

# 基于离散点云构造径向线的螺旋加工轨迹规划方法

吴江盛 柴兴亮\* 薄其乐 刘海波 王永青

大连理工大学机械工程学院,大连,116000

**摘要:**针对基于离散点云难以直接生成高效准确的连续光滑刀位轨迹的问题,提出了在点云上直接构造径向线的方法,通过径向线插值生成螺旋加工轨迹。对于径向线构造,提出了基于特征描述子边界识别方法,提取边界点作为径向线两 endpoint;以点云上两 endpoint 之间最优离散测地线作为径向线点集,提出了离散测地线曲率最小化问题,并通过牛顿迭代法求解该问题。在径向线点集的基础上,采用 B 样条曲线拟合并根据残留高度进行了重采样;提出了径向线插值算法,生成了等残留高度的螺旋加工轨迹。最后,通过实验验证了该方法的有效性,可通过点云数据直接生成螺旋刀位轨迹。

**关键词:**离散点云;边界点提取;最优测地线路径;径向线;螺旋刀位轨迹

**中图分类号:**V462;TH164

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.006

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Spiral Machining Trajectory Planning Method Based on Discrete Point Cloud Construction of Radial Lines

WU Jiangsheng CHAI Xingliang\* BO Qile LIU Haibo WANG Yongqing

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116000

**Abstract:** Aiming at the problems that it was difficult to directly generate efficient and accurate continuous smooth tool path trajectories based on discrete point clouds, a method to directly construct radial lines on point cloud and generate spiral machining trajectories through radial line interpolation was proposed herein. For the construction of radial lines, a boundary recognition method was proposed based on feature descriptors to extract boundary points as two end points of the radial lines. Taking the optimal discrete geodesics between two end points on the point cloud as the radial point set, the curvature minimization problems of discrete geodesics were proposed and solved by Newton iteration method. The B-spline curves were used to fit and resampling according to the residual height based on the radial point sets. The radial line interpolation algorithm was proposed to generate the spiral machining trajectory with equal residual height. Finally, an example was given to demonstrate the spiral machining trajectories directly generated by the point cloud data, which fully verified the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** discrete point cloud; boundary point extraction; optimal geodesic path; radial line; spiral machining trajectory

### 0 引言

复杂曲面类零件被广泛应用于航空、航天、船舶和汽车等领域,如火箭贮箱箱底、飞机壁板、舰船螺旋桨、汽车引擎盖等。对于结构复杂、配合精度要求极高的曲面,通常采用测量设备获得型面点云数据,再通过点云处理,生成刀位轨迹,从而进行加工。

传统从散乱点云生成加工轨迹的方法通常需要对散乱点云进行曲面重构,进而进行曲面加工轨迹规划。然而,曲面重构是一个复杂的、耗时的过程,对于结构复杂的点云数据,例如存在孔洞、锐角等,很难得到满意的重构曲面<sup>[1]</sup>。此外,曲面

重构的效果依赖于具体的算法和参数的选择以及技术人员熟练度,不具有通用性和鲁棒性。从分散的点构建网格会导致精度损失和拓扑问题<sup>[2-3]</sup>,为此,有学者提出了基于散乱点云直接生成加工轨迹的方法<sup>[4]</sup>。目前,基于散乱点云直接生成加工轨迹的方法主要分为直接规划法和间接规划法两种<sup>[5]</sup>。

1)直接规划法。该方法通常对点云数据直接进行处理,利用曲线或曲面与点云相交或通过约束条件进行迭代计算以获取目标点数据,并进一步推导出刀具路径,如截平面法、轮廓偏置法、等参数法等。PARK 等<sup>[6]</sup>直接从实测数据中计算了等平面精加工刀具路径,但该方法仅适用于规律点云。ZHANG 等<sup>[7]</sup>解决了偏置点云面自相交

问题,采用截平面法生成刀位轨迹;XIAO 等<sup>[8]</sup>基于截面算法生成刀具轨迹,用于航空发动机叶片维修。该类方法均为截平面法,较为简单高效,但会导致表面精度不一致,且存在路径冗余。STAVROPOULOS 等<sup>[9]</sup>通过特征值分析进行边缘提取,然后基于聚类算法对零件进行分割,并使用 alpha 形状对分割点云的外部 and 内部部分进行曲线拟合,进而生成刀具路径。聚类算法更容易分割具有明显棱角的零件,但并不适用复杂的光滑曲面。

2)间接规划法。该方法需先构建简单的辅助基面或参数域,并在辅助基面或参数域上规划加工轨迹曲线或直接构建辅助曲线,然后对曲线进行离散化并利用投影技术将离散化的曲线点映射到点云上得到的目标点,最后对目标点进一步处理,即可转化为刀具轨迹,如最小二乘投影法。ZHANG 等<sup>[10]</sup>提出了一种刀具路径生成方法,即使用基于水平集的点投影技术将平面或圆柱面上的导向曲线投影到点云上。XU 等<sup>[11]</sup>提出了一种导线投影生成刀具路径的方法,该方法详细讨论了投影方向的计算和权重函数的构造,以尽可能地消除投影误差,但一些复杂曲面存在遮挡区域无法采用柱面或简单曲面规划路径并投影。LIU 等<sup>[12]</sup>开发了一种基于移动最小二乘法(MLS)的曲面方法,将点沿切片窗格上一条线的投影计算为刀触点,但该方法仍是采用等截面法生成路径。此外,XU 等<sup>[13]</sup>提出了一种集边界提取、区域三角剖分、网格映射和点投影为一体的径向曲线构造

方法,在径向曲线的基础上,对径向曲线进行插值,得到较好的螺旋刀具轨迹,但该方法只适用于三轴机床,且径向线需要在参数域内构造。

光滑连续的螺旋刀位轨迹具有良好的运动学和动力学特性,目前,关于在点云上直接生成五轴螺旋加工轨迹的算法还鲜有报道,因此,本文以离散点云为研究对象,提出特征描述子边界识别方法,提取边界点并序列化;采用 Dijkstra 算法计算螺旋线中心点与边界点间在点云上的最短测地线;提出测地线曲率最小化问题,并采用了牛顿迭代法求解;基于椭圆加布里埃尔图(elliptic Gabriel graph, EGG)邻域的 MLS 点投影方法将优化后的点投影至点云,经 Taubin 平滑算法光顺投影点后,将该点作为最优离散测地线点集;以周向最短步长为约束,基于 B 样条拟合方法构造参数化径向线;利用等残留高度法确定螺旋轨迹间的行距,对参数化径向线重采样;通过线性插值计算得到离散螺旋轨迹点,得到光顺的离散螺旋加工轨迹刀位点。

### 1 点云上径向线的构造

本文提出采用特征描述子边界识别方法提取边界点并序列化,通过 Dijkstra 算法生成两点间最短离散测地线路径,通过牛顿迭代法和基于 EGG 邻域的 MLS 点投影方法,确保离散测地线曲率最小化以及测地线位于点云面上,进而精确计算出点对点之间的最优测地线,具体流程如图 1 所示。

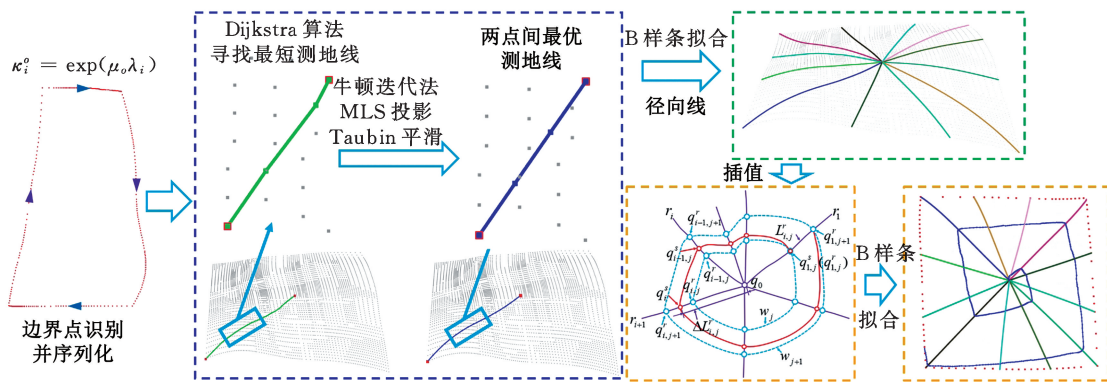


图 1 螺旋轨迹规划流程图

Fig.1 Spiral trajectory planning flow chart

#### 1.1 边界点提取及序列化

建立点与重心距离  $d_{io}$  差值的单调递增指数函数,提出边界特征识别描述子参数,表达式为

$$\kappa_i^o = \exp(\mu_o \lambda_i) \tag{1}$$

$$\lambda_i = d_{io} =$$

$$\sqrt{(p_{ix} - \bar{p}_{ox})^2 + (p_{iy} - \bar{p}_{oy})^2 + (p_{iz} - \bar{p}_{oz})^2}$$

式中: $\lambda_i$  为点到邻域重心距离差; $\mu_o$  为比例因子;下标  $i$  表

示点云序列数, $o$  表示点云重心序列数; $p_{ix}$  为  $p_i$  点的  $x$  坐标值; $\bar{p}_{ox}$  为点云重心坐标的  $x$  值坐标;其他类推。

边界特征识别描述子参数识别原理如图 2 所示,红色点为当前点,紫色圈为当前点邻域半径,绿色点为当前点邻域点,紫色点为当前点邻域重心。从两幅图中可以很明显看出,边界点到邻域重心的距离远大于内部点到邻域重心的距离。识

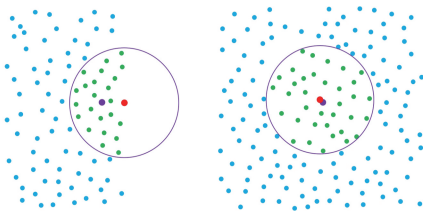


图2 边界点识别原理示意图

Fig.2 Schematic of boundary point recognition principle

别出边界点之后,根据相邻点连线向量之间夹角关系序列化边界点,如图3所示。主要流程如下:  
① 构建八叉树结构;② 设定初始点为  $P_0$ ,下一点为  $P_1$ ,  $P_0$  指向  $P_1$  的方向为初始方向  $n_0$ ,通过八叉树寻找点  $P_1$  的最近点,若  $P_1P_2$  与  $n_0$  的夹角大于阈值  $\theta_{th}$  则舍弃该点,寻找一下最近点;若小于  $\theta_{th}$  则将该点存入点序列集合  $A_j$  中;③ 重复步骤②,直至初始点与上一点连线满足阈值条件。

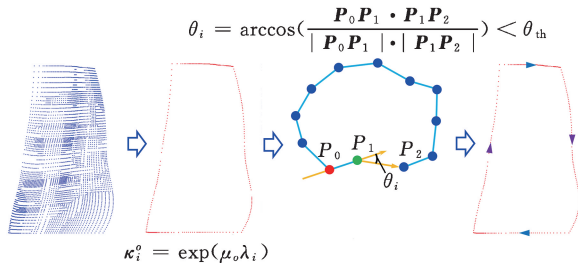


图3 边界提取及序列化流程图

Fig.3 Boundary extraction and serialization flow chart

### 1.2 牛顿迭代法优化测地线路径

点云上的测地线是连接点云面上给定的两点之间的最短路径。给定一个点云  $Q = \{q_i\}, i = 0, 1, \dots, n-1$  和两个点  $p_1, p_2 (p_1, p_2 \in Q)$ , 目标是找到连接两点的最优测地线路径。本文采用 Dijkstra 算法计算点云上两点之间的最短测地线,该算法是一个基于贪心、广度优先搜索,动态规划求两点之间最短路径的算法。通过 EGG 邻域实现 Dijkstra 算法的初始路径构建,如图4中红色点所示(紫色点为给定的初始两点),该路径呈多段折线形式,而理想的测地线上每一点曲率都应为零,因此,接下来介绍如何优化离散测地线曲率。

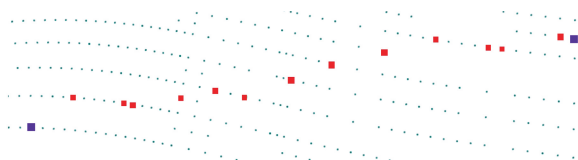


图4 最短离散测地线路径

Fig.4 The shortest discrete geodesic path

设  $C(s)$  为参数化曲面  $S$  上的光滑参数曲线,其中  $s$  为曲线的弧长参数,  $C(s_1) = r_1$  和  $C(s_2) = r_m$  为两个端点,则  $C(s)$  的测地线曲率  $k_g$  可以表示为

$$k_g \mathbf{N} = \mathbf{C}_{SS} - \langle \mathbf{C}_{SS}, \mathbf{n} \rangle \mathbf{n} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{N}$  为曲线的切向法线;  $\mathbf{n}$  为给定点的曲面法线;  $\mathbf{C}_{SS}$  为  $C(s)$  对弧长的二阶导数。

因本文为针对离散点云的测地线构造,曲线  $C(s)$  是一组离散点序列,因此  $C(s)$  关于  $s$  的二阶导数用有限差分近似。则由点云中  $m$  个序列点  $\{p_0, p_1, \dots, p_i, \dots, p_{m-1}\} \in Q$  构成的初始路径的离散曲率  $\mathbf{C}_{SS}$  可以描述为

$$\mathbf{C}_{SS} = \mathbf{K} \mathbf{p} \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & \dots & 0\mathbf{I} \\ a_2\mathbf{I} & b_2\mathbf{I} & c_2\mathbf{I} & \dots & 0\mathbf{I} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0\mathbf{I} & \dots & a_{m-1}\mathbf{I} & b_{m-1}\mathbf{I} & c_{m-1}\mathbf{I} \\ 0\mathbf{I} & \dots & 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} \end{bmatrix}_{m \times m}$$

$$a_i = \frac{2}{g_i(g_i + f_i)} \quad b_i = -\frac{2}{g_i f_i}$$

$$c_i = \frac{2}{f_i(g_i + f_i)}$$

$$f_i = \|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{i+1}\| \quad g_i = \|\mathbf{p}_{i-1} \mathbf{p}_i\|$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$\mathbf{p} = [p_0 \quad p_1 \quad \dots \quad p_{m-1}]_{m \times 1}^T$$

式中:  $\mathbf{I}$  为  $3 \times 3$  单位矩阵。

因此,离散测地线曲率可以定义为

$$\mathbf{K}_g = \mathbf{M} \mathbf{p} = (\mathbf{K} - \mathbf{N}_1 \mathbf{N}_1^T \mathbf{K}) \mathbf{p} \quad (4)$$

$$\mathbf{N}_1 = \text{diag}(n_1, n_2, \dots, n_m)_{m \times m}$$

式中,  $n_i$  为点  $p_i$  处的法向量;矩阵  $\mathbf{N}_1$  中除了对角线外,其他位置数值均为 0。

本文并未直接求解  $\mathbf{K}_g = \mathbf{0}$ , 而是提出了以下优化问题:

$$\min_{\mathbf{p} \in S - \{p_0, p_{m-1}\}} Q(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{K}_g\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{p}^T \mathbf{M}^T \mathbf{M} \mathbf{p} \quad (5)$$

式(5)中,设点云集合  $P$  中的第一点和最后一点为路径的起始点  $p_0$  和终止点  $p_{m-1}$ 。

本文采用牛顿迭代法求解该函数的最小值。最小化函数的梯度和海森矩阵的性质与解决二次无约束问题时的相似,即

$$\left. \begin{aligned} \nabla Q(\mathbf{p}) &= \mathbf{M}^T \mathbf{M} \mathbf{p} \\ H &= \nabla^2 Q(\mathbf{p}) = \mathbf{M}^T \mathbf{M} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

因此,在每次迭代的第一步中,路径点按以下方式更新:

$$\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p} - \mathbf{H}^{-1} \nabla Q(\mathbf{p}) \quad (7)$$

牛顿法迭代过程中的  $\mathbf{H}^{-1} \nabla Q(\mathbf{p})$  可由共轭梯度法求出,优化后的测地线如图5中红色点所示。

### 1.3 基于 EGG 邻域的 MLS 投影及路径平滑

采用牛顿迭代法优化测地线路径之后,生成的新的离散点可能会偏离点云。为了确保生成的测地线路径位于点云上,由于点云没有与曲面类似的曲面方程,故本文通过构造 MLS 隐式曲面,

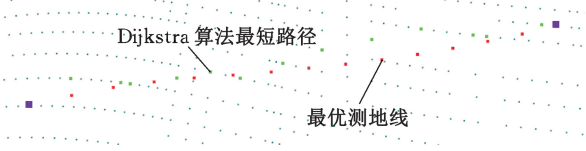


图 5 牛顿迭代法优化测地线

Fig.5 Optimization of geodesics by Newton iteration method

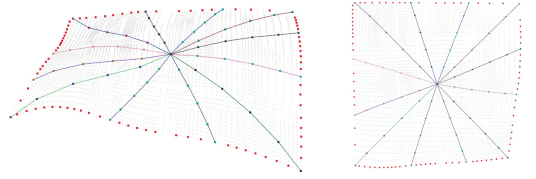


图 7 自由曲面点云最优测地线路径

Fig.7 Optimal geodesic path for free-form surface point cloud

将点投影至点云上。

设离散测地线路径上每一点  $p_i$  在点云  $Q$  中的 EGG 邻域为  $EGG_{p_i}$ , 则点  $p_i$  向点云  $Q$  的投影向量可以定义为

$$n_{p_i} = \frac{1}{\sum_{q_j \in EGG_{p_i}} \omega_{q_j}^{(i)}} \sum_{q_j \in EGG_{p_i}} \omega_{q_j}^{(i)} n_{q_j} \quad (8)$$

其中,  $n_{q_j}$  为通过 EGG 邻域求得的点云  $Q$  中每一点的法向量; 权函数  $\omega_{q_j}^{(i)}$  可以为任意单调函数, 通常采用高斯函数:

$$\omega_{q_j}^{(i)} = \exp\left(\frac{p_i - q_j}{h^2}\right) \quad (9)$$

其中,  $h$  是一个恒定比例因子。离散测地线路径点  $p_i$  处的权重可以根据其与参考平面的距离选取。路径点  $p_i$  在点云上的最优定向投影可以通过以下函数的最小化获得:

$$E(p_i^*) = \sum_{q_j \in EGG_{p_i}} \omega_{q_j}^{(i)} \|q_j - p_i^*\|^2 \quad (10)$$

$$p_i^* = p_i^*(t) = p_i + t n_{p_i} \quad t \in \mathbf{R}$$

最佳  $\hat{t}$  可由下式计算:

$$\hat{t} = \frac{\lambda - p_i \cdot n_{p_i}}{\|n_{p_i}\|^2} \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{c_1 n_x + c_2 n_y + c_3 n_z}{c_0} \quad c_0 = \sum_{q_j \in EGG_{p_i}} \omega_{q_j}^{(i)}$$

$$c_1 = \sum_{q_j \in EGG_{p_i}} \omega_{q_j}^{(i)} q_{jx} \quad c_2 = \sum_{q_j \in EGG_{p_i}} \omega_{q_j}^{(i)} q_{jy}$$

$$c_3 = \sum_{q_j \in EGG_{p_i}} \omega_{q_j}^{(i)} q_{jz}$$

对投影之后的离散点采用 Taubin 平滑之后将其作为离散径向线。生成的箱底点云上的离散径向线如图 6 所示, 自由曲面上点云离散径向线如图 7 所示(图 6、图 7 中线段为两点间的直线连线, 仅为展示离散径向线路径)。

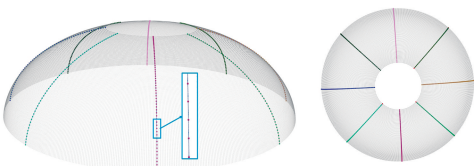


图 6 箱底点云最优测地线路径

Fig.6 The optimum geodesic path of the point cloud at the bottom of the tank

## 2 螺旋线加工轨迹生成

采用与阿基米德螺旋线规律性穿过径向线相似的原理, 在第 1 节构造径向线之后, 通过 B 样条曲线拟合、插值, 生成点云上的螺旋加工路径。

### 2.1 阿基米德螺旋线

阿基米德螺旋线是一种数学曲线, 其方程可以用极坐标表示, 其特点是在平面上绕着一个中心点旋转, 同时沿着径向线向外扩展。阿基米德螺旋线的方程为

$$r = A + B\theta \quad (12)$$

式中:  $r$  为极坐标中的半径;  $\theta$  为角度;  $A$ 、 $B$  为常数。

### 2.2 加工步长与行距计算

轨迹步长生成算法一般有等参数法、等距法和等弦高误差法等, 本文采用等弦高误差法。由于生成的径向线越靠近中心越密集, 所以, 如果表面加工精度要求较高, 可以将边界相邻点间距离作为最大步长, 对生成的离散螺旋点云重采样得到等步长的精加工轨迹。

对于贮箱箱底, 其表面形状可以近似为椭球形的一部分, 将螺旋轨迹近似为等平面轨迹, 进而可以推导出所截圆的直径为

$$D = \frac{a}{b} \sqrt{b^2 - z_0^2} \quad (13)$$

其中,  $a$  为长轴;  $b$  为短轴(该椭圆为双长轴);  $z_0$  为当前截圆的  $z$  坐标。如图 8 所示, 弦高误差  $\Delta h_R$  的计算公式为

$$\Delta h_R = D - \sqrt{D^2 - (L_R/2)^2} \quad (14)$$

则离散步长  $L_R$  与弦高误差  $\Delta h_R$  间的计算公式为

$$L_R = 2\sqrt{\frac{2a}{b} \sqrt{b^2 - z_0^2} \Delta h_R - (\Delta h_R)^2} \quad (15)$$

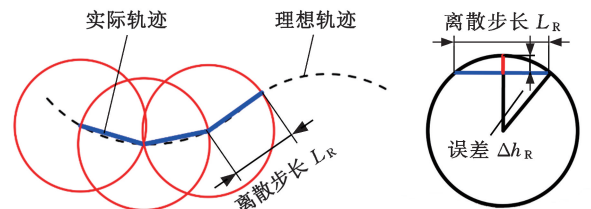


图 8 步长计算

Fig.8 Step size calculation

为了保证表面加工质量,优化加工轨迹,本文采用等残留高度法,该方法可以使相邻刀具路径之间的加工残留高度均为最大允许残留高度值<sup>[14]</sup>。

如图 9 所示,对于大曲率曲面,曲率远大于残留高度,其行距  $L_s$  与残留高度  $\Delta h_s$  之间的公式为

$$L_s \approx 2 \sqrt{2\Delta h_s R_b} \quad (16)$$

式中,  $R_b$  为刀具半径。

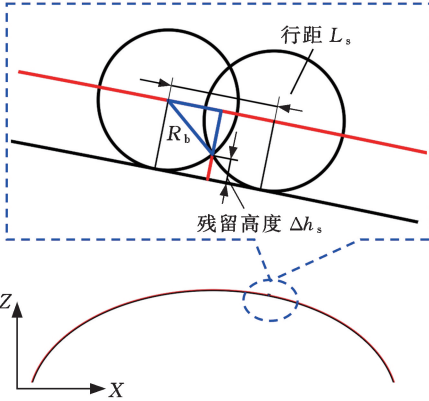


图 9 行距计算

Fig.9 Spacing calculation

### 2.3 线性螺旋差值算法

对 1.3 节计算得到的点云上的最优测地线进行 B 样条曲线拟合,将得到的曲线作为径向线。根据 2.2 节依据等残留高度计算出的行距,对径向线重新采样,采样点为  $q_{i,j}^r$  ( $i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$ ),并计算螺旋线圈数:

$$N_s = L_i^r / L_{i,j}^r \quad (17)$$

式中:  $N_s$  为圈数;  $L_i^r$  为每条径向线弧长;  $L_{i,j}^r$  为第  $i$  条径向线上相邻圈的弧长。

则每一圈总弧长  $s_j = \sum_{i=2}^{N_s} \|q_{i,j}^r - q_{i-1,j}^r\|$ 。设第  $i$  条径向曲线上圈数为  $j$  时的点为  $q_{i,j}^s$ ,如图 10 所示,则该点在径向线上的弧长  $\Delta L_{i,j}^r$  计算公式为

$$\Delta L_{i,j}^r = \begin{cases} 0 & i = 1; j = 1 \\ \Delta L_{i,j-1}^r + \delta_{i,j} L_{i,j}^r & i = 2, 3, \dots, n; j = 2, 3, \dots, m \end{cases} \quad (18)$$

$$\delta_{i,j} = \begin{cases} 0 & i = 1 \\ \delta_{i-1,j} + \frac{\|q_{i,j}^r - q_{i-1,j}^r\|}{s_j} & i = 2, 3, \dots, N_s; j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $\delta_{i,j}$  为比例系数;上标  $s$  表示当前点在螺旋曲线上,  $r$  表示当前点在径向线上;下标  $i$  表示当前径向线数,  $j$  表示当前螺旋圈数(取在一条径向线上两点之间的曲线作为一圈,如图 10 中的  $q_{i-1,j}^r$  和  $q_{i-1,j+1}^r$  之间曲线为一圈);  $q_{i,j}^s$  为螺旋线每一圈在径向线上的起点;  $\Delta L_{i,j}^r$  为径向线上插

值点与径向线初始点间弧长;  $q_{i,j+1}^s$  为螺旋线每一圈在径向线上的终点。

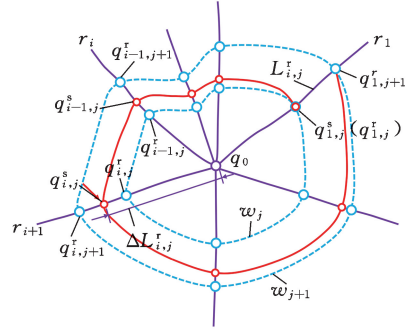


图 10 插值计算原理图

Fig.10 Interpolation calculation schematic diagram

计算得到  $q_{i,j}^s$  点在径向线上弧长  $\Delta L_{i,j}^r$  之后,根据 B 样条拟合得到径向线,得到该点的坐标。

### 3 轨迹生成结果

本文提出的方法已采用 VS2022+PCL1.9.1+CGAL 环境,通过 C++ 语言编程,在具有 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12400F 2.50 GHz 和 16 G 物理内存的 PC 中实现。下面通过实测箱底毛坯件点云数据以及自由曲面两个案例生成螺旋轨迹,验证所提方法针对单边界、两边界两类曲面生成螺旋加工轨迹的有效性。

案例 1:箱底为直径约 3300 mm、高度约 860 mm 的半椭球形,用线激光测量得到的点云数据约 1200 万,经过滤波、精简得到点云数量约 200 万,生成轨迹所需时间为 4000 s 左右,箱底及生成的螺旋轨迹如图 11 所示。

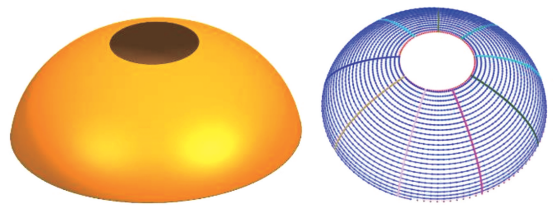


图 11 箱底模型及点云轨迹

图 11 Box bottom model and point cloud track

所生成的离散螺旋加工轨迹与原始点云面间偏差最大值为 0.046 mm,误差云图见图 12,经 VERICUT 软件模拟加工后,得到的加工表面与理论模型表面误差最大值为 0.1215 mm,误差云图见图 13,满足实际工程误差需求。

经主成分分析法计算得到每一点的法向量,将法线方向绕当前局部轨迹前进方向旋转  $15^\circ$  作为刀轴方向<sup>[15]</sup>,可以将该轨迹作为五轴加工轨迹。

案例 2:自由曲面包围盒尺寸为 1000 mm × 1000 mm × 450 mm,经过滤波、精简得到点云数量约 8.6 万,轨迹生成所需时间约 150 s,生成的

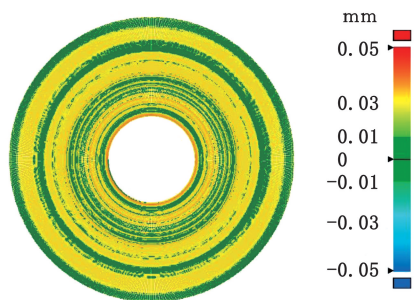


图 12 加工轨迹与原始点云表面误差云图

Fig.12 Machining trajectory and original point cloud surface error cloud image

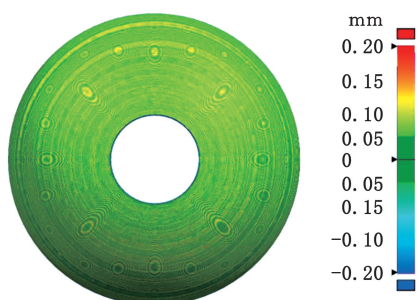


图 13 加工结果误差云图

Fig.13 Machining result error cloud map

螺旋轨迹如图 14 所示。经主成分分析法计算得到每一点的法向量,将法线方向绕当前局部轨迹前进方向旋转  $15^\circ$  作为刀轴方向,可以将轨迹作为五轴加工轨迹。

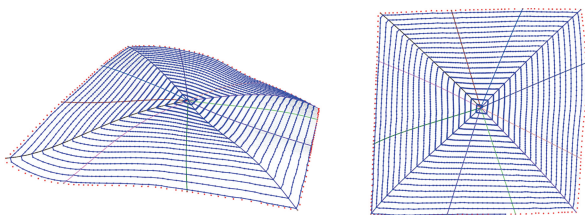


图 14 自由曲面模型及点云轨迹

Fig.14 Freeform surface model and point cloud trajectory planning

## 4 结论

1) 提出的特征描述子边界识别及序列化方法简单有效,为径向线构造奠定基础。

2) 提出的径向线构造方法可以直接在点云面上构造,省去了向参数域内映射的过程,提高了精度和效率。针对测地线曲率最小化问题,采用牛顿迭代法求解,得到了准确、光滑的离散测地线。

3) 针对路径冗余等问题,对离散径向线采用 B 样条曲线拟合并重采样,满足等残留高度行距需求;通过最短步长计算径向线个数;提出径向线插值算法,生成了等残留高度的离散螺旋加工轨迹,并通过案例展示了所提方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] 姜世阔,王小平,汪凯,等.基于点云曲面的定角度自动铺丝路径规划[J].中国机械工程,2023,34(21):2629-2636.  
JIANG Shikuo, WANG Xiaoping, WANG Kai, et al. Fixed-angle Method for Examines Automatic Fiber Placement Based on Point Cloud Surfaces[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(21):2629-2636.
- [2] LIU W, ZHOU L S, AN L L. Constant Scallop-Height Tool Path Generation for Three-axis Discrete Data Points Machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(1/4):137-146.
- [3] YANG P, QIAN X. Adaptive Slicing of Moving Least Squares Surfaces; Toward Direct Manufacturing of Point Set Surfaces[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2008, 8(3):11-14.
- [4] 祁少华. 基于散乱点的数控加工刀位规划[D]. 大连:大连理工大学,2006.  
QI Shaohua. Tool-path Planning of NC Machining Based on Scattered Points[D]. DaLian: Dalian University of Technology, 2006.
- [5] 张蕾. 基面曲线导向复杂点云数控加工路径生成方法[D]. 大连:大连理工大学,2016.  
ZHANG Lei. Path Generation Method for Base Curve Oriented Complex Point Cloud NC Machining [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [6] PARK S C, CHUNG Y C. Tool-path Generation from Measured Data[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(5):467-475.
- [7] ZHANG Y J, YU M R. Computing Offsets of Point Clouds Using Direct Point Offsets for Tool-path Generation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 226(1):52-65.
- [8] XIAO W, LIU G, ZHAO G. Generating the Tool Path Directly with Point Cloud for Aero-engine Blades Repair[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2020, 235(5):877-886.
- [9] STAVROPOULOS P, ATHANASOPOULOU L, SOUFLAS T, et al. Adaptive Toolpath Planning for Hybrid Manufacturing Based on Raw 3D Scanning Data[M]. Porto, Portugal: Springer, 2024.
- [10] ZHANG Yingjie, GE Liling. Adaptive Tool-path Generation on Point-sampled Surfaces[J]. Precision Engineering, 2011, 35(4):591-601.

(下转第 714 页)