



普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

数控加工 实用技术

◎关跃奇
◎王万新

主 编
陈志鹏

王高升 副主编

➤ 数控技术是当今先进制造技术与装备最核心的技术，机械制造业的竞争，其实质是数控技术的竞争

➤ 本书坚持“宽而不散”的原则，做到内容够用、重点突出；理论问题论述条理清晰，便于掌握；实例分析典型全面，接近生产实际

➤ 配有 PPT 课件等教学资源，可登录华信教育资源网 www.hxedu.com.cn 免费获取



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

TG659
528

014054657

内容简介

普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

数控加工实用技术

关跃奇 主 编
王万新 陈志鹏 王高升 副主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry



北航

C1744495

TG659
528

723220310

内 容 简 介

本书共 7 章,系统介绍了数控加工技术的基本知识、数控加工工艺设计、数控车床和铣床加工的手工编程技术、Mastercam X6 软件的铣削加工自动编程技术、数控机床的结构和数控机床的操作与维护等。全书按照内容完整、少而精,兼顾课堂教学和自学需要的原则进行选材,将传统的数控加工技术知识进行优化整合,强调实用;内容丰富,通俗易懂;理论问题论述条理清晰,便于掌握;精选的编程实例分析典型全面,完全接近生产实际,对学生全面了解和掌握数控机床切削加工的工艺理论和数控编程技能有较大的帮助。每章附有思考与练习题,便于学生自学及复习掌握各章知识点。

本书可作为应用型本科、高职、高专、成人高校进行数控加工编程学习的教材,也可以作为从事数控加工的工程技术人员和操作人员的培训教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

数控加工实用技术 / 关跃奇主编. —北京:电子工业出版社, 2014.6

普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

ISBN 978-7-121-23092-9

I. ①数… II. ①关… III. ①数控机床—加工—高等学校—教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 084786 号

策划编辑:李 洁(ljje@phei.com.cn)

责任编辑:刘真平

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:北京天宇星印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:12.5 字数:320 千字

版 次:2014 年 6 月第 1 版

印 次:2014 年 6 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

专 家 编 审 委 员 会

主 任 委 员 黄传真

副主任委员 许崇海 张德勤 魏绍亮 朱林森

委 员 (排名不分先后)

李养良	高 荣	刘良文	郭宏亮	刘 军
史岩彬	张玉伟	王 毅	杨玉璋	赵润平
张建国	张 静	张永清	包春江	于文强
李西兵	刘元朋	褚 忠	庄宿涛	惠鸿忠
康宝来	宫建红	李西兵	宁淑荣	许树勤
马言召	沈洪雷	陈 原	安虎平	赵建琴
高 进	王国星	张铁军	马明亮	张丽丽
楚晓华	魏列江	关跃奇	沈 浩	鲁 杰
胡启国	陈树海	王宗彦	刘占军	

前 言

自第一台数控机床于 1952 年问世以来,数控技术得到了迅猛发展和广泛应用,给传统制造业的生产方式、产品结构、产业结构带来深刻的变化,也给传统的机电类专业人才的培养带来新的挑战。专家预言:21 世纪机械制造业竞争的实质是数控技术的竞争。目前,随着国内数控机床的应用范围日益扩大,急需培养一大批熟悉数控加工工艺、熟练掌握现代数控加工技术的应用型高级技术人才。为了适应我国高等教育发展及应用型卓越工程师人才培养的需要,我们总结了大量的实践经验,编写了本书。

本书为应用型本科系列教材之一,依据工程类高等教育的特点,按照机械设计制造及其自动化专业的培养目标和教学要求,同时兼顾材料成型、机电一体化等机械类专业的需求。全书共 7 章,系统介绍了数控加工技术的基本知识、数控加工工艺设计、数控车床和铣床加工的手工编程技术、Mastercam X6 软件的铣削加工自动编程技术、数控机床的结构和数控机床的操作与维护等。针对目前最流行的 CAD/CAM 软件的实用数控编程技术,按照数控编程的一般步骤和数控编程人员必备的知识结构,重点讲述了 Mastercam X6 的铣削加工,主要包括 Mastercam 的特点、系统相关性、2.5 轴加工、曲面 3 轴加工、曲面多加工及编程实例。本书精选的编程实例对全面了解和掌握数控机床切削加工的工艺理论和数控编程技能有较大的帮助。

本书内容全面,通俗易懂,实用性强;坚持“宽广而不散”的原则,做到内容够用、重点突出;理论问题论述条理清晰,便于掌握;实例分析典型全面,完全接近生产实际,具有示范性,有利于学生应用能力的培养。

全书由湖南工程学院关跃奇担任主编,负责全书的统稿工作,并编写了前言、第 1 章、第 6 章;德州学院王万新编写了第 2 章、第 7 章;北京工业大学耿丹学院陈志鹏编写了第 3 章、第 4 章;湖南工程学院王高升编写了第 5 章。

由于编者水平有限,书中难免存在错误与不妥之处,敬请读者批评指正。

编者电子邮箱:guanyaoqi2003@hnie.edu.cn; 383174624@qq.com.cn。

编 者

2013 年 10 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为，歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 数控加工的基本知识	(1)
1.1 数控加工技术基础	(1)
1.1.1 基本概念	(1)
1.1.2 数控机床的工作原理	(2)
1.1.3 数控加工运动轨迹的插补原理	(3)
1.1.4 数控加工的特点	(8)
1.2 数控机床的分类与应用	(9)
1.2.1 按机床运动的控制功能分类	(9)
1.2.2 按伺服系统的类型分类	(10)
1.2.3 按工艺用途分类	(11)
1.3 数控编程的基础知识	(12)
1.3.1 数控程序的编制方法及步骤	(12)
1.3.2 程序的结构与格式	(13)
1.3.3 数控机床的坐标系	(14)
1.3.4 辅助功能指令	(16)
1.4 数控加工技术的发展	(17)
1.4.1 数控加工技术的发展概述	(17)
1.4.2 先进数控加工技术	(19)
1.4.3 数控加工技术的发展趋势	(22)
思考与练习题	(23)
第 2 章 数控加工工艺设计	(24)
2.1 数控加工工艺特点	(24)
2.2 数控车削加工工艺设计	(25)
2.2.1 数控车床的加工对象	(25)
2.2.2 数控车削加工工艺性分析	(26)
2.2.3 数控车削刀具的选用	(26)
2.2.4 加工工艺路线的确定	(28)
2.2.5 加工工艺参数的确定	(32)
2.3 数控铣削加工工艺设计	(33)
2.3.1 数控铣床及加工中心的加工对象	(33)
2.3.2 数控铣削加工工艺性分析	(34)
2.3.3 数控铣床及加工中心刀具系统	(35)
2.3.4 加工工艺路线的确定	(42)
2.3.5 加工工艺参数的确定	(46)

2.4 数控加工工艺文件的编写	(48)
思考与练习题	(49)
第 3 章 数控铣床和加工中心的手工编程	(50)
3.1 数控铣床编程基本指令	(50)
3.1.1 绝对坐标与增量坐标编程指令 (G90、G91)	(51)
3.1.2 快速定位指令 (G00)	(51)
3.1.3 直线插补指令 (G01)	(52)
3.1.4 插补平面选择指令 (G17~G19)	(52)
3.1.5 圆弧插补指令 (G02、G03)	(52)
3.1.6 坐标系统的设定	(54)
3.1.7 暂停指令 G04	(54)
3.1.8 刀具半径补偿指令 (G40~G42)	(55)
3.1.9 刀具长度补偿指令 (G43、G44、G49)	(56)
3.1.10 返回参考点指令 (G27~G29)	(57)
3.1.11 孔加工固定循环指令 (G73、G74、G76、G80~G89)	(58)
3.1.12 主程序与子程序	(67)
3.2 数控铣床和加工中心编程实例	(68)
思考与练习题	(70)
第 4 章 数控车床的手工编程	(73)
4.1 数控车床编程的特点和方法	(73)
4.1.1 数控车床的编程特点	(73)
4.1.2 常用准备功能指令	(73)
4.1.3 切削循环指令	(76)
4.1.4 螺纹加工	(82)
4.1.5 刀尖圆弧自动补偿功能	(85)
4.2 数控车床的对刀	(87)
4.3 数控车床编程实例	(89)
思考与练习题	(91)
第 5 章 数控加工自动编程技术	(94)
5.1 数控自动编程概述	(94)
5.1.1 自动编程的内容与步骤	(94)

5.1.2 自动编程的主要特点	(95)	6.4 进给系统传动间隙的消除	(158)
5.2 常用自动编程软件介绍	(95)	6.4.1 传动齿轮间隙的消除	(158)
5.2.1 Unigraphics 的功能特点	(96)	6.4.2 键连接间隙的消除	(160)
5.2.2 Cimatron 的功能特点	(96)	6.5 回转工作台与导轨	(161)
5.2.3 CAXA-ME 的功能特点	(97)	6.5.1 回转工作台	(161)
5.3 CAM 实践——Mastercam X6 概述	(97)	6.5.2 导轨	(163)
5.3.1 Mastercam X6 的功能特点及基本操作	(97)	6.6 数控机床的自动换刀装置	(164)
5.3.2 Mastercam X6 系统的相关性及其应用	(100)	6.7 数控加工用辅具	(167)
5.4 CAM 实践——X6 二维加工	(100)	思考与练习题	(169)
5.4.1 外形铣削	(101)	第 7 章 数控机床的操作与维护	(170)
5.4.2 挖槽加工	(101)	7.1 数控机床操作装置	(171)
5.4.3 钻孔加工	(101)	7.2 数控机床的操作步骤	(174)
5.4.4 面铣削	(102)	7.3 MDI 的运行	(175)
5.4.5 二维加工实例	(102)	7.4 工作参数的设置	(176)
5.5 CAM 实践——X6 三维加工	(111)	7.4.1 刀库参数设置	(176)
5.5.1 曲面加工的共同参数设置	(112)	7.4.2 设置刀偏数据	(177)
5.5.2 曲面粗加工	(112)	7.4.3 工件零点偏移量的设置	(177)
5.5.3 曲面精加工	(121)	7.5 程序输入与文件管理	(180)
5.6 CAM 实践——X6 多轴加工	(126)	7.5.1 进入程序编辑菜单	(180)
5.6.1 多轴加工的共同参数设置	(127)	7.5.2 选择编辑程序	(180)
5.6.2 旋转四轴加工	(129)	7.5.3 编辑当前程序	(180)
5.6.3 五轴加工	(130)	7.5.4 保存程序	(181)
5.7 典型零件自动编程加工实例	(130)	7.6 数据的输入、输出	(181)
思考与练习题	(145)	7.6.1 以太网连接传输数据	(181)
第 6 章 数控机床的结构	(146)	7.6.2 RS232 串口传入数据	(181)
6.1 数控机床的结构特点	(146)	7.6.3 RS232 串口传出数据	(182)
6.2 数控机床主传动系统	(149)	7.6.4 RS232 串口 DNC 加工	(182)
6.2.1 数控机床主传动系统的特点	(149)	7.7 程序运行与控制	(183)
6.2.2 数控机床主传动系统的传动方式	(150)	7.8 数控机床的安全使用	(183)
6.2.3 数控机床的主轴部件	(150)	7.8.1 数控机床的操作规程	(184)
6.3 数控机床进给伺服系统	(153)	7.8.2 数控系统的日常维护	(185)
6.3.1 数控机床进给传动系统的特点	(153)	7.8.3 数控机床的日常维护保养	(186)
6.3.2 滚珠丝杠螺母副	(154)	思考与练习题	(188)
		参考文献	(189)

第 1 章 数控加工的基本知识

数控加工技术基础

【教学提示与目标】了解数控加工技术的概念、涉及的关键技术领域和发展趋势；掌握数控编程技术和数控机床的基本概念及理论；了解数控机床的工作原理、分类及数控加工技术发展趋势；掌握数控加工运动轨迹的插补原理、数控加工的特点、数控机床的分类等重点内容。

1.1 数控加工技术基础

1.1.1 基本概念

图 1-1 数控加工技术基础

1. 数控与数控技术

数字控制 (Numerical Control, NC) 简称数控, 是一种借助数字、字符或其他符号对某一工作过程 (如加工、测量、装配等) 进行可编程控制的自动化方法。

数字控制技术简称数控技术, 是用数字指令控制对象的一种自动控制技术。有早期使用的普通数控系统 (NC) 和目前广泛使用的计算机数控系统 (Computer Numerical Control, CNC)。采用数控技术的自动控制系统称为数控系统。

2. 数控机床

装备了计算机数控系统, 能实现运动和加工过程自动控制的机床称为数控机床。随着生产的发展, 数控技术已广泛应用于金属切削机床、三坐标测量机、工业机器人、数控雕刻机等机械设备上。

数控机床由程序、数控系统、伺服系统、检测反馈装置和机床主体组成, 综合了计算机、自动控制、精密测量、机床制造及其配套技术的最新成果, 成功地解决了现代产品多样化、零件形状复杂化、产品研制生产周期短、精度要求高的难题, 是现代制造业的主流设备, 也是关系国计民生、国防尖端建设的战略物资。

3. 数控加工

数控加工是指在数控机床上进行切削加工的一种工艺方法, 即采用数字信息对零件加工过程进行定义, 并控制机床进行自动运行的一种自动化加工方法。

数控加工技术集传统的机械制造、计算机、现代控制、传感控制、信息处理、光机电技术于一体, 已成为现代机械制造技术的基础。它的广泛应用, 给机械制造业的生产方式、产品结构带来了深刻的变化。数控技术的水平和普及程度, 已经成为衡量一个国家综合国力和工业现代化水平的重要标志。

1.1.2 数控机床的工作原理

1. 数控机床的基本工作过程

利用数控机床完成零件的数控加工过程如图 1-1 所示, 主要包括以下内容:

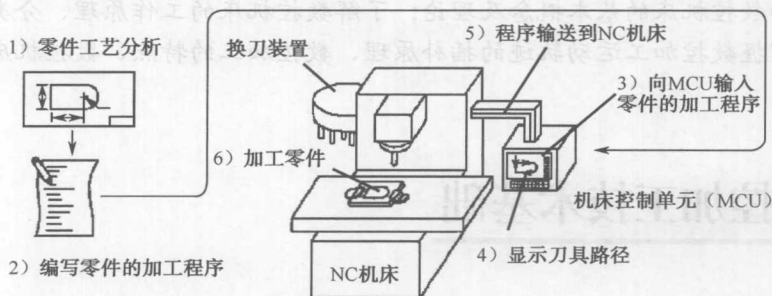


图 1-1 数控加工过程示意图

- ① 根据零件的加工图样进行工艺分析, 确定加工方案、工艺参数和位置数据。
- ② 用规定的程序代码和格式编写零件加工程序单, 或用自动编程软件进行辅助设计与制造工作, 直接生成零件的加工程序文件。
- ③ 程序的输入或传输。由手工编写的程序, 可通过数控机床的操作面板输入程序。由自动编程软件生成的程序, 通过计算机的串口直接输入到机床控制单元(MCU)。
- ④ 将输入传输到控制单元内的加工程序, 进行试运行、刀具路径模拟等。
- ⑤ 通过对机床的正确操作, 运行程序, 完成零件的加工。

2. 数控系统的工作过程

数控系统是数控机床的控制核心, 它通常由一台带有专门系统软件的计算机构成, 即数控系统由软件和硬件两部分组成。硬件是软件的物理基础, 软件是整个系统的灵魂, 数控系统的活动均依靠系统程序来指挥。数控系统的工作过程如图 1-2 所示。

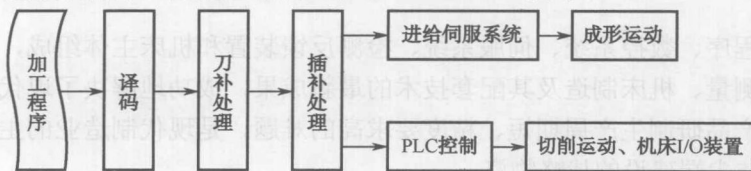


图 1-2 数控系统的工作过程

(1) 数据输入。输入数控系统的有零件和程序、控制参数、补偿参数, 输入过程中还需要完成校验和代码的转换工作。输入的全部信息存储在数控装置的内部存储器中。

(2) 译码处理。将零件程序以一个程序段为单位进行处理, 每个程序段含有零件轮廓信息(起点、终点、直线、圆弧等)、加工速度信息(F 代码), 以及其他如换刀、换挡、冷却液等辅助信息(M、S、T 代码等)。计算机依靠译码程序来识别这些代码符号, 按照一定的语言规则解释成计算机能够识别的数据形式, 并以一定的数据格式存放在指定的内存区间。

(3) 数据处理。一般包括刀具半径补偿、速度计算及辅助功能处理。刀具半径补偿是把零

件轮廓轨迹转化为刀具中心轨迹,从而大大减轻了编程人员的工作量。速度计算是解决该加工程序段以什么样的速度运动的问题。编程所给的刀具移动速度,是在各坐标的合成方向上的速度,速度处理首先是根据合成速度来计算各坐标方向的分速度,此外,对机床容许的最低速度和最高速度的限制进行判别并处理。辅助功能如换刀、主轴启停、冷却液开停等,大部分都是些开关量,因此辅助功能处理的主要工作是标志识别,即在程序执行时发出信号,让机床相应部件执行这些动作。

(4) 插补运动。数控机床在加工复杂几何形状的零件时,机床的多个坐标轴必须同时联动控制。这就要求数控系统能够产生一系列控制坐标轴的运动指令,因此,机床数字控制的中心问题是:计算机数控装置如何把输入的数控程序,通过运算处理来控制刀具的运动轨迹。该过程由数控系统的插补功能来实现。插补是在已知曲线的起点、终点之间,确定一些中间点坐标值的计算方法。插补的任务是根据加工程序中进给速度的要求,完成从曲线轮廓起点到终点的中间点坐标值的计算。插补程序在每个插补周期运行一次,在每个插补周期中,根据指令进给速度计算出一个微小的直线数据段,通常经过若干个插补周期后,插补加工完一个程序段,即从数据段的起点走到终点。计算机数控系统是一边插补,一边加工;而在本次处理周期内插补程序的作用是计算下一个处理周期的位置增量。

当一个程序段开始插补加工时,管理程序即着手准备下一个程序段的读入、译码、数据处理,即由它调动各个功能子程序,并保证在一个程序段加工过程中完成下一个程序段的数据准备,一旦本程序段加工完毕立即开始下一个程序段的插补计算。整个零件加工就在这种周而复始的过程中完成。

(5) 位置控制。位置控制可以由软件来实现,也可以由硬件来实现,它的主要任务是在每个采样周期内,将插补计算的理论位置与实际反馈位置相比较,用其差值去控制进给电动机,进而控制机床工作台(或刀具)的位移,这样数控机床就自动地按照零件加工程序的要求进行切削加工。

3. 伺服系统的工作原理

在数控机床中,伺服系统是数控系统的执行部分。它用来控制被控对象的转角(或位移),使其能自动地、连续地、精确地复现输入指令的变化规律。在数控机床上伺服驱动系统接收来自插补装置或插补软件产生的进给脉冲指令,经过一定的信号变换及电压、功率放大,将其转化为机床工作台相对于切削刀具的运动,主要通过对步进电动机、交/直流伺服电动机等进给驱动元件的控制来实现。

数控机床的伺服驱动系统作为一种实现切削刀具与工件间运动的进给驱动和执行机构,是数控机床的一个重要部分,在很大程度上决定了数控机床的性能。数控机床的最高转动速度、跟踪精度、定位精度等一系列重要指标主要取决于伺服驱动系统性能的优劣。

1.1.3 数控加工运动轨迹的插补原理

实际加工中零件的轮廓形状是由各种线型(如直线、圆弧、螺旋线、抛物线、自由曲线)构成的。其中最主要的是直线和圆弧。数控编程时,一般仅提供描述该线型所必需的相关参数,如对直线,提供其起点和终点;对圆弧,提供起点、终点、顺圆或逆圆,以及圆心相对于起点的位置。为满足零件几何尺寸精度要求,必须在刀具(或工件)运动过程中实时计算出满足线形和进给速度要求的在起点和终点之间的若干中间点,通常把这个过程称为“插补”

(Interpolation)。插补的结果是输出运动轨迹的中间点坐标值，机床伺服系统根据此坐标值控制各坐标轴协调运动，走出预定轨迹。

数控系统中，完成插补运算的装置称为插补器。插补运算可由硬件或软件来完成，早期的 NC 系统，完全由硬件（即逻辑电路）实现插补。在计算机数控（CNC）系统中，由软件（即程序）完成插补，具有结构简单、灵活多变、可靠性好等优点。现代计算机数控系统为了满足插补速度和插补精度越来越高的要求，采用软件与硬件相结合的方法，由软件完成粗插补，硬件完成精插补。

目前，CNC 系统中常用的插补算法可归纳为两类：

(1) 基准脉冲插补法。基准脉冲插补又称脉冲增量插补。其特点是每次插补结束仅向各运动坐标轴输出一个控制脉冲，各坐标仅产生一个脉冲当量或行程的增量。脉冲序列的频率代表坐标运动的速度，而脉冲的数量代表运动位移的大小。常用的基准脉冲插补的方法有逐点比较法、数字积分法、脉冲乘法器等。

(2) 数据采样插补法。数据采样插补又称数字增量插补，其特点是采用时间分割思想，根据编程的进给速度将轮廓曲线分割为每个插补周期的进给直线段（又称轮廓步长）进行数据密化，以此来逼近轮廓曲线。然后再将轮廓步长分解为各个坐标轴的进给量（一个插补周期的进给量），作为指令发给伺服驱动装置。该装置按伺服检测采样周期采集实际位移，并反馈给插补器与指令比较，有误差运动，误差为零停止，从而完成闭环控制。常用的数据采样插补法有时间分割法和扩展数字积分法。

本节仅介绍一下逐点比较插补法的计算。

1. 逐点比较插补法

逐点比较法就是刀具（或工件）每走一步控制系统都要将加工点与给定的图形轨迹相比较，以决定下一步进给的方向，使之逼近加工轨迹。逐点比较法是以折线来逼近直线或圆弧，其最大误差不超过一个设定单位（脉冲当量）。它运算直观，输出脉冲均匀，而且输出脉冲的速度变化小，调节方便，在两坐标数控机床中应用较为普遍。

2. 逐点比较法直线插补

1) 偏差计算公式

假设加工如图 1-3 所示的第一象限的直线 OA 。直线的起点为坐标原点 O ，终点 A 的坐标为 (x_e, y_e) 。设 $M(x_m, y_m)$ 为任一加工点。若 M 在 OA 直线上，则根据相似三角形的关系可得

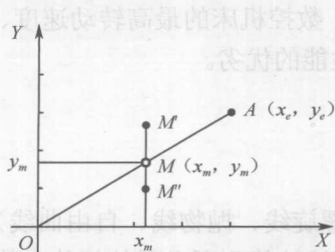


图 1-3 逐点比较法直线插补

$$\frac{y_m}{x_m} = \frac{y_e}{x_e} \quad \text{取} \quad F_m = y_m x_e - x_m y_e$$

作为直线插补的偏差判别式。

若 M 点在 OA 直线上， $\frac{y_m}{x_m} = \frac{y_e}{x_e}$ ，则 $F_m = 0$ ；

若 M 点在 OA 直线上方的 M' 处， $\frac{y_m}{x_m} > \frac{y_e}{x_e}$ ，则 $F_m > 0$ ；

若 M 点在 OA 直线下方的 M' 处, $\frac{y_m}{x_m} < \frac{y_e}{x_e}$, 则 $F_m < 0$ 。

设在某加工动点处, 有 $F_m \geq 0$, 为了逼近给定轨迹, 应沿 $+X$ 方向进给一步, 走一步后新的坐标值为

新的偏差为

$$x_{m+1}=x_m+1, y_{m+1}=y_m$$
$$F_{m+1}=y_{m+1}x_e-x_{m+1}y_e=F_m-y_e$$

若 $F_m < 0$, 为了逼近给定轨迹, 应向 $+Y$ 方向进给一步, 走一步后新的坐标值为

新的偏差为

$$x_{m+1}=x_m, y_{m+1}=y_m+1$$
$$F_{m+1}=F_m+x_e$$

2) 插补计算过程

插补计算时, 每走一步, 都要进行以下四个步骤 (又称四个节拍) 的逻辑运算和算术运算, 即偏差判别、坐标计算和进给、偏差计算、终点判别。

3) 终点判别

逐点比较法的终点判断方法一般有两种:

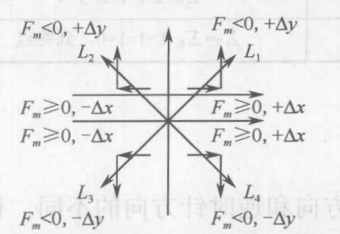
① 设置 X 、 Y 两个减法计数器, 加工开始前, 在 X 、 Y 计数器中分别存入终点坐标 x_e 、 y_e , 在 X 坐标 (或 Y 坐标) 进给一步时, 就在 X 计数器 (或 Y 计数器) 中减去 1, 直到这两个计数器中的数都减到零时, 便到达终点。

② 用一个终点计数器, 寄存从起点到达终点的总步数 Σ ($\Sigma=x_e+y_e$), X 、 Y 坐标每进一步, Σ 减去 1, 直到 Σ 为零时, 就到了终点。

4) 不同象限的直线插补计算

上面讨论的为第一象限的直线插补计算方法, 其他三个象限的直线插补算法可以用相同的原理获得, 表 1-1 列出了四个象限的直线插补时的偏差计算公式和进给脉冲方向, 注意在偏差计算时, 无论是哪个象限的直线, 均用坐标的绝对值来计算。

表 1-1 四个象限的直线插补计算

	线 型	$F_m > 0$ 时, 进给方向	$F_m < 0$ 时, 进给方向	偏差计算公式
$F_m < 0, +\Delta y$ L_2	L_1	$+\Delta x$	$+\Delta y$	$F_m > 0$ 时: $F_{m+1}=F_m-y_e$ $F_m < 0$ 时: $F_{m+1}=F_m+x_e$
$F_m \geq 0, -\Delta x$ $F_m \geq 0, -\Delta x$	L_2	$-\Delta x$	$+\Delta y$	
$F_m < 0, -\Delta y$ L_3	L_3	$-\Delta x$	$-\Delta y$	
$F_m < 0, -\Delta y$ $F_m < 0, -\Delta y$	L_4	$+\Delta x$	$-\Delta y$	

5) 直线插补计算流程

如图 1-4 所示为逐点比较法直线插补的流程图。

【例 1-1】图 1-5 中的 OE 为欲加工的第一象限直线, 直线的起点为 $O(0, 0)$, 终点为 $(4, 3)$, 试用逐点比较法对该直线进行插补, 并画出插补轨迹。

解: 插补完这段直线, 刀具沿 X 、 Y 轴应走的总步数为

$$\Sigma=x_e+y_e=4+3=7$$

开始时刀具在直线起点, 故 $F_0=0$, 插补运算过程见表 1-2, 插补轨迹见图 1-5。

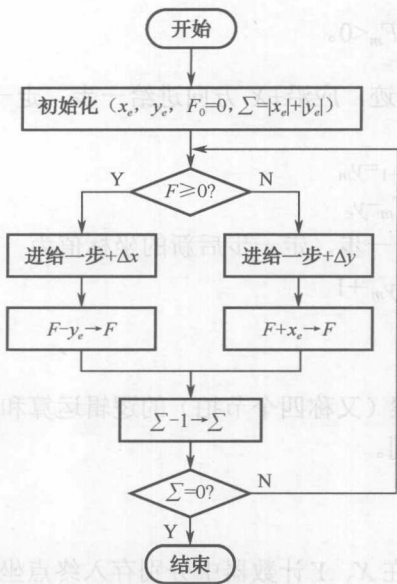


图 1-4 第一象限逐点比较法直线插补的运算流程

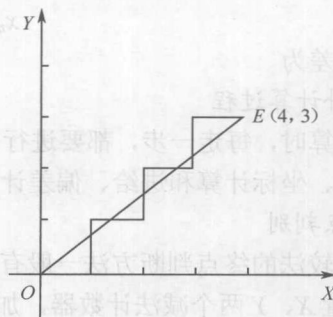


图 1-5 直线插补轨迹

表 1-2 直线插补的运算过程

序 号	偏差进给	进 给	偏差计算	终点判别
1	$F_0=0$	$+\Delta x$	$F_1=F_0-y_e=0-3=-3$	$\Sigma_1=\Sigma_0-1=7-1=6$
2	$F_1=-3<0$	$+\Delta y$	$F_2=F_1+x_e=-3+4=1$	$\Sigma_2=\Sigma_1-1=6-1=5$
3	$F_2=1>0$	$+\Delta x$	$F_3=F_2-y_e=1-3=-2$	$\Sigma_3=\Sigma_2-1=5-1=4$
4	$F_3=-2<0$	$+\Delta y$	$F_4=F_3+x_e=-2+4=2$	$\Sigma_4=\Sigma_3-1=4-1=3$
5	$F_4=2>0$	$+\Delta x$	$F_5=F_4-y_e=2-3=-1$	$\Sigma_5=\Sigma_4-1=3-1=2$
6	$F_5=-1<0$	$+\Delta y$	$F_6=F_5+x_e=-1+4=3$	$\Sigma_6=\Sigma_5-1=2-1=1$
7	$F_6=3>0$	$+\Delta x$	$F_7=F_6-y_e=3-3=0$	$\Sigma_7=\Sigma_6-1=1-1=0$, 到终点

3. 逐点比较法圆弧插补

1) 偏差计算方式

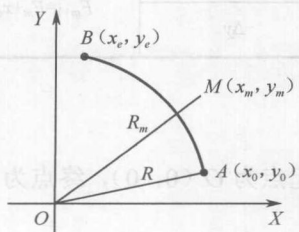


图 1-6 逐点比较法圆弧插补

圆弧轨迹的形式有顺时针方向和逆时针方向的不同，也有坐标象限的区别。现以第一象限逆圆为例讨论偏差计算公式。如图 1-6 所示，设需要加工圆弧 AB ，圆弧的圆心在坐标系原点，已知圆弧的起点为 $A(x_0, y_0)$ ，终点为 $B(x_e, y_e)$ ，圆弧半径为 R 。令加工动点为 $M(x_m, y_m)$ ，它与圆心的距离为 R_m 。比较 R_m 和 R 反映加工偏差。

$$R_m^2 = x_m^2 + y_m^2, \quad R^2 = x_0^2 + y_0^2$$

因此，可得圆弧偏差判别式为

$$F_m = R_m^2 - R^2 = x_m^2 + y_m^2 - R^2$$

若 $F_m=0$ ，表明加工点 M 在圆弧上；

若 $F_m>0$ ，表明加工点 M 在圆弧外；

若 $F_m < 0$ ，表明加工点 M 在圆弧内。

设加工动点正处于 $M(x_m, y_m)$ 点，若 $F_m \geq 0$ ，对于第一象限的逆圆，为了逼近圆弧，应沿 $-X$ 方向进给一步，到 $m+1$ 点，其坐标值为 $x_{m+1}=x_m-1$ ， $y_{m+1}=y_m$ 。新加工点的偏差为

$$F_{m+1} = x_{m+1}^2 + y_{m+1}^2 - R^2 = F_m - 2x_m + 1$$

若 $F_m < 0$ ，为了逼近圆弧，应沿 $+Y$ 方向进给一步，到 $m+1$ 点，其坐标值为 $x_{m+1}=x_m$ ， $y_{m+1}=y_m+1$ ，新加工点的偏差为

$$F_{m+1} = x_{m+1}^2 + y_{m+1}^2 - R^2 = F_m + 2y_m + 1$$

因为加工是从圆弧的起点开始的，起点的偏差 $F_0=0$ ，所以新加工点的偏差总可以根据前一点的数据计算出来。

2) 终点判别法

圆弧插补的终点判断方法和直线插补基本相同。可将起点到达终点 X 、 Y 轴所走步数的总和 Σ 存入一个计数器，即

$$\Sigma = |x_e - x_0| + |y_e - y_0|$$

无论 X 轴还是 Y 轴每进给一步，从 Σ 中减去 1，当 $\Sigma=0$ 时便发出终点到达信号。

3) 圆弧插补计算流程

和直线插补计算流程一样，逐点比较法圆弧插补每进给一步也需要经过四个工作节拍，但是偏差计算公式不同，如图 1-7 所示。

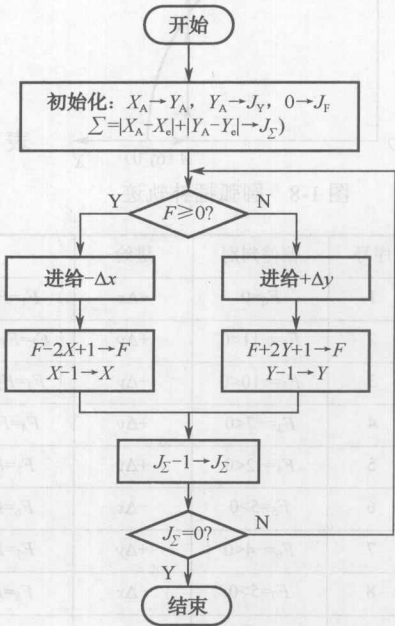
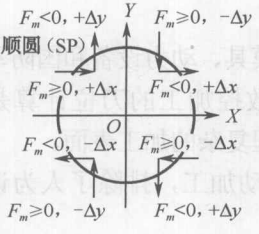
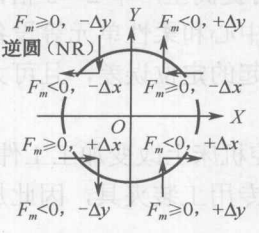
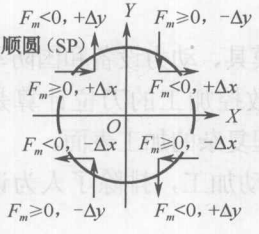


图 1-7 逐点比较法圆弧插补流程

4) 四个象限圆弧插补计算公式

圆弧所在象限不同，顺逆不同，则插补计算公式和进给方向也不同。归纳起来共有八种情况，这八种情况的进给脉冲方向和偏差计算公式见表 1-3。

表 1-3 四个象限的圆弧插补计算

	线 型	$F_m \geq 0$ 时，进给方向	$F_m < 0$ 时，进给方向	偏差计算公式
	SR1	$-\Delta y$	$+\Delta x$	$F_m \geq 0$ 时: $F_{m+1} = F_m - 2y_m + 1$ $y_{m+1} = y_m - 1$ $F_m < 0$ 时: $F_{m+1} = F_m + 2x_m + 1$ $x_{m+1} = x_m + 1$
	SR3	$+\Delta y$	$-\Delta x$	$F_m \geq 0$ 时 $F_{m+1} = F_m - 2x_m + 1$ $x_{m+1} = x_m - 1$ $F_m < 0$ 时: $F_{m+1} = F_m + 2y_m + 1$ $y_{m+1} = y_m + 1$
	NR2	$-\Delta y$	$-\Delta x$	
	NR4	$+\Delta y$	$+\Delta x$	
	SR2	$+\Delta x$	$+\Delta y$	
	SR4	$-\Delta x$	$-\Delta y$	$F_m \geq 0$ 时 $F_{m+1} = F_m - 2x_m + 1$ $x_{m+1} = x_m - 1$ $F_m < 0$ 时: $F_{m+1} = F_m + 2y_m + 1$ $y_{m+1} = y_m + 1$
	NR1	$-\Delta x$	$+\Delta y$	
	NR2	$+\Delta x$	$-\Delta y$	
	SR2	$+\Delta x$	$+\Delta y$	

注：表中 x_m 、 y_m 、 x_{m+1} 、 y_{m+1} 都是动点坐标的绝对值。

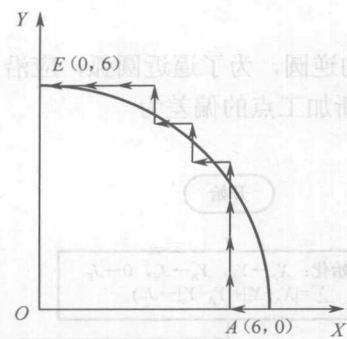


图 1-8 圆弧插补轨迹

【例 1-2】 设欲加工第一象限圆弧 AE，圆弧起点为 A (6, 0)，终点为 E (0, 6)，用逐点比较法对该段圆弧进行插补，并画出插补轨迹。

解： 加工完这段圆弧，刀具沿 X、Y 轴应走的总步数为
 $\Sigma=|6-0|+|0-6|=12$

开始时刀具在起点 A，即在圆弧上， $F_0=0$ 。插补运算过程如表 1-4 所示，插补轨迹如图 1-8 所示。

表 1-4 圆弧插补运算过程

序号	偏差判别	进给	偏差计算	坐标计算	终点判别
1	$F_0=0$	$-\Delta x$	$F_1=F_0-2X_0+1=0-2\times6+1=-11$	$X_1=6-1=5, Y_1=0$	$\Sigma_1=\Sigma_0-1=12-1=11$
2	$F_1=-11<0$	$+\Delta y$	$F_2=F_1+2Y_1+1=-11+2\times0+1=-10$	$X_2=5, Y_2=0+1=1$	$\Sigma_2=\Sigma_1-1=11-1=10$
3	$F_2=-10<0$	$+\Delta y$	$F_3=F_2+2Y_2+1=-10+2\times1+1=-7$	$X_3=5, Y_3=1+1=2$	$\Sigma_3=\Sigma_2-1=10-1=9$
4	$F_3=-7<0$	$+\Delta y$	$F_4=F_3+2Y_3+1=-7+2\times2+1=-2$	$X_4=5, Y_4=2+1=3$	$\Sigma_4=\Sigma_3-1=9-1=8$
5	$F_4=-2<0$	$+\Delta y$	$F_5=F_4+2Y_4+1=-2+2\times3+1=5$	$X_5=5, Y_5=3+1=4$	$\Sigma_5=\Sigma_4-1=8-1=7$
6	$F_5=5>0$	$-\Delta x$	$F_6=F_5-2X_5+1=5-2\times5+1=-4$	$X_6=5-1=4, Y_6=4$	$\Sigma_6=\Sigma_5-1=7-1=6$
7	$F_6=-4<0$	$+\Delta y$	$F_7=F_6+2Y_6+1=-4+2\times4+1=5$	$X_7=4, Y_7=4+1=5$	$\Sigma_7=\Sigma_6-1=6-1=5$
8	$F_7=5>0$	$-\Delta x$	$F_8=F_7-2X_7+1=5-2\times4+1=-2$	$X_8=4-1=3, Y_8=5$	$\Sigma_8=\Sigma_7-1=5-1=4$
9	$F_8=-2<0$	$+\Delta y$	$F_9=F_8+2Y_8+1=-2+2\times5+1=9$	$X_9=3, Y_9=5+1=6$	$\Sigma_9=\Sigma_8-1=4-1=3$
10	$F_9=9>0$	$-\Delta x$	$F_{10}=F_9-2X_9+1=9-2\times3+1=4$	$X_{10}=3-1=2, Y_{10}=6$	$\Sigma_{10}=\Sigma_9-1=3-1=2$
11	$F_{10}=4>0$	$-\Delta x$	$F_{11}=F_{10}-2X_{10}+1=4-2\times2+1=1$	$X_{11}=2-1=1, Y_{11}=6$	$\Sigma_{11}=\Sigma_{10}-1=2-1=1$
12	$F_{11}=1>0$	$-\Delta x$	$F_{12}=F_{11}-2X_{11}+1=1-2\times1+1=0$	$X_{12}=1-1=0, Y_{12}=6$	$\Sigma_{12}=\Sigma_{11}-1=0$ ，到终点

1.1.4 数控加工的特点

与传统的加工手段相比，数控加工具有以下几个方面的特点：

- (1) 具有复杂形状加工能力。复杂形状零件在飞机、汽车、造船、模具、动力设备和国防军工等制造部门具有重要地位，其加工质量直接影响整机产品的性能；数控加工的刀位计算是由 CAD/CAM 系统完成的，不需要人工的计算，能够高效率、高质量地处理复杂的加工表面。
- (2) 加工精度高，质量稳定。数控加工是用数字程序控制实现自动加工，排除了人为误差因素，且加工误差还可以由数控系统通过软件技术进行补偿校正。
- (3) 生产效率高。与采用普通机床加工相比，采用数控加工一般可提高生产率 2~3 倍，在加工复杂零件时生产率可提高十几倍甚至几十倍。特别是五面体加工中心和柔性单元等设备，零件一次装夹后能完成几乎所有部位的加工，不仅可消除多次装夹引起的定位误差，且可大大减少加工辅助操作，使加工效率进一步提高。
- (4) 适应性强和高柔性。适合加工单件或小批量复杂工件。在数控机床上改变加工工件时，只需改变零件程序即可适应不同品种的零件加工，且几乎不需要制造专用工装夹具，因此加工柔性好。

可以说，生产对象的形态越复杂、加工精度要求越高、设计更改越频繁、生产批量越小，

数控加工的优越性就发挥得越明显。数控机床的使用效果在很大程度上取决于其应用技术水平的高低,而数控编程则是数控加工应用技术的核心。

1.2 数控机床的分类与应用

数控机床的品种规格较多,从不同角度对其进行考查,就有不同的分类方法,一般可根据其功能和结构,按以下原则进行分类。

1.2.1 按机床运动的控制功能分类

(1) 点位控制数控机床。这类机床仅能实现刀具相对于工件从一点到另一点的精确定位运动,对点与点之间的运动轨迹不作控制要求,在移动过程中不进行任何加工,各坐标轴之间的运动是不相关的,可以同时移动,也可以依次运动。为了实现快速精确的定位,两点间位移的移动一般是先快速移动,然后慢速趋近定位点,以确保定位精度。如图 1-9 所示为点位控制的运动轨迹。具有点位控制功能的机床主要有数控钻床、坐标镗床、数控冲床和数控测量机等。随着数控技术的发展和数控系统价格的降低,单纯采用点位控制的数控系统已不多见。

(2) 直线控制数控机床。这类机床除了要求控制点与点之间的准确位置外,还需控制两相关点之间的移动速度和移动轨迹,一般是沿与坐标轴平行的方向作切削运动,如图 1-10 所示。具有直线控制功能的机床主要有某些简易数控车床、数控镗铣床等。同样,单纯采用直线控制的数控机床也不多见。

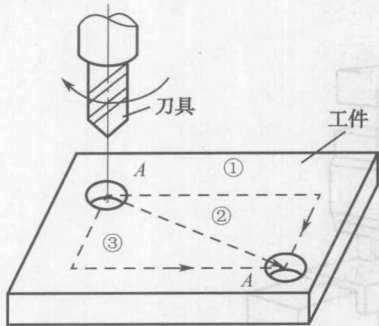


图 1-9 点位控制加工示意图

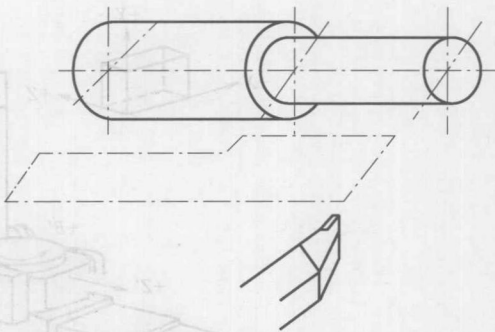


图 1-10 直线控制加工示意图

(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,能同时控制两个或两个以上坐标轴联动,使工件相对于刀具按程序规定的轨迹和速度运动。这类机床在加工过程中,每时每刻都对各坐标的位移和速度进行严格的不间断控制。

具有连续控制功能的机床根据所控制的联动轴数不同,可分为两轴联动、两轴半联动、三轴联动、四轴和五轴联动。两轴联动同时控制两个坐标轴实现两维直线、圆弧、曲线的轨迹控制,如图 1-11 所示。两轴半联动主要用于三轴以上机床的控制,其中任意两根轴联动,第三根轴作周期性进给,以实现简单曲面的轨迹控制,如图 1-12 所示。三轴联动一般分两类,一类是 X 、 Y 、 Z 三个直线坐标轴联动,多用于数控铣床和加工中心,如图 1-13 所示用球头铣刀铣削三维空间曲面;另一类是除了同时控制 X 、 Y 、 Z 中两个直线轴外,还同时控制绕某一直线坐标轴