

# 大口径天然气管道音波信号的降噪方法<sup>\*</sup>

梁伟<sup>1</sup>, 张来斌<sup>1</sup>, 郭磊<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院 北京, 102249)

(2. 中石油昆仑燃气公司 北京, 100007)

**摘要** 针对大口径天然气管道运行的非线性系统的特点,利用局部投影降噪方法对高含噪声的音波信号进行降噪处理。介绍了局部投影降噪方法的理论基础、算法步骤和数学模型,对该算法中的关键参数嵌入维数和时间延迟分别进行了说明,并用相应的方法进行求解计算。对现场3种不同工况的原始音波数据进行降噪分析,结果显示信噪比提高了20.7~38.2 dB,说明了局部投影降噪方法对音波信号降噪的有效性和实用性,能实现噪声与特征信号的正确分离。

**关键词** 大口径;天然气管道;泄漏检测;音波;局部投影降噪法

**中图分类号** TE973.6

## 引言

大口径天然气管道发生泄漏时将会产生连续音波信号<sup>[1]</sup>。该信号中混杂有大量强背景噪声,影响数据的分析效果,需要对信号进行降噪处理。传统的降噪算法(如低通、高通滤波器等)都是基于线性系统建立的,对非线性信号的降噪效果很差。天然气管道在运行过程中是复杂的非线性系统,当大口径天然气管道出现破裂、泄漏尤其是小泄漏时,传统降噪方法不能满足要求,易造成误报和漏报。小波降噪是一种常用的混沌去噪方法,但简单地利用小波变换技术对音波信号进行降噪处理,效果不很理想,有时不能满足工程的需要。局部投影降噪法是基于非线性系统而建立的,尤其适用于微弱信号分离;因此,本研究利用局部投影法结合小波变换理论共同对音波信号进行降噪处理。首先,利用局部投影降噪法去除音波信号中大量的背景噪声,获取含有少量随机噪声的音波序列;然后,利用小波变换理论,提取弱特征信号,突出信号突变拐点。

## 1 局部投影降噪理论

局部投影降噪法是将时间序列通过相重构,在高维的相空间上将背景信号、特征信号和噪声信号

分解到不同的子空间上,利用子空间的重构,分离出背景信号及特征信号,同时抑制时间序列中的随机噪声分量。该方法能很好地保留弱周期成分,是一种有效的非线性降噪算法。

令离散音波时间序列  $X$  为

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (1)$$

$X$  由两部分组成,分别为特征信号  $S$  和加法噪声信号  $\eta$ ,即  $X = S + \eta$ 。因此,降噪的目的就是从  $X$  中消除  $\eta$ ,获取特征信号  $S$ 。

传统的低维空间难以揭示大口径天然气管道复杂的动力学特性,需要应用相空间重构技术对其进行描述。在动力系统中,对于任何一组时间序列  $X$ ,均可将其重构为一个与系统动力学行为为微分同胚的  $m$  维相空间,即重构后的  $m$  维相空间具有与系统相同的动力学特征<sup>[2]</sup>。根据 Takens 嵌入定理<sup>[3]</sup>,令嵌入维数为  $m$ ,延迟时间为  $\tau$ ,则重构相空间矩阵为

$$X_i^T = [x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}] \quad (2)$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, M; M = N - (m-1)\tau; M$  为重构相空间矩阵中的向量个数;  $m$  维列向量  $X_i$  为第  $i$  个相点,表征相空间的一个态。

通常情况下,不知道大口径天然气管道系统的真实维数,进行相空间重构时一般选取较大的嵌入维数 ( $m \geq 2D + 1$ ),  $D$  为音波序列的混沌吸引子维数。因此,重构后的相空间必定包含一个由特征向量张成的局部线性子空间以及一个由噪声分量形成的

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(编号:51005247);国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(编号:2008AA06Z209);北京市科技新星计划资助项目(编号:2010B068);北京市教委共建项目

收稿日期:2011-05-11;修改稿收到日期:2011-08-04

零子空间。局部投影降噪的目的就是识别这两个空间,还原与之对应的特征信号和噪声分量,并对噪声分量加以剔除。

局部投影降噪的基本思路为:对于相空间中的每一个相点  $\mathbf{X}_i$ ,搜索在邻域半径  $\epsilon$  范围内的所有相点,这些相点构成邻域区间  $\mu_i$ ,根据邻域区间内的所有相点求邻域质心以及协方差矩阵。该矩阵较大和较小的特征值分别对应着吸引子的主要方向和噪声方向,较小的特征值对应的特征向量可构成正交投影空间,因此向这个空间投影就可以获得噪声成分并加以去除。具体步骤如下。

1) 设定延迟时间和嵌入维数,按式(2)对采样音波序列进行相空间重构,得到  $M$  组  $m$  维空间相点。

2) 确定每个相点的  $\mathbf{X}_i$  的邻域  $\mu_i$  以及邻域质心  $\bar{\mathbf{X}}_i$ 。以  $\mathbf{X}_i$  为观测点并计算该点与其他所有相点  $\mathbf{X}_j$  的欧氏距离  $d_{ij}$

$$d_{ij} = \|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^m [x_{i+(k-1)\tau} - x_{j+(k-1)\tau}]^2} \quad (3)$$

其中:  $i, j = 1, 2, \dots, M$ , 且  $i \neq j$ 。

对于给定的邻域半径阈值  $\epsilon$ ,若  $d_{ij} < \epsilon$ ,则认为相点  $\mathbf{X}_j$  在相点  $\mathbf{X}_i$  的邻域  $\mu_i$  范围内,为一个邻域点。令  $\mu_i$  内所有邻域点  $\mathbf{X}_j$  的个数为  $K$ ,则相点  $\mathbf{X}_i$  的邻域质心为

$$\bar{\mathbf{X}}_i = \frac{1}{K} \sum_{\mathbf{X}_j \in \mu_i} \mathbf{X}_j \quad (4)$$

3) 计算邻域  $\mu_i$  内的协方差矩阵  $\mathbf{C}_i$  以及投影矩阵  $\mathbf{V}_i$ 。当前相点  $\mathbf{X}_i$  的邻域矩阵

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}}_i \quad (5)$$

构造协方差矩阵  $\mathbf{C}_i$

$$\mathbf{C}_i = (\mathbf{R}\mathbf{A}_i)(\mathbf{R}\mathbf{A}_i)^\top \quad (6)$$

其中:  $\mathbf{R}$  为  $m \times m$  维对角权矩阵。

对角元素  $R_{11}$  和  $R_{mm}$  取值较大,如选为 100 或者更大,其余对角元素为 1。计算  $\mathbf{C}_i$  按降序排列的特征值  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$  以及对应的单位正交特征向量  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_m$ 。在这些特征值中,必定存在一个序数  $q$ ,使得  $\lambda_q / (\lambda_q + 1)$  为最大值,  $q$  为整数且  $1 \leq q \leq m$ ,则  $q$  以及  $p = m - q$  分别对应着低维子空间以及零子空间的维数。低维子空间分量由特征信号引起,而零子空间的分量为噪声所引起,是应去除的对象<sup>[4]</sup>。  $p$  个最小特征值对应的特征向量构成投影矩阵  $\mathbf{V}_i$

$$\mathbf{V}_i = \sum_{j=m-p+1}^m \mathbf{v}_j \mathbf{v}_j^\top \quad (7)$$

4) 将相点  $\mathbf{X}_i$  的邻域矩阵  $\mathbf{A}_i$  向式(7)所描述的

正交投影空间进行投影,计算噪声成分  $\eta_i$

$$\eta_i = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{V}_i (\mathbf{R}\mathbf{A}_i) = \mathbf{R}^{-1} \left( \sum_{j=m-p+1}^m \mathbf{v}_j \mathbf{v}_j^\top \right) [\mathbf{R}(\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}}_i)] \quad (8)$$

因此,相点  $\mathbf{X}_i$  的修正值为  $\hat{\mathbf{X}}_i = \mathbf{X}_i - \eta_i$ 。

5) 所有相点修正值  $\hat{\mathbf{X}}_i$  构成修正相空间,然后利用 Takens 定理的逆过程还原采样序列,即可获得一次投影降噪后的信号。

6) 重复步骤 1~5,直到分离出大量背景噪声,获得含有少量随机噪声的弱音波特征信号。

## 2 参数分析

### 2.1 嵌入维数

一般地,嵌入维数  $m$  不能取得过小也不能取得过大。  $m$  取值过小不能完备地描述流行中吸引子的形态,从而使吸引子发生畸变,造成降噪后的特征信号也发生畸变。  $m$  取值过大则会影响算法效率,从而给在邻域内寻找邻近点的个数带来困难。选择合适的嵌入维数  $m$  时必须满足<sup>[5]</sup>:

1) 嵌入变换可能会使轨道变形,但它与原状态轨道是等价的;

2) 嵌入变换是一个一一对应的光滑映射,它不改变轨道上点的次序,并且保留了原来的方向;

3) 若原空间轨道是闭合的,则经过映射后的嵌入空间仍然是闭合的;

4) 必须保留原空间固定点的稳定特性。

通常情况下,嵌入维数根据奇异吸引子维数  $D$  进行选取,  $m \geq 2D + 1$ 。而奇异吸引子的维数主要有关联维数、Lyapunov 维数以及信息维数等。本研究应用的是根据关联维数求取嵌入维数  $m$ ,对应算法为饱和关联维数(G-P)法,即当嵌入维数  $m$  增加时,关联指数  $D_m$  也会随之增加,直到饱和,这个饱和的关联指数  $D_m$  即为关联维数  $D$ 。具体过程如下。

给定一个较小的嵌入维数  $m$ ,选择不同的邻域半径  $r$  ( $r$  充分小),计算相应的关联积分  $C_m(r)$

$$C_m(r) = \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \theta[r - \|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|_\infty] \quad (9)$$

其中:  $\theta(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0) \\ 1 & (x > 0) \end{cases}$ 。

利用最小二乘法对双对数关系  $\log C_m(r) \sim \log r$  中的直线段进行拟合,该拟合直线段的斜率即为对应于当前  $m$  值的关联指数  $D_m$ 。关联指数随着嵌入维数的增加而增大,最后达到一个饱和值;因此,继续不断增加  $m$  并计算  $D_m$ ,直到  $D_m$  达到饱和值  $D$ ,这个

$D$  值就是所求的关联维数,然后根据关系式  $m \geq 2D+1$  就可以求出最小嵌入维数。需要注意的是,计算关联积分时,  $r$  选取不能过大和过小。  $r$  过大,关联积分为1;  $r$  过小如趋近于0,则关联积分为0。这两种情况都不能反应系统的内部性质,没有意义。

## 2.2 延迟时间

在相空间重构的过程中,延迟时间  $\tau$  的取值同样十分重要。从嵌入定理及重构公式(2)可以看出,只要满足维数条件,  $\tau$  的取值只要满足相空间矩阵的数学意义即可。

实际上,  $\tau$  取值的恰当与否对信号降噪有直接影响。  $\tau$  的选择取决于相空间重构的相关维数,相关维数越小说明所选择的  $\tau$  越能反映吸引子的形态。若  $\tau$  取值过小,引起延迟矢量的不同元素之间强相关,坐标几乎一致,重构轨迹被挤压在相空间的主对角线附近,产生冗余现象。若  $\tau$  取值太大,各坐标之间变得不相关,轨迹在相空间中会出现间断现象,导致系统相图失真,无法获得有用的信息。  $\tau$  的准确计算比较困难,目前普遍采用时间序列自相关函数的第1个过零点和时间延迟互信息的第1个最小点作为对延迟时间  $\tau$  取值的依据<sup>[6]</sup>。其中,自相关函数法较为成熟<sup>[7]</sup>,当自相关函数下降到初始值的  $1-e^{-1}$  倍时,所得到的时间即为所求延迟时间  $\tau$ 。但该方法只计算了序列的线性关系,不适合高维空间的非线性运算。互信息法的计算效果优于自相关法,但计算量庞大,算法复杂,在海量音波序列数据中的应用较为困难;因此,本研究应用改进的自相关法计算延迟时间  $\tau$ ,引入非线性相关函数。具体过程如下。

1) 利用线性相关函数检测状态之间的线性相关性

$$R_x(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x}_i)(x_{i-\tau} - \bar{x}_i) \quad (10)$$

2) 利用非线性相关函数检测状态之间的非线性相关性

$$R_{x^2}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i^2 - \bar{x}_i^2)(x_{i-\tau}^2 - \bar{x}_i^2) \quad (11)$$

3) 计算延迟时间  $\tau = \min(\tau_x, \tau_{x^2})$ 。其中:  $\tau_x, \tau_{x^2}$  分别为  $R_x(\tau), R_{x^2}(\tau)$  的第1个极小值。

## 2.3 局部投影-小波变换联合降噪

大口径天然气管道的微小、缓慢破裂泄漏过程中,产生的音波信号十分微弱,与背景噪声或背景信号极为相似,具有很强的隐蔽性,因此需要较好的弱信号提取方法。而单一的降噪方法有时不能达到理想

效果<sup>[8]</sup>,可以将不同方法共同使用,降噪效果最大。

局部投影降噪算法实质上是利用空间线性变换方法,将原始一维时间空间的信号序列拓展到另一个  $m$  维相空间中,然后将相空间进行分解得到不同的子空间,从而获得在各子空间上的分解信号。在这些分解信号中,特征值较大的部分主要是由原一维时间序列中占主要成分的信号引起的,特征值较小的部分是由微弱信号和随机噪声组成的。此外,小波分解技术也是一种很好的混沌降噪<sup>[9]</sup>方法,通过选定小波基函数及分解层数对信号进行分解,利用阈值进行量化处理,通过各层的小波系数进行信号重构来实现噪声与特征信号分离,具有突出尖峰变化等优点。因此,在实际使用局部投影降噪算法时,可以采用多次局部投影算法结合小波分解来提取弱特征信号。具体过程为:

1) 对于原始音波序列,选择较大的嵌入维数  $m$  以及相应的延迟时间  $\tau$ ,按照投影降噪的步骤进行重构、投影和噪声分离,然后还原降噪后的信号;

2) 对步骤1中的降噪信号,再次选择较小的嵌入维数  $m$  以及延迟时间  $\tau$ ,进行局部投影降噪;

3) 类似于步骤2,逐渐减小  $m$ ,直到最后的降噪信号增益符合要求,获取含有少量随机噪声的弱音波特征信号;

4) 针对步骤3中含噪弱特征信号,采用小波多分辨率分析方法进行处理,消除随机噪声,提取弱特征信号,突出信号突变拐点信息。

## 3 试验分析

天然气管道音波信号混叠在强背景噪声中,给天然气管道泄漏检测带来难度。通常情况下,在没有音波信号产生时,从音波采集系统获取的离散序列近似为均值为0的随机噪声信号。当系统产生音波信号时,采样数据在幅度上有所增强。此外,不同信号源产生的音波序列具有不同的显示规律,如管壁敲击产生的音波信号具有不连续性,而泄漏产生的音波信号则具有连续性特征。

图1为典型的连续音波信号(未降噪)时域图及幅值谱图。在时域图中可以看出,当音波未产生时(图中大约1600点之前),信号类似于随机噪声。当音波信号产生时,信号整体强度有所增强,但从表面上看依然类似于噪声。此外,从幅值谱也能说明,未降噪时音波信号频率充满整个频域范围,存在大量噪声,因此,为了准确获取音波序列,必须对采样音波信号进行降噪处理。

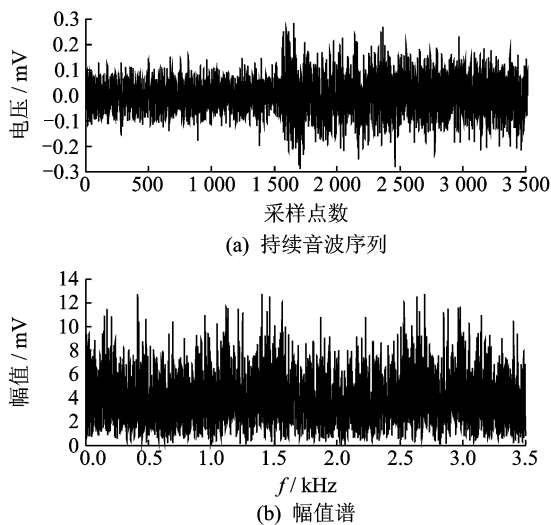


图1 持续音波信号

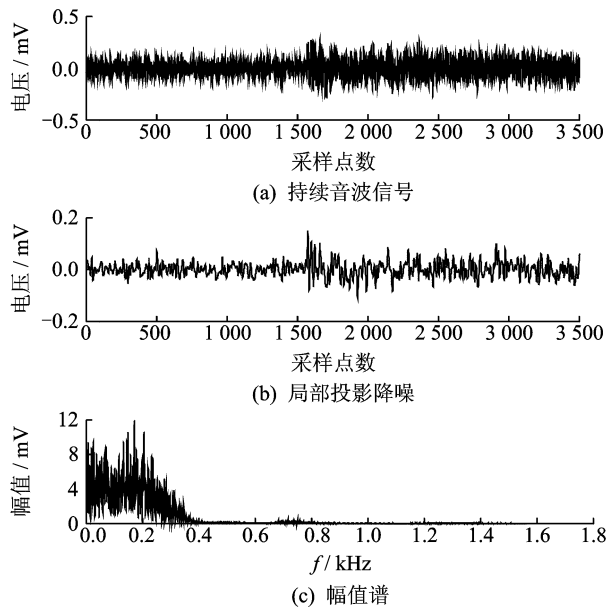


图2 持续音波信号的降噪效果

现场试验包括模拟泄漏(持续开阀)、短时开阀后关闭以及落锤试验3种工况。

### 3.1 天然气泄漏

通过持续开阀模拟泄漏,管内压力会在短暂下降后再次达到一个新的稳态。但在阀门处,气体依然持续喷出而产生连续音波振荡,不随管内压力达到新稳态而停止。

图2为泄漏持续音波信号数据降噪效果图。由图2可以看出,局部投影降噪方法能有效获取弱特征信号。同时,从降噪后的幅值谱图也可看出,信号能量集中在 $0\sim 340$  Hz范围内,且在200 Hz后开始衰减,体现出音波信号能量主要集中在低频段范围的特点。如果选择距离模拟泄漏点(阀门)较远处进行测量,则有效频带范围更窄,说明了音波信号高频部分在传输过程中衰减较快,只有低频部分才能远距离传输。

### 3.2 短暂开阀后关闭

当阀门短暂开启并关闭时,该位置音波信号源也随之消失;因此,从波形上看,时序信号短暂增强后又恢复到随机噪声状态。

图3为该工况下信号降噪效果图。从原始采样列中可以看出,在这段时间内共进行了2次开阀及关闭操作。从降噪后的幅值谱看出,在测点位置处检测到的音波信号能量主要集中在340 Hz以下,与泄漏音波信号类似,这是因为在同一测点获取同一位置产生的音波信号,其衰减的频率成分相同,但幅值(能量)稍有区别;因此,在相同距离范围内,高频信

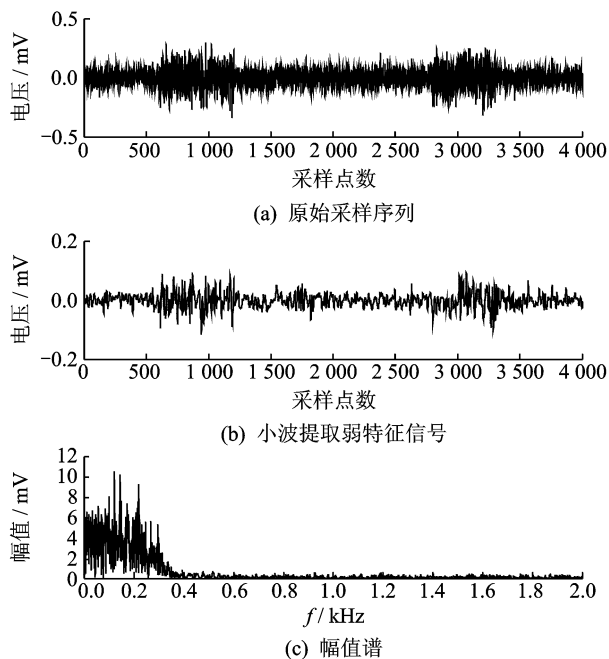


图3 短暂开阀及关闭信号的降噪效果

号衰减特性相同,所测音波信号有效能量频谱范围也类似。

### 3.3 落锤试验

进行落锤试验时,管壁撞击为离散态,且每次撞击瞬间完成;因此,整体上音波序列也为间隔一段时间出现一次振幅波动,且每次波动时间较短,这与图3单次持续时间较长不同。同时,由于落锤与管壁撞击力度较大,产生的音波强度也较大;因此,在信

号图上表现为幅值较大,但有效能量频谱范围依然与上述两次试验类似。图4为落锤试验信号及降噪效果图。

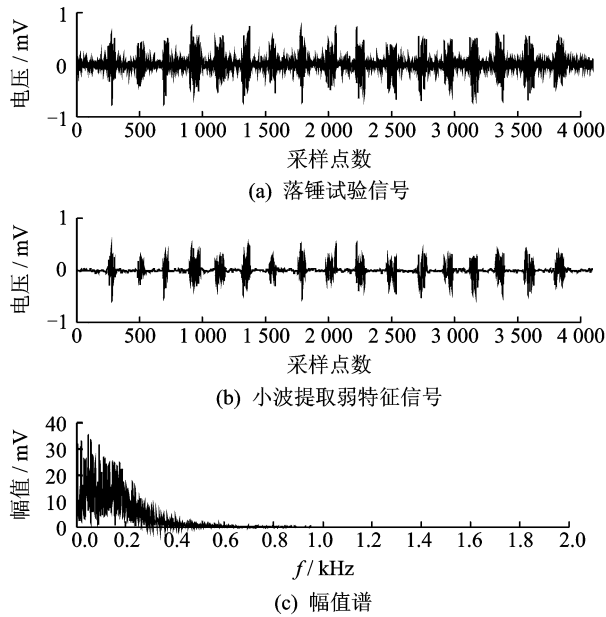


图4 落锤试验信号的降噪效果

在测试期间,对模拟泄漏试验、开关阀试验和落锤试验分别进行了多次样本分析。降噪后,信号信噪比提高了20.7~38.2 dB,有效地去除了信号中的干扰信息,为后续分析提供了良好的数据基础。

## 4 结束语

音波信号降噪是大口径天然气管道泄漏音波检测技术应用过程中的难点和重点之一,降噪效果的好坏将直接影响着泄漏检测效果。本研究利用基于非线性理论的局部投影降噪方法对音波信号进行降噪处理,通过试验验证了该方法的有效性。同时,对于复杂的管道系统而言,可以将局部投影降噪理论与其他的降噪方法混合使用,提高降噪效果。

### 参 考 文 献

[1] Loth J, Morris G J, Palmer G M. Technology assessment of on-line acoustic monitoring for leaks/infringerments in underground natural gas transmission lines[D]. USA: West Virginia University, 2003.

- [2] Kanty H, Schreiber T. Nonlinear time series analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 75-78.
- [3] Rand D A, Young L S. Dynamical systems and turbulence[M], Berlin: Springer, 1981:366-381.
- [4] 韩敏,刘玉花,史志伟,等.改进局部投影算法的混沌降噪研究[J].系统仿真学报,2007,19(2):364-368. Han Min, Liu Yuhua, Shi Zhiwei, et al. The study of chaotic noise reduction method with improved local projection [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(2):364-368. (in Chinese)
- [5] 王岩.相空间重构方法在非线转子动力学中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002.
- [6] Liebert W, Schuster H G. Proper choice of the time delay for the analysis of chaotic time series [J]. Physics Letters A, 1998, 142(2): 107-111.
- [7] 李亚安,贾雪松,孙进才.基于局部投影理论的水声信号降噪处理研究[J].西北工业大学学报,2005,23(2): 147-150. Li Yaan, Jia Xuesong, Sun Jincai. Noise reduction of ship-radiated noise with local projective noise reduction method [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005,23(2): 147-150. (in Chinese)
- [8] 王朝晖,张来斌.应用混沌神经网络诊断发动机磨损故障[J].振动、测试与诊断,2005,25(2):95-97. Wang Zhaohui, Zhang Laibin. Engine's friction fault diagnosis by using chaotic neural network [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2005,25 (2):95-97. (in Chinese)
- [9] 王朝晖,张来斌,刘玉辉,等.利用缸盖振动信号测定发动机功率[J].振动、测试与诊断,2001,21(2):49-54. Wang Zhaohui, Zhang Laibin, Liu Yuhui, et al. Measurement of engine power using its cylinder vibration signal [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2001,21(2):49-54. (in Chinese)



第一作者简介:梁伟,男,1978年6月生,博士、副教授。主要研究方向为设备安全监测与故障诊断。曾发表《Using fuzzy method to evaluate safety condition of big diesel engine》(《Journal of Loss Prevention in the Process Industries》2009, Vol. 22, No. 6)等论文。  
E-mail:lweimm@yahoo.com.cn