

王余伟, 韩进, 孙伟, 等. 超低频振动实验室设计及应用[J]. 华南地震, 2017, 37(2): 22-28. [WANG Yuwei, HAN Jin, SUN Wei, et al. Design and Application of Ultra-low Frequency Vibration Laboratory[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(2): 22-28.]

## 超低频振动实验室设计及应用

王余伟<sup>1</sup>, 韩进<sup>1</sup>, 孙伟<sup>1</sup>, 何闻<sup>2</sup>

(1. 四川省地震局, 成都 610041; 2. 浙江大学机械工程学院 浙江省先进制造技术重点研究实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 根据超低频振动标准装置的研究现状和应用需求, 研究和建立了四川省地震局振动标准装置, 其频率范围为 0.002~160 Hz、振幅为峰-峰 0.1 m、承载 15 kg、波形失真度优于 1%。介绍了超低频振动实验室设计定位与相关参数选择, 装置的结构组成以及基础设计。最后对装置的实测, 结果表明: 装置能够满足四川省地震局对地震计检定的要求。

**关键词:** 超低频振动台; 地震计; 频率范围; 最大加速度; 失真度

中图分类号: P315.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) 02-0022-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.02.004

## Design and Application of Ultra-low Frequency Vibration Laboratory

WANG Yuwei, HAN Jin, SUN Wei, HE Wen

(1. Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China; 2. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** According to the current research status and application requirements of ultra-low frequency vibration standard devices, a vibration standard device is set up in Sichuan Earthquake Agency, whose frequency range is from 0.002 Hz to 160 Hz, and amplitude of peak to peak is 0.1m, and load is 15 kg, and waveform distortion is less than 1%. The paper analyzed the design proposal and parameter selection for the ultra-low frequency vibration standard laboratory, and introduced in detail the structure of the device and the design of the base. Finally, the test results show that the device could meet the demand of calibrating seismometers in our bureau.

**Keywords:** Ultra-low-frequency; Vibration exciter; Seismometer; Base Distortion

收稿日期: 2016-03-16

基金项目: 水库诱发地震实验室监测中心设备升级集成与实验室基础设施改造; 四川赛思特科技有限责任公司西部大开发投资项目(D2013007)资助

作者简介: 王余伟 (1982-), 男, 工程师, 现从事水库地震台网的建设和设备仪器研发等工作。

E-mail: 13880893949@163.com.

## 0 引言

地震计是我们获取地震数据的关键设备,广泛地应用于大地脉动测量、地震分析、预测研究和工程应用等重要领域,对地球物理、天文物理等基础学科的发展具有重要的意义。随着社会的发展和科技的进步,对地震信号采集、传输和分析处理的要求越来越高,地震计也因此向多功能、宽频带、大动态范围、高精度等方向发展。

地震计是一个复杂的机电系统,里面的机械零部件与控制电路在经过一定的使用时间后,其性能均会发生变化。在使用地震计之前,须对其进行校准。并且,根据国家计量检定规程(JJG134-1987、JJG644-1990),需要定期对传感器进行校准,一般校准周期为一年,以保证地震计的各项性能指标,从而提高数据测量的精度和可靠性。

超低频振动台能产生各种振幅、频率的振动,得到全频带的传递函数,其主要是用于标定垂直分向和水平分向低频标准振动传感器或测振仪的设备,是检测和研究振动传感器各项参数最直接的实验平台,可保证地震观测和工程上使用的地震计或振动传感器量值的准确性。本实验室建造的超低频(0.002 Hz)、振幅为峰峰 0.1m、大负载(15 kg)和低失真(波形失真度<1%)的振动幅值和相位激光绝对法标准装置,可实现对现有大多数伺服加速度计、地震计等超低频振动传感器的校准和检定。

在超低频振动实验室建立前,我们仔细进行了川内已有超低频振动台现状分析、应用需求分析、台基背景噪声分析等前期工作,为超低频振动实验室的建成奠定了良好的基础。

## 1 四川地区已有振动计量站的现状

据我们了解,目前四川地区具有国家计量局授权计量振动一起的单位仅有两家。其一是中国计量研究院成都分院计量站,其二是中国航空工业总公司第十区域计量站四川国防区域计量站6101核准实验室。

第一家属专业台。台址在大邑县鹤鸣镇,台址优良,离成都 140 km 左右。其设备为 80 年代产品,未完全更新,不能保证长期稳定工作。

第二家属企业台,台址在成都市区内,台址一般。但随着城市建设发展,环境干扰已严重影

响其工作性能,特别是垂直分向的标定已不能再进行。也因为设备老化而不能长期稳定工作。其振动台最大负荷为 8 kg,不能满足地震仪整体标定工作需要。

其它部门也存在类似设备,但其精度和测定标准远低于计量要求,仅用于单位内部粗略测定,并不能满足对现在使用量较大的地震计,如宽频带地震计、短周期地震计的标定。而具有地震计标定能力的振动台位于北京,标定一次需要花费大量的时间和费用。

因此,无论从地震观测规范和计量标准的要求,还是从研制新振动传感器的必需,甚至服务于社会相关部门,便于西南地区振动传感器的标定,都提出了建立新的超低频振动实验室的必要性。四川省地震局新建立的超低频振动实验室对提高西南片区振动传感器的测量精度,发展新型振动传感器,进而提高地震数据的精确度,具有重要的理论意义和实际应用价值。

## 2 系统设计与定位

超低频振动台系统作为伺服加速度计、地震计等超低频设备的检测计量装置,台体定位和使用要求决定了它们的设计精度与控制范围。由于其复杂的系统、不菲的造价,并对土建要求极高,必须严密分析与论证其定位及建筑抗震设计规范使用途径,既要充分利用振动台的每一份功能,又要避免造成不必要的功能浪费。

### 2.1 超低频振动台的设计定位及主要参数

针对以下几方面考虑建造的超低频振动台的设计参数。

(1) 先进性。根据国际标准 ISO16063-11 对绝对法校准测振传感器用标准振动台的技术要求及目前测试条件,制定超低频振动台的主要参数指标,包括波形失真度、加速度横向振动比、台面加速度不均匀度等技术参数指标,并使其达到国内外同类产品的最高水平;同时,采用独立的水平和垂直向振动台设计方案,使得系统的技术指标更加稳定、操作更加简便;振动台的振级自动控制技术,实现校准过程的自动化。

(2) 承载能力与台面尺寸的选择:在超低频振动实验室设计应用之前,我们对地震系统内使用的一些主流地震计、加速度计等产品的参数进行了查阅,如北京港震公司、英国 Guralp 公司、

美国 Kinometrics 公司、珠海泰德公司等的产品,最终确定了新建的超低频振动台最大负载为 15 kg,垂直台台面尺寸为  $\Phi 300$  mm,水平台台面尺寸为 350mm×280mm,并在台面上均匀展布不同大小的螺孔,用于固定测量设备使用的夹具。

(3) 驱动方式选择:振动台系统按其激振方式的不同可以分为 3 类:机械式振动台、电液式振动台和电磁式振动台。机械式和电液式振动台最大的不足是其上限工作频率较低、波形失真度较大。电磁式振动台的主要特点是工作频率范围宽、波形失真度小、易于控制等。综合考虑目前

使用的地震计频率范围、测量精度、失真度等技术参数,为了达到最好的检测效果,选择了电磁式振动台。

(4) 最大加速度的选择:振动台最重要的控制参数就是输出加速度与使用频率范围,合理的参数选择对于满足实验要求是十分重要的。根据数据显示,在汶川大地震中记录到的峰值加速度约 0.9g,所以选定最大加速度为满载 1g,这样即可满足绝大部分实验的需求。

综上所述,我单位新建的超低频振动台基本参数如表 1 所示。

表 1 超低频振动台基本参数

Table1 Ultra low frequency vibration table of basic parameters

名称	频率范围/ Hz	最大位移 (峰值)/m	最大速度 (峰值)/ (m·s <sup>-1</sup> )	满载最大 加速度 (峰值)/(m·s <sup>-2</sup> )	台面 尺寸/mm	最大 负载/kg	失真度/%	横向 振动比/%	台面不 均匀度/%
垂直台	0.002~160	0.1	0.2	10	$\Phi 300$	15	位移失真度 $\leq 0.5$ ( $f < 0.1\text{Hz}$ ); 加速度失真度 $\leq 1$ ( $f \geq 0.1\text{Hz}$ )。	$\leq 3$ (80~160 Hz) $\leq 2$ ( $< 80\text{Hz}$ )	$\leq 1$
水平台	0.002~160	0.1	0.2	10	350×280	15	位移失真度 $\leq 0.5$ ( $f < 0.1\text{Hz}$ ); 加速度失真度 $\leq 1$ ( $f \geq 0.1\text{Hz}$ )。	$\leq 2$ ( $< 80\text{ Hz}$ ) $\leq 3$ (80~160 Hz)	$\leq 1$

## 2.2 超低频振动台的系统构成

超低频振动台系统主要由超低频垂直向和水平向振动台、功率放大器及运动控制器、激光测振仪、振动校准测控仪、控制软件及计算机等组成。结构示意图如图 1 所示。其中垂直向和水平向振动台分别实现垂直向和水平向的机械振动;功率放大器用于驱动振动台;运动控制器实现对振动台波形的精密控制;激光测振仪用于实现对振动台振动幅值和相位的激光绝对测量,可通过转换机构分别实现对水平台和垂直台的精密测量;振动校准测控仪主要用于完成对振动台振级的控制以及对传感器的自动校准,主要包括程控高精度超低频信号发生器、程控八通道高精度数据采集器、程控光电信号信号采集器等硬件系统,控制软件实现对整个校准系统的计算机集中控制,从而实现校准过程自动化,并将校准结果打印输出。

## 3 系统基础的设计

### 3.1 振动台基础设计及建造

振动台动力基础的设计与建造必须严格满足

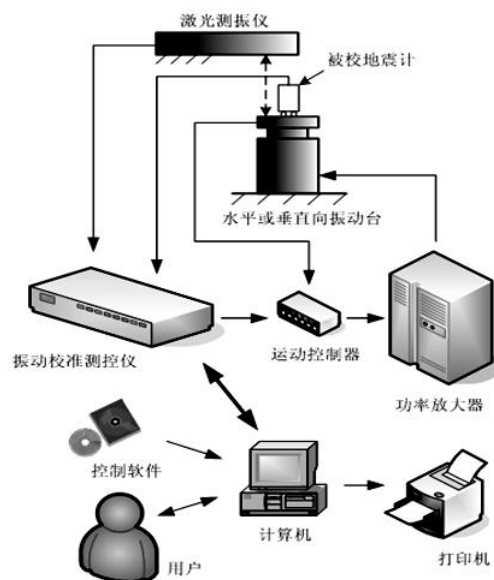


图 1 超低频振动台系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the system structure of ultra low frequency vibration table

上部结构动力系统运动的需要并考虑周边建筑的影响,以达到设计精度和使用效果。当标准振动

台工作于超低频段时, 振动台台面输出的加速度非常小, 容易受外界环境因素, 比如拍岸浪、气旋风暴、地震波、车辆行人等的影响, 使输出波形的失真度变大, 信噪比和稳定性变差, 并且也大大降低了激光测振仪的跟踪测量性能<sup>[3]</sup>。为了实现超低频标准振动计量, 必须设计合理的隔震基础, 这是实现超低频标准振动系统基本指标的必要条件。

振动台基础质量越大则振动台本体受台面运动以及外界干扰的影响就越小, 振动台的工作性能就越好, 因此, 振动台基础选择实体基础是比较合适。进一步地, 为了得到更好的隔振和防振效果, 最理想的是采用基岩体作为超低频振动台的基础。

在四川省地震局的大力支持下, 通过对建设场址的勘察, 针对建设场址有基岩和无基岩两种情况分别作了设计。后经过建设场地勘察, 根据地勘报告, 覆盖层大约在 1.5~2 m 左右, 故此我们采用了有基岩情况的基础设计方案。在建造实验室时, 进行了基岩的深挖, 挖掘到基岩后, 对基岩表面风化层进行了清理, 然后水洗、钻孔, 将钢筋和基岩连接, 内筋捆扎好后使用高强度混凝土进行浇筑, 将基础体铺平, 利于设备安装。为隔绝振动台振动对激光测量的影响, 通过橡胶减震垫将激光测振仪基础与振动台基础分开, 从而进一步提高对激光测振仪的测量精度。

3.2 台基背景噪声测试

我们在建成的超低频振动台台址上采用如图 2 所示的测试框图, 设备见表 2, 连续记录台址 48 小时左右的振动干扰波形数据(见表 3)。将记录到的振动干扰波形数据经专用处理程序进行处理, 计算出台址按时间顺序排列的振动干扰有效值。经测试, 垂直向的噪声在最佳优于  $5\times10^{-9}$  m/s, 说明超低频振动台的基础设计及建造是合格的。噪声柱状图见图 3。

表 2 台基噪声测试设备列表  
Table 2 Equipment list of base noise test

设备名称	类型	数量
短周期地震计	RSFS-1 观测频带: 1S~40Hz	1 台
地震数据采集器	EDAS-24GN 24 位	1 台
稳压电源	12V	1 台
蓄电池	12V/100Ah	1 只
笔记本电脑		1 台
GPS 天线		1 套

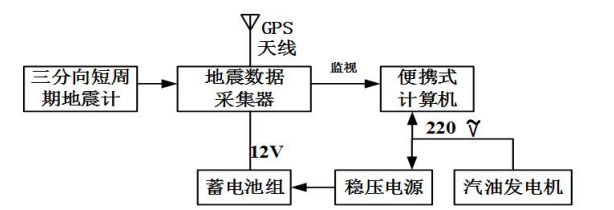


图 2 台基背景噪声测试框图  
Fig.2 Diagram of background noise test platform

表 3 振动台基础背景测试噪声数据  
Table 3 Noise data of basic background test of shaking table

测试记录时间	UD 向噪声	EW 向噪声	NS 向噪声
19:00	1.15E-08	1.75E-08	1.68E-08
20:00	1.37E-08	1.72E-08	1.91E-08
21:00	1.34E-08	1.74E-08	1.78E-08
22:00	9.16E-09	1.28E-08	1.13E-08
23:00	8.85E-09	1.09E-08	6.99E-09
0:00	1.04E-08	1.24E-08	1.31E-08
1:00	5.52E-09	8.45E-09	7.86E-09
2:00	8.88E-09	9.06E-09	1.19E-08
3:00	4.79E-09	6.39E-09	7.43E-09
4:00	4.65E-09	6.33E-09	7.48E-09
5:00	4.57E-09	6.46E-09	6.43E-09
6:00	4.95E-09	7.22E-09	6.87E-09
7:00	6.42E-09	9.58E-09	9.57E-09
8:00	1.12E-08	1.67E-08	1.57E-08
9:00	1.34E-08	2.05E-08	2.02E-08

(转下表)

(接表 3)

测试记录时间	UD 向噪声	EW 向噪声	NS 向噪声
10:00	1.44E-08	2.29E-08	2.30E-08
11:00	1.32E-08	1.91E-08	2.07E-08
12:00	1.43E-08	2.24E-08	2.16E-08
13:00	1.21E-08	1.84E-08	1.77E-08
14:00	1.40E-08	1.89E-08	2.06E-08
15:00	1.34E-08	1.96E-08	2.14E-08
16:00	1.13E-08	1.73E-08	1.83E-08
17:00	1.19E-08	2.03E-08	2.06E-08
18:00	9.61E-09	1.55E-08	1.77E-08
19:00	1.23E-08	1.77E-08	1.91E-08
平均值	1.03243E-08	1.484E-08	1.517E-08

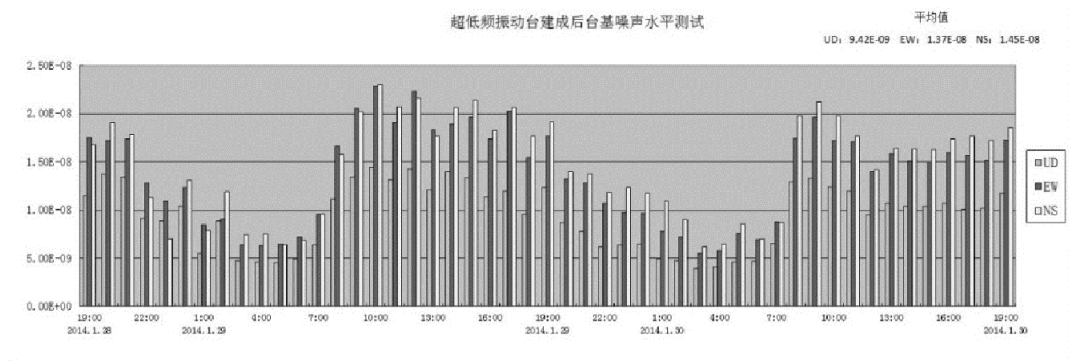


图 3 超低频振动台台基噪声柱状图

Fig.3 Basic noise histogram of ultra low frequency vibration table

4 系统测试结果

超低频振动标准实验室建成后，由中国计量科学研究院委派专家进行了现场测试，测试结果

表明建成的超低频振动台系统完全达到表 1 所列的各项技术指标，满足我局对地震计等超低频测针传感器校准的要求。表 4 中列出了水平向和垂直向振动台的失真度测试数据。

表 4 超低频振动台水平向和垂直向失真度

Table 4 The distortion in horizontal and vertical of ultra low frequency vibration table

水平向			垂直向		
频率/Hz	振级	失真度/%	频率/Hz	振级	失真度/%
0.002	49.51mm	0.020*	0.002	49.55mm	0.046*
0.005	49.50mm	0.019*	0.005	49.52mm	0.048*
0.01	49.48mm	0.020*	0.01	49.45mm	0.045*
0.02	49.46mm	0.021*	0.02	49.42mm	0.048*
0.05	49.45mm	0.022*	0.05	49.34mm	0.050*
0.1	49.43mm	0.92	0.1	45.94mm	0.97
0.4	48.98mm	0.90	0.4	47.61mm	0.55
0.8	200.33mm/s	0.90	0.8	196.27mm/s	0.50
1.0	201.60mm/s	0.88	1.0	202.71mm/s	0.83
2.0	205.55mm/s	0.76	2.0	208.65mm/s	0.80
4.0	194.22mm/s	0.57	4.0	195.51mm/s	0.76
8.0	10.02m/s <sub>2</sub>	0.75	8.0	10.04m/s <sup>2</sup>	0.64
12.5	10.09m/s <sup>2</sup>	0.68	12.5	10.16m/s <sup>2</sup>	0.46

(转下表)

(接表 4)

水平向			垂直向		
频率/Hz	振级	失真度/%	频率/Hz	振级	失真度/%
16.0	10.10m/s <sup>2</sup>	0.65	16.0	10.21m/s <sup>2</sup>	0.33
20.0	10.10m/s <sup>2</sup>	0.65	20.0	9.86m/s <sup>2</sup>	0.32
31.5	10.08m/s <sup>2</sup>	0.58	31.5	10.09m/s <sup>2</sup>	0.29
40.0	10.03m/s <sup>2</sup>	0.53	40.0	10.26m/s <sup>2</sup>	0.29
63.0	9.95m/s <sup>2</sup>	0.46	63.0	10.05 m/s <sup>2</sup>	0.24
80.0	10.06m/s <sup>2</sup>	0.44	80.0	9.95m/s <sup>2</sup>	0.22
100.0	9.87m/s <sup>2</sup>	0.42	100.0	10.10m/s <sup>2</sup>	0.18
120.0	10.023 m/s <sup>2</sup>	0.37	120.0	10.04 m/s <sup>2</sup>	0.32
160.0	10.038 m/s <sup>2</sup>	0.35	160.0	10.02 m/s <sup>2</sup>	0.33

\*：测得值为位移失真度，其余为加速度失真度。

5 应用

超低频振动实验室建成后，承担了一些科技项目和建设项目中地震计的测试任务。其中包括国家自然科学基金项目-精确传递函数地震观测系统研究（41074026）；中国地震局测震台网青年骨干培养专项（20140322）；中国地震局台网中心川滇国家地震预报实验场-四川长宁地震窗注水影响和机理研究（2016CESE0101）；四川省地震局地震科技

专项-特定场区结构周期与震害关系研究（LY1305）；四川赛思特科技有限责任公司西部大开发优惠政策节税资金投资项目-高稳定反馈式短周期地震计研制（XDK2015004）；四川赛思特科技有限责任公司大岗山、长河坝、黄金坪等水库诱发地震监测台网建设、四川省宜宾市珙县上罗镇页岩气勘探区地震监测台网中地震计的标定及校准；测试结果举例如表 5、6，测试报告见表 7。

表 5 垂直台传感器测试  
Table 5 Vertical station sensor test

频率	振级	失真度	灵敏度	相位
0.1	50mm	1.73	123.77	-0.38
0.2	50mm	2.07	123.7	-0.68
0.4	50mm	2.2	123.661	-1.36
0.8	200mm/s	0.95	123.43	0.04
1	200mm/s	0.75	123.395	0.04
2	200mm/s	0.81	123.34	-0.08
4	200mm/s	0.84	123.31	-0.17
8	10m/m <sup>2</sup>	0.69	123.318	-0.34
12.5	10m/m <sup>2</sup>	0.45	123.366	-0.54
16	10m/m <sup>2</sup>	0.38	123.106	-0.69
20	10m/m <sup>2</sup>	0.33	123.478	-0.87
31.5	10m/m <sup>2</sup>	0.31	123.988	-1.45
40	10m/m <sup>2</sup>	0.32	124.038	-1.96
63	10m/m <sup>2</sup>	0.28	124.519	-3.21
80	10m/m <sup>2</sup>	0.25	124.837	-4.31
100	10m/m <sup>2</sup>	0.23	125.181	-5.66
120	10m/m <sup>2</sup>	0.27	125.039	-7.44
160	10m/m <sup>2</sup>	0.32	122.979	-10.151

表 6 水平台传感器测试  
Table 6 Level sensor test

频率	振级	失真度	灵敏度	相位
0.1	50mm	0.73	124.585	-0.53
0.2	50mm	0.73	123.893	-0.69
0.4	50mm	0.78	123.692	-1.36
0.8	200mm/s	1.06	123.404	-0.04
1	200mm/s	0.7	123.38	-0.06
2	200mm/s	0.83	123.315	-0.09
4	200mm/s	0.89	123.321	-0.17
8	10m/m <sup>2</sup>	0.8	123.288	-0.36
12.5	10m/m <sup>2</sup>	0.63	123.333	-0.54
16	10m/m <sup>2</sup>	0.57	123.37	-0.7
20	10m/m <sup>2</sup>	0.53	123.433	-0.88
31.5	10m/m <sup>2</sup>	0.48	123.867	-1.44
40	10m/m <sup>2</sup>	0.45	123.84	-1.9
63	10m/m <sup>2</sup>	0.37	124.559	-3.22
80	10m/m <sup>2</sup>	0.33	124.564	-4.34
100	10m/m <sup>2</sup>	0.31	124.513	-5.71
120	10m/m <sup>2</sup>	0.37	124.221	-7.31
160	10m/m <sup>2</sup>	0.42	122.67	-10.06

表7 测试报告  
Table 7 Test report

编号	频率/Hz	振级/(cm·s <sup>-1</sup> )	传感器输出/mVrms	灵敏度/(mV/cm·s <sup>-1</sup> )	相位差/(°)	失真度/(%)
1	1	10.02	1 235.31	174.41	-0.01	0.18
2	1	10.02	1 235.05	174.37	-0.1	0.19
3	1	10.02	1 235.04	174.36	-0.04	0.2
4	1	10.02	1 235.23	174.41	-0.02	0.19
5	1	10.02	1 235.27	174.38	-0.04	0.2
平均	1	10.02	1 254.097	177.061	-0.045	0.194

6 结语

超低频振动测量是目前许多前沿科学亟待解决的问题和重要的研究方向，因此建立和完善超低频振动实验室、开展西南地区超低频振动测量是支撑相关前沿科学研究和工程应用的技术基础。测试结果表明，建设的超低频振动台系统技术指标达到代表了国内外最先进水平的设计要求，能够满足超低频测振传感器校准的精度和可靠性要求，同时提高了传感器校准的自动化程度。实验室的建立解决了测振传感器超低频振动测量的问题，填补了西南地区超低频振动检测项目的空白，为相关领域的基础研究和工程测试提供检测/校准服务共享平台；为推动地震计等低频或超低频振动测量仪器的自主研发提供检测技术支撑。

参考文献：

[1] 中科院地球物理研究所. 地震仪器概论[M]. 北京：科学出版社，1978.

[2] 韩 冬，何 闻. 超低频标准振动系统基础设计技术[J]. 振动与冲击，2008，27（9）：1-7.

[3] 杨晓源，邵玉平，杜 瑶. 速度传感反馈地震计的参数稳定性分析[J]. 地震地磁观测与研究，2011，32（6）：109-115.

[4] 杨晓源，饶文松. 速度传感反馈地震计的环路噪声输出传递特性分析[J]. 地震地磁观测与研究，2007，28（5）：43~49.

[5] 中国地震局监测科技司. 数字地震观测技术[M]. 北京：地震出版社，2003.