

# 基于地下水入渗反演解析的污水管网破损 数值化定位

徐祖信<sup>1,2,3,4</sup>, 王思玉<sup>1</sup>, 刘淑雅<sup>1</sup>, 尹海龙<sup>1,2,3,4</sup>, 楚文海<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092;  
3. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 同济大学 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

**摘要:** 地下水位高于管道埋深的地区, 污水管道破损会导致大量地下水入渗, 严重影响城市污水治理效能。高密度城市交通繁忙、高楼林立, 难以开挖查找破损管道; 物理探测方法操作复杂, 价格不菲, 难以推广。污水管网破损摸排成为制约城市污水治理的瓶颈问题。为此, 利用粒子群算法, 建立了高地下水位地区污水管道破损寻优定位模型, 通过管网水力学模型和关键检查井水位监测信息, 开发了城市污水管网破损的数值化定位技术。该技术方法在某城市污水管网进行了实例验证, 结果表明基于检查井水位对地下水入渗流量进行解析, 可确定破损点位, 相对误差小于 5%。在此基础上, 进一步探究了监测点数量对破损点寻优定位精度的影响, 结果表明只需监测 60% 的节点, 寻优定位的查准率和查全率分别可达到 75% 和 94%。

**关键词:** 污水管网; 管道破损; 地下水入渗; 优化算法

**中图分类号:** TU992; X52

**文献标志码:** A

## Numerical Analysis and Location of Sewer Network Damage Based on Groundwater Infiltration Inversion

XU Zuxin<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Siyu<sup>1</sup>, LIU Shuya<sup>1</sup>,  
YIN Hailong<sup>1,2,3,4</sup>, CHU Wenhai<sup>1,2,3,4</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Pipe damages will lead to the infiltration of groundwater into sewer systems, which seriously affect the efficiency of urban sewage treatment in areas where

the groundwater level is higher than the buried depth of the pipeline. Cities with busy traffic and high-rise buildings make it difficult to dig damaged pipes. In addition, the physical detection method is very labor-intensive and even hard to perform. Therefore, in areas with high groundwater level, a particle swarm optimization methodology in conjunction with hydraulic model computation and water level monitoring was proposed to identify sewer defect. The method was demonstrated in the sewer system of a certain city. The damage points were determined by quantified groundwater infiltration flow based on water level monitoring and flow calculation, with a relative error less than 5%. Meanwhile, the influence of the monitoring points on the optimization model was discussed. 60% of the total nodes was selected as the optimal number, and the location precision rate and location recall rate are 75% and 94%, respectively.

**Key words:** sewer network; pipe damage; groundwater infiltration; optimization algorithm

截至 2020 年, 我国城市排水管道总长约 80.2 万 km<sup>[1]</sup>, 其中, 近一半排水管道使用年限超过 10 年, 管网老化增加了管网破损的几率<sup>[2]</sup>。在污水管道埋设于地下水位之下的地区, 污水管道破损导致的地下水入渗问题严重。调查显示, 我国南方部分城市污水管道的地下水入渗量可达 3 800~6 300 m<sup>3</sup>·(km·d)<sup>-1</sup>, 部分地区入渗量可占污水量的 42%~66%<sup>[3-4]</sup>。入渗地下水侵占了管道容量, 虚高了城市污水处理率, 影响污水处理厂处理效能<sup>[5-6]</sup>。因此, 污水管道破损检测十分重要, 破损管段定位有

收稿日期: 2022-03-24

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200700; 2021YFC3200702)

第一作者: 徐祖信(1956—), 女, 中国工程院院士, 工学博士, 主要研究方向为城市流域水环境综合治理。

E-mail: xzx@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

助于管道修复和改造。

目前,污水管道破损诊断主要应用检测设备,如管道闭路电视(CCTV)和潜望镜检测(QV)等,通过实时影像反映管道内部结构,直接确定管道破损位置<sup>[7-9]</sup>。设备检测定位精度高,但是价格昂贵,难以全面推广应用。此外,基于水量、水质监测数据解析水量来源,可间接判断管道状况,如最小流量法和三角分析法等可对封闭片区污水管道的地下水入渗情况进行评估<sup>[10-11]</sup>,操作简便但定位精度低,难以获得准确的破损位置。

本文创新性建立了高地下水位地区污水管道破损的数值化定位技术,将污水管道破损识别转化为入渗地下水量的识别,晴天条件下对管道中的污水和地下水水量进行解析,判断管道是否破损或者破损是否严重。进入管网的污水和地下水属于管网系统流动模拟的外部边界条件,由此,这个问题在管道水动力数学模拟上属于已知管道内部流动求解外部边界条件,是数学上的反演问题<sup>[12-14]</sup>,通过启发式算法进行寻优搜索<sup>[15]</sup>,确定入渗地下水量和入渗点位,从而识别污水管网破损点位和管段。本研究方法无需开挖地面,不干扰污水管道的运行,有限节点的水位监测成本低,容易实施。

## 1 研究方法

### 1.1 基于检查井水位流量计算方法

基本原理是通过管道实际流动的监测来计算分析区域的边界条件。由于污水管道的流量监测存在操作复杂、成本高等问题,通过管道检查井的水位监测来计算管道流量。根据管渠水力学计算原理<sup>[16]</sup>,流量计算公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} h = H - H_1 - h_1 \\ \theta = 2\arccos \frac{D - 2h}{D} \\ \chi = \frac{1}{2}\theta D \\ A = \frac{D^2(\theta - \sin \theta)}{8} \\ R = \frac{D}{4} \left( 1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right) \\ Q = \frac{1}{n} \times A \times R^{2/3} \times I^{1/2} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: $h$ 为下游管道水深,m; $H$ 为检查井地面高程,m; $H_1$ 为管底标高,m; $h_1$ 为地面至水面高度,m; $\theta$ 为水流中心夹角,rad; $D$ 为管径,m; $\chi$ 为湿周,m; $A$ 为

过水断面面积,m<sup>2</sup>; $R$ 为水力半径,m; $Q$ 为管道流量,m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>; $n$ 为管道粗糙系数; $I$ 为水力坡度。

### 1.2 基于寻优定位模型的破损节点诊断

污水管网系统的水流运动由管网拓扑结构和边界条件共同确定。当管网拓扑结构一定时,任意管段或节点发生地下水入渗,都会引起管网内水流运动改变。根据此特性,可以反向解析地下水的入渗量和入渗位置。我国城市污水管网破损点较多,地下水入渗量的直接逆向求解比较复杂。因此,采用寻优分析方法将反问题转化为正问题参数寻优问题,寻找适配的边界条件,使得污水管网水动力模拟数据和检查井监测数据误差小于允许误差,技术路线如图1所示。由此可见,污水管道破损寻优定位模型的实质就是遍历所有管网节点地下水适配方案,寻求实际入渗量的过程。

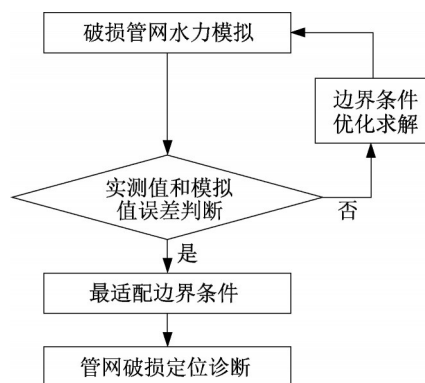


图1 污水管网破损诊断技术路线

Fig. 1 Technical roadmap of sewer defect diagnosis

污水管道破损寻优定位模型包括两部分,一是污水管网水动力模型,二是寻优定位模型。

#### 1.2.1 污水管网水动力模型

污水管网水流运动可用圣维南方程组描述,如式(2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left( \frac{\partial h}{\partial x} + S_0 \right) = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: $t$ 为时间,s; $x$ 为沿水流方向管道的长度,m; $q_0$ 为单位管长上的旁侧入流,m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>; $g$ 为重力加速度,m·s<sup>-2</sup>; $S_0$ 为管底坡度。

采用InfoWorks ICM模型模拟污水管网中的流动状况。在InfoWorks ICM中,管道的旁侧入流可通过节点外部入流输入。在晴天工况下,城市污水管网外部入流主要包括接纳的污水和入渗地下水,因此,在管网模型节点上,有

$$q_i(t) = Q_{i,s} \times f_s(t) + Q_{i,g} \times f_g(t) \quad (3)$$

式中:  $q_i(t)$  为  $t$  时刻节点  $i$  的外部入流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{i,s}$ 、 $Q_{i,g}$  分别为从节点  $i$  处进入的日均生活污水量和日均地下水入渗量(实际是从节点  $i$  及其上游管段共同进入的),  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $f_s(t)$  和  $f_g(t)$  分别为生活污水和地下水的时变化系数, 满足  $\sum_{t=1}^L f_s(t=t_l) = 1$ 、 $\sum_{t=1}^L f_g(t=t_l) = 1$ , 其中  $L$  为 1 天内的时间离散数。

### 1.2.2 寻优定位模型

寻优定位模型主要由决策变量、目标函数和约束条件共同组成。

(1) 决策变量。决策变量为待求的各节点地下水入渗水量, 由于全部节点都有可能发生地下水入渗, 破损节点的优化维度直接由管网的节点数确定。

$$X = (q_{1,g}, \dots, q_{i,g}, \dots, q_{N,g}) \quad (4)$$

式中:  $q_{i,g}$  为节点  $i$  的地下水入渗量,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $N$  为污水管网的总节点数。

(2) 目标函数。目标函数表达为监测点的实测水位与模拟水位的最小均方根误差, 如式(5)所示:

$$f(X^*) = \min_X \left\{ \sum_{s=1}^{N_s} \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T [h_{1,s}(t) - h_{2,s}(t)]^2}{K_s}} \right\} \quad (5)$$

式中:  $X^*$  为地下水入渗适配方案;  $N_s$  为监测点数量;  $T$  为管网模拟时间序列;  $h_{1,s}$  和  $h_{2,s}$  分别为监测点  $s$  处的模拟水位和监测水位;  $K_s$  为模拟的时刻数目。

(3) 约束条件。在污水管道破损寻优定位过程中, 除了保证总的节点地下水入渗量与污水管网系统的地下水入渗总量一致, 还需满足污水管网的水力平衡条件, 包括节点连续性方程和管段能量方程, 如式(6):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N q_{i,g} = Q_g \\ 0 \leq q_{i,g} \leq Q_g \\ \sum (\pm Q_{ij}) + q_i = 0 \\ H_{j1} - H_{j2} = h_j \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Q_g$  为污水管网系统整体的地下水入渗量,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{ij}$  为与节点  $i$  连接的各管道流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $q_i$  为节点  $i$  的流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $H_{j1}$  为管段  $j$  上游节点水头,  $\text{m}$ ;  $H_{j2}$  为管段  $j$  下游节点水头,  $\text{m}$ ;  $h_j$  为管段  $j$  的压降,  $\text{m}$ 。

### 1.2.3 基于粒子群优化算法的模型求解

污水管道破损寻优定位模型的求解空间随着管网结构复杂程度的增加呈指数型增长, 可借助启发式优化算法完成入渗地下水分配方案的试算过程。

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization,

PSO)<sup>[17]</sup> 是一种基于群体智能理论的优化算法, 由于其特有的记忆性和简单的算法结构, 已被广泛应用于多个研究领域, 如供水管网爆管定位<sup>[18]</sup>、排水管网设计<sup>[19]</sup>、排水管网污染源溯源<sup>[20]</sup>等。在各种改进粒子群算法中, 基于随机权重策略的 PSO 算法能在一定程度上避免多峰函数陷入局部最优<sup>[21-22]</sup>。选择基于随机权重策略的 PSO 算法进行模型求解, 完成地下水分配方案的持续自反馈寻优过程。具体步骤如下:

(1) 初始粒子群生成: 随机产生多个粒子, 初始化粒子群。每个粒子的位置向量代表一种地下水分配方案, 其中每个维度代表一个节点的地下水入渗量; 粒子的速度向量控制着粒子飞向最优解。

(2) 目标函数值评价: 将粒子代表的地下水分配方案嵌入到水动力模型中, 基于模拟结果计算粒子的目标函数值, 以衡量个体的优劣性, 根据目标函数值确定粒子和粒子群的最优位置。

(3) 粒子群进化: 更新每个粒子的位置向量和速度向量, 产生新一代的粒子群。并与上一代粒子群进行比较, 更新每个个体的历史最优位置和粒子群的全局最优位置。在更新粒子速度时引入了随机惯性权重策略。惯性权重是平衡算法全局与局部搜索能力的最重要参数, 利用随机变量改变惯性权重可以帮助算法跳出局部最优, 在迭代后期不易发生目标函数值停滞现象, 保证粒子群的多样性<sup>[21]</sup>。

(4) 迭代终止: 当目标函数值小于给定误差范围或满足迭代次数时结束计算, 得到全部节点的地下水最适配方案, 否则重复上一步, 直到满足终止条件。

基于 ICM Exchange 模块实现污水管道破损寻优定位模型的构建和求解, ICM Exchange 能够在 Ruby 开发环境下对默认封装的 InfoWorks ICM 模型进行外部调用, 从而实现与 MATLAB 软件运行文件的交互。因此, 利用 ICM Exchange 平台, 在 MATLAB 开发环境下, 实现 InfoWorks ICM 管网模型和 PSO 算法的耦合 (图 2)。该耦合模型能够实现管网节点地下水适配方案的自动设计, 并在水力平衡和目标函数的约束下对参数空间进行充分搜索, 直至得到最小误差解。

### 1.3 污水管道节点破损程度评价方法

寻优定位模型最终解析的是各节点的地下水入渗量, 为了更好地评价各节点是否为破损点, 通过管段破损状况进行评估。《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)<sup>[23]</sup> 给出了单位管长、单位管径地

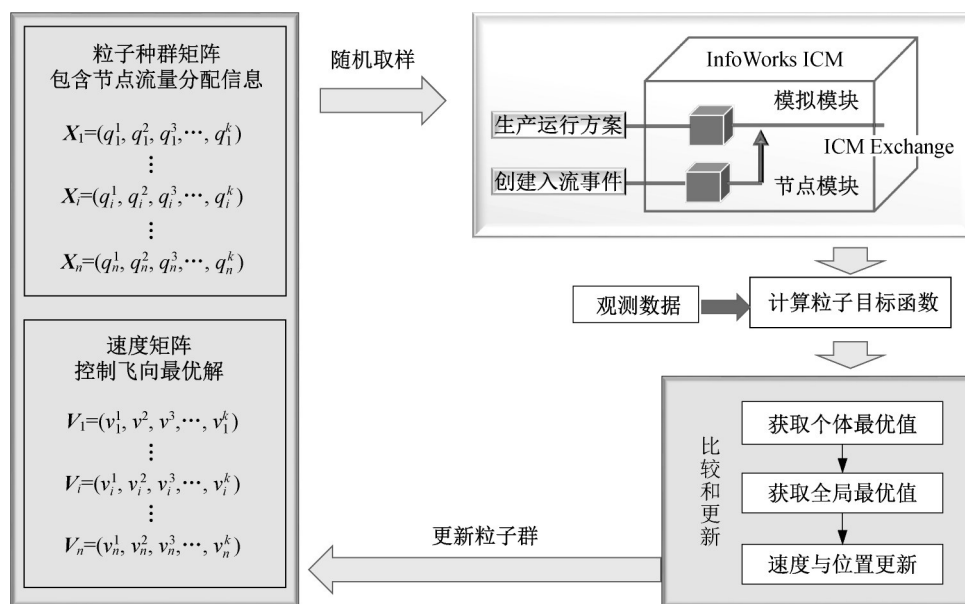


图2 污水管道破损寻优定位模型示意

Fig. 2 Schematic diagram of optimization localization model for identifying sewer damage

下水入渗量  $\epsilon$  的限值为  $0.01 \sim 1.0 \text{ m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{mm} \cdot \text{km})^{-1}$ 。参照这一标准值,建立如表1的评价方法。

表1 污水管道破损评价方法

Tab.1 Evaluation method for damage to sewage pipes

序号	$\epsilon / (\text{m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{mm} \cdot \text{km})^{-1})$	管道破损评价
1	$\epsilon \leq 1.0$	基本不破损
2	$1.0 < \epsilon < 2.0$	轻微破损
3	$\epsilon \geq 2.0$	严重破损

## 2 案例应用

### 2.1 研究区域概况

研究区域为安徽省某市HS污水泵站服务范围涉及的污水管网系统(图3 a),区域总面积约  $3.93 \text{ km}^2$ ,污水管道总长约  $9 \text{ km}$ ,污水管网封闭、独立,主要接纳区域内居民生活排放的污水。

首先建立研究区域的污水管网和污染源综合地理信息系统(GIS系统,见图3 b),确定该污水系统接纳的生活污水总量约  $5305 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。根据污水泵站旱天进水水量记录,确定该污水泵站晴天进水量约  $11156 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。因此,基于水量平衡可确定该系统地下水入渗总量约  $5184 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,占晴天总水量的49%,说明研究区域内污水管网系统整体破损情况严重。

### 2.2 检查井水位监测及流量计算

研究区域内的污水管网共有100个检查井,全

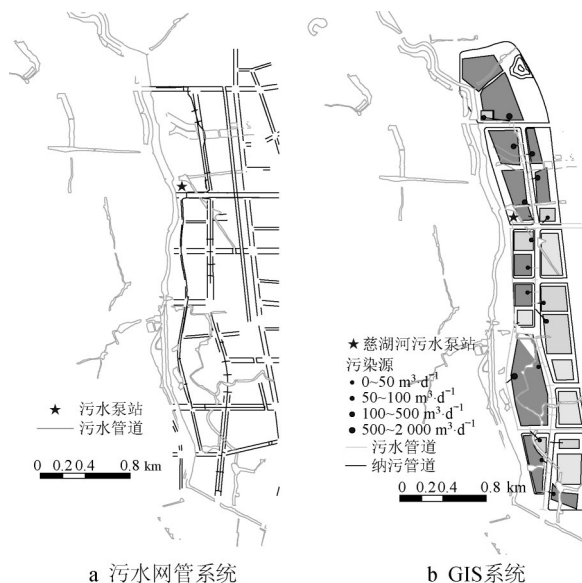


图3 研究区域示意

Fig. 3 Schematic diagram of the area studied

部进行水位监测,监测时间为2021年10月28日,前期晴天数为7天,每个检查井分别于高水位时段(10:00—11:00)和低水位时段(15:00—16:00)各监测1次,监测时刻是根据泵站实测水位的变化情况确定的,以获取各检查井的高、低水位,计算平均值。现场工作分为7个小组同步开展,以保证在同一时间段内完成全部监测工作。

城市污水管网晴天输送水量一般仅包括生活污水和地下水。日均生活污水的波动性不大,地下水入渗量主要和破损程度相关,一般认为地下水日入

渗水量是恒定的<sup>[24]</sup>。因此,假设晴天时污水管网流动是恒定流,取 $f_s(t)=f_g(t)=1$ ,通过检查井日平均水位可以计算日平均流量(图4)。

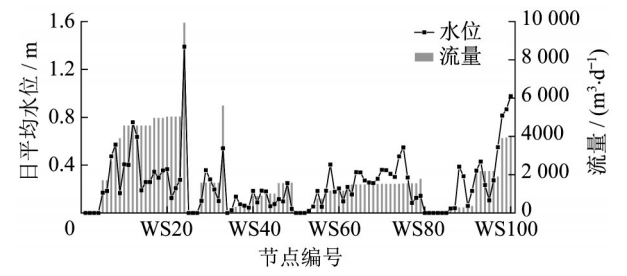


图4 节点日平均水位及流量

Fig. 4 Water level and flow of manholes

2.3 破损点位的确定性分析

为了减小计算工作量,提高计算精度,排水管网水力模拟前通常需要根据流动性一致原则进行管网概化。概化后的管网共有 99 条管道,节点数与检

查井数一致。根据连续性方程,管道节点下游出水量和上游进水量的差值为该节点的外部入流量(包括接纳的生活污水和入渗地下水),因此节点地下水入渗量为

$$q_{i,g}=q_{i,out}-q_{i,in}-q_{i,s} \tag{7}$$

式中: $q_{i,out}$ 为节点*i*下游出水量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,通过该节点水位计算得到; $q_{i,in}$ 为节点*i*上游进水量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,通过上游节点水位计算得到; $q_{i,s}$ 为节点*i*的生活污水接纳量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,根据建立的研究区域污水管网和污染源 GIS 系统确定。

对全部节点建立连续性方程,结合图4所示节点流量水位关系,可以确定性求解出全部节点的地下水入渗量,节点破损计算分析结果如表2所示。从中可以看出:研究区域内共存在 16 个破损节点,其中 2 个节点为轻微破损,14 个节点为严重破损。破损节点的总地下水入渗量为  $5\,050\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ,与污水管网总水量平衡解析结果相比,其相对误差小于 5%,说明计算结果可靠。

表2 实际破损节点及其地下水入渗量

Tab. 2 Actual damaged nodes and their groundwater infiltration

破损节点号	$\varepsilon/(\text{m}^3\cdot(\text{d}\cdot\text{mm}\cdot\text{km})^{-1})$	破损节点号	$\varepsilon/(\text{m}^3\cdot(\text{d}\cdot\text{mm}\cdot\text{km})^{-1})$	破损节点号	$\varepsilon/(\text{m}^3\cdot(\text{d}\cdot\text{mm}\cdot\text{km})^{-1})$	破损节点号	$\varepsilon/(\text{m}^3\cdot(\text{d}\cdot\text{mm}\cdot\text{km})^{-1})$
WS6	10.2	WS7	9.1	WS8	6.4	WS9	10.8
WS15	8.0	WS16	2.5	WS19	1.8	WS38	12.0
WS41	3.2	WS44	8.0	WS48	11.7	WS65	2.1
WS71	30.8	WS78	5.8	WS85	6.8	WS89	1.1

2.4 有限监测节点下破损点位定位寻优解析

污水管网的监测点数量会影响计算结果的准确程度,水位监测节点若少于实际检查井数量,会直接影响寻优定位模型诊断的精度。但是,在实际工程中,对所有检查井监测水位较为困难,有必要继续探讨检查井监测数量和模型计算精度之间的关系。为探究最佳监测点数量,采用均匀布点,选取占总节点数 20%、30%、40%、50%、60%、70%、80% 共 7 种工况进行分析。

运用 InfoWorks ICM 水力模型耦合 PSO 算法自动反演计算时,设置粒子维度为 100,粒子群规模为 80,进化代数数为 300,学习因子均为 2。为了避免粒子出现早熟收敛现象,引入随机惯性权重来提高算法的收敛速度和全局收敛性。图5展示了 60 个监测点数量工况下目标函数的变化情况,大致可分为 3 个阶段:在迭代初期目标函数值离散分布,经过 20 代后,目标函数值从 0.042 快速减小到 0.035;在迭代中期,目标函数值逐渐密集,减小速度变缓;在迭代后期,目标函数值逐渐收敛,最终趋近于最优值

0.026。由于 PSO 中的粒子具有记忆性,可将历史最优位置传递给其他粒子,因此目标函数是朝着同一方向逐步下降的<sup>[21]</sup>。

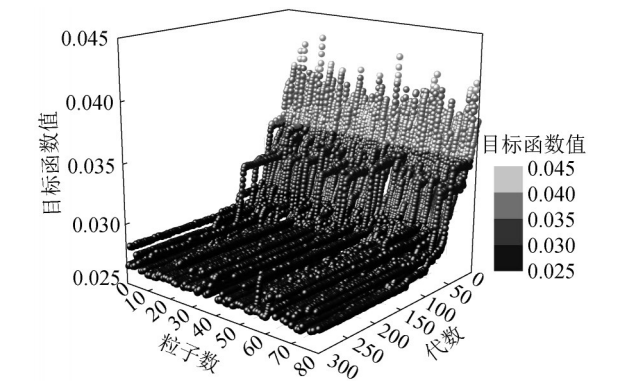


图5 基于粒子群算法的管网模型寻优过程

Fig. 5 Process of sewer modeling optimization based on PSO algorithm

不同监测点数量工况对应的寻优定位结果见图6、图7和表3。当监测点数量较少时,模型定位存在

较大偏差。20 个监测点寻优定位结果是 32 个模拟破损节点,实际上,其中只有 11 个为实际破损点,误差较大,主要原因是监测点数量过少,模型的约束条件和目标函数无法限制反演参数的多种组合方式,难以寻出最优解。随着监测点数量的增加,约束条

件和目标函数也随之进行了调整,模型的定位结果也逐渐改善。当增加到 80 个监测点时,模型正确定位到了全部实际破损点,如图 6 g 所示,表明不需监测全部检查井水位在计算上是可行的。

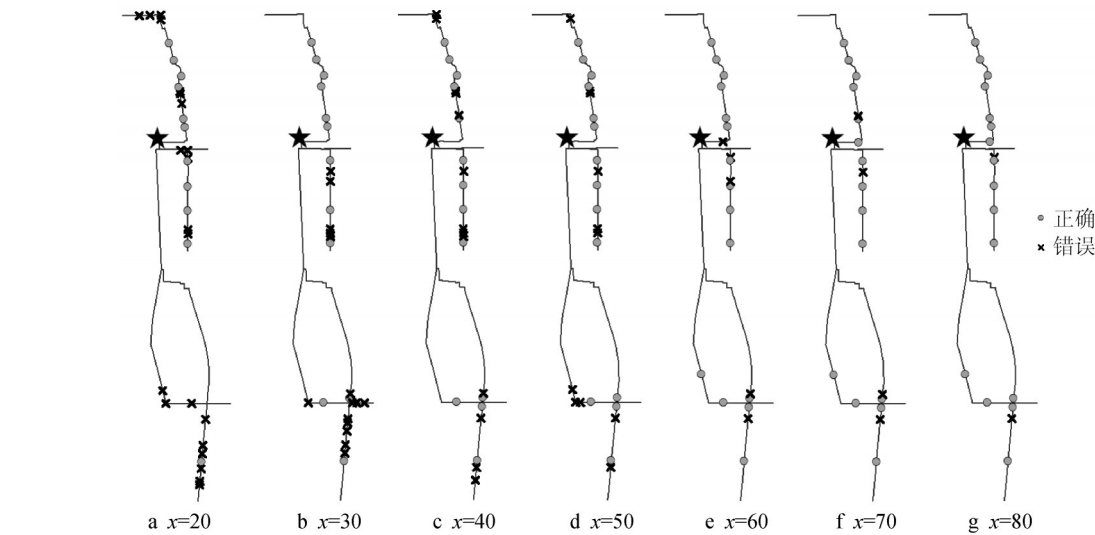


图 6 不同监测点工况下模型的定位结果

Fig. 6 Location results under different monitoring point conditions

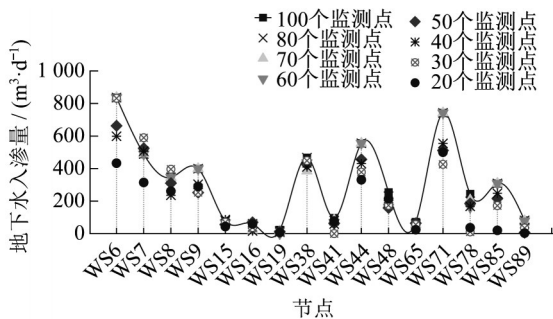


图 7 不同监测点工况下实际破损点的地下水入渗量反演计算结果

Fig. 7 Inversion calculation results of groundwater infiltration at actual damaged points under different monitoring point conditions

为了进一步说明监测节点数对寻优定位结果的影响,建立定位查准率和定位查全率指标对模型的定位效果进行评价。定位查准率直接从模型的诊断结果出发,衡量模型定位结果的有效性;定位查全率从实际情况出发,衡量模型是否能尽可能多地定位到真实的破损节点。对应表达式如式(8)、式(9):

$$P=\frac{N_T}{N_D}\times 100\%$$
(8)

$$R=\frac{N_T}{N_P}\times 100\%$$
(9)

表 3 不同监测点工况下实际破损节点处定位结果

Tab. 3 Positioning results at actual damaged points under different monitoring point conditions

破损节点号	监测点数量						
	20	30	40	50	60	70	80
WS6	正确	正确	正确	正确	正确	正确	正确
WS7	正确	正确	正确	正确	正确	正确	正确
WS8	正确	正确	正确	正确	正确	正确	正确
WS9	正确	正确	正确	正确	正确	正确	正确
WS15	正确	正确	正确	正确	正确	正确	正确
WS16	正确	正确	错误	正确	正确	错误	正确
WS19	错误	错误	错误	错误	错误	正确	正确
WS38	正确	正确	正确	正确	正确	正确	正确
WS41	正确	错误	正确	正确	正确	正确	正确
WS44	正确	正确	正确	正确	正确	正确	正确
WS48	正确	正确	正确	正确	正确	正确	正确
WS65	错误	正确	正确	正确	正确	正确	正确
WS71	正确	正确	正确	正确	正确	正确	正确
WS78	错误	错误	正确	正确	正确	正确	正确
WS85	错误	正确	正确	正确	正确	正确	正确
WS89	错误	错误	错误	错误	正确	正确	正确

式中: $P$ 为定位查准率; $N_T$ 为模型模拟破损正确的全部节点数; $N_D$ 为模型模拟破损的全部节点数; $R$ 为定位查全率; $N_P$ 为实际破损的全部节点数。

定位查准率和定位查全率与监测点数量呈正相关关系,在 60 个监测点处,定位查准率的斜率发生陡增,定位查全率与 70 个监测点处相当(图 8)。因

此,在同时考虑模型定位精度和监测成本的情况下,推荐60个监测点为最佳工况,此时模型正确定位到了15个实际破损点,误判了5个节点,均位于实际破损点周边1个节点处,定位查准率为75%,定位查全率为94%。若对定位到的实际破损点及其上游管道进行修复,可相应减少 $5\,028\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 地下水入渗量,由此可见,基于有限监测节点的破损寻优定位技术可行、有效。相比于全范围内的CCTV检测,可以大幅度减少现场排查的工作量,降低人力、物力成本。

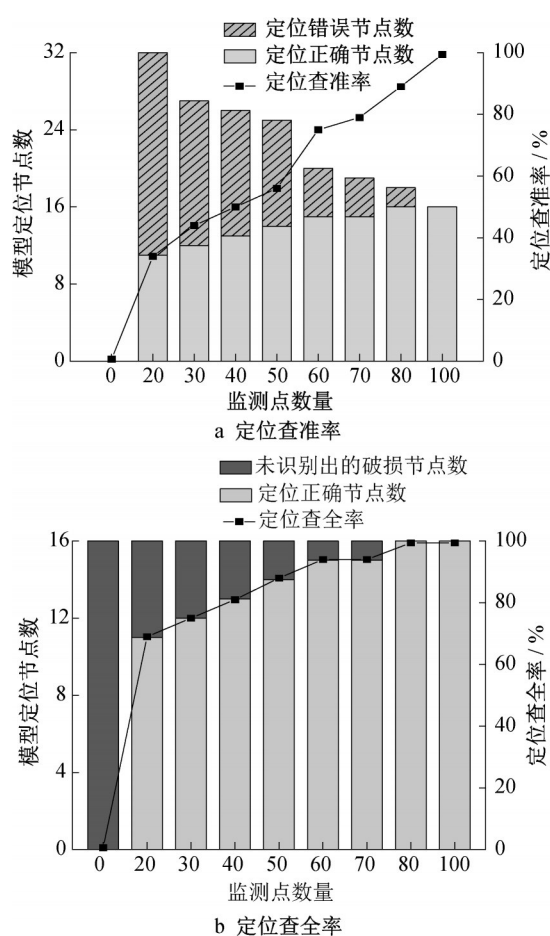


图8 不同监测点工况下定位查准率与定位查全率

Fig. 8 Location precision rate and location recall rate under different monitoring point conditions

### 3 结语

创新了高地下水位地区基于有限检查井水位监测的管道破损数值化定位技术,采用InfoWorks ICM模型与PSO算法耦合的方式,建立了具有自我反馈调节机制的破损寻优定位模型。通过构建污水管道外部入流与检查井水位的响应关系完成节点地

下水入渗方案的自动设计和动态寻优,可以有效进行污水管道破损点诊断,实现了低成本、无干扰的污水管网破损点数值化定位。

实证研究表明,寻优定位结果的精度与监测点数量相关。通过不同监测点数量的寻优定位结果分析,根据定位精度与技术经济可行性综合比较,推荐监测点是总节点数的50%~60%较为合理,此时定位查准率为75%,定位查全率为94%。对这些节点及其上游管段进行修复,可减少污水管网系统97%的地下水入渗量,显著提升污水管网的运行效能。

综上,本文创新的污水管网破损数值化解析定位方法有效可行、应用简便、经济实用,在我国城市污水治理提质增效中有重要作用。

#### 作者贡献声明:

徐祖信:研究整体指导、论文修改。

王思玉:数学模型构建、论文撰写。

刘淑雅:数据采集。

尹海龙:研究方法指导。

楚文海:论文审阅与修订。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城乡建设统计年鉴—2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban-rural construction statistical yearbook—2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [2] 李田,郑瑞东,朱军. 排水管道检测技术的发展现状[J]. 中国给水排水, 2006(12): 11.  
LI Tian, ZHENG Ruidong, ZHU jun. Development of sewer inspection and assessment technologies [J]. China Water & Wastewater, 2006(12): 11.
- [3] 徐祖信,徐晋,金伟,等. 我国城市黑臭水体治理面临的挑战与机遇[J]. 给水排水, 2019, 55(3): 1. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2019.03.001.  
XU Zuxin, XU Jin, JIN Wei, *et al.* Challenges and opportunities of black and odorous water body in the cities of China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(3): 1. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2019.03.001.
- [4] 邢玉坤,曹秀芹,柳婷,等. 我国城市排水系统现状、问题与发展建议[J]. 中国给水排水, 2020, 36(10): 19. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.10.004.  
XIN Yukun, CAO Xiuqin, LIU Ting, *et al.* Current status, problems and development suggestions of urban drainage system in China [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(10): 19. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.10.004.
- [5] 张明凯. 基于污染物过程线模型的污水管网水量水质动态模

- 拟研究[D].北京:清华大学,2017.
- ZHANG Mingkai. Research on dynamic variation of wastewater quantity and quality in sewer system based on pollutant[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [6] BÉNÉDITIS J D, BERTRAND-KRAJEWSKI J L. Infiltration in sewer systems: Comparison of measurement methods[J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2005, 52(3): 219. DOI: 10.2166/wst.2005.0079.
- [7] GOKHALE S, GRAHAM J A. A new development in locating leaks in sanitary sewers [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2004, 19 (1) : 85. DOI: 10.1016/j.tust.2003.08.003.
- [8] WIRAHADIKUSUMAH R, ABRAHAM D M, ISELEY T, *et al.* Assessment technologies for sewer system rehabilitation [J]. *Automation in Construction*, 1998, 7 (4) : 259. DOI: 10.1016/S0926-5805(97)00071-X.
- [9] KUMAR S S, ABRAHAM D M, JAHANSHAH M R, *et al.* Automated defect classification in sewer closed circuit television inspections using deep convolutional neural networks [J]. *Automation in Construction*, 2018, 91: 273. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.03.028.
- [10] 郭帅,张士乔,ZHU David Z. 地下水渗入排污管道的定量方法[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(4): 21.
- GUO Shuai, ZHANG Tuqiao, ZHU David Z. Quantitative method for groundwater infiltration into sewer system [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(4): 21.
- [11] WEISS G, BROMBACH H, HALLER B. Infiltration and inflow in combined sewer systems: Long-term analysis [J]. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2002, 45(7): 11.
- [12] 金忠青,周志芳. 工程水力学反问题[M]. 南京: 河海大学出版社, 1997.
- JIN Zhongqing, ZHOU Zhifang. Inverse problem on hydraulics [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1997.
- [13] ZHAO Zhichao, YIN Hailong, XU Zuxin, *et al.* Pin-pointing groundwater infiltration into urban sewers using chemical tracer in conjunction with physically based optimization model [J]. *Water Research*, 2020, 175: 115689. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115689.
- [14] XU Zuxin, QU Yang, WANG Siyu, *et al.* Diagnosis of pipe illicit connections and damaged points in urban stormwater system using an inversed optimization model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292(552): 126011. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126011.
- [15] 胡一波. 求解约束优化问题的几种智能算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- HU Yibo. Several intelligent algorithms for constrained optimization problems[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [16] 刘遂庆. 排水管网优化坡度设计计算[J]. *给水排水*, 2008 (8): 114. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2008.08.032.
- LIU Suiqing. Optimization design of conduit slope in drainage system[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2008 (8): 114. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2008.08.032.
- [17] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]// *Proceedings of Icn95-international Conference on Neural Networks*. Perth: IEEE, 1995: 1942-1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [18] 刘书明,王欢欢,徐锦华,等. 基于智能优化算法的供水管网漏水点定位[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(5): 740. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2014.05.013.
- LIU Shuming, WANG Huanhuan, XU Jinhua, *et al.* Identification of leakage location based on modern optimization algorithms[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42 (5) : 740. DOI: 10.3969/j. issn. 0253-374x. 2014. 05.013.
- [19] GEEM Z W. Particle-swarm harmony search for water network design[J]. *Engineering Optimization*, 2009, 41(4): 297.
- [20] 王久振,余健,徐林,等. 利用粒子群算法求解管网污染源反向追踪模型[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(5): 265. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2014.05.059.
- WANG Jiuzhen, YU Jian, XU Lin, *et al.* An optimal simulation method for identifying pollution source in water distribution networks based on the particle swarm optimization [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14 (5) : 265. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2014.05.059.
- [21] EBERHART R C, SHI Y. Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms [C]// *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*. Seoul: IEEE, 2001: 94-100. DOI: 10.1109/CEC.2001.934376.
- [22] 赵志刚,黄树运,王伟倩. 基于随机惯性权重的简化粒子群优化算法[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(2): 361. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3695.2014.02.010.
- ZHAO Zhigang, HUANG Shuyun, WANG Weiqlan. Simplified particle swarm optimization algorithm based on stochastic inertia weight [J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31 (2) : 361. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-3695.2014.02.010.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 室外排水设计标准: GB 50014—2021[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局, 2021.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for design of outdoor wastewater engineering: GB 50014—2021 [S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation, 2021.
- [24] 李田,时珍宝,张善发. 上海市排水小区地下水渗入量研究[J]. *给水排水*, 2004, 30(1): 29.
- LI Tian, SHI Zhenbao, ZHANG shanfa. Study on groundwater infiltration of Shanghai drainage systems [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2004, 30(1): 29.