

引文格式: 朱燊, 李世军, 王文理. 基于重构曲面的整体叶盘叶根过渡区域精确搭接加工轨迹生成方法[J]. 航空制造技术, 2021, 64(18): 79-87.

ZHU Yu, LI Shijun, WANG Wenli. Precisely overlapping toolpath generation method for machining blade root transitional surface of blisk based on reconstructed surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(18): 79-87.

基于重构曲面的整体叶盘叶根过渡区域精确搭接加工轨迹生成方法*

朱 燊^{1,2,3}, 李世军^{1,2,3}, 王文理^{1,2,3}

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 复杂构件数控加工工艺及装备北京市重点实验室, 北京 100024;

3. 数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 提出一种基于曲面重构技术的叶根过渡区域加工轨迹的生成方法, 生成的加工轨迹由已加工区域边界向叶根圆角边界渐变过渡, 该加工轨迹与相邻区域的加工轨迹之间可实现精确搭接。该方法首先对已使用的加工轨迹进行分析, 得到一组用于代表已加工区域的点集, 并通过边界重构方法生成一条 NURBS 曲线作为该点集的边界。然后在已加工区域边界与叶根圆角边界之间插入多条过渡曲线, 并重构叶根过渡区域, 该区域即用于生成相应的加工轨迹。通过所提出的算法在某整体叶盘的叶根过渡区域实际加工中进行了应用, 加工后的叶根区域与已加工区域之间可实现曲面的光滑搭接。

关键词: 轨迹生成; 过渡区域; 数控加工; 整体叶盘; 搭接

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.18.079



朱 燊

高级工程师, 博士, 研究方向为数控加工编程技术, 整体叶盘、叶轮加工技术, CAD/CAM 软件及算法, 机器人智能加工技术。

航空发动机的整体叶盘的叶片采用五轴数控铣削的方式进行加工^[1]。首先选用曲率半径较大的刀具完成除叶片叶根附近区域以外的叶片中上侧区域的加工, 然后使用与叶根圆角半径相同的小直径球头刀铣削叶片叶根过渡区域。

叶片叶根过渡区域是指在叶片曲面上靠近叶根圆角的一段区域, 该区域内叶片曲面的 uv 参数线与叶根圆角边界线相交, 难以通过传统的轨迹规划方式生成光滑渐变的加工轨迹^[2]。现阶段, 叶根过渡区域的加工通常采用球头刀具进行点铣, 并通过

偏置清根轨迹来生成过渡区域的加工轨迹。对于清根加工轨迹, 蔡永林等^[3]在保持刀具与流道面和叶片面同时相切的情况下计算加工轨迹的刀尖径矢与刀轴矢量, 并生成无干涉加工轨迹。刘长明等^[4]在计算理论余量的基础上识别需清根的区域并生成加工轨迹。西北工业大学相关学者在基于点搜索技术的基础上, 提出了一系列的清根轨迹计算方法, 搜索出叶根圆角边界点并生成加工轨迹^[5-8]。Ren 等^[9]通过一组虚拟球确定清根区域边界以及刀具的切触点, 进而生成清根加工轨迹。此外, 对于

* 基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2017205A001); 中国航空制造技术研究院院基金项目(KS912053115)。

复杂曲面的侧铣加工, Gong 等^[10]提出的基于约束面的轨迹计算方法与 Li 等^[11]提出的球头锥鼓型刀具的轨迹生成算法都可生成加工叶根过渡区域的加工轨迹。然而,提出上述的清根加工轨迹生成算法的目的是加工叶根圆角,在叶根过渡区域的加工中,未考虑与相邻加工轨迹之间的搭接问题。

在精确搭接轨迹生成方面,贺英等^[12]通过调整刀轨驱动线的位置使圆环面刀具加工复杂曲面时的参数边界落在有效搭接区间内,进而实现加工轨迹的搭接。金曼等^[13]通过控制圆环面刀具的端点误差生成具有重复搭接区域的加工轨迹。Xu 等^[14]针对圆环面刀具端铣自由曲面提出双驱动线算法与 Zhu 等^[15]针对鼓形刀具侧铣自由曲面提出的双点接触算法也可以生成具有搭接效果的加工轨迹。然而这些方法生成的加工轨迹实现的是一次生成的多行加工轨迹之间的搭接,而非多次生成的不同加工轨迹之间的搭接。对于一次生成的多行轨迹,上述算法为了实现不同行轨迹之间的搭接,需要在每行轨迹计算的同时,计算该行轨迹对应的加工区域的边界,进而通过加工区域边界的搭接实现相邻两行轨迹之间的搭接。但是在目前算法和商用软件中,为了保持不同轨迹计算操作之间的独立性和高效性,并不生成某一轨迹计算操作对应的加工区域的边界,并且在执行某一个轨迹计算操作时不对其他轨迹计算操作的结果进行引用或参考,因此无法直接实现相邻轨迹之间的精确搭接。对于某些专用的叶片、叶盘加工编程软件或编程模块,在虚参数化功能的支持下,可附带实现相邻的球头刀螺旋加工轨迹之间的搭接,但不能实现鼓形刀加工轨迹与球头刀加工轨迹之间的搭接;在这些软件中,若针对叶根过渡区域单独生成其他拓扑形式的轨迹,则不能与已生成的螺旋加工轨

迹之间形成精确的搭接。其根本原因是没有识别并单独地划分出真实的叶根过渡区域,因而不能够单独地对该区域进行处理,并进而生成可搭接的加工轨迹。

在整体叶盘的叶片较短且叶片弯扭程度不大的情况下,可使用通用的 CAM 软件(如 UG NX 的叶盘叶片加工功能)或专用的 CAM 软件(如 Hypermill 等)计算加工叶片曲面的螺旋加工轨迹和平行加工轨迹。该功能在设置几何体的基础上,通过两种驱动方式规划叶片曲面的加工轨迹,一种是在叶肩面与流道面之间按比例插值生成轨迹,另一种是通过偏置流道面生成加工轨迹。但是,在流道面狭窄的情况下,该功能在叶根过渡区域处无法生成完整的加工轨迹,且加工轨迹的进刀点位置及刀轴矢量难以灵活控制。在目前的 CAM 软件中,叶根过渡区域的加工轨迹与叶身加工轨迹之间通常存在一定的重叠,重叠区域的叶片曲面将被重复切削,由于钛合金叶片加工中的回弹现象,重复切削区域的轮廓度一定会受到影响。由于航空发动机叶片的加工精度要求高,且叶片在加工中存在一定的变形,如果不能准确地搭接相邻区域的加工轨迹,极有可能导致叶片(尤其是叶片进排气边)的过切。此外,过多的重复切削也增加了不必要的加工轨迹,增加了零件的占机时间,影响了加工效率,增加了加工成本。因此,针对叶盘叶片加工过程中叶片上侧与叶根过渡区域使用不同

刀具或不同方法进行加工时产生的轨迹搭接问题,本研究提出一种生成精确搭接加工轨迹的方法。通过读入已使用的加工轨迹,识别已加工区域与未加工区域,并在此基础上进行未加工区域的曲面重构,进而生成相应的加工轨迹。

本研究首先给出了整体叶盘叶身已加工区域的识别技术;其次使用识别的已加工区域边界线与叶根圆角边界线重构出相应的叶根过渡区域;然后针对重构的加工区域进行轨迹规划与生成;最后,通过对某压气机整体叶盘的叶根过渡区域的加工试验来验证本研究提出的相应算法的效果。

面向叶根过渡区域曲面重构的边界求解方法

整体叶盘在叶根圆角上侧的叶片曲面可分为已加工区域与叶根过渡区域两个部分,如图 1 所示。已加工区域通常选用较大直径球头刀或具有复杂母线形状的鼓形刀具进行加工,叶根过渡区域通常采用小直径球头刀加工。

如图 1 所示,叶根过渡区域在上边界与下边界两条曲线之间,其中上边界是已加工区域的边界,下边界是叶根圆角与叶身曲面相交的边界线。本研究首先通过对使用的加工轨迹进行分析,找到已加工区域的离散点集,进而找到已加工区域的边界作为叶根过渡区域的上边界。然后处理叶根圆角的边界线,确定叶根过渡区

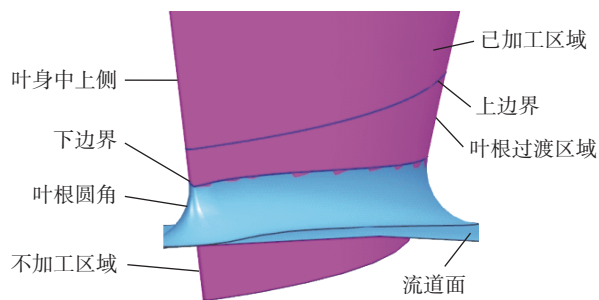


图 1 整体叶盘叶根过渡区域
Fig.1 Transitional surface of a blade on a blisk

特征点构成第 i 个刀位点的加工区域点集 $\{P_{Si}\}$ 。如式(5)所示,全部 n 个刀位点的点集的并集记为 $\{P_S\}$, $\{P_S\}$ 用于表征已加工区域。

$$\{P_S\} = \{P_{S1}\} \cup \{P_{S2}\} \cup \{P_{S3}\} \cdots \cup \{P_{Sn}\} \quad (5)$$

2 叶根过渡区域上边界求解

在获得点集 $\{P_S\}$ 的基础上,需要识别出点集的边界作为已加工区域的边界,进而在后续的轨迹规划中实现对已加工区域的搭接。由于点云的形状并不规则,点集并不一定是一个凸集,因此使用传统的三角剖分方法将无法获得有效边界。本研究针对叶片加工需求,在 uv 参数空间内使用基于包围盒的边界搜索算法寻找点集 $\{P_S\}$ 所代表的已加工区域。在搜索点集 $\{P_S\}$ 的边界的过程中,只需要寻找点集 $\{P_S\}$ 沿叶展方向的下侧边界,不需要寻找点集 $\{P_S\}$ 内的孔与上侧边界。

图5所示为使用文献[16]中所述边界搜索算法对边界点搜索后得到的结果。该搜索算法用于寻找 uv 参数域内的边界点。将边界点顺次连接后,得到一条由多段线组成的边界线。该边界线光滑性差,不能直接用来重构加工区域或规划加工轨迹。为了保证加工边界的光顺性,本研究在此基础上采用NURBS曲线对边界点进行插值,但直接插值后的曲线可能会超出原多段线边界的范围。

为了保证提取的区域边界都在多段线边界内,从而保证后续生成的加工轨迹与已加工的区域之间的精确搭接效果,需在插值生成边界曲线的基础上对曲线进行调整。本研究首先遍历多段线边界中的每一段,计算每段中插值边界超出多段线边界的距离 Δv ; 然后将该段边界线左右的点在参数域内向上移动 Δv , 作为新的边界点; 最后重新插值生成边界线。若新生成的插值边界线仍然有图5所示现象,则继续执行此过

程,直至插值后生成的NURBS边界曲线都在多段线边界内部为止。生成的已加工区域边界如图6所示,该边界是参数空间内的已加工区域的边界,其对应的三维空间内的曲线即是叶根过渡区域的上边界。

3 叶根过渡区域的下边界处理方法

叶根过渡区域的下边界是叶根圆角的边界线,下边界曲线与上边界曲线之间通常不具备统一的参数对应关系。如图7所示,为了避免重构的叶根过渡区域曲面的褶皱,首先将

叶根过渡区域的上边界与下边界曲线进行对齐。首先通过前一节求解出的上边界 $C_{BU}(t)$ 来重生成下边界 $C_{BD}(t)$, 并使叶片曲面 Σ_B 上的点 P_{BUi} 与点 P_{BDi} 在叶片的弦长方向(参数 u 方向)上具有相同的参数值,其中 $P_{BUi} = C_{BU}(t_i)$, $P_{BDi} = C_{BD}(t_i)$, $t_i \in \{t_0, t_1, \dots, t_n\}$ 。

对于图7所示的叶片模型,叶片沿叶展方向为参数 v 方向。首先采用等误差法将上边界 $C_{BU}(t)$ 离散为 n 个采样点 P_{BUi} , $i \in [1, n]$, 误差

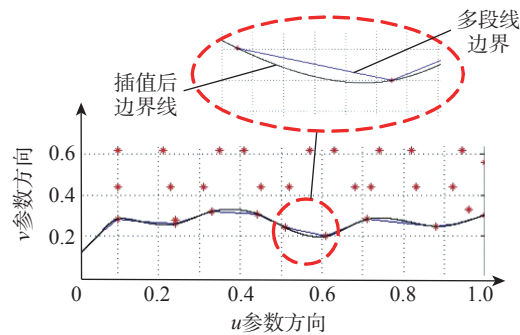


图5 已加工区域边界曲线构造

Fig.5 Constructing boundary for a machined surface

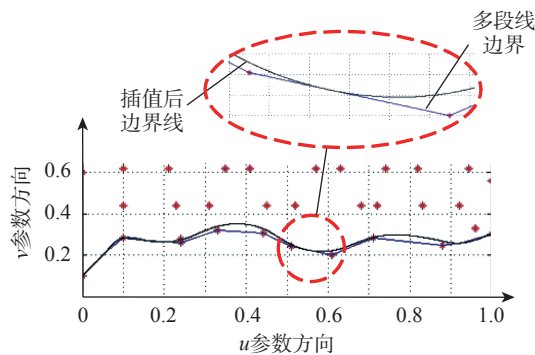


图6 加工区域边界曲线调整

Fig.6 Adjusting boundary for a machined surface

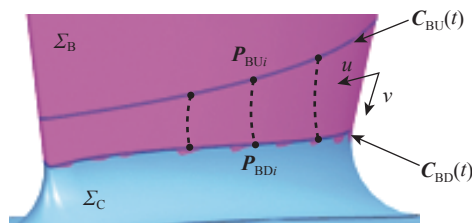


图7 加工区域边界寻找叶根圆角边界上的点

Fig.7 Finding points in boundary of a fillet corner which corresponds to points in boundary for a machined surface

值为 δ ;其次对于每个采样点,计算通过该点的等 u 线;然后求解等 u 线与原始叶根圆角 Σ_C 的交点 P_{BDi} ;最后通过插值 n 个 P_{BDi} 点重构下边界曲线。对于重构的下边界曲线 $C_{BD}(t)$,计算其与原始的叶根圆角边界线 C_{BD0} 之间的最大偏差 d_i ,若 d_i 小于预设值 ε 则采用此重构曲线作为边界,否则通过系数 ζ 减小 δ 的值,并重新执行此过程,如图8所示。

叶根过渡区域曲面重构与加工轨迹规划

在曲线 $C_{BU}(t)$ 与曲线 $C_{BD}(t)$ 的基础上,对叶根过渡区域进行重构,为了控制重构的曲面与原始曲面之间的偏差,可在曲线 $C_{BU}(t)$ 与曲线 $C_{BD}(t)$ 之间插入 m 条过渡曲线。如图9所示, P_{BUi}^{uv} 为曲线 $C_{BU}(t)$ 的采样点 P_{BUi} 在 uv 参数域内对应的

点, P_{BDi}^{uv} 为对应的曲线 $C_{BD}(t)$ 上的点 P_{BDi} 在 uv 参数域内的点。首先在 uv 参数域内计算点 P_{BUi}^{uv} 与点 P_{BDi}^{uv} 之间的 m 个插值点,然后计算相应插值点对应的工件坐标系下的点,遍历完曲线 $C_{BU}(t)$ 上的 n 个采样点后,得到 m 组过渡点,每组 n 个点。在此基础上生成的三维空间内的 m 组过渡曲线如图10所示。根据自由曲面建模理论^[17]及方法^[18],在 m 条曲线的基础上采用曲线串插值的方法生成重构的叶根过渡区域。由于此过渡区域的上边界是已加工区域的边界,下边界是叶根圆角边界,因此按照新生成的曲面规划的加工轨迹可实现与已加工区域的搭接且光滑地在两个边界之间过渡。

针对重构的叶根过渡区域,可采用球头刀或球头锥鼓形刀具进行加工,并采用等参数的方式规划加工轨

迹,加工轨迹沿重构的过渡区域的参数 u 方向,从而生成由已加工区域边界逐渐过渡至重构叶根边界的加工轨迹,如图11所示。

本研究所述方法的核心是构造过渡区域的曲面,过渡曲面构造后,可生成螺旋加工轨迹或按等参数方式生成等参数轨迹。在叶片较短或流道空间较开敞的情况下,可采用螺旋加工轨迹。在叶片弯扭情况复杂、流道空间狭小的情况下,应当分区生成等参数的加工轨迹,使刀具从叶盘叶片的侧面进刀完成叶根过渡区域的加工。

整体叶盘流道空间极其复杂,叶片叶根区域在排气边附近的径向流面角小,整个叶片沿发动机轴向的径向流面角变化幅度大,叶根过渡区域扭曲程度大,因而难以生成通用的螺旋加工轨迹。本研究所述方法正是

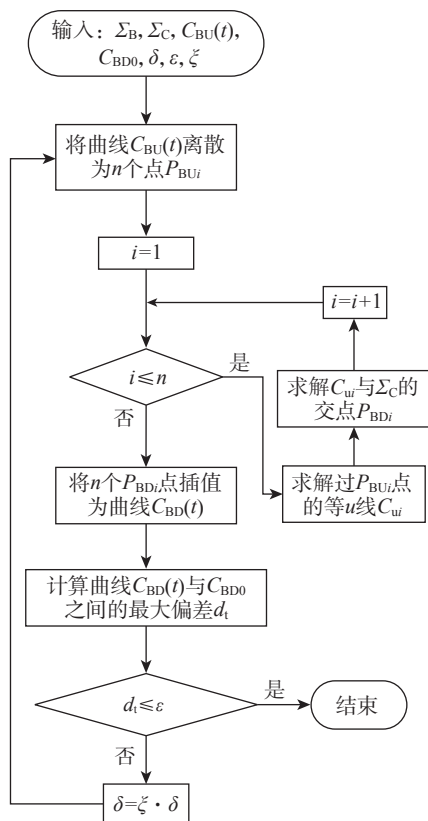


图8 叶根圆角边界曲线重构流程图
Fig.8 Flow chart for reconstructing boundary of a fillet corner

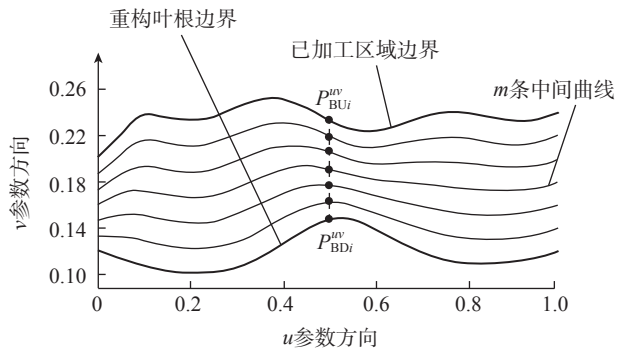


图9 uv 参数域内的过渡曲线
Fig.9 Transitional curves in uv -parametric region

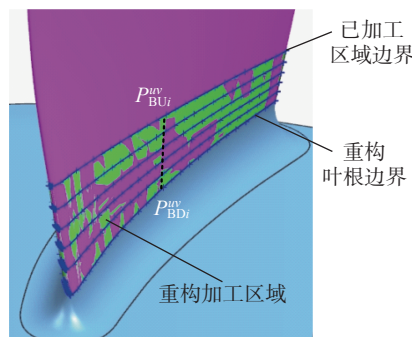


图10 基于过渡曲线的曲面重构
Fig.10 Reconstructing a surface with a group of transitional curves

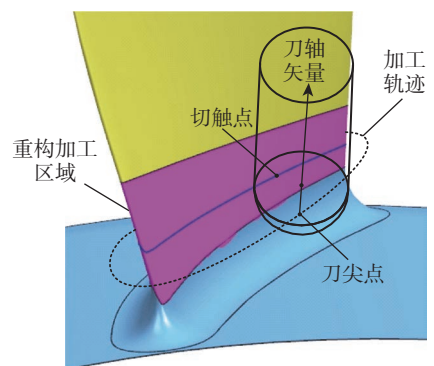


图11 重构曲面的加工轨迹生成
Fig.11 Tool path generation with a reconstruction surface

针对此类叶盘在实际加工中的工艺需求而设计的轨迹生成算法,在重构叶根过渡曲面后,分区域计算等参数加工轨迹,从叶盘叶片的进气侧或排气侧进刀,针对叶根过渡曲面扭曲较大的区域单独生成加工轨迹,进而完成相应区域的加工。

重构曲面上的点与原始设计曲面之间沿设计曲面的法向存在一定的偏差,该偏差值在远小于曲面的轮廓度公差的情况下可采用本方法直接加工重构曲面。目前,整体叶盘中叶片曲面轮廓度要求最高的区域为叶片进气边,为了保证加工后该区域的轮廓度,根据加工经验应当控制重构曲面与设计曲面之间的最大偏差值小于该轮廓度的 1/10。通常对于航空发动机的叶盘叶片来说,此时重构曲面与原始曲面之间的偏差值已远小于使用机床的 RTCP 精度,因而忽略曲面的理论偏差对加工后精度的影响。

重构的曲面通常不与原始曲面相切,在曲面光顺程度要求较高时,可将重构曲面作为驱动曲面,将原始叶片曲面作为加工曲面计算轨迹,从而保证加工后的叶根区域与已加工区域之间具有更好的搭接效果。后续的研究中也可通过相关方法^[19]调整重构后曲面的控制顶点及节点矢量来调整重构曲面,使其与原始曲面之间在边界处达到 G1 连续,从而进一步保证该区域的光顺性。

实例

通过某压气机叶盘叶根过渡区域的加工来验证算法的可行性。整体叶盘的叶片模型如图 12 所示,其叶片下侧通过一个 R2.5mm 的圆角与流道面相连,叶片高 60mm,相邻叶片之间的最近距离 12.1mm,叶片与加工刀具之间易产生干涉。

使用传统的 CAM 软件生成螺旋加工轨迹加工叶片叶身中上侧,加工中采用 $\phi 10$ 的球头刀。由于刀具

的刀头半径大于叶根圆角的半径,因而该刀具加工后将在叶片上留下未加工的区域。为此,首先采用本研究方法读入已生成的加工轨迹,得到加工区域的点集 $\{P_s\}$,并判断已加工区域的边界如图 13 所示。

图 14 为使用本研究算法重构的加工区域及生成的加工轨迹。在获取已加工区域边界曲线的基础上,首先生成参数对齐的加工区域上下边界曲线,随后在其内部插入 3 条曲

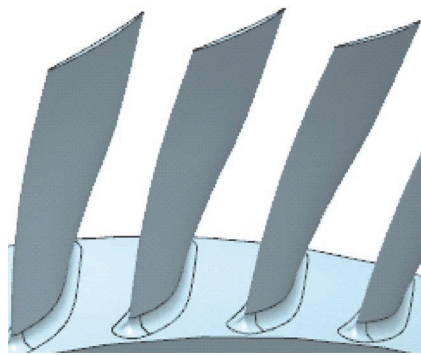


图 12 整体叶盘模型
Fig.12 A blisk model

线,最后通过这 5 条曲线重新生成由已加工区域边界至叶根圆角的叶根过渡区域。该区域将用于分区生成加工轨迹,并使用直径 $\phi 5$ 的球头刀具进行加工,加工后该区域的效果如图 15 所示。可知,使用重构的叶根过渡区域计算的加工轨迹,可实现叶根过渡区域与叶片中上侧已加工的区域之间的光滑搭接,并实现该区域与叶根圆角之间的光滑过渡。如图 16 (a) 所示,按等参数的方式从重构叶根区域上均匀取出 2000 个点 (40 行 \times 50 个 / 行),依据微分几何原理^[20]计算点到原始叶片曲面之间的法向距离,得到的法向偏差的最大值为 0.000548mm。叶根过渡区域在加工后通过三坐标测量机的 REVO 测头及相关软件进行了扫描测量与评价,叶片在该区域的截面线轮廓度合格,如图 16 (b) 所示。

图 17 (a) 为用原始叶片曲面规划的加工轨迹,由于叶根未加工区域的参数边界在参数 v 方向有较

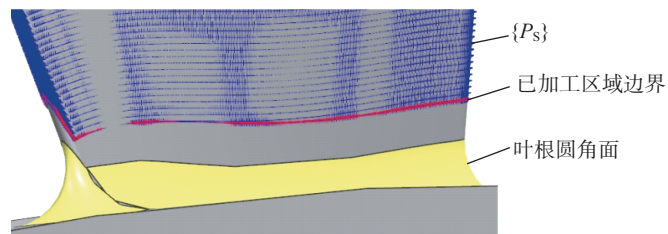


图 13 已加工区域边界识别
Fig.13 Boundary recognition for a machined surface

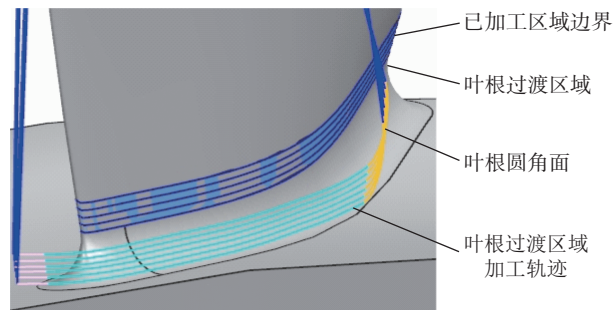


图 14 按本研究方法重构叶根过渡区域与生成轨迹
Fig.14 Surface reconstruction and tool path generation for a transitional surface using presented method

大的波动,在使用原始曲面规划加工轨迹时,为了覆盖整个未加工区域,需要根据未加工区域边界在参数 v 方向的最大值与最小值来确定

轨迹规划时使用的参数边界。由于在通常情况下叶片类零件的 uv 参数方向与叶根圆角的边界不平行,规划的加工轨迹将覆盖大量的重复

切削区域,而且会造成加工轨迹与叶根圆角边界相交的情况。生成的加工轨迹如图17(b)所示,在保证加工轨迹不过切叶根圆角面与流道面的情况下,生成的加工轨迹无法实现向叶根圆角边界的渐变过渡,进而生成了多条被干涉检查面(叶根圆角面)裁剪的加工轨迹,增加了空走刀与重复走刀的情况,降低了加工效率,且无法保证叶根圆角的加工质量。

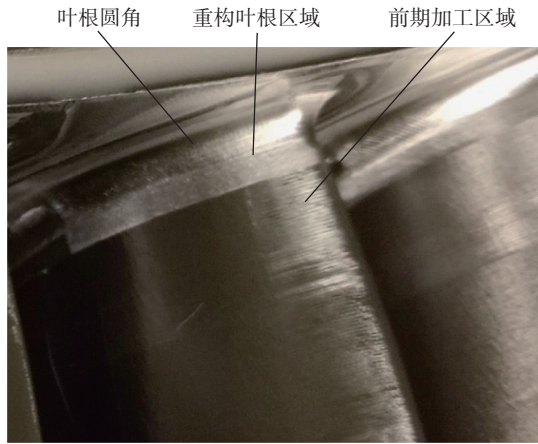
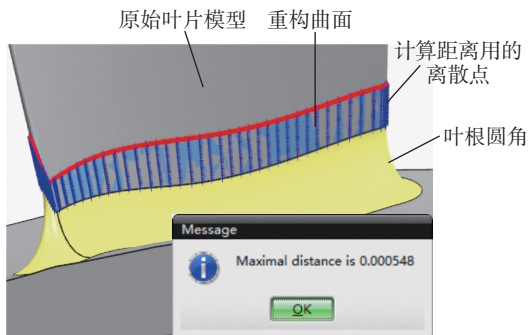


图 15 过渡区域加工效果

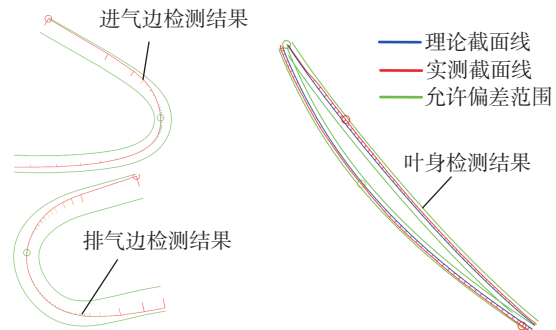
Fig.15 Machining result for a transitional surface

结论

(1) 针对整体叶盘叶根过渡区域的数控加工工艺需求,提出了一种重构叶根过渡区域从而进行加工轨迹规划与生成的方法,进行了相应的软件开发,并通过某叶盘试件的数控



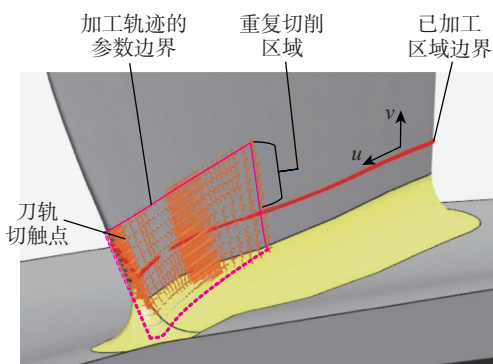
(a) 原始曲面与重构曲面的对比



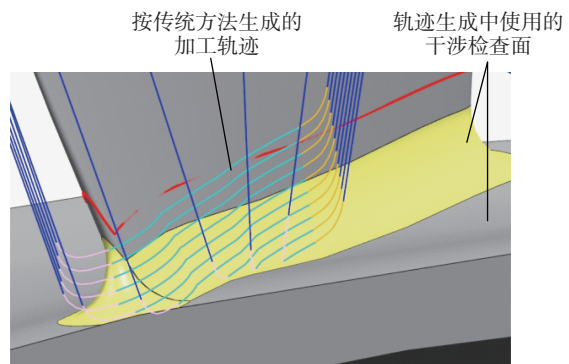
(b) 叶根过渡区域的截面线检测结果

图 16 叶根过渡区域曲面重构及加工结果

Fig.16 Surface reconstruction result and machining result of blade root transitional surface



(a) 规划的加工轨迹



(b) 生成的加工轨迹

图 17 使用传统方法计算的加工轨迹

Fig.17 Toolpaths generated for milling blade root transitional surface by traditional method

加工过程进行了验证。

(2) 提出的算法可准确识别已加工区域的边界,且生成光滑的边界曲线,从而在已加工区域边界与叶根圆角之间重构加工区域,因而可以生成具有精确搭接效果的加工轨迹。

(3) 提出的算法可保证已加工区域边界线与叶根圆角边界线的参数保持较好的一致性,从而保证重构的叶根区域与原始曲面之间的一致性。

(4) 对本研究所述算法进行了试算与加工试验,计算结果表明重构的叶根过渡区域与原始曲面之间的偏差小于 0.001mm,加工后的叶根区域与已加工区域之间可实现光滑搭接。

参考文献

- [1] LASEMI A, XUE D Y, GU P H. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review[J]. *Computer-Aided Design*, 2010, 42(7): 641-654.
- [2] 石巍, 宁涛, 陈志同. 环面工具加工叶根过渡曲面的刀位可行域[J]. *航空学报*, 2014, 35(12): 3470-3479.
- SHI Wei, NING Tao, CHEN Zhitong. Tool position feasible area of torus tool in machining blade root transitional surfaces[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(12): 3470-3479.
- [3] 蔡永林, 席光, 王尚锦. 叶轮加工中清根刀心轨迹的生成[J]. *机械设计*, 2001, 18(11): 37-40.
- CAI Yonglin, XI Guang, WANG Shangjin. The generation of cutter-center path during machining fillet of impeller[J]. *Journal of Machine Design*, 2001, 18(11): 37-40.
- [4] 刘长明, 闫光荣, 许鹤峰. 基于留量模型的自动清根技术的研究[J]. *工程图学学报*, 2001, 22(1): 39-46.
- LIU Changming, YAN Guangrong, XU Hefeng. The research of automatic clean-up tool-path generation based on stock-remaining model[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2001, 22(1): 39-46.
- [5] 李山, 马建宁, 罗明, 等. 基于点搜索的多曲面体清根轨迹生成方法[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(11): 1317-1320, 1325.
- LI Shan, MA Jianning, LUO Ming, et al. Clean-up tool path generation by searching-approach for multi-patch solid model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(11): 1317-1320, 1325.
- [6] 蔺小军, 王志伟, 张新鸽, 等. 基于点搜索组合曲面清根加工轨迹优化算法[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(19): 191-198.
- LIN Xiaojun, WANG Zhiwei, ZHANG Xinge, et al. Improved algorithm for clean-up machining of combinatorial-surface model based on point-searching method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(19): 191-198.
- [7] TANG M, ZHANG D H, LUO M, et al. Tool path generation for clean-up machining of impeller by point-searching based method[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25(1): 131-136.
- [8] LUO M, ZHANG D H, WU B H, et al. Clean-up tool-path generation for multi-patch solid model by searching approach[M]// *Global Design to Gain a Competitive Edge*, London: Springer, 2008.
- [9] REN Y F, YAU H T, LEE Y S. Clean-up tool path generation by contraction tool method for machining complex polyhedral models[J]. *Computers in Industry*, 2004, 54(1): 17-33.
- [10] GONG H, WANG N. 5-axis flank milling free-form surfaces considering constraints[J]. *Computer-Aided Design*, 2011, 43(6): 563-572.
- [11] LI T, CHEN W Y, XU R F, et al. Flank milling for blisk with a barrel ball milling cutter[J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 407-408: 202-206.
- [12] 贺英, 陈志同, 吴献珍. 复杂曲面宽行加工等参数线刀轨精确搭接方法[J]. *航空学报*, 2014, 35(4): 1142-1148.
- HE Ying, CHEN Zhitong, WU Xianzhen. Iso-parametric tool path overlapping method for sculptured surfaces in wide strip machining[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(4): 1142-1148.
- [13] 金曼, 张俐, 陈志同. 圆环面刀具五坐标加工端点误差控制刀位优化[J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(9): 1125-1128.
- JIN Man, ZHANG Li, CHEN Zhitong. End-points error controlling method for torus tool position optimization in five-axis NC machining[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(9): 1125-1128.
- [14] XU R F, CHEN Z T, CHEN W Y, et al. Dual drive curve tool path planning method for 5-axis NC machining of sculptured surfaces[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, 23(4): 486-494.
- [15] ZHU Y, CHEN Z T, ZHANG Y, et al. Tool positioning method for achieving double-point contact in flank milling of a concave surface with a barrel cutter[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(5-8): 1791-1807.
- [16] 陈涛, 李光耀. 平面离散点集的边界搜索算法[J]. *计算机仿真*, 2004, 21(3): 21-23, 63.
- CHEN Tao, LI Guangyao. A boundary searching algorithm for planar scatter data points[J]. *Computer Simulation*, 2004, 21(3): 21-23, 63.
- [17] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- SHI Fazhong. CAGD & NURBS[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [18] 莫蓉. 图表详解 UG NX 二次开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- MO Rong. Chart details UG NX secondary development[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.
- [19] 曲学军, 宁涛, 席平. B 样条曲面的光滑拼接[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(1): 138-141.
- QU Xuejun, NING Tao, XI Ping. Smooth joining between adjacent B-spline surfaces[J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(1): 138-141.
- [20] 梅向明, 黄敬之. 微分几何[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- MEI Xiangming, HUANG Jingzhi. Differential geometry[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2008.

Precisely Overlapping Toolpath Generation Method for Machining Blade Root Transitional Surface of Blisk Based on Reconstructed Surface

ZHU Yu^{1,2,3}, LI Shijun^{1,2,3}, WANG Wenli^{1,2,3}

- (1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2. Beijing Key Laboratory of NC Machining Technology and Equipment of Aero-Component, Beijing 100024, China;
3. Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technology, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] This paper presented a method to compute toolpaths for machining the transitional surface, which can gradually change from the boundary of the machined surface to the boundary of the fillet corner. The toolpaths generated by our method can precisely overlap the boundary of the region that has been machined. This method analyzed the toolpaths, which had been used, to find a group of points. These points were employed to represent the machined surface. Then a boundary extraction algorithm was employed to reconstruct a NURBS curve to represent the boundary of the point set. A group of curves were generated between the boundary of machined surface and the boundary of the fillet corner. Then those curves were applied to reconstruct the blade root transitional surface. And the surface was employed to generate relevant toolpaths. This method was applied to machining the blade root transitional surface of a blisk. The machining result indicated that the blade root transitional surface smoothly connected the upper region of the blade and the corresponding fillet corner after machining.

Keywords: Toolpath generation; Transitional surface; CNC machining; Blisk; Overlapping

(责编 阳光)

(上接第 78 页)

Multi-Objective Optimization of Slot Milling Process Parameters Based on Scallop Height Control

XU Weihong¹, SONG Weiwei², CHEN Lunwang³, HUANG Tao³, ZHANG Xiaoming³

- (1. AECC Nanjing Light Aviation Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China;
2. Aviation Military Representative Office of the Army Equipment Department in Shanghai, Shanghai 200233, China;
3. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[ABSTRACT] In this paper, the deep groove plunge milling process of nickel-based super-alloys was researched. Taking material removal rate and residual height as the optimization goals, a process parameter optimization model under the constraints of cutting force and stability was proposed. The weight of each target was difficult to quantify and adjust when the objective function was established by the weighting method. Aiming at the problem, the ratio weighting method was used to establish the objective function to ensure the balance of the optimization direction. The genetic algorithm was used to solve the optimization model example, and the performance indicators of the optimization results and empirical results were compared. The results show that when the constraints are met, the optimized process parameters can not only significantly increase the material removal rate, but also control the residual height, so as to achieve high-efficiency and high-quality processing.

Keywords: Plunge milling; Scallop height control; Cutting stability; Ratio weighting; Multi-objective optimization

(责编 阳光)