



## 地形变和测震台记录中道路施工信号的特征分析：以宜昌台为例

杨小林

### Imprints of vibratory signals induced by road construction in strain and seismic records: A case study of Yichang station

Yang Xiaolin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-034>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### 宜昌地震台山洞伸缩仪干扰分析

Interference analysis of the cave extensometer at Yichang seismic station

地震科学进展. 2024, 54(5): 331–338

##### 五指山台洞体形变观测资料对热带气旋的响应特征研究

Study on the influence of tropical cyclone to the deformation observation data of Wuzhishan Station

地震科学进展. 2022, 52(7): 328–332

##### 海宁山洞地形变台建设总结与思考

Summary and consideration on the construction of Haining cave topographic deformation station

地震科学进展. 2024, 54(2): 147–152

##### 水下节点地震仪在陆地主动源探测中的应用

Research on the application of underwater node seismograph in land active source detection

地震科学进展. 2023, 53(12): 561–566

##### 安康地区地形变资料同震形变波特征分析

Study on co-seismic deformation wave characteristics of crustal deformation observation records in Ankang area

地震科学进展. 2022, 52(10): 487–494

##### 黄梅台宽频带倾斜仪记录的台风扰动特征分析

Analysis of typhoon disturbance characteristics recorded by broadband tiltmeter at Huangmei station

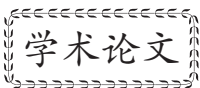
地震科学进展. 2023, 53(7): 309–314



关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨小林. 地形变和测震台记录中道路施工信号的特征分析: 以宜昌台为例 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(3): 143-147. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-034

Yang X L. Imprints of vibratory signals induced by road construction in strain and seismic records: A case study of Yichang station[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(3): 143-147. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-034



# 地形变和测震台记录中道路施工信号的特征分析：以宜昌台为例

杨小林<sup>\*</sup>

(井冈山大学, 江西吉安 343009)

**摘要** 如何阐明道路施工所产生的地形变和地震波信号, 一直是地震预测预报业务中的难点之一。2018 年 3—5 月, 宜昌台观测到了较典型的道路施工信号。为此, 本文以该台为例, 尝试采用数字信号处理方法对其水管仪、垂直摆、伸缩仪和地震仪的观测数据进行综合分析。结果表明: 道路施工振动对水管仪的影响较为显著, 其信号以高频震颤波为主, NS 和 EW 分量所记录的信号主频分别为 0.07 cpm 和 0.059 cpm; 垂直摆和伸缩仪对道路施工时的振动信号并不敏感; 地震仪所记录的道路施工振动信号主要分布在 2.2~4.6 Hz, 波形类似于两个串联的枣珠; 道路施工所产生的振动信号主要集中在 8:00—20:00, 持时可达 12 h。以上认识将有助于对道路施工振动信号的识别, 同时还能对类似信号的溯源研究提供技术参考。

**关键词** 道路施工; 宜昌台; 地壳形变; 地震仪; 震颤

中图分类号: P315.63 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2025)03-0143-05

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2024-034

## Imprints of vibratory signals induced by road construction in strain and seismic records: A case study of Yichang station

Yang Xiaolin

(Jinggangshan University, Jiangxi Ji'an 343009, China)

**Abstract** One of the crucial issues in the field of earthquake forecasting and prediction is the reasonable identification of the tilt, strain, and seismic signals induced by road construction. During March to May 2018, some special disturbances induced by road construction were observed at Yichang station. With the goal of uncovering the impact on the records of the water-tube tiltmeters, vertical pendulums, extensometers, and seismometer, we analyzed the signatures of this disturbance using the signal processing method. The study produced several important results: In particular, the water-tube tiltmeters were more capable of detecting the vibratory disturbances than the vertical pendulums

收稿日期: 2024-02-25; 采用日期: 2024-07-02。

基金项目: 国家自然科学基金(42104091)资助。

<sup>\*</sup> 通信作者: 杨小林(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事地震学研究。E-mail: yang-xiaolin123@163.com。



and extensometers, and the main feature of the disturbances was dominated by high-frequency tremors. Furthermore, the primary frequencies of high-frequency tremors for the water-tube tiltmeters in the NS and EW directions were 0.07 and 0.059 cpm, respectively. The vertical pendulums and extensometers were less sensitive to vibratory disturbance excited by the road construction. The high-frequency tremors in the seismic data occurred mainly at frequencies of approximately 2.2~4.6 Hz, and their whole waveform was analogous to the shape of two connected beads. The vibratory disturbance excited by onset of road construction was recorded at 08:00 and had a duration of approximately 12 h. The results of this study can be used to identify the noise generated by road construction in tilt, strain, and seismic data. Moreover, the method used in this work may contribute to traceable diagnosis.

**Keywords** road construction; Yichang station; crustal deformation; seismometer; tremor

## 0 引言

随着地形变、地震台网监测能力的不断优化,其连续波形中的阶变、脉冲和高频震颤信号(相对于潮汐频段)也愈加丰富。然而,这些异常变化的成因并不单一。从已有的研究成果来看,它们既可能源自火山活动<sup>[1]</sup>、断裂滑移<sup>[2]</sup>等大地构造事件,同时也可能是因气象<sup>[3]</sup>、水文<sup>[4]</sup>、人类活动<sup>[5]</sup>和仪器<sup>[6]</sup>等因素所致。因此,如何科学阐明其真实的物理源,一直都是地震前兆、地球动力学和环境地震学等研究中的一大难点。

单就道路施工而言,其对定点地形变和地震仪的影响形态究竟如何?一直是一个值得深入探究的课题。例如,日本鎌田山台伸缩仪在 1974 年 2 月 17 日—7 月 31 日期间,相继记录到了 40 余次拉张型的阶变,究其原因,主要是在距该台 150 m 处的公路隧道内有爆破作业<sup>[7]</sup>。不仅如此,若台站周边的道路上存在挖掘机、破碎锤、自卸车和搅拌机等重型机械激励时,那么地形变曲线上还会出现脉冲或高频震颤波,这种现象业已被四川姑咱和云南腾冲台所捕

捉<sup>[8]</sup>。从地震预测预报业务的视角来看,厘清此类信号的物理源具有重要的现实意义。

2018 年 3 月初,湖北宜昌台南侧约 150 m 处的道路及边坡发生了坍塌事故,为了抢通损毁路段,施工方集结了挖掘机和自卸车等机械,对此地实施了为期 2 个月的土方回填和边坡修缮等作业。与此同时,该台地形变和地震仪均记录到了显著的振动噪声<sup>[9-10]</sup>,这为定量揭示道路施工振动信号提供了理想的观测实证,其例证价值较高。有鉴于此,本文对该现象进行了系统且深入的个例分析,相关结果将有助于台域及周边道路施工振动信号的理性识别。

## 1 台站及仪器概况

宜昌台始建于 1982 年,属国家形变基本台,该台位于宜昌市夷陵区小溪塔森林公园内(图 1a),其所处地层倾向南西、倾角约为 3°~26°,呈单斜构造。该台台基岩性为白垩系下统石门组砾岩,岩体坚硬且完整性较好,其主洞长约 177 m,洞体顶部覆盖层的最大厚度达 29 m,洞内气温常年维持在 18℃ 上

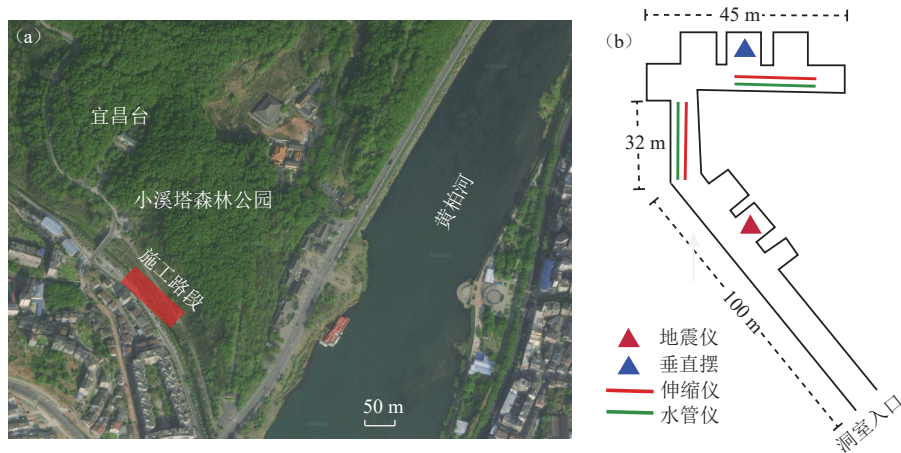


图 1 宜昌台所处位置(a)和洞室结构及其仪器布设(b)

Fig. 1 Overview of the location of Yichang station (a) and plan view of the tunnel and sites of the instruments (b)

下, 年变幅度小于  $0.2^{\circ}\text{C}$ 。

目前, 宜昌台主要有伸缩仪、水管仪、垂直摆和地震仪等测项, 其仪器类型及在洞室内的布设位置等详见图 1b 和表 1。

表 1 宜昌台地形变和地震仪类型

Table 1 Types of terrain deformation instrument and seismometers for Yichang station

测项	仪器型号	分量	基线长度/m	采样率
伸缩仪	SS-Y	NS分量	30.03	1次/min
		EW分量	29.92	
水管仪	DSQ	NS分量	30.03	
		EW分量	29.92	
垂直摆	VP	NS分量	/	
		EW分量		
地震仪	BBVS-120	NS、EW和UD分量	/	50 Hz

2 道路施工详情

此次道路施工地点位于宜昌台南侧, 图 1a 中的红色区域标注了具体的修缮路段, 施工期为 2018 年 3 月 8 日—5 月 24 日, 施工场地有挖掘机、自卸车、搅拌机和破碎锤等多种重型机械(图 2), 作业时间一般为 07:30—21:00。



图 2 道路施工现场照片(修改自文献 [9])

Fig. 2 Photograph of the road construction site (modified from reference [9])

3 道路施工的振动信号特征

3.1 地应变和地倾斜仪记录的信号

在整个施工过程中, 宜昌台捕捉到了大量且规律的信号。以 2018 年 4 月 6 日为例, 从图 3 中可以明显看出水管仪 NS 分量含有高频震颤波, 其持时约为 11 h (09:00—20:00)。但值得注意的是, 其他测项(向)似乎并未记录到该现象, 这是由于此种弱信号

被潮波湮没了? 为此, 本文采用 2 阶 Butterworth 高通滤波器, 对各测项进行了无相移的滤波处理, 该步骤旨在滤出周期低于 1 h ( $f > 1\text{ cph}$ )(注: cph 指周期数每小时)的高频信号, 具体结果如图 4 所示。

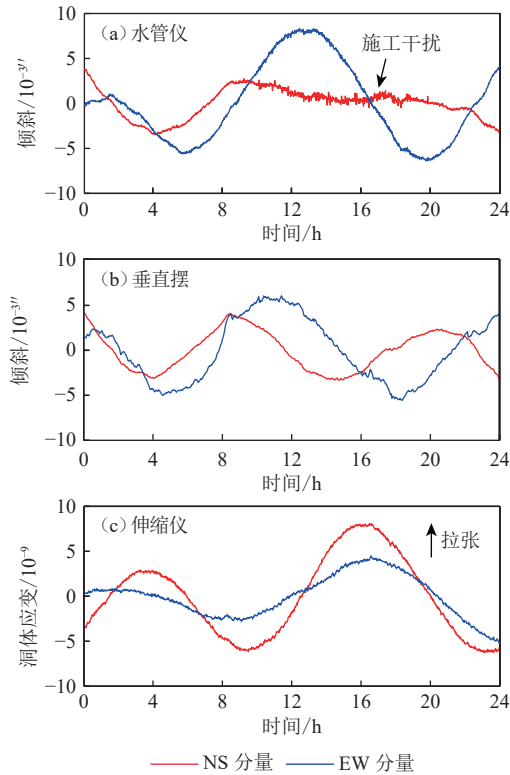


图 3 2018 年 4 月 6 日宜昌台记录的时变曲线  
Fig. 3 Time varying curve recorded by Yichang station on April 6, 2018

从滤波结果来看, 水管仪 NS 和 EW 分量中均含有显著且连续的高频震颤波(图 4a), 其初始及结束时刻与当天的作业时段十分吻合。相比之下, 垂直摆和伸缩仪就未能观测到类似的波形(图 4b 和图 4c)。这一方面说明了水管仪对施工振动信号更为敏感, 另外同时也表明不同类型仪器观测原理和频响的差异性[11-13]。

进一步用快速傅里叶变换(FFT)解析了这些高频震颤波的主频, 从振幅谱结果来看(图 5), 水管仪 NS 和 EW 分量的主频点分别为 0.07 cpm 和 0.059 cpm (注: cpm 指周期数每分钟), 其对应的周期约为 14 min 和 17 min。相比于 NS 分量, EW 分量的主频要偏低一些, 这可能是由于该分量距施工地更远, 高频振动信号也因此快速衰减。

3.2 地震仪记录的信号

从之前的研究来看, 一些学者仅关注道路施工对地形变测项的影响, 而忽略了地震波记录[8]。显



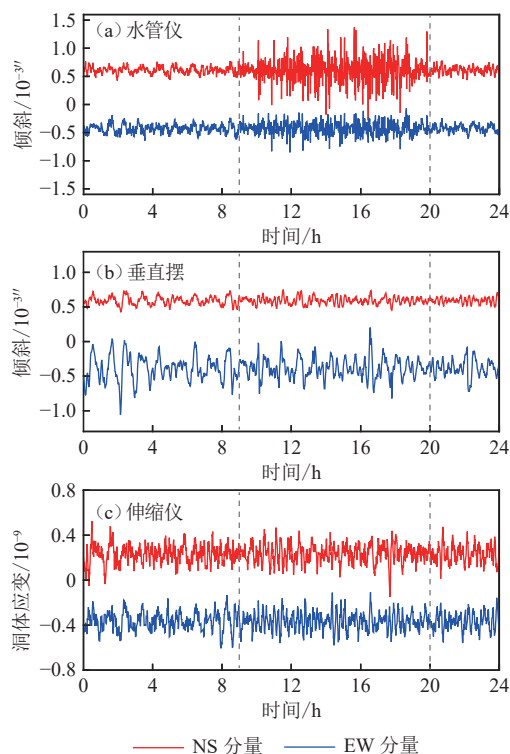


图4 2018年4月6日宜昌台测值的高通滤波( $f > 1$  cph)波形

Fig. 4 High-pass filtered ( $f > 1$  cph) waveform measured at Yichang station on April 6, 2018

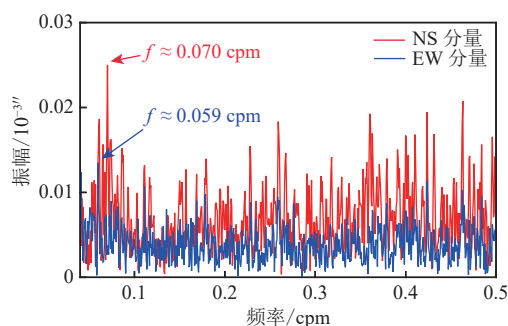


图5 水管仪高频震颤波的振幅谱

Fig. 5 The Fourier spectra (FFT) of tremors recorded by the water-tube tiltmeters

然,这并不足以揭示此类信号的全貌。鉴于此,笔者又专门对2018年4月6日宜昌台的测震波形进行了分析。首先,对垂直分量的原始数据进行去仪器响应和去均值等预处理,之后再转化成速度波形,所得结果如图6所示。此处需要说明的是,国家地震科学数据中心(<https://data.earthquake.cn>)所提供的连续波形的采样率为10 Hz。

从原始波形可以清晰地看出,地震仪较好地记录了施工的振动过程(图6a)。在8:00—20:00时段,震颤波的能量明显高于背景噪声,其功率谱密度

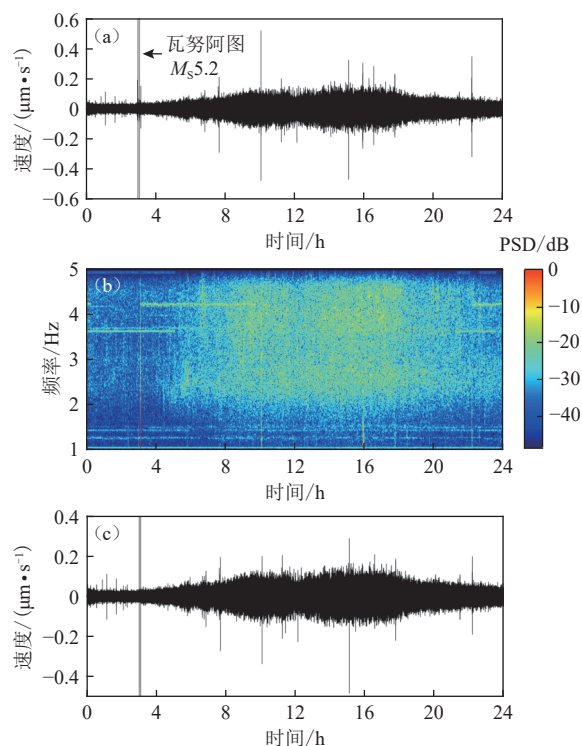


图6 2018年4月6日宜昌台地震仪观测的连续波形(a),功率谱密度(b)和滤波图(c)

Fig. 6 Continuous waveform (a), power spectral density (b) and filtering diagram (c) observed by the seismometer at Yichang station on April 6, 2018

(PSD)较大的频段主要分布在2.2~4.6 Hz(图6b)。为了更好地揭示震颤波的形态特征,本文采用了2阶Butterworth带通滤波器(2.2~4.6 Hz)对原始波形进行了滤波处理,滤波后的结果如图6c所示。一个有趣的现象是,在中午12点左右,震颤波的振幅明显减弱,这主要是由于施工人员就餐和休息所致。总体来看,整个施工过程所产生的震颤波形状与两个串联的枣珠相仿,而这与气旋等天气事件所产生的纺锤状震颤波有所差异<sup>[3]</sup>。

综上所述,可以看出台站周边道路施工产生的高频震颤波,可以在不同频段被水管仪和地震仪观测到。

## 4 结论和讨论

为系统揭示宜昌台临近道路施工所产生信号的特征,本文采用数字信号处理方法,对该台水管仪、垂直摆、伸缩仪和地震仪的测值进行了深入分析,主要结论如下:

(1)相比于垂直摆和伸缩仪,水管仪对道路施工振动更为敏感,其记录到信号以高频震颤波为主,持

时与当天施工时段高度相关。水管仪 NS 和 EW 分量所探测到的震颤波主频点分别为 0.07 cpm 和 0.059 cpm。

(2) 在更高频段, 道路施工所产生的振动信号可以被地震仪有效捕捉到, 其振动主频集中在 2.2~4.6 Hz, 波形类似于两个串联的枣珠。

本工作仅针对宜昌台进行了个例分析, 所得认识可能具有很大的局限性。在未来的工作中, 尚需对更多的道路施工实例进行剖析。另外, 这类信号的影响范围究竟有多大? 无疑也是一个值得深入探究的

问题, 下一步我们将着重对宜昌台周邻的测震台进行系统研究。而随着我国基础设施建设的不断推进, 一些台站难免会面临类似的问题, 希望本文的研究能对其起到启发的作用。

## 致谢

国家地震科学数据中心提供了宜昌台的地震波形; 两位审稿专家提出了诸多建设性意见, 对稿件质量的提升帮助很大。作者在此一并表示感谢!

## 参考文献

- [1] Konstantinou K I, Schlindwein V. Nature, wavefield properties and source mechanism of volcanic tremor: A review[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2003, 119(1/4): 161-187
- [2] Shelly D R, Beroza G C, Ide S, et al. Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip[J]. *Nature*, 2006, 442(7099): 188-191
- [3] 张雁滨, 蒋骏, 李胜乐, 等. 热带气旋引起的震颤波 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(2): 335-341  
Zhang Y B, Jiang J, Li S L, et al. The tropic cyclone aroused the tremor[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(2): 335-341
- [4] Díaz J. On the origin of the signals observed across the seismic spectrum[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 161: 224-232
- [5] Zhao Y M, Li Y E, Nilot E, et al. Urban running activity detected using a seismic sensor during COVID-19 pandemic[J]. *Seismological Research Letters*, 2022, 93(1): 181-192
- [6] 张秀萍, 叶青, 张晓刚, 等. SS-Y 型伸缩仪典型故障图像特征分析及处理 [J]. *地震地磁观测与研究*, 2022, 43(2): 134-144  
Zhang X P, Ye Q, Zhang X G, et al. Analysis and process of image features of typical fault of SS-Y type extensometer[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2022, 43(2): 134-144
- [7] 足立昭. 観測坑近傍で実施されたトンネル工事の伸縮計記録への影響について [J]. *測地学会誌*, 1976, 22(1): 40-48  
Adachi A. On effects of tunnel excavation executed in the vicinity of an observation gallery on strain records[J]. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 1976, 22(1): 40-48
- [8] 张凌空, 牛安福. 姑咱地震台张应变异常信号与修路施工间关系探讨 [J]. *地震地磁观测与研究*, 2021, 42(1): 98-104  
Zhang L K, Niu A F. Discussion on the relationship between the abnormal signal of tensional strain and the construction of road repair at Guza station[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2021, 42(1): 98-104
- [9] 王杰. 2019 年 5 月 21 日湖北宜昌台水管仪东西分量 [R]. 武汉: 湖北省地震局, 2019  
Wang J. Analyzing the anomalous changes recorded by water-tube tiltmeter in EW direction at Yichang station, Hubei Province[R]. Wuhan: Hubei Earthquake Agency, 2019
- [10] 涂先新, 钱山, 曾智辉, 等. 湖北省宜昌台水管倾斜仪异常核实与分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2019, 39(增刊 2): 79-83  
Tu X X, Qian S, Zeng Z H, et al. Abnormal verification and analysis of water pipe tiltmeter at Yichang station, Hubei Province[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(S2): 79-83
- [11] 崔庆谷, 杨星, 杨跃文. 水管仪、垂直摆及水平摆高频段记录数据差异的对比 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(4): 175-178  
Cui Q G, Yang X, Yang Y W. Comparisive study on the perormance in high frequency of water tube tiltmeter, vertical pendulum tiltmeter and horizontal pendulum tiltmeter[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(4): 175-178
- [12] 袁曲, 许裕之, 吕品姬, 等. 宜昌台三类地倾斜仪观测数据的对比研究 [J]. *地震工程学报*, 2019, 41(6): 1536-1544  
Yuan Q, Xu Y Z, Lü P J, et al. A comparative study of the observation data from three kinds of ground tiltmeter at Yichang station, China[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2019, 41(6): 1536-1544
- [13] 郭昱琴, 李盛, 张慧, 等. 五指山台洞体形变观测资料对热带气旋的响应特征研究 [J]. *地震科学进展*, 2022, 52(7): 328-332  
Guo Y Q, Li S, Zhang H, et al. Study on the influence of tropical cyclone to the deformation observation data of Wuzhishan station[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2022, 52(7): 328-332