

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.10.015

武汉大东湖污水深隧系统流量监测方法

肖 权¹, 邓 沛¹, 常 超¹, 李胡爽¹, 谈泽龙¹, 鲁尔超¹,
王 强²

(1. 中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 上海铂尔怡环境技术股份有限公司, 上海 201203)

摘 要: 国内外均有应用于缓解城市内涝和溢流污染的深隧系统,而深隧系统成功运营的关键技术在于深隧的流量监测,需要根据深隧系统的特点选择合适的流量监测方法。基于技术比选,武汉市大东湖污水深隧系统选择基于超声波互相关原理的超声波流量计作为深隧中流量监测设备,该设备可实现可视化的实时流速监测且达到管道的断面扫描效果,可以在深隧中的400 kPa水压和极端条件下稳定长期工作。采用互相关超声波流量计对深隧断面进行了16层流速测量,结果表明,靠近管壁处的流速远低于平均流速,以平均流速作为深隧不淤流速的判断标准将给深隧运行带来淤积风险。

关键词: 污水深隧系统; 流量监测; 超声波互相关流量计; 断面流场分布

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)10-0095-06

Flow Monitoring Method of Sewage Deep Tunnel Drainage System in Wuhan Dadong Lake

XIAO Quan¹, DENG Pei¹, CHANG Chao¹, LI Hu-shuang¹, TAN Ze-long¹,
LU Er-chao¹, WANG Qiang²

(1. China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan 430056, China;
2. Shanghai BIOENV Environmental Technology Co. Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: Deep tunnel system has been applied to alleviate urban waterlogging and overflow pollution both at home and abroad. The key technology for the successful operation of a deep tunnel system depends on the flow monitoring of the deep tunnel, which needs to select the appropriate flow monitoring method according to the characteristics of the deep tunnel system. Through technology comparison, the ultrasonic flowmeter based on the principle of ultrasonic cross-correlation was selected as the flow monitoring equipment in a deep tunnel system in Wuhan Dadong Lake. The equipment realized visualized real-time flow rate monitoring and pipeline cross section scanning, which operated stably for long periods under 400 kPa water pressure and extreme conditions in the deep tunnel. The flow rate of 16 layers in the deep tunnel section was measured by the ultrasonic cross-correlation flowmeter. The results showed that the flow rate near the pipe wall was much lower than the average flow rate. Therefore, taking average rate as the evaluation criterion of non-silting flow rate of deep tunnel will bring silting risk to the operation of the deep tunnel.

Key words: sewage deep tunnel drainage system; flow monitoring; ultrasonic cross-correlation flowmeter; cross section velocity distribution

武汉市位于长江中下游平原,梅雨季节降水充沛且地下水位较高,使其长期面临汛期的合流制污水溢流^[1]与内涝问题。为缓解水环境状况,武汉市于2020年建设完成大东湖污水深隧传输系统并实现通水,集中输送污水,从而实现污水有效处理并大幅削减初雨、溢流污染。

在深隧设计和运营过程中,运营人员的核心控制指标为深隧内的流态和可能淤积状态,因此需要实时测量流速、流量和淤泥厚度,以便评估运行中的风险并调整运行策略。其中深隧的流速是深隧运行中的关键考核指标,若流速低于0.65 m/s,则深隧将面临较高的淤积风险,此外,深隧的流速也是水力模型的校准条件之一。因此,流速的准确监测对深隧系统可持续性和长期可靠运行至关重要,也是运营期间项目风险管控的关键评判指标。

1 大东湖污水深隧流量监测需求分析

近年来,深隧系统在国内外城市均有成功应用的案例,有效提高了城市排涝能力并改善了水体环境。深隧从建设目标上主要分为调蓄型雨洪深隧、传输型污水深隧与复合型多功能深隧,调蓄型雨洪深隧以芝加哥深隧为代表,传输型污水深隧以新加坡深隧为代表,而复合型深隧则以吉隆坡深隧为代表。其中,新加坡深隧与大东湖深隧相似,作为污水深隧实现了区域污水的全集中处理,市政污水用地由20世纪90年代的300 hm²缩减至190 hm²,污水厂数量由6座缩减为3座,水循环利用率由30%提升至55%,对于缓解新加坡城市市政用地紧张、水资源缺乏等问题起到了重要的作用。但从深隧运营角度来看,早期国外深隧建设缺乏相应的在线监测技术与实时调度平台,而国内深隧建设又处于起步阶段,规划设计、风险论证等阶段较为仓促,实际运行中会存在较多隐患。

大东湖污水深隧埋深达到50 m以上,全长17.6 km,且仅保留7座通风井^[2],一旦通水后无法停水查看管道状态,缺乏对深隧内污水的水量与流速等关键技术点的管控能力,给深隧运营与调度带来巨大的风险。

在国内,深隧工程仅在广州、香港^[3]、北京、上海等一线城市有初步应用,因此对深隧的在线监测仍在探索之中。通过在深隧关键节点处设置一系列监测传感器,利用实时监测获取的数据,可实现对

深隧的入流和排水的全面掌控与精确调度。例如,美国芝加哥排水系统通过对深隧竖井的液位进行监测^[4],结合降雨监测数据决策闸门的启闭;与此类似,广州排水深隧的东濠涌段设有在线液位监测传感器^[5],采用压阻式液位传感器,基于液位阈值对整个深隧的运行状态进行报警。然而,基于竖井液位监测可对深隧的运行状态有初步判断,但实际影响深隧运行的流速、淤积等状态仅通过液位难以反映。在深隧流量监测方面,美国的密尔沃基深层隧道储存系统设立了超过300个实时监测流量设备^[6],通过实时精确调度,确保深隧在运营时不堵塞,避免了人工下井维护和设备清淤。

结合国际深隧运行的成功经验进行判断,可以认为流量是最直观反映深隧传输水量的关键参数,而流速是最直观有效地反映深隧淤积风险的指标,一旦流速低于最低设计流速,深隧管控平台应及时发出报警信息来提醒运营人员关注可能发生的淤积情况。通过在深隧平直管段设置流量计传感器,利用实时监测获取流速、流量、液位、淤积厚度等数据,可实现对大东湖深隧运行状态的实时掌控。

基于上述需求与大东湖深隧自身条件,大东湖深隧流量监测面临如下问题:

- ① 流速高动态变化,对传感器监测的稳定性有较高要求;
- ② 满管运行,液位达到深隧管底以上30 m,对传感器的耐压提出更高的要求;
- ③ 在流速低于0.65 m/s时,可能产生淤泥,对传感器的安装方法与安装位置有限制;
- ④ 受限于深隧结构,传感器必须安装于竖井附近的平直管段,并通过电缆传输数据至地面,因此要求传感器与变送器之间的电缆长达100 m以上,电缆屏蔽效果好。

2 在线流量监测方法选取

随着地下排水管网精细化管理的要求,流量测量不仅要有瞬时流速、瞬时流量、液位、水温 and 累计流量,还对测量精度和周期提出更高的要求。流量计的种类繁多,用于地下管网流量测量的流量计主要是超声波流量计、电磁流量计和雷达流量计等。超声波流量计又分为超声波多普勒流量计、超声波时差法流量计和超声波互相关流量计。各类流量计优缺点及适用条件如表1所示。

表1 不同流量测量方法的比较

Tab.1 Comparison of different flow monitoring methods

项目	超声波互相关流量计	超声波多普勒 ^[7] 流量计	超声波时差法流量计	电磁流量计 ^[8]	雷达流量计
流速传感器种类	脉冲超声波, 1 MHz	连续多普勒, 1 MHz	超声波时间差法, 1 MHz	电磁流量计	雷达多普勒, 24 GHz
流速传感器扫描层数	16 层, 直接测量过流断面流速	点流速, 用数学模型拟合过流断面流速	与测量通道有关, 最多 32 通道	切割磁力线	表面点流速, 用数学模型拟合过流断面流速
流速测量范围/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	-1~6	0.1~6	-20~20	0.5~10	0.15~10
流量的测量不准确度	测量值的 $\pm(1\%\sim3\%)$	受液位和前后平直段影响, 通常为测量值的 $\pm 15\%$ 以上, 甚至更高	2 组 4 个传感器, 在前后平直段足够时, 流量测量误差 $<5\%$, 仅能监测非满管状态	受流速的影响很大, 通常在 2 m/s 的范围内测量精度高, 流速降低后测量误差会大幅度增加, 且仅能监测满管状态	表面流速为测量值的 $\pm 0.5\%$, 流量的误差比较大, 仅能监测非满管状态
耐压程度/kPa	400	100	600	600	水面上安装
是否需要定期校正	绝对零度漂移, 测量真实流量, 不需要校正	流速值为计算结果, 需要定期校正	不需要校正	定期校正	需要校正
适用水质	污水、含杂质和气泡的水	污水、含杂质和气泡的水	干净或略微污染的水	电导率 $>5\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 的液体	不受水质的影响

考虑到大东湖深隧排水系统的最大埋深为地下 50 m 左右, 为压力流满管运行, 压力达到 400 kPa 以上, 流量监测对象为污水, 且实际运行中有一定可能性会在满管与非满管状态间切换, 因此电磁流量计、雷达流量计和超声波时差法流量计均不适合, 仅能采用超声波测量技术。其中, 多普勒流量计向水中发射连续超声波, 超声波遇到水中颗粒后反射, 多普勒流量计接收到的反射波的频率将发生变化, 流量计将记录这个频率的变化值, 并根据多普勒效应计算出颗粒的运动速度。但基于深隧测量场景, 多普勒流量计具有如下的不适用性:

① 测量得到的流速实际为点流速, 而非断面流速, 对于管道糙率较大的管段, 其靠近管壁部分的流速与平均流速之间有较大差距, 对实际产生冲淤效果的流速判断不准。

② 需要稳定的流场条件, 深隧流量计安装位置受限于电缆长度, 往往安装于竖井附近, 流场条件较为复杂。

③ 需要定期校正, 通过比较测量进行校准, 在深隧通水后难以进行定期校正工作。

互相关流量计测量流速的方法同样基于超声波反射原理, 但其记录并比较的值为颗粒的移动图

像而非变化频率。工作时, 流量计传感器发射固定角度的超声波脉冲, 扫描污水中的反射物(微小颗粒、矿物或气泡), 将得到的回波保存为图像或回波模式。间隔几毫秒后, 接着进行第二次扫描, 产生的回波图像或模式也被保存(见图 1)。由于反射物随污水介质同步移动, 通过比较前后两个相似图像或模式之间的相互关系可以识别反射物的位置来检测和计算流速。基于该测量原理, 考虑到超声波的光束角度和脉冲重复率, 通过空间分配最多可以直接测量流体中的 16 层微小颗粒的速度, 从而直接计算得到高精度的管道断面流速。

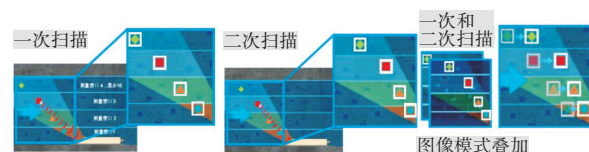


图1 互相关流量计的测量原理

Fig.1 Measurement principle of cross-correlation flowmeter

互相关流量计基于最新的水力模型, 系统计算了一个密集测量网络, 从单个测量点位出发覆盖了整个流体横截面, 相比多普勒技术具有如下特点:

- ① 具有经过科学流量测量的、渠道专用的实时流体数学模型;
- ② 靠近壁面和水平速度分布的流速计算;
- ③ 速度积分覆盖这个断面,最多测量 16 层流速;
- ④ 无需校准。

互相关流量计能够基于流体数学模型,建立覆盖整个断面的计算网格,从而得到整个断面的流速分布情况,对研究深隧淤积与流速之间的关系提供新的方法手段,且其无需校准的特点也更适合于深隧这样的特殊场景。

3 流量监测方案

3.1 测量布点方案

考虑深隧完工后仅保留 7 座竖井,流量计采集到的数据需要通过有线的方式传输至地面远传设备,此外考虑管径变化、安装条件、入流条件,最终选择在 4 个关键竖井附近设置流量监测点(见图 2),每个监测断面处在不同角度安装 3 个传感器探头,其具体安装方位、安装管径与安装角度见表 2。



图 2 深隧流量计布设点位

Fig.2 Flowmeter distribution in deep tunnel drainage system

表 2 流量计安装位置

Tab.2 Location of flowmeters

流量计安装竖井	安装方位	安装管径/m	安装角度/(°)
3#井	下游	3.2	180/30/-30
4#井	下游	3.4	180/30/-30
6#井	下游	3.4	180/30/-30
7#井	上游	3.4	180/30/-30

3.2 流量监测设备安装

在每个点位安装一套流量计相关设备,单套流量计安装组件包括 1 个 NF7-5M3E0A001 变送器、2 个 CS2-V200KTE99K0 互相关流速传感器(安装于 30°与-30°)、1 个 CS2-V2H1KTE99K0 互相关流速传感器(安装于 180°)、300 m 电缆、安装附件及 1 个电

控柜等。其中,每个断面安装 3 个互相关流速传感器探头用于测量剖面流速分布,其中安装于 180°的探头可满足满管流量测量,同时用于流速与淤积界面的测量;安装于 30°与-30°的探头可用于非满管条件下的流速测量,且与顶部探头形成监测网格,其 16 层流速测量网格如图 3 所示;变送器在地面电控柜内安装,可连接 3 个流速传感器。电缆材质为 PPO+PEEK,安装附件材质为不锈钢,均耐污水腐蚀。

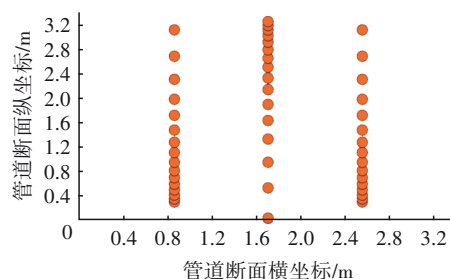


图 3 深隧管道断面 16 层流速监测点位

Fig.3 Sixteen layers monitoring points of flow rate of pipeline section in deep tunnel drainage system

深隧设备安装难度高,安装方式需选择长期稳定固定的方式,且安装后密封防水性高,安装过程需对管道破坏程度低、安装时间灵活、配合深隧自身施工进度等。基于以上限制条件,深隧流量计采用化学螺栓固定安装的方式,由竖井向内布线 40 m 确定传感器位置,传感器沿管壁共布设 3 个探头(见图 4),其中,正顶部安装一个传感器探头,超声波垂直向下发射,在满管的水力状态下,可同时用于监测流量与泥水界面的位置;左右 30°角位置各安装一个传感器探头,垂直向上发生超声波,用于流量监测;3 处传感器探头监测的数据互为校准,使监测数据的准确性得到极大提升,同时避免未来的频繁校准维护问题。

安装过程中,在每个传感器探头确定的固定孔位分别打 4 个孔,并用化学螺栓固定安装附件,将传感器探头安装于附件之上,保证探头与地面水平;用扎带将三根信号电缆捆绑,汇合于深隧管壁右侧 45°位置,从深隧内部沿伸至井口处;考虑竖井处有湍流或汇水,对竖井冲击力比较大,因此从竖井处开始,三根传感器电缆外部用钢管保护,在竖井浇筑前穿过竖井井壁,从外壁引入地面,最大程度地避免对井体结构的影响。深隧施工结束后,最终传感器及其保护套管将浇筑至竖井管壁混凝土内,保

证其稳定性,图5为流量计安装现场效果图。

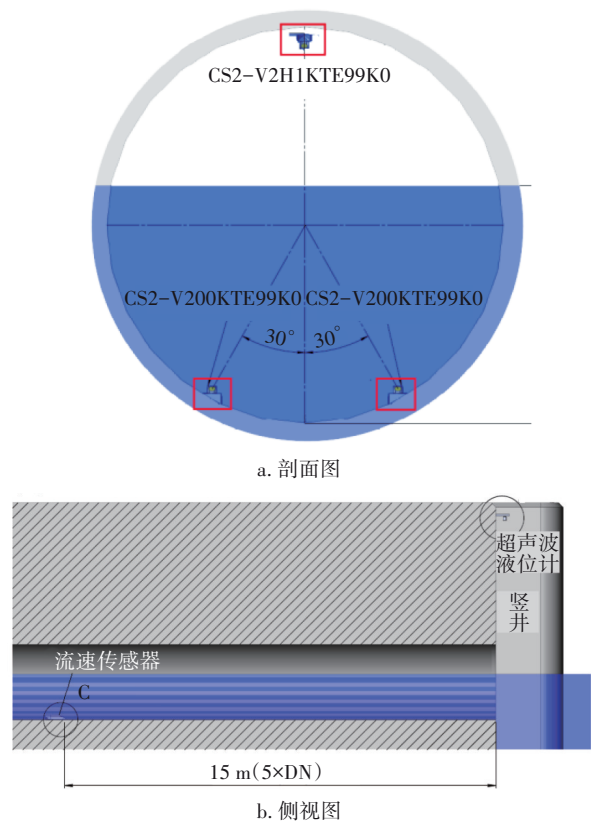


图4 固定式流量计安装示意
Fig.4 Schematic diagram of fixed flowmeter installation

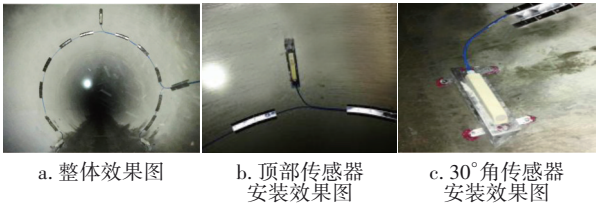


图5 流量计安装现场效果
Fig.5 Photos of flowmeter installation site

4 深隧流量监测结果分析

深隧通水运行后,选取某个时刻下4个监测断面的监测网格数据进行分析。各断面的流速监测统计值如表3所示。液位结果显示,4个监测断面均为满管状态,与深隧设计要求相符;全断面的平均流速监测结果显示,4个断面的平均流速在0.693~0.750 m/s的范围内波动,从上游至下游的平均流速均满足深隧设计中0.65 m/s的最低流速要求。然而对每个断面的3处传感器分别计算平均流速时,−30°的传感器所处位置的流速较中心位置的流速偏低,其中4#井、7#井断面处的流速低于0.65 m/s的最低流速要求。

表3 流量计监测数据
Tab.3 Monitoring data of flowmeters

流量计 安装竖 井	平均流 速/(m· s ^{−1})	液位/ m	瞬时流 量/(m ³ · s ^{−1})	180°流量 计平均流 速/(m·s ^{−1})	30°流量计 平均流速/ (m·s ^{−1})	−30°流量 计平均流 速/(m·s ^{−1})
3#井	0.750	3.2	6.028	0.694	0.772	0.783
4#井	0.734	3.4	6.518	0.707	0.846	0.649
6#井	0.747	3.4	6.779	0.772	0.782	0.686
7#井	0.693	3.4	6.294	0.667	0.770	0.642

基于监测的3×16处点位的流速数据,构建断面的流速矩阵数据,制作4个监测断面的深隧管道断面流速分布图(见图6)。从图6中的流速分布可看出,贴近管壁处的流速均存在低于0.65 m/s的区域,即低于理论的不淤流速,使得靠近管壁处的悬浮物易沉积而不易冲刷再悬浮;此外越靠近下游则低流速区域越大,下游深隧水力条件受末端抽排泵站影响,整体流速下降,淤积风险较高。从流速分布情况来看,从4#井监测断面开始,深隧管道流速分布不再呈现对称的同心圆形态,而开始出现右偏心形态,这是由于4#井为支隧的汇流井,汇流对流速分布造成明显影响,且该影响一直延伸至深隧末端。

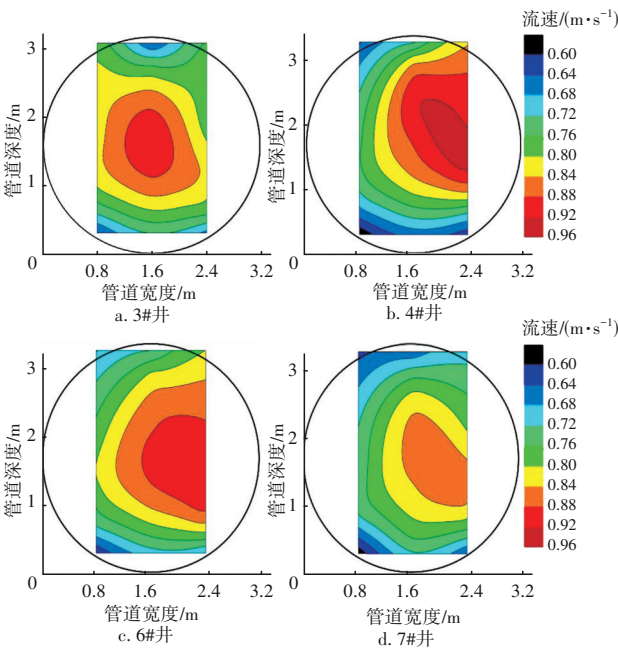


图6 深隧管道断面流速分布
Fig.6 Flow rate distribution of pipeline section in deep tunnel drainage system

由上述结果可以判断,在平均流速满足设计条件时,其靠近管道内壁处流速存在大量低于设计流速的区域,实际运行条件难以满足深隧运行的不淤

流速的设计要求,仅通过测量单一平均流速,无法反映深隧等大管径管道的实际运行流速。因此,对深隧淤积风险评估需采用互相关流量监测技术来获得靠近管壁的实际流速,并基于该实际流速进行风险评估,且通过提升流速来实现淤积冲刷时,也同样需要以靠近管壁处的流速为参考标准。

5 结论

将超声波互相关流量监测技术成功应用于大东湖污水深隧中,满足深隧监测的高防水性、免维护的设备安装要求,实现对深隧管道断面上 3×16 的测量点位的实际流速的在线监测。基于监测获得深隧流量与流速数据,可实现对深隧转输水量的实时掌控,同时可为深隧在线水力模型提供校准条件,并作为深隧淤积风险评估模型的输入参数,为大东湖深隧运行状态监控与运维工作提供可靠保障。监测结果显示,深隧由于其管径较大,平均流速无法反映深隧管壁处的实际流速,在通过流速控制深隧淤积风险时,应充分考虑平均流速与管壁实际流速的差值。在深隧内部进行流量监测国内尚属首次实践探索,其成功安装经验为其他深隧系统的水下流量监测提供了可借鉴的方案。

参考文献:

- [1] 马乐宽,谢阳村,文字立,等. 重点流域水生态环境保护“十四五”规划编制思路与重点[J]. 中国环境管理, 2020, 12(4): 40-44.
MA Lekuan, XIE Yangcun, WEN Yuli, *et al.* Keynotes of making the 14th Five-Year Plan for water ecology and environment protection in key river basins [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(4): 40-44(in Chinese).
- [2] 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, 2020, 36(2): 74-78.
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, 2020, 36(2): 74-78 (in Chinese).
- [3] 刘家宏,夏霖,王浩,等. 城市深隧排水系统典型案例[J]. 科学通报, 2017, 62(27): 3269-3276.
LIU Jiahong, XIA Lin, WANG Hao, *et al.* Typical case analysis of deep tunnel drainage system in urban area [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(27): 3269-3276 (in Chinese).
- [4] 门绚,李冬,张杰. 国内外深隧排水系统建设状况及其启示[J]. 河北工业科技, 2015, 32(5): 438-442.
MEN Xuan, LI Dong, ZHANG Jie. Construction status and inspirations of deep tunnel drainage system both at home and abroad [J]. Hebei Journal of Industrial Science & Technology, 2015, 32(5): 438-442 (in Chinese).
- [5] 周午阳,孙志民,汤舒. 深层隧道排水区域液位在线监测系统研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(1): 1-6.
ZHOU Wuyang, SUN Zhimin, TANG Shu. Research on liquid level on-line monitoring system of deep tunnel drainage basin [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(1): 1-6(in Chinese).
- [6] 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).
- [7] 张楠. 超声波流量计的原理与应用[J]. 工业计量, 2019, 29(3): 36-38.
ZHANG Nan. Principle and application of ultrasonic flowmeter [J]. Industrial Metrology, 2019, 29(3): 36-38 (in Chinese).
- [8] 田野,王岳,郭士欢,等. 常见流量计的应用[J]. 当代化工, 2011, 40(12): 1294-1296, 1304.
TIAN Ye, WANG Yue, GUO Shihuan, *et al.* Application of common flowmeters [J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, 40(12): 1294-1296, 1304 (in Chinese).

作者简介:肖权(1987-),男,湖北大冶人,学士,工程师,主要从事给排水工程现场管理工作。

E-mail: 389931321@qq.com

收稿日期: 2021-06-07

修回日期: 2021-07-06

(编辑:孔红春)