

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于高程邻域信息的FCM算法管网漏损控制策略

李红艳, 常子峰, 史文韬, 张峰, 毛立波, 石可铨

引用本文:

李红艳, 常子峰, 史文韬, 等. 基于高程邻域信息的FCM算法管网漏损控制策略[J]. *控制与决策*, 2025, 40(3): 946-954.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0293>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制

A fast distributed control of smart grids with nonlinear dynamic model

控制与决策. 2021, 36(8): 1849-1854 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1696>

#### 基于混合邻域约束项的改进FCM算法

Mixed neighborhood constraints based fuzzy C-means algorithm

控制与决策. 2021, 36(6): 1457-1464 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1321>

#### 含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制

Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system

控制与决策. 2021, 36(5): 1069-1077 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

#### 机器视觉在轨道交通系统状态检测中的应用综述

A survey of the application of machine vision in rail transit system inspection

控制与决策. 2021, 36(2): 257-282 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1199>

#### 基于2D-OTSU图像边缘检测的回转窑工况识别方法

Condition recognition method of rotary kiln based on 2D-OTSU image edge detection

控制与决策. 2021, 36(10): 2427-2434 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0348>

# 基于高程邻域信息的FCM算法管网漏损控制策略

李红艳<sup>1,2†</sup>, 常子峰<sup>1</sup>, 史文韬<sup>3</sup>, 张峰<sup>1</sup>, 毛立波<sup>4</sup>, 石可铨<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600; 2. 吕梁学院 建筑与土木工程系, 山西 吕梁 033000; 3. 中核第七研究设计院有限公司 建筑工程设计院, 太原 030032; 4. 山西大地环境投资控股有限公司 科创管理部, 太原 030032)

**摘要:** 供水管网的漏损控制与监测难题普遍存在, 传统基于压力敏感度对管网进行分区并布设压力传感器的方法仅考虑管网节点压力变化情况, 并未结合管网自身高程信息, 减压阀调压时局部压力过高效果不明显. 针对此问题, 首先将管网节点压力敏感度与高程差耦合, 将FCM算法中目标函数中的距离定义为特征距离与高程距离之和, 建立包含高程邻域信息的新的聚类目标函数, 实现节点分区聚类; 在分区入口处布设减压阀, 采用GA求解阀后压力实现分区内各节点压力的实时精细化调控, 联合智能方法与经验法在各个分区布置压力传感器, 并通过漏损模型验证传感器布置的合理性. 结果表明: 分4个区的方案将BIN管网的漏损率降低至6.55%, 相较初始管网降低22.79%, 联合智能算法与经验法进行传感器布设对管网漏损的监测效果显著, 引入高程信息的FCM算法管网漏损控制优化策略具有有效性和优越性.

**关键词:** 供水管网; FCM算法; 高程邻域信息; 漏损控制; 减压阀; 压力传感器; 漏损监测

中图分类号: TU991.33 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0293

引用格式: 李红艳, 常子峰, 史文韬, 等. 基于高程邻域信息的FCM算法管网漏损控制策略[J]. 控制与决策, 2025, 40(3): 946-954.

## Network leakage control strategy based on high range neighborhood information based on FCM algorithm

LI Hong-yan<sup>1,2†</sup>, CHANG Zi-feng<sup>1</sup>, SHI Wen-tao<sup>3</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>, MAO Li-bo<sup>4</sup>, SHI Ke-quan<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China; 2. Department of Architecture and Civil Engineering, Lvliang University, Lvliang 033000, China; 3. Institute of Architectural Engineering Design, CNNC No.7 Research and Design Institute Co., Ltd., Taiyuan 030032, China; 4. Shanxi Dadi Environment Investment Holdings CO Ministry of Science and Innovation Management, Taiyuan 030032, China)

**Abstract:** Leakage control and monitoring problems of water supply pipe networks are common. The traditional method of partitioning networks based on pressure sensitivity and deploying pressure sensors only considers the pressure changes of network nodes, without combining the elevation information of the network itself, and the effect of excessive local pressure during pressure regulation by pressure reducing valves is not obvious. To solve this problem, the pressure sensitivity of network nodes is coupled with elevation difference, and the distance in the objective function of the fuzzy C-means (FCM) algorithm is defined as the sum of feature distance and spatial distance. A new clustering objective function containing elevation information is established to realize node partitioning clustering. The pressure reducing valve is arranged at the entrance of the partition, and the genetic algorithm (GA) is used to solve the pressure behind the valve to achieve real-time fine control of the pressure of each node in the partition. The pressure sensors are arranged in each partition jointly with the intelligent algorithm and the empirical method, and the rationality of the sensor arrangement is verified by the leakage model. The results show that the scheme divided into four areas reduces the leakage rate of the Balerna irrigate network (BIN) to 6.55%, which is 22.79% lower than that of the initial network. The sensors layout combined with the intelligent algorithm and empirical method has a remarkable effect on

收稿日期: 2024-03-21; 录用日期: 2024-07-12.

基金项目: 山西省基础研究计划自然科学研究面上项目(202203021221060).

责任编辑: 刘向杰.

†通信作者. E-mail: lhy3162@126.com.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

the monitoring of network leakage, and finally proves that the optimization strategy of network leakage control based on the FCM algorithm introducing elevation information is effective and superior.

**Keywords:** water supply network; FCM algorithm; high range neighborhood information; leakage control; pressure reducing valve; pressure sensor; leakage monitoring

## 0 引言

供水管网是现代城市基础设施的重要组成部分, 保证城市地区饮用水的运输、分配和供应<sup>[1-2]</sup>, 由于管网老化和维护不善易导致管网监控和安全性难以得到保障, 造成供水管网中的漏损最高可达30%<sup>[3]</sup>, 其带来的经济损失和社会影响不可估量. 因此, 漏损控制需要新的和有效的方法来应对这些挑战.

目前, 在数字孪生以及智慧水务背景下, 独立计量 (district metered area, DMA) 分区和压力管理都是漏损控制的有效手段<sup>[4]</sup>, DMA分区是在分区边界关闭阀门和加装流量计, 将整个管网划分为若干个相对封闭的独立计量区域, 通过对出入口流量监控及入口压力调控, 达到管网漏损控制和压力管理的目的. 由于分区时要关闭边界阀门, 不可避免会造成水头损失增大, 从而实现降低压力, 但对于末梢节点分区后很难满足最小服务水压<sup>[5]</sup>.

本文将分区与压力管理相结合, 将原本 DMA 分区边界阀门替换为减压阀, 有助于实现分区内部压力精细化调控. 目前, 国内外聚类主要使用传统模糊 C-均值 (fuzzy C-means, FCM) 聚类方法进行分区, 例如, 牟天蔚等<sup>[6]</sup>运用 FCM 算法确定阀门位置, 并使用布谷鸟算法求解阀门开度实现压力管理; Li 等<sup>[7]</sup>采用 FCM 算法实现管网分区, 并挑选分区代表节点布置传感器监测漏损, 通过算例表明效果良好. 但这些研究仅通过压力敏感度进行 FCM 分区, 并未考虑管网自身特性, 如高程等, 极易导致一些高程差较大的管网分区离群点较多, 调压效果较差.

综上, 本文采取引入高程邻域信息的 FCM 算法聚类分区, 首先实现区域划分确定减压阀位置再进行减压阀压力管理, 可以有效实现分区漏损监测. 采取降低供水管网富余压力的压力管理方法, 可有效降低因压力过高造成的管网漏损. 目前, 国内外实现压力管理主要通过减压阀优化调度, 例如, Xu 等<sup>[8]</sup>提出了一种在线优化控制减压阀来调控剩余压力的方法, 并采用连续线性规划算法进行求解; Paola 等<sup>[9]</sup>提出使用和声搜索算法求解给水管网减压阀设定值模型的方法; 乔怡超等<sup>[10]</sup>提出一种基于 NAGA-II 的减压阀优化控制模型方法; 吴玮等<sup>[11]</sup>提出一种采用混合蛙跳算法求解减压阀最优安装位置及压力设置值的方法. 但现有研究仅停留在对管网整体进行压

力管理, 并未对管网局部压力过高区域进行精细化降压, 同时缺乏对压力管理后续的漏损监测研究.

本文的主要贡献如下: 1) 提出一种基于压力敏感度并将高程邻域信息引入 FCM 聚类分区的方法, 旨在解决供水管网需水节点分布分散、高程差较大产生的漏损难题; 2) 在分区入口处布置减压阀并采用遗传算法 (genetic algorithm, GA) 对减压阀后压力进行实时优化, 从而实现供水管网分区压力管理, 以不同分区方案的成本和降漏效果为控制指标, 选出最优的减压阀布置方案; 3) 通过智能方法与经验法相结合的方法选出压力传感器布置方案, 并采用减压阀建立漏损模型, 验证传感器布置的合理性.

## 1 相关工作

本节主要介绍对管网进行系统性漏损控制策略.

### 1.1 漏损分析

漏损是供水管网客观存在的, 根据漏损点是否可以被发现, 是否可以通过主动检漏措施探测到, 将管网漏损划分为 3 种<sup>[12]</sup>:

1) 明漏 (reported burst). 明漏指供水管网中容易被用户、路人或检修人员发现的漏损点, 漏损量较大, 多为爆管事故, 对漏损点周围环境和相关用户造成较大不良影响.

2) 暗漏 (unreported burst). 暗漏一般通过主动检漏措施监测得到, 这些漏损点的漏损量处于中等水平, 不能从埋设表面上发现. 暗漏在供水管网系统比较常见, 具体漏损量大小取决于系统的压力和土壤情况等, 而持续时间则取决于主动检漏的积极性和实施强度.

3) 背景漏损 (background leakage). 背景漏损是指管网中单个漏损点的漏损水量小于 400 ~ 500 L/h 时, 通常不能被一般的检漏设备检测到的漏损, 又称不可检测漏损 (undetectable leaks). 控制背景漏损唯一有效且经济的方法是通过管网压力管理.

### 1.2 压力管理

一般而言, 明漏漏水量较大溢出地面, 无需特殊仪器即可直接观察到, 因此不做过多讨论. 本文主要研究系统性解决背景漏损过高以及暗漏难以监测的问题.

在供水管网中将压力变化相似的节点聚在一个区域有助于进行局部压力管理与监测. 当管网中某

一个节点的需水量出现变化或者发生漏失事故时势必影响到相互关联管段内的水流状态以及相关节点的水压变化,通过 EPANET 进行水力模拟改变任意一个节点需水量得到其他节点的压力变化差.在此引入“影响系数 $X(i, j)$ ”的概念,即当节点 $i$ 需水量发生变化时对节点 $j$ 的压力影响.遍历管网中所有节点,计算所用压力均为24 h内的平均压力,并将影响系数矩阵归一化得到敏感度矩阵 $X_{ij}$ ,有

$$x(i, j) = \frac{X_i - X'_i}{X_j - X'_j}, \quad (1)$$

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x(1, 1) & \dots & x(1, j) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x(i, 1) & \dots & x(i, j) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中: $i, j$ 为管网节点编号; $X_i$ 和 $X_j$ 分别为初始管网 $i, j$ 节点的压力,单位 $\text{mH}_2\text{O}$ ; $X'_i$ 和 $X'_j$ 分别为 $i$ 节点需水量发生改变后 $i$ 和 $j$ 节点的压力,单位 $\text{mH}_2\text{O}$ .

通过对 FCM 分区模型的求解分别得出不同分区下供水管网节点的聚类分区方案;然后在各个分区的出入口处布设减压阀,基于 GA 对分区内部压力进行精细化调控,同时实现背景漏损降低.

### 1.3 漏损模拟

在 EPANET 中模拟漏失的发生,通过压力传感器监测压力变化情况,判断管网中是否发生漏失及漏失的大致位置,证明压力传感器布设是否合理以及候选压力传感器是否有效.

管道发生漏损时漏损流量可以利用水力穿孔口出流式计算,对于地下的供水管道,漏损流量计算<sup>[13]</sup>如下:

$$L_Q = C_1 \times C_2 \times A_d \times \sqrt{2gH}. \quad (3)$$

其中: $L_Q$ 为供水管网漏损流量,单位 $\text{m}^3/\text{s}$ ; $C_1$ 为覆土对漏水出流的影响,折算为修正系数,根据管径大小取值, DN15 ~ DN50 取 0.96, DN75 ~ DN300 取 0.95, DN300 以上取 0.94<sup>[14]</sup>; $C_2$ 表示孔口出流流量系数,一般取 0.62; $A_d$ 为漏点处开口面积,单位 $\text{m}^2$ ; $H$ 为破坏处水头,单位 $\text{mH}_2\text{O}$ ; $g$ 为重力常数,一般取  $9.8 \text{ m/s}^2$ .

管网漏损程度通过破坏处出流流量大小进行衡量,但事实上该值一般难以测量,如果用漏点处开口面积 $A_d$ 来衡量破坏程度,会忽略漏口大小与管径之间的关系,不能真实体现管道的损害程度,因此本文引入漏点开口处面积与管道断面面积比 $K_a$ 表征管道破损程度

$$K_a = \frac{A_d}{A_o}. \quad (4)$$

其中: $K_a$ 为漏损面积比; $A_d$ 为漏点处开口面积,单位 $\text{m}^2$ ; $A_o$ 为管道断面面积,单位 $\text{m}^2$ .

本文采用减压阀调压的方式模拟漏失,通过蒙特卡罗法在可信空间内模拟阀后压力<sup>[15]</sup>,设置 100 组压力值 $H$ ,设置所模拟的漏损面积比为 0.05,通过式 (3) 计算出不同 $H$ 所对应的漏点流量 $L_Q$ ,将管道发生漏损后各传感器、候选传感器与正常状态下的传感器压力值进行对比.通过式 (5) 得到传感器的压力变化率,同时运行 EPANET 计算出各分区节点变化率的平均值,分析压力监测点是否能监测管网漏损发生,候选压力监测点是否能取代压力检测点.有

$$\alpha = \frac{\Delta H}{H_o} = \frac{H_t - H_o}{H_o}. \quad (5)$$

其中: $\Delta H$ 为漏损前后监测点的压力变化值,单位 $\text{mH}_2\text{O}$ ; $H_o$ 与 $H_t$ 分别为漏损前和漏损发生时监测点的水压,单位 $\text{mH}_2\text{O}$ .

## 2 相关方法

本节介绍所使用相关算法.

### 2.1 模糊 C 均值 (FCM) 算法

FCM 聚类算法最早在 1985 年由 Bezdek 等<sup>[16]</sup>提出,是一种使数据集按照相似度划分到多个簇之中的聚类方法<sup>[17]</sup>.在供水管网,设 $n$ 个节点压力变化值组成的集合为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,则管网分割问题转化为将这 $n$ 个节点分成 $c$ 个聚类的问题.根据节点压力变化程度和聚类中心的加权相似测度,对目标函数进行迭代优化以确定最佳聚类.FCM 算法的目标函数为

$$J(U, V) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^\alpha d_{ij}^2. \quad (6)$$

其中: Ozkan 等<sup>[18]</sup>将幂指数 $\alpha$ 的取值范围确定为  $1.4 \leq \alpha \leq 2.6$ ,在 FCM 算法应用时一般取 2; $u_{ij}$ 为第 $i$ 类中节点 $x_j$ 的隶属度; $d_{ij} = \|x_j - v_i\|$ 为节点 $x_j$ 与聚类中心 $v_i$ 的欧氏距离.

利用拉格朗日乘子法,可以推导出式 (1) 的两个优化迭代公式分别为

$$u_{ij} = 1 / \sum_{k=1}^c (d_{ij} / d_{kj})^{2/(n-1)}, \quad (7)$$

$$v_i^l = \sum_{j=1}^n [(u_{ij})^\alpha x_j] / \sum_{j=1}^n (u_{ij})^\alpha. \quad (8)$$

### 2.2 基于高程邻域信息的 FCM 聚类算法

#### 2.2.1 相似度测度

相似度测度是定义聚类的根本,样本与聚类中心的相似度测度对于大多数聚类算法是必不可少

的<sup>[19]</sup>. 由于在供水管网中运用传统 FCM 算法分区时, 仅通过改变节点需水量所得压力敏感度进行样本点聚类, 这样实际上忽略了节点自身很有价值的高程邻域信息, 相邻节点间具有近似的特征值更可能属于同一类<sup>[20]</sup>, 此 FCM 算法对噪声十分敏感. 为克服这一问题, 必须同时利用特征距离 (即节点压力敏感度) 和高程信息计算相似度测度.

**定义 1** 设  $N_j^i$  为  $x_j$  邻域的节点中属于第  $i$  类的节点数目,  $N_j$  为  $x_j$  邻域的节点数目,  $p_{ij} = N_j^i/N_j$ , 则节点  $x_j$  到聚类中心  $v_i$  的高程距离  $d_{ij}^H$  定义为

$$d_{ij}^H = 1 - \frac{\sum_{t \in \Omega_j} u_{it} p_{it}}{\sum_{k=1}^c \sum_{t \in \Omega_j} u_{kt} p_{kt}}. \quad (9)$$

其中:  $p_{ij}$  为邻域的贡献;  $\Omega_j$  是以  $x_j$  为中心的  $N \times N$  的邻域区间,  $N$  为常数, 通常取 3 或 5, 本文取 3.

领域中节点相互影响, 若节点  $x_j$  邻域中所有节点均属于第  $i$  类, 则认为  $x_j$  位于第  $i$  类区域内, 并使高程距离  $d_{ij}^H = 0$ ; 反之则认为  $x_j$  位于第  $i$  类区域外, 并使高程距离  $d_{ij}^H = 1$ . 否则  $d_{ij}^H \in (0, 1)$ .

**定义 2** 设管网中节点  $x_j$  到聚类中心  $v_i$  的特征距离为  $d_{ij}$ , 则改进后的节点  $x_j$  到聚类中心  $v_i$  的距离为

$$d_{ij}^* = d_{ij}^P + \theta d_{ij}^H. \quad (10)$$

其中:  $d_{ij}^* = \|x_j - v_i\|$  为  $x_j$  距节点聚类中心  $v_i$  的欧氏距离;  $\theta$  为权重因子, 用来调节特征距离与高程距离对目标函数中距离的贡献.

### 2.2.2 改进的 FCM 聚类算法

基于高程邻域信息的新 FCM 聚类算法是通过管网中节点和聚类中心的加权相似度测度来实现的, 对目标函数进行迭代优化以确定最佳聚类. 根据式 (7), 得出改进 FCM 算法的目标函数为

$$J^*(U, V) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n (u_{ij}^*)^\alpha (d_{ij}^*)^2, \quad (11)$$

其中:  $l$  为迭代次数, 一般取 100; 其余符号同前.

同标准 FCM 算法, 改进的 FCM 算法也可以用拉格朗日乘子法求解, 得到形如式 (4) 和 (5) 的模糊隶属度和聚类中心的迭代函数.

算法实现步骤如下.

step 1: 在聚类前需要从 EPANET 的 input 文件中读取管网数据, 设置分区最小规模、分区最大规模和管网需水量等基本参数<sup>[21]</sup>, 确定聚类数目  $c$ , 设定迭代停止阈值  $\varepsilon = 10^{-5}$  以及迭代次数  $l = 0$ , 确定模糊分类矩阵  $U^{(0)}$  和  $V^{(0)}$ .

step 2: 利用初始隶属度和聚类中心的结果, 根

据最大隶属度原则计算出  $N_j^i$  和  $p_{ij}$  后, 根据式 (9) 计算出  $d_{ij}^H$ .

step 3: 根据式 (10) 计算出  $d_{ij}^*$ .

step 4: 根据隶属度和聚类中心的迭代函数计算隶属度矩阵  $U^{*(1)}$  和聚类中心矩阵  $V^{*(1)}$ .

step 5: 达到所设定迭代停止阈值, 即  $\max\{u_{ik}^{(1)} - u_{ik}^{(L-1)}\} < \varepsilon$  或达到最大迭代次数  $l_{\max}$  时停止迭代, 根据隶属度  $J^*$  求得分区结果, 否则令  $l = l + 1$ , 循环至 step 2.

### 2.3 基于 GA 算法的减压阀优化调度

GA 是一种启发式全局搜索算法, 经过染色体交叉、变异和选择优良父辈而形成更优的子代种群, 通过迭代择优选择, 最终产生最适合的个体最优解<sup>[22]</sup>. 本文探讨的减压阀后压力为单目标函数处理离散变量, 所以选择 GA 算法优化阀后压力. 不同 FCM 分区均采用 GA 进行优化阀后压力, 以确保不同配置方案不可能出现不同的阀后压力优化过程.

1) 决策变量.

本文决策变量为减压阀后压力设定值, 在优化过程中设定值保留两位小数, 其维度为所布置减压阀的数目.

2) 目标函数.

用 PlatEMO 平台中的主函数文件 platemo.m 选择 GA 求解模型输出求得的最优解<sup>[23]</sup>, 有

$$\min f = \min k \omega_j \sum_{i=1}^n C_L L_i P_{i,j}^\gamma. \quad (12)$$

其中:  $\omega_j$  为模拟周期内第  $j$  时刻对应时段的水费;  $\varepsilon, k$  为单位换算系数;  $C_L$  为单位长度管道泄漏量与节点使用压力之间的关系系数;  $L_i$  为与节点  $i$  连接的管段总长度的一半, 单位 m;  $P_{i,j}$  为第  $j$  时刻节点  $i$  的压力, 单位 m;  $\gamma$  为漏损指数系数.

3) 约束条件.

① 节点数量约束, 供水范围必须覆盖所有节点.

② 节点压力约束, 所有节点的压力均高于最小服务水头.

③ 管网水力平衡约束, 满足流体力学三大方程.

### 2.4 压力传感器布置方法

实际管网节点数目较多, 对每个节点进行压力监测成本太高, 因此需要对管网压力传感器进行优化布置. 管网压力传感器的优化布置方法主要有有人工经验法和理论分析法, 本文提出一种智能方法与人工经验相结合的综合评估挑选压力传感器的新方法.

#### 2.4.1 优化布置压力传感器

选择用节点间压力敏感度的平均欧氏距离量化

压力敏感度<sup>[24]</sup>, 对于一个包含  $n$  个节点的子区与其余  $n-1$  个节点平均欧氏距离最小的节点, 其水压波动情况也最能反映该子区内各节点水压波动情况, 在该节点布置压力传感器. 因此, 使得平均欧氏距离取最小值的节点  $i$  即为该子区压力传感器的布置位置. 通过第 1.2 节确定压力敏感度矩阵的方法得到归一化后的矩阵  $X_{ij}$ , 通过下式计算得到任意一个节点与其他节点的欧氏距离:

$$R(i, j) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_p'(i, k) - X_p'(j, k))^2}, \quad (13)$$

$$\bar{r}_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq j}^n r(i, j). \quad (14)$$

其中:  $R(i, j)$  为节点  $i$  和节点  $j$  压力敏感度的欧氏距离, 反映了节点  $i$  与节点  $j$  的水压波动相似程度, 该值越小表明节点  $i$  与  $j$  被划分到一个子区的可能性越大;  $\bar{r}_i$  为节点  $i$  压力敏感度的平均欧氏距离.

#### 2.4.2 经验法布置候选压力传感器

经验法选取压力检测点需考虑的原则有: 1) 供水主干实际管网是依据管网管径来选择干管, 管径越大能够输送的流量越大, 其重要性也越大, 越可能成为供水主干同时为提高供水可靠性, 通常挑选连接水源点的管段作为干管; 2) 干管末梢与大用户位置, 干管联通的节点末梢一般为大用户位置; 3) 高程起伏较大处与供水分界线<sup>[25]</sup>, 本文在管网分区过程中已经将高程差作为权重进行考虑, 因此高程起伏较大处一般为供水分界线.

### 3 仿真实验与分析

#### 3.1 实验案例

以西班牙巴勒马管网 (Balerna irrigate network, BIN) 为实际案例. BIN 管网是对西班牙 Sol-Poniente 区域现有网络的改造, 该区域位于西班牙 Almeria 省的 Guadalquivir 流域. BIN 管网地势分布呈现北高南低, 如图 1 (b) 所示, 尤其是西南部节点地势大多

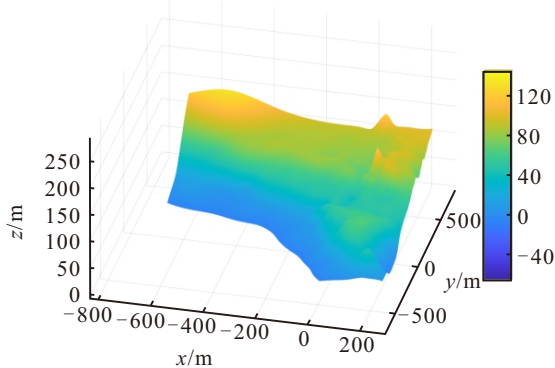


图1 BIN 三维地形图

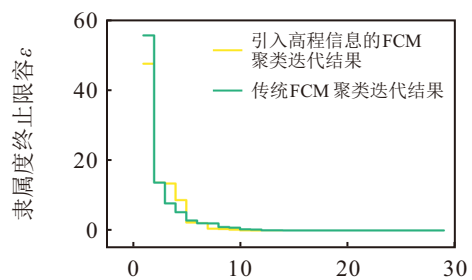
低于 5 m, 而东北部节点地势约在 100 m 左右. 这种高程差较大的供水管网设计时通常以最高日最高时需求量作为设计水量, 且需满足管网中各节点压力均高于规定最小服务水头这一目标, 导致在用水低峰时段, 管网地势较低处运行压力就会偏高, 使得管网漏损增大, 在管道落差较大的部位极易发生爆管, 因此需要进行系统性压力管理和监测.

#### 3.2 漏损控制结果

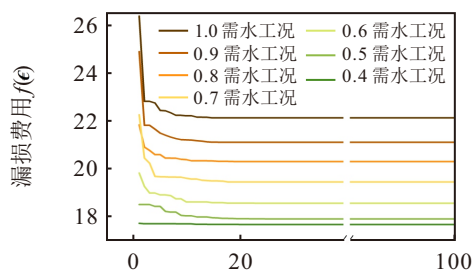
采用单台处理器为 Intel® Core™i7-12700H、16 GB 运行内存的笔记本电脑, 在 EPANET 中建立供水管网的压力驱动分析水力模型, 利用 Matlab 调用 EPANET 工具箱, 将 “Balerna.inp” 文件导入, 设置整个管网的实际需水量为 855.5 L/s, 分区数目为 2~7 个, 权重因子  $\theta = 0.2$ , 延时模拟 24 h. 运用 FCM 算法对管网完成不同分区的聚类, 并在分区边界安装减压阀, 使用 GA 算法对 6 种分区下的不同工况进行减压阀阀后压力优化, 每种用时约为 14 000 s.

##### 3.2.1 算法分析

本文将高程邻域信息引入传统的 FCM 聚类算法, 对于解决高程差较大的供水管网中节点聚类问题具有重要意义, 有效避免了大量离群点出现, 使管网分区更科学. 同时由图 2 (a) 可知, 引入高程信息的 FCM 聚类迭代收敛速度快且效果好, 极大地节省了算法运行时间. 供水管网需要满足所有节点达到最小服务水头, 一些节点由于高差较大导致局部压力值大, 将这一类节点进行分区压力管理, 能很好地解决局部压力过大的问题. GA 算法迭代结果表明一般 30



(a) 迭代次数



(b) GA 算法迭代收敛曲线

图2 迭代收敛曲线

代前目标函数  $f$  便能完成收敛, 对于不同需水情况下均可收敛表明这种求解模型具有良好的鲁棒性<sup>[26]</sup>.

### 3.2.2 经济性分析

减压阀安装具体投资费用见表 1. 安装费、现场测试费以及减压阀维护费用等取 1 000€/台, 减压阀的服务年限一般为 5 ~ 10 a.

使用 Matlab 通过式 (12) 计算出未分区时整个管网因漏损产生的费用为 588€/d, 对分 2 ~ 7 个区的阀后压力优化求解所得漏损费用分别为 481、478、454、465、471 和 474 €/d. 结果表明, 通过分区布设减压阀优化压力管理对于管网降低漏损费用有显著作用, 其中分 4 个区相较于未分区降低了 22.79%, 效果最好. 分区后影响漏损费用的指标主要有: 减压

阀数目和布设减压阀需新增的管道. 由于在 EPANET 中建立减压阀优化调度模型是通过在两个节点之间的管段上安装减压阀, 需要在两个节点之间设置一个新的节点, 根据流向在管道上游与新节点处设置减压阀, 但这种 EPANET 中减压阀的布设方式看作新增一条管道, 相应的漏损也会增加. 因此, 减压阀数目随着分区数目增加而增加, 而降漏效果是先升高后降低. 通过计算所有分区方案均能在减压阀服务年限内实现盈利, 分 4 个区时利润最大. 因此, 本研究通过技术经济比较后选择分 4 个区的减压阀布置及阀后压力优化的方案, 该方案用约 106 d 即可收回成本, 之后带来的年利润为 48 910€.

表1 不同分区方案下安装减压阀成本与利润

阀门直径/mm	113	144.6	180.8	285	361.8	成本合计	日利润	收回成本天数
阀门单价/€	370	510	680	1 870	2 450	(€)	(€/d)	(d)
2个分区减压阀数目	0	1	0	0	2	8 410	107	79
3个分区减压阀数目	0	1	0	1	2	11 280	110	103
4个分区减压阀数目	0	1	0	2	2	14 150	134	106
5个分区减压阀数目	3	0	1	1	2	15 560	123	127
6个分区减压阀数目	5	0	0	1	3	20 070	117	172
7个分区减压阀数目	7	0	0	1	2	19 360	114	170

注: 数据来源于造价通

### 3.2.3 降压效果分析

初始管网和分 4 个区开展压力管理后的管网分别在 0.4、0.7 和 1.0 需水量工况下的水压等值线如图 3 所示. 由图 3 可知, 在 0.4 和 0.7 需水工况开展压力管理后, 红色和黄色覆盖的高压区范围已全部消失, 表明该方法对降低管网整体运行压力有显著效果. 在 1.0 高需水工况时, 初始管网压力本身较低, 漏损较少, 不易发生爆管.

均衡降低管网压力可以降低背景漏损, 并且能够更大程度地发挥原有的管网供水能力, 特别是在管网不断扩张和改扩建更新的前提下, 通过管网自身调节提高管网适应性、维持管网稳定性, 更大程度上减少管网整个生命周期的投入成本, 有利于降低工程投资. 同时, 管网稳定性和可靠性的提高有利于减少管网事故发生的风险, 保障了用水和社会经济的发展.

## 3.3 漏损模拟结果

### 3.3.1 压力传感器布置结果

综上, 分 4 个区为最优方案, 并采用节点间压力

敏感度的平均欧氏距离量化压力敏感度, 与其余节点平均欧氏距离最小的节点是随压力变化最敏感的节点, 在节点布置传感器. 由于第 3 分区节点数目以及区域面积是其他分区的两倍, 为确保能够监测漏损, 在第 3 分区选出两个距离相差较大的较敏感点布置压力传感器确保能对整个分区完成监测, 最终结果为: 分区 1 ~ 分区 4, 压力传感器位置分别为节点 269、节点 215、节点 26 和 138、节点 329.

依据经验法布置压力传感器的原则在每个分区挑选出需要布置候选传感器的节点, 第 1 分区选择高程起伏较大节点 324, 分区 3、分区 4 选择分区边界节点 13 和 415, 分区 2 选择水库出水口干管末梢节点 202001.

基于高程邻域信息的 FCM 分区布设减压阀与传感器方案如图 4 所示, 即完成分区减压阀布设, 以及布置压力传感器和候选压力传感器的管网拓扑图.

### 3.3.2 压力监测漏损效果分析

采用夜间最小流量法, 在 0.4 需水工况下建立的漏损模型, 运行 EPANET 记录所布置传感器以及候

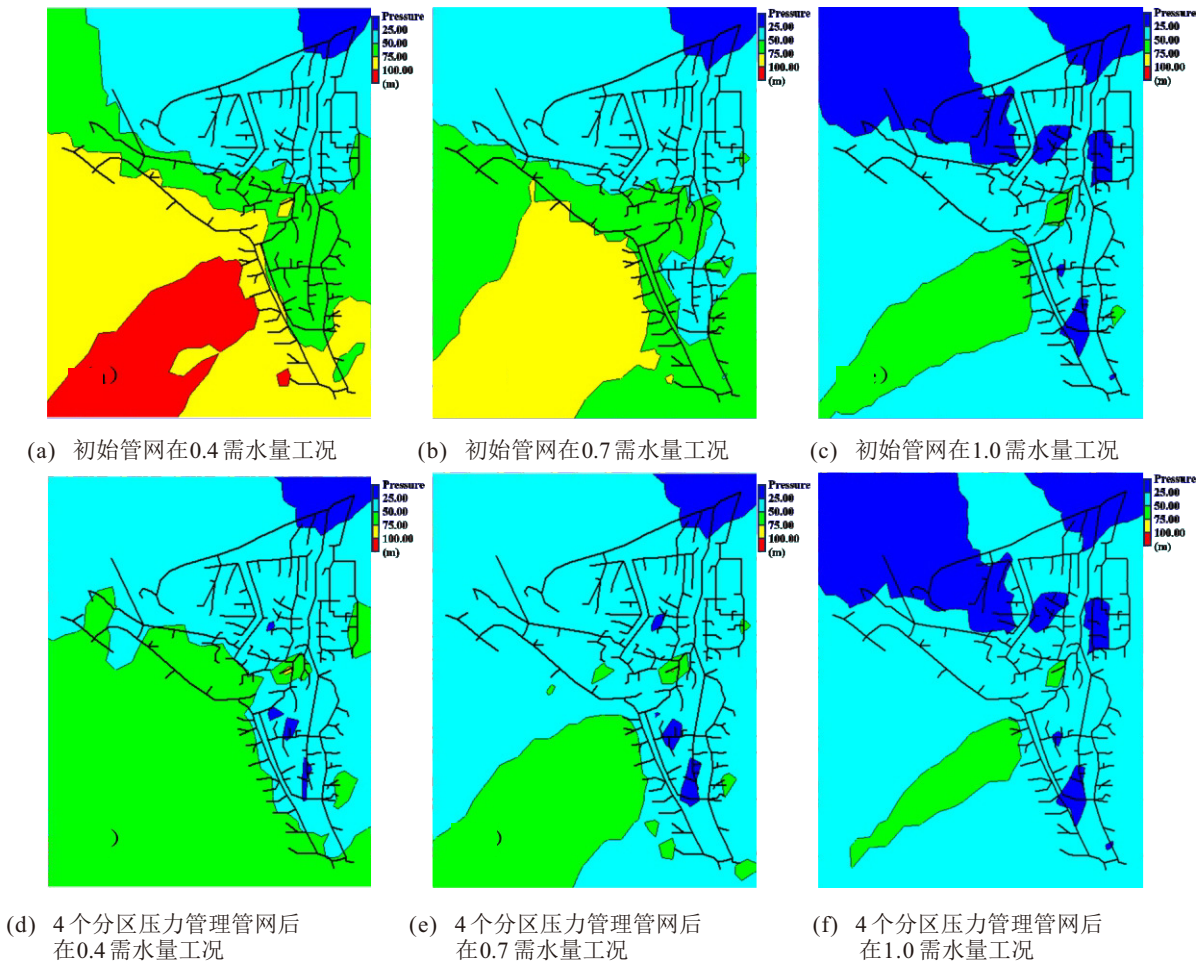


图3 初始管网和压力管理分区管网在3种需水工况下的水压等值线图

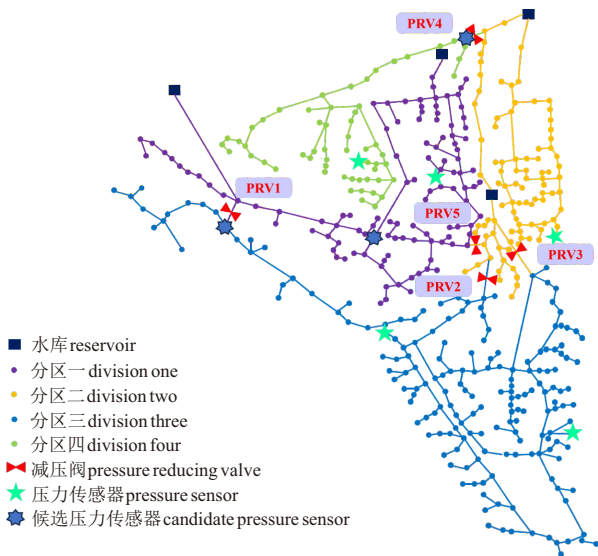


图4 分区布设减压阀与传感器结果

表2 不同PRV处模拟漏损监测点压力平均变化率

平均变化率/%	PRV1	PRV2	PRV3	PRV4	PRV5
压力传感器压力	1.7	5.3	4.0	3.4	4.1
候选传感器压力	6.9	1.3	0.1	3.4	2.1

选传感器的压力值,并计算出压力平均变化率,结果见表2.由表2可知,通过经验法所布置的候选传感器不具有稳定监测管网压力变化的效果,如果将候选传感器位置挑选在易发生严重漏损甚至爆管的节点则监测效果显著.例如在PRV1处模拟漏损时候选传感器布置节点13,在节点13布置传感器后计算最终方案的均值为6.01%,远远高于1.7%,认为方案合理.

模拟漏损管网节点以及监测点的压力变化如图5所示.压力传感器压力变化均值稳定高于整个管网节点压力变化均值,根据运行经验一般压降值高于0.2 m即可判定发生漏损,表明量化压力敏感度为欧

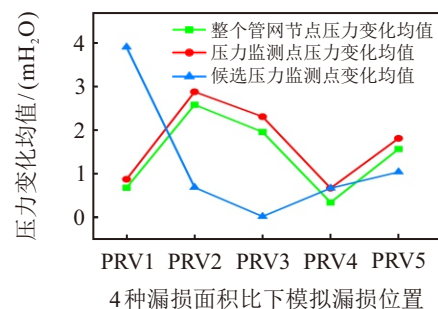


图5 模拟漏损管网节点以及监测点压力变化

氏距离在各个分区中所布置的压力传感器对于监测管网压力是有效的; 通过减压阀模拟漏损是一种方便且不需要在管网中新增其他配件, 并可以通过 EPANET 实现模拟真实漏损的新方法, 简单可控且能准确计算漏点损失水量, 最终起到证明传感器布置效果良好的作用。

## 4 结论

在高程差较大的供水管网中, 针对背景漏损大及暗漏难以监测的难题, 本文将 FCM 与 GA 算法联合使用, 在极大地降低管网漏损量的同时能够及时对管网的漏损进行监测。主要结论有:

1) 将高程邻域信息引入传统 FCM 算法, 对地势高差较大的供水管网分区时离群点更少速度更快, 所确定的分区方案更科学, GA 算法作为一种全局算法可有效避免优化结果陷入局部最优, FCM-GA 算法可为供水管网漏损控制提供新思路。

2) 提出一种低成本、高效降漏的供水管网减压阀布设优化方案, 通过该方案对减压阀进行调压并构建漏损模型, 模型在背景漏损较低时通过最小夜间流量法模拟孔口出流, 实现 EPANET 模拟真实情况, 具有良好的现实意义。

3) 联合智能方法以及人工经验法布置压力监测点, 监测管网的漏损效果显著, 在解决供水管网背景漏损大、暗漏不易被监测等突出问题方面提供了新方法。该方法将 BIN 管网的漏损率降低至 6.55%, 相较初始管网降低了 22.79%, 收回成本后年利润可达 48 910 €, 具有较好的经济意义。

4) 本文漏损模型建立时假设漏损位置固定于减压阀处, 经过多次改变压力表明监测点选择合理, 为验证其他位置发生漏损时监测点设置的合理性, 今后仍需对漏损模型进行深入研究, 期望实现更为精准的供水管网漏损定位。

## 参考文献 (References)

[1] 赵珩, 李芍毅, 唐文哲, 等. 宁夏“互联网+城乡供水”工程项目建设运维影响要素分析及管理建议[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2024, 64(2): 243-249.  
(Zhao H, Li X Y, Tang W Z, et al. Analysis of factors influencing construction and operation of Ningxia's "Internet + urban and rural water supply" project and management recommendations[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2024, 64(2): 243-249.)

[2] 陈森发. 城市供水管网系统布局的优化[J]. 控制与决策, 1992, 7(6): 461-465.  
(Chen S F. Optimization for the layout of water-supply pipeline systems[J]. Control and Decision, 1992, 7(6): 461-465.)

[3] Feng Y X, Zhang H, Rad S, et al. Visual analytic hierarchical process for *in situ* identification of leakage risk in urban water distribution network[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 75: 103297.

[4] Morrison J, Tooms S, Rogers D. District metered areas guidance notes[R]. London: IWA, 2007.

[5] Liu J, Lansey K E. Multiphase DMA design methodology based on graph theory and many-objective optimization[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2020, 146(8): 04020068.

[6] 牟天蔚, 蒋白懿, 沈丹玉, 等. 供水管网实时分区及节流阀调度研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(5): 167-170.  
(Mou T W, Jiang B Y, Shen D Y, et al. Real-time partition and throttle valve scheduling in water distribution system[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(5): 167-170.)

[7] Li J, Wang C, Qian Z, et al. Optimal sensor placement for leak localization in water distribution networks based on a novel semi-supervised strategy[J]. *Journal of Process Control*, 2019, 82: 13-21.

[8] Xu C, Powell R S. Leakage reduction and security enhancement for water distribution networks by on-Line pressure control[J]. *Civil Engineering Systems*, 1993, 10(1): 55-75.

[9] Paola F, Galdiero E, Giugni M. A jazz-based approach for optimal setting of pressure reducing valves in water distribution networks[J]. *Engineering Optimization*, 2016, 48(5): 727-739.

[10] 乔怡超. 供水管网减压阀优化控制漏失研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
(Qiao Y C. Study on optimal control of leakage of pressure reducing valve in water supply network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.)

[11] 吴玮, 林广阳, 冉雨晴, 等. 基于混合蛙跳算法的供水管网减压阀优化控制模型研究[J]. 给水排水, 2023, 49(6): 141-149.  
(Wu W, Lin G Y, Ran Y Q, et al. Research on the optimal control model of pressure reducing valve in water supply network based on shuffled frog leaping algorithm[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(6): 141-149.)

[12] 张楠. 城市供水管网分区管理技术优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.  
(Zhang N. Study on optimization of district management technology of urban water supply network[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.)

[13] 聂练桃. 基于管网建模的漏损控制研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.  
(Nie L T. Research on leakage control based on water supply network modeling[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.)

[14] Francés-Chust J, Brentan B M, Carpitella S, et al. Optimal placement of pressure sensors using fuzzy DEMATEL-based sensor influence[J]. *Water*, 2020, 12(2): 493.

[15] 徐志强, 刘崎峰, 刘佳峰, 等. 基于 FCM 聚类漏失模

- 拟的给水管网压力监测点布设[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(6): 642-648.  
(Xu Z Q, Liu Q F, Liu J F, et al. Optimized layout of pressure monitoring points in water supply network based on FCM clustering and leakage events simulation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(6): 642-648.)
- [16] Bezdek J C. Corrections for “FCM: The fuzzy  $c$ -means clustering algorithm” [J]. Computers & Geosciences, 1985, 11(5): 660.
- [17] 宋燕, 李元昊. 融合稀疏自表示和残差驱动的自适应模糊  $C$  均值聚类[J]. 控制与决策, 2024, 39(4): 1333-1341.  
(Song Y, Li Y H. Sparse self-representation incorporated and residual driven adaptive fuzzy  $C$ -means clustering[J]. Control and Decision, 2024, 39(4): 1333-1341.)
- [18] Ozkan I, Turksen I B. Upper and lower values for the level of fuzziness in FCM[J]. Fuzzy Logic: A Spectrum of Theoretical & Practical Issues, 2007: 99-112.
- [19] 李艳灵, 沈轶. 基于空间邻域信息的 FCM 图像分割算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 56-59.  
(Li Y L, Shen Y. Fuzzy  $C$ -means algorithm based on the spatial information for image segmentation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(6): 56-59.)
- [20] 张腾飞, 张宇迪, 马福民. 基于改进邻域空间的高维混合数据特征选择算法[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 929-938.  
(Zhang T F, Zhang Y D, Ma F M. Improved neighborhood space based feature selection algorithm for high-dimensional mixed data[J]. Control and Decision, 2024, 39(3): 929-938.)
- [21] Zhang K, Yan H X, Zeng H, et al. A practical multi-objective optimization sectorization method for water distribution network[J]. Science of the Total Environment, 2019, 656: 1401-1412.
- [22] 轩华, 郑倩倩, 李冰. 带不相关并行机和有限缓冲 MHFS 调度的混合启发式算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(3): 565-576.  
(Xuan H, Zheng Q Q, Li B. Hybrid heuristic algorithm for multi-stage hybrid flow shop scheduling with unrelated parallel machines and finite buffers[J]. Control and Decision, 2021, 36(3): 565-576.)
- [23] Tian Y, Cheng R, Zhang X Y, et al. PlatEMO: A Matlab platform for evolutionary multi-objective optimization[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2017, 12(4): 73-87.
- [24] 何忠华, 袁一星. 基于分区模型的城市供水管网压力监测点布置[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(10): 37-41.  
(He Z H, Yuan Y X. Layout of pressure monitoring points in urban water distribution system based on district model[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(10): 37-41.)
- [25] 李珊珊. 基于压力监测的给水管网漏失定位研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.  
(Li S S. Study on leakage location of water supply network based on pressure monitoring[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.)
- [26] 李晓豪, 郑海斌, 王雪柯, 等. 基于改进交叉熵的模仿学习鲁棒性增强方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 768-776.  
(Li X H, Zheng H B, Wang X K, et al. Robustness enhancement method of imitation learning based on improved cross entropy[J]. Control and Decision, 2024, 39(3): 768-776.)

### 作者简介

李红艳 (1975-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为城市水资源与水系统, E-mail: [lhy3162@126.com](mailto:lhy3162@126.com);

常子峰 (1999-), 男, 硕士, 主要研究方向为城市供水系统优化调度, E-mail: [17200639434@163.com](mailto:17200639434@163.com);

史文韬 (1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为城市供水系统优化调度, E-mail: [150473846@qq.com](mailto:150473846@qq.com);

张峰 (1981-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为城镇给排水系统优化, E-mail: [anuo Zhang@gmail.com](mailto:anuo Zhang@gmail.com);

毛立波 (1980-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为城市内涝风险评估和海绵城市建设, E-mail: [35243862@qq.com](mailto:35243862@qq.com);

石可铨 (2001-), 男, 硕士, 主要研究方向为城市供水系统优化调度, E-mail: [1327628157@qq.com](mailto:1327628157@qq.com).