

# 平原河网地区泵闸合建枢纽布置形式

陆倩<sup>1,2</sup>, 崔冬<sup>1,2</sup>, 田利勇<sup>1,2</sup>, 张婧<sup>1,2</sup>

(1. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061;

2. 上海市水务局防汛减灾工程技术研究中心, 上海 200061)

**摘要:** 由于泵闸合建后易导致枢纽上下游水流流态复杂化, 因此需要合理选择具体布置形式以减轻不利影响。以上海地区拟建的赵家沟东泵闸工程为例, 采用平面二维水动力数学模型对工程附近的水流流态进行模拟计算, 从水动力条件角度对平原河网地区泵闸合建枢纽的不同平面布置形式进行比选分析。结果表明: 从枢纽上下游总体流态看, 泵闸对称布置形式的水动力条件优于不对称布置形式; 从节制闸排涝时闸下流速分布看, 对称布置形式中的“闸+泵+闸”形式比“泵+闸+泵”形式对减轻闸下冲刷更为有利; 从节制闸引水时内河侧通航水流条件看, “闸+泵+闸”形式比“泵+闸+泵”形式对内河通航横流的影响明显减小, 当采用相同内河侧通航横流限制条件时, “闸+泵+闸”形式比“泵+闸+泵”形式允许的过闸流量明显增大。

**关键词:** 平原河网; 泵闸合建; 布置形式; 数值模拟; 水动力条件

**中图分类号:** TV61

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2019)03-0062-06

**Arrangement types of a combined sluice-pump hub in plain river network region**//LU Qian<sup>1,2</sup>, CUI Dong<sup>1,2</sup>, TIAN Liyong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2</sup> (1. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200061, China; 2. Engineering Research Center on Flood Control and Disaster Reduction, Shanghai Water Authority, Shanghai 200061, China)

**Abstract:** Due to the complexity of the flow pattern in the upstream and downstream of the combined sluice-pump hub, reasonable selection for arrangement types is required to reduce the adverse effects. Taking the Zhaojiagou East Combined Sluice-Pump Hub in Shanghai as an example, comparison and selection for different arrangement types of a combined sluice-pump hub in plain river network regions were analyzed in the aspect of hydrodynamic conditions based on two-dimensional numerical simulation of the flow patterns near the project. The results show that, symmetric arrangements are superior to asymmetric ones in terms of the overall flow patterns in the upstream and downstream of the hub. In terms of the velocity distribution during flood drainage, the sluice-pump-sluice arrangement is superior to the pump-sluice-pump arrangement in the symmetric arrangement types, because it is more beneficial to reduce the scour downstream the sluice. From the perspective of river navigation conditions during water diversion, the influence of sluice-pump-sluice arrangement on the navigable cross-flow of the inland river is obviously reduced compared with the pump-sluice-pump arrangement. The allowable discharge of the sluice-pump-sluice arrangement is obviously larger than that of the pump-sluice-pump arrangement under the same restrictions on the navigable cross-flow of the inland river.

**Key words:** plain river network; combined sluice-pump; arrangement type; numerical simulation; hydrodynamic condition

平原河网地区一般具有河网水系密布、水体流动性复杂等特点, 往往采取分片控制的治水方针, 其中泵闸作为水利片控制工程的重要组成部分, 主要发挥排涝功能, 兼顾引水、水资源调度等综合功能。关于水闸、泵站枢纽的布置方式, 一般有分建与合建两大类。其中, 传统的泵闸分建方式, 占地面积大, 在土地资源宝贵的平原地区, 易引起征地拆迁和移民安置等难以解决的社会难题; 泵闸合建方式, 具有

布置紧凑、占地面积小、挡水面小、运行管理方便等优点, 在平原河网地区被广泛应用<sup>[1]</sup>。

目前, 泵闸合建枢纽工程的布置形式主要有3类: ①平面不对称布置, 即水闸与泵站分居河道两侧, 如上海的张家塘泵闸、虹江泵闸、斜路港泵闸、清水港泵闸、朱泖河泵闸工程等<sup>[2-3]</sup>; ②平面对称布置, 包括2种具体布置方式, 一种是“泵+闸+泵”, 即水闸位居河道中间, 泵站对称布置在水闸两侧, 如上海

的龙华港泵闸、木渎港泵闸工程等<sup>[2]</sup>;另一种是“闸+泵+闸”,即泵站位居河道中间,水闸对称布置在泵站两侧,如上海的薛家泓泵闸、常熟的望虞河枢纽、杭州的钱江枢纽、萧山四工段排涝泵闸工程等;③立面分层布置,即泵站布置在水闸的上层,下层闸室可代替水泵流道,适合规模较小的小型水利枢纽,如上海化工区排水工程泵涵枢纽等<sup>[4]</sup>。

泵闸合建布置形式虽解决了征地面积大等问题,但易引起枢纽上下游水流流态的特殊化和复杂化<sup>[5-11]</sup>,需要谨慎对待、合理布置。本文以上海地区拟建的赵家沟东泵闸工程为例,通过平面二维水动力数学模型的模拟论证,从水动力条件角度对泵闸合建工程的不同布置形式进行比选分析,以期为类似平原河网地区泵闸合建工程的布置提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程平面布置

拟建的赵家沟东泵闸工程是上海市浦东新区防洪排涝和水资源调度沿长江口的6个引排水口门和通道之一,位于浦东新区赵家沟入长江口处。赵家沟东泵闸工程包括泵闸1座(节制闸净宽30m,泵站设计流量 $90\text{ m}^3/\text{s}$ )以及泵闸前长约800m的引河。其中泵闸主体结构包括闸首、站身、内外河消力池、进出水池、内外河海漫及防冲槽,主体结构总长365m,内外河海漫段河道底宽分别为130m和80m,图1为赵家沟东泵闸工程示意图。

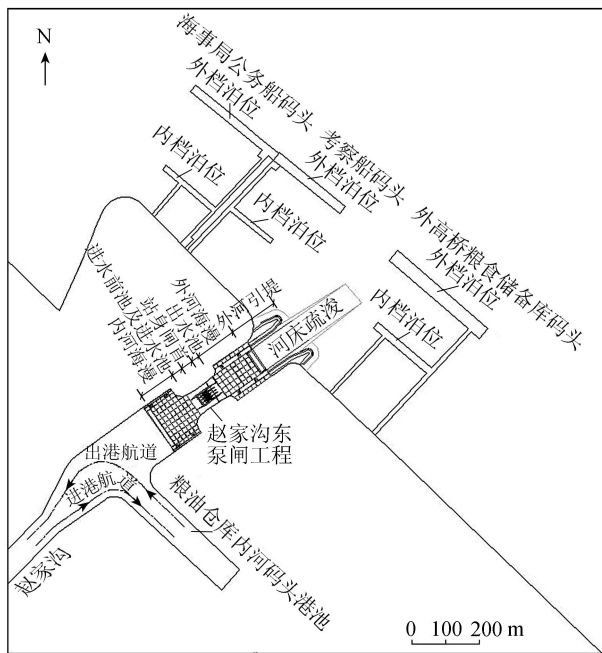
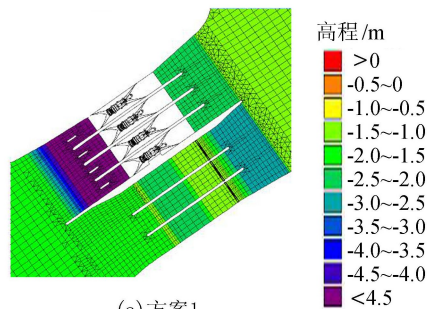


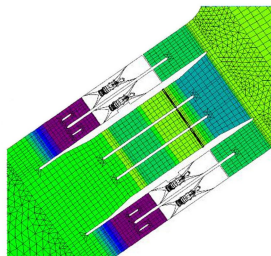
图1 赵家沟东泵闸工程示意图

### 1.2 泵闸平面布置方案

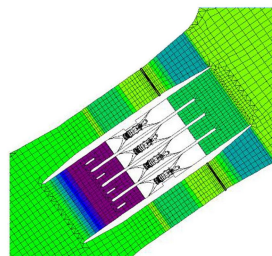
泵闸工程平面布置设计了3种布置方案,见图2。



(a) 方案1



(b) 方案2



(c) 方案3

图2 3种泵闸平面布置方案示意图

方案1:“泵+闸”不对称布置形式,水闸分3孔设在河道右侧,单孔净宽10m,泵站集中布置在河道左侧,泵型采用4台斜式轴流泵,单机流量 $22.5\text{ m}^3/\text{s}$ 。

方案2:“泵+闸+泵”对称布置形式,水闸分3孔设在河道中间,单孔净宽10m,4台斜式轴流泵对称布置在闸的两侧,两侧各2台,单机流量 $22.5\text{ m}^3/\text{s}$ 。

方案3:“闸+泵+闸”对称布置形式,4台斜式轴流泵设在河道中间,单机流量 $22.5\text{ m}^3/\text{s}$ ,水闸对称布置在泵站的两侧,两侧为单孔闸门,单孔净宽15m。

## 2 研究方法

### 2.1 数学模型

采用丹麦水力学研究所(DHI)研发的MIKE 21 Flow Model(FM)模块,建立平面二维水动力模型进行模拟计算,分别建立大、小两个模型。大模型为长江口、杭州湾整体模型,上游边界取至江阴,东至外海 $123^\circ\text{E}$ ,北至吕四港附近,南至象山港附近,东西宽约275km,南北长约305km,大模型范围、网格及地形见图3。小模型范围为长江口南港局部水域,以工程区域为中心,向上下游各延伸5km,现状条件下(即工程前)小模型范围、网格及地形见图4。大模型主要为小模型提供开边界条件,小模型用于模拟不同泵闸布置方案的水流流态。小模型采用无结构三角形与四边形混合格网,为保证计算精度,对泵闸工程区域网格进行加密,单元格最小边长约为0.5m,工程区地形采用2016年实测资料(吴淞基面,下同)。3种泵闸平面布置方案的模型网格及地形见图2。

上海市水利工程设计研究院有限公司建立的长

表 1 数值模拟计算工况

模拟工况	内河水位/m	外海潮位/m	最大设计流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
闸排涝工况 1	控制最高水位 3.75	平均低潮位 0.87	285.00
闸排涝工况 2	最高通航水位 3.00	平均低潮位 0.87	285.00
闸排涝工况 3	最低通航水位 2.00	平均低潮位 0.87	285.00
泵排涝工况 1	最高通航水位 3.00	20 年一遇高潮位 5.63	90.00
泵排涝工况 2	最低通航水位 2.00	平均高潮位 3.39	90.00
闸引水工况 1	最高通航水位 3.00	5 年一遇高潮位 5.24	183.90
闸引水工况 2	最低通航水位 2.00	平均高潮位 3.39	131.90

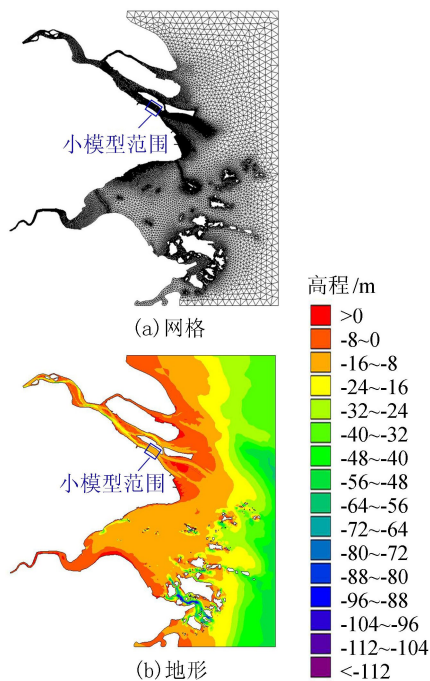


图 3 长江口、杭州湾整体模型网格及地形

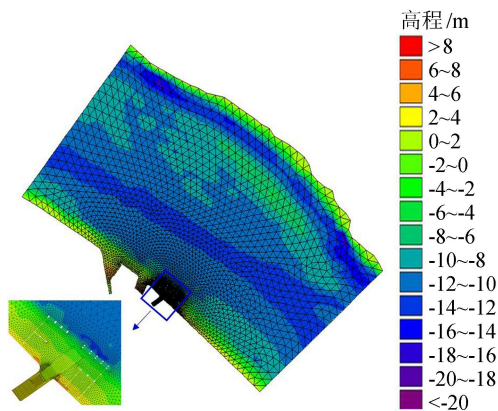


图 4 工程前小模型范围、网格及地形

江口、杭州湾整体模型,已经历过多次水文测验成果的率定验证,并得到了成功应用<sup>[12-13]</sup>。本次计算中,计算潮型采用 2006 年 8 月 10—12 日汛期大潮,大模型外海开边界给定潮位过程,上游江阴处给定流量过程;小模型外海北边界给定流量过程,南边界给定水位过程,小模型外海南北边界由大模型计算提供,工程后小模型内河给定水位边界。

## 2.2 计算工况

拟建赵家沟东泵闸工程的主要功能为排涝和引水,因此,二维水动力数学模型计算工况包括排涝工况和引水工况,其中排涝工况分为节制闸排涝(简称闸排涝)和泵站排涝(简称泵排涝)2 种情况,引水工况为节制闸引水(简称闸引水)。考虑内外河不同的水位组合情况,计算工况设定了 7 组,详见表 1。

初步计算结果表明,上述 7 组工况中,在闸排涝工况 1 与闸引水工况 1 条件下,3 种泵闸平面布置方案的水动力条件差异最为明显。限于篇幅,下文以

闸排涝工况 1(以下简称排涝工况)与闸引水工况 1(以下简称引水工况)作为典型计算工况,对 3 种平面布置方案展开详细分析比较。

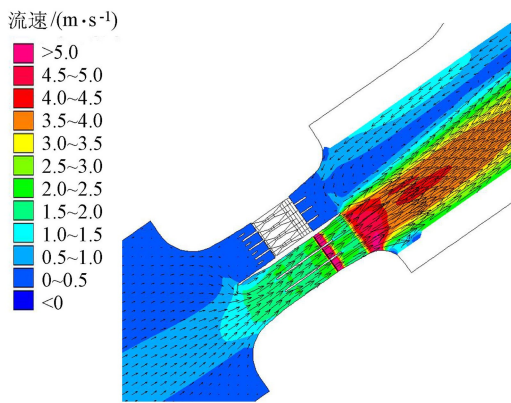
## 3 计算结果及其分析

根据 SL 75—1994《水闸技术管理规程》及《上海市水闸技术管理规定》,过闸水流应平衡、平稳,避免发生集中水流、折冲水流、回流、漩涡等不良流态。此外,为保证泵站的正常运行,还要尽量减少泵站上游及下游侧泥沙淤积。因此,以下重点比较 2 种典型工况下,3 种泵闸平面布置方案下枢纽上下游平面二维水流流态和流速分布情况。

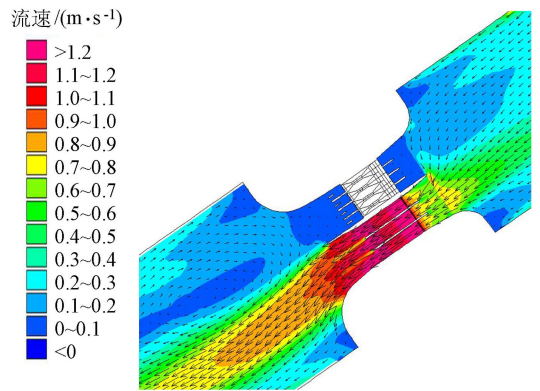
### 3.1 对称布置与不对称布置方案的比较

在排涝和引水工况下,3 种平面布置方案枢纽上下游局部流场见图 5~7。从图中可以看出,当采用方案 1(“泵+闸”不对称布置形式)时,水流主要集中在闸门所在直线的河道一侧,上游来流发生偏折,泵站前形成大片滞水区,节制闸前水流收缩明显,横向流速较大。枢纽下游由于单侧泄流,泵站前出现较大的回流,回流区宽度约占河宽的 40%,在排涝工况下,回流区尾部延伸至外高桥粮食储备库码头外档泊位,距枢纽出水口约为 650 m,在引水工况下,回流区尾部延伸至内河侧与粮油仓库内河码头港池的“T”形交叉口(简称“T”形区),距枢纽出水口约为 320 m。主流区与回流区之间形成的压差产生横向水面坡降,使主流沿河道一侧前进,形成偏流。

当采用方案 2(“泵+闸+泵”对称布置形式)时,水流基本沿着河道中心线流动,上游来流在两侧泵站前偏折流向闸前。枢纽下游两侧泵站前出现小范围回流,两侧回流区总宽度约占河宽的 35%,在排涝工况下,回流区尾部延伸至与外高桥粮食储备库码头内档泊位齐平的位置,距枢纽出水口约为 460 m,在引水工况下,回流区尾部延伸至“T”形区,距离枢纽出水口约为 320 m。当采用方案 3(“闸+泵+闸”对称布置形式)时,两侧闸下水流沿着水闸中心线逐渐扩大至整个河道流动,上游来流的偏折现象得到很大的缓解。枢纽下游泵站前回流区范围较

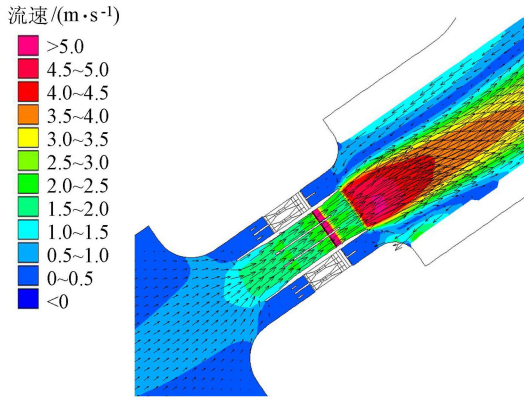


(a) 排涝工况

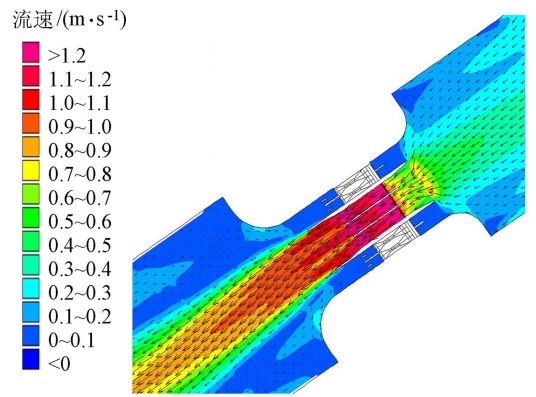


(b) 引水工况

图5 方案1 枢纽上下游流场

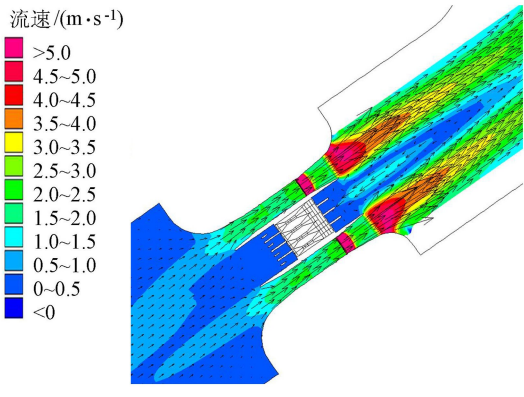


(a) 排涝工况

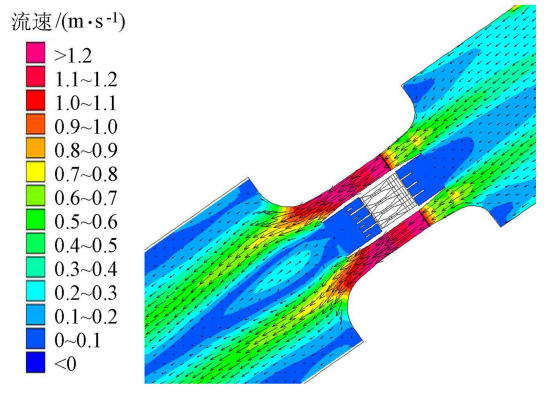


(b) 引水工况

图6 方案2 枢纽上下游流场



(a) 排涝工况



(b) 引水工况

图7 方案3 枢纽上下游流场

小,宽度约占河宽的20%,在排涝和引水工况下,回流区尾部距枢纽出水口分别约为130 m和150 m。

从总体流态上看,平面对称布置形式水流较为平顺、流畅,没有明显的横流和偏流现象,优于不对称布置形式。两种对称布置方案相比,方案3较方案2上游来流偏折现象减轻,下游泵站前回流区范围减小,方案3略优于方案2。为进一步比较两种平面对称布置方案水动力条件的差异,下文分别从闸下流速分布和内河侧通航水流条件方面,对方案2和方案3进行详细比较。

### 3.2 不同对称布置方案的比较

#### 3.2.1 流速分布

从排涝和引水工况下,两种平面对称布置方案泵闸下游流速分布图(图6和图7)可以看出,相较于引水工况,排涝工况下流速更大,节制闸下段防冲压力更大,因此重点比较排涝工况下,两种对称布置方案闸下流速分布情况。

由闸下流速等值线分布(图8)可以看出,方案2闸下最大流速在5~5.5 m/s之间,大流速区延伸范围较远,3 m/s流速等值线延伸距离约为250 m,出海

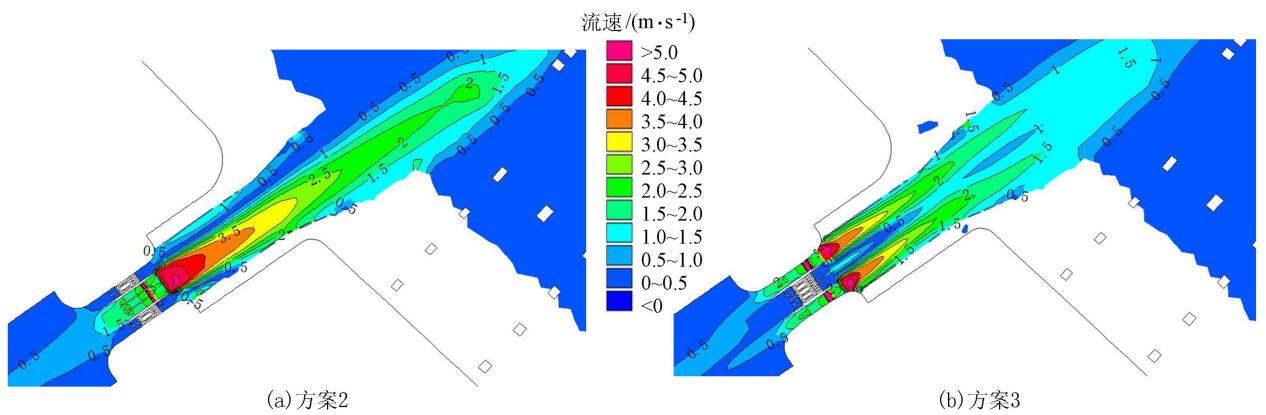


图8 排涝工况闸下流速等值线分布

口处流速约为  $2.3 \text{ m/s}$ , 闸下流速总体较大。方案3 闸下最大流速也在  $5 \sim 5.5 \text{ m/s}$  之间, 大流速区延伸范围相对缩小,  $3 \text{ m/s}$  流速等值线延伸距离约为  $140 \text{ m}$ , 出海口处流速约为  $1.1 \text{ m/s}$ , 闸下总体流速相对减小。从闸下流速分布情况看, 方案3 优于方案2, 对减轻节制闸下段水流冲刷更为有利。

### 3.2.2 内河侧通航水流条件

距工程枢纽约  $350 \text{ m}$  的内河侧, 垂直河道方向布置有粮油仓库内河码头港池 (如图1), 船舶进出港需要横穿内河, 枢纽的运行势必会在交叉口处产生较大横流, 给船舶进出港带来一定的影响。

在排涝和引水工况下, 两种平面对称布置方案内河侧流速等值线分布如图9 和图10 所示。从图中

可以看出, 排涝工况下, 当过闸流量为  $285.00 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 方案2 和方案3 的“T”形区最大横向流速分别为  $0.62 \text{ m/s}$  和  $0.61 \text{ m/s}$ ; 引水工况下, 当过闸流量为  $183.90 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 方案2 和方案3 的“T”形区最大横向流速分别为  $0.72 \text{ m/s}$  和  $0.42 \text{ m/s}$ 。即当过闸流量相同时, 排涝工况下, 两种平面对称布置方案“T”形区最大横向流速值相当, 引水工况下, 方案3 的“T”形区最大横向流速比方案2 明显减小。进一步计算表明, 引水工况下, 在“T”形区横向流速不超过允许横向流速限值条件下 (参照 JTJ305—2001 《船闸总体设计规范》, 横向流速限值按  $0.3 \text{ m/s}$  取值), 方案3 的允许过闸流量 (约为  $107 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 大于方案2 的允许过闸流量 (约为  $77 \text{ m}^3/\text{s}$ )。因此, 从对内

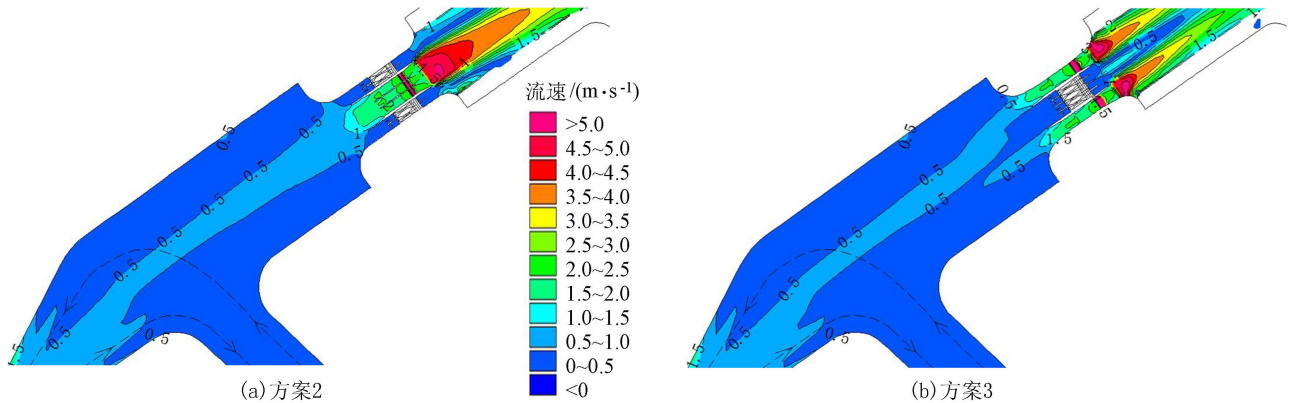


图9 闸排涝工况内河侧流速等值线分布

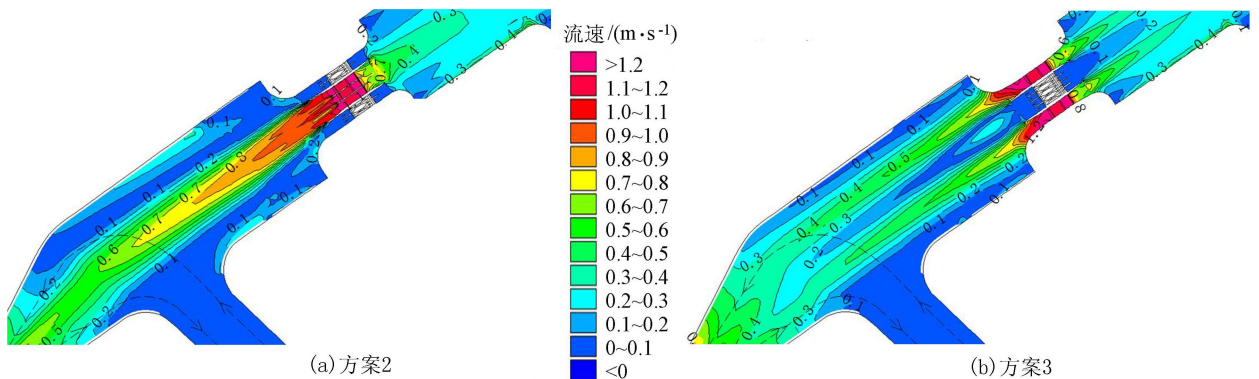


图10 引水工况内河侧流速等值线分布

河侧通航水流条件的影响看,方案3 优于方案2。

## 4 结 论

a. 从枢纽上下游总体流态看,平面对称布置形式(方案2 和方案3)的水流较为平顺、流畅,没有明显的横流和偏流现象,优于不对称布置形式(方案1);方案3 较方案2 上游节制闸前来流偏折现象减轻,下游泵站前回水区范围减小。

b. 当节制闸排涝时,从两种平面对称布置形式的闸下流速分布来看,方案3 闸下总体流速相对较小,对减轻闸下水流冲刷更为有利。

c. 在节制闸引水工况下,当过闸流量相同时,方案3 对内河侧“T”形区横向流速的影响比方案2 明显减小;当采用相同的内河侧通航横向流速限制条件时,方案3 的允许过闸流量较方案2 明显增大。

d. 经过对3 种平面布置方案水动力条件的分析比较,方案3(“闸+泵+闸”对称布置形式)的水动力条件最优,加之方案3 具有闸上空间利用率高、运行管理较方便等优点,为该工程的推荐方案,可作为类似平原河网地区泵闸合建枢纽泵闸平面布置形式。

## 参考文献:

[1] 沈芝莹. 闸站结合枢纽交叉河道水流三维数值模拟及试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.

[2] 周琴, 陈映华. 浅论引排水泵闸布置型式的多样性[J]. 造船工业建设, 2005(3): 27-30. (ZHOU Qin, CHEN Yinghua. Variation analysis of the pump and sluice layout scheme [J]. Shipbuilding Industry Construction, 2005(3): 27-30. (in Chinese))

[3] 卞彬, 刘晓青, 丁园. 大型泵闸进出水池流态数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2013(5): 133-136. (BIAN Bin, LIU Xiaoqing, DING Yuan. Numerical simulation of flow pattern in the sluice-pump hub [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(5): 133-136. (in Chinese))

[4] 梁民阳, 熊孟果. 水闸与泵站合建的一种新的布置形式[J]. 中国农村水利水电, 2006(6): 82-86. (LIANG Minyang, XIONG Mengguo. A new layout form of the joint construction of water gate and pumping station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(6): 82-86. (in Chinese))

[5] 季永兴. 不对称布置的泵闸枢纽工程水流问题分析[J]. 水利水电科技进展, 1999, 19(1): 27-30. (JI Yongxing. Analysis of current problems in unsymmetrical layout of combined sluice-pumping station project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1999, 19(1): 27-30. (in Chinese))

[6] 陆银军, 周伟, 明月敏, 等. 基于数值模拟的闸站结合布置优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(11): 963-967. (LU Yinjun, ZHOU Wei, MING Yuemin, et al.

Layout design optimization of integrated pumping station and sluice with numerical stream simulation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(11): 963-967. (in Chinese))

[7] 严忠民, 周春天, 阎文立, 等. 平原水闸泵站枢纽布置与整流措施研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(2): 50-53. (YAN Zhongmin, ZHOU Chuntian, YAN Wenli, et al. Study on the layout of combined sluice-pump station projects and modification of flow pattern [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2000, 28(2): 50-53. (in Chinese))

[8] 傅宗甫, 顾美娟, 严忠民. 闸站合建枢纽导流墙体型及适宜长度[J]. 水利水电技术, 2011, 42(10): 128-131. (FU Zongfu, GU Meijuan, YAN Zhongmin. Shape and suitable length for guide wall of combined sluice-pump station project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(10): 128-131. (in Chinese))

[9] 黄建军, 郑源, 张盾. 泵闸结构流场的水力特性[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(2): 149-154. (HUANG Jianjun, ZHENG Yuan, ZHANG Dun. Hydraulic characteristics of flow filed in pump and sluice gate [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(2): 149-154. (in Chinese))

[10] 伍志元, 蒋昌波, 陈杰, 等. 泄水闸开启方式对通航水流条件的影响[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3): 73-77. (WU Zhiyuan, JIANG Changbo, CHEN Jie, et al. Influence of sluice gate opening mode on navigation flow condition [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(3): 73-77. (in Chinese))

[11] 黄章羽, 马晓忠, 王玲玲, 等. 复杂嵌套网格模型及其在三河闸大修工况泄流流态模拟中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 653-658. (HUANG Zhangyu, MA Xiaozhong, WANG Lingling, et al. Application of a nested grid hydrodynamic model to discharge pattern simulation overhaul conditions of Sanhe Sluice [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(6): 653-658. (in Chinese))

[12] 崔冬, 刘新成, 俞相成. 泥沙数学模型在围填海工程促淤效果预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 78-84. (CUI Dong, LIU Xincheng, YU Xiangcheng. Applicability of sediment numerical model to prediction of effect of reclamation project on accelerating sediment deposition [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(1): 78-84. (in Chinese))

[13] 吴继伟, 刘新成, 潘丽红. 长江口北支咸潮倒灌控制工程水动力数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 43-45. (WU Jiwei, LIU Xincheng, PAN Lihong. Hydrodynamic simulation of control project on saltwater intrusion from north branch of Yangtze River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(4): 43-45. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-05-16 编辑: 雷燕)