

规模较大的全地下污水处理厂建设 关键问题分析

张亚南

(中铁十七局集团市政建设有限公司, 江苏 无锡 214111)

摘要: 随着城市的快速扩张,土地资源的匮乏,全地理式污水处理厂受到越来越多的关注。为了最大限度减少污水处理厂运行对周边环境的影响,无锡太湖新城污水处理厂三期扩建工程采用全地下建设形式,污水、淤泥、臭气等均按照高标准设计。针对规模较大的全埋式污水处理厂的高标准尾水排放、紧凑的用地范围、外管网水位近远期变化幅度大、高标准臭气控制、地下厂的安全保障、优选基坑和地基处理方案、无人化值守的实践、低碳理念的全方位贯彻等建设关键问题进行了介绍和分析,并针对该项目特点提出的解决思路,供类似工程参考借鉴。

关键词: 全地下污水处理厂;高标准设计;关键问题分析

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)03-0229-05

Analysis on Key Issues in Construction of Large-scale Fully Underground Wastewater Treatment Plants

ZHANG Yanan

(R17BG Municipal Construction Co., Ltd., Wuxi 214111, China)

Abstract: With the rapid expansion of cities and the scarcity of land resources, the fully underground wastewater treatment plants (WWTPs) are receiving increasing attention. In order to minimize the impact of WWTP operations on the surrounding environment, the form of fully underground construction is adopted for the Wuxi Taihu New Town WWTP Phase III Expansion Project. The introduction and analysis are conducted on the key issues in the construction of large-scale fully underground WWTPs, such as high-standard tail water discharge, compact land use, large fluctuations in the water level of the external pipeline network in the short term and the long term, high-standard odor control, safety guarantee of underground WWTPs, optimal treatment schemes for foundation pits and subgrades, practice of unmanned operation, and the all-round implementation of low-carbon concepts. And the solution ideas proposed in light of the characteristics of this project are provided for reference by similar projects.

Keywords: fully underground WWTP; high-standard design; analysis of key issues

0 引言

随着人民对美好生活的需求更加迫切,全地下污水处理厂以其更加绿色环保、低碳节约的特点,充分利用地下空间、节约土地,为污水处理厂提标扩能提供新模式、新思路^[1]。但不同于常规的污水处理厂或半埋式污水处理厂,无锡太湖新城污水处理厂三期扩建工程是全地下污水处理厂规模较大、出水标准最高,在全埋式污水处理厂建设过程中,针对高

标准尾水排放、紧凑的用地范围、外管网水位近远期变化幅度大、高标准臭气控制、地下厂的安全保障、优选基坑和地基处理方案、无人化值守的实践、低碳理念的全方位贯彻等建设关键问题进行了介绍和分析,并针对该项目特点提出的解决思路,可提供类似工程参考借鉴。

1 项目背景

无锡市太湖新城污水处理厂三期扩建工程位于无锡市新吴区吴都路以南、运河西路以西、吴少泽浜以北规划预留地块内,总占地面积5.6 hm²,建设规模为10万 m³/d,其中土建按规模20万 m³/d一次建成,为全地下建设形式,污水处理采用“预处理+AAO+

收稿日期: 2025-08-11

基金项目: 中铁十七局集团有限公司科研课题(2020-32)

作者简介: 张亚南(1989—),男,学士,高级工程师,从事隧道及地下工程技术管理工作。

MBR+气浮+消毒”工艺。地下箱体基坑长度为318.8 m,宽度为155.3 m,深度约13.9~17.8 m,混凝土强度等级为C35P8,底板厚度800 mm,侧壁厚度500~700 mm,顶板厚度200~250 mm,大直径管道为DN2000 mm的钢管,受限空间安装高度为3.7 m。

2 本工程建设难点及关键问题分析

2.1 高标准尾水排放

从进出水水质来看,污水处理难度大,出水标准是目前省内最严标准。污水处理后尾水排放标准均高于国家一级A标准,属高标准排放。合理选用可靠、稳定、经济的处理工艺确保出水高标准排放^[2],是项目的关键技术问题之一。

2.2 紧凑的用地范围

本工程用地仅为5.6 hm²,但建设规模为20万m³/d,全流程污水处理构筑物布置非常紧凑,仅为0.28 m²/m³污水。如何在如此紧凑且并不规整的用地内,合理安排构筑物布局,是本工程的一个关键问题。此外,优选高效、节地型工艺和建设形式,也是破解用地紧张的一个手段。

2.3 外管网水位近远期变化幅度大

南方城镇地下式污水处理设施广泛存在一个共性难题——截污管网系统水位居高不下,实际运行水位远超原设计工况,导致厂区长期处于高液位非正常运行状态,尤其在雨季这个问题更加突出。高液位运行不仅会对地下厂进水泵的设置、选型造成困扰,严重的还会造成淹水的重大风险^[3]。所以如何合理地设计进水泵房,即充分考虑到现状高水位运行的情况,又能兼顾今后远期管网改造后液位恢复正常水平的工况,是本工程一个特点,也是建设过程中的难点。

2.4 高标准臭气控制

本工程臭气控制标准非常严格,对排气筒的排放浓度、排放强度以及厂界都有规定。同时考虑后期开发对臭气的敏感性,如何实现臭气的高标准控制,是项目的关键技术问题之一。

2.5 优选基坑和地基处理方案

全地下污水处理厂的土建工程量极大,往往占整个工程总投资的一半以上。所以合理地选取土建、基坑、地基处理方案,是整个工程节省投资的重中之重,也是结构主体顺利施工的保障。

2.6 无人化值守的实践

本工程规模较大,箱体体量大、设备复杂,运行

人员的工作量巨大,而且污水处理厂位于地下,运维工作的安全性和便捷性受限。如何打造一座“无人化值守”的污水处理厂,大幅减少操作工人的劳动量,进一步保障操作人员安全,是本工程的一个关键问题。

3 关键问题的应对措施

3.1 高标准尾水排放的对策措施

从进出水水质来看,污水处理难度大,出水标准是目前省内最严标准。从用地面积来看,本工程吨水占地非常紧凑,仅为0.28 m²/m³污水。因此,严格的出水标准和紧凑的用地条件,是本工程突出的矛盾所在,也是本工程首先要解决的关键问题。

3.1.1 优选AAOA+MBR用于主体工艺

为了在非常紧凑的用地内布置20万m³/d污水处理设施,经过多方案比选后选用MBR工艺,同时考虑到本工程TN≤10 mg/L,AAO污水处理系统采用多级生化反应区协同作用实现氮磷去除。在初始厌氧反应区,聚磷菌通过优先摄取易降解有机物完成释磷过程;随后进入的缺氧反应区内,反硝化微生物利用剩余有机碳源将硝态氮还原为气态氮,实现氮素去除。系统优化后增设的二级缺氧区,利用膜生物反应器维持的高浓度活性污泥特性,通过微生物内源呼吸产生的有机物质作为碳源,强化深度反硝化效果^[4]。该工艺改进既提高了脱氮效能,又降低了对外加碳源的需求,从而实现了运行费用的有效控制。

3.1.2 优选气浮用于深度处理工艺

常规出水标准的工艺选择,污水经过MBR的处理后可以直接消毒后排放,如一级A标准中对于TP的要求为0.5 mg/L,大部分工程采用在MBR及前端的生化系统内投加化学除磷药剂确保TP达标排放。经过调研发现,此类MBR系统在运行一段时间后,由于化学药剂的长期投加,造成了曝气系统、活性污泥系统和MBR膜组器多方面的困扰,如曝气器堵塞、活性污泥系统活性低,膜组器衰减严重等,究其原因除磷药剂在生化系统内长期投加,剩余污泥的定期排除并不能将化学药剂投加带来的不利因素消除^[5]。本工程TP出水标准较一级A更加严格,如果沿用在生化系统内投加除磷药剂的工艺,上述风险会更加严重。所以经过多方案比选,选用气浮工艺续接在MBR系统后的深度除磷工艺。

气浮工艺是实现化学混合絮凝和分离的一种形

式。其原理是在污水中投加无机盐(如铝盐、铁盐等)与污水中溶解性的磷酸根离子反应生成相应的磷酸盐沉淀,从而降低污水中TP的含量^[6]。根据污水中需要去除TP的总量以及相似工程经验,本工程可以采用高速气浮池用于去除磷酸盐。高速气浮池工艺集混凝、絮凝和气浮于一体,整个工艺过程在一个单元中完成。由于气浮工艺的固液分离特点,能够将出水的TP和SS控制在非常低的水平,也经过了工程检验,所以选择气浮工艺既能够保证TP稳定达标,也能够节省过滤单元的设置,能够大幅节地、节省投资,是非常适合本工程的。

3.2 用地紧凑的对策措施

如前所述,本工程的建设用地非常紧凑,为满足建设需求且不影响周边环境,最终采用全地下建设形式。原因如下:

(1)占用空间小,节省地面土地资源:主体结构均位于地下,只有部分辅助建筑物建于地面,地面占用空间小。在基坑开挖时采用地下连续墙、钢管桩等占地面积小的深基坑支护工艺,总体占地面积基本与建筑面积投影保持一致。上部空间在建成后可用于商业开发或公园建设,土地资源利用率高。

(2)噪声污染小:主要处理设备均处于地下一层的主体结构中,机械设备运行过程中产生的噪声和振动通过主体结构顶板、地面覆土后逐渐减弱,到达地面后不会影响建筑的安全以及居民的身心健康。

(3)环境污染小:地下污水处理厂产生的臭气,在封闭的环境中汇集,不会飘散到外部,可以在箱体内部进行处理,对环境的危害性微乎其微。

(4)节省土地资源:地下污水处理厂采用立体化布局(见图1),土地利用率显著提升,其非外露特性既维护了城市景观完整性,又消除了邻避效应,为城市更新预留了土地开发潜力。

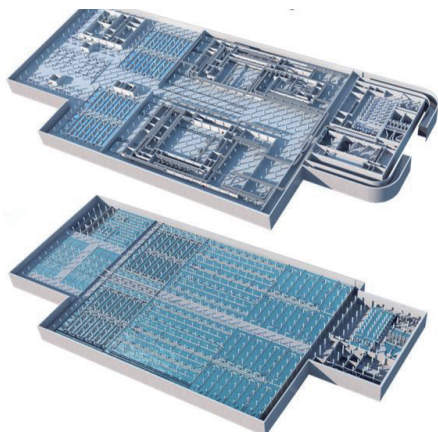


图1 全地下箱体分层示意图

3.3 外管网水位近远期变化的对策措施

3.3.1 难点分析

太湖新城服务片区主要收集处理滨湖区的山水城、经开区主要区域、新吴区的太科园等区域内的城镇污水,服务面积116.02 km²。收水范围由自流区和泵提区组成,以贡湖大道为界。

经与管网运行部门沟通,由于自流片区服务面积占比较大(不小于1/3面积占比),且靠近太湖新城污水处理厂,雨季时污水管网液位上升明显,汇集到污水处理厂前端的运行液位会达到1.5~2 m。此时需要控制上游泵提区的水量,但对于污水处理厂前端的液位控制效果不明显。

3.3.2 应对措施

若直接按最高和最低液位来选泵,本工程设计扬程变化较大(2~6 m),比较适合轴流泵,离心泵低扬程不适用,但轴流泵用作原生污水进水泵案例较少。

为了确保水泵在适宜的扬程区间内稳定运行,必须将集水池的液位严格维持在较低波动范围内,特别是要防止液位过高的情况发生^[7]。通过对近三年太湖厂栅前液位变化规律的深入分析,我们决定在泵房外部设置一座闸门井,并安装高低不同的出水闸门,以实现对外泵房液位的基本控制。具体而言,当水位较高时,通过高孔闸门出流;而当水位较低时,则通过低孔闸门出流。这样可以初步调节进入泵房的液位,确保其处于合理区间。为了进一步保障系统的安全运行,我们在泵后也采用了高低孔出水的设计模式。这种设计不仅有助于维持液位稳定,还能有效延长水泵的使用寿命,提高整个供水系统的运行效率和可靠性。

在污水处理系统进水环节,可通过多点液位监测实现智能联动控制。具体而言,上游闸门井及泵房集水井均配置液位传感装置,通过与闸门启闭机构和水泵机组的自动化连锁系统实现水位调控。此外,建议将厂区外管网提升泵站的运行参数纳入整体调控体系,实现厂站协同运行优化。实际上进水泵房高低液位的变化有季节性变化的特点^[8],不会非常频繁地进行高低孔运行状态的切换。同时正常运行液位范围(栅前液位0~1.5 m)(涵盖80%以上范围),均在出水高孔运行,泵的性能曲线均能满足要求。高于1.5 m情况下,通过自控联动控制上游闸门井高孔闸门开度,以稳定集水井液位。

当外水占比较大,管网一直处于高水位运行状

态,则启用泵后的高位出水孔,同时配合上游闸门井的开孔数量,尽量控制进入闸门井的液位标高,使水泵能够稳定、安全运行^[9]。待今后管网修复、雨污混接改造彻底后,进入泵房的液位回归正常,进水管道恢复重力流后,则启用低位出水孔,关闭高位出水孔,污水提升的高度不变,不会造成浪费。

3.4 高标准臭气控制的对策措施

针对本项目臭气源,确定合理的除臭风量及除臭工艺。

污水处理单元设置除臭系统,预处理区污泥区臭气浓度大,臭气散发的设备增加设备贴身罩,除臭生物滤池停留时间适当延长,采用水洗+生物滤池工艺,总风量为65 000 m³/h。生反池厌氧缺氧区、曝气区、膜池除臭采用生物滤池工艺,规模为105 000 m³/h;远期需增加一套生物滤池,用于另外一组生物反应池的除臭。在预处理区、污泥处理区等臭气散逸情况明显的地方,设置离子新风装置,改善操作环境,进一步降低大空间的臭气浓度。

臭气控制,不仅仅是选用合理的臭气处理装置,在臭气密封、管路布置、排放等环节都需要精心设计^[10]。

3.5 优化结构设计方案

全地下污水处理厂的土建工程量巨大,往往占整个工程总投资的一半以上。所以合理地选取土建、基坑、地基处理方案,是整个工程能否节省投资的重中之重,也是结构主体顺利施工的保障。

(1) 选择合理的地基处理与抗浮设计

对于地下污水处理设施,地下结构埋置深度较深,水池及空箱加上覆土后荷载很大,且不同单元之间荷载相差甚大,为避免构(建)筑物不均匀沉降,同时考虑构筑物自重抗浮尤其局部抗浮不满足,需采取桩基承载抗浮^[11]。桩基可选用钻孔灌注桩、预制管桩或者劲性复合桩。综合比较,考虑本工程基坑较深,工程桩桩顶埋置较深,空钻或者送桩长度均较大。为加快施工速度,减小对周边环境的影响,宜选用钻孔灌注桩。

(2) 超长结构及大体积混凝土设计处理措施。

地下箱体平面尺寸超大,纵横两个方向均超长,为减少超长混凝土构筑物因混凝土收缩、温度应力等引起混凝土开裂,常用的解决措施有:设置伸缩缝、后浇带(加强带)、混凝土中掺加抗裂防水剂等^[12]。地下箱体采用现浇钢筋混凝土结构形式以满足池壁在高度方向的强度和裂缝宽度要求,结合工

艺布置,根据箱体内单体位置情况,底板每隔30 m左右设置一道后浇带,池壁及顶板每隔30 m设置一道后浇带。

地下箱体在结构钢筋布置上也尽量选用“细而密”的配筋形式,以提高混凝土适应温度变化的能力。

(3) 加强综合体整体性的措施

结构设计根据构筑物的作用荷载大小、基础埋深、正常运行和检修放空的要求,采取桩基进行抗浮或抗压抗浮,避免荷载不均匀引起沉降差^[13]。

地下结构埋设深度在13.7~17.6 m。水池及空箱加上覆土后荷载很大,且不同单元之间荷载、埋深相差甚大,为避免构(建)筑物不均匀沉降,同时考虑构筑物自重抗浮尤其局部抗浮不满足,需采取桩基承载抗浮。

(4) 整体建模,精细化计算模式

本工程部分区域形态复杂,如预处理区,深度处理区等,同时含有多个单体组合而成。若仅采用单一构件计算,由于对构筑物内各构件间相互作用缺乏整体把握,难免造成部分构件处于受力复杂、风险较高的状态而另一部分构件出现承载力过剩、配筋浪费的现象^[14],故本工程在结构设计时,采用三维整体模型的计算方法(见图2),更接近构筑物的实际受力状态,更安全更经济性。

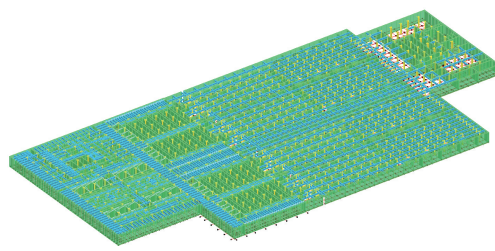


图2 构筑物整体计算模型

3.6 无人化值守的对策措施

3.6.1 应用智能巡检机器人

本次设置生物反应池智能巡检机器人系统(见图3),其可根据设定的时间,在生物反应池盖板下自动巡检,观察反应池曝气情况,智能判断曝气强弱,并生成巡检报告。该系统填补了生反池曝气巡检技术的空白,解决了生反池加盖后巡检困难的局面,推动了污水厂智能化生产的发展。

相比人工巡检,智能巡检机器人系统具有观察范围广、准确度高、无人安全隐患、视频可回溯等优点。也就是说,在巡检过程中,机器人可以实现全程无人工干预,而且能避免危险性。

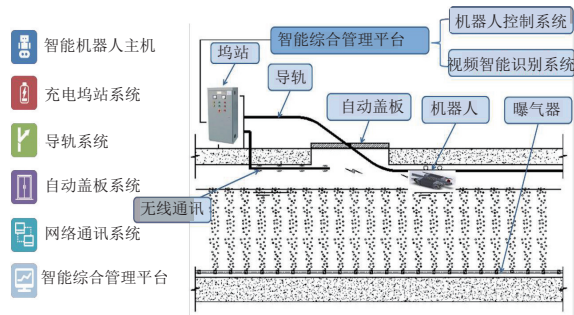


图3 智能巡检机器人安装位置示意图

3.6.2 应用无人机巡检系统

本工程地下箱体空间高大、设备多、管线繁杂，传统的人工巡检弊端凸显，如巡检工作量大；盲区多，很多空间无法巡检；巡检画面不可追溯，需要靠人工记录；巡检过程存在一定的人身安全隐患等问题，部分封闭空间存在泄漏风险，尤其是泵坑等低洼空间，易造成硫化氢积聚。故本次设计基于无人飞行器的智能巡检，将传统人工巡检经验数字化、智能化。

4 结 语

全地下式污水处理设施具备显著的集约化建设优势，其立体化布局大大降低了土地资源占用，通过密闭式处理工艺有效控制臭气、噪声等二次污染，显著提升了周边环境品质和土地利用价值。该类设施为土地资源紧张的城市区域提供了可持续的水处理解决方案，在解决传统地上式污水处理厂选址困难、环境影响明显等问题方面展现出优越性。但需注意

的是，此类工程在实施过程中会面临独特的技术挑战，需要持续优化设计规范和施工技术，积累地下污水处理系统的运维管理经验，以确保设施长期可靠运行。

参考文献：

[1] 张晶瑶. 江苏省某全地下污水处理厂安全设计措施总结[J]. 净水技术, 2024(增刊1): 327-335.

[2] 韩蒙. 全地下式泰和污水处理厂建设[J]. 净水技术, 2018(3): 6-11.

[3] 张洋, 刘君岳, 中秋. 某高标准出水综合污水处理厂设计案例分析[J]. 净水技术, 2025(44): 189-197.

[4] 魏翔, 李怀波, 郑凯凯. 无锡锡北污水处理厂运行评估及优化改造方案[J]. 中国给水排水, 2024(3): 95-100.

[5] 靳鑫. 古城煤矿生活污水处理过程中智能加药除磷系统研究[J]. 煤, 2025(34): 105-108.

[6] 丁强, 赵云, 郭文娟. 气浮-沉淀深度处理给水厂排泥水脱滤液[J]. 城镇供水, 2025(4): 4-6.

[7] 王胜己. 二级泵房吸水井不同高度液位的 CFD 数值模拟[J]. 净水技术, 2024(1): 115-120.

[8] 邱明, 杨书平. 地下污水处理厂工程设计探讨与实例[J]. 中国给水排水, 2015(31): 48-51.

[9] 李成江. 全地下污水处理厂的发展与关键技术问题[J]. 给水排水, 2016(8): 36-39.

[10] 马昭. 西安某污水处理厂除臭工程设计案例分析[J]. 煤化工, 2024(4): 49-52.

[11] 林光. 基于某娱乐广场工程的抗浮设计分析[J]. 福建建筑, 2024(5): 120-126.

[12] 封明村. 超长超高薄壁水处理构筑物混凝土施工技术及其质量控制措施[J]. 工程技术研究, 2023(21): 141-143.

[13] 董霁远. 多层民用建筑地基不均匀沉降的因素及防治措施[J]. 建材发展导向, 2025(15): 67-69.

[14] 吴红林, 马玉全, 欧泽锋. 钢筋混凝土压弯构件设计方法研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2024(1): 54-57.