

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.09.008

基于耦合统计及模型驱动的供水管网爆管定位

卢 慢, 杜 坤, 宋志刚, 周 明, 董云程, 黄乐烽
(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 随着数据监测成本的不断下降、管网模型的普遍应用,基于数据与模型的爆管检测及定位技术受到广泛关注,但背景噪音往往导致上述方法无法准确定位爆管。针对该问题,提出基于耦合统计及模型驱动的供水管网爆管定位方法。首先利用加权最小二乘法计算延时状态下供水管网中各节点的爆管残差,然后采用耦合统计算法对爆管残差信号进行卡尔曼滤波与累积和运算进而定位爆管。采用简化管网阐明了耦合统计算法的基本原理与计算步骤,进一步利用某园区小型管网验证该算法的可行性。结果表明,该方法能从背景噪音中识别并放大爆管信号、降低爆管定位误报率,并能同时预警与定位爆管。

关键词: 供水管网; 爆管定位; 背景噪音; 模型驱动; 耦合统计

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)09-0046-05

Burst Location of Water Supply Pipe Network Based on Coupling Statistics and Model Driven

LU Man, DU Kun, SONG Zhi-gang, ZHOU Ming, DONG Yun-cheng,
HUANG Le-feng

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, China)

Abstract: With the continuous decrease of data monitoring cost and wide application of pipe network model, the detection and location technology of pipe burst based on data and model has been widely concerned. However, background noise often leads to the failure of the above methods to accurately locate the pipe burst. In order to solve this problem, a burst pipe location method of water supply pipe network based on coupling statistics and model driven was proposed. Firstly, the burst pipe residual of water supply pipe network under delay state was calculated by using weighted least square method, and then the coupling statistical algorithm was used to carry out Kalman filtering and cumulative sum operation on the residual signal of the pipe burst to locate the pipe burst sites. The basic principle and calculation steps of the coupling statistical algorithm were illustrated by using the simplified pipe network, and the feasibility of the algorithm was further verified by using a pipe network in a park. The proposed method could identify and amplify the burst signal from the background noise, reduce the false alarm rate of the burst location, and simultaneously warn and locate the burst sites.

Key words: water supply pipe network; burst location; background noise; model driven;

基金项目: 云南省重点领域科技计划项目(202003AC100001); 国家自然科学基金资助项目(51608242)
通信作者: 杜坤 E-mail: dukun_cq@foxmail.com

coupling statistic

1 研究背景

随着我国城市供水管网逐渐老化,爆管事故频发。当爆管发生在夜间或隐蔽处无法及时检修时,会导致大量优质水资源浪费,甚至可能引起供水管网二次污染、路面塌陷并阻断交通。因此,实时监测管网爆管、迅速定位爆管点对维护供水管网的安全运行具有重要意义。

信昆仑等^[1]指出供水管网水力模型可为管网的科学调度、规划与优化设计提供依据,同时也是供水管网爆管定位智能化管理的核心。针对基于模型的管网爆管定位问题,国内外学者开展了广泛研究。Pérez 等^[2]指出模型驱动法是利用管网水力模型、流量/压力传感器进行爆管定位,通过比较管网中压力监测值与模型估计值判断爆管位置。Wu 等^[3]提出一种基于遗传算法优化的爆管定位方法,并指出爆管定位效果取决于监测数据的准确性及模型的精确度。杜坤^[4]提出了基于加权最小二乘回归的爆管定位法,并指出在不存在监测误差的情况下,该方法可准确定位管网爆管点,但当存在监测误差时只能缩小爆管点范围。Kazeem 等^[5]将爆管模型引入供水管网水力模型中进行爆管定位,该方法不能精准定位爆管。

综上,基于模型驱动的爆管定位方法能降低爆管定位的不确定性。然而,由于监测误差及用水量随机波动形成的背景噪音对爆管定位的影响,上述方法均不能准确定位爆管。考虑背景噪音对爆管定位的影响,本研究提出基于耦合统计及模型驱动的供水管网爆管定位方法。该方法结合爆管预警与爆管定位,实时计算延时状态下供水管网的爆管信号,一旦检测爆管就能迅速定位爆管点。该方法从背景噪音中识别并放大爆管信号,提高了爆管定位成功率,降低了非爆管时段误报率。

2 基于模型驱动的爆管定位

模型驱动法的本质是分析爆管引起压力、流量等管网参数的变化,通过比较参数监测值与模型预测值进行爆管定位。考虑监测误差及用水量随机波动形成的背景噪音对爆管定位的影响,本研究对模型驱动法做出改进,提出基于耦合统计及模型驱动的供水管网爆管定位方法,该方法的流程如图 1 所示。

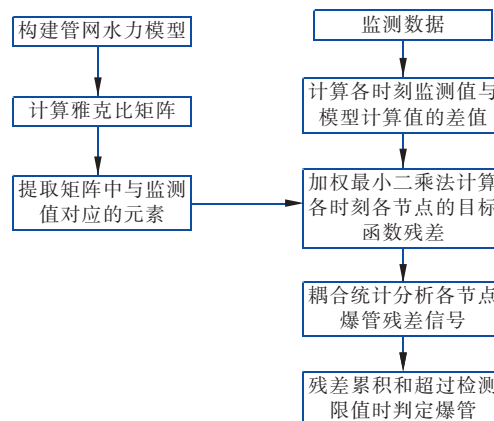


图 1 基于耦合统计及模型驱动的爆管定位流程

Fig. 1 Flow chart of burst location based on coupling statistics and model driven

爆管残差计算:利用加权最小二乘回归法计算延时状态下供水管网的各节点残差。由加权最小二乘回归法计算的爆管流量为:

$$\Delta Q^n = \left(\begin{bmatrix} J_H(Q_0) \\ J_q(Q_0) \end{bmatrix}^T w \begin{bmatrix} J_H(Q_0) \\ J_q(Q_0) \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} J_H(Q_0) \\ J_q(Q_0) \end{bmatrix}^T w \begin{bmatrix} \Delta H_0 \\ \Delta q_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $J_H(Q_0)$ 为节点水压对节点流量的梯度向量; $J_q(Q_0)$ 为管道流量对节点流量的梯度向量; w 为权重矩阵; ΔH_0 为节点水压监测值变化量; Δq_0 为管道流量监测值变化量。

爆管残差为:

$$\begin{bmatrix} \Delta H_r \\ \Delta q_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta H_0 \\ \Delta q_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta H_0 \\ \Delta q_0 \end{bmatrix} - \Delta Q_n \begin{bmatrix} J_H(Q_0) \\ J_q(Q_0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ΔH 为节点水压模型计算变化量; Δq 为管道流量模型计算变化量; n 为节点数。

3 基于耦合统计算法的爆管定位

本研究采用耦合统计算法分析爆管信号,具体地,利用卡尔曼滤波从背景噪音中识别爆管残差信号,随后对爆管残差进行累积和运算。当残差累积和最小值超过检测限值时,判定爆管且残差累积和最小值对应的节点是爆管点。

3.1 爆管信号识别

利用卡尔曼滤波法从背景噪音中识别供水管网中各节点的爆管残差信号,计算步骤如下:

① 根据 $k-1$ 时刻的最优估计值预测 k 时刻估计值:

$$x_{k/k-1} = x_{k-1} \quad (3)$$

式中: $x_{k/k-1}$ 为 k 时刻的预测值; x_{k-1} 为 $k-1$ 时刻的最优估计值。

② 计算 k 时刻预测值的方差:

$$P_{k/k-1} = P_{k-1} + q_{k-1} \quad (4)$$

式中: P_{k-1} 为 $k-1$ 时刻的方差; q_{k-1} 为 $k-1$ 状态过程噪音方差。

③ 计算 k 时刻的卡尔曼增益方程:

$$g_k = \frac{P_{k/k-1}}{P_{k/k-1} + r_k} \quad (5)$$

式中: g_k 为 k 时刻的卡尔曼增益方程; r_k 为节点在 k 时刻残差值 z_k 的方差。

④ 利用加权平均法来计算 k 时刻的最优估计值:

$$x_k = x_{k-1} + g_k \cdot s_k \quad (6)$$

$$s_k = z_k - x_{k-1} \quad (7)$$

式中: s_k 为 k 时刻残差计算值与预测估计值的差, 称为新息序列。

⑤ 更新 k 时刻的方差:

$$P_k = (1 - g_k) P_{k/k-1} \quad (8)$$

⑥ 计算新息标准差序列 c_k 和方差 r_k :

$$c_k = \frac{1}{M} \sum_{i=k-M+1}^k s_i^2 \quad (9)$$

式中: M 为滚动时域窗口, 本研究取 $M=5$ 。

$$r_k = c_k + P_{k/k-1} \quad (10)$$

⑦ 重复步骤①至步骤⑥对 $k+1$ 时刻的残差进行滤波, 计算 $k+1$ 时刻最优估计值。

对各节点的爆管残差进行卡尔曼滤波, 得到各节点对应的连续最优估计值(滤波残差值)。

3.2 残差累积和运算

采用累积和算法处理节点的爆管残差, 选取累积和阈值为 0.5 倍标准差、检测限值为 0.1 倍节点流量。累积和算法的单侧累积量:

$$C_i^+ = \max \{0, x_i - (\mu_i + K) + C_{i-1}^+\} \quad (11)$$

式中: C_i^+ 为上单侧累积量, $i=1, 2, 3, \dots$; x_i 为滤波残差值; $\mu_i=0$; K 为累积和阈值, 取 $K=0.5\sigma$ 。

爆管检测限值为 $0.1Q$, 即当 $C_i^+ \geq 0.1Q$ 时判定为爆管。

4 案例分析

本研究将基于耦合统计及模型驱动的爆管定位

方法与传统的模型驱动法应用于相同爆管信号定位, 通过对比定位结果论证该方法的可行性。

4.1 案例 1

采用的小型管网示意图 2, 管网中各管道长度均为 500 m, 管径为 200 mm, 爆管点为节点 2。采用 EPANET 软件对正常与爆管状态下管网进行水力状态仿真, 监测值为节点 1 的节点水压和水泵流量, 采样频率为 1 次/h, $T=0$ h 发生爆管。

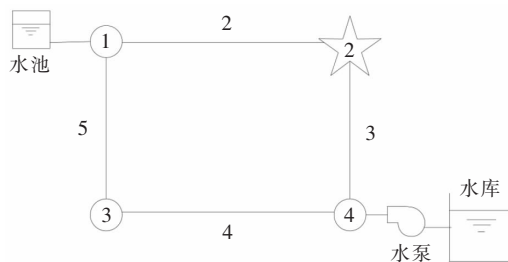


图2 案例1管网示意

Fig. 2 Schematic diagram of pipe network in case 1

根据各时刻监测值变化量与梯度向量, 利用加权最小二乘回归法计算各节点的目标函数残差, 例如 $T=1$ h 时对节点 1 有:

$$\begin{bmatrix} J_H(Q_0) \\ J_q(Q_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.165 & 4 \\ 0.250 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \Delta H_0 \\ \Delta q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.200 & 6 \\ 0.346 & 5 \end{bmatrix}, \text{权重矩阵 } w = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-2}.$$

则由式(1)、(2)可得, $T=1$ h 时节点 1 的爆管流量为 1.216 5 L/s, 爆管残差为:

$$\begin{bmatrix} \Delta H_r \\ \Delta q_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta H_0 \\ \Delta q_0 \end{bmatrix} - \Delta Q_1 \begin{bmatrix} J_H(Q_0) \\ J_q(Q_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000 & 6 \\ 0.042 & 3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

节点水压残差与流量残差无量纲化后绝对值之和为爆管残差, 即 $T=1$ h 时节点 1 的残差为 0.048 7。

利用模型驱动法计算的各节点爆管残差值见图 3。可见, 由于背景噪音的影响, 在多个时刻残差最小值对应的节点(红色柱子对应的节点)并不是真实爆管点。在爆管时间内的 11 次定位中存在 8 次误报, 误报率为 72%。

利用耦合统计算法的各节点残差累积和见图 4, 各节点的爆管检测限值见表 1。由图 4 可知, $T=5$ h 后, 红色柱子对应节点 2 的残差累积和为最小值。 $T=8$ h 时, 节点 2 的残差累积和为 2.347 4, 超过了对应的检测限值 1.936 8, 判定节点 2 发生爆管, 此后爆管检出结果均为节点 2, 这与实际情况一

致。从爆管发生($T=0$ h)到检出($T=8$ h)时,各节点的爆管信号通过耦合统计分析后被放大 9 倍。

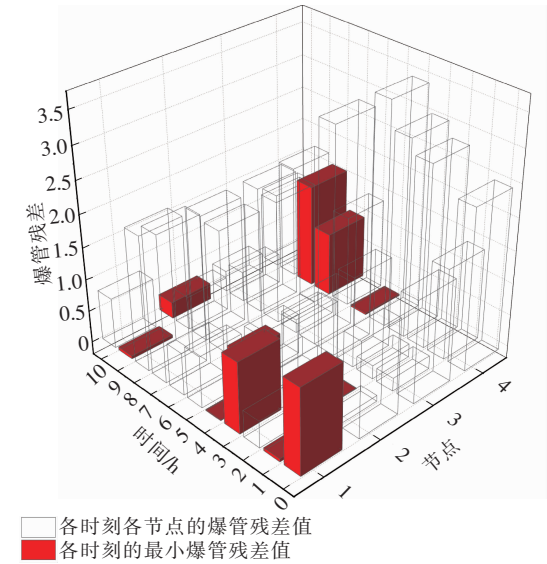


图 3 案例 1 爆管残差值

Fig. 3 Case 1 residual value of pipe bursting

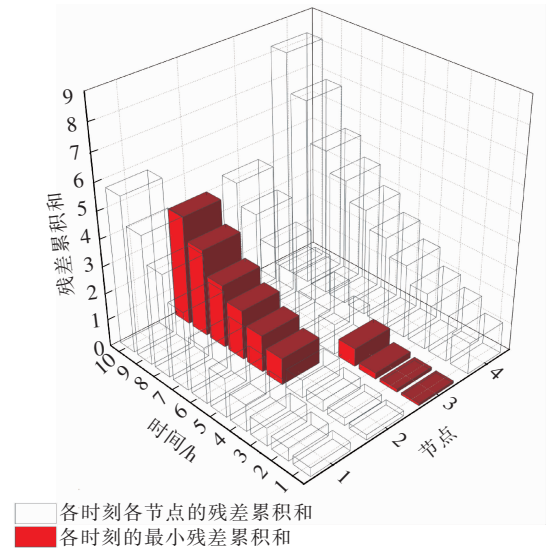


图 4 案例 1 残差累积和

Fig. 4 Case 1 residual cumulative sum

表 1 案例 1 节点的爆管检测限值

Tab. 1 Case 1 burst detection limit of node

节点	1	2	3	4
爆管检测限值	1.936 8	1.936 8	1.452 6	2.905 2

4.2 案例 2

案例 2 管网如图 5 所示,节点 4 为爆管点,采用 WaterGEMS 软件设置节点射流系数 K ,取 $K=0.4$,对正常与爆管状态下的管网进行水力状态仿真,将水泵出口水压(节点 1、2、14)与节点 11、20 的节点

水压作为监测值,采样频率为 1 次/15 min, $T=4$ h 时发生爆管。

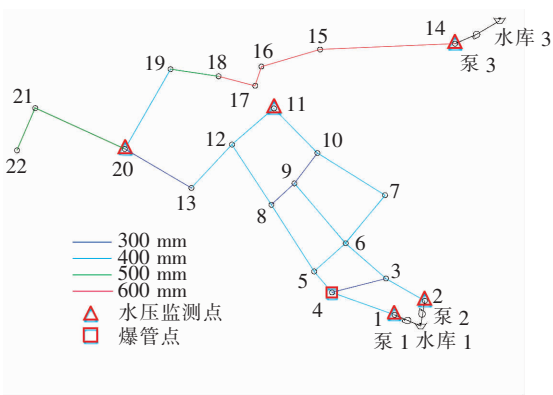


图 5 案例 2 管网示意

Fig. 5 Schematic diagram of pipe network in case 2

为评估背景噪音对爆管定位结果的影响,添加服从标准差为 0.1 m 的正态分布随机误差至监测值(约为 10% 的监测值误差)。利用一次二阶矩法计算所有节点残差的误差方差,分析误差带来的定位不确定性。计算结果如图 6 所示,各节点残差方差约为平均值的 0.5 倍,这表明在噪音干扰下,残差波动较大,无法精确定位爆管。

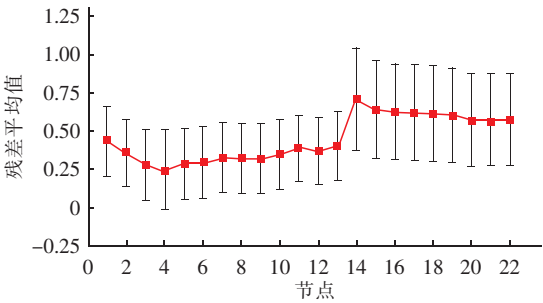


图 6 节点残差的误差方差

Fig. 6 Error variance of node residuals

利用传统模型驱动法计算的爆管残差值如图 7 所示。由图 7 可知,由于背景噪音的影响,该方法的爆管定位结果不准确,而且误报率高。在爆管时间 4.5 h 内的 19 次定位中存在 9 次误报,误报率达到了 47%。

利用耦合统计法计算的残差累积和见图 8。由图 8 可知, $T=4.75$ h 后,节点 4 的残差值持续为最小。 $T=4.75$ h 时,节点 4 的残差累积和为 1.467 2,超过了节点 4 检测限值 1.389 4,判定节点 4 发生爆管,此后爆管检出位置持续为节点 4。从爆管发生($T=4$ h)到检出($T=4.75$ h)时,各节点的爆管信号通过耦合统计分析后被放大 4 倍。

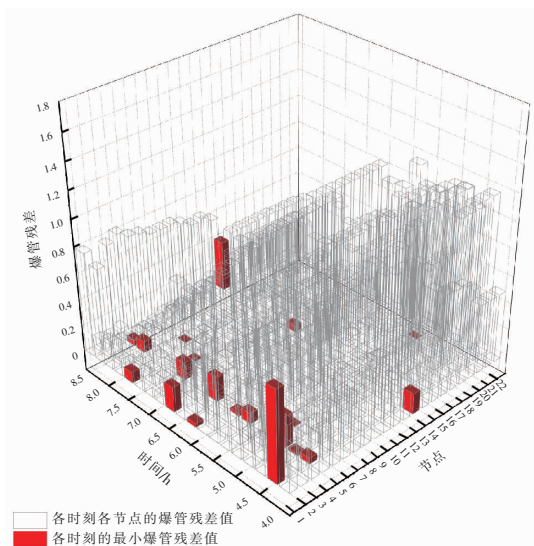


图7 案例2 爆管残差值

Fig. 7 Case 2 residual value of pipe bursting

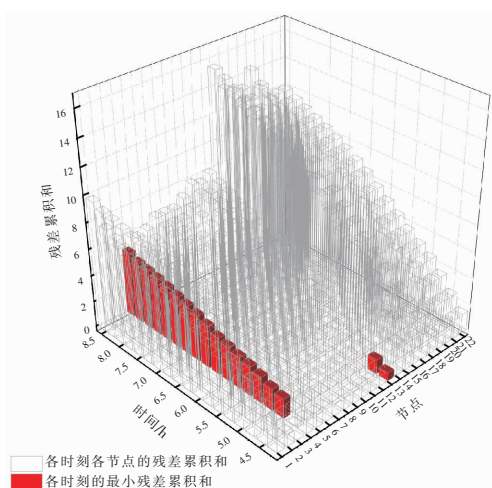


图8 案例2 残差累积和

Fig. 8 Case 2 residual cumulative sum

5 结论

考虑监测误差及用水量随机波动形成的背景噪音会影响定位效果,提出基于耦合统计及模型驱动的供水管网爆管定位方法。首先利用加权最小二乘回归法计算延时状态下供水管网中各节点残差,再采用耦合统计算法分析爆管信号进行爆管定位。

利用两个管网水力模型对该方法进行论证,得出结论如下:

① 耦合统计法结合爆管预警与爆管定位,一旦检测爆管就能迅速定位爆管点。然而,传统模型驱动法通过检测管网入口流量,当流量波动超过正常波动范围时判定爆管,随后计算各节点残差进行

爆管定位。案例2 结果分析表明,管网爆管发生0.75 h后判定爆管,同时确定节点4 为爆管点且后续检出结果稳定。

② 耦合统计法从背景噪音中识别并放大爆管信号,降低了爆管定位误报率。案例1、2 结果表明,存在背景噪音时传统模型驱动法误报率高,两个案例中误报率分别为72%、47%。然而,本研究所提出方法在两个案例中均成功定位爆管点,在爆管发生到检出时间内,通过耦合统计分析后各节点的爆管信号强度分别被放大9、4 倍。

此外,值得说明的是,本研究采用的管网规模较小,干扰因素较少,而该方法在实际复杂管网中的应用还有待进一步验证。

参考文献:

- [1] 信昆仑,刘遂庆. 城市给水管网水力模型准确度的影响因素[J]. 中国给水排水,2003,19(4):52-55.
XIN Kunlun, LIU Suiqing. Factors affecting the accuracy of hydraulic model for urban water distribution network [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(4): 52-55 (in Chinese).
- [2] PÉREZ R, PUIG V, PASCUAL J, *et al.* Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks [J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(10): 1157-1167.
- [3] WU Z Y, SAGE P. Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration [C] // ASCE. Proc ASCE Water Distribution Systems Analysis. Ohio: ASCE, 2006. DOI:10.1061/40941(247)180.
- [4] 杜坤. 供水管网水力模型校核与漏损定位研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
DU Kun. Study of Hydraulic Model Calibration and Leakage Location of Water Distribution System [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014 (in Chinese).
- [5] KAZEEM B A, YSKANDAR H, BOLANLE T A, *et al.* Leakage detection and estimation algorithm for loss reduction in water piping networks [J]. Water, 2017. DOI:10.3390/w9100773.

作者简介:卢慢(1997-),女,贵州毕节人,硕士研究生,主要研究方向为供水管网爆管定位。

E-mail:2845125655@qq.com

收稿日期:2020-01-18

修回日期:2020-07-02

(编辑:孔红春)