

北京航空航天大学学报
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics
ISSN 1001-5965,CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目：基于曲率场域与拓扑语义约束的压气机叶片特征识别方法
作者：袁阳鑫，杨炯，宁涛，凌鹏
DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0596
收稿日期：2026-08-27
网络首发日期：2026-11-17
引用格式：袁阳鑫，杨炯，宁涛，凌鹏．基于曲率场域与拓扑语义约束的压气机叶片特征识别方法[J/OL]．北京航空航天大学学报．
https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0596



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于曲率场域与拓扑语义约束的压气机叶片特征识别方法

袁阳鑫[1]，杨炯[1,✉]，宁涛[2]，凌鹏[1]

（1. 郑州大学 机械与动力工程学院,郑州 450001；2. 北京航空航天大学 机械工程与自动化学院，北京 102206)
*通信作者 E-mail：jiong_yang@foxmail.com

摘要 针对当前基于规则的叶片特征识别算法无法较好地识别多种情况的复杂叶身曲面的问题，提出一种基于曲率场域与拓扑语义约束的压气机叶片特征识别方法。由 B-Rep 模型构建属性邻接图，识别圆角、倒角等细节特征；在拓扑面的有效参数域内采样并构建曲率场域，判断面内高曲率带数量以及曲面是否为全局高曲率面；根据面曲率场域的判定结果筛选最优叶身种子面，并沿种子面两侧对其余叶身曲面进行拓扑邻域搜索；设定四条拓扑语义约束，实现其余典型叶片特征的语义标注。在基于 5 个公开模型构造的 105 个原始及变种模型上开展对比实验，所提方法的模型完全正确率为 96.19%；实例验证中，8 个满足流道回转面先验条件的模型整体识别准确率均不低于 95.41%。另选取 4 个流道面被简化为平面的公开模型进行范围外验证，其整体识别准确率为 34.6%～50.0%，表明该先验条件是所提方法适用范围的重要约束。结果表明，该方法无需固定特征模板即可有效识别多种结构形式的叶身曲面，并能在所界定的适用范围内完成压气机叶片特征语义标注。

关键词 压气机叶片；特征识别；曲率场域；属性邻接图；拓扑语义约束
中图分类号 TP391.72；V263.1 文献标志码 A DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0596

A compressor blade feature recognition method based on curvature fields and topological semantic constraints

YUAN Yangxin[1], YANG Jiong[1,✉], NING Tao[2], LING Peng[1]

（1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China；
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 102206, China）
*E-mail: jiong_yang@foxmail.com

Abstract To address the limitations of existing rule-based blade feature recognition algorithms in identifying complex blade body surfaces with diverse geometric configurations, a compressor blade feature recognition method based on curvature fields and topological semantic constraints is proposed. First, an attributed adjacency graph is constructed from the boundary representation (B-Rep) model to identify detailed features such as fillets and chamfers. Subsequently, curvature fields are constructed by sampling within the valid parametric domains of topological faces to determine the number of intra-face high-curvature bands and whether a face exhibits globally high curvature. Based on the curvature field analysis, the optimal blade body seed face is selected, and the remaining blade body surfaces are identified through topological neighborhood searches on both sides of the seed face. Finally, four topological semantic constraints are established to assign semantic labels to the remaining typical blade features. Comparative experiments are conducted on 105 original and variant models derived from five publicly available models, achieving a completely correct model recognition rate of 96.19%. In the case studies, the overall recognition accuracy is no lower than 95.41% for all eight models satisfying the prior assumption that the flow passage surfaces are surfaces of revolution. Four additional publicly available models with flow passage surfaces simplified to planes are selected for validation outside the defined applicability range, yielding overall recognition accuracies of 34.6%–50.0%. These results indicate that the prior assumption constitutes an important constraint on the applicability of the proposed method. The results demonstrate that the proposed method can effectively recognize blade body surfaces with various structural configurations without relying on fixed feature templates and achieve semantic labeling of compressor blade

收稿日期：2026-08-27
基金项目：国家科技重大专项(2024ZD0713400)
Fund：National Science and Technology Major Project (2024ZD0713400)
网络首发时间：2026-11-17 09:37:29 网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2625.v.20261116.1608.002

features within its defined applicability range.
Key words compressor blade; feature recognition; curvature field; attributed adjacency graph; topological semantic constraint

加工特征识别技术被称为 CAD 与 CAM 之间的纽带[1]。通常以 B-Rep 模型的几何信息与拓扑关系为输入，形成知识推理[2]、属性邻接图匹配[3]、基于痕迹[4]、体积分解[5]、基于神经网络[6,7]以及基于混合策略[8]等多种加工特征识别方法。通用的加工特征识别方法对常见的简单零件较为适应，对于特定种类的复杂零件，仍需针对该特定零件进行专一特征识别算法的设计[9]。

叶片典型特征识别是航空发动机典型复杂零件智能化加工的关键技术之一[10]。通过从叶片 CAD 模型中自动提取具有工程语义的结构特征并进行语义标注，可实现叶片设计与制造之间的有效关联，为叶片智能工艺规划、刀具轨迹生成、加工过程优化等提供数据支撑，从而提高叶片加工效率与质量。

针对压气机叶片的特征识别方法目前有一些研究。Fan 等[11]建立了面向可制造性评价的叶片零件信息模型，依据叶片结构将叶片划分为叶身、榫头、叶冠、缘板等形状特征，并赋予其特征工程语义，为面向制造的叶片特征描述与识别提供了思路。Xiao 等[12]通过 K-means 聚类算法，从叶片模型点云进行分割并识别出叶身曲面区域。蔡舒妤等[13]对所提取的特征点云，基于主成分分析对榫头特征区域进行精准提取。李加森等[14]通过筛选参数曲面并从中选取边数小于经验阈值的方法识别叶身曲面，并利用邻接关系识别榫头端面；赵霞等[15]通过构造扩展属性邻接图并构建特征子图库的方法识别叶片典型特征。

但当前针对压气机叶片特征识别的方法所呈现出的一个问题是：对叶身曲面的识别无法兼顾多种实际情况。当前方法大多针对压气机叶片模型的理论情况或某一情况，但在实际情况中，叶身曲面与根部转接圆角都有可能被分割，致使叶身曲面的实际边数可能会大于理论边数，且造成叶身曲面的拓扑邻接关系多样，最终导致构造可以兼顾多种情况的子图模板较为困难。

压气机叶片相较于其他通用零件，具有以下两个特点：①具有独特的叶身曲面特征，叶身曲面复杂，故在实际模型中可能以多张子面的形式存在，并且叶身曲面具有独特的曲率特征，两个叶缘区域曲率很高，盆、背侧区域曲率平滑。②与孔、槽、台阶等相对独立的通用加工特征不同，压气机叶片中叶身、榫头、叶冠等特征的位置和连接关系相对固定，不同特征之间通常具有明确的拓扑邻接与从属关系。

针对当前压气机叶片特征识别方法在叶身曲面特征识别上的局限性与叶片特点，可以从分析曲面曲率并从中提取特征作为识别叶身曲面的一种思路。Berkmans 等[16]基于多尺度曲率的方法对诸如凸脊、沟槽等局部的形状特征进行分割与特征提取；Wan 等[17]通过曲率分析对叶片中的 3D 激光熔覆区域进行分割提取。之后，便可以根据叶片各形状特征，设计合适的拓扑语义约束规则，实现压气机叶片的特征分割与特征语义标注。

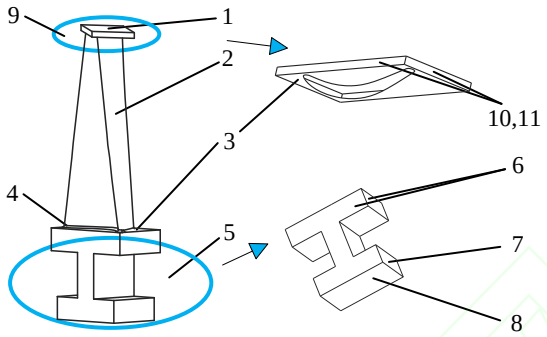
基于此，本文提出一种基于曲率场域与拓扑语义约束的压气机叶片特征识别方法。核心贡献如下：①构建物理面积加权曲率场域，以面内高曲率带和全局高曲率特征筛选最优叶身种子面，再通过拓扑邻域搜索识别其余叶身曲面，从而避免固定子图模板难以覆盖不同曲面分割形式的问题；②以流道面为解耦边界，将叶片结构稳定的位置与邻接关系形式化为四条拓扑语义约束，完成叶身、榫头和叶冠等典型特征的语义标注。最后通过阈值敏感性分析、同数据集对比实验和实例验证评估方法的有效性及适用边界。

1 压气机叶片特征体系

根据结构组成及加工语义，将压气机叶片典型特征划分为叶身、榫头、叶冠、底面和辅助特征，各类特征的具体语义标签如图 1 和表 1 所示。其中，流道辅助面为与内/外环流道面邻接的一圈榫头侧面或叶冠侧面，图 1 中仅指向面向视角的对应面，叶尖、榫头底面分别为叶冠与榫头的底面特征，故底面特征与辅助特征属于榫头或叶冠区域。因此，在整体结构层级上，可进一步将压气机叶片归并

为叶身、榫头和叶冠三部分的结构特征。

由于不同型号压气机叶片的结构形式存在差异，叶冠结构特征并非所有模型具备。为提高算法对不同叶片类型的适应性，本文将其作为可选结构进行处理，在模型具备相应结构时执行识别，否则不参与后续语义分割。



1.叶尖　2.叶身特征　3.流道面　4.根部转接圆角
5.榫头特征（6.内环流道辅助面　7.榫头侧面　8. 榫头底面）
9. 叶冠特征（10.外缘板面 11.外环流道辅助面）

图 1　压气机叶片典型特征示意图
Fig. 1　Typical compressor blade features

表1　压气机叶片典型特征语义标签
Table 1　Semantic labels of typical compressor blade features

特征类	语义标签集
叶身特征	叶身曲面
榫头特征	榫头面
叶冠特征	外缘板面
底面特征	叶尖、榫头底面
辅助特征	流道面、流道辅助面、根部转接圆角

2 识别方法

本文方法总体流程如图 2 所示。首先，由 B-Rep 模型构建属性邻接图并识别细节特征；随后，将叶身曲面由一张、两张或四张面构成的情形归纳为叶缘独立面和叶缘混入叶身面两类，构建面曲率场域，依据面内高曲率带与全局高曲率特征筛选最优种子面，再通过拓扑邻域搜索获得其余叶身曲面；最后，利用叶身、流道面、榫头和叶冠之间稳定的位置与邻接关系，设置四条拓扑语义约束，完成叶片结构分割与典型特征语义标注，生成特征识别树。

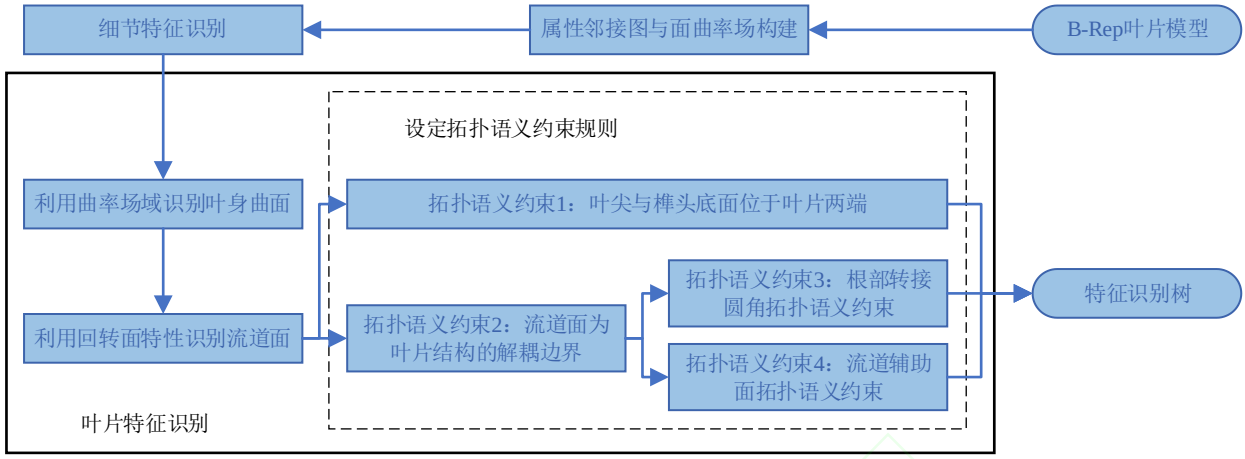


图 2　基于曲率场域与拓扑语义约束的压气机叶片特征识别流程

Fig. 2　Flowchart of compressor blade feature recognition using curvature fields and topological constraints

2.1 叶片属性邻接图构建

主流 CAD 系统通常采用边界表示（boundary representation，B-Rep）描述实体。B-Rep 以面、边和顶点的层级拓扑定义边界，并通过曲面和曲线将拓扑元素嵌入三维空间，从而统一表达几何与拓扑信息。属性邻接图的构建过程如图 3 所示。

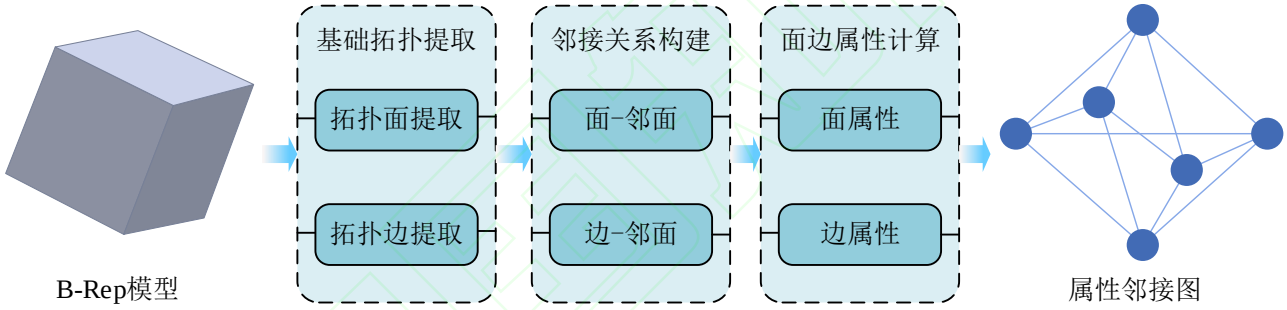


图 3　B-Rep 模型到属性邻接图的构建

Fig. 3　Construction of the attributed adjacency graph from a B-Rep model

设压气机叶片的边界表示模型为

$$G=\{V,E,A_{\mathrm{v}},A_{\mathrm{e}}\} \tag{1}$$

式中：V 表示属性邻接图中的所有面节点；E 表示共享边；A_{v} 表示所有面的属性；A_{e} 表示所有边的属性。叶片属性邻接图以拓扑面为节点 V、共享边为无向边 E。节点属性包括索引、面积、几何类型与曲率场域，边属性包括索引、长度、几何类型与边凹凸性，其中边凹凸性的计算参考文献[18]。该图统一组织模型的几何和拓扑信息，为后续特征搜索与语义标注提供基础。

2.2 细节特征识别

圆角、倒角细节特征不改变叶片主体语义，却会增加属性邻接图的规模并干扰主体特征搜索。本文对固定曲率半径圆角、常规四边平面倒角与通槽、盲槽进行识别。结合文献[19]制定具体识别规则，如表 2 所示。

表2　细节特征识别规则

Table 2　Rules for detailed feature recognition

细节特征	设定规则
等半径圆角	候选面为圆柱面、圆环面与球面；至少存在两条光滑邻接边，半径<20 mm。
常规倒角	候选面为平面、圆锥面或低曲率自由曲面；具有四条无光滑边；二面角设定 45°。
通槽	槽底面为平面；具有两个互不邻接的开口凸边，其余边主要为凹边或平切凹边；沿凹邻接关系搜索槽侧面，并要求槽底面与侧面近似正交。
盲槽	与通槽采用相同的底面和侧面判定方法，但槽底面仅具有一个开口凸边。

2.3 拓扑面曲率场域构建

本文构建曲率场域用于刻画参数曲面在其面内的曲率分布特征以及曲面是否为全局高曲率面，供后续叶身最优种子面筛选使用。

2.3.1 曲率场采样与场域构建

设第 i 个面为 S_i，其有效裁剪参数域为 Ω_i。在参数域起点 $(u_{\min},v_{\min})$ 处分别构造 u 向和 v 向等参数线，并依据曲线曲率采用几何引擎已有接口进行固定点数的自适应曲率离散，使得高曲率区分配更密集的参数节点，平缓区分配较稀疏的节点，由此得到严格递增的参数序列 $U_i=\{u_a\}$ 和 $V_i=\{v_b\}$。两序列作笛卡尔积后形成候选参数网格，仅保留位于 Ω_i 内的组合 $\boldsymbol{p}_{ab}=S_i(u_a,v_b)$。该方法能够提高前、尾缘狭窄参数区间的采样密度，避免均匀参数采样漏失高曲率带。

由于参数节点非均匀分布，后续阈值计算不采用等权点数统计。令 Δu_a、Δv_b 为相邻参数节点中点所确定的节点宽度，$J_{ab}=\|\boldsymbol{S}_u\times\boldsymbol{S}_v\|$ 为曲面参数化的面积雅可比，则采样点对应的物理面积权重为

$$w_{ab}=\Delta u_a\cdot\Delta v_b\cdot J_{ab} \tag{2}$$

面 S_i 的物理面积可离散近似为

$$A_i=\sum\nolimits_{(a,b)}w_{ab} \tag{3}$$

对于曲面上的任一区域 R，其物理面积占比为 η_R：

$$\eta_R=\frac{\sum_{\boldsymbol{p}_{ab}\in R}w_{ab}}{A_i} \tag{4}$$

若叶片模型坐标单位为 mm，则主曲率单位为 mm^{-1}，曲面面积与包围盒尺寸的单位分别为 mm^2 和 mm；采用其他长度单位时按同样关系换算。

对每个有效采样点 $\boldsymbol{p}_{ab}$，计算其主曲率 $k_1(\boldsymbol{p}_{ab})$、$k_2(\boldsymbol{p}_{ab})$。为了增强对局部高曲率区域的表征能力，本文采用最大主曲率的绝对值作为曲率强度指标 $C(\boldsymbol{p}_{ab})$：

$$C(\boldsymbol{p}_{ab})=\max\left(|k_1(\boldsymbol{p}_{ab})|,|k_2(\boldsymbol{p}_{ab})|\right) \tag{5}$$

为消除不同尺度模型之间的量纲差异，取模型整体包围盒三向尺寸中的最大值作为特征长度 L_{ref}，并构造无量纲曲率强度：

$$C^*(\boldsymbol{p}_{ab})=L_{\mathrm{ref}}\cdot C(\boldsymbol{p}_{ab}) \tag{6}$$

为了压缩尖峰值的动态范围，在此将曲率强度转化为对数形式：

$$\hat{C}(\boldsymbol{p}_{ab})=\log(1+C^*(\boldsymbol{p}_{ab})) \tag{7}$$

最后，构建面曲率强度矩阵：

$$\begin{cases}\boldsymbol{M}_{\mathrm{c}}^{*}(a,b)=C^*(\boldsymbol{p}_{ab})\\ \boldsymbol{M}_{\mathrm{c}}(a,b)=\hat{C}(\boldsymbol{p}_{ab})\end{cases} \tag{8}$$

2.3.2 面内高曲率带的加权双阈值提取

对于高曲率叶缘区域混合在叶身曲面内部的情形，本文在每个面内对 $\hat{C}$ 进行物理面积加权 Otsu 分割，旨在从曲率差距过大的叶身曲面中提取叶缘高曲率特征。

对任一候选阈值 t，按 $\hat{C}\le t$ 与 $\hat{C}>t$ 将有效采样点划分为两类，分别计算加权面积概率 $\omega_0(t)$、$\omega_1(t)$ 和加权均值 $\mu_0(t)$、$\mu_1(t)$，低曲率面积概率 $\omega_0(t)$ 与高曲率面积概率 $\omega_1(t)$ 为

$$\begin{cases}\omega_0(t)=\dfrac{\sum_{\hat{C}\le t} w_{ab}}{A_i}\\ \omega_1(t)=\dfrac{\sum_{\hat{C}>t} w_{ab}}{A_i}\end{cases} \tag{9}$$

两类的面积加权均值分别为

$$\begin{cases}\mu_0(t)=\dfrac{\sum_{\hat{C}\le t} w_{ab}\hat{C}(a,b)}{\sum_{\hat{C}\le t} w_{ab}}\\ \mu_1(t)=\dfrac{\sum_{\hat{C}>t} w_{ab}\hat{C}(a,b)}{\sum_{\hat{C}>t} w_{ab}}\end{cases} \tag{10}$$

利用直接枚举法对有效采样点的曲率强度排序，枚举相邻不同曲率值之间的分割位置，取加权类间方差最大时的阈值：

$$T_{\mathrm{L}}=\underset{t:\omega_0(t)>0,\omega_1(t)>0}{\arg\max}\ \omega_0(t)\omega_1(t)\left[\mu_0(t)-\mu_1(t)\right]^2 \tag{11}$$

为低阈值，用于确定可能属于叶缘的候选点。若多个分割位置具有完全相同的最大类间方差，程序保留第一个遇到的阈值。低阈值附近的点不能全部作为生长种子，因此当前算法另外设置高阈值。对于高阈值，将有效采样点按曲率强度升序排列，并同步累加对应物理面积权重，将累计面积占比首次达到 95%时对应的曲率强度作为加权 95%分位数，最终取该分位数与低阈值中的较大值作为高阈值：

$$T_{\mathrm{H}}=\max(T_{\mathrm{L}},Q^{w}_{0.95}(\hat{C}(a,b))) \tag{12}$$

之后，据此定义低阈值候选集合和高置信度种子集合：

$$\begin{cases}Q_i=\left\{\boldsymbol{p}_{ab}\,\middle|\,\hat{C}(a,b)>T_{\mathrm{L}}\right\}\\ Z_i=\left\{\boldsymbol{p}_{ab}\,\middle|\,\hat{C}(a,b)\ge T_{\mathrm{H}}\right\}\end{cases} \tag{13}$$

以 Z_i 为起点，在参数网格八邻域内向 Q_i 执行有限层滞后连通生长，生长层数按单方向采样数的10%，避免因低阈值过低造成的溢出扩张，得到面内高曲率二值矩阵 $\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{local}}$ 。

对 $\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{local}}(a,b)=1$ 的点进行八邻域连通域搜索，获取矩阵中的一系列高曲率连通域 R_i。之后，对每个连通域进行如下描述量的计算：

物理面积占比 η_R；

主方向跨度 s_R；

由加权协方差特征值确定的长宽比 r_R。

对一个高曲率连通域 R_i，计算其加权中心：

$$\bar{\boldsymbol{p}}=\frac{\sum_{i=1}^{N_k} w_i\boldsymbol{p}_i}{\sum_{i=1}^{N_k} w_i},\ \boldsymbol{p}_i=\begin{bmatrix}u_i\\ v_i\end{bmatrix} \tag{14}$$

式中：w_i 为该点对应的物理面积权重，其定义见上文。建立加权协方差矩阵：

$$\boldsymbol{C}=\frac{\sum_i w_i(\boldsymbol{p}_i-\bar{\boldsymbol{p}})(\boldsymbol{p}_i-\bar{\boldsymbol{p}})^T}{\sum_i w_i} \tag{15}$$

并进行特征值分解，得到两个特征值 $\lambda_{1,R}\ge\lambda_{2,R}$ 及其对应的单位特征向量 $\boldsymbol{e}_{1,R}$ 和 $\boldsymbol{e}_{2,R}$。将所有点投影到 $\boldsymbol{e}_{1,R}$ 上：

$$s_i=(\boldsymbol{p}_i-\bar{\boldsymbol{p}})\cdot\boldsymbol{e}_{1,R} \tag{16}$$

计算主方向跨度并进行归一化：

$$s_R = \frac{\max s_i - \min s_i}{s_A} \tag{17}$$

式中：s_A 整个曲面沿该方向的跨度。

计算连通域的长宽比：

$$r_R = \sqrt{\frac{\lambda_{1,R}}{\lambda_{2,R} + \varepsilon}} \tag{18}$$

式中：ε 是为防止分母为零而设置的极小正数。

当前采用的有效高曲率带判据为

$$0.015 \le \eta_R \le 0.40, r_R \ge 3.0, s_R \ge 0.60$$

满足上述判据的高曲率连通域被认定为有效面内高曲率带，最终记录面内高曲率带数量 N_i^{band}，$N_i^{\text{band}} \ge 1$ 的曲面被标记为含高曲率带面，标记 $Flag_i^{\text{local}} = 1$。该判据同时约束区域面积、狭长程度及延伸范围，避免将大面积均匀高曲率面或局部奇异点误认为叶身曲率带。

2.3.3 全局高曲率面判定

当叶缘以独立曲面存在时，其有效区域整体处于高曲率状态。本文在同一模型的全部拓扑面上采用统一的模型级阈值 T_{g} 进行判断，并依据该阈值创建全局高曲率判断矩阵：

$$\boldsymbol{M}_i^{\text{global}} = \begin{cases} 0, \hat{C}(a,b) < T_{\text{g}} \\ 1, \hat{C}(a,b) \ge T_{\text{g}} \end{cases} \tag{19}$$

利用物理面积权重计算面 S_i 的全局高曲率覆盖率：

$$\rho_i^{\text{g}} = \frac{\sum_{a,b} w_{ab} \boldsymbol{M}_i^{global}(a,b)}{\sum_{a,b} w_{ab}} \tag{20}$$

设全局高曲率覆盖率阈值为 R_{GH}，当 $\rho_i^{\text{g}} \ge R_{\text{GH}}$ 时，该面被标记为全局高曲率面，标记 $Flag_i^{\text{global}} = 1$。

2.3.4 曲率场输出

标记为 $Flag_i^{\text{local}} = 1$ 与 $Flag_i^{\text{global}} = 1$ 的面作为叶身曲面的种子面后续，在 2.4 中会从中寻找最优叶身种子面，并根据种子面识别其余叶身曲面。

2.4 典型叶片特征识别

2.4.1 基于曲率场域的叶身识别

叶身曲面是叶片的关键功能曲面，且具有如下曲率特征：前缘与尾缘区域呈局部高曲率，叶盆与叶背则大范围平缓过渡。因此，其曲率场域具有“整体连续平缓、局部含高曲率带”的分布特征。

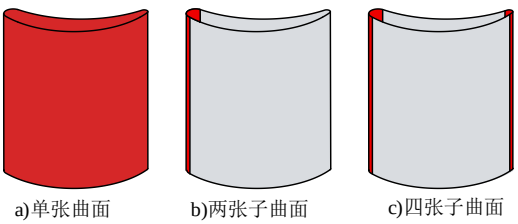


图 4　叶身曲面在压气机叶片模型中的表示形式

Fig. 4　Representations of airfoil surfaces in compressor blade models

在图 4 所示的多种叶片结构形式下，叶身曲面可总结为两种情况：①叶身曲面组中存在独立叶缘面；②两个叶缘区域均包含在叶身曲面中。表 3 展示了叶身两种情况的依据与示意。若叶缘以独立曲面存在，则该面通常表现为全局高曲率面，且该面在积叠轴向的包围盒上具有最大的长宽比。如果叶缘均混在叶身曲面中，则相应叶身子面通常具有较大的面积。由此，先寻找是否存在单独的叶缘，如

果没有，再尝试寻找混有叶缘的叶身曲面。

无论叶身曲面以何种形式存在，均包含叶缘区域。据此采用“最优种子识别—拓扑邻域搜索”的两阶段策略。

表3 叶身曲面的两种情况

Table 3 Two cases of airfoil surface representation

叶身表示	判定依据
独立叶缘	叶缘高曲率区域完全独立，且不混合或轻度混合盆、背侧的少部分区域
叶缘混入叶身面	叶身曲面存在完整的叶缘区域并包含盆、背侧的部分区域

首先从全部拓扑面中筛选参数曲面，并存入叶身候选面集合，以缩小搜索范围。

针对情况 1，遍历所获得的候选面集合，收集候选面中 $Flag_i^{\text{global}}=1$ 的面，这些面均为全局高曲率面。如果筛选出符合该条件的面，则计算各面在积叠轴方向的包围盒长宽比，设定叶身曲面沿积叠轴方向的包围盒长宽比阈值 b_{m}，选择候选面中长宽比最大且大于 b_{m} 的参数曲面作为叶身曲面的最优种子面。图 5 展示了某独立叶缘的面曲率场域热力图与全局高曲率矩阵图。

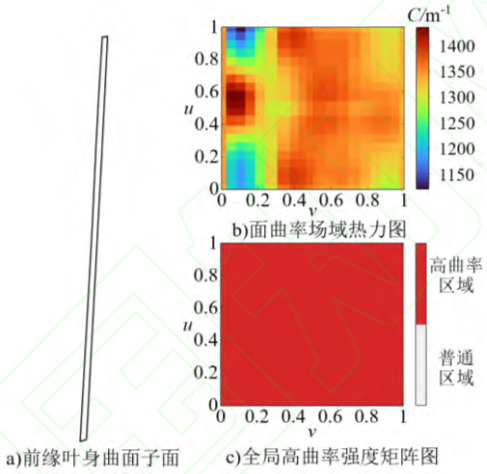


图 5 情况 1 的叶身曲面及其全局高曲率矩阵图

Fig. 5 Airfoil surface in Case 1 and its global high-curvature matrix

如果没有 $Flag_i^{\text{global}}=1$ 的面，则表明可能不存在独立的叶缘面。此时，寻找 $Flag_i^{\text{local}}=1$ 的面，在所有候选面中选取面积最大的面作为叶身曲面搜索的种子面。图 6 展示了含叶缘区域的叶身曲面的曲率场域热力图与面内高曲率矩阵图。

之后，判断叶身曲面是否为完整叶身曲面。对于从 $Flag_i^{\text{global}}=1$ 中筛选出的种子面，必定不是完整曲面。而在 $Flag_i^{\text{local}}=1$ 中所获得的种子面，通过获取其参数中点位置的 u 向等参数线与 v 向等参数线，判断是否有一条等参数线是封闭曲线。若存在封闭等参数线，则种子面为完整叶身曲面；否则为非完整叶身曲面。

若叶身曲面不完整，则从当前种子面向两侧搜索，持续查找种子面上与叶片积叠轴方向一致的边所对应的邻面，直至不再发现新面，通常经 1～2 轮搜索即可完成。

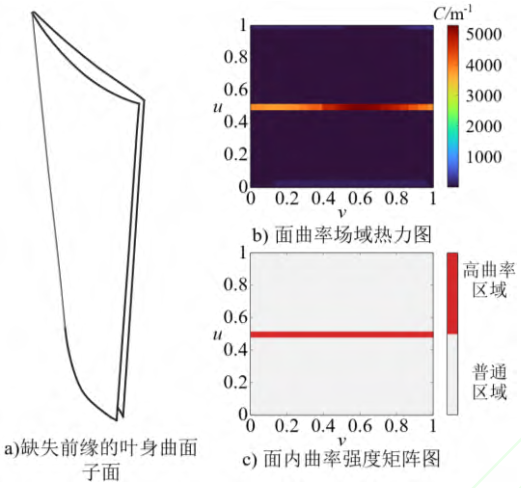


图 6　情况 2 的叶身曲面及其面内高曲率矩阵图
Fig. 6　Airfoil surface in Case 2 and its local high-curvature matrix

2.4.2 基于拓扑语义约束的叶片结构特征分割

流道面分隔叶身、榫头和叶冠，是后续语义分割的关键边界。本文首先依据几何类型和曲率特征识别流道面，之后，通过设定拓扑语义约束规则，对压气机叶片进行特征解耦，分割并识别典型叶片特征。

（1）流道面的识别

流道面位于叶身曲面沿压气机叶片积叠轴方向的上下两端，几何类型为回转面，曲率半径较大，曲率较为平缓。

流道面一般是被裁剪过的回转面，必然在垂直其旋转轴的截面上，与曲面的交线为圆或圆弧，这种特性一般在其参数域上就有所表现。在其参数域上，其任何位置的等 u 参数线或等 v 参数线都为圆或圆弧。

基于此，通过获取曲面的一系列等 u 参数线和等 v 参数线，判断是否存在一组曲线均为圆或圆弧，即可判断该面是否为回转面。

首先收集满足以下条件的回转面：①曲率半径较大，且不小于流道面曲率半径下限阈值 q_r；②质心法向量接近积叠轴，二者夹角不超过质心法向量与积叠轴夹角上限阈值 θ_N；③与叶身曲面或根部圆角（即圆角邻面含叶身曲面）邻接。

之后，将收集的面以及叶身曲面的质心投影到积叠轴上，将投影值相近的回转面归为一组，然后挑选与叶身曲面投影值相邻的一组或两组回转面，并根据投影值大小标记为内环流道面和外环流道面。

（2）拓扑语义约束下的叶片特征语义分割

完成叶片流道面的识别与分层后，为帮助对压气机叶片特征面进行语义分割与识别，设定如下拓扑语义约束：

依据特征在模型中的空间位置语义，叶尖与榫头底面分别位于叶片的最顶部与最低部。

流道面具有分隔叶身与榫头/叶冠结构区域的分区语义，因此将其作为拓扑解耦边界，实现叶片主要结构区域的分割。

根部转接圆角：根部转接圆角具有连接叶身与流道区域的过渡语义。以流道面完成结构分割后，叶身侧区域由叶身曲面及其根部转接圆角组成，据此可进一步识别根部转接圆角。

流道辅助面：与流道面邻接的榫头侧面或叶冠侧面。

利用以上四条拓扑语义约束规则，解耦并识别叶片特征，识别示意图如图 7 所示。

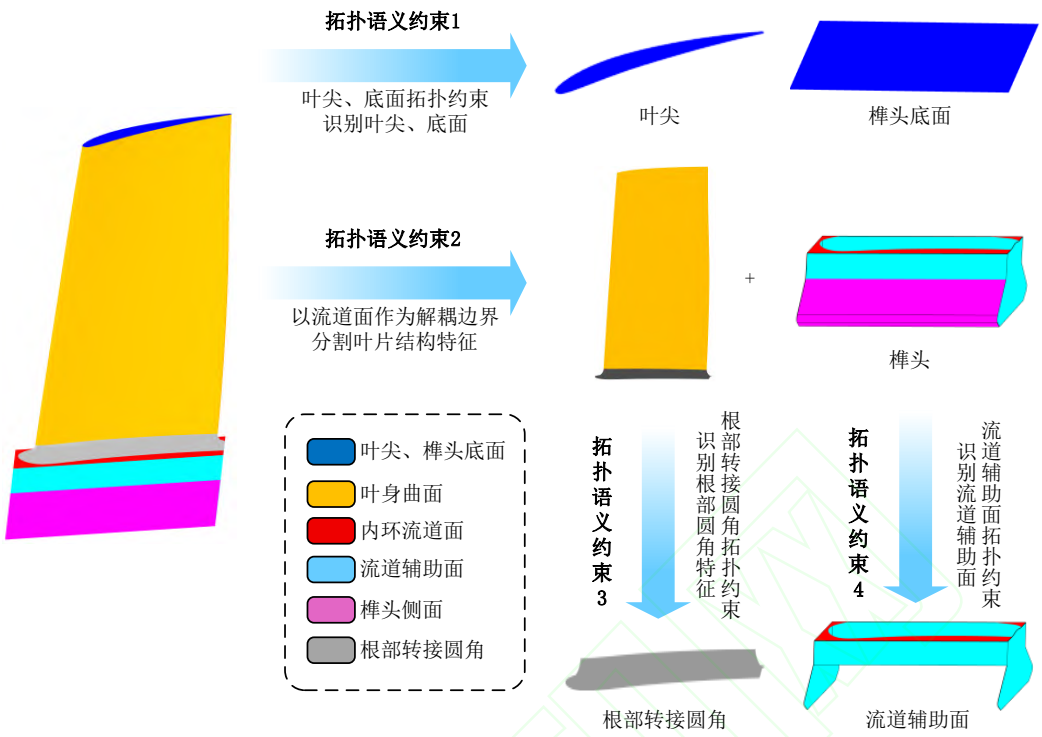


图 7 以流道面为解耦边界的叶片特征分割

Fig. 7 Blade feature segmentation using flow-path surfaces as decoupling boundaries

3 实验与分析

本文在企业开发的 CAM 平台中完成算法二次开发，并开展阈值敏感性分析、同数据集对比实验与实例验证。实验计算机配置为 Intel(R) Core(TM) i7-14650HX 2.20 GHz 处理器和 NVIDIA GeForce RTX 4060 Laptop GPU；各对比方法均独立编译为 UG 插件，并在同一软硬件环境下运行。

3.1 阈值来源与敏感性分析

本文方法前文所述的经验阈值包括全局高曲率阈值 T_{g}，全局高曲率覆盖率阈值 R_{GH}，叶身曲面情况 1 时的曲面包围盒长宽比阈值 b_{m}，流道面判定中的曲率半径下限阈值 q_{r} 与质心法向量与积叠轴夹角上限阈值 θ_{N}。

本文选取 6 个叶片模型进行阈值标定，其结构示意如图 8 所示（仅展示模型结构，不代表实际模型）。通过分析叶身曲面、流道面及对应非目标面的阈值分布与敏感性，确定各经验阈值；测试过程中对所有模型统一采用表 4 所列阈值，不进行逐模型调参。

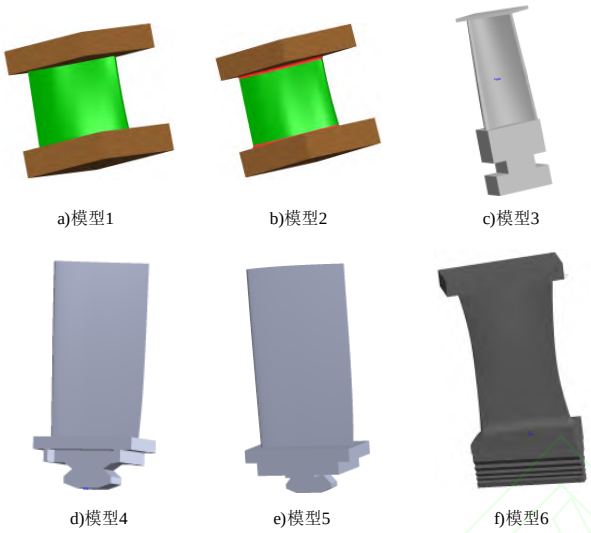


图 8　6 个模型的模型示意图
Fig. 8　Schematic illustrations of six blade models

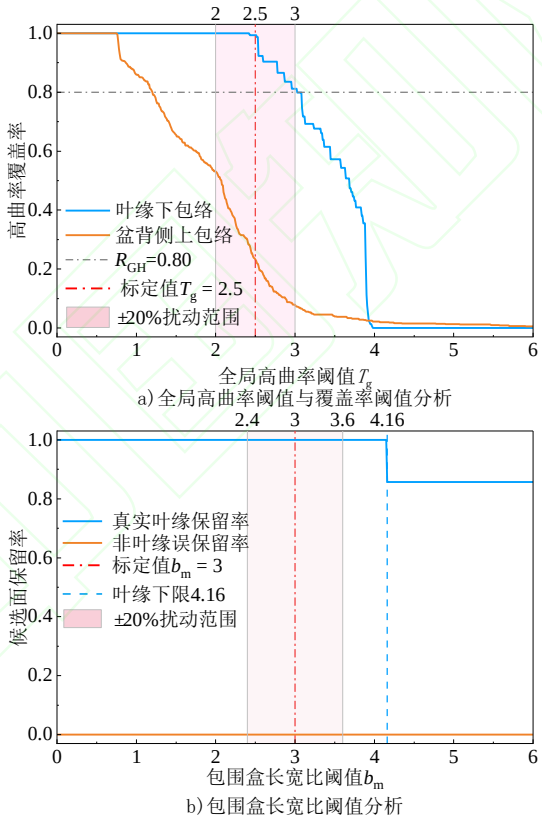


图 9　叶身阈值分析
Fig. 9　Airfoil threshold analysis

对于叶身组，由于 T_g 与 R_{GH} 是相关的，基于 T_g 才能获取全局高曲率覆盖率，图 9 展示了 6 个模型叶缘全局高曲率覆盖率的下包络与盆背侧的上包络在 T_g 变化下的趋势，设定 T_g 阈值为 2.5，在±20%（2.0~3.0 范围）扰动下，叶缘覆盖率下包络的最小值为 0.813，盆背侧覆盖率上包络最大 0.531。因此，最终取 T_g=2.5， R_{GH} = 0.80 。

对于叶缘长宽比阈值 b_m，通过计算所有参数曲面的包围盒长宽比，计算并对比在 b_m 变化时叶缘

保留率与非目标面误保留率的变化，设定阈值 $b_m=3$，阈值及其±20%扰动范围均位于叶缘全部保留、非叶缘候选面全部排除的稳定区域内。

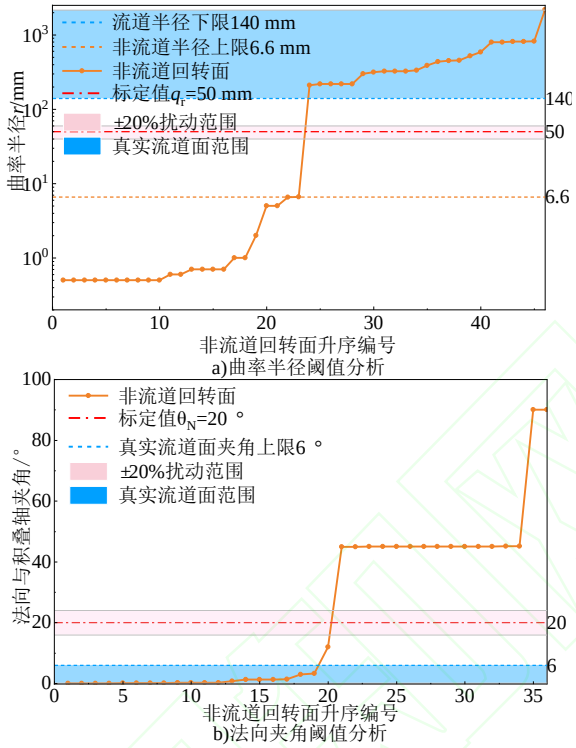


图 10 流道面阈值分析

Fig. 10 Flow-path surface threshold analysis

对于流道面组的两个阈值，由于榫槽侧面等可能在几何上与流道面特征一致，故图 10 中部分非流道回转面在两个阈值分析中位于流道面区域的情况，而剩余非目标面基本均为圆角面等特征面。故对于 q_r 与 θ_N 的取值，取 50 mm 及 20°，旨在区分与流道面几何差距过大的回转面。

由于流道面与非流道回转面的曲率半径差距过大，故该阈值稳定，而由于存在少量非流道回转面法向与积叠轴夹角接近流道面对应夹角的上包络，故存在较小的敏感性。

敏感性分析采用单因素扰动方式：各阈值在标定值的±20%范围内变化，其余参数保持不变，并根据候选集合及最终识别结果的变化程度作定性分级。T_g、全局高曲率覆盖率、叶缘长宽比、流道面曲率半径和法向夹角的扰动区间依次为 2.0～3.0、0.64～0.96、2.4～3.6、40～60 mm 和 16°～24°。其中，目标面与非目标面的分离关系及最终结果均不变时记为稳定；仅边界样本裕量或少量候选面发生变化时记为较小或中等敏感。

表4 关键阈值的标定结果与敏感性

Table 4 Calibration results and sensitivity of key thresholds

对象	阈值	敏感度	最终值
叶身	T_g	稳定	2.5
叶身	R_{GH}	中等敏感	0.80
叶身	b_m	稳定	3
流道	q_r	稳定	50 mm
流道	θ_N	较小敏感性	20°

3.2 叶身曲面识别的对比实验

以 Blade18、CRB01、EDUA、TB2 与 Rhom 五个公开测试模型为基础，分别构造沿积叠轴向分割的 1-5 张面叶身结构形式组成的 100 个变种，生成方式为：首先创建单张面叶身的变种模型，然后

在该模型基础上对叶身曲面进行沿积叠轴向分割，控制叶身面片的最小面积为总面积的 10%。五个模型各 20 个变种模型，模型集容量 105，测试模型示意图如图 11 所示。三种方法均独立编译为 UG 插件并在同一环境下运行。李加森等[14]方法取边界数阈值 N=5；赵霞等[15]方法分两组：组 1 选取原始模型与每族任意 2 个变种模型制作子图模板，组 2 则在组 1 基础上每族再抽 7 个模型补充模板库，分别命名：赵[15]组 1 与赵[15]组 2。三种方法均使用相同的 105 个模型和统一参数设置，结果如表 5 所示。

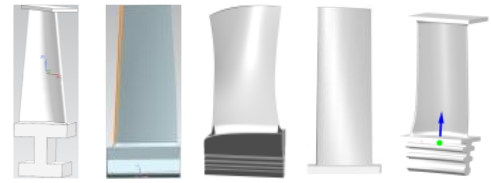


图 11　测试模型的原始几何形态
Fig. 11　Original geometries of the test models

表 5 表明，李加森等[14]方法效果很差，说明固定面类型和边界数量规则难以适应叶身曲面的不同分割形式。扩展属性邻接图法[15]的识别效果明显依赖模板库规模，组 1 与组 2 的对比也展示了补充模板能够提高对不同拓扑结构的覆盖能力。

模板库扩大还带来了匹配冲突，造成多个模板在同一目标模型中分别获得满足属性约束的同构映射，但部分映射对应的是与叶身具有相似拓扑结构和几何属性的非叶身子图。随着模板数量增加，模板结构的覆盖范围扩大，非叶身区域被某一模板误匹配的概率也随之上升，这也是造成组 2 中 Precision 下降的原因。

表5　三种叶身曲面识别方法的对比结果
Table 5　Comparison of three airfoil recognition methods

方法	完全 正确率	面级 Precision	面级 Recall	面级 F1	平均耗时/ms
李[14]	4.76%	47.37%	47.22%	47.30%	10.82
赵[15]组 1	29.52%	100%	27.16%	42.72%	28.73
赵[15]组 2	61.90%	91.80%	69.14%	78.87%	28.83
本方法	96.19%	96.88%	95.99%	96.43%	240.67

相比之下，本文方法在 105 个模型中完全正确率为 96.19%，Precision、Recall 和 F1 分别为 96.88%、95.99%和 96.43%，明显优于两种对比方法。该方法无需为不同叶片族和叶身分割数量逐一制作特征子图，对未参与参数确定的新拓扑结构仍保持较好的识别能力，说明其对多种叶身结构形式具有更强的适应性。

本文方法 UG 插件流程包括叶身识别所需数据准备（拓扑面及邻接信息提取+曲率场域构建）和叶身识别阶段。表 5 中的平均耗时为 105 个模型单次运行 UG 插件耗时的算术平均。在运行效率上，本文方法的平均耗时为 240.67 ms，高于两种基线方法的 10.82～28.83 ms，但单模型耗时仍低于 1 s。

3.3 实例验证

为检验完整流程的有效性，将 11 个测试模型与未参与算法测试且符合流道面先验的公开模型 Turb 进行实例验证。计算机配置为：Intel(R) Core(TM) i7-14650HX (2.20 GHz)及 NVIDIA GeForce RTX 4060 Laptop GPU。图 12 给出了 Turb 模型实例验证的可视化结果。由于榫头面和细节特征面数量较多，图中仅展示识别特征树对应顶层节点的部分子节点。

表 6 给出了 12 个模型的识别准确率，整体准确率定义为完整识别流程结束后，语义标签正确的拓扑面数量与模型拓扑面总数之比。在满足流道回转面先验条件的 8 个模型上，整体识别准确率均不低于 95.41%，能够满足实际应用需求。

本文方法以流道面为回转面作为先验条件。表 6 中 Blade18、CRB01、TB2 和 Rhom 的识别结果

表明，当该先验条件不成立时，流道面识别错误会向后续拓扑语义分割传播。

表6 12个叶片模型的实例识别结果

Table 6 Recognition results of twelve blade models

叶片模型	细节特征正确数/总数	叶身曲面正确数/总数	整体准确率	运行时间(ms)
Blade18*	10/10	1/1	34.6%	441
CRB01*	6/6	2/2	50%	572
EDUA	28/28	4/4	100%	4907
TB2*	-	1/1	37.5%	74
Rhom*	38/38	7/7	41.98%	4120
Turb	34/34	4/4	100%	5956
模型 1	18/18	4/4	100%	603
模型 2	8/8	4/4	100%	428
模型 3	8/8	4/4	97.78%	1773
模型 4	63/63	1/1	100%	3123
模型 5	47/48	1/1	98.78%	3405
模型 6	56/63	4/4	95.41%	4550

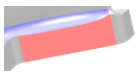
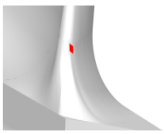
注：*表示不符合流道面先验的叶片模型。

细节特征列统计前置阶段的正确数/总数；漏识别面仍可能在后续被识别为根部转接圆角或叶身，因此与最终整体准确率不一一对应。错误主要源于交线求解接口不稳定影响边凹凸性判断、自由曲面圆角不满足定曲率条件以及非常规倒角或碎面，表 7 展示了识别失败的部分案例与可视化。

受 CAM 平台仅支持 IGES 格式模型文件的限制，算法运行时间主要集中于数据准备阶段，包括拓扑面边提取、几何属性获取、面法向方向判定与修正、拓扑关系建立及属性邻接图构建等。数据准备完成后，各模型叶片特征识别时间约为 3～50 ms，表 6 中的运行时间为包含如上数据准备和特征识别的完整流程耗时。总体而言，算法运行时间主要受模型规模及数据预处理开销影响，后续将重点优化数据准备阶段的计算流程与代码实现，以进一步提升整体识别效率。

表7 错误案例原因分析与可视化

Table 7 Error case analysis and visualization

模型	错误原因	示意图
模型 3	流道面被根部圆角挤占，导致该流道辅助面未被正确识别，但归入榫头面中。	
模型 5	不规则倒角未被识别。	
模型 6	根部转接存在碎面。	

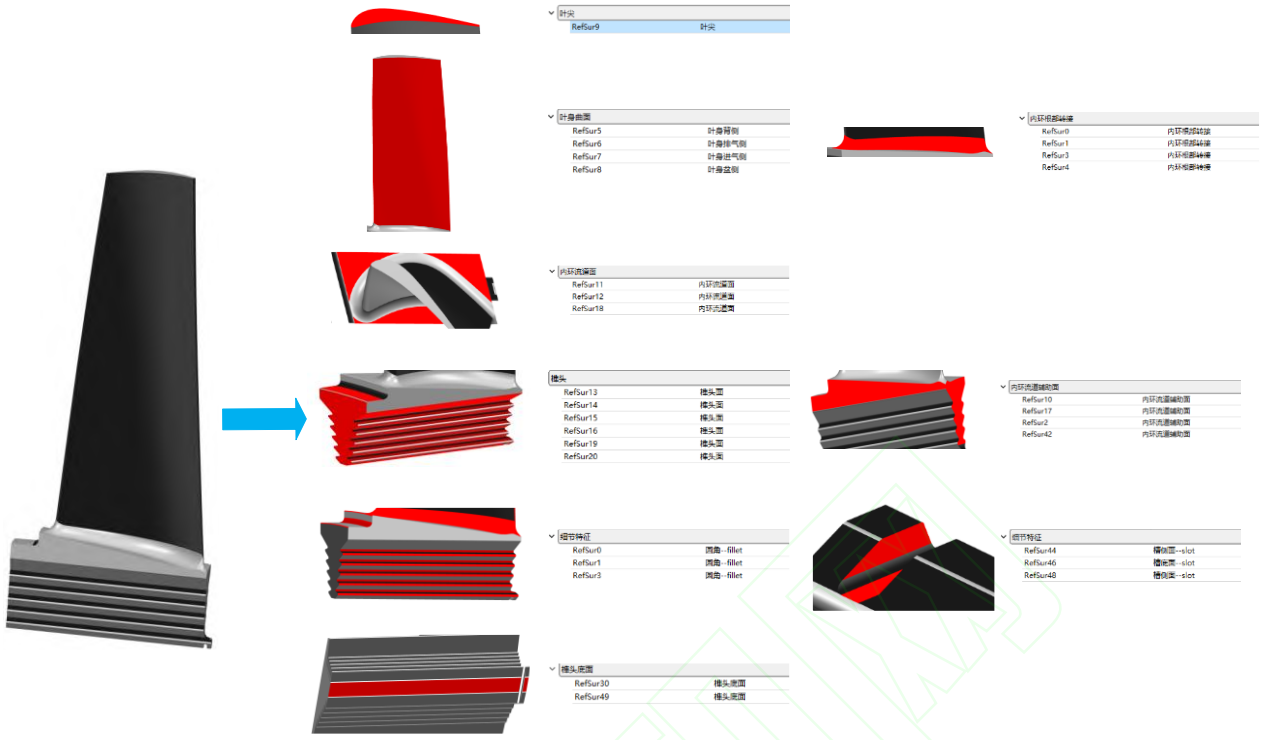


图 12　Turb 叶片模型及其识别结果
Fig. 12　Turb blade model and recognition results

4 结论

1) 构建物理面积加权曲率场域，并以面内高曲率带和全局高曲率特征筛选最优种子面，再通过拓扑邻域搜索识别其余叶身曲面。该策略无需为不同分割形式逐一制作固定模板；在 105 个原始及变种模型上，模型完全正确率为 96.19%，面级 Precision、Recall 和 F1 分别为 96.88%、95.99%和 96.43%。

2) 以流道面为解耦边界构建四条拓扑语义约束，将叶身识别结果扩展为叶身、榫头、叶冠及其附属特征的结构分割与语义标注，从而形成由几何特征提取到完整叶片语义识别的统一流程。

3) 在实例验证中，8 个满足流道回转面先验条件的模型整体识别准确率均不低于 95.41%；完整流程耗时为 74～5956 ms，其中主要开销来自 IGES 模型的数据准备，数据准备后的特征识别阶段耗时约为 3～50 ms。

4) 本文对流道面存在先验条件且存在失效风险。4 个平面流道面的公开模型整体准确率仅为 34.6%～50.0%，说明该先验失效会向后续拓扑语义分割传播；未来需研究不依赖单一曲面类型的流道面识别方法。

参考文献（References）

[1] 何皓辰，方正，卢政达，等．PT-MFR：一种基于 Point Transformer 的 CAD 模型加工特征识别方法[J]．中国科学院大学学报（中英文），2026，43（1）：115-124.
He H C,Fang Z,Lu Z D,et al.PT-MFR:A machining feature recognition method for CAD models based on Point Transformer[J].Journal of University of Chinese Academy of Sciences,2026,43(1):115-124(in Chinese).

[2] Marchetta M G,Forradellas R Q.An artificial intelligence planning approach to manufacturing feature recognition[J].Computer-Aided Design,2010,42(3):248-256.

[3] Deng T,Li Y,Liu X.An inexact subgraph matching algorithm for subpart retrieval in NC process reuse[J].Journal of Manufacturing Systems,2023,67:410-423.

[4] Vandenbrande J H,Requicha A A G.Spatial reasoning for the automatic recognition of machinable features in solid models[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1993,15(12):1269-1285.

[5] 李旺，刘厚才，康辉民，等．基于图和体分解的异型零件加工特征识别方法[J]．工程设计学报，2023，30（5）：545-553.
Li W,Liu H C,Kang H M,et al.Machining feature recognition method of special-shaped parts based on graph and volume decomposition[J].Chinese Journal of Engineering Design,2023,30(5):545-553(in Chinese).

[6] Li Y,Li E,Lenover M,et al.Edge adjacency graph and neural network architecture for machining feature recognition[J].The International

Journal of Advanced Manufacturing Technology,2025,136(2):897-908.
[7] Wang M,Yang G,Du Z,et al.EAGNet:A graph neural network architecture for machining feature recognition[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2026,144(3-4):2119-2135.
[8] 李济洲．基于混合策略的航空发动机机匣零件加工特征识别方法研究[D]．武汉：华中科技大学，2023：51-62.
Li J Z.Research on machining feature recognition methods for aero-engine casing parts based on a hybrid strategy[D].Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2023:51-62(in Chinese).
[9] 汤志鸿，郑国磊，郑艺玮．飞机框肋类零件基础特征自动识别与提取算法[J]．北京航空航天大学学报，2019，45（4）：811-820.
Tang Z H,Zheng G L,Zheng Y W.Automatic recognition and extraction algorithm of basic features for aircraft frame and rib parts[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2019,45(4):811-820(in Chinese).
[10] 石叶楠，郑国磊．三种用于加工特征识别的神经网络方法综述[J]．航空学报，2019，40（9）：182-198.
Shi Y N,Zheng G L.A review of three neural network methods for manufacturing feature recognition[J].Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2019,40(9):182-198(in Chinese).
[11] Fan Q M,Cao Y,Liu H J.Research on aero engine blade information model based on manufacturability evaluation[J].Advanced Materials Research,2011,346:294-300.
[12] Xiao W L,Liu G Y,Zhao G.Generating the tool path directly with point cloud for aero-engine blades repair[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part B:Journal of Engineering Manufacture,2021,235(5):877-886.
[13] 蔡舒妤，郝峰伟，史涛．基于邻域点特征分割与对应的航空发动机叶片损伤点云配准[J]．北京航空航天大学学报，2025，51（3）：784-794.
Cai S Y,Hao F W,Shi T.Partition based on features of neighborhood points and corresponding point cloud registration of aero-engine damaged blade[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2025,51(3):784-794(in Chinese).
[14] 李加森，赵威，辛云，等．航空发动机叶片典型特征设计制造一体化建模技术研究[J]．工具技术，2025（12）：1-8.
Li J S,Zhao W,Xin Y,et al.Integrated design and manufacturing modeling technology for typical features of aero-engine blades[J].Tool Engineering,2025(12):1-8(in Chinese).
[15] 赵霞，刘永华，宋猛，等．基于 MBD 的叶片 CAPP-NC 系统研究[J]．机械设计与制造工程，2022，51（7）：58-61.
Zhao X,Liu Y H,Song M,et al.Research on CAPP-NC system of blade based on MBD[J].Machine Design and Manufacturing Engineering,2022,51(7):58-61(in Chinese).
[16] Berkmans F,Bartkowiak T,Grochalski K,et al.Curvature-based multiscale feature extraction for surface quality inspection in manufacturing[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2026,142(9-10):4567-4592.
[17] Wan Q H,Zou L,Wang W X,et al.Curvature point cloud-based 3D cladding segmentation for robotic belt grinding of remanufactured aero-engine blades[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2026,144(3-4):2781-2794.
[18] 周敏，郑国磊，郑祖杰．基于模糊推理的飞机结构件平顶筋自动识别方法[J]．浙江大学学报（工学版），2018，52（3）：591-598.
Zhou M,Zheng G L,Zheng Z J.Automatic recognition method based on fuzzy inference for planar-top rib in aircraft structural parts[J].Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2018,52(3):591-598(in Chinese).
[19] 薛顺聪．面向工艺智能决策的焊接零件特征识别方法研究[D]．郑州：郑州大学，2024：29-39.
Xue S C.Research on feature recognition methods for welded parts oriented toward intelligent process decision-making[D].Zhengzhou:Zhengzhou University,2024:29-39(in Chinese).