

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.15.013

# 基于Fast ICA算法的供水管网漏失量估算

赵 桓, 吕 谋, 刘志壮, 王 兴

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266500)

**摘 要:** 针对日益严峻的城镇供水管网漏损问题,对漏失量与用户水量的变化特征及源信号相互独立特征进行深入分析,并基于Fast ICA算法建立漏失量估算模型,对观测漏失信号进行白化处理、寻优迭代及信号幅值还原;然后,以北方某生活小区为研究区域,构建供水管网实验模型,在实验室条件下验证Fast ICA算法用于管网漏失量估算的可行性;最后,将Fast ICA漏失量估算模型应用于DS山庄工程实例的供水管网漏失分析中,并与小波变换理论在实际供水环境下的适用性进行比较。结果表明,与小波变换算法相比,Fast ICA模型计算出的漏失量与真实漏失量相对误差更小,变化趋势相似性更高。

**关键词:** 供水管网; 盲源分离; Fast ICA算法; 小波变换; 漏失量估算

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)15-0091-06

## Estimation of Water Supply Network Leakage Based on Fast ICA Algorithm

ZHAO Huan, LÜ Mou, LIU Zhi-zhuang, WANG Xing

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology,  
Qingdao 266500, China)

**Abstract:** In response to the increasingly severe issue of leakage in urban water supply network, an in-depth analysis was conducted to examine the variation characteristics of leakage and user water consumption, as well as the mutual independence of source signals. A leakage estimation model based on fast independent component analysis (Fast ICA) algorithm was developed. Subsequently, whitening processing, optimization iteration, and signal amplitude restoration were performed on the observed leakage signals. A residential community in the northern region was selected as the case study site, and an experimental model of the water supply network was constructed. The feasibility of applying the Fast ICA algorithm for leakage estimation was validated under controlled laboratory conditions. Furthermore, the Fast ICA leakage estimation model was applied to the leakage analysis of the water supply network in the DS mountain villa project, and its applicability was compared with that of the wavelet transform theory in a real water supply setting. In comparison with the wavelet transform algorithm, the Fast ICA model achieved a smaller relative error between the estimated and actual leakage, as well as a higher degree of similarity in the trend of variation.

**Key words:** water supply network; blind source separation; Fast ICA algorithm; wavelet

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778307); 山东省重点研发计划项目(2019GSF111003); 青岛市科技计划园区培育计划项目(2511yqpy10qy)

通信作者: 吕谋 E-mail: qdlvmou@yeah.net

transform; leakage estimation

漏失量的大小不仅可反映水务公司的供水效率,而且能反映管网的健康状态。爆管和背景漏损估算理论提出,供水管网总漏失量由表观漏失量和物理漏失量组成,一般采用水力模型法、水量平衡法、夜间最小流量法量化评估管网的漏失状况<sup>[1]</sup>。水量平衡法对用水量数据的精度要求较高,但各种用水模式的数据获取难度较大,我国大多数供水企业采取人工抄表的方式获取用水量数据,抄表周期一般为1个月,人为主观性较强,且在实际水量平衡法计算过程中需要工作人员有丰富的经验来区分不同类型的用水,这限制了水量平衡法的应用。夜间最小流量法需要对夜间流量在一定时间内连续观测,不仅时间较长,还要投入很多人力物力,无法做到方便快捷<sup>[2]</sup>。水力模型法中FAVAD的参数较多而且难以确定,同时FAVAD面向单漏点漏失情况建模,实际供水管网中的漏失点数量差异限制了FAVAD模型的应用<sup>[3]</sup>。指数模型在漏失量计算中应用较多,但模型在简化的同时限制了其精度<sup>[4]</sup>。为快速、便捷地计算漏失量,尽可能节约人力物力,采用盲源分离算法(BSS)对漏失量进行估算。

## 1 BSS应用于漏失量计算的依据

BSS中最常用的解决方法之一是快速独立成分分析(Fast ICA),其可以从多维混合信号中搜索内部统计独立的非高斯源信号。由于高斯子空间的旋转不变性,混合矩阵失去了唯一性,仅非高斯源的唯一性得以保留<sup>[5]</sup>,一旦源信号混合中存在两个或多个高斯源,Fast ICA将伪造的稀疏源无法准确分离信号。Fast ICA方法的主要假设是源的非高斯性和相互统计独立性,因此基于这个理论,如果用户正常用水产生的信号和从漏损中获得的源信号在统计上是独立的,并且是非高斯的,那么供水网络的漏损源信号就能够被分离。

## 2 Fast ICA应用于管网漏失量估算的前提

在实际工程中想正确使用Fast ICA算法需要满足三个前提:①各源信号相互独立;②源信号中高斯信号个数最多为1;③收集到的观测信号数量>源信号个数<sup>[5]</sup>。本研究中源信号为用水量信号与漏失量信号,观测到的信号为供水量信号与压力信号,个数皆为2个,满足③的应用前提。

## 2.1 源信号独立性验证

在供水管网中,三段式节点流量模型得到了广泛应用,见式(1)。

$$q^{\text{val}} = \begin{cases} q^{\text{req}} & H^{\text{des}} \leq H^{\text{avl}} \\ q^{\text{req}} \left( \frac{H^{\text{avl}} - H_{\text{min}}}{H^{\text{des}} - H_{\text{min}}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} & H_{\text{min}} \leq H^{\text{avl}} \leq H^{\text{des}} \\ 0 & H^{\text{avl}} \leq H_{\text{min}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $q^{\text{val}}$ 为节点实际用水量,L/s; $q^{\text{req}}$ 为节点额定用水量,L/s; $H^{\text{avl}}$ 为节点额定压力, $10^4$  Pa; $H_{\text{min}}$ 为节点最小水头, $10^4$  Pa; $H^{\text{des}}$ 为节点临界压力, $10^4$  Pa; $\gamma$ 为节点供水量系数。

由式(1)可知,节点用水量在不同压力区间的计算公式不同。我国市政供水设计规范中要求:水厂出口压力要满足控制点的最低服务压力,故节点压力一般比节点临界压力高,此时节点用水量与节点压力大小无关。对于漏水量的计算,得出漏水量与压力的经验公式<sup>[4]</sup>如下:

$$q_L = \alpha H^{1.18} \quad (2)$$

式中: $q_L$ 为节点漏失量,L/s; $H$ 为节点压力,m; $\alpha$ 为漏失系数, $\text{m}^{1.82}/\text{s}$ 。

由式(2)可知,漏失量仅与配水网的压力有关。综上所述,漏失量与节点用水量相互独立,满足Fast ICA建模的前提条件。

## 2.2 源信号非高斯性验证

为使Fast ICA模型适合供水管网漏失量估算,用水量信号和漏失量信号至少有一个呈现非高斯性。从理论上来看,高斯序列的偏度函数在各处都相同而且为零,而非高斯线性时间序列的偏度函数具有恒定的非零值<sup>[6]</sup>。本研究采用Matlab软件中的[h,p,jbstat,cv]函数对数据进行正态分布检验,若计算结果为h=1,认为输入信号不符合正态分布;若计算结果为h=0,则认为输入结果符合正态分布。

## 3 Fast ICA漏失量分离模型及算法求解

### 3.1 Fast ICA算法概述与求解

为建立Fast ICA漏失量分离模型,将用户用水量与漏损量视作源信号、管网总流量与入口处的总压力视为观测信号,将管网总流量与入口处总压力拟合的二维矩阵作为Fast ICA漏失量分离模型的输

入变量。由此可以得到解混模型,见式(3)。

$$Y(t) = W \times X(t) \quad (3)$$

式中: $Y(t)$ 为分离信号; $W$ 为分离矩阵; $X(t)$ 为总流量与总压力拟合的二维矩阵。

在实际工程中获得的观测信号一般都相关,为提高模型的收敛效果,简化模型对独立分量提取的计算过程,在输入模型前先通过白化处理将观测信号转变为白色信号。白色信号为独立源信号且均值为零,其性质有 $E(S_i S_j) = E(S_i)E(S_j)$ ,且协方差矩阵为单位矩阵 $COV(S) = I^{[7]}$ 。

### 3.2 目标函数求解与寻优迭代

采用Fast ICA算法对目标函数求解时,其运算内核是以熵作为衡量指标来判断数据是否具有非高斯性,在应用中常采用熵的修订形式,即负熵<sup>[8]</sup>。在计算中,一般采用非二次函数进行求解,最终解得负熵近似解<sup>[9]</sup>。为使分离信号 $Y(t)$ 以最快速度进行非高斯最大化,引入牛顿迭代法对估计负熵后的目标函数进行寻优。经过迭代后,通过施密特正交化去除相关,再对其进行标准化,由此可得到对初始信号的分离矩阵。

### 3.3 分离不确定性求解

Fast ICA漏失量分离模型的输入信号为管网总供水量与入口处供水总压力,输出信号为二维矩阵。对于输出的二维矩阵,无法直接对漏失量信号与用水量信号进行分离,故考虑通过用水量变化趋势一致性进行信号分离<sup>[9]</sup>。在实际工程中,与用水量相比,漏失量占总供水量的比例小,因此用水量变化趋势应与总供水量变化趋势相似,运用皮尔森相关系数法比较二者的变化趋势。

### 3.4 信号幅值还原

经Fast ICA漏失量分离模型分离后的用水量信号与漏失量信号为无量纲数据。为获得有意义的分离信号,需对分离后的信号进行幅值还原。在幅值还原之前,假设Fast ICA算法分离后的用水量、漏失量信号与实际用水量、漏失量信号变化趋势相似。设供水管网实际用水量均值为 $\mu_y$ 、标准差为 $\sigma_y$ ,实际漏损量均值为 $\mu_l$ 、标准差为 $\sigma_l$ ,那么下式成立:

$$\begin{cases} Q_y(t) = y_p(t) \times \sigma_y + \mu_y \\ Q_l(t) = l_p(t) \times \sigma_l + \mu_l \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Q_y(t)$ 为管网实际用水量,L/s; $Q_l(t)$ 为管网实际漏损量,L/s; $y_p(t)$ 为用水量信号变化趋势;

$l_p(t)$ 为漏失量信号变化趋势。

## 4 验证Fast ICA算法估算漏失量的可行性

### 4.1 实验室算例管网模拟DS山庄供水方式

DS山庄是高品质生活区,地势较高,由管道加压泵单独从市政管网抽水供往山庄,在加压泵后装有流量计与压力计,计量频率为1次/h,DS山庄的日均用水量为124 m<sup>3</sup>,管线长度约为3.6 km,其管径包括DN200、DN150和DN100,其中DN100的管线最多,占比为60%。供水管材为球墨铸铁管、钢管、PVC管,其中球墨铸铁管应用广泛,占比高达72%。山庄所有用户水表均为远传式智能表,计量频率以天为单位。综上所述,DS山庄可以视为单水源供水管网。

为证实Fast ICA模型在实际工程应用中的可行性,先在实验室搭建供水管网,模拟DS山庄的供水条件,通过实验数据验证Fast ICA理论的可行性。在供水管网仿真模拟平台<sup>[10]</sup>基础上设计一套局部漏水实验装置,实验平台主要由配电系统、控制系统、管网数据在线监测系统、循环水系统、失效管段更换系统组成。失效管段更换系统主要是通过将健康管道替换为失效实验管段来模拟实际漏损工况。为实现对运行数据的监测,在失效管段前后各安装电磁流量计与压力传感器,当实验模型运行稳定后可使每一段管段均处于满管流状态,通过更换失效管段可模拟实际运行工况。

### 4.2 管网漏失模拟实验

水泵起始段装有流量计与压力计,同时将流量计安装在失效管段两端,当管段出现漏失时,失效管段前后流量计上的数值会有不同,漏失流量为失效管段前后流量计读数之差。时长为5 760 s,并以2 s为间隔取1次流量计读数。实验在24组压力工况下进行,每组工况持续240 s,两个流量计在工况开始与结束时读数的差值即为漏失量,总供水量减去漏失量即为实验条件下的用户流量。

在利用Fast ICA算法之前,对总供水量信号进行正态分布检验,输出结果为: $h=1, p=1.0E-03$ 。证明总供水信号为非高斯信号,判断为高斯性的概率为0.001,总供水量信号与压力信号满足Fast ICA算法应用条件,则利用盲源分离独立分量分析算法从两个混合信号中得到分离信号A1、A2的变化趋势。在总供水中,绝大多数的水被用户使用,因此用户

用水量变化趋势应与总供水量变化趋势相似。在实验室模拟 DS 山庄水力条件,应用 Fast ICA 漏失量估算模型计算漏失量,并与实际漏失量进行对比,结果如图 1 所示。经过 Fast ICA 算法分解与幅值还原后的漏失量变化趋势与实际漏失量变化趋势一致,估算的漏失量能够较好地反映不同时刻漏失量的变化。在大部分工况下,模拟漏失量与实际漏失量之间相对误差均在 14% 以下,只是在工况 12,其相对误差较高(14.74%),24 组工况相对误差的绝对值平均为 8.67%。实验结果表明,利用 Fast ICA 算法能够有效地从混合信号中分离出用水量信号与漏失量信号,分离后的信号经过幅值还原后能够较好反映漏失量的变化趋势,计算得到的漏失量与实际漏失量的相对误差较小。

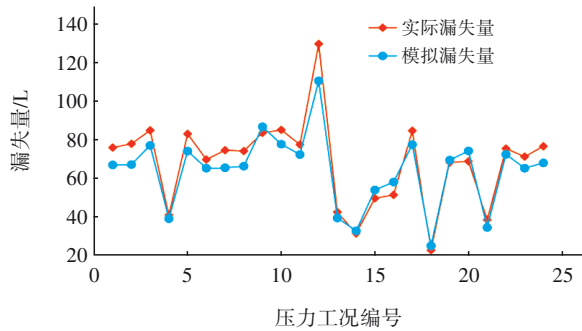


图 1 实际漏失量与模拟漏失量的变化

Fig.1 Change in actual leakage and simulated leakage

## 5 实际工程案例

### 5.1 方案设计

实际工程中,供水管网拓扑结构较复杂,除去用户用水量与供水管网物理漏失量外,还包括非法用水量与未计量计费水量等,此外实际漏点的位置、个数也不确定。为增强 Fast ICA 算法的适用性,利用 Fast ICA 算法对 DS 山庄进行漏失量估算。通过实时数据传输系统得到 DS 山庄从 2020 年 5 月 1 日—24 日管道加压站的压力数据和平均供水量。

### 5.2 DS 山庄供水管网漏失量的计算与分析

利用 Matlab 软件中的  $[h, p, jbstat, cv]$  函数对 DS 山庄总供水量信号进行正态分布检验,计算结果为  $h=1$ ,证实总供水信号为非高斯信号。利用 Fast ICA 算法从管网入口流量和入口压力两个混合信号中得到分离信号 A1、A2。求分离信号 A1、A2 与总供水量的皮尔森相关性系数,相关性绝对值越接近于 1,则认定其相关性越强。DS 山庄入口流量信号与

分离信号 A1、A2 的皮尔森相关性系数矩阵见表 1。

表 1 DS 山庄入口流量信号与分离信号 A1、A2 的皮尔森相关性系数矩阵

Tab.1 Pearson correlation coefficient matrix of inlet flow signal and separation signals A1 and A2 of DS mountain villa

项目	DS 山庄总流量	解混后信号 A1	解混后信号 A2
DS 山庄总流量	1	0.05	0.876
分离信号 A1	0.05	1	—
分离信号 A2	—	0.876	1

由表 1 可知,分离信号 A2 为用水量信号。列水平平衡方程,获得最优解  $\sigma_y$  为 20.110、 $\mu_y$  为 123.842、 $\sigma_1$  为 0.765、 $\mu_1$  为 16.176。将最优解代入式(4),得到解决幅值问题后拟合的用水量与漏失量,计算结果见表 2。

表 2 Fast ICA 盲源分离计算结果

Tab.2 Calculation results of Fast ICA blind source separation

时间	用水量模拟值/m <sup>3</sup>	用水量实际值/m <sup>3</sup>	漏失量模拟值/m <sup>3</sup>	漏失量实际值/m <sup>3</sup>	用水量相对误差/%	漏失量相对误差/%
1 日	97.27	86.94	14.97	16.03	-11.88	6.61
2 日	101.29	111.11	15.28	16.52	8.84	7.51
3 日	116.61	125.59	16.67	15.90	7.15	-4.84
4 日	130.96	138.72	17.15	16.29	5.59	-5.28
5 日	146.61	147.63	17.01	17.57	0.69	3.19
6 日	140.26	152.33	16.31	16.81	7.92	2.97
7 日	132.99	142.88	16.46	16.59	6.92	0.78
8 日	105.65	127.63	13.79	15.75	17.22	12.44
9 日	121.28	120.18	13.29	14.60	-0.92	8.97
10 日	130.11	125.91	17.16	16.20	-3.34	-5.93
11 日	134.67	134.78	14.56	15.43	0.08	5.64
12 日	140.63	147.65	18.72	17.29	4.75	-8.27
13 日	147.80	146.23	16.56	17.46	-1.07	5.15
14 日	140.60	143.63	16.69	17.01	2.11	1.88
15 日	155.03	144.38	16.09	16.87	-7.38	4.62
16 日	126.43	135.76	15.42	16.24	6.87	5.05
17 日	118.18	130.64	17.52	15.53	9.54	-12.81
18 日	105.03	115.73	17.14	15.79	9.25	-8.55
19 日	99.94	107.30	15.85	16.64	6.86	4.75
20 日	110.65	103.55	15.19	16.10	-6.86	5.65
21 日	101.28	99.24	13.77	15.23	-2.06	9.59
22 日	93.94	103.44	15.41	16.00	9.18	3.69
23 日	85.58	91.72	16.54	14.75	6.69	-12.14
24 日	80.64	89.24	14.09	15.64	9.64	9.91

由表2可知,5月1日—24日,DS山庄实际供水量为3 360 m<sup>3</sup>,实际用水量为2 972 m<sup>3</sup>。由水量统计分析结果可知,DS山庄在24 d内的产销差为11.5%,Fast ICA模拟用水量为2 864 m<sup>3</sup>,模拟用水量与实际用水量相对误差的绝对值平均为6.37%。

应用Fast ICA漏损量估算模型计算模拟漏失量,其与DS山庄实际漏失量的对比结果如图2所示。可知,5月8日、17日、23日的漏失量模拟值与实测值的相对误差较高,为12%左右,其余时间相对误差均在10%以下,整体相对误差的绝对值平均为6.51%。Fast ICA算法拟合精度较高,计算出的漏失量与实际漏失量变化趋势一致,能够帮助有关人员了解不同时间段的漏失量,从而为制定减压策略提供数据支撑。

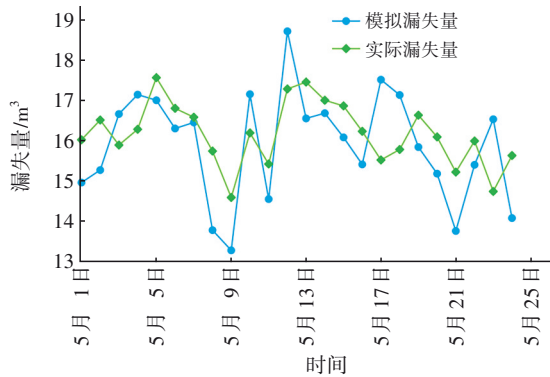


图2 实际漏失量与模拟漏失量的变化

Fig.2 Change in actual leakage and simulated leakage

### 5.3 Fast ICA与小波变换在工程中的应用

有研究表明<sup>[11-12]</sup>,小波变换算法同样可以用来估算漏失量。原理为通过小波基函数对供水量信号进行分解与重构,重构后的尺度信号可以视作用水量信号,实际供水量与重构后的用水量信号之间的差值便是获得的漏失量。综上所述,重构后的用水量信号(尺度信号)与实际用水量越接近,计算出的漏失量与真实的漏失量也越接近。为了能直观了解小波分解算法在实际工程中的适用性,以用水量为基准,比较小波分解算法重构后的尺度信号与实际用水量之间的相对误差,并与Fast ICA算法计算出的用水量信号进行比较。

利用MATLAB软件中的Wavedec函数对DS管网入口流量信号进行3层小波分解与重构,小波变换在实际应用过程中的核心内容为小波基函数种类的选择,不同种类的小波基函数分解与重构的能力不同,分解与重构后的信号精度也不同。选择

db4、coif2、sym3、haar四种小波基函数,db4、coif2、sym3、haar分解重构后的尺度信号与DS山庄管网入口流量信号的皮尔森相关性系数分别为0.72、0.086、0.78、0.54。可见,sym3小波基函数分解后的尺度信号与管网入口流量的皮尔森相关性系数更大,因此选择sym3作为小波变换算法的基函数。经小波分解与重构后的尺度信号为有量纲数据,无需进行幅值还原,sym3小波基函数分解与重构后的尺度信号即为小波分解算法还原出的用水量信号。图3为sym3小波变换模拟用水量、Fast ICA模拟用水量与实际用水量的变化。

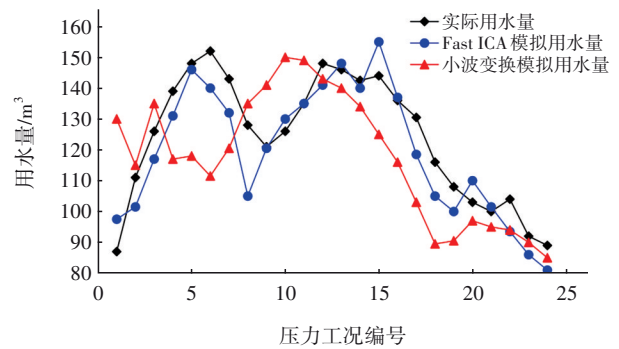


图3 sym3小波变换模拟用水量、Fast ICA模拟用水量与实际用水量的变化

Fig.3 Change in simulated water consumption by sym3 wavelet transform, simulated water consumption by Fast ICA and actual water consumption

由图3可知,与Fast ICA算法相比,小波变换算法模拟出的用水量与实际用水量相差较大,未能较好反映实际用水量的变化趋势。仅在工况21、22、23时与实际用水量较为相似,而且小波变换算法计算出的用水量整体变化趋势滞后于实际用水量的变化趋势。且sym3小波基函数分解后的尺度信号与管网入口流量的相关系数为0.78,小于Fast ICA法分解后与管网入口流量的相关系数0.876。综上所述,Fast ICA漏失量估算模型的计算精度更高,小波变换在本次数据集上并无普适性。

## 6 结论

基于Fast ICA的漏失量分离模型,构建了单水源支状管网单漏失点的算例管网。实验证实,经Fast ICA算法分离与重构后的漏失量与真实漏失量之间的相对误差为8.67%,且分离与重构后的漏失量变化趋势与真实漏失变化趋势一致。可见,在实验室条件下,此模型能够准确估算区域内的总漏失量,进而得到此区域的漏失状态,且Fast ICA法比小

波分解效果更好。在实验数据支撑的前提下,将Fast ICA法应用于工程实例中,也取得了良好的效果,可以为供水企业节能降耗、控制漏失量提供技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 徐兆凯. 基于纵向水量平衡的供水管网漏损控制研究与应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.  
XU Zhaokai. The Study and Application of Water Supply Pipeline Network Leakage Control Based on Longitudinal Water Balance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017(in Chinese).
- [2] 胡祖康,周同高,陈蓓青,等. 基于水量平衡法和夜间最小流量法的供水管网漏损评估[J]. 中国水利, 2020(21):65-67.  
HU Zukang, ZHOU Tonggao, CHEN Beiqing, *et al.* Assessment of water supply network leakage based on water balance and night minimum flow methods [J]. China Water Resources, 2020(21):65-67(in Chinese).
- [3] CASSA A M, ZYL J V. Predicting the leakage exponents of elastically deforming cracks in pipes [J]. Procedia Engineering, 2014, 70:302-310.
- [4] TUCCIARELLI T, TERMINI D, CRIMINISI A. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(3):277-285.
- [5] 郑成志,高金良,何文杰. 基于Fast ICA算法的物理漏损流量分析模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(6):1031-1039.  
ZHENG Chengzhi, GAO Jinliang, HE Wenjie. Leakage discharge analysis model based on Fast ICA algorithm [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(6): 1031-1039(in Chinese).
- [6] GAO J L, YAO F, XU Y P, *et al.* Analysis model of physical leakage flow based on blind source separation theory [J]. Procedia Engineering, 2017, 186:269-277.
- [7] 付卫红,周新彪,农斌. 单通道盲源分离的研究现状与展望[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(5):1-11.  
FU Weihong, ZHOU Xinbiao, NONG Bin. The research of SCBSS technology: survey and prospect [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(5):1-11(in Chinese).
- [8] 高金良,陈健勋,郑成志,等. 应用改进ICA-R算法的供水管网漏失量估计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(5):42-47.  
GAO Jinliang, CHEN Jianxun, ZHENG Chengzhi, *et al.* Leakage estimation of water supply network by improved ICA-R algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(5):42-47(in Chinese).
- [9] 王健. 城市供水管网漏失量估计[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2019.  
WANG Jian. Estimation of Leakage Quantity of Urban Water Supply Pipeline Network [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2019(in Chinese).
- [10] 费建刚,董深,吕谋,等. 城市供水管网仿真模拟分析平台的开发与应用[J]. 青岛理工大学学报, 2012, 33(3):48-53.  
FEI Jiangan, DONG Shen, LÜ Mou, *et al.* Development and application of water supply network simulation analysis platform [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2012, 33(3): 48-53 (in Chinese).
- [11] 李娟娟. 基于小波变换的供水管网漏损量化方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.  
LI Juanjuan. Study on Leakage Quantification Method of Water Distribution Network Using Wavelet Transform [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015(in Chinese).
- [12] 张璐. 沈阳市A小区供水管网漏失评价及控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.  
ZHANG Lu. Study on the Evaluation and Controlling of Leakage of Water supply Network in a Residential Area of Shenyang [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017(in Chinese).

作者简介:赵桓(1996-),男,山东日照人,博士研究生,主要研究方向为给排水系统分析与优化。

E-mail:zhaohuan961007@163.com

收稿日期:2024-12-22

修回日期:2025-03-15

(编辑:任莹莹)