

文章编号: 1000-5013(2012)03-0241-06

采用关联维的溢流阀故障诊断

高宇, 黄宜坚

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 用 Grassberger-Procaccia(G-P)算法合理选择嵌入维数、数据长度、延迟时间等重要参数,并且在对数曲线图中准确划定无标度区,以得到比较客观的关联维数. 结果表明:关联维有定量描述非线性信息的特点,在一定的工作条件下,不同的故障类型对应不同的关联维数,通过计算溢流阀振动信号的关联维数来诊断出其工作状态.

**关键词:** 溢流阀; 故障诊断; Grassberger-Procaccia 算法; 关联维

**中图分类号:** TH 165.3                      **文献标志码:** A

分形是从几何学角度研究不规则几何形状的工具,也是定量研究自然界中复杂动力学行为的有力手段. 关联维是分形方法之一,它对系统吸引子的不均匀性反映敏感,能够很好地反映吸引子的动态结构. 关联维因其良好的特征性,通过重构相空间与非线性问题建立了联系,近年在水声信号处理<sup>[1]</sup>、地震信号处理<sup>[2]</sup>、机械故障诊断<sup>[3-6]</sup>等领域得到应用. 因此,关联维作为解决复杂非线性问题的重要方法具有广阔的应用前景. 本文对溢流阀的振动信号进行相空间重构,计算其关联维数.

1 实验装置

选择液压实验装置的先导式溢流阀为研究对象,而位移传感器采集溢流阀横向振动的位移信号. 图 1 为液压实验装置图,图 2 为信号采集时位移传感器的安装位置,图 3 为先导式溢流阀的结构示意图. 溢流阀由主阀芯、阻尼孔、先导锥阀、调压弹簧、主阀弹簧等组成<sup>[7]</sup>.

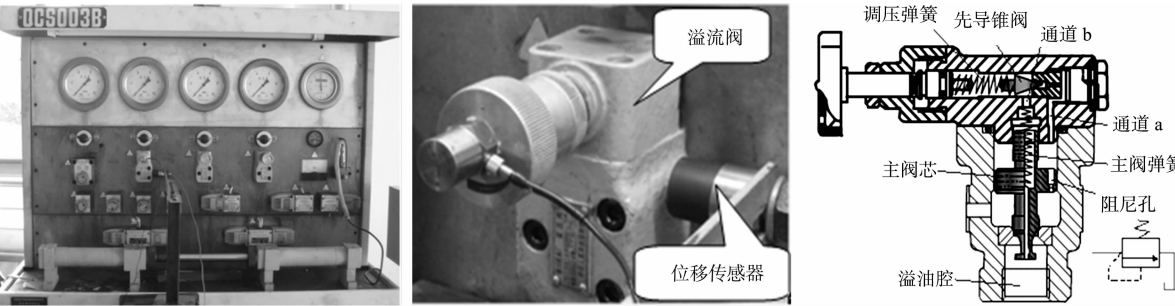


图 1 液压实验装置                      图 2 位移信号采集                      图 3 溢流阀结构

Fig. 1 Hydraulic test equipment                      Fig. 2 Displacement signal acquisition                      Fig. 3 Structure of the relief valve

其工作原理:主阀用来控制溢流流量,保持系统压力恒定;导阀用来调定主阀部分的溢流压力. 压力油由溢流阀进油口进入主阀下腔,经主阀芯上的阻尼孔流入主阀上腔,再流经通道 a,当系统压力大于调压弹簧预调压力时,锥阀左移,先导锥阀打开,部分压力油经通道 b 流入主阀芯中间的通道,再经溢流口流回油箱. 油液流经阻尼孔时受阻力影响,会在阻尼孔两端产生压力差. 当压力差大于主阀弹簧力时,主阀芯向上提升,阀口被打开,将多余的油从溢油腔溢回油箱. 主阀溢流量的多少是由主阀芯开口大小

来确定,而确定主阀芯开口量的是主阀芯上下腔(即阻尼孔两端)的油液压力差.

当溢流阀发生故障时,如当阻尼孔被阻塞时,系统的调整压力变小;而当弹簧损坏时,系统压力不稳定,发生振荡等.溢流阀内部的液压油流动会产生振动,分析其振动信号可以有效了解其工作状态.实验对溢流阀设置了正常状态和 4 种故障状态,所有的工作状态都是在压强为 6 MPa 的液压环境中进行的. 1) 故障 1. 主阀弹簧变形. 2) 故障 2. 阻尼孔内加小纸团代替异物. 3) 故障 3. 主阀芯未安装弹簧. 4) 故障 4. 调压弹簧变形.

2 数据预处理

实验采用 ST-1-03 型非接触式电涡流位移传感器和 PCI-6014 数据采集卡(美国国家仪器(NI)公司),在基于 LabVIEW 虚拟仪器的平台上采集、存储数据,采样频率  $f=1\,000\text{ Hz}$ ,每组实验采样数据长度为  $N=6\,000$  个.在信号采集时,传感器受到周围环境不确定因素的干扰,信号出现毛刺,给计算信号真实的关联维数带来一定的误差,需要对原始数据信号进行平滑预处理,降低干扰对关联维数计算的影响.因此,通过五点滑动平均法进行数据预处理.信号经五点滑动平均法处理前后,其对比图如图 4 所示.由图 4 可知:处理后的信号较为平滑.

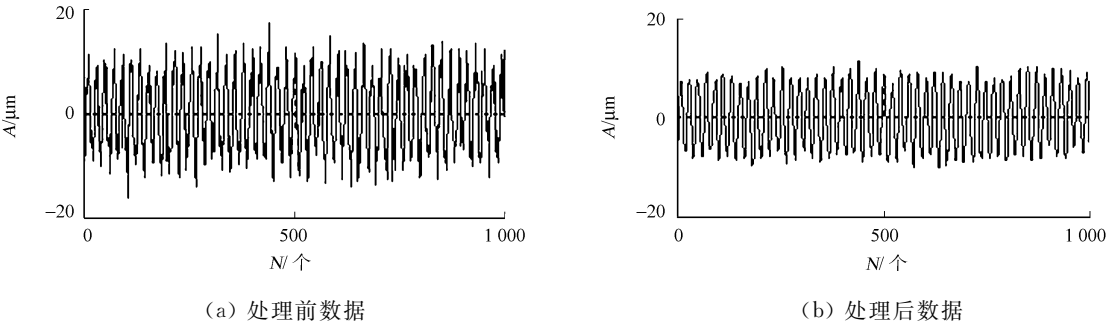


图 4 位移信号经五点滑动平均法处理前后对比图

Fig. 4 Comparison charts of displacement signals processed before and after by five-point moving average method

3 关联维算法

3.1 时间序列的相空间重构

一般来说,非线性系统的相空间可能维数很高,但在大多数情况下维数是未知的.对于给定的时间序列  $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_{n-1}, x_n, \cdots$ ,通常是将其扩展到三维甚至更高维的空间中去,以便把时间序列中蕴藏的信息充分地展露出来,这是目前广泛采用的延迟坐标状态空间重构法<sup>[8-9]</sup>.相空间重构的基本思想是动力系统中任一分量的演化都是由与之相互作用的其他分量决定的,这些相关分量的信息隐含在任一分量的发展过程中.

对溢流阀位移信号的时间序列  $\{x(i), i=1, 2, 3, \cdots, n\}$  用延迟时间法进行相空间重构,嵌入维数为  $m$  时的相空间向量表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_1 &= (x_1, x_{1+\tau}, x_{1+2\tau}, \cdots, x_{1+(m-1)\tau}), \\ \mathbf{X}_2 &= (x_2, x_{2+\tau}, x_{2+2\tau}, \cdots, x_{2+(m-1)\tau}), \\ &\vdots \\ \mathbf{X}_{N-1} &= (x_{N-1}, x_{N-1+\tau}, x_{N-1+2\tau}, \cdots, x_{n-1}), \\ \mathbf{X}_N &= (x_N, x_{N+\tau}, x_{N+2\tau}, \cdots, x_n). \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

建立的重构相空间为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \cdots, \mathbf{X}_N]^T.$$

即

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_{1+\tau} & x_{1+2\tau} & \cdots & x_{1+(m-1)\tau} \\ x_2 & x_{2+\tau} & x_{2+2\tau} & \cdots & x_{2+(m-1)\tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-1} & x_{N-1+\tau} & x_{N-1+2\tau} & \cdots & x_{n-1} \\ x_N & x_{N+\tau} & x_{N+2\tau} & \cdots & x_n \end{bmatrix}.$$

式(1)中： $N$  为重构相空间后的向量个数，且  $N=n+(1-m)\tau$ ； $m$  为嵌入空间的维数； $n$  为时间序列信号的数据个数； $\tau$  为固定时间间隔，是采样时间间隔的整数倍。

3.2 G-P 算法

关联维数是 Gtassberger 和 Procaccia 在相空间重构基础上提出的，由时间序列计算相应动力系统吸引子关联维数的方法，即 G-P 算法<sup>[10-11]</sup>。相空间重构之后，定义关联积分函数为

$$C_m(r) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j=1}^N \theta(r-r_{i,j}). \tag{2}$$

式(2)中： $r_{i,j}=d(X_i-X_j)=\|X_i-X_j\|$ ，即任选一个参考点  $X_i$ ，计算  $X_i$  到其余各点之间的距离，对  $X_i$  ( $i=1,2,\cdots,N$ ) 重复计算，得到所有点对的间距； $r$  为观测尺度； $\theta(u)$  为 Heaviside 函数，即

$$\theta(u) = \begin{cases} 1, & u \geq 0, \\ 0, & u < 0. \end{cases} \tag{3}$$

关联积分函数的含义为当变量  $r$  一定时，重构相空间  $X$  中的所有点对之间距离小于  $r$  的点的个数占所有点的多少。适当地选取  $r$ ，在无标度区内存在  $D=\frac{\ln C_m(r)}{\ln r}$ ， $D$  为关联维数。

3.3 关联维参数选择

在相空间重构过程不丢失数据信息的情况下，应使数据的自相关程度尽可能地小。实验选择自相关函数法，自相关函数值的第 1 个零点所对应的延迟时间值为最佳时延<sup>[9]</sup>。经过验证，不同状态的溢流阀振动信号的延迟时间相差不大。在  $\tau=5$  情况下，溢流阀在正常状态时的自相关函数图如图 5 所示。

嵌入维数  $m$  是指能完全包容吸引子的最小子空间维数，它是重构相空间的一个重要参数。在由单变量的时间序列重构相空间时，为了保证该相空间容纳该状态空间原吸引子的拓扑结构特性，Takens 从数学上证明了嵌入相空间维数大小的嵌入定理。即  $m>2d+1$ 。其中： $m$  为嵌入维数； $d$  为原吸引子所处的维数。当嵌入维数过小时，重构的相空间无法反映原系统的动力学特性；而当嵌入维数过大时，在增加计算量的同时，多余的相空间维数将放大原时间序列中噪声的效应。本实验在处理溢流阀数据时，发现嵌入维数选择在 50 左右比较合适，如图 6 所示。从图 6 可知：随着  $m$  的增大，关联维数趋于稳定状态，故实验中取  $m=50$ 。

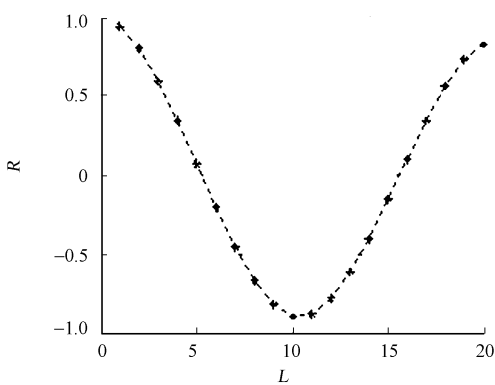


图 5 自相关函数图

Fig. 5 Graph of autocorrelation function

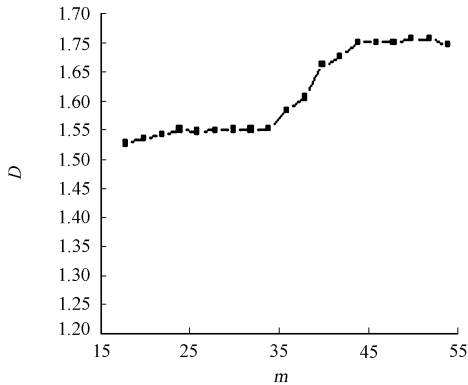


图 6 关联维与嵌入维的关系

Fig. 6 Relation of correlation dimension and embedding dimension

理论上，不同长度的时间序列，计算所得的分形关联维数略有不同。随着时间序列长度的增大，关联维数趋于稳定，计算结果也越精确，但过多的数据计算量过大，故实验时间序列的长度  $n$  取 1 000。

3.4 确定无标度区

将双对数曲线中直线度较好的区间定义为无标度区<sup>[12]</sup>. 一般无标度区的确定采用肉眼判别法, 简单快速, 但带有主观性和随意性, 使关联维数的计算结果产生很大偏差. 因此, 准确客观地确定无标度区间对关联维数的计算尤为重要. 文中采用以最小曲率为基点, 其余各点斜率和其逐一比较的方法找出线性度较好的区域, 定为无标度区.

对于溢流阀同一组信号, 不同嵌入维数双对数曲线变化图及无标度区, 如图 7 所示. 从图 7 可知: 无标度区曲线随着  $m$  的增加趋于平行或者重合, 也验证了随着  $m$  的增大, 关联维数趋于稳定状态; 当  $m$  为 50 时, 双对数曲线趋于一致, 故在溢流阀数据处理时, 选择  $m=50$ .

4 溢流阀关联维分析

每组实验采集  $N=6\ 000$  个数据, 在每组中随机选择一段  $n=1\ 000$  个的连续数据, 对其计算关联维数. 当溢流阀在不同工作状态时, 嵌入维数从 44 到 50 时关联维数  $D$  值, 如表 1 所示. 由表 1 可见:  $D$  值略有变化, 但基本趋于稳定.

表 1 各种状态下的不同嵌入维数对应的  $D$  值

Tab. 1  $D$  values corresponding to different embedding dimensions in various conditions

状态	$m$						
	44	45	46	47	48	49	50
正常	2.29	2.31	2.32	2.33	2.33	2.33	2.33
故障 1	2.27	2.23	2.24	2.24	2.25	2.25	2.25
故障 2	1.75	1.71	1.71	1.71	1.70	1.69	1.71
故障 3	2.14	2.04	2.08	2.08	2.11	2.08	2.07
故障 4	1.97	1.97	1.93	1.98	1.97	1.98	1.97

不同状态下传感器采集的数据经过预处理后的信号图, 以及  $m=50$  时的关联维对数曲线图, 分别如图 8~12 所示. 在图 8~12 中的无标度区内进行最小二乘直线拟合, 得到了不同斜率值即为关联维数. 每组数据不同数据段处理结果基本符合表 1 规律.

从表 1 的数据中可以看出, 溢流阀在不同的工作状况下, 振动信号的分形特征明显不同. 在正常状态下关联维数最大; 故障 2 的关联维数最小, 这是由于阻尼孔阻塞, 导致了液压压力降低, 致使关联维数发生变化; 故障 1 和故障 4 的关联维数比正常情况较低, 说明了弹簧变形后弹力变化使溢流阀振动的非线性程度发生变化, 调压弹簧变形对系统的分形特征影响比主阀弹簧变形影响更大; 故障 3 是主阀弹簧去除后使振动信号更加平稳了, 非线性程度减小, 所以其关联维数要比故障 1 小. 溢流阀不同的工作状

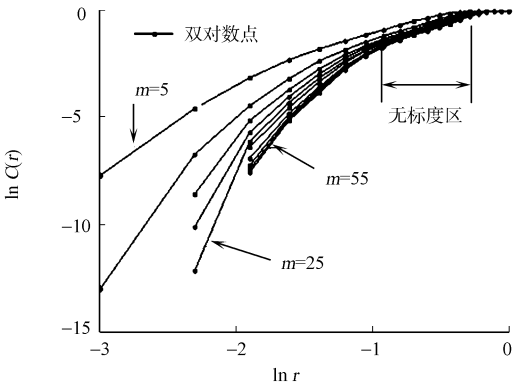
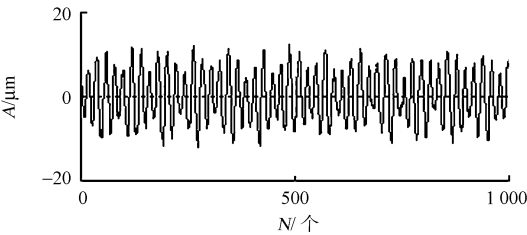
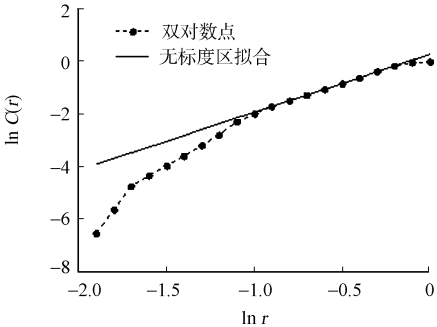


图 7 不同嵌入维数双对数曲线变化图及无标度区  
Fig. 7 Double logarithmic curve graphs and non-scale ranges under different embedding dimensions



(a) 预处理后位移信号



(b) 关联维对数曲线

图 8 正常状态下数据预处理信号图与关联维对数曲线图

Fig. 8 Graphs of preprocessing signal and correlation dimension logarithmic curve under normal state

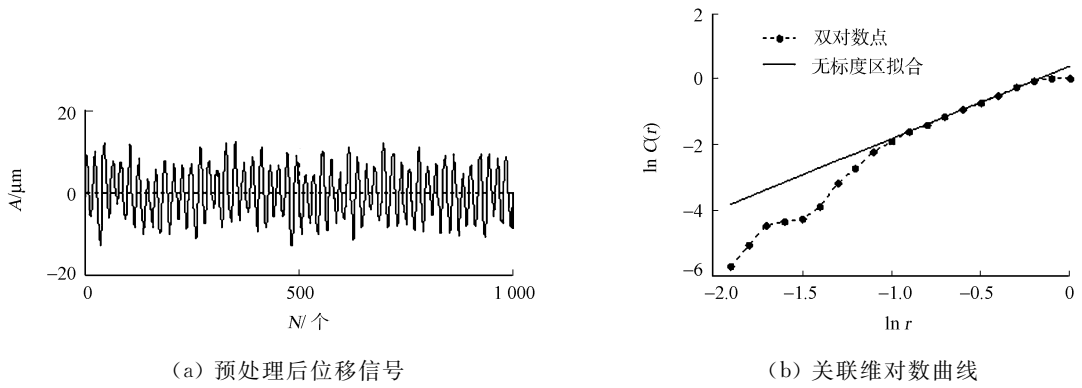


图 9 故障 1 状态下数据预处理信号图与关联维对数曲线图

Fig. 9 Graphs of preprocessing signal and correlation dimension logarithmic curve under fault 1 state

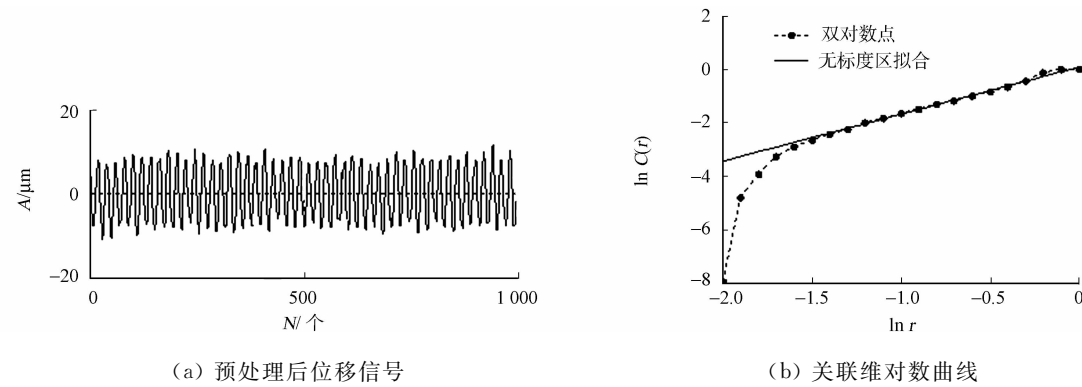


图 10 故障 2 状态下数据预处理信号图与关联维对数曲线图

Fig. 10 Graphs of preprocessing signal and correlation dimension logarithmic curve under fault 2 state

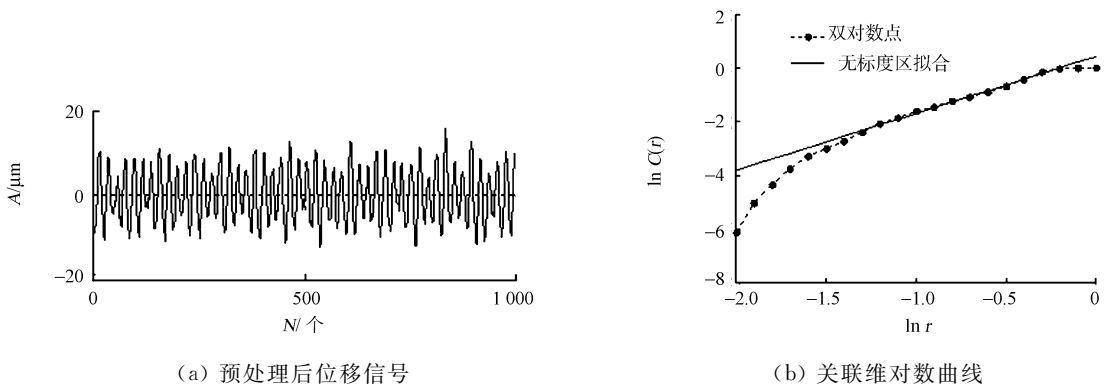


图 11 故障 3 状态下数据预处理信号图与关联维对数曲线图

Fig. 11 Graphs of preprocessing signal and correlation dimension logarithmic curve under fault 3 state

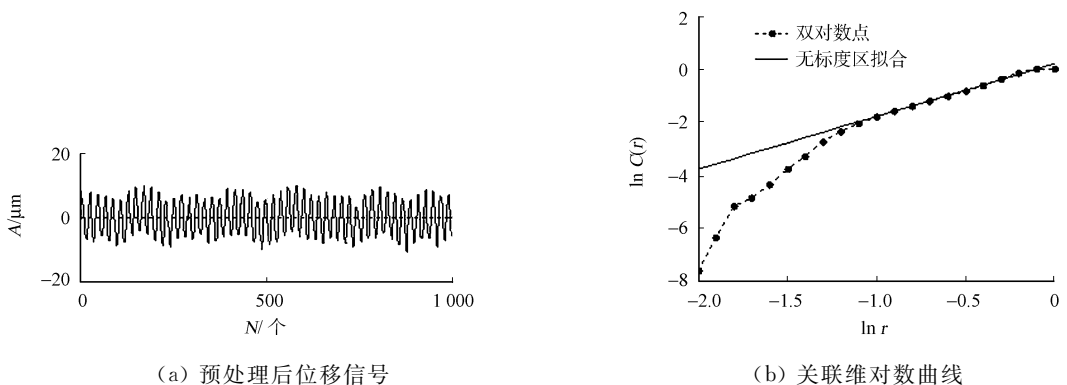


图 12 故障 4 状态下数据预处理信号图与关联维对数曲线图

Fig. 12 Graphs of preprocessing signal and correlation dimension logarithmic curve under fault 4 state

况对应不同的关联维数,故一定条件下,计算溢流阀振动信号的关联维数可以诊断出其工作状态.

5 结 论

- 1) 应用分形理论计算时间序列的关联维数,可以定量分析系统的非线性信息,具有一定的优越性.
- 2) 合理选择嵌入维数、数据长度、延迟时间等重要参数,并且在对数曲线图中准确划定无标度区才能得到比较客观的关联维数,从而正确反映出系统的非线性信息.
- 3) 溢流阀在不同工作状态下有明显不同的关联维数.所以,在一定工作条件下,可以用溢流阀信号的关联维数来描述设备的工作状态,反映设备故障的类型,对实际生产具有一定的现实意义.

参考文献:

[1] FRISON W, ABARBANEL H D I, CEMBROLA J, et al. Nonlinear analysis of environment distortions of continuous wave signals in the ocean[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 99(1): 139-146.

[2] TURCOTTE D L. Fractals in Geology and Geophysics[J]. Pure and Applied Geophysics, 1989, 131(1/2): 171-196.

[3] 陈俊杰, 黄宜坚. 利用关联维数进行液压阀故障诊断[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 371-375.

[4] 石博强, 申焱华. 机械故障诊断的分形方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.

[5] 梁平, 龙新峰, 樊福梅, 等. 基于分形关联维的汽轮机转子的振动故障诊断[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 85-89.

[6] 邵辉, 赵庆贤, 李燕, 等. 关联维数在机械设备故障诊断中的应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(3): 129-134.

[7] 吴文兵, 黄宜坚. 基于 AR 参数的液压阀故障信号检测[J]. 重型机械, 2011(2): 15-18.

[8] 王利英, 赵卫国, 黄欣锋. 关联维数在尾水管压力脉动分析中的应用[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(4): 69-73, 91.

[9] 徐陈辉. 基于分形理论的水轮机振动分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2008.

[10] PETER G, ITAMAR P. Characterization of strange attractors[J]. Physical Review Letters, 1983, 50(5): 346-349.

[11] 王庆华, 张兴彪, 张洪朋, 等. 分形理论在液压泵故障诊断中的应用[J]. 大连海事大学学报, 2004, 30(2): 40-43.

[12] 党建武, 王瑞玲, 黄建国. 基于 G. P 算法的关联维数计算中无标度区的识别[J]. 弹箭与制导学报, 2003, 23(1): 35-38.

Fault Diagnosis of Relief Valve by Using Correlation Dimension

GAO Yu, HUANG Yi-jian

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Grassberger-Procaccia (G-P) algorithm is used with reasonable selection of important parameters such as embedding dimension, length of data, delay time ect, and delimiting non-scale range accurately in logarithmic curve graph in order to get more objective correlation dimension. The result prove that correlative dimension can quantitatively describe non-linear information, and there are different correlative dimensions for different types of faults under certain conditions. So working state of relief valve can be diagnosed by computing correlation dimension of its vibration signal.

**Keywords:** relief valve; fault diagnosis; Grassberger-Procaccia algorithm; correlation dimension

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 杨建红)