

朱贵兵, 李俊, 苏善昭. 管内检测机器人在城镇供水管网评估中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(12):183–190.

ZHU G B, LI J, SU S Z. Application of in-pipe inspection robot in evaluation of urban water supply pipelines network [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(12):183–190.

管内检测机器人在城镇供水管网评估中的应用

朱贵兵*, 李俊, 苏善昭

(上海市供水水表强制检定站有限公司, 上海 201900)

摘要 面对供水管网密集度高、体量大、管龄长等特征,同时因地下管网的复杂性使得供水管网的改造和维修带来巨大挑战,越来越多的管道在超龄和受损状态下运行,给城市安全带来隐患。以往的供水管线评估模型多使用单纯的爆管事故统计数据来评价管道事故,而统计量的限制不足以用来对管网进行全面风险评估。近年来,供水管道带压带流内检测技术日趋成熟,而基于此检测方法的管道运行状态评估方法尚未统一。文章在采用管道内检测机器人对上海市中心城区的老旧、隐患管网进行内窥检测的基础上,借鉴排水管道评估的方法,以管道内实际的可视化检测成果半定量风险评价方法分析管段缺陷,提出了针对城镇供水管网中某一特定管段运行状态评估、量化管道风险的方法,对管道风险进行预判和控制,并对某一管段进行了实例评估。文章提出的供水管道运行状态的半精确评估方法有助于供水企业准确掌握供水管网运行状态,一定条件下可推广应用,未来还可借助其他检测手段对评估结果进行交叉验证和多数据融合分析,同时可建立供水管道动态风险评估模型,以实现安全风险的实时预警。

关键词 供水管道 缺陷 检测 风险评估 案例分析

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)12-0183-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.12.023

Application of In-Pipe Inspection Robot in Evaluation of Urban Water Supply Pipelines Network

ZHU Guibing*, LI Jun, SU Shanzhao

(Shanghai Water Supply Meter Compulsory Verification Station Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract Given the high density, large volume, and aging of water supply networks, along with the complexity of underground pipe networks, the transformation and maintenance of water supply networks present significant challenges. The increasing number of aging and damaged pipelines poses hidden risks to urban safety. Previous evaluation models for water supply pipelines often relied on statistical data of pipe burst accidents, which had limitations in assessing the comprehensive risk of the pipeline network. In recent years, pressurized detection technology for water supply pipelines has become more mature, but there was no unified evaluation method for assessing the operational state of pipelines based on this detection method. This study drew on the method of evaluating drainage pipelines and applied it to the endoscopic detection of old and concealed pipeline networks in the central urban area of Shanghai, using pipeline inspection robots. The study analyzed pipeline defects through semi-quantitative risk assessment based on actual visual inspection results. It proposed a method to evaluate the operational status of specific sections in the urban water supply network and quantify pipeline risks. An example of evaluating a particular pipeline section was provided. The accurate evaluation method for water supply pipeline operational status presented in this study helps water supply enterprises accurately understand the operational state of their pipeline networks. Under specific conditions, this method can be popularized and applied. In the future, other monitoring and detection methods can be used to validate the evaluation results, and multi-data fusion analysis can be conducted. Additionally, a dynamic risk assessment model for water supply pipelines can be established to enable real-time early warning of safety risks.

Keywords water supply pipelines defect detection risk assessment case analysis

[收稿日期] 2023-04-07

[通信作者] 朱贵兵(1992—),男,研究方向为城市供水管网运行管理,E-mail:823076899@qq.com。

在城镇供水系统中,尤其是在超级大都市上海,供水管网规模庞大,拓扑结构复杂,部分供水管网已运行超过 100 年^[1]。目前在役供水管道的主要构成材料以钢管和铸铁管为主,金属管道使用率超过 70%。尽管在敷设时对供水管道内部采取了防腐措施,仍然存在因管材材质参差不齐、管道超龄使用、管网运行环境恶劣等因素而导致管道内壁出现严重腐蚀、结垢。与此同时,在管网运行期间,因管网维护不当、邻近工程私接乱改而导致管内出现气囊、障碍物、冗余接口、变形甚至漏点等影响管网正常运行的现象。

以往的供水管线评估模型多使用单纯的爆管事故统计数据来评价管道事故,而统计量的限制不足以用来对管网进行全面风险评估^[2]。2021 年上海市出台了《城市供水管网安全风险评估技术规范》地方标准,从管道物理属性、管网周边环境、管网运维状态 3 个方面总结了影响城市供水管网风险发生可能性的要素,并从区域重要程度、影响居民数量、中断供水时间、事件漏失水量、影响区域范围等情况对供水管网事故后造成的影响进行评价,填补了供水管网安全风险评估标准缺乏的空白^[3]。

面对供水管网密集度高、体量大、管龄长等特征,同时因超大型城市道路交通及各种地下管网的复杂性,使得供水管网的改造和维修带来巨大挑战,越来越多的管道在超龄和受损状态下运行,给城市安全带来隐患。近年来,上海引入了 Permanet、智能球、Sahara、Aquarius 等国内外先进的管网检测技术手段用于管网检测、监测以发现管网漏损,降低管网产销差。其中,Sahara 技术不仅可以用于发现管道漏损,更能够凭借其可视化的检测成果来了解管道内部的实际受损状态、用数据量化综合管况以反映管道最真实的情况。类似于 Sahara 的基于声学、无损检测手段的国内检测设备诸如 Snake701、谛听™60、G70 也已成熟运用在管道内检测中,在上海市检测长度逾 200 km,但针对特定管段的管道运行状态评估方法尚未统一。本文借鉴排水管道评估的方法,采用定级和打分的半定量风险评价方法对管道进行受损状态评估,同时结合管段影响用户量、敷设区位、周边道路等级等因素,细化各项风险因素及分级评价指标,给出了建议权重值,并以此建立供水管道失效后果的评估方法。

1 管道内检测系统

当前的管道内检测系统一般都是高灵敏水听器、高清视觉集成的带水带压无损检测技术,均可在正常供水状态下实现主检测设备的投放和对管道内部高清影音数据的采集。

鉴于实际应用过程中各种管道内检测设备的参数、操作使用以及检测能力大同小异,本文将以深圳市博铭维技术股份有限公司生产制造的型号为 Snake701 的供水管道内检测设备为参考。Snake701 配备了以下一系列的组件以形成一整个检测系统:1)单节内置高灵敏度水听器、高清摄像单元、高精度定位发射模块以及微型 6 轴惯性导航姿态传感器的胶囊式探视器仓(集成度优于上代串式传感器仓);2)辅助探视器仓进入待检管道的插入装置(较上代笨重的管式推送装置更便捷);3)抗拉 300 kg 的线缆及缆盘,包含探视器通信光缆、供电线缆、锂电池以及与操控平台连接的通信模组;4)送缆、收缆装置,包含计米器和消毒装置;5)接收定位信号的追踪定位机;6)插入式流量计;7)控制探视器声光系统、收送线缆、接收和处理音视频的平板电脑。

该套检测设备在理想条件下能够检测管径 DN200~DN3000 的任意类型和材质的供水管道,能够通过 DN500 及以上带有蝶阀的复杂管道。该套检测系统能够通过插入装置连接最小 DN80 的闸阀将带有牵引伞的探视器仓投放至待检管道,探视器仓将依靠水流传递给牵引伞的推力在管道中实现前行,在管况良好的情况下(检测区域范围内单个管道弯度不大于 90°,累计弯度不小于 270°;管内水流速为 0.3~3.0 m/s;管内水压为 0.1~1.7 MPa),单次有效检测距离理论上不受限制(需定制线缆长度)。在检测过程中,主检管道无需停水但需要一定的流速(与主检管道相连接的其他管段需停水),Snake701 配备了 5 种不同型号的牵引伞以适应在不同流速情况下的检测,所以在检测前需使用插入式流量计对管中流速进行测量,并以测得的流速数据作为伞面选择的依据。图 1 为管道内检测系统的工作示意图。

Snake701 检测系统的视频系统能够清晰地观察到管道内存在的管道阀门、支管、非法接头等管道附属管件或滞留气囊、管瘤、堆积物、泄漏等缺陷情况,并能够根据惯性导航姿态传感器确认附属物或

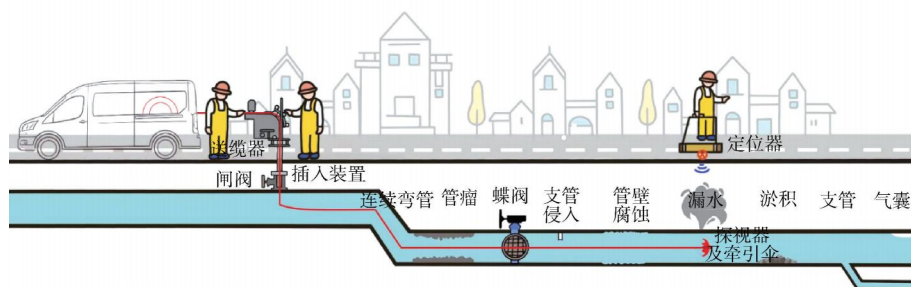


图1 管道内检测系统工作

Fig. 1 Working Inspection System in Pipeline

缺陷的时钟位置,根据管径、检测距离、图像估算出缺陷面积大小及严重程度。高灵敏度水听器能够智能识别漏点大小。在检测时,当发现气囊、管瘤、漏点、非法接头等需要进行地面定位时,可使用接收定位信号的追踪定位机对探视器的位置进行精准定位。该系统可对覆土深度不超过8 m的管道中的探视器进行精准定位,定位精确到±0.5 m。

2 管道运行状态评估模型的构建

2.1 管道受损状态评估

供水管道的受损状况跟管道本身材质、管径大小、所使用年限等因素有关,定义供水管道的缺陷类型包括:结构缺陷、连接缺陷及运行状态缺陷。结构性缺陷主要是本体结构的损坏,是由管道发生腐蚀、变形、断裂等导致的。连接缺陷是未在管线图中标注的冗余支管等连接。功能性缺陷主要是指管道内部因施工、制水工艺等原因造成管道内部过水断面变小、混入杂质悬浮物等。

供水管道的受损状况的研究首先需要选择评价指标,评估结果的准确性也取决于评价指标是否正确、合理、可靠。管径、管材、管龄、覆土深度、道路等级等指标在国内外评价供水管网健康状况中被大量选用^[4],因供水管道本身具有多样性和复杂性,在进行评价指标筛选时,需要考虑的健康状况影响因素众多。鉴于上海市区中心范围内的管道在覆土深度、运行管压、温差、道路荷载指标间差异较小,所以在进行评估指标选择时,重点考虑管材、管径、管龄以及检测所见的结构、连接和运行状态缺陷。

管道受损状态评估(半定量风险评价方法)由两大项风险因素构建:管道缺陷检测结果及管道物理属性。缺陷检测结果定义如表1所示,管径 D 、管材 M 、管龄 A 3个管道物理属性指标评分参照《城市供水管网安全风险评技术规程》(表2~表4)。供

水管道受损状态评估采用式(1)~式(6)计算。

$$S = \frac{\omega_1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n p_i + \omega_2 (\omega_{L1} \cdot D + \omega_{L2} \cdot M + \omega_{L3} \cdot A) \quad (1)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 1 \quad (2)$$

$$\omega_{L1} + \omega_{L2} + \omega_{L3} = 1 \quad (3)$$

$$S_{\max} = \max \{ p_i \} \quad (4)$$

$$S_{\max} \geq S \text{ 时}, F = S_{\max} \quad (5)$$

$$S_{\max} < S \text{ 时}, F = S \quad (6)$$

其中: S 、 F ——管道受损状态评分;

p_i ——缺陷等级评分系数,参照表5;

n ——缺陷总数;

ω_1 、 ω_2 ——缺陷检测结果、管道物理指标的计算权重,分别取0.7、0.3;

ω_{L1} 、 ω_{L2} 、 ω_{L3} ——管道物理指标中管径、管材和管龄的计算权重,分别取0.15、0.4、0.45^[3]。

计算得到管道受损状况评分数值后,可通过表6对管道受损状态等级进行评估,等级越高代表管道受损状态越严重。

2.2 管道失效后果等级评估

管道失效后果即管道发生风险事件后引起的各类损失或不利影响,可通过管道失效后影响用户量、管道敷设区位及管道所在道路等级进行综合评定。按照事故影响用户数量的多少,可以500户、1000户、2000户为界划分出4个区间,影响人口越多,后果越严重,取值越大。按照事故发生区位的重要性,划分为重点区域、重点区域邻近区以及一般区域。按照事故发生区位对道路交通的影响可划分为主干路、次干路及支路。管道失效后果评分系数和失效后果评估权重分别如表7、表8所示。管道失效后

表 1 管道缺陷定义

Tab. 1 Definition of Pipeline Defect

类别	缺陷指标	缺陷描述
管道结构缺陷	泄漏	管道破裂导致的水量流失
	变形	管道的原始形状被改变
	错位	两根管道的套头接口处偏离
	腐蚀	管道内壁受到有害物质的腐蚀或管道内壁受到磨损
	管瘤	管道横截面积的附着堆积物
	内涂衬脱落	管道内涂衬剥落
	异物侵入	非自身管道附属设施的物体存在于管道内
管道连接缺陷	冗余接口	未在管线图标注的支管等连接
管道运行状态缺陷	气囊	管道内由气体聚集形成的气囊
	杂质	管道内悬浮物或沉积物
	局部淤塞	管道中有机或无机物,在管道底部沉积,形成了减少管道横截面的沉积物
	障碍物	管道内存在障碍物,影响水流通行

表 2 管材物理属性指标评分值

Tab. 2 Physical Attribute Index Score of Pipe Material

管材	评分值
球墨铸铁	1
钢管	2
预应力水泥	3
石棉水泥	6
灰口铸铁	8
聚乙烯 (PE)	3
塑料 (除 PE)	4
其他管材	5

注:对于采用非开挖修复的管道,按照修复类型与管材进行分类;功能性修复管道宜按原来管道材质作为评分依据,结构性修复管道宜按照新材料物理性能进行类比评分。

表 3 管径物理属性指标评分值

Tab. 3 Physical Attribute Index Score of Pipe Diameter

管径/mm	评分值
300≤管径<500	1
500≤管径<600	5
600≤管径<800	9
800≤管径<1 200	4
管径≥1 200	7

果评分 R 计算如式(7)。

$$R = \sum_{i=1}^n q_i \cdot E_i \quad (7)$$

其中: q_i ——第 i 项失效后果评估评分系数;

E_i ——第 i 项失效后果评估权重;

n ——失效后果评价总数。

表 4 管龄物理属性指标评分值

Tab. 4 Physical Attribute Index Score of Pipeline Service Life

管龄/年	评分值
0≤管龄<10	5
10≤管龄<30	8
30≤管龄<50	2
50≤管龄<70	8
管龄≥70	6

注:对于 1950 年—1970 年、1985 年—1995 年敷设的供水管道,其评分值宜定为 9。

计算得管道失效后果评分数值后,可通过表 9 对管道失效后果等级进行评估,等级越高代表管道失效后影响程度越高。

2.3 管道运行状态等级评估

综合考虑管道受损状态及管道失效后果二者的影响,对管道运行状态等级进行评估,运行状态等级分为低风险、中风险、高风险 3 个级别,评估方式如表 10 所示。

3 供水管道内检测结果评估实例

《上海市供水管网隐患管道闭环管控工作指南(试行)》要求对市内当年无法改造的隐患管网进行闭环管理,一系列先进的管网检测、监测手段得到了应用和推广。作为管网闭环管理措施之一的系统式管道内检测已实施了逾 200 km 的检测工作,指导了部分中心城区的管网风险排查及老旧管网更新改造工作,同时积累了大量的检测经验,在降低城市供水

表 5 管道缺陷等级评分系数
Tab. 5 Grading Coefficient of Pipeline Defect Grade

类别	缺陷指标	缺陷等级	缺陷评分	缺陷描述
管道结构缺陷	泄漏	轻度缺陷	10	漏量 ≤ 8 L/min (0.1 MPa)
		中度缺陷	10	漏量为 8~40 L/min (0.1 MPa)
		重度缺陷	10	漏量 >40 L/min (0.1 MPa)
	变形	轻度缺陷	2	变形小于管道直径的 5%
		中度缺陷	5	变形为管道直径的 5%~15%
		重度缺陷	10	变形大于管道直径的 15%
	接口错位	轻度缺陷	2	相连接的两个管口偏差小于管壁厚度的 0.5 倍
		中度缺陷	5	相连接的两个管口偏差为管壁厚度的 0.5~1.0 倍
		重度缺陷	10	相连接的两个管口偏差为管壁厚度的 1.0 倍以上
	腐蚀	轻度缺陷	2	表面轻微剥落,管壁出现麻面
		中度缺陷	5	表面剥落明显,显露凹凸面
		重度缺陷	10	表面呈现严重蜂窝状态
	管瘤	轻度缺陷	2	管瘤突起小于半径 5%
		中度缺陷	4	管瘤突起为半径 5%~10%
		重度缺陷	8	管瘤突起大于半径 10%
	内涂衬脱落	轻度缺陷	1	管道防腐层轻微脱落,且未露出管道材质
		中度缺陷	2	管道防腐层脱落,露出管道材质且环向覆盖范围不大于 30°
		重度缺陷	4	管道防腐层脱落,露出管道材质且环向覆盖范围大于 30°
	异物入侵	轻度缺陷	1	占用过水断面小于 10%
		中度缺陷	3	占用过水断面 10%~25%
		重度缺陷	6	占用过水断面大于 25%
管道连接缺陷	冗余接口	轻度缺陷	2	支管管道截面总和占主管管道截面积不大于 20%
		中度缺陷	6	支管管道截面总和占主管管道截面积 20%~40%
		重度缺陷	10	支管管道截面总和占主管管道截面积大于 40%
管道运行状态缺陷	气囊	轻度缺陷	6	气囊不大于管道直径的 10%,且长度不超过 10 m
		中度缺陷	8	气囊为管道直径的 10%~30%,且长度不超过 30 m
		重度缺陷	10	气囊大于管道直径的 30%或长度超过 30 m
	杂质	轻度缺陷	1	水质清晰,少量悬浮物或沉积物
		中度缺陷	4	水质较为清晰,较多悬浮物或沉积物
		重度缺陷	8	水质混浊,较多悬浮物或沉积物
	局部淤塞	轻度缺陷	2	淤塞厚度为管径的 10%~30%
		中度缺陷	4	淤塞厚度为管径的 30%~50%
		重度缺陷	8	淤塞厚度大于管径的 50%
	障碍物	轻度缺陷	1	占用过水断面小于 10%
		中度缺陷	3	占用过水断面 10%~25%
		重度缺陷	6	占用过水断面大于 25%

漏失率、减少供水管网事故等方面取得了显著成效。
图 2 展示了检测过程中部分典型缺陷图。

本文结合实际,选取上海市中心城区某路段
DN500 铸铁管进行了管道内检测及管道运行状态

表 6 管道受损状态等级评估
Tab. 6 Grade Assessment of Damaged State Pipeline

管道受损状态等级	状态描述	评分数值 F
3 级	受损严重	>7.0
2 级	状态不佳	$3.5 \sim 7.0$
1 级	状态良好	≤ 3.5

表 7 管道失效后果评分系数
Tab. 7 Score Coefficient of Pipeline Failure Consequence

评估指标	影响用户量				敷设区位			道路等级		
	0~500	500~1 000	1 000~2 000	$>2\ 000$	一般区域	重点区域 临近区	重点区域	支路	次干路	主干路
评分数值	1	4	7	10	4	6	9	3	5	8

表 8 管道失效后果评估权重
Tab. 8 Weight of Pipeline Failure Consequence Assessment

评估指标	权重
影响用户量	0.5
敷设区位	0.2
道路等级	0.3

表 9 失效后果等级评估
Tab. 9 Failure Consequence Grade Assessment

失效后果等级	失效后果描述	评分数值 R
3 级	影响严重	>7.0
2 级	影响中等	$2.5 \sim 7.0$
1 级	影响较小	≤ 2.5

评估。该管段埋设于 1991 年,管段长为 76.6 m,已运行超 30 年,目前尚在服役状态,缺陷检测结果汇总如表 11 所示。

由表 11 中的检测结果,参照本文提出的管道受损状态评估方法,计算得出管道受损状态评

表 10 管道运行状态等级评定方法
Tab. 10 Grade Evaluation Method of Pipeline Operation State

管道运行状态等级	管道受损状态等级			
	1 级	2 级	3 级	
管道失效后果等级 1 级	低风险	低风险	中风险	
2 级	低风险	中风险	高风险	
3 级	中风险	高风险	高风险	

分 $F=S=3.71$,评估为该管道受损状态等级为 2 级(状态不佳)。考虑该管段敷设在一般区域的主干路,影响用户数小于 500 户,则该管段失效后果等级

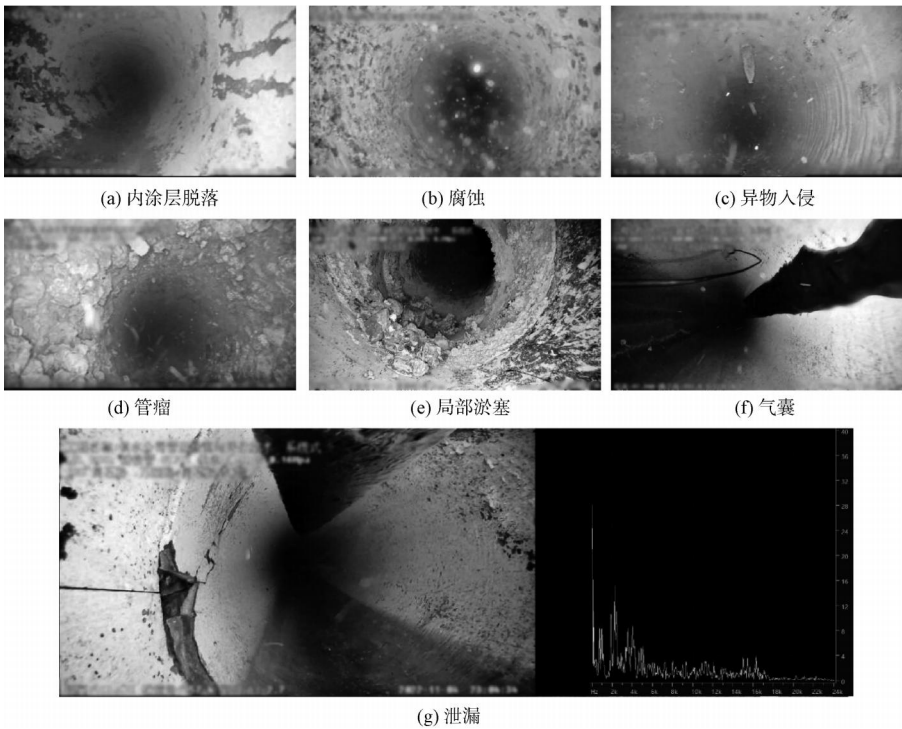


图 2 典型管道缺陷

Fig. 2 Typical Pipeline Defect

表 11 供水管道检测缺陷汇总
Tab. 11 Summary of Inspection Defects of Water Supply Pipelines

距离投放点距离/m	缺陷名称	等级	管道内部状况描述
2. 14	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
4. 0	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
5. 2	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
7. 3	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
8. 5	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
9. 4	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
14. 6	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
16. 9	内涂层脱落	轻度	管道防腐层轻微脱落,且未露出管道材质
21. 0	腐蚀	轻度	表面轻微剥落,管壁出现麻面
24. 4	内涂层脱落	轻度	管道防腐层轻微脱落,且未露出管道材质
27. 5	腐蚀	轻度	表面轻微剥落,管壁出现麻面
32. 2	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
33. 5	局部淤塞	轻度	淤塞厚度为管径的 10%~30%
37. 5	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
44. 0	腐蚀	轻度	表面轻微剥落,管壁出现麻面
45. 2	内涂层脱落	轻度	管道防腐层轻微脱落,且未露出管道材质
47. 3	腐蚀	轻度	表面轻微剥落,管壁出现麻面
53. 0	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
59. 0	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
64. 6	异物侵入	中度	占用过水断面 10%~25%
65. 9	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
71. 5	管瘤	轻度	管瘤突起小于半径 5%
76. 2	障碍物	轻度	占用过水断面小于 10%

为 2 级(影响中等)。综合考虑管道受损状态及管道失效后果二者的影响,按照风险分级标准,该管道运行状态等级为中风险,管道基本符合安全要求,管道存在劣化及病害加剧迹象,有可能影响系统安全和整体功能,应对该管道缺陷部位采取维修措施,加强定期检测或监测。

4 结论及展望

管道内检测系统凭借其高效性、精确性、安全性以及可视化的检测成果,可以应用于城镇供水管网运行状态的评估。本文结合供水管道内检测经验,采用管道内窥检测的方法,以管道内可视化检测成果结合半定量风险评价方法分析管道缺陷,参考国内外管线风险评估模型,分析本地区影响供水管道的主要因素,提出了针对城镇供水管网中某一特定管段运行状态评估、量化管道风险的方法,解决了目前供水管道维护管理被动、滞后等问题,能够为管道维护管理与更新改造提供一定的技术依据。

本文提出的评估方法综合考虑了管道本身以及周围环境的影响,可在根据当地实际情况调整和优化的基础上进行推广应用,在技术上具有一定的借鉴意义。然而,本文提出的评估方法一方面受限于影响管道健康状况因素的差异化指标,另一方面是检测数据的量化。当前技术条件下的管道内检测仅是对管道内部的声光数据进行采集,手段较为单一,且复杂的服役状态和环境对其多有掣肘,需要结合其他检测手段进行交叉验证和多数数据融合分析评估,以对管道进行全面、精准的运行状态评估,同时可建立供水管道动态风险评估模型以实现安全风险的实时预警。在当前人工智能技术较为发达的背景下,通过缺陷样本的积累可以逐步设计出高精准率管道缺陷识别模型,并将其集成至检测系统中,以提高管道运行状态评估的质量和效率。

参考文献

[1] 王圣,王婷婷,阮久丽,等.上海市供水管网改造工程探讨

- [J]. 净水技术, 2018, 37(s1): 155-157, 163.
- WANG S, WANG T T, RUAN J L, et al. Discussion on reconstruction of water supply pipe network in Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(s1): 155-157, 163.
- [2] MUHLBAUER W K. 管道风险管理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- MUHLBAUER W K. Pipeline risk management manual[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2003.
- [3] 上海市市场监督管理局. 城市供水管网安全风险评估技术规范: DB31/T 1332—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

- Shanghai Market Supervision Administration Bureau. Technical specification of safety risk assessment for urban water supply pipelines network[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [4] 李蒲剑, 高金良, 张怀宇, 等. 城镇供水管网漏损控制技术探讨与展望[J]. 给水排水, 2020, 56(6): 52-57, 64.
- LI P J, GAO J L, ZHANG H Y, et al. Summary of the frontier technology and experience of leakage control in urban water supply networks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(6): 52-57, 64.

(上接第 146 页)

去除率为 76%~95%;不具备植物覆盖的典型源头 LID 设施(透水铺装)对 SS、COD_{Cr} 的去除率仅为 54%左右;对 TN 的去除率仅为 42%左右。

(3)不同降雨事件之间由于降雨量、最大降雨峰值及降雨时长不同,而导致径流的不同,最终也是因为径流的不同产生了径流总量和典型源头 LID 设施的径流控制效果、径流污染物去除率在不同雨型之间有差别现象。分析得出,降雨量较大且峰值雨量较为明显、径流污染较为严重且内涝风险较大的工业区或商业区,布置雨水花园、高位花坛等生物滞留带类型的典型源头 LID 设施来削减径流量,降低内涝风险以及净化初期雨水所造成的径流污染;降雨量较小且存在多个峰值雨量的地区,可以布置透水铺装、透水沥青等硬化铺装类典型源头 LID 设施以及调蓄池来收集净化后的雨水,从而达到削减初期雨水污染,雨水循环利用的目的。

参考文献

- [1] GOSWAMI B N, VENUGOPAL V, SENGUPTA D, et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment[J]. Science, 2007, 314(5804): 1442-1445. DOI: 10.1126/science.1132027.
- [2] EASTERLING D, EVANS J L, GROISMAN P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3): 417-417.
- [3] 邓海军, 郭斌, 曹永强, 等. 1961—2016 年中国昼夜降水变化的时空格局[J]. 地理研究, 2020, 39(10): 2415-2426.
- DENG H J, GUO B, CAO Y Q, et al. Spatial and temporal patterns of daytime and nighttime precipitation in China during 1961—2016[J]. Geographical Research, 2020, 39(10): 2415-2426.
- [4] 李艳兰, 黄卓, 何洁琳, 等. 1961—2017 年广西区域性暴雨过程变化特征[J]. 气象与环境学报, 2020, 46(1): 51-57.

- LI Y L, HUANG Z, HE J L, et al. Characteristics of the regional rainstorm processes in Guangxi during 1961—2017[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2020, 36(1): 51-57.
- [5] 李娟, 闫会平, 朱志伟. 中国夏季极端气温与降水事件日数随平均气温变化的定量分析[J]. 高原气象, 2020, 39(3): 532-542.
- LI J, YAN H P, ZHU Z W. Quantitative analysis of changes of summer extremes temperature and precipitation days over China with respect to the mean temperature increase [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(3): 532-542.
- [6] 杨春, 张勇, 张亚萍, 等. 近 25 a 重庆地区小时降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(1): 71-80.
- YANG C, ZHANG Y, ZHANG Y P, et al. Analysis on the characteristics of temporal and spatial distribution of hourly precipitation in Chongqing during recent 25 years [J]. Torrential Rain and Disasters, 2020, 39(1): 71-80.
- [7] WAHL T, JAIN S, BENDER J, et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities[J]. Nature Climate Change, 2015, 5: 1093-1097. DOI: 10.1038/nclimate2736.
- [8] ZHANG Q, XIAO M Z, SINGH V P, et al. Max-stable based evaluation of impacts of climate indices on extreme precipitation processes across the Poyang Lake Basin, China[J]. Global & Planetary Change, 2014, 122(9): 271-281.
- [9] 顾正强, 朱玲, 龚强, 等. 辽宁省降雨变化对海绵城市低影响开发雨水系统建设的影响[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(5): 76-85.
- GU Z Q, ZHU L, GONG Q, et al. Influence of variation in precipitation on the construction of a low-impact-development rainwater system for sponge city in Liaoning Province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(5): 76-85.
- [10] 龚红君. 天津中心城区典型区域径流污染规律研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
- GONG H J. Study on runoff pollution regulation in typical downtown areas of Tianjin City[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2020.