



大型船闸主动式安全拦阻方案研究

齐俊麟，李涵钊，陈 坤，陈 社，曾 维，金 锋
(长江三峡通航管理局，湖北 宜昌 443002)

摘要：针对现有防撞拦阻系统与船舶大型化发展不相适应的问题，进行主动式安全拦阻方案的相关研究。通过机械臂自主套缆，阻拦索上的拉力通过刹车带、导带轮传递至摩擦吸能单元，由摩擦吸能单元上的摩擦制动器在制动距离内逐渐吸收船队的动能等系列方法，保障船队过闸期间安全停靠，消除船舶失速、超速撞击船闸人字门的安全风险。同时通过数值模拟仿真验证拦阻方案的可行性和有效性。结果表明：该方案可满足 8 750 t(空载)~3 万 t(满载)载质量排水量范围的成组过闸船队，0.5 m/s 进闸航行速度，在 20 m 制动距离内减速制动，安全停船，有效保证船闸人字门和成组过闸船队安全。

关键词：安全拦阻；主动式；成组过闸；数值仿真；大型船闸

中图分类号：TH113；U64

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)04-0131-07

Active safety arresting scheme of large ship lock

QI Junlin, LI Hanzhao, CHEN Kun, CHEN She, ZENG Wei, JIN Feng
(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

Abstract: Regarding the problem that the existing anti-collision arresting system does not adapt to the new situation of large ships and formation of new ships, an active safety arresting scheme of large ship locks is proposed. By using a robotic arm to autonomously lay cables, the tension on the blocking cable is transferred to the friction energy absorption unit through the brake belt and guide pulley. The friction brake on the friction energy absorption unit gradually absorbs the kinetic energy of the fleet within the braking distance, and a series of methods are used to ensure the safe parking of the fleet during the lock period, eliminating the safety risks of ship stalling, speeding and hitting the ship's gate. At the same time, The feasibility and effectiveness of the arresting scheme are verified by numerical simulation. The results show that the scheme can satisfy a group of lock passing fleets with a displacement range of 8,750 t (no load) ~ 30,000 t (full load), the entering speed of 0.5 m/s, the braking speed of 20 m braking distance, and the safe stopping of the ship. The safety of the miter gate of the ship lock and passing fleet are effectively ensured.

Keywords: safety arrest; active; a group of lock passing; numerical simulation; large ship lock

某大型船闸地处长江干线咽喉要津，设计水头超 20 m，相对于中小型船闸，其允许通过的船舶尺寸、吃水更大，且配套安全措施要求更高。根据统计，三峡枢纽过闸货船平均定额吨位由 2011 年的 2 844 t 增长至 2021 年的 4 972 t，单次过闸船舶艘次由 2011 年的 5.37 艘降至 2021 年的 4.00 艘，长江航运船舶正向着大型化、标准化发

展。船舶过闸期间受浅水效应、岸壁效应和船间屏蔽效应影响，产生船体下沉和纵倾、岸推或岸吸等现象，导致船舶操作难度加大，航速难以精准控制，船舶失速、超速将增大撞击人字门的安全风险^[1]；另外，现有的防撞装置因设计冲击载荷较低、设备老化等原因很难适应过闸的大型船队。进一步完善防撞拦阻系统不仅可以防护人字

门免于撞击受损，也可辅助船舶控制进闸船速实现安全靠泊，保障船方生命财产安全^[2-5]。

某大型船闸现有防撞装置因设备老化、故障率较高，且相关零部件损坏后采购困难，在日常使用中可靠性较低。增加主动式安全拦阻装置可弥补现有防撞装置性能不足，与现有防撞装置形成两级保护，适应新型船型和船舶成组编队过闸，意义重大。目前，国内外常见的拦阻系统主要有路基拦阻和舰机拦阻^[6-9]，在船闸通航领域尚未有适用于船闸的主动拦阻装置实例。巴拿马运河为了保证船闸和船舶安全，通过设置在船闸两侧的牵引车牵引船舶过闸，防止船舶失速撞击闸门或与闸墙刮擦^[10-11]。

本文在梳理某大型船闸安全拦阻装置设计指标的基础上，通过理论计算和方案比选，研发设计一套适用于大型船闸的主动式安全拦阻装置。该装置利用机械臂自主套缆，将船舶动能通过刹车带、导带轮传递，由摩擦吸能单元上的摩擦制动器在制动距离内逐渐消耗吸收，通过数值模拟仿真验证拦阻方案的可行性和有效性。

1 拦阻理论

1.1 能量转化原理

船舶进闸过程中，通过安全拦阻装置，船舶动能一部分转化为缆绳的弹性势能和热能，另一部分消耗于碰撞时产生的船舶运动及周围水的运动。根据能量守恒定理推导缆绳拉力。

进闸靠泊阶段，由于船舶在缆绳张紧时刻存在初始速度 v_0 ，船舶动能 E_s 为：

$$E_s = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}Wv_0^2 \quad (1)$$

式中：W 为船舶实际排水量， v_0 为初始速度，均为影响动能和缆绳受力的重要因素，缆绳的物理特性决定了其吸收船舶动能的能力。其特性主要包含缆绳类型、缆绳直径、缆绳质量、缆绳长度和破断强度等。缆绳的负荷与伸长率之间存在着非线性的函数关系，在系缆操纵用缆过程中，缆绳所吸收的外力能量与缆绳的伸长率也有着密切

的关系，缆绳吸收的能量 E_l 即缆绳的弹性势能可按下式计算：

$$E_l = T\Delta L \quad (2)$$

式中： ΔL 为缆绳伸长量；T 为缆绳的拉力，采用 Wilson 公式进行计算：

$$T = C_p d^2 \delta^n \quad (3)$$

式中： C_p 为弹性系数，d 为缆绳直径， δ 为应变，n 为表征弹性变形非线性的无量纲参数。对于钢缆， $C_p = 275$ GPa， $n = 1.5$ 。

由于缆绳的弹性因素，缆绳在外力作用下逐渐伸长，其拉力 T 为 ΔL 的函数，因而缆绳吸收的能量计算公式可进一步改写为：

$$E_l = \int_0^{\Delta L} T d(\Delta L) \quad (4)$$

式中： ΔL 为 δL_0 ， L_0 为缆绳刚刚收紧时的初始长度。

$$E_l = \int C_p d^2 \delta^n L_0 d(\delta) \quad (5)$$

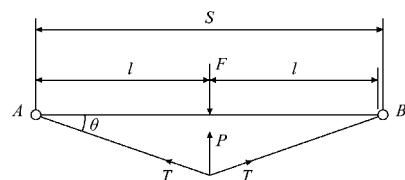
计算可得：

$$E_l = C_p d^2 L_0 \frac{\delta^{n+1}}{n+1} \quad (6)$$

式中： E_l 为缆绳吸收船舶动能的能力，由缆绳类型、缆绳直径和缆绳初始长度共同决定。

1.2 缓冲距离计算

船舶与钢丝绳碰撞时，船舶动能转化为钢丝绳的变形能（在钢丝绳的极限载荷范围内）。作用方式见图 1（碰撞点为中心）。



注：S 为钢丝绳长，l 为作用力，F 为钢丝绳两端距离，P 为钢丝绳制动力，T 为钢丝绳伸张时的张力。

图 1 钢丝绳碰撞受力

由图 1 中力的关系得：

$$P = 2T \sin \theta = \frac{2Tx}{\sqrt{x^2 + l^2}} \quad (7)$$

制动力所作的功 E_l 为：

$$E_l = \int_0^y P dx = \int_0^y \frac{2Tx}{\sqrt{x^2 + l^2}} dx \quad (8)$$

按照最大拦阻力 360.0 kN 进行计算可得, 钢缆张紧后的拦截距离 y 为 7 m 。为保障设备使用的安全性和可靠性, 在后续设计中将拦截距离设置为 20 m , 即导轮安装位置距闸室上游侧 120 m , 距下游侧 160 m , 见图 2。

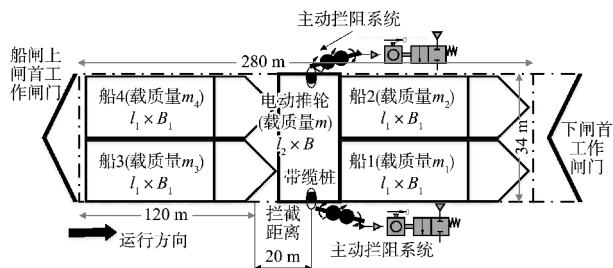


图 2 拦阻装置布置

拦阻装置对称分布于闸室两侧, 依闸墙方向安装, 通过与水工建筑预埋螺栓或钢板固定连接, 所承受的最大剪切力应不小于 300 kN , 对于闸面所使用混凝土强度具有较高要求。

2 拦阻方式比选

2.1 液压阻拦方式

液压缓冲器的油缸体固定在受保护的设备上(图 3)。初始状态时柱塞伸出, 当柱塞受到冲击载荷后, 缓冲油缸活塞向左位移, 无杆腔产生高压, 油液从油缸无杆腔经溢流阀、节流孔进入蓄能器, 冲击物的动能绝大部分转变为油液的液压能和热能。

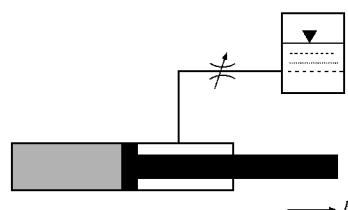


图 3 缓冲油缸结构原理

成组过闸船队在工作船(推轮)的牵引下以 0.5 m/s 的航行速度进闸, 机械臂将钢缆套索固定在工作船两侧带缆桩。工作船继续航行约 4 m 时缆绳绷紧, 拉力通过钢缆、导轮传递至滑轮组, 滑轮组带动缓冲油缸活塞杆伸长, 同时缓冲油缸通过储能形成反作用力进行缓冲(图 4)。船舶随

水位下降时, 钢缆自动脱钩, 缓冲油缸的储能释放, 油缸缩回, 钢缆被收回。

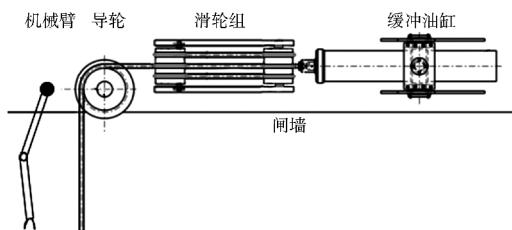


图 4 液压拦阻装置

2.2 卷扬机机械制动阻拦方式

以卷扬机作为制动装置, 安装在闸室下游侧闸面上, 成组过闸船队在推轮的牵引下以 0.5 m/s 的航行速度进闸, 到预定位置, 机械臂将钢缆索固定在推轮两侧带缆桩, 推轮继续航行约 4 m 缆索绷紧, 拉力通过钢缆索、导轮传递至卷扬机卷筒, 此时, 通过控制卷扬机制动器制动力矩形成反作用力, 抵消船舶动能(图 5)。

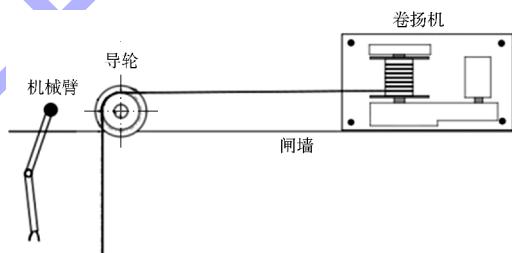


图 5 卷扬机机械制动拦阻方式

2.3 摩擦制动阻拦方式

相比于卷扬机机械制动阻拦方式, 摩擦制动方式利用摩擦吸能单元代替卷扬机, 使用刹车带作为传力部件, 通过调节制动器压力, 满足不同拦阻力和制动距离的控制要求, 能够实现不同载质量的船队在相同制动距离内被拦停下来, 见图 6。

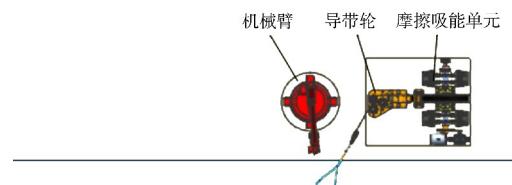


图 6 摩擦制动拦阻装置

通过比较, 3 种能量吸收方式的主要优缺点见表 1。

表 1 3 种阻拦方式比较

| 阻拦方式 | 结构复杂性 | 阻拦距离的适应性 | 传力部件 |
|---------|-------------------------|--|------|
| 液压阻拦 | 采用 2~3 倍率滑轮组和缓冲油缸, 结构复杂 | 考虑降低施工改造难度, 阻拦距离大, 放绳量较大。由于油缸行程有限, 需要更大倍率的滑轮组, 阻拦距离适应性较差 | 钢丝绳 |
| 卷扬机摩擦阻拦 | 在卷扬机基础上采用液压摩擦制动器, 结构复杂 | 阻拦距离的适应性较好, 需在卷扬机上进行重新设计, 满足较大拦阻力的设备体积庞大 | 钢丝绳 |
| 摩擦阻拦 | 采用单盘摩擦制动盘和刹车带, 结构较紧凑 | 技术较成熟, 体积相对较小, 采用刹车带缠绕方式, 能够适应更长阻拦距离的需要 | 刹车带 |

通过比较上述阻拦方式的优缺点, 结合某大型船闸现场使用环境和使用参数要求, 同时考虑装置的可靠性、实用性和维修便利性, 摩擦阻拦方式较适用, 采用了较成熟的摩擦阻拦技术。摩擦阻拦技术中核心部件为摩擦制动器, 其结构见图 7。

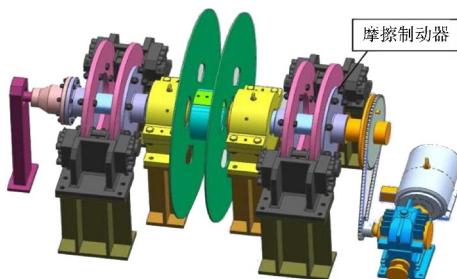


图 7 摩擦制动器装置结构

3 主动式安全拦阻装置性能分析

3.1 主动式安全拦阻装置结构

主动式安全拦阻装置主要由摩擦吸能单元、导向传力系统和机械臂组成。摩擦阻拦主要通过液压力控制摩擦力矩进行能量吸收, 可以适应质量较宽范围的阻拦场合。阻拦制动距离也可根据需要, 通过调整液压力大小进行灵活控制。

摩擦吸能单元包括摩擦制动器、带盘组件、制动器液压系统、收带系统等, 见图 8。使用刹车带作为传力部件, 通过调节制动器压力, 可满足不同的拦阻力和制动距离控制要求, 实现不同质量的船队在相同的制动距离被拦停下来。摩擦阻拦技术中核心部件是摩擦制动器。

导向传力系统用于实现刹车带从带盘上传递到智能推轮带缆桩上, 并保证刹车带的 90°翻转以及把索上的张力传递到能量吸收器上。导带轮组件包含导带轮、刹车带、索带连接器和阻拦索, 见图 9。

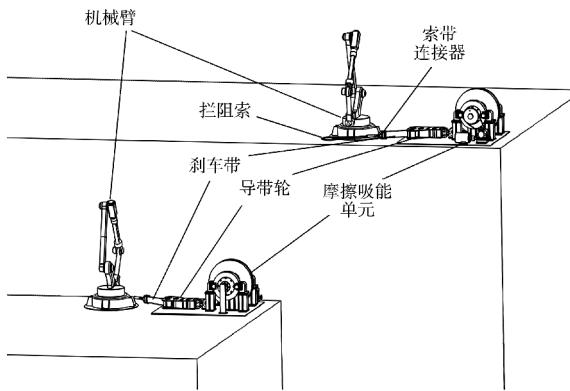


图 8 主动式安全拦阻装置组成



图 9 导向传力系统结构组成

机械臂主要用于抓取阻拦索套索, 在工作船到达预定位置时固定套索至带缆桩。选取现有工业化中成熟的机械臂产品, 非作业状态, 机械臂在闸墙以内待机, 进行作业时检测成组过闸单元到位后自动旋转 90°伸出至闸室, 进行套缆。

工作船牵引船队以 0.5 m/s 的航行速度进闸, 到达预定位置(图 2)后, 机械臂将阻拦索套索固定在推轮两侧带缆桩上, 工作船继续航行约 4 m 时缆索绷紧, 缆索上的拉力通过刹车带、导带轮传递至摩擦吸能单元, 由摩擦吸能单元上的摩擦制动器在制动距离内逐渐吸收掉船队的动能。闸室泄水时, 船舶随水位下降, 缆索自动脱离带缆桩, 最后通过摩擦吸能单元上的收带系统收回缆索和刹车带, 到位后具备下一次作业状态。

3.2 阻拦性能仿真分析

三峡船型(大长宽船型)尺寸 $130.0\text{ m} \times 16.3\text{ m}$ (长 \times 宽), 自身排水量约为 1500 t , 当船舶吃水达 4.3 m 时, 载货量约为 $5500\sim 6000\text{ t}$, 总排水量约为 $7000\sim 7500\text{ t}$ 。推轮设计尺寸 $20.0\text{ m} \times 32.0\text{ m}$ (长 \times 宽), 吃水小于 4.3 m , 排水量应小于 2752 t 。由此可知: 成组过闸船队最小排水量约为 8752 t ; 成组过闸船队最大排水量约为 32752 t 。考虑到某大型船闸过闸船舶吃水受三江引航道水深影响较大, 单闸次最大排水量按照 3 万 t 计算。

推轮在系缆位置挂缆后, 钢缆暂时处于松弛状态, 随着推轮向前移动, 钢缆瞬间收紧并受力, 形成纵向和垂向系缆角, 见图 10。 θ 为纵向系缆角, 即钢缆与水平轴投影夹角。随着钢缆不断伸长, 纵向系缆角 θ 变小, 系缆力沿纵向分力增大。

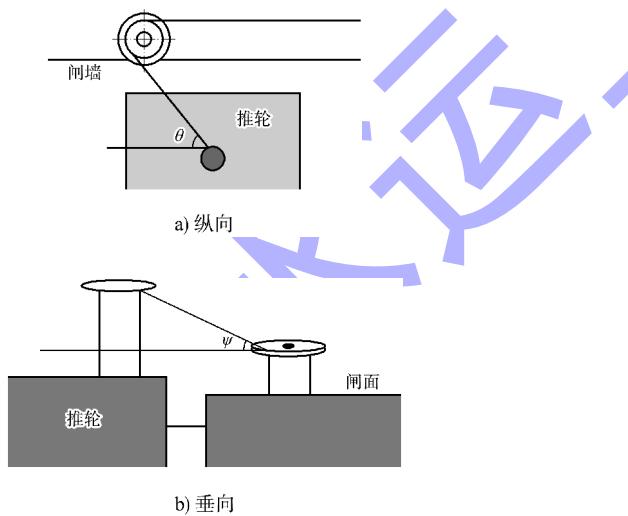


图 10 系缆角

某大型船闸枢纽上游最高通航水位为 66.5 m , 最低通航水位为 63.0 m 。上游水位存在 3.5 m 落差, 因此系缆过程存在垂向系缆角 ψ , 见图 10b)。闸面高程 70 m 、最低通航水位 63.0 m , 假设工作船(推轮)甲板高 64 m , 缆绳绷紧距离为 4 m , 根据夹角几何关系计算放大系数最大约为 1.8 , 即考虑垂向系缆角时, 总系缆力在纵向系缆力基础上放大 80% 。

根据安全拦阻装置在闸面的布局, 建立仿真模型代入相关参数, 进行性能仿真计算。

3.2.1 拦阻方案 1

满载排水量 3 万 t 成组过闸船队, 0.5 m/s 进闸航行速度, 输入跨距 36 m , 得出阻拦速度、阻拦距离和拦阻力分别与时间曲线, 见图 11。

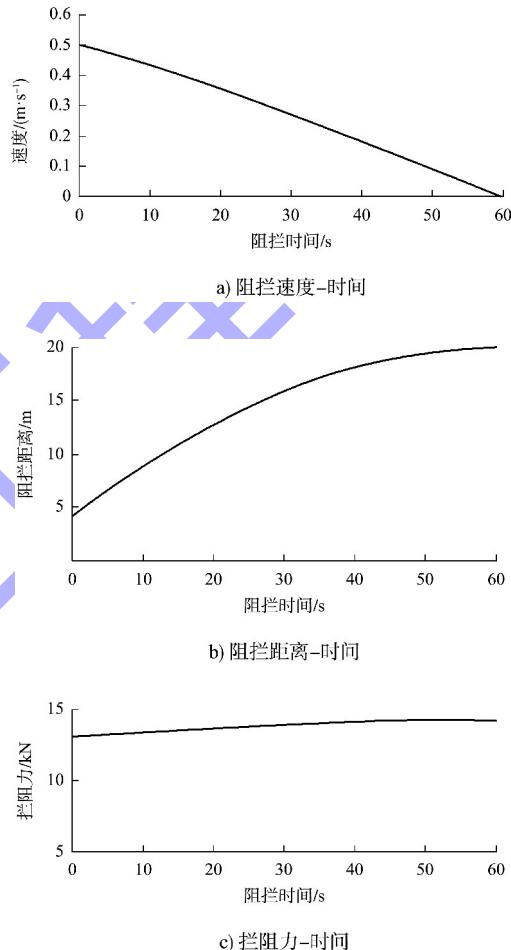


图 11 拦阻方案 1 曲线

由图 11 可知, 在 20 m 制动距离内, 通过约 150 kN 的拦阻力(本仿真为水平拦阻力, 不考虑垂向分力; 若考虑垂向分力, 总拦阻力在仿真结果基础上乘以 1.8), 可以将 3 万 t 船队在制动距离内从进闸航行速度 0.5 m/s 降至 0 m/s , 仿真结果表明拦阻方案具有可行性和有效性。

3.2.2 拦阻方案 2

排水量 8750 t 成组过闸船队, 0.5 m/s 进闸航行速度, 输入跨距 36 m , 得出速度、阻拦距离和拦阻力分别与时间的曲线, 见图 12。

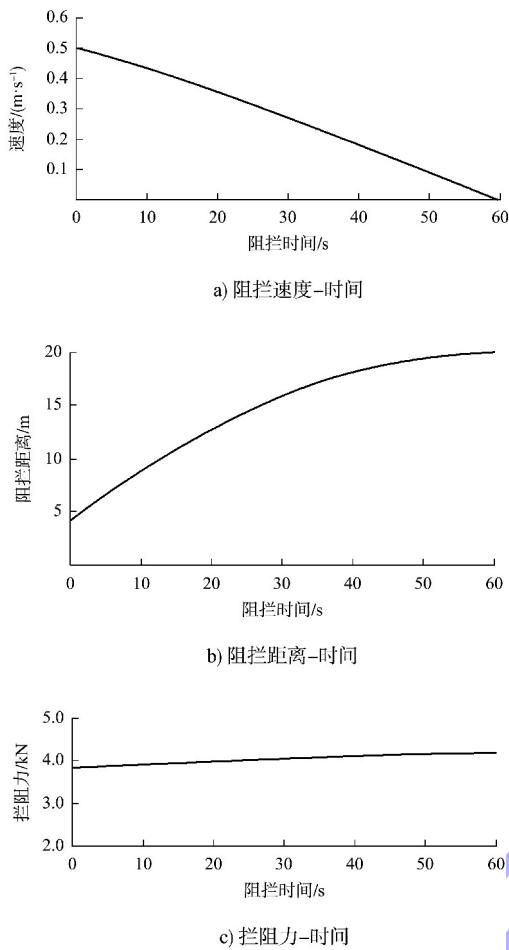


图 12 阻拦方案 2 曲线

由图 12 可知, 在 20 m 制动距离内, 通过约 50 kN 的拦阻力(本仿真为水平拦阻力, 不考虑垂向分力; 若考虑垂向分力, 总拦阻力在仿真结果基础上乘以放大系数 1.8), 可以将 8 750 t 船队在制动距离内从进闸航行速度 0.5 m/s 降至 0 m/s, 仿真结果表明阻拦方案具有可行性。

不同船队载质量可以通过调节刹车力矩的大小来实现相同的制动距离。

3.2.3 阻拦方案 3

满载排水量 3 万 t 成组过闸船队, 0.5 m/s 进闸航行速度, 输入跨距 36 m, 水平拦阻力 248 kN(带缆桩安全负荷 451 kN 的 55%, 根据 GB/T 554—2023《船舶和海上技术 船舶系泊和拖带设备 海船用钢质焊接带缆桩》规范规定^[12], 推轮带缆桩直径为 500 mm 时最大安全负荷为 451 kN)得出速度、阻拦距离和拦阻力与时间的曲线, 见图 13。

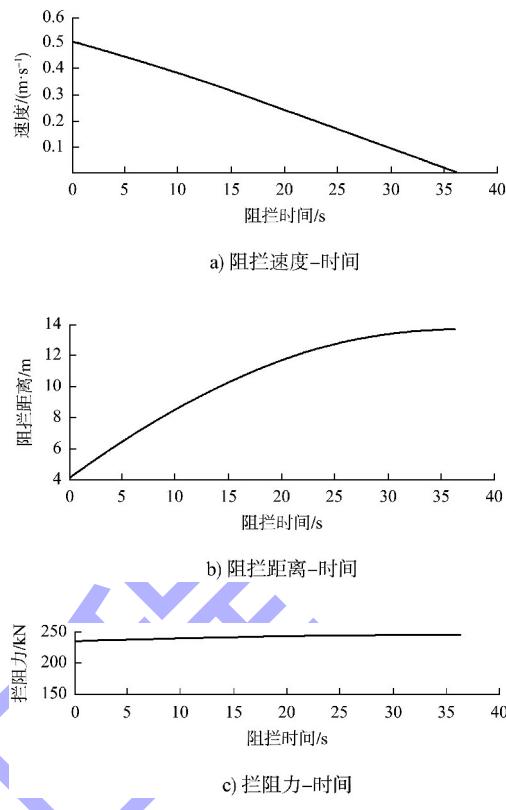


图 13 阻拦方案 3 曲线

由图 13 可知, 在 14 m 制动距离内, 通过约 248 kN 的拦阻力(本仿真为水平拦阻力, 不考虑垂向分力; 若考虑垂向分力, 总拦阻力在仿真结果基础上乘以放大系数 1.8), 可以将 3 万 t 船队在制动距离内从进闸航行速度 0.5 m/s 降至 0 m/s, 仿真结果满足目标要求。

通过仿真分析结果, 若不考虑垂向系缆角, 20 m 制动距离内, 通过约 150 kN(最大 143 kN)拦阻力可以把 3 万吨的船队从速度 0.5 m/s 降至 0 m/s。若考虑垂向系缆角, 则最大拦阻力放大 80%, 约为 257 kN。根据 GB/T 554—2008 带缆桩设计规范规定, 假设推轮采用直径 500 mm 带缆桩, 其最大安全负荷为 451 kN, 完全可承受 257 kN 拦阻力, 仿真结果表明阻拦方案具有可行性和有效性。

4 结论

- 主动式安全阻拦装置方案能满足 8 750 t(空载)~3 万 t(满载)载质量排水量范围的成组过闸船队, 0.5 m/s 进闸航行速度, 在 20 m 制动距

离内减速制动, 安全停船。

2) 建立的数值模型仿真分析结果可知: 通过约 257 kN 拦阻力可以将 3 万吨级船队从进闸航行初速度 0.5 m/s 降至 0 m/s。最大拦阻力小于工作船带缆桩最大安全负荷。

3) 该主动式安全拦阻方案为船舶成组捆绑过闸方式的实现提供了有效技术支撑, 可防止船舶失控撞击人字门, 减少船舶进出船闸时间, 提升内河枢纽既有船闸通过能力, 为适用于船闸通航领域的应急安全拦阻提供技术参考。

参考文献:

- [1] 李家熹. 多级船闸船舶过闸安全初探[J]. 水运工程, 2003(4): 46-49.
- [2] 肖波, 李军. 船桥碰撞中桥墩防撞装置性能研究[J]. 水运工程, 2010(3): 17-20.
- [3] 饶建江, 胡涛勇, 任涛, 等. 苏州河河口水闸水上安全防撞设施设计[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(S1): 79-81.
- [4] 夏春荣. 基于 LSTM 的内河船闸主动防撞系统研究[J]. 中国水运(上半月), 2019(12): 56-59.
- [5] 张杰, 罗宁. 葛洲坝 1 号船闸增设防撞安全设施的探讨[J]. 水运工程, 2017(7): 145-148, 154.
- [6] 柳刚, 聂宏, 任志勇, 等. 舰载型拦阻装置拦阻性能分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(9): 1244-1249, 1255.
- [7] 王文云. 一种液压拦阻装置的设计与研究[J]. 液压与气动, 2016(5): 98-101.
- [8] 张道磊. 拦阻系统的仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [9] 杨一栋. 舰载飞机着舰引导与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [10] 谢礼猛. 基于 DSRC 车载通信的车辆防撞预警研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
- [11] 张丽伟. 对航母舰载机“阻拦索”的初步认识[J]. 物理教学探讨, 2014, 32(4): 56-58.
- [12] 江南造船(集团)有限责任公司, 中国船舶及海洋工程设计研究院. 船舶和海上技术 船舶系泊和拖带设备 海船用钢质焊接带缆桩: GB/T 554—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

(本文编辑 赵娟)

- (上接第 113 页)
- [5] WEBBER N B, GREATED C A. An investigation of flow behaviour at the junction of rectangular channels [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1966, 34(3): 321-334.
 - [6] MOSLEY M P. An experimental study of channel confluences [J]. The journal of geology, 1976, 84 (5): 535-562.
 - [7] 甘富万, 黄宇明, 张华国, 等. 河流支流入汇口处水利工程防洪设计水位研究: 以珠江流域西江桂平航运枢纽为例 [J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 198-206.
 - [8] 胡朝阳, 王新强, 许立, 等. 大樟溪入汇对乌龙江洪水动力影响研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(3): 73-81.
 - [9] 倪晋仁, 王光谦, 张国生. 交汇河段水力计算探讨 [J]. 水力学报, 1992 (7): 51-56.
 - [10] 徐孝平, 彭文启, 李炜. 直角交汇河段分离区流场的几何特性研究 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1993 (6): 638-645.
 - [11] 刘建新, 程雪华. 山区河流支干流汇流特性研究 [J]. 水运工程, 1996(7): 23-26.
 - [12] 罗保平. 汇流河段干支流分界线的实验研究 [J]. 水运工程, 1994(11): 13-16.
 - [13] 赵升伟, 茅泽育, 罗日升, 等. 等宽明渠交汇水流数值计算 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005(5): 494-499.
 - [14] 陈月华. 干支流交汇河段水流特性计算研究 [D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007.
 - [15] 谭柱林. 直角交汇明渠水流二维数值模拟 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
 - [16] 杨泽一. 干支流交汇口水力特性三维数值模拟研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
 - [17] 茅泽育, 赵升伟, 张磊, 等. 明渠交汇口三维水力特性试验研究 [J]. 水利学报, 2004 (2): 1-7.
 - [18] 郭维东, 王晓刚, 曹继文, 等.“Y”型汇流口水流水力特性试验研究 [J]. 水电能源科学, 2005, (3): 53-56, 92.
 - [19] 广西自治区水文总站. 广西壮族自治区暴雨径流查算图表 [R]. 南宁: 广西自治区水文总站, 1984.
 - [20] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 运河通航标准: JTS 180-2—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

(本文编辑 王璁)