

# 基于模拟实验数据的靠泊风险指标确权方法

戴官全<sup>1</sup>, 杨神化<sup>2</sup>, 王宗开<sup>1</sup>

(1. 泉州师范学院航海学院, 福建 泉州 362000; 2. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 为了提高风险指标权重的客观性, 使风险评价结果更加真实, 提出一种以实验数据来确定船舶靠泊风险指标权重的方法。以厦门东渡港区1#、2#泊位邮轮靠泊风险评估为例, 对模拟操纵实验数据进行统计分析, 引入变异系数法, 并采用逆向思维的方法确定风险指标的权重。该方法消除了指标确权中的人为因素, 对模拟实验数据的分析与应用具有一定意义。

**[关键词]** 靠泊风险; 指标权重; 实验数据; 变异系数

**[中图分类号]** U 676

## The Method of Determining the Weight of Berthing Risk Index Based on Simulation Experimental Data

DAI Guanquan<sup>1</sup>, YANG Shenhua<sup>2</sup>, WANG Zongkai<sup>1</sup>

(1. Navigation Institute, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China;

2. Navigation Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to improve the objectivity of the weight of risk indicators and the authenticity of the risk assessment results, we propose a method to determine the weight of risk indicators by experimental data. Taking the risk assessment of large cruise berthing at No. 1 and 2 berths of Dongdu Port Area of Xiamen Port as an example, we statistically analyze the experimental data from the simulation maneuvering and introduce the coefficient of variation method and adopt the converse thinking method to determine the weight of risk indicators. This method eliminates the human factor in the determination of the index weight, and has certain significance for the analysis and application of simulation experimental data.

**Keywords:** berthing risk; index weight; experimental assessment; coefficient of variation

## 0 引言

风险评价已广泛运用于海上交通安全领域, 主要方法有层次分析法、熵权法、模糊综合评价法、神经网络法、因子分析法等<sup>[1]</sup>。风险评价的核心是风险指标体系(合理性)和风险指标权重(客观性)。由于大量风险无法量化, 在确定指标权重时, 大多数评价方法都是在专家定性分析的基础之上完成的<sup>[2-5]</sup>, 风险评价的结果大多受到主观因素的影响。

随着仿真技术的发展, 国内外学者已采用模拟实验进行风险评估<sup>[6-7]</sup>, 我国在新建或改建泊位进行通航安全评估时, 通常也是采用虚拟仿真技术进行大量的模拟操纵实验<sup>[8]</sup>。这种直接采用实验结

**[收稿日期]** 2019-08-22

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(51579114)

**[作者简介]** 戴官全(1986—), 男, 助教、硕士, 从事航海技术研究。通信作者: 杨神化(1976—), 男, 教授、博导, 从事航海仿真技术与航海智能技术研究。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

果来评估风险的方法有一定的客观性和针对性,但评价较为笼统,缺乏对各个指标的详细分析。本文通过提取实验数据来确定各个指标的权重,可为模拟实验数据分析和风险评价提供参考。

## 1 建立风险评估指标体系

在安全评价的整个过程中,首要任务就是确定指标体系。识别风险指标的方法<sup>[9]</sup>一般采用头脑风暴法、事故树分析法和德尔菲法(问卷调查)等。为了更加科学、高效地确定风险评价指标,通常要遵循风险指标的完整性、代表性、可操作性和可测量性等原则。本文以《厦门港东渡港区 0#~4#泊位改建工程,8 万吨级邮轮和 10 万吨级邮轮靠离东渡 1#、2#邮轮泊位三维模拟操纵试验报告》项目(以下简称项目)为例,列出厦门东渡港区 1#、2#泊位邮轮靠泊风险评估的部分指标,如图 1 所示。

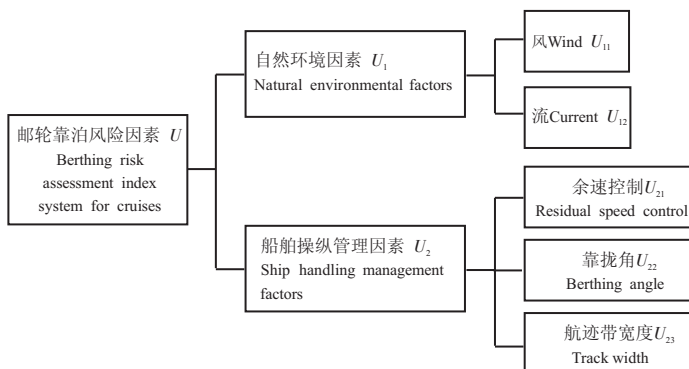


Fig.1 No.1 and 2 berths of Dongdu Port Area of Xiamen Port risk assessment index system

## 2 利用实验数据确立指标权重

风险指标体系建立后,还需要对指标进行客观的权重设置。通航安全评估时往往生成大量的模拟操纵实验数据,为指标的确权提供了基础。本文收集了项目中东渡港区 1#、2#邮轮泊位的模拟操纵实验数据进行分析。

### 2.1 方法及思路

变异系数法是一种客观赋权法,它是在所有统计数据中,统计观测数据的变异程度来确定指标权重的。如果观测数据的变异程度大,则赋予的权重也较大;反之,赋予的权重就较小<sup>[10]</sup>。本文通过统计分析实验数据的变异系数比值的大小,来确定指标权重。

利用实验数据来确定风险指标权重有两种情况,一种是风险评价指标是实验初始状态指标,另一种是实验过程或结果数据指标。对于实验过程和结果指标,只需统计分析过程或结果的数据,将变异系数之比作为指标的权重比;对于初始指标(如风、流等),无法直接比对和判断,它对船舶靠泊风险的影响无法量化,本文以逆向思维的方法确立初始指标的权重,研究模型如图 2 所示。

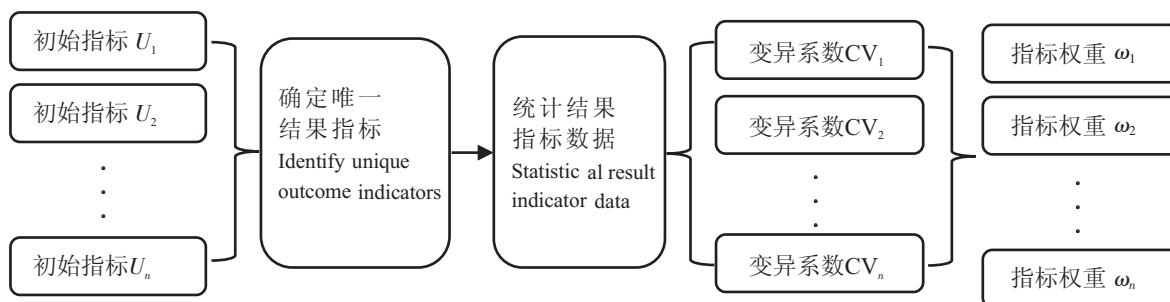


Fig.2 Initial indicator weight establishment model

首先,分类提取实验初始数据和结果数据,并找出受初始状态指标影响变化最为明显的一项实验结果数据。

其次,将这一项实验结果数据作为统计分析的对象,并假定为衡量初始状态指标重要程度的唯一结果指标,进行方案的合理性分析。

最后,在方案合理的情况下,统计分析不同初始状态下的实验结果数据,并计算变异系数,利用线性模型比对变异系数进而确定指标权重。

## 2.2 确立初始状态指标的权重

### 2.2.1 利用航迹带宽度确定风流指标的权重

风流是自然环境因素的两个重要指标,直接影响风险评估的结果。然而,不同船型受风流影响也不同,准确地说,每艘船舶受风流影响都不同<sup>[11]</sup>。

本文假定航迹带宽度作为体现船舶进出港操纵能力的唯一结果指标,在其他条件不变的情况,研究不同风流下的航迹带宽度变化情况,通过逆向思维的方法,得出风流对船舶操纵安全的影响程度,进而确定风流两个风险指标的权重。船舶航迹带宽度大,说明船舶操纵能力受风流影响大,船舶靠泊风险大;反之,船舶航迹带宽度小,说明船舶操纵性能好,靠泊风险小。

#### 1) 利用航迹带宽度来衡量船舶水上操纵能力的合理性

航迹带宽度也称为“保向宽度”,是指船舶航行时保持航迹过程中所占据的水域宽度<sup>[12]</sup>,航迹带宽度值的大小反映了船舶偏离航迹线的程度。除船舶操纵者的人为因素外,航迹带宽度大小就是船舶受外界因素影响的大小。外界因素可分为船舶因素、地理因素和自然环境因素三个方面。其中,船舶因素就是他船对本船航行的影响,本船在避让他船时,航迹带自然会增大;地理因素的影响是指有些水域环境复杂,船舶在航行过程中需要频繁转向,使得航迹带也变得弯曲复杂;自然环境因素也会影响船舶的航迹带宽度,其中主要的就是风和流,使船舶产生偏转、漂移等。

因此,利用航迹带宽度来衡量船舶操纵能力,必须排除船舶因素和地理因素,不能受到他船和地理水域的影响,那么在其他因素不变的情况下,航迹带宽度就只受自然环境的影响了,利用航迹带宽度来衡量船舶操纵能力就更加合理。

#### 2) 选择合理的航迹带宽度测量位置

选择航迹带宽度的测量位置需要根据实际情况具体分析,重点是不能受到他船和地理水域的影响或影响最小。如图3所示,东渡1#、2#邮轮泊位位于海沧大桥的南侧,进港船舶需要航经厦门港主航道,然后沿图示的A-B-C-D-E到达E点,东侧为码头平台,共有4段航程。其中,AB段为厦门港主航道的一段;BC和CD为东渡航道;DE为码头前沿水域。

根据东渡航道通航能力和通航限制规定,进出东渡0#及以北的泊位,船长超过260 m的船舶必须单线通航。故此,大型邮轮进出东渡1#、2#邮轮泊位时,在东渡航道内不会有其他大船通行,但是仍然有小型拖船(千吨级沙船和泥驳)、小型客船和渔船干扰。这些小型船舶基本沿航道的边界航行,最多占用约1/3的航道,基本不影响大型邮轮进出港航行。但在码头前沿水域可能受到轮渡船舶的

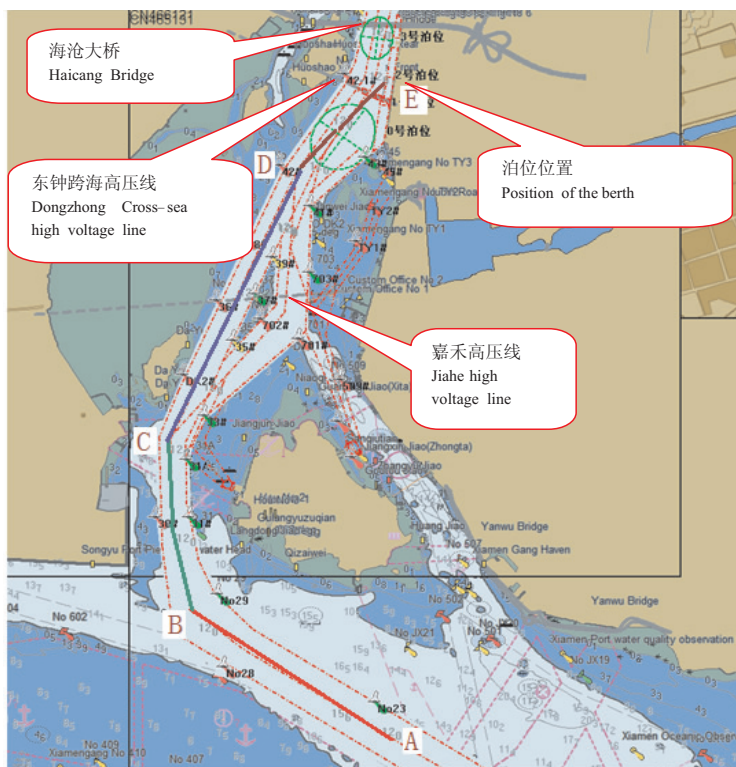


图3 东渡1#、2#邮轮泊位进港示意图

Fig.3 Inbound map of No.1 and 2 berths of Dongdu Port Area

干扰。

综上所述,  $AB$  航段为厦门港主航道, 进出船只较多;  $BC$  航段略有弯曲, 不适合测量;  $DE$  段为码头前沿水域, 需要调头或者调整航向, 且容易受到轮渡船舶干扰; 唯有  $CD$  航段为直线, 且大型船舶进出港时需要交通管制, 航道内没有其他大型船只通行。因此, 选择东渡航道中  $CD$  段作为航迹带宽度测量位置, 具有一定的合理性。

为了保证方案的合理性, 根据方案的分析结果, 再次访谈了相关专家, 专家一致认为, 选择  $CD$  段的航迹带宽度来衡量邮轮进出港的操纵能力, 较为合理。

### 2.2.2 实验数据的提取与计算

#### 1) 航迹带宽度的测量方法

根据前文所确定的位置 (东渡航道猴屿西侧,  $CD$  段), 采用电子海图显示与信息系统 (ECDIS) 的尾迹功能, 来测量船舶航行的最大航迹带宽度值, 如图 4 所示。

2) 以 10 万吨级邮轮靠离东渡 1#、2#邮轮泊位为例, 收集提取 6 级风、3 kn 流时, 10 万吨级邮轮靠离东渡 1#、2#邮轮泊位的最大航迹带宽度数据, 如表 1 所示。其中: 1~12 号为 1#泊位数据; 13~24 号为 2#泊位数据。

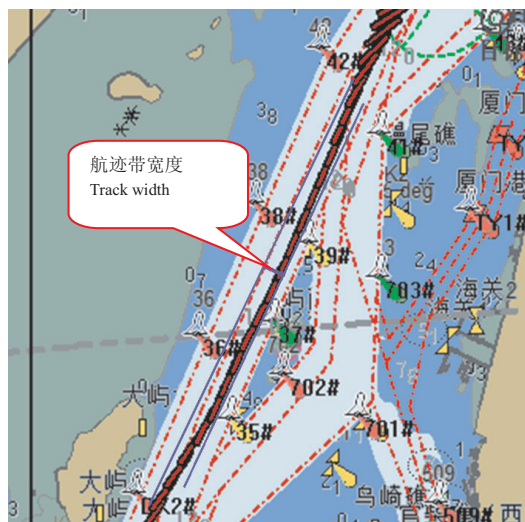


图 4 航迹带宽度测量

Fig.4 Track tape width measurement

表 1 最大航迹带宽度统计表

Tab.1 Maximum track tape width statistics

序号 Serial number	编号 Number	最大航迹带宽度 Maximum track width/m	序号 Serial number	编号 Number	最大航迹带宽度 Maximum track width/m
1	10M613112D1	71.8	13	10M613112D2	100.5
2	10M623112D1	147.2	14	10M623112D2	140.4
3	10M613121D1	85.3	15	10M613121D2	77.2
4	10M623121D1	108.3	16	10M623121D2	66.8
5	10M613221D1	211.8	17	10M613221D2	199.5
6	10M623221D1	125.7	18	10M623221D2	89.8
7	10M613122D1	115.1	19	10M613122D2	68.2
8	10M623122D1	68.2	20	10M623122D2	68.2
9	10M613222D1	168.8	21	10M613222D2	69.8
10	10M623222D1	102.5	22	10M623222D2	58.8
11	10M613211D1	97.2	23	10M613211D2	50.5
12	10M623211D1	58.4	24	10M623211D2	64.1

说明: 表中的编号是模拟实验编号。

Notes: The number in the table is the simulation experiment number.

#### 3) 计算标准差与变异系数

航迹带宽度指标的变异系数计算步骤如下。

$$\mu = (\sum_{i=1}^n \chi_i) / n = (\sum_{i=1}^{24} \chi_i) / 24 = 100.59(\text{m}). \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为航迹带宽度的算术平均值;  $\chi_i$  代表第  $i$  个数据的航迹带宽度值;  $n$  为数据的个数。

$\sigma$  为航迹带宽度的标准差,

$$\sigma = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (\chi_i - \mu)^2] / n} = \sqrt{[\sum_{i=1}^{24} (\chi_i - \mu)^2] / 24} = 43.69(\text{m}). \quad (2)$$



变异系数为:

$$T_{CV} = \sigma/\mu = 43.69/100.59 = 0.4343。 \quad (3)$$

4) 同样的方法可以得到: 6 级风、2.5 kn 流, 5 级风、3 kn 流, 5 级风、2.5 kn 流时, 10 万吨级邮轮靠离东渡 1#、2# 邮轮泊位的航迹带宽度数据。将数据统计整理汇总如表 2 所示。

### 2.2.3 实验统计权重确立

由于统计航迹带宽度值时, 其他指标保持不变, 只改变了风流指标, 因此, 航迹带宽度的大小及变异情况, 只受风流变化影响。为方便比较, 本文以 5 级风、2.5 kn 流为基本工况的起点值, 6 级风、3 kn 流为终点值, 分别比较风力增加 (5 级风、2.5 kn 流到 6 级风、2.5 kn 流, 5 级风、3 kn 流到 6 级风、3 kn 流) 和流速增大 (5 级风、2.5 kn 流到 5 级风、3 kn 流, 6 级风、2.5 kn 流到 6 级风、3 kn 流) 时, 航迹带宽度的变化情况, 流程如图 5 所示。

表 2 不同风流时的航迹带宽度变异系数统计表

Tab.2 Statistical formula of track width variation coefficient for different wind currents

风 Wind	流 Current/kn	
	2.5	3.0
5 级 BF 5	0.234 2	0.312 8
6 级 BF 6	0.264 0	0.434 3

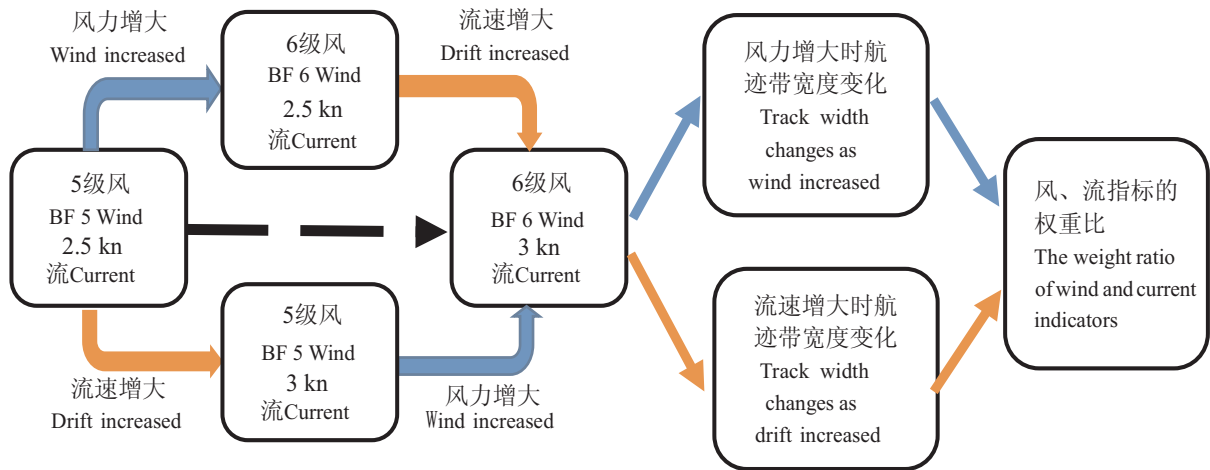


图 5 确定风、流指标权重比的流程图

Fig.5 Flow chart for determining the weight ratio of wind and current indicators

为方便比较与计算, 采用图像法作图得图 6。其中:  $K_1$ 、 $K_3$  分别表示 5 级风和 6 级风时流速增大的斜率;  $K_2$ 、 $K_4$  分别表示流速为 2.5 kn 和 3.0 kn 时风速增大的斜率。由图 6 可知, 无论是风力增加, 还是流速增大, 航迹带宽度值的变异系数都呈上升趋势, 其变化趋势是简单的一次线性函数模型。先纵向比较, 流速增大的斜率  $K_1$  明显大于风速增大的斜率  $K_2$ , 且  $K_3$  明显大于  $K_4$ ; 再横向比较, 流速增大的斜率  $K_1$  略小于风速增大的斜率  $K_4$ , 但  $K_3$  明显大于  $K_2$ ; 综合比较, 流速

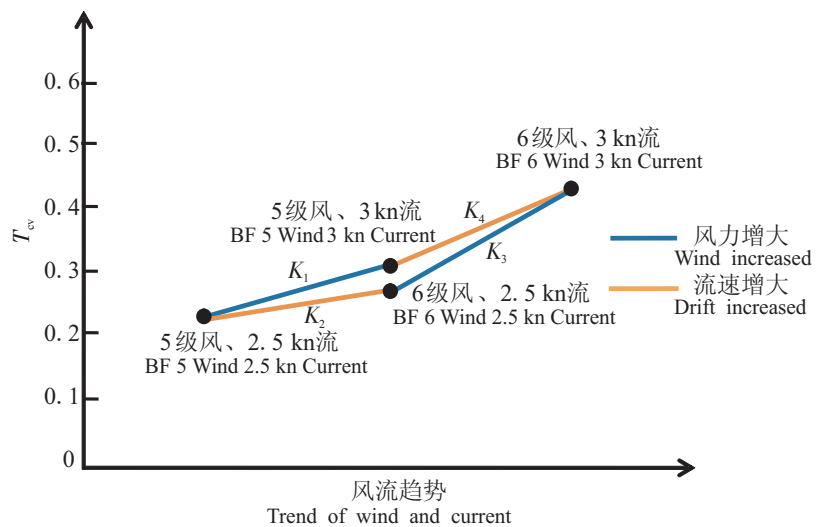


图 6 风流增大时变异系数变化趋势

Fig.6 Trend of variation coefficient when the wind and current speed increases

增大的斜率 ( $K_1 + K_3$ ) 明显大于风速增大的斜率 ( $K_2 + K_4$ )。因此本文认为, 流速增大比风力增大对船舶操纵地影响更大, 赋予的权重也应该更大。根据图像法结合一次函数计算公式可得出风、流指标的实验权重比:

$$\omega_1/\omega_2 = (K_2 + K_4)/(K_1 + K_3) = 0.6079。 \quad (4)$$

其中:  $\omega_1$  为风的指标权重;  $\omega_2$  为流的指标权重。

### 2.3 确立实验结果数据指标的权重

对于可直接收集或统计分析的实验结果数据指标, 采用变异系数法直接统计实验数据的变异系数, 将变异系数的比值作为指标的权重比。其中, 余速控制是指船舶到达码头前沿水域时, 对船舶速度的控制情况, 本文选取东渡港区 1#、2#邮轮泊位前沿、船舶调头区边界为研究点, 在实验数据中提取对地速度信息并进行统计分析。靠拢角是船舶接触码头的那一时刻, 船艏线与码头的夹角, 本文提取实验中船舶贴靠泊位时的船艏向 (HDG) 数据, 再用船艏向减去码头走向 (东渡邮轮泊位的码头走向为  $008^\circ$  或  $188^\circ$ ) 的绝对值, 作为靠拢角进行统计分析。航迹带宽度则如前文所述的方法进行测量, 取其最大航迹带宽度进行统计分析。

为使结果更加客观, 本文收集了同一种工况 (5 级风、2.5 kn) 下, 10 万吨级邮轮靠离东渡 1#、2#邮轮泊位的余速控制、靠拢角、航迹带宽度三个指标各 24 次的实验数据 (表 3), 并利用公式计算其三个指标的变异系数分别为 0.301 8、0.400 0、0.234 2。

表 3 对地速度, 靠拢角, 最大航迹带宽度数据统计表

Tab.3 Speed over the ground, Berthing angle, Maximum track tape width data statistics

序号 Serial number	编号 Number	对地速 SOG/kn	靠拢角 Berthing angle/ $(^\circ)$	最大航迹带宽度 Maximum track width/m
1	10M512112D1	1.244	1.9	72.2
2	10M522112D1	1.030	1.5	70.2
3	10M512121D1	1.139	0.8	69.3
4	10M522121D1	0.634	1.7	68.3
5	10M512221D1	1.273	1.0	124.0
6	10M522221D1	1.175	2.3	89.8
7	10M512122D1	1.105	0.5	62.8
8	10M522122D1	1.025	0.8	60.8
9	10M512222D1	1.504	1.5	115.5
10	10M522222D1	1.174	2.0	69.8
11	10M512211D1	1.682	1.8	118.4
12	10M522211D1	1.661	1.5	79.1
13	10M512112D2	0.535	1.6	66.1
14	10M522112D2	0.341	0.5	76.0
15	10M512121D2	1.128	2.1	70.7
16	10M522121D2	0.989	1.8	72.2
17	10M512221D2	0.968	0.8	95.4
18	10M522221D2	0.971	2.2	63.9
19	10M512122D2	0.857	1.9	92.3
20	10M522122D2	0.748	1.8	62.5
21	10M512222D2	1.040	1.5	110.2
22	10M512222D2	0.855	0.6	71.9
23	10M512211D2	1.308	1.9	70.0
24	10M522211D2	0.748	2.3	69.8
平均值 $\mu$		1.047	1.5	80.05
标准差 $\sigma$		0.316	0.6	18.75
变异系数 $T_{cv}$		0.302	0.4	0.23

## 2.4 确立风险指标的权重

根据各指标的权重比归一化处理,得出东渡港区1#、2#泊位邮轮靠泊风险评估指标的权重,如表4所示。

表4 大型邮轮靠泊风险评估指标权重

Tab.4 Large cruise ship berth risk assessment indicator weight

一级指标 Primary indicators	二级指标 Secondary indicators	实验统计权重比 Experimental statistical weight ratio	权重( $\omega$ ) Weight
自然环境因素 $U_1$ Natural environmental factors	风 Wind $U_{11}$	0.607 9	0.378 1
	流 Current $U_{12}$		0.621 9
船舶操纵管理因素 Ship maneuver management factors $U_2$	余速控制 Residual speed control $U_{21}$	0.301 8:0.400 0:0.234 2	0.322 4
	靠拢角 Berthing angle $U_{22}$		0.427 4
	航迹带宽度 Track width $U_{23}$		0.250 2

说明:表中的权重只适用于大型邮轮靠离厦门港东渡港区1、2#泊位,仅供其他工程项目参考。

Notes: The weights in the table are only applicable to berths No. 1 And No. 2 in dongdu port area of xiamen port for large cruise, and are only for reference of other projects.

由表4可知,10万吨级邮轮靠离东渡1#、2#邮轮泊位时,流的影响比风重要,靠拢角比余速控制重要等。针对此权重结果,调查访谈了“厦门引航站引航员、进出东渡港区的船长、通航评估专家、航海类大学教授”等专家学者,一致认为该权重较为合理,可以为大型邮轮靠离厦门港东渡港区1#、2#邮轮泊位提供参考,也可用于整个工程的风险评价。

## 3 结论

基于模拟操纵实验数据确定风险指标权重的方法,可以消除指标确权中的人为因素,提高风险指标权重的客观性。本文以厦门东渡港区1#、2#泊位邮轮靠泊风险评估为例,确立了指标权重,验证了基于模拟操纵实验数据确定风险指标权重的方法是可行的,指标的权重结果较为合理准确。较于传统的确权方法,该方法具有取材方便、操作简单、客观实用的优点,可为其他项目的模拟实验数据分析和风险评价提供参考。

### [ 参考文献 ]

- [1] 郭昱. 权重确定方法综述 [J]. 农村经济与科技, 2018, 29(8): 252-253.
- [2] GÜLÇİN BÜYÜKÖZKAN G Ç. A combined fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS based strategic analysis of electronic service quality in healthcare industry [J]. Expert Systems With Applications, 2012, 39(3): 2341-2354.
- [3] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用 [J]. 中国安全科学学报, 2008(5): 148-153.
- [4] 刘大海, 宫伟, 邢文秀, 等. 基于 AHP-熵权法的海岛海岸带脆弱性评价指标权重综合确定方法 [J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 462-467.
- [5] 郭晓黎, 王子健, 高小珣, 等. 基于模糊综合评价法的铁路货车运用效率分析 [J]. 铁道货运, 2017, 35(12): 35-39.
- [6] DELEFORTRIE G, VANTORRE M, VERZHBITSKAYA E. Evaluation of safety of navigation in muddy areas through real-time maneuvering simulation [J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2007, 133(2): 125-135.
- [7] 吴春杰. 基于船舶交通模拟实验的水域通航风险评估 [J]. 船海工程, 2011, 40(2): 156-160.
- [8] 王哲凯, 陈磊. 船舶操纵模拟器在通航安全评估中的应用 [J]. 天津航海, 2018(3): 10-12.
- [9] 许炳, 白霄. 项目风险识别、度量及评价研究综述 [J]. 项目管理技术, 2014, 12(5): 25-28.
- [10] 陈影, 翁建军, 郭国平. 港区水域通航环境综合评价模型研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2012(3): 571-574.
- [11] 潘纬超, 刘明俊. 新建大型海船长江安徽段拖航受风流影响定量分析 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2014, 38(2): 446-449.
- [12] 陶俊. 大型船舶进出港训练评估方法的研究与实现 [D]. 大连: 大连海事大学, 2009.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)