

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.17.009

基于爆管监测的供水管网压力监测点优化布置

蔡艳伟¹, 龙志宏², 邵煜³, 楚士鹏³, 俞亭超³

(1. 浙江大学 工程师学院, 浙江 杭州 310015; 2. 广州市自来水有限公司, 广东 广州 510600; 3. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 供水系统监测网是获取爆管数据进行有效爆管监控的前提。流量大的管段往往为配水干管,其发生爆管危害性更大;管段流量相同的情况下,长度越长意味着爆管发生的可能性越大,沿线用户更多,则爆管发生后的排查难度也更大。因此,通过引入管段流量及管段长度两个重要性参数,对新增压力监测点的布置位置及数量进行优化,提升重要管段的爆管监测覆盖率。采用启发式算法求解优化问题,并在中国南方某大型城市管网的一个区域进行方法验证。与未考虑管段重要性参数的结果进行对比,考虑重要性参数后,当新增5个监测点时,DN400~600管段的增加监测率由41.9%提高至54.8%,DN700~1 800管段则由28.6%提高至78.6%;当新增25个监测点时,DN700~1 800管段的增加监测率由78.6%提高至100%,重要管段优先得到监控。

关键词: 爆管监测; 供水管网; 压力监测点; 优化布置; 管段重要性

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0059-06

Optimal Layout of Pressure Monitoring Points in Water Supply Network Based on Pipe Burst Monitoring

CAI Yan-wei¹, LONG Zhi-hong², SHAO Yu³, CHU Shi-peng³, YU Ting-chao³

(1. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China; 2. Guangzhou Water Supply Co. Ltd., Guangzhou 510600, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The monitoring network of water supply system is the prerequisite to obtain pipe burst data for effective pipe burst monitoring. The pipe sections with large flow rate are often the distribution mains, and the burst of these pipes is more harmful. In the case of the same flow rate in these pipe sections, a longer length means a greater possibility of pipe burst, more water consumers along the line, and more difficulty in burst location. Therefore, this paper introduced two important parameters including pipe section flow and pipe length to optimize the location and number of new pressure monitoring points, so as to improve the burst monitoring coverage of important pipe sections. The optimization problem was solved by using heuristic algorithm, and the method was verified in a district of a large city pipe network in southern China. Compared with the results without considering the importance parameters of pipe sections, when 5 pressure monitoring points were added after considering the importance parameters, the increased monitoring rate raised from 41.9% to 54.8% for DN400-600 pipe sections and from 28.6% to

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52070167); 广州市自来水有限公司资助项目(SC-2020009-FW-04)

通信作者: 楚士鹏 E-mail: chushipeng@zju.edu.cn

78.6% for DN700-1 800 pipe sections. When 25 pressure monitoring points were added, the increased monitoring rate of DN700-1 800 pipe sections raised from 78.6% to 100%, and the important pipe sections were monitored first.

Key words: pipe burst monitoring; water supply network; pressure monitoring point; optimal layout; importance of pipe

据2019年《城乡建设统计年鉴》可知,我国城市供水管网年漏损水量高达 $81.64 \times 10^8 \text{ m}^3$,漏损率达14.12%,其中管道爆管是水资源流失的主要原因。实施有效的爆管监测技术,可以尽早发现爆管事件,具有良好的社会和经济效益。获取有效的压力监测数据是实施爆管监测技术的基础,目前国内城市对爆管事件的监控存在监测点数量不足、安装位置不甚合理的现象。

现有的爆管监测研究较少考虑管段重要性参数,往往将每根管段视为同等重要^[1-2],且对小直径管段的关注较少^[3]。笔者在已有研究的基础上通过考虑管段重要性参数,为重要管段设置更高的监测覆盖权重,优化了管道监测覆盖率目标函数。由于小管段爆管引起的压降较小,对于部分破裂的爆管(如漏失面积比 $n_s=1/2$),其难以被监测到^[1]。为了探究直径较小管段的爆管监测率,通过在最大爆管流量下进行爆管事件模拟,以提高包括小管径(DN200~300)在内的爆管监测覆盖率为目标,增加监测点的布设。

1 压力监测点优化布置模型的构建

1.1 爆管特征数据的获取

尽管爆管发生危害性大,但从发生概率来讲属于小概率事件,历史爆管数据存在爆管发生起始时间、爆管流量记录不全,且不能覆盖爆管发生所有工况的问题。要获得管网中所有管段爆管时的压力特征数据,一般需要通过软件进行模拟。

1.1.1 压力驱动分析水力模型

供水管网水力模型一般分为两种,一种是需水量驱动分析(DDA)水力模型,一种是压力驱动分析(PDA)水力模型。DDA水力模型中需水量优先得到满足,当管网中发生爆管事故时,节点压力降低,而为了满足节点需水量,管网中可能会出现负压现象。而PDA水力模型中节点实际出水量与节点水压相关,其值由PDA水力模型公式获得,比较经典的是Wagner等^[4]提出的公式:

$$q_i^{\text{real}} = \begin{cases} 0 & H_i^{\text{real}} < H_i^{\text{min}} \\ q_i^{\text{req}} \left(\frac{H_i^{\text{real}} - H_i^{\text{min}}}{H_i^{\text{req}} - H_i^{\text{min}}} \right)^\gamma & H_i^{\text{min}} \leq H_i^{\text{real}} < H_i^{\text{req}} \\ q_i^{\text{req}} & H_i^{\text{real}} \geq H_i^{\text{req}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_i^{real} 为节点*i*的实际出水量; q_i^{req} 为节点*i*的设计出水量; H_i^{real} 为节点*i*的实际出流压力; H_i^{min} 为节点*i*的最小出流压力; H_i^{req} 为节点*i*在设计出水量时的出流压力; γ 为压力指数,根据不同的管道材料, γ 可在0.5~2.5变化。本研究中 $\gamma=0.5$,其已被证明适用于金属管的泄漏建模^[5]。采用PDA模型来模拟管道爆管,其中 H_i^{req} 取18 m, H_i^{min} 取5 m。

1.1.2 爆管模拟方法

在实际爆管场景中,管道破裂时的破口形式可能是横纵向爆裂、裂缝和腐蚀孔等。但在模拟计算分析中,可以将管道破损处看作是一个节点,水从该节点泄漏出去。由于小管段爆管引起的压降较小,本研究为了同时探究覆盖小管径(DN200~300)的爆管监测率,假定管段均发生最大爆管流量的破裂,即管道完全断裂。其模拟方式^[6]是将设定为爆管的管段删除,重新添加2根管长为原长度1/2(假设从管段中点处断裂)、其他参数与原管段相同的管段。为了触发压力不足时的PDA模型,在2根新增管段末端节点各添加一个足够大的需水量初始值,通过迭代确定最终出流的水量,2个节点流量之和即为该管段的最大爆管流量。

1.1.3 监测阈值设定

正常情况下,监测点压力值由于受用水量变化、泵阀启闭、传感器测量噪声等的影响会在一定范围内波动(一般认为近似服从正态分布)。发生爆管事故时,压力值严重偏离正态分布^[7],可通过统计分析方法设定环境背景噪声阈值(以下简称“监测阈值”),以区分环境背景噪声造成的正常压力波动与爆管事故造成的压力降低。监测阈值设定过大,监测点反应迟钝,会导致漏报率偏高;反之,则

误报率偏高。本研究根据已有的压力监测数据,以其统计分布的 2~3 倍标准差确定监测阈值^[7]。

1.2 目标函数的设置

本研究的目标函数从扩大管段监测覆盖率角度进行设置。将模型模拟的爆管前后节点压力差值生成的爆管残差矩阵与监测阈值进行比较,压力差值大于阈值则认为该爆管事件能被监控。一些研究^[1-2]将每根管道视为同等重要,即最大化可监测管段数量占比的情况下,大直径管道即使在监测点数量较多时,也未能被 100% 监控。

基于爆管发生后的危害大小和影响范围、爆管后定位难易程度等,考虑在监测点优化布置目标函数中为每根管段设置系数(用 $Q_j^\alpha \cdot l_j^\beta$ 表示),以此反映管段重要性。系数设置越大,表明其爆管后危害越大、排查越难,爆管监测时应赋予其更高的优先级。管段流量包含了管道直径、管道流速等信息,因此管段流量比管段直径更能反映管道实际工况,本研究采用动态参数管段流量作为管段重要性参数之一。此外,在管段流量相同的情况下,长度越长意味着爆管发生的概率越大,沿线用水用户更多,则爆管发生后排查难度也更大,因此将管段长度作为另一个重要性参数。通过增加考虑管段流量和管长两个因素,以管段监测覆盖率最大化为目标函数,求解监测点布置方案 X , 假设布置方案中共有 K 个传感器,目标函数的表达式如下:

$$\max F_X = \frac{\sum_{j=1}^L S_j(t, X) \cdot Q_j^\alpha \cdot l_j^\beta}{\sum_{j=1}^L Q_j^\alpha \cdot l_j^\beta} \quad (2)$$

$$S_j(t, X) = \begin{cases} 1 & \sum_{k=1}^K I[p_j(t, k), p_a(t, k)] \neq 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$I[p_j(t, k), p_a(t, k)] = \begin{cases} 1 & p_j(t, k) < p_a(t, k) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_X 为目标函数,表明管网的爆管监测覆盖率; j 为爆管管段编号; L 为管段总数; Q_j 为管段流量; l_j 为管段长度; $S_j(t, X)$ 为 t 时刻管段 j 是否能被给定监测点布置 X 中 K 个传感器内任意一个传感器 k 监测到的函数,可以被监测为 1, 否则为 0; $p_j(t, k)$ 为 t 时刻管段 j 发生最大流量爆管时传感器 k 处的水压; $p_a(t, k)$ 为传感器 k 设定的报警压力,爆管发生

时,当压力 $p_j(t, k) < p_a(t, k)$ 时,传感器报警,此时将 $I[p_j(t, k), p_a(t, k)]$ 设置为 1, 否则为 0。

如公式(2)所示,当 $\alpha > 0, \beta > 0$ 时,流量与长度较大的管道在目标函数中的权重较大,布置的监测点将优先覆盖这些管段。当 $\alpha = 0, \beta = 0$ 时,所有管道权重相同。由于管网中管段流量、管长的最大值与最小值相差悬殊,为了使各管段的重要性设置在合理范围内,管道流量、管长的重要性指数(α, β)应根据模拟计算的管段监测效果进行调整。

1.3 求解算法的选定

监测点优化布置属于带约束的非线性优化问题,适合采用遗传算法求解,图 1 为传感器布置算法流程。

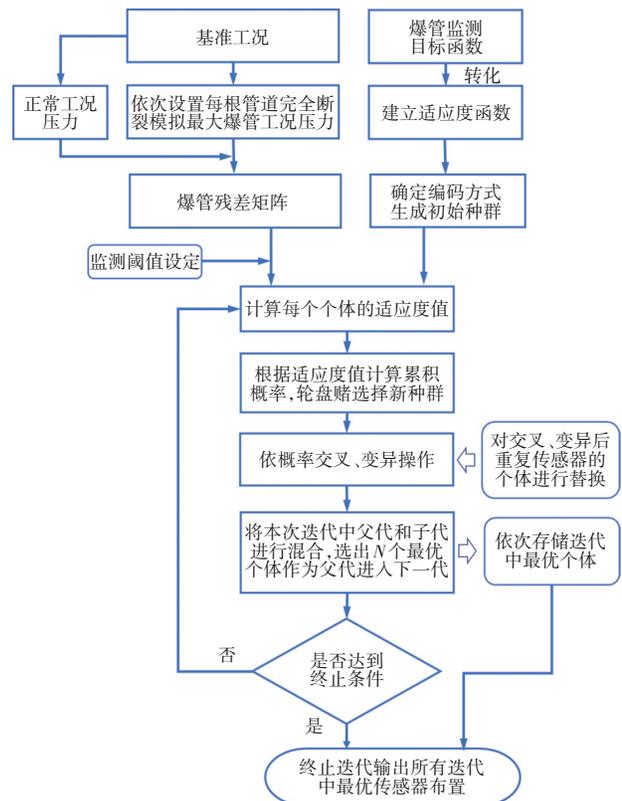


图 1 传感器布置算法流程

Fig.1 Flow chart of sensor layout algorithm

2 实例分析

2.1 管网实例概况

以南方某特大城市 G 市供水管网的一个区域为例进行分析。管网模型拓扑结构如图 2 所示,共包含 550 个节点, DN200 及以上管道 735 根,其管段总长为 110.73 km,供水量约为 $2.33 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,供水面积为 14.54 km^2 。模型中现有 7 个压力监测点,根据

现有监测点的历史数据进行统计分析,各点监测阈值较为接近,本研究均设定为 1.6 m,即当压力下降幅度超过该值时则报警。

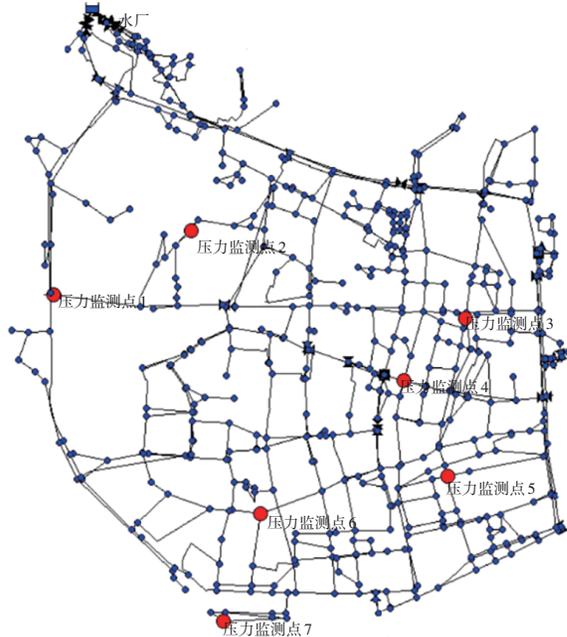


图2 案例管网模型拓扑结构及现有监测点布置

Fig.2 Topology of case network and layout of existing monitoring points

2.2 监测现状评价

根据已安装的 7 个传感器,对现有监测点的监测能力进行评估,各类管段监测情况见表 1。

表 1 各类管段监测情况

Tab.1 Monitoring of various pipeline sections

项 目	管段数量/根	占比/%	可监测数量/根	监测率/%
DN200~300	338	46.0	116	34.3
DN400~600	217	29.5	186	85.7
DN700~1 800	180	24.5	166	92.2

由表 1 可知, DN200~300 管段所占比例最大,但监测率最低。由于小管段爆管流量相对较小,造成管网的压力波动也较小,因此小管径管段比大管径管段更难监控。本研究旨在通过对监测点数量及位置进行优化,优先将 DN700~1 800 管段全覆盖,同时提高 DN200~300 和 DN400~600 管段的监测率。

2.3 目标函数优化

首先对目标函数中两个管段重要性参数的指数进行优化,再进行目标函数的计算分析。图 3 为管网中管段的流量分布。可知,随着管径增大,管

段流量呈快速上升趋势。在流速相同的情况下,管段流量与管道直径呈二次方正相关关系,大管段与小管段之间的流量差异较大。从图 3 中观察到相同直径的管段其流量分布差异也很大,因此相较于直径,采用管段流量作为重要性参数能更好地反映管段的实际工作状态。

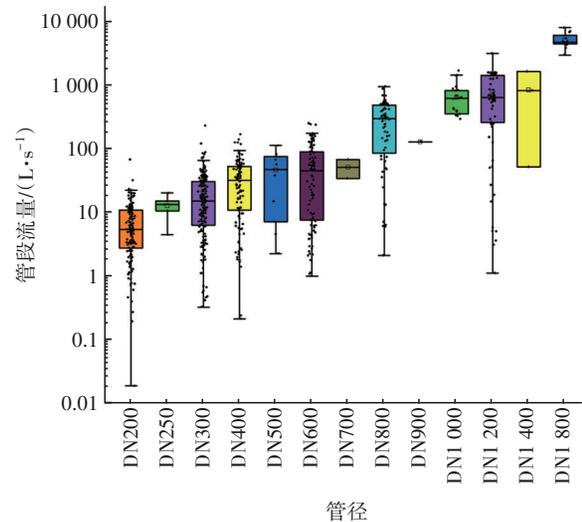


图3 管段流量分布

Fig.3 Flow distribution of pipes

由图 3 可知,最大与最小管段之间的流量差异较大,直接将管段流量作为重要性参数可能会导致一些管段设置的爆管监测权重过大,而一些小流量管段则会因为权重设置过小而难以被监控。本研究设置管段流量指数 $\alpha=0.1、0.3、0.5、0.7、1.0$,通过对各类管段监测率进行考察,选取合理的流量指数值。

图 4 为管网中管段的长度分布。

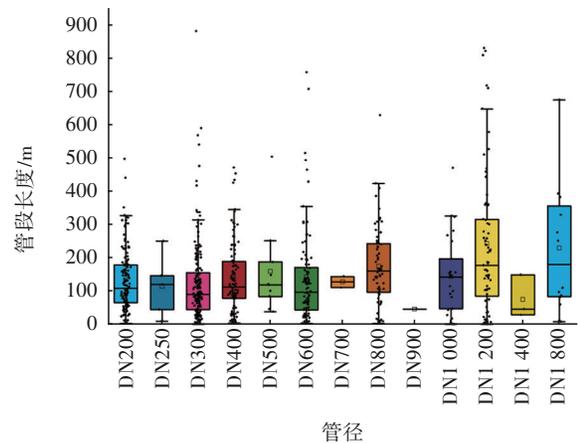


图4 管段长度分布

Fig.4 Length distribution of pipes

由图4可知, DN200~700管段的管长中位数约为100 m,除DN900、DN1400外, DN800以上管段的管长中位数略高,约为150 m。类别间的管段长度分布差异不大,但各类别内的差异较大,因此直接将管段长度作为重要性参数可能会导致一些管段设置的爆管监测权重过大。本研究设置管段长度指数 $\beta=0.1、0.3、0.5、0.7、1.0$,通过对各类管段监测率进行考察,选取合理的长度指数值。

通过模拟计算分析,当管段流量指数 $\alpha=0.5$ 、管长指数 $\beta=0.3$ 时,各类管段均能取得较好的监测效果。图5为考虑($\alpha=0.5, \beta=0.3$)与不考虑($\alpha=0, \beta=0$)管段重要性因素的目标函数值对比。

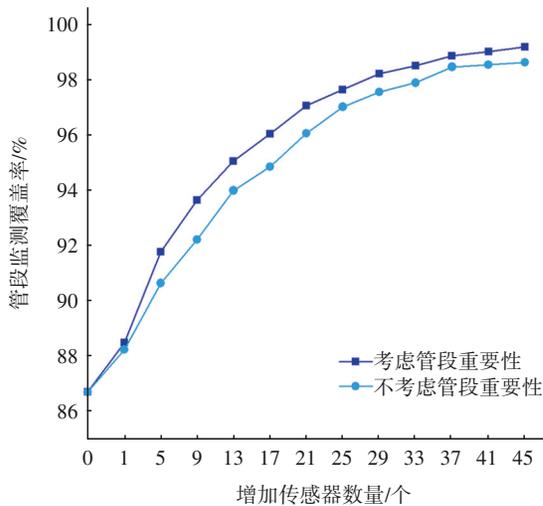


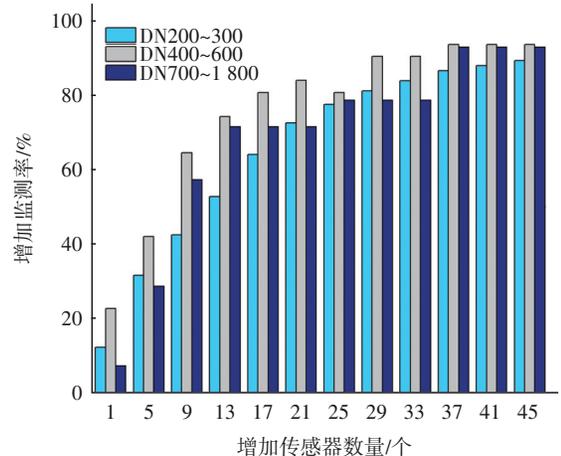
图5 目标函数值对比

Fig.5 Comparison of objective function values

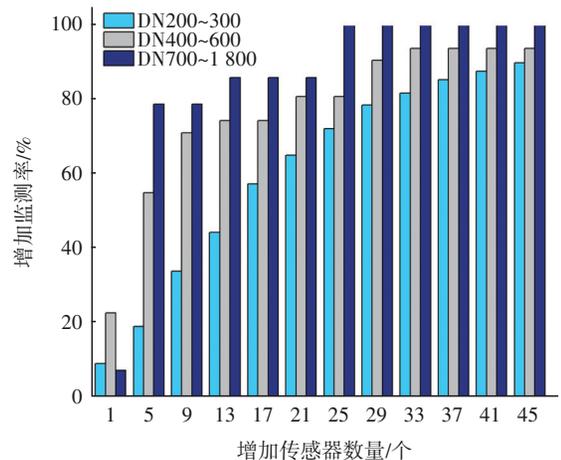
由图5可知,随着新增传感器数量 n 的增加,管段监测覆盖率在 n 较小时提高较快;当 $n \geq 25$ 时,增速开始放缓;当 $n=41$ 时,管段监测覆盖率约为99%,已达到较好的监测效能。对比未考虑管段重要性参数的一组,其监测覆盖率有了一定提升,差值部分主要体现在重要管段监测覆盖率的提高。

图6为考虑管道流量和管长前后,管段增加监测率的变化。增加监测率是指在增设传感器后,新增可监测的管段数量占现有监测点未监测管段数量的比例。增加监测率指标能够直接反映通过增加传感器,管段监测效能的提升幅度。在不考虑管道流量和管长的情况下, DN700~1800管段在新增监测点数量较大($n=45$)时,也未能得到100%监控。而通过考虑管段重要性参数, DN400~600、DN700~1800管段的增加监测率有了较大提升。当 $n=5$ 时,

DN400~600管段的增加监测率由41.9%提高至54.8%, DN700~1800管段由28.6%提高至78.6%;当 $n=25$ 时, DN700~1800管段的增加监测率由78.6%提高至100%。由此可见,通过设置管段重要性参数,可使重要管段优先得到监控。



a. 未考虑管段重要性参数



b. 考虑管段重要性参数

图6 管段增加监测率变化

Fig.6 Change of pipe increased monitoring rates

当新增传感器数量 n 取不同值时,按照可监测管段数量(包含现有监测点已监测管段)与该类别管段总数的比值计算管段总监测率,结果见表2。

表2 管段总监测率变化

Tab.2 Change of total monitoring rate of pipes %

项目	$n=0$	$n=25$	$n=29$	$n=37$	$n=41$
DN200~300	34.3	81.7	85.8	90.2	91.7
DN400~600	85.7	97.2	98.6	99.1	99.1
DN700~1800	92.2	100	100	100	100

由表2可知,当增加传感器数量 $n \geq 29$ 时, DN200~300管段的总监测率在85%以上;当 $n \geq 37$

时, DN200~300管段的总监测率在90%以上;当 $n \geq 25$ 时, DN400~600管段的总监测率在97%以上, DN700~1800管段的总监测率达100%。

图7为增加25、41个传感器的监测点布置。

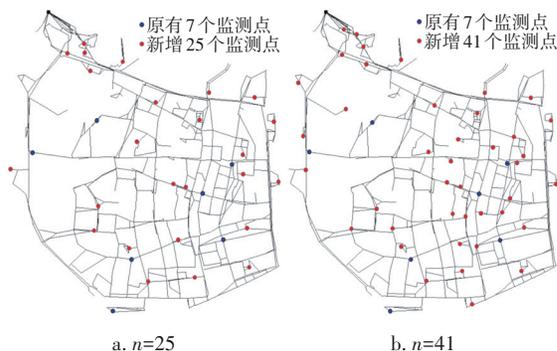


图7 新增监测点布置

Fig.7 Layout of new monitoring points

3 结论及建议

① 通过引入管段重要性参数,可优先监控重要管段。对比未考虑管段重要性参数($\alpha=0, \beta=0$)的情况,考虑管段重要性参数($\alpha=0.5, \beta=0.3$)后,在增设监测点数量 $n=5$ 时, DN400~600管段的增加监测率由41.9%提高至54.8%, DN700~1800管段由28.6%提高至78.6%;当 $n=25$ 时, DN700~1800管段的增加监测率由78.6%提高至100%,重要管段优先得到监控。

② 在最大爆管流量下考察 DN200~300管段的监测率,基于现有7个传感器, DN200~300管段的总监测率仅为34.3%;通过优化增加37个传感器,可使 DN200~300管段的总监测率提高至90%以上,达到较好的监控效果。

③ 除管段流量和管长这两个管段重要性参数外,后续可将其他因素考虑进来,如管段所处地理位置、爆管危害性大小等。当监测点的增加数量达到一定程度,管段监测覆盖率难以进一步提升,尚有部分管段难以被监控。对最大爆管流量下无法监控的管段,应加强日常巡检工作,定期进行人工检漏及管段维护,减少该类管段爆管造成的损失。

参考文献:

[1] 何锐,俞亭超,邵煜. 监测供水管网爆管的测压点优化布置方法[J]. 中国给水排水, 2020, 36(17): 36-40.

HE Rui, YU Tingchao, SHAO Yu. Optimal placement method of pressure monitoring points for monitoring water supply pipe burst [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(17): 36-40(in Chinese).

[2] 姚恬. 服务于供水管网爆管预警的数据识别方法和压力监测点优化布置研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.

YAO Tian. Research on Data-based Identification Method and Optimal Sensor Deployment in Water Distribution Networks for Leak Detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020(in Chinese).

[3] 陈亚威. 面向供水管网爆管监控的监测点布局优化研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.

CHEN Yawei. Study on Layout Optimization of Monitoring Points for Pipe Burst Detection in a Water Supply Network [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020(in Chinese).

[4] WAGNER J M, SHAMIR U, MARKS D H. Water distribution reliability: simulation methods [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1988, 114(3): 276-294.

[5] VAN ZYL J E, CASSA A M. Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(2): 182-189.

[6] 齐哲娴. 城市供水管网系统爆管的水力水质影响与区域定位技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.

QI Zhexian. Investigating Hydraulic and Water Quality Impacts as well as the Localization of Pipe Bursts in Water Distribution Systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020(in Chinese).

[7] 赵丹丹,程伟平,许刚,等. 供水管网系统爆管可监控最小管径分析方法研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(23): 117-122.

ZHAO Dandan, CHENG Weiping, XU Gang, et al. Study on minimum detectable pipe diameter for pipe burst in water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(23): 117-122(in Chinese).

作者简介:蔡艳伟(1989-),女,湖南湘潭人,硕士,主要研究方向为城市供水管网系统爆管监控。

E-mail: caiyanwei0604@163.com

收稿日期:2021-11-23

修回日期:2022-03-15

(编辑:沈靖怡)