

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 15. 006

# 一种适用于独立计量分区的小泄漏检测方法

黄海东, 张志雄, 宋丰轩, 林振良

(北部湾大学 建筑工程学院, 广西 钦州 535011)

**摘要:** 指数加权移动平均算法具有累积效应,能够将微小的波动进行放大。利用这一特点,提出了一种适用于独立计量分区的小泄漏检测方法。为了提高检测效率和减少假性报警的概率,在小泄漏事件的逻辑判断过程中引入了Westgard多规则质控思想,并结合漏损发生后流量增加的特点,对其进行适当改良。通过室外消防栓放水的方式在真实管网中模拟两个小泄漏事件,并利用流量数据对所提方法进行验证。结果表明,该方法能够有效地检测出小泄漏事件,可以作为供水管网主动漏损控制的辅助工具。

**关键词:** 小泄漏检测; 独立计量分区; 指数加权移动平均算法; Westgard多规则质控方法

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0037-06

## A Method for Small Leakage Detection in District Metering Area

HUANG Hai-dong, ZHANG Zhi-xiong, SONG Feng-xuan, LIN Zhen-liang  
(College of Civil Engineering and Architecture, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

**Abstract:** Exponential weighted moving average algorithm has a cumulative effect and is capable of magnifying minor fluctuations. Based on this characteristic, a method suitable for small leakage detection in district metering area was proposed. To improve the detection efficiency and reduce the probability of false alarm, Westgard multi-rule quality control idea was introduced into the logical judgment process of small leakage events, and it was appropriately improved in combination with the characteristics of increased flow after leakage occurred. Two small leakage events were simulated in a real water pipe network by releasing water from an outdoor fire hydrant, and the proposed method was verified by flow data. This method was able to effectively detect small leakage events and could be used as an auxiliary tool for active leakage control in water supply network.

**Key words:** small leakage detection; district metering area; exponential weighted moving average algorithm; Westgard multi-rule quality control algorithm

漏损检测一直以来都是供水管网中的一个重要研究领域。按照检漏所采取技术手段的不同,漏损检测方法大致可以分为基于硬件设备的方法和基于

软件分析的方法。前者主要依赖硬件设备如听音棒、探地雷达等对漏点进行探测,此类方法只能按照一定的检漏周期间歇性进行,人力成本较高,对于城

基金项目: 北部湾大学高层次人才科研启动基金资助项目(2019KYQD22)

通信作者: 黄海东 E-mail: 2447012621@qq.com

市规模大、管网结构复杂的供水系统,检测效率低,难以满足当前供水管网管理中对漏损事件要“及时发现”的要求;后者主要通过建立模型或者对信号进行分析处理达到检漏目的,如神经网络法<sup>[1]</sup>、卡尔曼滤波法<sup>[2]</sup>、聚类算法<sup>[3]</sup>等,此类方法实时性较强,得益于计算机技术、控制理论、信号处理、模式识别、人工智能等学科快速发展,有关这方面的检测技术仍将是未来研究的热点和趋势。

在小泄漏事件中,通常单位时间泄漏的水量少,引起的流量和压力波动小,允许漏失的时间较长。而在较大泄漏事件(如爆管)中,则往往伴随着较大的流量和压力波动,对生活、生产影响大,允许漏失的时间较短。因此,小泄漏检测更强调检测的准确性,而较大泄漏的检测则需同时保证检测的准确性和实时性。但现有的基于软件分析的方法大都集中于较大泄漏的检测,而对于小泄漏的检测效果欠佳。小泄漏的检测依然是供水管网漏损检测领域中的难点问题。

为解决小泄漏难以有效检测问题,提出了一种基于指数加权移动平均(EWMA)算法的漏损检测方法。EWMA算法通过不断累积观测值与预测值的差值,放大观测数据出现的波动,从而能更加迅速、敏感地探测到微小的异常情况,在故障诊断、质量控制、异常检测等领域应用广泛。本研究正是利用EWMA算法能够将微小波动进行放大这一特点实现供水管网的小泄漏检测。独立计量分区(DMA)管理是供水管网主动漏损控制的有效管理手段,目前已在北京、东莞、济南等地得到推广使用<sup>[4-5]</sup>,因此本研究主要探讨DMA中的小泄漏检测。为了清晰起见,本研究在参考相关文献<sup>[6]</sup>的基础上将漏失水量低于入流总量5%的漏损定义为小泄漏。

## 1 小泄漏检测方法

### 1.1 EWMA算法

EWMA算法是一种根据历史数据距当前时刻的远近,分别赋予不同的权重,距现在越近则赋予的权重越大的时间序列数据处理方法。EWMA算法主要依靠分析EWMA统计量的变化趋势而识别微小波动。EWMA统计量利用了历史和当前的所有观测数据的有效信息,其数学表达形式如下:

$$EWMA_i = \gamma X_i + (1 - \gamma)EWMA_{i-1} \quad (1)$$

式中:EWMA<sub>i</sub>表示第*i*时刻的统计量,其初始值

EWMA<sub>0</sub>=0;X<sub>i</sub>表示当前观测值;γ为权重因子,0 ≤ γ ≤ 1。

权重因子γ决定了历史数据对当前EWMA统计量的影响程度。距离当前时刻越远的历史数据,其影响越小,赋予的权重因子也越小,且以指数形式递减。公式(1)表明,当前的EWMA统计量是由过去一段时间内所有历史数据共同作用的结果。因此,EWMA统计量能够对历史数据发生的任何微小变化进行累积,达到放大变化的效果,从而有利于持续的微小偏移的检出。小泄漏事件发生后,总体而言流量会有所增加,进而发生微小的波动。利用EWMA算法对微小波动的灵敏性就可以有效检测出这种微小变化,从而检测出小泄漏事件。

### 1.2 小泄漏检测步骤

以EWMA算法为基础,将小泄漏检测分为以下3步:收集正常状态下的流量数据;估算夜间正常用水量范围;应用EWMA算法进行漏损检测。

#### ① 收集正常状态下的流量数据

凌晨02:00—04:00时间段内DMA的用水量比较稳定,近似服从正态分布,更有利于小泄漏事件的检出。另外,考虑到小泄漏引起的压力变化很小,因此主要收集每天凌晨02:00—04:00的正常流量数据,其中流量数据记录间隔为1~5 min。对于拥有多个流量出入口的DMA,流量数据特指该区域的净入流量数据,即多个流量计同一时刻流量数据的代数和,并且规定流入DMA为正、流出DMA为负。

#### ② 估算夜间正常用水量范围

受水压、用户用水随机性、计量仪表误差等外部因素影响,夜间用水量数据发生随机波动不可避免。小泄漏本身会导致流量增加,但变化幅度较小,当存在较大低值波动时可能会掩盖小泄漏带来的流量变动信息。因此,为了消除较大低值波动所带来的不利影响,本研究通过估算夜间正常用水量范围的方法对流量数据进行处理。

估算夜间正常用水量范围的具体步骤为:a. 选取若干天数的凌晨02:00—04:00流量数据;b. 从小到大设定不同的流量范围,其中第一个流量范围可适当放大,之后的流量范围按照固定的变化幅度进行设置,并通过频率分析估算出夜间正常用水量范围;c. 设定合适的置信度,如95%、99%等,确定置信区间;d. 对第二步估算出的正常用水量范围进

行验证,如流量范围完全处于置信区间中,则可认为所估算的夜间正常用水量范围是合理的,如流量范围没有处于置信区间中,则返回第二步重新设置流量的变化幅度。

### ③ 应用EWMA算法进行小泄漏检测

在进行漏损检测之前,样本学习数据和新的待测流量数据都需要利用夜间正常用水量范围消除较大低值波动造成的不利影响。在本研究中,低于夜间正常用水量范围下限的流量数据将被视为异常低值数据,并被剔除。剔除异常低值数据后,将每天02:00—04:00时间段内的流量数据的平均值作为样本学习数据和待测流量数据。应用EWMA算法进行检测通常分为以下两个阶段:样本学习阶段和检测阶段。

a. 样本学习阶段。对新数据进行检测之前,首先需通过获取适量正常状态下的历史数据进行学习,以保证EWMA算法初始阶段的稳定性。历史数据越多,就越能代表正常状态下的特征,因此从理论上来说,用于学习的历史数据越多越好。

b. 检测阶段。在本研究中,小泄漏检测实质上是一个不断加入新的流量数据更新EWMA统计量并分析其变化趋势的过程。完成样本学习阶段后,将新的流量数据加入并计算EWMA统计量,然后根据一定规则判断是否发生漏损。在传统的检测程序中,通常采用三西格玛准则(即 $\mu \pm 3\delta$ ,其中 $\mu$ 为均值, $\delta$ 为标准差)来判断数据是否误差过大,从而确定过程是否已经失控。由于小泄漏本身造成的流量变化较小,加之流量会出现随机波动,如果只采用 $\mu \pm 3\delta$ 这单一的判断规则,就有可能需要很长时间才能符合判断规则,导致检测效率大大降低,这对于控制供水管网漏损是不利的。Westgard多规则控制方法是第二代质量控制方法,既能够大大提高质量控制效率,又能极大地减少假性报警的概率,目前已广泛应用于血液学检测、血凝检测等领域<sup>[7]</sup>。Westgard多规则质控方法是利用多个判断标准、质控规则的组合,来确定一个分析结果是在控还是失控的方法。与单规则质控方法相比,Westgard多规则质控方法对误差的检出具有更高的灵敏度,从而提高了检测效率。限于篇幅,Westgard多规则质控方法的具体介绍见文献[8]。本研究在借鉴Westgard多规则质控程序思想的基础上,同时结合漏损发生后流量增加的这一特点,对Westgard判断规则适当

地加以改良,规定只要符合下列判断规则之一,则可判定为出现小泄漏事件,否则说明管网运行处于正常状态:任意EWMA统计量大于 $\mu + 3\delta$ ;连续两个EWMA统计量大于 $\mu + 2\delta$ ;连续 $N$ 个EWMA统计量呈现递增趋势。其中, $N$ 可以综合考虑检测效率、误报率和可接受的漏失水量进行合理设置。

本研究提出的小泄漏检测方法流程见图1。

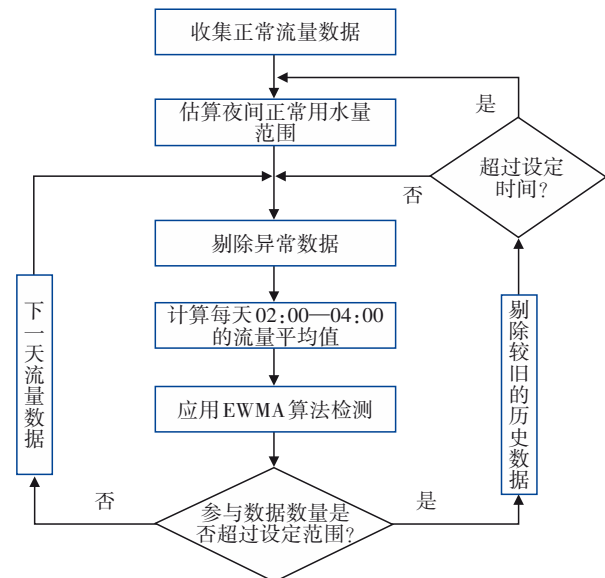


图1 基于EWMA算法的小泄漏检测流程

Fig.1 Flow chart for small leakage detection based on EWMA algorithm

### 1.3 评价指标

为了验证方法的检测性能,同时考虑到小泄漏检测容许泄漏事件的持续时间相对较长,本研究采用检出率和误报率两个指标进行评价。一般而言,检出率越高,误报率越少,说明检测方法的检测性能越好。这两个评价指标的计算公式如下:

$$DP = \frac{N_d}{N} \times 100\% \quad (2)$$

$$RF = \frac{FN}{TN} \times 100\% \quad (3)$$

式中:DP和RF分别表示检出率和误报率; $N_d$ 和 $N$ 分别表示正确检测出泄漏事件的次数和发生泄漏事件的次数;TN表示检测时流量处于正常状态的次数;FN表示流量处于正常状态而被错误判定为发生泄漏的次数。

## 2 实例研究

### 2.1 研究地点和监测数据

选取某大学的校园供水管网作为研究对象,并



收集相应的流量数据进行分析。该大学位于广西某沿海城市滨海新区,位置较为偏僻,整个校园供水管网只由一条DN300的市政管道供水,无其他出水口,因此可以作为一个DMA区域进行研究。图2为实例管网拓扑结构示意。用于分析的数据通过在市政进水管道处安装一个超声波流量计进行收集,包含了2019年5月1日—6月29日共60 d凌晨02:00—04:00的流量数据,并分别在2019年5月31日和6月17日通过室外消防栓放水的方式进行两次小泄漏模拟实验,每次实验持续时间共5 d。这两次小泄漏模拟实验的漏失水量分别约为 $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ,占入流量的比例分别为2.98%和3.89%。流量数据采集的时间间隔为5 min。

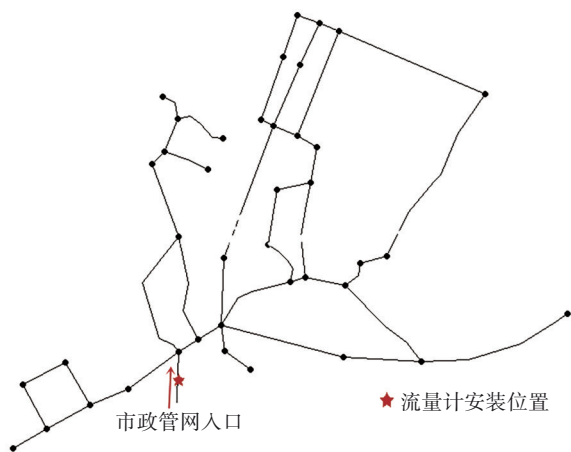


图2 实例管网拓扑结构示意  
Fig.2 Topology of pipe network

## 2.2 估算夜间正常用水量范围

选取2019年5月1日—14日共336个流量数据进行统计分析,得出这些数据的均值 $\mu$ 为 $30.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ,标准差 $\delta$ 为 $0.85 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

从小到大设计流量范围,其中第一个流量范围设为 $[0, 28.0 \text{ m}^3/\text{h}]$ ,后续的流量范围按 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 的增幅进行设计,然后通过频率分析估算正常用水量的可能范围。结果表明,流量 $<28.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 的次数仅占2.09%,流量 $>31.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 的次数为3.21%,可以认为属于小概率事件。而流量处于 $[28.5 \text{ m}^3/\text{h}, 29.0 \text{ m}^3/\text{h}]$ 以及 $[30.5 \text{ m}^3/\text{h}, 31.0 \text{ m}^3/\text{h}]$ 区间的次数分别占到了7.44%和6.25%,已属于多次出现,因此初步估算夜间正常用水量范围为 $[28.5 \text{ m}^3/\text{h}, 31.0 \text{ m}^3/\text{h}]$ 。

选取95%置信度对正常用水量范围进行验证,

则可以得出置信区间 $[30.2-2\times 0.85, 30.2+2\times 0.85]$ ,即 $[28.5 \text{ m}^3/\text{h}, 31.9 \text{ m}^3/\text{h}]$ 。估算的夜间正常用水量范围处于 $[28.5 \text{ m}^3/\text{h}, 31.9 \text{ m}^3/\text{h}]$ 区间内,因此可以认为前面估算出的夜间正常用水量范围是合理的。根据估算出的夜间正常用水量范围对流量数据进行处理,低于该用水量范围下限 $28.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 的数据将视为异常低值数据,不会参与后续泄漏检测过程中每天凌晨02:00—04:00平均流量的计算。

## 2.3 小泄漏检测

### 2.3.1 学习阶段

在利用EWMA算法进行漏损检测之前,首先要保证初始阶段的过程处于稳定状态。权重因子 $\gamma$ 的取值范围推荐为0.01~0.30,本研究采用 $\gamma=0.2$ 。在该实例中,综合考虑误报率和检测效率等因素,小泄漏事件判别规则第3条中的 $N$ 取7。选取前14 d正常流量数据进行学习,如图3所示。可以看出,EWMA统计量不符合判断规则的要求,说明初始阶段处于稳定状态,管网运行正常,至此可以进行下一步的检测流程。

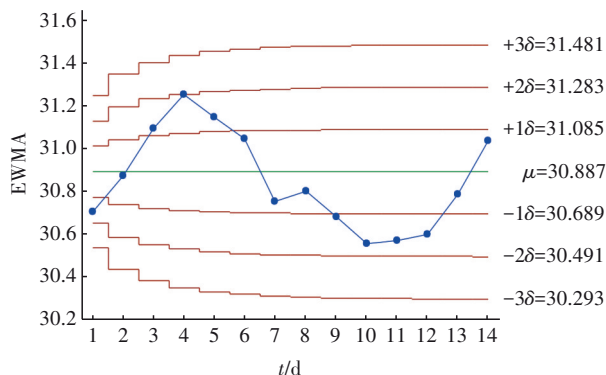


图3 学习阶段EWMA趋势

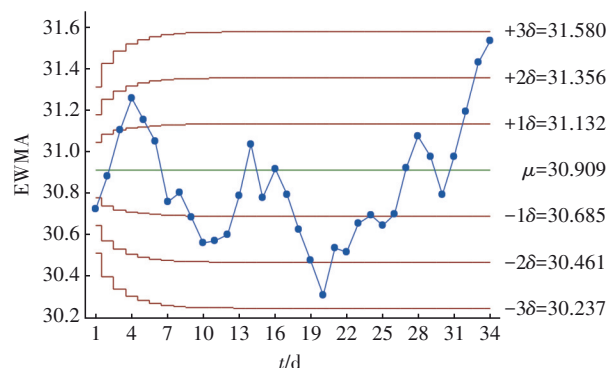
Fig.3 EWMA trend in the learning stage

### 2.3.2 检测结果分析

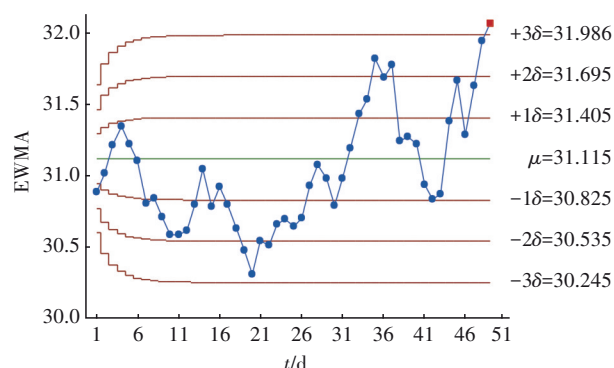
检测结果如图4所示。其中,图4(a)为2019年5月1日—6月3日共34 d的EWMA统计量趋势变化,图4(b)为2019年5月1日—6月18日共49 d的EWMA统计量变化趋势。

分析图4可以发现,图4(a)第33和34天连续两天的EWMA统计量都大于 $\mu+2\delta$ 。根据判断规则的第2条规定,可以认为第34天也即是第一次小泄漏实验实施后的第4天检测出小泄漏事件。图4(b)中第49天EWMA统计量大于 $\mu+3\delta$ ,符合判别规则的

第1条规定,说明在第二次小泄漏实验实施后的第2天成功检出小泄漏事件。两个小泄漏事件的成功检出有力地证明了所提出的小泄漏检测方法是有效的。另外,与供水企业定期检漏周期相比,大大缩短了小泄漏的发现时间,如济南水务集团按45 d周期进行巡检<sup>[5]</sup>。需要说明的是,图4以及后续的趋势变化图中的红点表示该点的EWMA统计量超出了3倍方差 $\delta$ 的界限。



a. 前34 d的EWMA统计量趋势变化



b. 前49 d的EWMA统计量趋势变化

图4 EWMA统计量趋势变化

Fig.4 EWMA statistics trend

图5显示了全部60 d的EWMA统计量随时间的变化趋势。第二次实验时间为2019年6月17日—21日。图5中的变化趋势显示,第49~55天,也即从2019年6月18日—24日,根据判断规则的第1条,都检测出小泄漏事件,与实际情况不符,说明存在误报。发生该现象的主要原因是EWMA统计量充分利用过去的的数据信息,具有较强的记忆效应。有鉴于此,在实际推广应用中,为了减少误报,需要在小泄漏事件确定后分析EWMA统计量开始发生向上偏移的起始时间,从该起始时间到泄漏得到控制的这一段时间内的数据将不参与后续EWMA统计量的计算。以图4(a)为例,通过对EWMA统计量进

行趋势分析,检出小泄漏事件之前从第31天开始EWMA统计量向上偏移的趋势明显,因此在实际应用中,第31~34天的流量数据可视为异常数据,并在后续计算EWMA统计量时应及时剔除。

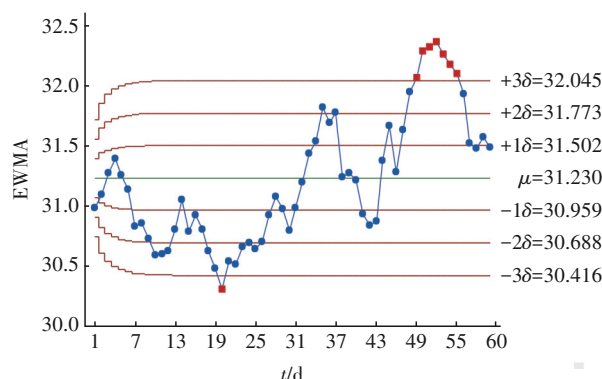


图5 全部60 d的EWMA统计量趋势变化

Fig.5 EWMA statistics trend chart for all 60 days

综上,本研究所提出的检测方法能全部检测出2次模拟泄漏事件,检出率达到100%,充分说明检测方法的有效性。根据统计结果,检测阶段处于正常状态时的次数为46次,被错误检测的次数为7次。由公式(3)可知误报率达到15.22%,处于误报率较高的状态,过高的误报率会增加管网管理的工作量。根据前面的分析可知,之所以导致误报率较高完全是由于EWMA算法本身的记忆特性,没有及时剔除异常数据的缘故,因此只要及时剔除异常数据即可从某种程度上减少误报率。图6为剔除第31~34天的流量数据后EWMA统计量的变化趋势。

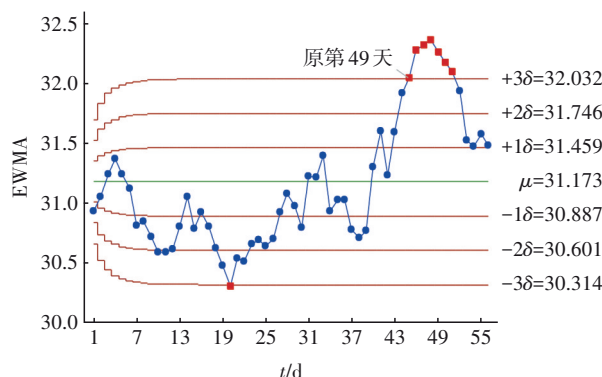


图6 剔除异常数据后的EWMA统计量趋势变化

Fig.6 EWMA statistics trend after excluding abnormal data

从图6可以看出,剔除第31~34天的流量数据后,在第49天即第二次实验的第2天成功检测出小泄漏事件,说明上述所提出的异常数据判断方法是

可行的。统计结果还显示,及时剔除异常数据后,被错误检测的次数由7次变为4次,误报率从15.22%下降到8.70%,可见及时剔除异常数据可有效减少误报。

### 3 结论

针对小泄漏隐蔽性强、不易检测的特点,利用EWMA算法能够有效检测到微小偏移的优点,并充分借鉴Westgard多规则质量控制的思想,提出了一种基于EWMA算法的小泄漏检测方法。通过一个实例管网的现场实验数据对上述方法进行了验证,结果表明所提方法能够成功地检测到DMA分区中的小泄漏事件。

近年来,随着供水管网精细化管理日益成为主流以及分区计量的快速发展,该技术将拥有较为广阔的应用前景。另外,该技术在泄漏较小时就能较早地发现,有效指导检漏人员开展漏点精确定位工作,避免泄漏量进一步扩大后带来的负面影响,具有重要的实用价值。总体而言,基于EWMA算法的小泄漏检测方法具有简单易用、对流量微小波动较为敏感等优点,但必须指出该方法是以1d的时间作为检测间隔,对较大泄漏事件的反应速度慢,无法满足较大泄漏事件发生时较高的实时性要求。因此在实践中,该方法可以作为补充手段,与其他检测方法同时使用,这样才能确保有效地检测出所有(较大的和较小的)泄漏事件。

### 参考文献:

- [1] MOUNCE S R, BOXALL J B, MEXELL J. Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2010, 136(3): 309–318.
- [2] JUNG D, LANSEY K. Water distribution system burst detection using a nonlinear Kalman filter [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2015, 141(5): 04014070.
- [3] 刘书明, 吴以朋, 王晓婷, 等. 应用聚类算法识别供水管网爆管事故[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(10): 1096–1101.
- LIU Shuming, WU Yipeng, WANG Xiaoting, *et al.* Clustering algorithm for burst detection in water distribution systems [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2017, 57(10): 1096–1101 (in Chinese).
- [4] 李蒲剑, 高金良, 张怀宇, 等. 城镇供水管网漏损控制技术探讨与展望[J]. *给水排水*, 2020, 46(6): 52–57, 64.
- LI Pujian, GAO Jinliang, ZHANG Huaiyu, *et al.* Summary of the frontier technology and experience of leakage control in urban water supply networks [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(6): 52–57, 64 (in Chinese).
- [5] 王瑞彬, 陈峰, 张蕊, 等. DMA 管理在济南市供水漏损控制中的应用[J]. *净水技术*, 2019, 38(2): 1–6, 46.
- WANG Ruibin, CHEN Feng, ZHANG Rui, *et al.* Application of DMA management in leakage loss control in Jinan water supply [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(2): 1–6, 46 (in Chinese).
- [6] WU Y P, LIU S M. A review of data-driven approaches for burst detection in water distribution systems [J]. *Urban Water Journal*, 2017, 14(9): 972–983.
- [7] 何敏, 徐建华, 黄宪章, 等. Realtime 实时质控结合 Westgard 多规则理论[J]. *中国医疗设备*, 2012, 27(1): 64–67.
- HE Min, XU Jianhua, HUANG Xianzhang, *et al.* Application of roche Realtime QC combining with Westgard multirules theory in the internal quality control [J]. *China Medical Devices*, 2012, 27(1): 64–67 (in Chinese).
- [8] 孟保福. 正确理解和应用 Westgard 多规则质控规则[J]. *国际检验医学杂志*, 2009, 30(11): 1117.
- MENG Baofu. Correctly understanding and applying Westgard multi-rule quality control rules [J]. *International Journal of Laboratory Medicine*, 2009, 30(11): 1117 (in Chinese).

作者简介: 黄海东(1982–), 男, 广西钦州人, 博士, 工程师, 研究方向为水资源与给水排水管网设计最优化。

E-mail: 2447012621@qq.com

收稿日期: 2020-07-26

修回日期: 2020-09-13

(编辑: 任莹莹)