基于Coons重新参数化的整体叶盘组合曲面叶片螺旋精加工路径生成方法研究

韩 江[1,2] 杜 豪[1,2] 田晓青[1,2*] 夏 链[1,2]
1.合肥工业大学机械工程学院,合肥,230009
2.安徽省智能数控技术及装备工程实验室,合肥,230009

摘要:为提高叶片加工质量和解决现有叶片螺旋加工轨迹生成方法无法用于裁剪曲面的问题,提出了一种新的针对有裁剪曲面存在的组合曲面造型叶片的螺旋精加工轨迹生成方法。首先使用基于Coons重参数化的方式计算螺旋加工轨迹生成所依赖的控制线,适用于有裁剪曲面的叶片。然后根据组合曲面叶片造型,给出组合曲面叶片螺旋加工刀位轨迹生成方法和切触点的计算公式,通过引入敏感度分析来修正刀触点。最后通过引入球面插值,最小化旋转轴的加速度来优化刀轴矢量。开发了基于所提方法的自动编程软件,仿真和实验结果表明,所提方法相较于UG/NX叶片轮廓精度得到了提高,压力面粗糙度减小了11.28%,吸力面减小了20.32%。刀轴矢量优化后旋转轴加速度最大减小了88.72%。

关键词:叶片;组合曲面;裁剪曲面;Coons面片;刀位轨迹生成
中图分类号:TG54
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.08.017 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Research on Tool Path Planning of Spiral Finishing Processes Based on Coons Reparameterization for Blades with Blisk Compound Surfaces

HAN Jiang[1,2] DU Hao[1,2] TIAN Xiaoqing[1,2*] XIA Lian[1,2]
1.School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009
2.Anhui Intelligent Numerical Control Technology and Equipment Engineering Laboratory, Hefei, 230009

Abstract: In order to improve the blade processing quality and solve the problems that the existing blade spiral machining trajectory generation method might not be used for trimmed surfaces, a new spiral finishing trajectory generation method was proposed for combined curved surface modeling blades with cutting surfaces. Firstly, using the Coons reparameterization method to calculate the control lines relied on for spiral machining trajectory generation, suitable for blades with trimmed surfaces. Then, based on the model of blade with compound surfaces, a method for generating tool path and the spiral cutter contact point's calculation formula were proposed. The cutter contact point is modified by introducing sensitivity analysis. Finally, the tool axis vector is optimized by introducing spherical interpolation to minimize the acceleration of the rotation axis. An automatic programming software based on this method was developed to generate a continuous and smooth blade spiral finishing tool path. Simulation and experimental results show that the proposed method improves the blade profile accuracy compared to UG/NX, the pressure surface roughness is reduced by 11.28%, and the suction surface is reduced by 20.32%. After the optimization of the tool axis vector, the acceleration of the rotation axis is reduced by 88.72 %.

Key words: blade; compound surface; trimmed surfaces; Coons patch; tool path generation

0 引言

整体叶盘是飞机发动机的关键部件[1-2]。与传统的榫卯结构叶片相比[3],整体叶盘具有结构简单、气流稳定的优点[4-6]。然而,整体叶盘通道狭窄且表面复杂,这给刀具路径规划以及保证狭窄空间内刀轴的平滑运动带来了巨大的挑战[7-8]。整体叶盘的主要加工方式是五轴加工,包括粗铣、半精铣、精铣[9]。铣削复杂表面的最佳方法是以连续方式进行,尽可能减少中断或空切次数,以获得最大切削效率[10]。ZHANG等[11]认为,对于五轴高速铣削,生成的五轴刀具路径不应包含任何急转或快速回退刀具运动,尤其是在精加工过程中。

在路径生成方面,学者们研究了各种加工策略,例如:方向平行(Zig-zag)[12-13]、轮廓平行[14]和摆线[15-16]策略。其中,螺旋刀具路径已被证明是一种高效的加工策略。它具有多种优点,例如平

收稿日期:2024-12-24
基金项目:国家重点研发计划(2022YFA1005204)

滑的轨迹、恒定的切削方向、逐渐改变切削宽度以及只需一次进刀和退刀过程[17]。螺旋路径的生成方法主要可分为以下6种：

1)基于投影的方法。该方法在商业CAD/CAM系统中比较常见，例如UG/NX[18]。它通过将阿基米德螺旋线沿固定方向投影到设计表面上来生成螺旋刀具路径。然而，该方法有两个明显的缺点：一是相邻路径之间的距离随着零件表面斜率的增加而增加[19]。特别是当表面法线垂直或接近垂直于投影方向时，这些区域将不会生成螺旋路径。二是将阿基米德螺线投影到复杂的表面上会导致平滑刀具路径的中断。

2)基于偏移轮廓的方法。这类方法首先由LEE[10]提出。该方法中，连续创建偏移轮廓，然后将螺旋刀具路径生成为偏移轮廓之间的对角曲线。为了避免螺旋切削操作中从外边界开始并在中心停止的不良工件，HAUTH等[20]进一步设计了相邻偏移曲线之间的双螺旋刀具路径，使得起点和终点螺旋刀具路径的两个部分都位于曲面的外边界上，仍然依赖于偏移曲线的计算。但复杂曲面上偏移曲线的计算已被证明是难度较大的任务，特别是对于偏移曲线的复杂自交点的识别和去除[21]。

3)基于求解偏微分方程的方法。最初，该方法仅应用于2D型腔加工[22]。ZHOU等[23]将该方法扩展到曲面加工。首先在由曲面投影最大轮廓和边界条件形成的参数域上构造等值曲线。然后，等值曲线被映射回曲面，形成螺旋刀具路径。螺旋刀具路径的构建取决于用于计算偏微分方程解的等值曲线的数值网格分辨率[24]，容易在尖角的区域出现路径间距不均的情况。

4)基于映射的方法。该方法通过构造分段线性近似来实现满足拉普拉斯方程的从欧氏空间曲面到简单拓扑区域的调和映射[25]。一旦创建了设计曲面和平面区域之间的映射关系，平面区域上的阿基米德螺旋线就可以逆向映射到设计曲面上，形成螺旋刀具路径[26]。由于该方法不涉及依赖于投影方向的操作，故可以处理相对复杂的表面[27]。SHEN等[28]提出一种基于共形狭缝映射的螺旋形完全覆盖多联通域路径规划方法，解决了传统的多连通域螺旋形路径规划方法通常采用子区域划分导致子区域桥接过多的问题。但是，网格曲面到圆形区域的映射可以看作将弹性三角形拉伸或挤压到平面区域上。在高斜率曲面上生成螺旋刀具路径时，路径间隔分布不均匀。

5)基于径向曲线的方法。XU等[29]将网格曲面映射到一个圆形区域上，从中心出发规划径向线，然后将其逆映射到网格曲面上，从而形成所需的径向曲线。吴江盛等[30]以点云上两端点之间的最优离散测地线作为径向曲线，通过径向线插值生成螺旋加工轨迹。

6)基于中轴树的规划方法。该方法能够在简单的单连通区域上通过沿中轴线逐渐偏移的方式生成螺旋。但由于多连通区域中轴线存在多个回环，不能直接用于此类区域的螺旋生成，故需要事先将多连通区域划分为若干个简单连通的子区域。HELD等[31]利用Voronoi图将多连通区域划分为单连通子区域，并利用中轴树在每个子区域中生成螺旋路径。HUANG等[17]基于中轴变换，利用共形狭缝映射无需子区域划分即可将多连通域变换为规则的圆盘或环面的特征，以减少刀具路径的总长度，从而提高加工性能。

在叶盘叶片螺旋加工刀具路径生成方面，白瑀等[32]提出了一种叶片类零件四坐标高效螺旋数控编程方法，该方法给出的螺旋加工公式是一种等参数加工方法，其叶片螺旋加工方法不能很好地处理有边界约束的情况。单晨伟等[33]对其进行了改进，根据叶轮通道加工方法原理，提出了一种带边界约束叶片的通道螺旋加工方法，取得了良好的效果。但是因为缘头(前、后缘，也称为进气边和排气边)部分很薄，有不少叶片缘头部分的厚度不足1 mm，且叶片的缘头部分与叶背/盆(也称吸力面和压力面)曲面之间的曲率变化很大，故不应采用同一种方法进行切触点和刀位点的计算。现有的叶片螺旋路径生成方法存在典型的局限性，待加工的组合曲面必须为未被裁剪的曲面，否则会出现路径中断和折返问题。

为了解决组合曲面叶片螺旋路径生成的普适性问题，本文提出了一种新的针对有裁剪曲面存在的组合曲面叶片的螺旋精加工轨迹生成方法。首先用2D Coons面片拟合叶片曲面的2D参数域。其次通过两步映射，借助Coons面片的等参数曲线生成边界一致的控制线。再次由控制线计算出螺旋刀触线，在弦高约束下离散成刀触点，通过引入敏感度分析来修正刀触点。最后通过计算每个刀触点的无碰撞刀轴矢量得到最终的刀具路径。解决了有裁剪曲面存在的组合曲面叶片螺旋刀具路径精确生成的问题，并进行了实验验证。

1　基于Coons的组合曲面叶片重新参数化

在叶片螺旋精加工刀具路径生成方法中，需要获得无相交且完整的控制线，否则会造成最终得到的螺旋路径出现折返、相交和截断的问题。图1所示为控制线相交和自交，导致路径折返和相交。

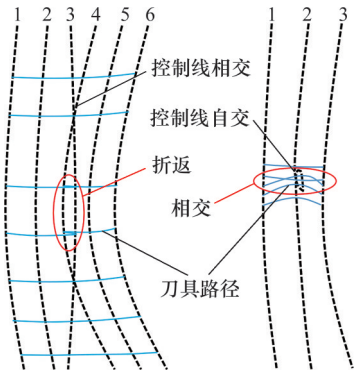


图1 控制线相交示意图

Fig.1 Control line intersection diagram

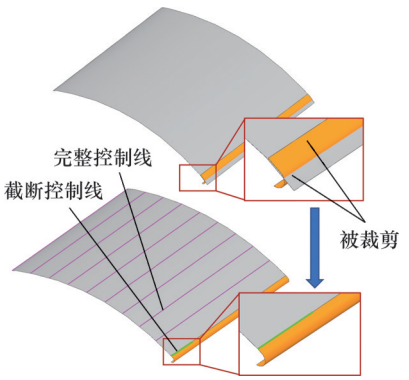


图2 等参数线与曲面边界相交示意图

Fig.2 A schematic diagram of the intersection of isoparametric curves and surface boundaries

单晨伟等[18]提出以曲面的等参数线作为控制线，如图2所示，裁剪边界与等参数线相交，无法获得完整的控制线，导致螺旋路径无法在该处生成。

为了在裁剪的曲面片上生成符合边界的控制线，同时控制线应分布平滑且无相交，对叶片曲面的参数域重新参数化。为了实现这一想法，本文提出了一种基于Coons插值算法的方法，具体流程如图3所示。

图4所示为典型的开式整体叶盘结构，叶片面分为前缘面、后缘面、吸力面和压力面共四张曲面。由于四张曲面均使用相同方式重新参数化，故以单个面为例，介绍叶片曲面重新参数化的过程（图5）。如图5b所示，D_0、D_1、C_0、C_1为曲面S对应的参数域边界曲线，曲线均采用非均匀有理B样条（NURBS）表达，记曲线D_0，D_1，C_0，C_1的参数范围依次为$[f_{D0}, l_{D0}]$，$[f_{D1}, l_{D1}]$，$[f_{C0}, l_{C0}]$，$[f_{C1}, l_{C1}]$。Q_{00}、Q_{01}、Q_{10}、Q_{11}为曲面S对应的参数域的四个顶点。

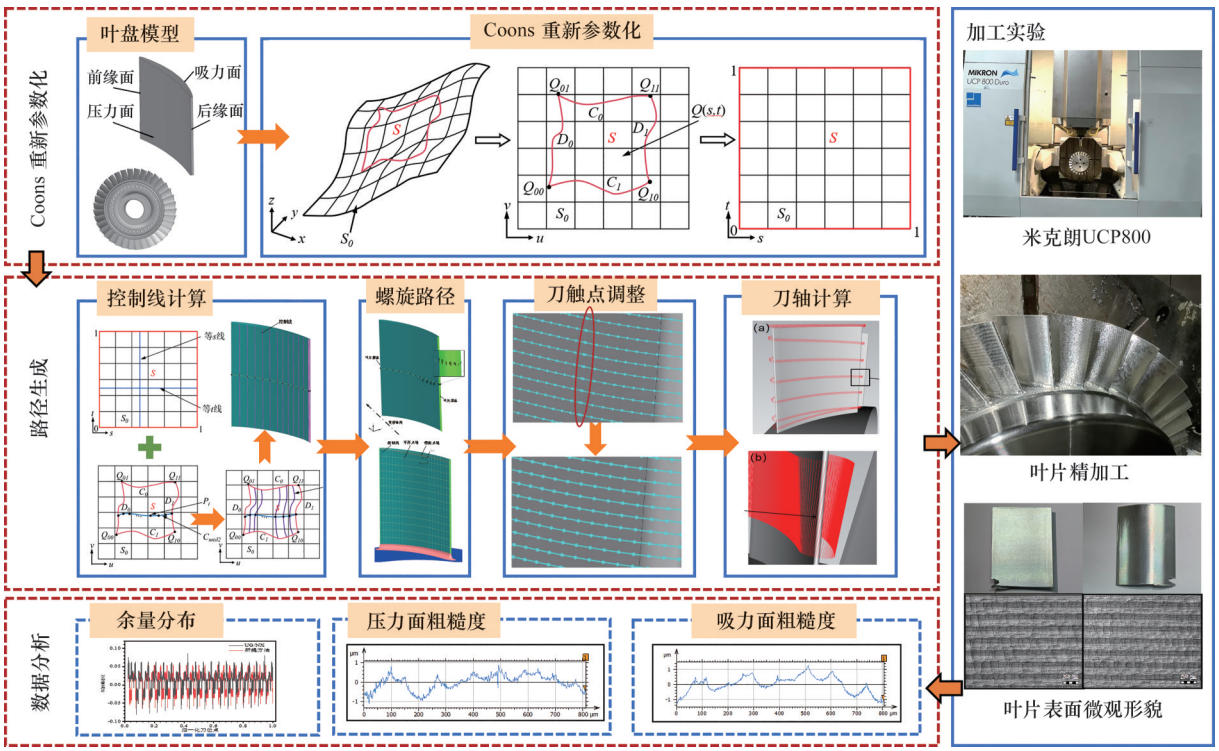


图3 开式整体叶盘叶片螺旋精加工流程图

Fig.3 Open blisk blade spiral finishing flow chart

利用四条边界曲线和四个角点，给出了$Q(s,t)$的双线性Coons曲面表达式：

$$Q(s,t)=Q_A(s,t)+Q_B(s,t)-Q_C(s,t) \tag{1}$$

其中

$$Q_A(s,t)=\begin{bmatrix}1-s & s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}D_0(f_{D_0}+t(f_{D_0}-l_{D_0}))\\D_1(f_{D_1}+t(f_{D_1}-l_{D_1}))\end{bmatrix}$$

$$Q_B(s,t)=\begin{bmatrix}C_0(f_{C_0}+s(f_{C_0}-l_{C_0}))\\C_1(f_{C_1}+s(f_{C_1}-l_{C_1}))\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}1-t\\t\end{bmatrix}$$

$$Q_C(s,t)=\begin{bmatrix}1-s & s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}Q_{00} & Q_{01}\\Q_{10} & Q_{11}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1-t\\t\end{bmatrix}$$

由此得到的Coons面片$Q(s,t)$实现了裁剪曲面S的参数域的重新参数化，即$Q(s,t)$覆盖了

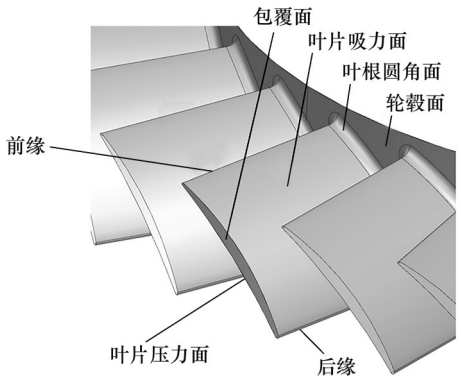


图4　典型的开式整体叶盘结构

Fig.4　Typical open blisk structure

图5b中的S区域，实现了将曲面不规则参数域映射为一个矩形参数域的过程。

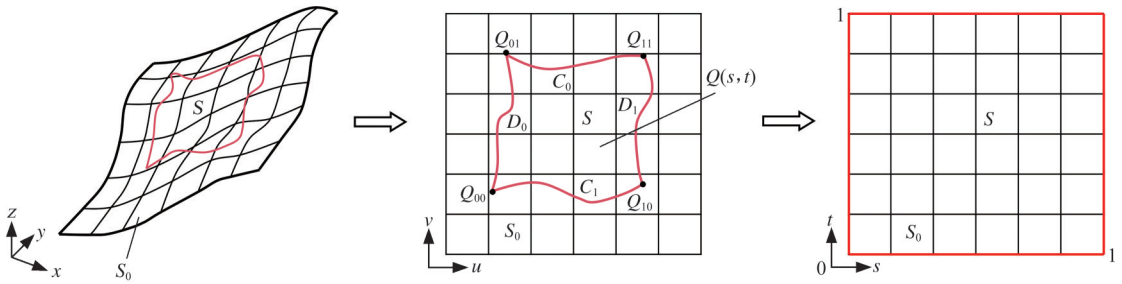
2　叶片螺旋刀具路径生成

在不失算法一般性的情况下，叶盘叶片可视为由四张满足连续性条件的裁剪曲面构成。叶片各曲面均采用非均匀有理B样条曲面表示法，用$r(u,v)$表示：

$$r(u,v)=\frac{\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}\omega_{ij}d_{ij}N_{i,k}(u)N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}\omega_{ij}N_{i,k}(u)N_{j,l}(v)} \quad (2)$$

$$0\leqslant u,v\leqslant 1$$

其中，d_{ij}表示曲面的三维控制点，ω_{ij}表示曲面的权值，$N_{i,k}(u)$表示曲面k次B样条基函数，$N_{j,l}(v)$表示曲面的l次B样条基函数。



(a)欧氏空间中的裁剪曲面　(b)裁剪曲面的参数域　(c)Coons曲面的参数域

图5　吸力面重新参数化示意图

Fig.5　Suction surface reparameterization schematic diagram

2.1　控制线的生成

要生成单向平滑的螺旋路径，首先需要构建无自相交的控制线，下面介绍控制线的生成方法。

通过弦高约束控制线的数量，根据Coons曲面参数域的等t线（图6）计算其对应曲面的参数域上的曲线。不妨取Coons曲面中部的等t线，令$t_{\mathrm{mid}}=0.5$，s从0开始以0.01（保守取值，也可取更小或更大）为步长，循环计算，得到一系列的二维点$Q_i(s,t_{\mathrm{mid}})$，对得到的点使用二维NURBS曲线拟合得到C_{mid2}，如图7所示，NURBS曲线的表达式为

$$C_{\mathrm{mid2}}(u)=\frac{\sum_{i=0}^{n}\omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^{n}\omega_i N_{i,k}(u)} \qquad 0\leqslant u\leqslant 1 \quad (3)$$

其中，d_i表示控制点，ω_i表示控制点的权值，$N_{i,k}(u)$表示曲面k次B样条基函数。

对曲线C_{mid2}根据其对应的欧氏空间的曲线C_{mid3}按弦高约束来离散取点。令$t_0=0$计算$C_{\mathrm{mid2}}(t_0)$作为初始点P_0，目标弧长$s_0=0$，根据弦高误差公式为

$$f\leqslant 2\sqrt{2eR+e^2} \quad (4)$$

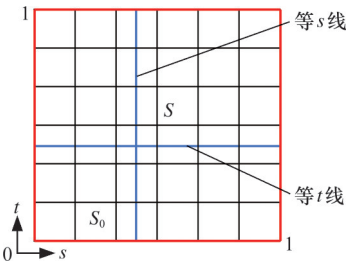


图6　Coons曲面参数域等s/t线示意图

Fig.6　Coons patch parameter domain iso s/t curves diagram

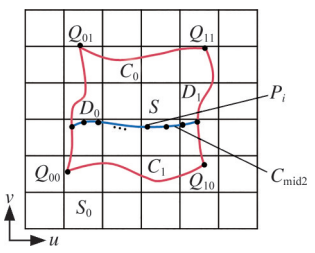


图7　曲面参数域上的等t线

Fig.7　The iso t curve on the parameter domain of the suction surface

$$R=\frac{\left\|\begin{bmatrix}r_u & r_v\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_t & v_t\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\right\|}{\left\|\begin{bmatrix}r_{uu} & r_{uv} & r_{vv}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_t^2 & u_tv_t & v_t^2\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\right\|} \quad (5)$$

$$\mathrm{d}s=\begin{cases}f & k_{\mathrm{n}}=0\\ 2R\arcsin\dfrac{f}{2R} & k_{\mathrm{n}}\neq 0\end{cases} \quad (6)$$

计算相邻两点之间的弧长ds。其中，e表示允许的最大弦高误差，R为曲线C_{mid3}在该点处的曲率半径，f为相邻两点的直线距离，k_{n}为曲面在该点处的法曲率。

根据ds计算目标弧长$s_{i+1}=s_i+\mathrm{d}s$，再依据曲线C_{mid3}的弧长与曲线C_{mid2}的参数的映射关系，求解出t_{i+1}，循环求解直至曲线C_{mid2}的终点。最终输出的点P_i如图7所示。对每个点P_i，构建其与Coons曲面的等t线上的点的映射关系。利用黄金分割法，按公式

$$f(s_i)=\left\| Q(s_i,t_{\mathrm{mid}})-P_i \right\|^2 \tag{7}$$

迭代计算函数极小值所对应的s_i，点(s_i,t_{mid})即为P_i在Coons曲面参数域的等t线上对应的点。根据每个s_i处Coons曲面参数域的等s线，对所得的s_i，计算其在曲面参数域上的曲线，结果如图8所示。

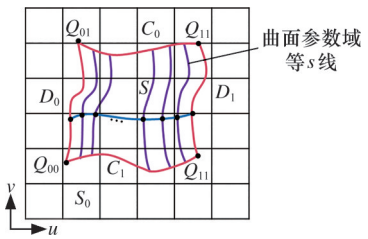


图8 弦高约束下曲面参数域上的等s线

Fig.8 The iso s curves on the parameter domain of the suction surface under chord height constraint

每条曲线按照弦高约束进行离散，计算离散点对应的欧氏空间的坐标，对欧氏空间的点使用NURBS曲线拟合，得到一系列弦高约束下的控制线。将这些控制线的第一条和最后一条替换为曲面的边界曲线。然后保证这些曲线的参数方向一致，即随着曲线的参数的增长，曲线上与该参数对应的点越来越靠近轮毂面。同理，对叶片的所有曲面都进行求解，在计算过程中以曲面的相邻关系作为计算顺序，共得到四组控制线，如图9所示。

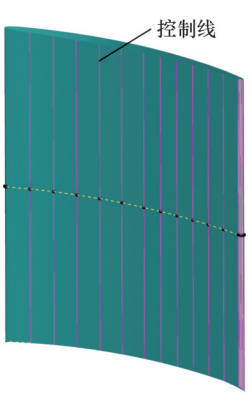


图9 欧氏空间中曲面的控制线

Fig.9 The control curves in Euclidean space

2.2 螺旋刀具路径的生成

为了生成螺旋刀具路径，需要将所有控制线离散为相同数量的点，点的数量由刀具路径的行距决定，刀具路径的最大行距由人指定或由允许的最大残留高度决定。对四组控制线中最长的曲线以最大行距进行离散，记录该曲线被分割的段数，将其余的控制线按相同的段数进行等弧长离散。

将所有控制线上相同序号的点排列在一起，每一个序号的点排列好后都能形成围绕叶片一圈的环形点链。考虑到加工时进退刀的安全，将进退刀位置安排在前缘或后缘处，因为此时相邻叶片与刀具距离最远。以后缘进退刀为例，通过遍历最后一圈环形点链中的点，找到沿轮毂轴向最低的点，以该点作为环形点链中的第一个点，将点链中的点重新排序，按顺时针或逆时针方向排序（从包覆面看向轮毂轴线，顺时针或逆时针取决于铣削加工时是顺铣或逆铣），图10是从叶片后缘进刀时，顺铣加工（主轴默认正转）点链排序示意图。

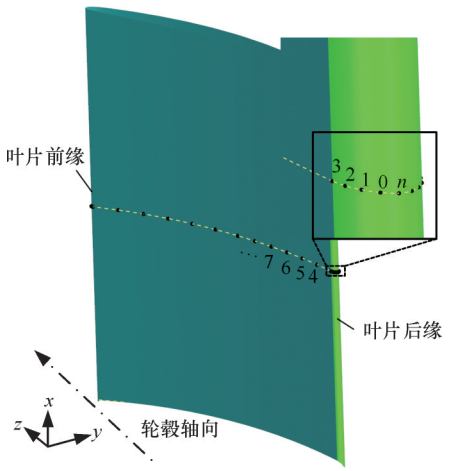


图10 顺铣加工点链排序示意图

Fig.10 Sorting diagram of climb milling processing point chain

对相邻两个点链中在同一控制线上的两点，按公式

$$\begin{aligned}
&n_{\mathrm{all}}=n_0+n_1+n_2+n_3-4\\
&A_{0ij}=L_{0ij}\frac{n_{\mathrm{all}}-i}{n_{\mathrm{all}}}+L_{0i(j+1)}\frac{i}{n_{\mathrm{all}}} \qquad 0<i<n_0-1\\
&A_{1ij}=L_{1ij}\frac{n_{\mathrm{all}}-n_0-i+1}{n_{\mathrm{all}}}+L_{1i(j+1)}\frac{i+n_0-1}{n_{\mathrm{all}}}\\
&\qquad\qquad 0<i<n_1-1\\
&A_{2ij}=L_{2ij}\frac{n_{\mathrm{all}}-n_0-n_1-i+2}{n_{\mathrm{all}}}+L_{2i(j+1)}\frac{i+n_0+n_1-2}{n_{\mathrm{all}}}\\
&\qquad\qquad 0<i<n_2-1\\
&A_{3ij}=L_{3ij}\frac{n_{\mathrm{all}}-n_0-n_1-n_2-i+3}{n_{\mathrm{all}}}+\\
&\quad L_{3i(j+1)}\frac{i+n_0+n_1+n_2-3}{n_{\mathrm{all}}} \qquad 0<i<n_3-1
\end{aligned} \tag{8}$$

进行线性插值，得到一系列螺旋排列的点链。其中，n_0、n_1、n_2、n_3分别为环形点链在叶片四个面上的点的数量，如图11所示，L_{0ij}表示第0个面（压力面）上第j圈环形点链上的第i个点，A_{0ij}表示第0个面（压力面）上第j圈螺旋点链上的第i个点，以此类推。

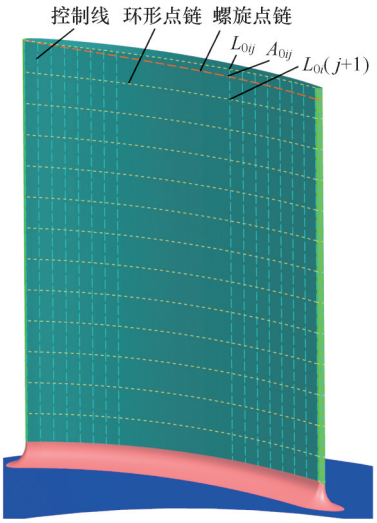


图11　线性插值出螺旋点链原理

Fig.11　The principle of spiral point chain is linearly interpolated

将得到的每一圈螺旋排列的点按照生成该点的控制线所在的曲面分为四组，每一组内的点使用NURBS曲线拟合，得到一系列刀触曲线，通过拟合前每一组点和曲面的对应关系构建每条刀触曲线和曲面的对应关系。依据式(4)～式(6)对刀触曲线按照弦高约束离散取点。

2.3　刀触点修正

直接按照弦高约束对刀触线进行离散取点（图12），常常会出现计算出来的倒数第二个刀触点Q_i^q和最后一个刀触点Q_i^{q+1}之间的弧长超过Q_i^q至刀触曲线终点Q_i^p的弧长，超出部分如蓝色曲线所示。常规做法是将刀触曲线的终点作为最后一个刀触点，这会造成最后两个刀触点Q_i^q和Q_i^p距离过近，以及Q_i^q和Q_i^p之间曲线的弦高误差小于给定值，导致整条曲线在加工时的误差分布不均匀。

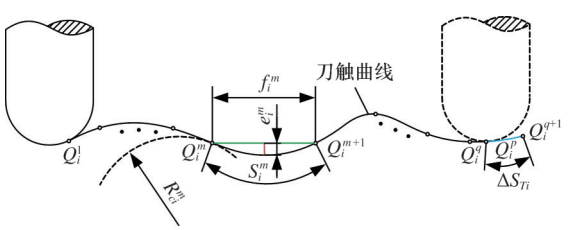


图12　第i条刀触曲线上刀触点生成原理

Fig.12　The principle of cutter contact point generation on the i th cutter contact curve is drawn.

为了保证刀触曲线上的最后一个刀触点是精确的，需对除第一个刀触点外的所有刀触点进行修正。由于刀触点具有不同的几何特征，首先对相邻刀触点之间的弦高进行灵敏度分析，然后利用刀触曲线上相邻刀触点之间弦高的影响因子确定弧长的修正值。

在考虑几何特征的情况下，相邻刀触点之间弧长的相同修正值会导致弦高不同的变化。为避免相邻刀触点之间的弦高过大或过小，修正值不能通过等分法确定。因此，对相邻刀触点之间的弦高进行灵敏度分析，分别计算修正值。

为方便评价各弦高对总弧长的影响程度，本文提出了弦高对总弧长的影响因子。定义相邻刀触点Q_i^m和Q_i^{m+1}之间的弦高e_i^m对总弧长s_{Ti}的影响因子为β_i^m。考虑到表面的凹凸质量，可以计算β_i^m。根据影响因子的定义，β_i^m可写成

$$\beta_i^m=\frac{\mathrm{d}s_{Ti}}{\mathrm{d}e_i^m}=\frac{\mathrm{d}\sum_{m=1}^{q}s_i^m}{\mathrm{d}e_i^m}=\frac{\mathrm{d}s_i^m}{\mathrm{d}e_i^m} \tag{9}$$

根据以上计算，可以得到刀触曲线上各个刀触点的影响因子。当相邻刀触点之间的弦高发生变化时，可以根据影响因子确定弧长的修正值：

$$\Delta s_i^m=\beta_i^m\Delta e_i^m \tag{10}$$

式中：Δs_i^m为相邻刀触点Q_i^m和Q_i^{m+1}之间的弧长修正值。

对相邻刀触点之间的弦高进行敏感性分析后，对第i条刀触曲线上的刀触点进行修正。如图13所示，Q_{Mi}^m是第i个刀触曲线上的第m个修正的刀触点。为了保证表面内部的加工质量，修正后的刀触点数量比修正前的数量多1。因此，Q_{Mi}^{q+1}是第i条刀触曲线上的最后一个刀触点。R_{Mi}是Q_{Mi}^m处的局部曲率半径。s_{Mi}^m和e_{Mi}^m分别为相邻刀触点Q_{Mi}^m和Q_{Mi}^{m+1}之间修正后的弧长和弦高。

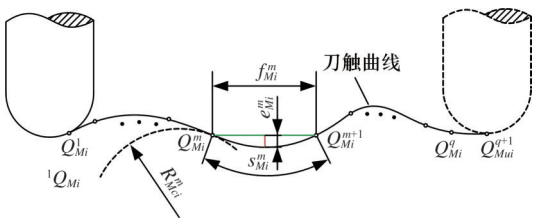


图13　第i条刀触曲线上刀触点修正原理

Fig.13　The principle for modification of cutter contact point correction on the i th cutter contact curve

为了避免密集的刀触点，弦高的修改值被确定为常数Δe。基于式(10)，总弧长误差Δs_{Ti}可表示为

$$\Delta s_{Ti}=\sum_{m=1}^{q}s_i^m=\sum_{m=1}^{q}\beta_i^m\Delta e_i^m=\Delta e\sum_{m=1}^{q}\beta_i^m \tag{11}$$

化简式(11),Δe为

$$\Delta e=\Delta s_{Ti}/\sum_{m=1}^{q}\beta_i^m \tag{12}$$

因此,修改后的相邻刀触点之间的所有弦高可写成

$$e_{Mi}^1=e_{Mi}^m=e_{Mi}^{q-1}=e-\Delta e=e-\Delta s_{Ti}/\sum_{m=1}^{q}\beta_i^m \tag{13}$$

弧长的修正值Δs_i^m表示为

$$\Delta s_i^m=\beta_i^m\Delta e=\beta_i^m\Delta s_{Ti}/\sum_{m=1}^{q}\beta_i^m \tag{14}$$

所以修正后的弧长s_{Mi}^m为

$$s_{Mi}^m=s_i^m-\Delta s_i^m=s_i^m-\beta_i^m\Delta s_{Ti}/\sum_{m=1}^{q}\beta_i^m \tag{15}$$

根据修正后的弧长,可以依次修改刀触曲线上除第一个刀触点外的所有刀触点。通过对刀触曲线上的刀触点的修改,使得最后一个刀触点刚好落在刀触曲线的终点上。

将修正后的刀触点投影到该曲线所对应的曲面上,得到投影点的欧氏空间坐标和曲面参数域上的坐标。曲面上一点$r(u_0,v_0)$的法矢量为

$$\boldsymbol{N}(u_0,v_0)=\frac{\boldsymbol{r}_{u'}(u_0,v_0)\times\boldsymbol{r}_{v'}(u_0,v_0)}{\|\boldsymbol{r}_{u'}(u_0,v_0)\times\boldsymbol{r}_{v'}(u_0,v_0)\|} \tag{16}$$

将投影点沿其法向偏移球头刀半径和加工余量的距离,得到刀位点,修正前后刀位点的对比如图14所示。

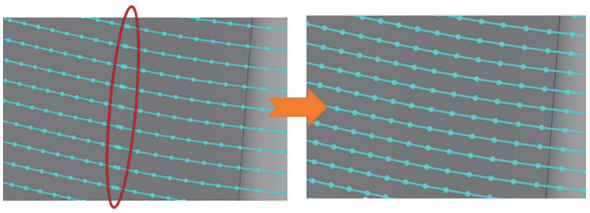


图14 修正前后刀位点对比

Fig.14 Comparison of tool location points before and after correction

添加进退刀路径后,如图15所示,为方便观察,将加工行距设为1.0 mm。

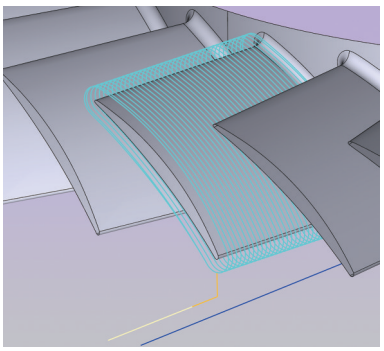


图15 加工行距为1.0 mm时的刀具路径

Fig.15 The tool paths when the machining row spacing is 1.0 mm

2.4 无干涉刀轴矢量的计算

对于开式整体叶盘,叶盘流道空间狭小,叶片扭转程度大,加工叶盘流道的刀轴矢量规划相较于一般曲面难度会更大。每个刀位点的刀轴计算方法如下。

如图16所示,对于每一个刀位点P_{CL},以与其对应的刀触点P_{CC}处的切向量为X轴,以P_{CC}处的曲面法向量为Y轴,Z轴的方向矢量则通过X、Y轴和右手坐标系确定,构造刀位点局部坐标系。刀轴方向可在刀位点局部坐标系中由前倾角θ和侧倾角β表示。刀轴矢量T可在刀触坐标系中表示为

$$T=\boldsymbol{i}\cdot\sin\theta\cos\beta+\boldsymbol{j}\cdot\sin\beta+\boldsymbol{k}\cdot\cos\theta\cos\beta \tag{17}$$

其中,$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$分别表示刀位点坐标系X轴、Y轴、Z轴方向单位向量;前倾角θ为刀具和加工轨迹的夹角,在刀位点坐标系中表示为刀具在$XP_{CL}Z$平面上的投影与Z轴的夹角;侧倾角β为刀具偏离加工轨迹的角度,在刀触坐标系中表示为刀具和$XP_{CL}Z$平面的夹角。

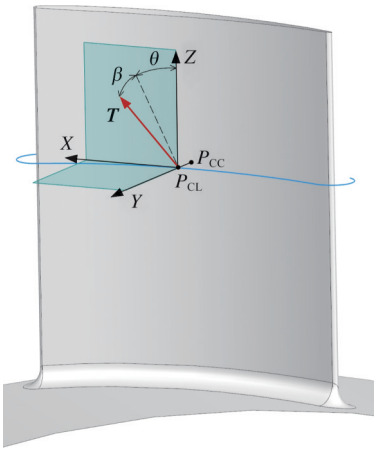


图16 刀位点刀轴矢量规划示意图

Fig.16 Schematic diagram of tool orientation planning for tool location points

由于使用球头刀,当刀具半径小于曲面的最小曲率半径时,可以避免刀具的局部干涉。刀具的全局干涉主要通过调整侧倾角β来避免,将Z轴的方向矢量作为刀位点P_{CL}的初始刀轴矢量,通过缓慢调整增加侧倾角β来判断刀具与叶片的干涉情况,第一个与加工叶片无干涉的侧倾角为最小侧倾角,最后一个与相邻叶片无干涉的侧倾角为最大侧倾角。确定给定前倾角下对应的侧倾角可行域,作为无干涉刀轴矢量的可行域Ω。

对于典型的五轴机床,由于旋转轴比三个线性轴具有更大的转动惯量,在为叶盘零件规划刀具方向时,如果旋转轴的位移发生剧烈变化,机床惯性会导致运动不稳定,从而影响加工精度。对

AC型五轴机床进行优化研究，不同型号的机床可切换不同的运动学模型。在工件坐标系(WCS)中生成的刀具尖端位置$\boldsymbol{P}=(P_x,P_y,P_z)^{\mathrm{T}}$和刀具方向$\boldsymbol{O}=(O_x,O_y,O_z)^{\mathrm{T}}$应通过逆运动学变换为机器的五个驱动器$(X_M,Y_M,Z_M,A,C)^{\mathrm{T}}$：

$$\left.\begin{aligned}X_M&=(P_x+L_x)\cos C-(P_y+L_y)\sin C\\Y_M&=(L_x\sin C+L_y\cos C)\cos A-(P_z+L_z)\sin A\\Z_M&=(P_z+L_z)\cos A+(P_x\sin C+\\&\quad(P_y+L_y)\cos C+L_x\sin C)\sin A\\A&=\arccos(O_z)\\C&=\arctan2(O_x,O_y)\end{aligned}\right\}\tag{18}$$

式中：$(L_x,L_y,L_z)^{\mathrm{T}}$为工件坐标系的偏置。

刀具方向的平滑度由旋转轴的变化表示。为了旋转轴的位移在加工过程中变化平稳，考虑机床动态性能的全局刀具方向平滑度指标定义为刀具加工过程中旋转轴的平方加速度之和。工件坐标系下的刀轴矢量可行域转换为机床的轴位移(A_i,C_i)。基于数值差分法，第i个刀尖位置P_i对应旋转轴的加速度指数(a_i^A,a_i^C)定义为

$$\left.\begin{aligned}a_i^A&=\frac{2A_{i-1}}{\Delta t_{i-1}(\Delta t_{i-1}+\Delta t_i)}-\frac{2A_i}{\Delta t_{i-1}\Delta t_i}+\frac{2A_{i+1}}{\Delta t_i(\Delta t_{i-1}+\Delta t_i)}\\a_i^C&=\frac{2C_{i-1}}{\Delta t_{i-1}(\Delta t_{i-1}+\Delta t_i)}-\frac{2C_i}{\Delta t_{i-1}\Delta t_i}+\frac{2C_{i+1}}{\Delta t_i(\Delta t_{i-1}+\Delta t_i)}\\\Delta t&=\left\|\overline{P_iP_{i+1}}\right\|/f\end{aligned}\right\}\tag{19}$$

式中：$\{(A_{i-1},C_{i-1}),(A_i,C_i),(A_{i+1},C_{i+1})\}$分别为第$i-1$个、第$i$个和第$i+1$个刀尖点的旋转轴位移；$\Delta t_i$为刀具从$P_i$移动到$P_{i+1}$所需要的时间；$f$为机床进给速度。

为了保证刀具变化在整个加工过程中的平滑度，将其转化为求解加工路径上每个刀尖点P_i对应A、C旋转轴的加速度平方和的最小值。同理，对于每一层叶片加工路径，希望减少使用惯性矩较大的A轴。因此，在优化刀具平滑度的同时，需要保证A、C旋转轴位置严格落在可行域中，结合式(19)，构建光顺性优化模型：

$$\left.\begin{aligned}&\min\left\{\sum_{i=2}^{N-1}(a_i^A)^2+(a_i^C)^2\right\}\\&\text{s.t. }A_{i,\min}<A_i<A_{i,\max}\\&\qquC_{i,\min}<C_i<C_{i,\max}\end{aligned}\right\}\tag{20}$$

式中：N为每层刀具路径上的离散点的数量；A、C轴的无碰撞刀轴矢量区域确定为优化变量的搜索范围。

刀轴矢量可行域可通过引入球面线性插值来归一化处理，记靠近当前叶片的刀轴矢量为$\boldsymbol{q}_0$，靠近相邻叶片的刀轴矢量为$\boldsymbol{q}_1$，则可行域内的刀轴矢量$\boldsymbol{T}_i=(x_i,y_i,z_i)$为

$$T_i=\mathrm{SLERP}(\boldsymbol{q}_0,\boldsymbol{q}_1;t)=\boldsymbol{q}_0\cdot\frac{\sin\big((1-t_i)\theta\big)}{\sin\theta}+\boldsymbol{q}_1\cdot\frac{\sin(t_i\theta)}{\sin\theta}\qquad 0\leqslant t_i\leqslant 1\tag{21}$$

$$\theta=\arccos(\boldsymbol{q}_0\cdot\boldsymbol{q}_1)\qquad 0\leqslant\theta\leqslant\pi\tag{22}$$

将式(18)、式(19)、式(21)代入式(20)中的优化函数，则优化函数可转变为以t_i为自变量的优化函数。

A_i对t_i的梯度为

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial A_i}{\partial t_i}&=-\frac{1}{\sqrt{1-z^2}}\frac{\partial z_i}{\partial t_i}\\\frac{\partial z_i}{\partial t_i}&=q_{0z}\cdot\frac{\partial\dfrac{\sin((1-t_i)\theta)}{\sin\theta}}{\partial t_i}+q_{1z}\cdot\frac{\partial\dfrac{\sin(t_i\theta)}{\sin\theta}}{\partial t_i}\end{aligned}\right\}\tag{23}$$

C_i对t_i的梯度为

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial C_i}{\partial t_i}&=\frac{1}{1+\left(\dfrac{x_i}{y_i}\right)^2}\left(\frac{1}{y_i}\frac{\partial x_i}{\partial t_i}-\frac{x_i}{y_i^2}\frac{\partial y_i}{\partial t_i}\right)\\\frac{\partial x_i}{\partial t_i}&=q_{0x}\cdot\frac{\partial\dfrac{\sin((1-t_i)\theta)}{\sin\theta}}{\partial t_i}+q_{1x}\cdot\frac{\partial\dfrac{\sin(t_i\theta)}{\sin\theta}}{\partial t_i}\\\frac{\partial y_i}{\partial t_i}&=q_{0y}\cdot\frac{\partial\dfrac{\sin((1-t_i)\theta)}{\sin\theta}}{\partial t_i}+q_{1y}\cdot\frac{\partial\dfrac{\sin(t_i\theta)}{\sin\theta}}{\partial t_i}\end{aligned}\right\}\tag{24}$$

上述优化函数为高阶非线性，不能用常用的数值解法求解。根据式(23)、式(24)、式(20)中的优化函数对t_i可求梯度，借助C++中的非线性优化方法(NLOPT)库，使用基于局部梯度的优化方法来计算优化函数的最优解。得到最优解后，将t_i代入式(21)即可计算出边界无碰撞且光滑的刀轴矢量$\boldsymbol{T}_i$。

3　仿真与实验

以Visual Studio 2022为开发平台，上述所有算法已经被编程实现。在米克朗机床UCP 800上进行开式整体叶盘叶片的精加工实验验证。

选择的实验对象为直径290 mm的开式整体叶盘，叶片高度约37 mm，叶片个数为36。使用的圆柱毛坯直径为292 mm，高度为32 mm。本文主要验证所提方法的正确性，故选用易切削的6061铝合金作为工件材料。在精加工前，先使用直径8 mm的牛鼻刀将叶盘流道内的材料去除，保留叶片余量为0.5 mm。由于叶根圆角半径为2 mm，为了一次性能够将叶根圆角加工出来，故叶片精加工刀具选择球头直径为4 mm、锥度为2°的锥度球刀，全长70 mm，其中切削刃长度为20 mm。叶片精加工余量为0 mm，行距为0.15 mm，在弦高误差为0.01 mm的约束下，根据所提方法

生成的叶片螺旋铣削路径和同参数下UG/NX软件的路径如图17所示。

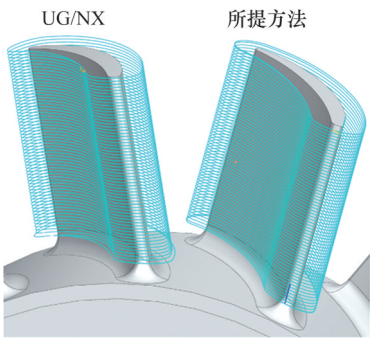


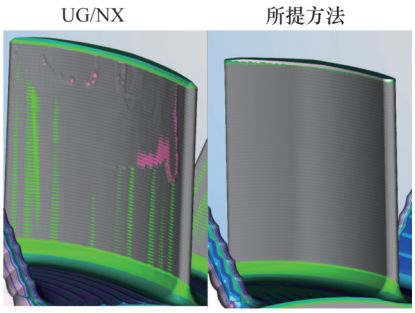
图17 UG/NX和所提方法的铣削路径

Fig.17 Toolpaths for UG/NX and proposed methods

在实际加工前，对UG/NX和所提方法生成的路径在Vericut软件中仿真，结果如图18所示，仿真结果表明，所提方法过切和残留均在0.02 mm以内，明显优于UG/NX。整个仿真过程未出现机床碰撞问题，可以进行加工实验。



(a)仿真图例



(b)余量分布图

图18 UG/NX和所提方法仿真结果

Fig.18 Simulation results of UG/NX and the proposed method

叶片实际加工时，主轴转速设为12 000 r/min，进给速度为1000 mm/min。叶片实际加工结果如图19所示。

通过三坐标测量仪测量所提方法和UG/NX的叶片表面轮廓精度如图20所示，轮廓精度数据的统计分析如表1所示。其中，平均值代表整体误差的平均水平。平均值越接近目标值(通常为0，代表无误差)，表示加工精度越高。标准偏差描述误差的分散程度。标准偏差越小，加工过程越稳定，误差分布越集中，加工精度越高。所提方法的平均误差(0.042 mm)、标准差(0.010)均较小，表

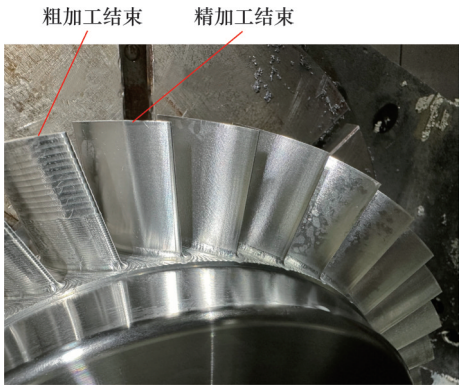


图19 叶片实际加工结果

Fig.19 Results of blade processing

明其整体精度和稳定性较好。此外，其偏度(0.762)和峰度(−0.330)值表明，与UG/NX相比，误差分布更加均衡和均匀，最大误差范围更小。

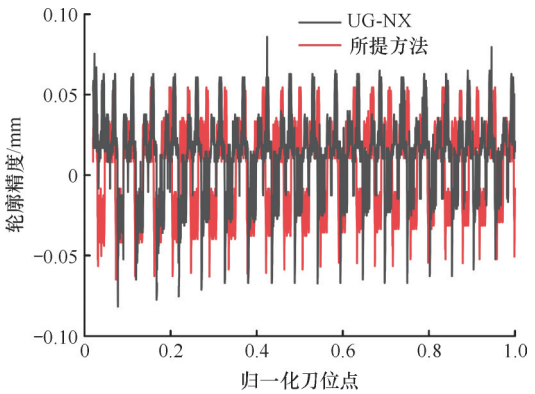


图20 所提方法和UG/NX的叶片表面轮廓精度

Fig.20 Blade surface profile accuracy of the proposed method and UG/NX

表1 所提方法和UG/NX的叶片表面轮廓精度对比分析

Tab.1 Comparative analysis of the blade surface profile accuracy between the proposed method and UG/NX

	平均值/mm	标准差	偏度	峰度	最小值/mm	最大值/mm
所提方法	0.042	0.010	0.762	−0.330	−0.065	0.067
UG/NX	0.046	0.016	1.197	0.757	−0.082	0.086

将叶片切割下来后在白光干涉仪下测量叶片吸力面和压力面的三维形貌，结果见图21～图24。首先，由图21、图23可以看出，切痕呈现规则的长方形；轮廓曲线呈波浪形，波长等于路径行距0.15 mm；由表面形貌也能观察到路径行距为0.15 mm，证明叶片精加工切削过程稳定以及所提算法的有效性。其次，根据图21和图23中的数据，计算所提方法加工的叶片压力面粗糙度Sa约1.368 μm，吸力面粗糙度Sa约1.561 μm，根据图22和图24中的数据，计算UG/NX方法加工的叶片压力面粗糙度Sa约1.542 μm，吸力面粗糙度Sa约1.959 μm，所提方法加工的压力面粗糙度比

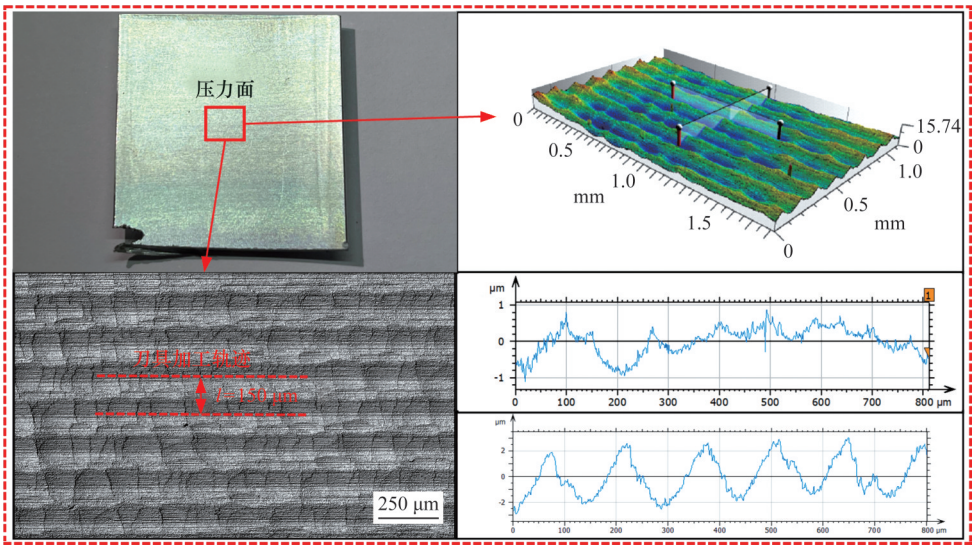


图 21　所提方法加工压力面粗糙度测量结果

Fig.21　Measurement results of the roughness of the pressure surface machined by the proposed method

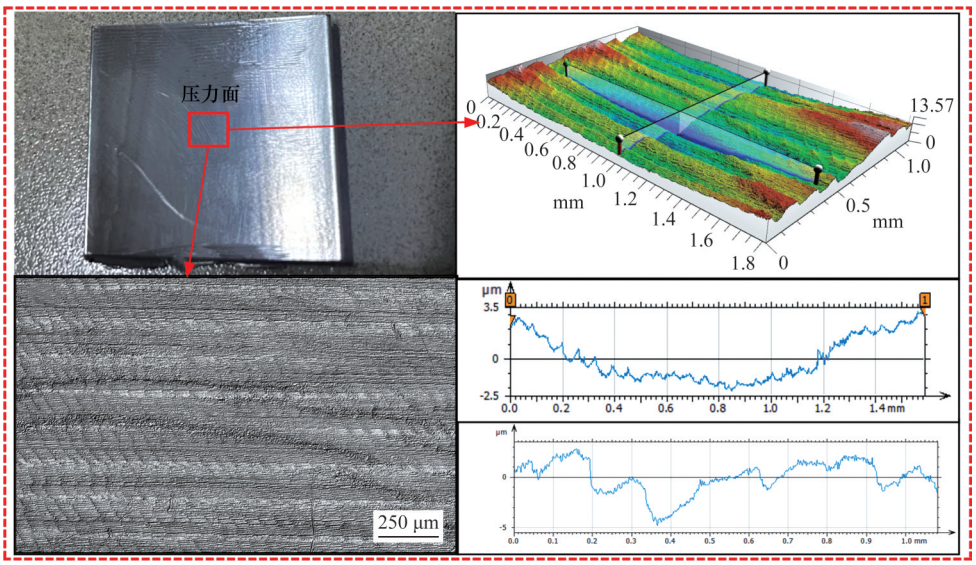


图 22　UG/NX 加工压力面粗糙度测量结果

Fig.22　Measurement results of the roughness of pressure surface machined by the UG/NX

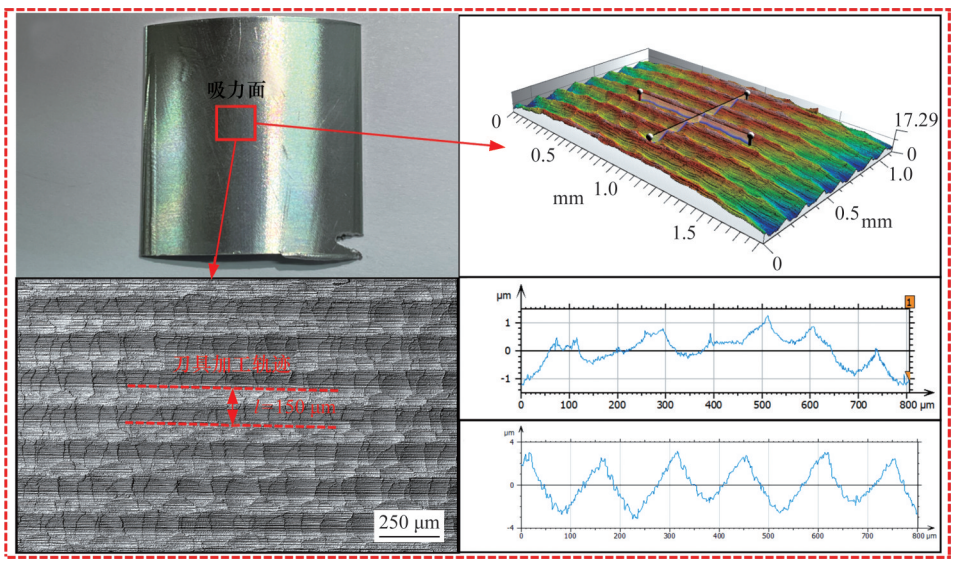


图 23　所提方法加工吸力面表面粗糙度测量结果

Fig.23　Measurement results of the roughness of the suction surface machined by the proposed method

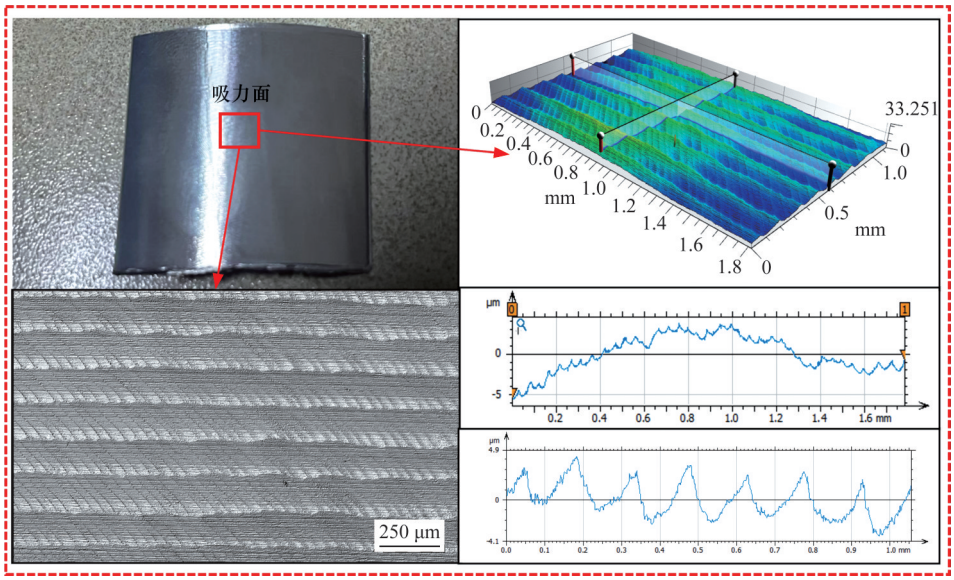


图24 UG/NX加工吸力面表面粗糙度测量结果

Fig.24 Measurement results of the roughness of suction surface machined by the UG/NX

UG/NX降低了11.28%，吸力面比UG/NX降低了20.32%。总体而言，与UG/NX相比，叶片表面加工质量得到了提高，所提方法具有更好的加工精度和一致性。

截取叶片精加工中的一圈加工路径，优化前的刀轴矢量为可行域内靠近叶片的矢量。如图25所示，红色射线为刀轴矢量，所提优化方法光顺了刀轴矢量。图26、图27分别记录了A、C轴

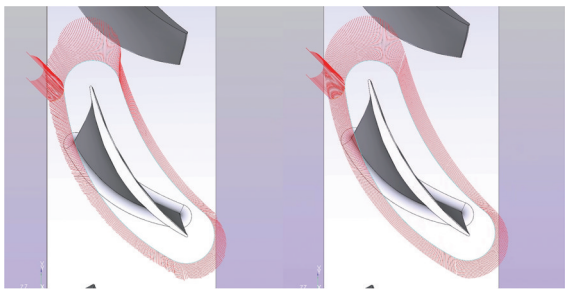


图25 刀轴矢量优化前后对比

Fig.25 Comparison of tool axis vector before and after optimization

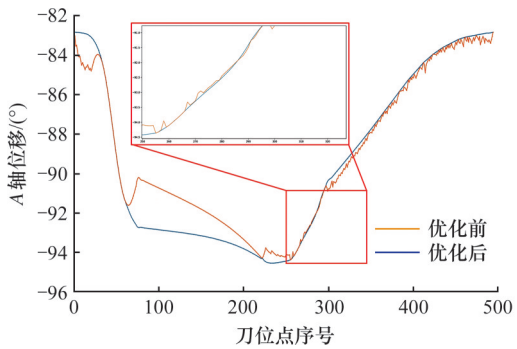


图26 A轴位移优化前后对比

Fig.26 Comparison of A-axis displacement before and after optimization

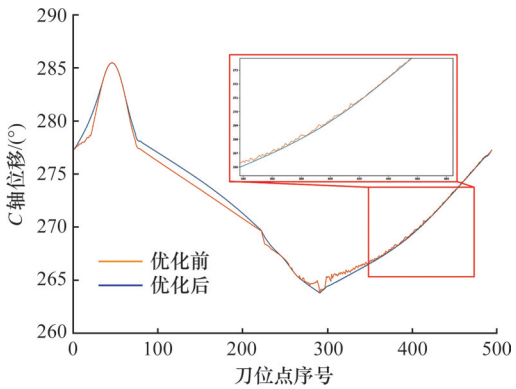


图27 C轴位移优化前后对比

Fig.27 Comparison of C-axis displacement before and after optimization

的位移，可以看出所提方法使A、C轴运动更加平滑。图28、图29分别记录了A、C轴的加速度，A轴最大加速度比优化前的0.789°/s^{-2}减小了88.72%，同时，C轴最大加速度比优化前的0.988°/s^{-2}减小了81.38%。该结果表明，所提的刀轴矢量优化方法在避免刀具和工件之间发生碰撞时有效地减小了旋转轴的加速度。这一改进有助于提升加工过程的稳定性，还减小了因轴突变导致的振动和误差，从而提高了加工精度和表面质量。

4 结论

1)本文提出了一种整体叶盘组合曲面叶片螺旋加工轨迹生成方法，解决了有裁剪曲面存在的组合曲面叶片刀具路径精确生成的问题。

2)所提方法已集成到自主研发的CAM软件中，加工相同的叶盘叶片，所提方法加工叶片轮廓精度在70 μm以内，而UG/NX轮廓精度在90 μm以内，具有更高的加工精度。同时，所提方法的误

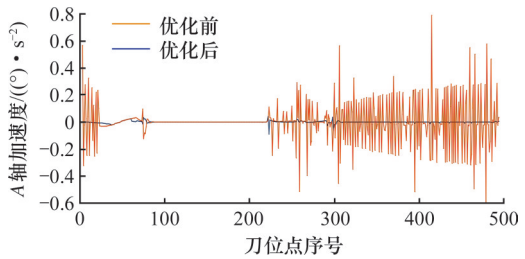


图28　*A*轴优化前后加速度对比

Fig.28　Comparison of acceleration before and after *A*-axis optimization

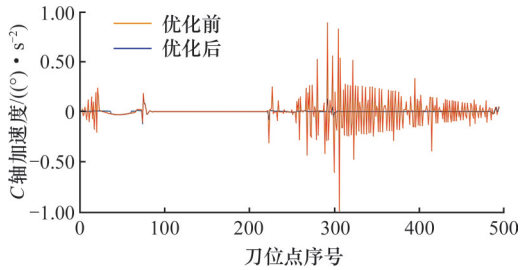


图29　*C*轴优化前后加速度对比

Fig.29　Comparison of acceleration before and after *C*-axis optimization

差分布更加均衡，加工误差具有更好的一致性。

3）与UG/NX相比，所提方法加工的压力面、吸力面粗糙度分别降低了11.28%、20.32%，叶片表面加工质量得到了提高，表面粗糙度达到设计要求，验证了所提方法的优越性。

4）通过引入球面插值，最小化旋转轴的加速度生成叶片加工路径无碰撞和光滑的刀轴矢量。实验结果表明，所提方法可以有效地减小机床旋转轴的加速度，减小因轴突变导致的振动和误差。

参考文献：

[1] SHEN Moqi, LIU Jia, WANG Jingtao, et al. Design Method and Experimental Study of a Cathode Tool with an Extremely High Leveling Ratio for Electrochemical Machining of Blisk[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(4): 593-608.

[2] ASCHENBRUCK J, ADAMCZUK R, SEUME J R. Recent Progress in Turbine Blade and Compressor Blisk Regeneration[J]. Procedia CIRP, 2014, 22: 256-262.

[3] YAO Zequan, SHEN Jingyuan, WU Ming, et al. Position-dependent Milling Process Monitoring and Surface Roughness Prediction for Complex Thin-walled Blade Component[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 198: 110439.

[4] WANG Jingtao, XU Zhengyang, ZHU Di. Improving Profile Accuracy and Surface Quality of Blisk by Electrochemical Machining with a Micro Inter-electrode Gap[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(4): 523-537.

[5] WU Dongbo, WANG Hui, ZHANG Kaiyao, et al. Research on Formation Mechanism and Optimization Method of Surface Waviness of TC4 Blisk Blade[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 39: 305-326.

[6] LIANG Jiawei, WU Dongbo, LIU Shibo, et al. Research on Hybrid Remanufacturing Process Chain of Laser Cladding, CNC Machining and Ultrasonic Rolling for Aero-engine Blades[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 110: 331-349.

[7] LI Xiangyu, REN Junxue, TANG Kai, et al. Optimization of Cutter Profile for Achieving Maximum Stiffness in Five-axis Milling of Deep and Narrow Channel Parts[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 541-555.

[8] LI Xiangyu, LI Zhaoyu, HE Dong, et al. Efficient Machining of a Complex Blisk Channel Using a Disc Cutter[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(1): 414-437.

[9] DAI Xing, QI Qi, YANG Jixiang, et al. A Trochoidal Toolpath Planning Method for 5-axis Milling of Blisks with Equal Radial Cutting Depth[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 123: 128-141.

[10] LEE E. Contour Offset Approach to Spiral Toolpath Generation with Constant Scallop Height[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(6): 511-518.

[11] ZHANG Ke, TANG Kai. An Efficient Greedy Strategy for Five-axis Tool Path Generation on Dense Triangular Mesh[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(9): 1539-1550.

[12] MONREAL M, RODRIGUEZ C A. Influence of Tool Path Strategy on the Cycle Time of High-speed Milling[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(4): 395-401.

[13] PAVANASKAR S, PANDE S, KWON Y, et al. Energy-efficient Vector Field Based Toolpaths for CNC Pocketmachining[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20: 314-320.

[14] PARK S C, CHUNG Y C, CHOI B K. Contour-parallel Offset Machining without Tool-retractions[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(9): 841-849.

[15] RAUCH M, DUC E, HASCOET J Y. Improving Trochoidal Tool Paths Generation and Implementation Using Process Constraints Modelling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(5): 375-383.

[16] WU Shixiong, MA Wei, LI Bin, et al. Trochoidal Machining for the High-speed Milling of Pockets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233: 29-43.

[17] HUANG Nuodi, JIN Yongqiao, LU Yaoan, et al. Spiral Toolpath Generation Method for Pocket Machining[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 139: 106142.

[18] 单晨伟，张定华，刘维伟. 组合曲面叶片的螺旋加工刀位轨迹生成[J]. 计算机集成制造系统，2008，14(11)：2243-2247.
SHAN Chenwei, ZHANG Dinghua, LIU Weiwei. Spiral Machining Tool Path Generation for Blade with Compound Surfaces[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(11): 2243-2247.

[19] GONG Hu, WANG Yi, SONG Le, et al. Spiral Tool Path Generation for Diamond Turning Optical Freeform Surfaces of Quasi-revolution[J]. Computer-Aided Design, 2015, 59: 15-22.

[20] HAUTH S, LINSEN L. Double-spiral Tool Path in Configuration Space[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(9): 1011-1022.

[21] XU Jinting, SUN Yuwen, ZHANG Lei. A Mapping-based Approach to Eliminating Self-intersection of Offset Paths on Mesh Surfaces for CNC Machining[J]. Computer-Aided Design, 2015, 62: 131-142.

[22] BIETERMAN M B, SANDSTROM D R. A Curvilinear Tool-path Method for Pocket Machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, 125(4): 709-715.

[23] ZHOU Bo, ZHAO Jibin, LI Lun. CNC Double Spiral Tool-path Generation Based on Parametric Surface Map-

ping[J]. Computer-Aided Design, 2015, 67/68: 87-106.
[24] BANERJEE A, FENG H Y, BORDATCHEV E V. Process Planning for Floor Machining of 2½D Pockets Based on a Morphed Spiral Tool Path Pattern[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63(4): 971-979.
[25] SUN Yuwen, GUO Dongming, JIA Zhenyuan. Spiral Cutting Operation Strategy for Machining of Sculptured Surfaces by Conformal Map Approach[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 180(1/2/3): 74-82.
[26] REN Fei, YUWEN Sun, GUO Dongming. Combined Reparameterization-based Spiral Toolpath Generation for Five-axis Sculptured Surface Machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(7): 760-768.
[27] SUN Yuwen , XU Jinting, JIN Chunning, et al. Smooth Tool Path Generation for 5-axis Machining of Triangular Mesh Surface with Nonzero Genus[J]. Computer-Aided Design, 2016, 79(C): 60-74.
[28] SHEN Changqing, MAO Sihao, XU Bingzhou, et al. Spiral Complete Coverage Path Planning Based on Conformal Slit Mapping in Multi-connected Domains[J]. The International Journal of Robotics Research, 2024, 43(14): 2183-2203.
[29] XU Jinting, JI Yukun, SUN Yuwen, et al. Spiral Tool Path Generation Method on Mesh Surfaces Guided by Radial Curves[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(7): 071016.
[30] 吴江盛，柴兴亮，薄其乐，等. 基于离散点云构造径向线的螺旋加工轨迹规划方法[J]. 中国机械工程，2025，36(4)：697-702.
WU Jiangsheng, CHAI Xingliang, BO Qile, et al. Spiral Machining Trajectory Planning Method Based on Discrete Point Cloud Construction of Radial Lines[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4): 697-702.
[31] HELD M, de LORENZO S. On the Generation of Spiral-like Paths within Planar Shapes[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2018, 5(3): 348-357.
[32] 白瑀，张定华，刘维伟，等. 叶片类零件四坐标高效螺旋数控编程方法研究[J]. 机械科学与技术，2003，22(2)：177-179.
BAI Yu, ZHANG Dinghua, LIU Weiwei, et al. An Efficient Method for Four-axis Spiral NC Programming of Blade Parts[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(2): 177-179.
[33] 单晨伟，张定华，刘维伟，等. 带边界约束叶片的螺旋加工轨迹规划[J]. 中国机械工程，2005，16(18)：1629-1632.
SHAN Chenwei, ZHANG Dinghua, LIU Weiwei, et al. Track Programming for the Spiral Machining of the Blade with Boundaries[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(18): 1629-1632.

（编辑 陈 勇）

作者简介：韩 江，男，1963年生，教授、博士研究生导师。研究方向为智能数控技术与高档数控机床、数控系统、机器人控制与机器人化加工、增材制造(3D打印)与增减材复合制造、智能制造技术、装备与系统、大数据驱动制造与数字孪生技术等。E-mail：jianghan@hfut.edu.cn。田晓青*（通信作者），女，1987年生，教授、博士研究生导师。研究方向为智能数控技术系统及装备、数字孪生与工业软件、软体机器人与柔性电子3D打印。E-mail：tianxiaoqing@hfut.edu.cn。

本文引用格式：
韩江，杜豪，田晓青，等. 基于Coons重新参数化的整体叶盘组合曲面叶片螺旋精加工路径生成方法研究[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：1976-1988.
HAN Jiang, DU Hao, TIAN Xiaoqing, et al. Research on Tool Path Planning of Spiral Finishing Processes Based on Coons Reparameterization for Blades with Blisk Compound Surfaces[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(8): 1976-1988.

（上接第1975页）

[17] XU Ziwei, LI Yanfeng, HUANG Hongzhong, et al. A Novel Method Based on CNN-BiGRU and AM Model for Bearing Fault Diagnosis[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38(7): 3361-3369.
[18] NAJM S M, PANITI I. Predict the Effects of Forming Tool Characteristics on Surface Roughness of Aluminum Foil Components Formed by SPIF Using ANN and SVR [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2021, 22(1): 13-26.
[19] ZHU Haitao, GENG Guoqian, YU Yang, et al. Probabilistic Analysis on Parametric Random Vibration of a Marine Riser Excited by Correlated Gaussian White Noises[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2020, 126: 103578.
[20] YÜZGEÇ U, KUSOGLU M. Multi-objective Harris Hawks Optimizer for Multi-objective Optimization Problems[J]. BSEU Journal of Engineering Research and Technology, 2020, 1(1): 31-41.
[21] ZHANG S J, TO S, WANG S J, et al. A Review of Surface Roughness Generation in Ultra-precision Machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 91: 76-95.
[22] COELLO C A C, PULIDO G T, LECHUGA M S. Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.

（编辑 陈 勇）

作者简介：乐庾忻，男，2000年生，硕士研究生。研究方向为智能制造、绿色制造等。李聪波*（通信作者），男，1981年生，教授、博士研究生导师。研究方向为绿色制造、智能制造等。E-mail：congboli@cqu.edu.cn。

本文引用格式：
乐庾忻，李聪波，黄康华，等. 考虑刀具磨损的TB6钛合金镗削表面粗糙度预测及工艺参数优化[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：1965-1975.
LE Yuxin, LI Congbo, HUANG Kanghua, et al. Surface Roughness Prediction and Process Parameter Optimization for TB6 Titanium Alloy Boring Considering Tool Wear[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(8): 1965-1975.