



曹娥江清风船闸引航道通航水流条件*

吴惠国¹, 孙逸豪^{2,3}, 史英标^{2,3}, 郑国诞^{2,3}

(1. 绍兴市公路与运输管理中心, 浙江 绍兴 312000; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020;
3. 浙江省河口海岸重点实验室, 浙江 杭州 310020)

摘要: 清风枢纽位于曹娥江干流中游段, 为满足上游水运需求, 需改建现状枢纽, 并新建船闸一座。枢纽泄洪闸泄水方向斜交新建船闸下游引航道, 使船闸下游水流条件较复杂, 通航条件相对较差。为保证船闸下游引航道正常通航, 建立曹娥江中游段平面二维数学模型并开展计算, 通过布设不同导流墙研究其对通航水流条件的改善效果。结果表明: 1) 平行于引航道的导流墙可以更好地改善航道内水流条件, 改善效果 70%~90%。2) 延长导流墙长度可进一步改善引航道通航水流条件, 改善效果可达 100%。3) 导流墩对纵向流速的改善效果优于横向流速, 纵向流速的改善效果为 100%, 而横向流速的改善效果小于 2%。

关键词: 曹娥江; 船闸; 通航; 水流条件

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0138-08

Navigable flow conditions of the approach channel of Qingfeng ship lock on the Cao'e River

WU Hui-guo¹, SUN Yi-hao^{2,3}, SHI Ying-biao^{2,3}, ZHENG Guo-dan^{2,3}

(1. Highway and Transportation Management Center of Shaoxing, Shaoxing 312000, China;
2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China;
3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Estuary and Coast, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Qingfeng hub is located in the middle reaches of the Cao'e River. In order to meet the needs of upstream water transportation, it is necessary to rebuild the existing Qingfeng hub and build a new ship lock. The discharge direction of the sluice gate of the hub is oblique to the downstream approach channel of the new ship lock, which makes the downstream flow conditions of the ship lock more complex and the navigation conditions relatively poor. In order to ensure the normal navigation of the downstream approach channel of the ship lock, a plane two-dimensional mathematical model of the middle reaches of the Cao'e River is established and calculated, and its improvement effect on the navigation flow conditions is studied by arranging different diversion walls. The results show: 1) The training wall parallel to downstream approach channel can better improve the flow conditions in the channel, and the improvement effect is 70%~90%. 2) Extending the length of the training wall can further improve the navigable flow conditions of the approach channel, and the improvement effect can reach 100%. 3) By diversion pier, the improvement of longitudinal velocity is more effective than that of transverse velocity, and the improvement effect of longitudinal velocity is 100%, while the improvement effect of transverse velocity is less than 2%.

Keywords: the Cao'e River; ship lock; approach channel; flow conditions

收稿日期: 2021-06-30

*基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LGF20E090003)

作者简介: 吴惠国(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为港口与航道工程及水文专业方向。

船闸引航道以及连接段通航水流条件一直是船闸工程中的热点问题。影响引航道通航水流条件的因素众多, 包括: 船闸布置形式、河道河势、船闸周边涉水建筑物布局等。为改善引航道水流条件, 目前国内常采取的措施包括: 调整导流堤长度和堤头形式、堤身开孔引流、导流堤外扩开孔、导流堤浮式结构、丁潜坝挑流、口门区设置导流墩等。颜志庆等^[1]以犬木塘枢纽为例, 通过采用布设隔流墙、疏浚航道以及调整航道布线等综合手段研究并优化了船闸在“S”形弯道时的通航水流条件; 何飞飞等^[2-3]研究了透空式隔流墙对八字嘴枢纽貂皮岭船闸引航道水流条件的作用; 刘芷妍等^[4-5]通过研究导流墙和丁坝对长安枢纽船闸上游引航道水流条件开展优化; 潘雅真等^[6]通过在导流堤堤头增设丁坝, 在丁坝挑流作用下, 减小了贵港航运枢纽船闸工程口门区水流流速; 朱红等^[7]通过水槽试验研究发现布设导流墩可以有效改善口门区水流条件。由于不同河段具有不同的河势, 船闸建造须考虑的因素亦有所差异。这也导致了现如今国内船闸研究无法实现以点代面、全面覆盖各个河道, 尤其在水流条件复杂、河势弯曲的河段研究稍显薄弱。

本文以清风枢纽船闸下游为例, 采用平面二维数学模型计算方法研究不同导流墙方案对下游引航道的通航水流条件的影响, 分析导流墙走向、长度以及与导流墩组合对下游引航道通航水流条件改善效果。研究工作旨在填补曹娥江中上游船闸研究的空白, 完善束窄弯曲河道内建闸研究工作。

1 河道与枢纽概况

曹娥江大坝是亚洲最大的强涌潮河口第一大门, 位于钱塘江南岸曹娥江河口处, 于 2008 年 12 月下闸蓄水。大坝的建设阻挡了外海泥沙进入河道, 曹娥江也变为内河水道, 同时闸上河道水流泥沙运动规律以及通航水流条件也随之改变^[8-10]。

清风水利枢纽工程位于曹娥江干流中游段, 距离上游嵊州市城关约 14 km, 下游 29 km 处建设有节点枢纽(上浦闸枢纽)。随着上游嵊州及新昌

等地大宗货物运量快速增长, 通过新建清风船闸打通曹娥江上游航运的瓶颈(清风枢纽)紧迫且必要。

如图 1 所示, 工程位于束窄河段, 河段走势由西南向东北。上游河宽约 480 m, 船闸下闸首断面河宽约 300 m, 而下游清风大桥断面河宽最窄, 仅 150 m。过清风大桥后, 河段走势转为正北。

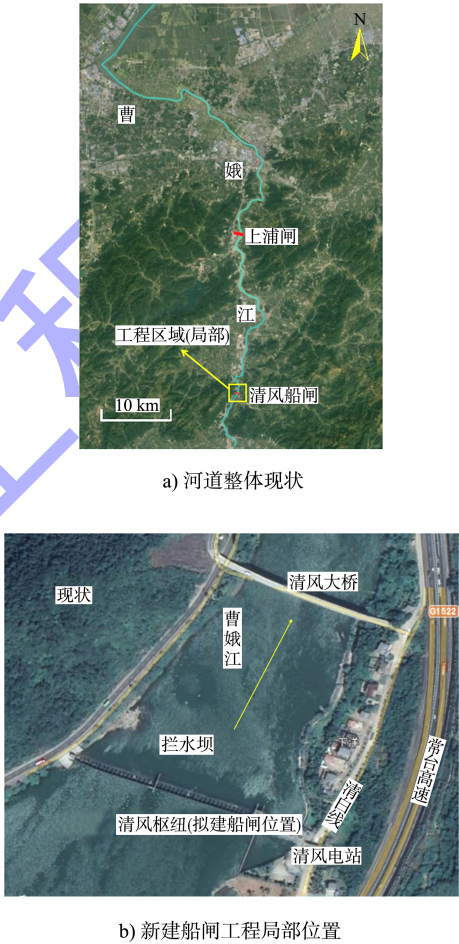


图 1 清风水利枢纽工程

清风水利枢纽是一个集防洪、发电以及通航功能于一体的综合枢纽。原枢纽由水力自控翻板闸、冲沙闸、河床式电站组成, 枢纽集雨面积 3 185 km², 多年平均流量 77.34 m³/s, 枢纽正常蓄水位 10.4 m; 电站发电死水位为 9.0 m, 满发流量为 101.7 m³/s。电站枢纽工程为 V 等, 主要建筑物为 4 级、次要建筑物为 5 级, 枢纽自左向右依次布置有 232 m 宽拦水坝、7.5 m 宽冲沙闸和 63.32 m 宽电站。其中拦水坝段为 22 扇 5.5 m×10 m (高×宽)水力自控翻板门。

新建船闸工程包括：船闸、泄洪闸以及电站等。船闸按照Ⅳ级通航标准建设，布设于河道左侧，采用坝上式布置方法，其中船闸下游引航道贴岸布置，闸室与上游引航道平顺于水流方向离岸布置。从船闸位置上看，下游引航道口门段受河宽束窄、河道转弯等影响，流速增大、水流向北转向。此外，电站排水受下游岸线挑流影响，水流斜向汇入主槽，并对左侧口门段产生一定顶冲作用。所以，船闸下游引航道水流流态存在一定的安全隐患；且受河宽限制，下游引航道的优化难度较大。

2 模型建立与验证

对工程河段建立二维水流数值模型并开展计算。模型包括一个连续性方程和两个动量方程：

连续性方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = S \tag{1}$$

动量方程：

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} =$$

$$f_v h - g h \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g h^2}{2 \rho_0} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{xx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} + u_s S \tag{2}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -f_u h - g h \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g h^2}{2 \rho_0} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + v_s S \tag{3}$$

式中： h 为水深，即水面到某一基准面的距离； t 为时间； η 为水位； u 、 v 为 x 、 y 方向上的流速分量； g 为重力加速度； f 为柯氏力参数； ρ 为水密度； ρ_0 为水的参照密度； S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yy} 为波浪辐射应力分量； p_a 为大气压力； τ_{xx} 、 τ_{sy} 为风应力分量； τ_{bx} 、 τ_{by} 为底部摩擦应力分量； T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 为黏性项分量； S 为源汇项。

模型计算范围的上边界设置在清风枢纽断面（位于清风枢纽上游 9 km 左右）、下边界设置在上

浦闸；对清风枢纽工程区域的计算网格作了进一步加密，最小网格约为 2.0 m，网格总数为 65 354，见图 2。二维模型概化区域包括了两岸堤防之间河槽之外的滩地，网格岸线为两岸堤防岸线，并对曹娥江主槽和边滩进行了网格加密，模型范围内水下地形采用实测地形。

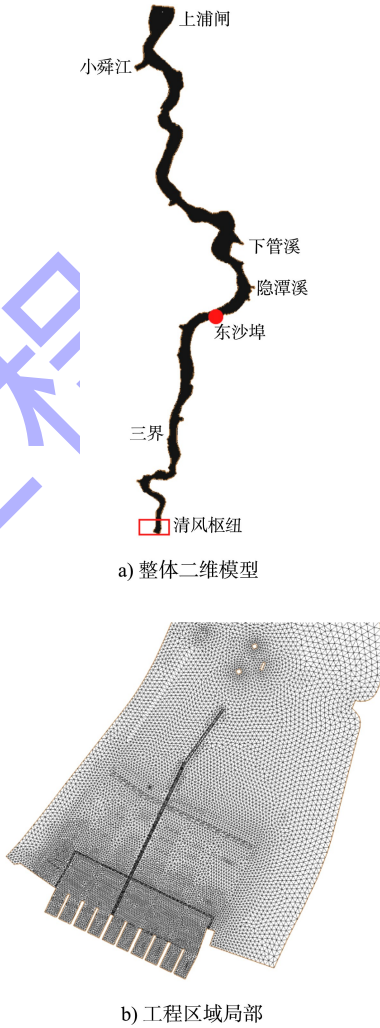
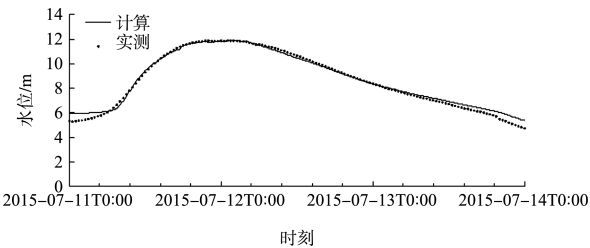


图 2 网格示意

采用 2015 年 7 月“灿鸿”台风期间洪水过程对模型进行验证。见图 3。



注：洪峰水位实测值 11.89 m，计算值 11.80 m。

图 3 “灿鸿”洪水位过程东沙埠水位验证

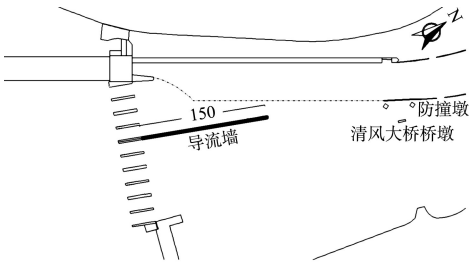
由图 3 可知, 东沙埠站洪峰水位验证误差为 -0.09 m , 在规程允许偏差 10% 以内, 符合《海岸河口潮流泥沙模拟技术规程》要求, 该模型可用于进一步的方案比选工作。

3 方案说明

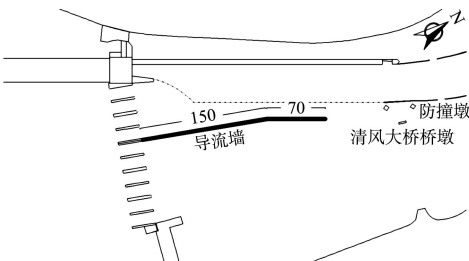
根据设计要求, 在电站运行情况下, 仅打开导流墙右侧 6 孔泄洪闸泄水。为了进一步提高船闸通航流量、提高船闸的通航保证率, 采用延长调整导流墙的方法改善船闸下游引航道水流条件。图 4 和表 1 为原船闸布置方案与 3 种优化方案。

表 1 各方案船闸参数

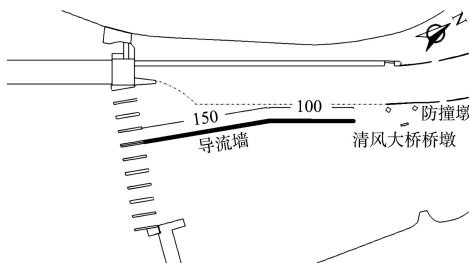
方案	闸室宽/m	闸首宽/m	泄洪闸/(m×个)	导流墙/m	导流墩
原方案	28	28	14×10	150	无
优化方案 1	28	28	14×10	220	无
优化方案 2	28	28	14×10	250	无
优化方案 3	28	28	14×10	220	8 m×3



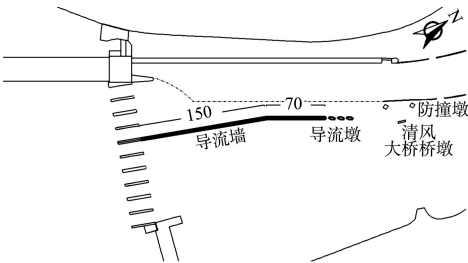
a) 原方案



b) 优化方案1



c) 优化方案2



d) 优化方案3

图 4 船闸比选布置方案 (单位: m)

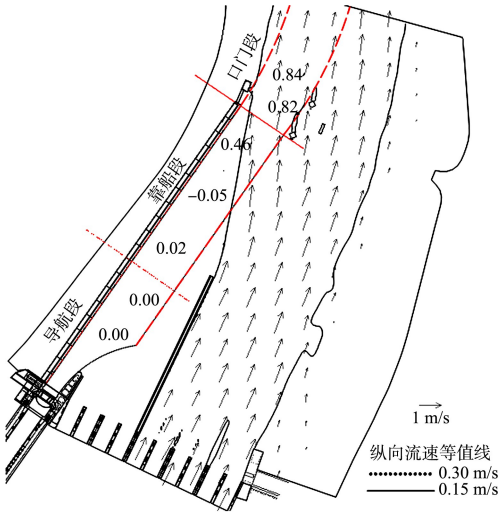
由图 4 和表 1 可知, 各个方案船闸与泄洪闸的设计尺寸一致, 唯一不同的是导流墙的设计尺寸。原方案导流墙长 150 m; 优化方案 1 导流墙长 220 m; 优化方案 2 导流墙长 250 m; 优化方案 3 导流墙长 220 m, 并在导流墙下游增设 3 个长约 8 m 的导流墩。

4 通航水流条件比选

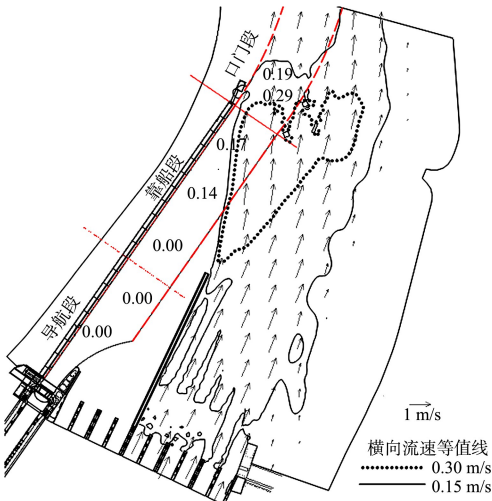
本文通过控制变量法控制各个方案下模型边界条件相同, 研究各个方案的优化效果。模型上游边界为流量边界, 为船闸最大设计通航流量 $850\text{ m}^3/\text{s}$; 下游边界为水位边界, 为上浦闸闸上最高通航水位 7.5 m。

4.1 水流流态分析

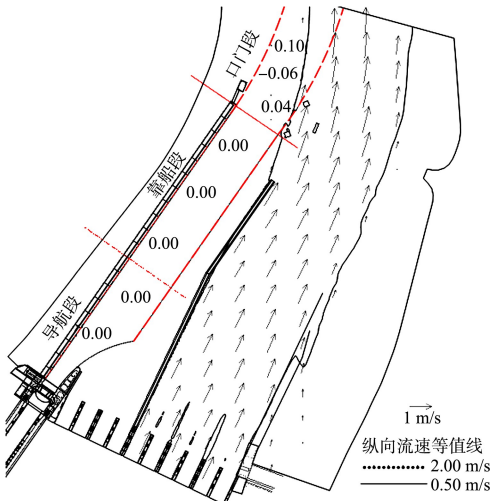
如图 5 所示, 在相同的泄流与水位条件下, 船闸下游河道流态近似。水流分别由右侧泄洪闸与电站出水至河槽中。受导流墙影响, 水流顺着导流墙的走向向下, 水流通过导流墙后向左侧水域扩散, 河道右侧流速放缓, 左侧流速增加。



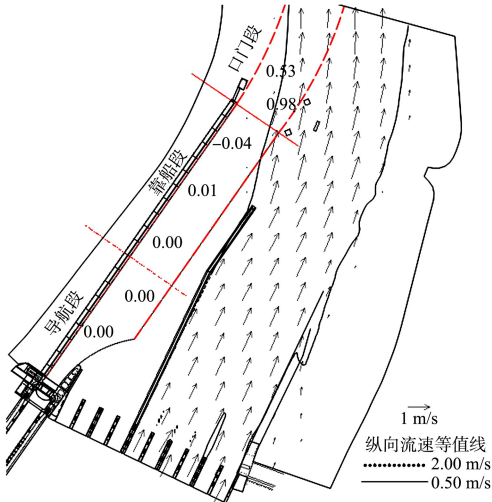
a) 原始方案纵向流速



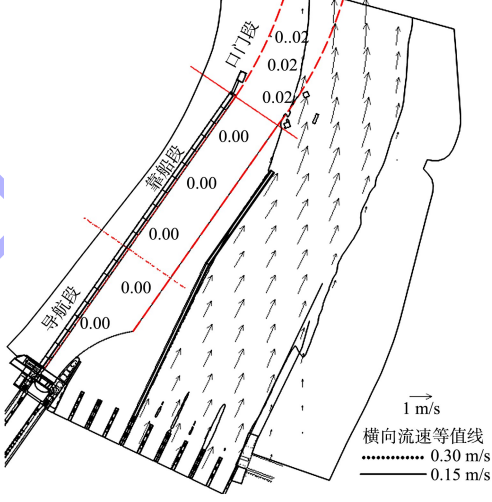
b) 原始方案横向流速



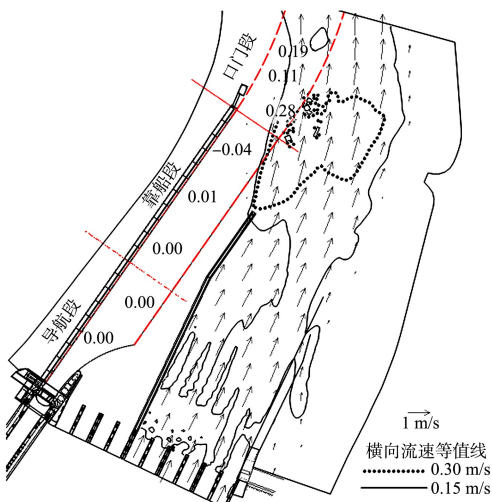
e) 优化方案2纵向流速



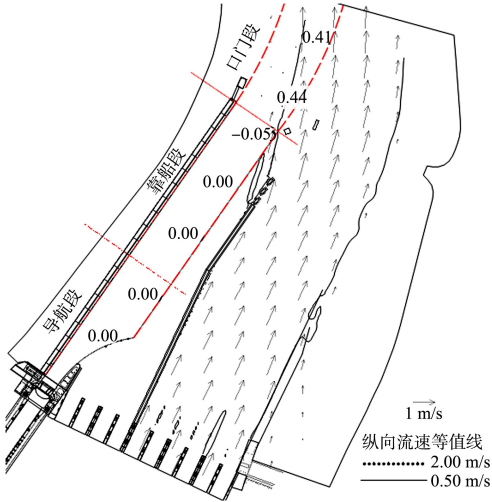
c) 优化方案1纵向流速



f) 优化方案2横向流速



d) 优化方案1横向流速



g) 优化方案3纵向流速

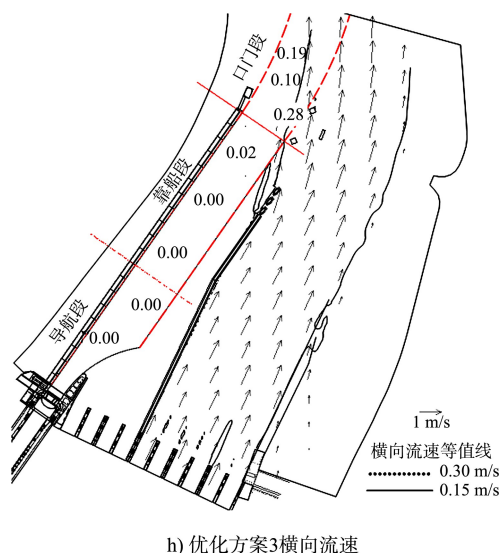


图5 船闸下游引航道流速分布 (单位: m/s)

如表2所示,受各方案不同导流墙布设影响,水流对船闸下游引航道的影响位置和入流角度有所差异。原始方案,导流墙长150 m,并与船闸下游引航道存在 10° 的夹角,水流于导流墙下游57 m处斜向进入靠船段中部,与引航道夹角约 26.9° ;优化方案1,导流墙长220 m(其中150 m与原始方案导流墙一致,新增70 m导流走向与船闸下游引航道平行),水流于导流墙下游50 m处斜向进入靠船段尾部,与引航道夹角约 24.3° ;优化方案2,导流墙长250 m(其中150 m与原始方案导流墙一致,新增100 m导流走向与船闸下游引航道平行),水流于导流墙下游46 m(清风大桥)处斜向进入口门段,与口门段夹角约 18.0° ;优化方案3下,导流墙长220 m(其中150 m与原始方案导流墙一致,新增70 m导流走向与船闸下游引航道平行,并新增3座8 m长的导流墩),水流于导流墙下游46 m(清风大桥)处斜向进入靠船段尾部,与引航道夹角约 22.7° 。

初步可知, 优化方案 2 入流角度较小, 入流位置在口门段。与其余方案相比, 该方案对引航道保护效果相对较好。

表 2 各方案流态

方案	入流角度/ $^{\circ}$	入流位置
原方案	26.9	靠船段中部
优化方案 1	24.3	靠船段尾部
优化方案 2	18.0	口门段
优化方案 3	22.7	靠船段尾部

4.2 水流流速分析

根据《内河通航标准》中对各段流速的规定,通航水流条件是否满足通航要求的评定标准见表3。

表3 引航道各段流速大小参考标准 m/s

位置	最大纵向流速	最大横向流速	最大回流流速
导航段	0.10	0.10	0.10
靠船段	0.50	0.15	0.40
口门区	2.00	0.30	0.40

注：当纵向、横向与回流流速小于 0.10 m/s 时为静水。静水区与动水区之间的流态可有过渡。

如图 6 所示, 为进一步了解船闸下游引航道内水流流态情况, 在船闸上下游引航道内共布设 10 个流速采样点, 从定量上分析上下游导航段、靠船段以及口门段水流纵向、横向以及回流流速是否满足规范要求, 其流速统计结果见表 4。

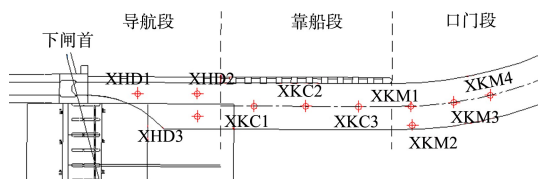


图 6 下闸首导航段、靠船段与口门段流速采样点布置

如图 5、表 4~5 所示,受各方案不同导流墙布设影响,各速度点流速与各段流速超标水域面积均不同。在原始方案与优化方案 1 工况下,存在横向流速超标的流速点出现在较明显的流速超标水域。而在优化方案 2 与优化方案 3 下,不存在横向流速超标的流速点,仅优化方案 3 在靠船段存在局部水域不满足要求。

表 4 下游引航道采样点纵向、横向流速

[illegible]

续表4

位置	采样点	原始方案		优化方案 1		优化方案 2		优化方案 3	
		纵向流速	横向流速	纵向流速	横向流速	纵向流速	横向流速	纵向流速	横向流速
靠船段	XKC1	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	XKC2	-0.05	0.14	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	XKC3	0.46	0.17	-0.04	0.03	0.00	0.00	-0.05	0.02
口门段	XKM1	0.84	0.29	-0.14	0.02	-0.05	0.02	-0.05	0.02
	XKM2	0.82	0.31	0.98	0.28	0.04	0.02	0.44	0.28
	XKM3	0.84	0.19	0.53	0.11	-0.06	0.02	0.26	0.10
	XKM4	0.80	0.12	1.00	0.19	0.10	0.02	0.41	0.19

表 5 下游引航道纵向、横向流速超标面积 m²

位置	原始方案		优化方案 1		优化方案 2		优化方案 3	
	纵向流速	横向流速	纵向流速	横向流速	纵向流速	横向流速	纵向流速	横向流速
导航段	0	0	0	0	0	0	0	0
靠船段	1 426	1 727	131	142	0	0	0	140
口门段	0	576	0	172	0	0	0	0

在原始方案下，超标的流速点有：靠船段 XKC3 点横向流速 0.17 m/s、口门段 XKM2 点横向流速 0.31 m/s，此外，靠船段纵向流速超标 1 426 m²、横向流速超标 1 727 m²、口门段横向流速超标 576 m²；优化方案 1 超标的流速点有口门段 XKM2 点横向流速 0.28 m/s，此外，靠船段纵向流速超标 131 m²、横向流速超标 142 m²、口门段横向流速超标 172 m²；优化方案 2，船闸下游引航道与口门段流速均满足要求；优化方案 3，流速点纵向与横向流速均满足要求，仅靠船段横向流速超标 140 m²。

分析比较原始方案与优化方案 1 可知：通过改变导流墙走向平行引航道可以有效减小水流扩散斜向进入航道的角度、有效减小引航道中水体横向流速、有效减小引航道中流速超标的水域面积，其中靠船段纵向流速和横向流速的改善效果达 90%，口门段横向流速改善效果达 70%。

分析比较优化方案 1 与优化方案 2 可知：通过延长导流墙长度，可以进一步改善引航道内水流通航条件；优化方案 2 中的导流墙长度为 250 m，其尺寸与船闸下游引航道（导航段+靠船段）长度近似，对引航道内水体起到充分的掩护作用；河道右侧下泄水流通过导流墙后，扩散并直接进入口门段，由于口门段航道转向正北方向，

使得水流斜向进入口门段的角度进一步减小，更好地保证了口门段通航水流条件。根据表 5 可知，与优化方案 1 相比，优化方案 2 在靠船段纵向流速和横向流速的改善效果以及口门段横向流速改善效果均达 100%。

分析比较优化方案 1 与优化方案 3 可知：通过在导流墙末端增设导流墩，对引航道以及口门段的水流条件存在一定的改善作用；增设导流墩后，靠船段的纵向流速与口门段的横向流速均满足规范要求，然而导流墩对靠船段横向流速并没有明显的改善效果，该段水域横向流速超标面积仍为 140 m²。根据表 5 可知，与优化方案 1 相比，优化方案 3 在靠船段纵向流速和口门段横向流速改善效果均达 100%，在靠船段横向流速改善效果不足 2%。

5 结论

1) 原始方案与优化方案 1 对比，在下泄水流与引航道存在一定交角时，通过布设平行于引航道的导流墙可以较好地保护航道内水流条件，其靠船段与口门段通航水流条件改善效果可达70%~90%。

2) 优化方案 1 与优化方案 2 对比，导流墙长度越长对引航道掩护作用越充分、通航水流条件改善效果越好，靠船段与口门段通航水流条件改

善效果可达 100%。

3) 优化方案 1 与优化方案 3 对比, 通过布设导流墩, 可以较好地改善引航道内纵向流速条件, 改善效果均达 100%; 但对靠船段横向流速条件的改善效果不明显, 改善效果不足 2%。

参考文献:

[1] 颜志庆, 赵建钧, 辜晋德, 等. “S”形急弯河段通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2021(6): 128-134.

[2] 何飞飞, 王晓刚, 王彪, 等. 基于等面积法的透空式隔流墙二维水流数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(10): 86-91.

[3] 王彪, 何飞飞, 王效远, 等. 弯曲窄槽型河段多线船闸通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2021(4): 108-115.

[4] 刘芷妍, 李艳, 张绪进. 长安水利枢纽二线船闸上引航

道布置物理模型试验研究[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(5): 75-77, 153.

[5] 刘芷妍, 李艳. 浅谈引航道口门区导航墙型式及应用[J]. 珠江水运, 2021(8): 78-79.

[6] 潘雅真, 罗序先, 李穗清, 等. 贵港航运枢纽船闸引航道回门区水流条件的研究[J]. 水运工程, 1996(7): 30-35.

[7] 朱红, 郝品正. 导流墩改善船闸引航道口门区水流条件试验研究[J]. 水道港口, 2005, 26(2): 109-112.

[8] 郑国诞, 吴军君, 史英标, 等. 曹娥江大闸闸上河道建桥通航水流条件[J]. 水运工程, 2021(6): 141-146.

[9] 郑国诞, 曹颖, 史英标, 等. 曹娥江大闸建闸后闸上河道冲淤变化分析[J]. 人民长江, 2020, 51(S2): 20-23.

[10] 王柏明, 史英标, 杨元平. 潮汐河口闸上河床演变对建闸的响应[J]. 水电能源科学, 2011, 29(5): 99-102.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 48 页)

5 结论

1) 本文通过有限元软件建立了带有卸荷板的大圆筒结构三维有限元模型, 研究岸桥荷载、波浪力、堆载土压力分别作用下的结构受力特性。结果表明, 在岸桥荷载作用中, 顶升荷载为最大荷载。

2) 顶升荷载作用下, 圆筒顶部竖向、环向弯矩显著, 分别为 202、49 kN·m。而对圆筒下部结构影响与波浪荷载、土压力大致相同。因此在顶部圆筒处需要增大壁厚并加强配筋, 以抵御结构内力。

3) 受上部结构及荷载影响, 圆筒顶部出现竖向弯矩较大值, 而圆筒下部受到的环向弯矩影响更大。圆筒下部整体呈现波浪侧受拉、土侧受压的趋势。

4) 针对老旧码头改造工程, 运用有限元软件建立带卸荷板的大圆筒结构整体模型, 可综合考虑上部结构及其荷载, 从而得到较为全面的内力计算结果, 为工程设计提供参考。

参考文献:

[1] 王元战, 王文良. 大圆筒结构计算与工程应用[M]. 北

京: 人民交通出版社, 2008.

[2] 王元战, 蔡雅慧, 王禹迟. 沉入式大圆筒码头稳定性有限元强度折减法分析[J]. 海洋工程, 2013, 31(2): 1-10.

[3] 张博杰, 王婷婷. 大圆筒结构整体稳定性和水平变位三维数值模拟[J]. 水运工程, 2019(8): 177-182.

[4] 王婷婷, 陈良志, 李建宇. 格型钢板桩与复合地基组合式岛壁稳定性研究[J]. 水运工程, 2019(1): 173-178, 198.

[5] 祝成. 基床式大直径薄壁圆筒结构受力机理与弹簧元数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2006.

[6] 覃杰. 广州港南沙港区集装箱运输特点及存在问题[J]. 中国港口, 2010(5): 23-24.

[7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[9] 刘洋, 麦宇雄, 覃杰. 适用于江海联运海港自动化集装箱码头的总体布置方案[J]. 水运工程, 2019(9): 119-124.

(本文编辑 王璁)