

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2020.10.018

# G1501 跨泖港大桥主动防撞系统设计

闫兴非, 张涛, 侯伟, 朱钊, 陈玮

(上海市城市建筑设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125)

**摘要:** G1501 高速公路跨泖港大桥上跨平申线(上海段)航道。该航道是《上海市“十二五”内河高等级航道建设规划》中首批启动建设的航道,为黄浦江上游三大支流之一,目前航道等级 V 改 IV。改造过程中航道上桥梁被船撞风险高,通过对桥梁预防航道船舶碰撞预警系统工作模式与参数化技术、多源数据三维测量空间的平面转换算法与工程实现技术、基于多源数据融合的船舶通航异常行为的判别技术、桥梁预防航道船舶碰撞预警系统性能优化与工程测试技术等内容进行研究,突破基于多源数据融合的复杂背景下航道多目标检测/跟踪算法、基于多源数据融合的船舶-桥撞击态势预测等关键技术,泖港大桥采用主红外、可见光和激光测距三类传感器复合体制的航道桥梁主动防撞系统。从而实现全天候、全天时、全自动航道桥梁主动防撞监控及预警,其应用效果良好。

**关键词:** G1501;桥梁防撞;主动防撞;航道;预警;监控

**中图分类号:** U442.5+9

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2020)10-0065-05

## 1 概述

平申线(上海段)航道是《上海市“十二五”内河高等级航道建设规划》中首批启动建设的一条航道,南起上海与浙江省省界,北至黄浦江上游横潦泾航段,航道里程约 19.3 km,由胥浦塘、掘石港、大泖港(由上游至下游)三个航段组成,是黄浦江上游三大支流之一,属于感潮河流。目前为 V 级航道标准,计划按照 IV 级标准进行改造。

G1501 高速公路跨泖港大桥现状桥梁为主跨 80 m 变截面预应力混凝土连续梁。按照航道整治计划,需拆除重建。新建跨航道桥梁采用变高度钢-混凝土混合连续梁结构,分为左右两幅,跨径为(65+135+65)m,目前已完成半幅桥梁,计划安装防船撞系统。

## 2 桥梁防撞系统的选择

目前国内外解决桥梁防船撞问题的主要措施是基于船舶交通管理系统(VTS)和被动防船撞设施,它们都存在一定的局限性。

用于沿海港口及水域的 VTS 中的雷达采用微波波段工作,有目标前沿跟踪和目标重心跟踪两种工作方式。其缺点在于:(1)建立跟踪的时间太长,达一个天线扫描周期,不利于对港区机动目

标快速建立稳态跟踪,因此无法适用于内河航道水域下的船舶快速定位和跟踪。(2)用于两船检测和跟踪的空间分辨率较低,目标跟踪混迹现象较严重,因此不适应对交通密集的内河航道水域目标进行跟踪与预警。

被动防船撞主要是保护桥梁安全,没有考虑对船舶的保护。被动防船撞装置对水域的通航能力和通航路线有一定影响。在水位变幅较大的情况下,被动防撞装置中浮式防撞装置适应性较好,但变坡度和变截面的桥墩结构会使浮式防撞装置安装困难,原因在于水位升降过程中,内钢围与桥墩的连接及滑轨设置较难解决,从而影响船撞力的传递,使防撞装置的防护能力不能有效发挥,同时滑轨存在养护和失效问题。

对此,提出基于视频监控的通航桥梁主动防船撞预警概念及方案,采用可见光、红外、激光进行复合探测并将探测到的数据进行融合的模式,可以满足全天候、全天时、全自动和稳定可靠的防撞预警需求。通航河道图像视频交通监控系统能够及时提供各重点航道的水文、气候、航道设施、船舶信息,对采集的视频图像进行鲁棒的实时的分析处理。即:在内河复杂背景、不良气候条件下,对运动船舶目标进行检测和跟踪,并进行航迹预测,从而辅助船舶航行,保障人员的生命和财产安全,减少或避免严重污染水域和自然环境事故的发生,确保航行运输安全。

开发基于视频监控的桥梁主动防船撞系统区别于被动防船撞系统,具有易于安装和维护、对环境影响小的优点;区别于以雷达为主要传感器

收稿日期: 2020-04-15

基金项目: 上海市科学技术委员会课题(17DZ1204303、17DZ2251900、19XD1432400); 住房和城乡建设部资助项目(2018-K9-039)

作者简介: 闫兴非(1976—),男,博士,教授级高级工程师,从事桥梁工程设计工作。

的船舶交通管理系统(VTS),具有实时性、可靠性和成本低的优点。

### 3 主动防撞系统的设计

#### 3.1 系统工作原理

可见光视频系统受光照、天气等因素的影响较大,天气条件不好(阴、霾、雨、雾、雪)或者夜间情况下,系统拍摄的目标特征不明显。红外热像仪是被动接受目标自身的红外热辐射,红外线的波长较长,克服雨、雪、雾的能力较高,因此可以在完全无光时对物体成像,也可以在浓厚的烟雾、云雾中探测船舶目标,然而红外热像仪所成图像没有颜色信息。同时,可见光传感器具有硬件成本较低,易于维护等优点;红外成像传感器具有测温度场、夜间连续观测的优点;激光可以完成运动目标测速和测距的功能。所以,该系统采用红外、可见光及激光三类传感器复合探测并利用探测到的信息进行分析的体制模式,工作原理如图1所示。

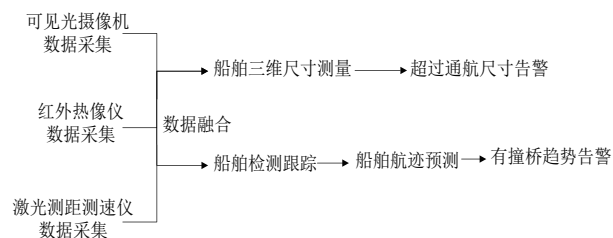


图1 系统工作原理图

当白天且天气情况良好时,基于可见光传感器采集的视频数据和激光传感器采集的距离、速度数据,利用计算机视觉和自动目标跟踪技术进行船舶的三维尺寸测量计算,同时对船舶目标进行检测、跟踪,以及航迹预测,对超宽、超高和有撞桥趋势的船舶提前采用声光进行告警;在夜间或者能见度很低的情况下,利用探测到的红外视频图像,并综合激光传感器采集的船舶目标距离和速度信息进行船舶的三维尺寸测量和过桥位置预测。这种根据可见光采集的视频信号清晰程度决定是否利用红外信息进行工作的机制使系统具有计算量小、可靠性高的特点,即协同利用可见光和红外传感器的组合方式,可以有效地解决全天候全天时的检测难题,提高系统的精度和可靠性,使全天时、全自动、精确、鲁棒的智能监视和船撞桥预警成为可能。

#### 3.2 系统功能流程

当传感器采集到现场数据后,利用系统软件模块对其进行相应的数据分析,从而做到对监控视频的自动理解,对航行异常进行告警,告警后

船舶进行航迹自校正,当自校正失败后,采取外力干预改变航迹从而解除船撞桥威胁。其功能流程如图2所示。

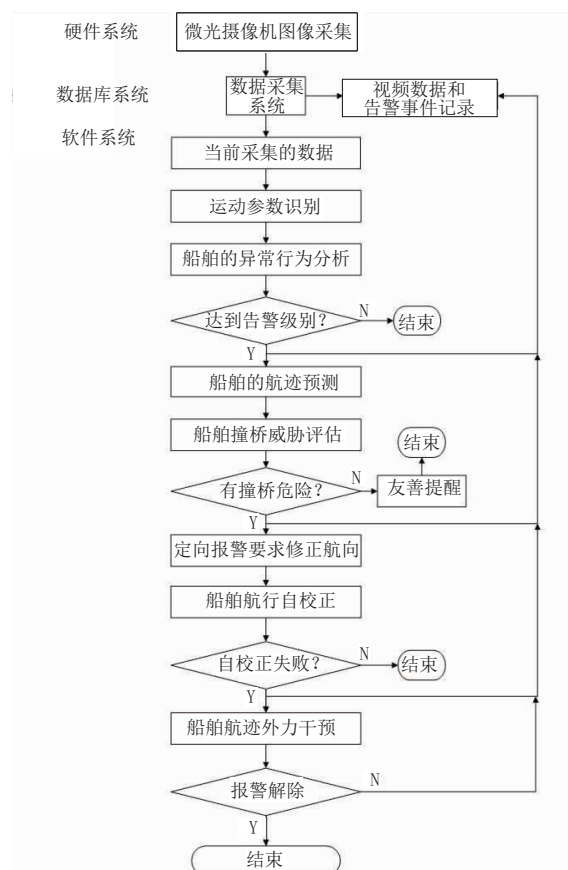


图2 系统功能流程图

根据桥梁防船撞的应用需求,将整个内河监测区划分为三段,即检测区(距桥500 m~1 km)、监视区(距桥500~200 m)、危险区(距桥小于200 m)。系统应满足如下的功能要求:(1)对通航桥梁上下游的船舶进行24小时监测;(2)对航行异常的船舶提前进行自动或者人机交互告警;(3)对有撞桥趋势的船舶提前进行自动或者人机交互告警;(4)对违规事件和相应的视频数据进行记录,便于事后进行事故评估和责任认定;(5)当告警船舶航迹自校正失败后,能够人工进行航迹干预,解除撞桥威胁。

#### 3.3 系统技术指标

主动防撞系统技术指标要求:(1)系统监控视场能覆盖全部航道;(2)单套系统在无遮挡情况下能够进行直线距离2 km范围内的监控;(3)多目标船舶检测能力不低于10个;(4)航道船舶防船撞概率大于95%;虚警率不大于5%;(5)具备抗强风、防雨水和防感应雷能力(三防),工作温度-20℃至50℃;(6)系统可在室内对室外设备进行远距离控制功能;(7)系统能够存储海量(不少于

1TB)视频图像,具有回放功能。

## 4 主动防撞系统的算法

### 4.1 视频预处理算法

由于摄像系统受自身,以及周围环境影响,使得摄取的图像会存在一些诸如图像灰度范围小,分布不均,显得图像对比度不够,模糊不清等问题。此时,如果直接提取并跟踪目标难度比较大,效果也不好。因此,需对视频进行预处理,消除采集的视频图像中的噪声,同时对离线打开的数据和采集的实时数据进行按比例缩放到显示界面中。该系统有两种预处理去噪方式,根据使用者的选择进行相应的操作:分别是高斯平滑去噪和形态学变换去噪。

高斯平滑去噪采用高斯滤波器,是一类根据高斯函数(即正态分布函数)的形状来选择权值的线性平滑滤波器,对于去除服从正态分布的噪声是有很有效的。高斯平滑滤波器虽然不是最快的,却是最有用的滤波器<sup>[1]</sup>。

基本的形态学转换是腐蚀和膨胀,功能是消除图像噪声。腐蚀操作是计算核区域像素的最小值:当核B与图像卷积时,计算被B覆盖区域的最小像素值,并把这个值放到参考点上。腐蚀操作能够消除细的突起,将图像中的斑点腐蚀掉,消除图像中的斑点噪声,且能保证图像内的较大区域依然存在。膨胀操作是指将一些图像与核进行卷积,核可以是任意形状或大小,它拥有一个单独定义出来的参考点(anchor point),膨胀是求局部最大值的操作<sup>[2]</sup>。因为在大多数情况下一个大区域可能被噪声、阴影等类似的东西分割成多个部分,而一次轻微的膨胀操作又使这些部分融合在一起。所以,该系统采取基本的 $3 \times 3$ 的正方形核模块,先腐蚀再膨胀,消除一些摄像头采集和传输过程中形成的噪声。

图像的腐蚀算法为<sup>[3]</sup>:将结构元素S的原点移到点 $(x, y)$ 时,结构元素变为 $S_{xy}$ ,若此时 $S_{xy}$ 包含于X,则满足这种情况的点 $(x, y)$ 的集合为X被S腐蚀的结果。其表达式如下:

$$X \ominus S = \{(x, y) | S_{xy} \subseteq X\}$$

具体总结为三点:(1)用 $3 \times 3$ 的结构元素,扫描图像的每一个像素;(2)用结构元素与其覆盖的二值图像做“与”操作;(3)如果都为1,结果图像的该像素为1,否则为0。

图像膨胀可以看作是腐蚀的对偶运算,其算法为<sup>[3]</sup>:若 $S_{xy}$ 击中或包含于X,则满足上述条件的 $(x, y)$ 点组成的集合称作X被S膨胀的结果。其

表达式如下:

$$X \oplus S = \{(x, y) | S_{xy} \cap X \neq \emptyset\}$$

### 4.2 船舶检测算法

背景减除法通过预先建立背景图像,将每一幅待检测图像与当前背景图像作比较来检测运动目标,并根据场景的变化动态地对背景图像进行更新。背景减除方法不受目标运动速度的限制,但检测性能与背景建模的好坏息息相关。最简单的背景建模方法有均值背景建模法和中值背景建模法。背景减除法一直是运动目标检测技术中的主流方法,受到广泛的关注。

背景减除算法的优点在于:操作简单,计算量小,实时性较好,并且检测位置准确,一般能够提供最完整的运动目标信息。但通常的背景减除法对于动态场景的变化,如光照、摄像头抖动、外来无关事件的干扰等特别敏感,运动目标的阴影也常常被检测为运动目标的一部分,影响检测结果的准确性<sup>[4]</sup>。背景减除法根据背景模型建立和模型更新步骤的不同分为:(1)参数与非参数化建模方法;(2)单峰与多峰分布建模方法;(3)迭代与非迭代建模方法;(4)像素级与区域级建模方法。

迭代建模方法首先根据第一帧建立一个背景模型,并根据后续输入的图像迭代地更新模型,无需开辟大量存储空间,能够适应背景动态变化的情况,而且算法比较简单。所以,该系统采用背景减除法中的迭代建模方法进行船舶目标检测,并对水波和相机抖动造成的噪声进行改进处理,以适应内河航道中运动船舶的目标检测。

### 4.3 船舶跟踪算法

基于图像序列的目标跟踪,难点体现在跟踪场景和目标的复杂性。目标运动时,由于噪声的影响和遮挡等原因,不同的目标有可能合并成一个目标,而同一目标又可能分裂成多个新的目标,且在目标运动过程中目标的外表特征也可能发生改变,如光照变化或阴影的影响造成的颜色特征的变化等。运动目标跟踪方法一般可分为基于模型、基于轮廓和基于区域的跟踪方法三种<sup>[5]</sup>。

基于区域跟踪的基本思想是:首先得到包含目标的模版,该模版可以通过图像分割获得或者预先人为确定,模版尺寸通常略大于目标,然后在序列图像中,运用相关算法跟踪目标,对彩色图像可以利用基于颜色的相关,如Camshift算法、基于核的算法和基于信任区域的算法,对灰度图像可以采用基于纹理和其它特征的相关。基于区域的跟踪方法通常可以和预测算法结合使用,以估计每幅图像中目标的位置。该方法在目标未

被遮挡的情况下,可以实现精确、稳定的跟踪,但是当存在较大遮挡或目标变形较大时,通常会导致目标的丢失,并且其模板的初始化对先验信息依赖较强。

该系统船舶跟踪算法采用基于区域跟踪的方法,提取区域的特征统计信息进行跟踪,采取计算量小的 Camshift 算法,有效解决目标外观变化的问题。当目标与背景颜色相近时,采用人为剔除与船舶颜色相近的河岸背景的方法进行跟踪;在夜间模式下当目标的颜色信息丢失时,采用基于纹理信息的算法进行跟踪。

#### 4.4 船舶二维标定算法

张正友针对径向畸变问题提出了一个新的求解摄像机内外参数的方法,即张氏标定法。该方法介于传统标定和自标定之间,只需要摄像机对某个标定板从不同方向拍摄多幅图片,通过标定板上每个特征点和其像平面的像点间的对应关系,即每一幅图像的单应矩阵,来进行摄像机的标定,不需要知道运动参数。该方法模板制作容易,使用方便,成本低,鲁棒性好,准确率高,得到了较为广泛的应用。因此,该系统船舶二维标定采用张氏摄像机标定法<sup>[6]</sup>。具体流程:首先计算单应矩阵,其次根据最小二乘法求解摄像机内外参数,然后采用最大似然估计进行优化,接着对摄像机镜头的一阶和二阶径向畸变进行矫正,最后求解新的摄像机线性标定。

### 5 主动防撞系统的组成

主动防撞系统由三个模块组成:目标探测与告警模块;数据处理与分析模块;监控与人机交互模块。通航桥梁主动预警系统的实现需要解决硬件系统的设计,从而获得监控视频数据和对有撞桥威胁船只的告警;软件系统防船撞预警算法的设计,从而实现监控视频的自动理解、系统测试与外场标定等关键技术。因此,系统组成包含有硬件和软件两大块,硬件完成数据的采集和声光告警;软件完成告警事件的检测,即船撞桥趋势预测。

#### 5.1 系统的硬件

系统硬件包括:微光摄像机、固定云台、4G 无线视频终端、告警装置、独立电源系统、继电器模块、太阳能控制器、防雷器、视频分析处理器。

(1)微光摄像机的选择,要考虑视场、景深、极低的照度、背光补偿、宽动态强光抑制、电子防抖、多模式滤光、性价比、技术支持力度等。通过对 ZENO 微光摄像机、INFINOVA 微光图像传感器、SMART IPC 图像传感器三家微光摄像机设

备进行比较,综合技术指标、以及实际弱光环境现场测试。该系统选择 ZENO 微光摄像机。

(2)为了与 ZENO 微光摄像机配套,选半固定二维云台,可在水平和俯仰方向作小范围调节。如在抗风、抗震的露天环境,可固定最终的使用位置。

(3)选合适的声光报警装置可解决远距离让违规船舶驾驶员听到和看到告警信号,及时纠正船舶航向,驶入安全区域。所有声光告警信号由桥上工控机通过实时分析河道船舶行驶图像后发出。

(4)选用稳定可靠的太阳能独立电源系统是系统正常工作的关键。太阳能独立电源系统包括:太阳能电池板、太阳能支架、蓄电池、控制器、安置杆。利用太阳电池组件发电,蓄电池储电,控制器控制蓄电池的充放电。白天太阳能电池的光伏效应产生电能通过控制器对蓄电池进行充电,并对桥上设备供电;夜晚无光时,蓄电池直接对桥上设备供电。

(5)太阳能控制器内部有一个先进的跟踪算法,来获取太阳能电池组件的最大功率,给蓄电池进行充电;同时,其低压断开(LVD)功能,可以防止蓄电池过度放电而造成损坏。该系统采用的 T-150 控制器的蓄电池,充电过程经过优化,能够延长蓄电池寿命,改善系统性能;其全面的自测功能和电子保护功能可以避免由于安装错误和系统故障而导致的控制器损坏;其上有一个专用的 RJ45 接口用来实现与其他监控设备进行通信。

(6)JK2 防雷器为电源、网络二合一防雷器,电源部分由气体放电管及压敏电阻组成,采用压敏与温控串联对地实施保护。通过压敏电阻发热来使温控断开,温控断开后则指示灯不亮;网络部分由 10kA 型气体放电管和 TVS 管组成;其接线端子为 RJ45 接口;其保护模式为线对地。

(7)视频分析处理器是该系统核心部件,采用无风扇工控机,进行图像分析,发出告警信号。无风扇工控机要求功耗低,能在室外不间断工作,可实时处理二路 1080P 视频信号。选择室外用全高清视频处理无风扇工控机,其特点如下: Intel i5-4300U 双核 1.9GHz;支持 4 路主流 IPC;多种通信能力: WWAN, WLAN;隔离电压 3KV; 9~36V 宽电压工作;支持 iManger, SUSIAccess, 内嵌软件 APIs。

#### 5.2 系统的软件

航道桥梁主动防船撞系统软件包含基于多源数据融合的复杂背景下航道多目标检测/跟踪算

法技术、基于多源数据融合的船舶-桥撞击态势预测等关键算法,以红外/可见光/激光复合探测为主要手段并将探测到数据进行分析,可以满足全天候、全天时、全自动和稳定可靠性的防撞预警需求。区别于被动防船撞系统,具有易于安装和维护、对环境影响小的特点;区别于以雷达为主要传感器的船舶交通管理系统(VTS),具有实时性、可靠性和成本低的特点。

软件可实现功能包括:(1)对通航桥梁上下游的船舶进行24小时监测;(2)对超高超宽的船舶进行告警;(3)对航行异常的船舶提前进行告警;(4)对有撞桥趋势的船舶提前进行告警;(5)对违规事件和相应的视频数据进行记录,便于事后进行事故评估和责任认定;(6)当告警船舶航迹自校正失败后,能够人工进行航迹干预,解除撞桥威胁。

相应的系统性能指标:(1)满足全天候、全天时、全自动的桥梁防船撞主动预警需求,同时对船舶目标的探测距离不低于1.5 km,报警距离不低于0.5 km;(2)对进入监视区的所有船舶能进行实时跟踪;(3)成功告警率不低于95%(虚警率不超过5%)。

## 6 主动防撞系统的应用

G1501高速公路跨柳港大桥,主动防船撞系统布置在防撞墙外侧,靠近规划单侧航道中心线,位置如图3所示。

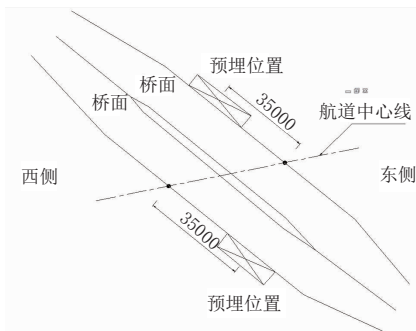


图3 防撞系统布置位置图(单位:mm)

外挂平台设置在图3所示预埋位置处,包括预埋板、转接板、太阳能板支架、太阳能板立柱、太阳能板及吊篮平台等。转接板焊接于防撞墙外露的预埋钢板上,吊篮及太阳能板支架通过转接板上的螺栓固定,太阳能板立柱通过法兰螺栓固定在支架上,然后太阳能板使用U型抱箍固定在

立柱上。整套外挂装置以吊篮为中心,按2 m等间距布置八套太阳能板支架。监测系统、蓄电池及电源控制箱安装于吊篮内。通过手机和电脑实时监控船舶信息。结构示意图如图4所示。

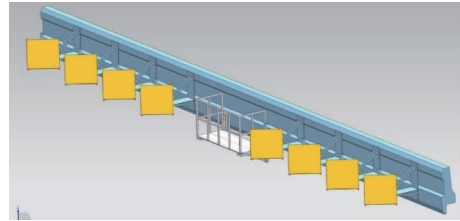


图4 支架系统结构示意图

应用显示,此主动防船撞系统实现了:全天候、全天时、全自动的桥梁防船撞主动预警需求,同时对船舶目标的探测距离不低于1.0 km,报警距离不低于200 m;对进入监视区的所有船舶能进行实时跟踪;成功告警率不低于95%(虚警率不超过5%);系统稳定、数据可靠。

## 7 结语

船撞桥事故给人民的生命财产安全,以及环境和社会造成了极大的损害,而我国交通运输事业处于迅猛发展阶段,公路、铁路桥梁在不断增多,桥梁防船撞是急需解决的民生课题。柳港大桥采用主红外、可见光和激光测距三类传感器复合体制的航道桥梁主动防撞系统,实现全天候、全天时、全自动航道桥梁主动防撞监控及预警,效果良好,具有非常大的应用价值,可供相关桥梁参考借鉴。

### 参考文献:

- [1] 许景波. 高斯滤波器逼近理论与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [2] 陆宗骥, 朱煜. 用带形状校正的腐蚀膨胀实现 Euclidean 距离变换[J]. 中国图象图形学报, 2010(2): 294-300.
- [3] 李晓飞, 马大玮, 粘永健, 孙晶菁. 图像腐蚀和膨胀的算法研究[J]. 影像技术, 2005(01): 37-39.
- [4] Talukder, A. and L. Matthies. Real-time detection of moving objects from moving vehicles using dense stereo and optical flow. in Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on. 2004: IEEE.
- [5] Lucas, B.D. and T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. in Proceedings of the 7th international joint conference on Artificial intelligence. 1981.
- [6] Horn, B.K.P. and B.G. Schunck. Determining optical flow. Artificial intelligence, 1981. 17(1): p. 185-203.