文章编号: 1673-5005(2009)01-0093-06

迭代奇异值分解降噪与关联维数在烟气轮机故障诊断中的应用

王 浩, 张来斌, 王朝晖, 梁 伟, 段礼祥

(中国石油大学 机电工程学院, 北京 102249)

摘要: 烟气轮机的振动信号具有很强的非线性特征。提出了将迭代奇异值分解(ISVD)降噪与关联维数分析相结合应用于烟气轮机故障诊断。采用低通数字滤波与 ISVD降噪两种方法对实测数据进行降噪处理, 对其效果进行对比, 并计算烟气轮机在不同故障状态下振动信号降噪前、后的关联维数。结果表明: 对于烟气轮机信号, 低通数字滤波的降噪效果并不理想, 而 ISVD 降噪则能有效地去除噪声; 降噪后, 烟气轮机振动信号的伪相图特征清晰, 关联积分曲线的标度区明显变宽; 不同故障状态下计算得到的关联维数明显不同, 可以将关联维数作为故障诊断的定量特征进行提取, 从而为烟气轮机故障诊断提供简单而有效的方法。

关键词: 烟气轮机; 故障诊断; 关联维数; ISVD降噪; 伪相图; 低通滤波

中图分类号: TK 268.1; TE 969; TH 165.3 文献标识码: A

Application of ISVD de-noising and correlation dimension in fault diagnosis of flue gas turbine

WANG Hao, ZHANG Lai-bin, WANG Zhao-hui, LIANG Wei, DUAN Li-xiang

(Faculty of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract Considering the complicated and non-linear characteristics of the vibrational signal of flue gas turbine, the iterative singular value decomposition (ISVD) de-noising and correlation dimension were applied in fault diagnosis of flue gas turbine. To eliminate the noise, the low-pass filter and the ISVD de-noising were applied separately. Then the correlation dimensions of vibration signal of flue gas turbine under different fault conditions were estimated. The results show that the effect of the low-pass filter is not obvious while the ISVD de-noising can reduce noise effectively. Comparing with the pseudo-phase portrait reconstructed from signal containing noise, the pseudo-phase portrait reconstructed after ISVD de-noising is more regular. By ISVD de-noising, the scale region on the log-log plot of correlation integrals becomes wider. The correlation dimension is obviously different for different fault conditions after ISVD de-noising, so it can be used as the quantitative characteristic parameter for fault diagnosis. This offers a simple and effective method for fault diagnosis of flue gas turbine.

Key words flue gas turbine; fault diagnosis; correlation dimension; ISVD de-noising; pseudo-phase portrait; low-pass filter

烟气轮机是炼油厂中的大型旋转机械, 由于结构复杂, 其运行往往表现出强烈的非线性。近年来, 在大型复杂非线性系统的故障诊断中, 混沌分形理论得到了广泛的应用[1-2]。分形理论中的关联维数是定量刻划混沌吸引子的一个重要参数, 它经常被用于定量描述非线性系统的行为[3]。关联维数对噪声非常敏感, 实测信号中含有的噪声会使关联积分曲线的标度区减小, 关联维数估计值增大, 同时还会淹没系统内在的确定性特征[4-5]。因此, 要正确估计关联维数, 必须对信号进行降噪处理。笔者将关联维数用于烟气轮机故障特征的定量提取。

1 迭代奇异值分解降噪

对于非线性信号, 噪声与系统信号的频谱常常

收稿日期: 2008-05-03

基金项目: 国家"863"资助(2008AA06Z209); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0110); 石油科技中青年创新基金(07E1005); 中国石油天然气集团公司创新基金

作者简介: 王浩(1980-), 男(汉族), 河北辛集人, 博士研究生, 主要从事机械设备振动测试、故障诊断研究。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

互相混叠,采用低通数字滤波等传统降噪方法的效果并不理想。本文中采用迭代奇异值分解(ISVD)降噪[6-7]方法。该方法是基于噪声与系统信号对相空间轨道矩阵的奇异值的不同影响进行降噪的,而不是基于它们的频谱特性,因此能有效地去除非线性信号中含有的噪声。ISVD降噪的步骤如下:

(1)相空间重构。假设实际测得的单变量时间序列为 $\{x_1, x_2, \cdots, x_N\}$,用时延法重构相空间轨道矩阵

$$\boldsymbol{D}=\begin{Bmatrix} x_1 & x_{1+\tau} & \cdots & x_{1+(n-1)\tau} \\ x_2 & x_{2+\tau} & \cdots & x_{2+(n-1)\tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N_n} & x_{N_n+\tau} & \cdots & x_{N_n+(n-1)\tau} \end{Bmatrix}. \tag{1}$$

式中,τ为时间延迟;n为嵌入维数;N_n为重构相空间中向量的个数,$N_n=N-(n-1)\tau$,$N_n \gg n$。

(2)奇异值分解。对轨道矩阵 $\boldsymbol{D}$ 进行奇异值分解(SVD):

$$\boldsymbol{D}=\boldsymbol{S}\Sigma\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}},$$

式中,$\boldsymbol{S}$ 是 $\boldsymbol{D}\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}$ 的特征向量矩阵;$\boldsymbol{C}$ 是 $\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}$ 的特征向量矩阵,$\Sigma=\mathrm{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n)$,$\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ 是矩阵 $\boldsymbol{D}$ 的奇异值,且有 $\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant \cdots \geqslant \lambda_n \geqslant 0$。Shin等指出[6],噪声将会使所有的奇异值都大于零,假设矩阵的秩为 k,则前 k 个奇异值要远大于其他奇异值。

(3)获得降噪时间序列。轨道矩阵 $\boldsymbol{D}$ 还可以写为 $\boldsymbol{D}=\boldsymbol{D}_{\mathrm{m}}+\boldsymbol{W}$,其中,$\boldsymbol{D}_{\mathrm{m}}$ 对应着没有噪声干扰的系统信号;$\boldsymbol{W}$ 对应着噪声信号。保留矩阵 $\boldsymbol{D}$ 较大的前 k 个奇异值,将其他奇异值置零,然后利用奇异值分解的逆过程就可以得到 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{m}}$ 的最佳逼近矩阵 $\overline{\boldsymbol{D}_{\mathrm{m}}}$。将矩阵 $\overline{\boldsymbol{D}_m}$ 的各列对应相加取平均,即可得到降噪后的时间序列。

(4)迭代。由于 $\overline{\boldsymbol{D}_{\mathrm{m}}}$ 仅是对 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{m}}$ 的逼近,一次迭代得到的时间序列并没有完全剔除噪声,可以重复以上各步,直到满足降噪要求。

2 关联维数的计算

2.1 G-P算法

G-P算法是Grassberger和Procaccia提出的一种从时间序列直接计算关联维数的方法[8],该算法计算简单,容易实现。

由单变量时间序列 $\{x_1, x_2, \cdots, x_N\}$ 用时延法重构相空间轨道向量

$$\boldsymbol{X}_t=\{x_t, x_{t+\tau}, \cdots, x_{t+(n-1)\tau}\}. \tag{2}$$

式中,τ为时间延迟;n为嵌入维数;$t=1, 2, \cdots, N_n$,$N_n=N-(n-1)\tau$。

关联维数可由下列关联积分导出:

$$C_n(r)=\frac{1}{N_n^2}\sum_{i,j=1}^{N_n}H(r-r_{ij}). \tag{3}$$

其中

$$H(s)=\begin{cases}1, & s>0\\ 0, & s\leqslant 0\end{cases}$$

$$r_{ij}=\|X_i-X_j\|_2.$$

式中,r为相空间中超球体的半径;r_{ij}为相空间中两向量间的距离。

适当选取超球体的半径 r 的范围,使得在某个区间内存在

$$C_n(r)\propto r^{d(n)},\quad d(n)=\lim_{\varepsilon\to 0}\frac{\ln(C_n(r))}{\ln r}. \tag{4}$$

式中,$d(n)$即为嵌入维数为 n 时的关联维数。这个区间称为标度区。

根据上述定义,$d(n)$可通过计算关联积分曲线 $\ln(C_n(r))-\ln r$ 的标度区的斜率获得。因此,标度区范围判定的正确与否十分关键。本文中采用文献[9]的方法,绘制出局部斜率曲线,由局部斜率曲线的最大平坦区即可正确判定出标度区。

(1)时间延迟 τ 的选择。时间延迟 τ 的选择非常重要,τ太大或太小都会影响相空间重构的质量。本文中采用自相关函数法,即将自相关函数值第一次降为零的时刻选作 τ。该方法计算简单,且实际应用效果良好。

(2)嵌入维数 n 的选择。比较合理的方法[10]是,先给嵌入维数一个初始值,计算它对应的关联维数 $d(n)$,然后逐渐增大嵌入维数,当关联维数 $d(n)$ 不随嵌入维数变化时,此时的嵌入维数即是合理的嵌入维数,该方法虽然计算量稍大,但可以确保使重构的相空间能容纳原来状态空间的吸引子特征。

2.2 G-P算法的改进

G-P算法虽然原理简单,但其中存在大量的重复运算,计算耗时大。本文中采用改进的G-P算法计算关联维数,运算效率明显提高。

(1)用 $\|X_i-X_j\|_1$ 计算两向量间的距离,这样,只须先计算出很少的量,其余可由递推公式得出[11],即

$$\begin{cases} r_{ij}=\sum_{l=0}^{n-1}|x_{i+l\tau}-x_{j+l\tau}|,\\ r_{i+\tau,j+\tau}=r_{ij}-|x_i-x_j|+|x_{i+n\tau}-x_{j+n\tau}|. \end{cases} \tag{5}$$

与使用 $\|X_i-X_j\|_2$ 相比,运算量大大减少。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2)在计算出向量的两两距离 r_{ij}后, 将其取整量化, 引入等距积分[12]

$$Q_s(r)=\sum_{i=1}^{N_n-1}\sum_{j=i+1}^{N_n}Q(r-r_{ij}). \quad (6)$$

其中

$$Q(s)=\begin{cases}1, & s=0\\ 0, & s\neq 0\end{cases}$$

通过等距积分累加就可以得到关联积分

$$C_n(ir)=1/N_n^2\sum_{r=0}^{ir}Q_s(r). \quad (7)$$

这样, 可以避免直接按式(3)计算关联积分时 r与向量间距离的重复比较, 关联积分计算量只有原来的 $1/k$。

3 计算结果及其分析

对某烟气轮机进行实测, 得到了转子 3种不同故障状态下的振动信号。采集时烟气轮机转速为 5 625 r/min, 采集频率 16 kHz, 采集点数 40 960个。为了进行对比, 首先采用传统的低通数字滤波器对信号进行降噪处理, 滤波截止频率 100 Hz, 降噪前、后信号的时域波形与伪相图分别如图 1, 2所示(信号 a为转子不平衡信号; 信号 b为轻微碰磨兼转子不平衡时的信号; 信号 c为严重碰磨时的信号)。

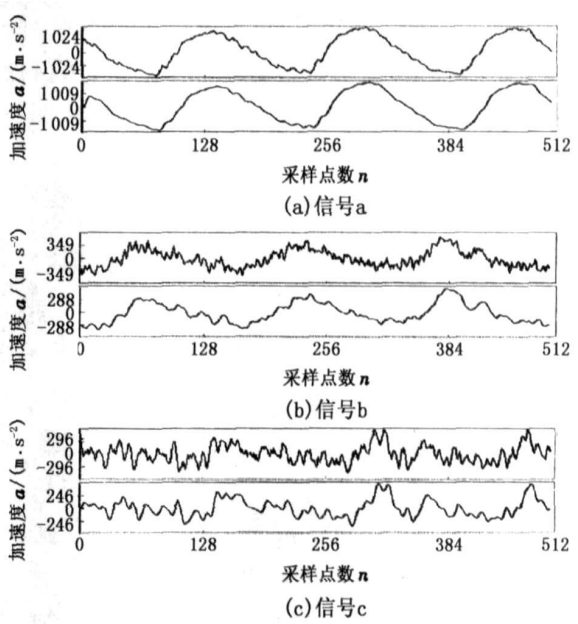


图 1 低通滤波前(上)、后(下)3种振动信号的时域波形

Fig. 1 Time-domain waveforms of vibration signals before and after low-pass filtering

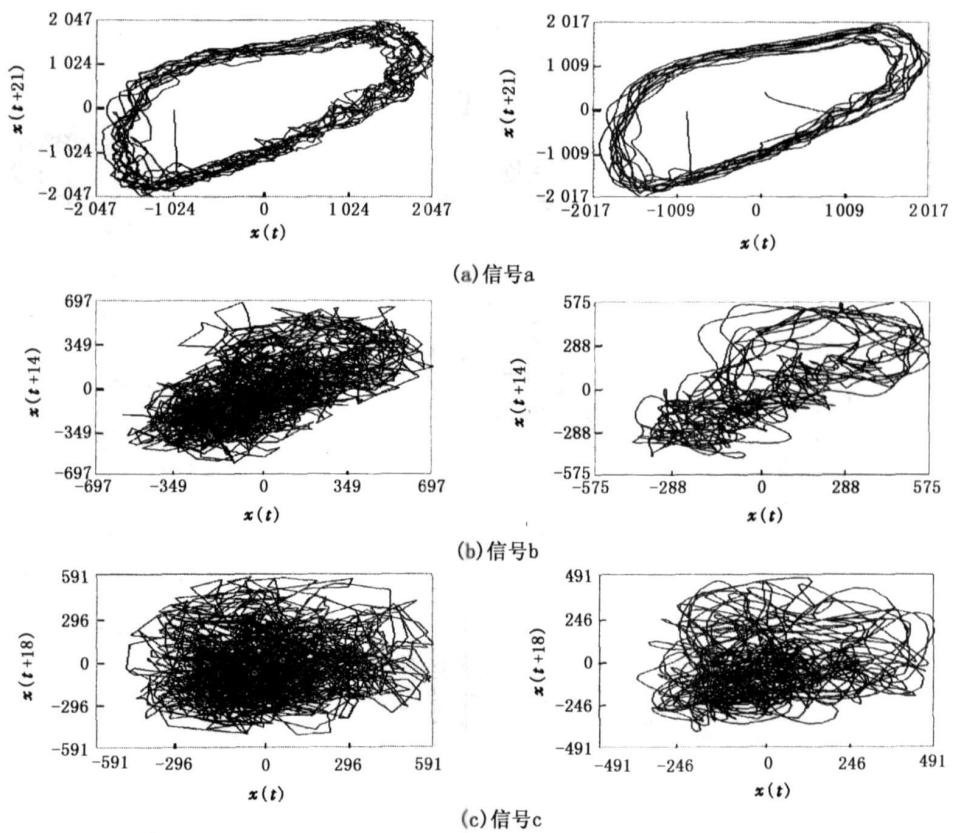


图 2 低通滤波前(左)、后(右)3种振动信号的伪相图

Fig. 2 Pseudo-phase portrait of vibration signals before and after low-pass filtering

由图 1和图 2可以看出, 低通数字滤波后, 信号 中仍然含有很多噪声, 伪相图的特征仍然被大量噪

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

声淹没。这表明数字滤波对非线性信号的降噪效果并不理想。

采用 ISVD降噪算法对信号进行降噪处理。降噪时, 迭代次数为 2, 嵌入维数 n= 15, 时间延迟(点数) τ= 1。降噪前、后信号的时域波形与伪相图分别如图 3, 4所示。

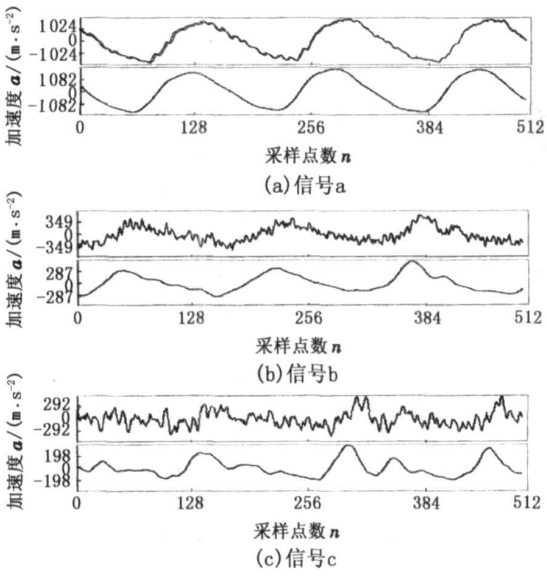


图 3　ISVD降噪前(上)、后(下)3种振动信号的时域波形

Fig 3　Time-domain waveforms of vibration signals before and after ISVD de-noising

由图 3可以看出, ISVD降噪后信号的信噪比明显提高, 同时较完整地保留了信号的特征波形。由图 4可以看出, 降噪前, 随着故障程度的加剧, 信号中的噪声成分增多, 导致伪相图越来越不规则, 甚至无法识别其特征; 降噪后, 3种信号的伪相图特征都很清晰。

为了定量描述 3种故障状态, 采用改进的 G-P算法分别计算其关联维数。因为关联维数对噪声很敏感, 所以先用 ISVD降噪算法对信号进行降噪处理, 降噪时, 迭代次数为 2, 嵌入维数 n= 15, 时间延迟(点数) τ= 1。

降噪前信号的关联积分曲线与局部斜率曲线如图 5所示, 降噪后如图 6所示。依照前面所述的方法确定计算关联维数时的参数值, 所选参数和降噪后关联维数的计算结果如表 1所示。

表 1　计算关联维数所选参数和结果

Table 1　Parameters and results for the calculation of correlation dimension

信号	嵌入维数	时间延迟 τ	关联维数 $d(n)$
a	1~ 29	41	1. 07
b	1~ 29	39	1. 32
c	1~ 29	24	1. 54

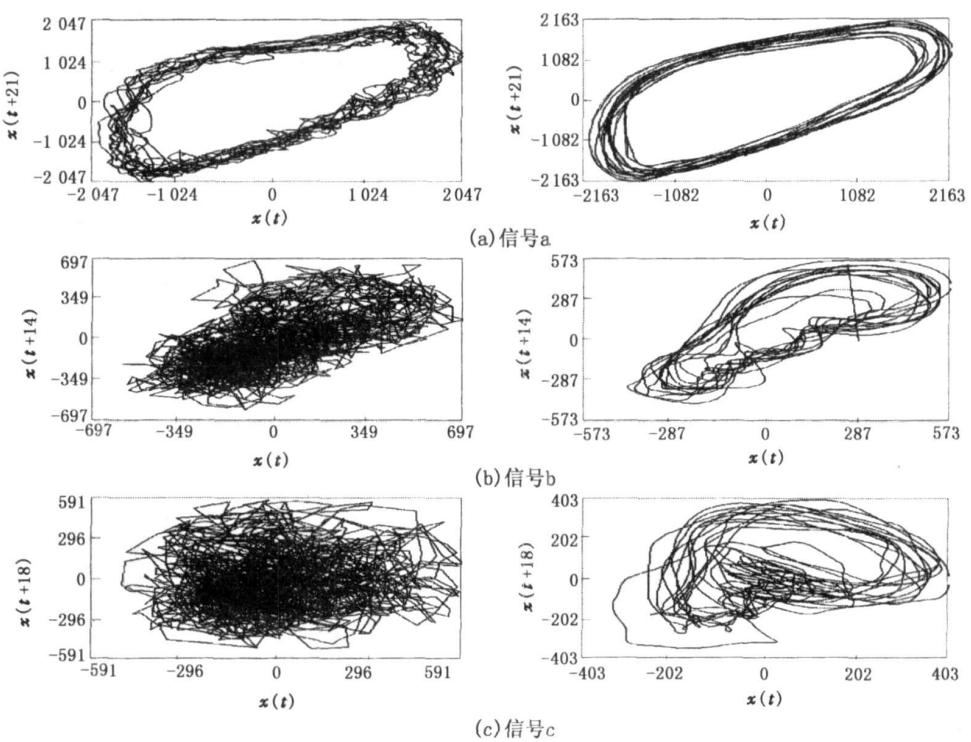


图 4　ISVD降噪前(左)、后(右)3种振动信号的伪相图

Fig 4　Pseudo-phase portrait of vibration signals before and after ISVD de-noising

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

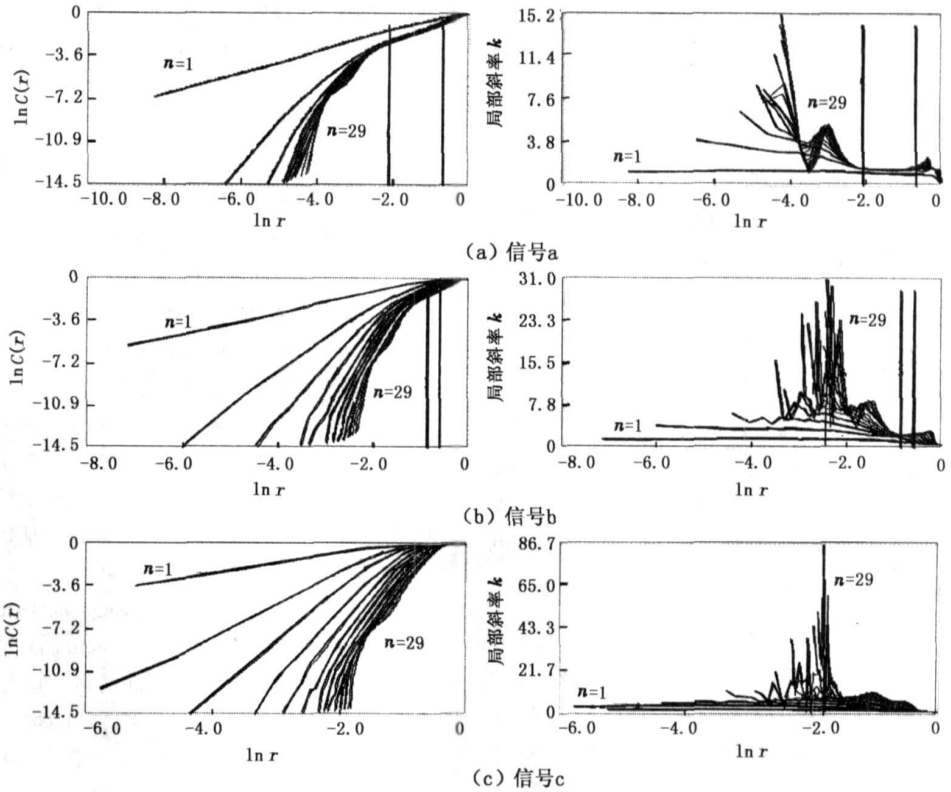


图 5 降噪前 3 种信号的关联积分和局部斜率

Fig. 5 Correlation integrals and partial slope for original signals

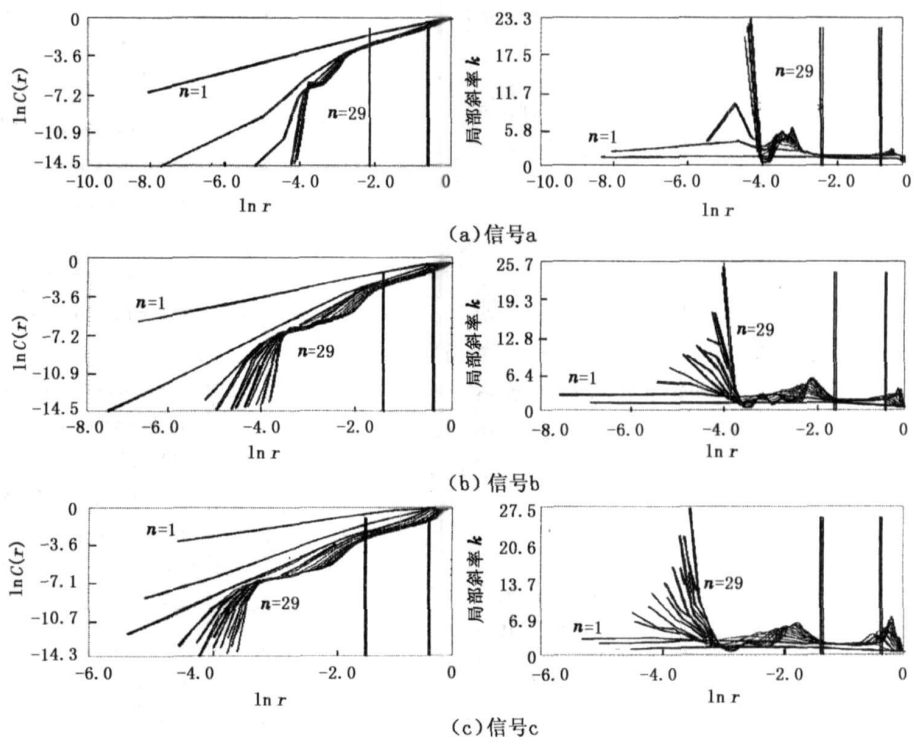


图 6 降噪后 3 种信号的关联积分和局部斜率

Fig. 6 Correlation integrals and partial slope for signals by ISVD de-noising

由图 5可以看出, 不平衡故障信号 a的关联维数 $d(n)$随嵌入维数 n的增大比较快地收敛或饱和,

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而碰磨类故障信号 b和 c的关联维数则收敛很慢,说明信号 b和 c中含有的噪声成分很多。这是因为,确定性系统的关联维数会随着嵌入维数的增加而很快达到饱和,而噪声的关联维数则会随着嵌入维数的增加而增加,不会达到饱和[10]。由于大量噪声的影响,信号 b和 c的关联积分曲线的标度区很窄甚至消失,估计出的关联维数值会很大,是不准确的。由图 6可以看出, ISVD降噪后,关联积分曲线的标度区明显变宽, 3种信号的关联维数都随嵌入维数的增加而快速达到饱和,说明此时的信号是由烟气轮机系统本身产生的,估计出的关联维数是合理的。

由表 1可以看出,降噪后 3种故障信号的关联维数值明显不同,且随故障程度的加剧呈增大的趋势。出现这种现象的原因可能在于:系统状态在相空间总是收敛于一定的吸引子,系统正常工作时,其吸引子的结构是稳定的,当系统发生故障而状态变化时,吸引子的结构就会变化[13],而关联维数是定量刻划混沌吸引子"奇异"程度的重要特征量,对吸引子结构的变化非常敏感,因此 3种故障信号的关联维数值明显不同;同时,关联维数又是耗散系统能量变化的标志,耗散能越大,关联维数值越大,随着故障程度的加剧,系统克服故障所耗散的能量呈递增的趋势,则 3种故障信号的关联维数值呈增大的趋势。

关联维数可以敏感地反映系统的不同故障状态,因此可以将其作为非线性故障的特征指标进行定量提取。

4 结束语

将 ISVD降噪和关联维数分析相结合应用于烟气轮机的故障诊断,能有效地去除实测信号中的噪声,降噪后,不同故障状态下振动信号的关联维数明显不同,因而可将关联维数作为非线性故障诊断的特征量。

参考文献:

[1] 朱春梅,徐小力,张建民. 基于混沌分形的旋转机械故障诊断方法研究[J]. 煤矿机械, 2006, 27(6): 1101-1102.
ZHU Chun-mei, XU Xiao-li, ZHANG Jian-min. Rotary machine fault diagnosis research based on chaos and fractal theory[J]. Coal Mine Machinery, 2006, 27(6): 1101-1102.

[2] 陈予恕. 机械故障诊断的非线性动力学原理[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 25-34.
CHEN Yu-shu. Nonlinear dynamical principle of mechanical fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 25-34.

[3] 吕志民,张武军,徐金梧. 基于奇异谱的降噪方法及在故障诊断技术中的应用[J]. 机械工程学报, 1999, 35(3): 85-88.
LÜ Zhi-min, ZHANG Wu-jun, XU Jin-wu. A noise reduction method based on singular spectrum and its application in machine fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(3): 85-88.

[4] KOSTELICH K J, SCHREIBER T. Noise reduction in chaotic time-series data: a survey of common methods[J]. Phys Rev E, 1993, 48(3): 1752-1763.

[5] 张梅军, 陈江海, 侯宝科. 发动机故障分形诊断中噪声信号的分析和处理[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2006, 7(4): 380-384.
ZHANG Mei-jun, CHEN Jiang-hai, HOU Bao-ke. Analysis and processing of noise in engine fault diagnosis by fractal method[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2006, 7(4): 380-384.

[6] SHIN K, HAMMOND J K, WHITE P R. Iterative SVD method for noise reduction of low-dimension chaotic time series[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13(1): 115-124.

[7] 王朝晖,张来斌. 分形法在发动机隐含故障诊断中的应用[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(1): 54-56.
WANG Zhao-hui, ZHANG Lai-bin. Diagnosis on cryptic fault of engine with fractal method[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2003, 27(1): 54-56.

[8] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Characterization of strange attractors[J]. Phys Rev Lett A, 1983, 50(5): 346-349.

[9] THEILER J. Spurious dimension from correlation algorithms applied to limited time-series data[J]. Phys Rev A, 1986, 34(3): 2427-2432.

[10] 谢向荣, 陈洪峰, 朱石坚, 等. 关联维数在齿轮箱振动信号特征提取中的应用[J]. 海军工程大学学报, 2005, 17(6): 102-107.
XIE Xiang-rong, CHEN Hong-feng, ZHU Shi-jian, et al. Application of correlation dimension in extracting characteristics from vibration signals of gearbox[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2005, 17(6): 102-107.

[11] 李后强, 汪富泉. 分形理论及其在分子科学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 190-194.

(下转第 108页)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

els for heat transfer from a buried pipe[R]. SPE 36763, 1997.

[7] NEGIZ Antuan, HASTAOGLU Mehmet A, HEIDEMANN Robert A. Three-dimensional transient heat transfer from a buried pipe-I laminar[J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48(20): 3507-3517.

[8] 中华人民共和国石油天然气行业标准. SY/T 5537-92 原油输送管道运行技术管理规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 1992.

(编辑 沈玉英)

(上接第 98页)

[12] 张涛, 文学章. 吸引子维数计算的几点改进[J]. 浙江大学学报, 1993, 27(5): 673-679.
ZHANG Tao, WEN Xue-zhang. Several improvements in the calculation of attractor dimension[J]. Journal of Zhejiang University, 1993, 27(5): 673-679.

[13] 赵吉文, 冯志华, 刘志刚, 等. 混沌理论与小波包分析相结合的状态监测方法研究[J]. 振动与冲击, 2004, 23(4): 21-25.
ZHAO Ji-wen, FENG Zhi-hua, LIU Zhi-gang, et al. Research on chaos theory and wavelet packet method in the field of condition monitoring[J]. Journal of Vibration and Shock, 2004, 23(4): 21-25.

(编辑 沈玉英)

(上接第 102页)

[4] WANG H Y, JIANG Q C, ZHAO Y Q. Fabrication of TB_2 and TB_2-TiC particulates reinforced magnesium matrix composites[J]. Materials Science and Engineering, 2004, 372(3): 109-114.

[5] 王引真, 石建稳, 李小龙. 超音速火焰喷涂技术的现状及展望[J]. 材料导报, 2004, 18(10): 186-188.
WANG Yin-zhen, SHI Jian-wen, LI Xiao-long. The present and future situation of high velocity oxygen—fuel spraying technology[J]. Material Review, 2004, 18(10): 186-188.

[6] 姚海玉, 王引真, 王海芳, 等. Ti-Ni-C系反应超音速火焰喷涂合成研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(5): 84-88.
YAO Hai-yu, WANG Yin-zhen, WANG Hai-fang, et al. Study of reactive high velocity oxygen fuel spraying for Ti-Ni-C coatings[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2005, 29(5): 84-88.

[7] 王建江, 杜心康, 刘宏伟, 等. TiC-TiB_2复相陶瓷涂层的反应火焰喷涂制备[J]. 复合材料学报, 2006, 23(4): 100-105.
WANG Jian-jiang, DU Xin-kang, LIU Hong-wei, et al. TiC-TB_2 multiphase ceramic coatings prepared by reactive flame spray[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(4): 100-105.

[8] ZHANG X H, ZHU C C, QU W, et al. Self-propagating high temperature combustion synthesis of TiC/TB_2 ceramic-matrix composites[J]. Comp Sci Tech, 2002, 62(15): 2037-2041.

[9] 刘家浚. 材料磨损原理及耐磨性[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 82.

[10] 朱子新, 徐滨士, 马世宁. 高速电弧喷涂 Fe-Al/WC复合涂层的摩擦学特性[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(3): 174-179.
ZHU Zi-xin, XU Bin-shi, MA Shi-ning. Tribological Properties of Fe-Al/WC composite coating prepared by high velocity arc spraying[J]. Tribology, 2003, 23(3): 174-179.

[11] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 174.

(编辑 沈玉英)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net