

# 基于 $\Phi$ -OTDR 光纤传感技术的供水 管道泄漏辨识方法\*

王大伟<sup>1</sup>, 封皓<sup>1</sup>, 杨洋<sup>2</sup>, 沙洲<sup>1</sup>, 曾周末<sup>1</sup>

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072; 2. 河北省仪器仪表工程技术研究中心 承德 067000)

**摘要:** 由于城市供水管道周边工况复杂, 如何实现对不同工况的泄漏及其他干扰振动的模式识别成为系统的关键技术。提出了采用分形盒维数和改进近似熵作为特征量的基于相位敏感的时域反射计( $\Phi$ -OTDR)分布式光纤传感进行供水管道振动检测的方法。根据泄漏孔附近空泡噪声的信号空间填充度特征, 引入分形盒维数对时域信号进行度量, 采用了一种新的寻找无标度区的办法, 使得出的盒维数参数值能够把握过电平率很高信号的特定特征根据湍流噪声信号混沌性特征; 根据湍流噪声的混沌特性, 引入近似熵复杂度对时域信号进行度量, 采用了一种新的相似容限选取方法, 使得更能体现信号随机性的大小。将去噪处理后检测信号的分形盒维数和改进近似熵同时作为二维参数平面的两个输入, 通过在该平面设置阈值范围辨识管道泄漏信号, 用以区分泄漏信号和干扰信号。对实验信号进行处理, 使用该方法对泄漏辨识的准确率能达到 96.7%, 结果表明, 采用该方法能够准确、高效地区分将供水管道泄漏信号及其他信号。

**关键词:** 泄漏检测; 光纤传感; 分形盒维数; 改进近似熵; 模式识别

**中图分类号:** TN911.7 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

## Study on leakage identification method of water supply pipeline based on $\Phi$ -OTDR optical fiber sensing technology

Wang Dawei<sup>1</sup>, Feng Hao<sup>1</sup>, Yang Yang<sup>2</sup>, Sha Zhou<sup>1</sup>, Zeng Zhoumo<sup>1</sup>

(1. School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Instrumentation Engineering Technology Research Center of the Hebei Province, Chengde 067000, China)

**Abstract:** Due to the complex working conditions around the city water supply pipeline, it is difficult to achieve pattern recognition on leakage and other interference vibration. This study proposes a method to identify leakage vibration detection by utilizing the  $\Phi$ -OTDR distributed optical fiber sensor based on fractal box dimension and improved approximate entropy. According to the signal space filling feature of cavitation noise near the leakage, the time domain signal is measured by the fractal box dimension. A new scale-free zone searching method is adopted. Then, the value of the box dimension parameters can be obtained by the high feature of the signal according to the turbulence noise signal chaotic characteristics. According to the turbulence noise signal chaotic characteristics, the approximate entropy is employed to measure the time-domain signal. A new method of selecting a similar margin is used. Hence, the improved approximate entropy can reflect the randomness of signals. The fractal box dimension and improved approximate entropy of denoised signal are utilized as the input of the two-dimensional parameter plane. By setting the threshold range in the plane, the distinction between the leakage signals and interfering signals can be realized. By processing signals detected in experiments using this method, the results show that the accuracy rate of leakage recognition can reach up to 96.7%, which indicates that this method can separate water pipeline leakage signals and other signals accurately and efficiently.

**Keywords:** leakage detection; fiber-sensing; box fractal dimension; improved approximate entropy; pattern recognition

## 1 引言

我国水资源人均占有量仅为世界水平的1/4,是一个水资源短缺的国家。同时,我国人口居住相对集中,城镇容纳了大量人口,管道供水承担了保障这些人口生活用水、工业用水安全、高效的供给任务。而根据建设部调查,我国供水管网平均漏损率在20%以上,甚至有的中小城市供水效率只有30%多,漏损率高达66%<sup>[1]</sup>。如此低的供水效率不仅对城市人口的生活工作带来了不便,由漏水引发的城市公共安全隐患也逐日增加,因此,控制和降低供水管网的漏损有重大意义。

相位敏感的时光域反射计( $\Phi$ -optical time domain reflectometry,  $\Phi$ -OTDR)分布式光纤传感系统<sup>[2-4]</sup>具有结构简单、检测距离长、可同时多个扰动进行定位、分辨率高、定位精度稳定等优点,应用在供水管道泄漏检测上可以实时监测和定位泄漏位置。然而对于检测信号处理,普通的求差值法、移动平均法等只能定位振动能量大的点,该点振动信号所蕴含的模式信息却解读不甚明朗或因为模式识别算法运算量庞大而不能应用在实时系统上。2014年,Tan D等人<sup>[5]</sup>以信号强度为识别依据在埋地环境下对人工挖掘、车辆经过以及挖掘机挖掘3种模式进行了识别研究;2014年,Zhu H等人<sup>[6]</sup>以短时过电平率为识别依据在埋墙环境下对攀爬、踢以及浇水3种模式进行了识别研究。到目前为止,研究多集中在提高 $\Phi$ -OTDR系统定位精度和增加传感长度上,而对扰动事件模式识别的研究较少,且由于 $\Phi$ -OTDR的时域信号等效采样率非常低,频域分析的方法易受复杂环境影响且准确率低。

本文通过对 $\Phi$ -OTDR泄漏信号产生的机理和由此产生的特征进行分析,通过分形盒维数和改进近似熵这两个度量时间序列复杂度的特征参量对时域信号进行量度,把握泄漏时域信号的复杂度数值特征,避开了频域分析的不利因素,实现对泄漏信号的辨识。在计算分形盒维数的过程中,采用一种新的无标度区选取办法,使得分形盒维数适用于度量泄漏时域信号这种过电平率很高的信号;在近似熵的计算过程中,采取新的相似容限选取方法,使得近似熵对相空间重构后的时间序列细节信息把握更加充分,提取出泄漏信号的混沌性特征,从而实现对泄漏信号的辨识。由于本方法只选用了两个特征向量,与需要多特征向量的方法相比计算速度更快、识别效率更高,后续分类器设计也比较简单。

分形盒维数在心电信号特征提取<sup>[7]</sup>、机械故障诊断<sup>[8-9]</sup>、爆破地震波分析<sup>[10]</sup>等领域有广泛应用,近似熵在机械设备故障诊断<sup>[11]</sup>、脑电信号检测<sup>[12]</sup>等领域应用较广,以往两者均没有被应用在 $\Phi$ -OTDR分布式光纤振动

传感信号处理中。本文创新性地将分形盒维数和近似熵应用在 $\Phi$ -OTDR分布式光纤振动传感模式辨识中,达到良好的辨识效果。

## 2 实验系统及原理

1993年Taylor H. F.等人<sup>[13]</sup>提出了 $\Phi$ -OTDR技术,其工作原理如图1所示。超窄激光器(narrow linewidth lasers, NLL)发出的激光经声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)调制成的光脉冲,由掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)放大后,通过环形器注入传感光纤。传感光纤中后向瑞利散射光在脉冲宽度内发生干涉,干涉光强通过环形器被光电探测器(photo detector, PD)检测,经放大后进入数据采集卡进行采集。

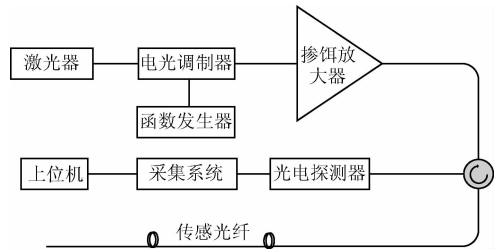


图1  $\Phi$ -OTDR 光纤传感系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of  $\Phi$ -OTDR fiber sensing system

当有扰动作用在传感光纤上时,由于弹光效应的影响,受到扰动位置的光相位产生变化,引起对应位置后向散射光的相位变化,与脉冲宽度内散射光的干涉光强也会发生相位变化。将 $\Phi$ -OTDR在不同时刻的后向瑞利散射光干涉光强曲线做差,差值曲线上光干涉信号发生剧烈变化的位置,则对应扰动发生的位置。

本试验系统采用脉冲触发采集方式进行数据采集,采样频率为50 MHz,脉冲触发频率为1 000 Hz。采集过程如下:函数发生器(function generator, FG)分别各给AOM和采集卡一个脉冲信号,AOM将超窄线宽激光调制成光脉冲,经EDFA放大后开始在光纤中传播,同时采集卡以采样频率开始采集。每一个光脉冲在光纤中传播,在各个位置都有后向瑞利散射光形成并在脉冲宽度内发生干涉,各个位置的干涉信号沿光纤后向传播被光电探测器接收,再被采集卡采集,组成了整段光纤空间内的空域信号。1 s内触发1 000个光脉冲进行探测,采集的数据对应1 000个空域信号,将其中某采样点的信号分别取出,构成了样本数为1 000的该采样点在一秒内的时域信号。本文研究的对象即为采样点的时域信号。

### 3 单采样点时域信号特征分析

由于供水管道内部压力大于管外大气压力,当管壁某处出现裂缝或小孔时,高压水从漏口处喷出会主要引发一下3种噪声源<sup>[14]</sup>:1)使得近壁区流体从层流状态转变为湍流状态,引起流体非稳定流动,造成湍流噪声;2)当管内高压水向管外喷射时,泄漏处形成低压区,水中气核在该低压区析出发生空化现象形成空泡,空泡溃灭爆破造成空泡噪声;3)液体在漏口处喷出与漏口高速摩擦引发摩擦噪声。由于供水管道中压力较大,平均压力在0.3 Mpa<sup>[15]</sup>以上,泄漏孔喷出的液体多处于临界状态,喷口液体流速不受诸如液体压力等因素的影响,液体与喷口即空气摩擦引发的噪声相对恒定。

#### 3.1 信号空间填充度特征

由于空泡生长,溃灭具有一定周期性<sup>[16]</sup>,加上周围流体的紊乱,所以在泄漏时域信号上会有不规则的起伏。泄漏稳定时,大小空泡溃灭形成的空泡噪声互相叠加,在时域信号上体现出较稳定的序列曲线填充特征。采用分形盒维数测度可以将泄漏信号的信号空间填充度特征提取出来。

##### 3.1.1 分形盒维数测度

分形学<sup>[17]</sup>是以局部和整体具有自相似的复杂事物为研究对象探索其复杂性的科学,应用在时间序列可以描述信号的不规则性和复杂性。在分形理论中,有从不同角度定义的多种分形维数的概念,如盒维数、信息维数、关联维数、相似性维数、谱维数等,其中盒维数以其计算简单、概念明晰等优点而被广泛采用。设离散振动信号 $x(j) \subset X$ , $X$ 是 $n$ 维欧氏空间 $R^n$ 上的闭集,将 $R^n$ 划分成尽可能细的网格,若 $N_\Delta$ 是网格宽度 $\Delta$ 的离散空间上集合 $X$ 的网格计数,则盒维数定义为:

$$d_b = \lim_{\Delta \rightarrow 0} (-\lg N_\Delta / \lg \Delta) \quad (1)$$

本文采用矩形盒覆盖时域曲线的算法<sup>[18]</sup>。设时间序列样本数为 $n$ ,取时间尺度为 $r$ , $X$ 轴坐标尺度为 $cr$ ( $c$ 为一常数)。求出每个 $r$ 尺度内的时间序列最大离差 $d^l = \max_{i,j} (X^i - X^j)$ ,其中 $l$ 表示第 $l$ 区间, $l \in \{1, 2, \dots, n/r\}$ ;  $X^i, X^j$ 表示在第 $l$ 区间内的 $i, j$ 时刻的采样。每段时间尺度内曲线与平行于时间轴 $t$ 的网格线相交数为 $m^l = \frac{d^l}{cr}$ ,而与垂直于 $t$ 轴的网格线相交数为1。则信号与尺

度 $r$ 的网格总相交数为 $N = \sum_{l=1}^{n/r} m^l + n/r$ 。再将时间尺度放大为 $kr$ ( $k = 2, 3, \dots, p$ ,且 $pr \leq n$ ),重复以上步骤,得到各时间尺度 $kr$ 网格下的盒子数。由于时域离散信号 $x(j)$ 的最高分辨率为采样间隔 $\Delta t$ ,所以式(1)极限无法按其定义 $r \rightarrow 0$ 求出,而当 $r \rightarrow 0$ 时, $\log N_r = -$

$d_N(X) \log r$ ,所以由以上一系列尺度为 $kr$ 的方形网格对其进行覆盖,得到各尺度下的有效覆盖网格数量 $N_{kr}$ ,通过最小二乘法得到 $-\lg(kr) \sim \lg N_{kr}$ 的拟合直线,其斜率就是该信号的分形盒维数 $D$ 。

##### 3.1.2 信号的归一化

由于对时间序列进行盒维数计算时最小网络方格的时间轴跨度 $r$ 为1, $X$ 轴坐标尺度为 $cr$ 。对某两个幅值跨度范围相差很大的时间序列,无论 $c$ 取何值,网络方格对于幅值跨度大的曲线的相对精度就要比幅值跨度小的曲线高。例如取 $r=2, c=1$ ,则 $cr=2$ ,此网络方格对于一个值在 $[0, 1]$ 之间变化的曲线进行覆盖后,由于网格的纵向宽度为 $cr$ ,曲线没有穿过任何一个网格的上下边界,即纵向网格全部被忽略,计算得到的相交网络方格数必然为 $\frac{n}{r} = \frac{1000}{2} = 500$ ,此时对于不同的数值在 $[0, 1]$ 之间变化的曲线计算盒维数表现不出区分度。为了消除幅值大小对分形盒维数计算的影响,有必要对所有序列在计算分形盒维数之前进行归一化处理。

选取序列绝对值之和、序列标准差、序列复制范围作为备选归一化因子,考察22个数据文件将计算得到的分形盒维数与归一化因子作相关处理,得到的相关系数曲线如图2所示。结果表明分形盒维数值对整个序列绝对值之和有最大的正相关性,所以选择序列绝对值之和作为归一化因子,将每个序列绝对值之和进行统一。

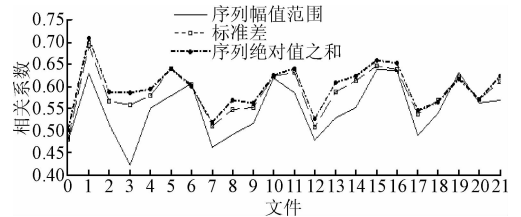


图2 归一化因子与盒维数的相关系数曲线

Fig. 2 The correlation curve of normalization factor and box dimension

归一化方法为 $x' = a \times \frac{x}{\sum |x|}$ , $x$ 为原序列元素, $x'$

为归一化后对应序列元素, $a$ 为一常数。

##### 3.1.3 无标度区的选取

由于本试验系统单采样点采样频率是1000 Hz,1 s内时域信号点数太少,且滤掉直流信号后过电平率很高,信号细节包含的信息很多且不可忽略。这不像分形盒维数应用较广的心电信号特征提取<sup>[19]</sup>等领域,信号过电平率低,信息特征从大尺度范围信号提取出来,用尺度较大的网络方格覆盖后能够准确地把握心电信号的特征,即在 $-\lg(kr) \sim \lg N_{kr}$ 关系图(见图3)中 $kr$ 较大的一些点中选取部分线性关系较好的点集进行最小二乘法线性拟

合,即可得到描述心电图特征比较合理的分形盒维数<sup>[20]</sup>。

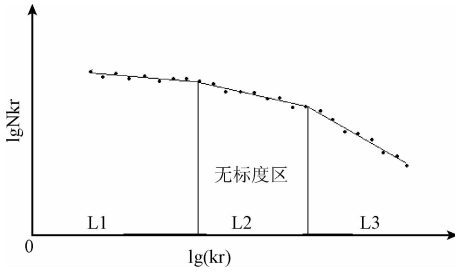


图3 无标度区选择

Fig.3 Selection of scale-free zone

如图3所示,一般在  $-\lg(kr) \sim \lg N_{kr}$  关系图中有3段折线,取中间L2段为无标度区。这些点属于  $kr$  较大的点,即用比较大的网络覆盖后得到的盒子数量与盒子尺度的对数关系。这种选取无标度区的方式只适合类似心电图、地震波肉眼明显能看到大尺度特征的信号,对于过电平率较高的信号特征把握度不高。比如对图4和5所示的Φ-OTDR点噪声信号和泄漏信号选取  $kr$  较大的点进行拟合就不能很好地区分开来。所以本算法在选取无标度区进行拟合时,取  $r=1, k$  等于1、2、4、5( $kr$ 需能被序列数据数  $n=1000$  整除,  $k=1, 2, 4, 5$  是网络方格最小的4个尺度。)时的  $-\lg(kr) \sim \lg N_{kr}$  关系图中的点进行最小二乘法线性拟合,取其斜率。

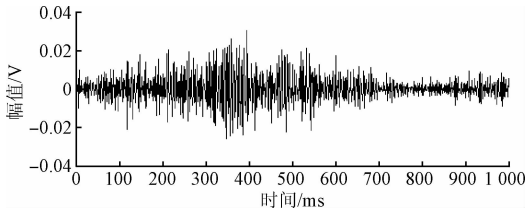


图4 泄漏信号

Fig.4 Leakage signal

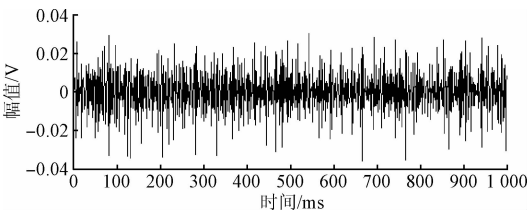


图5 电噪声信号

Fig.5 Electrical noise signal

如表1所示,选取L2区为无标度区时不能区分开泄漏信号和电噪声信号,说明用L2区域下的较大网络覆盖会忽略掉泄漏信号特征;而选取4个最小尺度做为无标度区能够很好地区分泄漏信号和电噪声信号。这表明表明

在同一次网格覆盖后,选取较小的网格尺度作为无标度区对类似泄漏这种信号的细节特征把握性更好一些。

表1 不同无标度区选则的两种信号分形盒维数

Table 1 Fractal box dimension under different scale-free zone selection of two types of signal

分形盒维数值	选取中间L2段作为无标度区	选取最小的4个尺度网格作为无标度区
泄漏信号	1.743 4 ~ 1.764 9	1.182 1 ~ 1.231 8
电噪声信号	1.744 2 ~ 1.777 5	1.264 9 ~ 1.315 3

根据文献[21],信号盒维数  $D$  越大,信号局部起伏越大,信号相邻点之间的相关性越弱,意味着信号频谱结构中中高频成分越多;盒维数  $D$  越小,信号的波动小,信号的相邻点之间相关性强,相应的,信号中高频分量少。而对采集到的Φ-OTDR后向散射相位时域信号来说,不同振动模式的信号有着不同的分形盒维数,所以可以通过分形盒维数的大小将振动模式分类。

本节对一种信号分形盒维数测度计算方法中无标度区选择进行了修正,使得该方法不仅可以对类似心电图、地震波形等大尺度特征比较明显的信号进行量度,也可以对肉眼看不出明显特征、信号特征隐藏在尺度比较小的细节中的信号类型进行量度。

### 3.2 信号的改进近似熵复杂度特征

#### 3.2.1 泄漏信号的混沌性特征

发生泄漏时,泄漏孔附近流场变化复杂,流体的流动状态从层流变为紊乱的湍流。从宏观(大尺度)出发,湍流的流动在外界影响下有一定方向性和有序性;从微观(小尺度)出发,湍流中小涡旋的旋度矢量随机性极强,表现出强烈的无序性和不确定性<sup>[22]</sup>,是混沌现象的特征。湍流系统属于混沌系统,带有湍流噪声的泄漏噪声信号则是作为混沌的离散情况表现出的混沌时间序列,自然而然的具备了混沌时间序列的特征,识别泄漏信号可以从区分时域信号序列曲线的混沌性入手。

#### 3.2.2 近似熵复杂度

20世纪90年代初,Pincus S. M.<sup>[23]</sup>从衡量时间序列复杂性的角度提出了近似熵(approximate entropy, ApEn)的概念。ApEn是一个非负测度参数,采用常用在时间序列混沌性判定的相空间重构方法,根据序列自相似程度确定信号整体的复杂程度,是适用于短时间序列的混沌性特征复杂度参数。ApEn主要用来度量信号中产生新模式概率的大小,产生新模式概率越大,相应的近似熵也越大。对于给定的  $N$  点时间序列  $\{u(i)\}$ ,其近似熵通过如下步骤计算得到(其中  $m$  是预先选定的模式维数,  $r$  是预先选定的相似容限)。

1)将序列  $\{u(i)\}$  按顺序组成  $m$  维向量  $X(i)$ ,即

$\mathbf{X}(i) = [u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)]$ ,  
 $i = 1 \sim N - m + 1$ .

2) 对每一个  $i$  值计算矢量其余矢量  $\mathbf{X}(i)$  与  $\mathbf{X}(j)$  之间的距离为  $d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] = \max_{k=0 \sim m-1} (|x(i+k) - x(j+k)|)$ 。

3) 对于给定相似容限  $r (r > 0)$ , 对每一个  $i$  值统计  $d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] < r$  的数目, 此数目与总的向量个数  $N - m + 1$  的比值记作  $C_i^m(r)$ , 即  $C_i^m(r) = \{d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] < r\}$  的数目  $\div (N - m + 1)$ 。

4) 先将  $C_i^m(r)$  取对数, 再求其对所有  $i$  的平均值, 记作  $\Phi^m(r)$ , 即  $\Phi^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_i^m(r)$ 。

5) 再对  $m+1$ , 重复步骤 1) ~ 4), 得到  $\Phi^{m+1}(r)$ 。

6) 此序列的近似熵为  $\text{ApEn}(m, r, N) = \Phi^m(r) - \Phi^{m+1}(r)$

ApEn 对相似容限以外的“不可重复”特征敏感, 信号越复杂, 不可重复度越高, 近似熵越大; 信号越简单或有越多相似容限内近似的相空间矢量, 则近似熵越小。文献[24]中一般都提到根据经验  $r = (0.1 \sim 0.25)STD$  ( $STD$  为序列的标准差) 时的近似熵具有较合理的统计特性。

### 3.2.3 改进近似熵

如图 6 所示, 以第 4、5 个采样点所组成的二维向量为基准, 20 为相似容限时, 前后两点分别落在第 4 点上下 20 区间和第 5 点上下 20 区间的二维向量入选为该基准向量在相似容限 20 意义下的相似向量, 如图 6 中粗线所示, 除去第一条为基准向量, 共有 4 个入选为该向量的相似向量。根据近似熵定义, 算了二维的相似向量个数, 还要算  $m+1$ , 即三维相似向量个数。注意到, 三维向量相似即连续 3 点折线段每点都相似容限内近似, 实际只需在  $m=2$  时入选的线段后再考察新引入的一点是否相似容限内近似即可, 即以基准向量后一点做相似容限区间, 考察 4 个相似向量后一点是否落在容限空间内。

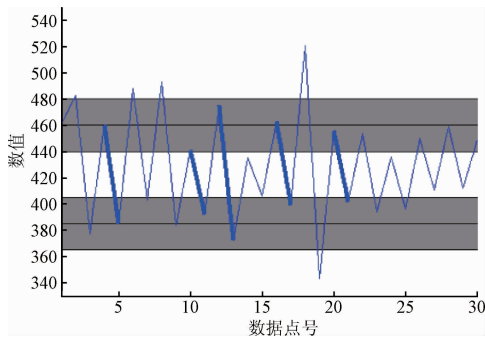


图 6 单个向量相似

Fig. 6 Similarity of a single vector

如图 7 所示, 只有一个向量与基准向量三维容限内相似。当全部序列共用同一个相似容限时, 不妨设为该

序列标准差的 1/4, 幅值较小的序列全部淹没在相似容限内, 当中某些形状迥异的矢量也会被认为是相似矢量, 造成该矢量的特征被忽略掉。

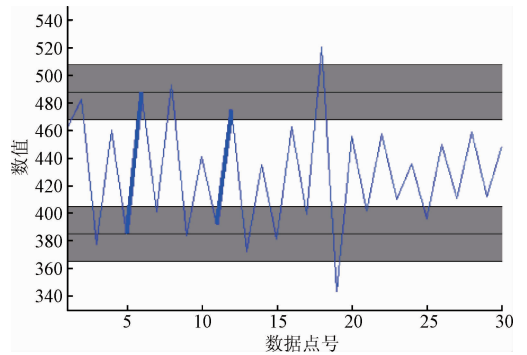


图 7 第 3 点相似

Fig. 7 Similarity of the third dot

如图 8 所示, 对于一个二维相空间矢量, 两个点的大小差远小于该序列相似容限, 当以第 14、15 点组成的二维向量为基准向量时, 由于该向量两点差很小, 造成上下两点各自的容限空间相互重叠。向量的两点差越小, 其容限空间相对于它的大小而言就越大, 序列包含的可能的相似向量与基准向量差别就越大, 导致两个丝毫不相近的向量会被入选成为相似向量, 造成两点差值小的信号特征被忽略。这有悖于近似熵定义的初衷, 即确定一个时间序列在模式上自相似程度的大小。

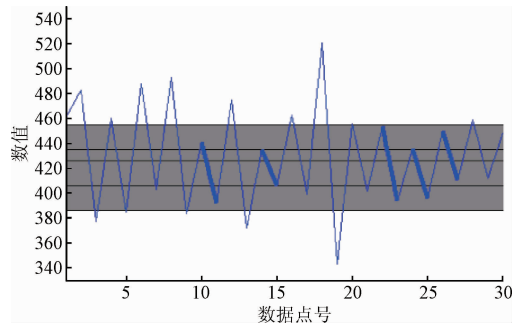


图 8 短向量的相似容限

Fig. 8 Similar margin of short vectors

为了使每个信号段的信息都被同等程度的参考, 信号的特征不会被容限空间所淹没, 本文提出了针对相似容限定义的改进近似熵。将传统的整个序列使用同一个相似容限摒弃, 使相似容限  $r$  与基准向量两点差的大小相关。例如选择相似容限为 0.1 倍的基准向量两点差绝对值, 每个向量的容限相似空间都和它本身成正比, 每个信号段的特征都被同等程度的参考。这样计算出的近似熵更能体现序列复杂度信息, 也更加贴合它的定义。

本节对近似熵计算方法中相似容限的选取做了重新定义, 消除了某些向量序列与它本身相似向量差别过大



的不足,更准确的度量信号的复杂度。

## 4 实 验

辨识的信号样本来源于近期对PVC水管泄漏的工程实验,试验现场如图9所示。



图9 承德试验现场

Fig. 9 Test field picture in Chengde

管道内径为100 mm,泄漏孔直径为3 mm,向管道内施加0.17 MPa的水压,模拟包括掩埋、裸露、覆盖等几乎自来水管能遇到的各种工况。在泄漏试验数据中挑选20个泄漏点的时域信号样本,在敲击试验中挑选20个敲击点时域信号样本,在跺脚试验中挑选20个跺脚点时域信号样本,再在前后反射峰中间随机挑选20个样本,视为环境噪声,进行分形盒维数和近似熵计算。

如表2所示,无论是泄漏信号还是其他入侵信号,其分形盒维数值均比环境噪声以及电噪声信号要小,说明在统一标准归一化后环境噪声及电噪声信号对二维空间的填充度大,可以借此将入侵及泄漏信号与干扰信号区别开来。但同时注意到泄漏信号与跺脚信号有重叠的部分,说明在对信号空间填充度上区分不开泄漏和跺脚信号。

表2 四类信号的分形盒维数值对比

Table 2 Fractal dimension of four types signal

信号类型	分形盒维数	信号类型	分形盒维数
泄漏信号	1.182 ~ 1.231	跺脚信号	1.178 ~ 1.257
敲击信号	1.061 ~ 1.202	环境噪声信号	1.287 ~ 1.451

如表3所示,泄漏信号和跺脚信号的改进近似熵数值比环境噪声信号的要大,而敲击信号和环境噪声有一部分重叠。其中泄漏信号的改进近似熵最大,说明泄漏信号的随机性最强,且其和跺脚信号的近似熵值不在一个区间内。故结合分形盒维数和改进近似熵,将两参数所在参数平面划分阈值空间,以此来辨识泄漏信号。对在泄漏监测中采集到的信号选取150个进行辨识,结果显示有5个数据发生了漏判,对泄漏信号的辨识率达到96.7%。漏判的原因是可进行度量的时域信号太短,时间段内空泡噪声或湍流噪声随机性较大。选取更长的时间序列可以获得统计平均意义上的空泡噪声和湍流噪声,对泄漏信号的识别率能得到提升,但系统的实时性会降低。

表3 四类信号的改进近似熵对比

Table 3 Improved entropy of four types of signal

信号类型	改进近似熵	信号类型	改进近似熵
泄漏信号	1.276 ~ 1.311	跺脚信号	1.229 ~ 1.255
敲击信号	1.173 ~ 1.208	环境噪声信号	0.846 ~ 1.198

本方法是基于泄漏发生时泄漏孔附近空泡噪声和湍流噪声在对信号时间序列的特征分析而来,而形成空泡的空化作用和湍流混沌程度受泄漏孔大小和水压的影响,泄漏孔和水压越大,空化现象越明显,湍流混沌程度也越大,泄漏辨识率越高;泄漏孔和水压越小,空化现象越弱,湍流混沌程度也越小,信号的泄漏特征越不明显,可能会造成误判漏判,泄漏辨识率越低。

另外,对于分形盒维数的计算量,本算法只需要计算4次单一盒径下的盒子数(对应4个最小盒子大小),之后再行最小二乘法拟合,计算量小,可以实现与采集同步实时计算处理;而对于改进近似熵,注意到针对某一基准向量,当 $m=3$ 时,要求连续3点连成的折线要与以基准向量开始的连续3点折线每个点都落在其相似容限内部这实际上只要在 $m=2$ 时的入选模式后再考查一点,即第三点是否在其相对应的相似容限内。这大大的简化了计算复杂度,为进一步的信息挖掘奠定了基础。

## 5 结 论

从泄漏信号产生的流体动力学机理触发,分析了空泡溃灭和湍流系统对信号特征的影响,采用了分形盒维数和改进近似熵对这些特征进行描述。在对信号分形盒维数测度计算方法中对无标度区选择进行了矫正,使得该方法可以对肉眼看不出明显特征、信号特征隐藏在尺度比较小的细节中的泄漏信号进行量度。在对信号的近似熵计算过程中,对相似容限的选取做了重新定义,使得该算法更加贴合近似熵本身的定义,消除了某些向量

序列与它本身相似向量差别过大的不足,更准确地度量信号的复杂度,把握了由于湍流噪声的混沌性,造成的时间序列相关性弱的特征。结合分形盒维数和改进近似熵,对泄漏信号的辨识达到了96.7%,实现了对泄漏准确、高效的辨识,为信号处理领域扩展出了一种新方法,具有一定指导意义。

## 参考文献

- [1] 杨进. 供水管道泄漏检测定位中的信号分析及处理研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.  
YANG J. Study on signal analyzing and processing for leak detection and location in water pipelines [D]. Chongqing:Chongqing University,2007.
- [2] SHI Y, FENG H, AN Y, et al. Research on wavelet analysis for pipeline pre-warning system based on phase-sensitive optical time domain reflectometry [C]. IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM), 2014:1177-1182.
- [3] LI X, SUN Q, WO J, et al. Hybrid TDW/WDM-based fiber-optic sensor network for perimeter intrusion detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8):1113-1120.
- [4] 刘建霞.  $\Phi$ -OTDR 分布式光纤传感监测技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013(8):193-198.  
LIU J X. Research progress of distributed optical fiber sensing and monitoring technology based on  $\Phi$ -OTDR[J]. Laser & Optoelectronics Progress | Las Optoelect Prog, 2013(8):193-198.
- [5] TAN D, TIAN X, SUN W, et al. An oil and gas pipeline pre-warning system based on  $\Phi$ -OTDR [C]. International Conference on Optical Fiber Sensors, 2014:91578 W-4.
- [6] ZHU H, PAN C, SUN X. Vibration pattern recognition and classification in OTDR based distributed optical-fiber vibration sensing system [C]. International Society for Optics and Photonics, 2014:2978-2982.
- [7] 雷鸣. 基于非线性分形理论的心音信号分析研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.  
LEI M. The study of heart sound analysis based on nonlinear fractal theory [D]. Chongqing : Chongqing University, 2012.
- [8] 郝研,王太勇,万剑,等. 基于级联双稳随机共振和多重分形的机械故障诊断方法研究[J]. 振动与冲击, 2012,31(8):181-185.  
HAO Y, WANG T Y, WAN J, et al. Mechanical fault diagnosis based in cascaded bistable stochastic resonance and multi-fractal [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(8):181-185.
- [9] 郝研,王太勇,万剑,等. 分形盒维数抗噪研究及其在故障诊断中的应用[J]. 仪器仪表学报,2011,32(3):540-545.  
HAO Y, WANG T Y, WAN J, et al. Research on fractal box dimension anti-noise performance and its application in fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3):540-545.
- [10] 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):1223-1229.  
WEN Y M, ZHANG X Y, WEN J, et al. Identification of water pipeline leakage based on acoustic signal frequency distribution and complexity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6):1223-1229.
- [11] 胥永刚,李凌均,何正嘉. 近似熵及其在机械设备故障诊断中的应用[J]. 信息与控制, 2002, 31(6):547-551.  
XU Y G, LI L J, HE ZH J. Approximate entropy and its applications in mechanical fault diagnosis [J]. Information and Control, 2002, 31(6):547-551.
- [12] FLEISHER L A, PINCUS S M, ROSENBAUM S H. Approximate entropy of heart rate as a correlate of postoperative ventricular dysfunction [J]. Anesthesiology, 1993, 78(4):683-692.
- [13] TAYLOR H F, LEE C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing; US, US 5194847 A[P]. 1993.
- [14] 苏天一,石志标. 液体管道泄漏的流场模拟与空泡噪声分析[J]. 东北电力大学学报, 2013, 33(3):35-37.  
SU T Y, SHI ZH B. Flow field simulation and bubble noise analysis of liquid pipeline leakage flow field simulation and bubble noise analysis of liquid pipeline leakage [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2013, 33(3):35-37.
- [15] 吴珊,刘彦辉,张申海,等. 供水管道压力调控对漏水量影响的试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3):27-29.  
WU SH, LIU Y H, ZHANG SH H, et al. Experimental study on the effect of water supply pipeline pressure regulation on leakage [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3):27-29.
- [16] 蒲中奇,张伟,施克仁,等. 双空泡溃灭及空化噪声的建模[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2005, 45(11):1450-1452.  
PU ZH Q, ZHANG W, SHI K R, et al. Noise generation during the simultaneous collapse of two bubbles [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(11):1450-1452.
- [17] MANDELBROT B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension [J].

- Science, 1967, 156(3775):636-638.
- [18] 王炳雪, 史忠科, 吴方向. 时间序列曲线盒维数的一种快速算法[J]. 系统工程, 2000, 18(4):68-72.  
WANG B X, SHI Z K, WU F X. A Fast algorithm for curve box dimension of time series [J]. System Engineering, 2000, 18(4):68-72.
- [19] 郑会永, 肖田元, 韩向利, 等. 心电信号的混沌分形特性分析[J]. 清华大学学报:自然科学版, 1999, 39(9):103-105.  
ZHENG H Y, XIAO T Y, HAN X L, et al. Chaotic fractal analysis of ECG signals [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1999, 39(9):103-105.
- [20] 瞿艳阳, 胥永刚, 何正嘉. 离散振动信号分形盒维数的改进算法和应用[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(3):373-375.  
ZI Y Y, XU Y G, HE ZH J. Fractal box dimension of discrete vibration signals: Improved algorithm and applications[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2001, 20(3):373-375.
- [21] 钟明寿, 龙源, 谢全民, 等. 基于分形盒维数和多重分形的爆破地震波信号分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1):7-11.  
ZHONG M S, LONG Y, XIE Q M, et al. Analysis of blasting seismic wave signal based on fractal box dimension and multifractal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(1):7-11.
- [22] 沈学会, 陈举华. 分形与混沌理论在湍流研究中的应用[J]. 河南科技大学学报:自然科学版, 2005, 26(1):27-30.  
SHEN X H, CHEN J H. Application of fractal and chaos theory in turbulence study [J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2005, 26(1):27-30.
- [23] PINCUS S M. Approximate entropy as a measure of system complexity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1991, 88(6):2297-301.
- [24] 洪波, 唐庆玉, 杨福生, 等. 近似熵、互近似熵的性

质、快速算法及其在脑电与认知研究中的初步应用[J]. 信号处理, 1999(2):100-108.

HONG B, TANG Q Y, YANG F SH, et al. ApEn and cross-APEn: Property, fast algorithm and preliminary application to the study of EEG and cognition [J]. Signal Processing, 1999(2):100-108.

## 作者简介



王大伟, 2014 年于南华大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为  $\Phi$ -OTDR 分布式光纤传感。

E-mail:903058046@qq.com

**Wang Dawei** received his B. Sc. degree in 2014 from Nanhua university. Now he is a master candidate in Tianjin University. His main research interest the  $\Phi$ -OTDR distributed fiber sensing system.



封皓, 分别在 2006 年和 2011 年于天津大学获得学士学位和博士学位, 现为天津大学讲师, 主要研究方向为光纤传感技术、测控技术与仪器、信号分析与处理。

E-mail:fenghao@tju.edu.cn

**Feng Hao** received his B. Sc. degree in 2006 from Tianjin University, and received his Ph. D. degree in 2011 from Tianjin University. Now he is a lecture at Tianjin University. His main research interests include optical fiber sensing technology, measurement and control technology and instrumentation, signal analysis and processing of teaching and research work.



杨洋, 1990 年于河北师范学院获得学士学位, 1997 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2013 年于天津大学获得博士学位, 现为承德石油高等专科学校教授, 主要研究方向为光纤检测技术。

E-mail:yangy1958@sohu.com

**Yang Yang** received his M. Sc. degree in Hebei Normal University in 1990, M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1997 and Ph. D. degree from Tianjin University in 2013. Now he is a professor at Chengde Petroleum College. His main research interest is optical fiber detection technology.