



数控编程理论、 技术与应用

黄翔 李迎光 编著
陈文亮 审校



清华大学出版社

数控编程理论、技术与应用

黄 翔 李迎光 编著

陈文亮 审校

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统全面地介绍了数控编程的各环节,内容涉及数控加工及其编程的基础知识、数控程序的手工编程、数控编程的工艺分析、高速加工的数控编程策略,以及从点位加工、二坐标、三坐标到多坐标和高速加工数控刀具轨迹的计算,介绍了数控仿真与精度验证算法、后置处理算法,同时给出了12个典型编程实例的编程策略,并给出了用UG软件建立的零件数模和生成的刀轨。

本书面向数控加工理论研究、数控编程系统开发以及数控编程人员,可作为相关专业(机械制造、CAD/CAM等)专业的本、专科学生和研究生使用教材,也可作为从事数控编程的广大科技人员的学习参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

数控编程理论、技术与应用/黄翔,李迎光编著. —北京:清华大学出版社,2006.1

ISBN 7-302-11686-5

I. 数… II. ①黄… ②李… III. 数控机床-程序设计 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第153529号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn 邮 编:100084
社 总 机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:许存权

文稿编辑:刘欢欢

封面设计:范华明

版式设计:李永梅

印 刷 者:北京密云云胶印厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:14.5 字数:317千字

版 次:2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-11686-5/TG·20

印 数:1~5000

定 价:26.00元(附光盘1张)

前 言

数控加工综合了计算机、自动控制、电机、电气传动、测量、监控和机械制造等学科的内容。数控加工是以数字化控制为基本特征的柔性自动化技术,具有适应性强、加工精度高、加工质量稳定和生产效率高的优点,是先进制造系统的重要组成部分,在制造业中数控加工已得到了广泛应用。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。数控编程是数控加工的前提,是数控加工的重要环节。目前,CAD/CAM 技术已经广泛应用于数控编程中。为此,在总结多年来数控编程系统的研究、开发和应用的基础上,编写了这本以介绍数控程序自动编程为主的著作。

本书共分 9 章。第 1 章介绍了数控加工的基础知识、数控编程的基础、数控程序的代码格式、手工编程以及机床调整等内容;第 2 章系统介绍了数控编程工艺分析,包括加工工艺分析、刀具和切削用量选择、数控加工工艺文件的制定和难加工材料的加工工艺等,提供了大量实用基础数据和技术规范,反映了企业的实际需求;第 3 章针对近年来日益广泛应用的高速加工,系统论述了高速加工的技术内涵和数控编程策略;第 4 章介绍了数控加工自动编程的基础并给出了二坐标刀轨生成算法;第 5 章介绍了从点位、三坐标到多坐标数控加工的刀具轨迹的计算算法;第 6 章讨论了高速铣削刀轨生成的基本算法;第 7 章讨论了数控仿真的基础算法、消隐算法以及精度验证算法;第 8 章论述了后置处理的基本概念、任务以及后置处理算法;第 9 章分析了经过实际加工的 12 个具体编程实例的编程策略,同时在附盘给出了用 UG 软件建立的零件数模和生成的刀轨。

本书的主要特点是对现有数控编程书籍的体系结构作了调整,加强了数控编程理论和实际应用的结合,全面系统地介绍了数控编程的各环节,包括数控加工和编程的基本知识、数控编程工艺分析、高速加工、刀轨生成算法、数控仿真与精度验证、后置处理和应用案例。在数控加工理论和实际应用的结合方面作了尝试,无论对数控加工理论研究、编程系统开发还是数控编程人员都会有所帮助,适用于大中专院校学生、研究生、从事数控编程方面研究的科研人员和企业数控编程的人员使用。

陈文亮教授在百忙之中认真审校了全书,并在本书的写作过程中提出了许多建设性的建议和指正意见。孙全平、安鲁陵、伍铁军、李炎、姜厚文等先生在本书的编写过程中给予了支持与帮助,他们提供了许多资料和案例,丰富了该书的内容。研究生方挺立、赵明等绘制了部分插图,在此表示衷心的感谢。

限于作者水平和阅历,恳请同行专家和广大读者对书中不妥或错误之处提出批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 数控编程基础.....	1
1.1 数控加工的基本概念.....	1
1.1.1 数控与数控机床	1
1.1.2 插补原理与控制系统	3
1.1.3 数控加工的特点	6
1.2 数控编程的基本概念.....	7
1.2.1 数控机床坐标系	7
1.2.2 数控编程的特征点	9
1.3 基本指令和手工编程.....	15
1.3.1 基本指令	15
1.3.2 手工编程	19
1.4 数控机床的调整.....	35
1.5 本章小结.....	39
第 2 章 数控程序编制的工艺处理.....	40
2.1 数控加工工艺分析的特点.....	40
2.1.1 数控加工工艺的设计特点	40
2.1.2 数控加工工艺的主要内容	41
2.2 零件的加工工艺性分析.....	41
2.2.1 数控加工内容的确定	41
2.2.2 零件图样上尺寸数据的标注原则	42
2.2.3 数控加工零件的结构工艺性	43
2.2.4 数控加工方案确定	46
2.2.5 工艺路线设计	49
2.2.6 走刀路线的确定	51
2.2.7 确定定位和夹紧方案	55
2.2.8 确定刀具与工件的相对位置	55
2.3 数控加工刀具的选择.....	57
2.3.1 数控加工常用刀具	57
2.3.2 数控加工刀具的选择	76
2.3.3 数控立铣刀的正确使用	77
2.3.4 刀具常见的磨损形式	78

2.4	数控加工切削用量的确定	80
2.4.1	切削用量的确定	80
2.4.2	金属切削液的选择	83
2.4.3	在线测量	86
2.5	数控加工工艺文件	86
2.5.1	数控加工工艺分析卡	87
2.5.2	工序卡与工步卡	88
2.5.3	数控加工刀具明细表	89
2.5.4	机床调整单	90
2.5.5	数控加工程序单	90
2.6	难加工材料的切削加工技术	91
2.6.1	难加工材料的切削加工	91
2.6.2	不锈钢加工	93
2.6.3	钛合金加工	95
2.7	本章小结	96
第3章	数控高速加工的编程	97
3.1	数控高速加工的基本概念	97
3.1.1	高速加工的基本概念	97
3.1.2	高速加工的基本要求	97
3.1.3	高速加工的特点和应用领域	100
3.2	数控高速加工的工艺特点	102
3.3	数控高速加工的编程策略	106
3.3.1	高速加工粗加工编程策略	107
3.3.2	高速加工半精加工编程策略	109
3.3.3	高速加工精加工编程策略	115
3.4	本章小结	122
第4章	数控加工自动编程及二坐标刀轨生成算法	123
4.1	数控加工自动编程	123
4.1.1	数控加工自动编程的发展概况	123
4.1.2	数控加工自动编程的一般过程	126
4.1.3	数控刀轨生成基本算法概述	127
4.2	二坐标数控刀轨生成基本算法	129
4.2.1	二坐标联动数控加工	129
4.2.2	二坐标联动刀轨的生成	132
4.2.3	残留区域补充加工	138
4.2.4	工艺刀具轨迹的生成	139

4.3 平面铣削与型腔铣削数控刀轨生成算法	140
4.3.1 数控刀具轨迹的生成	140
4.3.2 有效加工域	142
4.4 本章小结	144
第 5 章 多坐标数控加工刀轨生成算法	145
5.1 点位加工	145
5.2 参数线加工方法	146
5.2.1 等参数步长法	146
5.2.2 参数筛选法	147
5.2.3 局部等参数步长法	148
5.3 截平面法	149
5.3.1 截平面法加工的基本思想	149
5.3.2 等距曲面的生成	150
5.3.3 截平面的选择	151
5.3.4 截平面与加工表面等距面求交	152
5.3.5 刀位点的计算	152
5.4 投影法	155
5.5 五坐标铣削刀轨生成算法	156
5.5.1 五轴加工刀轨面的 NURBS 直纹面重构	156
5.5.2 刀具轨迹面的 5 次 NURBS 曲面构造	157
5.5.3 基于 NURBS 的侧刃铣削刀轨生成算法	159
5.5.4 端面铣削加工刀轨生成算法	161
5.5.5 全局碰撞快速检查	164
5.6 本章小结	165
第 6 章 高速铣削刀轨生成的基本算法	166
6.1 高速二轴铣削刀轨生成	166
6.1.1 螺旋进刀刀轨生成算法	166
6.1.2 圆角过渡的二维轮廓加工刀轨生成算法	167
6.1.3 摆线加工刀轨生成算法	168
6.1.4 行间过渡边“桥弯道”	170
6.1.5 螺旋刀轨生成算法	171
6.1.6 变行距的螺旋刀轨生成算法	172
6.2 本章小结	175
第 7 章 数控加工仿真	176
7.1 数控仿真系统的框架	176

7.2 数控加工仿真技术基础算法.....	177
7.2.1 光照模型.....	178
7.2.2 切削过程几何表示和真实感图形显示算法.....	179
7.3 用于加工仿真的快速消隐算法.....	183
7.3.1 消隐算法概述.....	183
7.3.2 数控加工仿真快速局部消隐算法.....	185
7.4 精度验证算法.....	187
7.4.1 精度验证概述.....	187
7.4.2 Z&N 编程精度的验证算法.....	188
7.5 本章小结.....	191
第 8 章 后置处理.....	192
8.1 后置处理的基本概念和任务.....	192
8.2 后置处理计算.....	193
8.3 通用后置处理系统.....	196
8.4 本章小结.....	197
第 9 章 数控编程案例分析.....	198
例 1 弯管成形模凸凹模的数控编程.....	198
例 2 钢制凹模的数控编程.....	200
例 3 模具型芯数控编程.....	201
例 4 注塑模型芯数控编程.....	202
例 5 行程控制管的数控编程.....	203
例 6 增压器涡轮叶轮成型滑块数控编程.....	204
例 7 石墨电极数控编程.....	205
例 8 铝制箱形零件数控编程.....	206
例 9 航空横梁零件数控编程.....	209
例 10 航空框类零件数控编程.....	211
例 11 飞机接头的数控编程.....	213
例 12 整体叶轮五坐标数控加工.....	217
本章小结.....	219
参考文献.....	220

第 1 章 数控编程基础

1.1 数控加工的基本概念

数控加工是 20 世纪 40 年代后期发展起来的一种自动化加工技术，它综合了计算机、自动控制、电机、电气传动、测量、监控和机械制造等学科的内容。目前在制造业中数控加工已得到了广泛应用，并在制造业中已开始占据主导地位。

数控机床是数控加工的执行单元，它是数字控制机床（Numerically Controlled Machine Tool）的简称，是为了满足单件、小批、多品种自动化生产的需要而研制的一种灵活的、通用的、能够适应产品频繁变化的、以数字化控制为基本特征的柔性自动化机床，具有适应性强、加工精度高、加工质量稳定和生产效率高的优点。

1.1.1 数控与数控机床

数控（Numerical Control, NC）是以数字化信号对机床运动及加工过程进行控制的一种方法。数控机床是指应用数控技术对加工过程进行控制的机床。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，可以自动地对被加工工件进行加工。从数控系统外部输入的直接用于加工的程序称为数控加工程序（简称为数控程序），它是机床数控系统的应用软件。与数控系统应用软件相对应的是数控系统内部的系统软件，系统软件是用于数控系统工作控制的。本书主要介绍数控程序的编制。

1. 数控机床的组成与工作原理

数控机床一般包括 3 个基本组成部分：控制系统、伺服系统及机床主体（如图 1.1 所示）。控制系统是数控机床的核心，主要作用是对输入的零件加工程序进行数字运算和逻辑运算，然后向伺服系统发出控制信号。控制系统是一种专用的计算机，它由硬件和软件组成，有些数控机床的控制系统就是将 PC 机配以控制系统软件而构成的。

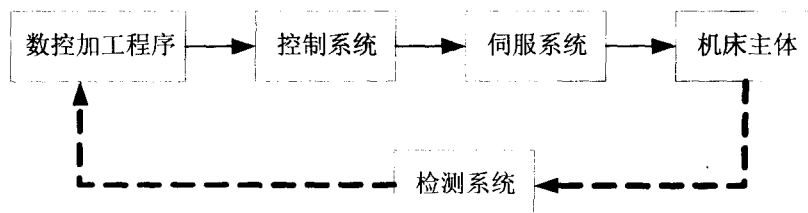


图 1.1 数控机床的基本组成

伺服系统的主要作用是根据控制系统发出的控制信号驱动执行元件运动。伺服系统由驱动装置和执行元件组成，其中常用的执行元件有步进电机、直流伺服电机和交流伺服电机 3 种。

机床主体是加工运动的实际部件，包括主运动部件、进给运动部件（如工作台、刀架）和支撑部件（如床身、立柱）等。有些数控机床还配备了特殊的部件，如刀库、自动换刀装置和托盘自动交换装置等。数控机床本体结构与传统机床相比有很大的变化，普遍采用了滚珠丝杠、滚动导轨，传动效率更高。由于减少了齿轮的使用数量，使传动系统更为简单。

大多数数控机床还具有位置检测装置，用于检测实际的位移量。伺服系统中的位移比较环节就是对控制位移量与实际位移量进行比较，根据比较的差值，调整控制信号，适时控制机床的运动位置。

2. 数控机床的分类

数控机床的分类方法有多种，如果从数控机床应用的角度分类，可分为数控车床、数控铣床、多轴数控铣床和加工中心等。

（1）数控车床。数控车床的机床本体与普通车床在结构布局上相差不大（如图 1.2 所示）。在普通车床上能够完成的加工内容都可以在数控车床上完成，另外由于具有数控系统和伺服系统，数控车床还能加工各种复杂的回转成形面。

（2）数控铣床。典型的立式数控铣床如图 1.3 所示。其中主轴带动刀具旋转，且主轴箱可上下移动（Z 轴），工作台可沿横向和纵向移动（X、Y 轴）。二轴联动的数控铣床可以加工复杂的内外型轮廓和简单的型腔；具有复杂曲面的零件可以在三轴联动的数控铣床上加工。

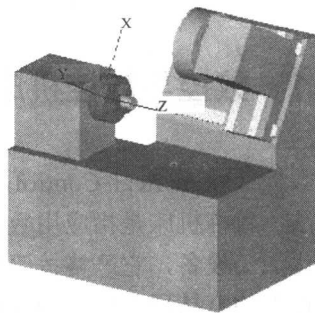


图 1.2 典型数控车床的结构

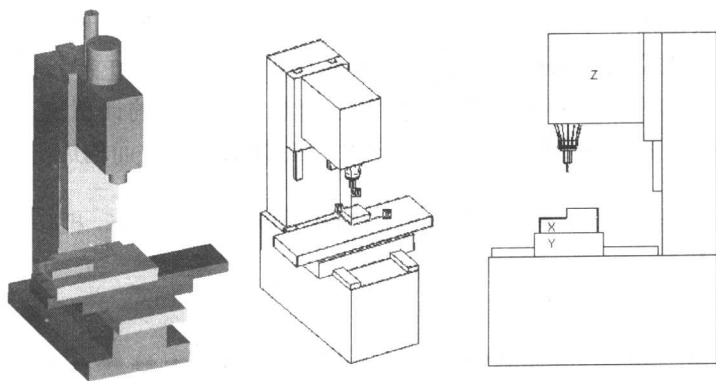


图 1.3 典型的立式数控铣床结构

(3) 多轴数控铣床。如果使数控铣床的工作台和主轴箱实现围绕 X、Y、Z 坐标轴旋转的运动（分别为 A、B、C 轴），则就成了多轴（四、五坐标联动）数控铣床。如图 1.4 所示的 A 向和 B 向的转动进给就构成了五轴数控铣床，它可以加工更为复杂的空间曲面。

(4) 加工中心。如果给数控铣床配上刀库和自动换刀装置就构成了加工中心，如图 1.5 所示为立式加工中心。加工中心的刀库可以存放数十把工具，由自动换刀装置进行调用和更换。工件在加工中心上的一次装夹可完成多项加工内容，生产效率与数控铣床相比大大提高。有些高端加工中心，不仅具有回转刀库，还具有交换托盘，当一个工件正在加工时，可以在交换托盘内装夹下一个工件。当前一个工件加工完毕，下一个将要加工的工件会自动移动到工作台上，从而节约了由于工件装夹而用机床的时间，提高了机床的有效加工时间。

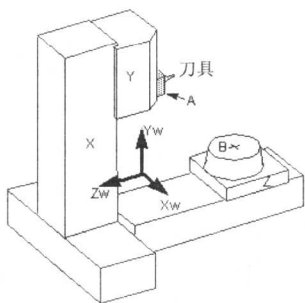


图 1.4 典型的多轴数控铣床结构

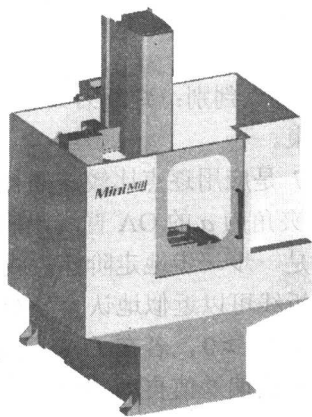


图 1.5 立式加工中心的结构

1.1.2 插补原理与控制系统

1. 插补原理

无论是简单的零件形状（由直线、圆弧等构成）还是包含复杂的曲线、曲面的零件，都需要在给定的误差范围内离散成直线、圆弧等，才能实现数控加工。在数控机床上加工直线或圆弧等，实际上是数控装置根据有关的信息指令进行的“数据密化”工作。例如加工如图 1.6 所示的一段圆弧，已知条件仅是该圆弧的起点 A 和终点 B 的坐标以及圆心 O 的坐标和半径 R，如果要把该圆弧光滑地描绘出来，就必须在预定的插补误差范围内将圆弧段 AB 之间各点的坐标计算出来，再把这些点填补到 A、B 之间，这种“数据密化”工作就是插补，计算插补点的运算称为插补运算，实现插补运算的装置称为插补器。

由于数控装置具有插补运算的功能，所以只需记录有限的信息指令，如加工直线只需记录直线的起点和终点的坐标信息；加工圆弧只需记录圆弧半径、起点和终点坐标、顺时针和逆时针加工等信息，数控装置就能利用控制介质上的这些有限的信息指令进行插补运

算,将直线和圆弧的各插补点坐标计算出来,并根据脉冲当量换算成脉冲数,然后发送相应的脉冲信号,通过伺服机构控制并加工出直线和圆弧。

在数控系统中,常用的插补方法有逐点比较法、数字积分法、时间分割法等。现将数控系统中用得最多的方法——逐点比较法的插补过程和直线圆弧插补运算方法简介如下。

逐点比较法的插补原理可概括为“逐点比较,步步逼近”,分为以下 4 个步骤:

(1) 偏差判别: 根据偏差值判断刀具当前位置与理想线段的相对位置,以确定下一步的走向。

(2) 坐标进给: 根据判别结果,使刀具向 X 或 Y 方向移动一步。

(3) 偏差计算: 当刀具移到新位置时,再计算与理想线段间的偏差以确定下一步的走向。

(4) 终点判别: 判断刀具是否到达终点。未到终点,则继续进行插补。若已达终点,则插补结束。

图 1.7 是应用逐点比较法插补原理进行直线插补的情形。机床在某一程序中要加工一条与 X 轴夹角为 α 的 OA 直线,在数控机床上加工时,刀具的运动轨迹并不是严格地走 OA 直线,而是一步一步地走阶梯折线,折线与直线的最大偏差不超过插补精度允许的范围,因此这些折线可以近似地认为是 OA 直线。当加工点在 OA 直线上方或在 OA 直线上,该点的偏差值 $F_n \geq 0$,若在 OA 直线的下方,则偏差值 $F_n < 0$,机床数控装置的逻辑功能,就是能够根据偏差值自动判别走步。当 $F_n \geq 0$ 时朝 +X 方向进给一步,当 $F_n < 0$ 时,朝 +Y 方向进给一步,每走一步自动比较一下,边判别边走刀,刀具依次以折线 O-1-2-3-4……A 逼近 OA 直线。就这样,从 O 点起逐点插补进给一直加工到 A 点为止,这种具有沿平滑直线分配脉冲的功能称为直线插补,实现这种插补运算的装置称为直线插补器。数控机床中,相对于每一个脉冲信号,机床移动部件产生的位移量称为脉冲当量。在插补运算中,进给一步的移动量即一个脉冲当量,它是机床移动的最小移动量。有一些数控系统直接用脉冲当量数作为坐标计算单位。例如,当脉冲当量是 0.001mm/脉冲时,要求向 X 轴正方向移动 7.75mm,向 Y 轴正方向移动 14.89mm,用 X7750Y14890 表示。

应用逐点比较法插补原理进行圆弧插补的情形如图 1.8 所示。机床在某一程序中要加工半径为 R 的 AB 圆弧,在数控机床上加工时,刀具的运动轨迹也是一步一步地走阶梯折线,折线与圆弧的最大偏差不超过插补精度允许的范围,因此这些折线可以近似地认为是 AB 圆弧。当加工点在 AB 圆弧外侧或在 AB 圆弧上,偏差值(该点到原点 O 的距离与半径 R 的比值) $F_n \geq 0$;若该点在圆弧的内侧即偏差值 $F_n < 0$ 。加工时,当 $F_n \geq 0$ 时,朝 -X 方向进给一步;当 $F_n < 0$ 时,朝 +Y 方向进给一步,刀具沿折线 A-1-2-3-4……B 依次逼近圆弧,从起点 A 逐点穿插进给一直加工到 B 点为止。这种沿圆弧分配脉冲的功能称为圆弧插补,实现这种插补运算的装置称为圆弧插补器。

一般的数控装置都具有直线和圆弧插补功能,一些高档的数控系统还具有样条和 NURBS 插补功能,样条和 NURBS 插补特别适应高速数控加工。

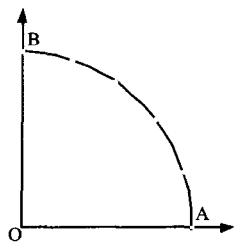


图 1.6 插补原理

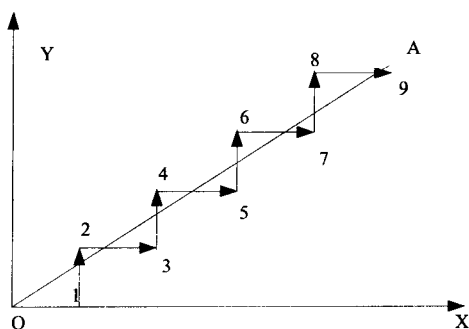


图 1.7 直线插补

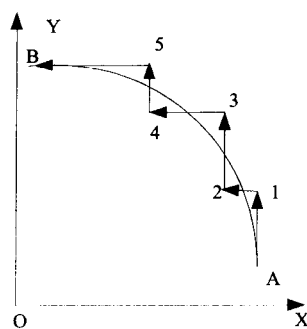


图 1.8 圆弧插补

2. 控制系统

随着电子技术的发展, 数控 (Numerical Control, NC) 系统有了较大的发展, 从硬件数控发展成计算机数控 (Computer Numerical Control, CNC)。CNC 与 NC 系统的主要区别在于: CNC 机床采用专用的或通用的计算机控制, 系统软件安装于内存中, 只要改变计算机的控制软件, 就能实现一种新的控制方式。

计算机数控系统 (CNC) 是采用计算机元件与结构, 并配备必要的输入/输出部件构成的。采用控制软件来实现加工程序存储、译码、插补运算、辅助动作逻辑联锁以及其他复杂功能。

完整的 CNC 系统分为 PC 部分与 NC 部分。PC 部分称为可编程控制器, 它主要接收程序中辅助功能指令或操作控制面板的操作指令, 控制各种辅助动作及其联锁等, 并显示各种控制信号状态。NC 部分称为数控部分, 是 CNC 系统的核心, 主要控制机床主运动和进给运动, 它又可分为计算机部分、位置控制部分和数据输入/输出接口及外部设备等。

与通用计算机一样, NC 的计算机部分由中央处理器 (CPU) 及存储数据与程序的存储器等组成。存储器分为系统控制软件存储器 (ROM)、加工程序存储器及工作区存储器 (RAM)。ROM 中的系统控制软件程序是由数控系统生产厂家写入的, 用来完成 CNC 系统的各项功能。数控机床操作者将各自的加工程序存储在 RAM 中, 以供数控系统用来控制机床加工工件。工作区存储器是系统程序执行过程中的活动场所, 用于堆栈、参数保存、中间运算结果保存等。CPU 执行系统程序, 读取加工程序, 经过加工程序段译码、预处理计算, 然后根据加工程序段指令, 进行实时插补与机床位置伺服控制, 同时将辅助动作指令通过计算机送往机床, 并接受通过计算机返回机床的各部分信息, 以确定下一步操作。

位置控制部分有两种, 一种是进给位置控制, 另一种是主轴位置伺服控制。两者均由位置控制单元、速度控制单元和进给或主轴伺服电动机组成。主轴位置伺服只用于主轴多点定向和螺纹切削。在一般切削时不需要位置控制, 仅用速度控制就可以了。

数据输入/输出接口和外部设备用来实现数控系统与操作者之间的信息交换。操作者通过光电阅读器、磁盘驱动器、手动数据输入装置 (键盘)、DNC (Direct Numerical Control, 直接数字控制) 以及以太网等将加工程序等输入数控系统, 并通过显示器 (CRT) 显示已

输入的加工程序以及其他信息,也可以将存储在数控系统的、经过修改并经实际加工检验的加工程序复制在磁盘或穿孔纸带上。

数控系统是数控技术的关键。目前,数控系统正在发生根本性变革。在集成化方面,数控系统实现了超薄型、超小型化;在智能化方面,综合了计算机、多媒体、模糊控制、神经网络等多种学科技术,实现了高速、高精度、高效控制,加工过程中可以自动修正、调节和补偿各种参数以及在线诊断和智能化故障处理;在网络化方面,CAD/CAM 与数控系统集成一体,机床联网,实现了中央集中控制的群控加工。

1.1.3 数控加工的特点

所谓数控加工就是用数控机床按照程序指令加工零件的方法,是伴随数控机床的产生、发展而逐步完善起来的一种应用技术,数控加工的主要内容包括:

在数控机床加工前,首先考虑操作内容和动作,如工步的划分和顺序、走刀路线、位移量和切削参数等,按规定的代码形式编程序,再将程序输入到数控机床的数控系统中,使数控机床按所编程序运动,从而自动加工出所要求的零件轮廓。

数控加工与普通机床加工相比具有以下特点:

- ◆ 加工的零件精度高、一致性好。数控机床在整体设计中考虑了整机刚度和零件的制造精度,又采用高精度的滚珠丝杠传动副,机床的定位精度和重复定位精度都很高。特别是有的数控机床具有加工过程自动监测和误差补偿等功能,因而能可靠地保证加工精度和尺寸的稳定性。同时由于数控加工消除了操作者的主观误差,从而保证了零件加工的一致性,确保加工质量的稳定。
- ◆ 生产效率高。数控加工零件的装夹次数较少,一次装夹可加工出很多表面,省去了画线找正和检测等许多中间环节。据统计,普通机床的净切削时间一般占总切削时间的 15%~20%,而数控机床可达 65%~70%,可实现自动换刀的带刀库数控机床甚至可达 75%~80%,加工复杂工件时,效率可提高 5~10 倍。有交换托盘的数控机床,几乎可以实现“零时间”装夹。
- ◆ 特别适合加工复杂的轮廓表面。如在航空、汽车等行业普遍存在的复杂自由曲面等。
- ◆ 数控机床是柔性制造系统的基础单元,有利于实现计算机辅助制造。目前在制造业领域中,CAD/CAM 已经被广泛应用,数控机床及其加工技术正是计算机辅助制造系统的基础。数控机床是柔性制造系统(Flexible Manufacturing System)的基础单元,它使用数字信息,可以方便地与计算机辅助设计系统以及其他流水线、自动控制系统联结,构成柔性制造系统。
- ◆ 初始投资大,加工成本高。数控机床的价格一般是普通机床的若干倍,机床备件的价格也高;另外加工首件需要进行编程、调试程序和试加工,时间较长,从而使零件的加工成本高于普通机床。

1.2 数控编程的基本概念

1.2.1 数控机床坐标系

1. 标准坐标系的确定

在数控编程时,为了描述机床的运动,简化程序编制的方法及保证记录数据的互换性,数控机床的坐标系和运动方向均已标准化,目前国际上数控机床的坐标轴和运动方向均已实现标准化。掌握机床坐标系、编程坐标系、加工坐标系等概念,是具备人工设置机床加工坐标系的基础。

(1) 机床相对运动的规定。无论机床在实际加工中是工件运动还是刀具运动,在确定编程坐标时,一般看作是工件相对静止,而刀具运动这一原则可以保证编程人员在不确定机床加工零件时是刀具移向工件,还是工件移向刀具的情况下,都可以根据图纸或数模进行手工或自动数控编程。

为了确定机床的运动方向和移动距离,需要在机床上建立一个坐标系,这个坐标系就是机床坐标系。数控机床上的标准坐标系采用右手直角笛卡儿坐标系,如图 1.9 所示。

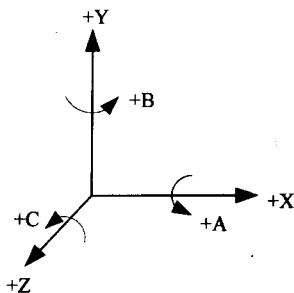


图 1.9 机床坐标系

(2) 机床坐标系的规定。在确定机床坐标轴时,一般先确定 Z 轴,然后确定 X 轴和 Y 轴,最后确定其他轴。机床某一零件运动的正方向,是指增大工件和刀具之间距离的方向。

① Z 轴: Z 轴的方向是由传递切削力的主轴确定的,与主轴轴线平行的坐标轴即是 Z 轴,Z 坐标的正向为刀具离开工件的方向。如果机床上有几个主轴,则选一个垂直于工件装夹平面的主轴方向为 Z 坐标方向;如果主轴能够摆动,则选垂直于工件装夹平面的方向为 Z 坐标方向;如果机床无主轴,则选垂直于工件装夹平面的方向为 Z 坐标方向。

② X 轴: X 轴是水平轴,平行于工件的装夹面,且垂直于 Z 轴。这是在刀具或工件定位平面内运动的主要坐标。对于工件旋转的机床(如车床、磨床等),X 坐标的方向是在工件的径向上,且平行于横滑座。刀具离开工件旋转中心的方向为 X 轴正方向。

③ Y轴：Y坐标轴垂直于X、Z坐标轴。Y运动的正方向根据X和Z坐标的正方向，按照右手直角笛卡儿坐标系来判断。

④ 旋转坐标轴：围绕坐标轴X、Y、Z旋转的运动，分别用A、B、C表示。它们的正方向用右手螺旋法则判定，如图1.9所示。

⑤ 附加轴：如果在X、Y、Z主要坐标以外，还有平行于它们的坐标，可分别指定第2组U、V、W坐标，第3组P、Q、R坐标。

常见类型数控机床的坐标系如图1.10～图1.16所示。

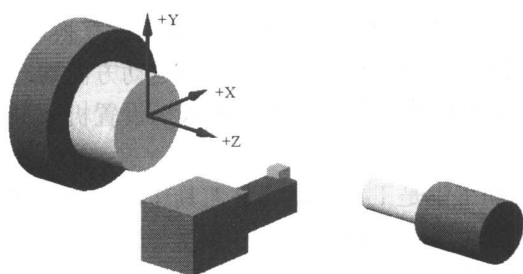


图 1.10 二轴数控车床的坐标系

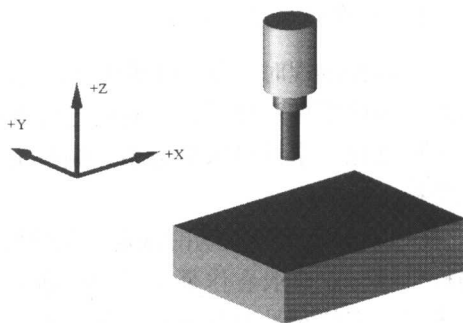


图 1.11 三轴数控铣床的坐标系

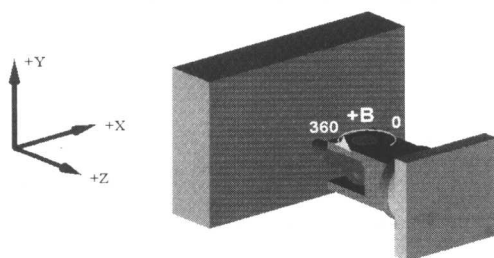


图 1.12 带旋转头的四轴铣床的坐标系

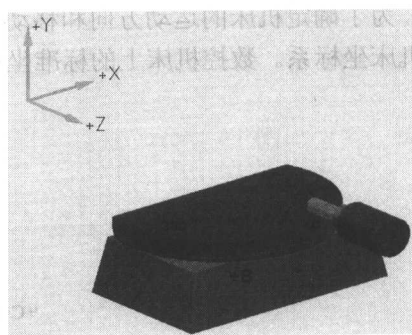


图 1.13 带旋转工作台头的四轴铣床的坐标系

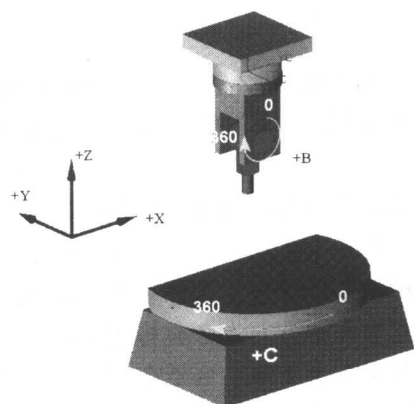


图 1.14 带旋转头和工作台的五轴铣床的坐标系

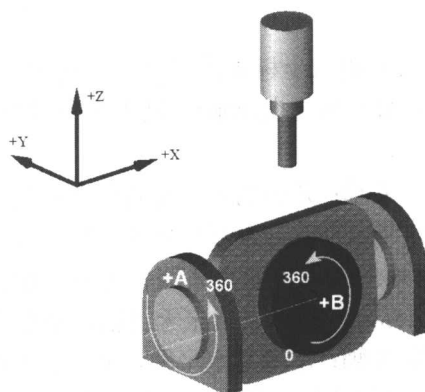


图 1.15 带双旋转工作台的五轴铣床的坐标系

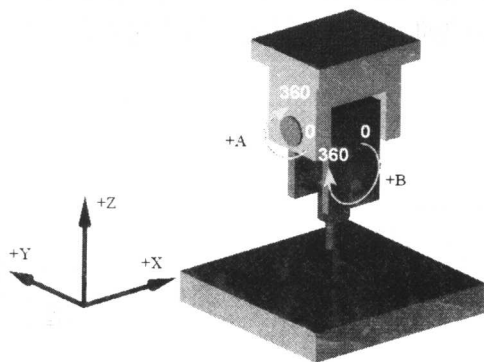


图 1.16 带双旋转头的五轴铣床的坐标系

2. 工件坐标系

工件坐标系是用于确定工件几何图形上各几何要素（点、直线和圆弧）的位置而建立的坐标系。工件坐标系的原点即是工件零点。选择工件零点时，最好把工件零点放在工件图的尺寸能够方便地转换成坐标值的地方。车床工件零点一般设在主轴中心线上，工件的右端面或左端面。铣床工件零点，一般设在工件外轮廓的某个角上，进刀深度方向的零点，大多取在工件表面。工件零点的一般选用原则如下：

- ◆ 工件零点选在工件图样的尺寸基准上，这样可以直接用图纸标注的尺寸，作为编程点的坐标值，减少计算工作量。
- ◆ 能使工件方便地装夹、测量和检验。
- ◆ 工件零点尽量选在尺寸精度较高的工件表面上。这样可以提高工件的加工精度和同一批零件的一致性。
- ◆ 对于有对称形状的几何零件，工件零点最好选在对称中心上。

1.2.2 数控编程的特征点

1. 机床原点与参考点

机床原点是指机床坐标系的原点，即 $X=0$, $Y=0$, $Z=0$ 。机床原点是机床的基本点，它是其他所有坐标，如工件坐标系、编程坐标系，以及机床参考点的基准点。从机床设计的角度看，该点位置可以是任意点，但对某一具体机床来说，机床原点是固定的。数控车床的原点一般设在主轴前端的中心（如图 1.17 所示）。数控铣床的原点位置各生产厂家不一致，有的设在机床工作台中心，有的设在进给行程范围的终点（如图 1.18 所示）。

机床参考点是用于对机床工作台、滑板以及刀具相对运动的测量系统进行定标和控制的点，有时也称机床零点。它是在加工之前和加工之后，用控制面板上的回零按钮使移动部件退回到机床坐标系中的一个固定不变的极限点。机床参考点的位置是由机床制造厂家在每个进给轴上用限位开关精确调整好的，坐标值已输入数控系统中，因此参考点对机床