

文章编号:1673-5005(2012)01-0112-05

基于混沌理论的往复式压缩机故障诊断

张来斌¹, 陈敬龙², 段礼祥¹

(1. 中国石油大学 机械与储运工程学院 北京 102249; 2. 中原石油勘探局 勘察设计研究院, 濮阳 457001)

摘要:实测某往复压缩机气缸在正常、活塞体松动及拉缸工况下的振动信号,计算信号的关联维数、Kolmogorov 熵及最大 Lyapunov 指数,并证明信号具有非线性。用奇异值分解(SVD)降噪法对信号进行降噪,通过奇异熵增量曲线选择降噪阶次,用互信息法求最佳延时,并用假近邻域法求最佳嵌入维数,同时用 G-P 算法、小数据量法求出关联维数、Kolmogorov 熵及最大 Lyapunov 指数。计算结果表明,3种工况下的往复压缩机气缸振动信号均为非线性混沌信号,故障越严重,信号表现出的混沌特性越明显,可依据混沌指标对往复压缩机气缸的状态进行监测。

关键词:往复压缩机;混沌理论;非线性信号;故障诊断

中图分类号:TH 17 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2012.01.019

Fault diagnosis of reciprocating compressor based on chaos theory

ZHANG Lai-bin¹, CHEN Jing-long², DUAN Li-xiang¹

(1. College of Mechanical and Transportation Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Survey and Design & Research Institute, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang 457001, China)

Abstract: The vibration signals of a cylinder were measured in three work conditions, including normal operation, loosening of piston and piston-liner wear, then chaotic indexes were calculated and the nonlinear characteristics of these signals were proved. Firstly, the original signals were decomposed using singular value decomposition(SVD), and a reasonable order for noise reduction was selected according to the singular entropy of singular spectrum, and the best delay was calculated using mutual information method, and the best embedding dimension was calculated using fault near neighbour method. Then correlation dimensions and Kolmogorov entropies were calculated using G-P algorithm simultaneously, and the largest Lyapunov exponents were calculated using small-data method. The results show that the cylinder vibration signals are nonlinear chaotic signal, and the more serious the fault is, the more apparent the chaotic character is. The vibration condition monitoring for the reciprocating compressor can be implemented using chaotic indexes.

Key words: reciprocating compressor; chaos theory; nonlinear signal; fault diagnosis

往复压缩机是油田广泛使用的设备,但其易损部件多。活塞和缸壁发生碰磨可导致气缸损伤,严重时会引起活塞杆断裂、连杆断裂及曲轴变形,甚至导致整台机组报废,造成巨大的经济损失。对往复压缩机的气缸进行状态监测非常重要,其中通过振动信号对气缸进行故障诊断是较常用的方法。但是,往复压缩机振源多、气缸振动信号具有强非线性,用常规的频谱分析难以对其做出准确的诊断。混沌理论属于非线性科学,适合于处理非线性信号^[1-2],可将混沌理论用于往复压缩机的故障诊断,

通过混沌指标对往复压缩机进行状态监测。往复压缩机气缸振动信号是否是非线性信号必须加以证明,否则计算信号的混沌特性将无意义。目前尚无学者研究往复压缩机的气缸振动信号是否是非线性,因此笔者采用替代数据法对其进行证明。

1 信号降噪

设信号 $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, 将其用 Takens 嵌入定理进行重构^[3]:

$$A = (x(t), x(t + \tau), \dots, x(t + (n - 1)\tau)). \quad (1)$$

收稿日期:2011-05-23

基金项目:国家“863”计划项目(2008AA06Z209);中国石油天然气集团公司创新基金项目(07E1005)

作者简介:张来斌(1961-),男(汉族),安徽铜陵人,教授,博士,博士生导师,现从事石油机械工程方面的教学与科研工作。

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

根据奇异值分解理论, A 满足以下关系式:

$$A = USV^T. \quad (2)$$

矩阵 S 的非对角元素全为 0, 其对角元素 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_l \geq 0, \lambda_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 是矩阵 A 的奇异值。将较小的 λ_i 置为 0, 构成一个新的对角矩阵 S' , 用 S' 代替 S , 代入式(2)中算出一个新的矩阵 A' , 通过构造相空间的逆过程, 从 A' 中可获取降噪后的信号。通过奇异熵法可确定降噪阶次, 奇异熵的计算公式^[4] 为

$$E_k = \sum_{i=1}^k \Delta E_i, k \leq l, \quad (3)$$

其中

$$\Delta E_i = - \left(\frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^l \lambda_j} \right) \lg \left(\frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^l \lambda_j} \right).$$

式中, E_k 为阶次为 k 时的奇异熵; ΔE_i 为奇异熵在阶次为 i 时的增量。

当 ΔE_i 曲线开始下降并趋向于一个较小的稳定值时, 选择此时的 i 作为降噪阶次。

为验证奇异值分解降噪的效果, 将其用于仿真信号的降噪。在 Lorenz 信号上叠加白噪声信号, 图 1 为含噪信号的伪相图。用奇异值分解降噪对信号进行降噪处理, 图 2 为降噪后信号的伪相图。可看

出混沌吸引子变得清晰。可见, 奇异值分解降噪具有很好的降噪效果。

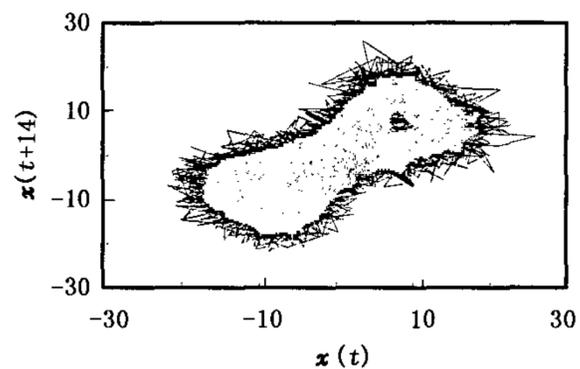


图 1 含噪信号的伪相图

Fig. 1 Pseudo-phase portrait of original signal

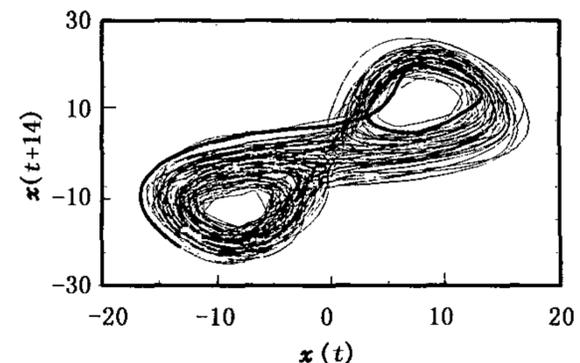


图 2 SVD 降噪后信号的伪相图

Fig. 2 Pseudo-phase portrait for noise reduction by SVD

实测的某往复式压缩机 2 号气缸 3 种工况下的加速度振动信号如图 3 所示。采样频率为 16 kHz, 采样长度为 10240 个点。工况 1 为正常, 工况 2 为活塞体松动, 工况 3 为活塞体与缸壁碰磨。用奇异值分解降噪对原始信号进行降噪处理。

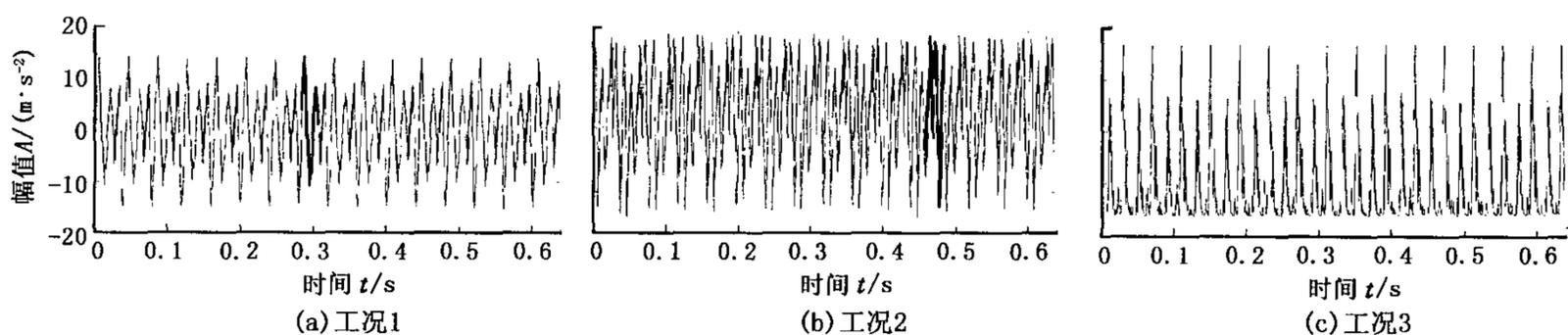


图 3 3 种工况下气缸的原始振动信号

Fig. 3 Original cylinder vibration signals under three work conditions

2 最佳延时及嵌入维数

2.1 最佳延时的计算

自相关法是计算最佳延时的常用方法^[5], 但自相关函数只能表征信号中的线性关系。互信息能表征信号中的非线性, 故笔者选用互信息法^[6-7] 计算最佳延时。

延时 $\tau = k\Delta t$, Δt 为相邻采样点的时间间隔。令 $[s, q] = [x(n), x(n+k)]$, 在 (s, q) 平面上用一个矩形划出所求的所有点, s 方向的长度为 Δs , q 方向的长度为 Δq 。等间隔划分 Δs 和 Δq , s 方向格子数为

M , 格子长度为 ε_s ; q 方向格子数为 M' , 格子长度为 ε_q 。 (a, b) 是所划区域的起点, 做如下判断: 若 $(i-1)\varepsilon_s \leq s-a < i\varepsilon_s$, 则 s 在第 i 个格子中, 对 N_i 做一次记录; 若 $(j-1)\varepsilon_q \leq q-b < j\varepsilon_q$, 则 q 在第 j 个格子中, 对 N_j 做一次记录; 若 $(i-1)\varepsilon_s \leq s-a < i\varepsilon_s$ 且 $(j-1)\varepsilon_q \leq q-b < j\varepsilon_q$, 则 (s, q) 在标号为 (i, j) 的格子中, 对 N_{ij} 做一次记录。 N_{total} 为矩形区域中的总点数, 可得 $p_s(i) = N_i/N_{\text{total}}, p_q(j) = N_j/N_{\text{total}}, p_{sq}(i, j) = N_{ij}/N_{\text{total}}$ 。

互信息的计算公式为

$$I(s, q) = H(s) + H(q) - H(s, q), \quad (4)$$

其中

$$H(s) = - \sum_i p_s(i) \lg p_s(i),$$

$$H(q) = - \sum_j p_q(j) \lg p_q(j),$$

$$H(s, q) = - \sum_{i,j} p_{sq}(i, j) \lg p_{sq}(i, j),$$

把互信息标准化为

$$I(s, q) = I(s, q) / \sqrt{H(s) \times H(q)}.$$

互信息曲线第一次下降到极小值所对应的延时为最佳延时。格子数取为 80×80 , 经计算, 3种工况下的最佳延时分别为 50、40 和 32。

2.2 最佳嵌入维数的计算

选用假近邻域法^[8] 计算最佳嵌入维数, 传统的假近邻域法有多处需要人为选取阈值, 不利于计算, 故用改进的假近邻域法^[9] 计算最佳嵌入维数。

对时间序列 (x_1, x_2, \dots, x_N) 进行相空间重构:

$$X = \{x(n), x(n+k), \dots, x[n+(m-1)k]\}, n=1, 2, \dots, M; M=N-(m-1)k. \quad (5)$$

式中, m 为嵌入维数; k 为时间延迟。

计算距离矩阵 R , 共有 $M(M-1)/2$ 个元素, 其中

$$r_{ij} = \left[\sum_{l=0}^{m-1} (x(i+lk) - x(j+lk))^2 \right]^{1/2}.$$

求取 R 的最小值 R_{\min} 和最大值 R_{\max} , 则

$$\begin{cases} r_{ij} \leq R_{\min} + p_0(R_{\max} - R_{\min}), \text{邻域点;} \\ r_{ij} > R_{\min} + p_0(R_{\max} - R_{\min}), \text{非邻域点.} \end{cases}$$

式中, p_0 为阈值参数; $p_0 \in [0, 1]$, 本文中选取 $p_0 = 0.1$ 。

令 $m = m_1$, 统计邻域点总数, 再令 $m = m_1 + 1$, 计算 $m = m_1$ 时的邻域点是否为真邻域点, 统计非邻域点总数, 并计算非邻域点总数与邻域点总数的比值。不断重复这个过程, 直到比值小于 0.05, 或不再随 m 的增加而增加, 取此时的 m 为最佳嵌入维数。经计算 3 种工况下气缸振动信号的最佳嵌入维数为 13、16 和 20。

3 关联维数及 Kolmogorov 熵

3.1 关联维数的计算

Grassberger 和 Procacciay 提出了 G-P 算法^[10], 可用其计算关联维数。对时间序列进行相空间重构后, 计算向量的距离。计算有关联的向量对数, 它在一切可能的 $M(M-1)$ 种配对中所占的比例称为关联积分表达式, 表示为

$$C_n(r) = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i,j=1}^M \theta(r - r_{ij}), i \neq j. \quad (6)$$

式中, $\theta(\cdot)$ 为 Heaviside 单位函数, 表示为

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0; \\ 1, & x > 0. \end{cases}$$

根据式(6)可计算关联积分 $C_n(r)$ 。当 r 在某一范围时, 关联积分 $C_n(r)$ 与 r 存在以下关系:

$$\lim_{r \rightarrow 0} C_n(r) \propto r^D. \quad (7)$$

由式(7)可得

$$D = \lg C_n(r) / \lg r. \quad (8)$$

图 4 为 3 种工况下气缸振动信号的关联积分曲线, 图 5 为相应的局部斜率曲线。

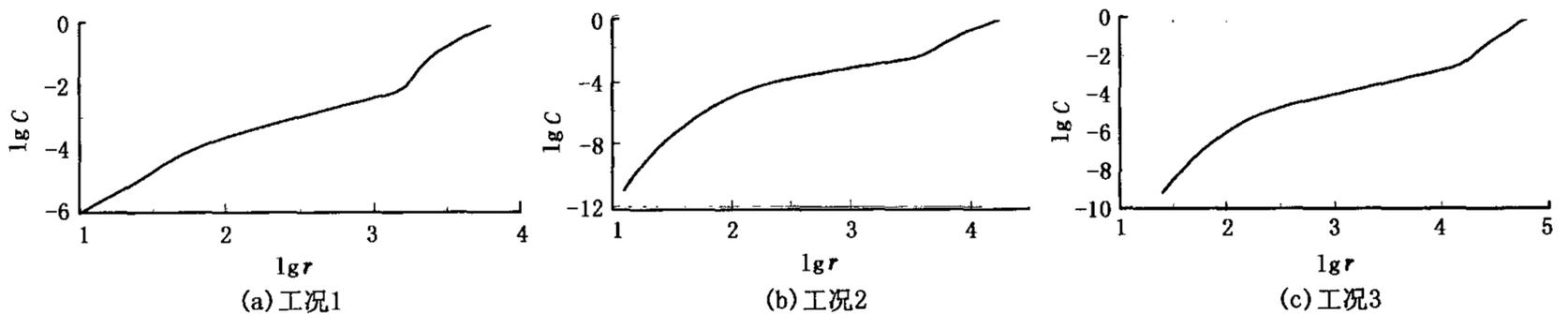


图 4 3 种工况下气缸振动信号的关联积分曲线

Fig. 4 Correlation integral curves of cylinder vibration signals under three work conditions

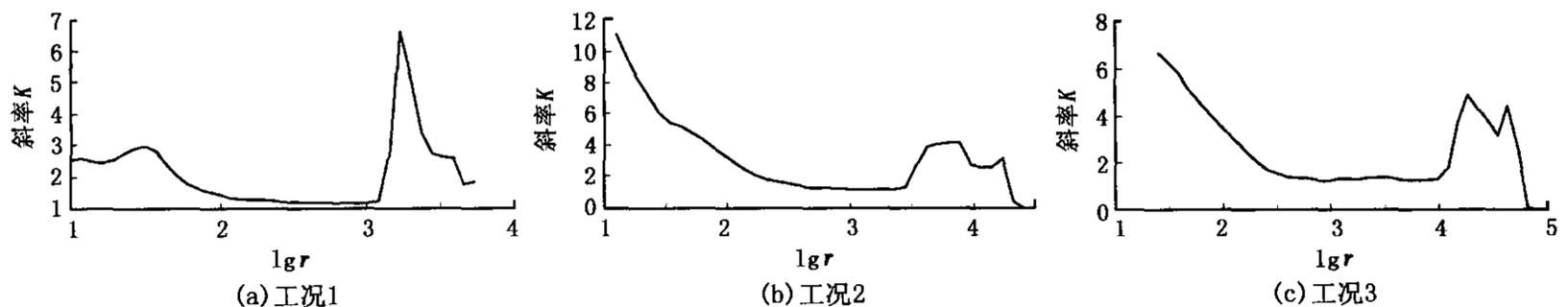


图 5 局部斜率曲线

Fig. 5 Local slope curves

根据局部斜率曲线,用最小二乘法对关联积分曲线的直线部分进行计算,直线斜率即为关联维数。3种工况下的关联维数分别为1.1853、1.1955和1.2951。随着故障程度的加剧,关联维数增大。这是因为故障越严重,系统的耗散能越大,引起能量变化的作用力也就越大。

3.2 Kolmogorov 熵

Grassberger 和 Procacciay 提出了计算 Kolmogorov 熵的算法^[11]。Kolmogorov 熵的定义如下:设一个动力系统的自由度为 F ,将 F -维相空间划分为一系列的盒子,盒子的尺寸为 ε^F ,假设相空间中存在一个吸引子,每隔 τ 对系统的状态进行测量。令 $p(i_1, i_2, \dots, i_d)$ 为 $\vec{x}(t = \tau)$ 在盒子 i_1 中, $\vec{x}(t = 2\tau)$ 在盒子 i_2 中, \dots , 且 $\vec{x}(t = d\tau)$ 在盒子 i_d 中的联合概率,则 Kolmogorov 熵的表达式为

$$K = - \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{1}{d\tau} \sum_{i_1, i_2, \dots, i_d} p(i_1, i_2, \dots, i_d) \lg p(i_1, i_2, \dots, i_d). \quad (9)$$

文献[11]中已证明,在某些情况下 K_2 在数值上接近于 K 。计算 K 是非常困难的,但计算信号的 K_2 较容易,因此可以用 K_2 估计 K 。 K_2 的计算公式为

$$K_2 = - \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{1}{d\tau} \lg \sum_{i_1, i_2, \dots, i_d} p^2(i_1, i_2, \dots, i_d). \quad (10)$$

也可通过下式计算 K_2 :

$$K_2(\varepsilon) = \frac{1}{d\tau} \lg \frac{C_m(\varepsilon)}{C_{m+d}(\varepsilon)}. \quad (11)$$

当 $d \rightarrow \infty, m \rightarrow \infty, \varepsilon \rightarrow 0$ 时, $K_2 \rightarrow K$ 。

用 G-P 算法计算关联积分时,可同时算出 Kolmogorov 熵。3种工况下气缸振动信号的 Kolmogorov 熵分别为 7.68×10^{-4} 、 8.32×10^{-4} 和 8.53×10^{-4} 。随着故障程度的加剧, Kolmogorov 熵也增大,这是因为引起系统能量耗散的冲击力增大。

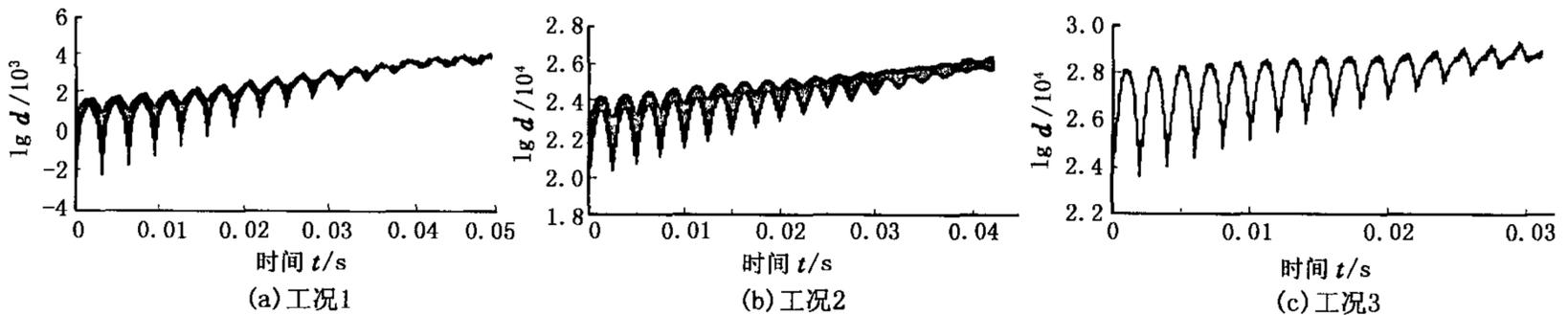


图6 求取最大 Lyapunov 指数的曲线

Fig.6 The largest Lyapunov exponent curves

5 气缸振动信号的非线性证明

Theiler 等^[13]提出了用替代数据法检验时间序

4 最大 Lyapunov 指数

最大 Lyapunov 指数是混沌特性的一个重要的指标,如果信号有最大 Lyapunov 指数且为正值,则说明该系统是混沌的。因实际获取的信号长度有限,故选用小数据量法^[12]计算最大 Lyapunov 指数。

对信号进行相空间重构,计算相空间每个点的最短初始距离,并限制短暂分离。

$$d_j(0) = \min_{X_j} \|X_j - X_j\|, |j - \hat{j}| > p.$$

其中 p 为平均周期,可通过傅里叶变换估算出来。

$$p = \sum_{i=1}^L A_i \left(\sum_{i=1}^L f_i A_i \right)^{-1}.$$

式中, $f_i (i = 1, 2, \dots, L)$ 为 0 到奈奎斯特频率之间均匀分布的频率点; A_i 为对应于 f_i 的幅值。

对相空间中的每个点,计算该邻点对的 i 个离散时间步后的距离 $d_i(j)$ 。

$$d_i(j) = \|X_{j+i} - X_j\|.$$

式中, $i = 1, 2, \dots, \min(M - j, M - \hat{j})$ 。对每个 i , 求出所有 j 的 $\lg d_i(j)$ 的平均值 $y(i)$ 。

$$y(i) = \frac{1}{h\Delta t} \sum_{j=1}^h \lg d_i(j).$$

式中, h 为非零 $d_i(j)$ 的数目。

用最小二乘法对曲线 $y(i)$ 的直线部分做线性回归,直线的斜率就是最大 Lyapunov 指数 λ_1 。

图6为求取气缸振动信号的最大 Lyapunov 指数曲线,工况1~工况3的最大 Lyapunov 指数分别为4.3195、4.4448和4.6131。3种工况下的最大 Lyapunov 指数都是正值,且故障越严重,最大 Lyapunov 指数越大。可见,随着故障程度的加剧,系统的混沌特性越明显。

列中的非线性,雷敏^[14]对该算法进行了改进。

对时间序列进行傅里叶变换。

$$X(f) = A \exp(j\varphi(f)).$$

对相位进行随机化,新生成的相位 $\varphi(f) \in [-\pi, \pi]$ 。当信号长度为奇数时, $\varphi(f_1 = 0), \varphi(f_i) = -\varphi(f_k), i = 1 \sim (N+1)/2, k = N \sim (N+1)/2 + 1$ 。当信号长度为偶数时, $\varphi(f_1 = 0), \varphi(f_{N/2+1}) = 0, \varphi(f_i) = -\varphi(f_k), i = 2 \sim N/2, k = N \sim N/2 + 2$ 。引入以下判据^[15]:

$$S = |D_{\text{orig}} - \bar{D}_{\text{surr}}| / \sigma_{\text{surr}} \quad (12)$$

式中, D_{orig} 为原始数据的关联维数; \bar{D}_{surr} 为所有替代数据关联维数的平均值; σ_{surr} 为所有替代数据关联维数的标准差。若取显著水平 $\alpha = 0.05$, 则当 $S \geq 1.96$ 时, 原始数据以 95% 的置信水平为非线性序列; 当 $S < 1.96$ 时, 原始数据以 95% 的置信水平为随机序列。

各工况下都生成 10 组替代数据, 计算其关联维数, 并计算各工况下关联维数的均值和标准差, 结果见表 1。将表 1 数据代入式(12), 可算得各工况下的 S 。

表 1 3 种工况下关联维数的统计量

Table 1 Statistics of correlation dimensions under three work conditions

统计量	工况 1	工况 2	工况 3
D_{orig}	1.1853	1.1955	1.2951
\bar{D}_{surr}	3.5425	3.3176	3.4048
σ_{surr}	0.1092	0.0536	0.1158

工况 1: $S_1 = 21.5860 > 1.96$;

工况 2: $S_2 = 39.5914 > 1.96$;

工况 3: $S_3 = 18.2185 > 1.96$ 。

3 种工况下的判据 S 都大于 1.96, 可见, 往复压缩机的气缸振动信号是非线性混沌信号。

6 结 论

(1) 计算的 3 种工况下某往复压缩机气缸振动信号的混沌指标包括关联维数、Kolmogorov 熵和最大 Lyapunov 指数。故障越严重, 这 3 个指标的值越大, 且 3 种工况下的最大 Lyapunov 指数都为正值。往复压缩机的气缸振动信号具有混沌特性, 且故障越严重, 混沌特性越明显。混沌指标对往复压缩机气缸的工况很敏感, 可通过混沌指标对往复压缩机气缸进行状态监测。

(2) 用替代数据法证明了 3 种工况下往复压缩机气缸振动信号是非线性混沌信号, 可用混沌理论对其进行分析。

参考文献:

[1] 吴光强, 盛云. 混沌理论在汽车非线性系统中的应用

进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 81-87.

WU Guang-qiang, SHENG Yun. Review on the application of chaos theory in automobile nonlinear system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 81-87.

[2] 韩敏. 混沌时间序列预测理论与方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 97-150.

[3] 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.

[4] YANG Wen-xian, PETER W. Development of an advanced noise reduction method for vibration analysis based on singular value decomposition [J]. NDT and E International, 2003, 36(6): 419-432.

[5] 陈铿, 韩伯棠. 混沌时间序列分析中的相空间重构技术综述[J]. 计算机科学, 2005, 32(4): 67-70.

CHEN Keng, HAN Bo-tang. A survey of state space reconstruction of chaotic time series analysis [J]. Computer Science, 2005, 32(4): 67-70.

[6] LIEBERT W, SCHUSTER H G. Proper choice of the time delay for the analysis of chaotic time series [J]. Phys Lett A, 1989, 142: 107-111.

[7] 杨志安, 王光瑞, 陈式刚. 用等间距分格子法计算互信息函数确定延迟时间[J]. 计算物理, 1995, 12(4): 442-448.

YANG Zhi-an, WANG Guang-rui, CHEN Shi-gang. Determination of delay time by calculating mutual information with equally distant space cells [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1995, 12(4): 442-448.

[8] KENNEL Mathew B, BROWN R Abarbanel H D I. Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction [J]. Phys Rev A, 1992, 45: 3403-3411.

[9] 岳毅宏, 韩文秀, 王健. 基于相点距离集的相空间重构嵌入维数确定法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(10): 35-38.

YUE Yi-hong, HAN Wen-xiu, WANG Jian. Embedding dimension in phase-space reconstruction based on distance set of phase points [J]. Chinese Journal of Mechanical, 2005, 41(10): 35-38.

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

[11] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal [J]. Phys Rev A, 1983, 28(4): 2591-2593.

(下转第 121 页)

6 结 论

(1) 确定隔水管单根主管壁厚主要有环向应力准则、轴向应力准则和挤毁压力准则,根据环向应力准则得到的结果最保守;确定辅助管线参数主要依据等效应力准则;确定浮力块参数主要是合理确定浮力块的外径和密度;隔水管接头等级要考虑不同载荷工况进行选型确定。

(2) 外径 0.5334 m, 内径 0.48895 m 的隔水管可应用于 1830 m 的水域,且隔水管系统中无须配置填充阀,辅助管线设计合理,浮力块选用 3 种密度可满足工作水深的需要,选配 E 级隔水管接头可满足使用要求。

参考文献:

- [1] 畅元江,陈国明,孙友义,等.深水钻井隔水管的准静态非线性分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(3):114-118.
CHANG Yuan-jiang, CHEN Guo-ming, SUN You-yi, et al. Quasi-static nonlinear analysis of deepwater drilling risers[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(3):114-118.
- [2] HUGH McCrae. Marine riser systems and subsea blowout preventers [M]. Austin: University of Texas Press, 2003.
- [3] 畅元江,陈国明,许亮斌,等.超深水钻井隔水管系统设计影响因素分析[J].石油勘探与开发,2009,36(4):523-528.
CHANG Yuan-jiang, CHEN Guo-ming, XU Liang-bin, et al. Influential factors for the design of ultra-deepwater drilling risers [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4):523-528.
- [4] 畅元江,陈国明,许亮斌.导向架隔水管在波流联合作用下的非线性动力响应[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(5):74-77.
CHANG Yuan-jiang, CHEN Guo-ming, XU Liang-bin. Non-linear dynamic response induced by wave-current for marine risers with guide-frames [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(5):74-77.
- [5] GUESNON J, GAILLARD Ch, RICHARD F. Ultra deep water drilling riser design and relative technology [J]. Oil & Gas Science and Technology, 2002, 57(1):39-57.
- [6] CHARLES P Sparks. Fundamentals of marine riser mechanics: basic principles and simplified analyses [M]. Tulsa: Pennwell Corp, 2007.
- [7] 畅元江.深水钻井隔水管设计方法及其应用研究 [D].东营:中国石油大学机电工程学院,2008.
CHANG Yuan-jiang. Design methods and its application of deepwater drilling risers [D]. Dongying: College of Electromechanical Engineering in China University of Petroleum, 2008.
- [8] 畅元江,陈国明,许亮斌,等.深水顶部张紧钻井隔水管非线性静力分析[J].中国海上油气,2007,19(3):203-207.
CHANG Yuan-jiang, CHEN Guo-ming, XU Liang-bin, et al. Nonlinear static analysis of top tensioned drilling riser in deepwater [J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(3):203-207.
- [9] ERB P R, MA T C, STOCKINGER M P. Riser collapse—a unique problem in deep-water drilling [R]. SPE 11394, 1983.
- [10] GUESNON Jean. GAILLARD Christian. Method for dimensioning a riser element with integrated auxiliary lines: US, 6991038 [P]. 2006-01-31.
- [11] American Petroleum Institute. API RP 16R—1997 Specification for marine drilling riser couplings [S]. Washington: American Petroleum Institute, 1997.
(编辑 沈玉英)
- (上接第 116 页)
- [12] MICHAEL T Rosenstein, JAMES J Collins, CARLO J De Luca. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets [J]. Physical D, 1993, 65:117-134.
- [13] THEILER J, EUBANK S, LONGTIN A, et al. Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data [J]. Physica D, 1992, 58:77-94.
- [14] MIN Lei, WANG Zhi-zhong, FENG Zheng-jin. Detecting nonlinearity of action surface EMG signal [J]. Physics Letters A, 2001, 290:297-303.
- [15] ROMBOUTS S, KEUNEN R. Investigation of nonlinear structure in multichannel EEG [J]. Phys Lett A, 1995, 202:352-358.
(编辑 沈玉英)