



BOSHI WENKU

〔机械工程学〕

五轴联动刀具路径生成及 插补技术研究

WUZHOU LIANDONG DAOJU LUJING SHENGCHENG JI
CHABU JISHU YANJIU

陈良骥 著

知识产权出版社



BOSHI WENKU
(机械工程学)

五轴联动刀具路径生成及 插补技术研究

WUZHOU LIANDONG DAOJU LUJING SHENGCHENG JI
CHABU JISHU YANJIU

陈良骥 著

知识产权出版社

内容提要

本书系统、全面地介绍了五轴联动数控加工的相关技术,主要包括基于非均匀有理B样条的复杂曲面造型方法、曲线曲面微分几何相关理论、分块矩阵应用于求解任意阶次B样条基函数及其任意阶导数的方法、可消除局部曲率干涉的五轴环形刀刀具路径生成方法、基于五轴联动数控机床空间运动分析的刀位文件后处理方法、五轴联动线性插补的加减速控制方法、适用于五轴加工的双样条曲线插补方法、五轴曲面实时插补器方法以及三维刀具半径补偿和长度补偿方法等。

本书适合于国内各高等院校、研究所、民用军用工业企业中从事复杂曲面造型及五轴联动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

五轴联动刀具路径生成及插补技术研究/陈良骥著.北京:知识产权出版社,2007.12

ISBN 978-7-80198-809-6

I. 五… II. 陈… III. 数控机床—加工—研究
IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第183648号

五轴联动刀具路径生成及插补技术研究

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.cnipr.com>

发行电话: 010-82000893 82000860 转 8101

责编电话: 010-82000860 转 8324

印刷: 知识产权出版社电子制印中心

开本: 880mm × 1230mm 1/32

版次: 2008年1月第1版

字数: 161千字

ISBN 978-7-80198-809-6/T · 258

邮 编: 100088

邮 箱: bjb@cnipr.com

传 真: 010-82000860 转 8325

责编邮箱: songyun@cnipr.com

经 销: 新华书店及相关销售网点

印 张: 8.875

印 次: 2008年1月第1次印刷

定 价: 26.00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

目前,具有复杂曲面的产品越来越多而且精度要求越来越高。一般这类产品的生产加工在三轴联动数控机床下完成,但一些更复杂的产品在三轴机床上不可能一次装夹就能完成加工,必须在五轴联动的数控机床上进行加工。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,不利于产品的高速高精加工。从这个方面来看,需要对数控系统的插补功能进行必要的扩充,使之能够提高效率和加工的精度。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。为此,需要研究一种更加优化的刀具路径生成方法,尽可能地减少重复冗余的加工和遗漏加工的情况发生。

本书内容详实、新颖,对现行五轴联动加工研究中存在的诸多问题一一进行了研究,并给出了相应的解决方案。主要内容包括:非均匀有理B样条曲线曲面在几何造型和微分几何方面的相关理论、任意阶次基函数及其任意阶导数的求解方法、无局部干涉的五轴联动刀具



路径生成算法、五轴数控机床的空间运动学研究及后处理、五轴线性插补的加减速控制方法、五轴联动样条曲线插补方法、五轴实时曲面插补方法以及空间刀具补偿方法等。所给出的研究方法对于五轴联动数控加工技术的发展具有较好的指导意义和促进作用。

本书由郑州航空工业管理学院陈良骥主著，具体分工如下：陈良骥（第3章，第4章，第6章）；郑州航空工业管理学院曹海旺（第1章，第5章，结论）；郑州航空工业管理学院贺红霞（第2章）。



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.1.1 问题的提出	1
1.1.2 研究目的	3
1.1.3 研究意义	4
1.2 复杂曲面加工及五轴 CAD/CAM 编程发展概述	5
1.2.1 复杂曲面加工技术的发展概述	5
1.2.2 CAD/CAM 的发展过程与趋势	6
1.2.3 面向五轴加工的 CAD/CAM 技术的发展历程	8
1.2.4 五轴联动 CAD/CAM 编程 技术的研究现状	10
1.3 复杂曲线曲面实时插补相关方面的研究现状	16
1.4 五轴加工编程与插补方面存在的问题	20
1.5 主要研究内容	24
第 2 章 复杂曲面造型及微分几何计算	28
2.1 复杂曲面造型方法的发展过程概述	29
2.2 NURBS 曲线曲面表示及相关计算	30

2.2.1 NURBS 曲线表示	30
2.2.2 NURBS 曲面表示	33
2.2.3 曲线曲面相关量计算	35
2.3 曲线曲面拟合算法	42
2.3.1 NURBS 曲线拟合	42
2.3.2 NURBS 曲面插值	44
2.4 几种 NURBS 曲面造型方法	45
2.4.1 柱面的 NURBS 表示	45
2.4.2 直纹面构造	46
2.4.3 扫描生成的曲面造型方法	47
2.5 曲面微分几何基础	49
2.5.1 NURBS 曲线齐次坐标表示	49
2.5.2 NURBS 曲线求导	50
2.5.3 NURBS 曲面的偏导计算	52
2.5.4 曲面微分计算几个重要公式	54
2.6 小结	58
第3章 五轴加工刀具路径优	
化生成算法	71
3.1 概述	71
3.2 相关基本概念和模型	72
3.2.1 环形铣削刀具	72
3.2.2 刀触点与刀位点相关的概念	74
3.2.3 五轴铣削加工原理简介	75

3.3 进给步长计算	77
3.4 刀具路径计算方法	79
3.4.1 残留高度与加工行距	79
3.4.2 刀触点局部微分几何分析	80
3.4.3 有效加工带及其宽度的计算	86
3.4.4 下一条刀触点路径计算	90
3.4.5 从刀触点到刀位数据的计算	93
3.5 局部干涉检验与刀具姿态角的修正	94
3.5.1 刀倾角与刀转角对加工结果的影响	95
3.5.2 刀倾角与刀转角的优化	96
3.5.3 局部干涉检验与修正总结	99
3.6 刀具路径生成过程	99
3.7 实例计算	100
3.8 小结	102
第4章 五轴联动数控机床空间	
运动及后处理	103
4.1 几个相关概念	104
4.2 五轴数控机床运动基础	107
4.3 五轴数控机床空间运动分析	107
4.3.1 刀具旋转摆动的五轴机床	107
4.3.2 工作台旋转的五轴机床	114
4.3.3 机床空间运动学研究总结	121
4.4 五轴联动数控机床的后处理	122



4.4.1 后处理过程概述	122
4.4.2 刀具旋转的五轴机床后处理	123
4.4.3 工作台回转的五轴机床后处理	125
4.4.4 后处理过程总结	127
4.5 小结	127
第5章 五轴加工中的实时插补方法	129
5.1 概述	129
5.2 五轴线性插补方法	130
5.2.1 初始条件的给定	131
5.2.2 预处理过程中相关量的计算	131
5.2.3 插补步长计算	135
5.2.4 特殊情况讨论	136
5.2.5 线性插补过程总结	142
5.3 五轴双 NURBS 曲线的生成与插补	144
5.3.1 双 NURBS 曲线插补格式	145
5.3.2 刀具路径的 NURBS 拟合及数控代码 的生成	147
5.3.3 双 NURBS 曲线的信息提取	148
5.3.4 双 NURBS 样条实时插补计算方法	149
5.3.5 实例验证	151
5.4 五轴 NURBS 曲面插补器	154
5.4.1 概述	154
5.4.2 刀触点路径实时插补	158



5.4.3 刀心点及刀轴矢量计算	163
5.4.4 逆机床运动变换	165
5.4.5 计算机实现步骤	167
5.4.6 计算机仿真实验	168
5.5 三维刀具补偿方法	173
5.5.1 概述	173
5.5.2 五轴数控程序的生成	174
5.5.3 现行编程方式在三维半径 补偿方面的不足	176
5.5.4 五轴刀具半径补偿	177
5.5.5 五轴刀具长度补偿	179
5.6 小结	182
第6章 复杂曲面五轴数控加工的仿真技术	203
6.1 数控加工仿真概述	203
6.1.1 仿真研究对于数控加工的意义	204
6.1.2 数控加工仿真的类型	205
6.1.3 五轴数控加工仿真的研究现状	206
6.2 五轴加工仿真算法的研究与实现	208
6.2.1 算法基本原理	208
6.2.2 四棱柱体结构模型的建立	209
6.2.3 工件毛坯的建立	211
6.2.4 材料去除过程研究	216
6.2.5 算法的实现过程	218
6.2.6 仿真算法的计算机实现	218



6.3 整体叶轮五轴加工编程与仿真	223
6.3.1 整体叶轮的加工概述	223
6.3.2 整体叶轮的结构及几何造型	224
6.3.3 叶轮加工工艺的拟定	225
6.3.4 叶轮加工编程中一些关键问题的研究	228
6.3.5 整体叶轮五轴加工仿真	236
6.4 小结	238
结论	259
参考文献	262



第1章 绪论

1.1 研究目的和意义

1.1.1 问题的提出

现代科学技术的不断发展,对现代机械制造行业也提出了更高、更新的要求^[1]。例如,在很多航空航天飞行器设计时,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,刀具、模具、汽车车身覆盖件等的生产中,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。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^[2]。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。

上面所提到的两个方面的问题相辅相成、缺一不可。

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而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线，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，根据这些代码数控系统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一些问题^[3,4]：(i) 为满足加工精度要求，NC 程序文件通常很大；(ii) 刀具在每个程序段需要进行加减速。对于 (i)，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 (ii) 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。在加工相同精度的情况下，数控程序文件的大小将成倍甚至成几十倍地减少，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，才能使两部分紧密结合、相得益彰。本书主要要解决的问题就是这两个方面。

1.1.2 研究目的

前面已经述及，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 机床数控系统具有复杂曲线直接插补生成功能。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，我们只知道他们做了，但具体怎么做的却不得而知。为打破这种技术封锁，我们有必要进行 CNC 曲线曲面加工软件的自主开发和研制，让自己开发的数控系统能够实现这样的曲线曲面加工。数控系统带有样条曲线直接生成的功能了，接下来就要



考虑的是面向五轴联动还是三轴联动进行数控系统的研究呢？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的加工（如一些整体叶轮类的零件）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能保持一致，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。

综合以上所述，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 系统软件包和面向复杂曲面产品的刀具路径的生成方法及针对这种数控系统的 CAD/CAM 五轴编程系统。

1.1.3 研究意义

通过本书的研究，可以解决现行复杂曲线曲面加工中所遇到的很多难题，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、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 复杂曲面加工及五轴 CAD/CAM 编程 发展概述

1.2.1 复杂曲面加工技术的发展概述

复杂曲面加工技术主要应用于制造大批量生成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，铸造和塑料成形工业中使用的压铸模、注塑模具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式，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，这样的加工方式不但耗时、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，生成成本高，费用大，难以满足实际生产的需要^[5]。

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，特别是应用于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），复杂曲面加工效率和精度都不高。进入 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80年代末期，高速切削（High Speed Cutting, HSC）技术在工业生成中的应用从机床、刀具及其他相关技术都得到了不断的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计算机数控技术以外，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。本课题所要研究的复杂曲面加工即是针对复杂曲面的数控加工而言。

1.2.2 CAD/CAM 的发展过程与趋势

CAD/CAM 编程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^[6]。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