

局域波时频相干方法及其工程应用*

赵俊龙¹, 王奉涛², 李宏坤², 韩素兰¹

(1. 华北水利水电学院机械学院 郑州, 450011) (2. 大连理工大学机械学院 大连, 116023)

摘要 由于在工程现场采集到的振动信号一般为多个激励源所引起的振动响应的叠加,有效源信号往往被淹没在其他信号的干扰之中。对信号相似性评价标准进行研究,在此基础上提出局域波时频相干算法,将其应用于往复式压缩机缸体的故障诊断中。首先,双通道同步采集往复式压缩机气阀及缸体信号;其次,应用循环互相关方法消除气阀信号与缸体信号中气阀成分之间的时延;最后,应用局域波时频相干方法去除缸体信号中的气阀干扰成分。工程应用表明,该方法可以将气阀干扰信号从复合信号中剔除,实现往复式压缩机缸体及其内部部件的准确监测与诊断。

关键词 时频分析;相干;故障诊断;局域波;往复式压缩机

中图分类号 TP206.3; TH458

引言

往复式压缩机的机械结构复杂、激励源众多,在缸体上采集到的振动信号一般为多个激励源引起的振动响应的叠加。在往复式压缩机众多的振动源中,气阀引起的振动幅值最高、能量最大。在压缩机缸体各部位采集到的振动信号中一般均包含气阀引起的振动信号,且该成分有可能淹没气缸内部其他激励源引起的振动,这造成直接利用振动信号进行缸体内部部件的工作状态监测比较困难;因此,应用振动信号分析方法对往复式压缩机缸体进行状态监测与故障诊断时应剔除气阀振动信号的影响。

笔者提出了一种复合信号分离方法——局域波时频相干方法,将其应用于往复式压缩机缸体的故障诊断中,取得了良好的效果。

1 相干分析

相干函数又称凝聚函数,它是两个信号在频域中相似程度的判定指标。对于一个单输入单输出的随机振动系统,输入信号与输出信号的相干函数反映了二者之间的因果性,即输出信号的频率响应中有多少是由输入信号的激励引起的^[1]。

工程中测得的噪声、振动信号事实上可以看作是多输入单输出系统的输出响应,如果能够得到多个单独的源信号,就可以利用各源信号与输出信号之间的相干函数对输入输出之间的关系进行评估。

经典的相干方法是建立在随机过程平稳性假设的基础之上,但工程信号往往是非平稳时变信号,对于这种信号来说,了解不同时刻附近的频域特征非常重要。时频相干分析就是在经典的相干分析和信号时频表示的基础上引申的一种分析方法,刻画了两个随机过程不同时刻的内在联系在频域中的描述^[2-4]。

两个非平稳信号 $x(t)$, $y(t)$ 的时频相干估计可以表示为

$$R_{x,y}^2(\tau, f) = \frac{|S_{x,y}(\tau, f)|^2}{S_x(\tau, f)S_y(\tau, f)} \quad (1)$$

其中: $S_{x,y}(\tau, f)$ 为两信号的时频互谱; $S_x(\tau, f)$, $S_y(\tau, f)$ 分别为两信号的时频自谱。

目前,最常用的是基于小波分析的时频相干方法,该方法所求的时频相干系数实质上反映的是两个信号同尺度下小波系数的相干性。小波系数反映的是在某尺度下局部时间段上原始信号与一系列小波基函数的相似性,而小波基函数是与原始信号没有直接关系的一组谐频分量。虽然小波系数反映了原始信号的总体趋势,但基于小波系数的时频相干只是实际信号相干性的近似表示。

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50805014);教育部科学技术研究重点资助项目(编号:109047)

收稿日期:2010-11-10;修改稿收到日期:2011-05-08

2 局域波时频相干方法

局域波^[5]时频相干方法的基本思路为:首先,对由源信号和干扰信号组成的复合信号 $y(t)$ 进行 EMD 分解,将干扰信号与各基本模式分量划分为相对应的一些子段;然后,按照评估准则评价干扰信号 $d(t)$ 与各模式分量相应子段之间的相似性,判断模式分量的子段是否是由干扰信号 $d(t)$ 引起的,作为是否将其滤除的标准;最后,使用滤波后各模式分量进行重构得到源信号 $s(t)$ 的估计。

2.1 信号相似性评价准则

引入两类评价准则对信号相似性进行度量:第1类为基于模式向量之间角度的相似性度量,如余弦相似性;第2类为基于概率分布的度量,如熵及互信息^[6-7]。

2.1.1 余弦相似性

对于两个时间序列 X 和 Y ,它们之间的余弦相似性的定义为

$$\cos(X, Y) = \frac{\langle X, Y \rangle}{\|X\| \|Y\|} \quad (2)$$

其中: $\langle \cdot \rangle$ 为内积运算; $\|\cdot\|$ 为2范数。

两个时间序列的模式越相似,其余弦相似度的值就越大。最大值为1时表明两个信号完全相关。

2.1.2 互信息

两个时间序列 X, Y 的互信息定义为

$$I(X, Y) = H(X) - H(X|Y) = H(Y) - H(Y|X) \quad (3)$$

其中: $H(X)$ 为时间序列 X 的信息熵; $H(Y)$ 为时间序列 Y 的信息熵; $H(X|Y)$ 为 X 相对于 Y 的条件信息熵; $H(Y|X)$ 为 Y 相对于 X 的条件信息熵。

互信息刻画了两个时间序列 X, Y 共有的信息量。互信息越大,两个时间序列的相关性越大,当完全无关时,互信息取最小值0。

令 $M = \min[H(X), H(Y)]$, 则

$$0 \leq I(X, Y) \leq M \quad (4)$$

定义两个时间序列 X, Y 之间的关联信息测度^[8]为

$$I_R = \frac{I(X, Y)}{M} = \frac{I(X, Y)}{\min[H(X), H(Y)]} \quad (5)$$

由以上定义可知,关联信息测度 $I_R \in [0, 1]$ 。

2.1.3 权值曲线信息熵

如果复合信号中干扰信号成分分解到了某个基本模式分量 $\text{imf}_i(n)$ 的第 j 子段中,记为 $\text{imf}_{i,j}$,则该子

段与原始干扰信号对应子段 d_j 之比为一个常数,即

$$d_j / \text{imf}_{i,j} = \alpha \quad (6)$$

这是一条斜率为0的水平直线,它的信息熵值为0。如果两个子段的曲线波形存在明显的差异,那么这条权值曲线将是一条起伏明显的曲线,其信息熵值较大。

设权值曲线的总采样点数为 N ,将各采样点按其幅值离散到 $k(k > 1)$ 个区间,各区间的采样点集集合为 $\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$,那么权值曲线信息熵可定义为

$$H_{\text{wcc}} = - \sum_{i=1}^k (n_i/N) \log(n_i/N) \quad (7)$$

由定义可知,权值曲线信息熵的取值范围为 $0 \sim \log k$,且两子段曲线相似性越大,则权值曲线信息熵越小。为了与互信息的变化趋势相统一,定义权值信息熵为

$$H_W = 1 - H_{\text{wcc}} / \log k \quad (8)$$

由以上定义可知:权值信息熵 $H_W \in [0, 1]$,且 X, Y 之间的关联程度越大, H_W 越大;当 X, Y 之间的关联程度越小时, H_W 越小。

余弦相似性代表了两个信号的线性相似程度,适用于描述两平稳随机信号的相关性,对于往复式压缩机振动信号还需要结合基于概率分布的关联信息测度、权值信息熵来对曲线的相似性进行综合评价。笔者提出综合评价两信号相似度的相干系数为 $\gamma_{X,Y} =$

$$\frac{\alpha |\cos(X, Y)| + \beta I_R(X, Y) + \gamma H_W(X, Y)}{\alpha + \beta + \gamma} \quad (9)$$

其中: α, β, γ 为常数,相干系数取值范围满足 $[0, 1]$ 。

当两信号完全相关时,相干系数取得最大值1;当完全无关时,相干系数取得最小值0。

2.2 局域波时频相干算法

设存在复合信号

$$y(t) = s(t) + \alpha d(t) \quad (10)$$

其中: $s(t)$ 为有用的源信号; $d(t)$ 为干扰信号; α 为干扰信号的加权值,为正的常数。

从复合信号 $y(t)$ 中恢复源 $s(t)$ 的局域波时频相干算法如下:

1) 同步采集复合信号和干扰信号,得到同步采样信号 $y(n)$ 和 $d(n)$ 。

2) 对 $y(n)$ 进行 EMD 分解,得到基本模式分量矩阵 **IMF**,矩阵的行向量 $\text{imf}_i(n)$ 为第 i 个基本模式分量。

3) 计算基本模式分量矩阵 **IMF** 与干扰信号 $d(n)$ 的局部相干系数矩阵。将第 i 个模式分量 $\text{imf}_i(n)$

及干扰信号 $d(n)$ 分为 k_i 段, 每一段的信号点数为 j_i 点, 分别计算 $\text{imf}_i(n)$ 及 $d(n)$ 对应子段的相干系数构成相干系数矩阵。基本模式分量矩阵 \mathbf{IMF} 与干扰 $d(n)$ 之间的相干系数矩阵 $\mathbf{Coh}(M \times N$ 维) 为

$$\mathbf{Coh}[i, (l-1) \times j + 1; l \times j] = \gamma_{\text{imf}_i, d_l}^2 \quad (11)$$

4) 求取相干滤波掩膜系数矩阵

$$\mathbf{COF} = 1 - \mathbf{Coh} \quad (12)$$

设定信号的相干滤波系数阈值 Thr , 生成最终的掩膜系数矩阵 \mathbf{MASK} , 其第 i 行第 j 列处的元素值为

$$\mathbf{MASK}_{i,j} = \begin{cases} 0 & (\mathbf{COF}_{i,j} < \text{Thr}) \\ 1 & (\mathbf{COF}_{i,j} \geq \text{Thr}) \end{cases} \quad (13)$$

5) 对矩阵 \mathbf{IMF} 进行掩膜处理, 得到相干滤波后矩阵 $\mathbf{IMF}_{\text{Coh}}$ 为

$$\mathbf{IMF}_{\text{Coh}} = \mathbf{IMF} \times \mathbf{MASK} \quad (14)$$

6) 相干滤波后矩阵 $\mathbf{IMF}_{\text{Coh}}$ 各行向量相加即为重构信号, 则重构信号 $\bar{s}(n)$ 为

$$\bar{s}(n) = \sum_{i=1}^M \mathbf{IMF}_{\text{Coh},i}(n) \quad (15)$$

2.3 仿真信号分析

构造如式(9)的仿真信号 $y(t)$, 其中 $s(t)$ 为周期性冲击响应信号

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-\xi 2\pi f_n (t-nT+t_0)} \sin 2\pi f_n (t-nT+t_0) \quad (16)$$

其中: 阻尼比 $\xi = 0.05$; 固有频率 $f_n = 80$ Hz; 周期 $T = 0.25$ ms, 采样频率 $f_s = 1$ kHz; $d(t)$ 为随机噪声信号; 构成复合信号 $y(t)$ 的信噪比为 -1 dB。

$y(t)$ 及其局域波时频谱如图1所示。可以看出, 加入随机噪声之后, 时域中周期性冲击现象有所削弱, 时频图上能量分布的积聚性大大降低, 在整个时频面上都有能量分布的存在。

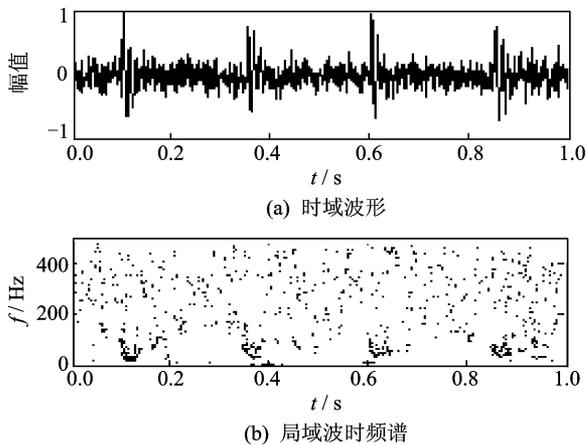


图1 仿真信号时域波形及局域波时频谱

以 $y(t)$ 为复合信号, $d(t)$ 为干扰信号, 对 $y(t)$ 进行 EMD 分解。应用局域波时频相干方法, 剔除干扰信号 $d(t)$, 相干滤波后恢复有用信号 $\bar{s}(n)$, 结果如图2所示。从图2可以看出, 经局域波时频相干滤波之后, 时域信号中可以看到明显的冲击现象, 噪声得到消除。在局域波时频图中可以看到能量分布具有明显的积聚性, 基本集中在 80 Hz 左右, 在时间轴上也与冲击出现的时间相对应, 时频面上其他位置的能量分布基本消失。该滤波结果表明, 局域波时频相干方法可以有效地从复合信号中剔除干扰信号。

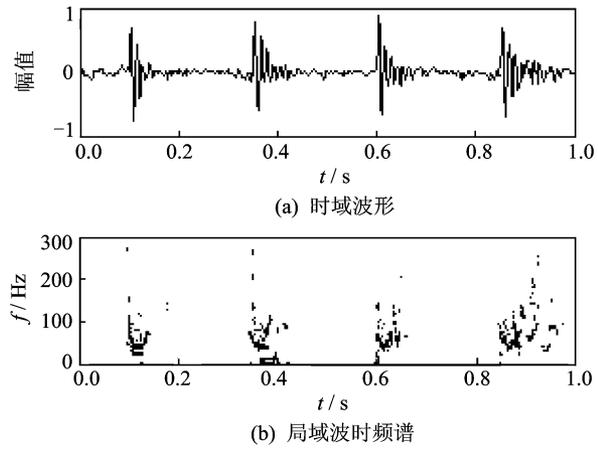


图2 重构信号时域波形及局域波时频谱

使用小波时频相干方法对同一信号进行处理, 采用 db10 小波 4 尺度分解, 时频相干后重构信号及其小波时频谱如图3所示。通过对图2及图3的对比可以看出, 局域波时频相干法和小波时频相干法都可以从复合信号中剔除噪声干扰, 将源信号分离出来, 局域波时频相干方法恢复出的信号与源信号在波形上的相似性更好一些, 这是由于 EMD 分解的基函数是自适应的。分别计算加噪复合信号、局域波相干重构信号及小波相干重构信号的信噪比, 如表1所示。

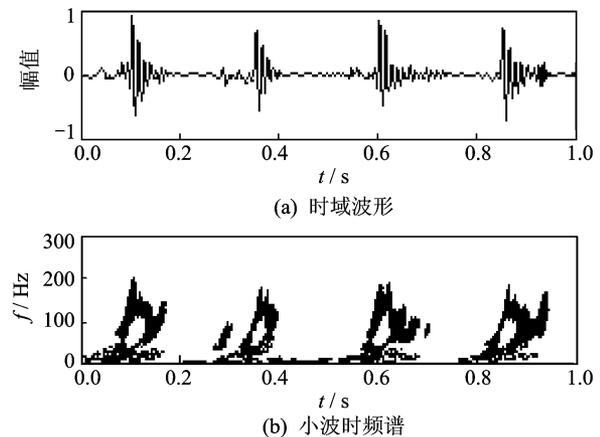


图3 小波相干重构信号的时域波形及小波时频谱

表1 复合信号、时频相干信号的信噪比

信号类型	加噪复合信号	局域波时频相干重构信号	小波时频相干重构信号
信噪比 SNR/dB	7.099 9	18.216	18.672

通过信号的信噪比可以看出,经过两种时频相干方法之后,重构信号的信噪比有比较大的提高。其中,小波时频相干重构信号的信噪比略高于局域波时频相干重构信号,且还处于同一个数量级内,说明这两种方法具有相近的降噪性能。

3 工程应用

将局域波时频相干方法应用于往复式压缩机气缸填料故障诊断中。信号采集自某石化企业超高压聚乙烯压缩机,使用双通道同时采集气阀信号及填料信号,测点位置分别在气缸壁填料位置及组合气阀上,采样频率为25.6 kHz。压缩机缸体结构及测点布置如图4所示。

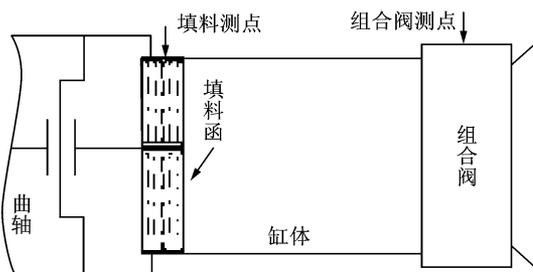


图4 缸体结构及测点布置图

该类压缩机的气阀与缸体是一体化安装,在缸体上测得的振动信号必然存在气阀信号的干扰成分。由于气阀和缸体存在一定的空间距离,所以缸体信号中的气阀信号成份相对于原始气阀振动信号在时间上会存在一定的延迟,在应用局域波时频相干方法去除缸体信号中的气阀干扰成分之前,必须首先消除气阀信号与缸体信号中气阀成分之间的时间延迟,否则就会引起比较大的误差。这里采用循环互相关的方法计算二者之间的时延。

计算二者以6.25 kHz为中心循环频率的较窄频带内,延迟时间为-150~150个采样点的循环互相关函数,如图5所示。从图5可以看出,循环互相关函数的最大幅值出现在延迟 $\tau = -17$ 的采样点上,说明填料信号中的气阀信号成分相比气阀原始信号滞后了17个采样点。

当填料发生泄漏时,气缸内的高压气体从泄漏位置冲出气缸会造成比较高频率的振动,因此是否

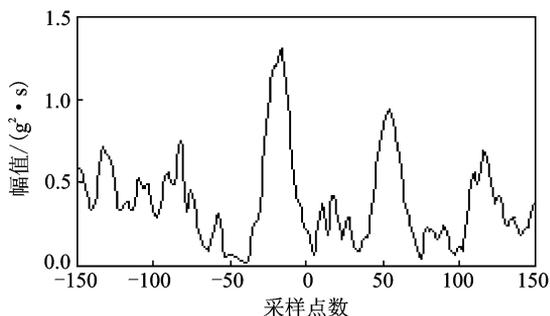


图5 循环互相关函数

出现高频成分是判断填料发生泄漏的一个重要依据。由于气阀振动信号本身含有很高的频率成分,所以在一般情况下难以判断缸体信号中的高频成分是由填料泄漏产生还是气阀振动信号造成的干扰,如图6所示。这时可以考虑使用局域波时频相干方法消除填料信号中的气阀干扰成分。首先,根据计算结果消除二值之间的时间延迟;然后,将填料信号作为复合信号,气阀信号作为干扰信号,应用局域波时频相干方法剔除填料信号中的气阀干扰成分,结果如图7所示。可以看出,经局域波时频相干滤波后,正常填料信号(图7(a))的时频能量分布更加集中在7 kHz左右,可能存在泄漏的填料信号时频谱(图7(b))中存在8 kHz以上的高频成分。

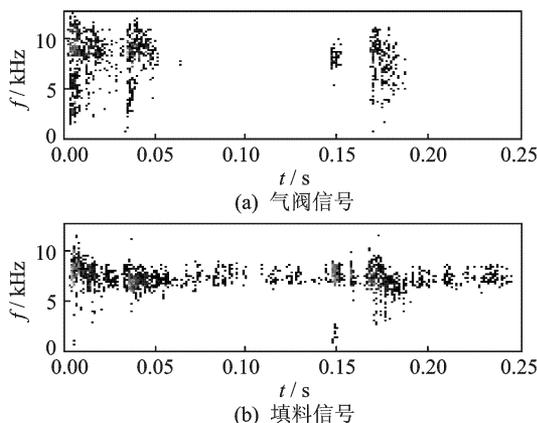


图6 气阀和故障填料信号局域波时频谱

为了表述时频相干前、后时频域能量的变化,将信号的时频分布按照频率高低分为3个子频带:1~4 000 Hz,4 001~8 000 Hz,8 001~12 800 Hz。各频带时频能量相对于整个信号时频能量的比例系数为

$$\gamma_e = E_i/E \quad (17)$$

其中: E_i 为子频带的时频能量; E 为整个信号的时频能量。

计算局域波时频相干前、后正常、故障信号各子频带的时频能量比例系数,如表2所示。可以看出

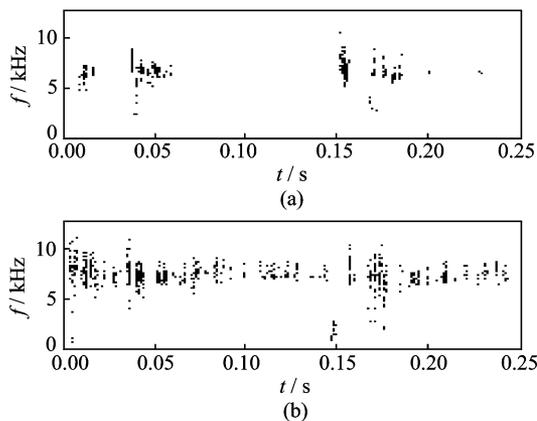


图7 局域波相干滤波后填料信号时频谱

在时频相干滤波之后正常信号的高频能量在整个信号能量中的比例有所下降,故障信号的高频能量的比例有所上升。这说明正常信号中的高频能量有相当一部分是由气阀干扰引起的,时频相干后气阀干扰去除,则时频能量比例系数下降;而故障信号的高频能量主要是由填料泄漏引起的,所以去除气阀干扰后时频能量比例系数上升。

表2 各子频带能量比例系数

信号	时频能量比例系数		
	1~ 4 000 Hz	4 001~ 8 000 Hz	8 001~ 12 800 Hz
正常信号	0.044 6	0.908 9	0.046 5
相干后 正常信号	0.078 6	0.878 1	0.043 3
故障信号	0.070 2	0.655 4	0.274 4
相干后 故障信号	0.113 8	0.591 0	0.295 2

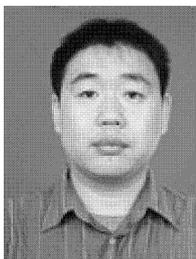
上述分析说明,压缩机可能存在故障信号中的高频成分是由填料泄漏引起的,该气缸的填料存在泄漏。

4 结束语

往复式压缩机缸体信号中存在较严重的气阀干扰信号,难以直接使用缸体信号对气缸及其内部部件的工作状态进行监测。局域波时频相干方法是一种新的复合信号分离方法,可以有效剔除源信号中的干扰信号,可用于对往复式压缩机缸体信号分析。在往复式压缩机气缸填料故障诊断中的应用表明,应用局域波时频相干方法剔除缸体信号中的气阀干扰成分之后,可以清晰、准确地对缸体及其内部部件的工作状态进行判断。

参 考 文 献

- [1] 王济,胡晓. MATLAB在振动信号处理中的应用[M]. 北京:水利水电出版社,2006:120-124.
- [2] Lachaux J P, Lutz A, Rudrauf D, et al. Estimating the time-course of coherence between single-trial brain signals; an introduction to wavelet coherence [J]. Neurophysiol Clin, 2002, 32:157-174.
- [3] 吴捷,张宁,杨卓,等. 小波相干分析及其在听觉与震动刺激事件相关诱发脑电处理中的应用[J]. 生物物理学报,2007, 23(6):482-486.
Wu Jie, Zhang Ning, Yang Zhuo, et al. Wavelet coherence and its application in analyzing auditory and motor task event-related potentials [J]. ACTA Biophysica Sinica, 2007, 23(6):482-486. (in Chinese)
- [4] 张辉,郑崇勋. 诱发电位的多通道时频相干提取算法[J]. 生物物理学报,2003,19(3): 303-307.
Zhang Hui, Zheng Chongxun. Evoked potential extraction based on multi-channel time-frequency coherence [J]. ACTA Biophysica Sinica, 2003,19(3): 303-307. (in Chinese)
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear non-stationary time series analysis [J]. Proceeding of Royal Society London A, 1998,454:903-995.
- [6] 闻兵工,冯伍法,刘伟,等. 基于光谱曲线整体相似性测度的匹配分类[J]. 测绘科学技术学报,2009,26(2): 128-131.
Wen Bingong, Feng Wufa, Liu Wei, et al. Journal of geomatics science and technology [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2009,26(2):128-131. (in Chinese)
- [7] 陈非,黄树红,张燕平,等. 基于信息熵距的旋转机械振动故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断,2008,28(1): 9-13.
Chen Fei, Huang Shuhong, Zhang Yanping, et al. Research on diagnosis of vibration faults for rotating machinery based on distance of information entropy [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008,28(1): 9-13. (in Chinese)
- [8] 谢平. 故障诊断中信息熵特征提取及融合方法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2006.



第一作者简介:赵俊龙,男,1977年8月生,讲师。主要研究方向为非平稳信号处理,机械设备故障诊断。曾发表《往复式压缩机气缸压力模拟曲线提取》(《振动、测试与诊断》2009年第29卷第1期)等论文。

E-mail:zhaojunlong@ncwu.edu.cn