

PDD 爆管定位模型的改进与应用

刘倍良¹, 余健¹, 黄帆¹, 刘晓飞², 麦华景², 叶军威²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 广州市自来水公司, 广东 广州 510600)

摘要: 目前, 压力驱动节点流量(PDD)爆管定位模型中的管网漏失系数多为随机赋值, 即在爆管定位模型运行时, 计算机匹配一个能快速结束定位运算的漏失系数值。该方法虽可节省运算时间, 但可能导致背景漏失量的计算值与实际背景漏失量不符, 进而影响模型定位精度。为此, 提出一种新的漏失系数计算方法, 建立改进的 PDD 爆管定位模型, 并将其应用于 G 市某区实际管网的爆管定位。结果表明, 改进的 PDD 爆管定位模型的定位精度较高。

关键词: 爆管定位; 压力驱动节点流量; 管网漏失系数

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0068-05

Improvement and Application of Pressure Drive Demand Pipe Burst Location Model

LIU Bei-liang¹, YU Jian¹, HUANG Fan¹, LIU Xiao-fei², MAI Hua-jing², YE Jun-wei²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Guangzhou Water Supply Co., Guangzhou 510600, China)

Abstract: At present, pipe leakage coefficients of pressure drive demand (PDD) pipe burst location model are mostly assigned randomly, that is, the computer matches a leakage coefficient value that can quickly finish the location operation when the model is running. Although this method can save computation time, it may cause the calculated value of the background leakage amount to be inconsistent with the actual background leakage amount, thereby affecting the model location accuracy. Therefore, a new method to calculate the leakage coefficient was proposed, and an improved PDD pipe burst location model was established, which was applied to the burst location of an actual pipe network in a certain area of G city. The results showed that the improved PDD pipe burst location model had a high location accuracy.

Key words: pipe burst location; pressure drive demand (PDD); leakage coefficient of water supply network

爆管漏水在供水管网中普遍存在, 若不能及时发现将会导致供水系统漏水严重, 损害供水企业经济效益。目前研究的管网爆管定位方法主要有基于数据采集与监控系统设备实时数据分析法(如压降中心分析^[1]、基于噪声信号对泄漏源进行定位的方

法^[2])和基于水力模型校核方法[如传统水力模型定位方法^[3]、神经网络模型定位^[4]以及压力驱动节点流量(PDD)爆管定位模型^[5]]等。利用压降中心分析以及噪声信号对漏水点定位都是基于 SCADA 系统在线设备的实时数据, 它的定位效果极度依赖

于设备灵敏度,定位精度低且成本高,不经济;基于水力模型校核方法主要是通过对比模型计算值和测量值来确定漏失位置和漏失量,爆管发生时,管网整体压力必会降低,管网节点水量必会随压力变动而发生变化,而传统水力模型^[3]忽略压力对于节点流量的影响,所以会产生较大定位误差;神经网络模型定位方法^[6]对人工神经网络预测值的准确度要求较高,在训练模型时需要各个时刻的数据样本,这在实际中实施起来具有一定的难度;基于PDD的爆管定位模型虽考虑爆管发生时管网节点水量随压力的改变,但该模型的漏失系数为随机赋值,这可能导致背景漏失量计算值与实际背景漏失量不符,进而影响模型定位精度。为此,笔者提出一种新的漏失系数计算方法,建立改进的PDD爆管定位模型,实现供水管网节点级精度的爆管位置快速定位。

1 PDD爆管定位模型

PDD爆管定位模型将节点流量分为节点背景漏失量和节点实际用水量,并分别建立其与节点压力相关的函数式,再将新增漏失量依次循环加到各个节点,根据相关公式求解此时压力监测点的计算值,最后以压力监测点计算值与实测值之差的平方和为目标函数来进行寻优而获得漏失位置。

PDD爆管定位模型中节点背景漏失量与节点压力的关系如下^[7]:

$$q_{i-\text{leak}} = c_i Q_i^{\text{req}} H_i^{1.18} \quad (1)$$

式中: $q_{i-\text{leak}}$ 为节点*i*的背景漏失量,L/s; Q_i^{req} 为节点*i*的额定流量^[5],L/s; c_i 为节点*i*漏失系数。

节点实际用水量与节点压力的关系式如下^[8]:

$$\begin{cases} Q_i^{\text{use}} = Q_i^{\text{req}} + Q_L & H_i > H_{\max} \\ Q_i^{\text{use}} = (Q_i^{\text{req}} + Q_L) \left(\frac{H_i - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} \right)^{0.5} & H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \\ Q_i^{\text{use}} = 0 & H_i < H_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_i^{use} 为节点*i*实际用水量,L/s; Q_i^{req} 为节点*i*的额定流量^[5],L/s; Q_L 为爆管节点的新增爆管水量,L/s; H_i 为节点*i*的计算水压,m(1 m水柱产生的压力约为9.8 kPa,下同); H_{\max} 为节点*i*的额定水压,m; H_{\min} 为节点*i*的临界水压,m。

当该节点无新增爆管时, Q_L 为零。

式(2)中有3个关键压力:临界水压、额定水压、计算水压。当节点计算水压小于临界水压时,节

点实际用水量为零;当节点计算水压大于额定水压时,节点实际用水量达到额定值,不会再随压力的增大而增大,即为额定流量;当节点计算水压介于额定水压和临界水压之间时,节点实际用水量符合指数关系,随压力的升高而增加^[7]。

节点流量计算公式:

$$Q_i = Q_i^{\text{use}} + q_{i-\text{leak}} \quad (3)$$

式中: Q_i 为节点*i*的流量,L/s。

PDD爆管定位模型的目标函数式如下:

$$\min f = \sum_{i=1}^n (H_{i_q} - H_i)^2 \quad (4)$$

式中: f 为目标函数值; n 为压力监测点个数; H_{i_q} 为压力监测点实际压力,m; H_i 为依据流量计算得到的监测点压力,m。

从式(1)可以看出漏失系数 c_i 值用于计算各节点的背景漏失量,从式(3)、(4)可以看出各节点的背景漏失量的准确性直接影响各节点流量的计算,进而影响水力计算得到的各节点压力,从而影响PDD爆管定位模型的准确度。因此,准确确定 c_i 值,是PDD爆管定位模型关键的一步。

2 PDD爆管定位模型的改进

节点漏失系数 c_i 是反映管道漏失除压力以及接口数目外所受其他因素影响的综合归纳值,其值只与管道本身性质有关,受管长、管龄、管材、施工质量等影响,不随管网运行工况等外界因素而变化。然而PDD爆管定位模型在进行节点背景漏失量计算时,通常是对 c_i 进行随机赋值。这样,在模型定位运算时,各个节点的背景漏失量计算结果可能与真实背景漏失量不符,从而影响后续定位精度。因此,为改进PDD爆管定位模型,本研究将漏失系数值与真实背景漏失量相关联,构建求解漏失系数的数学模型,求出管网节点综合漏失系数 c_i ,以该值反映管网真实背景漏失情况。

2.1 真实背景漏失量的求解步骤

通常真实背景漏失量数据为月供水量与月售水量之差,实际上这样计算存在弊端,无法保证该月是否出现新增漏损,若有则统计得到的真实背景漏失量值与其真实值可能存在较大偏差。因此,需要利用七日移动平均时隔差法^[8]判断第*T*-7日是否有新增漏损,若有则剔除该日数据,反之则将其纳入正常日供水管网数据库。七日移动平均时隔差法判别步骤如下:

① 采集 P_i (夜间 03:00—05:00 该分区的平均压力)、 F_i (夜间 03:00—05:00 的平均供水量)、日均供水量、夜间居民合法用水量、各分区大用户夜间 03:00—05:00 平均用水量。

② 根据压力公式估算每天夜间 03:00—05:00 的背景漏失 L_T [8] 和夜间背景漏失 (原有漏失) 七日移动平均时差值 $B_T(7)$ [8]。

$$L_T = (P_T/P_{T-1})^{1.5} \times L_{T-1} \quad (5)$$

$$B_T(7) = \sum_{i=0}^6 L_{T-i}/7 - \sum_{i=0}^6 L_{T-i-8}/7 \quad (6)$$

③ 计算夜间最小流量七日移动平均时差值 $C_T(7)$, 并计算 $D_T(7)$ [8]。

$$C_T(7) = \sum_{i=0}^6 F_{T-i}/7 - \sum_{i=0}^6 F_{T-i-8}/7 \quad (7)$$

$$D_T(7) = C_T(7) - B_T(7) \quad (8)$$

④ 根据 DMA 分区规模确定 $A_T(7)_{100\%}$ (夜间合法用水量七日移动平均时差值 100% 概率分布理论区间的上限) [8]。

⑤ 对比 $D_T(7)$ 与 $A_T(7)_{100\%}$, 如果 $D_T(7) > A_T(7)_{100\%}$, 则剔除第 $T-7$ 日数据; 反之, 将该日数据纳入数据库。

按上述判别方法构建正常日供水管网数据库后, 依据数据库数据计算真实背景漏失量。

$$q_{\text{act-leak}} = \frac{Q_T - \sum Q_i^{\text{use-real}}}{3.6 \times 24t} \quad (9)$$

式中: $q_{\text{act-leak}}$ 为真实背景漏失量, L/s; Q_T 为数据库中供水量, m^3 ; $Q_i^{\text{use-real}}$ 为数据库中售水量, m^3 ; t 为正常日时间间隔, d。

2.2 漏失系数值的求解模型

在构建数据库并基于数据库内的数据求解真实背景漏失量后, 通过构建求解漏失系数的数学模型, 求解漏失系数值。为求取 PDD 爆管定位模型中的漏失系数值, 需要引入背景漏失的计算公式、节点实际用水量计算公式 [见式 (10)]、管网真实背景漏失量, 从而构建求解漏失系数的 PDD 模型, 具体方法如下: 依据 PDD 流量计算公式计算节点各部分流量, 即计算供水管网在正常工况下的节点实际用水量 [7]、节点背景漏失量, 从而得到各节点水量, 并依据水力计算公式得到各节点的压力。令真实背景漏失量等于更新压力值后各节点计算的背景漏失量之和, 即构建函数变量为 c_i 的 fitness 函数, 最后以总水量不变作为约束条件, 用遗传算法求解目标函数: $\text{fitness}(c_i) = 0$, 得到 c_i 计算值。节点实际用水量计

算公式如下:

$$Q_i^{\text{use}} = \begin{cases} Q_i^{\text{req}} & H_i > H_{\max} \\ Q_i^{\text{req}} \left(\frac{H_i - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} \right)^{0.5} & H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max} \\ 0 & H_i < H_{\min} \end{cases} \quad (10)$$

式中: Q_i^{use} 为节点 i 的实际用水量, L/s; H_i 为节点 i 的计算水压, m; H_{\max} 为节点 i 的额定水压, m; H_{\min} 为节点 i 的临界水压, m。

节点背景漏失量计算公式和节点流量计算公式均同 PDD 爆管定位模型。

目标函数计算公式:

$$\text{fitness}(c_i) = q_{\text{act-leak}} - \sum c_i Q_i^{\text{req}} H_i^{1.18} \quad (11)$$

以此方法求得的漏失系数为管网节点综合漏失系数。

2.3 爆管定位模型定位步骤

求得漏失系数值后, 将其代入 PDD 爆管定位模型, 并将改进后的爆管定位模型用于爆管定位计算, 具体定位步骤如下: ① 随机生成节点流量初始种群, 并设定新增爆管量 Q_L 的下限值和上限值; ② 将 Q_L 加在节点 i 上, 并按照 PDD 公式计算出节点实际用水量 Q_i^{use} 、节点背景漏失量 $q_{i-\text{leak}}$ 和压力值 H_i , 以压力监测点计算值与实测值之差的平方和来进行寻优, 获得爆管定位节点。

3 PDD 爆管定位模型的应用

G 市某小型 DMA 分区于 2018 年 4 月 18 日由于施工原因发生爆管, 本算例以 G 市发生爆管的小型 DMA 管网为研究对象, 该管网包含 16 个用水节点、18 根 DN50 以上的给水管、1 个压力监测点、1 个进口远传流量计 (总表)。实际管网拓扑结构见图 1, 管段信息见表 1。

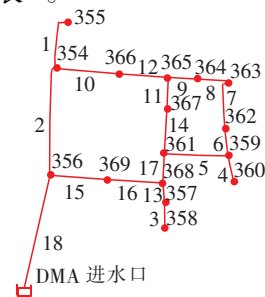


图1 实际管网拓扑结构

Fig. 1 Topology of actual water supply network

表1 实例管网管段信息

Tab.1 Segment information of actual water supply network

管段编号	管径/mm	管长/m	管段编号	管径/mm	管长/m
1	150	49.97	10	150	61.4
2	150	100.1	11	150	29.8
3	100	24.8	12	150	45.6
4	150	23.5	13	150	5.9
5	100	50.5	14	150	41.3
6	100	30.7	15	150	59.3
7	100	41.8	16	150	50.5
8	100	32.2	17	150	28.3
9	100	28.2	18	150	107.7
注: 管段的海曾威廉系数均取100。					

从SCADA系统查询并统计G市某小型DMA分区2018年3月23日—4月12日的日均供水量、售水量、最小夜间供水量、夜间03:00—05:00的压力值、夜间合法用水量。计算 $B_T(7)$ 、 $C_T(7)$ 和 $D_T(7)$ 。根据七日移动平均时隔差法筛选出正常日为3月29日—4月3日,并根据式(9)计算出真实背景漏失量,其值为7.49 L/s。

构造函数变量为 c_i 的fitness适应度函数,设定约束条件,运用遗传算法求得 c_i 为0.027 2。

供水管网数据库中正常日平均供水量为10.51 L/s,4月18日的管网平均供水量为17.02 L/s,4月18日压力监测点全天平均压力值为26.087 m, $c_i=0.027\ 2$,设定新增爆管量的下限和上限值(7、13 L/s)。代入PDD爆管定位模型进行寻优,寻优结果见表3。

表3 c_i 随机赋值时对应不同爆管量 Q_L 的适应度值

Tab.3 Fitness value corresponding to different bursts Q_L with c_i randomly generated

节点编号	7 L/s	8 L/s	9 L/s	10 L/s	11 L/s	12 L/s	13 L/s
354	495.31	2 628.60	10 350.00	230.19	33 876.40	13 703.10	46 682.43
355	7 484.20	37 998.10	624.01	285.00	99 271.30	119 809.30	47.53
356	18 620.90	292.90	89 229.00	11 279.20	34 664.50	89 792.00	95 333.06
357	1 313.00	9 218.21	21 640.00	70.23	890.05	48 442.20	2 486.99
358	2 971.30	3 269.17	7 089.00	4 814.65	84.10	455.54	50 815.23
359	37 674.80	7 138.72	7 849.00	37 010.70	136 092.00	270 233.70	30.20
360	210.28	522.15	59 301.00	165 024.00	351 439.00	12 597.84	94 255.45
361	55.29	391.08	56.17	3 127.90	783.87	4 549.67	1 220.32
362	535 532.00	58 036.70	883 497.00	352 494.00	379.90	911 775.10	271 144.78
363	82.38	22.47	155 519.00	12.40	3 913.00	9.34	354 157.00
364	33.62	2 801.19	15 541.00	12.60	19.30	487.96	1 808.23
365	491.41	90.70	129.71	233.44	208.71	152.77	7 383.41
366	6 311.65	585.59	3 208.00	2 946.29	2 062.82	11 420.01	4 275.23
367	1 072.53	957.47	43.63	2 478.19	1 568.51	10 221.81	45.12
368	107.66	219.96	1 199.00	1 394.84	2 671.14	1 360.46	260.84
369	1 016.62	698.77	1 193.00	46 580.80	80 587.30	70 234.80	68 647.80

表2。可知, $c_i=0.027\ 2$ 时爆管定位模型定位的爆管点在节点362,目标函数值为0.05,据G市自来水公司稽查部门抢修资料确定在节点362处发生爆管。这表明模型定位结果与管网实际情况相符。

表2 $c_i=0.027\ 2$ 时对应不同爆管量 Q_L 的适应度值

Tab.2 Fitness value corresponding to different bursts Q_L with $c_i=0.027\ 2$

节点编号	7 L/s	8 L/s	9 L/s	10 L/s	11 L/s	12 L/s	13 L/s
354	47.9	48.5	49.0	49.6	50.5	51.5	52.7
355	47.9	48.4	49.0	49.6	50.4	51.4	52.6
356	50.7	52.2	53.9	56.0	58.5	61.3	64.4
357	45.9	46.3	46.7	47.2	47.8	48.4	49.1
358	45.9	46.2	46.7	47.2	47.7	48.4	49.0
359	23.9	20.3	16.8	13.4	10.2	7.3	4.7
360	23.6	20.1	16.5	13.1	9.9	6.9	4.4
361	44.1	44.1	44.1	44.2	44.3	44.5	44.8
362	15.0	10.6	6.7	3.4	1.2	0.05	0.43
363	26.4	23.2	20.1	17.0	13.8	10.9	8.2
364	35.0	33.4	31.6	30.0	28.1	26.3	24.4
365	44.1	44.1	44.1	44.1	44.2	44.4	44.5
366	45.9	46.3	46.6	47.1	47.6	48.1	48.7
367	43.7	43.7	43.7	43.7	43.8	44.0	44.1
368	45.9	46.3	46.7	47.2	47.8	48.4	49.1
369	48.2	48.8	49.4	50.2	51.2	52.3	53.6

为进一步说明漏失系数对爆管定位模型的影响,按照 c_i 随机赋值的爆管定位方法确定爆管位置,寻优结果见表3。

从表3可以看出,将12 L/s的爆管水量叠加至节点363时,此时计算机自动匹配的随机漏失系数值为0.068 0,目标函数值达到最小值9.34,即爆管定位模型定位的爆管位置为节点363,其与实际结果有偏差。这可能是因为,将随机生成的 c_i 值用于PDD爆管模型定位时,其计算出的背景漏失量与真实值严重不符。对此,进一步做如下说明:在该算例管网正常工况下,真实背景漏失量为7.49 L/s,当爆管发生后,管网整体压力将降低,这时其真实背景漏失量应小于7.49 L/s。当 c_i 为0.068 0时,计算得出管网背景漏失量为16.10 L/s,其值反常,且明显高于真实背景漏失量(7.49 L/s),这将使得后续节点流量与节点水压的计算值均严重偏离实际值,最终导致模型定位准确度较差;当 $c_i=0.027\ 2$ 时,管网背景漏失量计算值为6.74 L/s,其值低于7.49 L/s,与实际情况比较相符,因而改进的模型定位准确度较高。

4 结论

基于PDD的爆管定位模型虽考虑爆管发生时管网节点水量随压力的改变,但该模型的漏失系数为随机赋值,这可能导致背景漏失量计算值与实际背景漏失量不符,进而影响模型定位精度。为此,提出一种新的漏失系数计算方法,改进PDD爆管定位模型,并将该模型应用于G市某小型DMA分区实际管网的漏失点定位。结果表明,改进后的爆管定位模型能准确定位爆管位置。

参考文献:

- [1] 陶涛,颜合想,信昆仑,等. 基于SCADA压力监测的爆管定位分析[J]. 供水技术,2016,10(4):11-14,28.
Tao Tao, Yan Hexiang, Xin Kunlun, *et al.* Pipe burst location analysis based on SCADA system pressure monitoring[J]. Water Technology, 2016, 10(4): 11 - 14, 28 (in Chinese).
- [2] 杭高杰. 城市供水管网漏损实时定位系统的研究[D]. 太原:太原理工大学,2014.
Hang Gaojie. Research on Urban Water Supply Network Leakage Real Time Location System [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [3] 牛志广,王宇飞,张琰,等. 供水管网摩阻系数校核与漏损定位计算方法[J]. 天津大学学报,2011,44(4): 364-368.
Niu Zhiguang, Wang Yufei, Zhang Ting, *et al.* Calibration of friction resistance coefficient and calculation method of leakage localization of water supply network [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44 (4): 364 - 368 (in Chinese).
- [4] Jang S P, Cho C Y, Nam J H, *et al.* Numerical study on leakage detection and location in a simple gas pipeline branch using an array of pressure sensors [J]. J Mech Sci Technol, 2010, 24(4): 983-990.
- [5] 涂敏. 供水管网在线监测漏失定位模型研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
Tu Min. Research on Online Monitoring and Leak Location Model in Water Distribution System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).
- [6] Shamloo H, Haghighi A. Optimum leak detection and calibration of pipe networks by inverse transient analysis [J]. J Hydraul Res, 2010, 48(3): 371-376.
- [7] 张敏. 城市供水管网基于压力驱动节点流量模型漏失控制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
Zhang Min. Research on Leakage Control of Urban Water Supply Network Based on Pressure-driven Node Flow Model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009 (in Chinese).
- [8] 李露. 夜间合法用水量预测与DMA漏损分析方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
Li Lu. The Study on Night Legal Water Consumption Prediction and DMA Leakage Analysis Method [D]. Changsha: Hunan University, 2016 (in Chinese).



作者简介:刘倍良(1994-),女,江西萍乡人,硕士研究生,研究方向为给排水管网系统及其优化。

E-mail: 1186722802@qq.com

收稿日期:2019-04-12