

大型跨海大桥主动防船撞预警关键技术研究

车世杰¹ 车行辉²

1. 岱山县疏港公路工程建设管理中心 浙江 舟山 316200

2. 岱山县交通运输行政执法队 浙江 舟山 316200

摘要: 近几年全球多次出现因船舶碰撞大桥的事故。船舶碰撞桥梁不仅影响船舶和桥梁安全,还危及桥上人员生命财产安全,引发重大社会影响和经济损失。本文结合笔者自身工作经历,聚焦大型跨海大桥主动防船撞预警技术略作研究探讨。首先概述了该预警技术的基本情况,接着详细剖析多源感知融合、智能算法、预警通信、数字孪生、协同防控等关键技术。这些技术相互配合,为大桥防船撞提供有力保障。最后探讨其发展趋势,包括技术融合深度化、预警智能化提升、协同防控广泛化以及绿色环保化发展等方向,旨在为提升大型跨海大桥安全防护水平,降低船撞风险提供理论支持与技术指引。

关键词: 大型跨海大桥; 主动防船撞; 预警技术; 发展趋势

引言: 随着交通基础设施建设的飞速发展,大型跨海大桥不断涌现,成为连接海陆交通的重要枢纽。然而,跨海大桥所处海域往往是“商、渔、客、危”等船舶来往密集的区域,船舶通航密度大,船撞风险时刻存在,严重威胁着桥梁的运行安全。如2024年3月26日,发生在美国巴尔的摩市的集装箱船撞塌大桥事故,不仅会造成巨大的经济损失,还可能引发严重的社会影响。因此,研发有效的主动防船撞预警技术,提升桥梁防撞预警能力迫在眉睫。主动防船撞预警技术能够提前感知船舶动态,及时发出预警并采取防控措施,对保障大型跨海大桥安全具有重要意义,成为当前交通工程领域的研究热点。

1 大型跨海大桥主动防船撞预警技术的概述

大型跨海大桥主动防船撞预警技术是保障桥梁安全运营的关键手段,其核心在于通过集成多源感知、智能算法与高效通信技术,构建“预防—预警—处置”的全链条防护体系。该技术突破传统被动防撞模式,将风险防控前置,通过实时监测船舶动态、分析碰撞风险,在事故发生前主动介入,为桥梁与船舶提供双重安全保障。技术架构上,系统以多源感知融合为基础,综合运用激光雷达、毫米波雷达、AIS(船舶自动识别系统)、视频监控及水位气象传感器等设备,实现对船舶位置、航速、航向、高度及桥梁净空高度等参数的精准采集。数据经边缘计算与云计算平台处理后,依托智能算法模型(如深度学习、轨迹预测算法)对船舶行为进行实时研判,识别偏航、超高、超速等异常状态,并评估碰撞风险等级。预警信息通过VHF(甚高频)、LED爆闪灯、定向声光报警器及AIS短信等多通道同步推送至船舶

驾驶台、桥梁管理方及海事监管中心,形成“船—岸—中心”三方协同的闭环处置机制。此外,数字孪生技术可构建桥梁与水域的虚拟映射,实现风险场景的动态模拟与可视化管控,进一步提升决策科学性^[1]。

2 大型跨海大桥主动防船撞预警关键技术

2.1 多源感知融合技术

多源感知融合技术是大型跨海大桥主动防船撞预警系统的“感知触角”,为精准预警提供全面且可靠的数据支撑。(1)多种传感器协同工作,实现全方位信息采集。激光雷达可精准测量船舶与桥梁的相对距离和三维轮廓,毫米波雷达能在复杂气象条件下稳定监测船舶航速与航向,AIS系统提供船舶身份、航行状态等关键信息,视频监控则直观呈现现场画面,同时水位气象传感器实时反馈环境参数。各传感器优势互补,克服单一设备在恶劣天气、遮挡等场景下的局限性。(2)数据融合算法提升信息质量。通过数据关联、特征提取与融合决策等步骤,将多源异构数据进行深度整合。例如,将激光雷达的距离数据与视频监控的图像数据进行融合,能更精准定位船舶位置;结合AIS信息与雷达数据,可验证船舶航行状态的真实性,有效剔除误报信息,提高数据准确性和可靠性。(3)分布式与集中式融合架构灵活适配。分布式架构下,各传感器节点独立完成初步处理,降低通信压力;集中式架构则将数据汇总至中心处理单元,进行全局融合分析,适用于对实时性要求较高的场景,确保系统在不同环境下稳定运行。

2.2 智能算法技术

智能算法技术是大型跨海大桥主动防船撞预警系统的“智慧大脑”,对提升预警的准确性和及时性起着关

键作用。(1)深度学习算法助力船舶目标精准识别。利用卷积神经网络(CNN)等深度学习模型,对多源感知设备采集的图像、雷达数据等进行深度挖掘。通过对大量船舶样本的学习训练,算法能够自动提取船舶的特征信息,精准识别不同类型、大小的船舶,即使在复杂背景下,如恶劣天气、光照不佳或存在遮挡物时,也能准确区分船舶与周围环境,有效降低误判率,为后续的风险评估提供可靠依据。(2)轨迹预测算法实现船舶航行趋势预判。基于船舶的历史航行数据和实时动态信息,运用时间序列分析、卡尔曼滤波等轨迹预测算法,对船舶未来的航行轨迹进行精确预测。通过分析船舶的速度、航向、加速度等参数,提前判断船舶是否存在偏离航道、靠近桥梁等危险行为趋势,为预警决策争取宝贵时间。(3)风险评估算法量化碰撞危险程度。综合考虑船舶与桥梁的相对位置、航行速度、船舶载重、桥梁结构特点等多方面因素,运用模糊综合评价、层次分析法等风险评估算法,对船舶碰撞桥梁的风险等级进行量化评估。根据评估结果,系统能够及时发出不同级别的预警信号,指导相关部门采取相应的防控措施。

2.3 预警通信技术

预警通信技术是大型跨海大桥主动防船撞预警系统实现信息高效传递、保障及时响应的关键环节,确保预警信息能准确无误地传达至相关方。(1)多通道通信方式保障信息覆盖。系统综合运用多种通信手段,如VHF无线通信,它具有通信距离远、覆盖范围广的特点,能快速将预警信息发送至附近船舶的驾驶台,提醒船员及时调整航向;同时,利用4G/5G移动通信网络,将预警信息推送至桥梁管理方、海事监管部门以及相关应急救援力量的移动终端,实现信息的实时共享,确保各方能迅速掌握情况并做出反应。(2)抗干扰与加密技术确保通信安全稳定。跨海大桥所处环境复杂,存在各种电磁干扰源。为保证通信质量,采用先进的抗干扰技术,如跳频通信、扩频通信等,有效抵御外界干扰,确保预警信息准确传输。此外,对通信数据进行加密处理,防止信息在传输过程中被窃取或篡改,保障预警信息的安全性和保密性。(3)智能通信协议优化信息传输效率。制定智能化的通信协议,根据信息的紧急程度和重要性进行分级传输。对于紧急预警信息,优先分配通信资源,确保其能够快速、准确地送达目标接收方,提高系统的应急响应能力^[2]。

2.4 数字孪生技术

数字孪生技术为大型跨海大桥主动防船撞预警系统构建了一个与现实桥梁及周边环境高度一致的虚拟镜

像,是提升预警精准度和系统智能化水平的重要支撑。(1)数字孪生实现了桥梁与船舶的动态映射。通过集成多源感知数据,在虚拟空间中实时还原桥梁的结构状态、应力分布以及船舶的位置、航速、航向等关键信息。这种动态映射使得管理人员能够直观、全面地掌握桥梁与船舶的实时状况,仿佛置身于现场,为精准预警提供了坚实的数据基础。(2)基于数字孪生的仿真模拟功能强大。利用虚拟模型,可对各种可能的船撞场景进行模拟分析,提前预测不同类型、不同速度船舶撞击桥梁不同部位时可能产生的后果,包括结构损伤程度、对交通的影响范围等。通过大量仿真实验,不断优化预警阈值和防控策略,提高系统应对复杂情况的能力。(3)数字孪生支持全生命周期管理。它不仅能在运营阶段发挥预警作用,还能贯穿桥梁的设计、施工阶段。在设计阶段,通过模拟不同设计方案下桥梁的防船撞性能,辅助优化设计;在施工阶段,监测施工对桥梁结构的影响,确保施工安全,为大型跨海大桥的安全运行提供全方位保障。

2.5 协同防控技术

协同防控技术是大型跨海大桥主动防船撞预警系统实现高效、全面防护的核心保障,通过多部门、多系统的联动协作,构建起一张严密的防护网。(1)跨部门协同形成防控合力。桥梁管理方、海事监管部门、交通管理部门以及应急救援力量等各方打破信息壁垒,建立统一的协同指挥平台。一旦预警系统发出船撞风险警报,各部门能迅速共享信息,明确各自职责,协同开展行动。例如,海事部门及时对违规船舶进行拦截和引导,交通管理部门对周边水域交通进行临时管制,应急救援力量做好应急处置准备,确保防控工作有序进行。(2)多系统协同提升防控效能。预警系统与桥梁结构健康监测系统、气象监测系统、导航助航系统等深度融合。结构健康监测系统实时反馈桥梁的受力状态,为防控决策提供结构安全依据;气象监测系统提供实时气象信息,帮助判断恶劣天气对船舶航行和桥梁安全的影响;导航助航系统引导船舶安全航行,与预警系统形成互补,共同降低船撞风险。(3)区域协同拓展防控范围。对于处于繁忙航道或连接多个地区的大型跨海大桥,建立区域协同防控机制。周边地区的海事、交通等部门共同参与防控,实现信息共享和联合执法,扩大防控覆盖范围,提升整体防控能力。

3 大型跨海大桥主动防船撞预警关键技术的发展趋势

3.1 技术融合深度化

未来,大型跨海大桥主动防船撞预警关键技术将朝着深度融合的方向发展。多源感知融合技术会进一步整

合更多新型传感器数据,如红外传感器、量子雷达等,实现更精准、全面的环境感知。智能算法技术将与感知技术深度交织,利用实时感知数据不断优化算法模型,提升船舶识别、轨迹预测和风险评估的准确性。预警通信技术与数字孪生技术融合,能实现虚拟模型与现实场景的实时交互,通过数字孪生体对通信网络状态进行模拟和优化,确保预警信息高效、稳定传输。同时,协同防控技术与其他技术的融合,可打破部门和系统间的壁垒,实现信息无缝共享和行动高度协同,形成一个有机的整体,全方位提升大型跨海大桥主动防船撞预警系统的性能和可靠性^[3]。

3.2 预警智能化水平提升

随着人工智能技术的不断进步,大型跨海大桥主动防船撞预警系统的智能化水平将显著提升。智能算法将具备更强的自主学习和自适应能力,能够根据不同的桥梁结构、海域环境和船舶类型,自动调整预警参数和策略,实现个性化的预警服务。借助大数据分析技术,系统可以对海量的历史数据进行深度挖掘,发现潜在的船撞风险规律和趋势,提前做出预警。此外,智能语音交互、虚拟现实等技术也将应用于预警系统中,为管理人员提供更加直观、便捷的操作和决策支持,使预警系统能够更快速、准确地响应各种船撞风险,有效保障桥梁安全。

3.3 协同防控广泛化

协同防控的范围将不断拓展和深化。在部门协同方面,不仅国内的海事、交通、应急等部门之间的协作将更加紧密,还会加强与国际海事组织等相关国际机构的合作,共同应对跨国航线的船撞风险。系统协同上,预警系统将周边的港口管理系统、航运调度系统等进行深度对接,实现信息共享和联动控制,从船舶的航行计划阶段就开始进行风险防控。区域协同也会更加广泛,相邻地区的大桥预警系统将建立区域协同防控网络,实现资源共享和联合行动,共同应对区域性的船撞风险,形成全方位、多层次的协同防控格局,提升整体的安全

保障能力。

3.4 绿色环保化发展

大型跨海大桥主动防船撞预警关键技术在发展过程中将更加注重绿色环保。在设备选型上,优先采用低能耗、高效率的传感器和通信设备,降低系统的能源消耗。例如,利用太阳能、风能等可再生能源为部分设备供电,减少对传统能源的依赖。在算法优化方面,通过改进算法结构,降低计算复杂度,减少数据处理过程中的能源消耗。同时,预警系统的建设和运行将充分考虑对海洋生态环境的影响,采用环保材料和工艺,避免对海洋生物和生态环境造成破坏。此外,通过精准预警和有效防控,减少船撞事故的发生,降低事故对海洋环境的污染和破坏,实现大型跨海大桥建设与海洋生态环境保护的协调发展^[4]。

结束语

大型跨海大桥主动防船撞预警关键技术研究意义重大且任重道远。随着技术融合深度化、预警智能化水平提升、协同防控广泛化以及绿色环保化发展等趋势的推进,该预警系统将不断完善。未来,其不仅能更精准、及时地察觉船撞风险并发出预警,还能以更高效协同的方式开展防控,同时兼顾环保要求。相信在科研人员的不懈努力下,这一技术将为大型跨海大桥的安全运营筑牢坚实防线,有力保障海上交通的顺畅与安全,推动交通基础设施领域朝着更智能、更安全、更绿色的方向蓬勃发展。

参考文献

- [1]宋小东,戴希红,段敏,等.大型跨海大桥主动防船撞预警关键技术研究[J].广东公路交通,2025,51(1):18-25.
- [2]刘胜利,李勤荣,罗超,郑欣蕊,董敏.超长跨海大桥非通航孔区段防船撞研究[J].公路,2021,66(10):180-182
- [3]林志丹.船舶撞击桥梁事故原因与教训浅析[J].公路交通科技(应用技术版),2020(6):311-313.
- [4]方泽兴,苏鹏华,徐宝军,何晓宇,杨凯.跨海桥梁主动防撞多级预警平台设计[J].港口科技,2023(9):33-38.