

基于突发污染事件的管网水质监测点优化布置

陶涛, 吕存阵, 信昆仑, 陆怡

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对城市供水系统中突发的污染事件, 提出了供水管网水质监测点布置方法. 利用混合整数规划模型表达了多目标水质监测点布置, 通过模拟管网发生的水质污染事件, 计算管网发生污染事件时对用户带来的影响值, 利用改进的贪心随机自适应性搜索算法对模型求解, 并结合 ZJ 市管网, 验证了该算法对模型的求解效率, 提出了该市基于突发污染事件的管网水质监测点优化布置方案.

关键词: 供水管网; 水质监测点; 优化布置; 贪心随机自适应搜索算法

中图分类号: TU 991.33

文献标识码: A

Optimal Layout of Monitoring Stations for Detecting Accidental Contaminations in Water Distribution System

TAO Tao, LV Cunzhen, XIN Kunlun, LU Yi

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An approach for optimal layout of monitoring stations was presented to monitor the accidental contaminations in water distribution system. A mixed-integer programming model was used to express the multi-objective monitoring stations placement. Through the simulation of accidental contaminations in water distribution system, the impact of the contaminations was calculated. The improved greedy randomized adaptive search procedure was used to solve the model, and the efficiency of the algorithm was verified by the testing of ZJ water distribution system. Based on an analysis of the results, the optimization locating of the monitoring stations of ZJ water distribution system was presented.

Key words: water distribution system; water quality monitoring station; optimal locating; greedy randomized adaptive search procedure

近年来, 我国出现了多起由于事故或人为引发的管网水质污染事件, 不但对社会造成了重大的经济损失, 甚至严重危及居民的生命安全. 为保障管网供水水质安全, 我国《城市供水 2010 年技术进步发展规划及 2020 年远景目标》中, 明确提出在管网中推广应用水质在线检测设备, 对供水水质进行实时监控.

水质监测点的布置是对管网进行在线监测的前提条件. 根据监测点的布置目的, 可分为常规水质监测和对突发污染事件的水质监测.

常规水质监测点的布置是以管网水力动态模拟或节点水龄计算等为基础, 利用管网拓扑结构的特性, 构造管网中各个节点之间的水质相互关系^[1-3]. 它的主要目的是监测水体在管网传输过程中, 自身以及与管壁发生的物理、化学和生物变化而使管网水质恶化的情况. 通常要求所取的节点要有代表性, 应包括人口集中、用水安全性要求较高、流量较大、水质较差的节点以及管网末梢节点等.

针对突发污染事件的水质监测是以管网水质动态模拟为基础, 通过分析污染物质在管网中的传播规律, 计算管网节点对可能发生的污染事件的监测效率^[4-6]. 它的目的是当管网因意外事故或遭受人为蓄意破坏, 导致污染物质入侵到管网系统中, 对用户的饮用水安全构成威胁时, 通过监测点对管网水质的在线实时监控, 能够在有限的时间范围内监测到污染事件的发生, 尽可能地降低污染事件对用户的影响.

考虑到管网突发水质污染事件可能对用户和社会造成的巨大影响, 在对监测点进行优化布置时, 应以监测突发污染事件为首要目的. 同时为结合对管网水质的常规监测, 本文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.

收稿日期: 2010-03-16

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07421-001); 国家自然科学基金资助项目(50908165)

作者简介: 陶涛(1974—), 女, 副教授, 主要研究方向为城市水资源管理. E-mail: taotao@tongji.edu.cn

1 突发污染事件的监测点优化数学模型

目前国内外研究已经提供了一些针对突发污染事件的监测点优化布置方法,其目标主要是单一地考虑从管网发生污染事件至被监测点探测到所经过的时间、对外供出的被污染水量或被影响的人数.为了表达监测点布置的多目标要求,Berry等^[7]将污染事件产生的影响采用统一的影响值来表示,提出了多目标混合整数规划模型.该模型在针对不同的选址目标时,只需要改变影响值的计算方法,而不需要改变模型本身的结构,适用于多目标选址问题.模型的目标函数如下:

$$\min \sum_{a \in A} \alpha_a \sum_{i \in l_a} d_{ai} x_{ai} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i \in l_a} x_{ai} = 1, \forall a \in A \\ x_{ai} \leq s_i, \forall a \in A, i \in l_a \\ \sum_{i \in L} s_i \leq p \\ s_i \in \{0, 1\}, \forall i \in L \\ 0 \leq x_{ai} \leq 1, \forall a \in A, i \in l_a \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为污染事件集合; α_a 是污染事件 a 发生的概率; d_{ai} 为影响值; l_a 为可能被污染事件 a 污染的节点集合,且 $l_a \subseteq L$; L 为管网节点集合; x_{ai} 是决策变量,若节点 i 在污染场景 a 中发出警报(第一个探测到污染物质节点)则值为1,反之为0; s_i 为二进制决策变量,若在节点 $i \in L$ 设置监测点取1,反之为0; p 为需要布置的监测点个数.

影响值 d_{ai} 是模型求解的关键参数.本文在该模型的基础上,提出针对不同监测目标的影响值计算方法.

1.1 最短探测时间

探测时间的定义是污染事件的发生至第一个监测点探测到污染物质所经过的时间.假设污染事件 a 发生在节点 i ,开始时间为 t_{as} ,结束时间为 t_{af} ,节点 j 在 t_h ($t_h \geq t_{as}$)时刻第一次监测到污染物质的出现,若选择节点 j 为监测点,则该目标的影响值计算如下式:

$$d_{aj}(t) = \sum_{k \in l_a} (t_h - t_{ks}) \lambda_k \quad (3)$$

式中: t_{ks} 为节点 k 第一次出现污染物质的时间; λ_k 为节点 k 的权重系数. λ_k 取值由节点用户的性质决定,如对学校、医院的节点或人口较集中的居住区节

点,可设置较高的权重系数,从而加强对这些节点的监测,以下各个目标的系数设置相同.

1.2 最少受影响的人数

对于特定的某个污染场景,受影响的人数与污染物质的摄取量有关,而污染物质的摄取量又取决于监测点对污染物质的探测时间.通常假设当有任何一个监测点探测到污染物质时,则认为用户不再摄取污染物质;且当节点消耗了具有一定浓度的污染物质的水量时,则认为节点所有用水人群均被影响.在假设的基础上,通过统计节点人口密度信息,计算得到该目标的影响值如下式:

$$d_{aj}(P) = \sum_{k \in l_a} P_k \lambda_k \quad (4)$$

式中, P_k 为节点 k 的人口密度.

1.3 最少被摄取的污染水量

被摄取的污染水量表示管网用户消耗的含有一定浓度污染物质的水量,并假设当第一个监测点探测到污染物质时,用户不再摄取被污染的水.该目标的影响值计算如下式:

$$d_{aj}(V) = \sum_{k \in l_a} Q_k \lambda_k \quad (5)$$

式中: Q_k 为被污染的节点 k 在监测点 j 发现污染物质时,对外供出的污染水量, $Q_k = \sum_{t_{ks}}^{t_h} q_k$,其中 q_k 为节点 k 摄取的污染水量.

1.4 污染事件可探测性

在给定监测点布置集合的情况下,污染事件的可探测性可由下式表示:

$$Z = \frac{1}{S} \sum_{r=1}^S d_r \quad (6)$$

式中: d_r 为二进制变量,当污染事件被探测到时取值为1,否则为0; S 为污染事件个数.

在4个目标中,前3个目标是期望得到最小值;而第4个目标则是期望得到最大值,其值是在给定的监测点布置集合情况下再计算得到,因此该目标主要作为评估监测点布置优劣的标准之一.

2 算法设计

模型的求解分为两个步骤:首先通过调用EPANET Toolkit来模拟管网污染事件,计算不同目标的影响值矩阵;然后再对影响值矩阵求解.当管网的节点较多时,影响值矩阵求解时间会迅速增加,因此需要通过启发式算法对模型求解.

2.1 贪心随机自适应搜索算法

贪心随机自适应搜索算法 (greedy randomized adaptive search procedure, GRASP) 是一种随机自适应简单启发式算法, 以有效的方式智能地构造好的初始解, 适用于求解组合最优化问题^[8]. 算法的迭代过程之间是相互独立的, 每一轮迭代由两个阶段组成: 构造阶段和局部搜索阶段.

在构造阶段, 初始解由贪心随机算法得到, 即从限制候选列表 (restricted candidate list, RCL) 中随机选择一个元素加入当前的部分解. 这种贪心随机化的技术包含了贪心和随机的特点, 使得 GRASP 算法每次迭代都有不同且合适的初始解. 在局部搜索阶段, 则利用局部搜索算法改进构造阶段生成的解, 以获得更好的结果.

2.2 路径重连技术 (Path-relinking)

贪心随机自适应搜索算法运行一定次数后结束, 取目标函数的最小值作为其运行结果. 但由于算法的每次迭代相互独立, 获得的各个局部最优解并没有得到充分利用. 路径重连技术是一种高效的启发式搜索策略, 可用于快速获得指定路径上的最优解, 综合考虑了搜索过程对解的强化和多样化.

2.3 基于 GRASP 和 Path-relinking 技术的算法设计

对于监测点优化选择问题, 其贪心策略是偏向于选择影响值最小的节点, 或者是能使当前组合影响值最小的节点. 贪心策略主要应用于算法的以下 3 个过程中:

(1) 初始解的构造阶段. 本文采用随机贪心策略来构造初始解, 即从备选的监测点列表中随机选择一定数量的节点, 通过比较这些节点的影响值, 选择影响值最小的节点作为初始解.

(2) 局部搜索阶段. 以已选择的初始解为基础, 从 RCL 列表中逐个地进行组合, 选择能使当前组合影响值最小的节点加入初始解, 逐渐地循环这个过程, 直到选择规定数量的节点作为最终的监测点布置集合.

(3) 路径重连阶段. 对每次得到的监测点布置集合之间进行节点交换, 每交换一个节点后, 保留影响值最低的组合作为下一个节点交换的出发集合.

算法的基本过程如下:

输入的参数: 迭代次数 $imax$; 随机选择个数 $xnum$; 监测点布置个数 $jmax$.

GRASP—Path-relinking ($imax, xnum, jmax$);

```
{
    读取影响值矩阵;
    for( $i = 1; i \leq imax; i++$ )
    {
```

```
        for( $x = 1; x \leq xnum$ )
        {
            选择  $xnum$  个互不相同的节点;
            计算得到最优的节点作为初始解;
        }
        从初始解出发, 贪心地构造一个包含  $jmax$ 
        个节点的监测点集合;
        保存集合至精英解集合;
        if ( $i > 1$ )
        {
            从  $i-1$  个精英解集合中随机选择一个解;
            与第  $i$  个集合进行 Path-relinking;
            保留 Path-relinking 产生的影响值最优
            解至精英解集合;
            更新精英解集合;
        }
    }
    计算精英解集合中影响值最优的监测点组合;
    返回最优组合;
}
```

输入的参数中除监测点布置个数外, 其余 2 个参数可通过试算确定.

3 实例分析

ZJ 市建有完善的管网水力模型、管网地理信息系统 (GIS) 和管网数据采集与监控系统 (SCADA), 其中管网水力模型包括管径 300 mm 及以上的管段, 共有节点 1 500 多个. 管网拥有 4 个大型的增压泵站供水区域和多个小型泵站供水点, 为便于计算, 把增压泵站的供水区域简化为一个高流量的用水节点. 简化后, 管网还存在节点 1 057 个, 管段 1 259 根. 简化后的管网拓扑结构如图 1 所示.

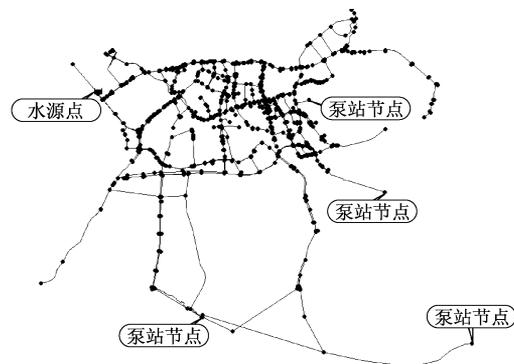


图 1 简化后的 ZJ 市管网拓扑结构图
Fig.1 Simplified pipe network topology diagram of ZJ city

3.1 污染事件模拟和影响值计算

通过管网 GIS 系统对各节点信息统计,将节点分类为普通节点、特殊节点和泵站节点.其中集中供水的泵站节点根据供水量大小设置不同的权重值,特殊节点如学校、医院或人口较为集中的小区等的权重为普通节点的 2 倍.最终得到的部分节点权重系数如表 1 所示.

表 1 部分节点权重
Tab.1 Part of node weight

节点编号	1	2	3	6	...	23	27	36
权重/ 10^{-3}	0.68	1.36	0.68	0.68	...	1.36	0.68	0.68

接着调用 EPANET Toolkit 来实现管网污染事件模拟和影响值计算,并在模拟时作出以下假设:

(1) 管网一次只在一个节点发生污染事件,污染事件可能出现在任何一个节点,且出现的概率相同.

(2) 设定污染物质特性为保守性物,不考虑衰减或增长反应过程.初始时刻所有节点污染物质浓度为 0.污染物质注入时间为早上 9:00,持续 5 h,质量注入速率为 $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$,管网模拟持续时间为 24 h,水力时间步长取 1 h,水质时间步长为 15 min,报告时间也为 15 min.

(3) 监测点能够在线实时监测一定浓度的污染物质.当污染物质质量浓度低于预先设置的阈值 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,则认为监测点没有监测到.

由于管网节点人口密度信息难以统计,在此仅考虑最短探测时间和被摄取污染水量最少 2 个目标.通过影响值计算,最终得到 2 个 $1\ 057 \times 1\ 057$ 的矩阵.

3.2 影响值矩阵求解

在求解影响值矩阵之前,首先确定监测点的布置数目区间.综合考虑 ZJ 市的水质现状和经济效益因素,初步确定监测点的数量为 20—30 个,在此基础上比较监测点数目对管网影响值降低的贡献大小,最终确定应布置的监测点数目.算法的其他 2 个参数,通过试算确定.由于算法中的随机性因素,因此采用多次平行计算的方法,从而得到每个监测点数目下的最优布置方案.

以最短探测时间为例,计算得到的不同监测点数目下各方案的影响值,如表 2 所示.从表中可以看出,随着监测点个数的增加,污染事件对管网的影响值逐渐变小,且当监测点数量为 21 个时,影响值降幅最大,达到了 7.72%.因此认为该目标下设置 21 个监测点时,最具有经济效益.

表 2 最短探测时间目标结果

Tab.2 Result of minimized time of detection target

监测点个数	影响值/h	影响值降幅/%	监测点个数	影响值/h	影响值降幅/%
20	4.12		26	2.97	3.53
21	3.81	7.72	27	2.85	4.05
22	3.67	3.68	28	2.72	4.72
23	3.49	4.68	29	2.57	5.46
24	3.24	7.12	30	2.44	4.79
25	3.08	5.09			

在规定监测点数量为 21 个的基础上,计算得到最少被摄取污染水量目标的监测点布置方案.将该方案与最短探测时间所得到的方案比较,2 个方案中有 9 个监测点是相同的.对所有节点的监测有效性和平均监测时间进行统计,结果如表 3 所示.

表 3 各方案的监测效率分析

Tab.3 Monitoring efficiency analysis of two solutions

监测目标	被有效监测的节点个数	占有所有节点百分比/%	平均监测时间/h	未被有效监测的节点个数	占有所有节点百分比/%
最短探测时间	773	73.13	1.27	284	26.87
最少被摄取污染水量	781	73.89	1.40	276	26.11

通过对比 2 个方案监测点的监测可能性和对有效监测点的平均监测时间,发现 2 个目标的监测点方案在节点的监测效率方面相差较小,但最短监测时间目标在平均监测时间上较少,因此该方案较优.最终得到的监测点布置方案如图 2 所示.从图可以看出,该方案的监测点位置在管网中的分布较为均匀,监测点集合中包括权重较高的泵站节点、管网末

端节点和人口较为密集的用水节点.图中椭圆区域内监测点数目较多,主要原因是由于该地区人口较为密集,管网拓扑结构较为复杂,管道中流速较慢,当某个节点发生污染事件时,监测点需要通过较长的时间才能监测到污染物质,因此对管网的影响值较大,需要布置较多的监测点.同时针对剩余的约 27% 的未被有效监测的节点,应采取人工采样的方

式对水质进行监测.

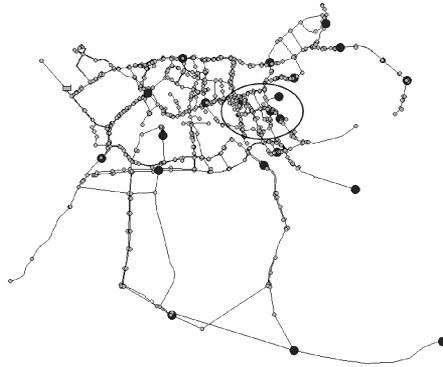


图 2 管网水质监测点分布图

Fig.2 Layout of monitoring stations in water distribution system

4 结论

本文针对供水管网突发水质污染事件,建立了监测点优化布置的多目标混合整数规划模型,在该模型的基础上,提出了最短探测时间、最少受影响的人数、最少被摄取的污染水量和污染事件可探测性为监测目标的影响值计算方法,进一步设计了基于贪心随机自适应搜索算法和路径重连技术的算法.

结合实际工程管网,调用 EPANET Toolkit 模拟污染事件,在仅考虑最短探测时间和被摄取污染水量最少 2 个目标下计算出影响值矩阵,基于改进的贪心随机自适应搜索算法求出了最经济的监测点数目,通过对比 2 个监测目标下监测点方案对管网节点的监测可能性和平均探测时间,最终得到了最优的监测点布置方案.结果表明,对于该市其监测点优化布置在管网中的分布较为均匀,监测点集合中包括权重较高的泵站节点、管网末端节点和人口较为

密集的用水节点.同时针对剩余的约 27% 的节点建议采取人工采样的方式对水质进行监测.该结果合理可信,对于 ZJ 市供水管网水质监测点的布置具有一定的实际指导意义和应用价值.

参考文献:

- [1] Lee B, Deininger R, Clark R. Locating monitoring stations in water distributions[J]. Journal of AWWA, 1991, 83(7): 60.
- [2] Harmant P, Nace A, Kiene L, et al. Optimal supervision of drinking water distribution network[C]// Proceedings of 29th Annual Water Resources Planning and Management Conference, Preparing for the 21st Century, Tempe: ASCE, 1999: 52.
- [3] 许仕荣,周书葵.基于节点水龄的供水管网水质监测点的优化布置[J].南华大学学报,2003,17(3):13.
XU Shirong, ZHOU Shukui. Optimal layout of monitoring stations based on water age in water distribution system[J]. Journal of Nanhua University, 2003, 17(3): 13.
- [4] Kessler A, Ostfeld A, Sinai G. Detecting accidental contaminations in municipal water networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1998: 192.
- [5] 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.
- [6] Berry J, Fleischer L, William E H, et al. Sensor placement in municipal water networks [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2005, 131(3): 237.
- [7] 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.
- [8] 詹青青,朱兴文.基于贪心随机自适应搜索的电路划分改进算法[J].浙江大学学报:工学版,2007,42(10):1679.
ZHAN Qingqing, ZHU Xingwen. Improved GRASP based circuit partitioning algorithm [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 42(10): 1679.