

DOI: 10.3901/JME.2022.15.292

面向航发叶片同步抛光的型面聚类分组方法^{*}

张 云¹ 王小东² 陈志同² 朱正清² 叶 欢²

(1. 北方工业大学机械与材料工程学院 北京 100144;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083)

摘要: 叶片是航空发动机核心零件, 其制造能力的提升是航空制造业关注的重点。在多主轴阵列机床高效加工的技术背景下, 针对批次叶片实际型面一致性不佳造成的同步定轨迹抛光质量不足问题, 提出了基于形状的叶片型面聚类分组方法。首先, 依据抛光去量与预压量关系确定组内叶片容许差异。其次, 依据抽样叶片实际型面差异确定分组标志点分布。然后, 将两两叶片型面的一致性表示为分组标志点实测数据的向量差, 在组内叶片容许差异约束下以 Ray-Turi 指数为目标确立最优分组。最后, 以批次叶片为对象验证了所提聚类分组方法的有效性。验证结果表明该方法可提高批次叶片分组后实际型面的组内一致性(实例为 0.098 5 mm 内), 组间超容许差异区域所占比例达到 16.67% 以上。对分组后叶片进行同步抛光, 截面线轮廓度 ≤ 0.054 mm, 且相同位置处抛光后精度差异 ≤ 0.021 mm, 从而说明了该方法有助于实现批次叶片的高质量多主轴同步抛光。

关键词: 航发叶片; 复杂型面; 同步抛光; 型面一致性; 聚类分组

中图分类号: TP391; V263

A Profile Clustering-based Grouping Method for the Synchronous Polishing of Aero-engine Blade

ZHANG Yun¹ WANG Xiaodong² CHEN Zhitong² ZHU Zhengqing² YE Huan²

(1. School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract: Blade is the core component of aero-engine, which manufacturing capability improvement has always been the focus of aviation manufacturing industry. With the high-efficiency machining of multi-spindle array machine tool, a profile clustering-based blade grouping method is proposed, aiming at the insufficient quality of synchronous polishing caused by poor consistency of actual profile. Firstly, the allowable intergroup difference is determined by the relationship of polishing indentation and removal depth. Secondly, the distribution of grouping points is determined by the profile difference of sampled blades. Thirdly, the profile consistency of two blades is expressed as the vector difference of measurement data for grouping points, and the grouping result can be established with the Ray-Turi index and allowable intergroup difference. Finally, the grouping and polishing experiment for batch blades has been performed to demonstrate the effectiveness of the proposed method, and the results show that it can improve the profile consistency within each group (less than 0.098 5 mm for the experiment). The area exceeding the allowable intergroup difference between groups is more than 16.67%. After multi-spindle array polishing, the cross-sectional profile of intergroup blades is less than 0.054 mm, and the precision difference at the same position is less than 0.021 mm, which shows that the proposed method is helpful to realize high-quality multi-spindle synchronous polishing of batch blades.

Key words: aero-engine blade; complex profile; synchronous polishing; profile consistency; cluster grouping

^{*} 航空科学基金资助项目(20200016112001)。20210901 收到初稿, 20220306 收到修改稿

0 前言

叶片是航空发动机中直接参与能量转换的核心动力部件^[1], 其加工质量及生产效率尤为重要。其中, 对于已经完成型面精加工工序的叶片, 抛光加工是提高表面质量的有效方式之一^[2]。

数控抛光是目前应用较为广泛的抛光方法, 其工艺灵活性和适应性较强^[3], 主要以砂带、砂布轮、橡胶轮等为抛光工具, 以工业机器人、数控机床等为抛光装备, 通过控制工具在叶片型面上形成空间运动轨迹达到抛光目的^[4]。其中, 华中科技大学徐晓虎^[5]论述了相较于人工打磨, 数控抛光效率可提高 50% 以上。重庆大学 ZOU 等^[6-7]研制出具有浮动补偿功能的自适应砂带磨抛系统, 并建立基于神经网络的磨抛状态预测模型。西北工业大学 XIAN 等^[8-9]根据弹性工具抛光原理建立了抛光效率的数学模型, 并获得基于效率的工艺参数组合。北京航空航天大学陈志同等^[10]研制了多主轴同步加工系统, 实现了多个叶片的同步加工。而德国亚琛工业大学与 STAMA 公司研究表明当采用双主轴同步加工批次零件时, 加工成本和工时较单主轴机床加工同样两件工件可降低 70% 以上^[11-12]。然而, 由于叶片多为薄壁结构、型面多为自由曲面、材料多采用难加工材料, 造成多主轴同步加工前批次叶片的型面存在轮廓度、位置度、相对扭转等误差^[13], 由此导致的抛光去量差异将会对同步抛光精度及其一致性造成不良影响^[14]。为此, 需要在多主轴同步抛光前对批次叶片进行数字化分组^[15], 以限制组内叶片差异, 从而在组内叶片采用同一抛光轨迹时, 达到保证抛光质量和提高抛光效率的目的。

现有数字化分组技术是将零件根据加工对象形状特征的相似性进行归类^[16], 多通过人工神经网络、聚类算法建立不同对象的特征矩阵和实际对象群之间的映射关系, 并依此获得符合特定要求的分组结果^[17]。但该分组方法多适用于具有明显特征的不同零件之间^[18], 对于同批次、仅局部存在道级型面误差的复杂曲面叶片, 需要对实际叶片进行更合理的形状描述来达到分组要求^[19]。

本文所提出的型面聚类分组是以待同步抛光的批次叶片为对象, 以提高组内叶片型面一致性为目标的聚类分析方法。首先, 介绍多主轴同步定轨迹抛光加工方式, 以及从工艺角度提出分组需求; 然后从分组点的选取、分组容差的确定、聚类分组算

法三个方面说明基于形状的叶片分组方法; 最后以典型批次叶片为对象, 验证分组的有效性, 并给出相应结论。

1 多主轴同步定轨迹抛光方式

1.1 多主轴阵列机床

为实现高效率抛光加工, 搭建如图 1 所示多主轴阵列机床(主轴数量: 2×2 支)。该机床具有 3 个移动轴 X 、 Y 、 Z 和 2 个回转轴 $B(B_{1/2/3/4}$ 同步摆动)和 $C(C_{1/2/3/4}$ 同步转动), 主轴摆头 B 摆动角度为 $\pm 45^\circ$, 回转工作台 C 为 360° 连续回转。4 支轮式抛光工具通过标准刀柄连接至 4 支主轴上, 工件通过快换工装安装于回转工作台 C 上。阵列机床通过控制轮式抛光工具在 4 件叶片型面上形成相同的、确定的空间运动轨迹, 即定轨迹轮式抛光方式, 从而实现高效率的同步抛光。

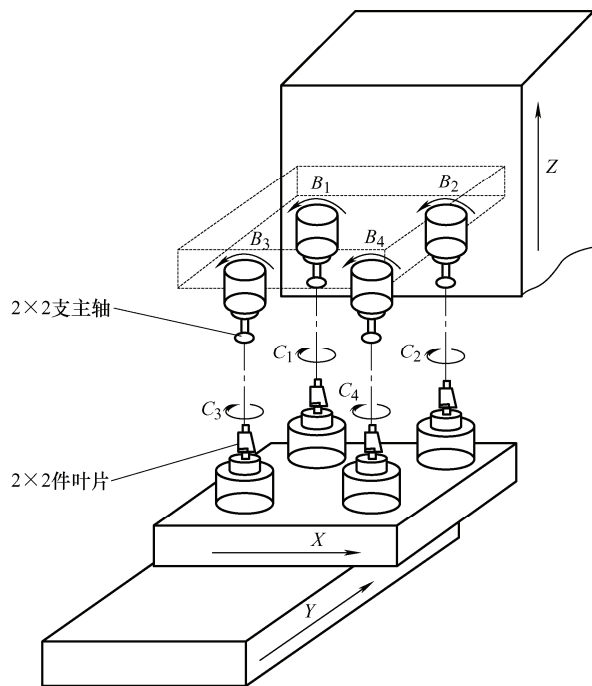


图 1 多主轴阵列抛光机床结构

1.2 定轨迹轮式抛光

如图 2a 所示, 定轨迹轮式抛光采用具有精确尺寸和确定弹性的柔性工具, 其橡胶与超硬磨料通过特殊工艺固接。采用最大回转直径为 Φ 的该工具以角速度 ω 高速转动, 在给定的预压力 E 下, 轮式工具与叶片表面接触后橡胶被压缩产生弹性变形, 进而提供稳定可控的接触压力^[20], 如图 2b 所示。在此接触压力的作用下, 超硬磨料对叶片表面起到抛光去量的作用。

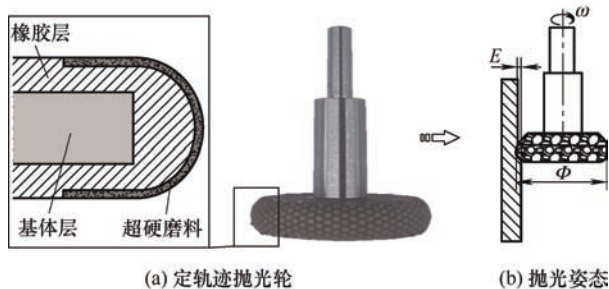


图2 定轨迹轮式抛光

图3a给出了某批次9件抽样叶片抛光前在指定截面(进排气边 $R=0.10\text{ mm}$, 0.35 mm)上测量结果。尽管在抛光前抽样叶片皆满足设计公差要求,但由于相对扭转、位置度、轮廓度等误差的存在,在工件基准下表现为进排气边测量型线存在显著差异。图3b给出了前期定轨迹轮式抛光试验中,不同尺寸半径($R=0.10\text{ mm}$, 0.35 mm , 0.5 mm)进排气边在预压量 $E(0.1\text{ mm}$, 0.2 mm , 0.3 mm , 0.4 mm , $0.5\text{ mm})$ 下抛光去量 ε 存在明显差异。由此可以说明,批次叶片间差异将导致预压量差异,进而导致抛光去量的差异,最终影响抛光型面的质量。因此,采用分组技术提高同步抛光组内叶片的一致性尤为重要。

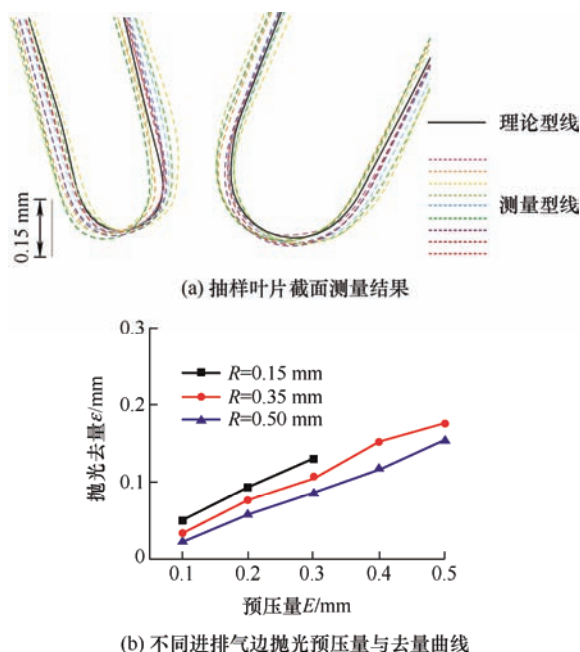


图3 多主轴同步抛光的型面分组需求

2 叶片型面聚类分组方法

本文以批次叶片实际形状为分组对象,以三坐标(CENTURY 977 计量型三坐标测量机; RENISHAW TP7M 点触式测头)高精度测量数据作为分组数据源,提出的基于形状的叶型面分组方法

主要流程为:同组叶片间容许误差的确定、分组标志点规划、基于K均值聚类的型面分组等步骤,如图4所示。

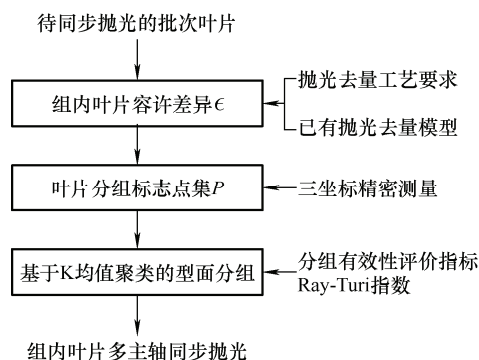


图4 基于形状的叶片型面聚类分组流程

2.1 组内叶片容许差异

组内叶片容许差异 ϵ 是指同步定轨迹抛光时,适用同一数控加工轨迹的多个叶片间型面的最大容许差异。由前期抛光试验可知,在其他工艺参数(进给速度、主轴转速、抛光轮规格等)已定的情况下,抛光去量与预压量 E 间可建立去量模型 $\varepsilon = F(E)^{[21]}$ 。设同组内叶片相对于组内中心叶片型面差异范围为 $[\epsilon_d, \epsilon_p]$, 则在区间边界的去量可表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_d = F(E + \epsilon_d) \\ \varepsilon_p = F(E + \epsilon_p) \end{cases} \quad (1)$$

期望的抛光去量应大于型面最大正余量与轮廓度上差 v_p 引起的最小抛光去量 ε_0 , 而小于型面最大负余量与轮廓度下差 v_d 引起的最大抛光去量 ε_1 。同时,由于 $[\epsilon_d, \epsilon_p]$ 的存在而产生的去量差异应经验性满足轮廓度要求 $[v_d, v_p]$, 则可列出下列不等式

$$\varepsilon_d \geq \varepsilon_0 \quad (2)$$

$$\varepsilon_p - \varepsilon_d \leq \alpha \cdot (v_p - v_d) \quad (3)$$

$$\varepsilon_p \leq \varepsilon_1 \quad (4)$$

式中, α 为根据叶片抛光前轮廓度确定的经验阈值,则根据式(1)~(4)可确定组内叶片容许差异 $\epsilon = \epsilon_p - \epsilon_d$ 。

2.2 分组标志点

分组标志点规划主要涉及点的数量与分布:

① 在数字化分组过程中,分组标志点选取的关键在于所选取点集是否有足够的信息表征实际叶片状态,以保证分组的有效性和稳定性;② 应使分组标志点的数量尽可能少,提高分组计算效率^[22]。因此,

分组标志点的选取应该考虑两项原则: 分组标志点是理论型面表征的关键点; 分组标志点是实际型面差异超过 ϵ 的点。

由此, 分组标志点规划流程如图 5a 所示。

(1) 叶片型面 CAD 模型多采用 2D 截面线沿积叠方向蒙皮定义, 如图 5b 所示。在理论截面线上选用基于弦高公差 h_ϵ 的曲线迭代逼近方法^[23], 从而将理论型面表征的关键点作为分组候选点集 $\{Q|q_1, \dots, q_i, \dots, q_t\}$, 如图 5c 所示。

(2) 从批量待分组叶片中抽取 m 件样本, 采用三坐标测量机对分组候选点集 Q 进行测量, 如图 5d 所示。其中, m 件叶片在分组候选点 q_i 处测量值较理论模型的有向距离可表示为 $\{d_i|d_{i1}, \dots, d_{ij}, \dots, d_{im}\}$, 则在 q_i 处最大有向距离差异 $\max|d_i| = \max(d_{i1}, \dots, d_{im}) - \min(d_{i1}, \dots, d_{im})$, 若 $\max|d_i| \geq \epsilon$, 则将 q_i 作为分组标志点。

(3) 依据步骤(2)逐点计算后形成分组标志点集 $\{P|p_1, \dots, p_i, \dots, p_n\}$, n 是分组标志点的总数, 则测量待分组叶片的点集 P 可作为分组的数据源, 如图 5e 所示。

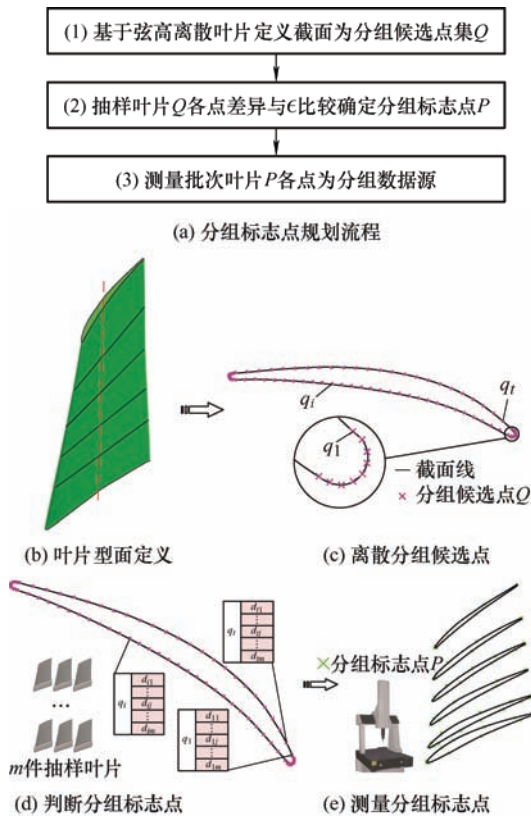


图 5 分组标志点规划流程

2.3 基于 K 均值聚类的型面分组

基于 K 均值聚类的型面分组就是按照距离准则将批次叶片的数据源分割成不同的组, 以求目标函

数最小化, 即同一个组内的叶片一致性最优。同时, 使生成的组尽量独立, 即组间的叶片差异尽量大^[24]。则基于 K 均值聚类的型面分组流程如图 6 所示。

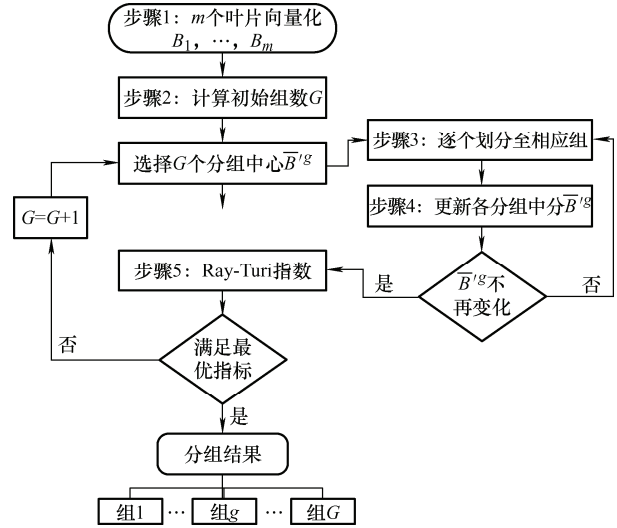


图 6 基于 K 均值聚类的型面分组流程

首先, 根据分组标志点将实际叶片形状表征为特征向量, 而两两叶片实际型面的一致性表示为分组标志点实测数据的向量之间的距离度量, 然后采用 K 均值聚类对叶片特征向量进行聚类, 最终相应的聚类结果即为分组结果。

(1) 叶片实际型面的向量化。

将叶片理论型面用分组标志点向量化为 $B = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_n) = (x_1, y_1, z_1, \dots, x_i, y_i, z_i, \dots, x_n, y_n, z_n)$ 。其中, 第 i 个标志点 p_i 的理论坐标值为 (x_i, y_i, z_i) , 则第 j 个待分组叶片在 p_i 处的测量值 $(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij})$, 而该叶片用分组标志点向量化为 $B'_j = (x'_{1j}, y'_{1j}, z'_{1j}, \dots, x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}, \dots, x'_{nj}, y'_{nj}, z'_{nj})$ 。

(2) 初始组数的确定。

由叶片间差异容许值 ϵ 和最大距离差异的最大值 $\max|D|$ 确定初始组数的下限。其中, $\max|D| = \max|B'_j - B'_{j'}|, (j, j' = 1, 2, \dots, m)$ 。则初始组数 G 可由 $\max|D|$ 与 ϵ 间比值向上取整而得

$$G = \text{int}(\max|D|/\epsilon) + 1 \quad (5)$$

将 $[0, \max|D|]$ 平均分割为 G 个区间, 从每个区间段选择一个实测叶片共 G 个叶片作为初始分组中心 $(\bar{B}^1, \dots, \bar{B}^g, \dots, \bar{B}^G)$, 一个中心确定一个组。

(3) 计算剩余待分组叶片到各中心的平均距离, 根据距离最近原则逐个划分叶片到相应的组。

(4) 计算组内叶片的均值向量 \bar{B}^g 作为新的分组中心, 并迭代步骤(3)、(4)直至所有叶片的分组情况不再更新。

(5) 在组内叶片差异 $\max|D^g| \leq \epsilon$ 的前提下, 计

算分组有效性评价指标 Ray-Turi 指数, 如式(6)所示, 若不满足最优指标, 则令组数 $G = G + 1$, 并返回步骤 (2), 直至找的最优指标所对应的分组数和分组结果。

$$\begin{cases} R(G) = \text{intra}(G) / \text{inter}(G) \\ \text{intra}(G) = \frac{1}{m} \sum_{g=1}^G \sum_{t=1}^{n_g} |B'_t{}^g - \bar{B}'^g|^2 \\ \text{inter}(G) = \frac{1}{G(G-1)} \sum_{g'=g+1}^G |\bar{B}'^{g'} - \bar{B}'^g|^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, n_g 为组 $g (g=1, \dots, G)$ 中的叶片数量, \bar{B}'^g 为组 g 的中心叶片向量化表示, $B'_t{}^g$ 为组内除中心的其他叶片实际测量值的向量化表示。intra(G) 衡量的是组内的差异性, inter(G) 衡量的是组间的差异, 则 Ray-Turi 指数越小表明组内差异越小, 组间差异越大, 聚类分组的效果越好。

3 批次叶片型面聚类分组验证

以 22 件某型号叶片(编号 1#, 2#, ..., 21#, 22#)为验证对象, 抛光前实际叶片与理论模型如图 7 所示, 其理论模型中最大/最小进排气边圆弧半径为 $R_{\max} = 0.44 \text{ mm}$, $R_{\min} = 0.25 \text{ mm}$ 。

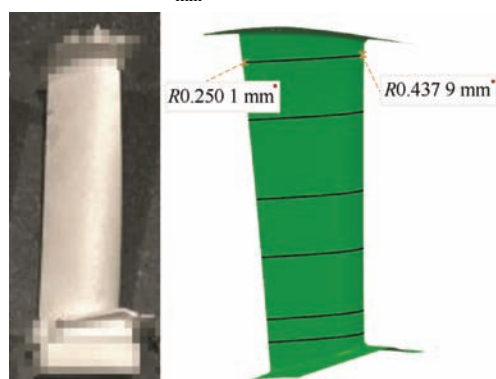
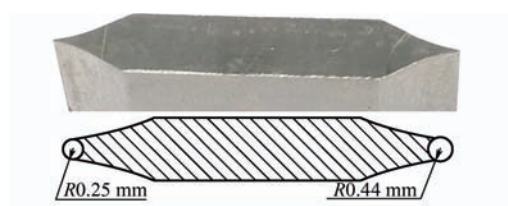


图 7 验证叶片及 CAD 模型

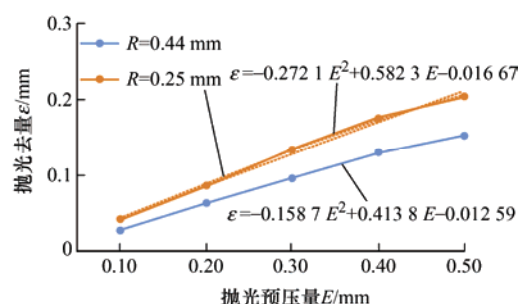
该叶型线轮廓度公差为 $v_d = -0.05 \text{ mm}$, $v_p = +0.05 \text{ mm}$, 但该叶片抛光前存在加工余量, 取最小去量 $\varepsilon_0 = 0.04 \text{ mm}$, 最大去量 $\varepsilon_1 = 0.1 \text{ mm}$ 。

由图 3b 可知, 在相同预压量下, 具有小尺寸半径的进排气边相较叶盆叶背具有更为显著的材料去除, 且对分组容差更为敏感。因此, 取图 8a 所示 $R_{\max} = 0.44 \text{ mm}$ 和 $R_{\min} = 0.25 \text{ mm}$ 抛光试件进行预压量 E 与抛光去量 ε 工艺试验, 即在其他工艺参数(进给速度、主轴转速、抛光轮规格等)优化确定的情况下, 在给定不同预压量($E=0.1 \text{ mm}$, 0.2 mm , 0.3 mm , 0.4 mm , 0.5 mm)下确定抛光去量。从而获得如图 8b 所示的预压量 E 与抛光去量 ε 关系曲线。其中, 以 $[0.1 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm}]$ 区间内斜率较大的 $R0.25 \text{ mm}$ 去量

曲线 $\varepsilon = F(E) = -0.2721 \cdot E^2 + 0.5823 \cdot E - 0.01667$ 为 ε 的确定依据。



(a) $R_{\max}=0.44 \text{ mm}$ 和 $R_{\min}=0.25 \text{ mm}$ 抛光试件



(b) 预压量 E 与抛光去量 ε 关系曲线

图 8 典型试件抛光工艺试验

该叶片多主轴同步抛光时预压量 $E = 0.2 \text{ mm}$, 取 $\alpha = 0.5$ 时, 则由式(2)可得 $-0.0798 \leq \varepsilon_d \leq 1.82$, 由式(4)可得 $\varepsilon_p \leq 0.0238$, 则整理式(3)为 $0.2721\varepsilon_p^2 - 0.4744\varepsilon_p + 0.4735\varepsilon_d - 0.2721\varepsilon_d^2 + 0.048 \geq 0$ 。为使得 $\varepsilon_p - \varepsilon_d$ 取得极大值, 在 $-0.0798 \leq \varepsilon_d \leq 1.82$ 区间内, $\varepsilon_p - \varepsilon_d$ 为 ε_d 的单调增函数, 当 $\varepsilon_p = 0.0238$ 时, $\varepsilon_p - \varepsilon_d$ 最大。此时 $\varepsilon_d = -0.0747$ 。由此, 组内叶片容许差异区间为 $[-0.0747 \text{ mm}, 0.0238 \text{ mm}]$, 则 $\varepsilon = 0.0985 \text{ mm}$ 。

对图 7 所示叶型以弦高公差 $h_\varepsilon = 5 \mu\text{m}$ 离散出 381 个分组候选点 $\{Q | q_1, \dots, q_i, \dots, q_{381}\}$, 其分布情况如图 9 所示。

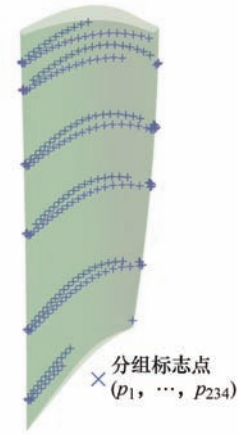


图 9 分组候选点集分布情况

抽取 $m=8$ 件样本叶片, 采用三坐标测量机对 Q 进行测量, 获得样本叶片在各候选点处最大有向

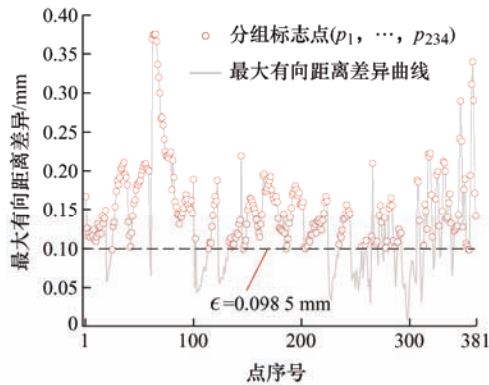
距离差异曲线, 如图 10a 所示。当 $\max/d_i \geq \epsilon = 0.0985 \text{ mm}$, ($i = 1, 2, \dots, 381$) 时, 存在 234 个分组标志点 $\{P | p_1, \dots, p_{234}\}$, 其分布如图 10b 所示, 对 22 件待分组叶片的点集 P 进行三坐标测量作为分组的数据源。

将数据源进行向量化表达, 单个叶片向量的维度为 $234 \times 3 = 702$ 。由图 10 所知的叶片间最大距离差异 $\max/D = 0.389 \text{ mm}$ 和容许差异 $\epsilon = 0.0985 \text{ mm}$ 确定式(5)中初始组数 $G = 4$ 。由第 3.3 小节确定聚类分组结果如表 1 所示。



(b) 分组标志点分布

图 10 最大差异曲线及分组标志点



(a) 分组标志点判断

表 1 分组结果及组内差异

组号	叶片编号#	分组中心	最小差异/mm	最大差异/mm
1	1, 2, 4, 10, 13, 19, 20, 22	1	0.015 2	0.101 2
2	3, 6, 7, 8, 9, 14, 17, 18, 21	8	0.028	0.099 8
3	11, 12, 15	11	0.004	0.101
4	5, 16	5	0.011	0.099 4

分组后, 计算组内两两叶片各分组标志点处最大差异, 如图 11 所示色彩图, 其中 u 、 v 参数坐标为叶

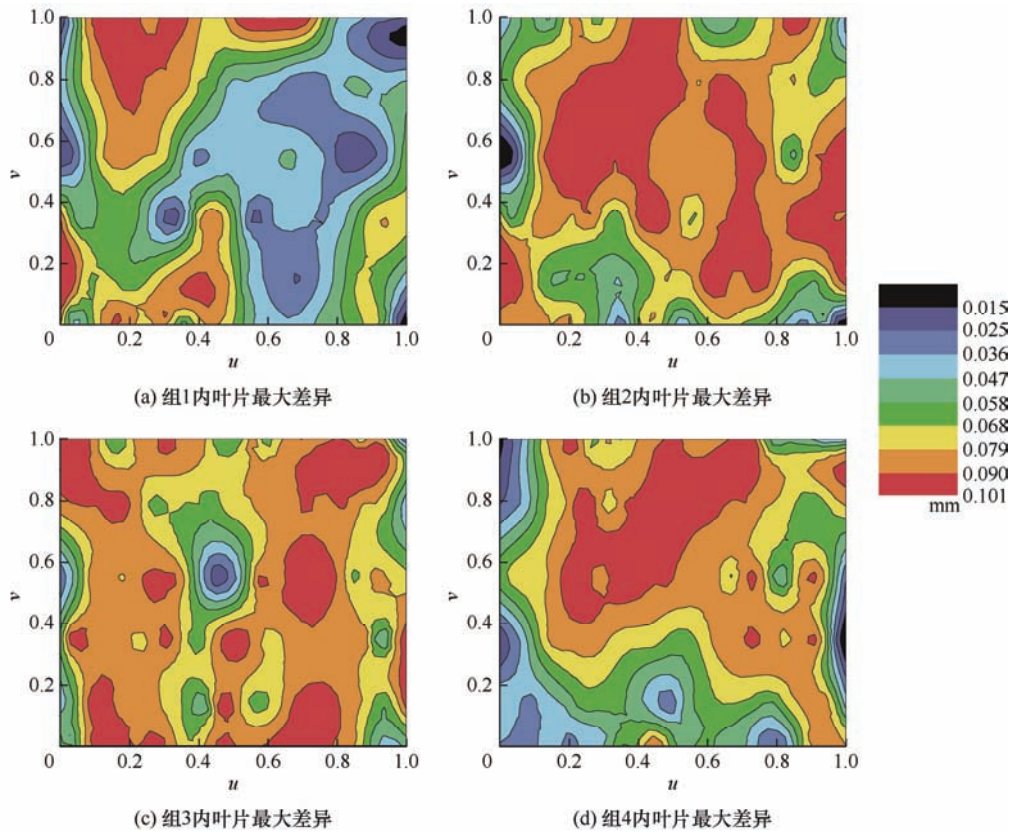


图 11 组内叶片最大差异分布情况

片的参数线方向。分组后组内叶片间最大差异为 0.101 mm, 该值略大于 $\epsilon=0.0985$ mm, 主要是由聚类分组时组内其他叶片至中心叶片差异计算的最近点, 不同于组内两两叶片差异计算的最近点引起的。

以组 1、组 2、组 3 与组 4 两两中心叶片各分组标志点处差异进行组间对比, 如表 2 所示。其中, 组间最大差异达到 0.303 mm, 差异超过 $\epsilon=0.0985$ mm 的最小比例为组 2 和组 3 间的 16.67%, 由此表明组间叶片不能用于同步抛光。

图 12 给出了表 2 中对比组差异在 u, v 下的分布情况, 色彩图所表示的组间最大差异多分布在关键的进排气边区域附近, 即 $u=0, 0.5, 1.0$ 参数附近, 符合实际批次叶片轮廓度、位置度、相对扭转等误

差显著表现在进排气边区域附近。

表 2 组间中心叶片差异对比

对比组#	最小差异/mm	最大差异/mm	差异超过 ϵ 值的百分比(%)
1、2	0.049	0.271	95.45
3、4	0.011	0.276	18.33
1、3	0.007	0.303	37.87
2、4	0.019	0.288	46.97
1、4	0.0014	0.297	85.60
2、3	0.0085	0.266	16.67

对组 1 中 1#、2#、4#、10# 叶片进行四主轴同步抛光加工, 预压量为 0.2 mm 下各叶片抛光过程稳定, 不存在由于型面差异而导致的过抛、欠抛等缺陷, 抛光效果如图 13 所示。图 14 给出了该 4 件叶片叶尖截面的同步抛光去量在 $[+0.041 \text{ mm}, +0.097 \text{ mm}]$

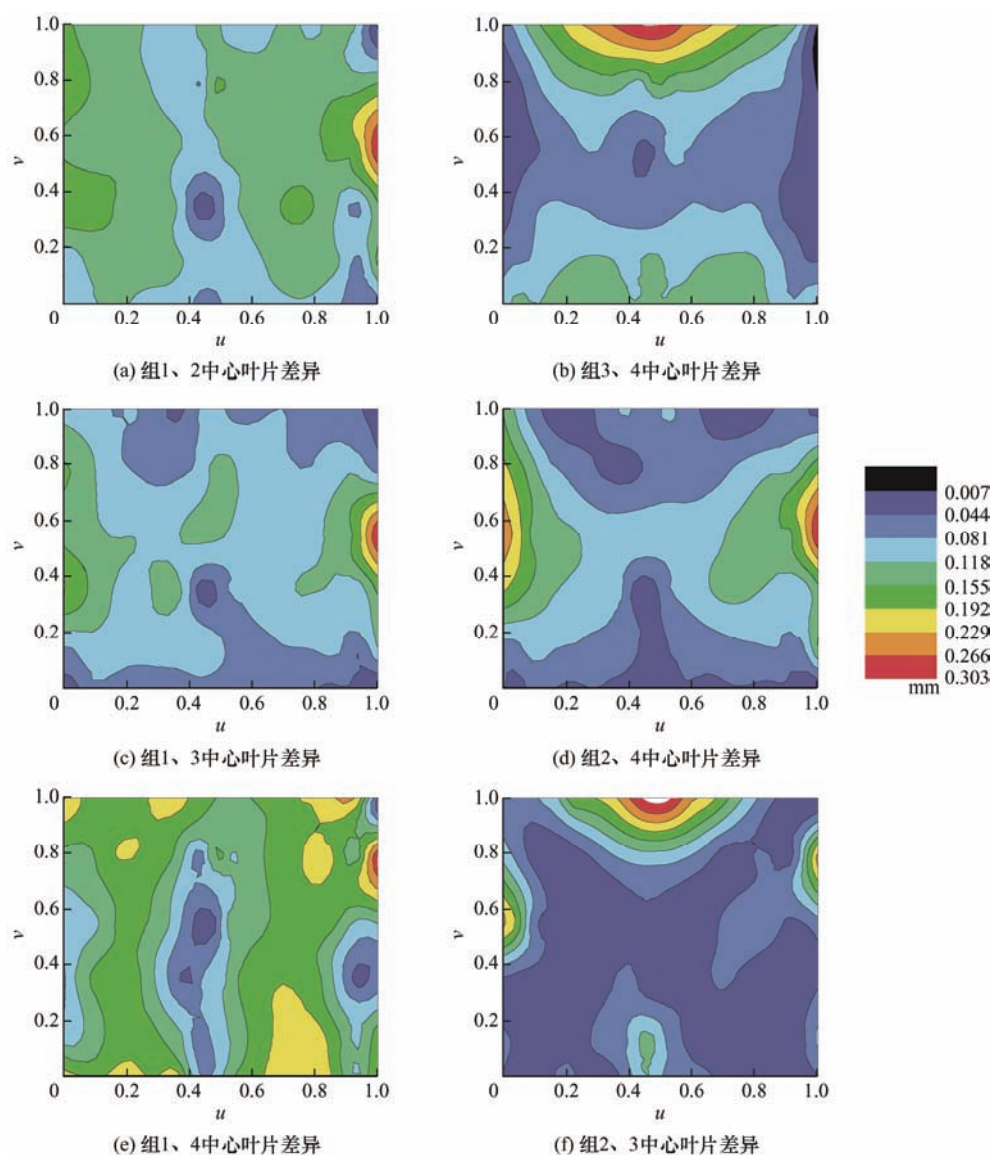


图 12 组间中心叶片差异分布情况

范围内, 且在该截面 4 件叶片去量差异 ≤ 0.026 mm。图 15 给出了该 4 件叶片叶尖截面的误差分布曲线, 抛光后截面线轮廓度 ≤ 0.054 mm, 且在该截面 4 件叶片精度差异 ≤ 0.021 mm。

由此可见, 同组各叶片抛光去量差异及抛光后精度差异趋势基本一致, 表明分组后提高了同组叶片的一致性, 满足了同步抛光的需求。

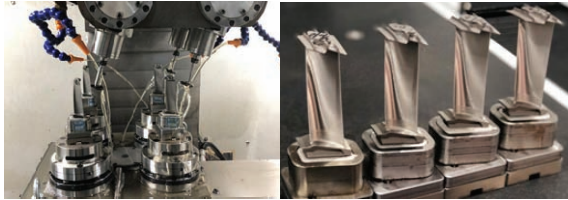


图 13 组 1 叶片同步抛光效果

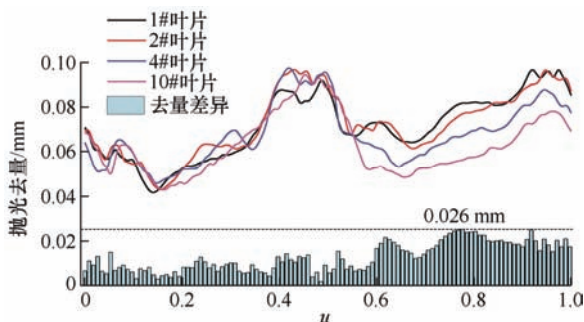


图 14 组 1 叶片叶尖截面同步抛光去量及差异

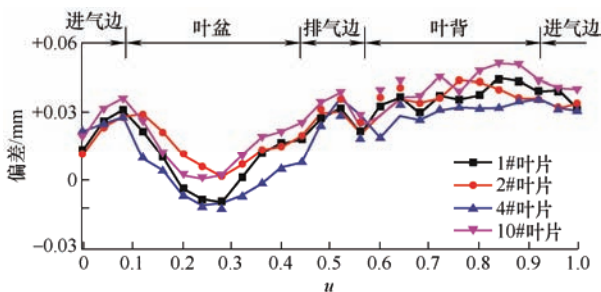


图 15 组 1 叶片同步抛光后叶尖截面误差分布曲线

4 结论

本文提出了一种在多主轴阵列加工领域进行叶片数字化分组的方法, 实现了同步抛光工艺与聚类算法的集成, 在高效率多主轴同步抛光保证抛光质量的需求下, 为提高组内叶片型面的一致性提供了完整的实施途径。首先, 依据抛光去量模型给出组内叶片容许差异的量化指标。其次, 将理论型面关键点表征与抽样叶片实际型面差异相结合, 实现对分组标志点的规划。最后, 将两两叶片型面的一致

性表示为分组标志点实测形状数据的向量差, 在组内叶片容许差异约束下以 Ray-Turi 指数为目标确立最优分组。

(1) 通过基于形状的叶片型面聚类分组方法可将组内叶片控制在同步抛光工艺容许差异内(验证实例为 0.098 5 mm 内), 从而提高了组内叶片的一致性。组内叶片抛光后无过抛、欠抛等缺陷, 抛光去量差异 ≤ 0.026 mm, 可以满足同步抛光需求, 也验证了本文方法的有效性。

(2) 分组后组间叶片差异达到 0.303 mm, 超过同步抛光工艺容许差异的区域达到 16.67% 以上, 甚至达到 95.4%, 由此表明组间叶片不能用于同步抛光, 本文方法分组效果明显。

(3) 组内叶片同步抛光后截面线轮廓度 ≤ 0.054 mm, 同位置精度差异 ≤ 0.021 mm, 由此表明在分组提高了同组叶片一致性的前提下, 同步抛光精度可满足设计需求。

参 考 文 献

- [1] 朱大虎, 徐小虎, 蒋诚, 等. 复杂叶片机器人磨抛加工工艺技术研究进展[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 524265. ZHU Dahu, XU Xiaohu, JIANG Cheng, et al. Research progress in robotic grinding technology for complex blades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 524265.
- [2] LIU De, SHI Yaoyao, LIN Xiaojun, et al. Study on improving surface residual stress of polished blade after polishing based on two-stage parameter method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5): 1491-1503.
- [3] ZHOU Pei, ZHAO Xingwei, TAO Bo, et al. Time-varying isobaric surface reconstruction and path planning for robotic grinding of weak-stiffness workpieces[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 64: 101945.
- [4] LV Yuanjian, PENG Zhen, QU Chao, et al. An adaptive trajectory planning algorithm for robotic belt grinding of blade leading and trailing edges based on material removal profile model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 66: 101987.
- [5] 徐小虎. 压气机叶片机器人砂带磨抛加工关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. XU Xiaohu. Research on the key technology of robotic

- abrasive belt grinding of compressor blade[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [6] ZOU Lai, LIU Xifan, REN Xu, et al. An integrated polishing method for compressor blade surfaces[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016: 1-11.
- [7] LI Zhaorui, ZOU Lai, YIN Jiachao, et al. Investigation of parametric control method and model in abrasive belt grinding of nickel-based superalloy blade[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(5-8): 3301-3311.
- [8] XIAN Chao, SHI Yaoyao, LIN Xiaojun, et al. Force modeling for polishing aero-engine blades with abrasive cloth wheels[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(11): 5255-5267.
- [9] WANG Zhiwei, LIN Xiaojun, SHI Yaoyao, et al. Reducing roughness of freeform surface through tool orientation optimization in multi-axis polishing of blisk[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(1-4): 1-13.
- [10] 陈志同, 张云, 刘瑞松, 等. 航空发动机叶片矩形阵列磨削加工技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(9): 34-39.
- CHEN Zhitong, ZHANG Yun, LIU Ruisong, et al. Rectangular array grinding process of aero-engine blade with complex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(9): 34-39.
- [11] STAMA. System 5 two place [EB/OL]. <https://stama.de/1/overview-machining-centers/system-5-two-place/>, 2022-04-15.
- [12] CHIRON. Multi-spindle machining [EB/OL]. <https://chiron.de/en/products/technology/multi-spindle-machining>, 2022-04-15.
- [13] 蔺小军, 崔彤, 杨碧颖, 等. 薄壁叶片叶型多工序加工检验模型建立方法[J]. 航空学报, 2019, 40(11): 324-333.
- LIN Xiaojun, CUI Tong, YANG Biying, et al. Method for establishing machining and inspection model of multi-stage machining processes of thin-walled blades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(11): 324-333.
- [14] 郑似玉, 滕金芳, 羌晓青. 叶片加工超差对高压压气机性能影响和敏感性分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 216-224.
- ZHENG Siyu, TENG Jinfang, QING Xiaoqing. Sensitivity analysis of manufacturing variability on high-pressure compressor performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 216-224.
- [15] 翟德慧, 张发平, 阎艳, 等. 基于加工特征向量的制造设备分组算法研究[J]. 现代制造工程, 2016(1): 1-6, 72.
- ZHAI Dehui, ZHANG Faping, YAN Yan, et al. Machining feature vector based algorithm for manufacturing equipment grouping[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(1): 1-6, 72.
- [16] 白俊杰, 龚毅光, 王宁生, 等. 多目标柔性作业车间分批优化调度[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(2): 396-403.
- BAI Junjie, GONG Yiguang, WANG Ningsheng, et al. Multi-objective flexible Job Shop scheduling with lot-splitting[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(2): 396-403.
- [17] 覃斌, 阎春平, 汪科, 等. 支持多任务集中下料的零件分组优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(5): 943-949.
- QIN bin, YAN Chunping, WANG Ke, et al. Grouping optimization method of large-scale parts supporting centralized cutting stock[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(5): 943-949.
- [18] 戚得众, 饶运清, 余天, 等. 板类零件分组下料优化研究[J]. 机械设计与制造, 2015(6): 129-133.
- QI Dezhong, RAO Yunqing, YU Tian, et al. Research on parts grouping cutting optimization of plate parts[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(6): 129-133.
- [19] 吕迅, 张冬峰, 金杨福. 软脆光学镜片多件抛光的表面质量一致性研究[J]. 轻工机械, 2017(6): 50-53, 60.
- LÜ Xun, ZHANG Dongfeng, JIN Yangfu. Consistency of surface quality on batch polishing of soft-brittle optical lens[J]. Light Industry Machinery, 2017(6): 50-53, 60.
- [20] MENG Fanjun, LI Xun, CHEN Zhitong, et al. Study on the cantilever grinding process of aero-engine blade[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(11): 1393-1400.
- [21] 谢明轩. 整体叶盘数控抛光工具研制及工艺研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2020.
- XIE Mingxuan. Development and technology research of

- CNC polishing tool for blisk[D]. Beijing: Beihang University, 2020.
- [22] ZHANG Yun, CHEN Zhitong, ZHU Zhengqing, et al. A sampling method for blade measurement based on statistical analysis of profile deviations[J]. *Measurement*, 2020, 163(1): 107949.
- [23] JIANG Ruisong, WANG Wenhua, ZHANG Dinghua, et al. A practical sampling method for profile measurement of complex blades[J]. *Measurement*, 2016, 81: 57-65.
- [24] BUNN P, OSTROVSKY R. Oblivious sampling with applications to two-partyk-means clustering[J]. *Journal of Cryptology*, 2020, 33(3): 1362-1403.
-
- 作者简介:** 张云, 男, 1987 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为先进数控加工技术与装备、复杂曲面 CAD/CAM 技术。
E-mail: zhangyun@ncut.edu.cn
- 陈志同(通信作者), 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进数控加工技术与装备、复杂曲面 CAD/CAM 技术和难加工材料切削参数优化。
E-mail: ztchen@buaa.edu.cn