

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.006

# 面向对象的稠密机知识驱动设计方法研究

李非凡, 董玉德, 袁中行, 白杨, 游泽元

(合肥工业大学机械工程学院, 安徽合肥 230009)

**摘要:**针对稠密机结构复杂、关联参数众多和设计过程繁琐导致的传统设计方式效率低下问题,文章提出一种面向对象的稠密机知识驱动设计方法。该方法基于参数化原理,采用知识工程(knowledge based engineering, KBE)技术模拟专家设计,利用面向对象的思想进行知识表达,并针对基于案例的推理(case-based reasoning, CBR)提出一种新的案例选择方法。利用构建的稠密机辅助设计系统进行验证,结果表明,面向对象的知识驱动设计方法能显著缩短稠密机的设计周期、规范设计过程、提高设计质量。文章所提方法对于稠密机及其他工业产品的智能化、自动化设计具有一定的参考价值。

**关键词:**稠密机;参数化设计;知识工程(KBE);辅助设计;二次开发

**中图分类号:**TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)12-1623-07

## Study on object-oriented knowledge-driven design method for dense machine

LI Feifan, DONG Yude, YUAN Zhonghang, BAI Yang, YOU Zeyuan

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Aiming at the low efficiency of traditional design methods caused by complex structure, numerous associated parameters and cumbersome design process of dense machine, this study proposes an object-oriented knowledge-driven design method for dense machine. This method is based on parameterization principle, uses knowledge based engineering (KBE) technology to simulate expert design, uses object-oriented thinking to express knowledge, and proposes a case selection method based on degree of difference for case-based reasoning (CBR). The effectiveness of this method is verified by constructing a dense machine auxiliary design system. The results show that the design method proposed in this paper can significantly shorten the design cycle of dense machine, standardize the design process, and improve the design quality. This method has reference value for the intelligent and automatic design of dense machine and other industrial products.

**Key words:** dense machine; parametric design; knowledge based engineering (KBE); auxiliary design; secondary development

## 0 引言

稠密机是一种可以加速固液分离过程从而实现悬浮液更经济有效利用的设备,具有负载能力高、安全可靠、便于维护的优点,被广泛应用于矿山、冶金等行业<sup>[1-4]</sup>。稠密机设计过程繁琐、结构复杂,且很多情况下模型仅修改部分参数后即被

重用,这使得当前企业普遍采用的传统人工设计在效率上有很大提升空间,可以采用参数化技术提高设计效率。参数化设计是将工程问题表征为函数和过程,通过修改初始条件直接获得设计结果,从而实现设计过程的自动化<sup>[5]</sup>。参数化设计的关键在于确定参数与参数间的关联,即以何种方式组织参数实现从有限的输入获得设计结果。

**收稿日期:**2023-02-23;**修回日期:**2023-06-05

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51775159);2022年度安徽省科技特派员农业物质技术装备“揭榜挂帅”专项资助项目(2022296906020012)

**作者简介:**李非凡(1998—),男,河南平顶山人,合肥工业大学硕士生;

董玉德(1966—),男,安徽舒城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:yddong@hfut.edu.cn.

然而稠密机设计过程需要严格按照设计规范、设计经验以及理论计算等进行,导致传统的几何驱动参数化设计方法难以满足设计参数的协调控制,因此,本研究引入知识工程(knowledge based engineering, KBE)技术进一步提升稠密机设计效率。

KBE 技术是用合适的形式来组织和表达相关的知识,并在求解问题的过程中使用知识,是智能化设计的基础,广泛应用于人工智能和专家系统等领域<sup>[6-9]</sup>。知识驱动的设计方法是采用 KBE 的理论进行知识获取、知识表达和知识推理,将知识融入参数化设计过程。

目前,KBE 已被引入到各个行业。文献[10]以起重机为例,通过建立规则库的方法对知识重用方法进行了研究;文献[11]结合知识实例库和知识规则库,通过 SWRL 语言构建知识表达,实现机械产品材料选择的 KBE;文献[12]采用图形化的方式进行知识表达,用 AutoFlowchart 软件将故障定位流程图转化为诊断知识数据库,并基于该表达方式构建液压系统故障诊断 KBE;文献[13]基于 CATIA 软件将航空结构件的设计特征保存为知识,以提高建模效率;文献[14]采用最近相邻法进行飞机结构件的混合推理,提高飞机结构件的变形设计效率。

上述研究采用的 KBE 方法均提高了相关机械产品的参数化设计效率,但同时也存在缺陷。

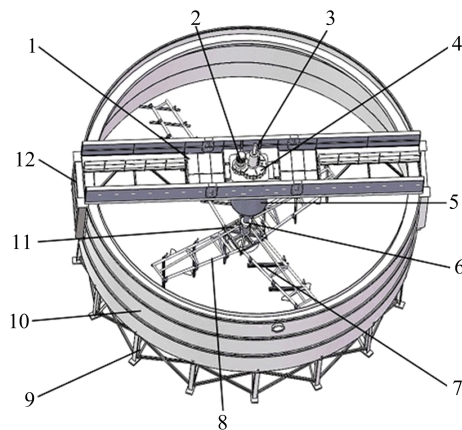
1) 知识表达存在缺陷。首先,通过访问规则库等中间结构获得知识描述,并将中间结构储存的知识描述解析为计算机语言,这导致额外的数据处理过程,增加了系统复杂度,降低了系统鲁棒性;其次,目前的知识表达还多依赖 CATIA、UG 等设计软件的内置功能进行,这影响了知识表达的扩展性和可移植性。

2) 知识推理存在缺陷。上述研究中知识推理多采用最近相邻法,完全在当前案例中选择重用对象,极端情况下会导致案例与设计目标相似度较低,而相似度越低需调整的设计参数越多,还可能产生案例结构不适用设计目标工况的情况。

本文在上述研究的基础上,针对相关研究中存在的问题,结合稠密机产品设计的特点,提出一种面向对象的稠密机知识驱动参数化设计方法,将稠密机设计相关的知识进行提取,通过面向对象的思想实现知识表达,并提出一种新的案例推理方法,即基于设计目标与当前案例的差异度进行判断,当设计目标与当前所有案例差异度都较

高时,重新挑选子模块组合出新的案例。本文研究的内容可以将知识驱动融入到参数化设计中,实现稠密机的高效设计。

稠密机结构图如图 1 所示。



1. 桥架 2. 驱动系统 3. 提耙油缸 4. 传动箱体 5. 稳流桶  
6. 主轴 7. 长耙臂 8. 短耙臂 9. 支撑钢架 10. 沉降池  
11. 固接台 12. 桥架支座

图 1 稠密机结构图

## 1 知识驱动的参数化设计技术路线

参数化设计可以显著提高产品的设计效率,但传统的几何驱动参数化设计只是将设计人员的精力从点、线、面的绘制转移到几何驱动参数的输入上,并不能对设计意图进行辅助<sup>[15]</sup>。以稠密机为例,传统的几何驱动参数化设计系统可以简化部件的建模过程,但在目标工况下部件类型的选择需要人工确定,另一方面当增加某类型耙架的长度时,几何驱动的参数化设计系统仅会增加该耙架的几何长度,并不会相应增加支撑件的数量。而本文提出的面向对象的稠密机知识驱动设计方法基于参数化技术和 KBE 技术,并将 KBE 融入参数化设计过程。首先,通过知识获取对稠密机的相关设计知识进行归纳分类,基于稠密机的设计知识构建稠密机的模板模型库,确定模型的主动参数和被动参数;然后,基于获取的知识通过面向对象的方法进行知识表达,对相关主动参数和从动参数进行参数关联;最后,基于面向对象的知识表达方式知识推理,控制稠密的设计过程,包括参数校核、结构类型决策、参数关联关系决策等。

通过面向对象的稠密机知识驱动设计方法构建的设计系统可以实现基于设计意图的稠密机参数化设计,设计人员仅需输入目标参数,系统将调

用相关知识分析稠密机的受力情况,自动选择稠密机的部件结构,自动进行支撑件的补充或减少等操作。稠密机知识驱动设计的技术路线如图 2 所示。

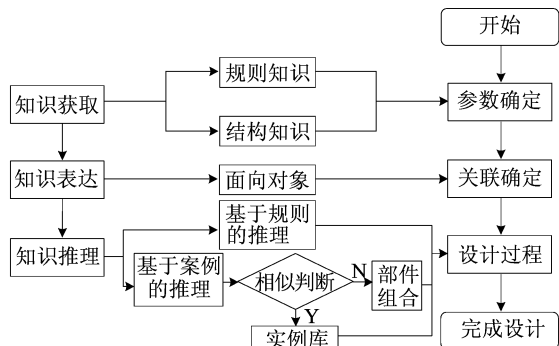


图 2 稠密机知识驱动设计的技术路线

## 2 稠密机 KBE 的构建

### 2.1 知识获取

知识获取是指从特定的知识源获取求解问题相关的知识,用以进行信息管理、过程控制和决策支持<sup>[16]</sup>。知识获取的最理想手段是完全自动获取,但对工业大数据和知识发现分析算法有较高的要求,在当前阶段的稠密机设计领域难以实施。本文采用半人工获取,首先人为地收集稠密机的设计知识并分类,然后通过储存的设计结果来完成知识的增长。知识存储的抽象集合称为知识库。收集的稠密机设计知识可分为规则知识和结构知识两类。规则知识指的是稠密机设计过程的各种规范,包括国家标准、企业标准、理论计算和设计经验等,规则知识通过构建关联方程式、代码表达式或表格数据的方式存储。

稠密机部分规则知识描述及知识来源见表 1 所列。

表 1 部分规则知识描述及来源

部件	知识描述	知识来源
桥架底部槽钢	槽钢尺寸应符合国家标准	槽钢执行标准 GB 707—88
耙架臂	耙架臂与沉降池壁保持 100 mm 距离	稠密机设计经验
桥架走台	走台宽度不小于 2 m	企业标准
传动机构	能克服矿浆屈服应力	金属矿膏体充填理论

结构知识是反映稠密机零件结构特征的知识,通过分析归纳已有的稠密机设计案例得出。

三角耙臂结构特征分析示意图如图 3 所示。

由图 3 可知,通过对比某稠密机 10 m 圆管耙臂和某稠密机 25 m 圆管耙架,可以将圆管耙臂结构特征归纳为根部的三角圆管阵列和头部的直线圆管阵列,在设计圆管耙臂时应维持该结构特征。结构知识信息通过建立各部件的模型模板储存。

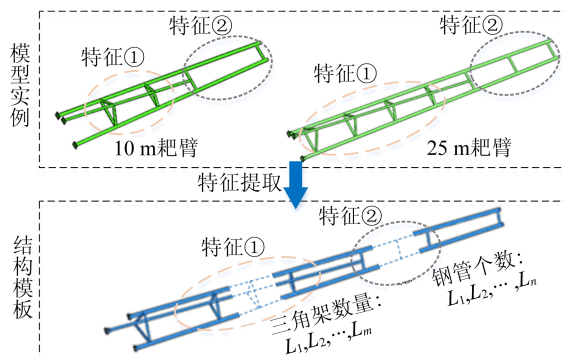


图 3 三角耙臂结构特征分析示意图

稠密机的设计知识是知识驱动设计的数据源,对稠密机的设计知识进行总结和归纳是进行知识驱动设计的前提。

### 2.2 知识表达

知识表达是采用合理的表现形式来展现知识库中知识的使用。面向对象的核心思想是万事万物均可看作对象,核心技术是如何用计算机的语言去表达对象<sup>[17]</sup>。由于具有封装性、继承性和多态性,使得面向对象思想在描述抽象事物时有着良好的表达形式,非常适用于知识表达。

面向对象的知识表达即将相关的知识作为类的属性和方法进行封装,设计时通过调用对象的方法来进行问题决策和参数处理。知识类的一般模板如下:

```

Class<知识类名>[:知识父类名]
{
    Properties:<描述知识的状态变量>
    Methods:<描述知识的动作函数>
}
    
```

在构建知识类前,需要用逆向设计的思维确定各类包含的知识范围。稠密机知识划分结构如图 4 所示。

从图 4 可以看出,按照设计关联性可以将稠密机划分为桥架模块、传动模块和耙架模块 3 个设计模块,这些模块内部的参数关联密度较高,可以作为一个知识集群。



于该实例进行参数驱动;若实例库中不存在合适的案例,则从部件模板库中选择部件组合为更符合设计目标的案例,再进行参数驱动。

### 2.3.1 基于案例的推理

CBR 的核心是案例的重用。在设计过程中,选择的重用案例与设计目标相似度越高,设计效率越高。

目前较为常用的案例选择方法为最近相邻法,即从已有实例中逐一比较与设计目标的差异量,选择总差异量最小的实例作为重用对象。该方法适用于结构较为简单的零件,但存在 2 个问题:① 通过差异量来描述相似度不够准确;② 完全从已有实例中选择,当所有案例均与设计目标差异较大时或实例库中模型较少时,所选案例与目标相似度可能较低,影响后续设计过程。稠密机在不同的设计参数下可能会选用不同类型的部件,最近相邻法会导致案例与设计目标结构不匹配的情况,不适合稠密机的案例选择。

为解决最近相邻法在稠密机设计中的不适用问题,本研究提出一种基于差异度的案例选择方法,整体流程如图 6 所示。

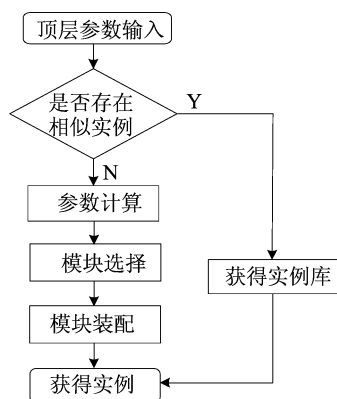


图 6 案例选择方法流程

### 2.3.2 案例选择方法

稠密机的设计涵盖了大量的参数,运用 KBE 技术可以充分利用参数间的相互依赖关系将绝大多数参数互相关联。选择对稠密机的结构影响最大的几个设计参数作为顶层设计参数,用于表征稠密机。

根据分析,稠密机的顶层设计参数为矿浆的浓度、桥架长度、耙架仰角和主轴直段长度。每个参数对稠密机设计结果的影响程度并不相同:当矿浆浓度发生改变时,显著影响稠密机的受力情况,进而显著影响稠密机的结构选择;桥架长度对应池体的直径也会影响稠密机受力情况,但影响

程度次于矿浆浓度;耙架仰角和直段长度对稠密机的结构选择影响较小,在很大范围内不同的仰角和直段长度都可以对应相同的结构。基于不同参数对稠密机设计的影响程度,设置顶层参数在设计中的权重,见表 3 所列。

表 3 顶层参数权重

顶层参数	矿浆浓度	桥架长度	耙架仰角	直段长度
权重	0.5	0.3	0.1	0.1

对比差异量的描述,采用差异度来描述设计目标于某个实例的差异情况,计算方法为:

$$S = \sum_{i=1}^4 \omega_i \left| \frac{x_i - X_i}{X_i} \right|, \quad S \geq 0 \quad (1)$$

其中: $\omega_i$  为各个顶层参数的权重; $x_i$  为实例库中已有的顶层参数值; $X_i$  为设计模板对应的顶层参数值; $i$  表示第  $i$  个顶层参数。

以 0.2 为计算阈值,若找到模型差异度  $S \leq 0.2$  的模型实例,则可用该模型为模板生成设计目标;若模型差异度  $S > 0.2$ ,则案例与设计目标差异较大,设计目标可能不适合采用当前案例的结构,此时应基于功能-行为-结构(function-behavior-structure, FBS)模型进行模型匹配。

首先将稠密机的功能进行分解,按各功能模块应实现的效果结合顶层设计参数进行模块类型决策;然后从预先建立的模型模板库中调用相关的模型进行组合和预参数驱动,形成新的实例。FBS 模型如图 7 所示。

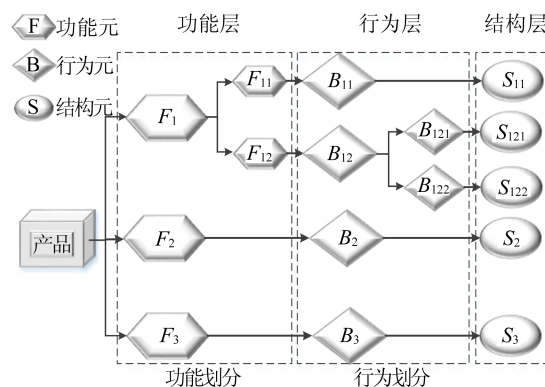


图 7 FBS 模型结构

## 3 应用实例

### 3.1 系统设计

基于面向对象的稠密机知识驱动设计方法,结合 CAD 软件二次开发技术,可以开发稠密机

的辅助设计系统。以某企业稠密机辅助设计系统开发为例,该系统基于 SolidWorks 平台进行二次开发,由规则知识库、部件模板库和案例库构成数据层,使用 C# 语言构建系统核心层实现知识表达,使用 WinForm 搭建系统界面层,实现系统数据交互和设计结果显示。系统实现原理如图 8 所示。

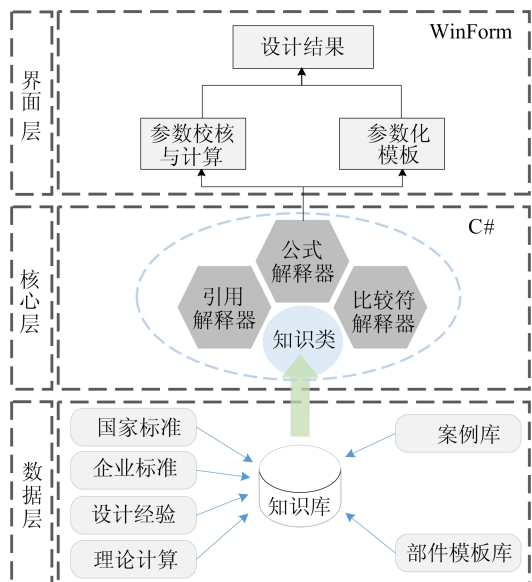


图 8 稠密机输辅助设计系统原理图

### 3.2 设计案例

以桥架长度 30 000 mm、矿浆固液比 0.6、耙架仰角 10°、轴直段长度 3 000 mm 为顶层设计参数,用户将顶层设计参数经交互界面输入,系统采用调用相关对象的方法对设计参数进行有效性验证,验证合理的参数被存入系统,系统采用基于差异度的案例选择方法检索实例库中是否有近似的设计实例。

案例库中现有实例与设计目标顶层参数的对比见表 4 所列。

表 4 案例与设计目标顶层设计参数的对比

设计参数	桥架长度/ mm	矿浆固液比	耙架仰角/ (°)	直段长度/ mm
案例 1	35 00	0.3	12	2 500
案例 2	45 00	0.7	10	5 000
设计目标	30 00	0.6	10	3 000

经计算,案例 1 与设计目标相似度为 0.34,案例 2 与设计目标相似度为 0.30,均不采用。相关知识类通过对象的方法对部件进行参数关联和过程控制,系统调用这些方法对部件类型进行决

策,从部件模板库中选择合适的部件模型组合为新的设计案例。

以传动模块选型为例,在部件推理界面输入横梁、刮泥耙和导水杆的部分结构参数,系统调用对象方法执行知识表达,模拟专家思考计算出选型所需的各种数据,有了耙架扭矩,即可进行部件选型参数的计算。根据数据库中保存的参数与型号对照表选择最合适的马达、减速机和油泵电机,完成案例的传动模块构建。

传动模块参数计算界面如图 9 所示,选型控制界面如图 10 所示。



图 9 传动模块参数计算界面

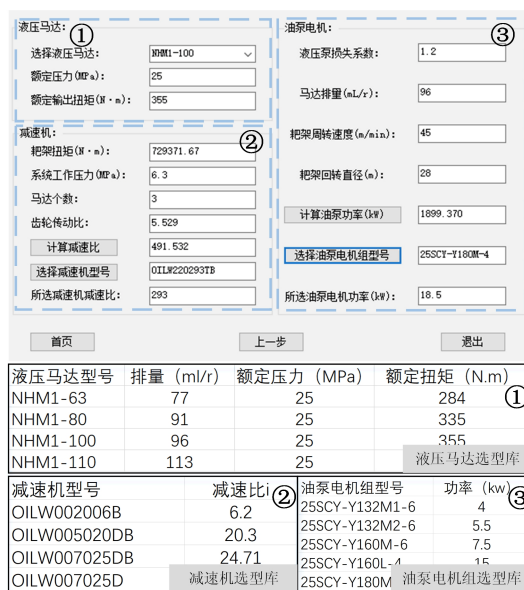


图 10 传动模块选型控制界面

耙架模块和桥架模块选型流程相同,不再赘述。最后将各部件装配,经过参数驱动最终生成设计目标。

设计完成的稠密机模型可以保存至模型实例库中,完成稠密机知识库的补充,用户可以直接使用实例库中的模型来提高设计效率。基于该系统的稠密机设计主要流程如图 11 所示。

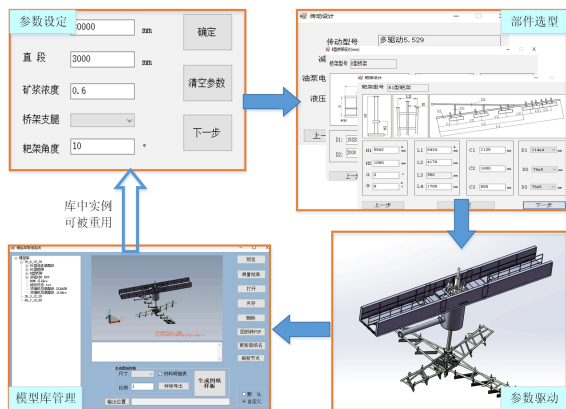


图 11 稠密机辅助设计系统主要设计流程

与企业技术人员的设计结果对比,通过上述系统设计的稠密机结构合理。经人为参数校核,该系统设计的稠密机参数与设计目标吻合,证明了基于本文方法构造系统的设计准确性。而在设计所用时间上,经统计,技术人员人工设计需要 8~12 h,系统只需 5~10 min。

实践表明,应用面向对象的稠密机知识驱动设计方法构建的设计系统操作简单、设计周期短,系统设计出的稠密机完全符合设计要求,本文设计方法能极大地提高稠密机的设计效率。

## 4 结 论

本文提出一种面向对象的稠密机知识驱动设计方法,将稠密机的知识进行分类和提取;利用面向对象的思想进行知识表达,使知识表达更加简洁高效;采用基于目标相似度的案例选择方法,提升稠密机的知识推理质量。

实例验证结果表明,本文方法可以解决稠密机设计过程复杂、设计周期长、设计思想不规范的问题,显著提高稠密机的设计效率。同时本系统的设计思路不仅局限于稠密机领域,也可为汽车、轮船、机床等具有复杂装配结构设备的智能化设计提供开发思路。

但本研究目前也存在缺陷,即参数化设计完全基于现有结构,不能对结构进行优化设计,后续可以配合有限元分析和拓扑分析进行稠密机优化设计。

## [参 考 文 献]

[1] CONCHA F, SEGOVIA J P, VERGARA S, et al. Audit in-

dustrial thickeners with new on-line instrumentation[J]. Powder Technology, 2017, 314: 680-689.

- [2] WANG X T, CUI B Y, WEI D Z, et al. Effect of feed solid concentration on tailings slurry flocculation in a thickener by a coupled CFD-PBM modelling approach[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(6): 1-12.
- [3] MOHANARANGAM K, HOPKINS J, SIMIC K, et al. Turbulent mixing of concentrated viscoelastic polymer solution: influence of submerged sparge shape and orientation[J]. Minerals Engineering, 2018, 128: 1-16.
- [4] 王小宇, 郭跃久, 姜磊, 等. 浓缩机中心驱动单元结构优化设计[J]. 矿冶, 2014, 23(6): 51-62.
- [5] 刘建华, 孟庆玉, 陈静婕. 参数化设计方法在非线形形体建筑设计中的应用研究[J]. 工程建设与设计, 2023(1): 30-33.
- [6] 方学良. 基于知识的旅游客车车身总布置系统的研究与开发[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [7] GIANFRANCO L R. Knowledge based engineering: between AI and CAD: review of a language based technology to support engineering design[J]. Advanced Engineering Informatics, 2014, 26(1): 159-179.
- [8] YANG H Z, CHEN J F, MA N, et al. Implementation of knowledge-based engineering methodology in ship structural design [J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(3): 196-202.
- [9] 张爽. 面向产品设计的知识工程若干关键问题研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [10] 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.
- [11] 安宁, 张应中, 田景海. 开放知识驱动的绿色工程材料选择方法[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(3): 133-142.
- [12] 何庆飞, 陈小虎, 姚春江, 等. 基于流程图知识表示的工程机械液压故障诊断专家系统[J]. 机床与液压, 2019, 47(17): 216-219.
- [13] 张航, 陈晓峰, 王旋, 等. 航空结构件快速建模的 CATIA 知识工程方法[J]. 机械设计, 2023, 40(1): 113-118.
- [14] 郝博, 汪万炯, 张鹏, 等. 基于混合推理的飞机结构件变形设计[J]. 航空制造技术, 2022, 65(21): 28-35.
- [15] 曹炳勇, 陈莎莎, 施新欣. 知识驱动下的 BIM 快速化设计系统[J]. 公路, 2022, 67(10): 308-313.
- [16] 林放, 卢幸伟, 翁国洲. 基于知识工程下机械产品数字化设计原理与关键技术[J]. 农机使用与维修, 2022(12): 75-77.
- [17] 戴邦. 基于面向对象的桥式起重机起升机构的优化设计[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2017.

(责任编辑 胡亚敏)