

叶片微织构数控加工无干涉刀轴生成方法研究*

魏盼¹, 张臣¹, 宋云², 徐琰¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 中国直升机设计研究所, 景德镇 333000)

[摘要] 随着仿生表面工程技术的发展, 微织构减阻、耐磨等众多优良的表面性能被越来越多的研究证实, 但其应用推广却一直受到复杂低效的制造技术的限制。数控加工作为一种高效自动化的加工手段, 能有效解决零件形状复杂、精度要求高等问题。针对叶片微织构的数控加工技术, 提出了一种无干涉刀轴生成方法。该方法首先通过提取微织构模型引导线或偏置微织构表面求交线获得刀具路径曲线; 然后在刀具路径曲线上每个刀心点处, 根据一定规则建立局部坐标系和参考平面; 紧接着在参考平面内根据叶片干涉情况、机床旋转轴行程以及刀具参数信息求解出该刀心点处的刀轴可摆动区域; 最后根据最安全原则生成无干涉的刀轴矢量。以一叶轮叶片为案例, 利用 NX Open C++ 二次开发技术结合 VERICUT 仿真, 成功验证了无干涉刀轴生成方法的正确性, 为叶片微织构的高效数控加工提供了技术方法支撑。

关键词: 叶片微织构; 刀轴矢量; 干涉碰撞; NXOpen C++ 二次开发; 数控加工

Research on Generation Method of Collision-Free Tool Orientation for Numerical Control Machining of Blade Micro-Texture

WEI Pan¹, ZHANG Chen¹, SONG Yun², XU Yan¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China;

2. AVIC Helicopter Design Institute, Jingdezhen 333000, China)

[ABSTRACT] As the development of bionic surface engineering technology, many excellent surface properties of micro-texture surface have been confirmed by more and more research, such as drag reduction and wear resistance. But its application and promotion have been limited by complex and inefficient manufacturing techniques. As an efficient and automatic processing method, CNC machining can effectively adapt to the processing of complex shape parts and meet the requirements of high precision. Aiming at the numerical control machining technology of blade micro-texture, a collision-free tool axis generation method is proposed. The method first obtains a tool path curve by extracting a micro-texture model guide line or intersection line of offset surface of micro-texture surface and smooth blade surface. Then, at each tool point on the tool path curve, a local coordinate system and a reference plane are established according to certain rules. Next, in the reference plane, the oscillating region of the tool axis at the tool point is solved according to the blade interference condition, the machine rotation axis travel and tool parameters. Finally, the collision-free tool axis vector is generated according to the safest principle. Taking an impeller blade as an example, the NXOpen C++ secondary development technology and VERICUT simulation successfully verified the correctness of the collision-free tool axis generation method, and it provides technical support for the high-efficiency CNC machining of the blade micro-texture.

Keywords: Blade micro-texture; Tool orientation; Collision; NXOpen C++ secondary development; CNC machining

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.22.088

随着流体动力学知识的发展, 人们发现当物体表

* 基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20171415); 国家自然科学基金(51675277); 江苏省六大人才高峰项目(GDZB-011)。

面出现一定尺度的纹理时, 会呈现出特殊的流体动力特性^[1]。根据这一发现, 众多学者聚焦微织构的微观特性机理研究, 并通过大量的试验验证了微织构的减阻、

耐磨以及疏水等特性^[2-3]。随着微织构的有效应用,其高效的制造技术便成为微织构能否进一步推广的关键。

大自然中,生物表皮的微织构形状千奇百怪,但因设计和制造方式的局限,目前对微织构的研究仅限于简化的仿生微织构,如小的突起、沟槽和肋条。仿生微织构的制造主要利用激光、电子束和材料合成等现代特种加工技术^[4]。随着超声辅助切削技术的完善和刀具制备技术的发展,用传统切削加工的方法加工微织构成为许多学者研究的内容^[5-7]。但目前为止,大部分的仿生微织构加工均为二次加工,即完成传统的机械加工后再进行表面微织构加工,既降低了加工效率又增加了生产成本。此外以上很多方法都只能在平面或是一些简单的回转曲面上完成,因此具有一定的局限性。由于近年来五轴数控加工技术趋向完善,因此结合五轴数控技术,在复杂曲面上加工出微织构成为可能。

将设计的特殊形状与布局的微织构应用到发动机叶片表面上,会减小叶片表面与流体间的剪切力,改善流体在叶轮中的流场分布,从而减少因流体粘性阻力和不合理的湍流结构而造成的能量损失,使得发动机在相同的输出功率下消耗的能量更少,进而显著提升发动机的工作性能^[8]。由于微织构的尺度(具体表现为沟槽的深度或肋条的高度)较小,通常在0.5mm以下,与通常叶片厚度相比微乎其微,因此微织构对叶片强度影响很小。

目前大多数叶片表面采用自由曲面,曲率变化较大,且由于流道狭窄,因此利用五轴数控技术加工叶片微织构是不错的选择。但由于微织构在设计之初是由很多碎小曲面组成,其形貌特征尺寸微小且复杂,再考虑到叶轮叶片多变的型面特征,常规数控刀轴生成方法很难生成理想的刀轴。

对于光滑曲面部件加工,很多学者针对刀轴干涉进行了大量的研究。姬俊锋等^[9]研究了一类开式整体叶轮五坐标数控加工刀轴矢量规划问题,借鉴关键帧的思想,对选取的关键刀轴矢量利用样条函数进行插值,并证明了生成刀轴转动速度和加速度的连续性,但其关键刀轴矢量的计算基本是人工完成,效率低,对除关键刀轴矢量之外的刀轴是否发生干涉的判断以及对干涉后的处理较为粗糙,而且工件坐标系下的刀轴矢量转动速度和加速度的连续并不能从根本上避免机床振动,改善加工表面质量。吴宝海等^[10]针对复杂曲面通道零件多轴加工的刀具优化选择问题,提出了一种通过离散刀轴可行域求解每个刀轴平面的临界刀轴避免干涉的方法,但没有对其他无干涉情况作处理。Tang等^[11]利用改进的启发式干涉检测算法,在有效检查干涉情况下减少了计算时间。尹周平等^[12]利用改进的可视锥计算方法,得到了刀轴的可行空间。Wang等^[13]利用C空间法求

解了给定切触点处无碰撞干涉刀轴摆动范围。

总的来看,上述有关无干涉刀轴生成的研究,除了各自的优劣势外,还有如下两个共同的特点:(1)最终计算的刀轴可行域是类似锥形的空间区域,如图1所示;(2)加工对象都是针对于相对光滑的曲面且曲面一般具有统一的参数分布。以上特点决定了一般的无干涉刀轴生成方法不适合曲面上复杂微织构的加工。

首先,当利用五轴数控技术加工微织构时,由于刀具的刃角半径和微织构尺寸相当,刀刃往往要嵌入到微织构之间进行切削。譬如沟槽类型的微织构,就会选择刃角半径和沟槽宽度相当的刀具,这样刀具便能嵌入沟槽单行走刀完成加工,如图2所示。因此这种情况下,每个插补点的刀轴可摆动区域是一扇形平面区域(图1(a))而不是圆锥形空间区域,也就是说,微织构加工时,刀轴在考虑全局干涉时也要考虑此刻微织构的走向。其次,微织构曲面由很多曲面拼接而成,没有统一的参数化,因此当用上述刀轴计算方法时,刀具轨迹走刀方向经常发生突变,微小的加工段会引起刀具运动的不平稳,生成的刀轴复杂多变,如图1(b)所示。另一方面,当加工连续起伏的微织构区域时,若采用分区域的加工方法会引起频繁的抬刀下刀动作,不仅会大大增加计算的复杂度并降低加工效率,而且这样的走刀方式也不符合原始型面的设计意图。

为解决曲面上复杂微织构的数控加工的上述难点与问题,本文提出了一种无干涉刀轴矢量生成方法。为方便论述,不失一般性,本文以如图3所示的整体叶轮自由曲面叶片上微型沟槽和肋条的加工为例。其中,肋条型织构截面形状为三角形,沟槽型织构截面形状为五边形。首先,提取微织构建模之初的扫掠引导线,或通过微织构表面偏置面求交线的方式,获得刀具刀心点要经过的刀具路径曲线;然后,在刀具路径曲线上的每个刀心点按照一定规则建立局部坐标系与刀轴摆动参考平面;紧接着在参考平面内根据叶片干涉情况和机床旋转轴行程求解出该刀心点处的刀轴可摆动区域;最后根据最安全原则生成无干涉的刀轴矢量。本文最后利用

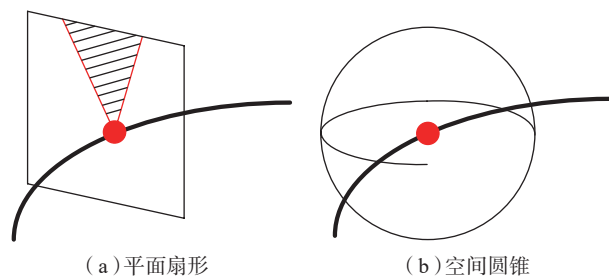


图1 刀轴可摆动区域

Fig.1 Tool axis feasible domain

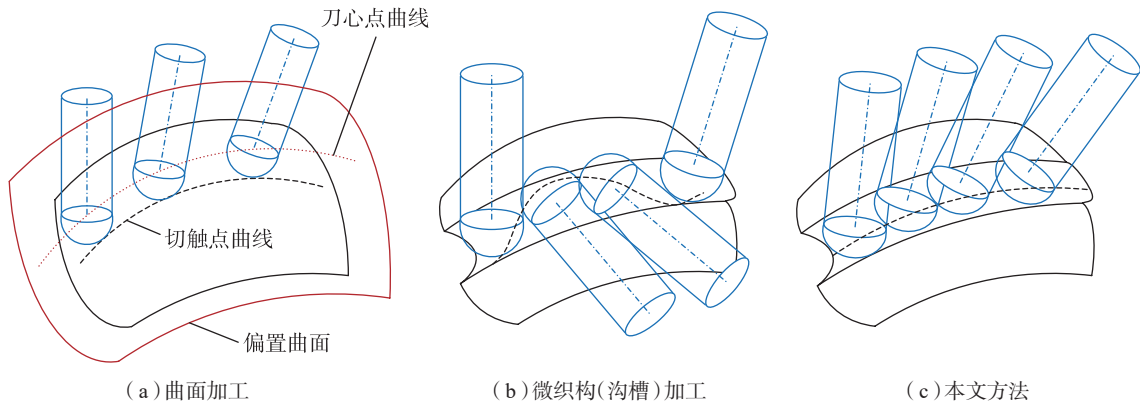


图2 现有NX11.0 CAM模块和本文方法编制的刀轨对比的示意图

Fig.2 Comparison between tool paths generated by common NX11.0 CAM model and method of this paper

NXOpen C++ 二次开发技术结合 VERICUT 加工仿真, 验证无干涉刀轴生成方法的正确性, 为叶片微织构的高效数控加工提供技术方法支撑。

1 单个刀心点刀轴可摆动区域求解

单个刀心点刀轴可摆动区域求解包含以下几个步骤:(1)将微织构模型引导线或微织构表面一定距离的偏置面的交线作为刀具路径曲线;(2)根据刀具路径曲线、加工方向以及原光滑叶片曲面信息,在刀心点处建立局部坐标系;(3)根据微织构相对叶片表面的倾斜程度,在局部坐标系中建立参考平面;(4)推导刀轴矢量与旋转轴坐标的运动变换关系方程;(5)根据当前加工叶片、相邻叶片以及刀具参数信息,在参考平面内求解临界刀轴矢量。

1.1 刀具路径曲线的提取

如图4所示,若忽略刀具形状尺寸与微织构尺寸差造成的工艺性误差,当分别加工沟槽和肋条类型的微织构时,只需要指定刀心点 CC 以及刀轴矢量 k 就可以很理想地对微织构 a 、 b 、 c 等表面进行加工。因此,在加工

每条微织构时,只需指定一条刀心点应该经过的曲线,然后根据一定规则在曲线上生成若干刀心点,在每个刀心点计算其刀轴矢量,最终生成微织构数控加工的刀具轨迹,这条曲线就是刀具路径曲线。

刀具路径曲线的提取主要有两种方法。(1)将微织构建模之初,其截面形状的引导线作为刀具路径曲线,如图5(a)所示,或是将此引导线作一定偏置得到,偏置距离根据切削用量以及微织构尺寸计算得到;(2)将原光滑叶片表面和微织构表面偏置刀刃半径的距离,再

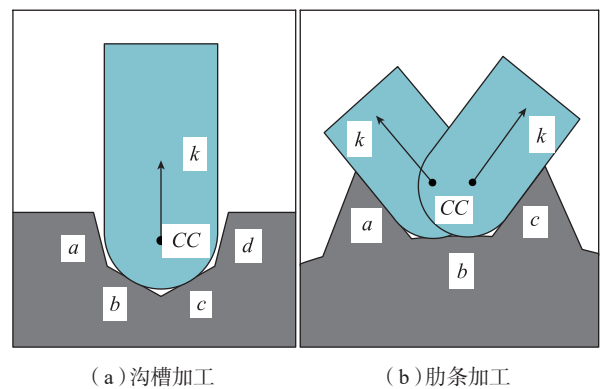


图4 球头刀铣削微织构表面示意图

Fig.4 Diagram of ball-end tool milling micro-structure surface

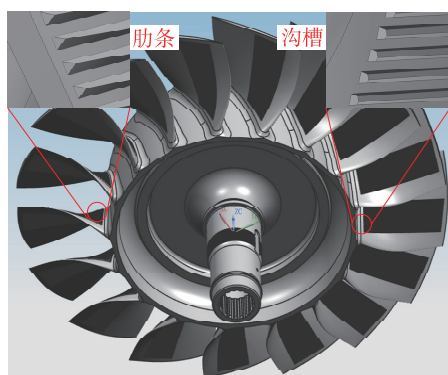


图3 无整流罩整体叶轮叶片微织构示意图

Fig.3 Diagram of micro-texture impeller blades without fairing

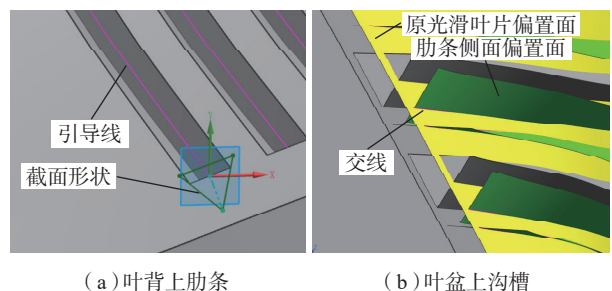


图5 刀具路径曲线提取方法示意图

Fig.5 Diagram of extraction method of tool path curve

作偏置面的交线,此交线作为刀具路径曲线,如图5(b)所示。

1.2 局部坐标系的建立

刀具路径曲线确定后,再按照等弧弦差生成一系列刀心点。设某条加工刀具路径曲线上共有 n 个刀心点,其中一个为 $CC_i, i=1, 2, \dots, n$,该刀心点对应的单位刀轴矢量为 k_i 。根据整体叶轮尺寸和要加工的微织构尺寸,选择一刀角半径为 r ,刃长为 l_c ,刃径到柄径过渡的半圆锥角为 θ ,刀柄半径为 R 的通用小径圆锥球头刀,如图6所示。值得说明的是,数控加工时机床执行代码中的刀位点是刀心点的坐标,在设置一定的刀具长度补偿后,机床对刀心点进行插补,因此在刀轴摆动的过程中不会出现非线性误差。

如图7所示,以当前刀心点 CC_i 为原点,刀具路径

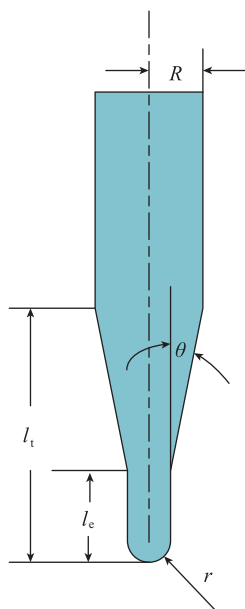
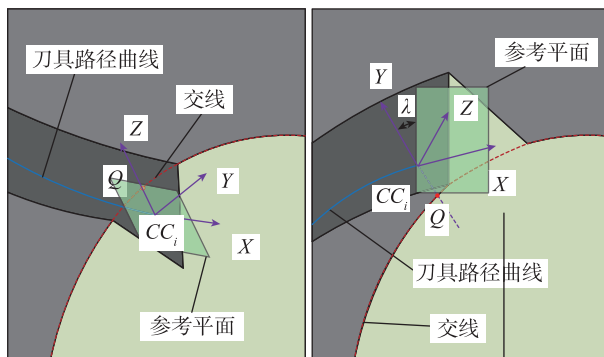


图6 微织构数控加工通用刀具

Fig.6 CNC machining universal tool for micro-texture surface



(a) 沟槽

(b) 肋条

图7 刀心点X轴垂直截面示意图

Fig.7 Diagrams of X plane at tool center point

曲线上该刀心点处的单位切矢 t 为 X 轴,设:

$$e_x = t \quad (1)$$

过刀心点 CC_i 作垂直于 X 轴的截面,该截面和原光滑叶片表面有一交线,局部坐标系的 Z 方向就是该交线经过刀心点 CC_i 的法线方向,法线与交线的交点,即垂足为 Q ,设:

$$e_z = \pm \frac{\overline{CC_i Q}}{|CC_i Q|} \quad (2)$$

e_z 指向叶片外方向,若设:

$$e_y = e_z \times t \quad (3)$$

则 e_y 方向就是 Y 轴方向。至此,局部坐标系建立完成。

1.3 参考平面的建立

参考平面就是刀轴在该刀心点处可摆动扇形区域所在的平面。根据微织构特征,该参考平面一般是上述局部坐标系的 XOZ 平面,或是以 XOZ 平面为基面,围绕 X 轴旋转一定角度 λ 形成的平面,如图7所示。对于沟槽类型的微织构,一般是 XOZ 平面;对于肋条类型的微织构, λ 通常为肋条顶角的一半。这样,刀轴的摆动就不会对微织构的侧面造成过切。

为方便论述,不失一般性,本文以德玛吉 ULTRASONIC 20 linear 型号 AC 轴双摆台机床为例。假设加工前机床坐标系和工件坐标系的对应变换矩阵为 T_{WM} ,旋转轴坐标为 $(0, 0)$,加工后旋转轴坐标为 (A, C) ,则易得工件坐标下的刀轴矢量与机床坐标系下的旋转轴坐标的运动变换关系为:

$$k = \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \\ 1 \end{pmatrix} = T_{WM} \begin{pmatrix} \cos C & -\sin C & 0 & 0 \\ \sin C & \cos C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A & 0 \\ 0 & \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = T_{WM} \begin{pmatrix} \sin A \sin C \\ -\sin A \cos C \\ \cos A \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

1.4 临界刀轴矢量的求解

一般情况下,某刀心点 CC_i 所在的参考平面与当前待加工曲面和潜在干涉曲面分别相交于不同的两条曲线,如图8(a)所示。 C_1, C_2 为参考平面与当前待加工曲面和潜在干涉曲面外偏置面的交线,偏置距离为刀柄半径 R 。 I_1, I_2 分别为交线 C_1, C_2 上的动点。点 E 为图3中 YOZ 平面与交线 C_1 的交点。

若设单位矢量:

$$m = \frac{\overline{CC_i I_1}}{|CC_i I_1|} \quad (5)$$

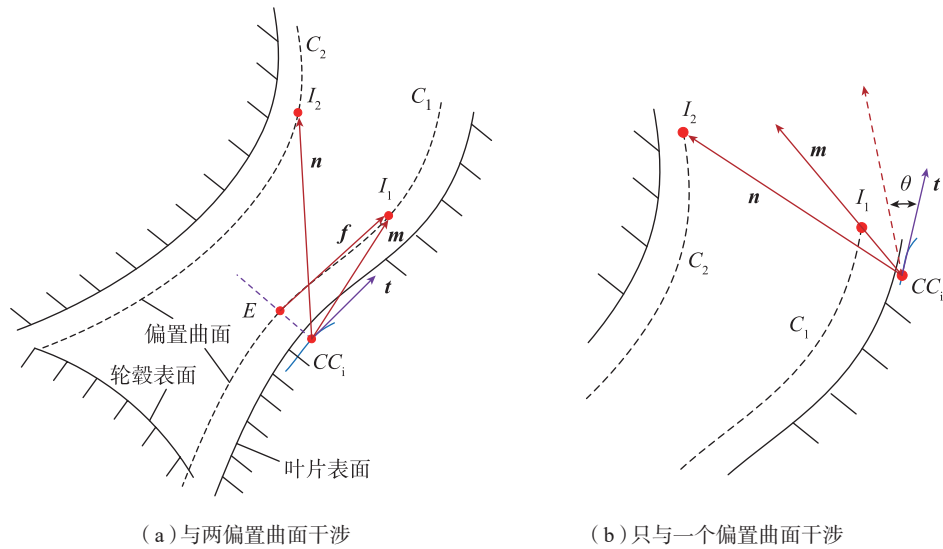


图8 临界刀轴确定示意图
Fig.8 Diagrams of limit tool axis

$$n = \frac{\overline{CC_i I_2}}{|\overline{CC_i I_2}|} \quad (6)$$

$$f = \frac{\overline{EI_1}}{|\overline{EI_1}|} \quad (7)$$

则干涉面一侧的临界刀轴矢量 a_2 应满足:

$$\theta < \arccos(n \cdot t) < \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

$$\min\{\arccos(n \cdot t)\} \quad (9)$$

这是因为不仅要控制刀轴向刀具进给的方向上倾斜,防止出现齿根切入现象,还要控制刀轴与刀心点失间的夹角要大于刀具的半圆锥角 θ ,防止局部干涉。

在求得临界刀轴矢量 a_2 后,同理可得出待加工曲面一侧的临界刀轴矢量 a_1 应满足:

$$\theta < \arccos(m \cdot t) < \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

$$\min\{\arccos(f \cdot a_2)\} \quad (11)$$

另外,根据式(10)和(11)确定的临界刀轴矢量 a_1 ,若在交线 C_1 的端点处取得,如图8(b)所示,若此时刀具柄径以下的过渡长度 l_i (图6)大于 $|CC_i I_1|$ 距离,则将与此处刀具前进方向上成 θ 角度的方向作为最终的临界刀轴矢量 a_1 ,如图8(b)中的红色虚线所示。

至此,一般情况下的临界刀轴矢量计算完成。但实际上,参考平面可能只与待加工曲面相交,也就是参考平面与相邻叶片没有交集,或者即使有交线,但经过上述计算得到的临界刀轴矢量代入到式(4)求得的旋

转轴坐标超出机床行程限制,这种情况下,就将该参考平面内旋转轴极限位置对应的刀轴矢量作为临界刀轴矢量。

综上所述,临界刀轴矢量的求解过程包含以下步骤。

第1步:分别将当前加工叶片和相邻潜在干涉叶片原光滑曲面向外偏置刀柄半径 R 的距离;

第2步:求参考平面与第1步中的偏置曲面的交线;

第3步:如果第2步中参考平面与相邻潜在干涉叶片原光滑曲面的偏置面没有交线,则根据式(4)确定 a_2 ; 否则,根据式(5)、(6)、(7)、(8)、(9)计算出一刀轴矢量,并代入式(4)验证是否超出旋转轴行程,没超出就将此矢量作为相邻潜在干涉叶片一侧的临界刀轴矢量 a_2 , 否则根据式(4)确定 a_2 。

第4步:根据式(10)和(11)计算出的一刀轴矢量,如果经过第2步中当前加工叶片一侧的交线的端点,则比较此端点与当前刀心点距离 $|CC_i I_1|$ 与刀具过渡段长度 l_i 的大小,若 $|CC_i I_1|$ 大,进行下一步; 否则,将与此处刀具前进方向上成 θ 角度的方向矢量取代计算出的刀轴矢量。

第5步:将第4步中计算出的刀轴矢量代入式(4)验证是否超出旋转轴行程,没超出就将此矢量作为相邻潜在干涉叶片一侧的临界刀轴矢量 a_1 , 否则根据式(4)确定 a_1 , 临界刀轴矢量求解结束。

最终,该刀心点对应的刀轴可摆动区域中的刀轴矢量可表示为:

$$k_i = t a_2 + (1-t) a_1, t \in [0, 1] \quad (12)$$

2 刀轴矢量生成

根据第 1 节的方法,单个刀心点刀轴的可摆动区域计算完成。但是在实际加工中出于安全因素,一般不会让刀轴摆到临界刀轴矢量的极限位置。本文出于最安全的刀轴矢量设置原则,取两个临界刀轴矢量的二分之一角,即刀轴的可摆动区域的中间位置作为该刀心点最终的刀轴矢量,即:

$$k_i = \frac{a_1 + a_2}{|a_1 + a_2|} \quad (13)$$

同理,最终计算出全部 n 个单位点的刀轴矢量 k_i , $i=1, 2, \dots, n$, 如图 9 所示。

3 实例分析与验证

本文以数控加工如图 3 所示的无整流罩整体叶轮叶片微织构为例(叶轮模型与实际相比缩小 3 倍)。叶轮直径约为 110mm。微织构沟槽截面是正三角形,深度约为 0.2mm,位于叶片压力面前半部分,方向大致垂直于流体流向;微织构肋条截面也是正三角形,高度约为 0.3mm,位于叶片吸力面一侧,前半部分的肋条方向大致垂直于流体流向,后半部分则大致平行于流体流向。根据微织构的尺寸,本文选择用刃角半径 $r=0.2\text{mm}$ 、刃长 $l_c=0.4\text{mm}$ 、过渡段半圆锥角 $\theta=15^\circ$ 、刀柄半径 $R=3\text{mm}$ 的球头刀加工沟槽,选择用刃角半径 $r=0.3\text{mm}$ 、刃长 $l_c=0.6\text{mm}$ 、过渡段半圆锥角 $\theta=15^\circ$ 、刀柄半径 $R=4\text{mm}$ 的球头刀加工肋条。本案例中,选择德玛吉 ULTRASONIC 20 linear 型号 AC 轴双摆台机床,其旋转轴 A 轴的最大转角设为 120° 。

利用 NXOpen C++ 二次开发技术,结合上述无干涉刀轴矢量生成方法,将上述曲面、刀具和机床信息输入到如图 10 所示的对话框中后,选取其中一条刀具路径曲线,可以看出生成的刀轴矢量没有和叶片偏置面相交,从而避免了刀具与叶片发生全局干涉,而半圆锥角的设置避免了刀具与当前加工曲面的局部干涉。

将生成的刀轴矢量和刀位点以及机床信息导入到 VERICUT 中,加工仿真结果如图 11 所示。再对比图 3 中微织构的理论模型可知,在忽略刀具形状尺寸与微织构尺寸差造成的工艺性误差的情况下,沟槽和肋条表面基本轮廓形貌形成良好,并且在微织构刀具轨迹加工仿真过程中,没有出现碰撞、干涉等异常情况。仿真过程表明本文的无干涉刀轴生成方法可有效避免数控加工叶片微织构过程中刀具与工件的干涉。

图 12 是图 10 中沟槽和肋条加工是各个刀位点机床旋转轴 A、C 轴坐标以及加工前倾角的变化情况,从中可

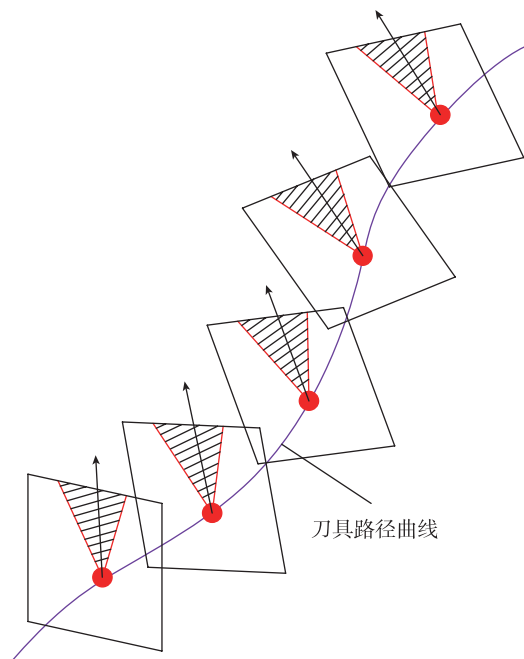
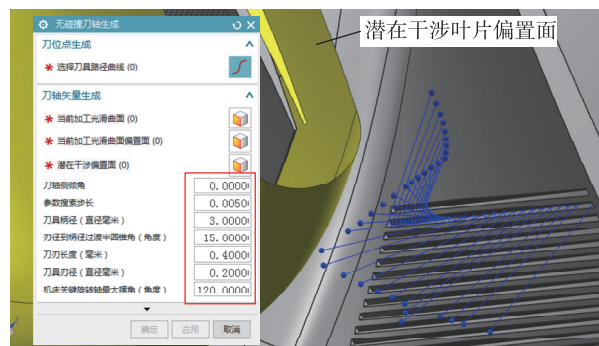
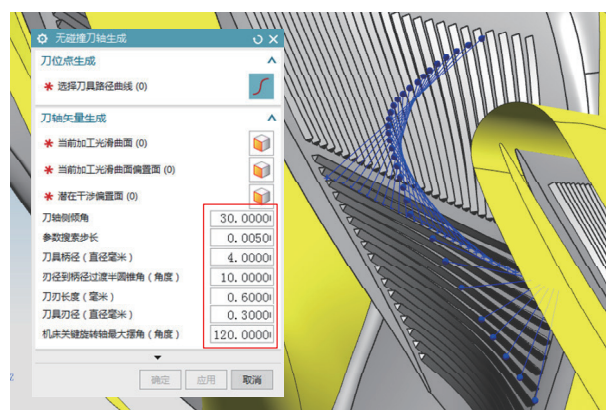


图9 刀轴矢量示意图

Fig.9 Diagram of tool axis vector



(a) 沟槽加工



(b) 肋条加工

图10 叶片微织构数控加工无干涉刀轴矢量生成实例

Fig.10 Example of free collision tool axis vector generation for micro-texture blade CNC machining

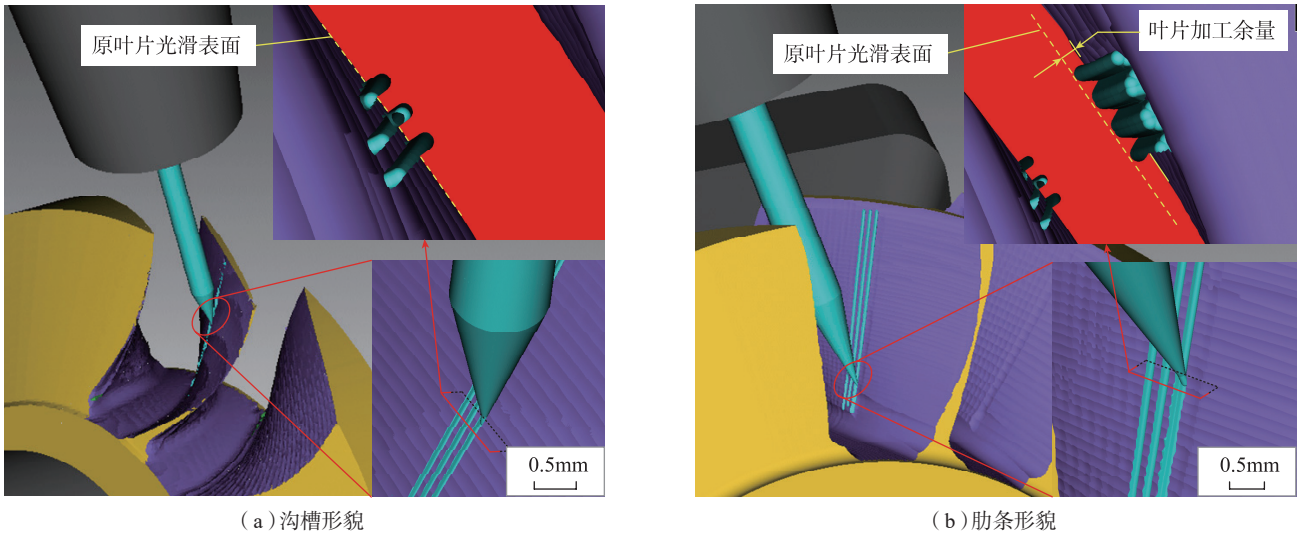


图11 VERICUT加工仿真结果
Fig.11 Result of VERICUT machining simulation

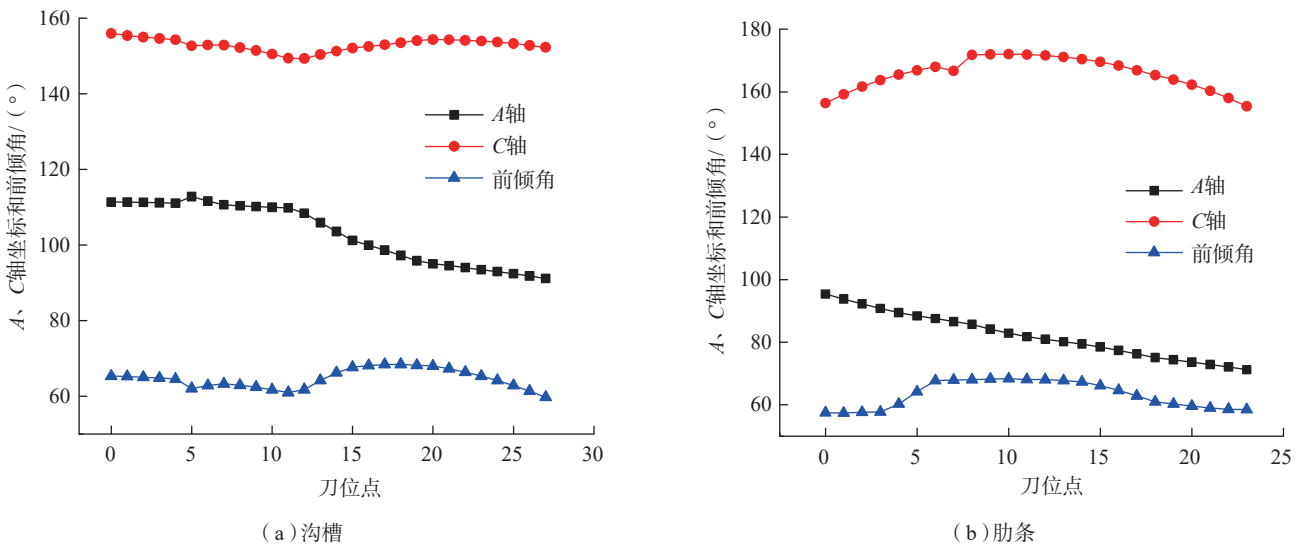


图12 微织构加工机床旋转轴以及刀具前倾角的变化情况
Fig.12 Change trend of machine rotation axis and tool forward angle for micro-texture surface CNC machining

以看出本文方法生成的无干涉刀轴矢量变化较为均匀。

4 结论

对于叶轮叶片微织构的数控加工,常规的曲面加工刀轴控制方法会对微织构侧壁产生局部干涉,且频繁的抬刀下刀操作会大大降低加工效率,导致刀轴的剧烈变化,造成表面加工质量下降。本文提出的叶片微织构数控加工无干涉刀轴生成方法能很好地解决上述问题,刀轴矢量生成不仅避免了刀具干涉,在一定程度上还满足光顺性要求。在忽略刀具形状尺寸与微织构尺寸差造成的工艺性误差的前提下,能够加工出良好

的微织构形貌,为叶轮叶片上微织构的数控加工提供了技术方法支撑。

参考文献

- [1] REIFW E, DINKELACKER A. Hydrodynamics of the squamation in fast swimming sharks[J]. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen, 1982, 164: 184-187.
- [2] RAAYAI-ARDAKANI S, MCKINLEY G H. Drag reduction using wrinkled surfaces in high reynolds number laminar boundary layer

(下转第101页)

参考文献

- [1] 白永红, 梁可, 周盛, 等. 基于MBD的飞机设计制造协同关联技术探讨[J]. 航空制造技术, 2015, 58(18): 40-44.
- BAI Yonghong, LIANG Ke, ZHOU Sheng, et al. Research on the cooperative association of aircraft design and manufacturing based on MBD [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(18): 40-44.
- [2] 李海泳, 唐秀梅, 亢亚敏, 等. 基于MBD技术的航空制造数字化工艺实施应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(13): 40-42.
- LI Haiyong, TANG Xiumei, KANG Yaming, et al. Research on the cooperative association of aircraft design and manufacturing based on MBD [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(13): 40-42.
- [3] 唐敦兵, 殷磊磊. 基于MBD的飞机-装配工装协同变更方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 718-726.
- TANG Dunbing, YIN Leilei. Research on the cooperative association of aircraft design and manufacturing based on MBD [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics Astronautics, 2017, 49(5): 718-726.
- [4] 魏志强, 王先逵, 吴丹, 等. 基于单一数据源的产品BOM多视图映射技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002(6): 802-805.
- WEI Zhiqiang, WANG Xiankui, WU Dan, et al. BOM multi-view mapping of product base on a single data source[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002(6): 802-805.
- [5] 陶剑, 范玉青. 成熟度在飞机研制一体化流程的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1117-1120.
- TAO Jian, FAN Yuqing. Application of maturity in development of aircraft integrated process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautical and Astronautics, 2006, 32(9): 1117-1120.
- [6] 朱海平, 苟坤, 何非, 等. 飞机装配制造执行系统关键技术研究及系统实现[J]. 航空制造技术, 2012, 55(15): 26-29.
- ZHU Haiping, GOU Kun, HE Fei, et al. Key technology of aircraft assembly manufacturing execution system and its implementation [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(15): 26-29.
- [7] 朱海平, 杨馥铭, 何杰, 等. 飞机装配质量管理体系关键技术研究及系统实现[J]. 航空制造技术, 2015, 58(9): 26-30.
- ZHU Haiping, YANG Fuming, HE Jie, et al. Key technology of aircraft assembly quality management system and its implementation [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(9): 26-30.
- [8] 党卫兵, 蔡红霞, 俞涛, 等. 飞机AO工艺文件在Windchill MPMLink中的实现[J]. 现代制造工程, 2012(4): 67-72.
- DANG Weibing, CAI Hongxia, YU Tao, et al. The implementation of aircraft AO process document in Windchill MPMLink [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012(4): 67-72.
- [9] 贾晓亮, 张振明, 朱名铨, 等. 飞机制造工艺路线分工计划及BOM管理系统研究[J]. 机械设计与制造, 2003(1): 113-115.
- JIA Xiaoliang, ZHANG Zhenming, ZHU Mingquan, et al. Research of manufacturing process route planning and BOM management system oriented airplane manufacturing venture [J]. Machinery Design & Manufacture, 2003(1): 113-115.

通讯作者: 蒋敏, 研究员级高级工程师, 研究方向为制造业信息化, E-mail: jiang_min2000@163.com.

(责编 大漠)

(上接第94页)

- flows[J]. Physics of Fluids, 2017, 29(9): 1-16.
- [3] LI W, WEAVER J C, GEORGE V L. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function[J]. Journal of Experimental Biology, 2014, 217: 1656-1666.
- [4] MALSHE A, RAJURKA R K, SAMANT A, et al. Bio-inspired functional surfaces for advanced applications[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2013, 62: 607-628.
- [5] KIMG D, LOHB G. An ultrasonic elliptical vibration cutting device for micro V-groove machining: kinematical analysis and micro V-groove machining characteristics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 190: 181-188.
- [6] KIMG D, LOHB G. Machining of micro-channels and pyramid patterns using elliptical vibration cutting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49: 961-968.
- [7] MATSUMUR A T, TAKAHASHI S. Micro dimple milling on cylinder surfaces[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2012, 14: 135-140.
- [8] CLAUDIA C B, SCHULZ U. Shark skin inspired riblet coatings for aerodynamically optimized high temperature applications in aeroengines[J]. Advanced Engineering Materials, 2011, 13(4): 288-295.
- [9] 姬俊锋, 周来水, 安鲁陵, 等. 一类开式整体叶轮五坐标数控加工刀轴矢量生成及其光顺方法的研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(2): 202-206.
- Ji Junfeng, ZHOU Laishui, AN Luling, et al. Generation and the smoothing method of 5-axis NC machining tool orientation for the open integrated impeller[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(2): 202-206.
- [10] 吴宝海, 梁满仓, 张莹, 等. 复杂曲面通道多轴加工的刀具选择方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 117-124.
- WU Baohai, LIANG Mancang, ZHANG Ying, et al. Tool selection of multi-axis machining for channel parts with sculptured surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 117-124.
- [11] TANGT D, BOHEZEL J. A new collision avoidance strategy and its integration with collision detection for five-axis NC machining[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81: 1247-1258.
- [12] 尹周平, 丁汉, 熊有伦. 基于可视锥的可接近性分析方法及其应用[J]. 中国科学, 2003, 33(11): 979-989.
- YIN Zhouping, DING Han, XIONG Youlun. Accessibility analysis method based on visible cone and its application[J]. Science in China, 2003, 33(11): 979-989.
- [13] WANG N, TANG K. Automatic generation of gouge-free and angular velocity-compliant five-axis tool path[J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(10): 841-852.

通讯作者: 张臣, 教授, 博士, 研究方向为数字化设计与制造、加工过程仿真、超声椭圆振动辅助切削技术、减阻结构设计与制造技术, E-mail: meeczhang@nuaa.edu.cn.

(责编 大漠)