

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.19.008

基于粒子源逆向追踪算法的管网污染源快速定位技术

程伟平¹, 张 邢¹, 龙志宏², 陈冬雷², 朱子朋², 许 刚²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 广州市自来水公司, 广东 广州 510600)

摘 要: 水质安全是供水管理的重中之重。一旦发现管网水质异常,应立即启动相应的污染倒查程序,尽快清理污染源。建立了粒子源逆向追踪算法(PBA),可根据下游水质监控点的水质异常信息进行逆向溯源分析,查找可能的污染源位置。同时根据PBA算法开发了相应的程序,集成到已有的实时水力模型中,并应用到某地市新建管网浊度异常处理过程中,取得了良好的效果。

关键词: 供水管网; 粒子源逆向追踪算法; 污染源定位

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)19-0050-05

Rapid Pollution Source Location Technology in Water Distribution System Based on Particle Back-tracking Algorithm

CHENG Wei-ping¹, ZHANG Xing¹, LONG Zhi-hong², CHEN Dong-lei², ZHU Zi-peng²,
XU Gang²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. Guangzhou Water Supply Company, Guangzhou 510600, China)

Abstract: Water quality safety is a top priority in water supply management. Once abnormality of water quality of the pipe network is found, corresponding pollution checking procedure should be started immediately to clean up the pollution sources as soon as possible. In the present work, a particle back-tracking algorithm (PBA) was proposed. It could be used to back track the path of water according to water quality abnormal information of monitoring points downstream, and help finding the possible pollution source location. Meanwhile, a program was developed based on PBA algorithm, and it was integrated into the existing real-time hydraulic model. The program was applied to deal with an abnormal turbidity event in a real-life water distribution system, in which good performance was achieved.

Key words: water distribution system; particle back-tracking algorithm; pollution source location

近年来,城市供水管网突发性污染事故时有发生,给城市生产、生活带来了较大负面影响。管网发生污染事故时应快速定位污染源,尽快采取措施减小污染范围和受影响人口。污染源定位是管网水中污染物推移过程的逆解问题。Grayman等^[1]利用标

准连续二次规划法来求解小型供水管网的污染事故问题;Laird等^[2]采用非线性规划方法计算管网中各节点的污染浓度,后来用混合整数二次规划方法对污染源追踪问题进行了进一步的求解计算^[3];Guan等^[4-5]在EPANET上利用既约梯度法求解污染源的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578486); 广州市科技计划项目(201604020019)
通信作者: 程伟平 E-mail: chengweiping@zju.edu.cn

位置、污染浓度以及事故发生时间;Preis等^[6-7]采用关系树线性规划法研究管网污染源定位,后又将EPANET和遗传算法等其他算法相结合求解管网污染源定位问题^[8-9];罗富敏等^[10]首先构建模拟-优化数学模型,利用粒子群-蚁群融合算法反演推求管网污染物侵入的地点、时间和速度;王久振^[11]基于粒子群优化算法并结合MATLAB工具编写程序,计算机在水质监测点处模拟污染物浓度和实际监测浓度识别污染源。随着贝叶斯网络理论的发展,该理论被引入并应用于供水管网监测点布置和污染源定位研究中^[12-14]。但上述方法依然存在一些局限性,例如粒子群算法在搜索过程中易产生早熟现象,且易陷入局部最优;粒子群-蚁群融合算法可移植性不高,不易大范围推广;而贝叶斯模型对输入数据的表达形式很敏感,分类决策时会存在错误率。

污染源定位是根据管网水质监测点监测到的水质指标异常值对管网污染事故进行分析,找到污染源的位置、污染浓度、事故发生时间等重要信息,指导管网运行管理工作人员及时采取合理的水质应急处理措施。污染源快速定位在国内外一直是研究热点,实际应用中要求高效、低资料:①分析简洁快捷,能够在极短时间内获得结果,从资料准备到获得有效结果少于30 min;②结果合理有效,在基础资料很少的情况下,结果能够为生产提供有效指导。笔者根据粒子源逆向追踪算法(PBA)^[15],提出了等时匹配法定位污染源,取得了良好的实用效果:①该方法简单实用,满足了在实际应急处理中高效快速的要求,可在生产管理中推广应用;②在实际应用过程中,不需要较高要求的水质监测资料,结果简单,便于理解,方便水司人员使用;③将该方法与实时水力模型结合应用,准确性高,可操作性强。

1 粒子源逆向追踪算法

粒子源逆向追踪算法是一种进行物质来源追踪的方法,其将输出点的浓度描述为输入源强度的线性函数,如式(1)所示。

$$c_0(T_0) = \sum_{j=1}^N \gamma_j c_j (T_0 - t_j) \quad (1)$$

式中: c_0 为输出点浓度; N 为输入输出之间的行程路径数; T_0 为输出时间; c_j 为水质源输入强度; t_j 为行程路径 j 的延时; γ_j 为行程路径 j 的影响系数。水质源输入强度 c_j 和影响系数 γ_j 的单位取决于所使用的源模型。

PBA是一种拉格朗日模型,在逆时间内运行。首先进行延时水力模型的计算,得到链路流量、流速的时间序列。PBA算法以结束时间 T_0 作为反向开始时间,设定粒子点沿着水流反方向回溯,一直到达水源,被追踪的粒子点消失。在整个回溯的过程中,回溯的速度与水流速度相同、流向相反,如果中间发生了化学反应,按照化学反应式计算。以单个管道为例,在逆向追踪计算过程中,记录每根管道下游节点 S 和上游节点 C 的编码,水流速度 v 和管道长度 L ,以及该管道上水质点的运动时间 Δt (见图1)。同时可以计算上游节点对下游节点的影响系数 γ ,量化该管道对下游输出浓度的贡献。

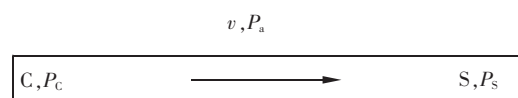


图1 管道逆向追踪标记

Fig. 1 Pipeline back-tracking diagram

计算过程中,对每根管道可以存储3个列表:管道中间活动粒子列表 P_a ,描述从下游往上追溯的粒子; P_c 为已到达上游的粒子列表; P_s 为下游节点列表。单一上下连接的管道则有 $P_s = P_c$ 。每个粒子点给定一个唯一的标识符。对于每个水力时间步长 Δt_h ,逐根计算管道内的粒子点,计算流程如下:

① 给定管道基本水力要素 v 、 L 和标准水质时间步长 Δt_q ,以及当前水质时间步长 t_q 和上一个水力时间 t_h 。

② 计算水质时间步长:如果标准水质时间步长 $\Delta t_q \geq t_q - t_h$,则采用标准水质时间步长,否则取 $\Delta t_q = t_q - t_h$ 。

③ 根据 Δt_q ,分别计算 P_a 、 P_c 、 P_s ,以及每个粒子到达的位置:a.从下游管道节点 P_s 开始更新下游管道到进入管道的粒子 P_a ,同时将粒子从下游粒子中删除,根据粒子点的唯一标识符同步删除管道中的 P_c ;b.根据 P_a 、 P_s 计算到达上游节点的粒子点,将新粒子加入到上游粒子点集合中,并更新 P_a 中粒子点的位置。

④ 更新水质时间步长 $t_q = t_q - \Delta t_q$,如果 $t_q = t_h$,进入下一个时间,否则转到第②步。

当管道分叉时,每一个粒子点对应一根管道分裂成一个粒子点。当存在中间水池时,每个水力时间步长按照停留时间和容积,等效为一根水管进行

计算。本研究以 EPANET 程序为基础编制了逆向追踪程序:首先进行水力计算,并存储水力计算结果,在水力计算结果的基础上,反向时间进行水质点追踪计算。在程序中可以指定某一个被逆向追踪的点,设定持续的污染源,经过逆向追踪计算寻找到源头,这种方法可以相对准确地了解被监控的点,在过去任意时间段水是从哪些地方来的。图2分别显示了某监测点上溯1、2和4h时水的来源。从路径上可以看到,标记点往上溯源在第1个分叉点仅仅是由上游管道供水,在第2个分叉点则是通过两条管道的水汇合而来的;而且从距离上可以发现,不同的路径走的逆向距离也不同。通过逆向溯源算法可以比较精确地了解任意一个节点的水是从哪些路径汇合而来,以及从上游到该节点花费了多长时间。

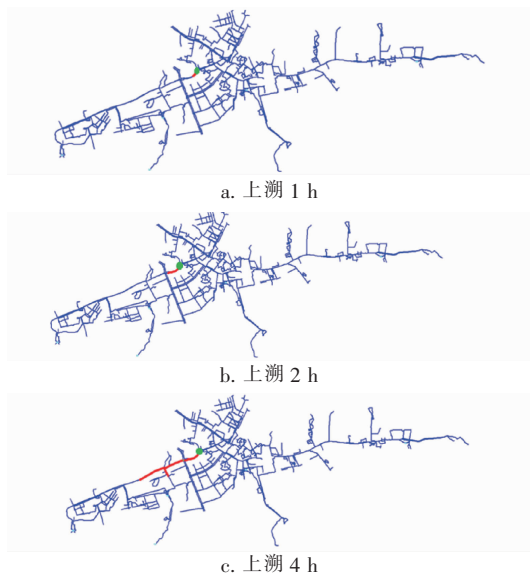


图2 粒子源逆向追踪路径

Fig.2 Paths of particle back-tracking

2 污染逆向溯源的基本原理

如果在管网中存在水质监测点,当发现水质异常时,该水质监测点上游都是可能的污染源。采用逆向追踪算法可以计算向上游追溯不同时间点的水的来源位置。以图3为例,假设有一个污染源在某处释放出污染物,经过 Δt_1 和 Δt_2 到达两个水质监测点 P_1 和 P_2 ,两个监测点可能发现水质异常的时刻不同,分别为 t^1 和 t^2 ,采用逆向追踪算法,不断往上游追溯,可以找到在两个监测点追溯的第1个匹配时间点 t_0^1 以及对应的位置 P_0^1 ,有 $t^1 - \Delta t_1 = t^2 - \Delta t_2 = t_0$,该点是污染源可能的最下游位置。

在匹配时间点的位置沿着管网水流逆向进行追查,可以大大减少现场工作量。如果有多个水质监测点,也可以采用多个水质监测点的数据进行叠加计算,查找等时匹配点,提高准确性。如果监测到异常的监测点大于或等于3个,等时匹配点即为污染点的可能性就非常大。这种方法只需要对有限的几个监测点分别进行一次逆向追踪计算,在应急处理过程中实施非常方便:①在分析过程中,只要根据受污染点就可以初步确定污染源范围;如果有多个污染点反馈信息且反馈时间准确,在等时匹配点就是污染源的最下游端;②目前国内外文献关于污染源的追踪模型,都需要提供比较准确的污染物浓度,但是在实际工作中,很难得到非常精确的污染物浓度,而采用逆向追踪法则不需要这样,只要求污染反馈时间尽可能准确,这为实际应用提供了可能性。即使污染反馈时间有偏差,根据逆向追踪的路径,也可以大大缩小自来水公司进行污染源排查的范围。

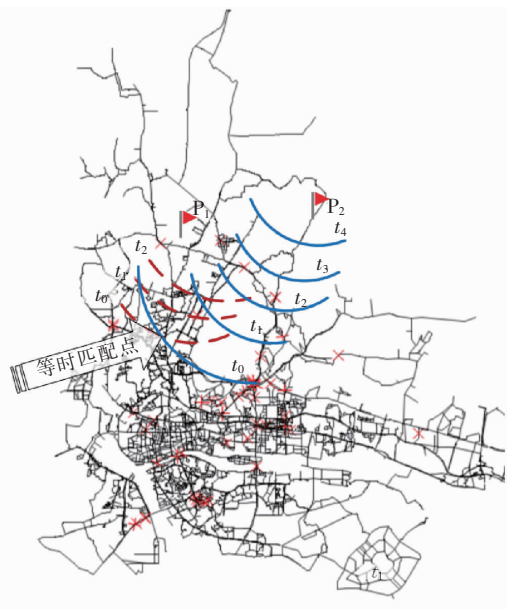


图3 粒子源逆向追踪等时匹配点

Fig.3 Isochronous matching point of particle back-tracking

3 管网粒子源逆向追踪应用实例

某市水厂及配套输水管线经清洗消毒后并网投入使用。管道并网时处于一年中的用水低峰期,经过两个多月运行,水力、水质状态一直保持正常。随着5月—6月用水量快速增加,决定增产至原有供水量的1.5倍以满足下游用户的需求。根据运行调度计划,在上午08:30高峰期增开水泵,提高供水量70%,首次试运行,在中午11:30左右第1水质监

测点出现了浊度增大现象,水质监测点浊度出现轻微上升并超过了1 NTU,短时间达到了2~3 NTU。经初步分析,有可能是因为管道施工过程中残留物经过长期浸泡后,逐步变得松散,再叠加流速短时间大幅度提高,出现松散体脱落导致浊度增大。次日再次提高供水量,08:30增开水泵,第1水质监测点在中午11:30—12:00左右出现了浊度显著上升,第2水质监测点在下午15:00—15:30左右出现浊度上升而不得不减流。

水质安全关系到下游上百万用户,必须在短时间内处理妥善。较好的方法是在污染源下游位置强化水力冲刷。由于管道长达10余千米,中间有多个分水点,关闭哪些分水点、打开哪些排污阀才能达到预期冲洗效果需要制定有效的方案。如果采用现场分段测试水质排查污染源位置,工作量大,会拖后实施的进度。分析人员在收到反馈信息后,当日下午当班时间调取实时水力模型,对第1水质监测点和第2水质监测点进行了逆向追踪计算。根据运行记录,08:30增开水泵,第1水质监测点在中午11:30以后浊度明显上升,逆向追踪时间由中午11:30上溯到上午08:30;第2水质监测点在下午15:30左右浊度明显增大,逆向追踪时间由下午15:30上溯到上午08:30。第2水质监测点是由新建水厂和一个老水厂共同供水,但是两个水质监测点上溯到08:30时,共同来源都出现在图4标记的管道点上,据此可以推断该管道是最有可能的污染源。整个分析过程从收集资料、提取实时水力模型并进行溯源追踪计算不到30 min,并形成了统一的认识。当日深夜避开用水高峰期,调度与现场人员协作对该处管段进行强化冲洗2 h后,全年下游再未出现浊度异常现象,表明对于污染源的位置预测准确,后续采取冲洗措施达到了预期效果。

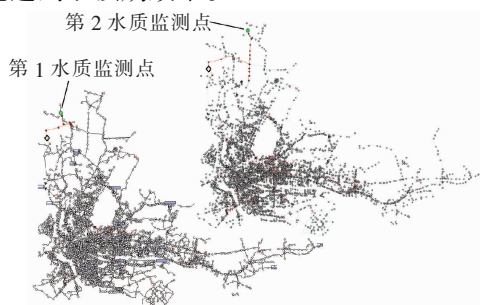


图4 污染源逆向溯源追踪

Fig.4 Pollution source back-tracking

4 结论

应用实时水力模型,建立了基于粒子源逆向追踪的突发污染快速定位分析方法,并将该方法应用到管网实际水质异常问题的处理过程中,经验证效果良好。虽然粒子源逆向追踪算法较为复杂,但在集成到水力模型中后的实际应用过程中,不需要较高要求的水质监测资料,只要输入被追踪的点即可在1 min以内完成一次追踪分析,简单高效,充分满足了应急工作中简便、快捷的需要,成果解释简单,易于理解。管网是一个非常复杂的大反应器,从水源到用户经过了许多管段,一线分析人员能够清晰了解管网中任意水质点的来源,以及过去时刻的位置,也能够为管网中的日常水质分析提供有效支持。

在本研究的实例中,也得到了一点新的启示可供供水司参考:即使新管段经过消毒冲洗后浊度达标,后期水质浊度未必一定达标。管道内部附着一些物质,经过一段时间的浸泡后会逐步变得松散,当流速快速增大后,存在浊度急剧上升的可能性。在用水低峰期接通的新管道,建议在经历第1个用水高峰期前进行二次冲洗,将经过一段时间浸泡后逐步变得松散的物质冲洗干净,冲洗速度建议不低于高峰期流速的1.5倍。

参考文献:

- [1] Grayman W M, Clark R M, Males R M. Modeling distribution system water quality: dynamic approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1988, 114(3): 295-312.
- [2] Laird C D, Biegler L T, van Bloemen Waanders B G, et al. Contamination source determination for water networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2005, 131(2): 125-134.
- [3] Laird C D, Biegler L T, van Bloemen Waanders B G. Mixed-integer approach for obtaining unique solutions in source inversion of water networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(4): 242-251.
- [4] Guan J B, Aral M M, Maslia M L, et al. Identification of contaminant sources in water distribution systems using simulation-optimization method: case study[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(4): 252-262.
- [5] 刘百仓,林璐,林佳琪,等. EPANET 在城市多水源供水管网水力及水质计算中的应用[J]. 给水排水,

- 2010,36(S):416-419.
- Liu Baicang, Lin Lu, Lin Jiaqi, *et al.* Application of EPANET in hydraulic and water quality calculation of urban multi-source water supply network[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 36(S):416-419 (in Chinese).
- [6] Preis A, Ostfeld A. Contamination source identification in water systems: a hybrid model trees-linear programming scheme[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2006, 132(4):263-273.
- [7] 盛希夫. 供水管网污染源追踪方法综述[J]. *中国高新技术企业*, 2010(24):84-87.
- Sheng Xifu. A summary of tracking methods for pollution sources in water supply network [J]. *China High Technology Enterprises*, 2010(24):84-87 (in Chinese).
- [8] Preis A, Ostfeld A. A contamination source identification model for water distribution system security [J]. *Engineering Optimization*, 2007, 39(8):941-951.
- [9] Preis A, Ostfeld A. Genetic algorithm for contaminant source characterization using imperfect sensors[J]. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 2008, 25(1):29-39.
- [10] 罗富敏, 王志红, 李斌, 等. 某城镇供水管网污染源反追踪模型构建及求解过程[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(19):62-66.
- Luo Fumin, Wang Zhihong, Li Bin, *et al.* Construction of a reverse tracing model for pollution sources detection in a water supply network and its solution [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(19):62-66 (in Chinese).
- [11] 王久振. 基于粒子群优化算法的供水管网污染源识别研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.
- Wang Jiuzhen. The Research on Contamination Source Identification in Water Distribution Networks Based on PSO [D]. Changsha: Hunan University, 2013 (in Chinese).
- [12] Dawsey W J, Minsker B, van Blaricum V L. Bayesian belief networks to integrate monitoring evidence of water distribution system contamination[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2006, 132(4):234-241.
- [13] 俞娉婷, 刘振元, 陈学广. 基于贝叶斯网络的一种事故分析模型[J]. *中国安全生产科学技术*, 2006, 2(4):45-50.
- Yu Pingting, Liu Zhenyuan, Chen Xueguang. A Bayesian networks approach to accident analysis[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2006, 2(4):45-50 (in Chinese).
- [14] Joseph S A, Adams B J, McCabe B, *et al.* Methodology for Bayesian belief network development to facilitate compliance with water quality regulations[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2010, 16(1):58-65.
- [15] Shang F, Uber J G, Polycarpou M M. A particle backtracking algorithm for water distribution systems analysis [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2002, 128(5):441-450.



作者简介:程伟平(1975-),男,湖南醴陵人,博士,副教授,主要研究方向为供排水管网优化。

E-mail:chengweiping@zju.edu.cn

收稿日期:2020-04-12