

· 综合研究 ·

# 基于经验模态分解的地震相分析技术

刘庆敏\* 杨午阳 田连玉 徐云泽 李琳

(中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃兰州 730000)

刘庆敏,杨午阳,田连玉,徐云泽,李琳. 基于经验模态分解的地震相分析技术. 石油地球物理勘探, 2010, 45(增刊1): 145~149

**摘要** 经验模态分解(EMD)方法是希尔伯特—黄变换的核心部分,可以将地震数据分解为多阶内蕴模态函数(IMF)分量,不同IMF分量具有不同的频率特性,不同的IMF分量对地震相的敏感程度不同,反映不同的地质信息。利用EMD方法结合kohonen神经网络的地震相分析可进行断层识别以及储层预测。文中将EMD方法应用于中国西部的实际地震资料分析,利用重构信号和分解得到的IMF分量进行波形地震相分析。模型试算和实际资料应用结果表明,用感兴趣的IMF分量能够重构信号,重构后的地震信号能够更加清晰地显示断层展布特征、有利储层范围等,提高了地震资料的信噪比和分辨率,对断层展布特征的认识和油气预测具有重要的参考价值。

**关键词** 希尔伯特—黄变换 经验模态分解 内蕴模态函数 波形分类 地震相分析

## 1 引言

希尔伯特—黄变换(HHT)<sup>[1~3]</sup>是美国工程院院士Huang等提出的一种全新的信号分析方法,它由经验模态分解(EMD)和希尔伯特变换两部分组成。与传统的傅里叶变换<sup>[4]</sup>和小波变换<sup>[5]</sup>相比,希尔伯特—黄变换不受时窗的限制,可根据数据的时间尺度特征进行分解,自适应性强,时频局部性好,更加适用于非线性和非平稳信号。EMD方法是HHT的核心算法之一,是对信号进行一种非线性的自适应分解,通过分解得到的每个内蕴模态函数(IMF)都代表了某种特定意义的频带信息,能更好地反映原始数据固有的物理特性,因此引起工业界的极大兴趣,已被广泛用于数据分析的诸多领域,在地震勘探领域用于噪声压制<sup>[6,7]</sup>、地震信号处理<sup>[8~10]</sup>以及储层识别<sup>[11,12]</sup>等方面。

随着地震属性技术的迅速发展,基于波形的地震相分析技术<sup>[13~16]</sup>利用地震道波形特征对某一层间内地震数据道进行逐道对比,可细致地刻画地震信号的横向变化,从而认识地震异常体的平面分布规律。基于波形的地震相分析技术综合利用了地震信号的各种信息,可认识地震信号的总体变化特征以及分布规律,具有独特的解决问题的能力。文中

将EMD方法应用于中国西部的实际地震资料分析,利用重构信号和分解得到的IMF分量进行波形地震相分析。实际资料的应用结果表明,EMD方法得到的波形地震相刻画了更多的地质信息,对断层展布特征的认识和油气预测具有重要的参考价值。

## 2 EMD方法基本原理

EMD方法的大体思路是利用时间序列上、下包络的平均值确定“瞬时平衡位置”,进而提取固有模态函数,具体描述如下:

(1)找出原始时间序列信号 $x(t)$ 的局部极大值和极小值,分别得到极大值包络 $s_{\max}(t)$ 和极小值包络 $s_{\min}(t)$ ;

(2)对每个时刻的局部极大值 $s_{\max}(t)$ 和极小值 $s_{\min}(t)$ 取平均,得到瞬时平均值 $m(t)$ ,即

$$m(t) = \frac{s_{\max}(t) + s_{\min}(t)}{2} \quad (1)$$

(3)用原始信号 $x(t)$ 减去瞬时平均值 $m(t)$ ,得到一个去掉低频的新序列 $h(t)$ ,即

$$h(t) = x(t) - m(t) \quad (2)$$

(4)判断 $h(t)$ 是否为固有模态函数,即要满足终止准则:①极值点数目和过零点数目相等或最多

\* 甘肃省兰州市中国石油勘探开发研究院西北分院,730000

本文于2010年5月19日收到,修改稿于2010年8月26日收到。

相差 1 个; ②在任意点, 由局部极大值点和局部极小值点构成的两条包络线平均值为零。如果  $h(t)$  满足上述两个条件, 则  $h(t)$  为固有模态函数; 否则, 将  $h(t)$  作为原始数列重复步骤(1)~(3), 直到满足这两个条件为止。这就得到第一个 IMF 分量, 记为  $c_1(t)$ 。

(5)将  $c_1(t)$  从原始信号中分离出来, 即

$$x(t) - c_1(t) = r_1(t)$$

$r_1(t)$  仍然包含较长周期分量, 因此将  $r_1(t)$  作为新的时间序列应用上述步骤进行处理

$$r_1(t) - c_2(t) = r_2(t)$$

⋮

$$r_{n-1}(t) - c_n(t) = r_n(t)$$

直到剩余项  $r_n(t)$  少于两个极值点, 那么分解终止。

经过 EMD 后, 得到  $n$  个 IMF 分量  $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$  和最后一个不可分解的序列  $r_n(t)$  (为  $x(t)$  的均值或者趋势项)。这些 IMF 分量分别对应着从高到低不同频率的信号成分, 所含的地质信息不同, 因此可以对感兴趣的频率范围进行地震信号重构, 即

$$x'(t) = \sum_k c_k \quad (2)$$

式中:  $x'(t)$  为重构信号;  $c_k$  为所选择的 IMF 分量。小波变换对线性信号的分析效果较好, 对非线性信号分析的效果不是很好。与小波变换相比, EMD 方法的分量不是等带宽的, 适合于非线性信号分析。

对各阶 IMF 分量以及重构后的信号, 沿目的层段逐道进行基于 kohonen 自组织神经网络的地震相分析, 并进行平面归类处理, 得到平面地震相图, 可研究断层展布、有利储层分布等地质信息。

### 3 模型试算

为了验证 EMD 方法的有效性, 文中对信号(图 1)

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) \quad (0 < t < 500\text{ms})$$

进行了分析。其中

$$y_1(t) = \begin{cases} \sin(20\pi t) + 0.5\sin(5\pi t)e^{-0.2t} & (0 < t \leq 250\text{ms}) \\ \sin(10\pi t) + 0.5\sin(5\pi t)e^{-0.2t} & (250 < t \leq 500\text{ms}) \end{cases}$$

$$y_2(t) = 0.5\cos(3\pi t) \quad (0 < t < 500\text{ms})$$

模型信号  $y(t)$  是由  $y_1(t)$  和  $y_2(t)$  叠加而成<sup>[17]</sup>, 其中  $y_1(t)$  在 250ms 处发生了一个频率跃变,  $y_2(t)$

是整个时间域的余弦函数, 因此  $y(t)$  是由多个频率成分不同的信号组合而成, 其频率随时间而变化。由  $y(t)$  进行 EMD 模型试算, 产生的一系列 IMF 序列重构信号, 在理论上可以检验 EMD 方法的应用效果, 具有重要意义。

图 1 为使用 EMD 方法前、后数据对比图, 由图中可见, EMD 方法能够明确地分离出两种振动信号, 而且分解信号与原组合信号基本相符, 这种符合物理模型的分解效果是其他分解法难以实现的。

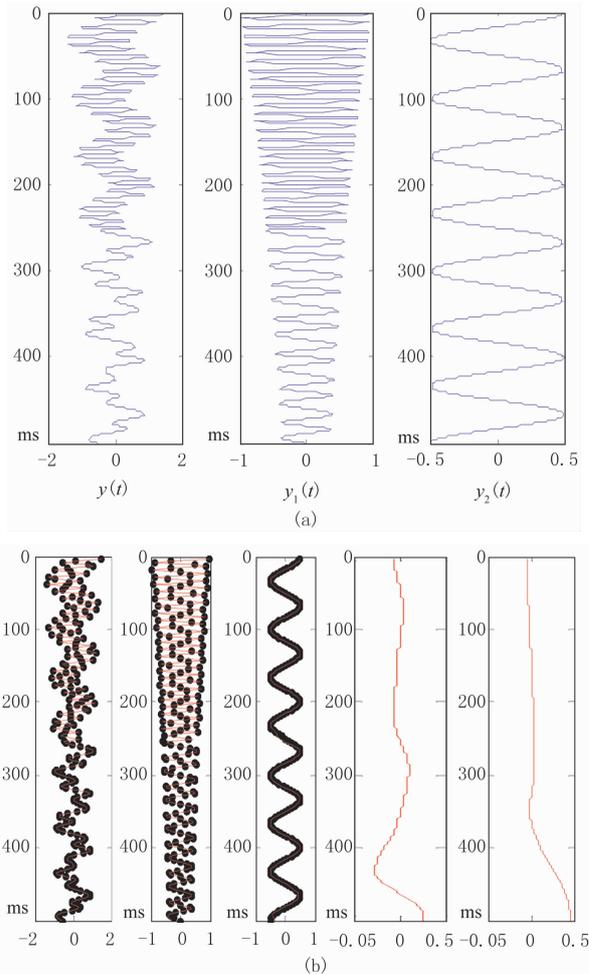


图 1 使用 EMD 方法前、后数据对比图

(a)原始数据;(b)使用 EMD 方法后的数据与原始数据叠合图(从左至右依次为  $y(t)$ 、EMD 数据,  $y_1(t)$ 、1 阶 IMF,  $y_2(t)$ 、2 阶 IMF, 3 阶 IMF, 残余分量) 红色为分解数据, 蓝色为原始数据

## 4 实际地震资料处理效果

### 4.1 实例 1

实际地震数据(图 2a)取自中国西部 A 区的一

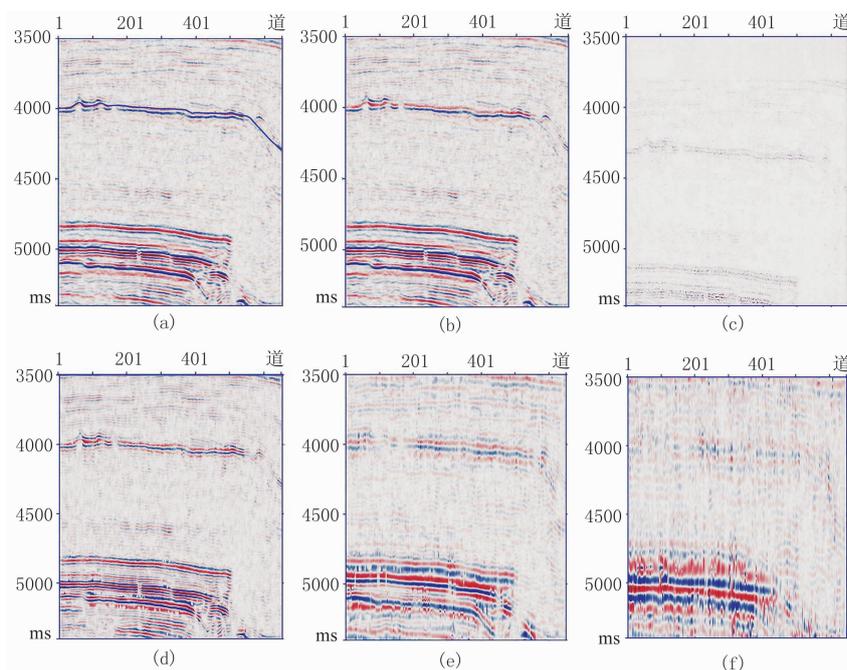


图 2 A 区使用 EMD 前、后的地震数据以及 1~3 阶 IMF

(a)原始地震数据;(b)分解重构后的地震数据;(c)分解前、后地震数据的差值;(d)1 阶 IMF;(e)2 阶 IMF;(f) 3 阶 IMF  
原始数据接收道距为 25m,时间采样率为 2ms

个小区块,工区内有 7 口井(井位见图 3),其中 A1、A4、A5、A6、A7 井获得工业油气流,A3 井为低产井,A2 井试油失利,目的层为颗粒灰岩段,埋深 4000 多米。该区主要发育两组断层(一组为区域背景下的北东—南西向、南东—北西向大断裂;一组为伴生的近南北向断裂)。对原始地震资料(图 2a)做自适应的分解,得到 9 个不同的 IMF 函数,由前几个 IMF 分量进行地震资料的重构,利用自组织神经网络的方法,在目的层的一定窗内,根据地震波形的相似性原理将各个地震数据划分出不同的类别,得到波形地震相平面图。图 2 展示了 A 区使用 EMD 前、后的地震数据以及 1~3 阶 IMF,由图中可见,1 阶 IMF(图 2d)存在频率最高、波长最短的波动,2 阶(图 2e)、3 阶 IMF(图 2f)频率逐渐降低。由于各 IMF 分量的分布状况是由其本性决定的,它总是把最主要的信号先提取出来,因此 EMD 方法是一种主成分分析方法。也就是说,由 EMD 方法分解出的前几个 IMF 函数,集中了原序列中最显著的信息,用这些 IMF 分量重构原始数据(图 2a),得到的差值很小(图 2c),可以根据实际需要选择不同的分量进行信号重构,从而得到识别目的层的有利属性分量。

图 3 为 A 区使用 EMD 前、后地震数据的波形分析地震相图及 1 阶、2 阶 IMF 的波形分析地震相

图,从图中可见,1 阶 IMF 分量(图 3c)能够显示断层信息,但有些模糊,2 阶 IMF 分量(图 3d)较清楚地显示该区发育两组断层,说明 1 阶、2 阶分量主要反映断层信息,分解重构后地震数据的波形分析地震相图(图 3b)与原始数据的地震相图(图 3a)相比,能更清楚地反映断裂系统的发育特征。

#### 4.2 实例 2

实际地震数据(图 4a)取自中国西部 B 区的一个小区块,工区内有 4 口井(井位见图 5),其中①、②井获得工业油气流,③、④井未见油气显示,目的层为颗粒灰岩段,埋深 4000 多米。对原始地震资料(图 4a)做自适应分解,得到 9 个不同的 IMF 函数,由前几个 IMF 分量进行地震资料的重构,利用自组织神经网络的方法,在目的层的一定窗内,根据地震波形的相似性原理将各个地震数据划分出不同的类别,得到波形地震相平面图。图 4 展示了 B 区使用 EMD 前、后的地震数据以及 1~3 阶 IMF,由图中可见,由 EMD 方法分解出的前几个 IMF 函数,集中了原序列中最显著的信息,用这些 IMF 分量重构原始数据(图 4a),得到的差值很小(图 4c),可以根据实际需要选择不同的分量进行信号重构,从而得到识别目的层的有利属性分量。

图 5 为 B 区使用 EMD 前、后地震数据的波形

分析地震相图及 1 阶、2 阶 IMF 的波形分析地震相图,从图中可见,其中,①井和②井为油气高产井,而③井和④井虽钻遇目的层位,但未发现油气显示,这

与试油结果相一致。经过重构后的波形分类属性清晰地反映了有利储层在平面上的展布范围,从而为有利目标的落实提供了证据。

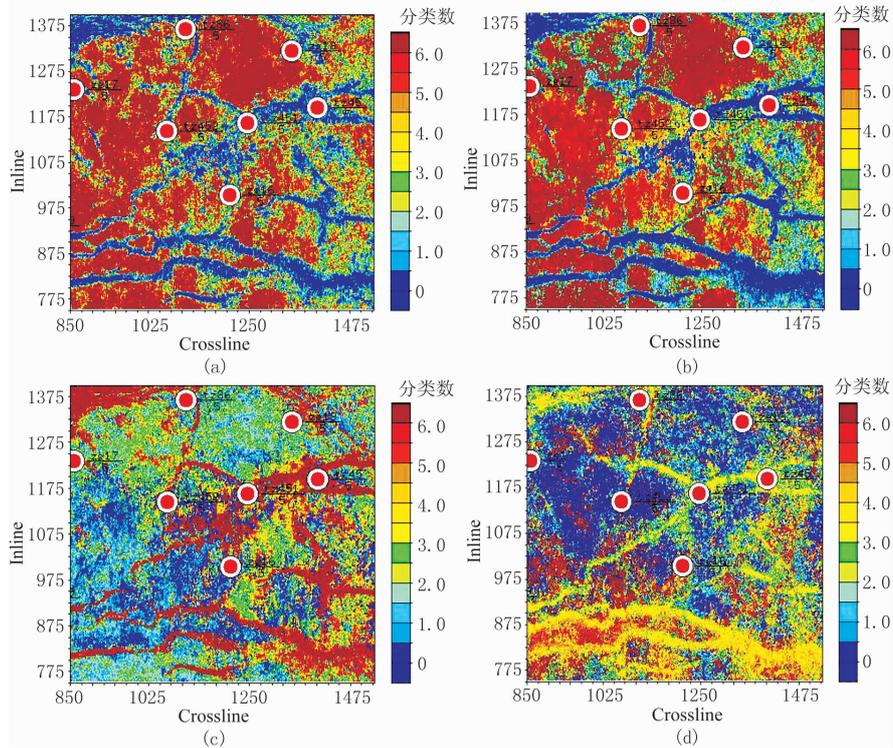


图 3 A 区使用 EMD 前、后地震数据的波形分析地震相图及 1 阶、2 阶 IMF 波形分析地震相图(分类数为 8)  
(a)原始地震数据; (b)分解重构后地震数据; (c)1 阶 IMF; (d)2 阶 IMF

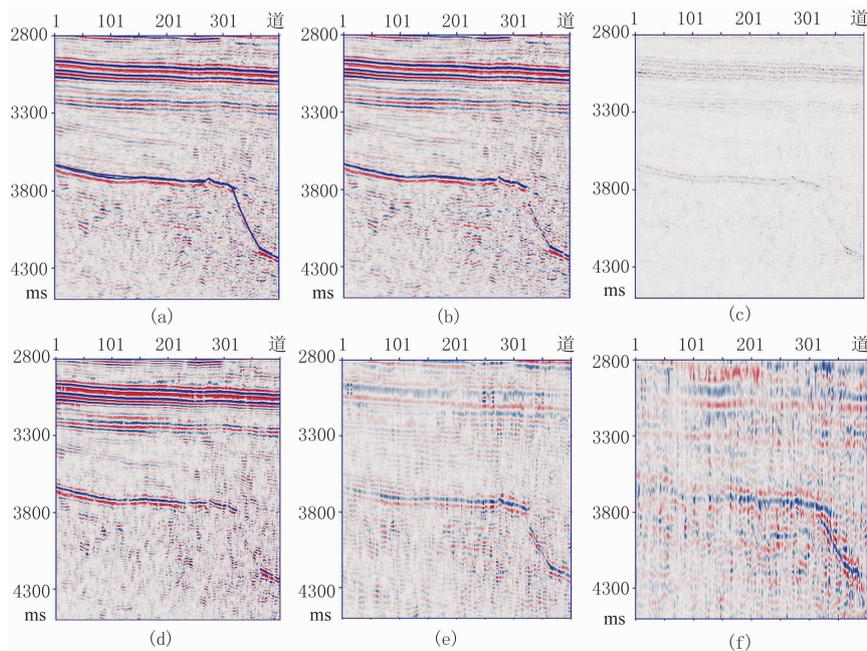


图 4 B 区使用 EMD 前、后的地震数据以及 1~3 阶 IMF  
(a)原始地震数据; (b)分解重构后的地震数据; (c)分解前、后地震数据的差值; (d)1 阶 IMF; (e)2 阶 IMF; (f) 3 阶 IMF  
原始数据接收道距为 25m,时间采样率为 2ms

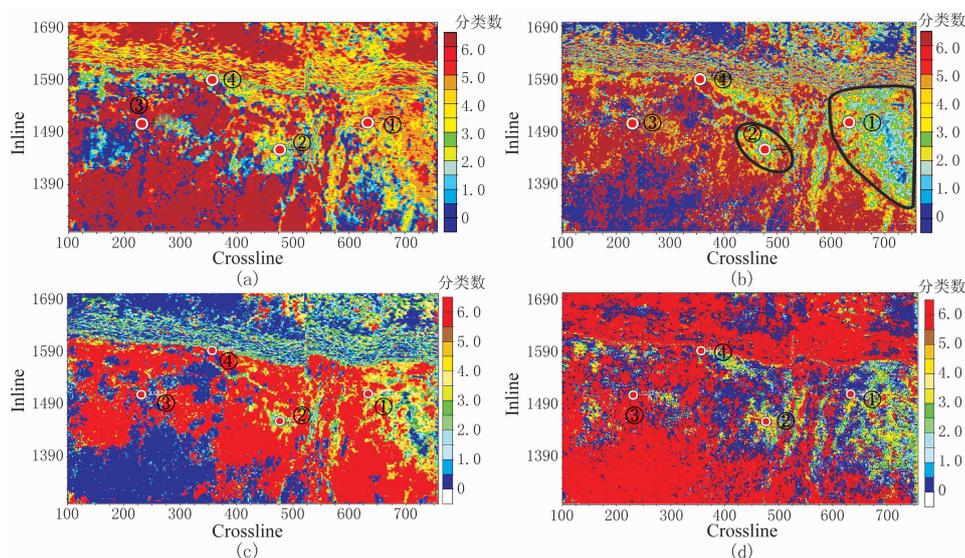


图 5 B 区使用 EMD 前、后地震数据的波形分析地震相图及 1 阶、2 阶 IMF 波形分析地震相图

(a)原始地震数据; (b)分解重构后地震数据; (c)1 阶 IMF; (d)2 阶 IMF

## 5 结束语

利用 EMD 方法结合 kohonen 神经网络的地震相分析可进行断层识别以及储层预测,不同的 IMF 分量对地震相的敏感程度不同,选取对地震相敏感的 IMF 分量进行重构,并对重构的数据体进行波形分析,可更有效地识别断裂、储层展布等特征,为储层预测和目标落实提供较重要的依据。

### 参考文献

- [ 1 ] Huang N E, Zheng Shen, Long S R et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analyses. *Proc R Soc Lond*, 1998, 454: 903~995
- [ 2 ] Huang N E, Wu M C, Long S R et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. *Proc R Soc Lond*, 2003, 459: 2317~2345
- [ 3 ] Huang N E, Man-Li Wu et al. Applications of Hilbert-Huang transform to non-stationary financial time series analysis. *Applied Stochastic Models In Business And Industry*, 2003, 19: 245~268
- [ 4 ] Denis Donnelly. The Fast Fourier and Hilbert-Huang Transforms; A Comparison. *International Journal of Computers, Communications & Control*, 2006, 1(4): 45~52
- [ 5 ] Morlet J et al. Wave propagation and sampling theory-part 2. *Sampling Theory and Complex Waves*, 1982, 47(2): 222~236
- [ 6 ] Yih Jeng, Ming-Juin Lin et al. Noise reduction and data recovery for a VLF-EM survey using a nonlinear decomposition method. *Geophysics*, 2007, 72 (5): F223~F235
- [ 7 ] Maza Bekara, PGS, and Mirko van der Baan. Random and coherent noise attenuation by empirical mode decomposition. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2008, 27: 2591~2595
- [ 8 ] Bradley Matthew Battista, Camelia Knapp et al. Application of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform to seismic reflection data. *Geophysics*, 2001, 66(1): 294~307
- [ 9 ] Paul A Hwang, Huang N E, Wang David W. A note on analyzing nonlinear and nonstationary ocean wave data. *Applied Ocean Research*, 2003, (25): 187~193
- [ 10 ] 段生全, 贺振华等. HHT 方法及其在地震信号处理中的应用. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 32(4): 396~400
- [ 11 ] 文晓涛, 贺振华, 黄德济. 基于 EMD 与波形复杂性的储层识别. *SEG 论文详细摘要*, 2009: 1213~1216
- [ 12 ] Ivan Magrin-Chagnolleau and Richard G. Empirical mode decomposition based time-frequency attributes. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1999, 18: 73~91
- [ 13 ] 邹文, 陈爱萍等. 基于 S 变换的地震相分析技术. *石油物探*, 2006, 45 (1): 48~51
- [ 14 ] 于红枫, 王英民等. Stratimagic 波形地震相分析在层序地层岩性生分析中的应用. *煤田地质与勘探*, 2006, 34 (1): 64~67
- [ 15 ] 吕景英. 用波形分析法预测塔河油田碳酸盐岩储层. *勘探地球物理进展*, 2004, 27 (2): 112~116
- [ 16 ] 邓传伟, 李莉华等. 波形分类技术在储层沉积微相预测中的应用. *石油物探*, 2008, 47 (3): 262~266
- [ 17 ] 杨智春, 谭光辉. 一种基于样条插值的经验模态分解改进算法. *西北工业大学报*, 2007, 25(5): 737~741

(本文编辑:刘勇)