



导流墩布置对岩滩升船机下游口门区 通航水流条件影响*

赵根生¹, 孙佳², 张首元¹

(1. 南京水利科学研究所, 江苏南京 210029; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

摘要: 针对岩滩升船机升级改造后口门区水流紊乱, 横流、回流强度超标等问题, 采用二维数学模型, 重点论述导流墩不同布置方式对口门区通航水流条件影响, 分析导流墩不同形状、数量和相对间距下的水流流态, 对比口门内横向流速、纵向流速及回流流速等水力参数, 进一步探究导流墩布置规律, 优化导流墩布置方式。结果表明: 导流墩对口门区通航水流条件有明显改善作用, 在岩滩下游口门区布置7~8个八边形导流墩, 且当导流墩的间距和长度之比控制在0.50~1.00范围时, 可有效改善岩滩升船机下游口门区通航流态, 使其满足船舶安全通航要求。

关键词: 岩滩升船机; 下游口门区; 通航水流条件; 导流墩布置; 数值模拟

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0086-06

Influence of diversion pier layout on flow conditions in downstream entrance area of Yantan ship lift

ZHAO Gensheng¹, SUN Jia², ZHANG Shouyuan¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. College of Harbor Coastal and offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To the problems of water flow turbulence, cross-flow, backflow intensity exceeding the standard in the entrance area after the upgrade and renovation of the Yantan ship lift. This paper uses a two-dimensional mathematical model to focus on the influence of different arrangements of diversion piers on the navigational flow conditions in the entrance area, and analyzes the flow pattern under different shapes, number and relative spacing of diversion piers. By comparing the hydraulic parameters such as transverse flow velocity, longitudinal flow velocity and backflow velocity, the layout law of diversion pier is further explored and the layout mode of diversion pier is optimized. The results show that diversion piers have obvious improvement effect on the navigational flow conditions in the entrance area. The recommended arrangement is 7-8 octagonal diversion piers in the entrance area downstream of the Yantan ship lift, with a spacing-to-length ratio between 0.50 and 1.00. This arrangement effectively improves the navigational flow conditions in the entrance area downstream of the ship lift, meeting the requirements for navigation.

Keywords: Yantan ship lift; downstream entrance area; navigable flow condition; diversion pier arrangement; numerical simulation

通航建筑物下游口门区是引航道静水与主河槽动水的能量交换区域, 可能存在严重横流以及大范围回流, 难以满足船舶正常安全航行的需求。

导流墩可明显改善口门区水流流态, 成为工程常用的整流措施。

针对导流墩具体布置措施对通航水流条件的

收稿日期: 2024-01-17

*基金项目: 湖北省重点实验室开放研究基金资助项目(CX2023K18)

作者简介: 赵根生(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事溃坝水力学、河流泥沙动力学、通航水力学研究。

改善, 国内外许多学者已开展相关研究。白玉川等^[1]组合顺直型与倾斜型导流墩, 形成“多人字形”导流墩改善通航流态; 王熔荣等^[2]通过优化导流墩数量以及导流墩与航线夹角改善通航条件; Zhou 等^[3]采用正交试验法对导流墩进行优化设计, 使得口门区各项流速指标满足规范要求; 冯侗侗等^[4]提出将最优偏斜角度导流墩和曲形导流墩相结合以减小漩涡面积; 贾君德等^[5]通过调节楔形导流墩的长度和角度减少回流区和死水区面积; 刘承等^[6]认为曲线导流墩对来流的导向效果优于直线导流墩; 徐波等^[7]构造八字形导流墩, 使流速分布更加均匀; 周迎等^[8]布置双导流墩并调整其倾斜角平稳水流。近年来, 为改善通航水流条件, 有学者提出一些导流墩新的布置措施, 如 V 形导流墩^[9]和收缩式导流墩^[10]等。尽管上述研究已取得较多成果, 但对于导流墩布置方式影响口门区水流条件的系列研究相对有限。

以岩滩升船机下游口门区为研究对象, 构建二维水动力数学模型, 模拟不同导流墩形状、数量和相对间距下的水流流态, 分析导流墩不同布置方式对口门区通航水流条件的影响, 提出导流墩最优布置方案。

1 工程概况

岩滩水电站位于珠江水系西江干流红水河中游, 地处广西壮族自治区大化县岩滩镇, 是南盘江红水河水电基地 10 级开发的第 5 个梯级, 上游为龙滩水电站, 下游为大化水电站。作为广西第 1 座超百万千瓦的大型水电站, 航道等级为 IV 级, 水库具有日调节性能, 是一座以发电、通航为主要功能的水利枢纽^[11]。岩滩坝址多年平均流量 1 770 m³/s, 水库总库容 33.5 亿 m³, 正常蓄水位 223.0 m 时库容 26.0 亿 m³, 调节库容 4.25 亿 m³, 坝址流域面积 10.658 万 km², 下游引航道长 492.4 m、宽 28 m, 底高程 150.0~151.5 m, 下游最高通航水位 177 m, 综合考虑船舶通过枢纽下游岩滩大桥的操作可行性, 岩滩升船机工程改造运行成熟后最高通航流

量可定为 4 000 m³/s。岩滩水电站特征水位见表 1, 枢纽下游整体布置见图 1。

表 1 岩滩水电站特征水位

正常蓄水位/m	下游设计洪水位/m	上游校核洪水位/m	下游校核洪水位/m	下游最高通航水位/m
223	190.7	229.2	193.8	176.95

注: 上游校核洪水位流量 $Q=3.48$ 万 m³/s ($P=0.02\%$); 下游最高通航水位流量 $Q=1.51$ 万 m³/s ($P=20\%$)。

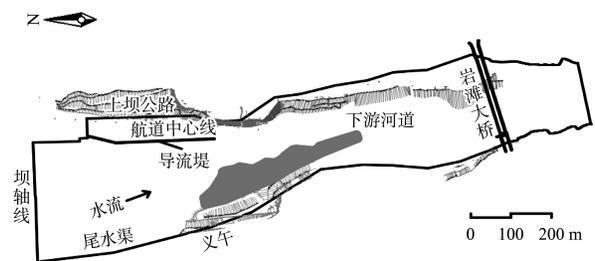


图 1 枢纽下游整体布置

由于岩滩升船机改造方案为在原升船机位置下游新建升船机, 升船机等级提高, 通航流量增大, 设计船型尺度、引航道长度和尺度等均发生较大变化, 对口门区的通航水流条件要求更高, 因此需改善岩滩升船机下游口门区的通航水流条件。根据相关文献及规范^[12], 引航道口门区应避免出现泡漩、乱流等不良流态, 且口门区横向流速不大于 0.3 m/s, 纵向流速不大于 2.0 m/s, 回流流速不大于 0.4 m/s。

2 数学模型建立

2.1 控制方程

基于岩滩升船机下游口门区的实际地形和水流条件, 以 Navier-Stokes 方程为基础, 对岩滩升船机下游口门区进行二维数值模拟。假定流体为一个常黏、不可压缩的液体, 根据质量守恒与动量守恒, 连续式与动量式控制方程为:

水流连续方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

水流动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中: x 为距离坐标, m; t 为时间, s; A 为过水断

面面积, m^2 ; Q 为流量, m^3/s ; q 为区间入流, m^3/s ; h 为水位, m ; R 为水力半径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; C 为河床糙率系数。

2.2 模拟范围及网格划分

根据岩滩升船机下游口门区的地形数据和水文资料构建二维水动力模型并设置边界条件。模型进水边界位于水电站坝轴线处, 出口边界位于坝轴线下游 1.4 km 处, 模型上下游均预留足够长度的整流段。导流堤长 300 m、宽 2 m, 模拟时长 3 h, 模型共划分 10.193 8 万个形状接近正三角形的非结构网格。入流及出流边界为透水边界, 其余均为不透水边界。模拟网格划分见图 2。

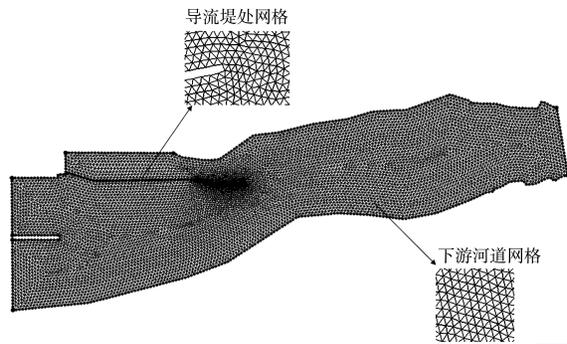


图 2 岩滩升船机下游口门区模拟网格划分

2.3 模型验证

对岩滩升船机下游口门区进行数值模拟, 以典型流量 ($Q = 15.1$ 万 m^3/s , $P = 20\%$), 对模型 5 个典型断面水位进行对比验证, 见图 3。验证结果表明, 沿程水面线相差在 ± 0.01 m 以内, 模型水位与原型水位吻合较好, 河道糙率设置较为准确, 水动力模型可较好地反映岩滩升船机下游口门区的实际情况。

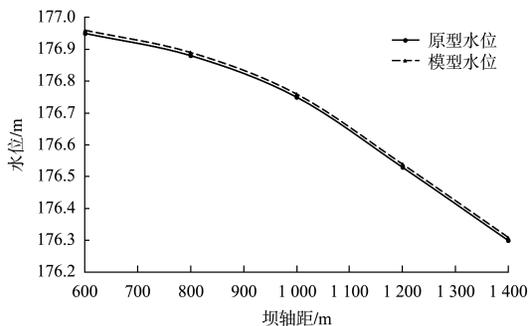


图 3 模型下游水面线验证

3 导流墩布置对下游口门区流场分布的影响

3.1 导流墩形状

为探究导流墩形状对岩滩升船机下游口门区通航水流条件的影响, 对下游口门区流态进行模拟计算。模型上边界选取实际最大通航流量 4 000 m^3/s , 电站为 2 台地下机组和 3 台坝上机组满发出流。导流墩布置平行四边形和八边形两种不同形状, 导流墩顶高程与导航墙顶高程一致, 两种形状的导流墩均按照 6.40 m 等距布置, 导流墩尺寸见图 4。

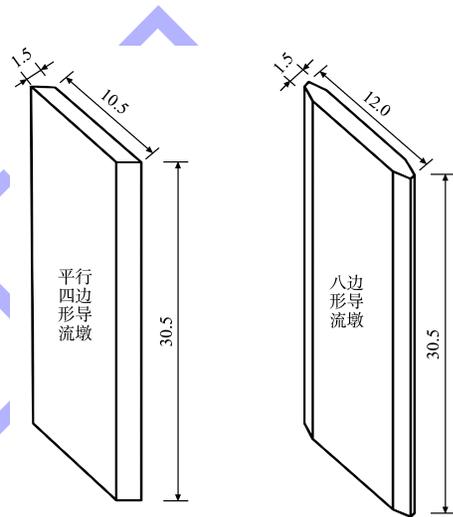


图 4 导流墩立面 (单位: m)

两种不同形状导流墩口门区流速分布见图 5, 口门区特征流速见表 2。两种形状导流墩布置下, 近岸侧均出现小范围回流。当布置平行四边形导流墩时, 回流流速最大可达 0.56 m/s, 回流强度较大, 多处测点回流流速不满足要求, 口门区及连接段内通航水流条件不满足通航要求。当布置八边形导流墩时, 回流流速明显降低, 回流强度减弱, 最大回流流速约为 0.27 m/s, 纵向流速均小于 2.00 m/s, 横向流速均小于 0.30 m/s, 较平行四边形导流墩最大横向流速减少了 40.82%, 流速分布更加均匀。结果表明, 岩滩下游口门区布置八边形导流墩时水流条件更优, 整流效果更为突出。

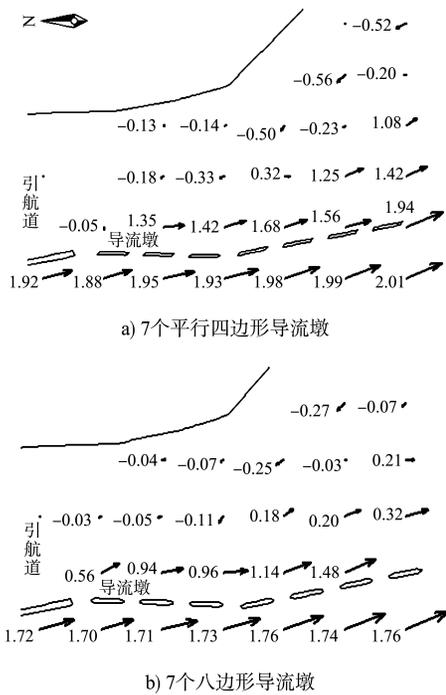


图 5 不同形状导流墩口门区流速分布 (单位: m/s)

表 2 不同形状导流墩流速

导流墩形状	最大横向流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大纵向流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大回流流速/ ($m \cdot s^{-1}$)
平行四边形	0.49	1.95	0.56
八边形	0.29	1.74	0.27

3.2 导流墩数量

导流墩可以显著改善口门区的斜流和回流, 导流墩的数量是影响口门区水流状况的重要因素。如果导流墩数量太少, 整流效果将显著降低, 无法有效削弱进入口门区的水动量以改善口门区的斜流和回流; 如果导流墩数量太多, 虽然可以加强整流效果, 但进入口门区的水太少, 将削弱导流墩尾端倾斜散流的调节作用, 对斜流的改善效果不明显。模拟 6 种不同数量 ($N=0, 4, 5, 6, 7, 8$) 的八边形导流墩 (长 12 m、宽 1.5 m、墩距 6.4 m) 口门区水流流态。口门区水流流速对比见图 6, 口门区流速特征值见表 3。

表 3 不同数量导流墩口门区流速特征值

导流墩数量/个	最大横向流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大纵向流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大回流流速/ ($m \cdot s^{-1}$)
0	1.09	2.28	1.16
4	0.61	1.97	0.59
5	0.59	1.92	0.57
6	0.47	1.89	0.39
7	0.29	1.74	0.27
8	0.30	1.78	0.29

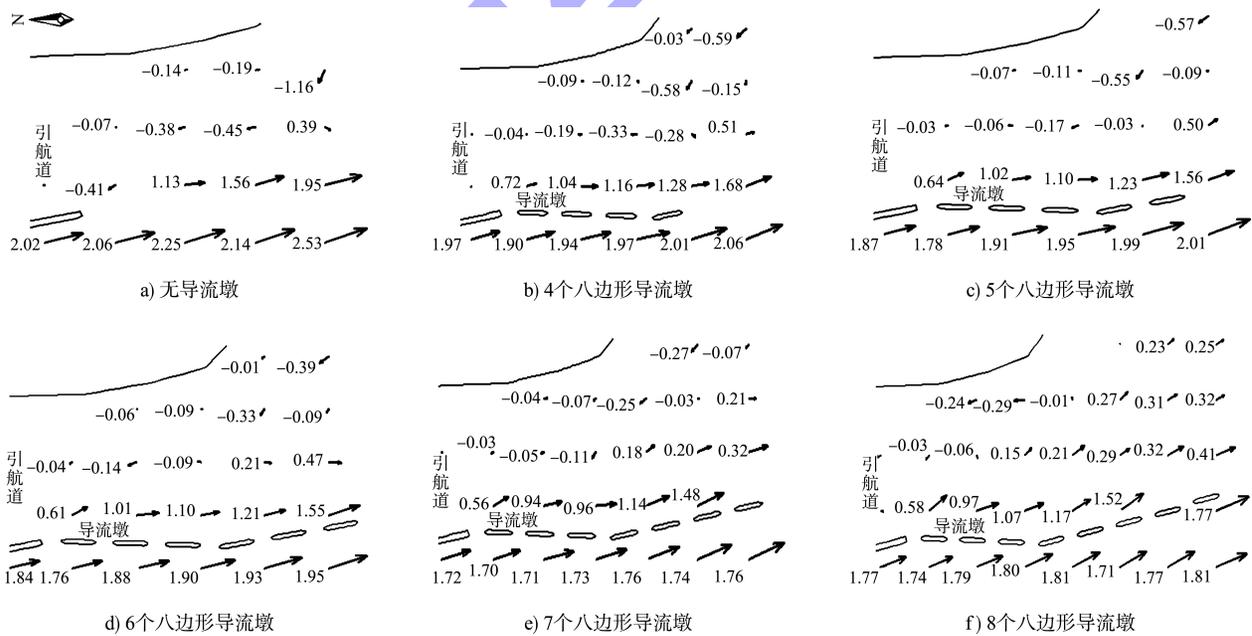


图 6 不同数量导流墩断面流速分布 (单位: m/s)

模拟结果表明: 当不设导流墩时, 枢纽下游水流通过导流堤后, 由于过水断面变大而逐渐向左侧扩展, 并伴随水流平面弯曲变形, 使得口门

区产生斜流与回流, 其强度进一步增强并逐步向后扩展, 挤压主流, 导致流场混乱, 流动方向发生较大偏差。当总流量达到 $4\ 000\ m^3/s$ 时, 口门

区的水流横、纵两个方向的速度都超过了通航的要求,存在明显的斜流区和回流区,航道左方水域的横向流速最大为 1.09 m/s,水流流态不佳,影响船舶安全航行。为此,考虑在口门区设置导流墩,增加至 4 个导流墩后,流线变得平顺。此时纵向流速约为 1.93~1.97 m/s,满足通航要求,横向流速约为 0.50~0.61 m/s,最大横向流速减幅为 44.04%,斜流夹角与回流长度也逐渐减小,导流墩的整流效果显著。但是导航墙堤头左侧位置依旧形成回流,口门区通航水流条件依旧较差,且导流墩附近也会出现一定尺度的绕流,严重影响船舶的安全进出,因此需优化调整设计方案。当增加至 5 个导流墩时,回流长度约 34.13 m,横向流速在距离口门区 50 m 范围内已经超标。当流量达到 4 000 m³/s 时,下游口门区回流长度进一步增大,需继续增加导流墩以改善通航水流条件。当导流墩数量增至 6 个时,口门区水流流速分布逐渐趋于均匀。口门区 200 m 范围内,除局部位置超标外,纵向、回流流速已满足通航要求,但仍须采取相应的改善措施。当口门区布置 7 个八边形导流墩时,各特征流速均符合通航安全标准,口门区动静水交汇时产生较小的边界回流,航道内部水流平稳,回流区域将随主流向前而逐渐消失。当在下游口门区布置 8 个导流墩时,导流墩尾部的散流增大,但各流速指标仍在安全通航范围内。

在口门区布置 4~7 个八边形导流墩时,随着导流墩个数的增加,水流条件得到改善,直至船舶可以安全通航。此时若继续增加导流墩,则各流速均变大,水流流态不及上一个工况。综上所述,在岩滩升船机下游口门区布置 7~8 个八边形导流墩时水流条件较优。

3.3 导流墩相对间距

为探讨八边形导流墩相对间距与各特征流速之间的关系,定义相邻 2 个八边形导流墩间距为 D ,长度为 L ,其比值 D/L 为相对间距。在下游口门区布置 7 个八边形导流墩(长 12 m、宽 1.5 m),

对比 5 种不同相对间距($D/L=0.50、0.75、1.00、1.25、1.50$)水流流态,流速特征值见表 4。

表 4 不同相对间距导流墩口门区流速

相对间距	最大横向流速/ (m·s ⁻¹)	最大纵向流速/ (m·s ⁻¹)	最大回流流速/ (m·s ⁻¹)
0.50	0.30	1.78	0.39
0.75	0.29	1.75	0.28
1.00	0.27	1.80	0.37
1.25	0.38	1.97	0.64
1.50	0.76	2.02	0.89

当相对间距为 0.50 时,虽各特征流速均未超标,但其回流流速较大,这可能是因为相邻导流墩距离太近,水流过流能力差,整流效果不明显;当相对间距为 1.50 时,导流墩之间间隔太远,也会增大横向流速和回流流速,对下游口门区通航水流条件的改善不明显。在导流墩的布置范围内,导流墩相对间距越大,则水流偏角越大。其原因在于,当导流墩之间间距很小时,过流量也很小,对导流墩附近的斜流速度几乎没有影响;但在过大的间隙下,过流量、流速和水流夹角都比较大。

当相对间距 D/L 为 0.50~1.00 时,岩滩升船机下游口门区各特征流速均在安全通航范围内,导流墩的整流效果较好且水流条件较优,可获得较好的改善效果。

4 结论

1) 针对改造后岩滩升船机存在通航流量增大、水流条件差的问题,通过二维数学模型可以较好地模拟导流墩不同布置方式下口门区的水流流态,反映其水动力特征,借助数学模型可较为准确地分析口门区导流墩布置方式。

2) 下游口门区布置导流墩可以减小水流主动力作用的距离,改善口门区的回流、斜流以及不良流态,使得流速分布更加均匀。

3) 对于岩滩升船机下游口门区,八边形导流墩的整流效果优于平行四边形导流墩,以 0.50~1.00 的相对距离布置 7~8 个导流墩,可以较好地改善下游口门区通航水流条件。

参考文献:

- [1] 白玉川, 李彬, 徐海珏, 等. 大跨度泵站多人字型前池导流墩整流分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(6): 75-79.
- [2] 王熔荣, 赵根生, 张首元, 等. 导流墩对急弯河道下游口门区水流条件的改善作用[J]. 水运工程, 2023(3): 99-104.
- [3] ZHOU J R, ZHAO M M, WANG C, et al. Optimal design of diversion piers of lateral intake pumping station based on orthogonal test[J]. Shock and vibration, 2021, 202: 1-9.
- [4] 冯侗侗, 梁金栋, 孙晨光, 等. 导流墩偏斜角度对侧向进水泵站前池整流效果的影响[J]. 水电能源科学, 2021, 39(7): 121-125.
- [5] 贾君德, 周济人, 赵苗苗, 等. 楔形导流墩对泵站大扩散角前池整流效果的影响[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8): 88-91.
- [6] 刘承, 陈奇, 蒋劲, 等. 导流墩布置形式对泵站前池流态影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2018, (4): 112-118.
- [7] 徐波, 吕和品, 谭超, 等. 泵站正向大扩散角前池八字形导流墩整流研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(4): 127-130.
- [8] 周迎, 邓欢, 黄永艳. 双导流墩偏斜角度对闸站合建枢纽渠道流场优化研究[J]. 陕西水利, 2021(12): 212-215.
- [9] 刘志泉, 成立, 卜舸, 等. 泵站正向进水前池“V”形导流墩整流数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 183-188.
- [10] XU W T, CHENG L, DU K L, et al. Numerical and experimental research on rectification measures for a contraction diversion pier in a pumping station [J]. Journal of marine science and engineering, 2022, 10(10): 1437-1437.
- [11] 南京水利科学研究所. 岩滩升船机改造工程可行性研究阶段枢纽整体水工模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2019.
- [12] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- (本文编辑 赵娟)
-
- (上接第 55 页)
- [10] SAULNIER J, PREVOSTO M, MAISONDIEU C. Refinements of sea state statistics for marine renewables: a case study from simultaneous buoy measurements in Portugal [J]. Renewable energy, 2011, 36(11): 2853-2865.
- [11] TAO A F, YAN J, PEI Y, et al. Swells of the East China Sea [J]. Journal of ocean university of china, 2017, 16(4): 674-682.
- [12] SHI F Y, DALRYMPLE R A, KIRBY J T, et al. A fully nonlinear Boussinesq model in generalized curvilinear coordinates [J]. Coastal engineering, 2001, 42(4): 337-358.
- [13] KIRBY J T. Boussinesq models and their application to coastal processes across a wide range of scales [J]. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, 2016, 142(6): 03116005.
- [14] 李辉, 毛艳军, 王昊天, 等. 涌浪作用下港内波况试验研究[J]. 海岸工程, 2021, 40(1): 10-19.
- [15] CHEN Z Z, ZHANG L G, ZHAO C, et al. A practical method of extracting wind sea and swell from directional wave spectrum [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2015, 32(11): 2147-2159.
- [16] GODA Y. A comparative review on the functional forms of directional wave spectrum [J]. Coastal engineering journal, 1999, 41(1): 1-20.
- [17] LONGUETHIGGINS M S, STEWART R W. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats' [J]. Journal of fluid mechanics, 1962, 13(4): 481-504.
- [18] 王岗, 高俊亮, 王培涛, 等. 港湾共振研究综述[J]. 海洋学报(中文版), 2017, 39(11): 1-13.
- [19] DONG G H, ZHENG Z J, MA X Z, et al. Characteristics of low-frequency oscillations in the Hambantota Port during the southwest monsoon [J]. Ocean engineering, 2020, 208: 107408.
- (本文编辑 王璁)