

基于 HHT 的高坝泄流结构工作模态参数辨识*

张建伟, 朱良欢, 江琦, 赵瑜, 郭佳

(华北水利水电大学水利学院 郑州, 450011)

摘要 基于高坝的工作特点, 提出一种适用于泄流结构的工作模态参数时域辨识方法。对于低信噪比泄流结构振动信号, 首先, 利用小波阈值-经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称 EMD)联合滤波方法滤除低频水流脉动噪声和高频白噪声, 得到结构振动有效信息; 然后, 通过希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, 简称 HHT)原理辨识结构系统的固有频率及阻尼比; 最后, 结合奇异熵增量理论对系统模态进行定阶和模态验证。仿真研究表明, 该方法能够有效避免模态分解中的频率混杂, 具有较强的鲁棒性以及较高的辨识精度。将该方法应用于三峡重力坝 5 号溢流坝段, 可准确辨识出结构系统的工作模态参数, 为研究高坝泄流结构安全运行与在线无损动态检测提供基础。

关键词 泄流激励; 工作模态; 参数辨识; 小波阈值-经验模态分解联合滤波; 希尔伯特-黄变换

中图分类号 TV31; TV32⁺3; TH825

1 问题的引出

模态参数辨识是系统辨识方法在工程领域的应用。模态作为结构的固有振动特性, 能够准确预报某频段内结构在外部或内部各种振源作用下的实际振动响应, 可用于结构的健康安全检测或优化设计等过程^[1]。传统的模态分析方法是建立在系统输入和输出数据已知的基础上, 利用完整的激励和响应信息进行参数辨识。由于在实际工程中难以获得结构完整输入激励信息, 因此仅利用响应数据的工作模态分析技术逐渐发展起来^[2]。工作模态参数辨识方法主要分为频域辨识法和时域辨识法。频域辨识法是将时域内测得的数据通过傅里叶变换(Fourier transform, 简称 FT)转换到频域内, 然后由功率谱函数进行辨识。该类方法概念清晰, 不易遗漏模态。时域辨识法是直接应用实测响应数据在时域内进行参数辨识, 避免了频域辨识法中由于傅里叶变换而引起的截断误差, 提高了辨识精度^[3]。工作模态参数辨识方法对比如表 1 所示。

随着计算机技术、信号分析技术和试验手段的进步, 基于振动的模态参数辨识研究得到了发展。研究对象已从单一较小线性不变结构向大型多相耦

合非线性动力时变体系过渡, 研究方法从经典的频域方法发展到现代时-频联合分析方法和人工智能方法, 激励方式由简单的脉冲方式发展到复杂的环境随机激励, 研究结构所处的背景环境由无干扰噪声到强干扰、强耦合、多特征条件下的随机噪声^[4]。

表 1 工作模态参数辨识方法对比

Tab. 1 Work modal parameter identification methods contrast list

方法	类型	优点	缺点
峰值拾取法	频域	操作简单、辨识快速	无法辨识密频结构和阻尼
频域分解法	频域	识别精度高、有一定的抗噪能力	模型定阶困难、易产生虚假模态
Ibrahim 法	时域	精度较高	计算量大、易产生虚假模态
最小二乘复指数法	时域	有一定的识别精度	抗噪能力差、模型定阶困难
时间序列法	时域	无能量泄露、分辨率较高	模型定阶困难、易产生虚假模态
特征系统实现算法	时域	识别精度高、可用于密频结构的识别	模型定阶困难
随机子空间法	时域	具有一定的抗噪能力	易产生虚假模态、计算量大

* 国家自然科学基金资助项目(51009066); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划(2012GGJS-101); 河南省科技攻关资助项目(142102310122, 142300410177, 132102310320); 华北水利水电大学研究生教育创新计划基金资助项目(YK2014-05)

收稿日期: 2014-11-10; 修回日期: 2015-03-10

章国稳等^[5]提出基于特征值分解的随机子空间算法,解决了数据驱动随机子空间法计算效率低下的问题。文献[6]对自然激励技术(natural excitation technique,简称 NExT)和特征系统实现算法(eigensystem realization algorithm,简称 ERA)的结合算法进行改进,并准确辨识出金门大桥的垂向和扭转模态。文献[7]运用 Morlet 小波及一个调整参数对结构自由衰减响应进行模态识别,该方法具有良好的抗环境噪声干扰能力。文献[8]忽略高阶模态对辨识结果的影响,通过模态参数特征灵敏度检测出损伤位置和严重程度。

高坝等泄流结构具有高水头、大流量和超高流速的特点,振动信号通常为低信噪比、非平稳随机信号,其有效信息往往被低频水流噪声淹没。为得到泄流结构振动特征,笔者提出一种适用于泄流结构的工作模态参数时域辨识方法。该方法通过对泄流振动数据进行预处理,提取结构振动有效信息,同时结合系统定阶和模态验证,为辨识高坝泄流结构的工作模态参数提供捷径。

2 小波阈值-EMD 滤波理论

对结构进行振动测试时,由于环境激励响应、采集仪器的干扰和自身精确度偏差以及其他无法避免的人为因素,导致采集到的数据含有不同程度的噪声,如果直接对实测振动信号进行模态参数辨识将严重影响辨识准确度。为此,选择合适的降噪方法成为模态辨识研究的关键。

泄流结构振动信号是含高频白噪声和低频水流噪声的非平稳非线性信号。小波阈值降噪对白噪声具有很强的抑制能力,通过阈值处理能滤除高频白噪声,其基本思想是在对含噪声信号作小波分解后的各层系数中,对大于和小于某一阈值的小波系数分别进行处理,然后再利用处理后的小波系数重构原信号,以达到降噪目的。

对于泄流振动信号,由于结构振动真实信息常常被低频水流噪声淹没,因此需要对小波阈值降噪后的信号进一步处理。EMD 分解突破了传统信号处理方法的瓶颈,不需要先验知识选择一些相应技术指标或者函数,从而降低人为误差,其本质在于对信号进行强制平稳化处理,将信号中不同尺度的波动或趋势逐级分解开来,产生一系列有限的具有不同特征尺度的本征模函数(intrinsic mode function,简称 IMF)^[9]。基于 EMD 的特点,可对小波阈值处理后的信号进行 EMD 分解。

笔者提出小波阈值与 EMD 联合的降噪方法。该方法充分结合小波和 EMD 的优点,利用小波阈值分离信号中的高频噪声,抑制 EMD 端点效应,为 EMD 做铺垫。EMD 分解可进一步分离白噪声和低频水流噪声,提高滤波降噪精度。其本质在于对有效信息表现出传递特性和对噪声表现出抑制特性,根据有效信息和噪声在小波分解尺度和 EMD 分解空间上的不同规律进行信噪分离。

小波阈值与 EMD 联合降噪流程如图 1 所示。其中,小波阈值的选取是处理过程的关键。由于硬阈值函数不连续,出现伪吉布斯现象,笔者采用软阈值函数。Donoho^[10]提出的阈值计算公式计算的是全局阈值,适用于高信噪比信号,对于被噪声淹没的低信噪比泄流振动信号,该阈值公式因保留太多较大的噪声小波系数而影响降噪效果,且噪声小波系数随着分解层数的增加不断降低。改进的阈值计算公式为

$$\lambda = \frac{\sigma\sqrt{2\lg N}}{\ln(e+j-1)} \quad (1)$$

其中: σ 为噪声方差; N 为信号数据长度; e 表示底数 $e \approx 2.71828$; j 表示分解层数。

为评定信号降噪效果,引入信噪比(signal to noise ratio,简称 SNR)和根均方误差(root mean square error,简称 RMSE)作为评定标准。

信噪比为

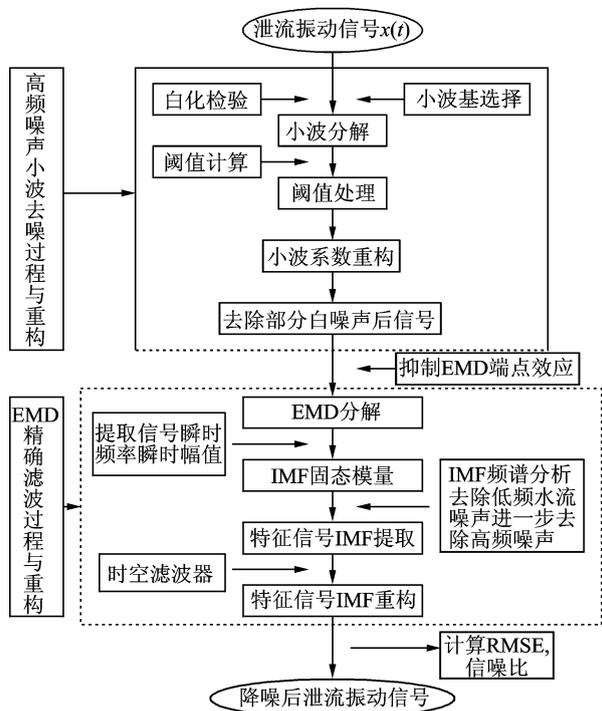


图 1 小波阈值-EMD 联合滤波方法流程

Fig. 1 The flowchart of wavelet threshold-EMD method

$$\text{SNR} = 10 \lg_{10} \left\{ \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f^2(n)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f(n) - \widehat{f(n)}]^2} \right\} \quad (2)$$

根均方误差为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f(n) - \widehat{f(n)}]^2} \quad (3)$$

其中: $f(n)$ 和 $\widehat{f(n)}$ 分别为原始信号和滤波后信号。

信噪比值越大,根均方误差值越小,说明消噪效果越理想。

3 工作模式参数辨识理论

3.1 NExT

NExT是由美国Sandia国家实验室结合时域模态分析方法而提出的^[11],线性系统在白噪声激励下两点响应的互相关函数和脉冲响应函数的数学表达式完全一致。在互相关函数中,每个衰减的正弦函数都对应于某阶结构模态,具有相同的固有频率和阻尼比。因此,互相关函数可以用来代替脉冲响应函数进行模态参数辨识。

3.2 基于奇异熵增量的结构工作模式定阶

脉冲响应数据构造的规范化Hankel矩阵反映的是脉冲响应信息矩阵,响应信号映射到 $m \times n$ 维相空间得到的重构吸引子轨道矩阵反映的是原始信号信息矩阵,两者具有完全相同的构造形式^[11]。引入奇异熵的概念对系统定阶

$$E_r = \sum_{i=1}^k \Delta E_i \quad (4)$$

其中: k 为奇异熵的阶次; ΔE_i 为奇异熵在阶次 i 处的增量。

$$\Delta E_i = - \left(d_i / \sum_{k=1}^i d_k \right) \ln \left(d_i / \sum_{k=1}^i d_k \right) \quad (5)$$

利用式(4)和式(5)计算规范化Hankel矩阵经奇异值分解后的奇异谱和奇异熵增量。同一脉冲响应信号无论受到噪声干扰的程度如何,完整抽取其有效特征信息所需的奇异谱阶次是一定的,即结构系统阶次一定。因此,选取奇异熵增量开始降低到渐近值时的阶次对结构系统进行模态定阶。

3.3 HHT模态参数辨识

将脉冲响应函数进行EMD分解,得到结构的各阶自由衰减响应,其函数表达式^[12]为

$$x(t) = A_0 e^{-\xi \omega_0 t} (x_0 \cos(\omega_d t + \varphi_0)) \quad (6)$$

其中: A_0 为与荷载强度、结构质量和频率特性等有关的常数; ξ 为相对阻尼系数; ω_0 为结构系统的无阻尼固有频率; x_0 为初始位移; ω_d 为有阻尼固有频率。

对各阶自由衰减响应进行Hilbert变换(Hilbert transform,简称HT),得到 $x(t)$ 的解析信号为

$$z(t) = x(t) + jH(x(t)) = A(t)e^{-j\theta(t)} \quad (7)$$

当系统中的阻尼较小时,式(7)中的幅值 $A(t)$ 和相位 $\theta(t)$ 表示为

$$A(t) = A_0 e^{-\xi \omega_0 t} \quad (8)$$

$$\theta(t) = \omega_d t + \varphi_0 \quad (9)$$

分别对幅值求自然对数,对相位函数求微分

$$\ln A(t) = -\xi \omega_0 t + \ln A_0 \quad (10)$$

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_d \quad (11)$$

此时可以通过 $\xi \omega_0$ 的值及 $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ 的关系求得结构固有频率和阻尼比。

基于HHT的工作模式参数辨识步骤如下:

- 1) 采用小波阈值-EMD联合滤波方法对泄流结构振动信号 $x(t)$ 进行滤波;
 - 2) 以振动量较小的测点为参考点并进行消噪处理,求同工况不同测点振动信号之间的互相关函数;
 - 3) 利用脉冲响应函数构造Hankel矩阵并进行奇异值分解;计算Hankel矩阵奇异值分解后的奇异熵,并确定奇异谱的阶次(即结构系统阶次),剔除非模态项(非共轭根)和共轭项(重复项),获得结构实际阶次;
 - 4) 对脉冲响应信号进行EMD分解得到的各阶自由衰减响应分量进行Hilbert变换,求出幅值对数时间函数及相位时间函数,得到各阶分量的固有频率和阻尼比;
 - 5) 针对已确定的脉冲响应函数实际阶次,结合模态置信度验证模态,得到系统各阶模态参数。
- 基于HHT的工作模式分析流程如图2所示。

4 仿真分析

为检验小波阈值-EMD联合滤波方法的滤波性能,构造模拟信号 $x(t)$ 和 $x_1(t)$ 进行检验,其中 $x_1(t)$ 为加入低频噪声和低频白噪声的信号,表达式为

$$x(t) = 10e^{-t\pi/2} \sin(15t) + 5e^{-t/3} \sin(20t)$$

$$x_1(t) = 8e^{-t/3} \sin(3t) + x(t) + 3\text{randn}(m)$$

其中: t 为时间;采样频率为100 Hz;采样时间为10 s;

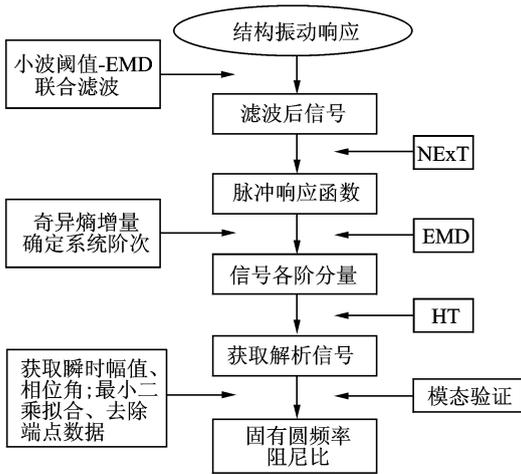


图2 HHT工作模态分析流程图

Fig. 2 The flowchart of HHT modal analysis

$\text{randn}(m)$ 是均值为零、标准差为1的标准正态分布的白噪声; m 为样本个数;假定振动幅值单位为 μm 。

构造信号时程曲线如图3所示。分别采用数字滤波、小波阈值滤波、EMD分解滤波和小波阈值-EMD联合滤波方法对含噪信号 $x_1(t)$ 进行降噪分析。数字滤波选用IIR数字滤波器,技术指标根据原始信号频谱选定。小波阈值降噪采用dB小波,根据白化检验自适应法确定分解层数为5层。EMD方法根据各阶IMF频谱图判断含真实信号的固有模量并对含真实信号的固有模量进行重构得到消噪后信号。4种滤波方法的消噪效果如表2所示。

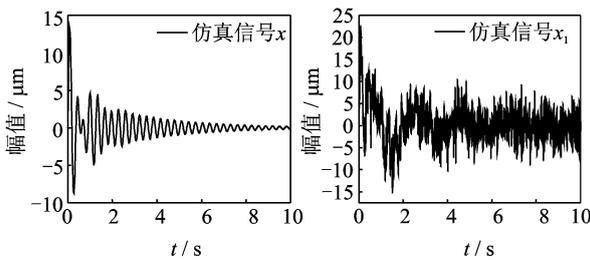


图3 构造信号时程曲线

Fig. 3 Time history curves of signal

表2 信号 x_1 采用4种滤波方法的消噪效果对比Tab. 2 Denoising effect correlation table of signal x_1 by four method

滤波方法	评价指标	
	信噪比	根均方误差
数字滤波	-3.600 1	2.940 2
小波	-1.854 5	2.376
EMD	2.365 5	1.461
小波阈值-EMD	5.938 9	0.968

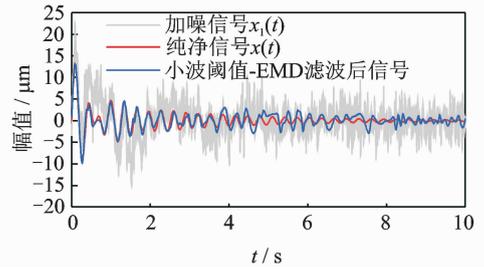
图4 信号 x_1 消噪前后对比图

Fig. 4 The contrast diagram of raw signal and de-noised signal

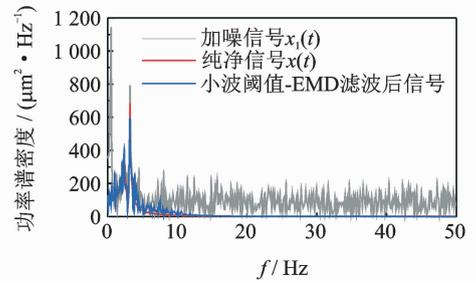
图5 信号 x_1 消噪前后功率谱密度对比图

Fig. 5 The contrast diagram of power spectral density between raw signal and de-noised signal

信号 $x_1(t)$ 消噪前后时程和功率谱密度图如图4,5所示。

由表2可知,采用小波阈值-EMD方法的降噪效果优于其他3种方法,该方法对于低信噪比信号滤波效果显著,尤其适合于泄流结构振动信号。由图5可知,当信号中噪声能量很大时,有用特征信息往往被噪声淹没,尤其低频脉冲噪声已经淹没了真实信号的优势频率,经过小波阈值-EMD联合滤波,含噪信号中的噪声成分已基本滤除,所保留信息能反映原始信号特征。

将滤波后信号做一时间延迟,得到二者之间的互相关函数,如图6所示。将作为脉冲响应函数进行模态辨识,结合奇异熵增量随奇异谱阶次变化曲

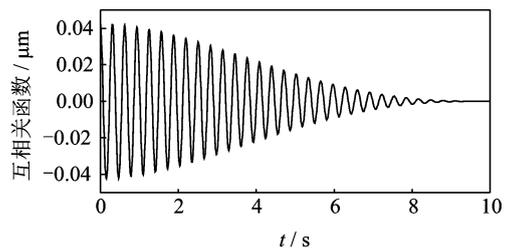


图6 互相关函数曲线

Fig. 6 The curve of cross-correlation function

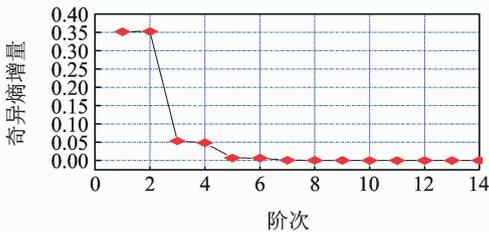


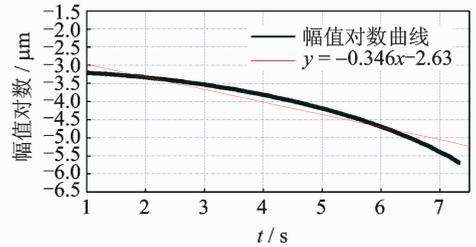
图 7 奇异熵增量随奇异谱阶次变化曲线

Fig. 7 The curve between increment of singular entropy and order

线对结构系统进行定阶, 奇异熵定阶结果如图 7 所示。当系统奇异谱阶次为 5 阶时, 对应的奇异熵增量开始缓慢增长并逐渐趋于平稳。根据复模态理论, 剔除系统非模态项(非共轭根)和共轭项(重复项)之后, 系统的模态阶次为 2 阶。

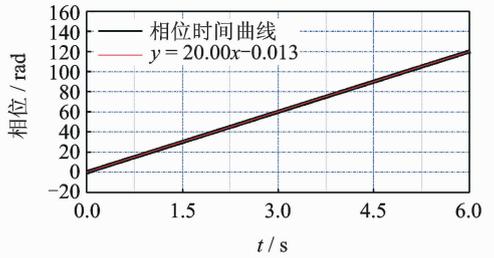
对脉冲响应函数进行 EMD 分解时, 适时剔除序列两端数据以抑制端点效应, 保证所得包络的失真度达到最小, 提高分解质量。将各阶分量进行 Hilbert 变换, 求幅值对数曲线及相位函数曲线, 对中间部分数据用最小二乘拟合得到固有频率和阻尼比。各阶分量模态辨识过程如图 8 所示, 辨识结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 仿真信号辨识误差在 5% 以内, 证明该方法的正确性及有效性。



(c) 第2阶分量幅值对数曲线及拟合直线图

(c) The logarithm amplitude and fitting straight line of the second order component



(d) 第2阶分量相位函数及拟合直线

(d) The phase function and fitting straight line of the second order component

图 8 各阶分量模态参数辨识过程

Fig. 8 Process of modal parameters identification

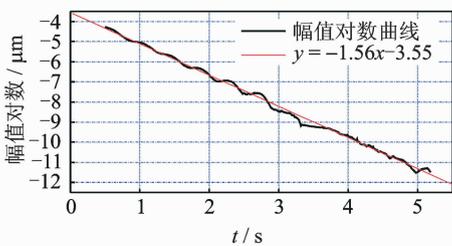
表 3 模态参数识别结果

Tab. 3 The result of modal parameters identification

模态阶数	理论值		辨识结果		辨识误差	
	圆频率/ Hz	阻尼比/ %	圆频率/ Hz	阻尼比/ %	圆频率/ %	阻尼比/ %
1	15	10.41	15.01	10.34	0.06	0.67
2	20	1.67	20.00	1.73	0.00	3.59

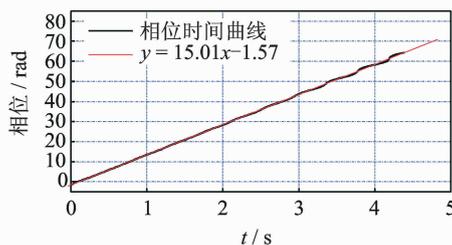
5 三峡重力坝工程实例

为分析三峡重力坝泄流振动情况, 选取 5 号溢流坝段为研究对象。坝顶上游侧距离坝顶防浪墙 3.6 m 布置 1#, 2# 测点, 下游侧距离坝顶走廊内侧 1.8 m 布置 3#, 4# 测点, 测点布置平面图如图 9



(a) 第1阶分量幅值对数曲线及拟合直线图

(a) The logarithm amplitude and fitting straight line of the first order component



(b) 第1阶分量相位函数及拟合直线

(b) The phase function and fitting straight line of the first order component

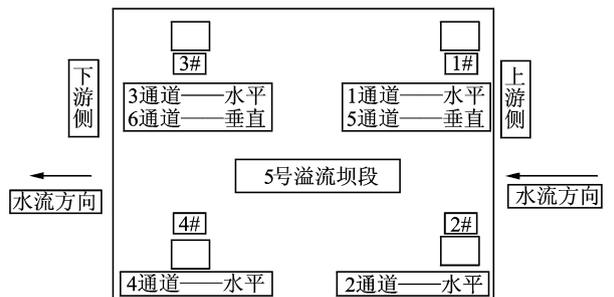


图 9 三峡 5 号坝段测点布置平面图

Fig. 9 The measuring point layout chart of No. 5 overflow section of three gorges gravity dam

所示。1#及3#测点布置水平向及垂向动位移传感器,其他测点仅布置水平向动位移传感器。1#,2#,3#,4#测点的水平向动位移传感器试验通道号分别为1,2,3,4;1#,3#测点的垂向动位移传感器试验通道号分别为5,6。

测试采样频率为100 Hz,采样时间为40s,选择1#和3#测点数据(即1,3,5,6通道)对该坝段进行工作模态参数辨识。限于篇幅,仅列第5阶模态

参数辨识过程(见图10),模态参数辨识结果见表4。为说明HHT方法的实用性,与文献[4]中的ERA方法辨识结果进行对比。ERA方法辨识精度高、能够用于辨识密频结构,并且与本研究方法辨识的模态参数具有相同的参数估计信息量和整体统一性。分析可知,笔者提出的HHT方法在辨识阶数及辨识精度上优于ERA方法的辨识结果,且具有辨识密频模态的能力。

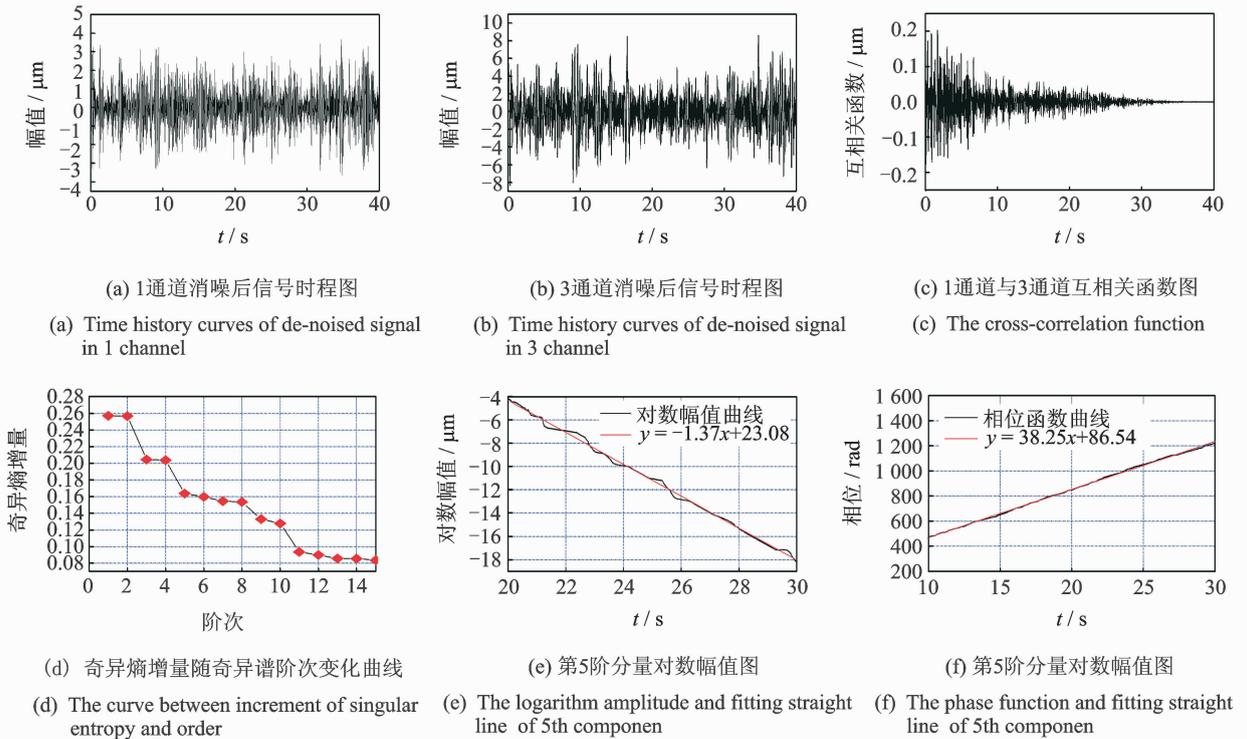


图 10 第 5 阶模态参数辨识过程图

Fig. 10 Process of modal parameters identification of 5th component

表 4 三峡 5 号溢流坝段模态参数辨识结果

Tab. 4 The result of modal parameters identification of No. 5 overflow section of three gorges gravity dam

模态阶数	提出的 HHT 方法			振型	文献[4]
	圆频率/Hz	f/Hz	阻尼比/%		ERA 方法
1	14.14	2.25	7.85	顺河向	f/Hz 2.43
2	17.78	2.83	7.01	顺河向	2.96
3	23.87	3.80	4.86	顺河向	4.0
4	32.48	5.17	3.89	垂向	—
5	38.25	6.08	3.58	顺河向	5.84
6	48.38	7.70	2.93	垂向	—

6 结 论

1) 小波阈值-EMD 联合滤波方法是一种适用

于泄流结构振动分析的信号降噪方法,较传统滤波方法具有更佳的降噪效果。

2) 结合奇异熵增量系统模态定阶,HHT 工作模态参数辨识方法能够直接确定系统阶数并准确辨识出泄流结构模态参数,能够有效避免模态分解中的频率混杂,具有较强的鲁棒性以及较高的辨识精度。

3) 该方法为模态参数的整体辨识方法,具有辨识密频模态的能力,为辨识高坝泄流结构的工作模态参数提供捷径。

参 考 文 献

[1] 史东锋,许锋,申凡,等.结构在环境激励下的模态参数辨识[J].航空学报,2004,25(2):125-129.

- Shi Dongfeng, Xu Feng, Shen Fan, et al. Modal parameter identification of structure in ambient excitation [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2004, 25 (2): 125-129. (in Chinese)
- [2] 张建伟, 李火坤, 练继建, 等. 基于环境激励的厂房结构损伤诊断与安全评价[J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32 (4): 670-674.
- Zhang Jianwei, Li Huokun, Lian Jijian, et al. Damage diagnosis and safety evaluation of underground powerhouse under ambient excitation [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(4): 670-674. (in Chinese)
- [3] 张建伟, 张翌娜, 赵瑜. 泄流激励下水工结构应变模态参数时域辨识研究[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(3): 199-203.
- Zhang Jianwei, Zhang Yina, Zhao Yu. Study on strain modal parameters identification of hydraulic structure in time domain under discharge excitations [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(3): 199-203. (in Chinese)
- [4] 张建伟. 基于泄流激励的水工结构动力学反问题研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [5] 章国稳, 汤宝平, 孟利波. 基于特征值分解的随机子空间算法研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(7): 74-78.
- Zhang Guowen, Tang Baoping, Meng Libo. Improved stochastic subspace identification algorithm based on eigendecomposition [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(7): 74-78. (in Chinese)
- [6] Chang M W, Pakzad S N. Modified natural excitation technique for stochastic modal identification [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139 (10): 1753-1762.
- [7] Sarparast H, Ashory M R, Hajiazizi M. Estimation of modal parameters for structurally damped systems using wavelet transform [J]. *European Journal of Mechanics A-solids*, 2014, 47: 82-91.
- [8] Yan Wangji, Ren Weixin. Closed-form modal flexibility sensitivity and its application to structural damage detection without modal truncation error [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2014, 20(12): 1816-1830.
- [9] Xu Lisheng, Shen Yanhua, Zhong Yue, et al. EMD-based adaptive wavelet threshold for pulse wave denoising [J]. *International Federation for Medical and Biological Engineering Proceedings*, 2013, 39: 367-370.
- [10] Donoho D L. Denoising by soft-thresholding [J]. *IEEE Transaction on Information*, 1995, 3: 613-627.
- [11] 练继建, 李火坤, 张建伟. 基于奇异熵定阶降噪的水工结构振动模态 ERA 识别方法 [J]. *中国科学*, 2008, 38 (9): 1398-1413.
- Lian Jijian, Li Huokun, Zhang Jianwei. The ERA identification method in hydraulic structure vibration modal based on singular entropy order selection and denoising [J]. *Science in China Press*, 2008, 38 (9): 1398-1413. (in Chinese)
- [12] 李成业. 泄流结构水力拍振机理及动态健康监测技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013.



第一作者简介: 张建伟, 男, 1979年3月生, 博士, 副教授。主要研究方向为水工结构耦联振动与安全。曾发表《水工结构泄流激励动力学反问题研究进展》(《水利学报》2009年第40卷第11期)等论文。

E-mail: zjwccivil@126.com

