

复杂曲面数字化制造的 几何学理论和方法

Geometric Theories and Methods for Digital
Manufacturing of Complex Surfaces

· 丁 汉 朱利民 著 ·



科学出版社

复杂曲面数字化制造的 几何学理论和方法

**Geometric Theories and Methods for Digital
Manufacturing of Complex Surfaces**

丁 汉 朱利民 著

科 学 出 版 社

北 京

序

复杂曲面类零部件在运载、能源和国防等行业有着广泛应用,其制造水平代表着国家制造业的核心竞争力。随着复杂曲面数字化制造的新工艺技术的发展,传统的几何学原理、模型和算法表现出了众多弊病,迫切需要发展新的理论和方法。刀位微小偏移对加工误差的影响、复杂约束下的刀具路径多目标优化、曲面拟合的高效稳健计算、夹持定位误差的传递关系等研究均是当今制造科学研究领域的前沿与热点。

十余年来,丁汉教授和朱利民教授以现代微分几何为工具,深入研究了大型复杂曲面零件数字化加工、测量的几何分析理论和方法,在数控加工成形、散乱点云分析、空间几何推理的基础理论方面取得了一些规律性认识和创新性成果,形成了较为完整的学术体系。该书是对这些研究成果的系统性总结,第1~4章沿着曲线、曲面论→曲面上的几何学→高维微分几何→微分流形→Lie群、Lie代数的线路循序渐进地介绍了现代微分几何的基础理论,并将运动学研究纳入到微分几何的框架下,在较高的层次上反映了几何学与运动学的一致性;第5~7章以微分几何和最优化为主要工具,建立了曲面测量、加工和夹持定位的新原理和新方法,内容包括:距离函数的可微性条件及其二阶导数的解析计算方法,散乱点云曲面逼近的统一方法体系,回转刀具扫掠包络面的解析表达、局部重建与整体形状控制原理,自由曲面线接触和高阶点接触数控加工刀位规划理论和方法,刀具全局可达方向锥的GPU计算方法,夹持完全约束性判别和夹具定位误差分析的二阶方法等。研究成果大部分发表在国际主流学术期刊,其创新性及对数字化制造领域的贡献得到了国内外同行的充分肯定。相关的一系列模型和算法已在自主知识产权的软件系统中实现,并取得了良好的应用效果,体现出理论与实践的紧密结合。

该书反映了我国学者在数字化制造基础研究方面的自主创新成果,具有先进性、系统性和实用性,我希望该书的出版对于我国数字化制造技术的发展能产生积极的促进作用。

熊有伦

中国科学院院士

2011年1月

前 言

大型复杂曲面类零部件在运载、能源和国防等行业有着广泛应用,如大型舰船螺旋桨、航空发动机叶轮、汽车覆盖件精密模具等。这些产品直接关系国民经济发展和国防安全,其制造水平代表着国家制造业的核心竞争力。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》(2006—2020)和国家自然科学基金委员会机械工程学科发展战略报告《机械制造科学》(2006—2010)均将大型复杂曲面零件设计、制造、测量等关键技术列入制造业重点发展领域的优先主题。近期“高档数控机床与基础制造装备”和“大飞机”等重大专项的开展,更是对关键复杂零件的高效、精密制造技术提出了前所未有的迫切需求。

五轴数控加工是工业中复杂高性能零件高效加工的重要手段,特别是使用非球头刀可以在避免干涉的同时通过调整刀具位置和姿态,使得在刀触点轨迹线附近的带状区域内刀具包络曲面充分逼近理论设计曲面,从而显著提高加工带宽;而原位测量技术的引入,使得“设计-加工-测量”一体化的闭环制造模式成为高精度、高物理性能产品快速开发的重要使能技术。这些先进工艺技术的发展向复杂曲面数字化制造的几何学原理提出了诸多挑战性的课题。例如,非球头刀五轴数控加工的成形原理为单参数面族包络原理,真实的加工误差为刀具包络曲面相对于工件曲面的法向误差,其几何学原理远比球头刀情形复杂,回转刀具扫掠包络面的解析描述、局部重建与整体形状控制是多年未解决的理论难题,已影响到五轴联动加工潜力的发挥。针对数控加工成形、散乱点云分析、空间几何推理的基础理论问题,作者以现代微分几何和最优化方法为工具,经过十余年的研究取得了系统性的研究成果:

(1) 提出了刀具包络面局部重建与整体优化原理,揭示出刀位微小调整对包络面形状和加工误差的影响规律,将目前普遍采用的刀位误差评价方式由刀具曲面与设计曲面的比较提升为刀具包络面与设计曲面的直接比较,提出了三阶切触法与整体优化法两种宽行加工刀位规划理论和方法。

(2) 以点-曲面法向距离度量点到曲面的偏差,提出了距离函数的可微性条件及其二阶导数的解析计算方法,建立了散乱点云曲面逼近的统一方法体系,设计出高效稳健的曲面识别、重建、寻位、误差评定与分解、面形再设计等点云数据分析新算法。

(3) 提出了刀具-工件单点接触约束下刀具可行方向的 GPU 计算方法,以及可行空间中的刀具方向多目标优化模型,建立了夹具-工件多点接触约束下工件可行运动分析和夹具定位误差分析的二阶理论和方法,为数控加工、CMM 测量、装夹规划中的无干涉自由空间计算和精密夹具优化设计提供了新方法。

相关的一系列模型和算法已应用于大弯角七叶螺旋桨模、涡轴发动机整体叶轮、汽轮机叶片等的数控加工和多款汽车发动机的设计开发,取得了良好的应用效果。本书是对这些理论、方法和实践的系统性总结。考虑到研究中所采用的一些现代微分几何方法已超出传统教材的范围,以一般读者的数学基础不易掌握,本书沿着曲线、曲面论→曲面上的几何学→高维微分几何→Lie 群、Lie 代数的线路循序渐进地介绍了现代微分几何和运动学的基础理论、内在联系及统一分析方法。与抽象的微分流形不同,描述刚体位形的欧氏运动群 $SE(3)$ 具有外围参考空间 \mathbb{R}^{12} , 因此可视为 12 维欧氏空间中的 6 维超曲面,刚体运动即对应于该表面上的一条曲线。这样通过高维微分几何过渡到 Lie 群将有助于读者理解,同时也能更好地表现出几何学与运动学的统一性,期间还结合应用穿插介绍了一些国内外的最新成果。这部分数学基础不仅对于理解曲面测量、加工和夹持定位的新原理和新方法,而且对于相关工作的深入和拓展都是至关重要的,是研究复杂曲面数字化制造的几何学理论和方法的先进工具。

本书对数控加工、CAD/CAM、计算机图形学、几何量精密测量和机器人操作等领域的科技工作者具有重要的参考价值,同时也适合作为高等院校相关专业的研究生教材或参考书。

在本书完成之际,作者衷心感谢各位学术前辈、师长和同事们的支持和帮助,特别是熊有伦院士多年来的关心和指导。本书文字整理过程中得到了博士生丁焯、毕庆贞、罗晨、张小明、郑刚的帮助,在此也对他们表示谢意!

感谢国家杰出青年科学基金项目(59725514)、国家 973 计划项目(2005CB724100)、国家自然科学基金项目(59990490、50205018、50424514、50775147、50835004)和上海市基础研究重点项目(04JC14050、07JC14028)等多年来对相关研究工作的支持!

由于作者水平有限,书中难免会有各种纰漏和疏忽,敬请读者批评指正。

丁 汉 朱利民

2011 年 1 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 数字化制造	1
1.2 数字化产品开发	2
1.3 数字化制造的几何基础	4
1.4 本书的内容编排	9
参考文献	10
第 2 章 曲线论、曲面论	12
2.1 刚体运动与活动标架	12
2.1.1 刚体运动	12
2.1.2 活动标架	14
2.2 曲线的局部微分几何	16
2.2.1 参数曲线	17
2.2.2 弧长参数	17
2.2.3 Frenet 标架和基本三棱形	18
2.2.4 曲率和挠率	19
2.2.5 活动标架	21
2.2.6 曲线的局部规范形式	25
2.2.7 曲线论基本定理	27
2.2.8 曲线插补	27
2.3 曲面的局部微分几何	30
2.3.1 参数曲面	30
2.3.2 第一基本形式	33
2.3.3 第二基本形式	35
2.3.4 自然标架场与曲面基本公式	37
2.3.5 结构方程	38
2.3.6 曲面论基本定理	40

2.3.7	法曲率	41
2.3.8	主曲率和主方向	43
2.3.9	正交网和曲率线网	45
2.3.10	曲面上的活动标架	46
2.3.11	广义欧拉公式与贝特朗公式	53
2.3.12	曲面的局部规范形式	54
2.3.13	曲面间的接触几何	57
2.3.14	回转面、直纹面与可展面	63
2.3.15	包络面	72
2.3.16	相伴曲面、法向映射曲面与等距曲面	76
	参考文献	81
第3章	曲面上的几何学	83
3.1	切向量场	83
3.1.1	切向量和切空间	83
3.1.2	切映射	88
3.1.3	切向量场	89
3.2	积分曲线	90
3.3	联络	94
3.4	测地线	97
3.5	平行移动	102
3.6	曲率张量	105
3.6.1	余切向量和余切空间	105
3.6.2	张量(场)	106
3.6.3	曲率张量场	107
3.7	指数映射与法坐标系	110
3.8	诱导度量	112
3.9	高维曲面上的几何学	115
3.9.1	截曲率	115
3.9.2	积分曲面与 Frobenius 定理	116
3.10	曲面上的曲线设计	118
3.10.1	曲面上的立方样条曲线	119
3.10.2	曲面上的 Bézier 曲线	122
3.11	旋转运动群 $SO(3)$ 的高维曲面表示	125

3.11.1 绕固定轴 x - y - z 旋转(RPY 角)·····	125
3.11.2 z - y - x 欧拉角 ·····	127
3.11.3 欧氏运动群 $SE(3)$ 上的立方样条曲线 ·····	128
3.11.4 欧氏运动群 $SE(3)$ 上的测地线 ·····	132
参考文献·····	133
第 4 章 欧氏运动群与刚体运动学 ·····	135
4.1 $SO(3)$ 和 $SE(3)$ 群 ·····	135
4.1.1 旋转运动与 $SO(3)$ 群 ·····	135
4.1.2 刚体运动与 $SE(3)$ 群 ·····	136
4.2 左、右平移及其切映射·····	138
4.2.1 左、右平移·····	138
4.2.2 左、右平移映射的运动学解释 ·····	138
4.2.3 左、右平移的切映射 ·····	138
4.3 左不变切向量场 ·····	140
4.4 Lie 代数 $so(3)$ 和 $se(3)$ ·····	142
4.4.1 Lie 代数 $so(3)$ ·····	142
4.4.2 Lie 代数 $se(3)$ ·····	142
4.4.3 Lie 代数 $so(3)$ 和 $se(3)$ 的运动学意义 ·····	143
4.5 指数映射与法坐标系 ·····	145
4.6 伴随变换 ·····	146
4.7 切向量场的协变导数 ·····	147
参考文献·····	151
第 5 章 曲面测量定位、误差评定与识别重建的统一分析方法 ·····	153
5.1 距离函数及其微分性质 ·····	153
5.1.1 点-自由曲面距离函数 ·····	153
5.1.2 点-运动曲面距离函数 ·····	161
5.2 点云数据拟合的统一方法体系 ·····	165
5.2.1 曲面测量定位问题的描述 ·····	166
5.2.2 曲面拟合问题的描述 ·····	166
5.2.3 形状误差最小二乘评定问题的描述 ·····	166
5.2.4 形状误差最小区域评定问题的描述 ·····	167
5.2.5 形状误差最大实体评定问题的描述 ·····	167
5.2.6 形状误差溯源问题的描述 ·····	168

5.2.7	位置误差和有基准要求的轮廓度误差评定问题的描述	168
5.2.8	装配间隙调整问题的描述	168
5.2.9	半成品毛坯定位/包容问题的描述	169
5.2.10	初始毛坯欠材料判别及再制造面筛选问题的描述	169
5.2.11	测头半径补偿	170
5.2.12	模型的求解策略	170
5.3	测量定位与面轮廓误差评定算法	171
5.3.1	测量定位算法	171
5.3.2	形状误差最小区域评定算法	175
5.3.3	位置误差和有基准的形状误差评定算法	177
5.3.4	仿真计算和应用实例	180
5.4	测量定位误差度量与测点布局规划	184
5.4.1	定位误差度量指标	185
5.4.2	定位误差控制指标	187
5.4.3	测点布局规划	190
5.4.4	面向质量控制的传感器布局规划	194
5.5	运动生成曲面的识别与重构	195
5.5.1	对称曲面的自由微分运动空间	195
5.5.2	曲面的识别与重构	196
5.6	圆度误差评定的最速下降方法	204
5.6.1	基于计算几何的数据预处理	205
5.6.2	局部最优解的充要条件及其判别准则	205
5.6.3	圆度误差最小区域评定的快速精确算法	208
5.7	空间直线度误差评定的半无穷线性规划方法	216
5.7.1	复线性切比雪夫逼近模型	216
5.7.2	半无穷线性规划模型	220
5.7.3	单纯形算法	221
5.7.4	最优性检验	223
	参考文献	226
第6章	自由曲面非球头刀宽行数控加工的几何学原理	231
6.1	单个刀位下刀具包络曲面的三阶局部重建原理	232
6.1.1	刀具包络曲面局部重建的基本方程	232
6.1.2	刀具曲面上特征线在刀触点处的切方向	234

6.1.3	刀具曲面退化为刀尖圆曲线时刀具包络曲面的局部重建	235
6.2	非球头刀宽行加工自由曲面的三阶切触法	237
6.2.1	回转刀具五轴数控加工自由曲面的位置和姿态描述	237
6.2.2	三阶切触加工自由曲面的刀位规划	242
6.3	圆柱刀五轴侧铣加工刀具路径整体优化原理与方法	250
6.3.1	基准互换原理	251
6.3.2	刀具路径整体优化模型与算法	252
6.4	回转刀具扫掠包络面解析表达的双参数球族包络方法	256
6.4.1	双参数球族包络理论	256
6.4.2	回转刀具的单参数球族包络表示	258
6.4.3	回转刀具扫掠体包络面的双参数球族包络表示	260
6.4.4	环刀包络面的边界线	261
6.5	任意回转刀具五轴侧铣加工刀具路径整体优化方法	264
6.6	侧铣加工刀具路径几何光顺性优化	272
6.6.1	刀轴轨迹面的光顺性	273
6.6.2	刀轴轨迹面光顺性优化模型与算法	273
6.7	叶轮叶片侧铣加工刀具半径优化与无干涉刀具路径生成	277
6.7.1	干涉分析	278
6.7.2	模型与算法	281
6.8	有理直纹面与等距双 NURBS 曲线设计	285
6.8.1	空间直线和点-线运动的螺旋表示	286
6.8.2	有理直纹面设计及等距双 NURBS 曲线生成	292
	参考文献	298
第 7 章	接触曲面间可行运动空间的表示与计算方法	302
7.1	面-面距离函数与虚接触运动学方程	302
7.1.1	面-面有向距离函数	302
7.1.2	光滑曲面间虚接触运动学方程	306
7.1.3	面-面有向距离函数的微分特性	309
7.2	面-面点接触约束分析及夹持完全约束性判别的二阶方法	314
7.2.1	可行运动空间	315
7.2.2	夹持的完全约束性分析	316
7.3	夹具定位误差分析的双边二次方法	318
7.3.1	夹具定位灵敏度方程	319

7.3.2 夹具定位元布局优化	326
7.4 可达性分析与刀具可达方向锥计算的 GPU 方法	327
7.4.1 刀具可达方向锥	327
7.4.2 刀具可达性分析的可视性方法	330
7.4.3 刀具可达性判别的 GPU 方法	333
7.5 基于可达空间的可制造性分析与刀轴方向整体优化	338
7.5.1 可制造性分析	339
7.5.2 刀轴方向整体光顺	341
参考文献	346

第 1 章 绪 论

1.1 数字化制造

先进制造技术与计算和信息技术相结合,在产品设计、制造工艺、装备和系统的描述、规划、操作和控制等方面发生了深刻的变革,推动产生了数字化制造这一新的学科领域^[1,2],其本质是将计算模型、仿真工具和科学实验应用于制造装备、制造过程和制造系统的定量描述与分析,通过对制造全过程中的复杂物理现象和信息演变过程进行定量计算、模拟与控制,结合科学试验,揭示制造活动乃至产品全生命周期过程中的科学规律,提高制造装备的自律性和适应性,实现对制造过程和产品性能的预测和有效控制,增强制造系统的可维护性和制造信息的可重用性,促使制造活动由部分定量、经验的试凑模式向全面数字化的计算和推理模式转变,实现基于科学的高性能制造。

在数字化制造研究中,与制造装备、制造工艺、制造系统相关的几何量、物理量和物理过程以及人的经验与技能等均需要离散化表示为可由数字计算机处理的数据和模型。制造装备数字化控制,制造过程数字化仿真与优化,以及制造知识、信息的数字化表达、组织和存储是数字化制造的重要体现。与数字化制造紧密相关的概念有虚拟制造、网络制造和智能制造等。虚拟制造的核心思想是用虚拟原型代替物理原型,利用计算机数字仿真技术优化产品设计和工艺过程;网络制造主要研究企业内部及企业间通过网络实现跨地域的协同设计、协同制造、信息共享、远程监控及远程服务,以及企业与社会之间的供应、销售、服务等外部网络应用服务;智能制造旨在将人类智慧物化在制造活动中并组成人机合作系统,使得制造系统能进行分析、推理、判断、构思和决策等智能活动,通过人与智能机器的合作共事,扩大、延伸和部分取代人类专家在制造过程中的脑力劳动,增强制造系统的柔性 with 自治性。数字化制造从不同角度综合了上述制造技术的部分属性,利用数字技术对制造过程和制造系统中的所有对象和活动进行表达、处理与控制,具有信息化、网络化、智能化、集成化和可视化等特征。与虚拟制造、网络制造、智能制造等制造技术相比较,数字制造强调信息集成与知识融合、制造系统和制造过程之间协同、虚拟仿真和数字加工软硬件技术并重,更多关注数字建模、数字加工等底层技术以及制造过程中物理因素对产品质量的影响机理和高速、高精数字制造装备的实现

方法。

当前,在全球化竞争的背景下,高、精、尖装备的生产不断向现代制造工艺与装备的极限能效提出新的挑战,亟须综合运用信息与计算技术、多学科联合仿真方法和科学实验手段,由产品几何精度和物理性能驱动,通过对制造全过程中的复杂物理行为的全方位数字化建模、仿真和优化控制,实现对机械产品成形、成性过程的定量主动控制。发展先进的高精度数字化制造技术已成为世界各国在制造科技竞争中抢占制高点的突破口。

1.2 数字化产品开发

实现产品数字化开发的必要条件是采用计算机能够处理的方式给出产品的描述,建立产品的数字模型,进行产品信息的表示、转换、获取、传递和一致性约束检验^[3,4]。建模过程涉及以下两个基本问题:产品几何、产品性能的数字化建模;基于特征的制造数据存取、操作与分析。数字化产品开发以 CAD/CAM 为典型代表。在设计过程中由计算机辅助完成需求分析、可行性分析、方案论证、总体构思、分析计算和评价以及设计定型后的产品信息传递,传递的信息包括零件的几何和拓扑信息,以及表面精度、公差和材料等制造信息。CAM 系统根据 CAD 系统提供的几何造型信息,自动生成刀具路径和数控加工代码,具有几何造型、零件几何形状显示、交互设计、生成和修改刀具轨迹、加工过程仿真、干涉检查等功能。

CAD/CAM 最初是从设计、制造领域独立发展起来的,后逐步集成,以实现数据共享、通信、交换,以及信息表达的完备性。可制造性分析(manufacturability analysis)强调在设计阶段就要充分考虑制造中的问题,以保证产品具有良好的工艺性、便于加工,减少由于在设计后期发现错误而导致的返工,其基本思想是从产品设计参数中提取与制造过程相关的信息,如产品形状,对制造过程的可行性进行分析,以改善设计。特征技术被认为是现代制造系统中沟通 CAD 与 CAM 的关键因素。研究者们从 CAD、CAPP、NC、GT 和 CAM 等不同领域的认识角度出发,对特征作了多种定义,反映了特征的不同侧面。为达到设计与制造之间的紧密集成,必须获得设计与制造特征之间的映射方法。特征识别可以看做是一种映射工具。在基于特征的产品建模方法中,特征作为设计使用的基本单元,通过操作特征产生设计,显然产品表达能力受到特征库中可获得特征类别数目的限制。目前,特征的概念已在集成设计与制造领域引起广泛的关注。在现代设计中,产品实现的复杂性造成了特征的多视域性。特征不仅依赖于应用领域,而且在一个特定领域的各个专家也可能提出对于特征的不同视角。在一个特定的应用领域,如 DFM 或

者 DFA, 领域规则或约束常常影响特征分解或表达。由于特征的领域依赖性, 应用基于特征的方法的一个关键问题是如何解释多视域性特征, 特别是特征表达之间的转换。此外, 一个 CAD/CAM 系统在运行过程中不仅要处理大量数据, 而且涉及多种数据类型, 包括数值型和非数值型数据、全局静态数据和随着过程产生与变化的动态数据, 因此需要采用工程数据库系统统一管理和维护 CAD/CAM 系统中的数据。现代产品全生命周期设计要求将产品从设计、制造、销售、服务直到报废再生的整个生命周期纳入可持续发展的轨道, 工程数据库在其中起着更为重要的数据集成与一致性维护的作用。

与 CAD 系统正向设计相反, 逆向工程(reverse engineering, RE)是根据已存在的零件或实物模型获得产品 CAD 模型的一种几何建模方法。逆向工程包括产品数字化和模型重构两个阶段。产品数字化过程是根据现有的模型或参考零件, 用测量设备获取其表面各点的空间坐标值; 模型重构过程则由获得的测量数据构造出产品的 CAD 模型。逆向工程技术作为一项多学科交叉融合的新技术, 从发展的初期就以计算机视觉和计算机图形学为研究基础, 以 CAD/CAM 和产品物理仿真为应用对象, 现已成为快速产品开发的一项重要使能工具。目前国内外的工作从总体上看仍然较多局限于对特殊对象、特殊测量数据和特殊建模方法的研究, 对复杂拓扑结构的对象和数据的研究还存在很多困难, 不同领域的研究缺乏沟通。当前的研究重点体现在两个方面: 第一, 针对不断发展的高速、高精度测量设备, 研究智能化的复杂曲面测量、建模和加工的理论的实现方法。这里的“智能”应该体现出这样的一些特点: 对散乱测量数据点、多视和补测数据点的几何、拓扑关系的自动确定; 结合视觉理解方法, 用高层次的几何模型和认识推理机制来指导对测量数据点云中包含的几何特征的智能提取, 从而实现合理的区域分割、模型重构和 NC 代码生成。第二, 将复杂曲面测量、建模与整个快速设计、制造环境有机结合, 特别是正、反向设计相结合, 在产品模型重建时还原产品的设计制造特征以及特征之间的约束, 尽可能按照原设计者的思路进行产品建模。这是由对“快速”和“创新”两方面的要求所决定的, 只有将测量、建模与整个制造环境中的设计修改、性能分析、NC 制造、快速原型制造等模块结合起来, 引入并行设计、反馈设计的思想, 才能彻底发挥其在快速设计中的作用。

快速成形(rapid prototyping, RP)是继数控加工之后的又一项数字制造技术, 其核心是基于离散/堆积成形思想化复杂的三维加工为简单的二维加工, 它的诞生标志着生长型制造技术(MIM, 或称可控添加材料制造, RPM)取得突破性进展, 给制造工艺带来了巨大的变革。20 世纪 90 年代中末期是 RP 技术迅速发展的阶段, RP 技术的迅速发展推动了快速制模(rapid tooling, RT)和快速制造(rapid manu-

facturing, RM)的发展,成功地实现了面向市场的产品造型设计与产品试制的敏捷化,并通过与 CAD/CAM、逆向工程的结合形成了重要的快速产品开发技术。

目前,在产品数字化表达方面,研究最多的模型有几何模型、知识模型、样机模型和物理模型,其中几何模型和知识模型是静态描述性模型,主要用于产品设计和制造,而样机模型和物理模型是动态仿真试验模型,主要面向产品的性能分析。获取产品几何信息的主要手段包括 CAD、逆向工程以及两者相结合的方法。数字样机(digital muck-up)是对物理产品的一种全方位计算机仿真,它通过对分布于不同领域的多维、多层次产品信息进行数字化建模与集成,基于仿真实现从产品设计、制造、装配、使用、维护直至回收整个过程中全部所需功能的测试评价与优化设计,从而取代或精简物理样机。随着 CAE、计算多体力学、三维计算机图形学等技术的发展,数字样机技术在某些方面已经达到了相当先进的水平。例如,美国波音公司利用数字样机技术成功开发出波音 777 客机,使开发周期从过去的八至九年缩短到四年半,缩短了 40%以上,成本降低了 25%,出错返工率降低了 75%,用户满意度也大幅度提高;美国通用汽车公司应用数字样机技术,将轿车的开发周期由原来的 48 个月缩短到了现在的 24 个月,碰撞试验的次数由原来的 100 多次降到 50 次。

1.3 数字化制造的几何基础

大型复杂曲面类零部件作为数字化制造的主要研究对象之一,在运载、能源和国防等行业有着广泛应用,如大型舰船螺旋桨、航空发动机叶轮、汽车覆盖件精密模具等。这些产品直接关系国民经济发展和国防安全,其制造水平代表着国家制造业的核心竞争力。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》(2006—2020)和国家自然科学基金委员会机械工程学科发展战略报告《机械与制造科学》(2006—2010)均将复杂曲面零件设计、制造、测量等关键技术列入制造业重点发展领域的优先主题。近期“高档数控机床与基础制造装备”和“大飞机”等重大专项的开展,更是对关键复杂零件高效、精密制造技术提出了前所未有的迫切需求。

几何学理论和方法是复杂曲面数字化制造的核心内容之一,其研究涉及三类基本问题:

1) 加工成形原理

五轴数控加工是工业中复杂高性能零件高效加工的重要手段,特别是使用非球头刀可以在避免干涉的同时通过调整刀具位置和姿态,使得在刀触点轨迹线附近的带状区域内刀具包络曲面充分逼近理论设计曲面,从而显著提高加工带宽。

五轴数控加工的成形原理为单参数面族包络原理,真实的加工误差为刀具包络曲面相对于工件曲面的法向误差。由于只有在所有刀位都确定之后才能计算刀具包络面,因此如何在单个刀位规划的时候考虑刀具包络面与工件曲面之间的偏差是个非常关键的问题,它直接关系到刀位计算的精度。由于操作上的难度及复杂性,多数文献都采用了近似的简化处理,将刀位规划转化为单个刀位下,刀具曲面与工件曲面间的优化逼近问题,给出的各种刀位优化模型并不能真实地反映实际加工过程,并且现有的方法仅仅适合某种曲面或某种刀具的刀位计算,在通用性、可操作性、稳定性和加工精度方面还有许多需要改进的地方^[5]。要处理好这些问题必须发展新的理论和方法,主要基础理论问题包括:①如何由单个刀位计算刀具包络曲面在刀触点处的三阶近似曲面?即刀具-工件接触特性分析问题;②如何解析表达回转刀具扫掠包络面,及其法向变形关于刀具轨迹调整的微分关系?即刀具扫掠造型问题;③如何生成和局部修改数控系统所支持的样条曲线格式的刀具路径?即“离散刀位→连续刀具路径”生成问题。近些年一些学者已就此进行了有益的尝试^[5~10]。

2) 几何数据处理

随着高速三维测量方法的不断涌现,坐标测量技术在复杂曲面数字化制造中的应用已从最初的几何误差评定和逆向工程扩展到误差源分析、配对加工、自适应加工等多个方面^[11]。特别是原位测量技术的引入,使得“设计-加工-测量”一体化的闭环制造模式成为高几何精度、高物理性能产品快速开发的重要使能技术^[2],其典型流程如图 1.1 和图 1.2 所示。

散乱点云数据处理一般包括数据点云分割和曲面拟合两个环节。数据点云分割的基本原理是根据测量数据的某些特征或特征集合的相似性准则,对数据进行分组聚类,将数据点云划分为一系列“有意义”的区域,然后在这些区域上构造不同的曲面片。曲面拟合时针对不同的应用可以分别调节曲面形状和位姿。曲面识别、重建、寻位、误差评定、分离与补偿等都要求对大规模散乱点云数据依照不同准则及约束进行曲面拟合,计算效率和稳定性问题非常突出。现有方法多是“一把钥匙开一把锁”,仅仅适合某种问题或某种曲面,缺乏规律性认识导致对某一类问题很有效的方法无法扩展应用到其他领域,不同应用领域的先进方法的优点难以集成于一体,特别是对于新出现的问题,需要经过长时期的摸索才能找到合适的方法。维也纳工业大学 Pottmann 教授于 2002~2007 年尝试建立统一的分析方法,取得了一定的成效^[12~14],但该方法仅适用于最小二乘拟合准则,并且不能处理单边约束。要建立散乱点云曲面逼近的统一方法体系,实现高效稳健计算,需要解决以下难题:①描述曲面刚体运动的欧几里得(简称欧氏)运动群 $SE(3)$ 是一个 Lie

群,不是线性空间,如何内蕴地表示群元素的微分增量? ②对于一般的曲面,点-曲面法向误差函数无显式表达式,如何建立其可微性条件及二阶导数的解析计算方法?

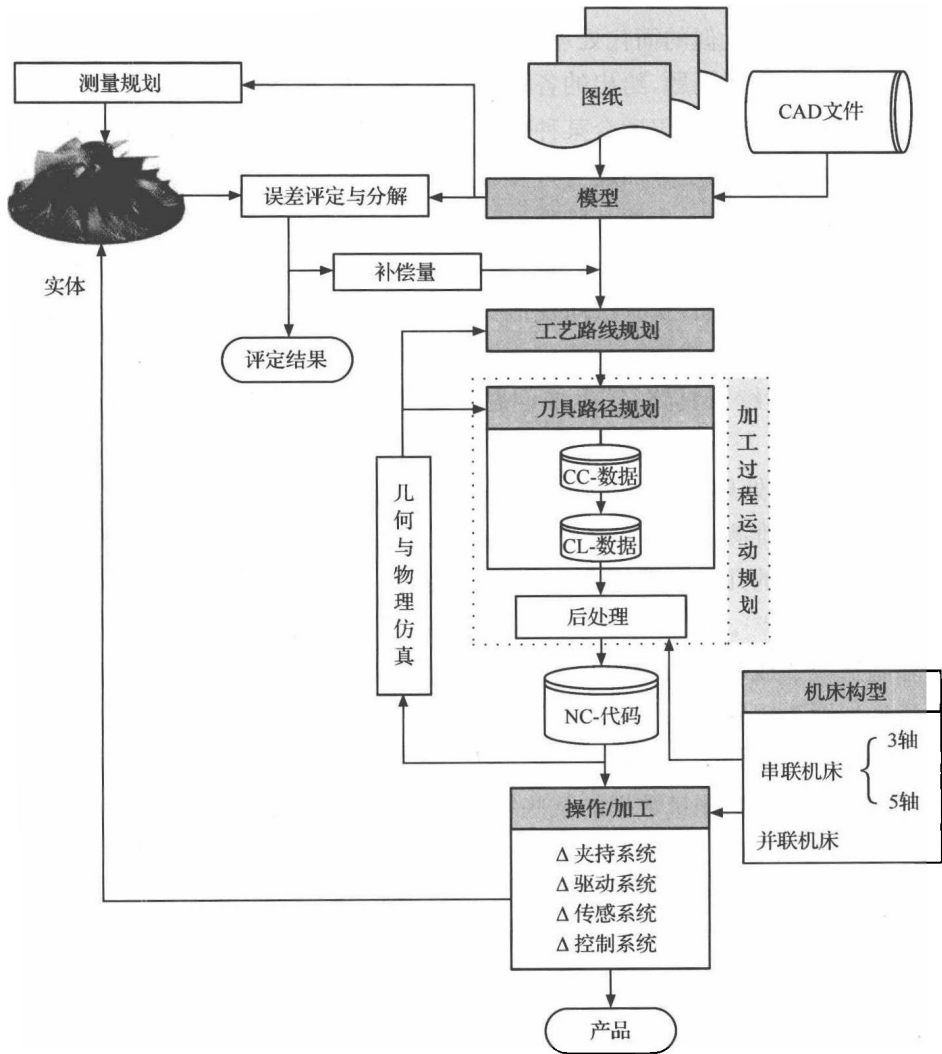


图 1.1 复杂曲面数控加工与“测量-加工”一体化

3) 空间几何推理

空间几何推理主要研究几何体间拓扑关系和几何关系的计算方法,以及这些关系在几何体微分运动/微小变形下的变化规律。在夹具-工件-刀具工艺系统中,工件在夹具定位元的约束下不能做自由运动,而刀具运动时不能与周边环境发生