

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.14.013

用地受限条件下雨水泵站及调蓄池合建设计优化

朱 洁

(上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125)

摘 要: 为减缓暴雨造成的城市内涝以及控制径流污染对河道生态的影响,以上海浦东新区康桥路雨水泵站和控污调蓄池合建项目为例,针对泵站用地狭小、侧向进水、轨交18号线穿越用地等不利因素进行优化设计。通过优化泵站总平面布置,采用调蓄池、雨水泵站、设备用房上下叠建方式,在有限平面空间内合理布置各类吊装口、透气井、人员出入口;采用深度为73.70 m的地下连续墙隔断承压含水层,解决了与轨交18号线盾构最小净距为8 m的难题,保障轨交运营安全;针对调蓄池有效水深达7.5 m,在排空过程中静扬程变动大的问题,提出了排空泵变频运行的节能优化措施;基于计算流体力学对进水流态的数值模拟分析,采用设置横梁的整流技术措施来缓解侧向进水主流偏流问题,实现进水流态稳定、流量分布均匀。

关键词: 雨水泵站; 调蓄池; 用地受限; 上下叠建; 节能优化; 整流措施

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)14-0073-06

Optimizing the Combined Construction Design of a Stormwater Pumping Station and Storage Tank within Limited Land Use Constraint

ZHU Jie

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

Abstract: In order to address urban waterlogging caused by heavy rain and control the impact of runoff pollution on river ecology, the design of the project of Kangqiao Road stormwater pumping station and pollution control and storage tank in Pudong New Area, Shanghai was optimized in the face of adverse factors such as limited land area for the pumping station, lateral water intake, and crossing the land of No. 18 Rail Transit Line. By optimizing the overall layout of the pumping station, the storage tank, stormwater pumping station, and equipment room were positioned vertically. Various lifting port, ventilation well, and personnel entrances and exits were thoughtfully arranged within the confined spatial constraints to ensure efficient functionality. The underground diaphragm wall, with a depth of 73.70 m, was implemented to intercept the confined aquifer. This solution effectively addressed the challenge of maintaining a minimum clearance distance of 8 meters between the shield and No.18 Rail Transit Line, thereby ensuring the safe operation of rail transit. In response to the issue of significant variations in static head during the emptying process, caused by an effective water depth of 7.5 m in the storage tank, energy-saving optimization measures for variable frequency operation of the emptying pump were proposed. Through the utilization of CFD numerical simulation to analyze the inlet flow state and implementation of rectification measures such as setting a cross beam, the issue of lateral inflow mainstream deviation was mitigated, achieving stable inflow flow state and uniform flow distribution.

Key words: stormwater pumping station; storage tank; limited land area; layered construction; energy-saving optimization; rectification measure

排水工程是城镇居民生活和社会经济发展的生命线,是保障公众身体健康、水环境质量和水安全的重要基础设施^[1]。随着城市更新建设的逐步深入,提高居民居住环境和保障生命财产安全是城市更新的首要任务。近年来,暴雨造成的城市积水情况越来越多,初期雨水排河造成河道水质污染也时有发生。随着《上海市城镇雨水排水规划(2020—2035年)》(以下简称“排水规划”)的实施,明确要求提高雨水排水标准,原有的城市排水设施已不能满足要求,需针对性改造或新建雨水排放设施;同时排水规划还提出了控制径流污染的要求,需新建控污调蓄池,解决雨水泵站在放江排水时污染河道水质的问题。而实际建设中,大部分建成区内城市用地已开发建设到位,新建雨水泵站选址难度大,只能利用城市用地“边角料”建设雨水泵站和控污调蓄池。在上海市浦东新区康桥路雨水泵站与调蓄池合建项目中,采用雨水泵站和调蓄池叠建的方案,优化平面及竖向布置,并通过计算流体力学(CFD)模拟后,采取有效的整流措施改善水流流态。

1 项目概况

康桥路雨水泵站服务于浦东新区御桥社区,西起咸塘港、东至盐船港、南起外环高速、北至康花河,泵站地理位置见图1。泵站汇水面积约为190 hm²,设计重现期 $P=5$ a,设计规模为19.80 m³/s,雨水进水总管位于北侧康桥路上,管径为D3 000 mm,进水总管与泵站轴线呈129°夹角,雨水泵站配置6台潜水轴流泵,单泵 $Q=3.30$ m³/s。控污调蓄池的服务范围同雨水泵站,分流制排水系统调蓄深度取5 mm,设计规模为5 300 m³,调蓄池排空按24 h设计,设置 $Q=31$ L/s的潜水离心泵3台,2用1备。

雨水泵站规划选址面积为2 708.70 m²,建设用地为东西向长条形,东侧宽35 m,西侧宽49 m,长度为63 m。已运营轨道交通18号线在南侧穿越规划康桥路雨水泵站用地,轨道盾构外线进入泵站红线5 m,轨道控制线进入泵站红线11 m。根据《上海市轨道交通管理条例》,雨水泵站位于轨道保护区50 m范围内,轨道上方及控制线范围内严禁开挖和堆载,因此,雨水泵站实际可利用用地面积约为1 964

m²,远低于《城市排水工程规划规范》(GB 50318—2017)中此类规模雨水泵站规划要求(6 900 m²),用地面积条件受限较大。



图1 泵站地理位置

Fig.1 Location of pumping station

2 平面设计优化

2.1 总平面及基坑设计优化

2.1.1 总平面设计方案

雨水泵站与控污调蓄池合建的形式一般分为两种:水平布置式和上下叠建式,需根据项目占地面积、基坑围护、工程造价、管理维护及地块控规要求等统筹考虑。相较于分建式,合建式造价高14%左右,但占地面积可节省42%左右^[2-3]。由于项目用地受限,只能采用上下叠建式,控污调蓄池布置于雨水泵站下方,实际设计雨水泵站占地面积为1 124 m²,基坑深度为20.8 m。

总平面布置中,重要的控制因素为确保轨交18号线的结构安全,在穿越康桥路雨水泵站用地处,轨道轨面高程由西向东为-24.5~-25.4 m(吴淞高程,下同),盾构外顶为-19.2~-20.1 m。通过查阅文献^[4],台北某高层建筑、天津某项目、上海新世界城的基坑深度分别为21、15.75、12.50 m,基坑与轨道近距分别为6.90、8.90、3 m。虽然与运营中轨道近距离基坑施工技术较为成熟,但是由于不同地质及地下水情况存在差异性,在该项目的总平面布局中以远离轨道作为控制因素。

最终确定北侧控制建筑外墙与规划用地红线间距不小于5 m,地下结构外墙与规划用地红线间距不小于3 m,南侧控制基坑围护外侧距轨交18号线盾构外侧的最小距离为8 m,且将泵站南侧地下部分改用不规则的折线。此外,利用北侧5 m建筑

退距作为人行通道,南侧利用地铁轨道上方作为消防和检修车道,并设置回车区域,项目总平面布置见图2。

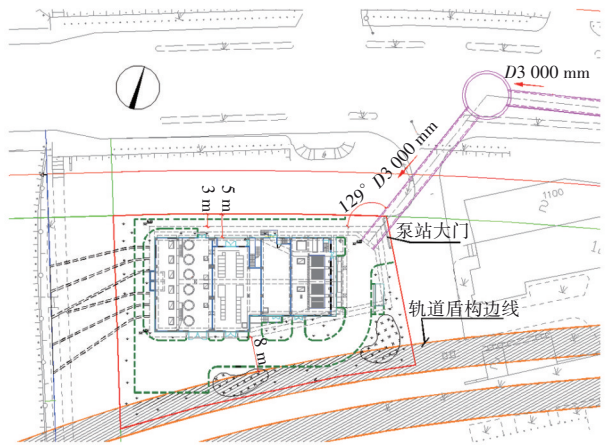


图2 总平面布置
Fig.2 General layout plan

2.1.2 基坑设计及监测

经与轨交管理部门沟通,项目基坑设计如下:基坑工程安全等级采用一级,环境保护等级采用一级,基坑采用1 200 mm厚地下连续墙围护,地下连续墙深度为73.70 m,隔断⑦₂灰色砂质粉土承压含水层,地下连续墙接头采用半根 \varnothing 2 600 mm N-JET超高压旋喷桩接缝止水,以明挖顺作法施工,沿基坑自上而下设置2道钢筋混凝土支撑+4道钢支撑,第1道钢筋混凝土支撑截面为800 mm×800 mm;第2、3道钢支撑为609钢支撑;第4道钢筋混凝土支撑截面为1 000 mm×1 000 mm;第5、6道钢支撑为800钢支撑。泵站基坑围护设计见图3。

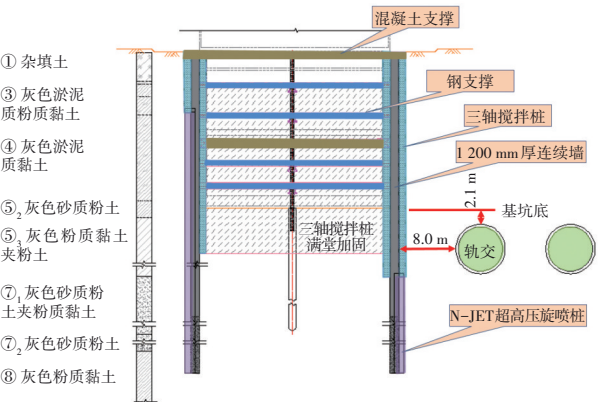


图3 泵站基坑围护设计
Fig.3 Design diagram of pumping station foundation pit enclosure

2.2 设备用房平面布局设计优化

泵站一层平面中布设配套的格栅间、高低压配电间、水泵房,调蓄池配套的人员出入口、设备吊装口、透气井,以及10 kV开关站和建筑的疏散楼梯。雨水泵站一层平面布置见图4,剖面见图5。

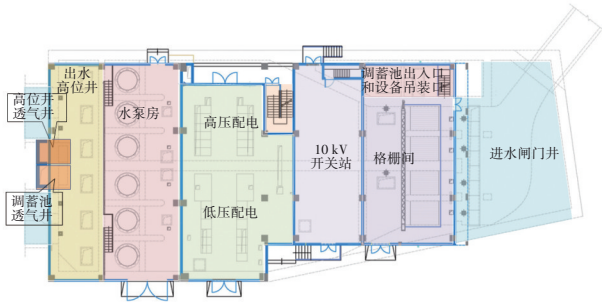


图4 雨水泵站一层平面布置
Fig.4 Layout plan of stormwater pumping station on the first floor

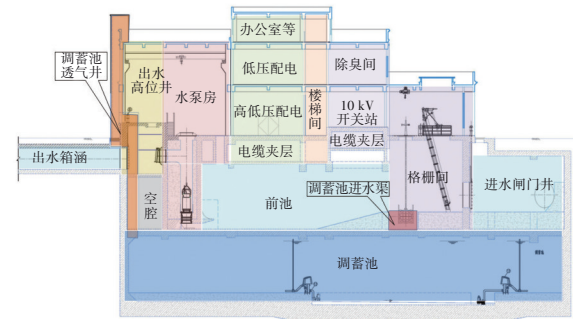


图5 雨水泵站剖面
Fig.5 Profile of stormwater pumping station

一层平面根据功能需求进行分区,其中格栅间东北侧预留的区域为贯通调蓄池到地面的空间,利用此空间设置调蓄池人员出入口和设备吊装口;并利用雨水泵站出水高位井内富余空间设置调蓄池的透气井,从调蓄池顶部开孔一直延伸到屋顶。

雨水泵站供电采用二级负荷,设有2路10 kV电源,每路电源容量为2 500 kVA,需建设10 kV开关站。10 kV开关站位于地面一层,并设置地下电缆通道夹层,整体布置于格栅间和高低压配电间之间,宽度为8 m。这造成下部进水闸门井的长度被压缩,导致进水流道变短,增加了水流的不稳定性。

对布置楼层要求不高的设备用房,如除臭机房、控制间、卫生间等,则布置于建筑二、三层内。

3 调蓄池排空系统设计

3.1 调蓄池进水集约化设计

调蓄池与雨水泵站合用格栅,栅距为70 mm,在

进水格栅后设置2.0 m×2.0 m的拦截沟,拦截初期雨水,经进水液压闸门后跌水进入调蓄池,达到调蓄池设计水位后关闭进水闸门,完成一次进水过程。调蓄池设置带切削功能的排空泵,以防杂物堵塞排水泵,初期雨水经提升释压后接入市政污水管。

3.2 排空泵节能设计

泵站设计地面高程为4.00 m,调蓄池设计最高水位为-7.90 m,最低水位为-15.40 m,静扬程变动较大,排空过程中要求在静扬程变动时流量保持基本稳定。按设计最高水位、设计平均水位、设计最低水位选择3个工况点进行扬程计算,具体见表1。

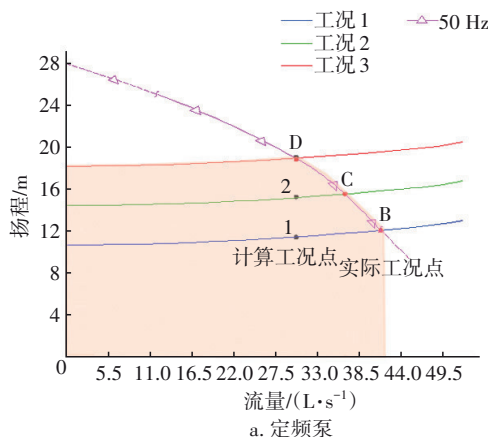
表1 排空泵扬程计算

Tab.1 Calculation of evacuation pumping head m

项目	集水池水位		水泵出水管最高点管内顶标高	水头损失	设计扬程
工况1	设计最高水位	-7.90	2.80	0.77	11.47
工况2	设计平均水位	-11.65	2.80	0.77	15.22
工况3	设计最低水位	-15.40	2.80	0.77	18.97

调蓄池排空泵单泵设计24 h排空, $Q=31 \text{ L/s}$, $H=11.47 \sim 18.97 \text{ m}$,配置3台潜水电泵,2用1备。图6为泵的流量-扬程关系,工况1~3为管道特性曲线,分别对应最高水位、平均水位、最低水位。由图6(a)可知,计算工况点1、2无法拟合在泵的流量-扬程曲线上,实际工况点为B、C,在满足设计扬程的条件下,流量变动范围为31~42 L/s,实际流量大于计算值,导致排水泵超载运行、效率降低,且流量的增加对下游市政污水管负荷冲击大。

根据潜水泵的相似定律^[5],增加变频器,在泵扬程变动时,将流量变动控制在设计流量的±10%之内。增加频率为47、44 Hz的流量-扬程曲线,见图6(b),其中B'-C'-D'-E'-F'-D曲线为采用变频器后的流量-扬程曲线,流量可控制在28~33 L/s之间。



a. 定频泵

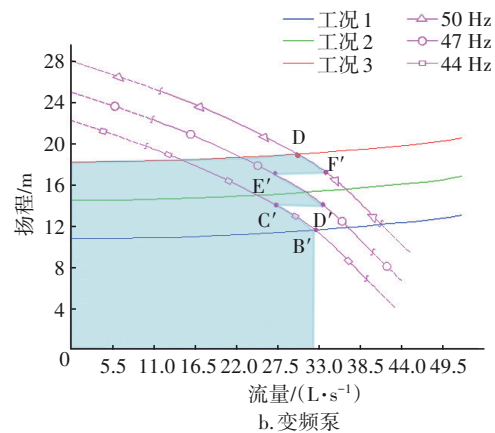


图6 泵的流量-扬程关系

Fig.6 Relationship between flow and head of pumps

图6(a)与(b)中阴影部分相差的区域与节约的功率成正比,节约功率约20%。

4 雨水泵站进水流态优化

受限于建设用地小,泵站进水总管与泵站主体之间的设计角度为129°,同时泵站一层平面内需布置电力10 kV 开关站,使得闸门井内间距较小,约8.0 m。由于进水闸门井长度较短,且非正向进水,水流突然扩大极易引起紊流、涡流。在设计中,采用CFD数值模拟水流状态,对进水流态进行分析研判,并设计合适的整流导流措施。

4.1 边界条件设定

基于CFD数值模拟对高水位工况进行计算,集水池水位为最高水位-1.0 m,6台泵全部开机,单泵 $Q=3.30 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{总}}=19.80 \text{ m}^3/\text{s}$ 。泵站模拟区域包括进水管渠、进水闸门井、格栅井、集水池、泵进水流道及部分水泵管,计算区域见图7。其中进水管取3倍管径长度,以保证来水均匀稳定,出口采用自由出流边界条件,各出口出流流量保持一致。

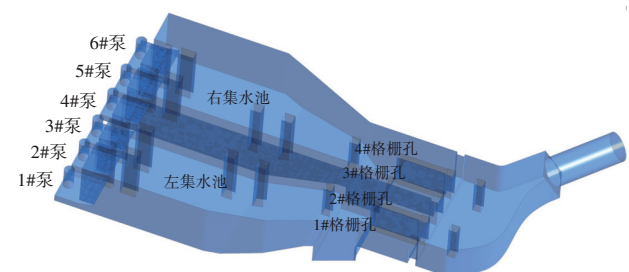


图7 计算区域

Fig.7 Calculation area

4.2 设计方案水力流态模拟

图8和图9分别为进水系统的平面流线分布云图、流道进口典型断面(取距泵轴线3.5 m 进水廊

道)的流速分布云图。可知,4个格栅进水流量差异较大,左右集水池内流线不均,均偏向左侧,泵前典型断面流速局部偏差较大。

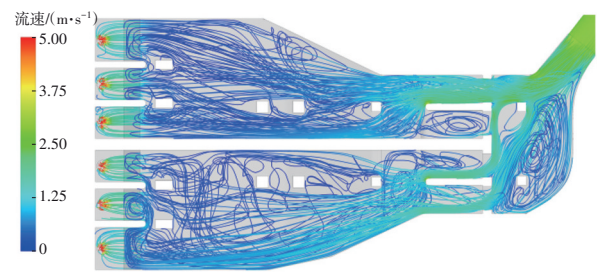


图8 平面流线分布
Fig.8 Planar streamline distribution

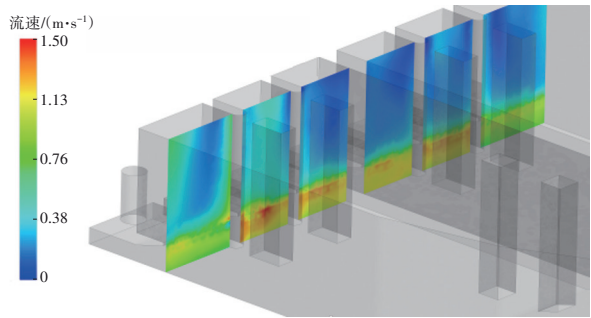


图9 流速分布
Fig.9 Flow velocity distribution

表2为4座格栅井的流量分配统计,左侧集水池1#、2#两孔格栅过流流量相对较为均匀,右侧3#格栅孔几乎不过流,流量占比仅为2.12%,4#格栅孔过流流量明显偏大,占比达47.96%。4条格栅廊道内水流分配均匀度较差。

表2 各格栅井流量分配统计

Tab.2 Flow distribution statistics of each grid well

项目	1#格栅井	2#格栅井	3#格栅井	4#格栅井
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	5.18	4.69	0.42	9.48
占比/%	26.20	23.72	2.12	47.96

表3为6台泵典型断面处流速分析,除2#泵前廊道内水流流速偏大,相对偏差大于10%,其余廊道内流速相对较为均匀。

表3 泵典型断面流速分析

Tab.3 Analysis of typical cross-section flow velocity of pumps

项目	1#泵	2#泵	3#泵	4#泵	5#泵	6#泵
平均流速/(m·s ⁻¹)	1.14	1.40	1.25	1.16	1.20	1.17
相对偏差/%	-6.85	14.97	2.18	-5.06	-1.40	-3.83

4.3 方案设计优化比选

根据原设计方案模拟结果,需解决进水井内主流偏流严重、水流分布不均的问题,并增加各泵前进水流道内水流流速的均匀性。

4.3.1 优化方案设计

提出了4种整流方案,具体如表4所示,对其进行同步比较。

表4 整流方案

Tab.4 Rectification schemes

项目	内容	备注
方案一	在进水闸门井中依托已有的2根柱子布置3根横梁	梁、柱的断面均为0.80 m×0.80 m
方案二	在进水闸门井内增加1根立柱、1根横梁	
方案三	在进水闸门井中依托已有的2根柱子布置4根横梁,在进水闸门井内沿格栅进水廊道增加3根横梁;增加1根立柱,并将3根立柱沿水流方向延长0.8 m	
方案四	在方案三的基础上,在集水池扩散段进口位置,依托现有的结构柱布置2组横梁	

各方案的整流措施布置见图10。

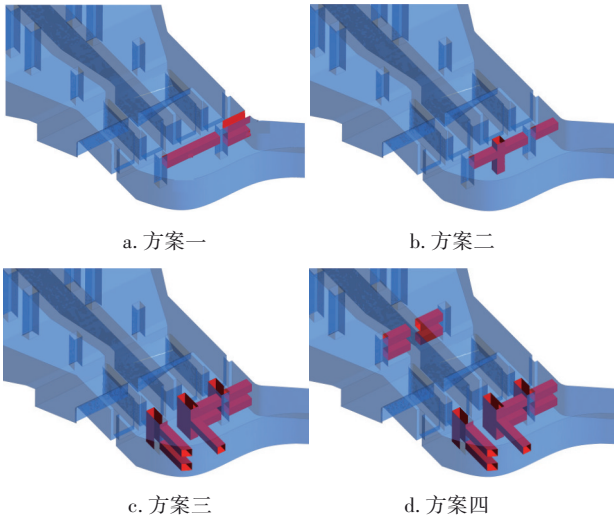


图10 各方案的整流措施布置

Fig.10 Layout of rectification measures for each scheme

4.3.2 格栅井内流量分析

通过CFD数值模拟,得出4种整流方案中闸门井至集水池的平面流线分布,对各方案中格栅井的流量分配情况进行统计,结果见表5。可以看出,在方案三和方案四中,格栅井内的流量分配得到了明显改善,各格栅的过流流量较为均匀。

表5 各方案格栅井流量分配统计
Tab.5 Flow distribution statistics of grid wells for each scheme

项目		1#格栅井	2#格栅井	3#格栅井	4#格栅井
方案一	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	3.02	6.86	2.97	6.91
	占比/%	15.3	34.7	15.0	35.0
方案二	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	6.34	3.57	2.06	7.86
	占比/%	32.0	18.0	10.4	39.6
方案三、四	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	5.39	4.52	3.94	5.95
	占比/%	27.2	22.8	19.9	30.1

4.3.3 泵流道进口内水流均匀性分析

对泵流道进口典型断面处的平均流速进行均匀性分析,选取位置为水泵吸水喇叭口等高处廊道。4种方案的典型断面流速分析结果显示,平均流速的相对偏差率基本控制在10%以内,相对偏差情况均较好,这主要受益于集水池较长,水流扩散稳定,且方案四在方案三的基础上增加了集水池内横梁,集水池内流线分布更均匀,偏流情况有所改善,水流稳定性更好,故推荐方案四。

5 结语

康桥路雨水泵站项目设计中,用地面积较小且为狭长形,雨水泵站进水为非正向进水,进水主流偏流严重。最终通过对雨水泵站和调蓄池布局方案的优化,并采用CFD数值模拟合理设计整流措施,缓解了进水主流偏流的问题,实现了进水流态稳定、流量分布均匀。基于此,提出以下建议:

① 城市建成区内建设雨水泵站及调蓄池等排水设施,需重点考虑制约因素如周边建筑、地下构筑物、河道驳岸、重要管线等,避免造成较大的问题,并进行风险控制。

② 当调蓄池位于雨水泵站下方时,需充分考虑上部泵站布局,利用有限可以通到地面的空间布置出入口、吊装口、通风口等,并在一层平面内集约化设置疏散检修设施。

③ 调蓄池水深较大,静扬程占泵总扬程的比例较大,建议采用变频泵,可在扬程变动时将流量变动控制在设计值的 $\pm 10\%$ 之内,并节约能耗约20%。

④ 受限于泵站建设条件,进水闸门井内水流

易形成紊流、涡流,泵站内流态稳定是设计的重要组成部分,应予以重视。

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] 熊亮亮. 雨水泵站与初期雨水调蓄池集约化设计[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 296-299, 364.
XIONG Liangliang. Intensive design of rainwater pump station and initial rainwater storage tank [J]. Water Purification Technology, 2022, 41 (s1) : 296-299, 364 (in Chinese).
- [3] 郁片红. 复杂地块条件下排水泵站与调蓄池合建的优化设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(10): 89-94.
YU Pianhong. Optimal design of the combined construction of drainage pump station and storage tank under complex land parcel conditions [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(10): 89-94 (in Chinese).
- [4] 孙佳羽, 杜一鸣, 郑刚, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的拟合分析及预测[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(3): 10-17.
SUN Jiayu, DU Yiming, ZHENG Gang, et al. Fitting analysis and prediction for deformation of existing tunnels adjacent to the excavation [J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(3): 10-17 (in Chinese).
- [5] 刘超, 徐辉. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 35-39.
LIU Chao, XU Hui. Water Pumps and Pumping Stations [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009: 35-39 (in Chinese).

作者简介: 朱洁(1976-), 女, 上海人, 本科, 高级工程师, 注册公用设备工程师(给水排水), 注册咨询工程师, 主要从事市政给排水设计工作。

E-mail: zhujie@suedri.com

收稿日期: 2023-08-28

修回日期: 2023-11-07

(编辑: 沈靖怡)