

· 信息技术 ·



## 过闸船舶闸室内超速越线智能监测设计与实现

肖玉华<sup>1</sup>, 高攀<sup>1</sup>, 安小刚<sup>2</sup>

(1. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002; 2. 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088)

**摘要:** 船舶通过船闸时, 可能存在因超速、越线等行为损坏系船柱、人字门等船闸设施, 同时受水工建筑物的遮挡、闸室内船舶交通管理系统(VTS)信号欠稳定等不利影响, 闸室内安全监管方式主要依赖人工进行, 船舶安全监管在智能化、及时性、准确性等方面存在一定的不足, 增大船舶在闸室内的安全风险。为解决上述问题, 基于船舶识别模型和雷达测速原理对过闸船舶超速越线监测进行研究, 通过理论推导提出船舶超速越线监测装置布置方案及计算思路, 进而提出船舶闸室内超速越线智能监测设计, 并在葛洲坝船闸成功应用。结果表明: 通过智能监测能够实现对过闸船舶超速、越线等潜在风险的有效监测, 预警准确率99.5%以上, 有效降低船闸安全风险。

**关键词:** 过闸船舶; 超速越线; 智能监测; 船闸安全

中图分类号: U641.7+8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0201-08

### Design and implementation of intelligent monitoring for overspeed and line crossing of passing ships in ship lock chamber

XIAO Yuhua<sup>1</sup>, GAO Pan<sup>1</sup>, AN Xiaogang<sup>2</sup>

(1. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China;

2. China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China)

**Abstract:** When ships pass through the ship lock, there may be damage to the ship lock facilities such as mooring columns and miter gates due to behaviors such as overspeed and line crossing, as well as adverse effects such as obstruction by hydraulic structures and unstable vessel traffic services (VTS) signals in the ship lock chamber. The safety supervision in the ship lock chamber mainly relies on manual work, and there are certain deficiencies in the intelligence, timeliness, and accuracy of ship safety supervision, which increase the safety risks of ships in the ship lock chamber. We aim to solve the above problems by studying the monitoring of the passing ship overspeed and line crossing on the basis of ship recognition models and radar speed measurement principles. Through theoretical derivation, we propose a layout plan and calculation approach for ship overspeed and line crossing monitoring devices, and put forward an intelligent monitoring design for overspeed and line crossing in ship lock chambers, which has been successfully applied in the Gezhouba ship lock. The results indicate that intelligent monitoring can effectively monitor potential risks such as overspeed and line crossing of the passing ships, with a warning accuracy rate of over 99.5%, effectively reducing ship lock safety risks.

**Keywords:** passing ship; overspeed and line crossing; intelligent monitoring; ship lock safety

近年来, 内河航运发展迅速。据统计, 2023年全国内河完成货运量47.91亿t, 已建通航建筑物超1000座<sup>[1]</sup>。船闸是内河常见的通航建筑物, 也

是高等级航道网的咽喉节点, 直接影响内河水运网的通畅和地区经济的发展。为满足日益增长的航运需求, 进一步挖掘船闸通过能力, 势必对船

收稿日期: 2025-04-11 录用日期: 2025-04-29

作者简介: 肖玉华(1973—), 男, 高级工程师, 从事规划基建管理工作。

闸高效安全运行提出更高的要求。

大量学者针对系船柱、人字门及水工建筑物等船闸设施的运行风险,开展实时安全监测、自动数据管理和智慧安全管理方面的研究。刘明维等<sup>[2]</sup>针对浮式系船柱系缆安全,构建柱身应变信号与船舶系缆力之间定量关系,并提出系缆安全的监测方法;陈明华<sup>[3]</sup>为监测人字门结构损伤及积累损伤,通过布设光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,FBG)传感器,经过信号处理、损伤识别和安全评定,对人字门健康状态进行远程实时监测;王贤龙等<sup>[4]</sup>以振动监测为基础,研制多传感融合的闸门状态监测方法,实现闸门的实时振动频率、开合角度监测和长期倾斜监测;张勃<sup>[5]</sup>为实时了解人字门长期满负荷工作可能带来的结构安全问题,提出一种基于FBG传感技术的人字门结构形变在线监测方法;姚明经<sup>[6]</sup>为满足葛洲坝船闸多源自动化监测数据与人工观测数据的综合管理,构建安全监测数据综合管理系统体系结构,对水工建筑物自动化监测数据进行统一管理;李明伟等<sup>[7]</sup>基于数字孪生对船闸实体进行三维场景构建、实时数据监测、智能预报及船闸结构仿真,实现对船闸的安全智慧管理。为保障船闸安全高效运行,船闸自身设施的安全运行是最重要的因素之一,过闸船舶的操作是否得当也是船闸安全运行不可忽视的因素。部分学者针对闸室监控、船舶吃水检测、过闸船舶限高、船舶和船员资格证书远程安全核验等方面进行研究,刘祖伟等<sup>[8]</sup>为规避人为因素在船闸运行中的风险,研究连续多级船闸智能自动化运行方法;韩伟等<sup>[9]</sup>为避免船舶在通过船闸等通航设施时因超吃水导致安全事故,结合超声波衍射原理,提出基于侧扫单波束阵列的吃水检测系统,对过闸船舶具有较好的预警作用;王海江等<sup>[10]</sup>分析大跨度侧扫式船舶吃水检测、过闸船舶限高、船舶和船员资格证书远程安全核验等关键技术,提出船舶过闸智能安检系统架构。

上述学者对船闸自身风险 and 过闸船舶吃水、

限高等外部条件的自动化监测进行研究,也采取诸如闸室防撞措施的研究和应用<sup>[11]</sup>,但是对船舶在闸室内航行、停靠等状态的安全监管方面的研究还很少。事实上,由于水工建筑物的遮挡、闸室内船舶交通管理系统(vessel traffic services,VTS)信号欠稳定等影响,过闸船舶稍有不慎就会损坏人字门、系船柱等船闸设施。目前,常见的过闸船舶操作不当的行为主要有超速、越线,其安全监管主要是依靠人工进行,存在的问题有:1)遇到船舶超速越线时须立即处置,对于人工观察或者仪器测量难以满足实时管理的要求;2)船舶大型化且闸室内船舶操作空间有限,提高了船舶的操纵难度和超速越线监测的精度要求;3)船舶外观和形状各异,船舶速度动态变化,超速越线观测比较困难,可能因主观判断不准导致误判。解决上述问题的关键在于采取措施对过闸船舶超速、越线进行智能监测,以进一步提高船闸安全管理。

为此,本文以降低过闸船舶损坏船闸设施风险为目标,提出船舶超速越线监测方法、监测装置布置方案和智能监测设计,实现对闸室内船舶的超速越线监测,减小船闸临时停航检修的概率,进一步提高船闸的通过能力。

## 1 智能监测方法

### 1.1 超速监测方法

对于测速监测装置,根据技术原理可分为雷达测速仪、激光测速仪、视频测速仪等,由于船闸有全天候工作的要求,激光和视频测速仪受天气或光照的影响较大。因此,选择雷达测速仪作为测速监测装置。雷达测速仪基于多普勒效应,电磁波以固定的速度向过闸船舶发射并反射,通过发射波与反射波的频率差,即可得到船舶的实时速度,公式为:

$$v = \frac{c\Delta f}{2f_0} \quad (1)$$

式中: $v$ 为过闸船舶的速度; $\Delta f$ 为发射波与反射波

的频率差;  $c$  为电磁波的传递速度;  $f_0$  为发射频率。

同时,为避免闸室内存在过闸船舶测速盲区,还需要获取测速监测装置与测速覆盖最远处之间的间距、测速监测装置测点高程、船舶进闸时的水面高程、测速监测装置与人字门挡水侧的间距等基础数据,通过几何原理计算测速监测装置有效覆盖的长度、测速方向中心线与水平面的夹角,以确定测速监测装置的布置方案。

## 1.2 越线监测方法

对于越线监测装置,选择实用性好、性价比高、满足监测功能的基于图像处理的扫描仪。该监测方法首先获取过闸船舶的亮度的变幅、像素的横纵坐标、像素中心位置的横纵坐标等基础数据;然后基于船舶识别模型计算过闸船舶在闸室内图像中的亮度,通过亮度确定船舶的形状,并与禁停线进行对比,从而判断船舶是否需要被禁停。船舶识别模型为:

$$f(x,y) = A \exp\left\{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma^2}\right]\right\} \quad (2)$$

式中:  $f(x,y)$  为在闸室图片中坐标为  $(x,y)$  处的所有船舶的亮度;  $A$  为闸室图片中所有船舶的亮度的变幅;  $x$ 、 $y$  分别为闸室图片中所有船舶像素的横、纵坐标;  $x_0$ 、 $y_0$  分别为在闸室图片中所有船舶中心位置的横、纵坐标;  $\sigma$  为在闸室图片中所有船舶像素值的变化率,其公式见式(3)。

$$\sigma = k \cdot \max(|G_x|, |G_y|) \quad (3)$$

式中:  $k$  为缩放系数;  $G_x$ 、 $G_y$  分别为闸室图片中所有船舶的水平、垂直方向的梯度值,可通过 Sobel 算子计算闸室图片中所有船舶的  $G_x$  和  $G_y$ 。

## 2 智能监测布置方案

结合船闸结构、监测装置性能、船闸安全管理等方面的要求,通过理论推导并综合船闸管理经验,提出闸室内过闸船舶的超速、越线监测装置的整体布置方案。

### 2.1 平面布置思路

1) 超速监测装置平面布置。由于需要监测过

闸船舶的进、出闸速度,测速监测装置可选择安装在船闸的上、下闸首人字门上,具体安装数量可根据装置扩散角、闸室尺寸、船舶宽度等确定,可选择安装 1 或 2 套甚至多套的超速监测装置,以保证能够监测到闸室内所有船舶的进、出闸速度。

2) 越线监测装置平面布置。考虑船闸管理人员检修、巡检、操作习惯等,越线监测装置可选择安装在闸室一侧的上、下游禁停线附近,与禁停线的距离可根据船闸管理经验选定。声光报警是过闸船舶在闸室内出现超速、越线行为时自动报警的装置。超速越线监测装置平面布置见图 1。

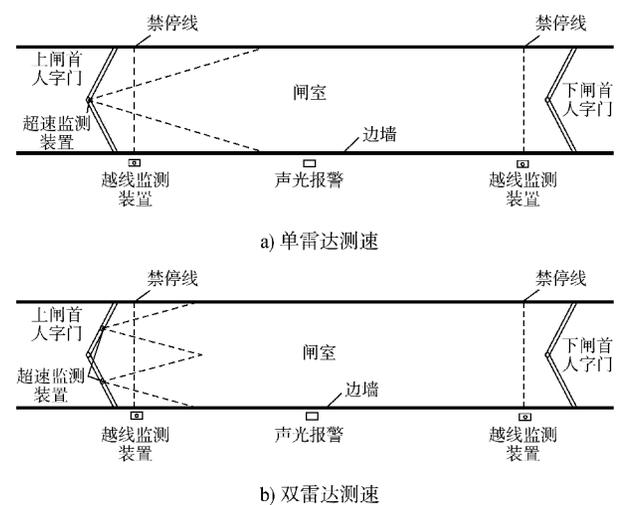


图 1 超速越线监测装置平面布置

Fig. 1 General layout of overspeed and line crossing monitoring device

### 2.2 立面布置思路

1) 超速监测装置立面布置。由于闸室上、下闸首人字门一般有人员通行的要求,超速监测装置可安装在人字门的行人桥下部。为对过闸船舶进闸速度的提前监控和预警,监测范围除了闸室的长度外,还要考虑将船舶进闸前一定距离纳入监测范围,可选择 50 m。同时,由于超速监测装置扩散角有限,其与水平面倾斜向下还存在一定的夹角,过闸船舶在靠近超速监测装置时可能存在一定的测速盲区,在布置时还应满足船舶

航行或停靠时测速盲区小于船舶长度的要求, 以保证超速监测能覆盖闸室内的所有船舶。过闸船舶上行测速时, 超速监测装置布置在上游人字门顶, 见图2。图中,  $H_1$  为最低通航水位,  $H_2$  为过闸船舶进闸时水面高程,  $H_3$  为过闸船舶进闸时水面高程加 5 m 时的高程,  $H_4$  为闸面高程,  $H_5$  为超速监测装置测点高程,  $\beta$  为超速监测装置扩散远边与水平面的夹角,  $\alpha$  为超速监测装置测速方向中心线与水平面的夹角,  $S$  为超速监测装置与测速覆盖最远处之间的间距,  $m$  为超速监测装置不能有效测速的闸室长度(测速盲区长度),  $n$  为超速监测装置与闸室底坎的间距,  $L$  为超速监测装置能够有效覆盖的测速长度。

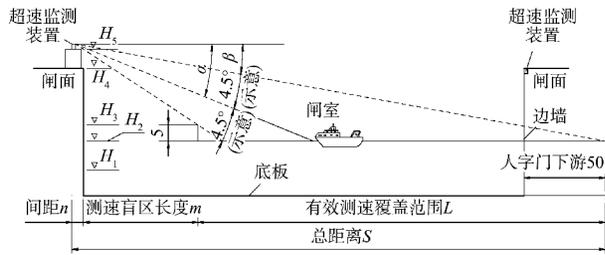


图2 超速监测装置立面布置(单位:m)

Fig.2 Vertical layout of speed monitoring device (unit:m)

根据船闸尺寸,  $\beta$  的计算公式为:

$$\beta = 90^\circ - \arctan [S / (H_5 - H_3)] \quad (4)$$

$m$  的计算公式为:

$$m = (H_5 - H_3) \tan [90^\circ - (\beta + 9^\circ)] - n \quad (5)$$

$L$  的计算公式为:

$$L = S - (m + n) \quad (6)$$

可得:

$$m = S - L - n \quad (7)$$

$\alpha$  的计算公式为:

$$\alpha = \beta + 4.5^\circ \quad (8)$$

根据不同的运行水位, 可以计算出在最高和最低通航水位的超速监测装置水平倾角。

在过闸船舶下行测速时, 超速监测装置安装

在下游侧人字门的行人桥下部。当  $H_5 > H_3$  时, 即超速监测装置测点高程大于过闸船舶进闸时水面高程加 5 m 时, 分析与上行测速立面盲区分析一致;  $H_5 \leq H_3$  时, 即超速监测装置测点高程等于或小于过闸船舶进闸时水面高程加 5 m 时, 可将超速监测装置水平安装, 不设置倾角, 测量无盲区。

2) 越线监测装置立面布置。为确保过闸船舶航行或停靠时不影响或碰撞越线监测装置, 其安装位置不允许超出闸墙边界伸入闸室内。同时, 为尽量减小扫描盲区, 越线监测装置不易远离闸室边界。由此, 要合理考虑越线监测装置的现场布置高度和扫描范围, 从而保证越线监测的可靠性。越线监测装置立面布置见图3, 图中  $H_6$  为越线监测装置测点高程,  $(H_6 - H_4)$  为立杆高度,  $d$  为立杆距闸室边墙的距离,  $D$  为过闸船舶的船宽。

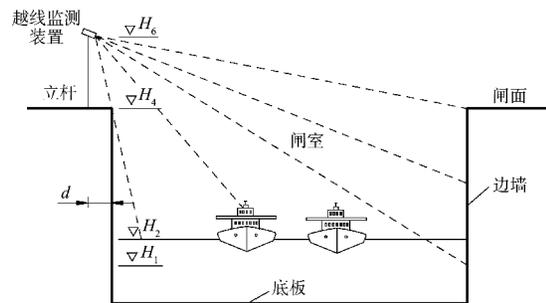


图3 越线监测装置立面布置

Fig.3 Vertical layout of line crossing monitoring device

为了能够覆盖全部过闸船舶的越线监测, 需要具备以下条件:

$$2d(H_4 - H_1) / (H_6 - H_4) \geq D \quad (9)$$

### 3 智能监测设计

#### 3.1 总体架构

过闸船舶闸室内超速越线智能监测总体架构由应用层、数据分析层、数据存储层、数据采集层、支撑层等5层组成, 见图4。

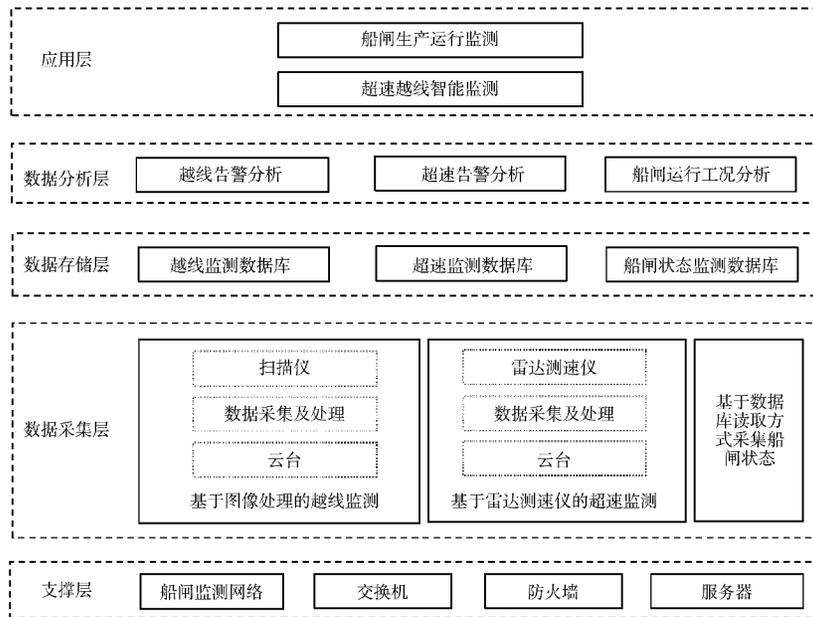


图 4 超速越线智能监测总体架构

Fig. 4 Overall architecture of intelligent monitoring for overspeed and line crossing

1) 应用层实现与船闸生产运行监测服务的接入, 实现对超速越线监测结果的应用展示。将过闸船舶超速越线报警、警告数据和超速数据上传至船闸生产运行监测, 当船舶速度达到或超过预警值时, 提供超速报警信号输出上传, 当船舶越线达到预警值时, 提供越线报警信号输出上传, 声光报警器提醒过闸船舶, 也为管理人员的现场管理提供支撑。

2) 数据分析层基于船闸运行工况实现对越线告警、超速告警分析, 包括越线告警分析、超速告警分析、船闸运行工况分析。

3) 数据存储层实现对监测数据的存储管理, 包括越线监测、超速监测、船闸状态监测数据库。

4) 数据采集层实现前端监测数据的采集, 包括基于图像处理的扫描仪的越线监测、基于雷达测速仪的超速监测、基于数据库读取方式采集船闸状态。主要装置有扫描仪、雷达测速仪、云台、数据采集及处理等设备。基于数据库读取方式采集船闸状态, 包括闸室水位、人字门开关、进出闸和上下行等信号, 向监测装置发送命令, 控制对应的上下游监测装置的开关, 为过闸船舶闸室内超速越线监测计算和分析提供基础。

5) 支撑层包括船闸监测网络、交换机、防火

墙、服务器等, 用于保障运行环境安全、流畅。

### 3.2 功能需求

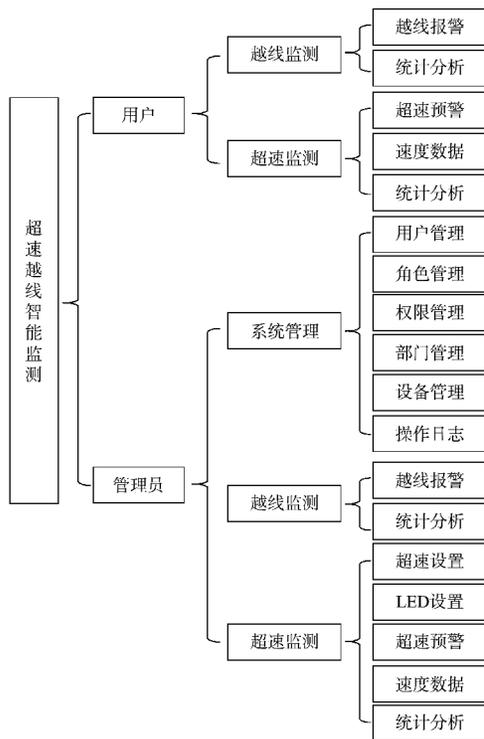
过闸船舶闸室内超速越线智能监测主要由越线监测和超速监测组成, 根据权限分为用户和管理员, 其中用户的功能权限包括: 越线监测、超速监测; 管理员的功能权限包括越线监测、超速监测和系统管理。具体功能见图 5。

1) 系统管理功能, 用户管理包括创建用户名、设置密码; 角色管理包括系统管理员、用户; 权限管理包括赋予角色不同的菜单访问权限; 部门管理包括标注用户所在部门名称; 设备管理包括实时记录监测设备运行状态和设备损坏预警功能; 操作日志包括记录登录、创建用户、查询的所有操作记录以及监测报错日志记录。

2) 越线监测功能, 越线报警是指对于过闸船舶越线的具体信息, 包括时间、闸次、越线位置、越线等级; 统计分析是指在所选时间范围内统计闸次内越线数量。

3) 超速监测功能, 超速设置是指在后台设定速度、距离作为预警值的判断, 设定测速区间并在测速区间内设定速度的预警值, 速度超过设定预警值则显示为超速; LED 设置是指当测速时 LED 屏幕显示过闸船舶速度, 当测速关闭时 LED

屏幕显示滚动文字；超速预警是指过闸船舶速度超过设定预警值并报警，统计超速预警的具体信息包括闸次时间、超速船速、时间；速度数据是指记录闸次内的进闸瞬时船速、出闸瞬时速度、最高速度生成闸次速度曲线；统计分析是指在所选时间范围内统计闸次内超速数量。



注：LED (light emitting diode, 发光二极管)。

图5 超速越线智能监测功能

Fig. 5 Function of intelligent monitoring for overspeed and line crossing

### 3.3 监测流程

#### 3.3.1 超速监测流程

1) 过闸船舶下行时监测流程。①船舶下行进闸信号，上游人字门超速监测装置关闭，启动下游人字门云台将超速监测装置探头旋转朝上游方向，当  $H_5 \leq H_3$  时保持水平；当  $H_5 > H_3$  时倾斜至超速监测装置测速方向中心线与水平面的夹角  $\alpha$ ，进而可以获取下行第1艘船舶从进闸到停泊的全过程船速信息。②船舶下行出闸信号，下游人字门超速监测装置关闭，启动上游人字门云台将超速监测装置探头旋转朝下游方向并倾斜至超速监测装置测速方向中心线与水平面的夹角  $\alpha$ ，根据船

舶高度遮挡情况可获取闸室内所有船舶从停泊到出闸全过程船速信息。

2) 过闸船舶上行时监测流程。①船舶上行进闸信号，下游人字门超速监测装置关闭，启动上游人字门云台将超速监测装置探头旋转朝下游方向并倾斜至超速监测装置测速方向中心线与水平面的夹角  $\alpha$ ，根据船舶高度遮挡情况可获取闸室内所有船舶从进闸至停泊的全过程船速信息。②船舶上行出闸信号，上游人字门超速监测装置关闭，启动下游人字门云台将超速监测装置探头旋转朝上游方向，当  $H_5 \leq H_3$  时保持水平；当  $H_5 > H_3$  时倾斜至超速监测装置测速方向中心线与水平面的夹角  $\alpha$ ，进而可以获取上行最后一艘船舶从停泊至出闸的全过程船速信息。

#### 3.3.2 越线监测流程

1) 过闸船舶上行时监测流程：船舶上行进闸信号，启动上游越线监测装置，下游人字门关闭信号，启动上游越线监测装置报警检测；船舶上行出闸信号，上游越线监测装置停止检测。

2) 过闸船舶下行时监测流程：过闸船舶下行进闸信号，启动下游越线监测装置，上游人字门关闭信号，启动下游越线监测装置报警检测；船舶下行出闸信号，下游越线监测装置停止检测。

### 4 工程案例

过闸船舶闸室内超速越线智能监测部署已应用在葛洲坝船闸。葛洲坝船闸共有1#~3#船闸，均为单级船闸，其中1#船闸位于枢纽右侧的大江主航道，2#、3#船闸位于枢纽左侧的三江航道。船闸主要由上游导航墙、桥墩段、上闸首、闸室、下闸首、下游导航墙等部分组成。1#、2#船闸的闸室平面有效尺度280 m×34 m(长×宽)，3#船闸的闸室平面有效尺寸120 m×18 m(长×宽)。3座船闸运行水位条件相同，最大水头为27 m。超速、越线监测装置具体布置方案是在1#、2#船闸采用双雷达测速布置，3#船闸采用单雷达测速布置，越

线监测装置布置在单侧靠近禁停线附近。结合船闸运行逾 40 a 的经验, 设置越线监测预警值 0 m, 超速监测预警值 1.5 m/s。

过闸船舶闸室内超速越线智能监测于 2022 年 12 月应用至今, 具有可靠性高、适用性强的特点, 实现了包括超速报警、禁停报警等功能的船舶超速越线智能监测, 见图 6, 对于船闸智能化改造具有重要的现实意义。针对过闸船舶进出闸的综合

监管, 采集船舶速度及禁停线附近位置信息, 通过监测网络上传至船闸生产运行监测系统, 对船舶的超速越线进行监测及报警, 辅以闸室内视频监控, 实现对船舶的智能化监测, 增强船舶进出闸综合监管和应急保障能力。据不完全统计, 2024 年至今, 葛洲坝船闸通行船舶超 5 万艘次, 超速、越线监测的预警准确率均在 99.5% 以上, 达到预期目标。



a) 禁停数据



b) 超速预警

图 6 超速越线智能监测应用统计界面

Fig. 6 Statistical interface of intelligent monitoring application for overspeed and line crossing

### 5 结论

1) 本文基于船舶识别模型提出闸室内过闸船舶越线监测方法, 基于雷达测速仪提出闸室内过闸船舶超速监测方法, 并通过公式推导和船闸管理经验, 提出超速越线监测装置布置方案及其计算思路。上述超速越线监测方法为智能监测构建

奠定了理论基础。

2) 本文构建过闸船舶闸室内超速越线智能监测设计, 分析过闸船舶闸室内超速越线智能监测功能和监测流程。通过读取船闸运行状态数据为超速越线监测提供运行数据支撑, 经过后台处理获取过闸船舶速度和位置信息并预警, 上传至船

闸生产运行监测系统以辅助管理人员决策处理。

3) 过闸船舶闸室内超速越线智能监测成功应用在葛洲坝船闸, 预警准确率 99.5% 以上, 达到了较好的效果。越线监测成果可推广应用在港口安全管理、秩序管理以及船舶服务设施分配等方面, 超速监测可广泛应用在类似船闸内过闸船舶超速监测, 也可应用在对航速有限制的区域。该成果对于船闸安全运行管理具有重要现实意义, 也可为智慧化船闸建设提供借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 建设新内河 构建新格局: 第二届内河航运高质量发展论坛 侧记 [EB/OL]. (2024-11-06) [2025-02-05]. [https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202411/t20241106\\_4159032.html](https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202411/t20241106_4159032.html).  
Constructing new inland rivers and creating a new pattern-side notes on the second forum on high quality development of inland shipping [EB/OL]. (2024-11-06) [2025-02-05]. [https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202411/t20241106\\_4159032.html](https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202411/t20241106_4159032.html).
- [2] 刘明维, 王钟浩, 吴林健, 等. 船闸浮式系船柱系缆安全监测方法研究[J]. 水运工程, 2023(3): 85-91.  
LIU M W, WANG Z H, WU L J, et al. Safety monitoring method for mooring lines of floating bollards in ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2023(3): 85-91.
- [3] 陈明华. 基于光纤布拉格光栅的船闸人字门健康状态远程监测系统[J]. 水运工程, 2020(2): 143-147.  
CHEN M H. Remote monitoring system of miter gate of ship lock health status based on fiber Bragg grating[J]. Port & waterway engineering, 2020(2): 143-147.
- [4] 王贤龙, 吴庞, 王鹏, 等. 多传感信息融合的闸门状态监测系统研究[J]. 水运工程, 2022(1): 157-164.  
WANG X L, WU P, WANG P, et al. Gate status monitoring system of multi-sensing information fusion [J]. Port & waterway engineering, 2022 (1): 157-164.
- [5] 张勃. 基于光纤传感技术的大型船闸人字门形变监测方法研究[J]. 半导体光电, 2023(3): 450-454.  
ZHANG B. Research on deformation monitoring method of miter gate of large ship lock based on optical fiber sensing technology [J]. Semiconductor optoelectronics, 2023(3): 450-454.
- [6] 姚明经. 葛洲坝船闸安全监测数据综合管理系统设计与应用[J]. 人民长江, 2020, 51(3): 189-192.  
YAO M J. Design and implementation of comprehensive management system for safety monitoring data of Gezhouba ship lock [J]. Yangtze River, 2020, 51 (3): 189-192.
- [7] 李明伟, 安小刚, 潘士琦, 等. 基于数字孪生的船闸安全智慧管理方法[J]. 水运工程, 2021(6): 212-217.  
LI M W, AN X G, PAN S Q, et al. Smart management method for ship lock safety based on digital twin[J]. Port & waterway engineering, 2021(6): 212-217.
- [8] 刘祖伟, 胡航, 熊锦玲, 等. 三峡船闸智能自动化运行方式的可行性研究[J]. 水运工程, 2021(3): 164-167.  
LIU Z W, HU H, XIONG J L, et al. Feasibility study on intelligent and automatic operation mode of the Three Gorges ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2021(3): 164-167.
- [9] 韩伟, 汤伟毕, 李然, 等. 一种内河船舶吃水检测系统设计[J]. 水运工程, 2020(2): 35-38.  
HAN W, TANG W B, LI R, et al. Design of draft detection system for inland river ships [J]. Port & waterway engineering, 2020(2): 35-38.
- [10] 王海江, 梁镨, 赵蒙, 等. 船舶过闸智能安检系统架构设计[J]. 航海工程, 2023, 52(5): 31-34.  
WANG H J, LIANG K, ZHAO M, et al. Design of the intelligent security inspection system architecture for ship passing through lock [J]. Ship & ocean engineering, 2023, 52(5): 31-34.
- [11] 张杰, 罗宁. 葛洲坝 1 号船闸增设防撞安全设施的探讨[J]. 水运工程, 2017(7): 145-148, 154.  
ZHANG J, LUO N. Adding anti-collision safety device for Gezhouba No. 1 Lock [J]. Port & waterway engineering, 2017(7): 145-148, 154.

( 本文编辑 王璁 )