

高曙德, 罗维斌, 张博, 等. 编码源地电观测对干扰信号的抑制试验——以通渭台观测为例[J]. 地震工程学报, 2020, 42(5): 1096-1103. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1096

GAO Shude, LUO Weibin, ZHANG Bo, et al. Experiment on Restraining Interference Signal by Coded-Source Geo-electricity Observation: A Case Study of the Observation at Tongwei Station[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1096-1103. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1096

编码源地电观测对干扰信号的抑制试验 ——以通渭台观测为例

高曙德¹, 罗维斌², 张博¹, 武善艺¹, 李娜¹, 曹玲玲¹, 窦喜英¹

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州资源环境职业技术学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 随着城镇化进程加快使中国的部分地面电阻率观测台站遭受到严重的电磁干扰, 导致地电阻率测量产生了较大的误差, 淹没了地震引起的地电阻率变化。本文选取通渭地震台, 通过运用编码源地电阻率观测技术和循环互相关计算方法, 改变发射序列信号周期(观测时间长度)和测量叠加次数使激发极化效应更加充分, 有效地抑制环境随机噪声, 在高铁、基建等干扰运行或活动时段获得离散度较小的地电阻率数据。这种新的地电阻率观测体系, 对现有地面地电阻率台站持续发展提供了技术保障, 能为地震预报与科学研究提供可靠的数据。

关键词: 编码源地电阻率观测; 高铁干扰; 台站试验

中图分类号: P315-24

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)05-1096-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1096

Experiment on Restraining Interference Signal by Coded-Source Geo-electricity Observation: A Case Study of the Observation at Tongwei Station

GAO Shude¹, LUO Weibin², ZHANG Bo¹, WU Shanyi¹, LI Na¹, CAO Lingling¹, DOU Xiying¹

(1. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech College, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In past earthquakes, we found that the change in the observed geo-resistivity is an effective basis for earthquake prediction. In recent years, the acceleration of urbanization has caused serious electromagnetic interference to some observation stations, resulting in a large error in geo-resistivity measurements. In this study, Tongwei station, Gansu Province, was selected as a case study. Various complex electromagnetic interferences are present near the station, such as high-speed railways, highways, buildings, and power consumption by industrial production.

收稿日期: 2020-07-10

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划(XH18047); 甘肃省地震局创新团队专项资助(2019TD-02-03)

第一作者简介: 高曙德(1970—), 男, 甘肃秦安人, 理学学士, 副研究员, 主要从事地震预测和电磁监测研究。

E-mail: gsd_gsd@126.com.

Here, the coded-source earth resistivity observation technology and the cyclic cross-correlation calculation method were used, and the transmission sequence signal cycle (observation time length) was changed to make the excitation polarization effect more adequate. The results showed that the environmental random noise could be effectively suppressed. Moreover, geo-resistivity data with small dispersion could be obtained under the interference of high-speed railway and infrastructure. This new geo-resistivity observation system can provide technical support for the sustainable development of existing geo-resistivity stations and reliable data for earthquake prediction and scientific research.

Keywords: geo-resistivity observation based on coded source; high-speed railway interference; station experiments

0 引言

随着城镇化进程的加快,地震台站受到日益严重的电磁干扰和其他因素的影响,干扰引起的视电阻率变化淹没了震前孕育的异常变化^[1-2]。近年地震系统探索用井下观测替代传统地面观测,在避开干扰上取得一定成效^[1,3-4],也暴露一些问题,如成本高、一次性投入风险高,其次要普遍改造需要大量的资金支撑,还受场地条件的限制,要改变目前的窘境实现地电阻率监测成为短临地震预报的突破点,地震台站亟需引入新的观测技术和方法来提高地电阻率观测精度和数据质量。编码源系统辨识法是可以有效去除随机噪声和干扰^[5-6],在机械、电子、自动化、生物医学、金属矿电法勘探等领域得到了应用和推广,赵璧如等^[7]介绍了基于 CDMA 技术的地电阻率高精度测量方法;罗维斌^[8]提出了基于逆重复 M 序列伪随机频率域电磁勘探方法原理,并讨论了对各种干扰的压制方法及测量精度;基于 PRBS 伪随机电法及观测系统研究也有新的进展^[9-12],武欣等^[13]研究了 m 序列伪随机编码源电磁响应的精细辨识问题;张宇等^[14-15]利用相关检测技术研制了交流地电阻率观测仪器在江宁台观测试验,抗干扰性得到了改善,但该项技术应用到在地震地电阻率监测中仍有一段距离,无专用仪器和资料处理方法。常规电阻率法采用直流(单频法)测量得到视电阻率,而编码源地电阻率在时间域观测,通过频率域的计算可以一系列频率点的地电阻率,信息更丰富;但是如何从辨识结果中提取更能指示物性变化的电性参数,还缺乏系统地研究,对辨识结果的认识还不充分。基于上述因素,本文介绍编码源地电阻率观测在通渭地电台试验时,对高铁等干扰信息的记录和计算地电阻率时对干扰信息的分离,来获取地下介

质电阻率的真实变化。

1 通渭台的基础资料

通渭地电台始建于 1971 年,是国家级基本台,至今已有近五十年历史,积累了丰富的基础资料。该台位于通渭县城东南约 3 km 处的田家坡村,地处青藏块体东缘与鄂尔多斯地块和华南地块的交接地带,构造上处于通渭断裂 NNE 方向,地质构造复杂,是地震多发区,1718 年发生通渭 7.5 级地震,距离现今最近的一次较大地震 2013 年岷县—漳县 6.6 级地震。通渭地电台测区属于剥蚀河谷堆积地形,位于散渡河 II 级阶地上,表面第四系地层总厚度小于 20 m,下为第三系砂质泥岩及古生代变质岩,潜水埋深 10~16 m 之间,电测深曲线为 KH 型^[16]。目前采用 ZD8M 数字地电仪进行日常观测,每小时产出一组观测数据。外线路共有三个测向: N20° W、EW、EW' 向(图 1),布极参数如表 1 所示。2012 年 3 月开工的通渭县综合物流园施工(占地 350 亩)区位于地电阻率测区内,几乎占距大半个测区,施工影响最大的 5 个电极是 EW 长、短极距测道的西供电极 A3 和 A3',短极距 EW 测道 M3' 测量极, N20° W 测道 A4 供电极和 M4 测量极(图 1)。2014 年以来、由于通信光缆的建设和宝兰高铁施工从测区边缘通过(EW 测道西供电极距离铁路最近),测值出现了多次突变,随着通渭县工业园区的不断发展,园区中的企业陆续投入生产运营,工业用电逐渐增强,园区地表的工业杂散电流干扰日趋严重,特别是 2017 年 7 月宝兰高铁线路通车后,测区干扰进一步加剧,从 2012—2019 年日均值曲线看出最大变化幅度达到 10%~15%(图 2),干扰引起的视电阻率变化淹没了震前孕育的异常变化,地震台站亟需引入

新的观测技术和方法来提高地电阻率观测精度和数据质量。

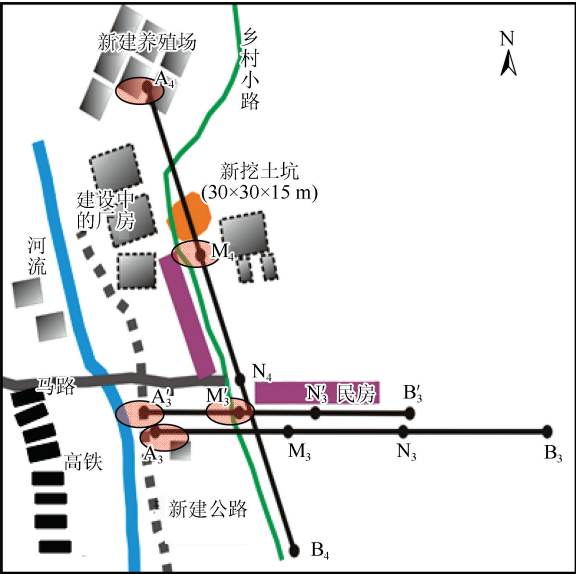


图 1 通渭台地电阻率布极图和测区环境影响示意图
Fig.1 The geo-resistivity layout diagram of Tongwei station and the environmental impact of the survey area

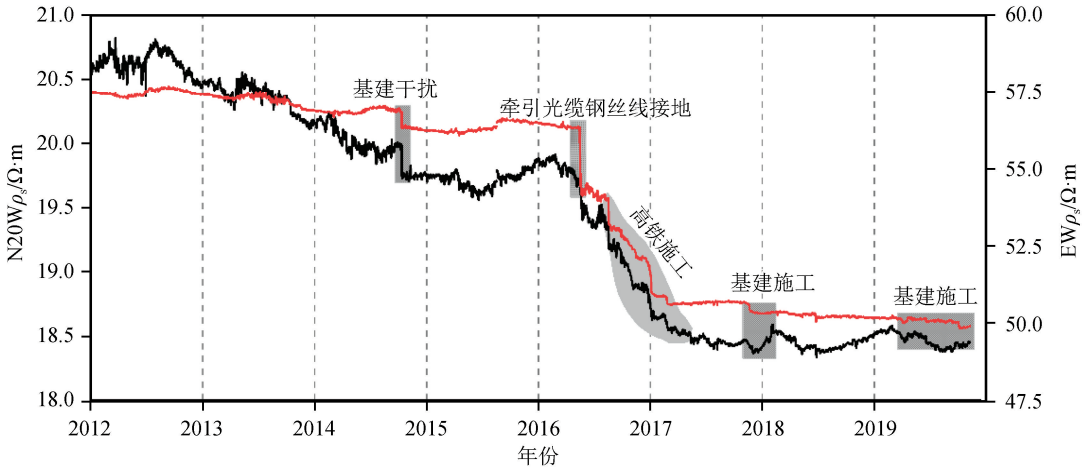


图 2 2012—2019 年通渭台地电阻率日均值曲线
Fig.2 Daily mean curve of geo-resistivity of Tongwei station in 2012—2019

(按照输入激励信号的时间序列周期和采样率触发软件程序生成无干扰信号),采用循环互相关法或高阶循环统计量法计算输出电压信号与参考信号,以及激励电流信号与参考信号的互相关时间序列,经 FFT 变换到频率域,通过谱线峰值拾取,频率对齐后计算就获得地电系统的频率响应(地电阻抗谱),代入装置系数 K 最终计算得到视电阻率谱(幅度和相位)。由于系统叠加的随机噪声和干扰与输入信号不相关,互相关运算后被消减,因此利用互相关运算,在辨识得到系统频率响应的同时压制了随机噪声及干扰。

表 1 通渭台地电阻率布极参数

Table 1 Distribution parameters of earth resistivity in Tongwei station

布极方位	AB/km	MN/km	装置系数 K/km
N20°W	1.100	0.300	2.932
EW	1.100	0.300	2.932
EW'	0.700	0.200	1.767

2 编码源地电阻率观测方法及试验

地电阻率测量在某种意义上也是一个系统辨识过程,编码源系统辨识法是一种可以有效去除随机噪声和干扰的系统辨识方法,该技术在何继善院士^[17]提出 2^N 系列伪随机电磁法理论基础上改进,核心思想是基于 PRBS 编码源电磁法通过同步采集输入电流信号、及大地电磁响应输出信号,由冲激响应和频率响应计算视电阻率等参数。通过 AB 供电电极发送逆重复 M 序列伪随机编码源信号电流,激励地电系统,同步采集输入电流信号和系统测量电极 MN 的电压信号,并记录为时间序列^[5-6]。加入与发送电流编码相同、且序列长度相同的参考信号

2.1 基本原理

采用 PRBS 或逆重复 M 序列作为激励信号波形,利用互相关法辨识未知系统的频率响应,系统输入、输出的互相关有^[18-19]:

$$R_{yu}(\tau) = h_s(\tau) * h_e(\tau) * R_u(\tau) \tag{1}$$

式中: $h_s(\tau)$ 为观测系统的冲激响应; $h_e(\tau)$ 为待辨识未知系统的冲激响应; $R_u(\tau)$ 为输入信号的自相关; $R_{yu}(\tau)$ 为系统输入与输出信号的互相关函数。在复数域, $H_s(s)$ 和 $H_e(s)$ 分别为观测系统自身 $h_s(\tau)$ 和待辨识系统的 $h_e(\tau)$ 拉普拉斯变换,式(1)在频率域可变换为:

$$S_{yu}(s) = H_s(s) \cdot H_e(s) \cdot S_u(s) \tag{2}$$

式中: $S_{yu}(j\omega)$ 和 $S_u(j\omega)$ 分别为系统输入与输出信号的互相关函数 $R_{yu}(\tau)$ 的拉普拉斯变换,以及系统输入信号自相关函数 $R_u(\tau)$ 的拉普拉斯变换; $H_e(j\omega)$ 为系统的频率响应。

基于循环互辨识法工作流程如图 1 所示。在计算数据中引入了一个参考信号 ss(按照输入激励信号的时间序列周期和采样率触发软件程序生成的无干扰信号),对于两个时间序列采用循环互相关法计算,将等长的两个时间序列分别首尾环状相连,这样在计算中序列循环移位,无需补零^[20],且互相关峰等幅。当观测值是接收电极间的电压值 U_{mn} 时间序列时(MN 为接收电场的测量间距),由观测电压 U_{mn} 和激发电流 I 循环互相关辨识得到的大地的阻抗谱为 $Z_{U_{mn}}(\omega)$,由此可得大地的视电阻率谱为:

$$\rho_{U_{mn}}(\omega) = K \times Z_{U_{mn}}(\omega) \tag{3}$$

式中: K 为观测装置系数: $K=2\pi\left(\frac{1}{AM}-\frac{1}{AN}-\frac{1}{BM}+\frac{1}{MN}\right)$;A 和 B 是供电电极;M 和 N 是测量电极。

2.2 观测方案

试验选用甘肃省地震局通渭地电台站,由于该台观测场地距离居民生活区 0.2 km,距离 G110(通渭段)0.6 km,S207 公路 2 km,宝兰高铁 1 km,

各种电磁干扰交错;选用台站电极距离高铁最近 EW 测道观测线路(与高铁线垂直) $A_3B_3=1\ 100\text{ m}$, $M_3N_3=300\text{ m}$ 采集数据(图 1),从 2018 年 3 月 25 日开始到 6 月进行了定点连续观测,仪器选用由高曙德等^[6]试制的测量样机,观测开始时间选用在每个整点后 20 分测量。在观测期间进行了两次参数调整,4 月 27 日以前发射编码序列周期 $T=14\text{ s}$,观测时间 11 分钟,数据采样率为 2 000 Hz;以后发射编码序列周期 $T=25.2\text{ s}$,观测时间 23 分钟,数据采样率为 1 000 Hz;对发送电流和接收电压多周期同步采集为时间序列,研究同步采样和不同步采样对于辨识结果的影响,通过计算观测结果来调整和优化仪器参数,从而确定最佳的观测参数。

3 资料分析

2018 年 3 月 25 日开始到 6 月进行了定点连续观测数据试验,在观测期间记录到高铁经过通渭地电测区时在时间序列波形,本文绘制 2018 年 4 月 6 日 8:40 通渭地震台编码源地电仪记录到高铁经过时的曲线(图 3),红色的波形是仪器发射编码源电流信号,蓝色的波形是电压的时间序列曲线(振荡部分高铁经过时的记录)。

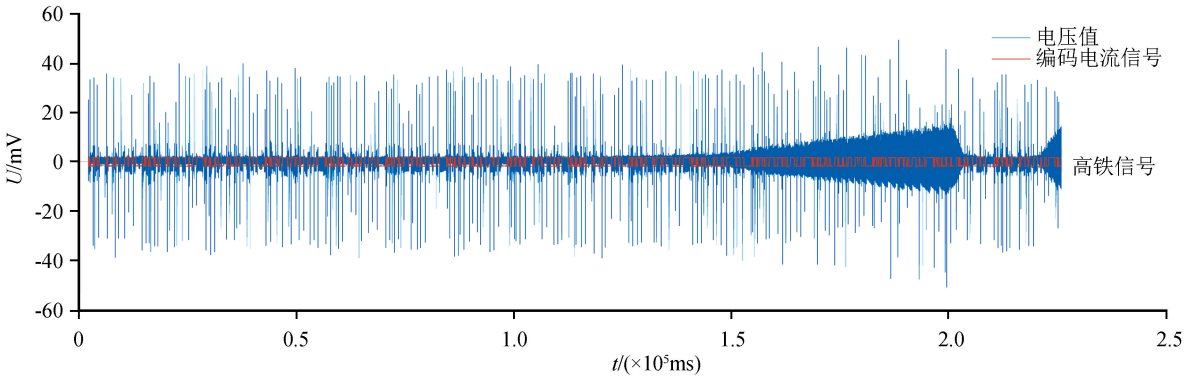


图 3 2018 年 4 月 6 日 8 时 40 分通渭地震台编码源地电仪记录到发生电流波形(红色)和电压波形(振荡部分高铁经过时的记录)

Fig.3 At 8:40 on April 6, 2018, the current waveform (red) and voltage waveform (record of the high-speed railway passing through the oscillating part) recorded by the code source geometer of Tongwei seismic station

对 2018 年 3 个月试验观测,将两次发射不同周期的电流信号与对应观测数据做循环相关互运算后,频率域计算得到地电阻率谱,通过抽频得到各频率点对应的地电阻率值。首先看第 1 时段观测结果,2018 年 4 月 4—6 日观测数据计算得到不同频

率(0.2 Hz、0.5 Hz、0.78 Hz、1.0 Hz)视电阻率绘制的曲线分析(图 4),这 3 天发射电流信号的周期 $T=14\text{ s}$,3 天内不同频率视电阻率整点值变化幅度基本上 30~32.5 $\Omega \cdot \text{m}$ 范围波动(6 日 13 时的资料变化超出范围),变化幅度 2.5 $\Omega \cdot \text{m}$,其中 00~08 h,

23~24 h 测值的离散度较小,因为这个时段没有高铁和动车等通行干扰较小^[6]。

其次、第 2 时段观测结果,2018 年 5 月 12—14 日观测数据计算得到不同频率(0.2 Hz、0.5 Hz、0.8 Hz、1.0 Hz)视电阻率绘制的曲线分析(图 5),发射

信号的周期 25.2 s,3 天不同频率视电阻率整点值变化在 32.5~33.5 Ω·m 范围波动,变化幅度 1.0 Ω·m,尽管白天 08~20 h 有高铁和动车等通行等干扰,但测值明显比图 5 观测数据稳定,离散度较小。

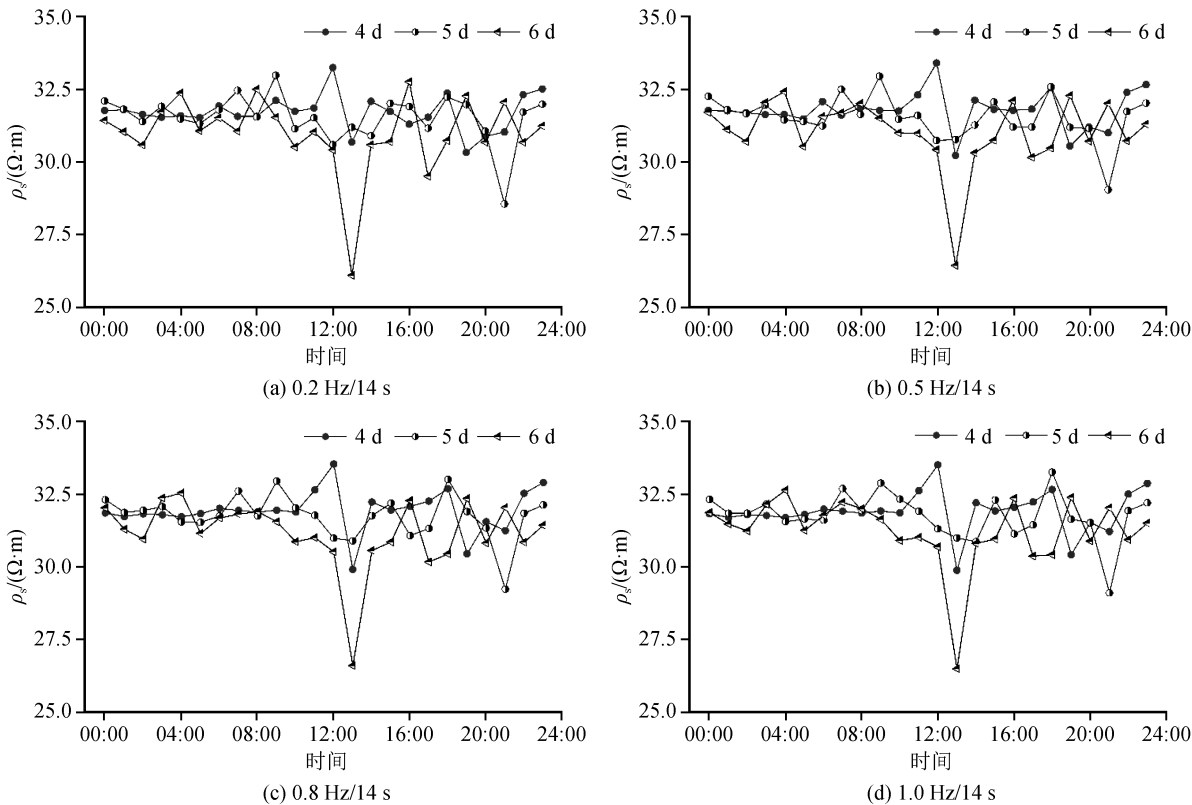


图 4 2018 年 4 月 4—6 日通渭地震台编码源观测(发射周期 14 s)不同频率地电阻率对比曲线
Fig.4 Comparison curve of earth resistivity at different frequencies of code source observation
(launch cycle 14 s) at Tongwei seismic station during April 4—6,2018

对比分析 5 月 12—14 日同一天不同频率(0.1 Hz、0.3 Hz、0.5 Hz、0.8 Hz、1 Hz)视电阻率结果,整点值变化幅度 32.5~33.5 Ω·m 范围波动(图 6),说明 1 Hz 以下频率计算的电阻率基本接近,表明各个频率点观测地层的电阻率是同性介质,其次、说明通渭地电测区有各种干扰(建筑施工、工业生产、高铁和其他车辆运行、雷电、降雨等气象因素),但在低频段测值基本稳定,表明编码源地电仪器可以抑制外界杂散电流,具有一定的抗干扰能力。将 2018 年 3 月 25 日至 6 月 8 日通渭地震台编码源地电仪器观测 0.5 Hz 频率点的地电阻率和幅频率日值绘图,发现 4 月 27 前后地电阻率和幅频率变化波动相对明显(图 8),在 27 日以前日均值几乎在 30.0~32.5 Ω·m 范围波动,而 27 日以后测值 32.5 Ω·m 附近波动,这是由于地电阻率测量均会产生激发极化效应,在供电作用下不同的电流强度地下介质均产生

不同程度极化效应。本次试验中用 25.2 s 发射电流信号周期,延长了供电时间和测量叠加次数,所以产生的激发极化效应比 14 s 周期的强,使激发极化效应更加充分,表现地电阻率测值高且更加稳定;从幅频率的变化也可以看出,增大周期后幅频率几乎在零值附近波动,与地电阻率变化同步。通过改变发射序列信号周期(观测时间长度)可以提升抗干扰能力,在高铁等干扰活动时段也能获得离散度小的数据。

4 结论与讨论

(1) 在通渭试验时编码源系统辨识技术对高铁等干扰具有较强的抑制,利用循环互相关运算,在辨识得到系统频率响应的同时压制了随机噪声及干扰,观测到地电阻率能够真实反映地下介质的电性变化。

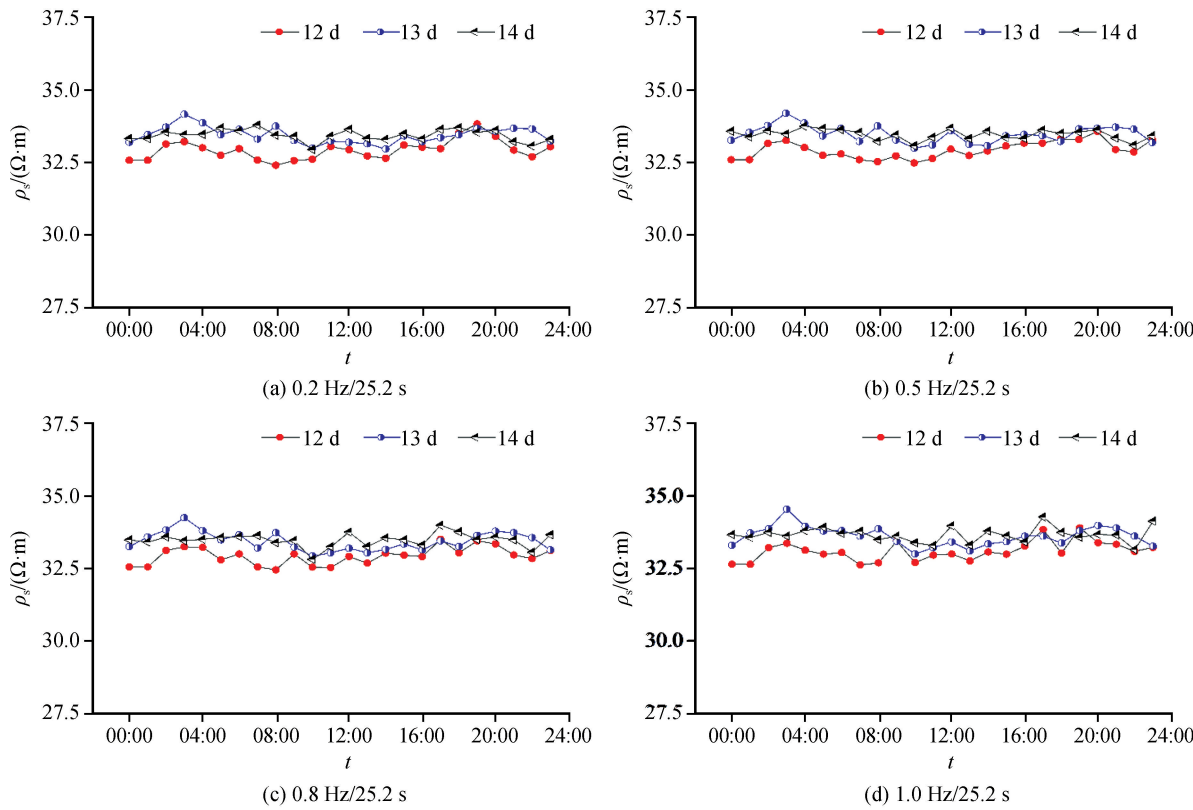


图 5 2018 年 5 月 12—14 日通渭地震台编码源观测($T=25.2$ s)不同频率视地电阻率对比曲线

Fig.5 Comparison curve of apparent earth resistivity at different frequencies of code source observation ($T=25.2$ s) at Tongwei seismic station from May 12 to 14, 2018

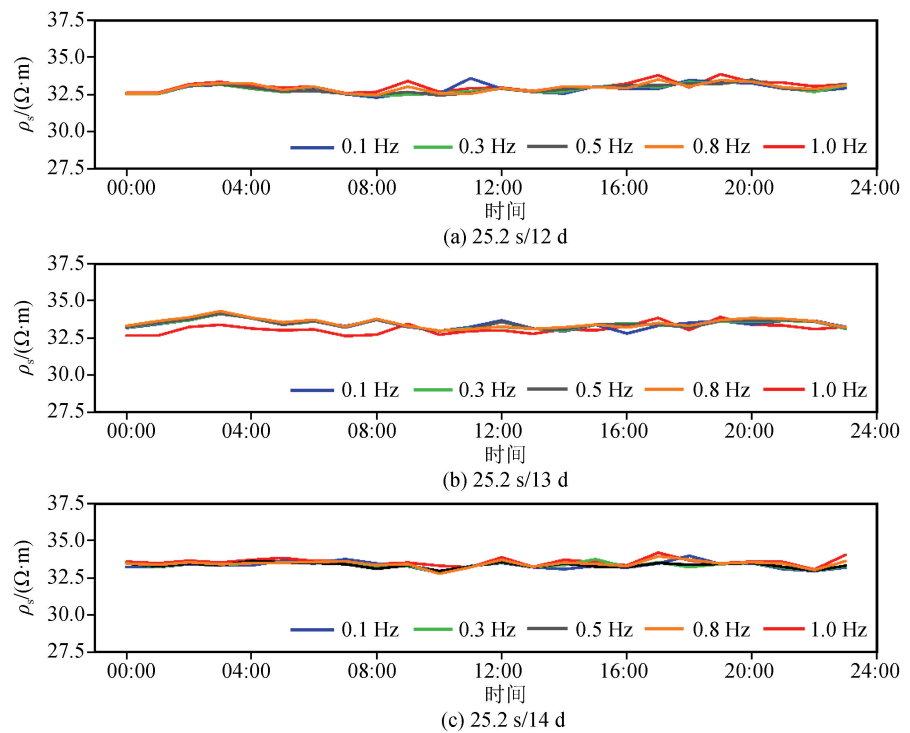


图 6 2018 年 5 月 12—14 日通渭地震台不同频率同一天视电阻率的变化对比曲线

Fig.6 Comparison curve of apparent resistivity changes on the same day with different frequencies at Tongwei seismic station during May 12—14, 2018

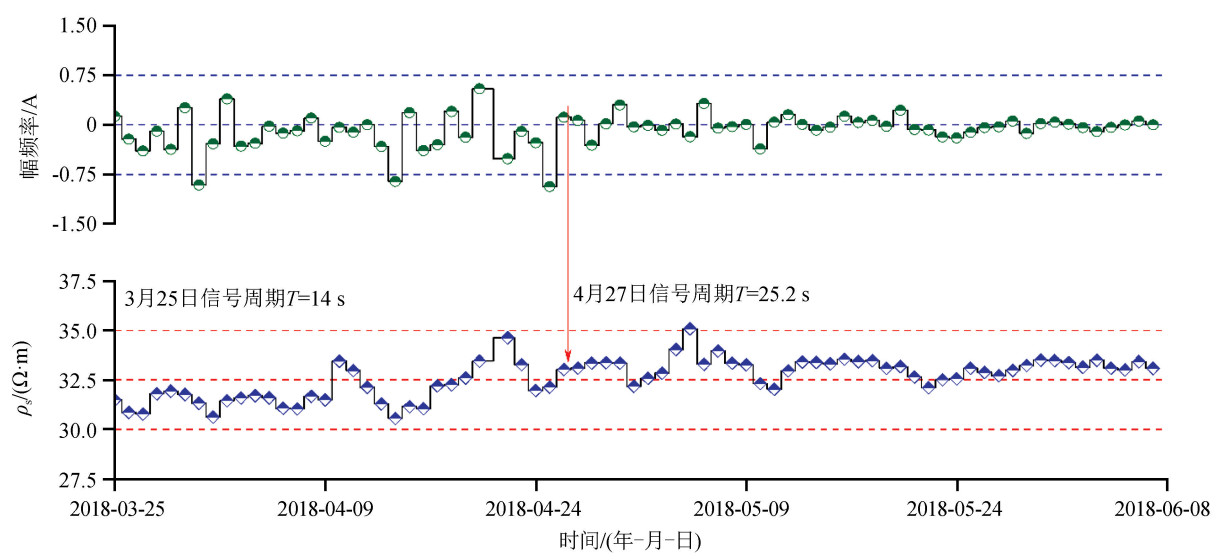


图7 2018年3—6月通渭地震台0.5 Hz频率点的地电阻率和幅频率日值曲线
Fig.7 Daily value curve of ground resistivity and amplitude frequency at 0.5 Hz frequency point of Tongwei seismic station from March to June 2018

(2) 在试验阶段,通过改变发射编码序列周期信号,来选择适合观测场地最佳频率,可以得到抑制干扰视电阻率的变化相对稳定的高质量数据。

这种测量方法可以解决目前我国地震系统地电阻率观测由于场地环境干扰的问题,利用地震台站现有的观测场地和线路,只更新观测仪器来提高观测数据质量,降低建设成本,是对近地表直流地电阻率观测补充和创新。

讨论:仪器记录高铁事件给我们有了新的启示,当发生地震过程中如果存在电磁辐射等信息,那么在一定距离仪器就能捕捉到比地震波传播更快的电磁信号,可以填补近震用地震波(P波与S波到时差)预警的盲区;其次在电压的时间序列上可以发现波形发生的畸变,可以判断异常信号的出现,对核实资料的变化提供了帮助。

致谢:中国地震局地震预测研究所钱家栋研究员、甘肃省地震局梁子斌副研究员给予关注和讨论,通渭地震台、天水中心地震台在试验中给予了大力支持,对参与该项工作专家和同事的辛勤付出表示感谢!

参考文献(References)

[1] 高曙德.深井地电观测技术在地震监测中的应用探讨[J].地球物理学进展,2016,31(5):2078-2088.
GAO Shude.Discussion on the Deep Well Geoelectric Observation Technique Applied in Earthquake Monitoring[J].Progress in Geophysics,2016,31(5):2078-2088.

[2] 解滔,卢军.地表固定干扰源影响下地电阻率观测随时间变化

特征分析[J].地震地质,2016,38(4):922-936.

XIE Tao LU Jun.Apparent Resistivity Temporal Variation Characteristics Affected by the Fixed Disturbance Source on Surface of Measuring Area[J].Seismology and Geology,2016,38(4):922-936.

[3] 毛先进,杨玲英,赵晋民,等.井下地电阻率观测的探测深度初步研究[J].地震学报,2017,39(2):230-238.

MAO Xianjin, YANG Lingying, ZHAO Jinmin, et al.Preliminary Research on Probing Depth of Borehole Geoelectrical Resistivity Observation[J].Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(2):230-238.

[4] 毛先进,段伟,庄儒新,等.井下地电阻率观测中布极参数的确定方法[J].地震研究,2019,42(1):96-101.

MAO Xianjin, DUAN Wei, ZHUANG Ruxin, et al.Determination Method of the Buried Depths and Intervals of Electrodes for Borehole Geo-resistivity Observation[J].Journal of Seismological Research,2019,42(1):96-101.

[5] 高曙德,罗维斌,苏永刚,等.编码源地电阻率观测试验[J].地震学报,2017,39(4):506-519.

GAO Shude, LUO Weibin, SU Yonggang, et al.Georesistivity Observational Experiment Based on Encoded Source[J].Acta Seismologica Sinica, 2017,39(4):506-519.

[6] 高曙德,罗维斌,杨兴悦,等.编码源系统辨识技术在地震监测中观测试验[A]//2018年中国地球科学联合学术年论文集集(二十二)—专题46:电磁地球物理学研究应用及其新进展.中国地球物理学会,2018:80.

[7] 赵璧如,赵健,张洪魁,等.PS100型IP到端可控源高精度大地电测仪系统:CDMA技术首次在地电阻率测量中的应用[J].地球物理学进展,2006,21(2):675-682.

ZHAO Biru, ZHAO Jian, ZHANG Hongkui, et al.The PS100 High Precision Earth-electricity Instrument System (IP to IP) with Controllable Source: Application of CDMA Technology to

- the Measurement of Earth-resistivity for the First Time[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 675-682.
- [8] 罗维斌, 李庆春, 汤井田. 编码电磁测深[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 341-349.
- LUO Weibin, LI Qinchun, TANG Jintian. Coded source electromagnetic sounding method[J]. Chinese Journal Geophysics, 55(1): 341-349.
- [9] 淳少恒, 陈儒军, 耿明会. 伪随机 M 序列及其在电法勘探中的应用进展[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 439-446.
- CHUN Shaoheng, CHEN Rujun, GENG Minghui. Review of the Pseudo-random M Sequence and Its Application in Electrical Prospecting of Exploration Geophysics[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(1): 439-446.
- [10] 罗先中, 李达为, 彭芳苹, 等. 抗干扰编码电法仪的实现及应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 944-951.
- LUO Xianzhong, LI Dawei, PENG Fangping, et al. Implementation and Applications of an Coded Electrical Instrument with Anti-interference Ability[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(2): 944-951.
- [11] 罗延钟, 陆占国, 孙国良, 等. 新一代电法勘查仪器: 伪随机信号电法仪[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 411-415.
- LUO Yanzhong, LU Zhanguo, SUN Guoliang, et al. New Generation of Instruments for Electrical and Electromagnetic Prospecting: Instruments Using Pseudo Random Signal[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 411-415.
- [12] 罗延钟, 陆占国, 孙国良, 等. 伪随机信号电法仪器的“第二方案”算法[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2604-2608.
- LUO Yanzhong, LU Zhanguo, SUN Guoliang, et al. Algorithms of Second Solution for Instruments of Electrical and Electromagnetic Prospecting Using Pseudo Random Signal[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2604-2608.
- [13] 武欣, 薛国强, 底青云, 等. 伪随机编码源电磁响应的精细辨识[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2792-2802.
- WU Xin, XUE Guoqiang, DI Qingyun, et al. Accurate Identification for the Electromagnetic Impulse Response of the Earth with Pseudo Random Coded Waveforms[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2792-2802.
- [14] 张宇, 王兰炜, 张兴国, 等. 相关检测技术在低频交流地电阻率观测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(4): 1973-1979.
- ZHANG Yu, WANG Lanwei, ZHANG Xingguo, et al. Application of Correlation Detection Technology in Low-frequency AC Geo-resistivity Observation[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(4): 1973-1979.
- [15] 张宇, 张兴国, 王兰炜, 等. 新型地电阻率交流观测系统研究及江宁台观测试验[J]. 地震学报, 2016, 38(5): 807-810.
- ZHANG Yu, ZHANG Xingguo, WANG Lanwei, et al. A New AC Geo-electrical Resistivity Observation System and Experimental Observation in Jiangning Seismic Station[J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(5): 807-810.
- [16] 李乐进. 甘肃省地电台址条件研究[J]. 西北地震学报, 1985, 7(2): 66-78.
- Li Lejin. Study on the Conditions of the Station location of Telluric Current in Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 1985, 7(2): 66-78.
- [17] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 1-214.
- HE Jishan. Wide Field Electromagnetic Sounding Methods And pseudo-random Signal Coding Electrical Method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 1-214.
- [18] 刘立超, 丁凯来, 林君, 等. 基于伪随机系统辨识的电磁法仪器标定[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1721-1728.
- LIU Lichao, DING Kailai, LIN Jun, et al. Instrument Calibration with Electromagnetic Method Based on Pseudorandom System Identification[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1721-1728.
- [19] 罗维斌, 李梅, 韩海涛, 等. 一种物探仪器系统特性高精度标定方法[J]. 物探与化探, 2016, 40(4): 816-819.
- LUO Weibin, LI Mei, HAN Haitao, et al. A High Accuracy Calibration Method for Geophysical Prospecting Instrument System Characteristics[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(4): 816-819.
- [20] ROINILA T, HELIN T, VILKKO M, et al. Circular Correlation Based Identification of Switching Power Converter with Uncertainty Analysis Using Fuzzy Density Approach[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2009, 7(6): 1043-1058.