



# 新型船闸闸门重力消能式防撞装置试验研究

林宁<sup>1</sup>, 冀温源<sup>1</sup>, 覃仕华<sup>1</sup>, 庄宁<sup>2</sup>, 江朝华<sup>2</sup>

(1. 广西西江开发投资集团有限公司, 广西南宁 530022; 2. 河海大学, 江苏南京 210098)

**摘要:** 为保证船闸安全运转、提高船舶过闸效率, 有必要在闸门前设置防撞装置。针对传统液压缓冲防撞装置制动距离短、制动力需求大、成本高等问题, 设计制作新型船闸闸门重力消能式防撞装置, 并进行现场防撞试验。对长洲四线船闸设计船型3 000 t满载的工况下, 以允许的最大进闸速度0.6 m/s碰撞阻拦索的全过程进行分析。结果表明, 碰撞过程中船舶制动距离为12.8 m, 配重提升总高度为2.23 m, 均在设计容许范围内, 阻拦索拉力、前端卷筒拉力未超过其极限抗拉强度, 验证了该装置在阻拦船舶过程中的有效性。该防撞装置能有效抵挡船舶的撞击, 保护船闸闸门, 具有满足水位变幅大、机构简单、易于维护等特点。

**关键词:** 船闸; 防撞装置; 重力消能; 阻拦索

中图分类号: U641.3+31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0139-07

## Test study on new type of gravity energy dissipation collision prevention device for ship lock gate

LIN Ning<sup>1</sup>, JI Wenyuan<sup>1</sup>, QIN Shihua<sup>1</sup>, ZHUANG Ning<sup>2</sup>, JIANG Chaohua<sup>2</sup>

(1. Guangxi Xijiang Development and Investment Group Co., Ltd., Nanning 530022, China;

2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To ensure the safe operation of the ship lock and improve the efficiency of ship passage, it is necessary to install collision prevention devices in front of the ship lock gate. In response to the problems of short braking distance, high demand for braking force, and high cost of traditional hydraulic buffering anti-collision devices, we design and manufacture a new type of gravity energy dissipation anti-collision device for ship lock gate, and conduct on-site anti-collision tests. Then we analyze the entire process of colliding with the blocking cable at the maximum allowable entry speed of 0.6 m/s for the design ship type of Changzhou fourth line ship lock under a full load of 3,000 t. The results show that the braking distance of the ship during the collision is 12.8 m, and the total height of the counterweight lifting is 2.23 m, both within the design allowable range. The pulling force of the blocking cable and the pulling force of the front drum do not exceed their ultimate tensile strength, which verify the effectiveness of the device in blocking the ship. This anti-collision device can effectively resist the impact of ships, protect the ship lock gates, and has the characteristics of meeting large water level fluctuations, simple mechanism, and easy maintenance.

**Keywords:** ship lock; anti-collision device; gravity energy dissipation; restraining cable

为保证船闸安全运转, 除了闸门启闭机械运行必须安全可靠外, 防止闸门受过闸船舶撞击而损坏也是一个很重要的方面。通常船闸都有一定

的管理措施, 如限制闸室内船舶速度、充分利用闸室镇静段等防止船舶碰撞闸门<sup>[1-3]</sup>。尽管如此, 仍然可能有意外发生, 特别是在船舶过闸繁忙时

收稿日期: 2024-01-18

作者简介: 林宁(1979—), 男, 高级工程师, 从事船闸生产运营、检修及船闸调度信息化工作。

段,一旦发生船舶碰撞闸门事故,严重时会造成断航事故。为避免此类事故,一方面要严格控制船舶进闸速度,另一方面应在闸门前设置防撞装置。大量研究证实,船闸防撞装置可直接规避诸多事故的发生,对于保障船闸枢纽的安全运营具有重要的现实意义。

设置船闸闸门防撞装置的目的是限制事故船舶的速度与位移,使其在安全距离内制动,不与下闸首闸门发生碰撞,因此船闸防撞系统工作是一个较为复杂的能量转换过程。事故船舶与防撞装置碰撞时,从能量转换的观点,其中一部分消耗于碰撞时产生的船舶运动及周围水的能量吸收,另一部分被结构的弹性、塑性变形或结构撕裂所吸收。因此碰撞的计算涉及船舶及周围水的运动、系统结构的能量吸收等方面,比较复杂。设船舶超越限位警戒线时的速度为  $v_1$ , 船舶质量为  $m_1$ , 则此时船舶具有的动能  $E$  为:

$$E = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \quad (1)$$

设船舶制动过程中系统结构可吸收的能量为  $E_1$ 、水吸收的能量为  $E_2$ , 那么当  $E \leq E_1 + E_2$  时, 防撞装置可以起到保护作用。

船闸防撞系统工作是一个较为复杂的能量转换过程, 仅有少部分的研究。如余友安等<sup>[4]</sup>对塑性梁的防撞进行研究, 提出船只撞击停止时间、移动距离、碰撞力和塑性梁吸能的简明计算公式; 赵铁柱等<sup>[5]</sup>分析缓冲油缸和塑性梁两种防撞方案的动力学问题, 指出撞击过程能量转换涉及刚、弹、塑、液等的耦合; 袁鹰等<sup>[6]</sup>采用幂函数弹塑性本构关系, 推导出防撞梁截面设计公式, 并对高坝洲升船机防撞梁进行设计; 曹士政等<sup>[7]</sup>对500吨级升船机船厢防撞系统开展实船撞击试验, 揭示了“缓冲油缸+防撞梁”形式防撞系统的工作特性; 迟朝娜等<sup>[8]</sup>、许佳妮<sup>[9]</sup>也对这个防撞系统进行研究, 发现在刚性防撞体系中防撞钢板通过支撑杆系与主桁架焊接为一体, 不能通过体系变

形吸收或转换撞击能量, 且质量过大, 不利于闸门的工作。与船厢防撞类似, 在船舶撞击船闸、桥墩等方面研究相对较多, 集中于与船舶撞击相关的能量吸收耗散、船舶变形损伤、内部受力与外部动力特性、缓冲材料等简化分析和数值模拟<sup>[10-11]</sup>。目前, 船闸闸门防撞系统是船闸以及升船机运行中极其重要的安全设备, 已成为目前通航安全关注的焦点。防撞系统基本大都通过设置缓冲器吸收船舶动能, 实现船舶制动, 由于制动油缸行程的限制, 使得制动距离较短, 这就势必需要制动油缸有更大的制动力, 使得制造成本增加, 则基建等成本也相应提高。防撞装置普遍具有吸能结构比较复杂、建造规模大、操作困难、投资较高的缺点, 除了一些级别较高、水位相差较大、具有重要枢纽地位的船闸采用外(如三峡永久船闸、葛洲坝水利枢纽船闸), 其他船闸从经济性与技术上都较难配置此类闸门防撞装置, 限制了防撞装置在船闸中的广泛应用。

西江是我国西南出海水路运输大通道, 同时也是广西最繁忙的黄金航道, 广西内河运量的90%经过此段, 长洲水利枢纽船闸是西江航运干线最大的枢纽, 为确保闸门等设备安全、船只高效过闸, 研发了新型船闸闸门重力消能式防撞装置。该装置是将船舶运动的动能转化为提升重物的势能, 达到制动船舶的目的。当船舶与阻拦索相撞后, 阻拦索张紧并提起两端的配重, 直至提升配重的势能增加到全部消耗掉船舶运动的动能, 则船舶停止。该防撞装置具有施工方便、机构简单、造价低、便于广泛推广应用的优点。因此本文针对所研发的新型重力式消能式防撞装置开展现场试验研究, 分析船闸设计船型以允许的最大进闸速度撞击重力消能式防撞装置全过程, 研究防撞装置吸能的特征, 验证重力消能式防撞系统消能的可行性, 旨在为后续该装置的设计、应用与推广提供理论与实践依据。

## 1 试验方案设计

### 1.1 新型重力式消能防撞装置设计

#### 1.1.1 消能原理

新型船闸闸门重力消能式防撞装置防撞基本原理结构见图 1, 其消能原理为:

$$\frac{1}{2}m_1v^2 = m_2gh \quad (2)$$

式中:  $m_1$  为过闸船舶质量, t;  $v$  为船舶进闸速度, m/s;  $m_2$  为消能配重质量, t;  $h$  为拦截船舶时船舶的制动距离, m, 也是配重的提升高度;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ 。消能的原理为通过滑轮结构将失控船舶的动能转化为配重的重力势能, 失速船舶在碰撞船闸闸门前制动, 保护闸门。

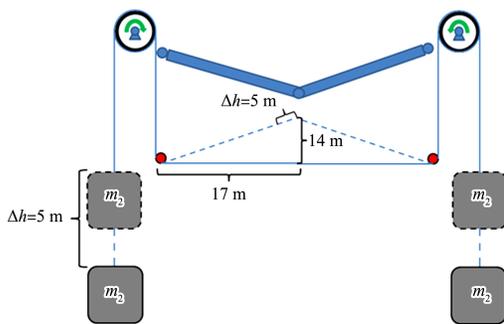


图 1 防撞原理

#### 1.1.2 新型重力式消能防撞装置结构

新型船闸闸门重力消能式防撞装置主要由双卷筒卷扬机、消能配重组件、浮筒、阻拦索等 4 部分组成, 防撞装置结构见图 2。阻拦索横跨船闸闸室、连接闸室两侧的双卷筒卷扬机, 浮筒机架与消能配重组件位于井槽内。阻拦索于人字门前横跨闸室, 阻拦索初始水平宽度与闸室宽度一致, 绕过水面浮箱以及顶墩的双卷筒卷扬机, 连接到滑槽内的消能配重组件。浮筒可在井槽内随水位上下浮动, 侧滑轮和滑块与井槽轨道相适应。机架设置穿行槽, 阻拦索可穿过机架下放至闸室底部, 见图 3。双卷筒卷扬机结构功能相当于一组定滑轮, 浮箱机架转轴相当于一组半固定动滑轮。船闸闸门防撞装置进入工作状态时, 船舶撞击阻拦索, 阻拦索沿闸室水平向闸室下游方向拉伸,

阻拦索拉力经过两侧两组滑轮的传导, 提升配重做功, 使试验船舶动能转化为配重的重力势能, 在有效的制动距离内拦截使船舶停止。配重下降带动阻拦索收紧, 船舶在阻拦索作用下后退, 退回至安全警戒线内, 浮筒下降, 防撞装置恢复到试验初始状态。

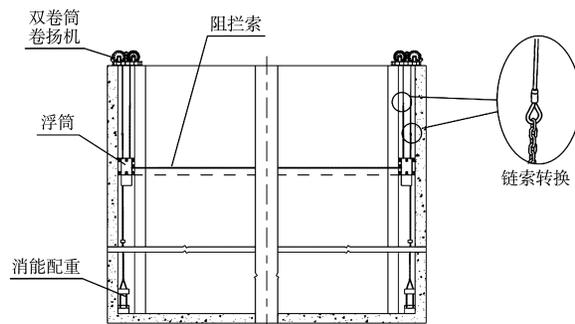


图 2 防撞装置整体结构

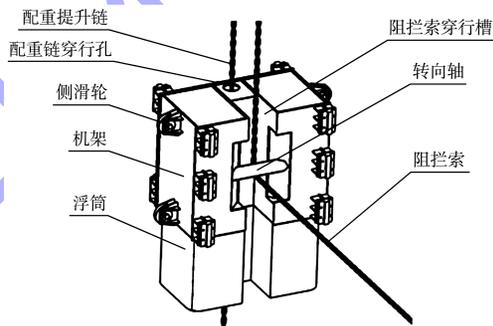


图 3 阻拦索与浮筒连接

#### 1.1.3 新型重力式消能防撞装置工作流程

装置处于准备状态时, 阻拦索下沉到闸室底部, 见图 4a)。向工作状态转换时, A、B 卷筒离合器脱开, 两卷筒动力不传动。动力装置带动两侧 B 卷筒收卷, 阻拦索提升, 浮筒机架放置在闸槽内, 通过浮筒浮力支撑, 随闸室水位升降。当阻拦索提升到机架转向轴位置时停止, 动力部分停机, 制动器抱闸, 防止阻拦索滑落。A、B 卷筒通过离合器结合, 两卷筒连接, 实现同步转动。此时, 相当于阻拦索与消能重物实现了连接, 防撞装置处于工作状态, 见图 4b)。当失控船舶撞击阻拦索时, 阻拦索传递拦截力, 带动 B 卷筒转动放卷, B 卷筒通过齿轮传动使 A 卷筒同向转动收卷, 提升配重, 船舶动能转化为重物的重力势能, 实现防撞消能。

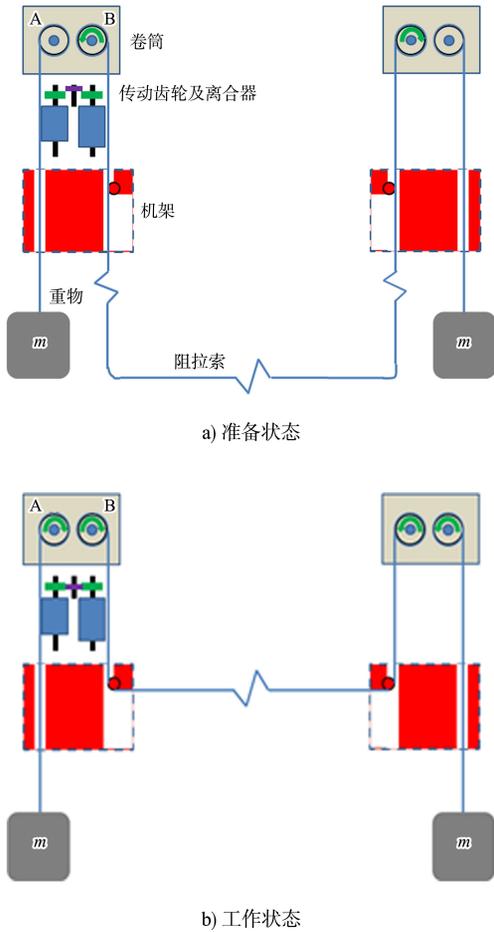


图4 重力效能式防撞装置工作流程

1.1.4 长洲四线船闸新型重力式消能防撞装置设计

长洲四线双线船闸为 I 级船闸，按最大通过 3 000 吨级船舶设计，闸室有效尺寸为 340 m × 34 m × 5.8 m (长 × 宽 × 门槛水深)。船闸上游设计最高通航水位 25.79 m，最低通航水位 18.6 m，下游设计最高通航水位 25.70 m，最低通航水位 3.32 m。试验时上游水位 20.6 m，下游水位 4.1 m，门槛水深 8.5 m。长洲四线船闸的人字门关闭后，防撞警戒装置滑槽距离人字门闸室方向为 18 m，闸室宽度为 34 m，船舶撞击防撞阻拦索后，最大制动距离应小于 18 m，设计值取 14 m，根据直角三角形边长关系可求得阻拦索伸长 5 m，即配重提升设计高度为 5 m。

依据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》<sup>[12]</sup>，有效撞击能量计算公式为：

$$E_0 = \frac{1}{2} \rho m_1 v_n^2 \quad (3)$$

式中： $E_0$  为船舶的有效撞击能量，kJ； $\rho$  为有效动能系数，取 0.7~0.8； $m_1$  为船舶质量，t，按满载排水量计算； $v_n$  为船舶沿撞击方向的法向速度，m/s。

按照长洲船闸船舶调度的相关规定，船舶在闸室内移泊速度  $v_0$  应小于 4 km/h 或 0.6 m/s，根据能量守恒定律，船舶撞击动能全部转化为两侧的配重势能，则有：

$$\frac{1}{2} \rho m_1 v_0^2 = 2m_2 gh \quad (4)$$

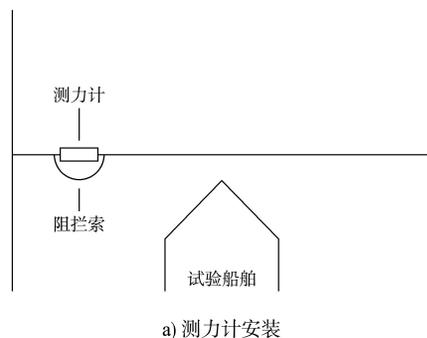
长洲三线、四线船闸最大设计船型为 3 000 吨级，满载质量约 3 800 t，为确保装置运行安全可靠，取船舶质量  $m_1$  为 4 300 t，当船速  $v_0$  为 0.6 m/s 时， $\rho$  为 0.8， $h$  为 5 m， $g$  为 9.8 m/s<sup>2</sup>，通过计算两侧设置质量为 6.5 t 的消能配重，可将以最大速度 0.6 m/s 行驶的满载 3 000 吨级船舶在 14 m 的距离内拦截至停止。

1.2 试验方案及工况

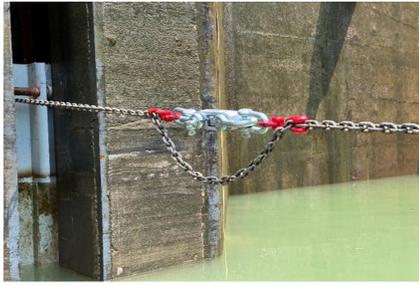
试验工况为：船闸设计最大船型 3 000 吨级满载散货船，船型尺寸为 108 m × 16 m × 5.9 m (总长 × 型宽 × 设计吃水)，总质量约 3 800 t，船舶在船闸中以最大允许进闸速度 0.6 m/s 匀速行驶，当船舶撞击阻拦索中部时船舶动力不关闭。

1.3 试验数据监测

阻拦索拉力通过采用电子测力计进行实时监测，安装时利用羊角调节器、蝴蝶扣和美式 D 形卸扣将测力计的两端与阻拦索并联(图 5)，当阻拦索受到船舶撞击时，产生的拉力将传导至拉力计上。

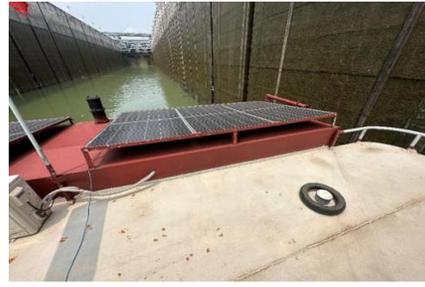


a) 测力计安装



b) 现场安装

图 5 阻拦索拉力监测

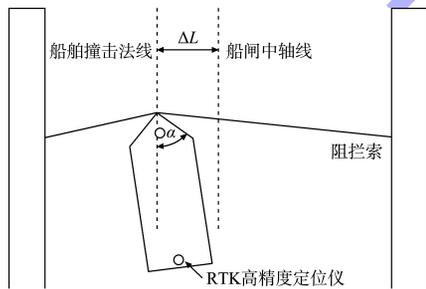


b) 船尾RTK安装

图 6 位移监测

防撞装置碰撞试验中, 在碰撞的过程中船舶可能会产生一定的偏转角, 因此在船首、船尾两处各放置 1 个实时动态载波相位差定位技术 (real-time kinematic, RTK) 高精度定位仪, 进行船舶位移监测, 见图 6。

阻拦索卷筒及配重卷筒所受拉力通过放置于阻拦索卷筒及配重卷筒左右两侧轴承支架与轴承底座之间的 WTM-AS/4 型综合监测仪进行实时监测。



a) RTK安装

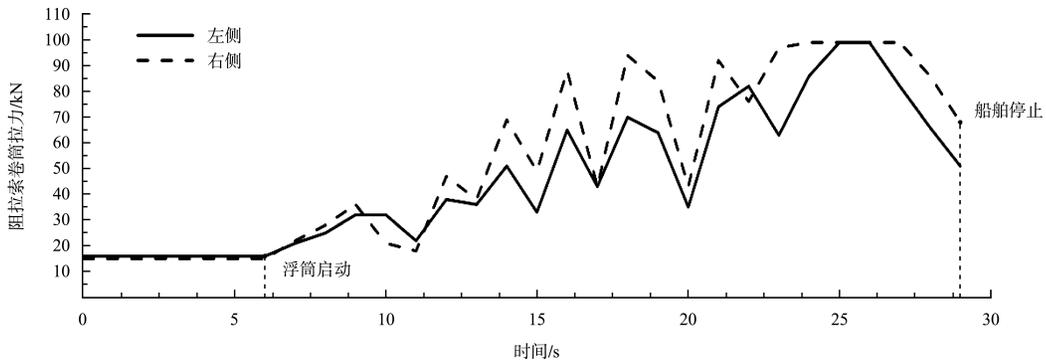


图 7 阻拦索拉力历时曲线

## 2 试验结果分析

### 2.1 阻拦索拉力

阻拦索拉力历时曲线见图 7。可以看出, 船舶撞击速度为 0.6 m/s, 阻拦索拉力从试验初始状态 21 kN 开始增加, 由于浮筒所受的动摩擦力小于其最大静摩擦力, 在浮筒准备上升时, 阻拦索上的拉力会减小, 因此 7 s 处阻拦索拉力减小; 随着船舶继续行驶, 阻拦索开始伸长, 阻拦索对阻拦索卷筒施加向下的拉力, 由于阻拦索拉力小于配重的重力, 故配重仍保持静止; 7~18 s 之间, 阻拦索伸长带动浮筒上升, 阻拦索拉力由 55 kN 缓慢上升至 65 kN; 18 s 时浮筒上升达到最大位置, 配重开始启动; 20 s 时阻拦索拉力增加至能带动配重卷筒转动的拉力值, 拉起重力为 30、35 kN 两级配重, 阻拦索拉力在 25 s 处达到拉力最大值 84 kN; 29 s 时船舶减速为 0 m/s, 船舶停止, 阻拦索实现船舶防撞功能。

### 2.2 船舶位移与船舶速度

船舶位移-速度曲线见图 8。可以看出, 船舶速

度为 0.6 m/s, 船舶于 0 s 处撞击铁索, 至 35 s 船舶速度为 0 m/s, 船舶停止, 船舶最大位移为 12.8 m。

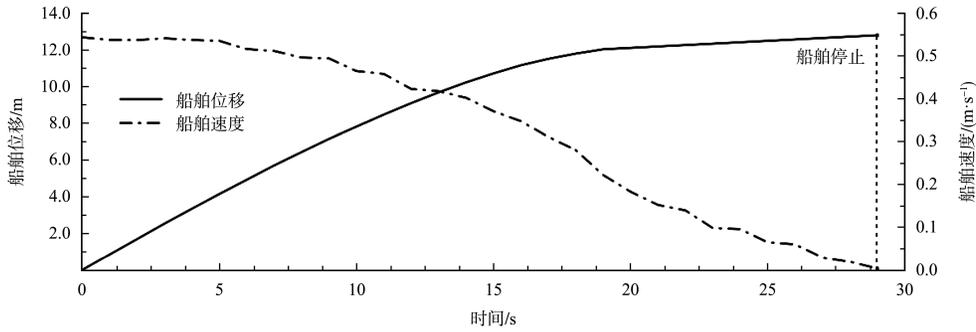


图 8 船舶位移-速度曲线

### 2.3 阻拦索卷筒所受拉力

阻拦索卷筒拉力历时曲线见图 9。船舶以 0.6 m/s 的速度于 0 s 处撞击阻拦索，由于阻拦索未绷紧，具有弧度，可伸长，阻拦索卷筒拉力初始值为 16 kN；6 s 时，两侧阻拦索绷紧，阻拦索卷筒开始受力，由于阻拦索卷筒与配重卷筒之间由离合器连接，属于齿轮机械结构，齿轮与齿轮之间尚有活动空间，同时阻拦索铁链是由铁环两两相扣而成，阻拦

索通过浮筒转向轴转向，因此在阻拦索伸长的过程中，阻拦索卷筒拉力值均呈现锯齿状上升趋势；24 s 时，右侧阻拦索卷筒受力达到最大值 99 kN，并持续 3 s 左右；25 s 时，左侧阻拦索卷筒受力达到最大值 99 kN，并持续 1 s 左右。由于船舶撞击阻拦索时靠船闸中轴线左侧，故右侧阻拦索伸长的距离更长，配重提升的高度更高，阻拦索卷筒受力最大值持续的时间更长。

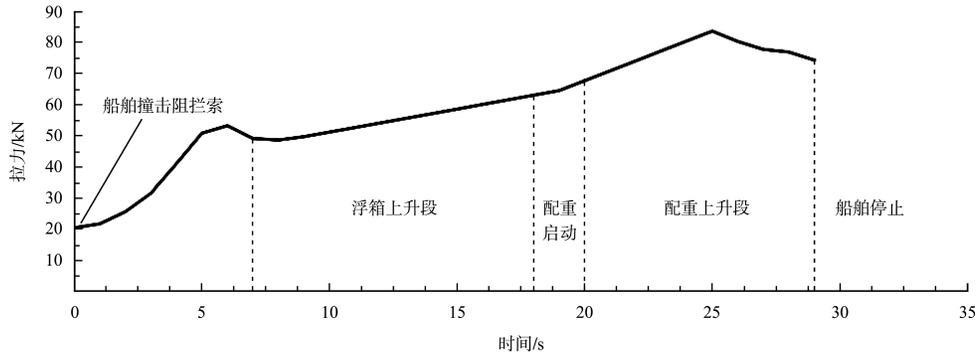


图 9 阻拦索卷筒拉力历时曲线

### 2.4 配重提升高度

配重提升高度历时曲线见图 10。可以看出，船舶以 0.6 m/s 的速度于 0 s 处撞击阻拦索，阻拦索伸长，浮筒上升，阻拦索卷筒受力增加，当阻

拦索卷筒受力达到配重的重力时，配重开始上升；右侧配重于 5 s 处开始上升，并在 28 s 处上升至最大高度 1.75 m；左侧配重于 20 s 处开始上升，并于 28 s 上升至最大高度 0.48 m。

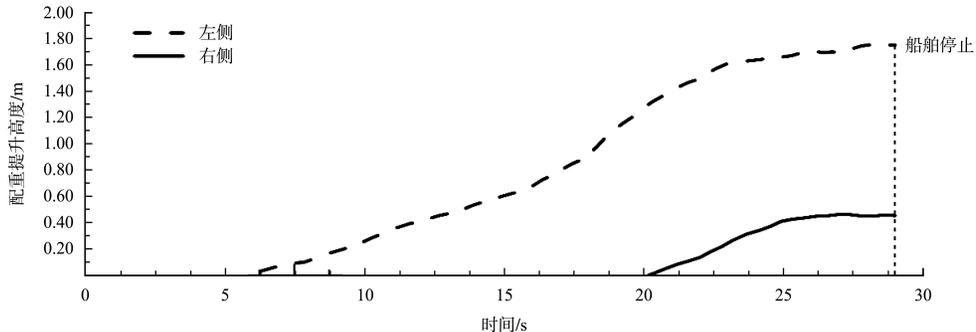


图 10 配重提升高度历时曲线

## 2.5 阻拦索卷筒转动距离

阻拦索卷筒转动距离变化曲线见图 11。可以看出, 船舶以 0.6 m/s 的速度于 0 s 处撞击阻拦索, 阻拦索伸长, 浮筒上升, 阻拦索卷筒受到锯齿状增加的拉力, 由于拉力未达到带动配重卷筒传动的

大小, 故阻拦索卷筒保持不动; 船舶碰撞阻拦索左侧, 因此右侧阻拦索伸长更长, 右侧阻拦索卷筒于 12 s 开始放卷, 于 28 s 放卷完毕, 放卷时间 16 s, 放卷长度 1.82 m; 左侧阻拦索卷筒于 20 s 开始放卷, 于 26 s 放卷完毕, 放卷时间 6 s, 放卷长度 0.50 m。

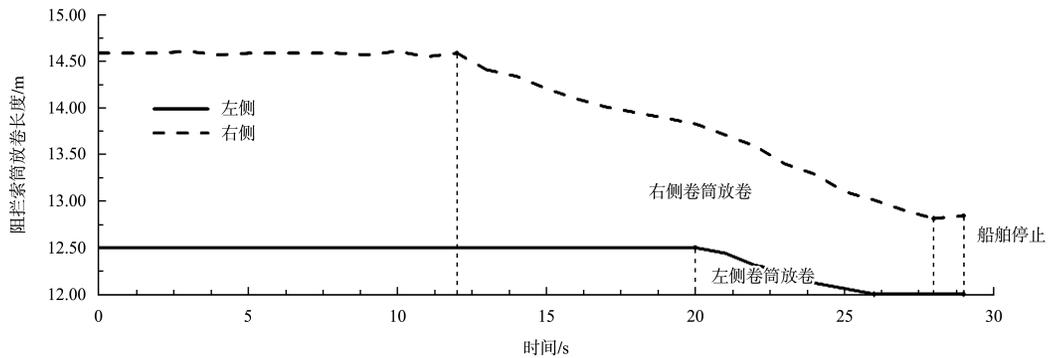


图 11 阻拦索卷筒转动距离变化曲线

## 3 结论

1) 本文提出的新型船闸闸门重力消能式防撞装置, 主要包括双卷筒卷扬机、消能配重组件、浮筒机架和阻拦索等 4 个主要部分, 该装置在船舶撞击阻拦中通过将船舶的动能转化为配重的重力势能, 确保船舶在碰撞船闸闸门前制动, 实现对撞击能量的吸收和分散。

2) 长洲四线船闸现场撞击试验中, 当满载 3 000 t 船舶以允许最大速度 0.6 m/s 撞击阻拦索时, 船舶撞击阻拦索后船舶制动距离为 12.8 m, 远小于防撞装置与闸室人字门之间距离 18.0 m, 且满足设计要求的 14.0 m, 表明该新型船闸闸门重力消能式防撞装置能够满足防撞要求, 很好地保护闸门; 试验过程中防撞装置阻拦索卷筒的最大拉力为 99 kN, 阻拦索的最大拉力为 84 kN, 未超过其极限抗拉强度, 配重提升总高度为 2.2 m, 均在设计容许范围内, 表明本文基于能量转换设计方法的正确性。

3) 试验中对船舶撞击阻拦索开始至船舶停止全过程中的阻拦索拉力、船舶位移与船舶速度、阻拦索卷筒所受拉力、配重提升高度以及阻拦索

卷筒转动距离关键指标进行实时监测, 并对撞击全过程中关键指标的变化规律进行分析, 进一步阐明了新型防撞装置在工作过程中船舶运动、阻拦索拦截方式、配重上升以及离合器连接双卷筒卷扬机的工作流程, 与设计理念一致, 表明新型重力式消能防撞装置在工作过程中安全可靠, 可进一步在其他船闸进行推广应用。

## 参考文献:

- [1] 李利强. 浅谈船闸区域船舶碰撞事件的防范与处理[J]. 红水河, 2009, 28(6): 92-95.
- [2] 唐风文, 肖英杰, 周伟, 等. 仿真技术在船舶碰撞事故再现中的应用[J]. 水运工程, 2011(10): 42-45.
- [3] 李莉, 刘清, 张恒, 等. 基于 ISM 的三峡船闸船舶过闸碰撞事故风险分析[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(2): 49-53.
- [4] 余友安, 廖乐康, 金辽. 构皮滩垂直升船机金属结构和机械设备设计研究[J]. 人民长江, 2019, 50(5): 119-126.
- [5] 赵铁柱, 石端伟. 基于 ANSYS Workbench 的升船机承船厢卧倒门优化设计[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(3): 378-382.