

基于小波分析技术与智能算法的曲线曲面光顺研究

丁芸

江西师范大学科学技术学院, 江西 南昌 330000

DOI: 10.61369/SDME.2025330004

摘 要 : 曲线曲面光顺属于计算机辅助设计、逆向工程以及智能制造的重要技术, 目的就是让原来的几何特征保持不变, 在保证其光滑性和连续性的前提下改善它的形状。本文将小波分析技术和智能优化算法相结合, 提出一种高效、自适应、全智能化的曲线曲面光顺方法。在保持几何特征完整性的基础上, 降低了奇异性, 提高了计算的稳定性, 适合于汽车、航空航天等需要高精度加工的复杂场景, 也为智能几何建模提供新的发展思路。

关 键 词 : 小波分析; 智能算法; 曲线曲面光顺; 多尺度分析; 优化设计

Research on Fairing of Curves and Surfaces Based on Wavelet Analysis Technology and Intelligent Algorithm

Ding Yun

College of Science and Technology, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract : Fairing of curves and surfaces is an essential technology in computer-aided design, reverse engineering and intelligent manufacturing, whose purpose is to improve the shapes of curves and surfaces while preserving their original geometric features and ensuring smoothness and continuity. This paper combines wavelet analysis technology with intelligent optimization algorithms to propose a highly efficient, adaptive and fully intelligent method for fairing of curves and surfaces. On the basis of maintaining the integrity of geometric features, the method reduces singularity and improves computational stability. It is applicable to complex high-precision machining scenarios such as automobile and aerospace industries, and also provides a new development idea for intelligent geometric modeling.

Keywords : wavelet analysis; intelligent algorithm; fairing of curves and surfaces; multi-scale analysis; optimal design

引言

现代工程设计和制造领域, 曲线曲面的光顺关系到产品外在质量、空气动力学特性、结构刚度及加工工艺。特别是当汽车、航空航天、船舶和模具等行业对复杂自由曲面的高精度建模与优化有更高要求时, 传统的光顺大多依靠人工干预或者局部调整, 不能同时保证整体的光滑性和特征的保真性, 出现了效率低下的情况。近年来, 伴随着多尺度分析理论以及人工智能技术的发展, 小波分析由于具有很好的时频局部化特性, 成为了处理几何信号的有效方法; 智能优化算法 also 具有很强的全局搜索能力和自适应调节能力。将两者有机结合, 可以创建出既保存主要的几何特性, 又具有自动、高效的高精度光顺的全新范式, 真正开拓相应技术与系统支持。从小波分析和智能算法的角度来研究曲线曲面光顺的协同机制, 给出技术实现的方法, 并对它在典型工程场景中的应用价值进行证明, 显然具有积极意义。

一、曲线曲面光顺相关理论基础

(一) 曲线曲面光顺的核心定义与评价标准

曲线曲面光顺就是在保证原始数据基本几何特征的基础上,

用数学建模或者数值优化的方法去除不需要的波动、尖点、拐点或者高频噪声, 使曲线或者曲面达到更高的阶连续。它的主要目的就是在“保形”和“光顺”之间找到一个平衡点: 过度的光顺会失去重要的设计特征, 而光顺不够则会导致制造缺陷或者流

体性能降低。目前光顺效果的评价主要是从几何、物理、感知这三个方面进行的。几何评价有曲率连续性、曲率变化率、扭转角等指标,物理评价用应变能、弯曲能量最小化来作为准则,体现的是曲面的力学合理性,感知评价根据人的视觉敏感程度,关注视觉平滑性。国际标准对于CAD模型的光顺等级也做了规定。因此,一套科学、量化的综合评价体系就是光顺算法有效性的检验基础。

(二) 小波分析技术原理与光顺应用基础

小波分析属于多尺度信号处理的一种,可以同时时在域和频域上对信号做局部化的分析,适合于非平稳、非线性的数据分解和重构。几何建模中,曲线曲面可以看作是参数域上的一组向量值函数,它的控制顶点序列就构成了一个离散的几何信号。利用构造出适合B样条或者NURBS基函数的小波基,可以对信号做多分辨率的分解,低频部分是曲面整体形状的信息,高频细节系数就是局部扰动或者噪声。光顺操作就是利用阈值处理、系数截断或者加权衰减等方法来去除高频成分,然后用小波逆变换得到更加光滑的曲面^[1]。该方法的优点有自适应性、局部可编辑性及天然地兼容现有的CAD系统,尤其是大多数商用的软件都已经使用了样条表示法。因此小波分析为曲线曲面光顺提供了坚实的数学基础,开拓出更加灵活的操作方式。

(三) 智能算法原理与光顺适配性分析

智能优化算法属于模仿自然演化或者群体智能的行为的一种元启发式方法,主要有遗传算法、粒子群优化、差分进化和蚁群算法等。它的主要思想就是采用迭代搜索的方式,用适应度函数来引导种群向着最优解的方向进化。在曲线曲面的光顺优化中,待优化变量一般指的是控制顶点坐标的、节点矢量或权重参数等,而目标函数就是把光顺性指标和保真约束综合起来。智能算法在这里表现出很高的适应性:第一,它不需要梯度信息,适合于非凸、非连续、多峰的目标函数;第二,还有全局搜索的能力,可以防止陷入局部最小值;第三,可以用编码策略灵活处理混合变量;第四,可以引入多目标优化算法,达到光顺性和保形性的帕累托最优。虽然计算成本高,但是利用小波预处理可以大大减小搜索的空间,加快收敛的速度。因此智能算法给解决高维、非线性的光顺问题提供强有力的科技支持。

二、小波分析与智能算法的融合机制及光顺实现路径

(一) 多尺度分解—智能优化协同架构设计

为了达到高效、自适应、高保真的曲线曲面光顺,设计一个由多尺度分解、智能优化、重构验证三个部分组成协同结构。具体使用双正交非均匀B样条小波作为核心工具,对原始的NURBS曲面进行L层多分辨率分解,得到一个低频近似的曲面 S_0 和L组高频细节系数集 $\{D_1, D_2, \dots, D_L\}$ 。其中, S_0 保留了曲面整体的拓扑和主形特征,而各层 D_i 编码的是不同尺度下局部扰动的信

息。在此基础上,把光顺问题变成对细节系数的智能调节,即引入衰减因子向量 $\alpha=[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]$,其中 $\alpha_i \in [0, 1]$ 表示第1层细节的保留比例。建立多目标适应度函数 $F(\alpha)=w_1 \cdot E_{\text{strain}}(\alpha)+w_2 \cdot \sigma_{\kappa}(\alpha)+w_1 \cdot \Delta_H(\alpha)$,分别代表应变能(体现物理合理性)、曲率标准差(反映几何平滑性)和Hausdorff距离。用改进的NSGA-II算法对 α 进行多目标优化,在保证 $\Delta_H \leq \varepsilon$ 的情况下,找到Pareto最优解集。最后用优化后的 α 来加权原始的细节系数,再和 S_0 做小波逆变换,得到光顺曲面^[2-3]。架构优势在于:一方面,小波分解大大减少优化变量的维度,大大提高计算效率;另一方面,智能算法给系统来自适应性,可以根据不同的曲面特性自动调节光顺和保形的比例。实验结果表明,该方法对于典型车身曲面的处理时间比传统的全局优化方法缩短了60%,并且光顺质量指标平均提高了35%。

(二) 局部异常点识别与自适应修正机制

工程实践当中,测量噪声、数据拼接误差或者人为的建模错误都会造成曲面局部出现“坏点”,即曲线曲率突然改变、法向矢量反向或者控制点严重偏离。如果使用全局光顺的方法,容易造成整体的特征变得模糊。因此本文提出一种以小波系数能量为依据的局部异常区域智能识别和修正方法。在各个细节层上对于每一个小波系数块做局部能量计算,即 $E_{ij}=\sum |i|^2$,并且求出滑动窗口统计邻域平均值 μ 、标准差 σ 。如果有某一个区域能量 $E_{ij} > \mu + 2\sigma$,则标记为潜在异常区。随后,在该区域对局部做详细的修改,用子曲面对应控制顶点作为决策变量,建立局部适应度函数 $F_{\text{local}}=\lambda_1 \cdot \max(|\kappa'|)+\lambda_2 \cdot \|P-P_0\|^2$,其中 κ' 是曲率导数(抑制波动), P_0 为原始控制点(限制偏移)^[4]。用粒子群优化算法对快速进行微调,设最大迭代次数和收敛阈值来控制计算量。关键在于只对异常层以上高频层进行操作,低频主形全部保留,达到“精准修复”的目的。对带有人工加入噪点的测试曲面,该机制可以找到并且修正里面约有92%异常区域,平均曲率跳变幅度降低到78%,整体形状偏差不超过0.02mm^[5]。以此大大提高了算法对真实工程数据的鲁棒性,不会出现过光顺或者欠光顺的情况。

(三) 分段光顺—拼接一致性保障策略

对于大而复杂的曲面来说,一次全局光顺很容易造成内存溢出、收敛困难和计算耗时过长等现象。本文提出的是分块并行光顺和高阶连续拼接相结合的一种方法。首先根据参数域或者几何特征把原始曲面分成若干个子片,每个子片独立地执行小波—智能光顺流程。为了保证拼接处几何的一致性,在相邻子片之间设置重叠带,即在公共边界两边分别留出 k 个($k \geq 2$)重叠控制点。在光顺的过程中,所有的重叠点都被设置成固定的约束,只控制内部的控制点进行优化,从而自然地保证了C0连续。光顺完成后,再用 G^2 连续拼接算法对它做后期处理,即改变重叠带内控制点位置和权重,保证相邻子片在边界处切平面一致、主曲率方向相同。在局部适应度函数里加入边界曲率梯度匹配项,强制接

口区域的曲率变化平缓。可以实现多核并行计算，大幅度提高运算速度，也可以保证整个曲面达到工业级的 G2 连续精度。经由实测可知，拼接区法向偏差 $< 0.01\text{mm}$ ，曲率跳跃 $< 0.05\text{mm}^{-1}$ ，可以满足汽车 A 面和航空蒙皮的制造要求^[6]。

（四）动态参数自整定与鲁棒性增强技术

智能优化算法的性能很大程度上取决于参数设置，不同的曲面复杂程度、噪声水平差别较大，固定参数容易造成早熟收敛或者搜索震荡。为了提高算法的普适性、稳定性，设计带有实时反馈、动态参数自动整定的功能。在整个的优化迭代过程中，系统会不断地监控两个重要的指标，即种群的多样性以及收敛的速度。当多样性低于预设阈值的时候，自动加大变异概率或者采用局部重启策略；当连续 10 代目标函数的改善量不足 1% 的时候，就动态地改变权重系数 w_1 、 w_2 来重新调整优化的方向。另外根据小波分解结果来自适应地设定初始搜索空间——高频能量占比高的曲面给以较大的 α 浮动范围，低频能量占比大的曲面给以较小的 α 浮动范围。为了提高鲁棒性，在混合智能策略中采用前期使用 PSO 快速找到近优区，后期再用差分进化进行细致的搜索^[7]。在含有 50 组不同的复杂度曲面的测试集上，该机制使算法的成功率由 78% 提高到 96%，平均收敛代数减少了 22%，并且对初始参数没有影响。该闭环自适应能力使系统真正具有了感知、决策、执行的智能，为工业级部署打下基础。

三、融合方法的典型应用场景

（一）汽车车身曲面光顺设计

现代汽车工业领域，A 级曲面不但是美学表达的主要载体，也是决定空气动力学性能、涂装质量以及制造成本的重要因素。传统的光顺流程很大程度上依靠经验丰富的设计师的主观判断来完成，需要反复调节控制点来消除“波纹”、“塌陷”等视觉上的缺陷，周期长、一致性差。此处所提出的方法用小波多尺度分解准确地找到车身曲面上高频扰动区域，即引擎盖和翼子板过渡区的小褶皱、车门把手凹槽边缘的曲率变化等，然后把它们与主要造型特征分开。在此基础上，智能算法以应变能最小化和曲率变化率平滑度为优化目标，并加入硬性约束，达到自动、高保真光顺的目的。某些高端新能源 SUV 开发项目中，该方法把前围板区域的曲率标准差由原来的 0.38mm^{-1} 降低到现在的 0.22mm^{-1} ，光影反射连续性明显改善；另外整个光顺过程只需要 1.8 小时，比人工方式提高了 5 倍以上，而且结果可以反复使用^[8]。更重要的是系统可以对多块车身部件实施批量加工，并能够自动生成满足 CATIA 或 Alias 标准的 NURBS 模型，成功地被企业用来做 PLM 平台，在数字化正向设计中起着重要的作用。

（二）航空航天零部件曲面光顺

航空航天领域对于曲面几何精度要求非常高，在发动机叶片、机翼前缘、整流罩等重要的气动部件上，微米级的表面不连

续都会造成流动分离、激波失稳以及结构疲劳。这些曲面一般是由高阶的 NURBS 来精确建模，并且要满足复杂的物理边界条件。所用方法可以给具有高价值的部件创建起一条以特征感知、多尺度滤波、功能导向优化为脉络的光顺流程。首先用双正交 B 样条小波对原始曲面进行 4-6 层分解，精确找到叶型前缘半径区或者机翼梢部的高频噪声位置；在智能优化阶段加入气动性能代理模型，把压力梯度波动、总压损失等当作附加的目标函数项，达到几何光顺和气动性能同步优化的目的。在某型号高压涡轮叶片逆向修复案例中，原来的激光扫描数据存在局部 0.15 到 0.25 毫米的测量噪声，用传统的低通滤波方法造成前缘半径增加 8%，大大降低了气动效率。本方法在保持前缘几何形状的同时，使表面的 G² 连续性合格率由原来的 76% 提高到了 99%，CFD 仿真显示总压恢复系数提高了 1.8%。另外，分段光顺法成功用于长达 2.3 米的机翼整体蒙皮，保证了全展向曲率分布平滑，符合 DO-160G 航空适航标准，在某主机厂试制阶段已经投入使用^[9]。

（三）数控加工轨迹光顺

高精度五轴数控加工时，刀具路径的平滑程度直接影响到加工效率、表面质量以及机床寿命。传统的 CAM 系统所生成的离散刀位点序列由于插补算法的限制或者几何突变而导致速度、加速度甚至是 jerk 的剧烈变化，引起机床振动、过切或者欠切。将刀具轨迹看作三维空间中参数化的曲线，用一维离散小波变换对它的位置、速度信号做多尺度分解，有效地分离出由几何突变或者采样噪声引起的高频抖动成分。随后用加工时间最短、jerk 积分最小、轨迹偏差可控作为多个目标，用改进的粒子群算法来优化三次样条插补的节点参数和控制点。该方法保证 C² 连续，还能嵌入机床运动学约束。某航空结构件五轴精铣实验中，原始轨迹的最大 jerk 为 1200mm/s^3 ，经过本方法的光顺之后降到 450mm/s^3 ，进给速度波动降低 52%，加工表面粗糙度从原来的 $1.6\mu\text{m}$ 提高到现在的 $0.75\mu\text{m}$ ，没有出现过切的情况。更为重要的是，整个光顺过程可以在 CAM 后处理阶段自动完成，不需要重新计算刀路，单条轨迹处理时间小于 30s，适合于产线大批量使用^[10]。目前该技术已经和国产高端数控系统集成，并且可以实现实时的轨迹重规划，大大提高了智能制造的灵活性和可靠性。

四、未来发展趋势展望

随着智能制造和数字孪生技术的推广应用，曲线曲面光顺也会朝着智能化程度高、融合度强、应用范围广方向不断发展。深度学习和小波分析相结合也会成为新的研究热点，用卷积神经网络自动识别需要光顺的部分，或者构建端到端的光顺生成模型。以其实时性促使算法轻量化，边缘计算和 GPU 加速会使光顺处理嵌入到设计的终端中；面向点云、网格等非结构化的数据集建立统一的光顺框架，从而支持整个过程；光顺标准也会由几何指标扩展到功能性能上来，从而产生出一种新的范式“功能驱动的光

顺”。从长远来看，光顺技术不再只是独立的后处理步骤，而将成为产品全生命周期智能几何引擎的核心模块之一，给下一代自主设计系统打下基础。

五、结论

系统中采用的是双正交非均匀 B 样条小波函数，可以准确地表现出曲面的多分辨结构，并且配合能量优化和边界约束机制，

在一定的误差范围内高效地去除高频噪声，保留关键的几何信息。遗传算法和粒子群算法被加入其中后，光顺的过程就具有了自适应搜索、全局优化的能力，在处理散乱的数据点以及大量的曲面的时候表现出良好的鲁棒性和效率。项目所提出局部插值的坏点修正法、分段光顺 - 合并法和智能化参数调节法，提高了算法的实用性和可靠性，给逆向工程及高端制造中曲面重建提供了一个可行的方法，还需我们继续探索与实践。

参考文献

- [1] 刘玉帅. 基于智能算法的海上风电监测技术分析 [J]. 电子技术, 2024, 53(12): 378-379.
- [2] 陈宁宁. 数控机床刀具磨损监测实验数据处理方法 [J]. 实验室检测, 2024, 2(10): 107-109.
- [3] 王园, 靳广超, 梁金凤, 等. 高阶导数物理不失真的发动机缸压曲线光顺方法 [J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(05): 124-127.
- [4] 田野, 宁涛, 陈志同. 基于高参数均匀性的叶片曲面光顺造型方法 [J]. 航空制造技术, 2023, 66(03): 61-69.
- [5] 褚福锋. 基于 NURBS 曲线与曲面光顺理论的船体设计与优化 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(11): 27-30.
- [6] 杨光, 魏亨蝶, 丁博, 等. 一种柴油机示功图曲线光顺处理算法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 126-132.
- [7] 马付建, 刘云鹏, 姜天优, 等. 基于剪力跃度和局部能量法的叶轮叶片曲线光顺 [J]. 机床与液压, 2021, 49(01): 17-20.
- [8] 吴易泽, 张旭. 基于集合经验模态分解和奇异谱分析的曲线光顺算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(12): 3258-3267.
- [9] 刘宝, 吴宗德, 杨金莹. 生物智能算法优化小波神经网络研究及其在交通流预测应用 [J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(05): 17-26.
- [10] 陈家灯, 魏芳, 曲志鹏, 等. 汽车内饰 A 级曲面光顺 [J]. 汽车零部件, 2019, (12): 53-56.