



基于智能模糊推理系统的船型概念方案快速生成研究

杨萌 龚俊斌 曹晋 周塔

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

YANG Meng, GONG Junbin, CAO Jin, ZHOU Ta

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03718>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[SOLAS 2020 破舱稳性要求对邮轮船型开发的影响研究](#)

The impact of SOLAS 2020 damaged stability requirement on the conceptual design of cruise ships
中国舰船研究. 2020, 15(5): 25-30 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01790>

[LNG 加注船 C 型舱优化方案设计](#)

Optimization scheme design for type C tank of LNG bunker vessel
中国舰船研究. 2020, 15(2): 76-81 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01561>

[高速船型融合特型球鼻艏的多方案优化设计](#)

Multi-plan optimization design of high-speed hull form fusion special type bulbous bow
中国舰船研究. 2020, 15(3): 54-60 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01556>

[船舶推进轴系方案设计的关键技术研究进展](#)

Progress in studies on key technologies for marine propulsion shafting scheme design
中国舰船研究. 2019, 14(5): 10-21 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01539>

[动力定位船舶模糊解耦定速航行控制算法](#)

Fuzzy decoupling constant-velocity navigation control algorithm for dynamic positioning ship
中国舰船研究. 2019, 14(3): 152-157 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01373>

[基于改进粒子群优化算法的船舶能量管理方案](#)

Ship energy management scheme based on improved particle swarm optimization algorithm
中国舰船研究. 2020, 15(6): 37-45 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01890>



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.1673-3185.03718>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 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).

基于智能模糊推理系统的船型概念 方案快速生成研究



扫码阅读全文

杨萌¹, 龚俊斌¹, 曹晋², 周塔³

1 汉江国家实验室, 湖北武汉 430060

2 江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212114

3 江苏科技大学 计算机学院, 江苏 镇江 212114

摘要: [目的] 针对现有船舶概念方案设计阶段中, 船型概念方案生成技术对具有模糊特性的用户需求难以建模的问题, 研究一种基于模糊推理系统的船型概念方案快速生成系统, 以快速推出符合用户要求的船舶性能数值, 并生成与之匹配的船型设计参数作为概念方案。[方法] 首先, 收集并整理现有船型的数据作为先验知识, 用于在用户需求建模过程中超参数初始化。其次, 基于模糊集理论将用户需求定量地映射至模糊空间, 利用整理的先验知识以可解释的方式推理出符合用户需求的船舶性能数值。最后, 对符合用户需求的每个船舶性能数值匹配出最佳的船型设计参数, 并通过模糊集理论中的“且”原理, 进一步推理出符合用户对全部船舶性能要求的船型设计参数, 将其作为船型概念方案。[结果] 实验结果显示, 智能模糊推理系统能够于30 s内根据模糊的用户需求快速推理出多条偏差在3.5%以内的船型概念方案。[结论] 智能模糊系统可量化用户需求中的模糊性, 经过两个阶段的推理, 高效地生成符合用户各项需求的船舶概念方案, 研究成果可为智能化、快速化的船舶概念设计的方案生成提供有益的参考。

关键词: 船舶设计; 人工智能; 船舶性能要求; 船型设计参数; 船型概念方案生成; 模糊集理论; 模糊规则

中图分类号: U662.2; U662.9

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03718

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

YANG Meng¹, GONG Junbin¹, CAO Jin², ZHOU Ta³

1 Hanjiang National Laboratory, Wuhan 430060, China

2 School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212114, China

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

Abstract: [Objective] Aiming at the problem that it is difficult to model user requirements with fuzzy characteristics in existing ship conceptual scheme design (SCSD), this study focuses on a rapid SCSD system based on a fuzzy inference system (FIS) that can quickly obtain ship performance values that meet the user requirements and generate the corresponding ship hull design parameter values. [Methods] First, the existing ship hull parameter data is collected and sorted as prior knowledge for hyper-parameter initialization in the process of user requirement modeling. Second, based on the fuzzy set theory, the user requirements are quantitatively mapped to the fuzzy space, and the sorted prior knowledge is used to infer the ship performance values that meet the user requirements in an interpretable way. Finally, the best ship hull design parameters are matched for each ship performance value that meets the user requirements, and through the "AND" principle in fuzzy set theory, the ship design parameters that meet all the user requirements for ship performance are further inferred and taken as the SCSD. [Results] The experimental results show that the intelligent FIS can quickly infer multiple SCSDs with deviations within 3.5% according to the fuzzy user requirements within 30 seconds. [Conclusions] The intelligent FIS quantifies the fuzziness in user requirements, and after two stages of inference, the SCSD that meets the various user requirements is efficiently generated. The results of this study can provide useful references for rapid intelligent SCSD generation.

Key words: naval architecture; artificial intelligence; ship performance requirement; ship hull design parameter; ship hull conceptual scheme generation; fuzzy set theory; fuzzy rule

收稿日期: 2023-12-30 修回日期: 2024-03-28 网络首发时间: 2024-10-11 10:45

基金项目: 国防基础科研计划资助项目(JCKY2020206B037); 国家春晖计划项目(HZKY20220133); 江苏省自然科学基金面上项目资助(BK20191200, BK20241831)

作者简介: 杨萌, 男, 1986年生, 博士, 高级工程师

龚俊斌, 男, 1978年生, 博士, 研究员

曹晋, 男, 1996年生, 硕士生。研究方向: 智能模糊推理。E-mail: 192020013@stu.just.edu.cn

周塔, 男, 1980年生, 博士, 副教授。研究方向: 机器学习, 模糊推理, 船舶设计。E-mail: jkdzhout@just.edu.cn

*通信作者: 周塔

0 引言

概念方案设计是现代船舶设计制造过程中最重要的环节之一,在概念方案阶段就基本决定了船舶的基本特征以及主要设计框架^[1]。船型概念方案设计则是介于理论与制造之间的研究,处于方案预研阶段,主要根据给定的任务、功能、航行需求,综合考虑设计准则与专家设计经验,初步生成船型的设计参数值,在多评价指标验证后选择最优的概念方案做进一步的探索,从而缩短后续具体方案设计的耗时,提高船舶设计制造的效率。

随着船舶种类和功能的增多,概念方案的生成需求也更加复杂。例如,刘瀛昊等^[2]详尽地分析了应急通信保障船的功能定位与设计需求,在现有科考船数据的基础上,确定了一条保障船的主尺度、船型和布置参数。岳玉帅等^[3]根据自适应的要求给出了一条三体无人监测船的概念设计方案。此外,郭一丁和郭亮等^[4-5]研究了乏燃料运输船和海上卫星发射船的概念方案设计。以上研究都能够根据特定的用户需求设计出对应的概念方案,但设计过程主要依靠专业人员的设计经验并参考母型船的设计参数,在概念方案的多样性和启发性方面还可作进一步的延伸。

为拓展可选概念方案的解集空间,并快速寻找收敛至较优概念方案解,研究人员将数字仿真技术引入了概念方案设计的过程中。赵良才等^[1]所提出的计算机辅助船舶轮机舱概念设计方法中,综合考虑现有主机库中符合用户需求的主机,并从技术、经济、船东等多角度进一步地筛选出目标主机。朱天明等^[6]基于数字孪生五维框架与发明问题解决理论提出了碰撞预警系统的概念设计方案。景旭文等^[7-8]建立了基于决策树算法的数据挖掘模型,从产品库、设计规则库、知识库中挖掘相关数据、信息和知识,用以支持产品概念设计研究。Ljulj 等^[9]在子系统中学习参数之间的耦合性,使生成的概念方案符合船舶设计规范。谢伟和王健等^[10-11]将多目标分流方法与多目标遗传算法分别引入至船舶概念方案多学科设计优化与飞行甲板参数化设计优化的过程中,有效地解决了参数之间复杂耦合导致的计算困难,具有优异的稳定性。引入数字孪生、虚拟样机等数字工程技术有利于在通用化、系列化的设计理念引导下实现低成本、可持续性设计^[12]。

这些新技术的引入提高了船舶概念方案设计的准确性和多样性,可取得多种优异的概念方案。若要进一步提升设计效率,则需探索研究如

何对甲方用户需求的合理建模表示。针对船舶设计,甲方需求常常自带模糊属性。比如要求船舶航速“快”,但对于 20 kn 还是 30 kn 才算“快”,不同的用户和专家有不同的答案。此类描述的概念难以用“属于”或“不属于”某集合表示,却可以用介于 0 和 1 之间的实数表示属于模糊集的“程度”,即隶属度。例如,30 kn 属于“快”的程度为 0.7,而属于“很快”的程度则是 0.4。于是,需求中对航速要求的模糊性可以量化为对多个模糊集的隶属度。隶属度是模糊集理论^[13]中的重要内容,主要应用于模糊控制领域,因其独特的非线性拟合能力与高语义可解释性而受到广泛关注。曾广武等^[14]首次将模糊理论应用于船舶评判领域,之后基于模糊理论的综合评判方法被应用于解决船舶安全性评估^[15]、船舶方案技术经济综合评判^[16]等问题。

为提高船型概念方案生成的效率与准确性,本文研究提出一种基于智能模糊推理系统的概念方案生成方法:通过建模表征概念方案中的多样性;通过模糊集理论综合量化表示需求中的模糊性;通过模糊算法优化提高计算过程的快速性。

本文提出的智能模糊推理系统主要包含现有船型数据库、船舶性能数值推理系统与船型设计参数推理系统 3 个部分,具体步骤和各部分之间的关系如图 1 所示。本文将按照以下结构详细介绍:第 1 节中将说明所构建的现有船型数据库中主要包括的船舶性能数值库和船型设计参数库,其可分别为两个对应的推理系统提供数据支撑;第 2 节中将介绍模糊用户需求的建模,船舶性能数值推理系统的构建,及其如何初步推理出符合用户单项需求的船舶性能数值;第 3 节则介绍数值匹配过程,以及船型设计参数推理系统的二次推理,得出符合用户每项需求的船型设计参数,作为输出的船型概念方案;第 4 节将使用模拟的用户需求来测试验证所建立的智能模糊推理系统的准确性;最后,第 5 节进行总结。

1 数据库制备

智能模糊推理系统作为一种生成式的机器学习算法,其推理过程需要以现有船舶数据作为数据库支撑,而无需额外的训练过程。根据船型概念方案设计过程中的数据类型,数据库中主要包括船型设计参数与船舶性能数值,且可以根据单个船型设计参数快速推算出主要船舶性能数值。

1.1 船型设计参数

船型设计参数数据基本确定了一艘船舶的结

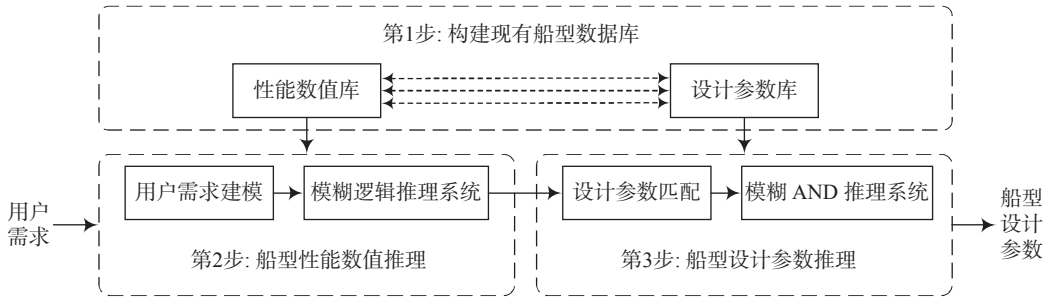


图 1 智能模糊推理流程图
Fig. 1 The workflow of intelligent fuzzy inference

构、尺寸和形状,然而,在船舶详细设计过程中会涉及到众多的船舶设计参数数据计算,难以在一个系统中一次全部生成。为了简化,在船型概念方案设计参数中,主要以对船型具有决定性影响的主尺度参数和型线参数为例。主尺度参数及其符号如表 1 所示,型线参数及其符号如表 2 所示,部分型线参数的含义如图 2 所示。

表 1 船型概念方案中主尺度参数及其符号

Table 1 Principal geometric parameters and its denotations for ship hull conceptual scheme

参数	符号
船长	L
船宽	B
型深	d
吃水	T
方形系数	C_B

表 2 船型概念方案中的型线参数及其符号

Table 2 The profile line parameters and its denotations in ship hull conceptual scheme

参数	符号	参数	符号
进流段长度	S_i	球艏基线下高度	S_x
平行中体长度	S_p	艏部倾斜角	S_e
去流段长度	S_o	艏切点位置	S_c
浮心纵向位置	S_b	舷侧倾斜角1	$Sd1$
棱形系数	S_r	舷侧倾斜角2	$Sd2$
水线面系数	S_s	舷侧倾斜角3	$Sd3$
艏部纵向斜度	S_w	舷侧倾斜角4	$Sd4$
半进流角	S_a	舷侧倾斜角5	$Sd5$
艏部倾斜角	S_h	舷侧倾斜角6	$Sd6$
球艏长度	S_q	舷侧倾斜角7	$Sd7$
球艏宽度	S_k	舷侧倾斜角8	$Sd8$
球艏基线上高度	S_j		

为便于计算机高效地数值运算,将以上船型设计参数以数字矩阵的格式存储,数字矩阵可表示为

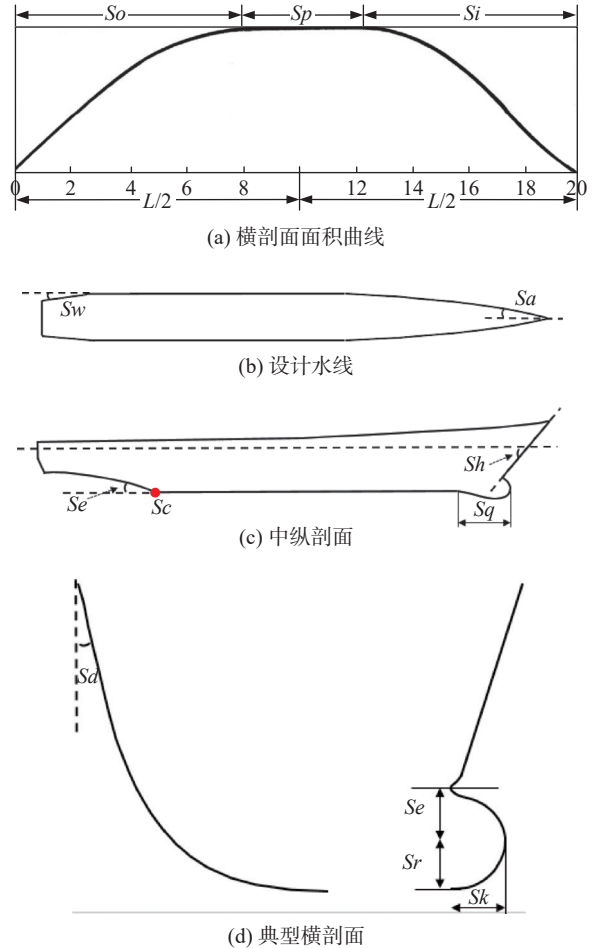


图 2 型线参数示意图

Fig. 2 Molded lines parameter diagram

$$Pa^{(Ref)} = \begin{bmatrix} L_1 & \cdots & Sd8_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{N_{Pa}} & \cdots & Sd8_{N_{Pa}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: Pa 为船型设计参数,(Ref)表示是现有母型船的参数; N_{Pa} 为船型设计参数中数据的数量(等于现有船舶的数量)。矩阵中每行数据表示一条现有船舶的船型设计参数,每列表示所有现有母型船舶的一项船型设计参数,实现了对现有船舶船型设计参数的收集与制备。

1.2 船舶性能数值

船舶性能数值是对一艘船舶性能的量化评价

结果。实际设计中对一艘船舶的性能评价所涉及的参数指标多且计算复杂。为了简化,本文在构建参数库时,主要以航行性能为代表,组成船舶性能数值库,如表 3 所示。

表 3 船舶概念方案设计中性能数值及其符号

Table 3 Performance parameters and its denotations in ship conceptual scheme design

航行性能	参数	符号
初稳性	初稳性高	PeX
快速性	总阻力系数	PeK
操纵性	相对回转直径	PeS
耐波性	品级因子	PeG

船舶航行性能数值可由各公式根据船舶设计参数值依次计算得出。如船舶航行性能中的初稳性 \overline{GM} 可按以下公式计算:

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (2)$$

式中: \overline{KB} 为浮心高度,按船舶三维模型取值,而三维模型可根据船型设计参数中的型线参数自动生成; \overline{BM} 为初稳心半径,按船型三维模型取值; \overline{KG} 为重心高度,按母型船取值。

船舶的快速性 C_T 由总阻力系数表示,其计算公式为

$$C_T = R_T / (\rho V^2 S / 2) \quad (3)$$

式中: ρ 为流体质量密度; V 为设定的船速; S 为湿表面积,按船舶三维模型取值; R_T 为总阻力,根据三维模型测量相关参数值并采用 Holtrop 法^[7] 计算,计算公式为

$$R_T = R_F(1+k) + R_W + R_A + R_{APP} + R_B + R_{TR} \quad (4)$$

式中: R_F 为摩擦阻力; R_W 为兴波和破波阻力; R_A 为实船与船模相关的修正阻力; R_{APP} 为船舶的附体阻力; R_B 为球艏引起的附加压阻力; R_{TR} 为浸水的方艏引起的附加压阻力。

用以表示船舶操纵性的相对回转直径 D' 采用 Knights 公式计算

$$D' = 4.19 - 203C_B / |\delta| + 47.4T_{\text{trim}} / L - 13B / L + 194 / \delta - 3.82h_R b_R / Ld + 7.79A_b / Ld \quad (5)$$

式中: C_B , L , d 和 B 分为船舶主尺度参数中的方形系数、船长、型深和船宽(见表 1); δ 为舵角,按母型船取值; A_b 为球艏浸湿面积,按船型三维模型取值; T_{trim} 为纵倾值,按母型船取值; h_R 和 b_R 按母型船取值。

品级因子 R 表示了船舶的耐波性,由贝尔斯方法计算

$$R = a_0 + a_1 C_{WF} + a_2 C_{WA} + a_3 (T/L) + a_4 (Cb/L) + a_5 C_{VPF} + a_6 C_{VPA} \quad (6)$$

式中: $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 为回归系数; C_{WF} 为前半段棱形系数; C_{WA} 为后半段棱形系数; C_{VPF} 为前半段垂向棱形系数; C_{VPA} 为后半段垂向棱形系数。以上 4 个系数都按船型三维模型取值。

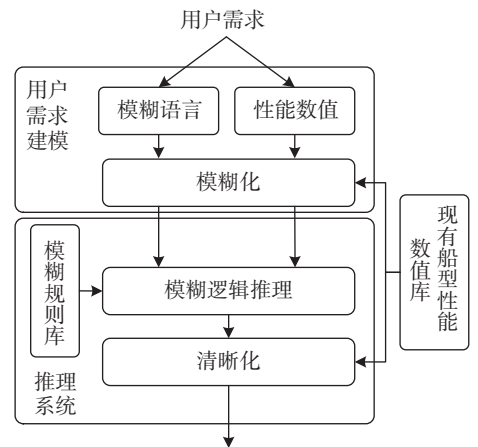
为便于计算机高效地进行数值运算,将航行性能数值以数字矩阵的格式存储,数字矩阵可表示为

$$Pe^{(\text{Ref})} = \begin{bmatrix} PeX_1 & \cdots & PeG_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ PeX_{N_{Pe}} & \cdots & PeG_{N_{Pe}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: Pe 为船舶性能数值, (Ref) 同样表示是现有母型船的参数; N_{Pe} 为船舶性能数值中数据的数量。各船舶航行性能的计算公式同样表明,数据库每条船型的性能数值与其设计参数具有明确的对应关系,即船舶性能数值可根据设计参数按照公式计算得到,于是 $N_{Pe} = N_{Pa}$ 。

2 船舶性能数值推理

首先将分别说明船舶性能数值推理模块的具体计算过程,实现对具有模糊性的用户需求的建模与对符合用户需求的船舶性能数值的生成。如图 3 所示,用户需求包括模糊语言变量及对应的船舶性能数值,依据现有的性能数值库,分别对其进行模糊化建模,之后在推理系统中,按照模糊规则库执行模糊逻辑推理,将推理结果清晰化后即可生成符合需求的船舶性能数值。接下来,将在 2.1 节与 2.2 节分别详细地描述用户需求建模过程与推理系统构建过程。



符合需求的船型性能数值

图 3 船舶性能数值推理流程图

Fig. 3 The workflow of inference process for ship performance values

2.1 用户需求建模

针对模糊的用户需求, 基于模糊集理论将其量化为数值向量。在模糊推理系统中, 语言变量的值构成了模糊语言名称的集合, 即模糊集。通过设定模糊划分的数量及每个划分对应的模糊语言变量, 实现对模糊集的定义, 进而量化模糊性, 本文使用常用的一种划分方式

$$T(L) = \{NB, NM, ZE, PM, PB\} \quad (8)$$

式中: $T(L)$ 为模糊集; L 为语言变量; NB 为负大 (negative big); NM 为负中 (negative medium); ZE 为零 (zero); PM 为正中 (positive medium); PB 为正大 (positive big)。例如, 用户要求“航速在 20 kn 左右”, 模糊语言“左右”可以量化为一个向量: $[0, 0.2, 0.9, 0.1, 0]$, 向量中的每个元素表示“左右”属于对应语言变量的程度 (参考本文引言中举例), 如向量中第 2 个元素 0.2 表示用户需求中的“左右”隶属于语言变量“负中”的隶属度为 0.2, 0.9 表示“左右”隶属于“零”的隶属度为 0.9。因此, 一个模糊的程度词就可以量化为一个向量, 具体量化的数值可由专家设定并根据实际情况微调, 也可以采用数据挖掘技术自动迭代优化。

用户需求中不仅包含模糊语言“左右”, 也包含具体清晰的船舶性能数值 20 kn。在模糊集理论中, 采用模糊化技术将清晰的数值模糊化为模糊的隶属度值, 从而与模糊的语言变量共同参与推理。隶属函数负责将清晰数值映射至模糊隶属度值, 其中高斯隶属函数具有很强的通用性, 本文使用通用性较强的高斯隶属函数以模糊化用户需求中的船舶性能数值。高斯隶属函数为

$$\mu_{j,m} = \exp\left[-(x_j - c_{j,m})^2 / 2\sigma_{j,m}^2\right] \quad (9)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, d_{pe}$, 船舶性能数值的数量 $d_{pe} = 4$ (详见第 1.2 节); $m = 1, 2, \dots, M$, 模糊空间的划分数量 $M = 5$ (详见式 (8)); $c_{j,m}$ 与 $\sigma_{j,m}$ 分别为高斯隶属函数中的超参数, 可由模糊 C 均值 (fuzzy c-means, FCM) 算法^[18] 根据现有船舶性能数值库 $Pe^{(Ref)}$ 快速地完成初始化。

于是, 记模糊的用户需求为 $X = \{X^{(S)}, X^{(L)}\}$, 其中 $X^{(S)} = (x_1^{(S)}, x_2^{(S)}, \dots, x_{d_{pe}}^{(S)})^T$ 为用户需求的船舶性能数值, 第 j ($j = 1, \dots, d_{pe}$) 个性能数值模糊化为 M 个模糊隶属度值 $\mu_{j,1}^{(S)}$ 至 $\mu_{j,M}^{(S)}$, 于是所有用户需求的船舶性能数值模糊化后的隶属度矩阵 $U^{(S)}$ 可表示为

$$U^{(S)} = \begin{bmatrix} \mu_{1,1}^{(S)} & \cdots & \mu_{1,M}^{(S)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{d_{pe},1}^{(S)} & \cdots & \mu_{d_{pe},M}^{(S)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$X^{(L)} = (x_1^{(L)}, x_2^{(L)}, \dots, x_{d_{pe}}^{(L)})^T$ 为用户需求的语言变量, 第 j ($j = 1, \dots, d_{pe}$) 个语言变量模糊化为 M 个模糊隶属度值 $\mu_{j,1}^{(L)}$ 至 $\mu_{j,M}^{(L)}$, 于是所有用户需求的语言变量模糊化后的隶属度矩阵 $U^{(L)}$ 可表示为

$$U^{(L)} = \begin{bmatrix} \mu_{1,1}^{(L)} & \cdots & \mu_{1,M}^{(L)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{d_{pe},1}^{(L)} & \cdots & \mu_{d_{pe},M}^{(L)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

将用户需求模糊化后, 即可根据接下来的模糊推理原理生成符合用户需求的船舶性能数值。

2.2 推理系统构建

模糊推理系统主要包括: 模糊化、模糊推理和清晰化。模糊化步骤已在用户需求建模过程中完成, 本小节重点说明模糊推理与清晰化过程。对船舶性能数值的模糊推理则主要依据专家设定的模糊规则。对于离散的模糊隶属度值, 如 $U^{(S)}$ 和 $U^{(L)}$, 其模糊规则可采用表格形式表示, 如表 4 所示。在表 4 中, $T(L)$ 表示用户需求中语言变量的模糊集合, $T(S)$ 表示用户需求中船舶性能数值的模糊集合, 表格中间部分为对应推理的符合用户需求的船舶性能数值的模糊集合 $T(C)$, 且 $T(C) = T(S) \circ T(L)$ 。

表 4 推理船舶性能数值时的模糊规则

Table 4 Fuzzy rules used in the inference of ship performance values

T(S)	T(L)				
	NB	NM	ZE	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	ZE
NM	NB	NB	NM	ZE	PM
ZE	NB	NM	ZE	PM	PB
PM	NM	ZE	PM	PB	PB
PB	ZE	PM	PB	PB	PB

对于用户需求中某一个性能需求的语言变量的模糊量 $\mu_j^{(L)} = [\mu_{j,1}^{(L)}, \dots, \mu_{j,M}^{(L)}]$ ($j \in \{1, 2, \dots, d_{pe}\}$) 与船舶性能数值的模糊量 $\mu_j^{(S)} = [\mu_{j,1}^{(S)}, \dots, \mu_{j,M}^{(S)}]$ ($j \in \{1, 2, \dots, d_{pe}\}$), 根据表 4 的模糊规则, 推理出符合用户需求的船舶性能数值的模糊量 C' 为

$$C' = (\mu_j^{(L)} \text{ and } \mu_j^{(S)}) \circ R \quad (12)$$

式中: “ \circ ” 表示模糊合成运算; “AND” 表示模糊算子; R 为模糊蕴涵关系, 可根据式 (13) 计算。

$$R = \bigcup_{h=1}^H R_h \quad (13)$$

$$R_h = (L_h \text{ AND } S_h) \rightarrow C_h \quad (14)$$

式中： $H=25$ 表示模糊规则的数量；“ \rightarrow ”表示模糊蕴涵运算。

将用户需求中的每项船舶性能数值推理一遍，可以获得每项都符合用户对应需求的船舶性能数值的模糊隶属值矩阵

$$U^{(C)} = \begin{bmatrix} \mu_{1,1}^{(C)} & \cdots & \mu_{1,M}^{(C)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{d_{pe},1}^{(C)} & \cdots & \mu_{d_{pe},M}^{(C)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

模糊推理系统得以获得广泛应用的另一个原因是其具有语义可解释性。语义可解释性是指可以为推理的结果提供语义解释，也即解释推理的过程。在模糊推理系统中，语义解释主要以模糊规则的形式呈现，如表 4 中的每个单元格都表示一个模糊规则，以第一行第一列 ($T(L)=NB, T(S)=NB$) 为例，其对应的模糊规则表示为

IF 需求的船型性能 is NB
and 语言变量 is NB,
THEN 符合需求的船舶性能 is NB (16)

这种 IF-THEN 形式的模糊规则以类似于人做推理的过程为结果提供了语言可解释性。

最后将推理的模糊隶属度值清晰化为具体的船舶性能数值。清晰化是指将模糊空间内的隶属度值重新映射为数值空间。常用的一种清晰化方法为加权平均法，其计算公式如下：

$$Pe_j^{(Infe)} = \frac{\sum_{m=1}^M c_{j,m} \mu_{j,m}}{\sum_{m=1}^M \mu_{j,m}} \quad (17)$$

式中：上标 (Infe) 表示该性能数值是推理 (inference) 后得到的性能数值，用以和参考的现有的母型船参数区分； $j \in \{1, 2, \dots, d_{pe}\}$ 为第 j 个船舶性能数值； $c_{j,m}$ 与 $\sigma_{j,m}$ 为模糊化过程中计算完成的高斯隶属函数超参数。于是，将每个船舶性能数值的隶属度值 $\mu_j^{(C)} = [\mu_{j,1}^{(C)}, \dots, \mu_{j,M}^{(C)}]$ ($j \in \{1, 2, \dots, d_{pe}\}$) 按照式 (17) 清晰化，则每个船舶性能数值都符合用户对应需求的船舶性能数值可表示为

$$Pe^{(Infe)} = (Pe_1^{(Infe)}, Pe_2^{(Infe)}, \dots, Pe_{d_{pe}}^{(Infe)})^T \quad (18)$$

3 船型设计参数推理

经过第 2 节的推理，已生成了船舶性能数值符合用户需求的船舶性能数值。考虑到用户提出要求时主要针对单项船舶性能数值，而船型概念方案中却以全部船型设计参数为主。于是接下来，一是要实现对船型概念方案从性能数值到设计参数的变换 (第 3.1 节)，二是要对变换后的船型设计参数执行二次推理 (第 3.2 节)，综合用户

对整体船型的需求，如图 4 所示。

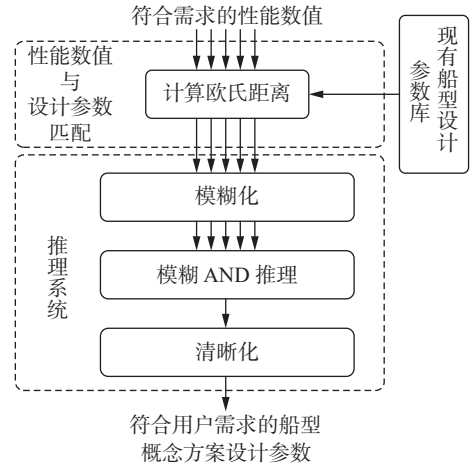


图 4 船舶设计参数推理流程图

Fig. 4 The workflow of inference process for ship design parameters

3.1 船型设计参数匹配

首先，将推理得到的船舶性能数值 $Pe^{(Infe)}$ 中的每个性能数值与现有船舶性能数值库 $Pe^{(Ref)}$ 中对应性能数值根据欧氏距离进行匹配，获得现有船舶性能数值库中与符合用户需求的性能数值最接近的样本序号 i 。对 d_{pe} 个船舶性能数值依次进行匹配，则现有船舶性能数值库 $Pe^{(Ref)}$ 中与各性能数值 $Pe_j^{(Infe)}$ ($j \in \{1, 2, \dots, d_{pe}\}$) 最匹配的样本序号 I 为

$$I = (i_1, i_2, \dots, i_{d_{pe}})^T \quad (19)$$

式中： $i_j \in \{1, 2, \dots, N_{pe}\}$ ， $j \in \{1, 2, \dots, d_{pe}\}$ ，且满足下列条件：

$$\|Pe_j^{(Infe)} - Pe_{i_j,j}^{(Infe)}\| = \min\{\|Pe_j^{(Infe)} - Pe_{i',j}^{(Infe)}\| \mid i' = 1, \dots, N_{pe}\} \quad (20)$$

然后，由船舶性能数值到船型设计参数的变换。在现有船舶的船型数据库中，从单个船型的性能数值视角下，多个不同组合的设计参数可具有近似的单项性能数值。于是，假设每个船舶性能数值对应 S 条船型设计参数，根据匹配得到的样本序号 I ，所有符合用户需求的船型设计参数可表示为

$$Pa^{(Com)} = \begin{bmatrix} Pa_{i_1,1}^1 & \cdots & Pa_{i_1,d_{pe}}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Pa_{i_S,1}^S & \cdots & Pa_{i_S,d_{pe}}^S \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中： $Pa_j^s = [Pa_{i_j,1}^s, Pa_{i_j,2}^s, \dots, Pa_{i_j,d_{pe}}^s]^T$ ， $j \in \{1, 2, \dots, d_{pe}\}$ ， $s = 1, 2, \dots, S$ 。因此符合用户单项需求的船型设计参数可有 $K = S^{d_{pe}}$ 条，但存在大量重复的设计参数，实际有效的船型设计参数数量仍然有限，同

时不同的用户需求对应匹配得到的船型设计参数数量有所不同,导致匹配所花费的时间有所不同。

由此实现了船舶性能数值到船型设计参数的变换匹配,考虑到推理的船舶性能数值一定符合用户需求,与其最匹配的船型设计参数同样能符合用户的需求,具体的误差分析将在第4节详细说明。由于性能数值推理过程中单独处理每个船舶概念设计性能数值,导致推理得到的船型设计参数 $\mathbf{Pa}^{(\text{Com})}$ 只符合用户的单项要求。通过执行二次推理,综合考虑各项性能要求,获得符合用户各项需求的船舶设计参数,同时在继承了处理的用户需求模糊性的基础上,综合考虑船舶性能数值模糊推理系统的推理误差与匹配系统产生的误差,降低这些误差对最终推理结果的影响。

3.2 推理系统构建

二次推理过程同样基于模糊集理论,包括三个部分:模糊化、模糊推理与清晰化。船型设计参数 $\mathbf{Pa}^{(\text{Com})}$ 的模糊化,同样采用式(9)的高斯隶属函数,隶属函数中的超参数 $c_{j,m}$ 与 $\sigma_{j,m}$ 则通过FCM算法基于现有船型设计参数库 $\mathbf{Pa}^{(\text{Ref})}$ 快速地完成初始化。于是,对任一 \mathbf{Pa}_{ij}^k ($k=1, \dots, K; j \in \{1, 2, \dots, d_{pe}\}$), 模糊化后表示为

$$U_{ij}^k = [\mu_{i,j,1}^k, \mu_{i,j,2}^k, \dots, \mu_{i,j,d_{pa}}^k] \quad (22)$$

式中: $\mu_{i,j}^k = [\mu_{i,1}^{j,j}, \dots, \mu_{i,M}^{j,j}]$ 。

在模糊推理中,模糊算子“AND”常用在模糊规则一个条件中多个变量的组合,以综合考虑多个变量的条件要求。因此,在每个单项船型设计参数都满足用户需求的前提下,使用模糊算子“AND”可一起综合考虑全部船型设计参数要求,从而获得各项设计参数都符合用户需求的船型设计参数。计算过程如式(23)所示。

$$\mu_{j',k,m}^{(\text{Infe})} = \min\{\mu_m^{i_1,j'}, \mu_m^{i_2,j'}, \dots, \mu_m^{i_{d_{pe}},j'}\} \quad (23)$$

式中: $j' \in \{1, 2, \dots, d_{pa}\}$ 表示第 j' 个船型设计参数, $k=1, \dots, K$ 为 $\mathbf{Pa}^{(\text{Com})}$ 的第 k 条船型设计参数。

于是,对每条船型设计参数执行二次模糊推理后,船型设计参数的隶属度值表示为

$$U^{(\text{Infe})} = \begin{bmatrix} \mu_{1,1}^{(\text{Infe})} & \dots & \mu_{1,d_{pa}}^{(\text{Infe})} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{K,1}^{(\text{Infe})} & \dots & \mu_{K,d_{pa}}^{(\text{Infe})} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中: $\mu_{k,j'}^{(\text{Infe})} = [\mu_{j',k,1}^{(\text{Infe})}, \dots, \mu_{j',k,M}^{(\text{Infe})}]$ 。

最终执行清晰化,将推理所得的隶属度值映射为船型设计参数。清晰化过程同样采用式(17)的加权平均法,将模糊空间内的隶属度值重

新映射为数值空间。清晰化后符合用户各项需求的船型概念方案设计参数为

$$\mathbf{Pa}^{(\text{Infe})} = \begin{bmatrix} \mathbf{Pa}_{1,1}^{(\text{Infe})} & \dots & \mathbf{Pa}_{1,d_{pa}}^{(\text{Infe})} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Pa}_{K,1}^{(\text{Infe})} & \dots & \mathbf{Pa}_{K,d_{pa}}^{(\text{Infe})} \end{bmatrix} \quad (25)$$

于是,在构建的船舶性能数值库与船型设计参数库的基础上,首先基于模糊集理论实现了对模糊用户需求的建模,并根据专家设定的模糊规则,可解释地推理出符合用户单项需求的船舶性能数值,之后执行二阶段推理,综合考虑用户对各项船舶性能数值的要求,并最终生成符合用户各项需求的船型设计参数作为智能模糊推理系统输出的船型概念方案。

经过对比可见,船型设计参数推理系统与第2.2节的性能数值推理系统有3个关键的不同点。

1) 推理原理不同:性能数值推理系统是基于模糊规则库的模糊推理,而设计参数推理系统是基于模糊算子“且”(即AND)的模糊推理;

2) 推理系统的输入不同:性能数值推理系统的输入是包含模糊语言变量的用户需求,而设计参数推理系统的输入是多种设计参数组合而成的一条条概念方案;

3) 适用场景不同:性能数值推理系统适用于同时包含模糊语言变量和具体数值的场景,而设计参数推理适用于仅有具体数值但数值之间存在“且”的逻辑关系。

4 算例验证

模糊推理系统为生成模型,不包含训练过程,可按如下过程验证。相关参数设定完备后,将模拟的用户需求作为输入算例,测试系统各部分工作过程,验证输出结果的有效性与参数敏感性。

4.1 算例描述

本文针对某型船舶的快速概念方案设计,收集了公开的船型数据与仿真的模型船型数据,作为构建数据库的基础。在收集的数据中,一共有50条现有船舶的船舶性能数值和船型设计参数,但缺少对应的语言变量及不同语言变量对应的船型设计参数。

考虑到真实应用场景中多数用户需求中的模糊语言变量为“大于”,而“等于”可视为满足用户需求的最低限度,同时也是一种极限情况,若本文提出的模糊推理系统能够在该极限情况下取得优异的表现,在真实应用场景中也可取得优异的表现。于是,在智能模糊推理系统的推理过程

中,将部分现有船舶性能数值作为用户需求中的船舶性能数值,并将需求中的语言变量全部设置为“等于”,如表 5 所示,以此作为智能模糊推理系统的验证算例,其对应的船型概念方案设计参数如表 6 所示,其中船长和船宽单位为 m,倾斜角单位为 ($^{\circ}$)。通过对比模糊推理系统生成的船型设计参数与数据库中的对应概念方案之间的差距,衡量模糊推理系统的有效性。

表 5 模拟的用户需求作为智能模糊推理系统的算例

Table 5 The simulated user demands are used as examples of intelligent fuzzy inference system

算例	船舶性能	性能数值	语言变量
1	初稳性	1.12	“等于”
	快速性	25	“等于”
	操纵性	8.4	“等于”
	耐波性	5.8	“等于”
2	初稳性	1.25	“等于”
	快速性	27	“等于”
	操纵性	8.6	“等于”
	耐波性	6.2	“等于”

4.2 数据库构建

在智能模糊推理系统开始生成船型概念方案前,先构建推理过程需要的数据库。在所收集的全部船型数据中,以上两个作为算例的船型数据除外,其余船型数据用于构建对应的船型设计参数库(详细说明见第 1.1 节)和船舶性能数值库(详细说明见第 1.2 节)。数据库内存在多条船型设计参数具有相同船舶性能数值的情况,即相同的性能数值对应多条船型的设计参数,参数间有细微差别。本研究通过模糊 C 均值的方法对这些设计参数向量的高维特征进行聚类,特征上表达出显著差异,根据式(19)和式(20),求得当前性能数值下最符合用户需求的某一条船型设计参数,而其他具有相同性能数值的船型设计参数则不会参与推理计算过程。最终,船舶性能数值库 $Pe^{(Ref)}$ 中包含 $N_{Pe} = 50$ 条船型的 $d_{Pe} = 4$ 个性能数值的数据;船型设计参数库 $Pa^{(Ref)}$ 中包含 $N_{Pa} = 50$ 条船型的 $d_{Pa} = 25$ 个设计参数的数据。

4.3 船舶性能数值推理

以表 5 所示的两个算例作为船舶性能数值推理系统的输入,观察推理的船舶性能数值与用户需求的船舶性能数值匹配情况。

推理结果如表 7 所示。在用户对各船舶性能

表 6 模拟的用户需求对应部分船型概念方案设计参数

Table 6 Part of design values of ship hull conceptual schemes corresponding to the simulated user requirements

算例	对应船型序号	船型设计参数	数值	
1	1	船长	145.3	
		船宽	16	
		
		舷侧倾斜角7	12.45	
	...	...	舷侧倾斜角8	12.75
		
			船长	133.1
			船宽	15.9
2	2	...	...
		舷侧倾斜角7	11.21	
		舷侧倾斜角8	13.39	
		

			船长	170
			船宽	15.7
		
1		1	...	...
			舷侧倾斜角7	11.29
			舷侧倾斜角8	14.03
		
2	...	...	...
		船长	135.4	
		船宽	15.9	
		
	2	2	...	...
			舷侧倾斜角7	12.49
			舷侧倾斜角8	13.59
		

要求中的语言变量为“等于”的情况下,船舶性能数值推理系统推理的船型概念方案性能数值基本上与用户需求的船舶性能值近似相等,但仍存在一定的浮动,表明单项船舶性能数值推理系统能够完成用户需求中模糊性和不确定性的建模,并推理出与需求相匹配的船型概念方案性能数值。在用户对各船舶性能要求中的语言变量为“大于”的情况下,推理的多数性能数值满足需求,但当需求接近或超过现有船舶性能数据库中的最大数值时,推理系统则难以根据现有的数据库推理出“大于”所需的性能数值。

4.4 船型设计参数推理

将船舶性能数值推理系统推理得到的概念方案性能数值(表 7)作为船型设计参数推理系统的输入,执行船型设计参数匹配及其推理,观察推理的船型设计参数与所期望能满足用户需求的船型设计参数匹配情况。

推理结果如表 8 所示。在船舶性能数值符合

表 7 智能模糊推理系统计算的船舶性能数值

Table 7 The ship performance values calculated by intelligent fuzzy inference system

算例	船舶性能	用户需求	推理数值	
			“等于”	“大于”
1	初稳性	1.12	1.13	1.23
	快速性	29	28.67	28.7
	操纵性	8.4	8.42	8.5
	耐波性	5.8	5.86	5.97
2	初稳性	1.25	1.13	1.23
	快速性	27	27.6	28.69
	操纵性	8.6	8.3	8.49
	耐波性	6.2	5.8	6.0

用户需求的情况下,推理的船型设计参数与期望的设计参数仍近似相等,表明了船型设计参数推理系统可以正确地生成与需求相符的船型概念方案设计参数。对比算例 1 和算例 2 中船型设计参数的推理偏差,当用户需求的船舶性能较高时,由于现有船型数据库中满足用户需求的参考船型方案数量较少,导致智能推理系统推理的船型设计参数偏差更大。

4.5 系统性能分析

通过两个标准衡量智能模糊推理系统生成船型概念方案的性能:推理偏差与推理耗时。

对于具有的 12 组用户需求及其对应的船型概念方案,采用 6 折交叉验证实验,将 12 组数据随机分为 6 对,依次选中其中 1 对数据作为模拟的用户需求及其船型概念方案,同时其余 5 对数据作为模拟的现有船型数据库。

首先,评估模糊推理模型的推理偏差。以欧氏距离计算生成的每条概念方案与现有船型设计参数的距离,作为衡量推理偏差 *bias* 的指标:

$$bias = \frac{1}{d_{Pa}} \left\| \mathbf{Pa}^{(Infe)} - \mathbf{Pa}^{(Ref)} \right\|_2 \quad (26)$$

测试结果如图 5 所示,横坐标 G1~G12 分别代表第 1 组至第 12 组,依次表示逐渐提高的用户需求,从图中结果可得,模糊推理系统所得的船型概念方案中平均每个设计参数数值的浮动偏差在 2.5%~3.5% 之间,以船长为例,用户的期望设计数值为 145.3 m,推理所得的设计数值平均后在 140~150.4 m 浮动,基本达到设计要求,表明模糊推理系统可有效地生成船型概念方案。

其次,评估模糊推理模型的推理耗时。模糊推理的时长同样重要,若推理时间过长,则失去了智能模糊推理快速设计船型概念方案的意义。

表 8 智能模糊推理系统计算的船型设计参数

Table 8 Part of design values of ship hull design parameters calculated by intelligent fuzzy inference system

算例	船型设计参数	期望数值	推理数值	
			“等于”	“大于”
1	船长	145.3	147.2	159.23
	船宽	16	16	16

	舷侧倾斜角7	12.45	11.25	11.82
	舷侧倾斜角8	12.75	13.54	13.63

2	船长	133.1	137.9	143.61
	船宽	15.9	16	16

	舷侧倾斜角7	11.21	11.72	11.81
	舷侧倾斜角8	13.39	13.28	13.71

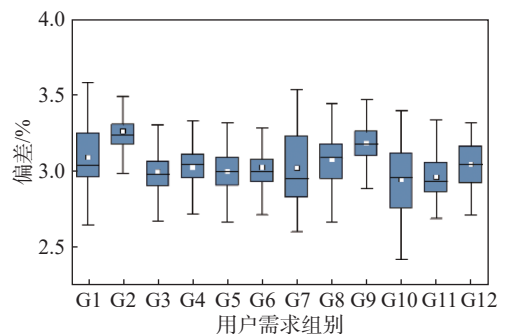


图 5 智能模糊推理结果有效性分析

Fig. 5 The analysis of effective of results generated by intelligent fuzzy inference system

若在推理时将用户对每组船舶性能需求的语言变量一致地设置为“等于”,计算时间并不会出现明显差异,考虑到真实的用户需求中对船舶性能数值的多数要求是“大于”一个数值,因此在推理时将用户需求的语言变量设置为“大于”的情况下观察智能模糊推理的耗时。从图 6 中可见,一阶段的推理速度较快,二阶段的推理耗时明显更

高。根据第 3.1 节的描述,在性能数值到设计参数的匹配过程中,由于多组不同的设计参数会取得近似的单项性能数值,导致用户要求的性能数值较小时,现有船型数据库中“大于”该较小的性能数值对应的设计方案数量也多,由此推理系统获得了大量设计参数组合,同时也耗费了更多的计算资源与时间。而用户要求的性能数值较大时,现有船型数据库中比要求的性能数值还“大”的船型设计方案较少,因此推理系统获得的设计参数组合较少,所需的计算资源和时间也较少。同时由于现有数据库中各种船型的数据分布不均匀,专家设定的测试组别也并不均匀,导致匹配过程的耗时波动较大,但总体上仍呈现出耗时随着用户要求的性能数值提高而降低的趋势。

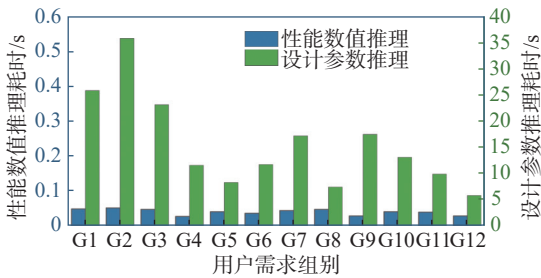


图 6 智能模糊推理耗时

Fig. 6 The time costs of intelligent fuzzy inference processes

5 结 语

本文提出了一种用于快速生成船型初始概念方案的智能模糊推理技术。该技术基于现有船型数据库与专家知识经验库,量化用户需求中的模糊性,以易于理解的方式有效地生成符合用户需求的船型概念方案,有助于解决船型设计过程耗时、耗工的问题。模糊推理系统中的船舶性能数值和船型设计参数分别于不同的数域中进行推理,在单项性能要求和整体设计要求上满足用户,实现了多层次的推理效果。最后,通过模拟实验验证了智能模糊推理系统生成的船型概念方案的有效性,偏差仅在 3.5% 以内,且计算的时长在 30 s 以内。因此,本文的模糊推理系统是可行且高效的,符合正常的使用要求。

由于在模糊推理过程中聚焦于满足用户的需求,而忽视了各设计参数之间的深度耦合关系,因此,在后续的研究中,将探索如何改进优化方法,进一步降低模糊推理生成的船型概念方案的误差。另一方面,本文所提出的模糊推理系统主要致力于解决用户需求中的模糊性与不确定性,会使得用户需求中性能要求的边界值产生一定的浮动与松弛,导致最终推理出的结果无法全部满

足用户初始提出的硬性边界值要求,在后续的研究中,将添加衡准模块弥补这方面不足。

参考文献:

- [1] 赵良才,鲁泳,刘建峰. 计算机辅助船舶轮机舱概念设计[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2001, 15(4): 6-10.
ZHAO L C, LU Y, LIU J F. A developed CACD system for ship engine room[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute (Natural Sciences), 2001, 15(4): 6-10 (in Chinese).
- [2] 刘滢昊,张韩西子,李敢,等. 应急通信保障船的需求分析与概念设计[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(8): 187-189.
LIU Y H, ZHANG H X Z, LI G, et al. Conceptual design of emergency communication support ship and its requirement analysis[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(8): 187-189 (in Chinese).
- [3] 岳玉帅,张航,白旭,等. 多海域自适应三体无人监测船概念设计[J]. 船舶标准化工程师, 2021, 54(6): 42-48.
YUE Y S, ZHANG H, BAI X, et al. Conceptual and general design of an unmanned survey trimaran for adaptive navigation in multi-sea[J]. Shipbuilding Technology Research, 2021, 54(6): 42-48 (in Chinese).
- [4] 郭一丁,郭健,谭美. 乏燃料运输船概念设计研究[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(10): 70-74.
GUO Y D, GUO J, TAN M. Research on conceptual design of spent fuel transport ship[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(10): 70-74 (in Chinese).
- [5] 郭亮,田大肥,宫经海,等. 海上卫星发射船的概念设计[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(5): 9-12.
GUO L, TIAN D F, GONG J H, et al. A concept design of ships for satellite sea launching[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(5): 9-12 (in Chinese).
- [6] 朱天明,武春龙,周有城,等. 基于 TRIZ 功能建模的扩展碰撞预警系统数字孪生概念方案构建[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 337-351.
ZHU T M, WU C L, ZHOU Y C, et al. Construction of extended collision warning system digital twin conceptual scheme based on TRIZ functional modeling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 337-351 (in Chinese).
- [7] 景旭文,赵良才,易红. 产品动态全息概念设计模型的研究[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2002, 16(5): 61-66.
JING X W, ZHAO L C, YI H. Research on product conceptual design based on dynamic and holographic model[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute (Natural Science Edition), 2002, 16(5): 61-66 (in Chinese).
- [8] 景旭文,易红,赵良才. 基于数据挖掘的产品概念设计建模研究[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(11): 950-954, 1000.

- JING X W, YI H, ZHAO L C. Product conceptual design modeling based on data mining[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2003, 9(11): 950–954, 1000 (in Chinese).
- [9] LJULJA, SLAPNIČAR V, GRUBIŠIĆ I. Multi-attribute concept design procedure of a generic naval vessel[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 59(3): 1725–1734.
- [10] 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(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(1): 7–12 (in Chinese).
- [11] 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).
- [12] 朱英富, 熊治国, 袁奕, 等. 现代水面舰船技术发展思考[J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(5): 1–8.
- ZHU Y F, XIONG Z G, YUAN Y, et al. Thoughts on development of modern ship technology[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(5): 1–8 (in Chinese).
- [13] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338–353.
- [14] 曾广武, 郝刚. 设计方案优选和排序中的模糊综合评判方法[J]. *中国造船*, 1987(3): 48–57.
- ZENG G W, HAO G. The fuzzy asserting criteria method for preferred rank and choice of design schemes[J]. *Shipbuilding of China*, 1987(3): 48–57 (in Chinese).
- [15] 林少芬, 李瑰贤, 陈映秋, 等. 散装货船模糊综合安全性评估的实现方法[J]. *船舶工程*, 2000(1): 59–62.
- LIN S F, LI G X, CHEN Y Q, et al. Fuzzy synthesis safety evaluation for bulk carrier[J]. *Ship Engineering*, 2000(1): 59–62 (in Chinese).
- [16] 周奇, 陈立, 周涛涛, 等. 基于组合赋权法的船型方案模糊综合评判[J]. *船舶*, 2013, 24(6): 4–7.
- ZHOU Q, CHEN L, ZHOU T T, et al. Fuzzy synthetic evaluation of ship form design based on combination weighting method[J]. *Ship & Boat*, 2013, 24(6): 4–7 (in Chinese).
- [17] HOLTROP J, MENNEN G G J. An approximate power prediction method[J]. *International Shipbuilding Progress*, 1982, 29(335): 166–170.
- [18] BEZDEK J C, EHRLICH R, FULL W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm[J]. *Computers & Geosciences*, 1984, 10(2-3): 191–203.

相关论文

- [1] 谢伟, 刘祖源, 冯佰威, 等. 知识工程技术在船体设计中的研究进展与展望[J]. *中国舰船研究*. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04046>
- [2] 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*. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03855>
- [3] 于群, 李鹏, 郑强, 等. 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[J]. *中国舰船研究*. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04050>
- [4] 李金成, 刘瞰, 令波, 等. 基于两阶段多目标智能设计方法的船舶动力舱设备布局优化研究[J]. *中国舰船研究*. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03958>
- [5] 孙寒冰, 白济维, 武超, 等. 滑行艇穿浪艏型线智能优化设计[J]. *中国舰船研究*. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03799>
- [6] 龚俊斌, 王鹏九, 汪皓, 等. 基于智能模糊推理的 UUV 艇型参数生成方法研究[J]. *中国舰船研究*. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04063>
- [7] 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. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.2017.05.003>