

# 管道泄漏声振动信号的特征分析

冯雪松, 文玉梅, 甄锦鹏, 张雪园, 李平, 文静

(重庆大学光电工程学院传感器与仪器研究中心, 重庆 400044)

**摘要:** 管道泄漏声振动是泄漏过程中多种事件共同作用产生的, 所以使用多种特征才可能比较准确地描述管道泄漏声信号。合理的选取和使用这些特征对于泄漏信号识别至关重要。通过分析泄漏过程, 确定选取信号的随机性和频率分布特性作为泄漏特征。由于随机性和频域特性可由多种参数描述, 于是比较了各种参数作为泄漏特征值的辨识效果。使用支持向量机作为分类器, 对比了使用单种特征以及组合使用多种相同或不同类特征时, 实际供水管道声振动及管道泄漏的识别效果。使用两种特征的识别准确率普遍高于使用单种特征的情况, 然而使用更多的特征却没有进一步提高准确率。其中样本熵和功率谱分布特征的组合准确率最高, 达到了 93%, 而且使用此特征组合能够正确区别管道周围常见噪声。

**关键词:** 管道泄漏识别; 特征提取; 模式识别; 频域分布; 统计特征

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-05-0413-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.05.007

## Feature analysis of pipeline leakage acoustic signals for leak identification

FENG Xue-song, WEN Yu-mei, ZHEN Jin-peng, ZHANG Xue-yuan, LI Ping, WEN Jing

(Research Center of Sensors and Instruments, School of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Leakage acoustic signal of pipelines is originated from the concurrent events during leaking. This physical fact suggests that only by combining multiple features of the signal can a leak be uniquely identified. Reasonable selection and appropriate application of features is the key to develop a valid leak recognizing pattern. According to the mechanism of leaking, the characteristics of randomness and frequency distribution are chosen as leak features. Since the randomness and frequency distribution can be described with various characteristics, a single characteristic and the combination of multiple characteristics from the same or different classes are compared for identifying leaks based on abundant acoustic signal samples collected from practical water-supplied pipelines. The Support Vector Machine is used for recognition. The recognition effect with two characteristics is better than that with a single characteristic, particularly the combination of sample entropy and power spectral distribution obtains the highest correct rate of 93%. However, more characteristics fail to produce further improvement in the correct rate of recognition. With the selected features, common noise and mimicked leakage sound can also be identified correctly.

**Key words:** pipeline leak identification; feature extraction; pattern recognition; frequency distribution; statistical property

## 0 引言

供水管道泄漏是频繁发生且危害严重的问题, 及时发现泄漏是降低管网漏损率的首要工作。最早出现的是人工听音检漏法<sup>[1]</sup>, 工作人员通过监听管道上的泄漏噪声判断是否发生泄漏, 巡检费时费工且十分依赖于工人的经验, 主观性强。依据用户用水的规律性, 不同时段管道声振动信号功率谱的欧

氏距离可以用于泄漏识别<sup>[2]</sup>, 但是要求信号采集时间长, 用水规律性差时, 容易出现误检。

泄漏引起的管道声振动, 必然和泄漏事件相关, 那么可以通过识别泄漏声信号本身的特征进行泄漏识别。Wan Qin 等人通过锅炉管道功率谱峰值的位置进行泄漏识别<sup>[3]</sup>, Osama Hunaidi 则通过塑料管道振动信号低频部分的平均幅值识别泄漏<sup>[4]</sup>, 然而, 不同的管道类型会使泄漏信号频谱存在明显差异, 作者只分析了对测试管道的有效性, 并没有考虑扩展到各种实际管道时的泄漏识别效果。Zhigang Qu 等人通过供水管道振动信号按频段划分的能量分布进行泄漏识别, 能区分挖掘和脚步声噪声<sup>[5]</sup>, 但这只是实际检测环境中可能出现的两种噪声情况, 并不包括其他噪声情况。李光海等人分析认为,

收稿日期: 2014-10-15; 修回日期: 2015-01-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174017)。

作者简介: 冯雪松(1991—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为泄漏信号识别。

通讯作者: 文玉梅, E-mail: ymwen@cqu.edu.cn

泄漏信号中包含了湍流产生的宽频信号,并提出使用对数功率谱的分形维数进行泄漏识别<sup>[6]</sup>,然而湍流声只是多种泄漏声成分中的一种,而且分形维度对宽频噪声敏感,这样非常容易产生误检。Majid Ahadi 等人通过观察供水管道上的泄漏时域信号,将其中某些固定形状的波形用于泄漏识别<sup>[7]</sup>,但是并没有说明这些波形是否是泄漏信号所特有的,根据我们对从工程实际中采集的大量信号的分析,泄漏波形与泄漏条件、管道条件密切相关,也就是说不同的管道、不同的泄漏状况,都会产生完全不同的波形。杨进等人分析了泄漏过程中湍流和空化现象,提出使用信号相关长度以后的自相关函数的近似熵作为泄漏信号特征,并能够区分泄漏信号与外界噪声(汽车发动机和钻机)<sup>[8,9]</sup>。但是管道内部运行过程中,接头阀门处也会发生湍流和空化,所以近似熵不足以将泄漏信号与管道运行噪声区分。

泄漏信号的特征多种多样,时域、频域内都有反映泄漏存在的特征,但是没有确定哪种特征能够更为有效地识别泄漏。而且实际管道复杂多变,部分特征是通过研究者自行搭建的实验管道提出的,难以说明是否具有普适性。最后,实际条件中噪声干扰复杂,然而只有少数研究者分析了几种噪声,无法说明这些特征能否适应实际检测。所以,目前已有的单个特征并不能够同时满足:(1) 有效性,即能够真实反映泄漏的存在;(2) 普适性,即能够普遍适用于各种实际管道;(3) 排它性,即能够与其它常见噪声区分。

在组合使用多种特征方面,甄锦鹏通过 Lempel-Ziv 复杂度和功率谱分布进行泄漏信号识别<sup>[10]</sup>,文玉梅等则使用了近似熵和谱宽参数来识别泄漏信号<sup>[11]</sup>,使用两种特征的识别准确率要高于它们分别单独使用的情况。

为了寻找能够准确反映泄漏存在且对实际管道具有普适性的特征或特征组合,本文通过泄漏事件分析泄漏信号的特征,并采用大量实际供水管道中存在泄漏和无泄漏的信号建立了样本库,以准确率作为标准,考察各种特征和特征组合的泄漏识别效果,对比了使用单种特征以及组合使用多种相同域或不同域特征时的泄漏识别效果,并对管道常见噪声和泄漏事件模拟声进行了测试,最终得到了能够准确反映泄漏发生并对各种实际管道普遍适用的特征组合。

## 1 频域分布特征

管道存在泄漏时,由泄漏引起的振动沿着管道

向两边传播。将加速度传感器吸附在管壁上采集管道振动声信号,并希望通过选取和使用合适的特征,识别出存在泄漏的管道。管道泄漏过程包括三种泄漏事件:(1) 泄漏水流的摩擦;(2) 空化现象;(3) 泄漏口湍流。

泄漏水流摩擦声的频率成分与泄漏口粗糙度<sup>[12]</sup>和水流速度<sup>[13]</sup>相关。空化现象是泄漏口附近水压降低导致的水中气体形成空穴并湮灭,James 认为<sup>[14]</sup>,空穴湮灭声的中心频率与空穴尺寸呈反比;Knapp 给出了描述空化强弱的空化数  $K^{[15]}$ ,与流体流速和压强相关。湍流是管内的正常流体受到泄漏影响而产生的紊流<sup>[6]</sup>,撞击管壁产生的振动频率与剪切速度相关<sup>[17]</sup>。另一方面,Fuller 分析了管道振动的传播特性<sup>[18,19]</sup>,认为充液管道中,振动信号的低频部分大部分由流体传播,而高频成分由管壁和流体同时传播;路炜则认为泄漏信号在管道上的传播过程中存在频散<sup>[20]</sup>。

但是实际检测中,不同的管道结构、管道尺寸、泄漏口、流体流速、流体溶气量和管内压强等因素各不相同,会使采集到的泄漏事件声的频率分布出现波动。所以,频域分布特征可以反映泄漏事件是否存在,但是不同泄漏信号的频率分布会因为管道和泄漏的差异发生改变,不会固定为一种形式。

### 1.1 功率谱分布

功率谱分布参数(Power Spectral Distribution, PSD)反映了频率域内能量分布情况,而泄漏信号频域能量分布与泄漏物理过程相关,所以可使用功率谱分布识别泄漏。下面通过实际信号的功率谱进行说明,图 1、2 分别是不同管道上泄漏和无泄漏信号的功率谱,采用压电加速度传感器 ZW9515TA,采样率  $f_s=5000$  Hz,并对功率谱作了归一化。

图 1(a)和 1(b)是在安静环境中近距离采集的高信噪比泄漏信号的功率谱,可以看出泄漏信号成分分布在高频段,但是不同管道泄漏频率成分分布存在一定差异。图 1(c)、1(d)和 1(e)表明高频段内存在泄漏信号成分,但是混入了低频噪声。图 1(f)是经过长距离管道(150 m)后的泄漏信号,高频成分衰减严重,与无泄漏信号功率谱图 2(d)相似。观察图 2 中的 6 幅无泄漏信号,频率分布分散,但是因为噪声使某个频段较为突出,如图 2(a)的高频成分突出,图 2(d)的低频成分突出。所以,使用频率分布特征可以反映泄漏的存在,但是并不能全部准确辨识,容易出现误检。

### 1.2 谱宽参数

谱宽参数(Energy Spectrum Width, ESW)能够反

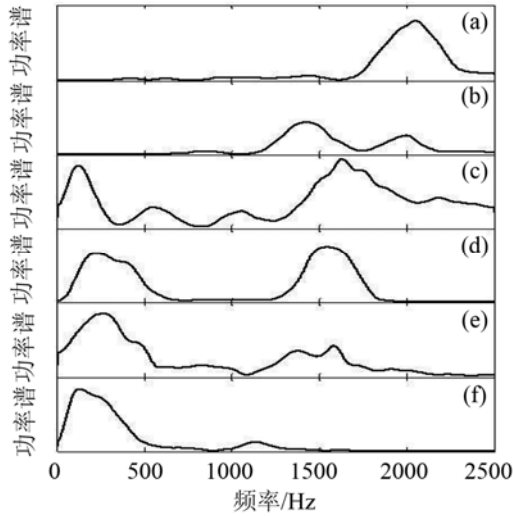


图 1 泄漏信号功率谱  
Fig.1 The PSD of leakage signal

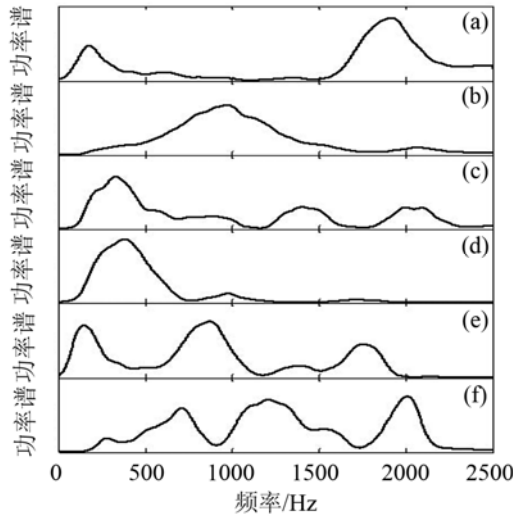


图 2 无泄漏信号功率谱  
Fig.2 The PSD of non-leakage signal

映信号频域的能量集中程度<sup>[21]</sup>。泄漏的物理过程导致了泄漏信号频率集中在一定范围内，所以能量集中程度是泄漏特征之一。谱宽参数  $\varepsilon$  的范围是 0~1，值越大表示能量越分散，值越小表示能量越集中。谱图分辨率  $\eta$  由信号采样率  $f_s$  和上限频率  $H$  决定， $\eta = H/f_s$ 。采样率  $f_s$  为 5000 Hz，通过改变  $H$  能够调整分辨率，分辨率低时，能够得到频谱的整体情况；分辨率高时，能够描述更多  $\varepsilon_{0-500}$  细节。将上限频率  $H$  选择为 500、1000、1500、2000 和 2500 Hz 时，谱宽参数分别记为  $\varepsilon_{0-500}$ 、 $\varepsilon_{500-1000}$ 、 $\varepsilon_{1000-1500}$ 、 $\varepsilon_{1500-2000}$  和  $\varepsilon_{2000-2500}$ 。表 1 和表 2 分别是多组有泄漏和无泄漏信号的谱宽参数，与图 1 和图 2 中信号一一对应。

表 1 中泄漏信号 1、2 是高信噪比泄漏信号，泄漏信号 3~5 混入了其他频段的噪声，泄漏信号 6

表 1 泄漏信号的谱宽参数  
Table 1 Energy spectrum width of leakage signal

谱宽参数	$\varepsilon_{0-500}$	$\varepsilon_{500-1000}$	$\varepsilon_{1000-1500}$	$\varepsilon_{1500-2000}$	$\varepsilon_{2000-2500}$
泄漏信号 1	0.3545	0.5382	0.5269	0.4926	0.4421
泄漏信号 2	0.3876	0.4529	0.4223	0.4400	0.4840
泄漏信号 3	0.7597	0.7533	0.7114	0.6275	0.6186
泄漏信号 4	0.6027	0.7539	0.7473	0.6681	0.6828
泄漏信号 5	0.5120	0.6431	0.7069	0.7462	0.7577
泄漏信号 6	0.6733	0.7852	0.8047	0.8225	0.8385

表 2 背景噪声的谱宽参数  
Table 2 Energy spectrum width of background noise

谱宽参数	$\varepsilon_{0-500}$	$\varepsilon_{500-1000}$	$\varepsilon_{1000-1500}$	$\varepsilon_{1500-2000}$	$\varepsilon_{2000-2500}$
背景噪声 1	0.5898	0.7057	0.7525	0.5956	0.5594
背景噪声 2	0.5570	0.5566	0.5874	0.6562	0.7105
背景噪声 3	0.5440	0.6573	0.7102	0.7269	0.7188
背景噪声 4	0.5248	0.6112	0.6660	0.7039	0.7087
背景噪声 5	0.6920	0.6300	0.6724	0.6798	0.6897
背景噪声 6	0.4710	0.5320	0.5631	0.6084	0.6245

是经过长距离传输后采集的，表 2 中是不同管道上采集的无泄漏信号。对比表 1 和表 2，泄漏信号 1、2 的信噪比高，泄漏频率成分集中在一定频率范围内，频域能量集中程度高，谱宽参数的值低；而泄漏信号 3~6 由于噪声或长距离管道传播后，频率成分的分布范围变广，能量集中程度下降，谱宽参数的值变高。无泄漏信号 1~6 采集的是管道背景噪声，频率分布的集中程度低，谱宽参数的值高。泄漏信号 1、2 的谱宽参数值明显低于各组无泄漏信号，而泄漏信号 3~6 难以与各组无泄漏背景噪声区分。所以，谱宽参数要求信号具有较高的信噪比，对实际泄漏检测而言，信号频谱容易被噪声干扰，使用谱宽参数不足以准确识别泄漏。

## 2 随机性特征

管道泄漏是一种混沌现象<sup>[22]</sup>，它的运动过程是确定的，但是任何微小的初值改变或扰动都可能使运动过程产生显著改变，所以无法通过计算准确地求出泄漏运动状态。其中，湍流和空化的发生是确定但不可预测的，这与纯粹的随机运动类似；另一方面，每次空化或湍流产生的声信号相似，且在一段时间内，发生的次数是大致平稳的；最后，泄漏水流与泄漏口的摩擦也会产生持续且规律的波形。综合以上分析，泄漏信号同时包含了随机性和规律性的成分，使泄漏信号随机性弱于近似于白噪声的背景噪声，强于周期性噪声，所以使用统计描述随机性程度的特征可以用于泄漏识别，但是难以辨别与泄漏信号复杂度相近的噪声。

多种参数可以描述信号随机性, 包括了近似熵、样本熵和 Lempel-Ziv 复杂度, 每种参数描述随机性的侧重点不同, 且有各自的特点。

### 2.1 近似熵

Pincus 提出的近似熵 (Approximate Entropy, ApEn) 是从信号的自相似程度对随机性进行描述的<sup>[23]</sup>。近似熵通过统计信号内相匹配数据段的概率来描述随机性。匹配的序列越多, 信号越规律, 近似熵值越低; 匹配的序列越少, 信号越随机, 近似熵值越高。匹配通俗地说就是相似, 所以近似熵实际上是从自相似程度的角度描述信号的随机性。但是, 近似熵高度依赖于数据的长度。当数据长度较短时, 近似熵的理论偏差突显出来, 使结果存在较大偏差。此时, 近似熵有可能不满足相对一致性, 即同种情况下采集的信号可能高于或者低于某一标准信号的近似熵。

### 2.2 样本熵

为了改善近似熵的不足之处, Richman 在近似熵理论上发展得到了样本熵 (Sample Entropy, SampEn)<sup>[24]</sup>。理论分析认为, 近似熵产生较大偏差和缺乏相对一致性的原因是计算过程中, 匹配过程将自匹配也计算进入了最后的结果, 而样本熵的计算过程不包括自匹配, 所以偏差程度低于近似熵。样本熵实际是两个信号连续  $m$  个点相似的条件下, 第  $m+1$  个点依然相似概率的负自然对数。所以样本熵也是从信号自相似程度上描述随机性的。

### 2.3 Lempel-Ziv 复杂度

Lempel 和 Ziv 提出的 Lempel-Ziv 复杂度 (LZC)<sup>[25]</sup>, 是通过计算信号内新模式出现的速度描述随机性的。周期信号的计算结果趋近于 0, 完全随机信号的结果趋近于 1, 其余的在 0 和 1 之间。与熵相比, Lempel-Ziv 复杂度具有以下一些优势, 它采用了二值化计算, 所以抗噪声能力强于熵, 而且对于同样长度的序列, 计算量比熵小了 3 个数量级。

### 2.4 随机性特征分析

计算了样本库中管道振动信号的随机性范围。样本库包含 200 组管道振动信号 (100 组无泄漏, 100 组有泄漏)。管道包括了供水管网主管道和各级分支管道, 内径范围是 100~1200 mm, 泄漏口与传感器距离范围为 0.5~291 m, 管内水压范围是 0.14~0.6 MPa, 周围环境包括了学校、小区和公路, 所以此样本库能够涵盖实际检测的各种情况。表 3 列出了样本库中无泄漏和有泄漏振动信号的随机性范围。

表 3 样本随机性特征范围  
Table 3 Randomness feature range of samples

随机性特征	有泄漏信号	无泄漏信号
近似熵	0.5012~1.5439	1.2481~2.1375
样本熵	0.5256~1.5611	0.8950~2.1205
Lempel-Ziv 复杂度	0.6758~0.9412	0.8282~0.9991

无泄漏信号随机性的总体水平高于有泄漏信号的, 但是两者的范围有重叠, 处于交叠范围内的样本容易出现误判。所以随机性特征都能反映泄漏存在, 但是无法设定一个界限将无泄漏和有泄漏信号全部准确区分, 只使用随机性特征难以完全准确识别泄漏。

## 3 泄漏检测

### 3.1 单种特征的检测对比

使用 2.4 节中的管道振动信号样本库进行泄漏检测, 以支持向量机作为分类器, 核函数选择为径向基函数。近似熵和样本熵的参数选择为匹配长度  $m=2$ , 匹配容差  $r=0.2$ , 计算长度为 2500 点; Lempel-Ziv 复杂度计算长度为 10000 点; 功率谱分布参数为 200~800 Hz, 800~1400 Hz 和 1400~2000 Hz 频段所占比重。在以上参数设置的情况下, 每种特征单独使用时的识别准确率如表 4 所示。

表 4 单种特征的识别准确率  
Table 4 Correct rates with a single signal feature

特征	随机特性			频域	
	ApEn	SampEn	LZC	ESW	PSD
准确率	77%	84%	76%	75%	82%

统计特征中, 识别准确率从高到低依次是样本熵、近似熵和 LZ 复杂度, 说明从信号自相似的角度描述随机性的特征更加适合泄漏识别。频域特征中, 功率谱分布的准确率高于谱宽参数, 说明信号的能量分布情况比能量集中程度更能反映泄漏的存在。

### 3.2 多特征的检测对比

使用单种特征时, 准确率均未能高于 84%, 所以对于实际泄漏识别而言, 使用单种特征的方法并不可靠。于是, 使用多特征组合对样本库中数据进行泄漏识别, 包括同类型特征和不同类特征的组合。结果如表 5 所示, 对角线上为单种特征的情况, 其它位置为两种特征组合的泄漏识别准确率。

使用两种特征时, 即使两种特征是同一种类型的, 准确率较使用一种特征的情形也有提高, 普遍达到了 80% 以上。其中, 使用功率谱分布和样本熵

表5 使用1~2种特征的准确率  
Table 5 Correct rates with one or two features

特征组合	ApEn	SampEn	LZC	ESW	PSD
ApEn	77%	86%	81%	76%	87%
SampEn	—	84%	82%	84%	93%
LZC	—	—	76%	76%	81%
ESW	—	—	—	75%	84%
PSD	—	—	—	—	82%

的特征组合准确率达到最高的93%。

特征数量从一种提高到了两种以后, 识别准确率有明显提高。那么使用的特征数量进一步增加时, 准确率是否会继续提高。于是选取3种特征进行测试, 结果如表6所示。

表6 使用3种特征的准确率  
Table 6 Correct rates of three features

特征组合	ApEn	ApEn	ApEn	ApEn	ApEn
	SampEn	SampEn	SampEn	LZC	LZC
	LZC	ESW	PSD	ESW	PSD
准确率	80%	85%	91%	82%	86%
特征组合	ApEn	SampEn	SampEn	SampEn	LZC
	ESW	LZC	LZC	ESW	ESW
	PSD	ESW	PSD	PSD	PSD
准确率	82%	84%	92%	90%	82%

观察表6, 使用三种特征时的整体准确率略有提高, 但最高准确率为92%, 低于使用两种特征时的最高准确率93%。

使用4种特征时, (ApEn, SampEn, LZC, ESW)的准确率为87%; (ApEn, SampEn, LZC, PSD)的准确率为91%; (ApEn, SampEn, ESW, PSD)的准确率为91%; (ApEn, LZC, ESW, PSD)的准确率为90%; (SampEn, LZC, ESW, PSD)的准确率为90%。使用5种特征时, (ApEn, SampEn, LZC, ESW, PSD)的准确率为89%。使用多种特征时, 最高的准确率反而有所降低, 低于使用样本熵和功率谱分布参数时的93%, 原因是其它特征对泄漏的敏感程度较低, 加入特征向量后, 使特征向量整体有效程度降低。

### 3.3 和泄漏无关噪声的区别辨识

实际管道检测中, 可能存在的各种噪声能够耦合到管道上, 对泄漏识别产生干扰。为了测试样本熵和功率谱分布的特征组合对噪声的鲁棒性和排它性, 在实际管道周围人为制造了多种实际中常见并与泄漏无关的噪声, 进行辨识分析。

在距离无泄漏管道5m范围以内放置声源, 分别选择人声(男音歌曲、男声朗读、女音歌曲、女声朗读)、机械噪声(电钻钻头、汽车发动机)和人脚步声总共7种自来水管网周围的常见噪声。使用样本

熵和功率谱分布参数对这7种噪声进行辨识, 均判断为无泄漏信号。说明对于常见的外界噪声, 样本熵和功率谱分布特征组合能够正确判别, 对噪声具有排它性。

### 3.4 和泄漏相关噪声的辨识

为了验证此特征组合对泄漏本质的描述, 制造了与泄漏相关的模拟噪声进行测试。空化现象是泄漏物理过程中的重要组成, Knapp给出了用于描述空化状态的无量纲空化数 $K^{[15]}$ , 不同的 $K$ 对应不同强弱的空化活动。使用样本熵和功率谱分布参数对实验室采集的多组空化噪声进行了测试<sup>[26]</sup>,  $K$ 值较大时(0.552, 0.559, 0.651), 空化活动弱, 辨识为无泄漏;  $K$ 值较小时(0.455, 0.418, 0.333, 0.306), 空化活动明显, 辨识为有泄漏。样本熵和功率谱分布参数能够正确识别出空化噪声, 而空化现象是管道泄漏过程中存在的物理事件之一, 空化噪声是泄漏声中重要的组成, 说明了使用样本熵和功率谱分布作为特征, 能够识别出包含了空化噪声的泄漏声信号。

泄漏水流的摩擦也是泄漏事件之一。泄漏流速 $V$ 的估算范围是4.47~15.8 m/s。使用物体在无泄漏管道上摩擦, 模拟泄漏水流的摩擦声。摩擦声的频率分布和随机性特征都和摩擦速度相关, 当摩擦速度低时(低于 $V$ ), 频域分布较为分散, 随机性强, 与背景噪声类似; 当摩擦速度高时(和 $V$ 相当), 频域分布较为集中, 随机性弱。使用样本熵和功率谱分布参数对摩擦声进行辨识, 当摩擦速度和 $V$ 相当时, 判别为有泄漏, 而摩擦速度低于 $V$ 时, 判别为无泄漏, 能够正确辨识泄漏水流摩擦声, 说明此特征组合能够辨识泄漏产生的水流摩擦声。

为了进一步验证此特征组合的辨识效果, 使用水枪往管道上喷水, 喷射速度和 $V$ 相近, 同时模拟泄漏水流的摩擦声和空化噪声, 能够较好地反映真实泄漏情形。样本熵和功率谱分布参数的特征组合将喷水声辨识为有泄漏, 说明此特征组合能够准确辨识泄漏物理过程产生的声信号, 而管道泄漏过程中必然存在这些物理过程, 所以使用此特征组合, 能够识别出持续产生泄漏噪声的泄漏管道。

## 4 结论

样本熵和功率谱分布特征组合对于大量实际管道振动样本的辨识结果准确率达到93%, 并能把检测环境中可能出现的与泄漏无关的噪声辨识为无泄漏, 而将泄漏物理过程中必然产生的与泄漏

相关的噪声辨识为有泄漏, 说明了此特征组合能够通过泄漏的物理本质识别泄漏, 满足对泄漏识别的有效性、对各种泄漏管道的普适性和对噪声的排它性。此方法在供水管道上取得了良好的效果, 对其他管道及无损检测领域也有借鉴意义。

### 参 考 文 献

- [1] 舒诗湖, 何文杰, 赵明, 等. 供水管网漏失检测技术现状与进展[J]. 给水排水, 2008, **34**(6): 114-116.  
SHU Shihu, HE Wenjie, ZHAO Ming, et al. Current application and recent development of leakage detection technologies in water supply networks[J]. Water Wastewater Engineering, 2008, **34**(6): 114-116.
- [2] Michael S. Detection of leaks in pipelines. US Patent, 5416724[P]. 1995.
- [3] QIN Wan, Daniel Koch. Multichannel spectral analysis for tube leak detection[C]// Southeastcon Proceedings IEEE, 1993: 1-4.
- [4] Osama Hunaidi, Wing T. Chu. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes[J]. Applied Acoustics, 1999, **58**: 235-254.
- [5] QU Zhigang, FENG Hao, ZENG Zhoumo, et al. A SVM-based pipeline leakage detection and pre-warning system[J]. Measurement, 2010, **43**: 513-519.
- [6] 李光海, 刘时风, 耿荣生, 等. 声发射源特征识别的最新方法[J]. 无损检测, 2002, **24**(12): 534-538.  
LI Guanghai, LIU Shifeng, GENG Rongsheng, et al. The up-to-date methods for acoustic emission source recognition[J]. Nondestructive Testing, 2002, **24**(12): 534-538.
- [7] Majid Ahadi, Mehrdad Sharif Bakhtiar. Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to acoustic emission signals[J]. Applied Acoustics, 2010, **71**(7): 634-639.
- [8] 杨进, 文玉梅, 李平. 基于相关分析和近似熵的管道泄漏声信号特征提取及辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, **30**(2): 272-279.  
YANG Jin, WEN Yumei, LI Ping. Feature extraction and identification of leak acoustic signal in water distribution pipelines using correlation analysis and approximate entropy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, **30**(2): 272-279.
- [9] YANG Jin, WEN Yumei, LI Ping. Approximate entropy-based leak detection using artificial neural network in water distribution pipelines[C]// Control Automation Robotics Vision, 11th International Conference on, 2011, 1029-1034.
- [10] 甄锦鹏. 供水管道泄漏声信号特征分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
ZHEN Jinpeng. Characteristics analysis of water supply pipeline leakage acoustic signal[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [11] 文玉梅, 张雪园, 文静, 等. 依据声信号频率分布和复杂度的供水管道泄漏辨识[J]. 仪器仪表学报, 2014, **35**(6): 15-21.  
WEN Yumei, ZHANG Xueyuan, WEN Jing, et al. Identification of water pipeline leakage based on acoustic[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, **35**(6): 15-21.
- [12] Boyko Stoimenova, Suguru Maruyama, Koshi Adachia, et al. The roughness effect on the frequency of frictional sound[J]. Tribology International, 2007, **40**(4): 659-664.
- [13] Gilsoo Cho, Chunjeong Kim, Jayoung Cho, et al. Physiological signal analyses of frictional sound by structural parameters of warp knitted fabrics[J]. Fibers and Polymers, 2005, **6**(1): 89-94.
- [14] James Lighthill. Waves in fluids[M]. New York: Columbia University Press, 1978: 327-331.
- [15] Knapp Robert T, Daily James W, Hammit Frederick G. Cavitation[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970, Chapter 2.
- [16] Langthjema M A, Moritab H, Nakamurac T, et al. A flexible rod in annular leakage flow: influence of turbulence and equilibrium offset, and analysis of instability mechanisms[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, **22**(5): 617-645.
- [17] McComb W D. The physics of fluid turbulence[M]. Oxford: Oxford University Press, 1990: 35-49.
- [18] Fuller C R, Fahy F J. Characteristics of wave propagation and energy distributions in cylindrical elastic shells filled with fluid[J]. Journal of Sound and Vibration, 1982, **81**(4): 501-518.
- [19] Fuller C R. The input mobility of an infinite circular cylindrical elastic shell filled with fluid[J]. Journal of Sound and Vibration, 1983, **87**(3): 409-427.
- [20] 路炜, 文玉梅. 供水管道泄漏声信号及传播特性[J]. 声学技术, 2007, **26**(5): 871-876.  
LU Wei, WEN Yumei. Leakage noise and its propagation in water pipeline[J]. Technical Acoustic, 2007, **26**(5): 871-876.
- [21] Cartwright D E, Longuet Higgins M S. The statistical distribution of the maxima of a random function[J]. Mathematical and Physical Sciences, 1956, **237**(1209): 212-232.
- [22] Hayashia S, Hayasea T, Kurahashib T. Chaos in a hydraulic control valve[J]. Journal of Fluids and Structures, 1997, **11**(6): 693-716.
- [23] Steven M Pincus. Approximate entropy as a complexity measure[J]. Chaos, 1995, **5**(1): 110-117.
- [24] Richman J S, Moorman J R. Physiological time series analysis using approximate entropy and sample entropy[J]. American Journal of Physiology, Heart and Circulatory Physiology, 2000, **278**(6): 2039-2049.
- [25] A Lempel, J Ziv. On the complexity of finite sequence[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1976, **22**(1): 75-81.
- [26] Yumei Wen, Manus Henry. Time frequency characteristics of the vibroacoustic signal of hydrodynamic cavitation[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2002, **124**(4): 469-475.