

FUZA QUMIAN SHUKONG JIAGONG  
XIANGGUAN JISHU

# 复杂曲面数控加工 相关技术

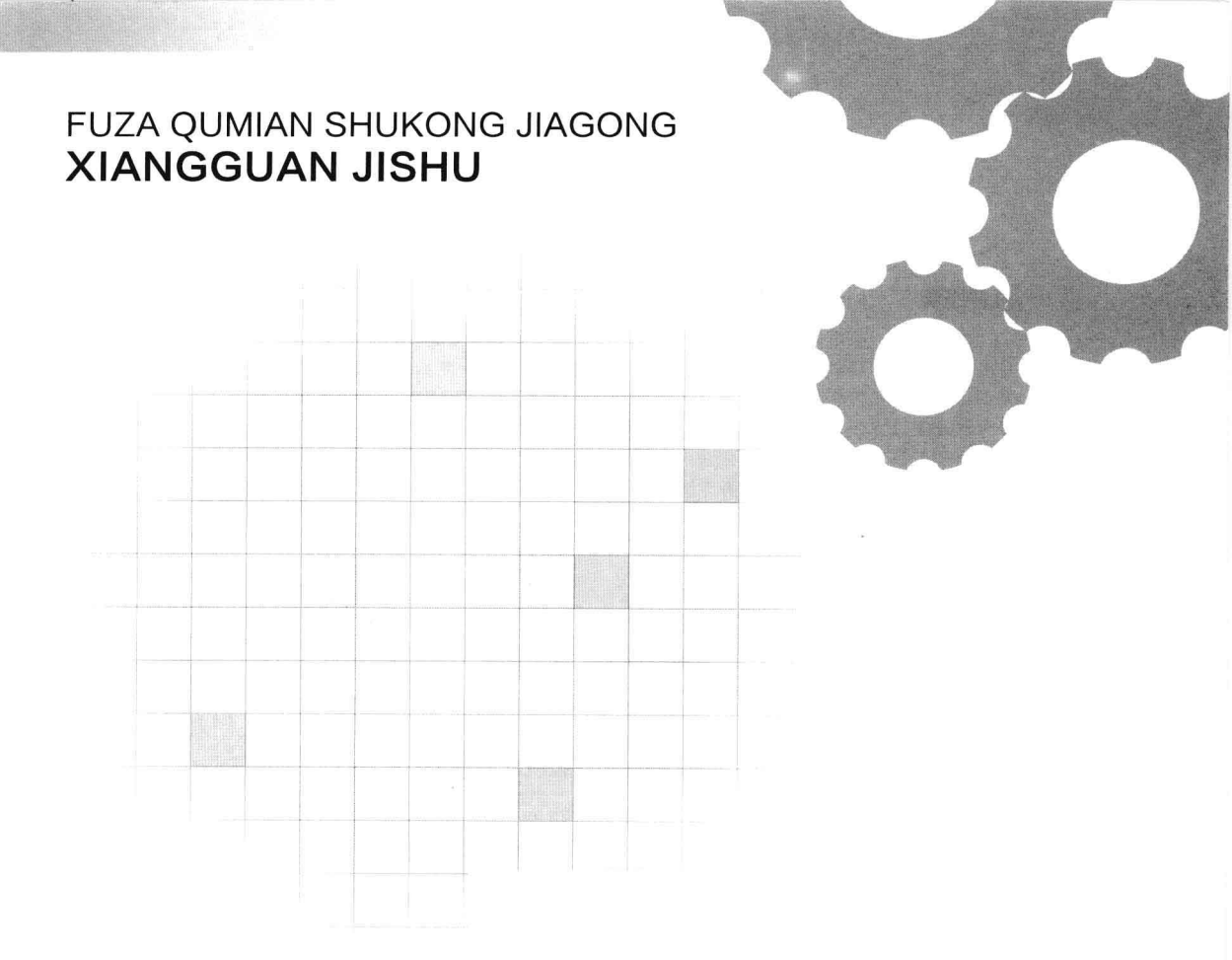
陈良骥◎著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

FUZA QUMIAN SHUKONG JIAGONG  
XIANGGUAN JISHU



# 复杂曲面数控加工 相关技术

陈良骥◎著

 知识产权出版社  
全国百佳图书出版单位

## 内容提要

本书系统、全面地介绍了应用数控技术原理加工复杂曲面时的相关方法和理论,并研究了相应的五轴数控系统实现技术和核心算法。主要包括复杂曲面数字化设计方法、复杂曲面微分几何相关理论、涉及B样条的计算理论及其应用技术、复杂曲面五轴加工刀位轨迹生成方法、五轴数控机床空间运动分析与后处理技术、五轴加工线性插补和样条曲线插补原理与加减速控制方法、NURBS曲面实时插补器以及五轴刀具半径补偿和长度补偿方法等。适于国内各高等院校、研究所、民用军用工业企业中从事复杂曲面数控加工技术的研究人员参考和使用。

责任编辑:宋云

图书在版编目(CIP)数据

复杂曲面数控加工相关技术/陈良骥著. —北京:  
知识产权出版社, 2011. 6  
ISBN 978-7-5130-0609-5

I. ①复… II. ①陈… III. ①曲面—数控机床—加工  
IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第106938号

## 复杂曲面数控加工相关技术

陈良骥 著

---

出版发行: 知识产权出版社

社址: 北京市海淀区马甸南村1号

网 址: <http://www.ipph.cn>

发行电话: 010-82000893 82000860 转 8101

责编电话: 010-82000860 转 8324

印 刷: 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

版 次: 2011年7月第1版

字 数: 230千字

ISBN 978-7-5130-0609-5/TG · 001 (3513)

邮 编: 100088

邮 箱: [hjb@cnipr.com](mailto:hjb@cnipr.com)

传 真: 010-82000860 - 8240

责编邮箱: [songyun@cnipr.com](mailto:songyun@cnipr.com)

经 销: 新华书店及相关销售网点

印 张: 15.75

印 次: 2011年7月第1次印刷

定 价: 48.00元

---

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

# 前 言

复杂曲面的高效、高速、高精加工问题一直是机械制造领域的一个重要的、亟待解决的热点和难点问题。常见的解决途径是采用数控编程与数控加工相关的技术。一般而言,这类复杂曲面产品可首先考虑采用三轴联动数控机床加工完成。然而,对一些外形结构更复杂的零部件,在三轴数控机床上不可能一次装夹就能完成加工,降低了复杂曲面的加工精度和表面质量。因此,必须在五轴联动数控机床上进行加工以提高加工精度。现行的五轴联动数控系统具有的线性插补功能存在很多弊端,不利于复杂曲面产品的高速、高精加工。所以,需要对数控系统的插补功能进行必要的扩充,使之能够提高加工效率和加工精度。另外,从复杂曲面的五轴数控编程角度来看,传统的刀具路径生成方法存在着严重的刀位冗余和刀位欠缺等问题,同样影响着加工效率和加工精度。综合起来看,研究一种更加优化的刀具路径生成方法,使复杂曲面加工时尽可能地减少重复冗余加工和欠缺加工的情形发生,对复杂曲面的高效、精密加工具有极大的促进作用和重要的科学意义与实际应用价值。

本书内容翔实、新颖,对现行复杂曲面数控加工中存在的诸多问题和不足之处分别进行了深入细致的分析,并相应地给出了解决方案和相关技术方法。主要包括:复杂曲面数字化设计方法、复杂曲面微分几何相关理论、涉及B样条的计算理论及其应用技术、复杂曲面五轴加工刀位轨迹生成方法、五轴数控机床空间运动分析与后处理技术、五轴加工线性插补和样条曲线插补原理与加减速控制方法、NURBS曲面实时插补器以及五轴刀具半径补偿和长度补偿方法等。所涉及的相关研究方法和关键技术对于复杂曲面数控加工技术的发展具有较好的理论指导意义和推广价值。

本书中所涉及的部分主要内容在研究阶段得到了国家自然科学基金项目（50905168）的大力支持和郑州航空工业管理学院的协助，得到了郑州航院“机械制造及其自动化”校级重点学科的支持。同时，比利时学者 Z. F. Zhang 对本书所涉及数值计算方面的内容给予了通力合作研究工作。作者在此一并表示诚挚的感谢。

# 目 录

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| 第 1 章 复杂曲面加工概述 .....              | (1)  |
| 1.1 复杂曲面精密加工的重要意义 .....           | (3)  |
| 1.1.1 相关学术背景介绍 .....              | (3)  |
| 1.1.2 复杂曲面精密加工目的 .....            | (5)  |
| 1.1.3 复杂曲面加工的研究价值 .....           | (6)  |
| 1.2 复杂曲面加工 CAD/CAM 编程发展情况综述 ..... | (6)  |
| 1.2.1 关于复杂曲面加工的相关技术综述 .....       | (6)  |
| 1.2.2 CAD/CAM 技术的发展概述 .....       | (7)  |
| 1.2.3 五轴 CAD/CAM 数控编程技术概述 .....   | (9)  |
| 1.2.4 五轴 CAD/CAM 技术现状分析 .....     | (10) |
| 1.3 复杂曲面数控插补方面的现状分析 .....         | (14) |
| 1.4 对上述相关方法的共性问题分析 .....          | (16) |
| 1.5 本书主要内容简介 .....                | (19) |
| 第 2 章 复杂曲面的数学模型及计算机表示 .....       | (23) |
| 2.1 复杂曲面数学模型发展简介 .....            | (25) |
| 2.2 复杂曲线曲面相关数学模型 .....            | (27) |
| 2.2.1 复杂曲线模型 .....                | (27) |
| 2.2.2 复杂曲面模型 .....                | (28) |
| 2.2.3 节点矢量计算 .....                | (30) |
| 2.2.4 基函数分块矩阵计算方法 .....           | (31) |
| 2.2.5 对分块矩阵方法的扩展 .....            | (36) |
| 2.2.6 曲线长度的数值计算方法 .....           | (42) |
| 2.3 过型值点的拟合方法 .....               | (44) |
| 2.3.1 线拟合 .....                   | (45) |

|       |                       |      |
|-------|-----------------------|------|
| 2.3.2 | 面插值 .....             | (46) |
| 2.4   | 曲面造型表示方法 .....        | (47) |
| 2.4.1 | 柱面的表示 .....           | (47) |
| 2.4.2 | 直纹面的表示 .....          | (48) |
| 2.4.3 | 扫描曲面的表示 .....         | (49) |
| 2.5   | 曲面的微分几何分析 .....       | (49) |
| 2.5.1 | 样条曲线齐次坐标表示 .....      | (50) |
| 2.5.2 | 对曲线求一阶导 .....         | (51) |
| 2.5.3 | 对曲面的偏导计算 .....        | (52) |
| 2.5.4 | 对曲面的微分计算 .....        | (54) |
| 第3章   | 复杂曲面加工刀具路径的生成方法 ..... | (59) |
| 3.1   | 简介 .....              | (61) |
| 3.2   | 基本概念和数学模型 .....       | (62) |
| 3.2.1 | 铣削刀具 .....            | (62) |
| 3.2.2 | 相关概念 .....            | (63) |
| 3.2.3 | 五轴加工原理 .....          | (65) |
| 3.3   | 进给步长 .....            | (66) |
| 3.4   | 刀具路径的计算方法 .....       | (67) |
| 3.4.1 | 残留波纹高度与行距 .....       | (67) |
| 3.4.2 | 局部微分几何数学模型 .....      | (68) |
| 3.4.3 | 加工带宽 .....            | (73) |
| 3.4.4 | 下一条 CC 路径计算 .....     | (76) |
| 3.4.5 | 刀触点转换为刀位数据 .....      | (78) |
| 3.5   | 干涉检验与修正 .....         | (79) |
| 3.5.1 | 刀倾角与刀转角对加工结果的影响 ..... | (79) |
| 3.5.2 | 优化刀倾角与刀转角 .....       | (80) |
| 3.5.3 | 相关结论 .....            | (82) |
| 3.6   | 刀具路径生成流程 .....        | (82) |
| 3.7   | 刀具路径生成实例 .....        | (84) |

|                                  |              |
|----------------------------------|--------------|
| 3.8 干涉条件的数值模拟分析 .....            | (85)         |
| <b>第4章 五轴机床的空间运动学模型及应用 .....</b> | <b>(91)</b>  |
| 4.1 相关概念介绍 .....                 | (93)         |
| 4.2 五轴机床运动学基础 .....              | (96)         |
| 4.3 五轴机床空间运动学分析 .....            | (96)         |
| 4.3.1 刀具旋转摆动的五轴机床 .....          | (97)         |
| 4.3.2 工作台旋转的五轴机床 .....           | (102)        |
| 4.3.3 五轴机床空间运动学方法 .....          | (107)        |
| 4.4 基于运动学模型的五轴机床后处理过程 .....      | (108)        |
| 4.4.1 后处理过程介绍 .....              | (108)        |
| 4.4.2 双摆头型五轴机床后处理 .....          | (109)        |
| 4.4.3 双转台型五轴机床后处理 .....          | (110)        |
| 4.4.4 后处理计算流程与实例分析 .....         | (112)        |
| <b>第5章 复杂曲线曲面的直接插补方法 .....</b>   | <b>(115)</b> |
| 5.1 插补原理简介 .....                 | (117)        |
| 5.2 多项式样条插补方法 .....              | (118)        |
| 5.2.1 两点间的二阶连续插值 .....           | (119)        |
| 5.2.2 通过多点多项式样条 .....            | (120)        |
| 5.2.3 三次多项式样条插补格式及其类的定义 .....    | (121)        |
| 5.2.4 插补预处理及插补算法 .....           | (123)        |
| 5.2.5 插补误差与速度分析 .....            | (126)        |
| 5.2.6 多项式插补计算实例 .....            | (126)        |
| 5.3 五轴线性插补方法 .....               | (128)        |
| 5.3.1 初始条件的给定 .....              | (129)        |
| 5.3.2 预处理过程中相关量的计算 .....         | (130)        |
| 5.3.3 插补步长计算 .....               | (132)        |
| 5.3.4 特殊情况讨论 .....               | (133)        |
| 5.3.5 线性插补过程 .....               | (138)        |

|       |                      |       |
|-------|----------------------|-------|
| 5.3.6 | 线性插补摆刀误差分析 .....     | (139) |
| 5.4   | 五轴样条插补相关理论 .....     | (151) |
| 5.4.1 | 插补格式 .....           | (151) |
| 5.4.2 | 数控代码的生成 .....        | (153) |
| 5.4.3 | 信息提取 .....           | (154) |
| 5.4.4 | 实时插补计算方法 .....       | (155) |
| 5.4.5 | 实例验证 .....           | (157) |
| 5.4.6 | 加减速处理 .....          | (159) |
| 5.5   | 加工路径段间速度转接算法 .....   | (169) |
| 5.5.1 | 概述 .....             | (169) |
| 5.5.2 | 插补前加减速处理 .....       | (170) |
| 5.5.3 | 加工路径段间转接速度规划 .....   | (171) |
| 5.5.4 | 转接速度的规划 .....        | (173) |
| 5.5.5 | 加工路径段内的加减速处理 .....   | (173) |
| 5.5.6 | 算法实现与实例计算 .....      | (178) |
| 5.6   | 五轴 NURBS 曲面插补器 ..... | (180) |
| 5.6.1 | 概述 .....             | (180) |
| 5.6.2 | 刀触点路径实时插补 .....      | (182) |
| 5.6.3 | 刀心点及刀轴矢量计算 .....     | (186) |
| 5.6.4 | 逆机床运动变换 .....        | (188) |
| 5.6.5 | 计算机实现步骤 .....        | (188) |
| 5.6.6 | 计算机仿真实验 .....        | (190) |
| 5.7   | 刀具补偿方法 .....         | (194) |
| 5.7.1 | 刀具补偿的重要性 .....       | (194) |
| 5.7.2 | 五轴数控加工程序的生成 .....    | (194) |
| 5.7.3 | 刀具半径补偿方面存在的问题 .....  | (195) |
| 5.7.4 | 五轴刀具半径补偿方法 .....     | (196) |
| 5.7.5 | 五轴刀具长度补偿方法 .....     | (198) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| <b>第 6 章 复杂曲面五轴加工仿真方法</b> | (201) |
| 6.1 仿真方法简介                | (203) |
| 6.1.1 仿真过程研究的重要性          | (203) |
| 6.1.2 加工仿真的类型             | (204) |
| 6.1.3 五轴数控加工仿真的现状         | (205) |
| 6.2 仿真算法的研究与实现            | (207) |
| 6.2.1 算法基本原理              | (207) |
| 6.2.2 四棱柱体结构模型的建立         | (207) |
| 6.2.3 工件毛坯的建立             | (209) |
| 6.2.4 去除过程建模              | (213) |
| 6.2.5 仿真算法流程              | (214) |
| 6.2.6 仿真算法实现技术            | (214) |
| 6.3 叶轮五轴加工仿真              | (219) |
| 6.3.1 叶轮加工工艺概述            | (219) |
| 6.3.2 叶轮结构及图形显示           | (220) |
| 6.3.3 叶轮加工工艺拟定            | (221) |
| 6.3.4 叶轮加工编程关键技术          | (222) |
| 6.3.5 叶轮加工仿真结果            | (230) |
| <b>参考文献</b>               | (231) |

# 第1章

---

## 复杂曲面加工概述



## 1.1 复杂曲面精密加工的重要意义

### 1.1.1 相关学术背景介绍

随着现代科学技术的不断发展,现代新产品的不断出现,由于要实现相关的特定功能,对其设计形状复杂性和加工精度、表面粗糙度的要求也越来越高,因此,对现代机械制造技术及水平也提出了更高、更新的要求<sup>[1]</sup>。例如,在对很多航空航天飞行器进行设计时,一些重要零部件,如飞行器外壳、发动机叶片等,根据其实现的功能和特殊的力学原理,往往由多张复杂、自由型的曲面拼合而成。另外,在刀具、模具、汽车车身覆盖件等的生产过程中也需要对一些复杂曲面进行制造和加工。

含有复杂曲面的产品或零件在现代制造业中所占的比例越来越大,同时对加工的精度和效率的要求也越来越高。同时,数控(Numerical Controlled, NC)加工技术,特别是计算机数控(Computer Numerical Controlled, CNC)加工技术及计算机辅助设计与制造(Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing, CAD/CAM)技术的迅速发展,在大幅度地缩短产品制造周期的同时,也极大地提高了产品的加工质量。所有这些新问题要求 CNC 系统首先必须具备复杂曲线曲面高速高精加工的能力<sup>[2]</sup>。

为了能够充分发挥 CNC 系统复杂曲线的直接加工能力,还必须要求数控系统能够有效地与面向复杂曲面加工数控编程的 CAD/CAM 编程系统紧密结合起来。因此,复杂曲面加工涉及以上两大方面,两个方面之间存在相辅相成、缺一不可的辩证关系。

如果所采用的机床数控系统不具有复杂曲线直接输出的能力,进行复杂曲面的加工时,通常的做法是先用 CAD/CAM 系统的 CAD 模块设计出被加工工件表面,然后根据程序员事先拟定的加工工艺路线和参数,由 CAM 模块负责计算出加工刀具走刀路径,并将这些刀具路径曲线在加工误差范围内离散成直线段或圆弧段,最后再由后置处理模块生成机床数控系统可以接受的数控代码,数控系统根据这些代码控制数控机床各轴的运动来完成曲面零件加工。这种离线式的逼近刀具轨迹曲线的加工方法可能会带来如下一些问题<sup>[3],[4]</sup>。

(1)为满足加工精度要求,NC 程序文件通常很大;

(2)刀具在每个程序段需要进行加减速。

对于第(1)个问题,庞大的加工数据不仅加重 CAD/CAM 系统与 CNC 机床间的数据传输负荷,而且占用大部分的 CNC 系统存储空间。而第(2)个问题则可能导致在相邻两段连接处速度不连续或突变,最后必然影响到加工表面质量。

如果所采用的数控系统可以直接输出复杂曲线,上面的问题可以立即得到解决。在加工精度相同的情况下,数控程序文件的大小将成倍甚至几十倍地减少,切削刀具在很长一段加工路径上可以匀速进给,而且进给速度可以得到提高而不影响加工表面的质量,使得复杂曲面产品加工精度和加工效率的提高成为可能。但是,新的问题也随之产生了,即如果不能从现有的 CAD/CAM 编程系统得到数控系统所能接受的曲线数控代码(可能是自行开发出来的代码格式)等高级功能指令,那么数控系统带有的这些新的功能指令将得不到有效支持,其结果只能是机床系统的闲置,造成巨大浪费。

因此,提高数控系统的复杂曲线曲面加工能力的同时,也必须提高复杂曲面数控编程的能力,这样才能使两部分紧密结合、相得益彰。本

书主要从以上两个方面入手来解决复杂曲面的精密加工问题。

### 1.1.2 复杂曲面精密加工目的

如前所述,欲解决上述复杂曲线曲面传统加工方法的不足,首先要使 CNC 系统具有复杂曲线直接插补生成的功能。可从如下两个方面来阐述复杂曲面精密加工所要达到的目的。

其一,国外在这方面的认识较早、研究的起步也较国内早,因此技术也比较成熟,应用也较广。然而遗憾的是,国外几个主要 CNC 系统商在这些技术的实现方面实行对华禁运。因此我们只知道他们实现了这些高级功能,但具体怎么做的却不得而知。为打破这种技术封锁,有必要进行 CNC 曲线曲面加工控制软件的自主开发和研制,让我们自己开发的数控系统能够实现这样的曲线曲面加工。

其二,数控系统已经带有样条曲线直接生成的功能,接下来要考虑的是,是面向五轴联动还是三轴联动进行数控系统的研究。我们知道,三轴联动数控加工也能完成一些复杂曲面零件的加工,由于同时联动的轴数少而且联动轴一般为平动轴,因此控制方式简单,但是对于特别复杂的零件(如一些整体叶轮类的零件)的加工却显得无能为力了,而这些复杂零件如果使用五轴联动加工便可迎刃而解。由于五轴加工比三轴加工多了两个旋转运动,这样可以使刀具方位矢量与加工面法线方向在加工过程中始终保持一致,在同样的加工精度要求下,可以得到较短的总加工路径长度和较大的加工带宽。因此,五轴加工与三轴加工相比更能促进加工效率和质量。

综上所述,本书主要研究目的是要研究开发面向五轴端铣侧铣数控加工中心的、具有非均匀有理 B 样条(Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS)曲线曲面直接生成功能的 CNC 系统软件包,面向复杂曲面产品的刀具路径的生成方法,以及针对这种数控系统的 CAD/CAM 五轴编程与仿真系统。

### 1.1.3 复杂曲面加工的研究价值

通过本书的深入分析和介绍,可以解决现行复杂曲线曲面加工中所遇到的很多技术难题,如刀具路径如何生成才能产生较大加工带宽和较小加工残高、刀轴方位如何优化、如何进行刀具局部干涉检查、如何进行三维刀补和刀具轨迹的样条曲线插补等,对提高复杂曲线曲面五轴数控编程与加工的能力具有重要的理论意义和实际应用价值。

## 1.2 复杂曲面加工 CAD/CAM 编程发展情况综述

### 1.2.1 关于复杂曲面加工的相关技术综述

目前,复杂曲面加工技术主要应用于制造大批量生产中所使用的复杂刀具、模具,如汽车制造中车身覆盖件的锻模和冲模,铸造和塑料成型工业中使用的压铸模、注塑模,以及电火花加工中所需的成形电极等。早期(数控技术出现之前)的复杂曲面加工主要采用人工方法,这种加工方法靠手工进行放样、打磨,为了在制造过程中进行检测,常常还需要使用事先制作好的大量型线样板,这样的加工方法不但耗时、产品生产周期长,而且加工精度低,完全靠工人熟练程度控制,生产成本高、费用大,难以满足实际生产的需要<sup>[5]</sup>。

自 20 世纪 70 年代以后,数控机床和数控加工技术在机械制造领域得到了广泛的应用,特别是在工具模具的加工制造中。复杂曲面轮廓数控机床铣削逐渐取代了以往人工打造的方式。但是那时采用的数控机床一般是三轴联动甚至是三轴两联动(两轴半)的,复杂曲面加工效率和精度都不高。进入 20 世纪 80 年代以后,五轴联动数控铣床在复杂曲面加工中得到了应用,铣削效率和精度都有所提高,经五轴轮廓铣后的工件

表面已经十分接近工件的最终形状,但仍需手工进行打磨和抛光。到了20世纪80年代末期,高速切削(High Speed Cutting, HSC)技术在工业生产中的应用从机床、刀具到其他相关技术都得到了不断地完善并逐步发展成熟。在数控加工中应用HSC技术后,刀具切削进给速度得到了成倍的提高,在生产效率不变的前提下使进刀步距减少成为可能,从而也为提高复杂曲面加工精度和降低其表面粗糙度提供了前提条件。

随着现代计算机、激光、电子技术的不断发展,以及新材料、新工艺的不断出现,复杂自由曲面的加工除了可以采用CNC技术以外,又出现了许多新方法,如激光开槽(Laser Caving)、快速原型制造(Rapid Prototyping)和快速工装(Rapid Tooling)等。这些新兴复杂曲面加工技术的优点在于所需设备结构简单、灵活性很高,特别适合于加工单件或小批量的工具或模具。虽然这些复杂曲面加工新技术、新方法各有自己的长处,但数控加工技术仍然是复杂曲面加工中一种量大、面广的技术,和这些新技术相比,有自己独到的优势,是目前复杂曲面加工的主要方法。

本书即将讲解的复杂曲面加工方法主要是复杂曲面的数控加工方法。

### 1.2.2 CAD/CAM 技术的发展概述

(1)CAD/CAM技术首先在航空工业中取得了重大突破,并且得到了成功的应用<sup>[6]</sup>。

在20世纪70年代初期,美国洛克希德加利福尼亚飞机制造公司率先成功开发出可以应用于飞机设计与制造的CADAM软件编程系统,该软件系统集成外形设计、图形绘制及自动编程功能于一体,大大提高了飞机生产效率。

到了20世纪70年代末期,法国的达索飞机制造公司引进CADAM系统,对其中的数控加工编程功能进行了完善和扩充,开发出了具备三