

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.10.029

高密度建成区水环境治理 PPP 项目技术优化策略

邓德宇, 朱飞龙, 刘 军, 张诗雄, 陈 俊
(中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 目前全国的黑臭水体治理已进入攻坚战阶段, 高密度建成区合流制溢流污染的根本, 仍是水环境治理领域的顽疾, 也是打好污染防治攻坚战必须要攻克的堡垒。以武汉市黄孝河、机场河水环境综合治理二期 PPP 项目为依托, 从风险管控的层面提出基于耦合模型分析系统目标可达性, 优化集成技术措施, 降低考核风险; 从 PPP 项目物有所值的层面探索核心设备的选型论证, 工艺设计方案的优化, 以期实现政府方、社会资本方的双赢。高密度建成区水环境治理 PPP 项目技术优化策略, 可为我国水环境治理 PPP 项目的建设单位、设计单位、运维单位提供借鉴。

关键词: PPP 项目; 技术优化; 水环境综合治理; 风险管控

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)10-0160-04

Technology Optimization Strategy of PPP Project for Water Environment Comprehensive Improvement in High-density Built-up Area

DENG De-yu, ZHU Fei-long, LIU Jun, ZHANG Shi-xiong, CHEN Jun
(China Construction Third Engineering Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan
430000, China)

Abstract: At present, the treatment of black and odorous water body in China has entered the critical stage. The fundamental control of overflow pollution in high-density built-up areas is still an intractable problem of water environment improvement, and also a fortress that must be conquered in order to fight against pollution. Based on the second phase comprehensive water environment improvement PPP project of Huangxiao River and Jichang River in Wuhan City, this paper analyzes the system target accessibility based on the coupling model from risk management and control aspect, optimize the integrated technical measures, and reduce the assessment risk. It also explores the selection demonstration of the core equipment and the optimization of the process design scheme from the value for money perspective of the PPP project, so as to realize the win-win situation of both government and social capital. The technology optimization strategy of PPP project in high-density built-up area can provide reference for the construction, design, operation and maintenance units of PPP project in China.

Key words: PPP project; technology optimization; water environment comprehensive improvement; risk control

1 项目概况

全国范围内的黑臭水体治理目前已进入攻坚战, 前期具备控源截污、活水补给等实施条件的河道已大部分完成治理任务。现阶段治理的工作重点是

根治超大城市高密度建成区行洪河道的雨季返黑顽疾(合流制溢流污染), 而武汉市黄孝河、机场河水环境综合治理(建设中)是典型代表。该项目的主要特点: ①地处城市高密度建成区, 源头分流改造难

度大;②上游缺乏清水补给来源,河道水环境容量丧失;③雨季承担区域行洪功能,水安全水环境难以兼顾;④周边规划及建设限制多,治理方案要求高。

为改善黄孝河、机场河水体环境,保障高标准、多目标、大尺度的运维管理考核目标的实现,该项目基于“2 河、2 厂、2 站、3 池、6 闸、1 涵 1 管 1 沉泥区”(本项目共 21 个子项)的基本框架,通过大数据和模型手段实施污染总量分析,优化工程措施和非工程措施的集成应用,协助政府构建流域综合管理体系,实现科学管理、长效久治。

项目模型研究技术路线见图 1。

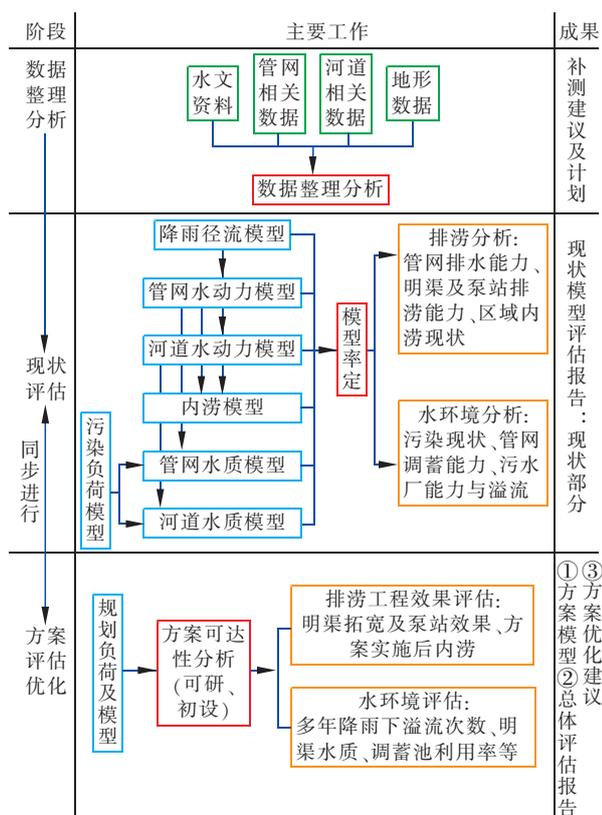


图 1 项目模型研究技术路线

Fig. 1 Technical route of project model research

2 基于风险管控的技术优化

水环境综合治理 PPP 项目具有流域边界不确定、社会影响广泛、治理模式特殊和全生命周期联动等特点,而设计作为实现治理效果、建造目标和投资收益的核心手段,重要性不言而喻。基于设计风险防控的技术优化,也成为项目风险防控的核心。

从系统目标可达及空间单元目标可达两方面进行分析论证,通过预警运维风险,反馈顶层设计方案的优化。

2.1 项目系统目标可达性分析

该项目边界条件复杂,任一边界条件不达标,都可能导致河道水质出现波动,水文-环境模拟作为重要手段,可为海绵城市规划建设、流域规划管理提供决策依据和有力支撑^[1]。为确保高标准、多目标、大尺度的运营维护管理考核目标的实现,特别是水质目标的可持续性,通过构建耦合数学模型进行定量化分析,模拟流域水动力、水环境状况,同时评估在各种工程措施和治理方案下河道污染负荷、流场、浓度场的变化。以模型为支撑,对设计进行校核,对运维调度方案进行指导,并科学论证项目水质目标可达性,确保投资风险可控。

2.2 空间单元设计论证

针对重大子项(净化水厂、CSO 调蓄池、明渠拓宽等)设计方案,依托数学模型分析,开展设计参数解读,充分论证空间单元目标可达性,优化各子项资源配置。

① 开展 21 个子项工程的设计参数解读,设计方案比选,邀请行业专家组织论证,深入探讨各空间单元设计的科学性、可行性、经济性。

② 利用项目区域内河道水系分布、河道断面等资料来详细描述黄孝河河道地形,结合降雨径流模型与管网模型,利用实测水文资料对糙率等河道水动力参数进行率定,精细地考虑河道形态、气象、水工构造物的调度等对河道动态流场的影响。通过模型预测多工况下黄孝河明渠的防洪排涝能力,优化断面型式,降低设计风险。

③ 在总投资受控的情况下,通过优化各子项投资结构,减少不影响功能目标实现的景观工程投资,增加核心设备的投资,确保空间单元功能性目标可达。

3 基于物有所值的技术优化

物有所值是采用 PPP 模式的根本原因,主要通过以下 4 个方面来达到物有所值的目标:

- ① 强调运营服务,而非基础设施提供;
- ② 强调长期成本,将长期运营成本和新建改建成本整合;
- ③ 强调激励创新,提供更多机会和激励措施,让社会资本提供创新解决方案,而非将其禁锢在传统模式之下;
- ④ 强调风险转移,将其中主要运营风险转移给社会资本方,促使其以较低成本运营。

按照合同约定,经营性子项付费规则:污水处理服务费=实际处理水量×污水处理服务基本单价(元),基本单价固定的前提下,通过对全生命周期的投资成本进行对比,确保使用功能目标可控,投资效益可观,是本项目基于物有所值的技术优化策略。

3.1 核心设备的论证对比

核心设备在水环境综合治理项目全生命周期中起到举足轻重的作用,本项目地下净化水厂设备购置费占子项总投资的 29.3%,而核心设备的选型,

与投资成本、运维期的水质达标、稳定运行密切相关。以净化水厂 MBR 膜论证比选为例,通过对国产膜与进口膜进行全方位对比(见表 1)可知,进口膜虽然一次性投资成本较高,但使用寿命、运行效果、运维成本等都要更佳。

作为 PPP 项目,核心设备选型应充分考虑稳定达标、工艺匹配、一次性投资、占地、运维、全寿命周期成本等因素,通过顶层设计的优化,得出投资效益与环境效益的最优解。

表 1 MBR 膜的对比

Tab.1 Comparison of MBR membrane

项目	膜材料	主要参数	膜通量	廊道	清洗方式	抗污染能力	经济指标	15 年生命周期总成本/万元
国产膜	加强支撑型 PVDF (湿法带衬,膜丝强度 200 N)	膜箱高 3.3 m; 单膜箱面积 1 610 m ² ; 公称膜孔径 0.2 μm; 最大跨膜压差 0.035 MPa; 膜箱 154 个	平均膜通量 16.8 L/(m ² ·h); 临界膜通量低(高通量运行时跨膜压差高); 持续膜通量低,典型值为 16 ~ 20 L/(m ² ·h)	净宽:6.4 m(双排); 数量:7 道; 布置:双层,明装	需要离线清洗,膜组件/膜箱需从膜池取出;需要次氯酸钠、氢氧化钠和盐酸等药剂;清洗废液需要中和或还原处理排放	单根膜组件布丝不均匀、抗污堵能力较差;膜组件的松弛度无法调整,将缩短膜的实际使用寿命	典型膜寿命:5 年; 典型能耗:0.1 ~ 0.2 kW·h/m ³ ; 膜清洗和维护成本:120.85 万元/a; 膜系统运行电费:591.01 万元/a; 膜更换成本:506.67 万元/a; 一次性投资:3 800 万元	22 077.9
进口膜	加强支撑型 PVDF (湿法带衬,膜丝强度 500 N)	膜箱高 2.6 m; 单膜箱面积 1 780 m ² ; 公称膜孔径 0.04 μm; 最大跨膜压差 0.05 MPa; 膜箱 126 个	平均膜通量 18.6 L/(m ² ·h); 临界膜通量高(高通量运行时跨膜压差低); 持续膜通量高且稳定,典型值为 20 ~ 30 L/(m ² ·h)	净宽:6.4 m(双排); 数量:7 道; 布置:双层,明装	在线原位清洗,只需要次氯酸钠和柠檬酸;清洗废液只需回流至前端生化池,不需要中和或还原处理排放	单根膜组件布丝较均匀、装填密度适中,过流通道宽,纤维束可自由摆动(可调整膜组件松弛度),不易污堵富集,采用曝气避免膜擦洗死角,总体抗污堵能力较强	典型膜寿命:10 年; 典型能耗:0.06 ~ 0.15 kW·h/m ³ ; 膜清洗和维护成本:29.95 万元/a; 膜系统运行电费:361.17 万元/a; 膜更换成本:503.33 万元/a; 一次性投资:7 550 万元	20 966.8
备注		膜箱数量越少,产水越均匀	①临界膜通量是确定 MBR 可能达到的最大膜通量,所有 MBR 均在临界膜通量以下运行; ②设计膜通量一般按 13 L/(m ² ·h)考虑				①国产膜按运营期内更换 2 次计算,进口膜按运营期内更换 1 次计算; ②进口膜无需采用离线清洗; ③膜寿命:在任何工况条件下包括冬季低温和化学清洗时,保证水量和水质是前提	

3.2 优化工艺方案

① 取消提升泵房,增加进水结合井

本项目地下净化水厂在批复可研中为满足后续处理工艺的高程要求,对来水进行提升,通过提升泵站进水。

通过验证,厂外污水来自合流制暗涵,由于净化水厂采用全地下建设,黄孝河钢坝门前水位在 16.0

m 以上时,污水可利用重力自流进入地下水处理构筑物,无需设进水提升泵房。为保障净化水厂的运行安全,在合流制暗涵与净化水厂之间设置一座进水结合井,通过进水管将明渠、进水结合井、净化水厂连接起来。

经本次设计优化,对于政府部门或投资方来说,增加进水结合井可保障净化水厂运行安全,避免因

意外事故导致地下厂被淹,对于社会资本方来说,取消提升泵房每年可减少运行费用约 79.26 万元,优化方案前后运行费用变化主要为水泵运行电费,新增闸门因所需电费极少,可忽略不计;水泵每年耗电为 $(37 \text{ kW} + 15 \text{ kW}) \times 2 \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ d} = 91.1 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,电价按 0.87 元/(kW·h)计算,属于双赢的策划。

② 增加精准除磷设备

对污水处理厂来说,如何在确保出水水质达标前提下实现能耗和药耗的降低是一个挑战。传统的

化学加药控制有两种方式:一是手动调节,不会根据处理水量和水质的改变自动调节加药量;二是流量比例控制,仅根据处理水量自动调节加药量。本项目设计方案引进精准处理系统(P-RTC),该系统可实现前馈及反馈:a. 根据水量和加药前的正磷酸盐浓度调节加药量;b. 根据处理水量和加药后的正磷酸盐浓度调节加药量。通过信息的及时反馈调整加药量,可确保水质目标可达,并进一步降低药耗。多个同类型项目的精准除磷设备节药效果见表 2,引入 P-RTC 系统后,节药率可达 13%~28%。

表 2 精准除磷设备节药效果对比

Tab. 2 Comparison of chemical saving effect of precise phosphorus removal equipment

项 目	工 艺	除磷方式	投药量(优化前)/ (t·d ⁻¹)	投药量(优化后)/ (t·d ⁻¹)	节药 率/%
北京小红门污水处理厂	A/A/O	同步除磷	12.5	9	28
苏州相城高铁新城污水处理厂 10×10 ⁴ m ³ /d 新建项目	高效沉淀池	前置除磷	3	2.6	13
珠海前山污水厂	A/A/O	同步除磷	9	6.6	26

注: 以上数据来自各污水厂实测。

以 20% 的节药率计算,运维期每年可节省药费百万元,在进一步保障出水水质的同时,也能实现社会资本的投资目标。

此外,生物池后接 MBR,精确的药剂投加,可避免絮凝团堵塞 MBR 膜,降低膜组件更换频次。

③ 调蓄池分隔处理

以 CSO 调蓄池调蓄能力为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、调蓄池面积约 $4 \times 10^4 \text{ m}^2$ 计算,充分考虑降雨径流的不确定性因素,将调蓄池分为 5 格(1#~5#),并制订如下运营规则:在降雨量达到调蓄池启动的条件后,开启调蓄池闸门,在小雨时混合污水优先进入 1#;中雨时,1#蓄满混合污水后分别进入 2#、3#,大雨时,混合污水蓄满 1#、2#、3#后,分别进入 4#、5#。武汉每年均有二三十场中小雨,通过优化调蓄池内部结构,减少雨后调蓄池冲洗面积,亦可降低电耗及冲洗水量,进而降低运维成本。

4 结语

高密度建成区水环境综合治理项目边界复杂,影响因素众多,作为基于合作多方相互信任、风险共担的原则建立的 PPP 项目公司,必须在项目建设前

期通过有效的技术管理,打破信息壁垒,确保设计、建设、运营等协同联动。本项目基于风险管控及物有所值两个层面,开展了系列的技术优化措施,以期在实现使用功能总体目标可控的前提下,得出社会效益、经济效益、环境效益多方共赢的最优解。

参考文献:

- [1] 张蓓,李家科,李亚娇. 不同开发模式下城市雨洪及污染模拟研究进展[J]. 环境科学与技术,2017,40(8): 87-95.
ZHANG Bei, LI Jiako, LI Yajiao. Study on urban storm water and non-point source simulation under different development patterns [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(8): 87-95 (in Chinese).

作者简介:邓德宇(1992-),男,广西岑溪人,本科,工程师,从事水环境综合治理 PPP 项目设计管理工作。

E-mail: 964573656@qq.com

收稿日期:2019-11-28

修回日期:2020-02-24

(编辑:衣春敏)