



“十二五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

复杂曲面高性能多轴精密 加工技术与方法

· 孙玉文 徐金亭 任斐 郭强 著 ·



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
21 世纪先进制造技术丛书

复杂曲面高性能多轴精密 加工技术与方法

孙玉文 徐金亭 任 斐 郭 强 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从数字化高质高效加工的角度,比较系统地探讨了复杂曲面数字化高性能多轴精密加工的技术和方法,较为全面地反映了高性能加工的相关进展以及作者的研究思路和方法。全书共9章:第1章论述复杂曲面零件高性能加工的概念和内涵;第2、3章叙述 Bézier 与 B 样条曲线曲面的基础知识,以及复杂曲面重构和几何连续性拼接的方法;第4~6章依次论述多岛链复杂型腔、复杂曲面端铣加工路径规划策略与方法、直纹面侧铣加工刀位规划方法;第7章论述复杂曲面的五轴加工铣削力精确预测与加工稳定性分析方法;第8、9章分别阐述参数曲线插补的适应性进给率定制方法和加工中的最优配准方法。

本书可作为机械工程专业本科生和研究生的参考用书,对 NC 加工、CAD/CAM/CAE 领域的研究人员和工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

复杂曲面高性能多轴精密加工技术与方法/孙玉文等著. —北京:科学出版社,2014
(“十二五”国家重点图书出版规划项目;21世纪先进制造技术丛书)
ISBN 978-7-03-127171-7

I. ①复… II. ①孙… III. ①曲面-精密切削 IV. ①TG506.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 261748 号

责任编辑:裴 育 王 苏 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年12月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年12月第一次印刷 印张:19 3/4

字数:375 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编:熊有伦(华中科技大学)

编 委:(按姓氏笔画排序)

丁 汉(上海交通大学/华中科技大学)

张宪民(华南理工大学)

王 煜(香港中文大学)

周仲荣(西南交通大学)

王田苗(北京航空航天大学)

赵淳生(南京航空航天大学)

王立鼎(大连理工大学)

查建中(北京交通大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

柳百成(清华大学)

王越超(中科院沈阳自动化所)

钟志华(湖南大学)

冯 刚(香港城市大学)

顾佩华(汕头大学)

冯培恩(浙江大学)

徐滨士(解放军装甲兵工程学院)

任露泉(吉林大学)

黄 田(天津大学)

刘洪海(朴次茅斯大学)

黄 真(燕山大学)

江平宇(西安交通大学)

黄 强(北京理工大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

管晓宏(西安交通大学)

李泽湘(香港科技大学)

雒建斌(清华大学)

李涤尘(西安交通大学)

谭 民(中科院自动化研究所)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

谭建荣(浙江大学)

宋玉泉(吉林大学)

熊蔡华(华中科技大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

翟婉明(西南交通大学)


《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪，先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点，同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展，为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术，出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合，产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战，要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展，激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升制造学科的学术水平。我们相信，有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为发展制造科学，推广先进制造技术，增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物，在制造业中的应用范围很广，从喷漆、焊接到装配、抛光和修理，成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科，已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一，并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展，因此，本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

A handwritten signature in black ink, reading '熊有伦' (Xie Youjun).

华中科技大学

2008年4月

前 言

复杂曲面零件应用的场合很多而且很关键。不同厂家制造的同类零件在使役性能方面的差异,除材料成型技术差别外,制造工艺是否会产生影响、影响程度如何;如何才能加工制造出高性能零件?材料成型过程中希望控形、控性,多轴加工过程中对零件是否也能做到控形、控性;加工运动能否做到平稳、光滑、高效、可控和可预测?这些问题一直困扰作者。高性能零件除具有复杂曲面特征外,材料往往具有高强、高硬、超韧、超脆、超黏等特征,加工表面也可能具有耐热、耐磨、耐蚀等特殊功能性表面层结构。多年来,郭东明院士一直倡导高性能零件的精密制造技术研究,作者跟随并在其熏陶之下,在上述经历和困惑中寻求数字化加工研究的切入点。

高性能加工的内涵很广,很难用一句话表达。零件加工涉及机床-刀具-工件-夹具这一复杂的工艺系统。如何针对工件和机床的特点,在加工中使机床性能得到最大限度的发挥,加工效率得到最大限度的提高,并尽量减少对机床、工件、刀具的损害,使走刀运动光滑、平稳、可控,加工的工件能够做到控形、控性,这是高性能加工涉及的主要问题。复杂曲面高性能加工的可控体现在对工艺系统的可控上。在充分了解机床、刀具和夹具以及工件形状、结构和材料特性的基础上,做到有针对性的加工过程拟实物理仿真与几何仿真,实现对零件加工效率和加工状态的预估和评价,并可在加工中引入在机测量技术,实现对刀具磨损状态、切削力状态的在线预报。由此形成的反馈控制是实现高性能加工的有效手段,但控制尚不具备普适性的方法,其迟滞性、复杂工况下因刀位、走刀骤停、路径拐点、切深或热聚积等导致的异常突发现象,往往很难将损伤或加工动力学特性限制在临界状态以内。因此,无论在加工中是否引入适应性控制,具有优良的运动学、动力学特性的刀位规划、运动规划和工艺参数规划,实现切削稳定性和加工动态误差控制,仍是高性能加工的基础和前提,这在高速加工中尤为重要。把复杂曲面高性能加工作为一个方向进行研究,通过研究高性能零件精密加工技术和方法,从中取得规律性的认识,有助于促进高性能零件加工能力的提高,以解决一类高性能零件精密加工制造的难题和需求。

近来,复杂曲面数字化加工理论和方法得到长足的发展。较早开展研究的Altintas等的工作在该领域内产生了深远的影响,使数字化加工正逐步向高性能加工阶段迈进。近期,国内外一批学者在复杂曲面加工的诸多方面也取得突出进展,把复杂曲面零件的加工制造水平提升到一个新高度:从常规三轴加工转向五轴加工,从常规切削转向高速加工和超高速加工,从通常的模具钢材料到高强度铝合金,再到超高强度300M钢、钛合金、镍基高温合金等材料。可以说,伴随这些新现

象的出现而先行的往往是切削特性评价,通过实验、有限元和理论分析等手段已得到初步解决。然而,对于形状各异的高性能、高品质零件加工,高性能加工的相关理论、方法和工艺有时很难在短时间内掌握。加工路径、刀具位姿、工艺参数与材料切削特性等因素相互影响,将加工水平提升到高性能加工的层次有滞后性。在进行工艺规划时,往往因缺乏有效的加工建模手段而采取保守的策略,很大程度上限制了先进机床加工能力和效率的发挥。同时,不可否认的是,在加工仿真方面仍以几何仿真居多,即便如此,加工路径的形式也仍需进一步丰富且更具针对性。随着高端装备性能的不断提高,有关复杂曲面数字化加工的工作仍未达到成熟的程度,需要不断探索、完善和提高。高性能、高品质零件的加工制造问题,仍令我们困惑,需要去解决。

本书的宗旨就是阐述和介绍复杂曲面数字化加工方面的进展,希望能够提供一些具有借鉴、应用意义和价值的思路和方法,使读者有所启发。本书涉及的内容均体现了作者关于复杂曲面数字化高性能加工的研究思想和研究方法。在复杂曲面几何建模、加工轨迹的定域映射和自由边界映射生成方法,刀具跳动情形下侧铣加工的刀具扫掠面形成原理、几何误差预测和刀位规划方法,铣削力精确建模与加工稳定性分析,驱动特性约束的运动规划以及复杂曲面的最优配准技术等方面具有一定的特色和创新。

本书涉及 Bézier 与 B 样条曲线曲面技术及微分几何学的相关知识,但限于篇幅,只在第 2 章叙述了 Bézier 与 B 样条曲线曲面造型基础;对于初学者,可事先阅读有关微分几何学的相关书籍,在掌握微分几何学的基本知识后再阅读本书,会有更好的效果。本书涵盖了复杂曲面建模和加工的很多方面,几乎所有内容都经过作者或其指导的研究生编制程序、进行实例验证或加工测试,并经历了在实践基础上思考、提炼和创新的过程。作者得以长期坚持有关工作,离不开国家自然科学基金等项目资助,在此一并表示感谢。

本书从构思到成稿,历时三年,其中包含了作者指导的研究生徐金亭、任斐、郭强、祝兴华、王刚、冯西友等的辛勤劳动,对他们的付出和努力表示真诚的感谢。同时,感谢导师刘健和郭东明长期以来对作者的教诲、指导。作者时刻感受到所在研究集体以及长期合作的老师和朋友的启发和鼓舞,感受到与国内兄弟院校相互间的交流、学习和探讨所带来的能力的拓展和提高。

限于作者水平和能力,书中疏漏之处在所难免,诚望同行和专家指正,并共同为高性能加工添砖加瓦。路漫漫其修远兮,彼此上下而求索,共勉。

孙玉文

2014 年 7 月

于大连理工大学

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 测量加工一体化	1
1.2 高性能加工	3
1.3 表面完整性	6
1.4 本书的结构	7
参考文献	8
第 2 章 Bézier 与 B 样条曲线曲面基础	11
2.1 Bézier 曲线曲面	11
2.1.1 Bernstein 多项式	11
2.1.2 Bernstein 多项式的算术运算	12
2.1.3 Bézier 曲线的定义和性质	14
2.1.4 Bézier 曲线的德卡斯特里奥算法	15
2.1.5 Bézier 曲面的定义和性质	16
2.1.6 Bézier 曲面的偏导和法矢量	17
2.1.7 Bézier 曲面上的等参数线	18
2.1.8 Bézier 曲面的分割算法	18
2.2 B 样条曲线曲面	20
2.2.1 B 样条基函数的递推定义和性质	20
2.2.2 B 样条基函数的导数公式	21
2.2.3 B 样条曲线的定义和性质	21
2.2.4 B 样条曲线导矢的计算公式	23
2.2.5 计算 B 样条曲线上点的德布尔算法	23
2.2.6 B 样条曲线的节点插入算法和分段 Bézier 表示	24
2.2.7 B 样条曲面的定义和性质	25
2.2.8 B 样条曲面的偏导和法矢量	27
2.2.9 B 样条曲面上的等参数线	28

2.2.10	计算 B 样条曲面上点的德布尔算法	29
2.3	曲线曲面的自由变形	29
2.3.1	曲线的自由变形	30
2.3.2	曲面的自由变形	31
	参考文献	32
第 3 章	自由曲面几何重构	34
3.1	散乱数据的预处理	34
3.1.1	曲线数据的序化处理	34
3.1.2	点云数据的主元分析	35
3.1.3	数据点 k 邻域的快速搜索	36
3.1.4	局部数据点的最小二乘拟合	37
3.1.5	空间数据的平面映射	40
3.1.6	测量数据的边界点提取	42
3.1.7	测量数据的截面轮廓提取	43
3.2	数据点的参数化	45
3.2.1	曲线数据点的参数化	45
3.2.2	曲面阵列数据点的参数化	46
3.2.3	曲面散乱数据点的参数化	46
3.3	B 样条曲线重构	52
3.3.1	节点矢量的设计方法	52
3.3.2	B 样条曲线插值	53
3.3.3	B 样条曲线的最小二乘逼近	55
3.3.4	规定精度内的 B 样条曲线逼近	57
3.4	B 样条曲面重构	58
3.4.1	B 样条曲面插值	58
3.4.2	规则数据点的最小二乘曲面逼近	60
3.4.3	曲面蒙皮	61
3.4.4	散乱数据的曲面逼近	62
3.5	B 样条曲面片的拼接	63
3.5.1	B 样条曲面拼接的几何连续性条件	63
3.5.2	两张 B 样条曲面的 G^1 光滑拼接	66
3.5.3	四张 B 样条曲面的角点 G^1 光滑拼接	67
	参考文献	68

第 4 章 多岛链型腔加工路径	71
4.1 型腔加工概述	71
4.1.1 常用的型腔分层加工方法	71
4.1.2 型腔加工的走刀方式	72
4.1.3 型腔加工的铣削方式	73
4.2 型腔加工区域的自动识别	73
4.2.1 截面轮廓的获取	73
4.2.2 截面轮廓嵌套关系的判断	74
4.2.3 加工区域的识别	75
4.3 Zig-Zag 加工路径	77
4.4 加工路径生成的偏微分方程方法	78
4.4.1 偏微分方程的定解问题	78
4.4.2 偏微分方程的差分解法	79
4.4.3 加工路径生成	83
4.5 流线型加工路径	84
4.5.1 流函数的数学描述	84
4.5.2 平面速度矢量场的重构	85
4.5.3 加工路径生成	87
4.6 轮廓平行加工路径	88
4.6.1 偏置曲线的计算	88
4.6.2 局部自交的消除方法	89
4.6.3 全局自交点计算的单调链法	91
4.6.4 有效偏置环的提取	93
4.7 加工路径的连接	94
4.7.1 路径连接的基本元素	94
4.7.2 路径的树形层次结构和连接原则	95
4.7.3 路径间的连接曲线	96
4.8 加工路径的拐角优化	98
4.8.1 轨迹尖角的分类	98
4.8.2 轨迹尖角的识别	99
4.8.3 牙状清根轨迹	100
4.8.4 单圆弧拐角轨迹	100
4.8.5 双圆弧拐角轨迹	101
参考文献	103

第 5 章 复杂曲面端铣加工路径规划	106
5.1 数控加工端铣刀位规划基础	106
5.1.1 铣削刀具的统一描述	106
5.1.2 刀触点和刀位点的基本定义	107
5.1.3 刀具姿态的定义	109
5.1.4 走刀步长的计算	109
5.1.5 加工行距的计算	111
5.2 参数映射的基本原理	115
5.2.1 协调映射模型	115
5.2.2 曲面与参数域上点的双向映射	121
5.3 复杂曲面加工路径设计	124
5.3.1 曲面上相邻轨迹的对应刀触点计算	124
5.3.2 映射域中的参数增量计算	127
5.3.3 等参数加工轨迹	128
5.3.4 无亏格曲面的螺旋加工轨迹	129
5.3.5 亏格曲面上的轮廓平行环切加工轨迹	133
5.3.6 亏格曲面上的螺旋加工轨迹	137
5.4 五轴加工刀具姿态优化	139
5.4.1 局部加工干涉的消除	139
5.4.2 全局碰撞干涉的消除	141
5.4.3 加工曲面的误差控制	142
5.4.4 可行加工空间的构造	142
5.4.5 刀具姿态的优化模型	144
参考文献	148
第 6 章 侧铣加工刀位规划	152
6.1 侧铣加工刀位规划基础	152
6.1.1 数控机床的运动学变换	152
6.1.2 铣削刀具切削刃的几何模型	155
6.1.3 直纹面的基本定义	157
6.1.4 刀位路径面的 B 样条插值方法	158
6.2 侧铣加工刀位的局部优化方法	159
6.2.1 单点偏置法	159
6.2.2 两点偏置法	159

6.2.3	三点偏置法	160
6.2.4	最小二乘法	161
6.2.5	密切法	162
6.3	侧铣加工刀位的整体优化方法	164
6.3.1	刀具跳动	164
6.3.2	侧铣刀具扫掠包络面的几何建模	167
6.3.3	被加工表面的几何误差	171
6.3.4	刀具跳动对被加工表面几何误差的影响	173
6.3.5	融合刀具跳动的侧铣刀位整体优化方法	174
6.4	薄壁件侧铣加工变形预测与刀位补偿方法	176
6.4.1	材料模型确定	177
6.4.2	有限元模型的构造	177
6.4.3	加工变形误差预测	179
6.4.4	薄壁件侧铣加工误差的刀位补偿	180
	参考文献	182
第7章	切削力预测与切削稳定性分析	185
7.1	切削力预测的理论模型	185
7.1.1	刀刃微元切削力模型	185
7.1.2	刀具跳动效应下的切削力模型	187
7.2	切削力模型参数的计算	188
7.2.1	瞬时未变形切屑厚度计算	188
7.2.2	参与切削的刀刃微元判断	193
7.2.3	切削力系数识别	196
7.2.4	刀具跳动参数的获取	198
7.3	铣削力模型仿真与实验	199
7.4	动态切削系统的动力学模型	200
7.4.1	柔性刀具-刚性工件系统的动力学方程	201
7.4.2	刚性刀具-柔性工件系统的动力学方程	203
7.4.3	刀具工件双柔性系统的动力学方程	204
7.5	动态切削系统稳定域的求解方法	206
7.5.1	常用的稳定域求解方法	206
7.5.2	稳定域的三阶全离散求解方法	208
7.5.3	刀具跳动下稳定域的三阶全离散求解方法	214
	参考文献	221

第 8 章 参数曲线插补与刀具进给率定制	224
8.1 参数曲线插补的基本描述	224
8.2 常用的曲线插补方法	225
8.2.1 等参数增量插补法	225
8.2.2 恒定进给率插补法	227
8.2.3 自适应进给率插补法	228
8.3 插补点参数的求解方法	229
8.3.1 泰勒展开法	229
8.3.2 常微分方程法	230
8.3.3 预估校正法	231
8.4 微分运动分析的活动标架方法	232
8.4.1 加工路径的弧长参数化方法	233
8.4.2 Frenet 标架	234
8.4.3 Darboux 标架	237
8.4.4 刀具运动与曲线参数间的联系	240
8.5 进给率定制中运动几何学特性的数学描述	243
8.5.1 几何精度	243
8.5.2 运动学特性	244
8.5.3 机床驱动特性	246
8.6 进给率定制的线性规划算法	247
8.6.1 线性规划算法的数学模型	248
8.6.2 线性规划算法的约束条件	248
8.6.3 线性规划算法的算例	251
8.7 进给率定制的曲线演化算法	253
8.7.1 约束条件的等比例调节	253
8.7.2 进给率曲线的演化	255
8.7.3 曲线演化算法的算例	258
参考文献	259
第 9 章 复杂曲面加工中的最优匹配策略	261
9.1 曲面匹配中的基本问题	261
9.1.1 曲面最优匹配的数学模型	261
9.1.2 坐标系间的刚体运动变换	262
9.1.3 刚体运动变换的求解	263
9.1.4 坐标系间对应关系的构造	265

9.2	点到曲线曲面最近点的计算	267
9.2.1	点到 B 样条曲线的最近点	268
9.2.2	点到 B 样条曲面最近点的计算方法	273
9.3	多视测量点云的数据融合	279
9.3.1	点的曲率特征匹配	280
9.3.2	三角约束条件	280
9.3.3	最小距离目标函数	281
9.4	复杂曲面加工精度检测与误差评估	282
9.4.1	复杂曲面上检测点的数量和分布	283
9.4.2	测量数据与设计模型间的精确匹配	284
9.4.3	加工曲面的误差评估	285
9.5	复杂曲面整体/局部的加工余量优化	287
9.5.1	加工余量优化问题的数学描述	287
9.5.2	加工余量的约束定位优化	289
9.6	复杂曲面零件的非刚性匹配方法	293
9.6.1	非刚性匹配的数学描述	293
9.6.2	求解非刚性变换的轮换迭代策略	294
9.6.3	基于非刚性匹配的截面轮廓重构	295
	参考文献	296

第 1 章 绪 论

随着航空航天、国防、运载工具、动力和机械等行业的快速发展,对高端装备的性能要求也越来越高,涌现出一大批加工难度大、性能指标要求苛刻的高性能关键零部件,其加工已由以往单纯的形位精度要求,跃升为形位与性能指标并重的精密加工要求。这些高性能零件多呈精密复杂曲面形状,往往因工艺和使用场合等的限制,采用预硬高硬度材料或自身超硬、超脆、超黏难加工材料^[1];因轻量化、强度等要求而采用薄壁、多腔复杂结构;因高频率、长期使役特点而对加工表面完整性有较高要求;因装配、密封和传热等要求而使被加工曲面与零件自身或其他零件的某一特定曲面之间存在几何关联性。几何、结构、材料和性能等多因素间的复合作用,使得这些高性能零件的加工制造十分困难,存在废品率高、加工效率低,特别是加工表面完整性和零件性能要求难以保证等难题。高性能加工着眼于加工制造中的几何精度、加工质量和零件性能保证等问题,并把对加工中各种约束复合作用的定性认识转化为对加工行为的定量控制,以突破高性能零件数字化高质高效加工的技术瓶颈。

1.1 测量加工一体化

测量(measuring)、建模(modeling)、加工(machining)一体化(3MS)技术较早出现在数字化仿形加工上,是测量技术与数字化加工技术的有机结合,在快速产品开发和产品迭代设计等领域得到广泛应用。高性能零件制造中的测量加工一体化不同于一般意义上的仿形加工,它以保证制造件形位精度、性能指标达标和进一步提高为目标,而不仅仅局限于几何上的形似过程,是从加工和性能保证角度对当前已有加工方式的补充、完善和再提高。随着现代测量技术的发展,可以通过原位测量方法高精度地检测出制造件的面形误差和表面粗糙度,从而在误差分析、评定和校正的基础上生成加工输入数据,省时省力地加工制造出高性能零件。高性能数字化加工的可控性不仅表现在按任意加工余量去除的可控性,也表现在形位与性能指标和机床加工参数之间映射关系的可控性方面。只有这样才能真正实现高性能零件的数字化主动加工。因此,高精度、高性能复杂曲面零件制造,有时并不单纯依赖机床的精度,更依赖测量技术,需要复杂的数据处理,经反演计算与实验验证而形成的加工制造工艺的一体化综合考虑,才能制造出符合要求的高性能、高品质的零部件。

目前,数字化加工中的测量主要用于几何形状反求、工件定位、表面形貌和形位误差等方面^[2],旨在解决加工中出现的几何建模、误差校正、控制、定位及与质量检测相关的分析、计算和评价问题。高品质零件高性能加工中可能需要获取的测量信息有:①被加工表面或其关联面的几何形状参数;②力、热、刀具磨损等工艺过程控制参数的测量;③关键性能参数的测量。几何参数获取通常在加工前、加工后或加工过程中与加工交替进行,一般采用三维扫描测头或激光检测等方法。由此涉及的相关问题有:①未知曲面自适应自动跟踪测量的控制与路径规划方法以及测球半径补偿办法;②数据采集、扫描点云信号的滤波、传递与定标问题;③检测中的盲点问题等。加工过程中的参数测量通常需要实时进行,通过测量工艺过程的参数,进行加工状态的分析、综合与判断,并按预设的数学模型进行计算。实时或定时调整能够改变加工状态的参数,实现加工过程的定量控制。一般来说,电、光、磁和表面完整性等参数的检测并没有统一的方法,要根据具体的性能指标特点选用或制订其检测方案。在性能参数的检测中,最关键的问题是检测原理和方法的确定。这类性能参数往往遵循一定的物理规律,要综合考虑测试精度以及测试系统物理信号处理装置、机械结构和控制实施的难易程度等因素选择具体的测试实施办法。

高性能关键件的型面尺寸往往比较大、精度要求高,用上述测量手段获取的数据点有时可多达百万量级,且这些数据还可能附加性能参数、法矢等信息。多源、异构和多维数据点的拓扑关系重建、点云平滑、测量疵点剔除、数据分割^[3]、高效数据结构、多分辨率表达和运算稳定性问题等都是制约点云数据处理的瓶颈,同时还要考虑下游建模和加工等操作的便利。相对于单纯的数据可视化,机械产品的测量建模更注重模型的几何精确性与拓扑完整性以及特定信息的提取和表达。同时,数字化加工领域的测量建模已不仅仅是精度问题,一些关键件的相关曲面间往往存在着几何约束关系。例如,从常见的规则线面垂直、平行、等距等约束到复杂曲面的等距、变厚度约束再到考虑加工、配合关系的几何约束等,这些约束加大了测量建模的难度。目前,已有的测量建模方法很多,如隐式曲面建模方法^[4]、细分曲面造型^[5]和 NURBS 曲面建模方法^[6]等,在选择具体建模方法时要以综合考虑精度和后续加工操作的便利性为原则。对于专用数字化加工设备,通用的 CAD 建模软件在约束建模能力、计算效率和精度方面有时还难于进行定量控制,而且需要过多的人机交互,不适合加工者的现场实际操作,因此通常需要开发专用的几何建模模块。在约束曲面建模时,为保证该类约束曲面几何外形的光顺性,常采用能量优化方法进行建模,优化模型具体数值解法的选择对计算效率和求解精度影响很大。此外,约束曲面还可通过曲面变形^[7]或几何操作方式^[8]得到。例如,可通过施加点、线或面作用外载荷推动局部曲面逐步向点、线等几何约束靠拢并最终贴合,实现几何约束建模。由于单张曲面往往无法满足高性能零件的实际建模要求,