双浮移动离船检测平台的研究及应用

李益琴^{1*}, 俞晓红¹, 周家海¹, 陈玲玲², 王伟², 宁文龙¹

1. 交通运输部水运科学研究所, 北京 100088;

2. 长江三峡通航管理局, 宜昌 443002

* E-mail: liyq@wti.ac.cn

收稿日期: 2018-04-26; 接受日期: 2018-08-29; 网络版发表日期: 2019-03-15

交通运输部“三峡通航船舶吃水检测设施工程”项目资助

摘要 通航船舶超吃水问题是影响内河航运安全的主要威胁之一, 针对困扰内河航运管理的吃水检测难题, 创新开发了国内外首套双浮移动离船检测平台并得到了成功应用. 本文介绍了双浮移动离船检测平台的总体布置和主要组成; 设计了浮式平台支承下保持姿态平稳的刚柔结合的结构型式; 通过水下载荷有限元计算和涡激振动仿真, 计算出最优化的横杆截面; 经过技术对比, 研发了基于多个单波束超声波阵列的吃水检测系统; 探索了干扰数据修正和误差补偿的数据处理技术. 该检测平台实现了通航船舶吃水深度的精确、高效检测, 可对通航船舶吃水情况进行实时监控和管理, 航运管理部门一旦收到超吃水预警信息, 立刻采取措施限制超吃水船舶的通行, 保证了内河航运的安全和通畅.

关键词 双浮, 离船, 检测平台

1 引言

2017年, 我国内河船舶运力规模1.31亿载重吨, 位居世界第一. 我国内河航道通航里程12.70万千米, 其中长江水系达到6.49万千米, 长江干线的年平均日船舶流量达到702.9艘^[1], 长江航运在我国内河水上运输中具有举足轻重的地位, 然而通航船舶“超吃水”严重影响长江航运的安全. “超吃水”通航船舶采取瞒报船舶吃水吨位、制造假吃水线、夜间通过浅水区等手段, 逃避执法部门的检查, 致使超载碍航事件接连发生, 不仅影响长江航道的通畅, 而且危及航道设施、三峡船闸和船舶的安全.

目前通航船舶吃水检测仍主要采用人工检测方法, 需要船舶靠岸或锚泊时, 依靠工作人员观察船舷边的水尺, 工作效率很低, 而且影响船舶正常航行, 同时部分水尺刻度模糊不清, 甚至吃水线被人为修改, 影响检测准确度.

针对船舶靠岸人工检测的弊端, 近年来我国航运领域开展了一些船舶吃水自动检测设施的研究, 取得一定的成果, 主要有以下几类技术: 一是在船体外侧安装水压传感器和陀螺仪的吃水检测方法^[2], 该方法要求在所有通航船舶上安装, 实施难度大, 施工成本高, 且易遭到人为拆毁或环境破坏; 二是基于多波束声呐技术的在线吃水检测方案^[3], 声呐技术主要运用

引用格式: 李益琴, 俞晓红, 周家海, 等. 双浮移动离船检测平台的研究及应用. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 1073–1079

Li Y Q, Yu X H, Zhou J H, et al. Research and application on the double-floating off-ship detection platform (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 1073–1079, doi: 10.1360/N092018-00118

于海底探测领域,用于船舶吃水检测技术尚不成熟,数据易受到严重干扰;三是采用激光测距仪方案^[4],该方法要将测量仪器安装在船舶上,实施难度大,且不能实现离船测量;四是基于图像处理的吃水检测技术^[5,6],该方法受天气影响、光线环境影响较大,光线弱时无法保证检测数据的准确性,无法实现全天候检测;五是基于侧扫超声波技术的船舶吃水检测方法^[7],超声波技术在水中具有衰减小、穿透力强、信号易接收的特点,但由于水面的声波反射系数与船底相差较大,侧扫超声波技术只能扫描出船底的轮廓图形,检测范围小,且只能安装在固定结构上,例如闸门两侧,安装和维修困难,同时受检测区域的限制,船舶进入引航道后方能进行检测,当检测到超吃水时,已危及船闸安全,而责令返回将会严重影响后续通航船舶的通航效率。其他型式的超声波检测技术多处于理论研究阶段,国内外尚无实际设施和应用。

为克服上述检测技术的缺点,本项目采用仰扫式单波束超声波阵列检测技术,同时为了突破检测地点的限制,有必要在航道的开阔区域对船舶进行吃水检测,及时发出超吃水预警并采取措施,以保证船闸及其他通航设施的安全,提高船舶通航效率。然而,在开阔区域设立检测装置的固定平台,需要在航道内打桩基,存在投资巨大、影响江底环境和永久碍航等不可行因素,故可移动的浮式平台是解决上述问题的最佳方法。

采用浮式移动离船检测平台,存在了诸多技术难点,需要攻克的主要关键技术是:一是浮式支撑平台与水流和波浪相互间有耦合作用,会产生相对运动^[8],安装有传感器的检测架横杆以浮式平台为支承,且位于一定流速的水流中,水下环境复杂,载荷因素众多,使水下检测结构的力学行为异常复杂,关键技术在于采取何种措施消除复杂水流作用的不利影响,使检测架横杆在工作工况时始终处于平稳姿态;二是在开阔区域中风浪和水流波动造成的水面扰动、通航船舶船艏螺旋桨扰动产生的急速水流、大面积密集漂浮物、浮式平台和检测结构架姿态误差、结构架动态变形、超声波传感器标定误差、传感器之间的相互干扰等都会影响检测系统的精度,关键技术在于如何对干扰数据进行处理及修正,如何补偿各类误差,使检测系统达到预定的检测精度。

本单位研制了双浮移动离船船舶吃水检测平台,

图1 (网络版彩图)双浮移动离船检测平台应用现场

如图1所示。该设施不借助闸门等固定航道结构,而采用浮动式平台,突破了检测地点的限制,且投资小、可移动,吃水深度检测范围为0~5 m,检测精度达到0.15 m,实现了全天候运行、实时自动精确的船舶吃水检测,是目前国内外首套双浮离船检测平台。

2 检测设施的总体布置

双浮移动离船检测平台布置地点位于三峡大坝上游的长江下行航道,此处航道宽、水位深。根据过闸的船型分析,吃水检测门的宽度定为70 m,吃水检测深度范围取为0~5 m,参照《内河通航管理办法》及实际使用要求,吃水检测系统精度要求达到0.15 m。

双浮移动离船检测平台主要由一个检测结构架、两个浮式平台以及检测系统、电气系统、数据处理中心等组成。总体布置如图2和3所示。

图2 总体布置图(主视图、俯视图)。1,浮式平台;2,检测结构架;3,电气系统;4,检测系统和数据处理中心;5,升降柱升降装置;6,钢丝绳升降装置

图 3 总体布置图(A-A和B-B剖视图)

检测结构架的钢结构主要由横杆、升降柱和双向铰组成; 机构由一套升降柱升降装置和两套钢丝绳升降装置组成, 分别布置在两侧浮式平台上; 两个浮式平台是检测结构架的依托平台, 其中一个浮式平台与升降柱连接, 平台上的升降柱升降装置驱动升降柱沿浮式平台的凹槽轨道上下移动, 另一侧浮式平台与V型钢丝绳连接, 平台上的两套钢丝绳升降装置驱动V型钢丝绳升降; 横杆一端通过双向铰连接于升降柱下端, 横杆另一端与V型布置的两根钢丝绳连接; 检测传感器阵列安装在检测结构架横杆上, 检测系统负责采集吃水数据; 数据处理系统负责检测数据的干扰修正和误差补偿; 采集的信息经过数据处理, 传输到监管终端平台。

工作状态下, 检测结构架横杆位于水下约7 m, 当船舶经过时, 检测系统开始工作, 当维修工况时, 两侧浮式平台的升降装置驱动检测结构架横杆提升至水面, 进行维护。

3 检测结构架姿态平稳的关键技术

检测结构架用于支撑检测系统的传感器阵列, 其稳定的工作性能是检测精度的必要前提, 因此必须克服水下复杂载荷, 保证其结构的安全和姿态的平稳。

工作状态下, 检测结构架位于水面以下7 m深处, 主要受力为: 水流力、自重、浮力、涡激振动以及其他水下复杂力学行为。

经对比多种截面型式和流体力学理论计算(式(1))和有限元计算, 为减少水流阻力, 确定检测结构架钢结构的横杆和升降柱采用圆管结构。

$$F_w = C_w \frac{\rho}{2} V^2 A, \quad (1)$$

式中, F_w 为水流力; C_w 为水流阻力系数; ρ 为水密度; V 为水流设计流速; A 为计算构件在与流向垂直平面上的投影面积。

从流体的角度来分析, 任何非流线型物体, 在一定的恒定流速下, 都会在物体两侧交替地产生脱离结构物表面的旋涡, 这种流体与结构物相互作用的问题被称作“涡激振动”。检测结构架横杆的长度方向尺寸远远大于横截面尺寸, 若采用圆柱界面布置, 部署至实际检测环境下, 极易发生涡激振动, 导致结构受损。为减小水流产生的涡激振动, 在横杆(圆形截面)的两侧加设导流板^[9], 通过对水流经过不同截面构型的结构架进行流动模拟仿真, 图4为导流板诱导的流场速度云图的示例, 最终确定了优化后的导流板外形尺寸。检测架钢结构如图5所示。

由于检测结构架的支承设施不是固定结构, 而是浮式平台, 因此检测结构架不仅要承受自身在水中所承受的复杂力学, 而且要控制由于浮式平台的横移、纵移、横摇、纵摇等姿态改变给检测结构架造成的扭转、弯矩、拉压、摆动等不平稳因素和破坏性影响。针对上述因素, 本文创新设计一种刚柔结合支承型式的检测结构架, 其钢结构主要由横杆、升降柱和双向铰组成, 横杆的一端通过双向铰连接于升降柱下端,

图 4 (网络版彩图)涡激振动模拟图

图5 检测架钢结构. 1, 滚轮; 2, 升降柱; 3, 双向铰; 4, 横杆; 5, 导流板

以适应浮式平台的摇摆及错位, 同时刚性支承控制横杆的翻转; 横杆的另一端, V型布置的两根钢丝绳设计为始终承受拉力, 且所有载荷相对于横杆横截面圆心的力矩均为零, 以保证钢丝绳悬挂端在水流作用下不发生偏摆和翻转现象, 同时柔性支承可以显著减小因横杆挠曲变形、温度变形、浮式平台姿态变化而使钢结构承受的拉力、横向推力、弯矩、扭矩等, 保证结构的安全可靠。

根据设计方案, 对检测结构架的整体建立有限元模型, 并进行了多工况计算, 设计出满足结构强度、刚度、稳定性要求的检测结构。

同时, 分别布置在两侧浮式平台甲板上的升降柱驱动装置和2套钢丝绳升降装置采用电机变频技术, 使得各套升降装置既能单独动作, 又可以联合动作, 从而实现检测结构架的整体同步升降, 并能在检测结构架出现倾斜时实现微调, 以保证检测结构架的姿态处于正常的工作范围内, 为检测精度奠定基础。

4 检测系统的关键技术

4.1 检测系统

检测系统由超声波传感器、压力传感器、倾角传感器、温度传感器等组成。被测船舶经过时, 单波速阵列超声波仰扫测量船舶底面到检测结构架的距离信息数据集合 C ; 水压传感器测量水面到检测结构架的距离信息数据集合 H , 水深数据集合 H 与船舶底部数据集合 C 的差值即为船舶吃水深度数据集合 D , 即 $D=H-C$, 其最大差值即为最大吃水, 如图6所示。

4.2 数据处理

复杂的工作环境和水文环境对检测系统存在多项干扰, 需要采取有效措施进行处理及修正, 以保证检测的精度。

(1) 传感器之间相互干扰的修正技术

图6 检测系统示意图

相邻的超声波传感器会导致两侧的传感器被干扰, 影响测量精度。为了减小相邻传感器发射和返回信号之间的串扰, 采用时分复用和空分复用的原理, 按组进行测量。具体的分组方式如图7所示。

将超声波传感器阵列中的传感器划分成9组, 组与组之间交错安放。当启用超声波传感器组进行测量时, 各组传感器按组号和一定时间间隔依次启动, 而非同时启动。

(2) 水流波动干扰和船艏螺旋桨扰动的修正技术

为了消除水流波动对水下检测精度的影响, 在传感器测量水面选取基准面时, 对测量数据进行包含有多重算法的数据处理, 以保证测量基准面的正确选取。通航船舶船艏螺旋桨扰动产生的尾流噪声会使得测量数据杂乱无章, 且异常数据呈现集中分布, 尾流噪声产生区域的最大吃水值数据跳变剧烈, 变化异常, 针对这一问题, 利用最小二乘法直线回归预测法来处理船舶尾流噪声, 当一组船舶横截面吃水数据的最大值比预测值大时, 则认为该组吃水数据是异常数据, 予以剔除。处理前后的船舶三维吃水图如图8所示。

(3) 复杂水域环境的数据处理技术

水中漂浮物、鱼类、船舶气泡等将导致检测结果出现偏差, 采用中值滤波法进行处理, 将中值滤波的概念推广到二维, 设 $\{x_{ij}, (i, j) \in I^2\}$ 表示检测数据集合。首先确定一个以某个检测数据为中心点的领域, 然后将领域中的各个检测数据的数值进行排序, 取其中间值作为中心点的新数据值, 滤波窗口为 A 的二维中值滤波可定义为

图7 传感器布置方式

图 8 (网络版彩图)船舶尾流噪声处理前后对比图. (a) 船舶尾流噪声原始数据图; (b) 船舶尾流噪声处理效果图

$$\begin{aligned} y_{ij} &= \text{med}_A \{x_{ij}\} \\ &= \text{med} \{x_{i+r, j+s}, (r, s) \in A, (i, j) \in I^2\}. \end{aligned} \quad (2)$$

当窗口在检测数据集合中上下左右进行移动后, 利用中值滤波算法可以很好地对检测数据集合进行平滑处理^[10]. 通过仿真, 构造一个近似的船舶底面模型, 模拟干扰因素, 引入随机噪声和突变噪声, 处理效果如图9所示. 效果显示中值滤波能较好地剔除船舶底面的粗差数据, 获得了较好的检测数据集合复原效果^[11].

(4) 浮式平台和检测结构架的误差补偿技术

浮式平台在流动的水中会产生横摇及纵摇, 采用高精度倾角传感器对浮式平台姿态误差进行补偿, 竖直方向产生的上下摆动, 采用水下压力传感器对姿态误差进行补偿.

在各种载荷作用下, 安装有超声波传感器阵列的检测结构架会有一定程度的挠度, 导致测量到的船舶吃水量存在误差. 传感器实际吃水深度值与假设的检测结构架没有变形时传感器的吃水深度之差即为检测结构架扰度补偿值, 计算该值并进行数据补偿.

(5) 水温和水质对声速的影响及误差补偿

声波在水中的传播速度受温度和水质的变化而变化, 其中声速受温度的影响最大, 按相应的声速随水温的变化关系进行补偿后, 温度变化引入的测量偏差可消除; 水质密度直接影响传播速度, 一般来说密度越大速度越大, 洪水季节三峡水质泥沙含量较多, 密度大幅增大, 需实时修正声速系数, 对所有测距传感器的测量值进行修正. 由于水温和水质两种因素对测量都有不可忽略的影响, 且变化频繁, 所以必须采用声速测量传感器进行水中声速的实时测量, 以便对吃水检测系统测量结果进行修正.

5 应用情况

该研究成果已得以成功应用, 监测系统的实际应

图 9 (网络版彩图)干扰数据过滤前后对比图. (a) 加突变噪声数据图; (b) 过滤突变噪声后数据图; (c) 加随机噪声数据图; (d) 过滤随机噪声后数据图

表1 实际应用检测数据

船名	海事执法人员 核查结果	检测系统结果	误差
重轮58	4.33	4.36	0.03
巨航96	4.33	4.32	-0.01
盟运1号	4.37	4.41	0.04
圣通56	4.44	4.49	0.05
圣通31	4.49	4.51	0.02
河牛57	4.53	4.52	-0.01
河牛67	4.63	4.65	0.02
海牛1005	4.46	4.43	-0.03

用误差基本控制在 ± 0.05 m以内, 完全满足吃水检测系统精度 ± 0.15 m的要求。

相比于较为先进的固定式检测系统, 本系统具有如下先进性。

(1) 检测设施移动部署

检测设施挂在移动平台上, 能够随移动平台在任意位置进行部署, 设施可利用性高。

(2) 横杆姿态自检测

针对横杆升至水面进行维护保养后, 降至水下工作位置, 其姿态发生微小变化会影响测量效果的问题, 检测系统支持传感器装置动态调整, 每次横杆维护保养后, 重新启动检测系统, 即可自动读入初始水深, 并实时分析姿态数据, 确保检测效果。

(3) 消除波浪干扰

消除波浪干扰主要通过实时分析水面数据, 并通过机器学习, 自我归纳波浪频率和波幅, 采用滤波算法, 消除波浪干扰。实际测试结果表明, 波浪干扰已经得到很好解决。

6 结论

重点针对困扰内河航运管理的超吃水检测难题, 创新开发了国内外首套双浮移动离船检测平台并得到了成功应用, 实现了通航船舶吃水深度的精确、高效检测, 有效解决了对通航船舶的实时监控和管理, 航运管理部门收到船舶预警信息后, 采取相应的手段, 限制超吃水船舶的通行, 保证了航运的安全和通畅。

在研制过程中, 攻克了多项技术难题, 挑战性地提出以浮式平台为支承, 突破了检测地点的限制, 成功解决了浮式平台支承下检测结构架在复杂水域下姿态改变和结构安全问题; 采用单波束仰扫式超声波阵列检测技术, 结合多种误差补偿和干扰数据修正方法, 保证了高精度的吃水检测效果。应用表明该成果具有实时精确、操作便捷、维修简单、不碍航、投资小、不破坏航道生态等特点, 填补了船舶超吃水移动离船检测设施领域的空白, 为我国船舶超吃水检测做出了开创性的贡献, 具有很好的行业示范作用。

参考文献

1 交通运输部综合规划司. 2017年交通运输行业发展统计公报. 2018-03-30

2 管利广, 祁亮, 雷俊松. 内河船舶吃水及装载实时监控系统设计. 中国水运, 2016, 6: 75-77

3 吕永祥, 李吉祥, 初秀民. 船舶吃水检测技术现状及分析. 交通科技, 2017, 5: 134-138

4 陈文炜, 俞汲, 徐杰. 一种船舶吃水测量系统. 中国造船, 2013, 1: 166-171

5 陈贺璋, 庄静. 基于图像分割的舰船吃水深度检测方法研究. 舰船科学技术, 2017, 8: 13-15

6 Ran X, Shi C, Chen J, et al. Draft line detection based on image processing for ship draft survey. In: Proceeding of the 2011 2nd International Congress on Computer Applications and Computational Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. 39-44

7 陆雷, 熊木地, 高云飞, 等. 升船机内船舶吃水检测系统研究. 人民长江, 2017, 10: 67-70

8 Liu Z, Teng B, Ning D, et al. Wave-current interactions with three-dimensional floating bodies. J Hydrodyn Ser B, 2010, 22: 229-240

9 冯民权, 范术芳. 导流板的布置方式及其导流效果. 武汉大学学报, 2009, 1: 87-91

10 鲁铁定. 总体最小二乘平差理论及其在测绘数据处理中的应用. 测绘学报, 2013, 4: 630

11 宁文龙, 李静. 通航船舶吃水检测设施及检测数据处理. 中国水运, 2017, 3: 86-88

Research and application on the double-floating off-ship detection platform

LI YiQin¹, YU XiaoHong¹, ZHOU JiaHai¹, CHEN LingLing², WANG Wei² & NING WenLong¹

¹ China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China;

² Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China

The problem of ships's ultra-draft is one of the main threats to the safety of inland navigation channel. Focus on the difficulty of draft detection, the first double-floating off-ship detection platform has been developed and applied successfully. This paper mainly introduces the general layout, major components and key technologies of the detection platform. A rigid-flexible supporting structure is designed to keep the stability of detection frame under two floating platforms. The optimum cross section of the detection frame is selected by analysis of loads and vortex-excited vibration simulation,. A draft detection system based on single-beam ultrasonic array is designed. The data processing techniques of interfering data and error compensation are explored. The detection platform can detect the draft depth of ships accurately and efficiently, and can monitor and manage the ships constantly. Once the shipping management department receives the warning information of ultra-draft, it immediately takes measures to restrict the passage of ultra-draft, thus ensuring the safety and smooth flow of inland river traffic.

double-floating, off-ship, detection platform

doi: [10.1360/N092018-00118](https://doi.org/10.1360/N092018-00118)