

VP 型宽频带垂直摆倾斜仪及其地震监测应用

庞聪^{1,2,3}, 马武刚^{1,2,3*}

(1.中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071;

2.中国地震局地震大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430071;

3.湖北省地震局, 湖北 武汉 430071)

摘要: 固体潮观测和地震活动监测有助于了解地震成因和影响, 是进行地震预警与地震烈度速报的重要手段, 而倾斜仪、强震仪等地球物理仪器在执行观测任务时必不可少。首先介绍了一种自主研发的 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪, 从工作原理、机械结构、主要性能、关键电路等方面具体阐述其特性; 然后结合了河北省地震台部署的多台 VP 型倾斜仪的地震观测资料, 详细分析了该仪器在多个天然地震事件中的映震效果, 并研究震级大小对倾斜仪观测结果的影响。实验表明: VP 型宽频带垂直摆倾斜仪具有显著的映震能力和效果, 可以作为测震系统的辅助观测工具。

关键词: 倾斜仪;宽频带;垂直摆;地震监测;映震能力

VP-type Broadband Vertical Pendulum Tilt-meter and its Seismic Monitoring Application

Pang Cong^{1,2,3}, Ma Wugang^{1,2,3*}

(1. Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China ;

Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Wuhan 430071, China ;

Hubei Earthquake Agency, Wuhan 430071, China)

Abstract: Solid tide observation and seismic activity monitoring help to understand the causes and effects of earthquakes, and are important tools for earthquake early warning and seismic intensity reporting, while geophysical instruments such as tiltmeters and strong seismometers are indispensable for observation tasks. Then, the seismic observation data of several VP-type tiltmeters deployed at the Hebei Seismological Station were combined to analyze the seismic reflection effect of the instrument in several natural seismic events and to study the effect of magnitude on the observation results of the tiltmeter. The experiments show that the VP-type broadband vertical pendulum tiltmeter has significant seismic reflection capability and effect, and can be used as an auxiliary observation tool for seismic measurement systems.

Keywords : Tilt-meter; broadband; vertical pendulum; seismic monitoring; seismic reflection capability

1 引言

固体潮^[1]是固体地球在太阳、月亮等天体的引潮力作用下引起的弹性-塑性形变，固体潮的观测与研究是经典大地测量的一种重要方法，能够直接反映地球内部的各种物理现象。随着空间技术的应用和全球地球动力学计划的实施，固体潮观测与相关地震前兆^[2]研究具有显著的前景与价值，更离不开观测所依托的仪器设备（如倾斜仪^[3]、重力仪^[4]、伸缩仪^[5]）的可靠性运转和有效观测。

VP 型倾斜仪^[6-9]作为一种新型的固体潮形变检测仪器，相对于传统 VS 型垂直摆倾斜仪，具有宽频带、低噪声、高增益稳定性和高灵敏度等特点，并已成功应用于武汉大学测绘学院、北京长城计量测试技术研究所、中国地震背景噪声探测、中国地震局地震监测系统运维任务“形变高频观测对比”等多家单位和项目中，取得一定的形变观测成效。自 2012 年投入台网观测以来，将形变观测仪器采样率从 min 提升到 s，采样率的大幅提升使其能记录到更多的高频信息。与地震计、秒采样 gPhone 重力仪等类似，该仪器也能够观测到地震的同震波、地脉动等丰富的地球物理信息。

本文着眼于“十四五”国家防震减灾规划、“新时代防震减灾事业现代化纲要（2019—2035 年）”和国家地震科技发展规划（2021-2035 年）中提升地震监测预报预警能力和升级地震观测技术与系统的长远需求，重点介绍了新型固体潮观测仪器—VP 型宽频带垂直摆倾斜仪的结构原理，讨论其在地震监测中的应用特性和推广前景。

2 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪

2.1 系统组成与主要性能参数

VP 型宽频带垂直摆倾斜仪属于垂直摆类倾斜仪，是三种洞体固体潮观测仪器之一，主要由数据采集、供电、信号处理以及垂直摆等 4 个模块构成，其中信号处理模块分别由低通滤波电路、同步检波电路放大电路、振荡电路、以及整形电路等部分组成，数据采集模块基于 ARM9 处理器开发，该仪器的相关技术参数如表 1 所示。

倾斜仪工作原理可简单归纳为：先由高精度差分式电容位移传感器拾取地倾斜固体潮信号(水平而非垂直应变信号)，然后通过放大、滤波、整形等信号调理电路把这种微变信号转变为电压信号，再通过数据采集器记录电压信号，还原成固体潮信息。

表 1 VP 倾斜仪主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters for VP vertical pendulum inclinometer

序号	指标	参数值	单位
1	传感器精度	0.0001	μm
2	量程	± 2000	mv
3	日漂移	≤ 0.005	ard.s
4	摆长	120	mm
5	自振周期	0.6	s
6	摆重	400	g
7	分辨力	0.0002	ard.s
8	频带宽度	≥ 2	s



图 1 VP 型宽频带倾斜仪实物图

Fig.1 Physical drawing of VP-type broadband vertical pendulum tiltmeter

2.2 机械结构设计

(1) 电容传感器机械结构设计 (如图 2) 包括: ①稳定的垂直摆悬挂机构主题支架; ②高度平行的定片; ③可垂直方向自由摆动的动片; ④可靠的锁摆机构。其中柔丝由两根 $0.02\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 3J53 衡弹性合金制成。加厚的传感器外屏蔽罩和双层(高强度 AB 胶和 703 防水硅橡胶)密封胶的方式, 使得仪器的气密性得到显著改善。

(2) 仪器底座设计。底盘作为垂直摆倾斜仪传感器的承载体, 一方面决定了传感器的基线长度, 另一方面也决定了传感器自身结构的稳定性。对于基线式观测设备, 基线越长信噪比越高, 所以底盘的设计要兼顾仪器的稳定性和信噪比。VP 型宽频带倾斜仪的底盘采取了与 VS 型垂直摆倾斜仪不同的形状, 即等腰直角三角形。这种形状使其获得了比等边三角形更长的基线, 但降低了少许稳定性, 对此等腰直角三角形底盘通过加厚来进行弥补。

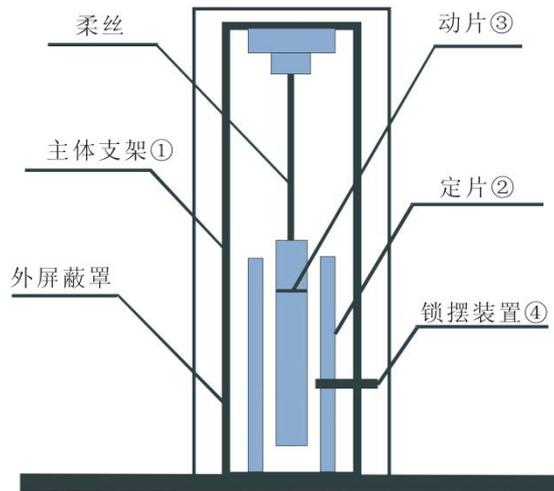


图2 垂直摆机械结构

Fig.2 Mechanical structure of the vertical pendulum

2.3 关键电路设计

信号调理模块振荡电路是倾斜仪的关键电路部分，在仪器中可以为同步检波电路提供同步信号吗，也可以给电容传感器中定片供给激励信号，按照类型不同可以分为方波振荡电路与正弦振荡电路。区别于 VS 型倾斜仪采用正弦波振荡电路，VP 型宽频带倾斜仪采用方波振荡电路，由运放和 RC 构成方波电路，并由 4069 芯片进行整形和反向，空比为 1 : 1 的两路大小相等、相位相反的方波。这是由于方波电路较为简单、调试方便、易起振且方波形态较好，该方波震荡信号的有效值远大于采用正弦波振荡的 VS 垂直摆倾斜仪，使得仪器的滤波常数得到降低，使仪器的频带宽度得到拓展。

图 3 中 R_1 和 C_1 及 U_1 构成 RC 振荡电路，振荡信号通过芯片 CD4069 进行整形输出，得到稳定的时间常数为 RC 的方波振荡信号。

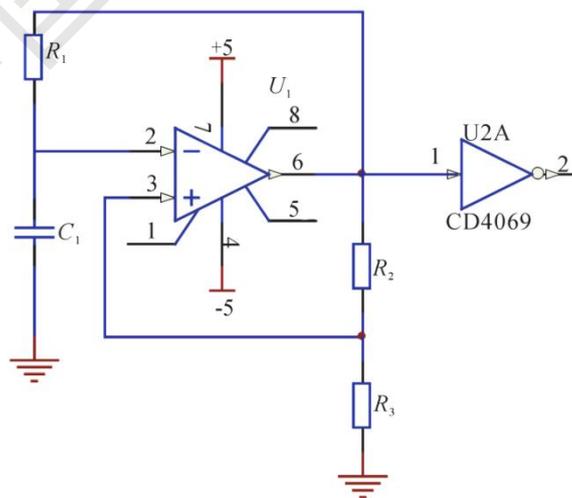


图3 振荡电路设计

Fig.3 Oscillation circuit design

3 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪在地震监测中的应用

3.1 目标区域仪器布设现状与观测资料选取

河北地区共有 12 个定点形变台站，其中 8 个台站布设有 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪,包括怀来台、张家口台、易县台、承德台、赤城台、丰宁台、宽城台及崇礼台，主要分布在黑山寺与狼山断裂带、北东向蔚县山前大断裂带、桑干河断裂带、东西向狼窝沟-崇礼-赤城断裂带和怀安-宣化断裂带、紫荆关断裂带上。为方便对各台观测资料进行对比，在本文后续分析过程中，选取各台站 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪 EW 分量 2020-09 至今的秒采样数据进行处理和分析。

3.2 映震能力验证

由于 VP 型倾斜仪不是专门的测震仪器，为了测试其在天然地震活动发生时的映震能力与效果，选定 2021 年 04 月 16 日发生于河北滦州(39.75° N, 118.72° E) 的 M_s 4.3 级地震案例进行具体分析，该次地震震源深度为 9 km，在河北省内共有 8 台 VP 型倾斜仪记录到本次大地倾斜数据，图 3 为河北省地震局承德地震台的 VP 倾斜仪与宽频带地震仪的记录对比图。从图 3 可看出，二者均记录到地震事件的能量波传递，但是倾斜仪的波形起伏相比地震仪更加分散和均匀，持续时间较长，而宽频带地震仪的地震波触发时刻稍迟，曲线能量更为集中，这也说明两种不同原理和结构的仪器具有显著的地震监测性能差异，在后续的地震学研究和地震预警系统应用工作中，可以进一步地深入研究。

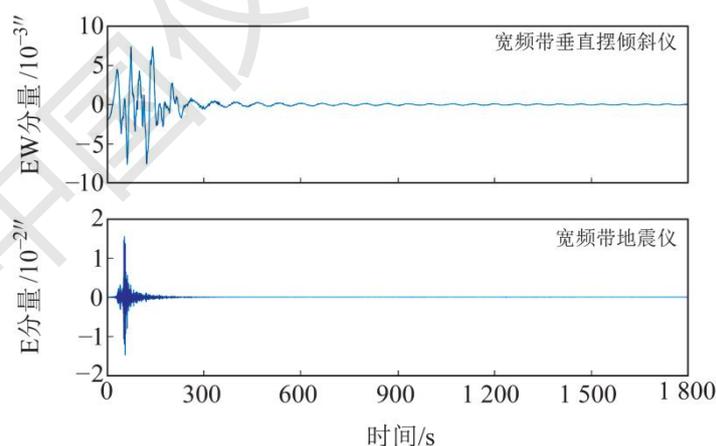


图3 VP倾斜仪与宽频带地震仪记录对比

Fig. 3 Comparison of VP tilt meter and broadband seismograph records

3.3 震级大小对 VP 倾斜仪映震效果的影响

为分析不同震级对河北地区 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪映震能力的影响，本文选取同一地区的 2 个不同震级、震中距差距较小、震源深度相同的地震事件，分别为发生于 2021 年 03 月 05 日的新西兰克马德克群岛 $M7.8$ 地震和 2021 年 03 月 13 日的新西兰克马德克群岛

M5.5 地震，具体记为“EQ-1”和“EQ-2”，二者的震源深度皆为 10 km，震中皆在（-29° N, -177° E）附近。

表2 震级大小对VP倾斜仪映震效果的影响

Tab.2 Effect of magnitude on the seismic effect of the VP tilt meter

台站	地震事件	初动时刻	持续时间/min	波幅/ 10^{-3} "	震中距/km	响应形态
怀来	EQ-1	03:42	161	321	10 424	高频震荡
	EQ-2	22:19	71	1.35	10 409	高频震荡
张家口	EQ-1	03:42	158	383	10 491	高频震荡
	EQ-2	22:18	50	2.2	10 476	高频震荡
易县	EQ-1	03:42	152	157	10 363	高频震荡
	EQ-2	22:17	52	1.07	10 348	高频震荡
承德	EQ-1	03:43	149	322	10 301	高频震荡
	EQ-2	22:17	53	1.37	10 288	高频震荡

由表 2 可知，震级较大的天然地震事件 EQ-2 持续时间明显较长，同一仪器记录的数据与 EQ-1 事件最大相差 108 min；地震波的波幅大小差异明显较大，可达 200 多倍以上；上述分析可证明 VP 倾斜仪对天然地震具有明显的映震能力，在震级大小差异上也能较为敏锐的区分开，可作为地震监测的发震时刻与地震强度指示性仪器或测震辅助观测装置。

4 结论

本文介绍了一种由中国地震局地震研究所自主研发的 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪，并结合天然地震观测实例，具体分析该仪器在多个天然地震事件中的映震能力与效果差异，证明其有一定的地震监测能力，可以作为测震系统的观测仪器与性能比测设备。

参考文献:

- [1] Bredehoeft, John D. Response of well-aquifer systems to Earth tides[J]. Journal of Geophysical Research, 1967, 72(12):3075-3087.
- [2] Sue Y, Hayakawa M. An approach to the validation of thermal and electromagnetic earthquake precursors: Effects of earth tides[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(4-5):428-433.
- [3] Saur P, Ensink F, Frese K, et al. Lumbar range of motion: reliability and validity of the inclinometer technique in the clinical measurement of trunk flexibility. [J]. Spine, 1996, 21(11):1332-1338.
- [4] Prothero W A, Goodkind J M. Earth-tide measurements with the superconducting gravimeter[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(5):926-937.

- [5] Nakao S, Mishina M, Miura S, et al. Earth Tide Observation by Borehole Strainmeters and Extensometers in Tohoku District, Japan[J]. science reports of the tohoku university fifth, 1990,33(01):55-67.
- [6] 马武刚, 吴艳霞, 胡国庆. VP 宽频带潮汐倾斜仪的研制[J]. 地震工程学报, 2015, 37(3):873—877.
- [7] 马武刚, 张肖. VP 宽频带倾斜仪现场自动校准装置设计[J]. 地震工程学报, 2016, 38(4): 1-5.
- [8] 马武刚, 卢海燕, 胡国庆等. VP 型垂直摆倾斜仪校准装置的设计[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(4):152-155.
- [9] 马武刚. 河北 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪映震效能及时频特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(06):643-649.

中国仪器仪表表学