



五轴自由曲面 NC加工刀路优化及误差控制

主 编 于 洋

副主编 刘 平 李 莎



國防工業出版社

National Defense Industry Press

五轴自由曲面 NC 加工 刀路优化及误差控制

主 编 于 洋
副主编 刘 平 李 莎

國防工業出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

五轴自由曲面 NC 加工刀路优化及误差控制/于洋主
编. —北京:国防工业出版社,2015.6

ISBN 978-7-118-09831-0



Ⅱ. ①于... Ⅲ. ①曲面-数控机床-
加工-最佳化 ②曲面-数控机床-加工-误差控制技

术 IV. ①TU659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 112750 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 5¼ 字数 202 千字

2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1200 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

当今的工业设计与生产中,比如汽车工业、航空航天工业、舰船工业或者医疗器械的设计与制造中均大量使用自由曲面设计。由于这类曲面曲率分布不规则,所以比较难以加工。有模具制造者发现,使用五轴机床将比使用三轴机床的效率提高 10~20 倍。五轴机床被认为是在自由曲面加工中最好的工具。然而,支持五轴加工的 CAM 软件仍然非常昂贵,并且在刀具路径设计方面主要依赖于用户与软件之间的交互,缺乏柔性。在实际应用中,五轴加工也有很多局限性。由于五轴机床相对于三轴机床增加了两个旋转自由度,因此也带来了新问题。例如,传统的 CAD/CAM 软件对其支持不够,复杂刀具与曲面之间的过切算法,刀具与非加工曲面之间的复杂碰撞算法。所以必须妥善计算刀具路径,才能达到预期效果,发挥五轴机床的加工优势。本书针对这方面的问题,系统地进行了五轴数控加工刀具路径规划以及加工误差控制方面的研究。

本书主要研究以下 5 个问题:① 在自由曲面加工中,探讨加工误差的来源,比较五轴机床与三轴机床在误差评估上的差异,并且对不同结构的机床分别进行研究,以达到简化程序、提高加工精度与效率的目的;② 研究并建立估算切削误差与步长误差的方法,在满足设定的最大容许误差的条件下,对加工曲面上的刀具路径进行插补,以达到优化刀具路径离散的目的;③ 研究一种基于优化加工区域的优化刀具路径规划算法,通过使用迭代算法来生成优化加工刀具路径,在满足误差要求的条件下,提高曲面加工效率;④ 研究在考虑到避免碰撞、过切的情况下,使刀具轴向光顺变化,并对所加工的曲面几何表现不敏感,提高加工精度;⑤ 综合以上所研究的技术点,提出了一种新的五轴自由曲面加工的刀具路径规划方法,在曲面加工的精度和效率上改善五轴的

加工性能。

全书共6章。第1章简要介绍了五轴自由曲面数控加工的工程背景和研究意义、研究对象和内容、研究方法和工程应用;第2章介绍了五轴数控曲面加工技术中的刀具路径规划方法、机床刀具轨迹插补方法、计算机数控加工仿真以及五轴自由曲面加工的国内外研究现状;第3章主要探讨五轴加工的误差来源,对比三轴与五轴在误差推导上的差异,并将不同的机床结构纳入考虑范围,推导出主轴旋转式以及工作台旋转式五轴机床在引入相关加工参数之后的加工误差,并从中探讨刀具轴向对切削误差的影响;第4章介绍了新的刀具路径设计方法,即“优化加工带宽度”方法,使得刀具沿着优化的切削方向生成刀具路径;第5章介绍了五轴加工中刀具轴向设计方法,即选择合适的刀具轴矢量以插补的方法来达到减少切削误差的目的,以及如何通过调整刀具轴向来避免过切和干涉之类的加工问题;第6章系统地介绍了一种新的五轴刀具路径规划方法,从数值分析及仿真模拟的角度研究对比了优化方法及传统方法的优缺点,并对结果进行了详细的分析与讨论;后记对本书研究内容进行了简单总结。其中,第1、2、6章由李莎编写,第3章由刘平编写,本书由于洋任主编,并负责统稿。

在国内科研和人才培养中,经常涉及五轴自由曲面加工方面的知识,每年都有大量的论文发表,但有关这方面系统论述的书籍不多。为此,本书可以作为从事五轴自由曲面加工的教师和工程技术人员的参考书目。

本书是作者近年来研究成果的系统总结,其中的研究工作得到了航空科学基金(05C53002)、国家自然科学基金(50875215)、高校博士点基金(20050699032)的资助,以及其他横向研究课题的支撑,特此向支持和关心作者研究工作的所有单位和个人表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,虽几经改稿,书中不足之处仍在所难免,欢迎广大读者不吝赐教。

作 者

2014年8月6日

CONTENTS | 目录

第 1 章	五轴自由曲面加工概述	1
1.1	数控技术及 CAD/CAM 发展	1
1.2	五轴数控的工程背景	5
1.3	五轴数控加工的研究内容及目标	6
第 2 章	五轴数控曲面加工技术及刀具路径规划研究现状及分析	8
2.1	引言	8
2.2	刀具路径规划方法	9
2.2.1	等参数刀具路径规划方法	9
2.2.2	等平面刀具路径设计方法	10
2.2.3	恒定残留高度刀具路径设计方法	11
2.2.4	空间填充曲线刀具路径设计方法	11
2.2.5	其他刀具路径设计方法	12
2.3	机床刀具轨迹插补	14
2.3.1	线性插补和圆弧插补	15
2.3.2	参数曲线插补	17
2.3.3	曲面插补	18
2.3.4	其他插补方法	18
2.4	刀具路径离散方法	19
2.5	五轴加工中的刀具轴向设计	21
2.6	计算机 NC 仿真和验证	22
2.6.1	扫掠包络方法	22
2.6.2	其他 NC 验证仿真方法	22

2.7	五轴自由曲面加工的国内外研究现状	24
2.8	本章小结	25
第3章	五轴加工误差分析及控制	26
3.1	引言	26
3.2	CAM 软件误差来源分析及对比	27
3.2.1	三轴加工误差分析	27
3.2.2	五轴 CAM 软件误差来源分析	30
3.2.3	不同五轴机床之间的误差对比分析	34
3.3	五轴数控机床分类及加工误差评估	35
3.3.1	主轴旋转式机床 SR(Spindle Rotating)	37
3.3.2	工作台旋转式机床 RT(Rotary Table)	44
3.3.3	主轴及工作台混合式 HT(Hybrid Type) ^[140]	52
3.4	步进长度向参数域的转换	53
3.5	优化线性插补刀具路径离散技术研究	55
3.6	实验及结论	57
第4章	五轴自由曲面加工中区域优化及刀具路径规划方法研究	59
4.1	介绍	59
4.2	刀具定义及五轴加工中的刀具描述	60
4.2.1	坐标系的定义	60
4.2.2	刀具定义	62
4.2.3	五轴加工中的刀具描述	65
4.3	加工带宽度的评估	66
4.3.1	五轴加工中的有效切削轮廓	66
4.3.2	曲面的有效曲率	70
4.3.3	加工带宽度的评估	71
4.4	自由曲面的优化加工带分析	75
4.5	寻找优化的初始刀具路径	78
4.5.1	刀具的扫掠区域	78
4.5.2	初始优化刀具路径的搜索	78

4.6	曲面刀具路径分布优化研究	83
4.7	侧向步进长度向参数域的转换	86
4.8	五轴自由曲面加工的刀具路径规划的优化迭代算法	90
4.9	实验与结论	92
第5章	五轴加工中刀具轴向光顺研究	97
5.1	介绍	97
5.2	基于内插法的刀具轴向确定	99
5.2.1	坐标插补法	99
5.2.2	欧拉角度插补法	101
5.2.3	四元数插补法	103
5.3	无干涉刀具轴向设计方法研究	105
5.3.1	无过切刀具轴向指定算法研究	105
5.3.2	无碰撞刀具轴向指定算法研究	110
5.4	无干涉刀轴光顺算法流程	120
5.5	仿真实验验证与分析	121
5.5.1	仿真实验步骤	121
5.5.2	实验结果对比及分析	124
第6章	五轴加工的刀具路径优化及误差分析	127
6.1	介绍	127
6.2	刀具路径规划流程	127
6.3	仿真加工试验以及误差分析	130
6.3.1	仿真加工试验	130
6.3.2	加工仿真结果总结分析讨论	136
6.4	与CAD/CAM系统的集成	146
参考文献		147
后记 研究总结		157

1.1 数控技术及 CAD/CAM 发展

制造的重要性在人类文明的发展过程中往往是被低估的。然而,人们都承认了这样的一个事实,从 8000 年前使用石器雕刻木头开始到现代化制造系统,人类走过了一个极其漫长而又错综复杂的过程。制造过程也就是通过对原材料的加工,来提高其物理性能、几何精度或者外观,以满足一定功能的过程。

加工过程就是通过去掉多余的材料,来得到人们所想要形状的过程。而大多数加工的特征,都是源于刀具与被加工材料的相对运动。在工业革命之后,有限的人力逐渐被强大的机床所替代。产生于 18 世纪的一些机床,历经 200 年左右,只经过了很小的改进,比如车床、铣床、钻床在现代车间中仍然有广泛的应用。

数控机床的设想和研制兴起于 20 世纪 40 年代末期的美国,当时是为了解决航空工业中复杂零件的加工问题。数控的概念最早是在 1940 年由 Parson 和 Stulen^[1] 提出的,他们成立的 Parsons 公司得到了美国空军的支持,主要从事数控新技术的研究。后来麻省理工学院也从事这项工程^[1]。

1948 年,美国帕森斯公司接受美国空军委托,研制飞机螺旋桨叶片轮廓样板的加工设备。由于样板形状复杂多样,精度要求高,一般加工设备难以适应,于是提出了使用计算机来控制机床的设想。1949 年,该公司在美国麻省理工学院伺服机构研究室的协助下,开始研究数控机床,并于 1952 年试制成功第一台由大型立式仿形铣床改装而成的

三轴数控铣床,不久即开始正式生产。

由于当时的数控装置采用电子管元件,放体积比机床本身还大,同时可靠性也不太高,后来又经过了3年的研究及改进,于1955年使其进入了实用阶段^[2]。第一批生产了一百台数控铣床,并且这些数控铣床在复杂零件的加工中发挥了很大作用。这是制造技术发展过程中的一个重大突破,标志着制造领域中数控加工时代的开始。

当时的数控机床只在航空工业等少数有特殊需要的部门用来加工复杂型面零件。1959年,随着晶体管元件和印刷电路板的发明及应用,数控装置进入了第二代,其体积缩小,成本也有所下降。1965年,出现了第三代的集成电路数控装置,不仅体积小,功率消耗少,且可靠性提高,价格进一步下降,促进了数控机床品种和产量的发展。20世纪60年代末,先后出现了由一台计算机直接控制多台机床的直接数控系统(Direct Numerical Control, DNC),又称群控系统;采用小型计算机控制的计算机数控系统(Computer Numerical Control, CNC),使数控装置进入了以小型计算机化为特征的第四代。1974年,研制成功使用微处理器和半导体存储器的微型计算机数控装置(Microcomputer Numerical Control, MNC),这是第五代数控系统。第五代与第三代相比,数控装置的功能扩大了一倍,而体积则缩小为原来的1/20,价格降低了3/4,可靠性也得到了极大的提高。

由于数控机床一问世就显示了极大的优越性,所以自第一台数控机床问世以来,各工业发达国家都十分重视,并纷纷投入大量人力和物力进行研究开发,只是限于当时的技术水平,再加上元器件可靠性不高以及造价昂贵等原因,一直到20世纪70年代中期以前,数控技术的发展都比较缓慢,其应用也多局限在航空、国防、汽车等工业领域^[4]。直到1971年微处理器问世,1974年人们开始把微处理器用于数控的研制开发后,才使数控技术得到了突飞猛进的发展^[5]。到目前为止,数控技术已经历了五代的发展过程。

任何一种数控系统都包含3个基本组件:程序指令、机床控制单元和加工设备,如图1-1所示。程序指令(或者NC代码)是数控机床自动加工零件的工作指令。数控装置是数控机床的核心。CNC系统是一种位置控制系统,它根据所输入数据插补出理想的运动轨迹,然后输

出到执行部件控制刀具运动,从而加工出所需要形状的零件。因此,数控装置主要由输入、处理和输出 3 个基本部分构成。而所有这些工作都由计算机系统进行合理的组织,以使整个系统协调地进行工作。

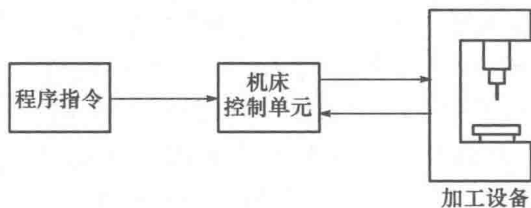


图 1-1 NC 系统的基本组件

伺服系统是数控机床的重要组成部分,用于实现数控机床的进给伺服控制和主轴伺服控制,其作用是把来自数控装置的指令信息,经功率放大、整形处理后,转换成机床执行部件的直线位移或角位移运动。伺服系统是数控机床的最后环节,包括驱动装置和执行机构两大部分,其性能将直接影响数控机床的精度和速度等技术指标。

驱动装置由主轴驱动单元、进给驱动单元和主轴伺服电动机、进给伺服电动机组成。步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机是常用的驱动装置。

机床主机是数控机床的主体,包括床身、底座、立柱、横梁、滑座、工作台、主轴箱、进给机构、刀架及自动换刀装置等机械部件。它是在数控机床上自动完成各种切削加工的机械部分。与传统的机床相比,数控机床主体具有如下结构特点。

- (1) 采用具有高刚度、高抗震性及较小热变形的机床新结构。
- (2) 广泛采用高性能的主轴伺服驱动和进给伺服驱动装置,使数控机床的传动链缩短,简化了机床机械传动系统的结构。
- (3) 采用高传动效率、高精度、无间隙的传动装置和运动部件,如滚珠丝杠螺母副、塑料滑动导轨、直线滚动导轨、静压导轨等。

数控机床的辅助装置是保证充分发挥数控机床功能所必需的配套装置,常用的辅助装置包括气动装置、液压装置、排屑装置、冷却装置、润滑装置、回转工作台和数控分度头、防护、照明等各种辅助装置。

计算机辅助设计与制造(Computer Aided Design and Computer Aided Manufacturing, CAD/CAM)是一项利用计算机软硬件协助人完成产品的设计与制造的技术^[3]。

CAD/CAM 技术产生于 20 世纪 50 年代末 60 年代初,高速发展于 20 世纪 80 ~ 90 年代。自 20 世纪 80 年代初以来,计算机的应用日益广泛,几乎深入到生产过程的全部领域,并形成了许多计算机辅助的分散系统。仅在制造业的产品设计与制造过程中就出现了如下分散系统:CAD、CAE(Computer Aided Engineering, 计算机辅助工程分析)、CAPP(Computer Aided Process Planning, 计算机辅助工艺过程设计)、CAM、CAQ(Computer Aided Quality, 计算机辅助质量管理)、CAFD(Computer Aided Fixture Design, 计算机辅助夹具设计)等。

通常一个完善的 CAD/CAM 系统应具备快速数字计算及图形处理功能、几何建模功能、处理数控加工信息的功能、大量数据和知识的存储及快速检索与操作功能、人机交互通信的功能、输入和输出信息及图形功能、工程分析功能等。CAD/CAM 系统应由人、硬件、软件三大部分组成,其中硬件包括计算机及其外部设备,广义上讲硬件还包括用于数控加工的机械设备和机床等。

软件一般包括系统软件、支撑软件和应用软件 3 类。

(1) 系统软件主要负责管理硬件资源及各种软件资源,它面向所有用户,是计算机的公共底层管理软件,即系统开发平台。

(2) 支撑软件运行在系统软件之上,是实现 CAD/CAM 各种功能的通用性应用基础软件,是 CAD/CAM 系统专业性应用软件的开发平台。

(3) 专业性应用软件则是根据用户具体要求,在支撑软件平台上进行二次开发的专用软件。

计算机系统的硬件为系统工作提供物资基础,而系统功能的实现由系统中的软件运行来完成。随着 CAD/CAM 系统功能的不断完善和提高,软件成本在整个 CAD/CAM 系统中所占比重越来越大。目前国外引进的一些高档软件,其价格已经远远高于系统硬件的价格。图 1-2 给出了 CAD/CAM 系统的基本组成。

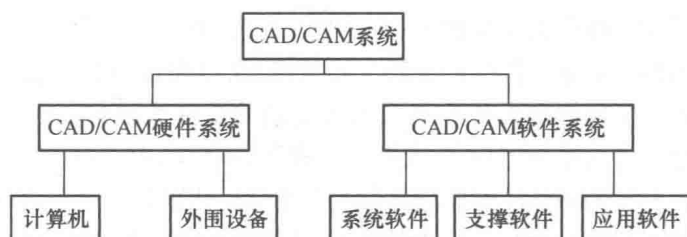


图 1-2 CAD/CAM 系统的基本组成

由于 CAD/CAM 系统的投资相对较大,如何科学、合理地选择适合本企业的系统,必须经过充分的论证,这也是当前我国在推广应用信息化技术改造和提升传统制造业企业技术水平的过程中需要重视的问题。随着软硬件技术和网络技术的发展,CAD/CAM 系统的总体趋势是向着集成化、智能化、标准化和网络化方向发展。

1.2 五轴数控的工程背景

数控机床的诞生是生产领域的一次革命,多轴联动数控机床特别是五轴及五轴以上数控机床是实现复杂曲面零件高精度、高效率的重要加工手段,五轴加工的水平代表着一个国家数控制造业技术的最高水平。

由于数控机床的重要性,美国、苏联、日本和西欧等国家和地区对数控机床十分重视,均投入了大量人力、物力和财力进行研究和开发,并取得了巨大成果,使数控机床得到了快速发展,机床性能得到了大幅度提高。

我国从 1958 年便开始了对数控机床的研究工作,经 20 多年持续不断的研究和发展,已基本上掌握了关键技术,建立了数控开发、生产的基地,培养了一批数控机床人才,初步形成了自己的数控机床产业。

五轴及五轴以上联动数控机床是我国现代国防工业急需的战略性装备,也是制造现代模具的基础装备,一直被西方某些大国列为对我国禁运的战略物资。所以对五轴加工的研究就显得尤为重要。

到目前为止,在复杂自由曲面加工中,五轴数控机床被认为是最好

的加工工具。在自由曲面加工中,其加工精度、加工效率和加工柔性等方面性能都远远好于传统的三轴数控机床,所以在过去的一段时间内,很多学者及工程技术人员普遍认为在复杂的零件曲面加工中,五轴机床将慢慢替代三轴机床的位置^[6-16]。在近几年中,在解决五轴 NC 加工中的一些固有缺陷,比如加工精度的控制问题、复杂冗长的程序问题、复杂的后处理过程、加工中的过切和碰撞问题以及如何控制成本的等问题中,都有了很多显著的研究^[17]。对于这些问题的研究在实际中有重要的应用价值。

虽然在五轴 NC 加工中已经取得了很多成就,但是到目前为止,并未有一本专著或者机构可以提供一个关于五轴加工的综合文献,这主要是由于在五轴自由曲面加工中还有很多未解决的问题。许多文献已经证明了,对于五轴自由曲面加工,传统的加工算法不能提供一个有效的加工^[18-67],为了改善五轴加工的性能,需要提出一些新的刀具路径规划算法。

目前,在五轴自由曲面加工中,有一个很重要的问题,即使用现有的商业 CAM 软件所规划的刀具路径并不能完全满足加工误差要求。往往在数控机床加工后,还需要工人手工打磨和抛光被加工零件的曲面,这种手工加工方式无疑会增加人们的劳动强度、加工时间且提高加工成本,这种问题可归结为五轴自由曲面有效加工算法的问题。因此,如何在刀具路径及刀具轴向设计上提供一种可靠的参数选择,使得精度和效率都能达到要求,这就构成了本书的研究主线。

1.3 五轴数控加工的研究内容及目标

本书主要研究以下问题。

(1) 在自由曲面加工中,探讨加工误差的来源,比较五轴机床与三轴机床在误差评估上的差异,并对不同结构的机床分别进行了研究,以达到简化程序、提高加工精度与效率的目的。

(2) 研究并建立估算切削误差与步长误差的方法,在满足设定最大容许误差的条件下,对加工曲面上的刀具路径进行插补,以达到优化刀具路径离散的目的。

(3) 研究一种基于优化加工区域的刀具路径规划算法,通过使用迭代算法来生成优化加工刀具路径。在满足误差要求的条件下,提高曲面加工效率。

(4) 研究在满足无碰撞、过切的情况下,提高刀具轴向的光顺变化程度,降低对所加工的曲面几何的敏感度,从而提高加工精度。

(5) 将以上所研究的技术点进行综合,提出了一种新的五轴自由曲面加工的刀具路径规划方法。从而在精度、效率和成本上改善五轴的加工性能。

本书针对上述内容进行了研究,从刀具路径的离散、刀具接触点的生成、不同五轴机床加工误差的评估、刀具路径的优化设计和刀轴的光顺性研究入手,对其进行了较为系统和全面的研究,提出了较为完整的理论体系和技术手段,在改善五轴数控加工的性能方面,具有重要意义。

本章主要对国内外刀具路径的设计方法、刀具路径的插补、计算机数控仿真与验证、刀具路径离散、刀具轴向的确定及五轴数控曲面加工等技术的研究现状进行了回顾、分析,并且讨论了当前方法的缺点和不足。

2.1 引言

国内的工厂和科研院所均拥有大量的数控设备,其在这类数控设备中所采用的 NC 编程的方法一般都是使用现成的商业软件,比如法国达索的 CATIA、西门子的 UGS NX、美国的 Pro/Engineer、Mastercam、PowerMILL 等商业软件。这些软件在刀具路径设计方面较为相似,都是按照一些非常稳定的算法,从被加工零件的几何角度规划刀具路径,其加工流程如图 2-1 所示。

数控机床通过执行 NC 命令加工零件的,而 NC 代码的质量直接影响着被加工零件的精度和成本。一般情况下,零件的加工过程可分为以下两个阶段。

(1) 粗加工阶段,主要使用直径较大的刀具以层加工方式来加工,去除被加工零件的大部分材料。

(2) 精加工阶段,主要通过一系列精加工刀具路径来覆盖零件表面,使被加工零件达到所设计的形状,满足所要求的误差。精加工中的刀具路径规划直接影响被加工零件的精度以及加工效率。

目前许多企业大量使用三轴或者五轴机床进行自由曲面加工。由于此类曲面的曲率分布很不规律,故在加工中引起很多困难。由于五

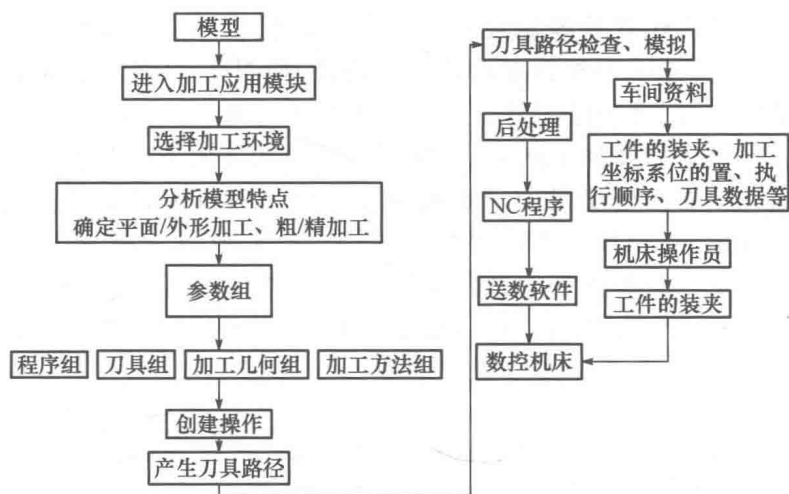


图 2-1 数控加工程序生成流程

轴机床相对于三轴机床增加了两个旋转自由度,在加工效率提高的同时也带来了新的问题。例如:传统商业 CAM 软件系统的支持能力不足;在刀具路径规划、刀具过切、刀具碰撞方面,缺乏柔性;复杂的后处理,等等^[19]。

2.2 刀具路径规划方法

在自由曲面加工中,首先必须将零件表面离散成一系列的刀具路径,此过程被称为刀具路径的生成过程。目前刀具路径规划的方法基本可以分为以下几种^[19,69]。

- (1) 等参数方法(Iso-parametric methods)。
- (2) 等平面方法(Iso-planar methods)。
- (3) 恒定残留高度方法(Constant scallop height methods)。
- (4) 空间填充曲线方法(Space-filling curve methods)。
- (5) 连续生成曲线方法(Sequential generated curves methods)。

2.2.1 等参数刀具路径规划方法

在当前比较流行的 CAM 系统软件中,应用最广泛的刀具路