

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221893

基于 NSGA- II 的供水管网漏损定位多目标优化模型

苏彦博, 吕 谋, 褚洋洋

(青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 针对城市供水管网漏失问题, 传统漏损定位模型采用单目标优化方法求解, 其目标函数由各优化目标加权求和构成, 权重因子取值不当会劣化模型定位结果。为此, 提出一种基于 NSGA- II 的供水管网漏损定位多目标优化模型。该模型以泄漏点编号和扩散器系数作为决策变量, 分别以压力和流量监测点的实际监测值与仿真值之间的误差最小作为优化目标, 采用 NSGA- II 算法进行寻优求解。为验证该模型的有效性, 将其应用于某居民区实际供水管网, 考虑管网实际运行中常见的故障工况, 分别对单节点和两节点漏损事故进行模拟定位。与目前应用较广泛的两种漏损定位模型进行对比, 结果显示, 基于 NSGA- II 的漏损定位多目标优化模型可以准确且稳定地定位到实际发生漏损的附近区域。

关键词: 供水管网; 漏损定位模型; 多目标优化; NSGA- II

中图分类号: TU991; TV672⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0132-05

1 引言

供水管网作为社会生存和发展的基础保障, 近年来, 由于管道老化等原因导致漏损事故频发, 对居民用水安全构成巨大威胁。及时发现并处理管网爆管等事故显得尤为重要。目前, 传统单目标漏损定位模型应用已相当广泛, 但该方法具有一定局限性, 存在收敛精度不足、易陷入局部最优等问题。近年来, 多目标优化方法在供水管网优化设计^[1]、管网水力模型校核^[2]等领域应用广泛, 但在预测管网漏损问题上应用较少。对此, 本文提出将多目标优化方法应用于求解管网漏损定位问题, 建立基于 NSGA- II 的供水管网漏损定位多目标优化模型, 以东南沿海某居民区实际供水管网为例, 与目前应用较广泛的两种漏损定位模型的优化性能进行对比, 为漏损定位方法的选择提供参考。

2 供水管网漏损定位多目标优化模型

为真实准确模拟管网发生漏损时的运行状态, 利用 EPANET 软件提供的节点扩散器属性

模拟管网中某处或多处节点不同程度的渗漏。泄漏量与所处节点的压力呈指数关系, 可表示为:

$$Q_i(t) = k_i [H_i(t)]^n \quad (1)$$

式中, $Q_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的泄漏量; k_i 为节点 i 处的扩散器系数; $H_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的压力; n 为漏失指数, 取值 0.5。

传统漏损定位模型以测压点实际监测值与仿真值误差最小作为目标函数, 通过调整模型漏点位置与扩散器系数模拟各种漏损工况, 方案对应目标函数值越小, 代表所模拟的漏损情况与实际情况更为相似。计算对比各组方案的目标函数值, 搜寻最贴合实际事故工况的一组结果。目标函数为:

$$\min f(X_i, k_i) = \frac{1}{N_h} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^{N_h} [H_n(t) - H'_n(t)]^2 \quad (2)$$

式中, X_i 为模拟漏点 i 的编号; k_i 为漏点 i 对应的扩散器系数; N_h 为压力监测点数目; T 为监测时间序列; H_n 、 H'_n 分别为压力监测点 n 在 t 时刻的监测值与仿真值。

为减小基于压力数据的漏损定位模型存在的误差, 利用供水管网中流量监测点的监测数据, 将流量监测值与仿真值间的误差计算加入漏损定位

收稿日期: 2022-09-12, 修回日期: 2022-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778307); 山东省重点研发计划项目(2019GSF111003)

作者简介: 苏彦博(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为供排水系统分析与优化, E-mail: suyanbo98@163.com

通讯作者: 吕谋(1965-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为供排水系统分析与优化, E-mail: qdLv mou@yeah.net

模型目标函数,构建基于流量、压力数据的供水管网漏损定位模型,即:

$$\min f(X_i, k_i) = \frac{1}{N_h + N_q} \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{n=1}^{N_h} W_n \left[\frac{H_n(t) - H'_n(t)}{H_p} \right]^2 + \sum_{n'=1}^{N_q} W_{n'} \left[\frac{Q_{n'}(t) - Q'_{n'}(t)}{Q_p} \right]^2 \right\} \quad (3)$$

式中, W_n 为压力权重因子; H_p 为压力转换参数; N_q 为流量监测点数目; $W_{n'}$ 为流量权重因子; $Q_{n'}$ 、 $Q'_{n'}$ 分别为流量监测点 n' 在 t 时刻的监测值与仿真值; Q_p 为流量转换参数。

流量监测数据的引入提升了漏损定位模型的准确率,但这种将多个优化目标加权求和转化为单目标问题求解的方式具有一定局限性,模型定位准确率一定程度上依赖权重因子取值是否合理。另一方面,在实际检漏工作中,对于规模较庞大、拓扑结构较为复杂的供水管网,实现对漏点的精准定位并不现实,更多的是需要确定发生漏损位置的所在区域。而单目标优化方法具有收敛至唯一最优解的特点,造成定位结果易陷入局部最优,导致误判或漏判。多目标优化法可有效避免权重因子的影响,且 NSGA-II 的快速非支配排序算法和精英保留策略可保留种群中的数个优良个体,使漏损定位模型可以更综合地定位至漏损附近区域。本文提出应用多目标优化方法构建供水管网漏损定位模型,模型的目标函数为:

$$\begin{cases} \min f_1 \\ \min f_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$f_1(X_i, k_i) = \frac{1}{N_h} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^{N_h} [H_n(t) - H'_n(t)]^2 \quad (5)$$

$$f_2(X_i, k_i) = \frac{1}{N_q} \sum_{t=1}^T \sum_{n'=1}^{N_q} [Q_{n'}(t) - Q'_{n'}(t)]^2 \quad (6)$$

约束条件为:

$$0 \leq k_i \leq k_{\max} \quad (7)$$

$$H_i > 0 \quad (8)$$

$$\sum \pm q_{ij} + Q_i = 0 \quad (9)$$

$$\sum h_{ij} + \Delta H_k = 0 \quad (10)$$

式中, k_{\max} 为节点 i 的最大扩散器系数; H_i 为节点 i 处的压力; q_{ij} 为与节点 i 相连管段流量; i 、 j 为起止节点编号; Q_i 为节点 i 处的流量; h_{ij} 为基环 k 内的水头损失; ΔH_k 为基环 k 的闭合差。

3 基于 NSGA-II 的漏损定位模型求解

3.1 NSGA-II 算法

NSGA-II 算法是由 DEB K 等^[3]提出的一种采用精英策略的快速非支配排序遗传算法。相比传统 NSGA 算法,NSGA-II 算法采用快速非支配排序算法获取种群 Pareto 前沿解集,降低了算法的计算复杂度,显著提升了搜索效率。引入精英策略和拥挤度概念,扩大了采样空间,防止优势个体流失,维持了种群的多样性和优良性。将 NSGA-II 算法与供水管网漏损定位多目标优化模型相结合,应用于实际管网进行分析。

3.2 基于 NSGA-II 的漏损定位求解流程

步骤 1 采用整数编码的方式随机初始化父代种群 P_t , 种群规模为 N 。由于决策变量为模拟漏点的索引编号和对应的扩散器系数,采用整数编码的方式可有效减少染色体复杂程度,提高算法的搜索效率。

步骤 2 非支配排序。将种群个体按支配关系分为若干层,并为各层定义 Pareto 等级,等级越小,表示该层解集的个体的各目标函数值更优,每层个体之间均为非支配关系。

步骤 3 选择、交叉、变异操作生成子代种群 Q_t 。

步骤 4 合并父代种群与子代种群得到 R_t , 种群规模为 $2N$, 进行快速非支配排序。

步骤 5 拥挤度计算。为区分同层的个体优劣水平,NSGA-II 算法通过计算拥挤度维持种群多样性。

步骤 6 应用精英保留策略从种群中选取前 N 个优良个体组成新的父代种群 P_{t+1} 。

步骤 7 循环至设定的最大迭代次数 M , 输出 Pareto 前沿解集。

基于 NSGA-II 算法的漏损定位求解流程见图 1。

4 算例分析

4.1 水力模型建立和漏损事故模拟

以东南沿海某居民区实际供水管网为例,利用 EPANET 软件建立管网简化水力模型,该供水管网水力模型包括 1 处水源、78 个节点、96 条管段,供水管网水力模型见图 2。分析供水管网模型拓扑结构,选取位于管网较中心的节点 17、27 处和位于管网边界的节点 20 处作为模拟泄漏位置,将漏损定位模型应用于该管网水力模型进行分析。为对比不同泄流量对漏损定位模型准确度的影响,利用 EPANET 软件提供的节点扩散器属性模拟管网发生不同程度的泄漏。参考扩散

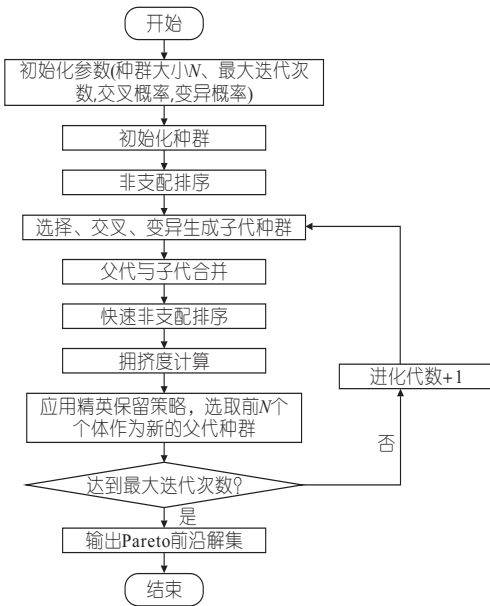


图 1 基于 NSGA-II 的漏损定位多目标优化模型流程
Fig. 1 Flow chart of multi-objective optimization model for leak location based on NSGA-II

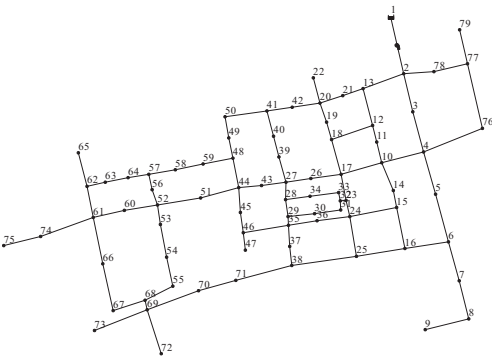


图 2 供水管网水力模型
Fig. 2 Hydraulic model of water supply network

器系数的取值规律^[4],为每种方案设置 3 组扩散器系数(k_1, k_2, k_3 分别为 0.3、0.6、0.9 L/(s · m^{0.5})),综合考虑不同监测时段算例管网各节点处的压力水平,所取扩散器系数 k_1, k_2, k_3 对应的平均漏损水量分别为 1.79、3.62、5.44 L/s。

4.2 算法参数设定

NSGA-II 算法的基本参数中设置种群规模 $N=40$;最大迭代次数 $M=50$;交叉概率 $P_c=0.8$;变异概率 $P_m=0.05$;模拟漏点的索引编号 X 边界范围为 2~79。

4.3 漏损定位结果

4.3.1 单漏点工况模拟定位

分别将节点 17、20、27 处发生漏损作为 3 组模拟事故工况,模拟记录压力监测点和流量监测点在正常工况和每种漏损工况下的监测值,将模拟监测值作为实际监测值输入模型。采用提出的基于 NSGA-II 的供水管网漏损定位多目标优化模型定位求解各漏损工况。另外,采用目前应用

较广泛的基于压力数据的供水管网漏损定位模型和基于流量、压力数据的供水管网漏损定位模型进行模拟定位。记录三种模型最终输出的 Pareto 前沿解集和模拟定位结果,见表 1。以拓扑距离的方式表示定位结果距离实际漏点最短路径的管段数量,拓扑距离数值越小,代表模拟结果距离实际漏点越接近。对比分析模拟定位节点与实际漏损节点间的偏差。由表 1 可知,管网发生单节点漏损事故时,三种供水管网漏损定位模型均展现出良好的定位效果,模拟定位节点距离实际漏点的拓扑距离稳定在 2 以内,极个别较偏离的定位结果距离实际漏点的拓扑距离也保持在 3 以内。结果显示了基于 NSGA-II 的漏损定位多目标优化模型用于处理单漏点定位问题的优异性能。

4.3.2 双漏点工况模拟定位

分别将节点 17 和 20 处、节点 17 和 27 处、节点 20 和 27 处发生漏损作为模拟事故工况,模拟记录压力监测点和流量监测点在正常工况和各漏损工况下的监测值。三种漏损定位模型的寻优结果见表 1。由表 1 可知,管网发生双节点漏损事故时,基于 NSGA-II 的漏损定位多目标优化模型的定位结果与实际漏点的拓扑距离稳定在 2 以内,平均拓扑距离约为 1.161,说明该模型依旧可以稳定定位至实际漏点的附近区域。相比之下,基于压力数据和基于流量、压力数据的供水管网漏损定位模型的定位结果偏差较大,最差结果的拓扑距离甚至达到了 6 左右,这类结果偏差过大属于无效定位。分析可知,出现此类结果是由于管网发生多点漏损时,解空间维度增大,优化目标的干扰项倍增。传统漏损定位方法存在每次寻优搜索仅能收敛至单一最优解的特点,导致其在处理空间较为复杂的多点漏损问题时,定位结果频繁陷入局部最优造成误判。而基于 NSGA-II 的漏损定位多目标优化模型的最终输出形式为目标函数的 Pareto 前沿解集,这种方法可以保留位于种群前列的数个优良个体,使得模型可以定位至漏损附近区域的多个近似节点,具有更高的参考价值。模拟结果表明,该漏损定位模型在处理多漏点工况定位问题时依旧可以有效缩小搜寻范围,为后续检漏工作提供有效参考。

4.3.3 扩散器系数对模型定位效果的影响

单漏点工况下,对比分析不同扩散器系数的模型定位效果, $k=0.9$ L/(s · m^{0.5})时的模型定位准确度最高,定位节点距离实际漏损位置的平均拓扑距离为 0.667; $k=0.6$ L/(s · m^{0.5})时的模型定位准确度次之,定位节点距离实际漏损位置

表 1 单、双漏点工况下模型定位结果

Tab. 1 Model localization results under single leakage condition and double leakage condition

工况	实际漏损节点	扩散器系数 $/(L \cdot s^{-1} \cdot m^{-0.5})$	基于 NSGA-II 的供水管网漏损定位多目标优化模型		基于流量、压力数据的供水管网漏损定位模型		基于压力数据的供水管网漏损定位模型				
			Pareto 前沿解集	拓扑距离	模拟定位结果	拓扑距离	模拟定位结果	拓扑距离			
单漏点	17	0.3	24,0.32	2	23,0.34	1	23,0.29	1			
			43,0.26	3							
			33,0.31	3							
		0.6	24,0.65	2	14,0.52	2	14,0.56	2			
			24,0.56	2							
			17,0.82	0							
		0.9	23,0.83	1	17,0.91	0	24,0.89	2			
			20,0.30	0							
			20,0.62	0							
	20	0.6	13,0.56	2	19,0.61	1	20,0.60	0			
			42,0.81	1							
			42,0.96	1							
	0.9	27,0.86	0	20,0.90	0	20,0.88	0				
		43,0.83	1								
		28,0.41	1								
27	0.3	28,0.32	1	28,0.32	1	17,0.32	2				
		30,0.32	3								
		28,0.58	1								
	0.6	43,0.58	1	43,0.54	1	27,0.60	0				
		33,0.63	3								
		27,0.68	0								
	0.9	43,0.83	1	43,0.76	1	29,0.88	2				
		11,0.37,22,0.19	2,1					37,0.28,12,0.31	5,3	26,0.21,36,0.33	3,4
		11,0.27,22,0.19	2,1								
23,0.08,22,0.52	1,1										
双漏点	17	0.3	25,0.64,20,0.50	3,0	15,0.62,49,0.56	3,4	35,0.25,12,0.87	4,3			
			11,0.39,20,0.77	2,0							
			11,0.56,22,0.63	2,1							
	20	0.6	14,0.61,20,0.50	2,0	15,0.88,22,0.91	3,1	12,0.89,48,0.86	3,5			
			19,0.50,20,0.70	2,0							
			12,0.90,20,0.92	3,0							
		0.9	10,0.76,22,0.73	1,1	31,0.26,46,0.32	3,4	10,0.28,45,0.27	1,3			
			11,0.81,20,0.81	2,0							
			10,0.20,28,0.38	1,1							
	17	0.3	11,0.12,28,0.46	2,1	12,0.52,36,0.67	3,4	19,0.75,57,0.39	2,6			
			23,0.39,28,0.73	1,1							
			10,0.39,28,0.73	1,1							
27	0.6	18,0.48,31,0.73	1,4	12,0.84,29,0.90	3,2	29,0.84,34,0.79	4,2				
		24,0.98,27,0.78	2,0								
		11,0.84,43,0.84	2,1								
	0.9	24,0.98,27,0.78	2,0	11,0.26,47,0.33	4,5	36,0.49,30,0.12	6,3				
		11,0.84,43,0.84	2,1								
		13,0.21,43,0.36	2,1								
20	0.3	12,0.24,40,0.35	3,2	12,0.58,35,0.60	3,3	17,0.82,45,0.37	3,3				
		21,0.25,40,0.35	1,2								
		22,0.35,43,0.25	1,1								
27	0.6	22,0.71,28,0.72	1,1	41,0.81,22,0.90	1,3	42,0.99,52,0.69	1,4				
		21,0.81,26,0.38	1,1								
		22,0.32,28,0.86	1,1								
	0.9	20,0.78,27,0.96	0,0	20,0.78,27,0.93	0,0	20,0.78,27,0.95	0,0				
		20,0.78,27,0.93	0,0								
		20,0.78,27,0.95	0,0								

的平均拓扑距离为 1.375; $k=0.3 L/(s \cdot m^{0.5})$ 时的模型定位准确度最差,定位节点距离实际漏损位置的平均拓扑距离为 1.857。双漏点工况下,对比分析模型定位效果, $k=0.9 L/(s \cdot m^{0.5})$ 时,模型定位节点距离实际漏损位置的平均拓扑距离为 0.750; $k=0.6 L/(s \cdot m^{0.5})$ 时,模型定位节点距离实际漏损位置的平均拓扑距离为 1.227;

$k=0.3 L/(s \cdot m^{0.5})$ 时,模型定位节点距离实际漏损位置的平均拓扑距离为 1.444。对不同扩散器系数下模拟定位节点与实际漏点间的偏差进行对比,见图 3。由图 3 可知,随着扩散器系数增大,模型定位准确度显著提升。 $k=0.9 L/(s \cdot m^{0.5})$ 时模型的定位效果最佳,单漏点工况下, $k=0.9 L/(s \cdot m^{0.5})$ 时相比 $k=0.6, 0.3 L/(s \cdot m^{0.5})$ 的

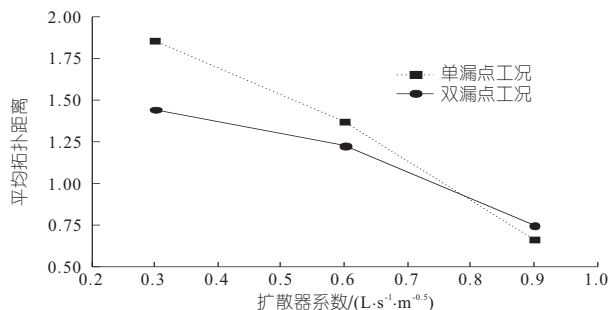


图 3 不同扩散器系数下模型定位偏差对比

Fig. 3 Comparison of model positioning deviation under different diffuser coefficients

模型定位准确度分别提升了 51.5%、64.1%。双漏点工况下, $k = 0.9 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^{0.5})$ 时相比 $k = 0.6, 0.3 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^{0.5})$ 的模型定位准确度分别提升了 48.1%、61.6%。

5 结论

a. 针对传统单目标漏损定位模型, 提出一种基于 NSGA-II 的供水管网漏损定位多目标优化

模型, 并结合实际管网水力模型验证了该模型的可行性和稳定性, 为漏损定位研究提供了一种参考方法。

b. 比较了不同扩散器系数对模型定位效果的影响, 结果显示, 随着扩散系数增大, 管网流量压力水平的变化更为显著, 模型定位效果得到有效提升。

参考文献:

[1] 孟勤超, 杨翠丽, 乔俊飞. 基于改进 SPEA2 算法的给水管网多目标优化设计[J]. 智能系统学报, 2018, 13(1):118-124.
 [2] 詹书俊, 陶涛. 基于 NSGA-II 的供水管网模型校核[J]. 给水排水, 2013, 39(3):158-160.
 [3] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE trans. evolutionary computation, 2002, 6(2):182-197.
 [4] 赵桓, 吕谋, 岳宏宇, 等. 基于群体智能优化算法的供水管网漏损定位研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7):128-130, 75.

Multi-objective Optimization Model for Leakage Location of Water Supply Network Based on NSGA-II

SU Yan-bo, LV Mou, CHU Yang-yang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: Aiming at the leakage problem of urban water supply network, the traditional leakage location model is solved by single objective optimization method. Its objective function is composed of the weighted sum of optimization objectives. Improper value of weight factor will degrade the model positioning result. This paper proposed a multi-objective optimization model for leakage location of water supply network based on NSGA-II. In this model, the number of leakage point and diffuser coefficient were taken as decision variables, and the minimum error between the actual monitoring value and the simulation value of pressure and flow monitoring point was taken as the optimization objective, and NSGA-II algorithm was used to find the optimal solution. In order to verify the effectiveness of the model, it was applied to the actual water supply network in a residential area. Considering the common fault conditions in the actual operation of the pipe network, the leakage accidents of single node and two nodes were respectively simulated and located. Compared with the two widely used leak location models, the results show that the multi-objective optimization model based on NSGA-II can accurately and stably locate the nearby area where the actual leak occurs.

Key words: water supply network; leakage location model; multi-objective optimization; NSGA-II

(上接第 157 页)

Construction Risk Evaluation of Shield Tunneling Under Integrated Pipe Gallery Based on Matter-Element Theory

HE Feng¹, HU Shao-hua¹, ZHANG Guang¹, ZHOU Xin-long²

(1. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: To accurately evaluate the comprehensive utility tunnel under river shield tunnel construction safety, reduce the safety accidents in the construction process, based on the method of risk breakdown structure (RBS), risk evaluation index system of four first-level indicators was constructed including engineering geological risk and comprehensive utility tunnel itself risk, environment risk, construction risk management. Based on the linear combination of interval number analytic hierarchy process (AHP) and indicator correlation method (CRITIC), the comprehensive weight was determined. Based on matter element theory, the weighted average relation degree was calculated to determine the final evaluation result. This method was applied to the comprehensive pipe corridor project of Yueyang Avenue sewage treatment at the Wangjia River section. Monte Carlo method was used to analyze the sensitivity of 15 basic indexes based on matter-element theory. The research results show that the construction project of Yueyang Avenue sewage treatment comprehensive pipe corridor at Wangjia River section is medium-risk, which is consistent with the actual situation. The sensitivity analysis shows that the surrounding rock strength and the buried depth of tunnel are more sensitive. The research results can provide a basis for the safety control decision and measure making of the project.

Key words: comprehensive utility tunnel; risk assessment; combined weighting; matter element theory; Monte Carlo