

· 航道及通航建筑物 ·



船闸浮式系船柱系统安全监测方法研究^{*}

刘明维^{1,2}, 王钟浩^{1,2}, 吴林键^{1,2}, 李明龙³, 杨嘉^{1,2}

(1. 国内河航道整治工程技术研究中心, 重庆交通大学, 重庆 400074;

2. 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆交通大学, 重庆 400074;

3. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 为保障浮式系船柱的系统安全, 依托京杭大运河某代表性船闸, 针对其浮式系船柱的实际结构特点, 根据数学力学基本原理推导构建了可反映浮式系船柱柱身应变信号与船舶系统力二者之间定量关系的表达式。在此基础上, 提出一套针对船闸浮式系船柱系统安全的监测方法。为了验证该安全监测方法的可靠性, 对依托船闸中的代表性浮式系船柱开展了现场试验。通过将安全监测方法所获得的船舶系统力与传统载荷量测手段测得的系统力值进行对比, 发现二者的相对误差低于 15%, 表明提出的船闸浮式系船柱系统安全监测方法具有较高的测量精度。

关键词: 船闸浮式系船柱; 系缆安全; 监测方法; 现场试验

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0085-07

Safety monitoring method for mooring lines of floating bollards in ship lock

LIU Mingwei^{1,2}, WANG Zhonghao^{1,2}, WU Linjian^{1,2}, LI Minglong³, YANG Jia^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education on Hydraulic & Water Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: To ensure the mooring safety of floating bollards in service, based on a representative ship lock of the Beijing-Hangzhou Grand Canal, according to the actual structural characteristics of floating bollards and the basic principles of mathematical mechanics, this paper deduces and constructs an expression that can reflect the quantitative relationship between the strain signal of floating bollards and the mooring force of ships. On this basis, a set of monitoring methods for the safety of mooring lines of floating bollards of ship locks are proposed. To verify the reliability of the safety monitoring method, field test is carried out on the representative floating bollards in the ship lock. By comparing the ship mooring force obtained by the safety monitoring method in this paper with the mooring force measured by the traditional load measurement method, it is found that the relative error between the two is less than 15%, which indicates that the safety monitoring method of the ship lock floating bollard mooring line proposed in this paper has high measurement accuracy.

Keywords: floating bollard of ship lock; mooring safety; monitoring methods; field test

我国内河航运发展迅速, 据统计, 2021 年全国内河货运总量达 41.89 亿 t, 居世界第一^[1]。为

满足日益增长的内河航运需求, 通航船舶建造的吨位级别也逐年提升, 因此对船闸系统设施的结

收稿日期: 2022-06-26

*基金项目: 重庆市教育委员会“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020030); 水利水运工程教育部重点实验室开放基金资助项目(SLK2021B13)

作者简介: 刘明维 (1972—), 男, 博士, 教授, 从事港口工程设计计算理论教学研究工作。

构安全提出了更高要求。现役船闸广泛运用浮式系船柱作为系缆设施，其通过浮力作用随水位变化而上下浮动，以满足过闸船舶的安全系缆^[2]。但在实际使用过程中，受船闸货物吞吐量增加、通航船舶大型化、系缆不规范、导槽导轨锈蚀卡阻及风浪流等多因素作用，浮式系船柱所受荷载值极易超出设计安全范围，导致其结构受损破坏，进而影响船闸正常运行造成经济损失，甚至引发船舶脱缆、吊船/拉船入水、船体损伤、船员伤亡等重大安全事故^[3-8]。因此，如何针对复杂通航条件下船闸浮式系船柱进行系统安全监测，从而及早发现浮式系船柱的结构安全隐患以保障船闸正常运行，是亟待解决的重大安全问题。

传统的浮式系船柱结构受力监测方法是通过在缆绳上安装传感器读取缆绳张力。然而，这些传感器不能作为船舶的长期附属设备，实用性不强；且安装较为繁琐，会影响船舶正常系缆工艺^[9-11]。

近年来，有学者基于结构应变能够直接反映其受力状态的理论，提出通过监测系船柱表面应变实现对系船柱结构的系统安全评估^[12-14]。然而在实际情况中，随着系泊高度与系缆角度的变化，系缆力对船闸浮式系船柱的作用存在差异，因此在缺乏缆绳系泊信息的情况下，通过简单测得的几点浮式系船柱结构表面应变来评估浮式系船柱的系统安全，其合理性尚需进一步论证。

为保障船闸浮式系船柱服役状态下的运行安全，本文针对传统监测方法与现有研究存在的局限性，提出通过实时监测浮式系船柱柱身受荷敏感区的应变信号来反演船舶系缆力的结构安全监测方法。在此基础上，依托京杭大运河某代表性船闸开展浮式系船柱受力特征现场试验，验证船闸浮式系船柱系统安全监测方法的可靠性。本文提出的监测方法对全面提升通航船闸设施的智能化运维水平具有重要的现实意义和实用价值。

1 工程概况

依托船闸工程位于长江与京杭大运河交汇处，

是京杭大运河苏南段上的第1个梯级，也是沟通南北两段京杭大运河的水路运输主通道。该船闸设有2个闸室，其中1号闸室长230 m、宽20 m、门槛水深4 m，年设计通过量2 100万t；2号闸室长230 m、宽23 m、门槛水深4 m，年设计通过量2 333万t。该船闸使用浮式系船柱作为主要系缆设施，见图1。近年来，受船闸货运量增加、船舶大型化、系缆不规范等多方面因素的共同影响，船闸浮式系船柱受损破坏严重，因此船闸管理方亟需构建一套可实时监测浮式系船柱受力特征和运行状态的系统安全监测方法。



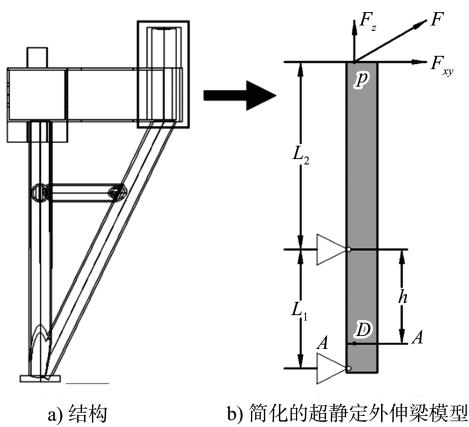
图1 某船闸船舶系缆现场

2 船闸浮式系船柱系统安全监测方法

船闸浮式系船柱系统安全监测方法主要分为3个部分：1) 通过在船闸浮式系船柱空心圆柱体柱身的受荷敏感区安装应变传感器，实时采集传输应变数据信息；2) 采用自主编译的浮式系船柱受荷响应力学公式反演得到浮式系船柱所受船舶系缆力的大小和角度；3) 将反演得到的系缆力与浮式系船柱设计允许系缆力进行比较，判断当前浮式系船柱的结构安全状态。

2.1 船舶系缆力-浮式系船柱柱身应变的定量关系

根据浮式系船柱结构受力特点，将浮式系船柱柱身结构概化为超静定外伸梁，即：将船闸浮式系船柱的空心圆柱体概化为等截面弹性梁，并将用于固定该空心圆柱体的3块钢板概化为2个固定铰支座，见图2。



a) 结构

b) 简化的超静定外伸梁模型

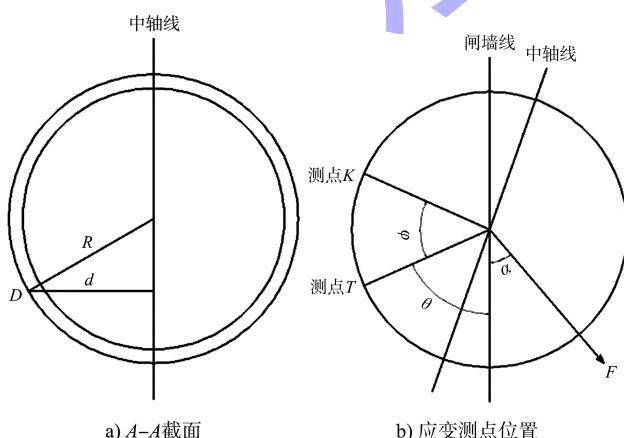
注: F 为船闸浮式系船柱的系统力; F_z 为船舶系统力的竖向分量; F_{xy} 为船舶系统力的水平分量; L_1 为船闸浮式系船柱简支段长度; L_2 为船闸浮式系船柱悬臂段长度; h 为应变测点到船闸浮式系船柱上简支点距离。

图 2 船闸浮式系船柱

在系统力作用下, 浮式系船柱柱身上任一受力点 D (图 3) 的应变 ε 计算式为^[15]:

$$\varepsilon = \frac{F_z}{EA} + \frac{M_{xy} + M_z}{EI} d \quad (1)$$

式中: F_z 为船舶系统力的竖向分量; M_{xy} 为船舶系统力水平分量作用下的弯矩; M_z 为船舶系统力竖向分量作用下的弯矩; A 为船闸浮式系船柱截面面积; E 为船闸浮式系船柱弹性模量; I 为船闸浮式系船柱截面圆环的惯性矩; d 为应变测量点到中性轴的垂直距离。



注: R 为船闸浮式系船柱轴向截面圆环半径; α 为系统角度; θ 为测点 T 与闸墙线之间的夹角; φ 为两测点之间的夹角。

图 3 A-A 截面和应变测点位置

浮式系船柱柱身上的 2 个应变监测点 T 和 K 的位置见图 3。根据前期研究成果, 推导得到船舶系统力 - 浮式系船柱柱身监测点应变的定量关系为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_T &= \frac{F_1 \sin \beta}{EA} + \frac{F_1 \cos \beta (L_1 - h) L_2 / L_1}{EI} \cdot R \sin(\alpha_1 + \theta - 90^\circ) + \\ &\quad \frac{F_1 \sin \beta (2R/\pi)}{EI} \cdot R \sin(\alpha_1 + \theta - 90^\circ) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_K &= \frac{F_1 \sin \beta}{EA} + \frac{F_1 \cos \beta (L_1 - h) L_2 / L_1}{EI} \cdot R \sin(\alpha_1 + \theta + \varphi - 90^\circ) + \\ &\quad \frac{F_1 \sin \beta (2R/\pi)}{EI} \cdot R \sin(\alpha_1 + \theta + \varphi - 90^\circ) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ε_T 、 ε_K 为测点 T 、 K 的应变值; β 为缆绳与水平面的夹角, 根据规范^[16]和现场实测资料^[17]可取为 15° 。将实时监测的应变数据代入式(2)(3)中, 可反演得到过闸船舶缆绳与闸墙线的水平夹角 α_1 以及系统力 F_1 。

2.2 公式精度验证

以图 2 中船闸浮式系船柱结构形式为前提, 采用数值模拟仿真方法验证式(2)(3)中 F_1 、 α_1 评估结果的精度。根据船闸管理方提供的浮式系船柱各部件的几何尺寸建立结构三维数值模型, 并将模型导入有限元软件 ANSYS 中进行计算分析。浮式系船柱柱身应变监测点所在截面位于距离柱身底部以上 170 mm 处, 见图 4。浮式系船柱上部结构的材料采用 Q235 钢, 相关参数为: 弹性模量 200 GPa, 泊松比 0.30 , 密度 7.85 t/m³, 屈服强度 250 MPa, 抗拉强度 460 MPa。

为模拟过闸船舶的不同系泊情况, 对浮式系船柱设置不同大小的系统力 F 与不同系统角度 α 的计算工况。设系统角度 α 从 35° 开始以 5° 的幅度进行递增, 一直增加到 145° ; 对每个系统角度 α 分别设置 5 、 10 、 30 、 50 kN 的系统力 F , 总计 92 种计算工况。各系统力工况下浮式系船柱模型 T 、 K 监测点的应变数据见图 5。

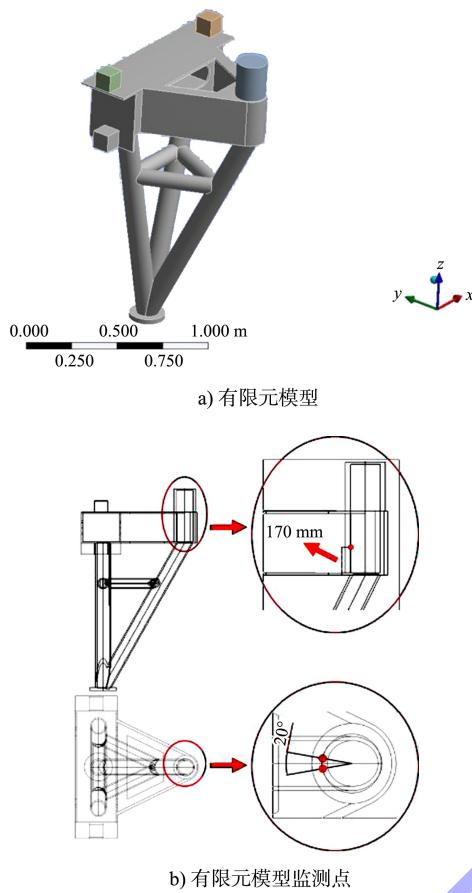


图 4 浮式系船柱有限元模型及监测点

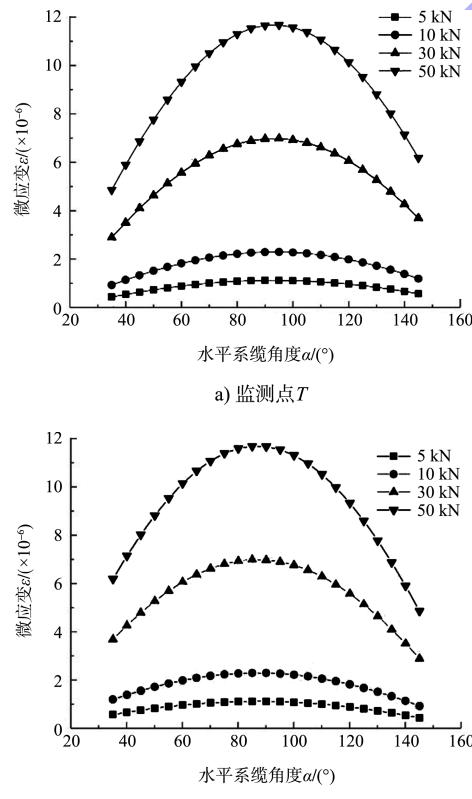


图 5 船闸浮式系船柱模型 T、K 监测点应变

将图 5 中基于数值模拟计算得到的浮式系船柱 T 、 K 监测点应变数据代入式(2)(3)中, 得到系统角度 α_1 与系统力 F_1 。随后, 分别将数值模拟仿真计算过程中预设的系统角度标准值 α 与 α_1 、系统力标准值 F 与 F_1 进行对比分析, 见图 6。

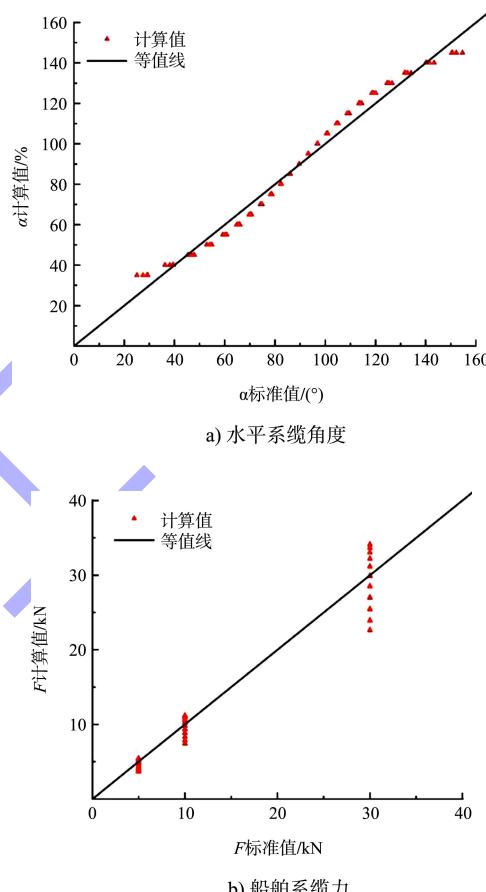


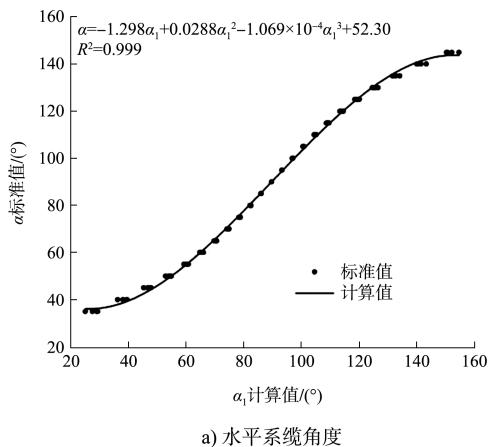
图 6 浮式系船柱水平系统角度和船舶系统力的计算值误差

由图 6 可知, 由式(2)(3)计算得到的 α_1 、 F_1 与标准值 α 、 F 比较存在着一定的差异。因此, 为减小计算误差, 将数值模拟仿真计算过程中预设的系统角度标准值 α 、系统力标准值 F 作为横坐标, 同时将计算得到的系统角度 α_1 、系统力 F_1 作为纵坐标, 进行拟合优化, 见图 7。在此基础上, 基于最小二乘法分别建立 $\alpha-\alpha_1$ 、 $F-F_1$ 的定量关系, 即: $\alpha=\alpha(\alpha_1)$ 、 $F=F(F_1)$:

$$\alpha = -1.298\alpha_1 + 0.0288\alpha_1^2 + 1.069 \times 10^{-4}\alpha_1^3 + 52.30 \quad (4)$$

$$F = 1.431F_1 \quad (5)$$

联立式(2)~(5)可得到过闸船舶缆绳与闸墙线的水平夹角 α 以及系缆力 F 。



a) 水平系缆角度

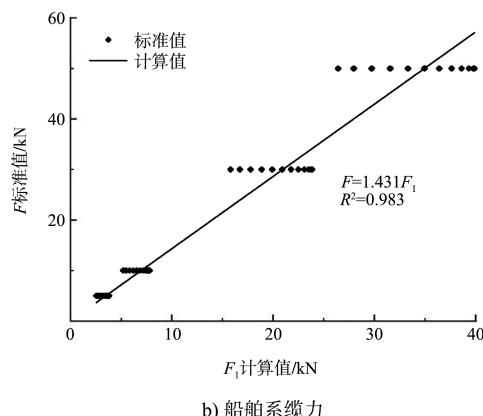


图7 浮式系船柱水平系缆角度和船舶系缆力计算值的拟合优化

3 现场试验

3.1 试验设备

1) 焊接式应变计。此类应变计使用焊接的方式固定于金属结构的表面。相较于常见的粘贴式应变计, 其改进了现场粘贴应变计时应变胶固化时间长、蠕变等缺点, 安装方便且稳定; 同时比普通电阻应变计具有更强的抗复杂环境干扰能力, 可以用于水工建筑结构的长期应变与应力监测。

2) 应变信号采集传输仪器。仪器由控制器与采集模块组成。控制器内置 ZigBee 协议转换模块, 可实现 ZigBee 与 4G 之间的协议转换, 采集器将收集到的数据信号通过 ZigBee 无线传输到控制器,

再通过 4G 与客户端进行数据传输。现场试验设备见图 8。

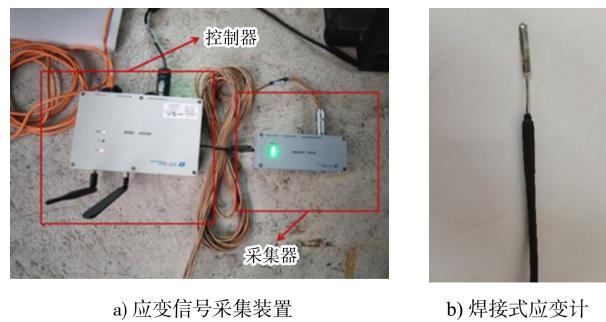


图8 部分现场试验设备

3.2 现场操作

1) 监测点的确定。根据浮式系船柱的实际使用情况, 选择系缆频率高、靠泊船舶吨位大且具有监测条件的浮式系船柱作为监测对象; 综合考虑现场实际情况以及应变片粘贴对通航船舶正常系缆影响等因素后确定浮式系船柱上的监测点。本次试验选定船闸第 2 隘室下游侧的右闸墙上第 2 个浮式系船柱为监测对象, 监测点选定在距离浮式系船柱空心圆柱体柱身底部 170 mm 的边缘处, 以截面 ox 为轴顺时针偏转 10°的点为 T, 逆时针偏转 10°的点为 K。利用卷尺、线绳和记号笔等工具对应变计焊接的区域范围进行标记。

2) 应变计焊接区域的处理。使用打磨机在监测点位置打磨出 2 处宽 4 cm、高 10 cm 的区域, 再用无水乙醇擦洗干净。目的是打磨掉监测点区域表面的锈迹使其平整干净, 使应变计与浮式系船柱表面贴合更紧密, 从而保证应变计的焊接强度和读数精度。

3) 应变计的焊接与仪器的调试。采用焊机点焊的方式将应变计焊接在处理后的监测区域。应变计固定好后, 将应变计与应变信号采集仪器按照 1/4 桥接的方式进行连接, 打开采集器与控制器, 对应变计与仪器的连通性和稳定性进行测试。现场相关操作见图 9。



图 9 监测点标记和应变计

4) 测试流程。采用船闸的检修工作船舶作为系缆船舶, 船舶参数见表 1。在检修船上对监测设备再次进行现场调试, 然后对浮式系船柱分别施加与闸墙呈 45° 、 90° 、 145° 的船舶动力荷载, 见图 10。在系统过程中, 仪器采集浮式系船柱表面的应变数据, 并将其传递到电脑, 再由电脑将应变数据代入浮式系船柱受荷响应力学公式, 计算得到系缆力的实时变化。测试过程中采集器的采样频率设置为 2 Hz。

表 1 试验船舶参数

总长/m	最大宽度/m	总吨位/t	空载吃水/m	满载吃水/m	全高/m	型深/m	净吨位/t	净水航速/(km·h ⁻¹)	乘客定额/人
17.40	5.20	44.00	1.30	1.40	5.50	2.10	13.00	19.00	10



图 10 船舶动力荷载施加

3.3 数据处理

对现场采集到的数据进行分析, 船舶系缆期间浮式系船柱表面监测点的应变数据见图 11, 将其代入浮式系船柱受荷响应力学公式(4)(5)得到系缆角度与系缆力, 见图 12。由图可知, 当没有船舶动力荷载作用时, 浮式系船柱的监测点应变和船舶系缆力整体趋于平稳; 当有船舶动力荷载作用时, 浮式系船柱的监测点应变和船舶系缆力都发生了明显突变, 与实际情况相符。本次试验计算得出的最大系缆力为 52.51 kN, 小于浮式系船柱设计值 250 kN, 因此评价此浮式系船柱系缆状态为安全。

为了评估船闸浮式系船柱系缆安全监测方法的准确性, 将船闸检修船作为试验船舶, 在检修船的缆绳上设置缆力传感器并开展验证性试验。将基于缆力传感器实测的系缆力与基于船闸浮式系船柱系缆安全监测方法反演得到的系缆力对比,

得出其误差低于 15%, 见图 13。产生误差的原因一是受荷响应力学公式本身存在一定的计算误差; 二是可能设置的仪器采集频率偏低, 导致采集器未能捕捉到缆力传感器进行记录时同时间点的浮式系船柱的监测点应变。

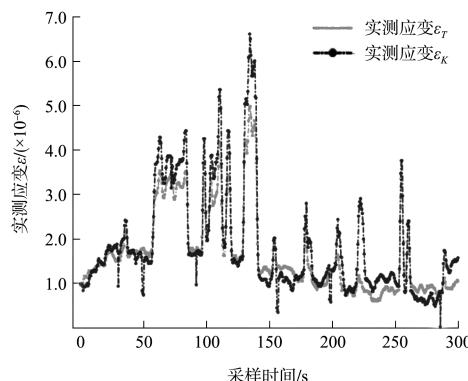
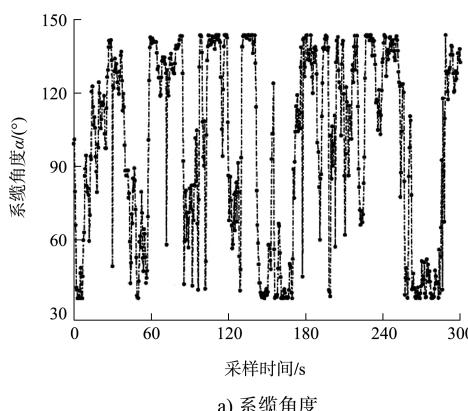


图 11 浮式系船柱实测应变数据



a) 系缆角度

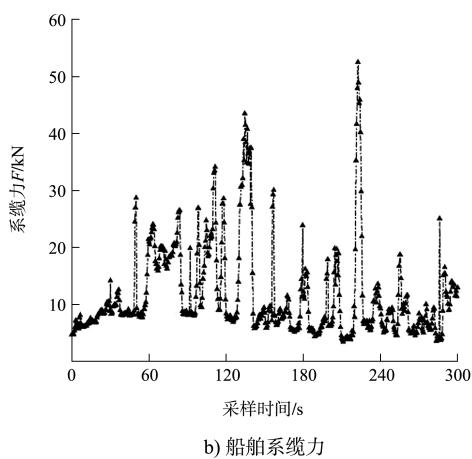
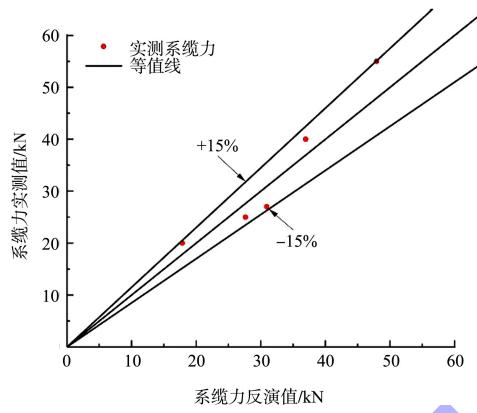


图 12 浮式系船柱船舶系统角度和系缆力计算值



4 结论

- 1) 现场实测得到的浮式系船柱柱身表面应变数据的变化趋势与浮式系船柱实际系缆过程吻合;
- 2) 通过对对比分析实测船舶系缆力与反演船舶系缆力, 反演计算误差低于 15%, 表明此方法具有较高的测量精准度, 能够为船闸工程项目中浮式系船柱系缆安全监测提供有力的理论基础和技术保障。

参考文献:

- [1] 发展货运 繁忙有序(新时代画卷). 人民网-人民日报 [EB/OL]. (2022-02-21) [2022-05-20]. <http://jx.people.com.cn/n2/2022/0221/c190262-35142029.html>.
- [2] 刘明维, 曾丽琴, 齐俊麟, 等. 船闸浮式系船柱受力状态数值模拟[J]. 水运工程, 2020(12): 112-117.
- [3] 叶雄顺. 码头附属设施设计及管理工作要点[J]. 水运工程, 2004(11): 59-60.
- [4] 李家熹. 多级船闸船舶过闸安全初探[J]. 水运工程, 2003(4): 46-49.
- [5] 张虎, 尹斌勇. 船闸新型浮式系船柱的设计与应用[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 137-140.
- [6] 张星星, 陈明栋, 巴添. 新型浮式系缆装置关键技术及可靠性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 489-493.
- [7] 蒋庆, 葛宏征, 谢鹏. 船舶类型及吨位因素对船舶系统力的影响[J]. 水运工程, 2007(9): 51-59.
- [8] 陈明, 宣国祥, 陈明栋. 船闸输水系统水动力学研究综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(1): 157-160, 168.
- [9] 徐宝富, 朱杏元, 徐鸣谦. 缆绳张力无线监测系统[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(11): 1509-1512, 1521.
- [10] NAM H, NGHIA N T. Estimation of cable tension using measured natural frequencies[J]. Procedia engineering, 2011, 14: 1510-1517.
- [11] CHEN C C, WU W H, CHEN S Y, et al. A novel tension estimation approach for elastic cables by elimination of complex boundary condition effects employing mode shape functions [J]. Engineering Structures, 2018, 166 (JUL 1): 152-166.
- [12] 李峰, 魏已杰, 温钰珊, 等. 船舶系缆力无线监测及预警系统设计[J]. 船海工程, 2013, 42(6): 196-199.
- [13] 郑剑, 肖英杰, 白响恩, 等. 基于缆桩表面应力的船舶缆绳载荷测量方法[J]. 上海海事大学学报, 2013, 34(1): 1-4.
- [14] 吴俊, 石培杨, 周世良, 等. 基于标准系缆力反演的系船柱结构安全评估方法[J]. 水运工程, 2019(12): 60-64.
- [15] 刘明维, 李明龙, 吴林健, 等. 船闸浮式系船柱受荷响应力学模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 127-132.
- [16] 交通部水运规划设计院技术管理室. 系船柱构件通用设计编制说明[J]. 水运工程, 1978(12): 1-15.
- [17] 张晨. 基于三峡船闸系缆安全性的大型化船舶主尺度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.

(本文编辑 王传瑜)