

# 基于经验模态分解的潮汐观测长趋势分析\*

吕品姬<sup>1,2</sup>, 赵斌<sup>1,2</sup>, 陈志遥<sup>1,2</sup>, 李正媛<sup>3</sup>

(1. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中国地震局地壳应力研究所 地壳运动与地球观测实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 中国地震台网中心, 北京 100086)

**摘要:** 运用经验模态分解方法, 提取定点倾斜和应变固体潮观测数据的长趋势变化。通过对在震中周边 600 km 范围内的地震台站的倾斜潮汐长趋势变化进行倾斜矢量分析, 发现在 2010 年 4 月 14 日青海玉树  $M_s 7.1$  地震前, 距震中 31 km 的玉树台倾斜矢量曲线出现“打结”现象。同时, 对该区域内的应变潮汐长趋势变化进行面应变分析, 发现处于玉树—甘孜断裂带两端的格尔木台和甘孜台的面应变在玉树地震发生前半年出现了异常转折, 这种变化可能反应了该断裂带在地震前的面应变的变化。经验模态分解方法可用于认识某个区域内的倾斜、应变状态。

**关键词:** 经验模态分解; 长趋势; 倾斜矢量; 面应变

**中图分类号:** P315.72\*5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2011)04-0453-04

## 0 引言

经验模态分解方法 (Empirical Mode Decomposition, 简称 EMD) 是由美国国家航空航天局的黄铘博士提出的一种信号分析方法。它依据数据自身的时间尺度特征来进行信号分解, 无须预先设定任何基函数。通过 EMD 分解得到的各个固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, 简称 IMF) 大多能反映真实的物理过程, 大量的实验表明, EMD 法是目前提取信号趋势或均值的最好方法 (Huang *et al*, 1998)。

## 1 EMD 算法

EMD 分解算法也称为筛选过程, 筛选过程主要有两个作用: 一是去除叠加波, 二是使波形更加对称, 其算法本身也是对原始观测信号提取 IMF 的过程。IMF 定义为满足下列两个条件的函数: ① 在整个信号中, 极值点的数量与过零点的数量相等或至多相差 1; ② 信号上任意一点, 由局部极大值点确定的包络线和由局部极小值点确定的包络线的均值均为 0 (张义平等, 2008)。

EMD 算法的具体步骤如下: 首先确定原始信

号  $x(t)$  的所有极值点, 再用三次样条函数将所有的极大值点和极小值点分别进行插值, 拟合出原始信号  $x(t)$  的上包络线  $x_{\max}(t)$  和下包络线  $x_{\min}(t)$ , 然后从原始数据中去除包络线的均值  $m_1(t)$ :

$$m_1(t) = \frac{x_{\max}(t) + x_{\min}(t)}{2}. \quad (1)$$

从而得到

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t). \quad (2)$$

重复上述过程  $R$  次, 得到第  $k$  次筛选的数据  $h_{1k}(t)$ :

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1(k-1)}(t). \quad (3)$$

筛选过程终止的标准是通过两个连续处理结果之间的标准差  $SD$  的值作为判据的, 即

$$SD = \sum_{i=0}^r \left| \frac{|h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right|. \quad (4)$$

在判断筛选过程是否停止时,  $SD$  取值一定要谨慎。要避免过于严格的标准, 以免导致 IMF 分量变成纯粹的频率调制信号, 造成幅值恒定, 同时, 也应注意选取过于宽松的标准, 导致  $SD$  与

\* 收稿日期: 2011-11-22.

基金项目: 中国地震局科研运行专项 (201101014)、中国地震局地震研究所所长基金 (IS201026010)、地震行业专项 (200808033) 联合资助。

IMF 分量要求相差太远。经验表明,  $SD$  值取  $0.2 \sim 0.3$  为宜, 这样既可以保证 IMF 的线性和稳定性, 又可以使 IMF 具有相应的物理意义。

当  $h_{1k}(t)$  满足  $SD$  值的要求时, 则  $h_{1k}(t)$  为第一阶 IMF, 记为  $c_1(t)$ , 即

$$c_1(t) = h_{1k}(t). \tag{5}$$

从原始信号  $x(t)$  中减去  $c_1(t)$  得剩余信号, 即残差  $r_1(t)$  :

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t). \tag{6}$$

再将  $r_1(t)$  看作一组新信号重复上述模态分解过程, 经多次运算可得到全部的残差  $r_i(t)$  :

$$r_i(t) = r_{i-1}(t) - c_i(t). \tag{7}$$

当  $c_n(t)$  或  $r_n(t)$  小于预定的误差, 或残差  $r_n(t)$  成为一单调函数, 即不可能再从中提取 IMF 分量时, 就终止模态分析过程。至此, 原始信号  $x(t)$  可由  $n$  阶 IMF 分量及残差  $r_n(t)$  构成:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t). \tag{8}$$

其中,  $r_n(t)$  称为残余函数, 代表信号的平均趋势。

通过 EMD 分解, 将原始信号进行平稳化处理, 分解出的  $n$  个 IMF 包含了原信号从高到低不同频段的成分, 残量则代表了信号的平均趋势。 $n$  为原始信号分解出的 IMF 分量的个数, 其取值因原始信号和标准差  $SD$  取值有关, 在本文的计算中取  $0.3$  作为收敛条件。

2 用 EMD 分解提取固体潮的长趋势

2010 年 4 月 14 日青海玉树发生  $M_s7.1$  地震。笔者对震中  $600\text{ km}$  范围内 6 个台站自 2009 年 1 月 1 日至 2010 年 4 月 13 日的倾斜、应变固体潮观测数据进行 EMD 分解, 提取各台站倾斜、应变的长趋势变化。从图 1 可以看出, EMD 分解得到的残余分量能够非常准确地将倾斜变化拟合出来, 说明通过 EMD 分解提取长趋势变化是可行的, 具有明确的物理意义。

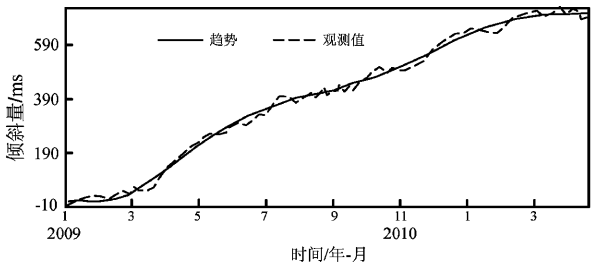


图 1 德令哈台钻孔倾斜北南分量原始数据与 EMD 分解长趋势对比时序图 (2009 年 1 月 1 日至 2010 年 4 月 13 日)

Fig. 1 Diagram of the observed data and the EMD decomposition residual of bole-hole tiltmeter's NS composition in DeLingha station (Jan. 1, 2009—Apr. 13, 2010)

3 潮汐观测数据的长趋势分析

对 2009 年 1 月 1 日至 2010 年 4 月 13 日玉树  $M_s7.1$  地震震中  $600\text{ km}$  以内的 6 个台站的倾斜、应变固体潮观测数据进行 EMD 分解, 提取各台站、各分量的长趋势变化后, 将倾斜南北、东西正交的两分量趋势做倾斜矢量图 (图 2)。

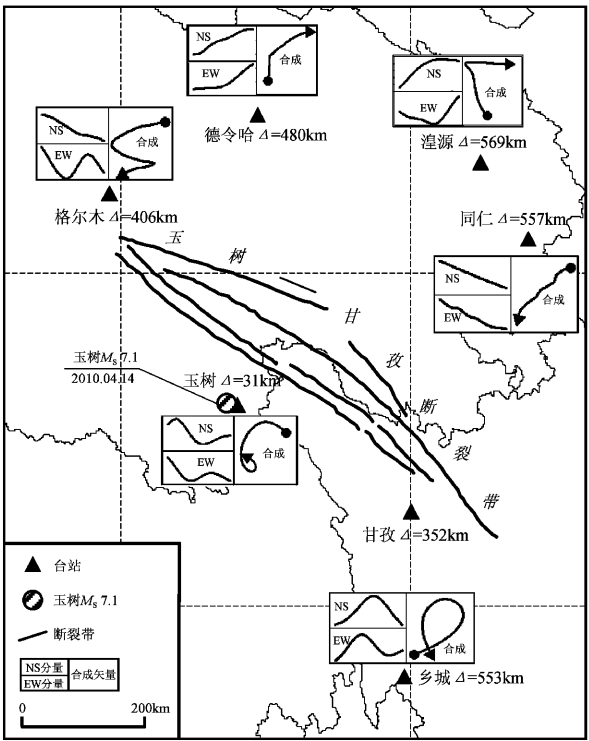


图 2 倾斜矢量空间分布图  
Fig. 2 Distribution of tilt vector

倾斜矢量图临震前出现“打结”现象的含义在于两个方向倾斜出现相对静止，或在较小的变化范围内反复，呈“被吸引”状（何翔，1993）。从图 2 可以看到，距离震中最近的玉树台（震中距为 31 km）倾斜矢量自 2009 年 9 月 15 日起出现转折，转折后矢量加速向北西向变化，并在矢量图出现“打结”时发震，矢量出现异常转折且变化方向直指震中。其它台站在 2009 年 8 月至 12 月间也分别出现了倾斜矢量变化转折的现象。值得注意的是，距震中 553 km 的乡城地震台在 2010 年 3 月也出现了倾斜矢量图“打结”的现象。由于乡城台倾斜矢量变化整体上看是均匀缓慢的，倾斜矢量围成一圈大致需要一年左右的时间，因此认为乡城台的倾斜矢量图打结应为正常年变。

把近似 90°的两个应变分量的长趋势进行相加，可以得到观测点面应变的长趋势变化（张雁滨等，1996）。将玉树地震震中 600 km 范围内 6 个台站的面应变长趋势变化从空间上进行展示（图 3），面应变数据的起止时间为 2009 年 1 月 1 日至 2010 年 4 月 13 日，图中还给出了玉树—甘孜断裂带。

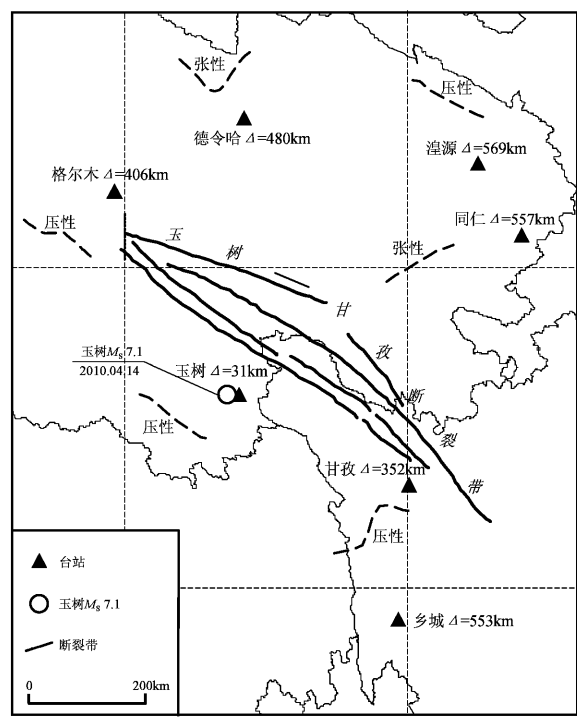


图 3 面应变空间分布图  
Fig. 3 Distribution of plane strain

对这些台站进行实地考察后，笔者发现青海德令哈台以北 1.5 km 处的黑山石水库因库容存在

夏高冬低的变化，造成德令哈台的钻孔应变呈现出与此相对应的夏低（受压）冬高（受张）的变化特征，这种变化是水库载荷的直接体现，因此用该资料分析发生在 480 km 以外的玉树地震，所得结果可信度较低。而同仁台因观测洞室渗漏，仪器零漂很大，观测资料不宜用来分析震前异常变化。湟源台距震中较远，观测资料也不宜采用，因此在面应变长趋势变化的研究中，我们着重分析位于玉树—甘孜断裂西北端的格尔木台、中部的玉树台和西南端的甘孜台震前的面应变长趋势变化，这三个台均处于人烟稀少、远离干扰的地方，观测条件较好。甘孜—玉树断裂带区域面应变的变化特点为：位于断裂带两端的格尔木台和甘孜台，其面应变均在 2009 年 7 ~ 9 月出现了调整：格尔木台的面应变由受压变为小幅受张，9 月以后继续呈加速下降的压性变化；位于断裂带另一端的甘孜台，其面应变在 7 ~ 9 月出现了加速张性上升的变化，尔后呈缓慢下降的压性变化；而位于震中也就是玉树—甘孜断裂中部的玉树台，其面应变呈近似单调下降的变化，表现出该点持续受压的应变状态。如何利用定点应变的观测结果与 GPS 观测结果进行对比，至今还未见相关的研究报道，因而现在还无法判断单点的定点应变观测可以反应多大范围内的应变变化，但这三个观测点的面应变在震前一年半发生的变化仍值得关注，尤其是位于断裂带两侧的格尔木台和甘孜台，在震前 10 个月左右都出现了为期约 3 个月的应变调整，两者反应出的不同受力结果是否会增加震中区的应力积累，还有待今后开展更深入的研究来验证。

### 4 结论

- (1) 利用 EMD 分解得到固体潮观测的长趋势变化，效果好、数据准确。由长趋势变化得到倾斜矢量图和面应变，其物理意义是明确的。
- (2) 利用两个正交方向的倾斜潮汐观测长趋势变化，可以获得每个观测点的倾斜矢量图。从玉树地震前距震中 600 km 以内的 6 个台站的倾斜矢量变化规律来看，玉树台的倾斜矢量在震前半年出现转折，在“打结”时发震，这与一些历史震例是相符的，比如 1975 年海城 7.3 级地震、1988 年澜沧、耿马 7.6、7.2 级地震（张雁滨等，

1996, 李永振, 2010)。

(3) 利用两个正交方向的应变潮汐观测长趋势变化, 可以获得每个观测点的面应变。在距此次玉树地震最近的三个应变台, 即位于甘孜—玉树断裂西北端的格尔木台和中部的玉树台的面应变表现为“受压—平缓—继续受压”, 位于东南端的甘孜台的面应变表现为“缓慢张性变化—加速张性变化—缓慢压性变化”这种变化可能反应了这个断裂带震前面应变的变化, 但仍有待于和 GPS 解算结果进行比对。

一个观测点的长趋势潮汐变化能反应多大区域内的潮汐应力变化, 是否可以与大尺度的 GPS 观测或其它断层形变资料进行对比, 还需要开展更多的研究来论证。

## 参考文献:

- 何翔. 1993. 倾斜矢量图正常年变化破坏的机理研究[J]. 地壳形变与地震, 13(1): 62-68.
- 李永振. 2010. 利用主成分分析法研究东北地震活动异常[J]. 地震研究, 33(2): 164-169.
- 张雁滨, 蒋骏, 周翠屏. 1996. 地表潮汐线应变、剪应变与面应变观测的残差矢量及其震兆变化[J]. 地壳形变与地震, 16(3): 49-54.
- 张义平, 李夕兵, 左宇军. 2008. 爆破振动信号的 HHT 分析与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社.
- Huang N E, Zhang S, Steven L, et al. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C]//Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 454: 903-995.

## Long-trend Analysis of the Tidal Observation Based on EMD Method

LU Pin-ji<sup>1,2</sup>, ZHAO Bin<sup>1,2</sup>, CHEN Zhi-yao<sup>1,2</sup>, LI Zheng-yuan

(1. Institute of seismology, CEA, Wuhan 43007, Hubei, China)

(2. Crustal Movement Laboratory, the Institute of Crustal Dynamics, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China)

(3. China Earthquake Network Center, Beijing 100045, China)

## Abstract

On Apr.14, 2010, an  $M_s 7.1$  earthquake occurred in Yushu, Qinghai. Using the Empirical Model Decomposition method, we analyzed the data of tilt earth tide and the data of strain earth tide from 6 stations (Yushu, Xiangcheng, Delingha, Huangyuan, Geermu, Ganzi) located within 600km from the Yushu earthquake's epicenter, to extract the long-trend variations of tilt earth tide and strain earth tide. Some abnormalities were found before the Yushu earthquake on the tilt vector map and plane strain map. The curves of tilt vector at Yushu Station which was only 31 km away from the epicenter quickly twisted before the Yushu earthquake. The curves of plane strain at Geermu Station and Ganzi Station which were located at both ends of the Yushu-Ganzi Fault changed their directions six months before the earthquake. This may reflect the Fault Zone's plane strain change before Yushu earthquake.

**Key words:** Empirical Mode Decomposition; long trend; tilt synthetic vector; plane strain