

方燕勋、卞根发、惠若愚等,2015,利用湖州台形变观测资料检测地震激发的地球球形自由振荡,中国地震,31(3),544~552。

利用湖州台形变观测资料检测地震 激发的地球球形自由振荡

方燕勋¹⁾ 卞根发¹⁾ 惠若愚²⁾ 孙宗强³⁾

1) 浙江省地震局湖州地震台,浙江省湖州市岷山路 15 号 313000

2) 浙江省地震局,杭州 310013

3) 云南省水富县防震减灾局,云南水富 657800

摘要 利用湖州地震台垂直摆倾斜仪、水管倾斜仪、伸缩仪和体应变仪等观测资料,采用功率谱密度估计方法,获得 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级大地震激发的 ${}_0S_5 \sim {}_0S_{50}$ 基频球型自由振荡数据;比对 PREM 模型的理论计算周期,其相对偏差均小于 1.2‰,且体应变观测的相对偏差最小;伸缩仪和体应变仪能清晰地检测到与地壳深部结构密切关系的 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 和 ${}_0S_4$ 低阶振型。

关键词: 垂直摆倾斜仪 水管倾斜仪 伸缩仪 体应变仪 地球自由振荡

[文章编号] 1001-4683(2015)03-0544-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

大地震能激发产生涉及地球局部运动的体波和面波,也能激发全球规模的地球自由振荡。巨大远震的震时、震后变化在形变观测资料中反映为阶变或振荡型波动现象的叠加。最早采用应变观测方法对地球自由振荡进行准确测量是在 1960 年智利 $M_s 8.3$ 地震后,由 Benioff 等(1961)用 Isabella 应变仪实现的,因其观测结果与理论值一致性良好,故此确定了长周期自由振荡的存在。近年来,一些学者根据倾斜或应变观测资料深入研究了地球自由振荡,邱泽华等(2007)利用泰安地震台钻孔差应变仪观测资料、唐磊等(2007)利用中国钻孔体应变台网观测资料研究了 2004 年 12 月 26 日苏门答腊巨大地震激发的地球自由振荡,Bolt 等(1975)、Zadro 等(1999)根据应变仪和倾斜仪的观测结果对自由振荡进行了研究,任佳等(2009)利用宽城台垂直摆倾斜仪和涉县台水管倾斜仪的观测资料提取了汶川地震激发的地球球型振荡信息。目前已有的研究表明,能检测到自由振荡的形变观测仪主要有体应变仪、水管倾斜仪、伸缩仪、垂直摆倾斜仪等。通过检索以往相关文献发现,大多数以一个台站的一种观测资料进行自由振荡分析,任佳等(2009)虽然同时使用了垂直摆和水管仪的观测资料提取汶川地震激发的球型振荡,但使用的是不同台站的资料,并没有对同一台站的多种倾斜或应变仪的资料进行对比分析。

[收稿日期] 2014-08-19; [修定日期] 2015-08-31

[项目类别] 中国地震局三结合课题(CEA-JC/3JH-161101)、浙江省地震局科技项目(2015ZJJ03)联合资助

[作者简介] 方燕勋,男,1983 年生,工程师,主要从事地震前兆形变研究和地震观测工作。E-mail:fangyanxun@126.com

2011年3月11日,日本发生9.0级地震。该地震激发了全球规模的地球自由振荡,这也为利用同一台站的不同地倾斜或应变仪观测资料对同一地球自由振荡进行检测与对比分析提供了难得的机遇。本文重点对浙江省湖州地震台(后简称湖州台)工作状态良好的垂直摆倾斜仪、水管倾斜仪、伸缩仪和体应变仪针对此次地震的观测资料进行分析,目的是通过同一台站不同形变仪器观测的资料,进一步证明利用倾斜和形变的观测资料分析地震激发地球自由振荡的可行性,并分析不同仪器对地球自由振荡的检测能力和差异特征。

1 资料

1.1 资料选取

地壳形变观测具有明确的几何意义和地球物理意义(国家地震局科技监测司,1995)。中国地震局武汉地震科学仪器研究院研制的VS型垂直摆倾斜仪、DSQ型水管倾斜仪、SSY型伸缩仪和中国地震局地壳应力研究所研制的TJ-2型体应变仪是目前国内地倾斜、应变潮汐观测台网中使用的主要观测仪器。

湖州台水管倾斜仪、垂直摆倾斜仪和伸缩仪于2002年投入正常观测,体应变仪于2008年投入正常观测。这些观测仪器均安装在完整性极好的花岗岩上,能清晰记录到潮汐波和同震响应(方燕勋等,2013)。笔者从4套形变观测仪所产出的数据中提取了日本9.0级地震激发的地球球型自由振荡的振型,采用地震发生后受地震影响明显的5天(共7200min)观测数据进行对比分析。图1给出了湖州台垂直摆NS、EW向,水管仪NS、EW向,伸缩仪NS、EW向和应变仪记录的日本9.0级大地震后5天的分钟值曲线,数据未经任何消除干扰处理。

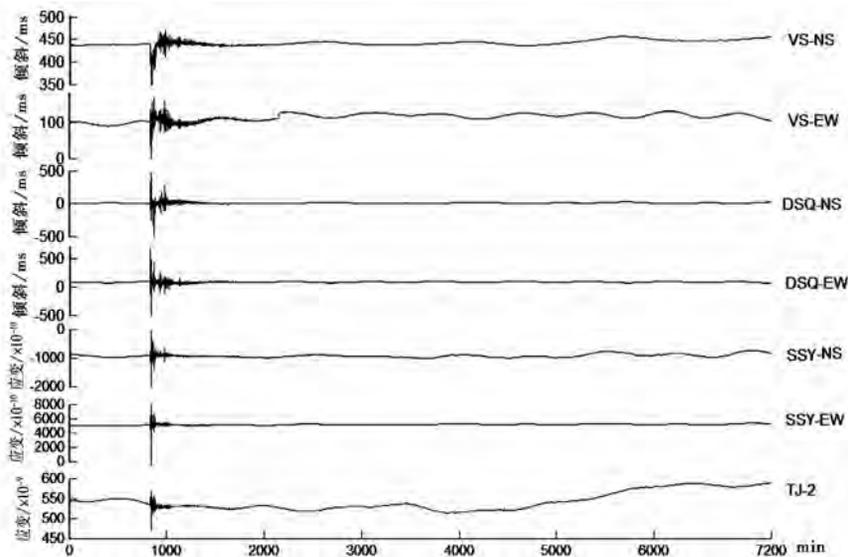


图1 湖州台地倾斜、应变仪记录到日本大地震的分钟值曲线

1.2 观测资料预处理

形变观测仪运行时的观测背景噪声非常复杂,主要包括两部分:①仪器运行时仪器本身

的观测噪声;②台站周围及区域性的背景噪声等。为了消除观测背景噪声的影响,我们作了简单的背景噪声去除处理。即采用大地震前后的一段地震平静且仪器正常运行时的观测残差资料,来模拟资料的正常观测背景噪声,再对其进行傅氏分析最终得到观测背景噪声谱。因这次日本地震震级巨大且大于 6.0 级的余震较多,震后较长时间仍不平静,所以我们采用震前平静时的观测残差资料模拟观测仪的背景噪声,对其进行傅氏分析,获得观测背景噪声谱。

数据预处理后,我们采用通常的功率谱密度估计方法来区分球型自由振荡振型的频率(万永革,2007),其定义为记录到波形资料的自相关函数 R_n 的傅里叶变换,即

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} R_n e^{-i\frac{2\pi nk}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中,自相关函数 R_n 为

$$R_n = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j x_{j+n} \quad n = -(N-2), -(N-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, N-2, N-1 \quad (2)$$

式中, $N=7200$ 为所采用数据的个数, x 为湖州台去背景噪声后的地倾斜或应变数据, S_k 离散值为功率谱密度值。其所对应的频率值运用观测数据的采样率 60/s 乘以序列号 k 确定。最后可得到功率谱密度估计。为了消除数据不能无限长而必须加窗造成的对功率谱密度估计的影响,本文采用汉宁窗来抑制旁瓣,以突出主瓣。

2 地球自由振荡计算

按照此前的计算方法,笔者得到了湖州台 4 套形变观测仪观测资料的功率谱密度估计(图 2~5)。

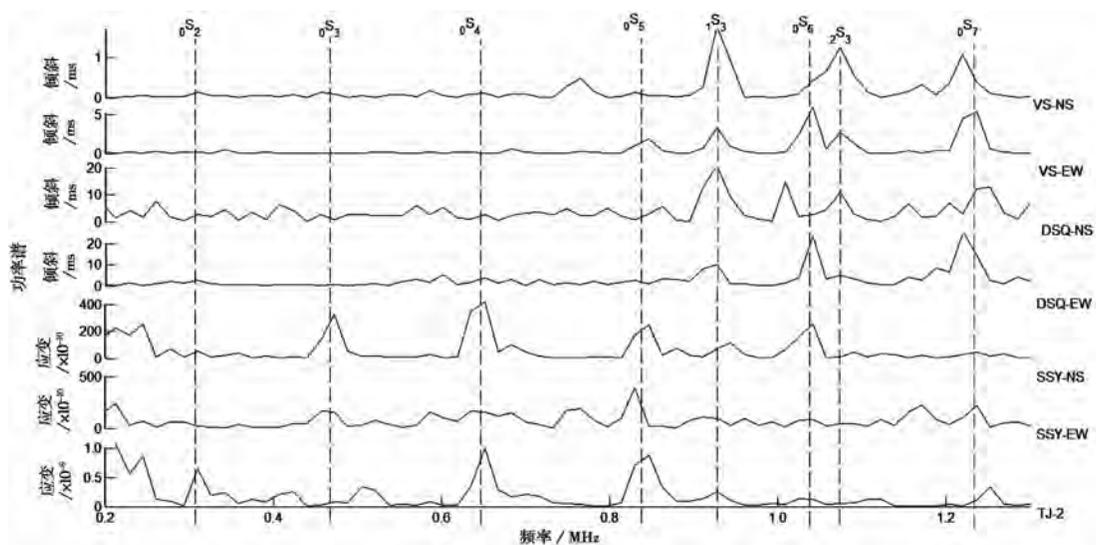


图 2 0.2~1.3MHz 频段形变观测数据功率谱密度估计曲线
垂直虚线表示 PREM 模型给出在其顶点标出振型的自由振荡频率值(后同)

图 2 为 $0.2 \times 10^{-3} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ Hz 频段的功率谱密度估计,由图 2 可见,利用湖州台形变观

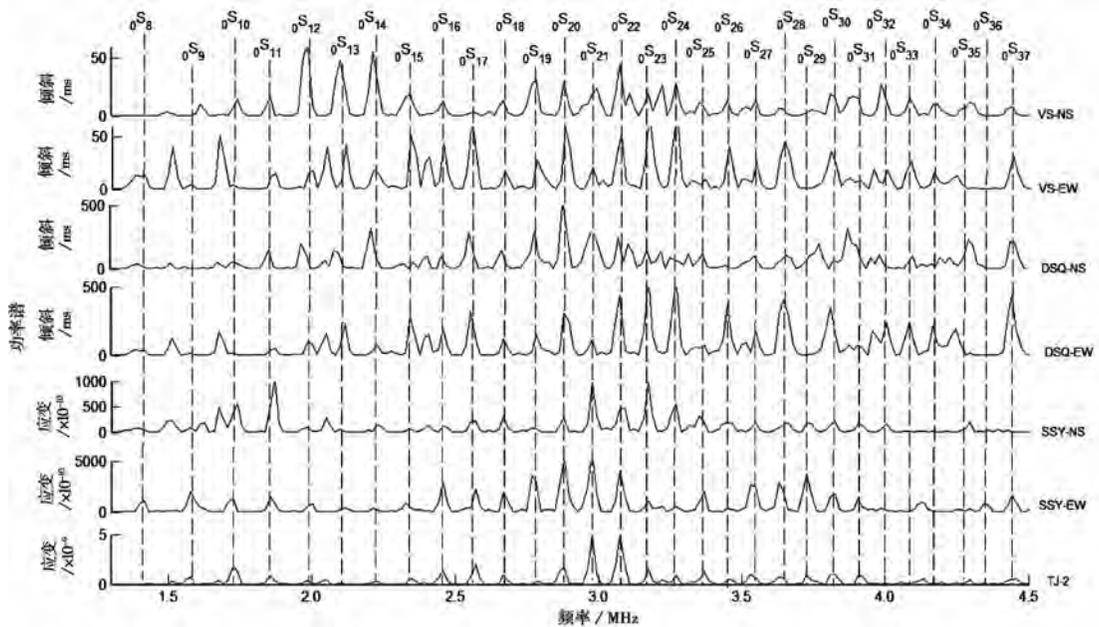


图 3 1.3~4.5MHz 频段形变观测数据功率谱密度估计曲线

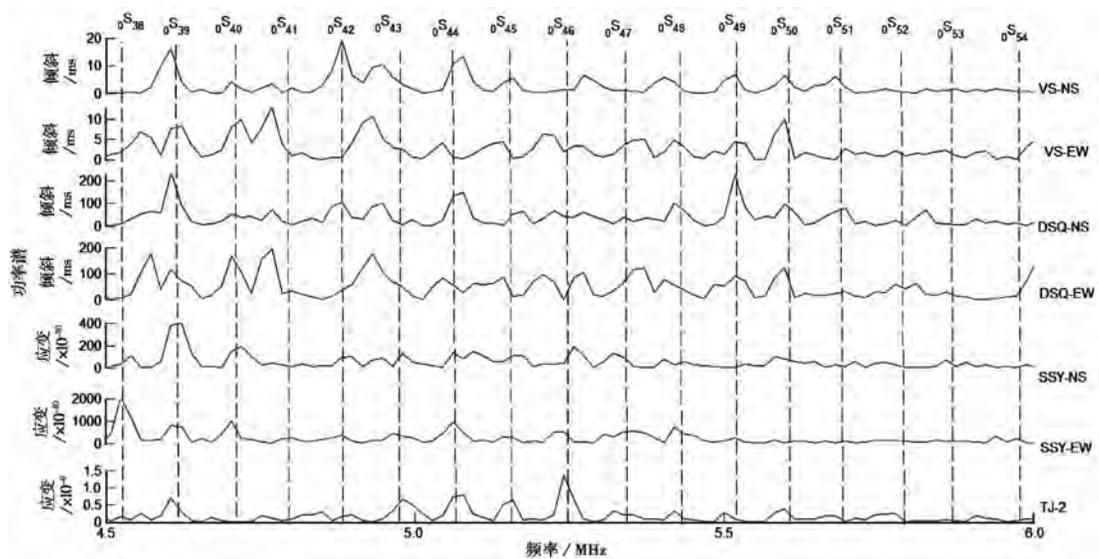


图 4 4.5~6.0MHz 频段形变观测数据功率谱密度估计曲线

测仪所记录的数据,除了能检测到球型振荡的基型振荡 ${}_0S_5$ 、 ${}_0S_6$ 、 ${}_0S_7$,外,还能清楚地检测到 ${}_1S_3$ 、 ${}_2S_3$ 。但 ${}_1S_3$ 、 ${}_2S_3$ 振型在 SSY、TJ-2 两套应变仪中并不能明显地从噪声背景中分离出来。SSY、TJ-2 两套应变仪可分辨 0.8MHz 以下的频段内的 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 、 ${}_0S_4$ 振型。由此看来,运用湖州台形变观测仪所记录的数据,能准确检测出大多数地球球型振荡的基本振型,且能检测到信号较强的谐频成分。为此,作为初步研究结果,我们只给出 PREM 模型的基型球型振

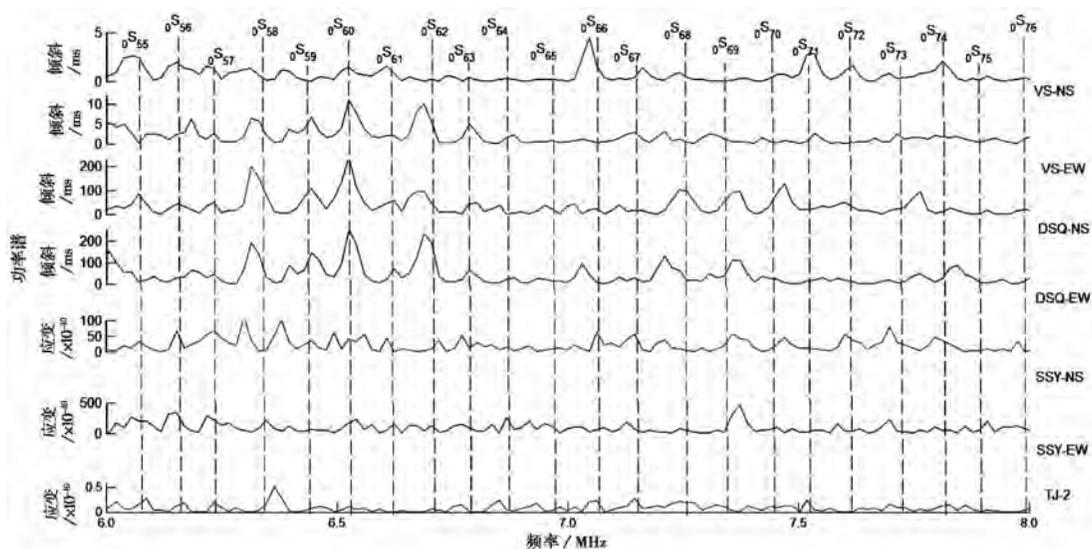


图5 6.0~8.0MHz频段形变观测数据功率谱密度估计曲线

荡的频率与2011年日本9.0级地震后湖州台形变观测数据的功率谱密度进行对比。

图3为 $1.3 \times 10^{-3} \sim 4.5 \times 10^{-3}$ Hz频段范围内湖州台形变观测数据的功率谱密度(相对值)与PREM模型的球型基型振荡频率的对应情况。在这一频段范围内可看到,由湖州台形变观测数据可清楚地检测到球型振荡的基型振荡 ${}_0S_8 \sim {}_0S_{37}$ 。但 ${}_0S_{29}$ 和 ${}_0S_{36}$ 的频率值呈少许偏离。

图4为 $4.5 \times 10^{-3} \sim 6.0 \times 10^{-3}$ Hz频段范围内湖州台形变观测数据的功率谱密度(相对值)与PREM模型的球型基型振荡 ${}_0S_{38} \sim {}_0S_{54}$ 频率值的对应情况。可看到湖州台形变数据均能准确反映地球自由振荡 ${}_0S_{38} \sim {}_0S_{50}$ 的信息,但 ${}_0S_{51} \sim {}_0S_{54}$ 频段范围内的谱峰并不明显,较难分辨。

图5为 $6.0 \times 10^{-3} \sim 8.0 \times 10^{-3}$ Hz频段范围的PREM模型给出的地球球型自由振荡振型频率与2011年日本大地震形变观测数据功率谱密度的对应关系。湖州台形变观测数据有丰富的谐频成分,但大部分谱峰尚不能与理论计算值相对应,只有 ${}_0S_{60}$ 振型与PREM模型基型球型振荡频率成分对应较好。

3 计算结果及不同观测项的对比分析

此次日本大地震中,湖州台4套形变观测仪所记录的数据均能检测到 ${}_0S_5 \sim {}_0S_{50}$ 地球自由振荡振型(表1)。通常浅源地震主要激发基频地球自由振荡,但此次日本地震释放出的能量巨大,不仅激发了基频地球自由振荡,还激发了谐频地球自由振荡。我们检测到了2个谐频振型,并与PREM地球模型的理论预测值作比较,发现实测值和理论值基本一致,表明对这2个振型的检测是可靠的(表1)。此次日本地震激发的振型只有在1级、2级谐频较好地检测到,表明日本地震激发的振型并不是各级振型都能检测到的,仅有某些种类的谐频振型在激发上占优势,可被观测仪器检测到。

为了便于对比分析湖州台4套形变观测仪记录资料检测到的地球自由振荡振型与PREM模型理论值偏差,我们计算了其每一振型与理论值的相对偏差 η ,图6中绘出4组观

表 1 湖州台 4 套形变仪所记录到的地球基频球型振荡值、PREM 模型理论值

振型	观测 1/s	观测 2/s	观测 3/s	观测 4/s	理论值/s
0^s_2	\	\	3233.42	3233.42	3233.11
0^s_3	\	\	2134.57	2134.43	2134.02
0^s_4	\	\	1541.78	1542.38	1545.36
0^s_5	1186.59	1187.72	1186.51	1186.45	1189.91
0^s_6	964.03	964.22	964.12	964.70	963.39
0^s_7	810.45	810.32	810.45	810.70	811.69
0^s_8	708.10	707.90	708.00	708.19	707.71
0^s_9	634.08	634.24	634.00	634.16	633.71
0^s_{10}	580.13	579.90	580.06	580.26	579.37
0^s_{11}	536.42	536.34	536.48	536.35	537.06
0^s_{12}	502.63	502.85	502.78	502.58	502.51
0^s_{13}	473.63	473.65	473.74	473.89	473.26
0^s_{14}	448.57	448.55	448.57	448.58	448.23
0^s_{15}	426.53	426.42	426.64	426.63	426.26
0^s_{16}	406.77	406.83	406.77	406.76	406.84
0^s_{17}	389.88	390.09	389.62	389.72	389.56
0^s_{18}	374.33	374.31	374.14	374.28	374.11
0^s_{19}	359.67	359.67	359.89	359.90	360.1
0^s_{20}	347.20	347.22	347.22	347.23	347.46
0^s_{21}	335.58	335.78	335.77	335.76	335.8
0^s_{22}	325.07	325.09	325.04	325.06	325.2
0^s_{23}	315.31	315.32	315.31	315.34	315.36
0^s_{24}	306.25	306.49	306.19	306.30	306.19
0^s_{25}	297.65	297.44	297.59	297.53	297.71
0^s_{26}	289.81	289.68	289.62	289.68	289.69
0^s_{27}	281.95	282.03	282.07	282.09	282.17
0^s_{28}	274.91	274.80	274.79	274.98	275.1
0^s_{29}	268.10	268.02	268.20	268.31	268.46
0^s_{30}	262.04	262.06	261.82	261.86	262.12
0^s_{31}	256.21	256.03	256.00	256.00	256.08
0^s_{32}	250.25	250.15	250.14	250.09	250.31
0^s_{33}	244.78	244.80	244.58	244.68	244.86
0^s_{34}	239.49	239.39	239.60	239.52	239.58
0^s_{35}	234.64	234.41	234.55	234.36	234.58
0^s_{36}	229.40	229.21	229.40	229.38	229.78
0^s_{37}	225.19	225.16	225.02	225.12	225.12
0^s_{38}	220.54	220.37	220.48	220.49	220.7
0^s_{39}	216.58	216.45	216.58	216.60	216.45
0^s_{40}	212.48	212.40	212.48	212.48	212.31
0^s_{41}	208.63	208.61	208.56	208.67	208.33
0^s_{42}	204.44	204.37	204.37	204.33	204.54
0^s_{43}	200.66	200.82	200.79	200.72	200.84
0^s_{44}	197.30	197.30	197.37	197.28	197.28
0^s_{45}	193.93	193.86	193.86	193.94	193.84
0^s_{46}	190.68	190.62	190.62	190.67	190.51
0^s_{47}	187.20	187.25	187.37	187.24	187.3
0^s_{48}	184.23	184.28	184.28	184.26	184.2
0^s_{49}	181.21	181.21	181.15	181.26	181.16
0^s_{50}	178.31	178.31	178.31	178.28	178.25

注:表内“观测 1”为 VS 观测的均值,“观测 2”为 DSQ 观测的均值,“观测 3”为 SSY 观测的均值,“观测 4”为 TJ-2 观测值,“理论值”为 PREM 模型理论值

测值在 ${}_0S_2 \sim {}_0S_{50}$ 振型与理论值的相对偏差(其中 VS、DSQ 未检测到 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 和 ${}_0S_4$ 振型,该振型的相对偏差数据为空)。VS 型垂直摆倾斜仪观测数据检测的振型与理论值相对偏差均小于 0.83% ,其相对偏差较大的振型是 ${}_0S_{31}$ 、 ${}_0S_{35}$;DSQ 型水管倾斜仪观测数据检测的振型与理论值相对偏差均小于 1.2% ,其相对偏差较大的振型是 ${}_0S_{29}$ 、 ${}_0S_{36}$;SSY 型伸缩仪观测数据检测的振型与理论值相对偏差均小于 0.89% ,其相对偏差较大的振型是 ${}_0S_{37}$;TJ-2 型体应变仪观测数据检测的振型与理论值相对偏差均小于 0.54% 。湖州台 4 套形变观测仪记录资料检测到的地球自由振荡振型与 PREM 模型理论值偏差较大的振型集中在 ${}_0S_{29} \sim {}_0S_{37}$ 。

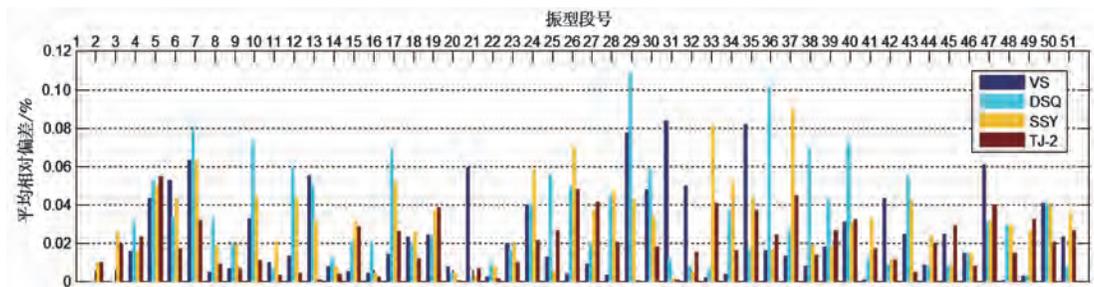


图 6 湖州台形变观测数据检测结果和 PREM 模型理论值相对偏差

将地倾斜观测仪检测到的地球自由振荡振型与理论值相对偏差对比分析后发现,DSQ 型水管倾斜仪高于 VS 型垂直摆倾斜仪。从地应变观测仪检测到的地球自由振荡振型与理论值相对偏差对比分析发现,SSY 型伸缩仪高于 TJ-2 型体应变仪。这是由于两者的工作环境、工作条件不同所决定的,一个是数十米的大跨度,一个是数十毫米的小跨度。它们获得的信号变幅相差几个量级,且地壳应变仪检测到的地球自由振荡振型与理论值相对偏差小于地壳倾斜观测仪检测到的。其中 SSY、TJ-2 这两套应变仪能清晰地检测到与地球内部的深部结构有密切关系的低阶振型: ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 和 ${}_0S_4$ 。而 VS、DSQ 这两套倾斜仪未检测到这几个振型,是由于正常运行时的观测背景噪声在该频段内功率谱密度很高,地球自由振荡波被淹没了。而 ${}_0S_{29}$ 和 ${}_0S_{36}$ 的频率值虽少许偏离,一方面是由于台站可能在振型的节线附近,信噪比较小;另一方面也可能是由于这个高阶基频振型对上地幔的剪切波速较敏感。

4 结论和讨论

(1) 本研究利用同一台站的垂直摆倾斜仪、水管倾斜仪、伸缩仪和体应变仪的观测资料成功地对日本 9.0 级大地震激发的球型自由振荡信息进行了提取,准确检测到了 ${}_0S_3 \sim {}_0S_{50}$ 地球自由振荡振型,其中 SSY、TJ-2 这两套应变仪能清晰检测到与地球内部的深部结构有密切关系的低阶振型(${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 和 ${}_0S_4$)。VS、DSQ 检测到 2 个谐频振型(${}_1S_{3,2}$ 、 ${}_1S_3$),且与 PREM 预测的振荡频率基本符合。这既反映了形变观测仪器运行状态良好,也表明本文的研究路径可行。

(2) 在 125~176s 频段内(即大于 ${}_0S_{51}$ 的频段),我们观测到较丰富的基频振型,同时也注意到一些谱峰尚不能与理论计算值相对应。这一方面与地幔的非均匀性有关,另一方面可能是受倾斜或应变观测仪幅频特征和采样率的限制,不能记录更高频率的缘故。

(3) 湖州台 TJ-2 型体应变仪观测数据对日本 9.0 级大地震激发的球型自由振荡信息检

测结果与理论值的相对偏差最小,这可能与该型号仪器安装在井下,受地表影响小有关(邱泽华等,2004)。

(4)随着对地球自由振荡问题探讨的逐渐深入,除了能为地球结构问题的研究提供约束条件外,还可以利用自由振荡观测资料研究震源过程、鉴别慢地震(Beroza et al,1990)。近来的研究表明,地球的自由振荡是一直存在的,其激发机制可能与大气和海洋的运动有关(Suda et al,1998;Tanimoto et al,1998)。另外,如何用这些观测资料来检验倾斜或应变仪的频响特性,也是值得进一步研究的问题。

致谢: 本项研究得到万永革、任佳等老师的指点,PREM 模型数据由万永革老师提供,匿名审稿人对论文的修改提出了详细而中肯的建议,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- 方燕勋、马武刚,2013,高邮-宝应 M4.9 地震前湖州定点形变异常分析,大地测量与地球动力学,33(增刊 I),76~78。
- 国家地震局科技监测司,1995,地震地形变观测技术,北京:地震出版社。
- 邱泽华、谢富仁、苏恺之等,2004,发展钻孔应变观测的战略构想,国际地震动态,30(1),7~13。
- 邱泽华、马瑾、池顺良等,2007,钻孔差应变仪观测的苏门答腊岛大地震激发的地球环型自由振荡,地球物理学报,50(3),797~805。
- 任佳、陈华静、王松等,2009,汶川大地震激发的地球球型自由振荡,中国地震,25(1),73~80。
- 唐磊、邱泽华、阚宝祥,2007,中国钻孔体应变台网观测到的地球球型振荡,大地测量与地球动力学,27(6),37~44。
- 万永革,2007,数字信号处理的 MATLAB 实现,252~279,北京:科学出版社。
- Bolt B A, Currie R G, Astron J R, 1975, Maximum entropy estimates of earth torsional eigenperiods from 1960 trieste data, Geophys J Roy Astron Soc, 40(1), 107~114.
- Beroza G C, Jordan T H, 1990, Searching for slow and silent earthquakes using free oscillations, J Geophys Res, 95(B3), 2485~2510.
- Benioff H, Press F, Smith S, 1961, Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes, J Geophys Res, 66(2), 605~619.
- Zadro M, Braitenberg C, 1999, Measurements and interpretations of tiltstrain gauges in seismically active areas, Earth Science Reviews, 47, 151~187.
- Suda N, Nawa K, Fukao Y, 1998, Earth's background free oscillations, Science, 279, 2089~2091.
- Tanimoto T, Um J, Nishida K, et al, 1998, Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days, Geophys Res Lett, 25, 1553~1556.

Detecting the free oscillation of the earth by use of observational data at Huzhou Seismostation

*Fang Yanxun*¹⁾ *Biang Genfa*¹⁾ *Hui Ruoyu*²⁾ *Sun Zongqiang*³⁾

1) Huzhou Seismic Station, Earthquake Administration of Zhejiang Province, Huzhou 313000, Zhejiang, China

2) Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China

3) Bureau of Earthquake Prevention and Disaster Reduction of Shuifu County, Shuifu 657800, Yunnan, China

Abstract By using digital observations of the pendulum tilt-meter, water tube tilt-meter, extensometer and volume-strain-meter at Huzhou seismic station and with power spectrum density estimation method, we acquired ${}_0S_5 \sim {}_0S_{50}$ fundamental sphere free oscillations caused by the March 11, 2011 Japan earthquake, and then compared it with PREM model. The relative errors are mostly smaller than 1.2%. Extensometer and volume-strain-meter can clearly detect ${}_0S_2$, ${}_0S_3$ and ${}_0S_4$ which is closely related to the deep structure and earth's interior.

Key words: Pendulum tilt-meter Water tube tilt-meter Extensometer Volume-strain-meter Free oscillation of the earth