

# 形状特征与领域知识驱动的多特征多领域铸件模型检索算法

孙晓龙<sup>1</sup>, 张东城<sup>2</sup>, 王 玉<sup>3</sup>, 计效园<sup>1</sup>, 王先飞<sup>2</sup>, 王 琳<sup>3</sup>, 刘睦坤<sup>4</sup>, 李宝辉<sup>2</sup>, 周建新<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074; 2. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 3. 西安航天发动机有限公司, 陕西西安 710100; 4. 黄石东贝铸造有限公司, 湖北黄石 435000)

**摘要:** 针对铸造典型应用领域中, 由于以形状分布直接检索复杂铸件三维模型的效果差, 造成的历史成熟工艺复用难等问题, 提出了一种形状特征与领域知识驱动的多特征多领域铸件模型检索方法。该方法基于D2算子、模数算子等6个特征算子提取三维模型形状、热节等结构特征与铸造工艺知识特征, 建立多个特征向量描述三维模型。计算并比较特征向量相似度大小进行模型的筛选, 检索出工艺设计方案相似的三维模型。开展航空、航天、轨道交通、工程机械等领域铸造企业产品三维模型库的相似检索实验, 在多领域多类别模型测试集、流体机械单领域多类别模型测试集中, Top-3模型检索准确率分别为85.06%、95.83%。结果表明, 相较于传统形状分布算子, 该方法对于铸件三维模型描述能力强、检索性能高, 为后续基于三维模型检索的铸件历史工艺复用提供技术支撑。

**关键词:** 三维模型检索; 多特征提取; D2算子; 铸造工艺设计

## 作者简介:

孙晓龙(1997-), 男, 硕士生, 研究方向为三维模型分类与检索。E-mail: 1033254030@qq.com

## 通讯作者:

计效园, 男, 副教授。E-mail: jixiaoyuan@hust.edu.cn

中图分类号: TP181; TG21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)09-1089-06

## 基金项目:

国家重点研发计划项目(2020YFB1710100); 国家自然科学基金(51905188、52090042、51775205); 中国航天科技集团有限公司第八研究院产学研合作基金(SAST2020-113); 中央高校基本科研业务费专项资金(2021yjsCXCY039)。

## 收稿日期:

2021-08-29 收到初稿,

2022-01-22 收到修订稿。

铸件广泛应用于航空、航天、轨道交通、工程机械等国民经济领域, 其中, 以机匣、航天发动机叶片、箱体、转向桥等为代表的典型铸件, 存在多维扭曲、异形曲面等复杂工艺结构, 导致工艺设计难度大、周期长等问题, 实现成熟产品的工艺复用是解决上述问题的关键之一<sup>[1-2]</sup>。目前, 铸造企业采用人工检索铸造工艺卡的方式实现工艺复用, 但往往难以保证检索的效果<sup>[3]</sup>。值得注意的是, 以三维模型为基础的工艺设计方式已广泛应用于各铸造企业, 所以实现基于三维模型检索的历史工艺复用成为解决上述问题的重要途径。

三维模型检索包括三维模型特征提取和相似性度量<sup>[4]</sup>。相同类型的三维模型存在着高度相似的非结构化特征信息, 所以常通过特征算子提取特征向量表征三维模型, 将三维模型检索转化为特征向量的相似性度量。

传统的特征向量包含统计数据、图像、信号分析等类型<sup>[5]</sup>。随着深度学习的发展, 基于图像的三维模型特征提取方法愈发成熟, 利用投影降维处理三维模型, 很好地利用现有的图像处理技术<sup>[6]</sup>。马萨诸塞大学的Hang等人<sup>[7]</sup>提出了从三维模型不同视角提取多张二维视图, 利用卷积神经网络进行训练, 对于三维模型的识别、分类有很好的效果。天津大学的王亚等人<sup>[8]</sup>从多视图特征、点云特征、全景视图特征三个方面提取模型的特征信息, 提出了一种新的多模态联合网络用于模型的检索分类。基于深度学习的模型检索方法存在网络模型收敛速度慢、训练时间长等问题, 并且当检索模型的数据集变化后, 神经网络需要重新训练, 不适用于生产制造中多领域多类别模型检索。因此, 人工设计三维模型特征提取方法, 形成不同的特征提取算子, 仍然是目前的研究热点。普林斯顿大学的Osada等人<sup>[9]</sup>提出了基于形状分布的三维模型特征提取方法, 该方法统计模型表面采样点几何信息分布, 使用形状分布特征描述符表征三维模型。浙江理工大学的夏爱军等人<sup>[10]</sup>提出了一种基于切片的三维模型检索算法, 通过计算模型在不同位置和方向上切片截面的相对面积进行三维

模型检索，取得了较好的检索效果。华中科技大学的郭飞<sup>[11]</sup>等人使用基于注塑成形过程中的压力配置信息描述三维模型的几何形状和工艺过程信息，实现了基于工艺特征的注塑模型检索。上海理工大学的朱文博等人<sup>[12]</sup>提出了基于骨架树的机械零件三维模型检索方法，利用邻接矩阵描述骨架树的拓扑结构特征，具有较高的检索准确性。西北工业大学的黄博等人<sup>[13]</sup>提出了一种面向宏过程重用的三维CAD模型检索方法，通过提取零件的加工特征、工艺设计特征等信息，实现了过程加工工艺复用的三维模型检索。西南大学的张艺琨等人<sup>[14]</sup>提出了一种多特征融合的三维模型检索方法，利用三维模型特征点信息、形状上下文特征描述三维模型的局部和整体特征，有效地提高了检索性能。

本团队在基于形状特征的铸件三维模型分类算法已有相关基础<sup>[15]</sup>，研究了传统D2算子、法向算子在提取不同类别铸件形状特征的效果，但铸件模型只涉及工程机械领域，算法泛化性不强。故在研究铸造多领域铸件三维模型检索方面还有大量的工作需要完成。

# 1 形状特征与领域知识的多特征算子模型检索算法

## 1.1 算法整体思路

Osada等人利用三维模型表面随机采样点之间的空

间位置关系或采样点构成的面、体的性质，抽象化表达模型三维结构，提出了如图1所示的D2形状分布算子，得到了一系列的特征频数分布向量来表征三维模型。即通过计算三维模型任意两采样点之间的距离，统计距离值的分布情况，形成特征频数分布图或特征频数分布向量表征三维模型。

随着研究的不断深入和发展，研究人员发现D2算子在处理复杂结构模型时，特征提取性能显著下降。对于结构差异较大的不同模型，形成的D2算子特征描述符都趋向正态化的“钟形”分布。如图1所示，阀体类铸件模型和阀盖类铸件模型的结构相差很大，但相应铸件模型的D2算子特征频数分布图都呈现出“钟形”的正态分布。所以，D2算子对于复杂铸件模型的特征提取性能差，无法直接用于复杂三维模型的检索。

综上所述，本研究提出了形状特征与领域知识驱动的多特征多领域铸件模型检索算法（shape feature and domain knowledge -6, SFDK-6），如图2所示。该方法首先利用主成分分析法将模型进行平移、旋转，达到姿态归一化的目的；其次，基于D2算子、法向算子、法矢夹角算子提取三维模型形状特征，基于铸造领域知识，利用模数算子、坐标面对称度算子、最小包络体算子提取三维模型工艺特征，形成6个特征向量表征三维模型；最后，通过依次比较6种特征向量的相

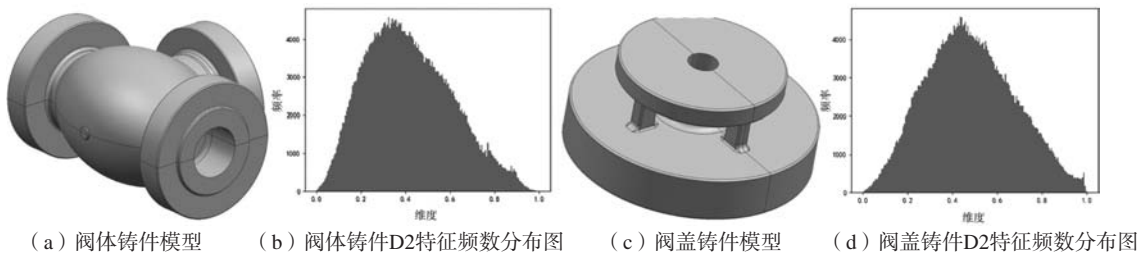


图1 部分铸件的D2算子特征频数分布图

Fig. 1 D2 operator characteristic frequency distribution of some castings

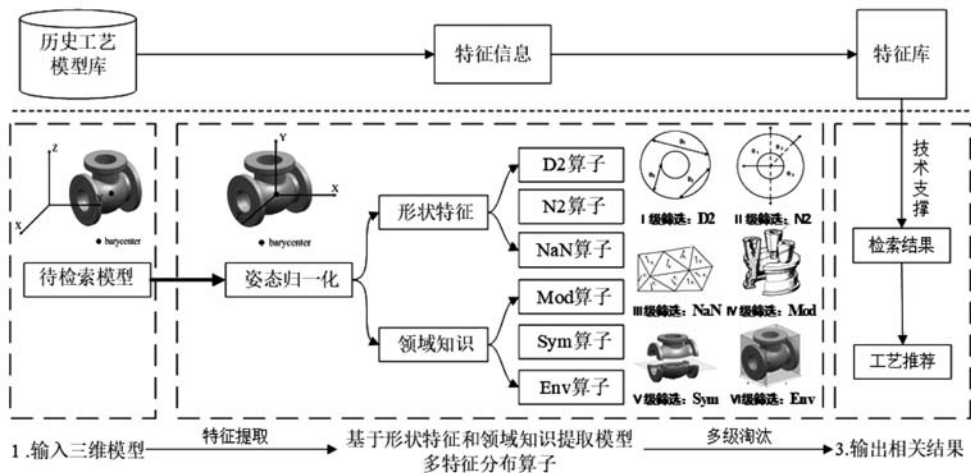


图2 检索算法整体流程图

Fig. 2 Overall flow chart of the retrieval algorithm

似度，获得最相似的检索模型。

## 1.2 基于形状特征的多特征算子提取方法

三维模型的形状特征是从三维模型的点特征信息、面特征信息等描述三维模型。其中，D2、A2等算子主要提取点之间距离、角度、面积等信息；法向算子（N2）、法矢夹角算子（NaN）主要提取三维模型面与面之间的位置关系、曲面的凹凸程度等信息。以上算子能够充分描述三维模型在空间的几何分布情况，故选择了D2算子、N2算子、NaN算子进行模型特征提取。其中，D2、N2算子的提取流程在团队前期研究成果中已详细阐述<sup>[14]</sup>，仅介绍NaN算子的提取流程：

（1）提取STL文件中面片顶点坐标值、面片法向量，并记录。

（2）以面片邻接点为线索，找出每个三角形面片的所有邻接面片，以“面片-邻接面片序号集合”创建key-value字典。

（3）通过查询（2）创建的字典，计算所有面片的法向量与其所有邻接面片法向量的夹角余弦值并求平均，将该均值存入法矢夹角余弦列表。

（4）利用各面片顶点坐标值计算相应面片的面积储存在一个面积列表中，并计算相应的累加面积列表。

（5）在0和三角形面片面积总和之间生成一个随机数，利用二分查找算法，在累加面积列表里查找对应面积值在列表的下标，实现通过面积值随机选取三角形面片的过程。

（6）在（3）中的列表中，查询采样面片与邻接面片法向量夹角余弦的均值。

（7）重复（6）-（8）步N次，会获得N个表示局部凹凸程度的法矢夹角余弦均值，统计N个余弦均值在[-1, 1]的分布情况，得到对应的频数分布。

（8）将频数分布除以采样个数N，即可得到NaN算子特征向量。

## 1.3 基于领域知识的多特征算子提取方法

本研究提出的铸件三维模型检索算法遵循“模型三维结构相似，铸造工艺设计相似”的思想，为后续铸件工艺设计提供技术支撑。为了保证检索模型能够在工艺设计上有一定的参考意义，引入铸造领域在

工艺设计过程中常用的工艺参数作为三维模型的特征算子，主要包括：铸件热节特征的模数算子（Mod算子）、尺寸特征的最小包络体算子（Env算子）、对称特征的坐标面对称度算子（Sym算子）。

模数算子作为描述三维模型的特征算子之一，保证三维模型的壁厚、热节信息不丢失，使得检索到的参考模型壁厚、热节等工艺量方面范围相似，保证工艺推荐结果的可靠性。模数算子计算见式（1）。

$$M = \frac{V}{A} \quad (1)$$

式中：M为模数，cm；V为模型体积，cm<sup>3</sup>；A为模型散热面积，cm<sup>2</sup>。

采用三维模型的总体积和总表面积计算模型整体模数，以简化计算。

三维模型的最小包络体描述三维模型的整体形状尺寸，该特征算子的具体计算过程如图3所示，采用宽高比、宽高比、高长比三个参数描述模型的最小包络体。

## 2 多领域铸件模型算法效果验证

### 2.1 算法测试数据集

为了说明形状特征与领域知识驱动的多特征多领域铸件模型检索算法（SFDK-6）的性能，选取了BJBM、AHHL、XHHF、HFZG、ZGTJ等多家知名铸造企业实际生产的铸件三维模型，涉及航空、航天、轨道交通、工程机械、流体机械等多个领域，进行模型检索试验。

坐标面对称度算子描述三维模型的对称信息，其计算过程如图4所示。

### 2.2 算法试验结果及分析

采用SFDK-6算法，对待检索模型进行多特征提取，得到描述铸件结构信息的6个特征向量进行模型相似性度量检索。

对常见铸件模型进行了模型检索，各特征算子在“筛选”过程中相似度较大的前三个模型（Top-3）检索结果如表1所示；同时，对轨道交通、工程机械、流体机械三个单领域多类别铸件模型进行试验，结果如表2、表3、表4所示。特别地，各表中Env算子筛选结

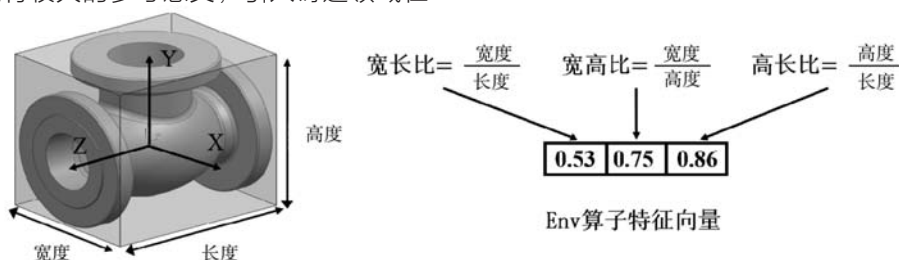


图3 最小包络体算子提取流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the extraction process of the minimum envelope operator

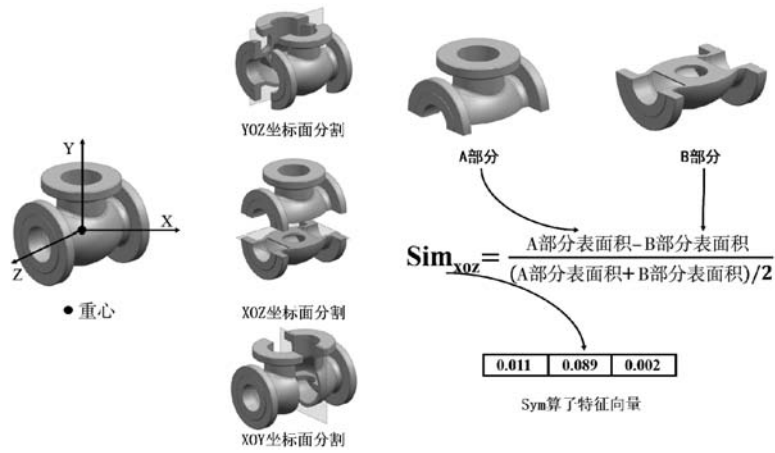


图4 坐标面对称度算子提取示意图

Fig. 4 Schematic diagram of extracting coordinate plane symmetry operator

表1 多领域多类别铸件模型Top-3检索模型结果

Table 1 Multi-domain and multi-category casting model Top-3 retrieval model results

| 待检索模型 | D2算子 I 级筛选结果 | N2算子 II 级筛选结果 | NaN算子 III 级筛选结果 | Mod算子 IV 级筛选结果 | Sym算子 V 级筛选结果 | Env算子 VI 级筛选结果 |
|-------|--------------|---------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|
|       |              |               |                 |                |               |                |
|       |              |               |                 |                |               |                |
|       |              |               |                 |                |               |                |

表2 轨道交通领域铸件模型Top-3检索模型结果

Table 2 Top-3 retrieval model results of casting models in the rail transit field

| 待检索模型 | D2算子 I 级筛选结果 | N2算子 II 级筛选结果 | NaN算子 III 级筛选结果 | Mod算子 IV 级筛选结果 | Sym算子 V 级筛选结果 | Env算子 VI 级筛选结果 |
|-------|--------------|---------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|
|       |              |               |                 |                |               |                |
|       |              |               |                 |                |               |                |
|       |              |               |                 |                |               |                |

果即为最终的模型检索结果。

从以上的结果可知，无论对于多领域多类别铸件模型或单领域多类别铸件模型，采用SFDK-6算法均能

有效地检索出相似模型，以提供铸造工艺设计参考。为了更加全面且具体地说明算法的准确度，选择了在信息检索领域较为常用的检索Top-k模型的准确度，即

表3 工程机械领域铸件模型Top-3检索模型结果  
Table 3 Top-3 retrieval model results of casting models in the field of construction machinery















| 待检索模型   | D2算子 I 级筛选结果  | N2算子 II 级筛选结果   | NaN算子 III 级筛选结果   | Mod算子 IV 级筛选结果   | Sym算子 V 级筛选结果   | Env算子 VI 级筛选结果  |
|---|---|---|---|--|---|---|
|  |  |  |  |  |  |  |

表4 流体机械领域铸件模型Top-3检索模型结果  
Table 4 Top-3 retrieval model results of casting models in the field of fluid machinery

| 待检索模型   | D2算子 I 级筛选结果  | N2算子 II 级筛选结果   | NaN算子 III 级筛选结果   | Mod算子 IV 级筛选结果   | Sym算子 V 级筛选结果   | Env算子 VI 级筛选结果  |
|---|---|---|---|--|---|---|
|  |  |  |  |  |  |  |

相似度大的前 $k$ 个检索模型与待检索模型是否为同类模型的准确度作为性能指标，对比了各测试集中检索Top-1、Top-3、Top-5模型准确度，如表5所示。

表5 各模型测试集检索准确度对比  
Table 5 Comparison of retrieval accuracy of each model test set

| 试验测试集      | 产品总数 | 准确度/% |       |       |
|------------|------|-------|-------|-------|
|            |      | Top-1 | Top-3 | Top-5 |
| 多领域铸件模型    | 59   | 81.36 | 85.06 | 73.61 |
| 轨道交通领域铸件模型 | 33   | 93.94 | 87.88 | 80    |
| 工程机械领域铸件模型 | 25   | 96    | 90.67 | 64.8  |
| 流体机械领域铸件模型 | 25   | 96    | 95.83 | 94.83 |

### 3 结论

(1) 针对铸造典型应用领域复杂铸件的“历史工艺复用”问题，提出了一种形状特征与领域知识驱

动的铸件三维模型检索算法(SDFK-6)。试验结果表明，SDFK-6算法可有效地提取三维模型的几何形状、凹凸程度、热节、对称面、包络尺寸等特征信息，对于三维模型的特征提取能力显著优于传统D2、A2等形状分布算子。

(2) 为了验证提出的铸件三维模型检索算法的有效性，对涉及航空航天、轨道交通、工程机械、流体机械4个领域，包含航天细管类、转向桥类、矿山机架类、叶轮类等9类铸件产品进行了检索试验。其中，Top-1、Top-3、Top-5模型检索准确率分别为81.36%、85.06%、73.61%，结果表明SDFK-6算法对于多领域多类别的铸件特征提取能力强。同时，在上述四个单领域内也进行了模型检索实验。结果表明，SDFK-6算法对于流体机械领域阀体、阀盖、叶轮、压板4类铸件模型识别效果最好，Top-1、Top-3、Top-5检索模型准确度均高于94%，具有很高的应用价值，为后续基于三维模型检索的铸造历史工艺复用提供了技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 周建新.铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势 [J]. 铸造, 2012, 61 ( 10 ): 1105-1115.
- [2] JI X, YE H, ZHOU J, et al. Digital management technology and its application to investment casting enterprises [J]. China Foundry, 2016, 13 ( 5 ): 301-309.
- [3] 彭泽普, 殷亚军, 沈旭, 等.基于统计特征识别算法的冒口工艺推荐方法 [J]. 铸造, 2018, 67 ( 9 ): 794-798.
- [4] FUNKHOUSER T, MIN P, KAZHDAN M, et al. A search engine for 3D models [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22 ( 1 ): 83-105.
- [5] 李海生, 武玉娟, 郑艳萍.基于深度学习的三维数据分析理解方法研究综述 [J]. 计算机学报, 2020, 43 ( 1 ): 41-63.
- [6] GUO H, WANG J, GAO Y, et al. Multi-view 3D object retrieval with deep embedding network [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25 ( 12 ): 5526-5537.
- [7] SU H, MAJI S, KALOGERAKIS E, et al. Multi-view convolutional neural networks for 3D shape recognition [C]// IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE, 2015.
- [8] 王亚, 郑博文, 张欣.基于多模态融合的三维模型检索算法研究 [J]. 计算机应用研究, 2021, 38 ( 3 ): 685-688, 695.
- [9] OSADAR, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions [J]. Acm Transactions on Graphics, 2002, 21 ( 4 ): 807-832.
- [10] 夏爱军, 孙树森, 曾勇.一种基于切片的三维模型检索算法 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29 ( 1 ): 363-365.
- [11] GUO F, LIU J H, ZHOU X W, et al. An effective retrieval method for 3D models in plastic injection molding for process reuse [J]. Applied Soft Computing, 2021, 101: 107034.
- [12] 朱文博, 耿国庆, 刘阳阳, 等.基于骨架树的机械零件三维模型检索方法 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 ( 13 ): 204-212.
- [13] HUANG B, ZHANG S S, HUANG R, et al. An effective retrieval approach of 3D CAD models for macro process reuse [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102 ( 6 ): 1067-1089.
- [14] 张艺琨, 唐雁, 陈强.基于多特征融合的三维模型检索 [J]. 郑州大学学报 ( 工学版 ), 2019, 40 ( 1 ): 1-6.
- [15] 孙晓龙, 张志鹏, 计效园, 等.法向算子和D2算子相结合的铸件三维模型分类算法 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 ( 22 ): 2655-2662.

## Multi-Feature and Multi-Domain Casting Model Retrieval Algorithm Driven by Shape Feature and Domain Knowledge

SUN Xiao-long<sup>1</sup>, ZHANG Dong-cheng<sup>2</sup>, WANG Yu<sup>3</sup>, JI Xiao-yuan<sup>1</sup>, WANG Xian-fei<sup>2</sup>, WANG Lin<sup>3</sup>, LIU Mu-kun<sup>4</sup>, LI Bao-hui<sup>2</sup>, ZHOU Jian-xin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Shanghai Aerospace Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600, China; 3. Xi'an Space Engine Co., Ltd., Xi'an 710100, Shaanxi, China; 4. Huangshi Dongbei Casting Co., Ltd., Huangshi 435000, Hubei, China)

### Abstract:

A multi-featured and multi-domain casting model retrieval method driven by shape features and domain knowledge is proposed for casting typical application areas, due to poor direct retrieval of casting 3D models by shape distribution and the resulting difficulty in reusing historical mature processes. The method is based on 6 feature operators such as D2 operator and modulus operator to extract 3D model shape, hot spots and other structural features and casting process knowledge features, establish multiple feature vectors to represent 3D models; calculate and compare the similarity of feature vectors, carry out the "multi-level elimination" of the model, and retrieve the three-dimensional model with similar process design scheme. The similarity retrieval experiments of the product 3D model libraries of foundry enterprises in the fields of aviation, aerospace, rail transportation and engineering machinery were carried out, and the accuracy of Top-3 model retrieval was 85.06% and 95.83% in the multi-domain and multi-category model test set and the single-domain and multi-category model test set of fluid machinery respectively. The results show that, compared with the traditional shape distribution operator, the method has strong capability for describing the 3D models of castings and high retrieval performance, which provides technical support for the subsequent reuse of casting history processes based on 3D model content retrieval.

### Key words:

3D model retrieval; multi-feature extraction; D2 operator; casting process design