

基于特征的开式整体叶盘插铣粗加工刀轴矢量优化生成方法*

Feature Based Optimal Tool Axis Generation Method for Plunge Milling in Rough Machining of Open Blisk

中航工业中国燃气涡轮研究院 张为民
南京航空航天大学 宋学坤 郝小忠 马斯博



张为民

中航工业涡轮院应急加工中心副主任,高级工程师,长期从事航空发动机试验件、试验件转接段加工工艺及技术管理工作。

随着发动机性能要求的提高,航空发动机中大量采用各类整体叶盘,如图 1 所示。整体叶盘与分立镶装式组合件相比,零件数量大为减少,大大降低装配引起的制造误差,符合发动机零件轻量化制造的要求,使发动机的推重比、寿命和安全性大为提

高。通过采用基于特征的方法,给出叶盘流道加工特征的定义,利用基于全息属性面边图的特征识别方法进行流道加工特征的自动识别,提取相关参数信息,以插铣余量均匀分布与插铣刀轴均匀变化为目标,计算合理的插铣刀轴矢量,以此提高整体叶盘粗加工的效率和质量,并实现节约加工成本的目的。

高。

国内各大发动机生产企业投入巨额资金引进了大量先进的数控

机床,但设备的有效利用率却不到 60%,整体叶盘的加工效率低,周期长。据统计,各发动机主机厂整体叶盘粗加工时间与精加工时间比例达到 5:1,因此如何提高整体叶盘粗加工效率和质量是目前研究的热点。

整体叶盘粗加工主要是去除叶片通道区域材料(两相邻叶片之间的沟槽部分),提高这部分材料的去除效率能够极大地提升零件整体加工效率。目前,整体叶盘常用的数控加工方法有点铣法、层铣法和插铣法。点铣法是用刀具头部切削刃铣削工件^[1],采用点铣法进

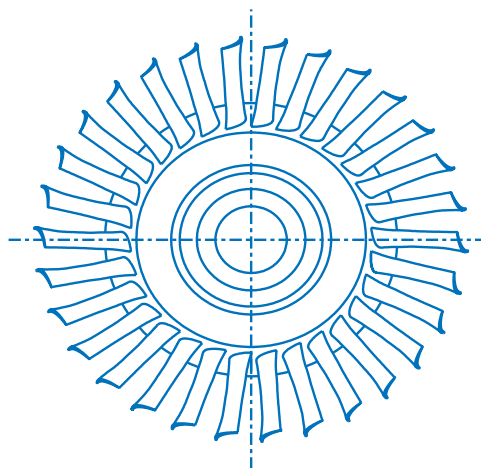


图1 整体叶盘

* 国家科技重大专项“飞机复杂结构件制造特征技术(2012ZX04010041)”资助。

行加工时,铣削刀具与待加工表面作点接触,通常用于复杂曲面的半精加工和精加工。吕雪丽^[2]等学者研究了基于多轴数控平底刀点铣加工复杂曲面的刀位轨迹规划算法。层切法^[3],利用铣刀侧刃一层一层的去除叶片通道材料,加工效率低,刀具消耗极大^[4]。插铣法是一种利用刀具底刃铣削的加工方式,胡创国^[5]在求解整体叶轮叶片偏置面的逼近直纹面的基础上,采用两点偏置法规划了插铣开槽的加工刀位。这种方法加工效率高,但编程效率低,编程难度大,对工艺人员的水平要求较高,编程的质量稳定性差。这是由于插铣编程缺少统一的标准,刀轴矢量都是由人工根据经验逐点来定义,因此带来刀轴矢量随意性大、效率低、无法重用、加工稳定性差等问题。

本文通过采用基于特征的方法,给出了叶盘流道加工特征的定义,利用基于全息属性面边图的特征识别方法进行流道加工特征的自动识别,提取相关参数信息,以插铣余量均匀分布与插铣刀轴均匀变化为目标,计算合理的插铣刀轴矢量,以此提高整体叶盘粗加工的效率和质量,并实现节约加工成本的目的。

发动机流道加工特征的定义

加工特征定义通常有两种方法,一种是基于几何形状相似性进行特征定义,典型有 ISO 10303 AP224^[6],典型特征类型包括槽、孔、台阶等;

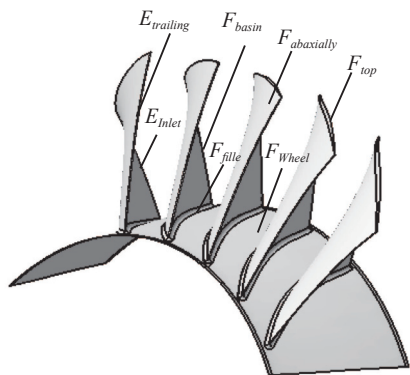


图2 流道加工特征定义

另一种是基于加工方法的特征定义,如孔特征的加工通常采用钻削方式,因此孔特征可定义为钻削特征,典型还有平面铣、侧刃铣等特征类型。由于发动机流道的几何形状相对固定,便于归纳,因此本文采用第一种特征定义方法进行流道加工特征的定义。

流道加工特征包含几何信息与加工工艺信息,定义如下:

$$MFC = Geo \cup Attr, \quad (1)$$

公式(1)中: Geo 表示流道加工特征的几何信息, $Attr$ 表示流道的加工属性信息。

$$Geo = F_{basin} \cup F_{abaxially} \cup F_{fill} \cup F_{wheel} \cup E_{inlet} \cup E_{trailing} \cup E_{top} \cup \vec{Z}, \quad (2)$$

其中, F_{basin} 代表叶盆面, $F_{abaxially}$ 代表

是相关领域的研究热点,常用的特征识别方法有基于边界匹配、基于体分解、基于痕迹的特征识别和混合式特征识别^[7]。本文采用基于全息属性面边图^[8]的方法依次获取各个流道加工特征。基于图匹配的特征识别方法采用面边图(包括图语法)表示特征的边界模式和零件的边界模型。面边图是指以面为节点、以面面之间的邻接关系为弧的图。基于图的特征识别方法的特征搜索策略是子图匹配,即通过将零件面边图中的适当子图与特征的面边图进行匹配来识别特征。

由流道加工特征定义可构建流道加工特征的属性面边图,如图3所

表1 流道加工特征Attr信息

标识	数据类型	说明	用途
Feature ID	INT	特征标识	区分流道各个加工特征的标识
Order	INT	序号	表示当前特征在所有特征中的顺序号
Torsion	DOUBLE	扭转度	用于评估流道开敞性
Tortuosity	DOUBLE	弯曲度	用于评估流道开敞性
MinWidth	DOUBLE	流道宽度	叶盆面与叶背面间最小距离
MaxDepth	DOUBLE	流道深度	叶顶线与叶根线间的最大距离

叶背面, F_{fill} 代表叶根圆角面, F_{wheel} 代表轮毂面, E_{inlet} 代表进气边, $E_{trailing}$ 代表出气边, E_{top} 代表叶顶线, \vec{Z} 代表叶盘轴线方向。

基于如表1所示对流道加工特征的定义,能够实现飞机发动机整体叶盘中流道的统一化描述,将会极大地方便流道特征插铣粗加工刀轴矢量的计算。

流道加工特征识别

特征识别是 CAD 系统与其它 CAX 系统的智能接口,30 年来一直

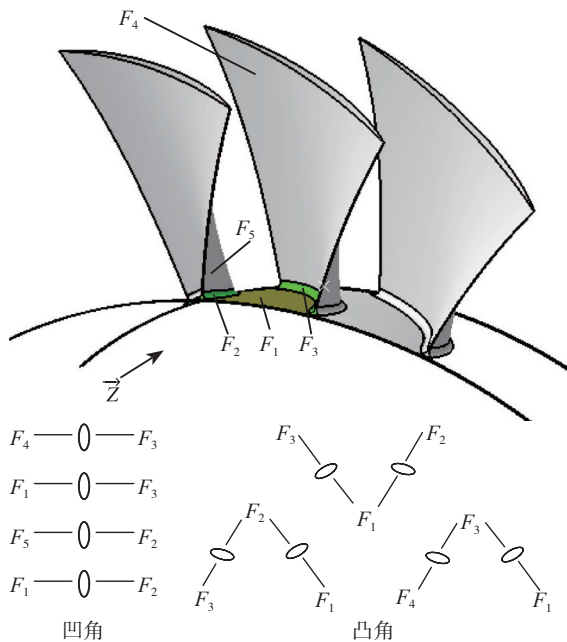


图3 属性面边图

示。

如图4所示是单独的流道加工特征。如图中所示 \vec{z} 方向是叶盘轴向,采用右手螺旋法则,除了大拇指其余四指首先穿过的着色型面为图2中所示的叶背面Fabaxially,该特征的其余子元素的几何位置依据图2同样可定位。

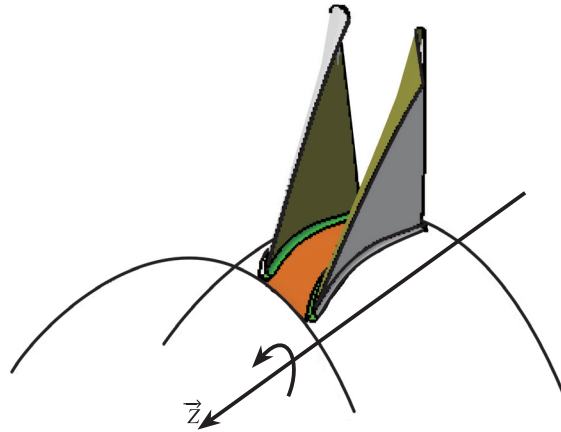


图4 流道加工特征

图3所示为流道加工特征的属性面边图。

首先依据指定的叶盘 \vec{z} 轴方向结合模型上所有的拓扑面构建整体叶盘的属性面边图,其某个流道加工特征的属性面边图如图3所示,将以每一个面为节点的子图与特征的面边图进行匹配获取流道加工特征。

流道加工特征安全加工区域确定与边界刀轴矢量获取

在得到流道加工特征信息后,根据得到的特征几何信息与属性信息快速构建安全加工区域并计算出边界刀轴矢量^[9]。

插铣加工刀具沿其轴向直线进给,而整体叶盘叶片型面为空间自由曲面,型面与平面的交线是空间自由曲线,无法直接生成插铣刀轴,因此需要生成一系列的直线作为插铣刀轴方向,为了保证生成的刀轴矢量符

合加工要求,不发生干涉碰撞情况,应该首先确定安全加工区域,流程如下:

(1)根据工艺要求确定粗加工余量的最小值 δ_{min} 和加工余量的最大值 δ_{max} 。

(2)将轮毂面沿着叶盘径向朝外偏置一个粗加工余量 $\delta = \lambda (\delta_{max} - \delta_{min}) + \delta_{min}$, $\lambda \in [0, 1]$,得到偏置面 Γ_B ;将叶顶线沿着叶盘径向朝外偏置一个安全距离 Δ ,并绕着Z轴旋转至同一流道加工特征的另一叶型面的上方获取 Γ_T ;将流道特征中的叶盆面与叶背面分别向流道内侧偏置 $R + \delta$, R 为刀具半径值,形成 Γ_{yb} 与 Γ_{yp} ;

(3)获取流道加工特征构成元素中在Z轴方向上的最大值点Pmax与最小值点Pmin,沿着 \vec{z} 轴方向等距插值 $(N-2)$ 个点,基于这 N 个点

创建垂直于Z轴的平面序列 Π_p 。

(4)分别求解平面序列 Π_p 与 Γ_{yb} 和 Γ_{yp} 的交线得到截面线组。

(5)分3种情况求取每条截面线的拟合直线段。该拟合直线段即是每行插铣刀轴的边界刀轴矢量,故其不可以与截面线相交,分以下3种情况来处理,处理的原则是不过切且加工余量尽量均匀,其中曲线 J_m 代表模型上的截面线, J_p 代表边界的截面线。

①当截面线两端点连线完全处于流道内侧并且与截面线不相交的情况。如图5中的左、右2个实例所示。

这种情况下虚线段QP即是该层插铣刀轨的一个边界刀轴矢量。

②当截面线两端点连线在截面线的一侧并且位于流道外侧的情况。如图6所示的情况。

在这种情况下,截面线不能直接作为边界刀轴矢量,需要构建局部坐标系,设直线段在该坐标系下的方程为 $y = k_i + b$,其中 k_i 为直线斜率且该斜率与截面线上离散点处的切线斜率相同, b 为直线截距,将截面线 J_p 离散成一定数量的点,获得每个离散点处的截面线切矢量 k_i ,算出每个离散点至该直线的距离,在保证直线段不与截面线相交的情况下,求出每个离散点至该离散点处切直线的距离的方差:

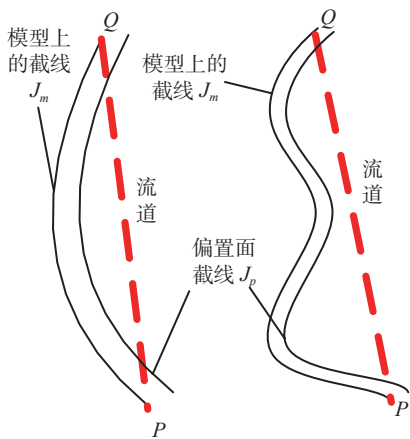


图5 端点连线位于截面线与流道中间

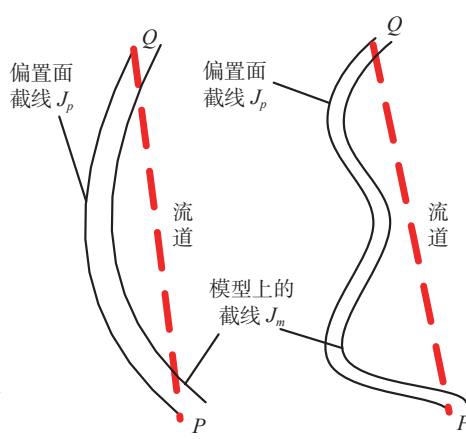


图6 截面线位于流道与端点连线中间

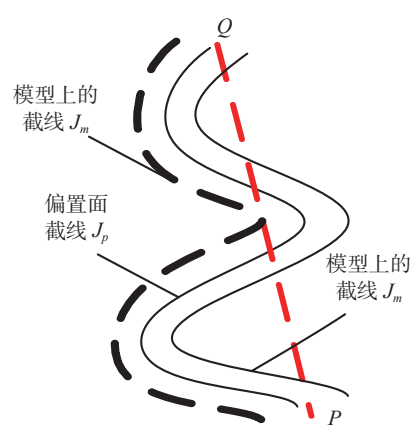


图7 截面线端点连线与截面线相交

$$s^2(H) = \sum_{i=1}^n (H_i - H_{\text{平均}})^2/n \quad (3)$$

最终会产生 n 个方差值,取与最小方差值相对应的那个离散点处的直线作为边界刀轴矢量,同时获得该直线段。其中 n 代表截面上离散点的个数的, H_i 表示每个离散点至直线段 y 的距离,

$$H_{\text{平均}} = \sum_{i=1}^n H_i/n \quad (4)$$

③当截面线端点连线与截面线相交的情况。如图7所示。该情况下直线段的获取与B情况相同。

(6)拟合直纹面^[10]。提取出(5)中各个端点直线段的端点,拟合出四条曲线 $C_1(u, v_{\max})$ 、 $C_1(u, v_{\min})$ 、 $C_2(u, v_{\max})$ 与 $C_2(u, v_{\min})$,由此建立两个直纹面 Γ_1 与 Γ_2 。

$$\Gamma_1(u, v) = vC_1(u, v_{\max}) + (1-v)C_1(u, v_{\min}) \quad (5)$$

$$\Gamma_2(u, v) = vC_2(u, v_{\max}) + (1-v)C_2(u, v_{\min}) \quad (6)$$

由 Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_T 与 Γ_B 共同构建了安全加工区域。

刀轴矢量计算

由于安全加工区域顶面 Γ_T 与底面 Γ_B 都是回转面^[11],故垂直于Z轴平面序列 Π_p 中的任意一个面与安全加工区域边界面的交线都是圆弧,故同一行的刀位点位于同一圆

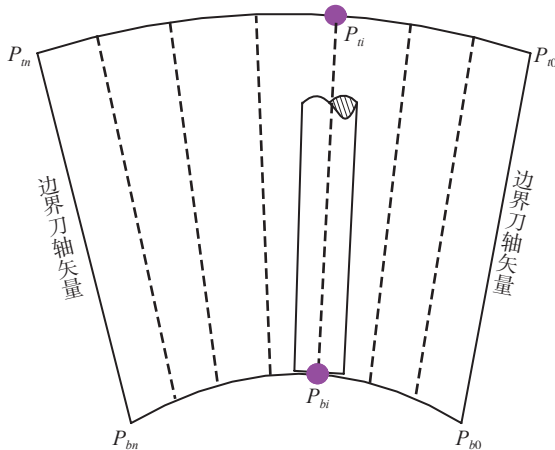


图8 Π_p 中的某个平面被安全加工区域截取视图

弧上,因此在获取了边界刀轴矢量的基础上,在同一行的两个边界刀轴矢量之间的圆弧进行等距插值即可得到该行的所有刀轴。如图8所示的 P_{ni} 与 P_{bi} 的连线即为两个边界刀轴矢量间的某一插值刀轴。

设圆弧 $\widehat{P_{ni}P_{ni}}$ 的长度为 L_i ,圆弧 $\widehat{P_{bi}P_{bi}}$ 的长度为 L_b ,于两边界刀轴矢量间插值 $n-1$ 个刀轴,则第 i 个插值刀轴与 Γ_B 交点为 P_{bi} 与 Γ_T 的交点为 P_{ni} ,故有如下:

$$\widehat{P_{ni}P_{ni}} = L_b \cdot \frac{i}{n-1} \quad (7)$$

$$\widehat{P_{bi}P_{bi}} = L_i \cdot \frac{i}{n-1} \quad (8)$$

由此可获得 P_{ni} 与 P_{bi} 。

图9所示为基于特征的开式整体叶盘插铣粗加工刀轴矢量优化生成应用实例。系统识别出流道加工特征获取流道几何信息与加工属性信息,并将识别结果保存,插铣粗加工模块通过调用特征文件,自动进行刀轴矢量计算,实现高效插铣粗加工。

结束语

针对飞机发动机整体叶盘数控插铣粗加工现状,本文提出了基于特征的整体叶盘插铣粗加工刀轴矢量优化生成方法,该方法实用性强,生成整体叶盘插铣粗加工刀轨的效率、质量稳定性好,能够很好地解决插铣粗加工时的刀具干涉、余量分布不均及刀轴突变等问题,能够极大提升整体叶盘的加工效率和质量。

参考文献

[1] 吴宝海,罗明,张莹,等.自由曲面五轴加工刀具

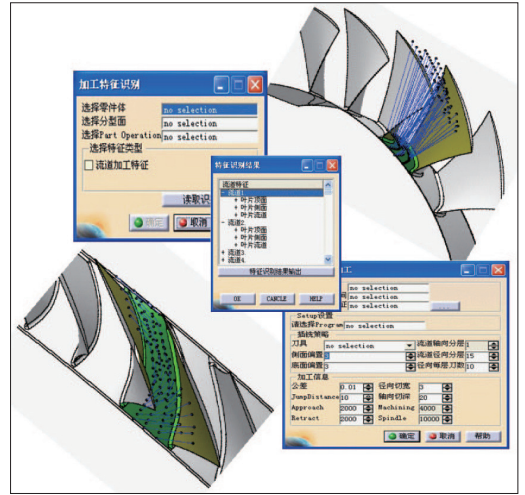


图9 基于特征的流道插铣加工实例

轨迹规划技术的研究进展.机械工程学报,2008,44(10):9-18.

[2] 吕雪丽.广域曲率吻合原则与复杂曲面数控加工的全面优化.北京:北京航空航天大学,2003.

[3] 孔马斌,胡自化,李慧,等.整体叶轮五轴侧铣刀位优化新算法与误差分析.计算机集成制造系统,2008,14(7):1386-1391.

[4] Bedi S, Mann S, Menzel C. Flank milling with flat end milling cutters. Computer-Aided Design, 2003, 35(3): 293-300.

[5] 胡创国,张定华,任军学,等.开式整体叶盘通道插铣粗加工技术的研究.中国机械工程,2007,18(2):153-155.

[6] ISO10303-224, Industrial automatic systems and integration-product data representation and exchange-Application protocol: Mechanical product definition for process planning using machining features.

[7] 高曙明.自动特征识别综述.计算机学报,1998,3(21):281-288.

[8] Li Y, Ding Y F, Mou W P, et al. Feature recognition technology for aircraft structural parts based on a holistic attribute adjacency graph. Proceedings of the institution of mechanical engineers part B, Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224(2): 271-278.

[9] 任军学,田卫军,田荣鑫,等.开式整体叶盘通道侧铣粗加工技术的研究.机械科学与技术,2008,27(10):1220-1224.

[10] 梁全,王永章,富宏亚,等.直纹面叶轮插铣加工关键技术.计算机集成制造系统,2010,6(1):182-187.

[11] 曹利新,苏云玲.三元整体叶轮的曲面造型及其计算机辅助制造技术.航空精密制造技术,2005,41(1):21-23.

(责编 亿霖)