

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.04.012

中心城区竖井初雨调蓄池工程设计

史义雄, 张素婷, 王宏峰

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 为缓解用地紧张与工程建设的矛盾,以上海中心城区某初雨调蓄池工程为例,提出了竖井初雨调蓄池及入流竖井布置形式,介绍了调蓄池冲洗、通风除臭及排空设计方案。调蓄池采用全地下式圆形竖井结构,调蓄容积4 700 m³,内径15 m,池深33.80 m,入流采用螺旋阶梯跌水消能,池底安装智能喷射器冲洗清淤,除臭采用三段式“洗涤法+离子除臭+化学吸附”工艺,竖井主体结构采用预制管片机械化拼装,可为用地紧张的大城市中心城区及老城区建设初雨调蓄池提供参考。

关键词: 初雨调蓄池; 竖井; 节约集约化; 截流

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)04-0075-05

Design of Shaft Initial Rainwater Storage Tank in Central Urban Area

SHI Yi-xiong, ZHANG Su-ting, WANG Hong-feng

(China Railway SIYUAN Survey and Design Group Co. Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: To address the conflict between land scarcity and project construction, this paper presented a case study of an initial rainwater storage tank project in central Shanghai, and proposed the layout of the shaft initial rainwater storage tank and the inlet shaft, along with detailed schemes for tank cleaning, ventilation, deodorization, and emptying. The storage tank utilized a fully underground cylindrical shaft structure, with a storage capacity of 4 700 m³, an internal diameter of 15 m, and a depth of 33.80 m. For inflow energy dissipation, a spiral-step drop system was employed, while intelligent ejectors installed at the bottom of the tank facilitated washing and desilting operations. The deodorization process consisted of three processes: washing, ion deodorization and chemical adsorption. The main structure of the vertical shaft adopted mechanized assembly of prefabricated pipe segments. This design can serve as a reference for constructing initial rainwater storage tanks in central urban areas and old districts of large cities facing land scarcity.

Key words: initial rainwater storage tank; shaft; intensification; interception

为解决城市初期雨水直接排放对受纳水体造成污染的问题,通过建设初雨调蓄设施,将初期雨水进行“截流-调蓄-处理”的方案逐渐得到推广^[1-3]。在中心城区,尤其是中心密集城区,土地资源通常非常紧张,调蓄池选址成为一个突出问题,

考虑将雨水调蓄池向地下空间延伸,节约集约化建设调蓄池,从而缓解用地紧张的问题^[4-6]。

1 项目概况

根据上海市《中心城雨水调蓄池选址专项规划》,上海市各区规划建设雨水调蓄池191座,调蓄

基金项目: 中铁第四勘察设计院科技项目(2022K039)

通信作者: 史义雄 E-mail: 645852272@qq.com

规模 $190 \times 10^4 \text{ m}^3$, 建成后将显著提升初期雨水治理能力。闵行区某排水系统采用分流制, 片区雨水经管道收集后由雨水泵站提升排入河网, 泵站服务面积约 1.30 km^2 。为全面提升周边河道水环境质量, 减少初期雨水入河, 控制面源污染, 保障地区防洪排涝安全, 在雨水泵站毗邻的公共绿地内建设初雨调蓄设施, 该片区内污水及截流的初期雨水最后进入白龙港污水处理厂, 处理达标后排放。

2 工程规模

根据《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017)的要求, 当初期雨水调蓄池用于分流制排水系统径流污染控制时, 其有效容积的计算方法如下式所示:

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

式中: V 为初期雨水调蓄量, m^3 ; D 为单位面积调蓄深度, 按照降雨量计, 可取 $4 \sim 8 \text{ mm}$; F 为汇水面积, hm^2 ; Ψ 为径流系数; β 为安全系数, 一般取 $1.1 \sim 1.5$ 。

该工程初期雨水截流标准取 $5 \text{ mm}^{[7]}$, 排水系统汇水面积为 1.30 km^2 , 下垫面主要由居住用地、工业用地、公共设施用地、道路广场、绿地和水系组成, 综合径流系数 Ψ 取 0.59 , 安全系数 β 取 1.2 , 则 $V = 4\,602 \text{ m}^3$, 取 $4\,700 \text{ m}^3$ 。

3 调蓄池设计

3.1 总体布置

为营造良好的景观效果, 调蓄池以全地下式居多。国标图集《雨水调蓄设施—钢筋混凝土雨水调蓄池》(20S805-1)适用于覆土 $2 \sim 3 \text{ m}$ 的全地下矩形钢筋混凝土雨水调蓄池, 但占地面积较大, $V = 5\,000 \text{ m}^3$ 的调蓄池占地 $21 \text{ m} \times 61.05 \text{ m}$ (不含出入楼梯间及围护桩)。该项目位于中心密集城区, 用地紧张, 无大面积规划用地建设大容积调蓄池, 因此考虑将雨水调蓄池向地下空间延伸, 采用深竖井结构, 从而减少占地面积。

初期雨水流量与降雨强度密切相关, 调蓄池设计截流初雨和进水时间为 1 h , 设计初雨截流量为 $1.306 \text{ m}^3/\text{s}$, 采用 $d1\,200 \text{ mm}$ 钢筋混凝土管, 坡度取 0.12% , 管道输水能力为 $1.35 \text{ m}^3/\text{s}$, 流速为 1.19 m/s , 满足管道不淤流速的要求。经与末端污水处理厂对接, 设计调蓄池排空时间为 12 h , 则初雨排空流量为 $4\,700/12 = 392 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

调蓄池总体布置如图1所示。



图1 调蓄池总体布置

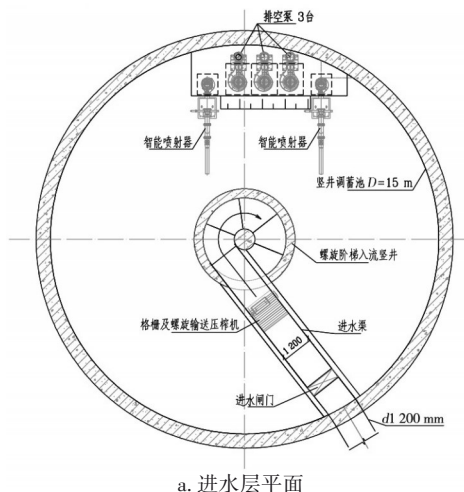
Fig.1 Overall layout of storage tank

3.2 调蓄池平面及竖向设计

初期雨水调蓄池为全地下布置形式, 池体上部进行绿化, 地面设置出入口、风亭、永久吊装孔等相关附属设施并采用绿篱等遮挡, 池顶覆土 1.5 m 。除调蓄池主体工程外, 还需配套建设的建(构)筑物主要分为2类: ①进出水类, 包括进水格栅间、出水水泵房等; ②配套功能类, 包含变配电间及控制室、通风设施、除臭设施等。调蓄池分上下两层, 负一层为设备层, 布置配电间、除臭设备间、环控机房、水泵检修间; 负二层为主要存水区, 包含进水廊道、入流螺旋阶梯、排空泵和智能喷射器, 进水廊道设置闸门和格栅除污机。

调蓄池防淹设计如下: ①场地百年洪水位 2.3 m , 室外场地地面标高 6.9 m , 高出百年洪水位 4.6 m , 且出入口及检修孔标高均高于周边地面 $0.5 \sim 1 \text{ m}$; ②在调蓄池前端截流井内及调蓄池进口处分别设置电动闸门, 根据调蓄池水位控制闸门的启闭。截流井闸门关闭时调蓄池液位为 -4.5 m , 当水位上升至 -1.6 m 时, 关闭竖井进口闸门, 保证调蓄池液位不会上升至设备层; ③负一层设备间内设置地漏, 内部少量结构渗漏水或雨水可以进入调蓄池, 保证地下设备间不被淹。

竖井调蓄池平面及剖面如图2所示。



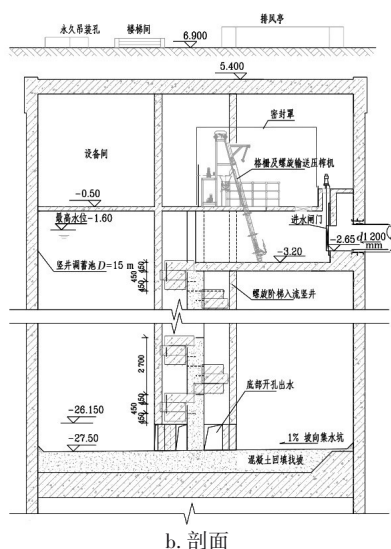


图2 竖井调蓄池平、剖面

Fig.2 Plan and section of shaft storage tank

竖井调蓄池内径 $D=15\text{ m}$,调蓄池深 33.80 m ,有效水深 25.90 m ,占地面积为传统矩形调蓄池的 15.87% 。竖井调蓄池采用沉井式竖井掘进机施工,主体结构采用预制钢筋混凝土管片机械化拼装,管片厚 0.55 m 。

3.3 入流消能设计

相较于普通矩形调蓄池,竖井调蓄池深度较大,需在调蓄竖井内设置入流竖井。在部分深隧工程及水利工程中,常用的竖井包括直接跌落式、交错折板式、旋流式和螺旋阶梯式^[8]。该项目对旋流涡流式和螺旋阶梯式进水方式进行数值模拟分析,模拟结果表明:螺旋阶梯在小流量及大流量入流情况下,消能排气效果均较好,而旋流涡流式竖井在小流量情况下未形成明显的附壁螺旋流,因此推荐调蓄池入流采用螺旋阶梯式。螺旋阶梯每层阶梯高 450 mm ,梯板旋转角为 60° ,进水经格栅后沿梯板螺旋下泄,于阶梯外筒底部开孔以便雨水流出。

3.4 清淤冲洗设计

调蓄池清淤冲洗采用“上层拦截、下层清淤”的二维治理体系,即上游来水进入粗格栅拦截主要悬浮物后进入调蓄池,调蓄池底部设清淤冲洗设施。调蓄池格栅渠道宽 1200 mm ,栅条间隙 20 mm ,格栅前设置DN1200电动进水闸门。

调蓄池冲洗常采用水力自清和设备冲洗,可分为门式自冲洗、水力翻斗冲洗、智能喷射器、真空冲洗、连续沟槽自清洗等方式,并辅以人工冲洗。门式自冲洗、水力翻斗式冲洗系统能耗较低,维护量

较小,成本低,适用于矩形蓄水池的清洗;连续沟槽式一般借助晴天污水进行冲洗自清,难以实现彻底清洗;真空冲洗需设置独立真空储水室,会扩大蓄水池建造规模;智能喷射器冲洗能够实现自动化控制,但运行成本略高。考虑该项目采用竖井式调蓄池,池深较深,设计采用智能喷射冲洗系统,在池底安装2组智能喷射器,单台设备功率 15 kW ,旋转角度 $-135^\circ\sim 135^\circ$,最大冲洗距离 20 m (超过池内径 15 m),冲洗水流能覆盖整个池底,池底被搅匀的泥砂与雨水一同通过排空泵抽升至下游污水管网,整个过程自动化运行,可保证良好的清淤冲洗效果。

3.5 排空设计

调蓄池设计放空时间为 12 h ,采用水泵提升放空,设置3台潜污泵,2用1备,单泵 $Q=200\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=100\sim 370\text{ kPa}$ 、 $N=45\text{ kW}$ 。排空泵采用立式潜水离心泵,单级单吸涡壳,叶轮采用双流道结构。考虑水泵所需扬程变化较大,采用变频控制,从而满足调蓄池排空及节能要求。当调蓄池液位为 $-4.6\sim -1.6\text{ m}$ 时,水泵变频采用 31 Hz ;当调蓄池液位为 $-8.6\sim -4.6\text{ m}$ 时,水泵变频采用 35 Hz ;当调蓄池液位为 $-10.6\sim -8.6\text{ m}$ 时,水泵变频采用 38 Hz ;当调蓄池液位为 $-13.6\sim -10.6\text{ m}$ 时,水泵变频采用 40 Hz ;当调蓄池液位为 $-17.6\sim -13.6\text{ m}$ 时,水泵变频采用 42 Hz ;当调蓄池液位为 $-21.6\sim -17.6\text{ m}$ 时,水泵变频采用 45 Hz ;当调蓄池液位为 $-25.6\sim -21.6\text{ m}$ 时,水泵变频采用 48 Hz ;当调蓄池液位为 $-27.5\sim -25.6\text{ m}$ 时,水泵不变频为 50 Hz ,以上均由PLC自动控制。

调蓄池排空管采用DN300球墨铸铁管,接入外环高速DN600市政污水支管,再汇入 $d200\text{ mm}$ 污水主干管,排空时段对外管网的流量冲击较小。

由于该项目潜水泵的最大淹没深度达 26 m ,水下电缆采用铸头电缆密封,零件间密封采用“O”型圈密封;水泵出厂电机腔及油室气密试验压力取 0.6 MPa ,泵腔水压试验压力取 1.2 MPa ,保证密封及承压满足水压要求;水泵动密封采用铸铁和不锈钢材料的硬质合金机械密封装置;智能喷射器主要材质同水泵要求。

3.6 除臭通风设计

初期雨水存蓄期间易散发 H_2S 、 NH_3 、 CH_4 等有毒有害气体,需防止其扩散到大气中并保障检修人员安全。调蓄池通风换气风量按 6 次/h 进行设计,并在排空泵泵坑设置局部专用机械排风系统;负一层

设备间通风换气风量按 12 次/h 进行设计。因 H₂S 密度大于空气,会沉积到调蓄池底部,故在调蓄池底部集水坑附近设置专用风管,平时采用 2 台局部轴流风机将池底臭气收集至除臭装置,处理后排放,蓄水工况下逸出的大量臭气也通过除臭装置排出。

根据《上海市市政排水泵站臭气处理技术指南》的技术要求,同时结合上海市已运行调蓄池工程中臭气的不连续性、风量大、浓度波动大等特点,该工程除臭设备推荐采用三段式“洗涤法+离子除

臭+化学吸附”工艺,从而达到较好的除臭效果。处理量按 1 h 处理调蓄池容积 1~2 倍的臭气体积考虑,设计除臭设备处理风量 10 000 m³/h,功率 21 kW,臭气排放满足《恶臭(异味)污染物排放标准》(DB 31/1025—2016)。

3.7 施工工法

深竖井调蓄水池主要施工工法包括明挖法、传统沉井法和机械式沉井法,各工法的优缺点如表 1 所示。

表 1 竖井调蓄水池建设方案对比
Tab.1 Comparison of construction plan for shaft storage tank

项目	明挖法	传统沉井法	机械式沉井法
工艺	先施工地下连续墙后开挖竖井,竖井开挖时同步浇筑内衬墙作为支撑,上部每层开挖 4~5 m,下部开挖高度小于 3.0 m	预先制作好沉井的刃脚和一段护壁,在其掩护下,边掘进边下沉,随着下沉在地面相应接长护壁,直到下沉至设计深度	采用沉井式竖井掘进机,可实现各个工序(截割、渣土清除、竖井施工以及竖井结构下沉)同时进行,施工进度较快
适应性	适用于所有地质条件,但对于少水、富水地质情况,需采取地连墙止水和降水措施;开挖直径适应范围较广	适用土质范围广,淤泥土、砂土、黏土、砾砂等均适合	适用于软土、砂层、岩石地层(硬度≤80 MPa)等所有地质条件,对于少水、富水地质情况,无需降水;适用于开挖直径 6~23 m
风险	基坑变形和地表沉降较小,基坑渗漏水、突涌和基底隆起风险高;施工人员井下作业风险高	沉井入土深度逐渐增大,沉井四周土层对井壁的约束力亦相应增加,沉井纠偏困难;沉井下沉过程的速度不可控	吊装工程风险低;施工人员地面上作业风险低
进度	施工工序较繁琐,施工速度较慢,土建建设期约 9 个月	后期下沉系数小,下沉效率低,施工工期长,土建建设期约 8 个月	施工工序可实现循环进行,施工进度较快,土建建设期约 6 个月
投资	施工成本高	施工成本低	施工成本较低
优点	开挖直径范围大,有直径 30 m 施工案例	工艺简单、设备少,造价较低,结构整体性好,质量易保证	开挖速度快、工期短;无需降水,机械化拼装,施工安全性高
缺点	围护结构施工慢;超深地连墙槽壁稳定、钢筋笼吊装、超深水下混凝土浇筑、深层承压水控制、微扰动施工与环境保护等难度较大;工程造价高	大直径深沉井纠偏困难,不排水下沉时,出土困难,开挖对周围环境影响大,会形成漏斗形地面;易偏斜、下沉速度不易控制	开挖直径 6~23 m,直径超过 23 m 后,需重新研发掘进设备;泥浆处理费用较高

由表 1 可知,机械式沉井法具有无需降水、开挖速度快、工期短等优点,工程投资介于传统沉井法和明挖法之间,且其已在南京建邺区儿童医院地下停车库和上海静安地下智慧停车库中成功应用,因此设计采用机械式沉井法施工方案,主体结构采用预制管片,机械化拼装。

4 运行模式

调蓄池的运行模式包括降雨进水模式和雨后排空及冲淤模式,其中冲淤在排空的后半程进行,模式的切换通过进水闸门、排空泵和喷射器的启闭自动化运行。

① 降雨进水模式:降雨初期,开启截流井进水闸门,初期雨水通过截流管进入调蓄池,主通风

机和除臭设备同步开启;当调蓄池水位达到预定高水位时,关闭截流井进水闸门和主通风机,进水流程结束。

② 雨后排空及冲淤模式:排空需在下游污水管道具有输送能力,且末端污水厂具备富余处理能力时进行,液位排空至低水位时开启机械通风和除臭设备;当液位降低至水深 2.5 m 时关闭排空泵,开启智能喷射器对池底进行充分冲刷搅拌,持续 0.5~1 h 后再开启排空泵,搅匀的池底沉积物随着冲洗水流进入泵坑,由排空泵抽排至下游污水管网;当液位降低至停泵液位时,排空泵及喷射器停止工作,停泵后仍持续通风 0.5 h 后再关闭通风机及除臭设备,准备下一次进水流程。

5 结语

该项目为国内首座竖井调蓄池,池体向地下空间延伸,占地面积为传统矩形调蓄池的15.87%,可为国内用地紧张的大城市中心城区和老城区建设初雨调蓄池提供借鉴。采用机械式沉井法施工方案,无需降水,施工工序可实现循环进行,具有开挖速度快、工期短的特点。

此外,设置初期雨水调蓄池可以增加雨水排放弹性,大大提高地区排水安全性,同时将初期雨水收集后提升至污水厂进行处理,可以进一步控制面源污染,改善当地的水环境,具有良好的环境效益。

参考文献:

- [1] 谢磊,解铭,薛江儒. 调蓄池在排水系统中的应用及发展方向探讨[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12): 37-43.
XIE Lei, XIE Ming, XUE Jiangru. Discussion on application and development direction of storage tank in drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 37-43 (in Chinese).
- [2] 曾木海,谢小龙. 初雨调蓄池在武汉市某湖泊综合整治工程中的应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 93-97.
ZENG Muhai, XIE Xiaolong. Application of initial rainwater storage tank in a lake comprehensive treatment project in Wuhan [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 93-97 (in Chinese).
- [3] 吴海涛,闫爱萍,曾祥国,等. 分流制排水系统中组合式初雨调蓄池的设计与优化[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 106-110.
WU Haitao, YAN Aiping, ZENG Xiangguo, et al. Design and optimization of combined initial rainwater storage tank in separate drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (12) : 106-110 (in Chinese).
- [4] 周传庭. 合肥市老城区全地下雨水调蓄池工程设计[J]. 中国给水排水, 2019, 35(14): 63-66.
ZHOU Chuanting. Project design of the full underground stormwater detention tank for old urban area of Hefei City [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(14): 63-66 (in Chinese).
- [5] 朱洁. 用地受限条件下雨水泵站及调蓄池合建设计优化[J]. 中国给水排水, 2024, 40(14): 73-78.
ZHU Jie. Optimizing the combined construction design of a stormwater pumping station and storage tank within limited land use constraint [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(14): 73-78 (in Chinese).
- [6] 王坤. 全地下雨水泵站及初雨调蓄池工程设计[J]. 中国给水排水, 2024, 40(2): 82-86.
WANG Shen. Design of underground rainwater pumping station and initial rainwater storage tank [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(2): 82-86 (in Chinese).
- [7] 汉京超,曹晶,周娟娟. 中心密集城区雨水调蓄设施集约化建设方案研究[J]. 给水排水, 2023, 49(6): 25-29.
HAN Jingchao, CAO Jing, ZHOU Juanjuan. Study on intensive construction scheme of rainwater storage facilities in central dense urban area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49 (6) : 25-29 (in Chinese).
- [8] 何贞俊,王斌,杨聿,等. 市政排水系统中竖井研究及应用进展[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 49-53.
HE Zhenjun, WANG Bin, YANG Yu, et al. Review on vertical shaft in urban wastewater drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (5) : 49-53 (in Chinese).

作者简介:史义雄(1980—),男,湖北天门人,硕士,正高级工程师,注册公用设备(给水排水)工程师,主要从事给排水设计与研究工作。

E-mail:645852272@qq.com

收稿日期:2023-12-27

修回日期:2024-03-04

(编辑:沈靖怡)