

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.18.011

数字化模型在老城区排水管网系统改造中的应用

王新夏, 卢兴, 李浩, 王一

(湖南大学设计研究院有限公司, 湖南长沙 410082)

摘要: 以长沙市河西大学城周边的罗家湖泵站排水系统为例,介绍老城区排水管网进行系统性改造的设计方法。设计中基于HY-SWMM平台,构建排水管网的水力模型,通过管网的水力模拟,优化排水管道的设计,校核内涝时调蓄水体的水深,并配合系统的雨污分流工作,保证排水管网满足排水防涝和雨污分流的功能要求。同时,通过CCTV和QV等管网检测技术手段,针对现状管网的结构性缺陷、功能性缺陷等情况进行详细摸底和评估,设计合理的管网结构性修复方案。通过管道排水功能性和结构安全性两方面的搭建,系统性地完成了排水管网的雨污分流、雨水高低分排改造、内涝防治和管网修复等工作。目前该项目主干管已投入运行,效果良好。

关键词: 排水管网; 管网改造; 管网检测; 水力模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)18-0058-06

Application of Digital Model in the Reconstruction of Old Urban District Drainage Network System

WANG Xin-xia, LU Xing, LI Hao, WANG Yi

(Hunan University Design and Research Institute Co. Ltd., Changsha 410082, China)

Abstract: The design method for systematic reconstruction of the drainage network in Luoiahu pumping station drainage system around Hexi University Town in Changsha City was introduced. In the design, a hydraulic model of the drainage network was constructed based on HY-SWMM platform. The project ensured that the drainage network met the functional requirements of drainage and water-logging prevention and the diversion of stormwater and sewage through hydraulic simulation of the pipe network, optimization of the drainage pipe design, verification of the water depth of the water body in water-logging areas, cooperation with the diversion of stormwater and sewage in the system. In addition, structural and functional defects of the current pipe network were explored and evaluated in detail, and a reasonable pipe network structural repair scheme was designed through CCTV, QV and other pipe network detection techniques. The stormwater and sewage diversion of the drainage network, partition drainage of stormwater in high and low elevation districts, water-logging prevention and control, pipe network repair and other works were systematically completed through the drainage function and structural safety construction of the pipeline. At present, the main pipeline of this project has been put into operation and shown a good performance.

Key words: drainage network; pipe network reconstruction; pipe network inspection; hydraulic simulation

由于建设年代较早,城市的老城区地下管网基本上采用雨污合流制,随着环保要求不断加强,很

多合流制管网都在末端进行了截流,保证晴天管网内的污水不直排进入水体,但这种截流式合流制无法彻底解决在雨季时雨污混合污水对城市水体的溢流污染,因此,有必要针对老城区排水系统,以排水流域为单位,进行系统、彻底的管网改造。

笔者结合长沙市岳麓区河西大学城周边的罗家湖泵站排水系统,探讨排水管网的系统性改造。

1 项目背景

罗家湖泵站位于长沙市岳麓山以东,湘江西岸,其管网的汇水面积约 1.2 km^2 ,范围内以重点高校、高中和居民小区等地块为主。片区内有1处景观水体——桃子湖,可作为暴雨时的雨水调蓄水体,近几年常发生过度调蓄事件,淹没周边游步道,且退水时间长。本改造片区为老城区,基本建成于20世纪80年代以前,排水系统为合流制排水。片区的主排水通道是学堂坡路下的 $B\times H=1.8\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 的合流暗涵,该涵在雨季时排水不畅,常有雨污水倒灌溢流至桃子湖的情况发生,溢流污染导致桃子湖的水质逐渐恶化。为改善片区内的水环境状况,减轻暴雨时桃子湖调蓄的压力,该项目针对罗家湖泵站汇水范围内的排水管网,进行全面、系统性的改造。

2 设计思路

该项目需要解决片区内涝和雨污合流的问题。设计思路是在片区内现状排水管网水力复核和软件模拟分析的基础上,根据雨污合流管线的普查资料,提出片区内涝防治、雨污分流改造的具体措施,结合管网检测成果,对管网的雨、污水管道排水功能和结构安全两方面进行综合研判,确定管网的改造方案。

在内涝治理方面,本项目针对现状合流制排水管网和末端的罗家湖雨水泵站,构建管网水力计算模型,复核现状泵站和排水管网在设计暴雨重现期下的排水能力,若实际过水能力与设计需要的过水能力相差过大,则针对现状管道进行改造。在雨污分流改造方面,通过从建筑立管层面至市政管道层面的详细摸排,充分掌握现状混接、错接点的情况,从建筑的合流立管开始,对整个排水管网进行全面、系统的雨污分流改造,保证污水全部接入污水管网,进入污水处理厂进行处理。另外,根据管网检测的相关成果,针对现状管道中的结构性缺陷和

功能性缺陷,进行管道重建或者非开挖修复。从以上几方面着手,实现片区的内涝治理和管网改造的目标。

排水管道改造的设计流程见图1。

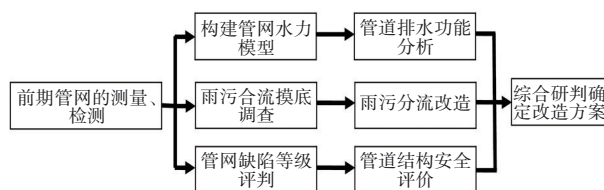


图1 排水管道改造的设计流程

Fig.1 Flow chart of drainage network reconstruction design

3 水力模拟分析

通过水力模型的构建,分析现状管道的排水能力,暴露现状管网系统存在的问题,为工程改造方案提供坚实的依据。

3.1 模型介绍

按照《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)要求,当汇水面积大于 2 km^2 时,需采用数学模型法确定雨水管道的设计流量。说明通过模型分析比传统经验公式的计算结果能更贴合实际,更有利于指导设计工作。

目前排水管道水力模型大部分是基于SWMM进行计算, HY-SWMM V5.0是类似SWMM的平台,可在CAD内直接进行暴雨时管道水力模拟和城市内涝分析,近年来广泛应用于排水工程设计。

3.2 模型参数取值

在HY-SWMM模型中,地表的渗入模型采用Horton模型,最大渗入速率为 18 mm/h ,最小渗入速率为 0.254 mm/h ,渗入速率的衰减系数为 4 h^{-1} 。

长沙地区暴雨强度公式:

$$q = \frac{1392.1(1 + 0.55 \lg P)}{(t + 12.548)^{0.5452}} \quad (1)$$

相关参数取值如下:设计重现期 $P=3\text{ a}$,地面集水时间 $t_1=5\text{ min}$,径流系数 $\Psi=0.68$ 。根据规范,内涝模拟时暴雨的设计降雨历时可取 2 h 。

设计降雨雨型参照芝加哥雨型,根据相关研究^[1-2],雨峰系数 γ 取值越大,则管网径流峰值流量越大,管网设计越安全。因此,针对重现期较大的,可选取较大的雨峰系数。 $P=1、2\text{ a}$ 时,雨峰系数的取值为 $\gamma=0.4$; $P=3、5\text{ a}$ 时, $\gamma=0.45$; $P=10\text{ a}$ 时, $\gamma=0.5$ 。设计降雨雨型如图2所示。

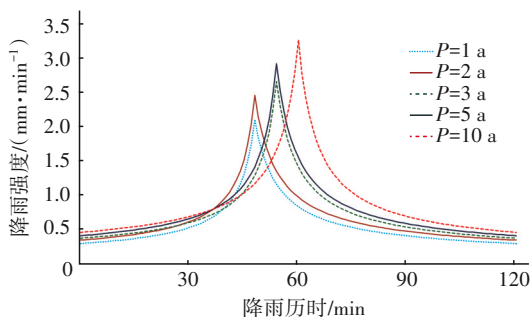


图2 设计降雨雨型

Fig.2 Design stormwater type

根据以上暴雨设计雨型,模拟2 h降雨历时下片区内部管网的过水能力和各重现期下桃子湖的溢流情况。

3.3 模型计算结果

在HY-SWMM模型中,针对暴雨重现期 $P=1、3、5、10$ a分别进行管道过流能力计算,得出流域内现状主干管道的过流能力能满足的最大设计暴雨等级。现状管道的模拟成果见图3。

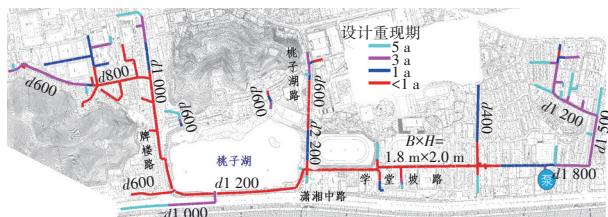


图3 现状管道的模拟成果

Fig.3 Simulation results of current pipeline

从模拟结果可以看到,学堂坡路的现状排水主通道 $B\times H=1.8\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 箱涵和大部分主干管道,都不满足1年一遇重现期的排水能力要求,绝大部分支管也不满足3年一遇的排水能力要求,且现状末端罗家湖泵站的抽排流量 $7.3\text{ m}^3/\text{s}$ 严重偏小,成为片区排水的另一瓶颈。造成此结果的缘由可能是以下两个方面:一是20世纪80年代设计的排水管道,设计标准是老暴雨强度公式,当时重现期一般取 0.5 a 或 1 a ,按照现在的暴雨强度公式和排水规范去复核,基本上现状管都不满足1年一遇的排水能力要求;二是本片区建成年代早,那时的城市基础建设并不强调地下排水管道的设计和建设标准,人们只追求下水(包括雨、污水)有排放通道,基本上都是雨污水合流排放,对水环境影响很大。因此,本片区排水管道明显存在雨污合流和雨水管道管径偏小的问题,导致桃子湖经常被溢流污染,片

区内偶尔发生内涝。

解决以上问题的主要措施是扩大排水管径和下游泵站规模,并进行全流域的雨污分流。经过传统的水力计算得出设计管径,并将泵站的设计规模提高到 $13.5\text{ m}^3/\text{s}$ (经桃子湖调蓄),在HY-SWMM中进行模拟分析,得到流域内主干管道在3年一遇重现期下的管道充满度,设计管径的雨水管道的充满度(h/D)基本为 $0.8\sim 1$,可以看出,经过传统雨水管道水力计算得出的管径比模拟所需要的管径略微偏大,更为保守。究其原因,主要是传统的雨水管道水力计算方法基本采用的是面积叠加法^[3],按管道满流进行设计,但管道管径取值不连续,常规设计中为保证排水能力,一般偏大取整,因此模拟后管道的实际充满度都小于1;另外,HY-SWMM模拟采用的是流量叠加法,根据徐得潜等^[4]的研究结果,在汇水面积随时间不均匀增加时,管道的最大流量出现在有些汇水面积仅部分汇流时,会出现流量叠加法的计算结果小于面积叠加法的情况。基于以上两方面的解释,综合本次管道充满度的模拟结果(见图4),说明小于 2 km^2 的片区采用经验公式法计算得到的结果和HY-SWMM模拟的结果,误差不大。而大于 2 km^2 的片区,经验公式法可能会造成计算的管径更加偏大,此时就需要采用流量叠加法,通过计算机模拟才能更符合实际。

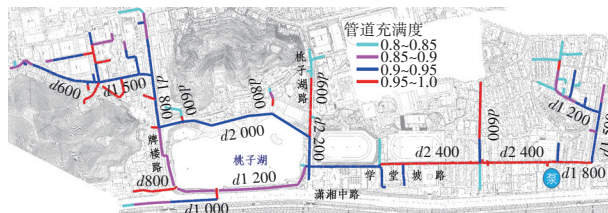


图4 设计管道的模拟成果展示

Fig.4 Simulation results display of the design pipeline

3.4 桃子湖调蓄模拟分析

桃子湖是片区内重要的景观水体,但常出现过度调蓄、景观栈道淹没、降雨后水位居高不下的情况,本项目的另一重要目的是合理发挥桃子湖的调蓄功能,减轻调蓄容积、加快退水时间。为分析桃子湖的调蓄能力,分别模拟桃子湖的现状排水管网在3年一遇和改造后排水管网3、10、20、50、100年一遇的桃子湖调蓄水深曲线,以评价改造后桃子湖的调蓄需求和退水时间是否满足要求,模拟结果如图5所示。

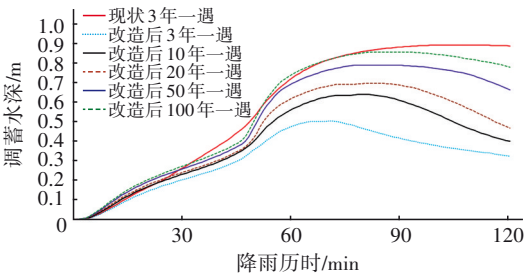


图 5 桃子湖在不同工况下的水深变化

Fig.5 Water depth variation of Taozi Lake under different working condition

从模拟结果可以看出,现状排水管网和雨水泵站(规模 $7.3\text{ m}^3/\text{s}$)在3年一遇暴雨的情况下,桃子湖在约100 min时达到最大调蓄水深0.88 m,且直至120 min设计降雨结束,桃子湖水深未出现下降。经过系统性的排水改造后,对排水管网主通道的管径进行放大,下游泵站扩容至 $13.5\text{ m}^3/\text{s}$,桃子湖在3年一遇的暴雨下,在约65 min时达到最大调蓄水深0.50 m,之后调蓄水深不断下降,至120 min设计降雨结束时桃子湖调蓄水深降至0.33 m;管网改造后,在《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)要求的特大城市内涝防治重现期的标准下,桃子湖在约90 min时达到最大调蓄水深0.85 m,之后调蓄水深不断下降,至120 min设计降雨结束时桃子湖调蓄水深降至0.77 m。从以上结果可以看出,原来排水系统在应对3年一遇的降雨时,过分依赖桃子湖的调蓄能力,3年一遇在2 h降雨历时下,桃子湖的水位居高不下,在应对城市内涝问题上,难以提供更多的调蓄、保障空间。经排水管网系统性改造和雨水泵站改造($13.5\text{ m}^3/\text{s}$)后,桃子湖的调蓄功能可以正常发挥,并且在降雨结束后,桃子湖水位可以迅速回到初始值,这对保护桃子湖的水环境也有一定的帮助。说明经过系统性的改造提升后,罗家湖泵站的排水片区,在桃子湖调蓄的条件下,片区已经可以有效应对100年一遇暴雨。

4 管网检测情况分析

4.1 排水管道检测方法

HY-SWMM水力模拟是针对管网排水功能的评价,为了综合评判现状管网的各种缺陷是否会影响其使用功能,需要对现状管网进行管道检测。工程中常用的管道检测方法有管道闭路电视检测系统(CCTV)、潜望镜(QV)和透地雷达(GRP)^[5]。本次设计过程中,主要采用CCTV和QV相结合的检

测手段。

4.2 片区排水管道检测结果

经调查分析,共检测管道长度27.55 km,发现缺陷1 066处,其中结构性缺陷445处、功能性缺陷621处。结构性缺陷中以错口(186处)为主,占40.88%;功能性缺陷中以障碍物(340处)为主,占54.75%,详细的缺陷统计情况见表1。

表 1 改造片区内管道缺陷统计

Tab.1 Statistics of pipeline defects in the transformation area 处

| 缺陷名称 | | 1级 (轻微) | 2级 (中等) | 3级 (严重) | 4级 (重大) | 小计 |
|-----------|--------|------------|------------|------------|------------|-------|
| 结构性 缺陷 | 支管暗接 | 5 | 0 | 1 | | 6 |
| | 变形 | 5 | 8 | 1 | 2 | 16 |
| | 错口 | 83 | 73 | 21 | 9 | 186 |
| | 异物穿入 | 12 | 8 | 14 | | 34 |
| | 腐蚀 | 15 | 35 | 7 | | 57 |
| | 破裂 | 11 | 20 | 25 | 7 | 63 |
| | 起伏 | 0 | 1 | 0 | 3 | 4 |
| | 渗漏 | 15 | 3 | 3 | 1 | 22 |
| | 脱节 | 1 | 5 | 4 | 7 | 17 |
| 功能性 缺陷 | 接口材料脱落 | 24 | 16 | | | 40 |
| | 沉积 | 118 | 44 | 29 | 51 | 242 |
| | 残墙、坝根 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| | 浮渣 | 0 | 0 | 1 | | 1 |
| | 结垢 | 21 | 5 | 1 | 0 | 27 |
| | 树根 | 2 | 2 | 0 | 4 | 8 |
| 障碍物 | | 195 | 49 | 36 | 60 | 340 |
| 合计 | | 507 | 269 | 144 | 146 | 1 066 |

4.3 排水管道检测结果分析处置

针对上述管道缺陷,本工程采用如下排水管道病害修复方法:

① 对管段中存在的2级及以上沉积、障碍物缺陷等功能性缺陷,进行清除处理。

② 对管段中存在的3级及以上的破裂(轻微)、错口、脱节等其他结构性缺陷采用裂缝嵌补、局部树脂固化、胀管法、不锈钢双胀环等非开挖修复技术处理。

③ 对部分缺陷较严重的管段,采用开挖修复的方式进行处理。

其中学堂坡路 $B\times H=1.8\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 箱涵,经检测,为砖砌拱涵,且老化、破损严重,局部拱顶存在塌陷可能。因学堂坡路是片区内主要通道之一,砖砌拱涵的结构缺陷可能导致路面沉降甚至坍塌,造

成安全事故,因此从管道检测结果情况分析,亟需对学堂坡路 $B\times H=1.8\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 箱涵进行加固或改建。

5 改造方案

经管道水力模拟分析和现状管道的检测普查,综合分析明确了片区排水管道系统改造的主要内容,包括雨水管网高低分排、雨水泵站扩容、提升雨水管道排水能力、雨污分流改造、排水管道清淤、排水管道病害修复等。

① 雨水管网高低分排

改造片区位于湘江边,泵站汇水范围内大部分地区地面标高低于湘江洪水位,该区域的雨水排水属于低水低排的范围,低区雨水需经泵站排涝。但是改造片区外围有岳麓山、天马山和凤凰山等山体,属于雨水排水高区,高区雨水可直接排入湘江,不接入雨水泵站。但实际上,片区内部分现状高排管道混入了低区雨水管,存在雨水高低区混排现象,增加了低区雨水泵站的排涝压力。在片区排水管道系统改造时,尤其需要注意针对雨水高低区混排现象进行分析,尽量合理地减小低区雨水管道的汇水面积,以减小低区末端雨水泵站的建设规模和排涝压力。

② 雨水泵站扩容

罗家湖雨水泵站现状规模为 $7.3\text{ m}^3/\text{s}$,根据最新的排水设计标准的计算和HY-SWMM模拟分析成果,在雨水高低分排的基础上,需将低区雨水泵站规模增加至 $13.5\text{ m}^3/\text{s}$,才可满足3年一遇的设计暴雨排水要求。本项目采取原址扩建该雨水泵站的措施,一次性完成末端泵站排涝设备的能力提升,为片区暴雨产生的雨水管道径流提供充足的排除能力。

③ 提升雨水管道排水能力

经过计算和模拟分析,片区大量雨水管管径偏小,不满足现行规范的排水能力要求。需要有针对性地改建或者重建管径偏小的雨水管道,尤其是片区学堂坡路原有的 $B\times H=1.8\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ 箱涵,过水能力严重偏小,且存在严重的结构性缺陷,需改建。雨水管道的重建改造,结合末端泵站扩容,共同保证了片区内雨水排水安全,缓解城市内涝风险,弱化桃子湖的调蓄功能。

④ 雨污分流改造

片区内部管网建设不完善,目前基本为合流制排水。在片区排水管道系统改造过程中,需要针对雨污合流的情况重点查明,补齐缺失的污水管道,完成片区内部污水的应接尽接,保证污水不接入雨水管,从而从根本上保证污水全部进入污水处理厂进行处理后排放,不从雨水管道溢流进入水体,改善片区的水体环境。

⑤ 排水管道清淤

排水管道经过多年运行,常存在多处管道的淤积。主要原因可能是管道内流量小,坡度小,可沉积物较多,以及片区开发建设排泥水多等。管道淤积会明显影响管道的通水能力,甚至导致管道堵塞。可通过人工清淤或者采用机动绞车、高压射水车、真空吸泥车、淤泥抓斗车等机械设备^[6]进行清淤,以恢复排水管道的使用功能。

⑥ 排水管道病害修复

针对查明的现状管道结构性缺陷,通过非开挖修复或者开挖重建的方式,进行维护处理。

6 运行结果及设计体会

目前本项目已经按照该设计方案进行施工,排水主干管已投入运行,效果良好。

在老城区排水管道系统改造项目的设计过程中,设计体会如下:

① 前期工作充分

老城区的地下排水管网错综复杂,连接关系十分混乱,应在前期的测量改造中,详实准确地进行管线测量和检测,查明管道尺寸、结构性缺陷等。另外设计之初要多方走访,调查本片区要突出解决的问题,以融入设计文件。充分的前期调查是准确进行排水管道系统改造方案设计的前提和基础。

② 运用先进技术手段分析

在设计过程中,应通过计算模型对现状、设计的管道进行模拟,分析管网动态运行情况,提高计算分析的准确性,并能在管道过流能力、内涝分析等方面展示计算成果。

③ 设计方案比选论证

通过HY-SWMM等模型,对现状管道计算模拟分析后,可充分暴露现状管道存在的问题和瓶颈,找出问题症结所在,在设计阶段通过管径放大、泵站规模扩容、调蓄水体水深校核的手段,提出多套不同改造参数组合的解决方案,并根据经济最优的

原则,推荐一个最佳方案,供建设方和相关部门决策。

④ 建设方决策能力

在对现状和改造方案进行充分论证后,常有“上、中、下”等多套可供选择的设计方案,不同方案的排水管网改造效果不一。此时建设方的决策是项目推进的关键力量,常会影响方案走向。设计方应实事求是、全方位评判各方案的优缺点,以供建设方选择和决策。

⑤ 现场条件

老城区内道路一般比较狭窄,可供施工的场地狭小,现场人、车流量很大,实施排水管道改造时,需要综合对比顶管、开挖等施工方式的影响和工程造价,结合城市各管理部门的意见,采取可实施性强的管道施工方案。另外,在老城区中实施项目,常会牵扯到居民的诸多利益,甚至会出现居民因自身利益阻工的情况。为尽可能使居民满意,应在前期测量阶段,详细摸排现场的绿化、健身设施等,在设计阶段尽量规避现状设施,无法避免必须破坏的,需提出解决方案,使居民配合项目的实施。

7 结语

结合长沙市河西大学城周边的罗家湖泵站排水系统改造工程,介绍老城区排水管网进行系统性改造的设计方法。设计中基于HY-SWMM平台,构建排水管网的水力模型,通过管网的水力模拟,优化排水管道的设计,保证排水管网满足排水防涝和雨污分流的功能要求。同时,通过CCTV和QV等管网检测技术手段,设计合理的管网结构性修复方案。

参考文献:

- [1] 李文涛,隋军,刘成林,等. 设计降雨雨峰系数对排水管网设计流量的影响分析[J]. 净水技术, 2015(5): 100-103, 111.
- LI Wentao, SUI Jun, LIU Chenglin, *et al.* Analysis of influence of design rainfall peak coefficient on design flow of drainage pipeline network [J]. Water Purification Technology, 2015 (5): 100-103, 111 (in Chinese).
- [2] 杨悦莹,朱志华,蔡宴朋,等. 城市流域径流峰值对降

雨时空异质性的响应[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 27-33, 66.

YANG Yueying, ZHU Zhihua, CAI Yanpeng, *et al.* Response of peak runoff to temporal and spatial heterogeneity of rainfall in urban watershed [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (6): 27-33, 66 (in Chinese).

- [3] 张智. 排水工程[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.

ZHANG Zhi. Drainage Engineering [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 (in Chinese).

- [4] 徐得潜,王瑞雯. 基于穷举法的雨水管渠设计流量计算方法研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 158-161.

XU Deqian, WANG Ruiwen. Discharge design in storm sewer based on exhaustion method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38 (3): 158-161 (in Chinese).

- [5] 李田,郑瑞东,朱军. 排水管道检测技术的发展现状[J]. 中国给水排水, 2006, 22(12): 11-13.

LI Tian, ZHENG Ruidong, ZHU Jun. Development of sewer inspection and assessment technologies [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22 (12): 11-13 (in Chinese).

- [6] 曹井国,田琪,闻雪,等. 城镇排水管道检测、清淤与非开挖修复标准体系思考[J]. 给水排水, 2020, 46(11): 138-142.

CAO Jingguo, TIAN Qi, WEN Xue, *et al.* Consideration of standard system for inspection, dredging and trenchless rehabilitation of municipal sewer [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(11): 138-142 (in Chinese).

作者简介:王新夏(1966-),男,湖南湘乡人,本科,高级工程师,国家注册公用设备(给水排水)工程师,湖南大学设计研究院市政总工程师兼市政院院长,主要研究方向为给水排水管网及海绵城市建设等,曾获湖南省勘察设计协会二等奖、教育部勘察设计一等奖等省部级以上奖项13项。

E-mail:383484056@qq.com

收稿日期:2022-05-08

修回日期:2022-08-05

(编辑:孔红春)