

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221586

基于 Kalman 滤波算法的供水管网漏失量计算

王一霖, 董 深, 吕 谋, 赵 桓

(青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 随着我国城市化进程的加快, 对水资源的需求与日俱增, 而供水管网的漏损造成了水资源的大量浪费, 因此供水管网漏损控制研究已迫在眉睫。其中需要精确计算管网漏失量, 但目前方法均存在一定不足。基于 Kalman 滤波, 建立管网漏失分析模型, 分别运用节点漏失量经验公式、标准卡尔曼滤波算法(SKF)与新息自适应卡尔曼滤波算法(IAKF)计算管网的漏失量。以实际管网工程为例进行 EPANET 模拟, 并将所得计算结果进行比较。结果表明, 两种滤波算法计算结果均比节点漏失公式更加精确, 且 IAKF 算法的计算结果优于 SKF 算法。这也为加快漏损控制技术研究, 实施科学有效的漏损控制手段提供理论依据, 对城市节水和可持续发展具有一定的意义。

关键词: 供水管网漏失; 卡尔曼滤波; 新息自适应滤波; EPANET

中图分类号: TV672⁺.2; TU991

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0098-04

1 引言

城市供水管网系统承担着输送生活和生产用水的重要任务, 目前对城市供水管网的要求逐步提高。因此, 为了实现水资源的高效利用, 必须有效控制供水管网漏失, 其中一个重要前提是精确计算漏失量, 但目前尚无统一的精确计算供水管网漏失量的方法^[1]。除了常规的夜间最小流量法、水平衡分析法, 简彩等^[1]应用标准卡尔曼滤波算法(SKF 算法)计算管网漏失量, 但未做进一步的分析比较。最近使用改进卡尔曼滤波—新息自适应卡尔曼滤波(IAKF)的研究逐渐增多, 如杨丽君等^[2]利用 IAKF 算法进行脱靶量的预测; 曾令权等^[3]使用新息自适应混合卡尔曼滤波构建地表沉降预测模型。这两个预测模型均有较好的效果, 但在管网漏失量计算方面, IAKF 算法目前应用较少。因此, 本文构建基于 Kalman 滤波的管网漏失模型, 分别采用 SKF、IAKF 算法求解漏失量, 并与节点漏失量常用公式、EPANET 管网模型进行对比, 验证并比较了两种算法所建模型在计算供水管网漏失量方面的效果, 旨在为实施科学有效的漏损控制手段提供理论依据。

2 Kalman 滤波基本方程

Kalman 滤波是以最小均方误差为最佳估计准则, 采用信号和噪声的状态空间模型, 利用前一时刻的估计值和当前时刻的观测值完成状态变量的更新, 求出当前时刻的估计值, 并进行下一步迭代, 最终得出所求参数的最优值。即用上一次的最优结果预测当前值, 同时使用观测值修正当前值, 得到最优结果^[4]。

标准卡尔曼滤波器假设 k 时刻的真实状态是根据 $k-1$ 时刻的状态演化来的, 且需要在公式中加入不断变化的噪声, 来弥补无法预测的误差, 其状态方程为:

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k \quad (1)$$

其中 $w_k \sim N(0, D_k)$

式中, F_k 为应用于先前状态 x_{k-1} 的状态转移矩阵; B_k 为应用于控制矩阵 u_k 的控制输入矩阵; w_k 为过程噪声, 假设为具有协方差 D_k 的零均值高斯白噪声。

在时间 k 当前状态 x_k 的观测值为 z_k , 观测方程为:

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (2)$$

收稿日期: 2022-07-02, 修回日期: 2022-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778307); 山东省重点研发计划项目(2019GSF111003)

作者简介: 王一霖(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为给排水系统分析与优化, E-mail: jwswsc995@outlook.com

通讯作者: 吕谋(1965-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为给排水系统分析与优化, E-mail: qdlvmou@yeah.net

其中 $v_k \sim N(0, R_k)$

式中, H_k 为当前状态 k 的观测矩阵; v_k 为观测噪声, 假设为具有协方差 R_k 的零均值高斯白噪声。

Kalman 滤波算法通常被概念化为预测和更新两个不同的阶段。预测阶段使用先前时间的状态估计生成当前时间的状态估计, 这种预测状态估计被称为先验状态估计; 在更新阶段, 先验估计和当前观测之差(预拟合残差为 $z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}$) 与最佳卡尔曼增益相乘, 并与先前的状态估计相结合, 以完善状态估计。这种基于当前观测的改进估计被称为后验状态估计。卡尔曼滤波器的工作流程见图 1。



图 1 卡尔曼滤波器工作流程

Fig. 1 Flow chart of Kalman filter

3 基于卡尔曼滤波理论的供水管网漏失系统模型

3.1 建立模型前所做的假设

(1) 假设供水管网系统满足式(1)、(2)的约束条件, 过程噪声和观测噪声均为均值为 0 的高斯白噪声序列。

(2) 初始状态和每一时间步的噪声 $\{x_0, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k, v_1, v_2, \dots, v_k\}$ 都假定为互相独立。

(3) 将初始状态 x_0 视作随机向量且服从某种已知分布。

(4) 将供水系统想象为一个连续的随机动态系统, 按照稳定的时间序列将其离散化处理。

3.2 建立状态方程

将每个稳定工况下管网中用户用水量和其随时间的变化率作为状态量, 即:

$$x_k = \begin{bmatrix} Q_k \\ a_k \end{bmatrix} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中 $Q_k = Q_{k-1} + a_k t \quad (4)$

$$a_k = a_{k-1} + a_k^* t \quad (5)$$

$$a_k^* = (a_k - a_{k-1}) / (t_k - t_{k-1}) \quad (6)$$

式中, Q_k 为 k 时刻管网中用户总用水量, L/s; a_k 为 k 时刻管网中用户用水量随时间的变化率, L/s²。

综上所述, 供水管网的状态方程为:

$$\hat{x}_k = \begin{bmatrix} Q_k \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{k-1} \\ a_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ t \end{bmatrix} a^* + \omega_k \quad (7)$$

3.3 确定管网漏失量计算方法及建立观测方程

使用 $Q_i = Q_n - q_i$ 作为模型中的观测信号, 以 $z_k = (Q_1, Q_2, \dots, Q_k)$ 作为供水管网的观测量, 则有:

$$z_k = H_k x_k + v_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_k \\ a_k \end{bmatrix} + v_k \quad (8)$$

式中, Q_i 为用户用水总量; Q_n 为管网总供水量; q_i 为漏失量。

3.4 建立迭代公式及求解

步骤 1 根据管网上时刻运行状态 $k-1$ 使用系统状态方程对管网当前时刻运行状态 k 进行更新预测, 计算公式为:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k \quad (9)$$

式中, $\hat{x}_{k|k-1}$ 为基于上一时刻运行状态 $k-1$ 所预测的用水量; $\hat{x}_{k-1|k-1}$ 为对上一时刻运行状态 $k-1$ 处的最优预测结果; B_k 为控制矩阵; u_k 为控制输入量, 研究中无控制量, 即 $u_k = 0$ 。

步骤 2 对方差矩阵进行更新, 计算公式为:

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + D_k \quad (10)$$

式中, $P_{k|k-1}$ 为运行状态 $k|k-1$ 所对应的协方差矩阵; $P_{k-1|k-1}$ 为运行状态 $k-1|k-1$ 所对应的协方差矩阵; F_k 为状态转移矩阵; F_k^T 为状态转移矩阵的转置矩阵; D_k 为过程噪声的方差。

步骤 3 计算满足最小均方误差的最佳卡尔曼增益 K_k , 计算公式为:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (11)$$

式中, S_k 为预拟合残差协方差; H_k 为观测矩阵; H_k^T 为观测矩阵的转置矩阵; R_k 为观测噪声的方差。

步骤 4 式(10)、(11)即为对供水管网系统的预测, 结合用水预测量 $\hat{x}_{k|k-1}$ 和当前状态测量值 z_k 更新当前时刻运行状态 k 用水量, 以便达到最优值, 计算公式为:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (12)$$

式中, \tilde{y}_k 为预拟合残差; z_k 为当前时刻运行状态 k 的观测值。

步骤 5 根据步骤 1~4, 可以得到管网系统在当前时刻运行状态 k 下用水量的最优估计值 $\hat{x}_{k|k}$, 为了使卡尔曼滤波实现递推, 需要更新协方差矩阵, 计算公式为:

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (13)$$

式中, I 为单位矩阵, 当模型为单模型且测量量唯一时, 有 $I = 1$ 。

经过步骤 1~5, 系统进行下一时刻 $k+1$ 运

行状态时, Kalman 滤波可以实现实时计算并递推更新。

步骤 6 在 Kalman 滤波运行前, 通常要拟定初始值 x_0 、 P_0 。在实际管网运行中并不知道用水量均值, 但因初始值的取值并不影响最终滤波结果, 所以可以直接用管网中的第一个观测值作为初始值 x_0 , 同时将 P_0 取值为 0。

4 基于新息自适应卡尔曼滤波的供水管网漏失系统模型

采用 SKF 的前提是噪声的统计学特性已知, 而在管网的实际运行过程中, 噪声的统计学特性, 包括过程噪声的方差 D_k 、观测噪声的方差 R_k 通常是未知或处于变化的。假如 D_k 、 R_k 的取值小于实际噪声分布, 就会造成真实值的不确定范围过小, 可能会引起滤波发散; 反之, 假如 D_k 、 R_k 的取值大于实际噪声分布, 则会造成状态估计误差过大, 也有可能引起滤波发散^[5]。所以, 需要建立自适应卡尔曼滤波器, 实时调节 D_k 、 R_k , 这对提高滤波的稳定性和精确性具有重要意义^[3,6]。在自适应卡尔曼滤波中新息自适应卡尔曼滤波算法(IAKF)较为优秀^[7]。

对于式(1)、(2)所描述的线性离散系统, 使用新息自适应卡尔曼滤波, 该算法具有在线估计噪声的能力。其具体步骤如下。

步骤 1 计算 k 时刻的新息 I_k :

$$I_k = z_k - H_k x_{k|k-1} \quad (14)$$

步骤 2 计算 k 时刻的新息协方差 C_k :

$$C_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (15)$$

步骤 3 更新过程噪声协方差 D_k :

$$D_k = K_k C_k K_k^T \quad (16)$$

步骤 4 更新观测噪声协方差 R_k :

$$R_k = C_k - H_k P_{k|k-1} H_k^T \quad (17)$$

步骤 5 迭代计算。将式(16)、(17)代入式(10)、(11)中, 完成迭代计算, 步骤同 SKF 算法。

利用新息自适应估计对过程噪声和观测噪声进行实时修正估计, 综合观测数据进行滤波的迭代, 以达到提高滤波精度的目的, 这种方法称为新息自适应卡尔曼滤波算法。在管网运行噪声无法提前得知的情况下, 将该算法应用于管网漏失计算, 一定程度上会提高滤波预测结果的精度。

5 基于 Kalman 滤波的管网漏失模拟

以某市一区域管网为例, 采用 EPANET 对

管网进行模拟, 该软件中提供的射流器组件(Emitter)是与连接节点相关的设备, 通过喷嘴或控制模拟流量排向大气, 可用于模拟管网系统中与连接节点相连管段的漏失。通过射流点的流量为节点压强的函数, 即:

$$q = Cp^\gamma \quad (18)$$

式中, q 为流量; C 为流量系数; p 为压强; γ 为压强指数, 对于喷嘴, γ 取 0.5。

将 EPANET 中的射流器出流量作为管网漏失量的方法, 选取这一区域的 30 个节点初步算出节点的用水总量 Q_i , 然后采用 SKF 算法算出用水总量 Q'_i , 采用 IAKF 算出用水总量 Q''_i , 最后利用差值法算出 EPA 漏失量和两种滤波算法求得的漏失量(分别为 q_i 、 q'_i 、 q''_i), 与模型模拟的管网漏失量进行比较, 相对误差分别为 e_{r1} 、 e_{r2} 。另外, 节点漏失 q_k 常用经验公式^[8]:

$$q_k = \sum \frac{1}{2} \beta_k l_k (p_k)^{\alpha_k} \quad (19)$$

式中, α_k 为漏失指数; β_k 为漏失系数; p_k 为管段两端节点平均压力值, MPa。

使用节点漏失常用经验公式算出的漏失量用 q_i 表示, 相对误差为 e_{r3} 。计算结果见表 1。

表 1 EPA 结果与三种方法计算结果对比
Tab. 1 Comparison of EPA results and results of three methods

节点 编号	Q_i	Q'_i	Q''_i	q_i	q'_i	e_{r1} /%	q''_i	e_{r2} /%	q_i	e_{r3} /%
1	7.006	6.971	6.971	0.275	0.240	12.67	0.240	12.67	0.342	24.36
2	13.525	13.493	13.503	0.578	0.545	5.61	0.556	3.77	0.656	13.54
3	3.589	3.641	3.614	0.583	0.635	8.90	0.608	4.25	0.688	17.94
4	4.675	4.654	4.673	0.258	0.237	8.25	0.256	0.81	0.101	60.90
5	2.864	2.866	2.867	0.719	0.722	0.34	0.722	0.42	0.945	31.35
6	1.825	1.823	1.827	0.758	0.756	0.25	0.760	0.20	0.425	43.96
7	9.811	9.776	9.801	0.264	0.229	13.15	0.254	3.79	0.307	16.34
8	3.078	3.120	3.085	0.733	0.775	5.72	0.741	1.03	0.600	18.18
9	1.036	1.035	1.038	0.536	0.535	0.23	0.538	0.39	0.491	8.41
10	1.450	1.440	1.450	0.594	0.585	1.67	0.594	0.07	0.234	60.64
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
27	5.028	5.042	5.028	0.250	0.264	5.65	0.251	0.21	0.206	17.60
28	4.022	4.027	4.023	0.847	0.852	0.50	0.848	0.04	0.672	20.68
29	5.839	5.830	5.838	0.261	0.252	3.44	0.261	0.23	0.141	46.00
30	15.383	15.351	15.380	0.258	0.226	12.63	0.255	1.21	0.343	32.77

分析 3 种计算方法求得的管网漏失量与 EPA 模拟的管网漏失量, 发现采用经验公式算出的漏失量与 EPANET 模型模拟的漏失量相比, 相对误差范围在 0.47%~60.90%之间, 平均相对误差为 30.38%; 使用 SKF 算法算出的漏失量与 EPANET 模型模拟的漏失量相比, 相对误差范围在 0.03%~22.47%之间, 平均相对误差为 4.96%。使用 IAKF 算法算出的漏失量与 EPANET 模型模拟的漏失量相比, 除去初始值误差较大外, 剩余预测结果相对误差范围在 0.01%~4.25%之间, 平均相对误差为 0.85%。研究认为

利用两种滤波算法计算的漏失量结果较好,相对于公式计算更加精确,其中使用 IAKF 算法预测结果更优。三种方法计算的漏失量与 EPA 模拟结果的差值见图 2。

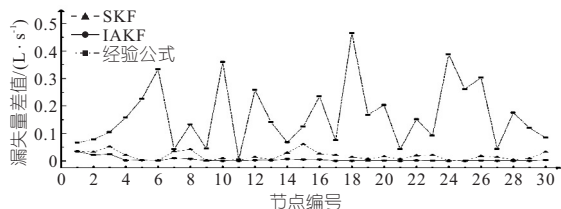


图 2 经验公式、SKF 和 IAKF 滤波算法求得
的漏失量与 EPA 模拟的漏失量差值

Fig. 2 The difference between the leakage calculated
by empirical formula, SKF and IAKF algorithms
and the leakage simulated by EPA

综上可知,利用两种 Kalman 滤波算法计算管网漏失量可行有效,但前几个节点的计算结果,运用 SKF 算法与模型模拟的漏失量之间数值差别较大,原因在于假定了初始值,且在观测量中加入观测噪声,所以算法开始运行时与实际值相差较大,但随着算法的递推,误差逐渐减小并呈现稳定状态。由数据可知,前 10 个节点漏失量差值为 0.02 L/s,后 10 个节点漏失量差值仅为 0.01 L/s。相对于 SKF 算法,使用 IAKF 算法的预测结果更加精确。前 10 个节点漏失量差值为 0.01 L/s,后 10 个节点漏失量差值仅为 0.001 L/s,均优于 SKF 算法。这得益于在 IAKF 算法中噪声的协方差不再是一个固定值,而是随着迭代过程的进行,对噪声的统计特性进行了实时估计与修正,这使过程噪声的方差 D_k 和观测噪声的方差 R_k 更加精确,进而提高了 Kalman 滤波的精度。

在 SKF 算法迭代过程中对参数 D_k 、 R_k 的选取通常是根据系统状态预估的,且为一定值,并不会对其进行更新,这导致存在一定误差。如果参数 D_k 、 R_k 可以实时更新,则卡尔曼滤波算法的处理效果更佳,适用性也更广。而 IAKF 算法恰好实现了这一想法,能在迭代过程中自动调整滤波过程中的噪声参数,从而使算法不仅仅适用于某一特定管网而具备通用性。

由于卡尔曼滤波的基本方程是时间域内的递推形式,其计算是一个不断“预测—修正”的过程,因此在求解过程中不需要获取和储存大量数据,而且一旦有新的观测值,就可以快速计算新的滤波值,这种滤波计算方法具有数据采集量小、计算效率高且适用于实时处理和计算机实现的特点。卡尔曼滤波仍存在误差,但其优点是巧妙地融合了观测值和滤波值,同时能剔除随机扰动误差的

影响,在不断计算过程中仍可以保持稳定的误差^[9]。

6 结论

a. 结合 Kalman 滤波,构建了基于 SKF、IAKF 滤波算法的供水管网系统数学模型,提出一种用于分析和计算管网漏失量的方法,结果表明两种算法用于计算管网漏失量可行有效,且 IAKF 算法的结果明显优于 SKF 算法。

b. 将供水管网运行状态离散化,并将模型简化,这可能导致建立的模型与实际运行状态有一定偏差。将供水管网看成一个连续的非线性系统,同时进一步了解运行过程中的过程噪声和观测噪声,尽可能分析出其统计学特性,这样就可以在更加准确的先验状态下开始算法的递推,从而使算法更加快速准确。

参考文献:

- [1] 简彩,姚芳,赵志领.应用 Kalman 滤波算法计算供水管网漏失量[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(8):60-64.
- [2] 杨丽君,刘博,王军,等.基于自适应新息卡尔曼滤波的脱靶量预测算法[J].指挥控制与仿真,2021,43(6):46-52.
- [3] 曾令权,熊鑫,陈竹安.新息自适应混合卡尔曼滤波算法构建地表沉降预测模型[J].工程勘察,2020,48(4):55-61.
- [4] 罗霄.基于卡尔曼滤波的干扰观测方法在预测控制中的应用[D].重庆:重庆大学,2012:88.
- [5] 周勇,张玉峰,张超,等.基于 Sage-Husa 的线性自适应平方根卡尔曼滤波算法[J].西北工业大学学报,2013,31(1):89-93.
- [6] FUAD A GHALEB, ANAZIDA ZAINAL, MURAD A. Rassam, et al. Improved vehicle positioning algorithm using enhanced innovation-based adaptive Kalman filter, Pervasive and Mobile Computing [J], 2017, 40: 139-155.
- [7] 张玉龙,王茁,杨巍.基于极大似然估计的新息自适应滤波算法[J].传感器与微系统,2018,37(1):141-144.
- [8] GEORGE GERMANOPOULOS. A technical note on the inclusion of pressure dependant demand and leakage terms in water supply network models[J]. Civil engineering systems, 1985, 2(3): 171-179.
- [9] 苏观南,郑东健,孙斌斌.卡尔曼滤波灰色模型在大坝变形预测中的应用[J].水电能源科学,2014,32(4):37-40.

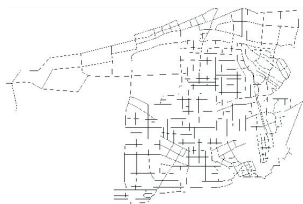


图 5 某市供水管网的简化拓扑结构

Fig. 5 Simplified topological structure of water supply network in a city

m,最低压力平均值则由 21.89 m 提升至 24.37 m。由此可知,充分利用各二次供水低位水箱和水池的调蓄容积,可降低管网供水节点的压力波动,起到稳定水压作用,同时能提升用水高峰期节点压力值,从而保障多层市政直供用户的用水需求。

6 结论

本文使用模糊 c 均值聚类算法分析不同用水特征的水箱,针对不同水箱提出了“水位调控”与“高峰限流”的错峰方案,解决了部分小区市政直供区域高峰期用水困难的问题,同时也避免了水

箱中产生“死水区”,提高了二次供水水质质量。通过高峰期的错峰,部分节点水压有所提高,具有一定的节能减碳作用,具有推广意义。

参考文献:

- [1] AVNI N, FISHBAIN B, SHAMIR U. Water consumption patterns as a basis for water demand modeling[J]. *Water resources research*, 2015, 51(10): 8165-8181.
- [2] PETERS L A H, CHANG H. Urban water demand modeling: Review of concepts, methods, and organizing principles[J]. *Water resources research*, 2011, 47(5): W05401.
- [3] 胡建军,唐常杰,李川,等.基于最近邻优先的高效聚类算法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2004, 36(6): 1-12.
- [4] 王俊岭,胡颖梦,徐强,等.基于 FAHP-灰色关联度分析的供水管网漏损影响因素评价[J]. *给水排水*, 2022, 58(3): 116-122.
- [5] 王雪,焦星瑞,许铮,等.城市供水管网微观模型的建立[J]. *中国资源综合利用*, 2017, 35(5): 123-124.

Study on Peak Staggered Storage of Secondary Water Supply Based on Cluster Analysis

WANG Qing-yi^a, WANG Tong^a, KANG Bing-qing^b, LI Zhong-yu^b,
XU De-lun^b, ZHAO Hong-bin^b, HONG Lei^b, LIU Jia-xiang^b

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Water Supply and Drainage,

Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: With the development of urbanization in China, secondary water supply has become a key part of urban water supply, but the utilization efficiency of water resources is low. This paper proposes the Demand Side Management (DSM) model based on the user's perspective. Starting from the user's Demand Side Management, the low water tank in the secondary water supply system at the end of the pipe network is taken as the research object. Using adaptive FCM clustering analysis and grey relational analysis, the paper analyzes the characteristics of user water use in different types of small areas, excavates the potential of regulation and storage and studies the peak-shifting scheme, and determines the appropriate peak-shifting scheme, so as to achieve good peak-shifting by demand-side management.

Key words: secondary water supply; low water tank; water use characteristics; adaptive FCM clustering analysis; grey correlation analysis method

(上接第 101 页)

Calculation of Water Supply Network Leakage Based on Kalman Filter Algorithm

WANG Yi-lin, DONG Shen, LV Mou, ZHAO Huan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization in China, the demand for water resources is increasing, and the leakage of the water supply pipe network has caused waste of water resources. Therefore, leakage control is imminent. The first is to accurately calculate the leakage of the pipe network, but the current methods have certain deficiencies. Based on the Kalman filter, this paper establishes an analysis model of pipeline network leakage, and uses the empirical formula of node leakage, standard Kalman filter (SKF) and innovation adaptive Kalman filter (IAKF) to calculate the leakage of the pipeline network, respectively. Taking the actual pipe network project as an example, the EPANET simulation was carried out, and the calculation results were compared. The results show that using both filtering algorithms is more accurate than the nodal leakage formula, and the result of the IAKF algorithm is better than that of the SKF algorithm. This provides a theoretical basis for accelerating the research on leakage control technology and implementing scientific and effective leakage control methods, which has certain significance for urban water saving and sustainable development.

Key words: water supply network leakage; Kalman filter; innovation adaptive Kalman filter; EPANET