

苏小芸,陈丽君,王文才,等.高压直流输电对甘肃地电场观测影响分析[J].地震工程学报,2020,42(4):934-940.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.934

SU Xiaoyun, CHEN Lijun, WANG Wencai, et al. Effect of HVDC Transmission on Geoelectric Field Observation in Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 934-940. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.934

高压直流输电对甘肃地电场观测影响分析

苏小芸^{1,2}, 陈丽君^{1,2}, 王文才^{1,2}, 周卫东^{1,2}, 姜佳佳^{1,2}, 季婉婧¹

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以甘肃河西地区瓜州、嘉峪关、高台地电场观测受酒泉—湖南±800 kV 高压直流输电工程影响为例,分析了甘肃地电场观测受干扰的异常变化形态和特征,并结合高压直流输电基本原理,对异常机理进行了探讨,定量的计算了不同距离、不同电导率和高压直流输电入地电流等对地电场观测的可能影响。结果表明,在理想状态下,高压直流输电对地电场观测的影响与入地电流成正比,与地电场观测场地距换流站接地极的距离的平方和影响区域的电导率成反比。并采用最小二乘拟合法对干扰进行消除,效果理想。

关键词:地电场观测; 高压直流干扰; 干扰消除

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)04-0934-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.934

Effect of HVDC Transmission on Geoelectric Field Observation in Gansu Province

SU Xiaoyun^{1,2}, CHEN Lijun^{1,2}, WANG Wencai^{1,2}, ZHOU Weidong^{1,2},
JIANG Jiajia^{1,2}, JI Wanjing^{1,2}

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

2. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In this study, the interference of Guazhou, Jiayuguan, and Gaotai geoelectric field observations in the Hexi Area of Gansu Province via the Jiuquan—Hunan ±800 kV HVDC transmission project was taken as an example to analyze the changes in anomalies during geoelectric field observation. The anomaly mechanism and the basic principles of HVDC transmission were discussed, and the possible effects of different distances, conductivities, and grounding currents on the observation were calculated. Under ideal conditions, the influence of HVDC on geoelectric field observation was directly proportional to the grounding current and inversely proportional to the square of the distance between the observation site and the earth electrode of a converter sta-

收稿日期:2020-05-09

基金项目:甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站基金(2020Y04)

第一作者简介:苏小芸(1987—),女,助理研究员,主要从事前兆台网运维及数据分析工作。E-mail:345893692@qq.com。

tion and the conductivity of the affected area. Least square fitting was conducted to eliminate the interference, and the effect was ideal.

Keywords: geoelectric field observation; HVDC interference; elimination of interference

0 引言

2019 年 5 月,甘肃省河西地区高台、瓜州、嘉峪关等地电场观测台站的地电场观测数据出现几组明显同步上升或下降变化。经与国家地磁台网高压直流输电判别系统对比,发现该现象属于国家电网酒泉—湖南±800 kV 高压输电工程运行造成的。高压直流输电对地电场观测的影响主要由直流感地极的入地电流造成,以国家标准规定的 0.5 mV/km 为电场强度干扰限值,正常运行时的干扰范围都可达 15 km 以上^[1],当高压直流输电运行故障或采用单回路方式运行时,会产生较大的不平衡电流,在输电线及换流站周围产生的干扰磁场将影响正常的电磁观测^[2],会对地电观测数据质量产生很大的影响。随着中国高压直流输电骨架网的形成,地震地电场观测受其影响的问题更加突出^[3-5],因此对高压直流输电对地电场观测影响分析及消除地电场观测数据

的高直干扰,保证地电场观测资料的准确性和连续性,对地电场的震情跟踪以及异常提取具有十分重要的实用价值。

1 高压直流输电对地电场观测的影响

1.1 高压直流输电干扰对地电场观测影响的主要表现

酒泉—湖南±800 kV 高压直流输电工程(图 1)西起甘肃酒泉,途径甘肃、陕西、重庆、湖北四省后落点于湖南湘潭地区,线路总长 2 385.6 km^[6]。受酒泉—湖南±800 kV 直流输电影响,甘肃河西地区高台、嘉峪关、瓜州等地电场观测出现多组时间同步、形态一致的明显的台阶式上升(下降)变化(图 2),它们变化时间同步,变化形态一致,影响范围至少达几千 km²。2019 年瓜州台地电场观测受高压直流输电干扰 30 余次,表 1 是瓜州地电场观测受

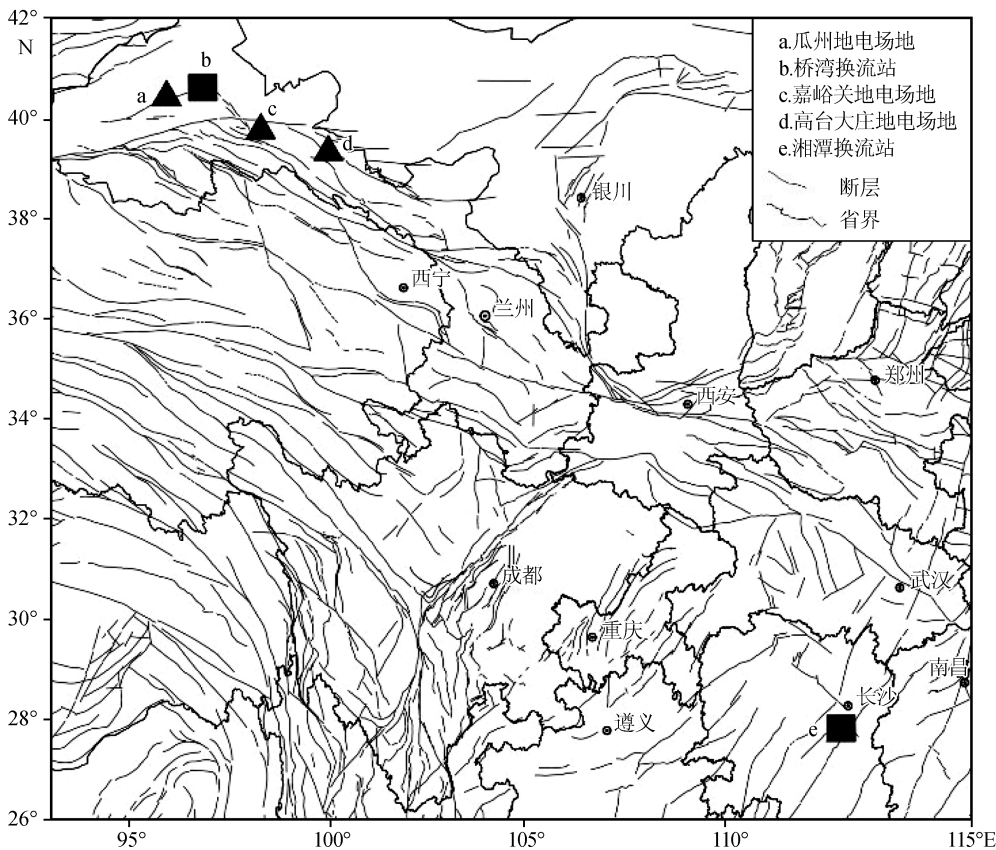


图 1 酒泉—湖南±800 kV 直流输电工程线路和部分地电台站分布图

Fig.1 Line of Jiuquan—Hunan ±800 kV HVDC project and distribution of some geoelectric stations

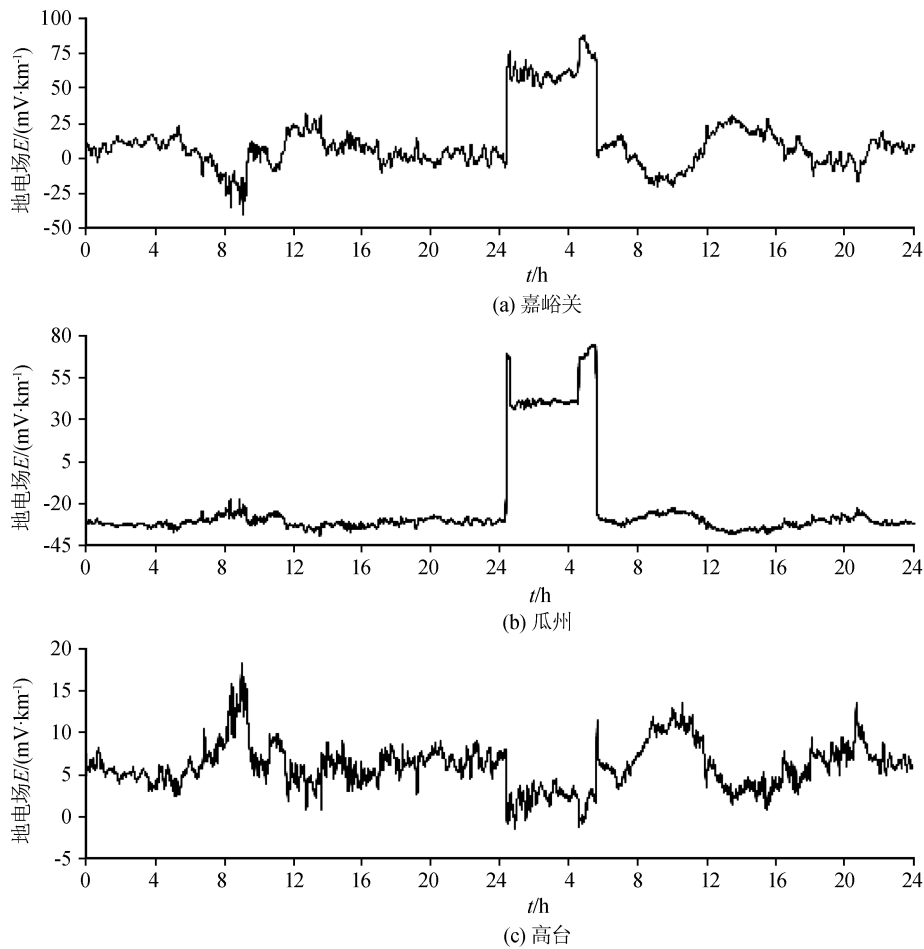


图 2 甘肃地电场观测受高压直流输电干扰同步变化举例(分钟值,2019 年 5 月 20—21 日)

Fig.2 An example of synchronous change of geoelectric field observation in Gansu interfered by HVDC transmission (minute value, May 20—21, 2019)

表 1 2019 年瓜州台地电场观测受酒湖线高压直流输电影响部分统计

Table 1 The influence of Jiuquan—Hunan HVDC transmission on the geoelectric field observation at Guazhou station in 2019

日期	测项	开始时间	开始数值	结束时间	结束数值	干扰形态
2019-05-05	NS	07:06	-1.09	07:43	-17.42	方波↓
	EW		-32.29		-29.08	方波↑
	NE		-24.59		-23.06	方波↓
2019-05-10	NS	03:20	-4.79	05:18	-6.35	方波↓
	EW		-28.26		-28.79	方波↑
	NE		-26.01		-25.22	方波↓
2019-05-21	NS	00:20	-11.24	05:42	-1.08	方波↓
	EW		-29.68		-29.68	方波↑
	NE		-23.67		-28.06	方波↓
2019-05-22	NS	07:57	-13.12	12:01	-16.13	方波↑
	EW		-25.65		-35.72	方波↓
	NE		-14.87		-29.53	方波↑
2019-07-02	NS	23:11	-33.17	3 日 14:11	-24.37	方波↓
	EW		-22.95		-24.54	方波↑
	NE		-30.12		-35.38	方波↓
2019-10-31	NS	06:42	-2.92	16:25	-20.43	阶变↓
	EW		-36.48		-24.52	阶变↑
	NE		-40.65		-32.40	阶变↓
2019-11-01	NS	02:18	-7.3	03:56	-18.11	方波↑
	EW		-29		-29.98	方波↓
	NE		-32.4		-35.59	方波↑

酒-湖高压直流输电影响的部分统计结果。以 5 月 21 日为例,由于酒泉—湖南 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^[1],导致地电场观测发生显著变化,在 10 min 内,瓜州台地电场 NS 向长极距观测上升达 70 mV/km,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,相邻的 2 次上升和下降变化的幅度大致相等。通过对瓜州、高台和嘉峪关台的其他测向观测数据分析,可以得到同样的结果。

2019 年甘肃省地电场观测受高压直流输电干扰影响 30 余天,大部分地电场观测台站均受到高压直流输电线路的干扰,干扰产生和消除时间不尽相同,有的十几分钟,有的长达数小时,有的甚至连续多天,白天和夜间均有,干扰时间比较随机。瓜州台数据变化尤为明显,受到酒湖线、哈郑线、昌宣线 3 条输电线路的影响,全年观测数据受到严重干扰。

1.2 高压直流输电对地电场观测影响的机理分析

利用大地作为回路输送电力是高压直流输电的特点,其正常运行机制是利用大地作为回流电路,正常情况下近乎无大地电流,但当运行故障或采用单回路方式运行时,会产生较大的不平衡电流^[3]。酒泉—湖南±800 kV 高压直流输电工程为双极线路^[7],输电线路供电方式如图 3,输电线路在正常工作时,电流基本上都从两条架空线路经过,电流大小基本相等,方向相反,其直流接地极在理论上是没有电流通过的,但实际上,由于触发角和设备参数的差异,会有很小的不平衡电流流入地^[1]。一旦输电线路运行故障或采用单回路方式运行时,即架空线中只有一条线路有电流时,利用大地作为回流电路,电流几乎全部从地下通过,就会出现很大的不平衡电流^[3],不平衡电流有时能达到数千安培,对高压直流输电接地极附近几百公里以及沿线的台站地电观测造成很大影响,仪器观测到的则是大地原有电场和入地电流对仪器干扰电场的矢量和^[1,8-9]。酒泉—

湖南±800 kV 直流输电工程在满负荷运行时,流经大地回路电流为 5 000 A,这种运行方式下,对甘肃河西地区的地电场观测影响很大。

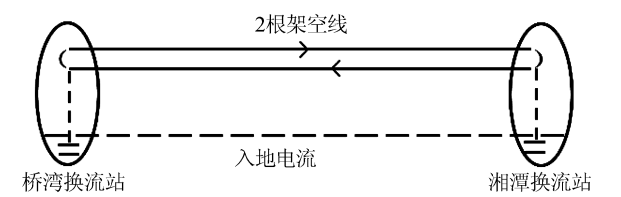


图 3 桥湾和湘潭之间的直流输电线路
Fig.3 Qiaowan—Xiangtan HVDC transmission line

假设单极直流感地点电流源在理想状态下使用均匀土壤模型,根据电流连续性定理和土壤本构关系,可以利用下式计算距离点电流源空间距离为 r 处的电场强度,

$$E = \frac{I_m}{2\pi\gamma r^2} \tag{1}$$

式中: I_m 为入地电流大小; γ 为土壤电导率。

根据张乐天、魏文博^[10-11]对华北中部岩石圈电性结构的研究结果,地壳电阻率最低可达 2.5×10^{-4} s/m,最高可达 0.8 s/m 左右,参照此数据通过计算,当 γ 分别取 1.4×10^{-3} 、 4.5×10^{-4} 和 0.9×10^{-3} 时(表 2~4),瓜州、嘉峪关、高台 3 个台站地电场观测改变量分别为 76.89、77.59 和 9.83 mV/km,2019 年 5 月 21 日瓜州、嘉峪关、高台 3 个台站地电场观测 EW 测项改变量分别为 76.66、77.583 和 9.52 mV/km(图 2),计算结果与实际观测资料比较接近。当 γ 取其他数值时,随着电导率的增加,计算结果不再与观测值相符,呈反比例下降,即高压直流输电对地电场观测的影响与入地电流成正比,与地电场观测场地与换流站接地极的距离的平方和影响区域的电导率成反比。由于某一地区地壳的电导率与该区域土壤含盐量、地下水的化学性状、岩石层的厚度和成分以及地质构造等密切相关^[3],不同区域地壳的电导率差异较大,酒一湖工程对上述 3 个地电场观测影响区域的电导率是否如此,还需另外测定。

表 2 不同大小的入地电流和土壤电导率下的地电场强度(瓜州 $r=86$ km)
Table 2 Geoelectric field intensity under different ground current and soil conductivity (Guazhou, $r=86$ km)

电导率	电场强度				
	1 000 A	2 000 A	3 000 A	4 000 A	5 000 A
0.01	2.15	4.3	6.46	8.61	10.76
0.005	4.3	8.6	12.92	17.22	21.53
0.004	5.38	10.76	16.14	21.52	26.91
0.001 5	14.35	28.71	43.06	57.47	71.76
0.001 4	15.37	30.76	46.14	61.51	76.89

表 3 不同大小入地电流和土壤电导率下的地电场强度(嘉峪关 $r=151\text{ km}$)

Table 3 Geoelectric field intensity under different ground current and soil conductivity (Jiayuguan, $r=151\text{ km}$)

电导率	电场强度				
	1 000 A	2 000 A	3 000 A	4 000 A	5 000 A
0.01	0.69	1.39	2.1	2.79	3.49
0.005	1.4	2.79	4.19	5.59	6.95
0.003	2.32	4.66	6.98	9.31	11.64
0.0005	13.96	27.93	41.9	55.87	69.84
0.00045	15.52	31.04	46.56	62.08	77.59

表 4 不同大小的入地电流和土壤电导率下的地电场强度(高台 $r=300\text{ km}$)

Table 4 Geoelectric field intensity under different ground current and soil conductivity (Gaotai, $r=300\text{ km}$)

电导率	电场强度				
	1 000 A	2 000 A	3 000 A	4 000 A	5 000 A
0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09
0.005	0.35	0.71	1.06	1.42	1.77
0.004	4.42	8.85	13.27	17.69	22.11
0.001	0.18	0.35	0.53	0.71	0.88
0.0009	1.96	3.93	5.9	7.86	9.83

在对 2019 年 5 月 21 日地电场实际观测资料的异常分析中发现,距离直流输电换流站较近的瓜州台的变化幅度反而小于距离较远的嘉峪关台,可能为瓜州、嘉峪关和高台 3 个台站的观测场地土壤电导率不同引起。由于瓜州和高台无地电阻率观测项目,计算中瓜州地电阻率取值近似嘉峪关台,高台地电阻率取值近似距离相近的小西沟地电阻率,根据嘉峪关和小西沟多年的地电阻率观测资料,嘉峪关和小西沟地电阻率观测年变曲线大致在 $26\ \Omega\cdot\text{m}$, $104\ \Omega\cdot\text{m}$ 左右波动,根据土壤电导率与地面观测的视地电阻率之间的反比关系^[3],结合公式(1)计算可得,在饱和入地电流(5 000 A)的作用下,引起瓜州、嘉峪关和高台 3 个台站地电场观测该变量大小之比约为 $1:2.4:0.03$,即在同时受到酒湖线高直干扰时,嘉峪关台地电场改变量要大于瓜州台和高台台,这与实际观测资料基本相符。

2 高压直流输电对地电场观测干扰消除

2.1 信号的最小二乘拟合

对于一组测量数据 $(X_i, Y_i) (i=1, 2\cdots n)$, 假设拟合函数为 $y=f(x, a)$, 其中 $a=(a_1, a_2\cdots a_n)$ 是参数, 求 a 使得拟合函数 $f(x, a)$ 在 X_i 点计算出的函数值 Y_i 与对应数据差值的平方和的平均值最小, 即 $\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2 = \min$ 。对被干扰的地电场观测数据采用最小二乘法拟合计算时, 选取多项式 $P(x) = \sum_{i=0}^n a_i x_i^n$ 作为拟合函数, 通过选取适当的系数 a_i , 就

可使 $S = \sum_{i=0}^n [p(x_i) - y_i]^2$ 达到最小^[12]。

2.2 实际观测数据的处理结果

王兰炜等^[12]采用最小二乘拟合法对地电场受地电阻率供电干扰进行消除, 处理后的数据基本不影响它原有的信息量和变化形态。本文采用最小二乘拟合法对瓜州、高台和嘉峪关的干扰数据进行了预处理, 图 4 为瓜州台、嘉峪关台、高台台地电场观测 EW 测向 2019 年 5 月 21 日受影响的观测数据, 图中阴影为受影响时段, 对应的下方为处理过的数据曲线, 可以看出, 处理后的数据曲线趋势变化比较清晰, 干扰消除效果明显。

3 结论与讨论

本文计算了瓜州、嘉峪关、高台地电场在理想状态下受高压直流输电影响时的变化幅度, 并将计算结果与实际观测值进行了对比, 在不考虑各台站地电场观测系统差异、极区地质构造等因素的影响时, 高压直流输电对地电场观测的影响与入地电流成正比, 与地电场观测场地距换流站接地极距离的平方和影响区域的电导率成反比。

地电场观测受高压直流输电干扰的特点是变化时间同步、形态一致, 相邻的 2 次台阶式上升和下降变化的幅度大致相等。根据 2019 年 5 月实际观测数据计算了在饱和入地电流(50 00 A)的情况下, 酒-湖高压直流输电工程对邻近地区地电场观测的可能影响, 计算结果表明, 理论值与实际观测值基本相符。

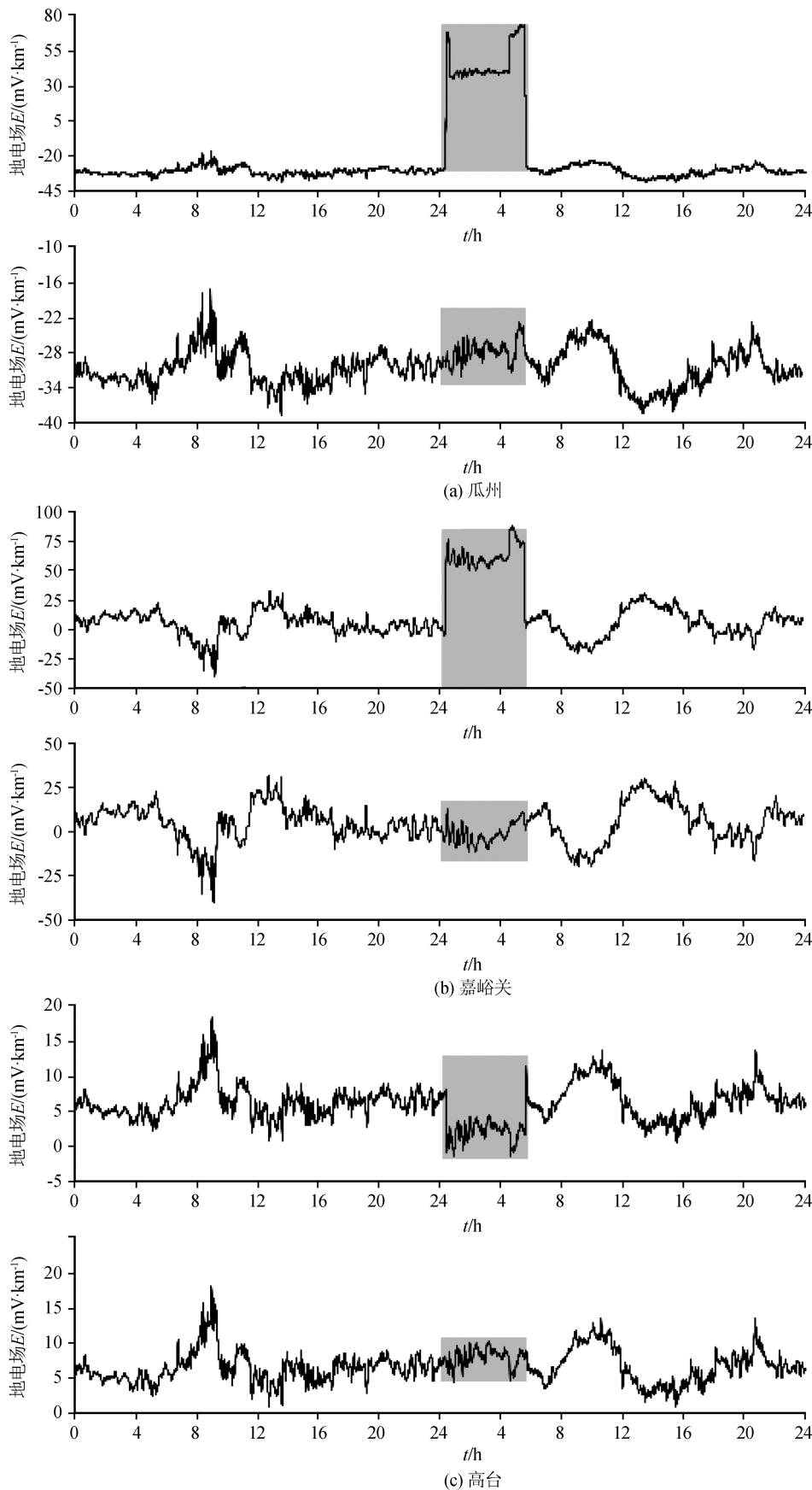


图 4 瓜州、嘉峪关、高台受高压直流影响的观测曲线和处理后的曲线

Fig.4 Observation curves interfered by HVDC and curves after processing at Guazhou, Jiayugan, and Gaotai stations

随着经济建设飞速发展,高压直流输电对地电场观测的影响将无法避免,开展消除干扰方法研究对提升地电场观测效能具有较好的应用价值。本文采用最小二乘拟合方法对被干扰的地电场观测数据进行插补处理,在消除干扰之后,数据曲线的趋势变化比较清晰,干扰消除的效果理想。

参考文献(References)

- [1] 马健,杨永,魏延禄,等.特高压直流接地极对地电场观测的干扰分析[J].电工技术,2017(4):15-16,25.
MA Jian,YANG Yong,WEI Yanlu,et al.Analysis of interference of UHVDC earth electrode to the observation of earth electric field [J].Electric Engineering,2017(4):15-16,25.
- [2] 蒋延林,张秀霞,杨冬梅,等.高压直流输电对地磁观测影响的特征分析[J].地震,2014,34(3):132-139.
JIANG Yanlin,ZHANG Xiuxia,YANG Dongmei,et al.Influence Characteristics of High Voltage Direct Current Transmission on Geomagnetic Observation[J].Earthquake,2014,34(3):132-139.
- [3] 方炜,张国强,邵辉成.高压直流输电对地电场观测的影响[J].地震地质,2010,32(3):434-441.
FANG Wei,ZHANG Guoqiang,SHAO Huicheng.Study on the Impact of Hvdc to Geoelectric Field Observation[J].Seismology and Geology,2010,32(3):434-441.
- [4] 方炜,张国强,邵辉成.高压直流输电对地电场观测的影响[J].地震地质,2010,32(3):434-441.
FANG Wei,ZHANG Guoqiang,SHAO Huicheng.Study on the Impact of Hvdc to Geoelectric Field Observation[J].Seismology and Geology,2010,32(3):434-441.
- [5] 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(S2):164-169.
LI Xiliang,WANG Feng,XU Rong.Analysis of Interference in Geoelectric Observations in Shandong Province [J]. China Earthquake Engineering Journal,2015,37(S2):164-169.
- [6] 徐浩,侍乔明,欧阳帆,等.祁邵±800 kV 特高压直流输电工程两种故障重启逻辑研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(12):143-150.
XU Hao,SHI Qiaoming,OUYANG Fan,et al.Research on Two Kinds of Fault Restart Logic of Qi-Shao ± 800 kV UHVDC Project[J].Power System Protection and Control,2018,46(12):143-150.
- [7] 岳一石,周年光,邹妍晖,等.酒—湖线对湖南电网变压器的直流偏磁影响研究[J].湖南电力,2016,36(3):5-8.
YUE Yishi,ZHOU Nianguang,ZOU Yanhui,et al.Research on the Effects of Jiu-Hu HVDC Project on Transformer DC Bias in Hunan Power Grid[J].Hunan Electric Power,2016,36(3):5-8.
- [8] 沈红会,张秀霞,冯志生,等.减小直流输电对地磁观测影响的几种办法[J].中国地震,2005,21(4):530-535.
SHEN Honghui,ZHANG Xiuxia,FENG Zhisheng,et al.The Countermeasures to the Influence of Direct Current Transiting to Geomagnetic Observation[J].Earthquake Research in China,2005,21(4):530-535.
- [9] 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(Suppl):127-133,148.
- [10] 张乐天,金胜,魏文博,等.青藏高原东缘及四川盆地的壳幔导电性结构研究[J].地球物理学报,2012,55(12):4126-4137.
ZHANG Letian,JIN Sheng,WEI Wenbo,et al.Electrical Structure of Crust and Upper Mantle beneath the Eastern Margin of the Tibetan Plateau and the Sichuan Basin[J].Chinese Journal of Geophysics,2012,55(12):4126-4137.
- [11] 魏文博,谭捍东,金胜,等.华北中部岩石圈电性结构:应县—商河剖面大地电磁测深研究[J].地球科学,2002,27(5):645-650.
WEI Wenbo,TAN Handong,JIN Sheng,et al.Conductivity Structure of Lithosphere in Central North China:Magnetotelluric Study of Yingxian-Shanghe Profile [J].Earth Science,2002,27(5):645-650.
- [12] 王兰炜,赵家骊,席继楼,等.曲线拟合法在地电场资料处理中的应用[J].西北地震学报,2003,25(2):131-135.
WANG Lanwei,ZHAO Jialiu,XI Jilou,et al.Application of Least Square Fitting Method to Processing Telluric Data[J].Northwestern Seismological Journal,2003,25(2):131-135.