

船舶冰区航行风险因素识别研究

李成海¹, 刘杰¹, 俞启军²

(1. 山东交通职业学院, 山东 潍坊 261206; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266041)

摘要: 针对冰区船舶航行面对的影响安全的风险因素辨识问题, 本研究提出了冰区船舶航行风险影响因素层次分析法模型。针对船舶冰区航行安全影响因素辨识中面对的复杂性和不确定性, 基于综合层次分析法和模糊数及仿真技术, 推出了基于仿真层次模糊分析法, 并采用此方法辨识冰区船舶航行安全影响因素。从模型和航海专家判断数值两方面对冰区船舶航行安全影响因素辨识研究的科学性和合理性进行分析和验证。结果表明: 能见度、风和海水密度是冰区船舶航行安全的主要风险因素。

关键词: 冰区航行; 安全影响因素; 风险因素辨识; 层次分析法; 模糊与仿真复技术

中图分类号: U692

文献标识码: A

0 引言

船舶冰区航行风险高、环境脆弱, 面临能见度、风、海冰密度等条件的挑战, 易酿成船舶事故。为了保证船舶冰区航行安全, 必须进行冰区航行风险因素辨识研究。胡基平等^[1]结合浮冰、低温和高纬度对冰区船舶航行的影响特点, 提出了北极冰区船舶航行航道风险概率转移过程, 建立了北极冰区船舶航行风险模型, 对北极冰区船舶航行风险进行仿真, 仿真结果表明: 夏季北极冰区船舶航行风险处于可以通航状态; 俄罗斯^[2]、挪威^[3]等国家构建了北极船舶冰区航行系统; KUM^[4]分析了北极冰区船舶碰撞事故的成因; 席永涛等^[5]通过北极冰区船舶航行风险资料梳理, 从技术和风险管理角度探讨了研究方向, 指出, 受限于当前北极数据的不确定性, 未来装备研发将从静态的、模型化风险识别向动态化、数据化预测发展; 郭丰田^[6]结合冬季船舶驶经俄罗斯鞑靼海峡冰区经历, 综合冰区船舶航行特点, 提出了船舶规避风险的方法, 提出在驶近冰泥海域的船舶警示, 对冰量增大的海区, 应联系代理索取 Sea Ice Condition Chart, 改行推荐航路。

本文以船舶航行事故险情和航行环境评估为研究对象, 利用冰区船舶航行安全风险影响因素, 建立船舶航行事故风险评估模型, 对冰区船舶航

行安全所涉及的因素进行科学和系统化分析和辨识研究。

1 冰区风险因素模型

船舶冰区航行涉及到冰况、海况和海洋气象等动态环境。本文通过文献资料分析和专家座谈、现场调研等方式, 辨别船舶在冰区航行所面对的风、气温、能见度、潮汐、潮流等外部环境和海水温度、海浪等海况以及海冰厚度、海冰密度等因素的影响^[7]。针对船舶冰区航行所面对的风险因素, 采用层次法构建冰区船舶航行风险因素层次模型。

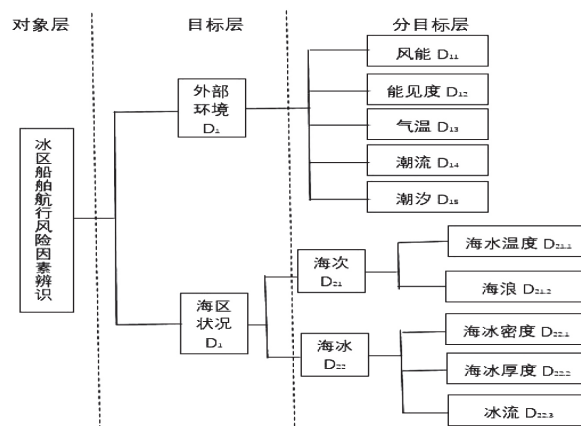


图1 冰区船舶航行风险因素层次模型

Fig.1 hierarchical model of ship navigation risk factors in ice area

收稿日期: 2021-11-26

第一作者简介: 李成海 (1963-), 男, 高级船长, 副教授

如图1,模型以辨识冰区船舶航行风险因素为对象,划分为外部环境和海区状况两大子系统作为目标层。外部环境子系统划分为风、能见度、气温、潮流和潮汐5个分目标,海区状况分为海况和海冰2个分目标层^[8]。海况分目标又分为海水温度和海浪2个底目标指标,海冰分目标又分为海冰密度、海冰厚度和冰流3个底目标指标。

2 辨识风险因素的方法

因为冰区航行船舶面临的外部环境因素具有不确定性,本文在图1冰区船舶航行风险因素层次模型基础上,运用模糊层次仿真分析法,计算冰区船舶航行风险影响因素层次模型的权重值^[9],以辨识影响冰区船舶航行安全风险因素。辨识步骤如下:

1) 建立判断矩阵。构建模糊数与航海专家判断间的映射架构,寻找航海专家对模型各分目标层指标的辨识建议,根据航海专家建议构建对

比模糊判断矩阵。

2) 计算权向量概率。遵循模糊层次计算原则,求取判断矩阵权向量,应用分析法将判断矩阵权向量由隶属度函数变换为概率。

3) 计算航海专家权重值。通过专家座谈和问卷调查方式依据专家的航海经验、文化程序和职称等因素,建立专家权重评估体系,评估参与专家的权重系数,根据专家权重系数,采取加权法对权向量概率进行信息融合。

4) 计算权重。依据专家建议融合各目标权向量,计算底目标指标对象层权重的概率函数,根据概率函数的大小排序,辨识重要的风险因素。

2.1 建立判断矩阵

根据层次分析法模糊集建立方式,结合层次分析法的九级标度法,对比较的九标度辨识术语所搜寻的专家建议进行定义^[10],见表1。

表 1 辨识术语的模糊数集合
Table 1 sets of fuzzy numbers for identifying terms

模糊集合 l_j, n_j, u_j	倒数 $1/u_j, 1/n_j, 1/n_j$	辨识术语	模糊数
(1,1,1)	(1,1,1)	两因素具有对等重要性	\widehat{B}_1
(3,2,1)	(1,1/2,1/3)	同样重要与较重要之间	\widehat{B}_2
(4,3,2)	(1/2,1/3,1/4)	前因素比后因素较重要	\widehat{B}_3
(5,4,3)	(1/3,1/4,1/5)	较重要与很重要之间	\widehat{B}_4
(6,5,4)	(1/4,1/5,1/6)	前因素比后因素很重要	\widehat{B}_5
(7,6,5)	(1/5,1/6,1/7)	很重要与最重要之间	\widehat{B}_6
(8,7,6)	(1/6,1/7,1/8)	前因素比后因素最重要	\widehat{B}_7
(9,8,7)	(1/7,1/8,1/9)	最重要与超重要之间	\widehat{B}_8
(9,9,8)	(1/8,1/9,1/9)	前因素与后因素超重要	\widehat{B}_9

从表1的辨别术语中,搜寻每一航海专家的评估建议,对各目标层指标建立判断矩阵。设定目标层次模型某一层有*i*个因素,用 \widehat{b}_{ji} 代表第*j*

个因素对第*i*个因素的重要程度对比结果,此目标层的判断矩阵 \widehat{B} 表示为:

$$\tilde{B} = (\tilde{b}_{ji})_{m \times n} = \begin{bmatrix} 1,1,1 & (u_{12}, n_{12}, l_{12}) & \dots & (u_{1m}, n_{1m}, l_{1m}) \\ (\frac{1}{l_{21}}, \frac{1}{n_{12}}, \frac{1}{u_{12}}) & (1,1,1) & \dots & (u_{2m}, n_{2m}, l_{2m}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\frac{1}{l_{1m}}, \frac{1}{n_{1m}}, \frac{1}{u_{1m}}) & (\frac{1}{l_{2m}}, \frac{1}{n_{2m}}, \frac{1}{u_{2m}}) & \dots & (1,1,1) \end{bmatrix},$$

$$j, i = 1, 2, \dots, m; i > j \quad \dots (1)$$

2.2 计算权向量概率

依据层次分析法的修正公式，计算判断矩阵 \tilde{B} 列向量值：

$$VE_j = \sum_{i=1}^m \tilde{b}_{ji} = (\sum_{i=1}^m l_{ji}, \sum_{i=1}^m n_{ji}, \sum_{i=1}^m u_{ji}), \quad j=1, 2, \dots, m \quad \dots (2)$$

对式(2)判断矩阵 \tilde{B} 进行归一化标准计算，求取各目标层权向量的模糊数：

$$\begin{aligned} \tilde{E}_j &= \frac{VE_j}{\sum_{i=1}^m VE_j} \\ &= \left[\sum_{i=1}^m l_{ji} / \sum_{i=1}^m l_{ji} + \sum_{h=1, h \neq j}^m \sum_{i=1}^m u_{hi} / \sum_{h=1}^m \sum_{i=1}^m n_{hi}, \sum_{i=1}^m n_{ji} / \sum_{h=1}^m \sum_{i=1}^m n_{hi}, \sum_{i=1}^m u_{ji} / \sum_{i=1}^m u_{ji} + \sum_{h=1, h \neq j}^m \sum_{i=1}^m l_{hi} \right] \\ j &= 1, 2, \dots, m \quad \dots (3) \end{aligned}$$

式(3)中， \tilde{E}_j 代表判断矩阵 \tilde{B} 第j个指标权重| 对模糊集合 \tilde{E}_j 取 β 截集，得到可信度 $1-\beta$ 下的模糊数， $(\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \dots, \tilde{E}_m)^k$ 构成判断矩阵 \tilde{B} 的特点 模糊截集 \tilde{E}_j^β ：
向量。

$$\tilde{E}_j^\beta = (L_j^\beta, u_j^\beta) = (\beta(N_j - L_j) + L_j, \beta(u_j - N_j) + N_j), \quad j=1, 2, \dots, m \quad \dots (4)$$

式(4)中， $\beta=0$ 时， \tilde{E}_j^β 代表100%可信区间， 式(6)式(7)对判断矩阵指标的权重值
 $\beta=5\%$ 时， \tilde{E}_j^β 代表95%可信区间， $\beta=95\%$ 时， 变换为分布函数：
 \tilde{E}_j^β 代表5%可信区间。

在仿真过程中产生一定概率的随机向量，使用统计法评估模型数字特性，求取符合实际的数值结果。因为输入的航海专家评估数据具有不确定性，可运用分布函数对不确定性进行仿真。函数分布众数为a、上限为d、下限为b的概率分布为：

$$P(x | b, a, d) = \begin{cases} \frac{2(x-b)}{(a-b)(d-b)}, & a \geq x \geq b \\ \frac{2(a-x)}{(a-b)(a-d)}, & d \geq x > a \end{cases} \quad \dots (5)$$

$$\begin{cases} a_j = \sum_{i=1}^m n_{ji} / \sum_{h=1}^m \sum_{i=1}^m n_{hi} \\ b_j = \sum_{i=1}^m l_{ji} / \sum_{i=1}^m l_{ji} + \sum_{h=1, h \neq j}^m \sum_{i=1}^m u_{hi} \\ d_j = \sum_{i=1}^m u_{ji} / \sum_{i=1}^m u_{ji} + \sum_{h=1, h \neq j}^m \sum_{i=1}^m l_{hi} \end{cases} \quad \dots (6)$$

$J=1, 2, \dots, m$

$$p_j(x_j | b_j, a_j, d_j) = p \left(\frac{x_j | \sum_{i=1}^m l_{ji} / \sum_{i=1}^m l_{ji} + \sum_{h=1, h \neq j}^m \sum_{i=1}^m u_{hi}, \sum_{i=1}^m n_{ji} / \sum_{h=1}^m \sum_{i=1}^m n_{hi}}{\sum_{i=1}^m u_{ji} / \sum_{i=1}^m u_{ji} + \sum_{h=1, h \neq j}^m \sum_{i=1}^m l_{hi}} \right) \quad \dots (7)$$

首先随机产生1000组样本数值，然后仿真分布函数的任意性，从而计算各目标层向量的可信区间和众数。

2.3 计算航海专家权重

根据专家座谈和问卷调查人员的职称(g_1)航海经验(g_2)冰区航行经验(g_3)和文化程度

等因素建立航海人员经验评估指标体系^[11]（见表 2）。通过对参与工作的航海专家经验综合评估，得到各专家的权重值。

设有 n 位航海专家参与了工作，各航海专家总分 $E^{(h)}$ ，权重值 $\lambda^{(h)}$ ，根据式（8）、式（9）计算求取：

$$E^{(h)} = E_{g1}^{(h)} + E_{g2}^{(h)} + E_{g3}^{(h)} + E_{g4}^{(h)}, \quad t=1, 2, \dots, n \quad \dots\dots (8)$$

$$\lambda^{(h)} = \frac{E^{(h)}}{\sum_{h=1}^n E^{(h)}}, \quad h=1, 2, \dots, n, \quad \sum_{h=1}^n \lambda^{(h)} = 1 \quad \dots\dots (9)$$

表 2 航海专家评估指标
Table 2 Evaluation indicators of navigation experts

评估指标	类别	级别
职称 g_1	正高	5
	副高	4
	中级	3
	初级	2
	其他	1
航海经验 g_2	> 20 年	5
	16~20 年	4
	11~15 年	3
	6~10 年	2
	1~5 年	1
冰区航行经验 g_3	> 15 年	5
	11~15 年	4
	6~10 年	3
	3~5 年	2
	1~2 年	1
文化程度 g_4	研究生	5
	本科	4
	专科	3
	中专	2
	其他	1

2.4 计算总权重
依据各航海专家的权重，运用加权法对向量

的分布函数进行数值融合^[12]，则

$$\bar{p}(x_j|b_j,a_j,d_j)=\sum_{g=1}^n \lambda^{(g)} p^{(g)}(x_j|b_j,a_j,d_j), j=1, 2, \dots, m \quad \dots\dots (10)$$

将对象层下的目标层设定为第 1 层，各分目标层设定为 2 ~ (m-1) 层，对各个层级的权重

进行融合，求取相对于对象层各层级融合权重的分布函数：

$$\bar{Q}_j^{(h)} = \prod_{h=1}^{m-1} \bar{w}_j^{(h)} = \prod_{h=1}^{m-1} p_j^{(h)}(x_j | b_j, a_j, d_j), \quad j=1, 2, \dots, m \quad \dots\dots(11)$$

式（11）中， $\bar{w}_j^{(h)}$ 代表第 h 层指标权重值， $\bar{Q}_j^{(h)}$ 代表第 h 层指标对于对象层的融合权重， $p_j^{(h)}(x_j|b_j,a_j,d_j)$ 代表第 h 层指标权向量分布函数。

3 冰区航行风险因素辨识研究

根据 2.1 节判断矩阵表述的辨识术语，采用座谈和问卷调查方式搜寻到 6 位航海专家对冰区船舶航行风险因素的辨识建议。表 3 为航海专家

对于外部环境目标中分目标层指标 ($d_i \sim d_{15}$) 的辨识建议^[13]。

3.1 组建判断矩阵

$$\widehat{B}_{d1}^{(B)} = \begin{bmatrix} (6,5,4) & (3,2,1) & (4,3,2) & (1/4,1/5,1/6) & (1,1,1) \\ (9,9,8) & (6,5,4) & (8,7,6) & (1,1,1) & (6,5,4) \\ (3,2,1) & (1,1/2,1/3) & (1,1,1) & (1/6,1/7,1/8) & (1/2,1/3,1/4) \\ (4,3,2) & (1,1,1) & (3,2,1) & (1/4,1/5,1/6) & (1,1/2,1/3) \\ (1,1,1) & (1/2,1/3,1/4) & (1,1/2,1/3) & (1/8,1/9,1/9) & (1/4,1/5,1/6) \end{bmatrix}^{(B)}$$

3.2 计算向量概念分布

运用式 (3) 对判断矩阵的权重进行计算,

从而得到 $\widehat{B}_{d1}^{(B)}$ 矩形权向量:

$$\widehat{B}_{d1}^{(B)} = \begin{bmatrix} 0.306\ 6 & 0.218\ 5 & 0.144\ 9 \\ 0.634\ 1 & 0.528\ 2 & 0.416\ 9 \\ 0.130\ 2 & 0.778\ 0 & 0.044\ 8 \\ 0.204\ 6 & 0.130\ 3 & 0.077\ 5 \\ 0.068\ 7 & 0.041\ 0 & 0.029\ 5 \end{bmatrix}^{k \times (B)}$$

运用式 (6) 式 (7) 将模糊向量变换为分布函数:

$$Pd11(B)(Xd11 | bd11, ad11, dd11) = P(Xd11 | 0.306\ 6, 0.218\ 5, 0.144\ 9)$$

3.3 计算评判专家权重

依据式 (8) 式 (9) 的计算获取 6 名航海专家 (1~6) 的权重值 λ_h 分别为 (0.180 8, 0.141 9, 0.193 8, 0.154 8, 0.089 9, 0.237 8)^k。通过式 (10) 对 6 名航海专家判断数值进行融合, 获得冰区航行风险因素 d11 指标的概率函数和分布函数^[14], 见图 2。

3.4 计算目标权重

表 3 外部风险因素两两比对辨识建议

Table 3 suggestions for pairwise identification of external risk factors

航海专家	目标指标	d15	d14	d13	d12	d11
1	d15	(1,1,1)	(1,1,1)	(5,4,3)	(1/3,1/4,1/5)	(4,3,2)
	d14	(1,1,1)	(1,1,1)	(5,4,3)	(1/3,1/4,1/5)	(5,4,3)
	d13	(1/3,1/4,1/5)	(1/3,1/4,1/5)	(1,1,1)	(1/5,1/6,1/7)	(1/2,1/3,1/4)
	d12	(5,4,3)	(5,4,3)	(7,6,5)	(1,1,1)	(8,7,6)
	d11	(1/2,1/3,1/4)	(1/3,1/4,1/5)	(4,3,2)	(1/6,1/7,1/8)	(1,1,1)
2	d15	(1,1,1)	(1/5,1/6,1/7)	(1,1/2,1/3)	(1/5,1/6,1/7)	(1/3,1/4,1/5)
	d14	(7,6,5)	(1,1,1)	(3,2,1)	(1,1,1)	(3,2,1)
	d13	(3,2,1)	(1/4,1/5,1/6)	(1,1,1)	(1/4,1/5,1/6)	(1/2,1/3,1/4)
	d12	(7,6,5)	(6,5,4)	(6,5,4)	(1,1,1)	(3,2,1)
	d11	(5,4,3)	(1,1/2,1/3)	(4,3,2)	(1,1/2,1/3)	(1,1,1)

将各位航海专家对各目标层指标辨识建议两两比对组成判断矩阵。如 B 航海专家对冰区航海风险因素判断矩阵可表示如下:

依据式 (11) 对各目标层相对对象层权重分布函数计算目标权重。表 4 是计算出的分目标层指标相对于对象层的目标权重, 分别用百分比、众数和 95% 可信度区间 $[p_{aj}, \bar{p}_{aj}]$ 表示。

从表 4 可以看出, 风、能见度及海冰密度是影响冰区船舶航行安全最重要的因素, 其众数权重 (在 95% 可信度) 等于大于 13%; 海冰厚度和海区气温是影响冰区船舶航行安全的次要因素, 其众数权重占比 10% 左右; 潮流、潮汐和冰流是影响冰区船舶航行安全的一般因素, 其众数权重占比 7% 左右; 海浪和海水温度对冰区船舶航行安全影响最小, 其众数权重占比小于 5%。

3.5 结果验证

从数值和矩形模型两方面对本文冰区船舶航行风险辨识结果进行有效性分析和验证。

3.5.1 航海专家判断数值验证

采用模糊矩阵中的模糊数去模糊化运算变换为常规模矩阵, 运用层次分析法对各航海专家判断数值进行分析。

航海专家	目标指标	d15	d14	d13	d12	d11
3	d15	(1,1,1)	(1,1/2,1/3)	(1,1/2,1/3)	(1/6,1/7,1/8)	(1/4,1/5,1/6)
	d14	(3,2,1)	(1,1,1)	(3,2,1)	(1/3,1/4,1/5)	(1/3,1/4,1/5)
	d13	(3,2,1)	(1,1/2,1/3)	(1,1,1)	(1/5,1/6,1/7)	(1/3,1/4,1/5)
	d12	(8,7,6)	(5,4,3)	(7,6,5)	(1,1,1)	(3,2,1)
	d11	(6,5,4)	(3,2,1)	(5,4,3)	(1,1/2,1/3)	(1,1,1)
4	d15	(1,1,1)	(4,3,2)	(3,2,1)	(1,1/2,1/3)	(1,1,1)
	d14	(1/2,1/3,1/4)	(1,1,1)	(1/2,1/3,1/4)	(1/2,1/3,1/4)	(1/3,1/4,1/5)
	d13	(1,1/2,1/3)	(4,3,2)	(1,1,1)	(3,2,1)	(1/3,1/4,1/5)
	d12	(3,2,1)	(4,3,2)	(1,1/2,1/3)	(1,1,1)	(1/2,1/3,1/4)
	d11	(1,1,1)	(5,4,3)	(5,4,3)	(4,3,2)	(1,1,1)
5	d15	(1,1,1)	(1/2,1/3,1/4)	(1,1/2,1/3)	(1/5,1/6,1/7)	(1/3,1/4,1/5)
	d14	(4,3,2)	(1,1,1)	(3,2,1)	(1/3,1/4,1/5)	(1,1/2,1/3)
	d13	(3,2,1)	(1,1/2,1/3)	(1,1,1)	(1/4,1/5,1/6)	(1/2,1/3,1/4)
	d12	(7,6,5)	(5,4,3)	(1,1/2,1/3)	(1,1,1)	(1/2,1/3,1/4)
	d11	(5,4,3)	(3,2,1)	(4,3,2)	(1/2,1/3,1/4)	(1,1,1)
6	d15	(1,1,1)	(1/2,1/3,1/4)	(1,1/2,1/3)	(1/8,1/9,1/9)	(1/4,1/5,1/6)
	d14	(4,3,2)	(1,1,1)	(3,2,1)	(1/4,1/5,1/6)	(1,1/2,1/3)
	d13	(3,2,1)	(1,1/2,1/3)	(1,1,1)	(1/6,1/7,1/8)	(1/2,1/3,1/4)
	d12	(9,9,8)	(6,5,4)	(8,7,6)	(1,1,1)	(6,5,4)
	d11	(6,5,4)	(3,2,1)	(4,3,2)	(1/4,1/5,1/6)	(1,1,1)

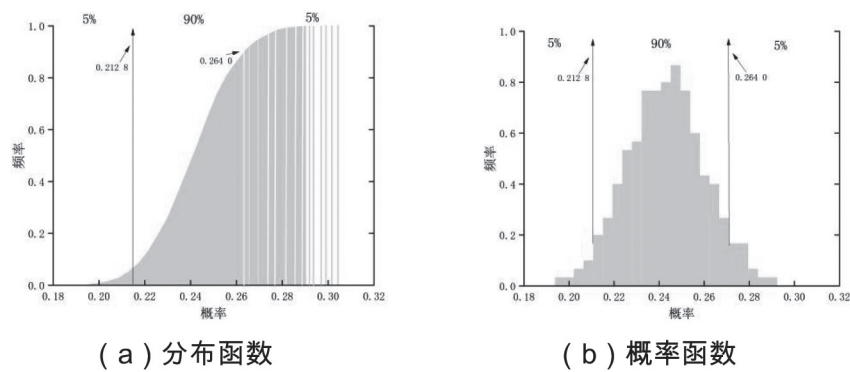


图 2 冰区航行风险因素 d11 指标的分布函数和概率函数
Fig. 2 Distribution function and probability function of navigation risk factor D11 in ice area

以 $\tilde{B}_{d_1}^{(B)}$ 为例介绍计算过程，选取 $\tilde{B}_{d_1}^{(B)}$ 矩阵中各模糊数的中值建立 AHP 评估矩阵 $B_{d_1}^{(B)}$ ，并逐一检验，得到如下结果：

$$B_{d_1}^{(B)} = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 & 1/9 & 1/5 \\ 3 & 1 & 2 & 1/5 & 1/2 \\ 2 & 1/2 & 1 & 1/7 & 1/3 \\ 9 & 5 & 7 & 1 & 5 \\ 5 & 2 & 3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}^{(B)}$$

$$\omega_{d_1}^{(B)} = (0.0431, 0.1997, 0.0719, 0.5690, 0.1913) = 5.1181, DI=0.0288, DV=0.0256$$

表 4 指标权重分布
Table 4 weight distribution of indicators

分目标指标	众数	占比%	95%可信区间 ($p_{d_j}, \overline{p_{d_j}}$)
风况 D_{11}	0.145 9	14.20	[0.157 5,0.126 9]
能见度 D_{12}	0.259 8	25.22	[0.277 5,0.235 7]
气温 D_{13}	0.102 0	9.96	[0.108 6,0.083 9]
潮流 D_{14}	0.061 9	6.08	[0.068 6,0.050 1]
潮汐 D_{15}	0.063 1	6.19	[0.072 1,0.054 2]
海水温度 $D_{21.1}$	0.031 8	3.16	[0.037 2,0.029 7]
海浪 $D_{21.2}$	0.052 1	5.13	[0.057 9,0.047 8]
海冰密度 $D_{22.1}$	0.141 2	13.75	[0.149 9,0.127 7]
海冰厚度 $D_{22.2}$	0.093 8	9.16	[0.105 3,0.077 1]
冰流 $D_{22.3}$	0.071 9	7.04	[0.080 9,0.068 2]

根据表 2 对一致性评估标准， $\tilde{B}_{d_1}^{(B)}$ 矩阵中 DI 数值为 0.028 8，符合小于 1 的要求，其评估矩阵具有一致性。

以此类推，计算求取各名航海专家评估矩阵均符合一致性要求。

3.5.2 模型验证

①对比验证

$$W_{defuzzification} = \frac{1}{3}(\sum_{i=1}^m l_{ji} / \sum_{i=1}^m l_{ji} + \sum_{h=1, h \neq j}^m \sum_{i=1}^m u_{hi} + \sum_{i=1}^m n_{ji} / \sum_{h=1}^m \sum_{i=1}^m n_{hi} + \sum_{i=1}^m u_{ji} / \sum_{i=1}^m u_{ji} + \sum_{h=1, h \neq j}^m \sum_{i=1}^m l_{hi})$$

此层次分析法去模糊数据可以看到，仿真模糊层次分析法和层次分析法计算结果一致，从而验证了仿真模拟层次分析法的科学性和有效性。

②验证结果

从国内外相关冰区航行研究看出，能见度

根据 6 名航海专家的评估建议，利用 CHANG^[15]层次分析法，获得层次分析法模型分目标层指标对于对象层权重，见表 5。层次分析法计算得到的结果用区间隔离、去模糊化数据和权向量 (\tilde{E}_j) 三个指标数据表示，方便对仿真模糊层次分析法运算求取的结果相比较。模糊层次去模糊化，运用下列公式计算：

和风被认为是船舶航行安全的重要因素，在 IMO 规则中也有海冰密度对冰区航行船舶安全因素的分析^[16]。本文基于仿真模拟层次分析法计算结论与国内外相关研究成果高度一致，从而验证了本文结果的科学和合理性。

表 5 权重的去模糊化与权向量数据
Table 5 de-fuzzification of weights and weight vector data

分目标指标	去模糊化数据	权向量 (\tilde{E}_j)
风况 D_{11}	0.144 2	(0.124 6, 0.137 5, 0.080 6)
能见度 D_{12}	0.258 8	(0.353 1,0.245 0, 0.169 3)
气温 D_{13}	0.060 6	(0.099 0,0.054 5,0.028 6)
潮流 D_{14}	0.091 2	(0.150 7,0.092 1,0.051 8)
潮汐 D_{15}	0.064 0	(0.099 5,0.058 3,0.034 3)
海水温度 $D_{21.1}$	0.035 4	(0.123 1,0.081 8,0.058 3)
海浪 $D_{21.2}$	0.055 0	(0.084 8,0.053 0,0.030 9)
海冰密度 $D_{22.1}$	0.145 2	(0.206 7,0.141 1,0.087 7)
海冰厚度 $D_{22.2}$	0.100 7	(0.206 7,0.096 0,0.059 5)
冰流 $D_{22.3}$	0.077 9	(0.111 5,0.074 6,0.047 5)

4 结束语

本文基于仿真模拟层次分析方法, 辨识能见度、风、海冰密度为影响冰区船舶航行安全的主要因素, 并从模型和数值方面对本文冰区船舶航行风险因素辨识研究进行合理性分析和验证。

本文提出的辨识风险影响因素可为冰区船舶航行险情建模中模型参数指标的取舍提供借鉴, 同时为冰区船舶航行险情评估权重计算提供理论支持。

参考文献:

- [1] 胡甚平, 轩少永, 刘宇, 付姗姗, 席永涛. 北极冰区船舶安全航行过程风险动态仿真[J]. 极地研究, 2019,31(01):84-93.
- [2] VAIZEZ B O A, GOER A F, KUZMIN V, et al. Risk management model of winter navigation operations[J]. Marine pollution bulletin, 2016, (108):242-262.
- [3] KHAN F, YANG M, VETCH B, et al. Transportation risk analysis framework for Arctic Waters[c]// Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, CA, USA 2014.
- [4] KUM S, SAHIN B. A root cause analysis for Arctic Marine accidents from 1993 to 2011[J]. Safety science, 2015, 74:206-220.
- [5] 席永涛, 付姗姗, 陈伟炯, 秦庭荣, 王建忠. 北极水域船舶航行风险管理研究现状分析[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(03):67-76.
- [6] 郭丰田, 亚历山大·彼得罗夫, 甄飞. 俄罗斯瓦尼诺港冰区航行探析[J]. 世界海运, 2019, 42(03):44-48.
- [7] 李壮, 付姗姗, 高郭平, 席永涛, 胡甚平. 海冰影响下船舶北极水域航行风险评估方法[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(03):92-98.
- [8] 周建文, 赵炎平, 席永涛. 冰区船舶模拟航行设计与自动评估方案[J]. 中国航海, 2021, 44(01):1-7.
- [9] 张伟斌, 邓雨亭, 邹紫瑶, 冯姚瑶. 破冰船护航条件下的船舶安全域划分方法[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(03):99-104.
- [10] 蔡梅江, 曹伟. 北极东北航道航行实践与安全性研究[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(03):77-83.
- [11] 夏登柱. 北极东北航道通航船舶应用的规则和规则[J]. 船舶与海洋工程, 2020, 36(01):51-56.
- [12] 焦宁泊, 黄永亮. 船舶冰区航行作业纪实及注意事项[J]. 世界海运, 2019, 42(01):39-42+52.
- [13] 戴厚兴, 吴兆麟, 刘大刚. 中国北方海域冰区航行船舶风险评估预警系统设计与开发[J]. 中国航海, 2018, 41(01):92-97.
- [14] 张宝新. 冰区航行及安全对策[J]. 航海, 2018, (02):46-48.
- [15] CHANG D Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP[J]. European journal of operational research, 1996, 95(3):649-655.
- [15] 蔡梅江. 近三年北极东北航道航行探索实践[J]. 世界海运, 2017, 40(03):15-19.

Study on Identification of Navigation Risk Factors in Ship Ice Area

LI Cheng—hai¹, LIU Jie¹, YU Qi—jun²

(1. Shandong Vocational College of Communications, Weifang 261206, China;

2. The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266041, China)

Abstract: In order to identify the risk factors affecting the safety of ship navigation in ice area, an analytic hierarchy process model of risk factors affecting ship navigation in ice area is proposed in this study. In view of the complexity and uncertainty in the identification of factors affecting ship navigation safety in ice area, a fuzzy analysis method based on simulation hierarchy process is proposed by combining Analytic hierarchy process (AHP), fuzzy number and simulation technology. This method is used to identify the influencing factors of ship navigation safety in ice area. The scientificity and rationality of the research on the identification of factors affecting ship navigation safety in ice area are analyzed and verified from two aspects of model and navigation expert value. The results of analysis and verification show that visibility, wind and sea water density are the main risk factors affecting the safety of ship navigation in the ice area.

Keywords: ice area navigation; influencing factors of safety; risk factor identification; analytic hierarchy process; fuzzy and simulation complex technology.