

基于 NSGA-II 的给水管网压力监测点多目标优化布置

彭 畅¹, 彭 森¹, 吴 卿¹, 梁建文²

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350)

摘 要: 针对给水管网压力监测点优化布置过程中采用单目标函数得到的优化结果不能代表多方面综合因素的问题,以监测点压力监测范围及监测点覆盖节点需水量作为目标函数,管网水力连通性、管网节点压力相关性、管网节点水量影响条件作为约束条件建立多目标压力监测点优化布置数学模型,并利用 Matlab 平台通过非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解。将该模型应用于某园区实际管网中,并分析不同约束条件的参数取值对模型所得优化结果的影响程度,以提高监测点布设方案的代表性,同时也验证了 NSGA-II 求解多目标给水管网压力监测点优化布置模型的有效性。

关键词: 给水管网; 压力监测点; 非支配排序遗传算法; 多目标优化; 欧氏距离

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)01-0058-05

Multi-objective Optimization of Arrangement of Pressure Monitoring Points in Water Distribution Network Based on NSGA-II

PENG Chang¹, PENG Sen¹, WU Qing¹, LIANG Jian-wen²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Single target function lacks representation of the comprehensive factors in the specification of pressure monitoring points in water distribution network. Using the number of covered nodes and the demand of covered points as target functions, and using hydraulic connectivity, correlation of node pressure, and effect of node demand as constrains, a multi-objective optimization model for the arrangement of pressure monitoring points was developed in Matlab platform using non-dominant sort genetic algorithm (NSGA-II). The model was applied to the distribution system in a district to evaluate the impact of various constrains on the optimization outputs, and to enhance the quality of sampling locations. The validity of the optimization model for the pressure monitoring points selection in water distribution network with the use of non-dominant sort genetic algorithm was confirmed.

Key words: water distribution network; pressure monitoring point; non-dominant sort genetic algorithm (NSGA-II); multi-objective optimization; Euclidean distance

为了对市政给水管网进行有效监控,需设置压力监测点进行压力数据采集,这样不仅能直观地了解整个给水管网的压力分布,同时对控制给水管网

漏损、爆管等问题也具有现实意义,所以监测点的布置与选择必须准确且有代表性。针对该问题,国内外学者都提出了一些给水管网压力监测点优化布置

的方法, Abo-Monasar 等^[1]考虑管网需水量分布、管网的脆弱性、人口的敏感性等因素, 利用模糊综合评价以及优化算法构建监测系统; 金溪等^[2]利用单目标遗传算法, 通过分析节点水压相关性及其量化标准, 建立了给水管网压力监测点优化布置的数学模型并对其求解; 许刚等^[3]利用给水管网的灵敏度矩阵及蚁群算法求解监测点优化模型; 曹宏桂等^[4]利用粒子群算法在多点固定源的条件下, 以目标污染物浓度值最高作为单目标函数寻找出整个管网初始污染源点, 并将其作为监测点。

在一般的遗传算法中, 以单目标函数构建压力监测点优化布置数学模型, 只能解决某一类最优化问题, 存在一定的局限性。舒诗湖^[5]以模型校核精度最大化以及监测成本最小化作为双目标函数来构建监测点优化布置模型; 刘书明等^[6]将管网监测范围中水压相关节点个数、水量覆盖作为目标函数, 在实际管网中确定测压点优化选址。在压力监测点优化布置方面, 主要为了确定监测点的数量、位置、监测范围, 这几方面互相制约, 为了解决给水管网压力监测点优化布置问题, 笔者将采用非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)求解多目标函数的给水管网压力监测点优化布置模型。

1 压力监测点优化布置模型的建立

1.1 约束条件的确定

1.1.1 管网水流路径

市政给水管网可以简化为一个包含多个节点的连通网络, 这也证明了任意两节点间均存在连通关系, 但为了表示水流在各节点间的最短水流路径, 需要用水流在管网任意两节点内通过的最短节点数来表征各节点间的连通关系, Wu^[7]利用 Dijkstra 算法计算每个节点构成的分区计量区域, 笔者将采用 Dijkstra 算法求解水流在管网任意两节点内通过的最少节点数, 将水流通过的最少节点数得到最短路径矩阵 $[D]_{n \times n}$, 即可作为压力监测点优化布置模型的约束条件。

1.1.2 管网节点压力差值

上述算法解决了任意两节点间的连通性问题, 而采用两节点间压力差能更直接地表现任意两节点间的相关性, 因此管网中节点压力相关性的条件^[2]为: 两节点间有水流通路; 任意两个节点之间满足设定的压力差 h 。

$$H(i, j) = (H_i - H_j) < h \quad (1)$$

其中: H_i 、 H_j 分别为节点 i 、 j 的压力。

根据式(1)可得到给水管网中任意两节点间的压力差值矩阵 $[P]_{n \times n}$, 以此作为监测点优化布置模型的约束条件。

1.1.3 管网节点的水量影响

一个确定的给水管网在某一给工况下, 当某节点的流量发生变化时, 必然会引起其他节点的水压发生变化, 但对每一节点水压变化的影响程度是不一样的。那么, 由此引起水压变化最大的节点就是布置压力监测点的最佳位置。

设管网有 n 个节点, 在 k 节点处产生了 ΔQ_k 的节点流量变化值(本研究选取原流量的 15%), 则全管网节点水压都会受到不同的影响, 其中被考察节点 i 的水压变化值为 ΔH_i 。 k 节点自身的水压变化值为 ΔH_k , 因此选用 $\Delta H_i / \Delta H_k$ 表示 k 节点流量变化对 i 节点水压的影响, 并对 ΔH_i 和 ΔH_k 取微分:

$$C_{ik} = \frac{dH_i}{dH_k} \quad (2)$$

式中: C_{ik} 为 k 节点对 i 节点的影响系数; $i, k = 1, 2, \dots, n$ 。

求解 C_{ik} 可用管网微观分析方法, 在某一基准工况下进行管网平差, 得出该工况下各节点水压 H_i , 再加大 k 节点的流量(其他节点流量不变)重新进行管网平差, 得出各节点水压 H_i' 。其影响系数计算如下:

$$C_{ik} = \frac{H_i - H_i'}{H_k - H_k'} \quad (3)$$

式中: H_i 、 H_k 为基准工况下 i 、 k 节点水压; H_i' 、 H_k' 为节点流量改变后 i 、 k 节点水压。

对于所得到的节点水量影响系数矩阵 $[C]$, 本研究采用标准差规格化法处理, 即将 $[C]$ 中各列元素的标准差进行标准化。

$$C'_k = \frac{C_{ik} - \bar{C}_k}{S_k} \quad (4)$$

式中: $S_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{ik} - \bar{C}_k)^2}$, 最后得到水量影响标准矩阵 $[C']$ 。

将 $[C']$ 中各列元素的极值进行标准化, 即:

$$C''_{i,k} = \frac{C'_{i,k} - C'_{kmin}}{C'_{kmax} - C'_{kmin}} \quad (5)$$

对得到的影响极值标准矩阵 $[C'']$ 采用欧氏距离法分析两两节点的影响程度, 其表达式如下:

$$r_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (C''_{ik} - C''_{jk})^2} \quad (6)$$

式中: r_{ij} 为 i 节点与 j 节点的欧氏距离; $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

r_{ij} 反映了 i 节点与 j 节点压力起伏的影响程度, r_{ij} 越小说明 i 节点对 j 节点影响程度越大, 若 $r_{ij} < \lambda$ (根据实际管网设定的欧氏距离约束值), 就可以说这两个节点满足水量影响的约束条件, 即可将两节点间的欧氏距离作为水量影响相似矩阵 $[R]_{n \times n}$ 引进为压力监测点优化布置模型的约束条件。

1.2 目标函数的确定

建立市政给水管网压力监测点的目的是为了通过监测部分节点的压力来反映管网中的压力分布及变化情况, 通过有限的监测点尽可能多地代表管网中其余节点的压力及需水量情况, 进而获得管网整体的压力趋势。所以本研究设定两个优化目标, 一是与所选压力监测点满足约束条件的所有节点集合的元素个数最大化, 二是与所选压力监测点满足约束条件的所有节点的需水量之和最大化。目标函数如下:

$$\begin{cases} \max I = \text{count}(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) \\ \max Q = \sum_{i=1}^N Q_i \end{cases} \quad (7)$$

约束条件如下:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (8)$$

$$A_{X_i} = \{j | P(X_i, j) < h, D(X_i, j) < d, R(X_i, j) < \lambda\} \quad (9)$$

式中: I 为与某一压力监测点满足约束条件的所有节点个数; Q 为与所有监测点满足约束条件的节点需水量之和; Q_i 为与监测点 i 满足约束条件的节点需水量之和; A_i 为与监测点 i 满足约束条件的节点集合; N 为与监测点满足约束条件的所有节点集合; X 为被选为压力监测点的节点集合; X_i 为第 i 个压力监测点的编号; n 为给水管网节点总数; $P(X_i, j)$ 为压力差值矩阵 $[P]_{n \times n}$ 第 X_i 行、第 j 列的元素; $D(X_i, j)$ 为最短路径矩阵 $[D]_{n \times n}$ 第 X_i 行、第 j 列的元素; $R(X_i, j)$ 为水量影响相似矩阵 $[R]_{n \times n}$ 第 X_i 行、第 j 列的元素; h, d, λ 均是根据实际给水管网设定的约束值。

2 模型的求解

市政给水管网压力监测点优化布置数学模型属于组合优化范畴, 通过枚举法求解显然是不现实的,

这种问题非常适合利用智能优化算法解决, 本研究采用 NSGA-II 算法^[8]进行模型的求解, 计算流程如图 1 所示。

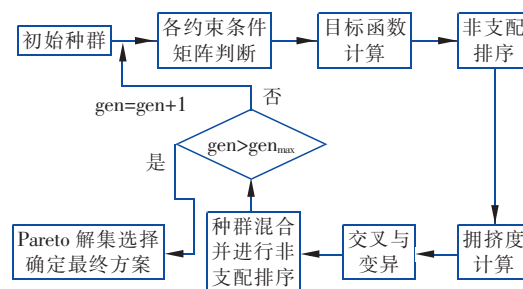


图1 NSGA-II 算法求解流程

Fig. 1 Flow chart of NSGA-II

2.1 求解原理

NSGA-II 算法采用锦标赛选择策略, 首先比较两个个体的非劣程度, 舍去非劣等级低的个体, 通过快速非支配排序选出种群的一部分非劣前沿, 最后通过拥挤距离的计算来保持种群的多样性, 一直循环重复直到当前进化代数大于最大进化代数, 得到一系列目标函数的 Pareto 前沿解集。

2.2 遗传编码、交叉、变异

本研究使用的 NSGA-II 算法采用整数编码, 将监测点的编号对应其整数形式; 交叉形式采用二进制交叉来进行父代、子代个体重组; 变异形式采用多项式变异, 防止种群陷入局部最优, 保证算法的有效性。

2.3 算法的 Matlab 实现

本研究采用 EPANET 平台进行管网的模拟计算, 采用 Matlab 软件进行程序编写。EPANET 可以模拟管网的节点压力及管道流量的变化情况, 在建立给水管网微观模型的基础上完成水力分析过程; Matlab 软件提供了与水力建模软件 EPANET 的接口, 通过使用 EPANET 提供的 ENtoolbox 工具箱, 调用工具箱中的函数来获取管网基本数据与参数设置, 对上述 3 个约束条件——最短路径矩阵、压力差值矩阵、水量影响相似矩阵进行子程序编写, 对优化目标函数的 NSGA-II 算法进行主程序编写。

3 实例分析

选择某园区给水管网作为研究对象, 验证基于 NSGA-II 算法求解给水管网压力监测点优化布置模型的有效性。管网总长为 236 km, 规模为 $21.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 管径覆盖 DN100 ~ 1 800, 服务面积接近

100 km²。该管网共包含 2 个泵站、544 个节点、809 条管段,在 EPANET 平台中可以获得所有节点的流量、压力等数据。本研究综合考虑该园区实际管网情况,计划选取 8 个监测点。

为了防止 3 个约束条件中的某个约束条件的约束范围过大或过小对最优解产生影响并且保证节点覆盖率及节点水量覆盖率在 80% 以上,先对 3 个约束条件的设定值做一个初步筛选,确定 λ_{\max} 值为 0.1~0.15,通过实际管网计算出的压力差值矩阵、

最短路径矩阵、水量影响相似矩阵可以求出:满足 λ_{\max} 为 0.1~0.15 的两两节点之间的压力差值范围在 0.3~0.4 m(1 m 水柱产生的压力约为 9.8 kPa),水流经过的最短路径为 6~8 个节点。NSGA-Ⅱ 算法中最大遗传代数设定为 100 代,初始种群为 100,交叉算子为 0.8,变异算子为 0.1,终止条件为满足最大遗传代数,设定不同的 λ_{\max} 、 h_{\max} 、 d_{\max} 值,经过算法求解,得出不同的 Pareto 前沿解集,最后选出具有代表性的解,如表 1 所示。

表 1 不同约束条件阈值的优化结果比较

Tab.1 Comparison of optimization results based on different constraint conditions

h_{\max}	λ_{\max}	d_{\max}	覆盖节点数 I	覆盖水量之和 $Q/(L \cdot s^{-1})$	节点覆盖率/%	节点水量覆盖率/%
0.4	0.15	8	451	2 004	82.90	80.64
0.4	0.10	8	431	1 812	79.23	72.92
0.4	0.15	6	445	1 870	81.80	75.25
0.4	0.10	6	433	1 676	79.60	67.44
0.3	0.15	8	418	1 706	76.84	68.65
0.3	0.10	8	411	1 470	75.55	59.15
0.3	0.15	6	414	1 576	76.10	63.42
0.3	0.10	6	414	1 578	76.10	63.50

由表 1 可知, h_{\max} 、 d_{\max} 和 λ_{\max} 减小均会使目标函数值减小,当 h_{\max} 为 0.4、 λ_{\max} 为 0.15、 d_{\max} 为 8 时,节点覆盖率与节点水量覆盖率均在 80% 以上。将约束条件参数设为 $h_{\max}=0.4$ 、 $\lambda_{\max}=0.15$ 、 $d_{\max}=8$,求解得到 3 个结果,Pareto 前沿解集如图 2 所示。可以看出,节点覆盖水量之和与节点覆盖个数呈负相关关系。

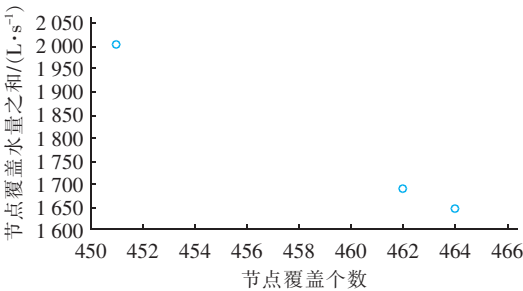


图 2 基于 NSGA-Ⅱ 算法的 Pareto 前沿解集

Fig.2 Pareto frontiers solution based on NSGA-Ⅱ algorithm optimization

各监测点布置方案目标函数值如表 2 所示。可以看出,方案 1 中节点覆盖数为 451,节点覆盖水量之和达到 2 004 L/s;方案 2 中节点覆盖数扩大为 462,但节点覆盖水量之和降至 1 688 L/s;方案 3 与方案 2 相似,节点覆盖数扩大为 464,节点覆盖水量之和减小为 1 642 L/s。

表 2 各方案目标函数值

Tab.2 Result of objective function for each project

项 目	节点覆盖数	节点覆盖水量之和/(L·s ⁻¹)	节点覆盖率/%	节点水量覆盖率/%
方案 1	451	2 004	82.90	80.64
方案 2	462	1 688	84.93	67.93
方案 3	464	1 642	85.29	66.08

3 个方案选取的压力监测点在实际管网中的位置见图 3。

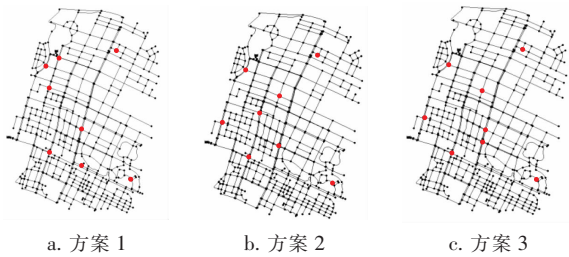


图 3 3 种压力监测点布置方案

Fig.3 Three layout plans of pressure monitoring points

由图 3 可以看出,不同的目标函数值对应的监测点分布位置和密度不一样。方案 1 中压力监测点多分布在需水量较大、大用户节点以及低压区域,与实际监测点布置原则相似度较高;而方案 2、3 中压力监测点分散较均匀,所能监测到的节点数更多,但

相较于方案1其节点覆盖率仅增加了约3%,节点需水量覆盖率却降低了约13%。综合考虑压力监测点监测范围要满足节点覆盖率与节点水量覆盖率均在80%以上的要求,应选择方案1作为该给水管网压力监测点布置方案。

4 结论

针对给水管网压力监测点优化布置过程中采用单目标函数得到的优化结果不能代表多方面综合因素的问题,提出了一种基于NSGA-II算法的给水管网压力监测点优化布置新方法。同时,通过改变NSGA-II算法中约束条件的参数取值,分析了其对模型求解结果的影响。实例表明,不同的目标函数值对应的监测点分布位置和密度不一样,因此可以针对想要得到的不同优化结果或管网实际情况来选定参数值。

参考文献:

- [1] Abo-Monasar A, Al-Zahrani M A. Framework for water quality monitoring system in water distribution networks based on vulnerability and population sensitivity risks [J]. *Water Sci Technol*, 2016, 17(3): 811-824.
- [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(增刊): 346-349.
Jin Xi, Zeng Xiaobing, Gao Jinliang, *et al.* Optimal placement of pressure monitoring points in water supply network based on genetic algorithm [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, 33(s): 346-349 (in Chinese).
- [3] 许刚,张土乔,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] 曹宏桂,负卫国. 基于PSO-DE算法的突发水域污染溯源研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(10): 3807-3812.
Cao Honggui, Yun Weiguo. Research of the abrupt waters pollution source based on optimization algorithm of PSO-DE [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(10): 3807-3812 (in Chinese).
- [5] 舒诗湖. 基于fmGA的供水管网系统模型自动校核及模型应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
Shu Shihu. *Water Distribution System Model Automatic Calibration Based on fmGA and Its Applications* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009 (in Chinese).
- [6] 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).
- [7] Wu Z Y. Multistep simulation-optimization modeling approach for partitioning water distribution system into district meter areas [J]. *J Water Resour Plan Manage*, 2018. DOI:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000927.
- [8] Deb K, Pratap A, Agarwal S, *et al.* A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.



作者简介:彭畅(1994-),男,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为给水管网优化。

E-mail: pengchang511@163.com

收稿日期:2018-05-15