

彭小波, 李小军. 2012. 汶川地震强震动地面倾斜研究. 地震学报, 34(1): 64-75.

Peng Xiaobo, Li Xiaojun. 2012. Study of ground surface tilts from strong motion records of the Wenchuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 34(1): 64-75.

## 汶川地震强震动地面倾斜研究<sup>\*</sup>

彭小波<sup>1,3)</sup> 李小军<sup>2,3),\*</sup>

1) 中国南京 210014 江苏省地震工程研究院

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

3) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

**摘要** 根据三分量强震动传感器水平摆和竖向摆对倾斜的动力响应差异, 利用谱比法计算出汶川  $M_s 8.0$  地震中近断层强震动的断层法线方向和平行方向的同震地面倾斜. 结果表明, 本次地震中强震动观测台处地面倾斜一般小于  $1^\circ$ , 影响频段主要在  $0.1\text{ Hz}$  以下, 发生较大倾斜的台站主要在距地表破裂迹线  $30\text{ km}$  以内, 在  $100\text{ km}$  之外或水平向加速度幅值均方根在  $200\text{ cm/s}^2$  以下时很少发生  $0.01^\circ$  以上的同震地面倾斜. 总体上看, 上盘区域的倾斜值普遍小于下盘区域, 法线方向倾斜值一般大于平行线方向倾斜值. 位于前山断裂与中央断裂之间区域的绵竹清平台谱比较低但平缓且频带较宽, 可能反应了该区域的运动特殊性, 而汶川卧龙台则显示了上盘边缘区域地面倾斜较大. 逆冲段与走滑段台站倾斜对比显示, 地面倾斜可能受局部场地条件影响较大.

**关键词** 强震动 地面倾斜 谱比 倾斜特征

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2012.01.006

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

## Study of ground surface tilts from strong motion records of the Wenchuan earthquake

Peng Xiaobo<sup>1,3)</sup> Li Xiaojun<sup>2,3),\*</sup>

1) *Earthquake Engineering Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China*

2) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

3) *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China*

**Abstract:** Based on the difference of dynamic response to tilts between horizontal pendulums and vertical pendulum, spectral ratio method was applied to estimate the coseismic surface tilts deduced from strong motion records of the Wenchuan earthquake. The result shows that the ground surface tilts are generally less than  $1^\circ$  and mainly appears within  $30\text{ km}$  to fault rupture surface traces, while rarely discovered in the area outside  $100\text{ km}$  or root-mean-squared horizontal peak accelerations are less than  $200\text{ cm/s}^2$ . The frequency band influenced by tilts is less than  $0.1\text{ Hz}$ . In general, tilts in hanging wall is greater than that in footwall in near fault areas, and tilts in normal direction of fault is

<sup>\*</sup> 基金项目 国家自然科学基金重大研究计划项目(90715038, 91015001)和国家科技支撑计划课题(2009BAK55B05)资助.

收稿日期 2011-03-14 收到初稿, 2011-09-07 决定采用修改稿.

<sup>+</sup> 通讯作者 e-mail: beerli@vip.sina.com

less than those in parallel direction. The spectral ratio of Qingping station located between central fault and front mount fault is relatively low and stable, which may imply a special movement feature of the area. The tilts of Wolong station may be controlled by deformation transition from the hanging wall to laterally stationary area. Comparison of tilts between the stations at reverse and strike slip fault segments showed that the tilts may be influenced by local site condition.

**Key words:** strong motion; ground surface tilt; spectral ratio; tilt characteristics

## 引言

地震引起的地面变形包括平动和转动分量(Bouchon, Aki, 1982). 对于汶川  $M_s 8.0$  这样的大地震, 中央断裂(北川—映秀断裂)地表破裂延续约 240 km, 前山断裂(灌县—江油断裂)地表破裂延续约 90 km, 位移量达 6 m(徐锡伟等, 2008). 可以预期, 在近断层区域存在地面倾斜, 这种倾斜可能造成或加剧岩体崩塌、滑坡等地质灾害, 残留的地面倾斜还可能对铁路、高层建筑等的使用造成影响. 但对于强震地面倾斜相关问题, 目前国内研究得很少. 赵斌等(2010)通过倾斜仪研究了该问题, 由于受到观测数据少、震中距远和环境噪音等影响, 结果不理想. 而经过研究发现, 广泛分布于断层附近的高性能宽频带数字强震动仪器的记录, 提供了另一种分析地面倾斜的较好选择(Li *et al.*, 2008). 在本次地震中, 记录到较高质量台站分布为: 在距地表破裂迹线(徐锡伟等, 2008)30 km 内有 10 台, 50 km 内有 13 台, 100 km 内有 32 台, 150 km 内有 53 台. 目前的强震动仪一般只能记录两个相互垂直的水平向平动量和一个竖向平动量. 但是研究表明, 地面倾斜会对水平向平动分量造成明显影响(Graizer, 1989, 1991; Trifunac, Todorovska, 2001), 对实际地震记录的分析也发现了这种影响(Boore, 2001; Graizer, 2006), 这就提供了通过研究近断层强震动记录来分析地面倾斜的可能. 本文即以近断层强震动记录数据为基础来研究汶川地震的地面倾斜情况.

## 1 地面倾斜的影响与估计

### 1.1 地面倾斜对传感器的影响

根据强震仪传感器在平动和转动存在的条件下的受力分析, 水平和竖向传感器的运动方程如式(1)—(3)所示(Graizer, 2005, 2006; Graizer, Kalkan, 2009).

$$\ddot{y}_1 + 2\omega_1 \xi_1 \dot{y}_1 + \omega_1^2 y_1 = -\ddot{X}_1 + \phi_2 g - \ddot{\phi}_3 r_1 + \ddot{X}_2 \theta_1 \quad (1)$$

$$\ddot{y}_2 + 2\omega_2 \xi_2 \dot{y}_2 + \omega_2^2 y_2 = -\ddot{X}_2 + \phi_1 g - \ddot{\phi}_3 r_2 + \ddot{X}_1 \theta_2 \quad (2)$$

$$\ddot{y}_3 + 2\omega_3 \xi_3 \dot{y}_3 + \omega_3^2 y_3 = -\ddot{X}_3 + g\phi_1^2/2 - \ddot{\phi}_1 r_3 + \ddot{X}_2 \theta_3 \quad (3)$$

式中,  $y_i$  为仪器记录的第  $i$  个传感器的反应,  $\omega_i$  和  $\xi_i$  是第  $i$  个传感器的自振频率和阻尼比,  $X_i$  是第  $i$  个方向的地面位移,  $\phi_i$  和  $\ddot{\phi}_i$  为地面绕  $X_i$  的倾斜和角加速度,  $\theta_i$  为第  $i$  个传感器的转动角度,  $r_i$  为第  $i$  个传感器的摆长,  $y_i = \theta_i \cdot r_i$ .

通过对右侧各项进行分析后指出(Trifunac, Todorovska, 2001; Graizer, 2006;

Wong, Trifunac, 1977), 对于现代自振频率 100 Hz 以上的短摆加速度传感器, 角加速度和轴间敏感性对传感器的影响都可以忽略. 但是其中的倾斜项对水平传感器的影响始终存在, 且不能忽略. 而竖向传感器中倾斜项的影响为二次项, 在小转动情形下亦可以忽视. 因此, 运动方程简化为如下 3 个关系式:

$$\dot{y}_1 + 2\omega_1 \xi_1 \dot{y}_1 + \omega_1^2 y_1 = -\ddot{X}_1 + \phi_2 g \quad (4)$$

$$\dot{y}_2 + 2\omega_2 \xi_2 \dot{y}_2 + \omega_2^2 y_2 = -\ddot{X}_2 + \phi_1 g \quad (5)$$

$$\dot{y}_3 + 2\omega_3 \xi_3 \dot{y}_3 + \omega_3^2 y_3 = -\ddot{X}_3 \quad (6)$$

从式(4)–(6)可见, 加速度记录中水平向为真实的地面平动和地面倾斜两部分组成, 而竖向记录则主要受地面的竖向平动控制. 实际上, 高精度数字强震动仪仍然受到一些仪器噪音的影响, 本文对此不展开讨论(Boore, Bommer, 2005; Graizer, 2010). 上式也说明, 当一次地震发生后即使产生了永久倾斜, 也不会引发强震动仪下一次记录的漂移. 因为永久倾斜表现为一个常偏量, 下次记录通过减去事前均值就消除了这种影响.

## 1.2 地面倾斜的估算方法

理论研究表明, 地面倾斜与速度近似成比例(Bouchon, Aki, 1982; Trifunac, Todorovska, 2001), 所以地面倾斜主要对水平向记录的低频部分产生影响, 可以利用水平与竖向记录的低频差异来求地面倾斜值. 估算地面倾斜的方法有基于谱比的方法和基于小波变换的方法(Graizer, 2006; Chanerley, Alexander, 2010). 这两种方法存在很大的差异, 基于小波分析的方法在一定程度上属于剔除了引起地面永久位移的长周期部分, 但只能估计平均倾斜和残余倾斜值, 对倾斜的过程表现不足. 本文采用 Graizer(2006)提出的基于谱比的方法进行计算分析, 计算分析过程如下:

1) 分别计算未校正三分量加速度记录的傅里叶谱, 并对谱进行平滑化处理. 采用 5 点平滑, 平滑 100 次后分别得到低频部分变化平缓的东西向、南北向和竖向地震动平滑幅值谱  $S_{EW}(\omega)$ ,  $S_{NS}(\omega)$  和  $S_{UD}(\omega)$ .

2) 计算水平向和竖向地震动傅里叶幅值谱的比值  $R_{EW}(\omega)$  和  $R_{NS}(\omega)$ .

$$\begin{cases} R_{EW}(\omega) = \frac{S_{EW}(\omega)}{S_{UD}(\omega)} \\ R_{NS}(\omega) = \frac{S_{NS}(\omega)}{S_{UD}(\omega)} \end{cases} \quad (7)$$

当受到地面倾斜影响时, 由平滑幅值谱计算得到的谱比值在低频段一般是单调减小的.

3) 确定一个阈值, 低频部分谱比与该值相等时的频率取为特征频率, 小于特征频率的频段主要受到地面倾斜的影响, 当低频部分谱比均小于该阈值时则特征频率取为 0, 认为倾斜可忽略.

4) 使用巴斯滤波器对水平分量进行低通滤波, 截止频率为上一步确定的特征频率, 经过滤波后的信号除以重力加速度常数即得以弧度表示的地面倾斜值, 可进一步转换为以“度”表示的倾斜值.

该方法中一个重要的参数就是阈值, 因为地面倾斜会导致水平向记录低频分量异常偏高, 此时  $R_{EW}(\omega)$  和  $R_{NS}(\omega)$  将大于 1, 因此该阈值设置为大于 1 的值. 但是如果该值取得过大, 又会导致低估倾斜的情况, 因此一般结合谱比特征和试算结果进行设置.

### 1.3 汶川 $M_s 8.0$ 地震的地面倾斜

汶川  $M_s 8.0$  地震主震中约有 460 个自由场地强震动台记录到地面运动(卢寿德, 李小军, 2008), 在离发震断层 500 km 以内的台站分布如图 1 所示. 其中空心三角形表示强震动台站, 两条粗灰线分别表示中央断裂地表破裂迹线(长线)和前山断裂地表破裂迹线(短线). 由于同震地面倾斜一般只在较大的震动条件下发生, 因为本文只分析加速度峰值满足以下条件的台站记录: 水平向峰值大于等于  $100 \text{ cm/s}^2$ , 并且竖向峰值大于  $50 \text{ cm/s}^2$ . 经过统计, 满足条件的台站共有 36 个, 其分布如图 1 中星号所示, 主要分布于Ⅷ度区以内. 这些台站中离地面破裂距离最远的为甘肃天水台, 约 220 km.

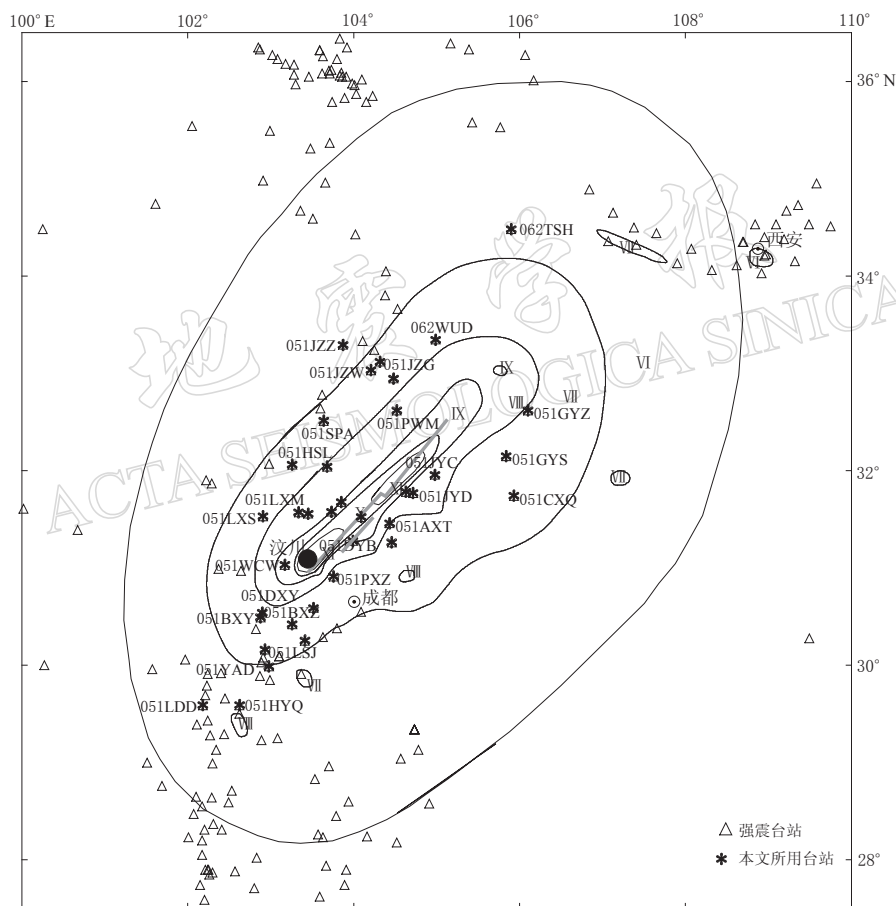


图 1 地表破裂距 500 km 内台站分布

Fig. 1 Strong motion stations within 500 km to ground surface rupture trace

考虑到研究近断层问题时破裂面延伸的影响,把东西向和南北向加速度转换为垂直于断层的法线分量以及平行于断层的平行分量,分别取东南向和东北向为正,断层的走向取为北偏东  $46^{\circ}$ .

按照上面描述的方法, 针对以上数据选取阈值为 2—5 进行试算. 结果表明, 计算得到的倾斜幅值可能出现较大差异, 但是残余倾斜值变化很小. 根据试算结果, 本文把该阈值设定为 4, 并讨论取为 3 时的情况. 表 1 中列出了阈值取为 4 时所有分析台站的结果.

表 1 估算的地面倾斜结果  
Table 1 Estimated ground tilts

| 台站名    | PGA-N<br>/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ | PGA-P<br>/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ | PGA-V<br>/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ | F-N<br>/Hz | F-P<br>/Hz | MT-N<br>/ $^{\circ}$ | RT-N<br>/ $^{\circ}$ | MT-P<br>/ $^{\circ}$ | RT-P<br>/ $^{\circ}$ | MR-N   | AR-N  | MR-P   | AR-P  | 场地<br>类型 | D/km |
|--------|--|--|--|------------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------|-------|--------|-------|----------|------|
| 051SFB | 530.4                                      | 655.7                                      | 632.9                                      | 0.06       | 0.08       | -0.21                | -0.20                | -0.66                | -0.64                | 16.49  | 9.81  | 52.76  | 24.09 | 土层       | 1    |
| 051MZQ | -820.8                                     | -894.5                                     | 622.9                                      | 0.00       | 0.04       | 0.00                 | 0.00                 | -0.10                | -0.02                | 0.00   | 0.00  | 37.85  | 11.65 | 土层       | 2    |
| 051JYH | -424.3                                     | -442.0                                     | -444.3                                     | 0.00       | 0.02       | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.01                 | 4.71   | 4.27  | 12.98  | 7.13  | 土层       | 15   |
| 051AXT | -284.4                                     | 202.9                                      | 179.9                                      | 0.02       | 0.01       | 0.15                 | 0.01                 | 0.02                 | 0.01                 | 95.92  | 21.48 | 35.93  | 13.26 | 土层       | 20   |
| 051JYD | 384.2                                      | 597.5                                      | -198.2                                     | 0.01       | 0.00       | -0.04                | -0.03                | 0.00                 | 0.00                 | 4.33   | 4.14  | 0.00   | 0.00  | 土层       | 23   |
| 051PXZ | -135.4                                     | 87.1                                       | 99.2                                       | 0.00       | 0.00       | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 基岩       | 25   |
| 051MXT | -345.5                                     | -321.0                                     | -266.6                                     | 0.04       | 0.02       | 0.05                 | 0.00                 | -0.01                | 0.00                 | 72.34  | 15.10 | 30.44  | 10.77 | 基岩       | 27   |
| 051MXN | -465.5                                     | -391.5                                     | -352.5                                     | 0.00       | 0.06       | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.01                 | 0.00   | 0.00  | 48.65  | 16.67 | 土层       | 28   |
| 051JYC | -264.4                                     | -316.1                                     | -180.5                                     | 0.06       | 0.05       | -0.18                | -0.16                | 0.15                 | 0.12                 | 333.87 | 49.36 | 233.38 | 39.50 | 土层       | 29   |
| 051WCW | 954.5                                      | 618.1                                      | 948.1                                      | 0.07       | 0.06       | -0.31                | -0.17                | 0.17                 | 0.14                 | 165.58 | 37.75 | 132.28 | 32.30 | 冲积       | 29   |
| 051DYB | 110.9                                      | 133.4                                      | 88.9                                       | 0.00       | 0.00       | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 土层       | 35   |
| 051DXY | -155.1                                     | -134.1                                     | 82.7                                       | 0.00       | 0.00       | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 土层       | 42   |
| 051LXT | -324.4                                     | -290.8                                     | 379.6                                      | 0.04       | 0.05       | 0.03                 | 0.01                 | -0.06                | -0.02                | 19.96  | 9.32  | 46.91  | 16.39 | 土层       | 46   |
| 051PWM | -231.5                                     | 265.5                                      | 177.4                                      | 0.00       | 0.00       | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00   | 0.00  | 4.09   | 3.84  | 土层       | 51   |
| 051LXM | -329.3                                     | 323.0                                      | 357.8                                      | 0.05       | 0.05       | 0.05                 | 0.03                 | 0.07                 | 0.02                 | 277.38 | 41.90 | 258.04 | 39.16 | 土层       | 54   |
| 051QLY | -160.6                                     | -181.0                                     | 55.1                                       | 0.01       | 0.01       | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 27.74  | 9.97  | 21.56  | 8.92  | 土层       | 64   |
| 051MXD | -173.9                                     | 209.6                                      | -143.9                                     | 0.04       | 0.04       | 0.03                 | 0.02                 | -0.02                | -0.01                | 29.36  | 12.82 | 19.15  | 9.41  | 土层       | 66   |
| 051BXY | 136.9                                      | 165.4                                      | 93.8                                       | 0.00       | 0.00       | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 土层       | 72   |
| 062WIX | -120.4                                     | -196.6                                     | -131.9                                     | 0.00       | 0.00       | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 基岩       | 77   |
| 051BXZ | -151.3                                     | 121.4                                      | 109.3                                      | 0.05       | 0.05       | -0.03                | -0.02                | 0.02                 | 0.02                 | 232.61 | 37.05 | 216.50 | 36.07 | 基岩       | 77   |
| 051GYS | -290.9                                     | 336.4                                      | -143.7                                     | 0.02       | 0.01       | 0.02                 | 0.02                 | 0.01                 | 0.01                 | 59.46  | 15.26 | 18.72  | 8.91  | 土层       | 79   |

续表

| 台站名    | PGA-N<br>/cm • s <sup>-2</sup> | PGA-P<br>/cm • s <sup>-2</sup> | PGA-V<br>/cm • s <sup>-2</sup> | F-N<br>/Hz | F-P<br>/Hz | MT-N<br>/° | RT-N<br>/° | MT-P<br>/° | RT-P<br>/° | MR-N  | AR-N  | MR-P  | AR-P | 场地<br>类型 | D/km |
|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|-------|-------|------|----------|------|
| 051PJD | 201.5                          | —168.6                         | —59.0                          | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 土层       | 80   |
| 051LXS | 274.8                          | 202.8                          | 211.1                          | 0.02       | 0.00       | 0.01       | 0.01       | 0.00       | 0.00       | 5.53  | 4.64  | 0.00  | 0.00 | 土层       | 81   |
| 051GYZ | —284.3                         | 466.4                          | —183.3                         | 0.00       | 0.02       | 0.00       | 0.00       | —0.02      | —0.02      | 4.38  | 3.97  | 12.73 | 7.23 | 土层       | 93   |
| 062WUD | —160.2                         | 166.0                          | 108.7                          | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 土层       | 94   |
| 051HSL | —104.5                         | 155.1                          | —109.0                         | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 4.19  | 3.88 | 土层       | 96   |
| 051JZG | —199.4                         | —173.5                         | 109.3                          | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 土层       | 101  |
| 051JZW | 135.4                          | 145.3                          | 81.5                           | 0.05       | 0.03       | 0.02       | —0.02      | 0.01       | 0.01       | 21.65 | 10.82 | 8.15  | 5.79 | 冲积       | 102  |
| 051LSJ | 100.3                          | —122.7                         | 59.9                           | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 土层       | 104  |
| 051SPA | 145.7                          | —167.8                         | 89.3                           | 0.01       | 0.01       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 7.34  | 5.22  | 8.04  | 5.39 | 土层       | 105  |
| 051CXQ | —225.3                         | 159.0                          | —69.9                          | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 4.71  | 4.23  | 0.00  | 0.00 | 土层       | 114  |
| 051YAD | 101.9                          | —167.0                         | 76.0                           | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 土层       | 118  |
| 051JZZ | 150.7                          | —287.0                         | —127.1                         | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 土层       | 146  |
| 051HYQ | 109.3                          | 120.9                          | 54.4                           | 0.00       | 0.01       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 6.41  | 5.09  | 19.30 | 8.83 | 土层       | 173  |
| 051LDD | 117.1                          | 117.1                          | —56.0                          | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 土层       | 197  |
| 062TSH | —133.0                         | —122.7                         | —51.4                          | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 土层       | 230  |

注：表中 PGA-N、PGA-P 和 PGA-V 分别表示断层法向、平行线方向以及竖向的加速度峰值，F-N 和 F-P 表示法向和平行线方向的截止频率，MT-N、RT-N、MT-P 和 RT-P 分别表示法线和平行线方向的最大倾斜角度以及残余倾斜角度，MR-N、AR-N、MR-P 和 AR-P 分别表示法线和平行线方向的最大谱比以及特征频率前的平均谱比值，D 表示离地表破裂迹线的距离。

从表 1 中可以看到,特征频率总体小于 0.1 Hz,也就是说地面倾斜主要影响的是周期在 10 s 以上的地震动成分,而发生的地面倾斜角度普遍在 1°以下.估算到的地面倾斜断层法线方向上汶川卧龙台(051WCW)最大,达到 0.31°;平行于断层方向的地面倾斜发生在什邡八角台(051SFB),达到 0.66°,可引发 11 cm/s<sup>2</sup> 的加速度值.在分析的 36 个台站中,断层法线方向上有 13 个台的最大倾斜估计值在 0.01°以上,0.1°以上有 4 个台站;断层平行线方向上有 15 个台的最大倾斜估计值在 0.01°以上,0.1°以上的也是 4 个台站.汶川卧龙台(051WCW)、什邡八角台(051SFB)和江油重华台(051JYC)3 个台站沿断层法线方向和平行线方向的估计最大倾斜值都在 0.1°以上,安县塔水(051AXT)和绵竹清平台(051MZQ)沿法线和平行线方向的估计倾斜值分别超过 0.1°.从断层距来看,这些台站均在 30 km 以内,而在 100 km 以外,很少发生大于 0.01°的地面倾斜情况.

进一步分析地面倾斜幅值与加速度峰值的关系,没有发现两者之间明显的线性相关性.水平向幅值的均方根值超过 800 cm/s<sup>2</sup> 的 3 个台站(汶川卧龙台、绵竹清平台和什邡八角台)均发生了地面倾斜,幅值均在 0.1°以上.水平向幅值的均方根值在 200 cm/s<sup>2</sup> 以下时,很少发生地面倾斜.

2 计算结果分析

2.1 清平台和八角台

绵竹清平台是本次地震中离中央断裂的地表破裂迹线最近的强震动台,在 2 km 以内;而什邡八角台是离前山断裂地表破裂迹线最近的台站,在 1 km 以内.在破裂出露的地方观察到达到 4 m 多的右旋走滑和逆冲错动,因此可以期望附近地面发生一定程度的倾斜,这两个台站提供了一个很好的研究资料,图 2 给出了两者的地面倾斜结果,为了便于理解,均以加速度的形式给出.

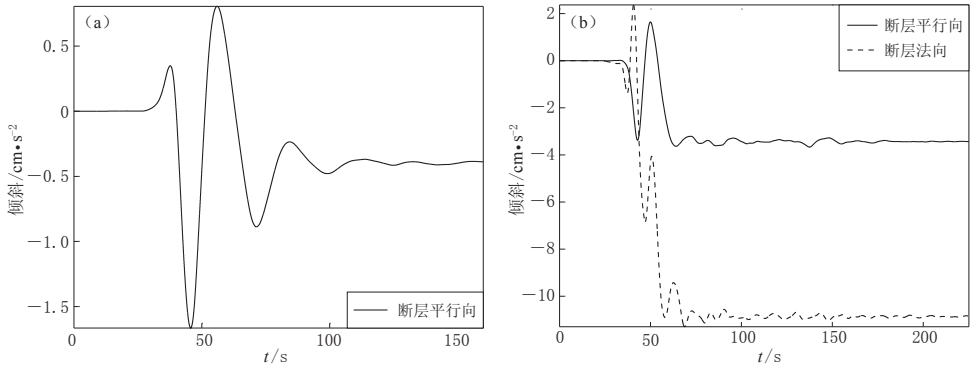


图 2 阈值取为 4 时清平台(a)和八角台(b)的倾斜估计

Fig. 2 Estimated tilts of Qingping station (a) and Bajiao stations (b) while threshold value is 4

图 2 显示了清平台只有在平行于断层方向发生了一定的地面倾斜,而断层法线方向并没有估计到倾斜;而八角台则发生了相对较大的地面倾斜,其平行断层方向倾斜引起的加速度约 11 cm/s<sup>2</sup>,断层法线方向接近于 4 cm/s<sup>2</sup>,从约 40 s 开始,在 65 s 左右时倾斜趋于稳定,成为残余倾斜量.中央断裂上的错动更大,但是倾斜量却这么小,似乎不符合一般的常理,考虑到清平台位于前山断裂与中央断裂之间,也存在着中间这一块发生整体平动

而不发生转动的可能，但是经过对其谱比曲线的分析，发现其具有特殊性。

从图 3 中可以看到，清平台的断层法线方向谱比在 1 Hz 之前有很长一段稍小于但很接近于 4。其形状与图 4 中八角台相比很相似，开始比较平稳，然后在某个频段迅速下降至

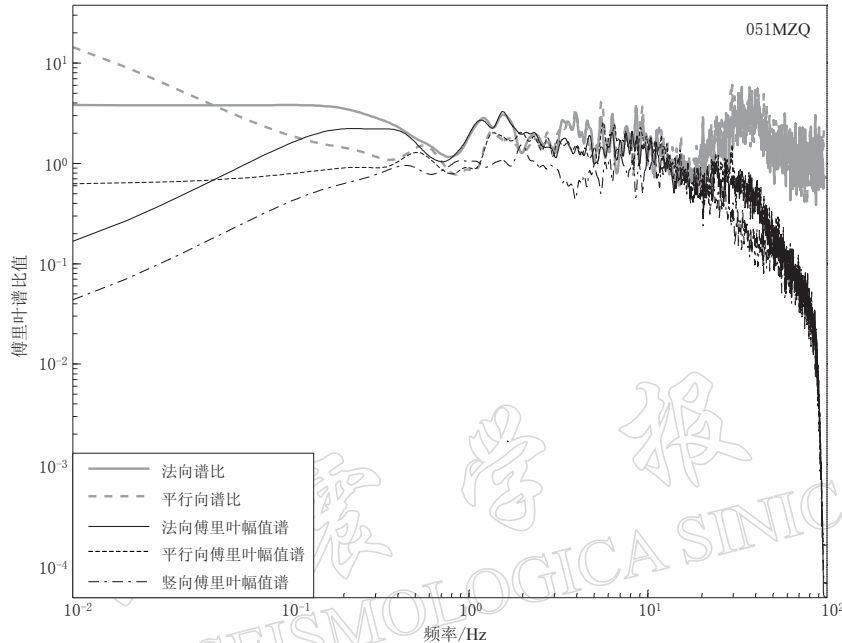


图 3 清平台谱比图

Fig. 3 Spectral ratio of Qingping station

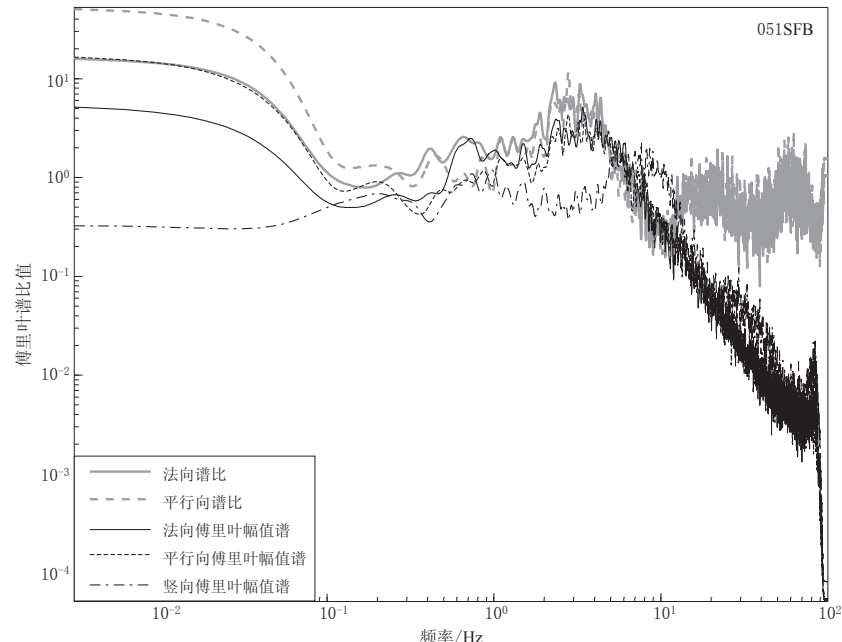


图 4 八角台谱比图

Fig. 4 Spectral ratio of Bajiao station



接近于 1. 当阈值取为 4 来计算时, 清平台断层法线方向的特征频率就成为 0, 估算不出倾斜情况. 把阈值取为 3, 则可得到法线方向的特征频率约为 0.3 Hz. 此时的倾斜估算结果如图 5 所示.

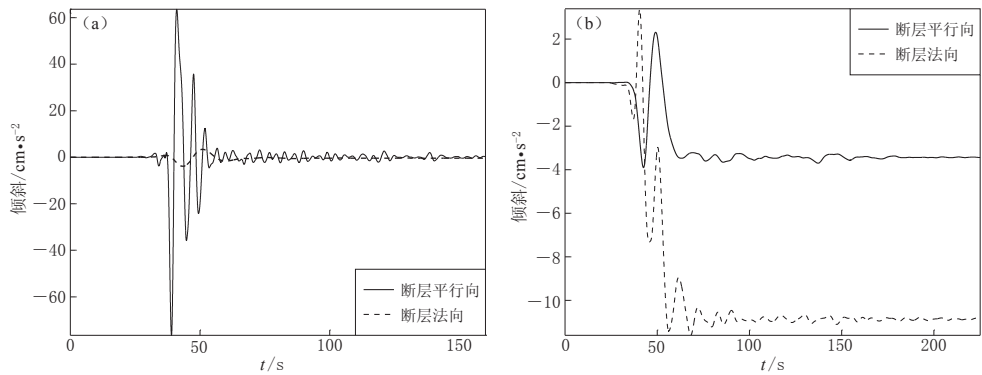


图 5 阈值取为 3 时清平台(a)和八角台(b)的倾斜估计

Fig. 5 Estimated tilts of Qingping station (a) and Bajiao stations (b) while threshold value is 3

与图 2 进行对比, 八角台的断层法线方向和平行方向的结果变化很小, 清平台的平行向结果也变化很小, 但是其法线方向却发生了巨大的变化, 此时估计出的地面倾斜引起的加速度超过  $70\text{ cm/s}^2$ , 约相当于  $4.47^\circ$ . 同时也注意到其残余倾斜量相对很小, 这可能表明位于前山断裂与中央断裂之间的清平台在强震过程中, 在断层法线方向上发生了较大地度的地面倾斜运动. 但是经过对该台的记录进行基线校正之后, 重新计算得到的谱比值在平行方向有较大变化而在法线方向几乎没有发生变化, 如图 6 所示. 校正后的加速度积分得到的法线方向速度表现出明显的大脉冲而位移则包括约 1.2 m 的永久位移值; 平行线方向速度脉冲相对较小, 永久位移也只有约 0.6 m, 只比竖向永久位移值约 0.5 m 大 20%. 考虑到造成速度大脉冲和永久位移的主要为低频分量, 因此使用阈值为 3 时得到的清平台法

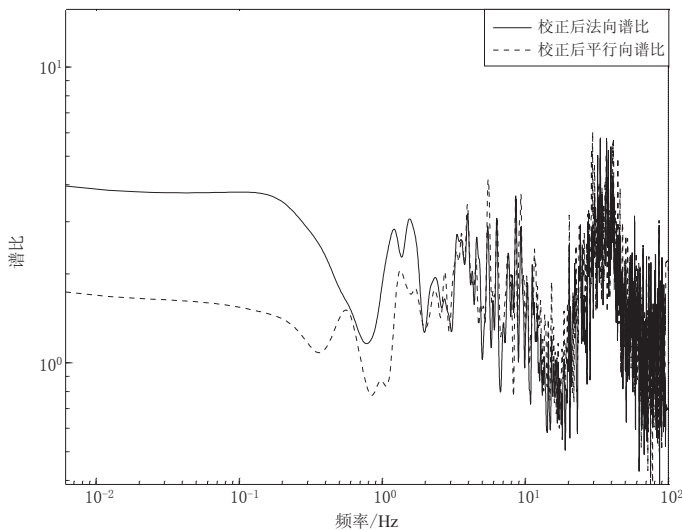


图 6 基线校正后的绵竹清平台谱比

Fig. 6 Spectral ratio of Qingping station with corrected records

线方向倾斜结果应该是估高了，使用阈值 4 更为合适。八角台具有明显的残余倾斜情况，并且平行向的值要大，这除了与所处场地有关外，还可能与局部断层错动形式有关。

2.2 断层法向与平行向倾斜比较

比较表 1 中地面倾斜幅值可知，有 7 个台站的断层法线方向的值小于平行线方向的值，而其余 10 个台基本上是法线方向倾斜占优(包括绵竹清平台)，这可能与断层错动的形式有关。汶川地震断层错动的情况是西南段逆冲为主，东北段右旋走滑占优，而在西南段台站较多，因此总体上呈现出法线方向倾斜占优的情况。但是仍然需要强调的是，根据强震记录仪进行地面倾斜估计，实际上估算的是强震仪所在平台的倾斜情况，而很多台站并非建立在基岩上，并且地形也比较复杂，因此倾斜情况可能极大地受到局部场地条件的影响，如什邡八角台离西南段断层很近，但是其断层平行线的倾斜估计值要比法线大 2 倍多。

2.3 上下盘倾斜结果的比较

绵竹清平台和什邡八角台是下盘中离地表破裂迹线最近的台站，发生了比较大的地面倾斜过程，尤其是什邡八角台还出现了较大的残余倾斜量。另外下盘上江油重华台和安县塔水台也有较大的残余变形；而位于上盘离断层地表破裂迹线约 27 km 的茂县桃平台(051MXT)和茂县南新台(051MXN)的估计值相对要小很多，最大只有  $0.05^\circ$ ，这有可能是由于上盘的整体逆冲所致。而在断层迹线西南端 29 km 处的汶川卧龙台则发生了较大的地面倾斜，这可能是由于上盘逆冲部分引起的位错向变形较小的西南部分的过渡所引起。但是与其情况接近的下盘上位于基岩上的郫县走石山台(051PXZ)并没有估算出地面倾斜。

2.4 逆冲段和走滑段倾斜比较

根据地表破裂调查结果，北川县曲山镇以北右旋走滑分量明显大于垂直分量(徐锡伟等, 2008)。选取均位于下盘且到中央破裂迹线距离相近的安县塔水台和江油重华台进行比较，前者位于逆冲占优的西南侧，后者位于走滑占优的东北侧。

从图 7 来看，安县塔水台的断层法线方向倾斜的幅值和残余值都要明显大于与断层平行方向的倾斜分量，而江油重华台则是沿断层法线方向和平行方向的倾斜程度的幅值和残余值的绝对值都比较接近，这两个台站倾斜结果的差异可能与断层的错动形式相关。由于错动形式的差异，逆冲段与走滑段之间可能存在转动的情况，但是李宏男(1997)的研究指出，转动对记录的影响主要在 5 Hz 以上，因此这里首次影响可忽略。但有的台站并不符合

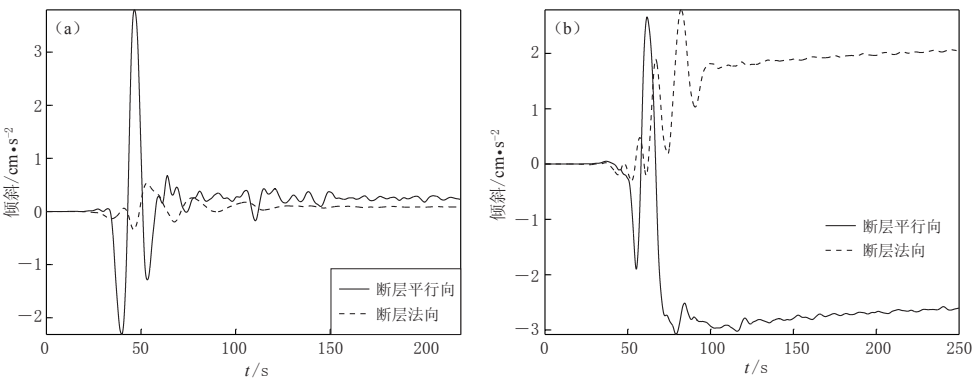


图 7 逆冲段与走滑段倾斜比较. (a) 安县塔水台；(b) 江油重华台

Fig. 7 Estimated tilts in reverse and strike slip segments. (a) Tashui station; (b) Chonghua station

这一特征,如茂县南新台位于上盘逆冲段,但走滑向倾斜较大,因此不能排除局部场地条件的影响,对此仍需要进一步研究。

## 2.5 谱比与倾斜

表1中统计了各个台站小于特征频率的频段上的最大谱比与平均谱比值,经过分析发现这两个值与倾斜值之间并不存在比例关系,如发生较大倾斜的什邡八角台的这两个值比理县木卡台(051LXM)的小很多,但后者的倾斜却要小很多。这可能不仅与谱比的幅值和均值有关,而且与加速度记录的大小,以及低频部分特性有关。什邡八角台平均谱比较小,但是其加速度幅值比后者要大很多且谱比更平缓,因此计算出的特征频率就高于后者。

## 3 讨论与结论

本文根据强震仪水平向和竖向传感器对地面倾斜响应的差异,使用谱比法估算了汶川 $M_s8.0$ 地震中强震动台处的地面倾斜峰值和残余值,研究得到如下认识:

1) 特征频率一般在 $0.1\text{ Hz}$ 以下, $30\text{ km}$ 内的强震动记录中包含较大的地面倾斜结果,但是幅值一般小于 $1^\circ$ 。在 $100\text{ km}$ 以外的记录中很少有 $0.01^\circ$ 以上的倾斜值,水平向均方加速度峰值在 $200\text{ cm/s}^2$ 以下时,亦很少观测到地面倾斜,特征频率以下频段的平均谱比同倾斜的大小没有直接相关性。

2) 位于中央断裂与前山断裂之间的绵竹清平台的谱比值具有特殊性,其均值较小但是平缓且持续较长频段,适当降低谱比来估算地面倾斜时,发现沿断层法线方向的倾斜幅值有极大增加,但实际上主要受到该处较大的永久位移影响,因此阈值的选取应该考虑这一特点。

3) 从倾斜的方向性来看,断层的法线方向的值总体上要高于平行线方向,而从上下盘的对比来看,上盘近断层区域的倾斜相对较小,可能与其整体抬升有关。而处于抬升边缘的卧龙台显示倾斜值较大,从以逆冲为主和走滑为主的区域来看,倾斜形式没有明显的规律性。

## 参 考 文 献

- 李宏男. 1997. 关于地震动转动分量的研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 7(1): 89-93.
- 卢寿德, 李小军(主编). 2008. 汶川8.0级地震未校正加速度记录[M]. 北京: 地震出版社: 1-600.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 马保起, 陈杰, 周荣军, 何宏林, 田勤俭, 何玉林, 王志才, 孙昭民, 冯希杰, 于贵华, 陈立春, 陈桂华, 于慎鄂, 冉勇康, 李细光, 李陈侠, 安艳芬. 2008. 汶川 $M_s8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 30(3): 894-926.
- 赵斌, 吕品姬, 陈志遥, 李正媛, 谭凯. 2010. 汶川 $M_s8.0$ 地震同震倾斜应变变化分析[J]. 大地测量与地球动力学, 30(3): 17-21.
- Boore D M. 2001. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 91(5): 1199-1211.
- Boore D M, Bommer J J. 2005. Processing of strong-motion accelerograms: Needs, options and consequences[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, 25(2): 93-115.
- Bouchon M, Aki K. 1982. Strain, tilt, and rotation associated with strong ground motion in the vicinity of earthquake faults[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 72(5): 1717-1738.
- Chanerley A A, Alexander N A. 2010. Obtaining estimates of the low-frequency 'fling' instrument tilts and displacement timeseries using wavelet decomposition[J]. *Bull Earthq Eng*, 8(2): 231-255.

- Graizer V M. 1989. On inertial seismometry[J]. *Izvestiya Earth Physics*, **25**(1): 26–29.
- Graizer V M. 1991. Inertial seismometry methods[J]. *Izvestiya Earth Physics*, **27**(1): 51–61.
- Graizer V M. 2005. Effect of tilt on strong motion data processing[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **25**(3): 197–204.
- Graizer V M. 2006. Tilts in strong ground motion[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **96**(6): 2090–2102.
- Graizer V M, Kalkan E. 2009. Resoponse of pendulums to complex input ground motion[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **28**(8): 621–631.
- Graizer V M. 2010. Strong motion recordings and residual displacement: What are we actually recording in strong motion seismology[J]. *Seism Res Lett*, **81**(4): 635–639.
- Li X J, Zhou Z H, Yu H Y, Wen R Z, Lu D W, Huang M, Zhou Y N, Cu J W. 2008. Strong motion observations and recordings from the great Wenchuan earthquake[J]. *Earthq Eng Eng Vib*, **7**(3): 235–246.
- Trifunac M D, Todorovska M I. 2001. A note on the useable dynamic range of accelerographs recording translation[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **21**(4): 275–286.
- Wong H L, Trifunac M D. 1977. Effect of cross-axis sensitivity and misalignment on response of mechanical-optical accelerographs[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **67**(3): 929–956.

地震学报  
ACTA SEISMOLOGICA SINICA