

引文格式: 蔡振华, 宋晓航, 董淑娟, 等. 航空发动机叶片热障涂层精密磨抛: 点云数据处理与样条路径优化[J]. 航空制造技术, 2025, 68(11): 22-32.

CAI Zhenhua, SONG Xiaohang, DONG Shujuan, et al. Precision grinding and polishing of aero-engine blade thermal barrier coatings: Point cloud data processing and spline path optimization[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(11): 22-32.

航空发动机叶片热障涂层精密磨抛: 点云数据处理与样条路径优化*

蔡振华¹, 宋晓航¹, 董淑娟¹, 陈廷样¹, 唐作鹏², 周 科²

(1. 武汉理工大学, 武汉 430070;

2. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 德阳 618000)

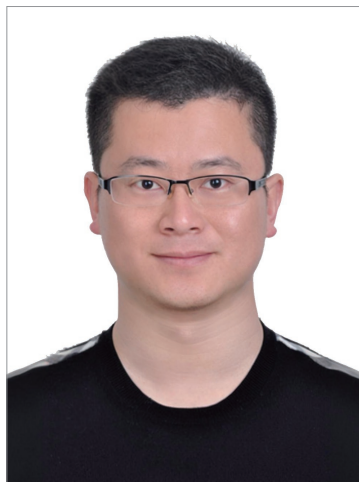
[摘要] 热障涂层是一种应用于军、民用航空发动机热端部件的重要高温防护技术, 由陶瓷氧化物面层和金属粘结底层组成, 可以显著降低基材工作温度, 具有硬度高、稳定性好、耐高温腐蚀、减少燃油消耗、提高发动机工作效率及使用寿命等技术优势。热障涂层采用大气等离子喷涂方式初始制备后, 其表面涂层粗糙度值较高($R_a 10 \mu\text{m}$ 左右), 生产过程中普遍采用磨抛后处理的方法, 将其降低至工艺要求的范围内($R_a 1.6 \mu\text{m}$ 左右)。提出了一种基于点云数据处理的样条路径曲线生成及特征点采样方法, 可用于航空发动机小型涡轮叶片表面热障涂层的机器人自动磨抛作业。该方法采用三维视觉传感器实时扫描叶片表面并生成点云数据, 然后经过点云处理与B样条曲线拟合算法, 生成航空发动机叶片表面高温涂层的全覆盖磨抛路径。经过试验验证, 该方法在保持涂层有效厚度的前提下可将涂层表面粗糙度降低至 $R_a 0.7 \mu\text{m}$ 以下, 实现了航空发动机叶片表面热障涂层磨抛精加工作业。

关键词: 航空发动机叶片; 热障涂层(TBCs); 路径规划; 点云切片; 曲线拟合

中图分类号: V23; TG

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.11.022



蔡振华

副教授, 博士, 研究方向为视觉测量与机器人控制。

航空发动机是考验国家高端制造能力的重要标志, 其关键部件涡轮叶片工作在高温高压及交变载荷的严苛环境下^[1-2], 采用热障涂层(Thermal barrier coatings, TBCs)可以显著提高涡轮叶片耐温能力^[3], 并兼具硬度高、抗氧化腐蚀、提高发动机工作效率及在役寿命等技术优势。其中, 表面粗糙度是影响TBCs热循环寿命与隔热能力的关键性能参数^[4], 该参数值过高会导致高温燃气所携带的环境沉积物CMAS($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$)产生熔融腐蚀, 进而引发涂层开裂失效。因此, 生产过程中通常采用磨抛精加工方

式将TBCs表面粗糙度值由原始的 $R_a 10 \mu\text{m}$ 左右降至工艺规范要求的 $R_a 1.6 \mu\text{m}$ 以下, 同时将涂层厚度稳定在 $(50 \pm 10) \mu\text{m}$ 范围内。

为了提高叶片表面的整体性能, 必须对涂层进行精细的磨抛操作。当前, 叶片表面磨抛工艺主要包括手工磨抛和多轴数控机床砂带磨抛^[5]。传统的手工磨抛尽管具有灵活性, 但在效率和精度方面存在明显不足, 正逐渐被自动化、智能化的磨抛技术所取代。现代多轴数控机床结合机器人磨抛技术, 通过在线测量和路径规划, 能够实现对复杂叶片曲面的高精度磨抛, 显著提高了加工效率, 解决

* 基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB4604800); 2023年湖北省重大攻关项目(JD, 2023BAA003)。

了复杂曲面磨削的难题。

目前,国内外关于叶片磨抛路径规划的研究主要集中在基于三维曲面拟合的路径生成和扫描点云处理两类方法上。三维曲面拟合方法依赖于CAD模型的重建,常见于大型叶片的加工研究,例如,Zhang等^[6]提出了基于模型曲面拟合的路径生成方法,该方法利用最小二乘法优化路径点的分布,适用于尺寸较大的燃气轮机叶片;Zhu等^[7]进一步提出通过截面优化设计生成磨抛路径的方法,但该方法需要依赖高精度的模型重建,对于复杂曲面区域的精度适配性较差。而扫描点云处理方法能够跳过复杂的模型重建过程,直接利用扫描点云生成路径,适应性更强,例如Wang等^[8]提出了基于最小二乘NURBS曲线拟合的路径规划方法,该方法适用于涂层较薄的大型叶片,但在小型叶片的局部复杂区域精度有所不足。此外,Yang等^[9]提出了结合有限元网格划分和逆向工程的路径生成方法,但对于尺寸较小且涂层厚度变化显著的叶片仍存在局限性。

通过与上述方法的对比可见,现有方法在加工复杂曲面上仍存在一定不足。本文提出的路径规划方法创新性地结合了三维点云实时处理与B样条拟合技术,针对小型涡轮叶片尺寸小、曲率复杂、涂层厚度不均等问题,优化了切分路径的曲率连续性和精度。同时,点云处理方法避免了模型重建过程的拟合误差,能够更适用于小型航空发动机叶片的磨抛需求。

1 试验及方法

1.1 点云预处理

本研究中使用扫描设备Gocator 2140线激光传感器(LMI Technologies公司,加拿大),其X方向分辨率为190~340 μm,Z方向分辨率为13~37 μm,扫描速率为0.17~5 kHz。在实

际扫描过程中,叶片由机器人固定并保持静止,线激光传感器则沿Y轴移动,对叶片进行扫描。为验证点云扫描的实际精度,本文设计了标定试验。首先,机器人夹持千分尺,并将其读数设置为10.000 mm,保持固定的位姿与扫描路径,利用线激光传感器对千分尺进行扫描,图1为千分尺点云数据。随后,在点云中两条测量边缘线上分别取点计算距离误差。随机选择5组数据,最大误差为-0.075 mm,平均误差为-0.0584 mm,均方根误差为0.0598 mm,表明在本试验条件下,逆向重建的实际精度能够满足航空小型涡轮叶片路径规划的要求。

在进行点云扫描时,为了保证扫描的完整性,设定的扫描范围超过了实际叶片的长度,并且采用了较高的扫描精度。因此需要对海量点云数据进行滤波、去噪,尽量保留原始点云数据的尖锐特征并去除无效点云。

根据磨抛区域的划分,扫描得到整片点云数据,其组成部分包含夹具、叶片基座和叶片主体点云,如图2所示。后续处理仅需使用叶片主体点云,因此需要去除夹具、叶片基座区域的点云。本文采用直通滤波^[10]来去除叶片的冗余点云。直通滤波的原理是在指定维度上过滤掉不在设定值域内的点云。具体步骤如下:首先,指定一个维度及其值域;然后遍历点云数据中的每个点,判断该点在指定维度上的值是否落在设定范围内,如若,则删除不符合条件的点;最后保留符合条件的点云。研究中采用直通滤波方法,并在Y轴方

向上设定值域,经过滤波后的点云仅保留磨抛所需的叶片主体点云,如图3所示。

由图3可以发现,在点云数据采集过程中,受扫描设备、物体姿态、环境条件及人为干扰等多种因素的影响,点云数据会包含一些噪点,这对后续的点云切分和计算产生较大影响。因此,预处理的首要任务是对点云数据进行滤波去除噪点。本文采用高斯滤波的方法来实现噪点的去除。

高斯滤波利用了高斯函数的特性,将指定区域的权重设定为高斯分布,可以有效滤除高频噪声点。具体操作是将某一数据点与其前后 n 个相邻点进行加权平均处理,而距离远超操作范围的点则被处理为固定的端点。高斯滤波的优势在于其能够

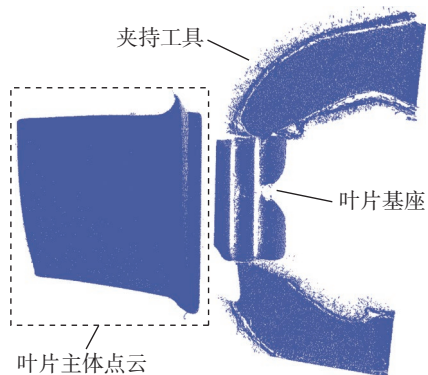


图2 扫描初始点云数据
Fig.2 Scanned initial point cloud data

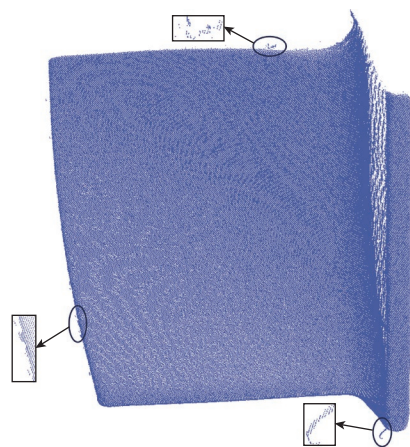


图3 叶片点云噪点示意图
Fig.3 Schematic diagram of blade point cloud noise

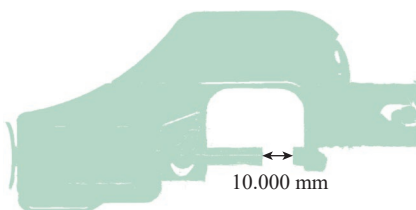


图1 千分尺点云数据
Fig.1 Point cloud data of micrometer

在保持数据原貌的同时,减少噪声的影响,且滤波效果较为温和。

在三维点云数据处理中,高斯滤波器通过对每个点的邻域进行加权平均来平滑点云。权重由高斯分布函数计算,在三维空间中函数形式为

$$G = e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中, d 为点云中每个点到邻域点的距离; σ 为高斯函数的标准差。

对于每个点,高斯滤波器将其邻域内的所有点乘以一个对应的高斯权重,然后将其加权平均。过程公式为

$$F(x, y, z) = \frac{\sum_{i=1}^N p_i G(\|p_i - p_o\|)}{\sum_{i=1}^N G(\|p_i - p_o\|)} \quad (2)$$

式中, p_o 为当前点的坐标值; p_i 为邻域内第 i 个点的坐标值; N 为邻域内的点数; $G(\|p_i - p_o\|)$ 为第 i 个点的高斯权重,它与第 i 个点与当前点的距离 $p_i - p_o$ 有关; $F(x, y, z)$ 为滤波后点的坐标值。

高斯核的标准差决定了它的宽度,直接影响高斯滤波的平滑程度。较大的标准差会使高斯核更宽,从而产生更强的平滑效果,但也会模糊掉更多的细节。而较小的标准差则会导致较弱的平滑效果,保留更多的局部细节。图4展示了不同标准差值下的滤波效果。当标准差 $d=1$ 时,部分噪点未被完全过滤;当 $d=5$ 时,一些有效点云被误认为噪点而被滤除;当 $d=3$ 时,能够有效去除噪点而

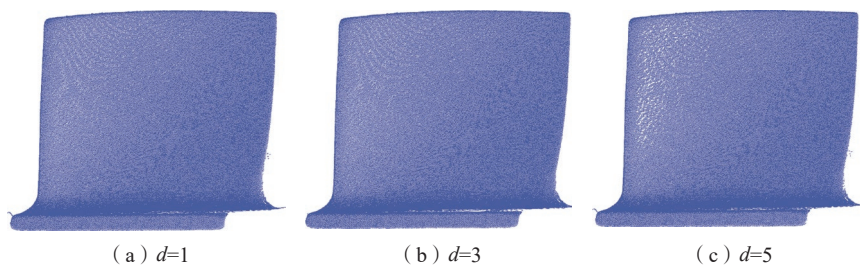


图4 不同标准差下的高斯滤波结果

Fig.4 Gaussian filtering results under different standard deviations

保留大部分有效数据。此外,如图5所示,当 $d>3$ 时,滤除的点云个数陡增,这表明滤除的点云包含了叶片主体点云。综上所述,在本例中 $d=3$ 时噪点的滤波效果最佳。

为了进一步提高计算效率,研究中采用了体素下采样^[11]的方法,将点云数量减少约60%~70%的同时,保持点云整体排列的均匀分布。

传统的体素下采样方法是将在点云空间进行网格化,每个网格称为体素,并用体素内所有点的重心来近似表示该体素中的所有点。这样,体素内所有点都被一个重心点代替^[12],然而,重心点通常不在原始点云中,这可能导致丢失部分原始细节特征。为提高点云表达的精确性,本文采用了距离体素重心点最近的原始点代替重心点的方法。这种方法可以更好地保留点云的细节特征。图6展示了不同体素栅格边长下的效果对比图,随着体素栅格边长 r 的增大,余留的点云数越少。表1详细说明了采用不同栅格边长时,体素滤波的效果。当 $r=0.05$ mm 时,点云处理效果最佳,此时点云数量为162693,去除率为63.8%,该步骤在显著减少点云数量的同时,保持了点云结构的完整性。

通过上述处理步骤,去除了夹具、基座点云以及离群噪点,降低了点云数据量。对于本文的研究对象而言,规划路径仅在叶身部分,缘板及榫部区域则为背景点云,因此需要去除,如图7(a)所示。为了实现叶

身与缘板的分割,本文采用RANSAC算法来计算分割平面^[13],其核心思想是通过迭代随机采样与内点评估策略,鲁棒提取目标区域边界平面,从而达到准确切分点云的目的。其具体原理如下。

RANSAC算法在未经处理过的点云上随机取3个点,用这3个点拟合平面,假设拟合的平面为

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3)$$

接着,计算所有的点到该平面的距离,记为 D_j ($j=0, 1, \dots, n$),同时设定一个距离阈值 T ,比较距离 D_j 与阈值 T 的大小,将距离小于 T 的划分为内点,将大于 T 的划分为外点,同时统计内点数量,记为 N_{in} 。上述步骤会重复多次迭代,每次随机选取不同的点集进行拟合,以找到使内点数量 N_{in} 最大的平面。

按照以上步骤,在对点云数据进行参数代入并计算后,得到的目标切分平面方程为

$$\begin{aligned} -0.00534626x - 0.651385y - \\ 0.801257z - 3.14675 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

RANSAC算法的核心在于通过随机采样找到与叶身区域拟合程度最高的平面,从而将叶身点云与叶盆点云准确分离。通过应用RANSAC算法进行切分,成功提取出了主体目标点云,如图7(b)所示。切分后的点云有效保留了磨抛区域的目标点,同时点云分布均匀,没有噪声干扰。

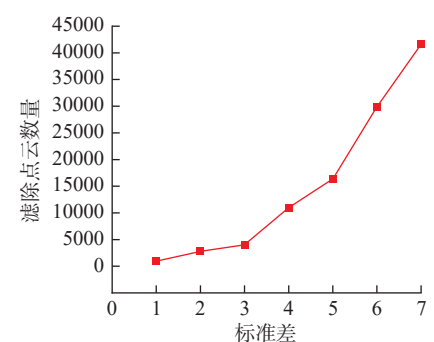


图5 不同标准差下高斯滤波滤除点云数量
Fig.5 Number of point clouds filtered out by Gaussian filtering under different standard deviations

1.2 点云切片

在实际磨抛过程中,需要根据叶片的形状及磨抛工具的尺寸等因素来设计不同拓扑结构的磨抛路径,常见的叶片磨抛路径通常分为横向磨抛和纵向磨抛两种,如图8所示。研究中选取与RANSAC切分平面平行的横向路径拓扑结构来实现叶片表面的磨抛加工。

本文采用图7所示基于平面拟合的切分方法,切分平面与叶片基座所在平面平行,并通过沿叶片纵向的平移形成一系列平行平面集合。该平面集合沿叶片方向等距排列,间距值 D_f 由叶片形状、磨抛工具的形状及尺寸等因素共同决定。假设基座平面数学方程为 $Ax+By+Cz+D=0$,则切分平面集合中的每个平面方程可以通过式(5)表示,经过单位化处理的法向量满足 $A^2+B^2+C^2=1$ 。

$$\begin{cases} Ax + By + Cz + D_i = 0 \\ \frac{|D_i - D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = D_f \end{cases} \quad (5)$$

根据横向路径的切分方法,首先将预处理后的叶片点云作为输入,计算出基座所在平面的方程,即切分间距 D_f 设定为1.2 mm,即可计算出所有的切分平面。

$$\begin{aligned} & -0.029823x - 0.607825y - \\ & 0.758947z - 2.926465 = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

在使用平面对点云进行切片时,由于点云在空间中的稀疏性和不连续性,平面与点云的交点可能很少,甚至没有相交点。为解决这一问题,本研究通过将平面附近的点近似投影到平面上来表示平面的交点,如图9所示。

计算过程的具体步骤如下。

步骤1: 在切分平面两侧分别设置一个等间距的辅助平面 α_l 和 α_r ,形成两个窄小的“邻域”,分别用于记录在平面左侧和右侧的点云,之后通过搜索切分平面两侧最近点的连接线段与切分平面的交点来获得切片路径上的点。

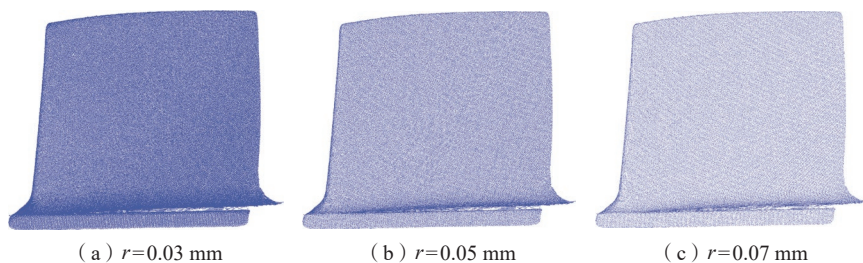


图6 体素滤波后点云显示效果图

Fig.6 Display effect image of point cloud after voxel filtering

表1 不同栅格边长下体素滤波结果

Table 1 Voxel filtering results with different grid edge lengths

体素栅格边长/mm	点云数量	邻近点距离平均值/mm	邻近点距离最大值/mm	邻近点距离最小值/mm
0	449627	0.0200	0.0548	0.006
0.03	329325	0.0255	0.0647	0.010
0.04	231948	0.0304	0.0663	0.012
0.05	162693	0.0359	0.2529	0.023
0.06	119644	0.0410	0.2787	0.031
0.07	91224	0.0473	0.3801	0.035
0.08	72071	0.0535	0.3644	0.036

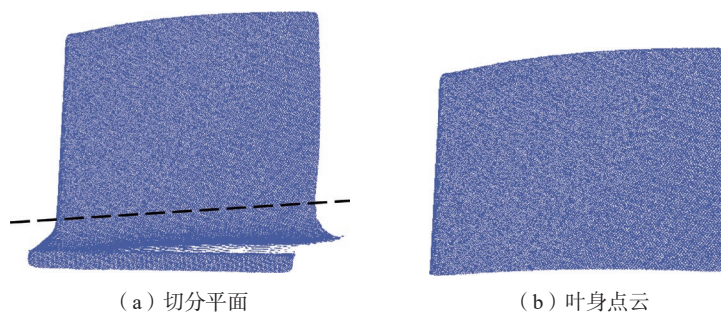


图7 点云切分平面示意图与切分后的叶身点云

Fig.7 Schematic diagram of point cloud segmentation plane and segmented blade profile point cloud

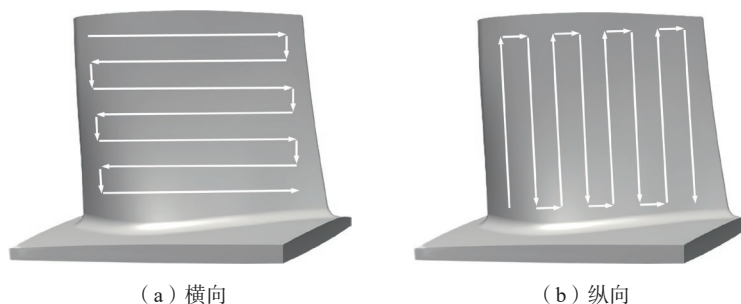


图8 横向与纵向磨抛路径示意图

Fig.8 Schematic diagram of horizontal and vertical grinding and polishing paths

步骤 2: 统计两侧点云数量, 在点云数量较多的一侧“邻域”中选取一个点 P_1 , 遍历另一侧“邻域”中的所有点, 找到与 P_1 最近的点 P_2 。

步骤 3: 连接 P_1 和 P_2 , 计算该线段和切分平面的交点, 作为切分平面与叶片点云的近似交点。

步骤 4: 重复步骤 2 和步骤 3。

辅助平面间距 δ 的值会直接影响求交法的结果, 而其大小取决于点云密度 ρ 。点云密度的计算方法有平均距离法、体素栅格法等, 本文采用平均距离法进行计算: 假设点云中有 n 个点, 每个点 P_j 与其最近的 m 个邻近点的平均距离为 L_j , $j=\{1, 2, \dots, n\}$, 即

$$L_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}}{m} \quad (7)$$

由此可以得到点云密度 ρ 为

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^n L_j}{n} \quad (8)$$

最终, 辅助平面间距 δ 由点云密度 ρ 与系数 q 的乘积决定, 即

$$\delta = \rho \times q \quad (9)$$

根据推导可知, 对邻近点个数 m 和系数 q 选取不同值会影响点云密度 ρ , 从而影响辅助平面间距 δ 。表 2 展示了参数 m 和 q 对切片误差的影响。可以看出, 当 $m=8, q=8$ 时, 切片得到的点云与原始点云之间的距离误差相对较小, 应用该参数进行点云切片, 得到的切分路径如图 10 所示。

切分后的点云分布密度不均, 需要对切分后的路径点进行数据压缩, 去除部分冗余点, 同时确保路径点的均匀性和曲率变化能够被准确保留。因此, 本文对点云进行了采样处理。几何采样依据点云的几何特征进行, 在不同的曲率下选择采样点。具体方法如下。

输入目标点云, 设定目标采样数为 S , 采样均匀性为 U 。

(1) 对于每个点计算 K 邻域, 计算点到邻域点的法向量夹角, 以此来近似计算曲率。

(2) 设定夹角阈值, 点的邻域夹角若大于设定值, 放入几何特征区, 小于此值放入其他区域。

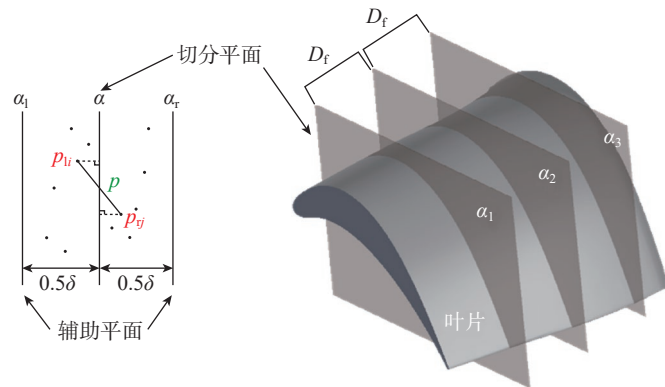


图 9 切片平面与点云的交点计算示意图

Fig.9 Schematic diagram of the intersection calculation between the slicing plane and the point cloud

表 2 不同参数的切片点云计算结果

Table 2 Calculation results of point cloud with different parameters for slicing

邻域 m	ρ/mm	乘数 k	δ/mm	平均误差/ mm
4	0.062	4	0.248	0.051
		6	0.372	0.052
		8	0.496	0.068
6	0.068	4	0.272	0.072
		6	0.408	0.065
		8	0.544	0.047
8	0.074	4	0.296	0.046
		6	0.444	0.040
		8	0.592	0.039
10	0.076	4	0.304	0.043
		6	0.456	0.079
		8	0.608	0.061

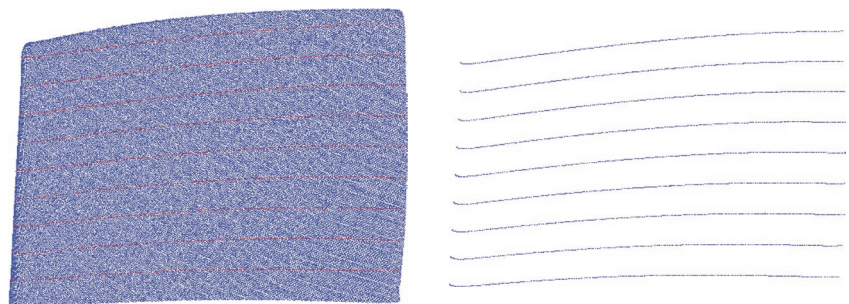


图 10 叶片点云切分示意图及切分结果

Fig.10 Blade point cloud segmentation diagram and segmentation results

(3) 对于几何特征区域和其他区域进行均匀采样, 采样数分别为 $S \times (1-U)$ 和 $S \times U$ 。

按照以上步骤进行采样, 图 11 为单道路径点采样前后点云对比, 其中下方单道路径点云相较于上方, 在保证路径各处曲率不变的条件下去除了冗余点, 并保留了尖锐特征, 能够使机器人在磨抛时更平滑地运行, 进而降低磨抛后叶片表面粗糙度。

由于喷涂了热障涂层, 叶片表面形成了凹凸不平的起伏, 需要对采样离散后的点云数据进行平滑拟合, 在这里引入了 B 样条曲线以对点云数据进一步处理。

1.3 B 样条曲线拟合

在三维点云数据处理过程中, B 样条曲线拟合是一种常用的方法^[14], 用于将离散点云数据转换为平滑的曲线。B 样条曲线是在贝塞尔曲线基础上发展而来, 有效减少了计算量, 目前广泛应用于路径规划和曲线拟合等领域。B 样条曲线可分为均匀 B 样条曲线、准均匀 B 样条曲线和非均匀 B 样条曲线 3 种类型。B 样条曲线的一般数学形式为

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u) \quad (10)$$

式中, $N_{i,k}(u)$ 是 k 次 B 样条基函数, 也叫调和函数, 其定义为

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

$$N_{i,k} = \frac{(u-u_i)N_{i,k-1}(u)}{u_{i+k}-u_i} + \frac{(u_{i+k+1}-u)N_{i+1,k-1}(u)}{u_{i+k+1}-u_{i+1}},$$

$$u_k \leq u \leq u_{n+1} \quad (11)$$

从式(11)可以看出, 基函数由 U 决定, 其中基函数满足微分方程

$$N'_{i,k}(t) = \frac{k-1}{t_{i+k-1}-t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{k-1}{t_{i+k}-t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t) \quad (12)$$

图 12 展示了均匀 B 样条曲线和准均匀 B 样条曲线的拟合原理。均匀 B 样条曲线的节点矢量呈等差数列分布, 虽然计算上较为简单, 但不具备端点的几何性质, 拟合过程中

曲线端点的控制较为困难, 常导致在复杂曲线的拟合中表现不佳。而准均匀 B 样条曲线通过在两端节点引入重复度 s , 保留了贝塞尔曲线在端点处的几何性质, 使得在曲线的端点处拟合精度更高。因此, 本文采用准均匀 B 样条对点云进行拟合。

在实际应用中, 不同区域的叶片几何特征具有显著差异, 例如凹凸面曲率的变化范围较大。因此, B 样条曲线拟合参数的选择需要根据点云的局部特性进行调整, 以在平滑性与拟合精度之间达到平衡。例如, 在曲率较平缓的区域, 使用较低的阶次能够提高拟合效率和全局一致性; 而

在曲率剧烈变化的区域, 需要选择较高的阶次并增加节点密度, 以更好地捕捉几何细节特征。

虽然高阶次的曲线能够增强曲线的平滑性, 但容易引入过多的极值点, 导致曲线产生不必要的波动和峰谷, 影响拟合效果。因此, 为了在曲线的平滑性与计算复杂度之间取得平衡, 本文用不同的阶次和平滑度参数进行拟合, 得到了原始点云和拟合曲线的误差, 如表 3 所示。拟合结果表明, 三阶准均匀 B 样条曲线在平滑度参数为 0.001 时, 不仅能够满足复杂曲率区域的拟合需求, 同时保持了较低的计算复杂度。通过这一参

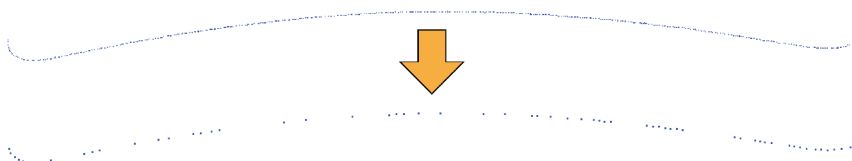


图 11 单道路径点采样前后点云对比

Fig.11 Comparison of point clouds before and after single path point sampling

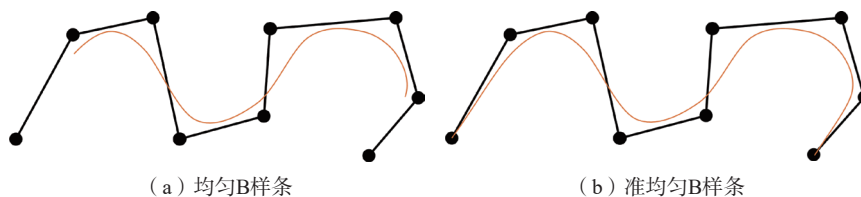


图 12 均匀 B 样条曲线和准均匀 B 样条曲线拟合原理

Fig.12 Principles of uniform B-spline curve and quasi-uniform B-spline curve fitting

表 3 不同阶次和平滑度下 B 样条拟合精度

Table 3 B-spline fitting accuracy under different orders and levels of smoothness

阶次	平滑度	最大误差/mm	平均误差/mm
3	0.001	1.727	1.369
	0.01	1.939	1.478
	0.1	2.921	2.460
4	0.001	2.311	1.750
	0.01	2.486	1.898
	0.1	3.284	3.171
5	0.001	2.703	2.151
	0.01	2.841	2.333
	0.1	3.835	3.874

数设置,可以在凹凸面曲率剧烈变化的区域获得更好的拟合精度,并满足实际磨抛路径的规划要求。

以凹面的切片为例,本文根据点云的分布情况选择相应的控制点,并对不同路径的叶身和叶背区域进行B样条曲线拟合。图13和图14展示了最终拟合结果,通过观察可见,拟合曲线在凹面区域的连续性和平滑性良好,能够较好贴合复杂几何形状,为路径生成提供了可靠的基础。

1.4 路径点生成

通过B样条曲线拟合,将离散点云转换为平滑的曲线。但是在实际的磨抛应用中,机器人轨迹通常由一系列与时间相关的路径点序列组成。因此,在获得拟合曲线后,需对曲线

进行离散化处理,以生成机器人所需的路径点。由于叶片表面曲率变化复杂且连续,在离散取点时应根据不同曲率区域进行差异化采样,以确保路径的整体精度。为满足路径要求,本文采用Douglas-Peucker(DP)算法^[15]。

DP算法在图形数字化中应用广泛,一般用于曲线或密集点集的采样处理,通过有限个点在一定程度上保持原有的形状。密集点进行数据压缩的精度通过误差阈值 D_i 控制,如图15所示,具体实现步骤如下。

(1)将原始点集按前后顺序排列,若有序则跳过。

(2)在首尾两点 A 和 B 间连接一条线段,记为弦 AB ,计算点 A 和点

B 之间距离弦 AB 最远的点,计为 C ,点到弦的距离值为 D_i 。

(3)比较最大距离 D_i 与距离阈值 D_t 的大小,若 $D_i \leq D_t$,则该弦的两端点可以代表该段区间内的点集,该段区间处理完毕。

(4)若 $D_i > D_t$,则误差较大,以点 C 将该区间分为两个子区间,再对两个子区间分别进行步骤(2)~(4)的处理。

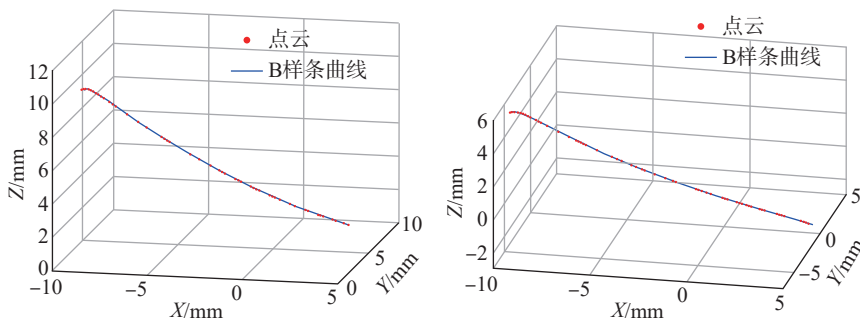
(5)当所有区间段均处理完毕,按坐标顺序依次保存步骤(3)中的端点,完成数据压缩。

通过在拟合后的曲线上曲率离散,可以得到计算后的点云数据,整体路径离散的结果如图16所示。

2 结果与讨论

2.1 磨抛路径生成与仿真

叶片涂层磨抛的硬件设备主要由机器人系统、线激光扫描仪、叶片工装(图17(a))、磨抛装置(图17(b))等组成,机器人系统采用ABB机器人IRB1200-7 kg/0.7 m,重复定位精度0.13 mm;采用Gocator 2140线激光扫描仪,测量范围MR为210 mm, x 方向分辨率为190~340 μm , z 方向分辨率为13~37 μm ,扫描频率为0.17~5 kHz;磨抛工具采用直径10



(a) 路径8三次B样条拟合曲线 (b) 路径2三次B样条拟合曲线
注:本研究试验中共有9条路径,本图选取了第8条和第2条B样条拟合曲线。

图13 叶身三次B样条拟合曲线
Fig.13 Three B-spline fitted curves of blade profile

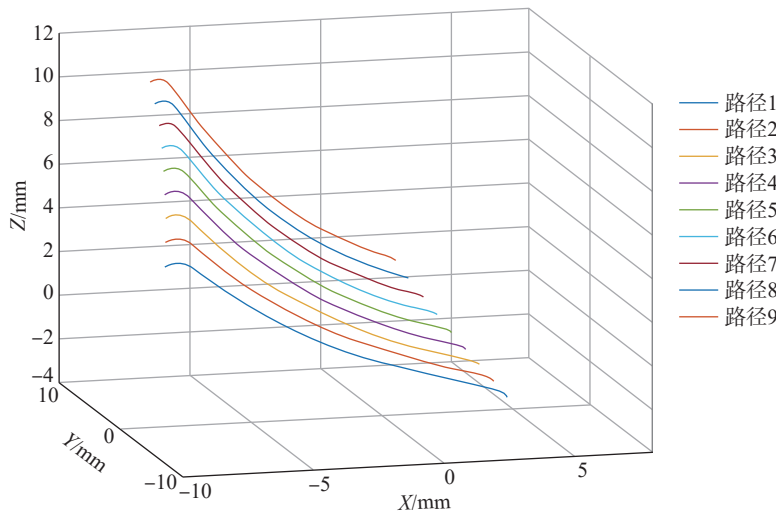


图14 切分路径B样条曲线拟合结果
Fig.14 Fitting results of the B-spline curves for the segmented path

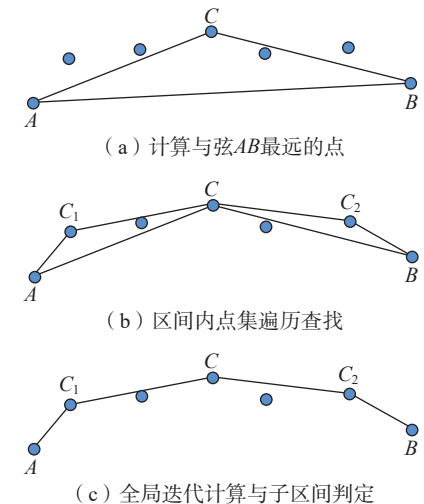


图15 Douglas-Peucker算法过程示意图
Fig.15 Schematic diagram of the Douglas-Peucker algorithm process

mm 的圆柱形羊毛磨头; 粗糙度测量仪采用 SJ-210 (三丰, 日本), 测量范围为 $R_a 0.025 \sim 12.5 \mu\text{m}$, 传感器探针测力为 0.75 mN, 分辨率达 $0.001 \mu\text{m}$, 能够满足高精度表面粗糙度测量的需求; 涂层测厚仪采用北京时代 2813,

测量范围为 $0 \sim 1500 \mu\text{m}$, 精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ (测量值的 $\pm 3\%$)。

机器人编程软件使用瑞士 ABB 公司的 RobotStudio 离线仿真软件。该软件是基于 ABB 机器人虚拟控制器研发而成的, 能够轻松搭建虚拟工

作站并进行离线编程、路径生成、碰撞检测等。如图 17 (c) 所示, 在工作站中导入叶片模型叶片点云数据, 对路径点姿态进行调整, 生成最终的仿真路径, 如图 17 (d) 所示。图 18 为试验中使用的粗糙度测量仪和涂层测厚仪。

磨抛路径的速度设定为 5 mm/s, 表 4 是仿真时磨抛速度的波动情况, 图 19 为速度曲线结果。可以看出, 网格划分和点云切分得到的磨抛路径的速度平均值均符合预设值, 但是点云切分速度波动较小, 能提供更为平稳的磨抛效果。

图 20 记录了仿真过程中机器人各轴角度变化, 可以明显看出, 点云切分路径的轴变化更加平稳, 波动更小, 这也表明在磨抛时采用点云切分的方式更加稳定, 对机器人关节的冲击更小, 也能产生更均匀的磨抛效果。

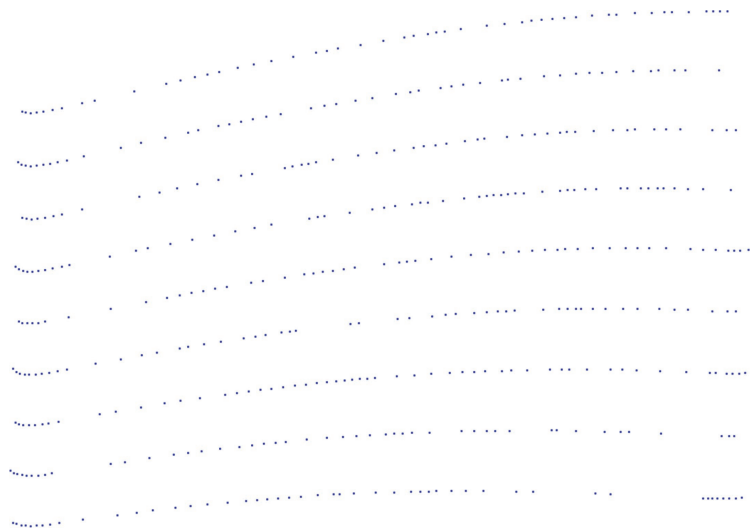
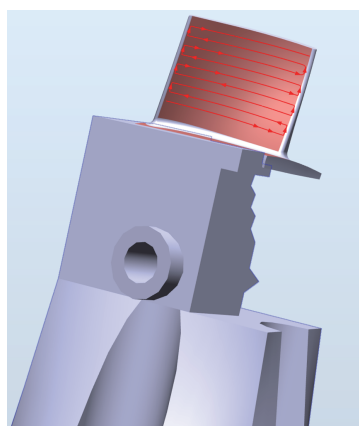
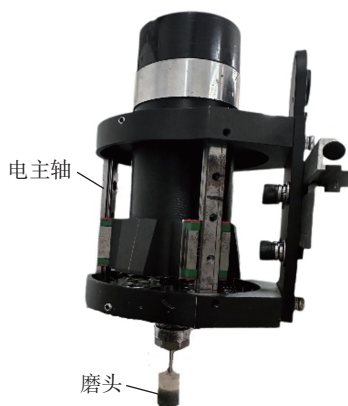


图 16 DP 离散后的磨抛路径点

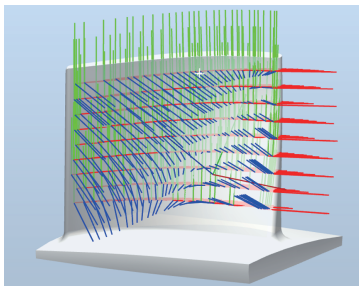
Fig.16 Grinding and polishing path points after DP discretization



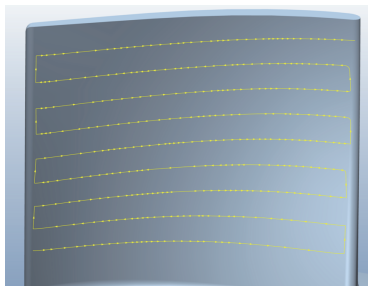
(a) 叶片工装



(b) 磨抛装置



(c) 叶片点云



(d) 仿真路径

图 17 航空涡轮小叶片整体仿真设计和路径示意图

Fig.17 Overall simulation design and path diagram of the small blade of aviation turbine



(a) 三丰 SJ-210



(b) 北京时代 2813 涂层测厚仪

图 18 粗糙度仪和厚度仪示意图

Fig.18 Schematic diagram of roughness meter and thickness meter

表 4 网格划分和点云切分路径波动比较

Table 4 Comparison of fluctuations between mesh division and point cloud segmentation paths

规划方式	设定速度/(mm/s)	平均速度/(mm/s)	最大速度/(mm/s)	最小速度/(mm/s)	速度波动/%
网格划分	5	4.998	11.629	3.327	166.04
点云切分	5	4.994	5.375	3.874	30.02

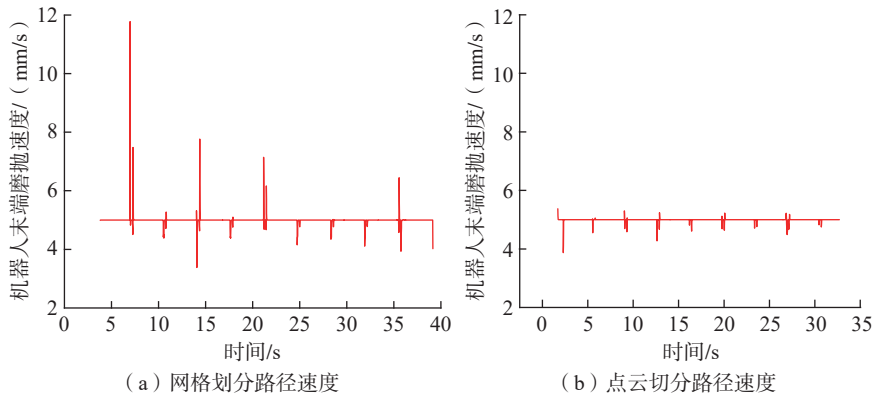


图 19 网格划分和点云切分路径速度

Fig.19 Velocity of mesh division and point cloud segmentation paths

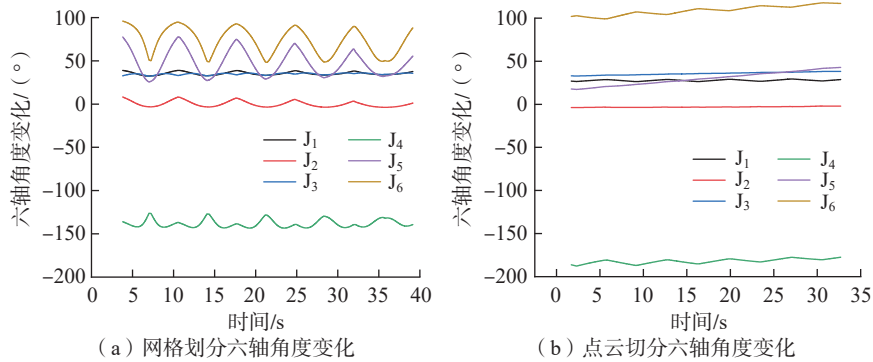


图 20 网格划分和点云切分机器人六轴角度变化

Fig.20 Mesh division and point cloud segmentation: six-axis angle variations of the robot

2.2 试验结果

为验证提出方法的有效性,将航空涡轮叶片作为对象设计磨抛试验。磨抛参数设置为压力 5 N,叶片与磨抛工具的相对速度为 5 mm/s,试验实物图如图 21 所示,工具坐标系设定在磨头端面的边缘。将前述磨抛路径生成 Rapid 程序并加载至机器人控制器后,机器人按预定轨迹完成涡轮叶片表面热障涂层的磨抛工作。最终获得图 22 所示的磨抛前后结果。

将叶片的叶身区域按照图 23

所示区域划分为面积相近的 9 个区域,每个区域分别测量 3 次表面粗糙度和厚度,取平均值,测量结果如表 5 所示。磨抛前粗糙度最大值为 11.79 μm ,最小值为 8.78 μm ,平均值为 10.48 μm ;磨抛后粗糙度最大值为 0.69 μm ,最小值为 0.38 μm ,平均值为 0.56 μm 。磨抛前厚度最大值为 105.6 μm ,最小值为 76.5 μm ,平均值为 93.2 μm ;磨抛后厚度最大值为 59.4 μm ,最小值为 41.4 μm ,平均值为 50.7 μm ;去除量最大值为 62.9 μm ,最小值为

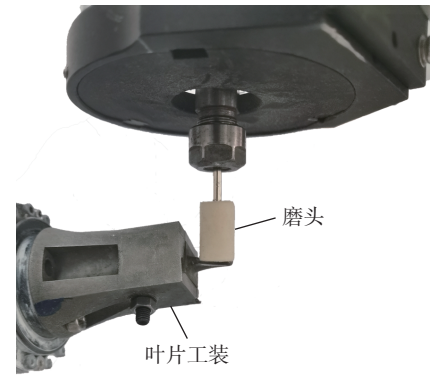
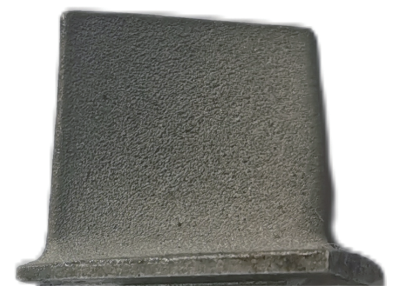
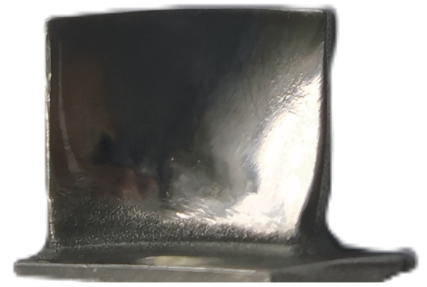


图 21 试验实物图

Fig.21 Experimental physical image



(a) 磨抛前叶片



(b) 磨抛后叶片

图 22 磨抛前后叶片

Fig.22 Blade before and after grinding and polishing

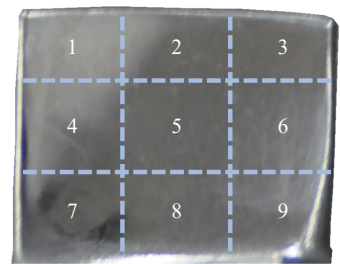


图 23 叶片粗糙度及厚度测量分区

Fig.23 Blade roughness and thickness measurement zoning

29.7 μm ,平均去除量为 42.48 μm ,符合叶片磨抛加工的要求。

此外,为进一步验证本文方法的

优越性, 试验中采用有限元网格划分方法生成路径, 并在相同磨抛参数下进行对比试验, 具体结果如表 6 所示。与本文方法相比, 网格划分方法在粗糙度和厚度控制方面的表现均存在较大波动, 磨抛后部分区域粗糙度接近或超过 $1.0 \mu\text{m}$ (如区域 7 达到 $1.33 \mu\text{m}$), 且局部厚度去除不均匀, 部分区域厚度过度去除, 去除后降至 $40 \mu\text{m}$ 以下 (如区域 5 和区域 9)。相比之下, 本文方法生成的路径能够在粗糙度和厚度控制方面表现出更高的均匀性和稳定性。

3 结论

本文提出了一种基于三维点云处理的航空发动机涡轮叶片热障涂层磨抛路径规划方法。通过对实时扫描的点云进行切片、离散化、B 样条拟合和路径点生成, 优化了磨抛路径的处理流程。根据试验得到了如下结论。

(1) 该方法在小型叶片上的应用验证了其合理性, 有效减少了磨抛过程中的误差, 提高了整体加工质量。

(2) 通过点云切分拟合生成的

路径, 相较于传统的网格点划分方法, 更加贴合叶片表面, 从而确保了磨抛过程的稳定性和一致性。

(3) 试验验证表明该方法能够有效降低叶片涂层粗糙度, 并保持涂层厚度, 具备一定的实用性和潜在效率优势, 为航空发动机涡轮叶片的精密制造提供了有效的技术支持。

然而, 该方法仍存在一定局限性, 其对点云数据质量具有较高依赖性。扫描设备精度或表面反光特性导致点云采样误差, 可能影响路径规划的精度。同时, 对于几何复杂度较高的叶片区域 (如急剧曲率变化的边缘), 现有拟合方法可能难以完全满足精度要求。此外, 该方法对设备精度和工艺参数的依赖性也限制了其普遍适用性。未来研究将针对复杂曲率区域的路径规划优化、多次扫描拼接技术以及动态厚度调整策略等方面开展进一步探索, 以提升该方法的适应性和鲁棒性。

参考文献

- [1] WU S, ZHAO Y T, LI W G, et al. Research progresses on ceramic materials of thermal barrier coatings on gas turbine[J]. Coatings, 2021, 11(1): 79.
- [2] 贾宜委, 王鹤峰, 王宇迪, 等. 航空发动机涡轮叶片热障涂层研究现状[J]. 表面技术, 2023, 52(11): 139-154.
- [3] JIA Yiwei, WANG Hefeng, WANG Yudi, et al. Current status of research on thermal barrier coating of aero-engine turbine blades[J]. Surface Technology, 2023, 52(11): 139-154.
- [4] PRAPAMONTHON P, YIN B, YANG G W, et al. Separate and combined effects of surface roughness and thermal barrier coating on vane cooling performance[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2020, 12(5): 051017.
- [5] CHIRIVIL, NICHOLLS J R. Influence of surface finish on the cyclic oxidation lifetime of an EB-PVD TBC, deposited on PtAl and Pt-diffused bondcoats[J]. Oxidation of Metals, 2014, 81(1): 17-31.
- [6] ZHU D H, XU X H, JIANG C, et al. Research progress in robotic grinding technology for complex blades[J]. Acta Aeronautica et

表 5 点云切分法磨抛前后粗糙度和厚度测量结果

Table 5 Measurement results of roughness and thickness before and after grinding and polishing by point cloud segmentation method μm

区域	磨抛前粗糙度	磨抛后粗糙度	磨抛前厚度	磨抛后厚度
1	10.15	0.66	86.1	46.5
2	11.65	0.62	96.4	56.7
3	8.78	0.41	99.7	59.4
4	11.69	0.64	105.6	42.7
5	9.56	0.59	88.6	58.9
6	10.39	0.69	87.5	51.7
7	10.48	0.52	76.5	41.4
8	11.79	0.49	96.4	57.8
9	9.83	0.38	102.4	41.8

表 6 网格划分法磨抛前后粗糙度和厚度测量结果

Table 6 Measurement results of roughness and thickness before and after grinding and polishing using grid partitioning method μm

区域	磨抛前粗糙度	磨抛后粗糙度	磨抛前厚度	磨抛后厚度
1	12.31	0.62	94.2	35.1
2	11.78	0.91	108.4	69.6
3	10.87	1.12	86.3	62.6
4	10.56	0.78	104.6	43.9
5	10.23	0.52	84.7	32.8
6	9.15	0.86	101.3	62.2
7	8.94	1.33	89.5	41.4
8	10.45	1.09	92.4	72.8
9	11.72	1.48	80.5	31.7

Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 524265.

[6] ZHANG K M, ZHU G D, LIU S, et al. Path planning for machining on surface of a blade[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Macao, 2017.

[7] ZHU Z Q, CHEN Z T, ZHANG Y. A novel model reconstruction strategy for polishing turbine blade based on position optimization of sectional curve[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(7): 5011–5023.

[8] WANG W P, POTTMANN H, LIU Y. Fitting B-spline curves to point clouds by curvature-based squared distance minimization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(2): 214–238.

[9] YANG F, CAI Z H, CHEN Y P, et al. A robotic polishing trajectory planning method combining reverse engineering and finite element

mesh technology for aero-engine turbine blade TBCs[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(7): 2050–2067.

[10] 宫德宁, 吴琳娜, 李荣华, 等. 改进直通滤波SAC-IA粗配准算法[J]. 大连交通大学学报, 2022, 43(2): 78–84.

GONG Dening, WU Linna, LI Ronghua, et al. Improved direct filtering SAC-IA coarse registration algorithm[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2022, 43(2): 78–84.

[11] 蒋通, 邹进贵. 基于区域生长的体素滤波点云去噪算法[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(2): 63–66.

JIANG Tong, ZOU Jingui. Point cloud denoising algorithm of voxel filtering based on region growing[J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(2): 63–66.

[12] ZHANG B, XIONG C B. Automatic point cloud registration based on voxel downsampling and key point extraction[J]. Laser

& Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 041008.

[13] LI L, YANG F, ZHU H H, et al. An improved RANSAC for 3D point cloud plane segmentation based on normal distribution transformation cells[J]. Remote Sensing, 2017, 9(5): 433.

[14] ZHAO X Y, ZHANG C M, XU L, et al. IGA-based point cloud fitting using B-spline surfaces for reverse engineering[J]. Information Sciences, 2013, 245: 276–289.

[15] DOUGLAS D H, PEUCKER T. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature[J]. Cartographica: the International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 1973, 10: 112–122.

通信作者: 唐作鹏, 工程师, 研究方向为表面工程技术。

Precision Grinding and Polishing of Aero-Engine Blade Thermal Barrier Coatings: Point Cloud Data Processing and Spline Path Optimization

CAI Zhenhua¹, SONG Xiaohang¹, DONG Shujuan¹, CHEN Tingyang¹, TANG Zuopeng², ZHOU Ke²

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Dongfang Turbine Co., Ltd., Dongfang Electric Corporation, Deyang 618000, China)

[ABSTRACT] Thermal barrier coating (TBC) is a critical high-temperature protection technology applied to hot-section components of military and civilian aero-engines. Composed of a ceramic oxide top layer and a metallic bond coat, it significantly reduces the substrate operating temperature and offers technical advantages such as high hardness, excellent stability, resistance to high-temperature corrosion, reduces fuel consumption, and improves engine efficiency and service life. After initial preparation via atmospheric plasma spraying, the surface roughness of the coating is relatively high (approximately $R_a 10 \mu\text{m}$). In production, grinding and polishing post-processing are commonly employed to reduce it to the required range (around $R_a 1.6 \mu\text{m}$). This study proposes a spline path curve generation and feature point sampling method based on the RANSAC segmentation principle, applicable to robotic automated grinding and polishing of TBC on small turbine blades in aero-engines. The method utilizes a 3D vision sensor to scan the blade surface in real time, generating point cloud data. Through point cloud processing and B-spline curve fitting algorithms, a full-coverage grinding and polishing path for the high-temperature coating on the aero-engine blade surface is generated. Experimental verification demonstrates that this method reduces the coating surface roughness to below $R_a 0.7 \mu\text{m}$ while maintaining effective coating thickness, achieving precision grinding and polishing of TBCs on aero-engine blade surfaces.

Keywords: Aero-engine blades; Thermal barrier coatings (TBCs); Path planning; Point cloud slicing; Curve fitting

(责编 阳光)