

基于实数编码遗传算法的压力相关漏损定位模型

张 瑱^{1,2}, 黄显怀^{1,2}, 杨伟伟^{1,2}

(1. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽建筑大学 水污染控制与
废水资源化安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 目前,城市供水管网漏损管理存在检测困难,人力、物力成本大等问题,为有效减少管网漏损,通过开发漏损定位模型为管网漏损管理提供技术支持。以供水管网中实时流量、压力数据和模型模拟值之间的误差最小构建目标函数,以管网节点的索引和喷射系数为决策变量并进行实数编码,研究压力相关漏损定位模型的可行性和有效性,同时进一步开展了流量和压力对漏损定位模型的敏感性分析,并通过安徽省某县级市供水管网算例进行了验证。结果表明,模型可有效识别案例中模拟漏损量在 18.83 L/s 以上的漏损事件,定位范围与设置漏点距离在 200 m 以内。可见,基于实数编码遗传算法建立的漏损定位模型可有效定位管网中的漏损点,且当管网中发生漏损时,流量监测值的变化比压力监测值的变化更敏感。

关键词: 供水管网; 漏损定位; 遗传算法; 压力相关漏损定位模型

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0074-05

Pressure-dependent Leakage Detection Model Based on Real-coded Genetic Algorithm

ZHANG Zhen^{1,2}, HUANG Xian-huai^{1,2}, YANG Wei-wei^{1,2}

(1. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Anhui Key Laboratory of Water Pollution Control and Wastewater Reuse, Anhui Jianzhu University,
Hefei 230601, China)

Abstract: The leakage management of urban water supply pipe network confronts challenges in detecting leakage and managing labor and material cost. To effectively reduce pipe network leakage, a leakage detection model was developed to support the pipe network leakage management. An objective function was constructed to minimize error in flow and pressure in water supply pipe network between real-time data and model simulation results. The injection coefficient with real number coding and the index of the pipe network node were taken as the decision variables. Furthermore, a sensitivity analysis on the flow and pressure for the leakage detection model was carried out. The model was verified with a water supply pipe network from a city in Anhui Province. The model effectively identified leakages beyond 18.83 L/s, and located within 200 m of the leakage. The results showed that the leakage detection model based on real-coded genetic algorithm could effectively detect the leakage in the pipe network; additionally, the flow monitoring data was more sensitive to leakage than the pressure monitoring data when leakage occurred in the pipe network.

Key words: water supply pipe network; leakage detection; genetic algorithm; pressure-dependent leakage detection model

随着城市化发展,为了满足用户用水需求,城市供水管网负荷增大,老旧管网漏损严重,给城市发展带来严重影响,国内外学者进行了大量研究以实现漏损的识别定位^[1-2]。牛志广等^[3]将供水管网摩阻系数的校核与漏损节点的定位相结合,提出了联合优化模型;Wu 等^[4]提出压力相关漏损定位模型(PDL模型),并结合DMA(独立计量区域)案例研究,得到PDL模型在许多不同的优化方案中能更有效识别出漏损点。张清周^[5]和桂衍武^[6]分别使用布谷鸟算法和粒子群算法对PDL模型进行研究,结合国内工程案例,其结果都能确定漏损所在区域。

在中大型管网中,优化空间会因用水节点个数的增加呈指数增长以致算法无法进行有效的寻优,PDL模型同时对节点喷射器系数和节点索引进行编码的方式可在一定程度上避免这种“维数灾难”。现有的PDL模型中建议使用不同的遗传算法(GA)参数和目标函数,求解多个方案进行验证,以获得鲁棒性好的有效解。笔者在PDL模型研究的基础上,对节点索引和喷射器系数进行实数编码,采用遗传算法求解模型,并开展了流量和压力对漏损定位模型的敏感性分析。研究中涉及到的模拟试验均在.NET平台上进行,采用C#语言编写基于GA的漏损定位模型,并使用EPANET自带的程序员工具箱(Toolkit)作为水力模型计算引擎。

1 研究对象与方法

基于机理模型的漏损定位问题是一个典型的隐式非线性优化问题,而遗传算法是一种人工智能优化算法,通过直接对结构对象进行操作,不存在求导和函数连续性限定,具有更好的全局寻优能力。遗传算法中解的编码方式影响到交叉算子、变异算子等遗传算子的运算方法,很大程度上决定了遗传进化的效率。对于问题表现形式为实向量的情形,若使用二进制编码,会导致染色体串过长、搜索效率低等,故本研究采用实数编码机制,使解的表现形式直观简单,提高算法的搜索能力。

研究对象为安徽省某县级市主城区供水管网,服务面积超过30 km²,供水量约为10×10⁴ m³/d,建有17个电磁流量计和压力变送器,管径范围为100~1 600 mm,管材多为球墨铸铁管。在不影响管网水

力模型精度的条件下,对模型进行简化,保留管径在200 mm以上管道以及部分100 mm的管道。供水管网简化后有1 235条管段、1 186个节点。调研了该市现状管道的管材、管径、铺设年份、管长及漏失记录等资料。

2 模型建立与应用

2.1 压力相关漏损定位模型

供水管网的漏损一般与所在管段的节点压力相关,可以被模拟成为一种喷射流量,其相当于一种与压力相关的需求形式,具体关系如下:

$$Q(t) = K[P(t)]^n \quad (1)$$

式中: $Q(t)$ 为漏失量; $P(t)$ 为 t 时刻的节点压力; K 为喷射系数; n 为漏失指数,可根据管网实际情况设定。根据管材的不同,漏失指数在0.5~2.5之间波动,对于金属管材可检测到的漏失和爆管,本研究漏失指数取0.5^[4]。

① 决策变量

漏损节点的优化维度是由漏失节点数决定的,而不是管网的节点数。设置最大漏失节点个数,求解方程后取喷射器系数大于零的解为模型模拟漏失节点个数。解的表达形式为:

$$\vec{x} = (LN_i, K_i) \quad (2)$$

式中: LN_i 为漏失节点 i 处的节点索引, $LN_i \in J$ (节点集合), $i=1,2,\dots,N_{\text{leak}}$ (设定的漏失节点数); K_i 为节点 i 处的喷射器系数。

② 约束条件

$$\begin{cases} 0 \leq K_i \leq K_{i\max} \\ P_i > 0 \\ \sum \pm q_{ij} + Q_i = 0 \\ \sum h_{ij} - \Delta H_k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_i 为节点 i ($1 \leq i \leq n$)处的喷射器系数, n 为管网节点数; $K_{i\max}$ 为节点 i 处最大的喷射器系数; P_i 为节点 i 处的压力; Q_i 为节点 i 处的流量; q_{ij} 为与节点 i 相连的各管段流量, i,j 为起止节点编号; h_{ij} 为属于基环 k 的管段的水头损失; ΔH_k 为基环 k 的闭合差或增压和减压装置产生的水压差。

优化计算结果存在求得的喷射器系数过大、节点自由水头为负值的情况,此解为非可行解,因此设

置惩罚函数 f_{Penalty} 对其进行约束。

$$f_{\text{Penalty}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{leak}}} \min(0, P_i^2) \quad (4)$$

③ 目标函数

为了检测漏损位置并计算漏损量,设置目标函

$$F(\vec{x}) = \sum_{nh=1}^{NH} W_{nh} \left[\frac{H_{\text{Snh}}(t) - H_{\text{Onh}}(t)}{H_{\text{pnt}}} \right]^2 + \sum_{nf=1}^{NF} W_{nf} \left[\frac{Q_{\text{Snf}}(t) - Q_{\text{Onf}}(t)}{Q_{\text{pnt}}} \right]^2 \quad (5)$$

式中: $H_{\text{Snh}}(t)$ 为节点 nh 在 t 时刻的压力模拟值; $H_{\text{Onh}}(t)$ 为节点 nh 在 t 时刻的压力观测值; $Q_{\text{Snf}}(t)$ 为管道 nf 在 t 时刻的流量模拟值; $Q_{\text{Onf}}(t)$ 为管道 nf 在 t 时刻的流量观测值; H_{pnt} 为压力自定义转换参数; Q_{pnt} 为流量自定义转换参数;NH 为压力观测值数;NF 为管段流量观测值数; W_{nh} 为压力标准化权重因子; W_{nf} 为流量标准化权重因子。

确定漏损定位模型的目标函数为:

$$F^*(\vec{x}) = F(\vec{x}) + f_{\text{Penalty}} \quad (6)$$

所以,漏损定位模型可以归纳概括为:

$$\begin{cases} \text{Minimize } F^*(\vec{x}) \\ \vec{x} = (\text{LN}_i, K_i), \text{LN}_i \in J, i = 1, 2, \dots, N_{\text{leak}} \end{cases} \quad (7)$$

2.2 基于实数编码遗传算法进行模型求解

漏损定位模型为隐式的非线性求解问题,使用实数编码遗传算法来求解。将漏损区域的位置及漏损量大小作为模型求解结果。具体计算步骤如下:

①设置种群大小、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 等参

数为监测点处节点水压和管道流量模拟值与观测值的误差。管网中,流量和压力的数值变化反映管网的运行状态,为使压力和流量的量纲等效,将水压和流量变为无量纲的值再进行优化,目标函数如下:

数,确定初始种群 $P(0)$;②进行模型的水力平差计算,得出监测节点的压力模拟值和监测管道的流量模拟值;③计算目标函数值和适应度值;④选择,交叉,变异,产生新一代种群 $P(t)$;⑤当目标函数值小于给定误差范围或者满足遗传代数时计算结束,显示计算结果,否则重复步骤②~⑤,直到满足终止条件;⑥输出结果。

2.3 安徽省某地级市供水管网案例分析

设置漏损点喷射器系数为 $3 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^{0.5})$,相应漏水量为 18.83 L/s ,漏损节点 ID 为“JS01041514”,节点索引为“366”。迭代次数设为 100,种群大小为 40,选择概率(选择被淘汰的比例)为 0.1,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.01,记录各监测点漏损前后的数据,分别在压力监测数据、流量监测数据、压力和流量监测数据参与目标函数计算的条件下,讨论该算法的漏损定位效果,结果见表 1。多次试验数据定位代数数为 100,则表示在给定的最大迭代次数内无法定位到真实漏点。

表 1 管网漏损定位结果

Tab. 1 Leakage detection results of water supply pipe network

项 目	试验次数	定位代数/代	定位结果			与真实漏点间的距离/m
			节点索引	喷射器系数/ ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-0.5}$)	节点编号	
流量	1	100	360	2.96	JS01041488	143.37
	2	100	365	2.82	JS01041512	31.37
	3	100	365	2.98	JS01041512	31.37
	4	100	1 005	2.98	JS01154011	517.64
	5	100	1 089	2.85	JS0120407	185.89
	6	100	1 089	2.96	JS0120407	185.89
	7	100	1 092	2.48	JS0120442	179.36
	8	100	1 092	2.92	JS0120442	179.36
	9	100	1 089	2.99	JS0120407	185.89
	10	100	1 090	2.83	JS0120413	211.77
压力	1	100	891	2.54	JS01122005	1 837.44
	2	100	584	1.68	JS01069463	1 255.57
	3	100	997	1.70	JS01153220	790.38
	4	100	362	2.96	JS01041494	35.92

续表 1(Continued)

项 目	试验次数	定位代数/代	定位结果			与真实漏点间的距离/m
			节点索引	喷射器系数/ ($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-0.5}$)	节点编号	
压力	5	100	815	1.92	JS01103681	463.98
	6	100	1 091	1.95	JS0120421	187.55
	7	100	1 153	2.43	JS01231440	1 597.19
	8	100	332	1.00	JS01041083	1 043.21
	9	100	1 073	1.97	JS0120214	213.57
	10	100	814	2.02	JS01103635	363.51
流量和 压力	1	100	912	2.94	JS0112910	735.60
	2	100	365	2.87	JS01041512	31.37
	3	100	1 003	2.69	JS01154049	383.73
	4	100	363	2.95	JS01041495	93.48
	5	100	365	2.88	JS01041512	31.37
	6	100	360	2.96	JS01041488	143.37
	7	100	1 007	2.87	JS01154030	473.37
	8	56	366	2.92	JS01041514	0
	9	100	1 092	2.74	JS0120442	179.36
	10	100	356	2.76	JS01041448	235.59

该研究设置最大迭代次数为 100,图 1 展示了只有流量数据参与计算时目标函数值的变化情况,10 次试验的目标函数值趋向于零,表明随着迭代次数的增加,模拟值和真实值逐渐接近,验证了基于实数编码遗传算法的压力相关漏损定位模型的可行性和有效性。

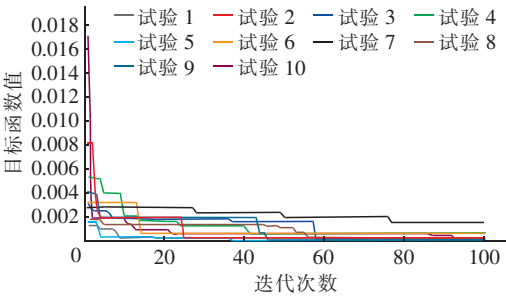


图 1 目标函数值随遗传代数的变化
Fig.1 Change of objective function value with genetic algebra

图 2 则展示了不同条件下模型定位结果(黄色三角形代表试验定位漏点,绿色实心点为实际漏点),其中部分定位结果节点重复。结合公式(5),当压力作为目标函数计算依据时,即 $W_{nh} \neq 0$ 、 $W_{nf} = 0$,10 次试验中只有 2 次距离真实漏点 200 m 以内;当流量作为目标函数计算依据时,即 $W_{nh} = 0$ 、 $W_{nf} \neq 0$,8 次定位结果距离真实漏点 200 m 以内;当压力和流量作为目标函数计算依据时,即 $W_{nh} \neq 0$ 、 $W_{nf} \neq$

0,6 次定位结果距离真实漏点 200 m 以内。本案例中压力敏感度较低也与该市压力监测点设置过少有关,通常情况下,每 200 户居民设置 1 个压力监测点可以较有效地监测漏损位置。本研究只采用新建 17 个在线监测压力计数据,对于复杂的管网系统而言,在线监测点密度过小,也导致了定位敏感度低。

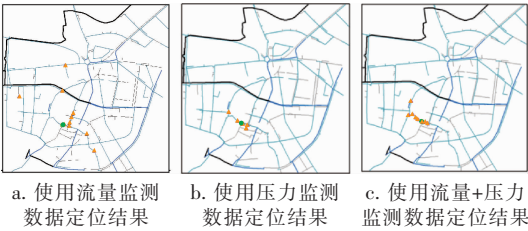


图 2 不同条件下模型定位结果
Fig.2 Model detection results under different conditions

综上,在监测仪器数目相同的情况下,当只有流量监测数据参与目标函数计算时,算法定位较准确,大部分定位漏点在漏损所在区域内;当压力参与目标函数计算时,试验中无法找到真实漏点;当流量和压力同时参与目标函数计算时,定位结果不稳定,仍存在多次定位结果距离漏点较远的情况。

3 结论

基于现状管网及现有的在线监测仪器,采用实数编码的遗传算法对管网进行漏损定位研究,结果表明,对于该供水管网(现有 SCADA 系统配有 17

个电磁流量计和压力变送器,监测点设置密度较低),当流量、压力以及流量和压力作为影响因素参与目标函数计算时,流量数据的敏感度最高,案例设置了18.83 L/s的漏损事件,可有效识别其漏损区域,大部分运算结果的定位漏点距离已知漏点200 m以内,可为人工探漏缩小搜索范围。

由于供水管网是一个复杂的非线性系统,机理模型对漏损量和水力模型误差都有限度的要求,当漏损量过低、监测点设置密度过小或者水力模型误差过大时,该模型就可能无法识别出漏损位置,对于实际管网中漏损量比较小的暗漏需要结合其他方法来检测。

参考文献:

- [1] 李伟峰,陈求稳,刘锐平,等. 基于GIS的城市供水管网漏失监测优化布设[J]. 中国给水排水,2011,27(13):42-45.
- Li Weifeng, Chen Qiuwen, Liu Ruiping, *et al.* Optimized layout of leakage monitoring-meters of urban water supply network based on GIS technology [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(13): 42-45 (in Chinese).
- [2] 徐强,陈求稳,李伟峰,等. 基于遗传编程的供水管网漏失模型[J]. 中国给水排水,2011,27(1):45-48,51.
- Xu Qiang, Chen Qiuwen, Li Weifeng, *et al.* Development of pipe leakage model for water distribution system using genetic programming [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(1): 45-48, 51 (in Chinese).
- [3] 牛志广,王宇飞,张珽,等. 供水管网的摩阻系数校核与漏损定位计算方法[J]. 天津大学学报,2011,44(4):364-368.
- Niu Zhiguang, Wang Yufei, Zhang Ting, *et al.* Calibration of friction resistance coefficient and calculation method of leakage localization of water supply network [J]. Journal

of Tianjin University, 2011, 44(4): 364-368 (in Chinese).

- [4] Wu Z Y, Sage P, David T. Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, 136: 116-128.
- [5] 张清周. 基于模型校核的给水管网漏失定位研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- Zhang Qingzhou. Research on Leakage Detection via Hydraulic Model Calibration in Water Distribution Systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [6] 桂衍武. 压力相关漏失定位的研究与应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- Gui Yanwu. Pressure-dependent Leakage Detection Research and Application [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).



作者简介:张琪(1995-),女,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为城市供水管网水力模型及漏损控制。

E-mail: 15256217430@163.com

收稿日期:2019-02-12

绿水青山就是金山银山