

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.05.017

叶片边缘破损曲面再生修复技术研究

李栋栋¹, 李树军¹, 曾一健¹, 贺志辉¹, 桑涛²

(1. 西北工业大学机电学院, 西安 710072; 2. 陕西飞机工业有限责任公司, 汉中 723000)

摘要: 发动机叶片长期在高温、高压和高速下工作, 工作过程中有异物进入, 不可避免地会发生损坏。对于弯扭叶片边缘破损曲面的修复, 本文采用基于邻近破损域未破损区域的完整叶片截面线与破损域叶片截面线的完好部分配准, 获得边缘破损处的叶片截面线点云特征, 实现破损曲面再生重构。同时, 采用迭代最近点 (Iterative closest point, ICP) 配准算法, 克服了搜索最近点集耗时较长的缺点。本文提出的基于建立辅助圆邻域的最近点集对搜索方法, 大大降低了配准时间成本。最后对破损域再生曲面进行了光顺性分析, 验证本文所提出的边缘破损曲面再生修复方法的可行性。

关键词: 发动机叶片; 叶片截面线配准; 最近点集搜索; 辅助圆邻域; 破损曲面再生

中图分类号: V232.4; TP391.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)05-0905-09

Research on Regeneration Technology of Damaged Blade Edge Surface

LI Dongdong¹, LI Shujun¹, ZENG Yijian¹, HE Zhihui¹, SANG Tao²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Shaanxi Aircraft Industry Co. Ltd., Hanzhong 723000, China)

Abstract: Engine blades work at high temperature, high pressure and high speed for a long time. Foreign bodies enter during the working process, and inevitably damage occurs. For the repair of damaged surface at the edge of curved and twisted blades, this paper adopts the allocation criterion based on the intact section line of intact blade in the adjacent undamaged area and the intact part of the blade section line in the damaged area to obtain the point cloud feature of the blade section line at the damaged edge and realize the regeneration and reconstruction of damaged surface. At the same time, the iterative closest point (ICP) registration algorithm is used to overcome the shortcoming of searching the nearest point set for a long time. The closest point pair search method based on auxiliary circular neighborhood is proposed to reduce the registration time cost. Finally, the smoothness of the damaged surface is analyzed to verify the feasibility of the method proposed in this paper.

Key words: engine blade; blade section line registration; nearest point set search; auxiliary circular neighborhood; regeneration of damaged surface

航空发动机叶片作为航空动力装置的核心零部件, 长期在振动、噪声、腐蚀、高温、高压和高转速下工作, 以及在工作过程中有外物进入, 极易受损^[1-3]。如果有缺陷或损坏的发动机叶片在使用后直接丢弃, 将造成巨大的贵金属浪费和经济财产损失^[4]。因此, 对于损伤叶片的修复有着重大意义和

工程应用价值^[5]。

对于发动机叶片边缘破损曲面修复技术, 陈振林等^[6]基于同期服役的相邻叶片与待修复损伤叶片在变形方式和大小几乎是相同的思想, 将同期工作服役非损伤叶片与损伤叶片进行对比识别, 构建出待修复目标曲面, 此方法不需要叶片的原始设计

收稿日期: 2022-12-07; 修订日期: 2023-05-29

通信作者: 李树军, 男, 副教授, E-mail: npusjli@nwpu.edu.cn。

引用格式: 李栋栋, 李树军, 曾一健, 等. 叶片边缘破损曲面再生修复技术研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(5): 905-913. LI Dongdong, LI Shujun, ZENG Yijian, et al. Research on regeneration technology of damaged blade edge surface[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(5): 905-913.

模型,最后通过实验验证破损曲面待修复区域与未破损区域能够实现光滑过渡,但其并未考虑在叶片制造、装配过程中存在的误差所导致相邻位置服役的叶片发生不同程度的变形。Wang等^[7]提出了一种重建小尺度叶片破损区域截面曲线的方法,将截面曲线分为前缘、后缘、吸力侧和压力侧4部分,通过构建4次多项式函数方程对未破损区域的截面曲线拟合,并求得多条未破损区截面曲线多项式函数方程的系数,推导估算破损区域4次多项式函数方程系数,构建破损区域截面曲线,最后对推导结果进行误差分析,这种方法只适用于修复小的破损区域。Rong等^[8]对于已知叶片设计模型场合,基于理论设计模型的自由变形,运用迭代最近点ICP配准算法,将叶片设计截面曲线与待修复叶片截面测量点云数据经多次迭代配准至给定距离精度,然后,基于自由形式变形(Free-form deformation, FFD),调整B样条曲线的控制顶点,使之与测点完全适应,从而得到损伤叶片的截面曲线。吕学庚^[9]利用叶片截面线的典型特征,发现横向(u 方向)截面轮廓曲率变化较大,而沿叶片高度方向(v 方向)曲率变化较小,提出了一种基于相邻未损伤截面线迭代变形的损伤截面线修复方法。该方法的主要过程如下:首先提取相邻损伤部位的未损伤剖面线作为参考剖面线;然后对参考截面线和破损截面线的测点进行配准,对距离参考截面线最近的破损截面线进行修复;依次迭代此过程,完成叶片所有损伤区域的曲面重构修复,但该方法在配准时间成本花费较大。Beal等^[10]在1992年提出经典ICP算法即迭代最近点算法。但经典ICP算法在求解最近点集时采用的是全局遍历搜索的计算方法^[11],对于点集规模为 n ,其平均时间复杂度为 $O(n^2)$ 。该方法具有较高的计算时间成本。为减小时间的复杂度,提出了最近邻域搜索算法,目前最常用的有:八叉树法^[12]、空间单元格法^[13-14]和K-D tree法^[15],提高了破损截面线和参考截面线的效率。

由上可知,对于叶片边缘破损曲面修复,大部分学者采用获取破损叶片截面线点云数据特征来实现破损域曲面再生重构。为了获取损伤叶片的截面线,考虑到叶片加工的生产误差和服役过程中的自适应变形,不能直接使用理论设计模型指导修复加工,本文采用基于邻近破损域未破损区域的完整叶片截面线与破损域叶片截面线的完好部分配准,利用叶片截面线点云数据在损伤边缘处的特征,实现损伤表面的再生与重建,如图1所示。同时为克服两者配准时,采用经典迭代最近点(Itera-

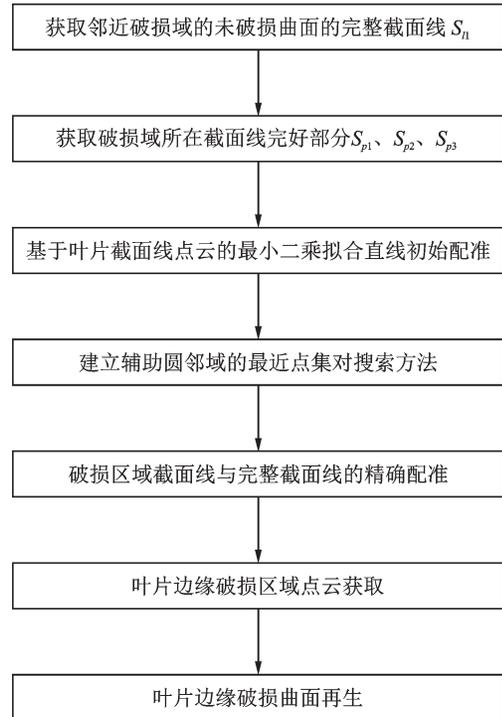


图1 叶片边缘破损曲面再生修复

Fig.1 Blade edge damaged surface regeneration repair

tive closest point, ICP)算法在搜索最近点集时花费时间较长缺点,本文提出基于建立辅助圆邻域的最近点集对搜索方法,减小了配准时间成本。

1 发动机叶片截面线获取

叶片截面线是发动机叶片设计的重要几何参数,直接决定了叶片的气动性能。对于叶片破损曲面修复,所获取的叶片截面线精度更是直接影响后续叶片曲面修复的质量。对于叶片截面线的获取,最常用测量设备为三维激光轮廓扫描仪,在与待检测叶片无接触的情况下获得其型面轮廓信息,可以在短时间内获得上万数量级的表面点云,效率较高^[16]。本文选用三坐标测量机获取叶片截面线点云数据,根据截面线曲率半径变化的大小,采用“弦高差法”^[17]。

如图2所示, A 、 B 、 C 为曲线上3点,在 A 、 B 间距离较小时,可以把圆弧 AB 看做是圆形边界上的

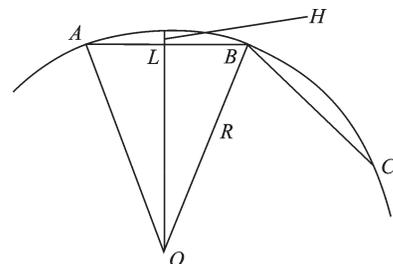


图2 弦高差选点示意图

Fig.2 Diagram of chord height difference selection points

两点,这时 R 为它们的曲率半径, O 为圆心,而弦长 L 为

$$L = 2 \times \sqrt{R^2 - (R - H)^2} \quad (1)$$

弦长 L 也即是 $A、B$ 间的距离。在已经获取了各点曲率半径的情况下,给出固定的弦高差 H ,就可以获得满足弦高差要求的曲线上两点间的距离,也即是图中的弦长。以此为判据可以在程序中实现通过给定弦高差选择所需测点。如图 3 所示的弦高差选点算法流程。

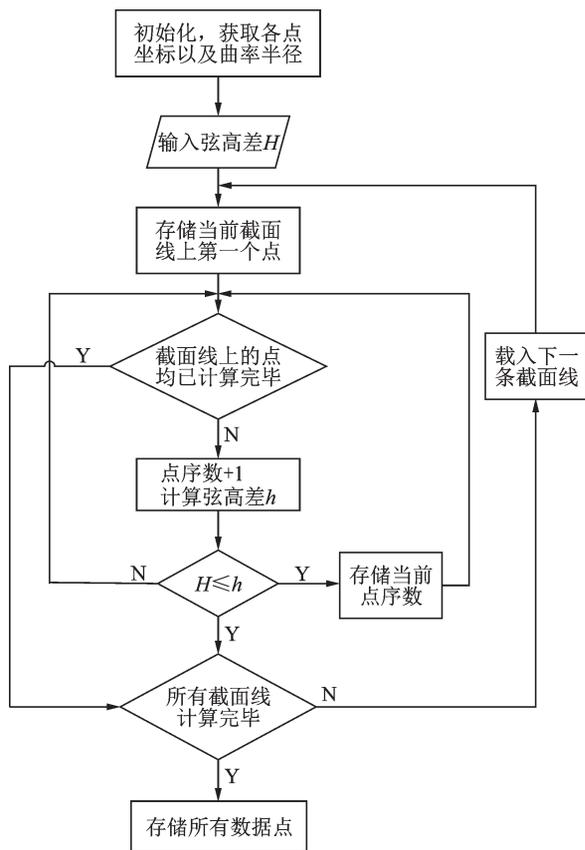


图 3 弦高差选点算法流程

Fig.3 Algorithm flow of chord height difference point selection

2 发动机叶片截面线配准

对于边缘破损的发动机叶片曲面修复,获取叶片邻近破损域下方的未破损域的完整截面线记为 S_{n1} ,以及破损域截面线的完好部分记为 $S_{p1}、S_{p2}、S_{p3}$,如图 4 所示。通过对邻近破损域的未破损曲面的完整截面线 S_{n1} 作平移旋转变换,使其与破损域截面线 $S_{p1}、S_{p2}、S_{p3}$ 完好部分配准,即可获得边缘缺损区域的截面线点云特征,重构出破损域的待修复曲面。

2.1 初始配准

为快速获得叶片破损区域的截面线信息,首先对其进行初始配准,以使截面线 S_{n1} 与截面线

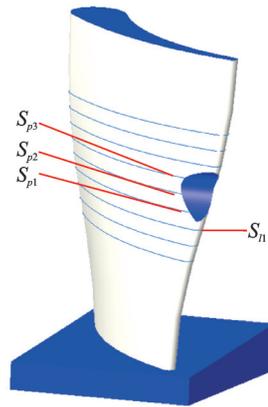


图 4 叶片截面线示意图

Fig.4 Schematic diagram of blade section line

$S_{p1}、S_{p2}、S_{p3}$ 之间不会产生方向上的错误,因此可以在以后实现准确的配准。本文采用基于叶片截面线点云的最小二乘拟合直线进行初始配准,操作流程如下:

(1) 首先获取叶片截面线点云数据信息,即叶片截面线 S_{n1} 和破损区域截面线 $S_{p1}、S_{p2}、S_{p3}$ 。

(2) 由于叶片截面线之间都是平行的,故将其邻近破损域的完整截面线 S_{n1} 分别投影到 S_{p1} 截面线所在的平面上,如图 5 所示为截面线 S_{n1} 投影到破损区域截面线 S_{p1} 所在的平面,其弦线方向一致,并未发生方向错乱现象。

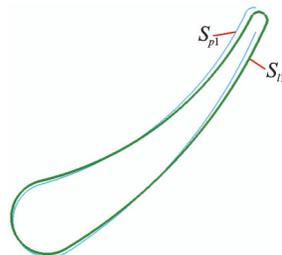


图 5 截面线 S_{n1} 投影到破损区域截面线 S_{p1} 所在的平面

Fig.5 Section line S_{n1} projected onto the plane with the section line S_{p1} of the damaged area located

(3) 取叶片截面线 $S_{n1}、S_{p1}$ 的最小二乘拟合直线分别记为 $l_1、l_{p1}$,由两直线的斜率求得两直线之间的夹角 θ_1 ,如图 6 所示。设参考数据点集为直线 l_1 上的点,记为 P ,目标数据点集为直线 l_{p1} 上面的点记为 M ,即可获取初始旋转矩阵 R'_1 ,再通过求解初始平移变换矩阵 T'_1 将两直线对齐。求旋转矩阵 R'_1 和平移矩阵 T'_1 的步骤如下:

Step 1 分别求点集 P 和 M 的重心 \bar{P} 和 \bar{M} 。

Step 2 以重心原点为三维坐标系,重构源数据点集和目标数据点集坐标系,即求取:

$\begin{cases} P'_i = P_i - \bar{P} \\ M'_i = M_i - \bar{M} \end{cases}$,并以 P'_i 和 M'_i 作为下一步的运算数据,以简化运算。

Step 3 以 P'_i 和 M'_i 为基础构造矩阵 H , $H = \sum_{i=1}^N P'_i M'^T_i$ 。利用奇异值分解算法^[18]分解矩阵 H , 得到 $H = U\Lambda V^T$, 得到矩阵 U 和 V 。

Step 4 由矩阵 U 和 V , 运算 $\begin{cases} R = VU^T \\ T = \bar{M} - R\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i - R \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P'_i \end{cases}$ 得到旋转矩阵 R'_i 和平移矩阵 T'_i 。

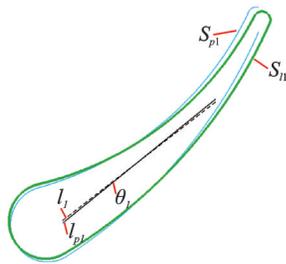


图6 截面线 S_n, S_{p1} 的最小二乘拟合直线 l_i, l_{p1}
Fig.6 The least square fitting lines l_i and l_{p1} of cross section lines S_n and S_{p1}

但截面线 S_n 的最小二乘拟合直线 l_i 与截面线 S_{p1} 的最小二乘拟合直线 l_{p1} 重合对齐后,有可能会有发生以下状况,如图7所示,即两截面线之间存在一定的平移偏差(也即 Q_{n1} 点与 Q_{p1} 点偏差较大)。

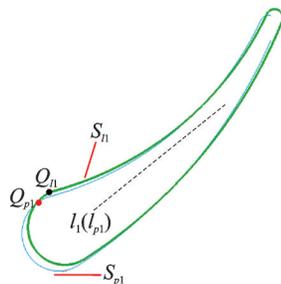


图7 Q_{n1} 点和 Q_{p1} 点位置示意图
Fig.7 Location diagram of point Q_{n1} and point Q_{p1}

因此通过调整平移变换矩阵 T'_i 使 Q_{n1} 点与 Q_{p1} 点重合,其中截面线 S_n 上的 Q_{n1} 点与截面线 S_{p1} 的 Q_{p1} 点获取的基本思路为:对叶片截面线轮廓的点云数据进行最小包容区域的直线逼近,获得最小包容区域的逼近直线与截面轮廓线的相切点 Q_1 和 Q_2 ,即弦线 Q_1Q_2 。作弦线 Q_1Q_2 的垂线与轮廓线相切于 T_1 和 T_2 。这4个点即为前、后缘上的特征点,以 Q_1, T_1 之间的点为前缘点初始范围, Q_2, T_2 之间的点为后缘点初始范围^[19],如图8所示。

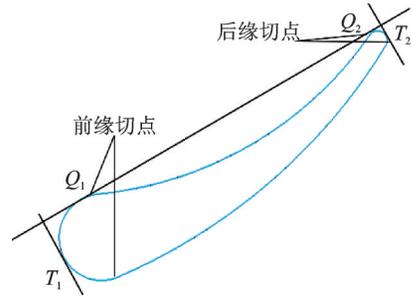


图8 点云数据分区原理图
Fig.8 Principle diagram of point cloud data partition

(4)再次将截面线 S_{n1} 分别投影到 S_{p2}, S_{p3} 截面线所在的平面上,重复步骤3,获取初始配准的平移矩阵 T'_2, T'_3 与旋转矩阵 R'_2, R'_3 。

(5)至此已完成破损区域所有截面线的初始配准。

由图9初始配准结果可以看出,叶片边缘点云数据的缺失对其初始配准的精度影响不是很敏感,叶片邻近破损域的完整截面线 S_n 与破损区域截面线 S_{p1} 的完好部分有较好的配准效果,但从其局部放大的细节还可以看出截面线 S_n 与截面线 S_{p1} 还存在一定的误差,同时由于破损截面线部分点云数据的缺失,造成 Q_{n1} 与 Q_{p1} 这两点的获取并不一定非常准确,因此需要对其进行更为精确的配准操作,提高损伤区域再生表面的重建精度。

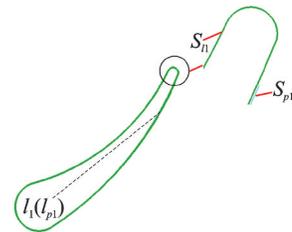


图9 初始配准后的两截面线
Fig.9 Two cross section lines after initial registration

2.2 基于建立辅助圆邻域的最近点集对搜索方法

为提高再生曲面的重构精度,需要完整的无损区域截面线 S_n 分别与破损域截面线的完好部分 S_{p1}, S_{p2}, S_{p3} 进行精确配准。对于点云数据的精确配准,结合叶片截面线的特性,即截面线在叶高方向上是平行分布的。同时前面已将邻近破损域的完整截面线 S_n 分别投影到了破损域截面线 S_{p1}, S_{p2}, S_{p3} 所在的平面上,并完成了初始配准。对于精确配准的最近点集对搜索,假设将截面线 S_n 的点云 $q_i, q_{i+1}, q_{i+2}, \dots$ 和截面线 S_{p1} 的点云 $p_{1,i}, p_{1,i+1}, p_{1,i+2}, \dots$ 一一对应,其实并不合适。如图10所示, $p_{1,i}$ 所对应的最近点为 q_i ,但发现对于 $p_{1,i+1}$ 点,选取 q_i 点或 q_{i+1} 点都不合适,两截面线之

间的数据不可能总是一一对应,对于这种问题的解决,提出了改进的最近点集对搜索算法,通过建立辅助圆邻域进行最近点集对的搜索。

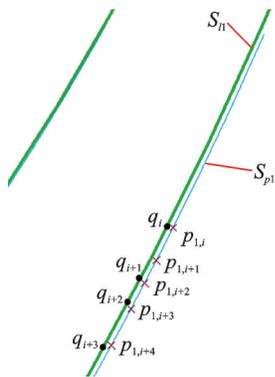


图 10 最近点集对的搜索算法

Fig.10 Search algorithm of nearest point set pair

其具体算法流程如下:

(1)获取邻近破损域的完整截面线 S_n 的点云 $q_i, q_{i+1}, q_{i+2}, \dots$, 及破损域截面线的完好部分 S_{p1} 的点云 $p_{1,i}, p_{1,i+1}, p_{1,i+2}, \dots$ 。

(2)对于截面线 S_{p1} 第一个点 $p_{1,i}$,通过遍历截面线 S_n 上的所有点云 $q_i, q_{i+1}, q_{i+2}, \dots$, 获取其最近点记为 q'_i ,同时计算这两点间的距离为 d_1 。

(3)通过步骤 2 计算得到的两点间距离 d_1 是截面线 S_{p1} 某点与截面线 S_n 最近对应点的距离,由于通过三坐标测量机获取截面线采样点时,叶片截面线的曲率变化导致采样点间距并不完全一致,因此截面线 S_{p1} 某一点与截面线 S_n 最近对应点的距离会有所变化,为了确保在每个辅助圆邻域都能大概率搜索到最近的对应点,设定辅助圆半径值 $R_1 = 1.3d_1$ 。

(4)接下来搜索截面线 S_{p1} 第 2 个点 $p_{1,i+1}$ 所对应截面线 S_n 上的最近点,记为 q'_{i+1} ,其搜索方法如下:以 $p_{1,i+1}$ 点为圆心, R_1 为半径,在截面线 S_{p1} 所在的平面作一圆 C_1 ,该圆 C_1 所包围的区域即为最近搜索邻域,分以下两种情况讨论:①如果圆 C_1 所包含的区域含有截面线 S_n 的点云数据,则找出其中的最近点记为 q'_{i+1} ;②如果该圆 C_1 所包含的区域未含有截面线 S_n 的点云数据,如图 11 所示,则找出截面线 S_n 中距离该圆 C_1 最近的两点 q_i, q_{i+1} ,作一直线过圆心 $p_{1,i+1}$ 点且垂直于两点 q_i, q_{i+1} 连线,则交点即为最近点 q'_{i+1} 。

(5)重复步骤 4 方法,获取截面线 S_{p1} 的剩余所有点 $p_{1,i+2}, p_{1,i+3}, \dots$ 在对应截面线 S_n 上的最近点对,记为 $q'_{i+2}, q'_{i+3}, \dots$ 。

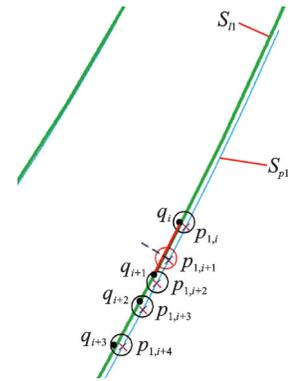


图 11 辅助圆邻域的最近点对搜索的建立

Fig.11 Building of the nearest point-pair search of the secondary circle neighborhood

(6)完成所有最近点集对的搜索。

其余截面线 S_{p2}, S_{p3} 对截面线 S_n 上最近点集对的获取方法同上述一样,该方法克服了经典的 ICP 算法在求解最近点集时采用全局遍历搜索计算花费时间较大的缺点,大大提高了最近点集对的获取效率。图 12 为 ICP 算法与辅助圆邻域最近点集搜索方法时间对比图,若遍历 10 个点,采用 ICP 算法需要 100 次,采用本文所提出的方法需要 20 次,是传统配准时间的 20%;若遍历 100 个点,本文所提方法所需时间是传统配准时间的 2%;当遍历点数为 n 时,其是传统配准时间 $2/n$,故点数越多效率越高。

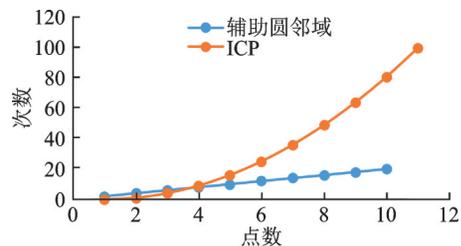


图 12 ICP 算法与辅助圆邻域最近点集搜索方法时间对比
Fig.12 Time comparison between ICP algorithm and auxiliary circle neighborhood nearest point set search method

2.3 破损区域截面线与完整截面线精确配准

前文已经对截面线 S_n 与截面线 S_{p1} 进行了初始配准,取得了良好的配准效果。但两截面线之间还存在一些误差,对于发动机叶片这种高精度零件的修复,还需在此初始配准的基础上分别对截面线 S_n 与破损域截面线的完好部分 S_{p1}, S_{p2}, S_{p3} 进行精确的配准,截面线 S_n 与截面线 S_{p1} 的精确配准具体操作流程如下:

(1)分别设初始配准后的截面线 S_n 的点云数据集为 $Q_n, Q_n = \{q_i\} (i = 1, 2, \dots, N)$, 破损截

面线完好部分 S_{p1} 的点云数据集合为 P_{p1} , $P_{p1} = \{p_{1,i}\} (i=1, 2, \dots, M)$, 其中点 $p_{1,i}$ 中下标 1 表示第 1 条破损截面线 S_{p1} , i 表示破损截面上点的序列。由于叶片边缘的破损造成破损截面线的点云数据小于完整截面线数据, 即 $M < N$ 。

(2) 定义破损截面线 S_{p1} 的一点 $p_{1,i}$ 到截面线 S_n 上的最近一点的距离为

$$d(p_{1,i}, S_n) = \min \|p_{1,i} - q'_i\| \quad i=1, 2, \dots, M \quad (2)$$

式中 q'_i 点集合为点云数据集合 Q_n , $Q_n = \{q'_i\} (i=1, 2, \dots, N)$ 为经过 2.2 节建立辅助圆邻域的最近点集对搜索方法获取的最近点集集合, 获得的最近点集对为 $(p_{1,i}, q'_i), (p_{1,i+1}, q'_{i+1}), (p_{1,i+2}, q'_{i+2}), \dots, (p_{1,M}, q'_M)$ 。

(3) 设置最近点集对之间的平均距离为

$$\epsilon_d = \frac{1}{M} \|p_{1,i} - q'_i\|^2 \quad (3)$$

若 $\epsilon_d < \epsilon$, 停止计算, 终止迭代, 此时精确配准完成; 否则转入第 4 步。

(4) 求取使平均距离 ϵ_d 最小的刚体变换矩阵, 即平移矩阵 T' 和旋转矩阵 R' 。其中矩阵 T' 和 R' 可以通过四元数法或奇异值分解的方法来获取, 其算法较为成熟, 本文不再重复介绍, 详细流程可参考文献 [18, 20]。

(5) 对截面线 S_n 的点云数据集合 Q_n 作如下矩阵变换 $Q'_n = R'Q_n + T'$, 并重令 $Q_n = Q'_n$, 转到第 2 步。

以破损域截面线的完好部分 S_{p1} 为基准, 截面线 S_n 与其配准对齐后的点云数据如图 13 所示。

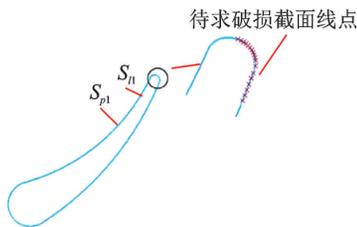


图 13 精确配准后的截面线

Fig.13 Section line after accurate registration

截面线 S_n 与破损域截面线 S_{p2}, S_{p3} 的配准同上述对 S_{p1} 的配准方法, 至此得到了所有破损断面线的点云数据。

本节通过改进后的 ICP 算法使叶片邻近破损域的完整截面线 S_n 分别与破损区域截面线 S_{p1}, S_{p2}, S_{p3} 配准, 获取叶片边缘破损部分缺失的点云特征, 如图 14 所示。至此已经得到叶片边缘破损部分的完整截面线。

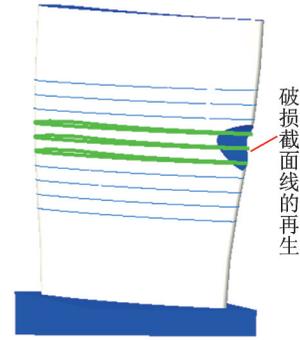


图 14 叶片损伤截面线缺失点云数据的获取

Fig.14 Acquisition of missing point cloud data of blade damaged section line

3 基于叶片截面线的 B 样条曲面逼近重构

B 样条法以其强大的曲线曲面表达能力和对自由曲面的设计能力在曲面重建领域得到了广泛的研究和应用。基于 B 样条曲线曲面的诸多优良特点, 本节通过 B 样条方法实现对叶片边缘破损区域的曲面再生。

一张由 $(n+1) \times (m+1)$ 个控制顶点决定的 $k \times l$ 次 B 样条曲面的数学表达式为

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) \quad 0 \leq u, v \leq 1 \quad (4)$$

式中: $d_{i,j} (i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m)$ 为控制顶点, 呈拓扑矩形阵列, 构成一个控制网格; k 为 B 样条曲面的 u 向次数; l 为 B 样条曲面的 v 向次数; $N_{i,k}(u) (i=0, 1, \dots, n)$ 为 u 向 k 次规范 B 样条基函数; $N_{j,l}(v) (j=0, 1, \dots, m)$ 为 v 向 l 次规范 B 样条基函数。

定义 u 方向为扭曲叶片横向截面轮廓方向; v 方向为叶高方向。B 样条曲面的逼近重构实质就是对两个参数方向上的 B 样条曲线逼近重构。首先对叶片截面线 (u 向) 进行 B 样条逼近, 生成中间控制顶点, 再沿叶高方向 (v 向) 进行逼近拟合, 构造出 B 样条逼近曲面。前面已获得所有叶片的截面线 (包含破损处缺失的截面线点云数据), 然后对 B 样条曲面进行 3×3 阶的逼近重构, 以获得由叶片的顶尖破损区域以下的完整截面线构成的曲面模型, 其具体操作流程如下:

(1) 给定测量数据点 $q_{i,j} (i=0, 1, \dots, s; j=0, 1, \dots, t)$, 确定曲面次数 $k=l=3$, 设定逼近误差 ϵ_u, ϵ_v 。

(2) 确保构造的叶片截面线具有相同的次数

和节点矢量。本文对叶片截面线的逼近拟合次数取 $k=l=3$, 无需再对其进行升阶或降阶处理, 减小了计算量; 同时, 在叶片截面线近似时, 各截面线的节点向量是统一的。

(3) 获得 B 样条曲线表示的叶片截面曲线。

(4) 确定叶高方向 (v 向) 节点矢量。对得到的叶片截面线控制顶点, 取每一层的第 i ($i=0, 1, \dots, n$) 个控制顶点作为 v 向插值点 $d'_{i,1}, d'_{i,2}, \dots, d'_{i,m}$, 对其参数化, 确定节点矢量。

(5) 确定控制顶点。采用最小二乘逼近的方法对 v 向的测量数据点逼近, 使其逼近误差小于 ϵ_v , 获得控制顶点 $d''_{i,j}$ ($i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m$)。

(6) 实现 B 样条曲面的逼近重构。

基于完整叶片截面线进行 B 样条曲面重构, 所获得叶片型面如图 15 所示。

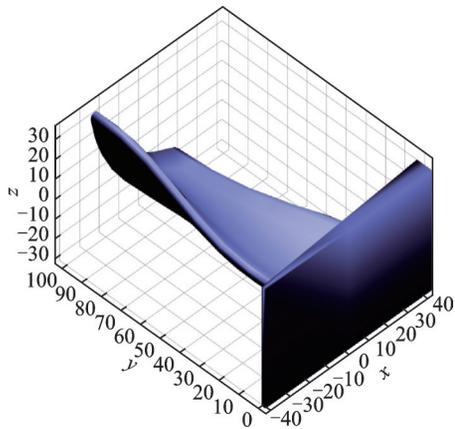


图 15 叶片曲面重构

Fig.15 Blade surface reconstruction

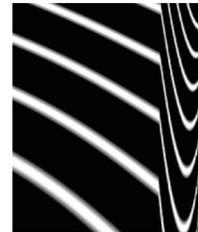
4 再生曲面光顺性分析

为验证叶片边缘破损再生曲面的质量, 基于等照度线法 (斑马线法) 对其破损域再生曲面与未破损域曲面连接处进行了光顺性分析。首先对两曲面片之间的 G_0 、 G_1 、 G_2 连续性与斑马条纹的对应关系进行简要说明, 如图 16 所示。 G_0 连续仅表示两曲面片连接在一起, 斑马线条纹在两曲面片连接处出现明显的错位, 在曲面模型上表示为尖角现象, 两曲面片连接效果较差; G_1 连续, 对应两曲面片连接处的斑马条纹出现明显的转折, 表明连接效果一般, 在曲面模型上表现为圆角等情况; G_2 连续, 对应两曲面片连接处的斑马条纹光滑相接, 满足曲率连续。

借助于 Creo 软件对边缘破损处再生曲面进行斑马线分析, 如图 17 所示, 红色部分表示叶片边缘磨损区域再生曲面, 通过对其斑马线分析发现, 叶



(a) Continuity zebra line for G_0



(b) Continuity zebra line for G_1



(c) Continuity zebra line for G_2

图 16 G_0 、 G_1 、 G_2 几何连续性斑马线示意图

Fig.16 G_0, G_1, G_2 geometric continuity zebra line diagram



图 17 边缘破损再生曲面

Fig.17 Damaged edge regenerated surface

片边缘磨损再生曲面与未磨损曲面连接处的斑马条纹有明显的转折现象, 如图 18 所示, 为破损再生曲面斑马线, 两曲面片间仅满足 G_1 连续, 曲面光顺性一般。



图 18 破损再生曲面斑马线

Fig.18 Damaged regenerated surface zebra line

为提高曲面质量, 通过调整配准精度, 即损伤区域截面线与完整截面线两截面线点云点集对之间的平均距离 ϵ_d 大小, 再次对修复再生的曲面进行

斑马线分析,如图19所示,此时叶片曲面连接处的斑马条纹比较光滑,无明显的错位和过渡现象,生成的曲面光顺性好。



图19 提高精确配准的边缘破损再生曲面斑马线分析

Fig.19 Analysis of edge damaged regenerated surface zebra to improve accurate registration

5 结 论

(1)本文基于邻近破损域未破损区域的完整叶片截面线与破损域叶片截面线的完好部分配准,获得边缘破损处的叶片截面线点云数据特征,实现破损曲面再生重构。

(2)为克服精确配准时采用传统ICP算法在搜索最近点集时花费时间较长的缺点,文中提出的基于建立辅助圆邻域的最近点集对搜索方法,大大降低了配准时间成本。

(3)对破损域再生曲面进行了光顺性分析,验证了本文所提出的边缘破损曲面再生修复方法的可行性。

参 考 文 献:

- [1] SHI X, LONG F, YAN Z, et al. A review of aero-engine blade fouling mechanism[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems.[S.l.]: IEEE, 2016.
- [2] MUATAFA A, BADAIRY H, MEHTA S. Gas turbine aero-engine first stage turbine blade failure investigation[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2009, 131(5):054504.1-054504.4.
- [3] MA Y, LIANG Z, WANG G, et al. Review on the blade loss of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3):513-526.
- [4] 赵旭升. 典型服役破损叶片修复自适应加工关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
ZHAO Xusheng. Research on key technology of adaptive machining for repairing damaged blade in typical service[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [5] 黄智,王洪艳,王立平,等. 面向叶片修复的激光融覆与自适应铣削一体化复合数控机床: 中国, CN105312903B[P]. 2019-07-19.
HUANG Zhi, WANG Hongyan, WANG Liping, et al. A composite CNC machine tool for blade repair with laser cladding and adaptive milling: China, CN105312903B[P]. 2019-07-19.
- [6] 陈振林,陈志同,朱正清,等. 基于逆向工程的航空发动机叶片再制造修复方法研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(Z2): 80-86,93.
CHEN Zhenlin, CHEN Zhitong, ZHU Zhengqing, et al. Research on aero engine blade remanufacturing repair method based on reverse engineering[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(Z2): 80-86,93.
- [7] WANG T, DING H P, WANG H, et al. Virtual remanufacturing: Cross-section curve reconstruction for repairing a tip-defective blade[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(17): 3141-3152.
- [8] RONG Y, XU J T, SUN Y W. A surface reconstruction strategy based on deformable template for repairing damaged turbine blades[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2014, 228(12): 2358-2370.
- [9] 吕学庚. 航空发动机叶片流曲面重构及修复方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
LYU Xuegeng. Research on reconstruction and repair method of aero-engine blade flow surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [10] BEAL P, MCKAY H. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [11] 蔺小军,吴刚,单秀峰,等. 基于叶片截面线CMM测量数据的ICP配准改进算法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(2): 1-8.
LIN Xiaojun, WU Gang, SHAN Xiufeng, et al. Improved ICP registration algorithm based on CMM measurement data of blade section line[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(2): 1-8.
- [12] 邵正伟,席平. 基于八叉树编码的点云数据精简方法[J]. 工程图学学报, 2010(4): 4.
SHAO Zhengwei, XI Ping. Point cloud data reduction method based on octree coding[J]. Journal of Engineering Graphics, 2010(4): 4.
- [13] 刘春明,方漪. 寻找三维散乱数据点拓扑结构的一种算法[J]. 青岛大学学报: 工程技术版, 2003, 18

- (3): 5.
- LIU Chunming, FANG Yi. An algorithm for finding topological structure of 3-D scattered data points [J]. Journal of Qingdao University: Engineering and Technology, 2003, 18(3): 5.
- [14] 吕震. 反求工程CAD建模中的特征技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- LYU Zhen. Research on feature technology in reverse engineering CAD modeling [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [15] 刘江, 张旭, 朱继文. 一种基于K-D树优化的ICP三维点云配准方法[J]. 测绘工程, 2016, 25(6): 15-18.
- LIU Jiang, ZHANG Xu, ZHU Jiwen. An ICP 3D point cloud registration method based on K-D tree optimization [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(6): 15-18.
- [16] 马雯琦. 航空发动机叶片截面特征参数提取技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- MA Wenqi. Research on extraction technology of aero-engine blade section Characteristic parameters [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [17] 吴一凡. 基于UG二次开发的整体叶轮测量规划与仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- WU Yifan. Integrated impeller measurement planning and simulation based on UG secondary development [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [18] 王伯玲, 田志宏, 张永铮. 奇异值分解算法优化[J]. 电子学报, 2010, 10:2234-2239.
- WANG Boling, TIAN Zhihong, ZHANG Yongzheng. Optimization of singular value decomposition algorithm [J]. Electronic Journal, 2010, 10:2234-2239.
- [19] 刘书桂, 毛晨丽, 张海涛. 基于无序点云的叶片截面特征参数提取[J]. 航空动力学报, 2016, 31(9): 2226-2232.
- LIU Shugui, MAO Chenli, ZHANG Haitao. Blade section feature parameter extraction based on disordered point cloud [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(9): 2226-2232.
- [20] 张蒙. 基于改进的ICP算法的点云配准技术[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- ZHANG Meng. Point cloud registration technology based on improved ICP algorithm [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.

(编辑:刘彦东)