

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.08.012

超大型综合体超深基坑地埋式再生水厂工程设计

袁际洲^{1,2}, 但功耀¹, 李莹¹

(1. 贵阳中节能水务有限公司, 贵州 贵阳 550000; 2. 中节能运龙<北京>水务科技有限公司, 北京 100000)

摘要: 为治理南明河水系,做好长江上游生态屏障,破解城市主城区污水治理难题,贵阳市六广门、贵医再生水厂打造了全国首例超深基坑地埋式再生水厂与上部综合体结合的项目。将市政基础+生态环境+城市建筑融合一体,地上修建体育场、体育文化综合体和商业综合体,地下修建商业体、停车场及污水处理厂。六广门再生水厂规模为 $12\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,核心处理工艺为MBR,采用中细格栅+曝气沉砂池+膜格栅+传统活性污泥生化池+MBR膜池+紫外线消毒工艺,主要出水指标达到地表Ⅳ类水体标准,出水排入贯城河,最终作为南明河生态补水。

关键词: 深基坑; 地埋式再生水厂; 综合体

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)08-0078-05

Design of Ultra-large Comprehensive Complex Ultra-deep Foundation Pit Underground Reclaimed Water Plant

YUAN Ji-zhou^{1,2}, DAN Gong-yao¹, LI Ying¹

(1. Guiyang CECEP Water Co. Ltd., Guiyang 550000, China; 2. CECEP Yunlong <Beijing> Water Co. Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: To remedy the Nanming River system, construct an ecological barrier in the upper Yangtze River and solve the problem of sewage treatment in the downtown, the first project of ultra-deep foundation pit underground reclaimed water plant combined with upper comprehensive complex was constructed in Liuguangmen and Guiyi reclaimed water plants in Guiyang. The project integrated municipal infrastructure, ecological environment and urban architecture. The stadium, sport and cultural complex and commercial complex were built on the ground, while the commercial complex, parking lot and wastewater treatment plant were built underground. The core treatment process of Liuguangmen reclaimed water plant($12\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$) is MBR, which adopts the process of medium grid and fine grid, aerated sand sedimentation tank, membrane grid, traditional activated sludge biochemical tank, MBR and UV disinfection. The main indicators of effluent meet the surface water class IV standard, and the effluent is discharged into Guancheng River and finally used as ecological water supplement of Nanming River.

Key words: deep foundation pit; underground reclaimed water plant; comprehensive complex

1 项目背景

贵州地处长江经济带上游腹地,是长江上游重要的生态屏障地区。南明河是贵阳市“母亲河”,属长江流域乌江水系,其中贯城河作为南明河一级支

流,南北纵贯云岩区,流域面积 22.06 km^2 ,所在区域服务人口55万人。为解决生活污水直排和南明河水污染环境等问题,贵阳市启动六广门和贵医再生水厂建设,两项目是全国首例超深基坑地埋式再生水

厂,采用“地上+地下”集合的建设方式,埋深达 32 m,并将市政基础+生态环境+城市建筑融合一体,地上修建停车场、体育场和商业综合体,打造成集生态环保、体育健身、文化休闲、商务办公于一体的一站式服务平台,实现生态建设与城市集约化发展的“双赢”。六广门和贵医再生水厂设计能力分别为 12×10^4 、 5×10^4 m³/d,两项总投资约 18 亿元,于 2017 年 12 月份开工建设,2020 年 6 月 30 日正式投运,对周边片区污水应收尽收。两项目均服务于贯城河流域,工艺设计基本相同,笔者着重介绍六广门再生水厂的设计与运行。

2 设计参数及特点

2.1 设计进、出水水质

六广门再生水厂设计水质见表 1,其中出水 COD、BOD₅、NH₃-N、TP 需达到地表Ⅳ类水体标准。

表 1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	总氮	氨氮	总磷	SS
进水	250	120	35	30	3	180
出水	30	6	15	1.5	0.3	10

2.2 设计工艺及流程

考虑占地等因素,六广门再生水厂采用 MBR 为核心处理工艺。

因埋深 32 m,原水经过引水隧道后,直接重力流入厂区,经过预处理、生化系统、MBR 系统、消毒系统和提升后达标排放至贯城河,最终作为生态补水流入南明河。污泥系统先经离心脱水至污泥含水率达到 80%,再进一步低温干化至 60% 含水率后外运处置。具体流程见图 1。

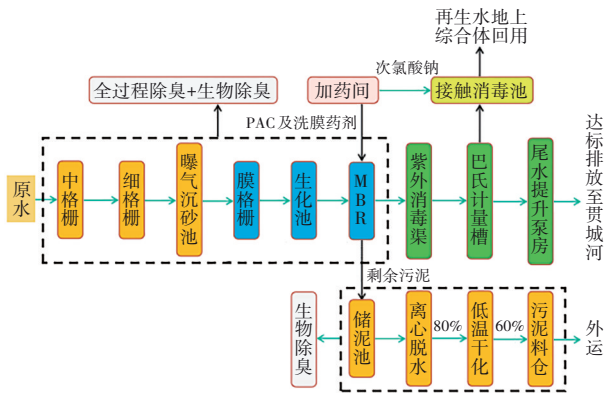


图 1 工艺流程

Fig.1 Process flow diagram

2.3 主要设计参数

2.3.1 进水管设计

进水管起点接贯城河截污沟处设计水面标高为 1 067.70 m,故进水管起点贯城河底标高为 1 066.50 m,截污大沟沟底标高 1 066.50 m,进水头部设计液位 1 066.65 m,设进水管 2×DN1 000,满管流进厂,两条进水管长度分别为 345、341 m。进水管上均安装速闭阀和闸阀,厂区总进水处设计液位约为 1 065.0 m,经计算可满足污水厂重力进水。

2.3.2 尾水管设计

由于地理式污水处理厂受工艺流程标高的限制,尾水需提升排入贯城河,规模为 12×10^4 m³/d,管径为 DN900,两根出水管长度分别为 345、341 m(不包含厂内管道长度),两根出水管均安装止回阀。管道末端安装拍门,防止河水倒灌。全厂出水管在隧道内敷设,根据厂区内的出水液位和河道的设计液位选型尾水排放水泵。尾水排入贯城河,最终流入南明河。进出水管布置见图 2。

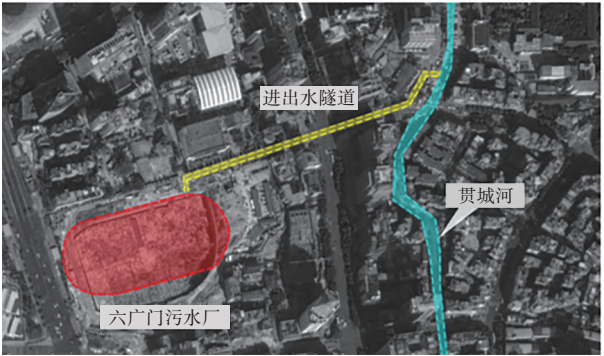


图 2 进出水管线布置

Fig.2 Layout of inlet and outlet pipeline

2.3.3 中格栅渠设计

设置反捞式格栅除污机 4 台,栅距 15 mm,过栅流速 0.8 m/s,栅宽 1.8 m,电机功率 1.1 kW,配套皮带输送机,功率 2.2 kW。

2.3.4 细格栅渠及曝气沉砂池设计

设置内进流孔板式细格栅 4 台,栅距 3.5 mm,过栅流速 0.7 m/s,栅宽 2 m,配套螺旋压榨机和栅渣输送溜槽,功率 3 kW。配套反冲洗中压冲洗泵,功率 7.5 kW。

曝气沉砂池分 2 格,水力停留时间 4.5 min,设置移动式刮砂桥 1 套,吸砂泵 2 台,气水比 0.15。设置 3 台罗茨风机,单台风量 9 m³/min,功率 15 kW。配套砂水分离器及撇渣功能。

2.3.5 事故池设计

为保证污水处理厂出现短暂偶发停产事故时污水处理厂的运行安全,设置事故池暂时储存污水,待污水处理厂正常运行后提升至沉砂池前段,进入后续处理单元。设计停留时间 20 min,设置 2 台潜污泵,流量 $220 \text{ m}^3/\text{h}$,功率 11 kW。

2.3.6 膜格栅设计

设置内进流板式膜格栅 6 台,栅距 1 mm,渠宽 1.6 m。配套螺旋压榨机和栅渣输送溜槽,功率 3 kW;配套反冲洗中、高压冲洗泵,冲洗压力大于 1 MPa。

2.3.7 MBR生化池设计

生化池设计规模 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分为两系列,有效水深 7 m,设计平均污泥负荷 $0.092 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,混合液浓度 5.0 g/L ,总泥龄 15.50 d,总水力停留时间 9.50 h,其中预缺氧区、厌氧区、缺氧区、好氧区的水力停留时间依次为 0.5、1.0、2.0、6.0 h。气水比为 4:1。

2.3.8 MBR膜设计

设计 10 个膜池,均可单独运行,MBR 膜平均膜通量 $24 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,膜孔径 $0.04 \mu\text{m}$,峰值膜通量 $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。单片膜面积 40 m^2 ,每个膜箱设计 52 个膜元件,单列膜池膜面积 $20\,800 \text{ m}^2$,共计 10 列,总膜面积 $208\,000 \text{ m}^2$ 。

2.3.9 加药间设计

加药间设置了除磷系统、碳源投加系统及 MBR 膜清洗系统,除磷药剂和碳源投加量较小,当进水和出水水质波动时,根据出水水质和自动化程序进行投加。膜清洗系统包括次氯酸钠碱洗和柠檬酸酸洗系统,其中次氯酸钠原液浓度 10%,液态柠檬酸浓度 30%,确保次氯酸钠配制浓度为 $200 \sim 2\,000 \text{ mg/L}$,柠檬酸配制浓度为 $2\,000 \text{ mg/L}$ 。

2.3.10 紫外消毒系统设计

紫外消毒系统设计进水悬浮物 $\leq 10 \text{ mg/L}$,最小穿透率 65%,照射剂量 $25 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。杀菌指标:出水总大肠杆菌群数 $< 1\,000 \text{ 个/L}$,配套自动清洗装置。

2.3.11 污泥脱水系统设计

污泥脱水流程为污泥储池+离心脱泥机+低温干化设备+外运处置。设计总干泥量 18 tDS/d 。设污泥离心浓缩脱水一体机 3 台(单台进泥量 $70 \text{ m}^3/\text{h}$)、污泥低温干化机 2 套(单套日处理污泥量 45 t)。

2.3.12 除臭系统设计

因与上部综合体合建,为获得更好的除臭效

果,本项目采用了以全过程除臭为基础、生物滤池法(一段生物滴滤+二段生物过滤)为保障的除臭工艺,预处理、清渣区、曝气沉砂池等工作区域全部采取密闭引风处理,确保厂内及厂界臭气达标。

2.3.13 中水回用及水源热泵系统设计

本项目设计中水规模为 $2.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,经过多介质过滤后加氯产生的高品质水 $1\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,回用为综合体上部建筑物的生活杂用水,剩余部分直接加氯后作为厂区及市政中水回用。本项目设计污水源热泵系统,为再生水厂上部及周边办公楼和体育综合体提供冷(热)源,建筑面积约 $5.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

2.3.14 平面和竖向高效空间设计

本项目充分利用了平面和竖向空间,其平面和竖向设计见图 3。

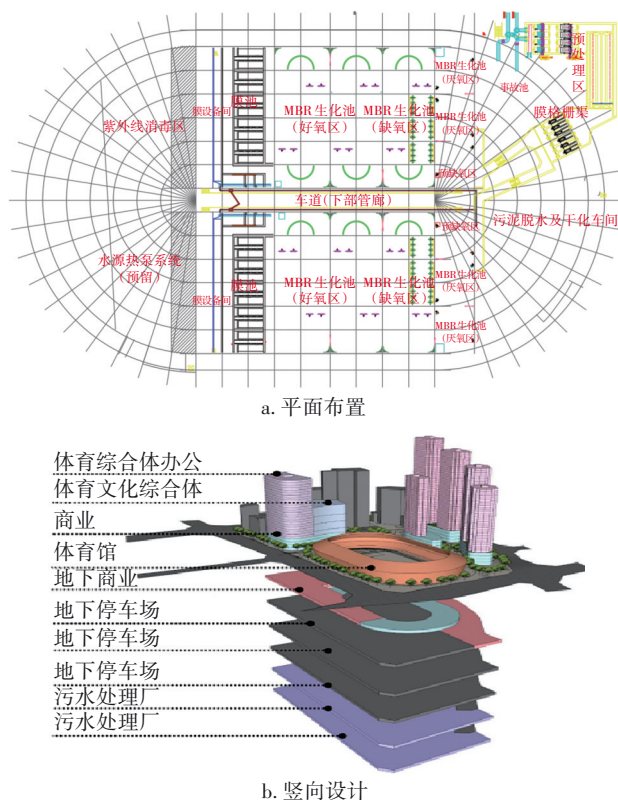


图3 工程平面及竖向设计

Fig.3 Plane and sectional design of the project

本项目占地约 $2.29 \times 10^4 \text{ m}^2$,平均占地仅 $0.19 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 。地下-5层设计为厂区主要处理工段,包括预处理区、MBR生化区、MBR膜池、设备间、加药间、鼓风机房、清水池、消毒、配电室以及水源泵房等。地下-6层主要为污泥处理区域、管廊以及旋转车道。各处理单元的合理布局、管道的布置走向等充分利用了地下空间。

2.3.15 智能化设计

工艺优化智能控制应用模糊逻辑和闭环自动控制原理,根据不同的运行条件(进水量、水质变化和环境温度等)实时调节,实现精确曝气、精确污泥回流和精确加药,使能耗药耗等运行成本处于较低水平。

精确曝气系统示例见图4。

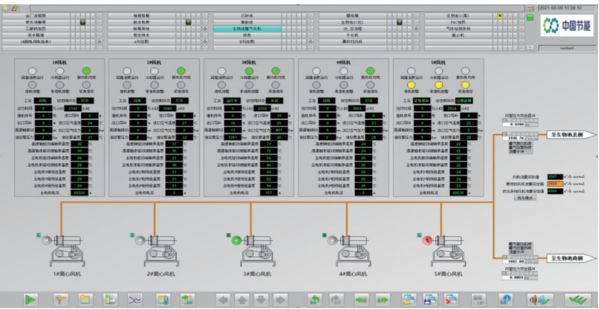


图4 精确曝气系统

Fig.4 Precision aeration system

厂区安防系统安装 CCTV 闭路电视监控系统、入侵报警系统、红外探测器和红外/微波双鉴器及人脸门禁一体机、指纹读卡器、IC 读卡器、电锁等。在污水处理流程的典型观测点设置实时高清视频显示,便于生产巡视和参观视察。各重要用房(如进出水仪表间、配电室、电容器室等)、地面进入厂区各出入口、楼梯出入口、生产调度中心出入口等均设置门禁系统。

厂区安装人员跟踪定位系统,对厂区进行数字化智能管理,以提高现场巡检维护安全性及工作效率,实现工作现场可视化和工作过程自动记录,为智能污水厂各创新业务应用提供位置信息采集基础环境,为工人安全与减员增效相结合提供平台保障。人员定位系统示例见图5。

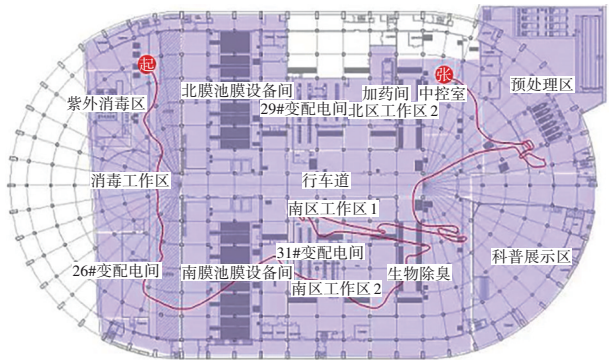


图5 人员定位系统

Fig.5 Personnel position system

厂区安装 11 套气体探测器和气体报警控制系统,实时监测厂区内 H_2S 、 CO 、 CH_4 、 O_2 含量,在次氯酸钠加药间配置氯气检测报警探测器,采集气体检测仪表数据和通风机的运行状态。当环境中探测气体浓度达到或超过预置报警值时,报警器立即发出声光报警,显示故障点和故障状态,记录故障信息,并驱动排风、控制系统,防止发生爆炸、火灾、中毒事故,从而保障安全生产。

2.3.16 双电源加柴油发电机组设计

本项目要求负荷为二级负荷,为此设计了双电源系统+柴油机组发电系统,双路电源工作上相互备用,确保安全生产。同时考虑到极端条件,设计的柴油发电机组可带整个厂区通风、消防以及照明用电,用于地下式再生水厂的安全工作。

3 实际运行效果

3.1 进、出水水质

本项目自正式投运以来,做到上游污水应收尽收,工艺运行平稳,出水水质全面优于设计指标,实际进、出水水质见表2。

表2 实际进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality

mg·L ⁻¹					
项 目	COD	SS	TN	氨氮	TP
90%保证率进水	154	209.9	24.28	19.84	2.4
出水	<10	<1	<11	<0.2	<0.2

3.2 MBR 膜系统运行和清洗

膜清洗参数及运行数据分别见表3、4。

表3 膜清洗参数

Tab.3 MBR cleaning parameters

项 目	次氯酸钠 (10%)	柠檬酸 (50%)	备注
维护性清洗浓度/(mg·L ⁻¹)	200	2 000	
维护性清洗频率/(次·周 ⁻¹)	2	1	
恢复性清洗浓度/(mg·L ⁻¹)	2 000	2 000	
恢复性清洗频率/(次·a ⁻¹)	2	2	由压差决定
维护性清洗持续时间/min	约 60	约 60	每列
恢复性清洗持续时间/h	约 6	约 6	每列

表4 实际跨膜压差和运行通量

Tab.4 Transmembrane pressure difference and running flux

项目	跨膜压差/kPa	运行通量/(L·m ⁻² ·h ⁻¹)	产水浊度/NTU
实际值	小于-10	16~22	小于0.1

近一年数据表明,膜工艺运行平稳,整个系统开12停1,反冲洗、在线维护性清洗和恢复性清洗按照正常的频率进行,膜压差控制在较低水平,出水水质较好,膜通量保持在较好水平。

4 地下再生水厂与地上综合体结合的优点

① 根据贵阳市截污形式以及南明河流域生态补水的要求,按照就地处理、就地回用的思路,采用科学合理布局。地埋式再生水厂可以节约占地和卫生防护带用地,以及污水管网、补水管网、补水提升泵站、沿途拆迁征地等费用^[1]。

② 地下厂解决了地上传统污水厂噪声、臭气以及选址难等难题。

③ 因地制宜地在老城区破解用地难题,采用全地埋式与地上综合体结合的形式,可实现土地创造最优价值,将市政基础+生态环境+城市建筑融为一体,地上修建停车场、体育场和商业综合体,在解决生态环境问题的同时,将市政等城市扩容问题一并解决。

④ 直接实现再生水回用,通过水源热泵系统及供热和供冷系统,可减少回用水管网投资以及暖通管网投资,预计每年可实现20%再生水回用。实现生态效益、经济效益及社会效益最大化^[2]。

5 结论

① 该项目是全国埋深最深的再生水厂,但工艺运行稳定,出水水质优于设计标准,表明MBR膜运行稳定,在智能化、信息化集成控制下能耗处于较低水平。

② 地上地下综合体建设运营模式,可节省大量征地费用和管网投资费用,实现污水的就地处理和回用,经济效益和社会效益明显。

③ 实现了资源化、能源化、生态化理念。一是实现了20%中水回用;二是通过污水源热泵系统,为上部城市综合体供暖和供冷,节约能源消耗;三是生产的再生水通过贯城河为南明河生态补水,恢复贯城河两岸自然生态。

④ 该项目成为节约城市土地资源的示范项目,在2021年荣获E20平台“空间高效利用标杆污水厂和信息化集成标杆”,不仅为贵阳市深度利用地下空间、节约土地开启先河,也为全国城市再生水厂提标扩能提供了新模式、新思路。

参考文献:

- [1] 侯锋. 地下式污水处理厂关键技术与工程实践[D]. 北京:清华大学,2017.
HOU Feng. Key Technology Research and Engineering Practice of Underground Municipal Wastewater Treatment Plant[D]. Beijing:Tsinghua University, 2017 (in Chinese).
- [2] 李成江. 地下式污水处理厂的发展与关键技术问题[J]. 给水排水,2016,42(8):36-39.
LI Chengjiang. Development and key technologies for underground wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(8): 36-39 (in Chinese).

作者简介:袁际洲(1985-),男,天津人,本科,中级工程师,注册环保工程师,项目负责人,主要研究方向为污水、再生水工艺技术,以及水厂精细化管理、智慧水务。

E-mail:394377689@qq.com

收稿日期:2022-05-16

修回日期:2022-06-17

(编辑:孔红春)

珍惜资源,保护环境,建设美丽中国