

文章编号: 1000-8241(2017)11-1308-07

基于小波包熵的天然气管道阀门内漏分析方法

张海峰¹ 杨淼² 张一峰² 王雪莉¹ 王建伟² 李东阳¹

1. 中国石油管道科技研究中心/油气管道输送安全国家工程实验室; 2. 中国石油管道公司锦郑管道运行筹备组

摘要: 为了解决严重威胁天然气管道运行安全的阀门内漏问题,采用小波包分解和信息熵理论相结合的方法对3 in(1 in=25.4 mm)球阀不同内漏程度下的声发射信号特征进行分析。首先,通过搭建阀门内漏声发射检测试验平台开展不同内漏流量下声发射检测试验;其次,应用小波包熵方法对声发射信号各频率段信息熵进行分析;最后,采用均方根值评价参数对不同频带内小波包熵值与内漏流量的相关性进行评价。结果表明:在25~37.5 kHz频带内的小波包熵值与阀门内漏流量具有最大相关性(均方根误差为0.012 6),表明小波包熵分析方法是一种输气管道阀门内漏流量量化检测的新方法。(图5,表3,参21)

关键词: 小波包熵;天然气管道;阀门;特征提取;声发射

中图分类号: TE88

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.11.013

网络出版时间: 2017-8-1 9:50:04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20170801.0950.008.html>

A new analysis method for the internal leakage of gas pipeline valves based on wavelet packet entropy

ZHANG Haifeng¹, YANG Miao², ZHANG Yifeng², WANG Xueli¹, WANG Jianwei², LI Dongyang¹

1. PetroChina Pipeline R & D Center/National Engineering Laboratory for Pipeline Safety;

2. Jinzhou-Zhengzhou Pipeline Operation Preparatory Group, PetroChina Pipeline Company

Abstract: It is in urgent need to solve the internal leakage of valves for it threatens the operation safety of natural gas pipelines. In this paper, a novel approach which combines wavelet packet decomposition and information entropy theory was developed to analyze the characteristics of acoustic emission signal of 3 in(1 in=25.4 mm) ball valve with different internal leakage levels. Firstly, the experiment platform used for the acoustic emission detection of valve internal leakage is built up to perform acoustic emission detection tests at different internal leakage rates. Then, the informativity of each frequency band of the acoustic emission signal is analyzed by means of the wavelet packet entropy method. And finally, the correlation between the wavelet packet entropy and the internal leakage rate in different frequency bands is evaluated by using root mean square (RMS) value as the evaluation parameter. It is indicated that the correlation between the wavelet packet entropy and the internal leakage rate is the highest (RMS error is 0.012 6) in the frequency band of 25-37.5 kHz. To sum up, this wavelet packet entropy analysis method is a new method to detect quantitatively the internal leakage rate of gas pipeline valves. (5 Figures, 3 Tables, 21 References)

Key words: wavelet packet entropy, natural gas pipeline, valves, feature extraction, acoustic emission

随着中国天然气长输管道配套阀门国产化进程的快速发展,管道配套阀门的安全性愈受关注。阀门在长期使用过程中,由于磨损、腐蚀、划伤等原因容易导致阀门密封不严,阀门上游管内天然气通过阀腔泄漏至阀门下游管道内部,从而出现阀门气体内漏问题^[1-2]。

目前,声发射已经被证明是一种有效的输气管道阀门内漏无损检测技术^[3-5],由于阀门内漏检测过程中受环境噪声干扰等影响,因此通过阀门内漏过程中的声发射信号分析,提取可以反映阀门内漏流量规律的信号特征参数,对输气管道阀门内漏量化检测具有重要作用。阀门内漏声发射信号为非线性非平稳信号,

而小波包分析具有较好的时频域局部特征,可以应用于内漏声发射信号进行时频域分析^[6-7]。同时,阀门内漏检测的关键是进行内漏声发射信号特征参数提取,信息熵作为近些年来提出的一种在信息学理论中反映信号源不确定性的评价方法,可以对阀门不同内漏程度下的声发射信号整体混乱程度进行评价^[8]。在此将小波包理论和信息熵理论相结合(小波包熵),融合小波包的局部特征分析和信息熵整体特征分析的优点,开展输气管道阀门内漏流量的量化检测试验研究,从而确定阀门内漏过程中不同频率范围内小波包熵变化特点,分析小波包熵与内漏流量之间的对应关系,为输气管道阀门内漏流量量化检测提供一种新思路。

1 基本原理

1.1 小波包分析原理

在输气管道阀门内漏过程中,由于阀门存在较大压差,泄漏孔后高速气体与静止或流动相对较慢的气体急剧混合而产生喷流噪声(声发射源),此时通过安装在阀门上的声发射传感器检测内漏声发射信号并进行分析、处理,即可进行阀门内漏的定性、定量、定位识别^[9-11]。输气管道阀门内漏过程产生的声发射信号是由一系列频率和模式丰富的信号构成,在频带范围内,信号分布较为广泛,因此,若想获得每一时间点对应的内漏声发射信号特征,需要对输气管道阀门内漏所产生的声发射信号源特征提取,提供一种新的方法,而小波包分析具有较好的时频域局部特征,可以对阀门内漏信号分解成不同频率带进行分析。

小波包分解过程采用二分形式将频率分解为低频部分和高频部分。依次对分解的低频部分和高频部分进行再次分解,从而使高频部分的频域信号的分辨率得到提高(图1, S为原始信号, G为信号分解后的高频部分, H为信号分解后的低频部分)。小波包分解后即可进行信号重构,获取不同分解尺度下的信号源,即对分解的信号按照原先分解过程进行逆运算^[12]。

1.2 小波包熵特征提取方法

熵的概念最早来自于统计热力学,也称为热熵,用于表达系统中分子状态的混乱程度。在信息理论中也有熵的概念,称为信息熵或 Shannon 熵,通讯过程中信号源信号的不确定性为信息熵^[13]。信息熵可以理解为某种特定信息出现的概率,一个系统表现得越有序,

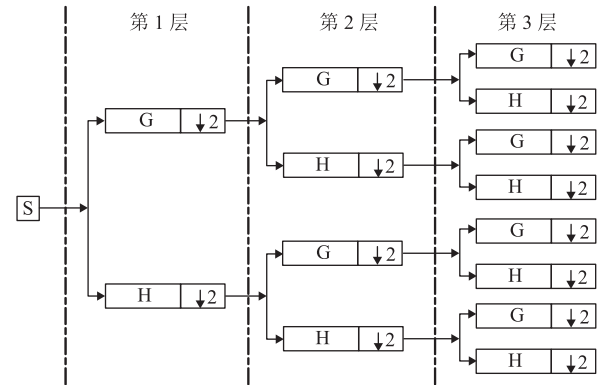


图1 小波包分解结构树示意图

系统所对应的信息熵值则越低。同样,一个系统表现得越混乱,其对应的信息熵值则越高^[14-15]。对于阀门泄漏过程中产生的声发射信号随内漏流量增加,其信号更加混乱。因此,阀门内漏声发射信号强度与内漏流量对应变化规律可以采用信息熵进行分析和评价。信息熵 H 的定义为:

$$H = - \sum_{i=1}^L (P_i \times \lg P_i) \quad (1)$$

式中: L 为信号源状态的总数; P_i 为信号取值的概率, $\sum_{i=1}^L P_i = 1, P_i \in [0, 1]$ 。

借用信息熵理论,对声发射传感器检测到的天然气管道阀门内漏信号进行 j 层小波包分解,将分解后的最后一层各结点小波包系数(共 2^j 个)进行重构,每一个重构信号 $S_{j,k}$ 均可视为构成原始检测信号的一个独立信号源,通过计算各结点(k)重构信号的信息熵 $H_j(k)$,将其称为小波包熵,选取这 2^j 个小波包熵 $H_j(k)$ 作为阀门内漏信号的特征向量^[16-18]。

(1) 将声发射传感器检测到的内漏声发射信号进行 j 层小波包分解,分别得到 2^j 个结点所对应小波包系数 $c_{j,k}^n (k=0, 1, \dots, 2^{j-1})$, 其中 n 为小波包系数长度。

(2) 选取第 j 层各结点小波包系数 $c_{j,k}^n$ 进行小波包系数重构,得到各结点的小波包重构信号 $S_{j,k}$ 。

(3) $S_{j,k}$ 信号总长度为 N , 将 $S_{j,k}$ 分解成 L 等分,通过计算第 i 个子空间信号 $S_{j,k}(n)$ 数值的平方和求得该空间信号对应的能量:

$$E_{j,k}(i) = \sum_{n=\frac{(i-1)N}{L}+1}^{iN/L} |S_{j,k}(n)|^2 \quad (2)$$

第 j 层第 k 结点重构信号的总能量可以表示为:

$$E_{j,k} = \sum_{i=1}^L E_{j,k}(i) \quad (3)$$

(4) 将 $S_{j,k}$ 的各个分段能量进行归一化处理:

$$P_{j,k}(i) = \frac{E_{j,k}(i)}{E_{j,k}} \quad (4)$$

式中： $P_{j,k}(i)$ 为第 j 层第 k 结点的重构信号 $S_{j,k}$ 在分解后的第 i 个子区间内所包含信号的能量值在重构信号 $S_{j,k}$ 总能量中存在的概率。

根据信息熵理论相关定义，信号通过小波包分解后的第 j 层第 k 结点重构信号 $S_{j,k}$ 的小波包熵可以表示为：

$$H_{j,k} = - \sum_{i=1}^L [P_{j,k}(i) \times \lg P_{j,k}(i)] \quad (5)$$

式中：当 $S_{j,k}(i) = 0$ 时，设定 $0 \lg 0 = 0$ 。

小波包熵反映了阀门内漏喷流声发射信号的无序程度，熵值越低，表明检测信息混乱程度越低；熵值越高，表明检测信号混乱程度越高，包含噪声越多。因此，可以通过检测阀门内漏时的声发射信号，并且计算其小波包熵值来识别阀门内漏流量。

2 检测试验

基于上述小波包熵值特点开展阀门内漏声发射检测试验(图2、表1、表2)。以输气管道常用球阀(已发生内漏)为试验对象，试验中通过氮气瓶向球阀上游管道注入3 MPa 氮气(由于试验客观条件限制，以氮气代替天然气)，阀门下游管道为放空状态，待上游压力计显示稳定时关闭氮气瓶上的调压阀。阀门内漏流量随压差的降低而逐渐减小，因此可以通过阀门上游压力的变化调节阀内漏流量。

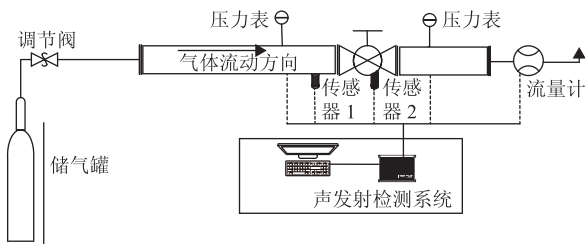


图2 声发射检测试验平台及声发射检测系统示意图

表1 声发射检测试验平台相关设备性能参数

检测试验平台设备	性能参数
储气罐	体积为40 L, 最大承压为15 MPa, 介质为氮气
调节阀	可调输出范围为0~10 MPa
待测球阀	尺寸为3 in, 承压为15 MPa, 内漏形式为密封圈损伤
管道	承压为15 MPa
压力变送器	承压为10 MPa, 检测精度为2.5级
流量变送器	检测范围为0~1.8 m ³ /h, 精度等级为1级

表2 声发射检测系统相关设备性能参数

声发射检测系统设备	性能参数
声发射传感器	类型为谐振式高灵敏度声发射信号接收器, 工作频率为20~220 kHz, 中心频率为150 kHz, 峰值灵敏度大于-65 dB
前置放大器	信号增益为(40±1)dB, 信号带宽为20~2 500 kHz
数据采集器	采集频率为200 kHz

阀门内漏检测过程^[19-20]：①将声发射传感器1和传感器2置于空气中检测环境噪声并进行传感器初始化标定；②将声发射传感器1固定于阀门上游靠近法兰处管道表面，经耦合剂耦合后采用磁性夹具进行固定，声发射传感器2固定于阀门下游靠近法兰处阀门表面(上游传感器用于检测管道背景基准噪声)；③内漏声发射信号通过声发射传感器、信号放大器后进入数据采集器，通过数据采集器将声发射信号上传至上位机器后进行小波包熵值计算(以传感器2小波包熵值与传感器1小波包熵值的差值作为消除管道基准噪声的阀门真实内漏声发射信号特征)；④阀门压差和内漏流量则通过另外一台数据采集器进行采集(数据采集频率为1 Hz)，将采集到的数据上传至上位机；⑤通过上位机处理后建立阀门内漏流量与声发射信号小波包熵值的对应关系。

3 结果分析

根据阀门内漏过程中压差与内漏流量随时间的变化曲线(图3)：试验过程前期，阀门压差和内漏流量下降梯度较大，随试验时间的延长，压差与流量下降梯度的变化减缓，整体呈指数变化趋势。

对试验中不同内漏流量下的声发射信号进行小波包分解，其分解过程的关键是小波基函数的选择。基于此，选择在时域范围内具有紧支性、在频域范围内具有快速衰减性特点的db5小波基函数进行3层小波包分解(图4)^[21]。分解成S0~S7共8个频带：0~12.5 kHz、12.5~25 kHz、25~37.5 kHz、37.5~50 kHz、50~62.5 kHz、62.5~75 kHz、75~87.5 kHz、87.5~100 kHz。

3层小波包分解之后，对每个频带内的小波包系数进行重构，即对分解的信号按照原先分解过程进行逆运算。

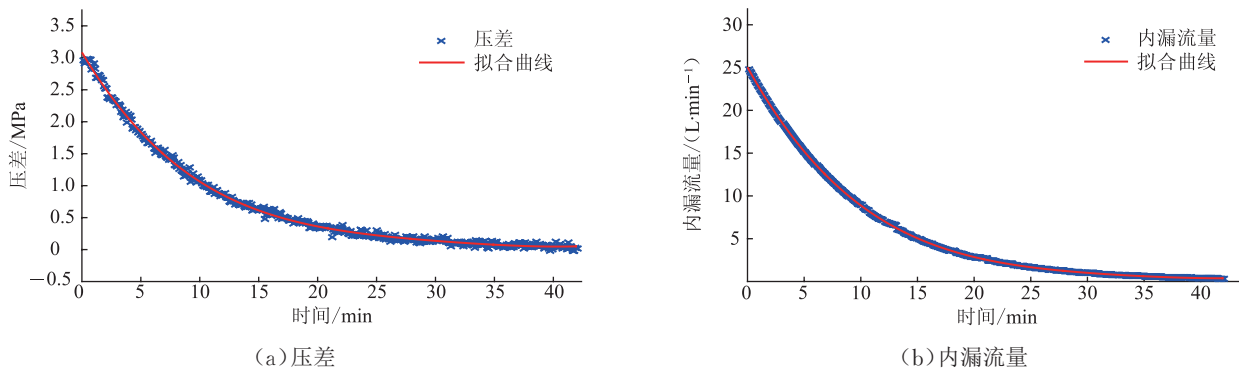


图3 阀门内漏过程中压差与内漏流量随时间的变化曲线

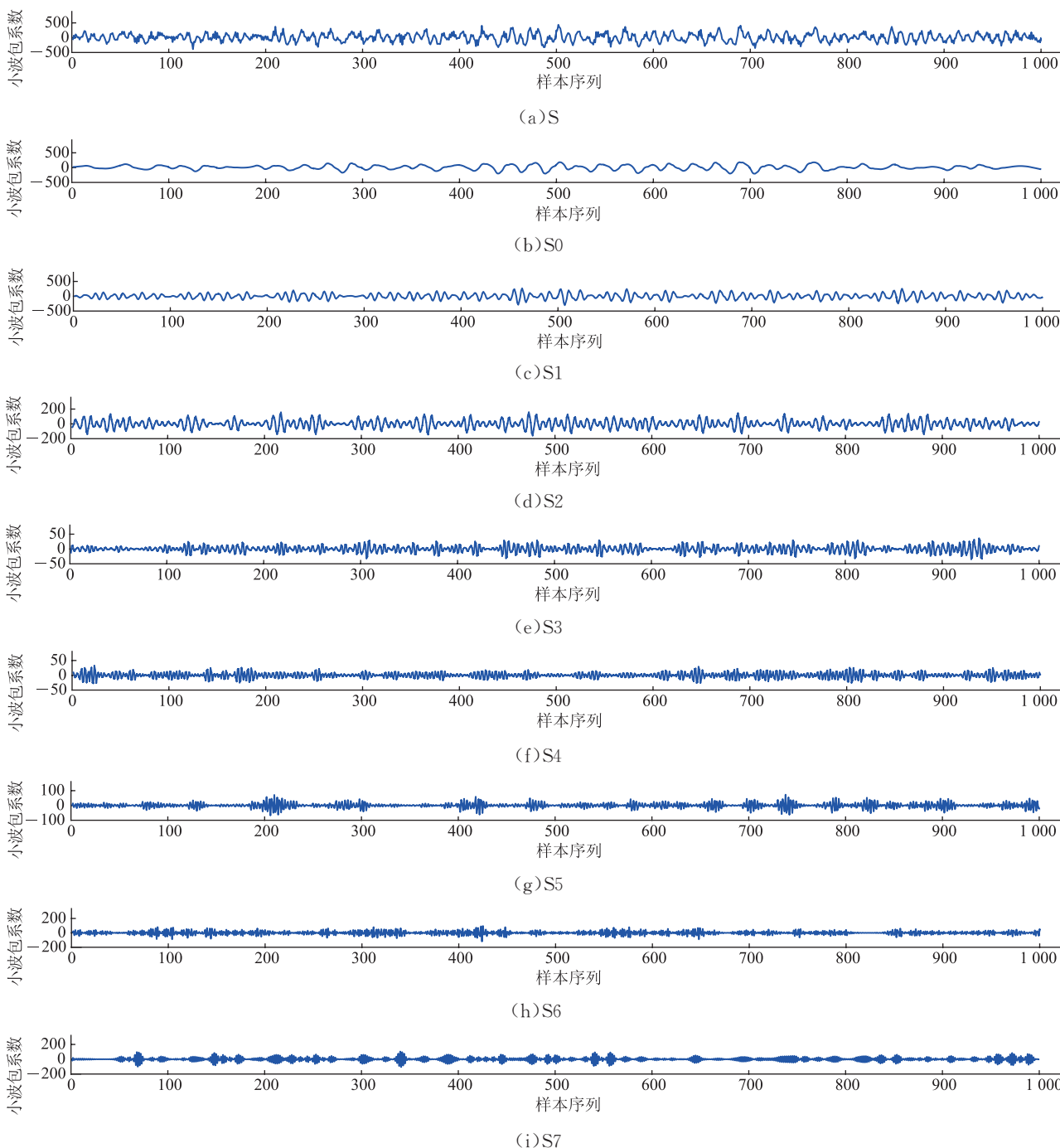


图4 3层小波包分解系数序列示意图

计算重构信号在时域范围内的小波包熵值(图5)。当阀门开始发生微小内漏时(0~5 L/min),小波熵值变化不大,表明在微小内漏过程中声发射信号混乱程度较低,信号相对平稳;当内漏流量开始增大时(大于5 L/min),小波包熵值开始发生明显变化,且随内漏流量的不断增大,声发射信号开始变得复杂。在S7频

带(87.5~100 kHz),随内漏流量的增大,小波包熵值变化并不剧烈,可以判断在该频带内声发射信号相对稳定,混乱程度较低,干扰信号较弱,其次是S2频带(25~37.5 kHz),因此,在后期可以提取87.5~100 kHz与25~37.5 kHz两个频率范围内的声发射信号特征进行内漏流量评价。

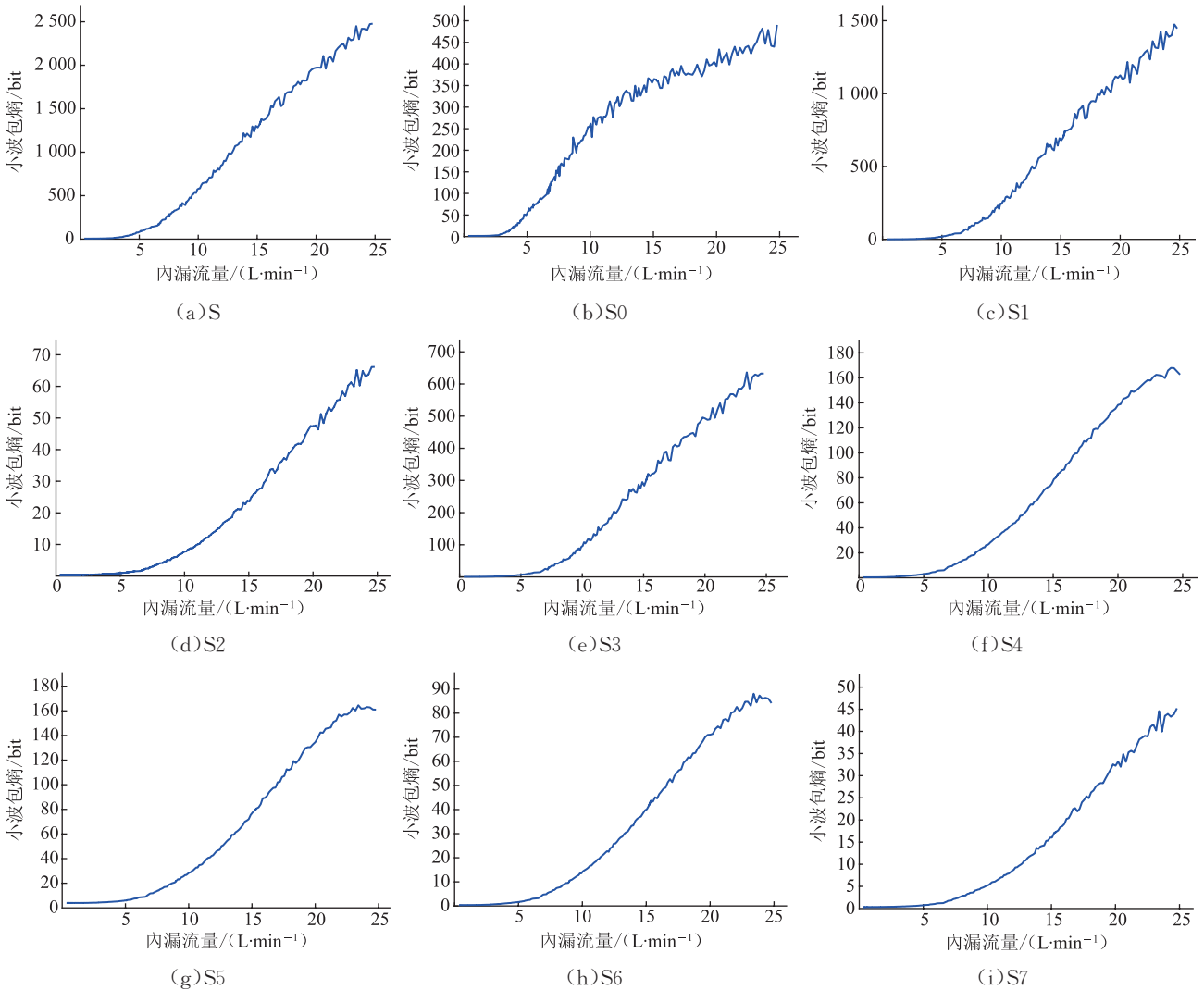


图5 不同频带内小波包熵值随内漏流量的变化曲线

同时,由于小波包熵值与内漏流量之间存在多项式函数对应关系,因此,也可以采用小波包熵值作为内漏流量评价指标,采用3次多项式函数进行不同频带内小波包熵值与内漏流量曲线拟合(表3),其中S2频带内曲线拟合效果最佳(均方根误差为0.0126)。

表3 不同频带内小波包熵值与内漏流量拟合曲线均方根误差

频带	均方根误差	频带	均方根误差
S0	0.039 5	S4	0.015 4
S1	0.153 0	S5	0.016 9
S2	0.012 6	S6	0.014 9
S3	0.015 0	S7	0.013 1

4 结论

针对输气阀门内漏声发射检测信号具有非平稳性、含噪声干扰的特点,采用小波包和信息熵相结合的方法进行3 in球阀不同内漏流量下声发射信号特征分析。阀门内漏所产生声发射信号在25~37.5 kHz和87.5~100 kHz两个频带内最为平稳,干扰信号较弱。采用小波包熵可以有效进行阀门内漏声发射信号无序程度特征分析,并且小波包熵值与内漏流量之间存在多项式函数对应关系,在25~37.5 kHz内曲线拟合效

果最佳(均方根误差为 0.012 6),可以采用该频带内声发射信号小波包熵进行阀门内漏流量量化评价。

参考文献:

- [1] 谭东杰,李柏松,杨晓峥,等. 中国石油油气管道设备国产化现状和展望[J]. 油气储运,2015,34(9):913-918.
TAN D J, LI B S, YANG X Z, et al. Development and prospect of PetroChina's pipeline equipment localization[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(9):913-918.
- [2] 刘翠伟,李玉星,王武昌,等. 输气管道气体流经阀门气动噪声产生机理分析[J]. 振动与冲击,2014,33(2):152-157.
LIU C W, LI Y X, WANG W C, et al. Analysis on the mechanism of aero-acoustic noise generated by gas flow through valves of natural gas pipelines[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2):152-157.
- [3] SIM H Y, RAMLI R, SAIFIZUL A, et al. Empirical investigation of acoustic emission signals for valve failure identification by using statistical method[J]. Measurement, 2014, 58(12):165-174.
- [4] 潘碧霞,徐长航,曹国梁,等. 管道泄漏声发射信号的传播特性[J]. 油气储运,2013,32(10):1141-1145.
PAN B X, XU C H, CAO G L, et al. Propagation characteristics of acoustic emission signals of pipeline leak[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(10):1141-1145.
- [5] 李振林,毕治强,刘刚,等. 基于声发射的天然气管道球阀内漏检测[J]. 油气储运,2013,32(6):647-650.
LI Z L, BI Z Q, LIU G, et al. Detection of internal leakage of ball valves in gas pipeline based on acoustic emission theory[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(6):647-650.
- [6] 孙立瑛,李一博,靳世久,等. 基于小波包和 HHT 变换的声发射信号分析方法[J]. 仪器仪表学报,2008,29(8):1577-1582.
SUN L Y, LI Y B, JIN S J, et al. Acoustic emission signal processing method based on wavelet package and HHT transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(8):1577-1582.
- [7] 杨晶,李录平,饶洪德,等. 基于声发射检测的阀门泄漏故障模式诊断技术研究[J]. 动力工程学报,2013,33(6):455-460.
YANG J, LI L P, RAO H D, et al. Diagnosis of valve leakage fault patterns based on acoustic emission detection[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(6):455-460.
- [8] 齐敏芳,付忠广,景源,等. 基于信息熵与主成分分析的火电机
组综合评价方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(2):58-64.
QI M F, FU Z G, JING Y, et al. A comprehensive evaluation method of power plant units based on information entropy and principal component analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(2):58-64.
- [9] NOIPITAK M, PRATEEPASEN A, KAEWWAEWNOI W. A relative calibration method for a valve leakage rate measurement system[J]. Measurement, 2011, 44(1):211-218.
- [10] MELAND E, HENRIKSEN V, HENNIE E, et al. Spectral analysis of internally leaking shut-down valves[J]. Measurement, 2011, 44(6):1059-1072.
- [11] 李振林,张海峰,夏广辉. 基于声发射理论的阀门气体内漏量化检测研究[J]. 振动与冲击,2013,32(15):77-81.
LI Z L, ZHANG H F, XIA G H. Quantitative detection of valve internal air leakage based on acoustic emission theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(15):77-81.
- [12] KIM E Y, LEE Y J, LEE S K. Health monitoring of a glass transfer robot in the mass production line of liquid crystal display using abnormal operating sounds based on wavelet packet transform and artificial neural network[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(14):3412-3427.
- [13] SEGAL I E. A note on the concept of entropy[J]. J Math Mech, 1960, 9(4):623-629.
- [14] 庞震,任学平,刘桐桐,等. 基于小波包熵值和 EMD 结合的滚动轴承微故障诊断方法研究[J]. 机械传动,2014,38(3):46-49.
PANG Z, REN X P, LIU T T, et al. Research of rolling bearing slight fault diagnosis method based on the wavelet packet entropy and EMD[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(3):46-49.
- [15] 任瑶,李国富,应小刚,等. 基于小波包熵与 SVM 的导轨摩擦磨损状态识别[J]. 计算机工程,2016,42(11):281-284.
REN Y, LI G F, YING X G, et al. Guideway friction and wear state recognition based on wavelet package entropy and SVM[J]. Computer Engineering, 2016, 42(11):281-284.
- [16] 胡鹏,龚沈光,胡英娣. 基于小波包熵的船舶轴频电场信号检测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2012,39(11):15-18.
HU P, GONG S G, HU Y D. Detection of ship shaft-rate electric field signals using wavelet packet entropy[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 39(11):15-18.

- [17] 王艳霞, 赵建民, 郑忠龙, 等. 一种基于数据场和小波包熵的掌纹识别方法[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2015, 51(1): 174-180.
WANG Y X, ZHAO J M, ZHENG Z L, et al. A palmprint recognition method based on data fields and wavelet packet entropy[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science Edition), 2015, 51(1): 174-180.
- [18] 李巍华, 戴炳雄, 张绍辉. 基于小波包熵和高斯混合模型的轴承性能退化评估[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 35-40.
LI W H, DAI B X, ZHANG S H. Bearing performance degradation assessment based on wavelet packet entropy and Gaussian mixture model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(21): 35-40.
- [19] 张海峰, 李振林, 姬忠礼, 等. 输气管道阀门内漏声发射多参数检测实验研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2013, 21(3): 14-17.
ZHANG H F, LI Z L, JI Z L, et al. A multi-parameter analysis of acoustic emission for gas pipeline valve internal leak detection[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2013, 21(3): 14-17.
- [20] 张海峰, 李振林, 姬忠礼, 等. 天然气管道阀门内漏声发射检测系统设计及试验研究[J]. 石油化工自动化, 2013, 49(6): 10-13.
ZHANG H F, LI Z L, JI Z L, et al. Acoustic emission detection system design and study for inner leakage of natural gas pipeline valve[J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2013, 49(6): 10-13.
- [21] 许健雄, 赵又群, 刘英杰. 汽车方向盘转角试验数据去噪的小波基选择[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(6): 809-813.
XU J X, ZHAO Y X, LIU Y J. Wavelet basis selection for denoising experimental data of steering wheel angle[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(6): 809-813.
- (收稿日期: 2016-06-23; 修回日期: 2017-08-01; 编辑: 刘朝阳)

基金项目: 中国石油天然气股份公司科技专项“油气管道关键设备国产化”, 2012E-2802。

作者简介: 张海峰, 男, 1986年生, 工程师, 2015年博士毕业于中国石油大学(北京)热能工程专业, 现主要从事输气管道阀门内漏检测技术相关研究。地址: 河北省廊坊市广阳区金光道51号, 065000。电话: 0316-2073945, Email: haifengzhang1986@163.com

(上接第1283页)

- development modes for deepwater oil and gas fields in west Africa[J]. Oil Field Equipment, 2010, 39(11): 1-8.
- [22] 孙宝江. 石油天然气工程多相流动[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2013: 184-266.
SUN B J. Multiphase flow in oil and gas engineering[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2013: 184-266.
- [23] 毛伟, 张绍槐, 梁政. 垂直向上环状流特性参数预测模型[J]. 钻采工艺, 2000, 23(2): 25-28.
MAO W, ZHANG S H, LIANG Z. A predicting model for upward annular flow properties in vertical gas well[J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(2): 25-28.
- [24] BENDIKSEN K, MAINES D, MOER, et al. The dynamic two-fluid model OLGA: theory and application[J]. SPE Production Engineering, 1991, 6(6): 171-180.
- [25] 王志远, 孙宝江, 程海清, 等. 深水井控过程中天然气水合物生成区域预测[J]. 应用力学学报, 2009, 26(2): 224-229.
WANG Z Y, SUN B J, CHENG H Q, et al. Prediction of natural gas hydrate formation area during deep water well control[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009, 26(2): 224-229.
- (收稿日期: 2016-11-13; 修回日期: 2017-09-01; 编辑: 刘朝阳)
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“深水钻井水合物储层-井筒耦合传热传质特性研究”, 51374232; 教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目“海洋油气井钻完井理论与工程”, IRT_14R58。
- 作者简介:** 郭艳利, 男, 1988年生, 在读博士生, 2014年硕士毕业于中国石油大学(华东)船舶与海洋结构物设计制造专业, 现主要从事海上油气钻采与集输、油气井流体力学与工程相关研究。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 266580。电话: 15908982014, Email: guoynli@126.com
- 通讯作者:** 孙宝江, 男, 1963年生, 二级教授, 博士生导师, 1999年博士毕业于北京大学流体力学专业, 现主要从事石油工程多相流理论及应用、海洋油气工程相关研究。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 266580。电话: 0532-86983137, Email: sunbj128@126.com