

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.05.008

基于移动压力监测的供水管网水力模型校核

王 禾, 颜合想, 信昆仑, 张诗佳, 陶 涛
(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要: 供水管网水力模型校核是开展模型深度应用的重要前提,管网监测点相对较少导致观测信息不足是其瓶颈问题之一。针对上述问题,提出了移动压力监测的校核新思路,通过“先整体,后局部,再整体”的移动监测策略,在监测器数量有限的前提下实现了提高管网空间监测覆盖率、获取更广泛的管网运行状态观测信息的目标。通过建立基于移动监测信息的供水管网管道粗糙系数校核方法,依靠分批次的监测数据,逐步提高校核参数精度,并证明了不同批次间校核精度的可累积性。案例测试中提出的移动监测校核方法使得管道粗糙系数的相对误差从18.85%降至1.52%,在效果上十分接近一次性同时布置同等数量监测点的相对误差(1.38%)。

关键词: 供水管网; 移动压力监测; 模型校核; 管道粗糙系数

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)05-0050-07

Calibration of Water Distribution Network Hydraulic Model Based on Mobile Pressure Monitoring

WANG He, YAN He-xiang, XIN Kun-lun, ZHANG Shi-jia, TAO Tao
(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The calibration of water distribution network (WDN) hydraulic model is an important premise for its advanced application, and the lack of observation information caused by relatively few monitoring points is one of the bottleneck problems. This paper proposed a new strategy called mobile pressure monitoring to address this issue. The spatial monitoring coverage of WDN was evidently improved with a limited number of sensors, and more extensive observed information of WDN was obtained through an “overall, part by part, overall” mobile pressure monitoring strategy. In addition, a set of feasible mobile monitoring layout approach and corresponding calibration methods for pipe roughness coefficient was established. Relying on the batched monitoring data, the calibration parameters were corrected step by step, and the accuracy was proved to be cumulative during the iterative monitoring process. The test results indicated that the mobile monitoring strategy evidently decreased the roughness relative error of the WDN from 18.85% to 1.52%, and the final relative error 1.52% was extremely close to the result of 1.38% when all the pressure sensors were set simultaneously.

Key words: water distribution network; mobile pressure monitoring; model calibration; pipe roughness coefficient

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3208104、2023YFC3208101); 国家自然科学基金资助项目(51808396、51978494、52270093); 上海市浦江人才计划项目(20PJ1417500)

通信作者: 颜合想 E-mail: hxyan@tongji.edu.cn

管网水力模型校核精度是决定模型应用深度的重要基础^[1-5]。在实际管网模型的校核过程中,由于压力、流量监测点数量一般远少于管网模型待校核参数,使得模型校核问题欠定,对校核参数的求解存在“异参同效”的问题。国内外学者提出了不同的校核方法以求获得更优化的结果,主要包括智能进化类算法如遗传算法,解析迭代算法如高斯牛顿法、贝叶斯分析等^[6-10];部分学者针对监测点的位置展开研究,在监测设备有限的情况下最大化校核观测信息收益^[11-12];部分学者将先验信息引入校核过程,如按照管材和管龄等对校核参数分组合并以减少参数个数^[9],或采用其他方法如SVD法使模型可解等^[10];此外,也有学者考虑通过增设虚拟监测点以增加模型校核问题中的边界条件^[13],以及采用图神经网络估计未知压力监测点的方法^[14]。

以上研究均取得了一定成果,但并未从本质上解决观测信息不足的问题,若要进一步提提高管网模型的校核精度,必须从实际管网中获取更多数据,并充分融合吸收不同时间、空间监测获得的管网运行状态信息进行模型参数校核。基于上述思路,笔者根据以下几点考虑提出了移动监测策略:①尽管近年来物联网传感技术的发展使得管网监测系统进一步完善,但是监测点数量仍远小于待校核参数数量;②管网中某一监测点的运行状态观测信息一般与一定范围内的管网参数密切相关,固定在同一位置的长时间压力监测数据对其有效覆盖范围内的管网参数修正效果的增益将随时间递减;③对于拆卸安装便携的监测设备,如果监测传感器在同一个位置获取足够时长的观测信息后,将其移动到其他位置,可以在新一批空间获得不同的监测信息;④模型参数在移动监测过程中可假设近似不变处理;⑤对应的管网模型校核方法可对不同时空的监测信息进行充分融合吸收,实现观测信息对模型参数校核效果的叠加,提升整体管网运行状态观测数据的信息量。在满足以上假设条件的情况下,通过建立与移动监测策略相应的模型参数校核方法,突破以往纯固定监测方式导致监测数据覆盖不全的信息瓶颈,从本质上解决模型校核欠定问题。

1 移动监测策略

本研究拟以管网压力移动监测方案获取监测信息,对管道粗糙系数进行校核,进而对提出的移

动监测策略进行可行性阐述。一般认为供水管网管道的粗糙系数变化相对缓慢,在相当长的时间内可认为其保持不变,这也是目前大多数校核方法中隐含的假设^[1-11]。对于供水管网水力监测系统,当压力监测点在同一位置监测足够长时间后(如1 d),粗糙系数校核模型将会收敛,此时继续采集该位置的监测数据将难以显著提高模型粗糙系数的精度,即已近似达到边际效应。而如果将监测设备移动到新位置,舍弃时间维度上的数据增量,换取空间位置上的信息增量,将进一步提高监测点的空间覆盖率,以更多地消除模型参数估计的不确定性,提高模型参数校核的准确度。

1.1 压力监测点空间移动部署方案

对于一定规模的供水管网系统,以及一定数量的便携压力监测传感器,通过移动监测部署方案,在不考虑重复监测的情况下,理论上可以遍历所有模型节点。然而在不确定不同监测点对参数校核贡献度的情况下,如何确定压力传感设备的移动监测路径,以及合适的监测周期是进行移动监测合理部署要解决的问题。假设每个压力点的观测数据覆盖一定范围的管道粗糙系数,当监测点布置到一个新的位置时,其对应位置的管道粗糙系数能被进一步校准,而再当监测传感器移走时,新位置所对应的管道粗糙系数被校准,而原位置对应管道已改进的管道粗糙系数不会被严重“损坏”,如此反复,通过不断移动监测方案的实施,理论上能达到逐步覆盖所有区域的叠加效果。事实上当校核过程是基于敏感度系数的前提下,上述的假设过程在很大程度上能够实现,后续将通过案例详细说明。因此本研究的具体方案为按虚拟分区进行移动监测部署,并建立相应的校核方法逐步进行校核。

基于移动监测数据逐次进行参数校核的过程类似于人工智能模型训练中随机梯度下降(SGD)训练理论方法^[15],采用分批次子数据集对模型进行训练,通过多次训练累积,完成模型的整体训练。借鉴SGD模型训练的技术理论,本研究提出了“先整体分散,后局部集中,再整体分散”的移动监测空间部署策略。首先采用“整体分散监测”的布置方案,其目的是尽可能全面地反映管网整体的压力分布情况,对所有管道的粗糙系数实现初步调整,使得所有管道校核参数均能获得初步修正值,可采用传统的压力监测点优化方法进行第一次监测点布置。

根据可用的监测器数目与合适的间隔均匀布置到整体管网区域中[见图1(b)]。整体上在所有参数均获得校核初步修正值后,再进行“局部集中监测”,实现局部参数精度的提升。由于校核方法基于管道敏感度系数与梯度下降法实现,因此管道修正量的空间分布与监测点布置位置有很强的相关性,基于此可对整个管网的校核区域进行虚拟分区,如图1(a)所示(示例虚拟分区数为3),在每个虚

拟分区均匀布置监测点[见图1(c)~(e)],以逐步细化校核参数。本研究考虑的监测点部署因素包括:①单次可用监测器数量;②水厂供水分区特点;③管网拓扑特点。

在经过移动周期2~4将图1(a)中的虚拟分区遍历完毕后,为避免部分区域校核的偏移,最后进行一次整体分散监测与校核[见图1(f)],以保证最终参数校核的稳定性。

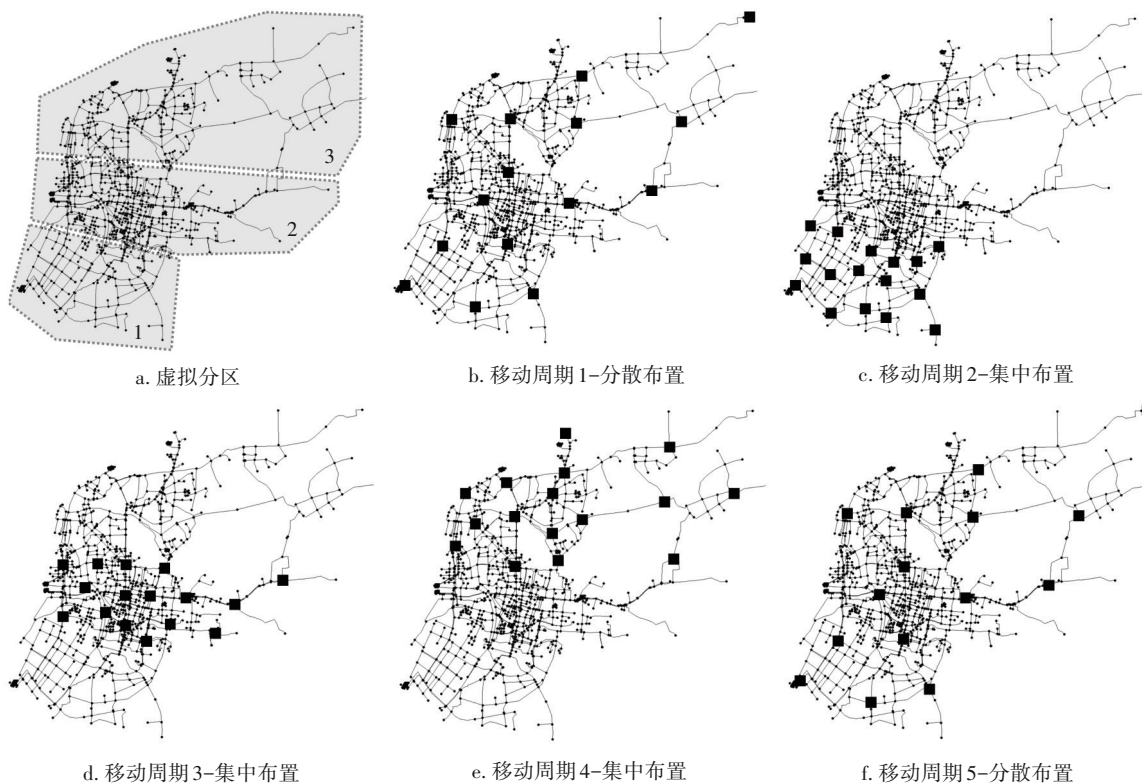


图1 移动压力监测点部署方案

Fig.1 Deployment plan for mobile pressure monitoring points

1.2 压力监测点移动监测周期

移动监测策略实施的另一个重要参数是移动监测周期,为了确定合适的监测周期时长,在先导实验测试研究了不同移动监测时长 T (0.5、1、7、15 d)对模型参数校核精度与效率的影响,其结果如图2所示。

由图2可知,除 $T=0.5$ d外,其他移动周期对校核精度与收敛速度的影响区别不大。诚然,节假日、不同月份之间的用水模式可能发生变化,带来一定的校核精度影响,但考虑到1 d是最为显著的用水模式周期且能够反映绝大多数的一般工况,综合考虑实际工程中的实践成本,选取1 d作为管道粗糙系数校核的最佳移动监测周期。

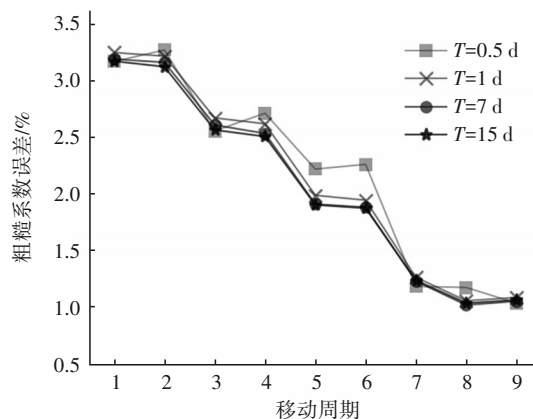


图2 移动校核精度与监测周期时长的相关性分析

Fig.2 Correlation analysis between mobile calibration accuracy and monitoring cycle duration

2 基于移动监测的管网校核方法

整套校核方法由移动监测策略与对应的校核器两部分构成,整体校核流程如图3所示。校核器的主要作用为利用每次移动观测数据,通过求解校核残差方程对管道粗糙系数进行一个阶段的修正。校核残差方程系统由敏感度矩阵和本批次监测点位的观测值构建。

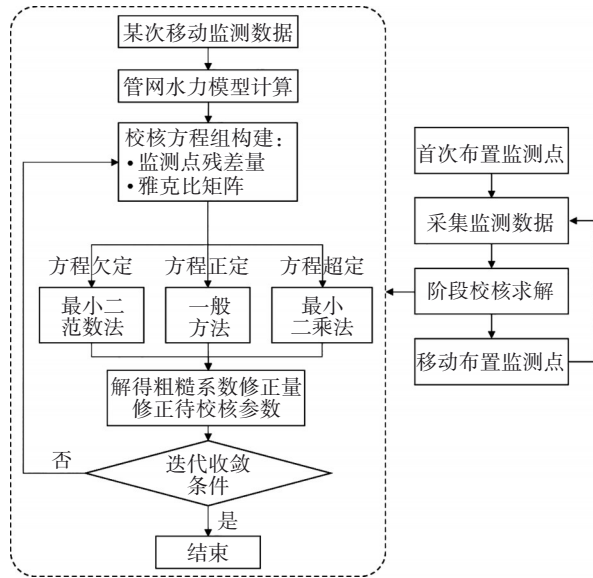


图3 移动校核流程

Fig.3 Flowchart of mobile calibration

2.1 供水管网雅克比矩阵解析式

敏感度矩阵可以定量表示参数变化对模型模拟结果的影响,Du等^[16]应用矩阵分析法建立了供水管网雅克比矩阵的解析式,如下所示:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{C}} = (\mathbf{A} \mathbf{B} \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A} \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \text{diag} \left(\frac{q_i}{1.852 h_i} \right) \quad (2)$$

$$\mathbf{S} = \text{diag} \left(\frac{q_i}{C_i} \right) \quad (3)$$

式中: \mathbf{H} 为节点压力矩阵; \mathbf{C} 为管道粗糙系数矩阵; \mathbf{A} 为 $n \times m$ 的管网关联矩阵,其中 n 为管网模型节点数、 m 为管网模型管段数; \mathbf{B} 、 \mathbf{S} 为求导系数矩阵; diag 为对角阵符号,阶数为 m ; q_i 为管段 i 的流量; h_i 为管段 i 的单位水头损失; C_i 为管段 i 的粗糙系数。

2.2 校核残差方程构建

模型粗糙系统校核的目标是通过修正初始设置的 \mathbf{C} ,使得模型模拟结果与真实管网的监测值不断接近。当模型修改 $d\mathbf{C}$ 时,则会对应产生压力误差

$d\mathbf{H}$ 。利用式(1)求得的雅克比矩阵和监测节点的压力残差,将管网非线性方程做一阶线性近似后,构建节点压力关于粗糙系数的迭代修正方程如下:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{C}} \cdot d\mathbf{C} = \Delta \mathbf{H} \quad (4)$$

$$\Delta \mathbf{H} = \mathbf{H}_{\text{true}} - \mathbf{H}_{\text{exp}} \quad (5)$$

式中: $d\mathbf{C}$ 为粗糙系数矩阵修正量; \mathbf{H}_{exp} 为模型求得的监测节点压力矩阵; \mathbf{H}_{true} 为真实管网的监测节点压力矩阵。

由于供水管网为非线性系统,通过式(4)、(5)求得的修正量多次迭代对校核参数进行修正,如下所示:

$$\mathbf{C}_{k+1} = \mathbf{C}_k + d\mathbf{C} \quad (6)$$

式中: k 为迭代次数。

2.3 参数分组与模型求解

由于在实际工程中每次移动的监测点远少于管网校核的参数,即方程组欠定程度往往较高,根据不同管道的空间位置、管材、敷设年限等先验信息,预先将粗糙系数进行分组,可以减少校核问题中未知数的数量。因此本研究对管网进行空间聚类,并对管道粗糙系数进行分组。定义矩阵 \mathbf{G}_e 为 $m \times g$ 的管道分组矩阵, g 为分组数,如下所示:

$$\mathbf{G}_e(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{管道} i \text{在分组} j \text{中} \\ 0 & \text{管道} i \text{不在分组} j \text{中} \end{cases} \quad (7)$$

将引入分组的校核残差方程调整为:

$$\left[\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{C}} \cdot \mathbf{G}_e \right] \cdot [d\mathbf{C}] = [\Delta \mathbf{H}] \quad (8)$$

针对式(8),根据方程与未知数个数情况采用不同的方式进行求解,如图3所示。

3 移动监测校核案例分析

3.1 案例管网概况

该管网位于江苏省南部的M镇,管网模型中包含567根管道、480个用水节点,总管长为147 km,日供水量约 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。模型中简化实际管网中漏损、阀门等因素,以此案例管网为基础,设定测试工况与参数。

3.2 移动监测方案

本测试案例中,管道粗糙系数分组数量、节点流量分组数量均为60个,大用户节点水量依据监测数据分配,其他水量按比流量均匀分配。为了验证移动压力监测校核方法的可行性,只对管道粗糙系数进行校核,故假设节点流量分配为准确值,不做

讨论。管道粗糙系数视管材情况,从 $[60, 150]$ 的范围取值分配给60组管道,作为管道粗糙系数的真值,待校核的管道粗糙系数的初始值均设置为100。以设置管道真值作为验证参数校核准确度的参考。

根据前述的移动监测策略,结合分析案例,整体的压力移动监测方案如图4所示。单批次可同时布置的移动监测压力点数量上限定为20个,共移动监测9次,每批次监测周期为1 d。监测数据反馈频

次为1 h反馈一次,共采集216个时段的数据,在该实验中不考虑监测误差。依照“先整体分散,再局部提升,后整体分散”的策略进行移动监测方案布置,在每一个校核周期中,用一组移动监测布置点位一个周期内的所有监测数据进行模型参数校核,校核完成后移动至下一组布置点位,再进行下一轮的数据采集与校核,后一轮校核在前一轮计算得到的粗糙系数的基础上继续修正。

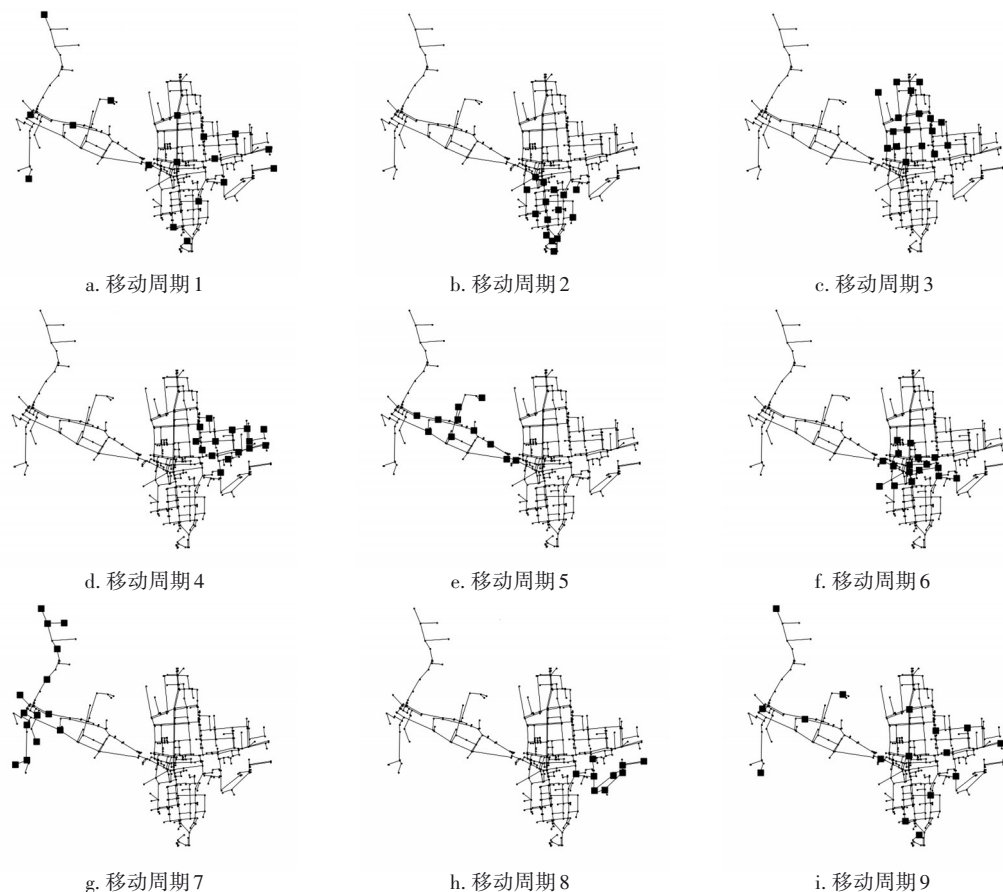


图4 压力移动监测布置方案

Fig.4 Pressure mobile monitoring layout plan

3.3 移动监测校核结果

为了分析移动监测校核的效果,本研究额外设置极端情况下的监测点布置作为对照实验,监测数据时长与移动监测整体时长一致,除监测点布置外,3个案例的其他条件均相同,其管网参数校核的精度如表1所示。Case1为采用本研究提出的移动监测策略所达到的粗糙系统平均精度;Case2对应Case1中全部移动周期监测位置同时布置监测设备时,所得监测数据达到的校核精度,该精度可认为是本研究移动校核(9次)的理论极限;Case3为假设

管网全节点都布置监测器情况下的校核精度,该精度可认为是同等其他条件下模型参数校核的理论极限。由表1可知,移动校核的平均相对误差1.52%与Case2中全部移动监测点位同时布置监测设备的1.38%已经十分相近,说明不同移动批次监测器提供的监测数据能够被有效利用,达到精度逐步累积提升的效果。

由Case1经过9次的移动监测与校核后,最终得到的校核结果可知,随着移动监测方案的逐步推进,总体上离散点逐渐向轴线靠拢, R 逐步提升(由

移动周期1的0.887提升至移动周期9的0.974)。表明随着移动监测方案的实施,粗糙系数校核值 C_{exp} 逐步逼近真实值 C_{true} ,体现了移动监测校核可实现逐步提升校核参数精度的效果。

表1 不同监测点布置方案的校核精度比较

Tab.1 Comparison of accuracy with different monitoring points layout solutions

项目	全节点压力平均 绝对误差/m	粗糙系数平均 相对误差/%	粗糙系数的 相关系数 R
Case1	0.018	1.52	0.974
Case2	0.012	1.38	0.975
Case3	0.006	0.49	0.999

由管网模型粗糙系统平均绝对误差与相对误差随移动监测周期推进的精度改进过程可知,该校核方法在第一个周期已经具备相当高的校核精度,这一步可视为传统固定监测校核的结果。经过多次移动校核后,整体压力绝对误差均值从1.410 m减小到0.018 m。而整体粗糙系数在经过9次移动监测校核后,模型模拟压力精度实现累积提升;整体粗糙系数的校核精度随移动监测与校核的推进提升明显,最终整体相对误差从初始的18.85%降低至1.52%。总体上该移动校核方案能够达到在传统校核方法上进一步提升校核精度的目的,表明了移动监测校核思路的有效性。

需要说明的是,本测试案例中,所谓的监测真值源于模拟数据,并未考虑实际监测设备中各种误差情形的影响,故校核结果的精度能够达到较高水平。

4 结论

① 基于移动压力监测的校核策略能够有效实现供水管网管道粗糙系数的逐步修正,实现模型参数校核精度的累积提升。

② 分批次的移动监测校核在最终效果上能够逼近一次性同时布置同等监测点数量的工况。

③ “先整体分散,再局部集中,后整体分散”的移动监测布置策略与校核方法,能够通过轮换移动监测提高管网监测空间覆盖率,突破监测设备数量限制导致观测数据不足的瓶颈问题,达到管网模型校核精度提升的目标,是一种在工程中可行并且容易操作的有效方法。

④ 本研究是对移动监测思路的初步探索,对于移动监测方案(如移动次数等)与校核精度边际

效应等问题尚待进一步讨论。

参考文献:

- [1] OLSSON G. Urban water supply automation—today and tomorrow [J]. Journal of Water Supply Research and Technology, 2021, 70(4): 420–437.
- [2] 谭奇峰,高金良,刁美玲,等. 给水管网压力驱动水力模型构建及降漏应用[J]. 中国给水排水,2016,32(15):66–70.
TAN Qifeng, GAO Jinliang, DIAO Meiling, *et al.* Building of pressure-driven hydraulic model for water supply network and its application to leakage reduction [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(15): 66–70 (in Chinese).
- [3] 高泽晨. 基于水力模型的城市供水主干管网联通工程研究[J]. 中国给水排水,2023,39(11):35–41.
GAO Zechen. Drinking water distribution main network interconnection project based on hydraulic model [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(11): 35–41 (in Chinese).
- [4] 王银宇,盛继红,潘斌,等. 服务于水力模型的监测点优化布置技术应用[J]. 中国给水排水,2022,38(17):39–44.
WANG Yinyu, SHENG Jihong, PAN Bin, *et al.* Application of a technology for optimizing layout of hydraulic model monitoring points [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(17): 39–44 (in Chinese).
- [5] 谭奇峰,高金良,叶健,等. 结合模型校核和贝叶斯决策理论的管网漏失定位[J]. 中国给水排水,2016,32(19):44–48.
TAN Qifeng, GAO Jinliang, YE Jian, *et al.* Leakage location of water distribution system based on model calibration and Bayesian decision theory [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(19): 44–48 (in Chinese).
- [6] 牛志广,王宇飞,张珽,等. 供水管网的摩阻系数校核与漏损定位计算方法[J]. 天津大学学报,2011,44(4): 364–368.
NIU Zhiguang, WANG Yufei, ZHANG Ting, *et al.* Calibration of friction resistance coefficient and calculation method of leakage localization of water supply network [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(4): 364–368 (in Chinese).
- [7] HUTTON C J, KAPELAN Z, VAMVAKERIDOU-LYROUDIA L, *et al.* Dealing with uncertainty in water

- distribution system models: a framework for real-time modeling and data assimilation [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2014, 140(2): 169–183.
- [8] XIE X, ZHANG H, HOU D. Bayesian approach for joint estimation of demand and roughness in water distribution systems [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(8): 1–10.
- [9] ZHOU X, XU W R, XIN K L, *et al.* Self-adaptive calibration of real-time demand and roughness of water distribution systems [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(1): 5536–5550.
- [10] CHENG W P, HE Z G. Calibration of nodal demand in water distribution systems [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2011, 137(1): 31–40.
- [11] 尹兆龙, 信昆仑, 项宁银. 供水管网压力监测点布置的实用方法[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(2): 19–23.
YIN Zhaolong, XIN Kunlun, XIANG Ningyin. A practical method for layout of pressure monitoring points in water distribution network [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(2): 19–23 (in Chinese).
- [12] 刘书明, 王欢欢, 徐鹏, 等. 多目标大规模供水管网监测点的优化选址[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2013, 53(1): 78–83.
LIU Shuming, WANG Huanhuan, XU Peng, *et al.* Multiobjective genetic algorithms for optimal monitoring station placement in large water distribution systems [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2013, 53(1): 78–83 (in Chinese).
- [13] 陈祥获, 吴珊, 侯本伟. 采用虚拟监测点的供水管网水力模型优化校核[J]. *给水排水*, 2021, 47(6): 133–137.
CHEN Xianghuo, WU Shan, HOU Benwei. Optimised calibration of the hydraulic model of water distribution network using virtual monitors [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(6): 133–137 (in Chinese).
- [14] ZHOU X, LIU S, XU W, *et al.* Bridging hydraulics and graph signal processing: a new perspective to estimate water distribution network pressures [J]. *Water Research*, 2022, 217: 118416.
- [15] SIRIGNANO J, SPILIOPOULOS K. Stochastic gradient descent in continuous time [J]. *SIAM Journal on Financial Mathematics*, 2017, 8(1): 933–961.
- [16] DU K, LONG T Y, WANG J H, *et al.* Inversion model of water distribution systems for nodal demand calibration [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2015, 141(9): 265–274.
- 作者简介:**王禾(1997–),男,浙江宁波人,硕士,主要研究方向为给排水管网系统设计与运行优化。
E-mail: wanghe@tongji.edu.cn
收稿日期: 2022-09-25
修回日期: 2023-06-11

(编辑:沈靖怡)

保护生态环境就是保护生产力
改善生态环境就是发展生产力