

DOI: 10.7652/xjtuxb201903003

九轴联动叶片双刀铣削刀路平滑算法

宋冬冬, 薛飞, 赵万华, 卢秉恒

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710054, 西安)

摘要: 针对九轴联动叶片型面双刀对顶铣削方法, 为保证加工轨迹的平滑性及双刀具的同步性, 提出了一种基于几何约束的刀路平滑算法。首先, 分析了九轴联动双刀加工机床中两把刀具的结构约束关系, 通过旋转矩阵将切触点处法向矢量转化为表征双刀具姿态的刀轴矢量, 并由刀轴矢量计算刀具的前倾角和侧偏角, 确定满足双刀铣削要求的前倾角和侧偏角取值范围; 然后, 由残留高度和弦高误差定义切削宽度和步长对应的参数增量, 对叶背、叶盆曲面沿行距方向上相邻切触点间参数增量 Δu_{di} 、 Δu_{bi} 和进给方向上相邻切触点间的参数增量 Δv_{di} 、 Δv_{bi} 进行等参数化求解; 最后, 根据叶背和叶盆曲面切削区域的范围设定自定义系数, 研究双侧对顶铣削轨迹线的参数匹配算法, 形成双刀铣削的刀路平滑算法。对典型汽轮机叶片规划了双刀对铣粗加工轨迹, 并进行了加工仿真和实验验证, 结果表明, 叶片两侧对应加工区域可同时完成加工, 且加工表面的轮廓误差满足该工序轮廓误差的公差要求。与考虑切削力抵消规划轨迹的算法相比, 该算法的计算效率提高了 56%, 且在等效切削参数下, 加工效率相对单刀提高了约 41.5%。

关键词: 汽轮机叶片; 双刀铣削; 轨迹平滑

中图分类号: O121.8; G558 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)03-0013-07

Tool Path Smoothing Algorithm for Nine-Axis Synchronized Twin-Tool Milling of Blades

SONG Dongdong, XUE Fei, ZHAO Wanhua, LU Bingheng

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at nine-axis twin-tool milling of blade profiles, a new path smoothing algorithm is proposed based on the geometric constraints in order to guarantee the smoothness of twin-tool paths and the synchronization of two cutters. Firstly, the structural constraint of two cutters in the nine-axis machine tool is analyzed, and the normal vector at cutting contact point is transformed into the cutter axis vector through rotation matrix for characterizing twin-tool pose. Meanwhile, the inclination angle and tilt angle of the cutter are calculated and the range of these two angles is determined to meet the twin-tool milling requirement. Secondly, the parameter increments in and between the cutting paths are calculated by iso-parametric solution on Δu_{di} , Δu_{bi} , Δv_{di} and Δv_{bi} , here Δu_{di} and Δu_{bi} are the parameter increments between two adjacent cutting contact points, one is on the dorsal surface and another on the basin surface of the blade, along the cutting direction; Δv_{di} and Δv_{bi} are the parameter increments between two adjacent cutting contact points (on the same aforementioned two surfaces) along feed direction, respectively.

收稿日期: 2018-07-16。 作者简介: 宋冬冬(1984—),男,博士生;赵万华(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51605373);国家科技重大专项资助项目(2018ZX04004001)。

网络出版时间: 2018-12-26 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181225.0858.006.html>

Finally, the self-defined coefficient is defined according to the range of milling area on the dorsal and basin surfaces of the blade, and the matching algorithm and twin-tool path smoothing algorithm are proposed. The twin-tool paths of rough machining are planned for typical turbine blade. The results of simulation and experiments show that the two surfaces of the blade can be simultaneously and entirely machined, and the contour errors do not exceed the tolerance range. Compared with the path planning algorithm considering the cutting force offset, the computational efficiency of our method is enhanced by 56%. In addition, the machining efficiency can be increased by about 41.5% compared with the single-tool milling at equivalent cutting parameters.

Keywords: turbine blade; twin-tool milling; path smoothing

叶片是汽轮机的关键部件,其型面多由扭曲的自由曲面构成,细长、薄壁特性使其在加工过程中易产生弯曲和扭转变形,严重影响叶片的加工质量和加工精度^[1-2]。目前,已有诸多学者针对工件加工变形的控制方法开展了大量研究,包括改善夹具结构以提高工件加工过程中的刚度^[3-4],改变切削参数^[5-6]、刀轴矢量^[7]来优化切削力大小和方向,以及通过加工过程中的误差补偿^[8-9]优化切触点的位置等,在一定程度上控制了加工变形,从而提高了加工精度。

五轴加工具有灵活自由度、良好材料去除率,适用于叶片类曲面的加工,但五轴加工的轨迹对加工表面质量有较大影响。传统的五轴轨迹规划方法有等参数法^[10]、等平面法^[11]和等残留高度法^[12]。文献^[13]提出了一种等高线的路径生成方法,通过曲面上的标量函数生成一系列等高曲线,探讨多目标约束下的函数求解问题,实现全局最优的刀具路径规划。文献^[14]以切削区域切削力的阈值为约束条件,建立自由曲面全局最优的五轴加工路径优化算法以提高加工效率,然而在路径规划中易于出现冗余的刀具运动轨迹。文献^[15]定义切削宽度和进给速度为两个独立的函数,使路径规划问题转化为全局最优函数的求解问题,但复杂曲面的轨迹规划有一定的局限性。加工轨迹的优化能够在一定程度上改善工件的加工质量,但加工精度和效率的相互影响限制了加工质量的持续提高。

双刀加工为解决加工精度和效率的矛盾提供一种新的思路。森精机公司在双刀头卧式加工中心 NT4300DCG^[16]上,采用与 DP Technology 公司在 CAM 软件 ESPRIT 上合作开发的后置处理程序^[17],实现了叶片型面 7 轴联动的双刀螺旋高效加工。西安交通大学研究了一种兼顾加工质量和加工效率的双刀对顶铣削方法,并提出了基于切削力抵消的轨迹优化算法^[18],为叶片型面的高效加工提出

了一种全新的解决方法。文献^[19]提出双刀纵切加工系统的实现方案及轨迹规划方法,规划了叶片型面的双刀加工轨迹。但上述方法都以切削力抵消作为轨迹规划的基础,存在轨迹规划算法计算量大、刀轨和刀轴不平滑的问题,影响了叶片的加工质量。

因此,本文提出了基于几何约束的叶片型面双刀对铣轨迹平滑算法,由双刀具的结构约束,建立了双刀轴矢量的统一表征模型,结合等残留高度和等弦高误差规划参数增量,提出相邻切触点间参数增量的等参化求解算法,并以叶片两侧曲面对应加工区域同时完成铣削为约束条件阐述了双刀加工轨迹的参数匹配优化算法。以某汽轮机叶片为例,规划了双刀对顶粗加工轨迹,通过仿真和实验分别验证了双刀加工轨迹的可行性,且叶片型面的轮廓误差均无超差现象。

1 叶片双刀对铣原理和实现方法

叶片双刀对铣是在叶盆和叶背曲面的加工区域内,采用刀具 1、刀具 2 对顶同步铣削实现叶片型面的高效加工,原理如图 1 所示。叶片型面粗加工工艺分为双刀对顶纵向铣削叶盆、叶背曲面和单刀纵向铣削叶片进、出汽边。

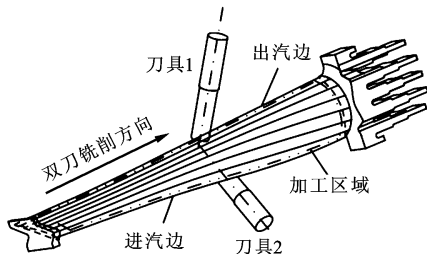


图1 双刀对铣原理示意图

结合双刀对铣刀具的位置关系,考虑叶盆和叶背曲面的不对称性,双刀加工系统各轴的运动关系模型如图 2 所示, $O_w X_w Y_w Z_w$ 为工件坐标系。刀具 B 具有沿 X 、 Y 、 Z 方向运动的直线轴和绕 Y 轴旋转

的 B 轴,刀具 C 具有沿 U 、 V 、 W 方向运动的直线轴和绕 V 轴旋转的 C 轴,两把刀具共用绕 X 轴旋转的工件回转 A 轴,通过 9 轴联动确定双刀具的姿态以实现双刀具对顶同步铣削。

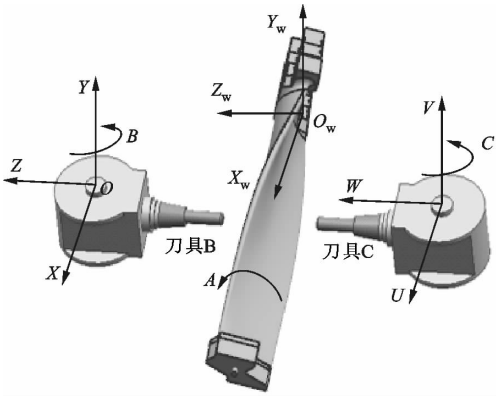


图2 双刀加工系统运动轴位置图

2 双刀刀具姿态的统一表征和求解

双刀共用 A 轴,如图2所示,以 $O_w X_w Y_w Z_w$ 为基准,刀具 B 、 C 分别在叶片两侧不同高度且平行于 $X_w O_w Z_w$ 的平面内摆动,即两把刀具在 $Y_w O_w Z_w$ 平面内的投影相互平行。刀具 B 、 C 的姿态在双刀加工系统中相互约束,需实现统一表征。

2.1 双刀刀轴矢量的统一表征

在 $O_w X_w Y_w Z_w$ 中,叶盆曲面和叶背曲面上相对的两切触点法向矢量分别为 $\mathbf{n}_1 = [x_1, y_1, z_1]$ 、 $\mathbf{n}_2 = [x_2, y_2, z_2]$,如图3所示,且 $\mathbf{n}_1$ 、 $\mathbf{n}_2$ 在 $Y_w O_w Z_w$ 平面内的投影分别为 $\mathbf{m}_1 = [0, y_1, z_1]$ 、 $\mathbf{m}_2 = [0, y_2, z_2]$,则 $\mathbf{m}_1$ 、 $\mathbf{m}_2$ 的夹角为

$$\varphi = \arccos\left(\frac{y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{y_1^2 + z_1^2} \sqrt{y_2^2 + z_2^2}}\right) \quad (1)$$

刀具 B 、 C 的刀轴矢量分别为 $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$,在 $Y_w O_w Z_w$ 平面内的投影分别为 $\mathbf{b}_1$ 、 $\mathbf{b}_2$,由双刀具的结构约束可得 $\mathbf{b}_1$ 、 $\mathbf{b}_2$ 的夹角为 π 。设 $\mathbf{m}_1$ 、 $\mathbf{b}_1$ 的夹角为 φ_1 、 $\mathbf{m}_2$ 、 $\mathbf{b}_2$ 的夹角为 φ_2 ,则有

$$\varphi_1 + \varphi + \varphi_2 = \pi \quad (2)$$

沿着 φ 增大的方向分别绕 X_w 轴旋转角度 φ_1 、

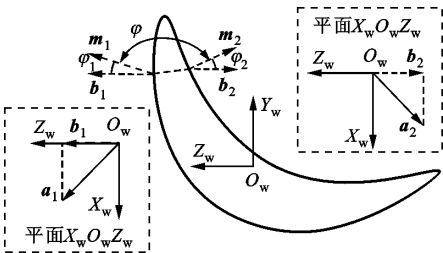


图3 刀轴矢量的结构约束关系

φ_2 ,使得 $\mathbf{m}_1$ 、 $\mathbf{b}_1$ 重合, $\mathbf{m}_2$ 、 $\mathbf{b}_2$ 重合,即

$$\mathbf{b}_1 = \mathbf{R}_X(\varphi_1) \cdot \mathbf{m}_1^T \quad (3)$$

$$\mathbf{b}_2 = \mathbf{R}_X(\varphi_2) \cdot \mathbf{m}_2^T \quad (4)$$

$$\text{式中: } \mathbf{R}_X(\varphi_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_1 & -\sin\varphi_1 \\ 0 & \sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_X(\varphi_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_2 & \sin\varphi_2 \\ 0 & -\sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 \end{bmatrix}。$$

根据向量与坐标轴的几何关系,设切触点处法向矢量和刀轴矢量具有相同的 X 轴分量,则 $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$ 的解析表达式为

$$\mathbf{a}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \cos\varphi_1 - z_1 \sin\varphi_1 \\ y_1 \sin\varphi_1 + z_1 \cos\varphi_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{a}_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ -y_2 \cos(\varphi + \varphi_1) + z_2 \sin(\varphi + \varphi_1) \\ y_2 \sin(\varphi + \varphi_1) + z_2 \cos(\varphi + \varphi_1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(5)(6)可知,参数 φ_1 影响 $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$ 的姿态,在参数 x_1 、 x_2 已知的情况下,计算了所有满足机床结构约束的刀轴矢量。

2.2 刀具姿态定义

在切触点 C 处建立局部坐标系 $O_L X_L Y_L Z_L$,如图4所示, X_L 轴为瞬时切削方向, Y_L 轴为曲面 C 点处的法线方向,由 X_L 、 Y_L 轴按右手法则确定 Z_L 轴,前倾角 α_L 为刀具轴线绕 Z_L 轴的旋转角度,侧偏角 λ_L 为刀具轴线绕 Y_L 轴的旋转角度。

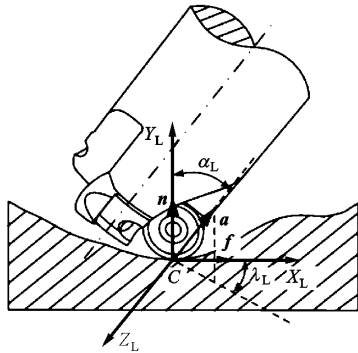


图4 刀轴矢量的定义方法

在 $O_L X_L Y_L Z_L$ 中,假设 $\mathbf{f}$ 为 X_L 的单位矢量, $\mathbf{n}$ 为 Y_L 的单位矢量, $\mathbf{a}$ 为刀轴矢量的单位矢量,则 α_L 、 λ_L 可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_L &= \arccos(x x_n + y y_n + z z_n) \\ \lambda_L &= \arccos\left(\frac{x x_f + y y_f + z z_f}{\sin\alpha_L}\right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{f} = [x_f, y_f, z_f]$; $\mathbf{n} = [x_n, y_n, z_n]$; $\mathbf{a} = [x, y,$

z]。

2.3 有效切削半径的表征

多轴联动加工引起刀轴矢量变化而改变了牛鼻铣刀的实际切削形状,如图5所示。在局部坐标系 $O_L X_L Y_L Z_L$ 中,牛鼻铣刀的有效切削半径^[20]为实际切削形状在切触点处与瞬时切削平面 P_f 、 P_k 相交轮廓线的曲率半径。平面 P_f 为 X_L 、 Y_L 确定的平面,平面 P_k 为 Y_L 、 Z_L 确定的平面。步距方向和行距方向的有效切削半径 R_{e1} 、 R_{e2} 为

$$\left. \begin{aligned} R_{e1} &= \frac{r(R-r+r\sin\alpha_L)}{r\sin\alpha_L\sin^2\lambda_L + (R-r+r\sin\alpha_L)\cos^2\lambda_L} \\ R_{e2} &= \frac{r(R-r+r\sin\alpha_L)}{r\sin\alpha_L\cos^2\lambda_L + (R-r+r\sin\alpha_L)\sin^2\lambda_L} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: R 为牛鼻铣刀半径; r 为圆角半径。

以局部曲面的结构特征为约束,为避免铣削过程中邻近曲面间产生过切现象,则 R_{e1} 、 R_{e2} 满足

$$\left. \begin{aligned} R_{e1} &\leq \rho_{Z_L=0} \\ R_{e2} &\leq \rho_{X_L=0} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $\rho_{X_L=0}$ 、 $\rho_{Z_L=0}$ 分别为局部曲面在平面 P_k 、 P_f 内的曲率半径。

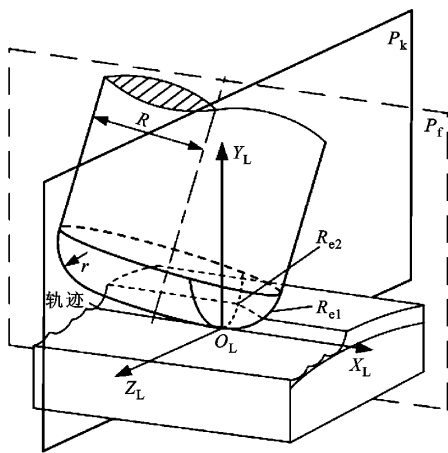


图5 牛鼻铣刀的有效切削半径

结合叶片型面的几何参数,考虑双刀轴矢量的约束关系,由式(8)(9)可计算满足双刀铣削要求的前倾角和侧偏角取值范围。

3 双刀加工轨迹平滑算法

3.1 参数增量的定义

在多轴铣削过程中,行距方向的切削宽度取决于允许的残留高度、有效切削半径和曲面局部曲率半径,如图6所示。假设 $c_{d(i-1,j)}$ 为叶背曲面第 $i-1$ 条轨迹上第 j 个切触点, $\rho_{ud(i-1,j)}$ 为该点 u 向曲率半

径, $R_{ed(i-1,j)}$ 为有效切削半径; $c_{b(i-1,j)}$ 为叶盆曲面第 $i-1$ 条轨迹上第 j 个切触点, $\rho_{ub(i-1,j)}$ 为该点 u 向曲率半径, $R_{eb(i-1,j)}$ 为有效切削半径。叶背和叶盆曲面上第 $i-1$ 与第 i 条轨迹线间的切削宽度分别为

$$\left. \begin{aligned} d_{wd(i-1,j)} &= \sqrt{\frac{8hR_{ed(i-1,j)}\rho_{ud(i-1,j)}}{\rho_{ud(i-1,j)} + R_{ed(i-1,j)}}} \\ d_{wb(i-1,j)} &= \sqrt{\frac{8hR_{eb(i-1,j)}\rho_{ub(i-1,j)}}{\rho_{ub(i-1,j)} - R_{eb(i-1,j)}}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

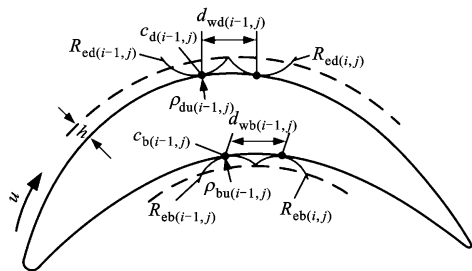


图6 残留高度和切削行距示意图

在切削步长方向上,以离散点间直线逼近曲线的弦高误差控制刀具切削的步长,如图7所示,轨迹线上的切削步长 $l_{(i,j-1)}$ 满足

$$l_{(i,j-1)} = \sqrt{8\varepsilon\rho_{v(i,j-1)} - 4\varepsilon^2} \quad (11)$$

式中: ε 为弦高误差; $\rho_{v(i,j-1)}$ 为第 i 行轨迹线上第 j 个切触点 $c_{(i,j-1)}$ 在 v 向的曲率半径。

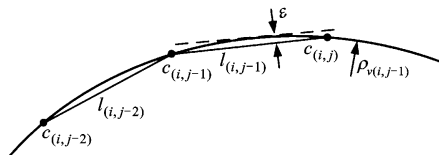


图7 弦高误差和切削步长示意图

叶片型面双刀铣削轨迹线如图8所示,选择型面的 u 向为行距方向, v 向为步长方向, L_d 、 L_b 分别为叶背、叶盆曲面的铣削宽度, $t_{d(i)}$ 、 $t_{d(i-1)}$ 为叶背曲面上第 i 、 $i-1$ 条轨迹线, $t_{b(i)}$ 、 $t_{b(i-1)}$ 为叶盆曲面上第 i 、 $i-1$ 条轨迹线。 $c_{d(i-1,j-1)}$ 的参数坐标为 $[u_{d(i-1,j-1)}, v_{d(i-1,j-1)}]$, $c_{b(i-1,j-1)}$ 的参数坐标为 $[u_{b(i-1,j-1)}, v_{b(i-1,j-1)}]$ 。在 u 向上,叶背和叶盆轨迹线间的参数增量为

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_{d(i-1,j-1)} &= d_{wd(i-1,j-1)} / \frac{\partial S_d}{\partial u} \\ \Delta u_{b(i-1,j-1)} &= d_{wb(i-1,j-1)} / \frac{\partial S_b}{\partial u} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: S_d 、 S_b 分别为叶背、叶盆曲面的参数方程; $d_{wd(i-1,j-1)}$ 、 $d_{wb(i-1,j-1)}$ 分别为叶背和叶盆曲面上第 $i-1$ 、 i 条轨迹线间的切削宽度。

v 向叶背、叶盆轨迹上的参数增量为

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_{d(i-1,j-1)} &= l_{d(i-1,j-1)} / \frac{\partial S_d}{\partial v} \\ \Delta v_{b(i-1,j-1)} &= l_{b(i-1,j-1)} / \frac{\partial S_b}{\partial v} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $l_{d(i-1,j-1)}$ 、 $l_{b(i-1,j-1)}$ 为叶背和叶盆曲面第 $i-1$ 条轨迹线上第 $j-1$ 、 j 个切触点间的切削步长。

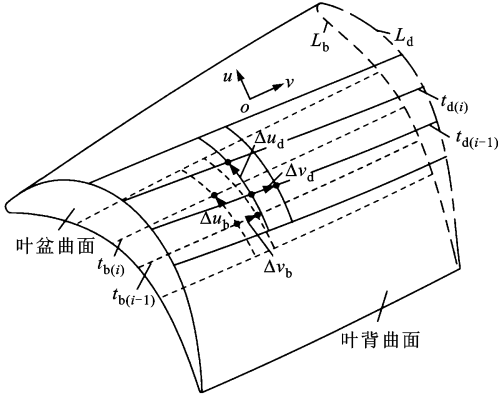


图8 叶片型面双刀铣削轨迹线示意图

3.2 单行切触点轨迹平滑算法

由于叶背和叶盆曲面上各切触点处曲率、有效切削半径的不同,即使残留高度和弦高误差相同, Δu 、 Δv 也不相同,单行切触点呈现出沿行距方向参数不等的现象,引起切触点轨迹线的不平滑,参数增量如图9所示。在 u 向上,仅以残留高度为约束计算 Δu_{di} 、 Δu_{bi} ,这不能保证双刀加工过程中叶片型面上切触点轨迹的平滑,进而影响型面的加工质量。

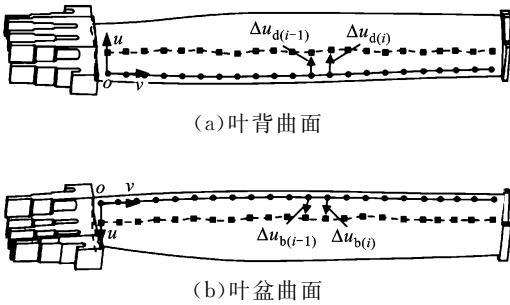


图9 轨迹线间切触点的参数增量

为了满足单行切触点轨迹线平滑的要求,并兼顾加工质量和加工效率,对 Δu_{di} 、 Δu_{bi} 进行等参数化求解,叶背和叶盆曲面任意相邻轨迹线间在行距方向的参数增量分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_d &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta u_{di}^2} \\ \Delta u_b &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta u_{bi}^2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 N 为相邻轨迹线间的切触点数。

以叶片曲面首条轨迹线为基准,通过式(14)所

得参数增量值来规划单行切触点的轨迹线,进而规划整个曲面的光滑轨迹线。同时,通过式(11)(13)规划轨迹线上的初始切触点,对 Δv_{di} 、 Δv_{bi} 进行等参数化求解,则叶背和叶盆曲面沿步距方向上任意相邻切触点间的参数增量分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_d &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta v_{di}^2} \\ \Delta v_b &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta v_{bi}^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

3.3 双侧参数匹配的轨迹优化算法

叶片曲面上各切触点沿 u 、 v 向等参数化的参数增量实现了加工曲面切触点轨迹线的平滑,但叶背和叶盆曲面加工区域的面积不同,在参数域内沿 u 向的参数取值范围存在差异,且任意相邻两条轨迹线间的等参数值不同,仅保证单行轨迹线的平滑,难以实现叶背和叶盆曲面上的轨迹线条数和切触点数量一致。为了满足叶盆和叶背曲面加工区域同时完成铣削的要求,需研究双刀对顶铣削参数匹配的轨迹线平滑算法。

为了保证叶片两侧曲面具有相同的轨迹线条数,在 u 向上取 Δu_d 、 Δu_b 的较小值作为基准参数,满足

$$\Delta u_{\min} = \min(\Delta u_d, \Delta u_b) \quad (16)$$

同时,设置自定义的比例系数

$$\gamma = \frac{L_d}{L_b} \quad (17)$$

由于叶背曲面切削区域沿 u 向的参数取值范围大于叶盆曲面,则叶背和叶盆曲面上相邻轨迹线间的参数增量 $\Delta u'_d$ 、 $\Delta u'_b$ 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta u'_b &= \Delta u_{\min} \\ \Delta u'_d &= \gamma \Delta u_{\min} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

在 v 向上,即使叶背和叶盆曲面切削区域的参数取值范围相同,但两侧曲面的参数增量值也无法一致,两侧对应轨迹线上切触点个数无法相同。为了保证对应轨迹线上具有相同的切触点个数,相邻切触点间的参数增量 $\Delta v'_d$ 、 $\Delta v'_b$ 为

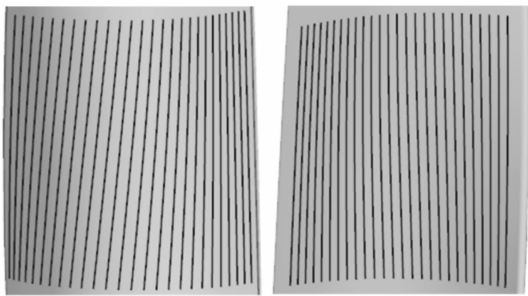
$$\left. \begin{aligned} \Delta v_{\min} &= \min(\Delta v_d, \Delta v_b) \\ \Delta v'_b &= \Delta v_{\min} \\ \Delta v'_d &= \Delta v_{\min} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

通过式(18)(19)分别计算任意相邻轨迹线间和对应轨迹上相邻切触点间的参数增量值,进而实现了叶背和叶盆曲面对应加工区域内轨迹线条数和切触点个数相同的目标。

4 典型零件的验证

4.1 叶片型面双刀加工轨迹规划及仿真

以不锈钢材质的汽轮机叶片作为研究对象,叶片型面的长度为 633 mm,回转直径为 165 mm,型面的粗加工轮廓度公差为 $[-0.3\text{ mm}, 0.3\text{ mm}]$ 。牛鼻铣刀的半径 R 为 16 mm,圆角半径 r 为 6 mm。残留高度 h 的允差为 0.05 mm,弦高误差 ϵ 的允差为 0.02 mm。采用双刀加工轨迹平滑算法规划叶片型面的双刀对铣粗加工轨迹,任意相邻轨迹线间的参数增量值不相等,但任意两条轨迹线具有相同的参数增量值,且轨迹线满足刀路平滑的要求,如图 10 所示。通过多次测试该算法规划双刀加工轨迹的时间,对比文献[19],计算效率提高了 56%。



(a)叶背曲面轨迹线 (b)叶盆曲面轨迹线
图 10 叶片型面双刀加工轨迹线

基于 VERICUT 软件建立了双刀加工机床的仿真模型,采用叶片型面的双刀对铣粗加工轨迹进行加工过程仿真,结果表明:两把刀具在叶背和叶盆曲面实现了同步铣削,且同时完成两个曲面上加工区域的铣削;双刀铣削过程中无干涉,且加工表面刀痕纹路整齐,无过切现象。

针对双刀仿真铣削的已加工叶片型面,随机选取均匀分布在叶盆和叶背曲面上理论测量点坐标,计算理论点与仿真加工曲面上实际测量点在法向方向上的距离偏差值,并表征测量点处的轮廓误差,结果如图 11 所示。叶盆和叶背曲面的轮廓误差为 $[-0.008\text{ mm}, 0.038\text{ mm}]$ 、 $[-0.008\text{ mm}, 0.042\text{ mm}]$,均满足公差要求。由于叶盆曲面为凹曲面,叶背曲面为凸曲面,参数增量值相同,叶背的切削宽度大于叶盆的,且型面加工区域 u 向参数范围不同,所以叶背曲面的残留高度大于叶盆曲面,加工型面与理论型面之间的距离偏大,型面的轮廓误差较大。

4.2 双刀铣削实验验证

九轴联动叶片双刀加工机床如图 12 所示,刀具 B 有独立的 3 个直线,刀具 C 有 1 个旋转运动。用

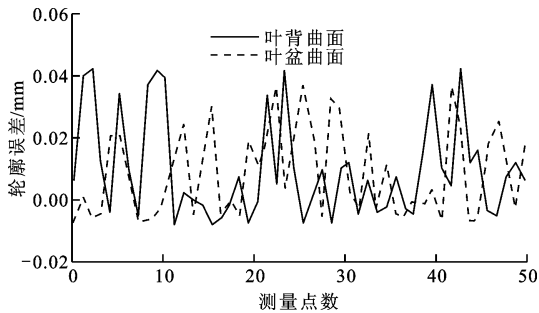


图 11 叶片型面仿真轮廓误差

4.1 节的参数来规划整个叶片的双刀加工轨迹,采用牛鼻铣刀开展实验,验证双刀加工轨迹在实际铣削过程中的可行性。该算法规划的双刀加工轨迹实现了叶片两侧曲面双刀对顶铣削过程,满足叶片型面加工区域完全铣削的要求,且已加工的区域与理论规划的区域一致,整个铣削过程中无干涉,但铣削后的叶片型面呈现不平整的现象,存在可见的振纹,如图 13 所示。

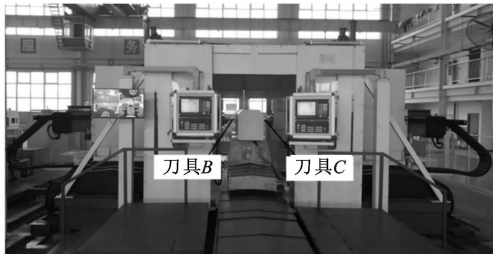
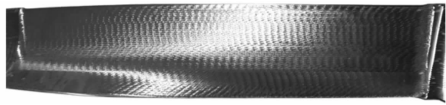


图 12 九轴联动叶片双刀加工机床



(a)叶背曲面



(b)叶盆曲面

图 13 双刀加工后的叶片型面

针对实际加工后的叶片型面,随机选取均匀分布在叶盆和叶背曲面上理论测量点的坐标,采用 HEXAGON 公司的 Global Performance 7107 三坐标测量机测量理论点所对应已加工叶片型面上的实际坐标值,计算实测、理论坐标值的距离偏离量,并表征已加工型面的轮廓误差,结果如图 14 所示。叶背、叶盆曲面的轮廓误差为 $[-0.029\text{ mm}, 0.07\text{ mm}]$ 和 $[-0.029\text{ mm}, 0.063\text{ mm}]$,均满足公差要求。实际加工的轮廓误差略大于 4.1 节中仿真所得

的轮廓误差,这可能是由拍振、刀具磨损及应力释放等原因造成的。

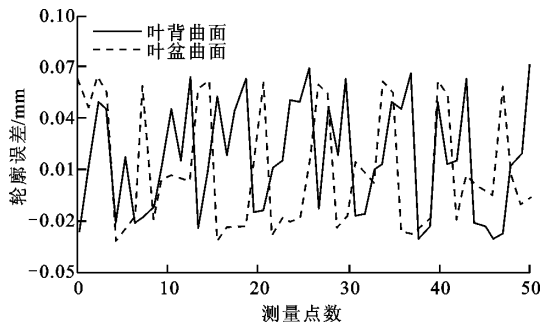


图 14 已加工叶片型面的实测轮廓误差

为了测试双刀铣削的加工效率问题,采用等效的切削参数分别在双刀加工机床上实测双刀铣削和单刀铣削的加工时间,约为 4.8、8.2 h,该工序双刀对铣相对单刀的加工效率提高了约 41.5%,且满足轮廓误差的公差要求。

5 结 论

本文提出了基于几何约束的叶片型面双刀对顶铣削轨迹平滑算法。利用九轴联动双刀加工机床中两把刀具的结构约束关系,由切触点处的法向矢量表征了双刀具姿态的刀轴矢量。结合等残留高度和等弦高误差定义的参数增量,确定了切触点间等参数化的参数增量,实现了单行切触点轨迹的平滑。由叶背和叶盆曲面切削区域的范围确定参数匹配关系,形成了双侧参数匹配的轨迹优化算法,满足叶片两侧加工区域同时完成铣削的要求。针对典型汽轮机叶片,规划了双刀粗加工轨迹,该算法的计算效率提高了 56%。仿真和实验结果表明,粗加工轨迹可实现叶片型面的双刀加工,且已加工表面的轮廓误差均在公差要求的范围内,双刀加工相对单刀加工的效率可提高约 41.5%。

参考文献:

- [1] WANG Hui, HUANG Lijiang, YAO Chao, et al. Integrated analysis method of thin-walled turbine blade precise machining [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(15): 1011-1019.
- [2] CHEN Yueping, GAO Jian, DENG Haixiang, et al. Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces [J]. Precision Engineering, 2013, 37(1): 203-212.

- [3] DO M D, SON Y H, CHOI H J. Optimal workpiece positioning in flexible fixtures for thin-walled components [J]. Computer-Aided Design, 2018, 95: 14-23.
- [4] FEI Jixiong, LIN Bin, XIAO Juliang, et al. Investigation of moving fixture on deformation suppression during milling process of thin-walled structures [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 403-411.
- [5] 付中涛, 杨文玉, 张彦辉, 等. 基于切削力预测模型的复杂曲面铣削进给速度优化 [J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(7): 722-730.
- FU Zhongtao, YANG Wenyu, ZHANG Yanhui, et al. Feedrate optimization of complex surface milling based on predictive model of cutting force [J]. Scientia Sinica: Technologica, 2016, 46(7): 722-730.
- [6] 陈志同, 张保国. 面向单元切削过程的切削参数优化模型 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 230-236.
- CHEN Zhitong, ZHANG Baoguo. Mathematic model on cutting parameter optimization for unit cutting process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 230-236.
- [7] HUANG Tao, ZHANG Xiaoming, DING Han. Tool orientation optimization for reduction of vibration and deformation in ball-end milling of thin-walled impeller blades [J]. Procedia CIRP, 2017, 58: 210-215.
- [8] WANG Minghai, SUN Yue. Error prediction and compensation based on interference-free tool paths in blade milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71: 1309-1318.
- [9] ZHANG Y, ZHANG D H, WU B H. An adaptive approach to error compensation by on-machine measurement for precision machining of thin-walled blade [C] // IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1356-1360.
- [10] 徐金亭, 刘伟军, 邱晓杰, 等. 自由曲面加工中的等参数螺旋轨迹生成方法 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 148-151.
- XU Jinting, LIU Weijun, QIU Xiaojie, et al. Isoparametric and spiral toolpath for free-form surfaces machining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3): 148-151.
- [11] DING Songlin, MANANN M A, POO A, et al. Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces [J]. Computer-Aided Design, 2003, 35: 141-153.

(下转第 42 页)