

王梅, 季爱东, 徐长朋, 王鹏, 曲同磊, 张明. 2015. 重力仪与宽频带地震仪地震波信号分析及其在异常判定中的应用. 地震学报, 37(3): 473-481. doi: 10.11939/jass.2015.03.010.
Wang M, Ji A D, Xu C P, Wang P, Qu T L, Zhang M. 2015. Analysis of high-frequency signal recorded by gravimeter and broadband seismometer and its application to anomaly identification. *Acta Seismologica Sinica*, 37(3): 473-481. doi: 10.11939/jass.2015.03.010.

重力仪与宽频带地震仪地震波信号分析 及其在异常判定中的应用^{*}

王 梅^{*} 季爱东 徐长朋 王 鹏 曲同磊 张 明

(中国济南 250014 山东省地震局)

摘要 以 2011 年 3 月 11 日日本东北 $M_{\text{S}}9.0$ 地震和 2013 年 11 月 23 日 3 个典型地震(近震、远震、深远震)为例, 对泰安地震台 JCZ-1 甚宽频数字地震仪及 LaCoste-PET 重力仪的地震波信号进行频谱分析。结果表明, 由于两套仪器的设计频率响应范围各有侧重, 其对地震波信号的采集能力也有所差别, 信号频谱分布也有所不同, 即地震仪卓越周期较重力仪偏小, 谱能量向高频方向集中, 而重力仪的频谱分布平坦且较地震仪响应周期大。地震仪和重力仪对长周期地震波信号的响应仍有对应性和可比性, 对 1 s 以上的地震波信号均有响应, 对远震波形记录有较好的一致性。宽频带地震仪和重力仪对地震波响应的特性, 为重力观测中阶变突跳等异常变化性质的判定提供了物理学指标, 对形变观测中可能出现的地震前兆异常的认识及判定具有重要意义。

关键词 重力仪 宽频带地震仪 地震波 频谱分析 异常判定

doi:10.11939/jass.2015.03.010 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

Analysis of high-frequency signal recorded by gravimeter and broadband seismometer and its application to anomaly identification

Wang Mei^{*} Ji Aidong Xu Changpeng Wang Peng Qu Tonglei Zhang Ming

(Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: Taking the Tohoku, Japan, $M_{\text{S}}9.0$ earthquake on March 11, 2011, and three typical earthquakes (near earthquake, teleseism, distant deep-focus earthquake) on 23 November 2013, for examples, the coseismic responses of JCZ-1 broadband digital seismometer and LaCoste-PET gravimeter were analyzed by means of frequency spectrum. Since the response range of design frequency for the two types of instruments are different, their signal acquisition capabilities and the signal spectral distribution are different. The predominant periods of seismometer are smaller than that of gravimeter. However, they still

* 基金项目 国家科技支撑计划项目(2012BAK19B04-01)和山东省地震局重点科研基金项目(JJ1201)联合资助.

收稿日期 2014-07-14 收到初稿, 2015-01-03 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: wm@eqsd.gov.cn

show well corresponding and comparability in response to the high-frequency crustal deformation signals. They response synchronously to those high-frequency seismic waves with period more than 1 s, and they have good consistency for teleseism wave recording. The characteristics of synchronous response to high-frequency crustal deformation signals recorded by gravimeter and broadband seismometer provide physics index for those high-frequency anomalies occurred in gravity observation, which is significant to identification of earthquake precursors probably appeared in deformation observation.

Key words: gravimeter; broadband seismometer; seismic wave; frequency spectrum analysis; anomaly identification

引言

重力固体潮连续观测可以记录与潮汐变化有关的地壳运动，可以精确观测地球系统各圈层物质迁移引起的重力变化效应，是研究固体地球内部构造和运动特征的重要物理量之一。地震孕育也会引起地球一系列物理化学变化过程，因此许多研究人员希望通过分析叠加在重力固体潮曲线中的非潮汐变化，提取与地震有关的地球物理信息。就目前的认识而言，固体潮畸变（包括阶变、突跳等）在震情判定中往往倾向于作为一种短临地震异常信息，用于地震形势预测的综合判定中。长期观测实践表明，重力固体潮曲线上往往叠加有大量突跳、阶变等异常变化，但其后并无地震与之对应。因此厘清这些现象是形变异常还是仪器工作状态不正常所致尤为重要。

由于同一地震事件在地球上同一点引起的地面运动是唯一的，地震仪和重力仪均能检测到反映地震破裂及传播这一物理过程的地震波。地震仪直接记录地面运动的位移、速度或加速度，重力仪记录的也是地面运动的加速度，与地震仪无差别，只是两套仪器的幅频特性略有不同。重力仪信号与宽频带地震仪信号在频率上相互重叠，可以覆盖从地震波到固体潮的宽广频域，二者在频域上自然衔接和延拓。许多研究表明，地震仪和重力仪可以同时记录到台风等强对流天气等引起的高频波动信号，且二者的观测结果能够相互佐证（郝晓光等，2008；胡小刚，郝晓光，2009；王梅等，2009；胡小刚等，2010；郝晓光，胡小刚，2011；蒋骏等，2012；张雁滨等，2013）。而重力观测中出现的阶变、突跳，一般是在几秒之内发生的、明显偏离固体潮轨迹的突出变化，是重力观测中的一种异常变化。若这类变化源于地球物理场，由地壳形变过程引起，那么它在地震观测中又会如何表现？本文主要针对 2011 年 3 月 11 日日本东北 $M_{\text{S}}9.0$ 地震和 2013 年 11 月 23 日发生的 3 个特征地震（近震、远震、深远震），利用泰安地震台的 JCZ-1 甚宽频数字地震仪和重力仪记录的地震波信号，对重力仪频响特征进行研究，进而从物理学角度对重力观测中的一些异常现象进行评价，并对这些变化的异常性质进行分析判断。

1 台站及仪器概况

泰安台位于泰山南麓，台基为太古代花岗片麻岩，结晶基底，岩体完整致密均匀，测量信噪比高。仪器洞室安装有 LaCoste-PET 重力仪和 JCZ-1 甚宽频带数字地震仪。

LaCoste-PET 重力仪可以精确地测量出地球重力固体潮的相对微小变化，分辨率为

$0.01 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 精度为 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 数据采样率可达 1 Hz. 可记录到固体潮, 也可以记录到地震波(王林松等, 2012)、地球自由振荡(聂仁奇等, 2012)以及强对流天气引起的高频扰动(信号周期为 1—10 s)(王梅等, 2009, 2014).

JCZ-1 甚宽频带数字地震仪的频带为 0—20 Hz, 在 360—0.05 s 频带内采用速度平坦型设计, 采样率为 100 Hz, 动态范围为 140 dB, 覆盖了从短周期地震波至固体潮汐的宽广频带范围(蔡亚先等, 1995).

泰安台 JCZ-1 甚宽频地震仪使用 GPS 校时, 重力仪采用原子钟计时, 两套仪器记录到的信号存在一定时差, 而且随着仪器运行时间的推移, 两套系统的时差逐渐加大, 但在较短时段内可以通过数据比对分析得到其具体时差数据. 此外, 一般情况下地震仪观测为“速度”输出, 重力仪为“加速度”输出, 两套仪器由于相频特性的不同而存在一定时差. 因此本文为减少这两套系统误差对数据分析的影响, 采用了一天内的观测数据进行对比分析, 这样一方面可以得到两套系统的具体时差, 另一方面也可最大限度地减小系统误差.

2 重力仪和地震仪的地震波形

地震仪和重力仪对地面运动和由此引起的地球重力场的变化均反应敏感. 地震仪主要设计用于检测诸如体波(P 波、S 波)、面波(瑞雷波、勒夫波)等各种地震波. 模拟记录情况下, 前兆仪器的采样仅到整点值, 而随着数字观测技术的发展和采样率的提高, 重力仪也凸显出其高频部分的信号优势, 即不但能清晰地反映周期在几十秒到几小时的地球自由振荡(聂仁奇等, 2012), 还能完整地记录地震波形(王林松等, 2012), 在高频部分与地震仪有很大范围的重叠, 因此可以与地震仪信号进行对比分析. LaCoste-PET 重力仪在泰安地震台的观测表明, 除周期很小的地方震(P 波周期约为 0.05—0.2 s, S 波周期约为 0.1—0.5 s)之外, 该仪器对周期较长的近震、远震和极远震都有清晰的记录.

2.1 日本东北 $M_s 9.0$ 地震的地震波形

图 1 给出了泰安台重力仪和地震仪对日本东北 $M_s 9.0$ 地震的波形记录. 由于量程限制, 两套仪器在最大量程范围内均存在限幅, 重力仪也在初至波到达 11 分钟后发生靠摆停测. 但在两套仪器的记录曲线上均能明显地辨认出 P 波、PP 波、S 波及勒夫面波, 且两套

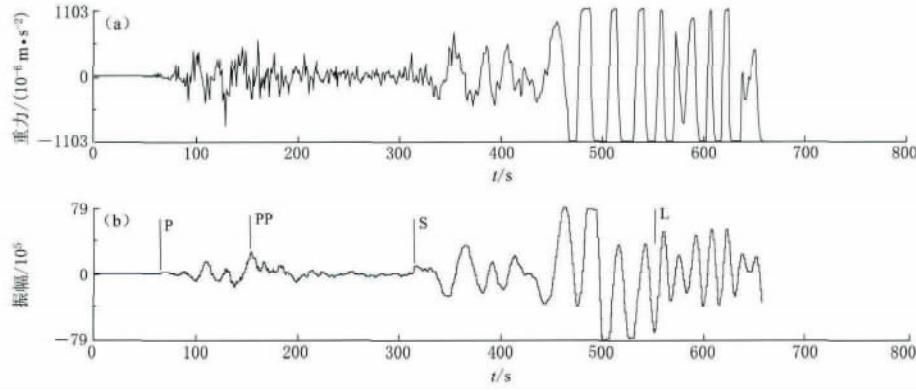


图 1 泰安重力仪(a)和地震仪(b)记录到的 2011 年 3 月 11 日日本东北 $M_s 9.0$ 地震的波形

Fig. 1 Seismic waves of Tohoku, Japan, $M_s 9.0$ earthquake on March 11, 2011 recorded by gravimeter (a) and seismometer (b) at Tai'an seismic station

仪器记录曲线的相关系数高达 0.701(初至波到达 660 s 内), 表明两套仪器波形相似度较高, 即重力仪可以准确地记录高频地面运动信号.

2.2 地震波形的频谱分析

泰安地震台在 2013 年 11 月 23 日记录到 3 个比较有特征的地震(近震、远震、深远震)和一次重力仪无响应的 M_s 3.5 近震(表 1). 这几次地震的地震波, 其频域都在 JCZ-1 甚宽频带地震仪的响应范围(360 s—20 Hz)内, 并且囊括了地震波的基本震相(体波、面波), 为分析重力仪的高频响应水平提供了较完备的基础数据. 本文在进行数据分析时, 首先将地震仪的速度转化为加速度并重采样为秒值数据, 使重力仪和地震仪的物理量统一归化为加速度(采样率为 1 sps)后, 利用快速傅里叶幅值谱和功率谱分析, 对重力仪和宽频带地震仪的地震波信号进行频域解析, 以获取两套仪器地震波响应的频率构成, 从而深入了解重力仪高频信号的响应特征.

表 1 2013 年 11 月 23 日地震目录^{*}

Table 1 Catalogue of earthquakes on 23 November 2013

| 地点 | 发震时刻(北京时间) | | 震中位置 | | M_s | 震中距/km | 震源深度/km |
|--------|------------|---------|----------|-----|-------|--------|---------|
| | 时:分:秒 | 纬度 | 经度 | | | | |
| 吉林省松原市 | 6:04:23 | 44.60°N | 124.10°E | 5.8 | 1100 | 9 | |
| 山东省莱州市 | 13:44:10 | 37.10°N | 120.02°E | 4.6 | 280 | 6 | |
| 山东省莱州市 | 13:24:22 | 37.09°N | 120.01°E | 3.5 | 280 | 7 | |
| 斐济群岛 | 15:48:32 | 17.10°S | 176.60°W | 6.7 | 9100 | 370 | |

* 据山东地震速报信息网

2.2.1 近震: 莱州 M_s 4.6 地震

一般情况下, 地震台记录到的近震震相为通过地幔上层界面的绕射波和反射波, 即主要震相为 Pn、Pg、Sn、Sg, 并且随着距离的增加, 瑞雷波和勒夫波逐渐成为记录中的最大震相(傅淑芳, 刘定诚, 1991). 莱州 M_s 4.6 地震距泰安台约 280 km, 属于近震, 泰安台 JCZ-1 地震仪记录到的主要震相为 Pn、Pg、Sn、Sg, 面波不明显, S 波与 P 波的到时差为 30.06 s, 地震波持续了约 4.5 分钟.

根据傅里叶谱分析测不准原理(郑治真, 1979), 对有限长度的记录, 无法精确测量其频谱值. 由于重力仪为秒采样, 对于长度 $t=30$ s 的信号, 其频率分辨为 $\Delta_\omega=2\pi/t$, 即只能较准确分辨 0.21 Hz 以下(周期 4.78 s 以上)的频率, 这一数值远大于实际地震波周期, 因此不能准确测定这一长度下的重力频谱值. 而地震仪为 100 Hz 采样, 可以满足这一长度下样本量的要求, 因此仅能从地震仪的数据获取近震初始震相的频谱值. 结果显示莱州 M_s 4.6 地震初始震相 30 s 内信号(P 波)频带主要集中在 0.30—1.05 s 的范围内.

此次地震初至波 4 分钟时段信号(P+S 波)的快速傅里叶变换的谱分析结果表明, 重力仪和地震仪都没有很清晰的谱峰, 利用功率谱进行周期探测, 可得到卓越周期的范围. 由功率谱主要周期项的前 8 项得到重力仪的卓越周期范围为 2.64—11.34 s, 地震仪的为 2.75—6.24 s, 详见表 2.

此外, 莱州 M_s 4.6 地震之前约 20 分钟, 莱州还发生了一次 M_s 3.5 地震, 这次地震泰安台仅地震仪有地震波响应(振动持续约 1 分钟), 频谱分析结果显示地震仪的卓越周期范围为 0.20—0.58 s, 重力仪则没有记录到该地震.

莱州 $M_S 4.6$ 地震重力仪与地震仪的同震波初至波到时差为 13 s, 重力仪较地震仪滞后。

2.2.2 远震: 吉林松原 $M_S 5.8$ 地震

地震台记录到的远震震相通常主要是地幔折射波和面波, 一般具有振动持续时间长、震相种类多、面波震相突出等特点, 而且波的周期较长, 纵波周期约 1—10 s, 横波周期约 3—20 s, 面波周期约 8—60 s(傅淑芳, 刘定诚, 1991)。吉林松原 $M_S 5.8$ 地震距泰安台约 1100 km, 属于远震信号。泰安台 JCZ-1 地震仪记录到的主要震相为 P、PP、S、SS, 勒夫面波表现明显, S 波与 P 波的到时差为 100.85 s, 地震波持续了约 30 分钟。对松原 $M_S 5.8$ 地震初至波 100 s 内(P+PP 波)信号谱的分析结果显示, 重力仪和地震仪都未显示出很突出的谱峰, 功率谱周期探测得到的重力仪卓越周期范围为 2.42—7.11 s, 地震仪为 2.29—8.53 s。对体波波群后出现的面波 4 分钟内信号进行谱分析, 结果显示重力仪也没有明显的谱峰, 信号周期在 2.15—36.57 s 范围内, 地震仪的信号周期则集中在 10 s 以内, 为 3.41—9.85 s, 周期明显变大, 具体如表 3 所示。

此次地震重力仪与地震仪的同震波初至波到时差也是 13 s, 重力仪较地震仪滞后。

表 3 泰安台重力仪及地震仪功率谱峰值序列(松原 $M_S 5.8$ 地震)

Table 3 Sequences of power spectrum peak value of gravimeter and seismometer at Tai'an seismic station ($M_S 5.8$ earthquake)

| 序号 | 重力仪 | | 地震仪 | |
|----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 地震 P 波初至 9 分钟 | 地震 S 波初至 4 分钟 | 地震 P 波初至 9 分钟 | 地震 S 波初至 4 分钟 |
| 1 | 7.11 | 7.76 | 8.53 | 7.76 |
| 2 | 2.51 | 23.27 | 2.67 | 8.53 |
| 3 | 5.82 | 19.69 | 2.29 | 5.82 |
| 4 | 2.61 | 3.01 | 3.46 | 9.85 |
| 5 | 4.27 | 36.57 | 3.28 | 6.92 |
| 6 | 2.42 | 2.15 | 5.33 | 6.40 |
| 7 | 2.84 | 5.95 | 4.41 | 5.30 |
| 8 | 4.92 | 4.06 | 4.13 | 3.41 |

2.2.4 深远震: 斐济群岛 $M_S 6.7$ 地震

斐济群岛 $M_S 6.7$ 地震, 距泰安台约 9100 km, 为深远震, 震相比较复杂, 泰安台 JCZ-1 地震仪记录到的主要震相有 P、pP、sP、PP、S、SS 波等, 但由于其震源深度为 370 km, 属深远震, 泰安台记录曲线上没有面波出现。S 波与 P 波的到时差为 586.6 s(9 分 46.6 秒), 地震波持续超过 1 小时。对此次地震初至波 9 分钟内信号的谱分析结果显示, 重力仪没有显示很突出的谱峰, 地震仪则比较集中; 功率谱周期探测得到重力仪的卓越周期范围为

表 2 泰安台重力仪及地震仪功率谱峰值序列(莱州 $M_S 4.6$)

Table 2 Sequences of power spectrum peak value of gravimeter and seismometer at Tai'an seismic station (Laizhou $M_S 4.6$ earthquake)

| 序号 | 重力仪 | | 地震仪 | |
|----|------------|------------|------------|--|
| | 地震波初至 4 分钟 | 地震波初至 4 分钟 | 地震波初至 30 s | |
| 1 | 4.57 | 4.41 | 1.05 | |
| 2 | 5.57 | 2.75 | 0.30 | |
| 3 | 3.16 | 4.66 | 0.93 | |
| 4 | 11.34 | 6.24 | 0.34 | |
| 5 | 9.85 | 4.27 | 0.33 | |
| 6 | 2.91 | 3.28 | 0.32 | |
| 7 | 3.46 | 5.45 | 0.34 | |
| 8 | 2.64 | 5.12 | 0.40 | |

37.93—78.77 s, 地震仪的为 4.05—11.91 s. 对 S 波出现后 4 分钟内信号频谱的分析结果表明, 重力仪信号周期仍为 37.93—78.77 s, 地震仪的为 6.65—21.79 s, 卓越周期也明显变大(表 4).

斐济群岛 $M_s 6.7$ 地震的同震波初至到时差重力仪仍滞后地震仪 13 s. 因此通过同一天 3 个地震的对比, 可以确认重力仪与地震仪的时钟差约为 13 s.

表 4 泰安台重力仪及地震仪功率谱峰值序列(斐济群岛 $M_s 6.7$ 地震)

Table 4 Sequences of power spectrum peak value of gravimeter and seismometer at Tai'an seismic station (Fiji Islands $M_s 6.7$ earthquake)

| 序号 | 重力仪 | | 地震仪 | |
|----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 地震 P 波初至 9 分钟 | 地震 S 波初至 4 分钟 | 地震 P 波初至 9 分钟 | 地震 S 波初至 4 分钟 |
| 1 | 78.77 | 78.77 | 9.48 | 21.79 |
| 2 | 68.27 | 68.67 | 5.33 | 12.96 |
| 3 | 60.24 | 60.24 | 5.20 | 20.48 |
| 4 | 53.89 | 53.89 | 8.68 | 7.82 |
| 5 | 48.76 | 48.76 | 4.05 | 5.52 |
| 6 | 44.52 | 44.52 | 11.91 | 6.65 |
| 7 | 40.96 | 40.96 | 7.06 | 8.00 |
| 8 | 37.93 | 37.93 | 5.92 | 12.05 |

上述 3 个典型地震重力仪和地震仪的频谱分析结果显示, 对于近震、远震、深远震, 地震仪的卓越周期范围由近震的 0.30—6.24 s、远震的 2.29—8.53 s (P 波)、3.41—9.85 s (S+P 波)逐渐增加至远震的 4.05—11.91 s (P 波)、6.65—21.79 s (S+P 波), 而重力仪的卓越周期范围则由近震的 2.64—11.34 s、远震的 2.42—7.11 s (P 波)、2.15—36.57 s (S+P 波)逐渐增加至远震的 37.93—78.77 s (P 波和 S+P 波).

由于重力仪为秒采样, 故能检测出频率的上限, 即奈奎斯特频率为 $f_{N/2} = 1/2\Delta t = 0.5$ Hz (2 s), 但根据傅里叶谱分析原理, 从重力仪信号中不能检测出周期小于 2 s 的高频分量信号. 对比分析两套仪器对地震波的响应时间以及频谱结构可知, 对于周期很小的地方震及震级较小的近震, 其地震波周期一般小于 1 s, 重力仪观测记录不到地震波; 而对于信号周期在 1 s 以上的振动, 两套仪器均有响应, 只是由于仪器所设计的频带响应不同, 宽频带地震仪较重力仪能够更好地响应高频信号, 表现为: 对同一地震, 两套仪器都有记录, 但地震仪的卓越周期较重力仪的短; 从信号波谱能量分布情况(图 2)看, 地震仪信号能量比较集中, 而重力仪的波谱总体比较平坦, 在 2 s—0 Hz 范围内基本平均分布.

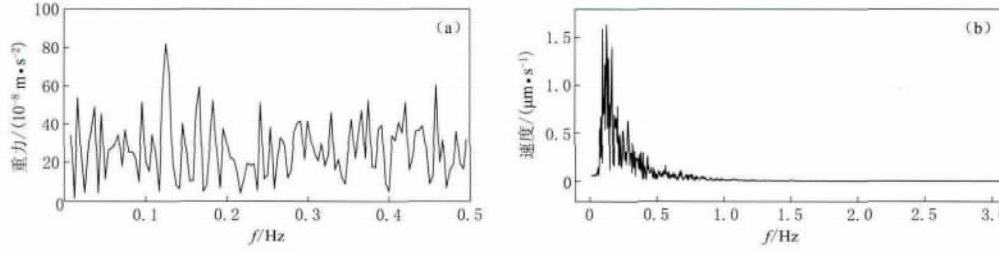


图 2 典型频谱曲线

(a) 重力仪; (b) 地震仪

Fig. 2 Curves of typical spectrum of the seismic waves recorded by gravimeter (a) and seismometer (b)

此外,根据相关性分析,泰安台重力仪和地震仪记录到的日本东北 $M_s 9.0$ 地震的地震波在长达 660 s 的时段内,相关系数高达 0.71,说明两套仪器对某些强远震的响应有很好的同步性。

上述观测结果表明,重力仪不但能记录低频段形变过程,如固体潮等,还能记录高频率(周期 1 s 以上)的地形变信号,包括地震波、强对流扰动等,地震仪和重力仪对地壳形变信号的响应有对应性和可比性。虽然两套仪器信号能量集中的部分有所偏差(地震仪信号周期较小),但从初始响应水平分析,对于周期在 1 s 以上的振动信号,两套仪器均可同步响应。重力仪和地震仪对高频信号同步响应的这一特性可以为重力仪观测中高频异常性质的判定提供物理指标,对重力仪工作状态分析及地震异常认识具有重要意义。

3 重力仪高频异常现象

泰安重力仪固体潮观测背景上经常出现短时间的台阶畸变(图 3),这些变化一般可持续几秒至 2 分钟,表现为单调下降(或上升),其后固体潮仍平稳地按正常固体潮轨迹发展,幅度在几到几十微伽。

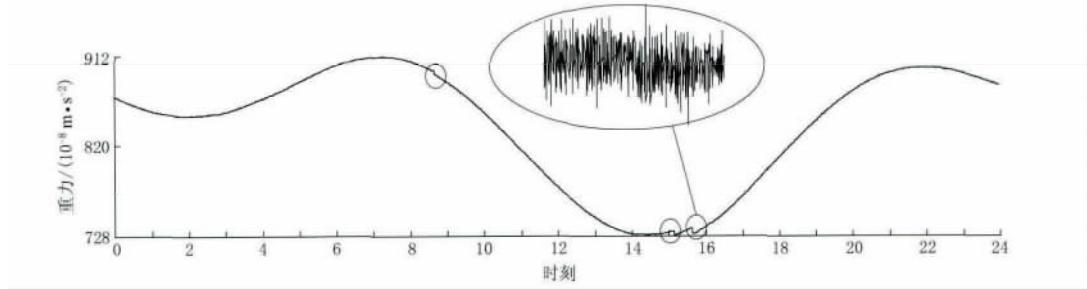


图 3 泰安重力仪 2014 年 5 月 3 日记录到的重力台阶突跳畸变

Fig. 3 Jump distortions recorded by gravimeter at Tai'an seismic station on 3 May 2014

由于重力仪记录的这类阶变、突跳变化持续时间短促,基于上述对重力仪高频信号响应能力的分析,认为对于 1 s 以上的地面运动信号,地震仪与重力仪应有同步响应。但对比泰安台宽频带地震仪观测,发现泰安台重力仪历次记录到阶变突跳现象时,地震仪却没有同步响应。故根据实际观测情况分析认为,重力观测中出现的阶变突跳不是地壳运动的响应过程,而是由于可能存在使仪器不稳定的因素所致。基于这样的认识,台站观测员用吹风机对重力仪信号线路进行干燥处理并重新连接后,阶变突跳现象基本消除,从而进一步证实观测中出现的阶变突跳现象是仪器运行不正常引起的,而不是“高频地震前兆异常”。

4 讨论与认识

本文通过对泰安地震台 LaCoste-PET 重力仪与 JCZ-1 甚宽频带数字地震仪的地震波数据频谱构成对比分析表明,LaCoste-PET 重力仪不但能反映低频地球物理场的变化情况,而且还能记录高频地壳运动变化,对 1 s 以上的高频地面运动有一定的响应。

除周期很小的地方震(P 波周期约 0.05—0.2 s, S 波周期约 0.1—0.5 s)和震级较小、地震波周期小于 1 s 的近震外,LaCoste-PET 重力仪与 JCZ-1 甚宽频带数字地震仪对地震波的响应几乎同步,对某些远震的波形记录几乎一致,可以在重力仪曲线上清晰地分辨出

各类体波和面波。

由于地震仪与重力仪的通带范围各有侧重, JCZ-1 甚宽频带数字地震仪设计选择在 20 Hz—360 s 频段对速度输入响应平坦, 在 360 s—DC 频段对加速度输入响应平坦; 而关于重力固体潮观测仪器的传递函数(蒋骏等, 2010)的研究表明, 其频带设计主旨对低频信号响应平坦。观测结果也表现为地震仪的谱能量向高频方向集中, 而重力仪的频谱分布平坦而且较地震仪响应周期长。

传统的地震观测主要服务于地震学, 提供了解地球内部构造和地震活动性的各种地震参数, 而随着形变学科观测仪器性能的提高、信息频域的拓展以及宽频带地震仪的大范围布设, 地震观测也逐渐显示了对形变学科的参考价值, 两个学科正在形成相互渗透、相互促进的发展趋势。宽频带地震仪与重力仪对地壳高频运动同步响应的特性为辨析重力前兆异常提供了物理学判定指标。利用宽频带地震仪观测数据分析重力高频信号响应特征的方法, 还可以应用到其它形变固体潮观测数据的分析中, 如倾斜、应变观测等; 可以修正、完善和提高对地震前兆现象的认识, 是准确认识形变异常性质以及把握震情的有效技术途径。

审稿专家对本文提出了详尽的修改意见和建议, 在此深表谢意!

参 考 文 献

- 蔡亚先, 吕永清, 周云耀, 程骏玲, 邵中明, 王惠群. 1995. JCZ-1 超宽频带地震计[J]. 地壳形变与地震, 15(3): 1—8.
Cai Y X, Lü Y Q, Zhou Y Y, Cheng J L, Shao Z M, Wang H Q. JCZ-1 ultra broadband seismometer[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 15(3): 1—8 (in Chinese).
- 傅淑芳, 刘定诚. 1991. 地震学教程[M]. 北京: 地震出版社: 410—480.
- Fu S F, Liu D C. 1991. *A Course in Seismology*[M]. Beijing: Seismological Press: 410—480 (in Chinese).
- 郝晓光, 胡小刚, 许厚泽, 钟敏, 方剑, 郝兴华, 刘明, 刘根友, 薛怀平. 2008. 汶川大地震前的重力扰动[J]. 大地测量与地球动力学, 28(3): 129—131.
- Hao X G, Hu X G, Hsu H T, Zhong M, Fang J, Hao X H, Liu M, Liu G Y, Xue H P. 2008. Gravity disturbance before Wenchuan $M_{S}8.0$ earthquake[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 28(3): 129—131 (in Chinese).
- 郝晓光, 胡小刚. 2011. “震前扰动”现象: 从模糊走向清晰: 与傅容珊教授商榷[J]. 地球物理学进展, 26(6): 2255—2261.
- Hao X G, Hu X G. 2011. Pre-earthquake-tremor maze, from confusing to gradually crystal: Answer to the comment by Professor Fu Rongshan on “The short-term anomalies detected by broadband seismographs before the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China”[J]. *Progress in Geophysics*, 26(6): 2255—2261 (in Chinese).
- 胡小刚, 郝晓光. 2009. 强台风对汶川大地震和昆仑山大地震“震前扰动”影响的分析[J]. 地球物理学报, 52(5): 1363—1375.
- Hu X G, Hao X G. 2009. An analysis of the influences of typhoon on anomalous tremors before the great Wenchuan and Kunlunshan earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(5): 1363—1375 (in Chinese).
- 胡小刚, 郝晓光, 薛秀秀. 2010. 汶川大地震前非台风扰动现象的研究[J]. 地球物理学报, 53(12): 2875—2886.
- Hu X G, Hao X G, Xue X X. 2010. The analysis of the non-typhoon-induced microseisms before the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(12): 2875—2886 (in Chinese).
- 蒋骏, 陈德璁, 林钢, 张雁滨, 马晓飞, 李畅. 2010. DZW 重力仪和 VS-1 倾斜仪的传递函数与响应特征[J]. 大地测量与地球动力学, 33(3): 151—155.
- Jiang J, Chen D C, Lin G, Zhang Y B, Ma X F, Li C. 2010. Transfer function and responses of DZW gravimeter and VS-1 tiltmeter[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 33(3): 151—155 (in Chinese).

- 蒋骏, 张雁滨, 林钢, 陈德璁, 李畅, 张云鹏, 马晓飞, 万晓辉. 2012. 固体潮观测中的震颤异常波[J]. 地球物理学报, 55(2): 462–471.
- Jiang J, Zhang Y B, Lin G, Chen D C, Li C, Zhang Y P, Ma X F, Wan X H. 2012. The tidal instruments recorded abnormal tremor wave[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(2): 462–471 (in Chinese).
- 聂仁奇, 章传银, 秘金钟. 2012. 超导重力仪观测数据分析[J]. 全球定位系统, 37(1): 35–38.
- Nie R Q, Zhang C Y, Bi J Z. 2012. Analysis of superconducting gravimeter observations[J]. *GNSS World of China*, 37(1): 35–38 (in Chinese).
- 王林松, 陈超, 梁青, 王秋革. 2012. 东日本大地震重力信号同震响应[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 37(1): 35–38.
- Wang L S, Chen C, Liang Q, Wang Q G. 2012. Coseismic response to gravity signals of the great earthquake in east Japan[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 37(1): 35–38 (in Chinese).
- 王梅, 季爱东, 郑建常. 2009. 台风引起的重力扰动现象[J]. 地震学报, 31(6): 641–649.
- Wang M, Ji A D, Zheng J C. 2009. Gravity disturbance caused by typhoon[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 31(6): 641–649 (in Chinese).
- 王梅, 季爱东, 曲同磊, 徐长朋, 王鹏, 佟瑞清. 2014. 泰安地震台重力扰动现象研究[J]. 地震学报, 36(3): 443–451.
- Wang M, Ji A D, Qu T L, Xu C P, Wang P, Tong R Q. 2014. Gravity disturbances of Tai'an seismic station[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 36(3): 443–451 (in Chinese).
- 张雁滨, 蒋骏, 李才媛, 唐焱, 朱健, 徐锐. 2013. 昆仑山强震前的震颤波并非源自慢地震[J]. 地球物理学报, 56(3): 869–877.
- Zhang Y B, Jiang J, Li C Y, Tang Y, Zhu J, Xu R. 2013. The tremor wave before the Kunlun strong earthquake is not slow earthquake event[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(3): 869–877 (in Chinese).
- 郑治真. 1979. 波谱分析基础[M]. 北京: 地震出版社: 207–232.
- Zheng Z Z. 1979. *Basic Course in Spectrum Analysis*[J]. Beijing: Seismological Press: 207–232 .