

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.20.023

武汉大东湖城市污水深隧结构健康监测系统设计研究

阮超¹, 张延军¹, 李胡爽¹, 杨怀¹, 董德雄²

(1. 中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 武汉威思顿环境系统有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 城市污水深隧系统是一种能够有效缓解城市污水输送压力和溢流污染的重要措施。污水隧道运营期一般长达 100 年, 建立健康监测系统是了解隧道结构安全性能, 确保隧道运营安全的关键环节。以武汉大东湖污水深隧为背景, 首先介绍污水深隧结构健康监测的系统架构和设计, 分析各子系统的内容和功能; 然后探讨监测内容、监测断面选取、传感器选型、安全评价、健康监测可视化等关键问题; 最后对城市污水深隧结构健康监测系统的设计提出了具体的建议。

关键词: 城市污水; 深隧健康; 监测

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)20-0126-07

Research on Structure Health Monitoring System of Dadonghu Urban Sewage Deep Tunnel in Wuhan

RUAN Chao¹, ZHANG Yan-jun¹, LI Hu-shuang¹, YANG Huai¹, DONG De-xiong²

(1. China Construction Third Engineering Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan 430000, China; 2. Wuhan Weston Environmental System Co. Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: The urban sewage deep tunnel system is an important measure that can effectively alleviate urban sewage transportation and overflow pollution problems. With sewage tunnels typically operating for up to 100 years, establishing a health monitoring system is a critical part to understand the safety performance of the tunnel structure and ensure safe tunnel operation. Taking Dadonghu sewage deep tunnel in Wuhan as the background, the architecture and design of the structural health monitoring system are introduced firstly, as well as the content and functions of each subsystem are analyzed. Then, the key issues such as monitoring content, monitoring section selection, sensor selection, safety evaluation, health monitoring visualization are discussed. Finally, specific suggestions are put forward for the design of a structure health monitoring system of urban sewage deep tunnel.

Key words: urban sewage; deep tunnel health; monitoring

随着我国城市化进程的加快, 城市地下空间利用率也不断提高。地下建筑物日益密集和管线日益复杂, 使得通过建设浅层地下污水管道来提高城市污水标准、完善截污系统变得异常困难, 且代价巨大。为解决城市污水输送问题, 未来将建设一大批长洞线、大断面、深埋藏的城市污水隧道工程^[1-4]。

为改善武汉市水环境生态状况, 创建“两型”社

会示范区, 武汉市提出构建大东湖生态网, 建设大东湖城市污水深隧, 解决大东湖地区的水环境问题^[5]。深隧工程在运营期常出现衬砌开裂、漏水、结构腐蚀等问题。大东湖污水深隧由于运营期间污水满管运行, 衬砌一直处于高水压的污水腐蚀环境中, 深隧运营期间结构安全风险较大, 需要对结构健康进行科学、有效的监测和评价^[6]。目前国内针对

隧道结构运行期健康监测无明确的规范要求,在污水深隧方面,国内外缺乏可参考案例。

结合武汉大东湖污水深隧结构健康监测系统,对污水深隧结构健康监测的关键问题进行探讨,可为类似污水隧道工程结构健康监测提供借鉴。

1 工程概况

武汉大东湖污水深隧是大东湖核心区污水传输系统工程子系统之一,全长约 17.5 km,覆盖范围约 130 km²,服务人口达 300 万人,近期污水输送规模为 80 × 10⁴ m³/d。大东湖深隧全景透视图 1。

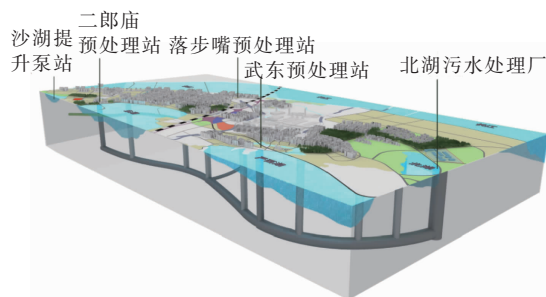


图1 大东湖深隧全景透视图

Fig. 1 Panoramic perspective of Dadonghu deep tunnel

污水深隧采用盾构法进行施工,隧道断面为圆形,直径为 3.0 ~ 3.4 m,采用钢筋混凝土预制管片与现浇钢筋混凝土内衬结合的叠合式双层衬砌结构(见图 2),其中预制混凝土管片厚 0.25 m,现浇内衬厚 0.2 m。结构设计使用寿命为 100 年,运营期间隧道内污水满管运行,污水常水压工况为 0.35 MPa,最高压力达 0.43 MPa。隧道主要穿越地层为中、强风化细粉砂岩,上覆地层主要为砾卵石层、粉细砂、黏土和杂填土,隧道埋深为 30 ~ 40 m。

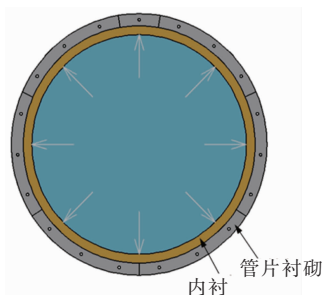


图2 双层复合衬砌结构示意

Fig. 2 Structural diagram of double layer composite lining

2 健康监测系统结构及功能

2.1 健康监测系统的构成

大东湖污水深隧结构健康监测系统主要由数据采集、数据处理软件平台两大部分组成,见图3。

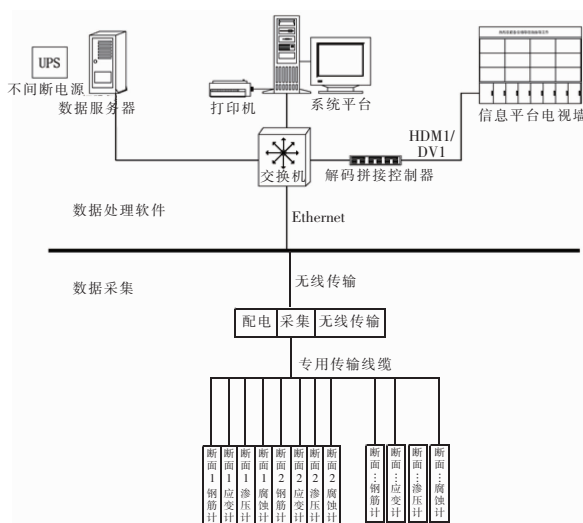


图3 大东湖污水深隧结构健康监测系统集成

Fig. 3 Composition of structural health monitoring system of Dadonghu sewage deep tunnel

健康监测系统平台软件主要对数据进行采集、处理、分析,并进行预警管理和可视化展示,是健康监测系统的主要软件部分。健康监测数据采集主要对隧道结构的受力、腐蚀、渗透以及环境信息进行采集,是健康监测系统的主要硬件部分。隧道结构受力和应变采用混凝土应变计、钢筋应力计监测,结构腐蚀状况通过腐蚀计对钢筋的自腐蚀电位、极化电阻、腐蚀速率以及混凝土 pH 值和 Cl^- 浓度进行监测,从而判断结构腐蚀情况。

2.2 健康监测系统平台主要功能

健康监测系统平台软件包括监测数据处理分析模块、预警管理模块和可视化模块,如图4所示。与以往系统平台的主要区别在于突出了数据应用和展示,单独开发了预警管理模块和可视化模块。

① 监测数据分析数据模块

以监测数据分析处理和图形绘制为核心,并向数据上下游扩展。主要包括用户管理、工程信息管理、测点管理、数据管理、数据查询、图形绘制以及项目文件报告管理。

② 预警管理模块

预警管理主要针对预警阈值、预警报警信息和报告的发布进行管理。本项目采用的预警评价方法主要有两种:首先根据预警阈值对结构安全风险进行指标的分级评价;其次,引入未确知测度理论和信息熵理论,根据不同的监测数据,对污水深隧的安全风险进行综合评价。

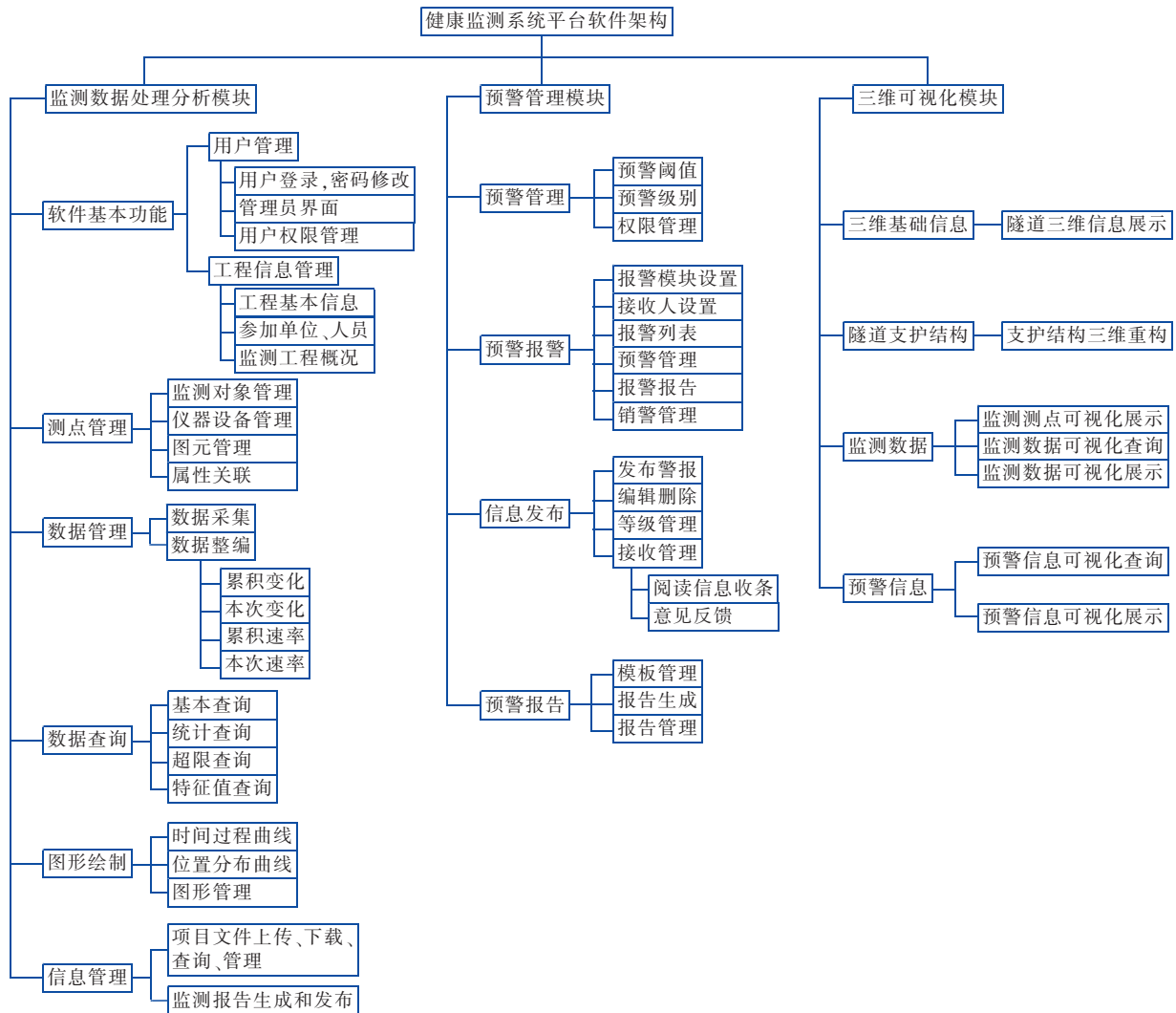


图 4 健康监测系统平台软件构架

Fig. 4 Software architecture of health monitoring system platform

③ 可视化模块

健康监测系统的可视化对后期运营管理十分重要。污水隧道运营管理人员一般对隧道工程设计、施工及监测情况不熟悉,而直接根据监测数据进行分析判断对人员专业水平要求很高,所以健康监测系统应尽量采用直观、简单的图形方式对数据进行展示,方便运营人员理解和运用。大东湖深隧健康监测系统采用智慧大屏,以三维形式对监测的隧道结构和测点进行直观展示,数据通过分类和透明化处理,以得到更好的展示效果。

3 污水隧道结构健康监测系统设计要点

目前,我国缺少城市污水隧道运行期健康监测方面的规范文件,隧道健康监测也以公路、铁路、地铁等交通隧道的健康监测为主,开展污水隧道健康

监测的研究较少。不同于普通隧道结构健康监测,大东湖污水深隧具有以下特点:

① 有压隧道结构的特殊性

大东湖污水深隧满管有压运行,内部污水压力高达 0.43 MPa。隧道结构的受力、变形是通过地层和内部水压作用在隧道结构上,同时隧道结构对地层有反作用,除了要对结构进行监测外,还要对隧道环境的内外水压进行实时监测。

② 污水隧道的腐蚀性

隧道内污水具有较强腐蚀性,与一般隧道的腐蚀环境完全不同。压力流满管运行,易形成硫化氢二次腐蚀支护结构,污水内有害离子浓度更高,混凝土和钢筋腐蚀更快,严重影响结构长期稳定性。

③ 运营期间无法维护

污水隧道满管高压运营,运营后无检修条件,监测点预埋需与结构施工同步进行,长期在水下腐蚀环境内工作,对传感器耐久性 & 安装要求高。

④ 结构敏感度

污水隧道运营期间影响隧道结构安全的因素多,影响程度不同。相对于地面大型建筑物、桥梁等荷载明确、受力直接的结构物而言,隧道外部荷载的变化大部分必须通过地层才能反映到隧道结构上,

对污水管道而言,还要考虑内部污水压力的变化、结构自身的腐蚀劣化,应重点监测这些因素的变化。

3.1 监测内容和测点布置

目前国内外隧道健康监测内容以结构及围岩的变形、应力应变以及水力学指标为主^[6],如表 1 所示。大东湖污水深隧由于运营期始终处于有压污水环境中,常规的沉降变形的监测不易开展,故以结构应力、应变、渗透压力、腐蚀监测为主。

表 1 典型隧道结构健康监测

Tab. 1 Health monitoring of typical tunnel structure

隧道名称	健康监测内容
英吉利海峡盾构隧道	断面收敛、渗透压力、隧道内力
美国波士顿泰德威廉姆斯隧道	沉降
美国巴尔的摩麦克亨利堡沉管隧道	沉降
日本青函海底隧道	隧道渗水、隧道表面应变、振动响应
南京纬三路长江隧道	土压力、水压、隧道内力、应变、管片接缝位移、管片倾斜偏转、车道板内力、断面收敛、不均匀沉降、振动响应
武汉长江隧道	隧道表面应变、管片接缝位移、不均匀沉降、振动响应
厦门翔安海底隧道	土压力、水压、渗水量、围岩内部位移、锚杆内力、钢支撑内力、隧道内力
青岛胶州湾海底隧道	拱顶沉降、锚杆内力、衬砌接触压力、钢支撑内力、隧道内力、水压、松动圈、渗水量
粤港供水隧洞	断面收敛、隧道表面应变、振动响应
广州洲头咀沉管隧道	管段主体应变,管段横向、纵向振动位移,管段横向和竖向振动加速度,管段接头剪力键的剪应力,管段接头的拉应力和压应力、横向和纵向相对位移

在监测断面选取上,主要根据工程地质特点、周边环境情况、运营工况等进行综合判断和选择。大东湖深隧结构健康监测在断面布置设计上,主要选择地质条件复杂的断层或岩溶地段、上覆地层厚度的最深/最浅层段、深隧周边具有重要建构的地

段,水压极值地段等易发安全风险的部位进行健康监测。此外,在施工质量有缺陷或者施工工艺变化处应布置监测断面,监测断面也应尽量集中,方便现场布置和数据对比。大东湖深隧项目健康监测设计的断面布设位置见表 2,覆盖了主要风险点。

表 2 大东湖深隧健康监测断面设置

Tab. 2 Health monitoring section setting of Dadonghu deep tunnel

监测断面编号	断面特征	地层	隧道埋深/m
DH-1	下穿武汉欢乐大道高架	中风化含钙泥质粉砂岩	33
DH-2	下穿京广高铁	中风化含钙泥质粉砂岩	34
DH-3	穿越破碎带,浅埋段	中风化砾岩、中风化含钙含细砂岩	21
DH-4	典型地层,深埋段,污水压力大	中风化泥质细粉砂岩	40
DH-5	岩溶发育带	强风化石英砂岩、中风化灰岩	34

3.2 传感器的选型

国内外隧道结构健康监测采用传感器主要可分为机电型和光纤型两大类。传统机电类传感监测技术主要有振弦式、差动电阻式、电感式、电阻应变片式等传统机械或电子传感技术。此类技术发展时间较长,也较为成熟,目前已经广泛应用各类工程监测中,其中尤以振弦式居多^[7]。但这种传统监测技术属于有源信号传输,传输距离有限,一般超过 200 m

后,数据信号开始衰减,影响测量精度。另外,如果布置的传感器较多,所需电缆线缆多,线管粗,侵占结构,影响结构安全。

光纤传感监测技术近年来日趋成熟,与传统监测技术相比,光纤传感技术具有体积小、质量轻、抗腐蚀、抗电磁干扰等特点,尤其是容易实现分布式监测和长距离传输,是结构健康监测的发展方向^[8]。

我国的南京纬三路、纬七路长江隧道、南京扬子

江隧道、厦门翔安隧道等均采用光纤式传感器^[9-11],测试信号稳定,效果较好。光纤传感基本可以克服传统监测方法的缺点,光纤应变计、光纤应力计等的性能稳定,线性关系好,综合性能优于传统的机电传感器。但光纤传感器的价格较贵,埋设方法要求高、对温度更加敏感。

大东湖深隧结构健康监测主要开展结构应力、应变、渗透压力和腐蚀监测,每个断面布设钢筋计、混凝土应变计各5对,布设渗压计5支,布设腐蚀传感器2支,共计布设17支传感器。传感器均埋设在20 cm厚的现浇钢筋混凝土二衬中。若采用传统的机电传感器,传输线缆较粗,线缆将严重侵占二衬结构,影响隧道结构安全。综合考虑技术先进性和经济合理性,采用光纤式传感器为主,机电传感器为辅开展监测。具体为钢筋计、混凝土应变计和渗压计采用光纤式,腐蚀传感器采用机电式。

钢筋计和混凝土应变计分别监测钢筋和混凝土的应力和应变大小。钢筋计量程为0~210 MPa,应

变计量程为 $\pm 1\ 500\ \mu\epsilon$ 。渗压计监测结构内部的渗透压力,以此了解污水渗透情况,渗压力最大量程为1 MPa。所有光纤传感器中心波长均为1 525~1 565 nm,精度为0.3% FS,引线采用铠装光缆。腐蚀传感器可以监测钢筋腐蚀速率、氯离子含量、pH值和混凝土电阻,以此4项参数对结构的腐蚀情况进行监测。传感器的所有光纤和线缆通过埋入隧道衬砌内的镀锌钢管进行保护,最终引出地面,无线传输到健康监测系统平台。

3.3 健康监测安全评价

污水隧道健康监测安全评价可从两方面进行:一是单个监测项目的监测数据超过设定阈值后的实时预警,二是多项监测数据的融合分析,并进行综合评价^[12-13]。大东湖污水深隧将未确知测度理论和信息熵理论相结合,根据健康监测数据、地质环境因素和运营条件,对污水深隧的安全风险进行综合评价。具体的风险因素分级标准及阈值情况如表3所示。

表3 风险因素和等级划分

Tab.3 Risk factors and level classification

一级指标	二级指标	I级	II级	III级
健康监测数据	钢筋应力	$<0.5f_y$	$(0.5 \sim 0.7)f_y$	$>0.7f_y$
	混凝土应变	$<0.5\text{fl}$	$(0.5 \sim 0.7)\text{fl}$	$>0.7\text{fl}$
	渗透压力/kPa	<30	30~100	>100
	腐蚀指标	未锈蚀	低锈蚀	中锈蚀
地质和环境因素	隧道围岩等级	I~III	IV	V
	周边设施影响	周边无设施	有设施,事故后果可以承受	有重要设施,灾难性后果
运营因素	污水压力/MPa	<0.3	0.3~0.35	>0.35

注: f_y 为钢筋的屈服强度。 fl 为混凝土结构的拉应变阈值($400\ \mu\epsilon$)。

具体步骤:

① 首先根据表3的等级划分,采用下式的线性函数,建立评价指标的未确知测度(μ)函数。

$$\mu_i(x) = \begin{cases} \frac{-x}{a_{i+1}-a_i} + \frac{a_{i+1}}{a_{i+1}-a_i}, & a_i < x \leq a_{i+1} \\ 0, & x > a_{i+1} \end{cases}$$

$$\mu_{i+1}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_i \\ \frac{x}{a_{i+1}-a_i} - \frac{a_i}{a_{i+1}-a_i}, & a_i < x \leq a_{i+1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为实测值, a_i 和 a_{i+1} 为第 i 级的边界值,由评价指标的分类标准确定。

② 根据评价指标未确知测度函数和评价对象参数值建立单指标测度评价矩阵,见下式:

$$(\mu_{ik})_{n \times m} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \cdots & \mu_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ \mu_{n1} & \cdots & \mu_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

③ 运用熵权法确定评价指标的权重,具体见下式:

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{k=1}^m \mu_{ik} \ln \mu_{ik} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

$$\mu_{ik} = (\mu_{ik} + 10^{-4}) / \sum_{k=1}^m (\mu_{ik} + 10^{-4}) \quad (4)$$

$$w_i = (1 - H_i) / (n - \sum_{i=1}^n H_i) \quad (5)$$

式中: H_i 为评价指标 X_i 的熵值; μ_{ik} 为评价指标 x_i 的单指标测度评价向量; w_i 为第 i 个评价指标 X_i 的权重。

④ 利用下式对多指标综合测度评价向量 μ_k

进行计算:

$$\mu_k = \sum_{i=1}^n w_i \mu_{ik} \quad (6)$$

⑤ 采用置信度识别准则(见下式)对隧道结构安全进行评价。

$$k_0 = \min \{ k : \sum_{l=1}^k u_l \geq \lambda, k = 1, 2, \dots, m \} \quad (7)$$

式中: λ 为置信度($\lambda \geq 0.5$),当满足式(7)时,则认为评价对象 R 属于第 k_0 个评价等级。

评估技术路线如图5所示。

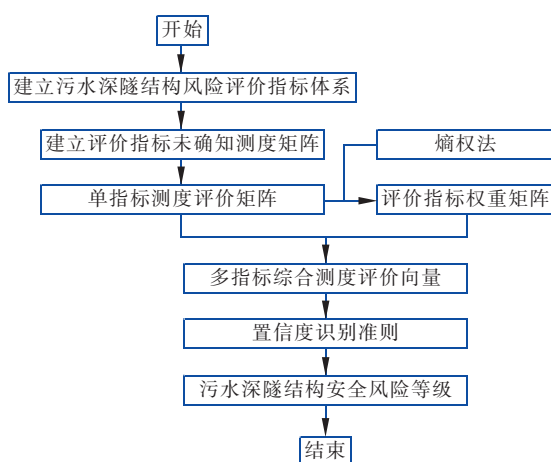


图5 评估技术路线

Fig.5 Technical route of risk assessment

4 污水深隧结构健康监测设计和实施建议

目前我国污水深隧健康监测实践的较少,还没有明确的规范要求,综合大东湖污水深隧结构健康监测的理解和应用,建议在污水深隧健康监测设计和实施时:

① 污水深隧健康监测应纳入到工程设计、施工和运营的各个环节中,统一设计和实施。将施工过程中的监测数据和运营中的健康监测有效衔接。

② 污水隧道健康监测可纳入运营期的污水综合管理系统中,与运营期的污水运营数据融合管理和分析,形成一个大数据库平台统一考虑。

③ 注重污水隧道健康监测系统的传感器选型和埋设工作。传感器的选型和埋设直接关系到监测数据采集的准确性、稳定性和可靠性。

5 结论

以武汉大东湖污水深隧为背景,研究污水深隧结构健康监测的设计实施等关键问题,对城市污水深隧结构健康监测系统的设计提出了具体的建议:

① 污水深隧结构健康监测系统主要包括数据

采集、数据处理软件平台两大部分。数据采集主要对隧道结构的受力、腐蚀、渗透以及环境信息进行采集,是健康监测系统的主要硬件部分,健康监测系统平台软件包括监测数据处理分析模块、预警管理模块和可视化模块。

② 污水深隧健康监测系统设计需要考虑其自身特点。针对污水隧道有内压、强腐蚀、难维护等特点,有针对性地对结构受力和腐蚀情况进行监测。

③ 在传感器选型和结构安全评价方面,建议采用光纤式传感器提高稳定性和耐久性。安全风险评价综合考虑健康监测数据、地质环境因素和运营条件,以有效把控污水深隧运营期的结构风险。

参考文献:

- [1] 王广华,陈彦,周建华,等. 深层排水隧道技术的应用与发展趋势研究[J]. 中国给水排水,2016,32(22): 1-6,13.
WANG Guanghua, CHEN Yan, ZHOU Jianhua, et al. Discussion on application and development trend of deep tunnel drainage technology [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 1-6, 13 (in Chinese).
- [2] 刘家宏,夏霖,王浩,等. 城市深隧排水系统典型案例分析[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).
- [3] 张盛楠,李成江,宗绍利,等. 应用深层隧道储存和输送城市雨污水的思考与案例分析[J]. 中国给水排水,2017,33(2): 13-19.
ZHANG Shengnan, LI Chengjiang, ZONG Shaoli, et al. Applicability analysis of deep tunnels for storing and transporting urban rainwater and sewage [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(2): 13-19 (in Chinese).
- [4] 夏霖. 城市深隧排水系统防涝控污效果模拟[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2019.
XIA Lin. Simulation of the Effect of Urban Deep Tunnel Drainage System in Waterlogging and Pollution Control [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019 (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,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).
- [6] 李晓军, 洪弼宸, 杨志豪. 盾构隧道结构健康监测系统设计及若干关键问题的探讨[J]. *现代隧道技术*, 2017, 54(1): 17–23.
- LI Xiaojun, HONG Bichen, YANG Zhihao. Design of a structure health monitoring system for shield tunnels and some key issues [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2017, 54(1): 17–23 (in Chinese).
- [7] 黄俊. 水底大直径盾构隧道健康监测系统设计研究与应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- HUANG Jun. Research and Application of Health Monitoring System for Underwater Large-diameter Shield Tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013 (in Chinese).
- [8] 钟东. 分布式光纤传感技术在大型过江隧道健康监测系统中的应用[J]. *现代交通技术*, 2017, 14(3): 67–71.
- ZHONG Dong. Application of distributed optical fiber sensing technology in structural health monitoring system of large-scale tunnel [J]. *Modern Transportation Technology*, 2017, 14(3): 67–71 (in Chinese).
- [9] 陈卫忠, 李长俊, 曾灿军, 等. 大型水下盾构隧道结构健康监测系统的构建与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(1): 1–13.
- CHEN Weizhong, LI Changjun, ZENG Canjun, *et al.* Establishment and application of structural health monitoring system for large shield tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(1): 1–13 (in Chinese).
- [10] 傅道兴, 王涛. 南京长江隧道结构健康监测系统设计研究与应用[J]. *南京工程学院学报(自然科学版)*, 2016, 14(4): 22–27.
- FU Daoxing, WANG Tao. Research and application of structural health monitoring system of Nanjing Yangtze river tunnel [J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 14(4): 22–27 (in Chinese).
- [11] 刘胜春, 张顶立, 黄俊, 等. 大型盾构隧道结构健康监测系统设计研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(4): 741–748.
- LIU Shengchun, ZHANG Dingli, HUANG Jun, *et al.* Research and design on structural health monitoring system for large-scale shield tunnel [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2011, 7(4): 741–748 (in Chinese).
- [12] 徐海博, 姜秀艳, 张先贵. 层次分析法在地下综合管廊规划中的应用——以红岛经济区为例[J]. *给水排水*, 2019, 45(增刊): 281–282, 293.
- XU Haibo, JIANG Xiuyan, ZHANG Xiangui. Application of analytic hierarchy process in planning of underground utility tunnel—taking Hongdao economic zone as an example [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(S1): 281–282, 293 (in Chinese).
- [13] 王博彦, 戴雄奇, 林峰, 等. 基于大数据的城市供水管网风险评估模型研究[J]. *给水排水*, 2020, 46(7): 154–157.
- WANG Boyan, DAI Xiongqi, LIN Feng, *et al.* Research of risk assessment model of urban water supply network base on big data [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(7): 154–157 (in Chinese).

作者简介: 阮超 (1980 –), 男, 湖北武汉人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事水环境综合治理工作。

E-mail: 1847406093@qq.com

收稿日期: 2020–10–21

修回日期: 2020–12–10

(编辑: 衣春敏)