

引文格式: 李景俊, 芮执元, 剡昌锋, 等. 基于双判定准则的航空发动机叶片缺陷孔洞的边界提取[J]. 航空制造技术, 2021, 64(6): 55-62.

LI Jingjun, RUI Zhiyuan, YAN Changfeng, et al. Boundary extraction of defect hole of aero-engine blades based on double decision criteria[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(6): 55-62.

基于双判定准则的航空发动机叶片缺陷孔洞的边界提取*

李景俊¹, 芮执元¹, 剡昌锋¹, 王文斌², 魏财斌¹

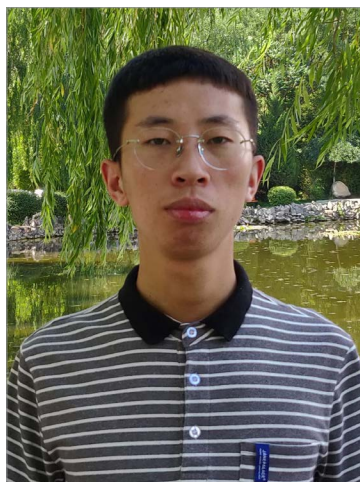
(1. 兰州理工大学机电工程学院, 兰州 730050;

2. 甘肃路桥飞宇交通设施有限责任公司, 兰州 730050)

[摘要] 航空发动机叶片缺陷孔洞的几何形状复杂、位置分布散乱且曲率变化明显,使用单一判定准则难以完整地提取其边界特征点。为实现叶片缺陷孔洞边界的精准提取和孔洞边界线的平滑拟合,提出了一种基于双判定准则的航空发动机叶片缺陷孔洞边界特征点的提取算法。该算法采用K-Dimension tree(K-D树)建立点云的空间拓扑结构,以采样点及其K邻域点为参考依据构建拟合平面,将采样点的空间坐标转化为平面坐标。通过融合采样点的法向夹角判定准则与邻域场力矢量和判定准则,采用加权的方式获得采样点的特征值与判别阈值作为边界特征点的判定依据。通过两组试验验证了该算法的有效性和准确性,试验结果表明,该方法可有效提取复杂缺陷孔洞模型的边界特征点。

关键词: 双判定准则; 航空发动机叶片; 缺陷孔洞; 边界提取; 边界拟合

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.06.055



李景俊

硕士研究生,研究方向为超声无损检测、三维成像。

航空发动机叶片是航空飞行器的核心部件之一,其健康状况直接影响飞行器的安全性能和使用寿命^[1]。涡轮叶片卸载情况复杂,工作环境恶劣,容易造成疲劳损伤,而三维模型的逆向重建是修复受损叶片的关键技术之一^[2]。缺陷孔洞的边界作为表达曲面的重要几何特征^[3],边界特征点的快速、准确提取对于重建曲面模型具有重要意义^[4]。

目前,航空发动机叶片缺陷孔洞的边界提取主要有两种方法,一种是在不确定数据结构的情况下基于三角网格提取缺陷孔洞边界^[5],提取效果较好。但是对于海量点云,网格重构的复杂度高,占用内存空间大,耗时较长。另外,重构中不匹配的相接

系数会产生错误的拓扑结构,导致重建模型结果失真或小孔洞识别失败,影响检测结果的准确性。另一种是基于三维点云的空间特征直接提取边界特征点。Nguyen等^[6]采用区域网格增长算法确定目标网格边界,该算法效率较高,但是没有考虑噪声点对提取结果的影响。王小超等^[7]利用协方差矩阵求得每一个采样点的法向度量,通过对阈值筛选后的特征三角形集进行子邻域划分并拟合每个子类点集的平面,判断采样点是否落在多个平面从而提取边界特征点。刘庆等^[8]建立了点云的空间拓扑关系,基于K邻域内的采样点在微切平面上构建局部坐标系,以矢量合成的原理作为点云分布特性判别准则,

* 基金项目: 国家重大科技专项 (2014ZX04012-015)。

实现边界特征点的提取。刘增艺等^[9]采用 K-D 树建立了每个采样点及其 K 邻域点的空间拓扑关系,并基于 K 邻域点构造微切平面,通过判断微切平面上投影点之间的最大角度值是否大于角度阈值判别边界特征点。Qiu 等^[10]利用空间分割策略对点云模型的最小包围盒进行光栅化,建立了每个离散点的空间光栅索引和拓扑结构,在微切平面上根据邻域内投影点之间的夹角值筛选点云模型的边界特征点。王春香等^[11]提出了一种针对密度不均、几何形状复杂点云模型的缺陷孔洞边界点识别方法,该方法采用相邻向量间角度序列的均值与比例因子的乘积作为最大角度阈值,对于非尖锐边界特征点的检测结果较好。Mineo 等^[12]提出了 BPD 算法判别边界特征点,该算法不需要设定任何阈值参数,通过局部邻域分辨率与邻域投影点在极坐标下的拓扑轨迹判别凹、凸型区域的边界特征点,适用性较好,但是运算复杂度较高。

对于几何形状不规则、采样点密度不均匀、曲率变化明显的航空发动机叶片等复杂形面的点云模型^[13],使用单一判定准则难以完整地提取出多种类型的边界特征点,本文提出一种融合采样点的法向夹角判定准则和邻域场力矢量和判定准则判别边界特征点的方法,提高了边界特征点判别的准确度和适用性。为提高孔洞边界线的可连续性和光滑均匀程度,采用 4 次 B 样条拟合曲线对边界线进行平滑拟合,达到了较好的拟合效果。

基于双判定准则的叶片缺陷孔洞边界提取

1 算法框架

本算法采用 K-D 树建立点云的空间拓扑结构以提高近邻点的搜索效率,通过主成分分析法计算采样点的特征法向量,将采样点法向量与其邻域点法向量之间的夹角序列均值

作为最大夹角阈值。基于 K 邻域点的场力矢量和准则,通过加权的方式获得采样点的特征值与判别阈值作为边界特征点的判定依据。为提高边界线的光滑均匀程度,采用 4 次 B 样条曲线拟合缺陷孔洞的边界线,算法流程图如图 1 所示。

2 基于 K-D 树的 K 邻域搜索算法

数据采集卡收集的点云数据在空间上呈散乱分布,因此需要建立三维点云的空间拓扑结构。近邻域搜索方法主要有栅格划分法、八叉树搜索法、K-D 树搜索法和 R 树搜索法等,其中 K-D 树搜索法具有搜索速度快,效率高等优点,因此采用 K-D 树对采样点数据进行空间结构划分,划分示意图如图 2 所示,可有效降低算法的复杂度,缩短算法的运行时间。

3 缺陷孔洞边界特征点提取

(1) 法向夹角判定准则。

法向夹角判定准则根据相邻采

样点的曲率特征变化实现对尖锐区域特征点的提取。本文基于 K-D 树算法,采用主成分分析法构造采样点 p_i 及其邻域点 q_j 的协方差矩阵 E ,通过求解该矩阵的特征值和特征向量得到采样点的特征法向量,

$$E = \sum_{j=1}^K (q_j - d_j)(q_j - d_j)^T \quad (1)$$

其中, E 为协方差矩阵; K 为邻域内的采样点数; q_j 为 K 邻域内的采样点; d_j 为 K 邻域的质心, $d_j = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K q_j$ 。

对协方差矩阵 E 进行奇异值分解得到其特征值及特征向量,其中,最小特征值对应的特征向量 V_{\min} 即为采样点 p_i 的特征法向量 $n_0 = (a, b, c)$ 。

采样点与其邻域点之间的法向夹角可以反映采样点邻域曲面特征的变化情况。定义 α_i 为任意采样点 p_i 的法向量 n_0 与其 K 邻域点 q_j 法向

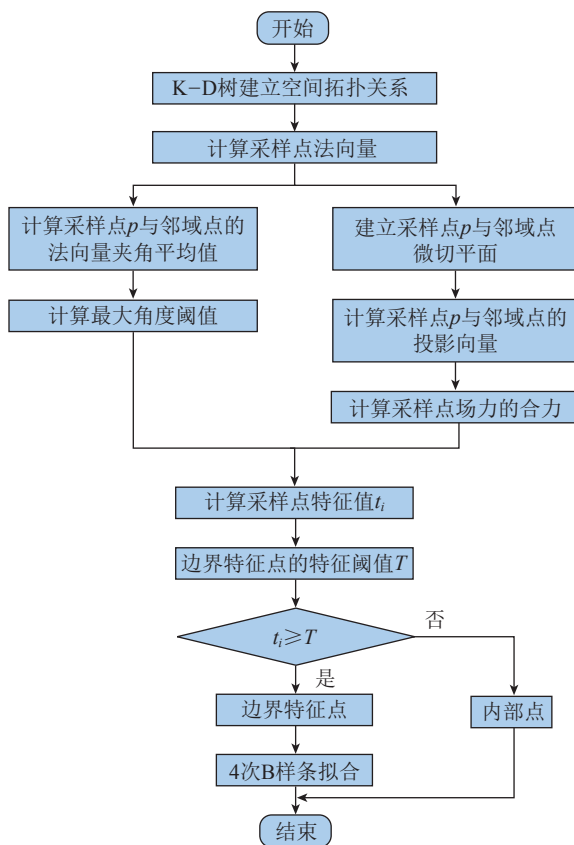


图 1 算法流程图

Fig.1 Flow chart of algorithm

量 n_j 的夹角值,有

$$\alpha_i = \cos^{-1} \frac{n_0 n_j}{|n_0| |n_j|} \quad (2)$$

在处理密度不均匀或边界中存在较多尖锐特征点的曲面时,可能存在边界特征点与较远的某一个非边界特征点形成较大夹角而造成特征点的误判。通过引入近邻域内两采样点之间的欧式距离作为调控系数以提高边界特征点判别的准确性和稳定性^[14]。以采样点与其邻域点之间的法向夹角值代替常规两采样点之间的夹角值,新定义的局部邻域内采样点法向量之间的夹角值 θ_i 和最大角度阈值 θ_t 分别由式(3)和式(4)计算得出,

$$\theta_i = \frac{1}{\|p_i - q_j\|} \cos^{-1} \frac{n_0 n_j}{|n_0| |n_j|} \quad (3)$$

$$\theta_t = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \theta_i \quad (4)$$

θ_i 值的大小反映局部邻域曲面特征的尖锐程度, θ_t 值越大表示该采样点的邻域曲面特征越尖锐,则该采样点属于边界特征点的概率越大。

(2) 邻域场力矢量和判定准则。

邻域场力矢量和判定准则是基于邻域场的合力在同方向增强、反方向削弱的原理对平坦和低曲率区域进行边界特征点的判别。基于采样点 p_i 的法向量方向,通过将 K 邻域内的任意一个采样点的坐标作为构建拟合曲面的约束条件,以 K 邻域

内采样点作为局部平面参考依据构建拟合平面,该拟合平面的法向量为 $n_0 = (a, b, c)$,拟合平面和投影向量如图3所示,投影点处的坐标向量由式(5)计算得出,

$$v'_i = v_i - |(v_i - v_0) \cdot n_0| n_0 \quad (5)$$

其中, $v_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 为平面上的任意采样点处的向量; $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ 为平面外任意采样点处的向量; $v'_i = (x'_i, y'_i, z'_i)$ 为平面外任意采样点到拟合平面上的投影点处的向量。

对于拟合平面上投影点的分布,如果 K 邻域投影点在拟合平面上呈均匀分布,则判定该采样点为非边界特征点。如果其 K 邻域投影点在拟合平面上的分布偏向一侧,则判定该采样点为边界特征点^[15]。如图4所示,定义采样点的投影点 p'_i 为坐标原点,与距离 p'_i 最远的投影点构成向量的方向作为 X 轴方向,以垂直 X 轴的方向为 Y 轴方向。通过将邻域采样点投影到拟合平面上得到邻域采样点的投影点坐标为 $q'_j = (q'_{jx}, q'_{jy})$ 。

如图4所示,采样点的投影点所构成的向量在拟合平面上一般呈无序分布,为计算简便,根据式(6)将投影向量进行单位化处理,单位化后的投影向量如图5所示,令单位化后 K 邻域内采样点的投影点坐标为 q''_j (X_j, Y_j)。

$$p'_i q''_j = \frac{p'_i q'_j}{|p'_i q'_j|} = \frac{(q'_{jx}, q'_{jy})}{\sqrt{q'_{jx}{}^2 + q'_{jy}{}^2}} \quad (6)$$

其中, $p'_i q''_j$ 为单位化后的采样点与其 K 邻域内采样点之间的投影向量; p'_i 为采样点的投影点, q''_j ($j=0, 1, 2, \dots, K-1$ 且 $j \neq i$) 为单位化后的 K 邻域内采样点的投影点。

赋予向量 $p'_i q''_j$ 一个作用力 F_{ij} , 力的方向与其向量方向相同,力的大小等于 $|p'_i q''_j|$,通过计算 K 邻域内投影向量的合力 $\sum F_{ij}$ 在 X 轴和 Y 轴上的分力 $(\sum_{j=0}^{K-1} F_{ij})_X$ 和 $(\sum_{j=0}^{K-1} F_{ij})_Y$ 来判别边

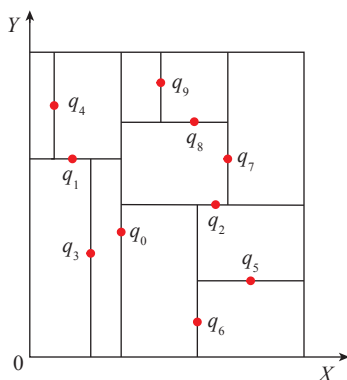


图2 平面数据点的空间划分示意图
Fig.2 Spatial division of plane data points

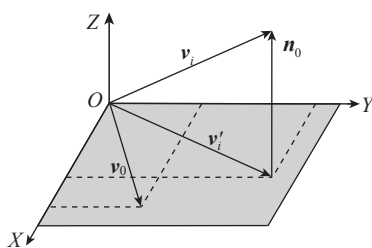


图3 采样点处拟合平面和投影向量示意图
Fig.3 Fitting tangent plane and projection vector

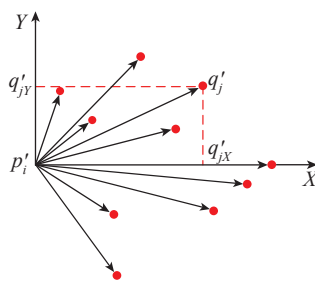
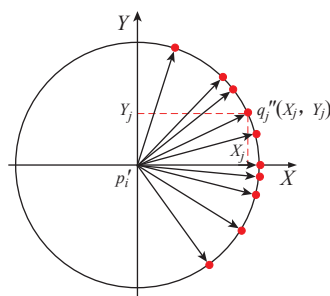
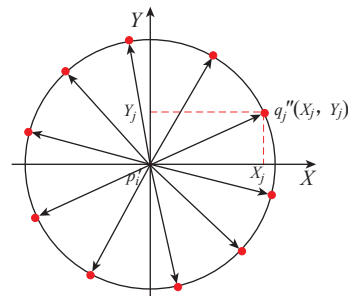


图4 K邻域内采样点的投影示意图
Fig.4 Projection of sampling points in K neighborhood



(a) 邻域内投影点的分布偏向一侧



(b) 均匀分布的邻域投影点

图5 单位化后的投影向量
Fig.5 Projection vector after normalization

界特征点,分力分别由式(7)和(8)计算得到,

$$\left(\sum_{j=0}^{K-1} F_{ij}\right)_X = \left(\sum_{j=0}^{K-1} p_i' q_j''\right)_X = \sum_{j=0}^{K-1} X_j \quad (7)$$

$$\left(\sum_{j=0}^{K-1} F_{ij}\right)_Y = \left(\sum_{j=0}^{K-1} p_i' q_j''\right)_Y = \sum_{j=0}^{K-1} Y_j \quad (8)$$

邻域投影向量的合力在 X 轴或 Y 轴方向上的分力值越大,则该方向上的采样点属于边界特征点的概率越大。因此取邻域投影向量的合力 $\sum F_{ij}$ 在 X 轴或 Y 轴方向上较大分力值作为邻域场力和,记作 F_i 。

为提高缺陷孔洞边界特征点提取的精准度,本算法融合上述两判定准则的优点,引入 μ_1 和 μ_2 分别作为法向夹角判定准则和邻域场力矢量和判定准则的调和系数,采用加权方式实现边界特征点的提取,可获得更加全面、准确的边界特征点提取结果。根据求得的 θ_i 和 F_i ,分别由式(9)和式(10)计算得出数据采样点的特征值 t_i 和判别阈值 T :

$$t_i = \mu_1 \frac{\theta_i}{\theta_i} + \mu_2 \frac{F_i}{F} \quad (9)$$

其中, $\mu_1 + \mu_2 = 1$, F 为邻域内每个采样点在同方向的场力和。

$$T = \frac{\eta}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\theta_i}{\theta_i} + \frac{F_i}{F}\right) \quad (10)$$

其中, η 是特征点数控制系数; N 为初始采样点数。

当 $t_i \geq T$ 时,则判定该采样点为边界特征点。为提高算法的自适应性和准确性,调和系数 μ_1 和 μ_2 的比值关系根据式(11)计算得出:

$$\mu_1 : \mu_2 = \frac{K_1}{K} : \frac{K_2}{K} = K_1 : K_2 \quad (11)$$

其中, K_1 为 K 邻域内 $\theta_i \geq \theta_c$ 的个数; K_2 为 K 邻域内 $|F_i| \geq |F_c|$ 的个数; F_c 为采样点的投影点与其邻域内所有投影点作用力的平均值,

$$|F_c| = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K |F_{ij}|$$

4 基于 4 次 B 样条的缺陷孔洞边界线拟合

对于大多数复杂孔洞工件,其边界多为复杂曲线,常规的 3 次 B 样条拟合的边界线存在较多的锯齿状边缘,不能较好地满足复杂几何形状边界线拟合的需求^[16]。本算法基于欧式距离将相邻的边界特征点建立一个元胞数组,根据由每个元胞数组构成的采样点集,采用 4 次 B 样条拟合曲线可有效地提高算法的精准度和曲线的光滑度。

4 次 B 样条曲线至少需要 5 个控制点,因此在采样点数据的首尾两端分别添加两个补充向量,为了使数据结构更具有周期性,将原始数据中末端和首端两个采样点分别作为数据首尾两端的补充向量,补充后的数据向量为,

$$p^* = (P_{N-1} P_N | p_1 p_2 \cdots p_i \cdots P_{N-1} P_N | p_1 p_2) \quad (12)$$

具体计算步骤如下。

Step (1): 将补充向量作为拟合曲线的初始控制点,第 k 次迭代的控制点记为 $p^{<k>}$,令 $p^{<k+1>} = p^*$ 。

Step (2): 采用 4 次 B 样条矩阵形式,则第 k 次迭代后的近似 B 样条曲线 $s(t)^{<k>}$ ($k \geq 1$) 可以表示为

$$s(t)^{<k>} = s_i(t)^{<k>} = \frac{1}{24} \begin{pmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ t^3 \\ t^4 \end{pmatrix} (p_{i-2}^{<k>} p_{i-1}^{<k>} p_i^{<k>} p_{i+1}^{<k>} p_{i+2}^{<k>}) A \quad (13)$$

其中, $s(t)^{<k>}$ 表示第 k 次迭代的第 i 段 B 样条线, $s(t)^{<k>} = [x_i(t) \ y_i(t) \ z_i(t)]^T$,

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ 11 & -12 & -6 & 12 & -4 \\ 11 & 12 & -6 & -12 & 6 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}。$$

Step(3): 记 $p^{<k>}$ 表示曲线 $s(t)^{<k>}$ 上对应于控制点 $p^{<k>}$ 的坐标,采用

$p^{*<k>} = (p_{N-1}^{*<k>} p_N^{*<k>} | p_1^{*<k>} p_2^{*<k>} \cdots p_i^{*<k>} p_i^{*<k>} \cdots p_N^{*<k>} | p_1^{*<k>} p_2^{*<k>})$ 计算 B 样条曲线 $s(t)^{<k>}$ 上对应的 $p^{<k>}$ 的坐标值,其中, $p^{*<k>} = s_i(t)^{<k>}$ ($i=1, 2, \dots, N$)。

Step (4): 根据迭代误差公式 $e = p^* - p^{<k>}$ 计算第 k 次的迭代曲线与数据点之间的迭代误差是否满足精度阈值要求。若达到精度要求,算法立即终止,输出曲线,若未达到精度要求则转至 Step (5)。

Step (5): 定义新的控制点 $p^{<k+1>} = p^{<k>} + e$, 令 $p^{<k+1>}$ 为新的控制点,循环 Step (2)~Step (4)。

试验结果和分析

1 数据来源及试验环境

试验采用 20MHz 超声换能器,六自由度的机械手(STAUBLI TX90L)夹持叶片以垂直叶片法向量的位姿等间距地移动,叶片的扫查装置如图 6 所示。通过数据采集卡(采集频率: 250MHz)实现航空叶片的原始数据采集,原始数据经过闸门设置和信号预处理后获得超声 C 扫点云数据。

叶片 A 是一块预制多处缺陷孔洞的航空发动机叶片,如图 7 (a) 所示,缺陷孔洞的几何形状不规则、

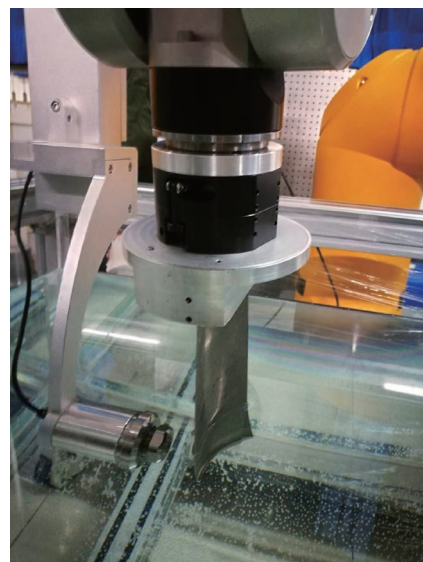


图 6 叶片的超声扫查装置实物图
Fig.6 Ultrasonic scanning device of blade

面积大小不同且位置分布散乱。叶片 B 为一块预制多种尺寸平底孔的航空发动机叶片,实物如图 7(b) 所示。表 1 为两块叶片点云数据的详细信息,表 2 为叶片 B 预制平底孔的尺寸信息。

边界特征点提取试验所使用的计算机的配置参数为: Intel(R) Core i7-7700 HQ, CPU 2.8GHZ, 内存 8GB, Windows 10 专业版 64 位操作系统。

2 试验结果与讨论

基于上述的理论基础,在具有多个复杂形状缺陷孔洞的航空发动机叶片点云模型上进行缺陷孔洞边界特征点的提取试验。分别使用单一判定准则^[9]判别方法和本文所提出的算法进行试验对比分析,试验结果对比如表 3 所示。

研究表明,邻域点数 K 的选取对边界特征点判别结果影响较大,当 K 值较小时不能准确反映该邻域点的分布情况,提取结果中存在较多的误判点,缺陷孔洞边界不清晰; K 值选取较大则会覆盖小孔洞,导致小孔

洞识别失败。 K 值的选取需要根据采样点的密度大小和噪声点的数量确定,本试验的两组数据选用 $K=20$ 均获得较为满意的提取效果。另外,特征点数控制系数 η 用于调节判定阈值的大小进而控制边界特征点的数量,本试验选用 $\eta=0.7$ 获得较好的提取结果。

通过对比表 3 试验结果和图 8 试验效果,使用单一判定准则难以完整地提取出复杂缺陷孔洞的边界特征点,而本算法可有效地提取更多的边界特征点,提高了边界特征点提取的准确度。对比图 9 试验效果,常规的边界点判别方法针对 0.2mm 较小孔洞边界特征点提取效果不佳,而本文采用的加权判断准则可以较完整地提取出小孔洞的边界特征点。引

入两采样点之间的欧式距离作为调控系数,降低了远距离点对特征点判别的影响,对于密度分布均匀或非均匀的点云模型边界特征点提取均具有一定的适用性。对比由 3 次 B 样条拟合的边界线效果与本文采用的 4 次 B 样条拟合的边界线效果(图 10 和 11),发现 3 次 B 样条拟合的边界线中产生较多锯齿状边缘,边界线不够平滑,而本文提出的曲线拟合算法达到较好的平滑效果,提升了复杂形面边界线的可连续性和光滑均匀程度,对于缺陷叶片的模型重建具有一定的实际应用价值。

结论

(1) 对于航空发动机叶片等复杂几何形面,提出一种融合法向夹

表 1 超声 C 扫描点云数据参数

Table 1 Specifications of ultrasonic C-scan point cloud

叶片序号	叶片名称	点云数量 / 个	缺陷区域点云数量 / 个	孔洞数量 / 个
1	Blade A	67834	497	8
2	Blade B	568198	4395	7

表 2 叶片 B 预制缺陷孔洞的尺寸

Table 2 Pre-fabricated defect specifications of blade B

缺陷孔洞序号	距离叶片上边缘的距离 l /mm	孔洞直径 d /mm	孔洞深度 h /mm	孔洞面积 $s/\times 10^2\text{mm}^2$
1	56	0.65	0.40	0.3318
2	62	0.20	0.30	3.142
3	64	0.25	0.25	4.909
4	67	0.25	0.30	4.909
5	71	0.20	0.40	3.142
6	78	0.35	0.30	9.621
7	90	0.45	0.25	0.1590

表 3 试验结果对比

Table 3 Comparison of experimental results

叶片序号	叶片名称	点云数量 / 个	单一判定准则提取特征点数 / 个	本文算法提取特征点数 / 个
1	Blade A	67834	1416	2055
2	Blade B	568198	2396	3786



(a) 叶片 A



(b) 叶片 B

图 7 叶片实物图
Fig.7 Blade photos

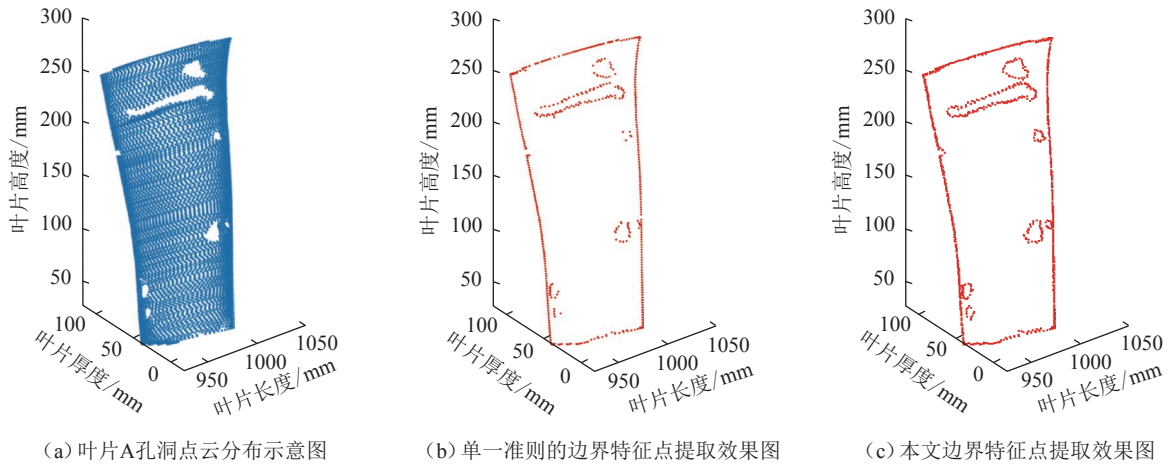


图8 叶片A孔洞边界点提取效果图
Fig.8 Boundary point cloud extraction of blade A

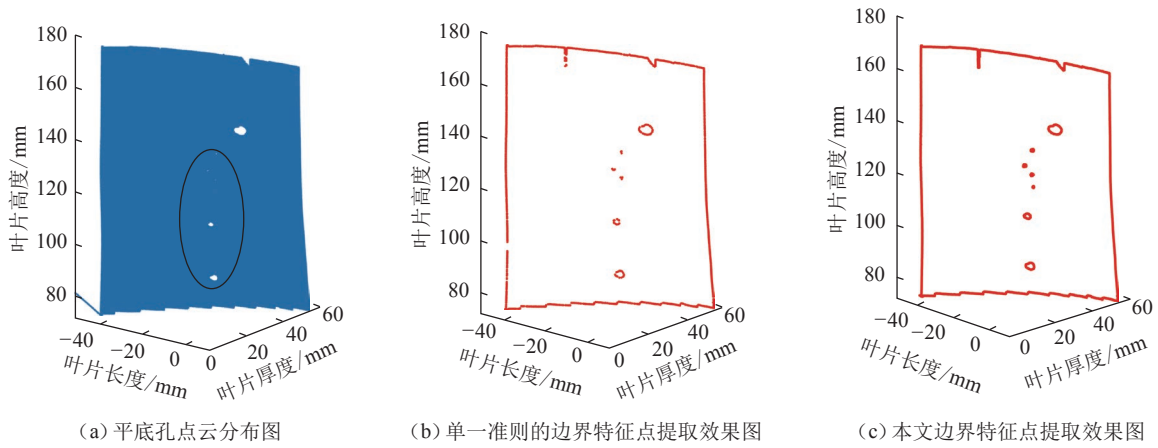


图9 叶片B孔洞边界点提取效果图
Fig.9 Boundary point cloud extraction of blade B

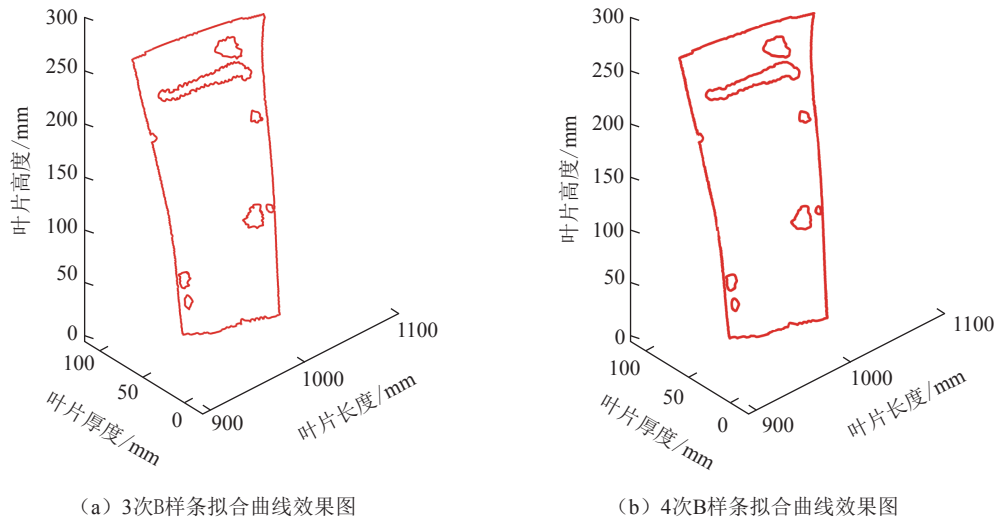


图10 叶片A缺陷孔洞边界点拟合效果对比
Fig.10 Comparison of fitting results of boundary points of defect hole in blade A

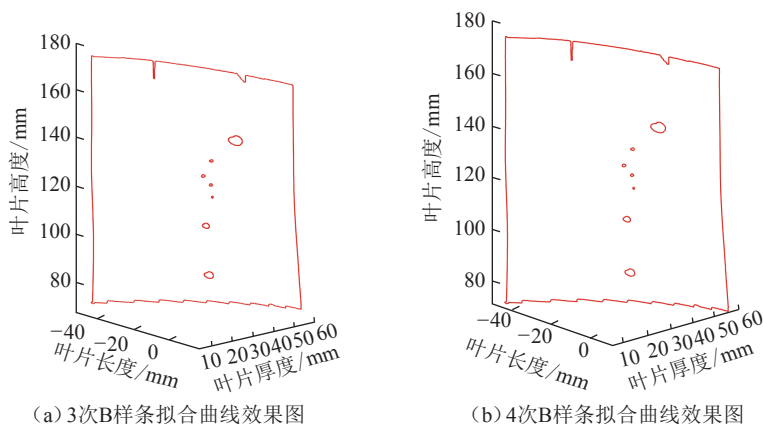


图 11 叶片 B 缺陷孔洞边界点拟合效果对比

Fig.11 Comparison of fitting results of boundary points of defect hole in blade B

角判定准则和邻域场力矢量和判定准则提取曲面模型中边界特征点的方法,试验结果表明,该方法可有效提取出多种复杂孔洞模型的边界特征点。

(2) 针对采样点与邻域点之间夹角过大而造成特征点误判的问题,通过引入两采样点之间的欧式距离作为调控系数,以采样点法向量与其邻域点法向量的夹角代替常规的采样点与其邻域点的夹角值,提高了边界特征点判别的准确性和适用性。

参考文献

[1] LI X Q, JIANG H H, YIN G F. Detection of surface crack defects on ferrite magnetic tile[J]. *NDT & E International*, 2014, 62: 6-13.

[2] 丁华鹏. 航空发动机受损叶片逆向重构与激光熔覆技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.

DING Huapeng. Research on model reconstruction of aero-engine damaged blades and laser cladding[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016.

[3] RAMIYA A M, NIDAMANURI R R, KRISHNAN R. Object-oriented semantic labelling of spectral-spatial LiDAR point cloud for urban land cover classification and buildings detection[J]. *Geocarto International*, 2016, 31(2): 121-139.

[4] JU M, WANG M L. 3D point cloud

hole repair based on boundary rejection method[C]// *Proceedings of the Seventh International Symposium of Chinese CHI on-Chinese CHI' 19*. Xiamen, 2019.

[5] NGUYEN V. 3D Modeling of elevation surfaces from voxel structured point clouds extracted from seismic cubes[D]. Marseille: Aix-Marseille University, 2013.

[6] NGUYEN V S, TRINH T H, TRAN M H. Hole boundary detection of a surface of 3D point clouds[C]//2015 International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP). Ho Chi Minh City: IEEE, 2015.

[7] 王小超, 刘秀平, 李宝军, 等. 基于局部重建的点云特征点提取[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(5): 659-665.

WANG Xiaochao, LIU Xiuping, LI Baojun, et al. Feature detection on point cloud via local reconstruction[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(5): 659-665.

[8] 刘庆, 章光, 陈西江. 融合改进场力和判定准则的点云特征规则化[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 200-209.

LIU Qing, ZHANG Guang, CHEN Xijiang. Point cloud feature regularization based on fusion of improved field force and judging criterion[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 200-209.

[9] 刘增艺, 江开勇, 林俊义. 散乱点云特征边缘交互提取[J]. *计算机工程与应用*, 2016, 52(6): 186-190.

LIU Zengyi, JIANG Kaiyong, LIN Junyi. Interactive extraction of boundary of specified target feature on scattered point cloud[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016,

52(6): 186-190.

[10] QIU X P, ZHANG Y P, ZHOU Y. Automatic extraction of boundary characteristic from non-Closed point cloud model[C]//2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIS). Harbin, 2017.

[11] 王春香, 周国勇, 王耀. 面向自动修补的复杂零件孔洞识别[J]. *机械科学与技术*, 2021, 40(2): 257-261.

WANG Chunxiang, ZHOU Guoyong, WANG Yao. Hole identification of complex parts for automatic repair[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2021, 40(2): 257-261.

[12] MINEO C, PIERCE S G, SUMMAN R. Novel algorithms for 3D surface point cloud boundary detection and edge reconstruction[J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2019, 6(1): 81-91.

[13] 徐春广, 马朋志, 肖定国, 等. 航空发动机叶片机械手无损检测技术[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(14): 42-48.

XU Chunguang, MA Pengzhi, XIAO Dingguo, et al. Robotic nondestructive testing technology for aero-engine blades[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(14): 42-48.

[14] 王庆华, 黄茹楠, 闫晓庚, 等. 基于多判据的散乱点云特征点提取算法[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(5): 1585-1588.

WANG Qinghua, HUANG Runan, YAN Xiaogeng, et al. Feature point extraction of scattered point cloud based on multiple criterions[J]. *Application Research of Computers*, 2019, 36(5): 1585-1588.

[15] 吴禄慎, 晏海平, 陈华伟, 等. 一种基于散乱点云的边界提取算法[J]. *计算机应用与软件*, 2014, 31(11): 264-268.

WU Lushen, YAN Haiping, CHEN Huawei, et al. A boundary extraction algorithm based on scattered point cloud[J]. *Computer Applications and Software*, 2014, 31(11): 264-268.

[16] 陈涵宇, 蒋勇. 基于四次 B 样条的曲线逼近算法[J]. *计算机工程与科学*, 2017, 39(8): 1489-1494.

CHEN Hanyu, JIANG Yong. An approximate algorithm based on quartic B-spline curves[J]. *Computer Engineering & Science*, 2017, 39(8): 1489-1494.

通讯作者: 荆昌锋, 研究员, 博士生导师, 研究方向为故障诊断与预测、机械强度理论以及人工智能等, E-mail: changf_yan@163.com.

Boundary Extraction of Defect Hole of Aero-Engine Blades Based on Double Decision Criteria

LI Jingjun¹, RUI Zhiyuan¹, YAN Changfeng¹, WANG Wenbin², WEI Caibin¹

(1. School of Mechanical and Electronical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu Luqiao Feiyu Transportation Facilities Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

[ABSTRACT] Due to the complex geometry, scattered position distribution, and obvious curvature change of the defect holes in aero-engine blades, it is difficult to extract the boundary feature points completely by using a single criterion. To realize the accurate boundary extraction of blade defect holes and smooth fitting of the holes boundary line, an algorithm for extracting boundary feature points of aero-engine blade defect holes based on double criteria was proposed. The fitting plane was established based on the spatial topological structure of the sampling point and its K neighborhood points, which transformed the three-dimensional coordinates into two-dimensional coordinates by the local coordinate system. By fusing the criterion of the normal angle of sampling points with the adjacent field power force criterion, the eigenvalue and discrimination threshold of sampling points are obtained by the weighted method, which can be used as the criterion for extracting boundary feature points. The validity and accuracy of the algorithm were verified by two sets of experiments, the experimental results demonstrate that the method can effectively extract the boundary feature points in complex holes model.

Keywords: Double criteria; Aero-engine blade; Defect holes; Boundary extraction; Boundary fitting

(责编 阳光)

(上接第 54 页)

Science and Technology, 2011, 22(9): 094019.

[15] 魏磊. 触针式轮廓仪传感器静态及动态特性检定系统研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

GUO Lei. Verification system for static and dynamic characteristics of stylus profilometer sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.

通讯作者: 常素萍, 讲师, 博士, 研究方向为光学精密测量技术及仪器、表面测量及分析、精密工程, E-mail: Changsp@mail.hust.edu.cn.

Research on Radial Dynamic Performance of Air Bearing Support Stylus Measuring System

WU Yunquan, CHANG Suping, WU Hao

(School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[ABSTRACT] The stylus surface topography measuring instrument is widely used in production and scientific research. Because of its structure, the lever stylus will produce nonlinear error in measurement, which will affect the accuracy of measurement results. This paper introduces a kind of air bearing stylus measuring sensor. The movement direction of the stylus axis is consistent with the displacement measurement direction, which effectively avoids the nonlinear error. In the research, the movement model of the air bearing stylus measuring system is established, the dynamic and static characteristics of the measuring system are analyzed, the factors affecting the radial dynamic performance of the air bearing support are studied, the theoretical simulation of radial stiffness and dynamic parameters is carried out, and the maximum scanning frequency of the sensor is 125Hz through the dynamic characteristic test and analysis; the air bearing stylus surface topography measurement system is built and the measurement experiment is carried out, and the relative error of the sensor measurement is 0.8%.

Keywords: Surface topography measurement; Stylus displacement sensor; Air bearing; Radial dynamic performance; Modal identification

(责编 阳光)