

基于遗传算法的供水管网反问题漏失定位

董 深, 吕 谋, 盛泽斌, 李 璞

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 266033 山东 青岛)

摘 要: 为有效减少城市供水管网漏失, 快速、准确确定漏失点的位置及漏失水量, 进而实现管网漏失的实时诊断, 提出了基于遗传算法的供水管网反问题漏失定位方法. 在构建基于反问题分析的微观基础水力模型的基础上, 通过对管网漏失量与压力变化的相关性分析, 以漏失点所在管网中的位置及漏失点相应的漏失水量为变量, 以漏失发生时管网压力监测点的监测值与模拟值的差值最小为目标, 建立了基于遗传算法的供水管网反问题漏失定位模型. 通过3种工况下的漏失模拟计算, 结果表明: 所建立的反问题漏失定位模型可以有效地定位漏失点并优化预测漏失水量, 可合理高效地制定漏失点检测与定位方案.

关键词: 供水管网; 漏失定位; 漏失量优化分析; 遗传算法; 反问题分析

中图分类号: TU991

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)02-0106-05

Inverse transient leakage location of water supply network based on genetic algorithm

DONG Shen, LÜ Mou, SHENG Zebin, LI Pu

(Institute of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao Technological University, 266033 Qingdao, Shandong, China)

Abstract: To reduce the network leakage effectively and determine the position of the leakage point or region and leakage volume quickly and exactly, the inverse transient leakage location technology based on genetic algorithm is proposed to realize the real-time leakage diagnosis of water supply network. First of all, the microscopic model is established as the basic hydraulic model based on inverse problem analysis. By correlation analysis of the network leakage and pressure variation, the inverse transient leakage location model of water supply network based on genetic algorithm is established. The model takes the position of the leakage point and the corresponding volume as variables, takes the minimum difference between the monitoring value and simulation value of pressure monitoring points when leakage occurs as target. By simulating three leakage modes, the practicality and effectiveness of the inverse transient leakage location model of water supply network are verified. The research provides important basis for making program of leakage detection and location effectively.

Key words: water supply network; leakage location; optimization analysis of leakage volume; genetic algorithm; inverse transient analysis

管网漏失会造成水资源的严重浪费, 直接影响供水企业的经济效益; 而且会危害城市安全, 造成道路、地基下沉, 甚至影响建筑物的质量和安全; 另外漏失也影响供水水质, 造成水质污染, 危

害群众健康, 因此必须尽可能地减少管网漏失. 而漏失管理目前面临的一个关键问题就是如何在复杂且不直观的管网中快速定位漏失发生点. 通过建立供水管网在线监控网络, 实时监测供水管网中的水量、水压等变化, 可实现城市供水管网故障的实时诊断, 常见的诊断方法是水压测量检漏. Germanopoulos 等^[1]把与压力有关的泄漏因素引入模型中, Ligget 等^[2]提出了基于压力和流量的逆分析法、瞬态分析与遗传算法, 并进行了瞬态分

收稿日期: 2012-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078193);
国家重大水专项课题(2009ZX7422-006).

作者简介: 董 深(1983—), 女, 博士研究生;
吕 谋(1965—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 吕 谋, lvmou1@163.com.

析的最优监测研究,国内在基于压力和(或)流量分析的漏损或泄漏诊断方面还在试验与理论探讨过程中,与国外相比差距较大.江朝元等^[3]采用负压波传播到上下游的时间差和管内压力波的传播速度并结合流量检测法进行漏点定位,伍悦滨等^[4]采用瞬变反问题分析数值模拟来确定给水管网漏失点和漏失量,王俊岭等^[5]考虑到测压点位置压力的代表性,提出采用图论理论对给水管网测压点进行优化布置的方法,郭新蕾等^[6]基于瞬变流和遗传算法的管道泄漏辨识方法,提出管道泄漏检测的水力瞬变全频域数学模型.虽然这些研究均基于压力和流量的分析,在漏损诊断的速度和精度方面有显著提高,但仍然无法做到漏损实时(在线)诊断.本文通过管网压力、流量等在线监测数据,采用基于GA的反问题漏失定位方法,可实现较为准确的漏失点定位.

1 实验方法与实验平台

1.1 水力瞬变流反问题分析方法

描述管道瞬变流的运动方程和连续方程^[7]可写为

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f |V| V|}{2gD} + J_0 = 0; \quad (1)$$

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} - V \sin \alpha + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

式中: x 为沿管道中心线方向的距离, t 为时间, H 为水压高度, V 为管道平均流速, D 为管道直径, g 为重力加速度, f 为Darcy-Weisbach摩阻系数, a 为水击波速, α 为管道倾角, J_0 为非恒定摩阻.

水力瞬变流反问题分析是在系统中激发不会对系统本身产生任何危害的低强度瞬变流动,同时选定系统中的测压点,通过实时监测,获得这些测压点在瞬变过程中的压力响应值,从而辨识系统的水力元件特性,如阀门工况、管道粗糙度和管道漏失等,而所有水力元件特性均反映在管网系统模型中^[4].反问题分析模型的数学表达式为

$$E(a) = \sum_{i=1}^M [H_i^m - H_i(a)]^2, a = (a_1, a_2, \dots, a_N). \quad (3)$$

式中: H_i^m 为第*i*个压力测量值; $H_i(a)$ 为第*i*个压力计算值; a 为漏失系数数组, $aN = (CA)N$, N 为假设可能存在的漏失点; M 为测压点数.

供水管网的在线监测系统可以实时从系统中提取大量的流量与压力等数据,这些数据可以用于对管网的瞬态分析计算^[8].供水管网反问题漏失定位就是在管网水力模拟分析的基础上通过对

管网实测值与模拟优化计算数值的对比分析来确定供水管网的漏失点位置及漏失水量.

1.2 水力分析模型的建立与优化

在实验室中建立供水管网仿真模拟实验平台,如图1所示.平台中设有2个供水水箱,2台加压水泵,4个进水点及数十个控制阀门,可根据实验需求,通过调节控制阀门或对水泵的变频调速控制更改管网拓扑结构,从而实现多种运行工况下的漏失点定位及漏失量模拟分析.



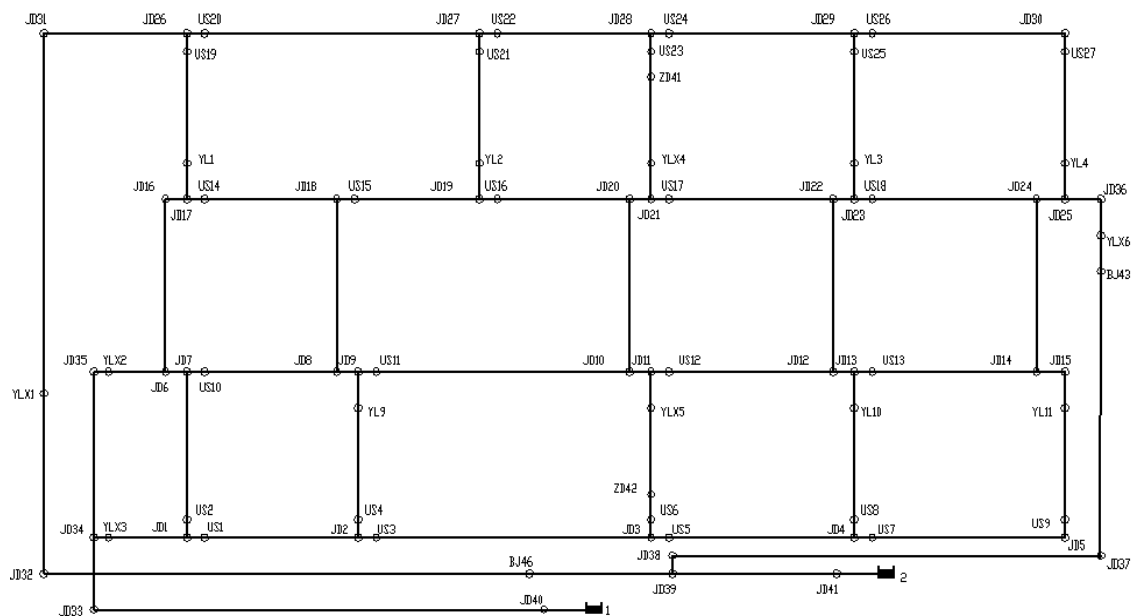
图1 供水管网仿真模拟实验平台

在管网仿真模拟实验平台中,通过关闭部分管段上的控制阀门,将管网组合为如图2所示的拓扑结构,并采用美国环境保护局(EPA)所开发的供水管网模拟软件EPANET建立了管网微观仿真模型,即

$$\begin{cases} A\bar{Q} = \bar{q}, \\ B\bar{h} = 0, \\ h = S\bar{Q}^n. \end{cases} \quad (4)$$

式中: A 为衔接矩阵, Q 为节点流量, $\bar{Q}$ 为由各节点的流量组成的向量, $\bar{q}$ 为由各管段的流量组成的向量, h 为管段水头损失, $\bar{h}$ 为管段水头损失向量, B 为回路矩阵, S 为管段摩阻, $n = 1.852 \sim 2$.

该模型包括12个主供水环、83个节点、75根供水管道,管道总长度为132.5 m,其中最小供水管径为50 mm,由两个变频调速水泵经4个进水口供水,该模型将作为管网漏失定位研究的基础性水力分析模拟平台.为提高所建立微观水力模型的精度,采用智能化遗传算法对上述微观模型进行优化校核计算,对应于管径为50 mm的管段的校核阻力系数为80,对应于管径为70 mm的管段的校核阻力系数为90,对应于管径为100 mm的管段的校核阻力系数为95,对应于管径为150 mm的管段的校核阻力系数为130.校核后管网监测点压力监测值与模拟值对比结果见表1.校核后模型相对误差小于2.5%,满足精度要求.



1、2—供水水箱;JD—管网节点;YL、YLX—压力监测点;US—用水点;ZD—浊度在线监测点;BJ—变径点。

图 2 微观水力模型拓扑结构

表 1 压力监测值与模拟值对比结果

测压点	实测水头/ m	模拟水头/ m	压力模拟 相对误差
YL1	4.13	4.14	0.001 5
YL2	4.12	4.13	0.001 6
YL3	4.11	4.13	0.004 6
YL4	4.15	4.14	0.001 4
YL9	3.95	4.11	0.039 0
YL10	3.99	4.11	0.029 0
YL11	3.91	4.11	0.050 0
YLX1	4.02	4.14	0.030 0
YLX2	3.98	4.19	0.052 0
YLX3	4.00	4.19	0.048 0
YLX4	4.02	4.13	0.028 0
YLX5	3.88	3.95	0.018 0
YLX6	4.03	4.14	0.028 0

2 基于智能寻优的反问题漏失定位模型

2.1 压力监测点优化布置

针对管网漏失定位的水压校核要求,为保证漏失变化能及时有效地在压力监测点的观测值中反映出来,在管网水力分析模型的基础上,通过灵敏度分析,寻找水头受漏失量影响大的几个节点作为压力监测点,以期提高漏失定位计算的准确率^[9].采用一维寻优计算的斐波那契法(Fibonacci method)对变量 N 直接进行寻优以确定测点数目,再确定优化的测点布置,其计算模型如下.

目标函数为

$$\min J = \{ [\max_{\Omega} (\max_{j \in Z_k} | p_j - p_{ck} |)] + W \cdot 1\,000 \cdot N_c \}.$$

约束条件为

$$N \leq N_p, j \in \{ N_1, N_2, \cdots, N_n \}, Q_{\min} \leq Q_j \leq Q_{\max}.$$

式中: W 为权系数; Z_k 为第 k 个测压点所代表区域; Ω 为 Z_k 的集合; N_p 为允许布置的最大测压点数目; p_{ck} 为第 k 个中心点的水压; p_j 为第 j 个节点的水压.

通过对所构建的水力分析模型进行灵敏度分析,在供水管网仿真模拟实验平台中优化布设 13 个压力监测点,进而建立实验平台在线监控网络.

2.2 漏失点定位及漏失量优化分析模型的建立

通过对管网漏失量与压力变化的相关性分析,采用所建立的微观模型为基础水力分析模型,以漏失点所在管网中的位置及漏失点相应的漏失水量为变量,以漏失发生时管网压力监测点的监测值与模拟值的差值最小为目标,结合 1.1 节中的水力瞬变流反问题分析方法,构建供水管网漏失定位反问题优化计算模型如下.

目标函数为

$$\min F = \sum_{i=1}^M (| H_{Mi} - H_{ji1} | \cdot \Delta W_i) / H_{ji1},$$

$$\Delta W_i = | H_{ji1} - H_{ji0} |.$$

约束条件为

$$j \in \{ N_1, N_2, \cdots, N_n \},$$

$$Q_{\min} \leq Q_j \leq Q_{\max}.$$

式中: ΔW_i 为管网中各压力监测点的权重函数,由发生漏失前后监测点压力变化值确定; H_{Mi} 为漏失时,第 i 个测压点的模拟计算水头, m ; H_{ji1} 为漏失时,第 i 个测压点的监测水头, m ; H_{ji0} 为未漏失时,第 i 个测压点的监测水头, m ; Q_j 为漏失点 j 的漏失量, m^3/h ; M 为压力监测点个数,对于 1.2 节中所构建的微观水力模型, $M = 13$.

2.3 遗传算法求解

遗传算法是基于自然选择和基因遗传学原理的随机优化搜索算法, 适合于处理传统算法无法解决的复杂非线性问题, 且可直接用于离散变量的计算. 由于本文所建立的模型变量既包括离散变量(漏失点位置), 同时也包括连续变量(漏失点相应的漏失量), 是一个混合变量的复杂非线性求解问题^[10], 因此本文可采用改进的智能化遗传算法对漏失点定位及漏失量优化分析模型进行求解, 实现流程见图 3.

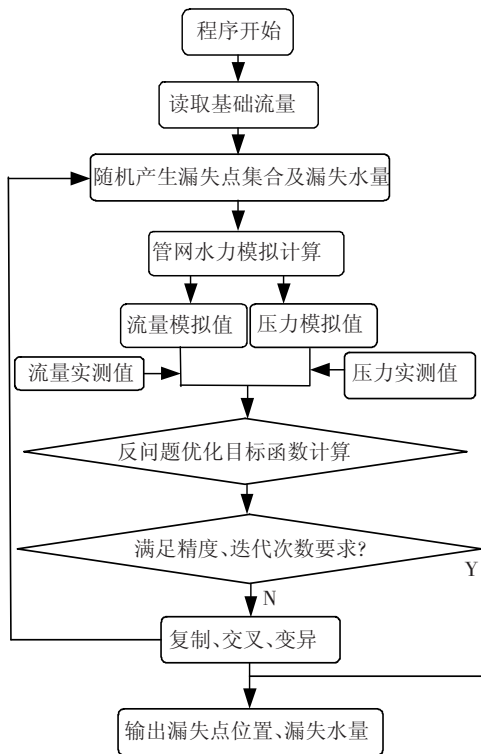


图 3 供水管网反问题漏失定位求解实现流程

采用混合编码方法对漏失点位置及相应的漏失量进行编码, 结合最优保存策略, 采用 BP 神经网络计算确定遗传算法的各算子分别为: 种群大小 $MM = 50$, 进化代数 generation 为 600, 交叉概率 $P_c = 0.98$, 变异概率 $P_m = 0.95$.

3 单点与两点漏失模拟计算

在图 1 所示的供水管网仿真模拟实验平台上进行 3 种漏失工况仿真模拟实验: 1) 单节点 JD2 漏失; 2) 单节点 JD27 漏失; 3) 双节点 JD2、JD4 漏失. 各种漏失模拟工况下的管网节点基础流量、漏失点的漏失量及 13 个压力监测点的压力值, 均可由实验平台中的在线监控网络实时获取.

3.1 单节点 JD2 漏失模拟

通过开启控制阀门使节点 JD2 发生漏失. 采用 2.2 节所构建的供水管网漏失定位反问题优化计算模型, 进行漏失定位计算, 测压点的实测值与计

算值见表 2. 节点 JD2 发生漏失时, 通过漏失定位反问题优化计算所得到的漏失点为 JD4, 在模拟实验平台中, 两节点间距离为 0.3 m, 漏失量的实测值为 $17.51 \text{ m}^3/\text{h}$, 优化计算值为 $17.283 \text{ m}^3/\text{h}$, 相对误差为 1.3%.

表 2 节点 JD2 漏失优化计算结果

测压点	实测水头/ m	优化计算 水头/m	压力优化 误差/%
YL1	1.95	1.966	0.84
YL2	1.96	1.962	0.12
YL3	1.97	1.962	0.41
YL4	1.97	1.969	0.04
YL9	4.35	4.353	0.06
YL10	4.36	4.350	0.23
YL11	4.35	4.357	0.17
Y LX1	2.81	2.822	0.41
Y LX2	3.64	3.641	0.03
Y LX3	3.62	3.642	0.61
Y LX4	1.96	1.961	0.04
Y LX5	4.37	4.356	0.31
Y LX6	2.81	2.802	0.27

3.2 单节点 JD27 漏失模拟

通过开启控制阀门使节点 JD27 发生漏失. 采用 2.2 节所构建的供水管网漏失定位反问题优化计算模型, 进行漏失定位计算, 测压点的实测值与计算值见表 3.

表 3 节点 JD27 漏失优化计算结果

测压点	实测水头/ m	优化计算 水头/m	压力优化 误差/%
YL1	1.94	1.947	0.35
YL2	1.96	1.975	0.77
YL3	1.98	1.983	0.14
YL4	1.98	1.989	0.46
YL9	4.43	4.387	0.96
YL10	4.42	4.386	0.76
YL11	4.42	4.385	0.79
Y LX1	2.80	2.815	0.52
Y LX2	3.70	3.666	0.91
Y LX3	3.71	3.678	0.86
Y LX4	2.04	2.030	0.49
Y LX5	4.44	4.417	0.52
Y LX6	2.83	2.823	0.25

节点 JD27 发生漏失时, 通过漏失定位反问题优化计算所得到的漏失点为 US19, 在模拟实验平台中, 两节点间距离为 4.35 m, 两节点位于管网的同一个环内. 漏失量的实测值为 $17.49 \text{ m}^3/\text{h}$, 优化计算值为 $17.761 \text{ m}^3/\text{h}$, 相对误差为 1.55%.

3.3 双节点 JD2、JD4 漏失模拟

通过开启控制阀门使节点 JD2、JD4 同时发生漏失. 采用 2.2 节所构建的供水管网漏失定位反问题优化计算模型, 进行漏失定位计算, 漏失量与测压点的实测值与计算值见表 4.

表 4 双节点漏失时的优化计算结果

测压点	实测水头/ m	优化计算 水头/m	压力优化 误差/%
YL1	1.16	1.161	0.10
YL2	1.17	1.170	0.00
YL3	1.18	1.171	0.73
YL4	1.18	1.180	0.00
YL9	3.56	3.569	0.27
YL10	3.53	3.533	0.09
YL11	3.54	3.541	0.02
Y LX1	2.03	2.030	0.01
Y LX2	2.85	2.864	0.48
Y LX3	2.85	2.874	0.84
Y LX4	1.30	1.295	0.36
Y LX5	3.56	3.566	0.18
Y LX6	2.03	2.014	0.79

节点 JD2、JD4 同时发生漏失时,通过漏失定位反问题优化计算所得到的漏失点为 JD9 和 US8,JD2 与 JD9 距离为 2.3 m,两点在管网的同一个环上,JD4 与 US8 两节点距离为 0.35 m.

JD2 的漏失量实测值为 10.42 m³/h,优化计算值为 10.572 m³/h,相对误差为 1.46%. JD4 的漏失量实测值为 7.94 m³/h,优化计算值为 7.853 m³/h,相对误差为 1.10%.

通过以上 3 种模拟漏失工况的反问题优化计算,可知此模型能够较准确地将计算漏失点锁定在模拟漏失发生点的相邻节点或同一环内的漏失点附近节点上,从而有效地缩小了漏失点的排查范围,与此同时,漏失量的优化计算误差均能够控制在 2% 以下.由此可见,所构建的供水管网反问题漏失定位模型精度较高.

4 结 论

1) 通过 3 种漏失工况下的模拟漏失实验与相应的反问题优化计算,表明漏失点定位及漏失量优化分析模型能够较为准确地将漏失点锁定在实际漏失点附近或同一环内的漏失点相邻节点上,在一定程度上有效缩短了管网漏失探测与定位的时间,与此同时,漏失量的优化计算误差均能够控制在 2% 以下,模型精度较高,根据供水管网中压力监测数据的瞬态变化,可以有效地定位漏失点并优化预测漏失水量.

2) 基于 GA 的反问题漏失定位方法依赖于管网压力、流量等在线监测数据的准确性和基础

水力分析模型的精度,因此,通过对管网压力、流量等监测点进行优化布置,提高在线监测网络的准确性,并通过灵敏度分析、智能优化算法等校核提高水力模型的精度,可有效提高供水管网反问题漏失定位的精准度.

3) 通过实验验证了所构建的反问题漏失定位模型具有一定的实用性和有效性,可应用于城市供水管网漏失诊断过程中.

参考文献

- [1] GERMANOPOULOS G, JOWITT P W. Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network[J]. ICE Proceedings, 1989, 87(6): 195 – 214.
- [2] VITKOVSKY J P, LIGGETT J A, SIMPSON A R, *et al.* Optimal measurement site locations for inverse transient analysis in pipe networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(6): 480 – 492.
- [3] 曹晓莉,江朝元,甘思源. 基于 GSM/GPRS 的供水管网泄漏监测与定位系统[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 173 – 175.
- [4] 伍悦滨,刘天顺. 基于瞬变反问题分析的给水管网漏失数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(11): 1483 – 1485.
- [5] 王俊岭,孙怀军. 给水管网测压点的一种优化布置方法[J]. 北京建筑工程学院学报, 2005, 21(4): 51 – 54.
- [6] 郭新蕾,杨开林. 基于瞬变流和遗传算法的管道泄漏辨识[J]. 计算力学学报, 2009, 26(5): 664 – 669.
- [7] VITKOVSKY J P, BERGANT A, SIMPSON A R, *et al.* Systematic evaluation of one-dimensional unsteady friction models in simple pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(7): 696 – 708.
- [8] 刘天顺. 瞬变流反问题分析在给水管网漏失检测中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
- [9] 梁宇舜. 基于 SCADA 系统的给水管网爆管事故快速定位系统的研究[D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [10] 王俊良,李娜娜,高金良,等. 基于压力驱动节点流量模型的供水管网漏失控制[J]. 中国给水排水, 2010, 26(13): 106 – 108.

(编辑 魏希柱)