

基于污染源反追踪的水质监测点优化选址

刘书明, 吴雪, 欧阳乐岩

(清华大学 环境学院, 北京 100084)

摘要: 采用非支配排序遗传算法, 以水质监测点探测到的不同污染事件的时段区间重叠度最小化和污染事件探测概率最大化为优化目标, 结合案例管网计算监测点优化选址方案. 算例结果与以污染事件探测及时度最大化和探测概率最大化为目标的优化选址方案相比表明, 水质监测点的污染事件探测能力和污染源位置识别能力较高.

关键词: 供水管网系统; 水质; 监测点; 多目标优化; 污染源位置识别

中图分类号: TU991.33

文献标志码: A

Optimal Sensor Placement Based on Contaminant Backtracking in Water Distribution Systems

LIU Shuming, WU Xue, OUYANG Leyan

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II was used to find the Pareto front between minimum overlap of possible detection times of two events and the best probability of detection. This methodology was applied to an example network for optimizing sensor placement in water distribution systems. The solutions obtained were then compared to those optimized by taking into account the probability of detection and time into detection. Results suggest that the proposed method performs better than the benchmark method in detecting a contamination event and identifying its possible source.

Key words: water distribution systems; water quality; monitors; multi-objective optimization; source identification

近年来, 国内发生多起较大规模饮用水污染事件, 对社会、经济以及国民健康造成严重危害, 因此,

通过水质监测点预警并快速准确定位污染源位置具有重要意义^[1].

Kessler 等^[2]以监测点系统能够在给定的服务水平下监测到所有的可能污染情况为目标进行监测点优化选址, 服务水平指的是从污染发生至监测点系统监测到污染物时整个管网对外供出的水量. Kumar 等^[3]以监测点监测到外部污染物所需时间最短为优化目标. Ostfeld 等^[4]在构建随机污染矩阵的基础上利用遗传算法对早期预警监测系统的选址问题进行研究. Berry 等^[5]以暴露在污染风险下的用户人口最少为目标提出了水质监测点优化选址的整数规划模型. 张土乔等^[6]以不同用户节点对外供出的污染水体量为目标函数研究了基于污染物侵入模拟的供水管网水质监测点优化选址方法. 陶涛等^[7]在多目标整数规划方法的基础上提出对管网中部分具有代表性的节点设置权重系数, 增加其被选为监测点的可能性. 2006 年以后众多学者开始关注如何反向追踪污染源位置和污染特征, 如污染开始和结束的时间、污染物的投加模式等. 国内外针对突发污染事件的研究主要集中于监测点的优化选址和污染源位置识别两方面, 尚未考虑以污染源位置识别为目标的水质监测点优化选址.

1 监测点选址方法

1.1 污染事件的模拟

将污染事件简化为单点瞬时投加事件, 并假定每次污染事件发生与污染物投加量、污染事件发生时间和污染物的投加位置有关, 如式(1)所示:

$$e(m, t, w) \in E \quad (1)$$

式中: $e(m, t, w)$ 为模拟发生的一次污染事件; m 为管网中任一个节点, 即污染源的位置; t 为污染事件发生时间; w 为污染物投加量; E 为模拟发生的

收稿日期: 2012-05-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07408002); 清华大学自主科研项目

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模型设计与运行最优化.

E-mail: shumingliu@tsinghua.edu.cn

所有污染事件的集合。

假定管网中任一个节点都可被选作监测点,并在监测点处设置污染事件报警阈值,如果监测值(比如 pH 值)小于报警阈值,警报系统则不发出预警信号,反之将迅速启动警报系统,并报告可能发生污染事件的节点位置。

1.2 污染事件探测时间

定义污染事件探测时间为监测点探测到污染事件发生的时间,由于污染物传播路径的不同,监测点对某一次污染事件的探测时间为一时段,如式(2)所示:

$$T(e, s) \in [T_{\min}(e, s), T_{\max}(e, s)] \quad (2)$$

式中: $T(e, s)$ 为污染事件探测时间, s , 其中 e 为模拟发生的一次污染事件, s 为管网水质监测点; $T_{\min}(e, s)$ 为污染事件探测时间的最小值, s ; $T_{\max}(e, s)$ 为污染事件探测时间的最大值, s 。

如果在模拟时间内污染事件未被探测到,则 $T_{\min}(e, s) = -\infty, T_{\max}(e, s) = \infty$ 。

1.3 监测点优化选址模型

建立管网在线水质监测点选址是多目标优化问题,目标函数为污染事件探测概率最大化和污染源位置识别准确度最大化 2 个优化目标,以非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II) 为优化计算方法求解管网水质监测点选址的多目标优化问题。NSGA-II 是 Deb 等^[8]2002 年提出的多目标优化算法,已被国内外很多学者应用于水质监测点选址研究^[9-10]。

(1) 优化目标 1: 污染事件探测概率最大化。定义污染事件探测概率 F_1 为探测到的模拟污染事件的个数 n 占模拟污染事件的总数 N 的比例,污染事件探测概率区间为 $[0, 1]$, 如式(3)所示:

$$F_1 = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (3)$$

(2) 优化目标 2: 污染源位置识别准确度最大化。一般情况下监测点的传感器能够通过对比不同污染事件的最短探测时间判断污染源的位置,当 2 个污染事件的最短探测时间相同时,监测点的传感器就不能判断污染源的位置。污染源位置识别系数能反映监测点区分 2 次污染事件的污染源位置的能力,如式(4)所示;最优监测点为管网中污染源识别系数最小的监测点,如式(7)所示:

$$v(s, e_1, e_2) = \frac{1}{2} \left(\frac{O}{l_1} + \frac{O}{l_2} \right) \quad (4)$$

$$l_1 = T_{\max}(e_1, s) - T_{\min}(e_1, s) \quad (5)$$

$$l_2 = T_{\max}(e_2, s) - T_{\min}(e_2, s) \quad (6)$$

$$v(S, e_1, e_2) = \min_{s \in S} v(s, e_1, e_2) \quad (7)$$

式中: $v(s, e_1, e_2)$ 为污染源位置识别系数; e_1, e_2 分别为模拟发生的污染事件 1 和 2; O 为探测时段重叠区间长度, $s; l_1, l_2$ 分别为污染事件 1 和 2 的探测时段区间长度, $s; S$ 为管网中所有监测点集合。

如图 1 所示,假定发生污染事件 e_1, e_2 , 监测点 3 的传感器探测到 2 个污染事件的时段区间分别为 $[1, 10]$ 和 $[5, 20]$, 2 个污染事件的探测时段区间部分重叠。

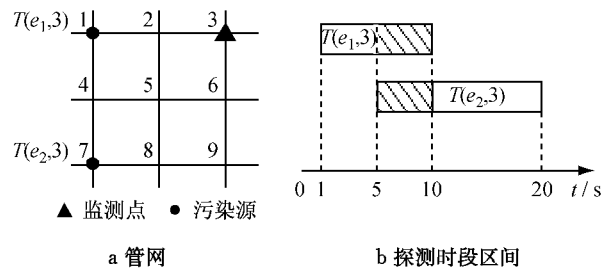


图 1 2 个污染事件的探测时段区间识别

Fig.1 Detection time identification for two incidents

根据式(5)和式(6)计算 $l_1 = 9, l_2 = 15, O = 5$, 根据式(4)计算污染源位置识别系数, 计算结果为 $v(3, e_1, e_2) = \frac{1}{2} \left(\frac{5}{9} + \frac{5}{15} \right) = 0.44$ 。

定义污染源位置识别准确度为管网中所有监测点的污染源位置识别系数总和的负值,污染源位置识别准确度数值越大表示 2 个污染事件的探测时段区间重叠越少、污染源位置识别的准确度越高,如式(8)所示:

$$F_2(S) = - \sum_{e_1 \neq e_2; e_1, e_2 \in E} v(S, e_1, e_2), \quad (8)$$

当 $T(e, s) = \infty$ 时, $F_2(S) = -\infty$ 。

1.4 对比分析

以污染事件探测概率最大化和污染事件探测及时度最大化为优化目标进行对比分析。

定义污染事件探测及时度为污染事件探测时段区间的中值和污染事件发生时间的差值,为了便于优化过程的计算此处取负值,污染事件探测及时度的值越大代表探测污染事件发生的时间越短,如式(9)所示:

$$F'_2(S) = - \sum_{e \in E} \left(\min_{s \in S} \frac{1}{2} (T_{\max}(e, s) + T_{\min}(e, s)) - T_{\text{event}} \right) \quad (9)$$

式中: $F'_2(S)$ 为污染事件探测及时度, $s; T_{\text{event}}$ 为污染事件发生时间, s . 当 $T(e, s) = \infty$ 时, $F'_2(S) = \infty$ 。

2 案例研究

采用 MATLAB 软件对 2 种监测点优化选址模型进行多目标优化计算,并以 EPANET 软件的开发者工具箱(programmer's toolkit)为管网水力和水质模拟工具^[11],选取 EPANET 软件的样例管网 3 为研究案例,监测点位置优化分别考虑布设 3,6 和 12 个监测点的情况.根据对管网流速的初始计算,管网水质模拟时间长度设定为 24 h,以确保污染物能够充分扩散至整个管网,并认为污染事件能发生在前 12 h 中的任何时间节点.监测点优化选址模型主要参数设定为:水力模拟时间步长 3 600 s;水质模拟时间步长 300 s;污染事件探测时间步长 300 s;遗传算法种群数量 100;种群代数 100;污染物投加量 10 g.

3 结果讨论

在图 2 中, N_p 为可能性节点数量,可能性节点

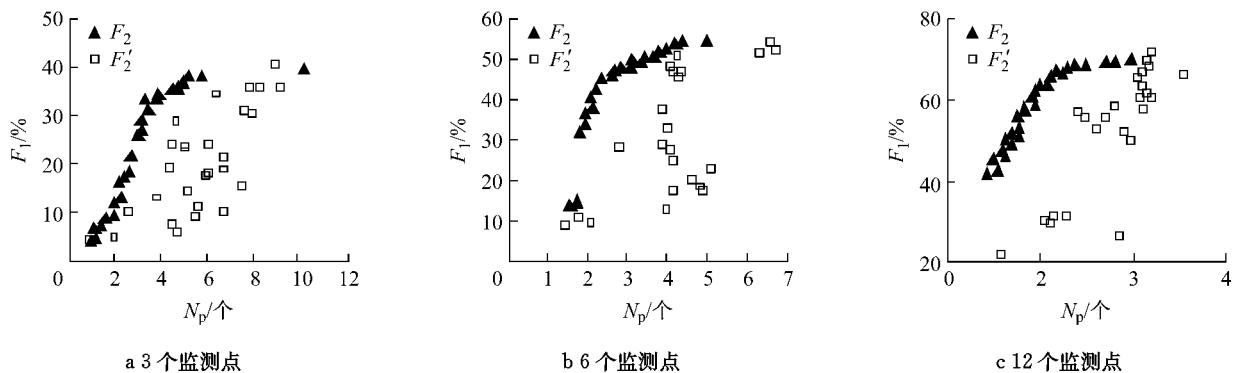


图 2 基于 2 种监测点优化选址模型的可能性节点数量的帕累托前锋对比

Fig.2 The number of possible locations corresponding to the Pareto fronts of the proposed and benchmark method

如图 3 所示,4 种监测点布置方案(每种方案 6 个监测点)中监测点分布由集中逐渐递变到分散.图 4 是帕累托前锋上的监测点布置方案.图 3a 的监测点布置最集中,具有较高的污染源位置识别准确度和较低的污染事件探测概率.图 3d 的监测点布置最松散,具有较低的污染源位置识别准确度和较高的污染事件探测概率.监测点布置越集中,通过相邻监测点间的数据对比,污染源位置识别准确度越高.相反,监测点布置越分散,污染事件探测概率越高,污染源位置识别准确度越低.

如图 4 所示,监测点布置方案 3 和方案 4 可保证污染事件探测概率不低于 50%,同时方案 3 具有较高的污染源位置识别准确度,因此当监测点为 6 个时,方案 3 是最优的监测点布置方案.

为模拟污染事件中污染源的最可能位置,其数量影响污染源位置识别的难易.如图 2 所示,相对于对比方法,当污染事件探测概率相等时,本文方法得到较少的可能性节点数量,有利于污染源位置的识别.当可能性节点数量相等时,本文方法具有较高的污染事件探测概率.这表明以本文方法优化目标确定的水质监测点具有较高的污染事件探测概率和污染源位置识别准确度.由于本文方法以污染源位置识别准确度为优化目标,在优化算法的各子代中只保留具有最小重叠时段区间的种群,这就减少了优化计算的冗余度,同时增加了污染源位置识别的准确度.如图 2 所示,随着监测点数量的增加,得到的可能性节点数量减少,污染事件探测概率增高.对于本研究中的案例管网,如图 2c 所示,选择 12 个监测点,可以实现超过 60% 的污染事件探测概率和不超过 2 个的可能污染源位置.在实际工程中监测点数量的确定通常还需要结合技术经济计算的结果.

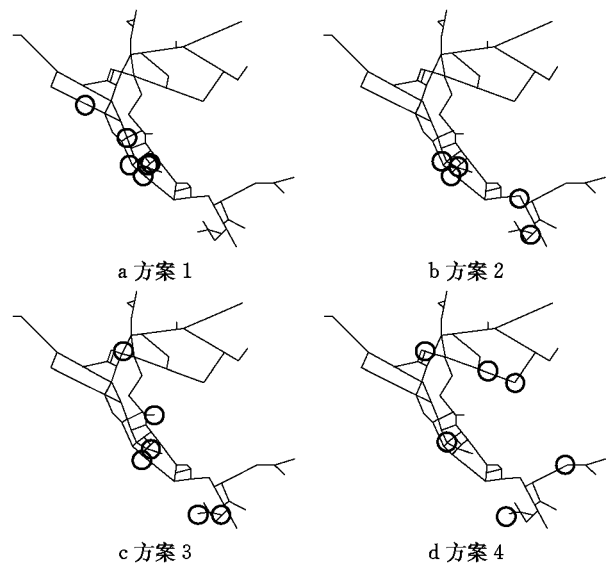


图 3 4 种监测点布置方案

Fig.3 Four optimal sensor placement solutions

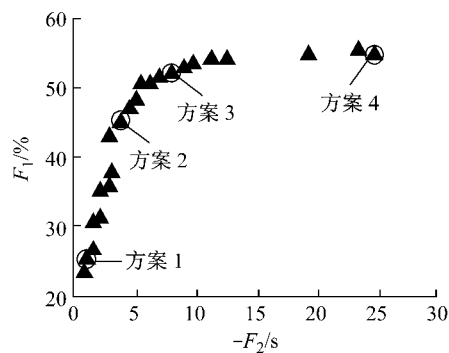


图4 帕累托前锋上的监测点布置方案

Fig.4 The optimal sensor placement solutions on the Pareto front

4 结论

基于污染事件探测时段区间冗余度的水质监测点优化选址方案,与以最短探测时间为优化目标的选址方案相比,污染事件探测能力和污染源位置识别能力较高。

监测点数量最大化有利于污染事件的探测和污染源位置的识别,可通过控制污染源位置识别准确度和污染事件探测概率这2个指标确定一个合适的监测点总数量,但在实际工程中还需要结合工程技术经济计算的结果。

监测点数量固定时,监测点布置集中和分散对污染源位置识别准确度和污染事件探测概率各有利弊。在保证污染事件探测概率不低于50%时,集中的监测点布置方案具有较高的污染源位置识别准确度。

参考文献:

[1] 李红卫,王梦琳,吕谋,等. 给水管网污染源定位模拟及影响因素分析[J]. 浙江大学学报:工学版,2011,45(1):81.
LI Hongwei, WANG Menglin, LÜ Mou, et al. Simulation of contamination source identification in water supply system and analysis of influencing factors [J]. Journal of Zhejiang

University: Engineering Science, 2011, 45(1): 81.

- [2] Kessler A, Ostfeld A, Sinai G. Detecting accidental contamination in municipal water networks [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1998, 124(4): 192.
- [3] Kumar A, Kansal M L, Arora G. Detecting accidental contaminations in municipal water networks [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 125(5): 308.
- [4] Ostfeld A, Salomons E. Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130(5): 377.
- [5] Berry J, William E H, Cynthia A P, et al. Sensor placement in municipal water networks with temporal integer programming models [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(4): 218.
- [6] 张土乔,黄亚东. 基于污染物侵入模拟的供水管网水质监测点优化选址方法[J]. 系统工程理论与实践, 2007(8): 146.
ZHANG Tuqiao, HUANG Yadong. A contaminant intrusion simulation based method for optimizing water quality monitoring stations in water distribution systems [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007(8): 146.
- [7] 陶涛,吕存阵,信昆仑,等. 基于突发污染事件的管网水质监测点优化布置[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(11):1621.
TAO Tao, LV Cunzhen, XIN Kunlun, et al. Optimal layout of monitoring stations for detecting accidental contaminations in water distribution system [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(11): 1621.
- [8] Deb K, Pratao A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182.
- [9] Preis A, Ostfeld A. Multiobjective contaminant sensor network design for water distribution systems [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134(4): 366.
- [10] Weickgenannt M, Kapelan Z, Blokker M, et al. Risk-based sensor placement for contaminant detection in water distribution systems [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, 136(6): 629.
- [11] Rossman L A. The EPANET programmer's toolkit for analysis of water distribution systems [C] // Proceedings of 29th Annual Water Resources Planning and Management Conference. Reston: ASCE, 1999: 1-10.