

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.005

机械叶片五轴数控加工刀具路径规划算法

马海国

(西安航空职业技术学院, 陕西 西安 710089)

摘 要:机械叶片五轴数控机床规划路径较为复杂,无法实现精简加工,为此设计基于投影离散点和包络面的机械叶片五轴数控加工刀具路径规划算法。设计基于投影离散点的初始关键刀触点包络面生成算法,生成刀具初始关键刀触点逼近曲线的扫掠面即初始关键刀触点的包络面。为获取刀位点数据,在初始刀触点包络面基础上,利用刀具形状补偿生成刀位点数据。设计等弓高误差变步长切线离散刀位点插值算法,实施机械叶片五轴数控加工刀位点轨迹插值,实现刀具路径规划。实验测试结果表明:设计算法的叶轮加工刀具路径规划更简单规整,通过设计算法进行加工刀具路径规划后加工流程更加简单、耗时更短。

关键词:叶片加工;投影离散点;包络面;刀具形状补偿;数控加工;路径规划

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)06-0030-05

Five-axis CNC Machining Tool Path Planning Algorithm for Mechanical Blades

MA Haiguo

(Xi'an Aviation Vocational and Technical College, Xi'an 710089, China)

Abstract:To overcome the failure in achieving simplified machining by mechanical blade five axis CNC machine tools due to their very complex path planning, a tool path planning algorithm for mechanical blade five axis CNC machining based on projection discrete points and envelope surfaces is proposed. An algorithm for generating the envelope surface of the initial key tool contact is designed based on projecting discrete points, and the swept surface of the tool's initial key tool contact approximation curve, namely the envelope surface of the initial key tool contact is generated. To obtain tool point data, tool shape compensation is used to generate tool point data based on the initial tool contact envelope surface. An interpolation algorithm for equal arch height error variable step tangent discrete tool point is designed, and tool point trajectory interpolation for 5-axis CNC machining of mechanical blades is implemented to achieve tool path planning. The experimental test results show that the designed algorithm for impeller machining tool path planning is drastically simpler and more regular, and that the machining process is simpler and time-saving with application of the algorithm.

Keywords:blade processing; projecting discrete points; envelope surface; tool shape compensation; CNC machining tools; tool path planning

0 引言

在军事工业产品与民用工业产品的加工中,机械叶片五轴数控加工技术得到了广泛应用^[1-2]。这种加工技术相比传统三轴加工技术增加了两个附加的自由度,可以获得更稳定、更好的加工质量以及更高的生产效率。现对机械叶片五轴数控加工刀具路径规划算法进行研究。对于刀具轨迹规划技术,目前的研究整体已经趋近成熟。

其中文献[3]中提出了一种三角网格曲面环形刀五轴加工宽行距刀具路径生成方法,仿真测试结果表明,在同样的加工条件下,该方法的加工效率更高。文献[4]中提出了一种基于双PH曲线五轴线性刀具路径光顺轨迹生成方法,能够提升五轴局部拐角光顺计算效率。以上方法存在规划路径较为复杂,无法实现精简加工的问题。为此,本文设计一种基于投影离散点和包络面的机械叶片五轴数控加工刀具路径规划算法。

基金项目:陕西省高校工程研究中心立项建设项目(11610000741297059L/2021-191)

作者简介:马海国(1982—),男,陕西汉中,人,讲师,学士,研究方向为智能制造、自动控制、职业教育管理等, xin69906819@163.com。

1 机械叶片五轴数控加工刀具路径规划算法设计

1.1 基于投影离散点的初始刀触点包络面生成

设计一种基于投影离散点的初始关键刀触点包络面生成算法,生成机械叶片五轴数控加工刀具初始关键刀触点逼近曲线的扫描面即初始关键刀触点的包络面。基于生成的关键刀触点包络面能够确定初始的节点矢量与控制顶点数。

由于曲率能够充分表现出曲线的特征,因此选取投影离散点,将这些离散的曲率极值点当做研究中的初始关键点^[5]。

设计的初始关键刀触点包络面生成算法需要分三个步骤来执行。

1) 估计刀触点的离散曲率

刀触点集用 P 来表示,其离散曲率用 L 来表示。应用局部估计法实施 L 的求取。

P 中的首端点用 p_0 来表示,对于 p_0 的离散曲率 l_0 ,利用以下方式来求取。

利用首端的 4 个数据点 p_0, p_1, p_2, p_3 构建参数三次多项式:

$$w(r) = \alpha_3 r^3 + \alpha_2 r^2 + \alpha_1 r + \alpha_0 \quad (1)$$

式中: $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$ 为 4 个数据点弦长; r 为沿切矢方向外延长度; $w(r)$ 为切矢量^[6]。

沿切矢量方向外延 r 长度后,依据切矢量 $w(r)$ 与弦长 α_0 来获取 p_{-1} 。以 p_{-1}, p_0, p_1 为依据,通过局部估计法实施离散曲率 l_0 的求取,具体公式如下:

$$l_0 = \frac{\|\dot{w}_1(o_i) \times \dot{w}_0(o_i)\|}{\|\dot{w}_1(o_i)\|^3} \quad (2)$$

式中: $\dot{w}(o_i)$ 为 p_{-1} 的局部估计 1 阶导数; $\dot{w}_0(o_i)$ 为 p_0 的局部估计 1 阶导数; $\dot{w}_1(o_i)$ 为 p_1 的局部估计 1 阶导数^[7]。

接着通过同样的方法对其他点以及末端点 p_m 的离散曲率进行求取,从而获取离散曲率 L ,具体如下式所示:

$$L = \{l_0, l_1, \dots, l_m\} \quad (3)$$

2) 提取初始投影离散点

确定了离散曲率 L 后,基于以下原则提取初始投影离散点:

- a) 必选端部两个刀触点;
- b) 必选 L 极小值位置的刀触点;
- c) 选择大于设定阈值的 L 极大值位置的刀触点。

求取离散曲率均值,具体如下式所示:

$$l_\beta = \frac{l_0 + l_1 + \dots + l_m}{m} \quad (4)$$

通过下式设定曲率阈值:

$$L_\alpha = \delta \times l_\beta \quad (5)$$

式中 δ 为投影系数^[8]。

依据上述原则,在 P 中提取共 $N+1$ 个投影离散点,具体如下式:

$$P_{\text{key}} = \{p_0^{\text{key}}, p_1^{\text{key}}, \dots, p_{N+1}^{\text{key}}\} \quad (6)$$

式中 p_{N+1}^{key} 为从 P 中提取的第 $N+1$ 个投影离散点^[9],其中 N 的大小是由曲率阈值 L_α 决定的,同时下式成立:

$$\begin{cases} p_0^{\text{key}} = p_0 \\ p_{N+1}^{\text{key}} = p_m \end{cases} \quad (7)$$

3) 构建节点矢量

依据初始投影离散点及逼近量,构建 B 样条逼近曲线:

$$\begin{cases} t_{N-n-1} = \frac{\sum_{l=1}^{N-n-1} \tilde{I}_l(P_{\text{key}}, L)}{L} \\ I = 1, \dots, N-n \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\tilde{t}_{g(P_{\text{key}}, P)}$ 为初始投影离散点 p_j^{key} 在 P 中的位置对应的逼近量; I 为离散化切矢量; n 为一个常数^[10]。

对于该节点矢量,为使其插值于两个端部关键刀触点,将端部节点重数取为 $n+1$,即

$$\begin{cases} t_0 = \dots = t_n = 0 \\ t_{N+1} = \dots = t_{N+n+1} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

该节点矢量即为根据初始投影离散点 P_{key} 确定的逼近曲线包络面^[11]。

1.2 基于圆弧半径补偿算法的刀具形状补偿

在机械叶片五轴数控加工刀具曲面的不同位置,加工曲面与刀尖的接触点不一致,因此利用生成的初始刀触点包络面仍无法控制机械叶片五轴数控加工刀具的运动。在加工过程中,机械叶片五轴数控加工刀具刀尖圆弧圆心位置被称为刀位点。为获取刀位点数据,需要在初始刀触点包络面基础上,利用刀具形状补偿来生成刀位点数据^[12]。

设计一种圆弧半径补偿算法,工件坐标系的对应坐标轴用 X_u, Y_u 来表示,机床坐标系的对应坐标轴则用 x, y 来表示,并用 E 来表示 C 轴的旋转方向。其中 X_u 轴与 x 轴正向夹角用 ζ 来表示^[13]。

利用代数方程表示机械叶片五轴数控加工刀具的加工曲面,具体如下式所示。

$$R = F(x, y) \quad (10)$$

式中 $F(x, y)$ 为机床坐标系坐标轴上的加工曲线^[14]。

设 $y = \rho x$, 其中 $\rho = \tan(\zeta)$, 则式(10)可以转化为下式:

$$R = \varphi(x, \rho) \quad (11)$$

式中 φ 为偏移系数。

某一时刻曲线 EC 的表达式可以用下式来描述:

$$\begin{cases} R = \varphi\left(\frac{x}{1+\rho^2}\right), \rho \in [-1, 1] \\ R = \varphi\left(\frac{\rho^2 x}{1+\rho^2}\right), \rho \in (-\infty, -1] \cup [1, \infty) \\ x \in [-Q, Q] \end{cases} \quad (12)$$

式中 Q 为工件半径。

获取某一时刻曲线 EC 的表达式后,即可计算刀触点 V_i 所对应的单位法向量 ψ_{V_i} 与单位切向量 ζ_{V_i} , 则通过下式可以计算法向补偿偏移的距离:

$$\Delta\psi_i = \psi_{V_i} \cdot \zeta_{V_i} \quad (13)$$

分别在 z 轴、 x 轴上面向 t_{i+n} 分解 $\Delta\psi_i$, 即可获得 z 轴、 x 轴上 t_{i+n} 法向补偿的偏移量, 从而获得对 t_{i+n} 实施法向补偿后的刀位点 G_i 。

1.3 刀位点轨迹插值

在获取加工需要的离散刀位点坐标后,设计一种等弓高误差变步长切线离散刀位点插值算法,实施机械叶片五轴数控加工刀位点轨迹插值,实现刀具路径规划^[15-16]。

该算法的执行步骤具体如下。

1) 在 G_i 的参数曲面 $O(f, s)$ 上直接拾取一条曲线 $U_i = J(T)$, 假设 U_i 为已知的 G_i 轨迹曲线^[17]。

2) 将 U_i 的端点作为初始点 $U_{i,0}$ 。

3) 计算 $U_{i,j}$ 上 U_i 的对应切线斜率 D_{ij} , 计算公式如下^[18]:

$$D_{ij} = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \quad (14)$$

式中: (x_1, y_1) 为 $U_{i,j}$ 的坐标; (x_2, y_2) 为曲线 U_i 的坐标。

4) 判断切线斜率 D_{ij} 。

当 D_{ij} 满足 $D_{ij} > 0$, 过 $U_{i,j}$ 作一条相切于偏置曲面 O_2 (下方的偏置曲面) 的切线 l_2 , 则 O_2 与 U_i 的

交点就是下一个刀位点 $U_{i,j+1}$ 。

当 D_{ij} 满足 $D_{ij} < 0$, 则过 $U_{i,j}$ 作一条相切于偏置曲面 O_1 (上方的偏置曲面) 的切线 l_1 , O_1 与 U_i 的交点就是下一个刀位点 $U_{i,j+1}$ 。

当 D_{ij} 满足 $D_{ij} = 0$, 则需计算并判断 $U_{i,j}$ 处 U_i 的 2 阶导数 D_{ij}' 。当其值小于 0, 与 $D_{ij} < 0$ 的情况相同; 当其值大于 0, 与 $D_{ij} > 0$ 的情况相同; 当其值为 0, 对 $U_{i,j}$ 处 U_i 的 2 阶导数 D_{ij}'' 实施计算, 并判断拐点附近曲线的凹凸性表现, 若左凹右凸, 与 $D_{ij} > 0$ 的情况相同, 若左凸右凹, 与 $D_{ij} < 0$ 的情况相同。

5) 重复步骤 3)~步骤 4), 直到刀位点遍布整条曲 U_i 。

2 加工实验

2.1 加工设备

在设计机械叶片五轴数控加工刀具路径规划算法的实验中, 利用其对实验数控机床实施加工刀具路径规划。实验数控机床是一个机械叶片五轴数控机床, 用于加工整体叶轮, 以该机床为对象验证设计算法有效性。

实验数控机床型号为 DMG-80 monoBLOCK。通过 DM55 三坐标测量机实施叶轮加工误差的测量, 分辨率可达 $0.4 \mu\text{m}$ 。通过基恩士 X-100 显微镜测量工件表面粗糙度。加工的样品如图 1 所示。

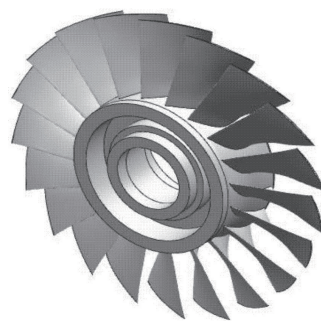


图 1 加工样品

在整体叶轮的加工中, 需要经过建模、开槽加工、半精叶片加工等多个步骤, 其中设计算法主要应用于叶轮流道精加工时的刀具轨迹生成。

2.2 实验过程

在实验中, 首先基于所设计的基于投影离散点的初始关键刀触点包络面生成算法生成实验机床刀具整体叶轮加工中的包络面, 其中生成的单个叶轮的包络面如图 2 所示, 是图中两种线条所构成的面。

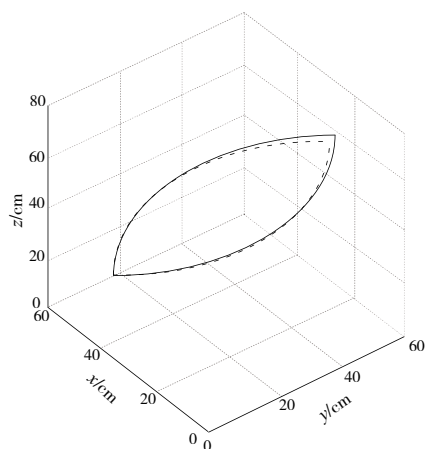


图2 生成的单个叶轮的包络面

在初始刀触点包络面基础上,利用刀具形状补偿来生成刀位点数据。其中法向补偿结果如图3所示。

最后利用所设计的等弓高误差变步长切线离散刀位点插值算法实施轨迹插值,完成路径规划。^[19]

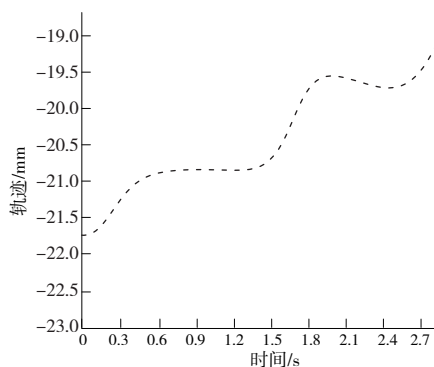


图3 补偿结果

2.3 实验结果对比分析

在实验中,将文献[3]中三角网格曲面环形刀五轴加工宽行距刀具路径生成方法和文献[4]中基于双PH曲线五轴线性刀具路径光滑轨迹生成方法作为对比方法,共同参与实验,并分别用方法1、方法2来表示。

3种方法的叶轮加工刀具路径规划的部分结果如图4所示。

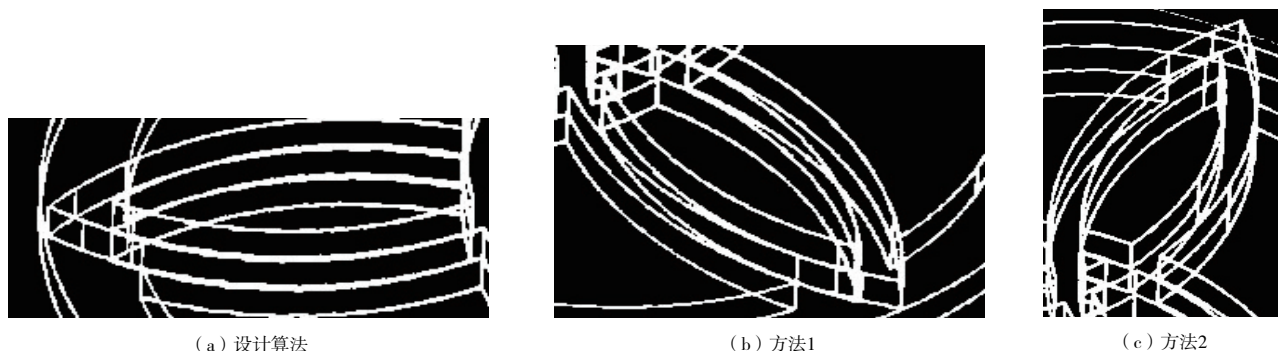


图4 叶轮加工刀具路径规划的部分结果

根据图4的叶轮加工刀具路径规划情况,发现设计算法的叶轮加工刀具路径规划明显更简单规整,说明通过设计算法进行加工刀具路径规划后加工流程更加简单、耗时更短。而经方法1、方法2的刀具路径规划后,获取的规划路径更加复杂,会带来复杂的加工流程。

3 结语

数控加工技术在加工领域有着绝对核心的地位。为实现数控系统产业的加速发展,针对机械叶片五轴数控机床加工刀具设计了一种基于投影离散点和包络面的刀具路径规划算法,实现了更加简单、规范的加工流程,提高了加工效率。

参考文献:

- [1] 王恒,王云鹏,武彦伟,等. 鞋楦五轴数控加工中的刀具半径补偿算法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(5): 1390-1396.
- [2] 岳晓明,臧烁,徐作珂,等. 基于6自由度串联机器人的电火花铣削加工轨迹规划及伺服控制策略研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(9): 20-27.
- [3] 陈良骥,赵波,马龙飞,等. 三角网格曲面环形刀五轴加工宽行距刀具路径生成方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 392-403.
- [4] 陶廷江,韩江,姜阳,等. 基于双PH曲线五轴线性刀具路径光滑轨迹生成及其参数同步方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(11): 1460-1466, 1534.

- 收稿日期:2023-11-24

40(13) : 146-153.

- 收稿日期:2023-11-14