

大家之言

李碧清, 唐霞, 蔡芸, 等. 广州地下式污水处理厂数字化建设与运营实践探讨[J]. 净水技术, 2022, 41(8):1-7.

LI B Q, TANG X, CAI Y, et al. Discussion on digital construction and operation of underground WWTPs in Guangzhou[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(8):1-7.



扫我试试?

## 广州地下式污水处理厂数字化建设与运营实践探讨

李碧清, 唐霞, 蔡芸, 肖先念, 张旭恒, 孙伟, 吴学伟

(广州市净水有限公司, 广东广州 510655)

**摘要** 文章概述了广州建设地下式污水处理厂的背景, 论述了地下式污水厂数字化建设的几个重要元素: 信息系统联动协同、资产数据可视化、运营管理数字化与各工艺环节控制逻辑优化升级的智能管理应用, 介绍了旋流沉砂池、生化池、污泥回流、二沉池、设备与管线智能控制措施, 总结了地下式污水处理厂污泥处理处置、臭气处理与再生水利用的运营实践, 探讨了地下式污水处理厂的综合开发, 并提出低碳源消耗生物除磷新技术、污泥固碳技术、组合工艺除臭技术、污泥调理药剂配方及地下式污水处理厂数字孪生是未来重点研发方向。

**关键词** 地下式污水处理厂 智能控制 运营管理 污泥处理 除臭 综合开发

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)08-0001-07

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.08.001

### Discussion on Digital Construction and Operation of Underground WWTPs in Guangzhou

LI Biqing, TANG Xia, CAI Yun, XIAO Xiannian, ZHANG Xuheng, SUN Wei, WU Xuewei

(Guangzhou Sewage Purification Co., Ltd., Guangzhou 510655, China)

**Abstract** The reasons for the construction of underground WWTPs in Guangzhou was expounded. Several important aspects of digital construction of underground WWTPs such as intelligent management application of information system linkage and coordination, asset data visualization, operation management digitalization and control logic optimization and upgrading of each process link were discussed. The measures of intelligent control of rotary current sedimentation tanks, biochemical tanks, sludge backflow, secondary sedimentation tank, equipments and pipelines were introduced. The operation practice of sludge treatment and disposal, odor treatment and reclaimed water utilization of underground WWTPs were summarized. The comprehensive development of underground WWTPs was discussed. The new biological phosphorus removal technology with low carbon source consumption, sludge carbon fixation technology, combined process deodorization technology and sludge flocculation agent will be the future research and development direction of underground WWTPs.

**Keywords** underground WWTP intelligent control operation management sludge treatment deodorization comprehensive development

[收稿日期] 2022-05-23

[基金项目] 广东省重点领域研发计划(2019B110209002);广州市“岭南英杰工程”人才计划(2019)

[作者简介] 李碧清(1966—), 正高级工程师, Email: libiqing@sohu.com。



李碧清,男,博士,广州市净水有限公司正高级工程师、总工程师。从事给水排水专业设计工作12年,完成各类市政工程项目设计100余项;参与广州市污水处理系统建设与运营管理18年,项目投资100余亿元;主持及参加完成省、部及市级科研项目10项;公开发表40余篇论文;授权发明专利8项;获2019年广州市“岭南英杰工程”人才称号;获广东省、广州市科学技术奖3项;获住建部华夏建设科学技术奖2项。

2010年全国第一座全地下式污水处理厂在广州市白云区京溪建成并通水运行,占地仅27亩(1亩 $\approx$ 666.67 $m^2$ ),处理污水达15万 $m^3/d$ ,实际出水优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。近几年来,广州所建8座污水处理厂都是地下式污水处理厂,国内的其他城市也陆续建成一批地下式污水处理厂<sup>[1-2]</sup>。广州污水处理厂建设从地面转到地下的主要原因有:①由于城市的快速发展,用于城市市政设施的用地越来越少;②已建成的传统污水处理厂占地大,地面不可能进行综合开发;③变“邻避效应”为“邻利效应”,地下式污水处理厂的上盖地面除少量管理用房外,其他大部分面积是绿色公园;④建设地下式污水处理厂可盘活土地增长收益,为城市污水处理可持续发展筹集资金<sup>[3]</sup>。地下式污水处理厂巧妙布局地下空间<sup>[4-5]</sup>,地面形成园林景观,化解了“邻避效应”。图1为广州地下式污水处理厂分布,表1为广州城区地下式污水处理厂综合开发面积统计。



图1 广州地下式污水处理厂分布

Fig. 1 Distribution of Underground WWTPs in Guangzhou

由表1可知,已建地下式污水处理厂地面可供开发面积可达10.71万 $m^2$ ,合计将约有410亿元综合收益,广州城区土地价值仍在上升,地下式污水处理厂的地面开发为实现污水处理企业可持续发展提供了强大资金支持,为广州水务环保产业园的建设提供场地支持。

表1 广州地下式污水处理厂综合开发面积统计

Tab. 1 Statistics of Comprehensive Development Area of Underground WWTPs in Guangzhou

污水处理厂	设计水量 /( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	污水处理 主体工艺	占地面积( $m^2$ ) /工程投资(亿元)	首期开发 面积/ $m^2$	吨水处理成本 /(元 $\cdot m^{-3}$ )
沥滘污水处理厂三期	$2.5 \times 10^5$	AAO+AO+砂滤池	$1.43 \times 10^5/18.3$	7 090	0.76
大沙地污水处理厂二期	$2.5 \times 10^5$	AAOA+MBR膜	$6.2 \times 10^4/14.8$	0	0.65
龙归污水处理厂三期	$1.5 \times 10^5$	AAO+MBR膜	$6.3 \times 10^4/10.3$	0	0.67
西朗污水处理厂二期	$2.5 \times 10^5$	AAOA+MBR膜	$1.14 \times 10^5/14.9$	45 600	0.64
石井净水厂一期	$1.5 \times 10^5$	AAO+AO+砂滤池	$1.39 \times 10^5/7.2$	0	0.64
石井净水厂二期	$1.5 \times 10^5$	AAO+AO+高效沉淀池	$9.62 \times 10^4/7.0$	35 700	0.61
京溪净水厂	$1.0 \times 10^5$	AAO+MBR膜	$1.8 \times 10^4/5.0$	0	0.65
江高净水厂	$1.5 \times 10^5$	AAOA+MBR膜	$6.04 \times 10^4/14.9$	0	0.61
大观净水厂	$2.0 \times 10^5$	AAO+砂滤池	$9.9 \times 10^4/10.4$	15 300	0.62
健康城净水厂	$1.6 \times 10^5$	AAOA+MBR膜	$8.7 \times 10^4/10.38$	3 450	0.61

注:吨水处理成本包含人工、药耗、电耗、材耗费用等,不包含折旧与大中修费用

## 1 广州地下式污水处理厂设计规划亮点

广州地下式污水处理厂规划设计运用地下建厂、地上建园的理念。已建9座地下式污水处理厂地下空间深度约为17 m,进水污水总管、粗格栅与提升泵房在负二层,细格栅、生化池、滤池、鼓风机与配电房等设施设计在负一层,地下式污水处理厂地面设计成绿化公园。以广州石井净水厂的设计图为例,图2为石井净水厂地面平面图,地面上只有少量管理用房,绿地与湿地覆盖率超过了占地的65%,图3为石井净水厂地面湿地公园。龙归厂三期、江高厂、健康城厂、西朗厂二期、大沙地厂二期5个污水厂采用AAO+MBR膜工艺;大观厂、沥滘厂三期、石井厂3个污水厂采用了AAO+二沉池+V型滤池工艺。图4为石井净水厂地下空间布置示意图。



图2 石井净水厂地面景观

Fig. 2 Landscape Map of Shijing Underground WWTW



图3 石井净水厂的湿地公园

Fig. 3 Wetland Park of Shijing Underground WWTW

广州地下式污水处理厂的规划设计与建设施工呈现如下特点。

(1)每座地下式污水处理厂选用EPC总承包模式,地下式污水处理厂建设施工方与设计方在技术上实现无缝对接,土建结构设计施工合理衔接机电设备的供货安装与调试。

(2)重点优化完善水泵、鼓风机、曝气系统、滤池、消毒系统与MBR膜组件等重要设备的工



图4 石井净水厂地下式空间布置示意图

Fig. 4 Underground Space Layout of Shijing Underground WWTW

艺参数,如MBR膜的膜通量精选为 $18 \sim 25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 等。

(3)为确保地下式污水处理厂检修间不停产,污水不外溢,地下式污水处理厂生产线之间通过阀门与管道相连接,各条生产线既能独立运行,又方便某一条生产线检修时总体流量的调度分配。

(4)地下式污水处理厂地下式空间结构工程负荷设计与地面综合开发项目相衔接。

(5)配电房有具体的防水措施设计。

(6)施工作业高峰期,采用全员进出场刷脸、全员安全帽芯片行程跟踪等安全管理措施。

## 2 地下式污水处理厂的数字化建设

地下式污水处理厂综合管理平台集中部署在公司总部云端,具有营运调度、应急指挥、经营数据分析、综合展示功能,集中运行维护,节约了系统的建设与运维成本。广州地下式污水处理厂营运基本实现了智能管理。

### 2.1 已建系统的联动和协同

将已建地下式污水处理厂的精确曝气控制系统、智能加药控制系统、智能回流控制系统、智能地磅称重系统、员工生命安全监测系统、智能安防系统等进行联动和协同,对具有多变量、非线性、大滞后等特点的污水处理系统进行稳定控制,图5为智慧污水处理运营管理平台示意图。为实现对碳源、除磷剂、消毒剂加药量更精确的智能控制,在出水水质达标的基础上节省药剂费用。系统的联动和协同解决了厂内信息数据无法交流互通、人员重复数据填报、设备缺少管理台账、人员缺乏绩效管理等问题。

### 2.2 资产数据可视化

污水处理厂智能管理实现了污水处理厂结构、



图5 地下式污水处理厂管理平台示意图

Fig. 5 Management Platform of Underground WWTPs

管道、控制、电气等专业图纸数字化与三维化,提高了厂区的结构、管道、配电自控等维护排障效率,完成了数据资产的传承、管理和分析。图6为地下空间管道优化前的布局,图7为地下空间管道优化后的布局,图8为地下空间智能维护管理,图9为地下空间泵房的BIM模型。

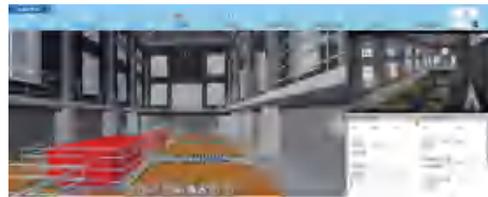


图8 地下空间智能维护管理

Fig. 8 Intelligent Maintenance of Underground Space



图6 地下空间管道优化前的布局

Fig. 6 Initial Layout of Underground Space Pipelines



图9 地下式空间泵房的BIM模型

Fig. 9 BIM Model of Underground Management of Pump Station



图7 地下空间管道优化后的布局

Fig. 7 Optimized Layout of Underground Space Pipelines

### 2.3 运营管理数字化

建立污水处理厂运行关键绩效指标评估机制,从管理质量、能耗分析、设备运行效率、运行工艺参数等多个方面定期对污水处理厂的运行工况进行综合性评定,实现基于智控中心的扁平化、高效化管理。工单覆盖日常巡检、化验、工艺调整、安全管控,图10为地下式污水处理厂日常巡检示意

图。自动化智能报表只填一次,杜绝二次录入,实现数据的高效流转和业务的充分融合,为厂区无纸化办公提供支持。建立完善的设备运维管理体系,利用人机协同解决设备运行、维护、维修规范化、标准化问题,可实现各类型业务的线上化执行及管理。

系,利用人机协同解决设备运行、维护、维修规范化、标准化问题,可实现各类型业务的线上化执行及管理。



图 10 地下式污水处理厂日常巡检示意图

Fig. 10 Schematic Diagram of Daily Inspection of Underground WWTP

## 2.4 广州地下式污水厂控制系统优化

(1)将旋流沉砂池的控制与周期运行装置联锁鼓风机、气提阀、气冲阀、砂水分离器,增加了智能控制功能。

(2)为提高二沉池沉淀效果,在二沉池配水槽前端安装高清摄像头,值班人员通过实时图像观察配水槽污泥絮凝状态,发现异常时及时调控相关设备运行参数,减少浮泥进入清水槽,减轻滤池压力,将手动阀门改造成电动阀门,优化控制程序,实现排泥阀周期顺序排泥,防止二沉池污泥浓度过高,保证二沉池水质稳定。同时在二沉池末端清水池增加SS浓度检测仪表,接入自控系统,设定报警限制,浓度过高时报警,保障滤池正常运行。

### (3)生化池在线控制

在地下式污水处理厂生化池的缺氧区与好氧区交界段安装氨态氮、硝态氮与磷酸盐在线检测仪,分析厌氧前段硝态氮、厌氧末端的氨态氮和硝态氮、缺氧区末端磷酸盐浓度,全面监控生化池内的脱氮除磷效果,并形成污水生化处理过程段5~6h的预警与诊断机制。生化池在线仪表检测值指引智能系统调节内外回流比、溶解氧、曝气量、碳源投加量与化学除磷药剂投加量,保障出水水质稳定达标。

### (4)构建全方位的报警体系

一旦监测到仪表或设备的报警信号,报警消息可通知到中控室、值班室人员及与报警信息相关的人员。与人员安全相关的点位有声光报警提醒,如

存在H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>泄露隐患的车间。PC端和移动端对报警消息进行同步记录和展示,使用者点击任意一条报警信息,系统画面将自动定位到对应问题所在污水处理厂的实际位置。

### (5)设备管理

实现设备快速查找和定位,实时监测设备的温度、频率、电流、电压等,并生成曲线。当监测数据超限报警时,系统结合经验模型自动判断产生报警的故障部件,在零件级设备模型的基础上,对可能发生故障的部位进行关联和突出显示,针对性地提供维修建议。

### (6)管线管理

以三维形式完整直观展现隐蔽工程中各类工艺管线布局,提高管路巡检维修的效率。系统将管网按类型分图层显示,可控制显隐,详细展示出管线属性、关联性、检修井分布位置,以及各维度的统计信息和物联网监测数据。

## 3 地下式污水处理厂的运营实践

### 3.1 高效能污泥处理处置技术

污水处理厂的污泥处理处置一直都是社会各界关注的环保难题。广州地下式污水处理厂污泥处理处置工艺由污水进出水水质、地下式空间尺寸、处理时间、处理温度、处理压力与臭气收集去除等因素综合确定,表2为广州所有地下式污水处理厂的污泥处理运行成本比较。

表2 广州地下式污水处理厂污泥处理运行成本  
Tab. 2 Operation Cost of Sludge Treatment of Underground WWTPs in Guangzhou

地下式污水处理厂	污泥处理处置工艺	干化污泥量 (35%含水率)/(t·d <sup>-1</sup> )	运行成本 /[元·(t DS) <sup>-1</sup> ]
沥滘污水处理厂三期	离心脱水+卧式薄层机干化+水泥窑协同焚烧	42	2 750
大沙地污水处理厂二期	污泥浓缩调理+板框脱水+圆盘机干化+水泥窑协同焚烧	42	2 119
龙归污水处理厂三期	污泥浓缩调理+板框脱水+低温干化+电厂协同焚烧	25	1 600
西朗污水处理厂二期	污泥浓缩调理+板框脱水+圆盘干化+电厂协同焚烧	42	2 200
石井净水厂一期	污泥浓缩调理+板框脱水+低温干化+水泥窑协同焚烧	25	1 600
石井净水厂二期	污泥浓缩调理+一体化板框干化+电厂协同焚烧	25	2 100
京溪净水厂	厂内离心脱水+厂外好氧堆肥	16	2 100
江高净水厂	污泥浓缩调理+板框脱水+低温干化+电厂协同焚烧	25	1 600
大观净水厂	污泥浓缩调理+一体化板框干化脱水+电厂协同焚烧	34	2 100
健康城净水厂	污泥浓缩调理+板框脱水+圆盘机干化+电厂协同焚烧	26	2 300

污泥在厂内干化后,主要指标应达到如下标准<sup>[6]</sup>:①5<pH值<10;②30%≤含水率≤40%;③处理后污泥的重金属含量不能高于处理前污泥重金属含量;④污泥(重量)减量比≥60%;⑤处理后的污泥氯离子质量分数标准≤0.55×10<sup>4</sup> mg/kg;⑥处理后的污泥颗粒度标准采用筛孔直径为30 mm的圆孔试验筛,筛上物质量比例<20%,采用筛孔直径为50 mm的圆孔试验筛,不应存在筛上物,其检测频率为不定期抽检。

### 3.2 地下式污水厂除臭技术

广州地下式污水处理厂周边几乎都是大型居民区或商业区,地下式污水处理厂的臭气处理效果直接关系到项目建设与运营的成败。地下式污水处理厂臭气主要来源于进水粗格栅、沉砂池、细格栅、生化池、二沉池与污泥处理车间等工艺环节,臭气的主要成分有H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>及CH<sub>4</sub>等。地下式污水处理厂的臭气处理设计时有如下几点考虑。

①在地下式空间的负一层与负二层开展气流分布与扩散模拟,绘制气流云图,以空气流体动力学模型的计算结果,科学合理布置臭气收集口、臭气管道

收集系统与离子送风系统。

②多组合工艺串联,以提高臭气处理效果。

③粗格栅、沉砂池、细格栅、生化池、污泥脱水干化区、污泥料仓区与污泥卸泥区加密封罩与负压运行。

④污泥调质区、污泥输送区、密封罩周边、污泥料仓区、污泥卸泥区与离子送风设备区等换气次数应严格按照设计标准或优于设计标准执行。

⑤处理后的尾气排放塔高度为15 m。

广州市9座地下式污水处理厂除臭采用了生物法+化学法+催化氧化法+活性炭吸附法等不同工艺的串联组合,使厂区排放臭气均达到且远优于《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)标准及广东省地方排放标准《城镇地下污水处理设施通风与臭气处理技术标准》(DBJ/T 15-202—2020),有效地解决了污水处理厂“邻避效应”难题。

以京溪净水厂为例,京溪净水厂的提升泵房臭气处理采用了等离子技术+气动乳化技术+生物除臭技术三级串联工艺,表3为京溪净水厂提升泵房臭气处理效果。低温等离子体主要是由气体放电产

表3 京溪净水厂提升泵房臭气处理效果  
Tab. 3 Deodorization Effect of the Pump Station of Jingxi Underground WWTP

检测项目	TVOC	硫化氢	甲硫醇	氨	臭气
处理前平均排放浓度	8.77 mg/m <sup>3</sup>	0.61 mg/m <sup>3</sup>	9.25×10 <sup>-2</sup> mg/m <sup>3</sup>	4.49 mg/m <sup>3</sup>	1 922.33(无量纲)
处理后平均排放浓度	0.87 mg/m <sup>3</sup>	0.009 mg/m <sup>3</sup>	7.04×10 <sup>-3</sup> mg/m <sup>3</sup>	0.238 mg/m <sup>3</sup>	192.33(无量纲)
平均净化效率	90.1%	98.5%	92.4%	94.7%	90.0%

生,利用高频流光放电等离子体的特性,在废气中产生等离子体电离电场,电离使有害气体氧化和裂解,达到分解废气中有害物质的目的。经等离子体装置处理后的废气进入气动乳化塔,经过乳化塔内的乳化剂进行气液交换净化,经净化后的气体再进入生物塔。根据生产过程中所产生的有机废气量、温度、浓度、废气成分、负荷变化和环保排放指标设计各工艺环节的参数。

### 3.3 再生水利用

2021年广州9座地下式污水处理厂经过了AAO+MBR膜或AAO+砂滤的主流程后,其出水COD<sub>Cr</sub>质量浓度为7~20 mg/L,SS质量浓度为1~5 mg/L,氨氮质量浓度为0.10~0.50 mg/L,总氮质量浓度为5~12 mg/L,总磷质量浓度为0.1~0.5 mg/L。地下式污水处理厂出水形成了广州沙河涌、石井河、海珠湖等城市河湖的稳定补水水源,城市水环境质量全面提升。广州城区再生水也广泛地应用在城市道路卫生与园林绿地用水、地下式污水处理厂各车间用水、施工工地用水与洗车用水等。

2021年广州市再生水使用量达 $5.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,城市用水既减少了向自然水体的取水量,同时也减少了向珠江排放污染物的量。与此同时,广州再生水的利用仍亟需解决几项问题:①制定出台工业、农业、商业与城市生活再生水利用价格体系;②城市专项规划既要有完善的自来水系统规划、污水系统规划与雨水系统规划,也要有完善再生水系统规划,城市道路上应预留再生水管道的空间位置;③污水处理厂区应预留再生水设施的发展空间;④政府各部门与社会各界广泛参与支持。

## 4 建议

广州地下式污水处理厂的建设与营运已有十余年的历程,地下式污水处理厂的建成破解了城市污水处理厂建设和运维之难。广州地下式污水处理厂每天处理污水总量为181万 $\text{m}^3$ ,为广州取得打赢黑臭水体攻坚战历史性成果,提供了补齐污水处理能力短板的基础支撑。但在以下几方面仍需要开展研发工作。

(1)研究低碳源消耗的生物除磷新技术,精准控制碳源供给,筛选优势聚磷菌群,实现生物除磷与脱氮系统减碳。探讨微生物群落的低细胞生产率、高碳源利用率与硝酸盐呼吸能力,形成在线控制的脱氮除磷关键技术体系。

(2)开展污水处理厂污泥固碳技术研究,由污水处理厂污泥生成生物质碳、园林绿化有机肥、土壤改良剂、海绵土、吸附剂与燃料等。

(3)研发高效的除臭微生物菌群,确保地下式污水处理厂组合工艺整体除臭效果。

(4)研发污泥调理药剂配方,为污泥脱水干化与资源化创造良好条件。

(5)优先选用优良的国产设备,如水泵、鼓风机、MBR膜组件与消毒设备等,使国内环保产业装备成为中国水务环保产业的主力军。

(6)地下式污水处理厂通过数字信息仿真模拟厂区运营管理所有真实信息,构建一个基于三维呈现的线上虚拟污水处理厂。数字孪生污水处理厂将集合污水处理厂区人、事、物全方位的动静态信息,能够回溯过去、展示现在和预测未来的地下式污水处理厂运行工况,形成实体与虚拟的联动协同,实现实体污水处理厂智能管理与运行。

### 参考文献

- [1] 杨一烽,杜炯,张欣.国内地下式污水处理厂的发展现状和关键技术分析[J].净水技术,2021,40(10):101-106,117.
- [2] 房阔,王凯军.我国地下式污水处理厂的发展与生态文明建设[J].给水排水,2021,57(8):49-55.
- [3] 李碧清,唐瑶,肖先念,等.城市水环境恢复的实践探索[M].广州:华南理工大学出版社,2021.
- [4] 肖丽萍,黎洪元,王未君.基于运行经验的半地下式污水厂前期设计细节优化[J].中国给水排水,2022,38(2):69-72.
- [5] 刘世德,王泽明,刘茜,等.地下式污水处理厂关键节点及设计对策[J].地下空间与工程学报,2021,17(s1):215-220.
- [6] 广州市市场监督管理局.城镇污水处理厂污泥厂内干化减量技术标准:DB 4401/T 75—2020[S].2020.