

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.15.009

基于遗传算法的供水管网爆管监控网络布置研究

程伟平¹, 陈亚威¹, 许刚², 龙志宏²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 广州市自来水公司, 广东 广州 510600)

摘要: 根据供水管网压力信号的自然波动特性,确定了爆管监控压力波动报警阈值。在此基础上,提出了爆管强度概念,作为监测点优化布局中水力模型爆管模拟的参数之一。根据爆管水力模拟结果,以可监控最大爆管漏水量为目标函数,优化监测网络的布置。在此基础上,进一步提出了爆管监控覆盖率作为确定监测点个数的主要指标。最后,将该方法应用于两个案例,计算结果显示监测点分布均匀,符合常理,被监测到的管道清晰明确,确定监测点数量的依据科学,表明该方法可以应用于工程。

关键词: 供水管网; 爆管监控网络; 遗传算法; 压力监测点; 爆管强度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)15-0046-06

Layout of Burst Monitoring Network in Water Distribution System Based on Genetic Algorithm

CHENG Wei-ping¹, CHEN Ya-wei¹, XU Gang², LONG Zhi-hong²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. Guangzhou Water Supply Company, Guangzhou 510600, China)

Abstract: According to natural fluctuation characteristics of pressure signal in water distribution system, alarm threshold of pressure fluctuation in burst monitoring was determined. On this basis, the concept of burst strength was put forward as one of the parameters of hydraulic model burst simulation in optimal layout of monitoring points. According to the results of burst hydraulic simulation, layout of the monitoring network was optimized by taking the maximum leakage of burst pipes as the objective function. The coverage rate of burst pipes detection was proposed as the main index to determine the number of monitoring points. Finally, the method was applied to two cases. The calculation results showed that the monitoring points were uniformly distributed and conformed to the common sense. The detected pipelines were clear, and the basis for determining the number of monitoring points was scientific, which indicated that the method could be applied to engineering.

Key words: water distribution system; burst monitoring network; genetic algorithm; pressure monitoring point; burst strength

供水管道爆管是一种突发性事故,对正常社会生产生活可能产生严重影响,是供水管理部门重点

关注的安全问题之一。布置压力计等仪表设备是爆管监控的一种重要手段。受监测网络建设和维护成

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578486); 广州市科技计划项目(201604020019)
通信作者: 程伟平 E-mail: chengweiping@zju.edu.cn

本的限制,监测点的数量是有限的;优化监测点空间位置和数量,可以提高管网爆管监控能力,实现监测系统经济性和有效性的平衡。压力监测点优化方法包含回归分析^[1]、敏感性分析^[2]、聚类分析以及启发式优化方法等。在传统聚类分析方法中,根据各节点压力变化或压差变化的近似程度、管道泄漏特性之间的相关性等进行分类^[3-4],图论与聚类方法相结合^[5-6],融合了管网的拓扑结构信息,能提高布点的合理性。启发式布点方法大多根据监测点的敏感度进行优化,许刚等^[7]采用蚁群算法、Sousa等^[8]基于模拟退火算法、李栋等^[9]提出改进的果蝇优化算法进行求解,均取得了良好的结果。刘书明等^[10]同时考虑需水量变化和压力变化,利用多目标遗传算法进行选址,提高了监控管网的效果。在管网已存在压力监测点情况下,张清周等^[11]利用蒙特卡洛方法建立异常事件数据库并利用遗传算法进行求解,实现了新增压力监测点的优化布置。

管网中布置压力监测点的目的大致可分为:状态估计、模型校验、爆管监测、污染检测。本研究的目的是爆管监测。研究发现,不是所有的爆管都可以被监控到^[12],只有当爆管冲击大于“管网系统压力波动环境背景噪声”时,爆管才能被监测。在此基础上,笔者提出了一种面向爆管的压力监测点数量和空间位置优化方法:①为了评估爆管并确定合理的指标进行爆管模拟,提出了爆管强度的概念。②在指定爆管强度下,建立了以最大可能监控到漏水量为目标的监测点布置优化函数,并采用遗传算法进行求解。③通过逐步增加监测点个数,以可能监控管道覆盖率增长率小于一定量来确定合理监测点数量。本研究通过两个不同的案例,展示了如何应用遗传算法进行监测点优化和监测点数量确定,计算结果显示采用本研究提出的方法,监测点布置均匀,结果符合工程经验,能够被监测网络监控覆盖的管线区域一目了然。

1 管网系统压力监测系统信号特征

供水管网 SCADA 系统监测到的压力数据是波动的,两个时间段的压力变化可表示为 $\Delta P_i = P_i - P_{i-\Delta t}$ 。将 ΔP_i 的累积概率绘制成曲线,总体符合正态分布,平均值为 0;在均值的 2~3 倍方差以外,经验累积概率曲线开始急剧偏离正态分布累积概率曲线。从统计学角度来看,2~3 倍方差以外的事件一般称为小概率事件,可能是爆管、仪表干扰、用户大

幅度波动等异常现象。文献[13]定义 2~3 倍方差以内的波动为“管网系统压力波动环境背景噪声”(简称背景噪声)。由于每个监测点所处环境不同,背景噪声阈值也稍有不同,一般为 0.6~1.5 m。当传感器监测到压力波动下降超过背景噪声阈值时,发生爆管等异常事件的概率较高,可启动预警信号。背景噪声阈值标准高,有利于降低误报率,但漏报率会增加,所需监测点数会增加。背景噪声阈值标准低,误报率高,但漏报率减少,所需监测点数会减少。自来水公司可根据实际情况合理设置阈值。

2 爆管对管网系统的冲击

2.1 爆管强度

爆管属于偶发事件,直接监测爆管或通过试验方法模拟爆管的难度非常大,而且针对每根管道进行爆管试验的可能性更小,因此采取数值方法模拟爆管冲击是比较可行的方法。不同条件下同一管道爆管产生的漏水量不一样,而且同样的漏水量在不同规模管网内产生的冲击差别也很大,因此评估爆管需要合理的指标,能够同时体现管径、漏水量等因素。类似于地震学的地震强度和烈度概念,本研究需要定义爆管强度的概念。

影响爆管漏水量的因素包括:压力、管道漏水口尺寸、管道来水直径等因素。自来水公司一般希望以爆管后的漏水量作为直接指标。指定爆管严重程度有 3 种表达方式:①指定管道破裂面积,漏水量可根据 $Q = \sqrt{2gh}A$ 计算,在压力不明确的情况下,不能直接计算出漏水量;②指定管道泄漏量,这一方式能直接反映漏水量,但对于不同管径的管道,指定的泄漏量不一定符合实际情况,例如指定管道的泄漏量为 1 000 m³/h 时,对于 DN100 的管道是不合理的;③指定管道流速增加量,即根据 $\Delta Q = \Delta v \pi d^2 / 4$ 能间接得到漏水量,由于考虑了管径大小的影响,指定的漏水量在合理范围内,也不需要考虑现场压力大小,直观反映了爆管严重程度。本研究定义爆管后流速增加量 Δv 为爆管强度,方便统一进行爆管冲击影响仿真计算。

2.2 爆管对管网冲击仿真

根据经验,指定管道流速增加量 Δv 在 0.8~1.2 m/s 作为爆管强度评估指标。以某管网^[14]为例,指定管道流速增加量 Δv 为 1 m/s、背景噪声阈值为 0.8 m,模拟分析每根管道爆管对管网产生的冲击影响范围。标记的点表示被影响使得压降大于

背景噪声阈值的节点,即大于0.8 m(如图1所示)。对于同一个管网系统,对比图1(a)、(b)可知,距离相近的两根不同管径的管道采用相同的指定流速增加量 Δv 产生的影响不同,管径越大爆管产生的冲击影响范围越大;对比图1(a)、(c)可知,同一根管道不同的管道流速增加量可以反映爆管冲击程度。综上,指定爆管强度选用指定流速增加量这一方式可以合理地模拟不同管径的爆管对管网产生的影响。如果要监控到指定爆管强度的爆管,必须在被标记节点范围内布设监测点才可能发现爆管。爆管冲击模拟分析可以为监测网络优化提供爆管监测点备选位置信息:即指定管线如果要被监测到,在标记的节点区域内需设有传感器。

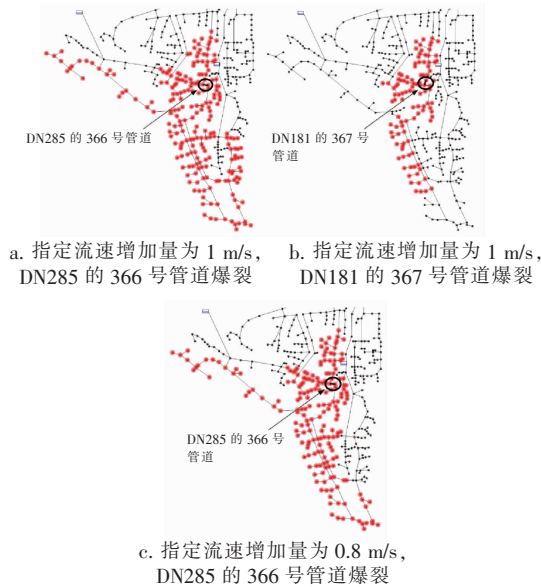


图1 爆管对周边管网节点影响情况

Fig. 1 Impact of burst on water distribution nodes

3 爆管监测网络优化方法

3.1 监测点布局目标函数建立

爆管监测系统的目标是优先监控重要管线。在指定爆管强度下,漏水量能体现管道的重要性。当给定监测点数量为 n 时,为最大可能监控到漏水量,指定爆管强度下管网爆管监控网络布置的空间布局目标函数如下:

$$\left. \begin{aligned} F_n &= \max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{i,j} l_i \cdot \Delta Q_i \cdot G_{i,j} \\ G_{i,j} &= \begin{cases} 1, & \Delta P_{i,j} \geq \Delta P^C \\ 0, & \Delta P_{i,j} < \Delta P^C \end{cases} \\ \text{s. t. } & \text{Distance}(j_1, j_2) \geq d_0 \quad j_1, j_2 \in \Omega \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: i 为管道编号; j 为监测点编号; m 为被监控的管道数; ΔQ_i 为第 i 根管道爆管产生的漏水量,根据指定爆管强度确定 $\Delta Q = \Delta v \pi d^2 / 4, \text{m}^3/\text{h}$; $W_{i,j} l_i$ 为加权重部分,管道越长则出现爆管的概率越大, l_i 体现了管道长度的影响, $W_{i,j}$ 与材料、用户重要性等因素有关,可根据具体情况确定; $\Delta P_{i,j}$ 为第 i 根管道爆管使第 j 个测压点压力下降的值, m ; ΔP^C 为管网监测系统压力波动背景噪声阈值, m ; Ω 为监测点的集合。

为防止监测点集中在重要的管道,采用约束条件来限制监测点之间的最小距离。

监测点数量为 n 时,管网爆管监控能力用管道覆盖率表示:

$$S_n^k = \frac{\sum l_{bi}^k}{\sum l_i} \quad (2)$$

式中: l_{bi}^k 为第 i 根管道被 k 个或更多个监测点同时监控的长度, m ; l_i 为第 i 根管道的长度, m 。

据文献描述^[15],野外仪表的误差很大,一般要2个或更多监测点同时监控才能相对比较可靠地判断爆管或其他异常事件的发生,因此在优化过程中以 S_n^2 作为终止准则。

3.2 基于遗传算法的优化方法

基于爆管分析的基础信息,采用遗传算法对目标函数进行求解。本研究中遗传算法采用整数编码,染色体个数为给定的监测点数量 n 。例如当监测点数量为5时,随机生成的个体可能是 $\{5, 11, 43, 85, 136\}$,里面的整数对应被选中的节点的编码。初始化种群,计算各个体对应函数[式(1)]的值,进行从小到大排序、随机遍历抽样选择、单点交叉、变异等操作直到满足终止条件,得到 n 个监测点的最优空间布置。

对于一个供水管网体系,监测点数量并非越多越好,当监测点布设超过一定数量时,覆盖率随着监测点数量的增加变化减小,监控能力提升有限。因此,爆管监测网络布置优化包括寻求经济、有效的监测点数量。

设定监测点的个数 n 至少从2开始,采用遗传算法寻找使得目标函数 F_n 最大的空间布置,计算 S_n^k 的增长情况,重复该步骤,当覆盖率 S_n^k 增幅小于一定值 e 后且保证其大于某一最低要求的覆盖率 S_e 后停止优化,此时就得到了较为经济的监测点数量,优化过程如图2所示。

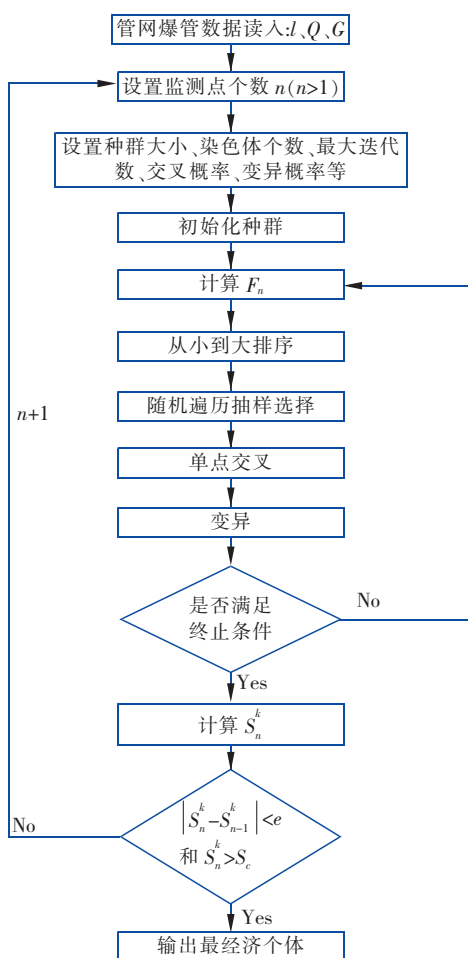


图2 优化流程

Fig. 2 Optimization procedure

4 爆管监测网络优化案例分析

4.1 案例一

案例一管网模型包括 443 个节点、454 根管道、4 个水厂、管道总长为 100.3 km。指定压力波动环境背景噪声阈值为 0.8 m, 管道流速增量为 1 m/s, 对每根管网进行爆管分析作为基础信息。在此基础上采用遗传算法进行监测点优化。遗传算法中设置种群大小为监测点数量的 500 倍, 染色体个数为监测点数量, 最大迭代次数为 1 000, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.01。从 5 开始逐步增加监测点个数, 迭代过程中可获得每次最优解的覆盖率 S_n^k 。

图 3 中包括了同时被监测点数量监测到情况下的覆盖率: S_n^1 表示被大于或等于 1 个监测点同时监控的管道覆盖率, S_n^2 、 S_n^3 表示被大于或等于 2、3 个监测点同时监控的管道覆盖率。当监测点数量一样时, $S_n^1 > S_n^2 > S_n^3$; 随着监测点数量的增加, S_n^1 、 S_n^2 、 S_n^3

增加, 但增加幅度越来越小。

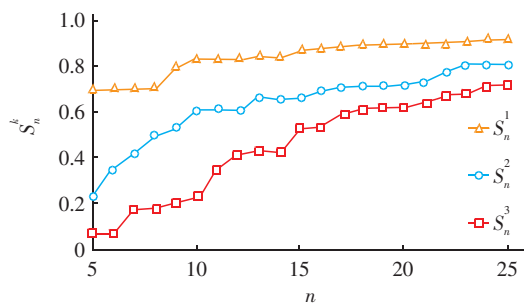
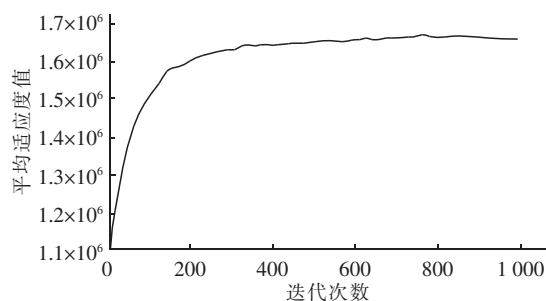


图3 案例一管道覆盖率

Fig. 3 Detection pipe coverage of case one

考虑到爆管监测的可靠性, 优化过程中以 S_n^2 作为判断准则。根据管网规模, 取 $d_0 = 100$ m、 $e = 1\%$ 、 $S_c = 0.80$, 最终确定最经济的监测点数量为 24。当监测点数量为 24 时, 遗传算法迭代的收敛过程如图 4 所示。最优空间布置如图 5 所示, 标记的点表示布置监测点的位置, 加粗的管道表示可以监控管道。

图4 迭代过程与平均适应度值($n=24$)Fig. 4 Iteration process and average fitness value($n=24$)图5 案例一爆管监控网络测点位置与被监控管线($n=24$, $S_n^2 = 0.8051$)Fig. 5 Optimal layout and monitoring capability of case one ($n=24$, $S_n^2 = 0.8051$)

由图4可以看出,该算法具有较好的收敛性,优良个体逐渐被筛选并保留下来。由图5可知,监测点分布均匀,能够对整个管网进行全面监控;被2个监测点同时监控的管道覆盖率为0.8051。

4.2 案例二

案例二管网模型包括811个节点、1124根管道、1个水厂、3个水池、1个水泵、管道总长为152.2 km。对案例二先进行爆管分析,再进行爆管监测网络布置优化,参数设置同案例一。在迭代过程中可以获得每次最优解的覆盖率 S_n^2 (如图6所示),案例二的监测点数量确定为18,最优空间布置如图7(b)所示,可以看出监测点较均匀地分布在管网中,对重要管道起到了良好的监控。当监测点数量不足时,管网被监控的情况如图7(a)所示,存在一些不足;当监测点数量过多时,管网被监测的情况如图7(c)所示,对比图7(b)可以看出监控能力提升不明显,由此可见本研究确定的监测点数量的方法具有合理性。

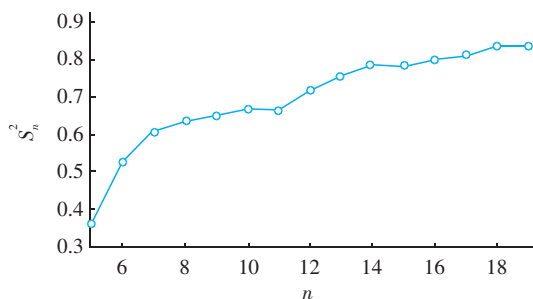


图6 案例二管道覆盖率

Fig. 6 Detection pipe coverage of case two

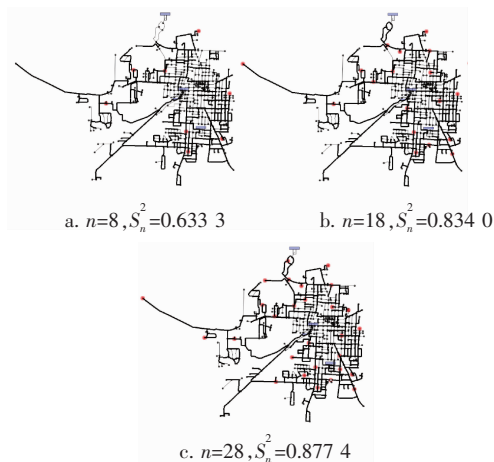


图7 案例二爆管监控网络空间分布及监控能力

Fig. 7 Layout and monitoring capability of case two

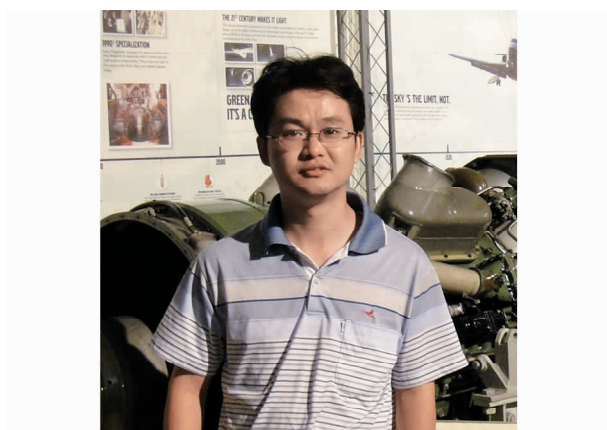
5 结论

本研究建立了以监控最大泄漏量为目标的监测点布局优化函数,同时考虑了管径、管长等因素,并采用覆盖率指标科学地解决一个供水管网系统合理布置监测点数量问题。两个案例的结果均显示,最优解时监测点都较均匀地分布在管网里。本研究提出的覆盖率指标,量化评估了监测点在爆管监测中的作用,有利于自来水公司理解监测网络在管网运行中的效果,为企业经济合理布设监测网络提供了较为扎实的理论依据。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 张宏伟,张丽,梁建文. 给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. Arrangement method of pressure monitoring point of water supply network[J]. China Water & Wastewater, 2003,19(3):52-55(in Chinese).
- [3] 黄雅芳,卫海,管慧玲,等. 聚类分析法选择给水管网压力监测点[J]. 净水技术,2014,33(S2):74-76.
Huang Yafang, Wei Hai, Guan Huiling, et al. Pressure monitoring points selection by clustering analysis method in water supply network[J]. Water Purification Technology, 2014,33(S2):74-76(in Chinese).
- [4] 陈峰,张蕊,赵明. 利用水力模型优化布置供水管网压力监测点[J]. 净水技术,2015,34(4):105-109.
Chen Feng, Zhang Rui, Zhao Ming. Layout optimization of monitoring points for water supply pressure of distribution network system in application of hydraulic model[J]. Water Purification Technology, 2015,34(4):105-109(in Chinese).
- [5] 陆仁强,张宏伟,牛志广,等. 基于非线性映射理论的城市供水管网压力监测点布置方法研究[J]. 水利学报,2010,41(1):25-29.
Lu Renqiang, Zhang Hongwei, Niu Zhiguang, et al. Study on an arrangement method for pressure monitoring points in urban water supply network by nonlinear mapping theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(1):25-29(in Chinese).

- [6] 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 Shukui, 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).
- [7] 许刚,张士乔,吕谋. 基于灵敏度分析和蚁群算法的管网监测点优化选择[J]. 中国给水排水,2007,23(11):94-96,101.
- Xu Gang, Zhang Tuqiao, Lü Mou. Optimized location of monitoring points for water distribution system based on sensitivity analysis and ant colony algorithm[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(11): 94-96, 101 (in Chinese).
- [8] Sousa J, Ribeiro L, Muranho J, *et al.* Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory[J]. Procedia Engineering, 2015, 119(1): 63-71.
- [9] 李栋,薛惠锋,张文宇. 面向故障诊断的供水管网水压监测点优化布置方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(2): 53-61.
- Li Dong, Xue Huifeng, Zhang Wenyu. Optimal layout method of water pressure monitoring points for water supply network based on fault diagnosis[J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2018, 40(2): 53-61 (in Chinese).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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(S1): 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(S1): 346-349 (in Chinese).
- [13] 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).
- [14] Reca J, Martínez J. Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks[J]. Water Resources Research, 2006, 42(5): 110-119.
- [15] 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.



作者简介:程伟平(1975-),男,湖南醴陵人,博士,副教授,主要从事供水管网监测点优化、爆管定位以及相关研究。

E-mail: chengweiping@zju.edu.cn

收稿日期:2019-04-23