



基于知识驱动的船体型线智能设计方法

冯佰威 张子诚 刘祖源 郑强 曾大连 薛亮 赵万水

Intelligent design method of hull form based on knowledge-driven

FENG Baiwei, ZHANG Zicheng, LIU Zuyuan, ZHENG Qiang, ZENG Dalian, XUE Liang, ZHAO Wanshui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04426>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

型线知识图谱在长江散货船型线设计中的应用

Application of hull form knowledge graph method in design of Yangtze River bulk cargo ship

中国舰船研究. 2024, 19(6): 17–24 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03855>

知识工程技术在船体设计中的研究进展与展望

Research progress and prospects of knowledge engineering technology in ship hull form design

中国舰船研究. 2024, 19(6): 3–16 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04046>

基于智能模糊推理系统的船型概念方案快速生成研究

Rapid ship hull conceptual scheme design based on intelligent fuzzy inference system

中国舰船研究. 2024, 19(6): 45–55 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03718>

基于智能模糊推理的UUV艇型参数生成方法研究

Intelligent fuzzy inference method for generating UUV hull parameters

中国舰船研究. 2024, 19(6): 56–63 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04063>

滑行艇穿浪艏型线智能优化设计

Intelligent optimization design of wave-piercing bow lines for planing craft

中国舰船研究. 2024, 19(6): 180–190 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03799>

智能货运船舶研究现状与发展思考

Review and prospect for intelligent cargo ships

中国舰船研究. 2021, 16(1): 1–6 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01674>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04426>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 冯佰威, 张子诚, 刘祖源, 等. 基于知识驱动的船体型线智能设计方法 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(X): 1–11.

FENG B W, ZHANG Z C, LIU Z Y, et al. Intelligent design method of hull form based on knowledge-driven[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(X): 1–11 (in Chinese).

基于知识驱动的船体型线智能设计方法



扫码阅读全文

冯佰威^{*1,2}, 张子诚¹, 刘祖源^{1,2}, 郑强^{1,2}, 曾大连³, 薛亮¹, 赵万水⁴

1 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063

2 高性能船舶技术教育部重点实验室(武汉理工大学), 湖北 武汉 430063

3 广西中船北部湾船舶及海洋工程设计有限公司, 广西 南宁 530028

4 武昌船舶重工集团有限公司, 湖北 武汉 430060

摘要: [目的] 针对现有型线设计手段耗时过长、知识重用性低的问题, 开展船体型线的快速智能设计研究。[方法] 重点围绕长江货船船型, 利用知识工程理论, 构建包含型线参数知识图谱、母型船实例、设计规则的知识库, 并基于建立的知识库设计船体型线混合推理模型。然后, 以长江 13 000 DWT 散货船的型线设计为例, 利用知识库的智能推理实现船体型线的高效生成。[结果] 结果显示, 与初始船型相比, 推理船型可达到 3.06% 的减阻效果。[结论] 研究表明, 基于知识驱动的船体型线智能设计方法可显著提高船体型线设计的效率及质量, 具有重要的工程意义。

关键词: 人工智能; 知识图谱; 设计规则; 母型船; 混合推理; 型线智能设计

中图分类号: U662.2

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04426

0 引言

船体型线决定了船舶的航行性能, 是船舶总体设计中最重要内容之一。随着计算机技术的发展, 基于计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的船型智能优化方法已成为型线设计的重要研究方向。冯佰威等^[1-3] 结合基于仿真的设计技术 (simulation based design, SBD), 提出了船型多目标优化平台, 该平台集成了 CFD 数值模拟技术、船体几何重构技术、优化技术和近似技术等, 利用该平台, 对多类船型进行了型线优化研究。Tran 等^[4] 利用三次样条插值函数, 实现了船体形状的 Lackenby 变形, 并基于 CFD, Kriging 代理模型和优化技术对一艘渔船进行船型优化, 实现总阻力约降低 8.8%。Kim 等^[5] 选择 29 个参数变量对一艘小型船舶进行了参数化几何描

述, 通过结合深度神经网络模型和遗传算法, 获得了最佳船体形状。

近年来, 人工智能的快速发展为设计领域开拓了全新的方向。人工智能需要大量的知识用于推理和决策, 其中的重点就是知识工程技术。在船舶领域, 针对知识工程技术的研究目前主要集中在船舶主尺度确定、结构设计和布置设计等方面。杨少明^[6] 将知识工程技术用于求解多层甲板舱室布置问题, 用产生式表示法和面向对象表示法对船舶生活舱室布局的知识予以了表示, 并按舱室布局推理策略完成了知识推理。Cui 等^[7] 针对集装箱船货舱结构设计, 运用设计规则法和插值法, 借鉴以往的成功案例指导了新船舶的结构设计。赵桐鸣^[8] 通过建立实船案例库和包含设计规范、专家知识等的规则库, 基于多种推理算法实现了母型船的选型及设计方案的自动智能化生

收稿日期: 2025-03-27 修回日期: 2025-04-21 网络首发时间: 20xx-xx-xx xx:xx

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2441289, 51979211, 52271327, 52271330, 52471339, 52401390); 装备预研教育部联合基金 (青年人才) 资助项目 (8091B032201); 高等学校学科创新引智计划资助项目 (BP0820028); 广西重大科技专项桂科项目资助 (AA23023013, AA23062037); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (104972024RSCbs0010); 国家资助博士后研究人员计划 C 档资助项目 (GZC20232018)

作者简介: 冯佰威, 男, 1974 年生, 博士, 教授。研究方向: 船舶性能多学科设计优化。E-mail: fengbaiwei@126.com

张子诚, 男, 2000 年生, 硕士生。研究方向: 船舶智能设计优化。E-mail: 13636179160@163.com

刘祖源, 男, 1963 年生, 博士, 教授。研究方向: 船舶性能、船舶多学科设计优化。E-mail: wtlzy@whut.edu.cn

*通信作者: 冯佰威

成。在船体型线设计领域,已有部分学者研究了型线参数与船舶性能之间的隐含关系,得到了船体型线的设计知识。张建仪等^[9]构建了长江中下游直立首-双尾鳍散货船型线知识图谱,可反映该船型在不同方形系数和尺度比下不同型线参数的变化规律。叶萌等^[10]采用粗糙集理论对 KCS 集装箱船优化仿真数据进行数据挖掘,得到了船型设计变量与兴波阻力之间隐含的设计规则。Zheng 等^[11]采用敏感性分析和自组织映射神经网络,通过在双尾鳍船型优化数据中提取设计知识,分析了变量之间以及变量与目标函数之间存在的隐性关系。

本文拟结合知识工程技术,建立适用于长江货船型线设计的知识库及混合推理模型,开发基于知识驱动的船体型线智能设计平台,然后以长江 13 000 DWT 散货船为例,论述知识驱动的船体型线设计流程,最后对推理获得的型线方案进行验证。

1 基于知识驱动的船体型线智能设计框架

基于知识驱动的船体型线智能设计框架如图 1 所示,主要包括用户层、应用层和知识库层,各层之间均能进行数据、信息和知识的双向传递。

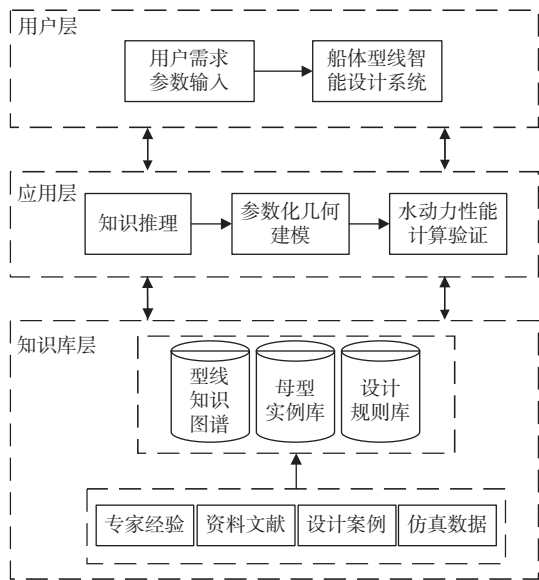


图 1 基于知识驱动的船体型线智能设计框架
Fig. 1 Intelligent design framework of hull form based on knowledge-driven

1)用户层。用户输入设计船的主要要素需求,包括垂线间长 L 、型宽 B 、吃水 T 、方形系数 C_B 、傅汝德数 Fr ,以及设计船的主要特征(包括船舶类型、首尾型、设计航速等)。

2)应用层。根据用户的设计要求,首先在母

型库中检索相似的初始船型,然后利用知识推理模型进一步得到阻力性能优秀的船型特征参数,最后集成参数化几何建模软件 CAESSES,利用参数化设计模块生成船体曲面的三维几何模型。

3)知识库层。对专家经验、实船设计资料、优化仿真数据、船舶设计原理及规范等知识进行合理有效的获取、表示、分类和管理,以总阻力性能为重点关注对象,建立船体型线设计知识库。

2 型线知识库构建

本文构建的知识库如图 2 所示,包括型线知识图谱、母型实例库和设计规则库,是后续进行知识推理的基础与核心。

2.1 母型实例库

本文将针对长江货船船型建立实例库,并将若干母型船设计实例存储于关系数据库 MySQL。这些设计实例均采用参数化的表达方法并基于 CAESSES 软件构建几何模型,具体实现过程参见文献[12]。构建几何模型的重要参数主要包括:

- 1)全局几何特征参数:平行中体长度比、进流段长度比、去流段长度比、浮心纵向位置等;
- 2)局部几何特征参数:设计水线进流角及去流角、球鼻艏参数、艨鳍参数等。

母型实例库所用的船舶特征属性包括船舶编号、船舶名称、船舶类型、艏型、艨型、垂线间长、长宽比、宽度吃水比、方形系数及设计航速。各个实例对应的结构属性由该实例的参数化几何模型、适用的型线知识图谱类型以及适用的设计规则库类型组成。后续,可通过 SQL 语言,根据特征属性对相似实例进行检索,从而得到设计所需的参数化几何模型和知识库种类。建立的母型实例库如表 1 和表 2 所示。

2.2 型线知识图谱

型线知识图谱构建的主要流程参见文献[9]。该型线知识图谱为不同方形系数下若干型线参数(浮心纵向位置、尾鳍内侧肥大度、尾轴间距比、首部宽度收缩比)随尺度比 L/B 、 B/T 的变化曲线,该曲线反映出了型线几何特征参数与总阻力性能之间的映射关系。部分型线知识图谱曲线如图 3 所示。

2.3 设计规则库

本文基于型线几何参数对船舶阻力的影响规律,建立了如图 4 所示型线设计规则库。

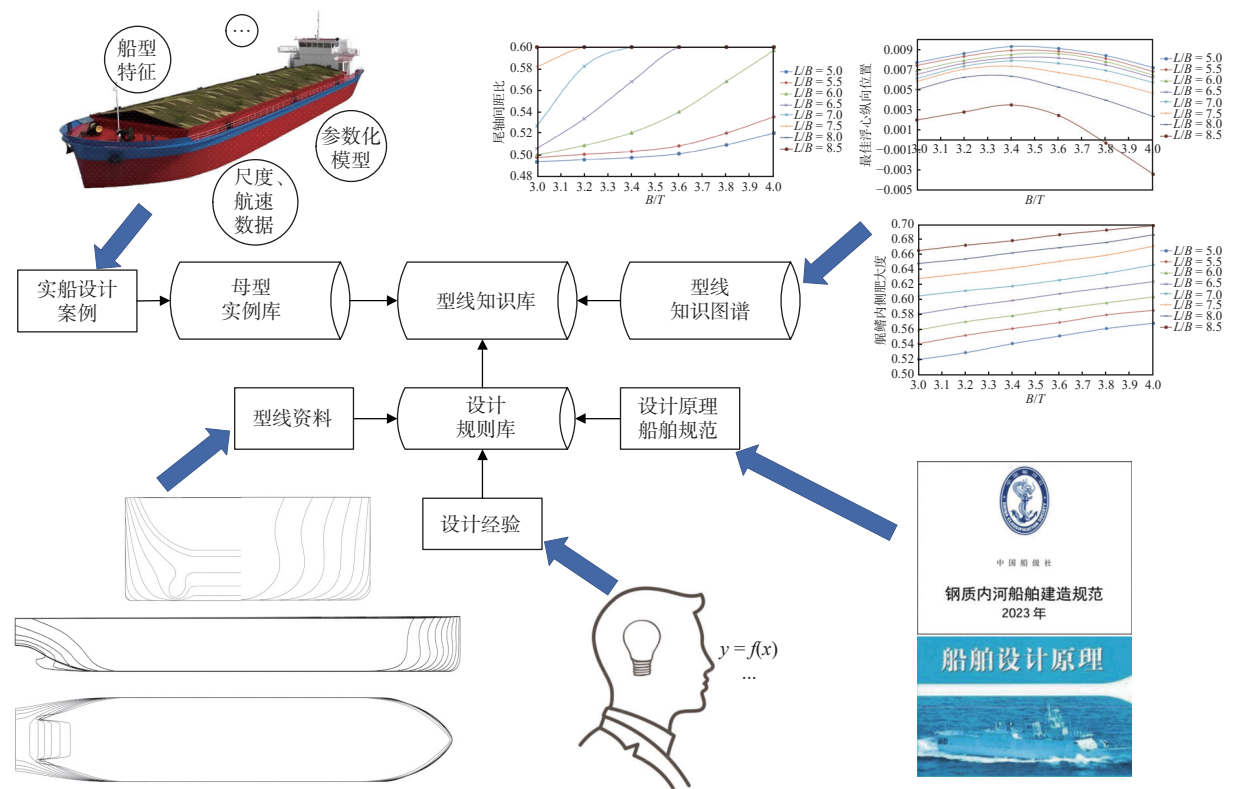


图 2 型线知识库结构

Fig. 2 The structure of hull form knowledge base

表 1 母型实例表(特征属性)

Table 1 Parent case table (feature attributes)

船舶编号	船舶名称	船型	艏型	船长/m	长宽比	宽度吃水比	方形系数	设计航速/kn
1	7 500 t散货船	直艏	双艏鳍	128	7.901	3.115	0.864	9.7
2	6 000 t散货船	球鼻艏	双艏鳍	105.6	5.677	3.407	0.862	11.9
3	4 500 t液货船	直艏	双艏	102.8	6.346	3.857	0.84	9.7
4	3 000 t散货船	倾斜艏	双艏	100.2	6.185	6.75	0.8	10.8
5	600 TEU集装箱船	直艏	双艏	126.9	6.609	3.491	0.867	10.8
...	...	...	...	...	...	...	...	...

表 2 母型实例表(结构属性)

Table 2 Parent case table (structural attributes)

船舶编号	参数化模型	图谱类型	设计规则库类型
1	7 500 t散货船参数化几何模型	直艏双尾鳍图谱	货船规则库
2	6 000 t散货船参数化几何模型	球鼻艏双尾鳍图谱	货船规则库
3	4 500 t液货船参数化几何模型	直艏双尾图谱	货船规则库
4	3 000 t散货船参数化几何模型	倾斜艏双尾图谱	货船规则库
5	600 TEU集装箱船参数化几何模型	直艏双尾图谱	货船规则库
...	...	...	...

以文献 [13] 中对满载水线进流角的描述为例, 如表 3 所示。表中: C_p 为设计船的棱形系数。

对于满载水线进流角的取值范围, 规则知识可以表示为:

规则 001: if $C_p > 0.78$, Then $30^\circ < \text{进流角} < 40^\circ$;

规则 002: if $0.75 < C_p < 0.78$ and $Fr < 0.182$, Then $26^\circ < \text{进流角} < 28^\circ$;

.....

.....

.....

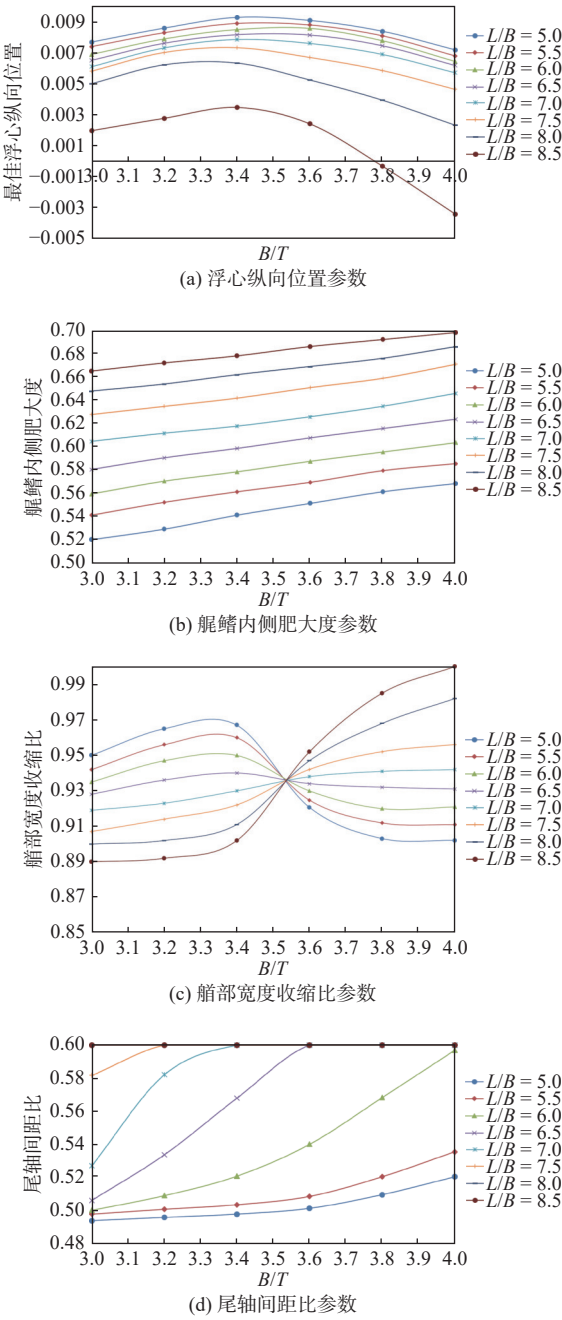


图 3 型线知识图谱曲线

Fig. 3 Curves of hull form knowledge graph

规则 005: if $0.60 < C_p < 0.65$ and $Fr > 0.238$, Then $6^\circ < \text{进流角} < 12^\circ$ 。

3 型线知识推理模型

本文母型实例库、型线知识图谱和设计规则库分别采用实例推理(case based reasoning, CBR)、模型推理(model based reasoning, MBR)和规则推理(rule based reasoning, RBR)^[14]，建立的推理模型如图 5 所示。主要分为以下 3 个步骤：

1) 根据输入的设计船的需求，针对母型实例库检索得到相似船型实例，并输出相似实例的结构属性(适用的参数化几何模型、图谱类型、设计

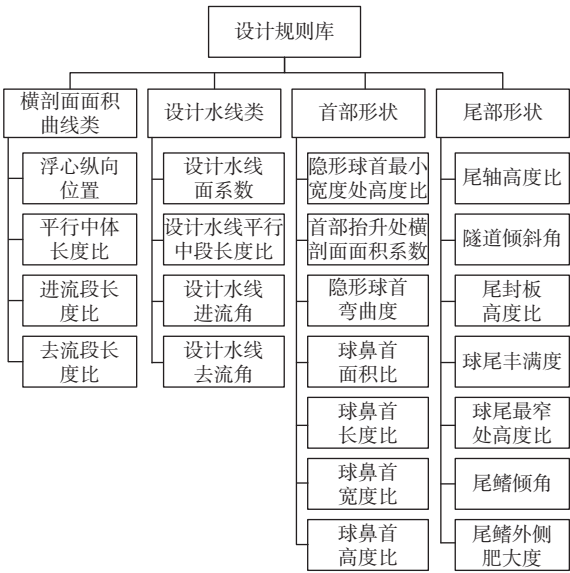


图 4 设计规则库框架

Fig. 4 Framework of design rule base

表 3 满载水线进流角的推荐取值范围

Table 3 The recommended range of inflow angle of full load waterline

C_p	Fr	满载水线首端进流角取值/(°)
>0.78		$30^\circ \sim 40^\circ$
$0.75 \sim 0.78$	$Fr < 0.182$	$26^\circ \sim 28^\circ$
$0.70 \sim 0.75$	$Fr = 0.182 \sim 0.194$	$12^\circ \sim 26^\circ$
$0.65 \sim 0.70$	$Fr = 0.194 \sim 0.238$	$12^\circ \sim 18^\circ$
$0.60 \sim 0.65$	$Fr > 0.238$	$6^\circ \sim 12^\circ$

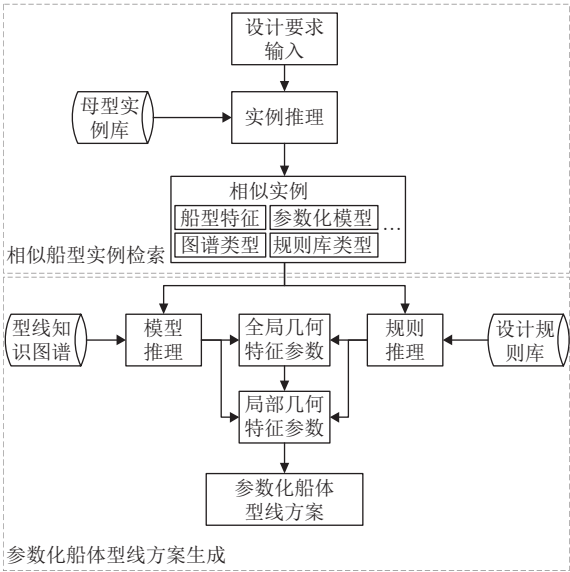


图 5 推理模型结构

Fig. 5 Structure of reasoning model

规则库类型)作为后续设计所需的模型及知识库来源,以便于进一步调整型线几何参数。

2) 针对相应的型线知识图谱和设计规则库,分别采用模型推理和规则推理得到其中的型线全局几何特征参数值或取值范围,用以控制船体全

局型线形状。

3) 得到型线局部几何特征参数值或取值范围, 控制船体局部的型线形状, 然后结合全局几何特征参数, 共同构成设计船的型线参数方案。

3.1 母型实例库知识推理

利用最近邻搜索法 (nearest neighbor search, NNS) 进行母型船实例检索。NNS 的核心在于计算概念距离、分配权重以及计算相似程度, 本文选择带有权重的欧式距离公式, 表达形式如下:

$$d(x,y)=\sqrt{\sum_{i=1}^n w_i |x_i - y_i|^2}$$

(1)

式中: x_i 为设计案例的第 i 个特征属性; y_i 为库中已有案例的第 i 个特征属性; n 为特征属性的种类个数; w_i 为第 i 个特征属性的权重。

假设每个特征属性对相似度的影响程度均为 $1/n$, 根据相似度公式^[8] 计算输入的船型特征与库中母型实例船型特征之间的相似程度, 从而获得最相似实例。相似度公式为

$$S(x,y)=\frac{1}{1+d(x,y)}$$

(2)

3.2 型线知识图谱推理

利用构建型线知识图谱的网格化数据集, 根据知识图谱反映出的型线参数变化规律, 建立型线参数关于 C_B , L/B , B/T 的分步插值推理模型, 插值公式见式 (3), 从而依据图谱曲线推理获得实际 C_B , L/B , B/T 下的图谱参数值。以图谱参数艏鳍内侧肥大度 X_{skeg} 为例, 推理模型如图 6 所示, 主要流程^[9] 如下:

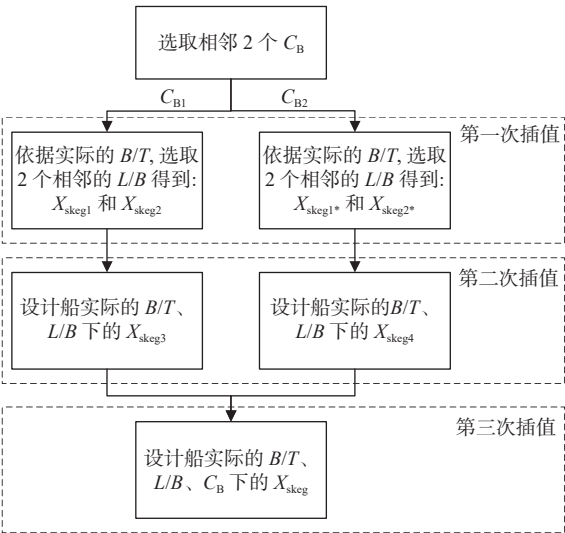


图 6 型线知识图谱推理模型

Fig. 6 Reasoning model of hull form knowledge graph

1) 选定相邻的 2 个 C_B (C_{B1} 和 C_{B2}): 对 C_{B1} , 首先根据用户给定的主尺度要素确定船舶实际的 B/T 和 L/B , 然后在型线知识图谱中选择 2 个相邻的 L/B , 分别插值得到 2 套参数值 X_{skeg1*} 和 X_{skeg2*} ;

2) 根据实际 L/B 的值插值得到该 C_B 对应的参数值 X_{skeg3} ;

3) 同理, 对 C_{B2} 根据实际的 L/B 插值得到参数值 X_{skeg4} ;

4) 最终, 根据 X_{skeg3} 和 X_{skeg4} 插值得到实际的 X_{skeg} 。

$$L(x)=y_0\frac{x-x_1}{x_0-x_1}+y_1\frac{x-x_0}{x_1-x_0}$$

(3)

3.3 设计规则库知识推理

设计规则库推理采用规则推理, 基于产生式规则对问题进行匹配, 其基本流程为: 根据用户输入的设计参数, 对规则库中存储的规则按照顺序逐项进行条件判别, 若满足规则便输出对应的结论, 不满足, 则跳过该规则, 直至完成所有规则的判别。流程如图 7 所示。

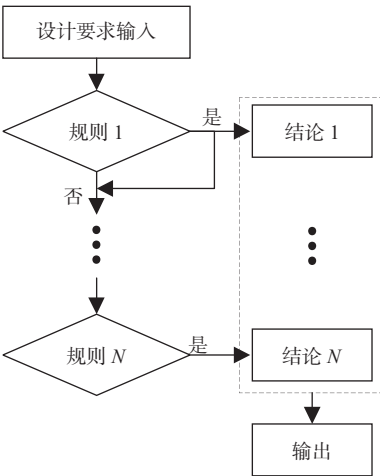


图 7 规则推理流程图

Fig. 7 Flowchart of rule reasoning

具体的推理过程为: 用户输入设计船的主尺度、方形系数和傅汝德数等初始条件, 计算机对库中几何参数的设计规则依次进行条件匹配。以 2.3 节列出的满载水线进流角设计规则为例, 若设计船的 $C_p = 0.76$, $Fr = 0.18$, 首先针对规则 001 进行匹配, 若不满足其条件 ($C_p > 0.78$), 便舍去; 对于匹配规则 002, 若满足条件 ($0.75 < C_p < 0.78$ 且 $Fr < 0.182$), 则输出规则 002 的结论 ($26^\circ < \text{进流角} < 28^\circ$), 至此, 完成对该型线几何参数的推理。对图 4 所示的设计规则库中所有型线几何参数依次进行类似的匹配后, 即可获得设计规则库的最终推理结果。

4 船体型线智能设计流程

依据前文构建的知识库和知识推理方法,结合基于 CAESSES 的参数化建模技术,最终形成基于知识驱动的船体型线智能设计方法。具体设计流程如图 8 所示,主要步骤如下:

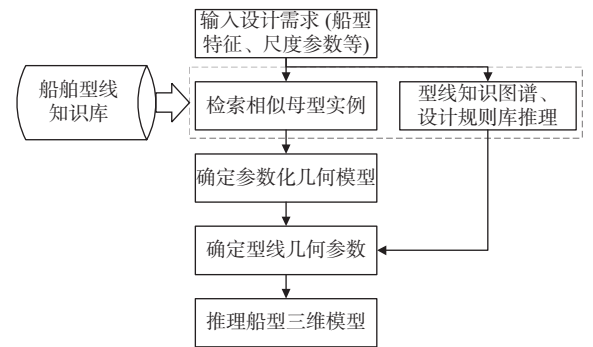


图 8 船体型线智能设计流程
Fig. 8 Intelligent design process of hull form

1) 用户输入待设计船的设计需求,包括船舶类型、船型、艏型、垂线间长、型宽、吃水、方形系数、中横剖面系数及设计航速。

2) 确定合适的参数化几何模型。基于 NNS,以船舶类型、船型、艏型、垂线间长、长宽比、宽度吃水比、方形系数和设计航速这 8 种船型特征属性作为检索相似船型的依据,计算出母型实例库中每个实例与用户需求之间的相似度,从而选出最相似的实例,并得到该实例的参数化几何模型。后续,可通过改变其几何特征参数实现尺度变换和局部曲面变形。

3) 确定型线几何参数值。对于型线知识图谱,根据设计需求的方形系数、长宽比和宽度吃水比,推理获得图谱中的型线几何参数值;对于设计规则库,根据设计需求的主尺度、方形系数、中横剖面系数及设计航速,推理得到对应的规则结论(库中型线几何参数推荐值或范围)。将上述推理结果与设计船的尺度需求进行汇总,即构成参数化船体型线方案。

4) 将参数化船体型线方案代入参数化几何模型,可快速生成阻力性能良好的船体型线及三维模型。

5 应用案例

本文将以长江 13 000 DWT 散货船的型线设计为例,来说明基于知识驱动的船体型线智能设计方法的可行性。具体流程如图 9 所示。

5.1 船体型线方案生成

长江 13 000 DWT 散货船为直艏-双艉船型,

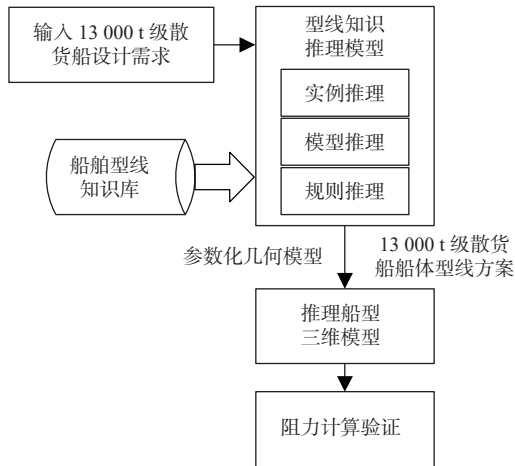


图 9 型线智能设计方法应用流程
Fig. 9 Application process of intelligent design method of hull form

$L/B = 5.825\ 7$, $B/T = 3.963\ 6$, 船舶主要参数如表 4 所示。

表 4 长江 13 000 DWT 散货船主要参数
Table 4 Main parameters of 13 000 DWT bulk carrier in Yangtze river

参数	数值
垂线间长/m	127
总长/m	130
型宽/m	21.8
设计吃水/m	5.5
方形系数	0.865 4
设计航速/kn	10.0

设计流程如下:

1) 首先进行实例推理,得出适用的参数化模型、型线知识图谱类型和设计规则库类型。实例库中相似船型的相似度如表 5 所示。选择相似度最大的船型,推荐型线知识图谱为直艏-双艉鳍货船图谱,设计规则库选择货船规则库。

2) 基于直艏-双艉鳍货船型线知识图谱和货船设计规则库,得到型线全局几何特征参数值或取值范围,如表 6 所示。

3) 得到型线局部几何特征参数值或取值范围,如表 7 所示。

4) 考虑到船东提出的布置约束(例如,尾轴高度、齿轮箱布置等),以及部分参数存在变形耦合的情况,在表 6 和表 7 中选取部分合适的全局和局部几何特征参数,其参数值为取值范围的中值,然后结合主尺度参数,生成参数化的船体型线方案,如表 8 所示。

5.2 几何模型生成及阻力性能计算

将 4.1 节的参数化船体型线方案代入实例推

表 5 实例库中船型的相似度
Table 5 Similarity of ship types in case base

相似度	船舶名称	船型	艨型	船长/m	长宽比	宽度吃水比	方形系数	设计航速/kn
0.930	12 000 t散货船	直艨	双艨	128	5.872	3.633	0.88	9.7
0.735	7 500 t散货船	直艨	双艨鳍	128	7.901	3.115	0.864	9.7
0.727	600 TEU集装箱船	直艨	双艨	126.9	6.609	3.491	0.867	10.8
0.720	4 500 t液货船	直艨	双艨	102.8	6.346	3.857	0.84	9.7
0.678	6 000 t散货船	球鼻艨	双艨鳍	105.6	5.677	3.407	0.862	11.9
0.662	400 TEU集装箱船	直艨	双艨鳍	128	7.901	3.115	0.878	10.8
...	...	...	...	...	...	...	...	...

表 6 全局几何特征参数
Table 6 Global geometric feature parameters

参数	推理值
平行中体长度比	0.389 6~0.549 6
进流段长度比	0.201~0.300
设计水线面系数	0.896 5~0.936 5
设计水线平行中段长度比	1.2~1.7
浮心纵向位置	0.005 6

表 7 局部几何特征参数
Table 7 Local geometric characteristic parameters

参数	推理值
设计水线进流角/(°)	31.2~41.2
设计水线去流角/(°)	0~30
隐形球鼻艨最小宽度处高度比	0.77~0.83
艨部抬升处横剖面面积系数	0.76~0.84
隐形球鼻艨弯曲度	0.86~0.96
艨鳍倾角/(°)	14~20
艨轴高度比	0.2~0.4
隧道倾斜角/(°)	15~20
艨鳍外侧肥大度	0.65~0.75
尾封板高度比	0.6~0.8
艨部宽度收缩比	0.906 5
尾轴间距比	0.522 5
艨鳍内侧肥大度	0.570 9

表 8 参数化船型方案
Table 8 Parameterized ship form scheme

参数	数值
垂线间长/m	127
长宽比	5.825 7
宽度吃水比	3.963 6
方形系数	0.865 4
浮心纵向位置	0.005 6
艨部宽度收缩比	0.906 5
尾轴间距比	0.522 5
艨鳍内侧肥大度	0.570 9
隐形球鼻艨最小宽度处高度比	0.8
艨部抬升处横剖面面积系数	0.8
隐形球鼻艨弯曲度	0.91
隧道倾斜角/(°)	18
艨鳍外侧肥大度	0.7
尾封板高度比	0.7

理得出的参数化几何模型, 最终生成的几何模型如图 10 所示。

将初始船型和推理船型的几何模型按 1:25 的缩尺比进行缩放, 使用全黏性流 CFD 计算软件 STAR-CCM+进行模型尺度的总阻力计算。计算域前边界取 1.5 倍船长, 后边界取 2.5 倍船长, 对船体表面、船体周围及自由液面和开尔文波处进行网格加密, 同时保证船体表面 Y 值在正常范围内, 最终生成的网格数量约为 180×10^4 , 网格分布图如图 11 所示。湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型, 时间步

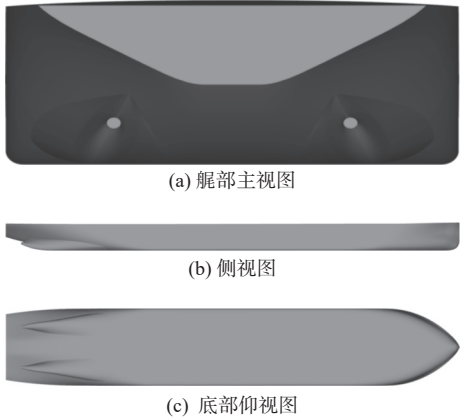


图 10 长江 13 000 DWT 散货船推理船型几何模型

Fig. 10 Geometric model of 13 000 DWT bulk carrier in Yangtze River by reasoning

长设置为 0.02 s, 在设计航速下对初始船型和推理船型进行总阻力数值仿真。

为了验证 CFD 计算的精度, 本文选取了 5 种不同的网格基础尺寸, 计算结果如表 9 所示。从

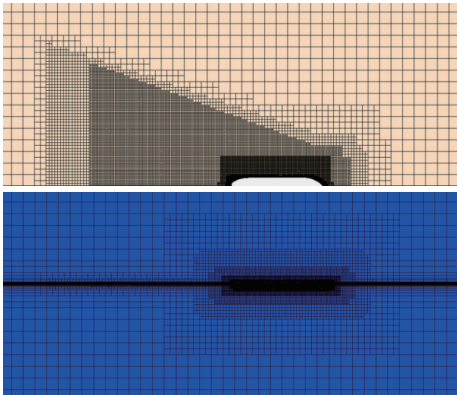


图 11 网格分布图
Fig. 11 Distribution of grids

中可以看出,后 3 种网格之间的阻力差值不到 1%,从计算精度和计算时间这两方面综合考虑,选取数量约为 170×10^4 的网格作为阻力计算的标准。

表 9 不同网格计算结果

Table 9 Calculation results of different grids		
网格数量	总阻力/N	相对变化/%
52×10^4	13.40	—
99×10^4	12.98	-3.13
172×10^4	13.06	0.62
261×10^4	13.12	0.46
359×10^4	13.10	-0.15

5.3 推理船型阻力性能对比分析

长江 13 000 DWT 散货船初始船型和推理船型的阻力计算结果与部分静水力数据的对比如表 10 所示,从中可见,推理船型的模型总阻力和初始船型相比降低了 3.06%。图 12 所示为初始船型和推理船型的型线对比情况,图 13 所示为船体表面压力分布对比,图 14 所示为自由液面兴波对比。由表 10 中数据可以发现,推理船型的排水体积略有增大,但湿表面积有所降低,故而导致推理船型的摩擦阻力略微下降,但下降数值不大,可见总阻力的下降主要是由于剩余阻力的变化。分析图 13,发现对于艏部压力分布,推理船型的高压区面积更小,而船底低压区的绝对数值不大,因此推理船型船首的压力差较小,压力分布更加均匀;同理,对于艉部压力分布,推理船型的压力差也较小,压力分布更加均匀。

结合推理型线的几何参数以及推理船型与初始船型的型线对比可以看出,2 种船型的首、尾部型线存在明显区别。由于对隐形球鼻艏最小宽度处高度比(推理值 0.8)、艏部抬升处横剖面面积

表 10 静水力及阻力结果对比

Table 10 Comparison of hydrostatic and resistance results		
参数	初始船型	推理船型
排水体积/ m^3	13 175.7	13 180.5
浮心位置/m	64.71	63.70
湿表面积/ m^2	3 837.9	3 829.9
摩擦阻力/N	10.24	10.16
模型总阻力/N	13.06	12.66
模型阻力差值/%		-3.06

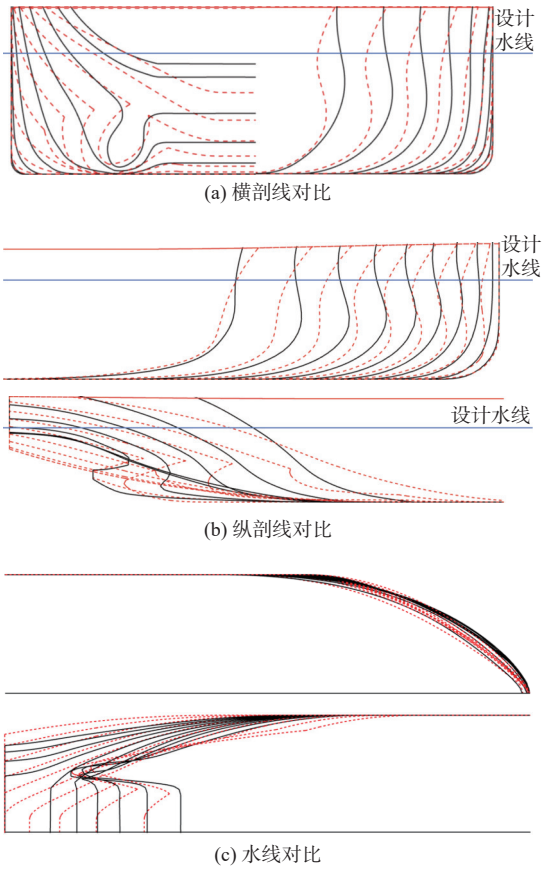


图 12 推理船型(红)与初始船型(黑)型线对比
Fig. 12 Comparison of hull forms of the reasoning ship (red) and the initial ship (black)

系数(推理值 0.345)、隐形球鼻艏弯曲度(推理值 0.91)、艏部宽度收缩比(推理值 0.906 5)这些艏部参数进行了基于知识库的推理,使得变形生成的推理船型的隐形球鼻艏内凹部分变得更加明显,艏部更加瘦削,艏部横剖面的 U 形程度更大,可以减小兴波阻力。同理,对于艉部,在对隧道倾斜角(推理值 18)、尾封板高度比(推理值 0.7)、尾轴间距比(推理值 0.522 5)、艉鳍内侧肥大度(推理值 0.570 9)和艉鳍外侧肥大度(推理值 0.7)这些艉部参数进行推理后,推理船型的尾部横剖面更趋于 V 形剖面,有利于水流沿纵剖线方向流动且不易发生分离,对阻力性能有利。而初始船型并未对这些船体部位以及型线几何参数进行有针对

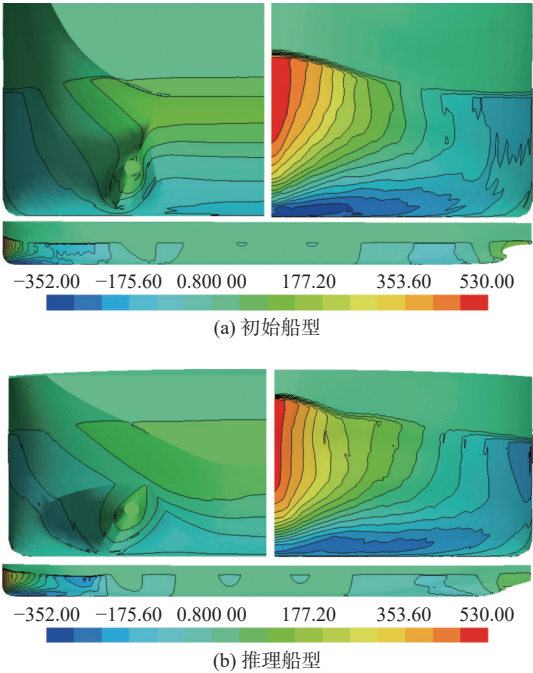


图 13 船体表面压力对比
Fig. 13 Comparison of hull surface pressure

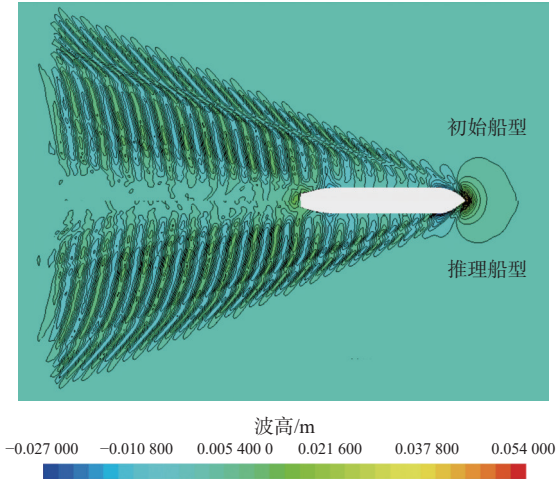


图 14 自由液面兴波对比
Fig. 14 Comparison of free surface wave-making

性的设计(基于阻力性能),其型线仍有较大的设计优化空间。

6 结 论

本文提出了一种基于知识驱动的船体型线智能设计方法框架,主要包括用户层、应用层和知识库这三大主体。构建了适用于型线设计的知识库,用于存储实例类知识、型线知识图谱和规则类知识,并采用多种推理方法对型线几何参数进行了知识推理,随后以长江 13 000 DWT 散货船的型线设计为例进行了验证研究,首先从母型实例库检索出相似的案例,确定适用的参数化模型、型线知识图谱类型和设计规则库类型;然后,利用型线知识图谱模型和设计规则库推理出设计船

的全局几何特征参数和局部几何特征参数,并生成推理船型;最后,利用 CFD 进行了验证,结果显示推理船型的阻力性能良好,说明基于知识驱动的船体型线智能设计方法可以快速生成满足设计需求的推理型线方案,具有重要的工程应用价值。

未来,将从以下 2 个方面开展相关研究:

- 1) 本文构建的知识库主要是针对船舶阻力性能,未来,可建立伴流等其他性能的知识库,进一步开展船舶多性能协同推理研究。
- 2) 本文主要是基于现有经验或是已有船型资料开展型线知识库的构建,未来,可开展船体型线生成式设计技术研究,该技术拟结合人工智能及优化技术,从而突破现有的基于经验的设计模式,进而产生突破常规的创新船型。

参考文献:

[1] 冯佰威, 刘祖源, 聂剑宁, 等. 基于 iSIGHT 的船舶多学科综合优化集成平台的建立 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(5): 897–899.
FENG B W, LIU Z Y, NIE J N, et al. Establishment of ship multi-disciplinary design optimization platform based on the iSIGHT[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2009, 33(5): 897–899 (in Chinese).

[2] 周昊, 冯佰威, 沈通. 基于 RBF 的船体曲面变形方法及其在船体型线优化中的应用 [J]. 船舶工程, 2014, 36(5): 103–106.
ZHOU H, FENG B W, SHEN T. Hull form modification method based on radial basis function and its application in hull line optimization[J]. Ship Engineering, 2014, 36(5): 103–106 (in Chinese).

[3] 冯梅, 冯佰威. 基于 CFD 的集装箱船阻力性能优化 [J]. 计算机辅助工程, 2017, 26(6): 53–58.
FENG M, FENG B W. Optimization of resistance performance of container ship based on CFD[J]. Computer Aided Engineering, 2017, 26(6): 53–58 (in Chinese).

[4] TRAN T G, NGUYEN H V, HUYNH Q V. A method for optimizing the hull form of fishing vessels[J]. Journal of Ship Research, 2023, 67(1): 72–91.

[5] KIM J H, ROH M I, YEO I C. Hull form optimization of fully parameterized small ships using characteristic curves and deep neural networks[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2024, 16: 100596.

[6] 杨少明. 基于知识工程和智能算法的船舶舱室智能布局方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022. doi: 10.26991/d.cnki.gdllu.2022.001566.
YANG S M. Research on intelligent layout method of ship cabin based on knowledge engineering and intelli-

- gent algorithm[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. doi: [10.26991/d.cnki.gdllu.2022.001566](https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdllu.2022.001566) (in Chinese).
- [7] CUI J J, WANG D Y. Application of knowledge-based engineering in ship structural design and optimization[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 72: 124–139.
- [8] 赵桐鸣. 基于知识工程的船型方案论证方法研究及系统实现 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022. doi: [10.26991/d.cnki.gdllu.2022.001671](https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdllu.2022.001671).
ZHAO T M. Research and system implementation of ship-type scheme demonstration method based on knowledge engineering[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. doi: [10.26991/d.cnki.gdllu.2022.001671](https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdllu.2022.001671) (in Chinese).
- [9] 张建仪, 肖吕戈, 冯佰威, 等. 型线知识图谱在长江散货船型线设计中的应用 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(6): 17–24.
ZHANG J Y, XIAO L G, FENG B W, et al. Application of hull form knowledge graph method in design of Yangtze River bulk cargo ship[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(6): 17–24 (in Chinese).
- [10] 叶萌, 吴凯, 冯佰威, 等. 面向船型阻力性能优化的知识获取技术研究 [J]. *船舶力学*, 2019, 23(10): 1151–1159.
YE M, WU K, FENG B W, et al. Research on knowledge acquisition method for ship hull resistance performance optimization[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2019, 23(10): 1151–1159 (in Chinese).
- [11] ZHENG Q, CHANG H C, LIU Z Y, et al. Design knowledge extraction framework and its application in multi-objective ship optimization[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114782.
- [12] 张萍. 船型参数化设计 [D]. 无锡: 江南大学, 2009. doi: [10.7666/d.y1585094](https://doi.org/10.7666/d.y1585094).
ZHANG P. The parametric design to hull form[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009. doi: [10.7666/d.y1585094](https://doi.org/10.7666/d.y1585094) (in Chinese).
- [13] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理 (上册)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
SHENG Z B, LIU Y Z. Principles of ships (the first volume)[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译信息, 请确认)
- [14] 王运平, 李宝清, 曹立林, 等. 基于知识工程的推理技术综述及应用 [J]. *工具技术*, 2023, 57(7): 13–19.
WANG Y P, LI B Q, CAO L L, et al. Review of reasoning technology based on knowledge engineering[J]. *Tool Engineering*, 2023, 57(7): 13–19 (in Chinese).

Intelligent design method of hull form based on knowledge-driven

FENG Baiwei^{*1,2}, ZHANG Zicheng¹, LIU Zuyuan^{1,2}, ZHENG Qiang^{1,2},
ZENG Dalian³, XUE Liang¹, ZHAO Wanshui⁴

1 School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology,
Wuhan 430063, China

2 Key Laboratory of High Performance Ship Technology (Wuhan University of Technology),
Ministry of Education, Wuhan 430063, China

3 Guangxi CSSC Beibu Gulf Shipbuilding and Marine Engineering Design Co., Ltd., Nanning 530028, China

4 Wuchang Shipbuilding Industry Group Co., Ltd., Wuhan 430064, China

Abstract: [**Objective**] In the realm of ship design, the hull form plays a crucial role in determining a ship's navigation performance. However, existing hull form design methods suffer from significant drawbacks, such as long design cycles and low knowledge reusability. This not only increases design costs but also restricts the innovation and development of ship design. Therefore, it is of great urgency to develop a rapid and intelligent hull form design method. [**Methods**] To address these issues, this research focuses on the Yangtze River cargo ship type and leverages the knowledge engineering theory. A comprehensive knowledge base is constructed, which includes a knowledge graph of hull form parameters, parent ship examples, and design rules. The knowledge graph depicts the mapping relationships between various hull form parameters and total resistance performance under different conditions, while the parent ship examples provide practical references, and the design rules summarize the influencing laws of hull form geometric parameters on ship resistance. Based on this knowledge base, a hybrid reasoning model for hull forms is designed. This model combines case - based reasoning (CBR), model - based reasoning (MBR), and rule - based reasoning (RBR) to fully utilize the knowledge in the knowledge base and obtain more accurate hull form design parameters. [**Results**] The research takes the hull form design of a 13,000 DWT bulk carrier in the Yangtze River as an example. Through

the intelligent reasoning of the knowledge base, a series of hull form geometric parameters are obtained. After considering the layout constraints and parameter coupling, a parametric hull form scheme is generated. By substituting this scheme into the parametric geometric model, a geometric model of the ship is created. The total resistance of the initial ship type and the reasoning ship type is calculated using the full - viscous flow CFD software STAR - CCM +. The results show that compared with the initial ship type, the reasoning ship type achieves a drag reduction effect of 3.06%. Further analysis reveals that the reduction in total resistance is mainly due to the change in residual resistance. The optimized bow and stern shapes of the reasoning ship type result in a more uniform pressure distribution, reducing the pressure difference and thus the resistance. [**Conclusion**] In conclusion, the knowledge - driven intelligent design method of hull forms proposed in this study can significantly improve the efficiency and quality of hull form design. It can quickly generate reasoning hull form schemes that meet design requirements, which has important engineering application value. Looking ahead, future research will focus on two aspects. One is to establish knowledge bases for other ship performances such as wake flow and conduct multi - performance collaborative reasoning research. The other is to explore the generative design technology of hull forms, which combines artificial intelligence and optimization techniques to break through the traditional experience - based design model and create innovative ship types. This will further promote the development of the ship design industry.

Key words: artificial intelligence; knowledge graph; design rules; parent ship; hybrid reasoning; intelligent design of hull form