

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.01.004

整体叶盘多通道旋进电解加工轨迹优化及试验

唐亚萍, 刘嘉, 段双陆, 朱荻

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 整体叶盘的高效、低成本制造已成为航空发动机研制和批量化生产中的关键问题。增加电极数量进行多工具同步电解加工 (Electrochemical machining, ECM) 是提升整体叶盘叶栅通道加工效率的有效方法。但是由于叶栅通道的复杂结构和狭窄形状, 工具通常需要通过多轴联动进给实现加工, 然而, 多工具同步联动进给加工不易实现。基于此, 本文提出基于靠模结构的多通道旋进 ECM 方法, 在设计运动轨迹的基础上开展了靠模槽结构的优化设计。利用面积最小法确定阴极最优进给方向和不同进给位置下工具阴极的最优旋转角度。基于运动轨迹, 利用最小二乘法、样条插值法、直线连接法拟合设计出不同靠模槽结构。仿真显示, 基于最小二乘法拟合出的靠模槽速度变化最平滑, 余量分布最均匀。最后, 开展多通道旋进电解加工试验, 加工出的叶栅通道余量差在 1.1 mm 以内, 一致性误差在 0.3 mm 以内。

关键词: 整体叶盘; 多通道旋进电解加工; 轨迹设计; 结构优化; 试验

中图分类号: TG66 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2025)01-0045-10

Trajectory Optimization and Experiment of Multi-channel Progressive Electrochemical Machining for Blisks

TANG Yaping, LIU Jia, DUAN Shuanglu, ZHU Di

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Efficient and cost-effective manufacturing of blisks remains a critical challenge in the development and production of aero-engines. Increasing electrode numbers for multi-tool synchronous electrochemical machining (ECM) is an effective way to improve the machining efficiency of blisk blade channels. However, due to the complex and narrow geometry of the blade channels, achieving synchronized multi-tool feed motion is difficult. This paper proposes a multi-channel progressive ECM method based on template structures, incorporating optimized trajectory design and template groove structure. The minimum area method determines the optimal cathode feed direction and rotational angles at different feed positions. Different template groove structures are designed by using the least squares method, the spline interpolation method, and the linear connection method. Simulation results indicate that the least squares method achieves the smoothest speed variations and the most uniform machining allowance distribution. Experimental results of multi-channel progressive ECM demonstrate that the residual machining allowance of the blade channels remains within 1.1 mm, with a consistency error of less than 0.3 mm.

Key words: blisk; multi-channel progressive electrochemical machining; trajectory design; structural optimization; experiment

基金项目: 国家自然科学基金(52075253); 国防基础科研项目(JKCY2021605B026)。

收稿日期: 2024-10-03; **修订日期:** 2025-01-07

通信作者: 朱荻, 男, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, E-mail: dzhu@nuaa.edu.cn。

引用格式: 唐亚萍, 刘嘉, 段双陆, 等. 整体叶盘多通道旋进电解加工轨迹优化及试验[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(1): 45-54. TANG Yaping, LIU Jia, DUAN Shuanglu, et al. Trajectory optimization and experiment of multi-channel progressive electrochemical machining for blisks[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(1): 45-54.

整体叶盘是现代航空发动机中的关键构件,具有叶栅密集、叶片型面扭曲、通道狭窄等特点,因此整体叶盘的加工制造成为难题^[1-2]。此外,整体叶盘多采用钛合金或镍基高温合金等难加工材料,这些材料普遍存在高强度、高塑性和低导热性等特点,这导致其机械切削性能较差,从而造成传统机械加工整体叶盘出现刀具损耗严重,加工周期长等问题^[3-4]。整体叶盘加工包括两个步骤:叶栅通道粗加工和叶片型面精加工。在叶栅通道粗加工中,材料去除量占比高,加工时间占总时间70%以上,由此可见,叶栅通道加工周期长是制约其效率提升的主要症结所在。因此,突破整体叶盘这类整体构件的高效、低成本制造瓶颈对航空发动机的研制和批产具有重要意义。

电解加工是一种基于阳极受控电化学溶解的非接触式加工方法,具有加工效率高、工具无损耗、加工无应力、可加工材料范围广等诸多优点^[5-7]。凭借这些突出的特点,电解加工在整体叶盘等航空发动机关键零部件制造领域有明显的效率和成本优势。尤其是电解加工可以用简单的运动加工出复杂型面,因此通过增加工具数量实现加工效率提升已成为研究热点。例如,德国MTU尝试61个阵列管电极同时电解加工航空发动机涡轮叶片上的气膜冷却孔,极大地提升了加工效率^[8]。德国Leistriz采用4个工具电极同时套料加工出4个等截面叶片,加工效率明显提升^[8]。Guo等^[9]研制了一种多电极扫描微电化学流动单元装置,开展8个空心电极阵列平行排列加工,加工出的通道宽度和深度的波动范围分别在150 μm 和15 μm 左右。Maity等^[10]开发了多线电解加工装置,利用三线工具在100 μm 厚度的SS 304工件上成功制备了微缝阵列和复杂微特征阵列。虽然上述方法偏重微结构或小尺度加工且均为阵列的简单结构加工,但其充分证明了多工具同步电解加工的可行性和在效率提升方面的显著效果。整体叶盘结构复杂,为了获得较均匀的余量分布,通常单个叶栅在加工过程中需要工具和工件完成多维相对运动。Zhang等^[11]提出了螺旋进给加工方法,优化阴极运动轨迹,加工所得叶背、叶盆余量差降低32.7%和33.6%。Wang等^[12]提出了一种阴极和工件协同旋转的轨迹优化方法,建立余量差与旋转角度的数学模型,该方法使叶盆和叶背轮廓的余量差分别减少了41.4%和36.6%。为了实现上述运动,加工单个叶栅通道都需要通过多轴联动实现进给,而当工具电极数量增加时就需要更复杂的进给系统,因此迫切地需要研究实现多工具同步复杂进给的方法。

部分研究学者已经针对叶栅通道多工具加工

开展了大量研究并取得了良好的效果。Xu等^[13]开发了3个管电极同步运动的试验系统,对管电极形状和结构进行了参数和试验优化,使用试验系统一次加工出3个通道,加工质量好、效率高。宗亚伟等^[14]开发了一种多叶栅通道的电解液流量控制系统,使用固定电极实现了整体叶盘扇段7个叶栅通道同时电解加工,加工所得工件的叶背和叶盆重复度误差分别为0.115 mm和0.171 mm。但目前多工具电解加工存在加工通道余量不均匀、轮毂面精度难以提升等问题,并且在加工通道较小的叶盘时存在一定的局限性。旋进电解加工是将具有一定轮廓的工具阴极旋转进给至叶盆流道处,通过工具电极前端面两侧阴极刃完成叶栅通道的加工^[15-16],该方法加工过程稳定,能够同时实现叶盆叶背型面和轮毂型面的电解加工成型。然而,当前的旋进电解加工主要是通过数控方式实现电极的直线进给和同步旋转。这种模式下只能实现单通道加工,加工效率低。当增加电极数量进行多通道电解加工时,需要同时增加多个独立驱动的进给和旋转主轴,体积大,增加机床装备复杂性和成本,因此目前针对多通道旋进电解加工的研究相对较少。

针对上述问题,本文提出基于靠模结构实现整体叶盘多通道旋进电解加工方法。通过运动轨迹设计,从而确定工具阴极进给方向和旋进运动参数,得到工具阴极在不同进给距离下的优选位置。在此基础上,基于曲线拟合原理设计不同靠模槽结构,并研究靠模槽结构对加工余量分布和稳定性的影响机制。最后开展多通道旋进电解加工试验,验证基于轨迹设计的靠模槽的可靠性和加工通道的一致性。

1 基于靠模机构的旋进电解加工方法

整体叶盘叶片型面扭曲复杂,是不规则的空间几何型面。旋进电解加工方法加工整体叶盘时(图1),工具阴极沿工件径向进给,同时围绕自身轴线旋转,利用加工端面腐蚀加工出轮毂,利用两侧阴极刃侧面腐蚀加工出叶盆和叶背型面,电解液从阴极一侧流经电极间隙带走电解产物和反应热后从另一侧流出。这种叶栅通道加工方法的加工过程稳定性高,加工出的轮毂精度和表面质量好。

为了实现多个工具电极的旋转进给运动,本文提出了基于靠模结构的多通道旋进电解加工方法,如图2所示。机床轴带动连接盘做Z轴直线运动,带动楔形连接模块向下运动,工具阴极模块中的阴极杆在楔形连接模块的带动下做直线运动,同时阴极杆在凸轮随动器的带动下沿导向筒靠模槽的限

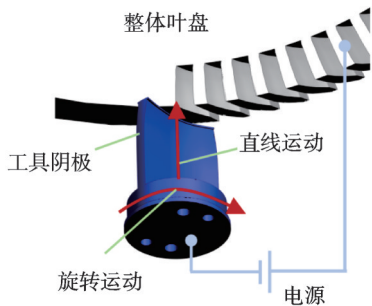


图 1 旋进电解加工的示意图

Fig.1 Schematic diagram of progressive electrochemical machining

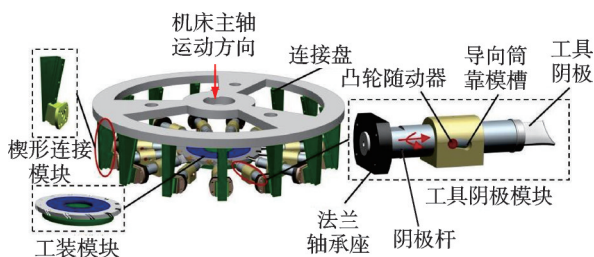


图 2 多通道旋进电解加工方法

Fig.2 Multi-channel progressive electrochemical machining method

制作旋转运动。在这种方式下,仅通过单轴直线进给就可实现多个工具电极的同步旋转和径向进给,大幅简化了多电极电解加工的机床结构。

2 工具阴极运动轨迹设计

不同的靠模槽结构会直接影响工具阴极的进给位置和运动精确性,从而影响加工余量的分布均匀性,因此导向筒的靠模槽设计至关重要,而其设计主要依赖工具阴极的运动轨迹。因此,接下来将开展工具阴极运动轨迹设计,确定工具阴极进给方向以及旋进运动参数。

2.1 确定工具阴极进给方向

整体叶盘叶片型面通常为复杂自由曲面,不同工具阴极进给方向得到的叶栅通道形状存在差异,如图 3 所示。进给方向的改变会影响叶栅通道的遮挡区域面积大小,遮挡区域会对加工后叶

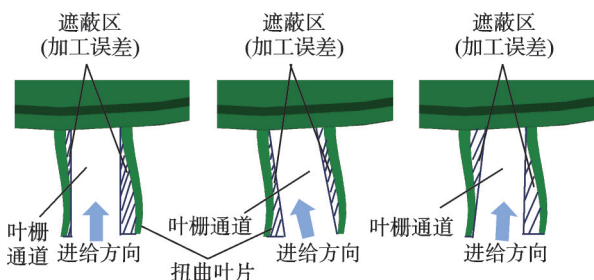


图 3 不同进给方向遮蔽区示意图

Fig.3 Schematic diagram of masking zones in different feed directions

栅通道的余量产生直接影响。因此需要优化阴极进给方向使遮挡区域面积最小,此时叶栅通道余量差相对较少,后续通过工具阴极的同步旋转可以进一步去除剩余的遮挡区来实现叶栅通道的余量均匀化。

选取一组平面切割设计模型叶片,得到如图 4 所示的相邻两个叶片的设计叶盆截面线组 $l_{p1}, l_{p2}, \dots, l_{p9}$ 和设计叶背截面线组 $l_{b1}, l_{b2}, \dots, l_{b9}$ 表示的叶栅通道。将叶盆叶背截面线组沿进给方向投影到与进给方向垂直的平面,投影线之间产生遮蔽。图 4 中的 I_{yp} 和 I_{yb} 分别为叶盆和叶背对应的投影曲线簇的最内侧, O_{yp} 和 O_{yb} 分别为叶盆和叶背对应的投影曲线簇的外侧包络线。那么,当 I_{yp} 、 O_{yp} 与 I_{yb} 、 O_{yb} 两者之间不干涉, I_{yp} 与 O_{yp} 的包络面积为 S_{yp} , I_{yb} 与 O_{yb} 的包络面积为 S_{yb} , 则当叶盆叶背包络面积 S_{yp} 、 S_{yb} 越小,代表叶盆叶背截面线组在进给方向上的叶栅通道遮挡区域越小,与设计模型重合度越高,那么叶盆叶背余量分布均匀性越好,最大最小余量差越小。而包络面积 $S(\alpha)$ 为 S_{yp} 和 S_{yb} 的最小值,即

$$S(\alpha) = \text{Min}(S_{yp, \min}, S_{yb, \min}) \quad (1)$$

角 α 为进给方向与坐标轴 Y 轴的夹角。在夹角 α 的取值范围内 ($-4^\circ \leq \alpha \leq 4^\circ$), 选取不同的 α 值, 根据式(1), 计算对应的叶盆叶背截面线投影包络面积 S_{yp} 、 S_{yb} , 图 5 为叶盆叶背截面线投影包络面积随进给方向与 Y 轴夹角 α 变化曲线图。当 α 约为 3.9787° 时(本文 α 取 3.98° , 叶盆投影曲线组包络面积 S_{yp} 与叶背投影曲线组包络面积 S_{yb} 基本相等, 叶栅通道余量差最小, 该值为进给方向与 Y 轴夹角 α 的最优解。

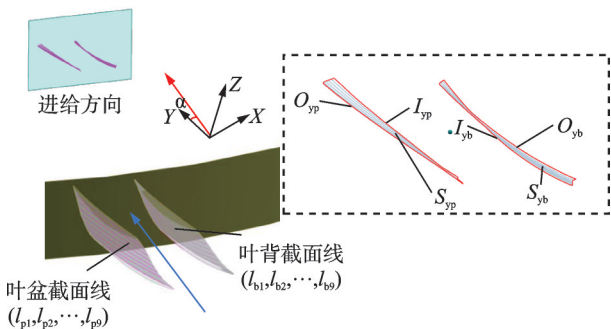


图 4 叶盆叶背截面线示意图

Fig.4 Schematic diagram of the cross-sectional line of the blade basin and blade back

通过 $\cos \theta$ 法对工具阴极前端面进行设计, 工具阴极加工刃的厚度 b ($b=1 \text{ mm}$), 工具阴极侧壁涂覆绝缘(防止杂散腐蚀), 基于此设计工具阴极三维模型如图 6 所示。

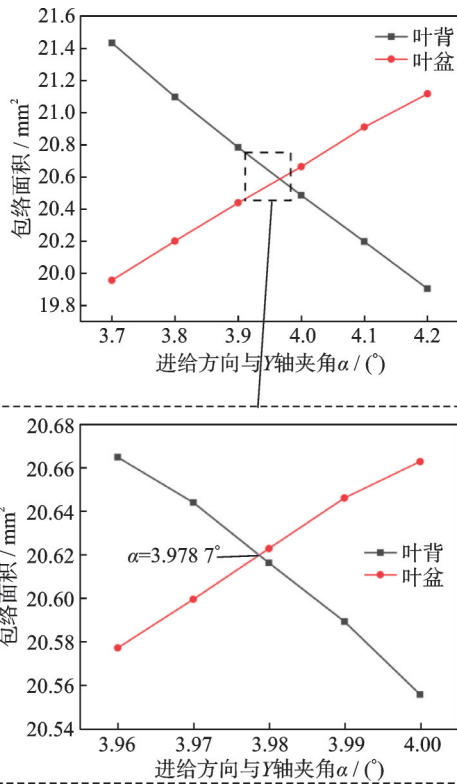


图 5 叶盆叶背截面线投影包络面积随进给方向与 Y 轴夹角 α 的变化曲线图

Fig.5 Curves of the projected envelope area of the blade basin and blade back cross-sectional line varying with the angle α between the feed direction and the Y-axis

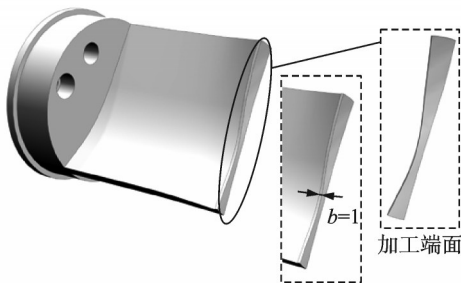


图 6 工具阴极三维模型

Fig.6 3D model of the tool cathode

2.2 确定工具阴极旋转角度

根据上述得到的工具阴极进给方向和设计的阴极结构,开展工具阴极运动轨迹优化。上节叶栅通道已经离散为多个截面,故求解工具阴极最佳运动轨迹的过程可以简化为求解工具阴极在进给位置 S 的最佳旋转角度。使包络面积 S_t 最小的工具阴极旋转角度 θ_{op} 即为最佳旋转角度。

为了使加工出的叶栅通道与设计叶片模型相比余量均匀且余量差尽可能小,提出面积最小法优化策略(图 7)。当工件绕进给方向轴旋转角度 θ 后(图 7(b)),与未旋转角度的叶栅通道(图 7(a))相比,减小了叶盆、叶背余量差包络面积,使叶栅通道

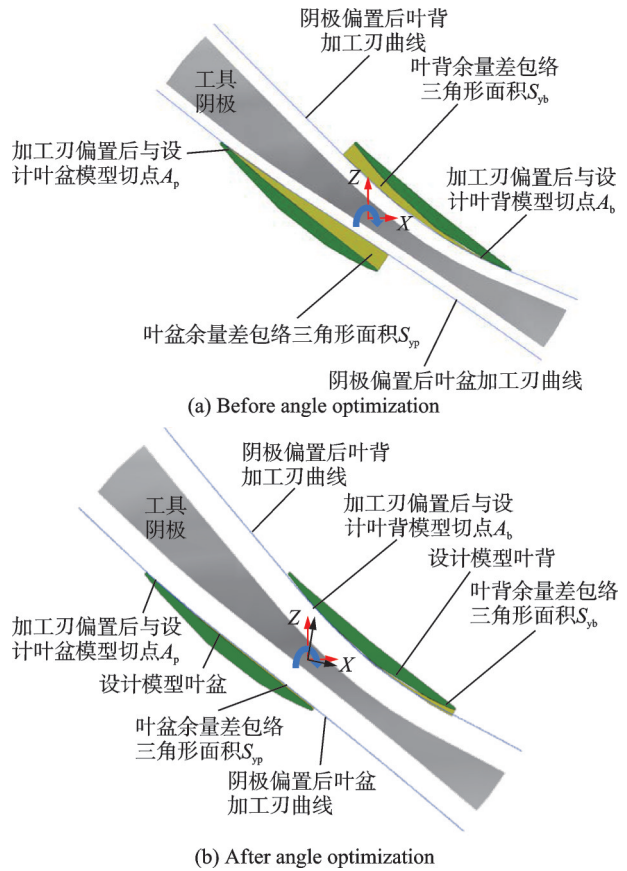


图 7 单个截面上的最佳旋转角度计算

Fig.7 Calculation of the optimal rotation angle on a single cross-section

轮廓余量差更小更均匀。

将阴极加工刃曲线偏置到与设计叶盆叶背模型相切而不过切的位置,设置叶盆切点为 $A_p(x_p, y_p)$,将设计模型叶盆轮廓分成 m 等分,点 P_i ($i=1, 2, \dots, m$) 为第 i 等分上的点,坐标分别为 (x_i, y_i) ,则点 A_p 到 P_i 的距离 $L_{(p,i)}$ 为

$$L_{(p,i)} = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} \quad (2)$$

当点 A_p 到点 P_i 的距离 $L_{(p,i)}$ 最大时,过点 P_i 作垂直于偏置叶盆阴极刃曲线得到叶盆余量差包络面积 S_{yp} 。针对叶背重复以上步骤,求得叶背余量差包络面积 S_{yb} 。计算出对应的叶盆叶背余量差包络面积 S_{yp}, S_{yb} ,则包络面积 S_t 为叶盆、叶背余量差最大包络面积为

$$S_t = \max(S_{yp}, S_{yb}) \quad (3)$$

改变工具阴极的旋转角度 θ ,计算出对应的包络面积 S_t 。 θ 与 S_t 的变化关系表示为

$$S_t = f(\theta) \quad (4)$$

图 8 为 S_{yp}, S_{yb} 和 S_t 随 θ 的变化曲线。如图 8 所示,随着 θ 的增大, S_t 的数值先减小,然后又逐渐增大。 S_t 在箭头所指的位置取得最小值,记该点的坐标为 $(\theta_{op}, S_{t,min})$,表示在进给位置 S 处,工具阴极旋转角度优化解为 θ_{op} ,此时 S_t 值最小。在计算求

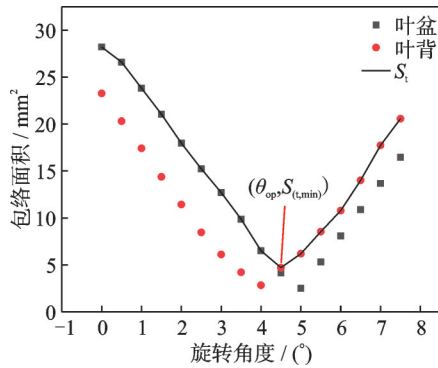


图 8 S_{yp} 、 S_{yb} 和 S_t 随 θ 的变换曲线图

Fig.8 Curves of S_{yp} , S_{yb} and S_t varying with θ

解的过程中, 可借助最小值计算公式求解 $(\theta_{op}, S_{t,min})$

$$\begin{cases} f'(\theta_{op}) = 0 \\ f''(\theta_{op}) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

图 9 给出在进给速度为 1 mm/min 时, 进给距离 S 和最佳旋转角度 θ_{op} 随着时间 t 的变化关系图。若 θ_{op} 为正值, 则表示工具阴极相对于初始位置作逆时针方向旋转; 相应地, 若 θ_{op} 为负值, 则表示工具阴极相对于初始位置向顺时针方向旋转。分析图 9 变化曲线可知, 工具阴极随着时间的增大一直做逆时针旋转, 在进给距离为 31 mm 时逆时针方向旋转至最大值为 6.51° 。

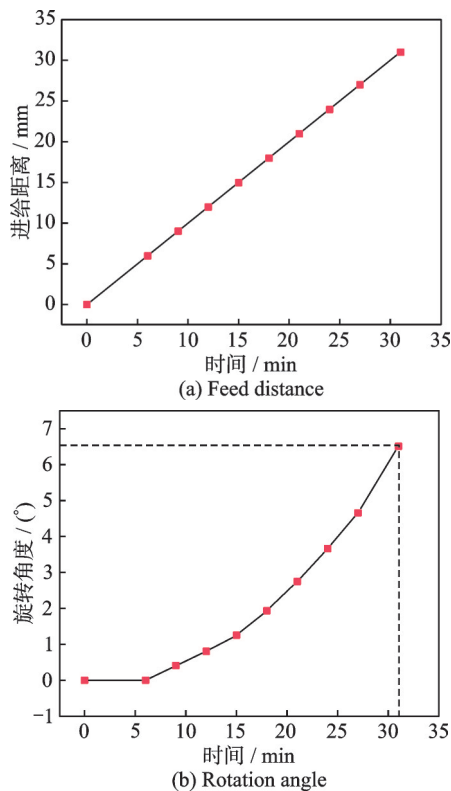


图 9 进给距离和旋转角度随时间变化关系图

Fig.9 Curves of feed distance and rotation angle varying with time

3 靠模槽结构优化设计

3.1 曲线拟合方式

根据上文确定的工具阴极进给角度和不同进给深度下阴极旋转角度进行导向筒靠模槽设计(图 10)。阴极杆在导向筒靠模槽的限制下绕 Y 轴作旋转进给运动, 在 X 轴和 Z 轴方向没有移动, 而不同的靠模槽形状会直接影响阴极的旋转角度, 因此靠模槽的设计极为重要。

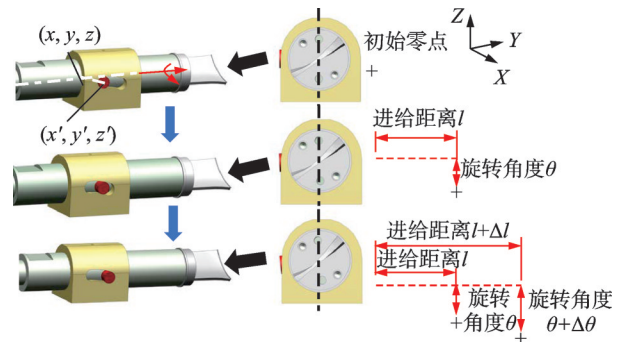


图 10 阴极杆与导向筒位置关系示意图

Fig.10 Schematic diagram of the positional relationship between the cathode rod and the guide tube

根据上文所确定的工具阴极在不同截面下的旋转角度与对应的弧度关系式为

$$l = \frac{\theta}{180} \cdot \pi \quad (6)$$

式中 l 表示阴极旋转角度 θ 时对应的弧度。

阴极杆中心轴与随动器中心轴的交点坐标为 (x, y, z) , 在靠模槽限制下带动阴极杆作旋转运动的随动器采样坐标点为 (x', y', z') , 坐标变换公式如下

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos l & 0 & \sin l \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin l & 0 & \cos l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据坐标转换公式, 可以计算出在 9 个不同截面上对应的随动器采样点坐标。利用不同截面上采样点的坐标, 可以进行靠模槽加工曲线的拟合。在曲线拟合过程中, 常用的方法包括直线连接法、样条插值法^[17]和最小二乘法^[18]。在使用直线连接点的曲线拟合方法时, 对于给定的三维数据点 $(x'_1, y'_1, z'_1), (x'_2, y'_2, z'_2), \dots, (x'_n, y'_n, z'_n)$, 每两个相邻点 $P_i = (x'_i, y'_i, z'_i)$ 和 $P_{i+1} = (x'_{i+1}, y'_{i+1}, z'_{i+1})$ 之间的连接可以参数化表示为

$$P(t) = (1-t)P_i + tP_{i+1} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (8)$$

样条插值法通过构建分段多项式模型确保在每个数据点处的精确拟合。将数据集划分为多个子区间, 在每个子区间 (x'_i, y'_i) 和 (x'_{i+1}, y'_{i+1}) 内, 定义样条模型为

$$S_{ij}(x', y') = a_{ij} + b_{ij}(x' - x'_i) + c_{ij}(y' - y'_j) + d_{ij}(x' - x'_i)(y' - y'_j) \quad (9)$$

式中: $S_{ij}(x', y')$ 表示在区间内的样条多项式; a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 和 d_{ij} 为待求的系数。

插值条件要求样条函数在数据点处的值与观测值相等

$$S_{ij}(x', y') = z'_{ij} \quad (10)$$

式中 z'_{ij} 表示对应于数据点 (x'_i, y'_j) 的 z 值。

最小二乘法是一种广泛应用于数据拟合的统计技术,其基本公式旨在最小化观测值与拟合模型之间的误差平方和,通常可以表示为

$$S = \sum_{i=1}^n (z'_i - f(x'_i, y'_i))^2 \quad (11)$$

式中: S 为总的误差平方和; z'_i 为对应点坐标; $f(x'_i, y'_i)$ 为所构建的拟合模型在对应坐标点处的预测值; n 为数据点的总数。通过求解式(11),可以获得最佳拟合参数。

综合对比 3 种曲线拟合方法,最小二乘法能有效减少误差,适合全局趋势,但对异常值敏感;样条插值法在每个数据点处精确拟合,保持光滑性,但在数据不连续时计算复杂;直线连接法实现简单,直观展示数据趋势,但无法捕捉数据的平滑性。不同方法拟合出来的曲线如图 11 所示。因此,选择合适的方法需考虑数据特征和分析需求。

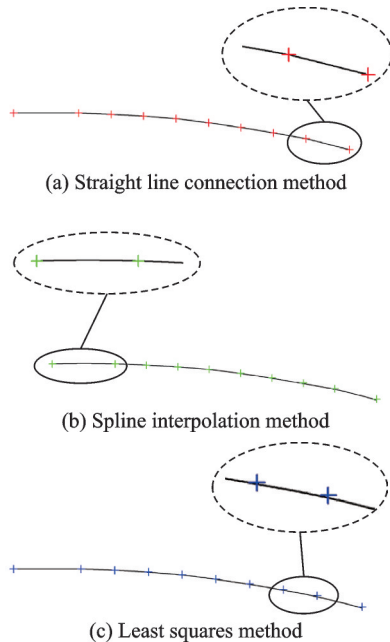


图 11 不同拟合方式曲线示意图

Fig.11 Schematic diagram of curves for different fitting methods

3.2 不同拟合方式下阴极运动速度对余量分布影响

加工过程中保证工具阴极运动速度的平稳可

以提高加工稳定性、优化加工精度、改善表面质量。结合模型,工具阴极沿与 Y 轴夹角 3.979° 的方向直线匀速进给,且同时绕轴线做旋转运动,因此工具阴极的进给速度 v_f 和旋转线速度 v_r 为正交关系(图 12),则加工过程中的任一加工点的合成速度 v 可以表示为

$$v = \sqrt{v_f^2 + v_r^2} \quad (12)$$

$$v_r = \omega r \quad (13)$$

式中: ω 表示阴极加工边缘某一点的角速度, r 表示阴极杆中心轴线到阴极边缘某一控制点的距离。

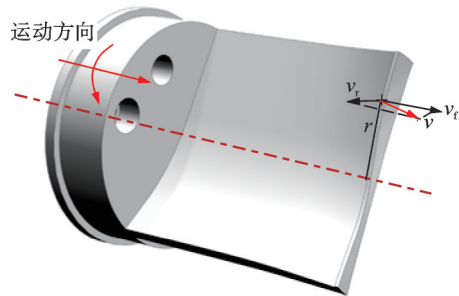


图 12 工具阴极运动速度关系示意图

Fig.12 Schematic diagram of relationship between tool cathode movement speed

根据上文提出的 3 种拟合曲线的方法,利用 UG 运动仿真将阴极杆设置为匀速进给,则阴极在靠模槽的限制下得到不同拟合方式下的旋转角速度和选取加工刃上某一控制点 ($r=12.03$ mm) 的合成速度如图 13、14 所示。可以看出,随着进给距离增加,工具阴极角速度和合成速度趋势一致,都在不断增加。直线连接法拟合的曲线角速度和合成速度在进给距离为 6、9、12、15、18、21、24 和 27 mm 处有明显突变,缺乏连续性和平滑性,这是由于连接点处通常会缺乏连续的切线方向和曲率变化的平滑过渡,从而导致速度发生突变;样条插值法拟合

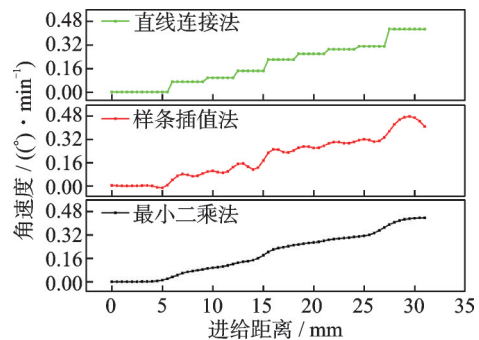


图 13 不同方法拟合曲线加工旋转角速度随进给距离变化示意图

Fig.13 Schematic diagram of the fitting curves for the rotational angular velocity of machining varying with feed distance using different methods

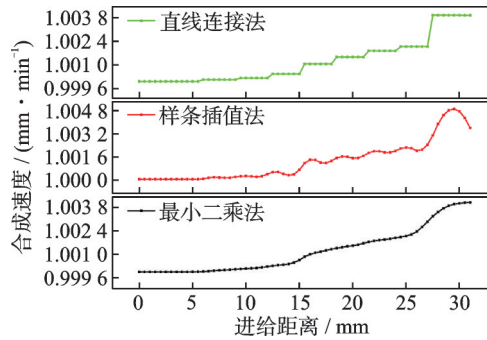


图 14 不同方法拟合曲线控制点合成速度随进给距离变化示意图

Fig.14 Schematic diagram of the fitting curves for the synthesis speed of control points varying with feed distance using different methods

曲线整体较为连续,但由于样条插值法严格通过每个数据点,因此在数据不连续或变化剧烈时产生振荡;最小二乘法拟合曲线的阴极合成速度变化最为平滑,在对数据整体趋势的捕捉上优于其他两种方法,能够更准确地描述数据的变化趋势。

进行运动仿真得到不同方法拟合曲线方法下的靠模槽对于加工余量分布的影响。在叶栅通道几处关键位置截取模拟通道与设计模型叶片形状,将模拟通道及理论叶片的每条轮廓线分别离散为 200 个控制点,得到各个截面下模拟通道余量(图 15)。直线连接法(图 15(a))和样条插值法(图 15(b))拟合曲线加工速度波动较大,影响了余量分布的均匀性,导致余量的不均匀分布;最小二乘法拟合曲线(图 15(c))使阴极的旋转速度保持相对

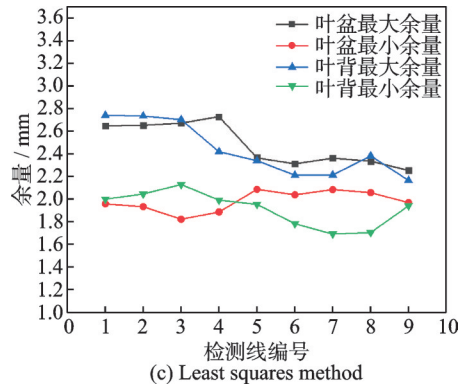


图 15 通道与设计模型叶片各截面轮廓下的余量极值模拟

Fig.15 Simulation of the maximum allowable margin for each sectional profile of the channel and the designed blade model

稳定,余量极值分布的波动幅度较小,模拟仿真余量分布最为均匀,叶盆、叶背余量差最大为 0.848 和 0.740 3 mm。

综上所述,通过对比不同拟合方式的结果,发现最小二乘法在运动速度的稳定性以及余量分布的均匀性方面表现优异,而样条插值法和直线连接法在特定情况下会引入更大的不确定性。因此,选择最小二乘法作为靠模槽加工曲线拟合方法对于优化阴极加工过程、提升加工精度具有重要意义。

4 试验结果及分析

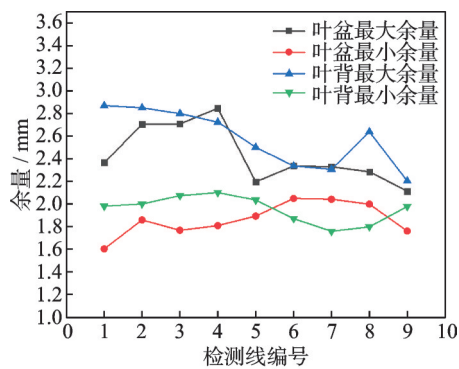
4.1 试验准备

为了验证运动轨迹的有效性和基于轨迹设计的靠模槽的可靠性,以航空发动机整体叶盘为加工对象,开展了多通道旋进电解加工试验。试验对象为叶盘扇段毛坯,材料为镍基高温合金,加工参数如表 1 所示,三通道旋进电解加工现场如图 16 所示。机床主轴带动连接臂做 Z 方向直线运动,带动楔形连接模块做 Z 轴向下直线运动,工具阴极模块在楔形连接模块的带动下相对工装模块做径向运动,阴极杆在凸轮随动器的带动下沿导向筒靠模槽的限制做旋转进给运动。

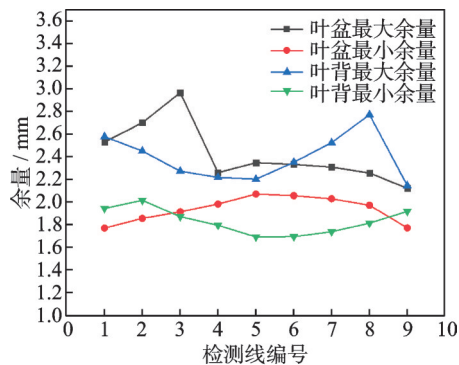
表 1 试验加工参数

Table 1 Experimental machining parameters

序号	参数	数值
1	电压/V	20
2	进液口压力/MPa	0.6
3	出液口压力/MPa	0
4	电解液类型	20%(质量百分数) NaNO ₃ 溶液
5	进给速度/(mm·min ⁻¹)	1.1
6	电解液温度/°C	30



(a) Straight line connection method



(b) Spline interpolation method

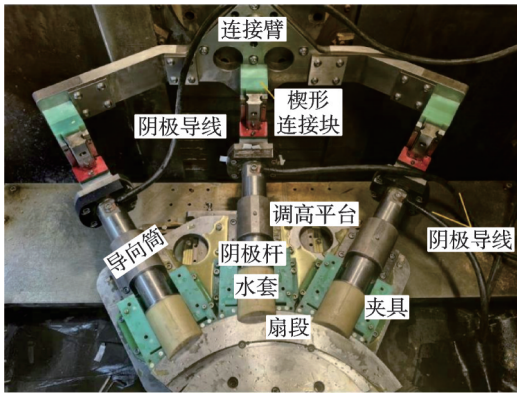


图 16 整体叶盘多通道加工现场图

Fig.16 On-site image of multi-channel machining for blisk

本试验一次进给加工完成后,执行退刀程序,退刀完成后运行C轴转台带动扇段工件逆时针旋转程序,从而实现不间断连续加工。加工得出的叶栅通道如图 17 所示。在 1.1 mm/min 的加工速度下,一次同时加工 3 个通道,单个通道平均成形时间仅为 9.4 min 。

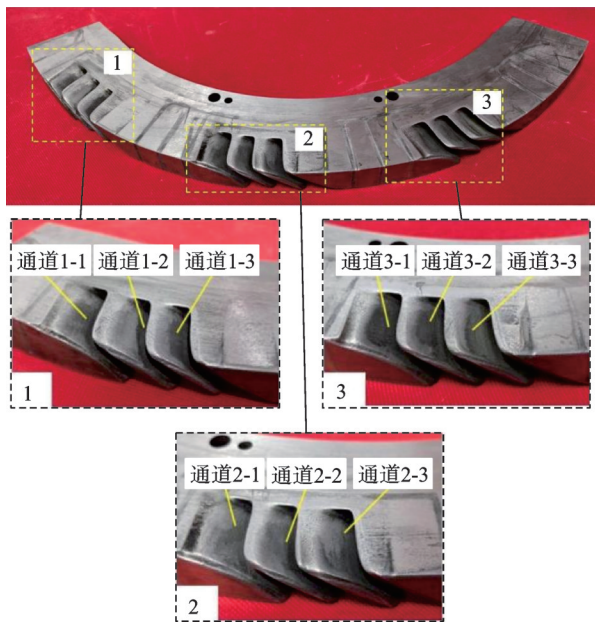


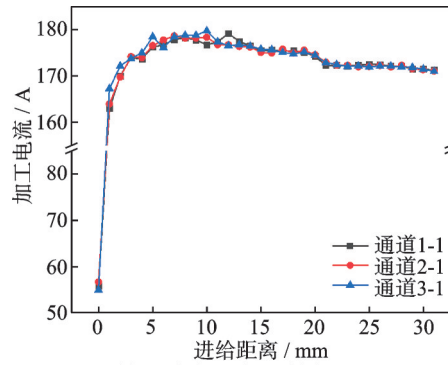
图 17 多通道旋进电解加工扇段

Fig.17 Multi-channel progressive electrochemical machining fan segment

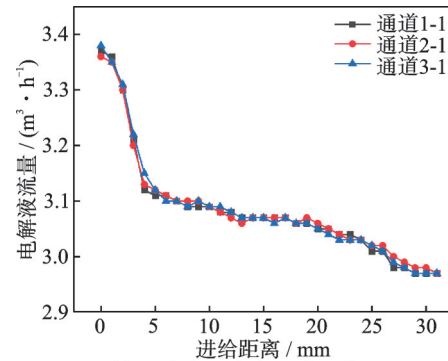
4.2 试验结果分析

4.2.1 叶栅通道加工参数分析

记录加工过程中的电流值、电解液流量值随着工具阴极的旋转进给的数据,选择 3 个通道加工过程中的数据绘制参数变化图,如图 18 所示。由图 18 可知,不同叶栅通道加工过程中的参数值变化趋势一致。如图 18(a) 所示,随着进给距离的增加,加工电流在初始阶段迅速上升,当加工间隙进入平衡间隙,电流值也逐渐进入平衡区间,但由于



(a) Variation of machining current



(b) Variation of electrolyte flow rate

图 18 参数变化值随进给距离变化关系示意图

Fig.18 Schematic diagram of relationship between parameter variation and feed distance

阴极在进给过程中还在进行旋转运动,阴极加工前端面不断转出,加工面积不断减小,因此加工电流呈现下降趋势。图 18(b) 显示加工不同叶栅通道时电解液流量随进给距离变化情况,随着加工间隙逐渐缩小到平衡间隙,电解液流量急剧下降,到达平衡间隙后流量仍然缓慢下降,这是由于随着阴极不断进给加工叶栅通道,电解液沿程阻力不断增加,导致流量不断减小。

4.2.2 加工精度分析

为了分析多通道旋进电解加工试验结果的加工精度和一致性,采用三维扫描仪(GOM, ATOS 5, 德国)对连续的 3 个通道进行余量检测分析,得到叶栅通道的叶盆型面和叶背型面在 6 条控制线下的余量极值分布如图 19 所示,具体余量差值如表 2 所示。根据图 19 和表 2 可知:(1)叶盆型面 6 条控制线上的最小余量范围在 $1.556 \sim 1.744 \text{ mm}$,最大余量范围在 $2.507 \sim 2.725 \text{ mm}$,叶背型面的最小余量范围在 $1.724 \sim 1.946 \text{ mm}$,最大余量范围在 $2.451 \sim 2.792 \text{ mm}$ 。(2)同一控制线下叶盆最大余量的差值为 0.165 mm ($2.709 \sim 2.507 \text{ mm}$),最小余量的差值为 0.111 mm ($1.68 \sim 1.569 \text{ mm}$);同一控制线下叶背的最大余量的差值为 0.213 mm ($2.761 \sim 2.548 \text{ mm}$),最小余量的差值为 0.214 mm ($1.946 \sim 1.732 \text{ mm}$)。(3)3 个通道的叶盆和叶背余量极值分布趋势基本一致,一次加工出的不同通道加工一致

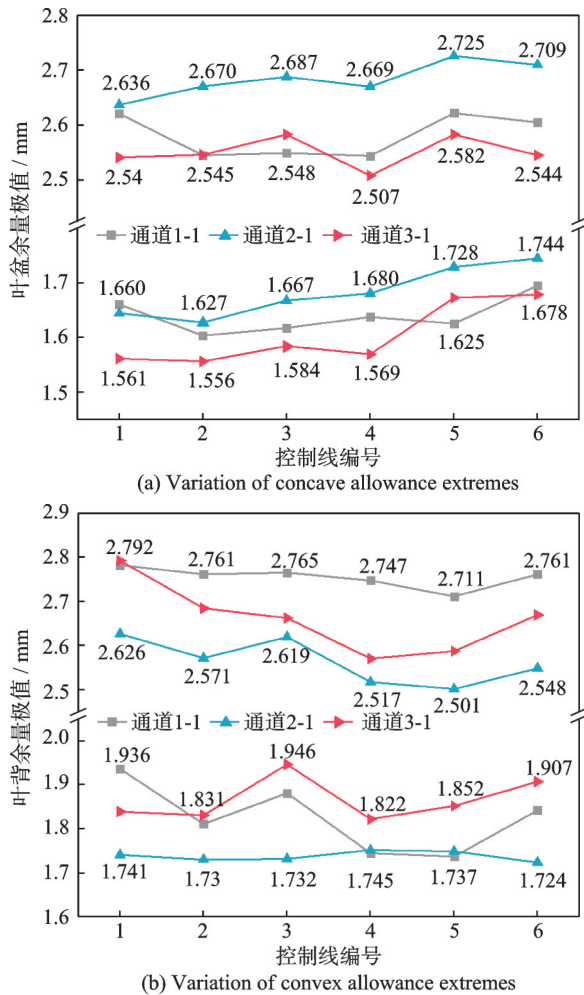


图 19 不同通道各控制线下余量极值分布

Fig.19 Distribution of allowance extremes under different control lines for each channel

表 2 不同叶栅通道叶盆、叶背余量差值

Table 2 Allowance difference between concave and convex for different blade row channels

通道序号	位置	最大余量/mm	最小余量/mm	余量差/mm
1-1	叶盆	2.621	1.603	1.018
	叶背	2.782	1.737	1.045
2-1	叶盆	2.725	1.627	1.098
	叶背	2.626	1.724	0.902
3-1	叶盆	2.582	1.556	1.026
	叶背	2.792	1.822	0.970

性为 0.214 mm,加工一致性好。(4)3个通道的叶盆型面最大余量差为 1.098 mm,最小余量差为 1.018 mm;叶背型面最大余量差为 1.045 mm,最小余量差为 0.902 mm,余量差异小,均匀性良好。

4.2.3 表面粗糙度分析

使用粗糙度检测仪(Perthometer M1, Mahr GmbHs, 德国)对加工出的叶栅通道进行粗糙度检测,获得了不同通道的表面粗糙度如表 3 所示。由表 3 可知,3个通道的轮毂面表面质量最好,并且叶

盆型面的表面质量优于叶背型面。电解加工中表面粗糙度与电流密度成正相关。径向电解加工轮毂面通过端面直接加工成型,加工间隙小,电流密度大,因此拥有好的表面质量。叶盆和叶背通过侧面成形,因此相较轮毂面表面质量低,本文电解液流动方式为侧流式,电解液从进液口流入流经叶盆、轮毂和叶背,而电解液在通过加工区域后最后流经叶背型面,含有大量电解产物包括气泡、反应热等,因此叶背的电流密度低于叶盆,相应的叶背的表面质量低于叶盆。

表 3 不同叶栅通道表面粗糙度

Table 3 Surface roughness of different blade row channels

叶栅通道序号	位置	表面粗糙度/ μm
1-1	叶盆	1.445
	叶背	1.849
	轮毂	0.246
2-1	叶盆	1.398
	叶背	1.763
	轮毂	0.223
3-1	叶盆	1.421
	叶背	1.804
	轮毂	0.243

5 结 论

为提高叶栅通道的加工效率,本文提出利用靠模机构实现旋转进给运动,通过单轴的进给输入,实现多个工具电极直线进给与旋转运动的协同输出。

文中结合叶栅通道理论模型,利用面积最小法建立余量差与阴极进给方向和旋进运动参数的优化策略,确定了不同进给距离下的工具阴极最优位置。在设计轨迹基础上,对导向筒靠模槽进行了设计,分析了最小二乘法、样本插值法、直线连接法拟合曲线的加工方式对旋转进给余量分布的影响,得到最小二乘法作为靠模槽加工曲线拟合方法可以使阴极运动速度无突变,余量分布最均匀。多通道旋进电解加工试验结果表明,加工出的叶栅通道余量差在 1.1 mm 以内,一致性误差在 0.3 mm 以内,加工精度和加工一致性好。

基于多通道旋进电解加工效率高的优点,适用于航空发动机整体叶盘量产。未来可结合复杂结构需求,研究其在不同构件中的适应性,提升航空航天工程应用能力。

参考文献:

[1] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术[J].

- 航空制造技术, 2006, 49(4): 94-100.
- HUANG Chunfeng. Modern aeroengine integral blisk and its manufacturing technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2006, 49(4): 94-100.
- [2] 史耀耀, 段继豪, 张军锋, 等. 整体叶盘制造工艺技术综述[J]. *航空制造技术*, 2012, 55(3): 26-31.
- SHI Yaoyao, DUAN Jihao, ZHANG Junfeng, et al. Blisk disc manufacturing process technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 55(3): 26-31.
- [3] 王明海, 孙越, 孙国强. 基于刀具轨迹的扭曲薄壁件加工仿真与实验[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(3): 373-379.
- WANG Minghai, SUN Yue, SUN Guoqiang. Simulation and experiment for twisted thin-walled part milling based on machining path[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(3): 373-379.
- [4] 韩江, 张文强, 田晓青, 等. 基于参数映射的开式整体叶盘流道铣削路径生成方法研究[J/OL]. *中国机械工程*, 2024: 1-11. [2024-09-18]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1294.th.20240813.1458.002>.
- HAN Jiang, ZHANG Wenqiang, TIAN Xiaoqing, et al. Research on the generation method of milling path of open blisk runner based on parameter mapping[J/OL]. *China Mechanical Engineering*, 2024: 1-11. [2024-09-18]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1294.th.20240813.1458.002>.
- [5] RAJURKAR K P, ZHU D, MCGEOUGH J A, et al. New development in electro-chemical machining[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 1999, 48(2): 569-579.
- [6] 朱荻, 刘嘉, 王登勇, 等. 脉动态电解加工[J]. *航空学报*, 2022, 43(4): 8-21.
- ZHU Di, LIU Jia, WANG Dengyong, et al. Pulse dynamic electrochemical machining[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(4): 8-21.
- [7] XU Zhengyang, WANG Yudi. Electrochemical machining of complex components of aero-engines: Developments, trends, and technological advances[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(2): 28-53.
- [8] KLOCKE F, KLINK A, VESELOVAC D, et al. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes[J]. *CIRP Annals*, 2014, 63(2): 703-726.
- [9] GUO C, SAXENA K K, BELLOTTI M, et al. Fast mesoscale texturing by multi-electrode scanning micro electrochemical flow cell[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 68: 741-745.
- [10] MAITY S, DEBNATH S, BHATTACHARYYA B. Modeling and investigation on multi-wire electrochemical machining (MWECM) assisted with different flushing strategies[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 57: 857-870.
- [11] ZHANG Juchen, XU Zhengyang, ZHU Dong, et al. Study of tool trajectory in blisk channel ECM with spiral feeding[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2017, 32: 333-338.
- [12] WANG Jing, XU Zhengyang, WANG Jingtao, et al. Electrochemical machining of blisk channels with rotations of the cathode and the workpiece[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 208: 106655.
- [13] XU Zhengyang, XU Qing, ZHU Di, et al. A high efficiency electrochemical machining method of blisk channels[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2013, 62(1): 187-190.
- [14] 宗亚伟, 刘嘉, 朱荻. 叶盘叶栅多管电极电解加工流场均匀性研究[J]. *电加工与模具*, 2021(5): 42-46.
- ZONG Yawei, LIU Jia, ZHU Di. Study of electrolyte distributing in multi-tube electrodes electrochemical machining[J]. *Electromachining & Mould*, 2021(5): 42-46.
- [15] 孙伦业, 徐正扬, 朱荻. 基于叶栅通道可加工性分析的整体叶盘径向电解加工阴极设计及实验[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(9): 1137-1141.
- SUN Lunye, XU Zhengyang, ZHU Di. Cathode design and experiments on radial feeding in ECM of blisk based on cascade channel machinability analysis[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(9): 1137-1141.
- [16] WANG Jing, XU Zhengyang, ZHU Di. Electrochemical machining of blisk channels via synchronous rotations of the workpiece and the radial feeding cathode employing various feed rates[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(3/4): 1213-1228.
- [17] 王能超. 分段样条插值[J]. *华中工学院学报*, 1979, 7(3): 50-59.
- WANG Nengchao. The piecewise spline interpolation method[J]. *Journal of Huazhong University*, 1979, 7(3): 50-59.
- [18] 谢友宝. 最小二乘法分段直线拟合[J]. *南昌航空大学学报(自然科学版)*, 1992, 9(1): 19-25.
- XIE Youbao. Least-squares piecewise linear fitting[J]. *Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology*, 1992, 9(1): 19-25.