

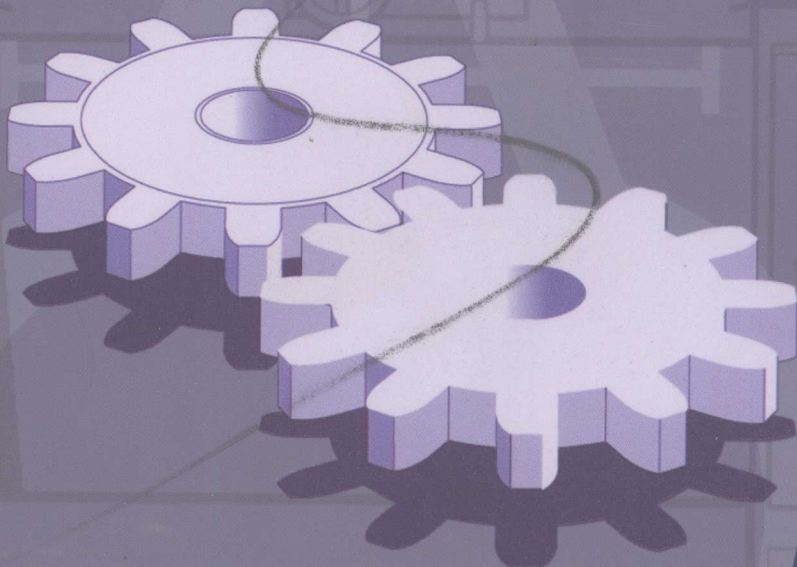
21世纪高等学校基础工业

CAD / CAM规划教材

Pro/ENGINEER

Wildfire 数控加工教程

雷保珍 主编



Compact 120



清华大学出版社

TG659-39/30D

2008

21 世纪高等学校基础工业 CAD/CAM 规划教材

Pro/ENGINEER Wildfire 数控加工教程

雷保珍 主 编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书以美国 PTC 公司的 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 (中文版) 为蓝本, 全面、系统地介绍了 Pro/ENGINEER 数控加工技术。本书内容包括数控加工概论、数控工艺简述、Pro/ENGINEER 数控加工入门、铣削加工、车削加工、线切割加工、五轴联动加工、数控加工综合实例等。

本书内容全面、条理清晰、实例丰富、讲解详细, 章节的安排次序采用由浅入深、循序渐进的教学原则。在内容安排上, 为了使读者更快、更深入地理解 Pro/ENGINEER 数控加工的一些抽象的概念、复杂命令和功能, 书中配备有相应的习题。

本书附光盘一张, 光盘中制作了本书的全程同步视频文件 (近 5 个小时), 另外, 光盘还包含本书所有的教案文件、实例文件、练习文件及 Pro/ENGINEER 软件的配置文件。

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。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目 (CIP) 数据

Pro/ENGINEER Wildfire 数控加工教程/雷保珍主编. —北京: 清华大学出版社, 2008. 8
(21 世纪高等学校基础工业 CAD/CAM 规划教材)

ISBN 978-7-302-17717-3

I. P… II. 雷… III. 数控机床—加工—计算机辅助设计—应用软件, Pro/ENGINEER Wildfire—高等学校—教材 IV. TG659-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 075208 号

责任编辑: 魏江江

责任校对: 李建庄

责任印制: 杨 艳

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印 张: 15.5 字 数: 371 千字

附光盘 1 张

版 次: 2008 年 8 月第 1 版

印 次: 2008 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1~4000

定 价: 29.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题, 请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770177 转 3103 产品编号: 029052-01

前言

Pro/ENGINEER 是由美国 PTC 公司推出的三维 CAD/CAM 参数化软件系统,它的内容涵盖了产品从概念设计、工业造型设计、三维模型设计、分析计算、动态模拟与仿真、工程图的输出、生产加工成产品的全过程,其中还包括了大量的电缆和管道布线、模具设计与分析等实用模块。应用领域包括家电、汽车、航空航天、机械设计、数控 (NC) 加工以及电子等诸多行业。

由于其强大的功能,Pro/ENGINEER 几乎成为三维 CAD/CAM 领域的一面旗帜和标准。它在国外大学院校里已成为学习工程必修的专业课程,也是工程技术人员必须掌握的技术。

随着我国经济持续发展,一场新的工业设计领域的技术革命正在兴起,作为提高生产效率和竞争力的有效手段,Pro/ENGINEER 也正在国内形成一个广泛应用的热潮。

Pro/ENGINEER Wildfire 是 PTC 公司推出的 Pro/ENGINEER 系列产品中的旗舰产品,特别强调了设计过程的易用性以及设计人员之间的互联性,其产品性能有了本质的改善。Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 是最新推出的版本,它构建于 Pro/ENGINEER Wildfire 的成熟技术之上,新增了许多功能。

建议本书的教学采用 32 学时(包括学生上机练习),教师也可以根据实际情况,对书中内容进行适当的取舍,调整学时。

本书由雷保珍主编,由清华大学副教授洪亮担任主审,参加编写的人员还有姜龙、王焕田、张世鹏、杨解元、王超、杨金凤、刘静、汪佳胜、冉敏、詹超、刘海起、高政、黄光辉、张坤、罗栓、陈强、冯元超、杨红涛、王帅、张麒、高健、郭世义、刘国新。

本书在编写过程中得到了北京兆迪科技有限公司的大力帮助,在此表示衷心感谢。读者在学习本书过程中如有疑问,可以通过访问该公司的网站 <http://www.zalldy.com> 获得技术支持。

本书虽经多次推敲,但书中错误之处在所难免,恳请广大读者予以指正。

电子邮箱: qhcx@163.com

本书导读

写作环境

本书使用的操作系统为 Windows 2000 Professional,对于 Windows 2000 Server/XP 操作系统,本书内容和范例也同样适用。

随书光盘使用说明

为方便教师教学和读者练习,本书所用到的实例、素材、练习、习题、软件配置文件等放入随书附赠的光盘中。

建议读者在学习本书前,把随书光盘中的 proe3.0_NC 文件夹复制到计算机的 D 盘根目

录下。在 proe3.0_NC 文件夹中共有 3 个子文件夹:

- (1) proe_system_file 子文件夹: 包含 Pro/ENGINEER 的配置文件。
- (2) work 子文件夹: 包含本书讲解中所用到的实例、素材、练习、习题等文件, 其中带有 “_ok” 后缀的文件或文件夹表示已完成的模型。
- (3) video 子目录: 包含本书讲解中所有的同步视频文件(无声音)。学习时, 直接双击某个视频文件即可播放。

读者在学习过程中可以利用这些实例、素材文件进行操作和练习。其中带有 “_ok” 后缀的文件或文件夹表示已完成的实例。

为了达到最佳的学习效果, 建议读者在学习过程中打开 proe3.0_NC 文件夹中有关的资料进行操作和练习。

本书约定

- 本书中有关鼠标操作的简略表述说明如下:

- ☑ 单击: 将鼠标指针移至某位置处, 然后按一下鼠标的左键。
- ☑ 双击: 将鼠标指针移至某位置处, 然后连续快速地按两次鼠标的左键。
- ☑ 右击: 将鼠标指针移至某位置处, 然后按一下鼠标的右键。
- ☑ 单击中键: 将鼠标指针移至某位置处, 然后按一下鼠标的中键。
- ☑ 滚动中键: 只是滚动鼠标的中键, 而不按中键。
- ☑ 选择(选取)某对象: 将鼠标指针移至某对象上, 单击以选取该对象。
- ☑ 拖动某对象: 将鼠标指针移至某对象上, 然后按下鼠标的左键不放, 同时移动鼠标, 将该对象移动到指定的位置后再松开鼠标的左键。

- 本书中的操作步骤说明如下:

- ☑ 对于一般的软件操作, 每个操作步骤以 Step 字符开始。
- ☑ 每个 Step 操作视其复杂程度, 其下面可以有多个子操作, 例如 Step1 下可能包含(1)、(2)、(3)等子操作、(1)级子操作下可能包含①、②、③等子操作。
- ☑ 如果操作较复杂, 需要几个大的操作步骤才能完成, 则每个大的操作冠以 Stage1、Stage2、Stage3 等, Stage 级别的操作下再分 Step1、Step2、Step3 等操作。
- ☑ 对于多个任务的操作, 则每个任务冠以 Task1、Task2、Task3 等, 每个 Task 操作下则可包含 Stage 和 Step 级别的操作。

- 由于已建议读者将 proe3.0_NC 文件夹复制到计算机的 D 盘根目录下, 所以书中在要求设置工作目录或打开光盘文件时, 所述的路径均以 D: 开始。例如, 下面是有关这方面的描述:

Step1. 将工作目录设置至 D:\proe3.0_NC\work\ch02。

编者

2008 年 5 月于北京

目 录

第 1 章 Pro/ENGINEER 数控加工基础	1
1.1 数控加工概论	1
1.2 数控编程简述	1
1.3 数控机床	3
1.3.1 数控机床的组成	3
1.3.2 数控机床的特点	4
1.3.3 数控机床的分类	5
1.3.4 数控机床的坐标系	8
1.4 数控加工工艺概述	9
1.4.1 数控加工工艺的特点	9
1.4.2 数控加工工艺的主要内容	10
1.4.3 数控工序的安排	11
1.4.4 加工精度	13
1.5 高度与安全高度	14
1.6 走刀路线的选择	15
1.7 对刀点与换刀点的选择	17
1.8 轮廓控制	18
1.9 Pro/ENGINEER 数控加工操作界面	19
第 2 章 Pro/ENGINEER 数控加工入门	24
2.1 Pro/ENGINEER 数控加工流程	24
2.2 新建数控制造模型文件	25
2.3 建立制造模型	25
2.4 制造设置	29
2.5 设置加工方法	39
2.6 演示刀具轨迹	46
2.7 加工仿真	48
2.8 切减材料	49
2.9 遮蔽体积块	50
2.10 后置处理	50

2.10.1	后置处理概述.....	51
2.10.2	数控代码的生成.....	51
第3章	铣削加工.....	55
3.1	体积块铣削.....	55
3.2	轮廓铣削.....	61
3.3	局部铣削.....	70
3.4	平面铣削.....	74
3.5	曲面铣削.....	81
3.6	轨迹铣削.....	93
3.7	刻模铣削.....	100
3.8	腔槽加工.....	105
3.9	螺纹铣削.....	111
3.10	陷入铣削.....	121
3.11	孔加工.....	127
第4章	车削加工.....	135
4.1	区域车削.....	135
4.2	轮廓车削.....	142
4.3	凹槽车削.....	145
4.4	螺纹车削.....	149
第5章	线切割加工.....	154
5.1	线切割加工概述.....	154
5.2	两轴线切割加工.....	155
第6章	五轴联动加工.....	164
6.1	五轴联动铣削加工概述.....	164
6.2	五轴联动铣削加工.....	164
第7章	综合实例.....	172
7.1	凸模加工.....	172
7.2	泵体加工.....	189
7.3	箱体加工.....	212
第8章	习题.....	232
8.1	体积块加工.....	232

8.2 轮廓加工.....	232
8.3 平面铣削.....	232
8.4 曲面铣削.....	233
8.5 轨迹铣削.....	233
8.6 刻模铣削.....	234
8.7 型腔铣削.....	234
8.8 孔加工.....	234
8.9 车削加工.....	235
8.10 铣削加工综合练习.....	235
8.11 铣削螺纹.....	236

第1章 Pro/ENGINEER 数控加工基础

本章提要

本章主要介绍 Pro/ENGINEER 数控加工的基础知识, 内容包括数控编程以及加工工艺基础、Pro/ENGINEER 数控部分的安装说明、Pro/ENGINEER 系统配置和 Pro/ENGINEER 数控加工操作界面等。

1.1 数控加工概论

数控技术即数字控制技术 (Numerical Control Technology), 指用计算机以数字指令方式控制机床动作的技术。

数控加工具有产品精度高、自动化程度高、生产效率高以及生产成本低等特点, 在制造业及航天加工业, 数控加工是所有生产技术中相当重要的一环。尤其是汽车或航天产业零部件, 其几何外形复杂且精度要求较高, 更突出了 NC 加工制造技术的优点。

数控加工技术集传统的机械制造、计算机、信息处理、现代控制、传感检测等光机电技术于一体, 是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及产品结构带来了深刻的变化。

近年来, 由于计算机技术的迅速发展, 数控技术的发展相当迅速。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。

1.2 数控编程简述

数控编程一般可以分为手工编程和自动编程。手工编程是指从零件图样分析、工艺处理、数值计算、编写程序直到程序校核等各步骤的数控编程工作, 均由人工完成的全过程。该方法适用于零件形状不太复杂、加工程序较短的情况, 而对于复杂形状的零件, 如具有非圆曲线、列表曲面和组合曲面的零件, 或者零件形状虽不复杂, 但是程序很长, 则比较适合于自动编程。

自动数控编程是从零件的设计模型 (即参考模型) 获得数控加工程序的全部过程。其主要任务是计算加工走刀过程中的刀位点 (Cutter Location Point, CL 点), 从而生成 CL 数据文件。采用自动编程技术可以帮助人们解决复杂零件的数控加工编程问题, 其大部分工作由计算机来完成, 编程效率大大提高, 还能解决手工编程无法解决的许多复杂形状零件

的加工编程问题。

Pro/ENGINEER 数控模块提供了多种加工类型用于各种复杂零件的粗精加工,用户可以根据零件结构、加工表面形状和加工精度要求选择合适的加工类型。

数控编程的主要内容有分析零件图样、工艺处理、数值处理、编写加工程序、输入数控系统、程序检验及试切。

(1) 分析图样及工艺处理。在确定加工工艺过程时,编程人员首先应根据零件图样对工件的形状、尺寸和技术要求等进行分析,然后选择合适的加工方案,确定加工顺序和路线、装夹方式、刀具以及切削参数,为了充分发挥机床的功用,还应该考虑所用机床的指令功能,选择最短的加工路线,选择合适的对刀点和换刀点,以减少换刀次数。

(2) 数值处理。根据图样的几何尺寸、确定的工艺路线及设定的坐标系,计算工件粗、精加工的运动轨迹,得到刀位数据。零件图样坐标系与编程坐标系不一致时,需要对坐标进行换算。形状比较简单的零件的轮廓加工,需要计算出几何元素的起点、终点及圆弧的圆心,两几何元素的交点或切点的坐标值,有的还需要计算刀具中心运动轨迹的坐标值。对于形状比较复杂的零件,需要用直线段或圆弧段逼近,根据要求的精度计算出各个节点的坐标值。

(3) 编写加工程序。确定加工路线、工艺参数及刀位数据后,编程人员可以根据数控系统规定的指令代码及程序段格式,逐段编写加工程序。此外,还应填写有关的工艺文件,如数控刀具卡片、数控刀具明细表和数控加工工序卡片等,随着数控编程技术的发展,现在大部分的机床已经直接采用自动编程。

(4) 输入数控系统。即把编制好的加工程序,通过某种介质传输到数控系统。过去我国数控机床的程序输入一般使用穿孔纸带,穿孔纸带的程序代码通过纸带阅读器输入到数控系统。随着计算机技术的发展,现代数控机床主要利用键盘将程序输入到计算机中。随着网络技术进入工业领域,通过 CAM 生成的数控加工程序可以通过数据接口直接传输到数控系统中。

(5) 程序检验及试切。程序必须经过检验和试切才能正式使用。检验的方法是直接将加工程序输入到数控系统中,让机床空运转,即以笔代刀,以坐标纸代替工件,画出加工路线,以检查机床的运动轨迹是否正确。若数控机床有图形显示功能,可以采用模拟刀具切削过程的方法进行检验。但这些过程只能检验出运动是否正确,不能检查被加工零件的精度,因此必须进行零件的首件试切。首件试切时,应该以单程序段的运行方式进行加工,监视加工状况,调整切削参数和状态。

从以上内容看来,作为一名数控编程人员,不但要熟悉数控机床的结构、功能及标准,而且必须熟悉零件的加工工艺、装夹方法、刀具以及切削参数的选择等方面的知识。

1.3 数控机床

1.3.1 数控机床的组成

数控机床的种类很多,但是任何一种数控机床都主要由数控系统、伺服系统和机床主体三大部分以及辅助控制系统等组成。

1. 数控系统

数控系统是数控机床的核心,是数控机床的“指挥系统”,其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。现代数控系统通常是一台带有专门系统软件的计算机系统,开放式数控系统就是将 PC 配以数控系统软件而构成的。

2. 伺服系统

伺服系统(也称驱动系统)是数控机床的执行机构,由驱动和执行两大部分组成,它包括位置控制单元、速度控制单元、执行电动机和测量反馈单元等部分,主要用于实现数控机床的进给伺服控制和主轴伺服控制。它接受数控系统发出的各种指令信息,经功率放大后,严格按照指令信息的要求控制机床运动部件的进给速度、方向和位移。目前数控机床的伺服系统中,常用的位移执行机构有步进电动机、电液马达、直流伺服电动机和交流伺服电动机,后者均带有光电编码器等位置测量元件。一般来说,数控机床的伺服系统,要求有好的快速响应和灵敏而准确的跟踪指令功能。

3. 机床主体

机床主体是加工运动的实际部件,除了机床基础件以外,还包括主轴部件,进给部件,实现工件回转、定位的装置和附件,辅助系统和装置(如液压、气压、防护等装置),刀库和自动换刀装置(Automatic Tools Changer, ATC),自动托盘交换装置(Automatic Pallet Changer, APC)。机床基础件通常是指床身或底座、立柱、横梁和工作台等,它是整台机床的基础和框架。加工中心则还应具有 ATC,有的还有双工位 APC 等。数控机床的本体结构与传统机床相比,发生了很大变化,普遍采用了滚珠丝杠、滚动导轨,传动效率更高;由于现代数控机床减少了齿轮的使用数量,使得传动系统更加简单。数控机床可根据自动化程度、可靠性要求和特殊功能需要,选用各种类型的刀具破损监控系统、机床与工件精度检测系统、补偿装置和其他附件等。

1.3.2 数控机床的特点

随着科学技术和市场经济的不断发展,对机械产品的质量、生产率和新产品的开发周期提出了越来越高的要求。为了满足上述要求,适应科学技术和经济的不断发展,数控机床应运而生。20 世纪 50 年代,美国麻省理工学院成功地研制出第一台数控铣床。1970 年首次展出了第一台用计算机控制的数控机床(CNC)。图 1.3.1 所示就是 CNC 数控铣床,图 1.3.2 所示是数控加工中心。



图 1.3.1 数控铣床



图 1.3.2 加工中心

数控机床自问世以来得到了高速发展,并逐渐为各国生产组织和管理者接受,这与它在加工中表现出来的特点是分不开的。数控机床具有以下主要特点:

- 高柔性。数控机床的最大特点是高柔性,即灵活、通用、万能,可以适应加工不同形状工件。如数控铣床一般能完成钻孔、镗孔、铰孔、攻螺纹、铣平面、铣斜面、铣槽、铣削曲面和铣削螺纹等加工,而且一般情况下,可以在一次装夹中完成所需的加工工序。加工对象改变,除相应更换刀具和解决工件装夹方式外,只需改变相应的加工程序即可。特别适应于目前多品种、小批量和变化快的生产特征。
- 高精度,加工重复性高。目前,普通数控加工的尺寸精度通常可达到 $\pm 0.005\text{mm}$ 。数控装置的脉冲当量(即机床移动部件的移动量)一般为 0.001mm ,高精度的数控系统可达 0.0001mm 。数控加工过程中,机床始终都在指定的控制指令下工作,消除了工人操作所引起的误差,不仅提高了同一批加工零件尺寸的统一性,而且产品质量能得到保证,废品率也大为降低。
- 高效率。机床自动化程度高,工序、刀具可自行更换、检测。例如,加工中心在一次装夹后,除定位表面不能加工外,其余表面均可加工;生产准备周期短,加工对象变化时,一般不需要专门的工艺装备设计制造时间;切削加工中可采用最佳切削参数和走刀路线。数控铣床一般不需要使用专用夹具和工艺装备。在更换

工件时, 只需调用储存于计算机中的加工程序、装夹工件和调整刀具数据即可, 可大大缩短生产周期。更主要的是数控铣床的万能性带来高效率, 如一般的数控铣床都具有铣床、镗床和钻床的功能, 工序高度集中, 提高了劳动生产率, 并减少了工件的装夹误差。

- 大大减轻了操作者的劳动强度。数控铣床对零件加工是根据加工前编好的程序自动完成的。操作者除了操作键盘、装卸工件、中间测量及观察机床运行外, 不需要进行繁重的重复性手工操作, 可大大减轻劳动强度。
- 易于建立计算机通信网络。数控机床使用数字信息作为控制信息, 易于与 CAD 系统连接, 从而形成 CAD/CAM 一体化系统, 它是 FMS、CIMS 等现代制造技术的基础。
- 初期投资大, 加工成本高。数控机床的价格一般是普通机床的若干倍, 且机床备件的价格也高; 另外, 加工首件需要进行编程、程序调试和试加工, 时间较长, 因此使零件的加工成本也大大高于普通机床。

1.3.3 数控机床的分类

数控机床的分类有多种方式。

1. 按工艺用途分类

按工艺用途分类, 数控机床可分为数控钻床、车床、铣床、磨床和齿轮加工机床等, 还有压床、冲床、电火花切割机、火焰切割机和点焊机等也都采用数字控制。加工中心是带有刀库及自动换刀装置的数控机床, 它可以在一台机床上实现多种加工。工件只需一次装夹就可以完成多种加工, 这样既节省了工时, 又提高了加工精度。加工中心特别适用于箱体类和壳类零件的加工。车削加工中心可以完成所有回转体零件的加工。

2. 按机床数控运动轨迹划分

点位控制数控机床 (PTP): 指在刀具运动时, 只控制刀具相对于工件位移的准确性, 不考虑两点间的路径。这种控制方法用于数控钻床、数控冲床和数控点焊设备, 还可以用在数控坐标镗铣床上。

点位直线控制数控机床: 就是要求在点位准确控制的基础上, 还要保证刀具运动是一条直线, 且刀具在运动过程中还要进行切削加工。采用这种控制的机床有数控车床、数控铣床和数控磨床等, 一般用于加工矩形和台阶形零件。

轮廓控制数控机床 (CP): 轮廓控制 (亦称连续控制) 是对两个或更多的坐标运动进行控制 (多坐标联动), 刀具运动轨迹可为空间曲线。它不仅能保证各点的位置, 而且还要控

制加工过程中的位移速度,也就是刀具的轨迹。要保证尺寸的精度,还要保证形状的精度。在运动过程中,同时要向两个坐标轴分配脉冲,使它们能走出所要求的形状来,这就叫插补运算。它是一种软仿形加工,而不是硬(靠模)仿形,并且这种软仿形加工的精度比硬仿形加工的精度高很多。这类机床主要有数控车床、数控铣床、数控线切割机和加工中心等。在模具行业中,对于一些复杂曲面的加工,较多使用这类机床,如三坐标以上的数控铣或加工中心。

3. 按伺服系统控制方式划分

开环控制是无位置反馈的一种控制方法,它采用的控制对象、执行机构多半是步进式电动机或液压转矩放大器。因为没有位置反馈,所以其加工精度及稳定性差,但其结构简单、价格低廉,控制方法简单,对于精度要求不高、且功率需求不大的地方,还是比较适用的。

半闭环控制是在丝杠上装有角度测量装置作为间接的位置反馈。因为这种系统未将丝杠螺母副和齿轮传动副等传动装置包含在闭环反馈系统中,因而称之为半闭环控制系统,它不能补偿传动装置的传动误差,但却得以获得稳定的控制特性。这类系统介于开环与闭环之间,精度没有闭环高,调试比闭环方便。

闭环控制系统是对机床移动部件的位置直接用直线位置检测装置进行检测,再把实际测量出的位置反馈到数控装置中去,与输入指令比较是否有差值,然后把这个差值经过放大和变换,最后去驱动工作台向减少误差的方向移动,直到差值符合精度要求为止。这类控制系统,因为把机床工作台纳入了位置控制环,故称为闭环控制系统。该系统可以消除包括工作台传动链在内的运动误差,因而定位精度高、调节速度快。但由于该系统受到进给丝杠的拉压刚度、扭转刚度、摩擦阻尼特性和间隙等非线性因素的影响,给调试工作造成较大的困难。如果各种参数匹配不当,将会引起系统振荡,造成系统不稳定,影响定位精度。由于闭环伺服系统复杂和成本高,故适用于精度要求很高的数控机床,如超精密数控车床和精密数控镗铣床等。

4. 按联动坐标轴数划分

(1) 两轴联动数控机床。主要用于三轴以上控制的机床,其中任意两轴做插补联动,第三轴做单独的周期进给,常称为 2.5 轴联动。如图 1.3.3 所示,在数控铣床上用球头铣刀采用行切法加工三维空间曲面。行切法加工所用的刀具通常是球刀铣头。用这种刀具加工曲面,不易干涉相邻表面,计算比较简单。球状铣刀的刀头半径应选得大一些,有利于降低加工表面粗糙度、增加刀具刚度以及散热等,但刀头半径应小于曲面的最小曲率半径。由于 2.5 轴坐标加工的刀心轨迹为平面曲线,故编程计算较为简单,数控逻辑装置也不复杂,常用于曲率变化不大以及精度要求不高的粗加工。

(2) 三轴联动数控机床。X、Y、Z 三轴可同时进行插补联动，在加工曲面时，通常亦用行切方法。如图 1.3.4 所示，三轴联动的刀具轨迹可以是平面曲线或空间曲线。三坐标联动加工常用于复杂曲面的精确加工，但编程计算较为复杂，所用的数控装置还必须具备三轴联动功能。

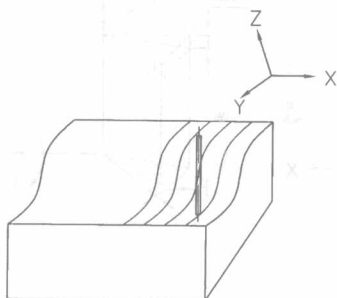


图 1.3.3 两轴联动

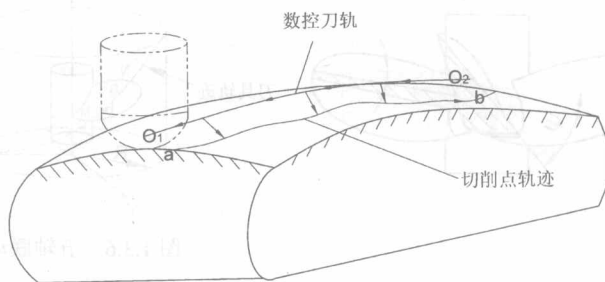


图 1.3.4 三轴联动

(3) 四轴联动数控机床。除了同时控制 X、Y、Z 三个直线坐标轴联动之外，还有工作台或者刀具的转动。如图 1.3.5 所示的工件，若在三坐标联动的机床上用圆头铣刀按行切法加工时，不但生产效率低，而且表面粗糙高。若采用圆柱铣刀周边切削，并用四坐标铣床加工，即除三个直角坐标运动外，为保证刀具与工件型面在全长始终贴合，刀具还应绕 O_1 （或 O_2 ）做摆角联动。由于摆角运动，导致直角坐标系（图中 Y）需做附加运动，其编程计算较为复杂。



图 1.3.5 四轴联动

(4) 五轴联动数控机床。除了同时控制 X、Y、Z 三个直线坐标轴联动以外，还同时控制围绕这些直线坐标轴旋转的 A、B、C 坐标轴中的两个坐标，即同时控制五个坐标轴联动。这时刀具可以被定位在空间的任何位置。

螺旋桨是五轴联动加工的典型零件之一，其叶片形状及加工原理如图 1.3.6 所示。在半径为 R_i 的圆柱面上与叶面的交线 MN 为螺旋线的一部分，螺旋角为 ϕ_i ，叶片的径向叶形线（轴向剖面）的倾角 α 为后倾角。螺旋线联动 MN 用极坐标加工方法并以折线段逼近。逼近线段 ab 是由 C 坐标旋转 $\Delta\theta$ 与 Z 坐标位移 ΔZ 的合成。当 MN 加工完后，刀具径向位移 ΔX （改变 R_i ），再加工相邻的另一条叶形线，依次加工，即可形成整个叶面。由于叶面的曲率半径较大，所以常用端面铣刀加工，可以提高生产率并简化程序。因此，为保证铣刀端面始终

与曲面贴合, 铣刀还应当相对于坐标 A 和坐标 B 做摆角运动, 在摆角运动的同时, 还应做直角坐标的附加直线运动, 以保证铣刀端面中心始终处于编程值位置上, 所以需要 Z、C、X、A、B 五坐标加工。这种加工的编程计算很复杂, 程序量较大。

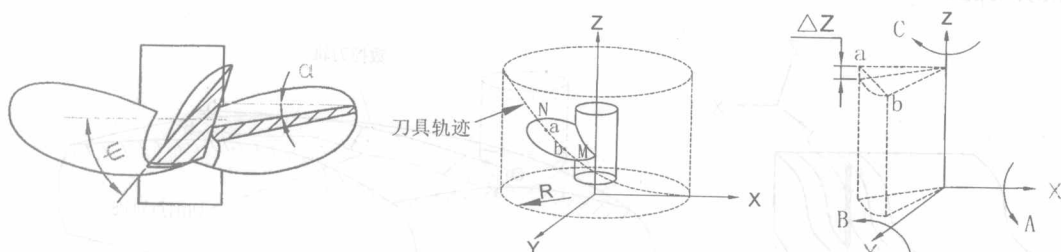


图 1.3.6 五轴联动

1.3.4 数控机床的坐标系

数控机床的坐标系统, 包括坐标系、坐标原点和运动方向, 对于数控加工及编程, 是一个十分重要的概念。每一个数控编程员和操作人员, 都必须对数控机床的坐标系有一个很清晰的认识。为了使数控系统规范化及简化数控编程, ISO 对数控机床的坐标系系统做了若干规定。关于数控机床坐标和运动方向命名的详细内容, 可参阅 JB/T 3051—1999 的规定。

机床坐标系是机床上固有的坐标系, 是机床加工运动的基本坐标系。它是考察刀具在机床上的实际运动位置的基准坐标系。对于具体机床来说, 有的是刀具移动工作台不动, 有的则是刀具不动而工作台移动。然而不管是刀具移动还是工件移动, 机床坐标系永远假定刀具相对于静止的工件而运动。同时, 运动的正方向是增大工件和刀具之间距离的方向。为了编程方便, 一律规定为工件固定、刀具运动。

标准的坐标系是一个右手直角坐标系, 如图 1.3.7 所示。拇指指向为 X 轴, 食指指向为 Y 轴, 中指指向为 Z 轴。一般情况下, 主轴的方向为 Z 坐标, 而工作台的两个运动方向分别为 X、Y 坐标。

若有旋转轴时, 规定绕 X、Y、Z 轴的旋转轴为 A、B、C 轴, 其方向为右旋螺纹方向, 如图 1.3.8 所示。旋转轴的原点一般定在水平面上。

图 1.3.9 是典型的单立柱立式数控铣床加工运动坐标系示意图。刀具沿与地面垂直的方向上下运动, 工作台带动工件在与地面平行的平面内运动。机床坐标系的 Z 轴是刀具的运动方向, 并且刀具向上运动为正方向, 即远离工件的方向。当面对机床进行操作时, 刀具相对工件的左右运动方向为 X 轴, 并且刀具相对工件向右运动 (即工作台带动工件向左运动) 时为 X 轴的正方向。Y 轴的方向可用右手法则确定。若以 X' 、 Y' 、 Z' 表示工作台相对于刀具的运动坐标轴, 而以 X、Y、Z 表示刀具相对于工件的运动坐标轴, 则显然有 $X'=-X$ 、 $Y'=-Y$ 、 $Z'=-Z$ 。

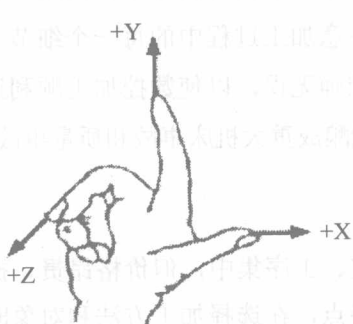


图 1.3.7 右手直角坐标系

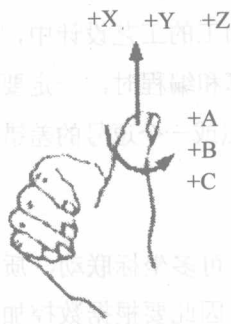


图 1.3.8 旋转坐标系

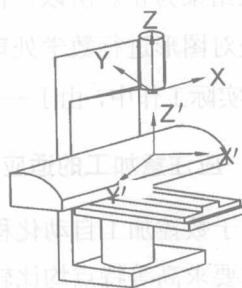


图 1.3.9 机床坐标系示意图

1.4 数控加工工艺概述

1.4.1 数控加工工艺的特点

数控加工工艺与普通加工工艺基本相同，在设计零件的数控加工工艺时，首先要遵循普通加工工艺的基本原则与方法，同时还需要考虑数控加工本身的特点和零件编程的要求。由于数控机床本身自动化程度较高，控制方式不同，设备费用也高，使数控加工工艺相应形成了以下几个特点。

1. 工艺内容具体、详细

数控加工工艺与普通加工工艺相比，在工艺文件的内容和格式上都有较大区别，如加工顺序、刀具的配置及使用顺序、刀具轨迹和切削参数等方面，都要比普通机床加工工艺中的工序内容更详细。在用通用机床加工时，许多具体的工艺问题，如工艺中各工步的划分与顺序安排、刀具的几何形状、走刀路线及切削用量等，在很大程度上都是由操作工人根据自己的实践经验和习惯自行考虑而决定的，一般无须工艺人员在设计工艺规程时进行过多的规定。而在数控加工时，上述这些具体工艺问题，必须由编程人员在编程时给予预先确定。也就是说，在普通机床加工时，本来由操作工人在加工中灵活掌握并可通过适时调整来处理的许多具体工艺问题和细节，在数控加工时就转变为编程人员必须事先设计和安排的内容。

2. 工艺要求准确、严密

数控机床虽然自动化程度较高，但自适性差。它不能像通用机床在加工时根据加工过程中出现的问题，可以自由地进行人为调整。例如，在数控机床上进行深孔加工时，它就