

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.12.026

高密度建成区多系统联合初雨线性调蓄管道设计

席旭军, 陈建华, 李永刚, 庞景昊, 丁婷婷, 叶 标
(上海浦东建筑设计研究院有限公司, 上海 201206)

摘 要: 为控制初期雨水污染,进一步提高受纳水体水质,各地推进实施初期雨水调蓄工程。在雨水强排系统较为集中的区域,建设线性管道对初期雨水进行收集调蓄,便于串接多个强排系统,达到多系统联合调蓄的目的,有利于节约用地并增强系统韧性。但若城市开发强度高,调蓄管道建设过程中需克服线路布置、障碍穿越、入流消能、冲洗防腐、联动控制等众多难题。以上海浦东金桥区域初期雨水治理工程为例,提出并分析对上述问题的解决方案,可为类似工程规划设计提供借鉴。

关键词: 初期雨水; 控污调蓄; 线性调蓄; 调蓄管道; 多系统联合

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)12-0170-08

Design of Multi-system Joint Linear Initial Rain Control and Pollution Storage Pipeline in High Density Built-up Areas

XI Xujun, CHEN Jianhua, LI Yonggang, PANG Jinghao, DING Tingting, YE Biao
(Shanghai Pudong Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: In order to control the initial rainwater pollution and further improve the water quality of the receiving water bodies, cities have invested heavily in implementing initial rainwater storage projects. In areas with concentrated rainwater drainage systems, linear pipelines are constructed to collect and store initial rainwater, facilitating the connection of multiple drainage systems and achieving the goal of joint storage of multiple systems. This is beneficial for land conservation and enhancing system resilience. But if the intensity of urban development is high, the construction process of regulating and storing pipelines will need to overcome many difficulties such as route layout, obstacle crossing, inflow energy dissipation, flushing and anti-corrosion, and linkage control. Taking the initial rainwater treatment project in the Jinqiao area of Pudong, Shanghai as an example, this paper summarizes the solutions to the above related problems in the design process of the project, providing reference for similar project planning and design.

Keywords: initial rainwater; pollution control and storage; linear storage; storage pipeline; multi-system integration

当前,各地大力推进初期雨水调蓄设施建设以控制初期雨水污染,相对于点状调蓄池,隧道、管道等线性调蓄具有节约用地、布置灵活、方便扩容等优点。隧道一般埋深较大,故常称为“深层隧道”或

基金项目:上海市住房和城乡建设管理委员会科学技术委员会科研课题(沪建科2025-003-008)

通信作者:席旭军 E-mail: xixujuns@163.com

“深隧”。国外的巴黎、伦敦、芝加哥、东京、新加坡以及国内的广东、武汉、上海等均已建或在建一定数量的深隧,用于防洪排涝、污染控制或二者兼顾^[1],取得了较好的效果,但普遍存在耗资大、周期长等问题,如底特律市由于雨洪控制隧道的投资高而放弃,芝加哥深隧的建设前后耗时30多年^[2]。

管道调蓄是一种在城市浅层地下空间内铺设管道,利用管道内部空间储水的调蓄方式,同样可用于防洪排涝、污染控制或二者兼顾。较隧道而言,管道调蓄具有规模小、埋深浅、技术成熟、建设周期短的特点,也更为经济。目前,管道调蓄在国内建成案例较少。本文以上海浦东金桥区域初期雨水治理工程为例,总结该工程设计过程中遇到的

相关难点及处理方案,可供解决类似问题参考。

1 区域概况

1.1 区域排水系统现状与规划

金桥位于上海市浦东新区中部,建成有金桥东北块(西)、金桥东北块(东)、金桥一期、金桥二期等4个强排系统。该区域已按20世纪90年代初用地规划建成工业区、居住区及少量办公区,是典型的高密度建成区。2035年排水规划基于现有泵站排水能力,按5年一遇标准所对应的服务范围对排水系统布局进行优化调整,将4个排水系统服务范围由1年一遇的1 399 hm²调整为5年一遇的788 hm²。其余范围结合周边未开发地块新建金沪、金桥汽车排水系统,具体见图1。

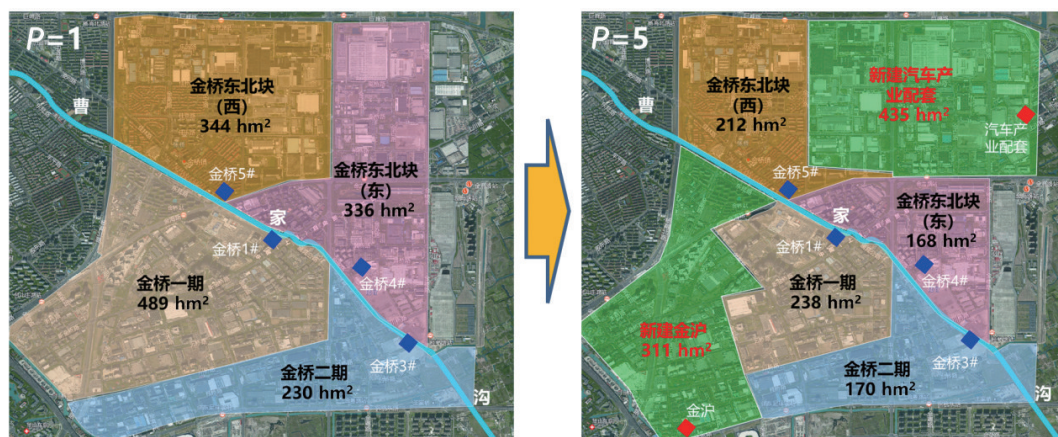


图1 上海金桥区域排水系统现状与规划服务范围

Fig.1 Current status and planning service scope of drainage systems in Jinqiao area of Shanghai

4个排水系统的初期雨水调蓄设施按照5 mm的单位面积调蓄雨量规划建设规模分别为9 710、6 630、6 552、8 395 m³,共计31 287 m³。通过点状异位调蓄池、线性联合调蓄方案比选后,选择线性联合调蓄方案^[3],沿曹家沟(永建路-川桥路)段新建调蓄管道。

1.2 建设条件

金桥区域4个雨水系统已建成4座雨水泵站(1#、3#、4#、5#),分布于曹家沟(永建路-桂桥路)段河道两侧。现状曹家沟河口宽度为18~25 m,新金桥路以南段以自然土坡或简易小木桩护岸为主,护坡局部破损严重;以北段为浆砌块石硬质护岸。河道与新金桥路等7条市政道路相交或平行,河道上分布川桥路桥等5座桥梁。金海路及申江路下分别有运营中的地铁9号线、青草沙原水管、污水支线干管。主要设施分布见图2。



图2 河道沿线主要设施分布

Fig.2 Distribution of main facilities along the river

场地开发情况:曹家沟北岸已建成居住社区、养老院,华为研发大楼在建;南岸与唐陆公路间为规划道路及河道公用绿带,现状建筑已拆除;3#泵站北侧为部队用地,川桥路北侧曹家沟东岸存在编

号为0161号的古银杏树。

2 工程总体方案

2.1 平面布置

河道沿线有部队用地、桥梁、银杏古树及部分未动迁建筑,无法按直线布置调蓄管道。曹家沟规划河口宽度40 m,两侧陆域控制带宽各20 m。设计充分利用河道下部及两侧陆域控制线内公共空间,结合曹家沟蜿蜒曲折的形态,将调蓄管道工作井迁

回布置于河道两岸。在曹家沟陆域控制带内距规划河口线12 m处设置工作井16座,自金桥5#雨水泵站、金桥3#雨水泵站起分别由北向南、由南向北新建直径3 500~4 000、3 000~4 000 mm调蓄总管至曹家沟、申江路东南角,总管全长2 693 m,全程5次垂直穿越曹家沟。调蓄管道容量约3.18万 m^3 ,满足规划要求。

调蓄管道总体布置方案见图3。



图3 调蓄管道总体布置方案

Fig.3 Overall layout of the storage pipeline

2.2 高程布置

新建的调蓄管道高程需满足建设与后期运行要求。管道纵断面布置见图4。

① 沿途4套排水系统初期雨水均能重力流入调蓄管道。1#、3#、4#、5#雨水泵站进水闸门井管底高程分别为-3.75、-3.10、-4.55、-4.30 m,新建调蓄管道均按照管底平接方式接入调蓄总管。

② 安全穿越河道。曹家沟规划河底高程为-1.0 m,5次过河处管底高程分别为-6.80、-8.01、-8.26、-7.83、-6.60 m,可确保管顶与规划河底净距 ≥ 3.0 m。

③ 穿越或避让沿线地铁、原水管道等设施。穿越地铁9号线处盾构顶板高程分别为-10.31、-10.22 m,确定新建调蓄管外底高程分别为-7.205、-7.197 m,满足上海市轨道交通管理条例中顶管穿越运营中轨道交通线路净距 >3.0 m的要求。申江路西侧道路下有双排 $\phi 3\ 600$ mm原水钢管,探测显示管顶高程为-7.57~-7.37 m;东侧管顶高程为-7.40~-7.38 m。采用倒虹下穿的形式,内底高程为-18.66~-18.57 m,与原水管道净距为2.03~2.22 m,满足上海市原水引水管渠保护办法中顶管穿越圆形引水管渠底部时间距 ≥ 1.5 m的要求。

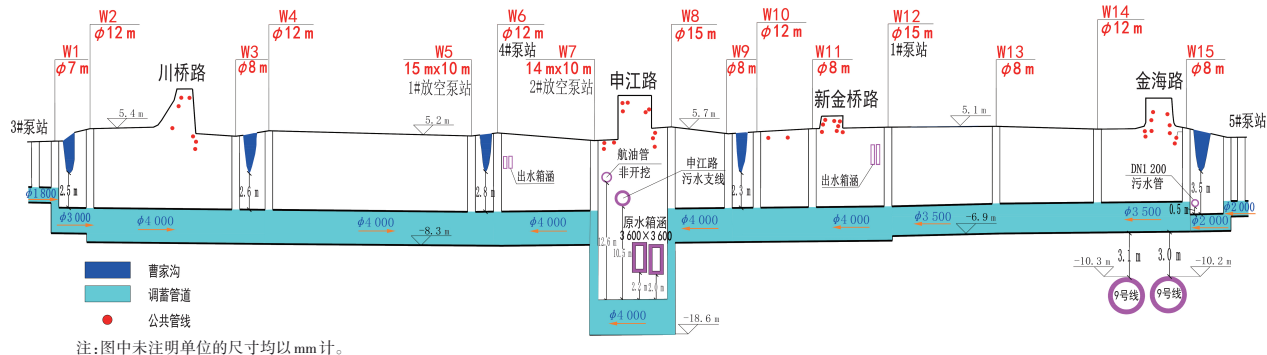


图4 管道、检查井纵断面布置

Fig.4 Vertical section layout of pipelines and inspection wells

据此,确定调蓄管底高程为-18.66~-6.69 m,下穿曹家沟河道、污水支线干管、原水管道及其他

埋深相对较浅的机场航油管、泵站出水箱涵、电力通信、高压燃气管等。

2.3 施工方式与管材

① 施工方式

施工方法的确定,一方面受沿线工程地质、水文地质以及环境条件的影响,另一方面也受工程场地条件、结构埋深、结构形式等因素制约,同时还需考虑工程的难易程度、工期、造价、运营效果等^[4]。新建直径3 000~4 000 mm调蓄总管埋深10.78~24.22 m,沿途将穿越诸多重要设施,故采用顶管施工。沿途设置顶管工作井、接收井共19座。其中,7#、8#井采用地下连续墙,其余均采用钻孔灌注桩+高压旋喷桩的围护及止水形式。

② 管材选择

管材需结合埋深、内压、施工方式、投资规模等因素进行选择。常用大口径管道主要有钢筋混凝土管、玻璃钢夹砂管、球墨铸铁管、钢管、预应力钢筒混凝土管(JPCCP)等。经综合比较,结合上海地区的施工经验,本工程采用JPCCP,钢环承口、插口,“O”型橡胶密封圈止水。

3 关键系统方案

3.1 初期雨水入流

4座雨水泵站(1#、3#、4#、5#)所在排水系统的调蓄规模分别为9 710、6 630、6 550及8 400 m³。根据《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017),调蓄设施进水时间宜采用0.5~1.0 h,本工程按0.75 h考虑,进水管直径分别取2 200、1 800、2 000、1 800 mm。自各泵站进水粗格栅后新建直径1 800~2 200 mm入流管接入调蓄总管。为进一步拦截杂质,接入调蓄总管前设置格栅井,内设循环齿耙式格栅除污机,栅条间距20 mm,安装角度75°。

3.2 入流消能

新建的1#、4#雨水泵站入流管道接入调蓄总管时,跌水高度3.15~3.44 m,水流易发生因空蚀、空蚀破坏和失稳产生的振动和噪声。在处于明满流交替时,对管道造成冲击破坏,故需采取消能措施。此外,为便于管道疏通及日常设备检修,需设置检修井,满足人员上下需要。常用检修井设置竖直爬梯,存在易腐蚀、上下不便、易坠落等缺陷^[5]。本次设计采用集旋流式消能流道和人员检修通道于一体的检查井。无水状态下可作为下井检修通道,避

免发生坠落事故,也减轻人员工作强度;有水状态时,初期雨水通过旋转梯道跌水消能。旋流阶梯式竖井运行风险会明显低于旋流式竖井^[6],其水力学特性更利于过流消能以及与调蓄隧道的水流衔接。

3.3 设施放空

3.3.1 下游放空能力复核

根据区级污水排水规划,金桥区域初期雨水放空出路为白龙港片区污水二期中线总管申江路污水支线。该支线污水干管主要布置在东陆路和申江路,直径为800~1 800 mm,污水经申江污水泵站提升后纳入龙东大道上的中线污水总管。

从支线规模看,申江污水泵站现状规模为21.1万m³/d,2019年1月—2022年7月平均日最高污水量约9.8万m³/d,尚富余11.3万m³/d排水能力,可以满足金桥区域初雨调蓄管道24 h错峰放空需求。

从管道通过能力看,接入段申江路污水支线直径为1 800 mm,坡度约0.08%,充满度按0.75计,最高日通过污水量约23.78万m³/d,平均日约15.85万m³/d,实际日均污水量均小于10万m³/d且有较大容量,可满足本次建设调蓄池放空需要。

3.3.2 放空泵站设计

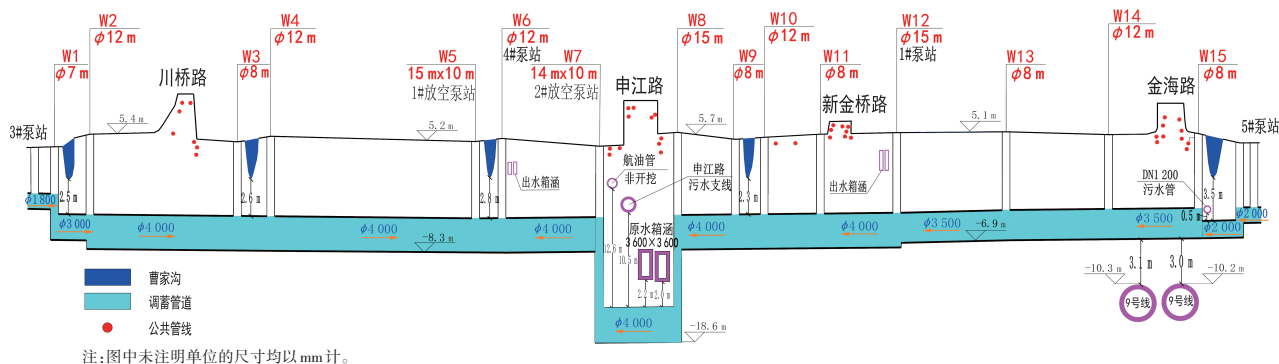
调蓄管道穿越申江路时,为避让原水箱涵、申江路污水支线、航油管等管线,采用倒虹穿越形式。为确保调蓄管道内彻底放空,拟于5#井后及倒虹管下游的7#井内分别设置1#、2#放空泵站,见图5。

放空时,1#排空泵站先运行,将除倒虹外(高程-8.15 m以上)存水(约28 680 m³)排空后,启动2#排空泵站将倒虹管内(高程-8.15 m以下)存水(约3 120 m³)排空。



注:图中尺寸以mm计。

a.1#、2#放空泵站平面位置



b.1#、2#泵站放空水量

图5 放空泵站位置及放空水量

Fig.5 Location and volume of emptying pump station

按雨后 24 h 放空计,平均排水能力为 1 325 m³/h。1#、2#放空泵站接力运行,运行时间分别约 21.65、2.35 h。1#、2#放空泵站均各配置 3 台变频潜水排污泵(2 用 1 备),1#放空泵站单泵 $Q=828\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=13.40\text{ m}$ 、 $P=45\text{ kW}$;2#放空泵站单泵 $Q=663\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=$

17.15 m、 $P=45\text{ kW}$ 。放空泵站设置直径 1 200 mm 进水管,配置粉碎格栅。为便于流量监测,泵站出水管处设计量井 1 座,内设电磁流量计 1 套。

3.4 冲洗设计

常用冲洗类型对比见表 1。

表 1 常用冲洗系统对比

Tab.1 Comparison of commonly used flushing systems

类别	门式冲洗	水射器	真空冲洗	拦蓄冲洗
土建	1.5~2.0 m 高存水空间	需外部储水间或池底存水坑	气密性存水间及水封坡,土建要求极高	利用管道空间
冲洗长度/m	最长 200	30	最长 500	2 000~3 000
能耗	0.1 kW·h/廊道,能耗较低	100~1 000 kW·h/(1 000 m ³),能耗很高	1.5 kW·h/廊道,能耗较低	2.2~5.5 kW·h/套,能耗较低
适用池型	矩形、圆形	形状不限	矩形、圆形	圆形管道、矩形箱涵
环境影响	水流噪声,无外散气体	水泵和水流噪声,无外散气体	噪声大且需考虑臭气处理	水流噪声,无外散气体
设备检修	需入池检修,每 1~2 年检查液压油,每 3~5 年更换设备	需入池检修,设备位于池底,易污染磨损,需经常维护	无需入池检修,需对真空泵进行日常保养与维护	需入池检修,维护较为简单

本工程新建的调蓄管道检查井间距为 80~480 m。综合考虑冲洗能力及效果、土建要求、环境的影响、能耗等方面,采用拦蓄盾+液动快开闸门相结合的冲洗方式。泵站至调蓄总管直径 1 800~2 200 mm

入流管内采用拦蓄盾冲洗,直径 3 500~4 000 mm 调蓄总管采用接液动快开闸门接力冲洗。该冲洗方式利用管道内调蓄水量自冲洗,具有节省用水量和能耗的优点。冲洗设施分布见图 6。

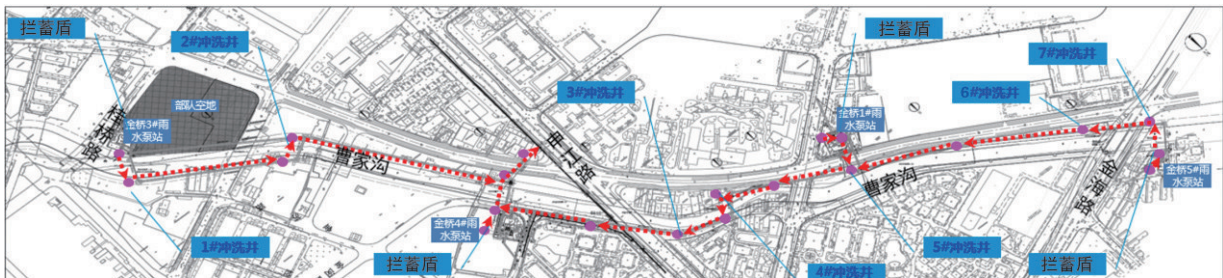


图6 冲洗设施分布

Fig.6 Distribution of flushing facilities

3.5 除臭与通风

3.5.1 除臭

初期雨水会产生 H₂S、NH₃、CH₄、CH₃SH 等气体

且浓度变化较大,必须采取除臭措施。常用的除臭方法有生物滤池法、离子氧除臭法、活性炭吸附法、天然植物液法、化学洗涤法、紫外(UV)光解法等。

本工程采用水洗涤+离子法串联+吸附三段式组合工艺进行臭气处理。

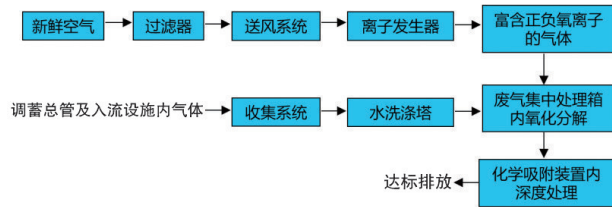


图7 除臭工艺流程

Fig.7 Flow chart of deodorization process

通过密闭的收集系统收集格栅间、进水闸门井、调蓄管道及检查井内气体,由后置式风机抽吸至除臭设备处理后达标排放。设施处理量宜按每小时处理调蓄容积的1~2倍,即80 000 m³考虑。在1#、3#、4#、5#雨水泵站及主放空泵站设置5套除臭设备,单套 $Q=16\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $P=18.5\ \text{kW}$ 。考虑10%漏失风量系数后,换气频率为1.82次/h。

3.5.2 通风

在调蓄总管内设施检修时需充分通风。为统筹解决通风、除臭问题,在5套除臭系统内各增设1套同规格备用风机,平时1用1备,交替使用,需通风时同时启动,满足4次/h的通风需求。

3.6 设施防腐

初期雨水与污水均对混凝土具有腐蚀性。初雨中悬浮物(SS)沉积在管道底部形成污泥,污泥中的微生物与管道中的H₂S发生一系列的化学反应后生成生物硫酸,对管道产生严重侵蚀。常规污水处理构筑物主要采用有机涂料类、无机砂浆类及内衬材料进行防腐,选择或处理不当易导致防腐层脱落、防腐失效。

调蓄管道及检查井一直处于干湿频繁交替的状态中,更易产生腐蚀,且后期需人员下井检修操作,对环境要求更高。工程选择防腐性能优良且具有较强附着力和裂缝桥接能力、耐磨、耐冲击、无毒性的无机改性聚脲防腐涂料,一底二面涂层总厚度为0.9 mm。

4 相关设施改建与保护

4.1 曹家沟驳岸拆除与新建

曹家沟蜿蜒曲折,调蓄管5次垂直穿越河道并有部分管段位于河底下部空间,具体见图8。

为确保顶管顺利进行,施工前需拔桩清障;施工后需按规划蓝线进行驳岸恢复或新建。为满足

河道及管道保护技术规定,按照垂直穿河管道两侧15 m、沿河段管道外边线10 m确定恢复或新建河道驳岸范围,避免后期重复保护。

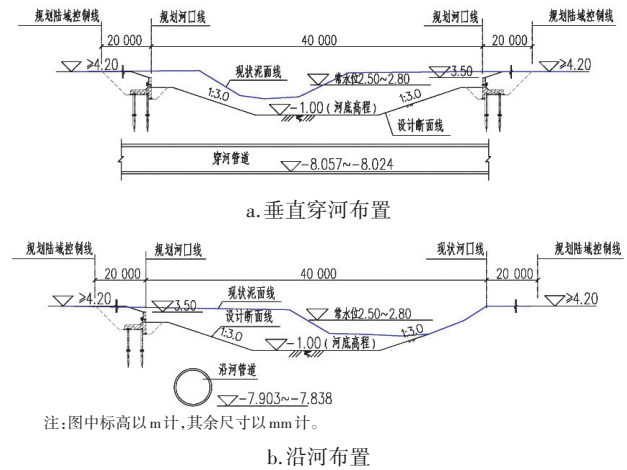


图8 管道垂直穿河与沿河布置

Fig.8 Pipeline crossing and layout along the river

4.2 古树保护

新建3#顶管工作井及其后直径4 000 mm管道邻近上海市0161号古银杏树。该树高约26 m、胸围380 cm、东西冠幅15.9 m、南北冠幅12.4 m、树龄300年,属上海市一级保护古树。依据相关条例及地区园林绿化管理部门意见,划定以古树中心为圆心、直径为38 m的圆范围为古树保护范围。施工前后需采取古树保护和养护措施,保护古树的水、气、光、温及矿质营养等五大环境。施工前对古树进行体检,检查生长势、树洞大小,并采用树木雷达测定古树根系的分布及生长方向;施工时在影响范围内进行水位观测、古树伤口消毒防腐处理、树体修剪;施工后古树采取复壮措施。

5 运行控制

5.1 运行模式

调蓄管道按不同模式,自动化控制运行。①晴天模式:关闭调蓄管道的进水闸门,不使用调蓄管道;②雨天模式:开启调蓄管道的进水闸门,将初期雨水输送至调蓄管道;当检测到调蓄管道内液位达到设计最高液位时关闭进水闸门,泵站开启雨水泵,抽排雨水至曹家沟。③放空及冲洗:降雨结束后,根据污水系统运行状况发出放空指令,先开启调蓄管道1#放空泵放空,管道抽至拦蓄盾、冲洗快开闸门蓄水水位;启动平直管段冲洗,自下游向上游依次、循序开启快开闸门、拦蓄盾完成平直管段

管道冲洗,继续启动1#放空泵站,直至冲洗水排空。开启倒虹管段放空及冲洗,启动2#放空泵站,管道抽至8#井内冲洗快开闸门蓄水水位后,开启快开闸门完成倒虹管道冲洗,继续启动2#放空泵站直至冲洗水排空。

5.2 控制方式

雨水泵站内新增的调蓄设施由泵站现有人员负责管理,按照有人值守设计,通过公共网络向上级管理平台进行数据传输。泵站内的调蓄设施就地设有小型可编程逻辑控制器(PLC)装置,并接入现有PLC控制系统以满足使用需求。

调蓄管道沿线的7座冲洗井以及放空泵站按照无人值守、数据上传、远端监控设计。在不具备有线网络接入的区域采用无线传输方式,应选用网络覆盖范围广、信号强度稳定的电信运营商,并设有多种安全措施,以确保无线通信的安全性及稳定性。

在4#雨水泵站设置初期雨水调蓄区域监管系统,对整个调蓄管道、放空泵站、冲洗设施等进行统筹监控及管理,实现操控一体化。系统可针对不同降雨情况、调蓄需求对各个设备发出远程控制指令,以实现各调蓄设施的有序运行,控制模式见图9。

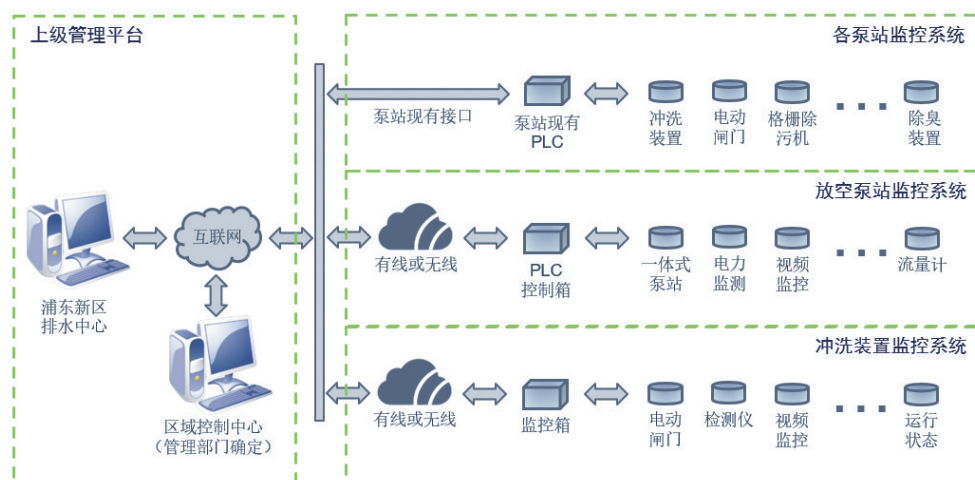


图9 多系统联合分级控制模式

Fig.9 Multi-system joint hierarchical control mode

通过构建多系统联合分级控制模式,各调蓄设施不仅能在各相应泵站监控系统中显示、控制,还能由区域监管系统进行统一管理、监控。控制级别由高至低分别为就地控制、各泵站监控系统、金桥区域排水系统初期雨水调蓄监管系统。所有数据、参数均能上传至新区或上海市管理平台。

6 结论

① 调蓄管道具有布置灵活、接入灵活、拓展灵活的特点,可为城市建成区排水系统提标改造和初期雨水污染控制提供新选择。

② 建设调蓄管道可避免土地规划转性、征收及动迁等,更具落地性。但当前各地架空线入地、地铁、地下通道等均在向地下要空间,应尽早编制排水系统初期雨水污染控制规划,将调蓄管道纳入城市规划,预留相关管线通道并做好控制。

③ 可根据调蓄管道直径、埋深、地质条件等选择不同的管道及施工方法,包括顶管法或盾构

法。相较顶管施工在遇到地下障碍物时需要较大转弯半径而言,小型盾构施工技术具有转向灵活、施工速度快等优点。

④ 对长距离初期雨水调蓄管道的管理是个新课题。调蓄管道串联多个排水系统,服务面积较大;建成后会遇到区域降雨不均衡、与现有排水系统耦合联动等问题,都会对运营控制带来新挑战。建议在运营初期留有余量,增加安全系数,后期总结运营经验后逐步达到设计规模。

参考文献:

- [1] 胡龙,戴晓虎,唐建国. 深层排水调蓄隧道系统关键技术问题分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(8): 17-21.
- HU L, DAI X H, TANG J G. Analysis of key technical problems of deep drainage tunnel system [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8): 17-21 (in Chinese).

- [2] 鲁朝阳,车伍,唐磊,等. 隧道在城市洪涝及合流制溢流控制中的应用[J]. 中国给水排水,2013,29(24):35-40,48.

LU C Y, CHE W, TANG L, et al. Application of stormwater tunnel to control of urban flooding and combined sewer overflow [J]. China Water & Wastewater, 2013,29(24): 35-40,48(in Chinese).

- [3] 席旭军. 高密度建成区强排系统初雨放江污染与调蓄策略[J]. 中国给水排水,2025,41(12):41-46.

XI X J. Initial rainwater discharge pollution and storage strategies for strong drainage system in high-density built-up areas[J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(12):41-46(in Chinese).

- [4] 王刚,周质炎. 城市超深排(蓄)水隧道应用及关键技术综述[J]. 特种结构,2016,33(2):74-79.

WANG G, ZHOU Z Y. Application and key technology overview of the city deep tunnel for drainage and water storage[J]. Special Structures, 2016,33(2):74-79 (in Chinese).

- [5] 席旭军,崔丽芳,覃大伟,等. 用于初期雨水治理线型调蓄管道的旋流式消能检修一体井: CN202320623834.2[P]. 2023-10-02.

XI X J, CUI L F, QIN D W, et al. Swirl-type Energy Dissipation and Maintenance Integrated Well for Linear Regulation and Storage Pipelines for Initial Rainwater Treatment: CN202320623834.2 [P]. 2023-10-02 (in Chinese).

- [6] 安瑞冬,游景皓,廖磊,等. 深层隧道排水系统中井隧水力学特性研究[J]. 水利学报,2021,52(12):1498-1507.

AN R D, YOU J H, LIAO L, et al. Study on the hydraulic characteristics of dropshaft and tunnel in the deep tunnel drainage system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021,52(12): 1498-1507(in Chinese).

作者简介:席旭军(1982—),男,江苏泰兴人,硕士,正高级工程师,主要研究方向为市政雨污水管网规划与设计、初期雨水治理、城乡污水治理、市政排水管道修复等,获2019年度上海市“碧水保卫战”劳动和技能竞赛优秀个人、2023年上海优秀青年工程勘察设计师、2024年浦东新区明珠工程师等荣誉。

E-mail: xixujuns@163.com

收稿日期:2024-05-15

修回日期:2024-06-11

(编辑:衣春敏)

加快推动发展方式绿色低碳转型,
因地制宜发展新质生产力,
积极稳妥推进碳达峰碳中和