

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.22.016

微型拦蓄盾在倒虹管冲洗中的设计与应用

徐 瑛¹, 赵方方², 陈 灿³, 蔡峻雯⁴, Haußmann Regina⁵

(1. 无锡市水务集团有限公司, 江苏 无锡 214061; 2. 杜塞尔多夫排水公司, 德国; 3. 北京雨人润科生态技术有限责任公司, 北京 100009; 4. 汨鸿<上海>环保工程设备有限公司, 上海 201815; 5. 亚琛工业大学 环境工程研究所, 德国)

摘 要: 市政污水倒虹管道在实际运行过程中极易产生淤积堵塞等问题, 现有的冲洗方式已越来越无法满足城市对倒虹系统冲洗的需要, 开发实用及更符合时代要求的倒虹冲洗系统已成为管网运营工作的当务之急。依托“十二五”中德水专项示范工程, 通过搜集GIS等基础数据, 在研究区安装新型微型拦蓄盾设备, 布控水位、流速、泥深等传感器, 采用正交实验设计方案, 共进行了12轮冲洗实验。实验中采集了较为完整的数据, 并通过分析得到了最佳倒虹自动冲洗设置参数。通过本次研究为解决倒虹管淤积问题以及管网的科学化、智能化运行管理积累了技术经验。

关键词: 倒虹冲洗; 微型拦蓄盾; 正交实验; 管网运营

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)22-0096-06

Design and Application of HydroGuard Mini in Inverted Siphon Flushing

XU Ying¹, ZHAO Fang-fang², CHEN Can³, CAI Jun-wen⁴, HAUßMANN Regina⁵

(1. Wuxi Water Group Co. Ltd., Wuxi 214061, China; 2. Stadtentwaesserungsbetrieb Duesseldorf, Germany; 3. Beijing Yuren Raineco Technology Co. Ltd., Beijing 100009, China; 4. Guhong <Shanghai> Environmental Engineering Equipment Co. Ltd., Shanghai 201815, China; 5. Institut für Siedlungswasserwirtschaft <ISA> der RWTH Aachen University, Germany)

Abstract: It is easy to have problems such as silting and blockage in the actual operation of inverted siphon that is unable to be cleaned by the existing flushing methods in the municipal sewer system. Thus it is urgent to develop an innovative inverted siphon flushing technology. Based on the Sino-German Water Demonstration Project under the national “12th Five-Year Plan”, this study installed a set of HydroGuard Mini flushing system in the study area, then controlled water level, flow velocity, sludge depth etc. by collecting GIS and other related data of sewer pipe, and carried out 12 rounds of flushing experiments by orthogonal experiment design. Relatively complete data were collected in the experiment, and the optimal setting parameters of the automatic inverted siphon flushing system were obtained through analysis. Through this study, technical experience has been accumulated for solving the silting problem of inverted siphon, and for intelligent operation and management of sewer networks.

Key words: inverted siphon flushing; HydroGuard Mini; orthogonal experiment; operating and management of sewer networks

在城市排水管道的设计建设过程中,经常会遇到与其他管线、构筑物标高或位置冲突,以及穿越河

道、路基等情况。在这种情况下,通常会设计建设倒虹管,在较深的位置埋设管道,绕开障碍物^[1]。但倒

虹复杂的结构在实际运行过程中会造成较大的水力损失,导致水中杂质沉降,进而产生淤积堵塞等问题。管网运营单位必须定期对倒虹管进行疏通清淤以确保排水管道的顺畅运行。

目前,一般管道清淤方法有人工清淤、机械清淤、洪流冲洗、高压冲洗清淤、真空吸污,以及切割、打磨等针对固化沉积物的特种工艺^[2-4];而对倒虹管段,由于其埋设普遍较深,且多位于重要的道路或者交通节点,场地和水力条件差,一般采用人工疏通。作业时普遍依靠疏通车等机械设备,通过高压水流对倒虹管进行冲洗。由于倒虹段断水抽水难度高,疏通工作难度大,整个倒虹管很难被彻底冲洗干净^[5-6]。随着城市建设步伐加快,倒虹系统数量不断增加,这使得针对倒虹管道的疏通维护工作量也不断增大。现有的冲洗方式已经越来越无法满足对倒虹系统清淤需求,因此寻找一种简便有效的倒虹冲洗方法已成当务之急。采取相应的技术手段,首先确保倒虹段不产生淤积,是一个相对于“先堵塞,再抢修”更加科学合理的管网运营方案。同时,实现对倒虹运行状况的实时监控,就能够真正推进管网的智能化管理进程。

应用微型拦蓄盾对排水管网进行自动化污水自重力冲洗在德国已得到深入研究和一定推广^[7],但目前拦蓄盾在我国管网的应用主要局限在平管段,其在倒虹管段冲洗的应用尚处于实验期。

本研究整合微型拦蓄盾对倒虹管进行自动冲洗,以及对管段运行参数的实时监控,以期在确定设备最佳运行设置的同时,推进管网的智能化、自动化运营。

1 微型拦蓄盾冲洗原理

拦蓄盾的运行原理如图1所示。

通过拦蓄盾的拦蓄作用,将管内水蓄积至一定水位高度,然后通过极快地开启拦蓄盾,使拦蓄水快速冲入下游管道,利用拦蓄水势能对下游管道进行冲洗。之前的研究表明,拦蓄盾的冲洗效果主要取决于管道的坡度、长度、水力损失点以及下游管网中水位高度的情况^[7]。拦蓄盾的动作通过PLC中控系统进行实时控制,一方面可以充分激活管道的潜在蓄水容积,另一方面可以实现整个排水流域间的管网调度。

一般情况下,微型拦蓄盾有效冲洗管长为1~2

km,理想状态下可达6 km。相较于普通排水管道,倒虹吸管道在利用拦蓄盾进行冲洗时,所需的冲洗水量更大,且需保证充足的上下游水位差^[8-10]。同时,拦蓄盾不仅是一种管道沉积物自冲洗装置,还是一种可应用于整个管网管理的设施,为整个排水流域的排水调度提供了一种新思路。

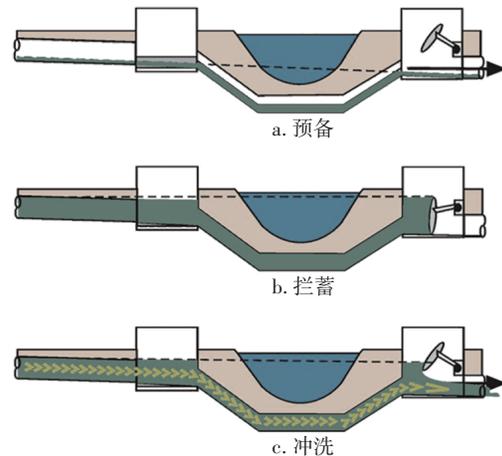


图1 微型拦蓄盾进行倒虹吸管道冲洗原理

Fig.1 Schematic diagram of the principle of HydroGuard Mini inverted siphon flushing system

2 工程案例

2.1 工程概况

无锡地处江南地区,河网纵横。随着城市市政基础设施建设及污水控源截污工程的全覆盖,全市排水管网建设发展迅速。

本项目研究区位于太湖北岸,具体位置如图2所示。

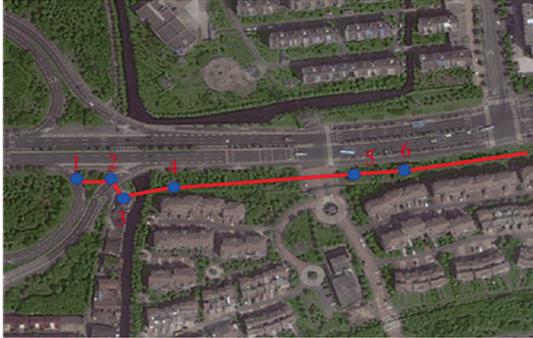


图2 研究区位置示意

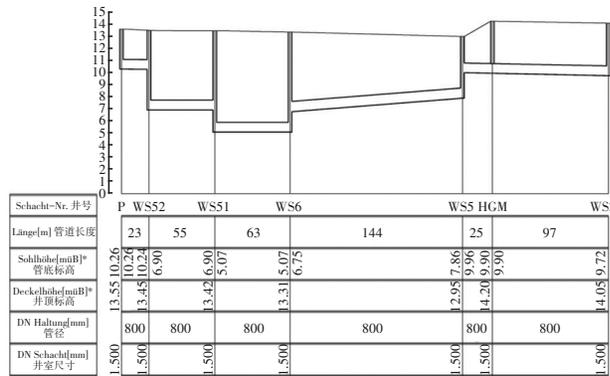
Fig.2 Location of the study area

梁清路污水管是东西向重要干管(DN800),是周边住宅、名胜景区及河道截污等用户的排水主通道。梁清桥段主干管在设计建设及改造过程中,由于河道阻碍和高速公路建设,采用倒虹结构跨过障

碍。倒虹总长达 265 m, 并两次改变高度和方向(见图 3)。



a. 倒虹管段平面图(数字为井号)



*[müB]=Meter über Bezugsniveau 标高单位:m

b. 倒虹管段剖面图

图 3 倒虹管段平面及剖面图

Fig.3 Floor plane and section view of the study inverted siphon

超长的倒虹长度和复杂的倒虹结构导致此段极易产生淤积。

2.2 设计参数

研究初期,通过对周边管线的梳理,根据倒虹管径和长度,设计使用微型拦蓄盾。设备最大蓄水高度为 1.6 m。

拦蓄盾安装井设计尺寸为 4 m×4 m,拦蓄盾设备井及安装如图 4 所示。

设计旱季运行水位为 600 mm,即 75% 满管运行。为确保汛期运行安全,设计警戒水位为 1.6 m,即在安装井中监测水位>1.6 m 时,拦蓄盾始终保持在抬升位置,不进行拦蓄。为确定最佳运行参数,在拦蓄盾设备控制系统内的管段以及倒虹井内布设流速、水位、泥深高度传感装置,并集成到拦蓄盾自控平台。拦蓄盾系统及监测设备安装如图 5 所示。

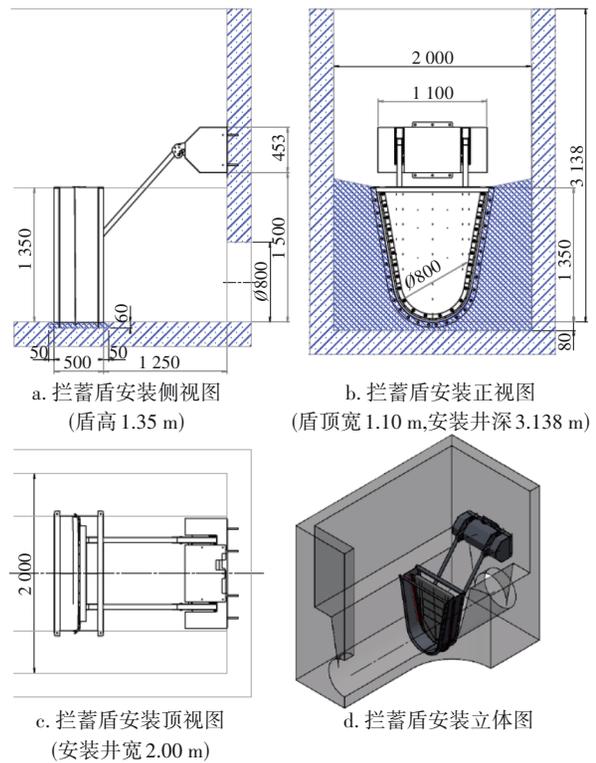


图 4 拦蓄盾设计图及参数

Fig.4 Design drawing and parameters of the HydroGuard Mini flushing system

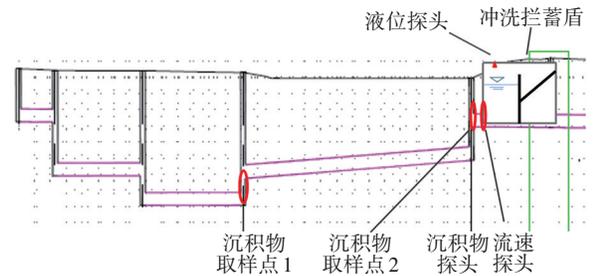


图 5 拦蓄系统及监测设备安装剖面示意

Fig.5 Schematic diagram of the installation section of the HydroGuard Mini flushing system and sensors

2.3 实验设计

为确定最佳运行参数,从拦蓄系统和水文水力条件方面进行分析。选取较易获取并具有明显相关性的 4 个影响因素:蓄水高度、冲洗频率、冲洗次数以及下游水位,并将每个影响因素按高度、频率、次数、水位的大小都分成三个等级。采用经典的“正交实验设计”,可以科学合理地降低实验次数,并达到实验目的;实际实验次数降至 9 轮,具体实验参数矩阵 $L_9(3^4)$ 如表 1 所示。

表 1 中 1~3 为每个影响因素的等级。根据实际情况制定的每个影响因素等级如下:①蓄水高度分

别为 1.00、1.30、1.60 m;②冲洗频率分别为 1 次/d、1 次/2 d、1 次/3 d;③冲洗次数分别为冲洗 1 次、连续冲洗 2 次、连续冲洗 3 次;④下游水位分别为低、中、高。

表 1 正交实验设计矩阵

Tab.1 Matrix of orthogonal experimental design

| 实验 编号 | 影响因素 | | | |
|----------|------|------|------|------|
| | 蓄水高度 | 冲洗频率 | 冲洗次数 | 下游水位 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 3 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| 4 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| 5 | 2 | 3 | 1 | 3 |
| 6 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 7 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 8 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| 9 | 3 | 2 | 1 | 2 |

利用监测设备每分钟采集一组流速、水位数据和检查井底沉积物高度变化。根据实验矩阵,每周进行一次实验,记录实验数据并进行正交实验数据分析。

2.4 实验结果

2.4.1 前期实验分析

在设备安装完成后,2018年1月24日—1月29日进行了前期实验。

第一轮先期实验结果见图6。

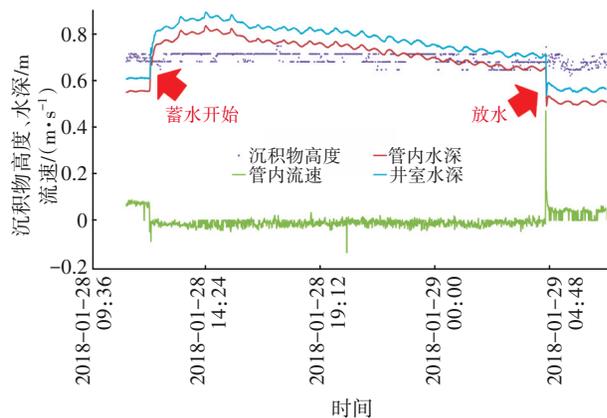


图6 第一轮实验采集水位、流速及沉积物数据

Fig.6 Data collected in the first round of experiments: water level, flow velocity and sediment height

在枯水期运行时冲洗效果较为明显。拦蓄盾下降后管内水位(红线数据)一度上升至满管(管道水位最高为 80 cm),拦蓄盾井室内水位最高至 90

cm(蓝线数据)。当拦蓄盾升起进行冲洗时,管内流速(绿线数据)由平均 0.1 m/s 迅速上升至 0.5 m/s。在冲洗过后,沉积物的高度(紫色点数据)发生了明显扰动。

在第二轮先期实验中(见图7),将蓄水时间设置为 5 h,冲洗效果明显,流速在冲洗时最高可达到 0.6 m/s。蓄水前正常运行流速为 0.06 m/s,拦蓄期间流速接近为零。由此可见,流速在冲洗瞬时提高了 10 倍,有利于将更多的固体杂质运出倒虹管段。

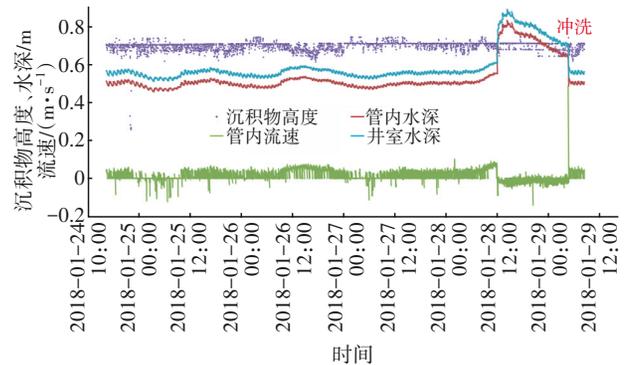


图7 第二轮实验采集水位、流速及沉积物数据

Fig.7 Data collected in the second round of experiments: water level, flow velocity and sediment height

2.4.2 最佳运行参数分析

在两轮先期实验的基础上,选取适宜的蓄水高度、冲洗频率、冲洗次数、下游水位高度作为冲洗效果的影响因子,通过 9 轮实验及数据采集,以测量到的拦蓄盾开启后水流达到的最高流速,以及井底沉积物的高度变化作为实验结果(见表 2),进行正交实验数据分析。

表 2 4 个因素对冲洗效果影响的实验结果

Tab.2 Influence of four factors on flushing effect

| 实验 编号 | 5 min 内达到最高 流速/(m·s ⁻¹) | 5 min 内最大沉积 物高度变化量/m | 沉积物高度变化 量/m |
|----------|--|-------------------------|----------------|
| 1 | 0.276 | 0.045 | 0.709 2 |
| 2 | 0.349 | 0.033 | 0.159 5 |
| 3 | 0.635 | 0.035 | 0.169 3 |
| 4 | 0.363 | 0.076 | 0.207 5 |
| 5 | 0.437 | 0.089 | 0.647 9 |
| 6 | 0.376 | 0.081 | 0.276 3 |
| 7 | 0.246 | 0.051 | 0.075 0 |
| 8 | 0.430 | 0.070 | 0.674 3 |
| 9 | 0.341 | 0.063 | 0.760 9 |

通过 4 个因素对可达最高冲洗流速的影响进行

分析可知,达到最高流速受冲洗次数影响最大,每次连续多次冲洗可以有效提高流速。原因是在前两次冲洗中,已将倒虹沉积物有效冲出,使过水阻力减小,从而有效提升了第三次的流速。可见每次冲洗时连续多次冲洗可以有效改善冲洗效果,而最高的蓄水高度因子对最大流速的影响最低,原因是在实验过程中,目标蓄水高度并未精确达到。由于研究区域在实验后期处于每年的丰水期,管网长时间处于高水位运行,而相应泵站距离实验倒虹管段较远,在实验中对下游水位无法实现精确控制,所以造成拦蓄盾下游水位高度对最高流速无明显影响。冲洗频率对流速影响的结果可以解释为,缩短冲洗频率有利于沉积物的运输和下游管段冲洗水流流速的提高。长时间不冲洗使管内沉积物倾向于板结,不利于沉积物的运输,进而影响冲洗流速。根据4个因素影响分析可知,最佳设置参数为蓄水高度1 m,每隔一天冲洗1次以及每次连续冲洗3遍。

通过4个因素对污泥高度变化的影响分析可知,冲洗蓄水高度越高,冲洗频率越快,则井底淤泥高度变化越大。下游水位越高,冲洗次数越多,则泥位变化越小。对泥位变化影响最大的设置参数为:蓄水高度1.60 m,下游低水位,以及每天冲洗一次。

综合考虑两个指标,将最佳运行参数确定为蓄水高度1 m、隔日冲洗和每次冲洗3遍。由于管道下游长期处于高水位,在最后一轮实验中不进行设计考虑。在最佳运行参数下,进行了最后一轮实验。最后一轮实验过程中蓄水未达到1 m的设计高度,最高流速达到0.151 m/s,泥高变化0.132 m。

2.4.3 沉积物分析

在实验过程中,分别于实验中期和后期两次在4号井和5号井(见图3)取井底沉积物样品,并进行有机物含量分析,以期为后期管网养护提供数据支撑。泥样烘干焚烧后进行有机质含量分析,结果如表3所示。取样点1(倒虹管中部,4号井)较取样点2(倒虹管末端,5号井)的有机质含量低,表明在拦蓄盾的冲洗下,可有效地将倒虹管中的有机质沉淀物带到下游管道中,而且整段倒虹管内沉淀物的有机质含量也在逐步降低。因此可推测,通过冲洗可以将管段中有机质沉积有效送入下游管段,从而间接提高污水厂进水浓度。

表3 倒虹管内沉积物有机物含量

Tab.3 Content of organic matter in the sediments from the inverted siphon

| 项目 | 样品 | 坩埚质量/g | 坩埚+样品/g | 烘干样质量/g | 烧后样质量/g | 烧失量/g | 有机质含量/% |
|-----------------------|------|--------|---------|---------|---------|-------|---------|
| 第一次取样 (2018-02-26) | 取样点1 | 25.3 | 32.1 | 6.8 | 5.4 | 1.4 | 20.0 |
| | 取样点2 | 34.2 | 41.9 | 7.7 | 5.8 | 1.9 | 27.9 |
| 第二次取样 (2018-05-09) | 取样点1 | 36.4 | 40.0 | 3.6 | 2.9 | 0.7 | 17.4 |
| | 取样点2 | 33.5 | 36.6 | 3.1 | 2.4 | 0.7 | 23.8 |

此外,经过定期频繁冲洗,后期在拦蓄井下游管段发现较明显的淤积。从数据及现场调查结果来看,微型拦蓄盾系统对倒虹冲洗达到了一定的疏通清淤效果,但是沉积物通过搬运沉积在下游管道。一方面证实了设备对倒虹防淤的积极影响,另一方面需要在设备后端采取有效措施,对管道进行及时清理,以避免造成下游淤塞,例如在长距离管段设置分段连续冲洗,同时也能将管道中的沉积物有效地送入污水处理设施。

3 结论与展望

2017年12月—2018年6月在研究区域完成了拦蓄盾设备与监测仪器的安装调试,对设备实地应用进行了初步研究,为后期的实例研究、长期观测和效果对比创造了硬件条件和前期数据积累。研究初步得出了拦蓄水位、冲洗频率、冲洗次数、下游水位4个运行参数在运行过程中对冲洗效果的影响。

由于受倒虹管下游管道实际情况的影响,很多时段未能达到理想冲洗状态,对分析结果造成一定影响。后期可在枯水期与丰水期阻断旁通管,有效憋高拦蓄水位的基础上,进一步加大参数选取广度,具体精确到流量、液位差等获取难度较大的参数加以精细分析,从而准确分析各因子对冲洗效果的影响;同时,可将监测范围进一步扩大至倒虹的上游管段和下游管段,通过数据分析,了解对片区的水文、水力等条件的影响;另外,可以通过对自动冲洗的成本核算与人工或机械疏通清淤的投入成本进行对比,为提高管网运营的科学性、经济性提供数据支撑;未来可以结合物联网技术,对拦蓄冲洗系统进行升级改造,以实现远程监测和控制,为

进一步提高厂、网一体化水平,实现智慧水务打下坚实基础。

参考文献:

- [1] 黄建双. 浅谈城市污水管网普查项目施工的技术要点[J]. 福建建设科技, 2015(6):82-84.
HUANG Jianshuang. Discussion about the technical points of executing the urban sewage pipe network census project [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2015(6):82-84(in Chinese).
- [2] 边艳玲,董巍. 排水管道中的清淤方法[J]. 黑龙江水利科技, 2003(3):95.
BIAN Yanling, DONG Wei. Method for desilting in drainage pipes[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2003(3):95(in Chinese).
- [3] 汤霞,陈卫兵. 城市排水系统沉积物特性及清淤方式研究进展[J]. 城市道桥与防洪, 2013(3):106-110.
TANG Xia, CHEN Weibing. Research progress on sediment characteristics and dredging methods of urban drainage system [J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2013(3):106-110(in Chinese).
- [4] BARENTHIEN L. Betrieb der Kanalisation: Reinigung, Inspektion, Bauliche Unterhaltung [M]. Germany: DWA, 2005 (in German).
- [5] 张伟. 基于InfoWorks CS模型的排水管道沉积规律研究[D]. 长沙:湖南大学, 2012.
ZHANG Wei. Research on Sediment Deposition in Drainage Pipes Using InfoWorks CS Model [D]. Changsha: Hunan University, 2012 (in Chinese).
- [6] 冉贞俊,张传雷. 凹型倒虹管的设计要点与实例分析[J]. 水利技术监督, 2012, 20(1):46-48.
RAN Zhenjun, ZHANG Chuanlei. Design and case study of inverted siphons [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2012, 20(1):46-48 (in Chinese).
- [7] SCHAFFNER J, STEINHARDT J. Numerical investigations on the effect of sewer cleaning flush waves under the influence of downstream water levels [J]. Journal of Water Management Modeling, 2011. DOI: 10.14793/JWMM R241-04.
- [8] 王矛矛. 南淝河污水倒虹管设计防淤措施[J]. 工程建设与档案, 2004(4):8-10.
WANG Maomao. The measures of prevent sewer sedimentation on the inverted siphons for a sewage system at Nanfei River [J]. Construction and Archives of Engineering, 2004(4):8-10 (in Chinese).
- [9] 何耘,刘成,韦鹤平. 大型污水管道倒虹管防淤措施的分析 and 试验[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2002, 10(2):38-43.
HE Yun, LIU Cheng, WEI Heping. Analysis and experimental study on the measures to prevent sewer sedimentation on the large inverted siphons for a sewage system [J]. Journal of Anhui Institute of Architecture, 2002, 10(2): 38-43(in Chinese).
- [10] 范伟,吕军. 微型拦蓄冲洗系统在倒虹吸污水管道中的应用[J]. 给水排水, 2014, 40(2):109-111.
FAN Wei, LÜ Jun. Application of miniature storing and flushing system in inverted siphon sewage pipelines [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(2): 109-111(in Chinese).

作者简介:徐瑛(1973-),女,江苏无锡人,大学本科,高级工程师,主要从事污水处理技术管理工作。

E-mail:764443618@qq.com

收稿日期:2020-11-16

修回日期:2022-10-12

(编辑:衣春敏)

实施国家节水行动,建设节水型社会