

刘水莲, 陈美梅, 全建军. 永安台钻孔体应变干扰与故障现象的探讨与总结[J]. 华南地震, 2015, 35(3): 46–53. [LIU Shuilian, CHEN Meimei, QUAN Jianjun. Discussion and Summary of Borehole Body Strain Interference and Fault Phenomena at Yong'an Seismic Station[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(3): 46–53.]

## 永安台钻孔体应变干扰与故障现象的探讨与总结

刘水莲, 陈美梅, 全建军  
(永安地震台, 福建 永安 366000)

**摘要:** 对永安台钻孔体应变观测的干扰特征进行了分析, 研究了影响钻孔应变仪观测曲线畸变的一些因素, 有助于我们在今后的工作中对 TJ-IIC 型体应变仪及其他前兆数字化仪器的不同干扰进行识别; 同时还总结了观测中碰到的故障情况及解决方法, 希望有利于提高台站观测人员对体应变仪的维护经验, 提取可靠的观测数据信息, 为地震短临预报提供可靠的判定依据和指标。

**关键词:** 体应变; 畸变; 干扰; 故障

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2015) 03-0046-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.03.007

## Discussion and Summary of Borehole Body Strain Interference and Fault Phenomena at Yong'an Seismic Station

LIU Shuilian, CHEN Meimei, QUAN Jianjun  
(Yong'an Seismic Station, Yong'an 366000, China)

**Abstract:** This paper analyzes the interference characteristics of borehole body strain observation at Yong'an seismic station, and studies some factors affecting the curve distortion of borehole strain meter observation, which is helpful to identify the different interference on the TJ-IIC type body strain meter and other precursory instrument in future work. Meanwhile, the paper also summarizes the fault conditions encountered in the observation and its solution, which is good to improve the body strain meter maintenance experience and extract the observation data for the observatory staff, and provide reliable decision basis and index of short-impending earthquake prediction.

**Keywords:** Body strain; Distortion; Interference; Fault

收稿日期: 2015-05-29

作者简介: 刘水莲 (1983-), 女, 工程师, 主要从事地震台站前兆监测工作。

E-mail: 470175472@qq.com.

0 引言

永安台钻孔体应变观测用的是 TJ-II C 型体应变仪。其精度为  $10^{-9}$ ，工作频段宽，除了能记录到清晰的应变固体潮外，同时也记录到了大量的非潮汐信息。2007—2013 年的观测资料中，非潮汐信息主要包含有：① 持续趋势性改变；② 单日固体潮畸变；③ 台阶、突跳；④ 同震响应。本文将统计永安台钻孔体应变资料中的畸变现象，探讨畸变的成因，对观测过程中的仪器故障、人为干扰情况进行总结，提出改进及解决方法，不仅能为台站人员提供仪器维护、提高观测质量的经验，还能提高对数据资料真实性的分辨能力，为分析预报人员提供更为可靠的资料。

1 井孔状况及仪器概况<sup>[1-2]</sup>

永安地震台(25.89°N, 117.36°E)位于政和-海丰断裂带西侧，该断裂是福建东南沿海地震带孕震构造之一，体积式钻孔应变仪安装在台内办公楼后侧。钻孔高程 179 m，2002 年 5 月 20 日第一次安装钻孔深 66.7 m，探头深度 66.7 m；2006 年

4 月 21 日第二次安装钻孔深 68.8 m，探头深度 67.0 m。钻孔岩性为侏罗纪上统南园组(J<sub>3n</sub>)凝灰岩，岩性完整，无明显裂隙。

体应变观测采用中国地震局地壳应力研究所研制的 TJ-II C 型 4# 体积式钻孔应变仪，配套进行温度、气压、钻孔水位辅助观测。2002 年 5 月 20 日仪器下井安装完毕，2005 年 6 月 13 日遭雷击导致 TJ-II C 型体积式应变测量仪井下传感器、辅助测项设备均损坏后，永安台钻孔体应变观测停测。2006 年 4 月重新安装体应变探头，至今运行稳定。

2 体应变观测精度及畸变图像分析

2.1 体应变观测精度

永安台钻孔应变观测记录资料连续完整，稳定性好，连续率在 99.5 %以上。根据永安台体应变观测情况，选取 2007 年 1 月至 2013 年 12 月的资料，利用维尼迪科夫调和分析法进行逐月分析，根据分析结果来跟踪潮汐参数随时间的变化，表 1 中为 2007—2013 年体应变观测资料按月序列的潮汐参数统计结果，图 1 为体应变 M2 波潮汐因子和相位滞后曲线。

表 1 永安台体应变调和参数逐年统计表

Table 1 The yearly statistics table of harmonic analysis of body strain in Yong'an seismic station

年份	潮汐因子 $\alpha$	潮汐因子中误差 $\sigma\alpha$	相对误差 $\sigma\alpha/\alpha$	潮汐相位滞后 $\Delta/(^{\circ})$	相位误差
2007	2.247 5	0.022 6	0.010 1	6.205 8	0.578 7
2008	2.311 6	0.022 1	0.009 6	7.085 9	0.549 2
2009	2.318 2	0.022 8	0.009 8	7.950 3	0.561 9
2010	2.313 5	0.023 5	0.010 2	7.882 1	0.585 5
2011	2.315 3	0.030 1	0.013 1	8.771 3	0.752 4
2012	2.262 2	0.054 5	0.028 0	11.793 6	1.240 5
2013	2.308 7	0.039 6	0.017 8	10.434 6	1.018 4

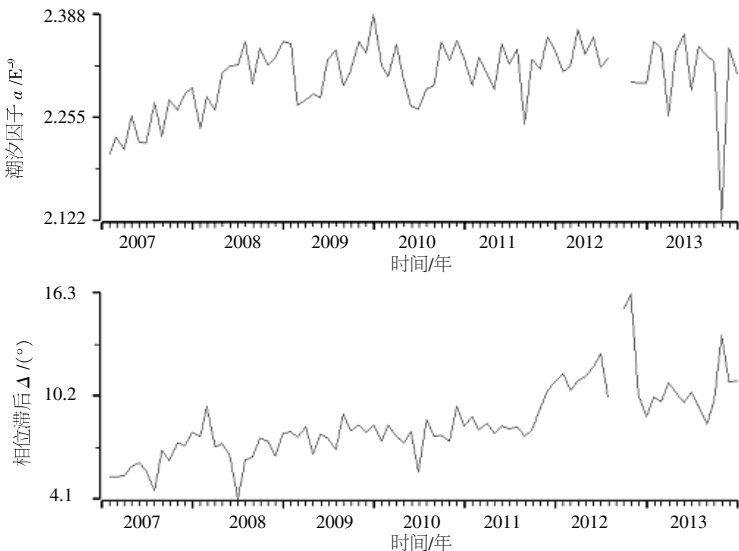


图 1 福建省体应变参数变化曲线

Fig.1 The parametric change curve of body strain in Fujian province

由统计表中的数据可以看到,永安台的数据基本符合形变规范中所要求  $\alpha \geq 2.0$ 、 $\sigma\alpha/\alpha \leq 0.05$  的内精度指标<sup>[9]</sup>。其中精度最差的是 2012 年,究其原因,2012 年 7 月 22 日至 9 月 5 日长时间数采故障,造成大范围断记,才使得  $\sigma\alpha/\alpha$  与相位误差最大。

## 2.2 畸变图像类型

钻孔应变仪观测的是地表附近的应变变化,采样率为分钟值,日变形态应显示为标准的固体潮变化,记录曲线表现为光洁的双峰双谷正弦波。当观测过程中受到干扰或存在地震前兆时,就会产生畸变,曲线不再光滑,畸变的形态主要有:瞬时台阶、瞬时突跳、多日持续单向应力变化、同震响应(图 2)。

## 3 干扰因素分析

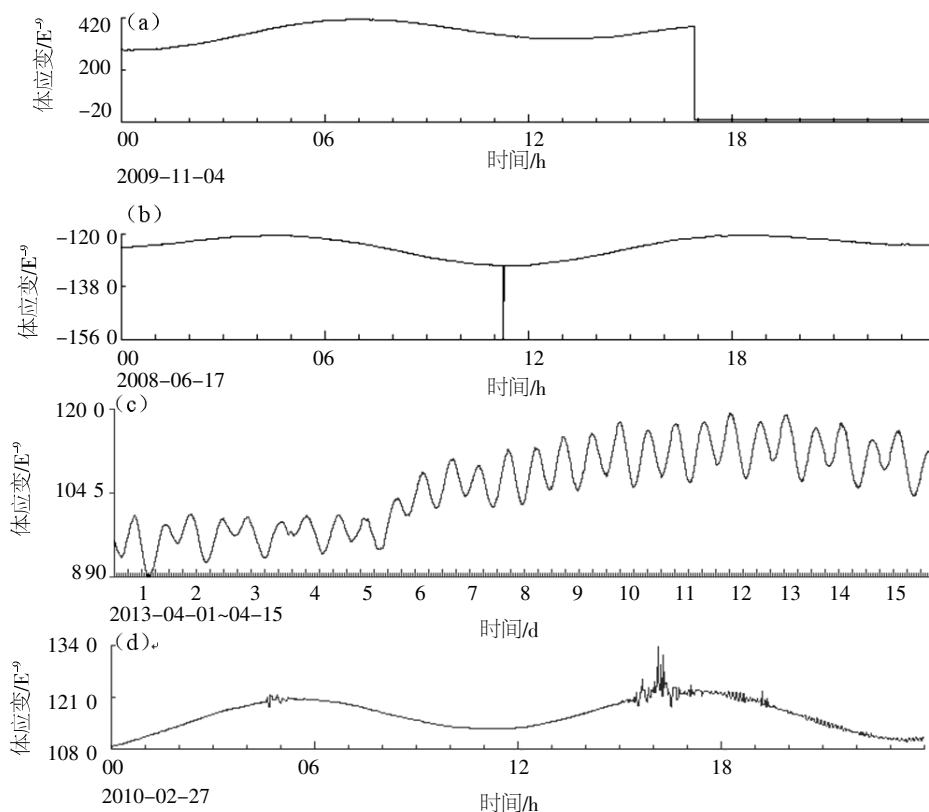
### 3.1 自然因素

#### 3.1.1 大风、气压干扰分析

许多学者研究表明<sup>[3-5]</sup>:大气压力是通过两种途径作用在体应变传感器周围的,一种是以附加

荷载的形式作用在地壳的表面,再通过传递的方式作用在传感器周围;另一种是通过井孔直接作用在仪器上方的水面上。钻孔体应变观测具有较宽的工作频带,可记录从零频(长年的缓慢变化)直到 1 Hz、5 Hz 或 10 Hz 以上的变化,因而它不仅记录到远震面波,震时微小的应变阶跃(同震应变阶),长、短期应变异常,还可以记录到气压对体应变的干扰影响,这种影响反映到记录的数据曲线上就表现为固体潮畸变现象。根据张绍治计算<sup>[9]</sup>,气压对体应变测值的影响为  $10^{-9}$  hPa 量级。选取永安台 2013 年非降雨时期的气压干扰数据计算,永安台的体应变气压影响系数约为  $5.6 \times 10^{-9}$  hPa,一般表现为数据曲线趋势性的变化及曲线的波动。

图 3 为永安地震台 2013 年 2 月体应变受气压干扰的分钟值曲线对比图,图中红线为体应变观测曲线,蓝线为辅助气压曲线。气压在 2 月 7 日 20 时至 8 日 04 时急剧升高 30 hPa,体应变约滞后一小时出现压性变化约  $141 \times 10^{-9}$ ; 2 月 19 日 02 时至 20 日 05 时气压急剧升高 27 hPa,体应变约滞后一小时出现压性变化  $120 \times 10^{-9}$ 。



(a) 台阶畸变图 (b) 突跳畸变图 (c) 持续压性畸变图 (d) 同震响应畸变图  
图 2 永安台钻孔体应变畸变曲线图

Fig.2 The distortion curve of borehole body strain of Yong'an seismic station

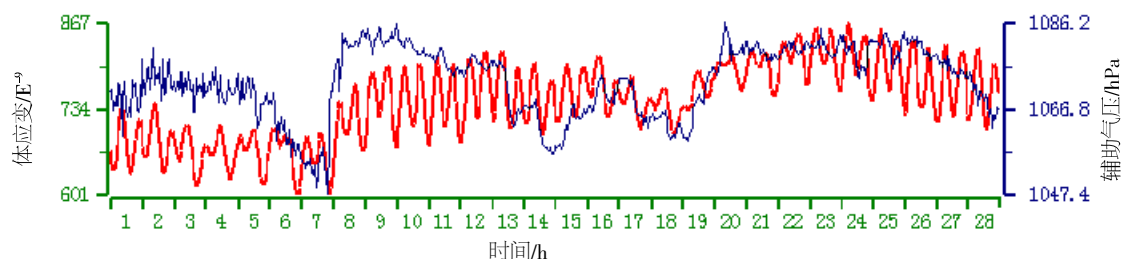


图3 2013年2月永安台钻孔体应变气压干扰畸变曲线图

Fig.3 The distortion curve of borehole body strain with pressure disturbance of Yong'an seismic station in February, 2013

大风天气对体应变的影响属于非周期性短时气压变化影响<sup>[8]</sup>。2008年1月29日05时至11时

永安地区出现大风天气,气压出现锯齿形波动现象,体应变曲线出现同步的畸变现象(图4)。

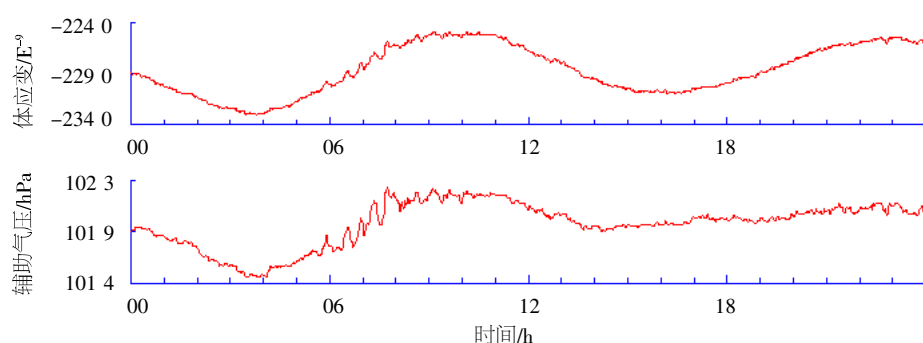


图4 2013年2月永安台钻孔体应变大风干扰畸变曲线图

Fig.4 The distortion curve diagram of borehole body strain with wind disturbance of Yong'an seismic station in February, 2013

### 3.1.2 降雨干扰分析

其他学者研究结果显示,降雨对体应变的影响又可分为两类<sup>[9]</sup>:①降雨可带来大地负荷效应,即当降雨为大暴雨时,这一效应在观测曲线上可明显看到;②降雨后延迟一段时间,雨水逐渐渗入岩体孔隙中,孔隙水压力增加,水位上升,使岩体体应变产生压缩变形,从而导致应变测值的变化。降雨对少数台站体应变测值影响是先呈张性变化,随后为较长时间的压性变化,时间一般滞后数小时到数天。

对比分析2007年至2013年的降雨量与体应变观测值,其影响可分为三类:①当降雨量低于30 mm/d时,对观测值基本影响不大;②当持续降雨总量在31~80 mm/d时,变化形态基本遵循张性变化-压性变化的波动形态,不同雨量会出现不同的体应变数据变化,时间上会出现一定的滞后,由于水的渗透需要一定时间,因而孔隙压力的增加是逐渐进行的,且压力状态持续存在;③当降雨量大于80 mm/d且降雨时间极短(数个小时),或同时引起上游水库日泄洪量达到10 000万立方米时,可理解为降雨带来的荷载效应对观测点和

仪器是一次直接受力过程,使体应变形成快速上升-下降的脉冲式变化,上升的体应变变化量超过 $100 \times 10^{-9}$ ,1~2 d后回至正常变化形态。

张凌空<sup>[10]</sup>曾经为了计算体应变对降雨的响应情况,引入降雨干扰系数 $\beta$ 和降雨干扰效率 $\eta$ 。设降雨量为 $W(\text{mm})$ 。由其产生体应变增量 $\Delta\alpha(1 \times 10^{-9})$ ,产生时间增量为 $\Delta t$ ,

$$\text{定义: } \beta = \frac{\Delta\alpha}{W}, \quad \eta = \frac{\beta}{\Delta t}$$

利用上式,计算得出永安台体应变的显著降雨干扰系数和效率( $W \geq 80 \text{ mm}$ ),如表2。

由表2中所见,2010年5月19日14时至22时有一次特大暴雨,降雨量达到83.7 mm,降雨效率高,干扰效率高达 $8.761 \times 10^{-9} \text{ mm/d}$ ,对体应变的影响非常显著,其恢复过程很快,一天之内这次的干扰影响就消失,背景变化和固体潮形态回到正常形态(图5);而2009年7月3日00时至14时暴雨达到87.4 mm,同时干扰效率计算也高达 $5.034 \times 10^{-9} \text{ mm/d}$ ,据上游西门水库工作人员提供的数据,当天泄洪量达到18 294.3万立方米,因此这个干扰系数就不是单纯的降雨干扰,应当

将泄洪导致的下游荷载增大，造成孔隙压力的变化考虑进去，它对体应变的影响也非常显著，干扰影响一天内消失，固体潮形态回到正常形态

(图 6)；因此当地面荷载突然大幅增加时，引起岩体孔隙压力的改变是突发性的，体应变观测值出现的同步变化。

表 2 2007—2013 年永安台体应变的降雨干扰系数和效率表 ( $W \geq 80 \text{ mm}$ )

Table 2 The rainfall interference coefficient and efficiency of body strain of Yong'an seismic station from 2007 to 2013 ( $W \geq 80 \text{ mm}$ )

日期	降雨量 $w/\text{mm}$	体应变增量 $\Delta\alpha/1\times10^{-9}$	干扰持续时间 $\Delta t/\text{d}$	降雨干扰系数 $\beta/[1\times10^{-9}/\text{mm}]$	降雨干扰效率 $\eta/[1\times10^{-9}/\text{mm}\cdot\text{d}]$	畸变恢复时间 $/\text{d}$
2007-08-16	102.8	170	7	1.654	0.236	1
2007-12-24	110.6	107	4	0.967	0.242	2
2008-02-04	140.7	100	6	0.711	0.118	
2008-07-29	81.2	130	1	1.601	1.601	3
2009-05-28	149.9	180	11	1.201	0.109	2
2009-07-03	87.4	220	0.5	2.517	5.034	1
2010-05-19	83.7	220	0.3	2.628	8.76	1
2010-06-16	171.2	392	3	2.290	0.763	2
2011-08-31	94.5	110	2	1.164	0.582	
2011-11-09	95.0	80	1	0.842	0.842	
2012-05-09	81.2	90	1	1.108	1.108	2
2012-06-11	110.0	200	2	1.818	0.909	2
2013-07-14	149.0	135	0.6	0.906	1.510	1
2013-12-17	97.7	186	4	1.904	0.476	

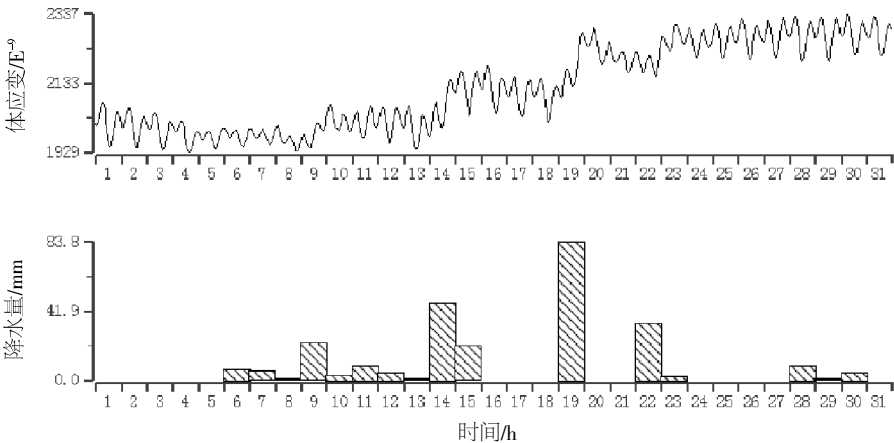


图 5 2010 年 5 月 19 日永安台钻孔体应变降雨干扰畸变曲线图

Fig.5 Distortion curve diagram of borehole body strain with rain interference of Yong'an seismic station on May 19<sup>th</sup>, 2010

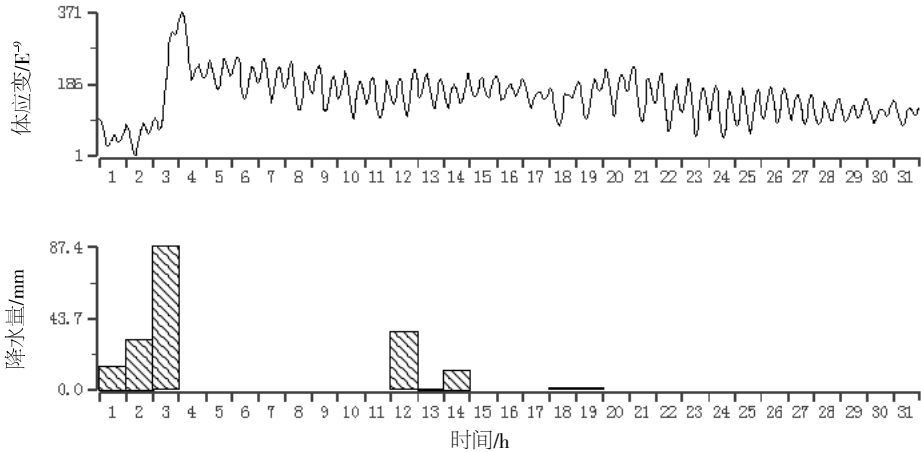


图 6 2009 年 7 月 3 日永安台钻孔体应变降雨干扰畸变曲线图

Fig. 6 Distortion curve diagram of borehole body strain with rain interference of Yong'an seismic station on July 3<sup>rd</sup>, 2009

我们可以看到,降雨效率并不与降雨量始终成正比,更多的决定于降雨方式和降雨持续时间。如2010年5月19日的降雨量为83.7mm,降雨持续时间为1d内,引起的体应变变化量为 $220 \times 10^{-9}$ 。而2007年12月15日的持续降雨量为110.6mm,引起的体应变变化量为 $107 \times 10^{-9}$ 。虽然这次的降雨量大于2010年5月19日,但累计这些降雨量的时间为4d,是较缓慢的一种降雨形态,导致降雨效率差异显著,引起的体应变畸变变化量也较小。因此可认为降雨对体应变的影响与降雨过程、降雨量及降雨时间等有密切的关系。由于水的渗透需要一定时间,孔隙压力的增加是逐渐进行的,所以体应变对降雨的响应存在延迟效应。持续降雨只有积累到一定程度(外在因素),才能促成固体潮畸变,这一过程虽然较为复杂,但它们之间的内在响应仍有一定的规律可寻。

### 3.2 同震响应分析

地震是构造应力增大到一定程度使断层滑动造成的;反过来,断层滑动将释放应力。当一个大地震发生时,发震断层的应力释放分为两种情况,一种是在某些断层上造成应力释放,使其更加趋于稳定,这种情况一般发生在“应力影”区域上;一种是在某些断层上造成应力增大,使其趋于滑动,即所谓的应力触发。TJ-II型体应变仪

高频特性好,耐振动,记录动态信息不失真,它能很好地感应应力触发下的应变波动,当它进行动态观测时,记录地震波的能力较好,相当于“速度型”的无摆地震计<sup>[4]</sup>。

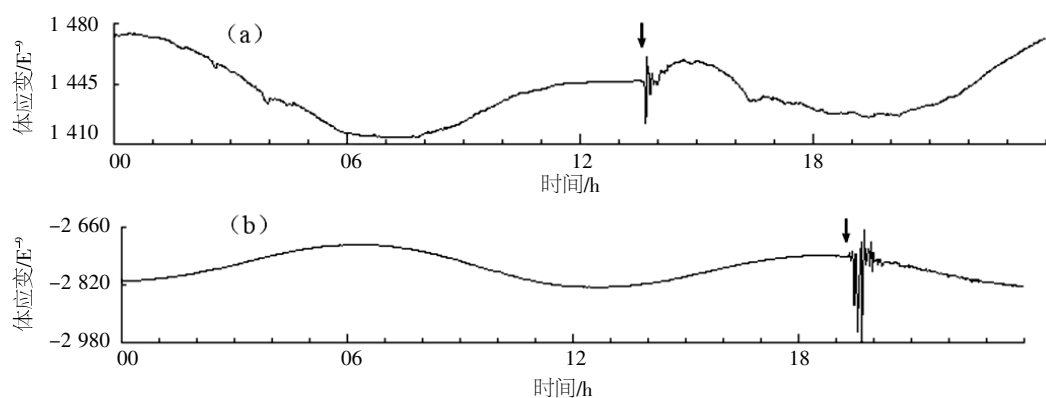
永安台体应变记录到的同震形态受震级大小、震中距离的不同所影响,幅度、形态不一,主要有两种:脉冲波、地震波。

近震、小震同震响应以脉冲波为主,远震、强震持续时间长,面波丰富,形态为完整的应变地震波,如图7所示。

### 3.3 人为故障分析

#### 3.3.1 仪器故障断记

永安台体应变观测采用TJ-II C型4#体积式钻孔应变仪,2007—2013年因雷击体应变测量仪故障造成断记1次;数据采集系统采用地壳应力研究所研制的DQS-1型地震前兆台站数字化设备,属“九五”数字化仪器,较不稳定,因数采故障造成断记达16次,其中2010年10月5日无故时钟集成块故障,造成收取的数据错误,10月10日更换后恢复正常,共断记7 018 min;2011年7月30日数采故障无法收取数据,经仪器中心专家维修确定主集成块损坏,当时备用仪器不足,直至2011年8月12日才更换新的数采,恢复正常记录。



(a) 2013年6月2日台湾南投  $M_s$  6.7级地震同震响应; (b) 2007年9月12日印尼苏门答腊  $M_s$  8.5级地震同震响应

图7 永安台体应变同震响应曲线

Fig.7 The coseismic response curve of body strain of Yong'an seismic station

#### 3.3.2 数采死机

2011年4月14日至5月12日DQS-1型数采发生8次无故死机,引起分量表错乱,使得原始数据无法自动转换,经人工转换后也总是形成大片的坏数,造成了大量的缺数。在此期间,台站人员首先自行排除人为干扰,将避雷箱甩脱,加

密维护UPS电源,排除断电引起的死机,其次要求值班人员每天校对2次分量表,特别是收数前必须先校对分量表。2011年5月12日上报福建省地震局监测处,由监测处派遣专家到台站维修仪器后,该情况大大改善,实际分量表错误造成的现象是:数采死机后,分量表紊乱,收到的体应

变原始文件中死机时间点后的测项代码、数据为辅助气压的测项代码、数据,其他测项依次递推。且预处理人员在排除故障的过程中积累了经验,将死机后紊乱的数据重新整理回各自的原始文件内,使得数据重新完整转换,不再轻易地将其当成坏数而处理掉。

### 3.3.3 运行不稳定

仪器的不稳定指的是在时间因素作用下,观

测系统各个部件性能的量变或者质变等造成的测值变动<sup>[2]</sup>,使得测值中偶尔出现不明原因的不规则台阶、突跳,2007—2013 年永安台体应变所记录的这一现象超过 40 次。也有一些有记录原因,例如 2007 年 1 月 2 至 3 日永安地区连续降雨,3 日体应变及辅助测项同时出现电信号干扰引起突跳(图 8);2008 年 7 月 14 日 17 时 57 分永安地区打雷闪电,同时体应变测值出现突跳(图 9)。

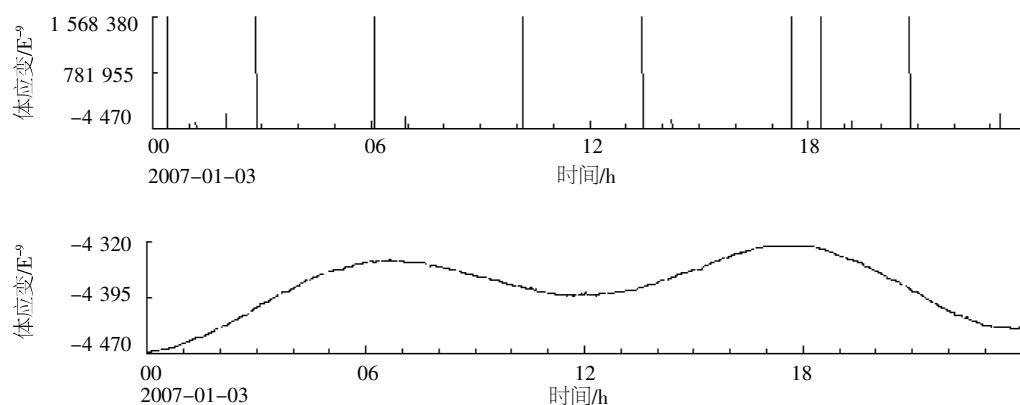


图 8 2007 年 1 月 3 日体应变突跳与预处理曲线对比图

Fig.8 The comparison chart of sudden jump curve and pretreatment curve of body strain on January 3<sup>rd</sup>, 2007

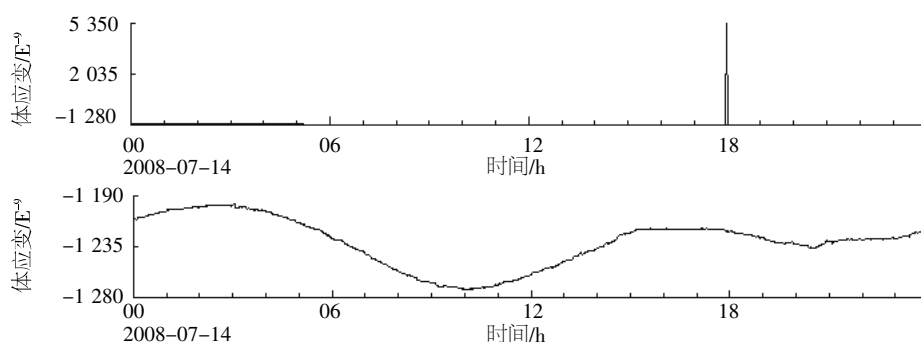


图 9 2008 年 1 月 14 日体应变突跳与预处理曲线对比图

Fig.9 The comparison chart of sudden jump curve and pretreatment curve of body strain on January 14<sup>th</sup>, 2008

实际上,仪器的不稳定性主要表现为电路的某些故障<sup>[2]</sup>(接触不良、漏电、地电流干扰、电磁干扰等);岩体的不稳定性在新打的钻孔上更明显,如钻孔岩面开挖后的自然崩落,井孔附近作业造成井内岩石小碎块的掉落。这些影响会这需要观测人员的细心谨慎,详细记录每一个观测环境的变化事件,否则会使得许多台阶、突跳无法找到原因,也无法判断其是否地震前兆信息。

### 3.3.4 人为干扰

2007—2013 年,永安台体应变因人为操作造成台阶、断记共 17 次。如 2007 年 9 月 23 日,因数采数据线接触不良造成多次断记,台站人员自行焊接加固导致当天数据断记 886 min;2011 年 9

月 8 日,为使九五前兆系统并入十五 IP 前兆系统,安装协转仪,造成全天断记 1 440 min;2011 年 9 月 19 日 17 时 12 分安装防雷器,造成体应变突跳(图 10);2013 年 10 月 29 日,北京地壳所专家到台检测仪器,进行手动开阀,造成台阶(图 11)。

## 4 结语

永安台体应变仪可记录到地震。近震、小震同震响应以脉冲波为主,远震、强震面波丰富,形态为完整的应变地震波

文中按自然因素(如气压、降雨)、同震响应和人为故障三类干扰因素进行了讨论,其中,体

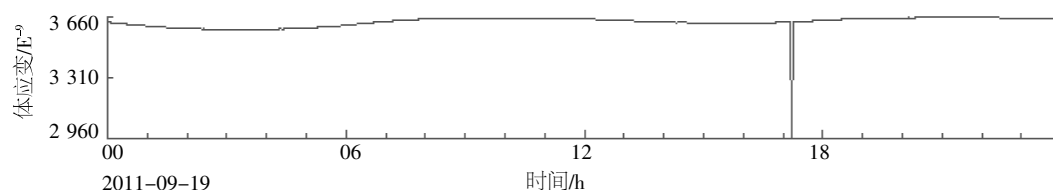


图 10 2011 年 9 月 19 日体应变分钟值曲线图

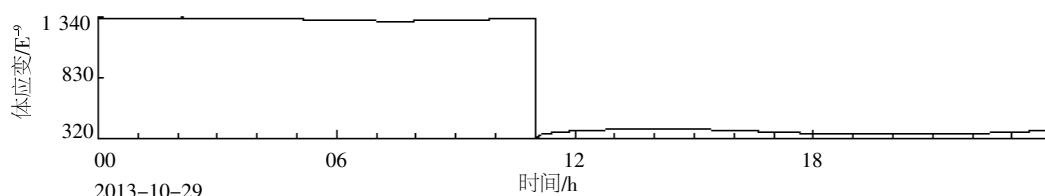
Fig.10 The minute value curve of body strain on September 19<sup>th</sup>, 2011

图 11 2013 年 10 月 29 日体应变分钟值曲线图

Fig.11 The minute value curve of body strain on October 29<sup>th</sup>, 2013

应变观测受自然因素干扰较为显著, 气压影响系数约为  $5.6 \times 10^{-9}$  hPa, 一般表现为数据曲线趋势性的变化及曲线的波动; 降雨影响分为三类, 平均干扰效率约为  $1.111 \times 10^{-9}$  mm/d, 表现在观测曲线上的畸变形态以持续单向畸变为主, 偶有显著的台阶或脉冲式畸变。

总结 2007—2013 年永安台体应变观测系统仪器因自身故障、运行不稳定、人为因素造成的台阶、突跳、断记情况如下: 2007—2013 年因雷击体应变测量仪故障造成断记 1 次; 因数采故障造成断记达 16 次, 数采发生无故死机 8 次, 仪器运行不稳引起不规则台阶、突跳超过 40 次; 人为调试仪器操作造成台阶、断记共 17 次。

### 参考文献:

- [1] 福建省地震局. 福建省地震监测志[M]. 北京: 地震出版社, 2005.
- [2] 刘水莲, 李祖宁, 杨 颖, 等. 福建省数字化钻孔体应变观测资料质量初步分析[J]. 华南地震, 2007, 27 (4): 79-87.
- [3] 吴劲柏, 李毅伟, 刘水莲, 等. 莆田台钻孔应变的震前固体潮畸变现象分析[J]. 华南地震, 2014, 34 (02): 91-95.
- [4] 易志刚, 邱泽华, 宋 荣, 等. 首都圈地区数字化钻孔应变观测资料分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26 (3): 53-58.
- [5] 王梅. 数字化体应变与气压水位相关性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22 (4): 85-88.
- [6] 郝军丽, 卢双苓, 于庆民, 等. 长清地震台体应变观测干扰识别分析[J]. 华北地震科学, 2012, 30 (1): 59-64.

- [7] 杨绍富, 徐长银, 孙海军. 新疆钻孔应变对汶川 8.0 和日本 9.0 级地震的同震响应特征分析[J]. 华南地震, 2013, 33 (1): 43-48.
- [8] 卢双苓, 李峰, 王强, 等. 泰安地震台钻孔应变固体潮畸变的分析探讨[J]. 华北地震科学, 2008, 26 (2): 49-52.
- [9] 李杰, 刘敏, 邹钟毅, 等. 数字化钻孔体应变干扰机理及异常分析[J]. 地震研究, 2003, 26 (3): 230-237.
- [10] 邱奕超, 郭德顺, 钟文衡. 低应变反射波法在钻孔灌注桩检测中的应用[J]. 华南地震, 2013, 33 (4): 111-116.
- [11] 赵爱平, 周红艳. 不同力源作用下九江地震台井水位仪与伸缩仪的体应变响应分析[J]. 华南地震, 2014, 34 (4): 94-101.
- [12] 王紫燕, 刘序俨, 钟继茂. 利用漳州深井 4 分量钻孔应变求测区应变场[J]. 华北地震科学, 2012, 30 (3): 22-26.