

文章编号: 1673- 9469(2010) 04- 0069- 05

## 关联维数在尾水管压力脉动分析中的应用

王利英<sup>1</sup>, 赵卫国<sup>1</sup>, 黄欣锋<sup>2</sup>

(1. 河北工程大学 水电学院, 河北 邯郸 056021; 2. 邯郸市水利局 漳滏河灌溉供水管理处, 河北 邯郸 056001)

**摘要:**以黄壁庄机组尾水管压力脉动试验的实测信号为例, 对时域信号进行了频谱分析, 并对在不同的工况下尾水管压力脉动信号进行嵌入维数和关联维数分析。结果表明, 当嵌入维数大于等于 18 时, 关联维数趋于稳定值。不同工况下水轮机尾水管压力脉动的关联维数也不同, 当导叶开度为 50. 70% 时, 分形关联维数为 3. 456 6; 导叶开度为 62. 85% 时, 分形关联维数为 3. 388 1。因此, 关联维数可以作为对水轮机尾水管压力脉动情况进行识别的指标, 可以指导电站的稳定运行。

**关键词:** 关联维数; 分形; 压力脉动; 尾水管

中图分类号: TK730

文献标识码: A

## Application of correlation dimension in pressure fluctuation of draft tube

WANG Li-ying<sup>1</sup>, ZHAO Wei-guo<sup>1</sup>, HUANG Xin-feng<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Electrical Power, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056021, China;  
2. Zhang-fuhe Irrigation Water Supply Management Office, Water Resources Bureau, Hebei Handan 056001, China)

**Abstract:** Based on the actual experiment signal of draft tube in Huangbizhuang unit, the time domain signal has been carried on the spectral analysis; embedding dimension and the correlation dimension also have been analyzed in different conditions of draft tube. Results show that when the embedding dimension is greater than or equal to 18, correlation dimension is tending to stability, so the minimum embedding dimension is 18. And when the guide vane opening ( $\alpha$ ) is 50. 70% and 62. 85%, the correlation dimension 3. 4566 and 3. 3881 respectively. This can be obtained that under different working conditions, correlation dimension is different, accordingly, the correlation dimension can be used as a conduit for pressure pulsation of draft tube, and it can guide the stable operation of the power.

**Key words:** correlation dimension; fractal; pressure fluctuation; draft tube

水轮机尾水管的压力脉动是影响水轮机稳定运行的主要因素<sup>[1-2]</sup>。在水轮机运行过程中, 利用各种动态测试仪器拾取、记录和分析水轮机尾水管的压力脉动信号, 可以实现水轮机运行稳定性的控制。毛汉领等<sup>[3]</sup>对模型水轮机进行了试验研究, 分析了尾水管内部不同位置不同工况下压力脉动变化规律, 为改善尾水管设计提供了参考; 也有一些学者在将人工神经网络应用于建立水轮机数学模型方面进行了研究<sup>[4-6]</sup>, 赵林明教授<sup>[7]</sup>采用人工神经网络方法分别建立了水轮机特征参数与空化系数的数学模型, 水轮机开度与出力的数学

模型, 以及水轮机特征参数与压力脉动幅值的数学模型。然而水轮机尾水管中的水力振动信号是随机信号, 其中许多是非线性的无规则的信号, 仅凭仪表检测或工作人员的个人经验是无法获取的, 因此也就很难准确的掌握水轮机的运行情况。为了准确的掌握水轮机运行时压力脉动变化规律, 选择一种先进的水力振动类型诊断技术方法是很有必要的。

分形维数是描述复杂系统混沌现象的重要参数, 其中其良好特征性的分形关联维数通过相空间重构和非线性问题建立联系。本文试图利用分形关联维

收稿日期: 2010- 09- 18

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2010001026); 河北省教育厅科学研究计划项目(2009422) 特约专稿  
作者简介: 王利英(1978- ), 女, 河北新乐人, 讲师, 博士研究生, 从事水利机械振动理论和故障诊断方面的研究。

数对水轮机的压力脉动进行分析,为实现水轮机尾水管压力脉动状态的自动识别提供参考。

### 1 关联维数基本原理及计算方法<sup>[3-5]</sup>

#### 1.1 时间序列的相空间重构

在时间序列的分析中,决定序列的可观测因素很多,而且相互作用的动力学方程往往是非线性的,甚至是混沌的;另外,由于测量精度的实际限制、计算的复杂性,以及可能存在的本质上的非确定性因素等多方面的困难,严重地制约了人们对时间序列内在机制的理解。20世纪80年代以来,由于Takens对Whitney早期在拓扑学方面工作的发展,使得深入分析时间序列的背景和动力机制成为可能,在确定性基础上对序列动力学因素的分析,目前广泛采用的是延迟坐标状态空间重构法,一般来说,非线性系统的相空间可能维数很高,甚至无穷,但在大多数情况下维数未知。在实际问题中,对于给定的时间序列  $x_1, x_2, x_3, \dots$ ,我们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,这就是延迟坐标状态空间重构法。

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它分量来决定的,这些相关分量的信息就隐含在任一分量的发展过程中。

重构相空间过程如下:

对一单变量时间序列  $\{x_{(i)}, i=1, 2, 3 \dots N\}$ , 对其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

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= (x_1, x_{1+\tau}, x_{1+2\tau}, \dots, x_{1+(m-1)\tau}) \\ X_2 &= (x_2, x_{2+\tau}, x_{2+2\tau}, \dots, x_{2+(m-1)\tau}) \\ &\dots\dots\dots \\ X_{N_m-1} &= (x_{N_m-1}, x_{N_m-1+\tau}, x_{N_m-1+2\tau}, \dots, x_{N-1}) \\ X_{N_m} &= (x_{N_m}, x_{N_m+\tau}, x_{N_m+2\tau}, \dots, x_N) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

建立重构相空间  $X$

$$X = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_{N_m-1}, X_{N_m}]^T =$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_{1+\tau} & x_{1+2\tau} & \dots & x_{1+(m-1)\tau} \\ x_2 & x_{2+\tau} & x_{2+2\tau} & \dots & x_{2+(m-1)\tau} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N_m-1} & x_{N_m-1+\tau} & x_{N_m-1+2\tau} & \dots & x_{N-1} \\ x_{N_m} & x_{N_m+\tau} & x_{N_m+2\tau} & \dots & x_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $N_m$  为重构相空间后的向量个数,且

$$N_m = N - (m - 1) \tau \quad (3)$$

式中  $m$ —嵌入空间的维数;  $n$ —时间序列信号的数据个数;  $\tau$ —固定时间间隔,是采样时间间隔  $\Delta t$  的整数倍。

#### 1.2 关联维数的求解

采用 P. Grass Berger 与 I. Procaccia 提出的 G-P 算法,步骤如下:

将时间序列  $\{x_{(i)}, i=1, 2, 3 \dots N$  进行相空间重构,如式(1)和式(2)。然后定义关联积分函数。

$$C(\epsilon) = \frac{1}{N_m(N_m-1)} \sum_{i,j=1}^{N_m} \theta(\epsilon - \nu_{ij}) \quad (4)$$

式中  $\epsilon$ —观测尺度;  $\theta(\epsilon)$ —Heaviside 函数;  $\nu_{ij}$  指从  $N$  个点中任选一个参考点  $x_i$ , 计算其余各点到  $x_i$  的距离。

$$\nu_{ij} = d(X_i - X_j) = \|X_i - X_j\| \quad (6)$$

对所有的  $x_i (i=1, 2, \dots, N_m)$  重复该过程,得到所有点对距离后,计算  $C(\epsilon)$ 。关联积分函数的含义即对于变量  $\epsilon$  一定时,对重构相空间  $x_i$  中的所有点对之间距离小于  $\epsilon$  的点的个数占所有点的多少。当  $\epsilon$  取一定范围时,关联积分函数有下式成立

$$\begin{aligned} C(\epsilon) &\propto \epsilon^D \\ C(\epsilon) &= K(\epsilon^D) \end{aligned} \quad (7)$$

因此,定义关联维数

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} [\ln C(\epsilon) / \ln(\epsilon)] \quad (8)$$

运算时所选定的相空间维数  $m$  应当使得  $\epsilon \rightarrow 0$  时关联维数  $D$  的值达到稳定状态,这时即为所求信号的关联维数。

### 2 水轮机机组测试

#### 2.1 背景介绍

黄壁庄水库位于滹沱河出山口处的获鹿县黄壁庄镇马鞍山两侧,总库容  $1.21 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,主坝高 128.5m,副坝高 129m,电站装机 2 台,分别为 16 000kW 和 800kW。水轮机型号:ZZ-LH-465;额定水头:14.5m;额定流量:120m<sup>3</sup>;额定输出功率:16MW;发电机型号:TS-70Q 81-48;额定功率:16MW。

#### 2.2 水压脉动测点布置

对于水轮机压力脉动测点位置的选择,应使得测点处测得的压力脉动幅值比其它位置处大;对于因尾水管涡带引起的压力脉动,其水轮机最

大脉动值一般出现在尾水管锥管(0.3-1.0) D2处<sup>[6-7]</sup>。因此,测试时将尾水管水压力脉动测点布置在尾水管进入门处,并从尾水管锥管段钢板管壁处用长500mm的4#普通自来水管引出至水压脉动传感器。压力脉动传感器安装时,注意应与流道齐平,且不能与其它管道连通或窝气,不允许在测点处与传感器之间用管路连接,以避免连接管对实际信号的缓冲、衰减或共振,影响幅频特性和相位特性的准确测量。图1为水压脉动测点布置图。

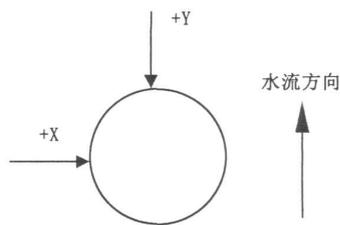


图1 水压脉动测点布置图

Fig.1 The setting of sensors pressure fluctuation

### 2.3 试验结果

待工况稳定后进行采样,采样时间20s,采样频率1500Hz。共进行了25个工况采样,见表1。

表1 采样工况

Tab.1 Working condition of sampling

样本	尾水压力脉动/(mH <sub>2</sub> O)			上架架 X 向/ $\mu\text{m}$			上架架 Y 向/ $\mu\text{m}$		
	max	mean	min	max	mean	min	max	mean	min
1	4.454 4	3.731 3	2.245 9	24.389 1	6.201 0	—	8.149 4	2.067 9	—
2	4.442 0	3.512 3	2.682 6	13.497 9	4.917 8	—	7.247 4	2.079 6	—
3	4.853 7	3.590 1	2.508 0	14.140 7	4.910 2	—	6.718 6	2.038 2	—
4	5.078 3	3.531 6	2.320 8	13.390 8	4.908 0	—	7.029 7	2.014 9	—
5	4.392 1	3.616 7	2.745 0	14.212 1	5.590 2	—	6.905 2	1.952 7	—
6	4.666 6	3.766 1	2.957 1	15.604 7	5.460 6	—	6.189 8	1.994 8	—
7	4.641 6	3.780 4	2.869 8	13.533 6	5.368 3	—	8.336 1	2.293 7	—
8	4.853 7	3.778 6	2.757 5	12.748 0	5.116 8	—	8.398 3	2.265 6	—
9	4.491 9	3.516 8	2.495 5	17.068 8	5.563 3	—	6.843 0	2.054 4	—
10	4.616 6	3.737 6	2.907 2	15.926 1	4.789 4	—	7.993 9	2.166 4	—
11	4.716 5	3.768 9	2.745 0	11.605 3	4.850 1	—	6.936 3	2.135 7	—
12	4.903 6	3.845 7	2.857 3	12.569 5	5.116 3	—	5.909 9	2.070 8	—
13	5.128 2	3.880 6	2.595 3	12.569 5	5.303 1	—	7.371 8	2.137 0	—
14	4.566 7	3.748 2	2.869 8	12.390 9	5.185 0	—	7.714 0	2.050 5	—
15	4.716 5	3.571 1	2.445 6	13.640 7	4.570 2	—	8.180 5	2.341 6	—
16	4.878 7	3.747 0	2.508 0	12.998 0	5.278 9	—	9.673 6	2.454 8	—
17	5.128 2	3.813 5	2.470 5	12.676 6	5.390 3	—	7.558 4	2.373 1	—
18	5.689 7	3.886 0	2.283 4	13.890 7	5.366 6	—	7.931 7	2.366 2	—
19	4.978 5	3.686 0	2.483 0	13.033 7	5.146 8	—	7.434 0	2.263 3	—
20	4.903 6	3.724 9	2.595 3	12.069 6	5.144 3	—	8.336 1	2.133 6	—
21	4.654 1	3.108 6	1.572 2	15.104 8	5.013 8	—	9.424 7	2.542 4	—
22	5.203 1	3.224 5	1.534 7	14.105 0	5.655 0	—	8.647 1	2.487 3	—
23	5.377 8	3.254 9	1.123 0	15.640 4	5.789 7	—	10.731 1	2.576 2	—
24	4.679 0	3.174 3	1.909 0	13.962 1	5.391 4	—	7.682 9	2.225 1	—
25	4.741 4	3.273 4	1.746 8	15.354 8	5.298 9	—	7.776 2	2.004 9	—

采用东方所信号处理软件对测点采集信号进行频域分析(图2)。时域指标统计:最大值为0.046mm,峰峰值为0.08343mm,有效值为0.0188mm。时域统计结果:最大值为0.0339mm,峰峰值为0.07354mm,有效值为0.0181mm。由测试软件分析结果可知机组测量部位的振动值无严重超标情况。

### 3 关联维数在尾水管压力脉动中的应用

将随机挑选得到的尾水管压力脉动测试值作为试验数据,进行工况测试。本实验选用的是水轮机浆叶开度为50.70%和导叶开度为62.85%时相对应的测试值,所有的试验数据都经过电子滤波器滤波处理后直接采集,因此数据信号的降噪问题已经解决。

#### 3.1 采样长度的选取<sup>[8-9]</sup>

在选取采样长度 $N$ 时,除根据上述理论要求进行选取外,为了保证数据的稳定性和可靠性,截取压力脉动值中间的一部分数据作为关联维数计算方法中的单变量时间序列 $x_i(i=1, 2, \dots, N_m)$ ,以避免测试起始和终止时测试仪器对测试数据所带来的稳定性影响。由于不同的时间序列长度,计算所得分形关联维数略有不同,但随着时间序

列长度的增大,分形关联维数趋于稳定,同时也为了保证选取的采样长度能够体现尾水管的压力脉动特性,选取512个振动试验数据作为研究对象,即 $N=512$ 。

#### 3.2 嵌入维数的选取

嵌入维数 $m$ 是重构相空间的一个重要参数<sup>[10]</sup>, $m$ 的确定是关联维数计算的重要前提。通过逐渐增大 $m$ ,直至关联维数的值不再变化时,即可求出最小的嵌入维数。

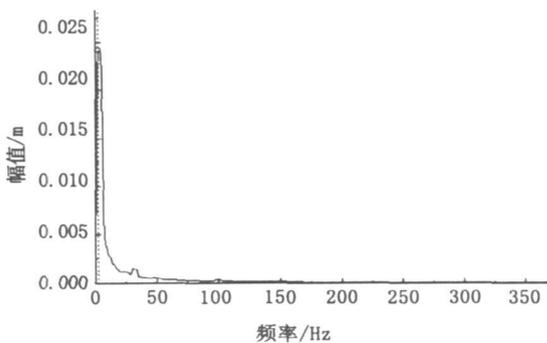
#### 3.3 时间延迟的选取

由公式(8)可得时间延迟 $\tau=14s$ 。

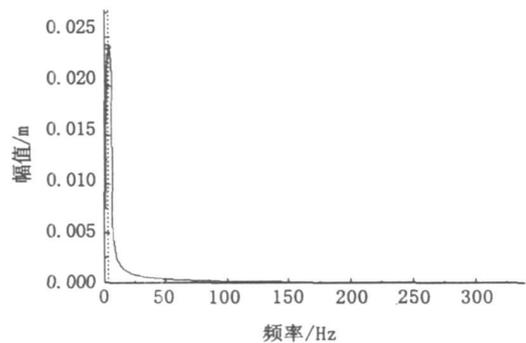
#### 3.4 结果与分析

根据前面试验参数,通过对测试数据进行分析,数据计算结果如表2所示。

根据表2,绘出了导叶开度 $a$ 为50.70%和62.85%时的嵌入维数与关联维数的关系图(图3)。当嵌入维数是大于等于18时,关联维数为定值分别为3.4566和3.3881。即关联维数曲线的无标度区线性较好,关联维数趋于稳定值,因此最小嵌入维数取18,它表征了动力系统有效自由度数目。



(a) 直通信号频域



(b) 10Hz滤波频域

图2 信号频域分析

Fig.2 Frequency-domain analysis of signal

表2 实测信号的关联维数

Tab.2 Correlation dimension of actual signal

状态 \ $m$	12	13	14	15	16	17	18	19
$a=62.85\%$	3.3518	3.3903	3.3983	3.4382	3.4514	3.4555	3.4566	3.4566
$a=50.70\%$	3.3416	3.3812	3.3847	3.3675	3.3861	3.3875	3.3881	3.3881

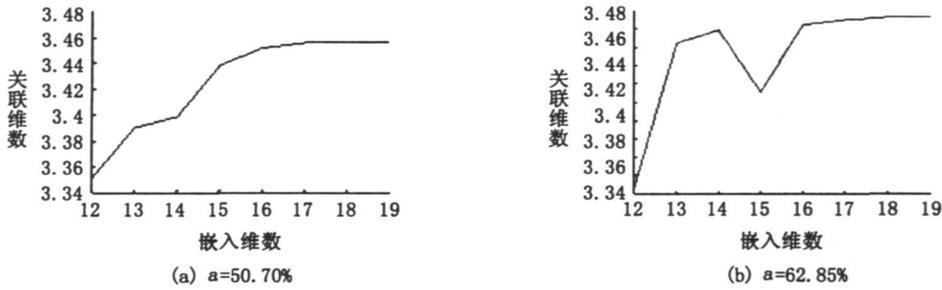


图3 嵌入维数与关联维数的关系

Fig.3 Relation between inserting dimension and correlation dimension

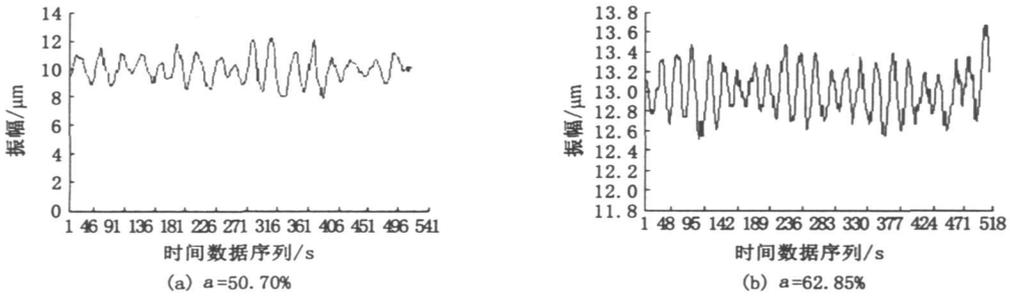


图4 压力脉动波形图

Fig.4 Time domain wave form

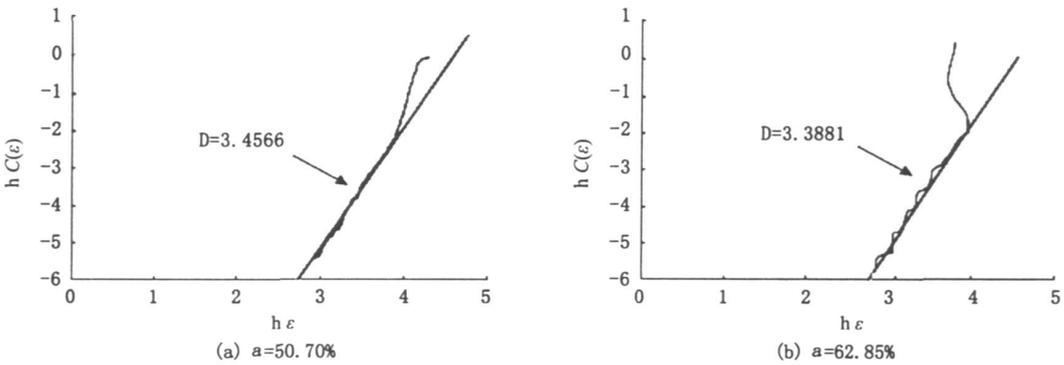


图5 分形关联维数图

Fig.5 Fractal correlation dimension chart

根据表 1 的数据, 得到了相应工况下水轮机尾水管压力脉动的测试结果如图 4 所示, 可以看出不同开度下尾水管压力脉动的振幅不同。由图 5 可以得到导叶开度为 50.70% 和 62.85% 时其分形关联维数分别为 3.4566 和 3.3881, 与表 2 所得结果吻合。由此可以得出不同工况下水轮机尾水管压力脉动的关联维数也是不同的, 因此, 关联维数可以作为判断尾水管压力脉动的指标。

### 4 结论

1) 当嵌入维数大于等于 18 时, 关联维数趋于

稳定值。

2) 不同工况下水轮机尾水管压力脉动的关联维数也不同, 当导叶开度为 50.70% 时, 分形关联维数为 3.4566; 导叶开度为 62.85% 时, 分形关联维数为 3.3881。

3) 关联维数可以作为对水轮机尾水管压力脉动情况进行识别的指标, 可以指导电站的稳定运行。

### 参考文献:

[1] 王珂仑. 水力机组振动[M]. 北京: 水利水电出版社, 1986.

(下转第 91 页)

有两级粒度的并发控制性能。试验结果对比可知,表级并发控制的粒度相对于谓词级的大,体现在事务的回滚率上表级粒度平均在 44.11%,而谓词级则平均为 26.01%。由此可见,在运行时间相同的条件下,后者(谓词级粒度)成功执行和提交的事务数量较多,所以谓词级多粒度控制的事务并发控制效率比表级有了较大的提高。因此,基于谓词级的多粒度事务并发控制方法有效提高了全局事务执行的并行度。

### 3 结束语

集群中各局部站点数据库的自治性和局部性只能对本地站点上的事务并发控制,而无法保证并发全局事务执行的一致性和正确性,无法防止全局事务间的冲突和死锁发生,因此在集群系统的事务管理器中实现了全局事务间冲突检测的多级粒度依次为:站点级 $\rightarrow$ 表级 $\rightarrow$ 谓词级。另外,还通过检测谓词冲突图中是否存在环的方法来避免冲突的全局事务可能会产生的全局死锁。该并发控制方法不需具体的上锁操作使并发控制粒度达到谓词级,不仅减小了死锁检测粒度而且还提高了全局事务处理的并发度,同时也不需要局部数据库做任何限制。

(上接第 73 页)

- [2] 何成连,王正伟,丘华.水轮机尾水管内部压力脉动试验研究[J].机械工业学报,2002,38(11):62-65.
- [3] 毛汉领,熊焕庭,沈炜良.偏相干分析在水电站振动传递路径识别的应用[J].广西大学学报(自然科学版),1998,23(1):6-9.
- [4] HUI W, QINGYU P, ZHANG ZHI C, et al. Vibration analysis of elastic plate submerged in incompressible viscous fluid by coupling finite element method [J]. ACTA Mechanical Solida Sinica, 1998(11): 1-12.
- [5] 刘玉民,孙开朗,张帆,等.水轮机发电机组动力稳定性研究[J].哈尔滨工业大学学报,1998,30(增刊):82-84.
- [6] 赵林明.人工神经网络的虚拟输入方法及其在水轮机建模中的应用[J].华北水利水电学报,1995,16(2):62-66.
- [7] 陈予恕.非线性振动[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [8] 赵林明,吕为亮,张贵棉.考虑水力振动特性求取转桨式水轮机的协联关系[J].河北工程大学学报(自然科学版),2007,24(4):74-75.

### 参考文献:

- [1] THAKKAR S S, SWEIGER M. Performance of an OLTP application on symmetry multiprocessor system[C]. American: IEEE Computer Society, 1990, 228-238.
- [2] NISHIKAWA H, STEENKISE P. A general architecture for load balancing in a distributed-memory environment[C]. American: IEEE Computer Society, 1993, 47-54.
- [3] DU X, ZHANG X. Coordinating parallel processes on networks of workstations [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 1997, 46(2): 125-135.
- [4] LEE J L, SCHEAUERMANN P, VINGRALEK R. File assignment in parallel I/O systems with minimal variance of service time [J]. IEEE Transactions on Computers, 2000, 49(2): 127-140.
- [5] LITWIN W, NEIMAT M A, SCHNEIDER D A. LH\* - a scalable, distributed data structure[J]. T ODS, 1996, 21(4): 480-525.
- [6] KEN BARKER, TAMER M OZSU. Concurrent transaction execution in multidatabase systems [C]. American: IEEE Computer Society, 1990, 282-288.
- [7] ZHANG A, ELMAGARMID A K. On global transaction scheduling criteria in multidatabase systems[C]. American: IEEE Computer Society, 1993, 117-124.

(责任编辑 刘存英)

- [9] 杨江天,陈家骥.时间序列关联维数在非线性系统运动性态识别中的应用[J].航空学报,2003,24(1):28-30.
- [10] ANGELO C. Parallel computation of the correlation dimension from a time series [J]. Parallel Computing, 1999, 25(6): 639-666.
- [11] 潘罗平.水轮机压力脉动试验方法的研究[J].水力发电学报,2003(3):107-113.
- [12] 何成连,王正伟,丘华.水轮机尾水管内部压力脉动试验研究[J].机械工业学报,2002,38(11):62-65.
- [13] WOLF A, SWIFT J B, SWINNEY H L, et al. Determining lyapunov exponents from a time series [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1985, 16(3): 285-317.
- [14] 张安兵,张俊芳,李喜盼,等.煤矿井筒变形混沌特征分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2009,26(3):85-88.
- [15] 万书亭,李和明,李永刚.发电机绕组故障时振动的关联维数分析及诊断[J].振动、测试与诊断,2005,25(3):210-213.

(责任编辑 马立)