

文章编号:0559-9350(2009)11-1397-06

基于自回归模型的水流脉动压力频谱特征研究

刘, 练继建, 辜晋德

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:以具有4种 Fr 数、3种比尺共12组工况的水流脉动压力试验数据为基础,提出将基于自回归(AR)模型的现代谱估计方法应用于水流脉动压力频谱特征研究中。分析结果表明:水流脉动压力谱密度曲线平滑、方差小,因不受虚假峰值的影响,谱密度曲线呈窄带有噪声形式分布,主频率明确;经 Sr 数归一化后, Fr 数相同的3条脉动压力谱密度曲线在主要频率范围内基本重合,表明水流脉动压力频谱特征在其主要频率范围内满足重力相似律。

关键词:脉动压力;频谱;谱估计;自回归模型;相似律

中图分类号:TV131.3+3

文献标识码:A

1 研究背景

水流脉动压力是泄水建筑物承受的重要荷载,有时甚至是导致泄水建筑物破坏的主要荷载^[1-5],国内外相关学者一直重视对水流脉动压力特征,特别是频谱特征的研究^[6-10]。由于高速水流的复杂性,脉动压力数值计算的难度较大,水流脉动压力的取值以及水流-结构耦合作用下的结构动力特性研究主要通过水工模型试验来完成。水流脉动压力的频谱特征及相似关系成为脉动荷载从模型引伸到原型的关键问题,同时也是进行“水流动力荷载-结构-水体-基础”四位一体的全水弹性模型试验的理论基础。

目前,对水流脉动压力频谱特征的研究主要以FFT变换为基础的无参数模型来实现^[11],该方法也常被称为经典谱估计。由于FFT变换没有考虑被分析数据的特点,经典谱估计自身存在一些不足,主要表现在^[12]:(1)谱的分辨率较低,它正比于 $2\pi N$, N 是所使用的数据长度;(2)由于窗函数的影响不可避免,谱在窗口主瓣内的功率向边瓣部分“泄漏”,降低了分辨率。较大的边瓣可能掩盖谱中较弱的成分,或是产生虚假的峰值。当分析数据较短时这些影响更为突出;(3)方差性能不好,不是真正谱的一致估计,且 N 值增大时谱曲线起伏加剧;(4)谱的平滑和平均是和窗函数的使用紧紧相关联的,平滑和平均主要是用来改善谱的方差性能,但往往又减小了分辨率和增大了偏差。没有一个窗函数能使谱在方差、偏差和分辨率各个方面都得到改善,因此使用窗函数只是改进谱估计质量的一个技巧,而不是根本的解决办法。

由于经典谱估计难以满足现代科学研究和工程技术应用逐渐提高的需求,一种以参数模型为代表的现代谱估计得到了越来越多的研究,并已广泛应用到诸如医学、地球物理、机械、环境、化工和核工程等各个领域^[13-18]。基于参数模型是现代谱估计可分为自回归(AR)模型、移动平均(MA)模型和自回归-移动平均(ARMA)模型。其中AR模型是全极点模型,它易于反映谱中的峰值;MA模型是全零点模型,它易于反映谱中的谷值;ARMA模型是极零模型,同时易于反映谱中的峰值和谷值。Elif^[13]在研究颈

收稿日期:2009-06-17

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(50725929);国家自然科学基金重点项目(50539060)

作者简介:刘 (1979—),男,辽宁抚顺人,博士,讲师,主要从事水工水力学模型试验与数值分析研究。

E-mail:llfyy2971@163.com

内动脉的多普勒信号时,对 FFT、AR 模型、MA 模型和 ARMA 模型的谱估计进行了对比,发现对于有明显峰值的谱,AR 模型和 ARMA 模型的谱估计比较接近,并且在分辨率和方差两方面都优于 FFT 的谱,而 MA 模型的谱比 FFT 的谱还要差。水流脉动压力频谱有明显的峰值,需选用 AR 模型或 ARMA 模型。由于 AR 模型只需解一组线性方程,而 ARMA 模型需解非线性方程,故选用 AR 模型对水流脉动压力的频谱特征进行研究,并与 FFT 谱进行了对比分析。

2 试验与方法

2.1 水流脉动压力模型试验 模型试验是在平底固定水槽中进行的,如图 1 所示。整个水槽由进水段、工作段和退水段三部分组成。进水段为高水箱,长 4.1m,宽 1.2m,高 4.4m,内设消浪栅和平水装置,最大供水能力 0.4m³/s。工作段为用型钢支撑的矩形水槽,长 14m,宽 0.6m,高 1.0m。退水段为砖结构,宽 1.2m,高 0.8m,尾部可换装矩形量水堰或 90°三角形量水堰。试验时控制压力顶板的开度(e)分别为 10cm、5cm 和 2cm,流量变化范围为 0.0192~0.3745m³/s,调节工作段尾部的人字门可以使水跃发生在任意需要的位置。脉动压力测点布置从压力顶板出口处起,顺流方向(x)在水槽中心线上以开度(e)的整数倍布置,共 50 个测点。模型试验工况见表 1。

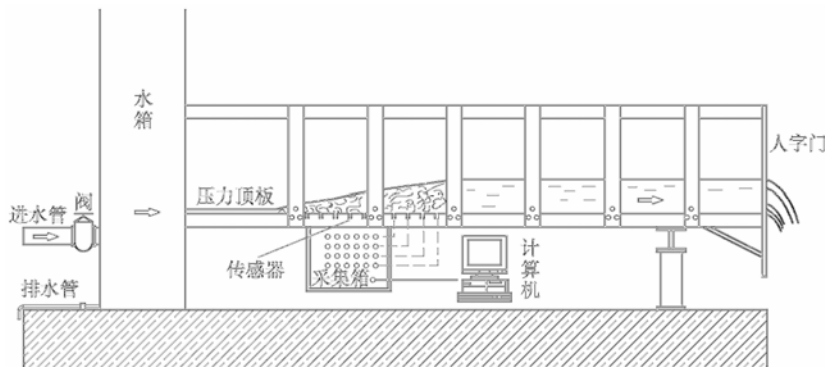


图 1 水流脉动压力模型试验布置

表 1 水流脉动压力试验工况

工况	开度 e cm	第二共轭水深 cm	水跃长度 cm	流量 Q (m ³ /s)	佛汝德数 Fr	雷诺数 Re	几何比尺 λ_t
1	10	84.24	512.23	0.3745	6.30	4.68×10^5	1:1
2		81.13	490.79	0.3614	6.08	4.52×10^5	
3		67.02	393.41	0.3022	5.08	3.78×10^5	
4		46.44	251.42	0.2149	3.62	2.69×10^5	
5	5	42.12	256.11	0.1324	6.30	1.89×10^5	1:2
6		40.56	245.40	0.1278	6.08	1.83×10^5	
7		33.51	196.70	0.1068	5.08	1.53×10^5	
8		23.22	125.71	0.0760	3.62	1.09×10^5	
9	2	16.85	102.45	0.0335	6.30	5.23×10^4	1:5
10		16.23	98.16	0.0323	6.08	5.04×10^4	
11		13.40	78.68	0.0270	5.08	4.22×10^4	
12		9.29	50.28	0.0192	3.62	3.00×10^4	

2.2 AR 模型 AR 模型的建模思路为:(1)假定所研究的序列 $x(n)$ 是由一个输入序列 $u(n)$ 激励一个线性系统的输出;(2)由已知的 $x(n)$,或其自相关函数 $r_x(m)$ 来估计系统转移函数 $H(z)$ 的参数;(3)由 $H(z)$ 的参数来估计 $x(n)$ 的功率谱。若 $x(n)$ 是随机序列,则 $u(n)$ 是一个白噪声序列,设其方差为 σ^2 ,有 $u(n)$ 和 $x(n)$ 之间的输入、输出关系:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k) u(n-k) \quad (1)$$

式中： $h(k)$ 为系统的单位抽样响应。

对于 AR 模型,式(1)可由一个差分方程表示:

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + u(n) \quad (2)$$

式中： a_k 为系数, p 为方程的阶次。

对式(1)和式(2)两边分别取 Z 变换,可得:

$$H(z) = \frac{1}{A(z)} \quad (3)$$

式中： $A(z) = 1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}$, $H(z) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k) z^{-k}$ 。

由随机信号通过线性系统的理论可知^[12],输出序列 $x(n)$ 的功率谱为:

$$P_x(e^{j\omega}) = P_u(e^{j\omega}) |H(z)|^2 = \frac{\sigma^2}{1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k}} \quad (4)$$

式中： $P_x(e^{j\omega})$ 为 $x(n)$ 的功率谱, $P_u(e^{j\omega})$ 为 $u(n)$ 的功率谱。式(4)中的未知系数可由 Yule-Walker 方程求得:

$$\begin{bmatrix} r_x(0) & r_x(1) & r_x(2) & \cdots & r_x(p) \\ r_x(1) & r_x(0) & r_x(1) & \cdots & r_x(p-1) \\ r_x(2) & r_x(1) & r_x(0) & \cdots & r_x(p-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_x(p) & r_x(p-1) & r_x(p-2) & \cdots & r_x(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

AR 模型阶次 p 的选择对谱估计质量有重要的影响,许多学者对该问题做了大量的研究工作^[19-21],其中应用 Akaike^[21]提出的信息论准则可以较好地选择合适的阶次 p :

$$AIC(p) = \ln \sigma^2 + 2 \hat{p} N \quad (6)$$

式中 N 为序列 $x(n)$ 的长度,当阶次 p 由 1 增加时, $AIC(p)$ 将在某一个 p 处取得极小值,该值即为模型合适的阶次。

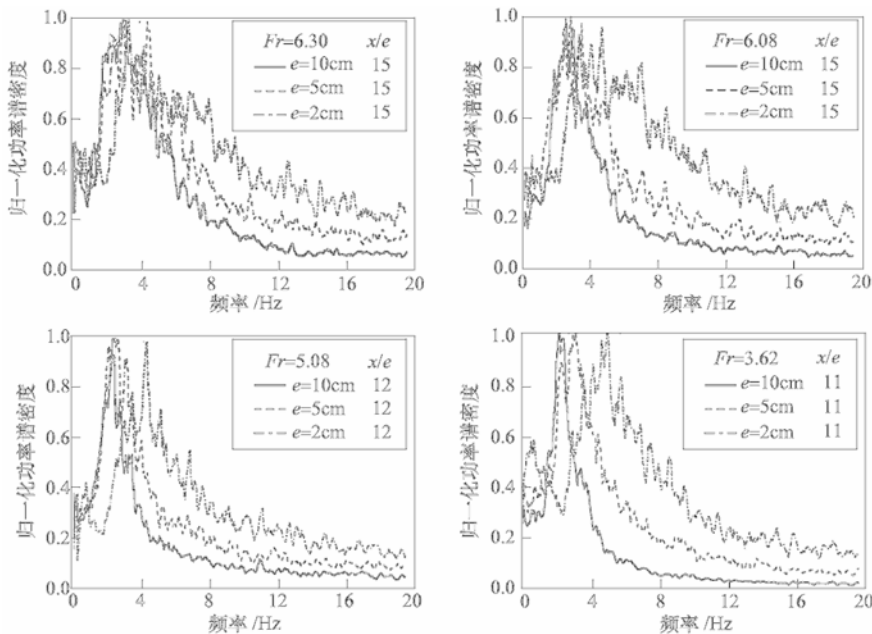


图2 基于 FFT 变换的水流脉动压力功率谱密度

3 结果与分析

3.1 基于 FFT 变换的水流脉动压力频谱特征 图 2 为基于 FFT 变换的各工况水流脉动压力均方根最大点处的归一化功率谱密度图。在图 2 中,将 Fr 数相同,开度不同的 3 个工况绘于一张图中。从图 2 的结果可以看到,脉动压力功率谱密度曲线起伏比较剧烈,方差较大。在主频率段处有许多虚假的峰值,对于同 Fr 数不同比尺的脉动压力谱密度曲线,其中一些峰值在同频率处重合,这给主频率的选取及其相似关系的判断带来了困难,选择不同的峰值频率就有可能得到脉动压力峰值频率比尺满足重力律($\lambda_f = \lambda_l^{-1/2}$)或等于 1 的两种截然不同的观点^[9]。

3.2 基于 AR 模型的水流脉动压力频谱特征 图 3 为由式(6)计算得到的对于本次模型试验水流脉动压力数据的 AIC 值与 AR 模型阶次 p 的关系曲线,其中 p 由 1 阶取到 50 阶。由图 3 可以看到,AIC 值随阶次 p 先是单调减小,而后又单调增加,在 $p=12$ 时,AIC 取得极小值 -4.70 ,因此可以选取 AR 模型的阶次为 12 阶。解式(5)和式(4)即可得到水流脉动压力频谱特征的 AR 估计,如图 4 所示。

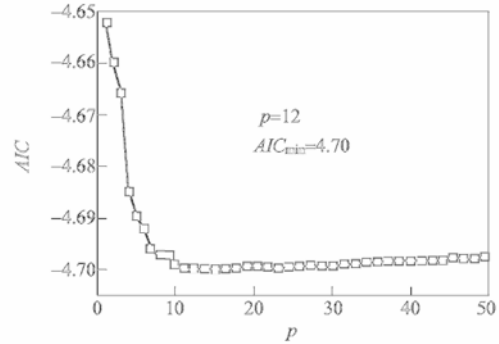


图 3 AR 模型阶次的选择

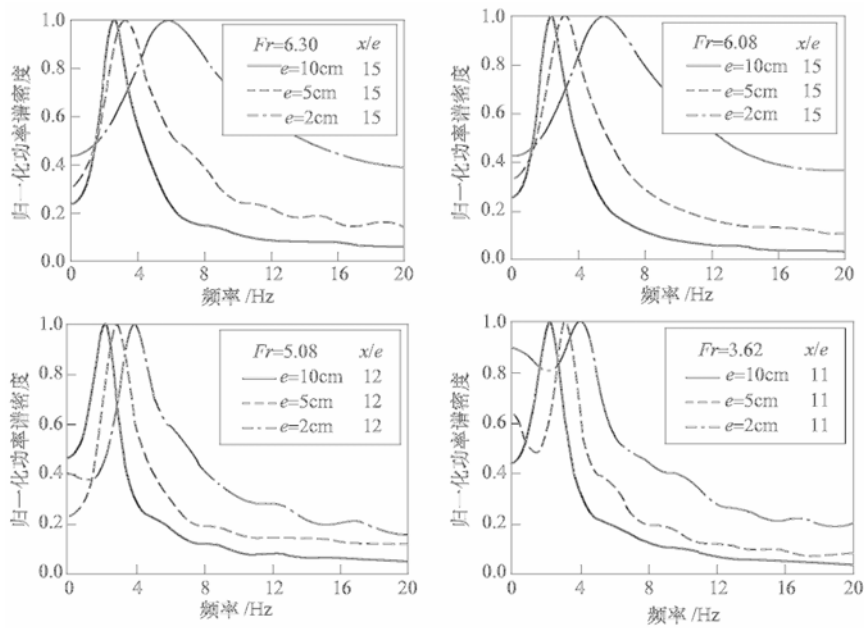


图 4 基于 AR 模型的水流脉动压力功率谱密度

从图 4 的结果可以看到,水流脉动压力功率谱密度曲线比较平滑,方差较小。曲线分布呈窄带有噪声形式,与主频率对应的峰值只有一个,对于同 Fr 数不同比尺的脉动压力谱密度曲线,其峰值频率互相分离,因此可以否定脉动压力频率比尺 $\lambda_f=1$ 的观点。从图 4 还可以发现,大比尺模型的水流脉动压力主频率值低、小比尺模型的水流脉动压力主频率值高,这种特性同满足重力相似律模型的脉动压力频率比尺在定性规律上一致。将图 4 的横坐标用 St 数归一化后可得图 5。

由图 5 可以看到,经 St 数归一化后,同 Fr 数的 3 条功率谱密度曲线在主要频率范围内基本重合,表明脉动压力的频谱特征在主频率取值和主要频率范围分布上都符合重力相似律,即水流脉动压力频谱特征的主要部分符合重力相似律,这与文献^[9]的研究成果相一致。

图 6 为水流脉动压力主频率的 St 数沿程分布图。由图可以看到在跃首和跃尾处脉动压力主频率

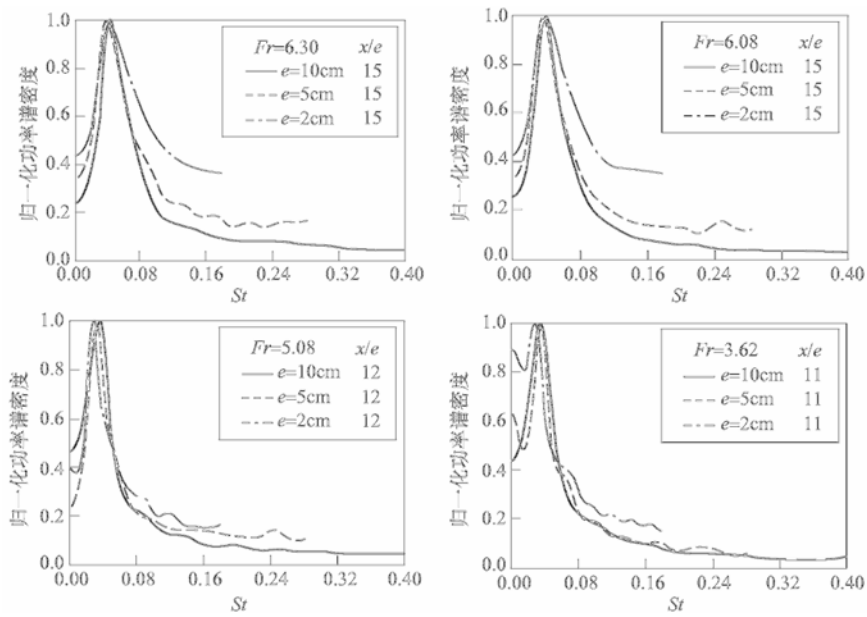


图5 基于AR模型 St 数归一化的水流脉动压力功率谱密度

的 St 数接近于0,这是由于频率分辨率的限制已无法在该区域得到准确的主频率值,故本文不对该区域的主频率特性做讨论。水跃段内各个 Fr 数下脉动压力主频率的 St 数基本分布在一条直线上,表明水流脉动压力沿程均符合重力相似律,原型—模型间的任意一点脉动压力数值均可按重力相似律引伸。水跃区内脉动压力主频率的 St 数沿程递减,表明水流紊动尺度沿程由小变大,涡旋尺度亦由小变大。

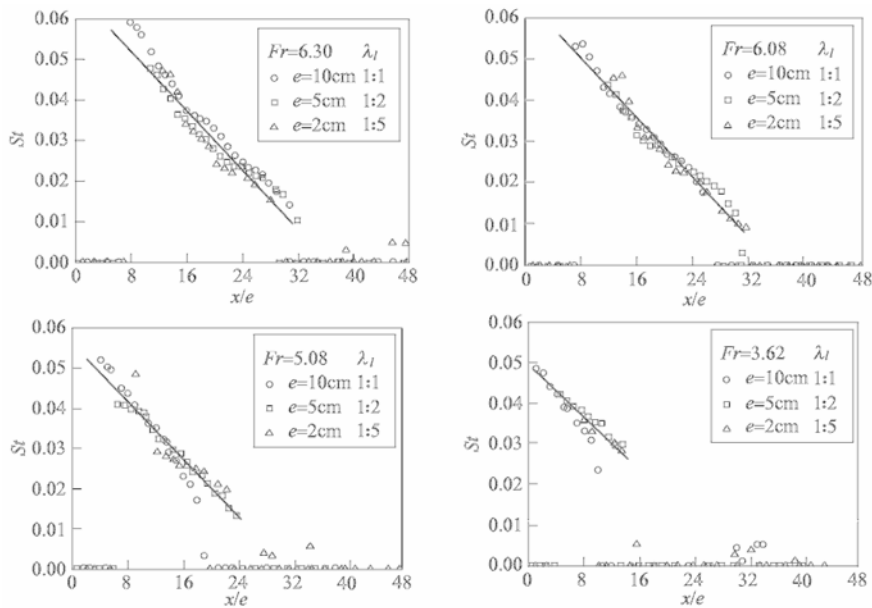


图6 水流脉动压力主频率的 St 数沿程分布

4 结论

以水流脉动压力模型试验数据为基础,分别应用基于FFT变换的经典谱估计方法和AR模型的现代谱估计方法对水流脉动压力频谱特征进行了研究。结果表明,基于FFT变换的功率谱密度曲线起伏较大、方差性能不好,并且会产生许多虚假的峰值,给水流脉动压力频谱特征研究以及型—模型之间的引伸带来困难。基于AR模型的功率谱密度曲线较光滑、方差性能好,谱密度曲线分布呈窄带有色噪声

形式,因为没有虚假峰值存在,主频率明确。经 St 数归一化后, Fr 数相同的 3 条脉动压力谱密度曲线主要部分基本重合,主频率沿程分布亦基本重合,表明水流脉动压力频谱特征在主要部分满足重力相似律。综上所述,基于 AR 模型的现代谱估计方法可以较好地应用于水流脉动压力频谱特征的研究中,为揭示水流脉动压力频谱特性及向原型中的引伸提供了一种有参考价值的方法。

参 考 文 献:

- [1] Berryhill R H. Experience with prototype energy dissipators [J]. J. Hydr. Div., 1963, 89(3): 181—201.
- [2] Sanchez Bribiesca J S, Viscaino A C. Turbulent effects on the lining of stilling basins [C]. ICOLD 11th Congress. 1973, 2. 1575—1592.
- [3] Edward Bowers C, Joel Toso. Kamafuli project, model studies of spillway damage [J]. J. Hydr. Eng., 1988, 114(5): 469—483.
- [4] 李爱华,刘沛清.岩石河床在冲击水流脉动压力作用下的解体破坏机理[J].水利学报,2007,38(11):1324—1328.
- [5] 万五一,江春波,李玉柱,等.溢流孔分流齿坎对水舌形状及水垫塘底板冲击压力的影响[J].水利学报,2007,38(5):552—557.
- [6] Abdal Khader M H, Elango K. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump [J]. J. Hydr. Res., 1974, 12(4): 469—489.
- [7] Akbari M E, Mittal M K, Pande P K. Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps [A]. Proc. Int. Conf. on the Hydraulic Modeling of Civil Engineering Structure, BHRA Fluid Engrg., Coventry England, 1982, 87—96.
- [8] Virgilio Fiorotto, Andrea Rinaldo. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps [J]. J. Hydr. Res., 1992, 30(4): 499—519.
- [9] Lian J J, Wang J M, Gu J D. Similarity law of fluctuating pressure spectrum beneath hydraulic jump [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(14): 2230—2238.
- [10] 辜晋德,练继建.水跃区底部压力脉动的沿程变化规律研究[J].水利学报,2008,39(2):196—200.
- [11] 崔广涛,练继建,彭新民,等.水流动力荷载与流固相互作用[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [12] 胡广书.数字信号处理[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [13] Elif Derya beyli, ? nan G? er. Spectral analysis of internal carotid arterial Doppler signals using FFT, AR, MA, and ARMA methods[J]. Comput. Biol. Med., 2004, 34(4): 293—306.
- [14] Hakan Karsli. Further improvement of temporal resolution of seismic data by autoregressive (AR) spectral extrapolation [J]. J. Appl. Geophys., 2006, 59(4): 324—336.
- [15] Endo H, Randall R B. Enhancement of autoregressive model based gear tooth fault detection technique by the use of minimum entropy deconvolution filter [J]. Mech. Syst. Signal Process., 2007, 21(2): 906—919.
- [16] Zhong W Q, Zhang M Y. Pressure fluctuation frequency characteristics in a spout—fluid bed by modern ARM power spectrum analysis [J]. Powder Technol., 2005, 152(3): 52—61.
- [17] Yang Y, Wang S W, Hao N L, et al. On-line noise source identification based on the power spectrum estimation and grey relational analysis [J]. Appl. Acoust., 2008, in press.
- [18] Sim C M, Chang K O, Sohn J M, et al. Burg spectrum estimation of neutron noise for the monitoring of reactor internal vibration with a hypothesis test [J]. Int. J. Pres. Ves. Pip., 2000, 77(1): 27—33.
- [19] Kay S M, Marple S L. Spectrum analysis—a modern perspective [J]. Proc. IEEE, 1981, 69(11): 1380—1419.
- [20] Cadzow J A. Spectral estimation; an overdetermined rational model equation approach [J]. Proc. IEEE, 1982, 70(9): 907—939.
- [21] Akaike H. A new look at the statistical model identification [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1974, AC-19: 716—723.

(下转第 1408 页)