

# 过闸船舶吃水深度检测系统关键技术

朱增伟,张劲军,杜晓啸,张 坤,储伟杰,许晨杨

(江苏省泰州引江河管理处,江苏 泰州 225300)

**摘要:**立足高港船闸航道实际情况,研究了一套过闸船舶吃水深度检测系统。利用多个超声波传感器扫描测距的方法,实现行进船舶的吃水检测。检测架连接2座警示浮筒安装于水下。采用动态压力补偿的方法解决浮筒摆动导致系统稳定性差及水下检测架弯曲变化导致系统测量精度低的问题。建立最小二乘支持向量机预测模型对异常检测数据进行处理,最终得到过闸船舶的吃水深度信息。本研究采用现场实测的方法对系统性能进行验证,结果表明,系统稳定有效,测量精度较高,满足高港船闸实际运管需求。

**关键词:**超声波;吃水深度检测;压力补偿;最小二乘支持向量机

中图分类号:TV213.4

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)06-0044-0005

## Key technology of draft depth detection system for lockage ship

ZHU Zengwei, ZHANG Jingjun, DU Xiaoxiao, ZHANG Kun,  
CHU Weijie, XU Chenyang

(Taizhou Yinjiang Canal Administration of Jiangsu Province, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** Based on the actual situation of Gaogang Ship Lock channel, a set of draft depth detection system for lockage ships is studied. The method of scanning distance measurement by multiple ultrasonic sensors is used to realize the draft detection of moving ships. The detection frame is connected to two warning buoys and is installed underwater. The dynamic pressure compensation method is used to solve the problem of poor stability of the system caused by the buoy swing and the low measurement accuracy of the system caused by the bending change of the underwater detection frame. The least squares support vector machine prediction model is established to process the anomaly detection data, and finally the draft depth information of the lockage ship is obtained. In this study, the performance of the system is verified by field measurement. The results show that the system is stable and effective, and the measurement accuracy is high, which meets the actual transportation management requirements of Gaogang Ship Lock.

**Key words:** ultrasonic wave; draft depth detection; pressure compensation; least squares support vector machine

## 1 概 述

高港船闸位于泰州引江河南端,距离长江口门1.9 km,是以航运为目的的复线船闸。通航以来大量商品物资从这里进出,船闸经济效益辐射整个苏

东、苏北地区。近年来,随着船舶大型化、新型化的不断发展,航运船舶密度和货运量大幅增加,航运事业突飞猛进,苏北河段船舶通行需求不断攀升,在经济效益的驱使下部分船舶吃水、装载谎报,导致过闸安全风险逐渐增大。船舶往往采取此地配

收稿日期:2023-03-07

作者简介:朱增伟(1989—),男,工程师,硕士,主要从事水利工程管理工作。E-mail:1018920265@qq.com

载异地签证、“大船小证”、谎报吃水、水尺造假等方式超过航道维护水深标准配载航行来规避管理<sup>[1]</sup>。当这些“超吃水”船舶冒险通过航道的浅险航段时,极易在航道内搁浅,不仅会破坏航道,而且可能引发堵航事件的发生,而当其进入闸室,则会对船闸门槛、闸门底止水、底轨等设施造成严重破坏,甚至导致船闸停航,危害极其严重。

当前,国内绝大多数船闸没有吃水检测的有效手段,通航管理单位主要通过船舶自主诚信申报和人工丈量的方式获取过闸船舶的吃水信息,所采用的测量手段大多为目测吃水线和卷尺测量。此类方法效率低、数据少、精度差,且检查人员检查吃水线时,船舶必须停船靠岸,既耗费时间,又妨碍其他船舶通航,极大降低了船闸通航效率,且检查结果不利于快速、准确地进行海量数据分析处理和共享利用,难供通航管理人员直接应用<sup>[2]</sup>。同时,该方法易受风浪、船舷波等因素的影响,测量数据或不被船员认可,因此常常产生矛盾、纠纷,甚至发生行风问题。

高港船闸作为连接长江与泰州引江河的一道重要水运卡口,保护着内河 300 km 航道及沿线桥梁的安全,因此,如何在不影响通航的前提下,快速、有效地进行船舶吃水深度检测,及时发现“超吃水”船舶并予以制止,并在“超吃水”船舶破坏航道后,船闸管理人员能够真实、准确掌握其实际吃水深度情况,取得“超吃水”证据,是高港船闸管理中迫切需要研究解决的问题。

本文结合高港船闸过闸实际情况,开展过闸船舶吃水检测系统研究,以形成可应用于工程实际的吃水检测方案。

## 2 过闸船舶吃水检测系统

### 2.1 检测系统组成

本检测系统由检测平台及数据处理与显示系统组成。过闸船舶吃水深度检测系统框图如图 1 所示。

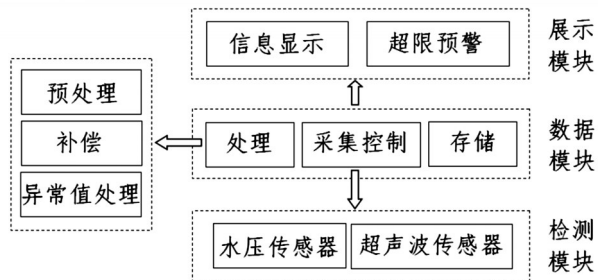


图1 过闸船舶吃水深度检测系统

检测平台由 2 座中大型警示浮筒与水下超声波检测装置组合而成。考虑到高港船闸下游航道水下高程分布特点、船舶过闸航线特点及检测所需深度要求,将 2 个浮筒东西向置于 C.S12 下-C.S13 下断面之间的航道位置,并用钢丝绳将检测架水平固定于水下-5 m 处。水下超声波检测装置由检测架和检测传感器组成。根据高港船闸过闸船型特点,同时保障行船检测安全,设置水下检测架长度为 30 m,并将 120 个单波束超声传感器、11 个水压传感器等测量仪器分组布置于检测架上,通过检测系统控制模块对各传感器进行控制,实现水下扫描测距。

数据处理与显示系统主要通过网络传输模块获取行进船舶吃水数据并对其信息进行一定的数据处理,保存到船舶信息数据库中,再展示检测信息,并对吃水超限船舶进行预警。

### 2.2 工作原理

水下超声波传感器发射固定频率的超声波,当没有船舶经过时,超声波经过水面折射回传感器接收端;当有船舶通过时,超声波传感器根据发射超声波到接收船底反射的超声波之间的时间差可得到船底距检测架的距离数据,再由检测系统对系统误差进行补偿处理后,可得到实际距离  $L$ ;同时根据安装在检测架上的水压传感器可测得检测架至水面的距离  $D$ ,则可以计算得到船舶的吃水深度,即  $H=D-L$ ,再对集合  $H$  中的所有数据进行异常值剔除后,集合中最大的数据  $H_{\max}$  就是该船舶的吃水深度。

## 3 安装方式及防撞措施

### 3.1 安装方式

检测平台东西两侧为警示浮筒,通过配重固定于航道中间。水下超声波检测架通过钢制链条水平置于两浮筒之间。由于过闸船舶通过检测架上方时,船舶最低点在船舶的中间部位,所以布置在检测架上的超声波传感器覆盖距离要大于半个船宽。根据高港船闸过闸船型实际情况,设置传感器布置间距为 0.25 m。同时,为了减小相邻传感器发射和返回信号之间的串扰<sup>[3]</sup>,保证采集到的数据能够尽可能真实地反映船舶吃水信息,采用分组的方式将检测架上的传感器分为 10 组并依次布设,按组进行测量,测量时依次启动,同一时间段每组只有特定传感器进行声波接收。通过这种方式可大大降低超声波传感器之间的干扰。

### 3.2 防撞措施

由于检测平台设置于航道中间,大量待测船舶

均需从其中间经过,给检测平台带来安全风险,因此从高港船闸管理实际出发,设置了防碰撞机制。一是加强航道秩序联合管理。加强高港船闸航道班与海事部门的联系,针对航道行船规范操作、船舶停靠区域及恶劣天气停航条件等方面的要求进行严格规范,并加强联合检查宣传,进一步规范通航秩序;二是强化行船安全宣传。运用高港船闸短信、高频提醒、语音播报及登船面对面宣传等手段对过闸船舶进行安全行船提醒;三是设置防碰撞设备设施。在检测平台浮筒上设置警示灯光,提醒行船及时避让;同时安装距离报警器,当行船与浮筒之间距离小于安全距离,报警器发出报警提示音,提醒船员注意船舶与浮筒间距;在航道及引航桥合适位置设置醒目标语,提醒船员规范驾驶<sup>[4]</sup>。

## 4 检测系统数据处理

当船舶通过检测平台,检测系统对船舶吃水进行实际测量时会出现测量数据与实际数据存在较大偏差的情况。经过对现场检测情况和所得数据的分析,得出造成偏差的原因主要有3个:一是受航道水流、风力及行船波浪等因素影响导致检测架出现摆动、不水平等情况;二是30 m检测架有一定柔性,导致存在一定程度的弯曲;三是航道中浮游物、船舶运动带来的气泡等因素。第一、二种原因造成的误差为系统误差,可通过对传感器的测量数据进行补偿解决;第三种为非系统误差,可通过建立最小二乘支持向量机预测模型对数据进行处理。

### 4.1 检测系统的数据补偿

在检测系统对船舶吃水进行检测时,由于受外部干扰因素的影响,检测架在水下一般处于不水平和弯曲的混合状态下,检测架传感器数据补偿示意图如图2所示。检测架上11个水压传感器从左到右所测得水深度依次编号为 $D_1, D_2, \dots, D_{11}$ ,相邻水压传感器之间距离为3 m,在这段长度内可忽略检测架弯曲影响。取 $D_2$ 至 $D_3$ 段,以第16个超声波传感器为例,则第2个水压传感器至第16个超声波传感器之间的距离为0.75 m,第16个超声波传感器偏

离 $D_2$ 所在水平线的距离为 $i_{16}$ ,则根据几何原理有:

$$\frac{i_{16}}{D_3 - D_2} = \frac{0.75}{3} \quad (1)$$

则有偏离距离:

$$i_{16} = \frac{D_3 - D_2}{4} \quad (2)$$

因此,第16个超声波传感器的实际深度 $I_{16}$ 为

$$I_{16} = i_{16} + (D_2 - D_1) = \frac{7D_2 + D_3}{4} - D_1 \quad (3)$$

据此可得出检测架上120个超声波传感器的实际深度 $I_n$ ( $n$ 为1至120之间的整数)。通过此方法可以有效地降低水下检测架不水平及弯曲对超声波传感器测量数据带来的影响,进一步提高测量数据的准确性。

### 4.2 检测系统的异常数据处理

在过闸船舶通过检测装置上方时,一方面船底与检测装置之间可能存在水草、浮游物、水域垃圾等,另一方面船舶尾部螺旋桨工作时会产生大量气泡,形成气幕带<sup>[5]</sup>。这两方面原因导致系统在测量船舶吃水深度过程中产生大量异常数据,且这类异常数据主要集中在船尾。针对这种情况和异常数据的特点,系统采用最小二乘支持向量机预测算法,通过实时预测船舶吃水深度来剔除异常数据,从而消除此类异常数据对系统测量准确性的影响。

最小二乘支持向量机是支持向量机的一种改进,计算结果更加精确,计算复杂程度大大降低<sup>[6]</sup>。设系统对行进船舶的检测次数 $x$ ,测得的船舶实际吃水深度 $y$ ,则第 $i$ 次测得的数据为 $(x_i, y_i)$ 。取一段测量数据集合并采用归一化的方法对其进行处理,得到训练样本 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i)\}$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ,其中 $x_i \in R^n$ 为 $n$ 维输入, $y_i \in R$ 为一维输出,则样本转换到高维特征空间中的线性回归函数为

$$f(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (4)$$

式中: $w$ 为权向量, $\varphi(x)$ 为核空间映射函数, $b$ 为常数。

最小二乘支持向量机可以将回归问题转化为一个等式约束的优化问题,其目标优化函数为

$$\min_{w, b, e} J(w, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (5)$$

其约束条件为

$$y_i = w^T \varphi(x_i) + b + e_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中: $e_i$ 为松弛变量, $\gamma$ 为正规化参数。

定义拉格朗日函数为

$$L(w, b, e, \alpha) = J(w, e) - \sum_{i=1}^n \alpha_i [w^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i] \quad (7)$$

其中: $\alpha_i$ ( $i=1, 2, \dots, n$ )为拉格朗日乘子。

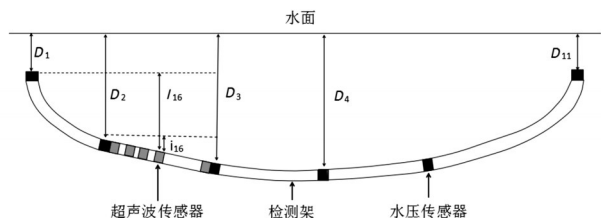


图2 检测架传感器数据补偿示意

对式(7)求偏导,再根据 $k(x_i, y_i) = \varphi^T(x_i)\varphi(y_i)$ 条件定义,上述优化问题可转化为求解线性方程:

$$\begin{bmatrix} 0 & I_n^T \\ I_n & \Omega + \frac{1}{\gamma} I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $y = [y_1, \dots, y_n]^T$ ,  $I_n = [1, \dots, 1]^T$ ,  $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]^T$ 。

则由(8)可得 $\alpha$ 、 $b$ 为

$$b = \frac{I_n^T \left( \Omega + \frac{1}{\gamma} I_n \right)^{-1} y}{I_n^T \left( \Omega + \frac{1}{\gamma} I_n \right)^{-1} I_n} \quad (9)$$

$$\alpha = \left( \Omega + \frac{1}{\gamma} I_n \right)^{-1} (y - I_n b) \quad (10)$$

得到最小二乘支持向量机的预测函数为

$$f(x) = A(x)\alpha + b \quad (11)$$

核函数取径向基核函数,有

$$k(x, x_i) = \exp\left\{-\|x - x_i\|^2 / 2\sigma^2\right\},$$

令  $A_i(x) = \exp\left\{-\|x - x_i\|^2 / 2\sigma^2\right\}$ ,  $A = [A_1, \dots, A_n]$ , 则

最小二乘支持向量机的预测函数为

$$f(x) = A(x)\alpha + b \quad (12)$$

由最小二乘支持向量机预测函数可以预测下一船舶的吃水深度数据 $f(x_i)$ ,则检测数据与预测数据的差值为 $|y_i - f(x_i)|$ 。

$$\text{设定阈值 } d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [f(x_i) - \overline{f(x)}]^2}{n-1}}, \text{ 若 } |y_i - f(x_i)| > d,$$

则判定检测数据为异常数据并剔除,否则判定为正常数据并保留。通过此方法,可以有效地消除过闸船舶尾部大量异常数据对检测系统测量数据准确性的影响,进一步提高检测的准确性。

## 5 结果与分析

本文在高港船闸待闸区选定20艘船舶状态良好且信誉优良的待过闸船舶,采用交叉验证法来确定最小二乘支持向量机船舶吃水深度预测模型的参数,选取输入向量维数为4,惩罚参数 $\gamma$ 为55,核函数 $\sigma^2$ 为1。通过传统人工丈量水尺的方法对船舶进行吃水深度测量,得到人工丈量吃水数据;为降低行船速度对系统测量的影响,要求船舶以较低的安全速度通过检测区域,得到检测系统测量数据。过闸船舶吃水深度测量数据对比如表1所示。

表1 过闸船舶吃水深度测量数据对比

(单位:m)

序号	船名	人工丈量吃水深度	检测系统测量吃水深度	实际吃水深度	人工丈量误差	检测系统测量误差
1	鑫达999	2.65	2.62	2.60	0.05	0.02
2	苏油789	3.38	3.42	3.40	-0.02	0.02
3	苏盐城货213999	3.05	3.01	3.00	0.05	0.01
4	永帮999	0.78	0.81	0.80	-0.02	0.01
5	俞垛5898	1.07	1.03	1.00	0.07	0.03
6	豫周口货7558	3.04	3.02	3.00	0.04	0.02
7	苏淮货18799	2.75	2.79	2.80	-0.05	-0.01
8	豫鑫裕11880	3.08	3.10	3.10	-0.02	0.00
9	苏东悦货6688	3.06	3.03	3.00	0.06	0.03
10	苏连云港货5866	1.55	1.52	1.50	0.05	0.02
11	志远516	1.18	1.08	1.10	0.08	-0.02
12	皖金龙99	2.08	2.09	2.10	-0.02	-0.01
13	皖阜南货1388	3.25	3.21	3.20	0.05	0.01
14	兴航化668	1.58	1.59	1.60	-0.02	-0.01
15	金城机9588	3.33	3.34	3.30	0.03	0.04
16	皖霍邱986	0.71	0.72	0.70	0.01	0.02
17	磊达080	2.64	2.63	2.60	0.04	0.03
18	星河118	2.05	2.03	2.00	0.05	0.03
19	鲁济宁货2683	3.04	2.99	3.00	0.04	-0.01
20	邮镇1688	0.48	0.51	0.50	-0.02	0.01

实测中人工丈量船舶吃水深度是通过反复多次目测船舶水尺数值并取平均值的方法得到的船舶最终吃水深度数值,此方法可以最大限度降低航道风浪、船舶晃动及水尺读数误差等因素对目测带来的影响。采用这种方法吃水深度误差一般可控制在0.04 m以内。检测系统的测量误差主要由超声波传感器测量误差、船舶航行对检测系统带来的误差以及异常数据未完全剔除带来的误差等几个方面构成。过闸船舶吃水深度测量误差对比如表2所示。

表2 过闸船舶吃水深度测量误差对比

序号	测量方式	平均误差	标准误差
1	人工丈量	0.034	0.037
2	检测系统测量	0.014	0.017

由表2可知,检测系统测量的平均误差与标准误差均满足通航要求,与人工丈量误差偏差小,且有一定的精度优势,检测系统的可信度较高。

## 6 结 语

现场实测表明,对超声波传感器测量数据进行

补偿,可以有效克服航道中检测架摆动、不水平及弯曲等问题;同时通过建立最小二乘支持向量机预测模型,能较好地对测量过程中的异常数据进行有效处理,以提高检测系统的测量精度。

此过闸船舶吃水深度检测系统满足高港船闸实际运管需求,对保证船舶过闸安全、提高通航效率,具有较高的实用价值。

### 参考文献:

- [1] 毕方全,梁山. 船舶“超吃水”航行动态检测方法研究[J]. 中国水运(下半月),2011,11(7):1-2.
- [2] 吕永祥,李吉祥,初秀民. 船舶吃水检测技术现状及分析[J]. 交通科技,2017,284(5):134-135.
- [3] 李海龙. 超声波传感器技术改进要点[J]. 电子技术与软件工程,2018,134(12):85.
- [4] 易光宇. 浅析一种三峡通航双浮吃水检测设施防撞策略[J]. 珠江水运,2022,548(4):108-109.
- [5] 刘竹青,马琳,陈奕宏,等. 模拟舰船模型气泡尾流的声学特性试验研究[J]. 船舶与海洋工程,2016,32(5):21-22.
- [6] 刘志飞. 基于最小二乘支持向量机的河段洪水预报研究[J]. 水利技术监督,2020,155(3):227-228.

(上接第43页)

时间空间关联。

(2)分析模拟。主要对各水利工程的水闸、泵站的日常运行状况进行分析模拟。启闭过程模拟:以动画的形式直观展示闸坝、泵站等的开启和关闭全过程,同时展现闸坝、泵站的监控传感器数据等信息,与动画场景进行联动。河道水位模拟:对工程上下游典型河段的水位进行模拟,辅助以表格、图表等形式展现出河道水位信息。

(3)基础功能。量测功能:支持包括距离、面积、区域通视、两点坡度等量测功能;鹰眼图:可在地图上显示出当前比例尺下在世界地图及中国地图中的鹰眼图。测点查询:支持输入测点名字,然后查询显示测点信息,显示测点位置并定位展示。

## 4 结 语

针对海安市的大范围多源多尺度实景三维模型数据,将倾斜摄影、矢量、遥感影像等多项技术融合应用、集成建库、一体化融合,纳入到统一的实景三维平台中,以满足未来规划、建设、管理等的需要。但后期也存在一定的问题,除胥家集闸管所和农村基层防汛系统有数据库,其他闸管所、水利站所用

系统数据均存储在组态软件里。国土局和南通市水利局的数据申请是否能及时获取数据、能否提供所需数据,存在一定不确定性。对于这样的问题后期将建设统一时空数据的空间参考基准,能够解决信息孤岛问题,打通各单位各部门信息互通壁垒,避免重复建设。利用RS、GIS、GPS、倾斜摄影、三维激光扫描仪、水下多波束等多种先进技术对空间信息进行采集、分析、传输和应用,并且加入三维分析和可视化技术,可获取历史及现实性底板数据,可更加直观准确地将海安市各种水利工程空间和环境信息映射到真实的三维世界中,为防汛抗旱、水资源调度、水质监测与评价等提供决策支持。

### 参考文献:

- [1] 曾家俊,麦叶鹏,李志威,等. 广州天河智慧城SWMM参数敏感性分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):15-21.
- [2] 郭亚丽,魏本胜,郑思远,等. 长江大保护生态云平台顶层设计架构研究[J]. 水资源保护,2023,39(2):9-16.
- [3] 王东. 面向辽宁智慧水利的水利云平台构建[J]. 吉林水利,2021(8):55-58,62.
- [4] 肖杰. 智能无人船单波束测深系统在水下地形测量中的应用[J]. 测绘工程,2023,32(1):63-70.