

计算机应用

## 典型飞机蒙皮零件工艺特征识别与智能检索方法

钱文鑫<sup>1</sup>, 李 强<sup>2</sup>, 卢 鹄<sup>2</sup>, 陈保国<sup>2</sup>, 张希磊<sup>1</sup>, 柳玉起<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 201324)

**摘要:**为解决飞机蒙皮模面设计中存在的过程复杂、依赖设计经验以及工艺知识重用程度低的问题,基于截面线方法提取工艺参数,实现了蒙皮拉伸成形工艺特征的数字化表达。采用最近邻策略,基于插值方法将特征矩阵标准化,并改进传统的TOPSIS算法,引入鲁棒标准化算法,排除了工艺参数极端值的影响,提高了相似度计算的稳定性和可靠性。基于以上研究,开发了一套工艺特征识别与相似度匹配的蒙皮成形工艺快速检索系统,实现了飞机蒙皮工艺零件的快速检索和知识重用。通过企业现场应用测试,系统的工艺搜索准确率达到90.5%,显著提升了蒙皮零件工艺设计的效率与质量。

**关键词:** 飞机蒙皮; 拉伸成形; 知识重用; 特征识别; 快速检索系统

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.031

中图分类号: V262.3<sup>+</sup>2; TP29

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 12-0250-07

## Process feature recognition and intelligent retrieval method for typical aircraft skin part

Qian Wenxin<sup>1</sup>, Li Qiang<sup>2</sup>, Lu Hu<sup>2</sup>, Chen Baoguo<sup>2</sup>, Zhang Xilei<sup>1</sup>, Liu Yuqi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China)

**Abstract:** To solve the problems of complex die surface design process for aircraft skin, dependence on design experience and low reuse degree of process knowledge, the process parameters were extracted based on section line method to achieve the digital expression of the aircraft skin forming process feature. Then, through adopting the nearest neighbor strategy, the influences of extreme values of the process parameters were eliminated, and the stability and reliability of similarity calculations were improved by standardizing the feature matrix based on interpolation methods, improving the traditional TOPSIS algorithm and introducing a robust normalization algorithm. Furthermore, based on the above research, a rapid retrieval system for aircraft skin forming process of process feature recognition and similarity matching was developed to achieve fast retrieval and knowledge reuse of aircraft skin process parts. The results of on-site application testing in enterprise show that the process search accuracy of system reaches 90.5%, significantly improving the efficiency and quality of process design for aircraft skin parts.

**Key words:** aircraft skin; stretch forming; knowledge reuse; feature recognition; rapid retrieval system

飞机蒙皮作为航空器外形结构的核心部件,对机身、尾部和机翼等关键区域的性能具有重要影响,其设计复杂性和尺寸规模呈增长趋势,对精度和表面质量的要求也日益提升<sup>[1]</sup>。数字化工艺设计技术的应用,是实现蒙皮零件精确成形、快速装配和满足研发需求的关键<sup>[2]</sup>。在传统飞机蒙皮零件成形工艺设计中,设计过程常受限于设计者的主观判断和手工测量,导致设计精度难以提高,且知识重用性不足,这不仅增加了设计工作的复杂性,也延长了

生产周期。因此,提高设计知识的重用性是提升产品设计效率的关键<sup>[3]</sup>。实例推理方法利用了历史设计方案中的规则和经验,对于提高设计效率具有显著作用<sup>[4]</sup>,但其在蒙皮成形工艺设计领域的应用潜力尚未得到充分挖掘。

传统知识重用过程中,对于飞机蒙皮拉伸成形有两个问题需要解决:一是蒙皮拉伸成形工艺特征识别与表达,这是实现知识重用的基础;另一个是快速准确的成形特征匹配算法,这是知识重用准确性的保障。目前,三维模型特征提取技术包括基于几何结构的分析<sup>[5-6]</sup>、基于统计的特征提取<sup>[7]</sup>、基于视图的特征提取<sup>[8]</sup>、基于拓扑的特征提取<sup>[9]</sup>以及基于深度学习的特征提取<sup>[10]</sup>等。这些技术虽然在通用零件设计中表现出色,但在飞机蒙皮拉伸成形过

收稿日期: 2024-08-06; 修订日期: 2024-11-13

作者简介: 钱文鑫 (2002-), 男, 硕士研究生

E-mail: m202371055@hust.edu.cn

通信作者: 柳玉起 (1966-), 男, 博士, 教授

E-mail: liuyq@hust.edu.cn

程中, 由于没有考虑其成形因素, 应用具有局限性。

本文在 CATIA 平台上基于 CAA (Component Application Architecture) 技术开发了飞机蒙皮工艺特征识别和智能检索系统, 该系统以知识库为依托, 应用特征识别与相似度匹配算法, 通过工艺特征相似性快速搜索成功案例, 有效提高了工艺设计的知识重用性。利用截面法精确提取蒙皮拉伸成形工艺的关键特征参数, 并采用最近邻策略对历史案例进行检索; 通过插值方法完成特征矩阵的标准化处理; 利用鲁棒标准化算法改进 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 方法, 消除极端值对相似度计算的影响, 实现了蒙皮拉伸成形工艺相似度的精确计算。

## 1 系统分析

本研究开发的知识重用系统针对飞机蒙皮拉伸成形设计的实际生产需求, 致力于实现模面设计的智能化。系统的核心功能包括工艺特征的自动检索与知识积累的自动化, 以解决长期存在的知识积累与重用难题。

### 1.1 知识库设计

知识库是知识驱动系统的基础架构, 如图 1 所示, 知识库分为 3 个主要模块: 材料库、方案库以及规则库。材料库专注于存储与特定材料相关的详细信息; 方案库则存储了各种零件的不同工艺版本, 具体包含产品模型、特征参数、模面设计等信息; 规则库则包含了飞机蒙皮的通用和专用设计规则。

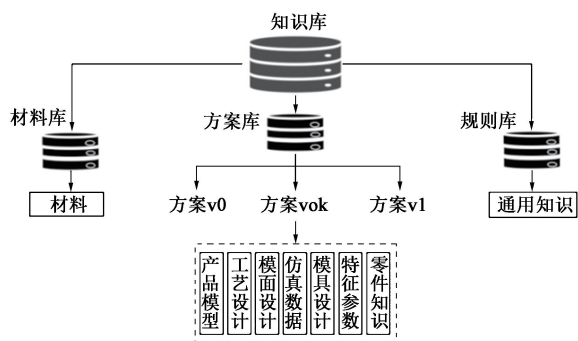


图 1 知识库结构

Fig. 1 Structure of knowledge base

### 1.2 飞机蒙皮工艺特征智能检索流程

知识重用系统的设计流程框架如图 2 所示。在飞机蒙皮工艺方案设计过程中, 设计人员首先基于输入的零件数据提取关键特征参数。系统将这些参数与数据库中存储的零件特征进行相似度计算, 以

识别出与当前设计任务最为相似的历史案例。选定相似度最高的案例后, 系统采用知识重用方法, 借鉴该案例的工艺方案来指导新零件的工艺设计。

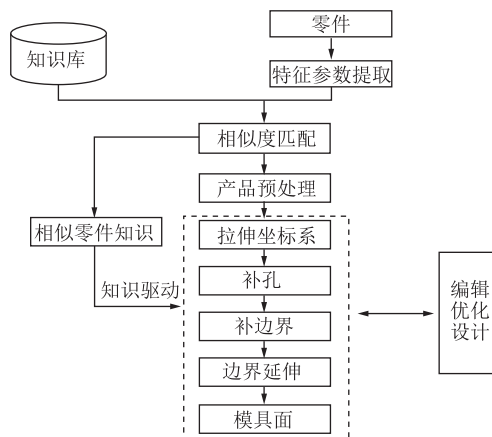


图 2 知识重用设计流程

Fig. 2 Design process of knowledge reuse

案例设计完成后会根据目标需求与设计结果之间的偏差进行必要的调整和优化。一旦实例满足特定的设计标准, 其将被纳入数据库中, 以此不断丰富和完善知识库的内容。数据库的核心功能是存储模型信息、特征数据以及工艺细节, 并通过不断增加的案例确保知识重用系统的可持续性和自我完善能力。

## 2 飞机蒙皮特征提取

### 2.1 蒙皮拉伸成形工艺特征识别

在飞机蒙皮工艺设计过程中, 对蒙皮曲面进行特征参数提取时, 应与特定的成形工艺紧密相连, 这样确保了通过相似度搜索和知识重用得到的工艺方案的合理性和一致性。

拉伸成形工艺是常用的蒙皮成形方法之一, 此方法是将板料两端固定于拉伸机的夹钳中, 在工作台的顶升或者夹钳的牵引作用下, 拉伸成形模具与板料接触, 通过不均匀的平面拉应变实现板料与拉伸成形模具的贴合<sup>[11]</sup>, 如图 3 所示。

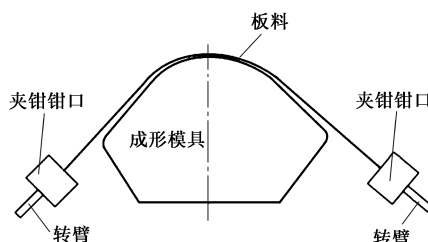


图 3 飞机蒙皮拉伸成形示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stretch forming for aircraft skin

在飞机蒙皮模面设计环节中,为保障拉伸成形质量,零件内孔的补充和零件边缘的修补设计应为曲率较小且曲率变化幅度较小的形状,以满足工艺要求<sup>[12-13]</sup>。拉伸成形过程中影响拉伸成形质量的关键参数包括拉伸成形零件曲率、拉伸成形高度和包覆角等,如图4所示。通过对零件不同位置的截面进行特征参数提取,能够全面地反映整个曲面的信息。

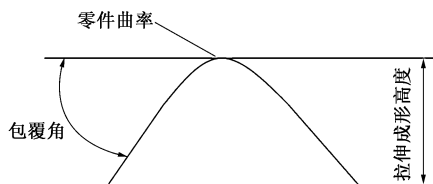


图4 特征参数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of feature parameters

## 2.2 特征参数提取算法

拉伸成形模具的坐标系不仅决定了零件的空间定位,还直接影响到拉伸成形质量。拉伸成形坐标系的设计与工艺(横拉、纵拉等)、拉伸成形设备(拉形机)以及零件的形状特征密切相关。定义拉伸成形坐标系 $z$ 轴为模具安装方向, $x$ 轴为夹钳的横向移动方向, $y$ 轴则垂直于 $z$ 轴和 $x$ 轴。

系统沿 $y$ 轴均匀划分并形成与 $xoz$ 平面平行的等距截面,这些截面与零件相交后形成的截面线为横向截面线。单纯等距划分截面线在曲率变化较大的区域会丢失较多的蒙皮零件形状信息,因此,系统自动在曲率变化较大的区域增加截面线,而在曲率变化较小的区域相应减少截面线,提高了横向截面线对零件形状描述的准确性。在每个截面线上,提取关键的特征参数,包括高度 $H$ 、曲率 $R$ 和包覆角 $A$ 。为保证截面线位置描述的一致性,将截面线位置进行归一化处理。在拉伸成形坐标系下,构建一个与主方向坐标系相对应的长方体包容盒,并计算在 $y$ 轴方向上的最大值 $Y_{\max}$ 和最小值 $Y_{\min}$ ,则截面线相对于整体零件坐标 $RC$ 为:

$$RC = \frac{Y - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (1)$$

式中: $Y$ 为截面线在拉伸成形坐标系中的 $y$ 轴坐标; $Y_{\max}$ 和 $Y_{\min}$ 分别为零件的最大、最小 $y$ 轴坐标。

所有截面线上的特征参数及其相对坐标将被整合进特征参数矩阵 $M$ 中,该矩阵以紧凑的形式编码了零件的几何和位置属性。与三维曲面相比,特征参数矩阵的数据量较小,能够提高检索过程的效率。这些特征参数矩阵将被存储在可解析的标准格式文

件中,以供未来进行检索和分析。特征参数提取整体流程如图5所示。

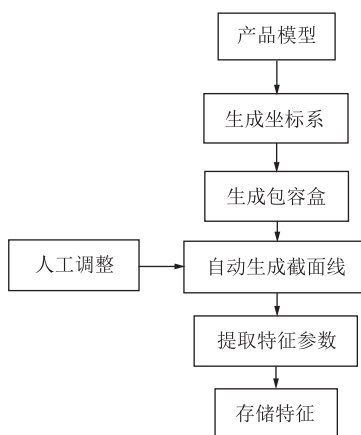


图5 特征参数提取流程

Fig. 5 Extraction process of feature parameters

## 3 飞机蒙皮实例检索

### 3.1 飞机蒙皮实例检索策略

实例检索是利用特定的算法,高效地识别出与当前蒙皮拉伸工艺相似的零件实例,此过程的成功与否直接影响到工艺知识重用的有效性。最近邻策略是检索中常见的一种方法,该策略通过计算目标零件与数据库中所有实例的相似度,从中筛选出相似度最高的实例。在实例检索过程中,属性相似度是衡量零件间某属性相似性的关键指标,而特征权值则用于评估不同特征参数对于整体相似度的影响程度。零件工艺的总相似度综合了各特征的局部相似度以及相应的特征权值,本文的飞机蒙皮总相似度表达式如式(2)所示:

$$Sim(m, n) = \frac{\sum_k Sim_k(m, n) \times B_k}{\sum_k B_k} \quad (2)$$

式中: $m$ 和 $n$ 分别表示当前零件与对照零件; $Sim(m, n)$ 为当前零件与对照零件的总体相似度; $Sim_k(m, n)$ 为当前零件与对照零件的局部相似度; $B_k$ 为特征权值; $k$ 表示各个特征。

整个检索方法包括:(1)采用基于插值的标准化技术对特征矩阵进行规范化处理;(2)运用改进的TOPSIS算法计算零件间的局部相似度;(3)通过总体相似度计算模型选取最相似的实例。

### 3.2 特征矩阵标准化算法

在飞机蒙皮零件的特征矩阵比较过程中,存在



的主要问题是不同零件的截面线数量和位置不一致。为了解决这个问题，本文提出一种基于插值的标准化方法，实现了特征向量的一致性和可比性。

根据原始特征矩阵  $M$ ，构建了一系列虚拟截面线。这些虚拟截面线的数量和位置是固定的，其相对坐标在  $0 \sim 0.99$  之间均匀分布。这些虚拟截面线的特征参数通过插值法由相邻的实际截面线特征参数来确定，如式 (3) 所示：

$$P'_j = \frac{RC - RC^l}{RC^r - RC^l} \times P_j^r + \frac{RC^r - RC}{RC^r - RC^l} \times P_j^l \quad (3)$$

式中： $P'_j$  为虚拟截面线的特征参数； $P_j^l$  和  $RC^l$  分别为左侧截面线的特征参数与相对坐标； $P_j^r$  和  $RC^r$  分别为右侧截面线的特征参数与相对坐标； $j$  表示各个截面线的位置， $j=1, \dots, 100$ 。

通过引入虚拟截面线并应用插值计算方法，实现了特征矩阵的标准化处理。在去除相对坐标  $RC$  后，得到的标准化特征向量为  $N=(H_j, R_j, A_j)^T$ ，其中， $H_j$ 、 $R_j$ 、 $A_j$  分别为截面线的高度、曲率、包覆角特征参数。

根据虚拟截面线与真实截面线的接近程度，为每个虚拟截面线分配了不同的权重，以增强标准化过程的准确性。权重的计算公式为：

$$B_j = \begin{cases} 1 - 10 \times (RC - RC^n), & RC - RC^n \leq 0.05 \\ 0.5, & RC - RC^n > 0.05 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $B_j$  为位置  $j$  虚拟截面线的权重； $RC^n$  为距离虚拟截面线最接近的真实截面线的坐标。

### 3.3 局部相似度计算算法

局部相似度的评估是通过综合考虑属性和位置这两个维度的信息来实现的。本文采用改进的 TOPSIS 方法来评估局部相似度<sup>[14]</sup>，该方法通过比较评价对象与理想解及负理想解之间的距离来进行排序，实现整体相似度评价。传统的 TOPSIS 方法可能受到极端值的影响，例如曲率的近 0 值或者近无穷值，这可能导致零件间相似度结果的差异性减小。为了解决这一问题，本文引入鲁棒标准化方法，以最大限度地减少极端值的影响。考虑数据库中有  $s$  个零件，对于每个属性在所有位置的参数，可以构建一个决策矩阵  $(y_{ij})_{s \times 100}$ ，其形式如下：

$$(y_{ij})_{s \times 100} = (|x_j - x_{ij}|)_{s \times 100} \quad (5)$$

式中： $y_{ij}$  为该矩阵的数值； $x_j$  为当前零件  $j$  位置截面线的参数； $x_{ij}$  为数据库内第  $i$  个零件的  $j$  位置截面线的参数， $i=1, 2, \dots, s$ 。

使用改进的 TOPSIS 决策算法进行局部相似度计算，步骤如下。

(1) 利用鲁棒标准化算法对原始矩阵进行标准化，得到决策矩阵  $z_{ij}$ ：

$$z_{ij} = \frac{2y_{1/2} - y_{ij}}{y_{3/4} - y_{1/4}} \quad (6)$$

式中： $y_{1/2}$  为中位数； $y_{3/4}$  为  $3/4$  位数； $y_{1/4}$  为  $1/4$  位数。

(2) 确定正理想点  $V^+$  和负理想点  $V^-$ ，分别表示为：

$$V^+ = [\max(z_{i1}), \max(z_{i2}), \dots, \max(z_{i100})] \quad (7)$$

$$V^- = [\min(z_{i1}), \min(z_{i2}), \dots, \min(z_{i100})] \quad (8)$$

(3) 确定权重，并考虑当前零件与目标方案的权重，进而构建权重矩阵  $\Omega$ ：

$$\omega_j = B_j B_{ij} \quad (9)$$

$$\Omega = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{100}) \quad (10)$$

式中： $\omega_j$  为  $j$  位置截面线的权重矩阵的权值； $B_{ij}$  为第  $i$  个零件的  $j$  位置截面线的权值。

(4) 计算各方案到正理想点和负理想点的距离  $D_i^+$  和  $D_i^-$ ：

$$D_i^+ = \sqrt{(V_i - V^+)^T \Omega (V_i - V^+)} \quad (11)$$

$$D_i^- = \sqrt{(V_i - V^-)^T \Omega (V_i - V^-)} \quad (12)$$

式中： $V_i$  为标准化的决策矩阵第  $i$  行的向量。

(5) 最后，计算局部相似度  $\text{Sim}_k(0, i)$ ：

$$\text{Sim}_k(0, i) = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (13)$$

式中： $\text{Sim}_k(0, i)$  为当前零件与第  $i$  个零件关于第  $k$  个特征的相似度。

通过这一计算方法，能够定量地评估零件间的局部相似度。

## 4 应用实例

根据某企业在飞机蒙皮制造过程中使用的 3 个实际零件 s1~s3 作为案例进行详细分析，如图 6a 所示。该案例的目标是设计零件的模面和设计蒙皮拉伸工艺，传统方法依赖于人工操作，不仅耗时，而且容易出错。为了提高设计效率和精度，采用本文智能化搜索算法，快速找到与其相似的工艺零件，参考该零件进行模面和工艺相关设计，显著提升了设计的质量和速度。

在系统数据库中，已有多个历史工艺零件案例，每个案例均附有详细的工艺信息和设计参数。在本

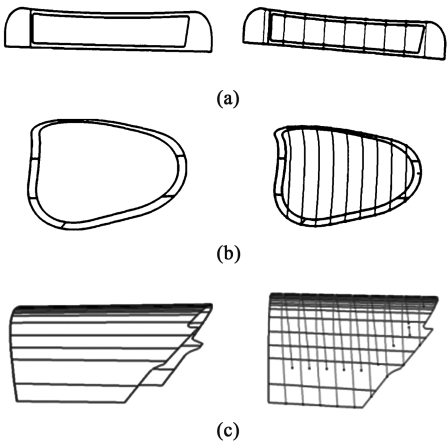


图 6 蒙皮零件实例与截面线划分  
(a) s1 (b) s2 (c) s3

Fig. 6 Instances and cross-section line division for aircraft skin parts

案例中，选择标记为 c1~c6 的 6 个零件作为参考，如图 7 所示。

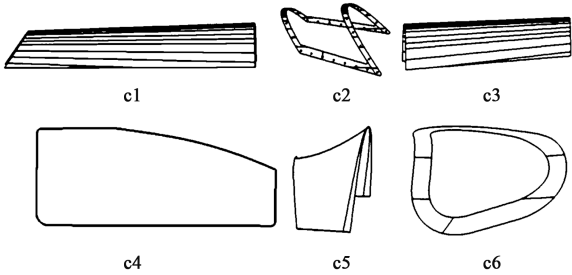


图 7 数据库内零件实例

Fig. 7 Instances of parts in database

利用第 3.2 节中介绍的特征提取算法，对目标 s2 零件进行了全面的特征识别，共提取出 9 条截面线，如图 6b 所示。这些截面线充分捕捉了蒙皮的形状特征，为后续的相似度计算提供了必要的几何信息。提取的特征参数见表 1，包括截面线的相对位置、高度、曲率和包覆角等关键成形工艺参数。

进一步地，根据第 3 章中提出的相似实例检索算法，计算得到总体相似度，如表 2 所示。结果显示，零件 c4 与目标零件 s1 的相似度最高，达到了 0.95；零件 c6 与目标零件 s2 的相似度最高，达到了 0.93；零件 c1 与目标零件 s3 的相似度最高，达到了 0.91。这表明其工艺方案与目标零件最为接近，这也符合直观上的判断。

以对应零件的工艺方案为基础，通过知识重用系统对目标零件进行模面设计，可重用相似零件的模面延伸方法和参数，如表 3 所示。图 8a 展示了知

表 1 s2 零件特征参数的提取结果

Table 1 Extraction results of feature parameters for s2 part

| 截面线 | RC  | 高度/mm  | 曲率/<br>( $\times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$ ) | 包覆角/<br>rad |
|-----|-----|--------|---|-------------|
| 1   | 0.1 | 43.53  | 51.56                                       | 2.20        |
| 2   | 0.2 | 64.18  | 53.24                                       | 1.74        |
| 3   | 0.3 | 79.46  | 55.61                                       | 1.60        |
| 4   | 0.4 | 89.93  | 55.33                                       | 1.52        |
| 5   | 0.5 | 108.10 | 55.74                                       | 1.45        |
| 6   | 0.6 | 125.90 | 56.50                                       | 1.39        |
| 7   | 0.7 | 137.80 | 58.06                                       | 1.34        |
| 8   | 0.8 | 140.90 | 62.71                                       | 1.33        |
| 9   | 0.9 | 129.00 | 65.76                                       | 1.37        |

表 2 相似度计算结果

Table 2 Calculation results of similarity

| 目标零件 | 库中零件 |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|
|      | c1   | c2   | c3   | c4   | c5   | c6   |
| s1   | 0.43 | 0.67 | 0.41 | 0.95 | 0.53 | 0.77 |
| s2   | 0.55 | 0.83 | 0.59 | 0.77 | 0.66 | 0.93 |
| s3   | 0.91 | 0.59 | 0.85 | 0.37 | 0.57 | 0.42 |

识重用模面延伸效果，与直接利用 CATIA 命令生成的效果（图 8b）对比，知识重用的模面生成面边界较平滑，一次性生成成功率更高。图 8c 展示了最终生成的模座面示意图。设计结果不仅满足了工艺设计的要求，而且与人工设计相比，大大缩短了设计周期，降低了成本，并减少了工人的劳动强度。通过对某企业提供的 105 个零件进行实际设计，最终满足设计人员要求的零件达到 90.5%，验证了该系统的准确性。

表 3 重用参数

Table 3 Parameters for reuse

| 零件 | 延伸长度/<br>mm | 模座高度/<br>mm | 拔模斜度/<br>( $^{\circ}$ ) | 圆角半径/<br>mm |
|----|-------------|-------------|-------------------------|-------------|
| s1 | 400         | 150         | 1                       | 20          |
| s2 | 500         | 100         | 2                       | 30          |
| s3 | 250         | 100         | 3                       | 10          |

5 结语

本文针对飞机蒙皮工艺设计领域中知识复用的问题，研发了飞机蒙皮工艺特征识别与检索系统。

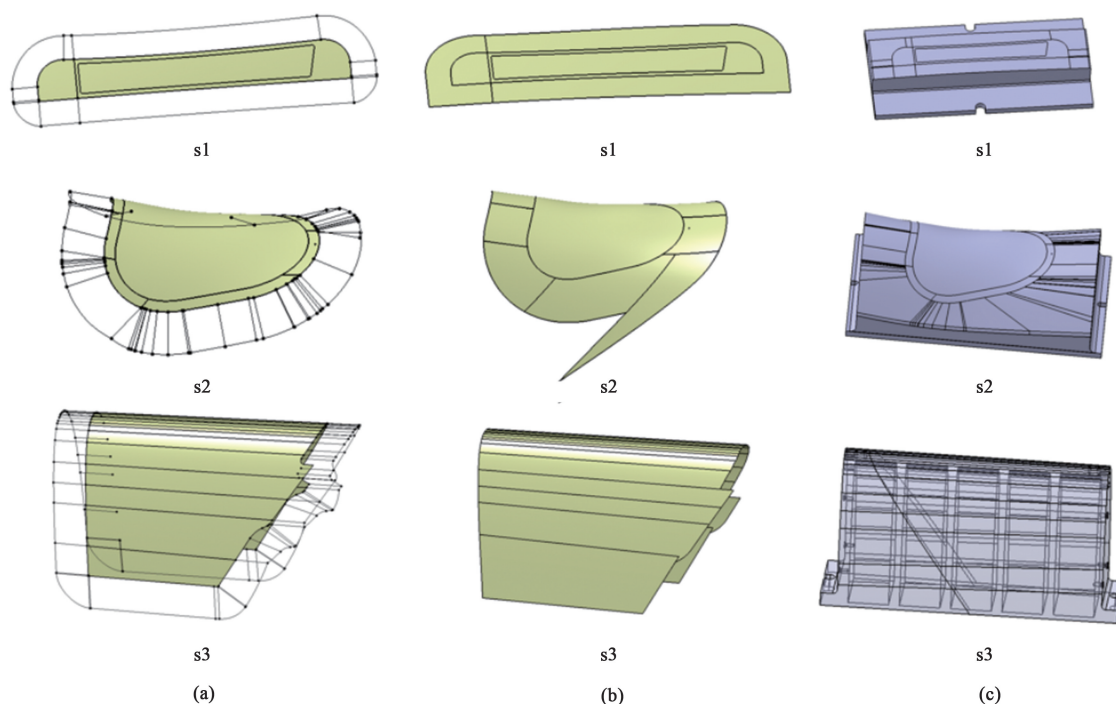


图 8 知识重用部分流程与结果

(a) 线框延伸 (b) CATIA 外插延伸 (c) 最终模座面

Fig. 8 Partial process and results of knowledge reuse

(a) Wireframe extension (b) CATIA extrapolation extension (c) Final die base surface

系统通过截面法精确提取飞机蒙皮零件成形工艺关键特征参数, 采用最近邻策略对知识库内零件进行排序。基于插值的特征矩阵标准化方法, 解决了工艺特征参数向量在相对坐标和数量上的不一致性问题。在计算局部相似度时, 对传统的 TOPSIS 算法进行了改进, 引入了鲁棒标准化算法, 以排除极端值的影响, 增强了相似度计算的稳定性和可靠性。通过实际应用案例的验证, 本系统在飞机蒙皮拉伸工艺和模面设计中展现出了良好的设计效果, 有效地提高了设计效率, 缩短了设计周期。

#### 参考文献:

- [1] 高秋阁, 辜茂. 飞机蒙皮加工工艺发展分析 [J]. 山东工业技术, 2024 (2): 120-127.  
Gao Q G, Gu M. Based on skin processing technology development analysis [J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2024 (2): 120-127.
- [2] 冯朋晓. 多夹钳式柔性拉形设备成形工艺及数值模拟研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2012.  
Feng P X. Research on Forming Technology and Numerical Simulation of Flexible Stretch Forming Equipment with Multi-clamp [D]. Jilin: Jilin University, 2012.
- [3] 王相兵, 马士良, 杜全斌, 等. 面向起重机起升机构 CAD/CAE 设计的知识重用方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2021 (12): 54-58, 62.  
Wang X B, Ma S L, Du Q B, et al. Research on knowledge reuse method for CAD/CAE design of crane lifting [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021 (12): 54-58, 62.
- [4] 韩志仁, 戴良景, 张凌云. 飞机大型蒙皮和壁板制造技术现状综述 [J]. 航空制造技术, 2009, 52 (4): 64-66.  
Han Z R, Dai L J, Zhang L Y. A survey of manufacturing technology for large aircraft skins and panels [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52 (4): 64-66.
- [5] 刘洪豪, 刘贤喜, 张开兴, 等. 基于光传播 Monte Carlo 模拟的三维模型特征提取方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40 (2): 385-390.  
Liu H H, Liu X X, Zhang K X, et al. A 3D model feature extraction method based on monte carlo simulation of light propagation [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40 (2): 385-390.
- [6] 徐立华, 黄成志, 李成武, 等. 一种改进的案例推理方法及其在表面质量估计中的应用 [J]. 智能制造, 2021 (32): 313-327.  
Xu L H, Huang C Z, Li C W, et al. An improved case-based reasoning method and its application in estimation of surface quality toward intelligent machining [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2021 (32): 313-327.
- [7] 刘玉杰. 基于形状的三维模型检索若干关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.  
Liu Y J. Research on Key Technologies for 3D Model Retrieval Based on Shape [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2006.

- [8] Tangleder J W H, Veltkamp R C. A survey of content based 3D shape retrieval methods [J]. Proceedings Shape Modeling Applications, 2004 (10): 441-471.
- [9] Hilaga M, Shinagawa Y, Kohmura T. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes [A]. In Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'01) [C]. New York, USA: Association for Computing Machinery, 2001.
- [10] 刘安安, 李天宝, 王晓雯, 等. 基于深度学习的三维模型检索算法综述 [J]. 数据采集与处理, 2021, 36 (1): 1-21.  
Liu A A, Li T B, Wang X W, et al. A review of 3D model retrieval algorithms based on deep learning [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2021, 36 (1): 1-21.
- [11] 罗红宇, 李东升, 张彦敏, 等. 数控蒙皮拉形试验机系统开发与应用研究 [J]. 工程与试验, 2006, 46 (4): 31-33.  
Luo H Y, Li D S, Zhang Y M, et al. Research on the development and application of CNC skin stretching test machine system [J]. Engineering & Test, 2006, 46 (4): 31-33.
- [12] 韩金全, 万敏, 袁胜, 等. 飞机复杂蒙皮拉形模具型面设计方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34 (11): 1360-1363.  
Han J Q, Wan M, Yuan S, et al. Method for designing the mold surface of complex aircraft skin stretching [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34 (11): 1360-1363.
- [13] 李云鹏. 复杂飞机蒙皮拉伸成形模具设计方法分析 [J]. 科技创新与应用, 2017, 7 (22): 91-92.  
Li Y P. Analysis of complex aircraft skin stretching die design method [J]. Technology Innovation and Application, 2017, 7 (22): 91-92.
- [14] 韩自强, 蒋燕, 左可, 等. 基于 TOPSIS 法的制造过程绿色工艺方案决策 [J]. 绿色科技, 2024, 26 (4): 254-257.  
Han Z Q, Jiang Y, Zuo K, et al. Green manufacturing process plan decision making based on the TOPSIS method [J]. Journal of Green Science and Technology, 2024, 26 (4): 254-257.

(上接第 242 页)

- 图片、表格应随文给出, 先见文后见图、表。
- 图题 (包括 (a)、(b) 等分图题)、表题要求同时用中、英文标注。
- 照片或灰度图应反差适当, 鲜明可见; 金相照片放大倍数均用比例尺表示, 如  $5\mu\text{m}$ 。
- 双栏排图片的宽度应控制在 7.8 cm 左右; 通栏排图片宽度应控制在 16 cm 左右。
- 表格使用三线表, 必要时可加横线, 但一般不得有竖线; 表格的宽度最好设计成 25 个汉字 (相当于 48 个字符) 以内; 表中所有文字一律左齐。
- 公式后应当注明公式中各符号的含义。
- 计量单位一律采用法定计量单位 (国际单位制)。
- 参考文献应按其在正文中被引用的顺序依次列出 (在正文中引用处务必用 “[序号]” 标注); 列出的参考文献应是重要的、近期的、已正式发表的文献资料, 每篇论文应列出 12 篇以上参考文献; 作者不多于 3 个的姓名全部写出, 多于 3 个的, 余者用 “, 等 (, et al)” 表示; 无论中外署名、一律姓 (首字大写) 先名后 (例如: Zhang Y H)。

原文为非英文的参考文献, 需要同时用英文著录。

格式如下:

- [1] 期刊 文章作者. 论文题目 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 (期号): 起页码-终页码。
- [2] 专著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 版本. 出版地: 出版社, 出版年。
- [3] 译著 作者. 书名 (英文实词首字大写) [M]. 译者, 译本. 出版地: 出版社, 出版年。
- [4] 论文集 论文作者. 论文题目 [A]. 论文集编者. 论文集名 (英文实词首字大写) [C]. 出版地: 出版者, 出版年。
- [5] 技术报告 作者. 论文题目 (英文实词首字大写) [R].

地名: 责任单位, 出版年。

[6] 学位论文 作者. 论文题目 (英文实词首字大写) [D]. 所在城市: 保存单位, 年份。

[7] 专利文献 专利申请者或所有者. 专利题名 [P]. 专利国别: 专利号, 公告日期或公开日期 (如, 2008-02-03)。

[8] 技术标准 标准号, 标准名称 [S].

[9] 在线文献 作者. 论文题目 [EB/OL]. 获取和访问路径 <http://...>, 发表或更新日期 (如, 2008-02-03)。

[10] 光盘文献 (数据库) 作者. 论文题目 [DB/CD]. 出版地: 出版者, 出版年。

原文为非英文的参考文献著录举例:

[1] 王博, 张凯锋, 赖小明, 等.  $\text{SiC}_p/\text{2024Al}$  复合材料板材脉冲电流辅助拉深成形 [J]. 锻压技术, 2012, 37 (5): 22-26.

Wang B, Zhang K F, Lai X M, et al. Pulse current auxiliary deep drawing of  $\text{SiC}_p/\text{2024Al}$  composites sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37 (5): 22-26.

### 3 投稿方式及要求

(1) 请通过本刊网站的“作者投稿”系统投稿。

(2) 来稿文责自负, 请勿抄袭他人论文, 请勿一稿多投。对抄袭者和一稿多投者, 一经发现, 本刊将无条件退稿, 并作不良作者记录; 同时, 本刊将保留追索抄袭者浪费本刊资源和其他纷争的权利。

(3) 编辑部对来稿拥有修改权, 遇重大删改时将与作者协商; 排版后的清样将通过 E-mail 发给作者进行核对。

### 4 编辑部联系方式

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部

邮编: 100083 电话: 010-62920652, 010-82415085

E-mail: fst@263.net

网址: <http://www.fstjournal.net/>

《锻压技术》编辑部