

李瑞卿, 郭学增, 张蕾, 等. 地电场电极故障判定及机理分析[J]. 地震工程学报, 2020, 42(2): 438-446. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.438

LI Ruiqing, GUO Xuezeng, ZHANG Lei, et al. Fault Determination and Mechanism Analysis for Electrodes in the Geoelectric Field[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 438-446. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.438

# 地电场电极故障判定及机理分析

李瑞卿, 郭学增, 张 蕾, 信世民, 尹宏伟

(河北省地震局, 河北 石家庄 050031)

**摘要:** 分析总结近几年来河北省地电场台站地电场电极故障出现的数据变化, 认为河北省地电场数据在无干扰情况下变化形态稳定, 部分台站图像中可见“峰-谷”形态, 且相关系数及差值良好。地电场电极故障时, 共用该电极的两测道数据有同步干扰主要表现在: ①两测道数据相关系数减小、差值变大。②图像上同步出现台阶、突跳、长趋势变化。根据数据变化的同步性可以初步判断电极故障及故障电极位置, 另外还需非电极故障的排除, 首先对观测环境、仪器、外线路、线路接头、配线板等进行检查, 其次用对比试验法, 即预埋新电极接入备用地电场仪器与故障电极并行观测, 通过对比确定电极故障。最后运用化学及数学方法 Butler-Volmer 方程及 Nernst 方程对电极故障造成的数据现象进行分析解释。该研究结果为台站及时进行电极故障判断有一定参考意义。

**关键词:** 电极故障; 数据变化; 特征; 同步性; 对比实验; 化学及数学方法

中图分类号:P319

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2020)02-0438-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.438

## Fault Determination and Mechanism Analysis for Electrodes in the Geoelectric Field

LI Ruiqing, GUO Xuezeng, ZHANG Lei, XIN Shimin, YIN Hongwei

(Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

**Abstract:** The variations of the data on the electrode faults in the geoelectric field in Hebei province in recent years are analyzed and summarized. The data variations are considered stable without interference, and a “peak valley” shape can be seen in the images recorded by several stations. Moreover, the correlation coefficient and difference are satisfactory. The synchronous interference of the data on the electrode faults in two channels mainly indicates the following: (1) the correlation coefficient of the data in the two channels decreases, and the difference becomes large; (2) the image shows synchronous step, jump, and long-trend changes. The position of electrode failure can be preliminarily determined according to the synchronicity of the data variation. Meanwhile, nonelectrode faults also need to be eliminated. The observation environment, instrument, external circuit, circuit connector, and wiring board are first checked, and

收稿日期: 2019-12-21

基金项目: 中国地震局专项: 全国地球物理台网数据跟踪分析与产出

第一作者简介: 李瑞卿(1990—), 男, 河北沧州人, 助理工程师, 主要从事地电观测与研究工作。E-mail: 976382068@qq.com。

the electrode failure is determined with a contrast test. The Butler-Volmer equation and Nernst equation are used to analyze and explain the data variation caused by the electrode failure. The results of this study can serve as a reference for stations in judging electrode faults promptly.

**Keywords:** electrode fault; data variation; characteristic; synchronicity; comparative experiment; chemical and mathematical methods

## 0 引言

地电场是重要的地球物理场之一。根据场源的不同,地电场可分成大地电场和自然电场两部分。大地电场由地球外部的各种场源作用在地球表面感应产生,一般具有广域性。自然电场由地下场源产生,是地下介质电性结构、地表、裂隙流体及地下金属体的物理、化学变化引起的局部性电场变化,一般具有局部性(或称为地域性)<sup>[1-2]</sup>,我国数字化地震地电场观测起始于 20 世纪 90 年代,经过“九五”项目、“首都圈示范工程”、“十五”项目及“背景场”项目的建设,逐步形成覆盖全国范围的自动化和网络化的地电场观测台网。

在地电场观测中,电极是地电场观测系统中的重要装置,通过电极可将地电场信号传输至观测仪器。在地电场观测中,由于电极与土壤直接接触,土壤中的导电离子的运动会产生相应的极化电位。由于不极化电极相对于其他电极可以减少电极与土壤介质接触的极化电位差,故目前国内地电场观测台站观测较多采用固体不极化电极替代以前极化电位差较大的铅电极。

不极化电极虽然相对稳定,但如果埋设不当,内部电解质变干,电极金属芯与电解质接触不良等原因造成的电极故障。对电极故障数据特征的研究可以使观测人员及早判断故障电极的位置并对其进行更换,保障地电场观测数据质量。目前国内对地电场观测数据的干扰研究可以总结为地电场观测系统故障、自然环境干扰、场地环境干扰、人为干扰等方面<sup>[3-11]</sup>,部分也提到地电场电极故障<sup>[12-15]</sup>,但没有判断方法的具体总结以及故障原理分析。本文对地电场电极故障特征判断方法进行总结,并对故障机理进一步分析,希望可以为其他台站提供参考。

## 1 台站布极图简介

目前我国地电场观测台站常用的布极方式为三角形,各台站根据场地观测条件,多为图 1 所示中的

其中一种。观测的 6 道通常为 NS<sub>L</sub>、NS<sub>S</sub>、EW<sub>L</sub>、EW<sub>S</sub>、NE<sub>L</sub>(或 NW<sub>L</sub>)和 NE<sub>S</sub>(或 NW<sub>S</sub>),电极多为共用电极<sup>[1,16]</sup>。关于地电场强度分量值的方向约定<sup>[17]</sup>,以电流向北、向东为正,即“南北分量”的正方向为北,“东西分量”的正方向为东,“北东(北西)分量”的正方向为偏北方向。如图 1(a)布极方式,B<sub>1</sub>既是 NS<sub>L</sub>测道的正极性电极,也是 NW<sub>L</sub>正极性电极。中心点电极 O<sub>1</sub>,为 NS<sub>L</sub>测道的负极性电极和 EW<sub>L</sub>测道正极性电极。按照图 1(a)的布极方式布极,共需 6 个电极,由 6 条观测用外线引入观测室。另外,也有一些台站根据自身观测环境等条件进行布极,如兴济台,沿平行与垂直台站附近的沧东断裂进行布极,有 N30°E<sub>L</sub>、N30°E<sub>S</sub>、N60°W<sub>L</sub>、N60°W<sub>S</sub>、N75°E<sub>L</sub>、N75°E<sub>S</sub>六个测向。

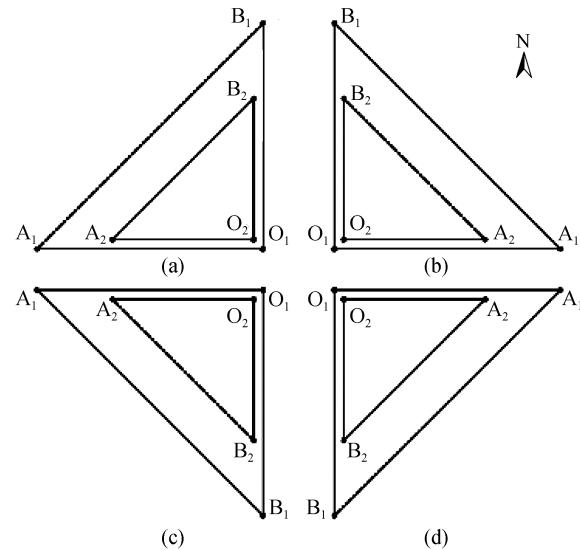


图 1 地电场布极方式

Fig.1 Mode for arranging the electrodes in the geoelectric field

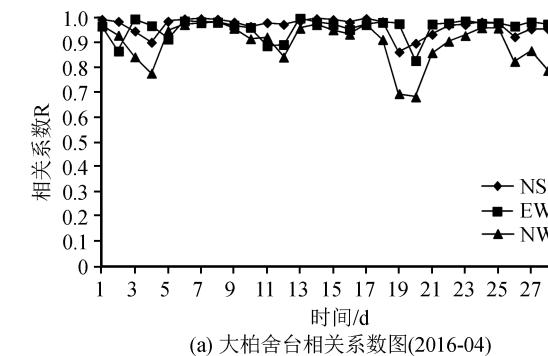
## 2 电极故障数据特征分析

地电场正常数据日变化形态可分为:峰-谷型、近直线型、无序变化型和混合型。河北省地电场观测数据无干扰的正常数据变化稳定,部分有“峰-谷”形态(兴济台、柏舍台、肥乡台呈早晚较为平静的直线状,中午 12 时前、后 6 小时呈正弦变化,有“两峰

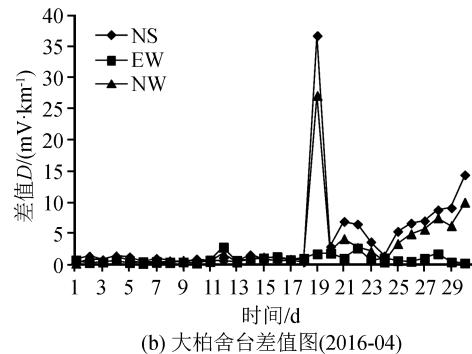
一谷”,昌黎台呈全天的正弦变化,有“一峰一谷”;阳原台、滦县台峰谷不明显,视为近直线型)。另外,多数地电场台站观测布极在同方向上分长短两测道,正常观测数据同向长短两测道的变化形态一致、相关性好(相关系数 $\geq 0.8$ ),日变化幅度有较小差异,当电极故障时,共用该故障电极的两个测道有同步干扰,但同向非故障电极测道的观测数据仍为正常,可以利用此特征对电极故障进行判断。

电极故障造成的数据变化可以总结为:数据观测质量方面,共用故障电极的长短测道差值变大,相关系数变小。如大柏舍台 2016 年 4 月 NS<sub>s</sub> 极距处电极 B<sub>2</sub> 故障,NS 及 NW 两个方向的长短测道相关系数出现变小情况,最大变化量为 0.218,在月底已下降到 0.620[图 2(a)];差值在 19 日出现增大变化,最大变化量为 26.24 mV/km。NS 及 NW 两个方向的相关系数及差值是同步变化的,而 EW 方向

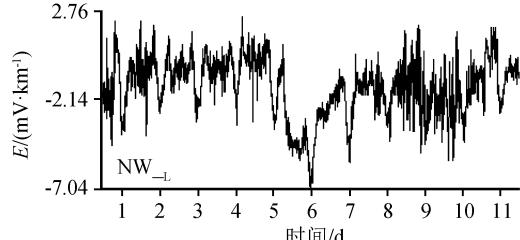
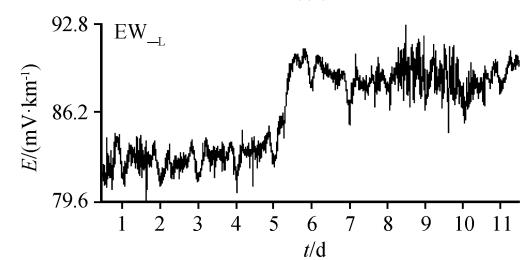
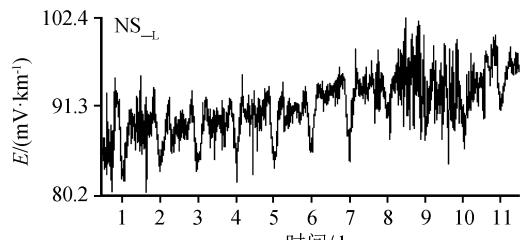
未受电极故障影响,数据相关系数基本保持在 0.950 以上,差值在 2.50 mV/km 以下[图 2(b)]。数据曲线上大致有四种变化,①数据趋势性变化,如图 2(c)中大柏舍台 NS<sub>s</sub> 极距处电极 B<sub>2</sub> 故障,绘制六道数据可以看出 2016 年 4 月 24 日至 5 月 4 日 NS<sub>s</sub> 与 NW<sub>s</sub> 同步出现趋势性变化,最大变化量为 275.12 mV/km,相对大柏舍地电场正常日变幅度 10.00 mV/km 变化了 20 多倍,其他测道数据正常;②数据台阶变化,如图 2(d)中兴济台,因落雷造成 N60°W<sub>s</sub> 极距处电极 A<sub>2</sub> 故障,2018 年 8 月 7 日 N75°E<sub>s</sub> 与 N60°W<sub>s</sub> 同步出现数据图形为台阶变化,变化幅度为 65.71 mV/km,相对于兴济台地电场正常日变幅度 5.00 mV/km 变化 10 倍左右。相应的长测道及 N30°E 方向两测道均数据在受到地电扰动情况下最大变化幅度为 10.10 mV/km,图像正常;③数据突跳变化,如图 2(e)中昌黎台,EW<sub>L</sub> 极



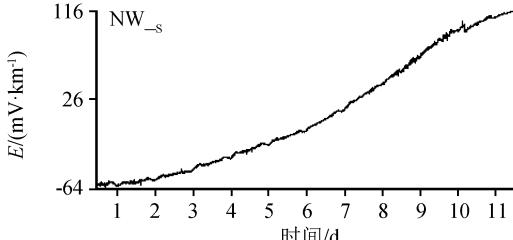
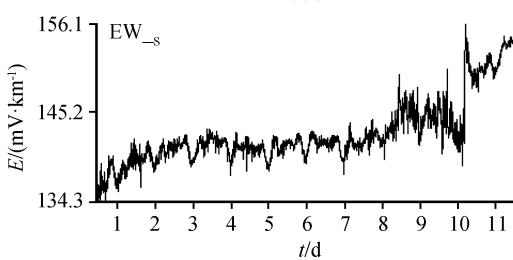
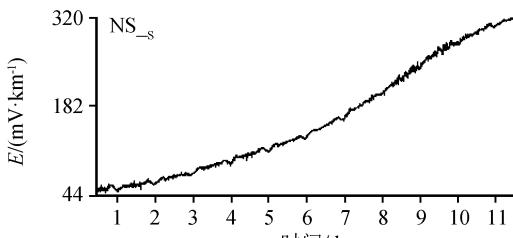
(a) 大柏舍台相关系数图(2016-04)



(b) 大柏舍台差值图(2016-04)



(c) 大柏舍台地电场图(2016-04-24—2016-05-04)



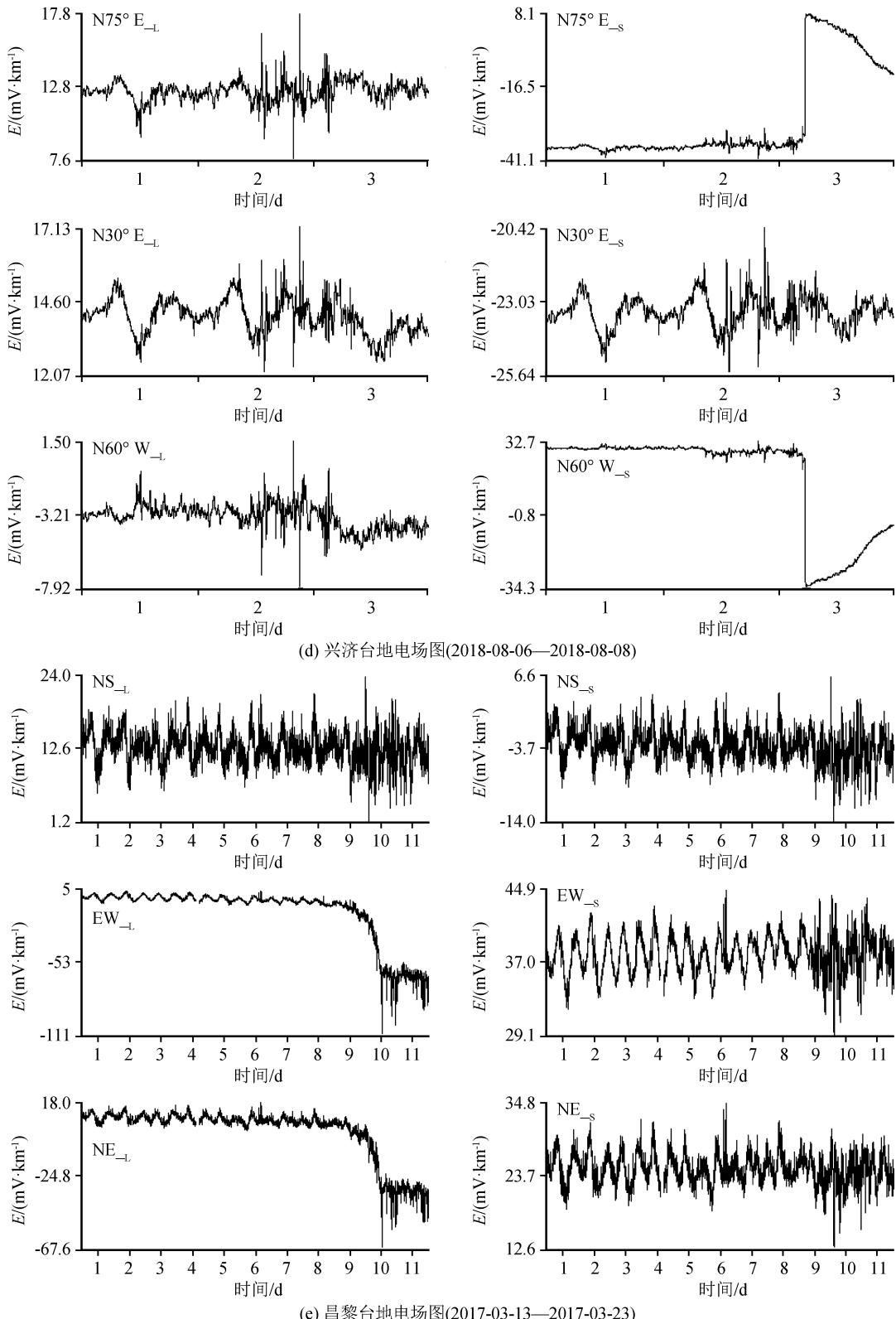


图 2 电极数据特征分析图

Fig.2 Character analysis of electrode data

距处电极  $A_1$  故障, 2017 年 3 月  $EW_{\perp L}$  与  $NE_{\perp L}$  出现数据多次出现突跳变化, 最大变化量为  $55.81 \text{ mV}/\text{km}$ , 相对于昌黎台正常日变  $10.00 \text{ mV}/\text{km}$  变化了

5 倍, 相应的短测道以及  $NS$  方向两测道均正常。  
④前三种简单变化的组合, 如图 2(e)中  $EW_{\perp L}$  极距处电极  $A_1$  故障, 2017 年 3 月 21 日至 22 日  $EW_{\perp L}$  与

NE<sub>L</sub>测道数据同时存在突跳变化与趋势性下降变化,趋势性下降变化量为59.82 mV/km。

### 3 非电极故障排除方法

通过数据图像变化基本可以判定电极故障以及故障电极位置,但还需要进行其他干扰项的排查:①进行观测环境巡视,排除因农田浇地、挖坑取土、居民工厂用电漏电等观测环境的影响;②检查外线路、室内线路的接头是否良好,排除接触不良等原因的影响;③外线路绝缘检查,确保外线路无破损漏电等;④检查配线盘避雷装置和线路连接闸刀等是否正常,排除避雷装置故障干扰;⑤电极接线极性检查,确保各电极线路正确接入仪器。

为进一步排除其他干扰可以进行对比观测。将购置的新电极进行预埋,待电极稳定后,将预埋电极接入备用仪器,与在用仪器同步对比观测,通过数据对比做进一步判断。如兴济台2015年4月电极故障,N75°E<sub>L</sub>、N30°E<sub>L</sub>两道数据频繁出现台阶变化,且相关系数变小,差值变大。检查室内线路、仪器及全部避雷器,均正常。巡视外线路、布极区电极、测区环境,无明显异常。通过数据图像初步判断N30°E<sub>L</sub>长电极B<sub>1</sub>故障。工作人员在N30°E<sub>L</sub>长电极B<sub>1</sub>处预埋新不极化电极,接入备用仪器进行对比观测。备用仪器观测到的预埋电极数据图形无台阶变化,而在用仪器的N75°E<sub>L</sub>、N30°E<sub>L</sub>两道数据图像均出现台阶。另外备用仪器观测到的共用预埋电极两方向的相关系数及差值均优于在用仪器运行观测数据,因此判断N30°E<sub>L</sub>电极故障[图3(a)、(b)]。

### 4 电极故障机理分析

对于金属电极,由于金属相对活泼,在与土壤直接接触的过程中,容易产生较大的极化电位差,且当周围土壤介质条件(如温度、湿度、电解质浓度等)发生改变时该极化电位易发生较大波动<sup>[18]</sup>。即使应用活性较低的铅制作电极也存在极化电位波动大问题。

目前在我国比较广泛应用金属-金属盐溶液电极,俗称不极化电极。应用最多的为铅-氯化铅不极化电极。该电极电解液中有氯化铅、氯化钠、高岭土、蒸馏水、稀盐酸,其中氯化钠与高岭土比例为1:1制得,电极极差小,有较好的应用效果。但高岭土对电解质pH值、泥浆的均匀性及黏性有影响。当电极故障时,如电极电解液变干或因扩散作用内部离子与外界土壤大量交换,使电解液成分改变,电

极环境的变化会引起电极的极差变化<sup>[19]</sup>。

笔者通过阅读邓明等<sup>[20]</sup>《海底电场传感器原理及研制技术》了解到Ag-AgCl电极的原理同样适用于Pb-PbCl<sub>2</sub>电极。Pb-PbCl<sub>2</sub>电极在土壤介质中存在在这两个相界面,即Pb|PbCl<sub>2</sub>|Cl<sup>-</sup>。电极的可逆反应包括如下两个平衡关系:



当有微量电流(如电场信号电流)通过电极界面时,式(1)中的平衡会发生改变。如果电极反应速度跟不上电子运动而造成电荷在界面上的累积,则电极极化现象增重。

当电极反应足够快,使去极化与极化作用趋势平衡,则极化电位很小。Pb-PbCl<sub>2</sub>电极传导电子速度快,可减少极化现象,有利于电场观测。其中Pb-PbCl<sub>2</sub>电极的反应速度符合Butler-Volmer<sup>[21]</sup>方程:

$$j = j^0 \left\{ \exp \left[ -\frac{\alpha F}{RT} \Delta U \right] - \exp \left[ -\frac{(1-\alpha)F}{RT} \Delta U \right] \right\} \quad (2)$$

式中:j<sup>0</sup>为金属铅的交换电流密度;α为传递参数;F为法拉第常数;R为气体常数;T为温度;ΔU表示有电流通过时的极化值;j为电极的净反应速度。

在温度一定时,同一净反应速度下,j<sup>0</sup>越大则ΔU越小,也就意味着偏离平衡态的趋势弱,即电极稳定。当遭受雷击时,如图2(d)中,测量电压也会突然性增大,电极交换电流速度不足,造成电荷在界面大量累积,其后累积的电荷缓慢释放。从数据图上看,观测数据突然出现大幅度台阶变化,其后观测数据会恢复但不会恢复至原数据水平。

关于Pb-PbCl<sub>2</sub>电极电位稳定性问题,按照电化学理论,金属与电解质接触时,其界面上必然存在电极电位,此电位可由Nernst方程<sup>[22]</sup>的变异式描述:

$$\Phi = \Phi_{\text{Pb}+\text{Pb}}^{\ominus} + \frac{RT}{F} \ln K_{\text{SP}} - \frac{RT}{F} \ln a_{\text{Cl}^-} \quad (3)$$

式中:Φ<sub>Pb+Pb</sub><sup>⊖</sup>表示在标准状态下铅电极与氢电极作参比的电极电位,可查表求得;F、R、T与式(2)中的意义相同;K<sub>SP</sub>为PbCl<sub>2</sub>的溶度积常数;a<sub>Cl<sup>-</sup></sub>为溶剂中氯离子的活度;Φ表示固液相界面上氧化还原反应平衡时的电极电位。因为Nernst方程为推导电源电动势方程,故式(3)中描述的电极电位在地电场观测相当于电源内部,即电极电位:

$$\Phi_{\text{电极}} = \Phi = - \left( \Phi_{\text{Pb}+\text{Pb}}^{\ominus} + \frac{RT}{F} \ln K_{\text{SP}} - \frac{RT}{F} \ln a_{\text{Cl}^-} \right) \quad (4)$$

由式(4)可知,Pb-PbCl<sub>2</sub>电极电位与温度T及氯离子活度有关。而电极埋入地下,可视为温度不

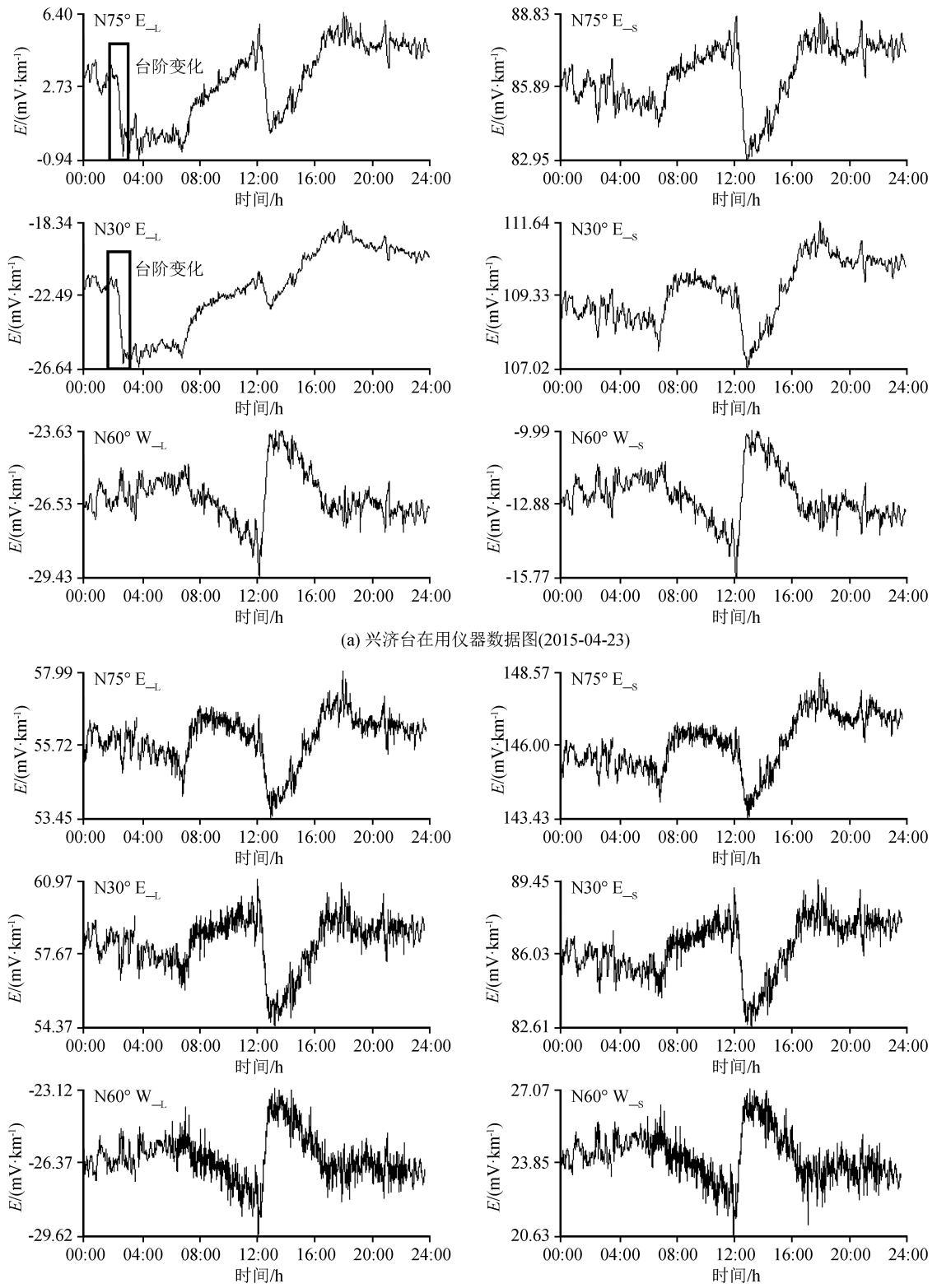


图 3 兴济台观测数据

Fig.3 Observation data of Xingji station

变。氯离子活度则由土壤以及电极本身含水量决定。

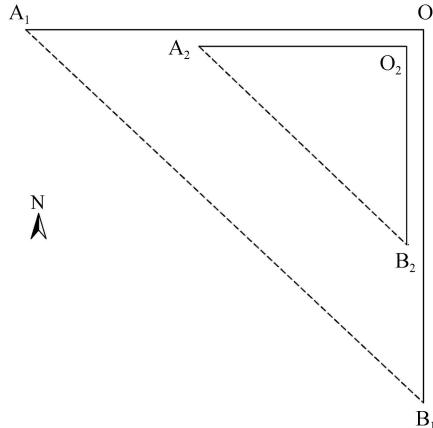
这样可以解释了雨季和旱季地电场电极故障

时, 出现如图 2(c)中的数据漂移现象。以大柏舍地电场冬天旱季为例, 其地电场布极图如图 4 所示, 在 2016 年 2 月份电极 A<sub>2</sub> 故障, 此时该电解质因干燥

氯离子活度下降,电位  $\Phi_{A_2 \text{电极}}$  减少。根据“东西分量”的正方向为东,“北东(北西)分量”的正方向为偏北方向,如图 4(a)大柏舍地电场布极图,  $O_2$  相对于  $A_2$  为正,  $A_2$  相对于  $B_2$  为正。则  $O_2 A_2$  电场即

$EW_{-S}$  数据:  $E_{O_2 A_2} = \frac{\Phi_{O_2 \text{电极}} - \Phi_{A_2 \text{电极}}}{L_{O_2 A_2}}$  增加( $L$  为电极间距离),故电场数据向上漂移,  $A_2 B_2$  电场即  $N45^\circ$

$W_{-S}$  数据:  $E_{A_2 B_2} = \frac{\Phi_{A_2 \text{电极}} - \Phi_{B_2 \text{电极}}}{L_{A_2 B_2}}$  减少,电场数据下漂移,如图 4(b)。



(a) 大柏舍地电场布极图

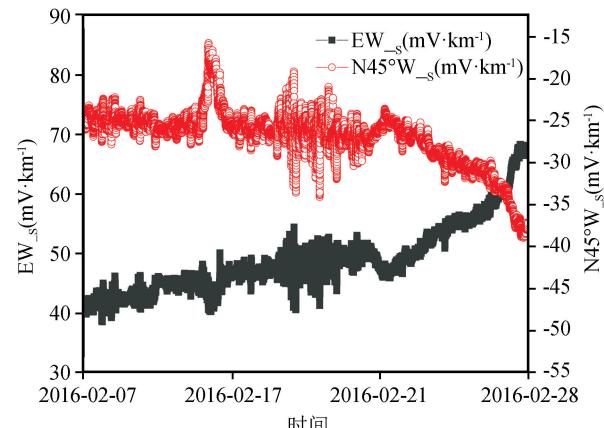
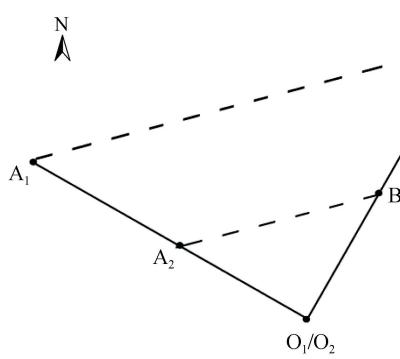


图 4 大柏舍电场布极及数据图

Fig.4 Distribution and data chart of Dobaishi geoelectric field



(a) 兴济台地电场布极图

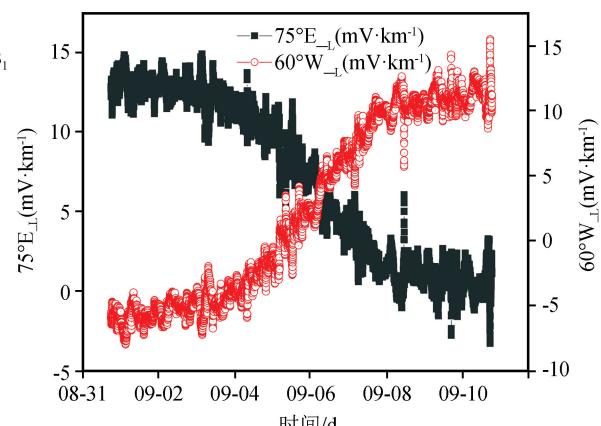


图 5 兴济台电场布极与数据图

Fig.5 Distribution and data chart of Xingji geoelectric field

移;如图 5(b)所示。

## 5 结论

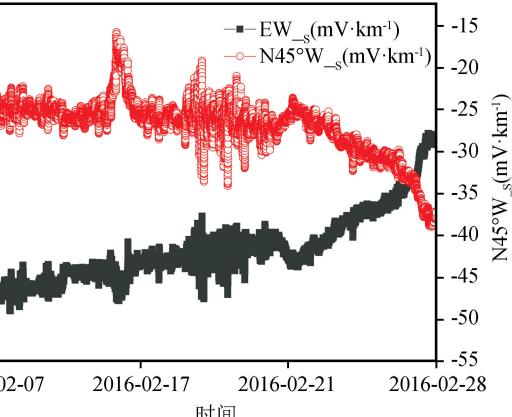
(1) 电极故障初步判断:地电场电极故障时,共用该故障电极的两测道数据变化具有同步性干扰变化。首先表现在相应的测道数据同步出现相关系数

以兴济台地电场雨季为例,其地电场布极图如图 5(a)所示,在 2018 年 9 月份电极  $A_1$  故障,因处于雨季结束,此时地下水比较充足,因电极故障,外界土壤内水分进入电极,使该处电解质内氯离子活度上升,根据式(4)此处电极电位  $\Phi_{A_1 \text{电极}}$  增加。则

$O_1 A_1$  电场即  $N60^\circ W_{-L}$  数据  $E_{O_1 A_1} = \frac{\Phi_{A_1 \text{电极}} - \Phi_{O_1 \text{电极}}}{L_{O_1 A_1}}$

增加,故电场数据向上漂移; $A_1 B_1$  电场即  $N75^\circ E_{-L}$

数据:  $E_{A_1 B_1} = \frac{\Phi_{B_1 \text{电极}} - \Phi_{A_1 \text{电极}}}{L_{A_1 B_1}}$  减少,电场数据下漂



(b) 大柏舍地电场2月  $EW_{-S}$  与  $N45^\circ W_{-S}$  数据图

图 4 大柏舍电场布极及数据图

变小,差值变大,即使相关系数及差值变化在规定变化范围内也有可能是电极故障造成,应对数据进行跟踪观察。其次共用故障电极测道数据图像会同步出现数据突跳变化、台阶变化、趋势性变化,以及雷雨等天气下抗干扰的能力变差等特征。多个电极故障,也可以根据数据变化的同步性逐一进行判断。

(2) 非电极故障排除方法:因电极埋于地下,无法直接查看电极故障情况,故需要通过排除法判断电极故障,应检查观测环境、仪器、外线路、线路接头等排除正常项。另外还可以通过对比法判断电极故障,通过预埋电极,待电极稳定后接入备用仪器。在用仪器与备用仪器同步运行,通过对比观测数据质量及图像进一步确定电极故障以及故障电极位置。

(3) 通过对电极工作机理分析,以 Butler-Volmer 方程对不极化电极的反应速度进行分析,解释雷击后电极故障的数据台阶变化,以 Nernst 方程讨论不极化电极内部与埋设环境中 Cl<sup>-</sup>离子含量对故障电极的影响,总结了雨季与旱季时电极故障数据曲线漂移规律,另外因为地下观测环境的复杂性电极故障造成的数据突跳、台阶、漂移等现象可能与电极内部及埋设环境的物质变化、埋设不当造成电极沉降的位置变化、电极附近存在金属异物等有关,有待进一步研究。

## 参考文献(References)

- [1] 中国地震局监测预报司编.地震电磁数字观测技术[M].北京:地震出版社,2002.  
Department of Monitoring and Forecasting, China Earthquake Administration. Seismic electromagnetic digital observation technology[M]. Beijing: Seismological Press, 2002.
- [2] 孙正江等编.地电概论[M].北京:地震出版社,1990,第一章.  
SUN Zhengjiang et al. Introduction to Geoelectricity[M]. Chapter 1. Beijing: Seismological Press, 1990, Chapter 1.
- [3] 罗娜,乔子云,寇海川,等.河北省地电场干扰因素分析[J].地震地磁观测与研究,2016,37(6):60-67.  
LUO Na, QIAO Ziyun, KOU Haichuan, et al. The Analysis and Summary of Interference Factors in Geoelectric Field in Hebei Province[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2016, 37(6): 60-67.
- [4] 马君钊,张磊,关华平,等.大地电场观测各类干扰源的调研与分析[J].地震地磁观测与研究,2010,31(5):65-72.  
MA Junzhao, ZHANG Lei, GUAN Huaping, et al. Analysis and Research Into Each Interference Source of Geoelectric Field [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2010, 31(5): 65-72.
- [5] 郭红魁,刘晓锋,何香玲,等.地电场数据观测干扰排查分析[J].地震地磁观测与研究,2012,33(1):75-80.  
ZHI Hongkui, LIU Xiaofeng, HE Xiangling, et al. Interference Sifting Analysis in Geo-electric Field Observational Data[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2012, 33(1): 75-80.
- [6] 安张辉,杜学彬,元丽华,等.HHT 方法在受城市轨道交通干扰地电场观测数据中的应用[J].地震学报,2011,33(2):243-251.  
AN Zhanghui, DU Xuebin, YUAN Lihua, et al. Application of Hilbert-Huang Transform to Geo-electric Data Disturbed by Urban Track Traffic[J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 33(2): 243-251.
- [7] 马新欣,李大虎,张小涛,等.地电场观测典型干扰数据的修正方法[J].地震地磁观测与研究,2012(3):159-163.  
MA Xinxin, LI Dahu, ZHANG Xiaotao, et al. Correction Methods on Typical Interference Data of Geoelectric Observation [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2012(3): 159-163.
- [8] 李希亮,王峰,徐溶.山东地电场观测干扰特征分析[J].地震工程学报,2015,37(增刊 2):164-169.  
LI Xiliang, WANG Feng, XU Rong. Analysis of Interference in Geoelectric Observations in Shandong Province [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(Supp2): 164-169.
- [9] 李伟,马钦忠,宋志平,等.小波变换在地电场数据分析中的应用[J].地震学报,2013,35(1):26-35.  
LI Wei, MA Qinzhong, SONG Zhiping, et al. Application of Wavelet Transform to the Analysis of Geoelectric Field Data [J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(1): 26-35.
- [10] 董晓娜,鲁成义,曲利,等.山东地区地电场观测资料分析研究[J].地震研究,2012,35(3):420-428.  
DONG Xiaona, LU Chengyi, QU Li, et al. Research on the Observation Data of Geo-electric Field in Shandong Region [J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(3): 420-428.
- [11] 张仰辉,荆红亮,李艳,等.影响地电场观测数据干扰因素分析[J].地震地磁观测与研究,2010,31(4):92-101.  
ZHANG Yanghui, JING Hongliang, LI Yan, et al. Analysis of Interference Factors Influencing on Observation Data of Geoelectric Field[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2010, 31(4): 92-101.
- [12] 邱颖.地电场观测中已知源干扰抑制研究[D].北京:中国地震局地震预测研究所,2008;8-14.  
QIU Ying. Research on Restraining the Known Source Interference in Geoelectric Field Observation [D]. Beijing: Institute of Earthquake Science China Earthquake Administration, 2008; 8-14.
- [13] 赵卫星,杜江,李宁,等.地电场观测中系统干扰分析[J].地震地磁观测与研究,2012,33(增刊 1):195-200.  
ZHAO Weixing, DU Jiang, LI Ning, et al. Analysis and Processing of Interferences of Observation System of Geoelectric Field in Observation [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2012, 33(Supp1): 195-200.
- [14] 王洪峰,王向阳,李民.山西夏县中心地震台大地电场测量电极故障分析与排除[J].山西地震,2013(4):1-4,8.  
WANG Hongfeng, WANG Xiangyang, LI Min. Analysis and Troubleshooting of Trouble of Electrode on Geoelectric Field Observation at Xiaxian Central Seismological Station, Shanxi [J]. Earthquake Research in Shanxi, 2013(4): 1-4, 8.
- [15] 高慧慧,孟凡博,文勇,等.都兰和大武地电场观测干扰因素分析[J].地震研究,2014,37(S1):124-132.  
GAO Huihui, MENG Fanbo, WEN Yong, et al. Analysis of Interference Factors of Geoelectric Observation at Dulan and Dawu Station[J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(S1): 124-132.

(S1):124-132.

- [16] 李伟,沈红会,皇甫德银,等.地电场布极方式研究[J].地震地磁观测与研究,2010,31(6):87-92.

LI Wei, SHEN Honghui, HUANGFU Deyin, et al. Study on the Electrode Layout of Geo-electric Field Observation [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2010, 31(6):87-92.

- [17] ZD9A-2B 地电场仪使用说明书[M].中国地震局地震预测研究所北京陆洋科技开发公司,2012:7-9.

Instruction Manual for ZD9A-2B Geoelectric Field Instrument [M]. Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Beijing Luyang Technology Development Corporation, 2012:7-9.

- [18] 宋艳茹,席继楼,刘超,等.一种 Pb-PbCl<sub>2</sub> 不极化电极试验研究[J].地震地磁观测与研究,2011,32(6):97-103.

SONG Yanru, XI Jilou, LIU Chao, et al. Research on a Type of Pb-PbCl<sub>2</sub> Non-polarizable Electrode [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2011, 32(6):97-103.

- [19] 王辉,叶高峰,魏文博.Pb—PbCl<sub>2</sub> 不极化电极的设计与实现

[J].地震地磁观测与研究,2010,31(3):115-120.

Wang Hui, Ye Gaofeng, Wei Wenbo. The Design and Implementation of Non-polarizable Pb-PbCl<sub>2</sub> Electrodes [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2010, 31 (3):115-120.

- [20] 邓明,刘志刚,白宣诚,等.海底电场传感器原理及研制技术[J].地质与勘探,2002,38(6):43-47.

DENG Ming, LIU Zhigang, BAI Yicheng, et al. The Theory and Development Technology of the Sea-floor Electric Field Sensor [J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(6):43-47.

- [21] 吴浩青,李永舫.电化学动力学[M].北京:高等教育出版社,1998.

WU Haoqing, LI Yongkun. Electrochemical Kinetics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.

- [22] 张绍衡,朱艳云,高文秦.电化学分析法[M].重庆:重庆大学出版社,1994,14-15.

ZHANG Shaoheng, ZHU Yanyun, GAO Wenqin. Electroanalytical Chemistry [ M ]. Chongqing: Chongqing University Press, 1994, 14-15.