

基于自适应卡尔曼滤波的用水量预测和爆管诊断

顾建强, 刘海星, 张 朝, 赵梦珂, 张 弛
(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 管道爆管事故不仅造成大量水资源的浪费,还严重影响周围环境和居民的生产生活,因此需要开发实时的爆管预警方法。根据大连理工大学西山生活区水表实时上传的流量数据,采用自适应卡尔曼滤波器,进行了为期 1 年的日流量实时预测,并根据预测曲线和实测曲线的偏差来判断爆管事故的发生,实现爆管诊断过程。结果表明,卡尔曼滤波器的预测可以随实测曲线的趋势而变化,并且预测曲线始终在实测曲线的均值上下波动,预测曲线既可以抵抗突变值的扰动,又能较准确地预测流量趋势;合理设置偏差限值,可以提高事故检测准确率。

关键词: 爆管诊断; 卡尔曼滤波; 流量预测; 偏差

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)07-0062-06

Flow Prediction and Burst Diagnosis Based on Adaptive Kalman Filter

GU Jian-qiang, LIU Hai-xing, ZHANG Chao, ZHAO Meng-ke, ZHANG Chi
(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Pipe burst incidents can waste a great amount of water and cause serious impacts to the surrounding environment, and public and industrial life. There is an urgent need for early warning methods for pipe burst. Based on the real-time metering records collected in the Xishan living area of Dalian University of Technology, the adaptive Kalman filter method was used to carry out the flow prediction experiments. The diurnal flow prediction experiments were based on data collected over a year. The residuals between the predicted and measured curves were used to determine the pipe burst occurrence. The experiments achieved the purpose of burst diagnosis. The results showed that the prediction of Kalman filter changed with the trends of the measured curve, and the predicted curve fluctuated close to the mean of the measured values. The predicted curve was resistant to the disturbance of the abrupt changes, and was able to accurately predict the flow trend. Kalman filter could improve the accuracy of the accident diagnosis with appropriately setting residuals.

Key words: burst diagnosis; Kalman filter; flow prediction; residual

随着我国城市化进程的加快,城市对水资源的需求急剧增长,而给水管网系统由于不断老化,爆管事故频发,输水能力下降,导致供水服务的供需矛盾比较突出。爆管事故不仅会造成水资源的浪费,影

响供水的经济性^[1],还会引起供水服务水平降低,增加供水公司的碳排放,甚至会带来水淹、锅炉爆炸等次生灾害,对周围环境和交通造成严重影响。

目前我国检测爆管事故主要通过地面溢水来判

断^[2],并根据用户投诉来确定事故发生的具体位置,此方式导致爆管事故确认和抢修之前,已经造成了大量水资源流失,并影响了周围环境和城市的正常运行。管道漏损检测采用基于经验的人工检测方式和运用声学等检测技术开展现场暗漏事故检测^[3],这种方法会耗费大量的时间、人力和物力,因此需要开发新的爆管预警方法,以提高突发事故的应对能力,爆管预警方法应具有经济性、安全性和高效性。任永昌等^[4]采用流量平衡法建立检测模型,通过对模型的分析来进行爆管检测,其条件要求比较高,建模的信息必须完全准确,并且流量监测点数据必须充足,而这在现实中往往难以达到。曹梅花^[5]根据爆管特征值的变化来分析爆管事件,但其管网模拟的精度有待提高,缺乏准确的节点流量计算方法。孟潇^[6]运用供水系统的历史资料,建立事故工况下的管网宏观模型,以此来实时监测管网运行,此方法对爆管事故判断不及时。李诚等^[7]基于CUSUM算法,利用观测值与目标值偏差的累积对给水管网爆管诊断进行分析,其诊断结果与历史数据密切相关,因此可能存在一定程度的误报。国外学者也对爆管问题展开了大量研究:Mounce等^[8]使用人工神经网络方法,处理供水管网中流量和水压数据,通过预测这些水力参数的概率分布函数,诊断长时间序列数据中的爆管事件,但该算法需要长序列的数据训练才能达到稳定收敛,并且需要定期更新,对历史数据要求较高;Misiunas等^[9]根据爆管时产生的瞬态压力波来进行爆管检测分析,其基于高频压力信号进行计算分析,实际效用较差。

笔者提出了基于实测流量数据的智能分析方法,应用自适应卡尔曼滤波算法^[10]来判断流量信号中的异常增大情况,进而推测爆管事件的发生。与上述方法相比,该方法具有计算速度快、效率高、预警及时,并且无需大量数据进行训练等优点。

1 自适应卡尔曼滤波器

卡尔曼滤波器是一组线性系统状态方程,其根据系统输入、输出观测数据,对系统状态进行最优估算^[11]。系统状态方程是一个递归函数,可将卡尔曼滤波器看作用递归方法解决离散数据线性滤波问题。因为观测数据中包括系统噪声和干扰的影响,所以最优估计也是一个滤波过程。

卡尔曼滤波器是利用观测量和系统的动态状态这两个信息,考虑它们的不确定性,以产生最佳估计

的过程。此不确定性假定遵循高斯函数的变化规律^[12]。本研究利用卡尔曼滤波器来估计供水管道中流量的正常值,管网系统中的爆管事故可通过估计值和测量值之间的差值来分析判断。

将第 $k-1$ 步和第 k 步的状态量之间的差异看作是符合高斯分布的噪声,在卡尔曼滤波器第 k 步时,在已知高斯白噪声 Q 的前提下,流量的状态量 x 可通过线性差分方程来表示:

$$x(k) = x(k-1) + Q \quad (1)$$

考虑到流量计测量和数据上传的误差,将由设备造成的不确定性看作符合高斯分布的噪声 R ,流量的观测量 z 可通过下述方程表示:

$$z(k) = x(k) + R \quad (2)$$

在第 k 步时,将公式(1)中的状态预测量记为 $x(k|k-1)$,将滤波器的估计值记为 $x(k|k)$, $q(k)$ 和 $r(k)$ 是 Q 和 R 的协方差,滤波器进行流量预测时按照以下5个步骤进行:

① 预估流量值

$$x(k|k-1) = x(k-1|k-1) \quad (3)$$

② 预估流量协方差

$$p(k|k-1) = p(k-1|k-1) + q(k) \quad (4)$$

③ 计算卡尔曼增益 K

$$K = p(k|k-1) [p(k|k-1) + r(k)]^{-1} \quad (5)$$

④ 更新流量预测值

$$x(k|k) = x(k|k-1) + K[z(k) - x(k|k-1)] \quad (6)$$

⑤ 更新流量协方差

$$p(k|k) = (1-K)p(k|k-1) \quad (7)$$

卡尔曼滤波器是递归计算过程,因此只需要在程序中存储最后更新的估计和协方差以及卡尔曼滤波器的参数就可以完成预测。滤波器需要输入多个数值(至少大于30)后才能达到收敛状态,稳定收敛的滤波器在运行时由不断更新的协方差 $q(k)$ 和 $r(k)$ 来控制。卡尔曼滤波器优于其他方法在于,其每次只需要根据前一时刻的测量变量计算当前的状态估计,而不是直接计算全部数据^[13]。

本试验采用自适应卡尔曼滤波器,其能根据滤波过程和观测值的合理权重自动调节参数,从而改进滤波设计、缩小实际误差以确定无偏估计。此种滤波方法将系统辨识与滤波估计有效地结为一体。

考虑到卡尔曼滤波器的原理,文中将同时进入滤波器的数据看作是一个真值在噪声影响下形成的

多个可能的实测值。每天的流量变化遵循相同的趋势,因此以1 d为研究对象。由于随时间变化的流量数据波动较大,因此在时间序列上的流量数据无法计算其均值和方差,因此卡尔曼滤波器很难在随时间演进的维度上得到合理的预测值。然而不同日同一时刻的流量值比较相近,理论上数值变化幅度较小,更符合卡尔曼滤波预测的原理,所以将不同日同一时刻的数据作为输入滤波器的实测值。

2 试验数据获取与处理

本研究的实测数据来自大连理工大学西山生活区流量监测数据。西山生活区内共有建筑40余栋,为满足其用水需求,从市政供水管线中引入两根管道为其供水,每根管道装有流量计,流量计按一定频率采集并上传相应的用水量数据,通过“大连理工大学节能监管平台”实时反馈给校园管理科。从节能监管平台中将两个水表的数据提取出来,发现水表2记录的用水量远远大于水表1,因为水表1只记录大学生服务楼的水量,因此将水表2统计的数据作为西山生活区实际用水量。从水表2中提取2013年10月—2014年8月的数据作为基础数据,进行了为期1年的正常流量预测试验。

节能监管平台中的数据是以小时为采样频率的水量数据,而本次研究需要的是更小频率下的流量数据,将数据由 m^3/h 换算成 L/s ,并通过线性插值的方式将该数据的采集频率缩小为15 min^[14]。

3 结果与分析

3.1 卡尔曼滤波器预测正常流量

以1 d为研究对象,每个时刻(15 min)单独建立滤波器,共有96个滤波器。滤波器的个数取决于采集频率,采集频率越高,滤波器个数越多。96个滤波器是1 d以15 min为间隔得到的,选取1 d中的4个典型时刻对滤波器进行分析,如图1所示。可知,预测曲线可以随实测曲线的趋势而变化,并且预测曲线始终在实测曲线的中间位置波动,预测值不会随观测值的剧烈变化而大幅波动,即滤波器可以预测出比较准确的流量均值。在实测流量曲线上,存在相邻两天流量值差异较大的数据,即单点数据异常波动,但仅仅通过此图上的数据异常不能判断该天发生了爆管事故,因为第 n 天 k 时刻的数据异常,确实会导致滤波器预测值与观测值差距较大,但在第 n 天 $k+1$ 时刻的数据不一定异常,每个滤波器都是独立且互不影响,最后是依据多个时刻连续

变化的流量数据异常判断管网是否发生爆管事故。

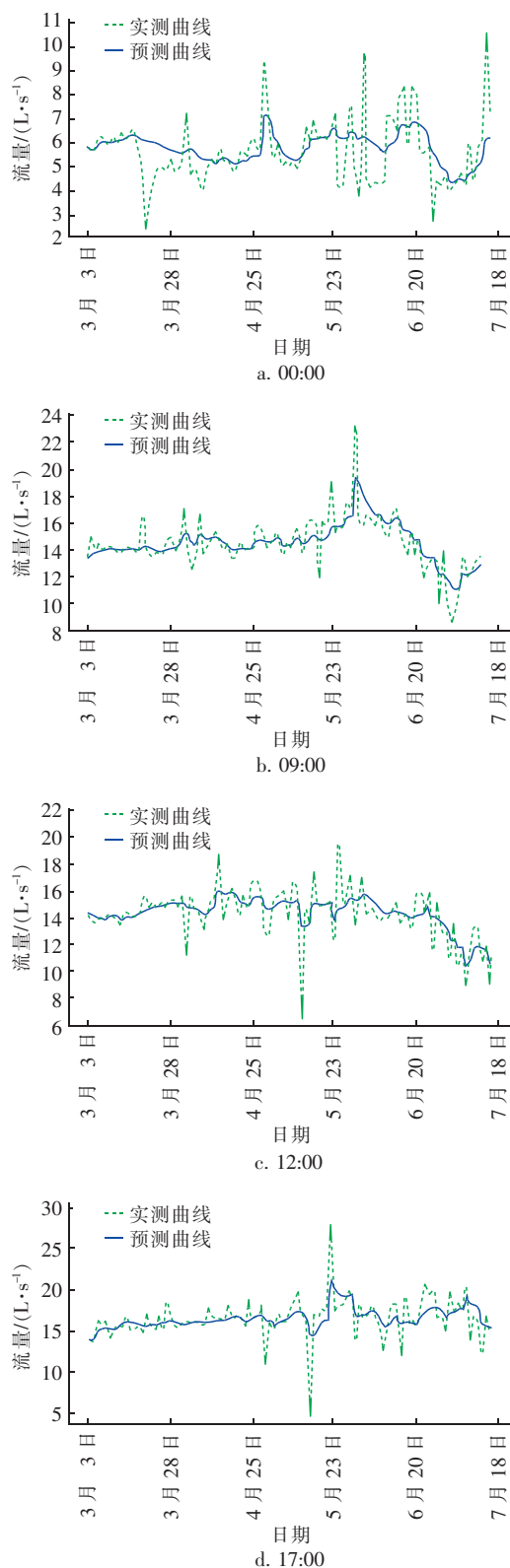


图1 3月3日—7月18日卡尔曼滤波器预测曲线
Fig. 1 Kalman filter prediction results from March 3rd to July 18th

根据试验结果(如图1所示),将预测的流量数据以时间轴和流量为参照系进行展示,选取典型日的流量变化曲线进行分析,如图2所示。

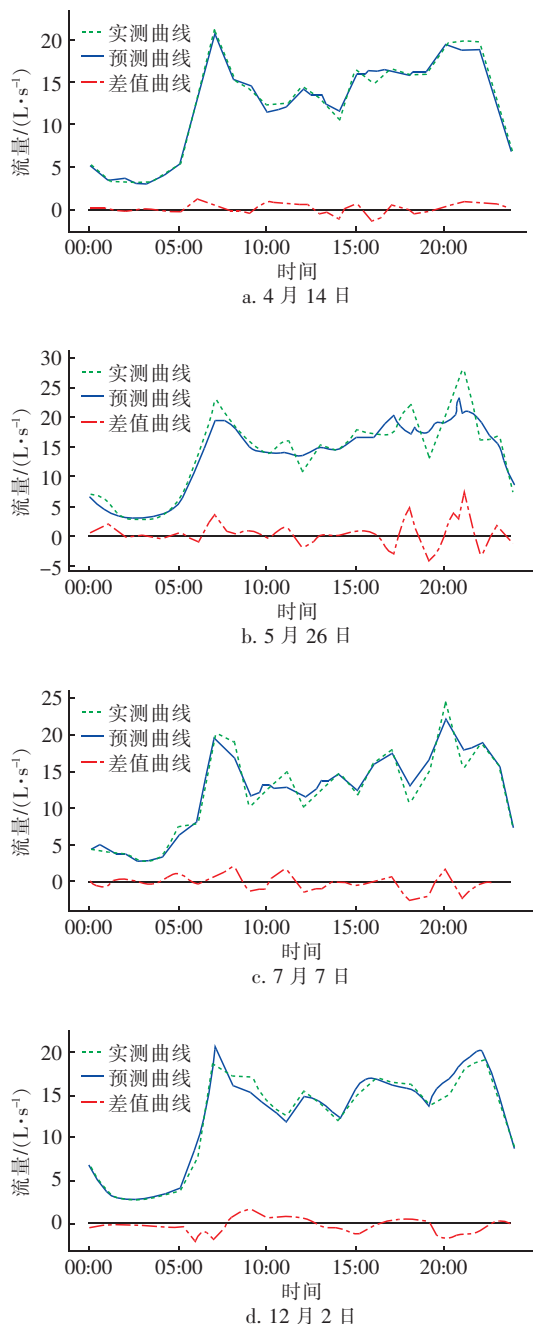


图2 典型日流量预测曲线

Fig. 2 Prediction curves for the typical days

本次试验选取2014年间隔一定时间(6周)的3个不同月周日的流量变化线,观察滤波器预测同一时间段流量变化时的效果;图2(d)为2013年12月周日的流量预测结果,用以判断整个预测试验的可靠度。

通过日流量预测曲线得出,日供水量呈早、晚两个高峰,夜间用水量较少,10:00—19:00用水量相对变化较小,该滤波器能比较准确地预测出工作日的正常流量变化趋势。因为该滤波器预测的是每天正常的流量值,因此根据实测曲线和预测曲线的差值,可以判断供水管网是否发生了爆管事故。当供水管网发生爆管时,管道内的流量会明显增大,并且会持续一定的时间,所以流量数据异常信号展示为流量实测值与预测值偏差较大,因此判断发生爆管事故的依据是红色实线在一定时间范围内基本位于直线 $y=0$ 以上,而位于直线 $y=0$ 以下的异常流量则暂不予考虑。图2中未出现明显的连续流量增大值,因此判断4个典型日的流量并未有异常(爆管)事故发生,这情况与实际事故记录相符。

3.2 用水规律差异对流量预测的影响

由于不同日学生生活的变化,节假日和正常工作日存在一定的用水规律差异,将节假日和正常工作日一起进行正常流量预测试验,分析预测曲线,如图3所示。

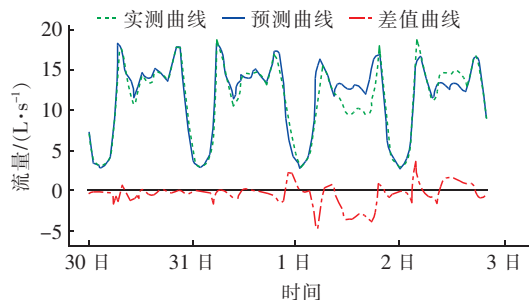


图3 12月30日—1月2日流量预测曲线

Fig. 3 Flow prediction curves from December 30th to January 2nd

图3中1月1日部分时段的实测流量明显低于临近几日同时段的预测流量,预测曲线与实测曲线存在较大差异,差值曲线向下偏离直线 $y=0$ 较远,而其他时段的流量变化则处于一个相对正常的范围。造成这个现象的原因是,1月1日为元旦,大多数同学离开宿舍进行活动,导致该天与正常工作日的用水规律存在较大差异。假设供水管网在该日发生爆管,由于图中实测曲线位于预测曲线以下,由爆管引起的流量增大将无法准确地通过预测曲线与实测曲线的差值反映出来,对真实的爆管事故诊断影响较大。因此,本研究将节假日与工作日的数据进行分类,分别针对节假日与工作日建立模型,对日用

水规律不同的日期分开进行预测,此方法可以提高流量预测的准确性。

图4展示了2月17日—20日的流量预测与实测值对比结果。其中2月23日是寒假最后一天,但23日之前便会有同学陆续回到学校,学生活动导致的用水量突然增大会被滤波器视为“异常数据点”而被检测出来。

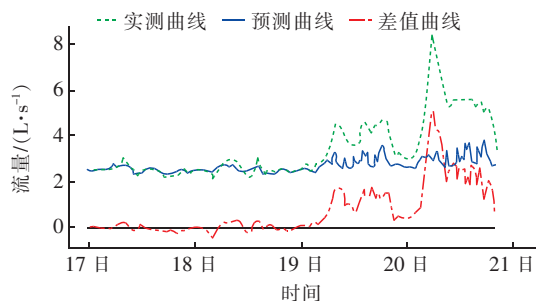


图4 2月17日—20日的流量预测曲线

Fig. 4 Flow prediction curves from February 17th to 20th

由图4可知,学生回到学校导致用水量大幅增加,实测曲线远远高于预测曲线,差值曲线几乎全天较大幅度地偏离了直线 $y=0$ 。由试验结果得出,除了爆管事故,突发性用水活动引起的流量增大同样可以通过滤波器检测出来,因此应结合实际事故记录及特定的用水事件,对滤波器的检测结果进行分析评估,以提高滤波器诊断爆管的成功率,防止发生误报。

3.3 爆管事故诊断分析

图5展示了6月3日—6日的流量预测曲线,根据实际日期的用水规律与管线维修报告,分析引起水量异常变化的原因。

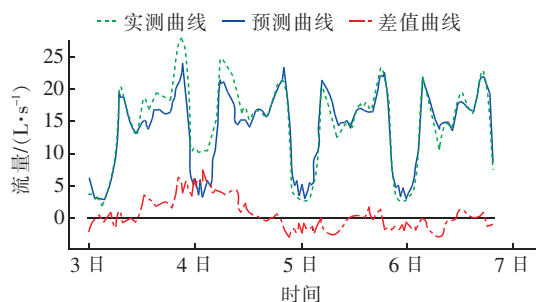


图5 6月3日—6日的流量预测曲线

Fig. 5 Flow prediction curves from June 3rd to 6th

在图5中,与其他时段较为正常的流量变化相比,6月3日12时—4日12时的流量存在明显的数

据异常,实测曲线高于预测曲线,导致差值曲线较大程度地偏离了直线 $y=0$,且该偏离由一系列连续数据点组成,可推测该时间段内可能发生了爆管事故。根据大连理工大学校园管理处的记录资料可知,2014年6月3日晚上西山生活区发生了一起爆管事故,与试验诊断结果相符。

4 结论

采用自适应卡尔曼滤波器,利用1年的流量历史数据进行预测试验,并根据预测曲线和实测曲线的偏差,进行了爆管等异常事故的诊断分析,得到如下结论:

① 卡尔曼滤波器的预测曲线可以随实测曲线的趋势而变化,并且预测曲线始终在实测曲线的均值上下波动,滤波器可以有效排除噪声(流量波动和设备误差等)的干扰,预测出一个比较准确的流量正常值。

② 单独的数据点异常不能成为判断爆管事件的标准,持续长时间的流量数据异常才可以推断爆管事故的发生,因此较高频率的流量数据收集及传输,可以提高诊断工作的效率,同时也要顾及流量监测点的电耗等方面的可操作性问题。

③ 在学校生活区节假日和工作日用水规律有明显差异,将不同用水规律的流量数据(以日为研究对象)分类,分别建立预测模型,可以提高预测模型的准确性,对辨识爆管事故产生有益的影响。

④ 除了爆管事故可以被检测出以外,突发性的用水活动也会干扰滤波器诊断效率,因此在实际诊断工作中,最好协同多部门(如热线服务系统)工作,以提高爆管预测预警的准确率。

参考文献:

- [1] 柯庆,周超,王林森,等. 供水管网爆管风险评估模型研究[J]. 给水排水,2016,42(7):114-118.
Ke Qing, Zhou Chao, Wang Linsen, et al. Burst risk assessment model for water supply networks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(7): 114-118 (in Chinese).
- [2] 何芳,刘遂庆. 供水管网爆管事故分析与对策探讨[J]. 管道技术与设备,2004(5):20-23.
He Fang, Liu Suiqing. Analysis on pipe break in water distribution system and its countermeasures [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2004(5): 20-23 (in Chinese).
- [3] 肖笛. 城市供水管网爆管事故在线监测研究[D]. 天

- 津:天津大学,2006.
- Xiao Di. Online Monitoring and Diagnosis Breaks in Urban Water Distribution System [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006 (in Chinese).
- [4] 任永昌,邢涛,刘大成. 基于GIS的供水管网爆管检测与关阀算法[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(6): 258 - 261.
- Ren Yongchang, Xing Tao, Liu Dacheng. Pipe burst detection and valve-turnoff algorithm on water supply pipe network based on GIS [J]. Computer Technology and Development, 2012, 22 (6): 258 - 261 (in Chinese).
- [5] 曹梅花. 基于SCADA系统的供水管网检漏检爆 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
- Cao Meihua. The Detection of Pipe Leakage and Break Based on the SCADA System Water Distribution System [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007 (in Chinese).
- [6] 孟潇. 基于SuperMap供水管网爆管事故分析研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2010.
- Meng Xiao. The Pipe Break Analysis and Research of the System of Urban Water Supplying Network Based on Supermap [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010 (in Chinese).
- [7] 李诚,杜坤,周明,等. 基于CUSUM算法的给水管网爆管检测分析[J]. 给水排水, 2016, 42(11): 118 - 121.
- Li Cheng, Du Kun, Zhou Ming, *et al.* Detection and analysis of water supply pipe burst based on CUSUM algorithm [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(11): 118 - 121 (in Chinese).
- [8] Mounce S R, Machell J. Burst detection using hydraulic data from water distribution systems with artificial neural networks [J]. Urban Water Journal, 2006, 3 (1): 21 - 31.
- [9] Misiunas D, Lambert M, Simpson A, *et al.* Burst detection and location in water distribution networks [J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2005, 5 (3/4): 71 - 80.
- [10] Ye G L, Fenner R A. Kalman filtering of hydraulic measurements for burst detection in water distribution systems [J]. Pipeline Syst Eng Pract, 2011, 2(1): 14 - 22.
- [11] 祝转民,杨宜康,李济生,等. Kalman滤波工程应用问题分析及改进方法研究 [J]. 宇航学报, 2002, 23 (3): 44 - 47.
- Zhu Zhuanmin, Yang Yikang, Li Jisheng, *et al.* The analysing of application problems and researching of modified method to Kalman filtering [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(3): 44 - 47 (in Chinese).
- [12] Houtekamer P L, Mrrchell H L. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique [J]. Monthly Weather Review, 1998, 126(3): 796 - 811.
- [13] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用 [J]. 软件导刊, 2009, 8(11): 33 - 34.
- Peng Dingcong. Pseudo-linear Kalman filter in passive target tracking [J]. Software Guide, 2009, 8(11): 33 - 34 (in Chinese).
- [14] Ye G L, Fenner R A. Study of burst alarming and data sampling frequency in water distribution networks [J]. Water Resour Plan Manage, 2014, 140(1): 1 - 7.



作者简介:顾建强(1994 -),男,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向为给水管网系统优化与计算。

E-mail: 121538934@qq.com

收稿日期: 2018 - 10 - 12