



引江济淮施工期派河口节制闸临时通航孔 通航可行性研究*

刘艳秋, 李 建

(安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘要: 通航航道新建航运枢纽或单线船闸大修往往需要断航施工, 在船闸相配套的节制闸设置通航闸孔可作为船闸建设或大修时一种保持通航的方案。以派河口节制闸为例, 为满足派河口船闸施工期间既有航运的延续, 拟开通节制闸中孔作为临时通航孔, 闸孔净宽 13.3 m。为研究论证临时通航孔通航的可行性, 采用数值模拟分析计算船舶碰撞力并验算闸墩抗撞性能, 再采用实船试验及船舶操纵模拟试验, 提出临时通航孔可通航船舶尺寸和过闸控制条件要求。结果表明, 在较小的风速、流速条件下, 节制闸临时通航孔可供型宽在 13 m 以下的船舶在白天慢速谨慎通过; 风力在 4 级以上以及流速大于 0.5 m/s 时禁航。

关键词: 节制闸; 临时通航孔; 模拟分析; 实船试验; 船舶操纵模拟试验

中图分类号: U612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0138-08

Navigation feasibility by temporary navigation hole of Paihekou regulating sluice during construction period of the Yangtze River to Huaihe River diversion project

LIU Yanqiu, LI Jian

(Anhui Traffic Survey & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230001, China)

Abstract: The construction of new shipping hub or the overhaul of single-line ship lock on navigable waterway often requires the suspension of navigation for construction. Setting of navigation hole in the sluice that matches the ship lock can be used as a traffic maintenance plan during the construction or overhaul of the ship lock. Taking the Paihekou regulating sluice project as an example, we propose a plan of opening the middle hole of the regulating sluice as a temporary navigation hole with a clear width of 13.3 m to meet the continuation of the existing shipping during the construction of Paihekou ship lock. In order to study the feasibility of navigation by the temporary navigation hole, we analyze and calculate the ship impact force by numerical simulation, check the anti-collision performance of the sluice, and propose the ship size and ship lock control conditions that can be navigated through the temporary navigation hole by means of full-scale ship trial and ship maneuvering simulation test. The results show that under conditions of low wind speed and flow velocity, the temporary navigation hole of the regulating sluice allows ships with a width of less than 13 m to pass through the ship lock slowly and carefully during the day. Navigation is prohibited when the wind force is above level 4 and the flow velocity is faster than 0.5 m/s.

Keywords: regulating sluice; temporary navigation hole; simulation analysis; full-scale ship trial; ship maneuvering simulation test

收稿日期: 2024-11-03

*基金项目: 安徽省交通运输重点科技项目(2021-KJQD-011); 安徽省交通勘察设计院有限公司科研项目(KY200041HF)

作者简介: 刘艳秋(1988—), 女, 高级工程师, 从事航道整治工程及桥梁防船撞设计工作。

通航航道新建航运枢纽或单线船闸大修往往需要断航施工,对航运造成影响。参考江苏、浙江、安徽等地的实际案例^[1-5],在船闸相配套的节制闸设置通航闸孔可作为船闸建设或大修时一种保持通航的方案^[6-8]。

引江济淮派河口枢纽为避免船闸建设期间断航,拟通过开通节制闸临时通航孔保障现状航运延续。为验证节制闸临时通航孔通航的可行性,先后开展了通航条件影响评价、施工安全维护保障方案、设防船撞力、实船试验及船舶操纵模拟试验等专题研究^[9-10],对闸墩进行抗撞能力验算,并通过实船试验及船舶操纵模拟试验论证实际可通航船型及限制条件。

1 工程概况

引江济淮工程沟通长江、淮河两大水系,集供水、航运、生态等巨大效益为一体,是当今标志性的重大调水工程和当代综合性的水资源配置

工程。2014年其被列入国务院要求加快推进的172项重大水利工程之一。引江济淮工程自南向北划分为引江济巢、江淮沟通、江水北送三大段,共设八大节制枢纽,形成Ⅲ级、Ⅱ级航道共354.9 km。其中,江淮沟通段航道在巢湖口门新建派河口枢纽沟通巢湖,枢纽主要包括抽水泵站、节制闸、船闸等,船闸占据主河道位置,节制闸布置在其右堤处。施工顺序为:利用老河道通航,新建节制闸下部结构;利用节制闸下部结构作为临时通航孔及导流明渠,封堵老河道新建船闸;待船闸能过船后,完成节制闸工程。派河口节制闸的位置见图1。

节制闸共5孔,以中孔作为临时通航孔,宽度14 m,通航净宽13.3 m,其余4个边孔净宽9.5 m。为保障施工期节制闸临时通航孔通航安全,论证开通的代表船型及条件,开展通航可行性研究。



图1 派河口节制闸的位置

Fig. 1 Location of Paihekou regulating sluice

2 临时通航孔主要功能及开通原则

2.1 主要功能

船闸施工期间,为保障合肥港熔安动力码头

柴油机的出运及返厂维修保养需求,需要维持航道内船舶航行畅通。节制闸与巢湖、熔安动力码头位置关系见图2。



图 2 节制闸与巢湖、熔安动力码头位置关系

Fig. 2 Location relationship of regulating sluice, Chaohu Lake, and Rongan Power Terminal

2.2 开通原则

- 1) 仅作为船闸施工期间临时保通措施，待船闸满足通航条件后不再通航。
- 2) 仅平水期开通闸使用，洪水期或其他不适宜通航时段禁航。
- 3) 鉴于临时通航孔净宽 13.3 m，上下游均有锚地，临时通航孔仅为单向通航，船舶过闸前停靠锚地等待指令过闸。

3 研究方法

针对拟通航船型，计算节制闸墩抗撞能力，采用实船试验及船舶操纵模拟试验验证拟通航船型通过节制闸孔的可能性，并提出通航限制条件。

4 施工期拟通航船型

4.1 现状船型

经对老河道沿线航运调查可知，靠泊船舶为 1 000~2 000 t，船长 50~70 m，船宽 10~13 m，最大吃水约 3.5 m，年船舶流量在 1 000 艘次左右，日均约 4 艘次。

4.2 拟论证通航船型

节制闸临时通航孔开通时间为船闸施工期，此时引江济淮航道尚未开通，拟通航船型仅为满足当时的通航需求。拟开通船型及尺度见表 1。

表 1 拟通航船型及尺度

Tab. 1 Type and dimension of proposed navigable ships

船舶编号	船舶类型	船长/m	船宽/m	吃水/m	用途
1	1 500 t 货船	74.3	13.00	3.40	集装箱船
2	1 000 t 货船	66.0	11.76	3.49	散货船
3	1 000 t 货船	58.5	11.00	3.10	多用途船
4	500 t 货船	39.9	8.00	3.00	设备船

5 节制闸抗撞性能分析

5.1 撞击风险分析

节制闸距上游最近的码头约 10.5 km，其间航道多弯。航道内现状船舶流量小，且均为往返熔安动力码头的船舶，在采取风险宣贯及设立警示标牌提醒后，船舶经临时航道抵达节制闸前有足够的时间完成减速操作，慢速过闸，由操纵失误或船舶故障而撞击节制闸的概率也很小。但由于临时通航孔口门净宽仅 13.3 m，存在因驾驶不慎而导致船舶刚蹭通航孔壁的风险。

5.2 撞击参数分析

5.2.1 设防代表船型

经分析搜集到的在航船舶资料，95% 保证率对应载的质量为 1 050 t。保守考虑，设防代表船型为 1 500 t 货船。

5.2.2 船速

根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[11]第 6.1.5.2 条，机动单船单向进闸平均速度 0.8 m/s，单向出闸平均速度 1.0 m/s。船闸进出闸时船舶行驶在一段封闭的狭窄水道内，水体受到船舶兴波和阻塞作用，水面下降，形成水位差和水面坡降，

船舶随之产生纵倾和下沉, 尤其船舶出厢时纵倾和下沉比进厢时更严重, 甚至造成船舶碰底, 危及航行安全。节制闸通航孔两端未封闭, 上下游均为广阔水域, 船舶兴波和阻塞作用小, 故船舶操纵性优于船舶进出船闸。为安全考虑, 船舶通过节制闸时的限制船速取船舶出闸船速, 为 1.0 m/s。

5.2.3 撞击偏角

因派河航道无航行偏角的统计资料, 参考《安庆长江公路大桥设防船撞力研究报告》^[12]对船舶自动识别系统(AIS)数据的分析结论, 经专家咨

询并考虑到船舶通过临时通航孔前有充分时间减速和调整航向, 保守取计算撞击偏角为 10°。

5.3 船撞力计算

5.3.1 撞击工况

研究选取了载质量为 500、1 000、1 500 t 三种船型, 不同船速不同撞击角度撞击节制闸墩不同部位进行分析, 最终确定工况为 1 500 t 船舶在最高通航水位时以船速 1 m/s、航行偏角 10°侧撞闸墙中部(工况 1)、闸墙前部(工况 2), 见图 3。

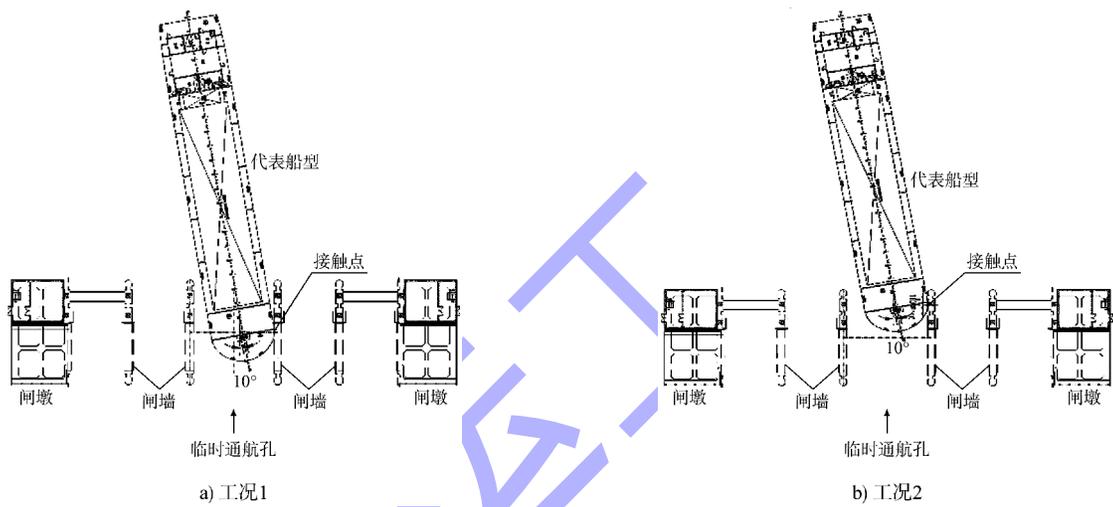


图 3 确定的工况

Fig. 3 Determined working conditions

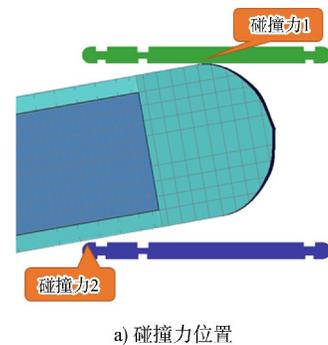
5.3.2 船撞力计算

参考船舶碰撞桥梁仿真计算的文献^[13-14], 采用有限元软件建立船舶和节制闸的有限元模型, 动态模拟船撞节制闸的过程。载质量为 1 500 t 的船舶总质量为 2 240.27 t, 载货采用分散配置集中质量的配重方法, 在整个货舱区域进行了配重, 整个船体全部采用壳单元精细化建模。各工况碰撞力计算参数及结果见表 2, 碰撞力位置及曲线见图 4、5。

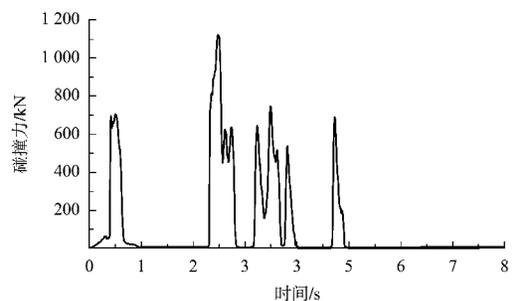
表 2 各工况撞击力计算参数及结果

Tab. 2 Calculation parameters and results of impact force under each working condition

工况	船速/ (m·s ⁻¹)	撞击角度 θ/(°)	撞击 部位	最大碰 撞力 1/kN	最大碰 撞力 2/kN
1	1	10	闸墙中部	1 121.49	848.58
2	1	10	闸墙前部	706.05	-



a) 碰撞力位置



b) 碰撞力1曲线

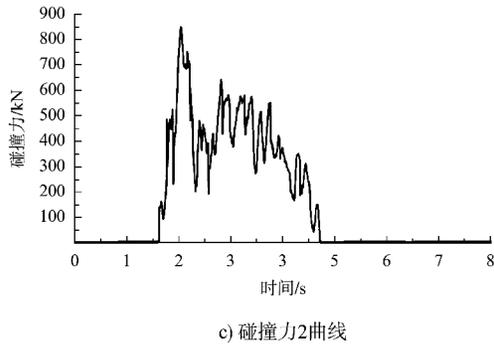


图 4 工况 1 的碰撞力 1 和 2 位置及曲线
Fig. 4 Position and curves of impact force 1 and 2 under working condition 1

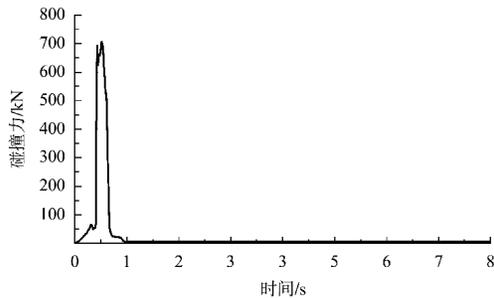


图 5 工况 2 的碰撞力曲线
Fig. 5 Impact force curve under working condition 2

5.4 节制闸抗撞性能分析

临时通航孔闸室净宽 14 m, 墩墙厚 1.2 m, 大底板宽 19.8 m, 顺水流向长 18 m, 墩墙顶至地板顶面高 10.7 m, 通过建立有限元模型进行复核, 墩墙及底板结构及配筋满足抗撞性能要求。模型及应力云图见图 6。

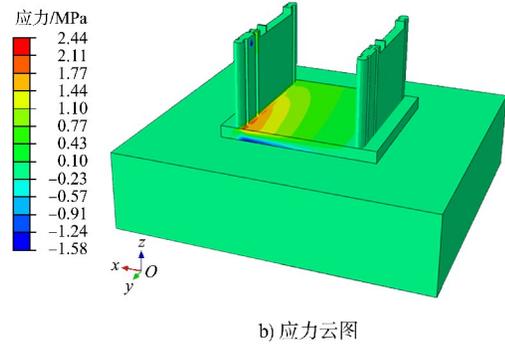
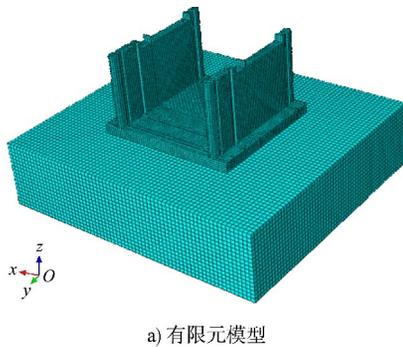


图 6 节制闸通航孔有限元模型及应力云图
Fig. 6 Finite element model and stress nephogram of regulating sluice navigation hole

6 实船试验

6.1 试验准备

针对试验所处的外部条件, 船员依据自身实际操纵技巧由船闸下游往上游方向操船过闸, 待过闸后, 选择合适水域掉头, 再次由上游往下游方向过闸。对试验过程中船位、船速、主机功率等进行记录, 获得有关船舶操纵和船舶运动的大量数据, 然后对试验结果进行分析, 从而总结船舶操纵规律、评价船舶通过节制闸的安全性。为验证不同船舶通过节制闸的情况, 共设置 3 组试验, 试验过程中无其他船舶干扰, 船舶技术状况良好。

6.2 试验过程

限于篇幅, 仅描述 1 号船的试验过程。

1) 船舶过闸前。船舶在节制闸下游约 600 m 处调正船身, 与航道中心线基本处于平齐状态, 因试验过程中存在 3 级西北风影响, 在靠近闸门处时, 将船身调到左岸高位处。驶入节制闸通航孔见图 7a)。

2) 船舶靠近闸门时。在调正船身后驶向闸门, 驶近过程中不断调整船舵, 在接近闸门时, 由于风的影响, 船尾仍向下风偏离闸门有半个船宽以上的距离。

3) 船舶过闸时。船首进入闸门后, 不断用船

舵将船身调直, 但由于船舶两侧与闸壁间隙过小, 船舶与闸壁存在一定的摩擦。

4) 船舶过闸后。船舶过闸后, 沿着主航道正常行驶至合适区域进行掉头, 从船闸上游返回再次过闸。驶出节制闸通航孔见图 7b)。



a) 驶入



b) 驶出

图 7 1 号船驶入和驶出节制闸通航孔
Fig. 7 Ship 1 entering and leaving navigation hole of regulating sluice

6.3 试验分析

在船舶过闸前, 船舶一直保持较为平稳的速度航行, 在 540 s 时船舶逐步靠近节制闸, 速度逐步放慢, 进闸后, 船舶速度进一步降低, 在 580 s 时, 船舶速度降至最低 0.07 m/s, 船舶由于与闸壁发生摩擦, 增加船舶过闸时航行阻力, 从而导致速度下降。船舶过闸船速见图 8。

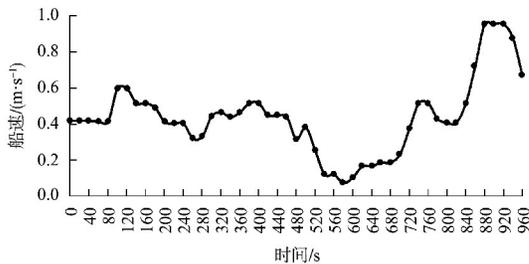


图 8 1 号船上行过闸的速度时程曲线
Fig. 8 Velocity-time curve of ship 1 driven upstream passing through lock

在船舶过闸过程中, 目测的船舶两侧与闸壁间距见表 3。闸门净宽 13.3 m, 1 号船最大宽度 13.0 m, 因此船舶几乎是紧挨着两侧闸壁通过节制闸。由于“牛腿”及风的影响, 船尾有碰擦闸壁和“牛腿”的情况。

表 3 船舶与闸壁间距
Tab. 3 Distances between ships and sluice walls

时间/s	船舶左舷与闸壁间距/m	船舶右舷与闸壁间距/m
540	<0.2	0.5
560	<0.2	<0.3
580	<0.2	0.2
600	<0.2	<0.3
620	<0.2	<0.3
640	<0.2	<0.3

6.4 小结

1) 1 号船在上、下行过闸过程中, 虽然操船人员凭借丰富的经验和良好的技艺保证船身平稳通过节制闸, 但由于船舶宽度几乎与节制闸临时通航孔通航宽度相同, 船舶几乎紧挨着两侧闸壁通过节制闸, 船舶与节制闸摩擦的风险较大。

2) 2 号船在上、下行过闸过程中, 船身最大宽度与节制闸临时通航孔宽度相差约 1.2 m, 留有一定的操作空间, 但因操船人员经验的欠缺和技艺的不娴熟, 在西北风 3 级和水流的影响下, 船舶过闸过程中船身与闸室频繁摩擦, 船舶过节制闸风险较大。

3) 3 号船在上、下行过闸过程中, 船舶始终与两侧闸壁保持 0.5 m 以上距离, 即使在东北风 4 级情况下, 操船人员仍能凭借丰富的经验和良好的技艺快速且安全地通过节制闸, 船舶过节制闸风险较小。

7 船舶操纵模拟试验

7.1 通航模拟试验方案

以宽度为 13 m 的超宽船型 1 500 t 船舶作为极限状况试验代表船型, 同时以 11 m 船宽的 1 000 t 船舶进行模拟。

选取 SE、NW 两个风向及对应的 4、6 级风力强度作为试验风要素；流场选取静水、中水和洪水 3 种情况；试验船舶选择满载（顺流）、空载（顶流）通航两种情况，共 64 种工况。

7.2 模拟结果

1) 超宽船型 1 500 t 货船仅在运用良好操船技艺、适当航速和风流压差条件下通过节制闸，但与节制闸的闸墩之间留有的安全间距很小，且有多次失败的试验情况，存在较大的安全隐患，建议对该船型限制通航；1 000 t 散货船能以相对较安全的航速通航节制闸，试验成功率较前者有显著提高，操船人员运用良好技艺，谨慎驾驶，在满足一定条件下能通航节制闸。

2) 通航宽度能够满足 3 种试验代表船型的通航要求。船舶在通过上下游引航道时，可以利用航道试验宽度调整适当的船位以便能顺利通航节制闸，试验船型在限定工况下能顺利过节制闸。

3) 船舶过闸过程中，风、流等自然因素对船舶过节制闸影响较大。船舶过闸过程中应明确限制作业条件，确保船舶过节制闸的通航安全。

8 结论

1) 实船试验过闸的船速，与闸墩抗撞验算所取船速基本一致。在人为管控的前提下，抗撞计算工况合理。

2) 根据试验结果，船舶越宽风险越大，在较小的风速、流速条件下，节制闸临时通航孔可供型宽 13 m 以下船舶在白天慢速谨慎通过。但最大船宽为 13 m 的船舶通过节制闸操纵困难，建议不允许 13 m 以上船舶通航，且最大宽度在 11~13 m 的船舶实行“一船一方案”通行模式。

3) 船舶驶入试验性航段前，须在临时停泊区限定的位置停靠，向联系管理单位报告船位及船舶参数，得到允许后，方可通行，且风力 4 级以上以及流速大于 0.5 m/s 时禁航。

参考文献：

- [1] 朱茂根, 田芝龙, 李建民. 通航节制闸事故的预防及除险[J]. 江苏水利科技, 1997(2): 61-63.
ZHU M G, TIAN Z L, LI J M. Prevention and removal of dangers of navigation regulating sluice [J]. Jiangsu water resources science and technology, 1997(2): 61-63.
- [2] 王西青. 平原水闸闸孔通航设计浅析[J]. 水利技术监督, 2022(8): 145-147, 239.
WANG X Q. A brief analysis of navigable design of plain water sluice hole [J]. Technical supervision in water resources, 2022(8): 145-147, 239.
- [3] 王重工. 关于太浦闸设置套闸必要性及其尺度确定的分析[J]. 中国水利, 2016(6): 36-37, 26.
WANG Z G. Analysis of the necessity of setting up a sluice gate at Taipu and the determination of its size [J]. China water resources, 2016(6): 36-37, 26.
- [4] 杨保恩, 成志超, 李春保. 关于淮河节制闸扩建方案的比选[J]. 治淮, 2019(7): 23-24.
YANG B E, CHENG Z C, LI C B. Comparison of expansion scheme of Suihe River regulating sluice [J]. Harnessing the Huaihe River, 2019(7): 23-24.
- [5] 许映建, 石磊. 海门市某河道工程套闸规模之通航要求解析[J]. 水利技术监督, 2016(2): 86-88.
XU Y J, SHI L. Analysis of navigation requirements for sluice scale of a certain river project in Haimen City [J]. Technical supervision in water resources, 2016(2): 86-88.
- [6] 于忠涛, 姜兴良, 吕小龙. 具备开通闸条件的通航节制闸建设方案[J]. 水运工程, 2019(10): 166-170, 175.
YU Z T, JIANG X L, LYU X L. Construction plan of navigation regulation lock with opening conditions [J]. Port & waterway engineering, 2019(10): 166-170, 175.
- [7] 王召兵, 徐奎, 段金宏, 等. 橇为枢纽施工期船闸低水通航条件研究[J]. 水运工程, 2021(12): 33-37.
WANG Z B, XU K, DUAN J H, et al. Navigation conditions of ship lock under dry season during construction of Qianwei junction [J]. Port & waterway engineering, 2021(12): 33-37.
- [8] 姜兴良, 周广群, 袁淑文. 具备长期开通闸条件的船闸

- 设计方案[J]. 水运工程, 2015(12): 104-107.
- JIANG X L, ZHOU G Q, YUAN S W. Design scheme of long-term opened shiplock [J]. Port & waterway engineering, 2015(12): 104-107.
- [9] 刘艳秋, 李建. 派河口枢纽工程节制闸设防船撞力研究报告[R]. 合肥: 安徽省交通勘察设计院有限公司, 2018.
- LIU Y Q, LI J. The report on the anti-ship impact force of the sluice gate of the Paihekou hub project [R]. Hefei: Anhui Traffic Survey & Design Institute Co., Ltd., 2018.
- [10] 陈宏权, 张进峰, 谢澄, 等. 派河口枢纽施工期临时应急通航孔实船及船舶操纵模拟实验通航研究[R]. 武汉: 武汉海之澄科技有限公司, 2020.
- CHEN H Q, ZHANG J F, XIE C, et al. Real ship and ship maneuvering simulation experiments and navigation research for the temporary emergency navigation hole of the Paihekou hub during construction period [R]. Wuhan: Wuhan Haizhicheng Technology Co., Ltd., 2020.
- [11] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [12] 李建, 刘艳秋. 安庆长江公路大桥设防船撞力研究报告[R]. 安徽: 安徽省交通勘察设计院有限公司, 2018.
- LI J, LIU Y Q. Research report on anti-ship impact force of the Yangtze River highway bridge in Anqing [R]. Hefei: Anhui Traffic Survey & Design Institute Co., Ltd., 2018.
- [13] 李磊, 张兆德. 船舶与桥墩碰撞的数值模拟[J]. 船海工程, 2011(5): 133-136.
- LI L, ZHANG Z D. Dynamic simulation of collision of ship and bridge pier [J]. Ship & ocean engineering, 2011(5): 133-136.
- [14] 刘艳秋, 李建. 内河航道桥梁船撞时船体最大变形量研究[J]. 水运工程, 2018(9): 119-125.
- LIU Y Q, LI J. Maximum deformation of ship in ship-bridge collision in inland waterway [J]. Port & waterway engineering, 2018(9): 119-125.
- (本文编辑 王璁)
-
- (上接第66页)
- [16] 周上博, 白兴兰, 谢强. 日本疏浚泥管中混合固化处理技术研究[J]. 中国水运(下半月), 2014(18): 192-194, 196.
- ZHOU S B, BAI X L, XIE Q. Study on mixed solidification treatment technology in dredged mud pipes in Japan [J]. China water transport (the second half of the month), 2014(18): 192-194, 196.
- [17] 高若沉, 杨尊儒, 白兴兰, 等. 基于CFD疏浚泥管中混合固化的数值仿真研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2016, 35(1): 60-64.
- GAO R C, YANG Z R, BAI X L, et al. Study on the numerical simulation of solidification for dredged spoils in pipeline mixing system based on CFD [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (natural science), 2016, 35(1): 60-64.
- [18] 白兴兰, 杨尊儒, 魏东泽. 航道疏浚淤泥管中固化处理试验研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(5): 134-137.
- BAI X L, YANG Z R, WEI D Z. Experimental study on in-pipe solidification of sediment dredged from waterway [J]. Water resources and hydropower engineering, 2016, 47(5): 134-137.
- [19] 周上博. 海洋疏浚泥固化试验系统研制及数值仿真[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2015.
- ZHOU S B. Study on the test system of in-pipe mixing process to solidify the dredged marine sediments and numerical simulation by CFD [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2015.
- [20] 朱桂华, 张春成, 邓玲, 等. Kenics型静态管道混合器内污泥药剂混合最佳药剂流速[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(10): 1164-1167.
- ZHU G H, ZHANG C C, DENG L, et al. Best drug velocity for the mixing of sludge and drug in Kenics static mixer [J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 2014, 37(10): 1164-1167.
- (本文编辑 王传瑜)