

设计经验

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 10. 007

大口径初雨调蓄管道工程设计

李宗强^{1,2}, 郭函君^{1,2}, 束敏^{1,2}

(1. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200063; 2. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200333)

摘要: 为进一步减少初期雨水径流污染及雨水泵站放江污染,近年来上海市大力推进初雨调蓄设施建设,并已取得阶段性成果。上海市中心城区建设用地较为紧张,在建成区建设初雨调蓄设施,其选址和建设型式成为工程设计的最大挑战。采用大口径调蓄管道可解决项目实施困难等问题,但也存在诸多建设和运维中的瓶颈和难点。以上海市某大口径初雨调蓄管道工程为例,设计规模11 300 m³,采用DN5 000调蓄管道,为工程的实施创造了条件,解决了大口径初雨调蓄管道冲洗清淤、进水预处理及除臭工艺设计难点,重点对调蓄管道水力冲洗清淤方式进行了比选论证,并采用计算流体力学(CFD)技术进行模拟分析,可为类似工程提供参考。

关键词: 初期雨水; 调蓄管道; 大口径; 冲洗清淤; 计算流体力学(CFD)技术

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)10-0046-07

Design of Large-diameter Initial Rainwater Storage Pipelines

LI Zong-qiang^{1,2}, GUO Han-jun^{1,2}, SHU Min^{1,2}

(1. Shanghai Water Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200063, China;

2. East China Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200333, China)

Abstract: In recent years, Shanghai has actively promoted the construction of initial rainwater regulation and storage facilities to further mitigate the pollution caused by initial rainwater runoff and stormwater pumping stations, achieving phased outcomes. Construction land in the downtown area of Shanghai is relatively limited, and the site selection and construction format for initial rainwater storage facilities in urbanized areas present the most significant challenge in engineering design. Utilizing large-diameter storage pipelines can address issues such as project implementation challenges; however, numerous bottlenecks and difficulties remain in terms of construction, operation, and maintenance. The design capacity of an initial rainwater storage pipeline project in Shanghai is 11 300 m³, and the pipe with a diameter of DN5 000 is utilized. This approach facilitated the implementation of the project while addressing challenges in the process design for sediments flushing, influent pretreatment, and deodorization of the pipeline. This paper focused on the comparison and validation of the flushing and dredging methods for the pipelines, as well as the simulation analysis conducted using computational fluid dynamics (CFD) technique. These findings can serve as a reference for similar projects.

Key words: initial rainwater; storage pipeline; large-diameter; flushing and dredging; computational fluid dynamics (CFD) technique

近年来,随着城市化进程加快,部分城市水体环境退化的主要原因逐渐由点源污染转变为面源污染,其中雨水径流污染负荷已达生活污水的1.70倍,由雨水径流与地表污染物引起的城市面源污染问题受到越来越多的关注^[1]。工业物流区的径流悬浮固体(SS)污染程度最严重,其次为交通区;商业区的径流COD污染程度最严重,其次为居住区;居住区的径流营养盐污染程度最严重,其次为商业区^[2]。为进一步提升水环境质量,减少初期雨水径流污染,根据《上海市城镇雨水排水规划(2020—2035年)》,上海市各区大力推进初雨调蓄设施建设。但是建成区用地较为紧张,如何在用地空间有限、工程投资可控和对周边环境影响尽量低等诸多苛刻的条件下进行建设,给设计和建设单位提出了更高的挑战和要求。以上海市某初雨调蓄管道工程为例,重点阐述大口径调蓄管道的设计思路和创新点,以期后续类似项目提供参考。

1 工程概况

该项目为两座雨水泵站初雨联合调蓄,涉及的A、B两个雨水系统均为雨污分流制排水系统,A系统总服务面积1.66 km²,系统规划设计暴雨重现期为5年一遇,规划综合径流系数0.60,系统内现有雨水泵站1座,设计规模10 m³/s;B系统总服务面积1.46 km²,系统规划设计暴雨重现期为5年一遇,规划综合径流系数0.60,系统内现有雨水泵站1座,设计规模6.84 m³/s。雨水径流经泵提升后排入淀浦河,两个排水系统的初期雨水调蓄设施设计规模为11 300 m³。该工程总体布置见图1。



图1 工程总体布置

Fig.1 General layout of the project

调蓄设施主体建设型式采用DN5 000调蓄管道,使用盾构施工,设置进、出水井各1座,其中进水井尺寸22 m×25 m,井底板埋深15.80 m;出水井尺

寸15 m×22 m,井底板埋深16.20 m。两座雨水泵站分别新建DN1 500进水管至调蓄管道进水井,主体占用地下空间面积约3 608 m²。同时,新建除臭系统、放空管道及其附属设施。

2 初雨调蓄规模

根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)以及上海市《雨水调蓄设施技术标准》(DG/TJ 08—2432—2023),用于污染控制的雨水调蓄设施,其调蓄量可以按照下式计算:

$$V = 10DF\Psi\beta \quad (1)$$

式中:V为雨水调蓄设施调蓄量,m³;D为单位面积调蓄雨量,mm;F为汇水面积,hm²;Ψ为径流系数;β为安全系数。

根据相关研究^[3],当上海的省际边界上游来水水质达到水功能区划要求时,结合雨污混接改造、源头海绵设施建设、分流制调蓄5 mm降雨、合流制调蓄11 mm降雨等措施,全市河网水系水质可以达到水功能区划的规划要求,满足溢流污染负荷控制率达到80%的目标(以SS计)。考虑该项目为分流制系统,故D取5 mm,Ψ依据区级雨水规划和加权平均复核计算取0.60,β取1.20,A、B雨水泵站汇水面积为312 hm²,经计算调蓄设施设计规模取11 300 m³。其中,调蓄池进水总管依据进水时间0.5~1.0 h进行设计。

3 调蓄设施选址及建设型式

3.1 调蓄设施选址

该初雨调蓄设施服务的两座泵站分别坐落于现状河道南北岸,河道南侧岸边现状有50 m宽的绿化景观带;河道北侧岸边现状有50 m宽的绿化景观带,远期沿河规划1条25 m宽的市政道路,绿化景观带外侧均为住宅。考虑到该项目的作用为联合调蓄,故初雨调蓄池的选址应兼顾两个系统,为方便建成后的运行维护,对两座泵站附近500 m范围内现状用地及规划用地情况进行了现场踏勘,选定了3个比选方案,具体如图2所示。

方案一选址在河道北侧岸边绿化景观带内,A泵站西侧,因远期规划1条市政道路,可供调蓄设施利用的空间较小,限制了调蓄设施的总体布局,且建成后会未来市政道路建设带来不利影响;方案二选址在河道南侧岸边绿化景观带内,B泵站西侧,可利用绿化景观带空间约50 m,可利用空间较大,

但泵站和调蓄设施之间有一座公共卫生间,需对其进行避让或实施搬迁;方案三选址在河道南侧规划绿地景观内,B泵站东侧,周边现状均为空地,工程实施条件较好,但选址地块和泵站间隔1条市政道路,A、B泵站进入调蓄设施的管道均需穿越该市政道路以及在建地铁盾构主线,且其距离泵站较远,运维人员需跨越市政道路,较为不便。综上所述,该工程选址推荐方案二。



图2 工程选址示意

Fig.2 Schematic diagram of project site selection

3.2 建设型式

初期雨水调蓄设施的建设型式应根据用地条件、竖向标高、周边建筑及其他公用设施等综合考虑,在确保项目易于落地、便于建设实施的基础上,提出技术经济最优的调蓄建设方案,将初雨调蓄设施单价投资规模控制到最低,因此,在选址确定的基础上对两种建设型式进行比选。

方案一采用调蓄管道建设型式,其平面布置如图3所示。

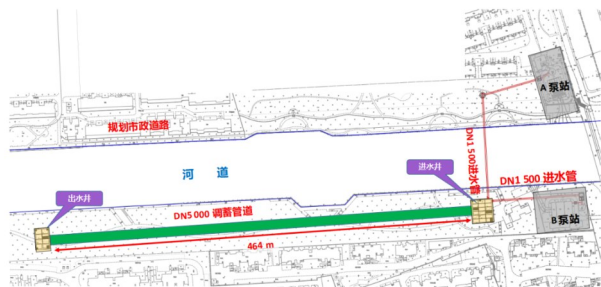


图3 调蓄管道方案平面布置

Fig.3 Layout plan of storage pipeline

该方案采用1根DN5000管道,长464 m,采用盾构施工工艺,调蓄管道始、末两端分别设置进、出水井,二者均设上下两层,下层分别设置进、出水设施等,上层设置配电设施、PLC柜及除臭通风设施等。A、B两系统初雨经DN1500进水管、进水闸门、

细格栅井和沉砂池预处理后进入调蓄管道,出水井内设置潜水排污泵用于放空初雨。整个设施为全地下构筑物,进、出水井主体占地约880 m²。

方案二采用矩形调蓄池建设型式,其平面布置如图4所示。

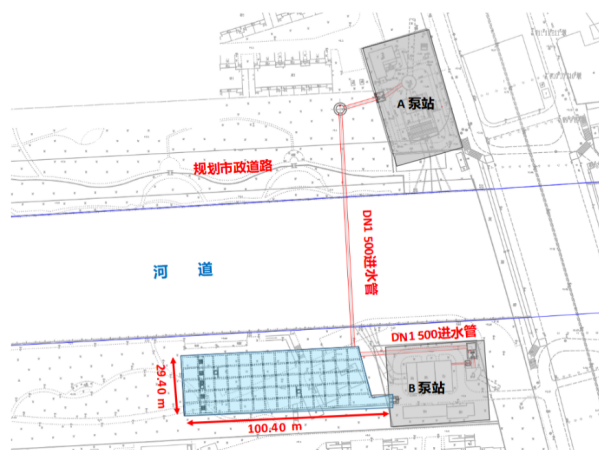


图4 调蓄池方案平面布置

Fig.4 Layout plan of storage tank

该方案中初雨调蓄池主体占用地面积约2952 m²,调蓄池尺寸为(85.50~100.40)m×29.40 m,池内有效水深5 m,调蓄池主体底板埋深约16.0 m,局部设置设备夹层,布置配电柜、PLC柜及除臭通风设施等。A、B两系统初雨经DN1500进水管、进水闸门和细格栅井后进入调蓄池,调蓄池末端设有放空潜污泵,调蓄池顶板标高3.00 m,顶板覆土3.00 m,满足绿化恢复要求。

方案一采用DN5000管道作为主体调蓄设施,在进、出水井上层设置设备夹层,用于布置除臭设备及电气自控设施,有效利用地下空间。该方案整体开挖面积较小,对周边居民影响较小,驳岸重建长度小,仅进、出水井上方产生绿化搬迁,基坑围护面积小、施工难度相对较低,工程投资较方案二略高。方案二采用常规矩形调蓄池,冲洗清淤及运维较方案一难度小,整体开挖面积较大,绿化搬迁量较大,对周边居民影响较大,维稳风险较高。由于此段驳岸采用锚杆型式,基坑边线距离驳岸较近(约9 m),需对沿线涉及的150 m驳岸拆除重建,施工难度和风险均较大。

因此,该项目推荐采用方案一调蓄管道的建设型式。

4 预处理及冲洗清淤设计

降雨初期,雨水溶解空气中的污染气体及颗粒物,降落后又冲刷屋面、道路、雨污管渠等,从而携带大量的SS、有机物、病原体、重金属等。据统计,北京、上海、天津等大中城市的初期雨水SS为153.88~1367.00 mg/L, COD为182.88~835.00 mg/L,总氮为1.40~39.00 mg/L,总磷为0.13~4.85 mg/L^[4-5]。考虑到初期雨水的污染负荷较大以及调蓄管道冲洗清淤的成本较高,需对较大颗粒物实施拦截,并应尽可能减少SS及有机物等污染物进入调蓄管道,故该项目设置预处理设施和自动冲洗清淤设备,以便于今后的运维管理,从而进一步降低运维成本和难度。

4.1 预处理设计

随着调蓄管道运行周期的增长,管道内初期雨水汇入后流速降低会导致大量泥砂和淤泥沉积在管道底部和末端,而调蓄管道的清淤难度和成本高于调蓄池,应尽量减少进入调蓄管道的污染物质,因此,该工程设置格栅和沉砂池两阶段预处理设施。

格栅和沉砂池布置于进水井下层,其平面布置如图5所示。

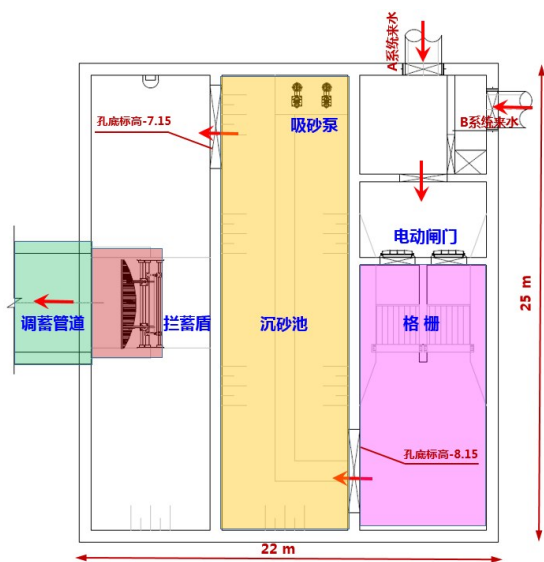


图5 进水井下层平面布置

Fig.5 Layout plan of inlet well lower layer

进水井下层设置汇合井、格栅井、沉砂池、冲洗清淤设备及其附属设施等。两个系统的初期雨水经重力自流依次进入汇合井、格栅井、沉砂池,最后进入调蓄管道。格栅井内设两台回转式格栅除污

机,栅距20 mm,宽2.20 m,对初期雨水中的悬浮颗粒物进行拦截,进水井上层设置螺旋输送机及栅渣收集设施。沉砂池净尺寸24.20 m×6.40 m,最小流速约0.16 m/s,最大停留时间约157 s,沉砂池中设两台吸砂泵并配套砂水分离器,以便于今后的运维养护。

4.2 自动冲洗清淤设计

4.2.1 方案比选

初雨调蓄池在每次调蓄排空后应进行水力冲洗,否则池底会出现淤积,如此反复多次后清洗难度较大,而淤积的污泥厌氧发酵后也会释放有毒有害气体,其中甲烷为易燃易爆气体,给运维带来了巨大风险^[6]。国内已建初雨调蓄池采用较多的冲洗方式有门式冲洗、水力翻斗、智能水射器、真空冲洗等,根据该项目初雨调蓄管道特点及上海市已建调蓄设施的冲洗方式,主要对拦蓄盾和智能曝气水射器两种冲洗方式进行比选论证。

方案一采用拦蓄盾冲洗方式,在进水井调蓄管道进水处设置拦蓄盾1台,尺寸 $B \times H = 4.50 \text{ m} \times 1.50 \text{ m}$,放空泵设置于出水井。初雨汇入调蓄管道期间,拦蓄盾开启;待系统切换到放空模式后,拦蓄盾关闭,以拦截上游管道雨水;待调蓄管道内初雨放空后,开启拦蓄盾对管道进行水力冲洗清淤。方案二采用智能曝气水射器冲洗方式,因其工作半径约20 m,根据调蓄管道长度,需设置21套智能曝气水射器,并在管道内部顶端设置风道以便设备充气,在初雨放空阶段同时实施冲洗清淤,放空泵设置于出水井。方案一冲洗设备少,维护量较方案二小,冲洗次数受上游蓄水量限制,如一次冲洗未达到既定冲洗目标,有时需进行第二次水力冲洗;方案二冲洗设备较多,设备维修困难,能耗较高,但冲洗方式较为灵活。经综合比选,该项目推荐采用方案一的冲洗方式。

4.2.2 冲洗清淤计算流体力学(CFD)模拟分析

Alihosseini等^[7]在2019年基于CFD-DEM耦合方法,对稳定流及冲洗波条件下的排水管道泥砂输运开展了数值模拟。CFD技术中Flow-3D以多相流的连续性方程和完整的纳维-斯托克斯方程作为流体运动的控制方程,求解得到流场数据,采用VOF方法进行自由面运动的计算,并通过FAVOR的分数面积和体积障碍物表示方法,对复杂的几何区域进行建模。该方法不仅能够处理计算流体内部边

界信息,还可以实现对网格内泥砂等固体的精准建模,有效解决多相流模拟中固体物质与流体交互的复杂计算问题。

① 模拟调蓄管道泥砂粒径

对两座泵站服务范围内的雨水管道泥砂样品进行现场采集,不同功能区雨水管道沉积物的级配曲线和粒径分布见图6。

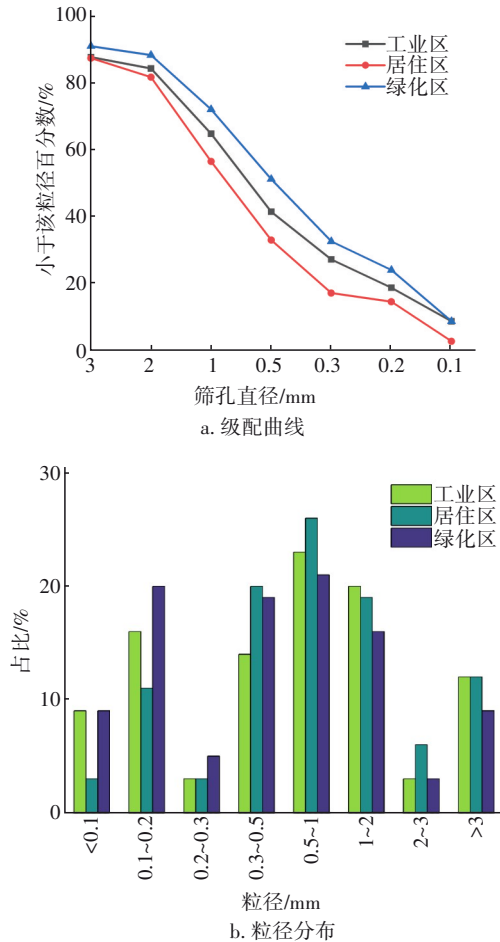


图6 不同功能区雨水管道沉积物的级配曲线及粒径分布

Fig.6 Gradation curves and particles distribution of rainwater sediments in different functional areas

由图6可知,粒径为0.5~1 mm的沉积物占比最高,故该项目CFD模拟泥砂的平均粒径取0.8 mm,密度为1 200 kg/m³。

② 几何建模与网格划分

为方便模拟分析,将工程模拟对象分为三部分,即进水井、调蓄管道、泥砂。调蓄管道泥砂冲洗建模效果如图7所示。

网格划分采用Flow-3D软件的笛卡尔网格,其中进水井为网格块1,调蓄管道为网格块2,调蓄管

道末端泥砂为网格块3。 Y 方向为水流方向,其网格尺寸为0.09~0.30 m; X 方向为管道横向方向,其网格尺寸为0.09~0.35 m; Z 方向为高度方向,其网格尺寸为0.09~0.10 m,对冲洗孔口处和泥砂层进行了加密,网格总数约200万个。基于调蓄管道的运行工况,考虑最不利条件,将泥砂设置于管道末端下游20 m处。

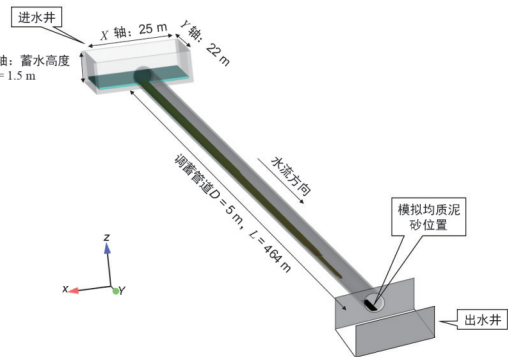


图7 调蓄管道泥砂冲洗建模示意

Fig.7 Diagram of sediment flushing modeling in storage pipeline

模型左侧 Y_{\min} 为由水头高度控制的墙边界,水头高度与蓄水池的初始水位保持一致;右侧 Y_{\max} 为自由出流边界;模型上边界 Z_{\max} 为固定压力边界,压力大小与标准大气压一致,取101 kPa,其余边界均为墙边界。

③ 不同水深对应不同泥砂厚度的冲洗效果

系列1中A、B、C工况的进水井蓄水水位为1.5 m,设置在管道末端的泥砂均匀堆积厚度分别为0.10、0.15和0.20 m;系列2中D、E、F工况的进水井蓄水水位为3.0 m,设置在管道末端的泥砂均匀堆积厚度分别为0.10、0.15和0.20 m。

在不同蓄水位条件下,调蓄管道中泥砂质量随时间的变化如图8所示。

由图8可知,A、B、C工况下,第一股水流到达 Y 轴444 m处所需时间约190 s,此时该处水流速度为1.74 m/s;D、E、F工况下,第一股水流达到 Y 轴444 m处所需时间约90 s,此时水流速度为3.84 m/s。上游集水井蓄水水位越高,第一股水流到达同一个断面的水流速度越大,所用时间越短;在相同的冲洗时间内,泥砂厚度越小,冲洗效果越好。同时,在去除泥砂质量相同的情况下,冲洗时间越长,冲洗效果也更佳。

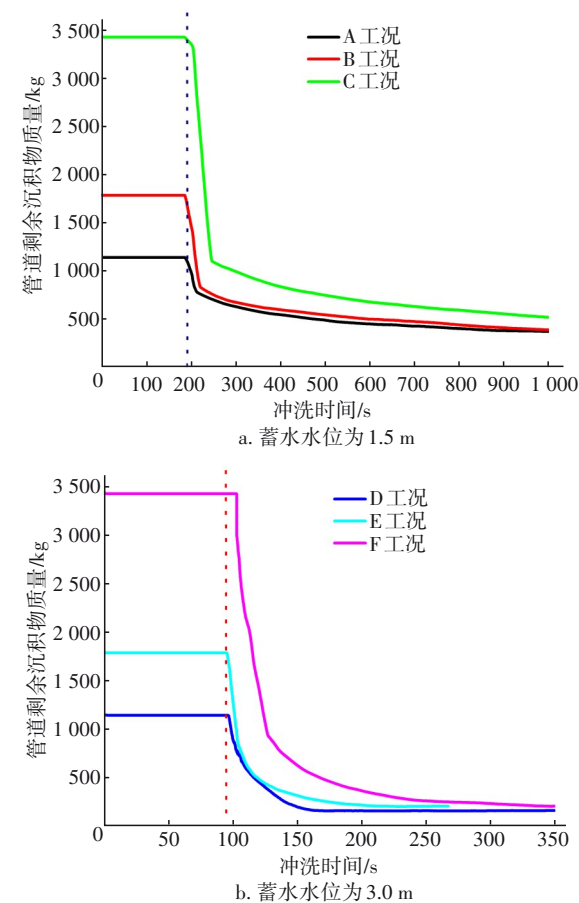


图 8 调蓄管道中泥砂质量随时间的变化

Fig.8 Change in residual sediment weight of storage pipeline with time

表 1 为泥砂冲洗数值模拟试验数据。

表 1 泥砂冲洗数值模拟试验数据

Tab.1 Experimental data of sediment flushing numerical simulation

运行工况	蓄水体积/m ³	初始泥砂质量/kg	一次冲洗剩余泥砂质量/kg	除砂率/%
A	825	1 143	373	67.4
B	825	1 787	390	78.2
C	825	3 430	517	84.9
D	1 650	1 143	159	86.1
E	1 650	1 787	190	89.4
F	1 650	3 430	210	93.9

由表 1 可知,A、B 和 C 工况在冲洗时间 1 000 s 内,除砂率分别为 67.4%、78.2% 和 84.9%,D、E 和 F 工况在冲洗时间 350 s 内,除砂率分别为 86.1%、89.4% 和 93.9%,故 3.0 m 蓄水水位的冲洗效果优于 1.5 m。综合考虑土建设备投资、安装难度及维修成本等因素,该项目推荐采用 1.5 m 高的拦蓄盾

冲洗方案,工程建成后可以根 据运行工况和上游雨水管道来水进行多次蓄水、冲洗,从而达到冲洗清淤要求。

5 除臭工艺设计

在调蓄设施运行过程中,进水阶段 NH₃ 和 H₂S 的平均浓度均超出《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93)中的二级标准,而二者浓度的最大值出现在存水阶段;NH₃ 平均浓度依次为进水阶段>闲置阶段>存水阶段>排水阶段,H₂S 平均浓度依次为进水阶段>存水阶段>排水阶段>闲置阶段^[8]。该项目主要的恶臭污染源是初期雨水,其成分与污水类似,按照上海市《恶臭(异味)污染物排放标准》(DB 31/1025—2016)设计,由于进、出水井设置在沿河景观带内且距离住宅较近,除臭设施需确保运行中达标率较高以免引发投诉。选用“水洗+离子法+化学滤料”三段式组合除臭工艺,根据臭气浓度灵活切换工艺段。除臭小时风量采用进、出水井和调蓄管道容积的两倍计算,并考虑 10% 的漏失风量,经计算除臭设备总风量 30 200 m³/h,其中 B 泵站设置 1 套,除臭风量 15 100 m³/h,通过风管自进水井引入泵站;出水井设备层设置 1 套,除臭风量 15 100 m³/h,两套设备在进水时同时运行。

6 结语

在城市的建成区规划建设初雨调蓄设施,对规划、设计、审批和建设各个流程均提出了较高的要求,采用线性、大口径调蓄管道在一定程度上解决了占地、施工及对周边环境 影响等难点问题,为项目的尽快落地创造了条件。初雨调蓄管道在建设型式等方面有其自身的优势和特点,但在运行维护等方面也存在不足,为使其更加高效、低碳地发挥面源污染控制作用,以上海市某大口径初雨调蓄管道工程为例,阐述项目在工程选址、预处理、冲洗清淤及除臭设计等方面所进行的创新性、试探性研究。在预处理方面,为尽量减少进入调蓄管道的污染 物量,在进水端设置格栅和沉砂池;在冲洗清淤方面,结合实际雨水的泥砂情况,通过 CFD 技术进行模拟分析验证,选用维护量少、易于控制的拦蓄盾自动冲洗清淤方式;在除臭方面,选用“水洗+离子法+化学滤料”三段式组合除臭工艺,可根据臭气浓度灵活切换工艺段。该项目对今后大口径初雨调蓄管道工程设计具有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 李定强,刘嘉华,袁再健,等. 城市低影响开发面源污染治理措施研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10): 2110-2118.
LI Dingqiang, LIU Jiahua, YUAN Zaijian, *et al.* Research advance and prospects on low impact development control measures for urban non-point source pollution [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(10): 2110-2118 (in Chinese).
- [2] 林卫红. 厦门市市政道路雨水径流污染研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(4): 19-24.
LIN Weihong. Research on pollution of municipal road rainwater runoff in Xiamen [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(4): 19-24 (in Chinese).
- [3] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 雨水调蓄设施技术标准: DG/TJ 08—2432—2023 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2023.
Shanghai Housing and Urban and Rural Construction Management Commission. Standard for Stormwater Detention and Retention Facilities: DG/TJ 08-2432-2023 [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2023 (in Chinese).
- [4] 张志彬,孟庆宇,马征. 城市面源污染的污染特征研究[J]. 给水排水, 2016, 42(s1): 163-167.
ZHANG Zhibin, MENG Qingyu, MA Zheng. Study on pollution characteristics of urban non-point source pollution [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42 (s1): 163-167 (in Chinese).
- [5] 周传庭,王梦玉,幸韵欣,等. 城市初期雨水污染及处理措施的研究进展[J]. 净水技术, 2022, 41(7): 17-26.
ZHOU Chuanting, WANG Mengyu, XING Yunxin, *et al.* Research progress of urban initial stormwater pollution and treatment measures [J]. Water Purification Technology, 2022, 41 (7): 17-26 (in Chinese).
- [6] 张文胜,孙巍. 武汉市黄孝河合流制溢流调蓄池工艺设计[J]. 给水排水, 2020, 46(2): 45-48.
ZHANG Wensheng, SUN Wei. Design for CSOs storage tank of Huangxiao River in Wuhan [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46 (2): 45-48 (in Chinese).
- [7] ALIHOSSEINI M, SÆGROV S, THAMSEN P U. CFD-DEM modelling of sediment transport in sewer systems under steady and unsteady flow conditions [J]. Water Science & Technology, 2019, 80(11): 2141-2147.
- [8] 李怀正,张璐璇,黄建秀,等. 雨水调蓄池的臭气排放规律研究[J]. 中国给水排水, 2012, 28(17): 12-16.
LI Huaizheng, ZHANG Luxuan, HUANG Jianxiu, *et al.* Study on odor emission from retention basin [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28 (17): 12-16 (in Chinese).

作者简介:李宗强(1978—),男,江苏徐州人,硕士,高级工程师,主要从事市政给排水工程的设计、建设和运维工作。

E-mail:734699576@qq.com

收稿日期:2024-07-25

修回日期:2025-01-09

(编辑:沈靖怡)

扎实推进水源地规范化建设和备用水源地
建设,保障好城乡饮用水安全