

马鑫,周云耀,吕永清.甚宽频带地震计噪声与环境耦合研究[J].地震工程学报,2019,41(2):545-548.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.545

MA Xin,ZHOU Yunyao,LÜ Yongqing.Coupling Relationship between Noise of a Very Broad Seismometer and the Environment[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(2):545-548.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.545

甚宽频带地震计噪声与环境耦合研究

马 鑫,周云耀,吕永清

(中国地震局地震研究所,中国地震局地震大地测量重点实验室,湖北 武汉 430071)

摘要: 首先以甚宽频带地震计为研究对象,分析垂直向的片簧系统理论模型,探讨气压变化对仪器的 LP 噪声影响;通过理论分析,得出垂直向的片簧系统受气压变化影响较大。根据片簧系统的理论模型,设计一种密封安装方法,通过实验探讨地震计噪声与环境耦合关系(气压、温度和底座变形的关系)。最后对实验数据进行功率谱噪声分析,结果显示抽真空后地震计三个分向的噪声均降低,其中在 100 s 处垂直向、东西和南北向分别降低了 10 dB、5 dB 和 6 dB。

关键词: 甚宽频带地震计; 噪声; 环境耦合; 功率谱

中图分类号: P319.56

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)02-0545-04

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.545

Coupling Relationship between Noise of a Very Broad Seismometer and the Environment

MA Xin, ZHOU Yunyao, LÜ Yongqing

(Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Agency, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: In this study, the theoretical model of the vertical leaf spring system for very broadband seismometers was analyzed, and the influence of pressure changes on the LP noise of the instrument is discussed. The theoretical analysis showed that the vertical leaf spring system is quite affected by pressure changes. Then, according to the theoretical model of the leaf spring system, a kind of sealing installation method was designed, and the coupling relationship between the noise and the environment (pressure, temperature, and the base deformation) is discussed through experiments. Finally, the power spectrum noise analysis results of the experimental data showed that, after vacuuming, the noise in the three branch directions of the seismometer was reduced, at 100 s, by 10 dB, 5 dB, and 6 dB in the vertical direction, east-west direction, and north-south direction, respectively.

Keywords: very broadband seismometer; noise; environmental coupling; power spectrum

收稿日期: 2017-07-27

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划(XH16028); 中国地震局地震研究所基本科研业务费专项资助项目和中国地震局地壳应力研究所基本科研业务费专项资助项目(ISO201556236)

第一作者简介: 马 鑫(1991-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事地震精密仪器研发方面的工作。E-mail: hmaxin@163.com。

通信作者: 周云耀(1967-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向地球科学仪器及其测试技术。E-mail: joewhen@126.com。

0 引言

“十五”期间,全国各区域测震台网进行了全面改造扩充,新增了大量台站,特别是地震计的拾震器发展成为以宽频带为主^[1]。CTS-1从“八五”期间开始研制,首先应用于国家数字地震台网。近十年来,经过多次改进,最新型号为CTS-1E^[2]。宽带地震仪对安装环境的要求相对短周期仪器而言高很多,主要是由于没有适当隔离保护的宽频带地震计对环境温度、气压等耦合因素的变化较为敏感^[3]。2009年7月29日C.R.Hutt等人在美国地质调查局(USGS)阿尔伯克基地震实验室(ASL)测试STS-2低噪声安装方法,研究了环境对地震计噪声的影响,重点探讨了隔离仪器环境温度和大气压力的变化,从而试图提高垂直向的LP性能^[4]。

本文针对甚宽频带地震计长周期的环境噪声限制,设计一种与环境耦合的地震计安装方法,以此来改善仪器垂直向LP噪声,同时不丧失水平向的性能,并通过甚宽频带地震计CTS-1实验验证。

1 甚宽频带地震计片簧理论模型

对于垂直向地震计,反馈地震计片簧无定向悬挂原理见图1^[5]。这种悬挂模型可以近似简化为半圆形片弹簧结构如图2^[6]。无定向片簧悬挂与拉科斯基悬挂类似,但其制作更加简单,得到广泛应用。无定向悬挂中脆弱的力平衡使它们对外界扰动很敏感,针对这一特性,需要一个稳定的反馈系统使其工作。对于一般的片簧式惯性系统,片簧垂直向工作载荷计算公式为:

$$P = \frac{W\sigma_p}{2R} = \frac{bh^2\sigma_p}{12R} \quad (1)$$

式中: $W = \frac{bh^2}{6}$; P 为工作载荷,单位 N; σ_p 为材料的许用应力,单位 MPa; W 为断面模数,单位 mm^3 ; h 为片簧厚度,单位 mm; b 为片簧宽度,单位 mm; R 片簧结构弯曲半径,单位 mm。

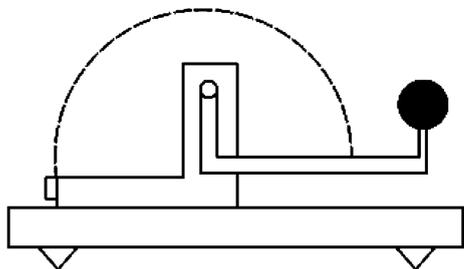


图1 片簧无定向悬挂原理图

Fig.1 No leaf spring suspension directional principle diagram

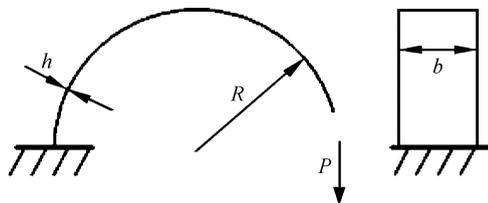


图2 片簧系统简化结构图

Fig.2 The simplified system structure diagram of leaf spring

根据地震倾斜模拟模型,可知,当地震计底盘产生倾斜角度为 θ 时,垂直向的重力加速度 g_0 会产生水平向的加速度 $g_0 \cdot \sin\theta$,如图3所示。这种由底盘倾斜产生的水平向加速度是无法被垂直向的地震计区分的,其引起的地震计垂直向的噪声不大。然而,对于水平向的地震计,由底盘倾斜产生的水平向加速度 $g \cdot \sin\theta$ 被仪器记录下来,这种噪声对地震计的影响较大。由仪器倾斜产生的水平向载荷 P_1 (单位 N)计算公式为:

$$P_1 = m \cdot H \quad (2)$$

式中: $H = g_0 \cdot \sin\theta$; H 为水平向的加速度,单位 m/s^2 ; m 为摆体质量,单位 kg; g_0 为重力加速度,单位 m/s^2 ; θ 为片簧结构倾斜角度,单位($^\circ$); 倾斜角度很小时, $\sin\theta$ 可以等效为 θ 。即:

$$P_1 = m \cdot g_0 \cdot \theta \quad (3)$$

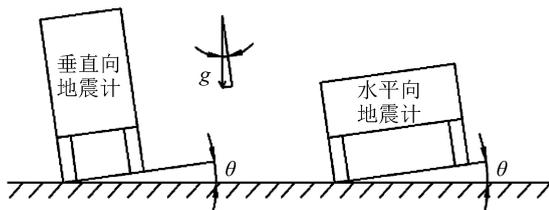


图3 地震计倾斜模拟图

Fig.3 Tilt plot of seismometer

可见,地震计底盘的倾斜角度 θ 越大,其产生水平向载荷越大,仪器记录到的噪声越大。由此,我们可以得出,气压变化引起的地震计底盘倾斜对地震计水平向的影响较大。

2 地震计安装方法探讨

由地震计倾斜理论模型可知,地震计产生倾斜时对水平向的仪器影响较大。事实上,在一般安装环境下,地震计外壳的密封设计可减少地震计环境噪声,但是也使地震计外壳内外产生气压差,进而导致仪器底盘变形,使摆体发生倾斜。

本单位研制的CTS-1E甚宽频带地震计设计了气压平衡底盘,有效防止地震计外壳气压变化差引

起的底盘变形,从而抑制地震计底盘变形对地震计水平向产生噪声。值得注意的是,由于外壳内部气压变化,造成空气密度发生变化,使垂直向仪器的质量块在空气中受到的浮力发生变化,从而产生噪声。这也就是气压变化对 CTS-1E 甚宽频带地震计垂直向仪器影响较大的原因。

同时,由于密封钢罩内外气压的变化也会导致密封钢罩内部温度的变化,在短时间内,该过程可以看作是近似的绝热过程。在该绝热过程中,密封钢罩内的理想气体三个状态参量 P 、 V 、 T 是同时变化的。其中, P 、 T 的关系式为:

$$p \cdot V^\gamma = \text{常量} \quad (4)$$

式中: $\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}}$ 为热容比。大气的热容比约为 1.4 左右。 P 、 V 、 T 分别为压强、体积和温度^[7]。

由式(4)可得,当钢罩内外的气压变化 1/1 000,钢罩内部的温度变化约为 $1/3.4 \times 10^7$ 。由此可估算出,当气压变化(1/1 000)时,钢罩内部温度变化产生的环境噪声约为 5 dB。这也就是说,地震计安装环境温度的变化会产生较大噪声,对仪器有较大的影响。如果将地震计安装在设有密封罩的底座上,该底座会随着大气压力的变化弯曲,导致水平向 LP 噪声比没有密封的时候要大。因而,我们集中注意力来改善仪器垂直向的 LP 噪声,同时不丧失仪器水平向的性能。

根据以上结论提出:将地震计放置在一种较厚的方形大理石底座上并进行密封,减小因气压变化产生的地震计安装底座的弯曲,从而减小底座的变形量对水平向仪器的影响。同时,对地震计的安装环境抽真空处理,在消除气压变化对地震计水平向影响的同时,改善地震计垂直向 LP 噪声。

3 实验与结论

为了探究甚宽频带地震计的实际应用环境,在位于武汉大学的武汉地震台摆房实验室基墩上放置尺寸为 1 m×1 m 的大理石板(厚度为 30 mm),对角放置两台 CTS-1 的甚宽频带地震计。两台地震计摆位方向相同,通过高精度数据采集器 Q330 的 A、B 通道采集数据。

2017 年 6 月 13 日,安装两台 CTS-1 的甚宽频带地震计(仪器编号为 1603 号、1608 号),如图 4 所示。在不加外罩的安装方式(方案 1)下,选取两台仪器夜晚较为安静的时间段记录的数据进行功率谱噪声分析。随后,在 6 月 21 日,将其中一台(编号

1603)罩上不锈钢密封罩(方案 2、3)(图 5),四周及插头接口处涂上 703 密封胶,分别进行长时间观测。将 1608 号设为基准比较仪器,1603 号设为优化安装仪器,具体可分为 3 个方案:方案 1 采用敞开式安装,即直接放置安装在基墩上;方案 2 将 1603 号仪器钢罩密封,并抽到 40% 真空;方案 3 将 1603 号仪器钢罩密封,并抽到 90% 真空。通过长时间的观测,针对方案 1、方案 2 和方案 3,通过高精度数据采集器 Q330 记录甚宽频带地震计信号,选取较为安静的实验观测数据,得到编号 1603 的仪器噪声结果,如表 1 所列。



图 4 不加外罩安装(方案 1)

Fig.4 Without cover installation (Option 1)



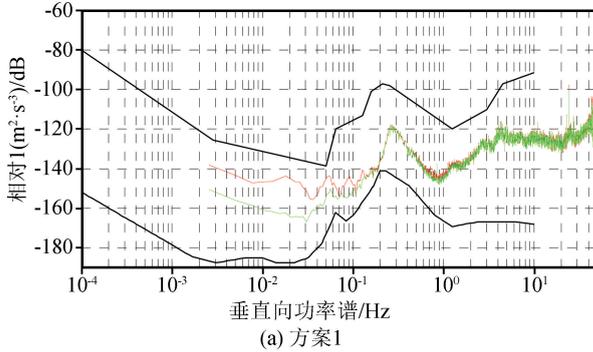
图 5 加外罩安装(方案 2、3)

Fig.5 Cover installation ((Option 2/3)

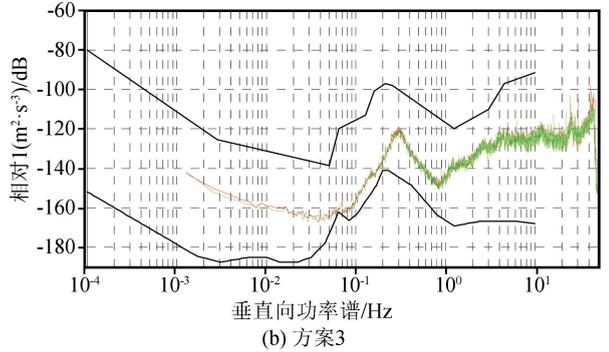
表1 钢罩抽真空噪声结果

Table 1 Noise results after vacuum

	噪声/dB		
	垂直向	东西向	南北向
方案1	-148	-133	-132
方案2	-152	-135	-134
方案3	-158	-138	-138



(a) 方案1



(b) 方案3

图6 功率谱噪声分析对比结果

Fig.6 The results of power spectrum noise analysis

从图6中红色曲线1603号仪器的数据,可以看出,加上不锈钢罩并抽取90%真空后,该仪器垂直向的噪声得到下降。在大于0.01 Hz频率范围内,该安装方案使噪声明显下降,在0.01 Hz处噪声下降值为5 dB。由此,说明了地震计抽真空的安装环境可以有效降低仪器垂直向的噪声,验证了甚宽频带地震计噪声与环境耦合理论推导的一致性。

4 结语

根据甚宽频带地震计CTS-1E的片簧模型计算和实验数据分析,验证了甚宽频带地震计噪声与环境耦合关系。得到以下结论:

(1) 在气压稳定(真空)且底盘稳定的安装环境下,地震计三个分向的噪声均下降,其中垂直向、东西和南北向分别下降10 dB、5 dB和6 dB。

(2) 地震计安装底座的稳定性,会大大影响地震计水平向仪器LP噪声水平,安装大理石底座很大程度上抑制了底座变形对地震计水平向仪器的影响。

(3) 由于仪器本身的噪声水平限制,在研究地震计噪声水平与环境耦合情况时,在一定程度上影响了实验效果,这也对仪器本身的噪声水平提出了要求。

本实验首次提出甚宽频带地震噪声与环境耦合关系,从影响地震计噪声的关键环境因素入手,探讨了安装环境气压和温度耦合变化影响地震计三分向噪声水平的原因,具有一定的创新性,本论文的测试

为了更清晰的展示抽真空的效果,选取方案1和方案3进行对比分析。分析安装方案中,甚宽频带地震计记录的垂直向数据的功率谱噪声,功率谱噪声对比分析结果如图6所示。其中,图6红色曲线代表1603号仪器,绿色曲线代表1608号仪器。

方法也可以拓展应用到相关仪器对比测量实验。

参考文献(References)

- [1] 赵建和,张学应. Geotech宽频带数字地震观测系统原理及应用[J]. 地震地磁观测与研究, 2004(b09): 21-27.
ZHAO Jianhe, ZHANG Xueying. Principle and Application of Geotech Broadband Digital Seismic Observation System [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2004(b09): 21-27.
- [2] 蔡亚先,吕永清,周云耀,等. CTS-1甚宽频带地震计[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(3): 109-114
CAI Yaxian, LÜ Yongqing, ZHOU Yunyao, et al. CTS-1 Very Broadband Seismometer [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(3): 109-114.
- [3] WIELANDT E. Seismic Sensors and their Calibration [M]. Chapter 5 of "New Manual of Seismological Observatory Practice". Geo Forschungs Zentrum Potsdam, 2002.
- [4] DIAZ J, VILLASENOR A, MORALES J, et al. Background Noise Characteristics at the Iber Array Broadband Seismic Network [J]. Bull Seism Soc Amer, 2010, 100(2): 618-628.
- [5] JENS HAVSKOV, GERARDO ALGUACIL. Instrumentation in Earthquake Seismology [M]. Beijing: Seismological Press, 2007, 6.
- [6] WIELANDT, E. The Leaf-spring Seismometer: Design and Performance [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982, 72(6A): 2349-2367.
- [7] 机械设计手册编委会. 机械设计手册. 第6卷 [M]. 机械工业出版社, 2004.
Editorial Board of Mechanical Design Manual. Mechanical Design Manual. Volume 6 [M]. Mechanical Industry Press, 2004.