

水面舰船风浪环境适应性内涵及 综合评估方法研究

吴玥¹, 敖晨阳¹, 刘云生¹, 孙树政²

(1.海军研究院, 北京 100161; 2.哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 首先对水面舰船风浪环境适应性的内涵进行了分析, 重点研究了风浪环境对舰船综合航行性能及作战使用效能的影响。考虑到实际风浪环境中舰船各项总体性能指标是一个复杂的体系, 各指标之间既具有矛盾性又具有一致性, 是一个多目标、多变量的复杂系统。提取了跟风浪环境相关性较强的船体性能指标, 建立了水面舰船风浪环境适应性多级综合评价指标体系。进而应用多级模糊综合评价模型, 建立了舰船风浪环境适应性评估方法, 对某深V船型和圆舦船型的风浪环境适应性进行评估, 深V船型评估结果为66.95, 圆舦船型为50.5, 验证了评估模型的合理性。采用4种不同评判矩阵对两船风浪环境适应性进行了评估, 结果表明, 评判矩阵的选取对评估结果有较大影响。

关键词: 水面舰船; 环境适应性; 评价指标体系; 模糊综合评估; 评判矩阵

中图分类号: TJ8; TB115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2021)09-0050-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.09.008

Concept and Evaluating Method Investigation of Wind & Wave Environmental Adaptability of Warship

WU Yue¹, AO Chen-yang¹, LIU Yun-sheng¹, SUN Shu-zheng²

(1. Naval Research Academy, Beijing 125000, China; 2. College of Shipbuilding Engineering,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: Environmental adaptability is an important technical performance index of warship. At present, the understanding of the concept of the environmental adaptability of warship is not enough. Firstly, the concept of the environmental adaptability of warship is investigated. The environmental adaptability of surface ship is mainly aimed at the overall performance of surface ship in the actual wind and wave environment, focusing on the influence of wind and wave environment on the comprehensive navigation performance and operational efficiency of the ship. In the actual wind and wave environment, the overall performance index of a ship is a complex system, which is a multi-objective and multi-variable complex system with contradiction and

收稿日期: 2021-02-02; 修订日期: 2021-03-03

Received: 2021-02-02; Revised: 2021-03-03

基金项目: 国家科技重大专项(2017-V-0002-0051); 国防科研项目(GXTC-A-20630443)

Fund: National Science and Technology Major Project (2017-V-0002-0051), National Defense Research Program (GXTC-A-20630443)

作者简介: 吴玥(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为舰船轮机装置。

Biography: WU Yue (1989—), Male, Master, Engineer, Research focus: marine instruments of ships.

通讯作者: 孙树政(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为船舶风浪环境适应性。

Corresponding author: SUN Shu-zheng (1982—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: environmental adaptability of ships.

引文格式: 吴玥, 敖晨阳, 刘云生, 等. 水面舰船风浪环境适应性内涵及综合评估方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 050-056.

WU Yue, AO Chen-yang, LIU Yun-sheng, et al. Concept and evaluating method investigation of wind & wave environmental adaptability of warship[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(9): 050-056.

consistency. In this paper, the multi-level comprehensive evaluation index system of ship's wind and wave environmental adaptability is established, and then the multi-level fuzzy comprehensive evaluation model is applied to establish the evaluation method of ship's wind and wave environmental adaptability. Taking a deep-V ship and a round bilge ship as an example, the evaluating result of deep-V ship is 66.95, and the round bilge ship is 50.5, which shows the reasonable of the evaluating model. Four different judge matrixes are used to evaluate the environmental adaptability of the two ships, and the evaluate results show a big influence.

KEY WORDS: warship; environmental adaptability; evaluating index system; fuzzy comprehensive evaluation; judge matrix

环境适应性是一个很广义的概念^[1],是指产品在服役过程中的综合环境因素作用下能实现所有预定的性能和功能且不被破坏的能力,是产品对环境适应能力的具体体现,是一种重要的质量特性。风浪环境适应性是水面舰船重要的技战术指标之一,然而长期以来,人们对其内涵的认识并不充分。从使用的角度来说,水面舰船环境适应性应该可以分为两个方向:1)主动利用环境,即根据不同气象、海浪、地理等环境特点,依据不同环境的需求推动新型装备的研发;2)被动适应环境,目的是使平台在实际作战使用环境下具有优良的环境适应能力,研究新型控制技术提高平台在恶劣环境中的稳定性,以适应不同环境的需求。

由于船舶风浪环境适应性的复杂性,研究该问题首先要对其内涵有更加清晰的认识,同时需要建立合理的指标体系和适当的评价方法。然而船舶风浪环境适应性评价是一个复杂的多目标过程,对于复杂的多目标综合评估系统来说,由于评估对象各目标涉及的范围不同,考虑问题的角度也各异。这些目标一般都具有不同的性质,加之问题中既有定量信息,又有定性信息,从而使得多目标综合评价问题往往极为复杂。

关于船舶在波浪环境中综合性能的评价,多年来许多学者针对该领域开展了大量研究工作。焦甲龙等^[2]基于模糊数学,建立了舰船风浪环境适应性评价指标体系和评估方法。赵峰等^[3]针对舰船环境适应性的复杂性和多学科特点,建立了舰船航行性能MDO系统。应荣镛、张炜灵等^[4-5]针对舰船在大风浪中的航行性能和航行安全性,建立了舰船风浪中航行安全性等级,并分析了环境适应性评价方法。杨松林^[6]采用遗传算法和模糊优化方法,以静水中快速性和操纵性为目标,进行了船型模糊综合优化,并用于大型中速船的设计中。Munehiko Minoura^[7]通过研究某集装箱船和散货船实际航行过程中测量的响应数据,提出了一种研究耐波性评估的随机理论模型,用于评估船舶耐波性的长期统计特性。熊文海等^[8]采用模糊综合评价及建立耐波性评价方程等方法,对船舶耐波性、操纵性评价指标体系开展了研究,建立了评价指标体系和评估方法。

目前水面舰船环境适应性的评价方法包括:专家

评分法、层次分析法、MDO方法、模糊综合评估方法等。其中,专家评分法主观人为因素对评价结果影响较大;层次分析法应用广泛,能够体现决策思维的基本特征,但同样会有人为因素的干预;MDO方法能够建立不同学科之间的复杂关系,并作出科学评判,适用于大型复杂系统的评估与优化设计;模糊综合评估方法根据隶属度理论,把定性评价转化为定量评价,能够较好地降低人为因素的影响,以及模糊、难以量化的问题,在船舶工程领域、船舶适航性评估、装备环境适应性评价等工程领域得到广泛应用^[9-11]。

文中基于模糊数学理论,建立了水面舰船风浪环境适应性多级模糊综合评估模型。首先针对某船构建了风浪环境适应性评价指标体系,并采用模糊综合评判方法,对该船风浪环境适应性进行了评估分析。同时,为了研究不同评判矩阵对综合评估结果的影响,采用了4种不同评判矩阵分别进行评估,并对评估结果进行了分析。

1 风浪环境适应性的内涵

环境适应性通常用来描述装备在一定范围的环境变量中能够达到的装备适应能力水平,可以通过一组定量或者定性的指标来描述其适应能力。环境适应性一般具有以下3个特点:

1)唯一性。装备对环境适应性的要求是唯一的,就是适应环境。

2)复杂性。装备在使用过程中遭遇的环境条件是非常复杂的,对装备环境适应性的要求是应能适应设计要求范畴内所有能够遇到的复杂环境。

3)定量和定性的组合。装备环境适应性指标及要求有些可以定量表达,有些无法定量表达,可以认为其具有半定量特征,是定量和定性的组合。

水面舰船平台在服役期间,将遭遇风、浪、流、海冰、温度、盐度等各种环境因素,其中对平台总体性能起重要作用的主要是风、浪、流的影响,也是与水动力学领域相关的研究内容,因此水面舰船风浪环境适应性研究的主要是对风、浪、流环境的适应性。水面舰船风浪环境适应性的主要研究目标是大幅提升水面舰船平台在实战海洋风浪环境中的适应能力

和作战效能。研究内容包括实战海洋环境的模拟、水面舰船平台在海洋环境中的真实响应以及水面舰船平台环境适应性评价指标体系和评估方法,同时,根据环境适应性评估结果,指导水面舰船平台的设计和使用。

2 综合评估模型的建立

建立水面舰船风浪环境适应性综合评估模型,首先需要建立水面舰船风浪环境适应性多级综合评价指标体系,进而建立多级综合评估的数学描述模型。模糊综合评估模型的建立一般首先要建立因素集、权重集和备择集,进而对各级指标进行模糊综合评判,最终给出综合评估结果。其中因素集即为评价的各项指标,权重集为各项指标的评判权重系数,备择集为各项指标的评价结果。

1) 因素集。首先建立评估模型的因素集,假设元素 $u_i (i=1,2,\dots,n)$ 为第一层指标中的第 i 个因素,它由第二层指标中的 m 个子因素决定,即 $u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}\}$, 其中 $u_{ij} (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m)$ 是第 i 个因素的第 j 个子因素,则评估模型的因素集为:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \tag{1}$$

2) 权重集。权重集是根据各因素集的重要程度,赋予每一因素相应的权数,进而可以得到各级因素的权重集。假设第一层因素的权重集为:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n) \tag{2}$$

其中,元素 $a_i (i=1,2,\dots,n)$ 是第一层因素 u_i 的权数。同理可知,第二层因素的权重集为:

$$A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}\} \tag{3}$$

对于评价过程中各指标权数的确定,可以采用专家评分法、层次分析法、模糊统计和二元对比法等。

3) 备择集。所有评价指标可能给出的所有评价结果的集合称为备择集,因而备择集只有一个,假设为:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\} \tag{4}$$

其中 $v_k (k=1,2,\dots,p)$ 是某个指标可能给出的第 k 个评价结果。

4) 一级模糊综合评价。评估模型包含多级评价指标,高一级的因素是由低一级的子因素决定的。因此对于某一因素的评判,首先要对低一级的因素进行

综合评判。文中建立的是二级综合评估模型,因此首先要对第二层次的因素进行评判,即给出一级模糊综合评判矩阵。假设考虑第二层子因素 u_{ij} 作出评判结果 v_k 的隶属度为: $r_{ijk} (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m; k=1,2,\dots,p)$, 则第二层评判矩阵可表示为:

$$R_i = \begin{Bmatrix} R_{i1} \\ \vdots \\ R_{im} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_{i11} & \cdots & r_{i1p} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{im1} & \cdots & r_{imp} \end{Bmatrix} \tag{5}$$

其中第 j 行表示考虑第二层第 j 个子因素 u_{ij} 的评判集。于是,一级模糊综合评价集为:

$$B_i = A_i \cdot R_i \tag{6}$$

5) 二级模糊综合评价。建立了一级模糊综合评价集后,可以进一步建立二级模糊综合评价集。二级模糊综合评价是对第一层因素 $u_i (i=1,2,\dots,n)$ 的综合评判。可见一级模糊综合评价集 B_i 也就是二级模糊综合评判的评判矩阵 R , 即: $R = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}^T$ 。因此,二级模糊综合评判集为:

$$B = A \cdot R \tag{7}$$

评估流程如图 1 所示。

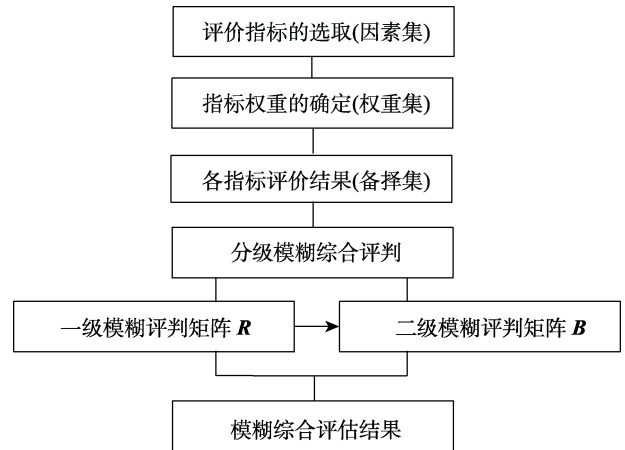


图 1 模糊综合评估流程
Fig.1 Flow chart of the evaluation process

3 算例分析

文中以某 4000 t 级深 V 单体复合船和圆舭船为算例,对两船在六级海况下、以航速 24 节航行时的风浪环境适应性进行评价。两个船型型线图见图 2 和图 3。



图 2 圆舭船型纵剖面图及横剖面
Fig.2 Longitudinal and cross sections of round bilge ship

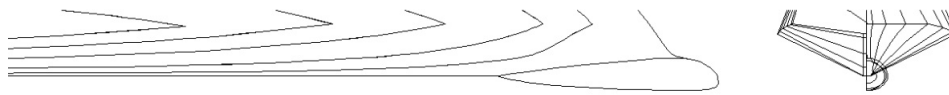


图 3 深 V 船型纵剖面图及横剖面
Fig.3 Longitudinal and cross sections of deep-V ship

3.1 建立因素集

为简单起见，参考相关文献^[12-13]，选取一些典型的有代表性的船体性能指标，建立舰船风浪环境适应性评价指标体系。选取的一级指标包括：快速性、耐波性、稳性和波浪载荷等，每一个一级指标又包括若干个二级子因素。

第一层因素集 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ ，其中 u_1 为耐波性； u_2 为快速性； u_3 为稳性； u_4 为波浪载荷。

第二层因素集 $u_1 = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}\}$ ，其中 u_{11} 为纵摇有义值； u_{12} 为升沉有义值； u_{13} 为船艏垂向加速度； u_{14} 为甲板上浪频率。 $u_2 = \{u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}\}$ ，其中 u_{21} 为波浪中的航速； u_{22} 为螺旋桨敞水效率； u_{23} 为船身效率； u_{24} 为相对旋转效率。

选用船在静水中的抗风极限能力作为稳性指标。在选取波浪载荷性能指标时，主要考虑舰船的总纵强度，选取极限强度时的安全系数作为评价指标，见式 (8)。

$$m = \frac{M_u}{M_s + M_w} \quad (8)$$

式中： M_u 为极限弯矩； M_s 为静水弯矩； M_w 为波浪弯矩。

3.2 建立权重集

权重参数对于评价的结果至关重要，不同类型的舰船在不同作业任务下的权重参数有很大区别，因此能够准确预测权重参数对于合理评价舰船环境适应性至关重要。分析各项性能对舰船综合航行性能的相对重要程度，首先按照波浪中快速性第一、耐波性第二、波浪载荷第三、稳性第四的顺序给出了式 (9) 所示的第一层判断矩阵，其中耐波性各项指标按照同等重要给出式 (10) 所示判断矩阵，快速性各指标按照波浪中航速最重要、其余三个指标同等重要给出式 (11) 所示判断矩阵。

第一层次的判断矩阵为：

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & 6 & 4 \\ 1/3 & 1/6 & 1 & 2/3 \\ 1/2 & 1/4 & 3/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

得第一层次的权数为 $A=(0.261, 0.522, 0.087, 0.130)$ 。

耐波性中各子层指标的判断矩阵为：

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

得权数 $A_1=(0.25, 0.25, 0.25, 0.25)$ 。

快速性中各子层指标的判断矩阵为：

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 5 & 5 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

得权数 $A_2=(0.625, 0.125, 0.125, 0.125)$ 。

3.3 建立备择集

为评分简洁清晰起见，以百分制的评分方式给出 $V=\{0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100\}$ ，共 11 个等级，所有指标均选定此备择集。

3.4 模糊评价过程

影响水面舰船环境适应性的各个因素，其可接受的最大值和最小值，以及深 V 船型和圆艏船型各指标的参考值见表 1，表 1 中各指标参数是通过数值计算或水池模型试验的手段获得的^[14]。其中纵摇有义值、升沉有义值、船艏垂向加速度、甲板上浪频率数值越小，舰船的环境适应性越好，而波浪中的航速、螺旋桨敞水效率、船身效率、相对旋转效率、抗风能力、安全系数数值越大，舰船的环境适应性越好。其中，耐波性指标衡量是参考文献[15-16]中关于船舶在

表 1 影响环境适应性各因素参数
Tab.1 Parameters of the environmental adaptability factors

第一层	第二层	最小值	最大值	参考值	
				深 V	圆艏
耐波性	纵摇有义值/(°)	0	4.8	1.45	2.13
	升沉有义值/m	0	2	0.96	0.92
	船垂向加速度/ (m·s ⁻²)	0	3.92	2.35	3.77
	甲板上浪频率/ min ⁻¹	0	0.5	0.074	0.265
快速性	波浪中的航速/kn	16	24	22.81	21.04
	螺旋桨敞水效率	0.5	1	0.83	0.82
	船身效率	0.5	1	0.78	0.80
	相对旋转效率	0.5	1	0.75	0.79
稳性	抗风能力	52	300	185.94	143.14
波浪载荷	安全系数	2.6	8	4.4	3.6

波浪中航行性能评估的衡准值获得的。快速性指标中，波浪中的性能是以静水中的性能作为参考衡准，其余指标参考 GJB 4000—2000《舰船通用规范 0 组》中对船体稳性和极限载荷的相关规定确定衡准值。

3.4.1 转化为百分制

根据以上信息，可以分别将舰船的某一参数值进行百分制评分。针对环境适应性评价的特征，文中采用半岭型函数计算百分制结果，函数公式见式(12)。

$$N = 50 \left[1 + (-1)^k \sin \frac{\pi}{u_{\max} - u_{\min}} \left(u - \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2} \right) \right] \quad (12)$$

$\begin{cases} k = 0 \text{ 指标数值越大, 环境适应性越好} \\ k = 1 \text{ 指标数值越小, 环境适应性越好} \end{cases}$

式中： N 为百分数； u_{\max} 为对应指标最大值； u_{\min} 为对应指标最小值； u 为对应指标实际数值。计算结果见表 2。

3.4.2 确定隶属度

接下来确定各指标得分 N 相对于备择集中各元素的隶属度函数。采用正态分布的模糊分布 $r(v_k) =$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.006 & 0.065 & 0.265 & 0.399 & 0.221 & 0.045 \\ 0 & 0 & 0.002 & 0.028 & 0.169 & 0.380 & 0.314 & 0.096 & 0.011 & 0 & 0 \\ 0.001 & 0.01 & 0.137 & 0.359 & 0.345 & 0.122 & 0.016 & 0.001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0.022 & 0.158 & 0.416 & 0.403 \end{bmatrix} \quad (13)$$

同理可得 R_2 、 R_3 、 R_4 。

3.4.3 一级模糊综合评判

采用 $M(\cdot, +)$ 算法，即 $b_{ik} = \sum_{j=1}^m a_{ij} r_{ijk}$ ，一级模糊综合评价的结果为：

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = \{0 \quad 0.003 \quad 0.035 \quad 0.097 \quad 0.129 \quad 0.127 \quad 0.099 \quad 0.096 \quad 0.142 \quad 0.159 \quad 0.112\} \quad (14)$$

同理可得：

$$\begin{aligned} B_2 &= \{0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.007 \quad 0.038 \quad 0.085 \quad 0.099 \quad 0.095 \quad 0.148 \quad 0.275 \quad 0.252\} \\ B_3 &= \{0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.013 \quad 0.106 \quad 0.327 \quad 0.373 \quad 0.156 \quad 0.024 \quad 0.001 \quad 0\} \\ B_4 &= \{0.018 \quad 0.130 \quad 0.352 \quad 0.352 \quad 0.130 \quad 0.018 \quad 0.001 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \end{aligned} \quad (15)$$

3.4.4 二级模糊综合评判

二级模糊综合评价的结果为：

$$B = A \cdot R = A \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \{0.002 \quad 0.018 \quad 0.055 \quad 0.076 \quad 0.080 \quad 0.108 \quad 0.110 \quad 0.088 \quad 0.116 \quad 0.185 \quad 0.161\} \quad (16)$$

3.5 评价结果

利用加权平均法 $F = V \cdot B^T$ 可以得到该深 V 船型的得分为 66.95，同样可以计算得圆舳船型的得分为 50.50。为了研究不同评判矩阵对评价结果的影响，在前述评判矩阵的基础上，又给出了 3 种不同评判矩

表 2 影响环境适应性各因素百分制分数
Tab.2 Percentile scores of factors affecting environmental adaptability

第一层	第二层	深 V 船型	圆舳船型
耐波性	纵摇有义值	79.1	58.8
	升沉有义值	53.1	56.3
	艏垂向加速度	34.6	0.4
	甲板上浪频率	94.7	45.3
快速性	波浪中的航速	94.6	69.9
	螺旋桨敞水效率	74.1	71.3
	船身效率	59.4	65.5
	相对旋转效率	50	62.4
稳性	抗风能力	56.3	29.8
波浪载荷	安全系数	25.0	8.2

$e^{-0.005(v_k - N)^2}$ 计算各指标得分的隶属度。式中： $r(x)$ 为隶属函数； v_k 为备择集中的元素分数等级； N 为该指标的得分。

以深 V 船型为例，给出其中第二层次第一个模糊评判矩阵：

阵，即共构建了 4 种不同的判断矩阵，分别计算评估结果，以分析指标权重判断矩阵的变化对评估结果的影响。4 种判断矩阵的变化方案见表 3。

代入综合评价模型求解，得到两船型风浪环境适应性评估结果。4 种判断矩阵百分制评价结果见表 4。

表 3 4 种判断矩阵变化方案
Tab.3 The fore different judge matrix plans

变化方案	方案内容
方案 1	原方案
方案 2	各指标同等重要
方案 3	第一层指标重要程度与原方案相反
方案 4	两层指标重要程度均与原方案相反

表 4 4 种判断矩阵评价结果
Tab.4 Evaluation results of four different judge matrixes

判断矩阵方案	深 V 船型	圆舢船型
方案 1	66.95	50.5
方案 2	65.74	43.87
方案 3	59.28	34.63
方案 4	66.06	37.54

由表 4 中两船型不同判断矩阵的评价结果可见，深 V 船型与圆舢船型评价结果的趋势基本相同，说明文中建立的评估方法比较稳定。第一种判断矩阵以波浪中快速性指标重要程度最高，评价指数值也是最高的。第三种判断矩阵以波浪中快速性指标重要程度最低，评价指数值也是最低，说明在评价体系中所占比重最大的指标，对评价结果的影响也是最大的。四种判断矩阵对深 V 船型的评价结果相对比较稳定，而不同的判断矩阵对圆舢船型的评价结果差别较大，说明深 V 船型风浪环境适应性各项评价指标较稳定，对评价指标权重敏感度较低。

4 结论

首先对舰船风浪环境适应性内涵进行了论述，进而建立了舰船风浪环境适应性模糊综合评估模型，以某深 V 船型和圆舢船型为目标，对其风浪环境适应性进行评估，并研究了不同评判矩阵对评估结果的影响。通过研究，可以得到以下结论：

1) 舰船风浪环境适应性内涵丰富，涉及到海洋环境、平台响应及控制技术、多目标综合评估等多学科的交叉，对真实海洋环境的建模、平台在实际环境中的响应预报及实战环境作战效能评估等技术提出迫切需求。

2) 选取不同权重判断矩阵对两船风浪环境适应性评估结果有较大差别，说明评价指标权重的选择对评估结果会产生较大影响。同时，在各项指标中所占比重较大的指标，对评估结果的影响较大。4 种判断矩阵的评估结果均为深 V 船型优于圆舢船型，表明深 V 船型的风浪环境适应性较优，说明建立评估方法的评价结果比较稳定。

3) 不同判断矩阵对深 V 船型评价结果的最大值与最小值相差 7.67，而圆舢船型相差 15.87，深 V 船型评估结果相比圆舢船型更稳定，说明深 V 船型风

浪环境适应性比圆舢船型更平稳，对评价指标权重敏感度较低。

参考文献：

- [1] 武月琴, 傅耘, 敖亮. 典型环境条件下装备环境适应性的评估方法[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 109-112.
WU Yue-qin, FU Yun, AO Liang. Equipment environmental worthiness evaluation method in representative environmental condition[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(6): 109-112.
- [2] 焦甲龙, 孙树政, 任慧龙. 水面舰船风浪环境适应性模糊综合评价方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(6): 667-673.
JIAO Jia-long, SUN Shu-zheng, REN Hui-long. A method of fuzzy comprehensive evaluation of the adaptability of surface ships in stormy wave environments[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(6): 667-673.
- [3] 赵峰, 程素斌, 杨磊, 等. 水面舰船航行性能 MDO 系统顶层设计研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(11): 1257-1266.
ZHAO Feng, CHENG Su-bin, YANG Lei, et al. Top-down design research for the navigational performance MDO system of naval surface combatant[J]. Journal of ship mechanics, 2012, 16(11): 1257-1266.
- [4] 应荣镛, 石爱国, 蔡烽, 等. 船舶大风浪航行风险等级评估[J]. 中国航海, 2009, 32(4): 49-52, 76.
YING Rong-rong, SHI Ai-guo, CAI Feng, et al. Risk level assessment for ships navigating in rough sea[J]. Navigation of China, 2009, 32(4): 49-52, 76.
- [5] 张炜灵, 蔡烽, 杨波, 等. 舰船风浪环境适应性综合评价分析[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(10): 170-173.
ZHANG Wei-ling, CAI Feng, YANG Bo, et al. Comprehensive evaluation and analysis of ship wind and wave environment adaptability[J]. Ship electronic engineering, 2019, 39(10): 170-173.
- [6] 杨松林, 朱仁庆, 王志东, 等. 大型中速船舶快速性和操纵性综合优化研究[J]. 船舶, 2003, 14(5): 18-23.
YANG Song-lin, ZHU Ren-qing, WANG Zhi-dong, et al. On the overall optimization of speed and maneuverability performance of large-size medium-speed ships[J]. Ship & boat, 2003, 14(5): 18-23.
- [7] MINOURA M, NAITO S. A stochastic model for evaluation of seakeeping performance[C]//Proceedings of the 14th international offshore and polar engineering conference. Toulon, France: [s. n.], 2004.
- [8] 熊文海, 毛筱菲, 李毓江. 船舶耐波性衡准及其评价方法浅析[J]. 航海工程, 2007, 36(4): 42-45.
XIONG Wen-hai, MAO Xiao-fei, LI Yu-jiang. Review on evaluation methods and criteria for sea-keeping of ships[J]. Ship & ocean engineering, 2007, 36(4): 42-45.
- [9] 徐昌文. 模糊数学在船舶工程中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.

- XU Chang-wen. The application of fuzzy theory in ship engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992.
- [10] 熊德国, 鲜学福. 模糊综合评价方法的改进[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(6): 93-95.
XIONG De-guo, XIAN Xue-fu. Improvement of fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Journal of Chongqing University (natural science edition), 2003, 26(6): 93-95.
- [11] 刘洪于. 基于模糊理论的导弹贮存使用环境分析[J]. 装备环境工程, 2020, 17(12): 95-100.
LIU Hong-yu. Analysis of missile storage/use environment based on fuzzy theory[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(12): 95-100.
- [12] 李华文, 吕靖. 船舶适航性的模糊综合评价[J]. 大连海事大学学报, 2006, 32(4): 54-57.
LI Hua-wen, LU Jing. Fuzzy comprehensive evaluation of ship's seaworthiness[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2006, 32(4): 54-57.
- [13] 韩智国. 舰船评估指标体系及评估方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
HAN Zhi-guo. Research on evaluation index system and evaluation method of naval vessel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [14] 孙树政, 赵晓东, 李积德, 等. 低内倾干舷单体复合船型模型试验研究[J]. 船舶力学, 2014, 18(7): 809-814.
SUN Shu-zheng, ZHAO Xiao-dong, LI Ji-de, et al. Model test study on hybrid monohull with intilted low-freeboard[J]. Journal of ship mechanics, 2014, 18(7): 809-814.
- [15] 杨宝璋, 石爱国. 大风浪中多因素优化航向航速选择[J]. 中国航海, 1991, 14(1): 30-40.
YANG Bao-zhang, SHI Ai-guo. To set optimum course and speed for ships at heavy sea[J]. Navigation of China, 1991, 14(1): 30-40.
- [16] 熊云峰. 基于灰色系统理论的船舶耐波性综合评价研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
XIONG Yun-feng. The comprehensive evaluation of seakeeping based on the theory of grey system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.