

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.04.013

# 深层隧道排水系统中深隧泵站的设计与优化

陈宝玉, 王正雄, 杨涛, 石亚军, 吴志高, 邹惠君  
(武汉市市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023)

**摘要:** 武汉市大东湖核心区污水传输系统工程采用深层隧道排水系统,隧道末端为北湖深隧泵站,其设计规模为  $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,为压力流泵站,地下深度为 46.35 m,净提升高度为 16.1 ~ 22.4 m。泵组采用 6 台离心泵(4 用 2 备),单泵流量  $Q = 2.79 \sim 3.87 \text{ m}^3/\text{s}$ ,水泵扬程  $H = 196.3 \sim 304.4 \text{ kPa}$ 。在北湖深隧泵站的设计过程中,采用了计算流体动力学(CFD)模拟分析、物理模型试验、水锤分析及结构振动分析方法,并根据分析结果对其设计方案进行了优化。

**关键词:** 深隧泵站(DTPS); CFD 分析; 物理模型试验

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)04-0062-05

## Design and Optimization of the Deep Tunnel Pumping Station in Deep Tunnel Drainage System

CHEN Bao-yu, WANG Zheng-xiong, YANG Tao, SHI Ya-jun, WU Zhi-gao,  
ZOU Hui-jun

(Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430023, China)

**Abstract:** A deep tunnel drainage system was applied in the sewage transmission system project of Wuhan Dadonghu Core Area. The end of the tunnel is the Beihu deep tunnel pumping station, with a design capacity of  $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . It is a pressure flow pumping station with underground depth of 46.35 m and net lifting height of 16.1 – 22.4 m. Six centrifugal pumps, including 4 working pumps and 2 spare pumps, were applied, and the working range was  $Q = 2.79 - 3.87 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $H = 196.3 - 304.4 \text{ kPa}$ . In the design of the Beihu deep tunnel pumping station, the computational fluid dynamics (CFD) simulation analysis, physical model test, water hammer analysis and structural vibration analysis were used. According to the analysis results, the design scheme was optimized.

**Key words:** deep tunnel pumping station(DTPS); CFD analysis; physical model test

随着城市规模的扩大和配套基础设施的建设,城市常规排水系统的压力越来越大,水环境治理要求也越来越严格。由于城市地下浅层障碍物较多、断面拥挤,因此在地下 30 ~ 50 m(部分 50 ~ 100 m)范围内建造深层隧道排水系统以积极应对城市内涝和溢流污染正逐渐得到重视,并已在伦敦、芝加哥、东京、新加坡以及我国香港、上海、广州等大城市排水系统中得到应用<sup>[1-3]</sup>。根据功能目标,深层隧道排水系统基本可划分为防洪排涝型、污染控制型和

功能复合型三种,并且通常由入流竖井、调蓄水池、输送隧道、通风排气井、除渣槽及排泥设施、提升泵站等组成<sup>[3-4]</sup>。其中,提升泵位于系统末端,是连接前端隧道及末端受纳水体的枢纽,通过站内大型泵组将隧道内的水抽排至江河或污水处理厂等下游。

### 1 工程概况

武汉市沙湖、二郎庙、落步咀三座污水处理厂均位于主城区中心,受处理负荷、用地空间限制,严重制约了主城区的经济社会建设与发展。为此,武汉

市实施了大东湖核心区污水传输系统工程。该工程通过新建 DN3 000 ~ 3 400 深层污水隧道传输系统将三座污水处理厂污水传输至城市外围的北湖污水处理厂<sup>[5]</sup>。为提升污水至污水厂,深隧末端新建一座污水提升泵站,即北湖深隧泵站,设计规模为  $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,隧道至泵站的水流为压力流,隧道进口隧道底高程为  $-20.65 \text{ m}$ ,泵站前池工况水位为  $2.3 \sim 8.6 \text{ m}$ ,出水池水位为  $24.7 \text{ m}$ ,泵站主体构筑物地下深度为  $46.35 \text{ m}$ ,提升高度为  $16.1 \sim 22.4 \text{ m}$ 。

2 相关案例

隧道末端的深隧泵站是整个深隧排水系统的枢

纽和设计关键。深隧泵站运行案例见表 1。深隧泵站特点如下:系统性强,需要水位联动运行;复杂程度高、集成程度高,在有限空间内集中配套动力、通风、冷却、润滑、监测、自控、检修、照明、消防等附属设施;安全性、稳定性要求高,设备运行环境要求严格;结构抗震及建筑降噪等级要求高。深隧泵站流量变化大,因此要求所选水泵运行工况适应性好,流量-扬程曲线有效范围广、高效区间宽;设备安全、稳定性高,抗气蚀性良好;转动惯量大,抗反转、抗震动性能好;水泵冷却系统及润滑油系统稳定可靠,宜双回路布置;泵组耗电功率大,宜配备变频器。

表 1 部分深隧泵站工程案例

Tab. 1 Some deep tunnel pumping station (DTPS) project cases

项目	香港昂船洲污水处理厂深隧泵站	新加坡樟宜污水厂深隧泵站	伦敦泰晤士河深隧泵站	芝加哥深隧泵站	印第安纳波利斯深隧泵站	东京江户川深隧泵站
泵房数量/座	一、二期各 1	2	1	3	1	1
设计规模	一期 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 二期 $245 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$	近期 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 远期 $120 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$	$100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$	一期 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 二期 $545 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 单座最大规模 $44 \text{ m}^3/\text{s}$	$8 \times 1.33 \text{ m}^3/\text{s}$	$200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$
地下部分结构方式	圆形,一期内径 $49.5 \text{ m}$ ,深约 $34 \text{ m}$ ;二期内径 $55 \text{ m}$ ,深约 $39.7 \text{ m}$	圆形,内径 $37 \text{ m}$ ,深约 $72.5 \text{ m}$	圆形,内径 $37 \text{ m}$ ,深约 $85 \text{ m}$	矩形,深约 $86.5 \text{ m}$	圆形,深约 $85 \text{ m}$	方形,深约 $20 \text{ m}$
水泵类型	立式离心泵	立式离心泵	立式离心泵	立式离心泵	立式离心泵	离心泵
水泵配置	一期 6 用 2 备,变频 二期 6 用 2 备,变频	按远期配置,近期 3 用 7 备,变频	4 用 2 备,变频	4 台(单座最大泵站)	4 用 4 备,变频	4 台
单泵参数	一期 $Q = 2.8 \sim 5.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , $H = 200 \sim 400 \text{ kPa}$ , $N = 2\,500 \text{ kW}$ ;二期 $Q = 2.7 \sim 4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , $H = 240 \sim 425 \text{ kPa}$ , $N = 2\,250 \text{ kW}$	$Q = 2.31 \sim 5.79 \text{ m}^3/\text{s}$ , $H = 500 \sim 740 \text{ kPa}$ , $N = 3\,500 \text{ kW}$	$Q = 3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , $H = 870 \text{ kPa}$ , $N = 3\,400 \text{ kW}$	$Q = 7.0 \sim 11.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , $H = 0.75 \sim 1.07 \text{ MPa}$ , $N = 13\,000 \text{ kW}$	$Q = 1.33 \text{ m}^3/\text{s}$ , $H = 607 \sim 814 \text{ kPa}$ , $N = 1\,400 \sim 1\,750 \text{ kW}$	$Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ , $H = 140 \text{ kPa}$ , $N = 10\,300 \text{ kW}$
进出水组织形式	一期圆形周边进出水,二期矩形槽中间进出水	大口径圆管进配水	矩形槽中间进出水	矩形进出水		矩形槽中间进出水
电机冷却	均为强制通风	水循环冷却	自封闭冷却	水循环冷却	自封闭冷却	强制通风
排空或应急泵	一期干式泵 2 台 二期干式泵 4 台	—	立式离心泵 2 台	—	—	—

3 深隧泵站工艺设计

北湖深隧泵站主体采用圆形结构断面,内径  $39.0 \text{ m}$ ,主体构筑物地下部分深  $46.35 \text{ m}$ ,地面以上部分高  $27.80 \text{ m}$ 。

深隧泵站平面图、剖面图见图 1,BIM 图如图 2 所示。

隧道在深隧泵站前端的汇水井处接入,汇水井不仅承接前端深隧来水,而且同时具有泵房前池的功能;汇水井通过管径为 DN2 400 的两根主管连接

至主泵配水流道,流道采用矩形渐变断面,流道侧向出水管径为 DN1 400,水流偏转角为  $45^\circ$ ;主泵分两列斜对称布置,采用立式离心泵,4 用 2 备,工作范围  $Q = 2.79 \sim 3.87 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $H = 196.3 \sim 304.4 \text{ kPa}$ ,配套电机  $N = 1\,400 \text{ kW}$ ,变频控制。此外,为排除流道及汇水井内的积水,进水流道末端各设 1 台排空泵排空。泵站出水池设置在地面,通过箱涵出水至处理单元。泵站竖向自底部向上依次为流道层、水泵层、电机层、电缆层、地面层、地上层等。

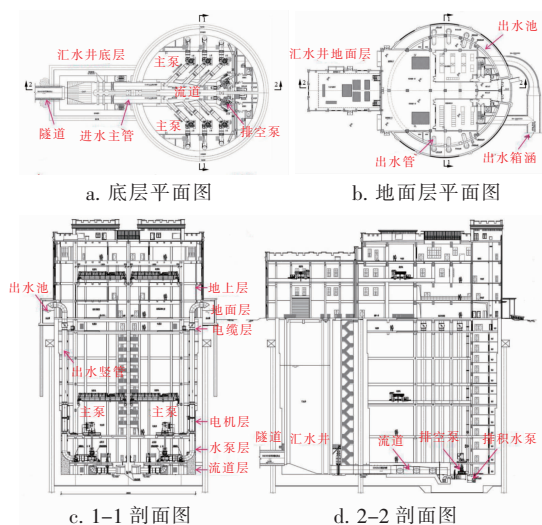


图1 深隧泵站示意

Fig.1 Schematic diagram of the DTPS

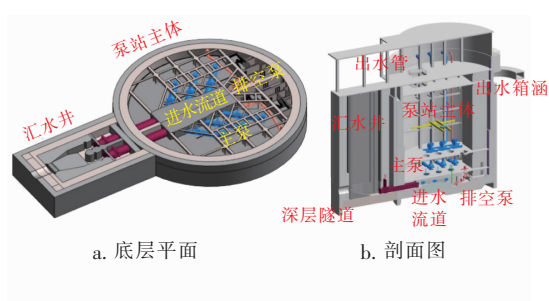


图2 深隧泵站 BIM 图

Fig.2 BIM diagram of DTPS

## 4 模拟分析

### 4.1 CFD 分析

对深隧泵站进出水水力流态进行计算流体动力学(CFD)数字模拟分析,针对局部出现的流态问题重点进行模拟验证,优化泵站水力流态,尤其是易产生旋涡和水力剥离现象的位置。以汇水井进水口和流道出水口的 CFD 分析为例,结果见图3。可见,在泵站低水位(低于设计最低水位)最不利连续运行工况下其负压较低,有产生剥离涡的可能,在汇水井 DN2 400 进口和流道 DN1 400 进口处均有剥离涡的产生。为解决该问题,拟定两种解决方案:第一种方案是通过控制运行水位,保证汇水井液面保持在最低水位线以上运行;第二种方案是通过对局部位置进行改进,改善进水水力流态,譬如在出水口上方设置旋涡防止板、优化进口倒角。通过 CFD 模拟分析最低控制水位,其中汇水井主管 DN2 400 进口淹没深度控制在 3.25 ~ 5.95 m 以上时,该处剥离涡得到有效控制,甚至消失。对局部采用改进措施后进

行 CFD 模拟分析,可见,在增设旋涡防止板后汇水井 DN2 400 进口处涡度等值面在中途中断,不与水面连接,水力流态得以改善,见图 3(a)。对不同倒角方案进行模拟对比分析后得出,在 DN2 400 进口采用锥形倾斜倒角且倒角 $\leq 15^\circ$ 时,水力流态改善明显,见图 3(b),剥离涡消失,且当采用  $15^\circ$  倾斜角优化后,该处压力值明显减小(从 -420 Pa 减小至 -118 Pa),水力流态更趋于平稳。增设旋涡防止板对流道 DN1 400 出(进)口处的水力流态未有改善,而采用倾斜倒角则有助于改善流道 DN1 400 出(进)口流态,见图 3(c)。当流道侧向出水管采用  $30^\circ$  倾斜角优化后效果最为明显,该处压力值明显减小(从 -580 Pa 减至 -140 Pa),水力流态整体平稳,见图 3(c),采用倾斜角优化后剥离涡消失,水力流态改善明显。从可实施性和实施效果分析,进口倾斜倒角方案实施效果和可实施性均优于旋涡防止板方案,故北湖深隧泵站最终采用倾斜倒角方案。

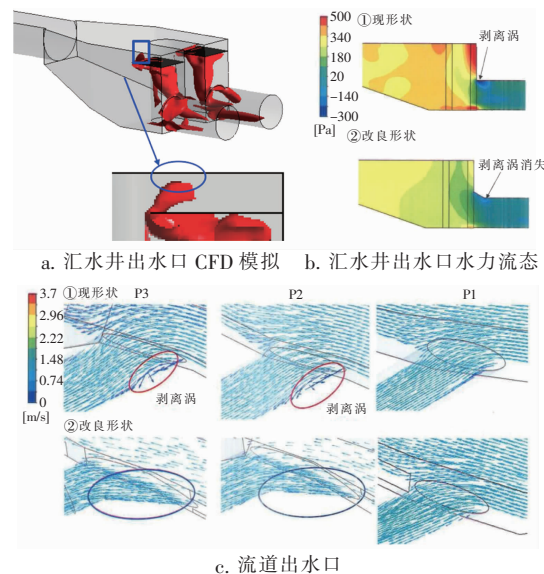


图3 汇水井出水口和流道出水口优化前后流态分析

Fig.3 Analysis of flow pattern of the collecting well outlet and channel outlet before and after the optimization

### 4.2 物理模型试验

在前述 CFD 模拟分析的基础上进行物理模型试验,通过构建比例模型,模拟分析设计工况下泵站内的水位液面、旋涡、分流及不同水位下气泡的产生,对设计和 CFD 模拟结果进行验证、优化,试验装置见图4。物理模型试验结果表明,主泵在不同运行工况下均可稳定、良好地运行。当汇水井 DN2 400 进口淹没深度控制在 3.25 m 以上时,汇水



井 DN2 400 进口及流道液下涡旋和表面涡旋消失,与 CFD 模拟结果一致。此外,通过试验反复验证,当排空泵进水管淹没深度控制在管口 1.05 m 以上时,排空泵水泵吸入口旋涡消失。



图4 物理模型试验装置

Fig.4 Physical model test device

### 4.3 水锤分析

水锤分析根据设计工况参数、设备选型参数、水泵曲线等基础资料,运用特征线方法构建水力过渡过程的数学模型,对设计工况、水泵正常开停机及突然断电事故工况下的水力过渡过程进行模拟计算,通过对水力过渡过程数值解的解析,计算出管路最大压力、最大负压、最大倒流流量、最大倒转转速等关联参数,分析水泵运行的安全性,重点针对发生最不利工况下的水锤分析,研究防护措施和改进方案,同时也可将其反馈给水泵厂家进行水泵设备的优化设计。以旱季最高流量设计工况下的最不利工况水锤分析为例,单侧流道进水  $10.89 \text{ m}^3/\text{s}$ ,3 台泵运行,按水头损失最大计算,进水池水位 29.97 m,出水池水位 50.85 m。事故工况为机组变频运行时突然断电情况下,以末端工作泵为分析对象进行分析。水泵参数变化过程见图 5。由图 5(a)可知,事故停泵后  $t=1.936 \text{ s}$  时,水泵处开始倒流,最大倒流流量  $v=0.788$  (相对  $3.63 \text{ m}^3/\text{s}$ ); $t=3.472 \text{ s}$  时,水泵开始倒转,最大倒转转速  $\alpha=0.918$  (相对水泵工况下转速);水泵最大扬程  $h=0.747$  (相对水泵工况下扬程)。结合水锤分析中的倒流反应时间、倒流量、转速、倒转后扬程、压力复核水泵的转动惯量及水泵反转特性是否满足突发情况下的反转冲击要求,同时对主泵电机启闭方式进行优化,采用变频电机逐级启动关闭的操作方式。由图 5(b)可见出水管路不同位置处在设计工况下压力水头变化过程,事故停

泵后,泵前管内压力水头先上升后下降,泵后管内压力水头先下降后上升,随后因泵后管部分放空,泵后压力水头趋于下降,最终系统压力水头趋于与进水池水位一致。在设计中针对不同工况的模拟确定管道内压力变化幅度,复核管道设计耐压强度及需要固定加强的位置。由图 5(c)可知,事故工况下全线最大压力为 47.332 m,为泵后工作压力;最低压力为  $-0.608 \text{ m}$ ,为泵出水管末端处压力,通过压力包络线图分析管路在事故工况下管道中工作压力、最低水压、最高压力的相互关系,确定管路耐压强度和固定加强及防止倒流的位置,进行优化设计。

水泵水锤及反转特性的分析同时作为深隧泵站振动分析的基础资料,用于振动分析,指导出水竖管固定支架的设计工作。

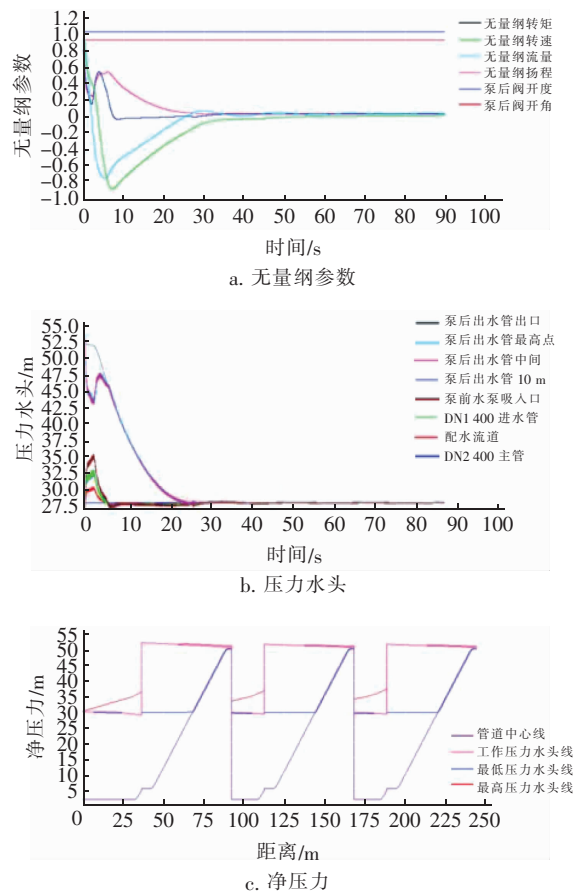


图5 水泵参数变化过程

Fig.5 Change of pump parameters

### 4.4 结构共振分析

深隧泵站设计中采用 ANSYS 软件对其管道、楼层结构进行模态分析,计算出其固有频率和振型,根据受力分析给出结构修改的建议,并进行对比分析

以验证改进措施的效果。在后期泵站运行中也可结合振动分析进行振动监测,通过监测、运算和分析振动数据,研判机泵运行的健康状况。

在结构共振分析中将模态分析与水锤分析相结合,通过流固耦合分析水锤波对结构的影响。模态分析根据深隧泵站水锤分析报告中的水锤压力数据,将出水竖管内水体的各部位压力加载到研究管道的内壁面上,再进行瞬态结构分析管道受力以得到每个固定箍各方向合力和管道由于水锤波作用对层板的压力波动,最后把压力变化加载到层板上得出层板的受力形变,以验证深隧泵站结构设计方案和出水竖管固定方案。本工程根据共振分析,对结构应力主要受力点、振幅较大位置处进行重点复核,根据模态分析受力情况调整设计方案,主要通过调整结构配筋、增加斜撑、增设分隔墙、增加板层厚度及优化梁柱设计,改善泵站整体受力情况,使泵站整体受力和抗振动性能保持良好状态。优化前、后泵房整体模态分析见图6、电机层模态分析见图7。

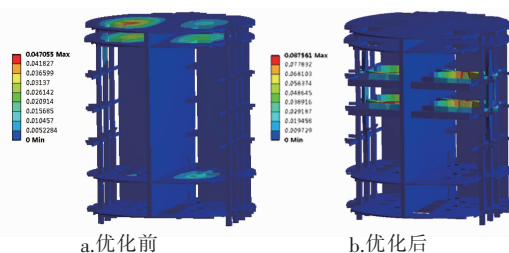


图6 优化前、后泵房整体模态分析

Fig. 6 Modal analysis of the whole DTSP before and after optimization

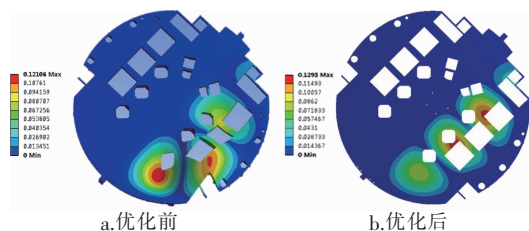


图7 优化前、后泵房电机层模态分析

Fig. 7 Motor layer modal analysis before and after optimization

## 5 结语

北湖深隧泵站是目前国内正在建设中的第一座深层隧道泵站。采用将泵站地下空间进行独立分隔、相互切换运行的空间布局模式,并创新性地运用流道进配水的技术方案。在泵站设计过程中充分应用BIM设计、CFD数值模拟分析、振动分析、水锤分

析、物理模型试验等新技术、新方法解决创新设计中的重(难)点,优化设计方案,可为其他深层隧道的泵站的设计工作提供借鉴。目前,北湖深隧泵站正在建设中,主体结构施工已经完成,即将建成通水。

## 参考文献:

- [1] Drainage Services Department. Design and construction of Hong Kong west drainage tunnel [EB/OL]. [2020-01-26]. <https://www.dsd.gov.hk/others/HKWDT/eng/background.html>.
- [2] 汤舒,吴学伟,孙志民,等. 国外深隧排水系统调度运行方案的启示[J]. 隧道建设,2017,37(4):449-454. TANG Shu, WU Xuewei, SUN Zhimin, et al. Inspirations from management and operation of deep tunnel drainage systems abroad [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(4): 449-454 (in Chinese).
- [3] 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 Zhaoyang, CHE Wu, TANG Lei, 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).
- [4] 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 Long, DAI Xiaohu, TANG Jianguo. Analysis of key technical problems of deep drainage tunnel system [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8): 17-21 (in Chinese).
- [5] 杜立刚,邹惠君,饶世雄,等. 武汉市大东湖核心区污水深隧传输系统工程设计[J]. 中国给水排水,2019,24(35):80-84. DU Ligang, ZOU Huijun, RAO Shixiong, et al. Design of Dadonghu core area wastewater deep tunnel transmission system project in Wuhan [J]. China Water & Wastewater, 2019, 24(35): 80-84 (in Chinese).

作者简介:陈宝玉(1982-),男,内蒙古兴安盟人,硕士,高级工程师,注册环保工程师,主要从事给排水、环境工程研究与设计工作,主持或参与完成的项目多次获得省、市工程设计奖和咨询奖。

E-mail: 877735287@qq.com

收稿日期:2020-03-26

修回日期:2020-04-23

(编辑:孔红春)