

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.007

监测供水管网爆管的测压点优化布置方法

何 锐, 俞亭超, 邵 煜

(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 为探究一种适用于管网爆管时监测各节点压力变化的测压点优化布置方法,结合华东 JX 市供水管网模型与历史统计数据,通过处理与分析,提出了一种测压点优化布置的启发式算法。首先对该供水管网历史数据进行统计分析得出各节点爆管阈值;然后在基准工况下对管网进行平差计算,获得各节点压力;再在各管段中间添加漏损口模拟爆管,对其赋射流系数,迭代计算爆管后各节点压力,计算前后差值得到压力变化值矩阵。将压力变化值矩阵中变量值与爆管阈值作比较获得 0-1 爆管判断矩阵,通过对该矩阵处理分析、编程计算,得到合适的监测点布置顺序。实例计算表明,在总计 640 根管段的管网中布置 5 个监测点时能够监测到 467 根管段,占比 73.0%;布置 10 个监测点时能监测到 545 根管段,占比 85.2%。可见,使用该方法布置的测压点监测范围广。在最经济情况下布置的监测点能均匀分布在管网中,并能有效监测管网爆管。

关键词: 管网爆管; 测压点; 启发式算法; 压力变化值矩阵; 爆管阈值

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)17-0036-05

Optimal Placement Method of Pressure Monitoring Points for Monitoring Water Supply Pipe Burst

HE Rui, YU Ting-chao, SHAO Yu

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to explore an optimal placement method of pressure monitoring points suitable for monitoring pressure change of each node when pipe burst, a heuristic algorithm was proposed through processing and analyzing the water supply network model and historical statistics of JX city in East China. Node pressure burst threshold at each node was first acquired by statistically analyzing historical data of the water supply network. Pressure of each node was obtained by compensating computation under standard condition. A virtual node was then added in the middle of the pipe to simulate pipe burst. A given efflux coefficient was set to obtain the corresponding pipe burst pressure of each node through iterative calculations, and pressure difference was calculated to obtain the pressure variation matrix. The judgment matrix ranging between 0-1 of pipe burst was obtained by comparing the variable value in the matrix with the threshold value. An appropriate monitoring point layout order was obtained through the matrix processing analysis and programming calculation. When five monitoring points were arranged in a

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400601); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07201003); 国家自然科学基金资助项目(51761145022)

通信作者: 俞亭超 E-mail: tingchaoyu@163.com

total of 640 pipe sections, 467 pipe sections could be detected, accounting for 73.0% of the total pipes. When 10 monitoring points were set up, 545 pipe sections (accounting for 85.2% of the total pipes) could be detected. Therefore, it could be seen that the monitoring range of pressure monitoring points arranged by this method was wide. Under the most economical condition, the monitoring points could be evenly distributed in the pipe network, and the pipe burst could be effectively monitored.

Key words: pipe burst; pressure monitoring point; heuristic algorithm; pressure variation matrix; burst threshold

节点水压是全面掌握供水管网运行状态以及对整个供水系统实施优化调度的重要参数,水压的监测对保证供水服务质量、校核管网水力分析的计算结果、合理进行管网的改造和扩建以及对管网进行实时的爆管监测等都存在着不可忽视的作用。

目前众多学者基于不同目的提出了多种测压点布置方法。为满足正常状态下管网实时调度的需要,黄廷林、丛海兵^[1]指出,当外界因素引起管网运行工况发生变化时,主要表现在节点水压的变化,而最敏感的外界变化因素是节点流量,并由此提出了影响系数的概念,建成影响系数矩阵后通过模糊聚类法对节点进行分组,进而获得测压点最优布置方法。郭思元等^[2]提出,通过对管网原有监测点监测数据进行相关分析,从而对已有测压点进行优化调整,使之满足服务于正常工况下管网调度的需求。王俊岭、孙怀军^[3]基于在布置有限监测点下所监测压力数据最能代表整个管网运行状态的目的,从运筹学中图的角度来研究供水管网中测压点的优化布置,并提出了图论法。Meier等^[4]将单目标遗传算法引入到测压点优化布置的问题中,遗传算法作为进化算法,可以获得管网监测点监测范围的信息,具有广泛的应用。de Schaetzen等^[5-7]将遗传算法进一步改进,取得了更好的计算结果。上述几种方法共同特点都是在管网正常工况下对测压点进行优化布置,使之能最优地反映管网正常工作时的压力分布状况,进而实现优化调度等其他功能。刘美侠^[8]利用故障前后节点水压变化作为分析基础,但仍回归到通过分析影响系数与灵敏度来进行测压点优化布置。本研究主要目的是通过对爆管状态下节点压力变化数据进行分析与计算,提出一种适用于爆管监测的测压点优化布置的启发式算法,从而更好地监测供水管网爆管情况。

1 爆管阈值的确定

供水管网节点水压的大小会受到外界各方面因

素的影响,其中最敏感、最频繁的影响因素是节点流量,即当某节点的用户用水量发生变化时,其他节点的水压必然会发生相应的变化;同理,当某管段发生爆管时,也必然会对管网中其他节点的水压产生影响,但这两者的影响程度是不一致的,一般较大的爆管,往往会造成局部区域短时间内压力急剧下降。当此压力下降值超过正常节点用水量引起的压力波动范围时,则可以用来监测爆管的发生。因此,节点爆管阈值就定义为该节点的某一压力值,当节点压力低于该值时,则可以认为其周围区域有爆管等异常情况发生。

笔者通过对广州、嘉兴等市供水管网 SCADA 系统中大量监测点水压历史数据分析得到,正常情况下各节点水压通常在一定区间内波动,压力变化值符合正态分布。因而可以利用正态分布的 3σ 法则进行压力是否异常的判断,根据小概率事件原则,对压力变化值处于区间 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 外的部分可以认为有较大的可能性发生爆管等异常情况,进而确定爆管阈值。

由于爆管前后的压力变化值 $\Delta P_i < 0$, 当该数值越小即绝对值越大时,其发生的概率 P_i 也越小,但被判断为爆管的可能性却增大。根据正态分布法则,设置所有监测点的压力变化 ΔP_i 的累积概率为 $*P_r$, 根据小概率事件定义赋予 $*P_r$ 一个合适的数值如 5% 作为爆管阈值概率,即认为该阈值概率对应的压力变化值为各监测点的爆管阈值,通过对历史数据分析统计,各监测点阈值 $*P_i$ 相近,因此可以取监测点爆管阈值的平均值 $\overline{*P}$ 。

2 测压点优化选取方法

2.1 爆管压力变化值矩阵计算

供水管网爆管一般采用节点射流模式^[9]模拟,为了不失一般性,本研究用于评估管网爆管漏失模型为:

$$Q_L = 0.4A_L\sqrt{2gH_L} \quad (1)$$

式中: Q_L 为爆管流量; A_L 为爆管口面积; H_L 为爆管处管内压力。

为可对比不同管径管道的爆管程度, A_L 采用漏失面积比 $n = A_L/A_D$ 确定, A_D 为管道截面面积。本研究统一设置 $n = 1/2$ 。

根据供水管网水力模型, 首先获取正常工况下各节点的压力值 H_j , 然后在第 i 管段中间增加漏损口模拟该管段的爆管, 分析计算该管段爆管时的管网各节点压力值 H'_{ij} , 计算前后压力变化值 $\Delta H_{ij} = H'_{ij} - H_j$ 。依次对每根管段增加爆管口进行计算分析, 从而得到整个管网各节点压力变化值矩阵, 如式(2)所示。

$$\Delta H = \begin{bmatrix} \Delta H_{1,1} & \Delta H_{2,1} & \cdots & \Delta H_{n-1,1} & \Delta H_{n,1} \\ \Delta H_{1,2} & \ddots & & & \Delta H_{n,2} \\ \vdots & & \Delta H_{i,j} & & \vdots \\ \Delta H_{1,m-1} & & & \ddots & \Delta H_{n,m-1} \\ \Delta H_{1,m} & \Delta H_{2,m} & \cdots & \Delta H_{n-1,m} & \Delta H_{n,m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n 为管段数, m 为节点数。其中, 行表示不同管段爆管后节点 j 的压力变化值, 列表示管段 i 爆管后不同节点的压力变化值。

2.2 测压点优化布置选址

将压力变化矩阵中变量绝对值与节点爆管阈值的绝对值作比较, 若 $|\Delta H_{ij}| \geq |\overline{P}|$, 表示第 i 根管段爆管能够被第 j 个节点的监测点监测到, 置为 1; 若 $|\Delta H_{ij}| < |\overline{P}|$, 则表示第 i 根管段爆管不能被第 j 个节点所监测到, 置为 0。从而可获得一个 0-1 爆管判断矩阵, 该矩阵列序号表示节点, 行序号表示管段。

在选取布置压力监测点时遵循两个原则: 一是, 要求每增加 1 个监测点时新增监测到爆管管段最多; 二是, 假设在其他监测点不工作情况下, 要求新增监测点能够独自监测到大量的爆管管段。在计算选取布置监测点时遵从前一个原则重要性大于后一个原则, 从而既能监测到最大范围管段, 又能使同一根管段在爆管时尽可能被多个监测点监测到。基于上述思路对 0-1 爆管判断矩阵进行统计分析与编码计算, 得到监测点布置节点顺序。监测点布置程序如图 1 所示。

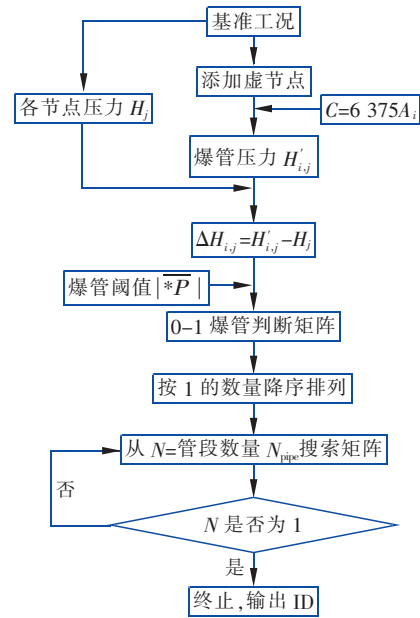


图 1 监测点布置程序

Fig. 1 Program of monitoring points layout

3 管网算例

华东 JX 市供水管网共有节点数 491 个、管段 640 根, 管段总长为 433.52 km。对 JX 市供水管网基于 SCADA 系统所监测到的数据进行统计分析, 得出不同监测点爆管阈值在数值上接近, 14 个点的平均阈值 $\overline{P} = -1.24$ m, 为简化模型, 便于数据处理计算, 认为当节点压力变化值大于 1.24 m 时, 供水管网中存在爆管管段的可能性高达 95% 以上。

3.1 监测点布置方案

输入爆管阈值 $|\overline{P}|$, 通过计算, 输出监测点编号, 图 2 为 15 个压力监测点示意。

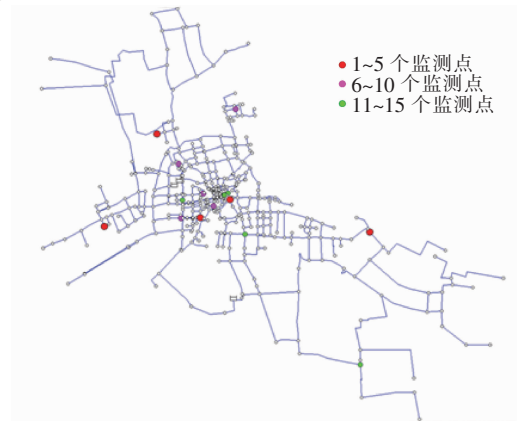


图 2 15 个监测点分布

Fig. 2 Distribution of fifteen monitoring points

布置 7 个监测点时各管段在爆管情况下能够被监测点监测的次数见图 3。

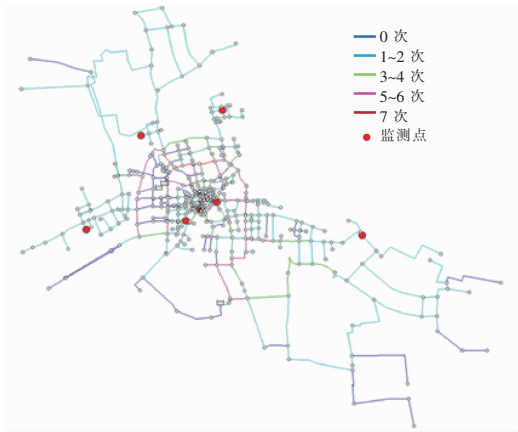


图 3 布置 7 个监测点时各管段爆管情况下被监测点监测到的次数
Fig. 3 Times of monitoring with pipes burst when seven monitoring points were arranged

随着监测点数量的增加,所能监测到爆管的范围越来越大(如表 1 所示),布置 1 个监测点能有效监测到 287 根管段爆管情况,占整个管网管段数量的 44.8%;布置 5 个监测点时能够监测到 467 根管段,占管段数量的 73.0%;当布置 10 个监测点时可以监测到 545 根管段,占比达 85.2%。可以发现,随着监测点数量的增加,能够有效监测到爆管管段的数量也越来越多,但是新增加的管段逐渐减少(见图 4)。

表 1 每增加 1 个监测点新增监测管段数及覆盖程度
Tab. 1 Monitoring pipeline number increased and its coverage degree with one more monitoring point added

监测点 数	独立监测 爆管数量	监测爆 管数量	新增加监 测爆管数	百分比/%
1	287	287	—	44.8
2	219	354	67	55.3
3	78	398	44	62.2
4	134	440	42	68.8
5	82	467	27	73.0
6	225	491	24	76.7
7	274	512	21	80.0
8	51	524	12	81.9
9	179	535	11	83.6
10	35	545	10	85.2
11	54	553	8	86.4
12	142	559	6	87.3
13	71	564	5	88.1
14	265	568	4	88.8
15	269	571	3	89.2

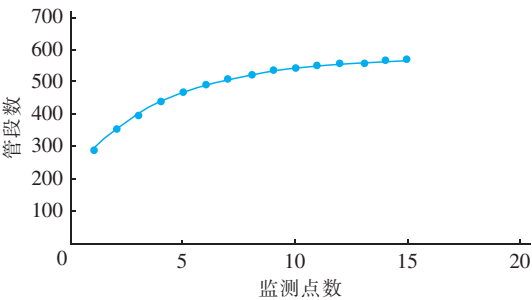


图 4 爆管监测数增长趋势
Fig. 4 Increase of monitoring number of burst pipes

3.2 监测点数量与监测爆管管段直径的关系

表 2 是关于监测管段数与直径关系的统计。可以发现,在爆管时漏失面积比 $n = 1/2$ 的情况下,对于该管网管径 ≥ 800 mm 管段的监测只需布置 4 个监测点,随着监测点数量的增加,其新增监测管段偏向覆盖小管径管段,同时新增管段数量越来越少。布置前 7 个监测点时每增加 1 个监测点,新增监测到的爆管数量都在 20 根以上,而后续增加布置的监测点新增监测有效爆管管段数快速减少。在实际管网中布置监测点时还要考虑到经济与效益,由于布置第 8 个及之后的监测点所能监测到的爆管基本上为小管径或管网末梢管段,因此认为在此管网中布置 7 个监测点为最经济有效的布置方法。

表 2 每增加 1 个监测点新增的监测管段数
Tab. 2 Monitoring pipeline number increased with one more monitoring point added

监测点 数	≥ 800 mm		500 ~ 700 mm		200 ~ 500 mm	
	现状	新增	现状	新增	现状	新增
1	65	—	45	—	177	—
2	66	1	50	5	238	61
3	70	4	51	1	277	39
4	71	1	69	18	300	23
5	71	0	76	7	320	20
6	71	0	76	0	344	24
7	71	0	76	0	365	21
8	71	0	80	4	373	8
9	71	0	80	0	384	11
10	71	0	80	0	394	10
11	71	0	80	0	402	8
12	71	0	80	0	408	6
13	71	0	80	0	413	5
14	71	0	80	0	417	4
15	71	0	80	0	420	3

4 结论与建议

① 通过分析节点爆管阈值,提出了一种适用

于爆管状态下的管道压力监测与判断的监测点优化布置方法。实例表明,应用该方法布置的监测点在管网中处于均匀分布状态,能够较好地监测管网爆管状态。

② 为了简化模型便于研究,假设整个管网处于同种程度下的爆管状态($n = 1/2$),而在实际管网中对于特定的监测点来说,处于不同地理位置与不同管径的管段只需在该管段最小程度下的爆管即可被该监测点监测与判断,因此有必要基于监测点能够反馈与判断的最小程度爆管继续进行后续研究。

③ 本研​​究所述监测点优化布置方法,能够有效监测与判断 500 mm 以上的管径爆管。随着监测点数量的增加,在一定范围内也能使得监测到的小管径管段数不断增加,但到一定数量后监测点过度集中且不能显著增加监测到的爆管数量。因此本研究提出的方法不适用于对较小管径管段爆管的监测,需继续探索一种适用于全尺寸管段爆管的压力监测点优化布置方法。

参考文献:

- [1] 黄廷林,丛海兵. 给水管网测压点优化布置的模糊聚类法[J]. 中国给水排水,2001,17(11):50-52.
Huang Tinglin, Cong Haibing. Use of fuzzy cluster method for the optimization distribution of pressure measuring points of water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(11): 50-52 (in Chinese).
- [2] 郭思元,刘遂庆,陈嵘. 给水管网压力监测点的优化布置[J]. 中国给水排水,2004,20(12):82-84.
Guo Siyuan, Liu Suiqing, Chen Rong. Optimization arrangement for pressure monitoring points of water distribution network [J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(12): 82-84 (in Chinese).
- [3] 王俊岭,孙怀军. 给水管网测压点的一种优化布置方法[J]. 北京建筑工程学院学报,2005,21(4):51-54.
Wang Junling, Sun Huaijun. Optimal algorithm of pressure measurement node layout in water distribution network [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2005, 21(4): 51-54 (in Chinese).
- [4] Meier R, Barkdoll B D. Sampling design for network model calibration using genetic algorithms [J]. J Water Resour Plan Manage, 2000, 126(4): 270-279.
- [5] de Schaetzen W B F, Walters G A, Savic D A. Optimal sampling for model calibration using shortest path genetic and entropy algorithm [J]. Urban Water, 2000, 2: 141-152.
- [6] Kang D, Lansey K. Optimal meter placement for water distribution system state estimation [J]. J Water Resour Plan Manage, 2010, 136(3): 337-347.
- [7] Kang D S, Parsha M F K, Lansey K. Approximate methods for uncertainty analysis of water distribution systems [J]. Urban Water, 2009, 6(3): 233-249.
- [8] 刘美侠. 城市供水管网监测点优化与爆管定位模型研究[D]. 保定:河北农业大学,2009.
Liu Meixia. The Study on Optimal Locating of Pressure Monitoring Station and the Model of Locating of Bursting Point in Urban Water Supply System [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2009 (in Chinese).
- [9] 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:何锐(1992-),男,安徽合肥人,硕士,研究方向为城市供水管网系统爆管监控。

E-mail: 21512161@zju.edu.cn

收稿日期:2019-12-21