

中文引用格式:冯玉涛,何杨,邓豪,等. 基于碰撞概率的通航桥梁船撞风险评价指标体系[J]. 中国安全科学学报,2025,35(9): 60-69.

英文引用格式:FENG Yutao, HE Yang, DENG Hao, et al. Risk evaluation index system for ship collision with navigable bridges based on collision probability[J]. China Safety Science Journal,2025,35(9):60-69.

基于碰撞概率的通航桥梁船撞风险评价指标体系^{*}

冯玉涛^{1,2,3}教授级高级工程师,何杨^{3,4},邓豪³,余葵³教授,侯云飞³

(1 重庆大学 土木工程学院,重庆 400045;2 中铁长江交通设计集团有限公司,重庆 401121;

3 重庆交通大学 交通运输学院,重庆 400074;4 南部县满福街道办事处,四川 南充 637300)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1064

资助项目:重庆市研究生导师团队建设项目(JDDSTD2022009);重庆英才计划项目(CQYC201903204)。

【摘要】 为提高通航桥梁船桥碰撞风险评估的准确性和可靠性,对国内外248起船桥碰撞事故作统计分析和致因识别,构建包含23个风险致因的船桥碰撞风险因素初始指标体系;在此基础上,基于故障树分析法绘制船桥碰撞风险致因初始故障树,采用布尔代数运算求取故障树割集,通过合并去重最小割集,首次化简初始故障树致因数量;之后根据剩余风险致因引发事故概率的计算分析,结合各风险因素的皮尔逊相关性分析,二次化简故障树致因数量,进而得到影响船桥碰撞的主要风险因素。结果表明:通航状况与超过通航净高、工作状态较差、沟通能力较弱和船员能力不高、船舶设备老化和习惯心理等因素宜分别并入通航状况生疏、缺乏航行技术、机械设备故障和侥幸心理等风险致因中;反常心理在8年事故概率期内未引发事故,且其10年的事故占比仅0.21%,宜剔除;船舶密度、助航设施管理与其他因素的相关性较弱,且2因素导致事故的概率低,可将其从船桥碰撞主要风险因素中去除。由此构建基于气象水文、机械设备故障、专业航行技术弱、紧急应对能力不强等14个主要风险因素的通航桥梁船桥碰撞风险评价指标体系。

【关键词】 碰撞概率; 通航桥梁; 船撞风险; 风险因素; 指标体系; 事故样本; 相关性分析

Risk evaluation index system for ship collision with navigable bridges based on collision probability

FENG Yutao^{1,2,3}, HE Yang^{3,4}, DENG Hao³, YU Kui³, HOU Yunfei³

(1 School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2 China Railway Changjiang Transport Design Group Co., Ltd., Chongqing 401121, China;

3 School of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

4 Nanbu County Manfu Subdistrict Office, Nanchong Sichuan 637300, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and reliability of ship-bridge collision risk assessment for navigable bridges, the causes of 248 ship-bridge collision accidents at home and abroad were statistically analyzed and identified, thereby constructing the initial index system of ship-bridge collision risk factors, including 23 risk causes. Based on the fault tree analysis method, the initial fault tree of ship-bridge

collision risk was constructed. Boolean algebra operation was used to obtain the fault tree cut sets. By merging and deduplicating the minimum cut sets, the number of causes in the initial fault tree was first simplified. According to the calculation and analysis of the accident probability caused by residual risk causes, combined with Pearson correlation analysis of risk factors, the number of fault tree risk causes was simplified in the second step, and then the main risk factors affecting ship-bridge collisions were identified. The results show that factors such as "navigational conditions and exceeding navigational clearance height", "poor working status", "weak communication ability and poor crew ability", "ship equipment aging and psychological habit" should be incorporated into risk causes including "unfamiliarity with navigational conditions", "lack of navigation technology", "mechanical equipment failure and fluky psychology". Abnormal psychology did not cause accidents during the 8-year period of accident probability analysis, and its proportion in accidents over 10 years was only 0.21%, so it should be eliminated. The correlation between ship density, management of navigational aids and other factors is weak, and the probability caused by the two factors is low, so they can be removed from the main risk factors of ship-bridge collision. Therefore, a ship-bridge collision risk evaluation index system for navigable bridges is constructed, which is based on 14 main risk factors such as meteorological and hydrological conditions, mechanical equipment failure, and weak professional navigation technology and weak emergency response capability.

Keywords: collision probability; navigable bridges; risk factors; ship collision risk; index system; accident samples; correlation analysis

0 引言

随着内河航运的提档升级和主要通航河流大型水利或水电枢纽的兴建与运营,通航水域交通事故及桥梁船撞风险凸显^[1-2]。交通运输部和国家铁路局于2020年部署开展全国船舶碰撞桥梁隐患治理三年行动^[3],虽取得了积极成效,但船舶碰撞事故仍时有发生。从国内外相关海事机构公布的248起船舶碰撞事故来看,受桥区水位升高通航尺度不足、自然环境复杂或灾害频发、航标缺失或失效、船舶故障或失控、桥梁抗撞性能不足或无防撞设施、警示标志缺失或维护不足,以及人为因素等影响,通航桥梁存在较大的船撞隐患,亟须建立可靠的船桥碰撞风险评价指标体系。

国内外学者对水上交通安全理论体系、船桥碰撞风险因素识别等展开了研究和分析。陈伟炯^[4]提出了“人-机-环境-管理”系统理论,揭示了人为、船舶、环境和管理等4要素间的关系,构建了海上安全科学体系。江玉杰等^[5]从船舶、环境、船员、管理和事故5方面选取19个碰撞事故严重度潜在致因,运用有序选择模型识别了显著致因因素。WU Bing等^[6]考虑到船舶撞击位置、运行轨迹、碰撞距离和桥区环境等因素,分析了船桥碰撞发生的具体条件。孔宪卫^[7]结合具体桥梁船撞事故,分析了航区运行

风险、人为因素和桥梁因素对事故的影响。徐飞^[8]从人为、船舶、环境和管理4方面建立了船桥碰撞因素模糊判断矩阵,得到了基本致因因素集。高延祥^[9]利用桥区环境、水文地质、通航状况等因素,分析通航水域桥梁墩柱倒塌概率。高攀等^[10]识别分析了事故桥梁的船撞风险因素,认为航区水位线、通航密度、桥区环境、助航设施以及船员素质等是导致船桥碰撞事故发生的主要因素。杨峰^[11]识别分析了南京航运段潜在的风险源和风险因素,对建设中的大桥作了风险评估。钱国辉^[12]通过对比新旧抗撞性能标准、桥梁航标校验以及通航净空复核,分析了通航桥梁船舶碰撞风险因素。

既有文献对桥梁船撞风险因素的识别和分析主要基于单个或数个事故(隐患)桥梁,导致对风险因素的识别和分析不够全面,难以建立具有普适性的风险因素评价指标体系,无法有效指导既有通航桥梁的风险评估。鉴于此,笔者拟统计国内外248起通航桥梁船桥碰撞事故,梳理、识别和分析事故致因,建立船桥碰撞风险因素初始指标体系,并计算分析各风险指标引发事故的权重比例;经故障树分析和布尔代数运算,求取割集并化简为故障树最小割集,进而化简船桥碰撞故障树风险因素数量;对化简后的风险因素进行事故概率计算分析,剔除发生概率小的风险因素;基于皮尔逊相关性分析研究各风

险因素间的相关程度,优化剔除相关性弱的风险因素,构建最优的桥梁船桥碰撞风险因素指标体系,以提升通航桥梁安全评估的可靠性和准确性。

1 船桥碰撞风险因素识别分析

1.1 事故统计

船桥碰撞事故调查和分析可揭示事故发生的大

致情况,对降低桥梁船撞风险和提高船舶通航安全有明显作用。文中统计了国家海事局、美国国家运输安全委员会、英国船舶事故调查局、日本海上保安厅和德国海事事故调查局等国内外涉及跨江(河)桥梁船桥碰撞事故 248 起,统计分析事故桥梁、事故原因和事故结果。限于篇幅,摘取 2013—2023 年间的 20 起事故示例,见表 1。

表 1 2013—2023 年部分船桥碰撞事故统计

Table 1 Statistics of 20 ship-bridge collision accidents between 2013 and 2023

事故时间	事故桥梁	对象	事故结果	事故致因
2013 年 7 月	重庆牛角沱嘉陵江大桥	船撞击桥墩	2 号桥墩被撞	驳船受洪水冲击
2013 年 9 月	上海南浦大桥	船撞击桥墩	上游右侧桥墩被撞	船员疏忽瞭望
2014 年 3 月	美国得克萨斯州 Houston Viaduct Bridge	船撞击桥墩	油轮受损,原油泄漏	恶劣天气致视线受限
2015 年 10 月	肇庆西江铁路大桥	船撞击梁部	大桥钢桁梁受损	不了解桥梁通航高度
2016 年 3 月	广东港珠澳大桥(通车前)	船撞防撞设施	26 号墩北侧防撞桩变形	能见度不良、疏忽瞭望
2016 年 4 月	美国伊利诺伊州 Thebes Railroad Bridge	船撞击桥墩	2 艘船沉没、14 艘船受损	人为操作失误
2016 年 7 月	天津永定新河特大桥	船撞击桥墩	桥墩受损,船舶沉没	船员无证驾驶
2017 年 8 月	中山磨刀门特大桥	船撞桥墩横梁	船舶侧翻,部分桥跨受损	台风影响
2017 年 10 月	美国明尼苏达州 Union Pacific Rail Bridge	船撞击桥墩	驳船撞上桥墩	船员缺乏经验,操作失误
2018 年 9 月	广州白坭河大桥	船撞击桥墩	大桥主墩开裂	舵机失灵,船舶失控
2018 年 10 月	美国佛罗里达州 Sunshine Bridge	船撞击梁部	桥梁损毁,交通中断	人为操作失误
2019 年 1 月	广州东洲河大桥	船撞击梁部	T 梁受损,船舶输送臂折断	船员无证驾驶
2019 年 3 月	美国弗吉尼亚州 Southern Railway Bridge	船撞击桥墩	轨道偏转,铁路中断	急流影响船舶行驶
2020 年 6 月	肇庆封开西江大桥	船撞防撞设施	货船碰撞桥墩	暴雨和急流影响
2020 年 9 月	舟山桃夭门大桥	船撞击梁部	钢箱梁和斜拉索受损	人为操作失误
2021 年 1 月	美国路易斯安那州 CSX Rigolets Bridge	船撞击梁部	桥梁与船舶受损	桥梁通航孔无导航照明
2021 年 10 月	广东广深沿江高速大桥	船撞防撞设施	船、墩柱及防撞设施受损	淤积致使航道变窄
2022 年 3 月	美国路易斯安那 Houma Twin Span Bridges	船撞击梁部	桥面断裂,交通受阻	不了解桥梁通航高度
2022 年 4 月	日本东京湾横滨大桥	船撞防撞设施	桥墩防撞设施受损	遭遇大风影响
2023 年 4 月	美国密西西比 Natchez-Vidalia Bridge	船撞击桥墩	船舶沉没	船员疏忽瞭望

统计分析表明:事故桥梁被撞主要由人为操作不当或失误、恶劣天气、不熟悉桥区环境、船员疏忽瞭望、无证(疲劳)驾驶、惯性心理、机械设备故障、航行技术不高、超过通航净高等导致。

1.2 风险因素的识别与分析

船桥碰撞风险因素是指船舶在通航水域航行过程中出现导致桥梁结构或防撞设施受损、船舶侧翻或沉没、人员伤亡、船体受损或水域污染等事故发生的潜在因素。根据事故样本统计结果,结合既有文

献,将船桥碰撞风险影响因素划分为环境、船舶、人为和管理等 4 类。统计发现 4 类因素指标占比分别为 18. 17%、6. 10%、62. 34%和 13. 39%。

1.2.1 环境因素

环境因素是船桥碰撞诱导因素,包括自然环境和航道环境。自然环境以气象水文、地形地貌与自然灾害为主,航道环境以船舶密度和通航状况为主。

1) 自然环境。气象水文因素主要包括因风、雷、雨、雪、雾等天气引发风浪、潮涌、暴雨、急流和浓

雾等风险,船舶受水文影响偏离预定航线或产生较大晃动;地形地貌因素主要包括两岸河滩变化与江内泥沙淤积,易导致船舶触礁偏航撞击桥梁;自然灾害因素包括地震、台风、洪水、危岩崩塌、库岸垮塌、泥石流等,因其发生突然且难以预测,易造成船舶操纵失控。如2017年8月23日,多艘船舶受台风涨潮影响,发生走(断)锚漂移而触碰中山磨刀门大桥桥墩,造成船舶翻沉和桥梁受损。

2) 航道环境。通航密度越低,通行效率越高,安全风险越小;熟悉航道航行受限区、掌握桥区水域设施布设情况、了解航道技术等级等,方能制定出安全航线。如2021年10月16日晚,因桥区水域淤积导致航道变窄,且卸货作业点紧靠通航孔,干货船触碰广东广深沿江高速大桥防撞设施,造成船舶损坏、桥梁墩柱及防撞设施受损。

1.2.2 船舶因素

船舶因素是诱发船桥碰撞事故较重要因素,可分为船体建造规格和机械设备故障2个方面。

1) 船体建造规格。包括船舶尺寸(含桅杆和驾驶室高度)、船体结构及强度、驾驶性能、导(助)航系统、动力装置和防撞装置等。船体尺寸越大、载重量越大,在狭隘通航区的碰撞概率和损失程度就越高。多用途船舶建造、高装载改造等宜考虑船舶过桥前突遇大风或急流而失控撞桥的风险。统计发现,因船体建造规格而产生的船桥碰撞事故占比1.23%。

2) 机械设备故障。主要指主机熄火、舵机失灵、电路故障、导(助)航设备失灵等,也包括船舶设备老化、意外脱锚等。受潮湿环境影响,船舶驾驶过程中易出现机械设备反应不灵敏、可操作性降低等问题。此外,机械设备故障会导致船舶失控撞击桥梁。统计发现,因船舶机械故障而产生的船桥碰撞事故占比4.87%。

1.2.3 人为因素

人为因素是引发水上交通事故的重要原因^[13]。中国船级社颁布的《船舶综合安全评估应用指南》(2015)中将人为因素划分为手动操作错误和思维判断错误2大类。主要包括船员心理素质、专业素养、身体状况、疲劳驾驶和通航水域熟悉程度等5个方面。

1) 心理素质。因习惯性心理而忽略异常或重要信息,未及时处理问题导致事故发生;面对突发情况认为事态不严重,屏蔽危险性,存在侥幸心理;受到强烈影响和刺激,情绪反常,主动引发事故。

2) 专业素养。船员应具备融会贯通的航运知识和操作技能、灵敏的紧急应变能力和能谋善断的团队协作能力,并对所驾船舶的运行特性、设备状态、航行路线、航道环境和风险区了然于心。

3) 身体状况。船舶驾驶员因身体存在特殊生理或病理而引发驾驶失误,导致船舶失控撞击桥梁。

4) 疲劳驾驶。长期的船上生活会影响船员的睡眠质量,长时间、高强度的操控易使船员体脑大量消耗,产生急性疲劳、眩晕或严重过敏等,导致船员思绪混乱、判断错误、动作失调而引发事故。

5) 通航水域熟悉程度。船员对通航水域即时信息不熟悉,从而做出错误研判。因未明确桥梁净空、助航设施位置或因涨潮等影响,造成桅杆和驾驶室与大桥触碰,被卡桥下并撞上助航设施。

1.2.4 管理因素

管理因素是水上交通事故的根本原因^[4],其主要在于协调人、机、环境各要素之间的关系,减少船桥碰撞事故受人为、机械设备和环境的影响。

1) 航运企业内控管理。一方面是有效管理涉航船舶的适航状况,消除船舶因无证航行、船龄过高、机械设备操纵性低、船体养护维修不及时等而引发船撞风险;另一方面是对船员适任状态的有效管理,提升船员航运技技能和安全意识,加强对涉航人员驾驶资格、身体(心理)状态和启航规划等的管理,消除船员因无证(疲劳)驾驶、带病上岗、对桥区气象水文或通航尺度不熟悉等而引发船撞风险。

2) 海事部门监督管理。一是对涉航船舶适航资格的审核检查,确保出航船舶整体性能合规适航;二是对船员适任资格的审查检验,定期组织桥区航行规则、防碰撞安全培训和应急演练,提高船员对桥区航道环境的熟悉程度以及恶劣环境下的防撞应急技术,确保出航船员从业资质合格适任;三是对桥区航道通航标志、助航设施、警示标识和预警设备的有效性进行即时管理和维护,确保各标志(识)和设施设备工作正常。

3) 桥梁运维安全管理。桥梁管养部门应结合桥区航道状况,根据桥区潜在风险,设置主动警示系统或被动防撞设施等措施降低桥梁的船撞风险,为船舶的安全过桥提供有效指引;建立健全桥梁安全管理体系,在日常维护中及时处理桥梁安全隐患;构建事故预警和应急响应机制,以应对突发的船桥碰撞事故,降低船桥损失、人员伤亡和社会舆情。

1.3 风险因素初始指标

根据1.1节事故样本统计和1.2节碰撞因素

的识别分析,桥梁船舶碰撞包含气象水文、地形地貌、自然灾害、船舶密度、通航状况、船体建造规格等 23 个风险因素。通航桥梁船舶碰撞风险因素初始指标如图 1 所示。计算图 1 中的 23 个风险因素在统计样本中所占权重,各因素引发的事故比

例如图 2 所示。其中,因超过通航净高引起事故的发生数最多,占比为 13.75%,而因船舶密度、反常心理和身体疾病引起事故的发生占比均小于 1%,其中,反常心理引起事故的发生率最小,占比 0.21%。

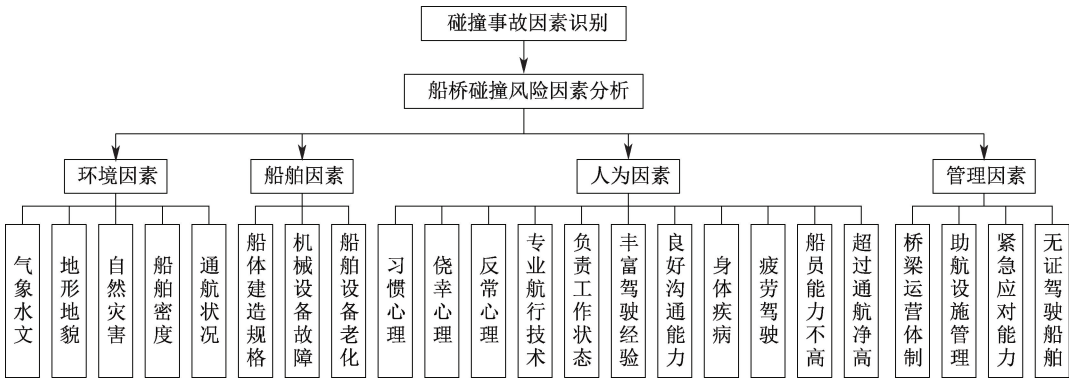


图 1 船舶碰撞风险因素初始指标

Fig. 1 Risk factors initial indicators for ship-bridge collisions

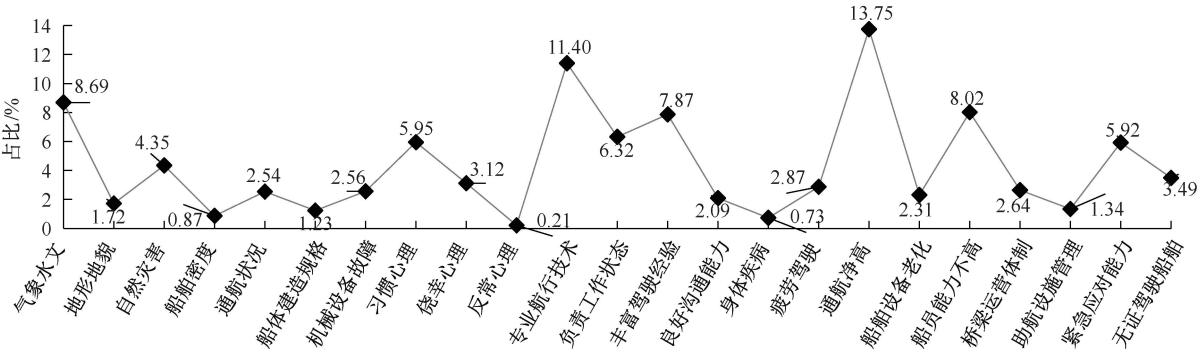


图 2 事故风险影响因素占比

Fig. 2 Proportion of accident influencing factors

2 船舶碰撞概率分析方法

根据通航水域船舶碰撞事故样本数据,运用数理统计和系统工程等方法计算碰撞概率,体现出事故与因素间的联系^[14]。

2.1 船舶碰撞概率计算方法选取

船舶碰撞事故发生概率常用的计算方法有经验取值法、贝叶斯网络法和故障树分析法。经验取值法的研究对象为船与船之间的对遇、追越和交叉碰撞,与船舶碰撞有本质上的不同;贝叶斯网络法研究对象也为船舶碰撞,但需要大量事故样本进行学习训练,而船舶碰撞事故样本并不能满足其要求,故这 2 种方法在船舶碰撞概率计算中存在较大局限性。故障树分析法可获得影响船舶碰撞事故各因素及其之间的逻辑关系,通过定量分析得到各影响因素的发生概

率,进而确定各因素对碰撞事故发生的影响程度,为船舶碰撞安全评估提供更完善和可靠的评价方法。

2.2 故障树分析

故障树分析法是一种采用逻辑方法探究从上(顶上事件)到下(基本事件)系统中最差情况发生的演绎式分析法,运用逻辑运算定性分析碰撞事故发生的影响因素,定量分析各影响因素导致碰撞事故发生的重要程度。在水上交通事故分析中,故障树分析法已成为常用方法。其分析流程为:确定船舶碰撞顶上事件和事故因素基本事件,绘制故障树并采用布尔代数运算求取割集,基于对最小割集的合并去重,化简故障树。

2.2.1 故障树基本元素

1) 顶上事件。位于故障树的顶点,为研究系统的核心,是最不希望发生的事件。

2) 底事件。位于故障树底部, 为逻辑门的输入要素。可分为基本事件和非基本事件 2 类, 基本事件是已查明或已分析出原因的事件, 非基本事件是指对研究系统影响较小或可以忽略的原因事件。

3) 中间事件。位于顶上与底事件中间, 输入/输出出均可, 也可进行更具体的原因划分。

4) 开关事件。已发生或将要发生的事件。

5) 条件事件。让逻辑门起限制作用的事件。

6) 逻辑门。连接图形元素表示各事件间的逻辑关系, 分为与门、或门、异或门和优先与门。与门是所有输入事件均发生时输出事件才发生的逻辑关系; 或门是存在输入事件至少发生一件时输出事件发生的逻辑关系; 异或门是各输出事件不全发生且不存在都不发生的逻辑关系; 优先与门是当且仅当输入事件按照规定顺序依次发生时输出事件才发生的逻辑关系。

故障树基本元素符号见表 2。

事件及符号		逻辑门及符号	
顶上事件/ 中间事件		与门	
基本事件		或门	
开关事件		异或门	
条件事件		优先与门	

2.2.2 绘制故障树

根据挖掘到的中间事件和基本事件(风险因

素), 用合适的逻辑门将各事件逻辑关系串联, 直到不能再继续分析出基本事件后故障树绘制完成, 即顶上事件→逻辑门→中间事件→逻辑门→中间事件→...→底事件。

2.2.3 系统事故故障树分析

1) 定性分析。确定最小割集数量和事件间逻辑关系, 求出故障树最小割集即引起顶上事件发生的最小基本事件集合。最小割集数量反映该故障树的危险程度, 数量越多, 表明引起事故发生因素的模式越多。常用方法有布尔代数化简法、富赛尔法、分离重复事件法等。

2) 定量分析。以布尔代数运算为基础, 通过计算各基本事件的发生概率求得顶上事件发生的概率, 通过提前防御, 从而减少顶上事件的发生。

3 通航桥梁船撞风险因素评价指标体系

故障树分析法通过逻辑门连接多个影响因子来表示他们之间的关系, 从而揭示系统失效原因, 降低事故发生风险。

3.1 碰撞概率分析

3.1.1 构建初始故障树

根据 1.3 节风险因素初始指标, 将编码的基本事件和中间事件按逻辑关系通过“与”和“或”门与顶上事件连接, 构建船撞事故致因初始故障树如图 3 所示。

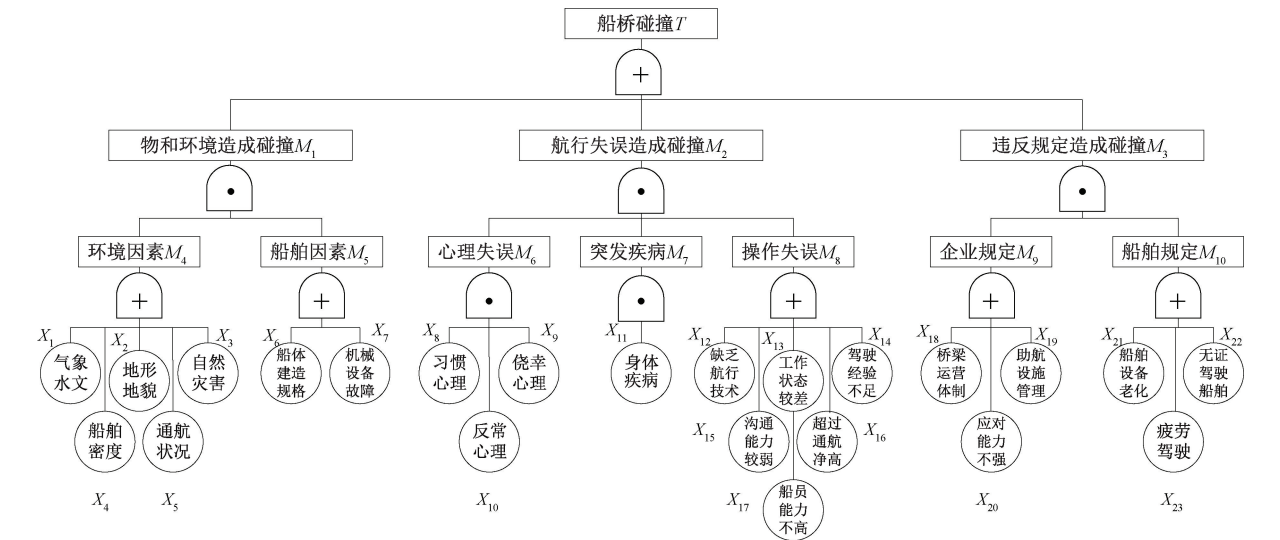


图 3 事故致因初始故障树

Fig. 3 Initial fault tree of accident causes

用布尔代数法对图 3 事故致因故障树表达如下:

$$T = M_1 + M_2 + M_3 = (M_4 \times M_5) + (M_6 \times M_7 \times M_8) + (M_9 \times M_{10}) = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5) \times (X_6 + X_7) + (X_8 + X_9 + X_{10}) \times X_{11} \times (X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17}) + (X_{18} + X_{19} + X_{20}) \times (X_{21} + X_{22} + X_{23})$$

经计算,初始因素故障树的 25 个最小割集为:
 $\{X_1, X_6\}$ 、 $\{X_1, X_7\}$ 、 $\{X_2, X_6\}$ 、 $\{X_2, X_7\}$ 、 $\{X_3, X_6\}$ 、 $\{X_3, X_7\}$ 、 $\{X_4, X_6\}$ 、 $\{X_4, X_7\}$ 、 $\{X_5, X_6\}$ 、 $\{X_5, X_7\}$ 、 $\{X_{18}, X_{21}\}$ 、 $\{X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}\}$ 、 $\{X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{13}\}$ 、 $\{X_{18}, X_{22}\}$ 、 $\{X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{14}\}$ 、 $\{X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{15}\}$ 、 $\{X_{18}, X_{23}\}$ 、 $\{X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{16}\}$ 、 $\{X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{17}\}$ 、 $\{X_{19}, X_{21}\}$ 、 $\{X_{19}, X_{22}\}$ 、 $\{X_{19}, X_{23}\}$ 、 $\{X_{20}, X_{21}\}$ 、 $\{X_{20}, X_{22}\}$ 、 $\{X_{20}, X_{23}\}$ 。

最小割集数量越多,船桥碰撞的风险程度就越高,由此说明图 3 建立的船桥碰撞事故致因初始故

障树并非最优,需对其进行合并去重和化简。

3.1.2 化简故障树

1) 通航状况生疏。图 3 中的通航状况 X_5 、超过通航净高 X_{16} 均表征对桥区通航状况的生疏度,应将两者合并,归入中间事件 M_8 。

2) 机械设备故障。图 3 中的机械设备故障 X_7 、船舶设备老化 X_{21} 均属于船舶设备问题,应合并至机械设备故障,仍归入中间事件 M_5 。

3) 侥幸心理。图 3 中的习惯心理 X_8 、侥幸心理 X_9 均表征船员对风险认识的心理固化或错误研判,应将两者合并归入中间事件 M_6 。

4) 缺乏航行技术。图 3 中的工作状态较差 X_{13} 、沟通能力较弱 X_{15} 和船员能力不高 X_{17} 均指船员业务技能不佳、相关知识不熟悉、临时应变能力缺乏等,应与缺乏航行技术合并,归入中间事件 M_9 。

化简后的船桥碰撞事故致因更优故障树如图 4 所示。

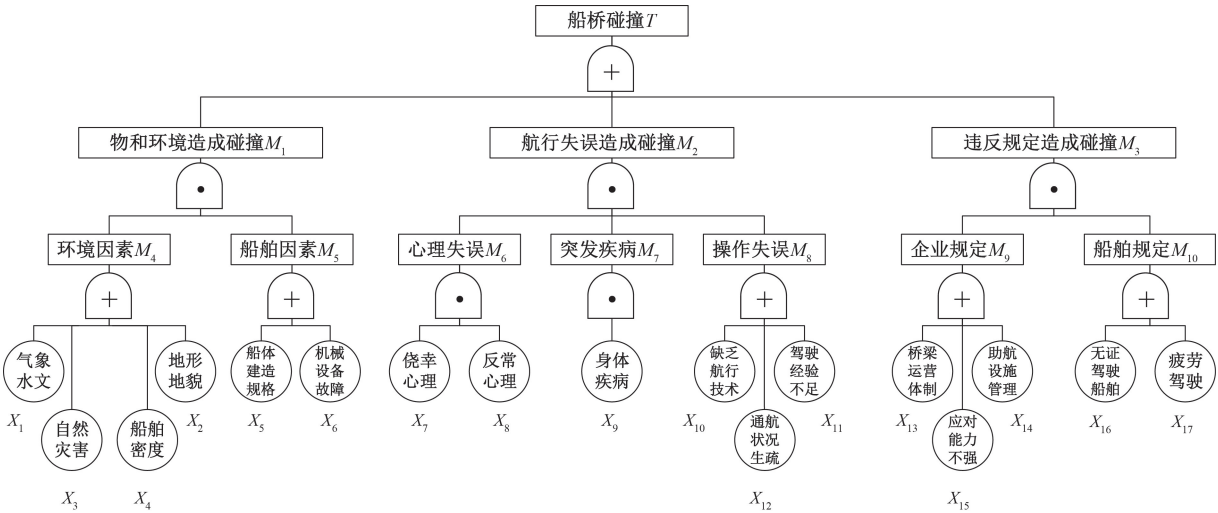


图 4 事故致因化简后的故障树

Fig. 4 Simplified fault tree of accident causes

3.1.3 基本事件概率分析

故障树要求各基本事件概率明确,但船桥碰撞事故概率是模糊的,无确定数据。因此,需通过计算由基本事件 X_1 — X_{17} 引起事故的频率来估算船撞事故的发生概率。事故发生频率由下式求得:

$$q_i = \frac{N_i}{S} \quad (1)$$

式中: q_i 为事件发生频率; N_i 为事件发生次数; i 为不同事件的编号; S 为桥区水域船舶交通量。

为获取足够的数据样本,在统计 2015—2022 年间船桥碰撞事故分析报告的同时,也将桥梁周边水

域的船桥碰撞事故作为研究样本。样本数据来源于中华人民共和国海事局及各地方海事局的事故调查报告、世界水运基础设施协会年报及国内外船桥碰撞事故新闻稿,将其中 248 起船桥碰撞事故调查报告作为研究样本,采用式(1)计算出各基本事件引发事故的概率,结果见表 3。

表 3 数据表明:引发船桥碰撞事故发生概率靠前的基本事件分别为通航状况生疏 X_{12} 、缺乏航行技术 X_{10} 、气象水文 X_1 、无证驾驶 X_{22} 与侥幸心理 X_7 ; 船舶密度 X_4 和助航设施管理 X_{14} 发生概率较低;而反常心理 X_8 在 8 年内引发事故的概率为 0,在 10 年

表 3 2015—2022 年间基本事件引发事故概率
Table 3 Accidents probability caused by basic events between 2015 and 2022

基本事件	概率值							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
气象水文 X_1	1.1×10^{-4}	6.1×10^{-5}	4.7×10^{-5}	2.1×10^{-5}	1.5×10^{-4}	6.9×10^{-5}	3.9×10^{-5}	1.8×10^{-5}
地形地貌 X_2	2.7×10^{-5}	4.1×10^{-5}	0	4.2×10^{-5}	0	2.3×10^{-5}	1.9×10^{-5}	0
自然灾害 X_3	2.7×10^{-5}	0	2.3×10^{-5}	2.1×10^{-5}	2.5×10^{-5}	0	0	1.8×10^{-5}
船舶密度 X_4	0	2.0×10^{-5}	0	0	0	0	0	0
船体建造规格 X_5	0	2.0×10^{-5}	0	2.1×10^{-5}	0	4.6×10^{-5}	0	0
机械设备故障 X_6	1.1×10^{-4}	2.0×10^{-5}	4.7×10^{-5}	6.4×10^{-5}	2.5×10^{-5}	4.6×10^{-5}	3.9×10^{-5}	5.4×10^{-5}
侥幸心理 X_7	8.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	4.7×10^{-5}	6.4×10^{-5}	7.6×10^{-5}	9.2×10^{-5}	1.9×10^{-5}	3.6×10^{-5}
反常心理 X_8	0	0	0	0	0	0	0	0
身体疾病 X_9	2.7×10^{-5}	0	2.3×10^{-5}	0	2.5×10^{-5}	2.3×10^{-5}	0	0
缺乏航行技术 X_{10}	1.1×10^{-4}	1.4×10^{-4}	9.4×10^{-5}	2.1×10^{-5}	5.0×10^{-5}	1.1×10^{-4}	3.9×10^{-5}	3.6×10^{-5}
驾驶经验不足 X_{11}	2.7×10^{-5}	4.1×10^{-5}	7.0×10^{-5}	2.1×10^{-5}	5.0×10^{-5}	0	1.9×10^{-5}	1.8×10^{-5}
通航状况生疏 X_{12}	2.7×10^{-4}	1.6×10^{-4}	2.1×10^{-4}	1.5×10^{-4}	2.3×10^{-4}	1.8×10^{-4}	2.1×10^{-4}	1.4×10^{-4}
桥梁运营体制 X_{13}	2.7×10^{-5}	6.1×10^{-5}	4.7×10^{-5}	2.1×10^{-5}	5.0×10^{-5}	2.3×10^{-5}	1.9×10^{-5}	0
助航设施管理 X_{14}	0	0	0	4.1×10^{-5}	0	0	0	0
应对能力不强 X_{15}	5.4×10^{-5}	0	2.3×10^{-5}	0	2.5×10^{-5}	0	0	0
无证驾驶船舶 X_{16}	5.4×10^{-5}	4.1×10^{-5}	7.0×10^{-5}	8.5×10^{-5}	1.3×10^{-4}	4.6×10^{-5}	1.9×10^{-5}	3.6×10^{-5}
疲劳驾驶 X_{17}	5.4×10^{-5}	2.0×10^{-5}	2.3×10^{-5}	6.4×10^{-5}	2.5×10^{-5}	4.6×10^{-5}	0	1.8×10^{-5}

事故统计期内的发生率为 0.21%(图 2),为偶然风险因素,宜予以剔除。

3.2 风险因素相关性分析

船桥碰撞事故的发生是由各风险因素相互作用、耦合链生的结果,具有显著的相关性,而各因素间相关性的强弱决定了该因素是否为引发事故的关键指标。基于通航桥梁基本事件的发生概率进行皮尔逊相关性分析,从船桥碰撞风险因素评价指标中筛选出与通航桥梁更适配的评价指标,从而建立最优的船桥碰撞风险因素评价指标体系。

3.2.1 皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数是研究变量 x 和 y 之间线性相关程度的统计指标^[15],其为变量协方差和标准差的商值,由下式求得:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

(2)

式中: $\bar{X}$ 为变量 X_i 的平均值; $\bar{Y}$ 为变量 Y_i 的平均值; n 为风险因素样本容量。

皮尔逊相关系数取值 $[-1,1]$, $r=(-1,0)$ 表示变量负相关; $r=(0,1)$ 表示变量正相关; $r=0$ 表示变量无相关性, $r=\pm1$ 表示变量完全相关。皮尔逊相关系数与相关程度关系见表 4。

表 4 皮尔逊相关系数与相关程度关系

Table 4 Relationship between correlation coefficient and degree

r 取值范围	相关程度	相关方向
$(-1, -0.8)$	强线性相关	负向
$[-0.8, -0.3]$	中线性相关	负向
$(-0.3, 0)$	弱线性相关	负向
$(0, 0.3)$	弱线性相关	正向
$[0.3, 0.8]$	中线性相关	正向
$(0.8, 1)$	强线性相关	正向

3.2.2 相关性分析

对基于事故概率优化后的 16 个风险因素进行相关性分析。根据表 4 相关度划分,各因素相关性计算结果见表 5。结果表明:除船舶密度 X_4 、助航设施管理 X_{14} 分别与其他因素的中强相关数量均为 4 个外,其余 14 个因素分别与其他因素的中强相关数量均超过 6 个。此外,结合表 3 数据,船舶密度 X_4 与助航设施管理 X_{14} 这 2 因素致使事故发生的概率在 2015—2022 年仅有 1 次,引发事故的概率较低。因此,从相关性和事故发生概率计算分析综合而言,船舶密度 X_4 和助航设施管理 X_{14} 对船桥碰撞事故的发生影响较小,可将其从通航桥梁船桥碰撞主要风险因素中去除。因此,船桥碰撞主要风险因素由 16 个被优化为 14 个,即气象水文、地形地貌、自然灾害、船体建造规格、机械设备故障、侥幸心理、身体疾病、缺乏航行技术、驾驶经验不足、通航状况

生疏、桥梁运营体制、应对能力不强、无证驾驶船舶和疲劳驾驶。

表 5 各因素相关性计算分析

Table 5 Correlation calculation and analysis for various factors

事件	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}
X_1	1	-0.457	0.298	-0.296	-0.103	-0.223	0.554	0.684	-0.339	0.260	0.546	0.364	0.207	0.395	0.734	-0.013
X_2	-0.457	1	-0.372	0.204	0.529	0.169	-0.029	-0.372	0.271	-0.377	-0.214	0.117	0.271	-0.196	-0.235	0.483
X_3	0.298	-0.372	1	-0.276	-0.557	0.515	0.401	0.437	-0.291	0.457	0.387	-0.019	0.125	0.688	0.644	0.397
X_4	-0.296	0.204	-0.276	1	0.218	-0.442	-0.196	-0.376	0.600	0.189	-0.297	0.606	0.085	-0.253	-0.222	-0.213
X_5	-0.103	0.529	-0.557	0.218	1	-0.164	0.379	-0.005	0.342	-0.543	-0.423	0.009	0.049	-0.470	-0.124	0.450
X_6	-0.223	0.169	0.515	-0.442	-0.164	1	0.430	0.300	0.007	-0.248	0.424	-0.450	-0.171	0.637	-0.119	0.615
X_7	0.554	-0.029	0.401	-0.196	0.379	0.430	1	0.755	0.490	-0.215	0.375	-0.062	0.435	0.455	0.521	0.746
X_9	0.684	-0.372	0.437	-0.376	-0.005	0.300	0.755	1	0.388	0.285	0.740	0.299	0.276	0.744	0.463	0.309
X_{10}	-0.339	0.271	-0.291	0.600	0.342	0.007	0.490	0.388	1	0.374	0.241	0.578	0.116	0.379	-0.228	0.069
X_{11}	0.260	-0.377	0.457	0.189	-0.543	-0.248	-0.215	0.285	0.374	1	0.316	0.714	0.277	0.387	0.476	-0.269
X_{12}	0.546	-0.214	0.387	-0.207	-0.423	0.424	0.375	0.740	0.241	0.316	1	0.265	0.020	0.744	0.241	0.049
X_{13}	0.364	0.117	-0.019	0.606	0.009	-0.450	-0.062	0.299	0.578	0.714	0.265	1	0.558	0.558	0.419	-0.113
X_{14}	0.207	0.271	0.125	0.085	0.049	-0.171	0.435	0.276	0.116	0.277	0.020	0.558	1	0.014	0.641	0.538
X_{15}	0.395	-0.196	0.668	-0.253	-0.470	0.637	0.455	0.744	0.279	0.387	0.744	0.558	0.014	1	0.339	0.297
X_{16}	0.734	-0.235	0.644	-0.222	-0.124	-0.119	0.521	0.463	-0.228	0.476	0.241	0.419	0.641	0.339	1	0.340
X_{17}	-0.013	0.483	0.397	-0.213	0.450	0.615	0.746	0.309	0.069	-0.269	0.049	-0.113	0.538	0.297	0.340	1

3.3 评价指标体系构建

以上述优化后的 14 个主要风险因素为基础,从

而构建出最优的通航桥梁船桥碰撞主要风险因素评价指标体系,如图 5 所示。

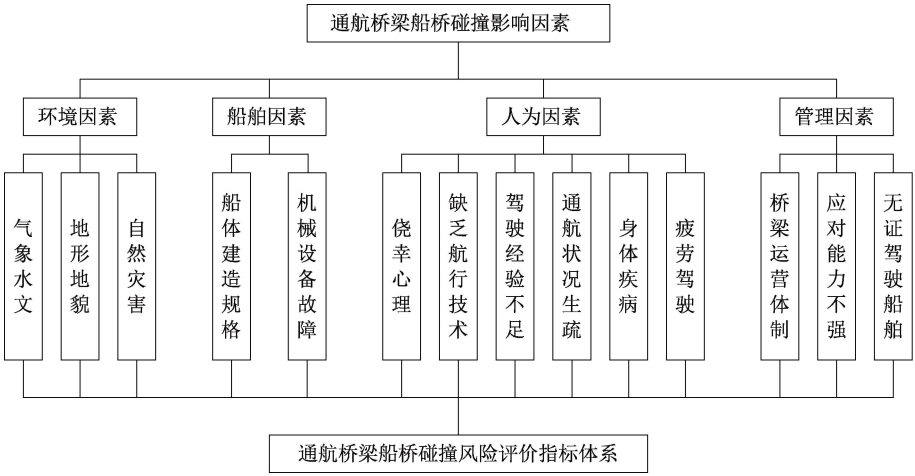


图 5 通航桥梁船桥碰撞风险因素评价指标体系

Fig. 5 Evaluation index system for ship-bridge collision risk factors of navigable bridges

4 结 论

1) 将 248 起通航桥梁船撞事故致因划分为环境、船舶、人为和管理 4 类,各因素引发船桥碰撞事故占比分别为 18. 17%、6. 10%、62. 34%和 13. 39%;并建立由气象水文、地形地貌、自然灾害、通航状况等 23 个因素构成的船撞风险因素初始指标体系。

2) 基于桥梁船撞风险致因初始故障树最小割集,将通航状况与超过通航净高、工作状态较差、沟

通能力较弱和船员能力不高、船舶设备老化和习惯心理等因素分别并入通航状况生疏、缺乏航行技术、机械设备故障和侥幸心理等风险致因中,故障树致因数量由 23 个化简为 17 个。

3) 反常心理在 8 年事故概率分析期内未引发事故,且其 10 年的事故占比仅 0. 21%,宜剔除;鉴于船舶密度、助航设施管理分别与其他因素的相关性较弱且导致事故的概率低,可将其从船桥碰撞主要风险因素中去除。由此构建了基于气象水文、机械

设备故障、专业航行技术弱、紧急应对能力不强等 14 个主要风险因素的通航桥梁船桥碰撞风险评价指标体系。

参考文献

- [1] 付姗姗, 张悦, 席永涛, 等. 多因素耦合下长江口水域交通事故致因链分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 60–67.
FU Shanshan, ZHANG Yue, XI Yongtao, et al. Causal chain of maritime accidents in Yangtze River estuary considering coupling effects of multi-risk factors[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 60–67.
- [2] 张智超, 张景峰, 杨栋, 等. 基于目标失效概率的桥梁船撞风险及防撞水准论证[J]. 公路交通科技, 2023, 40(2): 72–80.
ZHANG Zhichao, ZHANG Jingfeng, YANG Dong, et al. Demonstration of bridge-vessel collision risk and fortification criterion against vessel collision based on target failure probability[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(2): 72–80.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 船舶碰撞桥梁隐患治理三年行动实施方案(交办水〔2020〕69号)[Z]. 2020–12–23.
- [4] 陈伟炯. 面向 21 世纪的海事控制理论探讨: 船舶营运安全的基本要素结构[J]. 中国航海, 1999, 22(1): 34–38.
CHEN Weijiong. An exploration of marine accident control theories for the 21st century: structure of the basic elements of ship operation safety [J]. Navigation of China, 1999, 22(1): 34–38.
- [5] 江玉杰, 万征, 陈继红. 基于有序选择模型的船舶事故严重度致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 131–139.
JIANG Yujie, WAN Zheng, CHEN Jihong. Causation analysis of ship accident severity based on ordered choice model[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 131–139.
- [6] WU Bing, YIP T L, YAN Xinping, et al. Fuzzy logic based approach for ship-bridge collision alert system[J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 106 152–106 164.
- [7] 孔宪卫. 桥区水域船舶通航安全研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
KONG Xianwei. Study on safety of ship navigation in the waterway of bridge area[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [8] 徐飞. 基于贝叶斯网络的船舶触碰事故致因分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2021.
XU Fei. Causal analysis of ship collision accidents based on Bayesian network[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021.
- [9] 高延祥. 基于倒塌概率的桥梁抗撞设计方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
GAO Yanxiang. Study on crashworthiness design of bridges basing on probability analysis [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [10] 高攀, 李丝蔓, 赵旭, 等. 五元联系数在大中型水库船桥碰撞风险评价中的应用: 以三峡库区为例[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(10): 3 419–3 428.
GAO Pan, LI Siman, ZHAO Xu, et al. Application of the five-element correlation number in the ship-bridge collision risk assessment in medium and large reservoirs: a case study of the Three Gorges Reservoir Region[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(10): 3 419–3 428.
- [11] 杨峰. 南京长江第五大桥船桥碰撞安全风险评估研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
YANG Feng. A tentative study of risk assessment of ship-bridge collision for Nanjing Yangtze River Bridge V [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018.
- [12] 钱国辉. 既有航道桥梁船舶撞击风险评估及抗撞性能分析[J]. 中国市政工程, 2022, 236(1): 99–102.
QIAN Guohui. Ship collision risk assessment and anti-collision performance analysis of existing navigable bridges[J]. China Municipal Engineering, 2022, 236(1): 99–102.
- [13] KIM D H. Investigating collision risk factors perceived by navigation officers in a close-quarters situation using a ship bridge simulator[J]. Cognition, Technology & Work, 2021, 23(3): 419–428.
- [14] 刘灵芝. 基于 IWRAP 理论的船舶碰撞概率计算方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
LIU Lingzhi. Research on calculation method of ship collision probability based on the theory of IWRAP [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [15] OLORUNLEKE O F, ANTHONY O O, STANLEY A O, et al. Validation of selected gridded potential evapotranspiration datasets with ground-based observations over Ogun-Osun River Basin, Nigeria[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2024, 17(5): 113 213–113 221.



作者简介: 冯玉涛 (1979—), 男, 河南新郑人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事土木水利防灾减灾与安全防护方面的研究。E-mail: ytaof@126.com。