

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221676

基于图论法和贝叶斯理论的供水管网漏损定位方法

王 彤^{a,b}, 康炳卿^{a,b}, 李钟毓^{a,b}, 朱多林^{a,b}, 王晴怡^{a,b}, 赵红斌^{a,b}, 许德伦^{a,b}, 洪 磊^{a,b}

(长安大学 a. 建筑工程学院; b. 住房与城乡建设部给水排水重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘要: 目前大多数漏损定位方法都依赖于管网水力模型,但当水力模型精度无法达到要求或由于基础资料缺失无法建立模型时,基于模型的方法就会失效。为此,以压力监测数据为基础进行供水管网漏损定位研究,即基于图论法建模理论得出插值估计管网节点压力,通过分析各节点压力监测值和漏损发生后实测值的残差估计漏损位置,并借助贝叶斯理论对定位结果进行时序推理,将一定时段内概率最大的节点视为发生漏损的位置。借助 L 镇案例对管网发生单点漏损时的状态进行模拟,验证了漏损定位方法的可行性和定位性能。

关键词: 供水管网;漏损定位;图论法;贝叶斯理论;压力监测数据

中图分类号: TV672⁺.2;TU991

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0135-04

1 引言

供水管网漏损是目前供水行业面临的普遍难题。随着无线传输技术的发展,SCADA 系统可采集管网的基础信息,推动了管网漏损控制技术的发展^[1,2]。目前漏损定位方法主要分为水力模型和数据驱动。对于漏损定位,水力模型法能相对准确地定位到具体节点或管段,而数据驱动法通常只能识别漏损发生的大概区域。为缩小数据驱动法的漏损定位范围,SANTOS-RUIZ F 等^[3]为每个未知节点建立高斯过程回归模型估计其压力值;JENSEN T N 等^[4]提出了一种基于降阶模型的压力估计方法。这些方法是对水力建模法的初步简化,仍需管道阻力系数、管道流量等数据。为探索更加简单易行的图论法插值用于漏损定位,李霞^[5]在泄漏定位机理模型中引入了贝叶斯理论;周泽渊等^[6]将遗传算法与贝叶斯理论相结合用于管网的漏损定位。贝叶斯理论可以提高定位性能,因此本文以管网压力监测数据为基础,基于图论法插值估计未知节点压力并结合贝叶斯时序推理,提出漏损定位方法。

2 漏损定位方法

2.1 定位方法原理

由管网漏失压力理论可知,若管网中节点流量发生变化,附近的节点压力也会发生变化^[7]。因此,可通过对比分析发生漏损时的压力监测值和管网正常运行状态的压力监测值来估计漏损发生的位置。当已知管网所有监测点的压力监测值与当前管网边界条件 c 相同的正常压力数据时,节点压力的残差向量 r 计算公式为:

$$r = p(c) - p^{(l_j)}(c) \quad (1)$$

式中, $p(c)$ 为正常运行状态时管网压力监测点的压力值向量; $p^{(l_j)}(c)$ 为节点 j 发生大小为 l 的漏损时管网监测点的压力值向量。

根据残差计算结果估计漏损发生的位置 \hat{j} ,通常认为漏损发生在压力残差最大的节点附近^[8],则有:

$$\hat{j} = \arg \max_{i \in \{1,2,\dots,n_n\}} r_i \quad (2)$$

式中, $r_i (i=1,2,\dots,n_n)$ 为压力残差向量 r 的分量。

2.2 未知节点压力估计

以图论法建模过程为基础,用管长数据进行线性加权来描述相邻节点间的压降关系,将压力估计过程进行简化,使基于数据驱动的压力估计方法更加简单可行。

2.2.1 基于图论法的管网水力建模

城市供水管网的拓扑结构可看作一张有向图,将管网的用水节点及相关附件视为图论的节点,将带有水流方向的管道视为图论的边。因此,

收稿日期: 2022-08-14, 修回日期: 2022-10-04

基金项目: 水资源高效开发利用重点专项(2018YFC0406200)

作者简介: 王彤(1965-),男,教授、硕导,研究方向为给排水系统优化及人工湿地, E-mail: 894496318@qq.com

城市供水管网可描述为:

$$G = \{V, E\} \quad (3)$$

式中, G 为管网; $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ 为节点的集合; $E = \{e_1, \dots, e_{n_p}\} \in V \times V$ 为边的集合, 由 n_p 条管道组成。

2.2.2 未知节点压力插值估计

图论法建模过程中, 若采用节点之间的关系描述管道, 即管道 $e_{ij} = (v_i, v_j) \in E$, 其中 $v_i, v_j \in V$, v_i 表示上游节点, v_j 表示下游节点, 则可以推出四个关系矩阵。节点有 n 个, 节点之间的连通关系可用邻接矩阵 $\mathbf{A}(G)_{n \times n}$ 表示:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & e_{ij} \in E \text{ 或 } e_{ji} \in E \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

图论法中边的方向代表管道中的水流方向。当 v_i 为管道 e_o (或 e_{ij}) 上游节点, v_j 为管道 e_{ij} 下游节点时, 可用关联矩阵 $\mathbf{B}(G)_{m \times n}$ 表示:

$$b_{oj} = \begin{cases} 1 & e_o = (v_i, v_j) \in E \\ -1 & e_o = (v_j, v_i) \in E \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $o = (1, 2, \dots, m)$ 为边(管道)的个数。

每条边 e_{ij} 都设定一个仅与管长 l_{ij} 相关的水头损失值, 利用管道的水头损失可以构成一个加权邻接矩阵 $\mathbf{W}(G)_{n \times n}$, 其中:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1/l_{ij} & l_{ij} \neq 0 \\ 0 & l_{ij} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

权重值 w_{ij} 的设定使距离较近的节点间具有更强的关联程度, 距离越近节点间相互影响力就越强。根据加权邻接矩阵 $\mathbf{W}(G)_{n \times n}$ 可以得出节点的对角矩阵 $\mathbf{D}(G)_{n \times n}$, 其中:

$$d_{ij} = \begin{cases} \sum_{h=1}^n w_{ih} & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

式中, h 为与节点 v_i 相邻节点的数量。

最终管网未知节点的压力估计过程可转化为基于二次规划的最优化问题求解, 即:

$$\begin{aligned} \min_x \quad & [x^T \mathbf{L} \mathbf{D}^{-2} \mathbf{L} x + \alpha \gamma^2] / 2 \\ \text{s. t} \quad & \mathbf{B} x \leq \mathbf{F} \\ & \gamma > 0 \\ & \mathbf{S} x = \mathbf{x}^s \end{aligned} \quad (8)$$

式中, α 为参数, 表征第二目标函数在寻优过程中的相对重要程度; \mathbf{F} 为一个 n 维向量, 其元素均小于阈值 γ ; \mathbf{S} 为 n 维对角矩阵。

如果节点 v_i 是压力监测点, 则矩阵 \mathbf{S} 中对应的 i 行 i 列的元素为 1, 否则为 0。 n 维向量 \mathbf{x}^s 中对应监测点位置的元素为相应的压力监测值, 其余位置元素为 0。

当管网未知节点压力可用已知压力监测值进行估计时, 式(1)所定义的理想状态下的残差向量即可变成能够实现的近似向量。管网实际漏损位置, 可利用估算得到的近似残差向量 \hat{j} 进行估计:

$$\hat{j} = \arg \max_{i \in \{1, 2, \dots, n_n\}} \{\hat{r}_i(t)\} \quad (9)$$

2.3 贝叶斯时序推理

通常情况下管网在发生漏损后无法立即修复, 会持续一定时间。因此, 可借助贝叶斯理论进行时序推理, 将一定时段内可能性最大的节点视为漏损节点, 从而提高定位结果的准确性。在贝叶斯时序推理中, 可根据前一时刻的概率 $P_i(t-1)$ 更新得到候选节点 i 在 t 时刻的漏损概率 $P_i(t)$:

$$P_i(t) = \frac{P_i(t-1)\rho_i(t)}{\sum_{j=1}^{n_n} P_j(t-1)\rho_j(t)} \quad (10)$$

式中, $\rho_i(t)$ 可反映各节点的残差相对大小, 表征各节点发生漏损的概率。

利用节点的漏损概率代替残差估计值来定位漏损位置:

$$\hat{j}(t) = \arg \max_{i \in \{1, 2, \dots, n_n\}} \{P_i(t)\} \quad (11)$$

管网漏损定位流程见图 1。

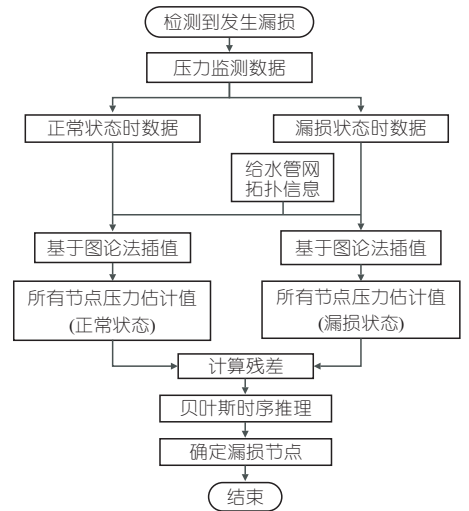


图 1 漏损定位流程图

Fig. 1 Flow chart of leakage location

3 可行性模拟分析

采用 X 市某区域的管网水力模型对管网发生单点漏损时的状态进行模拟, 然后利用模拟结果对残差值与漏损节点的敏感性、时序推理过程对定位精度的提升程度进行模拟分析。X 市水力模型采用 Epanet 建立, 选用 X 市某开发区进行模拟分析。为保证模拟结果能最大程度上符合管网实际运行状态, 采用压力驱动方法进行水力建模, 并将该分区入口的压力用水箱代替。该分区

由 51 个管段、31 个节点组成,节点总需水量约 2 990 L/s。

3.1 残差定位可行性模拟分析

先由 Epanet 生成管网正常运行时各节点的压力值,然后在相同的边界条件下通过增加节点用水量模拟管网漏损,运行模型生成管网发生漏损状态下各节点的压力值,计算管网正常状态下和漏损状态下各节点的压力残差值向量。

采用灵敏度分析法对压力残差和模拟漏损节点进行敏感度分析,得到归一化的灵敏度矩阵。其中,列向量为归一化后各节点的压力残差,行向量为发生漏损的节点编号。将节点漏损量设为 30 L/s 时,通过归一化处理后的灵敏度分析结果见图 2。由图 2 可看出,灵敏度接近 1 的值都在角平分线上,即残差的最大值与模拟漏损节点间具有较高的敏感度。

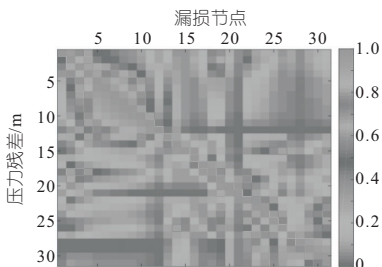


图 2 各节点漏损量为 30 L/s 时的归一化灵敏度矩阵
Fig. 2 Normalized sensitivity matrix when leakage of each node is 30 L/s

为进一步验证利用插值法进行漏损定位的可行性,仍采用 X 市某开发区管网水力模型模拟生成管网发生漏损前后的压力监测点数据。假定管网中有 6 个传感器,分别安装在节点 2、7、12、18、24、31 上,具体位置见图 3。假定这 6 个节点的压力值为实际管网中的压力监测值,其余节点均无压力传感器,则采用以下步骤模拟分析利用残差定位的可行性。

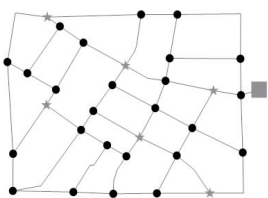


图 3 模拟传感器位置分布示意图
Fig. 3 Schematic diagram of analog sensor position distribution

步骤 1 通过增加节点用水量模拟管网漏损,假定在节点 16 上漏损为 30 L/s。

步骤 2 在未添加节点漏损时,运行水力模型得到模拟监测点的压力值,并利用基于图论的插值法估计管网正常运行状态下其余节点的压力值。

步骤 3 在节点 16 添加 30 L/s 的漏损后,运行水力模型得到模拟监测点的压力值,并利用基于图论的插值法估计管网漏损状态下其余节点的压力值。

步骤 4 利用插值结果,计算漏损前后各节点的残差值,得到残差向量。

利用模拟的监测点压力值进行插值,得到管网在正常运行状态和发生漏损后所有节点的压力分布状态。计算两种状态各节点的压力残差,得到各节点的残差分布状态见图 4。

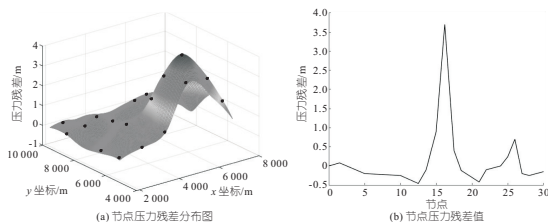


图 4 节点压力残差分析图

Fig. 4 Analysis diagram of residual error of node pressure

由图 4 可知,相同边界条件下,漏损节点的压力残差明显高于其他正常节点,能够明显突出压力变化幅度较大的节点,因此基于压力残差定位管网漏损的方法具有一定的可行性。

3.2 时序推理效果模拟分析

为评估时序推理过程对漏损定位精确度的影响,仍采用 X 市某开发区的水力模型进行延时动态模拟,时间步长为 5 min。具体步骤如下。

步骤 1 为使模拟状态更接近管网实际运行状态,将漏损节点的漏损量设为在一定范围内变化的随机变量,将模拟漏损量变化范围设定在 15~70 L/s 之间。

步骤 2 假设管网中有 6 个压力传感器,并在模拟节点添加 10% 的压力波动来模拟压力传感器误差。

步骤 3 采用不同漏损量和不同漏损发生节点进行 10 次漏损模拟,并分别在不同时刻进行定位。

步骤 4 数据采集以 5 min 为步长,数据样本即为延时动态模型在不同时刻的模拟结果,然后分析时序推理过程对漏损定位结果的影响。

步骤 5 利用相同推理时段内各漏损状态的定位节点与实际漏损节点间的平均拓扑距离 (A_{ATD}) 评估定位的精确度, A_{ATD} 的具体计算公式为:

$$A_{ATD} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_c} \Gamma_{i,j} D_{i,j}}{\sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_c} \Gamma_{i,j}} \quad (12)$$

式中, $D_{i,j}$ 为节点间的拓扑距离; n_c 为不同类别漏损的数量; $\Gamma_{i,j}$ 为混淆矩阵 Γ 中的元素,其中矩阵的行表示实际漏损,列表示漏损定位结果。

经过时序推理,得到 2 h 内定位节点与实际漏损节点拓扑距离和时间的变化关系见图 5。

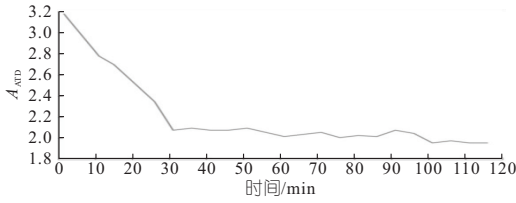


图 5 定位距离与时序推理时长的关系

Fig. 5 Relationship between location distance and time series reasoning duration

由图 5 可看出,由于添加了节点压力波动,当采用某单一时刻进行漏损定位时,平均拓扑距离达到 3.2 个节点,随着定位次数和时序推理时长的增加,定位节点与实际节点的距离越来越近,在利用 10 组样本数据推理后可达到约 2 个节点,定位效果有所提升。

本次模拟将压力传感器设置为 6 个,数量相对较多,位置亦分布均匀,取得较好的模拟效果。在利用插值方法进行节点压力估计时,以监测点的压力为基础,所以压力传感器的位置和数量会影响节点压力估计值的准确度,从而影响定位效果。因此,要提高漏损定位的精度,需增加压力传感器数量或对传感器的布置方式进行优化。

4 L 镇漏损定位

L 镇给水管网由 782 个节点、2 座水库、1 个水箱和 909 条管道组成。整个管网中共有 33 个压力监测点,所有压力传感器均能每 5 min 传输一组数据到 SCADA 系统。管网中共检测到 14 处漏损点。其中背景漏失发生在管道 P257、P427、P810、P654 上。L 镇给水管网的拓扑结构、监测点位置及发生漏损的位置见图 6。利用漏损发生后 2 h 内以 5 min 为时间步长的压力监测数据,插值估计正常状态和漏损状态下所有节点的压力值。然后计算各个时刻的压力残差,并利用贝叶斯时序推理过程确定漏损发生的位置。最终经过 2 h 的贝叶斯时序推理后,L 镇给水管网中各漏损点的定位结果见表 1。结果表明,经过 2 h 的



图 6 L 镇供水管网概况图

Fig. 6 Overview of water supply network in L Town

表 1 L 镇漏损定位结果

Tab. 1 Results of L Town leakage location

实际漏点	定位节点	ATD(节点)/个	实际距离/m
P461	n125	4	251
P232	n430	3	120
P673	n226	1	64
P628	n194	3	142
P538	n132	3	137
P866	n307	2	67
P31	n26	4	246
P183	n742	2	73
P158	n650	2	96
P369	n427	5	262

时序推理后能够定位到实际漏损管段附近的节点。对 10 处漏损点进行定位后,所有漏损点定位误差均控制在 300 m 之内,且部分漏损点能够达到 70 m 以内,能够减小管网漏损位置的搜索范围。

5 结论

a. 借助管网水力模型模拟了管网正常和漏损两种运行工况。利用灵敏度分析法验证了残差的最大值与模拟漏损节点间具有较高的敏感度。利用延时模拟过程验证了基于贝叶斯时序推理过程的应用效果,表明随着样本数量的增加,漏损定位精度有明显改善。

b. 本文的插值方法是将节点间压降等效为简单线性加权关系,当管网比较复杂时可能无法准确反映管网节点的实际压力。为此,后续研究需对插值过程进行进一步改进。

参考文献:

- [1] 信昆仑,陶涛,李树平,等. 人工智能技术在供水行业中的应用与展望[J]. 给水排水,2019,55(12):1-3.
- [2] 刘小帅,廖振良. 城镇供水管网漏损检测及定位技术研究进展[J]. 能源环境保护,2021,35(5):16-22.
- [3] SANTOS-RUIZ F, L6PEZ-ESTRADA V, PUIG V, et al. Estimation of node pressures in water distribution networks by gaussian process regression [C]//4th conference on control and fault tolerant systems (systol),2019:50-55.
- [4] JENSEN T N, PUIG V, ROMERA J. Leakage localization in water distribution using data-driven models and sensitivity analysis [J]. IFAC-Papers online, 2018,51(24):736-741.
- [5] 李霞. 城市供水管网漏损定位及控制研究[D]. 天津:天津大学,2006.
- [6] 周泽渊,金涛. 基于贝叶斯理论和遗传算法的管网漏损探测定位[J]. 实验室研究与探索,2016,35(2):26-29,262.
- [7] 王彤,金超归,杨瑞虎,等. 基于 PSO-LSSVM 时序预测模型的管网漏失信号识别[J]. 水电能源科学,2022,40(2):132-135,181.
- [8] KALLESOE C S, JENSEN T N. On the relation between leakage location and network pressures[C]// IEEE conference on control technology and applications(CCTA),2018.

参考文献:

- [1] 舒章康,李文鑫,张建云,等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5):116-125.
- [2] 叶伟,马福恒,胡江,等. 旱涝急转下斜墙坝渗流特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1923-1929.
- [3] 杨正华,刘嘉忻. 峡山水库大坝渗流安全评价[J].

- 水利水电科技进展, 2007(2): 40-44.
- [4] 刘永强,叶伟,石北啸. 干湿循环条件下裂缝对土体吸力影响的机制研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 101-104,96.
- [5] 陈勇,崔宪东,赵强,等. 干湿循环对边坡动力稳定性的影响及模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(9): 795-800.
- [6] 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范: SL274-2020[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2020.

Study on Impact of Extreme Weather Conditions on Stability Characteristics of Earth-Rockfill Dam

LUO Deng-ke¹, FANG Yi-xiang², LI Zhuo^{2,3}, LIU Xin-yi²

(1. Water Affairs Bureau of Pengyang County, Pengyang 756500, China; 2. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Affected by global climate change and human activities, extreme weather events such as drought and rainfall have led to landslides and other disasters in the reservoir dam. At the same time, the impact of evaporation and rainfall on the seepage and stability of the dam slope has not been considered in the design specifications for roller compacted earth-rockfill dams. Taking an earth-rockfill dam as the research object, a finite element calculation model was established to study the impacts of evaporation, rainfall and reservoir water level changes on the pore water pressure, saturation line and safety factor of anti-sliding stability of the earth-rockfill dam. And the cause mechanism of landslide was analyzed in combination with geological exploration and monitoring data. The results show that evaporation and rainfall have a great impact on the pore water pressure of the soil within 0~2 m of the downstream dam slope. The difference between the measured water level of the piezometer and the saturation line calculated by the finite element method is less than 0.4 m. At the initial stage, evaporation improves the stability of the dam slope, but evaporation causes the surface fill of the dam body to shrink and crack continuously, providing a channel for rainfall infiltration. With the increase of the number of rainfall and evaporation cycles and the rising of the reservoir water level, the cracks continue to increase, and the local stagnant areas near the bottom of the cracks are interconnected to form a saturation zone, which leads to the instability and damage of the shallow dam slope downstream of the dam. The research results provide a scientific basis for improving the design specifications of earth-rockfill dams and the early warning of reservoir dam landslides.

Key words: earth-rockfill dam; evaporation; rainfall; reservoir water level; landslide

(上接第 138 页)

Leakage Location Method of Water Supply Network Based on Graph Theory and Bayesian Theorem

WANG Tong^{a,b}, KANG Bing-qing^{a,b}, LI Zhong-yu^{a,b},

ZHU Duo-lin^{a,b}, WANG Qing-yi^{a,b}, ZHAO Hong-bin^{a,b}, XU De-lun^{a,b}, HONG Lei^{a,b}

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. Key Laboratory of Water Supply and Sewerage, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: At present, most leakage location methods rely on the hydraulic model of the pipe network. However, when the accuracy of the hydraulic model cannot meet certain requirements, or when the model cannot be established due to the lack of basic data, the model-based method will fail. For this purpose, the study of the leakage location of the water supply network was carried out on the basis of pressure monitoring data. Based on the modeling theory of graph theory, the interpolation method for estimating the node pressure of pipe network was obtained. The leakage position was estimated by analyzing the residual of the pressure monitoring value of each node and the measured value after the leakage occurs. With the help of Bayesian theorem, time-series reasoning was carried out on the positioning results, and the node with the largest probability in a certain period of time was regarded as the location where leakage occurs. By using the case of L Town, the state of pipe network was simulated when single point leakage occurred, and the feasibility and location performance of the leakage location method were verified.

Key words: water supply network; leakage location; graph theory; Bayes theorem; pressure monitoring data