

基于零件结构特征计算的 铸造工艺数据库研究

周楚昊, 郭树人, 向东, 李贝贝, 丁岩松, 曹华堂, 董选普

(华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 基于零件结构特征的空间距离计算, 提出了零件三维模型的唯一结构特征编码的构建方法。该编码包括了零件的外形结构特征和内部空腔结构信息, 使零件在数据库中的存储和调用更加简便和准确。基于上述三维结构特征编码, 本研究将铸造工艺实例中的零件信息、生产信息和工艺信息等相互关联的复杂信息体系进行“唯一性”编码, 从而实现了铸造工艺数据库的快速入库和准确查询。通过对优化后的数据库的使用, 能够简化铸造工艺设计流程以提高设计效率, 并实现设计知识和经验再利用的最大化。

关键词: 铸造工艺设计; 三维结构计算; 数据库技术; 三维模型检索

目前铸造工艺实例主要以文件型的方式储存, 包含零件、铸件和工艺等相关信息。其中零件信息包括三维模型原始数据以及模型的编号、名称、材质、尺寸、特征和用途等属性描述, 工艺信息则包括工艺模型、图纸、工艺卡片、说明文档和明细表等。零件的三维模型和属性信息在数据格式和编辑方式等方面存在显著差异, 为了满足各种需求需要分别进行存储和管理^[1-2]。在零件三维模型入库时如何描述其属性信息并存储进数据库是一个关键问题。

机械零件加工企业通常采用产品数据管理 (PDM) 或产品生命周期管理 (PLM) 软件来管理零件库^[3], 通过编码或者命名来标识每个零件并将其作为重要的文本属性与对应的原始数据文件相关联。一些专业零件库采用可扩展标记语言 (xml) 文档类型定义, 将三维数据映射为计算机可理解的零件信息模型, 并作为零件主要的属性内容进行存储^[4]。在铸造行业, 零件库的构建中通常以文本字段的形式存储三维零件模型对应的工艺相关信息, 以直接反映工艺设计细节和零件特征^[5-6]。然而, 以上通过规则命名、文本定义和标签标记等方式对零件信息的描述有许多不足, 如创建和修改随意、无约束规则、语义模糊、无法对结构进行参数化表示等。同时这些通过人工定义进行描述的方式无法真实地反映零件的结构特征, 导致在数据库中对相似零件检索时, 难以通过零件的属性内容准确检索出结构、尺寸、材质同时相似的零件。

另一方面, 铸造工艺信息覆盖的范围广泛且储存时涉及多种数据类型。由于普遍存在技术档案信息化管理不足的情形, 导致容易出现存储数据冗余、相似零件的工艺查找困难、工艺方案共享困难等问题^[7]。这些问题导致在设计时无法避免重复的劳动从而影响整体设计效率。

本研究对三维模型的结构进行深入分析, 基于零件的结构特征及其空间位置的计算, 将三维结构信息进行参数化表达, 并构建零件和铸件的特征编码; 同时对铸造工艺数据库的存储结构进行设计和优化, 将工艺设计中包含的各类信息进行关联, 从而能够全面地储存和描述完整工艺案例, 减少信息的冗余并便于工艺信息的共享与复用。不同项目或设计人员之间可以方便地共享已有的工艺方案, 减少重复劳动, 从而提高整体设计效率。

作者简介:

周楚昊 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为铸造工艺设计智能化。E-mail: zhouch09@hust.edu.cn

通讯作者:

董选普, 男, 教授, E-mail: dongxp@hust.edu.cn

中图分类号: TG24;
TP391

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2024)
10-1466-07

收稿日期:

2024-07-11。

1 基于零件结构特征计算的铸件编码设计

1.1 零件结构特征计算方法

零件和其对应的铸件在拓扑结构上基本保持一致，且在外形和尺寸上的差异微小。这种相似性使得从铸造成形性能的角度出发，可以将零件的结构特征

和其对应铸件的结构特征视为完全一致。

铸造过程中型腔和型芯的尺寸和相对位置关系确定了铸件的尺寸、模数和平均壁厚等重要参数，因此决定成形质量的铸件特征可以由决定型腔形状的铸件外形凸包特征和决定型芯形状与位置的铸件内部空腔特征共同描述。基于以上前提设计零件的结构特征提取方法，如图1所示。

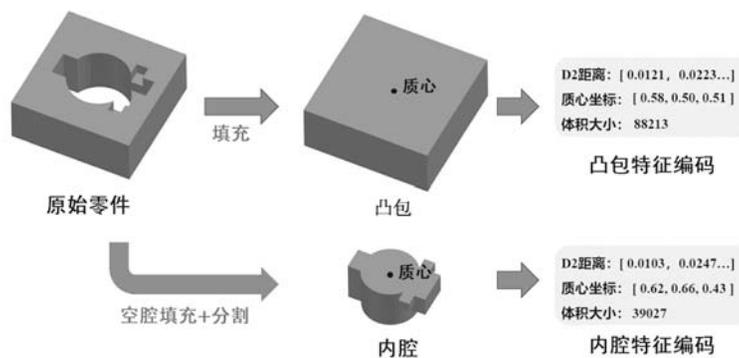


图1 零件结构特征提取过程

Fig. 1 Extraction process of the part structure feature

对原始三维零件进行填充和分割，获取模型凸包外形和其内部所有空腔，再从凸包外形和各个内腔实体中分别提取参数化特征，并共同构成零件的形状结构特征描述。这些参数化特征信息主要包括各实体的D2距离、质心位置和体积^[8]。

D2距离是Osada等人提出的形状分布法的一种距离计算函数，其核心思想是将三维模型的形状特征转

化为从形状函数中采样的概率分布，再通过统计分布来捕捉形状的全局特征^[9]。具体的提取过程如下：在模型表面选取采样点对，计算两点之间的欧几里德距离，并构建距离分布的直方图^[10-11]，如图2所示。再提取各距离分布相对频率值并形成一串序列，将该序列作为实体的D2距离编码内容进行存储。

KL散度也被称为相对熵，是一种衡量两个概率分

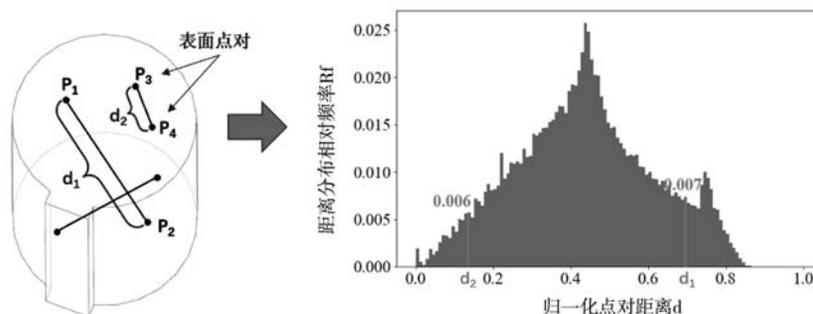


图2 D2距离计算过程

Fig. 2 Calculation process of the D2 distance

布之间距离的方法，其计算公式如(1)所示。KL散度的值越小，说明概率分布 $P(x)$ 和 $Q(x)$ 之间越接近。

$$d = \sum_{i=1}^N P(x_i) \log \left(\frac{P(x_i)}{Q(x_i)} \right) \quad (1)$$

为了验证D2距离算子对实体形状结构表征的可行性和准确性，选择一些典型形状特征的实体作为测试集，提取各实体的D2距离分布。同时以筒状类1#实体

作为参照，计算其他实体与参照实体的KL散度值。试验结果如表1-表2所示。表1显示主体形状相似但细节特征有所不同的实体，其D2距离分布也大致相似，由KL散度值可以看出2#实体与参照实体的D2距离分布差异小于3#实体与参照实体的差异，实际上由于模型细节特征的区别如凸台特征的数量，导致2#实体确实比3#实体更加相似于参照实体。表2中可以看出不同形状类实

表1 筒状类实体D2距离分布及其KL散度值
Table 1 D2 distance distribution and KL divergence values of cylindrical entities

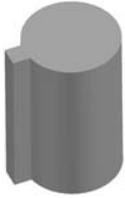
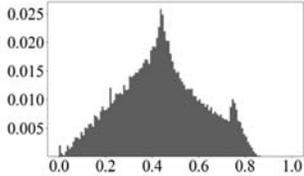
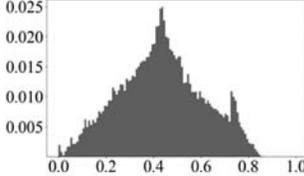
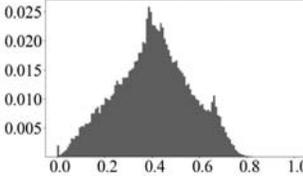
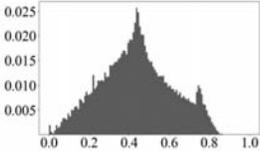
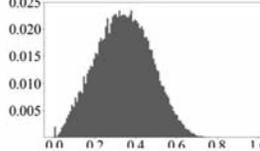
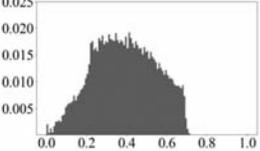
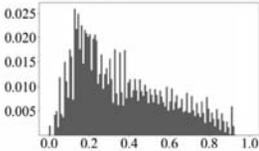
项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]
实体模型			
D2距离分布			
KL散度值	Null	0.02	0.14

表2 不同形状实体D2距离分布
Table 2 D2 distance distribution of different shaped entities

项目	筒状类	板状类	盘状类	条状类
实体模型				
D2距离分布				
KL散度值	Null	0.02	0.14	0.14

体的D2距离分布具有显著的特异性。因此可以得出结论，D2距离分布能够有效表征各类实体的形状结构特征。

1.2 铸件特征编码设计

零件结构特征编码由模型对应的凸包和内腔等多个实体的特征参数组成，其主体是各实体的D2距离分布。同时为了保证零件特征对模数、壁厚等参数变化的敏感性，实体的特征编码中还需包含该实体的体积大小和质心位置。最终零件的编码内容如图3所示，该编码作为零件的唯一标识以区分不同零件的结构特征，且编码内容蕴含的关键参数化信息可被用来衡量不同零件之间的相似度。

基于以上零件的结构特征编码内容，结合铸造过程的材料信息和生产信息等，可以形成铸件的特征编

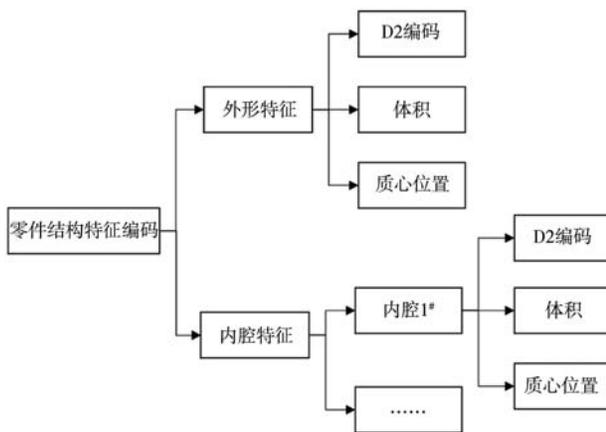


图3 零件结构特征编码内容
Fig. 3 Part structure feature encoding

码,如图4所示。该编码构成铸件信息的主体内容并对铸件对象进行标识。

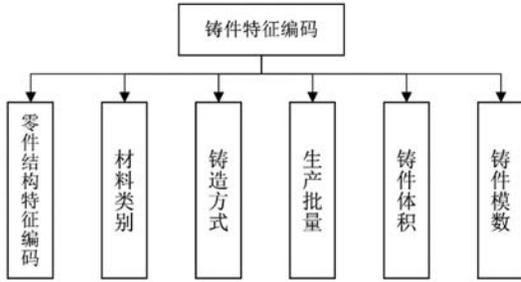


图4 铸件特征编码的内容
Fig. 4 Casting feature encoding

2 铸造工艺数据库的设计

2.1 数据库的存储结构和内容设计

本数据库采用Visual Studio 2022开发平台、C#语言和MongoDB数据库管理系统等工具进行设计和开发,其结构框架如图5所示。在数据管理层面将一项完整工艺案例拆分为零件信息、铸件信息和工艺信息三个模块并分别进行存储。在业务逻辑层中,基于零件信息模块中所存储的参数化结构特征编码能够计算不同零件之间的相似度并实现检索功能;数据库能全面记录并展示所有影响铸件质量的工艺参数,能够有效存储和管理涵盖各类铸造方式的工艺信息和基于不同格式承载的数据信息,因此可以有效实现工艺信息入库和

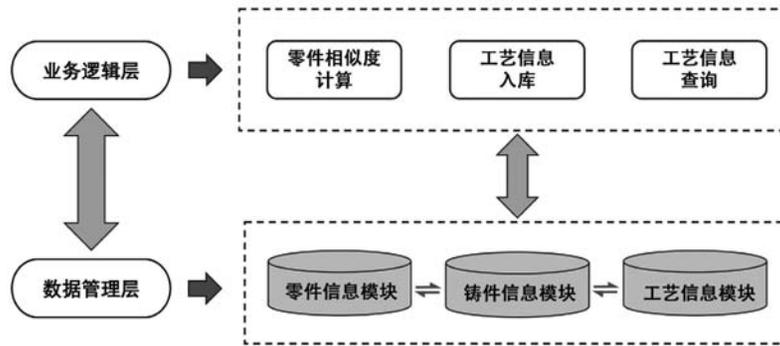


图5 铸造工艺数据库的结构框架
Fig. 5 Structure framework of the casting process database

查询功能。

每个入库的零件、铸件和工艺均处理为一条Bson(二进制Json)格式的文档^[12]存储进入三个信息模块中,分别构成各个信息模块的基本单元。不同模块间数据单元的对应关系如图6所示。一个零件可能对应多个铸件,形成一对多的关系;而每个工艺方案只能对应一个铸件,形成一对一的关系。通过这种对应关

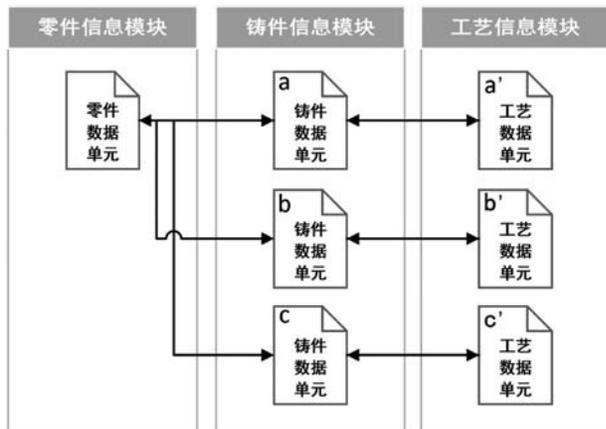


图6 数据单元的对应关系
Fig. 6 Corresponding relationships between Data units

系,可以在确定目标零件后,快速找到其所对应的多种铸件的生产信息、铸造工艺参数和相关工艺方案。同时,区分零件信息、铸件信息和工艺信息,可以更有效地管理和保存这些数据,避免信息丢失和减少冗余,提高信息管理的效率和准确性。

数据库中零件信息模块储存的信息主要包含零件结构特征编码、材质、质量、体积和表面积等,其中最重要的信息是通过前文所述方式计算得到的零件结构特征编码。数据库中铸件信息和工艺信息存储的主要内容如图7所示。其中,铸件信息模块储存了铸件尺寸、铸造方式、生产批量、机械加工余量和尺寸公差等信息。工艺信息模块主要包含工艺三维模型、铸造工艺图、工艺说明、物料清单、浇注系统参数模型^[13]、冒口和冷铁等信息^[14]。

以上设计的存储内容可以对一个完整工艺案例进行全面综合的描述,提供足够丰富的信息。将工艺实例拆分为零件、铸件和工艺数据单元并放入不同的信息模块分别储存,同时确保三个部分间的关联,这种储存方式减少信息冗余并保证了工艺信息的完整性、拓展性和可维护性。

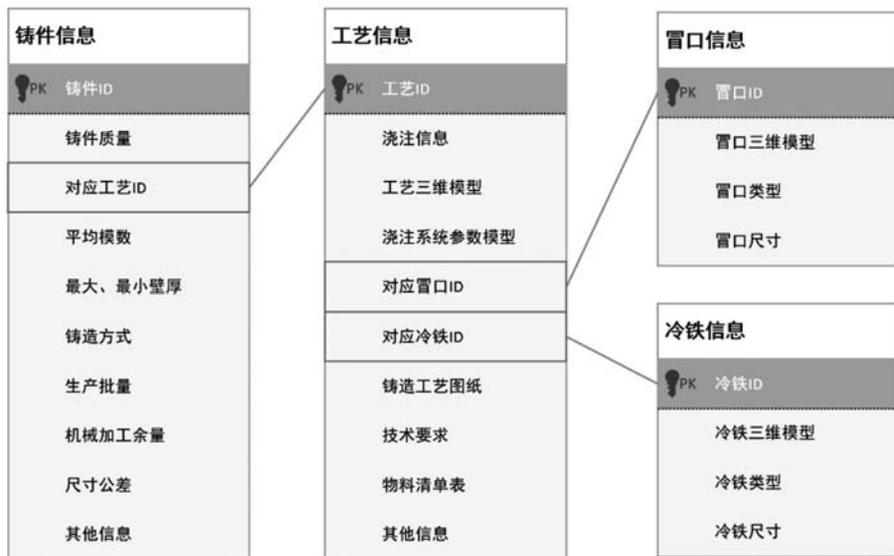


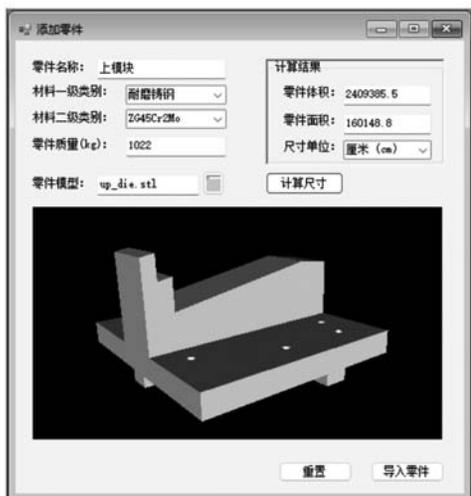
图7 数据库部分存储内容示意图

Fig. 7 Schematic diagram of partial database storage content

2.2 数据库的入库特征

为了确保铸造工艺信息的完整性，需要分别添加零件、铸件和工艺信息，以完成整个铸造工艺案例的入库。本数据库能够对三维模型、二维图纸和相关说明文件等各种类型文件进行便捷导入和相关参数提取。在对零件信息单元进行入库操作时，用户只需选

择目标零件模型文件并输入简要信息如零件的名称、材料类别和质量等，如图8a所示。后台系统将计算零件的体积和表面积等尺寸信息，同时进行零件的填充和空腔分割，并最终提取凸包外形和各个内腔的特征编码。这些信息将作为零件的关键结构特征，存储进入数据库的零件信息模块中，如图8b所示。



(a) 零件入库可视化界面

```

{
  "_id": "6531ec71c059807382725e3b",
  "name": "上模块",
  "materialPrim": "耐磨铸钢",
  "materialSec": "ZG45Cr2Mo",
  "mass": 1022,
  "volume": 2409385.5,
  "surface_area": 160148.8,
  "code": {
    "centroid": [ 0.5072, 0.5846, 0.4177 ],
    "volume": 2602135.8,
    "n2": [ ... ],
    "cavity_codes": [
      {
        "centroid": [ 0.3239, 0.2192, 0.2081 ],
        "volume": 289126.2,
        "n2": [ ... ],
        "D2距离序列": [ ... ],
        "centroid": [ 0.4256, 0.3763, 0.2078 ],
        "volume": 289104.6,
        "n2": [ ... ]
      }
    ]
  }
}
  
```

(b) 数据库中添加的零件实例信息

图8 零件入库可视化界面及数据库中添加的零件实例信息

Fig. 8 Visualization interface for part storage and addition of part instance information to the database

2.3 数据库的零件检索和工艺查询特征

基于数据库所存储的零件结构特征编码可以计算两个零件之间的相似度，进而实现对相似零件的检索功能。对模型的检索功能进行实例验证，以一个桥壳

作为目标零件，将其导入数据库中计算结构特征编码并进行检索。计算相似度值较大的前三个检索结果如表3所示。

对试验结果分析，选取相似度值最高的零件与

表3 相似零件检索结果
Table 3 Retrieval results of similar parts

项目	目标零件	1 [#]	2 [#]	3 [#]
零件模型				
计算相似度值	1.00	0.95	0.89	0.84

目标零件进行对比：目标零件与桥壳零件尺寸差异不大，重要结构信息如材料、热节分布和平均壁厚等基本相同，因此可以将原始零件的工艺方案复用于新零件上，即说明两零件结构的铸造工艺性高度相似。由此得出结论，基于本研究构建的零件结构特征编码能够有效地满足零件相似性计算和检索要求，且检索结果具备准确性和稳定性，便于快速匹配相似工艺方案。

同时，数据库的查询功能便利，可以显示整个铸造工艺的完整信息。工艺信息的查询界面如图9所示。界面中显示工艺三维模型、浇注系统和冒口冷铁等信息，通过交互式功能点击相应数据点可进一步深入查看更详细的数据信息。此外，可以快速查看铸造工艺图、技术要求 and 物料清单。界面还允许对任何有价值的其他工艺信息以键值对形式进行添加并展示。

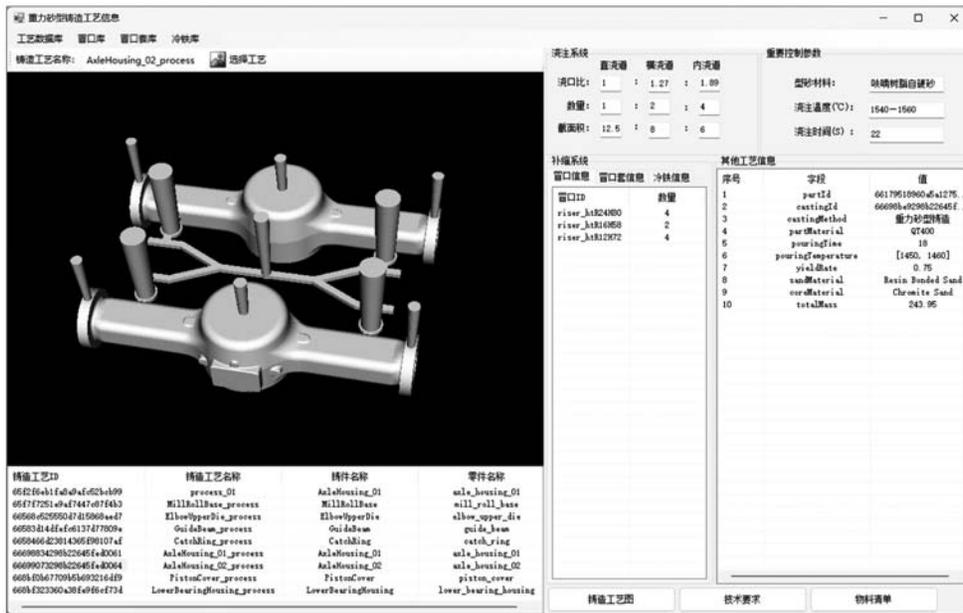


图9 工艺信息查询界面

Fig. 9 Process information query interface

3 结论

(1) 对铸件的结构特征如几何尺寸、外部形状特征和内部空腔特征等进行参数化计算，得到三维零件的特征编码，且具有唯一性。该编码将作为数据库中零件信息模块的重要字段，真实反应了零件的结构特征。

(2) 在数据库中将零件信息、材料信息和工艺信息进行关联编码，可以有效保存和展示完整的工艺案

例，避免信息的缺失和冗余，提升了工艺信息管理的效率和准确性。在此基础上能够方便准确地对铸造工艺信息进行入库和查询操作。

(3) 基于本数据库的功能，可以快速查找相似零件并对其工艺方案和参数进行复用，从而显著提高工艺设计的效率，并实现了设计知识和经验再利用的最大化。对推动铸造工艺设计向智能化和信息化发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 胡逢恺, 赵刚, 程旭. 基于SQL Server数据库的三维模型存取研究与实现 [J]. 四川理工学院学报 (自然科学版), 2010, 23 (2): 212-215.
- [2] 富瑶, 杨青, 罗建峰. 三维模型归档方案初探 [C]//2013年全国青年档案工作者研讨会论文集. 2013: 451-457.
- [3] 江志. 基于图形相似性和零件相关性的模具零件库检索技术的研究及应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [4] 黄沈权, 顾新建, 祁国宁, 等. 基于Web 2.0的零件库管理系统 [J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15 (10): 2057-2062.
- [5] LIM C H, LEE Y C, CHOI J K. Database construction and data retrieval for optimal casting design [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2006, 19 (4): 259-264.
- [6] 孙俊, 黄引平, 马敏团, 等. 柴油机铸件铸造工艺数据库管理系统结构设计 [J]. 铸造技术, 2013, 34 (11): 1588-1590.
- [7] 景贤淑. 当前铸造企业技术档案管理浅析 [J]. 铸造工程, 2023, 47 (6): 63-66.
- [8] 郭树人. 微滴喷射砂型打印及智能化工艺设计关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [9] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2002, 21 (4): 807-832.
- [10] ZHANG Z, JI X, ZHOU J, et al. A method for modeling and extracting 3D structural features of castings considering size [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 37: 563-570.
- [11] 孙晓龙, 张东城, 王玉, 等. 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 [J]. 铸造, 71 (9): 1089-1094.
- [12] JOSE B, ABRAHAM S. Exploring the merits of nosql: a study based on mongodb [C]//2017 International Conference on Networks & Advances in Computational Technologies (NetACT). IEEE, 2017: 266-271.
- [13] GUO S, ZHOU C, DONG X, et al. A transformation method for gating system designing between similar castings [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 112: 82-91.
- [14] 向东, 董选普, 郭树人, 等. 铸造浇注系统敏捷数字化设计及其案例研究 [J]. 铸造, 72 (7): 877-883.

Research on the Casting Process Database Based on Calculations of Part Structural Features

ZHOU Chu-hao, GUO Shu-ren, XIANG Dong, LI Bei-bei, DING Yan-song, CAO Hua-tang, DONG Xuan-pu
(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

Based on the spatial distance calculations of part structural features, this study proposes a method for constructing unique structural feature codes for 3D models of parts. The codes include the external structural features of the parts and the internal cavity structure information, which makes the storage and retrieval of parts in the database more convenient and accurate. Using the aforementioned 3D structural feature coding, this research uniquely codes the complex information system of part information, production information, and process information in casting process cases. This approach achieves rapid storage and accurate querying of the casting process database. Utilizing this optimized database could simplify the casting process design workflow and improve design efficiency, thereby maximizing the reuse of design knowledge and experience.

Key words:

casting process design; 3D structural calculation; database technology; 3D model retrieval
