

基于参数映射的开式整体叶盘流道 铣削路径生成方法

韩江^{1,2} 张文强^{1,2} 田晓青^{1,2*} 夏铨^{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:针对整体叶盘类零件流道的粗加工问题,提出了一种变层厚曲面分层的加工策略,并根据整体叶盘类零件流道宽度变化的特点,在任一切削层曲面,利用测地偏移原理确定流道两侧刀具路径边界,确定步长和路径条数,提出了一种沿着流道纵向铣削的走刀路径规划方法。计算了流道边界的刀轴矢量,利用四元数插值计算流道边界中间刀位点的刀轴矢量。计算结果表明,与常规采用叶盘轮毂回转面偏置或叶盘包覆回转面偏置的均匀分层法相比,变层厚曲面分层法可更好地适应包覆回转面至轮毂回转面的曲面变化,保证叶片表面质量,且加工后叶片表面余量较为均匀。最后通过加工实例验证了算法的可行性。

关键词:开式整体叶盘;曲面分层;测地偏移;粗加工;刀位规划

中图分类号:TH164;TP391.7

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Generation Method of Milling Paths of Open Blisk Channels Based on Parameter Mapping

HAN Jiang^{1,2} ZHANG Wenqiang^{1,2} TIAN Xiaoping^{1,2*} XIA Lian^{1,2}

1.School of Mechanical Engineering,Hefei University of Technology,Hefei,230009

2.Anhui Provincial Intelligent CNC Technology and Equipment Engineering Laboratory,
Hefei,230009

Abstract: A machining strategy for variable layer thickness with layered surfaces was proposed to address the rough machining issues of the channels across the entire blisk components. Considering the characteristics of the variation in the width of the channels across the entire blisk components, the geodesic offset was used to determine the toolpath boundaries on both sides of the channels, and the step size and the number of paths were determined. A planning method for the longitudinal milling path along the channels was proposed, and then the tool axis vector of the channel boundaries is calculated, and the tool axis vector of the middle cutter positions of the channel boundaries is calculated by quaternion interpolation. The calculation results show that, compared with the conventional uniform layering method using the blisk hub rotary surface offset or the blisk covering rotary surface offset, the variable layer thickness surface delamination may better adapt to the surface changes from the covered rotary surface to the hub rotary surface, the surface quality of the blades is ensured, with the advantage of a uniform machined blade surface allowance, and the feasibility of the algorithm was verified through machining examples.

Key words: open blisk; surface layering; geodetic offset; roughing; tool path planning

0 引言

开式整体叶盘类零件在航空、船舶、化工等各个领域起着至关重要的作用,其设计、加工制作受到广泛关注。整体叶盘的研发简化了传统发动机的结构,相较于传统叶盘,可以减小近50%的质

量^[1]。与传统叶盘相比,整体叶盘具有结构简单、气流稳定、消除安装过程中的挤压应力等优点^[2]。开式整体叶盘类零件加工主要采用圆柱毛坯件经过流道铣削加工、叶片半精加工、叶片精加工等一系列工序最终完成。作为加工整体叶盘的第一步,材料去除量绝大部分是在叶盘流道粗加工过程中完成的,而且为了后续半精加工和精加工的表面质量,流道粗加工阶段在需要保证效率的同

时,对零件表面的加工质量也有一定要求。

传统的刀具路径规划算法有等参数线法^[3-6]、平面截交法^[7]以及等残余高法^[8-9]。等参数线法以加工曲面的一系列参数线作为刀具轨迹,对于参数曲面该方法计算简单,但是等参数法会造成残高不均匀或路径冗余。平面截交法通过建立一组平面与模型曲面求交得到一组截交线作为刀路,该方法适应性强,算法简单稳定,但是生成的刀路不适合边界复杂的自由曲面,且刀路存在较多的短小刀路,刀路之间还可能需要过渡刀路。等残余高法是在给定初始刀具路径后,根据残余高度的约束,在曲面上不断迭代得到刀具路径,这样能保证很高的加工精度,但是其计算复杂,刀路之间可能出现自交,初始路径对刀路质量影响较大。

诸多学者对叶盘类零件流道铣削刀路的生成方法做了大量研究。曹利新等^[10]针对叶轮流道的每一个分层曲面提出了三角形和之字形的刀位生成方法;王伟^[11]提出了高效摆线粗加工路径规划方法;HAN等^[12]针对叶轮模型,在四轴加工中建立了与倾角相关的刀具轴优化模型,求解出最佳倾角,进行加工铣削验证;曾巧芸等^[13]将叶轮流道划分为多个不同区域,采用不同直径的刀具进行铣削;CHANG等^[14]通过等残留高度法计算粗加工刀位点,插值侧铣叶片的刀轴矢量得到整个粗加工刀位轨迹。

主流叶盘类零件流道铣削的方法都是利用长杆类刀具加工流道部分,大致分为分层铣和插铣,分层铣加工叶盘流道可保证叶盘流道两侧具有较高的加工质量;与分层铣相比,插铣的最大优势在于该工艺具有更高的加工效率。为了适应叶盘流道深度和宽度变化的特点,本文在开式叶盘建模的基础上,针对球头铣刀,利用等参数线法和等平面法提出一种变层厚曲面分层的加工策略,针对任一切削层曲面,利用测地偏移确定流道两侧刀具路径边界,确定步长和路径条数,提出一种螺旋走刀路径的刀具路径规划方法。

1 叶盘流道分层

图1为开式叶盘特征示意图。开式叶盘的主要特征包括包覆面、叶片面、轮毂面,以及它们之间的边界曲线或面,如包覆边界线、圆角边界线和叶根圆角面等。包覆面是指沿叶片包络而成的外侧曲面,轮毂面则为叶盘的底部曲面,两者之间的距离在流道中并不恒定。

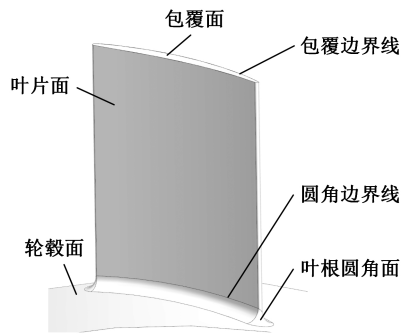


图1 开式叶盘模型特征示意图

Fig.1 The characteristics schematic diagram of the open blisk model

开式叶盘流道分层的方法主要有两种:一种是以轮毂面还原的回转面或包覆面还原的回转面为起始面,以恒定的层间距离轴向偏置出切削层曲面,对流道空间进行划分;另一种利用叶片参数线对叶片沿深度方向进行均分,将边界参数线绕回转轴旋转扫掠形成切削层曲面,对流道空间进行划分。由于叶盘包覆面和轮毂面的距离并不恒定,所以第一种方法会造成第一层或最后一层的余量与其他层的余量有很大差别,极大影响叶盘加工后的表面质量。由于粗加工后的表面质量会影响后续半精、精加工的表面质量,所以本文采用第二种变层厚的分层方法。但利用叶片面参数线来构造切削层会有两个问题:一是切削层的范围只在两叶片之间的流道,没有涉及流道两侧的开放区域;二是叶片面是裁剪的曲面,参数线可能不规则,直接利用叶片面的参数线构造切削层曲面不适用于大部分叶盘。为了保证叶盘流道曲面分层的适用性,本文提出一种利用包覆面和轮毂面生成过渡曲面的方法来构造流道切削层曲面。

对于任意一叶盘,将其几何变换到部件轴坐标系下,确保其回转轴为Z轴。如图2所示,提取叶盘模型的轮毂面和包覆面,构造轮毂面的最大包围盒,定出轮毂面的 Z_{\min} 和 Z_{\max} ,用 $(0,0,Z_{\min})$ 和 $(0,0,Z_{\max})$ 构成一个线段,沿 $(1,0,0)$ 方向拉伸一定距离值,得到一个线性拉伸面 S_{lin} ,线性拉伸体NURBS曲面可由下式求得:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,p}(u) R_{j,q}(v) P_{ij} \omega_{ij}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,p}(u) R_{j,q}(v) \omega_{ij}} \quad (1)$$

式中: v 为参数,通常在区间 $[0,1]$ 内变化; n, m 分别为沿着 u 和 v 方向的曲面控制点阶数减一; $R_{i,p}(u), R_{j,q}(v)$ 分别为定义在曲面上的 u 和 v 参数方向的B样条基函数; P_{ij} 为曲面上的控制点; ω_{ij} 为控制点的权重。

将轮毂面和包覆面还原成回转体曲面,分别与线性拉伸面求交,得到轮毂侧交线和包覆侧交

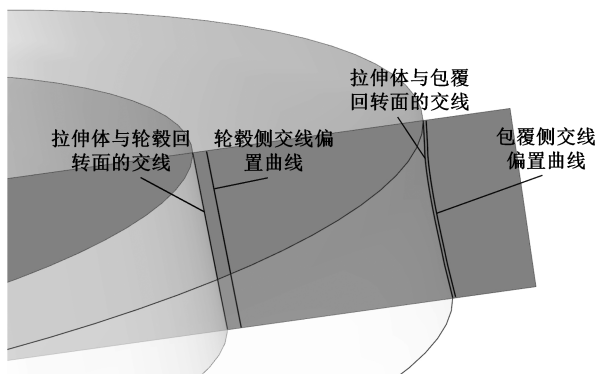


图 2 拉伸体与轮毂、包覆的回转面交线及交线偏置线

Fig.2 The extruded body intersects the hub and the wrapping rotary surface, and the intersection offset liner

线。B 样条曲线表示如下：

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,p}(t) \quad (2)$$

式中： P_i 为曲线控制点，控制曲线的形状； $N_{i,p}(t)$ 为 B 样条曲线的基函数。

设刀具半径为 R ，轮毂余量为 η ，毛坯余量为 μ ，对轮毂侧交线沿 $(1, 0, 0)$ 方向偏置一个刀具半径加轮毂余量的距离，即 $R + \eta$ ，得到轮毂侧偏置曲线 $C_{h,off}$ ；对包覆侧交线沿 $(1, 0, 0)$ 方向偏置毛坯余量的距离 μ ，得到包覆侧偏置曲线 $C_{s,off}$ 。B 样条曲线偏置表达式为

$$C_{off}(t, d) = C(t) + dN \quad (3)$$

式中： d 为曲线的偏置距离； N 为曲线上每个点的单位法向基。

使用图 2 中轮毂侧偏置曲线 $C_{h,off}$ 和包覆侧偏置曲线 $C_{s,off}$ ，构造扫掠体曲面 S_{lof} 。如图 3 所示，利用等参数步长法离散采样包覆侧偏置曲线得到一个点的序列 $P_{s,off}$ ，遍历其中的点对轮毂侧偏置曲线做投影计算，找到投影距离最大的离散点 $P_{s,max}$ 和它在轮毂侧偏置曲线上的投影点 $P_{h,off}$ 。

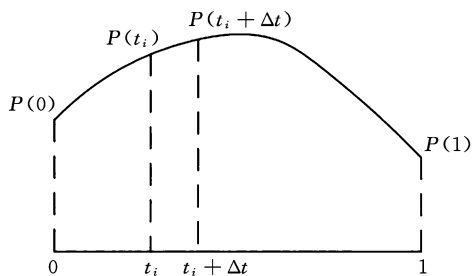


图 3 等参数步长法离散曲线

Fig.3 Isoparametric step method discrete curves

最大深度距离为 H ，使用 $P_{s,max}$ 和 $P_{h,off}$ 构造一个线段 C_L ，根据 H 对 C_L 进行划分得到线段上一系列的点 P_L ；遍历 P_L 内的所有点，每个点对扫掠体曲面 S_{lof} 做投影，得到每个点在扫掠体曲面参数域上的 (u, v) 值，根据每个点在扫掠体曲面参数域上的 v 值构造参数线序列 $C_{L,S}$ ，如图 4 所示。

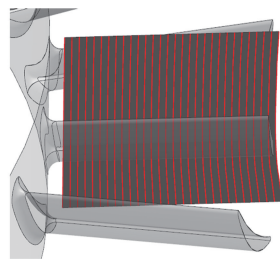


图 4 叶盘流道深度方向分层等参数曲线

Fig.4 The parametric curves of blade disk flow channel in the depth direction of the layered structure

遍历 $C_{L,S}$ 内的所有参数线，每一个参数线绕部件轴 (Z 轴) 回转一周，生成切削层曲面 S_{lay} ，如图 5 所示，每个切削层曲面在切削加工时是球头铣刀球心所在的曲面。

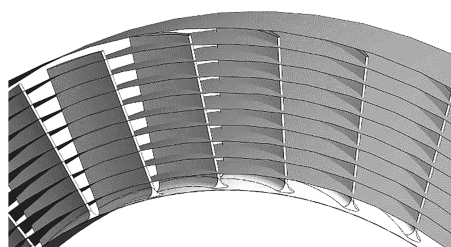


图 5 回转等参数曲线序列生成的切削层曲面

Fig.5 The cutting layer surface generated by the revolution of an iso-parametric curve sequence

2 刀具路径规划

在生成叶盘流道的切削层曲面组后，为了有效地规划刀具路径并确保在每个切削层曲面上留出必要的精加工余量，利用曲面上的测地偏移原理，在切削层曲面上进行偏置操作，将切削层曲面向叶片外部偏置，直至与叶片表面相交（偏置距离为刀具半径 R 加上叶片余量 ξ ），从而确保在粗加工阶段时刻保留足够的材料余量。

确定粗加工刀路的边界后，在流道边界内，在切削层参数域上利用线性插值的方法规划出流线型刀具路径，以确保刀具路径的顺畅性和流线性。通过考虑叶片的形状以及流道的设计要求，可有效地在切削层曲面上规划出适用的刀具路径，既满足了精加工的需求，又保证了流道的设计要求得以实现。

2.1 粗加工刀具路径边界的确定

切削层曲面的生成与刀具半径 R 、轮毂余量 η 和毛坯余量 μ 有关。切削层曲面与叶盘有以下 5 种关系：只与圆角面相交、与圆角面和叶片面相交、只与叶片面相交、部分与叶片面相交部分在包覆面外侧、全都在包覆面外侧。对前 3 种只有相交的情况直接作相交处理，获得交线序列 C_{int} ；对于后 2 种不完全相交的情况，提取包覆面的边界

线,等参数步长法离散采样,采样点投影至切削层曲面上,对所有投影点进行插值B样条拟合,将拟合的曲线作为当前切削层曲面与叶片面的交线序列 C_{int} ,如图6所示的叶片面与切削层曲面交线。

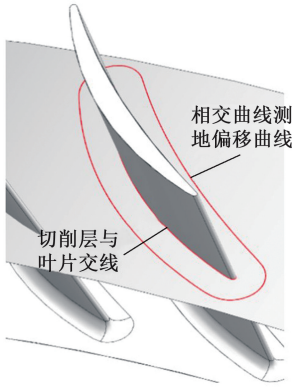


图6 相交曲线三维空间上测地偏移

Fig.6 Geodesic offset in 3D space of the cutting layer surface

在每一个切削层上,根据等弦高步长法,如图7所示,离散这一个切削层对应的交线序列 C_{int} ,得到一个离散点的序列(包含这个点在三维空间的坐标 (x, y, z) 和切削层参数域平面的坐标 (u, v)),计算每个点在三维空间中沿曲线方向的切向量 T 和每个点在切削层表面上的法向量 N :

$$T = \frac{dC}{dt} = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right) \quad (4)$$

$$N = \frac{S_u \times S_v}{|S_u \times S_v|} \quad (5)$$

式中: S_u 为曲面对 u 求偏导; S_v 为曲面对 v 求偏导。

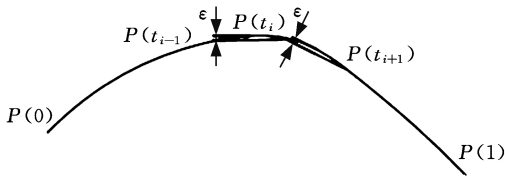


图7 等弦高步长法离散曲线

Fig.7 Isochord height step method discrete curves

对于每一个离散点,计算测地偏移方向 $T \times N$,给定偏移距离 $(R + \xi)$,根据以下方程组^[15]计算每次迭代更新点的坐标:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{ds} &= p \\ \frac{dv}{ds} &= q \\ \frac{dp}{ds} &= -\Gamma_{11}^{(1)} p^2 - 2\Gamma_{12}^{(1)} pq - \Gamma_{22}^{(1)} q^2 \\ \frac{dq}{ds} &= -\Gamma_{11}^{(2)} p^2 - 2\Gamma_{12}^{(2)} pq - \Gamma_{22}^{(2)} q^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: p, q 为偏移点的 u, v 坐标; $\Gamma_{jk}^{(i)}$ ($i, j, k = 1, 2$) 为用克里斯托费尔符号表达的曲面第一、第二基本量及其导数组成的表达式。

偏移后的点与叶盘的距离是 $R + \xi$,可保证刀具不会发生过切现象。接下来,将测地偏移后的所有点在切削层参数域上重新拟合成样条曲线 C_g 。图8为某一切削层参数域平面上的测地偏移视图。

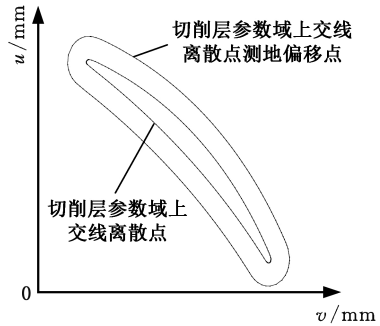


图8 切削层参数域平面上交线离散点测地偏移

Fig.8 Geodesic offset of the discrete point on the plane of the cutting layer parameter domain

在每一切削层曲面的参数域中,利用黄金分割法对偏移后的拟合曲线 C_g 进行计算,逐步逼近叶片前缘和后缘位置的极值点(三维空间中即曲线 Z 值的最大点和最小点),从而确定其精确位置:

$$c_k = b_k - \frac{b_k - a_k}{\varphi} \quad (7)$$

$$d_k = a_k + \frac{b_k - a_k}{\varphi} \quad (8)$$

式中: c_k, d_k 为通过黄金分割法迭代得到的一个新分割点,用于逐步逼近曲线极值点的位置,分别表示前后缘极值点; a_k, b_k 为迭代区间; k 为迭代次数; φ 为黄金分割比, $\varphi = (\sqrt{5} + 1)/2$ 。

将 C_g 分成左右两条曲线 C_{gL} 和 C_{gR} ,将左侧的样条曲线 C_{gL} 在参数域上沿 u 方向平移 $2\pi/M$ (M 为叶片个数) 的距离生成流道右边界 C_{bR} (三维空间对应绕 Z 轴旋转 $2\pi/M$ 的角度), C_{gR} 就直接可以作为流道左边界 C_{bL} ,如图9所示,这样就生成了叶盘流道铣削加工的刀具路径边界。

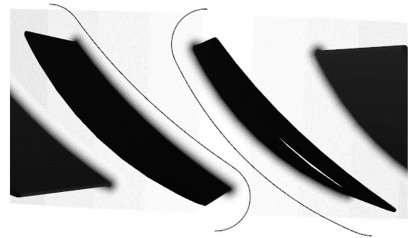


图9 切削层三维空间上流道边界

Fig.9 Channel boundary in 3D space of the cutting layer

2.2 粗加工刀具路径生成

生成流道铣削边界之后,利用流道两侧边界最高点和最低点 z 值相同的特点,采用线性插值的方式生成中间部分的刀具路径。

在实际流道粗加工中,只有切削层表面上的边界曲线最靠近叶片的位置最有可能发生过切现象,所以只需对边界曲线进行满足弦高约束的采样,左右边界之间的刀具路径可在计算出行距后插补得到,本文对 C_{bl} 利用等弦高步长法离散采点得到 P_{bl} (每个点包含这个点在三维空间的坐标 (x, y, z) 和切削层参数域平面的坐标 (u, v))。

在切削层参数域平面上,遍历 P_{bl} 内的点,每个点 (u_L, v_L) 等 v 参数线与流道右边界 C_{br} 相交得到交点 (u_R, v_R) ,此时 v_L 等于 v_R ,用 u_L 和 u_R 截取这个等 v 参数线,得到一个截取的参数线 C_v 。由上述步骤得到一个截取的参数线序列 $C_{v,s}$ 作为生成刀具路径的辅助线,如图 10 所示。



图 10 切削层三维空间上流道铣削路径辅助线

Fig.10 Auxiliary line for the milling path of the channel in 3D space of the cutting layer

切削层是规整的回转面,其参数域上的等 v 参数线近似为一个圆环,则 $C_{v,s}$ 内的每一个曲线都是圆环上的圆弧,圆弧弧长计算公式为

$$L = \alpha R_c \quad (9)$$

式中: R_c 为圆弧的半径; α 为圆弧的角度, $\alpha = u_R - u_L$ 。

利用式(9)计算每一个截取的参数线长度,得到最大的长度 L_{max} ,则流道内路径的个数为

$$n_s = L_{max}/d_{max} \quad (10)$$

其中, d_{max} 为加工时的最大行距,是路径生成的输入参数(与刀具直径百分比有关,具体选取的时候不会超过刀具直径的 100%)。

将 $C_{v,s}$ 所有等参线按刀路数均分,按等索引取点列,得到当前层上的所有刀轨,图 11 所示为某一切削层三维空间上的流道铣削路径,此时每条刀具路径方向都是 Z 轴的正方向。

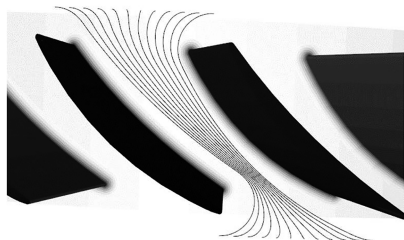


图 11 切削层三维空间上的多叶片粗铣路径

Fig.11 Multi-blade rough milling path in 3D space of the cutting layer

3 无干涉刀轴矢量规划

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。通过前文刀具轨迹规划方法可以获得切削层曲面上所有刀位点(球头刀球心)的三维坐标,并且每一条刀具轨迹刀位点的数量相同,所以本文首先计算流道边界上刀位点的刀轴矢量,然后采用四元数插值法获得边界中间刀具路径刀位点的刀轴矢量^[16]。

3.1 叶盘流道边界刀位点刀轴矢量规划

首先计算流道边界刀位点的刀轴矢量,对于流道边界上每一个刀位点 P_c ,根据式(4)计算它在流道边界曲线 C_b 上切向量 T ,然后计算它在叶片面上的投影点 P'_c ,再根据式(5)计算投影点在叶片面上的法向量 N 。

根据刀位点 P_c 和上述两个向量 T 、 N 构造刀位局部坐标系,如图 12 所示, P'_c 为刀位点 P_c 在叶片面上的投影点, X_c 轴的方向矢量为刀位点在流道边界曲线 C_b 上切向量 T , Y_c 轴的方向矢量为刀位点在叶片面上的投影点的法向量 N , Z_c 轴的方向矢量通过 X_c 、 Y_c 轴和右手坐标系确定。

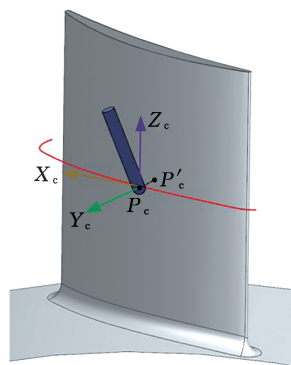


图 12 叶盘流道边界刀位点刀轴矢量规划

Fig.12 Blade flow channel boundary cutter location tool axis vector planning

刀具方向可在刀位局部坐标系中由前倾角 ϕ 和侧倾角 β 表示。前倾角 ϕ 为刀具和加工轨迹的夹角,在刀触坐标系中表示为刀具在 $X_c P_c Z_c$ 平面上的投影与 Z_c 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 $X_c P_c Z_c$ 平面的夹角。

对于叶盘流道加工,全局干涉主要通过调整侧倾角 β 来避免,将 Z_c 轴的方向矢量作为刀位点 P_c 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,得到刀位点 P_c 最终的刀轴矢量。图 13 所示为叶盘流道边界刀位点刀轴矢量。

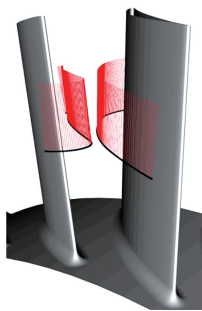


图 13 叶盘流道边界刀位点刀轴矢量

Fig.13 Blade flow channel boundary cutter location tool axis vector

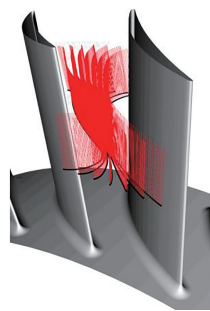


图 15 叶盘流道开粗刀位点刀轴矢量

Fig.15 Blade flow channel open thick knife point tool axis vector

3.2 叶盘流道边界中间刀位点刀轴矢量规划

通过前文可以得到所有流道边界刀位点的刀轴矢量,对于边界中间刀具路径刀位点 P ,根据索引对齐找到其流道两侧边界对应的刀位点 P_{c1} 和 P_{c2} ,利用四元数插值计算出刀轴,如图 14 所示,图中 C_1 和 C_2 分别是流道的两侧边界, Z_1 和 Z_2 分别是 P_{c1} 和 P_{c2} 的刀轴矢量, Z 是边界中间刀具路径刀位点 P 的刀轴矢量。

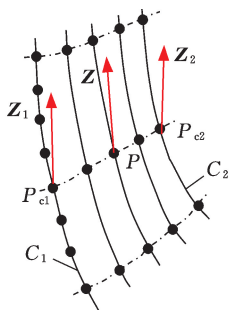


图 14 叶盘流道边界中间刀位点四元数插值

Fig.14 Quaternion interpolation of cutter location point in the middle of blade disc flow channel boundary

P_{c1} 和 P_{c2} 刀轴矢量的夹角计算式为

$$\theta = \arccos(Z_1 \cdot Z_2) \quad (11)$$

刀位点 P 到 P_{c1} 的距离与 P_{c1} 到 P_{c2} 的距离之比

$$t = \frac{PP_{c1}}{P_{c1}P_{c2}} \quad (12)$$

将 θ 和 t 代入下式计算就可以得到当前刀位点刀轴矢量 Z :

$$Z = \frac{\sin(\theta - t\theta)}{\sin \theta} Z_1 + \frac{\sin(t\theta)}{\sin \theta} Z_2 \quad (13)$$

如图 15 所示,通过对所有的刀位点进行插值,得到光滑、无干涉且满足加工余量的刀轴矢量。

生成流道铣削刀具切削路径后,还需将这些路径有序地规划连接。在每一个切削层内,在切削路径中选择中间路径为初始路径,初始路径两侧交替连接,相连接的路径利用插值 B 样条光滑连接,路径连接顺序与顺铣、逆铣有关,如图 16、图 17 所示。

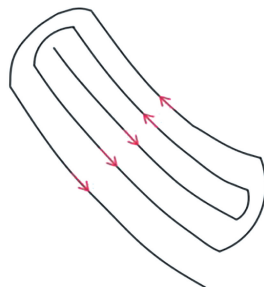


图 16 叶盘流道开粗刀具路径连接

Fig.16 Blade flow channel rough tool path connection

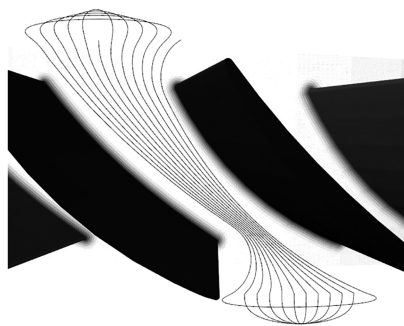


图 17 叶盘流道开粗刀具路径左右交替连接

Fig.17 The rough tool path of the blade disk flow channel path is alternately connected left and right

4 实验验证

在 Visual Studio Code 2022 编程软件中实现本文算法,根据上述方法对开式整体叶盘零件进行流道铣削加工刀位规划,并进行仿真加工,在沈阳机床厂研发的 i5 摇篮式五轴数控加工中心上对获得的走刀轨迹进行验证。

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的圆柱毛坯,直径为 290 mm,叶片圆角半径为 2 mm,叶片个数为 36。根据整体叶盘零件流道两侧距离自包覆至轮毂方向逐渐狭窄的特点,还有流道靠近圆角处加工时刀具半径不能大于圆角半径的要求,并考虑流道铣削加工效率,将流道自上而下的深度方向分为 0~60% 和 60%~100% 两个部分,用不同的切削工艺参数加工。需要注意的是,两个部

分选取的切削参数可以不一致,但是叶片余量的选取应该一致,否则会影响后续精加工的质量。0~60%部分选取粗加工球头圆柱刀具,刀具半径为 8 mm,刀具长度为 30 mm,叶片余量为 0.5 mm,轮毂余量为 0.5 mm,每层切削深度为 30% 刀具直径百分比,最大行距为 30% 刀具直径百分比;60%~100%部分选取粗加工球头圆柱刀具,刀具半径为 4 mm,刀具长度为 40 mm,叶片余量为 0.5 mm,轮毂余量为 0.5 mm,每层切削深度为 30% 刀具直径百分比,最大行距为 30% 刀具直径百分比。主轴转速设为 5000 r/min,进给速度为 2000 mm/min。

4.1 计算时间对比

通过对比本文方法和 NX12.0 流道开粗轨迹规划方法来验证本文方法的计算速度。在一台配备了 NVIDIA RTX4060Ti 显卡 8G 显存、13th i7-13700F 基准频率 2.10 GHz、8GB DDR4 运行内存的台式电脑上利用 NX12.0 软件和本文方法分别计算叶轮流道铣削轨迹,并记录计算时间,结果如表 1 所示。

表 1 计算时间对比

Tab.1 Comparison of calculation time

流道深度部分	NX12.0 计算时间/s	本文方法计算时间/s
0~60%	3.01	2.67
60%~100%	2.65	2.42

对比两个深度范围的流道,商业软件 NX12.0 叶盘流道铣削刀具轨迹计算时间为 5.66 s,本文方法的计算时间为 5.09 s,计算效率提高了 10.07%。由此可见,本文方法缩短了叶盘流道开粗刀轨的计算时间,是一种高效的轨迹规划方法。

4.2 仿真结果

在 Vericut 软件中的仿真结果如图 18~图 20 所示。叶盘流道仿真中,叶片余量为 0.5 mm,对应仿真图中淡绿色,颜色逐渐变蓝至紫色说明余量残余大于 0.5 mm 并且余量残留越来越大,颜色逐渐变黄至红色说明余量小于 0.5 mm 并且余量过切越来越大。由于叶片曲面本身的凹凸性,叶片凸面一般是残留较多,叶片凹面一般是过切较多。由图 19 和图 20 比较分析可知,本文方法凸面紫色、蓝色区域范围更少,凹面黄色、深黄色范围更少,叶片余量更为均匀。

将上述方法生成的开式整体叶盘流道铣削路径和同参数下 NX 开式整体叶盘流道铣削路径在 Vericut 软件里进行加工仿真,导出余量折线图,见图 21 和图 22。本文方法和 NX12.0 流道铣削加工叶片余量均值分别为 0.5651 mm 和 0.5701 mm,均方根误差分别为 0.087 483 mm 和 0.092 131 mm。

范围(毫米)	颜色	范围(毫米)	颜色
0.62000	68.Machine_8	0.50000	56.AutoDiff_E1
0.60000	69.Machine_9	0.48000	51.AutoDiff_G1
0.58000	60.AutoDiff_E5	0.46000	52.AutoDiff_G2
0.56000	59.AutoDiff_E4	0.44000	53.AutoDiff_G3
0.54000	58.AutoDiff_E3	0.42000	54.AutoDiff_G4
0.52000	57.AutoDiff_E2	0.40000	55.AutoDiff_G5
0.50000	56.AutoDiff_E1	0.10000	1.Red
0.48000	51.AutoDiff_G1	0.00000	5.Dim Gray

图 18 Vericut 仿真偏差图

Fig.18 Vericut simulation deviation diagram

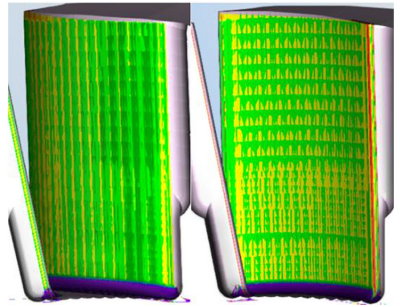


图 19 本文方法开式整体叶盘流道加工仿真

Fig.19 The proposed method simulates the processing of the open blisk channel

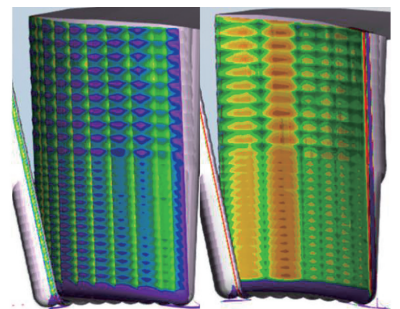


图 20 同参数下 NX12.0 开式整体叶盘流道加工仿真
Fig.20 NX12.0 open blisk channel machining simulation under the same parameters

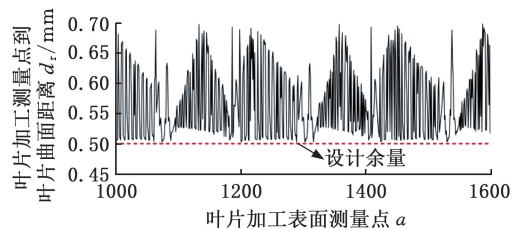


图 21 本文方法叶盘流道铣削仿真部分叶片余量
Fig.21 The proposed method of blade disk flow channel milling simulation part of the blade margin

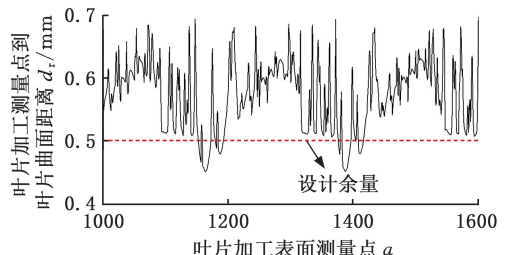


图 22 NX12.0 叶盘流道铣削仿真部分叶片余量
Fig.22 NX12.0 blade disk flow channel milling simulation part of the blade margin

由图 21、图 22 可知,两种方法仿真加工后流道两侧叶片余量变化趋势大致相同,流道两侧残留均匀,余量均值和余量平方差较为接近,本文方法加工出的叶片余量平均值更接近理论值 0.5 mm,均方根误差更小,实际余量与理论余量的变化幅度更小,流道两侧的叶片很少出现过切的点,证明本文方法具有良好的加工效果,是可行且有效的。

4.3 实例验证

为了进一步证明本文流道铣削方法的有效性和实用性,在规划流道铣削刀具路径后,得到叶盘流道铣削的 CLS 文件,对 CLS 文件进行后置处理转换成机床读取的 NC 代码,输入沈阳机床厂 i5 摇篮式五轴数控加工中心加工出完整的整体叶盘,如图 23 所示。实际加工的主轴转速和进给速度与仿真加工相同。



图 23 摇篮式五轴加工中心

Fig.23 Cradle type 5-axis machining center

图 24 为一个流道铣削加工图,整个叶盘流道铣削过程较为平稳,无明显振动,流道铣削的效果较好,保证了零件表面质量,加工后叶片表面余量较为均匀。叶片表面的切痕形状与刀具轨迹一致,说明本文方法是可行且有效的。

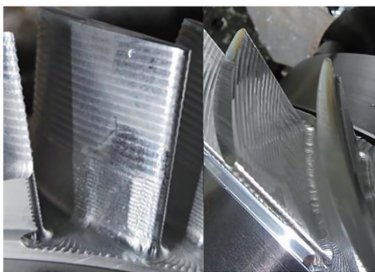


图 24 开式整体叶盘流道加工实例

Fig.24 Example of open blisk channel processing

5 结论

1)针对开式整体叶盘类零件流道的铣削加工问题,根据开式整体叶轮几何特征,分析开式整体叶盘的可加工性,提出了一种变层厚曲面分层的加工策略,利用测地偏移确定流道两侧刀具路径边界,并根据整体叶盘类零件流道宽度变化的特点,确定步长和路径条数,提出了一种具有通用性

的叶盘流道铣削螺旋走刀路径的规划方法。

2)所提方法已集成到自主研发的 CAM 软件中,算法具有高效性。与 NX12.0 对比,计算时间节省了约 10.07%,提高了叶片数控加工编程速度,验证了所提方法的高效性。

3)利用 Vericut 软件对本文方法和 NX12.0 生成的开式整体叶盘流道铣削路径进行加工仿真,对仿真结果进行加工余量比较,结果表明本文方法叶盘流道两侧仿真加工后的余量更加接近理论值,均方根误差更小,余量变化波动更小,验证了所提加工策略的可行性,并通过实例加工进一步验证了本文方法的可行性。

参考文献:

- [1] 阎兵,曹著明.整体叶盘数控铣削优化技术探讨[J].制造技术与机床,2020(4):50-55.
YAN Bing, CAO Zhuming. Discussion on Optimization Technology of CNC Milling of Integral Blisk [J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2020(4):50-55.
- [2] 史耀耀,段继豪,张军锋,等.整体叶盘制造工艺技术综述[J].航空制造技术,2012(3):26-31.
SHI Yaoyao, DUAN Jihao, ZHANG Junfeng, et al. Overview of Blisk Manufacturing Technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(3):26-31.
- [3] 陈晓兵,廖文和,戴宁,等.利用调和映射的复杂网格曲面螺旋刀轨生成算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2012,24(11):1399-1404.
CHEN Xiaobing, LIAO Wenhe, DAI Ning, et al. An Algorithm for Constant Scallop-height Tool Path Generation for Triangular Mesh Surface Machining [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(11):1399-1404.
- [4] SUN Yuwen, GUO Dongming, WANG Haixia, et al. Iso-parametric Tool Path Generation from Triangular Meshes for Free-form Surface Machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(7):721-726.
- [5] ZOU Qiang, ZHAO Jibin. Iso-parametric Tool-path Planning for Point Clouds [J]. Computer-Aided Design, 2013, 45:1459-1468.
- [6] SUN Yuwen, XU Jinting. Smooth Tool Path Generation for 5-axis Machining of Triangular Mesh Surface with Nonzero Genus [J]. Computer-Aided Design, 2016, 79:60-74.
- [7] HU Pengcheng, CHEN Lufeng, TANG Kai. Efficiency-optimal Iso-planar Tool Path Generation for Five-axis Finishing Machining of Freeform Surfaces [J]. Computer-Aided Design, 2017, 83:33-50.

- [8] XU Jinting, SUN Yuwen, WANG Shunke. Tool Path Generation by Offsetting Curves on Polyhedral Surfaces Based on Mesh Flattening[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(9):1201-1212.
- [9] LIN Zhiwei, FU Jianzhong, SHEN Hongyao, et al. A Generic Uniform Scallop Tool Path Generation Method for Five-axis Machining of Freeform Surface[J]. Computer-Aided Design, 2014, 56: 120-132.
- [10] 曹利新, 马晓嘉. 五坐标加工整体叶轮粗加工刀位规划[J]. 大连理工大学学报, 2008, 59(1):68-73. CAO Lixin, MA Xiaojia. Five-coordinate Machining Integral Impeller Roughing Tool Position Planning [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 59(1):68-73.
- [11] 王伟. 整体叶盘高效摆线粗加工路径规划及实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021. WANG Wei. Planning and Experimental Study on High-efficiency Cycloidal Roughing Path of Integral Blisk[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [12] HAN F Y, ZHANG D H, LUO M, et al. An Approach to Optimize the Tilt Angle of Indexable Table for Nonorthogonal Four-axis Milling of Impeller[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(9/12):1893-1904.
- [13] 曾巧芸, 王宏涛, 闫波. 整体叶轮五轴数控粗加工刀位轨迹规划[J]. 应用科技, 2012, 39(4):42-46. ZENG Qiaoyun, WANG Hongtao, YAN Bo. Trajectory Planning of Five-axis CNC Roughing Tool Position of Integral Impeller[J]. Applied Science and Technology, 2012, 39(4):42-46.
- [14] CHANG L C, YOUNG H T. Integrated Rough Machining Methodology for Centrifugal Impeller Manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34, 1062-1071.
- [15] PATRIKALAKIS N M, MAEKAWA T. Shape Interrogation for Computer Aided Design and Manufacturing[M]. Berlin: Springer, 2002.
- [16] 吴宝海, 韩飞燕, 杨建华, 等. 叶轮流道非正交四轴加工的刀轴控制方法[J]. 中国机械工程, 2012, 23(21):2546-2551. WU Baohai, HAN Feiyan, YANG Jianhua, et al. Cutter Axis Control Method for Non-orthogonal Four-axis Machining of Impeller Channel[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(2):143-146.

(编辑 袁兴玲)

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, 高档数控机床与数控系统, 机器人控制与机器人加工, 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。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, 软件机器人与柔性电子3D打印。E-mail: tianxiaqing@hfut.edu.cn。

本文引用格式:

韩江, 张文强, 田晓青, 等. 基于参数映射的开式整体叶盘流道铣削路径生成方法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(4):688-696. HAN Jiang, ZHANG Wenqiang, TIAN Xiaoqing, et al. Generation Method of Milling Paths of Open Blisk Channels Based on Parameter Mapping[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4):688-696.

(上接第 687 页)

- [16] 周续. 环形薄壁零件铣削过程动态响应预测与控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016. ZHOU Xu. Research on Dynamic Response Prediction and Control in the Milling Process of Ring-shaped Thin-walled Parts[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [17] LI Shikang, ZHAN Danian, SUN Shuoxue, et al. Dynamics Modeling and Simultaneous Identification of Force Coefficients for Variable Pitch Bullnose Cutter Milling Considering Process Damping and Cutter Runout[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 130: 2877-2898.
- [18] 王海艳, 周秩同, 武晔, 等. 基于斜角切削理论的钛合金螺旋铣孔切削力建模[J]. 中国机械工程, 2023, 34(2):142-147. WANG Haiyan, ZHOU Zhitong, WU Ye, et al.

Modeling of Cutting Force in Helical Milling of Titanium Alloys Based on Oblique Cutting Theory [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(2): 142-147.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 齐书韬, 男, 1996年生, 博士研究生。研究方向为难加工材料航空构件高质高效加工技术。E-mail: qst1012@163.com。孙玉文* (通信作者), 男, 1971年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为数字化制造与数控加工技术。E-mail: ywsun@dlut.edu.cn。

本文引用格式:

齐书韬, 李佳奇, 郑书材, 等. 不等前角变螺旋圆弧立铣刀瞬时铣削力建模与系数标定方法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(4):681-687. QI Shutao, LI Jiaqi, ZHENG Shucui, et al. Instantaneous Milling Force Modeling and Coefficient Calibration Method of Variable Helical Circular-arc End Mills with Unequal Rake Angle[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4):681-687.