

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.007

# 服务于水力模型的监测点优化布置技术应用

王银宇<sup>1,2</sup>, 盛继红<sup>3</sup>, 潘斌<sup>3</sup>, 俞亭超<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省饮用水安全与输配技术重点实验室, 浙江 杭州 310058; 3. 新昌县水务集团有限公司, 浙江 绍兴 312500)

**摘要:** 针对新昌县现有的供水管网系统,结合灵敏度分析方法和基于监测范围的分析方法,并根据实际工程情况,以最小化水力校核误差为目标,对新昌县供水管网的压力及流量监测点的优化布置方案进行研究,开发了服务于新昌县微观水力模型的监测点布置技术。同时,考察了监测点数量与位置对水力模型校核误差的影响,在充分利用原有监测点的原则下,最终确定了新昌县供水管网监测点布置方案。结果表明,校核误差随监测点数量的增加而减小,并在监测点数量达到一定值时不再降低,最终的流量、压力监测点布置方案实际应用效果良好,可满足工程需要。

**关键词:** 供水管网; 水力模型; 监测点; 优化布置; 灵敏度分析

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)17-0039-06

## Application of a Technology for Optimizing Layout of Hydraulic Model Monitoring Points

WANG Yin-yu<sup>1,2</sup>, SHENG Ji-hong<sup>3</sup>, PAN Bin<sup>3</sup>, YU Ting-chao<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Drinking Water Safety and Distribution Technology, Hangzhou 310058, China; 3. Xinchang Water Group Co. Ltd., Shaoxing 312500, China)

**Abstract:** Based on the actual engineering situation, the optimal layout of water supply network pressure and flow monitoring points in Xinchang County were explored by using sensitivity analysis method and monitoring range analysis method, and a monitoring point layout technology serving the micro hydraulic model of Xinchang County was developed to minimize the hydraulic calibration error. In addition, the influence of the number and location of monitoring points on the calibration error of the hydraulic model was investigated, and the monitoring point layout scheme of the water supply network in Xinchang County was eventually determined based on the principle of making full use of the original monitoring points. The calibration error decreased with the increase of the number of monitoring points until the number of monitoring points reached a certain value. The final flow and pressure monitoring point layout scheme had a good practical performance and met the need of the project.

**Key words:** water supply network; hydraulic model; monitoring point; layout optimization; sensitivity analysis

供水管网水力模型分为宏观模型和微观模型<sup>[1]</sup>。1975年,国外学者Demoyer等<sup>[2]</sup>最先提出并建

通信作者: 俞亭超 E-mail: yutingchao@zju.edu.cn

立基于比例负荷原理的宏观水力模型。俞亭超等<sup>[3]</sup>基于SVM算法建立了测压点压力与泵站流量及水头之间的函数关系,以及各水源供水量与水源供水压力间的定量关系。而微观模型考虑了管网中水泵、阀门等元素,遵循水力学方程,并且需依据准确的管网运行数据对建立的模型进行校核<sup>[4]</sup>。所以微观水力模型校核的精确度依托于现实管网中压力和流量的监测数据,监测点的合理布置有助于实现对水力模型的精确校准和维护<sup>[5]</sup>。

本研究的监测点优化布置技术主要用于建立更加精确的水力模型。理论上监测点数量越多,水力模型校核越准确,但是由于监测点存在影响范围,过多的监测点造成经济上的浪费<sup>[6]</sup>,因此要结合实际情况选择影响范围广且对压力及流量变化感应灵敏的点作为监测点。

## 1 服务于水力模型的监测点布置方法

### 1.1 监测点布置方法

目前在监测点优化布置上较为常用的方法有两种:经验法和理论法。经验法不具备一定的普适性,仅适用于满足一定条件的供水管网。压力监测点布置的理论法通常包含聚类分析法和灵敏度分析法<sup>[7]</sup>。两者分别以灵敏度以外的参数和灵敏度作为指标,将具有相同或类似指标的节点归为同类,并从中寻找最优监测点位置<sup>[8]</sup>。本研究中压力监测点的布置采用灵敏度分析法。

流量监测点布置的理论方法大致分为基于反映管网节点流量变化和基于有效监测范围的监测点布置方法<sup>[9]</sup>。前者通过求出管网各个节点的敏感度,建立考虑流量敏感度的监测点优化布置模型,最后通过优化算法进行求解<sup>[10]</sup>。后者通过求解管网节点的影响系数,建立优化求解模型,最后确定最优监测点布置方案<sup>[11]</sup>。

### 1.2 服务于水力模型的监测点优化布置步骤

采用结合基于节点敏感度分析和基于有效监测范围的监测点布置方法,并遵循以下两点布置原则:

#### ① 布置点设置在影响范围最广的位置

每一个监测点影响一个控制区域,在这个控制区域内,节点压力之间的灵敏度很高,如果将其中的一个点设置为监测点,不仅这个点会变得精确,其控制范围内的点也会变得更加精确。

#### ② 布置点设置在校核误差最大的位置

用节点压力灵敏度矩阵来评价监测点的控制范围。影响系数灵敏度矩阵 $X_{ij}$ ,代表当 $i$ 节点产生一个压力变化时 $j$ 节点的压力变化。若 $i$ 节点存在一个较大的误差值,那么在 $i$ 节点布置一个监测点后, $i$ 节点变得精确了, $j$ 节点相应地也会被优化,所以应当选择误差较大的节点。

在充分利用新昌县现有监测点的基础上,先固定流量点的增加数量,然后不断增加压力监测点的数量,通过下述方法确定监测点最优分布方案,并分析水力模型校核误差随监测点数量增加的变化规律,最终确定最优布置方案,包括最优的监测点数量和监测点位置。监测点优化布置的具体步骤见图1。

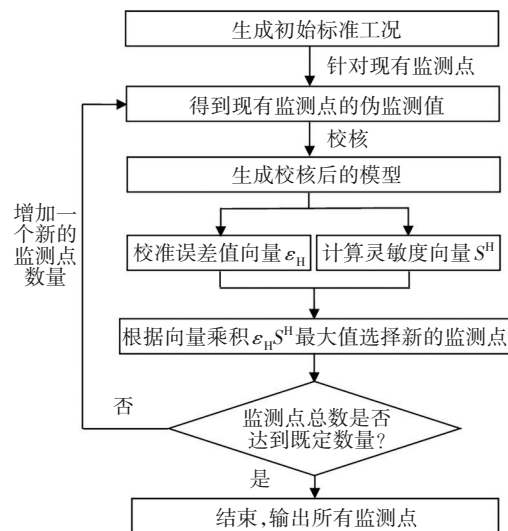


图1 监测点优化布置技术路线

Fig.1 Technical route of monitoring points optimization

① 选取2019年最高日最高时(6月27日8时)的总供水量,利用水力模型产生一个标准工况,标准工况的生成采用按管长分配的方法分配各节点需水量。通过EPANET模拟后可得到各个管段流量及节点压力值,将这组管段流量、节点压力值作为监测值的标尺,用于后续误差值的计算。

② 针对现有的监测点进行校核。通过第1步的标准工况,得到当前现有监测点的伪监测值。采用基于贝叶斯理论的数值方法,将先验需水量概率分布与监测结果相结合,进行节点需水量反演<sup>[12]</sup>。

先验节点需水量概率分布函数如下:

$$P_{\text{prior}}(X) = \prod_{i=1}^m \rho_{x_i}(X_i) \quad (1)$$

式中: $m$ 为节点需水量不同分布方式的种类,本研究所有节点先验需水量采用均匀分布, $m$ 取1; $\rho_{x_i}$ 为均匀分布下节点的概率密度函数。

节点监测值的正态似然函数如下:

$$P_{\text{likelihood}}(Y_i|X_i) = [(2\pi)^{n_{\text{obs}}} \det C_D]^{-\frac{1}{2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2} [g(X_i) - Y_i]^T C_D^{-1} [g(X_i) - Y_i]\right\} \quad (2)$$

$$C_D = C_T + C_M \quad (3)$$

式中: $Y_i$ 为监测值; $X_i$ 为节点需水量; $n_{\text{obs}}$ 为监测值的数量; $g(X_i)$ 为非线性水力函数; $P_{\text{likelihood}}(Y_i|X_i)$ 为正态似然函数; $C_T$ 为测量值的协方差矩阵; $C_M$ 为模型结构不确定性协方差矩阵。

将先验需水量概率分布函数与监测值似然函数相乘,得到后验节点需水量概况分布函数,并通过求最大化后验分布来计算节点需水量。

$$\max P(X_i) \propto P_{\text{likelihood}}(Y_i|X_i) P_{\text{prior}}(X) \quad (4)$$

③ 通过第2步校核后,与第1步产生的标准工况对比,得到各个节点的压力、流量误差矩阵如下:

$$\varepsilon_H = [\varepsilon_H^1 \varepsilon_H^2 \cdots \varepsilon_H^n]^T \quad (5)$$

$$\varepsilon_Q = [\varepsilon_Q^1 \varepsilon_Q^2 \cdots \varepsilon_Q^n]^T \quad (6)$$

计算得到当前监测点数量下的平均误差  $\varepsilon_H/n$ 。

④ 产生所有节点影响系数矩阵。

先创建灵敏度矩阵:

$$X_{ik} = \left| \frac{H_k - H'_k}{H_i - H'_i} \right| \quad (i, k = 1, 2, \cdots, n) \quad (7)$$

式中: $n$ 为节点数量; $H_i$ 、 $H_k$ 分别为节点 $i$ 与 $k$ 的原始压力; $H'_i$ 、 $H'_k$ 分别代表节点 $i$ 发生变化后节点 $i$ 、 $k$ 的压力; $X_{ik}$ 代表当节点 $i$ 产生一个压力变化后,节点 $k$ 的压力变化。

对矩阵各行求和,获取影响系数矩阵 $S$ :

$$S^H = \left[ \sum_{k=1}^n X_{1k} \sum_{k=1}^n X_{2k} \cdots \sum_{k=1}^n X_{nk} \right]^T \quad (8)$$

⑤ 将误差矩阵与影响系数矩阵相乘,按照先布置压力监测点的原则,选择乘积最大的点布置压力监测点:

$$M = \begin{bmatrix} \varepsilon_H^1 S_1^H \\ \varepsilon_H^2 S_2^H \\ \vdots \\ \varepsilon_H^n S_n^H \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$M_k = \max(\varepsilon_H^i S_i^H) \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (10)$$

⑥ 选择流量误差最大的点布置流量监测点:

$$T^k = \max(\varepsilon_Q^j) \quad (j = 1, 2, \cdots, n) \quad (11)$$

⑦ 判断当前的监测点数量是否达到了既定的监测点数量,若达到则计算结束,若未达到则回到第2步。

## 2 实例分析

### 2.1 供水管网基本情况

新昌县设计供水量约为  $14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,由3个水厂分别供给3个主要供水区域,供水人口约26万人,供水受益面积在  $90 \text{ km}^2$  以上。

通过软件建立新昌县供水管网的拓扑结构,包含节点2181个、管段2574个、水源3个。将新昌县3个供水区域分别用A、B、C区表示,其中A区域包含二次泵站前后两个区域,分别用A1和A2区表示,各自供水范围如图2所示。

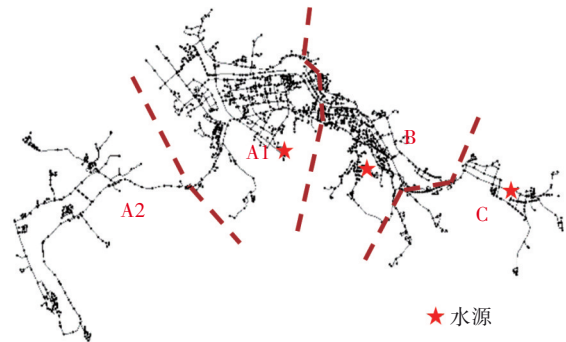


图2 新昌县供水管网拓扑结构

Fig.2 Topological structure of water supply network in Xinchang County

### 2.2 监测点布置现状分析

目前SCADA系统中能够接收回传数据的监测点共有69个,其中有34个流量点、23个压力点以及12个流量压力点(排除重复点以及不回传数据的点位,共有33个流量点和32个压力点,其中A1供水区域有16个流量点、14个压力点,A2供水区域有8个流量点、4个压力点,B供水区域有6个流量点、11个压力点,C供水区域有3个流量点、3个压力点)。以上现有监测点大部分由管理部门根据经验布置在大用户进口处。

随着新昌县供水管网扩建改建,以及未来城乡一体化供水的需求,原有供水管网信息系统无法准确反映真实管网的工况,亟需合理增设压力监测点和流量监测点,建立精确的水力模型和科学完善的供水管网监测系统。

### 2.3 监测点数量优化计算结果

通过上述方法计算得到A供水区域水力模型校核误差随监测点数量的变化曲线,如图3所示。从图3(a)可以看出,在流量点数量确定的情况下,随着压力点数量的增多,误差值逐渐降低;但是当压力点数量超过24个后,误差值明显降低减缓。当压力点数量为24个、流量点数量为18个时误差值最小,增加到19个时误差反而增大。所以,在A1供水区域建议布置24个压力点和18个流量点,相较于现状,增加了10个压力点和2个流量点。

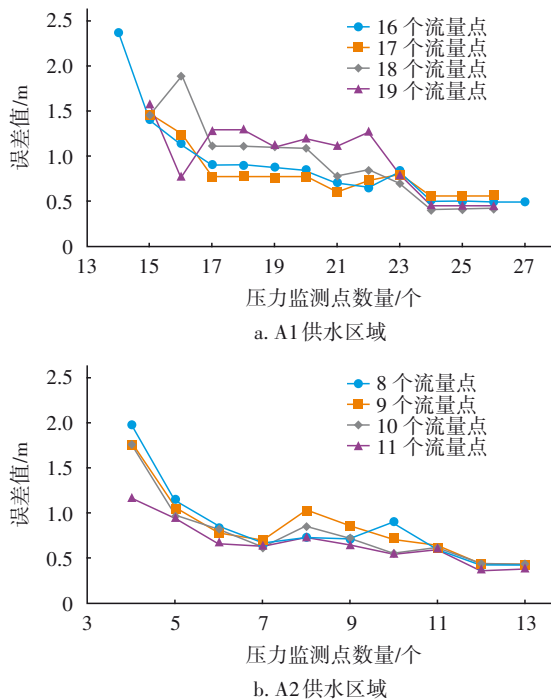


图3 A供水区域水力模型校核误差随监测点数量的变化  
Fig.3 Change of error with number of monitoring points in area A

从图3(b)可以看出,在流量点数量确定的情况下,随着压力点增多,误差值逐渐降低,但是当压力点的数量超过12个后,误差值明显降低减缓,甚至升高。当压力点数量为12个时,流量点数量为11个时误差值最小。所以,A2供水区域建议布置12个压力点和11个流量点,相较于现状,增加了8个压力点和3个流量点。

B供水区域水力模型校核误差随监测点数量的变化曲线如图4所示。可以看出,在B供水区域,当压力点的数量超过16个后,水力模型的校核误差值明显降低减缓,甚至升高。当压力点数量为16个时,流量点数量为8、9个时,误差值均较小,考虑到

成本,流量点可选择8个。所以,B供水区域建议布置16个压力点和8个流量点,相较于现状,增加了5个压力点和2个流量点。

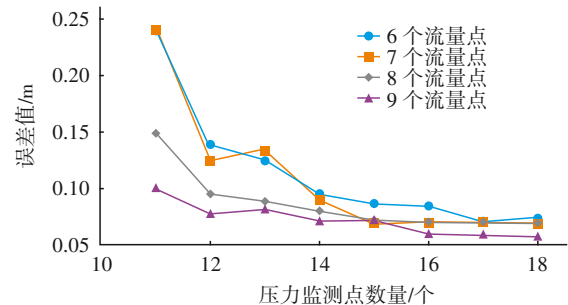


图4 B供水区域水力模型校核误差随监测点数量的变化  
Fig.4 Change of error with number of monitoring points in area B

C供水区域水力模型校核误差随监测点数量的变化曲线如图5所示。

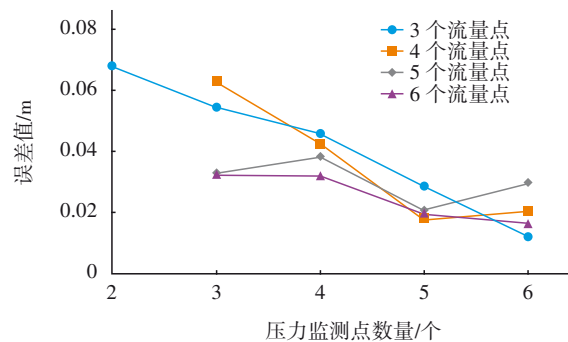


图5 C供水区域水力模型校核误差随监测点数量的变化  
Fig.5 Change of error with number of monitoring points in area C

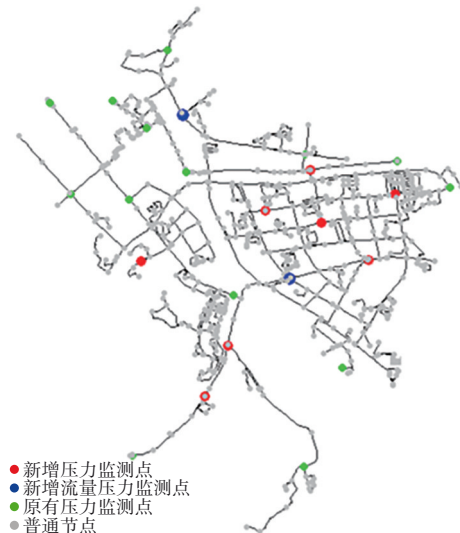
从图5可以看出,在C供水区域,当压力点的数量超过5个以后,误差值变化在不同流量点数量情况下规律不一。当流量点的数量为3、6个,压力点数量为6个时,误差值较小,并且当流量点数量为3时,误差值最小,所以流量点可选择3个,既节省成本又减少误差。所以,C供水区域建议布置6个压力点和3个流量点,相较于现状,增加了3个压力点,而流量点数量不变。

### 2.4 监测点优化分布

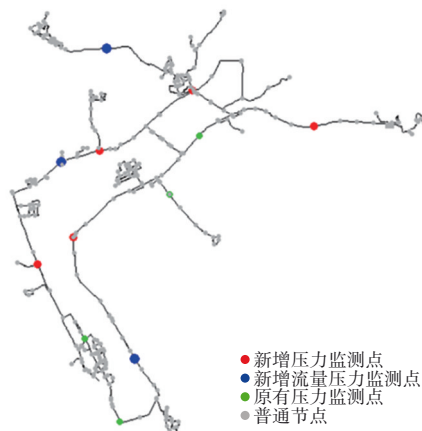
监测点数量和监测点位置的优化同时进行。A1、A2、B、C供水区域监测点分布如图6所示。最终,得到新昌县供水管网监测点布置方案,共有压力监测点58个,流量监测点40个,并且布置流量点的地方均布置相应的压力点,在达到预期目标的基础上降低了安装成本。



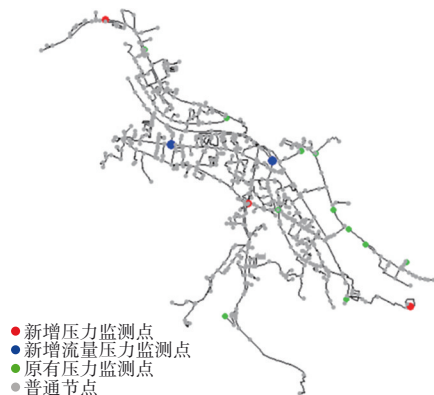
优化结果中,压力监测点大部分布置在干管和管网末端,符合《城镇供水管网运行、维护及安全技术规程》(CJJ 207—2013)中供水管网运行管理的布置原则,其数量也满足 CJJ 207—2013 规定的每 10 km<sup>2</sup>不应少于 1 个测压点。



a. A1 供水区域监测点位置分布



b. A2 供水区域监测点位置分布



c. B 供水区域监测点位置分布



d. C 供水区域监测点位置分布

图6 各供水区域监测点位置分布

Fig.6 Location of monitoring points in each area

### 3 结论

随着供水规模的增大,供水系统运行管理更加复杂,建立一个能够反映现实管网真实运行工况的水力模型十分重要。而准确可靠的管网运行监测数据是准确校核水力模型的基础,因此建立健全科学合理的,为模型校核、运行管理提供数据基础的管网监测系统极为关键。

① 采用基于贝叶斯理论的数值方法,将先验需水量概率分布与监测结果相结合,校核节点需水量,并将该方法应用于新昌县供水管网。结果显示,在优化布置监测点以后,能够满足国内管网的校核标准。

② 以选择影响范围最广和误差最大的节点布置监测点为原则,采用灵敏度分析方法,并结合实际管网结构,充分利用原有监测点,能够得到最优的监测点布置方案。在流量监测点数量确定的情况下,校核误差普遍随压力监测点数量的增加而不断减小,呈现一定的规律性。但压力监测点的数量存在饱和性,当压力监测点的数量达到一定值时,校核误差减小趋缓。

### 参考文献:

- [1] 马悦,于浩,闫鹏,等. 供水管网水力建模与漏失控制[J]. 供水技术,2014,8(1):19-25.  
MA Yue, YU Hao, YAN Kun, et al. Hydraulic model of water supply network and leakage control [J]. Water Technology, 2014, 8(1):19-25 (in Chinese).
- [2] DEMOYER R, HORWITZ L B. Macroscopic distribution system modeling [J]. Journal of American Water Works Association, 1975, 67(7):377-380.
- [3] 俞亭超,张土乔,吕谋. 基于SVM的管网状态估计模

- 型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(9): 45-48.
- YU Tingchao, ZHANG Tuqiao, LÜ Mou. State estimation model of pipe network based on SVM [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(9): 45-48(in Chinese).
- [4] 张志军, 张存章, 黄志超. 给水管网水力模型的建立及应用[J]. 供水技术, 2011, 5(4): 45-47.
- ZHANG Zhijun, ZHANG Cunzhang, HUANG Zhichao. Establishment and application of hydraulic model in water supply network [J]. Water Technology, 2011, 5(4): 45-47(in Chinese).
- [5] 尹兆龙, 信昆仑, 项宁银. 供水管网压力监测点布置的实用方法[J]. 中国给水排水, 2014, 30(2): 28-32.
- YIN Zhaolong, XIN Kunlun, XIANG Ningyin. A practical method for arranging pressure monitoring points in water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(2): 28-32(in Chinese).
- [6] 陈峰, 张蕊, 赵明. 利用水力模型优化布置供水管网压力监测点[J]. 净水技术, 2015, 34(4): 105-109.
- CHEN Feng, ZHANG Rui, ZHAO Ming. Layout optimization of monitoring points for water supply pressure of distribution network system in application of hydraulic model [J]. Water Purification Technology, 2015, 34(4): 105-109(in Chinese).
- [7] 周书葵, 许仕荣. 城市供水管网水压监测点优化布置的研究[J]. 华南大学学报(自然科学版), 2005, 19(1): 59-63.
- ZHOU Shukui, XU Shirong. Research on optimal layout of water pressure monitoring points in urban water supply network [J]. Journal of South China University (Natural Science Edition), 2005, 19(1): 59-63(in Chinese).
- [8] 孙光. 供水管网监测点的优化布置研究[J]. 建筑与预算, 2017(2): 34-36.
- SUN Guang. Research on optimal arrangement of water supply network monitoring points [J]. Construction and Budget, 2017(2): 34-36 (in Chinese).
- [9] 肖笛, 赵新华, 梁建文. 给水管网流量监测点优化布置的研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(3): 88-91.
- XIAO Di, ZHAO Xinhua, LIANG Jianwen. Optimal location of flow monitoring stations of water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(3): 88-91(in Chinese).
- [10] 武佳佳, 王威, 马东辉. 供水管网健康监测流量点优化布局集成方法研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2018, 40(5): 487-492.
- WU Jiajia, WANG Wei, MA Donghui. Integration method on the optimal layout of flow monitoring points in water supply network for health monitoring [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2018, 40(5): 487-492 (in Chinese).
- [11] 王绍伟, 李树平, 刘先品, 等. FCM聚类算法在给水管网流量监测点优化布置中的应用[J]. 给水排水, 2009, 35(Z1): 441-444.
- WANG Shaowei, LI Shuping, LIU Xianpin, et al. Application of FCM clustering algorithm in optimal layout of flow monitoring points in water supply network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(Z1): 441-444(in Chinese).
- [12] CHU S, ZHANG T, SHAO Y, et al. Numerical approach for water distribution system model calibration through incorporation of multiple stochastic prior distributions [J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 134565.
- 
- 作者简介: 王银宇(1995-), 女, 浙江台州人, 硕士研究生, 研究方向为给排水管网系统及其优化运行。
- E-mail: wangyinyu1203@163.com
- 收稿日期: 2020-03-20
- 修回日期: 2020-05-16

(编辑: 任莹莹)