

基于流体波信号和改进遗传算法的供水管网 泄漏监测点位布局优化方法

韩卓¹, 李炜¹, 岳宇², 李丹丹¹, 马子胜³, 任丰坤²,
李云飞¹, 刘娜⁴, 邢兰昌³

(1. 中国石化胜利油田分公司 技术检测中心, 山东 东营 257000;

2. 中国石化胜利油田分公司 胜利油田检测评价研究有限公司, 山东 东营 257000;

3. 中国石油大学(华东) 控制科学与工程学院, 山东 青岛 266580;

4. 中国石化胜利油田分公司 胜利采油厂, 山东 东营 257000)

摘要: 针对炼化企业供水管道泄漏监测技术需求, 提出了基于流体波信号和改进遗传算法的监测点位布局优化方法; 以管道内流体波信号的传播模型为理论基础分析了泄漏引起的流体波信号的波速和衰减特性; 在引入相邻监测点最短间隔、传感器成本、管道不平衡量、管道流量、管道风险等级等因素作为约束条件的基础上构建了监测点位布局优化模型; 对传统的遗传算法进行了改进, 解决了算法中重复编码的问题; 采用管网仿真案例对所建立的监测点位布局优化方法进行了验证, 首先利用最短间隔参数对监测点进行约束, 避免监测点距离较近引起的监测范围重叠问题, 然后以管网覆盖率及其变化率为性能指标获得最佳监测点数目, 实现经济性布局的目标, 最后利用改进的遗传算法对优化模型进行求解, 获得监测点位的最佳布局方案; 仿真管网和实际管网测试的结果表明: 在选择不同约束因素的前提下对监测点位进行优化布局, 监测点均能够有效地分布于使优化模型目标函数取值较大的管道区域, 验证了所建立布局优化方法的可靠性。

关键词: 供水管网 泄漏监测 点位布局 流体波 遗传算法

Layout Optimization Method for Leakage Detection Points in Water Supply Network based on Fluid Wave Signal and Improved Genetic Algorithm

HAN Zhuo¹, LI Wei¹, YUE Yu², LI Dandan¹, MA Zisheng³, REN Fengkun²,
LI Yunfei¹, LIU Na⁴, XING Lanchang³

(1. Technical Testing Center, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China;

2. Testing and Evaluation Research Co., Ltd., Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China;

3. College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying 266580, China;

4. Shengli Oil Production Plant, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China)

Abstract: To meet the leakage detection requirements of water supplying pipelines in refining enterprises, a detection point layout optimization method based on fluid wave signals and improved genetic algorithm was proposed. Based on the propagation model of fluid wave signals in pipelines, the wave velocity and attenuation characteristics of fluid wave signals caused by leakage were analyzed. A detection point layout optimization model was constructed based on the introduction of factors such as the shortest interval between adjacent detection points, sensor cost, pipeline imbalance, pipeline flow rate, and pipeline risk level as constraints. An traditional genetic algorithm was improved to solve the issue of duplicate encoding in the algorithm. The layout optimization method for the established detection points was validated using a pipeline simulation case. Firstly, the shortest interval parameter was used to constrain the detection points to avoid the overlapping detection ranges caused by nearby detection points. Then, the pipeline network coverage and its change rate as performance indicators were used to obtain the number of optimal detection points to achieve the goal of econom-

收稿日期: 2024-05-30; 修回日期: 2024-06-22。

基金项目: 国家留学基金项目(202106455003); 山东省自然科学基金项目(ZR2024ME090); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(20CX05005A); 中石化集团公司科技攻关项目(P321043)。

作者简介: 韩卓(1981-), 男, 硕士, 高级工程师。

通讯作者: 邢兰昌(1983-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 韩卓, 李炜, 岳宇, 等. 基于流体波信号和改进遗传算法的供水管网泄漏监测点位布局优化方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 73-80.

ic layout. Finally, the improved genetic algorithm was used to solve the optimization model, and achieve the optimal layout results for detection points. Experimental results between simulation and actual pipeline networks show that under different constraints, the layout of detection points is optimized, it can be effectively distributed in the pipeline area where the optimization model is a higher objective function value, verifying the reliability of the established layout optimization method.

Keywords: water supply pipeline networks; leakage detection; point layout; fluid wave; genetic algorithm

0 引言

炼化企业供水管道泄漏事故频繁发生, 严重地影响了企业的正常生产和安全运行, 造成了巨大的经济损失对供水管网进行在线实时泄漏监测势在必行^[1-3]。炼化企业厂区分管分支数量较多且分布错综复杂, 通过测量管道中的压力或流量变化难以准确判断其波动的产生原因, 如管路泄漏或是分支管道分流。该类方法受到检测仪表的精度以及所处环境因素的影响较大, 多用于油气长输管道而不适用于炼化企业厂区的复杂管网^[4-7]。

声波检测法的适用范围广, 具有实时监测管道运行状态、定位更加精准等优点, 该方法已逐渐成为管道泄漏监测的主要方法^[8-11]。获取管道泄漏产生的流体波信号可采用声波检测法, 获取方式相对安全, 同时信号可靠性强, 特别适用于对安全性要求高的炼化企业厂区分管。由于声波检测法的性能严重依赖于传感器的数量以及传感器的位置, 所以在管网拓扑结构较为复杂的情况下, 如何合理地布置传感器是该方法发挥优势的重要前提条件, 因此亟需研究监测点位的布局优化方法。

在供水管网泄漏监测领域, 已有研究人员针对压力、流量等传感器的布局优化问题开展了相关研究工作^[12-15]。文献 [16] 提出了一种考虑信息价值并基于模型的优化框架来确定泄漏检测压力传感器的最佳布局位置。文献 [17] 提出了一种基于 PPA (压力点分析算法) 的泄漏检测方法, 结果表明该方法能够减少误报并实现较高的检测精度。文献 [18] 提出了基于 ANSYS 数值仿真的应力监测点选取方法, 提高了传感器布局点选取的合理性。文献 [19] 应用 NSGA-III (非支配排序遗传算法) 算法求解一个多目标问题, 算法测试结果表明该传感器的布局方法具有良好的性能。文献 [20] 在研究网络布局算法时提出了基于 PageRank 的力导向模型的算法, 引入 PageRank 来完善节点的重力和斥力计算, 从而改进了节点布局的质量。文献 [21] 提出了一种基于节点压力信息相互关联理论的供水管网压力传感器优化布置方法, 实际案例测试结果表明该方法具有时间效率高的优势。

文献 [22] 提出了一种考虑测量数据噪声影响和用水节点需求的压力传感器布置方法, 利用遗传算法 (GA) 获得传感器的最优布局。文献 [23] 针对供水管网的拓扑结构、水压分布及水力波动, 提出结合压力相关性和水量影响矩阵的压力监测点优化布置模型, 并用粒子群算法对模型进行了求解, 结果表明该模型具有压力监测点自动优化布置、监测范围最大化等优点, 降低了监测点优化布置的

随机性和主观性。文献 [24] 基于 Kmeans 聚类法对供水管网水压监测点进行了优化布置。文献 [25] 结合经验法和聚类分析方法进行供水管网压力监测点布局优化, 通过实际案例对布局方案进行了评价和检验。文献 [26] 采用分布估计算法进行监测点的布局优化, 利用该方法确定了最佳效益监测点的数量和布局。文献 [27] 提出一种改进的遗传算法, 通过优化覆盖率和时间两个目标, 提高了异常检测和泄漏定位的准确性。文献 [28] 提出一种测压点优化布置的启发式算法, 提高了测压点的监测范围。文献 [29] 基于遗传算法进行监测点位的布局优化, 以可监控最大爆管漏水量为目标函数来优化监测点布置。然而, 上述研究工作集中于压力、流量等传感器的优化布局, 这些布局优化方法不能直接应用于流体波检测法中所采用的传感器。因此, 需要在探讨供水管网中流体波信号的传播特性及规律的基础上研究适合的传感器优化布局方法。

本文以管道内流体波信号的传播模型为理论基础分析了泄漏引起的流体波信号的波速和衰减特性。在引入相邻监测点最短间隔、传感器成本、管道不平衡量、管道流量、管道风险等级等因素作为约束条件的基础上构建了监测点位布局优化模型, 对传统的遗传算法进行了改进, 建立了基于流体波信号和改进遗传算法的泄漏监测点布局优化方法, 利用仿真管网和实际管网案例对布局优化方法的可靠性进行了验证。

1 供水管网泄漏声信号的性质与传播模型

1.1 泄漏声信号基本性质

一般认为泄漏管道中传播的声波信号是管壁薄壳受到空泡声、湍流声和湍流脉动压力的激励作用而产生的, 其中声振能量的传播方式主要包括流体波、壳体压缩波、扭转波和弯曲振动波^[30-32]。其中扭转波和弯曲振动波的衰减速度较快, 故传感器能够采集到的信号主要来自流体波和管道 (壳体) 压缩波。而管道压缩波传播速度较快, 不易测量及分析, 因此在实际测量条件下传感器测量到的可供进一步分析处理的为流体波信号^[32-33]。

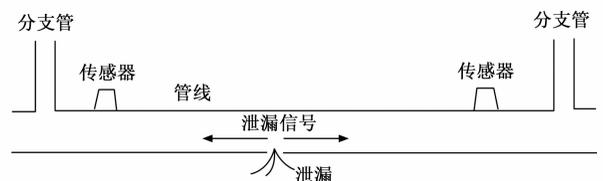


图 1 管道泄漏信号传播原理图

现有的泄漏检测仪器系统所测量和分析的振动波信号

通常为流体波信号^[9-10]。为了获取流体波信号, 可以采用非侵入式安装方式, 从而规避了管道打孔等容易引起安全事故的操作需求。泄漏信号特征受到管道自身条件、泄漏口条件、操作条件等的影响, 管道自身条件如管径、壁厚、管材等, 泄漏口条件如方位、形状、开口面积等。流体波传播速度在不同规格的管道中有所差异, 其与管道内部水压、泄漏口直径以及管道直径等因素存在密切的关系^[34-35]。

1.2 波速和衰减模型

将供水管道看作充液管道, 管道流体中传播的泄漏声波信号频带较宽, 但是能够在管道条件下传播的声波信号主要集中在管道截止频率以下, 在该频带范围内, 流体中传播的声波波长远大于管道直径, 因此在管道中传播的流体波主要为平面波。一般认为, 流体波波数 k_1 远大于平面压缩波波数 k_L ^[36-37], 设 $k_1^2 \gg k_L^2$ 。

$$k_1^2 = k_L^2 \left(\frac{1 + \beta - \sigma^2 - k_L^2 a^2}{1 - \sigma^2 - k_L^2 a^2} \right) \quad (1)$$

式中, σ 为材料的泊松比, β 为管内流体的体积模量 (Pa), a 为管道半径 (m), h 为管道的厚度 (m), k_L 为平面压缩波波数, $k_L^2 = \omega^2 (\rho (1 - \sigma^2) / E)$; E 为管道材料的杨氏模量 (Pa)。

结合式 (1) 以及波数和波速的关系, 从而得到泄漏管道中流体波波速 v_1 的计算公式如下所示:

$$v_1^2 = \frac{\omega^2}{k_1^2} = \left(\frac{\omega^2}{k_f^2} \right) \frac{1 - \sigma^2 - k_L^2 a^2}{1 + \beta - \sigma^2 - k_L^2 a^2} = v_f^2 \frac{1 - \sigma^2 - k_L^2 a^2}{1 + \beta - \sigma^2 - k_L^2 a^2} \quad (2)$$

式中, v_f 为无限大空间中流体介质的波速。

由于供水管道的壁面和水流之间存在粘滞力, 当泄漏口处的振动声信号沿着管道传播时, 声振动能量逐渐转化为流体和管道的热能。振动声波在传播过程中需要克服粘滞力而做功, 从而使得振动能量逐渐降低, 即产生媒质的粘滞吸收作用。泄漏引起的振动声信号沿管道的传播速度与管道压力、管道材料和温度等多种因素有关, 因此影响声速的因素同时也影响声波的传播速度。实际流体具有粘滞性是引起声波衰减的主要原因^[38-39]。声波幅值的衰减可用公式 (3) 来描述^[8]:

$$p = p_0 e^{-\alpha x} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\omega^2 \eta}{2 \rho_0 c^3} = \frac{\omega^2}{2 \rho_0 c^3} \left(\frac{4}{3} \eta' + \eta'' \right) \quad (4)$$

式中, p_0 为声波的初始幅值, α 为粘滞吸收系数, 是描述声波衰减快慢的物理量, 其取值与声波频率的平方成正比。管道泄漏处产生的声振动信号频率较低, 能量衰减较弱。粘滞吸收系数与声波传播速度的三次方成反比, 传播速度较高时, 信号能量衰减较小。 η' 和 η'' 分别为切变粘滞系数和容变粘滞系数, 在传播过程中声压振幅 p 随着传播距离的增大呈指数衰减。通过定量描述声压幅值随距离而衰减情况, 可确定声波沿管道传播的最大距离, 从而为传感器监测点位的布置提供理论依据。

2 基于声信号的监测点位布局优化方法

2.1 优化模型构建

合理布置监测点的位置有利于准确、快速地发现和定位泄漏点, 缩短事故周期、减少水资源损失。通过优化监测点数量, 可以降低购置成本和维护成本^[40]。为了实现上述目标, 需要对传感器的布局位置、传感器的数量进行优化。

以 N 表示传感器 (即监测点) 的个数, 以 T_N 表示在 M 根管道上 N 个监测点的最大监测泄漏量。为了考虑管道流量、不平衡量、风险等级等因素的影响, 在优化目标函数中加入上述因素并分别采用 Q_i 、 ΔQ_i 、 W_{ij} 来表示。通过对该优化问题进行分析, 现建立供水管网泄漏监测点位布局优化目标函数, 如式 (5) 所示:

$$\begin{cases} T_N = \max \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W_{ij} \cdot Q_i \cdot \Delta Q_i \cdot L_{ij} \\ L_{ij} = \begin{cases} 1, & \Delta P_{ij} \geq \Delta P_c \\ 0, & \Delta P_{ij} < \Delta P_c \end{cases} \\ s.t. \quad Dis(j_1, j_2) \geq d_c \quad j_1, j_2 \in \Omega \end{cases} \quad (5)$$

式中, i 为管道编号; j 为监测点编号; Q_i 为管道流量 (L/h); ΔQ_i 为管道不平衡量 (L/h); W_{ij} 为权重 (与管道风险等级、材料、重要性等因素有关); ΔP_{ij} 为第 i 根管道发生泄漏, 使得编号为 j 的监测点声压幅值产生的变化量; ΔP_c 为管网监测系统声压幅值波动的背景噪声阈值; L_{ij} 表示编号为 j 的监测点是否在第 i 根管道上, 若在则表示为 1、若不在则表示为 0, Ω 表示监测点的集合; d_c 表示各监测点之间的最小距离, 为防止监测点过度集中在重要的管道, 需要该约束条件来限制监测点之间的最小距离; T_N 表示 N 个监测点条件下的最优空间布局的目标函数, 以最大可监测泄漏量为目标, 同时考虑了管道流量、不平衡量、管道风险等级等因素, 最终确定 N 个监测点的最优空间布局方案。

为了避免出现监测点过度集中分布、导致监测点覆盖范围之间产生重叠的情况, 需要对监测点之间的最短间隔进行约束。以下进一步解释式 (5) 中重要参数的确定方法。以泄漏声信号的传播衰减特性模型为理论基础, 并结合行业标准对监测点间最短间隔 d_c 进行确定。例如: 对于 DN300 以下的钢管, d_c 取值为 150 m。确定 ΔP_c 时, 需要分析实际测试的数据, 该参数受到管网系统所处环境的背景噪声、传感器本身的性能等因素的影响。确定 W_{ij} 时, 如依据管道风险等级来确定权重, 则首先为每一等级的风险赋予合适的数值。

利用最短间隔参数 d_c 对监测点位进行约束之后, 进一步根据传感器对管网的监控能力来确定传感器 (即监测点) 的个数, 实现布局的经济性目标。传感器对管网的监测能力由供水管网系统中被监测的管道长度与总管道长度来决定, 当监测点数量为 N 时, 管网泄漏监测能力用管道覆盖率表示, 如式 (6) 所示:

$$C_N = \frac{\sum_{j=1}^M l_j}{l_s} \quad (6)$$

式中, l_j 表示第 j 根管道被监测点监测的长度, l_s 为 M 根管道的总长度。

上述目标优化函数 T_N 用来确定 N 个监测点的最优空间布局, 评价指标 C_N 用来确定合理的监测点个数 N 。在目标函数优化过程中, 除了要求 N 个监测点监测到尽可能多的泄漏量, 也要求监测尽可能多的管道长度、尽量覆盖风险等级高的以及不平衡量大的管道。

2.2 优化模型求解方法

本文针对传统的遗传算法进行了改进, 并利用改进后的遗传算法对供水管网监测点位进行布局优化。在传统的遗传算法中, 单点交叉或变异所产生的新个体可能存在编码重复的问题, 导致在不同组合交叉时生成的新组合中可能存在相同的监测点, 进而增大了计算量和计算时长。本文对交叉方式进行了改进, 即将交叉位置前的监测点与另外一个组合中的监测点进行对比, 若两者存在相同的监测点, 则将相同部分去掉, 剩余部分按照原来的顺序依次排序, 从而有效解决了编码重复的问题。在变异环节, 则将变异后的监测点与组合中的监测点进行对比, 若存在相同监测点则重新进行变异过程, 保证组合中的监测点互不相同。采用以上改进遗传算法对优化模型进行求解的过程如图 2 所示。

1) 初始化: 首先设定算法所需的参数值, 其中包括迭代次数、交叉率、变异率、基因的个数(监测点个数)。创建初始的两个集合 A 和 B , 每个集合包括 m 个监测点组合, 其中每个监测点组合包括 n 个监测点 (n 为监测点个数), 计算每个监测点组合对应的目标函数值。

2) 轮盘赌选择: 在 A 、 B 两个集合中随机选取目标函数值较大的监测点组合, 生成新的 B 集合。

3) 单点交叉: 将新的 B 集合中的监测点组合按照一定的几率进行两两交叉互换, 每一次交叉的结果是生成两个新的监测点组合, 每个组合之间不存在重复。

4) 变异: 将 B 集合中的监测点组合按照一定几率进行变异, 发生变异的结果是监测点组合中的监测点发生改变, 生成新的组合(与其他组合不重复)。

5) 结果判断: 若未达到迭代次数, 则将 A 集合中对应目标函数最大值的监测点组合放入 B 集合中(作为 B 集合的一个监测点组合), 再将 B 集合设为新的 A 集合, 返回到步骤 2 继续; 若达到迭代次数, 则得到优化后的结果(B 集合中对应目标函数最大值的监测点组合), 包括监测点组合中监测点的编号、对应的坐标信息等。

在监测点布局优化过程中, 首先利用最短间隔参数对可布设监测点位进行约束, 将距离过小的监测点进行处理, 进而得到最短间隔优化后的可布设监测点; 然后计算随机组合条件下监测点在不同数量条件下(以上述可布设监测

点为总集合、以其个数为上限)的管道覆盖率, 利用管道覆盖率随监测点组合和个数而变化的规律来确定用于后续优化布局的点数; 最后采用上述改进遗传算法对目标函数进行优化, 从而获得监测点的最优布局。

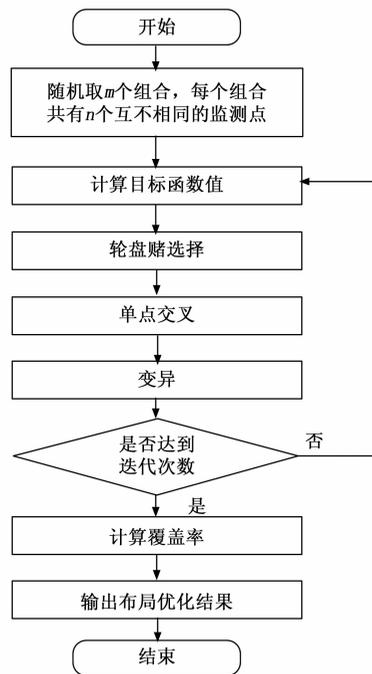


图 2 基于改进遗传算法的优化模型求解过程

3 监测点位布局优化方法仿真验证

3.1 模拟管网信息

以泄漏声信号传播衰减特性模型为理论基础, 初始状态下(即对监测点进行优化前)每间隔 160 m 设置一个监测点(称为“节点”), 得到节点的数量为 72, 对每个监测点进行编号(即 1~72), 相邻两个监测点之间的管道部分称为“管段”, 共计 82 个管段, 对每个管段进行编号(即 1~82), 管段的最大长度为 412.3 m, 最小长度为 100 m, 管径包括 DN400、DN800 和 DN1200。

模拟管网的基础信息包括管道的材质、管径、管道的不平衡量、管道流量和风险等级等信息。通过对管网基础信息进行处理得到如下矩阵参数: 管段长度矩阵 L , 泄漏量(不平衡量)矩阵 Q , 管段权重矩阵 W (根据每个管段的直径、流量、风险等级决定), 监测点坐标矩阵 J , 监测点与管段的关联矩阵 L 。

上述模拟管网包括 72 个节点和 82 个管段, 管网同时考虑了 3 类管径、2 组管道不平衡量、2 组管道流量和 3 个风险等级等因素, 具有一定的复杂度和典型性。以下采用该模拟管网对所建立的监测点布局优化算法进行仿真验证。

3.2 模型参数设定

对管网信息进行分析可得, 在实施优化之前每个管段均在监测点(即传感器)的监测范围内, 实现了 100% 全覆

盖。在此基础上, 首先对监测点的数量和位置进行优化, 然后对优化结果进行评价。优化的主要原则为: 对于管段权重值较大的情况 (本案例中大于等于 0.6), 保证优化后这些管段的覆盖率 100%; 对于权重值较小的情况 (本案例中小于 0.6), 两个监测点之间的距离不超过某一设定值。

首先利用最短间隔参数对最初的监测点进行约束, 以此约束后的监测点集合为基础, 在不同监测点个数 (从小到大逐步增大) 条件下, 采用随机遍历法计算各种组合条件下的管网覆盖率, 通过比较获得对应不同监测点个数条件的覆盖率最大值, 最终得到覆盖率最大值矩阵。随着监测点个数的增加, 当覆盖率最大值大于设定的覆盖率阈值 (如 0.75), 并且满足变化量绝对值小于设定的变化量阈值 (如 0.05) 时, 则得到所需进一步优化布局的监测点个数。

以上基于覆盖率的变化情况确定监测点个数 (N), 即遗传算法中的监测点组合中个体数量, 进而采用以上改进的遗传算法对监测点位实施布局优化。设置种群大小为 $500N$, 迭代次数为 400, 交叉概率设为 0.9, 变异概率设为 0.05。交叉概率和变异概率决定了新个体的多样性, 随着迭代次数的增加, 虽然计算结果的准确度有所提高, 但是计算量及计算时间相应地增加。

3.3 验证结果与分析讨论

为了考察不平衡量、管道流量以及风险等级对布局优化结果的影响, 首先在仅考虑传感器成本和实际可行布置点位的前提下对监测点位进行了优化布局, 优化结果如图 3 所示。在上述考虑传感器成本、实际可行布置点位两个因素的基础上, 以下将不平衡量、管道流量、管道风险等级作为优化布局所考虑的因素, 分别选择其中一个、两个、三个因素对监测点空间布局进行优化。

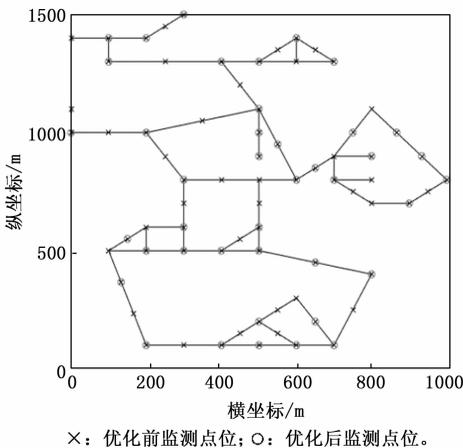


图 3 目标函数考虑传感器成本和实际可行布置点位时监测点分布

将不平衡量引入到待优化的目标函数 (式 (5)) 中, 利用改进的遗传算法对优化模型进行求解, 最终得到图 4 所示的监测点布局结果。分析图 4 可知, 不平衡量较大 ($\Delta Q \geq 60$ L/h) 管道上的监测点个数为 32 (占总数的

78.0%), 不平衡量较小 ($\Delta Q < 60$ L/h) 管道上的监测点个数 9 (占总数的 22.0%), 相比之下, 监测点大多分布于不平衡量较大的管道处。比较以上监测点数量可知, “不平衡量”这一因素的引入有效地约束了监测点的布局。

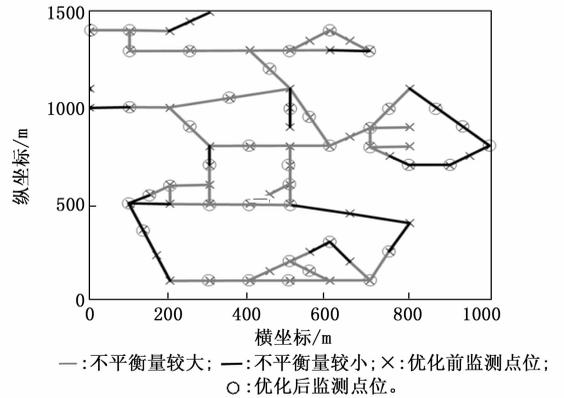


图 4 目标函数考虑传感器成本、实际可行布置点位以及不平衡量时监测点最优分布

将不平衡量和管道流量引入待优化的目标函数 (见式 (5)), 利用改进的遗传算法对优化模型进行求解, 得到的监测点布局方案如图 5 所示。由图 5 可知, 设管道不平衡量和管道流量为考虑因素时, 管道不平衡量和管道流量均较大 ($\Delta Q \geq 60$ L/h, $Q \geq 100$ L/h) 的位置处监测点个数为 23 (占总数的 56.1%), 管道不平衡量和管道流量均较小 ($\Delta Q < 60$ L/h, $Q < 100$ L/h) 的位置处监测点个数为 3 (占总数的 7.3%), 其余位置的监测点个数为 15 (占总数的 36.6%)。可见不平衡量和管道流量均较大的管道上分布的监测点较多。

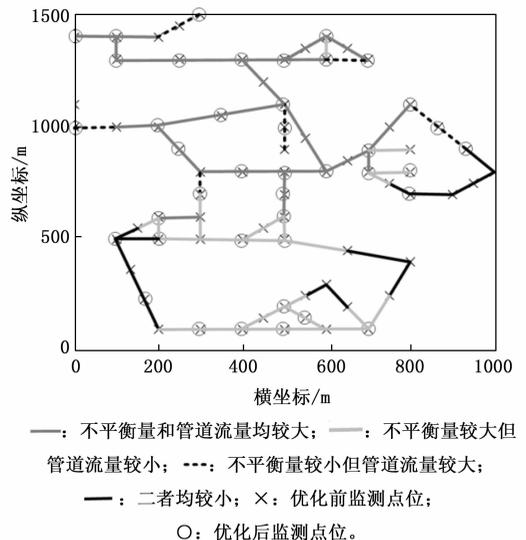


图 5 目标函数考虑传感器成本、实际可行布置点位以及不平衡量、管道流量时监测点最优分布

将不平衡量、管道流量及风险等级引入待优化的目标函数 (式 (5)), 利用改进的遗传算法对优化模型进行求

解,得到的监测点布局方案如图 6 所示。分析图 6 可知:3 种考虑因素均为较大值的管道上监测点个数为 21 (占总数 51.2%);两种因素为较大值、第三种因素为较小值的管道上监测点个数为 4 (占总数 9.8%);一种因素为较大值、另外两种因素为较小值的管道上监测点个数为 13 (占总数 31.7%);3 种因素均为较小值的管道上监测点个数为 3 (占总数 7.3%)。

在以上仿真案例中,首先利用最短间隔参数来约束监测点,避免了监测点过度集中分布、监测点覆盖范围之间产生重叠的情况,然后通过设置覆盖率阈值以及覆盖率变化量阈值确定监测点个数,获得了合理的监测点数量,最后利用改进的遗传算法对监测点的位置进行优化布局。布局结果显示,当考虑因素的个数不同时(此时目标函数值也不同,参见式(5)),传感器布置点位大多分布在使目标函数值取值较大的管道区域,验证了优化方法的正确性。

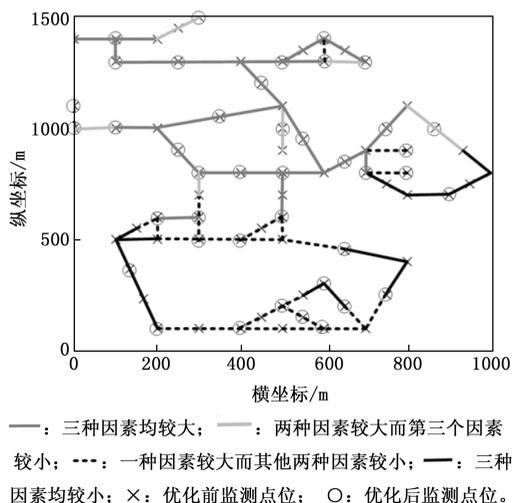


图 6 目标函数考虑传感器成本、实际可行布置点位、不平衡量、管道流量以及风险等级后监测点最优分布

4 炼化企业供水管网监测点布局优化实例应用

4.1 实际管网信息与模型参数设定

根据实际管网的 CAD 图得到如下信息:管道以及可布设监测点的位置信息、管道的长度、管道的直径。将各个可布设点位(阀门井)进行编号(1~276),共 276 个可布设监测点。依据每个管段上最多有两个可布设点位的规则,将管网的所有管道分为 308 个管段,将各管段进行编号(1~308)。根据可布设监测点与管段的对应关系,获得监测点与管段的关联矩阵 L (276 行、308 列),建立可布设监测点的坐标矩阵 J ,管段的长度矩阵 I ,管道流量矩阵 Q ,管段风险等级矩阵 W ,其中风险等级与管径有关。

对各监测点进行最短间隔约束,即各监测点之间的距离不得超过某一设定值。根据 CJJ159-2011 行业标准,不同口径钢管和铸铁管的建议布设间距为 80~150 m,考虑到实际情况(厂区内噪声情况较为复杂),本案例中将最小间隔

设定为 50 m,从而得到实际可布设点位。

设定管网覆盖率阈值为 0.5、0.6、0.7,变化量阈值为 0.1,随着监测点个数的增加,当管网覆盖率最大值大于设定的覆盖率阈值,并且满足变化量绝对值小于设定的变化量阈值时,得到用于进一步布局优化的监测点个数 N 。

4.2 优化结果分析与讨论

将所有阀门井位置均布设监测点后,管网覆盖率的计算值为 0.76,该值为考虑实际可行布置点位条件下的最大覆盖率。由此可见,实际的管网无法实现全覆盖。本案例中,设定目标管网覆盖率为 0.5、0.6、0.7。当考虑因素为不平衡量、管道流量和风险等级,管网覆盖率阈值为 0.5、0.6 和 0.7 时的监测点布局优化结果如图 7~9 所示。分析可知,当覆盖率为 0.5、0.6 和 0.7 时,计算得到监测点个数分别为 46、57 和 78,最大监测泄漏量分别为 30 925、34 533 和 36 666 (参见式(5),单位为 L^2/h^2)。当监测点个数为 78 时,监测点占总数的 28.3%,实际的管道覆盖率为 0.712,占最大覆盖率的 93.7%,在控制成本的同时有效地监测管网的泄漏情况。

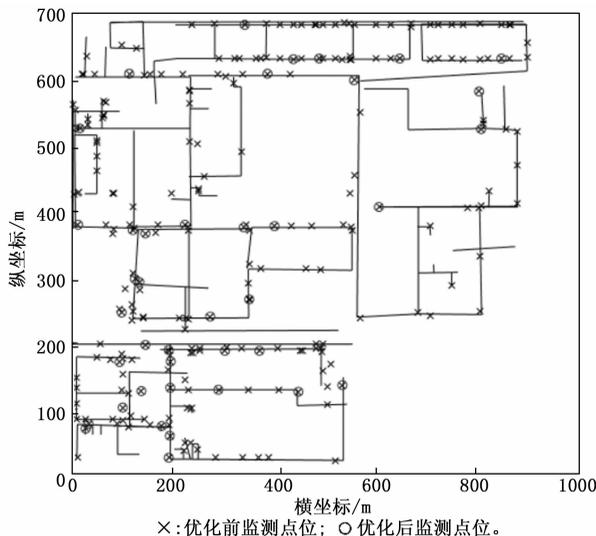


图 7 管网覆盖率阈值为 0.5 时监测点布局优化结果

图 7~9 给出了设定不同的覆盖率阈值时所得到的监测点最优布局方案。分析图中结果可知,重要布置区域主要偏向于左下方,少数分布在管网的边缘位置。根据管网信息可以计算出,左下方的管网部分目标函数值较大(用水量较大且权重较高),将监测点布置在该区域能够监测到更大的泄漏量。

相比于仿真案例,本案例采用的实际供水管网拓扑结构更为复杂。分析上述结果可知,通过设定覆盖率的阈值来约束监测点的个数,实现了监控能力的可调性。随着监测点个数的增加,系统的监测能力逐渐增强,最大监测泄漏量也逐渐增大。分析图中监测点布局结果可知,增加的监测点大多集中于左下方,即目标函数较大处,加大了对重要管道的监测力度,其余监测点分布较分散,在一定程

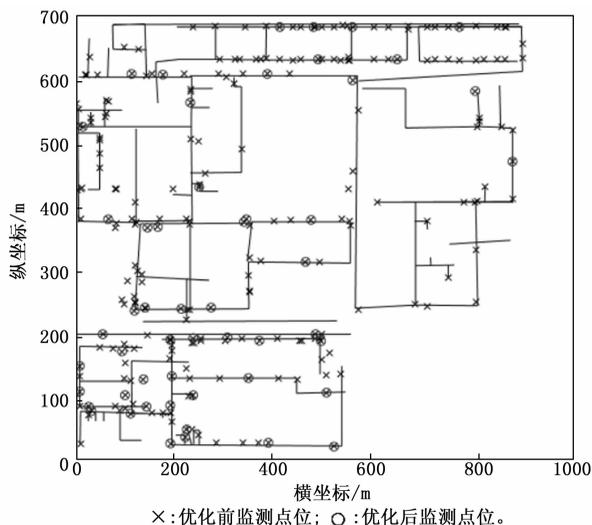


图8 管网覆盖率阈值为0.6时监测点布局优化结果

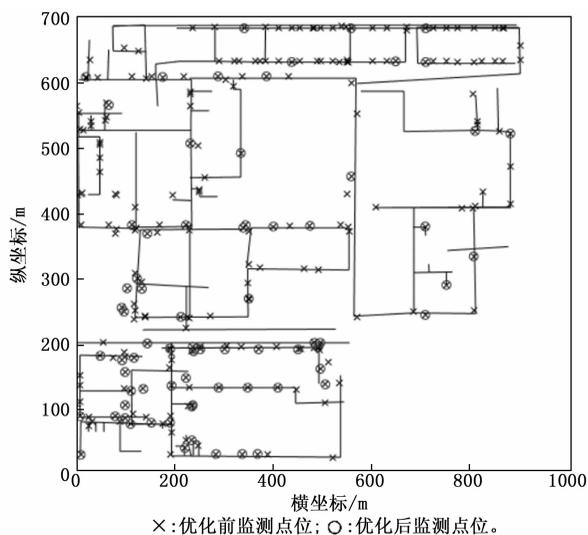


图9 管网覆盖率阈值为0.7时监测点布局优化结果

度上提高了对管网的覆盖率。

5 结束语

针对炼化企业供水管网监测点优化布局问题,以流体波信号的传播特性和衰减特性为理论基础,引入相邻监测点最短间隔、传感器成本、管道不平衡量、管道流量、管道风险等级等因素作为约束条件,构建了监测点布局优化模型。对传统的遗传算法进行了改进,解决了算法中的编码重复问题,减少了计算量和计算时长。利用改进的遗传算法对优化模型进行求解,形成了基于流体波信号和改进遗传算法的供水管网泄漏监测点位布局优化方法。

采用管网仿真案例对监测点布局优化方法进行了验证,在选择不同约束因素的前提下对传感器布置点位进行优化布局,结果显示监测点均能够有效地分布于使目标函数取值较大的管道区域。将所建立的布局优化方法应用于具有复杂拓扑结构的实际管网,得到了不同管道覆盖率阈值

条件下的监测点布局优化方案,进一步验证了布局优化方法的可靠性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 中国统计出版社, 2017.
- [2] 肖翊. 供水管网泄漏率因素分析及控制对策——以天津市为例 [J]. 城市, 2014 (3): 66-71.
- [3] 王聪. 城市供水管网泄漏监测的传感器布置问题的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [4] 王信, 刘建国, 马伟东, 等. 国内外管道泄漏检测技术进展 [J]. 化工设备与防腐蚀, 2003 (5): 40-44.
- [5] 杨启航, 周艳, 王晨婉. 浅析基于传递闭包法对供水管网压力监测点的布置 [J]. 陕西水利, 2022 (1): 3-5.
- [6] 党争光. 长输天然气管道泄漏监测定位方法应用 [J]. 石化技术, 2022, 29 (7): 61-63.
- [7] 吴同, 邓忠华, 沈亮, 等. 长距离输油管道泄漏监测技术研究进展 [J]. 油气储运, 2023, 42 (3): 259-275.
- [8] 杨理践, 张禄, 高松巍. 供水管道泄漏声信号特性 [J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33 (2): 183-187.
- [9] 孙保海. 供水管道泄漏声信号检测系统的研究与设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [10] 杨进, 文玉梅, 李平. 自来水铸铁管道泄漏声信号频率特征研究 [J]. 应用声学, 2006, 25 (1): 30-37.
- [11] 盖秋敏. 供水管网泄露压力衰减定位法应用 [J]. 科技创新与应用, 2020, 312 (20): 165-166.
- [12] AGRESTA A, FATTORUSO G, LANZA B, et al. Applying numerical models and optimized sensor networks for drinking water quality control [J]. Procedia Engineering, 2015, 119 (1): 918-926.
- [13] BANIK S, ANWER M, KHAN K A, et al. Forecasting Bangladeshi monsoon rainfall using neural network and genetic algorithm approaches [J]. The International Technology Management Review, 2009, 2 (1): 1-18.
- [14] 高欢. 基于负压波法输水管道泄漏监测研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [15] 宗边. 到2025年全国城市公共供水管网漏损率力争控制在9%以内 [N]. 中国建设报, 2022-01-31 (001).
- [16] LoPEZ E, ALFONSO L. Methodology to optimally place pressure sensors for leak detection in water distribution systems using value of information [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2022, 148 (8): 04022043.
- [17] YANG L, ZHAO Q. A novel PPA method for fluid pipeline leak detection based on OPELM and bidirectional LSTM [J]. IEEE Access, 2020, 8: 107185-107199.
- [18] 尹少平, 冯沫, 王灵梅, 等. 大型风电机组塔筒应力监测点的选取与预警 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (2): 36-39.
- [19] HAMIDEH J, SARA N, TAHER R. A multi-objective optimization method based on NSGA-III for water quality sensor

placement with the aim of reducing potential contamination of important nodes [J]. Water Supply, 2022, 22 (1): 928 - 944.

[20] 李冉, 吴亚东, 王松, 等. 基于 PageRank 的网络布局算法 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 250 - 257.

[21] SANTOS-RUIZ I, SANTOS-RUIZ F R, PUIG V, et al. Pressure sensor placement for leak localization in water distribution networks using information theory [J]. Sensors, 2022, 22 (02): 21093 - 21100.

[22] MAZZOLENI M, SCANDELLA M, PREVIDI F. Evaluation of robust sensors placement schemes for leaks isolation in water distribution networks [J]. IFAC PapersOnLine, 2022, 55 (33): 48 - 53.

[23] 林雨阳. 城市供水管网实时监控系统的设计与监测点的优化布置 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

[24] 戴一明. 基于 K-means 聚类法的供水管网水压监测点优化布置 [J]. 建筑安全, 2014, 29 (8): 74 - 77.

[25] ZHANG J, ZHANG L, CHAI C, et al. Insights into spatio-temporal variations of the water quality in Taihu Lake Basin, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193 (11): 757 - 757.

[26] 秦贤海, 杜坤, 罗雄武, 等. 基于爆管检测效益的供水管网水压监测点布局优化 [J]. 中国给水排水, 2022, 38 (5): 40 - 44.

[27] 张卫东. 基于管网泄漏模型的压力传感器优化布置方法的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.

[28] 何锐, 俞亭超, 邵煜. 监测供水管网爆管的测压点优化

布置方法 [J]. 中国给水排水, 2020, 36 (17): 36 - 40.

[29] 程伟平, 陈亚威, 许刚, 等. 基于遗传算法的供水管网爆管监控网络布置研究 [J]. 中国给水排水, 2020, 36 (15): 46 - 51.

[30] 金建波, 吕彪, 姚舜刚, 等. 基于超声导波的埋地管道检测技术研究 [J]. 化工机械, 2019, 46 (4): 366 - 371.

[31] 路炜, 文玉梅. 供水管道泄漏声信号及其传播特性 [J]. 声学技术, 2007, 26 (5): 871 - 876.

[32] 杨进. 供水管道泄漏检测定位中的信号分析及处理研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.

[33] 刘志宏, 崔伟华, 梁坤鹏. 泄漏管道波速预测理论及其应用 [J]. 振动·测试与诊断, 2011, 31 (4): 405 - 408.

[34] 王长坤, 孙艳香. 直埋保温管道设计年限与使用年限的差距分析 [J]. 区域供热, 2022 (4): 86 - 89.

[35] 谭建勇. 供水管道泄漏检测与定位系统的设计与实现 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.

[36] 刘敬喜, 李天匀, 刘土光, 等. 弹性介质中充液管道的波衰减特性 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2003, 31 (10): 90 - 92.

[37] 刘志宏, 崔伟华, 梁坤鹏. 泄漏管道波速预测理论及其应用 [J]. 振动·测试与诊断, 2011, 31 (4): 405 - 408.

[38] 吴莹. 基于管道模型的供水管道瞬态泄漏检测方法的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.

[39] 于海良. 供水管道泄漏所引起的振动特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

[40] 陈亚威. 面向供水管网爆管监控的监测点布局优化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.

决策支持系统 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (1): 1 - 10. (上接第 72 页)

[5] 蔚增岩. 基于激光测量技术的铁轨障碍物检测系统研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.

[6] 朱韵琳, 徐晓. 基于激光扫描系统的机车车顶异物检测 [J]. 激光杂志, 2016, 37 (5): 60 - 63.

[7] 林鹏飞, 邓天民, 李洋. 基于点云三维重构的轨道线路异物检测系统研究 [J]. 科学咨询 (科技·管理), 2014, 27 (7): 69 - 71.

[8] RUDER M MOHLER N, AHMED F. An obstacle detection system for automated trains [J]. Proceeding of Intelligent Vehicles Symposium, IEEE, 2003, 18 (2): 180 - 185.

[9] 罗立浩, 许亮. 基于机器视觉的非平整物体表面凸起异物检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (5): 50 - 54.

[10] 车建强, 林义闽, 廉士国. 检测飞机进气道的方法、装置及存储介质 [P]. 中国: CN110378878B, 2022 - 03 - 11.

[11] 魏韬, 徐梁刚, 史洪云, 等. 基于网格突变与半空心球邻域角度过滤的三维激光点云电力线异物精准检测定位方法 [J]. 电力大数据, 2021, 24 (7): 9 - 16.

[12] 韩莹, 袁静, 司江胜, 等. 16 线雷达点云的实时小障碍物检测研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (12): 487 - 498.

[13] WEI G, HANG Y, GE L, et al. Low complexity coding unit

decision for video-based point cloud compression [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2023, 76 (3): 59 - 65.

[14] 李维刚, 樊响, 梅洋, 等. 基于车载激光点云的道路标线提取方法 [J]. 中国激光, 2022, 49 (7): 149 - 160.

[15] 刘艳华. 迭代阈值分割法在 X 射线焊缝检测中的应用 [J]. 自动化技术与应用, 2015, 34 (10): 74 - 76.

[16] XIAO J, ZHANG J, ADLER B, et al. Three-dimensional point cloud plane segmentation in both structured and unstructured environments [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61 (12): 52 - 57.

[17] 徐善军, 任书楠, 李聪利, 等. 基于激光点云体素区域生长的配电网引线检测 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022 (7): 148 - 153.

[18] 王庆臻. 三维点云数据配准算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.

[19] YANG X, ZHANG W. Enhanced detection of straw coverage using a refined AdaBoost algorithm and improved Otsu method [J]. Traitement du Signal, 2023, 40 (3): 246 - 251.

[20] JIAN S S, LI D Y, YU Y Q. Research on taxi operation characteristics by improved DBSCAN density clustering algorithm and K-means clustering algorithm [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1952 (4): 3725 - 3736.