

樊晓春,李伟,袁慎杰,等.地铁对井下地电阻率观测的影响分析——以江宁台为例[J].地震工程学报,2020,42(3):680-687.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.680

FAN Xiaochun, LI Wei, YUAN Shenjie, et al. Influence of the Subway on Deep-well Resistivity Observation: A Case Study of Jiangning Station[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(3): 680-687. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.680

地铁对井下地电阻率观测的影响分析 ——以江宁台为例

樊晓春¹, 李 伟², 袁慎杰³, 吴 帆¹

(1. 南京市地震监测预警中心, 江苏 南京 210008; 2. 南京基准地震台, 江苏 南京 210014;
3. 江宁地震台, 江苏 南京 210014)

摘要: 南京江宁台距地铁 S1、S7、S9 号线最近距离均小于 3.2 km, 地铁对地电阻率观测造成很大影响。本文结合部分地铁测试方案, 分析了该台 2016—2018 年井下地电阻率观测数据, 初步探讨其正负脉冲型突跳、上升、下降变化的机理, 并比较地表和井下地电观测的数据最大变化幅度。结果表明: 井下短极距观测能够减轻地铁干扰, 当地铁线路增加时, 干扰也相应增加, 地铁试运行对地电观测的干扰通常强于正式运营

关键词: 地电阻率; 井下观测; 江宁台; 地铁干扰

中图分类号: P319

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)03-0680-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.680

Influence of the Subway on Deep-well Resistivity Observation: A Case Study of Jiangning Station

FAN Xiaochun¹, LI Wei², YUAN Shenjie³, WU Fan¹

(1. Nanjing Earthquake Monitoring and Early Warning Center, Nanjing 210008, Jiangsu, China;
2. Nanjing Seismic Station, Nanjing 210014, Jiangsu, China;
3. Jiangning Seismic Station, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract: Jiangning station in the city of Nanjing is less than 3.2 km from the S1, S7, and S9 Metro Lines and the subway can have a significant effect on deep-well observations. In this paper, the station's deep borehole resistivity observation data from 2016 to 2018 were analyzed in conjunction with some test schemes of the subway. Three kinds of interference characteristics have been found: positive and negative impulse jumping, ascending, and descending. The mechanisms of these changes were briefly discussed. The maximum variation range of surface and deep-well geo-electric observation data was also compared. The results showed that short polar distance ob-

收稿日期: 2020-01-10

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划(XH19015YSX)

第一作者简介: 樊晓春(1984—), 男, 江苏盐城人, 工程师, 主要从事地震监测预报及台网管理工作。

E-mail: fanxiaochungis@163.com。

通信作者: 李 伟(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事地震监测预报、地震观测系统维护方面的研究工作。

E-mail: 553813216@qq.com。

servation can minimize subway interference; as the subway line increases, the interference increases correspondingly; subway trial interference operating on geo-electric observation is typically greater than that of formal subway operation.

Keywords: geo-electrical resistivity; deep-well observation; Jiangning station; subway interference

0 引言

随着城市轨道交通的大规模建设,地铁运行成为前兆观测的主要干扰源。截至 2019 年,因城市建设、地铁干扰等因素,中国大陆人口密集的大、中城市附近的地震活动区。带原有的 92 个地电阻率观测站,仅剩 83 个担负着常规的地震监测任务^[1]。地铁运营对地磁场、地电场的影响特征和影响机理以及利用经验模态分解抑制干扰取得了一定成果^[2-4]。关于地铁运营对地表地电阻率观测的影响特征及机理的研究表明,地铁干扰周期从 1s 到 2~3 min 不等,平均干扰周期为 120~180 s,干扰频段主要集中在 0.1 Hz 以下。由于较难获得地铁这类干扰源的干扰幅度,并且地铁漏电产生的附加电场变化频率很低,与地电阻率仪的供电周期接近,所以无法补偿干净^[5-8]。地铁对江宁台地表地电阻率观测干扰通常表现为数据突跳和均方差变大等现象。由于地铁干扰,江宁台地表地电阻率观测仪每天夜间 00 时~05 时的数据满足相对方差不大于 0.3% 的要求^[6]。深井观测不仅能够提高观测精度,也是一种行之有效的能避开或减小地表干扰的一种途径^[9]。为应对城市轨道交通等地磁干扰影响,2007 年起全国地电台网技术管理部门和地电学科专家推进了井下地电阻率观测试验,如井下水平、单孔、多孔垂向观测实验^[10-13]。2014 年 3 月江宁台启动了国内首个达到 200 m 深的井下地电阻率水平观测装置的建设。该装置建设在原地表地电观测布极区,通过缩短极距和深埋电极来减轻轨道交通和地表农作业的影响^[6-8]。观测结果表明,井下观测数据的年变幅度较地表观测明显减小,有效减轻了 2014 年开通的地铁 S1 机场线(距离江宁台 2.9 km)的干扰^[10]。随着 2017 年 11 月南京市宁一漂(地铁 S7 号线,距离江宁台 3.2 km)、宁高二期(地铁 S9 号线,距离江宁台 1.9 km)相继开通,江宁台井下地电阻率观测再次受到了较强的地铁干扰,尤其是 S7 号线和 S9 号线的试运行期间出现了极少见的上升和下降趋势现象。目前,国内的研究主要集中在地铁对地表地电观测干扰的相关研究,而地铁对井下地电观测的干扰源机理和特征研究较少。本文通过

地铁供电方式、地铁试验资料、地电阻率观测数据、均方差等来研究地铁开通前和开通后对井下地电观测的干扰特征,并探讨地铁干扰引起的井下地电观测的上升或下降现象的机理。

1 江宁地电观测项目概况

江宁地电台始建于 1978 年,因城市建设先后于 1994 年、2003 年两次迁建观测场地,台址现位于江宁区禄口街道水荆墅村,测区为基本农田保护区,周围地形开阔平坦,地形高差不超过 2 m,地貌属秦淮河冲积平原,台址电测深曲线呈 K 型。测区地质构造单元为中生代火山岩盆地,位于南京一湖熟断裂南西盘和方山一小丹阳断裂西盘的楔形地块上,东距茅山断裂带 30 km,西北距长江 36 km。地表观测由于地铁强干扰于 2018 年 4 月停测,井下地电阻率观测于 2015 年 11 月开始。观测仪器采用 ZD8BI 型地电仪,采用井下两个水平正交方向的电阻率对称四极观测装置,井深(即电极埋深)200 m(图 1)。供电极、测量极布设情况和装置系数见表 1 所列。

2 地铁开通后对地电观测的干扰影响

2.1 地铁运营时对地电观测的机理探讨

地铁干扰时间段通常为地铁运营期间、运营前后 1~2 小时日常维护及不定期夜间(01 点~04 点)维护,其中不定期维护主要包括轨道探伤车检查钢轨、接触网检测、运输设备等维护。南京地铁采用两条铁轨和一条架空导线的供电模式,由架空导线供电和一条铁轨形成供电回路。由于铁轨与地面未完全绝缘,供电线路供出的电流经过电客车后分流成两个部分,一部分经铁轨流回供电电源处,另一部分经铁轨直接流入大地,即漏电电流^[5-8]。漏电电流位置随电客车行驶位置改变,漏电时间随电客车发车间隔、相邻站距离大小等因素而变化,电流大小通常在电客车进出站台时最大。地铁正常运营时,为多辆电客车双向行驶,每段线路布设有一个供电电源,在任一段线路中由供电电源、电客车、铁轨形成多个供电回路,因供电电流和回路中电流不等,产生了多处漏电电流。漏电电流会通过高架或站台与地面接

触渗入地下,相当于在场地外面增加了多处供电点,供电点在测量电极 M 、 N 处形成多个漏电回路。江宁台井下地电观测为水平方向布极,测量电极的极距

为 50 m 和 200 m,与地铁运行产生的漏电电流的传播方向或平行或成一定角度,所以漏电电流在两测量电极间将产生附加电位,使 ρ_s 的观测数值发生变化。

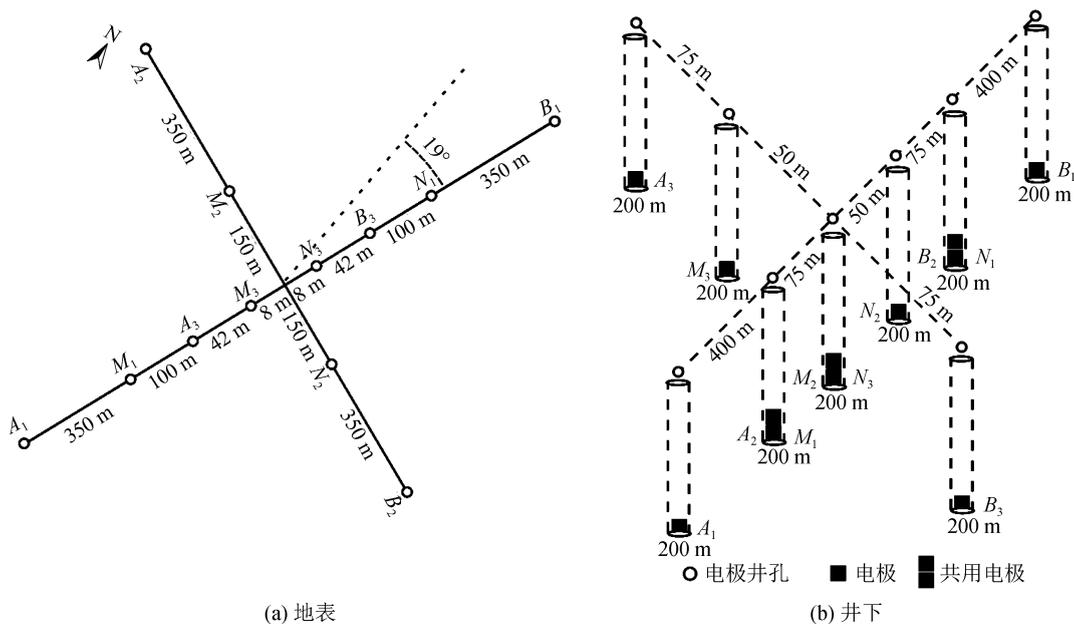


图 1 江宁台地电阻率布极图

Fig.1 Diagram of electrodes layout in Jiangning seismic station

表 1 供电极、测量极布设情况和装置系数对应表

Table 1 Arrangement of the transmitting electrode and the measuring electrode, and the matchup between the array coefficients

通道号	供电极距/m	测量极距/m	方向	装置系数 k
地表	1	0.3	N19°E	2 382.4
	2	0.3	N71°W	2 382.4
	3	0.016	N19°E	478.3
深井	4	0.2	NS	5 151
	5	0.05	NS	1 172
	6	0.05	EW	1 275

设 K 为装置系数, ΔV 为测量电极 M 、 N 之间的人工电位差, V_{SP} 为自然电位, $V_{干扰i}$ 为第 i 处供电点与测量电极 M 、 N 的形成漏电回路产生的电位差, 随电客车行驶动态变化, $V_{干扰}$ 为 n 处 $V_{干扰i}$ 之和, 主要包括 35 km 范围内所有地铁线路运营时产生的干扰, I 为人工电位场稳定后, 通过供电电极 A 、 B 流经大地的电流。由于 $V_{干扰i}$ 正负可能与供电点位置有关, $V_{干扰i}$ 大小可能与供电点位置、漏电电流大小等有关, $V_{干扰i}$ 随时间变化的周期和测数周期重叠, 当地铁运营时, $V_{干扰i}$ 在某一时间内是在一定幅度范围内随机变化。因此, 由式(1)和(2)可得出地铁正常运行时地电阻率主要为正负脉冲型突跳变化, 而不会出现趋势上升或下降。

$$\Delta V_{干扰} = \sum_{i=1}^n \Delta V_{干扰i} \quad (1)$$

$$\rho_s = K \frac{\Delta V - \Delta V_{干扰} - V_{SP}}{I} \quad (2)$$

2.2 地铁运营对地电观测的影响

地铁 S1 号线 2014 年 7 月 1 日开通, 距离江宁台的最近站为机场站, 直线距离 2.9 km, S9 号线 2017 年 12 月 30 日开通, 距离江宁台的最近站为铜山站, 直线距离 1.5 km, S7 号线 2018 年 5 月 26 日正式开通, 距离江宁台最近站为空港新城江宁站, 直线距离 3.2 km, 位置分布如图 2 所示。江宁台井下地电阻率观测初期, 由于地铁干扰较强使得人工电位差超出数据采集器主板 flash 存储上限, 产生溢出导致地电阻率计算错误, 井下地电阻率观测 NS 测向 ($AB=200$ m) 出现台阶[图 3(a)], 后将电流调小恢复。与该台地表地电阻率观测相比, 认为井下

地电观测的供电电流不宜过大,其供电电流为地表观测供电电流的 60%左右时可以稳定工作^[14]。井下地电阻率观测 NS($AB=1\ 000\text{ m}$) 由于极距较长受干扰最严重,从 2017 年 3 月开始数据预处理,主要保留了夜间 01 时至 04 时数据[图 3(b)],井下地电阻率观测 EW($AB=200\text{ m}$)数据相对较好,基本达到预期目标,如图 3 所示。地铁 S7 和 S9 号线开通前,就江宁台井下地电阻率观测 NS 测向($AB=200\text{ m}$)的数据来看,地铁对其干扰的幅度平均在 $1.04\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,其干扰的相对变化量为 0.639%。地铁 S7 和 S9 号线开通后,就江宁台井下地电阻率观测 NS 测向($AB=200\text{ m}$)的数据来看,地铁对其干扰的幅度平均在 $1.80\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右,其干扰的相对变化量为 1.105%。通常前兆异常信号应为噪声水平的 5 倍左右,日常观测中,要识别 1% 的前兆异常,观测信号必须是噪声的 500 倍,理想场地的信噪

比 54 dB 以上^[8]。地铁 S7 和 S9 号线未建设前和运营后井下地电阻率观测 NS($AB=200\text{ m}$)的信噪比分别为 44 dB、39 dB。

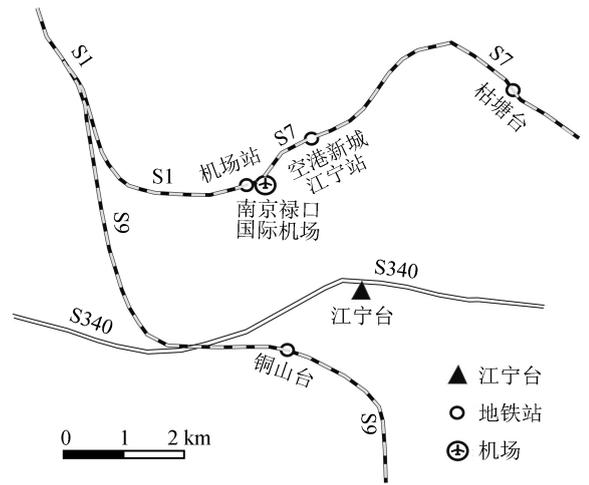


图 2 江宁台周边环境分布图

Fig.2 Environment around Jiangning station

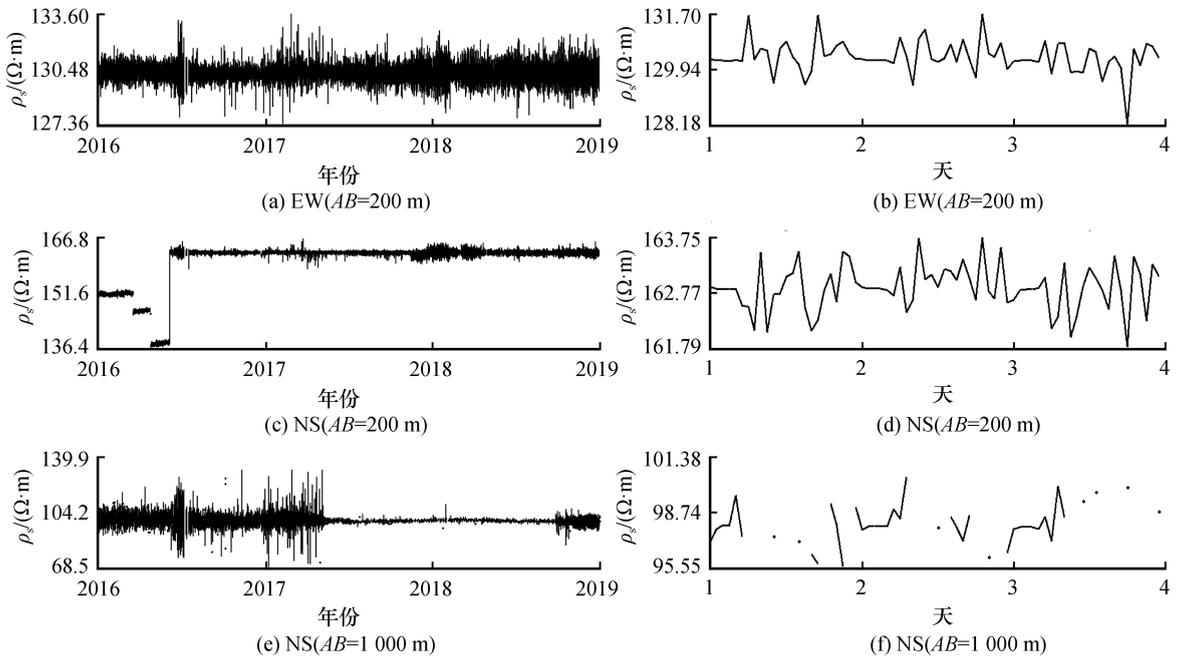


图 3 江宁台井下地电观测整点值曲线

Fig.3 Hourly value curves of geoelectric observation in underground well at Jiangning seismic station

为了直观表现地铁开通后对地电井下观测的影响,直接用均方差的月均值来表示地铁干扰。根据地铁 S1、S7、S9 线路的开通时间,计算地铁正式开通后井下各测道的均方差月均值,见表 2 所列。考虑到长极距数据预处理后仅保存夜间少部分数据,无法反映地铁干扰影响,仅作参考。地铁 S1 号线开通后,井下地电阻率观测 NS($AB=200\text{ m}$)、EW ($AB=200\text{ m}$)均方差月均值分别为 $0.395\ \Omega\cdot\text{m}$ 、

$0.549\ \Omega\cdot\text{m}$ 。S9 号线开通后,均方差均明显增大,井下地电观测 NS 向($AB=200\text{ m}$)、EW ($AB=200\text{ m}$)均方差月均值增大至 $1.224\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $0.686\ \Omega\cdot\text{m}$,要注意的是这期间还有 S7 号线试运行带来的干扰,也说明了试运行对井下地电观测 NS 向($AB=200\text{ m}$)干扰很强。地铁 S7、S9 正式开通后,井下地电阻率观测 NS($AB=200\text{ m}$)、EW ($AB=200\text{ m}$)均方差月均值为 0.714 、 0.822 。分析数据表明,随着地铁

S1、S7、S9 线路距地电井下观测测区的距离越来越近,地铁干扰越来越严重。地铁对井下地电观测干

扰影响主要体现在数据正负脉冲型突跳变化、缺数增多和均方差变大等现象。

表 2 地铁干扰下的井下地电观测均方差

Table 2 Mean square deviation of deep well geoelectric observation affected by subway

线路	开通时间	最近站台	距离/km	计算时间	均方差月均值/($\Omega \cdot m$)		
					NS(A=1 000 m)	NS(AB=200 m)	EW(AB=200 m)
S1	2014-07	机场	2.9	2017-04	1.271	0.395	0.549
S9	2018-01	铜山	1.5	2018-02	0.781	1.224	0.686
S7	2018-05	空港新城	3.2	2018-08	0.812	0.714	0.822

3 地铁试运行期间地电观测的变化

图 4(a)和(b)为江宁台井下地电阻率观测 NS 测向(AB=200 m) 2017 年 1 月—2018 年 12 月的日均值和均方差曲线。2017 年 11 月 9 日—12 月 1 日出现下降趋势,最大下降幅度达 $0.95 \Omega \cdot m$,2017 年 12 月 2 日—12 月 21 日出现上升趋势,最大上升幅度达 $1.29 \Omega \cdot m$,2017 年 12 月 22 日后开始下降,于 2018 年 5 月恢复正常形态,如图 4(a)所示。

2017 年 11 月—2018 年 4 月均方差显著增大,直至地铁 S7 于 2018 年 5 月 26 日正式运营后才恢

复正常,如图 4(b)所示。通过多次异常落实,先后排除了 S340 省道建设、蔬菜大棚、农田灌溉等干扰源,最后发现下降时间与 S7、S9 试运行时间较吻合。据南京地铁公司提供资料,地铁 S9 号线在 2017 年 9 月 15 日—2017 年 12 月 15 日开展空载试运行测试,于 2017 年 12 月 30 日正式运营。地铁 S7 号线 2017 年 11 月 27 日—2018 年 4 月 30 日开展空载试运行测试,于 2018 年 5 月 26 日正式运营。认为上述变化与 2017 年后在地电测区 3 km 区域内开通的宁高二期(S9 号线)线路的试运行相关的可能性较大,但地铁干扰特征与以往不同。

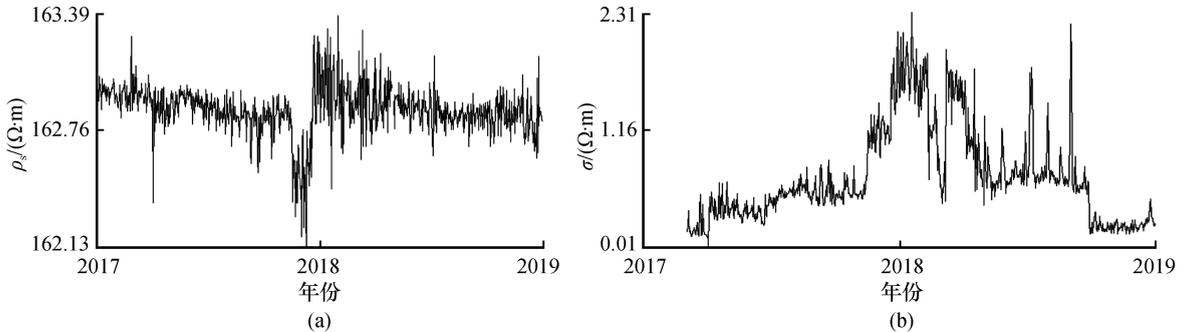


图 4 江宁台井下地电观测 NS(AB=200m)日均值(a)及均方差曲线(b)

Fig.4 Curves of daily mean value and mean square deviation of deep well geoelectric observation in the NS direction of Jiangning Station(AB=200 m)

3.1 地铁试运行对地电观测的干扰幅度

根据南京地铁公司提供的测试方案,地铁 S9、S7 号线的空载试运行实验包括列车型试验、接触网检修、动车信号系统、宁—高接口、更换车挡作业、车挡吊装作业等内容。各测试的时间相互独立,考虑到文章篇幅,仅列举 2017 年 11 月 13 日—12 月 3 日期间地铁 S9 号线的列车型式、动车信号系统和宁—高接口 3 种主要测试方案及其影响。动车信号系统测试次数为 13 次,通常安排在 08:30—18:30,测试期间的数据变化幅度为 2.09%。列车型式试验共 5 次,通常安排在当日 19:00—次日 06:00,夜间测试作业为主,测试期间的数据最大变化幅度为 1.63%,S9 宁—高接口测试作业 1 次,时间为 11 月 15 日 23:30—次

日 03:10,测试期间的数据最大变化幅度为 0.82%,如表 3 所列。地铁 S9 号线试运行期间井下地电观测的信噪比分别约为 34 dB,数据最大变化幅度为 2.09%。地铁 S7 号线试运行期间井下地电观测的信噪比约为 31 dB,数据最大变化幅度为 2.75%。

3.2 干扰机理探讨

地铁运营时使得地电阻率会产生突跳变化,而不会出现趋势上升或下降。分别比较地铁 S7、S9 号线试运行前和试运行期间某天观测数据,发现夜间 01:00—04:00 数据变化幅度小于 0.065%,表明异常主要发生在白天[图 3(b)]。对井下地电阻率观测在地铁 S7、S9 号线试运行期间出现的上升和下降进行两种假设:

表 3 S9 号线试运行影响

Table 3 Influence of trial operation of line S9

测试类型	测试流程	测试次数	最大变化幅度
动车信号系统	两列车配合,一列电客车从高淳站出,开始作业,销点后停放翔宇路南站,一列电客车从翔宇路南站出,开始作业,销点后停放翔宇路南站	13	2.09%
列车型式	一列电客车在翔宇路南站——高淳站或明觉站——高淳站上下行线(含辅助线),进行作业	5	1.63%
宁—高接口	两列车在机场线—禄口机场站—翔宇路北—上下行线(含辅助线),含禄口新城南转换轨 I、II,机场线—宁高线联络线,S9 翔宇路南站—铜山站(不包括)上下行线(含辅助线),进行作业	1	0.82%

假设一:地铁 S9、S7 号线试运行产生的漏电电流方向与井下地电阻率观测的人工供电电流方向不同和单向试运行测试为主导。地铁 S9 或 S7 号线试运行时,一列电客车从始发站和终点站行驶时会通过高架和站台与地面接触将产生的漏电电流渗入地下,相当于在场外增加了一个供电点,在测量电极 M 、 N 漏电点形成漏电回路。由于地电阻率观测采用正反供电,无论是漏电电流方向与地电观测人工电流是否相同,导致地电阻率趋势上升或下降的可能性都较小。仅当漏电电流周期与人工供电电流周期相同,且 $\Delta V_{\text{干扰}}$ 趋势上升或下降才有可能影响井下地电阻率趋势下降或上升。考虑到地铁试运行期间测试种类较多,其漏电电流更加复杂变化。因此,漏电电流的方向与人工供电电流方向不一致,导致地电阻率趋势上升或下降的可能性较小。而单向试运行测试与地铁正常运营时(双向运行)相比,仅减少了漏电电流点。同样,认为单向试运行测试导致地电阻率趋势上升或下降的可能性较小。

假设二:人工电位差溢出使得数据采集器计算错误的地电阻率值导致。异常发生后,南京市地震局、江宁地震办公室于 2017 年 12 月 8 日赴江宁台,通过人工测量计算与仪器测量结果的对比,来判断仪器是否正常工作。具体方法为根据数据采集器实时显示的自然电位、供电电流、人工电位差,由人工计算各测道的 ρ_s 与数据采集器自动观测的各测道的 ρ_s 比较。测试结果表明两者测值不一致,相差较大。结合江宁台井下地电阻率观测 NS 测向($AB=200$ m) 2016 年 3—6 月出现的台阶变化[图 3(a)],是由于人工电位差溢出导致。同样,认为此次异常可能与人工电位差溢出有关。12 月 8 日将井下地电观测的供电电流从原来的 1.25 A 左右,调整到 1.19 A 左右,数据停止下降,逐步上升恢复正常。

简单来说,异常可能是由于地铁 S7、S9 号线试运行期间两条地铁线试运行时间重叠、地铁距离地电测区更近(小于 3 km)、电客车的供电功率较大等

原因有关。当井下地电阻率观测采用下位机计算地电阻率时,人工电位差超出数据采集器主板 flash 存储上限产生溢出,反馈错误值,从而导致数据计算错误。当将井下地电观测供电电流调小时,人工电位差恢复到数据采集器主板 flash 存储上限,地电阻率值计算正确,使得数据逐步上升并恢复正常。但因地铁试运行的干扰较强,导致井下地电阻率观测数据变化幅度明显增大,造成上升变化的表象。因此,本文认为第二种假设可信度较高。

4 地表和井下地电观测受地铁影响对比

通过井下与地表地电阻率观测在不同时期的数据变化幅度,来比较地铁干扰影响幅度。地表地电阻率观测 EW 向($AB=1\ 000$ m)受地铁干扰较强,05:00—24:00 的数据在预处理中大部分删除,选择原始数据进行分析,数据持续到 2018 年 4 月停测。井下地电阻率观测 NS 测向($AB=200$ m)受地铁干扰影响强于 EW 测向($AB=200$ m),选择井下观测 NS 测向($AB=200$ m) 2016 年 1 月至 2019 年 3 月的观测数据。受地铁干扰影响的数据最大变化幅度计算方法为选取不同时期某天观测数据的最大值或最小值,减去当日夜间 01:00—04:00 平均值,取绝对值再除以夜间无地铁干扰时的平均值。

地表 EW 向($AB=1\ 000$ m)在地铁 S1 号线试运行时的数据最大变化幅度为 32.24%。地表观测 EW($AB=1\ 000$ m)在地铁 S1 号线运营时的数据最大变化幅度为 4.80%,表明地铁试运行的干扰影响大于地铁正式运营(表 4)。2017 年 12 月份 S9、S7 试运行期间,地表观测 EW($AB=1\ 000$ m)大量缺数,数据最大变化幅度并不能反映真实的地铁干扰影响。井下 NS($AB=200$ m)在地铁 S9、S7 号线试运行时的最大变化幅度为 1.93%。井下 NS($AB=200$ m)在地铁 S1、S9、S7 号线运营时与仅地铁 S1 号线运营时相比,数据最大变化幅度明显增大。

表 4 地铁干扰影响

Table 4 The influence of subway interference

日期	地铁干扰源	地表 EW($AB=1\ 000\ \text{m}$) 最大变化幅度	井下 NS($AB=200\ \text{m}$) 最大变化幅度
2014-06	S1 试运行	32.24%	-
2016-09	S1 运营	4.80%	0.99%
2017-12	S9、S7 试运行	7.77%	1.93%
2019-03	S1、S9、S7 运营	-	1.60%

5 结论与讨论

江宁台井下地电阻率观测装置的初始目标是为了减轻地铁 S1 号线的干扰。本文结合地铁供电模式和南京地铁公司提供的部分测试资料简单探讨地铁正常运营和试运行期间出现的干扰影响及机理,分析结果表明:

(1) 地铁正常运营时,每处漏电点形成的 $V_{\text{干扰}i}$ 正负可能与供电点位置有关,大小可能与供电点位置、漏电电流大小等有关, $V_{\text{干扰}i}$ 随时间变化的周期和测数周期重叠,而 $V_{\text{干扰}}$ 为某一时间段地铁干扰之和,在一定幅度范围内随机变化,因此,井下地电观测在地铁运营时表现为正负脉冲型的突跳变化;

(2) 地铁试运行期间,由于地铁试验种类多,比正常运营更加复杂,其漏电电流同样复杂变化,无论漏电电流方向与人工电流是否相同,导致地电阻率趋势上升或下降的可能性都较小,仅当漏电电流周期与人工供电电流周期相同且 $\Delta V_{\text{干扰}}$ 趋势上升或下降才有可能影响地电阻率趋势下降或上升;

(3) 地铁试运行期间与运营时相比,仅减少了漏电电流点,认为电客车单向运行导致地电阻率趋势上升或下降的可能性较小;

(4) 地铁试运行期间出现的趋势下降和上升与人工电位差溢出相关的可能性较大。由于两条地铁线试运行时间重叠、地铁距离地电测区更近(小于 3 km)、电客车的供电功率较大,当井下地电阻率观测采用下位机计算地电阻率时,人工电位差超出数据采集器主板 flash 存储上限产生溢出,反馈错误值,从而导致数据计算错误。错误的地电阻率值造成下降的表象,调整电流后,恢复正常,又因数据变化幅度明显增大,造成上升变化的表象。

(5) 井下地电观测 NS($AB=200\ \text{m}$) 在 S9、S7 试运行时的信噪比分别为 34 dB、31 dB 左右,地铁 S7、S9 正式运营时信噪比约为 39 dB,说明试运行对井下地电观测干扰更强;

(6) 地铁正常运营和试运行对地电观测的干扰非常复杂,且缺少出现干扰时的第一时间的资料和

完整的地铁试运行方案。地铁 S9、S7 号线试运行相关实验已知的有 6 种,但据地铁公司了解由于部分实验由地铁公司外包给第三方,实际上测试非常复杂。因此,确定哪种实验对数据影响幅度较大存在一定的困难,还需要做进一步分析研究。

致谢:中国地震局地壳应力研究所王兰炜研究员、张宇副研究员、中国地震局台网中心叶青高级工程师、江苏省地震局沈红会高级工程师对本文提出了建议和意见,作者表示衷心的感谢。

参考文献(References)

- [1] 叶青,张翼,黄兴辉,等.2015 年内蒙古阿拉善 $M_s5.8$ 地震前地电阻率变化特征研究[J].地震,2017,37(4):123-133.
YE Qing, ZHANG Yi, HUANG Xinghui, et al. Characteristics of Resistivity Variations before the April 15, 2015 Alashan Zuoqi $M_s5.8$ Earthquake[J]. Earthquake, 2017, 37(4): 123-133.
- [2] 谢凡,滕云田,徐学恭,等.直流牵引城市轨道交通系统对地磁观测干扰研究:以天津轨道交通为例[J].地球物理学进展,2011,26(2):732-738.
XIE Fan, TENG Yuntian, XU Xuegong, et al. Magnetic Perturbation Caused by D.C. traction Power Supply System for Urban Rail Transit a Case Study from Tianjin Railway Transit in China[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(2): 732-738.
- [3] 谢凡,滕云田,胡星星,等.地磁站点的城市轨道交通干扰的小波抑制方法研究:以天津轨道交通干扰为例[J].地球物理学报,2011,54(10):2698-2707.
XIE Fan, TENG Yuntian, HU Xingxing, et al. Suppression of Magnetic Perturbation Caused by Urban Railway to Geomagnetic Observations Using the Wavelet Method: a Case Study of Tianjin Subway[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(10): 2698-2707.
- [4] 王同利,胡乐银,崔博闻,等.北京城市轨道交通对地电场观测的干扰影响[J].地震地质,2013,35(4):887-893.
WANG Tongli, HU Leying, CUI Bowen, et al. A Preliminary Analysis on the Interference Generated by Urban Railway Transit in Beijing to the Geoelectric Field Observations[J]. Seismology and Geology, 2013, 35(4): 887-893.
- [5] 刘广宽,孙春仙,皇甫德银,等.地铁影响南京台磁电观测的分析[J].华南地震,2006,26(4):48-53.
LIU Guangkuan, SUN Chunxian, HUANGPU Deying, et al. Analysis of the Influence of the Subway on Magnetolectricity

- Observation[J].South China Journal of Seismology,2006,26(4):48-53.
- [6] 樊晓春,吴帆,袁慎杰.江宁台地电阻率数据干扰分析[J].内陆地震,2018,32(2):163-171.
FAN Xiaochun, WU Fan, YUAN Shenjie. Assessment of Ground Resistivity Data on Jiangning Seismic Station[J].Inland Earthquake,2018,32(2):163-171.
- [7] 樊晓春,解滔,吴帆,等.井下地电阻率观测影响系数分析:以江宁地震台为例[J].中国地震,2019,35(2):347-358.
FAN Xiaochun, XIE Tao, WU Fan, et al. Sensitivity Coefficients Analysis of Deep-well Resistivity Observation in the Jiangning Seismic Station[J].Earthquake Research in China,2019,35(2):347-358.
- [8] 沈红会,李鸿宇,袁慎杰,等.江宁台地电场地铁干扰试验结果分析[J].地震,2014,34(3):125-131.
SHEN Honghui, LI Hongyu, YUAN Shenjie, et al. Testing Results of Subway Interferences to the Jiangning Electromagnetic Observation Site[J].Earthquake,2014,34(3):125-131.
- [9] 李飞,秦磊,杨冯威.新沂台地电阻率新旧场地对比观测分析[J].华南地震,2015,35(3):7-14.
LI Fei, QIN Lei, YANG Fengwei. Comparison Observation Analysis of Earth Resistivity in New and Old Site of Xinyi Station[J].South China Journal of Seismology,2015,35(3):7-14.
- [10] 樊晓春,吴帆,袁慎杰.江宁地电台深井地电阻率观测系统分析[J].地震地磁观测与研究,2018,39(3):102-106.
FAN Xiaochun, WU Fan, YUAN Shenjie. Introduction and Analysis of Geo-electrical Observation System at Jiangning Deep Borehole Geoelectric Station[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2018,39(3):102-106.
- [11] 高曙德,郑卫平,安海静,等.井下地电阻率观测异常核实实例[J].地震工程学报,2016,38(增刊2):240-249.
GAO Shude, ZHENG Weiping, AN Haijing, et al. Anomaly Confirmation in a Deep-well Geo-electrical Resistivity Observation[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(Supp2):240-249.
- [12] 刘吉平,刘锦,严兴,等.和平台深井地电阻率在中强地震前异常特征[J].华南地震,2019,39(增刊1):90-96.
LIU Jiping, LIU Jin, YAN Xing, et al. The Abnormal Characteristics of Deep Well Geo-resistivity of Heping Station before Moderate Earthquakes[J].South China Journal of Seismology,2019,39(Supp1):90-96.
- [13] 梁浩东,安海静,谢宏,等.深井地电阻率观测装置构建及其近场干扰测试[J].地震工程学报,2017,39(增刊1):127-133,148.
LIANG Haodong, AN Haijing, XIE Hong, et al. Construction of an Earth Resistivity Observation Device in a Deep-well and Its Near-field Interference Test[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(Supp1):127-133,148.
- [14] 樊晓春,吴帆,袁慎杰,等.江宁地电台地表与井下地电阻率观测数据分析[J].地震地磁观测与研究,2019,40(5):63-69.
FAN Xiaochun, WU Fan, YUAN Shenjie, et al. About Ground and Borehole Resistivity Data Observed by the Jiangning Geoelectrical Station[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2019,40(5):63-69.