

技术总结

基于布谷鸟算法的管网漏损定位模型

吴文红, 崔玉莹, 刘宁

(华北水利水电大学 信息工程学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 水务系统中的基础设施供水管网在漏损管理方面存在着检漏复杂、投入成本高等问题。基于此,通过算例管网参数构建水力模型进行漏损水力模拟,利用管网压力监测点的观测数据与模拟数据之间的最小差值建立目标函数,采用布谷鸟算法(CS)和遗传算法(GA)对管网漏损定位模型进行优化求解验证,以实现供水管网的漏损定位。结果表明,基于CS算法的管网漏损定位模型,在设置3个压力监测点进行漏损节点定位时精准率可达74%,设置2个压力监测点进行漏损节点定位时精准率约为60%,均比传统遗传算法定位性能好。

关键词: 供水管网; 漏损定位模型; 布谷鸟算法; 遗传算法

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0038-05

Leakage Location Model of Pipeline Network Based on Cuckoo Search Algorithm

WU Wen-hong, CUI Yu-ying, LIU Ning

(School of Information Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The water supply network, which is the infrastructure of a water system, has the leakage management problems such as complicated leakage detection and high operating cost. Based on this, a hydraulic model was built through the parameters of a pipe network to simulate the hydraulic leakage, the minimum difference between the monitoring data and the simulated data was used to establish the objective function, and cuckoo search algorithm and genetic algorithm were used to optimize and verify the leakage location model, so as to realize the leakage location in the water supply network. The pipe network leakage location model based on cuckoo search algorithm had an accuracy of 74% when setting three pressure monitoring points to locate the leakage node, and approximately 60% when setting two pressure monitoring points to locate the leakage node, both of which had better location performances than that of the traditional genetic algorithm.

Key words: water supply network; leakage location model; cuckoo search algorithm; genetic algorithm

近年来,供水管网由于管道老化、铺设复杂、管理水平缺失等问题造成了爆管事件屡屡发生。“水十条”规定管网漏损率应控制在10%以内,而目前供水管网的漏损率较高,因此有效控制漏损率成为水

务系统要解决的一大难题。而传统的管网漏损检测技术及方法^[1]不仅检测范围低,同时耗费的经济成本巨大。所以如何将漏损定位方法与智能算法相结合,实现管网漏损位置的精确定位,成为了水务系统

智慧建设发展的必然趋势。针对传统漏损定位方法的不足和缺陷,研究人员提出了一些关于管网漏损智能算法定位模型的理论。其中Okeya等人^[2]利用校验水力模型的原理,采用敏感性分析方法对管网中的监测指标和阈值进行分析来定位爆管点。周泽渊等人^[3]利用EPANET软件对构建的管网模型进行不同工况下的水力模拟计算,以获取管网中所有节点在不同工况下的压力值,然后将压力数据计算值和观测值之间的最小差值作为优化的目标函数,采用贝叶斯理论和遗传算法进行寻优求解和相关性分析,获取管网模型各个管段的漏损概率,最终将概率最大的管段作为漏损管段来实现对管网漏损位置的定位。王珞桦等人^[4]利用BP神经网络深度学习算法对管网的相关数据进行学习和训练来预测供水管网漏损节点的区域位置。综上所述,虽然管网漏损定位模型理论越发成熟,但将其运用到实际管网中还有一定的距离。

笔者对算例管网参数进行收集和整理,然后搭建符合算例管网的水力模型^[5-6]。通过MATLAB平台调用EPANET工具箱进行不同工况的漏损水力模拟计算,建立管网漏损定位模型,采用布谷鸟算法(CS)和遗传算法(GA)对建立的管网漏损定位模型进行优化求解,再将定位结果进行对比分析,旨在为水务管理中的漏损定位研究奠定基础。

1 研究对象与方法

基于智能算法的管网漏损定位模型实际上是一个隐式非线性优化问题,其中采用的遗传算法主要是模拟生物在自然环境中通过选择、变异等作用机制来实现算法的全局寻优。而布谷鸟算法^[7]是一种新型的元启发式搜索算法,其算法思想包括以下两个内容:其一是利用其他鸟类的义亲来孵化和育雏自己卵蛋的巢寄生特性,一个鸟巢里面仅产生一个布谷鸟的蛋,这个蛋巢就代表一个问题的解决方案;其二是利用莱维飞行机制在解空间内进行随机探索飞行,以达到一种速度快、精度高的寻优模式。之所以采用CS算法,主要是该算法的可调整参数较少,并且在一些工业领域实际应用中表现出了较好的优化性能。

研究对象选取的是Anytown中的基础管网算例模型^[8],其管网模型见图1。该模型拥有16个节点、37个管段、1个水库和3个水泵。以管网中3个水

压监测点(节点4、8、14)和2个水压监测点(节点4、14)模拟供水管网中发生漏损状态下的运行状况,然后利用布谷鸟算法和遗传算法对管网漏损定位模型进行优化求解,以实现管网漏损位置的定位。

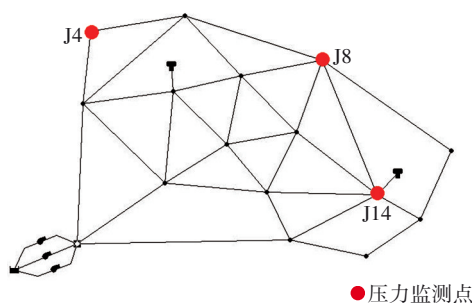


图1 管网模型及监测点

Fig.1 Pipe network model and monitoring points

2 管网漏损定位模型的建立与应用

2.1 构建管网漏损定位模型

近年来,基于压力相关漏损定位模型^[9],并结合管网算例模型和工程案例,国内学者运用粒子群等^[10-12]智能化算法进行了相关研究,发现所建立的模型能够有效定位出漏损节点或漏损区域。由于节点的漏损量会随时间和压力的变化而变化,因此漏损量可按式(1)计算。

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

式中: $Q(t)$ 为节点在 t 时刻的漏损量; $P(t)$ 为节点在 t 时刻的压力; k 为节点的喷射系数; n 为漏损指数,其值一般取0.5。

由于供水管网的运行状态与节点的流量和压力等因素紧密相关,所以将管网中的水压监测点处的模拟值与观测值的误差设置为漏损定位模型的目标函数,然后利用两种智能算法(CS算法和GA算法)进行差值最小寻优求解,其目标函数如下:

$$\min f(LN_i, K_i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (p_{1,n} - p_{2,n})^2 \quad (2)$$

式中: N 为压力监测点的数量; $p_{1,n}$ 和 $p_{2,n}$ 分别为压力监测点的模拟值和观测值; LN_i 、 K_i 为决策变量,其中 LN_i 表示管网中漏损节点的索引编号, K_i 表示与节点索引编号对应的喷射系数, $i=1, 2, 3, \dots, N_{\text{leak}}$ (N_{leak} 为管网中设置的最大漏损节点数),设置最大漏损节点数量的主要目的是为了在智能算法中对节点索引编号和漏损系数进行编码优化计算时避免出现维数灾难的现象,从而提高算法的性能。

约束条件如下:

$$\begin{cases} 0 \leq K_i \leq 1 \\ p_i > 0 \\ \sum \pm q_{ij} + Q_i = 0 \\ \sum h_{ij} - \Delta H_k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_i 为节点 i ($0 < i < n$) 处的喷射系数, 其中 n 为节点数量; p_i 为节点 i 处的压力; q_{ij} 为节点 i 与 j 之间相互连接的管段流量; Q_i 为节点 i 处的流量; h_{ij} 为基环 k 管段的水头损失; ΔH_k 为基环 k 的闭合差。

2.2 基于CS算法和GA算法的漏损定位模型求解

管网漏损定位模型的具体求解过程见图2。

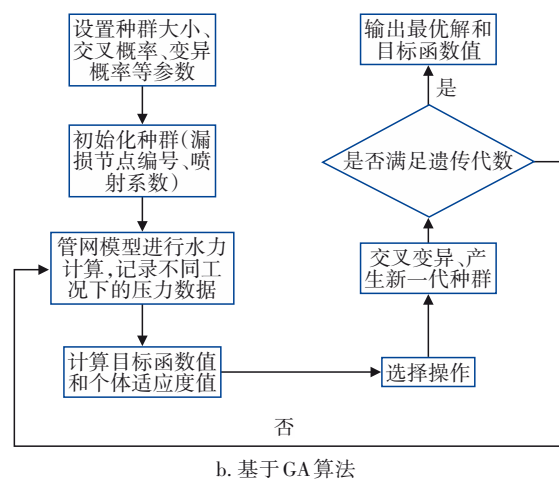
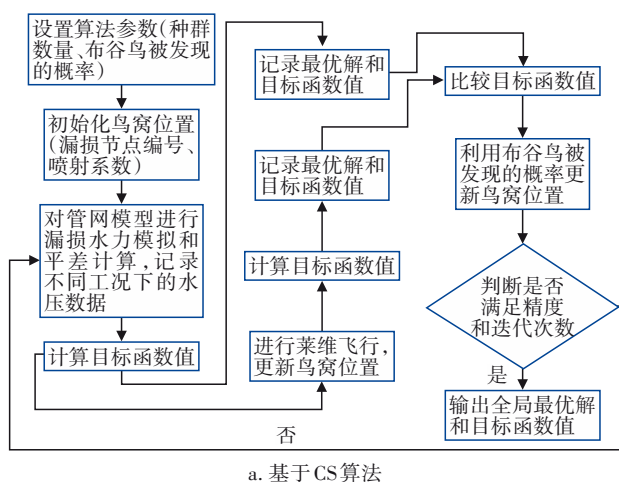


图2 管网漏损模型求解流程

Fig.2 Solution process of pipeline network leakage model

针对上述所构建的管网漏损定位模型, 采用布谷鸟算法(CS)和遗传算法(GA)进行优化求解, 其优化结果为该漏损区域的位置和喷射系数。

2.3 算例研究

将漏损节点设置为管网模型中的节点9, 通过设置不同的漏损系数 K [分别为 0.2 、 0.3 、 $0.4 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^{0.5})$] 来模拟管网在不同工况下的漏损量, 设置最大漏损节点数量为2。CS算法和GA算法在不同监测点数量下的定位结果见表1和表2。

表1 3个压力监测点管网漏损定位结果

Tab.1 Pipeline network leakage location results of three pressure monitoring points

漏损系数 $K/(\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-0.5})$	时间 t/h	布谷鸟算法优化结果			遗传算法优化结果		
		第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次
0.2	6	7,0.12	9,0.18	9,0.2	5,0.26	9,0.2	7,0.14
		12,0.14	12,0.06		16,0.06		9,0.02
	12	1,0.1	1,0.54	9,0.2	7,0.12	5,0.2	2,0.12
		9,0.18	8,0.1		9,0.06	8,0.04	8,0.1
	18	9,0.12	1,0.02	7,0.02	7,0.08	7,0.1	1,0.64
		10,0.1	9,0.2	9,0.18	10,0.14	13,0.14	13,0.14
0.3	6	9,0.3	9,0.3	9,0.3	10,0.34	7,0.2	2,0.34
						12,0.14	8,0.08
	12	1,0.12	1,0.14	3,0.06	2,0.2	1,0.16	5,0.04
		9,0.28	9,0.28	10,0.3	5,0.24	7,0.24	10,0.32
	18	1,0.1	9,0.28	3,0.04	9,0.3	9,0.28	7,0.2
		9,0.28	16,0.02	10,0.32		13,0.02	11,0.08
0.4	6	9,0.4	9,0.4	9,0.4	9,0.4	9,0.28	9,0.38
						10,0.14	16,0.02
	12	3,0.08	6,0.06	1,0.12	9,0.06	2,0.3	5,0.14
		10,0.4	10,0.38	9,0.38	10,0.4	9,0.2	9,0.3
	18	9,0.28	9,0.38	7,0.3	9,0.38		2,0.06
		10,0.14	11,0.02	12,0.12	11,0.02	9,0.4	9,0.36

表2 2 个压力监测点管网漏损定位结果

Tab.2 Pipeline network leakage location results of two pressure monitoring points

漏损系数 $K/$ ($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-0.5}$)	时间 t/h	布谷鸟算法优化结果			遗传算法优化结果		
		第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次
0.2	6	6,0.06	5,0.32	1,0.26	1,0.22	7,0.12	6,0.08
		12,0.26			2,0.26	15,0.08	14,0.1
	12	7,0.16	1,0.28	3,0.02	5,0.2	2,0.24	5,0.08
		14,0.02			15,0.06	7,0.02	9,0.14
	18	7,0.08	8,0.12	1,0.38	1,0.1	7,0.02	3,0.08
		9,0.14			2,0.24	10,0.22	13,0.18
0.3	6	1,0.26	1,0.48	7,0.2	9,0.28	7,0.2	8,0.2
		9,0.16			10,0.02	12,0.14	10,0.08
	12	1,0.02	2,0.2	1,0.14	1,0.14	5,0.12	5,0.06
		9,0.3			9,0.28	10,0.26	9,0.26
	18	5,0.2	4,0.04	4,0.04	8,0.3	8,0.3	10,0.02
		16,0.16					9,0.28
0.4	6	1,0.26	9,0.4	1,0.14	9,0.28	9,0.36	9,0.38
		9,0.36			10,0.14	10,0.04	16,0.02
	12	5,0.4	1,0.04	9,0.36	2,0.18	5,0.42	7,0.18
		12,0.22			7,0.24	12,0.2	10,0.24
	18	9,0.38	8,0.34	9,0.36	3,0.24	9,0.12	9,0.3
		14,0.02					10,0.12

将布谷鸟算法和遗传算法的种群数量设为40,迭代次数设为100,其中布谷鸟蛋被发现的概率设置为0.25,遗传算法中的交叉概率设置为0.3,变异概率设置为0.1。然后调用EPANET工具箱进行水力计算,分别记录3个压力监测点和2个压力监测点漏损前后的压力数据,将压力监测点数据代入目标函数进行优化计算,分析布谷鸟算法和遗传算法的定位效果。

当有3个压力监测点时,基于布谷鸟算法的管网漏损定位模型进行的不同漏损系数模拟的27次实验中,有20次的优化结果能够有效定位出漏损节点9,精准率达到了74%。当有2个压力监测点时,有16次有效定位出了漏损节点9,精准率约为60%。而基于GA算法的管网漏损定位模型在有3个压力监测点时,有14次定位出漏损节点9;当有2个压力监测点时,有10次定位出漏损节点9。各节点出现的频数如图3所示。可知,基于布谷鸟算法的管网漏损定位模型显示出更好的优化性能,并且该算例管网的优化结果也与水压监测点的数量密切相关,当监测点的数量较少时,漏损定位模型的精度也会随之降低。

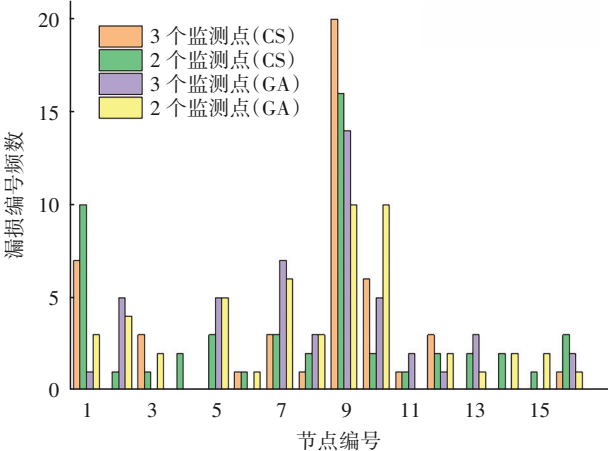


图3 智能算法漏损定位节点编号频数

Fig.3 Number frequency of intelligent algorithm leakage location node

3 结论

- ① 基于CS算法的管网漏损定位模型研究表明,管网铺设的压力监测点密度对漏损定位的效果有很大影响。分别采用3个压力监测点和2个压力监测点的数据对漏损定位模型进行优化求解,虽然都可以有效定位出漏损点,但是当压力监测点密度高时,其定位效果更好。
- ② 实际管网系统比较复杂,影响管网漏损的

因素也很多。本研究只讨论了采用压力数据这一因素参与目标函数计算时管网漏损定位的效果,通过两种算法的对比分析,验证了布谷鸟算法的有效性和可行性。后期将会把流量考虑在内,然后将基于CS算法的管网漏损定位模型运用到实际管网中,探讨该模型的定位效果。

参考文献:

- [1] 吴军胜. 郑州水司的供水管网漏水检测实践[J]. 中国给水排水, 2007, 23(20): 98-99.
WU Junsheng. Practice of water leakage examination of water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(20): 98-99(in Chinese).
- [2] OKEYA I, KAPELAN Z, HUTTON C, *et al.* Online burst detection in a water distribution system using the Kalman filter and hydraulic modelling [J]. Procedia Engineering, 2014, 89: 418-427.
- [3] 周泽渊, 金涛. 基于贝叶斯理论和遗传算法的管网漏损探测定位[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(2): 26-29, 262.
ZHOU Zeyuan, JIN Tao. Leakage detection and location in piping network based on Bayesian theory and genetic algorithm [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2016, 35(2): 26-29, 262(in Chinese).
- [4] 王珞桦, 李红卫, 吕谋, 等. 基于BP神经网络深度学习的供水管网漏损智能定位方法[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 61-64.
WANG Luohua, LI Hongwei, LÜ Mou, *et al.* Intelligent locating method of water pipeline leakage based on deep learning of BP neural network [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(5): 61-64 (in Chinese).
- [5] 杨开峰. 中小城市供水管网EPANET水力模型的建立和应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
YANG Kaifeng. The Research of Small City Water Supply Network EPANET Hydraulic Model Establishment and Application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).
- [6] 班福忱, 叶露, 吴丹, 等. 基于WaterGEMS的供水管网建模及爆管分析研究[J]. 给水排水, 2020, 46(8): 116-120.
BAN Fuchen, YE Lu, WU Dan, *et al.* Modeling and analysis of water supply network based on WaterGEMS [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(8): 116-120(in Chinese).
- [7] YANG X S, DEB S. Engineering optimization by cuckoo search [J]. International Journal of Mathematical Modeling and Numerical Optimization, 2010, 1(4): 330-343.
- [8] 朱世泰. 城市供水管网模型校核参数的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
ZHU Shitai. Study on Calibrated Parameters of Urban Water Distribution System Model [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [9] WU Z Y, SAGE P, TURTLE D. 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.
- [10] 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).
- [11] 简彩. 基于监测点优化的供水管网漏失模拟分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
JIAN Cai. Study on the Analysis and Simulation about Pipeline Leakage of Water Distribution System Based on Optimizing Layout of Monitoring Points [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014(in Chinese).
- [12] 岳宏宇, 吕谋, 李红卫, 等. 基于群体智能优化算法的供水管网压力监测点布置 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(21): 66-70.
YUE Hongyu, LÜ Mou, LI Hongwei, *et al.* Arrangement of pressure monitoring points in water supply network based on swarm intelligence optimization algorithm [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(21): 66-70 (in Chinese).

作者简介: 吴文红(1969—), 女, 辽宁沈阳人, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为数据挖掘与软件工程。

E-mail: wuwenhong@sina.com

收稿日期: 2020-10-12

修回日期: 2021-04-28

(编辑: 任莹莹)