

文章编号:1671-6833(2018)03-0093-04

突发饮用水污染下的水阀和消防栓的调度研究

邹露, 颜雪松, 胡成玉

(中国地质大学(武汉) 计算机学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 研究在突发饮用水污染情况下, 如何对消防栓和水阀最优调度, 从而使得对用户造成的危害程度最小、同时调度成本最小, 但是, 这两个目标是互相矛盾的, 调度成本的减小必然导致污染水体对用户危害程度增加. 因此, 首先建立了两目标优化模型, 其中, 第一个优化目标为污染事件发生后, 用户饮用的污染物质质量最小; 第二个优化目标为对消防栓和水阀调度的成本最小; 然后以美国某小镇真实饮用水管网为研究对象, 利用 NSGA-II 算法求解最优的水阀和消防栓调度方案, 同时分析了不同参数对调度结果的影响, 仿真结果验证了本文所建立的多目标优化模型和调度算法的有效性.

关键词: 多目标优化; 消防栓; 阀门; 污染源; 配水系统

中图分类号: TP301.6 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.006

0 引言

目前, 对突发饮水污染下的供水管网中消防栓和水阀最优调度的研究成果较少, 文献[1]以消耗的污水体积最少为目标, 确定了水阀和消防栓的调度方案. 考虑到水阀和消防栓的调度需要一定的成本消耗, 文献[2-4]在污染源可辨识的基础上, 建立了水阀和消防栓的多目标优化调度模型, 并利用 NSGA-II 算法求解. 文献[5-7]在污染源不确定的情况下, 利用鲁棒优化方法对水阀和消防进行最优调度, 使得用户受到伤害的程度最低. 文献[8]利用智能体算法求解突发饮用水污染下的应急调度策略.

笔者在前人研究工作的基础上, 建立了一种新的多目标优化模型, 第一个优化目标是 minimized 群众摄入的污染物质质量, 第二个优化目标为 minimized 对消防栓及水阀的操作代价. 区别于前人的工作, 笔者建立调度优化模型更加贴合实际应用. 首先, 在优化模型中, 决策变量不仅包括对哪些水阀和消防栓进行操作, 而且还包括操作的具体时间. 另外, 对水阀和消防栓的操作代价以距离的形式进行了定义, 也即从基站到需要操作的水阀或消防栓距离越远, 则操作代价越大.

1 水阀和消防栓多目标调度优化模型

图 1 显示了当发生污染事件后, 对水阀和消防栓不进行调度和进行调度两种不同情况下污染物扩散情况.

可见, 图(b)中污染物流经的管线(红色粗线路径)远比图(a)中要少, 这说明对水阀和消防栓的调度可以极大地减少污染区域, 降低对用户的危害程度. 一般来说, 通过对水阀操作可以隔离被污染水体, 而对消防栓调度可以将被污染水体排放到管外, 从而更快恢复供水.

第一个优化目标是 minimized 用户摄入的污染物质质量, 如式(1)所示:

min f_1 = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{t_{end}} C_{n,t}(x_h, x_v) Q_{n,t} \Delta t. \tag{1}

s. t. \sum_{h \in H} x_h \leq H_{max}. \tag{2}

\sum_{v \in V} x_v \leq V_{max}. \tag{3}

x_h \in \{0, 1\}, x_v \in \{0, 1\}. \tag{4}

其中, $f_{1a,i,t}(x_v, x_h)$ 表示当污染事件 a 在节点 i 时刻 t 入侵后, 用户摄入的污染物质质量; N 为污染物流经的节点总数; $C_{n,t}$ 表示在节点 n 时刻 t 污染物浓度; $Q_{n,t}$ 表示节点 n 时刻 t 需水量; Δt 表示仿真步长; x_v 和 x_h 为阀门和消防栓控制变量, $x_v = 1$ 表

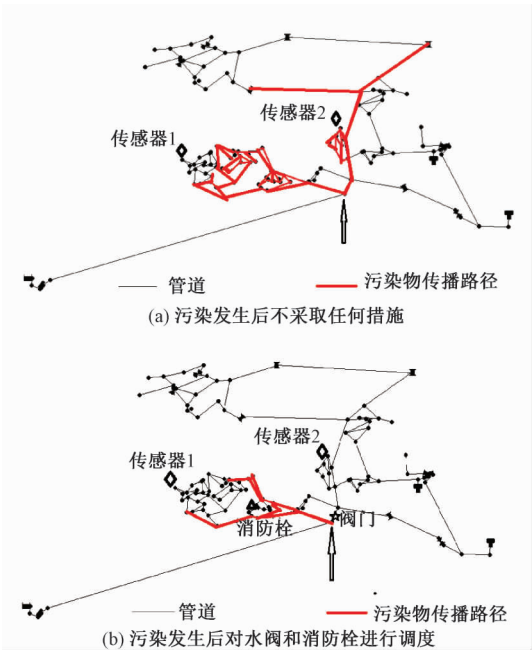


图 1 当污染发生后,有无调度策略对污染物扩散的影响

Fig.1 When contaminant event occurred, closing the valves and opening the hydrants or not will have a great impact on the results

示关闭阀门, $x_h = 1$ 表示打开消防栓; H 、 V 是消防栓和阀门的结合; H_{\max} 、 V_{\max} 为消防栓和阀门的数量约束。

第二个优化目标操作水阀和消防栓所需要的代价,如式(5)所示:

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^p D(\text{valve}_k) + \sum_{j=1}^q D(\text{hydrant}_j). \quad (5)$$

式中: p 、 q 为管网中需要操作的阀门和消防栓的次数; k 为阀门索引; j 为消防栓索引; $D(\text{valve}_k)$ 和 $D(\text{hydrant}_j)$ 分别表示从基站出发到需要操作的阀门 k 或消防栓 j 的距离。

2 基于 NSGA-II 的多目标优化算法

2.1 编码和初始化种群

在算法实现中,种群每个个体由一条染色体组成,每个染色体包括多个基因,每个基因对应水阀或消防栓的状态,比如某个水阀 V 的状态表示为 $(S, T_{\text{begin}}, T_{\text{end}})$. 其中 $S = 1$ 表示打开水阀, $S = 0$ 表示关闭水阀, T_{begin} 和 T_{end} 分别表示对水阀操作的开始时间和结束时间。

比如一个染色体表示为 $\{H_1(1, 4, 10), H_2(1, 7, 10), \dots, H_5(0, T, D), V_1(0, 3, 5), V_2(0, 2, 6), \dots, V_5(0, T, D)\}$, 则表示消防栓 H_1 在 4 h 后打开,持续时间为 6 h 后关闭,消防栓 H_2 于 7 h 后打

开,持续 3 h 后关闭;阀门 V_1 和 V_5 分别在 3 h 和 2 h 后关闭,持续 2 h 和 4 h 后打开。

2.2 交叉和变异算子

为了产生新的种群,我们将旧的种群个体随机两两随机配对作为父代,并采用算数交叉,得到新的子代. 为了避免消防栓或阀门节点重复,则需要进行检查修正,若重复,则采用父代染色体替代. 然后对种群进行变异操作,对每个染色体随机选择某个基因位进行变异操作。

2.3 适应度函数评价

由式(1)可知,要计算消费者摄入的污染物质量,则需要计算污染物在任意节点的污染物浓度,我们利用美国环境保护署开源软件 EPANET 进行水力和水质仿真,获得管网中每个节点的污染物模拟浓度,然后结合每次的消防栓和水阀的状态,计算出式(1). 对于式(5),则根据基站的坐标位置以及需要操作的消防栓和阀门位置可计算出操作距离,以此作为操作代价。

3 实验仿真及分析

3.1 实验仿真和算法参数设置

以美国某城镇一个真实管网为对象,该管网包括 126 个节点和 168 条管道. 如图 2 所示, Δ (索引为 20) 和 \star (索引为 30) 分别代表基站位置和污染源入侵位置. 消防栓打开时水流速度设置为 170 GPM.

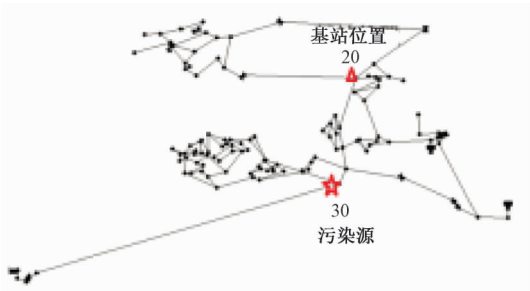


图 2 美国某镇真实配水管网(126 个节点,168 条边)

Fig.2 Water distribution system in one town of USA, (126 nodes and 168 edges)

在 NSGA-II 算法设置中,一个染色体包含 10 个基因,分别对应 5 个阀门和 5 个消防栓,种群大小为 100,迭代次数为 50 次,交叉因子和变异因子分别为 0.9 和 0.02。

3.2 实验结果分析

由于该优化问题的最优 Pareto 前沿未知,但是从图 3 可以看出,随着演化代数的增加,Pareto 前沿逐渐收敛,这说明所建立的模型是有效的。

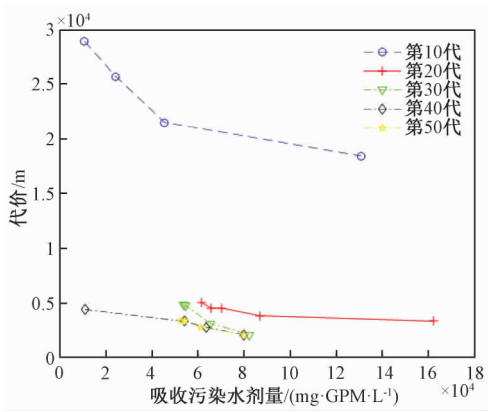


图 3 不同演化代数下 Pareto 前沿

Fig.3 Pareto fronts at different evolution generations

实际上,有诸多因素会影响到 Pareto 前沿,比如污染事件发生的位置、基站位置、消防栓的冲刷速度(即消防栓的水流速度)都会导致 Pareto 前沿发生改变.

3.2.1 消防栓的水流速度对 Pareto 前沿的影响

在该实验中,假定消防栓的排放污水速度为 70GPM、170GPM 和 270GPM.

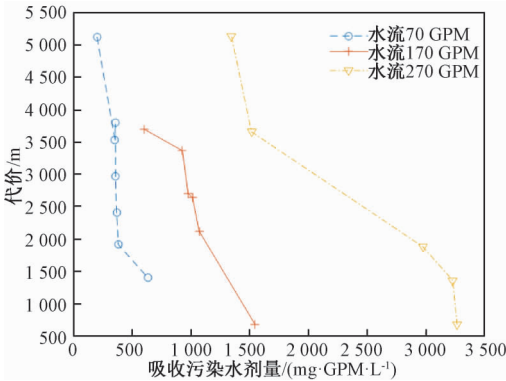


图 4 消防栓车速不同对 Pareto 前沿的影响

Fig.4 Impact on Pareto fronts by different water flow rate of hydrants

由图 4 可看出,消防栓的流速为 270 GPM 时,Pareto 前沿并未收敛. 而消防栓流速为 170 GPM 和 70 GPM 时,Pareto 前沿有交叉,说明这两种情况下 Pareto 解相对较好. 由此可知,冲刷力度大并不一定能得到最优的结果.

3.2.2 基站位置对 Pareto 前沿的影响

当污染源位置已知即为固定时,基站位置到污染源的也会对结果产生影响,在这部分中,实验中分别假定基站位置位于编号为 15、8、20 号节点处,而污染事件发生在 30 号节点处,其中,位于 20 号节点的基站离污染源最近,位于 15 号节点的基站离污染源距离最远.

由图 5 可以看出,基站位置对 Pareto 前沿有

一定的影响,当基站位置不同时,Pareto 前沿都有交叉,这也说明了算法具有一定的鲁棒性.

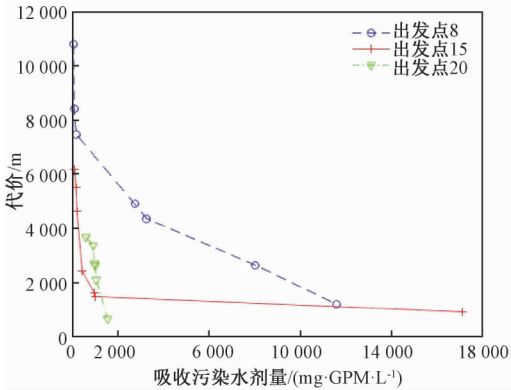


图 5 基站到污染事件的距离不同对 Pareto 前沿影响
Fig.5 Impact on Pareto fronts by the distance from base station to source of contamination

3.2.3 污染源位置对调度的影响

当污染事件发生在不同的节点处,其对管网的污染路径也是不同的,因此,需要进一步分析污染事件发生的位置对 Pareto 前沿产生影响. 在仿真实验中,假定污染事件可能发生在 30 号节点,32 号节点以及 57 号节点.

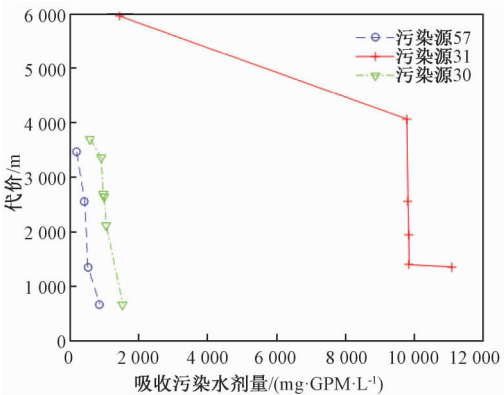


图 6 不同的污染源位置对 Pareto 前沿影响
Fig.6 Impact on Pareto fronts by different location of contaminant source

由图 6 可以看出,当污染源位置为 31 时,Pareto 前沿相对较差;而污染源位置位于 57 时,Pareto 前沿较好. 其原因在于与 31 号节点相连的边有 4 条,与 30 号节点相连的边有 3 条,而与 57 号节点相连的边仅有 2 条,因此,相连的边数越多,则污染物传输分支越多,其分流路径更为复杂,导致了 Pareto 解搜索的难度就相应增加.

4 结论

配水系统的预警与应急反应关系到国计民生,本文首先建立了一个两目标优化模型,然后利用多目标遗传算法 NSGA-II 进行求解,并分析了

污染源位置,消防栓的冲刷速度和基站位置对算法仿真结果的影响.

目前的研究工作都是面向小规模管网,实际上,大多数饮水管网的规模比较巨大,而水质传感器的布置数量相对较少,因此很难通过传感器采集的信息确定污染发生的精确位置,这样,在不确定环境下对水阀和消防栓调度研究是一个挑战性课题,这也是我们未来的研究方向.

参考文献:

- [1] POULIN A, MAIHOT A, GRONDIN P, et al. Optimization of operational response to contamination in water networks[C]//Proceeding of Water Distribution System Analysis Symp. Cincinnati, Ohio: ASCE Press, 2006.
- [2] BARANOWSKI T. M, LEBOEUF E J. Consequence management utilizing optimization[J]. Journal of water resources planning and management, 2008, 134(4): 386-394.
- [3] PREIS A, OSTFELD A. Multiobjective contaminant response modeling for water distribution systems security[J]. Journal of hydroinformatics, 2008, 10(4): 267-274.
- [4] ALFONSO L, JONOSKI A, SOLOMATINE D. Multiobjective optimization of operational responses for contaminant flushing in water distribution networks[J]. Journal of water resources planning and management, 2010, 136(1): 48-58.
- [5] PREIS A, OSTFELD A. Genetic algorithm for contaminant source characterization using imperfect sensors[J]. Civil engineering and environmental systems, 2008, 25(1): 29-39.
- [6] GAVANELLI M, NONATO M, PEANO A, et al. Genetic algorithms for scheduling devices operation in a water distribution system in response to contamination events[C]// Proceedings of 12th Euro Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. Malagaspain: Springer, 2012: 124-135.
- [7] RASEKH A, BRUMBELOW, K. Drinking water distribution systems contamination management to reduce public health impacts and system service interruptions[J]. Environmental modelling & software, 2014, 51: 12-25.
- [8] ZECHMAN E M. Integrating evolution strategies and genetic algorithms with agent-based modeling for flushing a contaminated water distribution system[J]. Journal of hydroinformatics, 2013, 15: 798-812.

Research on Dispatching Algorithm of Valves and Hydrants under Sudden Drinking Water Pollution

ZOU Lu, YAN Xuesong, HU Chengyu

(College of Computer Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, this study mainly focused on how to operate hydrants and valves to reduce the impact and operation cost under sudden drinking pollution. However, the two goals of impact and operation cost were in conflict. Therefore, a two-objective optimization model was proposed, one goal was to minimize the consumed contaminated water, the other is to minimize the operation cost, and then a real water distribution system in a town of USA was employed and Pareto solutions were given by NSGA-II, at the same time, an comprehensive analysis of different factors was conducted. The simulation results showed the effectiveness of the proposed multi-objective optimization model and scheduling algorithm.

Key words: multi-objective optimization; hydrant; valve; contaminant source; water distribution system