



DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 05. 006

技术总结

# 基于爆管检测效益的供水管网水压监测点布局优化

秦贤海<sup>1</sup>, 杜坤<sup>1</sup>, 罗雄武<sup>2</sup>, 宋志刚<sup>1</sup>, 彭彦焜<sup>1</sup>, 吴以文<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明官房建筑设计有限公司, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 为探究水压监测点数量与爆管检测效益的关系,开展了面向爆管检测的供水管网水压监测点优化布局研究。首先,利用管网水力模型在EPANET中计算各管道不同等级爆管下的压降,并根据压降结果构建爆管事件覆盖矩阵;然后,对于给定数量的水压监测点,以最大化爆管事件覆盖率为目标函数,优化水压监测点布局,并采用分布估计算法求解,进而确定给定监测点数量下的最优布局;最后,将爆管事件覆盖率与爆管最小可检测流量作为爆管检测精度指标,探讨水压监测点数量与爆管检测精度的效益关系。将所提出的方法应用于L-Town管网C区,结果表明所提出的方法能有效确定最佳效益监测点的数量及布局,进而有效解决工程实践中应布置多少水压监测点以及布局在何处两方面问题。

**关键词:** 供水管网; 爆管检测; 压力监测点

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)05-0040-05

## Distribution Optimization of Water Pressure Monitoring Point in Water Supply Network Based on the Benefit of Pipe Burst Detection

QIN Xian-hai<sup>1</sup>, DU Kun<sup>1</sup>, LUO Xiong-wu<sup>2</sup>, SONG Zhi-gang<sup>1</sup>, PENG Yan-kun<sup>1</sup>,  
WU Yi-wen<sup>1</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Kunming Guanfang Architecture & Design Inc., Kunming 650051, China)

**Abstract:** The optimal distribution of water pressure monitoring points in a water supply network for pipe burst detection was investigated to explore the relationship between the number of water pressure monitoring points and the benefit of pipe burst detection. First, the pressure drop under different grades of pipe burst in EPANET was calculated by pipe network hydraulic model, and the coverage matrix of pipe burst event was constructed according to the calculated pressure drop results. Then, for a given number of water pressure monitoring points, the optimal distribution of water pressure monitoring points was constructed with the maximum pipe burst event coverage rate as the objective function, and the function was solved by distribution estimation algorithm for further determination of the optimal distribution of water pressure monitoring points. Finally, the coverage rate of pipe burst event and the minimum

基金项目: 云南省重点领域科技计划项目(202003AC100001)

通信作者: 杜坤 E-mail: 765818261@qq.com

detectable flow rate of pipe burst were selected as the index of pipe burst detection accuracy to explore the relationship between the number of water pressure monitoring points and pipe burst detection accuracy. The proposed method was applied to area C of L-Town pipe network. The method could effectively determine the optimal number and distribution of the monitoring points, and then effectively solve the problem of how many pressure monitoring points should be arranged and where to be arranged in engineering practice.

**Key words:** water supply network; pipe burst detection; pressure monitoring point

爆管会导致严重的水资源浪费并危害供水系统的安全运行,及时检测并修复爆管具有重要意义。由于爆管时管网水压会异常下降,利用压力监测信号检测爆管是重要手段之一。理论上,监测点数量布置越多爆管检测效果越好,但由于资金限制,管网中只能布置一定数量的监测点,因此需要对监测点布局进行优化。周书葵等<sup>[1]</sup>根据管网节点流量的改变会影响节点水压,建立了水量影响矩阵,并通过聚类分析选择具有代表性的压力监测点。张宏伟等<sup>[2]</sup>利用水力学和拓扑学原理,对供水管网节点的压力灵敏度矩阵和方程进行构建,然后通过灵敏度分析,按照管网节点灵敏度大小排序,根据实际工程要求布置压力监测点。金溪等<sup>[3]</sup>利用遗传算法,通过分析节点水压相关性,建立了压力监测点优化布局的数学模型,并对其编码进行求解,进而优化水压监测点布局。刘书明等<sup>[4]</sup>采用多目标遗传算法对供水管网监测点进行优化选址,将覆盖水压节点个数和覆盖水量同时作为目标函数,改进了优化选址结果。张清周等<sup>[5]</sup>提出供水管网新增测压点布局方法,通过在管网水力模型上用蒙特卡洛方法建立异常数据库,并用遗传算法进行求解。

虽然上述方法从不同角度优化了压力监测点布局,但都不是以爆管检测为研究对象。何锐等<sup>[6]</sup>通过爆管判定矩阵确定检测点布置顺序,并探讨了给定检测点数量下的爆管覆盖率。程伟平等<sup>[7]</sup>通过提出爆管强度这一概念,以可监控最大爆管漏水量为目标函数,采用遗传算法优化了监测点布局。同时,监测点数量与爆管检测的效益关系也备受关注,即“应布置多少水压监测点”和“采用何种布局”能获得最优爆管检测效果。因此,笔者开展了面向爆管检测的供水管网水压监测点布局优化研究,主要目的是探究水压监测点数量与爆管检测精度的

效益关系,旨在为经济有效地布置水压监测点提供参考。

### 1 供水管网水压监测点优化问题构建

水压监测点布局的基本原则是:用有限数量的水压监测点检测到尽量多的爆管事件。基于该思路,水压监测点优化布局可转换为爆管事件覆盖率最大化的优化问题,其目标函数见式(1)。

$$\text{Max}S = \sum_{j=1}^{G_m} B_j / (G_m) \tag{1}$$

约束条件见式(2)和式(3)。

$$B = \begin{cases} 0, \text{count}(B_j^{L_1} \cup \dots \cup B_j^{L_i} \cup \dots \cup B_j^{L_N}) < 2 \\ 1, \text{count}(B_j^{L_1} \cup \dots \cup B_j^{L_i} \cup \dots \cup B_j^{L_N}) \geq 2 \end{cases} \tag{2}$$

$$N = X(r) \tag{3}$$

式中: $S$ 为爆管覆盖率; $B$ 为满足约束条件下监测点检测到管道的爆管事件; $G$ 为管道爆管等级; $m$ 为管道数; $j$ 为被检测的管道编号, $j \in [1, G_m]$ ;  $L$ 为管网布置压力监测点的位置; $B_j^{L_i}$ 为 $i$ 监测点能够检测到 $j$ 管段的爆管事件; $B_j^{L_1}, B_j^{L_i}, B_j^{L_N}$ 为爆管事件覆盖矩阵中的元素。

爆管事件覆盖矩阵见表1。

表1 爆管事件覆盖矩阵

Tab.1 Coverage matrix of pipe burst event

管道编号	爆管等级	节点1	节点2	...	节点n
管道1	爆管等级1	$B_1^1$	$B_1^2$	...	$B_1^n$
	爆管等级2	$B_2^1$	$B_2^2$	...	$B_2^n$
	...	...	...	...	...
	爆管等级G	$B_G^1$	$B_G^2$	...	$B_G^n$
...	...	...	...	...	...
管道m	爆管等级1	$B_{[G(m-1)+1]}^1$	$B_{[G(m-1)+1]}^2$	...	$B_{[G(m-1)+1]}^n$
	爆管等级2	$B_{[G(m-1)+2]}^1$	$B_{[G(m-1)+2]}^2$	...	$B_{[G(m-1)+2]}^n$
	...	...	...	...	...
	爆管等级G	$B_{G_m}^1$	$B_{G_m}^2$	...	$B_{G_m}^n$

式(2)用于保证爆管事件能同时被两个监测点有效检测<sup>[8]</sup>,这有利于爆管定位并提高爆管检测的鲁棒性;式(3)用于限定监测器数量, $N$ 为管网布置的压力监测点个数, $X(r)$ 为初始种群 $r$ 行的行相加数。

爆管事件覆盖矩阵表示管段发生爆管时水压监测点能否检测到爆管的情况,若能检测到该管道爆管赋值1,否则赋值0,基于此构建0-1爆管事件覆盖矩阵。实际工程中可在每根管道上安装水压监测器来检测爆管,但会造成大量财力和物力浪费。因此,可借助水力模型软件来仿真供水管网管道爆管,并根据仿真实验结果构建0-1爆管数据库。

爆管事件覆盖矩阵的创建分为以下过程:

① 水力仿真实验模型的构建。采用最新发布EPANET2构建水力模型并进行水力仿真,采用EPANET2压力驱动模型(PDA)模拟爆管时管网低压水力状态。

② 记录正常工况下的压力值。通过管网水力仿真实验,记录管网每个节点的压力信息 $P_n^0$ ( $n$ 是管网节点数), $P_n^0$ 是正常工况管网节点 $n$ 的压力。

③ 在虚节点上设置扩散器来模拟管道爆管。在管网拓扑模型上每根管段的中间加入虚节点,虚节点上设置不同的扩散器系数 $C$ 来模拟不同等级的管道爆管, $C=0.003477d^2$ , $d$ 为爆管的口径。

④ 爆管事件覆盖矩阵的创建。将发生不同等级爆管时的节点压力 $P_n^c$ 与正常工况下的压力 $P_n^0$ 相比较,分别计算出管网每个节点的压降。如果压降变化大于压力监测器爆管阈值 $\delta$ ,将数值1赋予爆管节点,表示压力监测器能够检测到该爆管事件;否则将数值0赋予该节点,表示压力监测器不能检测到该爆管事件,基于此来构建0-1爆管事件覆盖矩阵。

## 2 水压监测点布局优化流程

本研究采用分布估计算法求解该优化问题,求解过程如图1所示。分布估计算法是一种基于统计学习理论的群体进化算法,其通过比较初始种群个体适应度函数,筛选出优势种群,然后利用统计学习的手段生成一个描述当前解分布的概率模型,再根据概率模型随机采样生成新的种群,反复进行实现种群进化,本研究通过在MATLAB软件实现上述求解过程。

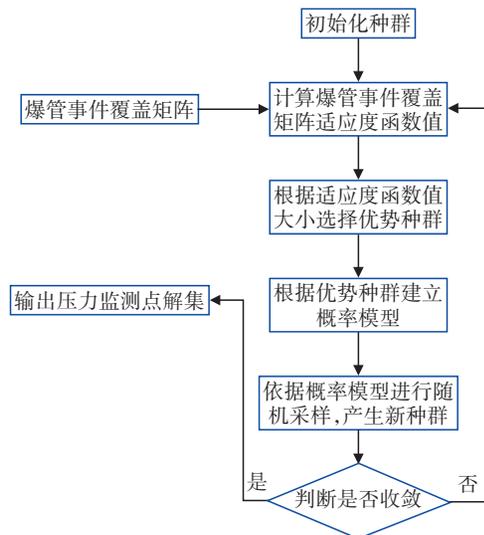


图1 基于分布估计算法的水压监测点布局优化流程

Fig.1 Distribution optimization process of water pressure monitoring points based on distribution estimation algorithm

## 3 案例分析

采用L-Town管网C区作为研究案例,探究水压监测点数量与爆管检测精度的效益关系。该管网包含1个水源点,92个节点(见图2),109根管道,管径范围为DN100~DN200,日用水量为1800 m<sup>3</sup>。

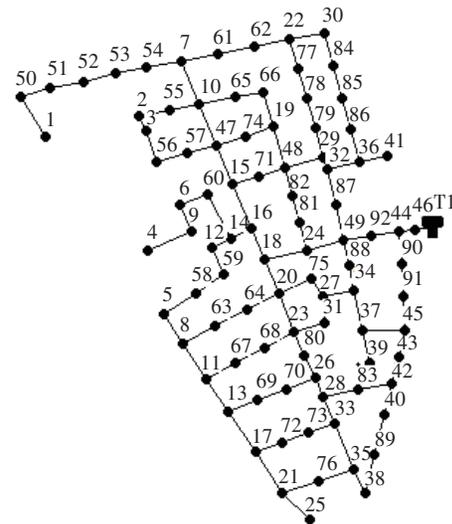


图2 L-Town管网C区拓扑图

Fig.2 Topology diagram of area C of L-Town pipe network

按照上述方法,将爆管分为10、20、30、40、50 mm五个口径的爆管等级,对应的扩散器系数分别为0.4207、1.3908、3.1293、5.5632、8.6925,管道的爆管流量为2~15 L/s。根据Wu等<sup>[9]</sup>的研究结果,

本研究选取的爆管检测阈值为0.3 m,即当爆管引起的压降大于0.3 m时认为可被检测。值得说明的是,爆管检测阈值受多种因素影响,如用水量的波动、水压监测误差等<sup>[6]</sup>。虽然爆管检测阈值对最终结果有一定影响,但不影响所提出方法的可行性。

### 3.1 监测点数量与爆管检测精度的效益关系

本研究采用爆管事件覆盖率与爆管最小可检测流量作为爆管检测精度指标。定义管网爆管最小可检测流量=各管道最小可检测爆管流量之和/管道总根数,各管道最小可检测爆管流量从爆管事件覆盖矩阵中读取。通过设置不同水压监测点数量解决优化问题,得到了不同压力监测点数量下的爆管覆盖率与爆管最小可检测流量,见图3和图4。

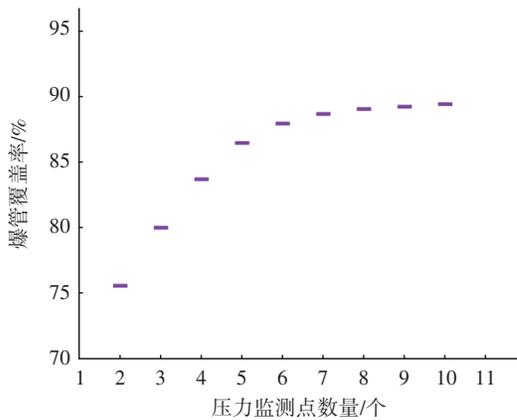


图3 爆管事件覆盖率

Fig.3 Coverage rate of pipe burst event

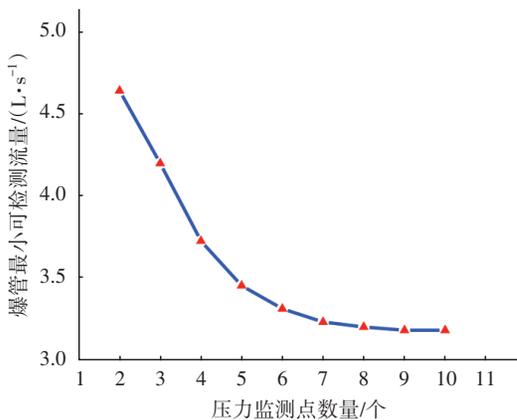


图4 监测点数量与爆管检测效益曲线

Fig.4 Curve of numbers of monitoring points and benefit of pipe burst detection

当管网中压力监测点数量从2个增加到10个时,爆管覆盖率逐步上升,最小可检测爆管流量精度也逐步提高,这与预期相符,即水压监测点越多

爆管检测效果越好。但值得注意的是,在监测点数量从2个增加到7个时,爆管覆盖率与最小可检测爆管流量精度提升显著,而当监测点数量>7个时,爆管覆盖率与最小可检测爆管流量精度提升甚微,这表明爆管检测效果未得到改进,因此在该管网中布置7个监测点的爆管检测效益最高,再增加监测点对提升爆管检测效果意义不大。通过上述分析可知,所提出的算法能回答“给定管网中应布置多少水压监测点”可达到爆管检测效益最优的问题。

### 3.2 水压监测点布局特征分析

考虑到优化结果的随机性,分别对2~10个监测点数进行10次优化,得到90组水压监测点优化布局方案。通过统计90次优化结果中各节点被选择次数分析水压监测点布局特征,见图5和图6。

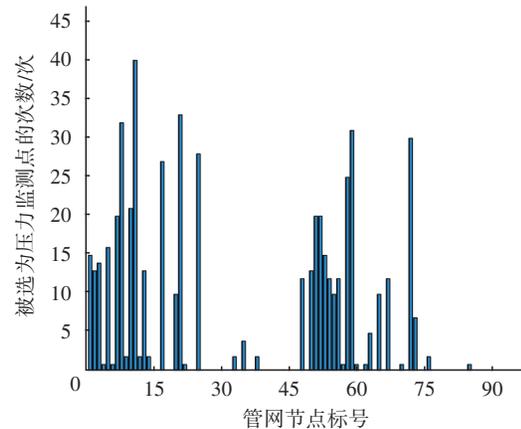


图5 节点被选为监测点的次数

Fig.5 Frequency of nodes selected as monitoring point

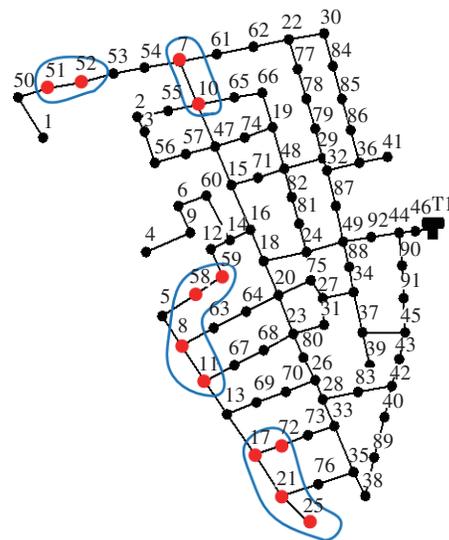


图6 监测点重要区域设置位置

Fig.6 Placement of monitoring points of important areas

将选中次数高于20次的节点在图6中进行标记,发现这些节点大致分布在管网末端。通过计算节点流量对水压的灵敏度发现,这些节点水压对流量变化灵敏度值较其他节点都高,意味着这些节点对管网爆管的响应更加灵敏,因此应优先考虑在这些节点布置水压监测点。由此可见,由优化所得的水压监测点布局与灵敏度分析结果也相符,故所提出的算法能回答“采用何种优化布局”最有利于爆管检测问题。

#### 4 结论

为探究水压监测点数量与爆管检测精度的效益关系,以检测爆管覆盖率最大化为目标函数,开展了面向爆管检测的供水管网水压监测点布局优化研究。将获得的结果应用于L-Town管网C区案例,结果表明在该管网中布置7个监测点时爆管检测边际效益最大,将水压监测点布置在管网末端时,对爆管灵敏度大的节点能更多地覆盖爆管事件。上述结果与实际相符,表明所提出的方法能有效确定最佳效益监测点数量及布局,进而有效解决工程实践中应布置多少水压监测点以及布局在何处两方面问题。值得说明的是,在仿真实验中设定压力监测器的爆管阈值为0.3 m、爆管口径为10~50 mm,这些设定与研究的管网有关,实际中对背景噪音较大、用水规模较大的管网应取较大值,该取值问题将在后续研究中进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] 周书葵,许仕荣. 城市供水管网水压监测点优化布置的研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2005, 19(1):59-63.  
ZHOU Shukai, XU Shirong. Studying optimal locating of pressure monitoring station in urban water distribution system [J]. Journal of Nanhua University (Science and Technology), 2005, 19(1): 59-63 (in Chinese).
- [2] 张宏伟,张丽,梁建文. 供水管网压力监测点的布置方法[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3):52-55.  
ZHANG Hongwei, ZHANG Li, LIANG Jianwen. Layout of pressure monitoring nodes of water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(3):52-55 (in Chinese).
- [3] 金溪,曾小兵,高金良,等. 利用遗传算法进行供水管网压力监测点优化布置[J]. 给水排水, 2007, 33(Z1):346-349.  
JIN Xi, ZENG Xiaobing, GAO Jinliang, et al. Optimal placement of pressure monitors in water supply network with elitist genetic algorithm [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(Z1): 346-349 (in Chinese).
- [4] 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 & Technology), 2013, 53(1): 78-83 (in Chinese).
- [5] 张清周,黄源,齐晶瑶,等. 供水管网新增压力监测点优化布置方法[J]. 给水排水, 2017, 43(3):127-131.  
ZHANG Qingzhou, HUANG Yuan, QI Jingyao, et al. Method for optimizing arrangement of new pressure monitoring points in water supply networks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(3): 127-131 (in Chinese).
- [6] 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).
- [7] 程伟平,陈亚威,许刚,等. 基于遗传算法的供水管网爆管监控网络布置研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(15):46-51.  
CHENG Weiping, CHEN Yawei, XU Gang, et al. Layout of burst monitoring network in water distribution system based on genetic algorithm [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(15):46-51 (in Chinese).
- [8] CHENG W P, FANG H J, XU G, et al. Using SCADA to detect and locate bursts in a long-distance water pipeline [J]. Water, 2018, 10(12):1727.
- [9] WU Z Y, SONG Y. Optimizing selection of fire hydrants for flow tests in water distribution systems [J]. Procedia Engineering, 2014, 70:1745-1752.

作者简介:秦贤海(1997-),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为供水管网监测点优化。

E-mail:1209727797@qq.com

收稿日期:2020-12-07

修回日期:2021-03-15

(编辑:任莹莹)