

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.07.009

面向爆管检测的供水管网水压监测点多目标优化

赵文轩¹, 杜坤¹, 孟繁艺², 罗雄武³, 周明¹, 宋志刚¹

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省设计院集团有限公司, 云南 昆明 650100; 3. 昆明官房建筑设计有限公司, 云南 昆明 650051)

摘要: 针对单目标优化算法在水压监测点优化布置模型求解过程中计算效率低、解集质量差的问题,提出了一种多目标非支配差分进化算法(NSDE)。首先,对各管段中间添加的节点赋予爆管流量并依次进行模拟,根据各节点压力变化值生成爆管事件判断矩阵;然后,以监测点个数最小化和爆管检测漏损量最大化为目标函数构建监测点优化布置数学模型,利用NSDE算法进行求解;最后对Pareto解集中监测点布局特征展开分析。以net3供水管网为例,采用单目标遗传算法、多目标非支配遗传算法(NSGA-II)和NSDE算法分别对模型进行求解,结果表明多目标NSDE算法计算效率更高且优化解质量更好,其Pareto解集对应的多种布局方案可为实际工程中监测点布置提供灵活选择。

关键词: 供水管网; 爆管; 水压监测点; 多目标优化; 非支配差分进化算法

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)07-0057-06

Multi-objective Optimization of Water Pressure Monitoring Points for Pipe Burst Detection in Water Supply Networks

ZHAO Wen-xuan¹, DU Kun¹, MENG Fan-yi², LUO Xiong-wu³, ZHOU Ming¹,
SONG Zhi-gang¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Design Institute Group Co. Ltd., Kunming 650100, China; 3. Kunming Guanfang Architecture & Design Inc., Kunming 650051, China)

Abstract: The single objective optimization algorithm has low computational efficiency and poor solution set quality in the process of solving the optimal arrangement model of water pressure monitoring points. A multi-objective non-dominated sorting differential evolution (NSDE) algorithm was proposed to solve these problems. Firstly, the nodes added in the middle of each pipe segment were distributed a pipe burst flow and the pipe burst simulation was carried out successively, and the pipe burst event judgment matrix was generated according to the pressure change value of each node. Then, a mathematical model for optimizing the arrangement of monitoring points was constructed with the objective function of minimizing the number of monitoring points and maximizing the leakage volume of pipe burst detection, and the solution was obtained by using NSDE algorithm. Finally, the arrangement characteristics of monitoring points in Pareto solution were analyzed and discussed. The model was solved by single

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52260011); 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

objective genetic algorithm, multi-objective non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) and NSDE algorithm respectively exemplified by the net3 water supply network. The multi-objective NSDE algorithm has higher computational efficiency and better optimal solution set quality, and the multiple layout schemes corresponding to its Pareto solution sets provide flexibility for monitoring site arrangement in actual projects.

Key words: water supply network; pipe burst; water pressure monitoring point; multi-objective optimization; non-dominated sorting differential evolution algorithm

爆管不仅造成水资源严重浪费,还会引起供水系统污染,及时发现和修复爆管具有重要意义。供水管网中布设水压监测点可以获取节点压力情况,根据压力异常值检测爆管是一种重要手段。受资金等条件限制,监测点的布设数量是有限的,因此需要对监测点空间布局进行优化。许刚等^[1]利用灵敏度分析矩阵建立监测点优化布置数学模型,并分别采用穷举法、遗传算法、蚁群算法求解。林雨阳^[2]结合压力相关性和水量影响模糊相似矩阵,以监测范围最大化为目标函数,分别采用粒子群算法和遗传算法对监测点优化布置数学模型进行求解。张清周等^[3]通过蒙特卡洛方法建立爆管异常事件数据库并采用遗传算法求解,对新增压力监测点布局进行优化。程伟平等^[4]以可监测泄漏量为目标函数建立水压监测点优化布置数学模型,利用遗传算法进行求解。Zhao等^[5]以爆管监测覆盖率为目标函数建立数学模型,采用遗传算法对不同监测点数下的布局进行优化。然而,上述方法均以单目标函数构建监测点优化布置模型,单目标优化算法一次优化仅能得到某个监测点数下的最优布局,因而需要对不同监测点数的布局进行多次优化,但存在工作量大、计算效率低等问题。同时,算法的整数编码方式使得解空间随监测点数的增加而急剧增大,不利于找到全局最优解。

基于多目标优化的 Pareto 前沿解集可为决策者确定最佳经济效益方案提供依据^[6]。笔者以监测点个数最小化和爆管检测漏损量最大化为双目标函数构建水压监测点优化布置数学模型,并提出一种采用 0-1 编码方式且引入重复解剔除策略的多目标非支配差分进化算法(NSDE)。为验证 NSDE 算法在求解水压监测点多目标优化布置模型的优越性,求解结果分别与多目标非支配遗传算法(NSGA-II)、文献[4]和[5]中的单目标遗传算法进行比较,并对

Pareto 解集中的监测点布局展开分析。

1 多目标优化模型的构建

1.1 爆管判断矩阵的建立

爆管事件的发生具有随机性,对实际管网中段进行爆管试验具有不现实性。因此,采用最新管网水力模拟软件 EPANET2 模拟管道爆管。根据文献[7],爆管会导致特定管道流速增加 0.8~1.2 m/s,因此通过在各管段中间增设虚拟节点,依次赋予特定的节点流量模拟管道爆管。

爆管模拟前,首先获取正常工况下各节点的压力 H_j^i ,然后采用 EPANET2 中压力驱动方法(PDA)依次对每根管段进行爆管模拟,根据爆管时压降构建节点压力变化矩阵 Δh 。将 Δh 的各元素与背景噪音阈值 ΔP 进行比较,当 $\Delta h_{i,j} \geq \Delta P$ 时, $b_{i,j}$ 置为 1,表示节点 j 的水压监测点可以检测到管段 i 的爆管;否则 $b_{i,j}$ 置为 0,表示节点 j 的水压监测点不可检测到管段 i 的爆管,从而得到 0-1 爆管事件判断矩阵 B 。

$$B = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \cdots & b_{1,m-1} & b_{1,m} \\ b_{2,1} & \cdots & \cdots & \cdots & b_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n-1,1} & \cdots & \cdots & \cdots & b_{n-1,m} \\ b_{n,1} & b_{n,2} & \cdots & b_{n,m-1} & b_{n,m} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: n 为管网管段总数; m 为节点总数; i 为管段编号, $i=1, 2, \dots, n$; j 为节点编号, $j=1, 2, \dots, m$ 。

1.2 目标函数的建立

优化水压监测点布局是为了监测更多管径较大且长度较长的管段^[4],因为这些管段爆管会产生较大漏损量,严重影响管网供水。基于此,以监测点个数最小和爆管检测漏损量最大为双目标函数建立数学模型,见式(2)。约束条件见式(3)~(5)。

$$\begin{cases} \min N = \sum_{j=1}^m X_j \\ \max F = \sum_{i=1}^n L_i Q_i B_i \end{cases} \quad (2)$$

$$B_i = \begin{cases} 1, \text{sum} [(b_{ij} \cap X_j) \cup (b_{i,j+1} \cap X_{j+1}) \cup \dots \cup (b_{i,m} \cap X_m)] \geq 2 \\ 0, \text{sum} [(b_{ij} \cap X_j) \cup (b_{i,j+1} \cap X_{j+1}) \cup \dots \cup (b_{i,m} \cap X_m)] < 2 \end{cases} \quad (3)$$

$$X_j = \begin{cases} 1, \text{节点 } j \text{ 设为监测点} \\ 0, \text{节点 } j \text{ 不设为监测点} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Length}(X_j, X_{j+1}, \dots, X_m) \geq D \quad (5)$$

式中: N 为某布置方案中监测点的总数; F 为某种布置方案对应的适应度值; X_j 为节点 j 是否设置为压力监测点; L_i 为管段 i 的长度, m ; Q_i 为管段 i 的爆管流量, L/s ; $b_{i,j}$ 为爆管判断矩阵 B 中对应的元素; B_i 为某一布置方案是否能够检测到管段 i 的爆管(某一爆管事件可以被两个监测点同时检测到才认为是有效检测^[8]); Length 为某布置方案中监测点之间的最短路径距离, m ; D 为监测点之间最短路径的阈值, m 。

某布置方案检测爆管能力的指标用爆管覆盖率(S)表示, 见式(6)。

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n L_i B_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (6)$$

2 压力监测点优化模型的求解

利用 NSDE 算法求解供水管网水压监测点多目标优化模型的流程如图 1 所示。

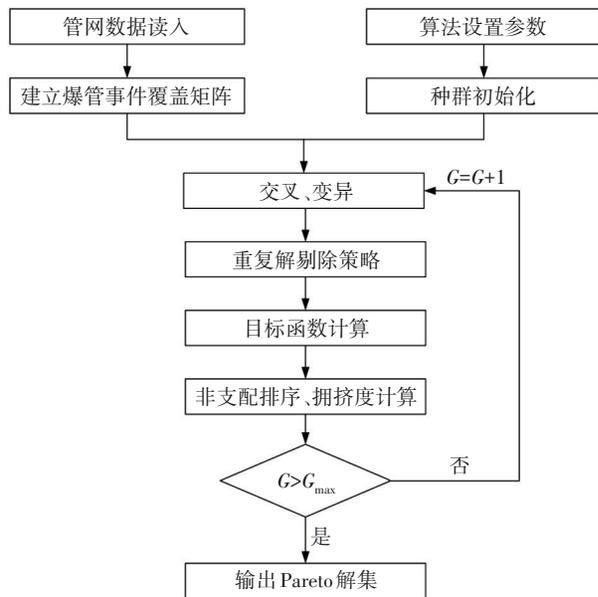


图 1 基于 NSDE 算法的水压监测点多目标优化流程

Fig.1 Multi-objective optimization of water pressure monitoring point based on NSDE algorithm

差分进化算法是一种基于群体的进化算法^[9], 具有参数设置少、鲁棒性强、搜索能力强等优点, 已被广泛用于求解工程优化问题。本研究将 NSGA-II^[10] 中锦标赛策略引入到差分进化算法中, 改进得到 NSDE。为保持进化过程中种群的多样性, 在父代和子代混合过程中引入重复解剔除策略, 剔除种群中染色体完全相同的个体。

2.1 求解原理

NSDE 算法采用 0-1 二进制编码方式, 染色体数为管网节点总数。随机为染色体赋值 0、1, 其中 0 表示该节点不设为水压监测点, 1 表示该节点设为水压监测点。

首先, 从种群中随机挑选 3 个个体, 通过变异和交叉策略产生新的个体, 得到与初始种群大小相等的子代种群。然后将父代与子代混合为染色体完全相同的个体, 并进行目标函数计算。其次, 对种群中个体进行非支配排序和拥挤度计算, 保留排名靠前与拥挤度较小的个体作为父代, 以此循环至最大迭代次数, 从而得到目标函数下的一系列 Pareto 解集。

2.2 算法的实现

NSDE 算法程序的编码和运算均在 MATLAB 上完成, 采用 EPANET2 中的压力驱动法(PDA)进行水力分析。MATLAB 调用 EPANET2 提供的 ENtoolbox 接口获取管网拓扑结构数据, 根据节点与管段关联关系生成节点衔接矩阵, 通过 Dijkstra 最短路径算法计算节点之间的距离, 从而得到管网节点之间最短路径矩阵。

优化算法的参数设置如下: NSDE 算法种群大小为 300, 最大迭代次数为 1 000, 交叉因子为 0.8, 变异因子为 0.5。NSGA-II 算法参数采用文献[11]中的推荐值。

3 案例分析

选取经典管网 net3 作为研究案例, 如图 2 所示, 该管网包含 2 个水源、3 个水塔、92 个节点、117 根管段, 管径范围为 DN250~750, 管段总长为 65.7 km。根据文献[7], 指定背景噪音阈值 ΔP 为 1.4 m, 管道流速增加量为 0.8 m/s, 监测点之间的最小距离阈值 D 为 1 000 m。

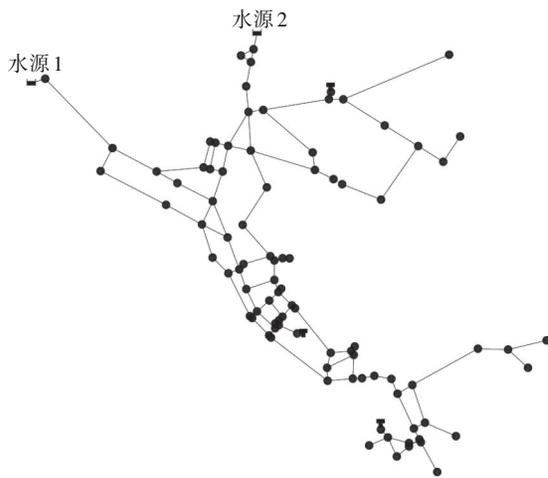
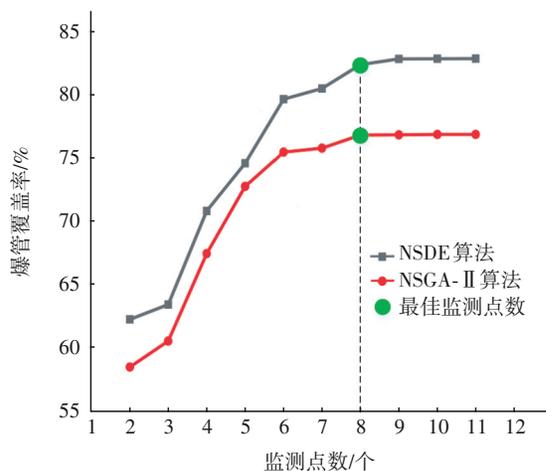


图 2 net3管网拓扑结构

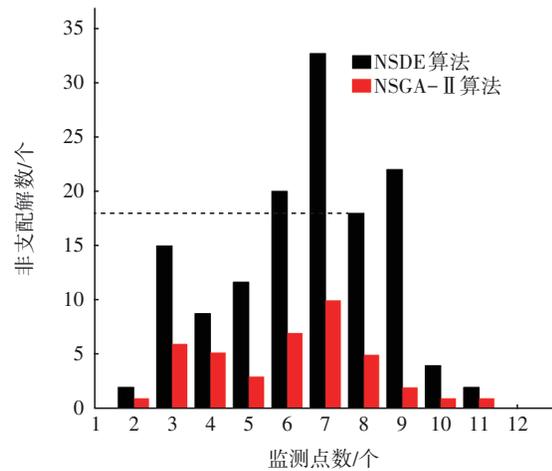
Fig.2 Pipe network topology of net3

3.1 NSGA-II 算法与 NSDE 算法性能对比

NSGA-II 算法被广泛用于求解多目标优化问题。但也有一些研究指出,其在求解高维度问题时存在全局搜索能力不足的缺陷^[12]。本研究同时采用 NSGA-II 与 NSDE 算法对水压监测点多目标优化布置模型进行求解,通过 Pareto 解集中不同监测点个数下非支配解的爆管覆盖率与数量比较算法的性能,结果如图 3 所示。相同监测点数下,不同布置方案取得了相同且最大爆管覆盖率,这些布置方案(解集)被称为非支配解集。由图 3(a)可以看出,NSDE 与 NSGA-II 算法得到的最佳监测点数均为 8 个,这是由于当监测点数大于 8 个时爆管覆盖率增大不明显。但值得注意的是,NSDE 算法得到的最佳爆管覆盖率(82.33%)远大于 NSGA-II 算法(76.41%),且不同监测点数下 NSDE 算法所得爆管覆盖率均高于 NSGA-II 算法。



a. 爆管覆盖率对比结果



b. 非支配解个数对比结果

图 3 爆管覆盖率和非支配解个数对比结果

Fig.3 Comparison results of pipe burst coverage and number of nondominant solutions

由图 3(b)可以看出,不同监测点数下,NSDE 算法比 NSGA-II 算法均能找到更多的非支配解,即 NSDE 算法能获得更多可供选择的水压监测点布局方案。综上所述,NSDE 优化解对应的爆管覆盖率与非支配解个数都优于 NSGA-II 算法,表明 NSDE 算法更适用于求解水压监测点多目标优化问题。

3.2 基于 Pareto 解集的监测点布局特征分析

由图 3(b)可知,最佳监测点数对应了 18 个爆管覆盖率相同的 Pareto 解集(18 种不同布置方案),其中 14 个节点被选为监测点。图 4 统计了这 14 个节点被选中的频率(节点频率=节点被选为监测点的次数/布置方案总数),图 5 给出了这些节点的空间分布特征。

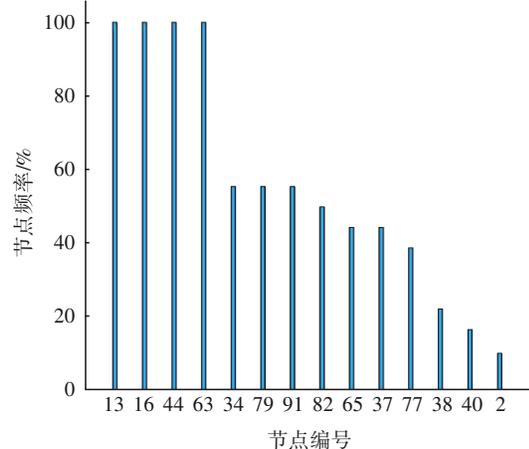


图 4 节点被选为监测点的频率

Fig.4 Frequency of pressure monitoring point location selection

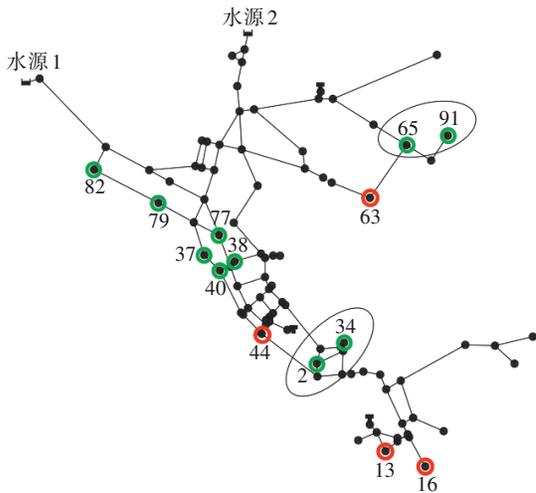


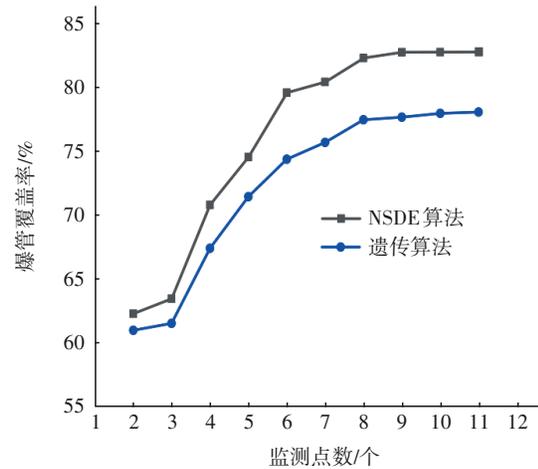
图5 监测点布局空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution characteristics of monitoring points

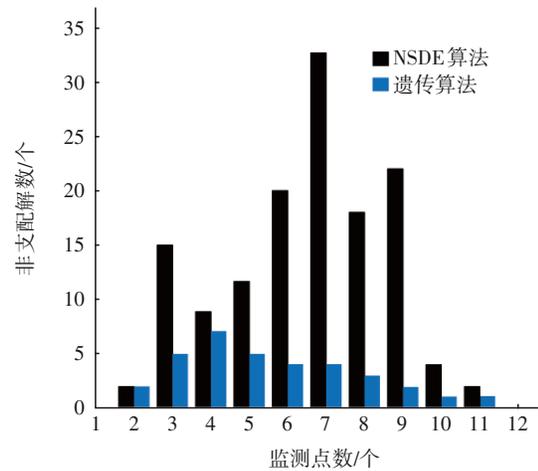
节点13、16、44、63被选为监测点的频率为100%，表明要达到最佳覆盖率该4个节点必须布置水压监测点，即该4个节点更重要且不可被其他节点替代。这些节点大多位于管网末端，比其他节点对爆管更敏感，这与秦贤海等^[13]的研究结果及工程实践经验相符。相反，其他节点可选择性地布置水压监测点，如节点65与91、2与34，这为工程实际中水压监测点布局提供了一定灵活性。

3.3 多目标与单目标优化结果对比分析

为进一步论证所提出多目标NSDE算法的优越性，采用文献[4]、[5]中单目标遗传算法对不同数量下监测点布局分别进行10次优化，结果如图6所示。可以看出，多目标NSDE算法优化解对应的爆管覆盖率与非支配解个数远大于单目标遗传算法。NSDE算法对应的爆管覆盖率最大值为82.85%，而遗传算法对应的最大值仅为78.14%。此外，NSDE算法得到的非支配解数(133个)是遗传算法(34个)的4倍。通过分析发现，这是由于文献[4]、[5]中的单目标遗传算法采用了整数编码方式，其解空间随监测点数的增加而急剧增大，进而导致监测点数增加时很难找到高质量非支配解。本研究所提出的多目标NSDE算法采用0-1二进制编码方式，其解空间与监测点个数无关，这有利于在较多监测点数时找到高质量非支配解。此外，通过引入重复解剔除策略，保证了优化过程中解的多样性，且通过一次优化即可得到不同监测点数下的多个非支配解，计算效率远高于单目标遗传算法。



a. 爆管覆盖率对比结果



b. 非支配解个数对比结果

图6 优化后爆管覆盖率和非支配解个数对比结果

Fig.6 Comparison results of pipe burst coverage and number of nondominant solutions after optimization

4 结论

① 针对单目标优化算法在求解水压监测点优化布置模型中计算效率低、优化解质量差的问题，提出了基于多目标NSDE算法的水压监测点优化方法。相较于单目标优化算法，多目标NSDE算法优点如下：采用0-1编码方式，解空间不随监测点数的增加而增大，有利于在监测点数较多时找到高质量非支配解；仅需通过一次优化即可得到不同监测点数下的多个非支配解，极大减少了工作量；引入重复解剔除策略后，优化过程中解集更具多样性。

② 将所提出的方法应用于net3管网案例，结果表明多目标NSDE算法优化解对应的爆管覆盖率与非支配解数均优于单目标遗传算法、传统多目标NSGA-II算法，并且Pareto解集中的多种布局方案

可为实际工程中监测点布置提供灵活选择。因此,所提出的多目标NSDE算法在求解供水管网水压监测点优化布置问题上更具优势。

参考文献:

- [1] 许刚,张土乔,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).
- [2] 林雨阳. 城市供水管网实时监控系统的设计与监测点的优化布置[D]. 广州:华南理工大学, 2013.
LIN Yuyang. Design of Real-time Monitoring System for Municipal Water Supply Network and Optimization of Monitoring Points [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [3] 张清周,黄源,齐晶瑶,等. 给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).
- [4] 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).
- [5] ZHAO M K, ZHANG C, LIU H X, *et al.* Optimal sensor placement for pipe burst detection in water distribution systems using cost-benefit analysis [J]. Journal of Hydroinformatics, 2020, 22(3/4): 606-618.
- [6] FU G T, KAPELAN Z, KASPRZYK J R, *et al.* Optimal design of water distribution systems using many-objective visual analytics [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2013, 139(6): 624-633.
- [7] CHENG W P, CHEN Y W, XU G. Optimizing sensor placement and quantity for pipe burst detection in a water distribution network [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2020, 146(11): 04020088.
- [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] VASAN A, SIMONOVIC S P. Optimization of water distribution network design using differential evolution [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, 136(2): 279-287.
- [10] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [11] 王礼炳,王琦,王志红,等. NSGA-II算法的参数取值对供水管网多目标优化设计的影响[J]. 给水排水, 2018, 44(10): 136-140.
WANG Libing, WANG Qi, WANG Zhihong, *et al.* Influence of parameter values in NSGA-II algorithm on multi-objective optimization design of water supply network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(10): 136-140 (in Chinese).
- [12] WANG Q, GUIDOLIN M, SAVIC D, *et al.* Two-objective design of benchmark problems of a water distribution system via MOEAs: towards the best-known approximation to the true Pareto front [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2015, 141(3): 04014060.
- [13] 秦贤海,杜坤,罗雄武,等. 基于爆管检测效益的供水管网水压监测点布局优化[J]. 中国给水排水, 2022, 38(5): 40-44.
QIN Xianhai, DU Kun, LUO Xiongwu, *et al.* Distribution optimization of water pressure monitoring point in water supply network based on the benefit of pipe burst detection [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(5): 40-44 (in Chinese).

作者简介:赵文轩(1997-),男,河南焦作人,硕士研究生,主要研究方向为供水管网优化。

E-mail: 995953795@qq.com

收稿日期: 2022-10-25

修回日期: 2022-12-25

(编辑:任莹莹)