



国家职业教育技能培训系列教材

“双证制”教学改革用书

数控机床的应用

Shukong Jichuang De Yingyong

韩鸿鸾 编著



国家职业教育技能培训系列教材
“双证制”教学改革用书

数控机床的应用

韩鸿鸾 编著
王俊元 主审



机械工业出版社

本教材分为9章,包括数控机床概述、数控机床的结构、数控机床加工工艺、数控编程基础、数控车床的编程与操作、数控铣床/加工中心的编程与操作、自动编程简介、数控机床使用、数控技术与机械加工的发展等内容。每章的后面还附有一定的思考与练习题以供读者选用。在本书的附录中介绍了数控加工常用术语。

本教材适用于高等职业学校、高等专科学校、成人教育高校及本科院校的二级职业技术学院、技术(技师)学院、高级技工学校、继续教育学院和民办高校的机电专业(非数控专业),亦可作为其他高职类专业及本科相关专业的师生用书,还可以作为工厂中数控机床操作与编程人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床的应用/韩鸿鸾编著. —北京:机械工业出版社, 2007.9
国家职业教育技能培训系列教材.“双证制”教学改革用书
ISBN 978-7-111-22317-7

I. 数… II. 韩… III. 数控机床—技术培训—教材 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第139761号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:汪光灿 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣
封面设计:张静 责任印制:杨曦
北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)
2008年1月第1版第1次印刷
184mm×260mm·22.75印张·562千字
0 001—3 000册
标准书号:ISBN 978-7-111-22317-7
定价:33.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 88379182
封面防伪标均为盗版

前 言

数控机床是现代机械工业的重要技术装备,也是先进制造技术的基础装备。随着微电子技术、计算机技术、自动化技术的发展,数控机床也得到了飞速发展,在我国几乎所有的机床品种都有了数控机床,并且还发展了一些新的品种。由于机床数控系统技术复杂,种类繁多,现在数控机床的“应用难”问题,已经是影响数控机床有效利用的首要问题。因此,职业院校对于数控机床应用人员的培养已成了当务之急。

本教材具有如下特点:在技术上是先进的,即所介绍的内容,都是社会上普遍应用的先进内容;在内容上是够用的和实用的,即所介绍的内容对于职业院校的学生来说够用就可以了,不是越多越好,这些内容都是实用的,学生学过后在工厂中就能用到;在顺序安排上是合理的,在应用上是可操作的,本教材不是工具书,亦不是手册,因此,力争做到方便教师对该教材的应用。

本教材由威海职业学院韩鸿鸾编著,由中北大学王俊元主审。山东省临沂技术学院、山东省烟台职业学院、山东省东营职业学院及湖北省、广东省的高等职业院校对本教材的编写提出了宝贵意见,在编写过程中得到了南京数控培训中心的大力帮助。部分从事数控专业教学的教师和从事数控加工的技术人员对本教材的编写也提出了一些建设性建议,在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促,再加上编者水平有限,书中缺陷乃至错误在所难免,望广大读者给予批评、指正。

编者于威海

2007年8月16日

目 录

前言

第一章 数控机床概述	1
第一节 概述	1
第二节 数控机床的分类	3
第三节 数控系统的插补原理	8
第四节 数控机床的组成及工作原理	18
思考与练习	23
第二章 数控机床的结构	24
第一节 概述	24
第二节 数控机床的主传动系统	29
第三节 数控机床的进给传动系统	34
第四节 数控机床用导轨	42
第五节 自动换刀装置	45
第六节 数控机床的辅助机构	53
第七节 典型数控系统简介	68
第八节 典型数控机床简介	90
思考与练习	94
第三章 数控机床加工工艺	95
第一节 数控加工工艺概述	95
第二节 数控加工工艺文件	95
第三节 数控机床加工工艺分析	100
第四节 数控加工用刀具	107
第五节 数控机床用夹具	122
第六节 典型零件数控加工工艺分析	126
思考与练习	130
第四章 数控编程基础	132
第一节 数控编程概述	132
第二节 数控机床坐标系	135
第三节 数控机床的主要功能	139
第四节 数控加工程序的格式与组成	147
第五节 数控机床上的相关位置点	150
第六节 刀具补偿功能	155
思考与练习	164
第五章 数控车床的编程与操作	165
第一节 概述	165
第二节 直线插补的应用	169
第三节 圆弧插补的应用	174

第四节 循环加工	178
第五节 螺纹加工	192
第六节 子程序的应用	198
第七节 零点偏置	202
第八节 FANUC 系统数控车床的操作	203
思考与练习	219
第六章 数控铣床/加工中心的编程与操作	222
第一节 概述	222
第二节 基本工件的编程	225
第三节 孔加工的固定循环功能	235
第四节 螺旋类加工与零点偏置	246
第五节 特殊功能与子程序的应用	251
第六节 FANUC 系统加工中心的操作	262
思考与练习	279
第七章 自动编程	283
第一节 自动编程简介	283
第二节 数控铣床(加工中心)的自动编程	286
思考与练习	295
第八章 数控机床的使用	296
第一节 数控机床的选用	296
第二节 数控机床的安装与调试	303
第三节 数控机床的验收	312
第四节 数控机床的使用	320
第五节 数控机床的维护保养	324
第六节 数控机床安全文明生产	328
思考与练习	332
第九章 数控技术与机械加工的发展	333
第一节 数控机床的发展	333
第二节 先进制造系统简介	339
第三节 数控机床的通信和网络技术	344
思考与练习	347
附录 数控功能的基本术语	348
参考文献	357

第一章 数控机床概述

第一节 概 述

一、基本概念

数字控制 (Numerical Control) 简称数控 (NC), 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。

数控技术 (Numerical Control Technology) 是指用数字量及字符发出指令并实现自动控制的技术, 它已经成为制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础技术。

数控系统 (Numerical Control System) 是指采用数字控制技术的控制系统。

计算机数控系统 (Computer Numerical Control) 是以计算机为核心的数控系统。

数控机床 (Numerical Control Machine Tools) 是指采用数字控制技术对机床的加工过程进行自动控制的一类机床。国际信息处理联盟 (IFIP) 第五技术委员会对数控机床定义如下: 数控机床是一个装有程序控制系统的机床, 该系统能够逻辑地处理具有使用号码或其他符号编码指令规定的程序。定义中所说的程序控制系统即数控系统。

二、数控加工与传统加工的比较

数控加工与传统加工的比较如图 1-1 所示。

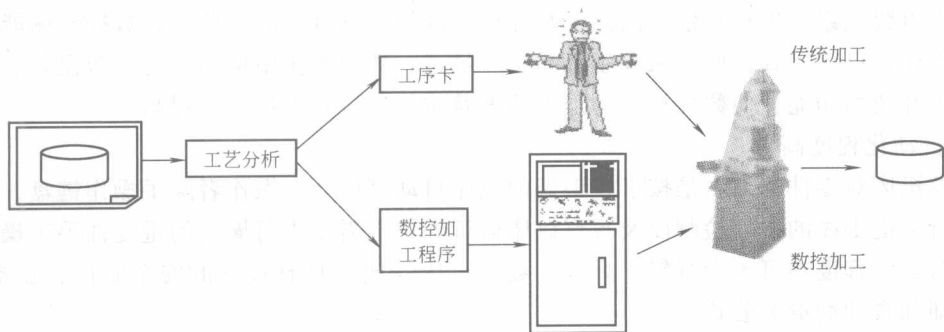


图 1-1 传统加工与数控加工的比较

在普通机床上加工零件, 一般先要对零件图样进行工艺分析, 制定出零件加工工艺规程 (工序卡)。在工艺规程中规定加工工序、使用的机床、刀具、夹具等内容, 机床操作者则根据工序卡的要求, 在加工过程中操作机床, 自行选定切削用量、进给路线和工序内的工步安排等, 不断地改变刀具与工件的相对运动轨迹和运动参数 (位置、速度等), 使刀具对工件进行切削加工, 从而得到所需要的合格零件。

在 CNC 机床上, 传统加工过程中的人工操作均被数控系统所取代。其工作过程如下: 首先要将被加工零件图样上的几何信息和工艺信息数字化, 即编成零件程序, 再将加工程序单中的内容记录在磁盘等控制介质上, 然后将该程序送入数控系统。数控系统则按照程序的要求, 进行相应的运算、处理, 然后发出控制命令, 使各坐标轴、主轴以及辅助动作相互协

调运动,实现刀具与工件的相对运动,自动完成零件的加工。

三、数控机床的产生

1949年美国空军后勤司令部为了在短时间内造出经常变更设计的火箭零件与帕森斯(John C. Parson)公司合作,并选择麻省理工学院伺服机构研究所为协作单位,于1952年研制成功了世界上第一台数控机床。1958年,美国的克耐·杜列克公司(Keaney&Trecker corp-K&T公司)在一台数控镗铣床上增加了自动换刀装置,第一台加工中心问世了。现代意义上的加工中心是1959年由该公司开发出来的。我国是从1958年开始研制数控机床的。

四、数控机床的特点

1. 适应性强

数控机床加工形状复杂的零件或新产品时,不必像通用机床那样采用很多工装,仅需要少量工夹具。一旦零件图有修改,只需修改相应的程序部分,就可在短时间内将新零件加工出来。因而生产周期短,灵活性强,为多品种小批量的生产和新产品的研制提供了有利条件。

2. 适合加工复杂型面的零件

由于计算机具有高超的运算能力,可以瞬间准确地计算出每个坐标轴瞬间应该运动的运动量,因此数控机床能完成普通机床难以加工或根本不能加工的复杂型面的零件。所以在航天、航空领域(如飞机的螺旋桨及蜗轮叶片)及模具加工中,得到了广泛应用。

3. 加工精度高、加工质量稳定

数控机床所需的加工条件,如进给速度、主轴转速、刀具选择等,都是由指令代码事先规定好的,整个加工过程是自动进行的,人为造成的加工误差很小,而且传动中的间隙及误差还可以由数控系统进行补偿。因此,数控机床的加工精度较高。此外,数控机床能进行重复性的操作,尺寸一致性好,减少了废品率。最近,数控系统中增加了对机床误差、加工误差等修正补偿的功能,使数控机床的加工精度及重复定位精度进一步提高。

4. 自动化程度高

数控机床对零件的加工是按事先编好的程序自动完成的,操作者除了操作键盘,装卸工件,进行关键工序的中间检测以及观察机床运行外,不需要进行繁杂的重复性手工操作,劳动强度与紧张程度均可大为减轻。另外,数控机床一般都具有较好的安全防护、自动排屑、自动冷却和自动润滑等装置。

5. 加工生产率高

数控机床能够减少零件加工所需的机动时间和辅助时间。数控机床的主轴转速和进给量范围比通用机床的范围大,每一道工序都能选用最佳的切削用量,数控机床的结构刚性允许数控机床进行大切削用量的强力切削,从而有效节省了机动时间。数控机床移动部件在定位中均采用加减速控制,并可选用很高的空行程运动速度,缩短了定位和非切削时间。使用带有刀库和自动换刀装置的加工中心时,工件往往只需进行一次装夹就可完成所有的加工工序,减少了半成品的周转时间,生产效率非常高。数控机床加工质量稳定,还可减少检验时间。数控机床可比普通机床提高效率2~3倍,复杂零件的加工,生产率可提高十几倍甚至几十倍。

6. 一机多用

某些数控机床,特别是加工中心,一次装夹后,几乎能完成零件的全部工序的加工,可

以代替 5~7 台普通机床。

7. 减轻操作者的劳动强度

数控机床的加工是由程序直接控制的, 操作者一般只需装卸零件和更换刀具并监视数控机床的运行, 大大减轻了操作者的劳动强度, 同时也节省了劳动力 (一人可看管多台机床)。

8. 有利于生产管理的现代化

数控系统采用数字信息与标准化代码输入, 并具有通信接口, 易实现数控机床之间的数据通信, 最适宜计算机之间的联接, 组成工业控制网络。同时用数控机床加工零件, 能准确地计算零件的加工工时, 并有效地简化了检验、工装和半成品的管理工作, 这些都有利于生产管理现代化。

9. 价格较贵

数控机床是以数控系统为代表的新技术对传统机械制造产业渗透形成的机电一体化产品, 它涵盖了机械、信息处理、自动控制、伺服驱动、自动检测、软件技术等许多领域, 尤其是采用了许多高、新、尖的先进结构, 使得数控机床的整体价格较高。

10. 调试和维修较复杂, 需专门的技术人员

由于数控机床结构复杂, 所以要求调试与维修人员应经过专门的技术培训, 才能胜任此项工作。

此外, 由于许多零件形状较为复杂, 目前数控机床编程又以手工编程为主, 故编程所需时间较长, 这样会使机床等待时间长, 导致数控机床的利用率不高。

第二节 数控机床的分类

目前数控机床的品种很多, 通常按下面几种方法进行分类。

一、按工艺用途分类

1. 一般数控机床

最普通的数控机床有钻床、车床、铣床、镗床、磨床和齿轮加工机床。图 1-2 是 XK5040A 数控铣床。它们和传统的通用机床工艺用途相似, 但是它们的生产率和自动化程度比传统机床高, 都适合加工单件、小批量和复杂形状的工件。

2. 数控加工中心

这类数控机床是在一般数控机床上加装一个刀库和自动换刀装置, 构成一种带自动换刀装置的数控机床。图 1-3 是 XH754 型卧式加工中心。这类数控机床的出现打破了一台机床只能进行单工种加工的传统概念, 实行一次安装定位, 完成多工序加工方式。例如, TH5632 型立式加工中心, 它的刀库容量是 16 把刀具, 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、钻、镗、铰、扩、攻螺纹等多种工序加工。数控加工中心因一次安装定位完成多工序加工, 避免了因多次安装造成的误差, 减少机床台数, 提高了生产效率和加工自动化程度。各种数控机床的照片见图 1-4。

二、按可控制联动的坐标轴分类

所谓数控机床可控制联动的坐标轴, 是指数控装置控制几个伺服电动机, 同时驱动机床移动部件运动的坐标轴数目。

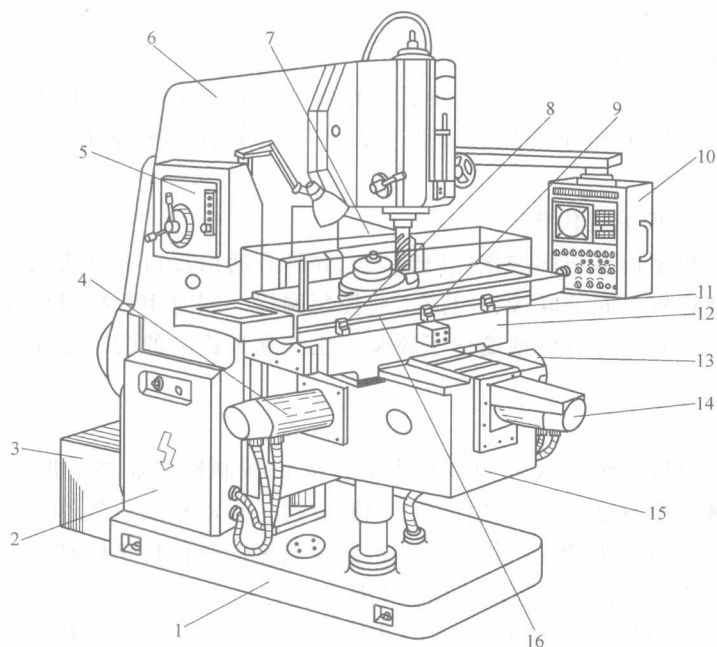


图 1-2 XK5040A 型数控铣床

- 1—底座 2—强电柜 3—变压器箱 4—升降进给伺服电动机 5—主轴变速手柄和按钮板
6—床身立柱 7—数控柜 8、11—纵向行程限位保护开关 9—纵向参考点设定挡铁
10—操纵台 12—横向溜板 13—纵向进给伺服电动机 14—横向进给伺服电动机
15—升降台 16—纵向工作台

1. 两坐标联动

数控机床能同时控制两个坐标轴联动，即数控装置同时控制 X 和 Z 方向运动，可用于加工各种曲线轮廓的回转体类零件。或机床本身有 X 、 Y 、 Z 三个方向的运动，数控装置中只能同时控制两个坐标，实现两个坐标轴联动，但在加工中能实现坐标平面的变换，用于加工图 1-5a 所示的零件沟槽。

2. 三坐标联动

数控机床能同时控制三个坐标轴联动，此时，铣床称为三坐标数控铣床，可用于加工曲面零件，如图 1-5b 所示。

3. 两轴半坐标联动

数控机床本身有三个坐标能作三个方向的运动，但控制装置只能同时控制两个

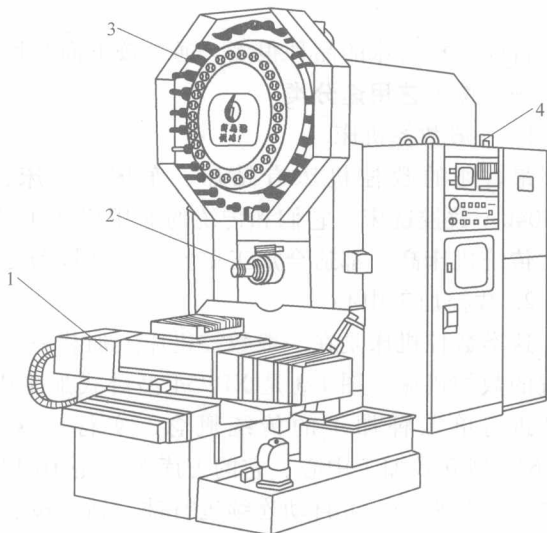
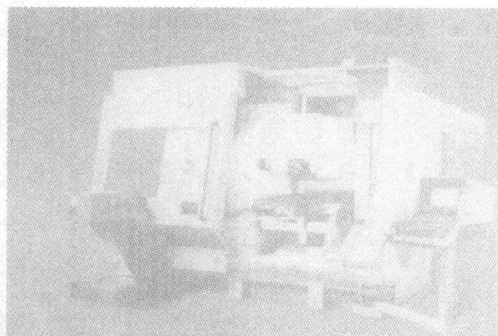
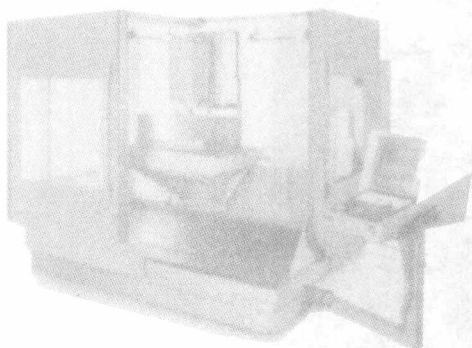


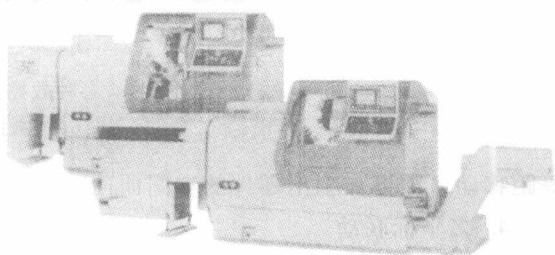
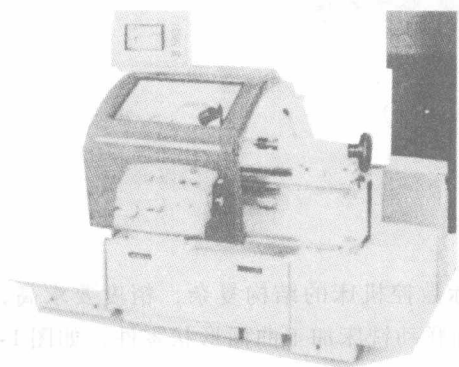
图 1-3 XH754 型卧式加工中心

- 1—工作台 2—主轴 3—刀库 4—数控柜

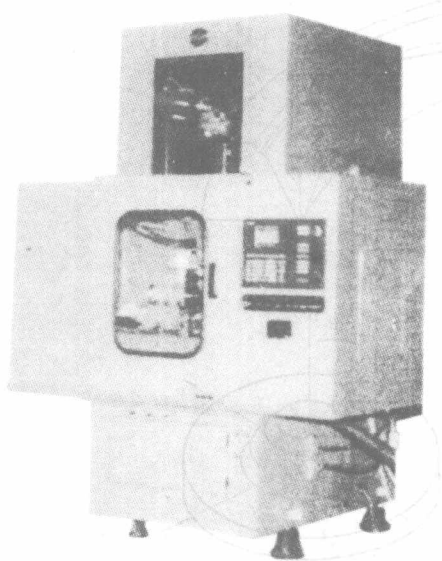
坐标，而第三个坐标只能作等距周期移动，可加工空间曲面，如图 1-5c 所示零件。数控装置在 ZX 坐标平面内控制 X 、 Z 两坐标联动，加工垂直面内的轮廓表面，控制 Y 坐标作定期



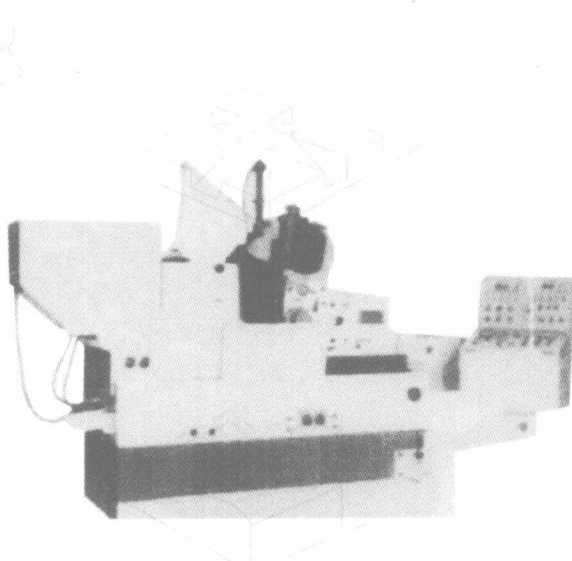
a)



b)



c)

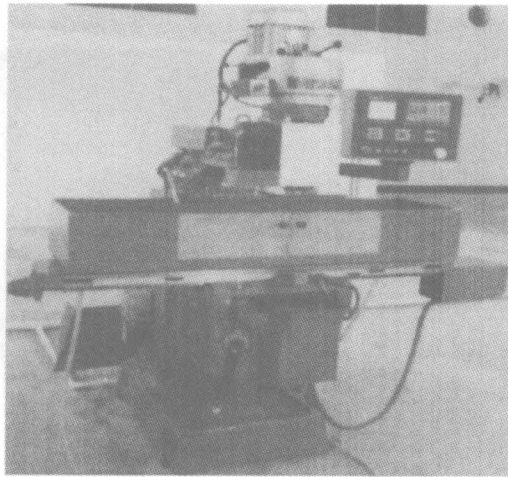


d)

图 1-4 各种数控机床的照片

a) 数控铣床与加工中心 b) 数控车床与加工中心

c) 数控剃齿机床 d) 数控磨床



e)

图 1-4 各种数控机床的照片 (续)

e) 数控钻床

等距移动, 即可加工出零件的空间曲面。

4. 多坐标联动

数控机床能同时控制四个以上坐标轴联动, 多坐标数控机床的结构复杂, 精度要求高, 程序编制复杂, 主要应用于加工形状复杂的零件。五轴联动铣床加工曲面形状零件, 如图 1-

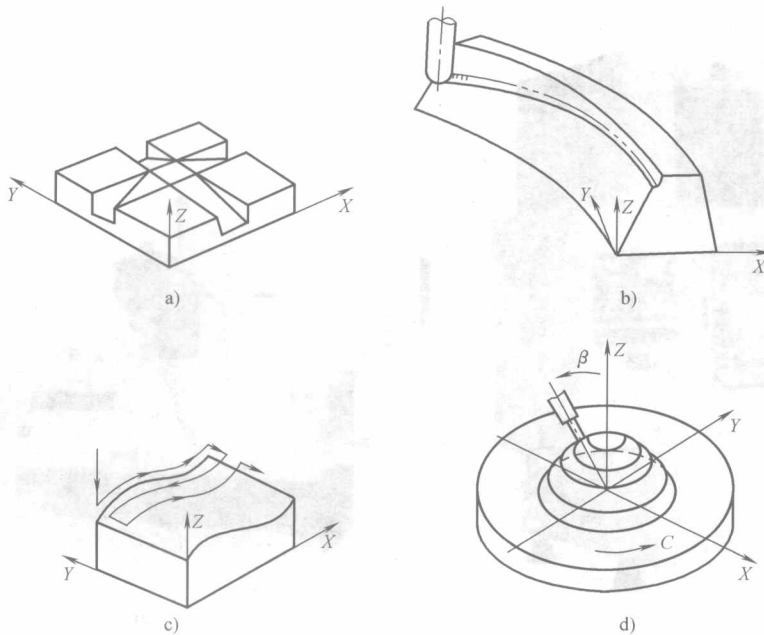


图 1-5 空间平面和曲面的数控加工

- a) 零件沟槽面加工 b) 三坐标联动加工曲面 c) 两坐标联动加工曲面
d) 五轴联动铣床加工曲面

12d 所示。六轴加工中心示意图, 如图 1-6 所示。

三、按加工方式分类

1. 金属切削类数控机床

这类机床如数控车床、加工中心、数控钻床、数控磨床、数控镗床等。

2. 金属成型类数控机床 (见图 1-7)

这类机床如数控折弯机、数控弯管机、数控回转头压力机等。

3. 数控特种加工机床 (见图 1-8)

这类机床如数控线 (电极) 切割机床、数控电火花加工机床、数控激光切割机等。

4. 广义数控机床 (见图 1-9)

这类机床如火焰切割机、数控三坐标测量机、工业机器人等。

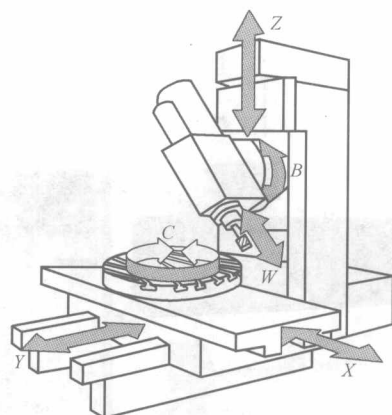


图 1-6 六轴加工中心

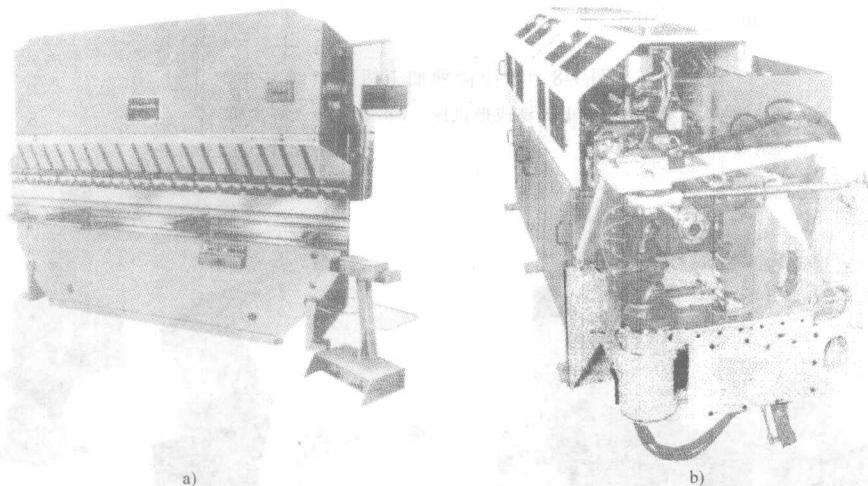


图 1-7 金属成型机床

a) 数控折弯机 b) 数控弯管机

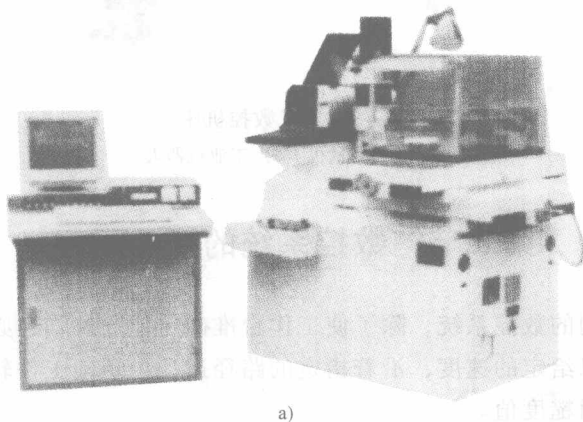


图 1-8 数控特种加工机床

a) 数控电火花切割机

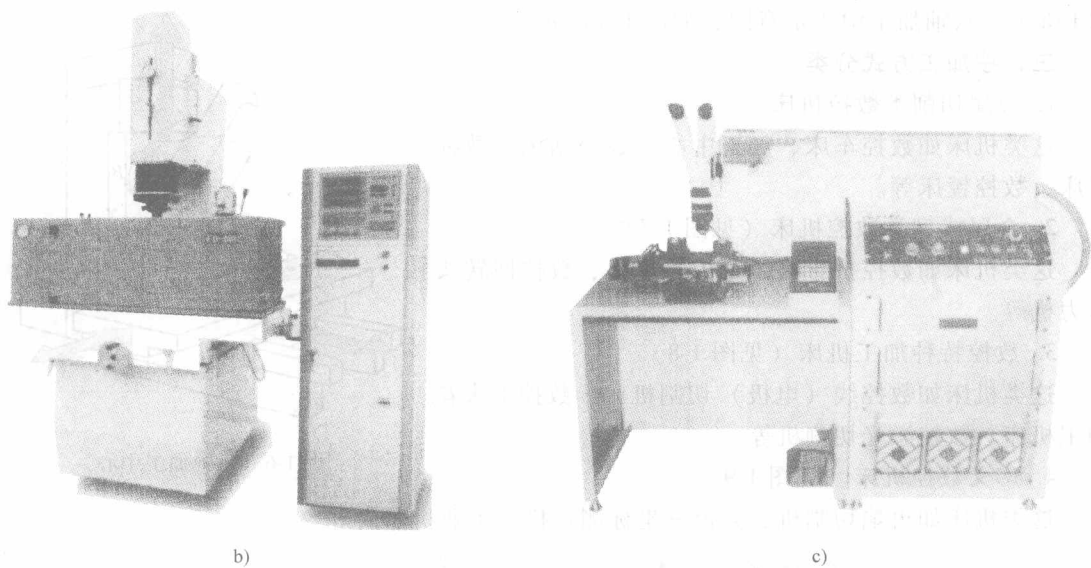


图 1-8 数控特种加工机床 (续)

b) 数控电火花成形机床 c) 数控激光焊接机

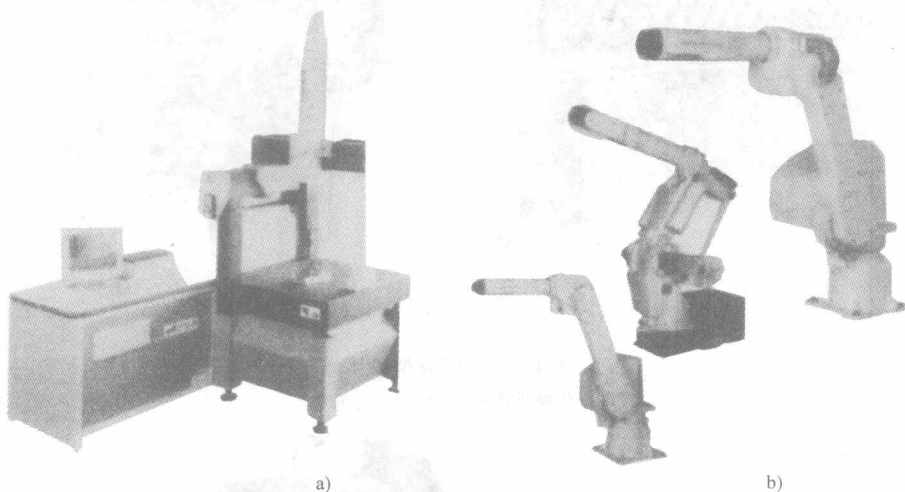


图 1-9 广义数控机床

a) 数控测量机 b) 工业机器人

第三节 数控系统的插补原理

一个连续切削控制的数控系统,除了使工作台准确定位之外,还必须进行轨迹控制,即控制刀具相对于工件以给定的速度,沿着指定的路径运动、切削工件轮廓,并且要保证切削过程中的精度和表面粗糙度值。

数控系统在处理轨迹控制信息时,一般情况,用户编程时给出了轨迹的起点和终点,以及轨迹的类型(即是直线、圆弧或是其他曲线),并规定其走向(如圆弧是顺时针还是逆时

针), 然后由数控系统在控制过程中计算出运动轨迹的各个中间点, 这个过程称之为插补, 即“插入”、“补上”轨迹运动的中间点。插补结果输出运动轨迹的中间点的坐标值, 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。

一、对插补计算的要求

- 1) 对插补所需要的数据最少。
- 2) 插补理论误差要满足精度要求。
- 3) 沿插补路线或称插补矢量的合成进给速度要满足轮廓表面粗糙度一致性的工艺要求, 也就是进给速度变化要在许可范围内。
- 4) 控制联动坐标轴数的能力强, 也就是易实现多坐标轴的联动控制。
- 5) 插补算法简单可靠。

二、插补算法的种类

插补工作可用硬件(插补器)或软件来完成, 也可由软硬件结合一起来完成。早期的数控系统(NC)中, 插补器是一个由专门的硬件接成的数字电路装置, 这种插补称之为硬件插补, 它把每次插补运算产生的指令脉冲输出到伺服系统, 驱动工作台运动。每插补运算一次, 便发出一个脉冲, 工作台就移动一个基本长度单位, 即脉冲当量。它的柔性较小, 计算能力较弱, 但其计算速度快, 它采用电压脉冲作为插补坐标增量输出, 称之为基准脉冲插补法(也称脉冲增量插补法), 它包括逐点比较插补法、数字积分插补法等; 随着计算机数控系统(CNC)的发展, 因软件插补法柔性好, 计算能力强, 可以进行复杂轮廓的插补, 所以应用得越来越广。软件插补法可分成基准脉冲插补法和数据采样插补法(Sampled-data)(也称数字增量插补法)两类。基准脉冲软件插补法是模拟硬件插补的原理, 其插补输出仍是脉冲; 数字增量插补法, 在每个插补周期内进行一次插补运算, 根据指令进给速度计算出一个微小的直线数据段, 然后计算出动点坐标, 经过若干个插补周期即可完成一个程序段的插补。插补结果输出的是二进制数据, 依靠二进制数据控制进给系统运动。现在大多数数控系统将软件插补法与硬件插补法结合起来, 软件插补完成粗插补, 硬件完成精插补, 既可获得高的插补速度又能完成较高的插补精度。

逐点比较插补法是插补时每走一步都要与给定轨迹上的坐标值进行比较, 看实际加工点在给定轨迹的什么位置, 上方还是下方(直线), 外面还是里面(曲线), 从而决定下一步的进给方向。其进给方向总是向着给定轨迹的方向逼近, 如果实际加工点在给定轨迹的上方, 下一步进给就向给定轨迹的下方逼近; 如果实际加工点在给定轨迹的里面, 下一步进给就向给定轨迹的外面逼近。

三、逐点比较法直线插补

1. 逐点比较法直线插补计算原理

(1) 偏差计算公式 数控系统必须根据设计者给定的数学模型才能进行工作。根据逐点比较法的原理, 每走一步可以将动点(插值点)的实际位置与给定轨迹的理想位置以“偏差”形式计算出来, 然后根据偏差的正、负决定下一步的走向, 以逼近给定轨迹。因此, 确定偏差的计算方法是逐点比较法的关键一步。下面以第一象限平面直线为例来推导偏差计算公式。

假定加工如图 1-10 所示的直线 OA 。取直线起点为坐标原点, 已知直线终点坐标为 $A(x_e, y_e)$, 即直线 OA 为给定轨迹。 $m(x_m, y_m)$ 点为加工点(动点)。若 m 点在直线 OA

上,则根据几何关系可得

$$\frac{x_m}{y_m} = \frac{x_e}{y_e}$$

即

$$y_m x_e - x_m y_e = 0$$

因此,可定义直线插补的偏差判别式如下

$$F_m = y_m x_e - x_m y_e$$

若 $F_m = 0$, 表示动点在直线 OA 上, 如 m ;

若 $F_m > 0$, 表示动点在 OA 直线上方, 如 m' ;

若 $F_m < 0$, 表示动点在 OA 直线下方, 如 m'' 。

从图 1-10 上可以看出, 第一象限直线插补, 当 $F_m > 0$ 时, 应沿 X 的正方向进给一步才能逼近给定直线, 而当 $F_m < 0$ 时应沿 Y 的正方向进给一步才能逼近给定直线。当 $F_m = 0$ 时, 动点在直线上, 为了插补能继续进行, 需从无偏差状态进给一步, 到有偏差状态, 这时可以沿 $+X$ 方向走, 也可沿 $+Y$ 方向走, 通常规定为沿 $+X$ 方向走一步。

因此, 我们得到第一象限直线的插补法, 即当 $F_m \geq 0$ 时沿 $+X$ 方向进给一步, 当 $F_m < 0$ 时沿 $+Y$ 方向进给一步。从起点开始, 当沿两个坐标方向进给的步数分别等于 x_e 和 y_e 时停止插补。

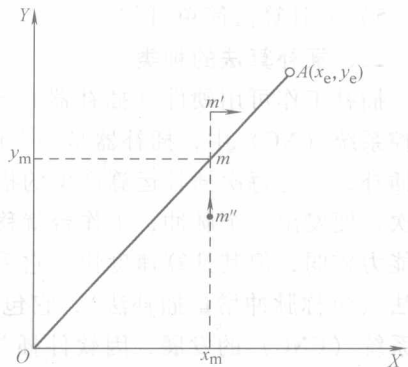


图 1-10 第一象限直线

按照上面几何关系得出的偏差公式计算偏差时, 要作乘法和减法运算。这样, 对硬件插补器电路, 实现起来不很方便, 需增加硬件设备; 对软件插补而言, 会影响插补运算速度。所以, 通常采用迭代法或称递推法, 来简化公式, 即每走一步后, 新加工点的偏差值用前一点的加工偏差递推出来, 如下所示。

就第一象限而言, 当 $F_m \geq 0$ 时, 表明加工点 m 点在直线 OA 上或直线 OA 的上方, 应沿 $+X$ 方向进给一步以逼近给定直线。因坐标值的单位为脉冲当量, 走步后新点的坐标值 (x_{m+1}, y_{m+1}) 为

$$x_{m+1} = x_m + 1$$

$$y_{m+1} = y_m$$

新点的偏差为

$$\begin{aligned} F_{m+1} &= y_{m+1} x_e - x_{m+1} y_e \\ &= y_m x_e - (x_m + 1) y_e \\ &= y_m x_e - x_m y_e - y_e \\ &= F_m - y_e \end{aligned}$$

若 $F_m < 0$, 表明 m 点在直线 OA 的下方, 应沿 $+Y$ 方向进给一步, 走步后新点的坐标值 (x_{m+1}, y_{m+1}) 为:

$$x_{m+1} = x_m$$

$$y_{m+1} = y_m + 1$$

新点的偏差为

$$\begin{aligned}
 F_{m+1} &= y_{m+1}x_e - x_{m+1}y_e \\
 &= (y_m + 1)x_e - x_my_e \\
 &= y_mx_e - x_my_e + x_e \\
 &= F_m + x_e
 \end{aligned}$$

简化后的偏差计算公式只有加减运算，并且不必计算出每一点的坐标，每一新加工点的偏差是由前一点的偏差加上或减去终点坐标 x_e 或 y_e 即可，大大简化了运算，不过需要逐步递推，这样需知道开始加工时那一点的偏差值，我们可用人工方法将刀具移到加工起点（对刀），这点就无偏差（刀在直线上），所以开始加工点的偏差 $F_0 = 0$ 。这样，随着加工点的前进，每一新加工点的偏差 F_{m+1} 都可由前一点的偏差 F_m 与终点坐标值相加或相减得到。

(2) 终点的判别方法 终点的判别方法有三种：

1) 设置 Σ_x 、 Σ_y 两个减法计数器，加工开始前，在 Σ_x 、 Σ_y 计数器中分别存入终点坐标值 x_e 、 y_e ，当沿 X 或 Y 坐标方向每进给一步时，就在相应的计数器中减去 1，直到两个计数器中的数都减为零时，停止插补，到达终点。

2) 设置一个终点计数器，计数器中存入 X 和 Y 两坐标方向进给步数的总和 Σ ， $\Sigma = x_e + y_e$ ，无论沿 X 或 Y 坐标方向进给时均在 Σ 中减 1。当减到零时，停止插补，到达终点。

3) 因为终点坐标值大的坐标轴一般后结束插补。选终点坐标值较大的坐标轴做为计数坐标值，放入终点计数器内，如 $x_e \geq y_e$ ，则用 x_e 值做终点计数器初值，仅 X 轴进给时，计数器才减 1，计数器减到零便到达终点。如 $y_e > x_e$ ，则用 y_e 值做终点计数器初值。

(3) 逐点比较法直线插补计算步骤 用逐点比较法进行直线插补计算，每走一步，都需要进行以下四个节拍：

偏差判别——逻辑运算，即判别偏差 $F_m \geq 0$ 还是 $F_m < 0$ ，从而判别当前动点偏离理论直线的位置，以确定那个坐标轴进给。

坐标进给——逻辑运算，根据直线所在象限及偏差符号，决定沿 $+X$ 、 $+Y$ 、 $-X$ 、 $-Y$ 四个方向中哪个方向进给。

偏差计算——算术运算，进给一步后，计算新的加工点的偏差，作为下次偏差判别的依据。

终点判别——进给一步后，终点计数器减 1，根据计数器的内容是否为 0 判别是否达到终点。若计数器为 0，表示到达终点，则设置插补结束标志后返回。主程序接到插补结束标志，读取下一组新的数据到插补工作区，清插补结束标志，重新开始插补。如终点计数器不为零则直接返回，继续插补本段直线。

例 1-1 设加工第一象限直线，起点为坐标原点，终点坐标 $x_e = 6$ ， $y_e = 4$ ，试采用逐点比较法进行插补计算，并画出进给轨迹图。计算过程如表 1-1 所示，表中的终点判别采用了上述的第二种方法，即设置一个终点计数器，用来寄存 X 轴和 Y 轴两个方向的步数和 Σ ，每进给一步， Σ 减 1；若 $\Sigma = 0$ ，表示到达终点，停止插补。进给轨迹如图 1-11 所示。

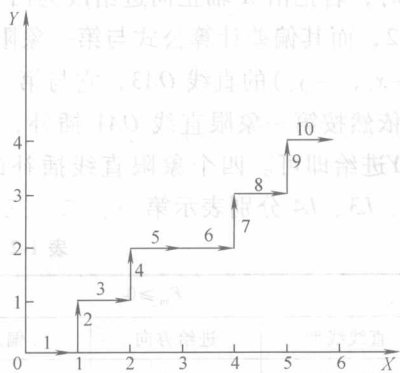


图 1-11 逐点比较法直线插补走步轨迹

2. 四个象限的直线插补计算

表 1-1 直线插补过程

步数	偏差判别	坐标进给	偏差计算	终点判别
起点			$F_0 = 0$	$\Sigma = 10$
1	$F = 0$	$+X$	$F_1 = F_0 - y_e = 0 - 4 = -4$	$\Sigma = 10 - 1 = 9$
2	$F < 0$	$+Y$	$F_2 = F_1 + x_e = -4 + 6 = 2$	$\Sigma = 9 - 1 = 8$
3	$F > 0$	$+X$	$F_3 = F_2 - y_e = 2 - 4 = -2$	$\Sigma = 8 - 1 = 7$
4	$F < 0$	$+Y$	$F_4 = F_3 + x_e = -2 + 6 = 4$	$\Sigma = 7 - 1 = 6$
5	$F > 0$	$+X$	$F_5 = F_4 - y_e = 4 - 4 = 0$	$\Sigma = 6 - 1 = 5$
6	$F = 0$	$+X$	$F_6 = F_5 - y_e = 0 - 4 = -4$	$\Sigma = 5 - 1 = 4$
7	$F < 0$	$+Y$	$F_7 = F_6 + x_e = -4 + 6 = 2$	$\Sigma = 4 - 1 = 3$
8	$F > 0$	$+X$	$F_8 = F_7 - y_e = 2 - 4 = -2$	$\Sigma = 3 - 1 = 2$
9	$F < 0$	$+Y$	$F_9 = F_8 + x_e = -2 + 6 = 4$	$\Sigma = 2 - 1 = 1$
10	$F > 0$	$+X$	$F_{10} = F_9 - y_e = 4 - 4 = 0$	$\Sigma = 1 - 1 = 0$

第一象限直线插补方法经适当处理后可推广到其余象限的直线插补。为便于四个象限的直线插补，在偏差计算时，无论哪个象限直线，都用其坐标的绝对值进行计算。由此，可得的偏差符号如图 1-12 所示。动点位于直线上时偏差 $F = 0$ ，动点不在直线上，偏向 Y 轴一侧时 $F > 0$ ，偏向 X 轴一侧时 $F < 0$ 。由图 1-12 还可以看到，当 $F \geq 0$ 时应沿 X 轴进给，第一、四象限沿 X 轴正方向进给，第三、二象限沿 X 轴负方向进给；当 $F < 0$ 时应沿 Y 轴进给，第一、二象限沿 Y 轴正方向进给，第三、四象限沿 Y 轴负方向进给。终点判别也应用终点坐标的绝对值做为计数器初值。象限的判别可根据直线终点坐标的正负号。

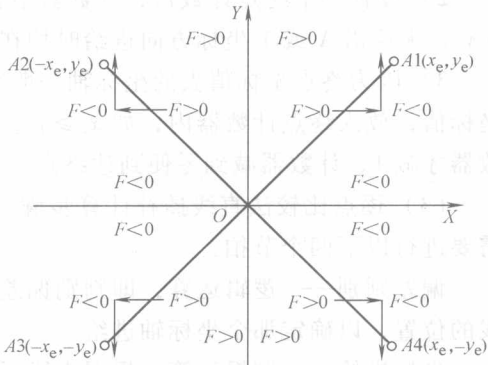


图 1-12 四象限直线偏差符号

例如，第二象限的直线 OA_2 ，其终点坐标为 $(-x_e, y_e)$ ，在第一象限有一条和它对称于 Y 轴的直线 OA_1 ，其终点坐标为 (x_e, y_e) 。当从 O 点开始出发，按第一象限直线 OA_1 进行插补时，若把沿 X 轴正向进给改为沿 X 轴负向进给，这时实际插补出的就是第二象限的直线 OA_2 ，而其偏差计算公式与第一象限直线的偏差计算公式相同。同理，插补第三象限终点为 $(-x_e, -y_e)$ 的直线 OA_3 ，它与第一象限终点为 (x_e, y_e) 的直线 OA_1 是对称于原点的，所以依然按第一象限直线 OA_1 插补，只须在进给时将 $+X$ 进给改为 $-X$ 进给， $+Y$ 进给改为 $-Y$ 进给即可。四个象限直线插补的偏差计算公式与进给方向列于表 1-2 之中。表中 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 分别表示第一、二、三、四象限的直线。

表 1-2 直线插补计算公式及进给方向

$F_m \geq 0$			$F_m < 0$		
直线线型	进给方向	偏差计算	直线坐标	进给方向	偏差计算
L_1 、 L_4	$+X$	$F_{m+1} = F_m - y_e$	L_1 、 L_2	$+Y$	$F_{m+1} = F_m + x_e$
L_2 、 L_3	$-X$		L_3 、 L_4	$-Y$	