

闭环型复杂曲面平底刀五轴数控加工 螺旋轨迹方法研究

邓华波,梁务宇,徐 鹏

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究复杂曲面刀具轨迹规划方法,以实现闭环型复杂曲面平底刀五轴数控高效加工。方法 针对目前的投影法不适用于闭环型复杂曲面的缺陷,在总结平底刀和螺旋走刀模式基础上,基于闭环型复杂曲面连续封闭的特性,提出一条展开式的投影映射新思路,应用求截交曲线弧长的方法将复杂曲面投影映射到二维平面上,规划完成螺旋曲线后逆映射回复杂曲面,得到完整的螺旋刀具轨迹。结果 采用这种新螺旋刀具轨迹规划方法的加工效率较之 UG 轨迹规划方法提高了 12.36%。结论 基于投影法的闭环型复杂曲面螺旋刀具轨迹生成方法使生成的刀具轨迹连续进给,实现了复杂曲面高速连续切削加工,在保证加工精度的基础上显著提高加工效率。

关键词 闭环型复杂曲面;五轴数控加工;平底刀;螺旋刀轨;投影法

中图分类号 TG659

文献标志码 A

Research on Spiral Path Generation Method for Five-axis NC Machining of Closed-loop Flat Bottom Cutter with Complex Curved Surface

DENG Huabo, LIANG Wuyu, XU Peng

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The tool path planning method of complex curved surface is studied to realize the five-axis CNC machining of complex curved flat-bottom cutter with closed loop. In view of the defect that the current projection method is not suitable for closed-loop complex surfaces, a new idea of expansion projection mapping is proposed based on the characteristics of continuous closure of closed-loop complex surfaces based on the summary of flat-bottom cutter and spiral cutter mode. The complex surface is projected onto a two-dimensional plane by the method of finding the arc length of intersecting curve, and the complex surface is reversely mapped back after the spiral curve is planned. The complete spiral tool path is obtained. The machining efficiency of this new spiral tool trajectory planning method is increased by 12.36% compared with UG trajectory

收稿日期:2022-02-22

基金项目:国家自然科学基金项目(52175107)

作者简介:邓华波(1974—),男,副教授,博士,主要从事数控加工技术和机器人数控设备等方面研究。

planning method. The closed-loop spiral tool path generation method based on projection method can make the generated tool path continuous feed, realize the high-speed continuous cutting of complex surface, and significantly improve the machining efficiency on the basis of ensuring the machining accuracy.

Key words: closed-loop complex surface; five-axis NC machining; flat bottom knife; spiral knife rail; projection method

具有复杂曲面的工业零部件由于外形美观、易塑性强以及力学性能好等优势,在航空航天、造船、汽车、能源、国防等领域获得了广泛应用^[1]。由于复杂曲面形状复杂、精度要求高且难以用数学式进行整体的精确表达,故它的高效高精数控加工一直是制造领域的难题^[2]。刀具轨迹规划作为复杂曲面进行五轴数控加工的关键环节,不仅影响曲面的加工效率,也直接决定曲面的加工质量。从轨迹排布来分,目前常用的刀具轨迹可分为 Zig-zag 轨迹^[3]、环形轨迹^[4]和螺旋轨迹^[5-6]。对于曲面的五轴数控加工,加工效率是考虑的主要问题之一。螺旋轨迹相比于前两者,在复杂曲面高效加工中更具优势,它能解决刀具轨迹零散的问题,大大减少了刀具的走空刀时间,提高了加工效率。徐冬冬等^[7]以等残留高度法生成参数环,在对参数环的突变点和拐点进行光顺处理后,以对角曲线连接相邻参数环构造光顺的螺旋轨迹。该方法规划思路清晰,但以对角曲线连接相邻轨迹很容易造成对曲面边界加工轨迹不完全的问题。林金涛等^[8-12]将复杂曲面三角网格化,利用协调映射的方法将网格曲面映射到参数平面进行螺旋轨迹规划,该类方法繁复,在曲面三角网格化与映射中会使误差累加较大。邵丁等^[13]针对叶片复杂曲面的特点,结合等参数法与等残留高度法来进行螺旋轨迹规划,实现轨迹均匀化。为简化运算,上述闭环型复杂曲面螺旋轨迹规划方法均采用球头刀为加工刀具,球头刀虽适应性强、规划简单,但其加工效率低下,难以适应高精加工领域的大批量制造。

投影法因其灵活且易于控制等优点获得

广泛地应用,因此,笔者对投影法进行了改良,提出基于展开式投影法的闭环型复杂曲面螺旋轨迹规划方法,选择平底刀作为加工刀具,克服了目前投影法不适用闭环型复杂曲面的缺陷,在分析刀轴倾角对加工效率影响的基础上,给出刀轴倾角的选取原则,在避免干涉的情况下,使加工刀具轨迹连续,实现闭环型复杂曲面高效加工,在保证加工精度的基础上显著提高加工效率。

1 基于投影法的螺旋轨迹生成方法

1.1 闭环型复杂曲面

闭环型复杂曲面应用在多个领域的核心零部件上,在复杂曲面中占据着重要地位,如涡轮叶片、船舶螺旋桨等,具备以下特性:①闭环型复杂曲面不是由初等解析曲面整体组成的,多由自由变化的复杂曲线曲面组成的;②闭环型复杂曲面两条参数线中的一条参数导线(u 或 v)为封闭曲线,如图 1 所示。

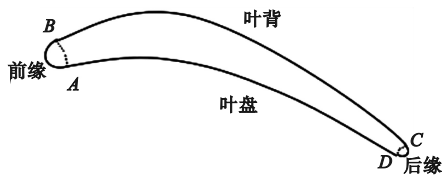


图 1 涡轮叶片截面示意图

Fig. 1 The schematic diagram of turbine blade section

1.2 平底刀刀轴倾角对加工效率影响

在平底刀的五轴数控加工中,加工行距与刀轴倾角的确定是刀具轨迹规划的基础,笔者以有效切削轮廓与走刀方向上的曲面法截线交点间的距离来求行距,构建出加工行距与刀轴倾角的函数关系。

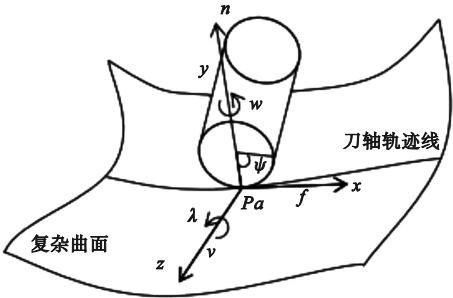


图2 平底刀局部坐标系的建立

Fig. 2 The local coordinate system of flat knife

图2为平底刀局部坐标系, p_a 为刀触点, f 为切削方向, n 为刀触点处的曲面法矢量, 令 $v = f \times n$, 则 v 为切削行距的方向。将 x 、 y 、 z 轴分别为 f 、 n 、 v 方向建立局部坐标系 $p_a xyz$ 。在数控加工中为避免产生干涉现象, 平底刀需绕 y 、 z 轴偏转角度 w (侧偏角)、 λ (后跟角), 这两个刀轴倾角即定义了平底刀的刀具姿态。

在局部坐标系中, 切削刃的表达式为

$$G_0 = (-R + R\cos\psi, 0, -R\sin\psi). \quad (1)$$

式中: R 为刀具半径; ψ 为切削刃上任一点与切触点 p_a 之间的圆心角。当刀具偏转刀轴倾角后, 切削刃的表达式为

$$G(\lambda, w) = G_0 \begin{bmatrix} \cos\lambda & \sin\lambda & 0 \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos w & 0 & -\sin w \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin w & 0 & \cos w \end{bmatrix}. \quad (2)$$

有效切削轮廓为平底刀刀具切削刃在垂直于走刀方向的平面投影, 有效切削轮廓方程为

$$z^2 \sin^2 \lambda + y^2 (\cos^2 w + \sin^2 w \cos^2 \lambda) + 2yz \cos \lambda \sin \lambda \sin w + 2Ry \sin \lambda \cos^2 w = 0. \quad (3)$$

被加工复杂曲面在行距方向的曲面偏置法截线方程 $U_0^{[14]}$ 为

$$y = 0.5 k_z z^2 + h. \quad (4)$$

式中: h 为残留高度; k_z 为行距方向上的曲面法曲率。

图3为走刀行距计算示意图, 联立有效切削轮廓方程与曲面偏置法截线方程可求解它们之间的交点 $p_1(z_1, y_1)$ 与 $p_2(z_2, y_2)$, 加

工行距为

$$L = |z_1 - z_2|. \quad (5)$$

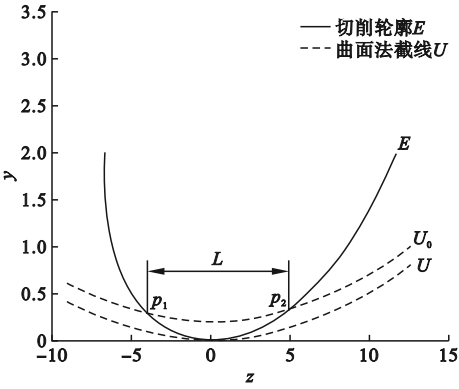


图3 走刀行距计算示意图

Fig. 3 The schematic diagram for calculation of cutter spacing

由上述的计算可以看出, 加工行距的影响因素包括刀轴倾角、刀具尺寸、加工曲面几何形状等, 在确定加工曲面、残留高度等因素情况下, 可构建加工行距与刀轴倾角的函数关系 $L = g(\lambda, w)$ 。

图4为侧偏角或后跟角为 10° 时, 另一刀轴倾角(后跟角或侧偏角)与加工行距之间的关系曲线。由图4可看出, 当固定其中一个刀轴倾角时, 另一刀轴倾角增大, 加工行距会随之减小, 加工效率也随之降低。因此, 在避免出现干涉的基础上, 使侧偏角和后跟角尽可能小以提高加工效率。

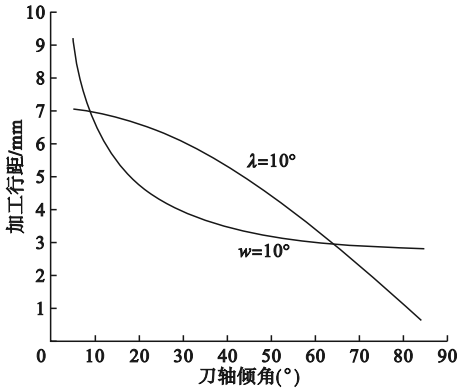


图4 刀轴倾角与加工行距之间的关系

Fig. 4 The relationship between inclination angle of the tool axis and machining row spacing

为避免干涉现象产生,平底刀的刀轴倾角需满足行距方向上的曲面曲率半径不小于有效切削半径,即

$$\frac{R\cos^2w}{|\sin\lambda|}\leqslant\frac{1}{k_z}.$$

(6)

刘雄伟^[15]推荐后跟角余量不小于2°,因此,当 $k_z<0$ 时,不会有过切现象的产生,后跟角取为

$$\lambda=-2^\circ.$$

(7)

当 $k_z>0$ 时,后跟角取为

$$\lambda=-\arcsin(Rk_z\cos^2w)-2^\circ.$$

(8)

1.3 基于投影法的螺旋轨迹生成算法

复杂曲面的投影做法通常是将复杂曲面沿一个方向投影到平面上,但对于闭环型复杂曲面,此方法会在投影过程中造成投影曲面的投影长度比例畸变。对此,笔者提出一种展开式的投影映射新思路。图5为闭环复杂曲面投影示意图。

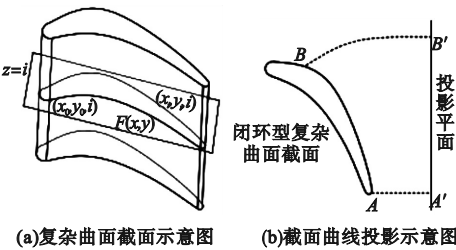


图5 闭环复杂曲面投影示意图

Fig. 5 The schematic diagram for projection of closed-loop complex surface

图5(a)中,闭环型复杂曲面为连续封闭的,将截平面交于复杂曲面,得到截交闭环曲线 $F(x,y)$,随后以求截交曲线弧长的方法进行曲线投影。图5(b)中,曲线上的 AB 弧长等于投影平面上的 $A'B'$ 线段长度。当截交平面之间无限趋近且历遍整个曲面时,可将闭环型复杂曲面转换到以 x 轴为弧长 s , y 轴为截距 d 的二维投影平面上,完成闭环型复杂曲面投影映射。笔者基于该展开式投影映射思路,在结合平底刀与螺旋轨迹特点的基础上,提出闭环型复杂曲面螺旋轨迹规划方法,轨迹算法具体流程如图6所示。

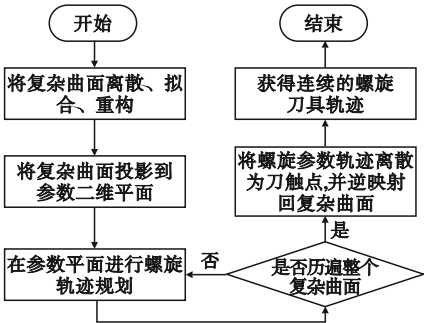


图6 刀具轨迹算法流程图

Fig. 6 The flow chart of tool path algorithm

2 螺旋刀具轨迹的生成

2.1 闭环型复杂曲面的重构

首先对闭环型复杂曲面进行分片离散,提取各曲面片离散点 (x_k, y_k, z_k) , $k=1, 2, \dots, N$,采用最小二乘法拟合曲面方程:

$$y=\sum_{i=m}^0\left(\sum_{i=j}^0c_{i,j-i}x^iz^{j-i}\right).$$

(9)

拟合总误差为

$$Q=\sum_{k=1}^N\left[y_k-\sum_{i=m}^0\left(\sum_{i=j}^0c_{i,j-i}x_k^iz_k^{j-i}\right)\right]^2.$$

(10)

Q 可看作是关于 $c_{i,j-i}$ 的函数,在拟合曲面方程时要使误差最小,则上述的拟合多项式构造问题便可转换为求多元函数的极值问题,即 $c_{i,j-i}$ 通过满足 $\partial Q/\partial c_{i,j-i}=0$ 条件来求得。

图7为复杂曲面重构示意图,在获取各子曲面方程后,应用CAM软件在边界曲线为限制条件下以曲面方程重新生成各子曲面,并重新组合成完整的复杂曲面。图7(a)

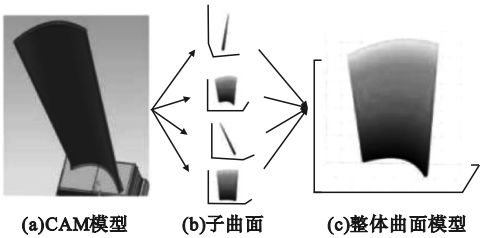


图7 复杂曲面重构示意图

Fig. 7 The flow chart for reconstruction of complex surface

为 CAM 建模模型,图 7(b)为以曲面方程重
构的子曲面,图 7(c)为在 MATLAB 中重构
的整体曲面模型。

2.2 闭环型复杂曲面的投影映射

在图 5 中,将截交平面 $z=i$ 与闭环型复杂
曲面相交,可得一条封闭的截交曲线 $F(x,y)$ 。
设一条边界曲线与截交曲线交点为起始点:

$$\begin{cases} S_1(x,y,z); \\ S_2(x,y,z); \\ z=i. \end{cases} \tag{11}$$

式中: $S_1(x,y,z)$ 与 $S_2(x,y,z)$ 为重构子曲
面。起始点 $p_0(x_0,y_0,i)$ 到截交曲线上其余
任意一点 $p_i(x_i,y_i,i)$ 的弧长为

$$s_i = \int_{x_0}^{x_i} \sqrt{1 + \left(-\frac{F'_x}{F'_y}\right)^2} dx. \tag{12}$$

因此,对于复杂表面上的任意一点
 $p_i(x_i,y_i,z_i)$ 与投影平面上的投影点 $p'_i(s_i,$
 $d_i)$ 可自由转换,转换式为

$$p_i(x_i,y_i,z_i) \Leftrightarrow p'_i(s_i,d_i). \tag{13}$$

式中: $z_i=d_i$; s_i 由式(12)计算得到。

从起始点顺时针绕截交曲线旋转一周回
到起始点,求得整条截交曲线的总弧长。将
截交平面之间无限趋近且历遍整个曲面,可
得到闭环型复杂曲面的投影平面。

2.3 刀具轨迹规划

2.3.1 投影平面上的轨迹规划

对于投影的二维平面,截交线 $d=d_n$ 与
截距和弧长曲线相交,得到的两交点在复杂
曲面上为同一点,如图 8 所示。本节基于这
一特点来进行螺旋轨迹规划。

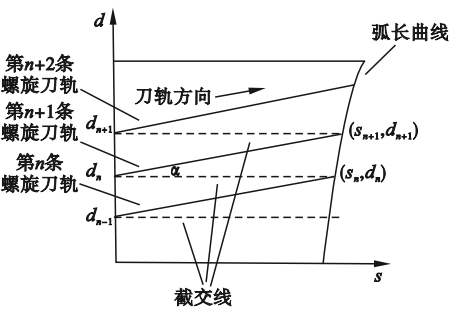


Fig. 8 The diagram of parameter trajectory planning

规划第 $n+1$ 条参数轨迹时,截距线为
 $d_{n+1} = d_n + d_0.$ (14)

式中: d_n 为第 n 条截距线; d_0 为初始截距。

截距线与弧长曲线相交可得交点 $(s_{n+1},$
 $d_{n+1})$,由交点 $(0,d_n)$ 与 (s_{n+1},d_{n+1}) 相连得到
第 $n+1$ 条参数轨迹:

$$d = (d_{n+1} - d_n)s/s_{n+1} + d_n. \tag{15}$$

由于初始截距为理论最大值,不一定满
足加工要求,因此需要求出参数轨迹上的刀
触点行距 $L(i)$,验证行距是否都符合加工要
求,即 $L(i)_{\min} \geq d_0$ 。采用求离散点处行距方
向的平面 G ,使之与复杂曲面相交得螺旋轨
迹,并求导行距方向的法曲率后,采用 1.2 节
中的方法求行距。

图 9 为离散点求曲率示意图,图 9 中,复
杂曲面离散点处的曲面法矢量为 $r_0 = (S'_x, S'_y,$
 $S'_z)|_{(x_0,y_0,z_0)}$,截交平面法矢量为 $r_1 = (0,0,1)$,
设平面 G 法矢量 $r_z = (a_1,b_1,c_1)$ 。平面 G 与离
散点处切平面垂直,与截交平面夹角为 $\beta =$
 $90^\circ - \alpha$, α 为投影平面上截交线与参数轨迹之
间的夹角,即 $r_0 \times r_z = 0, \cos\beta |r_1 \parallel r_z| = r_1 \times r_z$,
整理可得

$$\begin{cases} \cos(90^\circ - \alpha) = \frac{c_1}{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}; \\ a_1 S'_x(x_0,y_0,z_0) + b_1 S'_y(x_0,y_0,z_0) + \\ c_1 S'_z(x_0,y_0,z_0) = 0. \end{cases} \tag{16}$$

令 $c_1 = 1$,可求解法矢量 r_z ,根据已知离
散点 (x_0,y_0,z_0) ,平面 G 方程为
 $a_1(x-x_0) + b_1(y-y_0) + c_1(z-z_0) = 0.$ (17)

复杂曲面与平面 G 之间的交线即为曲
线方程,随后根据曲线求离散点曲率 k_z 。

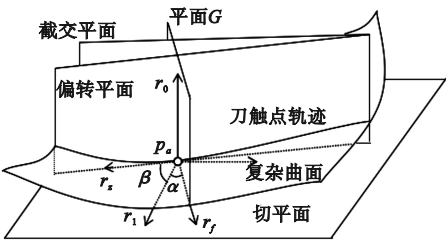


Fig. 9 The curvature of discrete points

截距线 d_{n+1} 与参数曲面螺旋规划轨迹之间的夹角为 α_{n+1} , 令侧偏角等于夹角 α_{n+1} , 则侧偏角为

$$w_{n+1} = \arctan(d_0/s_{n+1}). \quad (18)$$

将 w_{n+1} 代入(7)、(8)式求后跟角, 将 k_z 、 w_{n+1} 与 λ_{n+1} 代入(3)和(4)式求行距 $L(i)$, 验证行距是否符合加工要求, 若符合, 则该段参数曲面螺旋规划轨迹完成, 反之, 则将 $d_0 = L(i)_{\min}$ 重新进行该段参数轨迹规划。

2.3.2 初始截距的生成

在规划中初始截距过大会导致加工中无法保证加工精度, 过小会导致加工效率过低, 因此初始截距需特殊处理, 如图 10 所示。

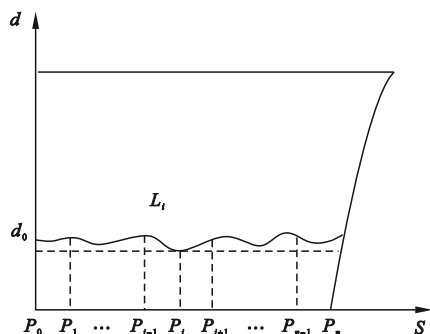


图 10 初始截距处理示意图

Fig. 10 The schematic diagram of initial intercept processing

具体步骤如下:

①使 $d=0$ 交截距和弧长曲线可获得截距线, 采用等误差步长法离散截距线 $d_i=0$, 获取一系列离散点 p_i , 求解离散点曲率 k_z , 获取复杂曲面在垂直于截距线方向的曲面法截线方程;

②为获取理论参考行距, 令 $w=0$, 后跟角由式(7)、式(8)计算得到, 代入切削轮廓方程整理可得

$$z^2 \sin^2(\lambda) + y^2 + 2Ry \sin(\lambda) = 0. \quad (19)$$

③联立曲面法截线 U_0 与切削轮廓可获得截距线行距 $L(i)$, 为使所有离散点符合加工误差要求, 令初始截距线为

$$d_0 = L(i)_{\min}. \quad (20)$$

3 刀触点计算

首先将刀触投影点通过式(13)逆映射回复复杂曲面, 求刀触点在复杂曲面切削方向的法曲率; 其次通过等误差步长法规划得到切削步长; 最后根据投影平面上规划得到的参数轨迹与切削步长求下一刀触投影点, 依次历遍全部参数轨迹, 并将刀触投影点逆映射回复复杂曲面, 获取刀触点合集。

3.1 刀触点在切削方向法曲率的确定

采用求切削方向的偏转平面, 使之与复杂曲面相交得螺旋轨迹后进行求导, 获取在离散点处沿走刀方向的法曲率 k_a 。

如图 9 所示, 设偏转平面法矢量为 $\mathbf{r}_f = (a_2, b_2, c_2)$, 偏转平面与离散点处切平面和行距方向的平面 G 垂直, 即 $\mathbf{r}_0 \times \mathbf{r}_f = 0$ 、 $\mathbf{r}_f \times \mathbf{r}_z = 0$, 整理可得:

$$\begin{cases} a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2 = 0; \\ a_1 S'_x(x_0, y_0, z_0) + b_1 S'_y(x_0, y_0, z_0) + c_1 S'_z(x_0, y_0, z_0) = 0. \end{cases} \quad (21)$$

令 $c_2 = 1$, 可求得偏转平面法矢量, 根据已知离散点 $p_a(x_0, y_0, z_0)$, 偏转平面方程 S_0 为

$$a_2(x - x_0) + b_2(y - y_0) + c_2(z - z_0) = 0. \quad (22)$$

联立复杂曲面方程与偏转平面方程可求得离散点走刀方向上的螺旋轨迹曲线方程 F 。根据曲线曲率表达式, 离散点的曲率为

$$k_a = y'' / [(1 + (y')^2)^{3/2}]. \quad (23)$$

$$\begin{cases} y' = \frac{F_x}{F_y}; \\ y'' = -(F_{xy}F_y^2 - 2F_{xy}F_xF_y + F_{yy}F_x^2)/F_y^3. \end{cases} \quad (24)$$

3.2 走刀步长的确定

采用等误差步长法来求切削步长, 如图 11 所示, 取一条刀具轨迹上任意刀触点 p_a 附近的部分轨迹曲线, 求刀触点 p_a 到下一刀触点 p_b 的走刀步长。设步长内外允差为 e , p_a

点处沿走刀方向的曲率 k_a 由 3.1 节中的方法求得,曲率半径为 $\rho_a = 1/k_a$,为简化运算,采用以 ρ_a 为半径的圆弧来近似代替 p_a 与 p_b 之间的局部轨迹,根据图中的几何关系可得:

$$\rho_a^2 = \left(\frac{l_a}{2}\right)^2 + (\rho_a - e^2). \tag{25}$$

当内外允差远小于曲率半径时,走刀步长可简化为

$$l_a = 2 \sqrt{2\rho_a e - e^2}. \tag{26}$$

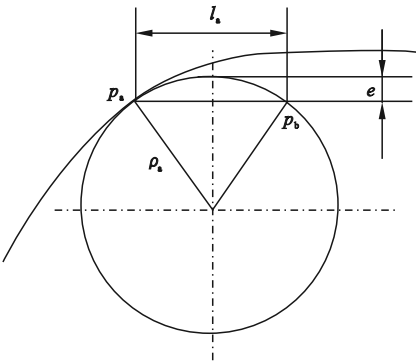


图 11 走刀步长计算示意图

Fig. 11 The schematic diagram for calculation of cutter step length

3.3 刀触点轨迹的计算

图 12 为刀触点轨迹计算示意图,闭环复杂曲面的投影平面由各子曲面的截交曲线弧长组成,各子曲面弧长之间存在着边界曲线,

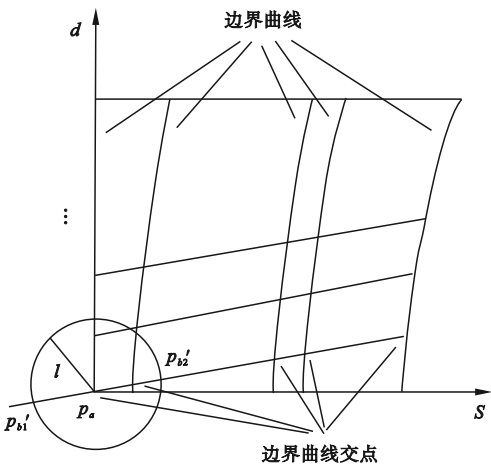


图 12 刀触点轨迹计算示意图

Fig. 12 The schematic diagram for calculation of tool contact trajectory

设初始参数轨迹的边界曲线交点为轨迹起始点,以 p'_a 为圆心、 l 为半径作圆交参数轨迹可得到交点 $p'_{b1}(s_1, d_1)$ 、 $p'_{b2}(s_2, d_2)$, p'_b 取

$$\begin{cases} p'_b(s_b, d_b) = p'_{b1}(s_1, d_1), s_1 > s_2; \\ p'_b(s_b, d_b) = p'_{b2}(s_2, d_2), s_1 < s_2. \end{cases} \tag{27}$$

图 12 中,若相邻刀触投影点 p'_b 与 p'_a 不在同一子曲面上时,会产生因曲率突变而造成的走刀步长计算不准的情况,对此,当计算的相邻刀触投影点 p'_b 与 p'_a 间存在边界曲线交点 (s_k, d_k) 时,则以边界曲线交点作为下一刀触投影点 p'_b ,即 $p'_b = (s_k, d_k)$,并以此为起点进行下一刀触投影点计算。由于下一参数轨迹的起始点与当前参数的终止点在三维复杂曲面上为同一点,故当前参数轨迹计算完成后可自动跳转到下一轨迹的起始点继续进行刀触点计算。

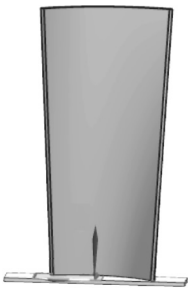


图 13 涡轮叶片模型

Fig. 13 The model of turbine blade

当刀触点轨迹计算历遍整个参数轨迹后,可得到刀触投影点序列 $f': \{p'_i\}$, $p'_i = (s_i, d_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ 。将刀触投影点根据式 (13) 依次逆映射回复杂曲面,最终得到刀触点序列 $f: \{p_i\}$, $p_i(x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

4 实例验证

笔者采用 MATLAB 进行编程来实现闭环型复杂曲面刀具轨迹方法的运算,并以某型号涡轮叶片为例进行轨迹规划,完成仿真,来验证所提出的刀具螺旋轨迹规划方法。如图 13 所示,涡轮叶片曲面复杂,由前缘、后缘、叶盘和叶背拼接组成,叶片沿叶高方向截得的截交曲线为封闭曲线,是典型的闭环型

复杂曲面。

在刀具轨迹规划的参数设置中,平底刀半径 $R = 10\text{ mm}$,残留高度 $h = 0.1\text{ mm}$,后跟角与侧偏角由式(7)、式(8)与式(18)分别计算得到,规划过程及运算如图 14 所示。

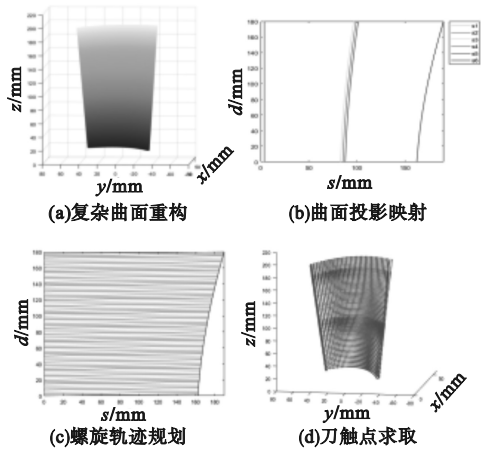


图 14 轨迹规划过程示意图

Fig. 14 The schematic diagram of trajectory planning process

对于涡轮叶片复杂曲面规划,采用笔者所提出的刀具轨迹规划方法得到加工轨迹总长为 $12\,481.936\,2\text{ mm}$,结果如图 15 所示,刀具轨迹连续,可实现高速连续加工。

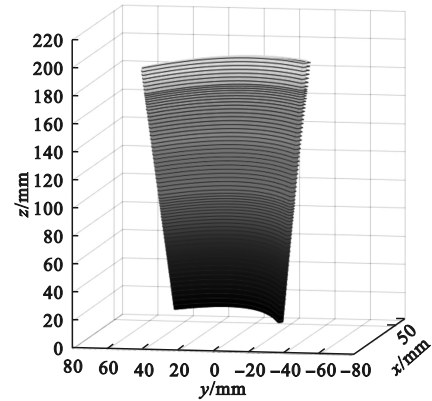


图 15 轨迹规划结果图

Fig. 15 The result of trajectory planning

为验证规划结果的真实可靠,在 VERICUT 中选择天大精益公司 9565v6 型的 AC 双转台五轴机床对提出的规划螺旋轨迹进行仿真加工,仿真结果如图 16 所示。

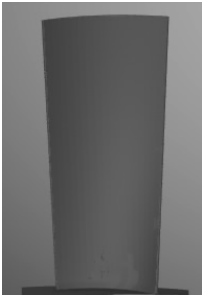


图 16 仿真结果图

Fig. 16 The simulation results

对同一型号涡轮叶片进行了 UG 数控加工模块下的螺旋轨迹规划,与笔者方法进行对比。参数设定中,选择平底刀作为加工刀具,刀具半径 $R = 10\text{ mm}$,残留高度 $h = 0.1\text{ mm}$,侧偏角 $w = 0^\circ$,后跟角 $\lambda = 30^\circ$ 。

采用 UG 固定刀轴倾角方法进行轨迹规划得到加工轨迹总长为 $14\,243.019\,8\text{ mm}$,结果如图 17 所示。

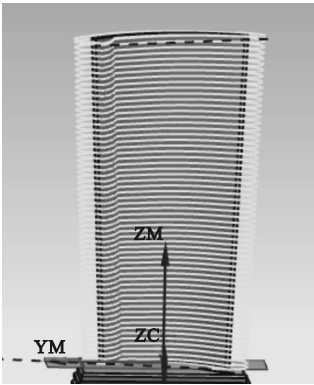


图 17 UG 轨迹规划结果图

Fig. 17 The results of UG trajectory planning

相比于 UG 规划得到的螺旋轨迹,笔者规划的螺旋轨迹长度减少了 12.36% ,大大提高了加工效率。

5 结 论

(1)笔者针对闭环型复杂曲面提出一种展开式的投影映射方法,可有效消除在传统投影法对复杂曲面进行投影映射过程中的成投影曲面中投影长度比例畸变的缺陷,并基于此,提出闭环型复杂曲面螺旋轨迹生成方法,将平底刀与螺旋走刀模式的特点相结合,

实现刀具轨迹连续进给,使加工能高效进行,为闭环型复杂曲面刀具轨迹规划提供了新思路。

(2)与UG固定刀轴倾角的螺旋轨迹规划方法相比,笔者的轨迹规划方法对同一闭环型复杂曲面的规划轨迹更短,在确保加工精度的情况下,大大提高了加工效率。

参考文献

- [1] 毕庆贞. 复杂曲面零件数控加工的关键问题: 解读《复杂曲面零件五轴数控加工理论与技术》[J]. 中国机械工程, 2018, 29(14): 1758-1763.
(BI Qingzhen. Key issues of CNC machining of complex curved parts: interpretation of theory and technology of five-axis CNC machining of complex curved parts [J]. China mechanical engineering, 2018, 29(14): 1758-1763.)
- [2] 徐金亭, 牛金波, 陈满森, 等. 精密复杂曲面零件多轴数控加工技术研究进展[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 31-54.
(XU Jinting, NIU Jinbo, CHEN Mansen, et al. Research progress of multi-axis NC machining technology for precision complex surface parts [J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2021, 42(10): 31-54.)
- [3] 蔡光辉. 三角网格模型的等残留高度刀具轨迹规划及拟合[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
(CAI Guanghui. Tool path planning and fitting of triangular mesh model with equal residual height [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.)
- [4] ZHANG R, HU P, TANG K. Five-axis finishing tool path generation for a mesh blade based on linear morphing cone [J]. Journal of computational design and engineering, 2015, 2(4): 268-275.
- [5] TAKASUGI K, ASAKAWA N. Parameter-based spiral tool path generation for free-form surface machining [J]. Precision engineering, 2018, 52: 370-379.
- [6] ROMERO-CARRILLO P, TORRES-JIMENEZ E, DORADO R, et al. Analytic construction and analysis of spiral pocketing via linear morphing [J]. Computer-aided design, 2015, 69: 1-10.
- [7] 徐冬冬. 基于等残留高度法的五轴数控加工刀具轨迹优化研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.
(XU Dongdong. Research on tool path optimization of five-axis NC machining based on equal residual height method [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2021.)
- [8] 林金涛. 高速铣削螺旋刀具轨迹规划算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
(LIN Jintao. Research on spiral tool path planning algorithm in high speed milling [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2016.)
- [9] HUERTAS-TALON J L, GARCÍA-HERNÁNDEZ C, BERGES-MURO L, et al. Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool [J]. Computer-aided design, 2014, 50: 41-50.
- [10] XU J, JI Y, SUN Y, 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.
- [11] 许都. 基于三角网格曲面的数控高速加工刀具轨迹规划研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
(XU Du. Research on tool path planning for CNC high speed machining based on triangular mesh surface [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.)
- [12] SUN Y, XU J, JIN C, et al. Smooth tool path generation for 5-axis machining of triangular mesh surface with nonzero genus [J]. Computer-aided design, 2016(79): 60-74.
- [13] 邵丁. 叶片造型及多轴加工刀具轨迹研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
(SHAO Ding. Research on blade modeling and tool path in multi-axis machining [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.)
- [14] 吴宝海, 李山, 张定华, 等. 自由曲面的五坐标端铣加工研究[J]. 中国机械工程, 2007(10): 1135-1139.
(WU Baohai, LI Shan, ZHANG Dinghua, et al. Research on five-axis end milling of free-form surface [J]. China mechanical engineering, 2007(10): 1135-1139.)
- [15] 刘雄伟, 张定华, 王增强, 等. 数控加工理论与编程技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
(LIU Xiongwei, ZHANG Dinghua, WANG Zengqiang, et al. NC machining theory and programming technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2007.)

(责任编辑: 王国业 英文审校: 范丽婷)