

通启运河水利枢纽工程选址研究

王家骥

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:对于城区内受限较多的河道,为改善水环境保障水安全,常采用泵闸合建的方式解决。水利枢纽的工程选址直接关乎其全生命周期的投入与效益。现以南通通启运河水利枢纽为例,基于满足自身功能性的要求,协调区域整体建设规划,结合二维水流数学模型验证流态及流速分布,具体研究工程选址,探求工程建设最优解。

关键词:泵站;水闸;工程选址;数值模拟

中图分类号: TV61

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)08-0178-06

0 引言

受城市开发建设及居民生产生活影响,南通城区内部分河道淤积、缩窄甚至被切断,河道的行洪除涝能力被大大降低,致使部分地区遭遇设计暴雨时积水不能及时排出,形成短期内涝、长期水质恶化的问题。同时灾害性天气频发使得长江遭遇持续性洪水及极端高潮位几率增加,区域内涝水自排进一步受限。为此在通启运河河口新建泵闸水利枢纽将显著提升通启片的水体流动性和除涝能力,保障人民生命财产安全。

工程选址与总体布置直接影响工程的建设进度和投资,并最终决定工程能否发挥效益^[1]。工程选址应根据水工结构的功能、规模、特点和运行要求,综合考虑地形、地质、水流、潮汐以及工程布置、交通、施工、管理和投资等因素,经过技术经济比较后选定^[2]。胡欣^[3]分析研究了黄浦江下游可建范围内航运、开发、地质和动迁等因素,推荐长航锚地闸址作为黄浦江河口挡潮闸闸址。严忠民^[4]、傅宗甫^[5]通过对江苏、上海十余座闸站合建工程的物理模型试验研究,总结出闸站合建枢纽的主要布置型式及相应整流措施。陆倩^[6]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数值模拟,分析比较了泵闸布置形式不同对水流流态的影响。季永兴^[7]从泵闸枢纽运行管理角度,结合工程实例计算分析了闸门启闭过程对水流流态的影响。

现以南通通启运河水利枢纽为例,基于满足自身功能性的要求,协调区域整体建设规划,结合二维

水流数学模型验证流态及流速分布,具体研究工程选址,探求工程建设最优解,以期类似工程的平面布置提供参考。

1 工程概况

通启运河西起长江,东至黄海,全长 93.39 km,流经南通市区、通州区、海门市、启东市,承担 530 km²排涝及 100 万亩农田灌溉任务,是南通市和沿海开发重要的区域性引排骨干河道之一。该工程拟在营船港下游侧合建泵站、水闸枢纽,其中泵站设计排涝流量 80 m³/s,引水流量 56 m³/s;水闸设计排涝流量 270 m³/s,校核过闸排涝流量 517 m³/s,设计引水流量 117 m³/s。泵站设 5 台潜水贯流泵,站身长 38.5 m,总宽度为 37 m。水闸在其东侧,设 3 孔 12 m 净宽的弧形上翻门挡水,闸室与内河消力池合建,总长 38.5 m,宽 50.8 m。工程建成后,内河侧堤防按内河水位控制,能有效降低河道周边路网高程,提高地块开发价值,同时增强区域水动力,保障水安全。

2 工程选址

2.1 拟建区域现状分析

该工程选址主要聚焦在长江口至现状营船港闸约 1 km 的范围内,该段河道整体较为顺直。通启运河自长江口向内河侧约 1.1 km 处建有营船港水闸,净宽为 8×3 m,闸门为升卧门。水闸北侧毗邻振兴路,公路桥分为五跨,总长约 45.5 m,宽 40 m。桥梁与闸室分建,各成独立体系。营船港闸南侧通启运河两岸支堤与长江主江堤连通,共同组成长江堤防,支堤在营船港处实现防洪圈封闭。堤后地块以工厂为主,西岸自长江口起依次分布有粮油厂、饲料厂、钢结构

收稿日期: 2022-10-26

作者简介:王家骥(1991—),男,工学硕士,工程师,从事水利工程设计工作。

厂等,部分厂区较为破旧,东岸堤后依次为中海油油库和化工厂。两岸堤内滩地宽度约为 40 m,高程约为 4.0~5.5 m。

2.2 选址原则

该工程选址原则如下:

(1)新建水利枢纽要处理好与现状营船港闸和通启运河河道的关系,保证排涝和引水的水流畅通。

(2)在保证防洪、排涝、水资源调度等基本功能的前提下,水利枢纽应最大限度地与周边现状相协调,丰富视觉效果。

(3)水利枢纽应尽可能布置在河道顺直段,使水流平顺通畅,水闸应尽可能靠近河道中心线,最优化水力条件。

(4)工程选址应尽量减少对周边现状建筑的影响,应尽可能减少拆迁。

(5)在常规水工建筑物设计中体现创新的理念,充分利用新技术、新工艺、新材料,优先选用节能、环保、性能可靠、便于以后维护和运行管理的设备产品。

(6)枢纽管理区建筑风格简洁明快,管理区有一定活动和绿化空间。

(7)工程选址应便于使用、管理、施工和维护。

2.3 选址思路

根据选址原则和周边情况,工程的选址需要重点考虑以下几个问题。

2.3.1 选址与水利建设和城市发展的关系

项目建设不仅要满足水利工程建设的要求,还要与城市的发展相协调。目前长三角一体化已经上升为国家战略,南通正逐渐成为融入长三角一体化的新展示窗口。通启运河水利枢纽是滨江湾区域转型发展的重要基础设施建设项目,建成后对保障区域水安全、改善区域水环境有着重要的意义,同时能够显著降低内河侧堤防标高,未来与规划建设的吉兴路桥和人行桥有机统一,进一步提升城市土地开发价值。

2.3.2 航道规划与通航现状

通启运河规划为 V 级航道,根据内河通航标准,与之配套的闸孔净宽为 12~18 m,而现状营船港闸水闸单孔净宽仅为 8 m。由于历史原因,沿线桥梁均按照 VI 级航道标准设计,现今船舶均通过新江海河进入长江或通吕运河,原通启运河营船港闸处已无通航需求。但考虑到城市的转型发展和滨江湾区域的建设,工程有必要为未来的发展预留可能,因此该

工程考虑水闸满足 VI 级航道的通航能力。

2.3.3 现状水闸的“去”与“留”

现状营船港闸建于 2001 年,与振兴路桥合建,桥梁位于水闸内河侧交通桥位置。新建通启运河水利枢纽如与营船港闸分建,配套节制闸可完全代替营船港闸,但拆除营船港闸对周边交通、建筑影响较大,一次性拆迁难以实现。因此这次通启运河水利枢纽按照不影响现状交通来进行布置,即现状水闸的闸墩和桥梁部分不做调整,未来适时拆除营船港闸。

2.3.4 减少水流对周边设施的影响

该工程建成后会改变现有通启运河的水流、泥沙情况,工程选址要考虑尽量减少水流对现状河道、水闸、码头、船只的影响^[8]。枢纽建成后水利调度仍以水闸引排为主,由于长江潮位日变幅较大,且水闸的设计过闸流量远大于泵站的流量,枢纽须与长江口保持一定距离,避免对长江航道产生影响。

2.3.5 考虑工程的管理便捷性

为方便管理,泵站管理区应贴近泵站布置,而该工程仍由位于营船港闸东北侧的闸管理所管理,届时闸管所和泵站管理区之间的人员会频繁交流,泵站管理区需尽可能贴近振兴路,减少管理人员往返路程。

2.3.6 降低实施难度、合理减少投资

工程选址直接关系到工程实施的难度和项目最终投资,合理的工程选址应尽量减少拆迁,减少工程投资。

2.4 选址方案比选

据此,该工程初选以下 3 处选址进行比选,平面位置见图 1 所示,选址特征列于表 1。

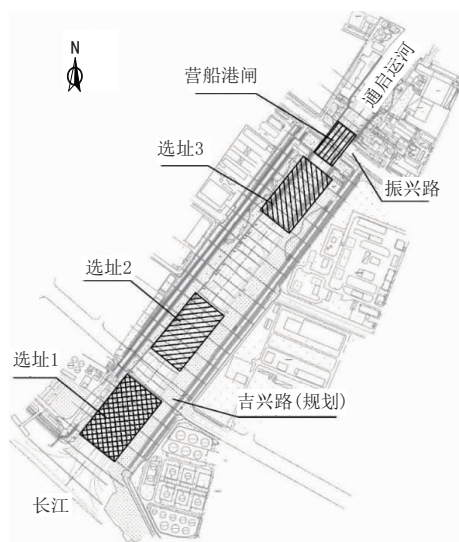


图 1 工程选址平面布置图

表 1 工程选址特征表

序号	位置	特征
选址 1	距营船港闸外河侧约 900 m, 距长江口约 200 m 处	靠近长江口布置, 规划路桥南侧
选址 2	距营船港闸外河侧约 600 m, 距长江口约 500 m 处	靠近长江口布置, 规划路桥北侧
选址 3	距营船港闸外河侧约 200 m, 距长江口约 900 m 处	靠近营船港闸布置

选址 1: 选址位于营船港闸外河侧约 900 m 处, 与长江口距离约 200 m, 位于规划吉兴路桥南侧。水闸消力池末端距离长江约 150 m, 枢纽外排时水流入长江前在顺直段内可达到较为平顺的流态。采用泵闸合建的型式, 水闸布置在东侧, 泵站在其西侧。工程两岸通过翼墙及引堤与通启运河堤防相连, 形成防洪闭合。该选址现存一座粮油码头, 需搬迁。

表 2 选址技术指标对比表

项目	选址 1	选址 2	选址 3
防洪岸线	两岸共缩短现有防洪岸线约 1.7 km	两岸共缩短现有防洪岸线约 1.3 km	两岸共缩短现有防洪岸线约 400 m
管理条件	与现状管理区较远	与现状管理区稍远	与现状管理区较近, 易于管理
营船港闸影响	水流无影响, 营船港闸可拆除	水流无影响, 营船港闸可拆除	水流无影响, 营船港闸可拆除
建筑外观设计	新建泵站与老闸距离较远, 主要考虑与周边现状相协调	新建泵站与老闸距离较远, 主要考虑与周边现状相协调	新建泵站与老闸距离较近, 建筑外观需要考虑与现水闸协调
出流条件及消能效果	上下游河道顺直, 水流条件较好, 消能工长度满足出流要求	上下游河道顺直, 水流条件较好, 消能工长度满足出流要求	上下游河道顺直, 水流条件较好, 消能工长度满足出流要求
施工条件	内外河围堰均布置在营船港闸外河侧, 需要一个非汛期完成水下施工	内外河围堰均布置在营船港闸外河侧, 需要一个非汛期完成水下施工	结合现状水闸建设内河围堰, 需要一个非汛期完成水下施工
对周边环境的影响	影响较小	需抬高规划吉兴路桥高程, 影响周边地块开发	需抬高规划吉兴路桥高程, 影响周边地块开发
工程占地及拆迁	占用水域或滩地, 管理区永久占地约 12.33 亩, 需要搬迁一座粮油码头	占用水域或滩地, 管理区永久占地约 12.33 亩, 无拆迁	占用水域或滩地, 管理区永久占地约 12.33 亩, 无拆迁
工程造价(亿元) 工程费+征拆费	2.45+0.05=2.50	2.44+0.04=2.48	2.44+0.04=2.48
主要优点	最大限度缩短防洪岸线, 降低内河堤防标高, 泵站可与滨江湾桥梁的建设同步实施	工程建设与吉兴路桥及滨江湾的建设影响较小, 无需拆迁粮油码头, 实施难度较小	基本不改变现状防洪体系, 与现状闸管所距离较近, 便于管理
主要缺点	靠近长江, 现状停靠有大量船只, 且需要拆迁粮油码头, 选址处河道较宽, 河底深度较大, 工程投资略高	防洪岸线缩短略少, 工程建成后规划的吉兴路桥需要按照长江测防洪标高布置, 桥梁及两侧道路标高较高	防洪线缩短较少, 与现状水闸距离较近, 水流条件较差

综上, 3 处选址均位于河道顺直段, 水流条件顺畅, 水面宽度约 100 m, 两岸滩地宽度约为 30~50 m, 便于工程布置。考虑到枢纽建成后其内河侧堤防高度可以显著降低, 有利于缩短长江堤防长度^[9], 对提升通启运河沿岸土地开发价值意义重大, 因此初拟选址 1 作为推荐选址。

3 水流流态数值模拟

3.1 控制方程及计算方法

水动力计算遵循从质量、动量和能量守恒定律推导出的描述非恒定流运动的 Navier-Stokes 方

程^[10], 对于天然河道的深度相较其流域尺度可忽略不计, 水流状况在垂直方向的变化率远小于水平方向的变化率, 故可将三维偏微分 N-S 方程组沿水深积分以均化深度, 从而得到平面二维浅水运动的质量和动量守恒控制方程组:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \Omega q - fV V_x = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial y} +$$

$$\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2}-\Omega q-fVV_x=0 \tag{3}$$

式中: $h(x,y,t)$ 为水深,m; $\xi(x,y,t)$ 为自由水面水位,m; $p,g(x,y,t)$ 为 x 、 y 方向的流量密度,即单宽流量, $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^{-1}=uh,vh$; (u,v) 为 x 、 y 方向平均水流流速, m/s ; $C(x,y)$ 为 Chezy 阻力系数, $\text{m}^{1/2}/\text{s}$; g 为重力加速度, m/s^2 ; $f(V)$ 为风摩擦因素; $V,V_x,V_y(x,y,t)$ 为风速及 x 、 y 方向的风速分量, m/s ; $\Omega(x,y)$ 为 Coriol 系数= $2\omega \sin \psi$, ω 为地球自转角速度, ψ 为计算点所处的纬度; x,y 为空间坐标,m; t 为时间,s。

现基于 MIKE21,建立了拟建枢纽位置上下游 1 100 m 范围的计算模型,如图 2~图 4 所示。选取曼宁糙率系数作为河道糙率,根据自适应网格大小、水深条件动态调整计算步长,采用网格冻结法处理模型内滩地干湿过程。

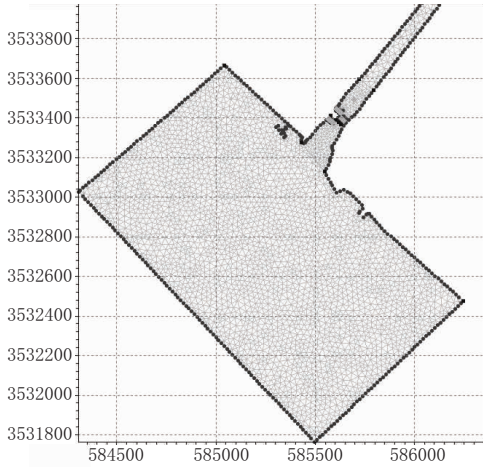


图 2 模型计算范围、计算网格图示

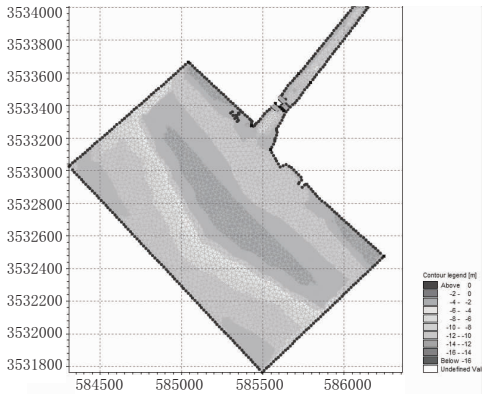


图 3 水下地形图

3.2 计算工况

拟建水利枢纽的功能主要为排涝和引水,不同水位组合下的典型工况列于表 3。

3.3 计算成果分析

工况 1(见图 5)模拟开闸排涝时的设计工况,流量边界为 $270 \text{ m}^3/\text{s}$,水位边界为 2.3 m 。计算表明,水

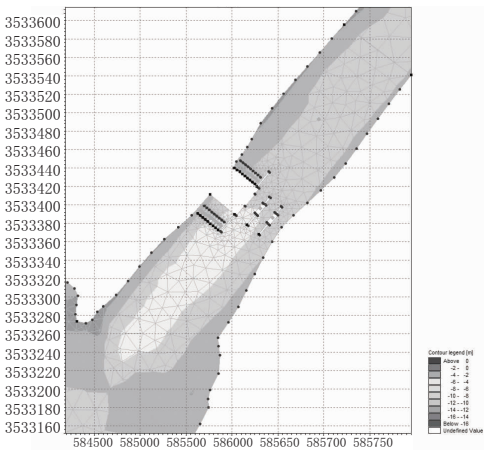


图 4 枢纽细部网格图示

表 3 计算工况一览表

计算工况	最大设计流量 / ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	内河水位 / m
工况 1 水闸排涝设计工况	270	2.25
工况 2 水闸排涝校核工况	517	2.07
工况 3 泵站排涝设计工况	80	2.25
工况 4 水闸引水设计工况	117	1.80

闸进出水流顺畅,扩散均匀,总体流态较好,因水闸偏置一侧,泵站内河导流墩处可能出现涡流,水闸东侧边孔过闸流速最大,约为 $1.7 \text{ m}/\text{s}$ 。枢纽上下游 80 m 以外水流流态较平稳,流速范围在 $0.5\sim 1.05 \text{ m}/\text{s}$ 之间,护砌消能后满足不冲要求。随着进入长江,水流扩散,流速迅速降至 $0.3 \text{ m}/\text{s}$ 以下,对长江的通航影响不大。

工况 2(见图 6)模拟开闸排涝时的校核工况,流量边界为 $517 \text{ m}^3/\text{s}$,水位边界为 2.07 m 。流态分布情况与工况 1 相似,但最大过闸流速达到 $3.0 \text{ m}/\text{s}$ 。枢纽上下游 80 m 河段以外流态较平稳,流速范围在 $1.0\sim 2.0 \text{ m}/\text{s}$ 之间,护砌消能后满足防冲要求。长江口流速降至 $0.5 \text{ m}/\text{s}$ 以下,此时会对通航造成一定影响。

工况 3(见图 7)模拟泵站排涝时的设计工况,流量边界为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$,水位边界为 2.25 m 。结果显示,泵站进出水流顺畅,扩散均匀,总体流态较好。枢纽上下游 80 m 以外河段流态较平稳,流速范围在 $0.1\sim 0.7 \text{ m}/\text{s}$ 之间,护砌消能后满足不冲要求。长江口流速降至 $0.2 \text{ m}/\text{s}$ 以下,不影响长江的通航。

工况 4(见图 8)模拟水闸引水时的设计工况,流量边界为 $117 \text{ m}^3/\text{s}$,水位边界为 1.8 m 。水闸进出水流顺畅,扩散均匀,总体流态较好,因水闸偏置一侧,泵站外河导流墩处可能出现涡流,水闸东侧边孔过

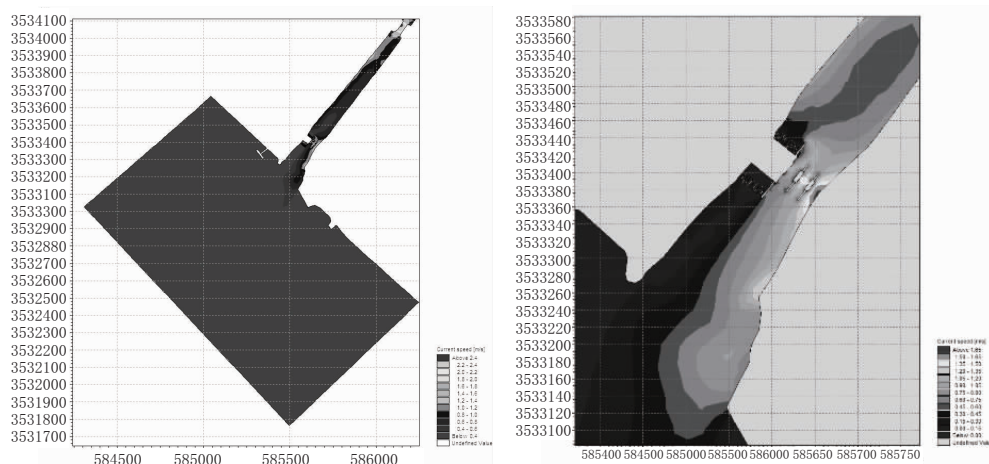


图5 工况1枢纽处流场图

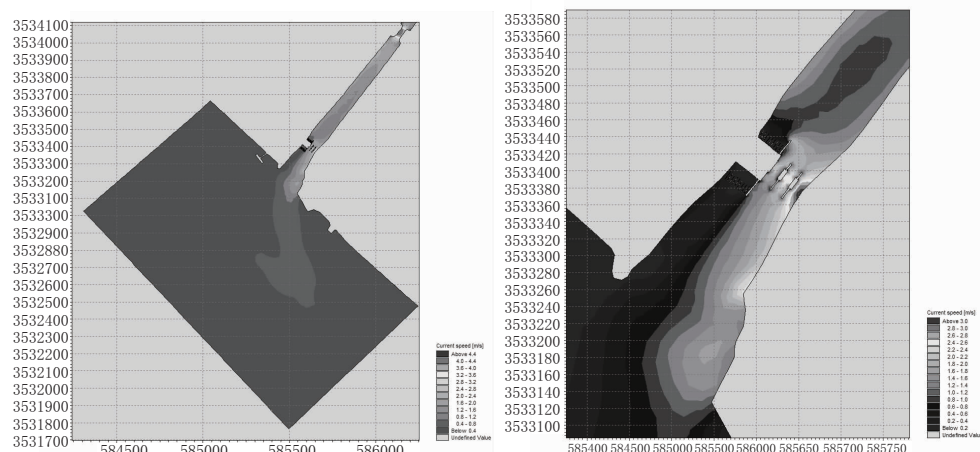


图6 工况2枢纽处流场图

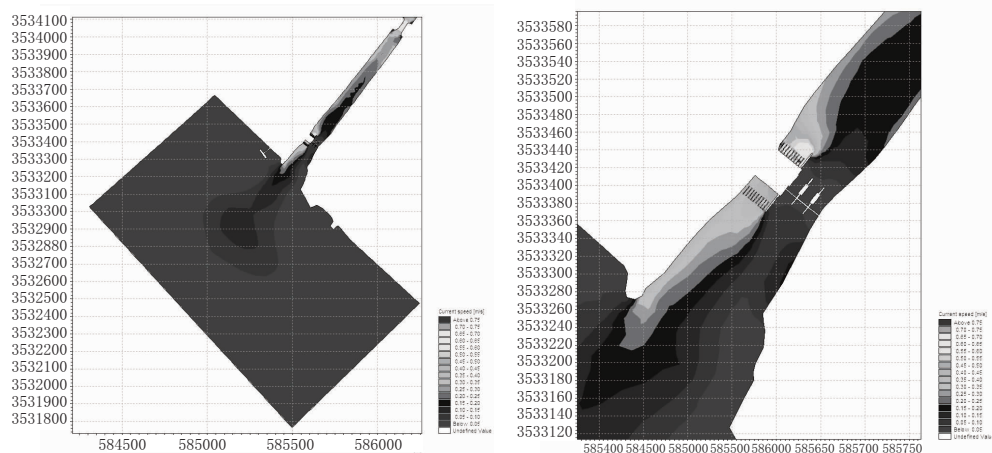


图7 工况3枢纽处流场图

闸流速最大,约为 0.7 m/s。枢纽上下游 80 m 以外河段流态较平稳,流速介于 0.2~0.5 m/s,护砌消能后满足不冲要求,不影响长江的通航。

4 结 语

(1)通过上述分析,在选址 1 位置新建枢纽,内河侧长达 900 m 的顺直段能够充分稳定水流流态,同时外河侧消能结构末端距长江口满足规范要求,水流经消能扩散后对长江的通航影响有限。该工程

在改善区域水环境、保障防洪除涝等功能要求的同时,与周边的环境和其它建设项目有机融合^[11],可为类似项目工程选址提供参考。

(2)枢纽平面采用“泵+闸”不对称布置方案,能有效减少泵闸底板尺寸,从而降低前期工程投资及施工难度,亦便于后期运行管理。结合水动力计算、现场用地及已有的工程案例^[12-13]分析,考虑将枢纽整体向西北偏移,使水闸中心线与河道中心线重合,泵站偏置于西侧,以减小涡流影响,进一步改善

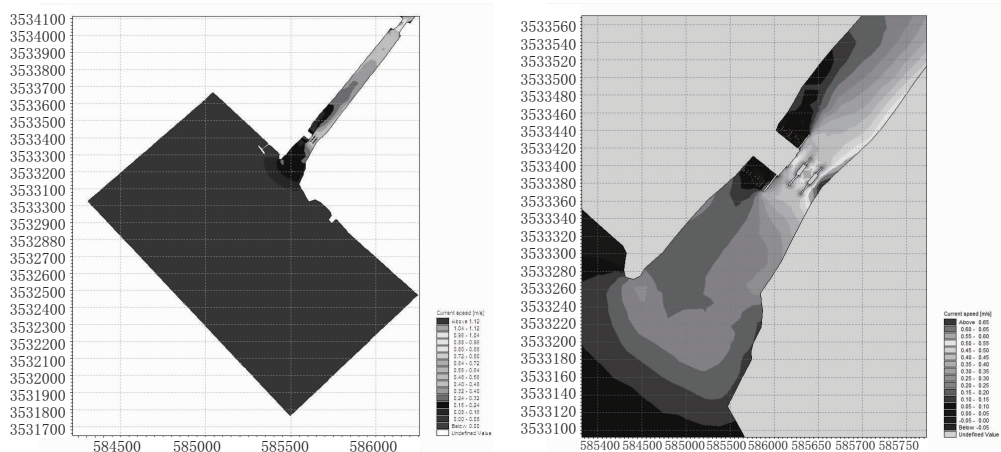


图 8 工况 4 枢纽处流场图

过流流态。

参考文献:

[1] 索丽生,刘宁,等.水工设计手册(第 2 版)[M].北京:中国水利水电出版社,2014.

[2] 陈德亮,等.取水输水建筑物丛书[M].北京:中国水利水电出版社,2004.

[3] 胡欣.黄浦江河口挡潮闸工程选址研究[D].南京:河海大学,2006,5.

[4] 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,2000,28(2):50-53.

[5] 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.

[6] 陆倩,崔东,田利勇,等.平原河网地区泵闸合建枢纽布置形式[J].水利水电科技进展,2019,39(3),62-67.

[7] 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):58-59.

[8] 王志林.青草沙水库取水泵站选址与平面布置研究[J].水利水电技术,2020,51(增刊 1):65-71.

[9] 韩文君.渤海湾出海闸工程工程选址与总平面图布置研究[J].水利技术监督,2021(4):175-181.

[10] 王领元.应用 MIKE 对河流一、二维的数值模拟[D].大连:大连理工大学,2007,6.

[11] 田利勇.大治河西枢纽二线船闸工程总体布置[J].水运工程,2020(4):120-124.

[12] 郭高贵.虹口港泵闸水利枢纽总体布置研究[J].城市道桥与防洪,2014(11):107-110.

[13] 潘源,沈小立.航塘港水利枢纽总体布置研究[J].城市道桥与防洪,2019(12):79-82.

(上接第 155 页)

城市不内涝、降水有截留的规划目的。

防洪排涝系统是一个庞大的系统工程,必须统筹规划,全盘考虑^[6]。只有坚持流域规划与区域规划相协调、综合规划与专业规划相联动、工程措施与非工程措施相结合,才能保证顶层设计的一致性,才能更好地指导后续的工程建设。

参考文献:

[1] 于卫红,盛玉钊,李丁,等.济南城市综合排涝规划研究[J].规划师,

2017,8(28):93-96.

[2] 高学珑,陈奕,唐丽虹.非平原城市排洪规划技术路线研究[J].中国给水排水,2008,24(15):100-103.

[3] GB 50201—2014,防洪标准[S].

[4] GB 50014—2021,室外排水设计标准[S].

[5] 魏培峰,赵明,王鑫.淄博市海绵城市规划编制思路与策略[J].规划师,2017,4(33):148-155.

[6] 高均海,蒋艳灵,石炼.山地小城镇排水防涝规划与建设探析[J].中国给水排水,2016,32(14):5-10.