

复杂曲面机器人抛磨路径规划与姿态平滑

冀泽金¹, 赵元^{1,2}

¹沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

²沈阳科技学院机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年7月19日; 录用日期: 2026年8月12日; 发布日期: 2026年8月18日

摘要

针对复杂曲面叶片机器人抛磨中路径覆盖难以与工艺参数对应、传统刀位姿点离散难以兼顾轮廓精度和抛磨头姿态连续性的问题, 提出一种基于曲面物理映射和弦高-姿态双重约束的路径规划方法。以NURBS曲面为基础, 建立参数域与实际覆盖长度的映射关系; 根据抛磨头有效宽度和搭接率确定最大允许行距, 据此生成加工路径框架。进一步以弦高误差和末端姿态偏转角共同确定刀位点, 经过坐标转换后规划出完整的机器人抛磨路径。结果表明, 所提方法在满足弦高误差要求的同时, 可减小姿态变化峰值。恒力抛磨试验中, 叶片表面粗糙度由 $Ra > 1.6 \mu m$ 降至 $Ra = 0.312 \mu m$ 。

关键词

机器人抛磨, NURBS曲面, 路径规划, 姿态平滑

Path Planning and Pose Smoothing for Robotic Polishing of Complex Surfaces

Zejin Ji¹, Yuan Zhao^{1,2}

¹School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

²School of Mechanical Engineering, Shenyang Institute of Science and Technology, Shenyang Liaoning

Received: July 19, 2026; accepted: August 12, 2026; published: August 18, 2026

Abstract

To address the mismatch between path coverage and process parameters, as well as the difficulty of conventional tool-pose point discretization in simultaneously ensuring profile accuracy and polishing-head orientation continuity during robotic polishing of complex blade surfaces, a path-planning method based on surface physical mapping and chord-height-orientation dual constraints is proposed. Using a NURBS representation of the blade surface, a mapping between the parametric

domain and the actual coverage length is established. The maximum allowable path spacing is determined from the effective polishing width and overlap ratio, based on which the machining path framework is generated. Chord-height error and end-effector orientation deviation are then jointly used to determine tool-pose points. After coordinate transformation, a complete robotic polishing path is obtained. Results show that the proposed method satisfies the chord-height tolerance while reducing orientation-change peaks. Constant-force polishing experiments reduce the surface roughness from $Ra > 1.6 \mu m$ to $Ra 0.312 = \mu m$.

Keywords

Robot Polishing, NURBS Surface, Path Planning, Attitude Smoothing

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着航空发动机、风电装备等高端制造领域的发展, 叶片等复杂曲面零件对表面质量和轮廓精度提出了更高要求。此类零件多采用钛合金、高温合金等难加工材料, 且通常具有薄壁、扭曲和曲率变化大的特点, 精密磨抛难度较高[1]-[3]。传统手工抛磨依赖人工经验, 存在效率低、劳动强度大和一致性不足等问题; 多轴数控机床虽然精度较高, 但专用性强、柔性有限, 难以充分适应多品种、小批量生产[4]-[6]。工业机器人具有工作空间大、通用性强和易于集成功控、视觉等模块的优势, 为复杂曲面精密抛磨提供了新的实现方式[7] [8]。但机器人抛磨能否稳定实施, 关键仍在于刀具路径是否同时满足轮廓精度、加工覆盖和姿态平稳等要求[9]。

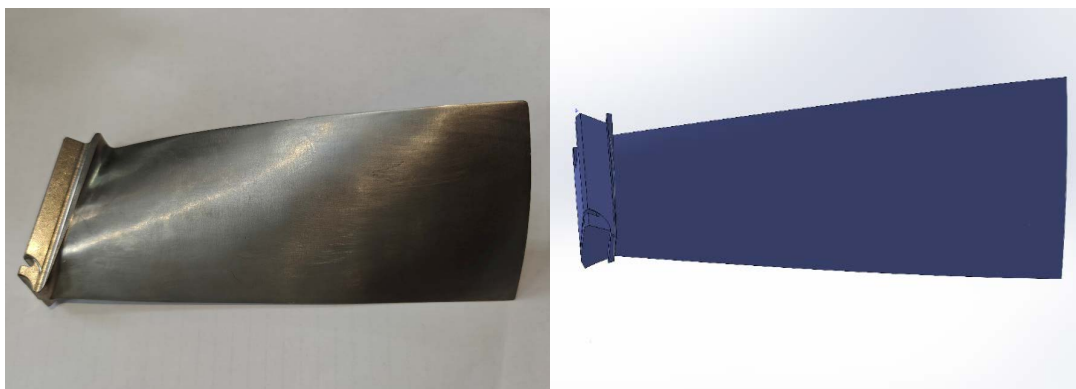
现有路径规划研究主要围绕路径步长和行距展开: 前者用于控制离散轨迹对曲面的逼近误差, 后者用于保证相邻轨迹之间的加工残留满足工艺要求[10]。常见方法包括平行截面法、等参数线法、等弦高误差法、等残留高度法、等距偏置法及曲面特征提取法等[11]-[13]。为提高复杂曲面的加工质量, 部分研究将等弦高误差与等残留高度结合, 用于同步确定路径步长和行距[14]; 也有研究通过改进 Douglas-Peucker 算法、泰勒插补算法或曲率驱动加密策略, 使刀位点在曲率较大区域适当增加, 在平缓区域减少[15]-[17]。

现有复杂曲面抛磨路径规划多以参数间隔或单一几何指标作为依据, 难以使路径覆盖距离直接对应抛磨工艺要求; 同时, 仅依靠几何误差进行刀位姿点划分时, 虽然能够保证离散路径对曲面轮廓的逼近精度, 但在局部扭转或法向变化较快区域, 相邻刀位点之间仍可能出现较大的抛磨头姿态变化。为此, 本文提出一种基于曲面物理映射与弦高 - 姿态双重约束的路径规划方法。首先建立曲面参数域与实际横向覆盖长度之间的映射关系, 根据抛磨头有效宽度和搭接率确定最大允许行距, 进而生成加工路径框架; 随后将弦高误差和末端姿态偏转角共同作为区间细分依据, 对每条路径进行刀位姿点自适应生成。弦高误差用于评价相邻刀位点之间的曲面逼近精度, 姿态偏转角用于评价抛磨头在相邻刀位点之间的姿态变化程度。二者分别对应路径位置精度和末端运动连续性, 因此在刀位姿点生成过程中作为并列约束进行判断。

2. 路径规划

2.1. 曲面建模

叶片工件的实物及模型图如图 1 所示。



(a) 叶片实物

(b) 叶片模型

Figure 1. Blade workpiece**图 1.** 叶片工件

建立工件在 u 方向 p 次、 v 方向 q 次的 NURBS 曲面的 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 表达式为:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} p_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}} \quad (1)$$

式中 $\{w_{i,j}\}$ 是权因子和 $\{N_{i,p}(u)\}$ 和 $\{N_{j,q}(v)\}$ 为两个参数方向的 B 样条基函数。

2.2. 路径行距规划

为避免路径在物理空间中出现局部过密或过疏, 本文沿横向参数方向计算最大尺度因子, 并将其积分分为物理弧长。考虑到单条路径覆盖率与材料去除的均匀性, 选择横磨(U 向走刀)。先去除 S_v 中沿走刀方向的分量, 得到横向尺度向量:

$$t_u = \frac{S_u}{\|S_u\|}, S_{v\perp} = S_v - t_u (S_v \cdot t_u) \quad (2)$$

整条路径取横向尺度最大值, 构建累计横向覆盖长度。

$$g_v(v) = \max_{u \in [u_{\min}, u_{\max}]} \|S_{v\perp}(u, v)\|$$

$$s(v) = \int_{v_{\min}}^v g_v(\eta) d\eta \quad (3)$$

设路径排列方向总物理宽度为 L_v , 最大允许行距为 $W_{\max}$, 抛磨头有效宽度为 b , 搭接率为 ρ , 则最大允许行距表示为:

$$W_{\max} = b(1 - \rho) \quad (4)$$

则路径数量取为:

$$N = \text{ceil} \left(\frac{L_v}{W_{\max}} \right) + 1 \quad (5)$$

在物理弧长坐标中均匀布置路径位置通过反插值得到各加工路径对应的参数位置。抛磨头有效宽度取 12 mm, 不同目标搭接率下的路径框架统计结果见表 1。随着最大允许行距增大, 生成路径数量相应减少, 从而实现路径数量及其位置的自适应确定。

Table 1. Statistics of paths with different overlap ratios
表 1. 不同搭接率路径统计

搭接率/%	最大行距/mm	路径数量/条	实际行距/mm
50	6	13	4.71~5.84
40	7.2	11	5.61~7.01
30	8.4	10	6.22~7.79
20	9.6	9	7.99~8.77

当搭接率为 30%时, 路径行距规划如图 2 所示。

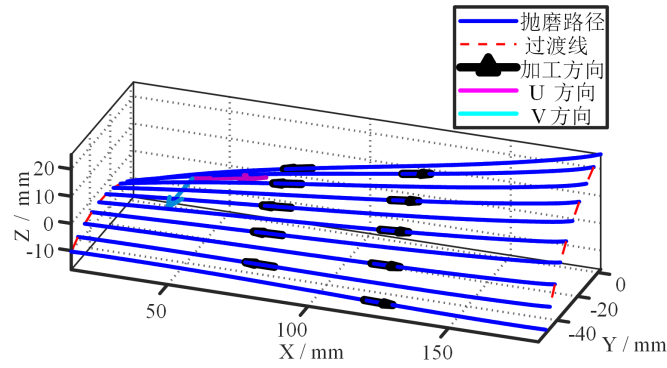


Figure 2. Path framework diagram
图 2. 路径框架图

2.3. 刀位点规划

2.3.1. 弦高误差约束

为保证离散轨迹对实际曲面路径的逼近精度, 本文以弦高误差作为刀位点间距的几何约束。

以 U 向走刀为例, 设曲线上相邻两刀位点分为设第 j 条路径上相邻两个路径点 $P_{i,j} = S(u_i, v_j)$ 和 $P_{i+1,j} = S(u_{i+1}, v_j)$ 。采用递归中点法估计当前区间的弦高误差, 设中间路径点为 $P_{m,j} = S(u_m, v_j)$ 。

弦向量和相对向量为:

$$\begin{aligned} c_{ij} &= P_{i+1,j} - P_{i,j} \\ r_{ij} &= P_{m,j} - P_{i,j} \end{aligned} \quad (6)$$

弦高误差表达为:

$$h_i = \frac{\|c_{ij} \times r_{ij}\|}{\|c_{ij}\|} \quad (7)$$

误差约束为:

$$h_i \leq \varepsilon \quad (8)$$

2.3.2. 姿态变化约束

为提高末端运动的连续性, 以末端姿态作为刀位姿点间距的姿态约束。抛磨头轴线取刀位点处的曲面单位法向量。

$$N(u, v) = S_u(u, v) \times S_v(u, v) \quad (9)$$

依据生成的路径框架切矢量为 S_u ，根据右手定则确定另一矢量。叶片曲面的局部坐标 $\{L\}$ 。

$$\begin{cases} x_L = \frac{S_u}{\|S_u\|} \\ y_L = \frac{N(u,v) \times S_u}{\|N(u,v) \times S_u\|} \\ z_L = \frac{N(u,v)}{\|N(u,v)\|} \end{cases} \quad (10)$$

α 、 β 、 γ 分别为两个相邻路径点的法向偏转角、切向偏转角、副法向偏转角，由于局部正交标架满足 $y_L = z_L \times x_L$ 的向量从属性，所以只需 α 和 β 。

相邻两个路径点法向偏转角和切向偏转角可表示为：

$$\alpha_i = \arccos(z_L(u_i) \cdot z_L(u_{i+1})), \quad \beta_i = \arccos(x_L(u_i) \cdot x_L(u_{i+1})) \quad (11)$$

夹角阈值划分刀位点的约束条件：

$$\alpha_i \leq \alpha_{lim}, \quad \beta_i \leq \beta_{lim} \quad (12)$$

2.3.3. 刀位点构建流程

以 U 向横磨为例，则生成路径的步骤如下所述。

(1) 确定合适物理间距，采用行距映射法规划 U 向的框架曲线，如图 2 所示。

(2) 得到 U 向的框架曲线后，准备对各个曲线进行位姿规划，从第一条 U 向曲线 $V=0$ 开始依次规划各条曲线，根据设定的参数值沿着曲线先前探索。

(3) 根据式(8)和式(12)的物理阈值和姿态阈值划分标准，选择合适阈值保证向前探索的路径点 $(u, v+x)$ ，只有当三项指标同时满足上述条件时，当前候选点才被保留为有效刀位姿点；若其中任一指标超过对应阈值，则认为该区间不能同时满足曲面逼近精度和姿态连续性要求，需要对当前区间进行二分细化，并重新计算细分后区间的弦高误差和姿态偏转角。在满足条件的刀位点的基础上以此计算直到曲线终点。

(4) 将加密后的刀位点按路径顺序首尾连接，构成完整的刀路规划，并导出各点的末端位姿矩阵，经过坐标转化生成离线编程文件。

图 3 为完整路径规划示意图，蓝线、绿线和红线分别表示局部法向、进给切向和侧向。

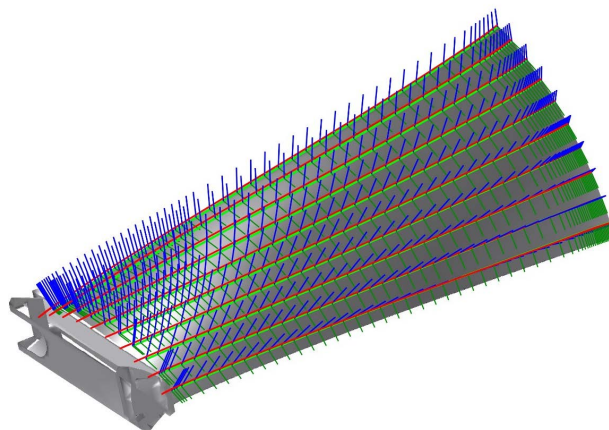


Figure 3. Schematic diagram of path planning

图 3. 路径规划示意图

2.4. 轨迹输出

完成离散后, 将各刀位点按加工顺序连接, 并进行坐标变换, 建立曲面局部坐标系{L}、工件坐标系{W}、机器人基坐标系{B}、工具坐标系{T}及 TCP 坐标系{F}之间的转换关系为:

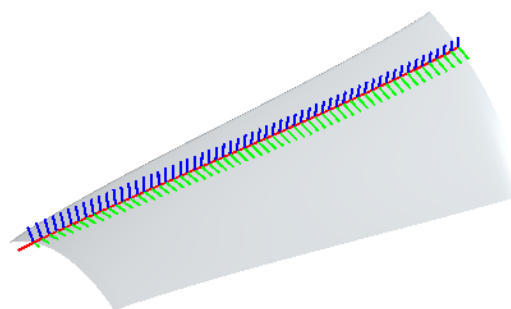
$$T_F^B = T_W^B \cdot T_L^W \cdot T_T^L \cdot T_F^T \quad (13)$$

经过坐标转换后可获得机器人控制器可识别的位置和姿态数据, 并输出离线编程文件。

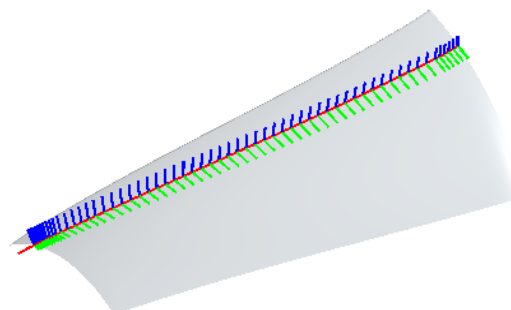
3. 仿真与实验验证

3.1. 路径规划结果与分析

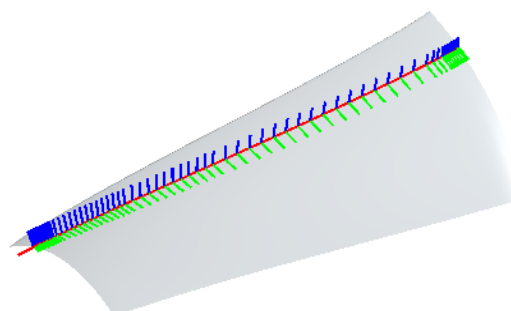
为分析双重约束对刀位姿点分布的作用, 选取同一 U 向路径, 分别采用等弦长法、弦高误差法和本文方法进行离散。各方案的起止位置一致, 点数控制在相近范围。图 4 展示了三种方法的点位分布, 可用于比较其在曲率或姿态变化较快区域的局部加密能力。



(a) 等弦长法刀位点划分图



(b) 等弦高误差法刀位点划分图



(c) 所提算法刀位点划分图

Figure 4. Distribution diagram of tool points for three algorithms

图 4. 三种算法的刀位点分布图

为考察各方法对路径局部变化的响应能力, 统计同一参数曲线的曲率分布及每 10%弧长区间内的刀位点数量, 结果见图 4。结合图 5 可知, 等弦长法的点位间隔基本固定, 难以反映曲率变化。等弦高误差法与本文方法均能进行自适应离散; 在路径中部较平缓区域, 两者点数差别较小, 而在前、后缘等变化较快区段, 本文方法增加了刀位姿点数量, 使局部路径描述更细致。

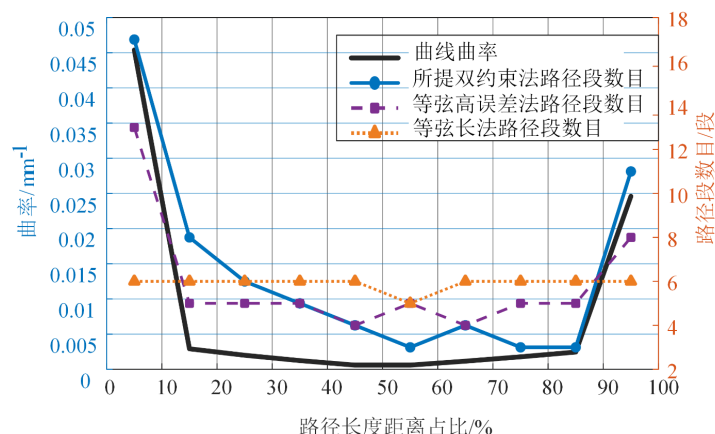


Figure 5. Statistics of curvature distribution and tool point quantity

图 5. 曲率分布和刀位点数目统计图

弦高误差表征离散线段与实际曲线的偏差。由图 6 可见, 等弦长法在局部曲率较大处误差起伏明显, 部分点超过设定范围。本文方法依据弦高误差调整点距, 在保证误差限值的同时, 避免在平缓区域过度加密。

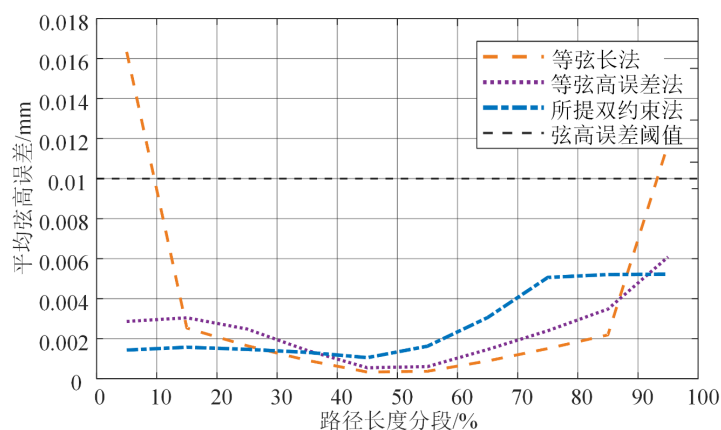
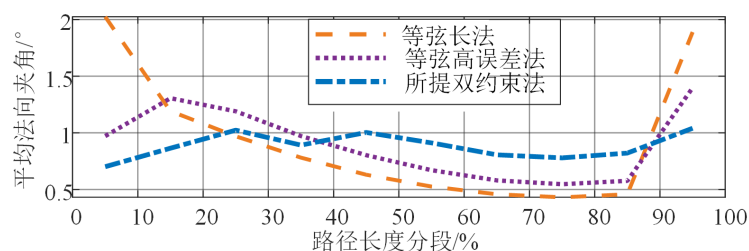


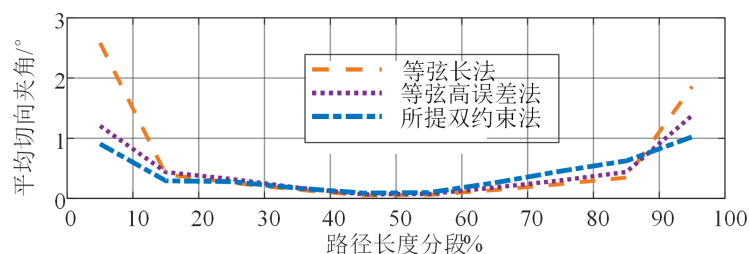
Figure 6. Comparison diagram of chord height error for three algorithms

图 6. 三种算法的弦高误差对比图

图 7 给出了相邻刀位点之间的法向偏转角和切向偏转角变化情况。法向偏转角主要反映抛磨头工具轴方向随曲面法向变化的调整幅度, 切向偏转角则反映抛磨头沿路径进给方向的姿态变化程度。两者共同表征相邻刀位姿之间的连续性, 是评价机器人末端姿态变化是否平稳的重要指标。结果表明, 本文方法生成的刀位姿点在两个方向上的偏转角均控制在 1° 以内, 且曲线峰值较低、波动幅度较小, 说明相邻刀位点之间的抛磨头姿态变化更加连续。该结果表明, 姿态约束能够有效抑制局部区域的姿态突变, 使机器人末端在沿轨迹运动时保持更平稳的姿态过渡, 有利于减小抛磨过程中的接触波动和运动冲击。



(a) 法向矢量夹角变化图



(b) 切向矢量夹角变化图

Figure 7. Diagram of vector angles between adjacent path points
图 7. 相邻路径点矢量夹角图

为进一步验证本文算法对机器人运动平稳性的改善效果, 仅分析相邻刀位点间的法向和切向偏转角仍不足以直接反映机器人本体的运动状态。因此, 本文在 MATLAB 中建立机器人运动学模型, 并将规划得到的刀位姿点经过坐标转换后输入仿真模型, 计算机器人执行轨迹过程中的各轴关节变量变化。考虑到机器人第 4、5、6 轴主要承担末端抛磨头姿态调整任务, 其运动变化能够较直接反映姿态规划对机器人执行平稳性的影响, 因此选取第 4~6 轴关节加速度作为评价指标。

关节加速度可用于表征机器人运动变化的剧烈程度。当关节加速度峰值较大时, 说明机器人在局部路径段需要进行快速姿态调整, 容易引起末端运动冲击和接触状态波动; 当关节加速度曲线变化平缓、峰值较低时, 说明机器人关节运动更加连续, 轨迹执行过程更加稳定。因此, 第 4~6 轴关节加速度曲线能够从机器人运动层面对路径姿态规划效果进行补充验证。

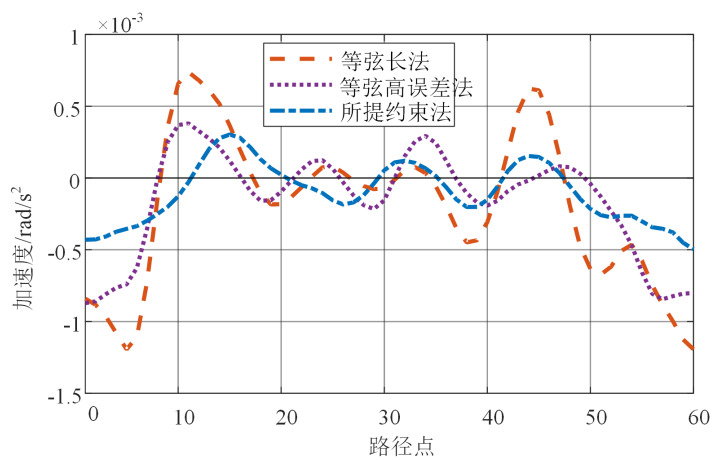
由图 8 可知, 等弦高误差法在部分路径段出现较明显的关节加速度峰值, 尤其在曲面扭转较大或法向变化较快的位置, 机器人腕部关节需要在较短时间内完成姿态调整, 导致加速度波动增大。相比之下, 本文所提算法在弦高误差约束的基础上引入法向偏转角和切向偏转角判据, 使姿态变化较快区域的刀位姿点得到补充加密, 从而减小相邻刀位姿之间的角度变化。因此, 第 4~6 轴关节加速度曲线整体更加平缓, 局部峰值有所降低。

三条代表性路径的仿真结果均表明, 本文算法能够在保证曲面逼近精度的同时, 降低机器人腕部关节的加速度波动, 使末端抛磨头沿轨迹运动时具有更好的姿态连续性。该结果从机器人关节运动角度进一步证明了弦高-姿态双重约束方法的有效性。

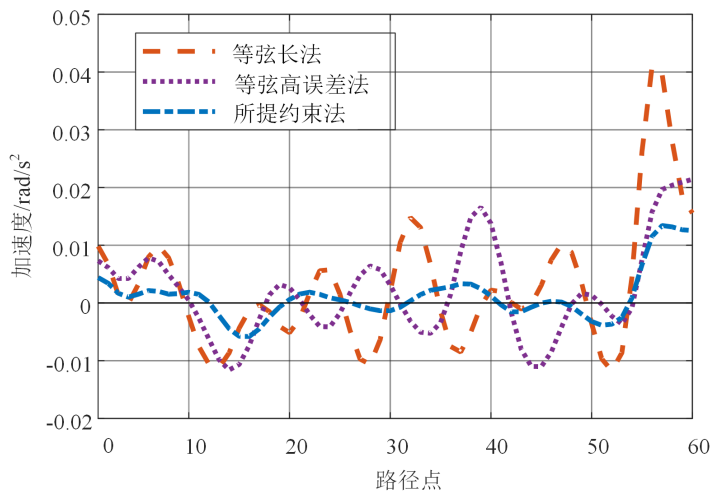
3.2. 实验验证

3.2.1. 抛磨平台搭建

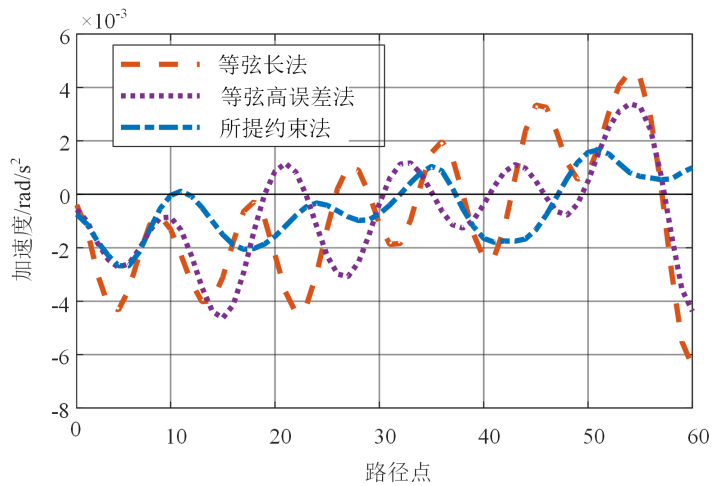
搭建机器人抛磨平台, 抛磨系统主要包括 ABB1410 机器人、恒力抛磨头、抛磨头控制单元、叶片夹具、伺服旋转平台、粗糙度测量仪等一套完整的系统, 通过离线程序控制机器人完成恒力抛磨加工。机器人抛磨平台如图 9 所示。



(a) 四轴关节加速度



(b) 五轴关节加速度



(c) 六轴关节加速度

Figure 8. Comparative analysis of three-joint angular accelerations
图 8. 三轴关节加速度对比分析

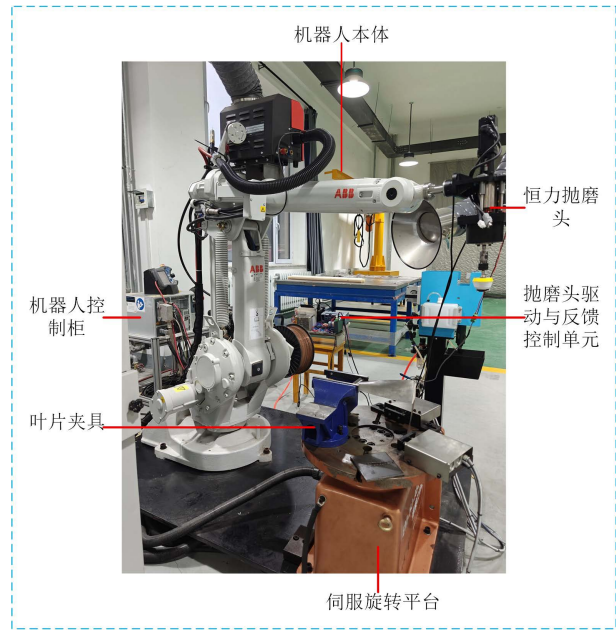


Figure 9. Robotic polishing system
图 9. 机器人抛磨系统

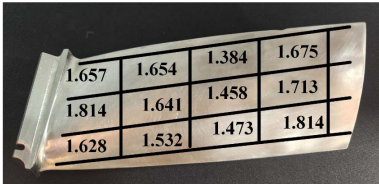
3.2.2. 轨迹规划与执行

选取某型号发动机钛合金叶片开展抛磨试验。首先将待加工曲面导入规划程序，提取其参数边界并生成 U 向加工路径。本文方法依据最大允许行距确定相邻路径位置，并在各路径上采用弦高误差和姿态偏转角联合确定刀位点；对照组仅采用等弦高误差法进行刀位点离散。

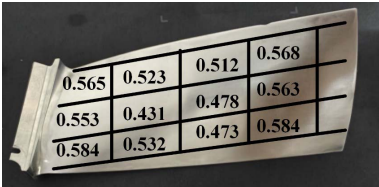
两种规划结果均经坐标转换生成机器人离线程序，并在相同加工区域、加工顺序及工艺条件下完成抛磨。试验中，法向接触力设为 10 N，砂纸目数为 800 目，有效抛磨宽度为 12 mm，主动轮转速为 3000 r/min，末端进给速度为 10 mm/s。

3.2.3. 实验结果分析

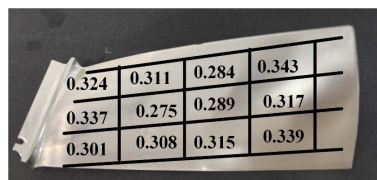
为对比不同路径规划方法的抛磨效果，分别选取抛磨前叶片、采用等弦高误差法抛磨后的叶片及采用本文算法抛磨后的叶片作为试样。将各叶片待测区域划分为 12 个区域，并采用粗糙度测量仪分别进行测量，具体分区方式如图 10 所示。



(a) 抛磨前叶片效果图



(b) 等弦高误差法抛磨叶片效果图



(c) 所提算法抛磨叶片效果图

Figure 10. Diagram of blade surface condition and roughness values**图 10.** 叶片表面状态与粗糙度数值图

实验结果表明, 抛磨前叶片表面仍保留明显加工纹理, 平均粗糙度为 $Ra1.620\ \mu\text{m}$ 。经等弦高误差法规划抛磨后, Ra 降至 $0.531\ \mu\text{m}$; 采用本文方法后进一步降至 $0.312\ \mu\text{m}$ 。对 12 个测量区域进行统计, 等弦高误差法和本文方法的粗糙度标准差分别为 $0.049\ \mu\text{m}$ 和 $0.022\ \mu\text{m}$ 。本文方法在降低平均粗糙度的同时, 区域间粗糙度波动更小, 表明双重约束生成的轨迹有助于提升叶片表面质量的一致性。

4. 结论

(1) 建立参数域与曲面实际横向长度的映射关系, 以最大允许行距为依据布置加工路径。结合抛磨头有效宽度和目标搭接率, 确定路径数量及对应参数位置。

(2) 构建弦高误差 - 姿态偏转联合约束的刀位姿点生成方法。弦高误差用于控制离散轨迹的轮廓逼近精度, 姿态偏转角用于限制相邻点间的抛磨头姿态变化。当任意指标超限时, 对当前区间继续细分, 从而在局部几何或姿态变化较快区域自动加密点位, 兼顾轨迹精度与执行效率。

(3) 通过轨迹规划结果和叶片恒力抛磨试验验证了方法的可执行性。结果表明, 所提方法生成的轨迹姿态变化较平稳。平均值由抛磨前的 $Ra\ 1.620\ \mu\text{m}$ 降至 $Ra\ 0.312\ \mu\text{m}$; 其标准差为 $0.022\ \mu\text{m}$, 低于等弦高误差法的 $0.049\ \mu\text{m}$, 表明所提方法可获得更均匀的叶片表面质量。

参考文献

- [1] 黄云, 肖贵坚, 邹莱. 航空发动机叶片机器人精密砂带磨削研究现状及发展趋势[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 53-72.
- [2] Wang, T., Zou, L., Wan, Q., Zhang, X., Li, Y. and Huang, Y. (2021) A High-Precision Prediction Model of Surface Roughness in Abrasive Belt Flexible Grinding of Aero-Engine Blade. *Journal of Manufacturing Processes*, **66**, 364-375. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.002>
- [3] 张高, 刘梅军, 韩嘉琪, 等. 压气机整体叶盘修复再制造的研究进展[J]. 航空材料学报, 2024, 44(3): 65-81.
- [4] 苏将兵, 廖宏谊, 苏卿双. 机器人模具抛光的研究现状与发展趋势[J]. 模具工业, 2012, 38(6): 63-66.
- [5] 李文辉, 温学杰, 李秀红, 等. 整体叶盘抛磨技术研究现状及其发展趋势[J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 88-102.
- [6] 李秀红, 王嘉明, 李文辉, 等. 航空发动机铣削叶片抛磨技术研究现状及其发展趋势[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(12): 2132-2143.
- [7] Li, X., Zhao, H., Zhou, H., Cai, Y., Yin, Y. and Ding, H. (2025) Robotic Grinding and Polishing of Complex Aeroengine Blades Based on New Device Design and Variable Impedance Control. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **92**, Article ID: 102875. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102875>
- [8] Tian, F., Lv, C., Li, Z. and Liu, G. (2016) Modeling and Control of Robotic Automatic Polishing for Curved Surfaces. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **14**, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.05.010>
- [9] 雷红华, 吴何畏. 面向机器人轮毂抛光的关节运动规划控制策略[J]. 机床与液压, 2025, 53(9): 96-104.
- [10] 顾连睿, 郭国强, 江仁政, 等. 薄壁复杂结构的机器人打磨路径规划和力位控制技术现状与发展[J]. 机械工程学报, 2026, 62(5): 117-132.
- [11] 邓建新, 袁邦颐, 黄秋林, 等. 基于工业机器人的复杂曲面磨抛关键技术综述[J]. 机械工程学报, 2024, 60(7): 1-21.

- [12] 方健, 尹旷, 王红斌, 等. 机器人砂带打磨路径规划[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(6): 1-6.
- [13] Sun, Y., Feng, D. and Guo, D. (2015) An Adaptive Uniform Toolpath Generation Method for the Automatic Polishing of Complex Surfaces with Adjustable Density. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **80**, 1673-1683. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7140-0>
- [14] 张海洋, 杨文玉, 张家军, 等. 叶片机器人砂带磨抛的轨迹规划研究[J]. 机电工程, 2014, 31(5): 578-581+586.
- [15] 梁子龙, 丁毓峰. 一种自由曲面抛光机器人轨迹规划方法[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(10): 1489-1495.
- [16] 张铁, 张斌. 机器人砂带磨削路径优化插补算法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(8): 983-990.
- [17] 王伟, 负超, 张令. 机器人砂带磨削的曲面路径优化算法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(7): 8-15.