

文章编号:1005-9865(2020)05-0125-09

跨海桥梁船撞风险综合评估

郭 健,何威超

(浙江工业大学 桥梁工程研究所,浙江 杭州 310023)

摘 要:近年来全世界范围内船撞桥事故时常发生,尤其是大型跨海桥梁,对其进行合理的船撞桥风险评估逐渐成为桥梁安全运营的重要保障之一。通过对近年国内外船撞桥案例调研分析,确定了影响事故的多重因素,建立包括 4 个二级风险评价指标和 18 个三级指标的层次化评价指标体系,并运用层次分析(AHP)法和熵权法,对各评价指标进行主客观综合赋权,明确各个风险因素对船舶撞击的重要性程度,基于模糊数学理论对船撞桥风险进行多层次综合评判。以浙江省舟山朱家尖跨海大桥为工程背景,结合该桥某年船舶通航统计数据,运用上述方法进行船撞桥风险评估,计算表明朱家尖跨海大桥平均风险评价值为 4.22,属于可接受中风险水平,并提出了相应的风险控制对策及措施。

关键词:跨海桥梁;船撞桥;层次分析法;模糊理论;风险评估

中图分类号:U447 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2020.05.013

Comprehensive risk assessment of ship collision with sea-crossing bridge

GUO Jian, HE Weichao

(Institute of Bridge Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In recent years, there have been lots of ship-bridge collision accidents around the world, especially large sea-crossing bridges. Reasonable risk assessment of ship collision for sea-crossing bridges is an important guarantee for the safe operation of bridges. Through the investigation and analysis of ship-bridge collision accidents in recent years, multiple influencing factors leading to collision were determined and a hierarchical evaluation index system consisting of 4 secondary indicators and 18 third-level indicators was established. Based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Entropy Weight Method, the subjective and objective evaluation indicators were empowered to clarify the importance of various risk factors. According to the fuzzy theory, the risk of ship collision with sea-crossing bridge was evaluated comprehensively at multiple levels. As an example of sea-crossing bridge engineering, with the ship navigation statistics of a certain year, the risk assessment of ship collision with bridge for the Zhujiajian Sea-Crossing Bridge in Zhejiang Province was carried out by using the above methods. The results show that the average risk evaluation value of the Zhujiajian Sea-Crossing Bridge is 4.22, which belongs to the acceptable medium risk level. Relevant risk control measures are put forward.

Keywords: sea-crossing bridge; ship-bridge collision; analytic hierarchy process; fuzzy theory; risk assessment

近几年来,我国浙江省沿海地区跨海大桥发展迅猛,杭州湾跨海大桥、金塘大桥、西堠门大桥等大型跨海桥梁相继建成通车。在海域船舶通航量逐年递增的同时,伴随而来的跨海桥梁船撞事件也时常发生^[1],在导致跨海大桥受损毁坏的同时,也经常会造成巨大的人员伤亡和经济财产损失,影响交通出行。因此对跨海桥梁进行船撞风险评估,并提出对应的预防措施,保障桥梁安全运营,船只正常通行是十分有必要的^[2]。

收稿日期:2019-06-06
基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0809604);国家自然科学基金重点项目(U1709207);国家自然科学基金面上项目(51578506)
作者简介:郭 健(1973-),男,浙江杭州人,教授级高工,博士生导师,博士,长期从事跨海桥梁防灾减灾及智能监测等领域的研究。
E-mail: Guoj@ zjut.edu.cn

目前国内外学者对船撞桥风险评估多数集中在研究船撞概率方向,并且建立了较多运用广泛且可靠性强的概率计算模型,例如美国 AASHTO 规范模型^[3]、昆兹模型^[4]和拉森(O.D.Larsen)模型^[5]等。国内学者耿波等^[6]考虑了船舶横向分布和水位变化情况,基于昆兹模型提出了船撞三参数概率模型;戴彤宇^[7]统计了长江、珠江和黑龙江上的船桥碰撞事件,建立了船撞概率分析数据库。基于概率分析的风险评估方法能有效计算出船舶撞击后倒塌概率,具有一定的可靠性和实用性,但也存在一定的不足,这类研究多数针对内河桥梁船撞,主要考虑船舶年通航量、偏航概率、撞击概率等指标,而对跨海大桥船撞风险评估很少涉及,没有充分考虑跨海大桥复杂的海域环境、水文气象和船员海域驾驶情况等因素^[8]。在其他工程领域风险评估中,层次分析法以半定性半定量多准则分析的特点被广泛应用,并取得了不小的成果^[9]。

针对跨海桥梁船撞风险评估研究方面的不足,以浙江省舟山朱家尖跨海大桥为工程背景,根据影响船撞桥风险因素具有多方面、多层次的特点,引用 AHP 法建立风险评估指标模型,并运用主客观赋权得出各评判指标的权重值^[10]。结合朱家尖跨海大桥桥区通航条件及某年船舶通行统计数据,采用定量分析和定性分析相结合的方式,确定风险评价指标隶属度矩阵,引入模糊数学理论进行风险多级综合评估^[10],形成了系统的船撞桥风险评价体系,对朱家尖跨海大桥进行船撞风险评估,并根据不同影响因素提出了预防措施。

1 船撞桥事故风险分析

对船撞桥事件开展风险分析是进行风险评估的第一阶段,旨在找出所有可能导致船桥碰撞的危险源^[11]。对世界范围内跨海桥梁船撞事件进行广泛调研,如 2019 年 2 月韩国釜山俄罗斯籍货轮“希格兰号”与釜山 Gwangan 大桥相撞事件;2001 年 9 月美国德克萨斯州,拖船与 Queen Isabella 跨海大桥相撞事件;我国 2006 年 8 月,新加坡籍货轮与正处于施工阶段的杭州湾跨海大桥相撞事件^[12];2008 年 3 月,“勤丰 128”货轮与金塘大桥^[13]非通航桥孔碰撞事件。跨海大桥船撞风险影响因素主要包括通行船只因素、船员人为因素、通航环境因素及机构管理因素 4 个方面^[14]。根据浙江省舟山市朱家尖跨海大桥桥区通航条件及相关海事部门监管情况,给出了关于船撞桥风险的影响因素,具体如图 1 所示。

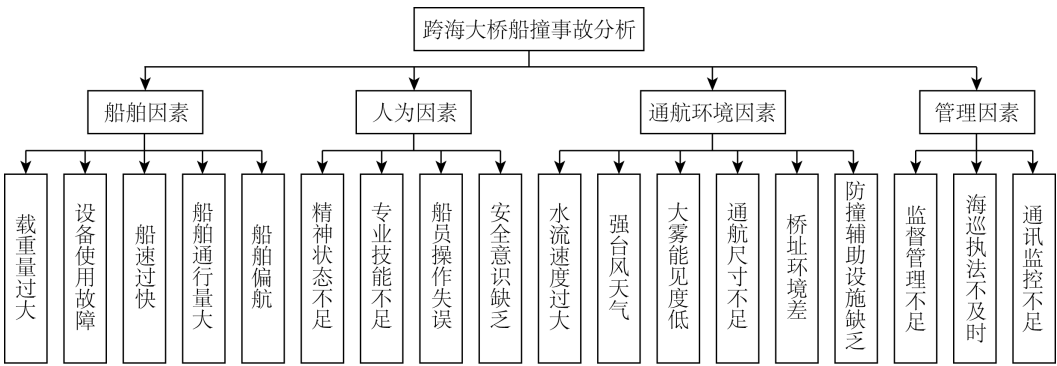


图 1 朱家尖跨海大桥船撞风险影响因素

Fig. 1 Risk factor of ship-bridge collision of the Zhujiajian Sea-Crossing Bridge

2 船撞桥事故风险评估

2.1 建立风险层次评价指标模型

基于上述对跨海桥梁船撞事故风险源分析,确定风险层次评价指标模型^[15]。将船桥碰撞事故风险作为一级评判指标 U , 确定通行船只因素、船员人为因素、通航环境因素、机构管理因素 4 个二级风险评价指标 $U = (U_1, U_2, U_3, U_4)$ 和 18 个三级风险评价指标 $U_i = (U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{ij})$, 形成船撞风险多层次评判指标模型^[16], 如表 1 所示。

表 1 船桥碰撞风险层次评判体系

Tab. 1 Index system of ship-bridge collision risk assessment

一级评判指标	二级评判指标	三级评判指标	指标分类
跨海桥梁 船舶撞击 风险 U	船舶因素 U_1	船舶载重量 U_{11} / t	定量
		船舶行驶中设备使用情况 U_{12}	定性
		船速 $U_{13} / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	定量
		船舶通行数量 $U_{14} / \text{艘}$	定量
		船舶通行路线 U_{15}	定性
		水流速度 $U_{21} / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	定量
	通航环境因素 U_2	风速 $U_{22} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	定量
		能见度 U_{23} / m	定量
		桥梁通航孔尺寸 U_{24} / m	定量
		桥梁选址 U_{25}	定性
		防撞及助航设施 U_{26}	定性
		船员身心状态 U_{31}	定性
	人为因素 U_3	船员资质能力 U_{32}	定性
		船员操作情况 U_{33}	定性
		安全责任意识 U_{34}	定性
		监督管理 U_{41}	定性
	管理因素 U_4	海巡执法 U_{42}	定性
		通讯监控 U_{43}	定性

2.2 确定评价指标对应权重

采用主客观赋权法(AHP 法—熵权法)来确定评判体系中各船撞风险指标的权重,使专家批判结果与信息数据的结合,消除了 AHP 法过程中的人为主观性,又避免了客观赋权法的机械性,以确保指标权重计算可靠准确^[17]。

2.2.1 AHP 法主观权重确定

以 AHP 法建立船桥相撞风险评判指标主观权重^[18]具体过程如下:

- 1) 构造判断矩阵
- 将层次评判模型中处于同一阶的 n 个评价指标进行两两比较来确定相对重要度,并构造重要度判断矩阵 A 。

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

(1)

式中: A 为重要度判断矩阵; a_{ij} 表示指标 i 相对指标 j 的重要度量值,采取 3 标度法进行赋值,如式(2)所示。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1.0 & t(i) > t(j) \\ 0.5 & t(i) = t(j) \\ 0 & t(i) < t(j) \\ 1/a_{ji} \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \cdots, n$$

(2)

- 2) 计算权重集
- 为确保重要度判断矩阵的准确性,需进行一致性检验并通过后,采用方根法得到评价指标权重集 $W = [w_1, w_2, \cdots, w_n]^T$,如式(3)所示。

$$W_i' = \frac{m_i'}{\sum_{j=1}^n m_i'} = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{j=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

(3)

2.2.2 熵权法客观权重确定

以熵权法建立船桥相撞风险评判指标客观权重过程如下：

1) 无量纲化处理

建立船撞风险评价指标判断矩阵 $B' = (B_{ij})_{m \times n}$ (B_{ij} 为第 i 个级别的第 j 个指标的属性值), 对数据进行无量纲化处理得 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ 。

2) 计算评价指标熵

$$H_j = -(\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

(4)

式中: $P_{ij} = (1 + b_{ij}) / \sum_{i=1}^m (1 + b_{ij})$; H_j 为第 j 项指标的信息熵。

3) 计算客观权重

$$W_i' = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T = (1 - H_j) / \sum_{j=1}^m (1 - H_j)$$

(5)

式中: W_i' 即为三级指标的客观权重值。

2.2.3 主客观组合权重计算

W 为组合权重; W' 为 AHP 法确定的指标权重; W'' 为熵权法确定的指标权重, 故 W 为:

$$W = \beta W' + (1 - \beta) W''$$

(6)

式中: β 为偏好系数, 且 $0 \leq \beta \leq 1$ 。

考虑对 AHP 法确定的指标权重和熵权法确定的指标权重的偏好系数各为 0.5, 故组合权重为:

$$W_j = 0.5 W_j' + 0.5 W_j''$$

(7)

2.3 确定风险评判等级及隶属度矩阵

2.3.1 确定风险评判等级

建立指标评价集 $V = (V_1, V_2, \dots, V_k)$, 以确定船撞风险指标因素集中每个指标情况。根据前人研究成果及风险评估相关规范^[19], 将桥梁船撞桥风险等级分为极低、低、中、高、极高的 5 个等级, 以 I 到 V 级表示并对不同风险等级进行区间赋值^[20], 如表 2 所示。

表 2 风险等级划分标准
Tab. 2 Risk evaluation criteria

等级	概率	分值区间	控制准则
V 类	风险概率极高	(8, 10]	不可接受, 极高风险水平, 必须高度重视并立即采取应对措施降低风险至不期望水平。
IV 类	风险概率高	(6, 8]	不期望, 高风险水平, 需重视并必须采取应对措施降低风险至可接受水平。
III 类	风险概率中等	(4, 6]	可接受, 中风险水平, 需采取预防措施降低风险至低风险水平。
II 类	风险概率低	(2, 4]	可接受, 低风险水平, 可采取相应预防控制措施。
I 级	风险概率极低	(0, 2]	可忽略, 极低风险水平, 不需要采用应对预防措施。

2.3.2 建立评价指标隶属度矩阵

评价指标隶属度矩阵是用来描述各个指标对于评价等级的赋值矩阵^[21], 根据朱家尖跨海大桥实际工程概况, 并参照表 2 所示的三级评判指标等级范围进行确定, 并建立指标隶属度矩阵。

$$\boldsymbol{M}_{ij} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \tag{8}$$

式中： $r_{ij}(i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n)$ 为第 i 个指标在第 j 个指标评价隶属度。

对于定性评价指标,可直接采用 Delphi 法确定^[5];对于定量评价指标,可由隶属度函数确定^[22]。

评价指标对于 V_k 和 V_{k+1} 的隶属函数分别为:

$$r(x) = \begin{cases} \frac{x - v_{k+1}}{v_k - v_{k+1}}, & v_{k+1} \leq x \leq v_k \\ 0, & x > v_k \text{ 或 } x < v_{k+1} \end{cases}$$
$$r(x) = \begin{cases} \frac{v_k - x}{v_k - v_{k+1}}, & v_{k+1} \leq x \leq v_k \\ 0, & x > v_k \text{ 或 } x < v_{k+1} \end{cases} \tag{9}$$

其中, x 为评价指标分值。

2.4 多层次模糊综合评价

1) 二级指标综合评定

由式(8)确定的三级指标隶属度矩阵 $\boldsymbol{M}_i$ 和相对应的三级指标的组合同权重值 $\boldsymbol{W}_i$ 可得二级评价矩阵 $\boldsymbol{X}_i$ 。

$$\boldsymbol{X}_i = \boldsymbol{W}_i \circ \boldsymbol{M}_i = (w_{i1}, w_{i2}, \cdots, w_{im}) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{im}), i = 1, 2, \cdots, m \tag{10}$$

式中:“ $\circ$ ”为模糊运算符号。采用 Zadeh 算法 $M(\wedge, \vee)$, 即 $x_{ix} = \bigvee_{j=1}^n (w_{ij} \wedge r_{jn})$, 为主因素决定型,突出主要船撞风险因素的影响而忽略其他次要风险因素^[23]。

2) 一级指标综合评定

由式(10)确定的二级评价矩阵 $\boldsymbol{X}$ 和相对应二级指标的组合同权重值 $\boldsymbol{W}$ 可得一级船撞风险评价矩阵 $\boldsymbol{P}$ 。

对于存在多个中间层的评估模型,可由下而上逐层评价。

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{W}^T \circ \boldsymbol{X} = (W_1, W_2, \cdots, W_m) \circ \begin{bmatrix} w_1^T \cdot M_1 \\ w_2^T \cdot M_2 \\ \vdots \\ w_m^T \cdot M_m \end{bmatrix} = (P_1, P_2, \cdots, P_m) \tag{11}$$

3) 综合评判

由式(11)确定的一级指标综合评定 $\boldsymbol{P} = (P_1, P_2, \cdots, P_m)$ 并结合风险等级评分区间中值 $\boldsymbol{V} = (1, 3, 5, 7, 9)$ 对桥梁船撞风险进行综合评估。

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{P} \cdot \boldsymbol{V} = (P_1, P_2, \cdots, P_m) \cdot (V_1, V_2, \cdots, V_m)^T \tag{12}$$

基于综合评价结果,参照表 2 确定船撞桥风险等级,依据控制准则采取相应的风险控制对策及措施,以降低跨海桥梁船撞风险。

3 案例分析

3.1 工程背景

朱家尖跨海大桥横跨浙江省舟山本岛与朱家尖岛之间的舟山海域普陀水道,按照二级公路标准设计并建设,位于 G329 国道上,接线公路全长 10.21 km,桥长 2 907 m,主桥长 290 m。通航法向净空 114.0 m,净高

23.0 m,如图 2 所示。朱家尖跨海大桥所处海域气象、浪流及航船环境复杂,船撞桥风险突出。



图 2 朱家尖跨海大桥桥位图

Fig. 2 Bridge map of the Zhujiajian Sea-Crossing Bridge

3.2 评价指标权重结果

选定 5 位相关船舶撞击风险评估领域有经验的技术专家以及 5 位长期在舟山海域驾驶的船员,结合朱家尖跨海大桥实际工程及海域船舶通行环境等情况,对船撞桥风险评价指标进行相互比较确定相对重要度。根据第 2.2 节风险因素主观、客观权重值相结合的计算方法,得到船撞桥风险评判指标的权重值,如表 3 所示。

表 3 指标权重表

Tab. 3 Index weight table

二级指标	主观权重值	客观权重值	组合权重值	三级指标	主观权重值	客观权重值	组合权重值
U_1	0.257	0.285	0.271 0	U_{11}	0.165	0.113	0.139 0
				U_{12}	0.219	0.235	0.227 0
				U_{13}	0.194	0.135	0.164 5
				U_{14}	0.183	0.244	0.213 5
				U_{15}	0.239	0.273	0.256 0
				U_{21}	0.174	0.208	0.191 0
				U_{22}	0.253	0.211	0.232 0
U_2	0.304	0.328	0.316 0	U_{23}	0.257	0.246	0.251 5
				U_{24}	0.133	0.114	0.123 5
				U_{25}	0.071	0.103	0.087 0
				U_{26}	0.112	0.118	0.115 0
				U_{31}	0.285	0.314	0.299 5
				U_{32}	0.152	0.253	0.202 5
				U_{33}	0.340	0.298	0.319 0
U_3	0.295	0.280	0.287 5	U_{34}	0.223	0.135	0.179 0
				U_{41}	0.343	0.364	0.353 5
				U_{42}	0.284	0.326	0.305 0
U_4	0.144	0.107	0.125 5	U_{43}	0.373	0.310	0.341 5

将表 3 中各三级船撞风险评判指标组合权重值与相对应二级船撞风险评价指标组合权重值相乘,得到三级评判指标在船撞桥风险评价体系中的综合权重值,如图 3 所示。计算结果表明船员驾驶过程中操作失误(9.2%)、身心状态不足(8.6%)是影响船舶撞击跨海大桥事故的主要危险因素,其次是能见度(7.9%)、风速(7.4%)等环境因素和船舶偏航(6.9%)的影响。

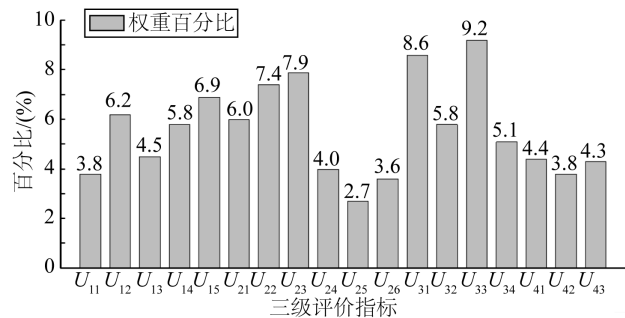


图 3 三级评价指标权重值

Fig. 3 Risk source of ship-bridge collision accident

3.3 多层次综合评价结果

结合定量评价指标与定性评价指标建立船撞风险层次评估模型,由图 3 可得其中定量指标权重占 39.2%,定性指标权重占 60.8%。对于定性评价指标,根据专家问卷调查方式可一次确定指标隶属度集。对于定量评价指标,考虑到船舶通行量、能见度、风速、水流速度等定量指标周期性波动幅度较大,且占权重比例较大,因此确立定量指标分级及量值范围,如表 4 所示,并按式(9)建立定量指标隶属度函数。

表 4 定量指标等级标准

Tab. 4 Quantitative index grade standard

指标	I 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	V 级
船舶载重量/t	<100	500	1 000	5 000	>10 000
船速/(km·h ⁻¹)	<20	30	40	50	>60
船舶通行数量/年艘	<1 000	5 000	10 000	30 000	>50 000
水流速度/(km·h ⁻¹)	<1	2	4	8	>10
风速/(m·s ⁻¹)	<5.5	8	10.7	13.9	>17.1
能见度/m	>20 000	10 000	5 000	2 500	<1 000
通航净空/m	>1 000×50	600×50~1 000×50	250×30~600×50	50×10~250×30	<50×10

1) 二级评价

根据对朱家尖跨海大桥相关船舶通航数据的统计,以某一天统计数据为例,当天船舶通行量约为 57 艘,推算年船舶通行量为 20 805 艘,按式(9)计算该指标隶属度为 $p_{14} = (0,0,0.459\ 8,0.540\ 2,0)$;日平均风速为 5.8 m/s,隶属度为 $p_{21} = (0.88,0.12,0,0,0)$;日平均能见度 1 224 m,指标隶属度为 $p_{31} = (0,0,0,0.850\ 7,0.149\ 3)$;其余定量指标隶属度同理可得,按式(10)所示计算得出二级评判结果。

如船舶因素 U_1 指标二级评价结果:

$$P_1' = (0.139\ 0, 0.227\ 0, 0.164\ 5, 0.213\ 5, 0.256\ 0) \circ \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.46 & 0.54 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.459\ 8 & 0.540\ 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.075\ 7, 0.641\ 3, 0.167\ 7, 0.115\ 4, 0) \tag{13}$$

其他指标 $U_2 \sim U_4$ 二级评价结果同理可得: $P_2' = (0.343\ 2, 0.224\ 3, 0.057\ 5, 0.337\ 5, 0.037\ 5)$, $P_3' = (0, 0.319\ 0, 0.441\ 8, 0.239\ 3, 0)$, $P_4' = (0.170\ 8, 0.347\ 5, 0.329\ 2, 0.152\ 5, 0)$ 。

2) 一级评价

由上述计算得到的二级评判结果和对应的组合权重值,按式(11)得出一级评判结果。

$$P = (0.271\ 0, 0.316\ 0, 0.287\ 5, 0.125\ 5) \circ \begin{bmatrix} 0.075\ 7 & 0.641\ 3 & 0.167\ 7 & 0.115\ 4 & 0 \\ 0.343\ 2 & 0.224\ 3 & 0.057\ 5 & 0.337\ 5 & 0.037\ 5 \\ 0 & 0.319\ 0 & 0.441\ 8 & 0.239\ 3 & 0 \\ 0.170\ 8 & 0.347\ 5 & 0.329\ 3 & 0.152\ 5 & 0 \end{bmatrix} = (0.150\ 4, 0.380\ 0, 0.231\ 9, 0.225\ 8, 0.011\ 9) \tag{14}$$

3) 综合评价

由上述计算得到一级评判结果和风险等级赋值向量,按式(12)得出朱家尖跨海大桥船撞风险综合评价分值。

$$D = P \cdot V^T = (0.150\ 4, 0.380\ 0, 0.231\ 9, 0.225\ 8, 0.011\ 9) \cdot (1, 3, 5, 7, 9)^T = 4.137\ 6 \tag{15}$$

同理,对朱家尖跨海大桥全年通航数据做上述处理,得到全年船撞风险评价曲线,如图 4 所示。

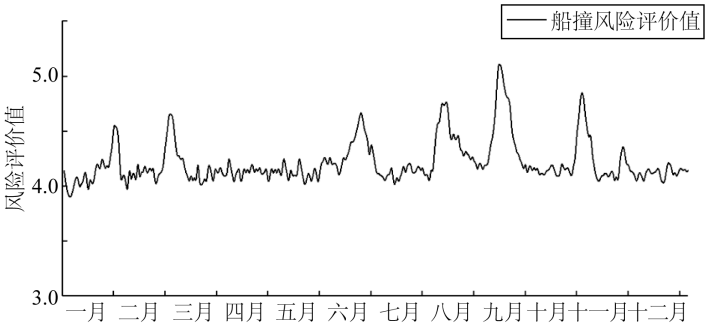


图 4 全年船撞风险综合评价值
Fig. 4 Comprehensive evaluation value of ship collision risk

由朱家尖跨海大桥全年船撞风险评价曲线得,评价值基本稳定在 4.0~4.5 之间,平均值为 4.22,风险评价值随时间波动较大,出现了 7 次波峰,由统计数据可得,二月初,桥区海域出现恶劣大雾天气,严重影响船舶通航;六月海域连续降雨,水位上涨严重,导致风险值增大。夏季三个月为沿海台风频繁期,达到最大风险评价值 5.12。依据表 2 船撞桥风险等级划分标准,确定朱家尖跨海大桥船撞风险等级为Ⅲ级,风险概率一般,属于可接受中风险水平,需采取对应的预防措施以降低朱家尖跨海大桥船舶撞击风险。

3.4 风险控制对策

由上述对朱家尖跨海大桥船撞风险评判结果,提出相应措施以控制船桥碰撞风险。针对跨海大桥通航环境方面,海上大雾、夏季强台风、暴雨等严重期间,管理部门加强对恶劣气象监测、预警,及时进行信息公布^[23];针对跨海大桥通航安全监管方面,加强通讯监控,时刻关注船舶穿越跨海大桥时的异常行为,可实行船舶航行定线制,降低船舶通航速度,减少船舶偏航情况,同时完善海巡执法、应急救援等力量配置;针对船舶和人为因素,相关船舶公司加强对通航船舶定期检查,加强对船员专业技能、安全责任意识的培训,规范职业操作行为,严禁船员违章驾驶。

4 结 语

综合考虑了影响跨海大桥船撞风险的通航环境因素、船舶因素、人为因素、管理因素 4 个方面,提出了 18 个风险评价指标。基于数学模糊理论,采用定量、定性分析方法,提出了跨海桥梁船舶碰撞模糊综合评估模型。对浙江省舟山朱家尖跨海大桥进行了船撞安全风险评估,根据 AHP 主观权重法和熵权客观权重法得出,对船撞风险的影响因素按重要性程度依次是船员驾驶过程中操作失误、身心状态不足、能见度、风速以及船舶偏航情况等。根据朱家尖跨海大桥某年通航统计数据,建立船撞风险评价曲线,得出全年最大风险评价值为 5.12,平均风险评价值为 4.22,属于可接受中风险水平,提出了对应的风险处置对策,为桥区海事部门明确船桥碰撞风险控制重点提供了依据。

目前仍有许多方面值得进行下一阶段的探究,主要有:

- 1) 基于船撞桥事故分析提出的评估模型具有一定的可靠性,但对于风险指标的建立是否全面,风险等级的划分是否合理,仍需进一步的验证。
- 2) 进行定量、定性分析是基于桥区通航监控统计数据,对于新建的跨海大桥或缺乏必要通航监测数据的桥梁,该方法具有一定的局限性,仍需研究提出更为科学和可行的船撞桥风险评估方法。

参考文献:

[1] REN Nianxin, OU Jinping. A crashworthy device against ship-OWT collision and its protection effects on the tower of offshore wind farms[J]. China Ocean Engineering, 2009, 23(4): 594-602.

- [2] 郭健. 跨海大桥建设的主要技术现状与面临的挑战[J]. 桥梁建设, 2010(6): 66-69. (GUO Jian. Current principal technique status and challenges to be confronted in construction of sea-crossing bridges[J]. Bridge Construction, 2010(6): 66-69. (in Chinese))
- [3] AASHTO, Guide specification and commentary for ship collision design of highway bridges[S]. 1991.
- [4] Royal Institute of Navigation. Some factors affecting the frequency of accidents in marine traffic [J]. Journal of Navigation, 1974, 27: 235-252.
- [5] LARSEN O D. Ship collision with bridges [J]. IABSE Structural Engineering Documents, 1993(2): 55-59.
- [6] 耿波, 王君杰. 桥梁船撞风险评估系统总体研究[J]. 土木工程学报, 2007(5): 34-40. (GENG Bo, WANG Junjie. Risk assessment system for bridges against ship impacts[J]. China Civil Engineering Journal, 2007(5): 34-40. (in Chinese))
- [7] 戴彤宇. 船撞桥及其风险分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003. (DAI Tongyu. Ship collision and risk analysis[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2003. (in Chinese))
- [8] 张圣坤, 白勇. 船舶与海洋工程风险评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. (ZHANG Shengkun, BAI Yong. Risk assessment in marine and ocean engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese))
- [9] 徐慧, 肖楠. 基于 AHP 法和灰色模式识别理论的海底管道系统路由定量风险评估[J]. 海洋工程, 2005, 23(4): 109-114. (XU Hui, XIAO Nan. Quantitative analysis of submarine pipeline routing risk based on AHP and grey-mode identification theory[J]. The Ocean Engineering, 2005, 23(4): 109-114. (in Chinese))
- [10] WANG Y M, LIU J, ELHAG T M S. An integrated AHP-DEA methodology for bridge risk assessment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(3): 513-525.
- [11] 秦炳军, 张圣坤. 海洋工程风险评估的现状和发展[J]. 海洋工程, 1998, 16(1): 15-23. (QIN Bingjun, ZHANG Shengkun. Current situation and development of risk assessment of marine engineering[J]. The Ocean Engineering, 1998, 16(1): 15-23. (in Chinese))
- [12] GOERLANDT F, KUJALA P. On the reliability and validity of ship-ship collision risk analysis in light of different perspectives on risk[J]. Safety Science, 2014, 62: 348-365.
- [13] 郭健, 裴力奇. 基于柔度矩阵的跨海大桥非通航孔桥船撞损伤识别[J]. 桥梁建设, 2017, 47(6): 72-77. (GUO Jian, QIU Liqi. Identification of ship collision damage to non-navigable span bridge of sea-crossing bridge based on flexibility matrix [J]. Bridge Construction, 2017, 47(6): 72-77. (in Chinese))
- [14] MASTAGLIO L. Bridge Bashing[J]. Civil Engineering-ASCE, 2014, 67: 38-40.
- [15] In Com Working Group. Ship collision due to the presence of bridges[R]. Report of Working Group of the Inland Navigation Commission, 2001.
- [16] 黄常海, 胡甚平. 大桥船撞动态风险评估系统的设计与实现[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(4): 120-126. (HUANG Changhai, HU Shenping. Design and realization of assessment system on dynamic risk of ship collision with bridge[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(4): 120-126. (in Chinese))
- [17] GUO Yanbao, MENG Xiaoli, WANG Degou, et al. Comprehensive risk evaluation of long-distance oil and gas transportation pipelines using a fuzzy Petri net model[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 18-29.
- [18] CHEN S, AHMAD R, LEE B G, et al. Composition ship collision risk based on fuzzy theory[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(11): 4296-4302.
- [19] 项海帆, 范立础, 王君杰. 船撞桥设计理论的现状与需进一步研究的问题[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(4): 386-392. (XIANG Haifan, FAN Lichu, WANG Junjie. State of art of ship collision design for bridges and future research [J]. Journal of Tongji University, Natural Science, 2002, 30(4): 386-392. (in Chinese))
- [20] 孙博, 肖汝诚. 基于层次分析-模糊综合评价法的桥梁火灾风险评估体系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 1619-1625. (SUN Bo, XIAO Rucheng. Bridge fire risk assessment system based on analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Tongji University, Natural Science, 2015, 43(11): 1619-1625. (in Chinese))
- [21] WANG Z Z, WANG J J, FAN L C. Risk analysis and management of ship collisions with bridges[J]. Transportation and Development Innovative Best Practices, 2008: 332-337.
- [22] YIN Z H, YU B, LIN J. Security risk evaluation on long span bridge structure based on grey fuzzy theory[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 433-435: 1005-1008.
- [23] 尹紫红, 李远富, 燕蒲龙, 等. 西堠门特大桥船撞桥概率分析与风险评估[J]. 铁道标准设计, 2010(10): 64-67. (YIN Zihong, LI Yuanfu, YAN Pulong, et al. Probability analysis and risk assessment of ship collision on the xihoumen bridge[J]. Railway Standard Design, 2010(10): 64-67. (in Chinese))