

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.10.016

复杂地块条件下排水泵站与调蓄池合建的优化设计

郁片红

(上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125)

摘要: 以上海市宝山区张华浜东排水泵站和调蓄池的设计为例,针对泵站在进水条件较差、泵站位置狭小且不规则、雨水出水口位置受岸线码头阻挡等复杂地块条件下的不利因素进行了优化设计。提出了计算流体力学(CFD)进水流态模拟的优化分析、泵房与调蓄池合建式叠加布置的优化措施,并通过数模分析对穿越已建码头的出水口水流扩散参数进行了最低环境扰动的优化选择。

关键词: 排水泵站; 初期雨水调蓄池; 优化设计; 复杂地块条件; 计算流体力学(CFD)

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)10-0089-06

Optimal Design of the Combined Construction of Drainage Pump Station and Storage Tank under Complex Land Parcel Conditions

YU Pian-hong

(Shanghai Urban Construction Design and Research Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: Taking the design of Zhanghuabang East drainage pump station and storage tank in Baoshan District of Shanghai as an example, the design was optimized under complex land parcel conditions of poor inlet, narrow and irregular location, and the blocked stormwater outlet by waterfront wharf. The optimal analysis of inflow pattern simulation by computational fluid dynamics (CFD) and the optimal joint construction measures of pump house and the storage tank up and down were proposed. The optimal selection of the minimum environmental disturbance for the outlet flow diffusion parameters crossing the existing wharf was carried out by means of the numerical modeling analysis.

Key words: drainage pump station; initial stormwater storage tank; optimal design; complex land parcel conditions; computational fluid dynamics(CFD)

近年来,受全球气候变化、城市化进程加速等因素影响,城镇排水防涝形势日益严峻,建设高标准雨水和内涝防治系统成为业界关注的重要课题,而建设强排泵站是其中重要的工程性措施。随着我国城市化的发展,城市建设空间受限日益成为常态,如何进行建设空间受限情形下的泵站选址和设计方案谋划成为城市排水工程设计需要考虑的问题。同时,城市黑臭水体治理又提出了建设高质量污水与径流控制系统的需求^[1],在泵站建设时需要考虑对初期

雨水进行调蓄控制。在泵站建设空间受限情况下,如何解决泵站和调蓄池合建导致的空间冲突,也需要通过优化设计来协调。有鉴于此,以上海市宝山区张华浜东分流制排水系统合建式雨污水排水泵站设计为例,讨论复杂地块条件下城市排水泵站与调蓄池合建的优化设计与分析方法,以期类似工程提供参考。

1 项目概况

该工程雨水泵站服务范围位于上海市区东北

部,服务面积约 288 hm²。现状主要为工厂自排区,雨污水排水标准偏低,环境影响较大,拟结合地块控规调整,按规划建设分流制排水系统,设置雨污水合建泵站1座,设计重现期 $P=5$ a,雨水泵站规模为 20.8 m³/s,污水泵站规模为 8 000 m³/d,装机功率为 3 220 kW。雨水经泵提升后排入黄浦江,污水接入合流一期污水总管转输至竹园污水处理厂。为控制初期雨水径流污染,泵站内设置初期雨水调蓄池,调蓄深度根据《上海市城镇雨水排水规划(2017—

2035 年)》取 5 mm,调蓄池容积为 1.2×10^4 m³。

由于区域选址困难,经论证协调,泵站设于军工路南侧,何杨支线、上港9区和10区铁路3条铁路合围地带,南北长约 43.2~68.3 m,东西宽约 104.5 m,泵站选址狭窄,周边障碍物较多。由于地块狭小,雨水出水总管要穿过一个货运码头后才能排入黄浦江,雨、污水进出水总管共有 8 处穿越铁路;1 处与铁路并行且距离较近。

泵站总平面图见图 1。

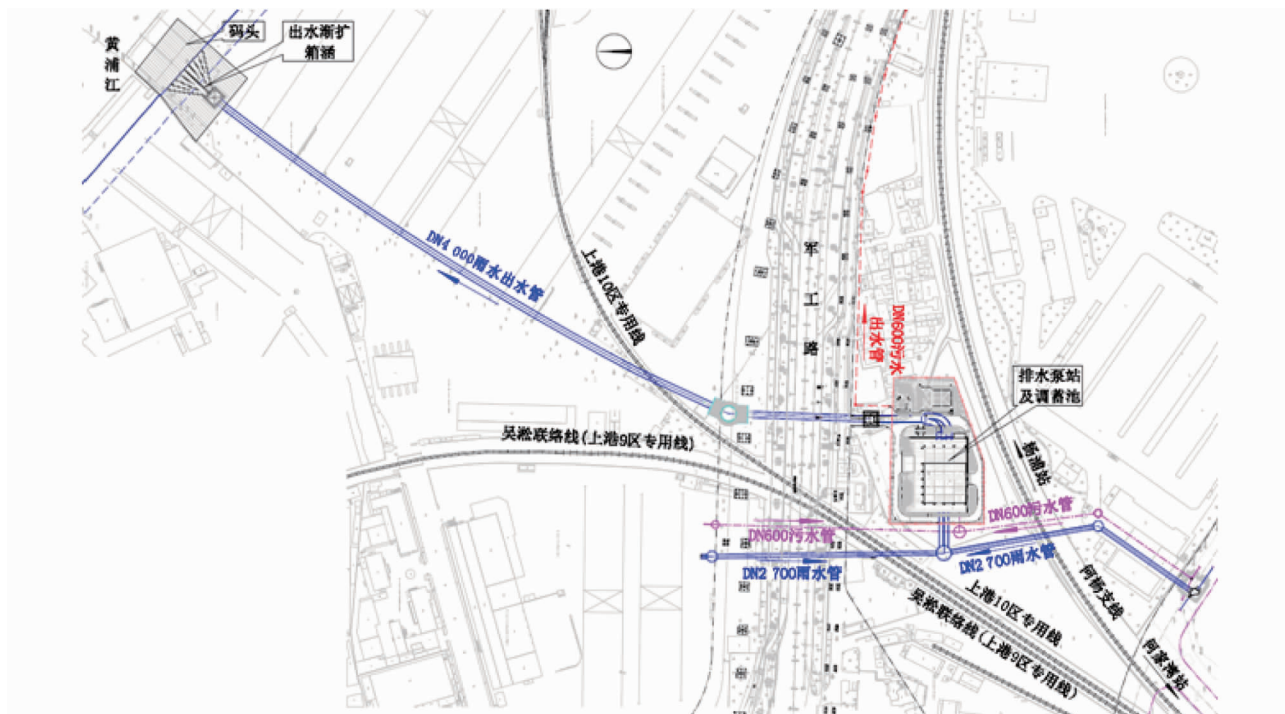


图1 泵站总平面图

Fig.1 General layout of pump station

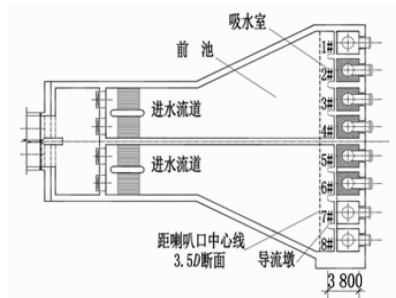
2 泵站进水流态模拟优化

雨水泵房进水流道由前池和吸水室组成。由于流体具有湍流动能,并受固壁边界的影响,进水流道常存在回流、旋涡等不良流态。通过计算流体力学(CFD)的 FLUENT 软件可对进水流道进行三维仿真模拟,并分析前池水流流态,提出整流方案,以利泵站机组稳定高效地运行。

2.1 水泵平面布置及工况

根据雨水泵站的设计规模(20.8 m³/s),近期安装 5 台水泵(2#、3#、4#、5#、6#泵),远期增加 3 台。单泵设计规模为 2.60 m³/s。雨水泵布置见图 2。参考美国 ANSI/HI 标准,要求在距水泵吸水管喇叭口中心线上游 3.5D 断面处,平均流速偏差值应小

于 ±30%,因此在模拟试验时取喇叭口中心线 3.5D 断面为典型测量断面来判别进水流道内水流运动特性,其中 D 代表水泵喇叭口的直径,为 1.42 m。选择近期安装的 5 台泵全开的工况(水深 3.3 m,总流量 13.0 m³/s)作为典型工况进行分析。



a. 原设计方案

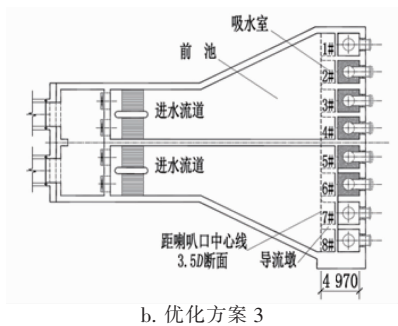


图 2 雨水泵布置平面图

Fig. 2 Layout plan of rainwater pump

2.2 优化方案

优化方案 1:延长导流墩以改善泵房进水流道的流态,即两泵之间的导流墩由距泵房后墙 3.8 m 延长至 3.0D 处(距泵房后墙 4.26 m),并向下延伸至池底。

优化方案 2:在优化方案 1 的基础上,继续加长导流墩至 3.5D 处(距泵房后墙 4.97 m),同时将导流墩加高至设计高水位以上,使各吸水室前的水流完全分隔。

优化方案 3:在方案 2 的基础上,将进水口位置从整体正中改为单侧正中进流。

2.3 流速流态分析

原设计方案和优化方案的流线图见图 3。

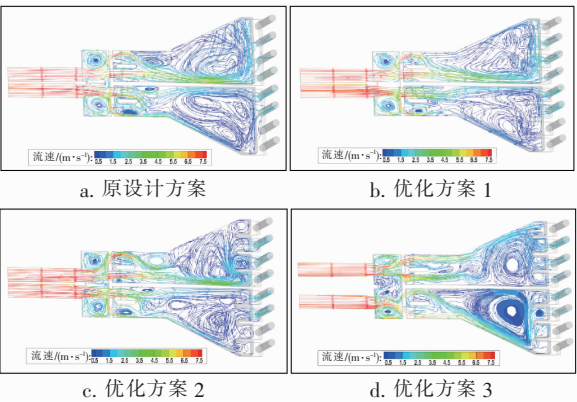


图 3 水深 3.3 m 时流道流线图

Fig. 3 Flow line of flow channel at water depth 3.3 m

从图 3(a) 可以看出:随着运行水泵数量的增加,流道内水流的流速相应增大,主流在前池内无法扩散均匀,流速呈现出内侧大、外侧小的现象,且两侧形成大面积回流,还有多个小旋涡。由于吸水室内隔墩较短且未超过设计高水位,使得吸水喇叭口处的水流出现大范围横流。

分析 3 个优化方案的流线图可知:优化方案 1 的水流流态明显平顺,前池部分边壁的旋涡减小甚至消失,且回流的范围明显减少,但吸水口附近横流现象依旧存在。将优化方案 2 与其对比,发现吸水室附近出现大面积横流的现象明显改善。采用优化方案 3,主流充分扩散,不再集中于中间边壁,吸水室的流速分布也较均匀,主流相对集中的问题得以解决。

进一步分析各方案的等值线云图(见图 4),可直观表明流速分布情况,其中优化方案 3 的流速分布均匀度明显好于其他方案。

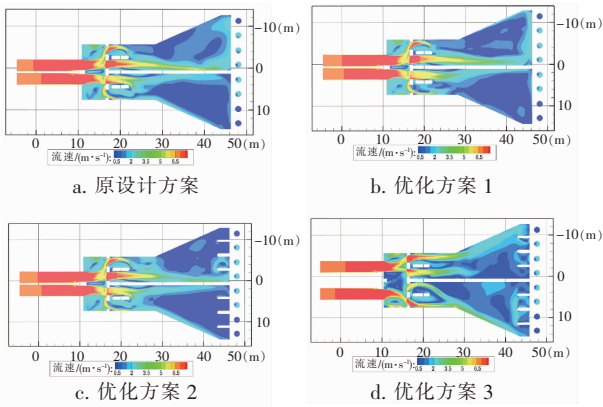


图 4 水深 3.3 m 时下距池底 3.15 m 平面 X 方向流速等值线云图

Fig. 4 Cloud chart of velocity isoline in plane X direction 3.15 m from the bottom of the pool at water depth 3.3 m

整流前、后水泵中心线上游 3.5D 断面处吸水喇叭口悬空高度处的平均流速见表 1。

表 1 各方案的平均流速对比

Tab. 1 Average velocity of different schemes

项 目	平均流速				
	2#	3#	4#	5#	6#
原设计方案	0.86	0.56	1.91	0.94	0.39
优化方案 1	0.60	0.74	1.25	0.51	0.23
优化方案 2	0.44	0.49	1.53	0.37	0.41
优化方案 3	0.53	0.66	0.48	0.55	0.93

从表 1 可知,优化方案 1 和优化方案 2 虽能降低流速,但 3.5D 断面处吸水喇叭口悬空高度处的流速分布极不均匀。采用优化方案 3 改变进口流道位置后,流速分布均匀度明显提升,断面处最大流速仅为最小流速的 1.94 倍,而原设计方案达 4.90 倍。整流前后水泵中心线上游 3.5D 断面处吸水喇

叭口悬空高度处的断面最大横向偏差值见表2。

表2 各方案的断面最大横向偏差值

Tab.2 Maximum transverse deviation value of different

schemes

%

项 目	断面最大横向偏差				
	2#	3#	4#	5#	6#
原设计方案	50.51	56.85	92.76	53.58	86.37
优化方案1	27.96	26.16	45.52	103.63	43.85
优化方案2	35.24	82.40	58.91	77.58	11.70
优化方案3	33.83	39.80	34.47	39.22	21.76

通过分析表征偏流特征的断面最大横向偏差值对比也可得出相似结论,原设计方案中断面最大横向偏差值为92.76%,在优化方案3中断面最大横向偏差值减少为39.80%,降低了52.96个百分点。

2.4 结果分析

经过数值计算及分析,开5台泵时,在进水流道内布设导流墩并改变进口位置作为整流措施后,流速明显降低,主流充分扩散。吸水室的流速分布也较均匀,流态得到明显改善。进一步分析开8台泵时,采取优化措施后进水流道内水流的流态明显平顺,前池部分边壁的旋涡减少甚至消失,回流的范围也明显减小,且吸水室附近出现大面积横流的现象明显改善,水泵能更稳定高效地运行。

3 泵站与调蓄池的布局和设计

3.1 布置型式与功能

由于用地受限,泵站所处三角形地带中2条边界为铁路,用地面积较小,泵站需兼具排水系统雨污水提升、初期雨水径流控制调蓄等综合功能,故采用泵房和调蓄池合建式,雨水、污水泵房与调蓄池上下叠加布置,配电室、控制室和值班室采用地上式。

同时,由于该分流制排水系统的改造为分步建成,现状雨污分流不彻底,雨水泵站设置旱天混接污水截流设施,输送至污水系统进行处理后达标排放。截流污水量按20%的旱流污水量计取。混接污水截流设施可随分流制系统建设的逐步完善而取消。

3.2 工艺设计与优化措施

泵房采用矩形布置,雨水、污水同侧正向进水,雨水泵房根据进水流态模拟优化方案3(见图2)布置,污水泵房利用雨水泵房进水区扩散角南侧多余空间设置,泵房平面内净尺寸为28.7 m×50.5 m;调蓄池位于雨污水泵房下部,平面上将泵房向北侧延展,利用了雨水泵房进水区扩散角北侧多余空间,调蓄池平面内净尺寸为43.6 m×50.5 m,具体如图

5、6所示。

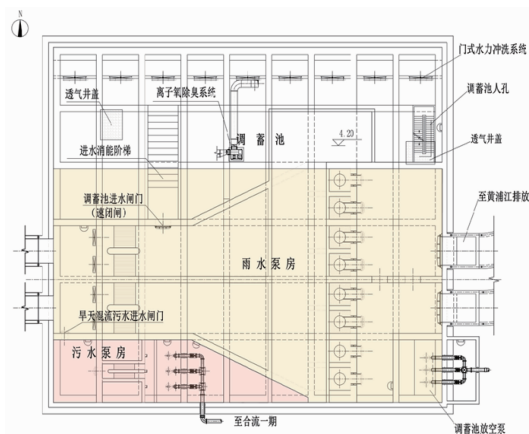


图5 泵房及调蓄池平面布置图

Fig.5 Layout plan of pump house and storage tank

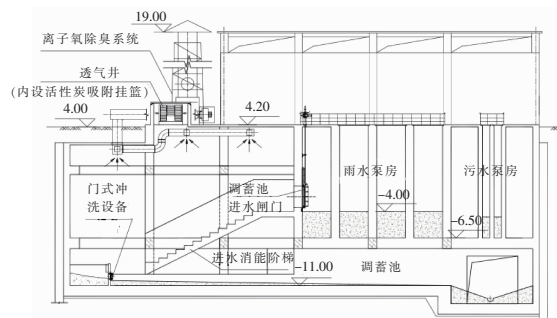


图6 泵房及调蓄池侧向立面图

Fig.6 Side elevation of pump house and storage tank

泵房与调蓄池合建式叠加布置的优点:①节约用地。如采用分建式平行布置,则构筑物尺寸约为74.25 m×50.5 m,叠加布置使平面尺寸节约40%左右。②进水方便。调蓄池采用重力自流进水模式,避免了因设备故障导致的进水问题,符合节能环保理念,而分建式则需通过水泵提升进水。

雨水泵站出水总管较长,为防止潮水倒灌冲力损坏水泵设施设备,出水高位井的设计高水位按照黄浦江历史高潮位5.99 m及壅水高度计算取值7.30 m,设计高位井平台标高取8.40 m,高位井设置2根DN500通气管排至调蓄池,以释放压力。针对泵房与调蓄池叠建导致调蓄池深度增加、调蓄池进水、排气及清淤养护困难等问题,考虑措施如下:①将调蓄池进水设置在雨水泵站格栅后,可减少调蓄池进水格栅设置。②调蓄池进水闸门采用速闭闸,确保调蓄池运行安全。③调蓄池采用“离子氧除臭系统+活性炭吸附装置”除臭。离子氧除臭系统与泵房共用,一路风管伸至调蓄池;调蓄池上部设置一

对自然通风透气井,顶部高出地面 2.1 m,内置可更换活性炭吸附挂篮,达到调蓄池进水时气体净化及气压平衡目的。④采用门式自冲洗系统,全封闭,冲洗效果好、效率高,单个冲洗过程的有效冲洗长度可超过 100 m;无需外部动力,无需外部水源,节能环保;在国内已建调蓄池中应用效果较好^[2]。⑤调蓄池进水闸门后设置消能阶梯,避免初雨快速跌落对池壁、池底的冲刷和冲击。

4 穿越铁路的总管保护设计

本工程涉及泵站进、出水管 8 处穿越 3 条铁路(吴淞联络线上港 9 区专用线、上港 10 区铁路、何杨支线)。铁路均为货运专线,穿越段均为路基,有砟道床。除何杨支线每日行车对数为 3~6 对外,其余铁路使用频率较低。为保护铁路安全,总管穿越铁路采用“顶管+内衬管”形式,顶管完成后在套管内铺设内衬管,空隙以水泥砂浆填充,起到双重保护作用。污水管顶管穿越既有运行铁路时,对其架设吊轨梁防护,铁路限速 45 km/h 慢行。

涉及穿越铁路的两根污水进水总管采用 $\varnothing 1\,000$ mm 顶管内衬 DN600 管道;涉铁污水出水压力管采用 $\varnothing 1\,000$ mm 顶管内衬 DN600 管道;涉铁两根雨水进水总管采用 $\varnothing 2\,700$ mm 顶管内衬 DN2 500 管道,雨水出水总管采用 $\varnothing 4\,000$ mm 顶管至码头,长 434 m,途中穿越铁路段 125 m 内衬 DN3 500 管道(定制)。顶管采用“F”型钢承口式钢筋混凝土加强管;内衬管除污水压力管采用球墨铸铁管,其余采用连续缠绕玻璃钢夹砂管,环刚度均采用 8 kN/m^2 。

5 穿越码头的低环境扰动优化选择

该工程的复杂地块条件不但增加了泵站选址狭小、泵房调蓄池布置的困难,而且雨水泵站出水口因岸线被已建货运码头阻挡,建设时需穿越码头至黄浦江排放,故制定一个低环境扰动的拆建方案设计也是该工程的另一难点。现状码头为集装箱码头泊位,货运繁忙,结构复杂,应选择科学合理的设计方案和实施步骤,最低限度减少码头占用,确保货运业务的正常开展,确保施工安全。以下结合码头、防汛墙拆建改造的结构设计,就穿越码头出水口水流扩散参数(流场、流速、水环境质量等)低环境扰动的优化选择以及工程对该段黄浦江的通航安全、河床演变的影响作简单介绍。

5.1 码头、防汛墙拆建改造设计

现状码头平面顺岸式布置,泊位长度 162.2 m,

宽 37.5 m,其中前平台宽 14.5 m,后平台宽 23.0 m(见图 7),码头前沿设计泥面标高为 -10.5 m 。码头结构复杂,排架下密布方桩,桩长 $31.5\sim 45\text{ m}$,其中前平台 1 对为叉桩,上部结构为现浇横梁、轨道梁,面板为预制现浇叠合板。出水口建设将拆建部分码头后平台,拆建防汛墙 74 m。

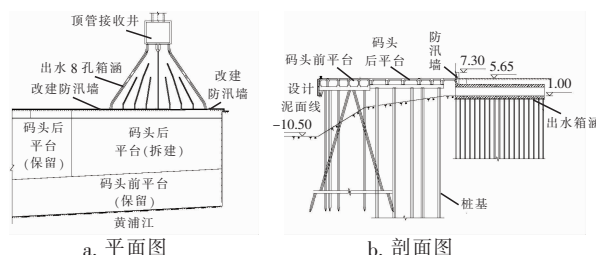


图 7 新建出水口与现状码头关系

Fig. 7 Relationship between new drainage outlet and current wharf

设计方案与实施步骤如下:

① 设置围堰结构和临时防汛墙。拟建出水口对应水域采用双排钢板桩型式围堰,宽 4 m,桩长 16.0 m;钢板桩内部清淤至 0.0 m 标高,采用黏土填实;顶部设置 0.15 m 厚碎石层。防汛墙改建工程安排在非汛期施工,防汛墙开缺后为使防汛体系封闭,需设置临时防汛墙。

② 拆除码头后平台。拆除区域内轨道 54.2 m,同步拆除锚锭、防风及顶升装置;拆除平台面板横梁、后边梁和轨道梁;后平台下方的方桩均截除至设计泥面线以下 1 m。

③ 新建出水口、改建防汛墙。出水喇叭口起自顶管接收井,为 8 孔渐扩箱涵,出口每孔尺寸为 $4.2\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 。采用现浇钢筋混凝土结构,出水口上下游防汛墙同步改造,箱涵范围内改建防汛墙与箱涵结合设置,防汛墙底板即为箱涵结构。

④ 改建码头后平台。新建结构采用高桩梁板式结构,共布置 8 榀排架,排架轴线尽量对齐排水箱涵隔墙,以减少出水水流阻力。每榀排架下布置 5 根钢管直桩,共 40 根桩。新建由现浇横梁、预制纵梁、预制轨道梁、预制面板和现浇面层组成的上部结构。在轨道梁上铺设岸桥钢轨 54.2 m,恢复锚锭、防风、顶升装置和车挡等附属设施,同时原样恢复水电路管。

5.2 出水口水流扩散参数选择

采用 MIKE 21 软件建立黄浦江下游段平面二

维潮流数学模型,假设出水口流速取 0.25 m/s ,采用8孔渐扩箱涵,出口每孔尺寸为 $4.2 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 。根据数模计算分析,出水口建成后,码头上游前沿外

侧流速略有增大,平台下方近岸流速在涨急、涨憩、落急时刻减小,落憩时刻增大,对航道的水流有一定影响。具体见表3。

表3 出水口建设后水流的流速变化

Tab.3 Change of flow velocity after construction of drainage outlet

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

项 目	涨急	涨憩	落急	落憩
码头前沿流速	0.90 ~ 1.00	0.15 ~ 0.20	最大流速约为 0.95	最大流速约为 0.12
流向	基本与码头前沿平行	与码头岸线近似成 15° 夹角	基本与码头前沿平行	与码头岸线近似成 90° 夹角
码头前沿横向流速	< 0.01	0.05	0.01	0.11
最大回流强度		0.20	0.40	0.20

黄浦江为感潮航道,目前尚无规范对感潮航道出水口横向流速作出明确规定,参考《航道工程设计规范》(JTS 181—2016)中天然径流航道的规定,航道横向流速不宜超过 0.3 m/s ,回流流速不宜超过 0.4 m/s 。从表3可知,码头前沿横向流速、最大回流强度均满足规范要求,雨水泵站出水口流速取值 0.25 m/s 合适。为减少水流对码头下泥面造成冲刷,出口处采用抛石护底处理。

5.3 对黄浦江通航安全及河床演变的影响

新建雨水泵站出水口位于码头前沿线后约 35 m ,未占用通航水域,对航道内船舶正常通航影响较小。码头前沿横向流速、最大回流强度均满足规范要求,对码头正常工作及船舶停靠影响较小。增设防撞设施,制定相应的防撞应急预案,同时,为保障航道夜间或雾天通航安全,在码头边缘增设 LED 灯带勾勒出码头轮廓,避免船只夜间误撞。

新建出水口位于黄浦江口门段,码头后平台改造实施后不改变河道岸线,基本不改变水流动力条件和泥沙环境,因此对河段整体的地形冲淤影响较小。但出水口排水会对岸线的水流条件造成一定的影响,应定期检测码头前水下地形,发现淤线及时采取相应工程措施。

6 结语

针对当前城市排水泵站设计所面临的有限、环境局促等诸多挑战,采用计算流体力学(CFD)软件对雨水泵站进水流道进行三维仿真模拟及流态分析,通过改变进水口位置及布设导流墩作为整流优化方案;采用雨污水泵房与调蓄池上下叠加布置节约了用地;泵站雨污水总管穿越铁路时采用“顶管+内衬管”形式以保护铁路安全;新建雨水泵站出水口充分考虑对老码头、黄浦江的影响,通过数模分析出水口流速取值 0.25 m/s 时码头前沿横向流

速、最大回流强度均满足规范要求。

该研究对同类型复杂地块条件下排水泵站和调蓄池的设计和建设具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 张辰. 基于海绵城市建设理念的排水工程设计[J]. 给水排水, 2019, 45(6): 1-5.
Zhang Chen. Drainage engineering design based on the concept of sponge city construction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45 (6): 1 - 5 (in Chinese).
- [2] 肖艳. 世博园区浦明全地下式雨水泵站设计[J]. 给水排水, 2010, 36(3): 46-48.
Xiao Yan. Introduction of the design of the underground storm water pumping station in Expo [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36 (3): 46 - 48 (in Chinese).



作者简介:郁片红(1968—),女,上海人,硕士,高级工程师,环境交通院副总工程师,主要从事排水工程、海绵城市和水环境治理设计与研究工作。

E-mail: 23733819@qq.com

收稿日期: 2020-02-08