

基于 SCADA 数据的长距离输水管爆管定位研究

程伟平¹, 陈梅君¹, 许刚², 龙志宏²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 广州市自来水公司, 广东 广州 510600)

摘 要: 推导并建立了基于管道压力、流量监测系统与长距离输水管水力模型相结合的爆管定位模型, 根据爆管前后压力和流量实时监控数据的变化判断是否出现爆管, 利用爆管前后的监测值变化计算爆管可能发生的位置。模型中采用了 Ransac 算法提取爆管定位模型的参数, 并进行了参数敏感性分析。以南方某市长距离输水管线爆管实例进行了验证, 结果表明该模型对于输水管实时爆管预警和定位是可行的, 并能保障合理的精度。当爆管或异常现象发生时, 可运用该模型指导一线人员及时到达现场核实和处理, 提高爆管处理效率。

关键词: 长距离输水管; 爆管定位; 水力模型; Ransac

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)13-0057-05

Location of Burst Point in Long Distance Water Pipe Based on SCADA Monitoring Data

CHENG Wei-ping¹, CHEN Mei-jun¹, XU Gang², LONG Zhi-hong²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Guangzhou Water Supply Company, Guangzhou 510600, China)

Abstract: A model was proposed to locate the burst point in long distance water pipe, based on the pipeline flow and the pressure data from the monitoring system and the hydraulic model. The changes in pressure and flow in real-time monitoring data before and after the pipe burst were used to determine whether the pipe was bursting, and then to identify the location. In the model, the improved Ransac algorithm was applied to preprocess the monitoring data, and the parameters of the calculation model were extracted. The parameter sensitivity analysis was carried out. A real case of burst event was used to verify the model. Results showed that the long water pipe burst locating model was feasible according to real-time SCADA monitoring data, and achieved reasonable accuracy. When the pipe burst, the model could notify the front-liners and improve the efficiency of pipe bursting responses.

Key words: long distance water pipe; location of pipe burst point; hydraulic model; Ransac

输水管道爆管监控和定位一直是热点, 国内外学者对此开展了大量研究。Baghdadi 和 Mansy 首先提出利用爆管前后管道内部压力变化进行管道渗漏检测和定位^[1]; Misiunas 等通过测定压力波数据, 分析初始压力波和反射波的时间差来判断爆管位

置^[2]; Lee 等建议在对监测数据处理后, 在频域范围内进行数据特征分析^[3]; 黄廷林等探索了基于 SCADA 系统, 结合模型状态估计和模糊相似优先比等方法, 进行城市给水管网爆管位置定位研究^[4]; 刘恩华利用模糊理论对爆管异常值进行判定, 并运

用证据理论对爆管位置进行定位^[5];刘书明等利用选定的数据构建支持向量回归(SVR)模型进行人工模拟异常值识别,并利用聚类算法在供水管网独立计量区域进行爆管定位^[6-7]。实际工程中多采用低频拟稳态的压力、流量监测仪器,负压波法需要采用高精度高频传感器进行监测,在实际工程中使用不方便。如果能基于现有低频仪表设备进行爆管识别和定位,将极大地提高供水安全保障能力。

1 输水管爆管识别定位理论模型

基于以往的经验 and 监测数据可以发现,输水管在正常输水工作状态下的压力和流量并非一个常量,而是在一定范围内波动。一般情况下假设压力和流量数据基本符合正态分布。赵丹丹等^[8]对管网大量数据分析后发现,压力和流量波动值的累积概率率在2~3倍方差以外急剧偏离正态分布累积概率率曲线,造成这种现象的原因可能是爆管,也可能是异常用水事件。笔者对G市某水厂输水管压力、流量监测数据进行分析,发现监测数据在2.5倍标准差附近也明显偏离正态分布曲线(见图1),说明在城市供水系统中发现的现象也适用于长距离输水管线。

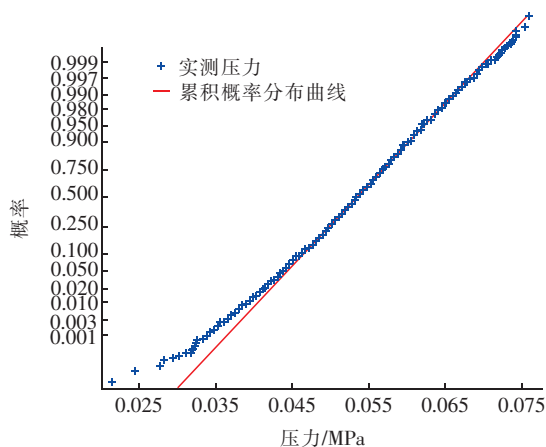


图1 某监测点压力累积概率分布曲线

Fig. 1 Pressure cumulative probability distribution curve of a monitoring point

1.1 输水管爆管识别模型

根据G市某水厂长距离输水管监控数据分布特征,定义2.5倍方差内为数据正常波动区间,超出该正常区间的即为异常数据(如图2所示)。从图2可以看出,超出波动区间的现象在一年内时有发生,这些超出波动区间的现象既可能是爆管事故,也可能是水厂进行压力调控。输水管发生管道爆裂后会

引起管道运行状态发生剧烈的变化,表现为流量骤增、压力骤降。泵站进行泵组调节时,若增加运行水泵数量,则各监测点压力和流量全部升高,反之输水量减小,则各监测点压力和流量全部降低。仅仅以单一监测值变化确定是否发生爆管容易出现误判。本文采用压力、压力差和流量3个特征值结合的方法进行综合判断,可有效排除因为仪器故障或者水厂调控等原因造成的误报现象。

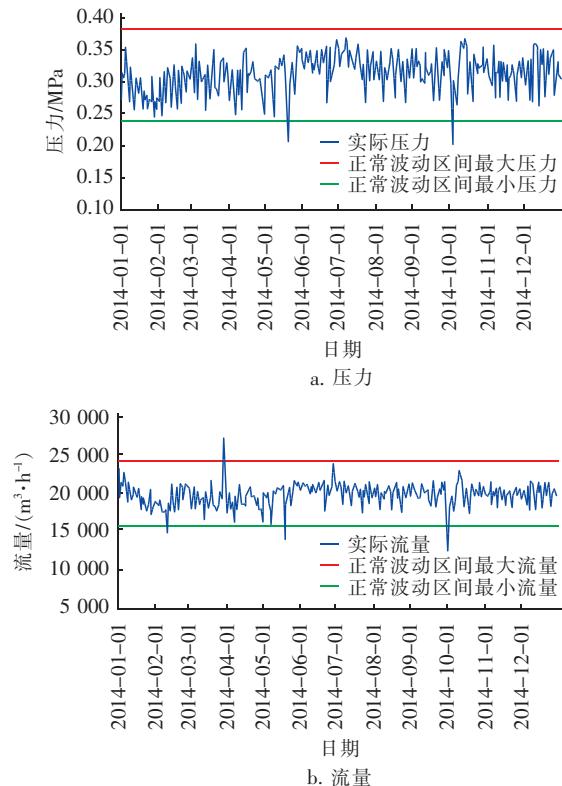


图2 某时段全年压力与流量波动分布区间

Fig. 2 Distribution of pressure and flow fluctuation in a certain period

定义数据异常指标DAI(Data Abnormal Index)作为判定系统是否出现异常现象的指标,公式如下:

$$DAI = \begin{cases} 0, & \text{Data} \in (\text{Data}_{\text{ave}} - 2.5\sigma, \text{Data}_{\text{ave}} + 2.5\sigma) \\ 1, & \text{Data} \notin (\text{Data}_{\text{ave}} - 2.5\sigma, \text{Data}_{\text{ave}} + 2.5\sigma) \end{cases} \quad (1)$$

其中, Data_{ave} 为监测信号的平均值, σ 为监测信号的方差。综合输水管线中压力、压力差和流量进行判别,得到基于3个特征值的DAI总值,即:

$$\sum DAI = DAI_p + DAI_{\Delta p} + DAI_Q \quad (2)$$

其中, DAI_p 为压力数据异常指标, $DAI_{\Delta p}$ 为压力差数据异常指标, DAI_Q 为流量数据异常指标。当某一时刻压力、压力差和流量均偏离正常波动区间,即 $\sum DAI = 3$ 时,可以初步判定为爆管事故。

1.2 输水管爆管定位模型

长距离输水管的水头损失以沿程水头损失为主,可采用长距离输水管沿程水头损失公式 $h_f = SlQ^n$,其中 l 为管段长度、 Q 为管段流量、 S 为阻力系数、 n 为指数,一般情况下,大管径输水管线雷诺数远远大于 10^6 ,处于阻力平方区, $n=2$ 。对于某一管段前后压差可表示为:

$$P_1 - P_2 = SlQ^2 + C \quad (3)$$

式中: P_1 、 P_2 是上下游测量压力; C 为参数,与上下游监测点高程有关。爆管发生时,假设爆管位置距上一个测压点距离为 x ,爆漏量为 ΔQ ,则有:

$$\begin{cases} P_1' - P_2' = SxQ_1^2 + S(l-x)Q_2^2 + C \\ Q_1 = Q_2 + \Delta Q \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P_1' - P_2'$ 为爆管后上下游测点压力差; Q_1 、 Q_2 分别为爆管前后流量; ΔQ 是爆管漏水量。根据式(4)可得爆管位置:

$$x = \frac{(P_1' - P_2') - (P_1 - P_2)}{S[(Q + \Delta Q)^2 - Q^2]} \quad (5)$$

根据历史数据可以拟合出输水管各段的参数 S 、 C 。实际应用时,根据式(2)判别输水管是否出现异常,如果异常,根据式(5)计算爆管最可能发生的位置。为排除单一监测点或监控管段监测数据的估计误差,采用最可能爆漏点附近 n 个监测段计算出的爆管位置的加权平均值确定最终的爆管定位,即:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_n}{n} \quad (6)$$

综上,爆管识别和定位方法计算流程见图3。

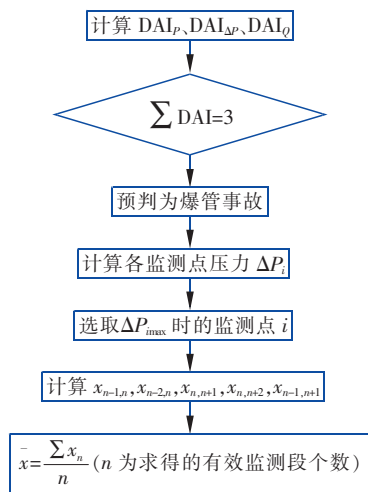


图3 爆管定位流程

Fig.3 Flow chart of pipe burst location

1.3 爆管定位线性拟合数据预处理

S 是反映管道阻力的综合系数,是定位模型中唯一影响结果的参数,需根据历史资料提取。传统的最小二乘法进行线性拟合时受个别大误差的数据影响大,拟合的直线(图4中红色直线)与理想直线(图4中黄色直线)有较大偏差。采用人工剔除噪声数据可提高最小二乘法的准确性,但人工剔除方法难免造成误删、错删且工作效率较低。Ransac 算法是 Fischler 和 Bolles 于 1981 年提出的随机抽样一致性算法^[9],其最大优点是能够处理传统鲁棒性方法不能处理的误匹配点。本研究结合最小二乘法和 Ransac 算法收缩最佳匹配参数。首先根据最小二乘法进行线性拟合之后,得到一个关于拟合值 a 的置信区间 $\Gamma = [a - 3\sigma, a + 3\sigma]$,随后在置信区间内利用 Ransac 算法进行二次拟合,得到相对更加合理可信的参数 S 。Ransac 算法数学表达见式(7),采用 Ransac 算法的计算结果见图5。

$$\text{Maximum}[S \in \Gamma, r \in R | F(lQ^2) = SlQ^2 + C] \quad (7)$$

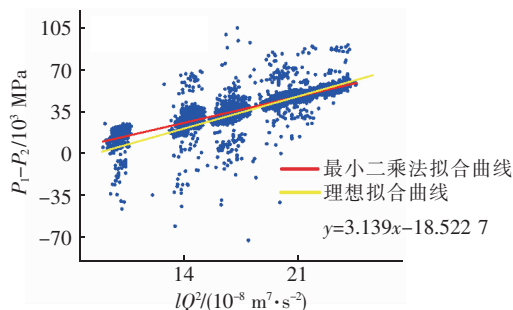


图4 最小二乘法拟合结果

Fig.4 Fitting results of least squares

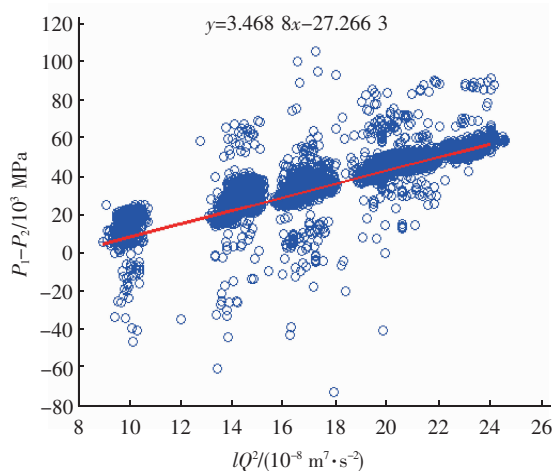


图5 Ransac 算法拟合结果

Fig.5 Fitting results of Ransac algorithm

2 实例研究

以G市某水厂长距离输水管线为例开展了研究。该输水管线全长24 km,采用输水管爆管识别方法初步判断得到该市输水管在2014年4月11日04:15—04:30之间发生了重大爆管事故。该输水

管在爆管发生后,输水管上布置的监测点压力数据如表1所示。将该输水管爆管前后各监测点压力降连接成曲线(如图6所示)。可以看出在管道发生爆管事故时,各测点压力下降达到一个峰值后就会逐渐减小,呈漏斗状,与理论分析完全一致。

表1 爆管前后各监测点压力变化

Tab.1 Pressure changes of each monitoring points before and after pipe burst

监测点编号	1 [#]	3 [#]	5 [#]	7 [#]	10 [#]	18 [#]	25 [#]
爆管前 P_1 /MPa	0.330	0.332	0.314	0.303	0.281	0.203	0.121
爆管后 P_2 /MPa	0.255	0.227	0.197	0.165	0.177	0.138	0.116
压力差 $P_1 - P_2$ /MPa	-0.075	-0.105	-0.118	-0.138	-0.105	-0.065	-0.005
与取水口的距离/m	0	1 200	2 200	3 050	4 646	8 459	12 403

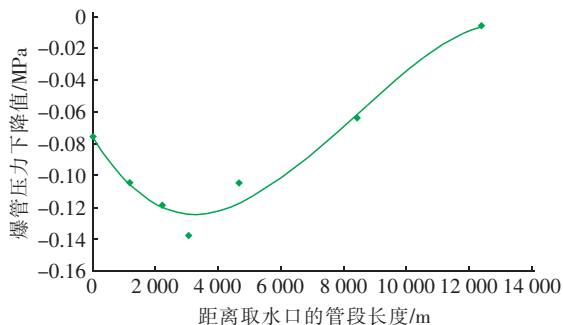


图6 爆管发生时各监测点压力降曲线

Fig.6 Pressure drop at pressure monitoring point

根据经验,爆管最可能发生在漏斗曲线最下方(峰值)附近,即管道沿程压力下降最明显的区域。笔者选取G市某水厂输水管上4个监测管段的监测数据进行分析,利用公式(5)分别计算得到不同

管段中爆管可能发生的位置,如表2所示。表中,管段编号指两个监测点之间的管段,爆管计算位置 x 是指计算爆管位置相对于该管段起始监测点的距离,与取水口的距离是指计算爆管位置相对于取水口的距离。

对表2中的计算结果进行加权平均可得: $\bar{x} = 3\,161.88$ m。根据水厂记录的核实,采用该模型预判的爆管位置与实际爆管发生位置偏差在 ± 400 m以内。根据其他数次有记录的爆管事故的模拟分析发现,利用爆管水力模型计算的爆管距离与实际记录距离误差均在500 m以内。500 m的距离在人们的视距范围之内,按照人均步行速度为80 m/min,工作人员到达预设点后搜索时间在5~10 min以内,属于合理精度范围,表明该方法在工程上可行。

表2 爆管定位计算结果

Tab.2 Linear fitting results of each pipe section

管段编号	1 [#] —10 [#]	3 [#] —10 [#]	5 [#] —10 [#]	7 [#] —10 [#]
拟合值 S	3.49×10^{11}	3.80×10^{11}	3.15×10^{11}	3.73×10^{11}
拟合值 C	-27.70	4.00	-2.67	-3.53
爆管计算位置 x /m	2 683	2 464	1 297	-246
与取水口的距离/m	2 683	3 664	3 497	2 804

3 参数敏感性分析

根据爆管水力定位模型计算的各个管段对应的管段爆管距离如表3所示,计算分析中发现参数 S 对结果有一定的影响。计算结果表明: S 上下波动

10%时,定位的爆管位置就会相差300 m左右, S 上下波动20%时,定位的爆管位置误差将会达到600 m以上。可见, S 参数的精度直接影响了爆管定位的准确度,参数提取过程中应谨慎处理。

表3 参数 S 敏感性分析

Tab.3 Sensitivity analysis of S

S 波动程度	S (基准值)	1.1 S	0.9 S	1.2 S	0.8 S
S 取值	3.8×10^{11}	4.18×10^{11}	3.42×10^{11}	4.56×10^{11}	3.04×10^{11}
爆管位置至取水口距离/m	3 565.52	3 319.168	3 866.617	3 113.874	4 242.988
偏离值/m	0	-246.352	301.096 9	-451.645	677.468 1

4 结论

建立了基于 SCADA 监控系统和管道水力学耦合的爆管定位算法,并采用 Ransac 算法根据历史数据提取模型参数。应用该模型对 G 市输水管实际爆管进行了计算分析,结果表明该方法对爆管事故的定位能力可以缩小到一线检测人员可控范围内,有利于爆管事故发生之后及时判断与定位,提高检修效率,降低爆管损失。

本研究提出的模型原理清晰,计算方法简单,参数获取简便,且基于该方法的硬件条件能得到有效保障。该算法已投入实际工程应用,将在长距离输水工程的安全保障中有较大应用前景。通过本项目的研究,笔者总结了几点经验供广大研究者参考:

① 长距离输水管线中,用于爆管监控的压力传感器宜均匀布置,传感器之间的距离不宜超过 5 000 m,从经济性和管理角度也无必要设置过高的监控密度。

② 压力传感器采样回传周期不宜超过 5 min。时间周期过长,爆管后管道回水会影响传感器采样结果,导致计算偏差大。频次太高,对供电要求高,但精度未必能够大幅度提高。合理的采样频率是影响长距离输水管线爆管监控工程可行性与有效性的重要因素。

③ 长距离输水管线监控数据的波动特征与管网监控数据波动特征一致,可根据监测数据的统计特征加强仪表诊断,保障系统的正常运行。

参考文献:

- [1] Baghdadi A, Mansy H A. A mathematical model for leak location in pipelines [J]. Applied Mathematical Modeling, 1988, 12(1): 25-30.
 - [2] Misiunas D, Lambert M, Simpson A, et al. Burst detection and location in water distribution networks[J]. Water Sci Technol, 2005, 5(3): 3-4.
 - [3] Lee P J, Vítkovský J P, Lambert M F, et al. Leak location using the pattern of the frequency response diagram in pipelines: a numerical study [J]. Journal of Sound & Vibration, 2005, 284(3/5): 1051-1073.
 - [4] 黄廷林,曹梅花,张卉. 基于 SCADA 系统给水管网实时检测爆管位置方法的研究[J]. 给水排水, 2007, 33(5): 104-108.
- Huang Tinglin, Cao Meihua, Zhang Hui. Study on SCADA

based real-time detection of pipe bursts location of water supply network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(5): 104-108 (in Chinese).

- [5] 刘恩华. 基于模糊理论和证据理论的爆管监测研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- Liu Enhua. Research of Bursts Based on Fuzzy Theory and Evidence Theory [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016 (in Chinese).
- [6] 刘书明,吴以朋,车晗. 基于交互识别的供水管网数据异常值检测[J]. 给水排水, 2015, 41(11): 150-154.
- Liu Shuming, Wu Yipeng, Che Han. Outlier detection for a water distribution system based on data interactive-recognition approach [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(11): 150-154 (in Chinese).
- [7] Wu Y, Liu S, Xue W, et al. Burst detection in district metering areas using a data driven clustering algorithm [J]. Water Res, 2016, 100: 28-37.
- [8] 赵丹丹,程伟平,许刚,等. 供水管网系统爆管可监控最小管径分析方法研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(23): 117-122.
- Zhao Dandan, Cheng Weiping, Xu Gang, et al. Study on minimum detectable pipe diameter for pipe burst in water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(23): 117-122 (in Chinese).
- [9] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.



作者简介:程伟平(1975-),男,湖南醴陵人,博士,副教授,主要研究方向为供排水管网系统优化。

E-mail: chengweiping@zju.edu.cn

收稿日期: 2018-12-12