



# 船闸浮式系船柱力学模型验证

齐俊麟<sup>1</sup>, 王雪萍<sup>1</sup>, 江涛<sup>1</sup>, 沈保明<sup>1</sup>, 杨珏<sup>1</sup>, 杨嘉<sup>2</sup>

(1. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002;

2. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074 )

**摘要:** 针对大型船舶过闸期间系缆力难以实时量化监测的问题, 通过对船闸浮式系船柱应变-系缆力受荷响应力学模型进行修正, 采取实船试验对修正后的模型进行验证分析, 统计过闸船舶系缆力实测历时曲线数据。结果表明: 修正后的浮式系船柱受荷响应力学模型基本符合过闸船舶实测系缆力实时变化趋势, 实测的船舶系缆力峰值与模型反演计算值之间的相对误差在±5%以内, 修正后的力学模型能够准确地预测船闸浮式系船柱的受荷情况。研究结果可为船闸浮式系船柱数字化监测和工程化建设提供参考。

**关键词:** 浮式系船柱; 力学模型; 实船测试

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0116-07

## Verification of mechanical model for floating bollard of ship lock

QI Junlin<sup>1</sup>, WANG Xueping<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>1</sup>, SHEN Baoming<sup>1</sup>, YANG Jue<sup>1</sup>, YANG Jia<sup>2</sup>

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

2. The Ministry of Education Key Laboratory, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** To the problem of difficulty in real-time quantitative monitoring of mooring forces during the passage of large ships, the mechanical model of the strain- mooring force load response of the floating bollard of ship lock is modified. Real ship tests are conducted to verify and analyze the modified model, and the measured duration curve data of mooring forces of the passing ship are collected. The results show that the modified mechanical model for the load response of the floating bollard basically conforms to the real-time trend of measured mooring force of the ship passing through the lock. The relative error between the measured peak mooring force of the ship and the model inversion calculation value is within ± 5 %. The modified mechanical model can accurately predict the load situation of the floating bollard of ship lock. The research results provide a reference for the digital monitoring and engineering construction of the floating bollard of ship lock.

**Keywords:** floating bollard of ship lock; mechanical model; real ship test

船闸浮式系船柱作为一种重要的通航设备, 应用范围广泛<sup>[1]</sup>。浮式系船柱的主要作用是在船舶进出船闸过程中, 起到稳定船舶的作用<sup>[2]</sup>, 以保证船舶安全通过船闸。在实际应用中, 随着使用时间的增长, 使用次数的增加, 船闸浮式系船柱存在卡阻的风险<sup>[3]</sup>。若浮式系船柱柱体发生卡阻, 船舶在闸室内自由升降时就有倾覆的危险<sup>[4]</sup>。

由于航运事业的快速发展, 船舶呈现大型化、重载化发展, 对船闸浮式系船柱的安全性能提出更大的挑战。船闸浮式系船柱的研究也颇受专家学者关注<sup>[5-6]</sup>, 刘明维等<sup>[7-8]</sup>采用数值仿真方法, 提出船闸浮式系船柱受力状态数值模拟, 为船闸浮式系船柱受力状态安全预警的现场试验提供了理论基础。孙刘林等<sup>[9]</sup>以阜阳船闸浮式系船柱系统

收稿日期: 2023-08-30

作者简介: 齐俊麟 (1964—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事船舶内燃机设计与制造及枢纽通航管理工作。

桩拉力实时监测为研究对象, 提出浮式系船柱系缆桩动态拉力测量技术研究。汪益兵等<sup>[10]</sup>通过数值模拟的方法, 进行船舶系缆柱静力学响应的数值模拟及分析。

在目前对船闸浮式系船柱的研究中, 大多基于理论研究层面<sup>[11-12]</sup>, 本文依托长江干线某大型船闸浮式系船柱实船试验, 通过对船闸浮式系船柱应变-系缆力受荷响应力学模型进行修正, 统计实船试验采集数据, 对受荷响应力学模型计算理论反演得到的系缆力与试验所测系缆力进行对比分析, 以验证模型是否能够准确地预测船闸浮式系船柱的受荷情况。研究结果旨在为船闸浮式系船柱的数字化监测和工程化建设提供参考。

## 1 船闸浮式系船柱的力学模型修正

### 1.1 浮式系船柱应变分析

浮式系船柱的应变主要包括轴向拉伸应变与弯曲应变两部分。根据船闸浮式系船柱结构受力特点, 将船闸浮式系船柱上部结构概化为简支外伸梁, 即将船闸浮式系船柱的空心圆柱桩身概化为等截面弹性梁, 并将固定该空心圆柱体的钢板概化为1个固定铰支座、1个固定支座。系缆力合力 $F$ 与水平面夹角为 $\beta$ , 船闸浮式系船柱结构在系缆力作用下产生拉弯组合变形。

当船舶干舷高度高于浮式系船柱顶部时, 船舶将对浮式系船柱柱身产生向上的系缆力, 此时可认为 $\beta$ 大于0。此外, 当船舶干舷高度较浮式系船柱顶部更低时, 船舶将对浮式系船柱柱身产生向下的系缆力, 即 $\beta$ 小于0。

根据前期的研究, 当 $\beta>0$ 时, 上部结构任意截面产生的应变为:

$$\varepsilon = \frac{F_z}{E_1 A_1} + \frac{F_{xy}(2L_1 - 3h)L_2/2L_1 d}{E_1 I_1} + \frac{F_z(2R/\pi)d}{E_1 I_1} \quad (1)$$

当 $\beta<0$ 时, 上部结构任意截面产生的应变为:

$$\varepsilon' = -\frac{F_z}{E_1 A_1} + \frac{3F_{xy} L_3 h}{A_2 L_1^3 E_1} d - \frac{F_z(2R/\pi)d}{E_1 I_1} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon$ 、 $\varepsilon'$ 为不同工况时浮式系船柱截面应变,  $F_z$ 为系缆力的轴向分力,  $A_1$ 和 $A_2$ 分别为浮式系船柱上部结构截面面积和空心圆柱体上部固定钢板的截面面积,  $E_1$ 为浮式系船柱材料的弹性模量,  $F_{xy}$ 为船舶系统力的水平分力,  $L_1$ 为浮式系船柱上部结构固定支座到固定铰支座之间的长度,  $L_2$ 为浮式系船柱上部结构悬臂段长度,  $L_3$ 为浮式系船柱空心圆柱体上部固定钢板的长度,  $h$ 为应变测量点到船闸浮式系船柱固定铰支座处距离,  $R$ 为船闸浮式系船柱空心圆柱体轴向截面圆环半径,  $d$ 为应变测量点到中性轴的垂直距离,  $I_1$ 为上部结构截面圆环的惯性矩。

### 1.2 浮式系船柱力学模型修正

根据刘明维等在船闸浮式系船柱受荷响应力学模型的研究成果, 代入 $\beta>0$ 和 $\beta<0$ 时船闸浮式系船柱受荷响应力学理论模型, 获得水平系缆角度 $\alpha$ 、系缆力 $F$ 的理论模型计算值, 通过将原值与水平系缆角度以及系缆力真实值二者进行对比, 并结合科学数据处理与回归分析方法, 实现对浮式系船柱受荷响应力学理论模型进行参数率定和修正。获得修正后的浮式系船柱力学模型。

当 $\beta>0$ 时,

$$F'_s = 1.24803 F_s - 1.16456 \quad (3)$$

$$F_s = \frac{E_1 I_1 (\varepsilon_T - \varepsilon_K)}{R(m+n) [\cos(\alpha_s + \delta) - \cos(\alpha_s + \delta + \gamma)]} \quad (4)$$

$$\alpha_s = \arccos \frac{0.259 I_1 (\varepsilon_T - \varepsilon_K)}{A_1 R (m+n) \sqrt{x^2 + y^2}} - \delta - \arctan \frac{y}{x} \quad (5)$$

$$\alpha'_s = 0.467 \alpha_s + 5.44 \times 10^{-3} \alpha_s^2 - 1.947 \times 10^{-5} \alpha_s^3 + 18.153 \quad (6)$$

当 $\beta<0$ 时,

$$F'_x = 0.97 F_x - 3.419 \quad (7)$$

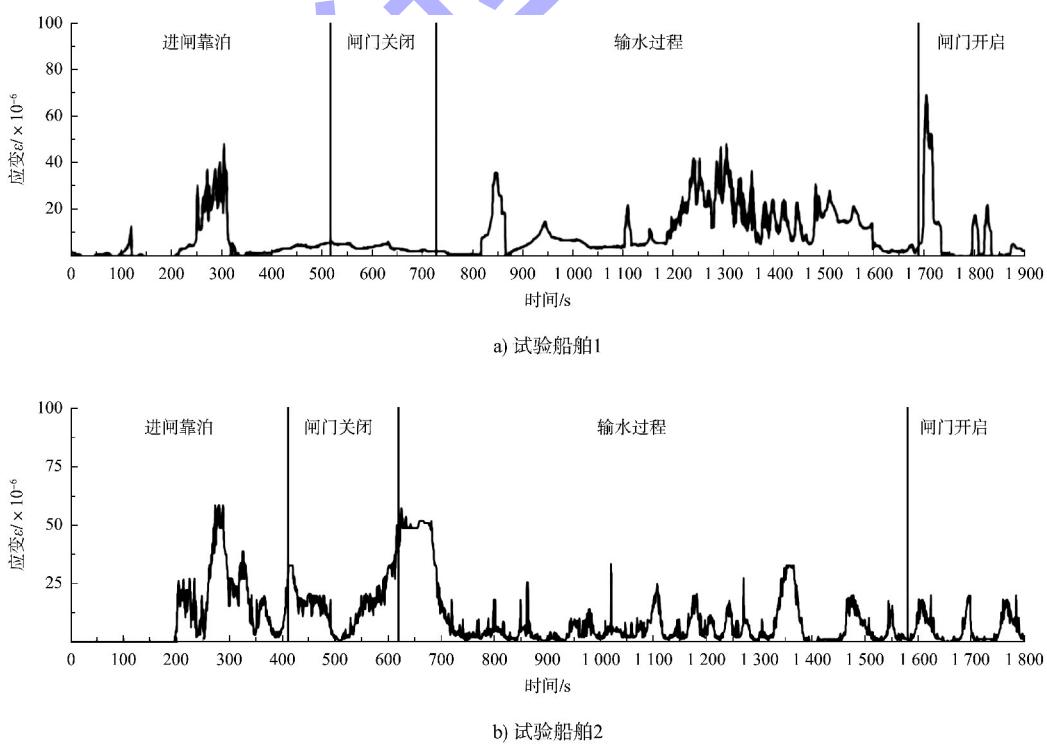
$$F_x = \frac{A_2 L_1^3 E_1 I_1 (\varepsilon'_T - \varepsilon'_K)}{R(m'-n') [\cos(\alpha_x + \delta) - \cos(\alpha_x + \delta + \gamma)]} \quad (8)$$

$$\alpha_x = \arcsin \frac{-0.259 A_2 L_1^3 I_1 (\varepsilon'_T - \varepsilon'_K)}{A_1 R (m'-n') \sqrt{(x')^2 + (y')^2}} - \delta - \arctan \frac{y'}{x'} \quad (9)$$

$$\alpha'_x = -0.443\alpha_x + 0.01907\alpha_x^2 - 0.705 \times 10^{-5}\alpha_x^3 + 26.515 \quad (10)$$

式中:  $x = \cos\gamma\varepsilon_T - \varepsilon_K$ ,  $y = \sin\gamma \cdot \varepsilon_T$ ,  $n = 0.295(2R/\pi)$ ,  $m = 0.966(2L_1 - 3h)L_2/2L_1$ ,  $x' = \sin\gamma\varepsilon'_T$ ,  $y' = \varepsilon'_K - \cos\gamma\varepsilon'_T$ ,  $m' = 2.898hL_3I_1$ ,  $n' = -0.259A_2L_1^3(2R/\pi)$ ,  $F'_s$  和  $F'_x$  为经回归分析得到的上拉与下拉系统缆力真实值,  $F_s$  和  $F_x$  为反演得到系统缆力,  $\alpha'_s$  和  $\alpha'_x$  为水平系统缆角度真值,  $\alpha_s$  和  $\alpha_x$  为水平系统缆角度原始值。 $\varepsilon_T$  和  $\varepsilon_K$  为测量点  $T$  和  $K$  的总应变,  $R$  为浮式系船柱轴向截面圆环半径,  $\sigma$  为测量点  $T$  与圆心连线和中性轴的夹角,  $\gamma$  为两测量点与圆心连线的夹角。

由式(3)~(10)可知, 只需通过实时测量浮式系船柱主体结构空心圆柱体表面指定受荷敏感区域内应变监测点的应变数据信息, 即可实时反演计算得到作用于浮式系船柱结构的船舶缆绳系统缆力  $F$ 。根据实船试验测试实时船舶缆绳系统缆力  $F$  与反演计算得到系统缆力进行对比, 验证力学模型的误差与可靠性。



## 2 试验数据分析

### 2.1 试验船舶参数

实船试验以长江干线上某船闸浮式系船柱为研究对象, 选取 4 条具有代表性的重载过闸船舶为试验船舶, 船舶参数见表 1。通过板环式拉力传感器采集船舶过闸过程中不同时期的实际缆绳系统缆力。同时应变数据信息采集传输系统采集浮式系船柱表面的应变数据, 并将其传递到计算机, 再由计算机将应变数据代入浮式系船柱受荷响应力学公式, 计算得到系统缆力的实时变化。

表 1 试验船舶参数

试验船舶	总长/m	过闸实载/t	吃水/m	满载排水/t
1	110	4 300	3.7	7 934
2	130	6 000	4.3	12 490
3	110	6 250	4.3	7 815
4	119	5 596	4.2	7 853

### 2.2 应变数据分析

将现场 4 组试验采集得到应变时域信号通过滤波、降噪、统计分析等手段进行处理, 获得 4 条船舶在过闸全过程中有效应变历时数据, 见图 1。

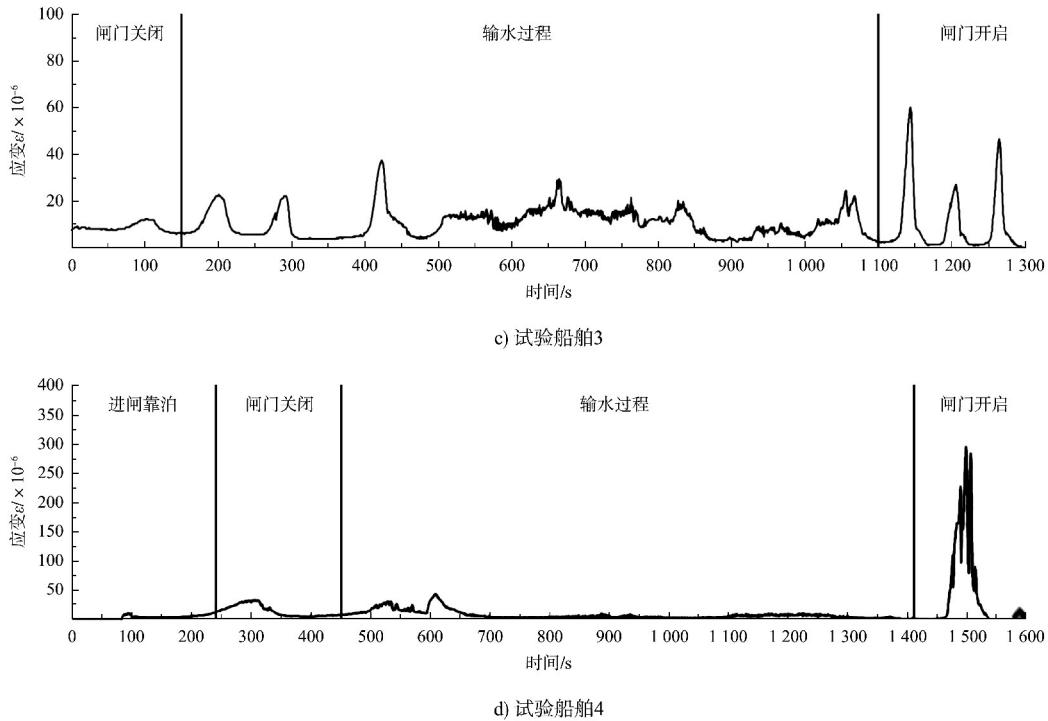


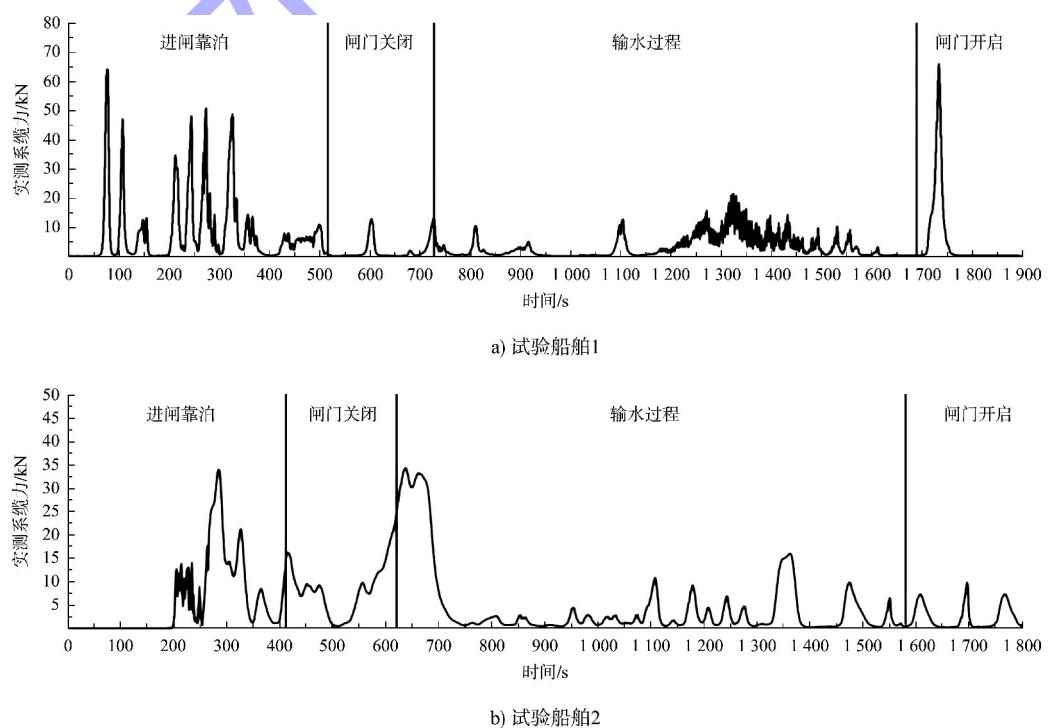
图1 浮式系船柱应变历时曲线

由图1可知: 试验船舶1和2在船舶系缆绳瞬间应变均同时迅速增大。4条试验船舶在闸门关闭阶段应变起伏不明显且数值较小。在船闸输水过程中应变起伏明显且迅速, 表明其变化均具有特征性。在闸门开启阶段, 试验船舶1、3、4应变出现最大值。试验船舶2在刚输水阶段出现较大值, 可能由于船舶尺寸较大、干舷高, 系缆后缆绳受拉较

大, 系缆力受船闸输水影响较大导致应变较大。

### 2.3 系缆力实测值历时曲线分析

在整个试验过程中, 利用板环式拉力传感器分别对4条船舶在过闸全过程中的系缆力进行实时监测, 获得全过程系缆力数值。通过记录过闸各时间节点, 获得试验船舶在过闸各阶段缆绳系缆力实测值的历时曲线, 见图2。



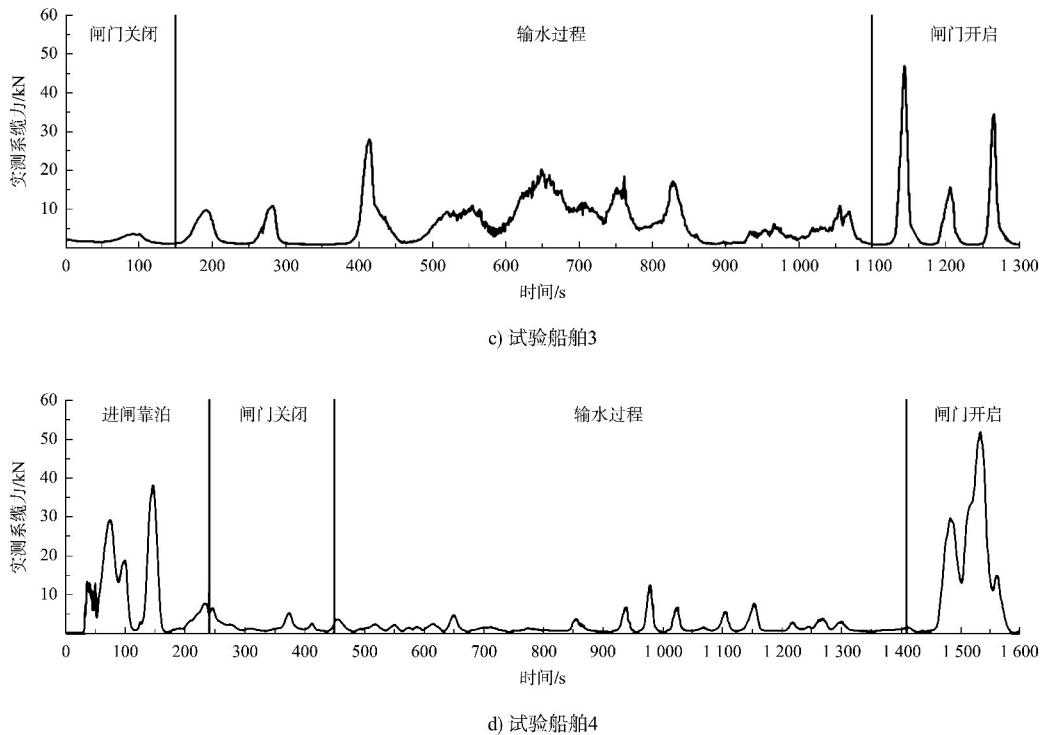


图 2 浮式系船柱缆系统缆力历时曲线

由图 2 可知：1) 船舶进闸靠泊过程中，艏缆在系统的瞬间数值持续增大，在某个特定时刻缆绳受力达到最大，此时出现进闸靠泊过程中的极大值。试验船舶系缆完毕后，监测到系统缆力持续剧烈波动，可能由于其他船舶进入闸室时所产生的船行波使停靠在闸室内的船舶发生飘移，导致系统缆力持续剧烈波动。与图 1 浮式系船柱应变历时曲线趋势保持一致。2) 在船闸闸室输水阶段，船舶系统缆力数值起伏明显且迅速，其变化图像具有特征性，可能与船闸输水工艺有关。3) 在下闸门开启后，系统监测到系统缆力数值发生一段上升突变，在解缆后监测到下降突变，最大值出现在闸门开启阶段。

#### 2.4 实测系统角度参数

实测 4 条试验船舶在过闸过程中的船舶缆绳系统角度，包括水平系统缆角度  $\alpha$  和竖直系统缆角度  $\beta$ ，均为分别测量 5 次后取平均值，见表 2。

由表 2 可知，试验船舶 1、4 的竖直系统角度  $\beta$  大于  $0^\circ$ ，为典型的上拉工况，符合上拉状态的力学模型。试验船舶 2、3 竖直系统角度小于  $0^\circ$ ，为典型的下拉工况，符合下拉状态的力学模型。

表 2 系统角度实测值

试验 船舶	水平角度 $\alpha/(^\circ)$	竖直角度 $\beta/(^\circ)$	系统 方向	系统 方式
1	17.00	11.00	上拉	单缆
	4.57	-5.00	下拉	八字双缆
2	28.75	-19.50	下拉	八字双缆
	25.40	-24.25	下拉	八字双缆
3	33.80	-32.90	下拉	八字双缆
	17.65	12.80	上拉	单缆

#### 2.5 力学模型误差验证

基于现场采集的浮式系船柱柱身应变历时数据，结合修正后浮式系船柱受荷响应力学模型反演得到的船舶系统缆力计算值。将实测系统缆力与反演所得计算值对比，见图 3。

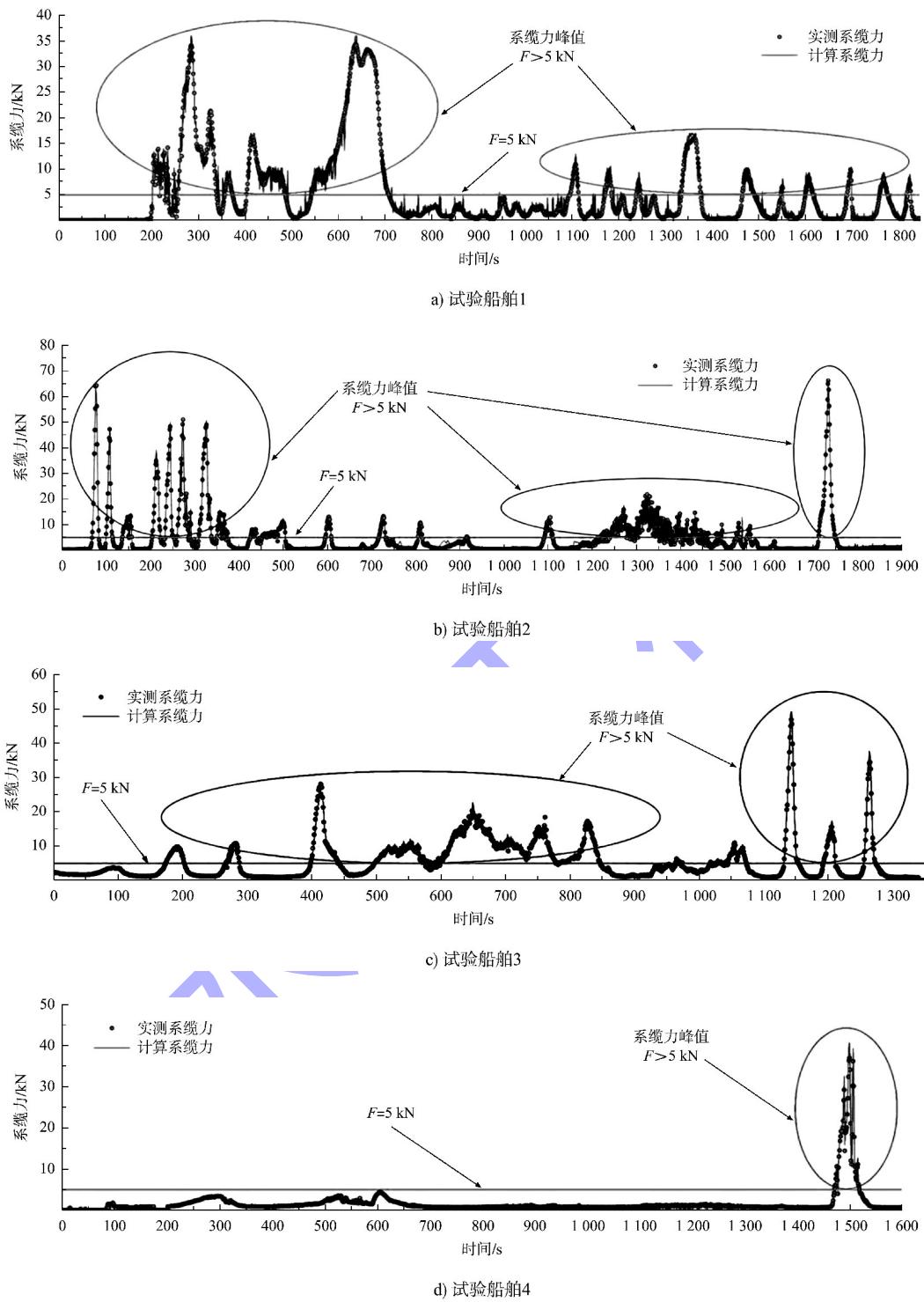


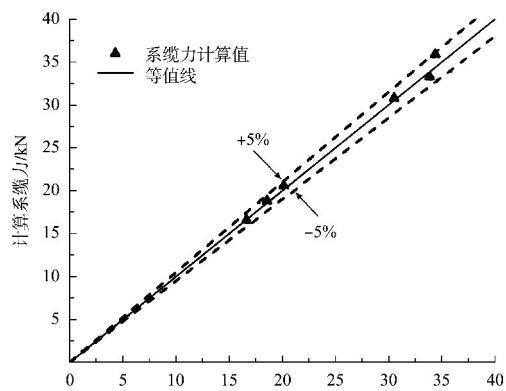
图 3 实测系缆力与计算系缆力对比

由图 3 可以看出: 1) 基于浮式系船柱力学模型反演得到的船舶系缆力计算值与实测值二者整体变化趋势较为符合。2) 试验船舶 1、2 进闸靠泊阶段 ( $t < 400$  s)、闸室灌水过程的前/后期 ( $550 s < t < 700$  s,  $550 s < t < 700$  s) 以及闸门开启阶段 ( $t > 1700$  s), 试验船舶 3 进闸靠泊阶段 ( $t < 400$  s)、

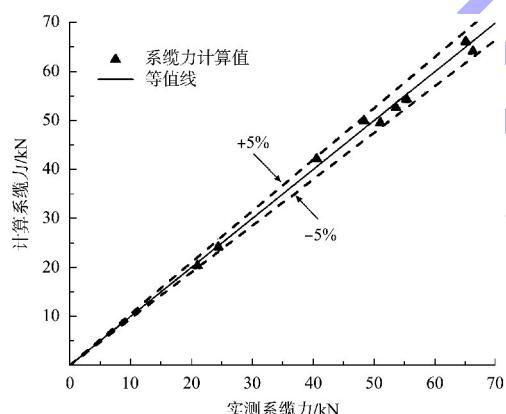
闸室灌水过程的中期 ( $800 s < t < 1600$  s) 以及试验船舶 4 的闸门开启阶段 ( $t > 1700$  s), 浮式系船柱所受到的船舶系缆力数值较大, 且波动幅度明显, 大部分大于 5 kN。

系缆力数值较大工况是造成浮式系船柱结构破坏和风险的因素。为进一步验证浮式系船柱力

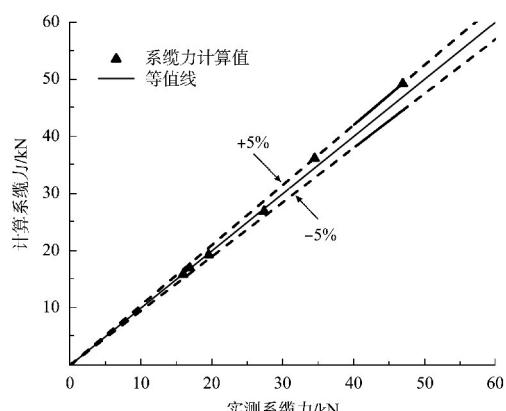
学模型的反演精度,选取缆力  $F$  大于 5 kN 的数据点作为样本,将船舶过闸过程中的缆力峰值单独对比,并分析二者的相对误差,绘制得到船舶缆力计算值与实测峰值的相对误差,见图 4。通过峰值缆力误差分析可知:4 条试验船舶实测的缆力峰值与模型反演计算值之间的相对误差在 $\pm 5\%$ 以内。再次验证了浮式系船柱力学模型的精确性与可靠性。



a) 试验船舶1



b) 试验船舶2



c) 试验船舶3

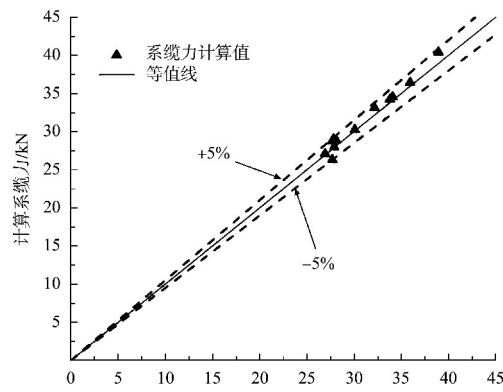


图 4 峰值缆力误差分析

### 3 结论

- 1) 通过试验所得数据分析,修正后的浮式系船柱受荷响应力学模型计算反演得到的船舶缆绳系统缆力与实测缆绳系统缆力实时变化趋势符合,说明浮式系船柱力学模型能够反映船舶缆绳系统缆力的变化情况。
- 2) 在缆力  $F$  大于 5 kN 的情况下,4 条试验船舶实测的缆力峰值与模型反演计算值之间的相对误差在 $\pm 5\%$ 以内。表明在过闸船舶大型化的趋势下,该力学模型具有较高的精确度。
- 3) 一般情况下,船舶系统缆力的峰值出现在船舶进闸靠泊系统及闸门开启阶段,该阶段对浮式系船柱结构破坏的风险最大,应作为重点监控阶段。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李家熹. 浅谈船闸浮式系船柱的使用和维护[J]. 水运工程, 1989(2): 23-25.
- [3] 谷湘. 三峡永久船闸浮式系船柱导槽安装[J]. 水力发电, 2001(3): 30-31, 46.
- [4] 刘明维, 李明龙, 吴林键, 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.
- [5] 肖鑫. 关于船闸系船柱及允许缆力中欧指南比较分析[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(4): 75-76, 82.

(下转第 129 页)