

基于改进卡尔曼滤波的供水管网爆管检测研究

马琪然, 杜坤, 周明, 宋志刚, 李贤胜, 冯燕, 孙建华
(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 根据 SCADA 系统监测的流量及压力信号检测爆管时, 监测误差及用水量随机波动形成的背景噪音会掩盖较小爆管信号。利用卡尔曼滤波能有效从背景噪音中识别爆管信号, 但存在爆管检测精度偏低、误报率较高的缺点。改进了传统卡尔曼滤波法, 对卡尔曼滤波残差进行累积和运算, 选取 0.5 倍标准差为累积和阈值, 3 倍标准差为检测阈值进行爆管检测。应用数值仿真验证算法, 结果表明: 普通卡尔曼滤波检测信号不稳定, 爆管检出信号断断续续且持续时长小于实际爆管时长, 非爆管时段出现 11 次误报; 改进卡尔曼滤波法检测信号稳定, 爆管检测信号持续时间大于实际爆管发生时间, 非爆管时段仅出现 1 次误报。相较于普通卡尔曼滤波法, 改进卡尔曼滤波法将非爆管时段理论误报率由 16% 降至 2.8%, 同时放大了爆管信号强度、持续时间, 提高了爆管时段爆管检出成功率。

关键词: 供水管网; 爆管检测; 改进卡尔曼滤波; 背景噪音

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0069-05

An Improved Kalman Filter Method for Burst Detection in Water Supply Network

MA Qi-ran, DU Kun, ZHOU Ming, SONG Zhi-gang, LI Xian-sheng,
FENG Yan, SUN Jian-hua

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

Abstract: In the detection of the burst in water supply network, when using flow and pressure signals from SCADA system, the burst signal can be masked by background noises such as monitoring errors and fluctuations of water consumptions. Studies have shown that the Kalman filter method is effective in identifying the burst signal from background noises, but has limitations of low detection accuracy and high false alarm rates. The traditional Kalman filter method was improved, in which the cumulative sum method was applied to Kalman filter residuals, half-time standard deviation was used as the cumulative threshold, and three-time standard deviation was used as the threshold for burst detection. Numerical simulations were used to demonstrate the proposed method. Results indicated large instability in the detection signal of ordinary Kalman filter. The ordinary Kalman filter showed intermittent detection signal and its duration was shorter than the actual duration of the burst; additionally, there were eleven false detections during the non-burst period. The improved Kalman filter showed stable detection signal

and its duration was longer than the actual duration of burst. There was only one false detection during the non-burst period. In conclusion, compared with the ordinary Kalman filter method, the improved Kalman filter method reduced the theoretical false detection rate from 16% to 2.8% during non-burst period, and amplified the intensity and duration of the burst signal, which increased the success rate of burst detection during the burst period.

Key words: water supply network; burst detection; improved Kalman filter method; background noise

随着越来越多的供水管网安装 SCADA 系统,基于 SCADA 系统流量与压力监测值的爆管检测受到越来越多的关注。相较于其他爆管检测方法,例如:听音相关仪、气体探漏法、红外成像法,基于 SCADA 信号的爆管检测主要优点包括:对爆管反应迅速,理论上能实时在线检测爆管;能自动检测爆管,无需额外设备及员工培训,节省人力、物力。

爆管会导致流量监测值异常增大、压力监测值异常减小,这是根据 SCADA 信号检测爆管的理论基础。然而,由于用水量本身波动及监测值随机误差,爆管信号往往被上述背景噪音掩盖,如何有效检测爆管是具有挑战的课题^[1-7]。Mounce、Aksela 等将爆管检测转化为分类问题,首先采用正常与爆管历史数据训练神经网络(ANN),然后利用训练好的 ANN 模型对当前监测信号分类,进而实现爆管信号检测;Mounce 等还研究了基于支持向量机(SVM)的爆管检测,其利用历史流量或压力数据训练 SVM 预测模型,当流量或压力实测值与预测值的差超过限值时判定爆管;Romano 等提出基于神经网络、数据统计及贝叶斯推断系统耦合的爆管检测法,其应用神经网络对压力、流量监测值进行短期预测,然后采用数据统计及贝叶斯推断系统实现爆管检测。

虽然上述方法成功用于一些 DMA 管网爆管检测,但 Ye 等^[8-9]指出,ANN 或 SVM 模型训练至少需要 3 个月的数据,且以后每个月需要更新模型,计算量巨大。为此,Ye 等提出利用卡尔曼滤波检测爆管,相较于 ANN 或 SVM 模型,该方法具有计算效率高、检测速度快、不需要大量训练数据的优点。然而,Ye 等提出的卡尔曼滤波法存在爆管检测精度偏低、误报率较高的缺点(误报率约为 16%)。Ye 等建议可采用其他方法处理卡尔曼滤波残差,以提高爆管检测精度。鉴于此,笔者对传统卡尔曼滤波法进行改进,考虑埋地管道爆管通常会持续一段时间,通过对卡尔曼滤波残差进行累积和运算,使爆管信

号强度叠加放大、爆管信号持续时间延长,进而提高爆管检测成功率。此外,通过设置较大累积和阈值及爆管阈值来降低非爆管时段误报率,并采用数值仿真案例验证所提出的算法。

1 卡尔曼滤波计算步骤

卡尔曼滤波是线性随机动态系统的最优递推数据处理算法,其广泛应用于实时在线监测数据的噪音剔除。供水管网爆管会导致流量监测信号异常增大、压力监测信号异常减小。理论上,通过识别监测信号的异常变化能实现爆管检测。然而,监测误差与用水量随机波动导致的噪音会掩盖爆管信号。卡尔曼滤波能剔除监测数据中的噪音,使爆管信号更易于识别,这是卡尔曼滤波能用于爆管检测的理论依据。卡尔曼滤波的基本原理是根据上一状态估计值与当前状态测量值,采用加权平均法计算当前状态值,实现状态量的最优无偏估计。对稳定变化的单参数变量,其计算步骤如下:

根据前一状态值预测当前状态值:

$$X(k/k-1) = \alpha X(k-1/k-1) \quad (1)$$

式中: $X(k/k-1)$ 为基于 $X(k-1/k-1)$ 的 k 时刻预测值; $X(k-1/k-1)$ 为 $k-1$ 时刻状态估计值; α 为系数,本研究取 1。

计算预测值方差:

$$p(k/k-1) = p(k-1/k-1) + q(k) \quad (2)$$

式中: $p(k-1/k-1)$ 为 $k-1$ 时刻状态变量方差; $q(k)$ 为状态过程噪音方差。

式(2)用于量化状态预测中的不确定性传播。

根据 k 时刻测量值 $Z(k)$ 及其方差 $r(k)$,采用加权平均法计算当前状态变量值:

$$X(k/k) = \frac{r(k)^{-1}}{p(k/k-1)^{-1} + r(k)^{-1}} + \frac{p(k/k-1)^{-1}}{p(k/k-1)^{-1} + r(k)^{-1}} X(k/k-1) \quad (3)$$

式(3)可变形为:

$$X(k/k) = X(k/k-1) + g(k) \cdot s(k) \quad (4)$$

式中: $s(k) = Z(k) - X(k/k-1)$, 为新息序列; $g(k)$ 为卡尔曼增益矩阵, 其表达式见式(5)。

$$g(k) = p(k/k-1) / [p(k/k-1) + r(k)] \quad (5)$$

更新 k 时刻状态变量方差:

$$p(k/k) = [1 - g(k)] p(k/k-1) \quad (6)$$

计算出 $X(k/k)$ 及方差 $p(k/k)$ 后, 再返回式(1)对 $k+1$ 时刻状态进行预测, 进而实现动态滤波。其中 $q(k)$ 与 $r(k)$ 可采用下式计算:

$$q(k) = g^2(k) c(k) \quad (7)$$

$$r(k) = c(k) + p(k/k-1) \quad (8)$$

$c(k)$ 为新息标准差序列, 其计算式为:

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

式中: M 为时域滚动窗口, 本研究取 $M=5$ 。

2 流量监测信号分解及爆管检测

由式(1)可知, 卡尔曼滤波法将上一状态滤波结果作为当前状态预测值, 这要求监测信号在整个时段内基本不变。然而, 实际用水在 24 h 内变幅较大且存在早晚峰值, 这导致流量及压力监测信号不满足式(1)。针对该问题, 将流量监测信号按用水周期进行分解, 即提取每个周期相同时刻监测信号构成新的时间序列, 如式(10)所示。

$$\begin{aligned} & \{ (T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1M}), (T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2M}), \dots, \\ & (T_{N1}, T_{N2}, \dots, T_{NM}) \} \Rightarrow \\ & \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1M} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{N1} & T_{N2} & \dots & T_{NM} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $(T_{N1}, T_{N2}, \dots, T_{NM})$ 表示第 N 个周期的 M 个监测值。对式(10)中矩阵沿列向量方向应用卡尔曼滤波, 并计算滤波结果与监测值的差, 即 $R(k) = Z(k) - X(k/k)$, 然后将残差矩阵按行向量还原, 如式(11)所示。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1M} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{N1} & T_{N2} & \dots & T_{NM} \end{bmatrix} \Rightarrow \\ & \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1M} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{N1} & R_{N2} & \dots & R_{NM} \end{bmatrix} \Rightarrow \{ (R_{11}, R_{12}, \dots, R_{1M}), \end{aligned}$$

$$(R_{21}, R_{22}, \dots, R_{2M}), \dots, (R_{N1}, R_{N2}, \dots, R_{NM}) \} \quad (11)$$

3 基于改进卡尔曼滤波的爆管检测

当管网中出现爆管时, 式(11)中的残差序列会持续大于零, 进而实现爆管检测。然而, 由于随机误差影响, 直接采用卡尔曼滤波残差 $R(k)$ 检测爆管会导致较高误报率。为此, Ye 等采用平均低通滤波对卡尔曼滤波进行处理, 并采用卡尔曼滤波残差期望与其 1 倍标准差的和作为爆管检出阈值, 此时爆管时段爆管检测成功率约为 60%, 非爆管时段理论误报率为 16%。为进一步提高爆管时段爆管检出成功率, 本研究对 Ye 的方法进行改进, 通过对卡尔曼滤波残差进行累积和运算, 使爆管信号叠加、放大, 进而提高爆管检测成功率。此外, 通过设置较大的爆管检测限降低非爆管时段误报率。

累积和算法是一种统计过程控制方法, 其对测量值与平均值的偏离度进行累积和运算, 当累积和超过规定限值时判定故障, 如式(12)、(13)所示。

$$C_i^+ = \max[0, x_i - (\mu_i + K) + C_{i-1}^+] \quad (12)$$

$$C_i^- = \max[0, (\mu_i - K) - x_i + C_{i-1}^-] \quad (13)$$

式中: C_i^+ 与 C_i^- 为单侧累积量, 对于供水管网爆管检测, 只需要计算 C_i^+ ; x_i, μ_i 分别为 i 时刻卡尔曼滤波残差及其期望, 如前所述, 由于卡尔曼滤波残差为监测值随机误差与用水波动叠加而成的背景噪音, 故可认为 $\mu=0$; K 为累积和阈值, 本研究取 $K=0.5\sigma$, 爆管检测限为 3 倍标准差, 即 $C^+ \geq 3\sigma$ 时判定爆管。

若卡尔曼滤波残差为服从正态分布的随机误差, 对于传统卡尔曼滤波算法, 采用 1 倍标准差为爆管检出限的理论误报率约为 16%。对于所提出的算法, 由于采用 3 倍标准差为爆管检测限, 则监测值个数为 1 时理论误报率为 $2.00E-04$ (即 $C_1^+ \geq 4\sigma$), 监测值个数为 2 时累积理论误报率为 $5.20E-04$ (即 $C_1^+ \geq 3.5\sigma$)。采用蒙特卡洛模拟计算所有采样情况下的累积误报率, 采样次数为 100 000 次, 计算所得的理论误报率约为 2.8%, 远小于传统卡尔曼滤波法误报率。

4 案例分析

将本研究提出的改进卡尔曼滤波及原始卡尔曼滤波法用于相同爆管信号检测, 通过对比检测结果论证所提出方法的可行性。

4.1 数据仿真

理论上,应采集实测数据论证方法的可行性,包括爆管发生时间、持续时长及爆管流量,但实际中上述数据难以获得。虽然消火栓放水能模拟实际爆管,但可能影响管网正常运行,同时耗费一定人力、物力。此外,由于管网水力状态的时变性及测量误差的随机性,消火栓放水所得数据难以重复,故爆管检测结果可靠性难以验证,同时无法客观评估算法的有效性。鉴于上述原因,本研究参考文献[10],采用仿真数据验证所提出的方法,具体包括如下4个步骤:

① 周期信号仿真。实际用水量具有周期变化特征,一天24 h存在早晚两个明显用水高峰。鉴于此,采用 $20 \times \sin(2\pi t/24) + 50$ 产生360 h的用水量监测信号;该正弦信号的波动周期为24 h、均值为50、振幅为20,1 min采样1次。

② 随机误差仿真。随机误差包括用水量波动及监测值误差,产生服从均值为零、标准差为10 L/s的正态分布,对用水量随机波动及监测值误差进行仿真。

③ 爆管信号仿真。产生4个爆管信号,持续时间均为10 h,爆管流量由小到大,在第5小时达到最大,爆管流量峰值为5、7、10、15 L/s。

④ 信号合成。将上述3个信号叠加得到最终信号。数据仿真流程见图1。

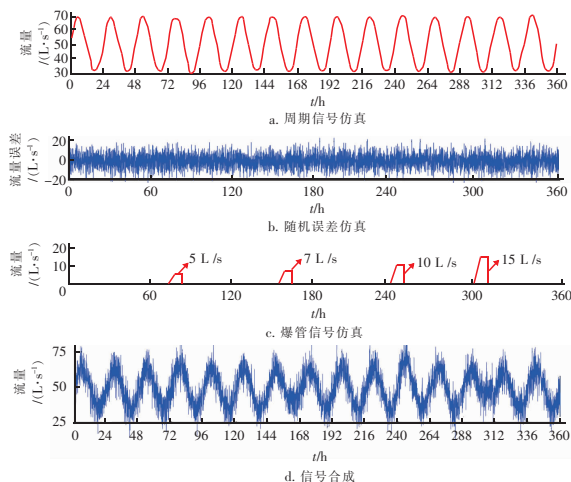


图1 数据仿真流程

Fig. 1 Data simulation process

4.2 爆管信号检测结果

分别采用普通卡尔曼滤波及改进卡尔曼滤波对图1爆管信号进行检测,结果如图2、3所示。

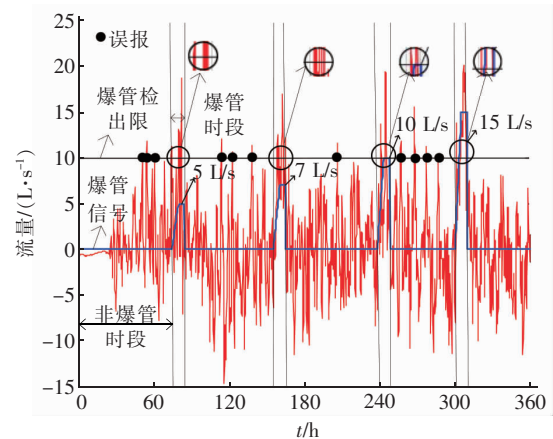


图2 普通卡尔曼滤波爆管检测结果

Fig. 2 Detection results of burst using ordinary Kalman filter

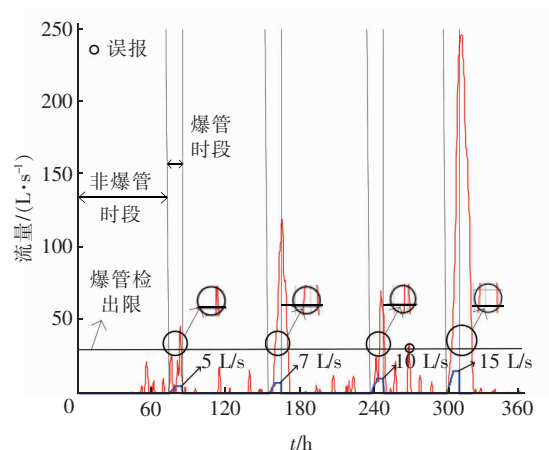


图3 改进卡尔曼滤波爆管检测结果

Fig. 3 Detection results of burst using improved Kalman filter

由图2、3可知,检测时段可分为爆管时段与非爆管时段。高质量检测结果应在爆管时段爆管检出率较高,而在非爆管时段的误报率较低。选取较小爆管检出限能提高爆管时段爆管检出率,但会导致非爆管时段内较高误报率。由此可见,爆管检出率与非爆管时段误报率间存在权衡关系。实际中,由于非爆管时段的频繁误报会导致工作人员不信任爆管检出结果并关闭爆管检出系统,因此有必要保证非爆管时段较低误报率。

如图2所示,普通卡尔曼滤波检测信号出现较大震荡,非爆管时段出现11次误报;爆管时段内检测信号出现间断且持续时间短(如图2放大部分),这不利于爆管准确检测。如图3所示,利用改进卡尔曼滤波法,即对卡尔曼滤波残差进行累积和运算,爆管信号强度、持续时间均被放大。具体地,5 L/s

的爆管信号放大为 50 L/s、15 L/s 的爆管信号放大到约 250 L/s,所有爆管信号强度放大均超过 10 倍。

对比图 2、3 放大部分可知,改进卡尔曼滤波的爆管检出信号持续稳定,较大爆管的检出时间大于爆管发生时间,这有利于提高爆管检出率。此外,非爆管时段仅出现 1 次误报,误报率远低于普通卡尔曼滤波。

5 结论

卡尔曼滤波能从检测误差及用水量随机波动的背景噪音中过滤出爆管信号,进而实现爆管检测。本研究改进了传统卡尔曼滤波算法,对卡尔曼滤波残差进行累积和运算,对比爆管信号检测结果,得到如下结论:

① 爆管时段的爆管检出率与非爆管时段误报率间存在权衡关系,较小爆管检出限能提高爆管时段爆管检出率,但会导致非爆管时段内较高误报率,实际中应采用较大的爆管预警限以保证非爆管时段较低误报率。

② 传统卡尔曼滤波在非爆管时段出现 11 次误报,在爆管时段内检测信号断断续续且持续时间短,这不利于爆管准确检测。改进卡尔曼滤波的爆管检出信号持续稳定,非爆管时段仅出现 1 次误报,理论误报率由 16% 降为 2.8%,同时能放大爆管信号强度及持续时间,提高了爆管检出精度。

参考文献:

- [1] 李栋,薛惠锋,张文宇. 面向故障诊断的供水管网水压监测点优化布置方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2018,40(2):53-61.
Li Dong, Xue Huifeng, Zhang Wenyu. Optimal layout method of water pressure monitoring points for water supply network based on fault diagnosis[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(2):53-61 (in Chinese).
- [2] 赵丹丹,程伟平,许刚,等. 供水管网系统爆管可监控最小管径分析方法研究[J]. 中国给水排水, 2014,30(23):117-122.
Zhao Dandan, Cheng Weiping, Xu Gang, et al. Study on minimum detectable pipe diameter for pipe burst in water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2014,30(23):117-122 (in Chinese).
- [3] Mounce S R, Machell J. Burst detection using hydraulic data from water distribution systems with artificial neural networks[J]. Urban Water J, 2006,3(1):21-31.
- [4] Aksela K, Aksela M, Vahala R. Leakage detection in a real distribution network using a SOM[J]. Urban Water J, 2009,6(4):279-289.
- [5] Mounce S, Mounce R, Boxall J B. Novelty detection for time series data analysis in water distribution systems using support vector machines [J]. Journal of Hydroinformatics, 2011,13(4):672-686.
- [6] Romano M, Kapelan Z, Savic D A. Automated detection of pipe bursts and other events in water distribution systems[J]. J Water Resour Plan Manage, 2014, 140(4):457-467.
- [7] Romano M, Kapelan Z, Savic D. Evolutionary algorithm and expectation maximization strategies for improved detection of pipe bursts and other events in water distribution systems[J]. J Water Resour Plan Manage, 2014,140(5):572-584.
- [8] Ye G L, Fenner R A. Kalman filtering of hydraulic measurements for burst detection in water distribution systems[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering & Practice, 2011,2:14-22.
- [9] Ye G L, Fenner R A. Study of burst alarming and data sampling frequency in water distribution networks[J]. J Water Resour Plan Manage, 2013,140(6):178-189.
- [10] Choi D Y, Kim S W, Choi M A, et al. Adaptive Kalman filter based on adjustable sampling interval in burst detection for water distribution system[J]. Water, 2016. DOI:10.3390/w8040142.



作者简介:马琪然(1992-),女,山东无棣人,硕士研究生,主要研究方向为供水管网爆管检测。

E-mail:302993432@qq.com

收稿日期:2018-10-11