



振动台导轨不平顺对地震计低频测试结果的影响

马洁美 范晓勇 何闻

Influence of the guide rail irregularity on low-frequency test results of seismometers on shake table

Ma Jiemei, Fan Xiaoyong, He Wen

引用本文:

马洁美, 范晓勇, 何闻. 2023. 振动台导轨不平顺对地震计低频测试结果的影响. 地震学报[J], 45(6): 1111–1117. DOI: 10.11939/jass.20220062

Ma J M, Fan X Y, He W. 2023. Influence of the guide rail irregularity on low-frequency test results of seismometers on shake table. *Acta Seismologica Sinica*[J], 45(6): 1111–1117. DOI: 10.11939/jass.20220062

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220062>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

静水条件下振动对测压水位影响实验

Experiments on response of piezometric level to vibrations under hydrostatic condition
地震学报. 2017, 39(3): 407–419 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.03.010>

BBVS-60型和CMG-3ESPC型地震计性能及记录数据相干性分析

Performance and data coherence analyses of BBVS-60 and CMG-3ESPC seismometers
地震学报. 2020, 42(1): 91–100 <https://doi.org/10.11939/jass.20190074>

截止频率的取值对地震动空间相干函数统计结果的影响

The influence of cut-off frequency on the statistical results of spatial coherency function of seismic ground motion
地震学报. 2018, 40(5): 664–672 <https://doi.org/10.11939/jass.20170185>

阿留申群岛地震台站方位角变化及其对横波分裂的影响

Orientation variations of the seismometers in the Aleutian Islands and their impacts on shear wave splitting analyses
地震学报. 2020, 42(2): 187–195 <https://doi.org/10.11939/jass.20190081>

2011年日本 M_W 9.0地震引发的海啸对地震背景噪声的影响

Impact of the tsunami excited by the 2011 M_W 9.0 Japan earthquake on seismic ambient noises
地震学报. 2021, 43(3): 321–337 <https://doi.org/10.11939/jass.20200176>

日本 M_W 9.1地震对区域热辐射背景场影响的时频分析

Time-frequency analysis of the influence of Japan M_W 9.1 earthquake on regional thermal radiation background field
地震学报. 2018, 40(2): 205–214 <https://doi.org/10.11939/jass.20170081>

马洁美, 范晓勇, 何闻. 2023. 振动台导轨不平顺对地震计低频测试结果的影响. 地震学报, 45(6): 1111-1117. doi: 10.11939/jass.20220062.

Ma J M, Fan X Y, He W. 2023. Influence of the guide rail irregularity on low-frequency test results of seismometers on shake table. *Acta Seismologica Sinica*, 45(6): 1111-1117. doi: 10.11939/jass.20220062.

振动台导轨不平顺对地震计低频测试结果的影响^{*}

马洁美^{1),†} 范晓勇¹⁾ 何 闻²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国杭州 310027 浙江大学机械工程学院

摘要 对振动台在大行程移动过程中导轨不平顺引起的倾斜效应进行了理论分析, 选择 0.1 Hz 及以下频点开展振动台导轨不平顺引起的台面倾斜对测试结果影响的定量化分析。结果表明, 振动台面在移动过程中的不确定倾斜对地震计水平分量灵敏度的影响大于对垂直分量灵敏度的影响。采用高精度水平仪获取水平振动台在不同行程下的运动轨迹起伏变化, 并基于倾斜效应的影响机制, 用 Labview 语言实现补偿系统, 在地震计的振动测试中对测试结果进行动态补偿。测试结果表明, 经过动态补偿, 导轨不平顺不再对灵敏度校准结果存在明显制约, 可大幅提高地震计的低频测试精度。

关键词 振动台 导轨不平顺 大行程 动态补偿

doi: 10.11939/jass.20220062 中图分类号: P315.62 文献标识码: A

Influence of the guide rail irregularity on low-frequency test results of seismometers on shake table

Ma Jiemei^{1),†} Fan Xiaoyong¹⁾ He Wen²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: This paper theoretically analyzed the influence of the guide rail irregularity on calibration of very-broadband seismometers under long stroke motions on shake table, and then quantitatively analyzed the oblique effect on calibration of seismometers on shake table due to the guide rail irregularity at 0.1 Hz and lower frequencies. The results indicate that oblique effect has a larger impact on sensitivity of the horizontal component than that of the vertical component. Higher-precision level meter was used to get the motion trace of the horizontal shake table under long stroke. Based on the influence mechanism of the guide rail irregularity and the data obtained from the level meter, a dynamic compensation system was designed with

* 基金项目 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB20B19)和国家重点研发计划(2019YFC1509503)联合资助。

收稿日期 2022-04-21 收到初稿, 2022-08-11 决定采用修改稿。

作者简介 马洁美, 硕士, 高级工程师, 主要从事测震设备检测技术研究, e-mail: majm@cea-igp.ac.cn



the software language of Labview. Test results suggest that the calibration accuracy is significantly improved at lower frequencies. Therefore, the dynamic compensating method is effective for very-broadband seismometer testing on shake table.

Key words: shake table; guide rail irregularity; long stroke; dynamic compensation

引言

地震观测是地震预测研究的基础，而地震计是地震观测的关键设备。随着数字地震观测技术的不断进步，大动态、宽频带地震观测技术已经成为主流(薛兵等, 2013)。当前地震观测正在向标准化、定量化方向发展，准确获取地震计的性能参数对提高地震观测资料的精度具有十分重要的意义。在测震台网的运行管理中，地震计灵敏度、传递函数的可靠准确对观测数据的质量影响较大，因此也颇受重视。

振动台是获取地震计灵敏度和传递函数的重要测试设备。振动台测试采用运动激励方式，测试信号直接作用在地震计上，摆体的惯性使得地震计框架与摆体产生相对运动，这种激励方式与地震计的实际观测相一致，由此得到的地震计传递函数更具有实际意义。振动测试中，在位移相同的情况下，振动加速度与振动频率的平方成正比。例如：当振动行程为 20 mm、振动频率为 0.01 Hz 时，其振动加速度峰值仅为 0.04 mm/s²。因此，为了提高测试信噪比，通常采用加大行程的方法，例如中国地震局地球物理研究所、工程力学研究所将水平振动台行程加大到 150 mm(匙庆磊, 2014)，而中国计量科学院建造了振动行程达 1 m 的水平振动台(杨争雄, 2016)。然而，振动台是一个非线性机电耦合的复杂惯性系统(杨争雄, 2016)。一般情况下，受目前工艺水平的限制，在长行程范围内，其导轨不可能达到理想状态(王春宇, 2013)，特别是对导轨水平运动而言，不引入倾斜运动，工艺尤为复杂(Havskov, Alguacil, 2007)。因此，在低频-超低频段增大行程可以提高信噪比，但势必会加大非线性因素(于梅, 2007)。大量振动台试验也表明大多数振动台的运动并非纯平动，而是有点倾斜，倾斜引起的角加速度、重力可能会耦合到地震信号中(Wielandt, 2006)。对于地震计的长周期水平分量记录，倾斜会产生很严重的后果(Barstow *et al.*, 2005; Forbriger, 2011)，这是因为误差随信号周期的平方而增大，每 mm 的线性运动产生 10 μrad 的倾斜效应是正常的，对于 30 s 的周期来说，这一倾斜引起的非线性电压输出将是线性运动产生电压输出的两倍(Bormann, 2002)。因此，如何在振动台上进行地震计的低频测试，是一个非常值得研究的问题。鉴于此，本文拟对振动台在大行程移动过程中导轨不平顺所产生的倾斜效应进行理论分析，继而对宽频带地震计 CMG-3ESPC 和甚宽频带地震计 CMG-3T 开展定量化的试验研究，并根据倾斜效应的影响机制给出地震计灵敏度的补偿方法，以提高宽频带地震计的低频测试精度。

1 导轨不平顺产生倾斜效应的理论分析

假设振动台台面在控制系统的驱动下在水平方向作无失真的正弦振动，而在导轨不平顺的影响下，台面将同时作俯仰运动(王春宇, 2013)。

当台面运动到某处，假设该处的位移为 x ，旋转切向加速度 a_t 和向心加速度 a_c 分别为

$$\begin{cases} a_t = r\alpha_r, \\ a_c = \frac{1}{2}r\omega_r^2, \end{cases} \quad (1)$$

式中: r 为位移 x 处导轨的曲率圆半径; ω_r 为旋转角速度, $\omega_r = d\theta/dt$; α_r 表示旋转角加速度, $\alpha_r = d^2\theta/dt^2$.

精密导轨的起伏变化一般比较平缓, 旋转角速度 ω_r 和旋转角加速度 α_r 很小, 因此旋转切向加速度 a_t 和向心加速度 a_c 也较小, 故其产生的速度分量在下面的分析中可以忽略(王春宇, 2013; 杨争雄, 2016).

假设被测地震计的灵敏轴方向平行于振动台台面, 则地震计受到加速度的作用如图 1 所示. 此时, 在振动台测试中, 作用于地震计灵敏轴方向的速度主要有振动台主振动速度和重力加速度引起的速度在地震计灵敏轴方向的分量.

1) 振动台主振动速度 v . 设振动台振动位移表达式为

$$x = A \cos(2\pi ft + \phi), \quad (2)$$

式中, f 和 ϕ 分别为振动频率和初始相位. 振动台主振动速度表达式为

$$v = -2\pi f A \sin(2\pi ft + \phi). \quad (3)$$

2) 重力加速度引起的速度在地震计灵敏轴方向的分量. 设 t 时刻振动平台运动到 x 处, 导轨面与水平面的夹角为 θ , 重力加速度 g 在地震计灵敏轴方向上的分量为

$$a_g(t) = g \sin[\theta(t)]. \quad (4)$$

考虑到地震计是速度传感器, 对加速度积分得到地震计灵敏轴方向上的速度分量

$$v_g = \int a_g(t) dt. \quad (5)$$

式(5)中的积分采用数值积分方法实现, 则作用于地震计灵敏轴方向的实际速度为

$$v_r = v + v_g. \quad (6)$$

因此, 被测地震计的实际灵敏度 S_r 为

$$S_r = \frac{U}{v_r}, \quad (7)$$

式中 U 为 t 时刻地震计在该频率的输出电压值. 被测地震计的测量灵敏度 S_t 为

$$S_t = \frac{U}{v}. \quad (8)$$

低频测试时振动台输出的速度值 v 较小, 根据式(6)可知 v_r 与 v 之间存在较大的偏差, 因此会出现灵敏度的测得值与理论值有较大差别; 另一方面, 由于同一频率不同行程时振动台台面的俯仰轨迹不同, 相应的 v_g 也不同, 因而也会出现同一频率不同行程测出的地震计灵敏度有较大偏差的现象.

当振动台在垂直方向作正弦振动时, 相对主振动速度而言, 重力加速度引起的速度分量

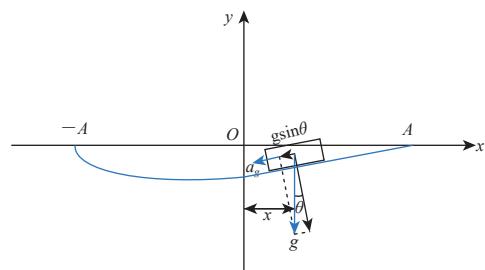


图 1 导轨不平顺情况下地震计受到的重力加速度作用

g 为重力加速度, a_g 为重力加速度在地震计灵敏轴方向产生的分量, x 为振动台的位移, A 为振动台位移的最大幅值, θ 为俯仰角

Fig. 1 Gravity acceleration on the seismometer resulted by guide rail irregularity

g is the acceleration of gravity, a_g is the acceleration on sensitivity axis of the seismometer due to gravity, x is displacement of the shake table, A is maximum displacement of the shake table, θ is the pitch angle

可以忽略,因此可以推断出水平振动台导轨不平顺对地震计低频测试结果的影响要大于垂直振动台对其的影响.

2 导轨不平顺影响的定量化试验

在使用振动台开展地震计测试前,委托中国计量科学研究院对垂直振动台和水平振动台分别进行了校准,结果如表1所示,可以看出振动台的输出特性良好,可满足宽频带地震计的低频振动测试需要.

表 1 振动台校准结果
Table 1 Calibration results of shake tables

设备名称	加速度校准结果不确定度			频带/Hz	溯源方式
	16 Hz	0.1—100 Hz	0.01—0.1 Hz		
低频振动标准装置(水平/垂直)	0.8%	1.5%	3%	0.008 33—160	校准

*委托中国计量科学研究院校准.

表 2 0.1 和 0.01 Hz 时地震计 CMG-3T 在垂直振动台不同行程时的灵敏度

Table 2 Sensitivities of seismometer CMG-3T on vertical shake table at different positions at 0.1 and 0.01 Hz

f/Hz	行程/mm	灵敏度/(V·s·m ⁻¹)
0.1	2.00	987.96
	4.05	987.97
	5.99	988.04
	7.99	988.08
	11.99	988.75
0.01	14.49	837.24
	19.35	837.27
	25.92	837.60
	35.39	837.96
	44.45	838.13
	57.86	837.17

范围内波动.

试验过程中,当振动频率降至 0.01 Hz 时,地震计灵敏度随行程的变化如表2所示. 可见:振动台行程从 14.49 mm 逐渐增至 57.86 mm 时,在 6 个不同的行程作用下,地震计的灵敏度测试结果基本保持恒定. 这表明随着行程的增加,垂直振动台在大行程移动过程中导轨不平顺产生的不确定倾斜对地震计灵敏度的影响非常小.

表 3 为测试频点为 0.01 Hz 时,甚宽频带地震计 CMG-3T 在水平振动台上,灵敏度随行程变化,此时不同行程下地震计 CMG-3T 的输出速度失真度和

以甚宽频带地震计 CMG-3T (T3T77) 为试验对象,定量化分析振动台在大行程移动过程中导轨不平顺所引起的台面倾斜效应对测试结果的影响. 分别在垂直振动台和水平振动台选择 0.1 Hz 及以下频点监控台面输出失真度、地震计输出灵敏度及失真度随振动台行程的增加而产生的变化. 当垂直振动频率为 0.1 Hz 时,地震计 CMG-3T 的灵敏度随行程的变化详见表2. 此时,地震计的速度和台面加速度输出值的失真度如图2 所示. 测试结果表明,台面输出加速度失真度和地震计输出的速度失真度随着行程的增大而不断减小,灵敏度仅在非常小的

表 3 0.01 Hz 时地震计 CMG-3T 在水平振动台测试时灵敏度随行程的变化

Table 3 Sensitivities of seismometer CMG-3T on horizontal shake table at different positions at 0.01 Hz

行程/mm	灵敏度/(V·s·m ⁻¹)	行程/mm	灵敏度/(V·s·m ⁻¹)
10.04	964.17	44.81	1129
20.01	1074	58.47	1093
27.48	1113	73.04	1072

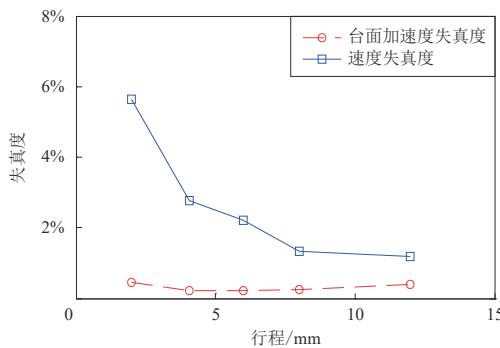


图 2 振动频率为 0.1 Hz 时不同行程下地震计 CMG-3T 输出速度失真度和台面加速度失真度的变化

Fig. 2 Output velocity distortions of seismometer CMG-3T and shake table acceleration distortion at different positions at 0.1 Hz

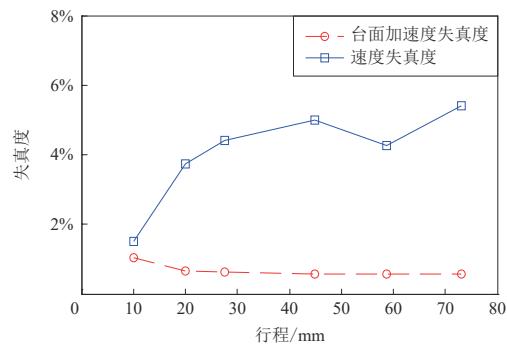


图 3 振动频率为 0.01 Hz 时不同行程下地震计 CMG-3T 输出速度失真度和台面加速度失真度变化

Fig. 3 Velocity distortions of seismometer CMG-3T and shake table acceleration distortion at different positions at 0.01 Hz

台面加速度失真度如图 3 所示。测试结果表明，随着行程增大，台面输出加速度失真度不断减小，地震计输出灵敏度整体呈增大趋势。当行程为 10.04 mm 时，灵敏度为 $964.17 \text{ V}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ ，而行程为 44.81 mm 时，灵敏度为 $1129 \text{ V}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ ，两者相差悬殊，这表明在该测试频率下测试结果的复现性较差，无法给出地震计确切的灵敏度。推测产生这种差异可能是测试过程中振动台导轨的不平顺使得台面在不同行程下的俯仰轨迹不同，重力加速度分量叠加到地震计的灵敏轴方向，造成测试结果的离散性偏大所致。

由上可见，振动台台面在大行程移动过程中，导轨不平顺产生的倾斜效应对地震计水平灵敏度的影响大于对垂直灵敏度的影响，与理论分析结果一致。因此若要提高地震计在水平振动台低频段灵敏度测试结果的准确性，还需要采取补偿措施以减小倾斜效应带来的影响。

3 导轨倾斜效应影响的动态补偿

考虑到从硬件上改变导轨不平顺的可行性空间很小，本文拟由软件对导轨倾斜效应产生的影响进行动态补偿。

首先在导轨的不同位置，依次使用高精度水平仪多次测量其倾斜高度，并取平均值得到最终高度值，以此获取振动台水平台面运动到不同位置的俯仰轨迹，如图 4 所示。水平振动台在不同行程移动中，可由振动台内置的光栅位移传感器的输出信号对图 4 实测的位移与倾斜高度的对应关系进行插值，求得对应的导轨倾角变化。同时将光栅传感器输出信号求微分后得到振动台的主振速度 v ，根据已求出的导轨在不同位置的倾角、由式(4)和式(5)得到的重力加速度在地

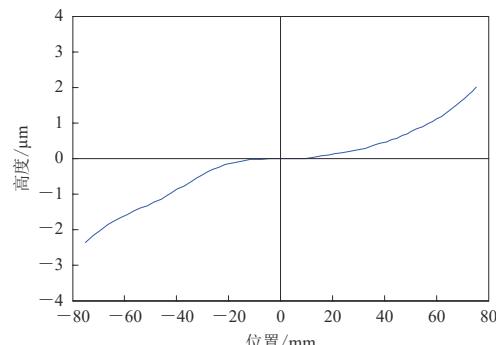


图 4 导轨在不同位置的俯仰轨迹

Fig. 4 Irregularity of guide rail at different positions

震计灵敏轴方向产生的速度分量 v_g , 由式(6)计算得到作用于地震计灵敏轴方向的实际速度值 v_r . 被测地震计在不同行程的电压输出 U 可由数据采集器获取, 根据式(7)和式(8)可分别算出补偿后和补偿前的灵敏度. 以上过程采用 LabView 实现.

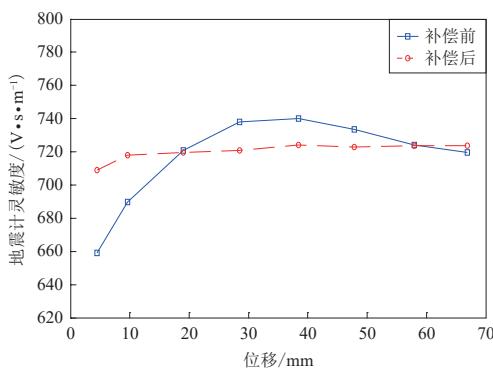


图 5 导轨补偿前后的地震计 CMG-3ESPC 灵敏度变化

Fig. 5 Sensitivity of seismometer CMG-3ESPC before and after compensation for guide rail

以宽频带地震计 CMG-3ESPC 为例, 导轨动态补偿前后的地震计灵敏度测试结果如图 5 所示. 可见: 补偿前, 地震计的灵敏度随行程变化的离散性较大, 最大偏离率达到 12.1%; 动态补偿后, 地震计的灵敏度随行程变化的离散性大大减小, 且当行程在 10—70 mm 变化时, 补偿后的灵敏度具有较高的一致性, 测试值与地震计标称值吻合. 仅仅在行程为 5 mm 时, 补偿后的结果偏小, 考虑受此时的行程制约, 振动台输出的加速度很小, 约为 $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 信噪比很低, 测试结果误差较大. 因此采用动态补偿的测

试系统时, 可选择较大的行程, 以确保振动台输出的信号质量, 获得可信的测试结果.

另以甚宽频带地震计 CMG-3T 为例, 当振动测试频率从 0.1 Hz 逐渐降至 0.01 Hz 时, 补偿前后的灵敏度如表 4 所示. 可见, 随着频率的不断降低, 振动台的行程不断增大, 导轨不平顺对测试结果的影响愈发显著, 补偿前后的灵敏度差异明显, 同时补偿后的灵敏度特性与标称值更为一致.

表 4 水平振动台测试时地震计 CMG-3T 补偿前后的灵敏度

Table 4 Sensitivities of seismometer CMG-3T before and after compensation at different frequencies on horizontal shake table

f/Hz	地震计输出电压值/V	补偿前灵敏度/(V·s·m⁻¹)	补偿后灵敏度/(V·s·m⁻¹)	f/Hz	地震计输出电压值/V	补偿前灵敏度/(V·s·m⁻¹)	补偿后灵敏度/(V·s·m⁻¹)
0.10	8.19	994.87	994.85	0.04	5.24	997.54	994.21
0.08	8.59	995.31	994.51	0.03	3.94	999.73	993.79
0.07	7.52	994.04	993.00	0.02	3.91	992.31	969.63
0.06	7.84	996.36	994.88	0.015	2.87	971.45	932.55
0.05	6.54	996.61	994.47	0.01	1.71	866.41	791.47

4 讨论与结论

地震计是数字化地震观测的关键设备, 其灵敏度和幅频特性等重要性能指标的准确测试需要在振动台上完成. 目前, 为了提高低频振动测试的信噪比, 振动台的行程不断增大. 然而大量的振动台试验显示, 水平振动台在大行程移动中并不是完全的纯平动, 而是有一定的倾斜, 会对地震计的低频振动测试结果产生很大的影响. 本文从理论上分析了倾斜效应的作用机制, 同时开展了定量化的试验研究, 并提出了相应的补偿方法. 该补偿方法可以对宽频带地震计低频段的灵敏度进行动态补偿, 使得导轨不平顺不再明显制约灵敏度测试结果, 有效提高了宽频带地震计的低频测试精度.

本文旨在提出一个有效的方法提高宽频带地震计的低频测试精度,其中很重要的一步是要获取导轨在不同位置的俯仰轨迹。而文中振动测试用到的振动台导轨为金属材质,易随实验室温度、湿度产生形变,随着时间推移会产生不同的俯仰轨迹。因此在进行地震计低频振动测试前需要确认导轨的俯仰轨迹,以免引入新的测试误差。

参 考 文 献

- 匙庆磊. 2014. 低频标准振动台系统和振动校准技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 3-4.
- Chi Q L. 2014. *A Study of Low-Frequency Standard Vibration Table Systems and Vibration Calibration Technology*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 3-4 (in Chinese).
- 王春宇. 2013. 超低频标准振动台相关设计理论及运动控制技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学: 51-65.
- Wang C Y. 2013. *Research on Related Design Theory and Motion Control Technology for Ultralow-Frequency Standard Vibrators*[D]. Hangzhou: Zhejiang University: 51-65 (in Chinese).
- 薛兵, 林湛, 张妍, 朱小毅, 杨桂存. 2013. 宽频带地震计反馈模型分析及应用实例[J]. 地震地磁观测与研究, 34(1/2): 246-253.
- Xue B, Lin Z, Zhang Y, Zhu X Y, Yang G C. 2013. Analysis of the feedback model of the broadband seismometer and an application example[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 34(1/2): 246-253 (in Chinese).
- 杨争雄. 2016. 超低频测振传感器动态测试技术若干问题的研究[D]. 杭州: 浙江大学: 11-12, 34-40.
- Yang Z X. 2016. *Research on Some Problems for Dynamic Measurement Technology of Ultra-Low Frequency Vibration Sensors*[D]. Hangzhou: Zhejiang University: 11-12, 34-40 (in Chinese).
- 于梅. 2007. 低频超低频振动计量技术的研究与展望[J]. 振动与冲击, 26(11): 83-86.
- Yu M. 2007. Research prospects of metrology technology for low-frequency and super low-frequency vibration[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 26(11): 83-86 (in Chinese).
- Barstow N, Cacho S, Collins J, Hayman R, Followill F, Martin E, Passmore P, Wielandt E. 2005. *Transfer Function Measurement, Absolute Sensitivity Measurement, Analysis, and Reporting*[R]. Albuquerque, New Mexico: USGS: 16-19.
- Bormann P. 2002. *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*[M]. Potsdam: GeoForschungsZentrum: 211-212.
- Forbriger T. 2011. *Calibration of Seismic Sensors*[R]. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology: 2-9.
- Havskov J, Alguacil G. 2007. *Instrumentation in Earthquake Seismology*[M]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing: 217-220.
- Wielandt E. 2006. *Seismic Sensors and Their Calibration*[R]. Stuttgart: Stuttgart University: 8-13.