/输出（I/O）接口等；软件部分主要是系统软件，系统软件完成数据运算、逻辑运算、计算机管理等工作。CNC 系统内置的插补运算模块根据读入零件的加工程序，通过译码、编码处理后，进行相应的轨迹插补运算，将其结果与各坐标轴伺服系统的位置、速度反馈信号进行比较，利用比较后的差值再控制机床各坐标轴的移动。时序逻辑控制由可编程控制器 PLC 来完成，如主轴启动、停止、正反转以及开关切削液等。CPU 按输入信号或检测信号进行运算、判断及控制，并根据加工过程中各个动作要求进行统一的协调指挥，完成加工任务。

3. 伺服驱动系统（或步进驱动系统）

伺服驱动系统或步进驱动系统是数控系统与机床之间进行电气传动的联系环节，它接受来自 CNC 系统的脉冲数量或位置控制等信息，将其转换成相应坐标轴的进给运动和脉冲当量。伺服驱动系统或步进驱动系统也是数控机床最后的控制环节。因此，伺服精度或步进精度及动态响应特性等将直接影响数控机床的生产效率、工件加工精度以及表面质量。伺服驱动系统或步进驱动系统主要包括主轴伺服单元和进给伺服单元。进给伺服单元在每个插补周期内接受数控系统的位移指令或脉冲个数，经过功率放大后驱动步进电动机或伺服电动机转动，并通过滚珠丝杠驱动工作台运动，同时完成进给速度控制和反馈控制。

4. 强电控制装置

强电控制装置的主要作用是接受 PLC 输出的各种控制信号，如主轴启停、主轴换向、选择或更换刀具，工作台转位和锁紧，切削液打开、关闭等。这些辅助操作信息经过功率放大后直接驱动相应执行部件的运动，完成程序指令规定的相关动作。

5. 位置和速度反馈系统

位置、速度反馈系统是通过传感器，如行程开关、旋转编码器、位置光栅及旋转变压器等来完成信号检测或信息反馈的。反馈系统检测步进电动机或伺服电动机的转角、位移、速度等信号并将此信号送到 CNC 中与给定指令信号进行比较，利用比较后的差值作为伺服系统的控制指令，此指令经过处理放大后再驱动伺服电动机或步进电动机运动。

6. 机床本体

机床本体是数控机床的机械结构和支撑部分，在整体布局、外观造型、主传动系统、进给传动系统、刀具系统等都和普通机床有着较大的区别。主要表现在：数控传动系统中使用了滚珠丝杠、直线滚动导轨副，显然，数控传动精度、刚度都要比普通机床高很多。

1.1.2 数控驱动系统

1. 开环伺服驱动系统

开环驱动系统主要包括步进电动机、伺服电动机、电液马达以及驱动电路等。CNC 发出进给指令脉冲，通过步进或伺服驱动器以及环形脉冲分配器控制步进电动机或伺服电动机的各相绕组使之按规定的方式通断电进行旋转，再经过同步齿形带、滚珠丝杠螺母副来驱动工作台运动。CNC 每发出一个脉冲信号步进电动机或伺服电动机就相应的旋转一个角度，工作台就走过一个脉冲当量的距离。通过指定脉冲数量、脉冲频率和通断电顺序来控制工作台运动的位移量、位移速度和方向等，典型的开环控制系统原理框图如图 1-3 所示。

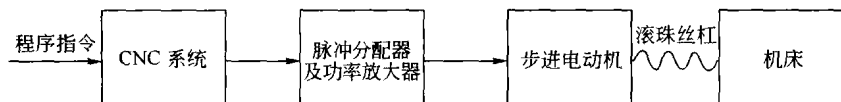


图 1-3 典型的开环控制系统原理

2. 半闭环伺服驱动系统

半闭环伺服驱动系统具有检测和反馈环节，具体的检测或测量元件（如光电脉冲编码器、旋转变压器、圆形同步感应器等）安装在滚珠丝杠或伺服电动机输出轴的端部。通过检测滚珠丝杠或电动机轴端部的回转角度，间接测量出机床工作台或刀具的位移，将此值反馈到 CNC 并与给定的指令值相比较，如果两者存在偏差，CNC 将发出减小偏差的指令，即控制电动机或驱动系统向着偏差减小的方向转动或移动，直至偏差为 0，图 1-4 为半闭环伺服驱动原理框图。

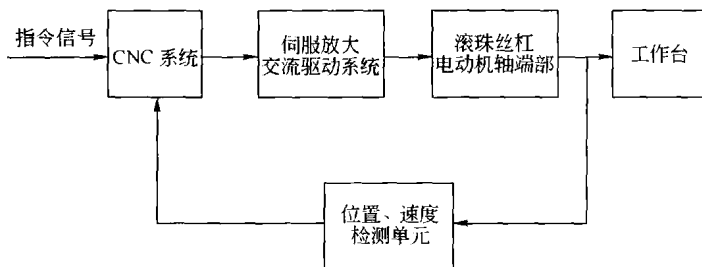


图 1-4 半闭环伺服驱动原理

3. 闭环伺服驱动系统

闭环伺服驱动系统的测量元件是直接安装在移动工作台上的。一般使用直线同步器、光栅尺、磁栅尺等，直接测出工作台的实际位置。该系统是将工作台的实际位置或所有环节的偏差全部检测出来，反馈到 CNC 系统并与之给定值相比较，CNC 根据比较后的结果，实时发出使偏差减小的控制指令，最后使偏差直至为 0，图 1-5 为闭环伺服驱动原理框图。

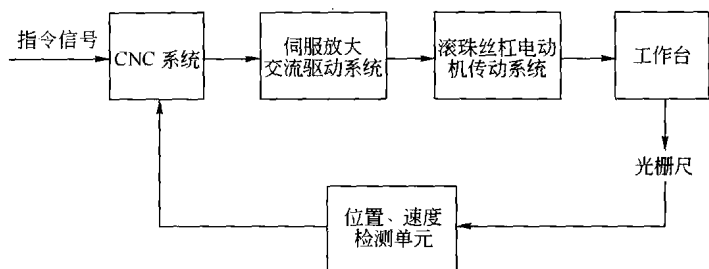


图 1-5 闭环伺服驱动原理框图

1.1.3 数控机床的分类

1. 按联动轴数分类

数控机床按联动轴数一般可分为：二轴联动（见图 1-6）、二轴半联动（见图 1-7）、三轴联动（见图 1-8）及四轴联动等。

(1) 二轴联动：X、Y 坐标轴同时受控，可加工平面轮廓。

(2) 二轴半联动：其中两轴联动，第三轴一般为主轴，主轴做周期性进给，可采用行切法加工三维空间曲面。

(3) 三轴联动：CNC 可同时控制 X、Y、Z 三个坐标轴进行联动，可加工空间曲面。

(4) 四轴联动：X、Y、Z 三轴联动，第四轴为 X 或 Y 轴的旋转坐标轴，即 A 轴或 B 轴。

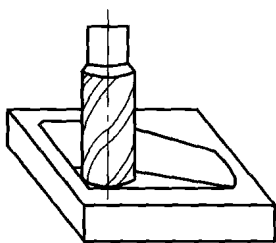


图 1-6 二轴联动

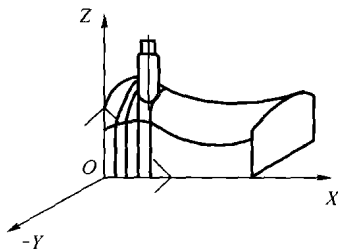


图 1-7 二轴半联动

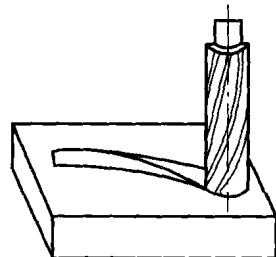


图 1-8 三轴联动

2. 按工艺用途分类

(1) 数控铣床、数控车床、数控镗床、数控钻床、数控磨床等。

(2) 带有刀库和自动换刀装置的铣削中心、车削中心等。

3. 按运动轨迹分类

(1) 点位控制数控机床。

(2) 直线控制数控机床。

- (3) 轮廓控制数控机床。
- (4) 空间曲线曲面数控机床。

4. 按有无检测反馈环节分类

- (1) 开环控制数控机床。
- (2) 半闭环控制数控机床。
- (3) 闭环控制数控机床。

5. 按布局形式分类

(1) 传统数控机床：按照串联运动学原理工作，将 X 、 Y 、 Z 坐标轴的运动进行叠加，在工件表面上形成刀位点的加工轨迹。

(2) 并联数控机床：按照并联运动学原理工作，刀具直接受控 X 、 Y 、 Z 坐标轴，当改变支撑刀具杆件的长度或移动杆件的支点时，在工件上形成刀位点的加工轨迹。

1.2 数控插补

零件的外形轮廓通常由直线、圆弧或平面、曲面构成。数控机床要通过数控加工程序以最小的允许误差，精确地加工出零件轮廓，CNC 就必须控制机床各坐标轴以最小量化单位的合成运动去逼近零件轮廓，这就是数控插补轨迹控制。

对一般的直线和圆弧，数控系统采取直线和圆弧插补指令；而对于非圆的任意曲线，数控系统则采用一小段直线或圆弧去拟合，这一小段的长度是由拟合允许误差决定的，拟合过程是由软件来完成的。

插补的方法有多种，早期的数控系统通常采用硬件逻辑电路来完成插补工作，称为硬件插补。目前，大多数数控系统均采用插补程序进行插补，称为软件插补。软件插补结构简单、灵活易变、可靠性好，而硬件插补速度快。在实际应用时经常采用软件、硬件共同插补，即用软件插补一小段数据作为粗插补，再用硬件插补方式将此小段数据进行精插补。

1.2.1 逐点比较插补法

逐点比较插补法，是在直线或圆弧的起点和终点之间按一定的规则进行数据点的密化，即按给定的进给速度（ F 值）在起点和终点之间计算出若干个在允差范围内的中间点的坐标值，由 CNC 向机床各坐标轴发出相应的进给脉冲序列，并将这些脉冲序列转换为机床刀具的运动。每一个脉冲使机床刀具运动的距离被定义为一个脉冲当量。这种由脉冲控制机床运动的方法，就是数控系统的插补法。插补是数控加工的核心任务。插补的基本内容概括起来可以描述为：以脉冲当量为单位，将加工轮廓进行有限分段、以折代直、以弦代弧、以直代曲、分段逼近，最后将加工轮廓相连接成加工轨迹。

根据直线斜率相等的原理可导出偏差判别式。如图 1-9 所示， OA 线段是待加工直线轨迹，也是程序拟给定的直线轨迹， O 点是坐标原点， (X_m, Y_m) 是动点 m 的坐标， (X_e, Y_e) 是终点 A 的坐标。该直线斜率可用两点式方程表示，其

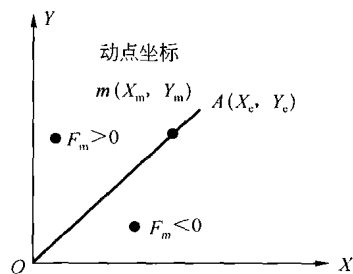


图 1-9 偏差判别

中： m 点坐标之比为 Y_m/X_m ； A 点坐标之比 Y_e/X_e 。因此，可以得出以下三种情况：

- (1) 当 $Y_m/X_m = Y_e/X_e$ 时，动点正好在该直线上；
- (2) 当 $Y_m/X_m < Y_e/X_e$ 时，动点在该直线的下方；
- (3) 当 $Y_m/X_m > Y_e/X_e$ 时，动点在该直线的上方。

令 $F_m = Y_m/X_m - Y_e/X_e$ ，将等式两边交叉相乘，可得偏差判别式或插补判别式，即：

$$F_m = Y_m X_e - Y_e X_m$$

在此只讨论第一象限的直线，动点（可以认为是刀具）从起点 O 出发，规定第一步动点向右运动，即动点沿 X 轴正向运动，这时动点 m 在直线的下方，即 $F_m < 0$ ；第二步动点应沿 Y 轴向上运动，动点 m 落在直线的上方，这时 $F_m > 0$ ；第三步动点应沿 X 轴向右运动，动点 m 在直线下方，这时 $F_m < 0$ 。当动点沿 X 轴、 Y 轴两个方向所走的步数与终点坐标值相等时，NCS 发出到达终点信号，停止插补。

由偏差判别式 $F_m = Y_m X_e - Y_e X_m$ 可得出如下结论：

- (1) 当 $F_m = Y_m X_e - Y_e X_m < 0$ 时，动点沿 Y 轴正向运动；
- (2) 当 $F_m = Y_m X_e - Y_e X_m > 0$ 时，动点沿 X 轴正向运动；
- (3) 当 $F_m = Y_m X_e - Y_e X_m = 0$ 时，动点沿 X 轴正向运动。

逐点比较插补法又称区域判别法或代数运算法。其基本原理是 CNC 在控制加工轨迹形成时，对每一个加工动点的瞬时坐标都要进行计算，并判断该计算值与给定点的偏差（其实是坐标正负），根据该点与给定点的偏差来决定下一步坐标进给的方向，使动点趋近给定轨迹，加工出合格零件。

在逐点比较插补过程中，CNC 控制机床刀具每走一步都要完成以下 4 个工作节拍：

- (1) 偏差判别。判别加工动点与给定几何图形轨迹的偏离位置，决定坐标进给方向。
- (2) 坐标进给。根据判别结果控制刀具沿某坐标轴进给一步，向给定的图形轨迹靠拢，缩小偏差。
- (3) 新偏差计算。计算新的加工动点与给定图形轨迹的偏差，作为下一步判别的依据。
- (4) 终点判别。判断是否到达程序给定的加工终点，若到达终点则停止插补。如此不断重复上述循环过程，就能加工出给定的图形轮廓或工件形状。

可见，逐点比较插补法是以折线来逼近直线或圆弧，它与给定的直线或圆弧之间的误差是在一个脉冲当量以内。因此，只要脉冲当量足够小，则加工精度就能够得到保证，如图 1-9、图 1-10 所示。

1.2.2 直线插补计算

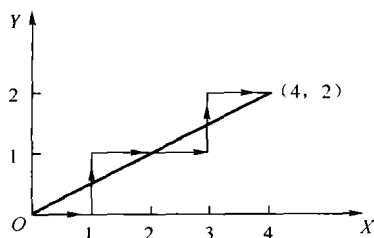


图 1-10 直线插补与动点坐标

图 1-10 中的直线，其插补计算过程可分成 6 个步骤和 2 个条件。

第一步：如图 1-9、图 1-10 所示，当 CNC 发出第一个脉冲时，规定动点沿着 X 轴正向往右移动一个脉冲当量（假设一个脉冲当量为 1mm），这时动点到达 $X=1, Y=0$ 处。判别式为 $F_m = Y_m X_e - Y_e X_m = 0 \times 4 - 2 \times 1 = -2 < 0$ 。

第二步：由 $F_m < 0$ 判断下一步动点应该向上移动，动点到达 $X=1, Y=1$ 处。判别式为 $F_m = Y_m X_e - Y_e X_m = 1 \times$

$4-2\times 1=2>0$ ，下一步动点应该向右移动。

第三步：由 $F_m>0$ 判断下一步动点应该向右移动，动点到达 $X=2, Y=1$ 处。判别式为 $F_m=Y_mX_e-Y_eX_m=1\times 4-2\times 2=0$ ，说明动点正好落在直线上，但没有插补结束，下一步动点仍继续向右移动。规定：动点在起始位置 $(0, 0)$ 处和动点落在欲加工的直线上时，即 $F_m=0$ 时，动点或刀具要继续向右移动。

第四步：由 $F_m=0$ 判断动点应该继续向右移动，动点到达 $X=3, Y=1$ 处。判别式为 $F_m=Y_mX_e-Y_eX_m=1\times 4-2\times 3=-2, F_m<0$ 下一步动点应该向上移动。

第五步：由 $F_m<0$ 判断动点应该向上移动，这时动点到达 $X=3, Y=2$ 处。判别式为 $F_m=Y_mX_e-Y_eX_m=2\times 4-2\times 3=2>0, F_m>0$ 下一步动点应该向右移动。

第六步：由 $F_m>0$ 判断动点应该向右移动，这时动点到达 $X=4, Y=2$ 处。判别式为 $F_m=Y_mX_e-Y_eX_m=2\times 4-2\times 4=0$ 。这时 $F_m=0$ 说明动点在直线上。

插补是否结束，要看插补完成的必要且充分条件能不能得到满足以下条件：

(1) 插补判别式： $F_m=0$ 。

(2) 程序给定插补的步数与实际完成插补的步数之差为 0，即 $\sum X_m+Y_m=4+2-(4+2)=0$ ，可知插补已经完成。

直线插补计算过程见表 1。

表 1-1 直线插补计算过程

步数	刀具运动方向	偏差判别	坐标进给	终点判别 (步数) $\sum X_m+Y_m$
0	起点 $X_m=0, Y_m=0$ 直线插补规定刀具在起始点时，刀具或动点应向右移动	$F_m=Y_mX_e-Y_eX_m=0\times 4-2\times 0=0$	动点在 $(0, 0)$ 处	CNC 每向某一轴发出一个脉冲指令，刀具就走过一个脉冲当量的距离
1	刀具向上运动	$F_m=Y_mX_e-Y_eX_m=0\times 4-2\times 1=-2<0$	动点在 $(1, 0)$ 处	$X_1+Y_0=1$
2	刀具向右运动	$F_m=Y_mX_e-Y_eX_m=1\times 4-2\times 1=2>0$	动点在 $(1, 1)$ 处	$X_1+Y_1=2$
3	刀具向右运动	$F_m=Y_mX_e-Y_eX_m=1\times 4-2\times 2=0$	动点在 $(2, 1)$ 处	$X_2+Y_1=3$
4	刀具向上运动	$F_m=Y_mX_e-Y_eX_m=1\times 4-2\times 3=-2<0$	动点在 $(3, 1)$ 处	$X_3+Y_1=4$
5	刀具向右运动	$F_m=Y_mX_e-Y_eX_m=2\times 4-2\times 3=2>0$	动点在 $(3, 2)$ 处	$X_3+Y_2=5$
6	刀具运动到终点	$F_m=Y_mX_e-Y_eX_m=2\times 4-2\times 4=2=0$	动点在 $(4, 2)$ 处	$X_4+Y_2=6$

1.2.3 圆弧插补计算

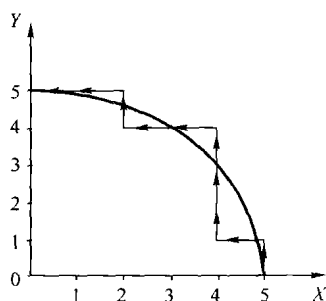
圆弧插补时,同样根据用户程序给出的被加工圆弧的起点和终点,建立一个平面坐标系,以第一象限的逆圆为例进行讨论。与直线插补相类似,圆弧插补法的基本原理是将加工动点到圆弧圆心的距离(动点半径)与被加工圆弧的名义半径(图 1-11 程序中给定的半径为 $R5$)相比较,并根据偏差大小确定坐标进给方向,使动点的轨迹逼近被加工圆弧。

图 1-11 是圆弧插补加工过程示意图,在圆弧插补过程中,同样用动点坐标 (X_m, Y_m) 运动轨迹与程序给定轨迹的拟合来描述圆弧的插补,直接给出圆弧插补偏差判别式:

$$F_m = Y_m^2 + X_m^2 - R^2$$

式中圆弧半径为 $R=5$,动点或加工点 (X_m, Y_m) 可能出现以下三种不同情况:

- (1) 正好在圆上;
- (2) 在圆内;
- (3) 在圆外。



圆弧插补偏差判别式的三种不同情况如下:

- (1) 动点或加工点 (X_m, Y_m) 正好在圆上, $Y_m^2 + X_m^2 - R^2 = 0$;
- (2) 动点或加工点 (X_m, Y_m) 在圆内, $Y_m^2 + X_m^2 - R^2 < 0$;
- (3) 动点或加工点 (X_m, Y_m) 在圆外, $Y_m^2 + X_m^2 - R^2 > 0$ 。

同样可利用判别式 $F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2$ 来判别动点的走向。

图 1-11 中圆弧插补加工的起始点是在 $(X5, Y0)$ 处,在实际操作过程中,首先要将刀具手动移到该起始点,也就是通过对刀操作来完成刀具的起始点定位,才能进行正确插补加工。

图 1-11 圆弧插补动点坐标

表 1-2 是圆弧插补的计算过程。

表 1-2 圆弧插补计算过程

步数	坐 标	偏 差 判 别	坐 标 进 给	终点判别 $\sum X_m + Y_m$
0	起点: $X_m=5, Y_m=0$ 规定圆弧插补刀具在起始点时,动点应向上移动	$F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2 = 5^2 + 0^2 - 5^2 = 0$	动点到 $(5, 0)$ 处	CNC 每向某一轴发出一个脉冲指令,刀具就走过一个脉冲当量的距离
1	动点向左移动	$F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2 = 5^2 + 1^2 - 5^2 > 0$	$X_m=5, Y_m=1$	$0+1=1$
2	动点向上移动	$F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2 = 4^2 + 1^2 - 5^2 < 0$	$X_m=4, Y_m=1$	$1+1=2$
3	动点向左上移动	$F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2 = 4^2 + 2^2 - 5^2 < 0$	$X_m=4, Y_m=2$	$1+2=3$
4	动点向上移动	$F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2 = 4^2 + 3^2 - 5^2 = 0$	$X_m=4, Y_m=3$	$1+3=4$
5	动点向左移动	$F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2 = 4^2 + 4^2 - 5^2 > 0$	$X_m=4, Y_m=4$	$1+4=5$
6	动点向左移动	$F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2 = 3^2 + 4^2 - 5^2 = 0$	$X_m=3, Y_m=4$	$2+4=6$

续表

步数	坐 标	偏 差 判 别	坐 标 进 给	终点判别 $\sum X_m + Y_m$
7	动点向上移动	$F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2 = 2^2 + 4^2 - 5^2 < 0$	$X_m = 2, Y_m = 4$	$3 + 4 = 7$
8	动点向左移动	$F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2 = 2^2 + 5^2 - 5^2 > 0$	$X_m = 2, Y_m = 5$	$3 + 5 = 8$
9	动点向左移动	$F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2 = 1^2 + 5^2 - 5^2 > 0$	$X_m = 1, Y_m = 5$	$4 + 5 = 9$
10	动点到达终点	$F_m = X_m^2 + Y_m^2 - R^2 = 0^2 + 5^2 - 5^2 = 0$	$X_m = 0, Y_m = 5$	$5 + 5 = 10$

复习思考题

1. 何谓计算机数字控制？其主要特点有哪些？
2. 数控机床都有哪几部分组成？
3. 数控机床有几种驱动形式？
4. 数控机床是如何分类的？
5. 何谓直线插补及圆弧插补？
6. 写出直线插补和圆弧插补判别式。
7. 在逐点比较法插补过程中，解释控制机床坐标每走一步都要完成以下 4 个工作节拍的含义（结合机床硬件组成）：
 - (1) 偏差判别。
 - (2) 坐标进给。
 - (3) 新偏差计算。
 - (4) 终点判别。
8. 数控机床主轴一般具有几种运动？
9. 数控机床联动坐标轴是什么意思？

第 2 章 数控铣削编程基础

2.1 数控铣床坐标系

2.1.1 机床坐标系

机床坐标系是机床固有的坐标系，机床在设计、制造、生产、出厂后便被确定下来。机床各运动坐标轴一起构成机床坐标系，机床坐标系的原点也称为机床坐标原点或机床零点。机床坐标原点是一个固定不变的点，除非生产厂家赋予用户一定的权限，否则，用户是不能随意更改的。

数控系统的微处理器（CPU）能够计算所有坐标轴相对于机床零点的位移量。但系统上电时并不知道测量的起点，为了正确地在机床工作之前建立机床坐标系，通常在每个坐标轴的移动范围内设置一个机床参考点（测量起点）。当机床启动时，一定要进行机动或手动回参考点的操作，用以建立机床坐标系。机床参考点可以和机床零点重合，也可以不重合。机床加工零件的几何尺寸范围，是机床零点或机床参考点到机械行程限位开关之间的最大距离。每个坐标轴的机械行程范围是由最大和最小限位开关来限定的。

机床坐标轴回参考点一般采用常开微动开关配反馈元件的标记脉冲方法确定，其过程如下：

（1）在由机床或数控系统制造商定义的回参考点方向上，使机床坐标轴（也可以说是刀具）向常开微动开关靠近，其实是每个坐标轴的正方向，在操作面板上，用手按一下“+X”、“+Y”、“+Z”按钮即可，刀具或工作台会自动运动，直到第一次压下行程开关。

（2）工作台压下行程开关后，即以慢速反方向运动，直到退出压下行程开关后，机床再次反方向慢速运动，直到再一次压下行程开关。

（3）再次压下开关后，即以慢速运动压下行程开关，直到 CNC 接收到第一个基准脉冲后，这时的机床位置就是机床参考点的准确位置。

机床回到了参考点位置，也就知道了该坐标轴的零点位置，找到了所有坐标轴的参考点，CNC 就建立起了机床坐标系。

机床坐标轴的有效行程范围是由软件限位来规定的，其值由制造商决定。机床零点（O）、机床参考点（M）、机床坐标轴的机械行程和有效行程的关系如图 2-1 所示。

2.1.2 机床坐标轴

为了简化编程和保证程序的可用性，对数控机床坐标轴和方向的命名，人们制订了统一的国际标准，规定直线进给运动的坐标轴用 X、Y、Z 表示，常称基本坐标轴，X、Y、Z 坐标轴之间的相互关系规定用右手定则判断。右手定则为：伸出右手大拇指、食指和中指，使之互相垂直，那么，大拇指的指向为 X 轴的正方向，食指的指向为 Y 轴的正方向，中指的指向为 Z 轴的正方向。

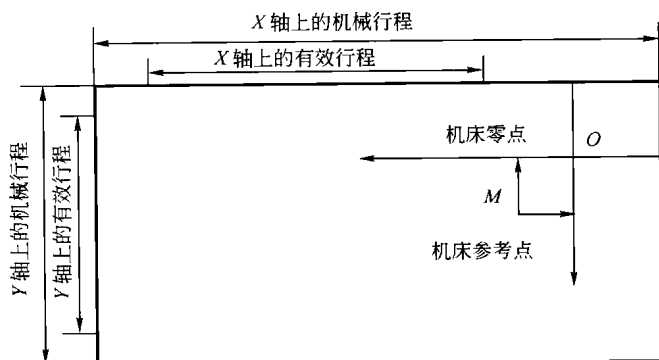


图 2-1 机械行程和有效行程的关系

围绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转的圆周进给坐标轴分别用 A 、 B 、 C 表示，根据右手螺旋定则判断其旋转方向。右手螺旋定则规定为：用大拇指指向 $+X$ 、 $+Y$ 、 $+Z$ 轴的正方向，其余四指共同握住 $+X$ 、 $+Y$ 、 $+Z$ 坐标轴，这时四指的指向就是圆周进给运动的 $+A$ 、 $+B$ 、 $+C$ 方向，如图 2-2 所示。

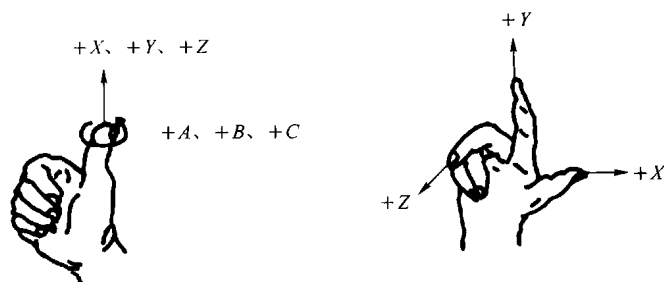


图 2-2 右手定则

数控机床的进给运动，有的由主轴带动刀具运动来实现，有的由工作台带着工件运动来实现。上述坐标轴的正方向，是假定工件不动，刀具相对于工件做进给运动的方向，同样两者运动的负方向也彼此相反。本书如不特殊说明，规定机床刀具在运动，而工作台不运动。

2.1.3 坐标轴的方向

机床坐标轴的方向取决于机床的类型和各组成部分的布局，对数控铣床而言， Z 轴与主轴轴线重合，刀具远离工件的方向为正方向 ($+Z$)； X 轴垂直于 Z 轴，并平行于工件的装卡面，如果为单立柱铣床（如华中 I 型 ZJK7532A 铣床），面对刀具主轴向立柱方向看，其向右运动的方向为 X 轴的正方向 ($+X$)； Y 轴与 X 轴、 Z 轴一起构成遵循右手定则的坐标系，如图 2-3 所示。

2.1.4 工件坐标系

在机床坐标系中，编程人员在工件的某个位置上选择一个已知点作为工件原点或程序原点，依此原点为坐标系

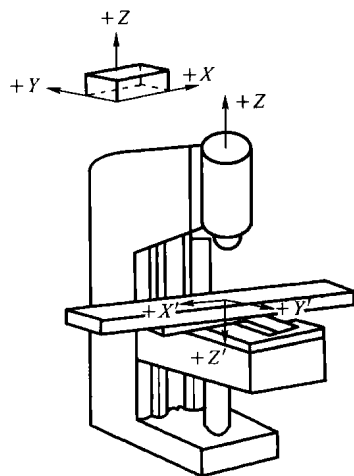


图 2-3 机床坐标轴方向