文章编号：0253-374X(2014)05-0740-05 DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2014.05.013

基于智能优化算法的供水管网漏水点定位

刘书明[1]，王欢欢[1]，徐锦华[2]，刘文君[1]
(1.清华大学 环境学院，北京 100084；2.北京市自来水集团，北京 100031)

摘要：针对城市供水管网的爆管事故，基于管网水力学模型和管网水压监测点的监测信息，利用 3 种智能优化算法——杜鹃算法、遗传算法和粒子群算法，建立了爆管定位模型，并在 2 个算例管网中进行了测试. 2 个算例管网的运行结果显示，杜鹃算法由于其调节参数少，快速搜寻能力强，在爆管定位的智能优化算法中显示了更优秀的定位能力，在小规模算例管网中可以实现对爆管点的定位，在较大规模的算例管网中也可以实现 90%以上的定位寻优效果，显示了强大的算法应用可扩展性.

关键词：给水管网；漏水点定位；智能优化算法
中图分类号：TU991.3 **文献标志码**：A

Identification of Leakage Location Based on Modern Optimization Algorithms

LIU Shuming[1], *WANG Huanhuan*[1], *XU Jinhua*[2], *LIU Wenjun*[1]
(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Waterworks Group, Beijing 100031, China)

Abstract: The paper presents an algorithm for the location of sudden bursts in combination with both continuous monitoring of pressure and hydraulic model computation. The Cuckoo Search, genetic algorithm and particle swarm approaches were employed to identify the location of leakage. Their performances were compared. The results show that the Cuckoo Search has a better performance in terms of searching speed and parameter requirement among the three optimization algorithms. The case study results reveal the potential of the proposed burst location identification technique in a real-life water distribution system.

Key words: water distribution system; leakage location; modern optimization algorithm

作为城市公用设施的重要组成部分，供水系统由于管材老化、施工不良、水压异常等原因极易造成大量漏水损失. 供水系统的水力漏损主要包含漏水、爆管和溢流. 爆管通常作为特殊的漏损形式进行处理，一般可分为环向破裂、承口破裂、纵向破裂和管壁穿孔 4 种[1]. 爆管会造成部分服务区断水，大量水溢流到路面，造成水资源浪费，影响正常生产与生活. 爆管造成的有压水流可能进入民居、仓库或者地下室，造成不同程度的经济财产损失，甚至危害人身安全. 因此，快速、有效、经济的爆管定位模型对于保证城市安全供水、节约水资源有着重要的意义.

目前，国内外都进行了大量研究以实现爆管的识别定位技术. 作为时间序列的供水管网的流量和压力数据常利用于漏损识别的数据驱动模型中. Mounce 等人[2]开发了基于流量和压力数据的利用多密度人工神经网络预测水力参数的概率密度函数. 概率密度函数与模糊推理系统相结合，共同检测漏损爆管和异常流量. 此方法应用于英国的 144 个压力计量分区的管网中.

Romano[3]利用贝叶斯推理系统开发了在线爆管检测方法. 与所有的数据驱动方法一样，需要至少 2～3 个月的数据进行训练模型，这种方法更多地依赖于人工推理方法来预测精度. Nazif 等人[4]利用人工神经网络模型和遗传算法开发了模型用于最优化蓄水池水平以减少管网富余的水压来降低漏损. 其应用在德黑兰中心城区西北部，使得每年漏损减少 30%. 此方法计算时间快，易于实施，但精度有所降低. 支持向量机作为人工神经网络模型的代替方法，在供水管网漏损检测中的应用越来越得到学者们的重视[5]. 在中国部分城市逐步建立了水力学模型，其水力学模型精度也逐步提高. 如何利用水力学模型进行爆管定位成为众多学者研究的热点问题.

收稿日期：2013-06-29
基金项目：水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07408-002)
第一作者：刘书明(1976—)，男，副研究员，工学博士，主要研究方向为供水管网漏损控制、管网水质模型、基于 GIS 的环境建模、中水回用、可持续性城市水管理以及模型不确定性分析等. E-mail:shumingliu@tsinghua.edu.cn

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由于供水管网爆管造成较大的经济损失与浪费，在实际研究中很难破坏管网进行爆管的真实模拟. 部分学者提出利用瞬时增加管网的多个消防流量来模拟爆管过程. 但是在实际操作过程中，很难进行大面积模拟，同时其实际工况很难与实际爆管完全一样. 但当供水管网已建立水力模型时，就可以利用水力模拟方法模拟供水爆管的运行状态. 爆管状态模拟流量一般与所在管段的节点压力有直接关系，节点压力越高，其漏失量越高，具体关系如下：$q=Cp^{\gamma}$. 式中，q 为流量，p 为压力，C 为流量系数，γ 为压力指数（一般取 0.5）[6]. 但是在爆管定位过程中，其流量系数很难直接确定. 考虑到实际情况，可以利用绝对流量或者相对流量模拟.

在管网模型软件平台上，建立精准的供水管网水力模型，对模型进行校核并确保模型的可靠性与精准性. 在水力模型中，当发生爆管时，将其管段所在的下游节点作为爆管发生的模拟节点，赋予其爆管流量值，以此工况状态进行模拟爆管事故的发生，得出爆管状态时的压力分布.

本文从如何利用管网水力模型、基于管网的水压监测点数据、建立爆管水力模拟角度入手，建立爆管定位模型，并利用多种优化算法对算例管网进行比较分析，为爆管定位研究提供扎实的基础.

1　供水管网爆管定位模型的建立

供水管网中任意管段处的爆管都会使得供水管网其他节点的压力等信息发生变动. 当供水管网拓扑结构固定时，这些信息的变动主要取决于爆管发生的位置与爆管流量. 因此，可以利用管网模型平台，根据监测点的信息，通过优化算法求解爆管位置与爆管流量. 通过不断更新爆管水力模拟模型中的爆管位置与爆管流量来模拟各种爆管事故，以爆管发生时监测点处的测量值与计算值的二乘误差值最小为目标函数，优化管网中的爆管位置，完成供水管网的爆管定位.

目标函数具体表示为

$$\min f(i)=\frac{\sum_{s=1}^{N_s}\sum_{t=1}^{T}[p_{1,s}(t)-p_{2,s}(t)]^2}{N_s}$$

式中：N_s 为监测点数量；T 为监测时间序列；$p_{1,s}$ 和 $p_{2,s}$ 分别为监测点的计算值和监测值. 决策变量为爆管发生位置和爆管泄露流量.

定位模型的流程见图 1. 定位模型约束为管网模型的水力约束条件和爆管位置的可选择集约束.

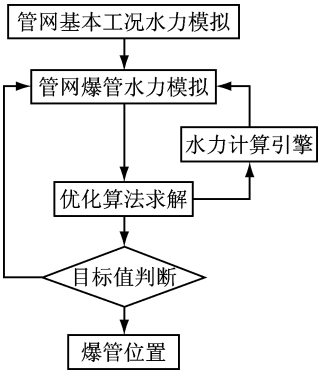


图 1　爆管定位模型技术流程

Fig. 1　Flowchart of burst localization

2　爆管定位模型的优化算法

爆管定位模型在求解可能爆管管段时，需要利用优化算法求解. 虽然理论上可以利用迭代法求解，但由于管网的复杂性，求解空间呈指数型增加，无法一一列举，在现有计算空间中无法实现. 因此，需要利用有效而迅速的现代智能优化算法求解爆管管段位置. 鉴于本问题为整数与实数组合优化问题，拟采用粒子群算法、遗传算法和杜鹃算法求解.

杜鹃算法（cuckoo search，CS）是由 Yang Xin-she 提出的一种模拟自然生物行为的智能优化算法[7]，杜鹃算法是模拟杜鹃鸟寻窝产卵行为的优化搜索算法. 杜鹃鸟具有卵寄生性，其在产生下一代时，并不自己筑巢，而是将自己的蛋产在与孵化期和育雏期类似、卵的形状和大小也类似的鸟类（多数为黄莺、云雀）的巢里，其在一个巢里仅产一个蛋. 与此同时，大杜鹃鸟在产卵前会将宿主的一枚蛋推出巢外. 杜鹃蛋虽然小，发育却很快，往往会比巢主鸟的蛋早孵化或者同时孵化出来. 小杜鹃一孵化出来将其他的雏鸟推出巢外，独自享受巢主鸟的抚育.

杜鹃优化算法流程如图 2 所示.

在单纯的基准测试函数中，杜鹃算法比粒子算法和遗传算法表现出了更快速与有效的特性，其寻优定位能力更强. 因杜鹃算法的可调整参数少（建巢数量和鸟蛋被发现概率），人为经验因素更少，目前其研究仍在起步阶段，但更有潜能以短路径搜索到最优解. 杜鹃优化算法由于其算法创立时间较短，在供水应用领域应用较少[8]，目前仅在供水管网多目标优化中有所应用[9]，表现了较强的优化性能.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

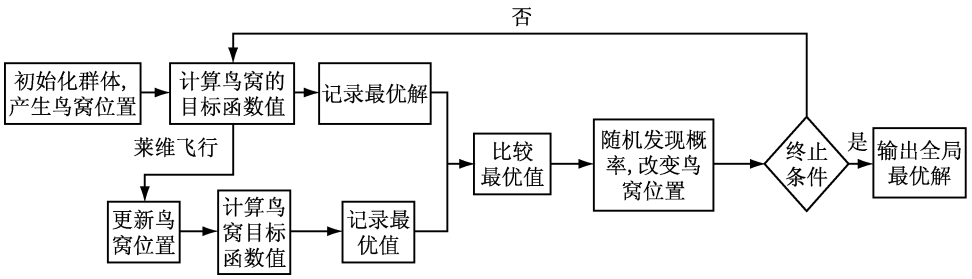


图2 杜鹃优化算法流程

Fig. 2 Flowchart of Cuckoo Search

遗传算法(genetic algorithm, GA)是由Holland在1973年提出,模拟自然界中的生物经过选择、变异、重组和杂交的从低级向高级的进化过程[10].遗传算法已广泛应用在供水管网的管径优化、加氯点优化、监测点优化、泵站优化调度等多个研究应用领域[11-14].

粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)是由James Kennedy和Russ Eberhart在1995年提出的一种群体智能优化算法[15].粒子群算法已应用在供水管网的多个研究领域,如管网设计、管网优化、水资源管理等方面[16-18].

3 算例研究

本研究利用3种优化算法进行爆管定位模型的研究,在2个算例管网中进行测试,看其性能的表现,以确定表现较优的爆管定位优化算法.

第1个算例的管网如图3所示,该算例管网拥有10个节点,12条管段,1个水源井和1个泵,模拟其管网中2个水压监测点(节点13和31).管网中,节点21,22,23,32,12依次模拟爆管,增加其大流量.此管网的平均用水量为70 L·s^{-1}(此管网为美国环保局EPANET案例管网,流量通过美制单位换算).以小算例管网流量的3%,5%,12%进行增加节点流量模拟爆管,即对每个爆管模拟节点进行2,4,8 L·s^{-1}的爆管流量模拟,分别利用粒子群算法、遗传算法和杜鹃算法模拟,寻找最可能的爆管点.此算例管网为小管网,在优化定位算法中,算法的基本参数设置如下:遗传算法中进化代数和种群规模取较小值,分别为50,20,交叉概率取0.8,变异概率取0.05;粒子群算法中,进化次数与种群规模也较小,分别为50,20,速度最大值为0.5,速度更新参数为1.494 45;杜鹃算法中,建巢数量取20,鸟蛋被发现概率取0.25.利用Matlab程序对3种算法依次编程,进行爆管模拟定位研究.程序运行结果整理成表1.

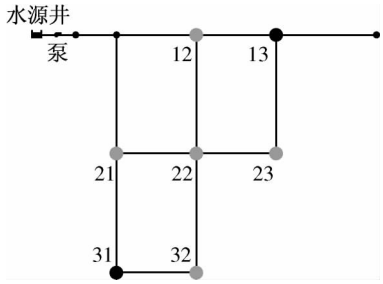


图3 算例管网1示意图及监测点信息

Fig. 3 Case network 1 and the measurement points

表1 算例管网1的爆管定位诊断结果

Tab. 1 Burst localization result in Case 1

漏损节点号	流量/(L·s^{-1})	算法		
		粒子群算法	遗传算法	杜鹃算法
22	2	22	22	22
	4	22	22	22
	8	22	22	22
23	2	23	23	23
	4	23	23	23
	8	23	23	23
32	2	21	31	32
	4	32	31	32
	8	32	32	32
12	2	22	12	12
	4	12	12	12
	8	12	12	12
21	2	21	21	21
	4	21	21	21
	8	21	21	21

由3种方法进行爆管模拟并定位后,得出3种方法都可以寻找到相应的爆管位置,但是粒子群算法在节点32,流量为4 L·s^{-1}模拟时,定位至节点21处,并没有找到最优解,使得爆管定位偏差较大.而在遗传算法中,模拟节点32时,也存在相应问题,但是其定位到了31处,32的临近位置,在实际中这种情况也是极有可能允许的.因为临近的管段节点水量变化给管网带来的变化差别很小.而利用杜鹃算法进行爆管定位的结果,则是在5个节点15次模拟事件中,都可以定位至爆管模拟位置,显示了较强的可扩展应用性.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

第 2 个算例管网如图 4 所示，该管网拥有 92 个节点，117 条管段. 模拟该管网中有 2 个水压监测点（节点 111 和 209），其中模拟 1 条管段爆管，进而搜寻爆管漏水位置. 依次模拟节点 145，119，163，267，199，215，139，205，191，263 等 10 处发生爆管，改变管网的流量分布，进而影响管网的水压分布.

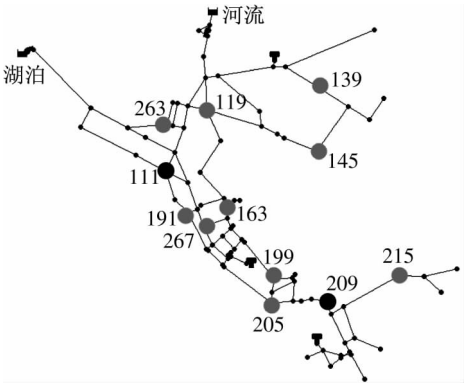


图 4　算例管网 2 示意图及监测点信息

Fig. 4　Case network 2 and the measurement points

此算例管网规模较大，其管网拓扑结构更复杂，节点数更多，可能的爆管位置也更多，因此在优化定位算法中，算法的基本参数也都进行了相应调整. 具体设置如下：遗传算法中进化代数和种群规模取较大值，分别为 100，50，交叉概率取 0.8，变异概率取 0.05；粒子群算法中，进化次数与种群规模均为 100，速度最大值为 0.5，速度更新参数为 1.494 45；杜鹃算法中，建巢数量取 40，鸟蛋被发现概率取 0.25. 利用 Matlab 程序对 3 种算法依次编程实现，进行爆管模拟定位研究，具体结果整理成表 2.

其中粒子群算法，在 10 个节点的 30 次定位中，有 20 次定位至爆管位置，其余 10 次定位位置均出现一定偏差，但是发现其位置多数在附近位置. 遗传算法的定位过程中有 16 次定位至爆管漏水位置，并发现其爆管流量，在其余 14 次定位位置中，其定位位置均在爆管位置的临近节点上，也充分显示了爆管的可能性，缩小了爆管漏水定位位置. 杜鹃算法则是有 26 次准确定位至爆管漏水位置. 在未寻找到最佳位置的 4 次测试中，节点 163 处都是定位至临近节点 166 处，两节点的大流量增加对管网的影响几乎一样，因此造成定位不太准确. 节点 215 处，定位结果是 217 和 219 处，分析管网的结构，2 个节点均在 1 条管段上，为上下游节点，3 个节点的流量变化对于整个管网的影响几乎一样，导致定位结果没有找到最佳位置. 以节点205处爆管为例描述3种算法进化过程，图 5～7 分别描述了其定位寻优的能力.

表 2　算例管网 2 的爆管定位诊断结果

Tab. 2　Burst localization result in Case 2

漏损节点号	流量/(L·s^{-1})	算法		
		粒子群算法	遗传算法	杜鹃算法
145	2	145	147	145
	4	145	145	145
	8	61	145	145
119	2	119	151	119
	4	119	119	119
	8	119	119	119
163	2	163	161	166
	4	166	164	163
	8	163	166	166
267	2	187	187	267
	4	187	187	267
	8	129	187	267
199	2	199	199	199
	4	199	199	199
	8	60	199	199
215	2	215	215	217
	4	215	219	218
	8	143	213	219
139	2	139	139	139
	4	139	139	139
	8	60	139	139
205	2	205	205	205
	4	205	205	205
	8	205	205	205
191	2	191	191	191
	4	191	191	191
	8	143	193	191
263	2	263	117	263
	4	263	117	263
	8	169	117	263

从图 5 和图 6 看出，粒子群算法和遗传算法的初始目标值范围一致，均在 0.10～0.15，但寻找定位速度遗传算法更快，在第 10 代就已经逼近 0.005，而粒子群算法是在第 30 代才逐渐逼近 0.005，但两者在算法结束时都找到了爆管最可能位置，满足现有的压力分布. 杜鹃算法则是初始目标值范围较大，但在第 15 次进化过程中就已经逼近 0.001，显示了在爆管定位过程中强大的搜索定位能力.

基于以上 2 个算例的爆管定位研究得出，智能优化算法可以应用于管网爆管定位中，其中杜鹃算法的定位寻优效率最高，其次是遗传算法寻优更快，表现更强劲，粒子群算法也可以找到临近解，但是其定位寻优速度较慢. 在计算方面，杜鹃算法更具有优势，可以在较少代数下搜索至相应的爆管点位置，但随着管网节点数的增加，搜索代数也有所增加.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

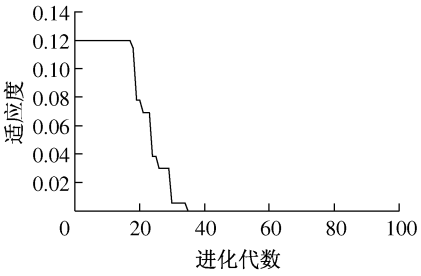


图5 粒子群算法爆管定位寻优过程

Fig. 5 PSO for burst localization

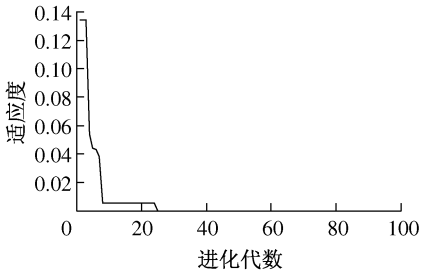


图6 遗传算法爆管定位寻优过程

Fig. 6 GA for burst localization

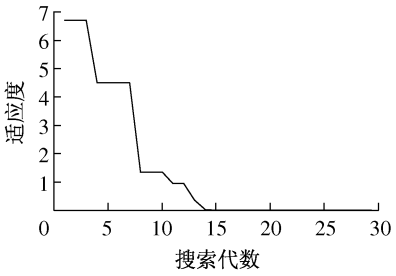


图7 杜鹃算法爆管定位寻优过程

Fig. 7 CS for burst localization

4 结论

(1) 供水管网爆管会影响供水管网的水力分布情况,爆管漏水定位可以利用管网水力模型的爆管模拟和水力监测信息进行定位.爆管漏水定位模型可以利用智能优化算法搜寻到爆管可能位置.

(2) 通过分析两个不同大小的算例管网,随着管网拓扑结构复杂度的增加,定位结果的准确性有所下降.遗传算法、粒子群算法和杜鹃算法都可用于爆管定位模型中.杜鹃算法的可调整参数较少,计算效率较快.基于定位计算结果的准确性和计算效率,杜鹃算法更适合用于供水管网的爆管漏水定位模型.

本文仅考虑了在精准水力模型的基础上进行爆管漏水定位的精度,在今后的研究中将进一步加入水力模型本身的精度,以评价爆管定位模型的准确度,进一步在真实管网中进行应用研究,以评价模型的真实应用性能与条件.

参考文献:

[1] 李树平,刘遂庆.城市给水系统[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.
LI Shuping, LIU Suiqing. City water systesm[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[2] Mounce S R, Boxall J B, Machell J. Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows. [J] Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, 136(3): 309.

[3] Romano M, Kapelan Z, Savic D A. Bayesian-based online burst detection in water distribution systems [C]// Integrating Water Systems. London: CRC Press-Taylor & Francis Group, 2010: 331-337.

[4] Nazif S, Karamouz M, Tabesh M, et al. Pressure management model for urban water distribution networks [J]. Water Resources Management, 2010, 24: 437.

[5] Mounce S R, Mounce R B, Boxall J B. Identifying sampling interval for event detection in water distribution networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2012, 138(2): 187.

[6] Rossman L A. EPANET 2 user's manual[M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U S Environmental Protection Agency, 2000.

[7] Yang X S, Deb S. Cuckoo Search via levy flights[C]// World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing. Coimbatore: IEEE, 2009: 210-214.

[8] Valian E, Tavakoli S, Mohanna S, et al. Improved cuckoo search for reliability optimization problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 64(1): 459.

[9] Wang Q, Liu S, Wang H, et al. Multi-objective cuckoo search for the optimal design of water distribution systems[C]// Proceedings of the 2012 International Conference on Civil Engineering and Urban Planning, China. Yantai: American Society of Civil Engineers, 2012: 402-405.

[10] Holland J H. Genetic algorithms and the optimal allocation of trials[J]. SIAM Journal on Computing, 1973, 2(2): 88.

[11] Kurek W, Ostfeld A. Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems [J]. Journal Of Environmental Management, 2013, 115: 189.

[12] Mohan S, Babu K S J. Water distribution network design using heuristics-based algorithm[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2009, 23(5): 249.

[13] Meng F, Liu S, Ostfeld A, et al. A deterministic approach for optimization of booster disinfection placement and operation for a water distribution system in Beijing [J]. Journal of Hydroinformatics, 2013, 15(3): 1042.

[14] Liu S, Liu W, Chen J, et al. Optimal locations of monitoring stations in water distribution systems under multiple demand patterns: a flaw of demand coverage method and modification [J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2012, 6(2): 204.

[15] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]// IEEE International Conference on Neural Networks Proceedings. Perth: IEEE, 1995: 1942-1948.

[16] Sedki A, Ouazar D. Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems[J]. Advanced Engineering Informatics, 2012, 26(3): 582.

[17] Qiao J F, Wang Y F, Chai W, et al. Optimal water distribution network design with improved particle swarm optimization [J]. International Journal of Computational Science and Engineering, 2011, 6(1/2): 34.

[18] Geem Z W. Particle-swarm harmony search for water network design[J]. Engineering Optimization, 2009, 414: 297.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net