

基于CUSUM方法的集中供热管网泄漏故障诊断

周守军^{1,*}, 张国正¹, 刘臣¹, 林旭东², 曹长红³

(1. 山东建筑大学 热能工程学院, 山东 济南 250101; 2. 华能山东发电有限公司 白杨河发电厂, 山东 淄博 255200; 3. 淄博市博山区热力公司, 山东 淄博 255200)

摘要: 为了有效降低集中供热管网泄漏故障发生率, 减轻大量管内介质泄漏导致的经济损失和环境破坏, 文章基于变点理论中的累积和(Cumulative Sum, CUSUM)方法以及集中供热管网泄漏仿真模型, 提出了一种新的集中供热管网泄漏故障诊断方法。针对实验室现有的集中供热实验管网, 开发了相应的算法程序, 并诊断分析了供热实验管网的泄漏工况。结果表明: 在所有工况条件下, 管网泄漏发生后 2.2 s 即可触发报警信号; 最大泄漏流量的计算值与实验值相对误差为 1.6%, 对应计算所得泄漏流量最大的时刻也接近实际时间; 泄漏位置诊断准确率随着误差距离增大而升高, 当误差距离 ≤ 6 m 时, 其准确率为 73.1%。

关键词: 集中供热; CUSUM 方法; 泄漏仿真模型; 实验管网; 故障诊断

中图分类号: TU995.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-7644(2023)05-0048-10

Fault diagnosis leakage of district heating pipelines based on CUSUM method

ZHOU Shoujun^{1,*}, ZHANG Guozheng¹, LIU Chen¹, LIN Xudong², CAO Changhong³

(1. School of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Baiyanghe Power Plant, Huaneng Shandong Power Generation Co., Ltd., Zibo 255200, China; 3. Zibo Boshan District Heating Company, Zibo 255200, China)

Abstract: In order to effectively reduce the incidence of leakage fault of district heating pipelines, and reduce the economic loss and environmental damage caused by the leakage of a large number of pipeline mediums, based on the CUSUM method in the change point theory and the leakage simulation model disctrict heating pipelines, a new method for fault diagnosis of leakage of district heating pipelines is proposed. Based on the existing district heating experimental pipelines in the laboratory, this paper develops the corresponding algorithm program, and diagnoses and analyzes the leakage conditions of the heating experimental pipelines. The result shows, under all working conditions, the alarm signal can be triggered 2.2 s after the leakage of the pipe network. The relative error between the calculated value of the maximum leakage flow rate and the experimental value is 1.60%. And the experimental time when the calculated leakage flow is the largest is also close to the actual time. The accuracy of leakage location diagnosis increases as the error distance increases, and when the error distance ≤ 6 m, the accuracy rate is 73.1%.

Key words: district heating; CUSUM method; leakage simulation model; experimental pipeline; fault diagnosis

收稿日期: 2022-03-07

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2019GSF111037); 山东省自然科学基金项目(ZR2020ME189)

作者简介: 周守军(1974—), 男, 教授, 博士, 主要从事城镇供热管网故障诊断技术与系统开发等方面的研究。E-mail: zhoushoujun@sdjzu.edu.cn [*通讯作者]

0 引言

城镇集中供热管道是城市地下管线的重要组成部分,相比于自来水管,其应用时间短,但发展却较为迅速。据统计,截至2019年,我国运营的热水管网总长达 48.8×10^4 km,其中一次网长度为 12.4×10^4 km、庭院管网长为 36.4×10^4 km^[1]。由于管网的运行状况愈加复杂,保障这些管网的运行安全就显得尤为重要。其中,泄漏是影响管网运行安全的主要问题,其主要原因包括腐蚀、设备老化、机械冲击等^[2-3],大量介质的泄漏会导致经济损失和环境破坏。由于管道性能会随着时间的推移而降低,不可避免地产生局部泄漏,因此及时有效的泄漏故障诊断在实践中非常重要。

最初,我国大部分供热企业处于“先漏后检”的阶段,一般是由工作人员“听声判漏”,或结合管网压力变化试挖泄漏位置,这种方式的效率低、耗时长、成本高且定位不够精准^[4]。随着研究深入,管道泄漏诊断技术根据其作用的位置及实施手段主要可分为管道内和管道外诊断。管道外诊断方法是将探测仪器置于在地表或管道外监测周围环境因素,获取数据并进行分析,从而及时地诊断泄漏的发生。杨汉瑞等^[5]提出一种基于分布式光纤传感技术的膨胀节膨胀量的泄漏诊断方法,建立了有效反映膨胀量与温度变化关系的检测模型,从而诊断了泄漏位置,其诊断结果与膨胀量的测量误差相关。吴晋湘等^[6]利用红外热像仪和土壤湿度速测仪等记录异常管段沿线土壤的温度、湿度信息,分析管网泄漏和保温层破损时传热传质对管道上方土壤温湿度的影响规律,判定泄漏点位置。PERPAR等^[7]利用土壤的温度梯度诊断供热管道的泄漏状况,其精度较高。FRIMAN等^[8]通过无人机搭载遥感热相机,将检测到具有异常高温度的区域认定为泄漏区域,此方法可以自动分割影响检测结果的建筑物,从而减小误报率。上述管道外诊断方法有一定的效果,但受外部环境因素影响较大,且大部分存在排查周期长、成本过高、实施过程复杂以及确定泄漏位置不够及时等缺点。

管道内诊断法发展源于20世纪末,主要利用监测设备置于管内获取管网运行数据进行直接诊断,或结合其他学科开展数据分析及泄漏诊断。FILIPPINI等^[9]基于压力波和质量流量数据分析,直接诊断泄漏时间和泄漏位置,但其准确度较差。PÉREZ-PÉREZ等^[10]提出人工神经网络结合在线监

测数据的管网泄漏诊断方法,利用模拟数据来训练人工神经网络,并结合数学模型估计管网阻力系数,得到较好的诊断结果,但所需数据量较多,对模型的精度要求也较高,且管网运行中的压力波动对泄漏定位的精度有较大影响。石光辉等^[11]利用高频压力传感器,通过捕捉管网泄漏瞬间形成的负压水击波,并根据小波分析方法得到负压波传播到传感器的时间,再以此定位泄漏位置,但供热管网距离长、分支多,负压水击波会产生较大的衰减,难以对其准确定位。

供热管网泄漏初期,补水流量及压力变化相对较小,泄漏情况难以确定。累积和(Cumulative Sum, CUSUM)方法基于似然比推出,通过分段累积监测数据序列信息,将过程的较小偏移叠加,以达到“质变”的效果,从而实现对较小偏移的检测^[12]。CUSUM方法已成功应用于金融分析^[13]、医学诊断^[14]、地震探测^[15]及给水管网爆管检测^[16]等领域。文章提出利用CUSUM方法和集中供热管网泄漏仿真模型,采用仿真模拟与实验研究相结合的方法,通过监测管网补水流量和压力开展泄漏故障诊断,旨在泄漏发生初期就能对供热管网进行泄漏故障报警和准确定位。

1 泄漏故障诊断及管网仿真

1.1 集中供热管网仿真模型

文章提出的泄漏故障诊断方法的基础是集中供热管网仿真模型^[17-18]。设任意一个供热管网,其支路数为 m 、节点数为 $n+1$,由网络图论理论、基尔霍夫定律、伯努利方程和管路特性方程,得到其水力工况仿真模型方程组,由式(1)表示为

$$\begin{cases} \mathbf{A} \times \mathbf{G} = \mathbf{Q}, \\ \mathbf{B} \times \Delta H = \mathbf{0}, \\ \Delta H = \mathbf{S} \times |\mathbf{G}| \times \mathbf{G} + \mathbf{Z} - \mathbf{DH}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{A}$ 为管网关联矩阵(为 $n \times m$ 阶矩阵); $\mathbf{G}$ 为管段流量向量; $\mathbf{B}$ 为管网的基本回路矩阵,为 $(m-n) \times m$ 阶矩阵; ΔH 为管段阻力压降; $\mathbf{S}$ 为管段阻力特性系数矩阵(m 阶对角矩阵); $|\mathbf{G}|$ 为管段流量 $\mathbf{G}$ 的绝对值 m 阶对角矩阵; $\mathbf{Z}$ 为管段支路中两节点的位能差向量; $\mathbf{DH}$ 为管段的水泵向量,当管段不含水泵时,该管段 $\mathbf{DH} = \mathbf{0}$,当有水泵时, $\mathbf{DH}$ 为水泵扬程; $\mathbf{Q}$ 为管网各节点的净出流量向量,入流为正,出流为负。当 $\mathbf{Q}$ 为零向量时,表示供热管网正常运行,管网各节点的出流量与入流量代数和为0,即管网为

一个闭合环路;当 Q 中某元素为负值,表示该管网发生泄漏。

而 S 可由式(2)表示为

$$S = 7.02 \times 10^{-3} \frac{K^{0.25}}{\rho d^{5.25}} (l + l_d), \quad (2)$$

式中 K 为管壁的当量绝对粗糙度,对于供热管道,一般为 0.0005 m ; d 为管道内径, m ; l, l_d 分别为管网计算管段的长度和局部阻力当量长度, m ; ρ 为管内流体介质的平均密度, kg/m^3 。

式(1)对应的求解模型由式(3)表示为

$$\mathbf{M}^k \Delta \mathbf{G}_1^{k+1} = -\Delta \mathbf{H}^k, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{M}$ 为马克斯威(Max Well)矩阵,是以 $\mathbf{B}$ 为基础的 $(m-n) \times (m-n)$ 阶的对称正定矩阵, $\mathbf{M}$ 矩阵对应于一定的树,不同的树相对应的 $\mathbf{M}$ 矩阵也不同; $\Delta \mathbf{H}^k$ 为基本回路管段压降代数和,当 $\mathbf{G}^k$ 为方程组的解时,其值为 0。

上述管网仿真模型方程组包括正常工况模型、节点泄漏模型和管段泄漏模型。其中节点泄漏是指泄漏位置在供回水干管到用户(换热站)的分支节点上,原管网的拓扑结构与正常工况一致,在节点泄漏仿真时,只需对该节点设定泄漏流量值即可。管段泄漏是指泄漏位置在供回水干管管段上,在管段泄漏仿真时,泄漏位置处设置流量接近零的“虚拟用户”,将管段泄漏转化成“虚拟用户”的分支节点泄漏,管网拓扑结构发生改变,在其分支节点处给定泄漏流量值,建立虚拟节点泄漏仿真模型,即为管段泄漏模型。

1.2 基于 CUSUM 方法的泄漏故障诊断方法

1.2.1 CUSUM 方法

假设 $x_1, x_2, \dots, x_\zeta, \dots, x_n$ 为按顺序记录的一组过程监测样本数据,对这组数据做以下假设,由式(4)^[12]表示为

$$\begin{aligned} H_0: x_i &\sim N(\mu_0, \sigma), i = 1, 2, 3, \dots, n, \\ H_1: x_i &\sim N(\mu_0, \sigma), i = 1, 2, 3, \dots, \zeta, \\ x_i &\sim N(\mu_1, \sigma), i = \zeta + 1, \zeta + 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 H_0 为原假设,表示过程无变点; H_1 为备择假设,表示过程有变点; μ_0, μ_1 分别为变点出现前后样本均值,变点即样本数据突变的点,对应供热管网中泄漏发生的点; σ 为样本标准差,假设为定值; n 为样本数据组别上限; ζ 为变点发生处数据组别, $\zeta < n$ 。

H_1 对 H_0 的似然比可由式(5)表示为

$$L_{n,\zeta} = \frac{L(n, \mu_1)}{L(n, \mu_0)} = \frac{\prod_{i=1}^{\zeta} f_0(x_i) \prod_{i=\zeta+1}^n f_1(x_i)}{\prod_{i=1}^n f_0(x_i)} = \frac{\prod_{i=\zeta+1}^n f_1(x_i)}{\prod_{i=\zeta+1}^n f_0(x_i)}, \quad (5)$$

式中 $L_{n,\zeta}$ 为备择假设 H_1 对原假设 H_0 的似然比统计量; $L(n, \mu_0), L(n, \mu_1)$ 分别为 H_0 与 H_1 的似然函数; $f_0(x_i), f_1(x_i)$ 分别为 H_0 与 H_1 的密度函数。

上、下偏移累积和由式(6)表示为

$$\begin{cases} C_i^+ = \max\{0, x_i - k + C_{i-1}^+\}, \\ C_i^- = \min\{0, x_i + k + C_{i-1}^-\}, \end{cases} \quad (6)$$

式中 C_i^+, C_i^- 分别为上、下偏移累积和; k 为漂移参数。供热管网发生泄漏时,管网补水流量向上偏移,因此只需计算 C_i^+ 。

1.2.2 泄漏故障诊断方法

文章提出的泄漏故障诊断方法是利用 CUSUM 方法监测管网补水流量变化,当管网补水流量累积和变化超过预定阈值时,即可发出报警信号,并确定泄漏发生时间及泄漏量,然后将泄漏流量带入管网泄漏仿真模型,对每个节点进行泄漏模拟计算,并根据给定的判定准则,比较分析采样压力表的实验运行值与仿真模拟值,确定泄漏位置。

(1) 诊断是否发生泄漏

① 获取一定时间间隔(5 min)的管网补水流量监测数据序列 q_i , 计算其均值 μ_0 与方差 σ_0 , 并将数据序列标准化为 y_i , 由式(7)~(9)表示为

$$\mu_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n q_i, \quad (7)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - \mu_0)^2}, \quad (8)$$

$$y_i = (q_i - \mu_0) / \sigma_0. \quad (9)$$

② 选取 CUSUM 累积和报警阈值 h 和漂移参数 k , 计算上偏移累积和,由式(10)表示为

$$C_i^+ = C_{i-1}^+ + y_i - k, \quad (10)$$

式中 $C_1^+ = 0$ 。

③ 判断 $C_i^+ = \max\{0, C_{i-1}^+ + y_i - k\}$ 是否大于设定的报警阈值 h , 若某一时刻 $C_i^+ > h$, 即在该时刻补水流量偏移累积和超过阈值,则在该时刻发出报警信号,认定管网发生泄漏,并记录该时刻为 i_a 。

(2) 诊断何时发生泄漏以及泄漏程度

① 继续计算累积和 C_i^+ , 同时开始计算 dC_i^+/di 。供热管网发生泄漏时,补水流量增大,对应时刻累积和发生突变,当 dC_i^+/di 突然增大 ($dC_i^+/di > 10dC_{i-1}^+/di$), 此时得到泄漏开始时刻 $i_s (i_s < i_a)$; 再计算 dC_i^+/di , 下一个 $dC_i^+/di = 0$ 时刻即为泄漏最大时刻 $i_t (i_t > i_a)$ 。

② 根据泄漏开始时刻补水流量值 $q(i_s)$ 和泄漏最大时刻补水流量值 $q(i_t)$, 计算最大泄漏流量

2 管网泄漏实验与模型验证

2.1 实验系统

实验系统由集中供热实验管网和在线数据监测系统两部分组成(如图2所示)。实验管网包含18个用户和3个热源,热源由循环水泵和电加热水箱组成。管道布置为上供下回,供回水管段对称布置,且二者管径相同。定压方式为变频水泵补水定压,定压点为循环水泵入口处,在泄漏实验运行的过程中,可实现自动补水。



图2 集中供热实验管网示意图

实验管网各用户管段上依次安装有进口压力表、温度表、电磁流量计、调节阀、截止阀和出口压力表。其中,截止阀用来模拟各用户阻力,调节阀用来进行实验管网初调节,使用户达到设计流量。循环水泵的前后位置依次安装进口温度表、进口压力表、出口压力表、电磁流量计和出口温度表,补水泵处亦

有进口压力表、电磁流量计和出口压力表。在线数据监测系统即对上述各仪表进行实时监测并将实验数据采集、存储到MySQL数据库中。

2.2 实验方案设计

文章进行单热源枝状供热管网泄漏工况模拟实验。所用单热源枝状管网拓扑结构如图3所示,其中n、s分别表示节点和管段。该管网包括1号热源和18个用户,共分为36个管段、38个节点。实验管网设计总流量为 $18 \text{ m}^3/\text{h}$,而每个用户设计流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

实验管网共13个泄漏点,根据距离热源由近到远、先节点后管段、先供水后回水的原则编号。其中节点泄漏点为3个,在用户的进口或出口节点,编号为1~3;管段泄漏点为10个,在供、回水管路上各5个,编号为4~13。具体泄漏点位置及编号如图3所示(括号内编号表示泄漏点在回水管路)。

城市供热管网正常工况下补水流量不宜大于总循环水量的1%^[20],而补水流量>5%时,表明管网发生了严重泄漏,此时泄漏位置也相对容易被确定。为了验证文章泄漏诊断方法对不同泄漏工况的有效性,并使实验工况研究更丰富,此次实验根据不同泄漏率(泄漏流量占总流量的百分比)分为1.1%(工况1)、2.5%(工况2)、4.0%(工况3)和5.5%(工况4)4种泄漏工况,13个泄漏点共52组实验。每组实验分为正常工况和泄漏工况两部分,各运行1870 s,数据采集频率为2.2 s/次。采用自适应递推最小二乘滤波算法^[21]对管网运行数据(主要包括压力、补水流量)进行预处理,消除噪声。

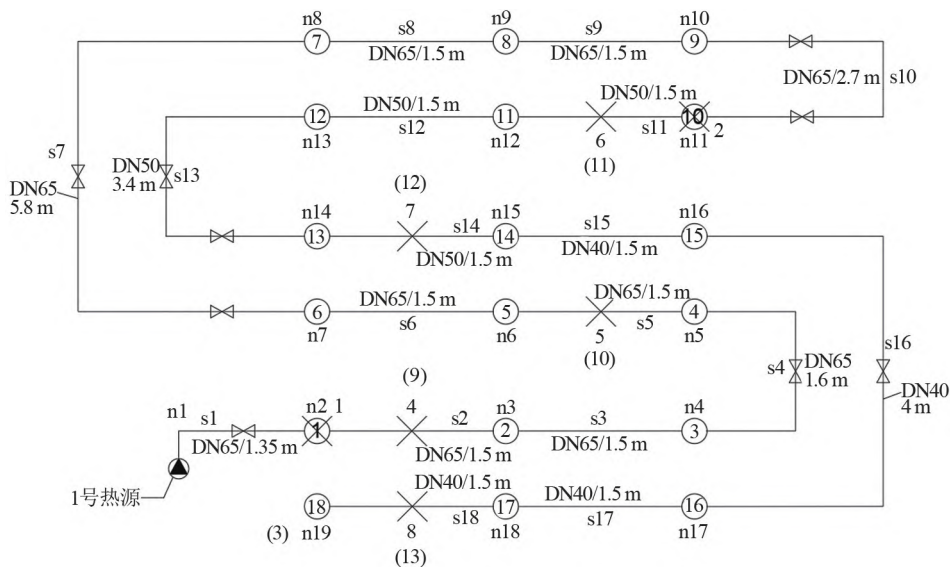


图3 单热源枝状实验管网拓扑结构图

2.3 泄漏仿真模型实验验证

针对供热管网的正常工况,龚璞等^[18]已经开展了模拟研究,而文章主要对一级节点泄漏模型和二级管段泄漏模型进行验证。

节点泄漏工况选择 1 号泄漏点工况 2,管段泄漏工况选择 11 号泄漏点工况 1。将两组实验中泄漏工况数据各取 300 组,计算其平均值,得到各节点泄漏工况下的运行压力以及循环水泵扬程、定压点压力、泄漏流量等数据;再将循环水泵扬程、定压点压力、泄漏流量分别代入已编译的节点和管段泄漏

仿真模型 MATLAB 程序中,得到管网各节点仿真与实验压力数据。如图 4(a)所示,节点泄漏工况下各节点压力实验值与仿真值的相对误差最大、最小值分别为 4.71%和 0.86%;如图 4 (b)所示,管段泄漏工况下各节点压力实验值与仿真值的相对误差最大、最小值分别为 4.64%、0.06%。两级泄漏仿真模型最大相对误差均不超过 5%,且从图 4 中可以看出,仿真模型的供回水压力曲线与实验曲线的变化基本相符,说明仿真模型的准确性较高。

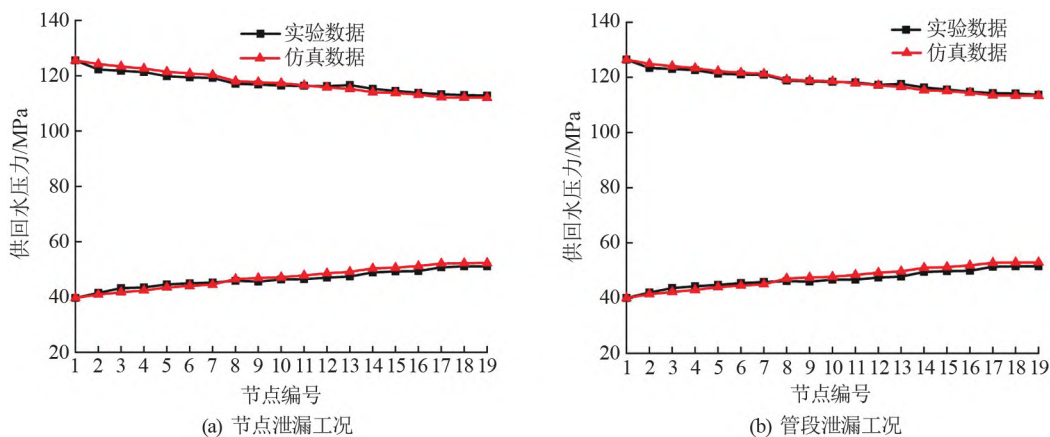


图 4 不同泄漏工况实验与仿真数据对比

3 泄漏故障诊断方法实验研究

3.1 CUSUM 方法参数选取

在泄漏故障诊断方法中,阈值 h 和漂移参数 k 的选取至关重要。如果参数选取过小,会使得泄漏报警灵敏度过高,可能会将管网正常状态显示为泄漏状态,增加误报率;而参数选取过大,又将降低灵敏性,可能会将管网泄漏状态误认为是正常状态,增加漏报率。主要采用 3 种方法选取 h 和 k 。

方法 1 为基于公式的推导^[22],由式(14)表示为

$$h = \frac{\sigma}{\delta} \ln \frac{1 - \beta}{\alpha}, k = \mu_0 + \frac{\delta}{2}, \quad (14)$$

式中 α 为误报率; β 为漏报率; $\delta = (\mu_1 - \mu_0) / \sigma$,为变点的标准化移位置。此方法期望值为 $\alpha \leq 10\%$ 、 $\beta \leq 5\%$ 。

方法 2 为基于平均运行链长 (Average Run Length, ARL) 的选取^[23]。ARL 指从检测开始到检测出发生异常所需要的平均样本个数,取 ARL 为 150,得到 $h = 3.5$ 、 $k = 0.5$ 。

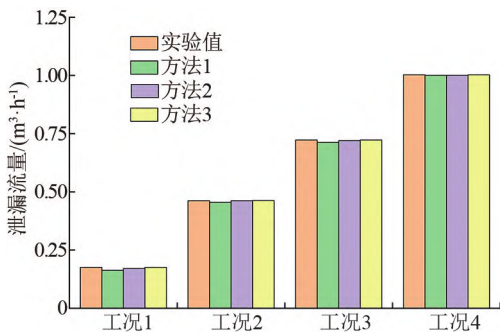
方法 3 为基于经验值的选取^[16], $h = 5\sigma$ 、 $k = 1.015$ 。

以 3 号泄漏点的 4 组工况为例,将上述 3 组 h 、 k 参数值代入上述泄漏诊断方法,计算泄漏报警时间及最大泄漏流量。泄漏报警时间结果见表 1,最大泄漏流量如图 5 所示。

从表 1 可以看出,3 组不同 h 、 k 值得到的泄漏报警时间一致,都是在泄漏发生 2.2 s 后即发出报警信号,泄漏报警效果良好。由图 5 可以看出:工况 1 和 3 中,方法 3 得到的最大泄漏流量与实验值基本一致,另外两种方法计算值则比实验值要低;工况 2 中,方法 1 的计算值比实验值小,另外两种方法计算结果与实验值相等;工况 4 中,方法 3 计算值与实验值相等,另外两种方法计算值都比实验值稍低。综上所述,方法 3 的整体计算结果更接近实验值,故选择参数 $h = 5\sigma$ 、 $k = 1.015$ 进行泄漏故障诊断方法的应用。

表 1 不同方法所得泄漏报警时间 单位:s

方法	泄漏报警时间			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
实验值	1 870.0	1 870.0	1 870.0	1 870.0
方法 1	1 872.2	1 872.2	1 872.2	1 872.2
方法 2	1 872.2	1 872.2	1 872.2	1 872.2
方法 3	1 872.2	1 872.2	1 872.2	1 872.2

图5 不同 h 、 k 值计算所得最大泄漏流量

3.2 实验结果分析

3.2.1 泄漏报警计算

以3号泄漏点4组工况为例,按照上述方法对实验管网补水流量数据进行泄漏故障诊断,实验管网补水流量运行数据及CUSUM累积和曲线如图6所示。可以看出,当管网发生泄漏时,管网补水流量

明显增大。经过累积和计算,4组工况在实验运行第1872.2 s时均有 $C_i^+ > h$,并在此之后累积和不断增大,因此可以判定此时发生泄漏,与实际情况相符。

利用此泄漏诊断方法对13个泄漏点共52组泄漏实验计算了泄漏报警时间,发现所有工况实验均在实验运行第1870.0 s时发生泄漏,而计算结果显示泄漏报警信号发出的时间均为实验运行第1872.2 s,没有误报、漏报或者延迟报警。由于现有实验台的压力表采集频率最高只能达到2.2 s/次,若提高采集频率,报警时间还能缩短。

泄漏报警之后,计算管网泄漏流量。从图6可以看出,工况1~4,计算得到泄漏开始时刻 i_s 与实际时刻一致,泄漏最大时刻 i_t 也是泄漏工况运行稳定后的时间,所以两个时刻对应补水流量差值即为最大泄漏流量。

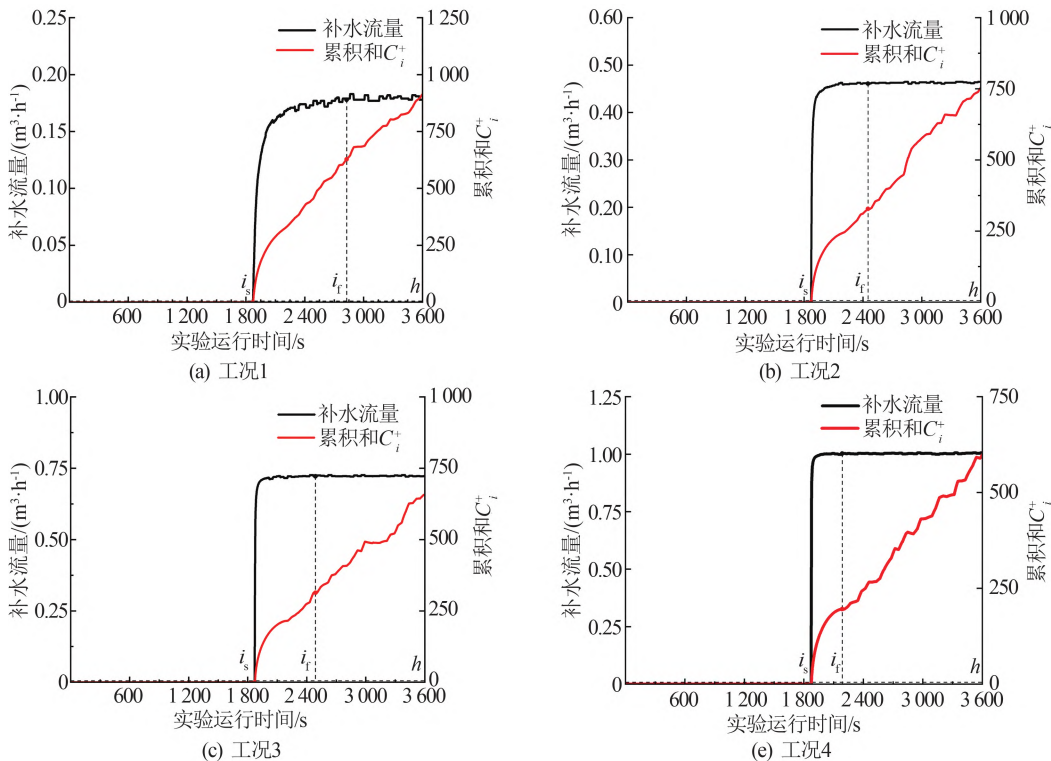


图6 补水流量运行监测数据及累积和曲线图

所有节点及工况最大泄漏流量诊断结果如图7所示,其中实验值是实验过程中管网最大泄漏流量值,计算值即为泄漏诊断得到的管网最大泄漏流量值。4种工况下计算值与实验值的误差均较小,其中相对误差最大值为1.6%,发生在2号泄漏点工况1和10号泄漏点工况1,其余工况误差 $<1.0\%$ 。泄漏流量计算值与实验值误差越小,说明最大泄漏时间 i_t 的计算也就越准确,这也为泄漏点位置准确诊

断提供了良好的基础。

3.2.2 泄漏点位置诊断

根据泄漏位置诊断准则可以看出,选取合适的压力采集点,是准确定位的关键。由于供热管网泄漏位置的出现没有规律可循,所以压力采集点的分布应当能反映泄漏发生后管网整体的压力变化,各个压力采集点距离过近或过远都有一定的局限性。利用距管网热源近、中、远的采集点选取原则,

详细对比分析不同的压力采集点分布方案,以期得 到一个合理的分布。具体分布方案见表 2。

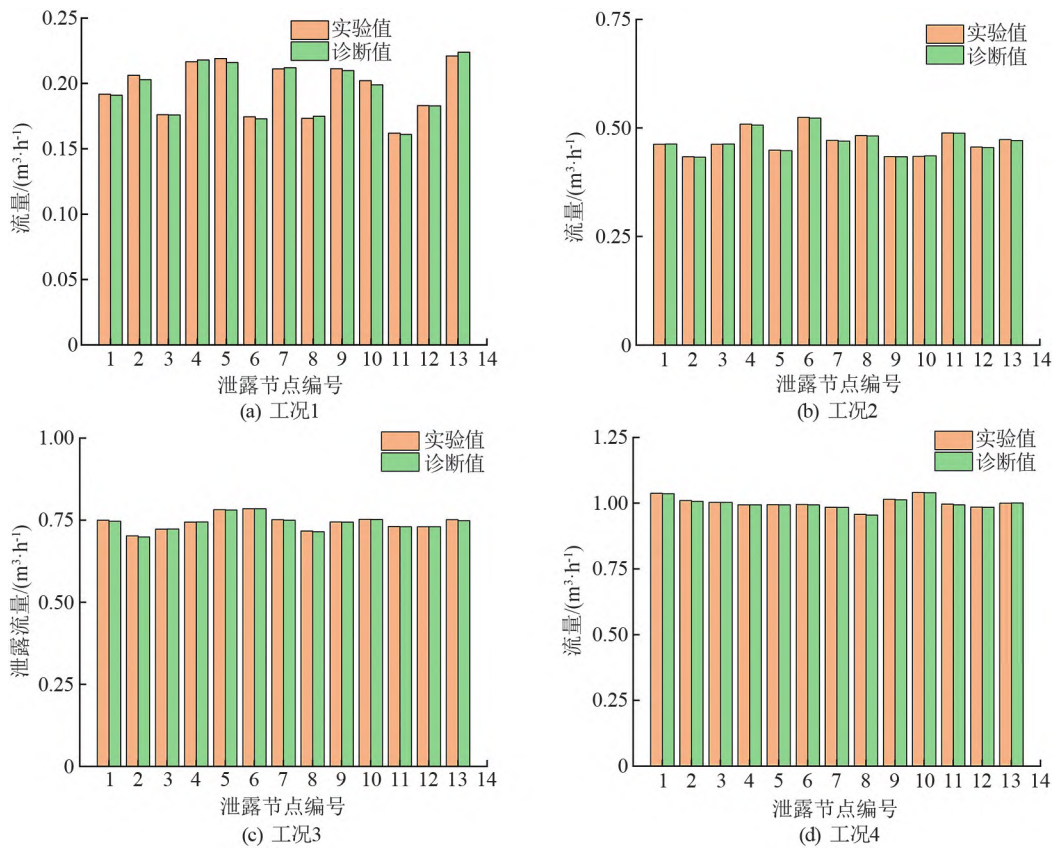


图 7 管网最大泄漏流量诊断结果图

表 2 不同压力采集点分布方案设计		
方案编号	采集点位置分布	采集点数量
1	用户 1、10 和 18 的供回水分支节点	6
2	用户 1 和 18 的供回水分支节点	4
3	用户 1、6、10、14 和 18 的供回水分支节点	10
4	用户 1、6 和 10 的供回水分支节点	6
5	用户 1、10 和 18 的供水分支节点	3

将泄漏诊断所得位置与实际泄漏位置的误差距离分为 $l \leq 2\text{ m}$ 、 $l \leq 4\text{ m}$ 以及 $l \leq 6\text{ m}$,以方案 1 为例,得到诊断结果见表 3、4 及 6(√表示诊断结果在误差范围内,×表示诊断结果在误差范围外)。

表 3 方案 1 泄漏位置诊断结果 ($l \leq 2\text{ m}$)													
工况	诊断结果												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	√	×	×	√	×	√	√	×	√	√	√	×	×
2	√	√	√	×	√	√	×	√	√	×	×	√	√
3	√	√	×	√	√	√	√	√	√	√	×	√	×
4	√	√	×	√	×	×	×	√	×	×	×	×	×

表 4 方案 1 泄漏位置诊断结果 ($l \leq 4\text{ m}$)													
工况	诊断结果												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	√	×	×	√	√	√	√	√	√	√	√	×	×
2	√	√	√	×	√	√	×	√	√	×	×	√	√
3	√	√	×	√	√	√	√	√	√	√	×	√	√
4	√	√	×	√	×	√	×	√	×	×	×	√	×

表 5 方案 1 泄漏位置诊断结果 ($l \leq 6\text{ m}$)													
工况	诊断结果												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	√	√	×	√	√	√	√	√	√	√	√	×	×
2	√	√	√	×	√	√	√	√	√	×	×	√	√
3	√	√	×	√	√	√	√	√	√	√	×	√	√
4	√	√	×	√	×	√	√	√	×	×	×	√	×

由上述泄漏工况实验条件可知,每组工况的泄漏位置诊断准确与否可视为随机事件,因此定义泄漏位置诊断准确率 P_A 为诊断准确的工况数占总工况数的百分比^[24]。令 P_{Ai} 表示第 i 个方案的泄漏位置诊断准确率,各方案泄漏位置诊断准确率 P_A 如图 8 所示。误差距离 $l \leq 2\text{ m}$ 时, $P_{A1} = P_{A2} = P_{A5} > P_{A4} > P_{A3}$;误差距离 $l \leq 4\text{ m}$ 时, $P_{A1} > P_{A2} > P_{A5} > P_{A4} > P_{A3}$;误差距离 $l \leq 6\text{ m}$ 时, $P_{A1} > P_{A2} > P_{A3} = P_{A5} > P_{A4}$ 。

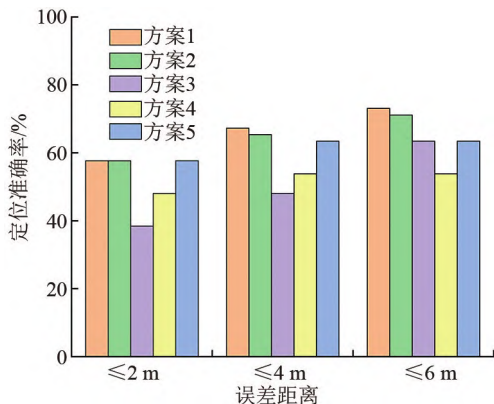


图8 各方案泄漏位置诊断准确率图

分析不同压力采集点方案诊断结果可以得到:

(1) 方案2相比于方案1,减少了2个压力采集点,但 P_A 降低不多,而方案3比方案1增加了4个压力采集点,反而 P_A 降低较多,说明 P_A 跟压力采集点个数有直接的关系,压力采集点个数过多或过少都会影响位置诊断效果;

(2) 方案4与1压力采集点个数相同,但位置分布不同,导致 P_A 整体下降较多,说明当压力采集点个数固定时,分布位置太过靠近热源,也会使 P_A 降低;

(3) 方案5与1相比,只选取了供水管段上的3个压力采集点,采集点个数减少了3个,但位置分布与方案1一致, P_A 却发生下降,说明只在供水管段或回水管段设置压力采集点,都不能准确反映出泄漏工况发生时管网的整体变化,会影响泄漏位置诊断效果。

通过以上压力采集点分布方案的泄漏位置诊断准确率 P_A 对比发现,压力采集点个数并不是越多越好,当管网规模较小,若压力采集点个数太多,则两点间距离近,因泄漏产生的压力变化并不明显,反而会对泄漏位置诊断结果产生较大影响,应该合理分布,使各压力采集点正确反映出管网泄漏时整体压力变化,这样才能使泄漏位置诊断结果更准确。

最终确定方案1为最优方案,其误差距离 $l \leq 2$ m时, $P_A = 57.7\%$; $l \leq 4$ m时, $P_A = 67.3\%$; $l \leq 6$ m时, $P_A = 73.1\%$ 。随着误差距离的增大, P_A 也增大,误差范围 >6 m时,对诊断结果基本无影响。

泄漏位置判定的影响因素包括实验运行压力和仿真模拟压力。其中,由于循环水泵工作点波动、仪表误差等,难以完全消除实验运行压力对泄漏位置诊断的影响;但仿真模型可以通过提高其精度、减小仿真模拟压力对泄漏位置诊断的影响,进而提高位置诊断准确度。

不论连续还是间断补水,只要能获取到补水流量监测数据序列,即可利用文章方法诊断泄漏故障。虽未验证环状供热管网,但环状管网与枝状管网在泄漏工况下的压力和补水流量变化规律一致,故文章方法对环状管网同样适用。

4 结论

基于变点理论中的CUSUM方法,结合集中供热管网泄漏仿真模型,提出了一种包括泄漏报警、泄漏流量计算以及泄漏位置诊断的集中供热管网泄漏故障诊断方法,并利用MATLAB软件进行了算法开发。结合集中供热实验管网设计了实验方案,得到单热源枝状管网不同泄漏位置及不同泄漏流量下的压力与流量数据,并验证了该方法,得到结论如下:

(1) 在利用合适的CUSUM参数值进行泄漏情况报警时,泄漏工况发生后2.2 s即可报警,且没有误报和漏报,说明文章方法可以及时对管网泄露报警;

(2) 文章方法诊断所得泄漏开始时间准确,泄漏最大时间也是泄漏工况运行稳定的时间,对应计算得到最大泄漏流量与实验值相对误差最大仅为1.6%,说明方法对泄露时间和最大泄漏流量的诊断较为准确;

(3) 压力采集点的分布距离应该适中,采集点个数也并非越多越好,采用其中的最优方案诊断泄漏位置,其准确率可达73.1%,说明文章方法对泄漏位置的诊断准确率较高。

参考文献:

- [1] 江亿. 我国供热行业2020年度发展状况报告[R/OL]. (2020-08-31) [2022-03-07]. <https://www.china-heating.org.cn/courseware/182030200.html>.
- [2] ZHOU S J, O'NEILL Z, O'NEILL C. A review of leakage detection methods for district heating networks [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 567-574.
- [3] 范海林, 彭述刚. 地下管网安全隐患研究[J]. 测绘通报, 2016 (增刊1): 34-37, 41.
- [4] 付道明, 孙军, 贺志刚, 等. 国内外管道泄漏检测技术研究进展[J]. 石油机械, 2004, 32(3): 48-51.
- [5] 杨汉瑞, 李勇勇, 徐士博, 等. 基于分布式光纤传感的热网膨胀节膨胀量测量方法[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2171-2177.
- [6] 吴晋湘, 王彦道, 赵涛, 等. 基于土壤温湿度的埋地供热管道泄漏检测方法[J]. 暖通空调, 2018, 48(9): 58-62.
- [7] PERPAR M, REK Z. Soil temperature gradient as a useful tool for small water leakage detection from district heating pipes in buried channels [J]. Energy, 2020, 201: 117684.

- [8] FRIMAN O, FOLLO P, AHLBERG J, et al. Methods for large-scale monitoring of district heating systems using airborne thermography [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8):5175-5182.
- [9] FILIPPINI E, MARINI I, ONGRAI M, et al. District heating leakage measurement: Development of methods [J]. Energy Procedia, 2018, 149:297-306.
- [10] PÉREZ-PÉREZ E J, LÓPEZ-ESTRADA F R, VALENCIA-PALOMO G, et al. Leak diagnosis in pipelines using a combined artificial neural network approach [J]. Control Engineering Practice, 2021, 107:104677.
- [11] 石光辉, 齐卫雪, 陈鹏, 等. 负压波与小波分析定位供热管道泄漏 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(14):212-218, 286.
- [12] PAGE E S. Continuous inspection schemes [J]. Biometrika, 1954, 41(1-2):100-115.
- [13] 王天宇, 瞿博阳, 乔百豪. 考虑监测成本和效率的累积和控制图经济统计多目标优化设计 [J]. 数理统计与管理, 2021, 40(5):761-770.
- [14] 钱子煜, 张越文, 马小越, 等. CUSUM 预警模型在医院感染性腹泻暴发预警中的应用 [J]. 中华医院感染学杂志, 2018, 28(19):3011-3015.
- [15] 刘畅, 靳平, 李欣. 3 种远震 P 波到时拾取方法的比较及其参数优化 [J]. 地震学报, 2018, 40(4):419-429.
- [16] 李诚, 杜坤, 周明, 等. 基于 CUSUM 算法的给水管网爆管检测分析 [J]. 给水排水, 2016, 52(11):118-121.
- [17] 周守军, 郭敏, 孙浩森, 等. 热水集中供热管网泄漏故障诊断模型 [J]. 山东大学学报(工学版), 2013, 43(4):105-110.
- [18] 龚璞, 周守军, 王涛, 等. 城市供热管网 MATLAB 仿真建模分析 [J]. 山东建筑大学学报, 2017, 32(4):339-344.
- [19] MISIUNAS D, VÍTKOVSKÝ J, OLSSON G, et al. Failure monitoring in water distribution networks [J]. Water Science & Technology, 2006, 53(4-5):503-511.
- [20] 雷翠红. 供热管网泄漏故障诊断的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [21] 王宝仁, 曹明瑞. 基于 RLS 自适应滤波算法的广义互相关时延估计方法研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(6):27-31, 36.
- [22] 薛丽. 累积和控制图参数选取方法 [D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- [23] 王淑君. 生产过程质量控制 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [24] 田胜元, 萧曰嵘. 实验设计与数据处理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.

(学科责编: 朱志鹄)

(上接第 32 页)

- [15] 曹永超, 朱南海, 贺小玲, 等. 建筑结构地震易损性研究综述及展望 [J]. 江西理工大学学报, 2019, 40(3):1-8.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 (2016 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016:226-227.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010:33-43.
- [18] 崔继东, 沈雪龙. Perform-3D 原理与实例 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [19] SCOTT B D, PARK R, PRIESTLEY M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. Journal Proceedings, 1982, 79(1):13-27.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 (2015 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015:209-215.
- [21] 何铭基. 带转换高层框架结构基于变形和损伤的抗震性能评估方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [22] 广东省住房和城乡建设厅. 建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程: DBJ/T 15-151—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019:43-44.
- [23] 张锐. 结构抗震时程分析输入地震波选择方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [24] 刘文锋, 王召猛, 张怀超. 基于 IDA 的高层框筒结构的抗震性能分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(4):49-55.
- [25] 钟岱辉, 田擎. 基于 IDA 的异形柱框架剪力墙地震易损性分析 [J]. 山东建筑大学学报, 2021, 36(1):17-22.

(学科责编: 邢鲁义)