

基于无线信号的柔性屏障主动 船舶拦阻系统设计

屈 斌, 陈潇逸

(上海中交水运设计研究有限公司, 上海 200092)

摘要: 随着船舶大型化的发展, 船舶撞击桥梁、港口已成为航道通航安全的主要威胁之一, 而现有的防护设施仍以被动型防护为主, 智能性有所欠缺。为减小船-桥碰撞、船-港口碰撞风险, 以“主动预警、主动防护、主动决策”为研发核心, 融合船舶航行异常识别、磁探测、柔性气囊拦阻等关键技术, 提出了一种适用于桥梁、港口等水中构筑物的柔性屏障主动船舶拦阻系统, 对其系统组成、系统功能、关键技术特点、推广及效益进行阐述。经分析, 该系统可作为有效的智能防船碰撞措施, 具备施工方便环保、景观影响小、环境适应性强、控制智能、使用耐久、造价较低的特点, 可为重点桥梁、重点港口等的安全设计及航道通航安全风险管控提供基础理论依据和技术参考。

关键词: 船撞风险; 拦阻系统; 主动预警; 航道安全

中图分类号: U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0188-07

Design of flexible barrier active ship arrest system based on wireless signal

QU Bin, CHEN Xiaoyi

(Shanghai Communications Water Transportation Design and Research Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: With the development of large-scale ships, ship collisions with bridges and ports have become one of the main threats to navigation safety. However, the existing protective facilities mainly rely on passive protection and lack intelligence. In order to reduce the risk of ship-bridge and ship-port collisions, with the core concept of “active warning, active protection, and active decision-making”, a flexible barrier active ship interception system suitable for underwater structures such as bridges and ports is proposed by integrating key technologies such as ship navigation anomaly recognition, magnetic detection, and flexible airbag interception. The system composition, system functions, key technical characteristics, promotion, and benefits are elaborated. After analysis, the system can be used as an effective intelligent anti ship collision measure, with the characteristics of convenient and environmentally friendly construction, minimal landscape impact, strong environmental adaptability, intelligent control, durable use, and low cost. It can provide a basic theoretical basis and technical reference for the safety design of key bridges, key ports, and the risk control of waterway navigation safety.

Keywords: ship collision risk; arrest systems; proactive early warning; waterway safety

水运是我国重要的交通运输方式之一, 承担着大量的货物和旅客的运输任务。水运行业在促进经济社会协调发展、推动产业沿江布局、保障城市建设、改善生态环境、缓解城市陆路交通

压力等方面均承担了不可替代的作用。在新发展阶段、新发展理念和新发展格局的指引下, 水运行业也将面临新的形势和任务, 需要把握好发展机遇, 应对好发展挑战, 实现高质量发展。其中,

收稿日期: 2025-01-02

作者简介: 屈斌(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道设计与咨询工作。

航道的通航安全更是重中之重。保障航道安全, 减少通航安全事故的发生, 有利于保障水运的顺畅进行。

近年来随着船舶大型化的发展, 通航船舶尺度及载质量不断增大, 船撞事故已成为航道通航安全的主要威胁之一^[1]; 港口码头区域的交通环境复杂、船舶操纵难度较大, 船舶靠离泊时失控碰撞码头结构的事故时有发生^[2], 威胁着沿海周边构筑物安全。

目前, 国内桥梁、港口码头通常采用的防护设施以“守株待兔”被动型防护为主, 桥梁多采用独立防撞墩、港口多采用护舷或防护钢管桩等形式^[3-4], 智能性有所欠缺, 而且不能避免船撞事故所引起的船舶损失和船员伤亡。随着船舶大型化的发展, 被动型防撞设施的抗船撞能力需求也日益增加, 从而导致防撞设施需求规模大大增加; 同时, 被动型防撞设施存在阻水性强、景观性差等不利影响, 甚至可能成为影响通航尺度的碍航物, 对船舶航行产生不利影响^[5]。近年来, 国内外针对预防船舶相撞事故的措施开展了许多相关研究, 提出基于视频监控的防船撞预警技术^[6-8]、融合船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)电子围栏技术的主动型防碰撞预警系统^[9]、基于协调避碰行动的碰撞风险预警模型^[10-11]等。对于主动型预警系统, 通常以喇叭或强光等提示手段为主, 缺少有效干预手段, 而且存在摄像头在雨雾等特殊天气时对船舶识别性差的问题; 对于 AIS 电子围栏技术而言, 无法对未配备或未开启 AIS 系统的船舶进行有效警告。

本文针对船舶碰撞风险进行研究, 形成防船撞主动拦阻安全技术体系, 以“主动预警、主动防护、主动决策”为核心, 研发适用于桥梁、港口等水中构筑物的智能化前置阻拦系统、警戒与防撞装置等关键设施, 为重点桥梁、重点港口等的安全设计及航道通航安全风险管控提供基础理论依据和技术支撑, 平衡城市运营成本及通航安全保障之间的关系, 解决实际发展难题。

1 系统设计

研究聚焦船-桥、船-港口等碰撞风险, 构建智能主动安全技术框架体系, 旨在研发“主动预警+被动防撞”双重功能的智能防船撞装置, 为航道通航、港口码头安全问题提供科学理论支撑及有效解决途径。基于此, 本次提出一种采用由图像监控预警系统、柔性防撞拦截装置、磁探测系统、趸船等组成的柔性屏障主动船舶拦阻系统, 由图像监控预警系统实现动态监控、柔性防撞拦截装置实现自动启动拦截设施、磁探测系统强化拦截效率。

本次系统拟将主动预警系统的“智能性”以及被动拦阻设施的“消能性”合二为一, 即通过主动系统发现闯入船舶并判断其闯入趋势后, 主动触发气囊拦阻系统进行拦阻, 降低船舶碰撞产生的危害, 具有“主动预警、主动防护、主动决策”的特点。主动船舶拦阻系统设计框架见图 1。

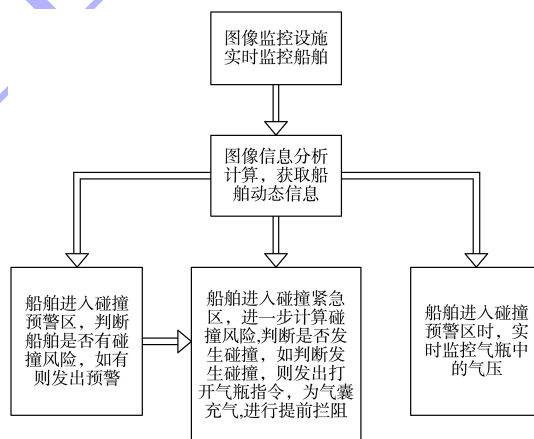


图 1 主动船舶拦阻系统设计框架

Fig. 1 Design frame of active ship arrest system

本系统针对可能对桥梁非通航孔区域造成碰撞风险的失控船舶设置。由于惯性的作用, 船舶失控后会继续按照原航向前行。同时, 由于船舶失去了动力和舵效, 船舶会在水流和风的作用下偏离所期望的航线。当运动惯性消失后, 船舶将在短时间内发生偏转, 被风吹至顺风方向, 然后在风与流的共同作用下, 继续运动, 直至船舶锚链产生拉力将船舶拉停, 然后船舶逐渐漂移至稳定状态。在上述运动过程中, 按照良好船艺, 船舶驾驶员通常都会采取紧急降速、抛锚等行为。在此

情况下, 船舶速度较正常航行速度有所降低。

本系统针对拦阻船舶的设防标准为: 拦阻船舶设防等级按照 3 000 吨级船舶考虑。在邻近桥梁通航孔的 1 跨非通航孔区域设置拦阻装置时, 按照船舶对地航速 10 kn 考虑; 除邻近通航孔的一跨非通航孔区域外的拦阻装置, 按照船舶对地航速 6 kn 考虑。

1.1 信号控制系统

拦阻系统的触发信号采用“主动预警技术”与“磁探测技术”相结合的双保险控制系统, 分别为主动信号与被动信号(备用)。主动信号指监控人员通过监控设备监控到船舶闯入后, 通过无线电向趸船设备发射信号, 趸船设备将无线电信号转换为电流并触发充气设备, 主动开启防撞气囊进行拦阻; 被动信号(备用)指船舶在未被探测到的情况下(低雷达反射、低可见度情况下)闯入危险区, 当距离较近时, 通过磁探测系统检测船舶位置, 船上的电磁信号被转化为电信号, 触发充气设备。

1.1.1 图像监控预警系统

综合采用雷达、AIS、高清视频摄像等方式, 识别、探测、监控水域内运行的船舶目标, 实时掌握船舶航行情况。根据监测到的船舶的运行状态, 利用系统内置的算法分析其运动轨迹、评判事故发生的危险性; 通过分析船舶行为、构建电子围栏等技术, 提早发现异常船舶, 实现主动预警。主动预警系统架构见图 2。

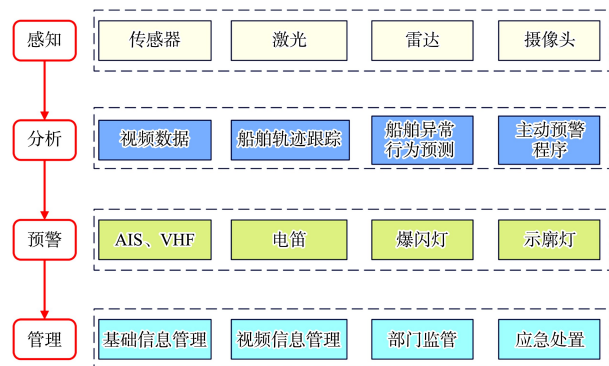


图 2 图像监控预警系统架构

Fig. 2 Frame of image monitoring and early warning system

1.1.2 磁探测系统

由于民用船舶船体含有大量钢材, 将会使检测区域总磁场产生较大变化, 即船舶磁场强度较大。采用磁感应器检测船舶所带磁场以确定船舶实时位置, 当位于磁感应器前方 20 m 时, 其磁感应强度波动约为 103 nT, 且随着与感应器距离的减小, 探测到的磁场波动将进一步增大。

通过设置磁探测系统, 当来船船体进入磁感应器阵列, 磁测量单元开始实时采集数据, 获取关于船体磁场信息数据。经数据处理, 通过磁感应强度梯度变化, 便可判断船舶位置以及运动姿态, 为后续拦阻系统触发提供基础信号。

1.2 柔性防撞拦截装置

柔性防撞拦截装置设置于受保护桥墩的上下游或码头结构的前侧, 用于防止行船与相关建筑物结构发生碰撞, 主要由控制系统、充(放)气系统、拦阻系统、消能系统、电源系统组成。

拦阻系统主要为安装在两部趸船之间的袋式气囊以及高摩阻索。充(放)气系统主要包括高压气瓶、充气导管等, 与电源系统均安装在系泊浮体(趸船)上。控制系统、充(放)气系统与电源系统连接, 通过气泵驱动装置连接到气囊; 磁感应器为系挂在两侧趸船之间的水下钢索布置的磁感应器阵列, 图像监控预警系统的监控设备设置于临近的桥梁或码头等建构物上; 消能系统主要包括恒阻力锁、浮体以及沉块。在未启动状态下, 拦截防撞装置悬浮于水面以下, 两侧依靠趸船进行固定; 气囊启动状态下浮上水面, 对船舶实施有效拦截。

柔性防撞拦截装置系统组成见图 3。图中拦截装置的布置角度、距离桥轴线的位置均为一种假设, 需根据具体项目情况细化。柔性防撞拦截装置布置见图 4, 趸船横截面布置见图 5。

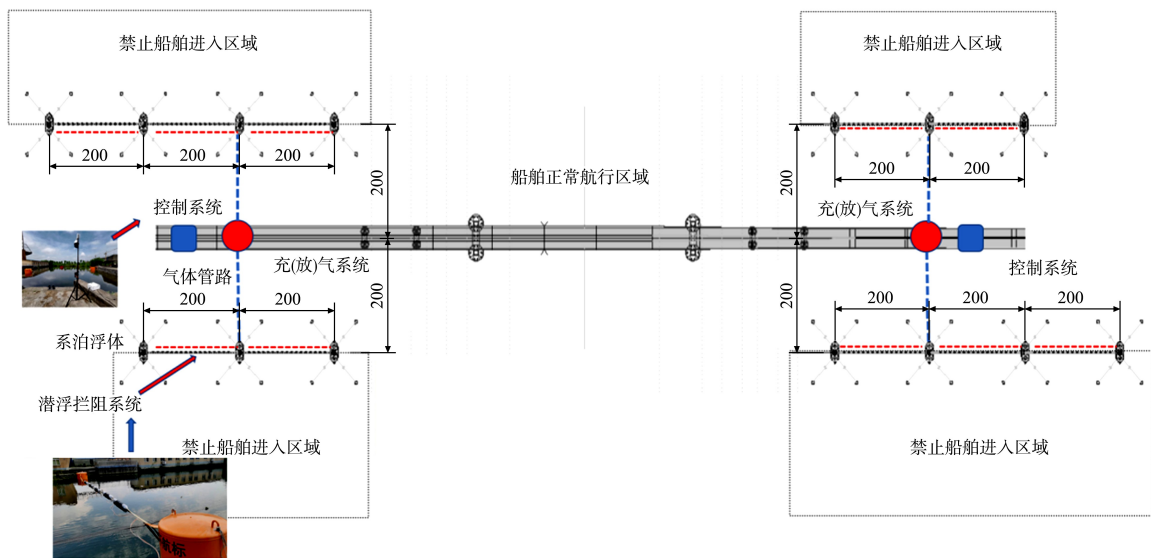


图 3 柔性防撞拦截装置系统组成 (单位: m)

Fig. 3 System composition of flexible anti-collision interception device (unit: m)

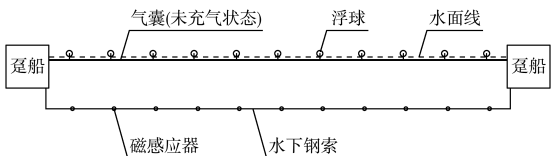


图 4 柔性防撞拦截装置布置

Fig. 4 Layout of flexible anti-collision interception device

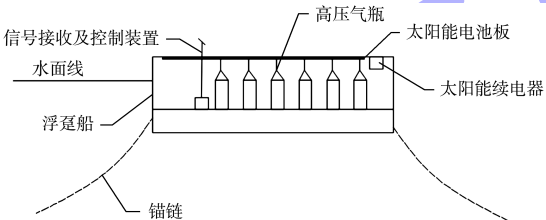


图 5 趸船横截面布置

Fig. 5 Cross section layout of pontoon

1.2.1 气囊设计

在初始状态下, 气囊少量充气, 通过配重沉于水底或泥面, 待充气后可上浮至水面。气囊上设有排气孔, 可待船舶拦阻完成后排气沉入水中重复利用, 仅需更换安装于趸船上的高压气瓶。目前较为成熟的、用于船舶拦阻的气囊尺寸参数如下: 单节气囊长 20~30 m、气囊直径 2.0~2.5 m、气囊工作压强 7~10 kPa, 爆破压力大于 1 MPa, 壁厚 8~10 mm。

1.2.2 充(放)气系统设计

充(放)气系统包括充气导管、高压气瓶和信

号接收及控制装置。电源系统中的太阳能电板和太阳能蓄电池安装在趸船顶面水面线以上, 信号接收及控制装置安装在趸船上, 而且其天线处于水面线以上, 高压气瓶安装在趸船船体中, 趸船通过锚链系泊, 高压气瓶通过充气导管连接气囊。充气气瓶接收信号后, 存储于高压气瓶内的高压气体(氮气与二氧化碳混合气体)通过导气管对气囊进行充气。

1) 阀门。目前国内成熟、快速充气的阀门打开方式有两种, 分别为电爆阀门与电磁阀门, 由于电爆阀门需使用雷管等管制用品, 因此本文研究选取电磁阀门。在通电时, 电磁线圈产生电磁力把关闭件从阀座上提起, 阀门打开, 高压气体释放。

2) 高压气体及储气气瓶。根据气囊尺度及工作条件初步测算, 单节气囊充气至工作压强采用的高压气体参数为: 容量 60 L 的高压气瓶 6 瓶, 气体压力 30~35 MPa, 气瓶高 1.2 m, 直径 400 mm; 保守估计充气时间 1 min 内。

3) 充气导管。充气导管从趸船接至水下气囊, 后期将根据气囊分舱情况, 对具体布置及连接方式进行深化设计。

气囊沉底及上浮状态示意图 6。

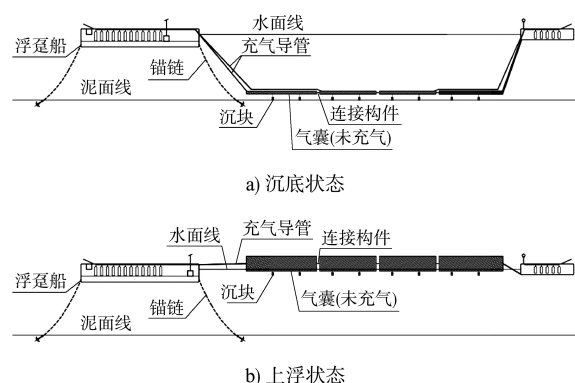


图 6 气囊沉底及上浮状态示意
Fig. 6 Sinking and floating state of airbag

1.2.3 电源系统设计

系统电力采取两种方案，一种新能源，一种传统有线电源。电源系统为超级电容光伏供电系统，包括太阳能电板、太阳能蓄电池、智能控制器、超级电容器模组；智能控制器中包括 DC-DC 控制器、集成控制器和超级电容模组。此外，可将传统电源方案作为备用方案，通过桥墩或码头引电线通过水下埋设至趸船。超级电容光伏供电系统见图 7。

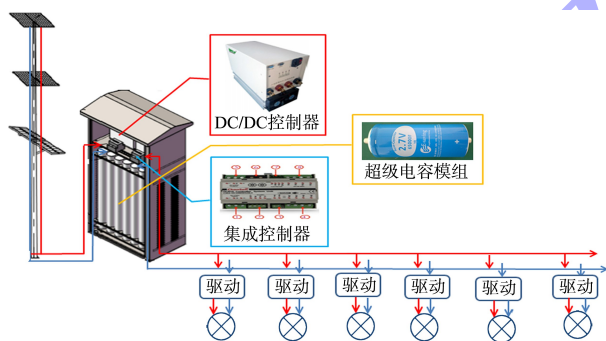


图 7 超级电容光伏供电系统

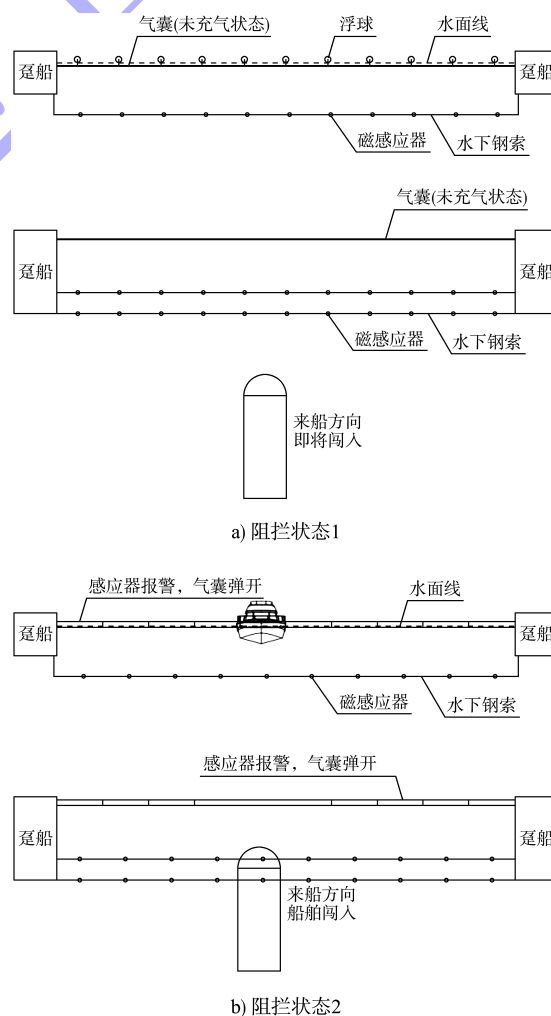
Fig. 7 Super capacitor photovoltaic power supply system

2 系统功能

当有危险船舶进入航道桥两侧拦阻装备布置水域时，本系统响应流程为：当图像监控预警系统利用雷达、AIS 等监控手段发现来船即将闯入预先划定的禁止区域时，进行危险船舶智能识别和取证，随后通过控制系统，给充气系统发出启动指令；若来船方向船舶进一步闯入磁探系统感应范围内，磁感应器检测到船舶闯入报警，磁感应器通过信号接收及控制装置传递信号后，也将触

发充气系统。高压气瓶电敏元件触发充气，气囊充气弹开并浮至水面，同时带动高摩拦截带也上浮水面，利用摩擦自锁原理，使得拦截带不会沿着船首下滑，实现有效拦阻船舶。

闯入的船舶行驶至气囊区域，来船头部顶触挤压气囊，气囊受船舶顶推，柔性拦阻船舶前进。随后，船继续前顶，船舶拖带拦截带向前移动，气囊受船舶顶推发生材料形变，与拦截带相连接的恒阻力耗能装置开始启动，消耗船舶动能，直至船舶停止运动。对于拦阻小吨位船舶，不需要启动恒阻力耗能机构；拦阻完成后，在气囊未损坏条件下，修复气囊与充气管道连接位置，启动抽气系统，使得气囊沉入水下，整个拦阻装置在系泊浮体的定位锚链系统作用下恢复原位。对于拦阻大吨位船舶，需要部分更换已启动的恒阻力耗能装置。主动船舶拦阻系统响应流程平面见图 8。



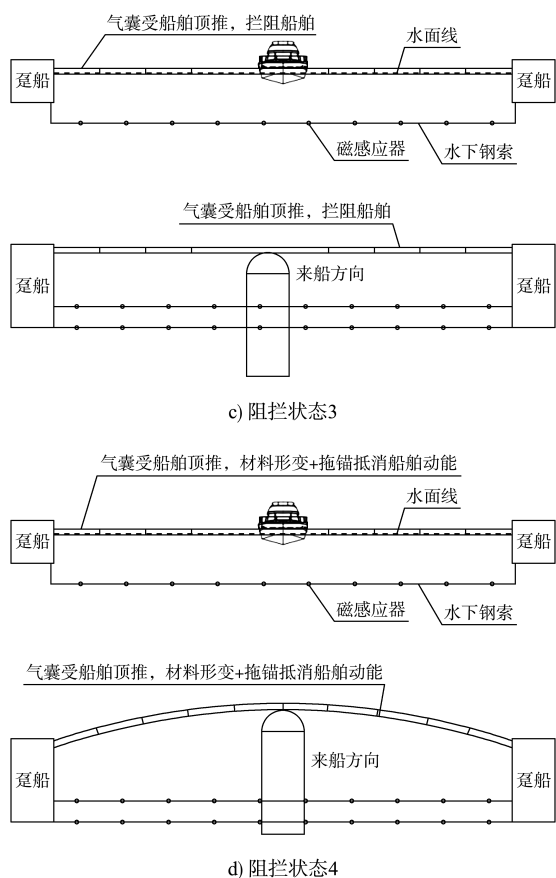


图 8 主动船舶拦阻系统响应流程

Fig. 8 Response process of active ship arrest system

3 关键技术特点

基于无线信号的柔性屏障主动船舶拦阻系统设计的关键技术是采用并融合了船舶航行异常识别技术、航道电子围栏的构建、船舶主动拦阻系统、气囊快速充气技术、磁探技术等, 构建主动安全技术框架体系, 研发了适用于水工建筑物的前置拦阻系统关键设施。提出船舶“智能拦阻”的理念及方案, 可成为桥梁、码头防撞的智能、有效的方式, 应用前景广阔。基于无线信号的柔性屏障主动船舶拦阻系统的特点如下:

1) 施工方便环保。装置主要包括气泵、气罐、管线、气囊拦阻带、浮体等, 均为工厂制造, 现场直接安装, 施工简单方便, 不涉及打桩、挖泥等施工, 对环境的影响小。

2) 景观影响小。装置的气泵可安装在桥上或码头上, 气囊在非工作状态时位于水下河床面上, 输气管线埋设在河床下, 正常情况下海上水面仅有浮体可见。对周边景观的影响较小, 能很好地融入周围环境。

3) 环境适应性强。装置的抗风浪能力强, 拦阻系统非工作状态时安置在河床面上, 不受风浪的影响, 即使是强风浪天气, 新技术装备也能保持很好的稳定性。

4) 控制智能。装置的智能控制系统采用了船舶交通管理系统 (vessel traffic services, VTS) 系统, 能够有效地区分大船与小船以及有碰撞风险和无碰撞风险船舶, 并通过系统风险分析运算, 自动控制拦阻系统起浮和下沉, 实现智能控制。

5) 使用耐久。新技术装备的拦阻系统非工作状态时沉在水下, 能够避免紫外线照射对拦截带及气囊的损伤, 延长装备的耐久性。同时, 由于沉在水下也可以有效降低海上风浪影响, 有效降低由于风浪作用装置时刻处于晃动状态、结构长期反复受力对装置、材料耐久性的影响。

6) 造价较低。在同等拦阻效果下, 可以降低工程投资。由于减少了风险较小船舶碰撞的概率和增强了结构的耐久性, 可以大大降低装置的使用及维护成本。

4 项目推广及效益

系统实现了船舶拦阻设施由被动防撞向智能主动拦阻的转变, 具有技术先进性。相较于安装被动防撞设施和传统 VTS 系统, 在同等拦阻效果下, 应用主动船舶拦阻系统装置能够大幅降低建设成本。新拦阻装备具有施工方便环保、景观影响小、环境适应性强、控制智能、使用耐久、造价较低等特点, 可以更好地适应桥梁以及港口对于防撞、环保、现场施工和景观等要求, 最终达到结构、船舶和环境三重保护的目标。

系统可应用于桥梁、港口码头等建筑物前沿防撞领域, 对船舶进行动态监测, 实现对即将发生碰撞或大概率碰撞的船舶进行更智能化、更精准的预拦截。同时可用于预警并拦截沿海周边恶意无人船或失控船舶, 保护沿海重大构筑物免受撞击破坏, 具有较大应用前景。通过主动预警系统, 有效地区分大船与小船以及有碰撞风险和无碰撞风险船舶, 并通过系统风险分析运算, 自动控制拦阻系统起浮和下沉, 实现智能控制。该系统适用的船舶类型和通航环境更加广泛, 防撞效

应更加可靠,可以提高航运监管效率,对预防人为因素导致的船舶碰撞事故具有积极意义。

5 结论

1) 聚焦船-桥、船-港口等碰撞风险,提出了一种具备“主动预警+被动防撞”双重功能的柔性屏障主动船舶拦阻系统,系统主要由图像监控预警系统、柔性防撞拦截装置、磁探测系统、趸船等组成,由图像监控预警系统实现动态监控,柔性防撞拦截装置实现自动启动拦截设施,磁探测系统强化拦截效率。

2) 柔性屏障主动船舶拦阻系统采用“主动预警技术”与“磁探测技术”相结合的双保险控制系统。不仅通过图像监控预警系统进行危险船舶智能识别和取证后,给充(放)气系统发出启动指令,还能由磁感应器阵列检测闯入危险区域的船舶后报警,传递信号至控制装置触发气囊拦阻系统。

3) 柔性屏障主动船舶拦阻系统的主要作用原理是利用气囊的浮力带动摩擦拦阻系统上浮水面,实现对危险船舶的有效拦阻。日常服役状态下气囊沉于水底,拦阻系统处于抗风浪稳定状态;工作状态下气囊快速上浮水面,同时带动高摩阻拦截带上浮水面,实施对来撞船舶有效拦阻。

4) 气囊拦阻装置构件简单有效,既能减少对船舶的损害,有利于大风浪下结构稳定性,又能减少对于周边景观的影响,可成为用于桥梁、码头防撞的智能、有效的方式。

参考文献:

- [1] 吕媛媛,罗士瑾.通航桥梁水上安全事故辨析与预控对策[J].公路交通科技(应用技术版),2012,8(12): 22-24.
LYU Y Y, LUO S J. Discrimination and pre-control countermeasures of water safety accidents of navigable bridges [J]. Highway transportation technology (application technology edition), 2012, 8(12): 22-24.
- [2] 廖德华,潘新恩,张建球,等.船舶撞击力作用下的墩式码头水工建筑物安全评估[J].水运工程,2021(9): 38-43, 54.
LIAO D H, PANG X E, ZHANG J Q, et al. Safety assessment of hydraulic structure of pier wharf under impact force of ship [J]. Port & waterway engineering, 2021(9): 38-43, 54.
- [3] 李才志,付欧阳.上海内河跨航道桥梁防撞设施分析[J].水运工程,2017(11): 141-145.
LI C Z, FU O Y. Analysis of anti-collision facilities of bridge crossing inland waterway of Shanghai [J]. Port & waterway engineering, 2017(11): 141-145.
- [4] 沈自力.桥梁防撞措施研究进展综述[J].交通科技,2015(3): 73-76.
SHEN Z L. Review on research progress of anti-collision equipment for bridge protection [J]. Transportation science & technology, 2015(3): 73-76.
- [5] 余葵,吴威力,刘宪庆,等.山区涉河桥墩布设防撞装置对通航的影响[J].水运工程,2022(6): 119-126.
YU K, WU W L, LIU X Q, et al. Influence of anti-collision devices for skew bridge piers on navigation [J]. Port & waterway engineering, 2022(6): 119-126.
- [6] 任慧.桥梁防船撞主动预警系统设计及实验研究[D].上海:上海交通大学,2013.
REN H. An active early-warning system for bridge piers against ship collision and its experiment [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [7] 张贵平,蔡雪尧,邓斌,等.跨越航道桥梁主动防碰撞预警系统研究[J].水上安全,2022(6): 44-50.
ZHANG G P, CAI X Y, DENG B, et al. Research on active anti-collision early warning system for bridge crossing waterway [J]. Maritime safety, 2022(6): 44-50.
- [8] 陈亮,吴善刚,肖英杰,等.基于视频目标检测的桥梁防船撞主动预警技术研究[J].水运工程,2012(6): 150-154.
CHEN L, WU S G, XIAO Y J, et al. Active forewarning technology for anti-collision between ship and bridge based on video object detection [J]. Port & waterway engineering, 2012(6): 150-154.
- [9] 潘放.通航桥梁船撞风险分析与规避措施研究与应用[D].广州:华南理工大学,2010.
PAN F. Risk assessment of ship collision with bridge and study on preventive measures [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [10] CHENG Z Y, LI Y L, WU B. Early warning method and model of inland ship collision risk based on coordinated collision-avoidance actions [J]. Journal of advanced transportation, 2020: 5271794.
- [11] WU B, YIP T L, YAN X P, et al. Fuzzy logic based approach for ship-bridge collision alert system [J]. Ocean engineering, 2019, 187: 106152.

(本文编辑 赵娟)