检测低频振荡模式的EMD复合算法研究

易建波[1]，黄　琦[1]，丁理杰[2]，张　华[2]

(1. 电子科技大学电力系统广域测量与控制四川省重点实验室　成都　611731；2. 四川电力科学研究院　成都　610072)

【摘要】提出一种抗模态混叠的EMD复合算法。首先，通过改进频率外差方法，增加混叠模态分量间的频谱距离，有效分离出倍频模态混叠成分；其次，结合小波奇异点检测技术，确定各模态分量的自适应滑动分析窗口，实现间歇性混叠模态分离和振荡模式非平稳参数辨识。为验证算法的有效性，利用测试算例和电网仿真算例进行了测试分析，结果表明，该算法能够有效分离出混叠模式分量，对于模式复杂的低频振荡信号，能够有效分离出对应的低频振荡模式，具有较高的振荡模式信息检测精度。

关　键　词　自适应滑窗；　EMD分解；　频率外差法；　低频振荡；　模态混叠

中图分类号　TM712　　**文献标志码**　A　　doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.06.012

Research on EMD Composite Algorithm for Detecting the Low Frequency Oscillations Modes

YI Jian-bo[1], HUANG Qi[1], DING Li-jie[2], and ZHANG Hua[2]

(1. Key Lab of Wide-Area Control and Measurement on Power System of Sichuan Province, University of Electronic Science and Technology of China　Chengdu　611731;　2. Sichuan Electric Power Research Institute　Chengdu　610072)

Abstract　In this paper, an anti mode mixing empirical mode decomposition (EMD) composite algorithm is proposed. First, the improved frequency heterodyne method is addressed to increase the spectral distance between mode mixing components in order to isolate the octave mode mixing components. Second, the wavelet singularity detection technology is applied to determine the adaptive sliding analysis window for each mode and then implement the intermittent mixing modes separation and their nonstationary parameters identification. In order to verify the validity of the algorithm, a test case and a grid simulation case are used to test and analyze the EMD composite algorithm. The analysis result shows that the proposed algorithm can isolate the mode mixing component effectively. Moreover, for a low frequency oscillation signal with complex modes, the proposed algorithm is able to isolate the corresponding low frequency oscillation mode and has high detection accuracy of oscillation mode information.

Key words　adaptive sliding analysis window;　empirical mode decomposition (EMD);　frequency heterodyne method;　low frequency oscillations;　mode mixing

现代电力系统动态行为复杂，低频振荡问题严重威胁互联电网运行的稳定性和安全性，而基于模型分析出的振荡模式结果已经难以精确描述系统动态过程[1]。低频振荡信号包含了激振模态的所有特征信息，是电力系统受扰动态的真实反映。目前主要以Prony方法[2]分析低频振荡信号，该方法以曲线拟合为基础，受噪声、拟合实际阶数的影响大，并且未考虑轨迹信号的非平稳特性，其强行拟合产生的假频问题影响振荡模式分析的有效性。其他在固定时窗范围内利用傅里叶和小波方法辨识低频振荡模式，受制于平稳信号假设条件和频率分辨率，分析准确性难以衡量[3]。

针对低频振荡信号所呈现的振幅随时间变化和激振模态出现随机性等非平稳信号特点，一种由数据驱动的HHT[4]方法被用于辨识低频振荡模式[5-7]。但是，低频振荡信号频率集中于0.2～3 Hz范围内，且模态构成复杂，而HHT方法的EMD过程存在倍频频率分辨率限制，测量噪声、端点效应和模式密集等问题容易引起本征模态函数(IMF)的模态混叠[8-9]，造成振荡模式辨识失真。对于EMD算法中的模态混叠问题，文献[10]提出总体经验模态分解(EEMD)方法，文献[11]利用EEMD方法对源信号附加白噪声进

收稿日期：2013 – 03 – 14；修回日期：　2014 – 05 – 26
基金项目：国家自然科学基金(51277022)
作者简介：易建波(1981 –)，男，博士，主要从事电力系统分析与故障诊断方面的研究.

行分解，从各IMF分量中滤除噪声，分离出混叠模式分量，但该方法分析窄带复杂模式信号尚不可行。文献[12-13]分别提出掩蔽信号法和频率外差法处理模态混叠问题，文献[14-16]应用这两种方法处理低频振荡信号，对于倍频混叠振荡模式能够有效分离，但需要预先根据混叠模式成分确定辅助信号，而且分解过程产生的高低频模态翻转和伪模态分量辨识等问题尚未解决。因此，要完全消除模态混叠现象还需对算法深入研究和改进。

本文针对电力系统低频振荡信号，提出一种抗模态混叠的EMD复合算法。首先，改进频率外差方法，增加混叠模态分量间的频谱距离，达到EMD算法倍频分辨率要求，同时避免高低频模态翻转导致的伪模态分量。其次，应用小波奇异点检测技术，设置各模态分量自适应滑动分析窗口，检验各子窗口内频谱分布，通过改进频率外差法实现混叠模态完全分离。最后，应用本文算法检测了多模振荡测试信号和电网仿真算例的受扰振荡信号，辨识结果符合系统的真实激振模式，表明本文算法能够有效分离出混叠模式分量，对含复杂模态成分的低频振荡信号具有良好的振荡模式信息检测精度，具备较高的工程实用性。

1 模态混叠现象

EMD算法分解非平稳信号，如果筛分出的某个IMF分量不是单一模态分量，则该IMF分量存在模态混叠现象，该分量会对其他分量的筛分产生链式影响，最终导致整个EMD过程失效。文献[17]通过定义极值点采样率推导了EMD分解过程存在模态混叠的临界条件，即两个模态频率比为$0.5<f_1/f_2<2$时，EMD过程不能筛分出单一模态分量，定义为倍频模态混叠现象。对于频谱集中度高的低频振荡信号，这种倍频模态混叠现象极易出现。此外，电力系统扰动因素多样，动态过程复杂，受扰振荡轨迹具有不可预测性。振荡轨迹除了振幅随时间变化外，激振模态的出现具有随机性，使得分析窗口内的信号频率发生跳跃性变化，产生间歇性模态混叠现象。

应用EMD算法时极易产生倍频模态混叠和间歇性模态混叠现象。而测量噪声、端点效应和插值算法等因素可能加重模态混叠的程度，引起频率漂移、伪模态分量、阻尼损失等问题。因此，判断和分离IMF分量中的混叠模态，是EMD算法应用是否成功的重要指标，对于提高低频振荡模式分析的精度和可信度非常重要。

2 模态混叠分离方法

2.1 改进频率外差方法

针对倍频模态混叠问题，文献[12]提出利用FFT预分析频率成分定义的掩蔽信号：

$$m(t)=M\cos(2\pi(f_1+f_2)t) \qquad f_1>f_2 \tag{1}$$

式中，振幅M是单一模态分量f_1振幅的5.5倍。应用掩蔽信号法分别对$x(t)+m(t)$和$x(t)-m(t)$做EMD分解，最后IMF分量结果为$(\mathrm{IMF}^{+}+\mathrm{IMF}^{-})/2$。然而对于复杂低频振荡信号，分析时窗内可测周期少，且振幅随时间变化，FFT频谱精度很难保证，准确预知混叠信号的频率成分比较困难。

文献[13]提出频率外差法，选定一高频载波信号对模态混叠信号进行调制，得到的调制信号为：

$$s_{\mathrm{M}}(t)=s(t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi Ft} \tag{2}$$

调制产生双边带信号(DSB)，载波频率为F，调制信号$s_{\mathrm{M}}(t)$包含新频率成分f_{m1}、f_{m2}，其实质是被调信号对于F频率信号的频移。如果定义外差频率F在$[f_1,2f_1-f_2]$，则DSB信号频率成分满足$|f_{\mathrm{m1}}/f_{\mathrm{m2}}|>2$，能够解决EMD分解过程的倍频模态混叠问题。

如图1a所示，频率外差法调制过程会引起原信号的高、低频率分量翻转。实际算法过程中，还可能存在噪声、多模态分量，端点效应和插值误差等引起的低频伪模式分量，混叠模态分离的正确率低。

本文改进频率外差法，如图1b所示，定义F在$[2f_2-f_1,f_2]$，信号调制过程不产生频率翻转，EMD分解结果序列符合原信号中的模态成分排序。

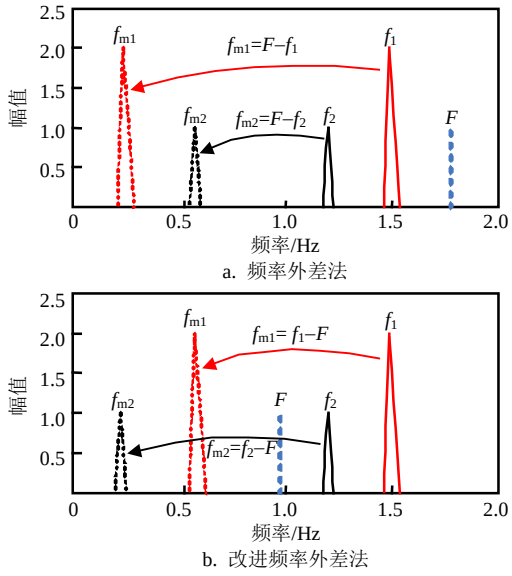

图1 频率外差法频谱对比图

式(2)中双边带信号中任意边带均包含被调制信号的所有信息，则应用Hilbert变换转换任意单边带

信号(SSB)为解析信号：

$$s_{\mathrm{H}}(t)=s(t)+\mathrm{j}H[s(t)] \tag{3}$$

式中，$H[s(t)]$表示信号$s(t)$的Hilbert变换：

$$H[s(t)]=\frac{1}{\pi}p\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{s(\tau)}{t-\tau}\mathrm{d}\tau \qquad i=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

本文提取下边带SSB信号为待分解信号，模态混叠信号通过载波F频率信号调制后，得到：

$$s_{\mathrm{SSB}}(t)=\mathrm{Re}\{s_{\mathrm{H}}(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi Ft}\} \tag{5}$$

经过调制后的SSB信号满足EMD分解的倍频分辨率要求，则该信号EMD分解结果为：

$$s_{\mathrm{SSB}}(t)=\sum_{i=1}^{n}c_i(t)+r(t) \tag{6}$$

式中，$c_i(t)$表示筛分出的IMF分量。在载波F频率信号选择合理的情况下，各IMF分量不存在模态混叠现象，$c_i(t)$均是单一模态分量。

恢复原模态信号，利用Hilbert变换构建各IMF分量的解析信号$c_{\mathrm{H}i}(t)$，同时利用载波F频率信号解调出原模式分量：

$$c_{si}(t)=-\mathrm{Re}\{c_{\mathrm{H}i}(t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi Ft}\} \tag{7}$$

针对低频振荡信号特点，可利用有效周期少，兼顾振荡模式分析实时性要求，外差过程中尽量避免出现极低频移频信号，预设改进算法的模态分辨率精度0.1 Hz，外差频率取值[0.8f_2,0.85f_2]，具有较好的应用效果。

2.2　自适应滑动窗口技术

针对间歇性模态混叠问题，本文提出自适应滑动窗口技术。电力系统在发生扰动或故障后，状态变量采样曲线可能发生畸变，其奇异性表现为两类间断点。利用小波奇异点检测技术，选择合适的小波基函数，测定波形间断点的位置，划分出不同振荡模式存在的完备时间窗口，使得算法能够在自适应划分的子窗口内进行振荡模式分离和参数辨识。

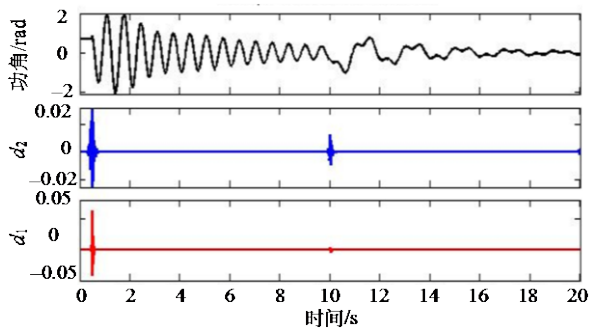

图2　小波分析检测信号奇异性

构建间歇性模态混叠功角信号如图2所示。应用DB小波[18]对信号进行多尺度分解，本文采用DB10小波为小波基函数，在信号波形发生突变的位置，小波系数具有模极大值，图2中小波分解第一层和第二层系数d_1、d_2的极值标示了信号存在间断点的位置信息。

根据信号间断点检测结果，振荡模式子窗口的划分与分析规则如下：

1) 最小子窗划分。由于EMD有效分解至少需要两个以上完整振荡周期，同时低频振荡频率可达0.2 Hz以下，故限制子窗口划分不少于5 s。2) 窗口边界伸缩处理。信号EMD分解时，为减小端点效应的影响，子窗口两边界各扩展0.5 s长度；振荡参数辨识过程中，为保证辨识结果的准确度，子窗口两边界各缩进0.5 s长度。3) 子窗口分析顺序设定。不按时标顺序，按窗口长度顺序，先分析短时窗，后分析长时窗。

自适应滑动窗口的划分，解决了低频振荡信号全局分解与局部分解的转换问题，对于低频振荡模式的时间随机性作出精确判断，确保了EMD分解非平稳振荡信号的完备性，有效解决间歇性模态混叠问题，对提高振荡模式辨识精度，增强EMD方法实用性效果显著。

3　算法流程

本文针对电力系统低频振荡信号，设计了一套完善的抗模态混叠EMD复合模式检测算法。应用改进频率外差方法和自适应滑动窗口技术能够有效解决模态混叠问题，且在各模态独立存在的时窗内辨识低频振荡模式特征参数，提高了非平稳参数的辨识精度和可信度。

如图3所示算法流程为：

1) 数据预处理。为保证信号的纯净度和对称性，利用低通滤波器滤除测量噪声，同时计算算术平均值，滤除直流分量。2) 自适应滑动窗口技术。检测信号奇异性，根据2.2节的自适应子窗口划分规则确定子分析时窗，对子窗口内信号进行频谱分析，判断窗内信号是否满足倍频分辨率要求。3) 改进频率外差技术。对于倍频模态混叠信号，利用本文2.1节的改进频率外差法分离出单一模式分量；对于无模式混叠信号，直接采用EMD算法分解单一模式分量。对于SSB信号分解的IMF分量，不必进行信号解调，阻尼特性可直接从IMF分量中辨识，原模态频率为$f_{\mathrm{m}}+F$。4) 参数辨识。单一振荡模式分量，首先通过Hilbert变换为解析信号。频率参数通过计算该解析信号瞬时频率的均值确定，幅值和阻尼参数通过最小二乘法拟合瞬时幅值函数的对数曲线获得。

对于外差后的振荡模式分量，幅值和阻尼参数辨识时不必进行信号解调，频率参数应为f_m+F。5) 分析结果。对比各子窗口中振荡模式分量的辨识结果，对于不同窗口中的相似振荡模式辨识结果进行比较修正，综合考虑间断点的分布情况，得出不同低频振荡模式存在区间的非平稳参数分析结果。

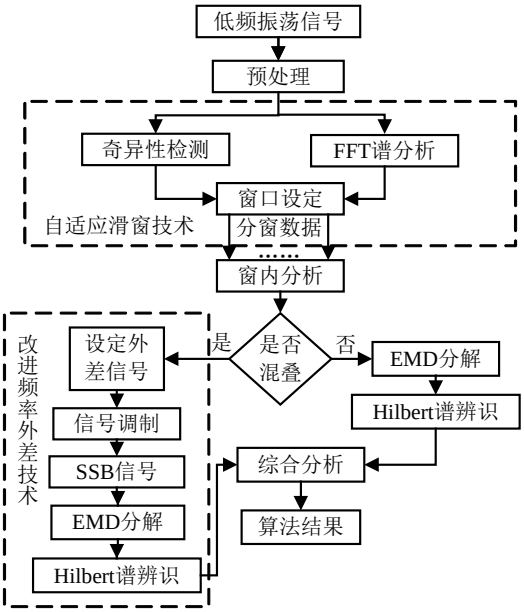

图3 低频振荡模式检测复合算法流程

4 算法测试

4.1 混模测试算例

为验证本文算法对EMD分解中混叠模态成分的区分能力，构建两种模态混叠均存在的混模信号：

$$x(t)=\begin{cases}0.5\mathrm{e}^{-0.11t}\cos(3.04\pi t) & t\in[0.5\quad 20]\\ \mathrm{e}^{-0.21t}\cos(1.04\pi t) & t\in[10\quad 20]\\ 0.2\mathrm{e}^{-0.17t}\cos(2.44\pi t) & t\in[10\quad 20]\end{cases}\tag{8}$$

功角轨迹信号式(8)在某一时刻出现新的激振模态，信号时间尺度产生跳跃性变化，同时两个模态成分还存在倍频模态混叠现象。

图2通过小波奇异性检测技术分析出了该轨迹的间断点位置。依据子窗口划分规则，图4a显示了子窗口顺序及长度划分为1#窗0～10.5 s，2#窗9.5～20 s，3#窗0～20 s。图4b显示了待分析混模信号的频谱，有3个振荡模式分量，而在1#窗内，1.52 Hz和1.22 Hz两个模式分量存在模态混叠问题。在1#窗内应用改进频率外差法，设定外差信号频率F=0.95 Hz，幅值为1，EMD分解结果如图4c所示。分离出的两个单一IMF分量，调制频率为0.57 Hz和0.25 Hz，分别对应原信号中的1.52 Hz和1.22 Hz两个模式，达到了混叠模式分离的效果。而在2#窗内信号不存在模态混叠情况，图4d显示了EMD分解的单一IMF分量，振荡模式分别为1.52 Hz和0.52 Hz。综合整个信号时区内间断点的分布情况，确定整个3#窗内只有1.52 Hz模式分量存在，10 s附近是0.52 Hz振荡模式和1.22 Hz振荡模式的分界区域。

图4的测试结果表明，本文提出的自适应窗口技术能够准确划分各模态成分的存在时窗，改进外差法能够分离出倍频模态混叠成分，振荡模式的辨识不受伪模态分量的干扰，模式辨识结果符合测试信号的混模情况。

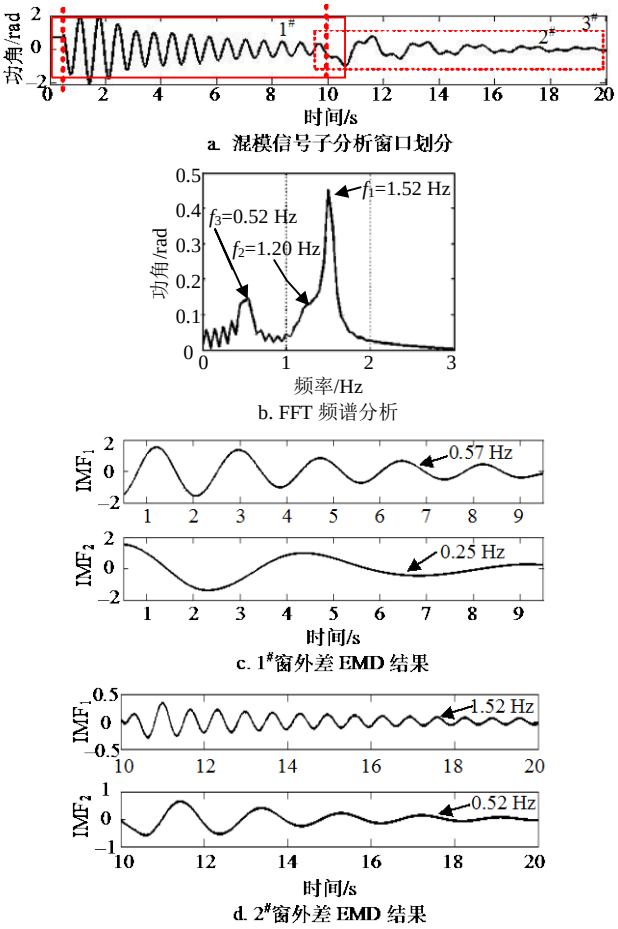

图4 自适应滑动窗口分析

4.2 电网仿真算例

利用EPRI-36电力系统全交流模式进行仿真，系统拓扑如图5所示。电网稳态运行过程中，在BUS3节点对发电机励磁施加幅度为0.5p.u，振荡频率为1.25 Hz的强迫扰动信号，作用时间2～22 s，扰动前后电网没有进行任何附加控制操作。

为测试本文算法检测实际低频振荡信号的有效性，本文选取BUS6的有功功率振荡轨迹信号作为测试信号，采样频率100 Hz，采样时长60 s，振荡轨迹和FFT频谱分析如图6所示。该振荡信号可能存在

0.38、0.78、1.12、1.25、1.65、2.21 Hz等模式成分，模式成分复杂，且各模式存在时间、阻尼情况，是否存在伪模式成分等均无法判断，直接采用EMD算法不可能分离出准确的模式成分。

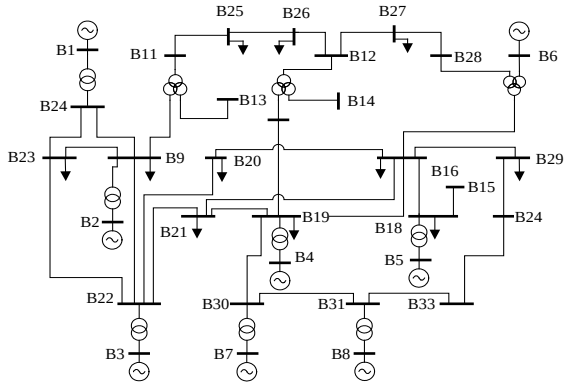

图5　EPRI-36系统拓扑图

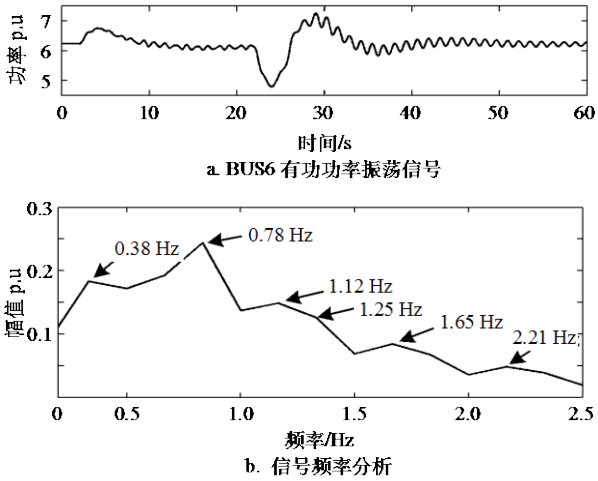

图6　有功功率振荡频谱图

应用本文复合算法，首先确定间断点分别为2、22、28 s，滑动分析窗口划分结果为1#窗[22,28] s，2#窗[2,22] s，3#窗[28,60] s。经过分窗后的局部信号不再出现间歇性模态混叠情况，同时大致确定了部分振荡模式的存在时间。

图7a中1#窗内信号不满足对称条件，无法分析振荡模式。图7b中2#窗内信号存在0.38、0.78和1.25 Hz 3个模式成分，存在倍频模态混叠情况，可设定外差信号为0.69 Hz，利用本文算法可分离出IMF_1模式为1.25 Hz，IMF_2模式为0.78 Hz，IMF_3为外差后的0.09 Hz模式结果，该结果对应0.38 Hz振荡模式，仍为频率较高振荡模式，外差分解过程没有改变模式排列顺序。图7c中3#窗内信号仅存在0.78 Hz振荡模式，直接经EMD分解获得一个有效的振荡分量。

对2#窗和3#窗的分量结果进行Hilbert谱分析，为了避免端点效应对振荡模式参数辨识的影响，谱分析窗口两端边界各缩短1 s，提高参数辨识精度。综合分析振荡模式辨识结果，对比图6中FFT频谱分析的振荡模式结果，确定实际激振模式的特征参数，表1为最后振荡模式参数检测结果。

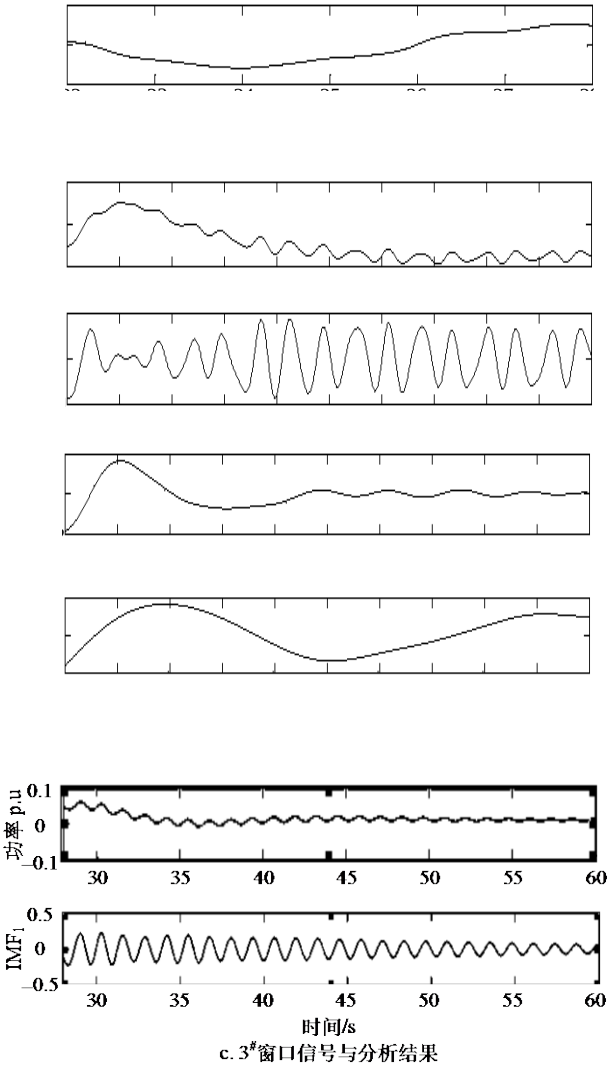

图7　低频振荡模式分离结果

表1　低频振荡分析结果

序号	频率/Hz	幅值	衰减系数	阻尼比/%	存在时间/s
1	2.21	—	—	—	—
2	1.65	—	—	—	—
3	1.25	0.1	−0.01	0.05	2～22
4	1.12	—	—	—	—
5	0.78	0.36	−0.046	1.07	2～60
6	0.38	0.52	−0.13	12.71	2～22

表2分析结果中0.78 Hz振荡模式属于弱阻尼振荡模式，复合该模型小扰特征根分析结果。1.25 Hz振荡模式属于迫振模式，0.38 Hz振荡模式可能由迫振模式激励，其他几种振荡模式未出现，或者阻尼较大，存在时间很短，振荡周期特性较少而无法辨

识。综上所述，本文算法能够根据低频振荡信号检测出的振荡模式信息，改进频率外差技术和自适应滑动窗口技术能够有效分离EMD算法中的混叠模式，并确定出各振荡模式的存在时间，辨识出的低频振荡特征信息符合理论结果。因此，本文算法是一种可行且有效的检测低频振荡信号的实用工具。

5 结 束 语

本文提出一种抗模态混叠EMD复合算法检测电力系统低频振荡模式。该算法的改进频率外差法和自适应滑动窗口技术很好地解决了EMD分解中的模态混叠问题，提高了该算法检测低频振荡模式的可行性和可信度。通过混模测试信号和电网小扰仿真振荡信号对算法性能进行测试，结果证明了本文算法能够有效分离混叠模式成分，检测低频振荡模式非平稳特征信息精度高。本文为通过测量信号分析电力系统低频振荡现象，提供了一种高效可靠的工程应用方法。

参 考 文 献

[1] 黄琦, 王周强, 张昌华. 基于Normal Form理论的电力系统三阶解析解[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(6): 957-961.
HUANG Qi, WANG Zhou-qiang, ZHANG Chang-hua. Third order analytical solution of power system dynamic model based on Normal Form[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(6): 957-961.

[2] 竺炜, 唐颖杰, 周有庆, 等. 基于改进Prony算法的电力系统低频振荡模式识别[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 44-47.
ZHU Wei, TANG Ying-jie, ZHOU You-qing, et al. Identification of power system low frequency oscillation mode based on improved Prony algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 44-47.

[3] 薛禹胜, 郝思鹏, 刘俊勇, 等. 关于低频振荡分析方法的评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 1-8.
XUE Yu-sheng, HAO Si-peng, LIU Jun-yong, et al. A review of analysis methods for low-frequency oscillations[J]. Automation of Electric Power, 2009, 33(3): 1-8.

[4] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc R Soc Lond A, 1998, 454: 903-995.

[5] MESSINA A R, VITTAL V. Nonlinear non-stationary analysis of inter-area oscillations via Hilbert spectral analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1234-1241.

[6] 蔡国伟, 杨德友, 张俊丰. 基于实测信号的电力系统低频振荡模态辨识[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 59-65.
CAI Guo-wei, YANG De-you, ZHANG Jun-feng. Mode identification of power system low-frequency oscillation based on measured signal[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 59-65.

[7] YANG D C, REHTANZ C, LI Y, et al. A hybrid method and its applications to analyse the low frequency oscillations in the interconnected power system[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2013, 7(8): 874-884.

[8] HUANG N E, WU M, LONG S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis[J]. Proc R Soc Lond A, 2003, 459: 2317-2345.

[9] MANDIC D P, REHMAN N U, WU Z H, et al. Empirical mode decomposition-based time-frequency analysis of multivariate signals: the power of adaptive data analysis[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(6): 74-86.

[10] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.

[11] 王宏, 周正欧, 李廷军, 等. 基于EEMD穿墙雷达人的运动模式识别[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(3): 346-351.
WANG Hong, ZHOU Zheng-ou, LI Ting-jun, et al. Human activity classification based on EEMD using a support vector machine[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(3): 346-351.

[12] DEERING R, KAISER J F. The use of masking signal to improve empirical mode decomposition[C]//IEEE Conference on Acoustics, Speech Signal Processing. [S.l.]: IEEE, 2005: 485-488.

[13] SENROY N, SURYANARAYANAN S. Two techniques to enhance empirical mode decomposition for power quality applications[C]//IEEE PES General Meeting. [S.l.]: IEEE, 2007: 1-6.

[14] 杨德昌, REHTANZ C, 李勇, 等. 基于希尔伯特–黄改进算法的电力系统低频振荡分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 102-108.
YANG De-chang, REHTANZ C, LI Yong, et al. Researching on low frequency oscillation in power system based on improved HHT algorithm[J]. Proceedings of the Chinse Society for Electrical Engineering, 2011, 31(10): 102-108.

[15] DINA S L, MESSINA A R, BIKASH C P. A refined Hilbert-Huang transform with applications to inter-area oscillation monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 610-620.

[16] PRINCE A, SENROY N. Targeted approach to apply masking signal-based empirical mode decomposition for mode identification from dynamic power system wide area measurement signal data[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(10): 1025-1032.

[17] RILLING G, FLANDRIN P. One or two frequencies? The empirical mode decomposition answers[J]. IEEE Transaction on Signal Process, 2008, 56(1): 85-95.

[18] 杨淑英, 王丽宏, 杜荣华. 电力系统暂态保护中小波基的选择与应用[J]. 电力系统及其自动化学, 2008, 20(5): 106-111.
YANG Shu-ying, WANG Li-hong, DU Rong-hua. Selection and application of mother wavelet in the electric power system transient protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(5): 106-111.

编 辑 漆 蓉