



## 基于类栈式船型概念方案模糊快速推理及优化

杨园庆 杨萌 汪皓 黄志刚 陈帅 刘维勤 杨习贝 周塔

### Fast fuzzy reasoning and optimization using a stacked-like-based ship conceptual scheme

YANG Yuanqing, YANG Meng, WANG Hao, Huang Zhigang, Chen Shuai, LIU Weiqin, YANG Xibei, ZHOU Ta

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04500>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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>

#### 基于自组织映射和K-means聚类的分层设计空间动态缩减方法及其在船型优化中的应用

Hierarchical space reduction method based on self-organizing maps and K-means clustering for hull form optimization

中国舰船研究. 2024, 19(6): 64-73 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04050>

#### 基于聚类分析的舰船冲击环境区域划分方法

Zone division method of ship shock environment based on cluster analysis

中国舰船研究. 2020, 15(5): 147-153 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01701>

#### 基于智能控制的船舶水动力导数敏感性分析方法

Sensitivity analysis method of ship hydrodynamic derivatives based on intelligent control

中国舰船研究. 2021, 16(4): 116-124 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01992>

#### 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>

#### 基于粒子群优化阈值的多堆燃料电池系统功率分配策略研究

Study on power distribution strategy of multi-stack fuel cell system based on particle swarm optimization threshold

中国舰船研究. 2023, 18(5): 224-233 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03049>



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.1673-3185.04500>

期刊网址: [www.ship-research.com](http://www.ship-research.com)

引用格式: 杨园庆, 杨萌, 汪皓, 等. 基于类栈式船型概念方案模糊快速推理及优化[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(X): 1-11.  
YANG Y Q, YANG M, WANG H, et al. Fast fuzzy reasoning and optimization using a stacked-like-based ship conceptual scheme[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(X): 1-11 (in Chinese).

# 基于类栈式船型概念方案模糊快速推理及优化



扫码阅读全文

杨园庆<sup>1</sup>, 杨萌<sup>2</sup>, 汪皓<sup>2</sup>, 黄志刚<sup>3</sup>, 陈帅<sup>3</sup>, 刘维勤<sup>4</sup>, 杨习贝<sup>1</sup>, 周塔<sup>\*\*1</sup>

1 江苏科技大学 计算机学院, 江苏 镇江 212114

2 汉江国家实验室, 湖北 武汉 430060

3 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082

4 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063

**摘要:** [目的] 在进行船型概念方案设计时, 往往很难处理船型设计参数之间的耦合关系。传统设计依赖专家的领域知识和工程经验, 导致周期长、成本高。为此, 本研究提出基于类栈式结构的船型设计方案模糊推理策略, 以快速生成概念方案初始解。[方法] 该策略通过模糊化推理用户需求, 得到符合需求的船型性能参数值, 再与母型船设计方案库进行匹配, 生成概念方案。同时设计优化的融合性能参数库及母型船设计方案库的聚类算法, 以增强概念方案的合理性。[结果] 算例表明, 推理生成的船型性能参数与对应的船型概念方案均能有效表达用户的真实需求, 且与已有文献研究相比在性能参数推理和设计参数映射上偏差更小, 所生成的船型概念方案设计合理性更高。[结论] 本研究通过对模糊推理系统中的性能参数推理与推理方案合理性的优化, 提高了模糊推理系统在船舶概念方案设计中的正确率与合理性, 为模糊系统在该领域的应用提供了新思路。

**关键词:** 船型概念方案; 模糊逻辑; 类栈式结构; 性能参数; 聚类分析

中图分类号: U662.2

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04500

## 0 引言

船舶设计制造是一项涉及多个工业体系, 涵盖水动力学、动力学、静力学等多学科的复杂技术, 是一个国家工业水平的体现。船舶设计包括船体结构设计、动力系统设计、设备配置、强度计算、舾装设计等, 需要考虑材料选择、制造工艺、法规标准等<sup>[1]</sup>。船舶概念方案设计作为船舶设计的前端环节, 通过对主尺度、型线等关键参数的初步拟定, 以达到缩短整体设计周期的目的。然而, 面对日益多样化、复杂化的船舶功能

需求, 该过程需深度融合多学科知识及专家经验, 往往耗费大量人力和时间成本, 背离了其高效辅助决策的初衷。

随着船舶工业的发展, 面对日趋多样化的船舶功能需求及随之提升的概念方案设计复杂性, 研究者们从船舶专家设计船型概念方案、计算机辅助设计船型概念方案以及利用模糊推理系统快速生成船舶概念方案几个方面寻求解决方案:

1) 不同的研究者根据自己相关领域针对不同功能需求的船舶进行独立的概念方案设计研究, 例如分析无人救援船、战略石油储备船等的

收稿日期: 2025-04-30 修回日期: 2025-06-19 网络首发时间: 20xx-xx-xx xx:xx

基金项目: 国家自然科学基金项目(62076111); 湖北省自然科学基金杰出青年A类项目(2025AFA117); 教育部“春晖计划”合作科研项目(HZKY20220133, 202200461); 国防基础科研计划项目(JCKY2020206B037); 船舶结构安全全国重点实验室开放基金(459900925); 国家高端外国专家引进计划项目(H20240949); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20241831); 工信部高技术船舶专项船舶CAE工业软件项目和汉江国家实验室自主科研项目(ZC2024011); 江苏高校“青蓝工程”资助项目

作者简介: 杨园庆, 男, 1999年生, 硕士生。研究方向: 智能模糊推理。E-mail: 231110701119@stu.just.edu.cn

刘维勤, 男, 1985年生, 博士, 副教授。研究方向: 海洋装备载荷与响应。E-mail: liuweiqin\_123@sina.com

周塔, 男, 1980年生, 博士, 副教授。研究方向: 机器学习, 船舶概念设计。E-mail: jkdzhout@just.edu.cn

\*通信作者: 刘维勤

\*\*第二通信作者: 周塔

使用需求,分别针对其使用环境、功能特性等进行设计<sup>[2-5]</sup>。

2) 为减小概念方案设计的时间成本,研究人员利用近年来愈发成熟的计算机以及数字仿真技术辅助寻找船型设计参数之间的耦合关系<sup>[6-8]</sup>,从而缩短概念方案设计周期。尤其在针对概念方案中的多目标优化问题方面取得了诸多成果。任伟等<sup>[9]</sup>基于多目标优化的方案设计系统,采用并行处理方式,缩短了船舶概念方案设计的周期。周奇等<sup>[10]</sup>为解决多目标问题,应用最小-最大适应度多目标粒子群优化算法,结合专家经验与信息熵权的主客观混合赋权 TOPSIS 法对船舶概念方案进行了快速优化。另外,刘传云等<sup>[11]</sup>基于改进的遗传算法,将其应用于潜艇概念方案设计当中。这些方法能够针对船舶概念方案设计中不同参数之间的耦合关系,快速生成或优化相应的概念方案,并且具有不错的稳定性和可靠性。此外,在国际相关领域也有类似工作的报道。比如, Mauro 等<sup>[12]</sup>结合决策树和多元线性回归设计了一种船舶主尺度参数估计的方法,为船舶设计者在早期设计阶段提供了对主尺度参数估计的工具。Gray 等<sup>[13]</sup>结合人类设计师与模糊逻辑开发的船舶概念方案辅助设计系统,使设计师可以通过图形用户界面(GUI)和网络软件工具与一个计算型的模糊逻辑系统互动,帮助设计师在概念方案设计阶段进行决策。Degan 等<sup>[14]</sup>构建了一种基于数学模型(MDM)的多属性决策方法(MADM),可以快速生成通过技术检验的船舶概念方案。更多相关文章可见文献[15-17]。这些方法重点与机器学习相结合,构建概念方案辅助设计系统,主要用于辅助设计师设计船舶概念方案;通过建立船舶概念方案的数学模型,快速生成船舶概念方案。

3) 尽管上述方法能够相对快速地生成船舶的概念方案,但多数智能方法仅针对特定船型或预设场景开发,模型固化,难以适应日新月异的定制化需求。对于创新船型或特殊功能需求,模型迁移性差。而数据驱动方法依赖高质量历史数据或先验知识库,这在创新设计中尤为匮乏。同时,专家经验的深度集成仍不足,优化算法的“黑箱”特性缺乏对复杂约束冲突的透明解释<sup>[9-12]</sup>,难以说服设计师。其他依据数学模型建立的计算机辅助概念方案生成系统则存在过于依赖设计师经验总结、存在主观偏差,且难以量化隐性知识<sup>[13]</sup>,或存在应用场景受限、船型普适性低的问题<sup>[14]</sup>。对此,杨萌等<sup>[18]</sup>基于用户对船的性能需求中通常带有的模糊属性,例如“航程非常大”中的“非常

大”这种模糊性的需求,基于模糊集、模糊逻辑<sup>[19]</sup>、普适专家经验的简洁可解释模糊规则以及模糊推理开发了能够根据不同用户需求快速生成船舶概念方案的系统。该系统将用户对船舶的性能需求通过模糊推理转化为相对应的性能数值,再将推理所得的性能参数值根据母型船库转化为设计参数进行二次模糊推理,最终得到船型概念方案。该模糊推理系统不仅快速且能够应对不同类型的船舶设计需求,具有优异的准确性。但其在船型性能参数推理过程的准确性以及概念方案是否符合船型设计合理性方面,尚有一些问题没有考虑:首先,在对用户需求的船型性能参数的推理过程中,没有验证推理所得的船型性能参数值是否符合用户需求,如果推理所得的性能参数值中某一个参数很大程度地偏离了用户的需求,那么对最终的船型概念方案符合用户需求的程度有极大的影响;其次,船舶的不同设计参数之间存在耦合关系,在对整个模糊推理生成系统的合理性评估中,没有考虑不同类型的船舶之间其设计参数的耦合关系不同;最后,将推理的船型概念方案与不同类型的船舶概念方案比较,无法作为合理性判断的依据。

因此,本研究将针对上述问题,对整个模糊推理系统进行优化,将类栈式结构<sup>[20]</sup>嵌入到船舶性能参数的推理过程当中,结合用户需求本身的信息与推理信息,以提高推理所得性能参数符合用户需求的程度。同时,还将推理所得的概念方案与母型船库中的方案进行分类,以将同一类型的方案进行对比,从而提高船舶合理性评估的可靠性。

## 1 基于类栈式结构的模糊快速推理模型

### 1.1 相关性工作

本小节将介绍模糊推理系统中用户需求的模糊化以及性能参数值的推理计算过程。并简要阐述由性能参数映射到船型设计参数的过程。

#### 1.1.1 性能参数生成

根据用户提供的含模糊变量的原始输入需求,在模糊集基础上建模,将模糊化需求表示为数值向量。模糊系统中,不同程度的语言变量被映射到对应区间以构成模糊集。针对语言变量的模糊化,本研究采用五等分法<sup>[21]</sup>将区间(0,1)划分为[0, 0.2] [0.2, 0.4] [0.4, 0.6] [0.6, 0.8] [0.8, 1],分别对应语言解释“非常小”“小”“中”“大”“非常大”。例如,“航行里程远大于5 000 km”中,“远

大于”对应第 2 区间“小”的隶属度为 0, 第 4 区间“大”为 0.7, 第 5 区间“非常大”为 0.9(隶属度通常由专家设定)。对清晰数值(如“5 000 km”)的模糊化, 则通过隶属度函数(如高斯函数)转换。高斯隶属度函数<sup>[22]</sup>因其平滑性、对称性及与自然分布的相似性, 被广泛用于模糊系统, 其形式为

$$\mu_{i,j} = \exp(-(x_i - c_{i,j})^2 / 2\sigma_{i,j}^2) \quad (1)$$

式中:  $i=1, 2, 3, \dots, d$ , 其中  $d$  表示用户需求的特征数量;  $j=1, 2, \dots, M$ , 其中  $M$  表示划分的模糊区间数量, 在本研究中  $M=5$ ;  $c_{i,j}$  与  $\sigma_{i,j}$  分别表示隶属中心与方差, 为 2 个超参数, 在本研究中采用模糊聚类方法(FCM)<sup>[23]</sup>, 根据已有的母型船性能参数库生成。FCM 的大致实现过程如下。

首先, 设定聚类簇数  $M$ 、模糊因子  $m$  以及迭代停止阈值等参数(本研究将在算例验证部分进行阐述), 并随机初始化隶属度矩阵  $U^0$ , 满足  $\sum_{i=1}^M u_{ij} = 1$ , 即每个样本隶属度和为 1。

其次, 计算每个簇的中心:

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m x_j}{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m} \quad (2)$$

式中:  $x_j$  为第  $j$  个样本;  $u_{ij}$  表示第  $j$  个样本对簇  $i$  的隶属度。

而后, 更新隶属度  $u_{ij}$  直到误差低于迭代停止阈值或最大迭代轮次:

$$u_{ij} = 1 / \sum_{k=1}^M \left( \frac{d_{ij}}{d_{kj}} \right)^{2/(m-1)} \quad (3)$$

式中,  $d_{ij} = \|x_j - v_i\|$  表示第  $j$  个样本到簇  $i$  的欧式距离。通过上述交替更新实现最小化目标函数:

$$J = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^n (u_{ij})^m \|x_j - v_i\|^2 \quad (4)$$

记模糊化的船型性能数值为  $V$ , 其隶属度矩阵表示为

$$U^V = \begin{pmatrix} \mu_{11}^V & \cdots & \mu_{1M}^V \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{d1}^V & \cdots & \mu_{dM}^V \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中,  $\mu_{ij}^V$  表示第  $i$  个用户需求的性能参数隶属于第  $j$  个模糊区间的隶属程度。

同样, 记模糊的用户需求的语言变量为  $L$ , 其隶属度矩阵表示为

$$U^L = \begin{pmatrix} \mu_{11}^L & \cdots & \mu_{1M}^L \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{d1}^L & \cdots & \mu_{dM}^L \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中,  $\mu_{ij}^L$  表示第  $i$  个用户需求的语言变量隶属于第  $j$  个模糊区间的隶属程度。

于是, 根据 2 个用户需求的隶属度矩阵作为模糊推理的前提条件, 进行符合用户需求的船型性能数值模糊推理。

### 1.1.2 模糊推理

在模糊推理的过程中, 包含 3 个阶段, 分别为模糊化、模糊推理和反模糊化。第 1.1.1 小节中介绍的 2 个关于用户需求的隶属度矩阵则对应模糊化阶段。接下来, 则以 2 个隶属度矩阵为前件, 根据特定的模糊规则进行模糊推理, 从而得到符合用户需求的船型性能参数值。在本项工作中, 模糊规则根据专家意见进行设定。

观察  $U^V$  矩阵的第  $j$  行  $[\mu_{j1}^V, \mu_{j2}^V, \dots, \mu_{jM}^V]$ ,  $j$  表示第  $j$  个性能参数, 此时, 该行最大的元素所在的模糊区间表示该性能参数应隶属于哪个模糊区间。例如, 假设该行第 3 个元素  $\mu_{j3}^V$  为该行最大的元素, 则该行元素所表达的模糊含义为第  $j$  个性能参数值的模糊语义为“中”。 $U^L$  同理, 因此可以得到 2 个模糊量, 最后根据模糊规则生成对应的用户需求性能参数。具体见表 1。

表 1 模糊规则  
Table 1 Fuzzy rule table

$F(V)$	$F(L)$				
	非常小	小	中	大	非常大
非常小	非常小	非常小	非常小	小	中
小	非常小	非常小	小	中	大
中	非常小	小	中	大	非常大
大	小	中	大	非常大	非常大
非常大	中	大	非常大	非常大	非常大

表中  $F(L)$  表示模糊语言变量,  $F(V)$  表示模糊性能参数数值。由此可以根据模糊规则进行模糊推理, 例如:

IF 船型性能数值 is 非常大  
and 语言变量 is 中,  
THEN 符合需求的船舶性能 is 非常大

由此得到一组符合用户需求的船型性能参数值。经过反模糊化后, 根据该组性能参数与母型船性能参数库通过欧式距离最小进行匹配, 得到与推理所得的性能参数值最接近的母型船性能参数序号。通过该组序号匹配相对应的母型船设计参数, 得到的每组设计参数值都符合对应的单个性能参数值。最后利用高斯隶属函数将所有设计参数模糊化, 通过模糊推理算子“and”综合考虑符合所有性能参数值的设计参数, 最终经过反模

糊化得到船型概念方案。由于篇幅问题,本文仅介绍设计参数推理的总体过程,详细的推理过程可见文献[18]。

## 1.2 模型优化

在船型设计的两阶段模糊推理过程中,如果第1阶段的性能参数推理结果未能满足用户需求,那么第2阶段生成的设计参数可能会偏离实际要求。并且第2阶段推理仅通过简单的参数映射关系来确定设计参数,未能充分考虑不同参数之间耦合关系,导致最终的概念方案可能不符合船舶设计的合理性。

因此,本研究针对上述局限性对推理模型进行优化,主要包括以下2点。

### 1.2.1 性能参数模糊推理优化

针对第1阶段所推理得到的船舶性能参数值可能不契合用户需求的问题,一般的方法是设计一种评估方法对推理结果进行评估,并对不满足用户需求的性能参数值进行优化。但直接对不满足要求的性能参数进行优化极其复杂和困难。其原因是性能参数的模糊推理过程是基于专家建议的模糊规则库,如果要对性能参数进行优化,则涉及模糊规则库的优化,这会增加整个模型的复杂程度,影响模型的推理效率以及可解释性。因此,本研究试图通过一种新的角度来减小可能存在的错误推理对于模型推理准确度的影响。

由于不同阶段的概念方案推理形成的知识表示和决策结论具有一定的差异性和互补性,在某一特定阶段很难形成满足用户需求的概念方案解;此外,由于用户需求的天然不确定性,不同阶段生成的概念方案解具有模糊性。因此,本研究的创新之处在于构建一种类栈式结构,能够保证最终的性能参数值符合相应的模糊推理规则(用户不确定性需求),同时将不同阶段推理过程中的决策误差限定在可控范围内,从而提高最终性能参数值符合用户需求的程度。

该方法的实现流程如下所示。

假设第1阶段直接推理得到一条符合要求的性能参数为

$$\mathbf{Per}_{(\text{infer})} = (\mathbf{Per}_1^{(\text{infer})}, \mathbf{Per}_2^{(\text{infer})}, \dots, \mathbf{Per}_d^{(\text{infer})})^T \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{Per}_j^{(\text{infer})}$  表示第  $j$  个符合要求的性能参数值,  $\text{infer}$  表示该参数是模糊推理后的参数;  $d$  表示总共有  $d$  个性能参数。

则本研究所提出的方法可以表示为

$$\mathbf{Per}'_{(\text{infer})} = \mathbf{Z} \times \mathbf{Per}_{(\text{infer})} + \mathbf{X}_{\text{input}} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{Z}$  是一个  $(0,0.01)$  区间内的随机偏置矩阵;  $\mathbf{X}_{\text{input}}$  表示原始用户输入的性能参数值。

将偏差更小的  $\mathbf{Per}'_{(\text{infer})}$  作为第2阶段模糊推理的输入,能够有效提高推理所得的设计参数与用户需求相符合的程度。

传统的栈式结构<sup>[24]</sup>,由 Zhou 等<sup>[20]</sup> 在多层次模糊神经网络结构中的相关工作中提出,主要表现为当前层网络的输入由原始输入与前层网络的输出的偏置共同构成。该方法是处理不同层神经网络之间的关系,主要应用领域为多层次神经网络。而本研究设计的类栈式结构求解船舶概念方案则是首次在船舶概念方案设计领域的尝试,也是对多层次神经网络建模的补充。

与传统推理方法相比,本研究提出的方法在建模结构和推理求解的过程方面都具有明显的差异性和先进性。传统方法的结构仅通过推理得到的性能参数值对设计参数进行推理,而本研究既考虑了性能参数值的影响,也避免了第2阶段推理的前提条件与用户需求的偏离。

考虑到模糊算子的不确定性,也为确保最终推理得到的性能参数满足用户需求,本研究设定了一种最优性能参数值选择机制。根据每个用户输入的性能参数的语言变量和性能参数值,在初始推理得到的性能参数值与通过栈式结构变换的性能参数值中,选择其中更加贴近用户需求的作为第2阶段模糊推理的输入。选择机制为:当用户需求语言变量为“小”“大”时,默认选择本研究提出的栈式结构变换后的性能参数值;当语言变量为“非常小”时,选择其中比用户输入的性能参数值更小的性能参数值;当语言变量为“非常大”时,选择其中比用户输入的性能参数值更大的性能参数值;当语言变量为“等于”时,选择更加贴近用户输入的性能参数值。

### 1.2.2 设计方案合理性优化

在文献[18]的研究中,其两阶段设计参数的模糊推理过程如下:首先,利用第1阶段推理得到的每条符合要求的性能参数,匹配母型船库中的对应设计参数;随后,对映射出的所有船型方案取“and”操作;最终,推理出一条船型的设计参数。该方法能确保每个设计参数均落在所有性能参数要求的区间内。然而,实际船舶设计中,设计参数不能仅基于性能需求独立确定,因其之间存在耦合关系。上述推理过程未考虑这种耦合,导致所得概念方案可能缺乏设计合理性。

为此,本研究提出一种船型概念方案合理性优化方法,通过确保推理结果与同类母型船的一致性,减少因参数耦合失衡引发的设计缺陷。

第 2 阶段推理生成的概念方案基于母型船参数库, 其设计参数与库中母型船具有较高相似性。为提升合理性, 本研究将生成方案库与母型船库按设计参数相似性分类, 将生成方案与母型船整体差距更小的概念方案划分为近似类别。最后, 定量评估同类生成方案与母型船的差异。因母型船方案已被验证合理, 若生成方案与母型船的差异低于阈值, 则认为其符合设计合理性要求。

本研究将推理所得设计方案库与母型船设计方案库中的样本利用 K-means 聚类方法<sup>[25]</sup>分别各自进行聚类。

### 1.2.2.1 聚类初始化

在 K-means++<sup>[26]</sup>基础上, 对聚类中心初始化方法进行了优化, 其过程如下。

首先, 通过密度阈值对数据进行去噪, 在此基础上进行归一化, 并利用主成分分析 (PCA) 降维方法降维。然后, 从数据集中随机选择一个点, 其概率与局部密度成正比 (局部密度为以随机选择点  $c_i$  为中心,  $r$  为半径范围内的所有点)。接着对范围内的所有点, 根据式 (9) 计算其到已选中心的最小加权距离平方:

$$D_w(x_i)^2 = \min_{c \in \text{已选中心}} \sum_{d=1}^m w_d \cdot (x_{i,d} - c_{i,d})^2 \quad (9)$$

结合距离与密度计算概率分布:

$$P(x_i) = \frac{\text{Density}(x_i) \cdot D_w(x_i)^2}{\sum_{j=1}^n \text{Density}(x_j) \cdot D_w(x_j)^2} \quad (10)$$

最后, 总共运行  $N$  次上述初始化过程, 得到  $N$  组聚类中心, 并对每一组计算其轮廓系数, 选择得分最高的一组作为最终初始化聚类中心。

### 1.2.2.2 聚类计算过程

由此将 2 个库中的数据分为  $c$  类, 分别得到  $c$  个聚类中心。K-means 聚类的计算过程如下。

首先, 分别从推理所得设计参数库与母型船设计参数库中随机初始化  $c$  个初始聚类中心:

$$C_i^S; C_i^P, i = 1, 2, \dots, c \quad (11)$$

式中:  $C_i^S$  表示推理所得船型设计方案聚类中心;  $C_i^P$  表示母型船设计参数库聚类中心。

然后, 分别计算各自库中剩余数据对象与聚类中心  $C_i^S, C_i^P$  的欧氏距离  $D_S, D_P$ , 判断距离每一个样本最近的聚类中心, 并将该样本归类到聚类中心所对应的簇中。

最后, 计算每个簇中数据对象的平均值作为新的聚类中心, 进行下一次迭代, 直到聚类中心

不再变化或达到最大的迭代次数停止。

### 1.2.2.3 方案合理性优化

经过上述聚类, 2 个样本库中的数据分别被归类为  $c$  个类别, 此时, 再计算推理所得设计参数样本库中的每个聚类中心到母型船设计参数库的每个聚类中心的欧式距离  $D_{CC}$ , 其表现形式为

$$D_{CC} = \begin{pmatrix} D_{C_1^S C_1^P} & \dots & D_{C_1^S C_c^P} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{C_c^S C_1^P} & \dots & D_{C_c^S C_c^P} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中,  $D_{C_i^S C_j^P}$  表示推理所得设计参数库的第  $i$  个聚类中心到母型船设计参数库的第  $j$  个聚类中心的距离。

对  $D_{CC}$  矩阵的每一行取最小值:

$$D_{\min} = (\min(D_{CC}))^T \quad (13)$$

现在, 计算得到了推理所得设计参数库中每个聚类中心与母型船设计参数库聚类中心距离的最小值, 以此表示推理所得设计参数库中的每一类对应母型船设计参数库的类别, 由此建立了 2 个参数库之间的类别关系。然而, 仅用这种方式将 2 个参数库中的样本建立类别关系, 有一个较为明显的缺陷, 即  $D_{\min}$  中的距离是计算所得的最小的距离, 但实际上是一个较大的量, 那么该情况下,  $D_{\min}$  显然无法作为将 2 个库中的样本归为同一类的依据, 此时 2 个样本之间存在较大的差异。因此, 还需要对推理所得的设计参数库中的样本进一步筛选。根据专家意见设定一个足够小的阈值, 当每个类别的样本到所对应的母型船设计参数库中的聚类中心的距离低于该阈值时, 可以认为 2 个样本库中的数据属于近似样本。满足该条件的样本与母型船参数库的样本具有较为接近的合理性。差异化判别公式为

$$D_{C_i^S C_j^P}^{\text{infer}} \leq \varepsilon \quad (14)$$

式中:  $D_{C_i^S C_j^P}^{\text{infer}}$  表示推理所得船型设计参数库的样本到其对应母型船参数库中的聚类中心的距离;  $\varepsilon$  是根据专家经验, 人为设定的一个较小的值。

如图 1 所示, 图中  $D_1 > \varepsilon, D_3 > \varepsilon$ , 因此与之相关的 2 个生成方案簇被认为与母型船方案库中的同类样本差异过大, 不能作为合理的设计方案。而  $D_2 \leq \varepsilon, D_4 \leq \varepsilon, D_5 \leq \varepsilon$  表明与之相关的 3 个生成方案簇与母型船方案库的差异较小, 可以被认为较为合理的方案。

本研究通过提出上述的 2 个方法, 减小了错误推理对于最终设计方案符合用户需求程度的影响。并将推理所得的设计参数方案库中的样本与

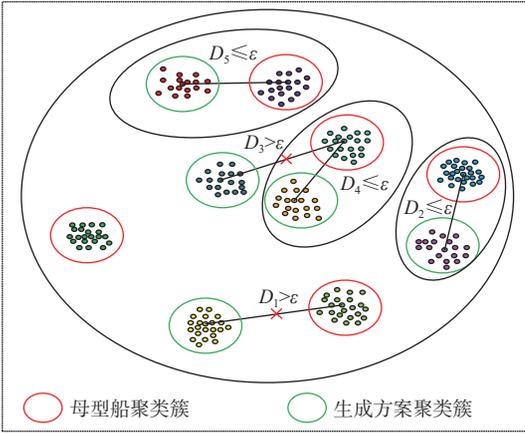


图1 差异评估过程

Fig. 1 Difference evaluation process

母型船设计参数库中的样本建立类别关系,并量化每个推理所得的方案与母型船库中方案之间的差异,从而保证最终的推理概念方案的设计合理性。该系统的整体过程如图2所示。

此外,由于本研究所提出的船型设计合理性优化方法依赖母型船库中的船型,因此,可能会出现推理结果为空的极端情况(所有推理结果不属于母型船库中任意船型)。对此,本研究采取以下措施:采用多轮生成的性能参数作为设计参数推理的输入,尽可能地生成更多的初始概念方案解,并与母型船库进行对比,找到若干较优的方案。若多轮推理迭代后,母型船设计参数库中依旧没有用户所需船型的相似模型,可以考虑在高维空间下对多维概念方案解进行增广。具体做法是:通过模糊聚类划分子凸包空间,结合密度驱动的改进凸包插值法实现数据增广。大体实现过程为:通过FCM算法对所有初始方案解聚类,计算所有初始概念方案解隶属度,由于隶属度能够反映样本与聚类中心的距离,因此,将隶属度从大至小排列,以降幅最剧烈的位置作为一个凸包子空间的边界。

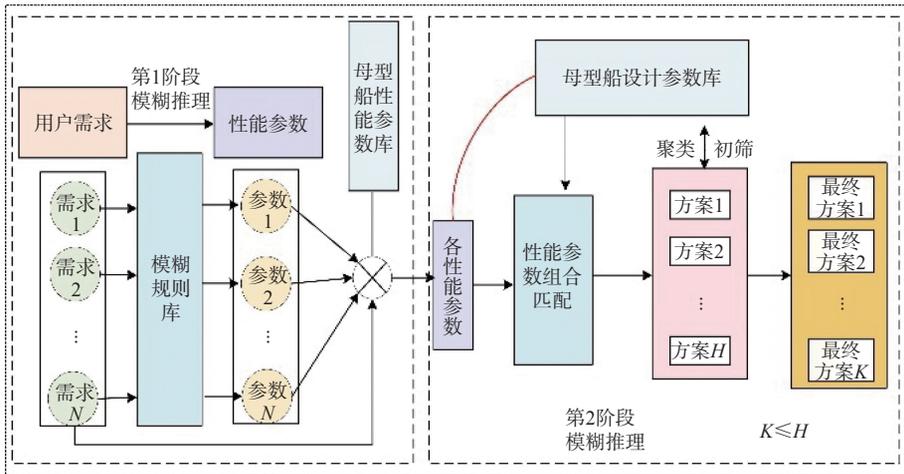


图2 模糊推理系统流程

Fig. 2 Process of fuzzy inference system

子凸包空间范围内数据点分布的密度比定义为

$$D(\mathbf{x}_b^{(t)}) = \frac{\min(\hat{\mathbf{x}}^{(t)})}{\hat{\mathbf{x}}_b^{(t)}} \quad (15)$$

式中:  $b = 1, 2, \dots, B_t$ ;  $B_t \in \{1, 2, \dots, N-1\}$  为子凸包空间的边界;  $t = 1, 2, \dots, T$ ,  $T$  为子凸包空间数量;  $\hat{\mathbf{x}}$  为密度向量。

采用半岭形曲线 ( $\lambda = e^{-\frac{\lambda}{\sigma}}$ ) 动态生成插值因子  $\lambda$ 。最后,根据插值法原理插值,生成更多的概念方案解:

$$\mathbf{x}_k^{(t)} = \lambda(\mathbf{x}_{p'} - \mathbf{x}_{q'}) + \mathbf{x}_c^{(t)} \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{x}_k^{(t)}$  为第  $t$  个子凸包内插入的新的方案;  $\mathbf{x}_c^{(t)}$  为模糊聚类中心方案;  $\mathbf{x}_{p'}$  与  $\mathbf{x}_{q'}$  为子凸包空间内相邻的 2 个向量。

### 1.3 本研究创新性

1) 在文献 [18] 中,杨萌等提出在船舶概念方案设计过程中仅考虑性能对设计参数的影响,弱化了用户的实际需求,这种方式导致实际生成的船舶概念方案解在一定程度上会偏离用户的需求。而在船舶概念方案设计过程中,用户需求往往扮演着非常重要的角色,其重要性不可小视,甚至对船舶概念方案设计起决定性的作用。因此,本研究设计的类栈式结构的性能参数值推理模型,既考虑了性能对船舶概念方案设计的影响,也强化了用户对船舶设计方案的真实表征。

2) 文献 [18] 仅考虑船舶概念方案设计过程中设计型参数与母型船之间简单的一对多映射关系,在一定程度上会割裂不同设计参数间的耦合关系。由于在模糊推理过程中,推理的结果应与

实际的母型船一一对应, 因此, 本研究既充分挖掘模糊推理结果与母型船间的共性关系, 又考虑了用户的实际需求。

## 2 算例验证

本研究所提出的模糊推理系统是一套单向生成系统, 其中不包括参数训练的过程, 所有参数均为提前设定的超参数, 在此基础上将模拟的用户需求作为输入数据, 验证整个船型设计模糊推理的过程以及性能。

### 2.1 算例描述

本文所构建的数据库来源于公开船型数据以及船型设计仿真数据。该数据库包括 2 个子库, 分别为船型性能参数库和船型设计参数库。船型性能参数库由 12 条船的排水量、续航里程等 12 个性能参数构成。船型设计参数库由 120 条船的船长、船宽等 68 个设计参数构成。2 个子库之间的样本存在对应关系, 一条性能参数值, 对应设计参数库中 10 条船的设计参数值, 该对应关系由船舶领域专家根据专业知识设定。

因为无法获取直接的用户需求以及用户需求的性能数值所对应的设计参数, 所以本研究考虑用母型船库中的某一条性能参数值来模拟用户需求, 作为整个模糊推理系统的输入。模型的输入是由性能参数值以及模糊语言变量构成, 除了性能参数库中的性能数值外, 还需将模糊语言变量全部设置为“等于”, 如表 2 所示。

表 2 模拟用户需求

Table 2 Simulated user requirements

算例	船型性能	性能数值	语言变量
1	排水量/t	7 200	等于
	续航里程/km	9 000	等于
	稳性约束	1.25	等于
	操纵性	8.6	等于
	...	...	...
	尾垂发	24	等于
	近防炮	2.2	等于
	舰载机规格	3	等于
	排水量/t	6 000	等于
	续航里程/km	6 000	等于
2	稳性约束	1	等于
	操纵性	8	等于
	...	...	...
	尾垂发	16	等于
	近防炮	2	等于
	舰载机规格	2	等于

船型性能参数库与设计参数库存在对应关系, 如表 3 所示。在性能参数推理过程中利用 FCM 生成模糊聚类中心以及方差, FCM 相关参数设置见表 4。通过观察模型推理所得的设计方案与母型船设计参数库中的设计方案的差异, 帮助本文评估模糊推理系统的推理偏差与合理性。

表 3 模拟用户需求船型性能数值对应母型船设计参数库中的设计参数值

Table 3 Corresponding design parameters in parent vessel database for simulated user requirement hull performance values

算例	设计参数	期望值
1	船长/m	142.8
	船宽/m	15.7
	型深/m	11.6
	吃水/m	5.8
	...	...
	舷侧倾斜角19/(°)	17.87
	舷侧倾斜角22/(°)	19.86
2	船长/m	154.5
	船宽/m	15.9
	型深/m	11.6
	吃水/m	5.8
	...	...
	舷侧倾斜角19/(°)	20.38
	舷侧倾斜角22/(°)	18.28

表 4 FCM 参数设置

Table 4 Parameter settings of FCM

参数名称	参数值
模糊权重/m	1.7
迭代最大轮次	1 000
收敛阈值	0.000 01

### 2.2 算性能参数推理

本研究在算例中与文献 [18] 的性能参数推理误差进行对比。通过表 5 可以看到, 经本研究优化后, 系统在模糊语言变量全部为“等于”时, 模糊推理系统第 1 阶段推理所得的性能参数值与模拟用户需求的性能数值相近, 表明本研究提出的系统在第 1 阶段模糊推理中具备对用户性能需求的建模能力, 能够准确地推理出用户的性能需求。同时对比文献 [18] 的模糊推理系统所推理得出的性能参数值, 在绝大多数性能参数上相对模拟用户需求的性能参数偏差更小。该结果表

明,本研究提出的模糊推理系统能够更加准确地捕捉到用户的性能需求。

表5 模糊推理性能数值与模拟用户需求性能数值对比

Table 5 Comparison of fuzzy inference performance indicators and simulated user requirement parameters

算例	船型性能	性能数值	模糊推理值 (本文)	模糊推理值 (文献[18])
1	排水量/t	7 200	7 222	70 58
	续航里程/km	9 000	9 061	8 613
	稳性约束	1.25	1.253	1.23
	操纵性	8.6	8.61	8.5
	...	...	...	...
	尾垂发	24	24.08	23.48
	近防炮	2.2	2.202	2.18
	舰载机规格	3	3.02	2.87
	排水量/t	6000	6012	6 193
	续航里程/km	6000	5760	6 254
2	稳性约束	1	1.09	1.11
	操纵性	8	8.06	8.14
	...	...	...	...
	尾垂发	16	19.68	20.34
	近防炮	2	2.09	2.11
	舰载机规格	2	1.92	2.08

### 2.3 船型设计参数模糊推理

将本研究提出的模糊推理系统的第1阶段用户需求性能参数模糊推理作为第2阶段船型设计参数模糊推理的输入,将性能参数映射到相应的设计参数。对比本研究与文献[18]的设计参数偏差,如表6所示。本研究提出的系统推理生成的设计参数值与预期的设计参数值的偏差明显小于文献[18]。该结果表明经过改进的船型设计方案模糊推理系统能够根据用户的需求生成相对应的船型设计方案,同时相比较未加入类栈式结构的系统具有更高的推理准确度。

### 2.4 船舶设计合理性判断

本研究提出的船舶设计方案生成系统通过模糊推理将用户需求转化为性能参数,再映射为船型设计参数。当需要同时满足2个性能需求时,系统通过模糊逻辑“and”运算从母型船参数库中筛选出同时符合两者的设计参数组合。然而,由于设计参数间存在耦合关系,满足一个性能需求的设计调整可能会限制另一性能需求的完全实现。因此,船舶设计方案推理系统最终所得到的结果,存在不符合实际设计标准的可能性,需要

表6 模糊推理所得船型设计参数与模拟用户需求对应设计参数对比

Table 6 Comparison of hull design parameters from fuzzy inference and simulated user requirement design parameters

算例	设计参数	期望值	模糊推理值 (本文)	模糊推理值 (文献[18])
1	船长/m	142.8	141.37	148.79
	船宽/m	15.7	15.83	15.91
	型深/m	11.6	11.54	11.68
	吃水/m	5.8	5.86	5.83
	...	...	...	...
	舷侧倾斜角19/(°)	17.87	17.9	18.35
	舷侧倾斜角22/(°)	19.86	19.79	18.67
	船长/m	154.5	154.8	158.48
	船宽/m	15.9	15.95	16.05
	型深/m	11.6	11.6	11.7
2	吃水/m	5.8	5.79	5.83
	...	...	...	...
	舷侧倾斜角19/(°)	20.38	19.05	18.52
	舷侧倾斜角22/(°)	18.28	18.43	18.37

对所生成的方案进行合理性优化,以便筛选出既符合用户需求又满足船舶设计标准的设计方案。

本文将性能参数库及母型船设计方案库划分为12组数据,每组数据包括一条模拟用户需求的性能参数值及其对应的船型方案和用于模拟现有参数库的剩余性能参数值及其对应的设计方案。对比本研究与文献[18]推理得到的船型设计方案与最近同类母型船每个设计参数之间的平均偏差,来验证二者的设计合理性。

合理性评分计算公式如下:

$$score = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (DP_i^{\text{infer}} - DP_i^{\text{Par}}) / DP_i^{\text{Par}}}{N} \right) \times 100 \quad (17)$$

式中:  $DP_i^{\text{infer}}$  表示推理方案的第*i*个设计参数;  $DP_i^{\text{Par}}$  表示母型船方案的第*i*个设计参数;  $N$  表示一条船共有*N*个船型设计参数。

如图3所示,12组数据在经过本研究优化后模型生成的船型概念方案的合理性评分明显高于文献[18]的模型。算例结果表明,本研究提出的船型概念方案设计模糊推理系统能够保证生成的设计方案在满足用户需求的同时,符合概念方案设计的合理性。

## 3 结论

本文针对船舶概念方案设计的传统方法存在

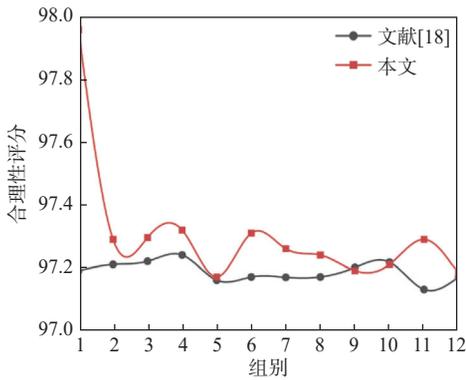


图3 优化与未优化方案合理评分对比图

Fig. 3 Comparison of rationality scores between optimized and non-optimized solutions

的时间成本高、设计过程复杂等问题,提出了一套船舶概念方案快速模糊推理系统。通过引入类栈式结构减少了推理过程中性能参数推理部分可能出现的错误推理,强化了用户需求的性能参数在设计参数推理中的影响。利用聚类算法对推理所得概念方案进行合理性优化,保证了概念方案的有效性和科学性。算例验证表明,本研究提出的船型概念方案模糊推理系统相比文献 [18] 在性能参数推理和设计参数映射上具有更小的偏差,提高了其推理准确性。同时本研究提出的推理系统所生成的船型概念方案相比文献 [18] 的系统具有更高的设计合理性。本研究不仅在理论上丰富了船舶概念方案设计的优化方法,也为实际应用提供了有效的支持,能够更好地满足日益多样化的船舶功能需求,提高设计效率和减少人力成本,为船舶设计提供了新的思路。

尽管本研究提出的模糊推理系统在船舶概念方案设计中表现出较好的性能参数推理准确性和方案,但该系统第 2 阶段模糊推理中的“and”算子仍然存在无法耦合多个参数的局限性。本研究从“and”算子的后端对该问题进行了优化,在未来的工作中会对“and”算子的直接优化进行研究,以进一步提升船型概念方案的合理性。此外,本研究在 2 个阶段的模糊推理之间引入了类栈式结构,未来可考虑构建具有栈式结构的多层次模糊推理系统。

#### 参考文献:

[1] 由蓬勃, 邹少军. 智能船舶设计与自动化控制研究 [J]. *船舶物资与市场*, 2024, 32(9): 18–20.  
YOU P B, ZHOU S J. Research on intelligent ship design and automatic control [J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2024, 32(9): 18–20.

[2] 周燮. 海上核应急救援无人方舱概念设计研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2023.

ZHOU X. Conceptual design of unmanned shelters for nuclear emergency rescue at sea [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023 (in Chinese).

- [3] 李文龙, 谭家华. 我国战略石油储备船概念设计研究 [J]. *海洋工程*, 2003, 21(1): 73–77.  
LI W L, TAN J H. A study on the conceptual design of oil storage vessels for national strategic petroleum reserve [J]. *The Ocean Engineering*, 2003, 21(1): 73–77 (in Chinese).
- [4] 李晓文, 李平, 林壮, 等. 单体双气垫登陆艇概念设计研究 [J]. *船舶工程*, 2014, 36(3): 16–19, 40.  
LI X W, LI P, LIN Z, et al. Research on conceptual design for landing craft of twin air cushion monohull [J]. *Ship Engineering*, 2014, 36(3): 16–19, 40 (in Chinese).
- [5] 谢云平, 金晨露, 胡冬芳, 等. 三体两栖潮间带风电运维船的概念设计 [J]. *船舶工程*, 2017, 39(10): 1–4, 31.  
XIE Y P, JIN C L, HU D F, et al. Concept design of amphibious maintenance trimaran for offshore intertidal wind farms [J]. *Ship Engineering*, 2017, 39(10): 1–4, 31 (in Chinese).
- [6] 李学斌, 甘霖. 舰船概念设计多目标优化和多属性决策研究 [J]. *中国舰船研究*, 2008, 3(3): 14–17, 33.  
LI X B, GAN L. Multi-objective optimization and multi-attribute decision making study of naval ship's conceptual design [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2008, 3(3): 14–17, 33 (in Chinese).
- [7] 王健, 谢伟, 熊治国, 等. 基于多目标遗传算法的飞行甲板参数化设计优化方法 [J]. *中国舰船研究*, 2013, 8(1): 7–12.  
WANG J, XIE W, XIONG Z G, et al. Parametric optimization of the flight deck design based on the multi-objective genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013, 8(1): 7–12 (in Chinese).
- [8] 王健, 谢伟, 王涛, 等. 基于目标分流方法的船舶概念方案多学科设计优化 [J]. *中国舰船研究*, 2017, 12(5): 22–29.  
WANG J, XIE W, WANG T, et al. Application of analytical target cascading method in multidisciplinary design optimization of ship conceptual design [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2017, 12(5): 22–29 (in Chinese).
- [9] 任伟, 熊鹰, 齐万江. 船舶主尺度及船型系数方案设计生成系统研究 [C]//第十六届中国国际船艇展暨高性能船学术报告会论文集. 上海: 中国造船工程学会, 2011: 221–226.  
REN W, XIONG Y, QI W J. Research on the design generation system for ship principal dimensions and hull form coefficients [C]//Proceedings of the 16th China International Boat Show & High-Performance Vessel Academic Conference. Shanghai: The Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2011: 221–226 (in Chinese).

- [10] 周奇, 陈立, 许辉, 等. 基于组合赋权 TOPSIS 法和粒子群的船舶概念优化设计 [J]. *舰船科学技术*, 2014, 36(1): 62–69.  
ZHOU Q, CHEN L, XU H, et al. Application of combination weight TOPSIS method and multi-objective particle swarm optimization in conceptual ship design[J]. *Ship Science and Technology*, 2014, 36(1): 62–69 (in Chinese).
- [11] 刘传云, 马运义, 刘明静, 等. 多种群变异遗传算法在舰船概念方案设计中的应用 [C]//国家自然科学基金海洋工程“十二五”期间发展战略高层研讨会暨 2009 年全国船舶与海洋工程学科博士生学术会议论文集. 武汉: 教育部学位管理与研究生教育司, 2009: 13–15.  
LIUC Y, MA Y Y, LIU M J, et al. Application of the multiple population mutation genetic algorithm in the conceptual design of warship[C]//Proceedings of the National Science Foundation Ocean Engineering "12th Five-Year Plan" Development Strategy High-Level Seminar & 2009 National Doctoral Academic Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering. Wuhan, 2009: 13–15 (in Chinese).
- [12] MAURO F, SALEM A. Development of regression models for estimating main particulars of RoPax vessels in the conceptual design stage[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 333: 121407.
- [13] GRAY A W, SINGER D J. A hybrid agent type-1 fuzzy logic system for set-based conceptual ship design communications and negotiations[J]. *Naval Engineers Journal*, 2016, 128(1): 77–89.
- [14] DEGAN G, BRAIDOTTI L, MARINÒ A, et al. LCTC ships concept design in the North Europe-Mediterranean transport scenario focusing on intact stability issues[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(3): 278.
- [15] HIRAYAMA S, ICHINOSE Y, WANAKA S, et al. Dynamic capabilities of maritime infrastructure: conceptual design of merchant vessels with usability in crisis[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2023, 28(2): 422–438.
- [16] ALVARADO D R, PATERNINA L A, PAIPA E G. Synthesis model for the conceptual design of inland cargo vessels to operate on the Magdalena River[J]. *Brodogradnja*, 2022, 73(4): 13–37.
- [17] TADROS M, VENTURA M, SOARES C G. A nonlinear optimization tool to simulate a marine propulsion system for ship conceptual design[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 210: 107417.
- [18] 杨萌, 龚俊斌, 曹晋, 等. 基于智能模糊推理系统的船型概念方案快速生成研究 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(6): 45–55.  
YANG M, GONG J B, CAO J, et al. Rapid ship hull conceptual scheme design based on intelligent fuzzy inference system[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(6): 45–55 (in both Chinese and English).
- [19] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338–353.
- [20] ZHOU T, CHUNG F L, WANG S T. Deep TSK fuzzy classifier with stacked generalization and triplely concise interpretability guarantee for large data[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2017, 25(5): 1207–1221.
- [21] ZHOU T, ZHOU Y, GAO S. Quantitative-integration-based TSK fuzzy classification through improving the consistency of multi-hierarchical structure[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 106: 107350.
- [22] 刘丙杰, 胡昌华. 基于高斯隶属函数的模糊定性仿真 [J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(7): 1098–1102.  
LIU B J, HU C H. Fuzzy qualitative simulation with Gauss membership function[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(7): 1098–1102 (in Chinese).
- [23] OZKAN I, TURKSEN I B. Upper and lower values for the level of fuzziness in FCM[J]. *Information Sciences*, 2007, 177(23): 5143–5152.
- [24] WOLPERT D H. Stacked generalization[J]. *Neural Networks*, 1992, 5(2): 241–259.
- [25] IKOTUN A M, EZUGWU A E, ABUALIGAH L, et al. K-means clustering algorithms: a comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data[J]. *Information Sciences*, 2023, 622: 178–210.
- [26] GOICOVICH I, OLIVARES P, ROMÁN C, et al. Fiber clustering acceleration with a modified Kmeans++ algorithm using data parallelism[J]. *Frontiers in Neuroinformatics*, 2021, 15: 727859.

# Fast fuzzy reasoning and optimization using a stacked-like-based ship conceptual scheme

*YANG Yuanqing<sup>1</sup>, YANG Meng<sup>2</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>, Huang Zhigang<sup>3</sup>, Chen Shuai<sup>3</sup>,  
LIU Weiqin<sup>4</sup>, YANG Xibei<sup>1</sup>, ZHOU Ta<sup>\*\*1</sup>*

1 School of Computer, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212114, China

2 Hanjiang National Laboratory, Wuhan 430060, China

3 China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China

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

**Abstract:** [ **Objective** ] The design of conceptual schemes for ship types often faces challenges in managing the complex coupling relationships among various design parameters. Traditionally, conceptual schemes for different ship types and corresponding requirements rely heavily on the domain knowledge and engineering experience of ship experts. This approach leads to long design cycles and high costs. Therefore, this study proposes a fuzzy reasoning strategy based on a stacked-like structure, aimed at rapidly generating initial solutions for ship conceptual scheme. [ **Method** ] This strategy employs fuzzy reasoning based on the user's requirements to derive the performance parameter values of the ship type that meet the user's requirements. These values are then matched with the design scheme library of the master ship to obtain the conceptual scheme of the ship type that meets the user's requirements. Drawing upon the principle of stacked generalization, the method introduces a stack-like structure to systematically combine the initially inferred valid information with the input user requirements in a hierarchical manner. This approach reduces reasoning bias by applying multi-stage verification. Finally, a clustering algorithm is designed to optimize the fusion of the performance parameter library and the master ship design scheme library. This optimization enhances the rationality of the ship conceptual scheme by establishing quantitative relationships between new designs and proven reference solutions. [ **Results** ] The numerical examples demonstrate that both the performance parameters of the ship type derived through reasoning and the corresponding conceptual schemes effectively address the real needs of users. [ **Conclusion** ] To address the significant inference bias in performance parameters observed in existing methods, this study proposes a rapid fuzzy inference system based on a stack-like structure for ship conceptual design. This system enhances computational efficiency while effectively reducing reasoning deviations during the inference process. By leveraging hierarchical reasoning layers, it improves decision-making accuracy in the early stages of ship design. Existing methods for ship conceptual schemes design often result in unreasonable coupling relationships among the solutions generated through reasoning technology. This study thoroughly explores the commonalities between the fuzzy reasoning results and the parent ship, ensuring that the user's requirements are met while eliminating the imbalance in the design parameter coupling of the ship conceptual schemes. As a result, the efficiency and rationality of generating ship conceptual scheme solutions are significantly improved.

**Key words:** ship hull conceptual scheme; fuzzy logic; stacked-like structure; performance parameters; cluster analysis