

杨江,王平,陈志高,等.水管倾斜仪观测频带拓展方法研究[J].地震工程学报,2019,41(5):1228-1233.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1228

YANG Jiang, WANG Ping, CHEN Zhigao, et al. A Method for Expanding the Observation Frequency Band of Water Tube Tiltmeters [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1228-1233. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1228

水管倾斜仪观测频带拓展方法研究

杨江^{1,2}, 王平^{3,4}, 陈志高^{1,2}, 黄俊^{1,2}

(1. 中国地震局地震研究所(地震预警湖北省重点实验室), 湖北 武汉 430071;

2. 武汉地震科学仪器研究院有限公司, 湖北 武汉 430071;

3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

4. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 现有水管倾斜仪可清晰记录长周期固体潮信息,但由于其固有周期高,对短周期倾斜形变无法响应,易导致震前短临异常信息缺失。通过机械结构优化以降低仪器固有周期,拓展仪器的观测频带;采用更高精度的传感器和放大电路提高仪器信噪比,保证固体潮观测正常;最后通过连续对比观测,分析仪器频带拓宽后的观测数据差异。

关键词: 水管倾斜仪; 固有周期; 短临异常; 信噪比; 频带拓展

中图分类号: P315.725

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1228-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1228

A Method for Expanding the Observation Frequency Band of Water Tube Tiltmeters

YANG Jiang^{1,2}, WANG Ping^{3,4}, CHEN Zhigao^{1,2}, HUANG Jun^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China;

2. Wuhan Institute of Seismologic Instrument Co. Ltd., Wuhan 430071, Hubei, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

4. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA & Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Water tube tiltmeters can clearly record information from long-period solid earth tides. However, because its natural period is long, it cannot respond to short-period tilt deformation, leading to the missing of short-term anomalous information. In this paper, the natural period of the instrument was reduced and the observation frequency band was expanded through mechanical structure optimization. Through use of sensors with higher precision and amplifier circuit, the signal-to-noise ratio of the instrument was improved, and normal observation of solid earth tide was ensured. By chitinous contrast observation, the difference in observation data after expansion

收稿日期: 2018-12-01

基金项目: 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 (IS201616247); 甘肃省重点研发计划(18YF1FA101)

第一作者简介: 杨江(1980-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为地震形变观测技术与地震预警技术。E-mail: meblor@whsii.com。

通信作者: 王平(1977-), 男, 副研究员, 主要从事土动力学与黄土地震灾害研究。E-mail: lanzhouwang_p@126.com。

of the frequency band was analyzed.

Keywords: water tube tiltmeter; natural period; short-term anomalies; signal to noise ratio (SNR); expansion of frequency band

0 引言

水管倾斜仪是自动测量地壳倾斜变化的一种精密仪器,除用来测定缓慢倾斜变化、倾斜固体潮与捕捉临震前兆信息外,还可用于地球动力学与精密工程测量等方面^[1]。该仪器采用差动变压器式位移传感器,并结合现代微电子技术的一些新成就设计而成,具有结构合理、性能稳定可靠、功能全、使用范围广等特点。现有水管倾斜仪的固有周期一般大于70 s^[2],其由下式求得:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{SD}{2ga}} \quad (1)$$

式中: S 为钵体截面积; D 为基线水管长度; a 为水管截面积; g 为重力加速度值^[3]。基线水管长度越长,对应的液面测量位移量就越大,仪器的信噪比也就越高,因此台站安装的水管倾斜仪的基线长度一般大于30 m。

假设基线水管长度 $D=30$ m,选定临界阻尼时的仪器钵体半径 $R=170$ mm,水管半径 $r=18$ mm,此时仪器的固有周期为73.4 s。为了配合仪器自身的观测频带特性,放大电路中选择60 s的硬件滤波常数,同时数据采集部分采用分钟采样进行记录。

利用此种设计的水管倾斜仪可以进行可靠的长周期观测,获取优质的固体潮观测数据。但是由于仪器本身固有周期的限制,仪器对70 s以下的短周期地壳形变无法响应,特别是震前短、临异常信息无法获取。

地震前兆观测的出发点是为了获取更多的震前异常信息,特别是短临异常信息。为解决上述问题,本文通过机械结构优化降低仪器固有周期,拓宽仪器的观测频带。同时,为了验证仪器的观测精度,利用更高精度传感器和放大电路提高仪器信噪比,以保证固体潮信息能够被正常观测。

1 水管倾斜观测频带拓展方法

由计算水管倾斜仪固有周期的式(1)可知,降低仪器固有周期的途径有:(1)缩小钵体截面积;(2)缩短基线水管长度;(3)增大水管截面积。

从仪器的机械结构特性来看,为了保证测量的

稳定性,受浮子大小的影响钵体尺寸很难进一步缩小,所以本文通过增大水管截面积和缩短基线水管长度来降低仪器的固有周期。考虑到水管与钵体之间的连接需要在钵体上焊接与水管同样直径的辅助不锈钢管,因此水管直径不宜超过钵体直径的1/3;根据水管倾斜仪的测量原理,缩短基线长度,液面测量位移量基本成正比例缩小,因此为了保证观测精度需要提高位移传感器的灵敏度,通过对传感器的特性分析,仪器的基线水管长度应不小于原基线长度(30 m)的1/10。

综合考虑,本文选用的钵体半径 $R=170$ mm,水管半径 $r=50$ mm,基线水管长度 $D=400$ mm。此种情况下由式(1)求得仪器的固有周期为9.65 s。

通过上述结构调整降低仪器的固有周期后,为了保证仪器的观测精度及拓宽记录频带,又解决了以下关键问题:(1)提高传感器的灵敏度,降低电路自噪声,提升仪器的信噪比:采用4 m基线长度,使液面观测位移量降低了近10倍,因此必须更换灵敏度更高的传感器和低噪声放大电路。本文采用提高传感器激励电源的频率稳定性和幅度稳定度的方法,来提高仪器的信噪比。(2)改变放大电路的滤波常数:现有的放大电路为了滤出高频噪声的干扰,在输出端采用60 s的硬件滤波。新的电路取消硬件低通滤波部分,仅设计了抗混叠滤波电路^[4-5],在后续处理中通过高频采样后数字滤波的方式进行数据处理。为了保证水管倾斜仪在记录高频信息的同时仍能清晰记录长周期固体潮汐,拟采用两级输出,一级输出保留高频信息,采用秒级滤波常数(1~3 s);二级输出仅用于记录长周期固体潮汐,采用数十秒级滤波(10~40 s)。(3)提高数据采集部分的采样率:现有研究采用EP-III型数采进行数据采集,采样频率为1次/min,为了获取到高频信息,本文采用新的数采,将采样频率提高到1次/s。

2 测试环境搭建

为了验证频带拓宽后仪器的特性和观测精度,进行测试试验。测试地点选择在湖北省武汉市华中农业大学狮子山台(30.48°N,114.35°E),其仪器布局如图1所示。

采样数据的原始电压值, Y1 数据源为存入国家数据库的物理量值($10^{-3}''$)。因观测环境的基岩条件和仪器的基线长度有较大差异, 本文仅从数据曲线形态予以定性分析, 不对数据源进行归一化处理。从图 5 可以看出, Y2 仪器经过 50 s 低通数字滤波后, 固体潮曲线光滑。因观测点基岩较为破碎, 基线长度过短, 其数据信噪比比 Y1 仪器低。

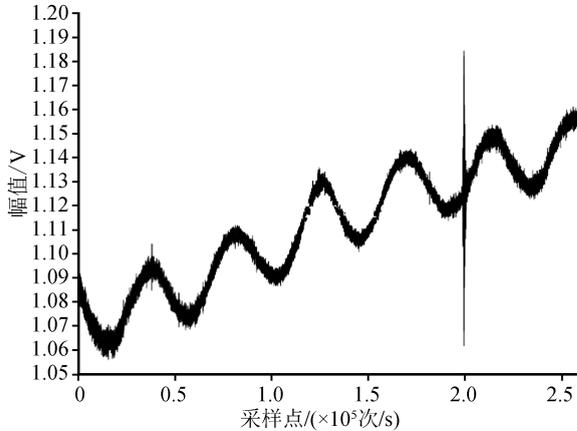


图 3 Y2 三天连续观测数据

Fig.3 Three-day continuous observation data of Y2

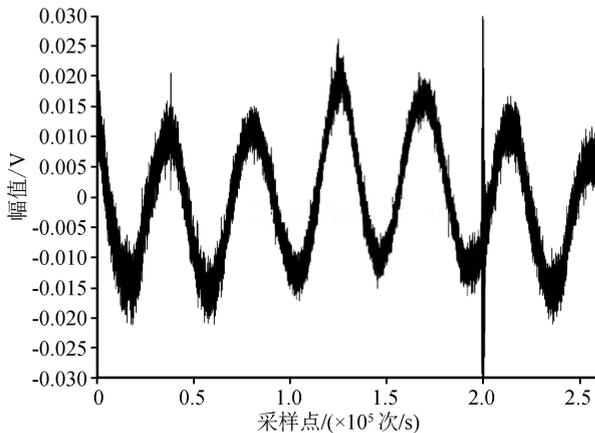


图 4 Y2 三天连续观测数据(去漂移)

Fig.4 Three-day continuous observation data of Y2 (after drift elimination)

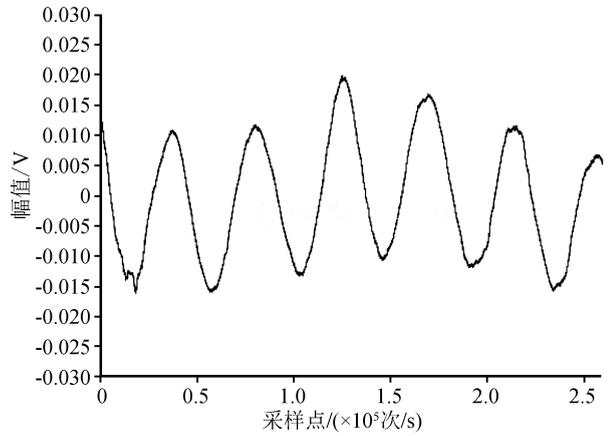


图 5 Y2 三天连续观测数据(50s 低通滤波)
Fig.5 Three-day continuous observation data of Y2 (50 s low-pass filter)

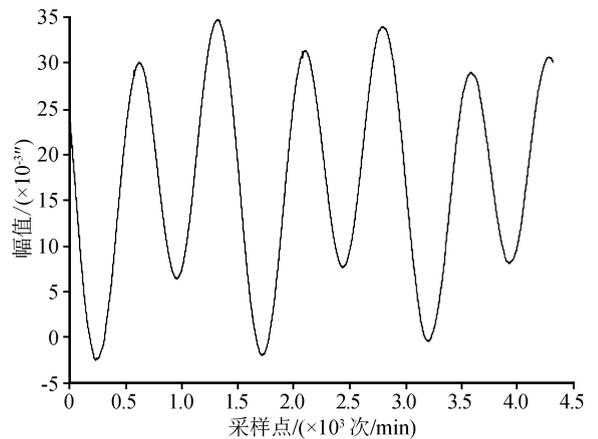


图 6 Y1 三天连续观测数据

Fig.6 Three-day continuous observation data of Y1

3.3 地震事件对比观测

在仪器对比观测期间, 全球发生了多次地震。经过数据比对, Y2 仪器对全球 6 级以上地震均有较好的响应, 且震相清晰; Y1 仪器能够记录到地震, 但信息丢失严重。本文选取了测试期间的 1 次地震事件数据记录进行对比分析, 并将地震信息列于表 1。

表 1 地震信息表

Table 1 Seismic information

序号	发震地点	发震时刻	震级/M	经度/(°)	纬度/(°)	震中距/km
1	马鲁古海	2014-12-21T19:34:15	6.2	126.4	2.2	3 394

取 Y2 仪器 2014 年 12 月 21 日的 24 h 观测数据, 绘制数据曲线如图 7 所示, 地震发震时刻的数据曲线如图 8 所示。

取 Y1 仪器 2014 年 12 月 21 日的 24 h 观测数据, 绘制数据曲线如图 9 所示, 地震发震时刻的数据曲线如图 10 所示。

由两个仪器地震事件曲线的对比结果可知, Y2 地震时间数据中包含丰富的高频信息。对 Y2 仪器的地震事件响应进行幅频和相频特性分析, 如图 11 所示。再对其进行傅里叶变换, 其功率谱密度图如图 12 所示, 可知本次地震经过远距离传播后其卓越周期在 0.1 Hz 左右。

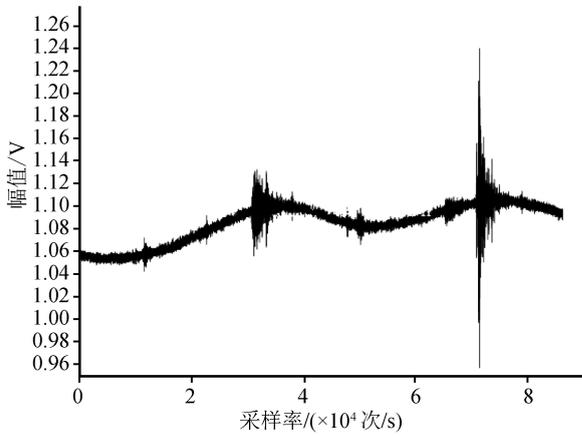


图7 Y2仪器12月21日24小时数据

Fig.7 24 h continuous observation data of Y2 on December 21

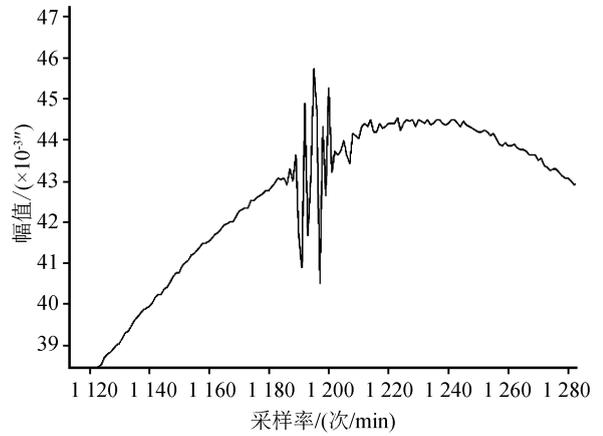


图10 Y1仪器12月21日地震事件数据

Fig.10 Earthquake event data of Y1 on December 21

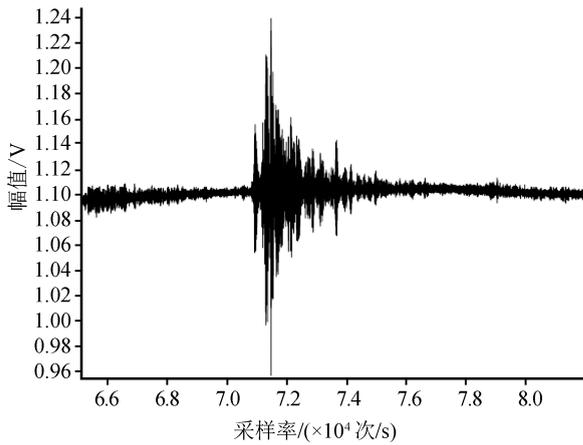


图8 Y2仪器12月21日地震事件数据

Fig.8 Earthquake event data of Y2 on December 21

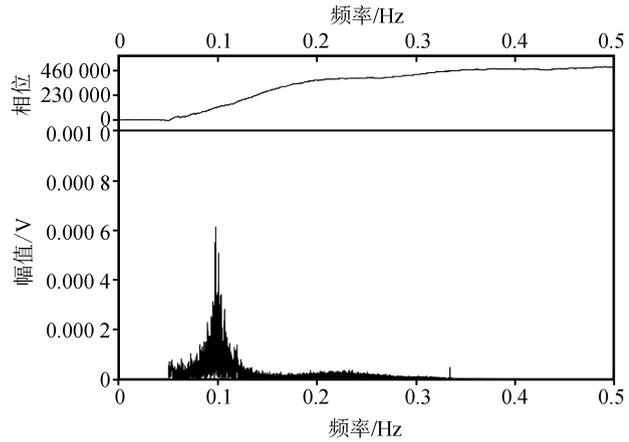


图11 Y2仪器地震响应幅频及相频特性

Fig.11 Amplitude-frequency, phase-frequency of seismic response of Y2

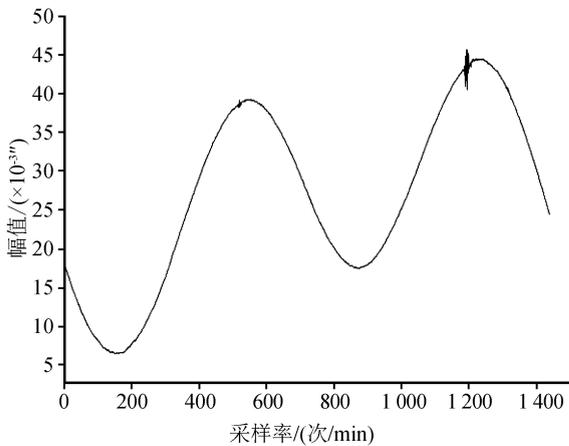


图9 Y1仪器12月21日24小时数据

Fig.9 24 h continuous observation data of Y1 on December 21

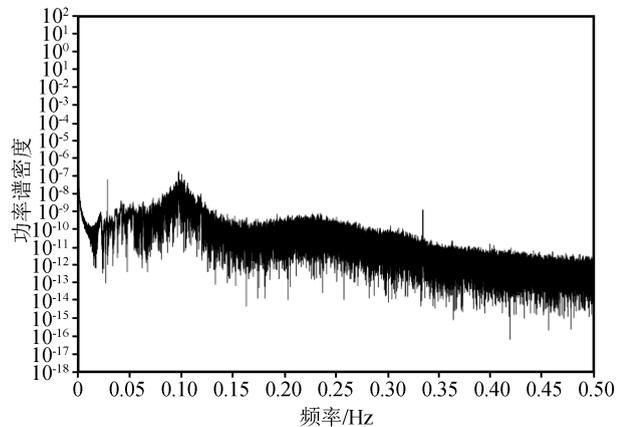


图12 Y2仪器地震响应功率谱密度图

Fig.12 Power spectrum density of seismic response of Y2

4 结论

(1) 水管倾斜仪通过机械部分的重新设计,其固有周期从70 s降低至10 s左右,实测固有周期为

10.2 s,与理论值较为吻合。仪器固有周期降低后,由于其基线长度大幅缩短,观测信噪比降低,但在4 m基线长度下,仪器能够清晰记录固体潮曲线。

(2) 本研究从定性角度对固体潮记录和地震事

件记录进行了分析,用以验证水管倾斜仪频带拓宽的有效性。仪器频带拓宽后记录的高频信息明显丰富,对全球大震均有明显的位移响应,这对利用水管倾斜仪进行长周期地震波的观测研究具有重要意义^[6-7]。

参考文献(References)

- [1] 张鸿旭,欧阳祖熙,付子忠,等.汶川大地震四种仪器观测到的异常现象及相关问题讨论[J].地球物理学进展,2011,26(1):99-109.
ZHANG Hongxu, OUYANG Zuxi, FU Zizhong, et al. Abnormal Phenomena Recorded by Several Earthquake Precursor Observation Instruments before the M_s 8.0 Wenchuan, Sichuan Earthquake[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(1): 99-109.
- [2] 周云耀,吴涛,温兴卫,等.DSQ水管倾斜仪传递函数的实验比测[J].大地测量与地球动力学,2010,30(增刊2):99-101.
ZHOU Yunyao, WU Tao, WEN Xingwei, et al. Test and Comparison for Transfer Function of DSQ Water Tube Tiltmeter [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(Supp2): 99-101.
- [3] 陈德福,聂磊.液体静力水准仪及其应用[M].北京:地震出版社,2008.
CHEN Defu, NIE Lei. Hydrostatic Level Instrument and Its Application[M]. Beijing: Seismological Press, 2008.
- [4] 彭永胜,王太勇,范胜波,等.高品质抗混叠滤波器设计[J].西南交通大学学报,2003,38(5):596-601.
PENG Yongsheng, WANG Taiyong, FAN Shengbo, et al. Design of High Quality Anti-aliasing Filter[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(5): 596-601.
- [5] 杨江,吕宠吾.基于AD598的伸缩仪放大电路设计[J].大地测量与地球动力学,2010,30(增刊1):179-183.
YANG Jiang, LÜ Chongwu. Design of Amplifier Circuit of Extensometer Based on AD598[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(Supp1): 179-183.
- [6] 吴迪,罗奇峰,罗永峰.长周期地震波的研究进展[J].地震研究,2007,30(3):296-302.
WU Di, LUO Qifeng, LUO Yongfeng. Development of Long-period Seismic Wave Research[J]. Journal of Seismological Research, 2007, 30(3): 296-302.
- [7] 熊先保,黄晓华,杨婕,等.施工振动对水管倾斜仪观测干扰的定量分析[J].华南地震,2018,38(1):91-94.
XIONG Xianbao, HUANG Xiaohua, YANG Jie, et al. Quantitative Analysis of Construction Vibration for Observed Interference of Water Tube Tilt Meter[J]. South China Journal of Seismology, 2018, 38(1): 91-94.