

截面相似性零件的自适应测点规划研究

叶建华^{1,2}, 曾寿金^{1,3}, 许明三^{1,3}, 黄卫东^{1,3}

(1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院 福建 福州 350118;

2. 福州大学 机械工程及自动化学院 福建 福州 350116;

3. 福建工程学院先进制造生产力促进中心 福建 福州 350118)

摘要: 针对整个模型统一尺度规划和曲面间的衔接处理困难问题,提出“曲面模型-三角网格模型-截面线-点集-测点集”的规划策略,实现基于曲率特性的自适应测点规划。通过将数字化设计模型转换成统一粒度的密集三角网格模型,实现复杂型面的一致性描述;进而利用三角网格的拓扑信息,提取截面线;在截面线曲率估算的基础上,通过均匀曲线质量进行测量点的自适应规划。结果表明,该研究能以较少的测点反映加工误差。

关键词: 测量规划;曲面采样;截面相似性零件

中图分类号: TH161.21

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)04-0331-05

Research on adaptive measure point planning for parts with similar sections

YE Jianhua^{1,2}, ZENG Shoujin^{1,3}, XU Mingsan^{1,3}, HUANG Weidong^{1,3}

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

3. Advanced Manufacturing Productivity Promotion Center, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: For the problem of uniform scale planning and convergence processing among multiple surfaces, a planning strategy of “curved surface model-triangular mesh model-section line-point set-measuring point set” was proposed to implement adaptive measure point planning based on curvature characteristics. The digital design model was transformed into a uniform granular dense triangular mesh model to achieve a consistent description of the complex surface. The section line was extracted by using the topological information of the triangular mesh. Based on the estimation of the curvature of the section lines, the adaptive measure point planning was performed with an equal division of the curves’ mass. The results of the simulation show that the method can reflect the machining errors with fewer measuring points.

Keywords: measure planning; curved surface sampling; parts with similar sections

在对如涡轮叶片、发动机气道等截面相似性零件进行加工误差评测时,涉及复杂曲面的测点规划问题^[1-3]。由于该类零件的截面在某一个方向上具有相似性,目前大多基于“曲面-曲线-点集-测点集”的策略进行测点的规划研究^[4]。当

零件由多张曲面拼接而成时,容易遇到相邻曲面的关系处理和统一尺度规划困难问题。

三角网格模型是表达复杂形体的有效方法,将复杂曲面统一转换成均匀细粒度的三角网格模型,则可实现整体模型的统一表达,能避免相邻曲

收稿日期: 2018-06-19

基金项目: 福建省科技计划项目(2018H0005);福建省科技区域发展项目(2016H4006);福建省自然科学基金(2016J01202,2016J01723)

第一作者简介: 叶建华(1980-),男,福建宁德人,副教授,博士,研究方向:制造过程自动化与信息化。

线、曲面的衔接处理难题^[5]。另外,工件的加工难度会随着曲率的变化而变化^[6],按曲率进行测点的合理规划,则可在保证精度的前提下,减少测点个数,提升效率。因此,本文在“曲面-曲线-点集-测点集”分解思想的基础上,引入三角网格模型和形状特征评估技术,进行“模型-截面线-点集-测点集”的自适应规划方法研究,实现多张曲面拼接而成的零件的统一尺度规划,达到以较少的测点反映加工误差的目的。

1 测点规划总框架

“模型-截面线-点集-测点集”的自适应规划流程框架如图 1。将多张曲面构成的数字化设计模型通过密集离散采样转换成三角网格模型,以实现复杂曲面模型的统一尺度描述。基于三角网格模型进行截面线的提取,实现三维整体模型到二维截面线的离散。然后将曲率与弧长的乘积作为度量指标,通过单位弧长曲线的弯曲程度进行截面线测点的自适应规划,实现高曲率的区间段比平坦区间段布置的测点更加密集。并将采样点投影回曲面模型,以避免测量点偏离原始曲面。

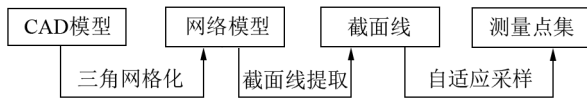


图 1 测点规划流程框架图

Fig.1 Flow chart of measure point planning method

2 测点规划实现

2.1 复杂曲面模型的三角网格化

截面相似性零件的设计模型由多张自由曲面包裹而成,而自由曲面可以由 NURBS 曲面进行统一表达。零件的曲面设计模型离散成均匀细粒度的三角网格模型,即可通过 NURBS 曲面的三角网格化加以实现。

NURBS 曲面的表达式为:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) Q_{ij} W_{ij}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) W_{ij}} \quad (1)$$

式中, Q_{ij} ($i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, m$) 为网格控制顶点; W_{ij} ($i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, m$) 为网络控制点的权值; $N_{i,k}(u)$ 为 NURBS 曲面 u 参数方向

的 B 样条基函数; $N_{j,l}(v)$ 为 NURBS 曲面 v 参数方向的 B 样条基函数; k, l 为 B 样条基函数的阶次。

在 $u \in [0, 1], v \in [0, 1]$ 的二维参数域平面上进行密集间隔采样,并对二维的采样点进行网格化剖分,实现参数域上的网格化离散。然后根据式 (1) 将参数域上的网格顶点映射回欧式空间,实现 NURBS 曲面的网格化。对各张曲面都进行三角网格化剖分,通过边界缝合获得一个完整的三角网格模型,即可实现复杂曲面模型的三角网格化。

2.2 截面线提取

通过三角网格模型与一组平行平面求交获得截面线,以实现三维网格模型到曲线的分解。为了提高截面线的提取效率,通过构建与平面平行相交的体素,缩小首条相交边的搜索范围;进而利用三角网格模型的拓扑信息进行相交截面线的快速提取。提取流程为:

- 1) 获得截交平行平面的法向,定义网格模型的 Z 向与平面的法向一致。
- 2) 构建三角网格模型的最小 AABB 包围盒。
- 3) 平行平面向 Z 向的正负方向偏移给定距离,把最小包围盒按给定的空间分辨率 $L \times L \times L$ 进行栅格化分割,并将与平行平面相交的栅格设为有效栅格。
- 4) 遍历网格顶点,当有顶点落入有效的栅格内时,通过该顶点获得一阶领域边,判断边与平面的相交关系,逐层向外扩张直至找到首条相交的边。
- 5) 在获得首条相交边后,建构三角网格模型拓扑关系。

6) 基于首条相交边和拓扑关系进行截面线的提取:步骤一,根据拓扑信息获得包含该边的三角面片,进而获得三角面片所包含的其它边和顶点,并与平面进行求交判断,获得下一相交顶点或相交边,并得到相交点;步骤二,如果是相交边,返回步骤一,否则交点落在顶点上,通过顶点获得其一阶领域边,并与平面做求交判断,以获得下一相交边并返回步骤一;不断重复上述过程,直到又找到搜索起始边或向两个方向都找到边界边为止。求出与切割平面相交的所有交点,即可得到一个完整的相交截面轮廓。

- 7) 重复步骤 4) ~ 6) 直至获得所有截交线。

2.3 基于曲率特性的自适应采样

通常零件表面的加工难度会随着曲面形态的

变化而变化,其中,曲率是一个关键的度量因素。为了更客观地评判加工误差,在高曲率的区间段应该布置更加密集的测点。因此,将曲率与弧长的乘积作为度量指标,通过单位弧长曲线的弯曲程度进行测点的自适应规划。

曲线的质量^[7]为:

$$m_{\text{cur}} = \int \rho ds \quad (2)$$

式中, ρ 为曲率。

通过等分曲面质量,使得单位曲率密度越大的区间段对应弧长越短,进而实现规划的测量点随曲率变化而自适应调整。又由于通过三角网格模型所截交获得的截面线由小直线段构成,式(2)可转化为:

$$m_{\text{cur}} = \sum_{i=1}^n k_i l_i \quad (3)$$

$$\rho_i = \frac{\sqrt{(l_i + l_{i+1} + h_i)(l_i + l_{i+1} - h_i)(l_i - l_{i+1} + h_i)(-l_i + l_{i+1} + h_i)}}{l_i l_{i+1} h_i} \quad (4)$$

式中, l_i, l_{i+1}, h_i 分别为线段 $p_{i-1}p_i, p_i p_{i+1}, p_{i-1}p_{i+1}$ 的长度。

当截面线不同区间段的曲率变化较大时,容易导致规划的测量点大量聚集在曲率变化大的区间段内,而小曲率区间的规划点过于稀疏。为避免上述情况发生,在归一化处理的基础上添加曲率调整因子。

$$k_i = \frac{\rho_i - \min(\rho)}{\max(\rho) - \min(\rho)} + \eta \quad (5)$$

式中, η 为调整因子, $\eta \in [0, 1]$ 。

通过将质量 m_{cur} 等分成count份,获得截面线上单元分段点,即可得到所规划的测量点。

2.4 测点的曲面投影

在三角网格模型截面上规划的测量点,很少与网格顶点重合的,大多落在三角面片的边上或内部。由于曲面到三角网格离散时,存在离散误差,导致大量规划点偏离原始曲面。因此,需要将规划测点投影回曲面,以消除三角网格离散误差的影响。

规划的测量点 q_i 到原始曲面 $S(u, v)$ 的投影点 q'_i 可以通过牛顿迭代法进行求解。然而牛顿迭代法对初值敏感,不合适的初值容易导致不收敛或局部最优解。利用三角顶点的参数域信息,通过线性插值估算最近投影点,并将其作为牛顿迭代法初值,以保证算法的收敛性能,如图3所示。

式中, k_i 为小线段曲率单量; l_i 为小线段长度。

截面线曲率通过离散小线段的端点进行估算,如图2。

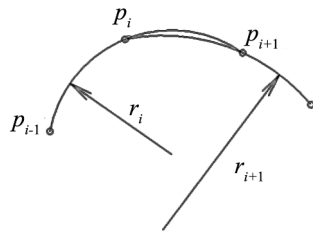


图2 端点圆弧曲率估算示意图

Fig.2 Schematic diagram of end arc curvature estimation

由相邻的3点 p_{i-1}, p_i, p_{i+1} 拟合圆,根据圆的半径 r_i ,即可估算 p_i 处的近似曲率:

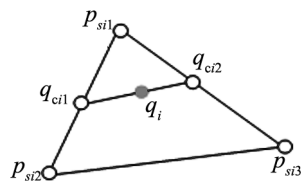


图3 插值估算示意图

Fig.3 Schematic diagram of interpolation estimation

设测量规划点 q_i 在三角面片的内部,该三角面片的顶点为 $p_{si1}(u_{si1}, v_{si1}), p_{si2}(u_{si2}, v_{si2}), p_{si3}(u_{si3}, v_{si3})$ 。则点 q_{ci1} 可通过 p_{si1}, p_{si2} 的线性插值进行估算:

$$q_{ci1} = \tau_1 p_{si1}(u_{si1}, v_{si1}) + \tau_2 p_{si2}(u_{si2}, v_{si2}) \quad (6)$$

式中, τ_1, τ_2 为插值系数,满足 $\tau_1 + \tau_2 = 1$,具体为:

$$\tau_1 = \frac{|q_{ci1} - p_{si2}|}{|p_{si1} - p_{si2}|}, \tau_2 = \frac{|q_{ci1} - p_{si1}|}{|p_{si1} - p_{si2}|}$$

进而可估算 q_{ci1} 在参数域中的坐标值 (u_{ci1}, v_{ci1}) :

$$\begin{bmatrix} u_{ci1} \\ v_{ci1} \end{bmatrix} = \tau_1 \begin{bmatrix} u_{si1} \\ v_{si1} \end{bmatrix} + \tau_2 \begin{bmatrix} u_{si2} \\ v_{si2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

同理,可得 q_{ci2} 在参数域中的坐标值 (u_{ci2}, v_{ci2}) 。根据 (u_{ci1}, v_{ci1}) 和 (u_{ci2}, v_{ci2}) ,可估算 q_i 的坐标值为 (u_i, v_i) 。将估算获得的坐标值 (u_i, v_i) 作为牛顿迭代法的初值,就可获得测量点 q_i 在原始曲面 $S(u, v)$ 上的投影点 q'_i 。

3 实验与分析

以图 4 所示的截面相似性曲面为例,进行基于三角网格截面线自适应测点规划法仿真验证。

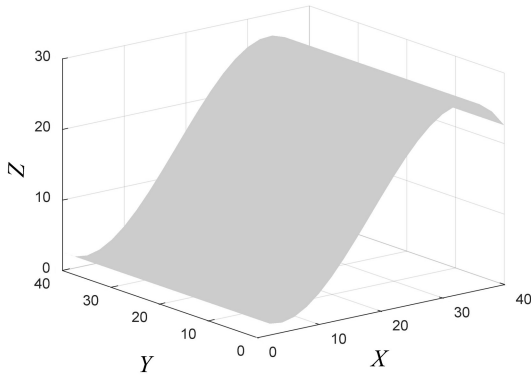


图 4 曲面模型(单位:mm)

Fig.4 Original model of a surface(unit: mm)

将曲面按允许容差 0.08 mm 进行三角网格化,离散成包含 6 728 个顶点、13 272 个三角面片的密集三角网格模型。图 5 为 $y = 20$ mm 处,采用本文获得的 20 个规划点布局图。可见,在曲率大的区域采样点较曲率小的区域密集。

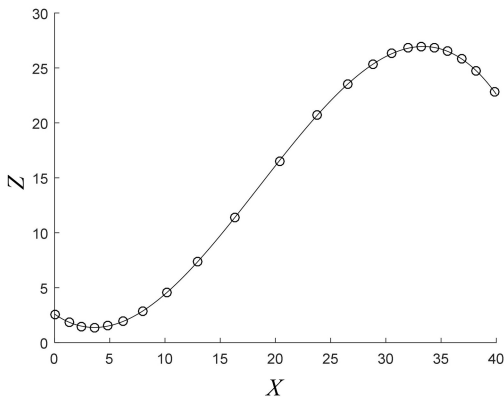


图 5 基于曲率的自适应测点(单位:mm)

Fig.5 Adaptive measure points based on curvature (unit: mm)

在允许容差 0.08 mm 的基础上,再按 1 mm 和 0.5 mm 的容差进行三角网格化离散。其中,1 mm 和 0.5 mm 的容差离散化后,三角网格模型包含的三角面片数分别为 644 个和 1 180 个。同样,在 $y = 20$ mm 处,各规划 20 个测量点,3 种离散精度下的测点布局基本一致,相互间的距离偏

离都在 1 mm 范围内,说明本文的规划方法对三角面片的离散粒度不敏感。在实际应用时,一般取规划测点的 10 倍密度进行三角网格的离散。另外,当基于截面线所获得的测量点未投影回曲面时,规划点偏离原始曲面的误差与离散密度直接相关,随着离散密度的增加,偏离误差变小,但不能消除。而将规划测点投影回原始曲面后,规划的测点就是原始表面上的点,即可消除网格化偏差的影响。

进一步在原始曲面上增加工艺系统噪声和随机测量噪声模拟曲面加工误差,采用参数法、等弧长法和本文方法对误差测量精度进行对比,以验证本文方法的有效性。3 种方法各规划 20、40、60、100 和 160 个测量点。利用测点所对应的模拟曲面测量值拟合曲线,拟合曲线与噪声曲线间的误差均方根体现测量精度。仿真结果如图 6。由图 6 可见,对于不同的测点个数,本文方法较等参数、等弧长法能获得更好的测量精度;随着采样点的增多,三者测量精度的差异减小,到某一饱和值后,三者没有明显差别,从而说明了本文方法能以较少的采样点反映误差情况。

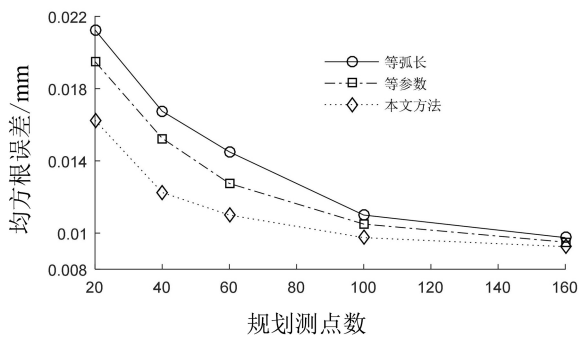


图 6 不同方法对应的误差均方根对比图

Fig.6 Comparison of RMSE from different methods

将本文方法应用于如图 7 涡轮叶片的加工测量中。涡轮为典型的截面相似性零件,设计模型如图 7(a),叶面部分由多张曲面拼接而成。历经三角网格化离散、截面线提取和自适应测点规划,在模型高度 2/3 处,获得图 7(c)的 30 个测量点。基于测量规划点对图 7(b)的加工工件进行截面误差测量,得到截面最大误差为 0.098 0 mm,测点的误差均值为 0.067 6 mm。

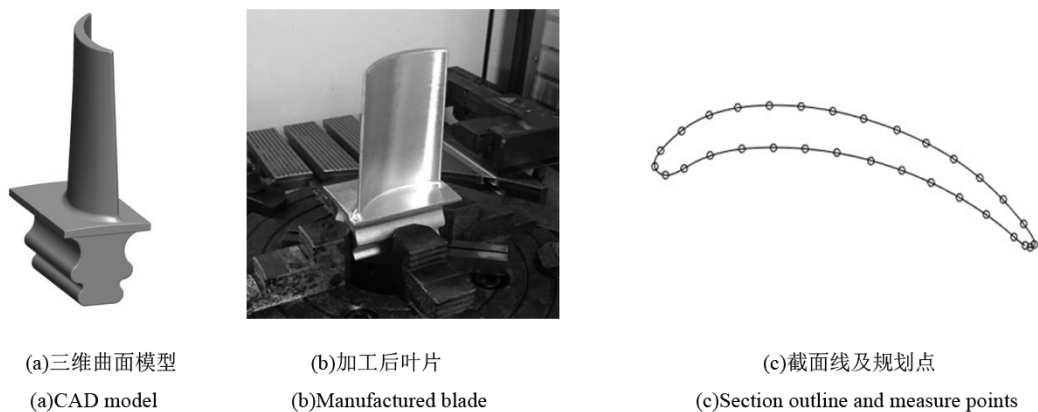


图7 涡轮叶片实例

Fig.7 Example of a turbo blade

4 结论

针对截面相似性零件的特点,构建“模型-截面线-点集-测点集”的测量。对截面线进行曲率估算,基于曲率特征进行测量采样点的自适应规

划。并将三角网格上的测量点投影回原始曲面,避免三角化离散误差对规划测点的影响。从而构建了基于网格形状特征的截面相似性零件的自适应规划方法。通过仿真分析与实验,验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] 周阿维,邵伟,吴莹.应用锥光偏振全息技术的航空叶片测量新方法[J].中国机械工程,2017,28(12):1394-1399.
- [2] 蔺小军,单晨伟,王增强,等.航空发动机叶片型面三坐标测量机测量技术[J].计算机集成制造系统,2012,18(1):125-131.
- [3] 杨海成,王玉,单纯利.航空发动机压气机叶片前后缘测量方法评述[J].航空精密制造技术,2015,51(6):43-45.
- [4] 陈细涛.航空叶片原位检测方法实验研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [5] 陈岳坪,靳龙,卢海燕,等.基于三角网格模型的复杂曲面测点规划[J].机床与液压,2015(23):42-45.
- [6] 陈佳佳,王彪,陈磊,等.基于形心模型的已知自由曲面测量点规划研究[J].机床与液压,2015,43(9):129-131.
- [7] 何改云,贾红洋.基于CAD模型的自由曲面自适应采样策略[J].电子测量与仪器学报,2012,26(10):835-840.

(责任编辑:陈雯)