

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221532

基于智能优化算法供水管网减压阀布设位置的优化研究

王 兴, 种宇飞, 吕 谋

(青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266400)

摘要: 针对供水管网系统中存在过剩压力的问题, 提出在管网中安装一定开启度的减压阀, 以各节点运行水压与各节点最小服务水头之差的平方和最小为目标, 结合管网水力平衡约束、节点压力约束构建减压阀优化压力漏失控制模型, 利用遗传算法对模型进行求解, 并以东南沿海城镇供水主干管网为算例进行验证。结果表明, 所提模型及方法有效、可行, 且优化效果显著。

关键词: 管网系统; 过剩压力; 减压阀; 多目标; 遗传算法

中图分类号: TV672⁺.2; TU991

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0097-04

1 引言

目前我国供水管网中的漏损率仍为一个很严重的问题, 许多供水公司利用积累的经验来控制管网的漏损, 但效果很不理想, 而分区计量(DMA)为行之有效的办法之一^[1], 即在原有的管网中加入若干阀门和流量计, 将区域划分为相对独立的若干子区域, 但容易产生过剩的压力。而减压阀具有灵活、可调、智能管理等方面的优势, 可优化分区压力, 达到最大程度的节能降耗并降低由于过剩压力造成的管网漏失, 故减压阀在DMA系统中较为常见。通过安装减压阀进行管网中运行压力管理, 进而控制漏损一直是业内关注的难题。如 GULLOTTA AURORA 等^[2]基于 NSGA II 开发了两种方案, 提出了一种提高间歇式配水网络配水公平水平的方法, 可通过重新安排管网中的流量循环, 确定最佳阀门位置和设置, 以改善用户之间的用水分配; SANTONAS-TASO G F 等^[3]提出了一个总体框架来调整给水管网(WDN)分区算法, 以考虑隔离阀的实际位置; ARAUJO L S 等^[4]为将管网中压力和泄漏水平降至最低, 开发了一个模型, 用于支持有关网络系统中控制阀的量化、位置和开启调整的决策系统; 唐鹏翔等^[5]通过粒子群算法优化管网泵阀一体的压力管理模型, 对比了优化前后漏损量的变化, 证明其有效、可行; 俞焱曦^[6]以减压阀的最优

位置、设置值及变速泵的开关、泵速作为决策变量, 利用遗传算法在多个工况下进行寻优求解, 最大程度地减少了能耗和漏损, 提升了经济效益。相较于其他研究管网中减压阀的安设位置或设置值的研究, 本文结合夜间最小流量法, 通过设置不同管段中海曾威廉公式中的管道粗糙系数 C 值来区别此管段是否安装减压阀; 再通过 Matlab 编写主函数程序调用已建立好的 EPANET 管网模型中各节点管段参数建立数学模型, 找到管网中减压阀的最优安装位置, 以此来达到减少管网系统的过剩压力, 降低管网漏失率的最终目的; 通过分区内漏失量的降低程度, 进而预测整个管网系统可降低的漏失量, 以期为城市实际供水管网在“智慧水务”等方面提供决策支持。

2 构建管网减压阀布设位置数学模型

2.1 目标函数

从减压阀对分区内部压力的优化方向求解减压阀布设位置数学模型, 该模型的目标函数为使各节点运行水压与各节点最小服务水头之差的平方和最小, 即:

$$\min \Delta P = \sum_{i=1}^N (P_i - P_{\min})^2 \quad (1)$$

式中, ΔP 为管网相对于最小服务压力的剩余压力的平方和; P_i 为节点自由水压; P_{\min} 为最小服

收稿日期: 2022-06-27, 修回日期: 2022-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(51778307); 山东省重点研发计划(GG201809260435)

作者简介: 王兴(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为给排水管网系统分析优化, E-mail: 605118420@qq.com

通讯作者: 吕谋(1965-), 男, 博士后、教授、博导, 研究方向为排水管网系统分析优化, E-mail: Lvymoul@163.com

务水头; N 为供水管网中节点数。

2.2 约束条件

(1) 管网水力平衡约束。节点流量连续方程是任何供水系统正常运行均应满足的水力平衡约束, 即:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n q_{ij} - d_i - l_i = 0 \quad (2)$$

式中, q_{ij} 为与节点 i 连接的管段流量; d_i 为节点 i 的用水量; l_i 为节点 i 的漏失量, $l_i = k_i P_i^{1.18}$ (1.18 为固定指数)。

(2) 节点压力约束。为保证供水系统正常运行、满足居民正常用水时最小需求压力, 同时避免出现过高压力造成压力过剩、管网破坏, 设置节点压力约束:

$$h_{i, \min} \leq h_i \leq h_{i, \max} \quad (3)$$

式中, $h_{i, \max}$ 、 $h_{i, \min}$ 分别为节点 i 压力的上、下限, 主要由节点类型来决定, 如在管网最不利供水位置的节点必须满足用户最小用水需求压力, 其他节点不能超过管材最高承受压力, 以防爆管危险。

2.3 减压阀优化布置

在管道中安装减压阀, 通常是根据管网各时间段的实际参数设定阀后压力, 在满足最不利点最小服务水头的前提下, 达到对管网区域进行局部降压的目的。根据经验法通常会安装在管径较大且区域划分较为明显的枝状管网的入口处。然而具体工程中由于管网错综复杂、管道数量巨大, 而管网中减压阀的优化布置从根本上讲属于排列组合问题, 从原理上讲可将布置方案一一列举出来, 再通过计算筛选出最优的减压阀布设位置, 但此方法仅适用于实验室阶段的试验管网, 因此群体智能优化算法的引入是解决此类问题的关键。

3 遗传算法

遗传算法^[7]是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程发展起来的随机全局搜索和优化方法。

3.1 遗传算法对减压阀的编、译码

C 值(海曾威廉系数)反映管道的新旧程度, 一般新的铸铁管取 140。 C 值越小则表明管道的水头损失越大, 此特性与一定开启度的减压阀有类似的功能。故选择管道 C 值来假设减压阀的设定。

3.2 遗传算法求解模型的思路

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。再利用 Matlab 对优化目标函数的遗传算法进行主程序编写。阀门优化布置问题属于离散型组合优化, 因此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遗传算法适用于解决离散优化问题。由于遗传算法默认采用整数编码方式, 故设定阀门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。

3.3 适应度函数的确定

适应度函数良好的设定, 既可使遗传算法的群体尽可能在解空间内, 又可使算法的收敛速度大大加快。由于算法在进化搜索中基本不利用外部信息, 所以通过将目标函数进行简单的数学变换即能减轻算法的复杂度。个体适应度 F 越大, 表明该个体适合能力越高, 对应的解越好。个体适应度下取目标函数 $f(P)$ 的倒数:

$$F = \frac{1}{f(P)} \quad (4)$$

式中, $f(P)$ 为目标函数关于压力的平方和。

4 案例分析

选取东南沿海某城镇的小区管网为例(图 1), 建立了供水管网水力学模型, 整合收集到的管网系统的相关基础数据, 结合 GIS 信息将管网拓扑结构输入 EPANET 2.0, 并将需水量分配到管网各节点。运行模型得到节点水压、管段流量。

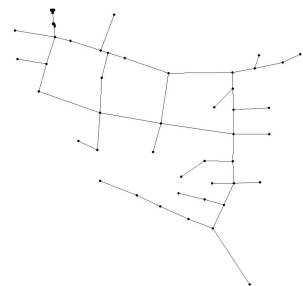


图 1 东南沿海某城镇管网示意图

Fig. 1 Pipe network of a town in the southeast coast

4.1 管网各参数的确定

4.1.1 用水节点的漏失系数 k_i 确定

英国水研究中心(WRC)经过长时间统计并分析夜间 2:00~4:00 的人均用水量数据, 提出夜间人均用水量为 1.7 L/(户·h)。以此为基础, 一个地区的夜间最小流量可较好推算该地区的夜间最小流量时刻的管网漏失量 $q(t_{\min})$ 为:

$$q(t_{\min}) = Q(t_{\min}) - 0.0017 \times \text{用户数} \quad (5)$$

式中, $Q(t_{\min})$ 为该时段的总进水量。

通过收集到的算例管网信息可知, 该地区夜

间最小流量为 40 m³/h,用户数为 2 940 户,根据式(5)可推算出该地区夜间最小流量时刻的管网漏失量为 35 m³/h。

引入比例因子作为漏失系数与流量的比值,利用计算漏失量的公式反算,可得比例因子和各节点漏失系数 k_i :

$$k_i = \beta d_i(t_{\min}) \quad (6)$$

其中
$$\beta = \frac{q(t_{\min})}{\sum_{i \in I_d} d_i(t_{\min}) p_i(t_{\min})^{1.18}}$$

式中, $d_i(t_{\min})$ 为该节点在此时刻的运行工况下的实际水量; $p_i(t_{\min})$ 为该节点在当前工况下的水压。

利用式(6)可得各用水节点的漏失系数 k_i 值,见表 1。

表 1 各用水节点的漏失系数 k_i 值

Tab. 1 Leakage coefficient k_i value of each water use node

节点号	漏失系数	节点号	漏失系数	节点号	漏失系数	节点号	漏失系数
1	0.005 67	12	0.002 27	23	0.004 54	34	0.003 40
2	0.003 40	13	0.004 54	24	0.004 54	35	0.001 13
3	0.001 13	14	0.003 40	25	0.001 13	36	0.004 54
4	0.002 27	15	0.002 27	26	0.001 13	37	0.001 13
5	0.005 67	16	0.001 13	27	0.001 13	38	0.005 67
6	0.003 40	17	0.003 40	28	0.004 54	39	0.002 27
7	0.002 27	18	0.001 13	29	0.001 13	40	0.001 13
8	0.001 13	19	0.004 54	30	0.001 13	41	0.001 13
9	0.002 27	20	0.005 67	31	0.002 27	42	0.002 27
10	0.001 13	21	0.005 67	32	0.003 40	43	0.006 80
11	0.004 54	22	0.001 13	33	0.003 40		

4.1.2 阀门位置参数的设定

算例管网均使用铸铁管且已有锈蚀情况出现,故 C 值取 130 来假设未设置减压阀管道。由于算例管网初始各节点水压相对均匀,减压阀的开启度不宜过大,故 C 值取 90 来假设设置减压阀管道。

4.1.3 管网最大用水量时各节点的压力值

表 2 为管网最大用水量时各节点的压力值。

表 2 最大用水量时各节点的压力值

Tab. 2 Pressure values of each node at maximum water consumption

节点号	压力值 /m	节点号	压力值 /m	节点号	压力值 /m	节点号	压力值 /m
1	46	12	45	23	39	34	32
2	46	13	43	24	40	35	36
3	45	14	42	25	39	36	38
4	43	15	43	26	35	37	33
5	46	16	43	27	34	38	35
6	43	17	42	28	35	39	35
7	42	18	42	29	33	40	36
8	45	19	42	30	36	41	37
9	42	20	45	31	38	42	28
10	44	21	42	32	39	43	31
11	44	22	43	33	31		

4.2 减压阀优化控制模型的求解

设置种群大小设为 20,进化代数设为 3 000,最小服务水头为 25 m,交叉概率设为 0.90,变异概率设为 0.01。遗传算法求解模型步骤见图 2。图 2 中, p_i 、 p_{\min} 分别为节点的自由水压和最低服务压力; p_{z_0} 为初始的模型目标函数值; p_{z_1} 为更新迭代后新的目标函数值。

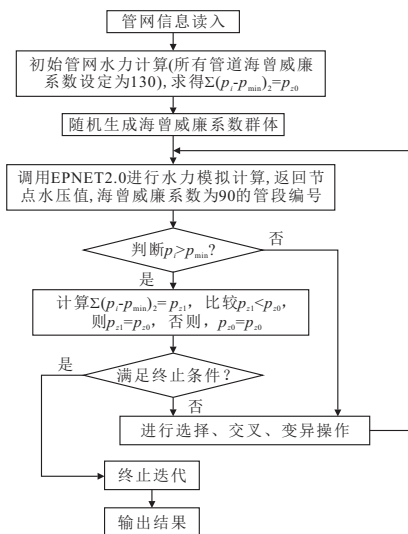


图 2 遗传算法求解模型的步骤图

Fig. 2 Step diagram of genetic algorithm to solve model

4.3 计算结果分析

通过算法的寻优结果返回模型验证的求解结果见表 3。由表 3 可知,管网余压随阀门数量的增加而降低,但并非说管网中减压阀的数量越多越好,因为阀门超过一定数量后再增加阀门数量就对管网降压的作用并不明显。综合考虑本文模型选用 3 个减压阀。

表 3 程序输出结果

Tab. 3 Program output results

阀门数量	目标函数值	所在管段编号	最大用水时节点平均压力下降值/mH ₂ O
2	5 558.85	46,31	0.42
3	4 495.60	5,25,37	1.36
4	4 265.20	5,21,28,35	1.41

由式(2)计算供水管网在未设置减压阀前漏失量为 9.722 L/s,在相应位置设置减压阀后漏失量为 9.333 L/s,漏失率下降 4.012%。以此小区推算整个管网,管网在平均时工况下供水总量为 326.42 L/s,在设置减压阀之前算例管网的漏失量为 55.30 L/s,估算设置减压阀之后漏失量为 42.21 L/s。

5 结论

a. 针对供水管网普遍存在过剩压力由此造成管网更大漏失的问题,提出在管网中安装一定

开启度的减压阀,建立了减压阀优化布置模型并采用遗传算求解模型。

b. 算例验证结果表明,本文模型及方法可行、有效,且优化效果显著。

参考文献:

[1] 张鹏飞,何芳,麦伟成,等. 水务企业编制 DMA 规划工作的实践与探讨[J]. 给水排水, 2014, 40(1): 156-160.

[2] GULLOTTA AURORA, BUTLER DAVID, CAMPISANO ALBERTO, et al. Optimal location of valves to improve equity in intermittent water distribution systems[J]. Journal of water resources planning and management, 2021, 147 (5): 04021016.

[3] SANTONASTASO G F, DI NARDO A, CREACO E. Dual topology for partitioning of water distribution networks considering actual valve locations[J]. Urban water journal, 2019, 16(7): 469-479.

[4] ARAUJO L S, RAMOS H, COELHO S T. Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management[J]. Water resources management, 2006, 20(1): 133-149.

[5] 唐鹏翔,许仕荣,盛烜. 基于粒子群算法的阀门协同泵站控制供水管网压力[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2020, 43(3): 70-75.

[6] 俞焱曦. 基于泵阀联合调度的供水管网漏损控制及能耗优化[D]. 杭州:浙江大学.

[7] 赫彦文,刘紫阳,李建义,等. 基于遗传算法的测试用例自动生成方法综述[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2020, 20(4): 16-20.

Research on Optimizing Position of Pressure Relief Valve in Water Supply Network Based on Intelligent Optimization Algorithm

WANG Xing, ZHONG Yu-fei, LV Mou

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266400, China)

Abstract: To address the problem of excess pressure in the water supply network system, this paper proposed to add pressure reducing valves with certain opening in the system. With the objective of minimizing the square sum of the difference between the operating water pressure at each node and the minimum service head at the node, the pressure reduction valve optimized pressure leakage control model was constructed by combining the hydraulic balance constraint of the pipe network and the node pressure constraint. The model was solved by using genetic algorithm. Taking the main water supply network of southeast coastal towns as an example, the results show that the proposed model and method are effective and feasible, and it has better optimal effectiveness.

Key words: pipe network system; overpressure; compression release valve; multi-objective; genetic algorithm

(上接第 29 页)

[2] BAILEY R T, WIBLE T C, ARABI M, et al. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model[J]. Hydrological processes, 2016, 30(23): 4420-4433.

[3] 傅笛,金鑫,金彦香,等. 巴音河中下游农业灌溉对地下水补给量与排泄量的影响[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 63-67.

[4] WHITE K, CHAUBEY I. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model[J]. JAWRA journal of the American water resources association, 2010, 41 (5):

1077-1089.

[5] MA N, SZILAGYI J, ZHANG Y, et al. Complementary-relationship-based modeling of terrestrial evapotranspiration across China during 1982 - 2012: Validations and spatiotemporal analyses[J]. Journal of geophysical research atmospheres, 2019, 124(8): 4326-4351.

[6] QUBAJA R, AMER M, TATARINOV F, et al. Partitioning evapotranspiration and its long-term evolution in a dry pine forest using measurement-based estimates of soil evaporation[J]. Agricultural and forest meteorology. 2019, 281: 107831.

The Impacts of Vegetation Restoration on the Hydrological Processes in Arid Inland River Basin

ZHAI Jing-ya^{a,b}, JIN Xin^{a,b,c}, JIN Yan-xiang^{a,b,c}, FU Di^{a,b}

(a. School of the Geographical Science; b. Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Processes; c. Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810016, China)

Abstract: In order to better understand the impact of vegetation restoration on hydrological processes, the SWAT-MODFLOW model and dynamic HRU was coupled, and LU-SWAT-MODFLOW model was developed to accurately simulate the dynamic change of vegetation and groundwater in the lower reaches of the Bayin River Basin. The results revealed that the LAI, ET and groundwater level simulated by LU-SWAT-MODFLOW model are better; After vegetation restoration in the study area, the monthly evapotranspiration of different sub-basins increased by 0-1.5 mm, and the annual evapotranspiration increased by 0-6 mm; The average monthly groundwater recharge increased about 1.27 mm, and the average annual groundwater recharge increased 14.02 mm. The exchange of the surface water and groundwater in the study area have obvious changes in the areas where the vegetation restoration type is low-coverage grassland and bare land converted to forestland.

Key words: vegetation restoration; LAI; ET; groundwater