

中文引用格式:胡基平,刘玲玲,席永涛,等.基于模糊 Petri 网的引航员作业舒适度评价[J].中国安全科学学报,2024,34(4):67-76.

英文引用格式:HU Shenping, LIU Lingling, XI Yongtao, et al. Evaluation of pilot comfort performance based on FPN method [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 67-76.

基于模糊 Petri 网的引航员作业舒适度评价*

胡基平 教授, 刘玲玲, 席永涛 教授, 张欣欣

(上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

中图分类号: X913.4 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.1206

基金项目: 国家自然科学基金资助(52272353); 教育部人文社会科学研究规划基金资助(23YJAZH157)。

【摘要】 为提高引航员的作业舒适度,提出一种基于模糊 Petri 网(FPN)的模糊推理算法(FRA)下的组合评价方法。首先,针对作业舒适度影响因子的不确定性信息,建立多因素耦合的 FPN 拓扑结构;然后,采用博弈论组合赋权法确定最优组合权重,提出融合层间相关性判断临界重要性、层次分析法和 FRA,建立基于主客观权重的 FRA,通过迭代求解库所可信度和状态矩阵;最后,结合上海港船舶引航的场景数据,基于 FPN 的 FRA 应用,评价引航员作业舒适度。结果表明:环境与引航设备是影响其作业舒适度的关键因素,冬季和夏季的引航作业舒适度评价等级对应“较不舒适”,其中,5月份为“较舒适”。所提方法充分体现系统舒适度影响因素的耦合特性。

【关键词】 模糊 Petri 网(FPN); 引航员作业; 舒适度评价; 模糊推理算法(FRA); 博弈论组合赋权

Evaluation of pilot comfort performance based on FPN method

HU Shenping, LIU Lingling, XI Yongtao, ZHANG Xinxin

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to improve the pilot's operational comfort, a combined evaluation method based on FPN and FRA was proposed. First, a multi-factor coupled FPN network topology was established for the uncertainty information of the influencing factors of operational comfort. Then, the optimal combination weights were determined by the game theoretic assignment method. An algorithm combining the inter-layer correlation to determine the critical importance, analytic hierarchy process and fuzzy reasoning was proposed to establish a FRA based on subjective and objective weights. The confidence and state matrices were solved by iterative solution of the library. Finally, combined with the scenario data of ship pilotage in Shanghai harbor, the operational comfort of pilots was evaluated through the application of FRA based on FPN. The results show that the environment and pilotage equipment are the key factors affecting the comfort of their operation. The comfort level of pilotage operation in winter and summer corresponds to "less comfortable", and "more comfortable" in May. The proposed method fully reflects the coupled nature of the factors influencing the comfort of the system.

Keywords: fuzzy Petri nets (FPN); pilot operation; comfort evaluation; fuzzy reasoning algorithm (FRA); game theory combinatorial empowerment

0 引言

上海港作为我国长三角区域的重要港口和国际化大型港口,船舶交通流量大,服务于船舶进出的引航作业非常频繁。引航员在这种特定的环境下长时间作业,来自其作业的感受及舒适性是一个值得关注的问题。该作业会引起引航员的疲劳感,影响其作业舒适度,同时,也会影响引航员作业效能,导致作业难度大,从而易引发引航安全性问题^[1]。因此,为提高引航效率及安全性,探讨“海上国门第一人”引航员作业的舒适性,具有重要意义。

目前,国内外学者针对作业舒适度评价的研究主要集中在振动舒适度、空间环境舒适度和特定场景下的热舒适度等领域,并关注评价指标体系和评价模型问题。ZHANG Jikui 等^[2]构建了爆破振动影响下的人体舒适度评价体系;聂兴信^[3]、FENG Chaoqing^[4]、LEI Tzehuan^[5]等针对特定场景下的热舒适问题,构建了作业人员的热舒适指标。在构建差异化指标体系的基础上,学者们采用不同模型和算法进行了测量,如模糊综合评判法^[6]等传统方法、改进的层次分析法和模糊数学^[7]、最小二乘法组合赋权^[8]、反向传播(Back Propagation, BP)神经网络^[9]、故障树分析法-模糊贝叶斯网络分析^[10]等组合方法已经被广泛应用。少数学者则提出基于虚拟仿真技术的复合评价方法,并应用到空间舒适性中^[11]。这些研究结果表明:全面辨析指标体系可实现影响因子的测量和综合程度的评价,权重对评价方法的影响比较显著,且需要深入讨论影响因子的不确定性问题。近年来,兼具并行计算和矩阵运算能力的有向网拓扑结构下模糊 Petri 网(Fuzzy Petri Net, FPN),通过模糊性较强的系统与图形化建模,在处理模糊变量值上显示了一些新的优势。使用 FPN 描述和分析一些主观型事务或问题,比如舒适度评价,具有理论意义^[12]。

鉴于此,笔者拟依据舒适度产生原理,探讨引航员作业舒适度问题,构建引航员作业舒适度评价指标体系,搭建舒适度 FPN 评价模型;运用博弈论组合赋权法确定指标权重,结合 FPN 和模糊推理算法(Fuzzy Reasoning Algorithm, FRA),评价引航员作业舒适度,以期提高引航员的作业舒适度。

1 引航员作业舒适度及评价指标

1.1 引航员作业舒适度

引航员作业是涉及人、机、作业方法、环境等多维的复杂系统,舒适度在本质上是一种主观感觉,受多种因素影响,在不同的作业环境、作业强度、不同的任务中会产生不同的舒适感觉。任何几个舒适度因子的随机叠加都会影响呼吸、视觉、听觉和手掌的舒适性,从而导致引航员作业缺乏灵活性及身体感到不舒适。

此外,舒适性是心理和生理感知体验的结合,评价标准应辅以生理测量来评估主观感觉。引航员作业舒适感是指引航员在执行引航任务时所感受到的舒适程度,受多重因素影响而产生的心理感受或主观评价。

1.2 舒适度评价指标体系

从引航员作业舒适度的致因机制出发,参考国内外对于舒适度评价的标准^[13-14],并咨询领域专家的意见,采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP),剔除掉重复的模糊指标,用最少指标数全面评价引航员作业的舒适度。考虑主观感受的形成过程及原理,根据相关舒适度研究,得到舒适度影响因子,主要集中在引航员本身、引航作业的设备与方法及作业环境 4 个方面。

影响引航员作业舒适度的因素为作业环境(包括温度、风速等)、引航相关设备及他们自身的主观感受(表现为身体、心理等因素)。引航员受到这些典型因素的影响,产生耦合效应共同影响引航员在作业过程中的舒适度。

这些影响其系统舒适度的指标可构建一个多元复杂的指标体系。提取影响程度较为突出的 14 个因素,确立评价指标,如图 1 所示。

系统指标分为主观型和客观型,往往用定量、定性等方式进行测量,这 2 类指标存在相互影响和含义模糊的关系,如在恶劣环境条件下进行引航工作,会增加身体疲劳感,也会增加心理压力和紧张感,从而降低舒适度。根据所构建的指标体系建立引航员作业舒适性的评分体系,通常将评分体系分为 5 个等级,分别是很不舒适 I、较不舒适 II、舒适 III、较舒适 IV、很舒适 V。令舒适度等级评价矩阵为 Θ ,令

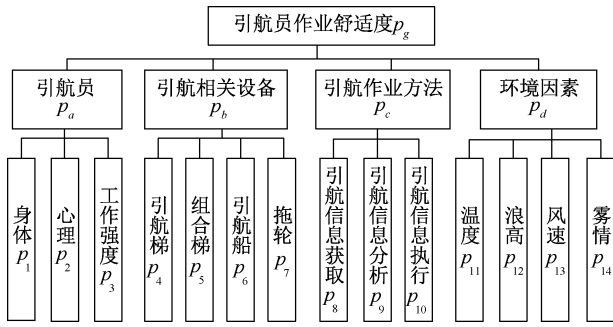


图1 引航员作业舒适度指标体系

Fig.1 Comfort evaluation index system of pilot operation

$\Theta = [10, 8, 6, 4, 2]$, 则 $(8, 10]$ 对应等级 V, $(6, 8]$ 对应等级 IV, $(4, 6]$ 对应等级 III, $(2, 4]$ 对应等级 II, $(0, 2]$ 对应等级 I。

2 引航员作业舒适度评价 FPN 模型

鉴于引航员作业系统的不确定性信息特性,其舒适度受多因素相互影响,且因子之间相互关联、相互影响,量化评价其舒适度,需建立 FPN 模型^[15]。

2.1 FPN 模型

FPN 模型通常描述一个 8 元组,即:

$$\text{FPN} = \{P, T, D, I, O, U, Z, M\} \quad (1)$$

式中: P 为由因子组成的库所有限集, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $p_i (1 \leq i \leq n)$; T 为影响舒适度因子发生过程的变迁集, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $t_j (1 \leq j \leq m)$; D 为命题有限集,表示影响舒适度因子的相关关系, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$; $I: P \rightarrow T$ 为输入矩阵, $I = \{\varphi_{ij}\}$, $\varphi_{ij} \in \{0, 1\}$; $O: T \rightarrow P$ 为输出矩阵, $O = \{\omega_{ij}\}$, $\omega_{ij} \in \{0, 1\}$; $U(t_j) = \{\mu_{ij}\}$ 为变迁置信度矩阵, μ_{ij} 表示变迁 t_j 的置信度, $\mu_{ij} \in [0, 1]$; $Z(p_i) = \{w_i\}$ 为库所可信度矩阵, w_i 表示库所 p_i 的可信度, $w_i \in [0, 1]$, 其中, $(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$; M 为 $n \times q$ 阶的状态矩阵, M_0 为初始状态矩阵, M_k 为 k 次变迁后的状态矩阵^[12]。

式(1)中,当库所 p_i 是变迁 t_j 的输入时, $\varphi_{ij} = 1$, $\omega_{ij} = 1$; 当 p_i 不是 t_j 的输入时, $\varphi_{ij} = 0$, $\omega_{ij} = 0$ 。这一规则对于影响因子的相关关系有很好的表示。

2.2 舒适度指标赋权

舒适度的影响因子往往有主观型和客观型数据,确立其相关关系以及对舒适度的效果影响也很有差异,因此,确立因子权重需要不同的权重计算方法。

2.2.1 改进的 AHP 主观赋权

由于传统 AHP 进行主观权重计算时常会出现不满足一致性检验且计算量大等问题。为减少迭代次数,提高计算速度与精度,优化 AHP^[17],采用标度构造法构造判断矩阵 $R, R = [r_{ij}]$ 满足如下条件: $r_{ij} > 0$; $r_{ji} = 1/r_{ij}$; $r_{ii} = 1$; $r_{ij} = r_{ik}r_{kj}$, $i, j, k = 1, 2, \dots, n$, 其中, r_{ij} 为第 i 个元素与第 j 个元素相比较的标度值。这一做法得到判断矩阵 R 满足一致性,可直接进行权重计算,无需检验。因此,各项指标的主观权重值由下式确定:

$$\alpha_i = \left(\prod_{j=1}^n r_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} / \sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n r_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

式中: α_i 为第 i 个指标的主观权重值; $\prod_{j=1}^n r_{ij}$ 为 R 在第 i 行所有元素的乘积。

2.2.2 改进的 CRITIC 客观赋权

数据波动性的客观权重赋权法 (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, CRITIC) 基本思路是确定指标的客观权重,并以标准差的形式来表现对比强度和以指标之间的相关性为基础冲突性等 2 个基本概念。将差异性与冲突性指标结果相乘,综合衡量指标的客观权重。然而,考虑到标准差反映的是指标变动的绝对程度,直接运用标准差反映指标的对比强度存在一定缺陷,因此,引入变异系数,用改进的相对变动 AHP-CRITIC 法^[18]。指标客观权重由下式确定:

$$\beta_j = C_j / \sum_{j=1}^n C_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: β_j 为改进 CRITIC 法确定的第 j 个指标权重; C_j 为指标的综合系数。

2.2.3 最优综合权重

将改进的 AHP 和改进的 CRITIC 法确定舒适度指标的主、客观权重进行协调一致化处理,使其各权重间偏差最小化,提高指标赋权的合理性,得到最优组合的指标权重。这一方法是基于博弈论的组合赋权^[19],通过下式求出组合赋权值 w_i^* :

$$w_i^* = \sum_{i=1}^m \chi_i^* w_i^T, i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中: χ_i^* 为权重最优分配系数; w_i 为组合权重系数。

2.3 FRA

FRA 是从模糊规则和输入对相关模糊集的隶属度得到模糊结论的方法。基于 FPN 理论特性以及规则,确立库所可信度和状态矩阵推理算法,迭代

求解舒适度因子的可信度与舒适度等级综合评价。利用 FRA 模糊产生式规则用于表示舒适度因子的逻辑关系,主要的逻辑关系有“and”规则和“or”规则 2 种^[16]。FPN 模糊产生式规则表示采用“or”规则,当任意某个舒适度因子发生变化,则会影响到引航员作业系统的舒适性。如下式:

$$\text{if } d_1(\omega_1) \text{ or } d_2(\omega_2) \cdots \text{or } d_n(\omega_n), \text{ then } d_g(\omega_g) \quad (5)$$

式中: d_1, d_2, \dots, d_n 与 d_g 分别为前提条件和结论命题; $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 为前提可信度; ω_g 为命题的可信度。

2.3.1 库所可信度推理算法

步骤 1: 令 $k = 0$, 通过专家评判法确定初始可信度矩阵 Z_0 和置信度矩阵 U 以及权值矩阵 W 。

步骤 2: 计算等效模糊真值向量:

$$G_{k+1} = W^T \times Z_k \quad (6)$$

步骤 3: 计算新的库所可信度矩阵:

$$Z_{k+1} = Z_k \oplus [U \otimes G_{k+1}] \quad (7)$$

其中, 定义 2 个推理式子:

$$\text{加法算子 } \oplus: C = X \oplus Y \Leftrightarrow c_{ij} = \max(x_{ij}, y_{ij}) \quad (8)$$

$$\text{乘法算子 } \otimes: C = X \otimes Y \Leftrightarrow c_{ij} = \max_{1 \leq k \leq p} (x_{ij} \cdot y_{kj}) \quad (9)$$

式中: X 为 $n \times p$ 维矩阵; Y 为 $p \times m$ 维矩阵; C 为 $n \times m$ 阶矩阵, $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 。

步骤 4: 若 $Z_{k+1} \neq Z_k$, 令 $k = k + 1$, 转步骤 3; 若 $Z_{k+1} = Z_k$, 则此推理结束, 输出最终库所可信度矩阵 $Z_{(k)}$ 。

2.3.2 状态矩阵推理算法

采用 FRA 求取舒适度的综合评价, 并评价引航员作业的舒适度。具体推理步骤如下:

步骤 5: 根据 FPN 的定义确定 I 和 O , 通过专家评判法以及实际场景数据值获取初始状态矩阵 M_0 , 再通过博弈论优化组合赋权法求得各舒适度因子的权重值 w_i , 表示为变迁的置信度向量 $\delta = \{\delta_j\} = \{w_i\}$, 舒适度等级评价矩阵为 Θ 。其中, 矩阵 M_0 中元素 m_{ij}^0 表示事件 p_i 在风险等级 j 的初始状态, $m_{ij}^0 \in [0, 1]$ 。

步骤 6: 令 $k = 0$, 影响舒适度因子的初始可信度定义为 $I^T M_k$, 不舒适性发生的可信度定义为 $\delta \otimes O$ 。

步骤 7: 计算舒适度问题发生后, 库所下一状态公式:

$$M_{k+1} = M_k \oplus [\delta \otimes O] [I^T M_k] \quad (10)$$

其中, 2 个推算式子定义为:

$$\text{加法算子 } \oplus: H = A \oplus B \Leftrightarrow h_{ij} = \max(a_{ij}, b_{ij}) \quad (11)$$

$$\text{直乘算子 } *: E = D * B \Leftrightarrow e_{ij} = d_i \cdot b_{ij} \quad (12)$$

式中: A, B, H, E 均为 $n \times m$ 阶矩阵; D 为 n 维矩阵, $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 。

步骤 8: 若 $M_{k+1} \neq M_k$, 令 $k = k + 1$, 转步骤 3; 若 $M_{k+1} = M_k$, 则此推理结束。

步骤 9: 计算库所对应的舒适度等级评价:

$$F = M_k \Theta^T \quad (13)$$

其中, 矩阵的最后一个元素对应的等级标准即为舒适度评价等级。

步骤 10: 结合库所可信度计算舒适度的综合评价:

$$S = \omega_g \times f_n \quad (14)$$

在该推理算法中, 舒适度因子评价价值 S 由命题发生的可信度 ω_g 与其相应的舒适度等级评价价值 f_n 共同决定。

3 引航员作业舒适度评价算例

为验证该模型和推理算法的可行性, 以上海港附近水域引航员作业舒适度为例, 进行舒适度评价。

3.1 数据获取

数据采集与处理规则为: ①舒适度评价指标体系中的定性指标虽无客观测量值, 但可由专家评判法确定进行量化处理, 如邀请 10 位专家(由 5 位资深的引航员和 5 位学界专家组成)评判其舒适度等级, 选用改进的 AHP 法将定性评判数据定量化。②基于现实场景和历史资料获取定量指标的数据。为使获取的数据具备客观真实性, 识别上海港引航员作业场景, 智能化处理其舒适度影响因子的场景数据。选取上海港附近水域现场照片为样本源, 采集 12 个月份的温度、浪高、风速以及雾况为场景数据, 其中 1 月份数据如图 2 所示。

3.2 引航员作业舒适度评价

根据舒适度评价指标体系以及采用模糊产生式“or”规则将指标体系转换为 FPN 模型, 如图 3 所示。其中, 库所 $p_1 \sim p_{14}$ 表示三级指标, $p_a \sim p_d$ 表示二级指标, p_g 表示目标层。

3.2.1 库所可信度推理与状态矩阵推理

初始的可信度矩阵 $Z_{(0)}$ 和 $t_1 \sim t_{18}$ 的置信度矩阵 U 表示如下:

$$Z_0 = [z_0^1 \ z_0^2 \ z_0^3 \ z_0^4 \ z_0^5]^T$$

其中

$$z_0^1 = [0.97 \ 0.91 \ 0.93]; z_0^2 = [0.98 \ 0.95 \ 0.99 \ 0.92];$$

$$z_0^3 = [0.96 \ 0.92 \ 0.91]; z_0^4 = [0.99 \ 0.95 \ 0.98 \ 0.93];$$

$$z_0^5 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]。$$

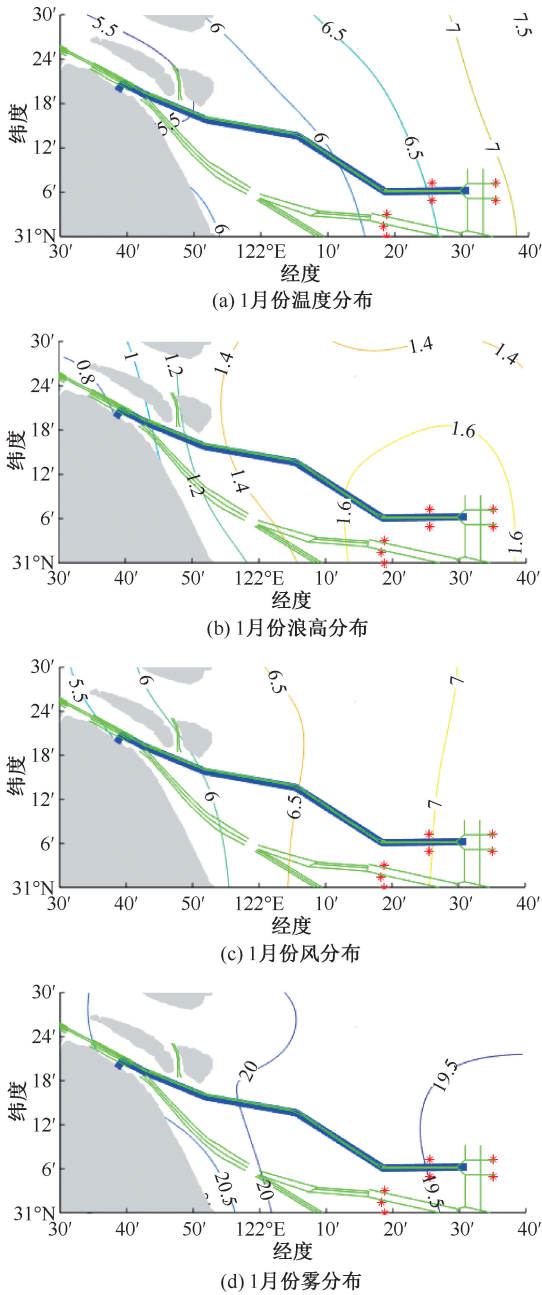


图2 1月份上海附近水域风速、浪高、气温的变化情况
Fig.2 Changes in temperature, wave height, wind speed and fog in waters of Shanghai port in January

$U = (\mu_{ij})_{19 \times 18} (i = 1, 2, \dots, 19; j = 1, 2, \dots, 18)$, 其中

$$\mu_{(15,j)} = \begin{cases} 0.91, (j = 1) \\ 0.86, (j = 2) \\ 0.89, (j = 3) \end{cases}; \mu_{(16,j)} = \begin{cases} 0.96, (j = 4) \\ 0.93, (j = 5) \\ 0.99, (j = 6) \\ 0.91, (j = 7) \end{cases};$$

$$\mu_{(17,j)} = \begin{cases} 0.93, (j = 8) \\ 0.89, (j = 9) \\ 0.91, (j = 10) \end{cases}; \mu_{(18,j)} = \begin{cases} 0.99, (j = 11) \\ 0.93, (j = 12) \\ 0.96, (j = 13) \\ 0.91, (j = 14) \end{cases};$$

$$\mu_{(19,j)} = \begin{cases} 0.89, (j = 15) \\ 0.96, (j = 16) \\ 0.92, (j = 17) \\ 0.97, (j = 18) \end{cases}; \mu_{ij} = 0, \text{其他}$$

由式(6)与式(9)迭代计算确定 $p_{15} \sim p_{19}$ 的库所可信度,得到 $Z_{(2)} = Z_{(3)}$, 迭代结束,则最终库所可信度矩阵 $Z_{(k)}$ 为:

$$Z_{(k)} = Z_{(2)} = Z_{(3)} = [z_3^1 z_3^2 z_3^3 z_3^4 z_3^5]^T$$

其中, $z_3^1 = z_0^1$; $z_3^2 = z_0^2$; $z_3^3 = z_0^3$; $z_3^4 = z_0^4$

即 $z_3^5 = [0.88, 0.98, 0.89, 0.99, 0.95]^T$ 。

可知:引航员、引航相关设备、引航作业方法、环境4个因素存在舒适性问题可信度分别为0.88、0.98、0.89、0.99,而目标层引航员作业舒适度的可信度为0.95,这表明环境与引航设备这2大因素引发引航员作业舒适性问题产生的可信度更高。

根据 FPN 的定义确定 I 和 O ,如下式:

$$I = (\alpha_{ij})_{19 \times 18}, \alpha_{ij} = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases} \quad (15)$$

$$O = (\beta_{ij})_{19 \times 18}, \beta_{ij} = \begin{cases} 1, (i = 15, j = 1, 2, 3) \\ 1, (i = 16, j = 4, 5, 6, 7) \\ 1, (i = 17, j = 8, 9, 10, 11) \\ 1, (i = 18, j = 12, 13, 14) \\ 1, (i = 19, j = 15, 16, 17, 18) \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

结合改进 AHP-CRITIC 法与博弈论组合赋权法,计算出引航员作业舒适度指标权重结果,如图4所示。

根据指标权重结果,得到其置信度向量为:

$$\delta = \{\delta_j\} = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5\}$$

其中

$$\delta_1 = \{0.5563, 0.1742, 0.2695\};$$

$$\delta_2 = \{0.2195, 0.1506, 0.5086, 0.1213\};$$

$$\delta_3 = \{0.4509, 0.3628, 0.1863\};$$

$$\delta_4 = \{0.4006, 0.1907, 0.2531, 0.1556\};$$

$$\delta_5 = \{0.0752, 0.2758, 0.1286, 0.5204\}。$$

式中: $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 为二级指标下的指标权重; δ_5 为一级指标下的指标权重。

从实际场景中采集数据,将获得的数据转化为直观的箱线图,上海港附近水域12个月份环境条件实际值如图5所示。

由图5可知:上海港附近水域12个月份的实际

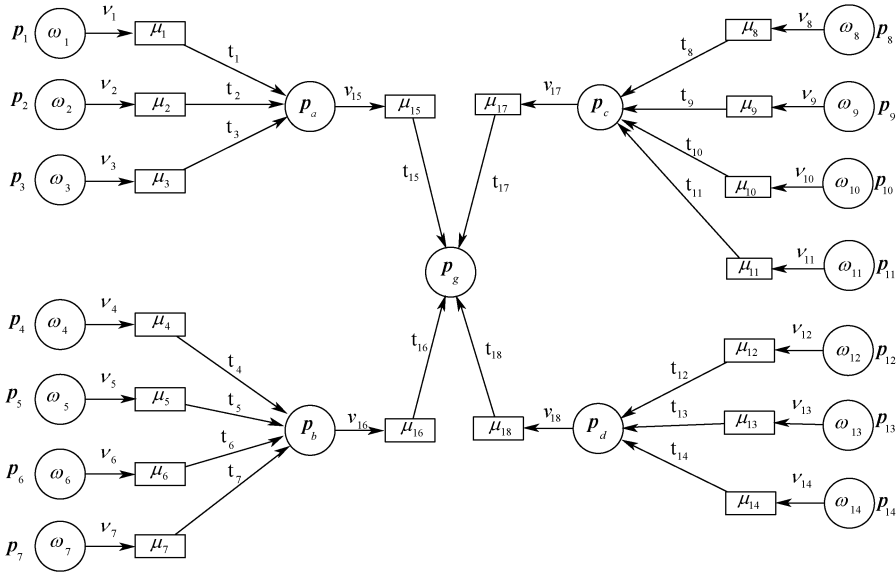


图3 引航员作业舒适度评价的 FPN 模型

Fig. 3 FPN model for pilot operating comfort evaluation

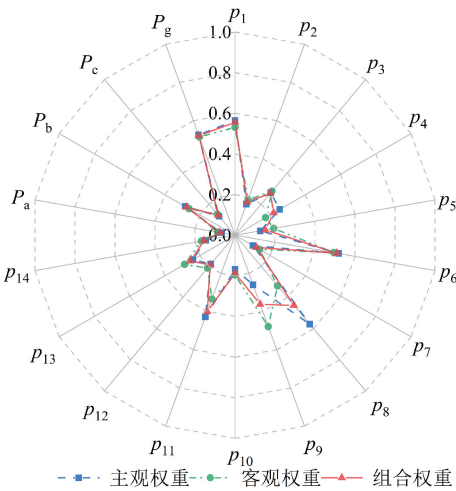


图4 指标权重结果

Fig. 4 Results of indicator weights

数据值都是在一定的范围内波动,符合实际情况。

将获取的实际数值转化为舒适度评价向量,依照以上处理方法,确定三级指标的舒适度评价向量,即 1 月份的初始状态矩阵 M_0 表示如下:

$$M_0 = [m_0^1 \ m_0^2 \ m_0^3 \ m_0^4 \ m_0^5]^T$$

$$m_0^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3 \end{bmatrix};$$

$$m_0^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 0.5 & 0.4 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.6 & 0.3 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \end{bmatrix};$$

$$m_0^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \end{bmatrix};$$

$$m_0^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \end{bmatrix};$$

$$m_0^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

基于 FRA 计算舒适度等级评价价值。基于上述,由 FRA 进行迭代可得最终的状态矩阵 M_k 如下:

$$M_k = M_2 = M_3 = [m_3^1 \ m_3^2 \ m_3^3 \ m_3^4 \ m_3^5]^T$$

其中

$$m_3^1 = m_0^1; \ m_3^2 = m_0^2; \ m_3^3 = m_0^3; \ m_3^4 = m_0^4$$

即

$$m_3^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1632 & 0.3086 & 0.3543 & 0.1739 \\ 0 & 0.0271 & 0.1272 & 0.5358 & 0.3099 \\ 0.0186 & 0.0549 & 0.3539 & 0.3912 & 0.1814 \\ 0 & 0 & 0.0381 & 0.8357 & 0.1262 \\ 0.0023 & 0.0268 & 0.1236 & 0.6596 & 0.1877 \end{bmatrix}。$$

m_3^5 中的最后一行向量为引航员作业系统舒适度的评价向量,可知该系统舒适度的评价向量为 (0.002 3, 0.026 8, 0.123 6, 0.659 6, 0.187 7)。由式(13)可得基于 FPN 的系统舒适度等级评价价值

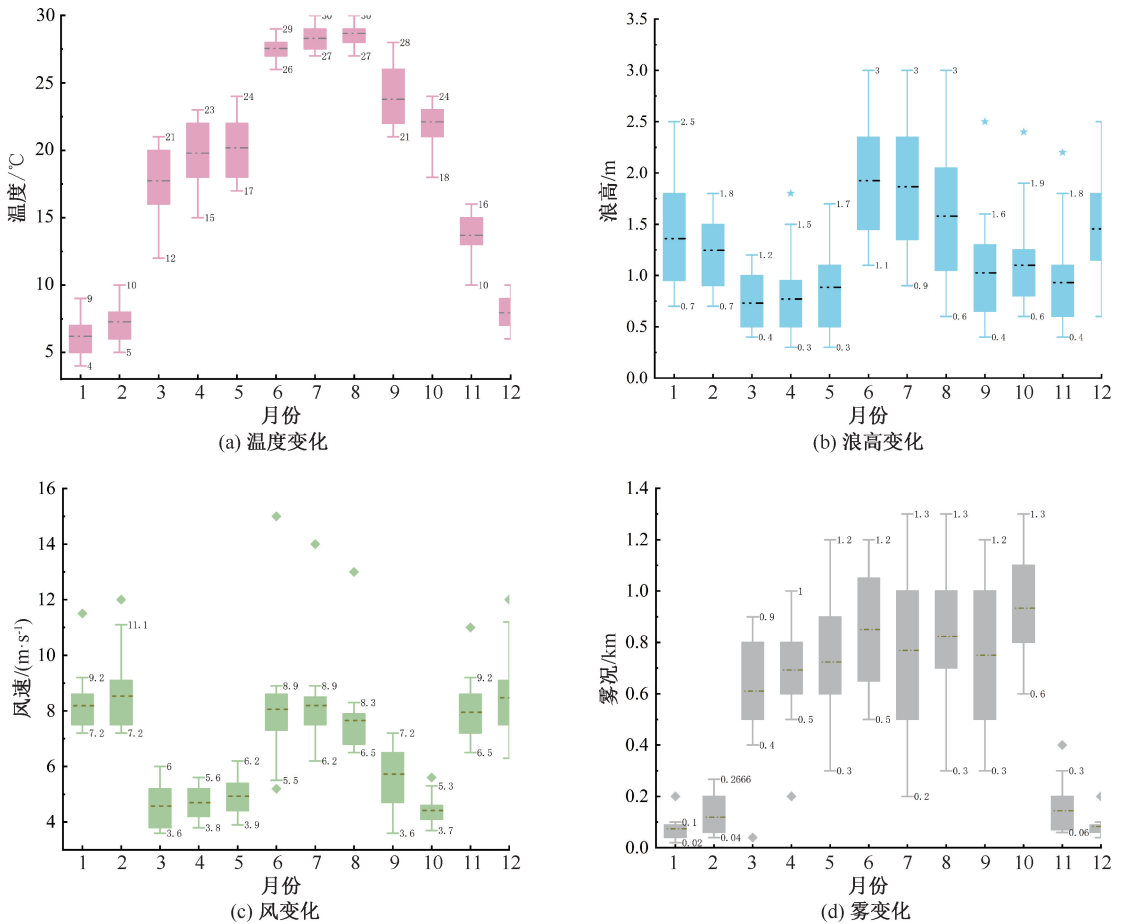


图 5 上海港附近水域 12 个月份环境条件实际值

Fig. 5 Changes of environment condition for 12 months in waters of Shanghai port

为 3.992 8。

3.2.2 引入可信度的舒适度综合评价

通过库所可信度推理求得命题的可信度 w_a 、 w_b 、 w_c 、 w_d 、 w_g ，即 $\Omega = \{0.88, 0.98, 0.89, 0.99, 0.95\}$ ，表明目标命题发生的可信度为 0.95。

根据式 (14)，求得系统舒适度的综合评价价值： $S = w_g \times f_n = 3.793 2$ ，其对应的舒适度评价等级为 II，结果与上海港引航站的实际调研分析结果一致。同理，可求得 p_a 的舒适度评价值为 4.331 5， p_b 的舒适度评价值为 3.747 3， p_c 的舒适度评价值为 4.161 8， p_d 的舒适度评价值为 3.668 2。

3.3 评价结果

采用 FRA 计算舒适度系统评价价值。将 1 月份舒适度评价向量和相应的舒适度影响因素权重集合进行模糊推理运算，得到舒适度系统评价价值为 3.993 8，对应的舒适度评价等级为 II。

$$\begin{bmatrix} 0.034 3 \\ 0.013 1 \\ 0.027 8 \\ 0.060 5 \\ 0.041 5 \\ 0.140 3 \\ 0.033 5 \\ 0.057 9 \\ 0.046 6 \\ 0.023 9 \\ 0.208 6 \\ 0.099 3 \\ 0.131 8 \\ 0.080 9 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.5 & 0.4 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.6 & 0.3 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.7 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \end{bmatrix} \odot^T = 3.993 8$$

同理，可运用模糊理论计算得出，1 月份舒适度系统最重的结果是 p_a 的评价值为 4.921 8， p_b 的评价值为 3.824 1， p_c 的评价值为 4.676 5， p_d 的评价值为 3.743 5。

3.4 结果比较与分析讨论

基于上述3种方法计算得出所涉及的12个月舒适度评价价值,如图6所示。

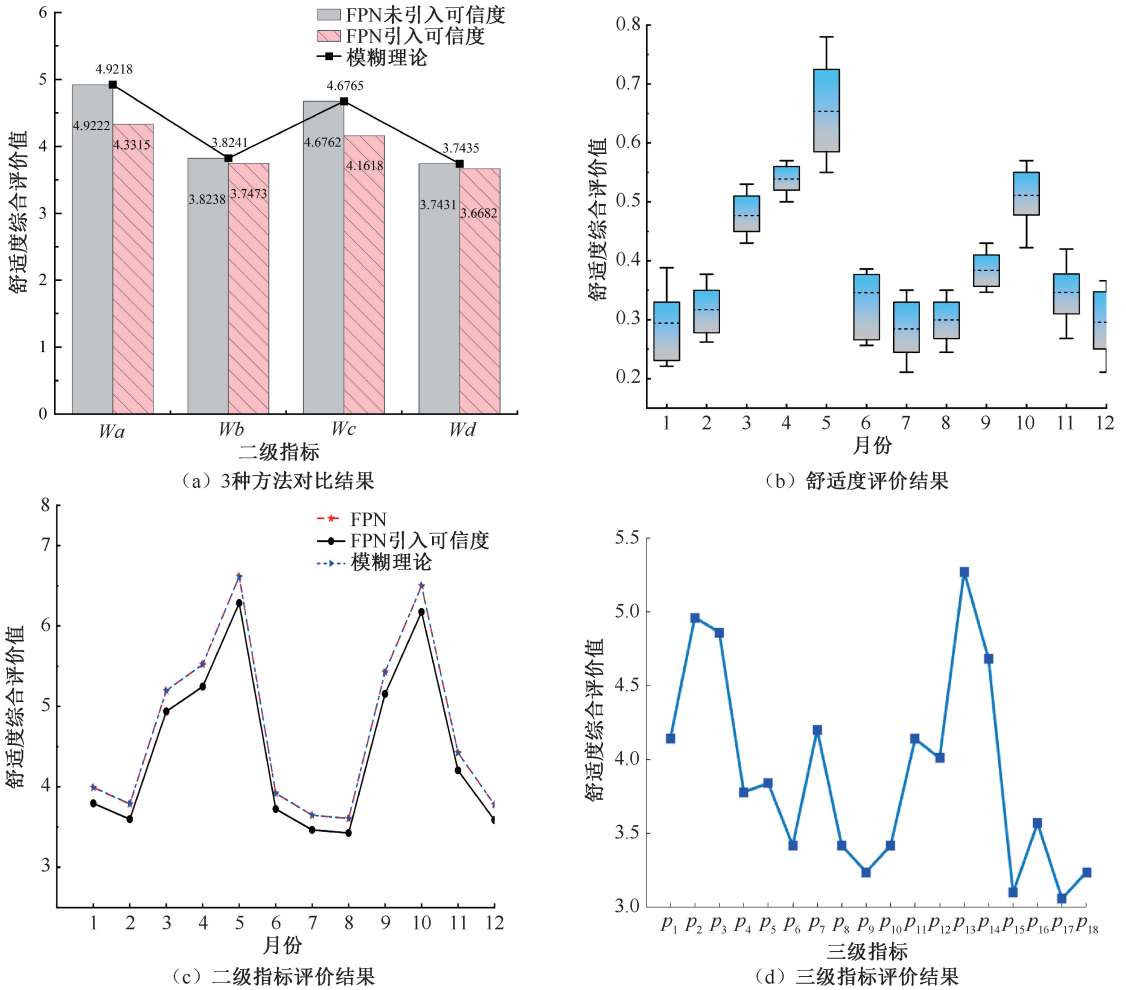


图6 综合评价结果

Fig. 6 Results of overall evaluation

由图6可知:

1) 基于 FPN 引入可信度的舒适度评价方法适用于引航员作业舒适度问题。该方法综合考虑各种影响因素,综合舒适度影响因子的评价结果,考虑评价指标所对应因素事件发生的可信度,通过 FRA 获取目标事件的可信度和评价指标值,将二者之积作为系统的舒适度综合评价价值,在一定程度上可避免主观性问题,使评价结果更加科学、准确。由图 6a 可知:基于模糊理论与基于 FPN 计算出的舒适度综合评价价值结果相差甚小,基于 FPN 引入可信度的评价结果相对偏小,但三者评价结果均在合理的误差范围内且与定性评判基本一致,证明文中提出算法具有一定的合理性。

2) 12 个月份中,1、2、12 月和 6、7、8 月份的舒适度等级对应 II,5 月为 IV,其余月份均为 III。根据

此评价结果(图 6b),找出引起系统不舒适性的关键性因素,并对此提出相应措施进行预控,进一步缓解不舒适性。为提高引航员作业舒适度,需严格检测引航环境。在引航过程中,要充分考虑引航相关设备、环境的特性,制定相关的控制措施,应对不同的引航环境,以保障引航员的安全和舒适感。

3) 系统舒适度受多重因素综合影响,其中,引航员和引航作业方法的综合评价价值对应舒适度等级 III,而环境和引航相关设备舒适度的综合评价价值 II,说明这三者是影响该系统舒适度的主要因素,是在多种因素共同耦合作用下叠加影响的结果,需要对其重点关注(图 6c)。

4) 分析 4 类舒适度指标评价价值,发现环境因素 < 引航相关设备 < 引航作业方法 < 引航员因素,表明环境因素和引航相关设备是影响系统舒适度主要的原

因,环境因素是关键性因素,引航作业方法和引航员因素为次要原因,与上海港引航站的相关调研分析结果一致,再次验证文中算法的科学和客观性(图 6c)。

5) 在环境因素的舒适度指标评价值中,温度<风速<雾情<浪高,表明除经受港域内风、浪不可抗力的因素以外,还需特别关注温度和雾情,对此,需时刻监测气象情况,并采取应对措施,引航员尽可能避免在高温、台风等极端天气下进行作业,确保引航员的安全和舒适度(图 6d)。

4 结 论

1) 基于 FPN 拓扑结构,引入 AHP-CRITIC 与 FRA 等算法,提出一种针对因子不确定性信息处理的舒适度评价方法。借助可信度量化方式,分析引航作业舒适度的影响因素并评价作业方式,评价结果可体现系统舒适的差异,为系统舒适度评价提供

新的方法借鉴。

2) 研究引航员作业的舒适度水平是人本理念的深层次体现,结合引航员作业特点及舒适度特性,确立“人、机、法、环”4 大方面对引航员作业舒适度的耦合影响,系统归纳出其舒适性影响指标,有助于实现对其舒适度的综合评价。

3) 以上海港引航员作业时的场景为样本源,分析影响引航员作业系统舒适度因子,通过博弈论组合赋权法确定最优组合权重,充分考虑了舒适度影响因子之间的耦合作用,模型应用表明:上海港船舶引航作业的舒适度具有季节性差异。此方法使赋权更符合实际情况,评价结果准确、科学,为泛作业场景获取数据和舒适度评价提供新的思路。

4) 文中研究重点在于引航员作业舒适度评价体制的构建,而在指标体系构建方面仅作了初步探讨,在未来的研究中需进一步优化。

参 考 文 献

- [1] CHEN Feiyu, FU Ming, LI Yayun, et al. A numerical tool for assessing human thermal safety and thermal comfort in cold-weather activities [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2023, 67(2): 377-388.
- [2] ZHANG Jikui, JIANG Nan, ZHOU Chuanbo, et al. Quantitative evaluation method of human comfort under the influence of blast vibration based on human physiological indexes and its application [J]. *Applied Acoustics*, 2023, 202: DOI: 10.1016/J.APACOUST.2022.109175.
- [3] 聂兴信, 冯珊珊, 张书读, 等. 高海拔矿井作业人员动态热舒适性评价[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(1): 180-186.
NIE Xingxin, FENG Shanshan, ZHANG Shudu, et al. Dynamic comfort evaluation for operators in high-altitude mines [J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(1): 180-186.
- [4] FENG Chaoqing, MA Fengge, WANG Rui, et al. A thermal comfort evaluation on vehicular environments based on local human body thermal sensations [J]. *Results in Engineering*, 2023, 17: DOI: 10.1016/J.RINENG.2023.100907.
- [5] LEI Tzehuan, LAN Li, WANG Faming. Indoor thermal comfort research using human participants: guidelines and a checklist for experimental design [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2023, 113: DOI: 10.1016/j.jtherbio.2023.103506.
- [6] 景国勋, 李欢, 张坤. 基于多层次模糊综合评判的作业工人整体舒适度研究[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(3): 80-83.
JING Guoxun, LI Huan, ZHANG Kun. On the comprehensive evaluation of the worker comfort based on multi-stage fuzzy synthetic judgment [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(3): 80-83.
- [7] 那寒鑫, 李夕兵, 马春德. 改进的层次分析法-模糊数学模型在矿井人体舒适度评价中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2015, 22(4): 12-16.
NA Hanchu, LI Xibing, MA Chunde. Application of the modified AHP-fuzzy method to the assessment of the mining personal comfort degree [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 22(4): 12-16.
- [8] 高佳南, 吴奉亮, 李文福. 基于最小二乘法的优化组合权重模型在矿井环境舒适度评价中的应用[J]. *安全与环境工程*, 2020, 27(5): 177-83.
GAO Jia'nan, WU Fengliang, LI Wenfu. Application of least square method based optimal combined weight model in comfort evaluation of mine environment [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(5): 177-183.
- [9] 王晓辉, 刘静蕾, 边会娟, 等. 基于改进 BP 神经网络的室内环境热舒适度预测与分析[J]. *控制工程*, 2021,

28(7):1 437-1 445.

WANG Xiaohui, LIU Jinglei, BIAN Huijuan, et al. Prediction and analysis of indoor environmental thermal comfort based on improved BP neural Network [J]. *Control Engineering*, 2021, 28(7): 1 437-1 445.

- [10] 陈登凯, 张献, 朱梦雅. 载人密闭舱室 FTA-FBN 舒适度评估方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2023, 55(4): 100-106.
- CHEN Dengkai, ZHANG Xian, ZHU Mengya. Comfort evaluation method of FTA-FBN for manned closed cabin [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2023, 55(4): 100-106.
- [11] 张帅, 何卫平, 陈登凯, 等. 载人潜水器舱室空间舒适性复合评估方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(10): 83-89, 193.
- ZHANG Shuai, HE Weiping, CHEN Dengkai, et al. Compound evaluation method for cabin comfort of manned submersible [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(10): 83-89, 193.
- [12] ZHOU Jianfeng, RENIERS G, ZHANG Laobing. A weighted fuzzy Petri-net based approach for security risk assessment in the chemical industry [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 174: 136-145.
- [13] CHEN Shihai, ZHANG Zihua, WU Jian. Human comfort evaluation criteria for blast planning [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(4): 2 919-2 923.
- [14] JOHANN F A, CARLOS M E N, RICARDO F L S. Wind-induced motion on tall buildings: a comfort criteria overview [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 142: 26-42.
- [15] 王猛. 基于 Petri 网模型的高铁沿线外部环境安全风险研究[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(增 1): 57-62.
- WANG Meng. Study on safety risk of external environment along high-speed rail based on Petri net model [J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(S1): 57-62.
- [16] CHANG Yuanjiang, WU Xiangfei, CHEN Guoming, et al. Comprehensive risk assessment of deepwater drilling riser using fuzzy Petri net model [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 117: 483-497.
- [17] 王敏, 邹婕, 王惠琳, 等. 基于改进的 AHP-CRITIC-MARCOS 配电网设备风险评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(3): 164-172.
- WANG Min, ZOU Jie, WANG Huilin, et al. Improved AHP-CRITIC-MARCOS-based risk assessment method for distribution network equipment [J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(3): 164-172.
- [18] 王坚浩, 王龙, 张亮, 等. 灰色群组聚类和改进 CRITIC 赋权的供应商选择 VIKOR 多属性决策[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(1): 155-164.
- WANG Jianhao, WANG Long, ZHANG Liang, et al. Supplier selection VIKOR multi-attribute decision making of grey group clustering and Improved CRITIC weighting [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(1): 155-164.
- [19] 张倩, 黄大荣, 王晶, 等. 基于博弈组合赋权的有源相控阵雷达收发组件脆弱性评估[J/OL]. *控制与决策*: 1-9. [2024-01-23]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1741>.
- ZHANG Qian, HUANG Darong, WANG Jing, et al. Vulnerability assessment of active phased array radar transceiver based on game combination weighting [J/OL]. *Control and Decision*: 1-9. [2024-01-23]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1741>.

作者简介: 胡甚平 (1974—), 男, 湖北通城人, 博士, 教授, 主要从事载运工具运用工程、安全工程、水上交通风险管理等方面的研究。E-mail: sphu@shmtu.edu.cn。