

淮安水利枢纽通航渡槽船舶航行三维数模分析



江 涛¹, 王立锋², 于忠涛¹, 付旭辉³

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019;
3. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 淮安水利枢纽二期工程需要增建渡槽, 与一期渡槽形成长距离通航渡槽后可能对通航条件造成影响。针对这一问题, 建立了三维数学模型, 选择最不利船型组合情况下的两种工况, 模拟分析二期渡槽建设前后的渡槽通航条件, 即上下行船舶对开工况、是否布置消能格栅工况。得出结论: 1) 在不布置消能格栅的情况下二期渡槽建成后波高增加约 20%, 在增加消能格栅后波高降低至 7%; 2) 横流在 0.05~0.20 m/s、弗汝德数远小于 1、船首偏角在 0.64°~1.74°, 与现状运行情况变化不大; 3) 一、二期组成的长渡槽通航条件良好, 不会对船舶航行造成不良影响。

关键词: 通航渡槽; 三维数值模拟; 淮安水利枢纽; 通航安全; 波高; 横流

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0125-06

Three-dimensional mathematical model analysis of ship navigation in the navigable aqueduct of Huai'an Water Control Project

JIANG Tao¹, WANG Li-feng², YU Zhong-tao¹, FU Xu-hui³

(1.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
2.JSTI Group, Nanjing 210017, China; 3.Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The second phase of the Huai'an Water Control Project needs to build an additional aqueduct, which may affect the navigation conditions after forming a long-distance navigation aqueduct with the first phase aqueduct. Aiming at the problem, a three-dimensional mathematical model is established, and the navigation conditions of the aqueduct before and after the construction of the second phase aqueduct are simulated and analyzed by selecting two operating conditions under the most unfavorable combination of ship types. They are the operating conditions of the upstream and downstream ships in the opposite direction, and the energy dissipating grid is arranged or not. Conclusions are drawn: 1) The wave height after the completion of the second-stage aqueduct is increased by about 20% without the energy dissipating grid, and the wave height is reduced to 7% after the energy dissipating grid is added. 2) The cross flow is at 0.05~0.20 m/s, and the Froude number is far less than 1. The bow deflection angle is 0.64°~1.74°. They have little change from the current operating conditions. 3) The long aqueduct composed of the first and second phases has good navigation conditions and will not cause adverse effects on the navigation of the ship.

Keywords: navigable aqueduct; three-dimensional numerical simulation; Huai'an Water Control Project; navigation safety; wave height; cross flow

在运河与天然深谷或河流交叉时, 通常建运河桥跨越, 即通航渡槽。目前国内已建成的通航渡槽有淮安枢纽渡槽(80 m 口宽)和滨海枢纽渡

槽(60 m 口宽)等, 其结构为上部通航渡槽、下部泄水涵洞; 在建的引江济淮淠河总干渠渡槽(2×16 m 口宽)为 110 m 主跨的桁架式梁拱组合

结构渡槽。

通航渡槽研究大部分以结构分析为主。孙精石^[1-2]通过分析《内河通航标准》，并结合特殊限制性航道——中间渠道和渡槽的运行特点，推求出其宽度和水深的计算方法和结果。吴志刚等^[3]通过理论分析和模型试验等手段，对钢渡槽的荷载特性、钢桁架式桥与槽身的受力机理、槽身内部流体流固耦合效应、考虑渡槽液体流固耦合的抗震性能、槽内与槽下船舶的撞击和伸缩缝止水设计等关键技术进行了研究，并针对关键点提出引江济淮淠河总干渠渡槽工程解决方案。郑宝友等^[4]在某升船机中间渠道和渡槽通航条件模型上进行船周回流速度与船体下沉的试验，提出船舶在限制性航道中交错运行两船相遇时周围的水流相互产生影响，两船周围的回流速度与单向航行是有区别的，水流十分复杂，有待继续研究。李焱等^[5]通过研究构皮滩升船机提出单线中间渠道(含通航隧洞和渡槽)尺度的确定应综合考虑船舶航速、航行阻力、船舶下沉量和水位波动等，并针对中间渠道开展了系列试验研究，提出不同航速条件下的单线中间渠道尺度方案和航行参数值。上述学者对通航渡槽做了大量的计算分析和试验工作，推动了通航渡槽的研究，但大部分通航渡槽的船舶尺度较小，渡槽宽度和水深也较小，随着船舶大型化发展和航道扩等升级，以往的研究尚存在一定局限，特别是在长距离、大尺度通航渡槽两船对遇时的航行条件，如：波高、横流、弗汝德数、船首偏角等方面研究甚少。

为分析长距离、大尺度通航渡槽的航行条件，本文以淮安水利枢纽通航渡槽为例，建立三维数值模型，选择最不利船型组合情况下两种工况(上下行船舶对开工况、是否布置消能格栅工况)，模拟二期渡槽建设前后的渡槽航行条件。

1 工程概况

1.1 淮安水利枢纽一期地涵现状

淮安水利枢纽一期工程于 2000 年底开工，2003 年 7 月提前通水泄洪，同年 10 月通过竣工验

收。一期地涵轴线与淮河入海水道中心线交角 77°，平面呈平行四边形，为上槽下洞结构，一期设计泄洪流量为 2 270 m³/s。上部为京杭运河通航渡槽，为 U 形断面，槽宽 80 m，设计通航水深 5 m，渡槽断面系数为 9.0；下部涵洞用于淮河入海水道泄洪，共 15 孔，孔径 6.8 m×8.0 m，顺水流方向长 108.6 m，垂直水流方向长 122.6 m，一期地涵断面见图 1。

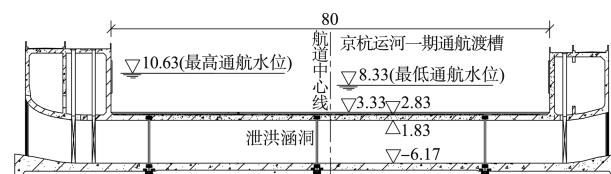


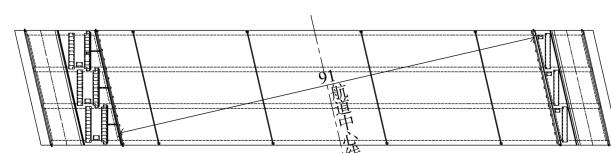
图 1 淮安枢纽一期地涵断面 (单位: m)

1.2 二期渡槽相关设计参数

淮安水利枢纽二期工程在一期地涵北侧预留的涵址上，地涵轴线与淮河入海水道中心线交角 77°，平面呈平行四边形，为上槽下洞结构，二期设计泄洪流量为 4 630 m³/s。上部为京杭运河二期通航渡槽，为 U 形断面，槽宽 91 m，设计通航水深 5 m，渡槽断面系数为 10.3；一、二期立交地涵间垂直水流方向设 60 m 连接段，采用两侧扶壁挡墙组成的 U 形断面，槽宽 80~91 m，设计通航水深 5 m，断面系数为 9.0~10.3；下部涵洞用于淮河入海水道泄洪，共 30 孔，孔径 6.8 m×8.0 m，顺水流方向长 122.6 m，垂直水流方向长 244.6 m，一、二期地涵和连接段垂直水流方向总长 427.2 m，二期地涵见图 2。



a) 平面



b) 立面

图 2 淮安枢纽二期地涵 (单位: m)

根据苏南运河公式计算得出渡槽 2025、2035、2045 年单向船舶通过能力分别为 2.34 亿、2.72 亿、3.18 亿 t, 满足京杭运河现状和远期规划的运量需求。

拟建二期渡槽位置的现状航道较宽, 随着二期渡槽建成, 将缩窄通航断面, 尽管二期渡槽设计尺度及航道断面系数等方面均满足航道设计要求, 考虑到二期渡槽建成后, 与一期渡槽共同形成 427.2 m 的渡槽, 存在船舶在渡槽内通行时形成船行波、航偏角、横流等不利因素。为研究船舶航行对通航安全的影响, 开展三维数学模型研究。

2 数学模型

2.1 计算工况

2.1.1 水流流向

正常工况下水流流向为自北向南, 在南水北调工况下水流流向为自南向北; 常工况下最高通航水位对应的流量为 100 m³/s, 调水工况为 80~100 m³/s。模型选取的水流流向取正常工况, 即自北向南。

2.1.2 特征水位

根据多组模型计算结果, 在其他条件相同情况下, 最高通航水位工况下船行波高应大于最低通航水位, 模型选取的特征水位为最高通航水位, 即 10.63 m。

2.1.3 船舶组合

根据各种船型工况组合计算结果, 选择单船和船队在渡槽内对向行驶为最不利船型组合, 即上行船舶选择 500 吨级货船, 船型尺度为 45.0 m×8.8 m×2.3 m, 下行船舶为 1 拖 6×1 000 t 拖带船队, 船型尺度为 357.4 m×11.0 m×2.5 m。

2.1.4 船舶流速与水流流速

上、下行船舶流速均取 8 km/h, 即 2.22 m/s。水流流速不作为初始条件, 根据 100 m³/s 的模型入口流量以及模型计算结果, 工程段的水流流速分布在 0.15~0.35 m/s。

2.1.5 船舶交汇位置

根据多组模型计算结果分析, 在其他条件相

同的情况下, 船舶交汇过程中产生的船行波规模显著高于单船运行时产生的船行波。由于一期渡槽已建成运行多年, 且未发生渡槽内航行安全事故, 故重点关注二期渡槽段航道通航条件, 因此将船舶交汇区域设置在二期地涵渡槽内。

2.2 模型建立与网格划分

在 FLOW-3D 中对流体流场的计算包括连续方程、质量方程、动量方程、能量方程等。FLOW-3D 的控制方程是基于连续性方程和不可压缩黏性流体运动的 Navier-Stokes 方程^[6]。本项目基于 FLOW-3D 建立一、二期渡槽和船舶等模型。

2.2.1 一期渡槽航道现状工况(工况 I)

一期渡槽长 122.6 m, 口宽与航宽均为 80.0 m; 地涵北侧口宽为 160.0 m、航宽为 90.4 m, 两侧边坡为 1:3。X 方向网格间距为 0.5 m、Y 方向网格间距为 1.0 m、Z 方向网格间距为 0.8 m, 共 495 200 个网格。

2.2.2 二期渡槽建成期工况(不含消能格栅, 工况 II)

一期渡槽同工况 I, 二期渡槽长 244.6 m、口宽 91.0 m、航宽 90.6 m; 中间为渐变段, 长 60.0 m, 口宽由 80.0 m 渐变至 91.0 m, 航宽由 80.0 m 渐变至 90.6 m。网格单元尺寸同工况 I, 共 664 900 个网格。模型见图 3。

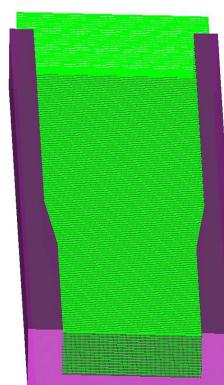


图 3 一、二期渡槽三维效果及网格划分

2.2.3 二期渡槽上布设消能格栅(工况 III)

二期渡槽模型同工况 II, 并在渡槽两侧槽壁布设消能格栅。网格间距布置同工况 I, 在消能设施部分网格加密处理, 加密后共 678 520 个网格。消能格栅局部模型见图 4。

2.2.4 船舶模型

建模方法是根据船体横剖线生成模型横剖面，再沿引导线汇成船体，球鼻艏等局部曲面变化较大区域，采用分段建模然后布尔运算的方法进行模型合并。

由于船体表面及球鼻艏位置处的曲面变形较大，为提高计算精度，要求网格对船体表面区域有尽可能高的贴合度。为了权衡计算的稳定性和精度之间的关系，采用三维嵌套子母网格的方式进行局部加密处理。网格过渡比为 2:1，即网格尺度为子网格=母网格/2。模型见图 5~6。

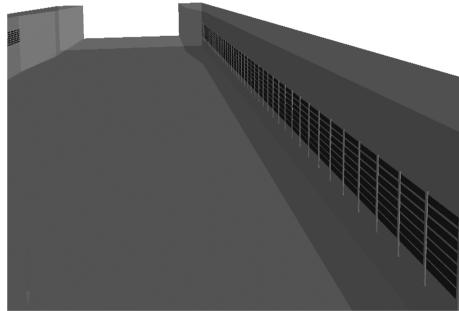


图 4 消能格栅三维效果及网格划分

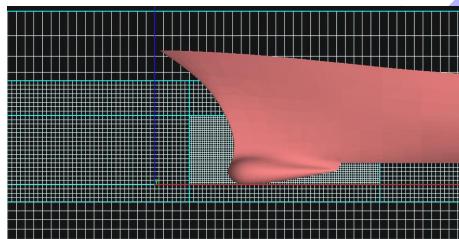


图 5 船首网格加密

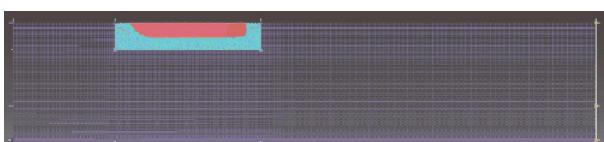


图 6 全局船舶模型网格

3 航行条件模拟结果及分析

3.1 船行波波高

工况 I：单船行驶状态下，1 拖 6×1000 t 拖带船队周边的船行波波高在 0.02~0.08 m，最大波高出现在船首前 3.5 m 处；500 吨级货船船行波波高在 0.01~0.05 m，最大波高出现在船首前 2.2 m 处。1 拖 6×1000 t 拖带船队与 500 t 货船

交汇过程中，上行、下行船舶产生的船行波不断传播、衍射、叠加，波高范围在 0.0~0.30 m，最大波高时刻出现在模型 $t=160$ s 时刻（即上行船舶交汇在 1 拖 6×1000 t 拖带船队的第 5 节货船处）。

工况 II：单船行驶状态下，1 拖 6×1000 t 拖带船队周边的船行波波高在 0.02~0.08 m，最大波高出现在船首前 3.3 m 处；500 吨级货船船行波波高在 0.01~0.05 m，最大波高出现在船首前 2.1 m 处。1 拖 6×1000 t 拖带船队与 500 t 货船交汇过程中，波高范围在 0.02~0.36 m，最大波高时刻出现在模型 $t=160$ s 时刻。

工况 III：单船行驶状态下，1 拖 6×1000 t 拖带船队周边的船行波波高在 0.02~0.07 m，最大波高出现在船首前 3.4 m 处；500 吨级货船船行波波高在 0.01~0.05 m，最大波高出现在船首前 2.2 m 处。1 拖 6×1000 t 拖带船队与 500 t 货船交汇过程中，波高范围在 0.02~0.28 m 范围内，最大波高时刻出现在模型 $t=160$ s 时刻。

表 1 最不利组合波高特征值分析

工况	船型	波高特征值/m		
		渡槽槽壁处	单船行驶	交汇过程
I	1 拖 6×1000 t 船队	0.02~0.24	0.02~0.08	0.0~0.30
	500 t 货船	0.01~0.05	0.01~0.05	0.0~0.22
II	1 拖 6×1000 t 船队	0.05~0.33	0.02~0.08	0.0~0.36
	500 t 货船	0.01~0.05	0.01~0.05	0.0~0.25
III	1 拖 6×1000 t 船队	0.03~0.25	0.02~0.07	0.0~0.28
	500 t 货船	0.01~0.05	0.01~0.05	0.0~0.19

与工况 I 相比，工况 II 航道面宽由 160.0 m 左右变窄至 91.0 m，船行波的衍射叠加强度小幅加强，最大波高和平均波高略有增大，其中最大波高由 0.30 m 增大至 0.36 m，但增加量较小。

在工况 III 增加消能格栅后，格栅结构有效抑制了船行波在槽壁处反射、叠加、传播，最大波高和平均波高均有所下降。最大波高由 0.36 m 下降至 0.28 m，波浪规模小于现状工况，船舶通航条件较好。工况 II 和工况 III 在 160 s 时的波高分布见图 7。最高通航水位为 10.63 m，图中水位高程减去 10.63 m 即为波高。

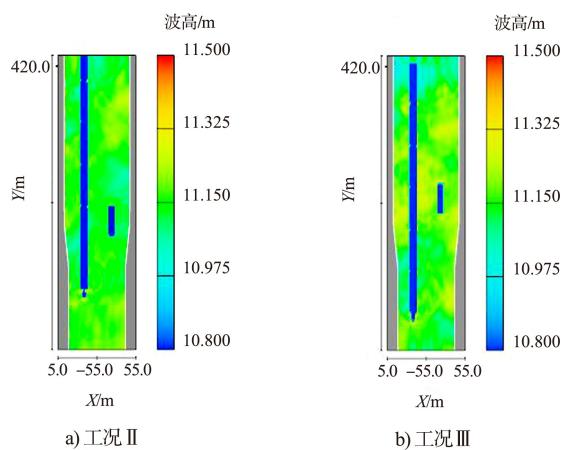


图7 波高分布

在其他条件相同的情况下,二期渡槽在增加消能格栅建成后,船行波波高分布与现状工况基本一致,波浪规模有所下降。

由于现状工况已平稳运行多年,因此二期渡槽在消能格栅建成后,在各船舶组合工况下,通过二期地涵处船行波波高较小,船舶通航条件较好。

3.2 横流

工况I。船队的拖船及第一节货船之间存在部分水体交换,横流流速较大,分布在0.05~0.20 m/s,除此之外,其他区域横流流速趋近于0。通航条件良好,有利于船舶航行。

工况II、工况III。横流分布规律、大小与现状工况基本一致,增加消能格栅之后,横流范围有所减小。工况II和工况III在160 s时的横流分布见图8。

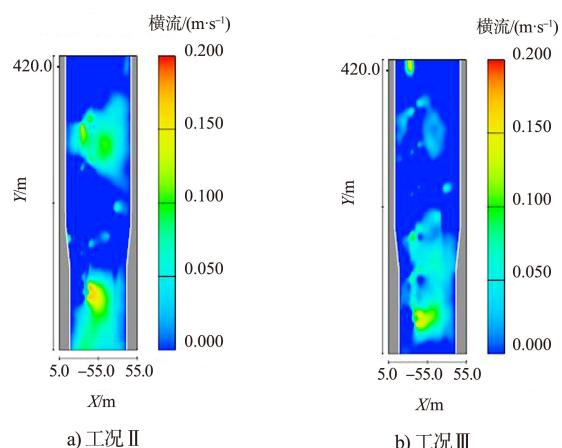


图8 横流分布

3.3 弗汝德数

弗汝德数(Fr)为流体内惯性力与重力的比值,

航道水流流态可用 Fr 来评价, $Fr < 1$ 水流流态为缓流, $Fr = 1$ 水流流态为临界流, $Fr > 1$ 水流流态为急流。

3种工况下,工程范围内的 Fr 均在0~0.08,远小于1的临界值,可以判定工程区域水流缓慢,航行条件较好,不存在急流、湍流、泡漩水等不利流态,与一期渡槽近年来实际运行情况一致。工况II和工况III在160 s时的 Fr 分布见图9。

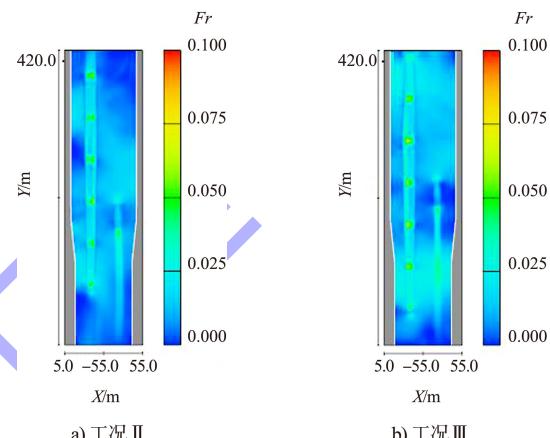


图9 弗汝德数分布

3.4 船首航偏角

3种工况下,1拖6×1 000 t拖带船队、500 t货船船首偏角变化见图10,90~200 s为船舶交汇过程(上行、下行船舶在X方向有重叠)。

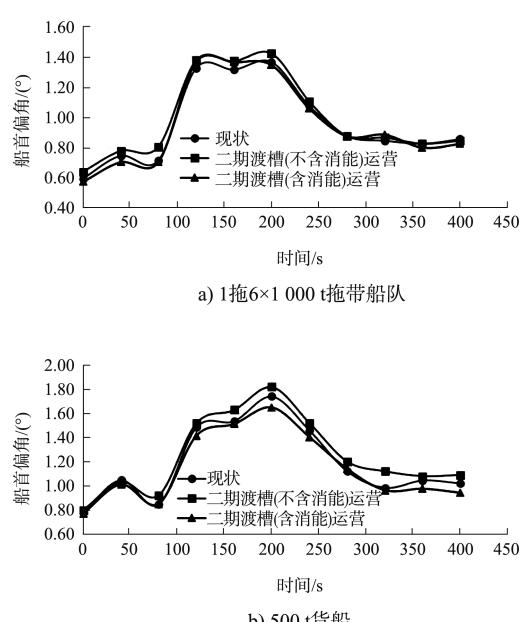


图10 船首偏角变化过程

1) 1 拖 6×1000 t 拖带船队。工况 I 船首偏角在 $0.6^\circ \sim 1.37^\circ$; 工况 II 船首偏角在 $0.64^\circ \sim 1.43^\circ$, 变化幅度较小, 变化区域主要集中在二期地涵渡槽段, 一期地涵渡槽段基本保持不变; 工况 III 船首偏角在 $0.58^\circ \sim 1.38^\circ$, 与工况 II 相比, 船舶在二期渡槽段航行过程船首偏角有所下降, 且基本小于现状工况下船首偏角。

2) 500 t 货船。工况 I 船首偏角在 $0.78^\circ \sim 1.74^\circ$; 工况 II 船首偏角在 $0.80^\circ \sim 1.82^\circ$, 变化幅度较小, 变化区域主要集中在二期地涵渡槽段, 一期地涵渡槽段基本保持不变; 工况 III 船首偏角在 $0.64^\circ \sim 1.43^\circ$, 与工况 II 相比, 船舶在二期渡槽段航行过程船首偏角有所下降, 且基本小于现状工况下船首偏角。

二期渡槽在增加消能格栅后, 1 拖 6×1000 t 拖带船队及 500 t 货船在航行过程中船首偏角有明显下降, 消能效果良好。3 组工况下, 各船型组合的船首偏角均较小, 船舶航行条件较好, 最大的船首偏角出现在上、下行船舶交汇过程中。

4 结语

1) 二期渡槽在增加消能格栅后, 格栅结构有效抑制了船行波在槽壁处的反射、叠加、传播, 各种船型组合情况下产生的最大波高和平均波高均有所下降。最大波高由 0.36 m 下降至 0.28 m , 即从相对现状增加 20% 到降低 7%, 比现状工况更

(上接第 94 页)

2) 在实际工程中应根据混凝土方桩破损特征和施工条件合理选择修复加固方案, 以满足安全可靠且经济合理的维护要求。

参考文献:

- [1] 李勇. 碳纤维复合材料(CFRP)加固技术在高桩梁板式码头加固维修工程中的应用[J]. 水运工程, 2001(12): 13-15.
- [2] 中交四航工程研究院有限公司. 港口水工建筑物修补加固技术规范: JTS 311—2011[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2010.

优, 船舶通航条件良好。

2) 二期渡槽在增加消能格栅后横流流速较小, 水流缓慢, 船首偏角较小, 与现状运行情况相比变化不大, 船舶在一、二期组成的长渡槽通航条件良好, 不会对船舶航行造成不良影响。

3) 数学模型试验成果可为淮安水利枢纽二期工程通航渡槽方案论证提供技术支持, 也可供类似大尺度断面、长距离的通航渡槽项目参考。

4) 拟在下阶段开展物理模型试验分析二期渡槽的通航条件, 以进一步验证三维数模成果的准确性。

参考文献:

- [1] 孙精石. 从《内河通航标准》看某些特殊限制性航道宽度的确定[J]. 水道港口, 2006(5): 300-305.
- [2] 孙精石. 从《内河通航标准》看某些特殊限制性航道水深的确定[J]. 水道港口, 2006(6): 373-377.
- [3] 吴志刚, 杨善红, 朱宇, 等. 跨越运河超大通航渡槽系列关键技术研究[C]. 2018 世界交通运输大会论文集. 北京: 中国科学技术协会, 2018.
- [4] 郑宝友, 周华兴, 李焱, 等. 限制性航道船周回流速度与船体下沉研究[J]. 水道港口, 2006(2): 95-100.
- [5] 李焱, 郑宝友, 周华兴, 等. 构皮滩升船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究[J]. 水道港口, 2012, 33(1): 45-50.
- [6] 苏巍. 基于 FLOW-3D 的对遇两船间水动力作用数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017: 45-50.

(本文编辑 武亚庆)

- [3] 张强, 孙熙平, 刘现鹏, 等. 高桩码头结构修复加固技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [4] 彭杰. 高桩码头桩基钢套筒灌浆修补技术在实际工程中的研究及应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- [5] 韩路, 顾祥奎. 高桩码头混凝土桩基修复加固技术[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(8): 58-62, 73.
- [6] 魏明晖, 严锋. 玻纤套筒加固技术在高桩码头维修工程中的应用[J]. 水运工程, 2017(9): 202-205.
- [7] 于鹏, 蒋昌平.“夹克法”加固桥梁桩基础的应用研究[C]//2014 年全国公路养护技术学术年会论文集, 北京: 人民交通出版社, 2014: 274-280.

(本文编辑 郭雪珍)