

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.01.006

## 基于 MCF 的改进 VF2 缺口识别算法研究

郭喜锋<sup>1</sup>, 李博朝<sup>1</sup>, 贺杰<sup>2</sup>, 韩子默<sup>1</sup>, 张泽松<sup>1</sup>

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**摘要:** 在现有三维几何规则识别方法的基础上, 本文提出一种基于属性邻接图的密闭腔体缺口特征识别算法。该算法首先通过构建面-边属性邻接图, 将几何与拓扑信息进行统一表达, 为复杂结构特征的识别提供了更直观和系统的描述方式。在此基础上, 结合缺口模板库与改进的 VF2 子图同构算法, 实现对目标模型中潜在缺口区域的自动匹配与判定。为提高匹配效率, 算法在搜索过程中引入节点限制度与启发式排序策略, 有效缓解了状态空间爆炸问题, 显著降低了计算复杂度。实验结果表明, 该方法在多类缺口特征的自动识别中优于传统规则方法, 具有更强的鲁棒性、精度与通用性, 为三维几何建模中的自动检测与特征识别提供了高效可扩展的解决方案。

**关键词:** 特征识别; 图匹配; 启发式排序; 子图同构

**中图分类号:** TP18; TH16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2026)01-0073-09

## Improved VF2 Algorithm for Notch Feature Recognition Based on MCF

GUO Xifeng<sup>1</sup>, LI Bochao<sup>1</sup>, HE Jie<sup>2</sup>, HAN Zimo<sup>1</sup>, ZHANG Zesong<sup>1</sup>

(1. Chengdu Aircraft Industrial(Group) Coporation Ltd., Chengdu 610092, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Building upon existing methods for three-dimensional geometric rule recognition, this paper proposes a sealed-cavity notch feature recognition algorithm based on an attributed adjacency graph (AAG). The algorithm first constructs a face-edge AAG to achieve a unified representation of geometric and topological information, thereby providing a more systematic and intuitive description framework for complex structural features. On this basis, the proposed method integrates a notch template library with an improved VF2 subgraph isomorphism algorithm to automatically match and identify potential notch regions within the target model. To enhance computational efficiency, a node constraint mechanism and heuristic ordering strategy are introduced during the search process, effectively mitigating the state-space explosion problem and significantly reducing computational complexity. Experimental results demonstrate that the proposed approach outperforms traditional rule-based methods in the automatic recognition of multiple types of notch features, exhibiting superior robustness, accuracy, and generality. This work provides an efficient and extensible solution for automatic detection and feature recognition in three-dimensional geometric modeling.

**Key words:** feature recognition; graph matching; heuristic ordering; subgraph isomorphism

在飞机结构设计与制造中, 密闭腔体主要承担密封与承载双重功能, 常用于存储燃油、液压介质或其他工质, 同时需要抵御飞行过程中复杂的气动压力与结构载荷。它的几何结构通常由多类曲面

围合而成, 空间布局紧凑, 对零部件之间的装配精度和表面连续性具有极高要求, 密闭腔体示例如图 1 所示。若腔体存在几何缺陷或装配误差, 不仅可能导致介质泄漏, 影响密封性能, 还会削弱结构整

收稿日期: 2025-11-11; 修订日期: 2026-01-29

通信作者: 李博朝, 女, 工程师, E-mail: 1141943781@qq.com。

引用格式: 郭喜锋, 李博朝, 贺杰, 等. 基于 MCF 的改进 VF2 缺口识别算法研究[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(1): 73-81. GUO Xifeng, LI Bochao, HE Jie, et al. Improved VF2 algorithm for notch feature recognition based on MCF[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2026, 58(1): 73-81.

体的安全性与可靠性。因此,精确识别密闭腔体零部件的缺口几何特征并评估其结构完备性,对于保障装配质量、提升密封效果及增强飞机整体性能具有重要意义。

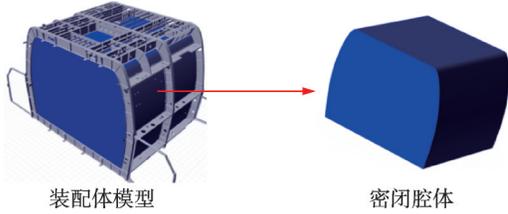


图 1 飞机装配结构中的密闭腔体示例

Fig.1 Examples of sealed cavities in aircraft assembly structure

然而,在实际的三维装配模型中,由于相邻零件之间未完全接触但处于一定接近范围内的表面所形成的局部几何区域,称为缺口。该类区域通常由零件的部分表面轮廓共同围成,其空间位置互相对应且近似平行,多出现于零件相邻但未实现完全贴合的边界位置。4类典型缺口类型如图 2 所示,其中:图(a)为下陷 R 区型缺口,图(b)为框梁套合型缺口,图(c)为叠层搭接型缺口,图(d)为小 R 包大 R 型缺口,外侧零件的弯曲半径  $R1 < R2$ 。

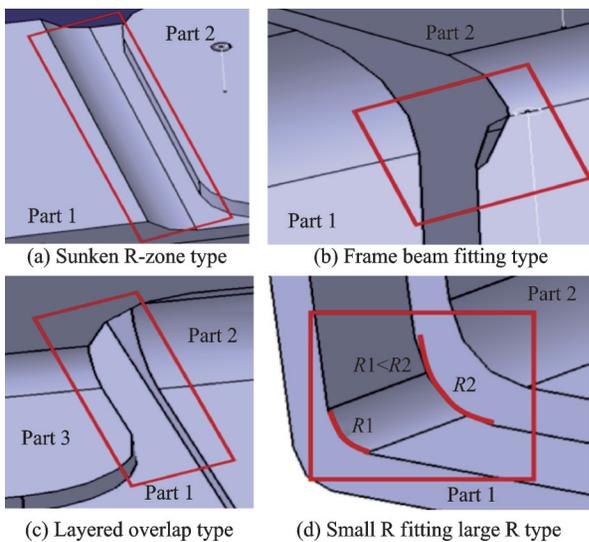


图 2 4类典型缺口示例图

Fig.2 Examples of four typical types of gaps

作为零件之间的一种典型局部几何特征,缺口的存在直接影响腔体的完整性判断,是密封性分析、装配精度评估以及后续工艺优化中的重要判据。由于这类特征形态复杂、分布隐蔽且可能引发装配干涉,若不能被及时准确识别,极易造成密封失效、结构误差或干涉返工,从而影响产品的交付效率与性能稳定性。现有方法多依赖人工目视分析,或采用基于单一几何规则的匹配检测方式,如

通过设定固定阈值判断曲面间隙或法向关系。这类方法在处理复杂曲面和多样化缺口时识别精度不足,且难以满足大规模模型的自动化检测需求。因此,构建面向缺口识别的智能图模型与匹配机制,已成为航空计算机辅助设计(Computer-aided design, CAD)与制造准备中的关键研究方向。

现有研究主要聚焦于以下 3 方面:一是从三维边界表示(Boundary representation, B-Rep)模型中自动提取几何与拓扑信息,构建表达面-边关系的属性数据结构<sup>[1]</sup>。该方法能够为后续的特征识别与匹配提供统一的数据表达基础,但在处理大规模复杂模型时,容易出现数据冗余和拓扑裂缝,导致提取效率和稳定性不足。二是通过预定义规则<sup>[2]</sup>或模板<sup>[3-6]</sup>方式对典型几何结构进行分类标识,能够较好地识别常见的标准化几何特征,提升了识别的自动化程度,但在缺口特征表现为多面组合或自由曲面构型时,规则表达能力受限,难以覆盖所有复杂情况。三是基于启发式搜索或图匹配算法进行匹配求解与验证评估<sup>[7]</sup>,在一定程度上能够提高对复杂空间关系的刻画能力,适用于不规则几何特征<sup>[8-9]</sup>的识别,但往往计算复杂度高,对初始节点排序或剪枝策略<sup>[10-12]</sup>依赖较强,容易出现效率下降或误识别的问题<sup>[13-16]</sup>。

总体而言,现有方法多依赖基于曲率规则的特征判断或基于布尔组合关系的连接检测,其优势在于能够针对特定几何模式快速判定,但当缺口结构表现为非标准曲率分布或多类曲面拼接时,判定条件难以准确表达结构语义。同时,规则扩展能力有限、计算效率偏低以及误识别率高等问题,仍是当前方法普遍存在的不足。

针对上述方法在处理复杂缺口结构时存在规则表达能力不足、计算效率低和误识别率高等问题,本文提出一种基于属性邻接图建模与子图匹配推理相结合的密闭腔体缺口特征自动识别方法。具体而言,该方法通过构建属性邻接图(Attributed adjacency graph, AAG),在图结构中同时编码面与面之间的几何属性和拓扑连接关系,从而避免了单纯依赖曲率或布尔判定时的语义缺失问题。进一步地,本文引入结合启发式排序的 VF2 子图同构算法,实现了对复杂多面组合和自由曲面构型缺口的高效匹配与语义识别。相比传统的规则判定方法,该方法具备更强的结构表达能力与泛化能力;相比直接图匹配方法,又通过启发式排序提升了搜索效率与匹配精度,从而能够兼顾准确性与可扩展性。本文在典型密闭腔体三维模型上开展了

实验验证,结果表明,该方法能够显著提升缺口结构识别的自动化程度与准确性。

### 1 基于MCF的改进VF2子图识别算法

为了提升在复杂油箱部件三维模型中缺口特征的识别效率,本文在经典VF2子图匹配算法的框架下,引入MCF(Most constrained first)节点排序策略,形成一种属性引导式的改进方法。VF2算法是一种常用的图匹配方法,能够通过递归扩展与剪枝机制实现子图同构搜索,具有较好的泛用性和效率。MCF策略是一种基于约束优先的启发式节点排序方法,其核心思想是在匹配搜索前对模板子图节点进行约束强度评估,并按照评分结果确定匹配顺序,使搜索过程优先扩展约束性最强的节点,从而在早期阶段即可判定不满足条件的分支,大幅减少搜索树规模并提升剪枝效率。

本文的输入数据来源于零件三维模型生成的属性邻接图G,示例零件三维模型如图3所示,对应属性邻接图G如图4所示;缺口模板子图库T,库中的每个模板子图Gi定义为四元组,4类典型缺口结构示例及其对应的缺口模板子图如图5~9所示。

$$\begin{cases} G=(V, E, A, B) \\ T=\{G'_1, G'_2, \dots, G'_m\} \\ G'_i=(V'_i, E'_i, A'_i, B'_i) \quad i \in [1, m] \end{cases} \quad (1)$$

式中:V与E分别表示模型图的节点集合和边集合;A与B分别表示节点属性集合与边属性集合;Vi、Ei、Ai、Bi对应于缺口子图的节点集合、边集合、节点属性集合、属性集合。

图4中,节点表示模型中的面片,边表示相邻面的拓扑连接关系。不同颜色的节点区分凹面、凸面和平面;边上的数字表示边的凹凸性;边的颜色表示类型,如直线、圆弧、样条和椭圆等。

相关几何属性的提取与模板定义方法现有研究中已较为完善,本文不再展开细节,而是重点介绍在此基础上提出的改进算法。

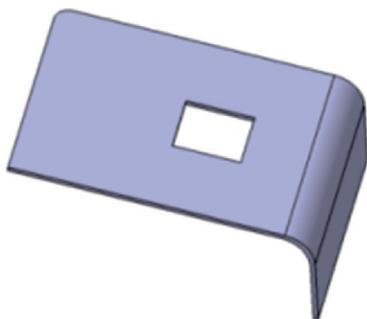


图3 示例零件  
Fig.3 Example part

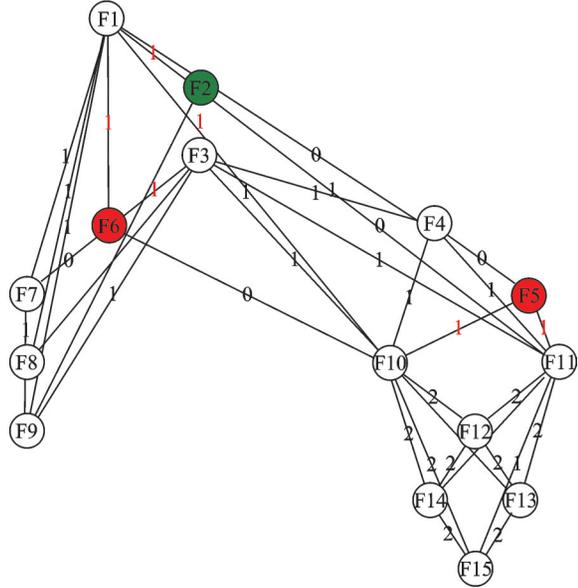


图4 示例零件的属性邻接图  
Fig.4 Attribute adjacency graph of example part

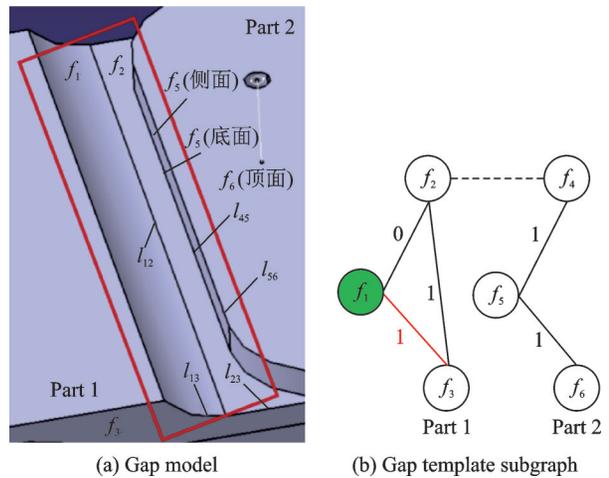


图5 下陷R区型缺口  
Fig.5 Sunken R-zone type gap

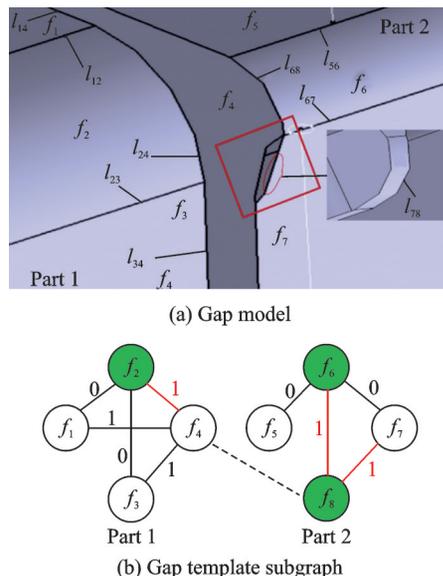
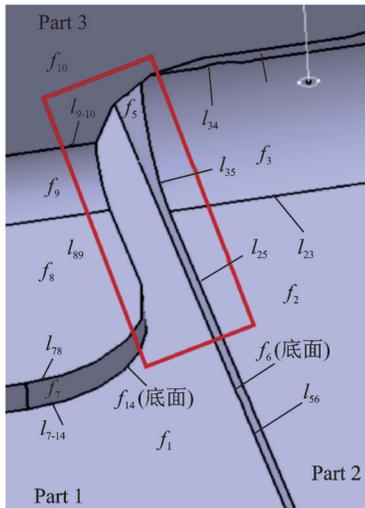
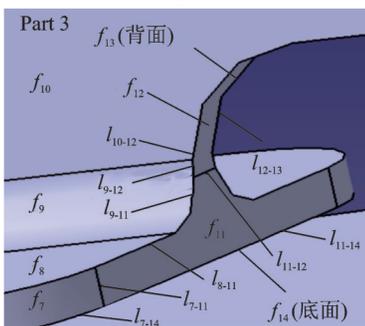


图6 框架套合型缺口  
Fig.6 Frame beam fitting type gap



(a) Gap model



(b) Gap template subgraph

图 7 叠层搭接型缺口

Fig.7 Layered overlap type gap

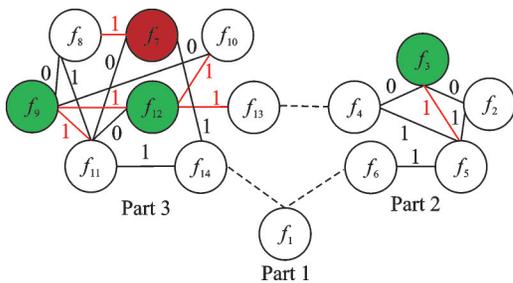
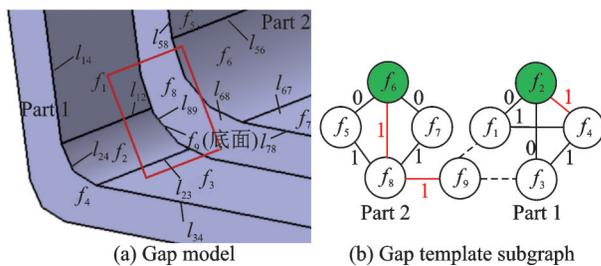


图 8 叠层搭接型缺口模板子图

Fig.8 Layered overlap type gap template subgraph



(a) Gap model

(b) Gap template subgraph

图 9 小 R 包大 R 型缺口模板子图

Fig.9 Small R fitting large R type gap template subgraph

## 2 算法流程

改进算法的整体流程分为 3 部分。预处理阶段:从三维模型中构建属性邻接图并获得缺口模板子图。随后,对模板子图的各节点计算 MCF 评

分,根据评分结果生成降序排列的匹配顺序序列,以保证后续搜索过程中优先扩展约束性最强的节点。搜索阶段:在 VF2 的深度优先搜索框架下,按照预先确定的节点顺序逐一选择模板节点,构建候选映射集。对每一个候选映射,依次进行属性一致性检查、边约束一致性检查和前瞻性容量校验。若候选节点满足全部约束,则扩展匹配并更新邻域集合;若不满足条件,则立即剪枝回溯,从而有效缩小搜索空间。终止阶段:当所有模板节点均成功完成匹配时,得到完整的映射结果,即识别出目标缺口子图;若所有分支均回溯终止而未能满足全部约束条件,则输出无解。算法整体流程如图 10 所示。

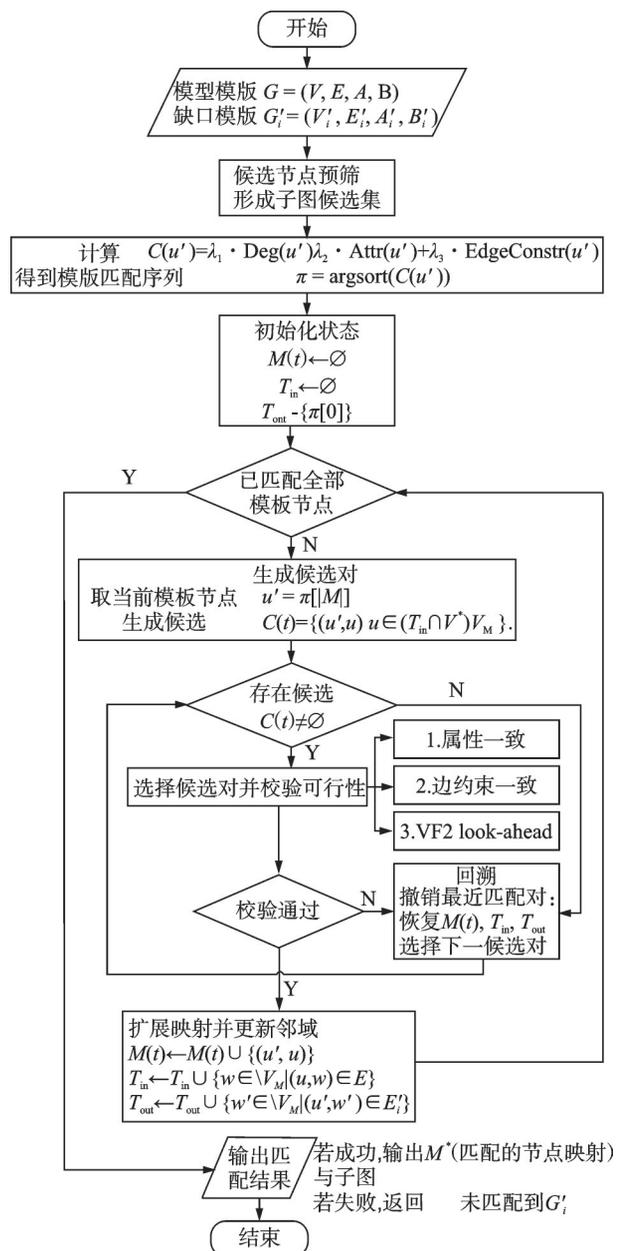


图 10 基于 MCF 的 VF2 匹配流程图

Fig.10 VF2 matching flowchart based on MCF

### 2.1 预处理阶段

首先需要从三维模型中提取面与边的几何信

息,并据此构建属性邻接图  $G$ 。为降低搜索规模,可选地在目标图中建立候选节点池  $V^*$ ,筛选条件定义为

$$V^* = \{u \in V \mid \text{type}(u) = \text{type}(u'), \text{conv}(u) = \text{conv}(u'), \angle(n(u), n(u')) \leq \epsilon_n\} \quad (2)$$

式中: $u'$ 为模板节点类型代表,用于预筛一致属性的候选;预筛选角度阈值取  $\epsilon_n = 10^\circ$ ,该阈值依据航空零部件三维模型中常见的建模误差与装配设计余量确定,用于在预处理阶段保留潜在缺口相关面节点,避免因局部法向偏差造成候选漏检。需要说明的是,该阈值仅用于候选节点的初步筛选,后续在 VF2 搜索阶段仍通过更严格的角度容差与边约束一致性条件进行精确判定。随后,对模板子图的每个节点计算 MCF 节点评分,有

$$C(u') = \lambda_1 \cdot \text{Deg}(u') + \lambda_2 \cdot \text{Attr}(u') + \lambda_3 \cdot \text{EdgeConstr}(u') \quad (3)$$

式中: $C(u')$ 表示节点  $u'$  的综合约束评分,用于衡量该节点在子图匹配过程中的限制强度与判别能力,评分值越大,表示该节点在拓扑结构与几何约束中越具区分性,应在匹配过程中优先处理; $\text{Deg}(u')$ 表示节点的拓扑度,用于刻画节点在模板图中的连接复杂程度,度数越大,说明该节点参与的拓扑关系越多,对整体结构约束越强; $\text{Attr}(u')$ 表示面属性复杂度指标,用于衡量该面在类型、凹凸性及法向特征等方面的几何判别能力; $\text{EdgeConstr}(u')$ 表示边属性的限制强度指标,用于反映其与邻接节点之间在夹角与凹凸关系上的限制程度;权重系数  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  分别用于平衡拓扑约束、面属性约束与边属性约束在综合评分中的影响比例,且满足  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。在本文实验中,考虑到拓扑结构在缺口模板中具有更稳定的区分能力,因此设置  $\lambda_1 = 0.4$ ,表示节点在拓扑结构中的核心程度;而几何属性与边约束在实际模型中存在一定容差波动,相应设置  $\lambda_2 = 0.3, \lambda_3 = 0.3$ 。

$\text{Deg}(u')$ :节点度数,定义为

$$\text{Deg}(u') = |\{v' \in V_i' \mid (u', v') \in E_i'\}| \quad (4)$$

本函数模板中与  $u'$  相邻连接的其他节点数,反映该节点在图结构中的核心程度。度数越高,越可能参与关键拓扑结构,因此应优先匹配。

$\text{Attr}(u')$ :面属性复杂度,定义为

$$\text{Attr}(u') = \omega_{\text{type}} + \omega_{\text{convexity}} + \omega_{\text{normal}} \quad (5)$$

式中: $\omega_{\text{type}}$ 表示面类型复杂度, $\omega_{\text{convexity}}$ 表示凹凸性权重, $\omega_{\text{normal}}$ 表示法向特殊性。

本函数综合考虑了面类型、几何属性和法向朝向 3 个因素,用于刻画该面在识别中的独特性。属

性越复杂,越具识别价值,须优先匹配。其中,面类型复杂度用于区分平面、柱面等不同几何类别;凹凸性权重用于反映该面在腔体结构中是内表面还是外表面;法向特殊性用于刻画该面在空间朝向上的判别能力。

边约束强度,定义为

$$\text{EdgeConstr}(u') = \sum_{(u', v') \in E_i'} (\gamma_1 \cdot \text{AngleR}(b_{u'v'}) + \gamma_2 \cdot \text{Convexity}(b_{u'v'})) \quad (6)$$

其中每个边上的约束由两部分构成,即

夹角范围限制强度,定义为

$$\text{AngleR}(b_{u'v'}) = \begin{cases} 1 & \text{若存在夹角区间(如 } \theta \in [30^\circ, 60^\circ]) \\ 0.5 & \text{若仅设上下界区域} \\ 0 & \text{无角度约束} \end{cases} \quad (7)$$

凹凸性限制强度,定义为

$$\text{ConvexityS}(b_{u'v'}) = \begin{cases} 1 & \text{若严格匹配凹/凸边} \\ 0.5 & \text{可匹配光顺边或凹/凸边} \\ 0 & \text{无要求} \end{cases} \quad (8)$$

式中:系数  $\gamma_1, \gamma_2$  表示两类限制的相对重要性,设置为  $\gamma_1 = 0.6, \gamma_2 = 0.4$ ;夹角约束在刻画相邻面空间关系中具有更高的稳定性,因此赋予较高权重;凹凸性约束主要用于辅助区分结构语义,其权重相对较低。该函数评价该节点与周边连接的结构匹配难度,总值越大,越应优先匹配。

随后,根据评分结果对节点按  $C(u')$  降序排列,排序结果  $\pi$  即为 VF2 匹配过程中节点匹配顺序输入序列

$$\pi = \arg \text{sort}(C(u')) \quad (9)$$

后续 VF2 搜索严格遵循序列  $\pi$  的顺序展开。

## 2.2 搜索阶段

首先初始化匹配状态,定义当前匹配集为

$$M(t) = \{(u', u) \mid u' \in V_i', u \in V, u' \leftrightarrow u\} \quad (10)$$

式中: $M(t)$ 表示模板图  $G_i' = (V_i', E_i')$  中已匹配的节点  $u'$  与目标图中节点  $u$ ,在当前搜索状态  $t$  下的映射关系。此集合是搜索状态的核心,记录每一步匹配对,并在搜索成功时作为最终结果返回。对应的已匹配节点集合为

$$\begin{cases} V_M = \{u \in V \mid \exists (u', u) \in M(t)\} \\ V_M' = \{u' \in V' \mid \exists (u', u) \in M(t)\} \end{cases} \quad (11)$$

为了在搜索过程中限定扩展范围,定义两侧邻域集合

$$\begin{cases} T_{in} = \{u \in V \setminus V_M | \exists v \in V_M, (u, v) \in E\} \\ T_{out} = \{u' \in V \setminus V'_M | \exists v' \in V'_M, (u', v') \in E'\} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $T_{in}$  表示目标图中与当前匹配映射中节点相邻、但尚未被匹配的节点集合;  $T_{out}$  表示模板图中当前已匹配节点所连接的未匹配邻接节点集合; 二者保证扩展在连通邻域内进行, 避免拓扑孤立。接着进行搜索从  $\pi$  中取下一个待匹配节点, 有

$$u' = \pi[|M(t)|] \quad (13)$$

式中:  $|M(t)|$  为当前已匹配对数(即匹配深度)。该选择遵循 MCF 顺序, 可尽早触发剪枝。随后, 构建候选映射集, 优先在  $T_{in}$  中为  $u'$  选择候选, 有

$$C(t) = \{(u', u) | u \in (T_{in} \cap V^*) \setminus V_M\} \quad (14)$$

若当前层  $T_{in} = \emptyset$ , 则在  $V \setminus V_M$  中补充候选, 以保证起始扩展可行。判定  $C(t) \neq \emptyset$ ; 若为空则立即回溯。而候选映射须经过 3 类约束检查。首先是属性一致性, 即

$$\begin{cases} \text{type}(u) = \text{type}(u') \\ \text{conv}(u) = \text{conv}(u') \\ \angle(n(u), n(u')) \leq \varepsilon_n \end{cases} \quad (15)$$

其次是边约束一致性, 须满足夹角与凹凸性条件, 对所有已匹配邻居  $(v', v) \in M(t)$  且  $(u', v') \in E', (u, v) \in E$ , 有

$$\begin{cases} \theta(u, v) \in [\theta'_{min}(u', v'), \theta'_{max}(u', v')] \pm \varepsilon_\theta \\ \text{conv}(b_w) = \text{conv}(b_{u'v'}) \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\theta(u, v)$  为两面夹角; 角度容差  $\varepsilon_\theta = 5^\circ$ , 该取值综合考虑了三维 B-Rep 模型中曲面离散误差以及航空零部件装配设计中常见的几何松弛因素, 能够在保证真实缺口结构不被误删的前提下, 有效排除空间关系明显不一致的候选映射。需要说明的是, 该角度容差用于子图匹配阶段的精确一致性判定, 相较于预处理阶段采用的宽松筛选阈值, 其约束更为严格; 边凹凸性的判定采用基于两面法向与共边切向的符号测定, 以保证边类型一致。最后是前瞻性容量校验

$$|\Gamma(u') \setminus V'_M| \leq |\Gamma(u) \setminus V_M| \quad (17)$$

式中:  $\Gamma(u)$  为邻接集合。该约束确保剩余未匹配邻域在目标图中仍有足够的映射空间, 防止后续层必然失败的扩展。若 3 项均不满足, 则放弃该候选对, 进行剪枝; 否则更新匹配状态。

$$\begin{cases} T_{in} \leftarrow T_{in} \cup \{\omega \in V \setminus V_M | (u, \omega) \in E\} \\ T_{out} \leftarrow T_{out} \cup \{\omega' \in V \setminus V'_M | (u', \omega') \in E'\} \end{cases} \quad (18)$$

进入下一递归层继续从  $\pi$  选择模板节点并重复上述步骤; 若某层  $C(t) = \emptyset$  或全部候选不可行, 则回溯到上一层, 撤销最近一次  $(u', u)$

的加入并恢复  $T_{in}, T_{out}$ 。

上述深度优先过程, 即为 VF2 的状态空间搜索; MCF 通过顺序  $\pi$  将高约束节点提前, 从而在属性一致/边一致/前瞻容量 3 类检查上更早触发剪枝, 减少无效分支。

### 2.3 终止阶段

成功条件: 当

$$|M(t)| = |V'| \quad (19)$$

时, 得到完整映射  $M^*$  (模板全部节点均已找到对应节点), 输出匹配成功的子图与映射对列表。若存在多解, 则可根据适应度函数  $\text{Fit}(R)$  对多个可行匹配进行排序与筛选。

失败条件: 若搜索树遍历完毕仍无法满足全部约束的映射(即所有分支均回溯终止), 则输出无解。

## 3 实验验证

为验证本文提出的基于 MCF 的改进 VF2 缺口识别算法, 本文在 Python OpenCASCADE 库 (Python OpenCASCADE, Python OCC) 与 CATIA 组件应用架构 (CATIA component application architecture, CAA) 二次开发环境下构建了缺口特征自动识别实验平台。该平台的核心功能包括: 三维模型解析模块、属性邻接图构建模块、缺口模板子图库管理模块以及改进子图匹配模块。主要接口函数如表 1 所示。

表 1 主要接口函数与参数

Table 1 Main interface functions and parameters

函数名称	功能描述
STEPControl_Reader.ReadFile(file_path)	读取 STEP 格式的三维模型文件
STEPControl_Reader.TransferRoots()	将 STEP 文件的几何数据传输到 OCC 内部结构
BRepGProp_Face(face)	计算面的质心、法向量等几何属性
ShapeAnalysis_Surface(surface_handle).ValueOfUV(point, tol)	计算点在表面上的参数坐标 $(u, v)$
BRepBuilderAPI_MakeEdge()	基于点/直线生成边
BRepGProp_Face(face)	计算面的质心、法向量等几何属性
TopExp_Explorer(shape, TopAbs_EDGE/FACE/WIRE/VERTEX)	遍历形状中的边、面、线、点
BRep_Tool().Pnt(vertex)	获取顶点的三维坐标
BRepAdaptor_Curve(edge)	将边封装为曲线适配器
nx.Graph()	创建无向图
nx.draw_networkx_*(*)	绘制属性邻接图

系统运行流程为:用户导入零部件三维模型文件,系统自动完成B-Rep数据解析与属性邻接图生成;随后调用缺口模板子图库,并基于MCF节点排序优化的VF2算法进行子图匹配;识别结果在软件界面中高亮显示,用户可直接点击零件对观察缺口识别区域,并导出识别结果文件以支持后续验证。

实验平台的用户界面如图11所示,用户通过指定三维模型文件路径与缺口模板库,即可点击运行按钮触发识别流程;系统在后台完成子图匹配与约束校验,并在前端界面实时显示识别进度与结果。

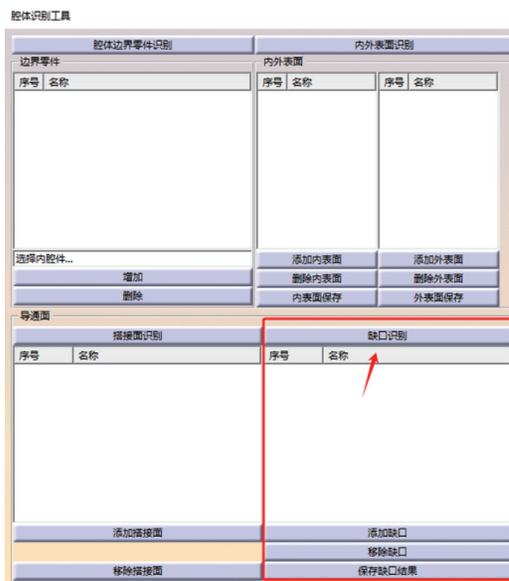


图 11 实验平台用户界面

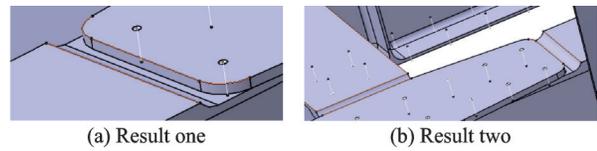
Fig.11 User interface of the experimental platform

选择某型飞机油箱结构三维模型(包含400~600个零件)作为测试数据,在实验中,从该装配体中选取48个具有代表性的零件作为测试样本,其中包含32个已知参与组成腔体缺口特征的零件以及16个不参与组成缺口特征的零件,用于综合评估算法在缺口识别与误判抑制方面的性能。本文为基于规则与图匹配的确定性算法,不涉及参数学习或模型训练过程,因此未进行训练集与验证集的划分。所有缺口模板均来源于人工构建的典型结构模板库,用于直接参与子图匹配推理。

在实验验证过程中,在相同软硬件环境下对全部测试样本独立重复运行10次,并对运行时间、匹配成功率等指标取平均值作为最终统计结果,以减小由系统调度与计算波动带来的偶然影响。通过构建三维零件模型的属性邻接图,并与缺口模板子图进行匹配,可以实现典型腔体缺口的自动识别。

在此基础上,调用改进VF2算法并结合MCF节点排序策略,对缺口模板子图库中的子图进行匹

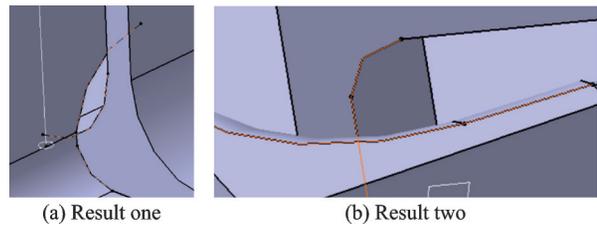
配,部分缺口识别结果如图12~15所示。识别结果中,系统在三维模型中以高亮方式标注缺口区域,如图16所示。



(a) Result one (b) Result two

图 12 部分下陷R区型缺口识别结果

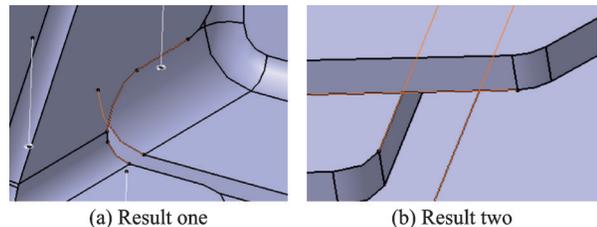
Fig.12 Recognition results of sunken R-zone type gaps (Partial)



(a) Result one (b) Result two

图 13 部分框梁套合型缺口识别结果

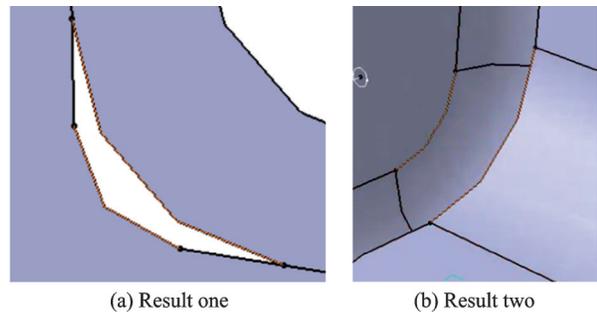
Fig.13 Recognition results of frame beam fitting type gaps (Partial)



(a) Result one (b) Result two

图 14 部分叠层搭接型缺口识别结果

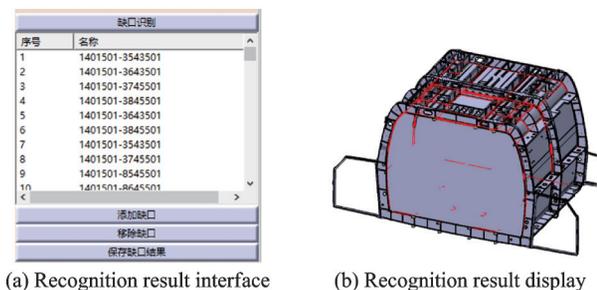
Fig.14 Recognition results of layered overlap type gaps (Partial)



(a) Result one (b) Result two

图 15 部分小R包大R型缺口识别结果

Fig.15 Recognition results of small R fitting large R type gaps (Partial)



(a) Recognition result interface (b) Recognition result display

图 16 缺口识别结果

Fig.16 Gap recognition results

为验证所提出 MCF 启发式节点排序策略对 VF2 算法性能的改进效果,本文设计了多算法对比实验。对比算法包括:(1)原始 VF2 算法;(2)基于节点度数排序的 VF2 算法(VF2+Degree),该方法仅利用拓扑结构信息对模板节点进行排序;(3)本文提出的基于多约束评分函数的改进 VF2+MCF 算法。实验采用平均运行时间、剪枝率、搜索树规模以及匹配成功率等指标对算法性能进行评估。其中,剪枝率用于衡量无效扩展的削减程度;搜索树规模表示算法在子图匹配过程中实际扩展的搜索状态节点数量,用于表征搜索空间规模与算法复杂度。匹配成功率用于衡量子图匹配过程在模板级别上的整体成功情况,其计算方式定义为:当模板缺口子图在目标零件的属性邻接图中成功找到满足所有节点与边约束条件的同构映射时,记为一次匹配成功。匹配成功率表示成功匹配的模板数量占模板库总数的比例。缺口识别精度用

于衡量算法在零件级别上对真实缺口特征的识别准确性,其计算方式定义为正确识别的缺口数量占人工标注真实缺口总数的比例。若算法识别结果与人工标注的缺口位置在拓扑结构与几何属性上均满足一致性判定条件,则视为一次正确识别。

实验结果如表 2 所示,相较于原始 VF2 算法,引入简单拓扑启发式的 VF2+Degree 在运行时间与剪枝率方面已有一定提升,但其改进幅度有限。相比之下,本文提出的 VF2+MCF 算法在平均运行时间、剪枝率及识别精度等方面均取得最优表现。具体而言,VF2+MCF 算法的平均运行时间较原始 VF2 缩短约 46.2%,剪枝率提升 26.5%,同时在匹配成功率与缺口识别精度上均表现出明显优势。上述结果表明,将几何属性与多约束信息引入节点排序过程,较仅依赖拓扑结构的启发式策略更能有效压缩搜索空间,从而显著提升复杂三维油箱零部件缺口特征识别的效率与准确性。

表 2 不同算法的效率对比

Table 2 Efficiency comparison of different algorithms

算法	平均运行时间/s	剪枝率/%	搜索树规模(节点数)	匹配成功率/%	缺口识别精度/%
VF2	28.47	41.3	$1.2 \times 10^5$	92.5	94.6
VF2+Degree	21.86	55.2	$7.6 \times 10^4$	93.4	95.2
VF2+MCF	15.32	67.8	$4.8 \times 10^4$	95.1	96.5

## 4 结 论

本文针对复杂油箱零部件三维模型中缺口特征的高效识别问题,提出了一种基于 MCF 节点排序策略的改进 VF2 子图匹配算法。通过在匹配前对模板节点进行约束性评估与排序,使得搜索过程能够优先扩展高约束节点,从而在早期阶段实现剪枝,缩小搜索树规模,有效提升了识别效率。

在实验验证中,本文方法在保证识别正确率的同时,平均运行时间较传统 VF2 算法缩短近一半,剪枝率显著提高,表明所提出的启发式策略能够在保持精度的前提下大幅优化算法效率,适用于复杂三维装配结构的缺口特征识别任务。

MCF 策略的引入表明,在三维模型识别中,仅依赖拓扑信息已难以满足复杂结构的需求,结合几何属性和约束条件进行综合建模与排序,将成为提高子图识别效率的重要途径。

展望未来,本文提出的 MCF 节点排序框架仍具有进一步提升空间。一方面,可引入图神经网络(GNN)对属性邻接图进行表示学习,通过大量模型样本自动学习节点的约束强度或匹配优先级,用于替代或修正现有 MCF 评分函数中依赖人工经验设定的权重参数,从而减少启发式规则对人工调

参的依赖。该方式可作为对现有基于规则的节点排序策略的增强模块,而非完全替代,使学习结果直接服务于 VF2 搜索过程中的节点选择与剪枝决策。另一方面,本文方法可进一步拓展至装配路径规划、腔体导通面识别以及复杂结构缺陷检测等三维工程应用场景,为复杂装备数字化设计与分析提供更加智能化的技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 舒敏, 杨涛. 结合属性邻接图与点云的零件模型特征识别方法[J]. 现代制造工程, 2024(12): 94-101.  
SHU Min, YANG Tao. A part model feature recognition method combining attribute adjacency graph and point cloud[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2024(12): 94-101.
- [2] SHI P Z, QI Q F, QIN Y C, et al. Intersecting machining feature localization and recognition via single shot multibox detector[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(5): 3292-3302.
- [3] 张怡, 赵玉申, 洪大良. 某插件用蒸汽腔均温板的结构设计及性能研究[J]. 电子机械工程, 2025, 41(4): 15-18, 54.  
ZHANG Yi, ZHAO Yushen, HONG Daliang. Structure design and performance study of a vapor chamber

- heat spreader for plug-in modules[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2025, 41(4): 15-18, 54.
- [4] ALEMANNI M, DESTEFANIS F, VEZZETTI E. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 52(1): 1-14.
- [5] 董景霖,付航.基于特征识别的航空发动机燃烧室机匣加工工艺分析[J]. *现代制造技术与装备*, 2025, 61(7): 177-179, 217.
- DONG Jinglin, FU Hang. Analysis of the processing technology of aeroengine combustion chamber casing based on feature recognition[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2025, 61(7): 177-179, 217.
- [6] TRAN T A, LOBOV A, KAASA T H, et al. CAD integrated automatic recognition of weld paths[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(7): 2145-2159.
- [7] BYUNG C K, DUHWAN M. Feature-based simplification of boundary representation models using sequential iterative volume decomposition[J]. *Computers & Graphics*, 2014, 38: 97-107.
- [8] 王宇,刘旭,仲杰鹏.航空发动机机匣零件加工特征交互识别方法[J]. *机械设计与制造工程*, 2025, 54(6): 84-88.
- WANG Yu, LIU Xu, ZHONG Jiepeng. Interactive recognition method of machining features for aero-engine casing parts[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2025, 54(6): 84-88.
- [9] 谢飞,郭宇,张红蕾,等.基于图和子图同构算法的制造特征识别方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(3): 390-396.
- XIE Fei, GUO Yu, ZHANG Honglei, et al. Manufacturing feature recognition based on graph and sub-graph isomorphism algorithm[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50(3): 390-396.
- [10] 张美玉,张立军,林明梁,等.一种改进深度强化学习的MBD语义推理方法[J]. *小型微型计算机系统*, 2021, 42(11): 2337-2343.
- ZHANG Meiyu, ZHANG Lijun, LIN Mingliang, et al. Improved deep reinforcement learning-based MBD semantic reasoning method[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2021, 42(11): 2337-2343.
- [11] YUSOF Y, LATIF K. Survey on computer-aided process planning[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75(1): 77-89.
- [12] 郑砥国,刘静华,李士才,等.采用图同构判定的工厂设计模型数据匹配研究[J]. *工程图学学报*, 2008, 29(3): 62-68.
- ZHENG Diguo, LIU Jinghua, LI Shicai, et al. Research on matching the model data in plant design using graph isomorphism[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2008, 29(3): 62-68.
- [13] 张建琪,龚时华,喻道远,等.回转体零件CAD/CAM集成系统[J]. *电子机械工程*, 1999, 15(4): 25-28.
- ZHANG Jianqi, GONG Shihua, YU Daoyuan, et al. CAD/CAM intergrated system of rotational parts[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 1999, 15(4): 25-28.
- [14] YEO C, CHEON S, MUN D. Manufacturability evaluation of parts using descriptor-based machining feature recognition[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2021, 34(11): 1196-1222.
- [15] ZHANG Z B, JAISWAL P, RAI R. FeatureNet: Machining feature recognition based on 3D convolution neural network[J]. *Computer-Aided Design*, 2018, 101: 12-22.
- [16] WEN X J, LIU J F, DU C X, et al. The key technologies of machining process design: A review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(5/6): 2903-2921.

(编辑:胥橙庭)