

# 基于船岸云协同的桥梁防撞 预警系统关键技术研究

舒小红, 田书冰

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

**摘要:** 近年来桥梁日益增多, 船舶与桥梁之间的碰撞事故频发。传统桥梁防撞模式由于船端与岸端信息割裂, 往往难以及时、准确地将预警信息传达到船舶端, 降低预警效率。为此, 本文提出基于“船岸云协同”的桥梁防撞预警系统, 通过船端、岸端与云端的实时数据交互, 将多源监测信息进行融合分析, 并将评估结果和管控指令快速回传至船端, 实现从监测到决策的闭环管理。本文系统梳理了该方案的架构及关键技术, 阐述了系统在降低碰撞事故、提升航道安全方面的良好效果, 可为内河航道智能化管理提供有益参考。

**关键词:** 船岸云协同; 桥梁防撞; 多源数据融合

中图分类号: U447      文献标识码: A      文章编号: 1006—7973 (2025) 05—0054—04

## Research on Key Technologies of Bridge Collision Warning System Based on Ship-Shore-Cloud Collaboration

Shu Xiao-hong, Tian Shu-bing

(Hunan Transportation Planning Survey and Design Institute Co., LTD., Changsha 410200, Hunan, China)

**Abstract:** In recent years, the increasing number of bridges has led to a rising frequency of ship-bridge collisions. Traditional bridge collision prevention models, due to the separation of information between the ship terminals and shore stations, often fail to convey warning information to the ship terminals in a timely and accurate manner, reducing the efficiency of warnings. To address this issue, this study proposes a bridge collision prevention early warning system based on “ship-shore-cloud collaboration”. By enabling real-time data interaction among ship terminals, shore stations, and cloud platforms, the system integrates and analyzes multi-source monitoring data, rapidly transmitting assessment results and control instructions back to vessels, thereby achieving a closed-loop management process from monitoring to decision-making. This paper systematically outlines the system architecture and key technologies, demonstrating its effectiveness in reducing collision incidents and enhancing waterway safety. The findings provide valuable insights for the intelligent management of inland waterways.

**Keywords:** ship-shore-cloud collaboration; bridge collision prevention; multi-source data fusion

我国河流众多、沿海航运繁荣, 各类跨江、跨海、跨河桥梁数量随之不断增长。桥梁连接起两岸, 促进区域经济发展, 然而从航道通航角度而言, 桥梁本身也是碍航物。由于桥区水域环境复杂, 通航水域有限, 且受流速及人为操纵失误等因素影响, 船舶与桥梁碰撞事件在近年来仍然较为频繁, 造成的经济损失、桥梁结构损坏及人员伤亡不容忽视<sup>[1,2]</sup>。

传统桥梁防撞系统主要分为被动防撞系统和主动防撞系统<sup>[3]</sup>, 前者是通过“物理防护”来保护桥梁安全。主动防撞系统则是通过实时监测桥区水域船舶航行情况, 判断船撞桥风险, 并提前预警和干预, 减少撞击事故的发生概率<sup>[4]</sup>。目前, 主流的主动防撞方案是通过信息化设备(如雷达、AIS、CCTV等)监测桥区水域船

舶航行状态, 在高流量场景或突发情况下缺乏灵活性与实时性。尤其在信息共享方面, 岸端往往难以及时、准确地将通航信息、预警同步到处置决策第一人——船舶驾驶员, 导致处置时机与效果均不理想。而随着航运信息技术发展, 未来船岸交互方式趋向于“船岸云协同”, 强调船舶和岸端通过感知、通信、计算协作, 以云端数据中心为核心, 配合岸端和船端边缘计算, 实现高效的信息交互与资源整合<sup>[5]</sup>。不仅显著提升了船舶与港口及航运管理之间的信息流通效率, 还全面推动了航运行业的信息化与智能化进程, 加速了其整体发展与转型升级。

本文聚焦“船岸云协同”理念, 提出一套新的桥梁防撞预警解决方案, 旨在实现多源数据高效处置和实时共享, 形成船端——岸端——云端一体化预警体系, 提

高船舶防撞预警系统的效率，保护船舶通航安全。

## 1 系统架构设计

### 1.1 船岸协同理念与内涵

船岸协同是指船端（包括船载传感器、通信系统和驾驶辅助设备）与岸端（包括桥梁感知设备、海事管理部门和应急指挥中心等）之间，通过高速通信网络与云端计算平台进行数据和指令的双向交互，共同完成对桥梁通航区内的碰撞风险识别与干预<sup>[6]</sup>。

（1）双向数据流。船端向岸端/云端发送自身航行状态、实时雷达/视频信息、船舶工况等关键数据；岸端向船端下发航道流量信息、桥梁安全状态、气象水文情况及预警结果等。双向数据的实时交换，打破了过去单向或割裂的信息壁垒，使得云端大数据分析所产生的价值能快速回馈给船舶驾驶员。

（2）联动决策与干预。云端通过多源数据的融合与智能算法，对每艘船的航迹预测进行综合评估；一旦评估碰撞风险达到阈值，云端即将将预警指令分发至岸端和船端；岸端可根据桥梁和航道实际情况做二次确认或细化调度，船端在驾驶终端实时收到警示信息并执行避碰策略。

（3）闭环反馈与持续优化。船端执行后的动作与结果数据再次回传云端，若与预测出现偏差，云端算法自适应更新参数，形成“自学习”环路。岸端也同步监测桥区水域交通态势及水流环境的变化，将新信息再次传送至云端，保证系统在动态环境下的安全与效率。

### 1.2 系统总体架构

基于“船岸协同”的核心思想，可将系统划分为船端、岸端和云端三个功能层，如图1所示。



图1 船岸云协同的桥梁防撞预警系统架构示意图

船端设备除了常规的导助航设备外，主要是增加了网络通信设备和边缘控制器，实现对本船及周边环境的实时云端同步，同时接收岸端或云端传来的预警信息与管控指令，并通过驾驶终端或语音提示驾驶员。

在桥梁附近部署雷达、AIS接收机、VHF基站、CCTV、声光预警设备等信息化设备，主要用于感知桥区水域船舶实时动态，并根据船撞桥算法计算风险。岸端与云端进行双向通信，一方面汇聚上传桥区水域交通监测数据，另一方面对云端分析结果进行验证并发布相应调度指令，必要时可协调拖船、救援队或封航指令等应急资源介入。

作为系统“中枢”，云端计算中心对多源数据进行综合计算、分析，当评估出现高碰撞概率后，云端立即推送预警等级给岸端和船端，以实现全局联动。同时，对已执行的干预措施进行数据回收和模型更新，保障系统在长期运行中持续优化。

### 1.3 功能架构设计

系统主要包含桥梁净高管理、桥梁超高管理、桥梁偏航管理和通航环境管理4大基础应用，以及综合监测管理、决策分析、公共服务、风险研判和公共用户、船舶用户的全方位服务体系。



图2 系统功能架构示意图

### 1.4 船岸协同关键特点

（1）信息通道多样化与冗余设计。针对水域环境下网络不稳定的问题，可综合利用4G/5G专网、北斗短报文、VHF/DSC、卫星等多种通信方式，保证在复杂场景也能实现低时延、高可靠数据传输。云端与岸端的网络需有容灾和备份机制，防止局部故障导致预警系统整体失效。

（2）协同管理。预警对数据的准确性和时效性要求较高，而传统的桥梁预警系统在感知、通信和计算能力方面存在局限，难以满足需求，因此需要引入其他资源进行辅助。通过船岸云协同架构，云端系统对各类资源进行统一调度，实现船岸之间的信息共享、协同感知、协同决策与协同控制，从而构建高效、精准的预警管理体系。

（3）动态适应与自学习。岸端与船端的感知设备

可能因环境等因素发生数据精度波动,需在云端通过权重调整进行适配。管控指令执行后的效果可通过船端与岸端的回传数据进行验证,若偏差较大,云端可动态修正航迹预测与碰撞算法参数,迭代提升系统性能。

(4) 分层协同控制架构。传统控制模式属于直连式,控制端发送控制指令到执行器,执行器按照指令执行。这种模式只适合简单、单一的系统,并不适合船岸协同控制。基于船岸云协同的信息交互模式,在船端和岸端增加边缘控制器,用于对本地化数据处理(边缘计算)、实时响应和通信调度等,并通过通信网络实现多个边缘控制器的协同控制<sup>[7]</sup>。

## 2 关键技术

### 2.1 多源数据融合与航迹预测

#### 2.1.1 多源数据协同融合

(1) 多源数据偏差处理。系统需融合 AIS、雷达、视频监控以及电子航道图等多种数据。由于各传感器的量测精度、量测频率和坐标系存在差异,必须进行数据的同步与校准。为保证融合结果的一致性,可采用如下观测偏差补偿模型:

$$X_i = R_i X'_i + b_i$$

其中,  $X'_i$  为原始采集数据向量,  $R_i$  为转换矩阵,  $b_i$  为偏差项。

(2) 时空对齐与数据清洗。利用 GPS 时间戳同步所有传感器的采集数据,对无统一授时来源的传感器数据可通过插值或重采样进行对齐。将岸基雷达、AIS 和船载雷达等采集的数据统一到同一坐标系(例如 WGS-84 坐标系),消除因坐标原点和角度定义差异导致的偏移。最后,对含噪或缺失数据进行滤波(卡尔曼滤波、粒子滤波等),利用统计学方法或机器学习模型检测并剔除明显异常值。

(3) 数据加权。根据传感器量测精度及环境适应性,为第  $i$  个传感器观测值  $X_i(t)$  赋予权重  $w_i$ ,形成融合向量  $X_{fusion}(t) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot X_i(t)$ 。该流程不仅能提高融合结果的鲁棒性,还可在局部传感器失效或精度衰减时自动降低其权重,确保系统整体可靠。

#### 2.1.2 航迹预测

(1) 通过岸端掌握的水文条件(流速、潮汐等)与船端船舶动力学参数(主机功率、舵角、吃水深度等),在云端建立更精确的运动方程:

$$\frac{ds(t)}{dt} = f(s(t), u_{ship}(t), d_{env}(t),)$$

其中,  $s(t)$  表示船舶在时刻  $t$  的状态向量,  $u_{ship}(t)$

为船舶的控制输入,  $d_{env}(t)$  则代表外部环境干扰(如水流、风浪、潮汐等)。此方程可由云端结合多源数据对参数进行实时修正,以获得高精度的船舶动态预测。

(2) 基于深度学习的多源混合预测。利用云端高算力对历史 AIS 航迹数据进行离线训练,构建 LSTM/GRU 或 Transformer 模型。实时预测时,模型输入既包含船舶近期运动特征,也包含岸端状态信息,输出未来多步船舶位置及其概率分布,便于后续碰撞风险评估。

### 2.2 碰撞风险评估与预警判定

#### 2.2.1 风险评估

基于船岸云协同架构,对航行数据回传到云端,并进行多源数据进行校核和实时修正,避免低估或高估风险。当轨迹预测模型给出船舶在未来时刻的位置与速度后,需要量化船舶与桥梁碰撞的风险程度。可以从这 4 个指标考虑:

(1) DCPA (Distance to Closest Point of Approach): 船舶与桥梁危险边界在预测窗口内的最近距离。

(2) TCPA (Time to Closest Point of Approach): 达到最近距离所需时间。

(3) 相对速度  $V_r$ : 船舶朝向桥梁危险区域(如桥墩、桥孔边缘)的速度分量。

(4) 桥梁净空信息: 在潮汐、水流等影响下的桥高、桥孔宽度或通航净空动态变化,也可纳入风险计算。

将上述指标综合为碰撞风险指数(CRI),可定义如下带权重形式的风险评估函数:

$$CRI = \alpha_1 \cdot \frac{1}{DCPA} + \alpha_2 \cdot \frac{1}{TCPA} + \alpha_3 \cdot \|V_r\|$$

其中  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3 > 0$ ,且需结合具体航道安全标准或历史数据进行调参。DCPA、TCPA 和  $V_r$  均来自融合后的多源预测结果。

#### 2.2.2 预警判定

当 CRI 超过设定阈值时,云端自动判定预警等级,并同时结果推送给岸端和船端。

表 1 碰撞风险指数与预警登记对照表

| 预警等级    | CRI 范围               | 响应策略                   |
|---------|----------------------|------------------------|
| I (低)   | $0 < CRI \leq 0.4$   | 正常监控,驾驶员注意观察           |
| II (中)  | $0.4 < CRI \leq 0.7$ | 通报监控中心,建议减速、改变航向或提前通过等 |
| III (高) | $0.7 < CRI \leq 1.0$ | 船岸云协同应急干预,强制调度或者拖船援助   |

在此过程中,为防止单一阈值造成过多误判或漏

判,可结合模糊逻辑 (Fuzzy Logic) 或置信区间 (Confidence Interval) 进行扩展,例如为每个预警等级设置一个过渡带,以减少频繁的等级切换。

## 2.3 船岸协同管控策略

在桥梁防撞预警系统中,管控策略的有效性取决于船端、岸端以及云端之间的动态协同程度。在高流量或多船协同场景下,仅靠单一环节的局部决策,难以及时对潜在碰撞风险实施高效干预。基于此,本文提出了融合风险分级响应、多目标优化与闭环反馈的船岸协同管控框架。

### 2.3.1 分级响应与触发机制

(1) 当 CRI 超过预警阈值时,系统自动进入管控流程。依据风险等级,分别触发相应的响应策略:低风险时仅在船端做提示或航行辅助;中风险时需岸基监控中心配合发布限速、分流等决策;高风险则立即启动紧急联动,可能涉及拖船、封航及桥梁应急管控等多方资源。

(2) 为兼顾实时性与稳定性,在云端引入“滞后惩罚函数”,当外部环境剧烈波动(如暴雨、突发洪水)或关键传感器失效时,系统会适度提升管控优先级。若风险指数在短时间内持续走高,系统自动加强协同密度,例如提高船舶端数据上报频率或岸端人工值守级别。

### 2.3.2 云端智能决策与多目标优化

云端基于大规模多源数据构建全局态势图,对不同船舶的实时航迹、多桥位净空信息进行统一管理。采用分布式多智能体强化学习 (Multi-Agent Reinforcement Learning) 可在云端快速迭代更新避碰策略,并兼顾整体流量与局部安全需求。

在航道繁忙、桥位密集的水域,系统需同时处理数十艘船舶与多个桥梁的碰撞风险。为此,可利用多目标优化算法,在保证安全的前提下尽量减小整体通航延误。云端会生成一份包含干预指令集的“候选解”,并根据预警等级优先下发至岸端或船端。

### 2.3.3 岸端执行与应急联动

(1) 指令发布与状态监控。岸基指挥中心接收云端解算结果后,通过专网或北斗短报文,向目标船舶发布强制或建议性管控指令。同时,岸基系统监测桥区水域流速、水位变化情况,一旦发现异常,向云端发出高优先级信号以重新评估方案。

(2) 应急协同与资源整合。当风险升级为最高等级,岸端可快速调度拖船、救援队伍或临时封航。由此形成“岸端——海事——桥梁”三位一体的应急网络,最大

限度遏制事故扩散并确保抢险资源的合理配置。

### 2.3.4 船端响应与闭环反馈

(1) 驾驶辅助与半自动控制。船载终端以可视化或语音形式提示驾驶员执行指令,如调整航速或转向等。若出现船舶设备故障或异常,船端应立即上报故障类型与可能影响,云端和岸端可协同纠偏或安排救援。

(2) 执行效果评估与模型迭代。船端实际执行过程将实时回传云端,并与预期轨迹比对。若偏差显著,云端算法会进入“自适应学习”模式,对后续碰撞风险评估进行修正。该闭环反馈使系统具备自学习属性,云端模型不断优化决策逻辑。

云端利用大数据和智能算法快速生成最优管控方案,岸端负责实际指令发布与应急保障,船端则执行并回传动态数据,形成多层次、闭环式的决策与控制框架。

## 3 结论与展望

本文以“船岸云协同”为核心理念,针对桥梁防撞的技术痛点,提出了一套融合多源监测、云端分析与决策、岸端/船端联动干预的预警系统。系统打破了过去船舶与岸端信息壁垒,通过双向、实时的数据交互与智能分析,实现了高效、闭环的碰撞风险预测与应急处置。该系统能够有效提升桥梁防撞系统的预警效率,在更广泛水域、更多桥梁节点的落地与推广将具备更高价值与广阔前景。

### 参考文献:

- [1] 陈文光. 基于特定水域边界虚拟 AIS 航标动态信息的实时联动 [J]. 中国水运, 2024, (21): 107-110.
- [2] 任正林. 航道桥梁防撞设计与分析 [J]. 北方交通, 2024, (10): 5-9.
- [3] 冯泽玲. 基于 AIS 的桥梁防撞预警系统应用探究 [J]. 中国公路, 2022, (19): 96-97.
- [4] 季本山, 谷溪, 方泉根. 苏通大桥主动防撞系统研究 [J]. 中国航海, 2010, 33(4): 34-38.
- [5] 马枫, 陈晨, 刘佳仑, 等. 船岸协同支持下的内河船舶远程驾控系统关键技术研究 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 125-133.
- [6] 严新平, 李晨, 刘佳仑, 等. 新一代航运系统体系架构与关键技术研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 22-29, 76.
- [7] 陈华龙, 文元桥, 黄亚敏, 等. 内河远程控制船舶的云岸船协同计算建模 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2022, 50(5): 53-58.

基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目 (202223)