

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.011

基于群体智能优化算法的供水管网压力监测点布置

岳宏宇, 吕 谋, 李红卫, 刘志壮, 种宇飞
(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033)

摘 要: 针对城市供水管网压力监测点的优化布置问题,以监测范围最大化为目标,结合节点间的水压相关性和水压敏感度构建监测点优化布置模型,将实际问题转化为一个单目标组合优化问题。以东南沿海某城镇供水主干管网为例,利用2种群体智能优化算法——蝙蝠算法(BA)和粒子群算法(PSO)对模型进行求解。将两种算法的运行结果进行了多方面对比,发现BA因其全局寻优能力强,计算代时较短,在监测点优化布置问题中展现了更为出色的搜索精度和效率。

关键词: 供水管网; 压力监测点; 群体智能优化算法; 组合优化

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0066-05

Arrangement of Pressure Monitoring Points in Water Supply Network Based on Swarm Intelligence Optimization Algorithm

YUE Hong-yu, LÜ Mou, LI Hong-wei, LIU Zhi-zhuang, CHONG Yu-fei
(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: Aiming at the optimal arrangement of pressure monitoring points in urban water supply network, the optimal arrangement model of pressure monitoring points was established by taking the maximization of monitoring range as the target and combining water pressure correlation and water pressure sensitivity between nodes, and the practical problem was transformed into a single-objective combinatorial optimization problem. Two swarm intelligence optimization algorithms—bat algorithm and particle swarm algorithm were applied in a water supply network of a town in southeastern coast to solve the model. The operational results of the two algorithms were compared in many aspects. Bat algorithm, which had strong global search ability and short computation time, had shown excellent search accuracy and efficiency in the optimal location of monitoring points.

Key words: water supply network; pressure monitoring point; swarm intelligence optimization algorithm; combined optimization

城市供水管网中布设压力监测点不仅可以监测管网的实时压力分布情况,而且对供水系统的优化调度、漏损控制、智慧水务建设等都具有重要意义。布设压力监测点时应兼顾经济性和合理性,用尽可

能少的测压点最大限度地监测管网的运行状况。

针对压力监测点优化布置问题,国内外学者都进行了一些探索并取得了一定进展,其中以遗传算法为代表的智能优化算法已经广泛应用于监测点优

化布置的研究中^[1-7]。针对遗传算法易早熟,计算时间长且交叉、变异操作复杂等问题,本研究将群体智能优化算法领域极具潜力的蝙蝠算法(BA)首次引入到测压点优化布置模型的求解。基于管网的拓扑结构、节点间的水压相关性和水压敏感度建立数学模型,拟验证BA求解测压点优化布置模型的有效性,并对比传统的粒子群算法(PSO)进行算法性能的研究探讨。

1 测压点优化布置模型的建立

1.1 约束条件的确定

1.1.1 管网的压力相关性

管网中布设压力监测点的目的是通过监测部分节点的水压,根据其数值和变化范围反映管网整体运行状况。因此,所选测压点应该与管网中其他节点之间有较强的压力相关性,而两点间具有水压相关性的量化评价标准为节点之间的绝对水压差^[2]。即满足条件:

$$|H_i - H_j| < h \quad (1)$$

式中: H_i 、 H_j 分别为节点*i*、*j*的压力; h 为设定的压力值。

当节点间水压差小于设定值*h*时表明两个节点间的压力相关。利用公式(1)计算出管网中两两节点间水压的绝对差值,得到管网节点的压差矩阵 $[P]_{n \times n}$,以此作为测压点优化布置模型的约束条件。又由于供水管网可以简化为全连通的节点网络,其拓扑结构关系决定了任意两节点间均具有水流通路,但通水路径中缺少距离或者节点数的限制,结果不能有效代表监测点周围的压力变化情况^[4]。因此,笔者利用MATLAB中提供的图论工具箱,计算管网各节点间的最短距离得到最短路径矩阵 $[L]_{n \times n}$,并以此作为测压点优化布置模型的约束条件,通过管网节点间的距离限制*d*来表明水流通路的有效性。

1.1.2 管网的水压敏感度

对于某工况下运行的供水管网,引起节点水压波动最显著的外界因素就是用水量的变化。当某一节点水量发生波动时,势必会引起管网内其他节点的水压发生不同程度的改变,引起节点水压变化最大的点就是布设测压点的合理位置。故引入敏感系数的概念^[8],假设管网共包含*n*个节点,在给定工况下进行水力模拟求得各节点水压值,若任一节点*k*处发生水量变化 ΔQ_k ,节点*k*对应发生水压变化

ΔH_k ,被考察节点*i*的水压变化为 ΔH_i ,则节点*i*的水压变化率可表示为 $\frac{\Delta H_i}{\Delta Q_k}$ 。由于压力和流量的可比

性差,可以改用压力差的比值 $\frac{\Delta H_i}{\Delta H_k}$ 来表征节点*i*的水压变化率,其反映了节点*i*水压对节点*k*水量变化的敏感程度,记为敏感系数。本研究对管网内每个节点的基本需水量分别增加10%的扰动流量,根据式(2)求出任意两节点间的敏感系数组成水压敏感矩阵 $[D]_{n \times n}$ 。

$$D(i, k) = \frac{H_i' - H_i}{H_k' - H_k} \quad (2)$$

式中: H_i 、 H_k 分别为基准工况节点*i*、*k*的水压; H_i' 、 H_k' 分别为节点*k*流量增大10%后的节点*i*、*k*的水压。

对矩阵 $[D]_{n \times n}$ 中的元素采取标准化处理。首先根据公式(3)对矩阵 $[D]_{n \times n}$ 各列元素的标准差进行标准化,得到矩阵 $[D']_{n \times n}$ 。

$$D'(i, k) = \frac{D(i, k) - \bar{D}_k}{S_k} \quad (3)$$

式中: S_k 为第*k*列元素的标准差,即 $S_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [D(i, k) - \bar{D}_k]^2}$ 。

再根据公式(4)对矩阵 $[D']_{n \times n}$ 各列元素的极值进行标准化,得到矩阵 $[D'']_{n \times n}$ 。

$$D''(i, k) = \frac{D'(i, k) - D'_{k_{\min}}}{D'_{k_{\max}} - D'_{k_{\min}}} \quad (4)$$

采用欧氏距离法对矩阵 $[D'']_{n \times n}$ 进行分析,根据公式(5)求出两两节点间的欧氏距离,最后可得到水压敏感模糊相似矩阵 $[R]_{n \times n}$ 。

$$r_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [D''(i, k) - D''(j, k)]^2} \quad (5)$$

式中: r_{ij} 为节点*i*与节点*j*间的欧氏距离, $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

r_{ij} 代表了节点*i*与节点*j*间水压变化的敏感程度, r_{ij} 越小说明节点*i*对节点*j*的水压变化越敏感。若 $r_{ij} < \lambda$ (λ 为设定值)则说明两节点间满足水压敏感的条件,即可将水压敏感模糊相似矩阵 $[R]_{n \times n}$ 作为测压点优化布置模型的约束条件。

1.2 目标函数的确定

本研究以满足约束条件的所有节点集合中的元素个数最大化为目标函数建立数学模型,即:

$$\max T = \text{count}(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) \quad (6)$$

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (7)$$

$$A_{X_i} = \{j | P(X_i, j) < h, R(X_i, j) < \lambda, L(X_i, j) < d\} \quad (8)$$

式中: T 为某一测压点布置方案中满足约束条件的节点个数; X 为被选中的测压点集合; X_i 为第 i 个测压点的编号; A_{X_i} 为监测点 X_i 满足约束条件的节点集合; $P(X_i, j)$ 为压差矩阵中第 X_i 行 j 列的元素; $R(X_i, j)$ 为水压敏感模糊相似矩阵中第 X_i 行 j 列的元素; $L(X_i, j)$ 为最短距离矩阵中第 X_i 行 j 列的元素; n 为算例管网中节点总数; h, λ, d 为设定的约束条件阈值。

2 测压点优化布置模型的求解

压力监测点的优化布置本质上属于组合优化问题,监测点数量确定后决策变量就是监测点的组合。理论上可通过穷举找出最优布设方案,但随着管网复杂度的增加,可行解数量巨大,此类问题很适合用智能优化算法求解。相较于其他优化算法,群体智能优化算法具有参数设置少、算法实现简单、搜索效率高等优势,目前已广泛应用到工程优化问题中。

蝙蝠算法(BA)是2010年由Yang等^[9]提出的一种模仿微型蝙蝠种群超声波定位的新型群体智能优化算法。每只虚拟蝙蝠在坐标位置 X_i (对应优化问题的解向量)以随机的飞行速度 V_i 飞行,同时蝙蝠具有不同的频率 f 、脉冲响度 A_i 和发射速率 r_i 。蝙蝠发现目标时,依靠动态改变蝙蝠的 A_i 和 r_i ,使位于最优位置的蝙蝠依靠动态概率对最优解进行局部扰动并不断向最优解靠拢。这本质上就是使用调谐技术来控制蝙蝠群的动态行为,平衡调整算法相关参数,从而得到BA的最优解。其速度与位置的更新策略与粒子群算法相仿,都是通过不断更新种群个体的速度和位置,使个体逐渐逼近最优解。BA的优势是可控制全局搜索与局部搜索的转化过程,研究表明BA在工程优化领域具有强大潜能^[10]。

本研究使用EPANET 2.0软件进行算例管网的水力模拟计算,通过使用EPANET提供的工具箱,调用工具箱中的函数获取管网的节点需水量和水压等数据,计算得到压差矩阵、最短路径矩阵、水压敏感模糊相似矩阵。再利用MATLAB对优化目标函数的蝙蝠算法、粒子群算法进行主程序编写。蝙蝠算法通常应用于连续域的优化问题,而监测点优化布置问题属于离散型组合优化,因此首先要明确解

空间和问题空间之间的映射关系,即通过合适的编码方式使蝙蝠算法适用于解决离散优化问题。本研究算法采用实数编码方式,通过取整的方法将监测点编号对应其整数形式。同时,为防止最优解中出现相同的点,利用添加罚函数的形式降低此类个体的适应度。利用蝙蝠算法的具体优化流程见图1。

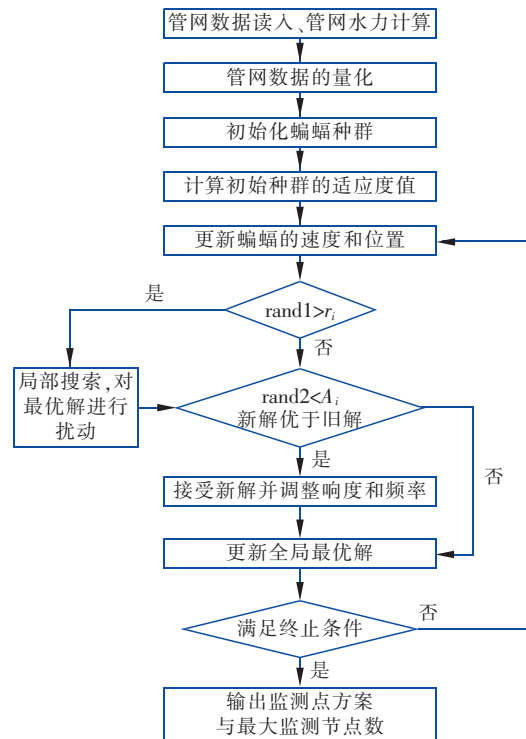


图1 蝙蝠算法优化流程

Fig. 1 Flow chart of BA

3 算例分析

选取东南沿海某城镇管网作为研究对象,管网水力模型经简化后共包含51个节点、54条管段、1处水源,总供水能力为354.2 L/s。研究计划选取5个压力监测点。

3.1 参数选择

3个约束条件中的阈值应结合管网实际情况进行设定,阈值的合理设置对得到准确的监测点方案至关重要。为防止某个约束条件的阈值设置过大或过小对最优解产生影响,先对3个约束条件的阈值进行初步界定,通过反复试算不同阈值,并分析结果的准确度和有效性,最终确定 $\lambda = 0.15$ 、 $h = 5$ m、 $d = 3\ 000$ m。

优化算法的参数设置如下:蝙蝠算法中种群大小为30,进化代数为500,脉冲响度为0.5,脉冲速

率为 0.5,频率范围为[0,12]。粒子群算法中种群大小为 100,进化代数为 500,最大速度为 20,速度更新参数为 1.494 45。对蝙蝠算法和粒子群算法分别运行 20 次,记录每次的最优适应度值和对应的最优解。具体结果见表 1。

表 1 蝙蝠算法与粒子群算法监测点寻优结果
Tab.1 Pressure monitoring point optimization results of
BA and PSO

运行 次数	蝙蝠算法(BA)		粒子群算法(PSO)	
	最优 适应度	编码	最优 适应度	编码
1	39	4,14,35,40,22	37	22,19,28,5,40
2	39	4,40,22,35,25	39	35,22,4,40,14
3	37	4,14,20,35,45	38	43,22,37,4,19
4	38	16,47,22,37,42	39	4,25,22,35,40
5	39	40,35,14,22,4	38	44,16,37,22,5
6	38	43,18,37,22,4	37	16,37,43,5,22
7	39	22,14,35,43,4	39	25,37,22,43,4
8	37	5,22,8,40,28	38	22,43,19,5,36
9	39	4,22,37,43,25	38	46,29,22,14,4
10	38	5,22,37,47,14	37	25,35,20,37,4
11	39	40,22,35,4,25	37	22,37,5,43,14
12	39	14,22,43,35,4	39	14,22,35,40,4
13	38	22,5,36,19,47	38	22,25,4,37,47
14	39	37,43,25,22,4	39	22,37,25,43,4
15	38	5,19,37,22,45	37	37,22,40,4,16
16	39	14,43,22,35,4	39	43,4,22,35,14
17	37	4,37,40,25,16	38	45,22,37,5,19
18	39	4,22,35,40,14	38	22,35,4,40,25
19	38	22,38,5,43,14	36	5,25,37,29,47
20	39	22,37,25,43,4	39	14,22,43,35,4

3.2 结果分析

由表 1 可以看出,两种群体智能优化算法都可以找到最优监测点布置方案。蝙蝠算法在 20 次运行过程中共有 11 次寻找到了全局最优值 39,其余 9 次出现了陷入局部最优的情况,但总体的适应度值全部保持在 37 以上。粒子群算法在 20 次运行过程中有 7 次找到了全局最优值,总体的适应度值也都保持在 36 以上。蝙蝠算法所得到最优解的质量要优于粒子群算法。另外,模型的最优解并不唯一,上述求解过程中总共得出了{4,14,22,35,40}、{4,14,22,35,43}、{4,22,25,35,40}、{4,22,25,37,43}4 组最优解。

研究结果表明,两种算法在达到最大进化代数时都取得了最优适应度,但蝙蝠算法的收敛速度要

明显快于粒子群算法,蝙蝠算法在第 40 代就收敛于最优解,而粒子群算法经过 80 代才搜寻到最优解。综合评判,相较于传统的粒子群算法,蝙蝠算法所得最优解的质量更高、算法计算代时较短,在监测点优化布置问题上展现了更好的应用价值。

将求出的 4 组监测点布置方案进行比较,因监测范围内的节点数目均为 39,遂对监测点方案所覆盖用水量进行比较。4 组监测点布置方案{4,14,22,35,40}、{4,14,22,35,43}、{4,22,25,35,40}、{4,22,25,37,43}监测范围内覆盖水量之和分别为 255.86、260.19、242.65、250.32 L/s。综上,选择方案{4,14,22,35,43}作为最优监测点布置方案。该方案节点覆盖率达到 76.47%,水量覆盖率达到 73.46%。

监测点分布如图 2 所示。可见,压力监测点在供水管网各区域分布较为均匀,布设位置多为大管段交叉处和管网末梢处,覆盖了节点密集、用水量较大的区域,有较强的代表性且符合传统经验法的测压点布置原则,具有一定的实际指导意义。

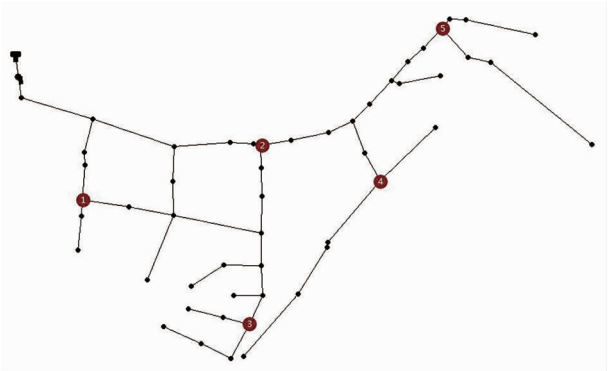


图 2 压力监测点布设方案
Fig.2 Layout plan of pressure monitoring points

4 结论

以监测范围最大化为目标构建供水管网测压点优化布置数学模型,模型综合考虑了管网的拓扑结构、水压相关性及敏感度等多方面因素。将粒子群算法和蝙蝠算法应用于模型的求解,在算例管网中实现了压力监测点的优化选择。经多方案比选后最终确定了压力监测点布设方案,其监测范围最大可覆盖管网总节点的 76.47% 以及管网总水量的 73.46%。压力监测点布设位置与传统经验法有较高的匹配度。

相较于粒子群算法,蝙蝠算法在模型求解中展

现出了更好的搜索精度和更快的收敛速度。基于计算结果的准确性和效率,蝙蝠算法在求解供水管网测压点优化布置模型上更具优势。

参考文献:

- [1] Meier R, Barkdoll B D. Sampling design for network model calibration using genetic algorithms[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2000, 126(4): 245-250.
- [2] 金溪,曾小兵,高金良,等. 利用遗传算法进行供水管网压力监测点优化布置[J]. 给水排水, 2007, 33(S1): 346-349.
Jin Xi, Zeng Xiaobing, Gao Jinliang, et al. Optimization of arrangement of pressure monitoring points in water distribution network based on genetic algorithm[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(S1): 346-349 (in Chinese).
- [3] 许刚,张士乔,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).
- [4] 刘书明,王欢欢,徐鹏,等. 多目标大规模供水管网监测点的优化选址[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2013, 53(1): 78-83.
Liu Shuming, Wang Huanhuan, Xu Peng, et al. Multiobjective genetic algorithms for optimal monitoring station placement in large water distribution systems[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2013, 53(1): 78-83 (in Chinese).
- [5] 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).
- [6] Casillas M V, Luis G C, Vicenc P. Optimal sensor placement for leak location in water distribution networks using evolutionary algorithms[J]. Water, 2015, 7(11): 6496-6515.
- [7] 彭畅,彭森,吴卿,等. 基于NSGA-II的供水管网压力监测点多目标优化布置[J]. 中国给水排水, 2019, 35(1): 58-62.
Peng Chang, Peng Sen, Wu Qing, et al. Multi-objective optimization of arrangement of pressure monitoring points in water distribution network based on NSGA-II [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(1): 58-62 (in Chinese).
- [8] 周书葵,许仕荣. 城市供水管网水压监测点优化布置的研究[J]. 南华大学学报:自然科学版, 2005, 19(1): 59-63.
Zhou Shukui, Xu Shirong. Studying optimal locating of pressure monitoring station in urban water distribution system[J]. Journal of Nanhua University: Science and Technology, 2005, 19(1): 59-63 (in Chinese).
- [9] Yang X S, Gandomi A H. Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization [J]. Engineering Computations, 2012, 29(5): 464-483.
- [10] 黎成. 新型元启发式蝙蝠算法[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(23): 6569-6572.
Li Cheng. A new metaheuristic bat-inspired algorithm [J]. Computer Knowledge and Technology, 2010, 6(23): 6569-6572 (in Chinese).



作者简介:岳宏宇(1995-),男,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为给排水系统分析与优化。

E-mail: yuehongyu9588@163.com

收稿日期:2020-04-10