

高云峰, 贾昕晔, 贾彦杰, 等. 高压直流输电对宝昌地震台地电场观测干扰分析[J]. 华南地震, 2023, 43(2): 69–76. [GAO Yunfeng, JIA Xinye, JIA Yanjie, et al. Interference Analysis of HVDC Transmission on Geoelectric Field Observation at Baochang Station[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(2): 69–76]

## 高压直流输电对宝昌地震台地电场观测干扰分析

高云峰, 贾昕晔, 贾彦杰, 白少奇

(内蒙古自治区地震局锡林浩特地震监测中心站, 内蒙古 太仆寺旗 027000)

**摘要:** 分析了宝昌地震台地电场受高压直流干扰的变化特征及原因, 对干扰的程度及方式进行了探讨, 并计算了高压直流输电干扰时台址岩体裂隙优势方位。结果表明: 宝昌台高压直流干扰线路主要为锡泰线; 地电场受高压直流干扰期间变化形态出现大幅度跃变只在高压输电入地电流开始注入和停止注入时产生; 地电场3测向受高压直流干扰影响幅度最大测项为NE测向, 最小为测项为NS测向, 同一测向长、短极距之间的影响量虽然存在差异, 但幅值比基本相同, 每次干扰长短极距各分量变化幅度不尽相同, 但各分量产生方波的方向相同; 宝昌台岩体裂隙优势方位 $\alpha$ 角为 $50^\circ \pm 10^\circ$ ; 高压直流输电干扰发生时, 岩体裂隙优势方位 $\alpha$ 角在正常背景值范围内, 并未超出背景值, 因此宝昌台地电场台址岩体裂隙优势方位角计算结果对区别高压直流输电干扰有效。

**关键词:** 地电场; 高压直流干扰; 岩体裂隙优势方位角

中图分类号: TM721.1; P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)02-0069-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.02.07

## Interference Analysis of HVDC Transmission on Geoelectric Field Observation at Baochang Station

GAO Yunfeng, JIA Xinye, JIA Yanjie, BAI Shaoqi

(Xilinhot Central Station, Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Taipusi 027000, China)

**Abstract:** This paper analyzes the variation characteristics and causes of the geoelectric field of Baochang Seismic Station influenced by HVDC, discusses the degree and mode of interference, and calculates the dominant orientation of rock fracture at the site during HVDC interference. The results show that the HVDC interference line of Baochang Station is mainly Xitai line; the large jump of the change pattern of the geoelectric field during the HVDC interference occurs only when the high-voltage transmission ground current starts to inject and stops to inject. The geoelectric field 3 direction finding is affected by HVDC interference, and the maximum measurement term is NE direction finding, and the minimum measurement term is NS direction finding. Although there are differences in the influence between the long and short polar distances of the same direction, the amplitude ratio is basically the same. The amplitude of each component of the long and short polar distances of each interference is different, but the direction of the square wave generated by each component is the same. The dominant azimuth  $\alpha$  angle of rock

收稿日期: 2022-04-12

基金项目: 内蒙古地震局局长基金课题(2020YB13)

作者简介: 高云峰(1993-), 男, 硕士, 主要从事地震监测工作。

E-mail: 308647910@qq.com

fracture at Baochang Station is  $50^{\circ} \pm 10^{\circ}$ , and the  $\alpha$  angle is within the normal background value range and does not exceed the background value, when HVDC transmission interference occurs. Therefore, the calculation results of the dominant azimuth of the rock fractures of geoelectric field site at Baochang Station are effective in distinguishing the interference of HVDC transmission.

**Keywords:** Geoelectric field; HVDC interference; Dominant azimuth of rock fracture

## 0 引言

随着20世纪80年代希腊学者提出的VAN法在地电场地震预测方面的广泛应用研究,国内专家学者基于对地电场的不同的研究机理,提出了多种应用地电场数据进行地震预测分析的方法。如:极化方位计算法、短极距比值计算法、频谱分析法、大地电场优势方位角分析方法等。但是目前地电场大多数分析方法都存在相对的局限性。例如:VAN法的点源模型对远源信号识别较好,而对近源的干扰判定存在一定的误差;频谱分析方法只注重前几阶谐波的能量,这使得其受复杂的电磁环境影响明显;极化方位计算方法主要存在结果的离散、取值的差异等;长短极距比值方法也存在取值及机理不清楚等。研究表明,大地电场优势方位角分析方法的机理解释、抗干扰性相对较好。

目前,宝昌地震台(简称宝昌台)关于地电场观测异常分析多根据台网数据进行环境干扰分析和异常识别,关于高压直流对地电场干扰异常研究方面的相关研究涉及甚少<sup>[1-4]</sup>。随着属地电网的迅速发展,大量的超(特)高压输电线路的建设和投入运营。高压直流输电线路宝昌台地前兆观测的干扰日趋严重,尤其是对地震地电场的干扰尤为突出,关于高压直流输电对宝昌台地电场的影响相关研究亟待解决。本文以内蒙古自治区宝昌地震台地电场观测数据为基础,分析了2019年1月至12月宝昌台地电场数据受高压直流输电期间对宝昌台地电场的干扰变化特征及原因,探讨了干扰的程度与方式,并利用宝昌台地电场台址岩体裂隙优势方位 $\alpha$ 角的方法分析高压直流输电干扰对宝昌台岩体裂隙优势方位计算结果的影响,为今后宝昌台地电场干扰分析及预处理提供一定的参考。

## 1 宝昌地震台概况

宝昌地震台位于内蒙古自治区锡林郭勒盟太

仆寺旗宝昌镇西沟村,地质构造位置属阴山构造带内蒙地轴东段,东南与燕山构造带交汇,西南与山西构造带交汇(图1)。这一特殊的地理位置,使宝昌地震台的地电观测资料在晋冀蒙交界地区及首都圈附近区域的地震监测预报有着不可替代的作用<sup>[4]</sup>。

宝昌地震台地电场于2008年1月正式运行,仪器型号为ZD9A-II地电仪。地电场采用L型观测装置单独布设电极和线路,具体为:在场地中心点向南和向西布设测线,每个方向均有两个测道,采用长短两种极距埋设电极,其中长极距为360 m,短极距为240 m,形成6极共用,室内分线组合成12个输入端进入仪器,形成6个测道,具体如图1,表1,埋设方法为:采用地电场观测专用固体不极化专用电极6个,埋设在地表冻土层以下的相对潮湿土壤当中,深度3.5 m,各电极处于相对统一水平面,且各电极坑中土质大致相同并进行导电性能人工处理。经过多年来的观测运行,数据稳定,相关系数达到0.9以上,观测质量较好,观测资料连续可靠,具有很高的应用和科研价值<sup>[5-7]</sup>。

## 2 宝昌台地电场变化形态

地电场是地表大地电磁场的一部分,由自然电场、大地电场组成。其中自然电场产生于地下介质物理、化学等作用,主要有接触扩散电场、过滤电场、氧化还原电场,有着极其明显的场地局部特征;大地电场来源于地球外部空间各种电流系和日、月潮汐,具有日变化形态,有着较为明显的区域性、全球性特征。地电场变化形态一般主要呈峰-谷型、近直线型、无序变化型和混合型,峰-谷型地电场与潮汐相对应,潮汐地电场一般有以下三种类型:与固体潮对应时,近正弦形态连续的双峰双谷TGF-A型;与空间 $S_q$ 电流变化对应时当地午12时前后6小时出现近正弦变化;波谷时间点相对稳定,早晚相对平静呈近直线状双峰单谷TGF-B型、无日变型<sup>[6-8]</sup>。

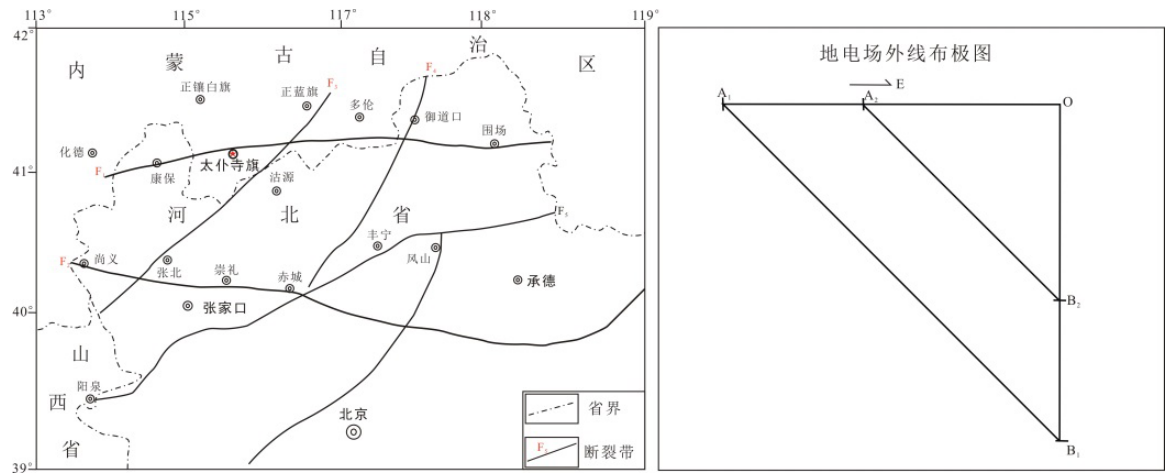


图1 宝昌地震台位置及地电场外线布极图

Fig.1 Location of Baochang Seismic Station and distribution of geoelectric field external line

表1 布极参数表

Table 1 pole distribution parameters

台站名称	坐标	布极方位	长极距/m	短极距/m
宝昌地震台	东经 115.27° 北纬 41.90°	EW	360	240
		N45°W	509	339
		NS	360	240

2.1 地电场正常日变形态

宝昌台地电场正常日变化分钟值曲线3个测向长、短极距正常记录曲线形态。如图2所示，宝昌

台地电场正常日变化形态表现为双峰双谷：3时至4时、16时至17时为地电场极小值，11时至12时，19时至20时为地电场极大值，即双峰双谷TGF-A型。

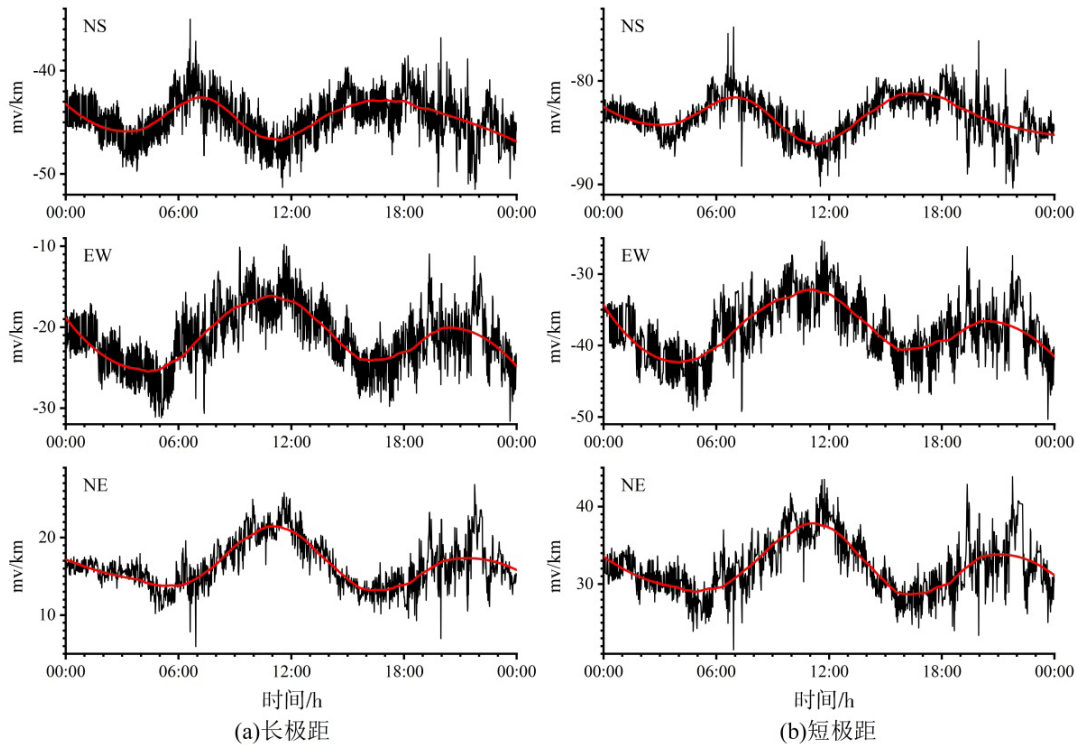


图2 宝昌台地电场正常日变化分钟值曲线

Fig.2 The minute value curve of normal diurnal variation of geoelectric field at Baochang Station

2.2 地电场受高压直流干扰形态

宝昌台地电场主要受锡泰线干扰，其对宝昌地电场数据的干扰形态主要表现为台阶或突跳，所有受影响各测道的观测数据在干扰产生与结束时同时形成明显的台阶或突升突降。以12月31日为例，由于锡林浩特至泰州±800 kV 直流输电单极运行，电流注入接地极引起换流站地电位升高，导致地电场观测发生显著变化，在10 min 内，宝昌台地电场六测项均出现1组明显的台阶式同步大幅变化，其中短极距NE测向变化幅度达34.83 mV/

km，相对变化率为56.31%。当停止输电时，注入接地极电流直接降为0，观测数据呈直线下降变化（图3）。同时段锡林浩特台地磁观测手段同样记录到阶跃干扰，通过“地磁台网高压直流输电判别处理系统”对比分析，可以得出为高压直流输电干扰。2019年宝昌电场观测共5次受高压直流输电干扰影响，其干扰开始与结束时间不尽相同，干扰持续时间有的为十几分钟，有的为几小时，有的可持续多天；干扰产生时段较为随机，但每次干扰各测项变化时间同步，变化形态一致(表2)。

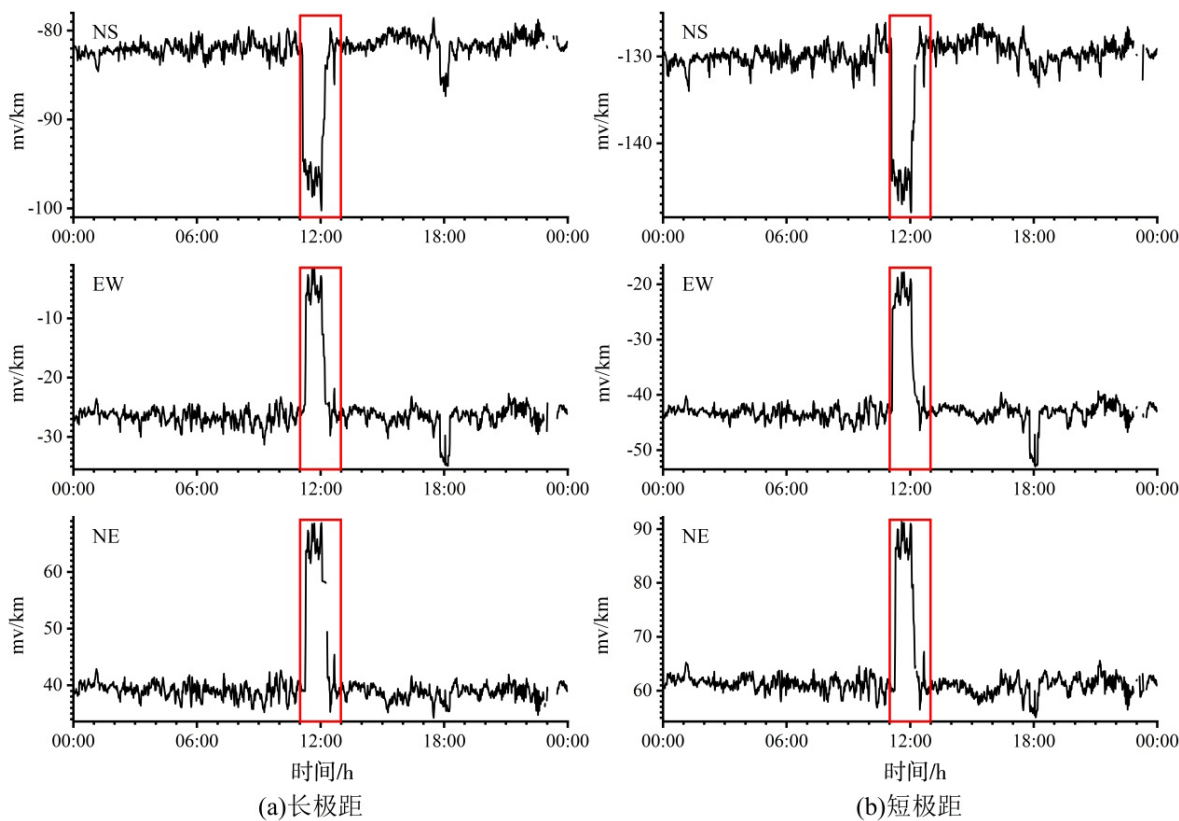


图3 宝昌台地电场受高压直流输电影响分钟值曲线  
Fig.3 The minute value curve of geoelectric field of Baochang Station affected by HVDC transmission

表2 宝昌台地电场观测数据受高压直流干扰幅度变化

Table 2 Amplitude variation of geoelectric field observation data of Baochang Station influenced by HVDC interference									
日期/年-月-日	开始 时间/h:min	长极距变化幅度/(mV·km <sup>-1</sup> )			短极距变化幅度/(mV·km <sup>-1</sup> )			结束 时间/月-日 h:min	变化 形态
		NS	EW	NE	NS	EW	NE		
2019-03-20	18:35	14.93	18.55	23.61	15.91	18.70	24.46	03-21 14:00	方波
2019-08-21	01:10	2.77	4.08	4.63	7.16	3.58	7.39	03:36	阶变
2019-09-11	07:50	23.68	29.99	36.47	32.28	33.49	44.07	09-17 19:20	方波
2019-11-06	02:20	30.36	44.87	42.43	28.18	37.64	49.36	10:15	阶变
2019-12-31	11:00	20.53	28.32	33.38	21.38	28.62	34.83	13:00	阶变



3 宝昌台地电场优势方位角分析

本文以2019年宝昌地震台地电场观测数据作为背景值抽取地电场观测资料FFT前10阶频率固定频率的谐波,分析计算地电场台岩体裂隙优势

方位 $\alpha$ 角。由图4可知宝昌台岩体裂隙优势方位 $\alpha$ 角在 $50^{\circ}\pm 10^{\circ}$ 左右。图4中与宝昌台岩体裂隙优势方位角相差较大的点,经核实是记录那些点的时间内发生了场地环境事件(测区内一砖瓦厂存在设备漏电现象)。

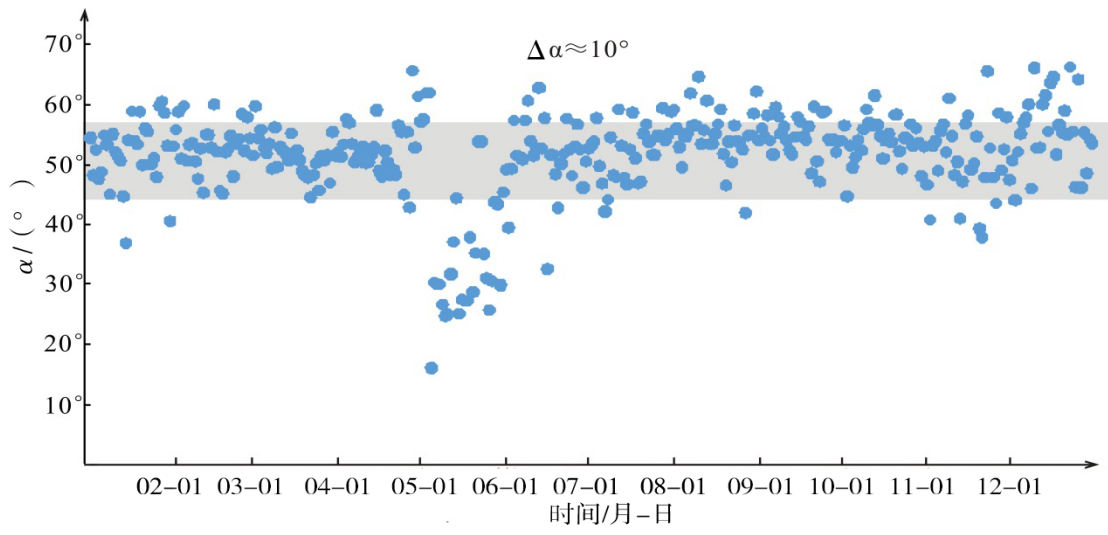


图4 宝昌台地电场台岩体裂隙优势方位 $\alpha$ 角计算结果

Fig.4 Calculation results of the dominant azimuth  $\alpha$  angle of rock fracture of geoelectric field at Baochang Station

根据谭大诚等提出大地电场岩体裂隙优势方位角 $\alpha$ 的变化范围,可分为三类:在图5a中, $\alpha$ 变化范围小,几乎呈直线状,反映的是场地岩体裂隙发育良好,具有孕育中强地震应具有的背景;图5b中, $\alpha$ 角虽在一定范围内变化,但 $\Delta\alpha$ 不大反映了场地岩体裂隙发育较正常;图5c中, $\alpha$ 角变化

范围分散且 $\Delta\alpha$ 大,反映了场地岩体裂隙较为破碎(少数情况会是裂隙生成阶段),这基本是中小地震发生区域具有的背景。宝昌台岩体裂隙优势方位 $\alpha$ 角在 $50^{\circ}\pm 10^{\circ}$ 上下波动, $\alpha$ 角变化范围 $\Delta\alpha$ 不大与图5b形态相似,反映了地电场地岩体裂隙发育较正常。

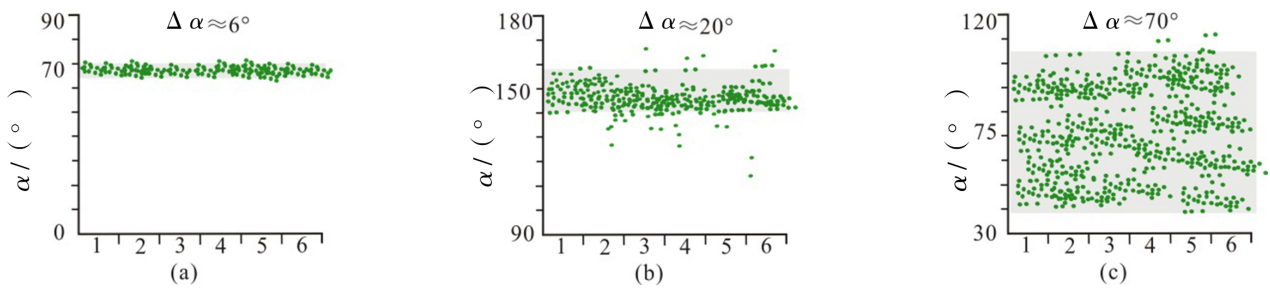


图5 典型的大地电场优势方位角正常变化形态<sup>[13]</sup>

Fig.5 Typical normal variation of dominant azimuth of geoelectric field<sup>[13]</sup>

表3为高压直流输电干扰时地电场方位角统计,可以得出:高压直流输电干扰产生时,宝昌台地电场台的岩体裂隙优势方位 $\alpha$ 角都在正常取值范围内,并未超出背景值。综合图4和表3分析得

出,高压直流输电干扰并不会对宝昌台地电场台岩体裂隙优势方位计算结果产生影响,即宝昌台地电场台址岩体裂隙优势方位角计算结果可以有效区别高压直流输电对宝昌地电场的干扰。

表 3 高压直流干扰时段宝昌台地电场  
台岩体裂隙优势方位 $\alpha$ 角

Table 3 The dominant azimuth  $\alpha$  angle of rock fractures of  
geoelectric field station at Baochang Station  
during HVDC interference period

日期/(年-月-日)	方位角/(°)
2019-03-20	48.2
2019-08-21	53.9
2019-09-11	54.2
2019-11-06	55.8
2019-12-31	53.6

4 高压直流对宝昌地电场影响

随着我国清洁能源的极速发展，我国电网已一跃成为世界发电增长量最快的电网，其中内蒙

古电网负责建设运营自治区中西部电网，承担着区内 8 个市(盟)工农牧业生产及城乡 1429 万居民生活供电任务，同时向华北、陕西榆林、蒙古国跨省区和跨国境供电，区内共有 13 条高压输电线路。目前对宝昌台地电场能够造成高压直流输电干扰的主要为锡泰线，其干扰形态主要表现为台阶或突跳，所有受影响测道的观测数据在干扰产生与结束时同时形成明显的台阶或突升突降变化<sup>[9]</sup>。

锡林浩特—泰州±800 kV 特高压高压直流线路输电工程起始于内蒙古锡林郭勒盟换流站，止于江苏泰州换流站，额定输送功率为 10 000 MW，途经内蒙、河北、天津、山东、江苏等地，全长共计 1600 余公里，工程于 2015 年开施工，2017 年 8 月双极建成投运。宝昌地震台位于锡泰线锡林浩特换流站西南方向 280 km 处(图 6)。

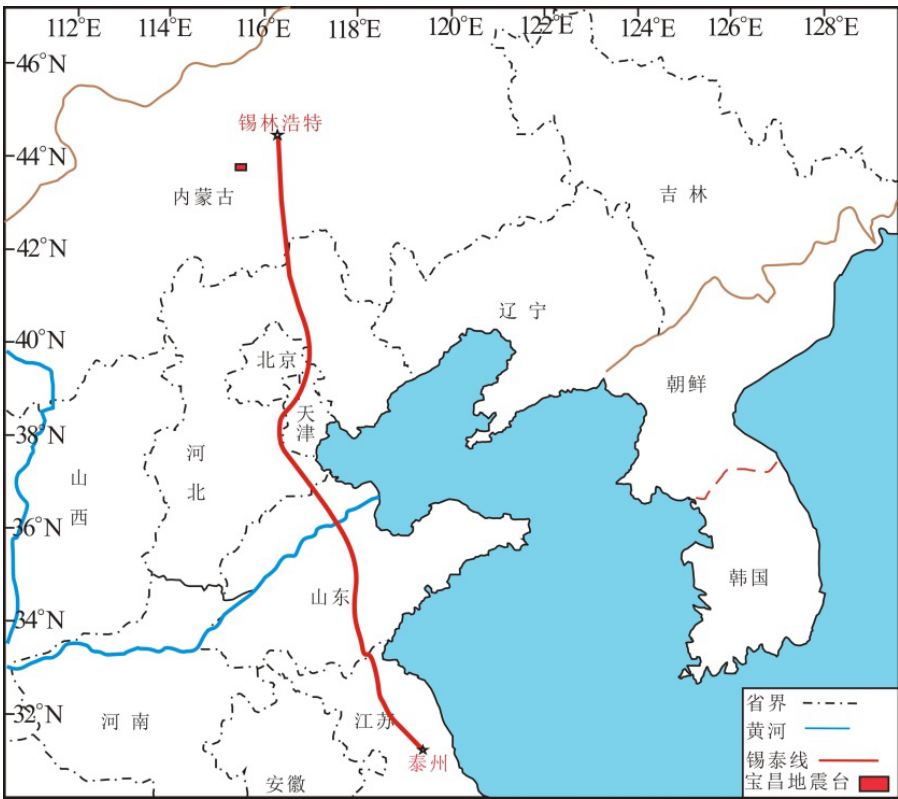


图 6 锡泰线高压直流输电线路示意图

Fig.6 Schematic diagram of HVDC transmission line of Xitai line

表 4 所示为宝昌台地电场部分磁静日无干扰且日变较清晰的长、短各极距日变化幅度值，经过计算，NS、EW、NE 向长、短各极距之间日变幅度的比值为 1: 1.4: 1.5 左右。剔除计算误差后与相应的高压直流影响量比值较为接近。根据前人

的研究可知，地电场不同测向的日变幅度差异性与观测场地地下介质差异性 & 浅表层电性结构差异性关联较大，且与浅表、深层电阻率存在一定相关性，因此高压直流干扰对宝昌台地电场不同测向之间影响量存在同异性<sup>[6]</sup>。

表4 宝昌台地电场磁静日日变幅对比结果

Table 4 Comparison results of diurnal variation amplitude of geoelectric magnetostatic field at Baochang Station

日期/(年-月-日)	长极距 NS 向/ 电场 (mV·km <sup>-1</sup> )	长极距 WE 向/ (mV·km <sup>-1</sup> )	长极距 NE 向/ (mV·km <sup>-1</sup> )	短极距 NS 向/ (mV·km <sup>-1</sup> )	短极距 WE 向/ (mV·km <sup>-1</sup> )	短极距 NE 向/ (mV·km <sup>-1</sup> )
2019-03-08	11.53	12.74	16.25	11.68	13.04	17.07
2019-04-10	14.07	19.27	23.22	14.01	19.62	23.89
2019-08-18	11.39	15.18	18.33	11.90	15.87	18.83
2019-09-22	10.57	13.09	14.26	10.48	12.89	15.09

表5、表6所示为宝昌台地电场受高压直流干扰时的长、短各极距影响量及影响形态。对比表4、表5发现存在以下现象：①宝昌台地电场3测向干扰影响幅度最大为NE测向，最小为测向NS测向；②虽然长、短极距之间的影响量存在差异，但是幅值比基本相同，NS、EW、NE长、短极距之间影响量比值大致为1：1.5：1.6；③每次干扰长短极距各分量变化幅度不尽相同，但各分量产生方波的方向相同，NS产生方波的方向与EW、NE产生方波方向相反。由于发生略明显的外空扰动时及门限和各电极稳定性不同的影响，表4、表5影响量计算结果存在一定的误差。

表5 高压直流输电对宝昌台地电场长极距影响的基本参数

Table 5 The basic parameters of influence of HVDC transmission on long pole distance of geoelectric field at Baochang Station

日期/(年-月-日)	影响时段	影响量/(mV·km <sup>-1</sup> )	形态特征	幅值比
2019-03-20	18:35-21 日 14:00	14.93 18.55 23.61	NS ↑ WE、NE ↓	1:1.2:1.6
2019-08-21	01:10-03:36	2.77 4.08 4.63	NS ↑ WE、NE ↓	1:1.5:1.8
2019-09-11	07:50-17 日 19:20	23.68 29.99 36.47	NS ↑ WE、NE ↓	1:1.3:1.5
2019-11-06	02:20-10:15	30.36 44.87 42.43	NS ↓ WE、NE ↑	1:1.5:1.4
2019-12-31	11:00-13:00	20.53 28.32 33.38	NS ↓ WE、NE ↑	1:1.4:1.6

注：“↑”表示方波向上，“↓”表示方波向下

表6 高压直流输电对宝昌台地电场短极距影响的基本参数

Table 6 The basic parameters of influence of HVDC transmission on short pole distance of geoelectric field at Baochang Station

日期/(年-月-日)	影响时段	影响量/(mV·km <sup>-1</sup> )	形态特征	幅值比
2019-03-20	18:35-21 日 14:00	15.91 18.70 24.46	NS ↑ WE、NE ↓	1:1.2:1.5
2019-08-21	01:10-03:36	7.16 3.58 7.39	NS ↑ WE、NE ↓	2:1:2.1
2019-09-11	07:50-17 日 19:20	32.28 33.49 44.07	NS ↑ WE、NE ↓	1:1:1.4
2019-11-06	02:20-10:15	28.18 37.64 49.36	NS ↓ WE、NE ↑	1:1.3:1.8
2019-12-31	11:00-13:00	21.38 28.62 34.83	NS ↓ WE、NE ↑	1:1.4:1.6

注：“↑”表示方波向上，“↓”表示方波向下

由毕奥-萨伐尔定律和楞次定律可知，线路两侧所产生的影响量与线路和各测向的方位存在一定关联，即与电流方向垂直的地电场的2个电极之间所产生的电位差最大，与电流方向平行的地电场2个电极之间所产生的电位差最小，由此认为宝昌台地电场所受高压直流干扰走向为近NS走向<sup>[7]</sup>。前人研究认为地电场数据产生方波的方向与观测台站的相对位置、高压直流输电线路接地极、观测台站装置系统的布设方法有关，同一条高压直流输电线路产生的干扰对同一台站同一方向上长、

短极距观测数据干扰幅度大致相同,由此分析认为宝昌地震台地电场历次所受高压直流干扰为同一条高压直流输电线路,并通过查询国家电网信息得知2018年内蒙古自治区锡林浩特至江苏省泰州市高压直流线路(简称锡泰线)投入运营,确认其为对宝昌台地电场高压直流干扰的线路。

## 5 结论

(1)宝昌台高压直流干扰线路主要为锡泰线。宝昌台地电场受高压直流干扰时变化形态出现大幅度跃变只在高压输电入地电流开始注入和停止注入时产生。

(2)宝昌台地电场3测向受高压直流干扰影响幅度最大为NE测向,最小为测向NS测向,宝昌台地电场长、短极距之受高压直流干扰的影响量存在差异性,但幅值比大致相对,NS、EW、NE长、短极距之间影响量比值维持在1:1.5:1.6左右。

(3)宝昌台岩体裂隙优势方位 $\alpha$ 角在 $50^{\circ}\pm 10^{\circ}$ 上下波动。宝昌台地电场台址岩体裂隙优势方位角计算结果可以有效区别高压直流输电干扰。

## 参考文献

- [1] 范莹莹,杜学彬, Jacques Zlotnick, 等. 汶川  $M_s$  8.0 大震前的电磁现象[J]. 地球物理学报, 2010, 53(12): 2887–2898.
- [2] 黄清华, 刘涛. 新岛台地电场的潮汐响应与地震[J]. 地球物理学报, 2006, 49(06): 1745–1754.
- [3] 黄清华, 林玉峰. 地震电信号选择性数值模拟及可能影响因素[J]. 地球物理学报, 2010, 53(03): 535–543.
- [4] 戴勇, 高立新, 陈立峰, 等. 地震前兆数据时频分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(06): 95–101.
- [5] 内蒙古自治区地震局. 内蒙古自治区地震局监测志[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2006.
- [6] 高云峰, 贾昕晔, 戴勇, 等. 宝昌地震台地电场观察中的干扰识别与分析[J]. 河南科技, 2021, 40(20): 132–135.
- [7] 戴勇, 高立新, 杨彦明, 等. 地电阻率变化成因分析——以宝昌台为例[J]. 地震地质, 2021, 43(03): 647–662.
- [8] 张伟峰, 潘洁, 赵桂宝, 等. 嘉山地震台大地电场观测异常干扰研究[J]. 国际地震动态, 2015(05): 28–35.
- [9] 关晓明, 李哲, 纪延辉, 等. 锦州义县地电场干扰因素的识别与分析[J]. 防灾减灾学报, 2011, 27(02): 36–47.
- [10] 谭大诚, 王兰炜, 赵家骝, 等. 潮汐地电场谐波和各向波形的影响要素[J]. 地球物理学报, 2011, 54(07): 1842–1853.
- [11] 谭大诚, 赵家骝, 席继楼, 等. 潮汐地电场特征及机理研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(03): 544–555.
- [12] 张波, 谭大诚, 罗娜, 等. 高压直流输电对大柏舍台地电场观测干扰的分析[J]. 地震, 2020, 40(01): 140–150.
- [13] 谭大诚, 辛建村, 王建军, 等. 大地电场岩体裂隙模型的应用基础与震例解析[J]. 地球物理学报, 2019, 62(02): 558–571.
- [14] 辛建村, 谭大诚, 赵菲, 等. 典型干扰对岩体裂隙优势方位计算结果的影响研究[J]. 地震, 2017, 37(04): 112–122.
- [15] 魏建民, 戴勇, 刘芳, 等. 宝昌地震台地电阻率电性结构特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(03): 56–63.