第 29 卷　第 4 期(501 ~ 512)　　中 国 地 震　　Vol. 29　No. 4
2013 年 12 月　　EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA　　Dec. 2013

王伟、鲁成义、陈传华等,2013,山东地区地电场和地磁场观测数据对比分析研究,中国地震,**29**(4),501 ~ 512。

山东地区地电场和地磁场观测数据对比分析研究

王伟[1,2)]　鲁成义[3)]　陈传华[1)]　赵银刚[4)]　董晓娜[5)]
田凤东[6)]　刘海林[4)]　李峰[1)]　王强[1)]

1) 泰安基准地震台,山东省泰安市红门东路罗汉崖 2 号　271000
2) 聊城地震水化试验站,山东省聊城市开发区军王屯东首　252000
3) 马陵山地震台,山东郯城　276114
4) 安丘地震台,山东安丘　262100
5) 山东省地震局,济南　250014
6) 陵阳地震台,山东莒县　276500

摘要　介绍了山东地区同时拥有地电场和地磁场观测的 5 个电磁台站的基本概况,选取了各台 2011 年度的观测数据,并对其观测资料质量进行了简要评价。重点对 5 个台站的地电场和地磁场观测数据进行了全面、系统的对比分析,探寻了地电场、地磁场日变规律以及地电场、地磁场观测对各类干扰响应的区别与联系,为两种观测资料的分析处理提供了相互参考、相互借鉴的依据。

关键词:山东地区　地电场　地磁场　对比分析
[文章编号] 1001-4683(2013)04-0501-12　[中图分类号] P315　[文献标识码] A

0　引言

由麦克斯韦电磁场理论可知:变化的电场产生磁场,变化的磁场产生电场,它们之间是相互激发、相互依存的关系,它们永远密切地联系在一起,组成一个统一的电磁场(国家地震局科技监测司,1995)。地震电磁学研究领域中电、磁两大研究方向的结合,一直是广大地震科技工作者努力的目标之一,数字化观测技术的发展为其创造了良好的条件。本文利用山东地区同时拥有地电场和地磁场(FHD)观测的 5 个站点的观测资料进行全面、系统的对比研究,探寻地电场和地磁场观测资料的关联性,为地电场和地磁场观测数据的联合分析与应用提供帮助。

1　概述

目前,山东地区同时拥有地电场和地磁场观测的 5 个台站分别是马陵山、安丘、菏泽、大

[收稿日期] 2013-09-12;[修定日期] 2013-09-26
[项目类别] 中国地震局“三结合”项目(SJH201202)资助
[作者简介] 王伟,男,1977 年生,工程师,主要从事地震电磁观测及地下流体观测工作。
Email:lc_wangwei@163.com

山和陵阳地震台。其空间分布如图 1 所示，各场地的构造条件、观测极距及布极方式见表 1、图 2。这 5 个台站的电磁观测场地条件、观测环境均良好，符合电磁观测规范要求。

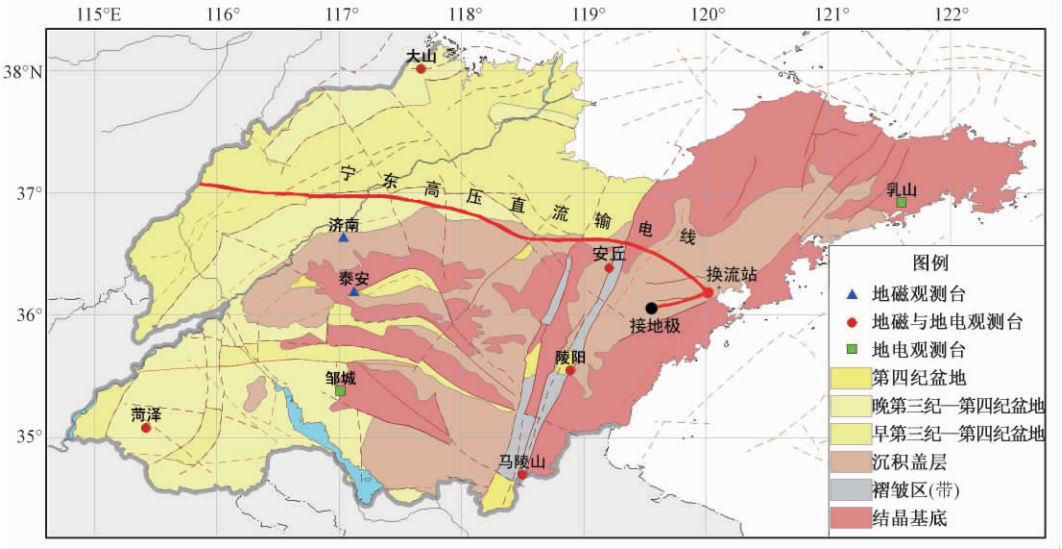


图 1 山东地区电磁台站空间分布图

表 1 **山东地区电磁台基本情况统计表**

台站名称	邻近断层	台站与断层间距(km)	台站与接地极间距(km)	$O_1A_1=O_1B_1$ (m)	$O_2A_2=O_2B_2$ (m)	仪器	电场布极方式
马陵山	沂沭断裂带中段，跨安丘-莒县断裂东侧	4	168	307	170	ZD9A-Ⅱ FHD-2B	图 2(d)
安丘	沂沭断裂带北段，在安丘-莒县断裂上	0.5	48	315	136	ZD9A-Ⅱ FHD-2B	图 2(a)
菏泽	地处鲁西南平原，聊考断裂带中北段东	30	420	350	200	ZD9A-Ⅱ FHD-2B	图 2(a)
大山	地处新生代沉降带埕宁隆起，隆起以北是黄骅新生代坳陷，以南是济阳坳陷，隆起与坳陷之间为断层接触	3	267	400	200	ZD9A-Ⅱ FHD-2B	图 2(a)
陵阳	地处昌邑-大店断裂带南端与陵阳-葛河断裂交汇部位	3	81	310	180	ZD9A-Ⅱ FHD-2B	图 2(d)

本文所选用的样本数据为上述 5 个台站 2011 年度地电场和地磁场的观测数据。通常用数据的连续率和完整率表示观测数据的连续性和完整性，地电场观测数据的可信度用相关系数来衡量，地磁场观测数据的可信度用各分量的平均背景噪声来衡量(表 2)。

由表 2 可见，各台地电场和地磁场观测资料保持了较好的连续性，表明各台仪器稳定性较高，观测系统运转正常。所有台站的地电场观测资料同测向相关性均较好(≥0.88)；地磁场背景噪声除菏泽台较高外(1.525)，其它各台均较低，观测资料质量可靠。

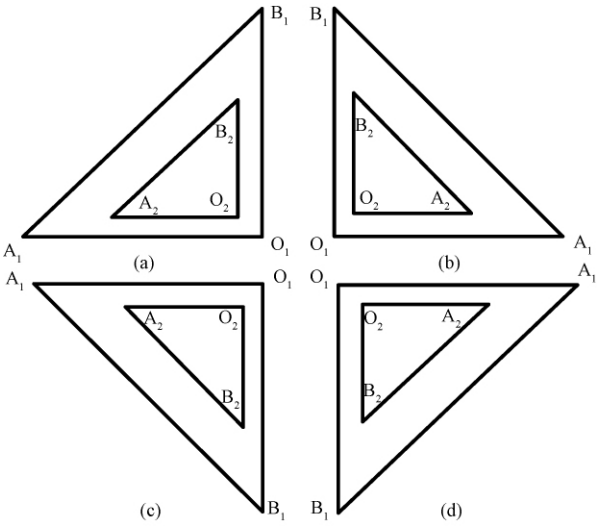


图 2　地电场布极图

表 2　　各台地电场和地磁场观测数据的连续率、完整率、年均背景噪声统计表

台站名称	地电场			地磁场		
	连续率(%)	完整率(%)	相关系数	连续率(%)	完整率(%)	年均背景噪声
马陵山	99.85	99.71	0.95	99.78	99.58	0.825
安丘	99.92	99.92	0.88	99.83	99.48	0.750
菏泽	99.79	99.73	0.95	99.34	98.05	1.525
大山	99.80	99.77	0.97	99.25	99.04	0.500
陵阳	99.89	99.36	0.97	99.61	99.50	0.625

2　观测资料的对比分析

2.1　地电场与地磁场概述

地电场是指地球表面天然存在的电场,包括大地电场和自然电场。其中,大地电场由地球外部各种电流体系与地球介质相互作用产生,具有区域性或广域性同步变化特性;自然电场由地下矿体、地下水和各种水系间的物理、化学过程产生,分布于局部地区,具有区域性或地域性相对稳定的特征。地电场的主要变化包括地电日变化、地电暴、地电湾扰等大地电场背景变化,由地下介质(场源)变化引起的自然电场变化,由于潮汐力作用产生的周期性变化,以及各种电磁环境干扰因素产生的非天然变化等(钱家栋,2010)。

地磁场是一个矢量场,是基本的地球物理场之一。地磁场包括基本磁场和变化磁场,其中基本磁场来源于地球内部,基本稳定,只随时间缓慢变化。变化磁场主要是由外部原因引起的叠加在地球基本磁场之上的各种短期的地磁变化,根据其出现的时间特点划分为平静变化和干扰变化两大类。平静变化是指连续存在的周、日变化,包括太阳磁静日变化(Sq)和太阴日变化(L);干扰变化是偶尔出现的持续时间不定的各类变化的总称,包括磁暴场、地磁亚暴、太阳扰日变化、地磁脉动等(国家地震局科技监测司,1995)。

地电场和地磁场的变化遵从麦克斯韦方程组(式 1)。其中,电场可以是电荷密度 q 引

起的发散场，也可以是变化磁场$\frac{\partial B}{\partial t}$引起的涡旋场；磁场是由传导电流和位移电流$\frac{\partial D}{\partial t}$激励产生的涡旋场。

$$\begin{cases} \square \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \square \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \square \cdot B = 0 \\ \square \cdot D = q \end{cases} \tag{1}$$

式中 E 为电场强度，B 为磁感应强度或磁通密度，D 为电通量密度或电位移，H 为磁场强度，j 为电流密度，q 为自由电荷密度。

2.2 静日变化对比分析

在地球自转的作用下，由于太阳和地球表面相对位置的周期性变化，使测点上空电离层中的电流发生周期性变化，电流的这种变化使地球表面的地电场和地磁场都发生规律性的日变化。地电（磁）日变化包括静日变化和扰日变化，比较典型的静日变化波形由全日波和半日波等波形叠加而成，形成比较典型的变化形态，可以连续出现或重复出现，具有确定的周期性；扰日变化由于其频率成分比较丰富，周期性不很明显，变化幅度可能较大。

目前，中国大陆地电场观测曲线的日变形态主要包括："峰-谷"型、近直线型、无序变化型和混合型等 4 种（董晓娜等，2012）。本文选取的 5 个样本台站的地电场观测日变形态均属于"峰-谷"型（图 3）。这种"峰-谷"型地电场观测曲线主要起源于潮汐现象，所以又称为潮汐地电场。潮汐地电场有近正弦形态，分为持续全天候的 TGF-A 型和只在午时前后出现的 TGF-B 型等 2 种（谭大诚等，2011）。

由图 3 可见，陵阳台属于 TGF-A 型地电场。TGF-A 型地电场与固体潮汐密切相关联，是潮汐力直接作用于岩石，导致岩石裂隙水周期性渗流而产生的过滤电场，该类型地电场基本分布在大面积水域附近（谭大诚等，2010）。陵阳台虽远离海洋和大水域，但其紧邻小湖群，台站的西南侧约 0.2km 处有一个小水库，北侧约 0.8km 处有一小水库，北侧及东侧约 2.5km 处分别有一小水库（董晓娜等，2012）。马陵山、安丘、菏泽、大山等台站属于 TGF-B 型地电场。TGF-B 型地电场与气潮作用产生的空间 Sq 电流体系关系密切，空间 Sq 电流在地表的感应电场易引起裂隙水周期性渗流，进而产生较强的大地电流场，使地表出现 TGF-B 型地电场（谭大诚等，2010；左恒等，2007）。TGF-B 型地电场日变形态与地磁静日变化（Sq）极其相似。Sq 场的变化依赖于地方太阳时，白天变化强，晚间变化弱，水平分量的极值时间约在地方时 11 ~ 12 时（国家地震局科技监测司，1995）。这是因为随时间变化的、大尺度的大地电场的最主要部分同变化磁场的起源基本上是一致的，所以前者的谐波成分同后者几乎可以一一对应，主要含以 24、12、8、6h 为周期的谐波（谭大诚等，2010），其中以 24、12h 周期波占主要成分（图 3）。

2.3 磁暴和地电暴对比分析

磁暴和地电暴均与太阳活动有关，由太阳辐射产生的高速太阳风（带电粒子流），在地球磁场的作用下，在高度约为 300km 处的极区电离层产生电流系，并在距离地心 5 □7 个地

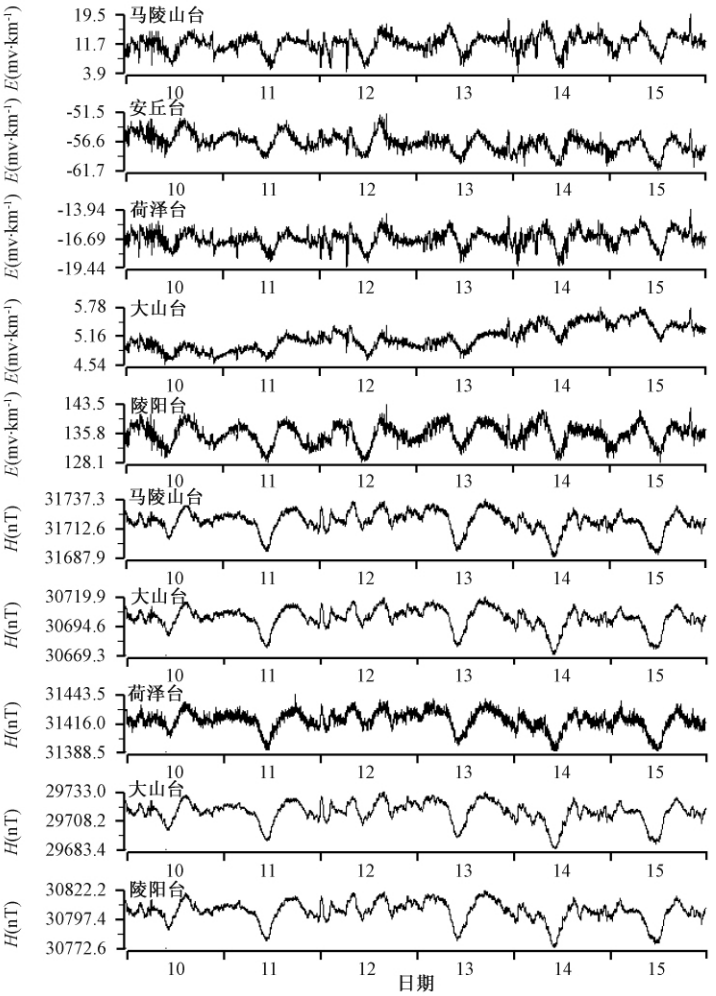


图 3　2011 年 1 月 10 ~ 15 日(北京时)地电场 NS 向长极距与地磁 H 分量的观测曲线

球半径的远处形成一个赤道电流环,它们分别是地电(磁)湾扰和地电(磁)暴的场源。磁暴的发生会导致全球同时性的强烈磁扰,地磁场总场强度 F、水平分量 H 和偏角 D 均会发生相应的扰动变化,但在中、低纬度地区总场强度 F 和偏角 D 的扰动幅度比水平分量 H 小得多,变化形态也不像水平分量那样典型。因此,在中、低纬度地区磁暴形态以 H 为主(张素琴等,2010)。地电场在磁暴期间会记录到剧烈变化的地电暴,而地电暴导致的地电场日变形态产生的较大畸变,在各台不同极距、不同方向都能记录到同步的异常信息,且在一定区域内对电场同方向长、短极距的影响是同步的,异常形态相似,异常持续时间、强度与磁暴的持续时间及强度呈很好的相关性(图 4)。

2011 年 2 月 4 日 02:40 ~ 8 日 06:00 发生了一次缓始型(GC)磁暴事件,泰安台记录的最大 K 指数为 7。各台站地电场仪和地磁场仪均清晰地记录到磁暴发生的全过程,其变化形态与静日变化截然不同(图 5(a))。从图 5(a)可以清楚地看出,地电场 NS 测向与地磁场 H 分量变化有较好的同步性(时间)响应,即在磁暴开始之前,磁场(或电场)的日变化正常;

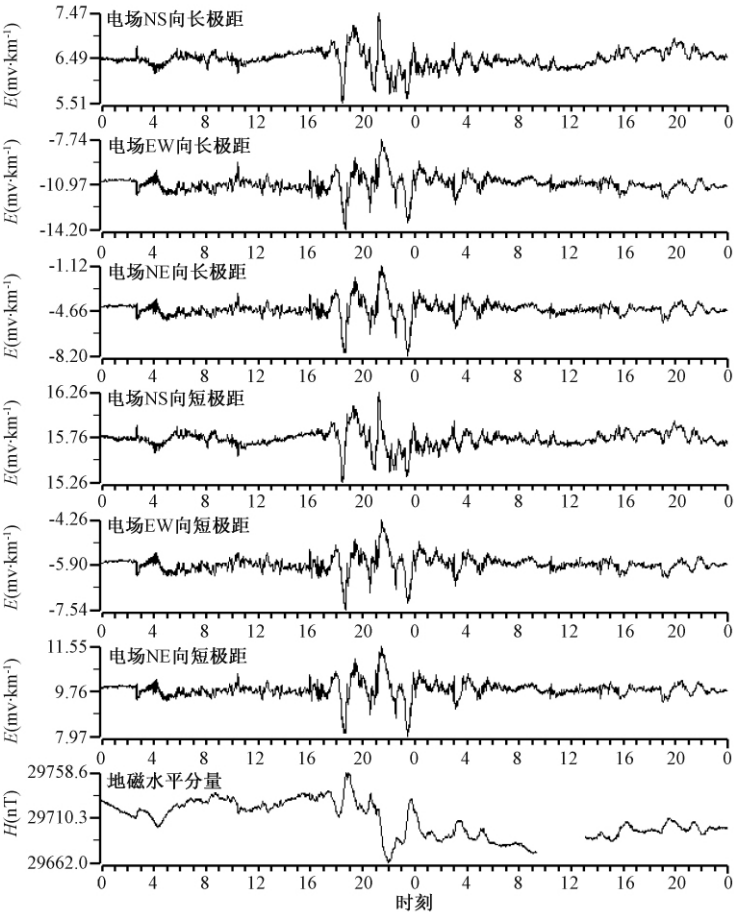


图 4 2011 年 2 月 4 ~ 5 日(世界时)大山台地电场与地磁场 H 分量的观测曲线

磁暴开始后,日变化明显打乱。但地电与地磁的变化时间上同步,变化形态具有一定的关联性。磁暴的急始变幅对应地电暴的脉冲突跳,然后是初相和主相的高频扰动。地电暴也有类似的急始变幅、初相和主相,这表明它们来自共同的空间电流系场源。

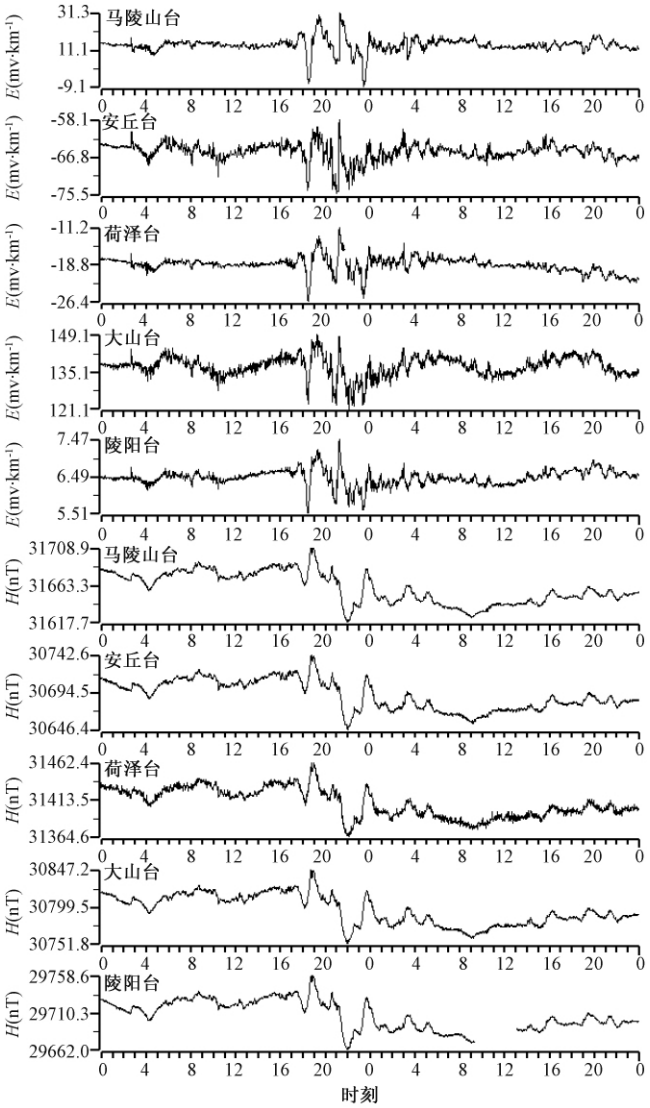
2011 年 6 月 4 日 20:45 ~ 5 日 15:00 发生的急始型(SC)磁暴(泰安台记录的最大 K 指数为 6),水平分量 H 有一个陡然的上升趋势(磁暴急始),在地电场观测曲线上则出现明显而尖锐的大幅度脉冲突跳,这比 GC 型磁暴更加明显(图 5(b))。地磁暴期间 H 分量快速下降是其主相的标志,无论磁暴大小如何,都有清晰的形态(初相、主相、恢复相),而此次地电暴则不同,虽然 H 分量变化形态清晰可见,但地电暴只记录到了高频扰动变化,并没有明显的初相、主相等形态。这是因为电场和磁场之间存在一阶差分的关系,所以并不是所有的地电暴都和地磁暴变化一致(郭建芳等,2010)。

2.3 高压直流干扰对比分析

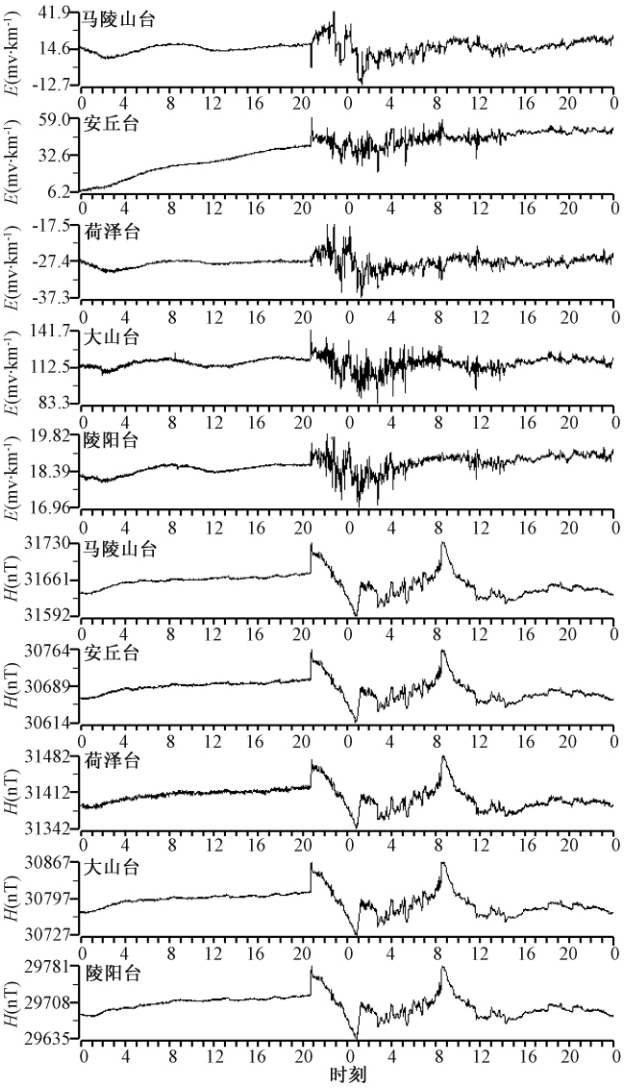
高压直流输电系统主要由双向输电导线、接地极以及换流站(交直流转换)组成。正常情况下,高压直流输电通过双向输电导线形成电流回路,流过两条导线的电流大小相等、方向相反,只有很少的一部分不平衡电流入地,对地电场和地磁场观测的影响比较小。但是,

当输电系统发生故障时,会导致两条导线上的电流不相等,造成大量的不平衡电流通过接地极注入大地。甚至在其中一条导线断掉的情况下,系统仍然可以通过接地极与大地形成电流回路,继续输送电力,此时回路电流基本全部从地下通过。此时,在输电线路和接地极附近一定范围内,会产生比较大的附加磁场,对地磁观测造成一定影响,而入地电流也会对地电场观测造成一定程度的干扰(方炜等,2010)。

宁东 ±660kV 直流输电工程是中国“西电东送”的北通道,起自宁夏银川东换流站,止于山东青岛换流站,途经宁夏、陕西、山西、河北、山东等 5 省区,直流线路全长 1333km,其中山东段线路长 415km(图 1)。该工程 2010 年 10 月 28 日试运行,2011 年 2 月 28 日开始双极投运。



(a) 2011年2月4～5日



(b) 2011年6月4～5日

图 5 山东地区地电场 NS 向长极距与地磁场 H 分量的观测曲线(世界时)

通过对山东地区电磁观测台站的地电场和地磁场观测数据统计分析发现(图 6):

(1) 高压直流输电对地电场和地磁场观测的干扰在时间上同步,在形态上相似,同一个干扰事件中,同时出现台阶或尖峰;

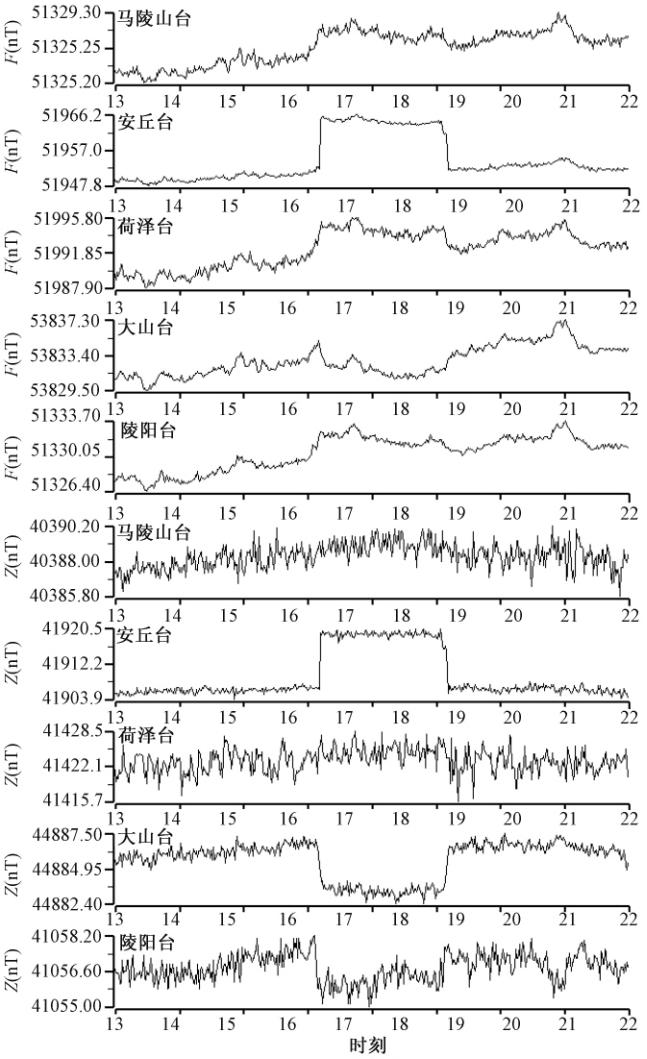
(2) 高压直流输电对地磁垂直分量、总场强度干扰明显(图 6(a)),对地电场各测项的干扰也比较明显(图 6(b)),且干扰幅度与台站到输电线路的垂直距离关系较大。

(3) 高压直流输电对地电场的影响程度大于对地磁场的影响程度,对地电场的干扰范围也大于对地磁场的干扰范围。这可能与山东地区的电磁台站距离青岛换流站(接地极)比较近有关。

2.4　雷电干扰对比分析

雷电影响也是一种天然的电磁环境干扰,除了会引起数据的波动和扰动外,强雷电冲击还可能造成观测仪器工作不稳定,甚至造成仪器毁坏和停测。雷电对电磁观测的影响主要通过两种方式:一是雷电改变了台站附近区域的电流体系,造成电磁场的变化;二是雷电感应对电子记录设备的冲击,造成记录数据的变化(李雪华等,2012)。

统计结果表明,雷电对地电场观测的影响大于对地磁场观测的影响,甚至会导致地电场观测系统的毁坏。从 2011 年 4 月 2 日陵阳台的雷电干扰曲线可以明显看出(图 7),在雷电期间地电场观测数据离散度较大,特别是在放电期间,数据呈现出典型的畸变,并伴有明显高频干扰,观测数据大幅突跳,为正常时的数倍(张建国等,2003;刘运生等,1996),而地磁各分量却看不出明显的干扰成分。这可能与地电场观测装置空间尺寸较大有关,带电云层与大地的电磁感应导致地表电场发生了变化,而放电期间,变化会更加剧烈。另外,沿架空线路迅速传播的雷电波也会对电子记录设备造成冲击。



(a) 地磁场

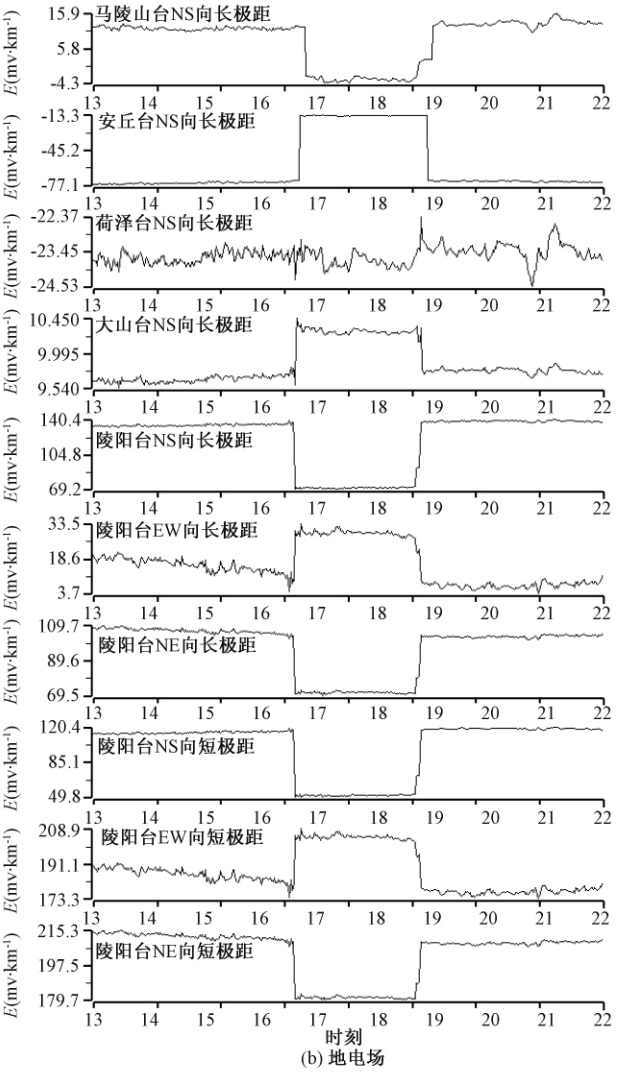


图 6 2011 年 3 月 24 日地磁场与地电场受高压直流影响时的观测曲线(世界时)

3 结论与讨论

(1) 山东地区各电磁台站地电场和地磁场日变化具有同步性和相关性。地电场观测的日变形态属于“峰-谷”型,其中陵阳台属于 TGF-A 型,马陵山、安丘、菏泽、大山等台属于 TGF-B 型。TGF-B 型地电场日变形态与地磁场静日变化(Sq)极其相似,二者均在白天变化强,晚间变化弱。

(2) 地磁暴与地电暴,在时间上具有同步性,在地域上具有广域性。但地电暴不一定都有完整的磁暴形态,因为电场和磁场之间存在一阶差分的关系,所以并不是所有地电暴都与地磁暴变化一致。有些地电暴没有变化形态,只出现高频的快速扰动,这符合麦克斯韦方程组所揭示的变化规律。

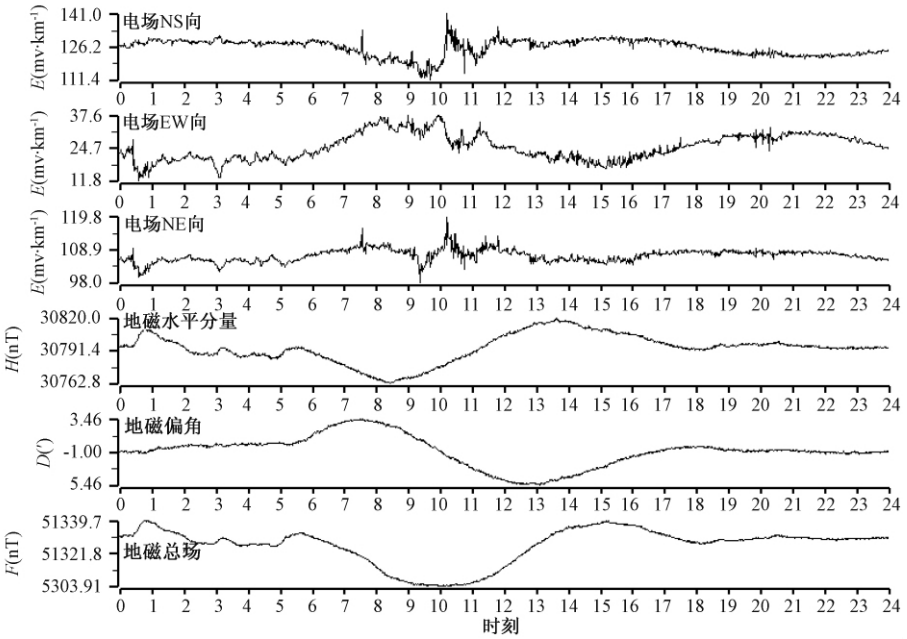


图 7　2011 年 4 月 2 日陵阳台地电场长极距与地磁场受雷电干扰时的观测曲线(北京时)

(3) 高压直流输电对地电场和地磁场观测的干扰在时间上同步,在形态上相似;高压直流输电对地电场的干扰范围和强度均大于对地磁场的干扰。

(4) 雷电对地电场观测的影响大于对地磁场观测的影响,特别是更容易造成地电场观测数据缺失、仪器毁坏等。其主要原因可能与地电场观测装置系统(主要是测量外线路)覆盖范围较大、雷电影响的渠道更多有关。

(5) 地电(磁)暴和雷电对地电场观测的干扰既有相似之处又有诸多不同。在频率变化上,地电(磁)暴和雷电都会对地电场高频干扰;在持续时间上,雷电干扰持续时间相对较短,一般持续十几至几十分钟,而地电(磁)暴持续时间相对较长,短则几小时,长则达 2 ~ 3 天;在影响区域上,雷电干扰的影响区域较小,仅限台址附件区域,而地电(磁)暴是全球同时发生的,具有广域性。

(6) 利用地电场、地磁场日变规律和地电场、地磁场观测对各类干扰响应的区别与联系,可以在观测资料的分析处理中实现相互参考、相互借鉴,提高观测资料处理的客观性、准确性和时效性,提升其在地震监测预报方面的实际应用效能。另外,对研发相应的自动化分析处理软件,实现二者观测数据的自动化预处理具有重要的现实意义。

致谢:本文得到了中国地震局地球物理研究所杨冬梅研究员、中国地震局地震预测研究所席继楼副研究员和江苏省地震局张秀霞高级工程师的悉心指导和帮助,在此表示衷心感谢。

参考文献

董晓娜、鲁成义、曲利等,2012,山东地区地电场观测资料分析研究,地震研究,**35**(3),420 ~ 428。

方炜、张国强、邵辉成,2010,高压直流输电对地电场观测的影响,地震地质,**32**(3),434 ~ 441。

郭建芳、李非、张秀霞等,2010,地电场日变幅与地电暴分析,地震地磁观测与研究,**31**(3),18~23。
国家地震局科技监测司,1995,地震电磁观测技术,北京:地震出版社。
李雪华、陈俊、赵银刚,2012,雷电对地磁相对记录干扰机理探究,地震地磁观测与研究,**33**(2),63~66。
刘运生、毛春长等,1996,地球物理学简明教程,北京:地震出版社。
钱家栋,2010,地震电磁学理论基础与观测技术,北京:地震出版社。
谭大诚、王兰炜、赵家骝,2011,潮汐地电场谐波和各向波形的影响要素,地球物理学报,**54**(7),1883~1853。
谭大诚、赵家骝、席继楼等,2010,潮汐地电场特征及机理研究,地球物理学报,**53**(2),544~555。
张建国、张国勇、王晋萍,2003,场电特性与防雷工程,山西气象,**52**(3),47~63。
张素琴、杨冬梅,2010,磁暴时磁场变化率与地电场相关性研究,地震地磁观测与研究,**31**(3),7~12。
左恒、吴爱祥、王贻明等,2007,地电场对裂隙岩块中溶浸液渗流特性影响的研究,岩石力学与工程学报,**26**(5),972~976。

The comparative analysis of geoelectric field and geomagnetic field observation data in Shandong Province

Wang Wei[1,2)] *Lu Chengyi*[3)] *Chen Chuanhua*[1)] *Zhao Yingang*[4)] *Dong Xiaona*[5)]
Tian Fengdong[6)] *Liu Hailin*[4)] *Li Feng*[1)] *Wang Qiang*[1)]

1) Tai´an Fiducial Seismic Station, Tai´an 271600, Shandong, China
2) Liaocheng Seismic Hydrochemical Observation Station, Liaocheng 252000, Shandong, China
3) Malingshan Seismic Station, Tancheng 276114, Shandong, China
4) Anqiu Seismic Station, Anqiu 262100, Shandong, China
5) Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China
6) Lingyang Seismic Station, Juxian 276500, Shandong, China

Abstract This paper describes the basic profiles of the five electromagnetic stations in the Shandong area which have both geoelectric field observation and geomagnetic field observation. We select the observation date of the year 2011 in each station, and evaluate the observation data quality briefly. The paper focuses on the comprehensive and systematic comparative analysis of the geoelectric field observation and geomagnetic field observation data in the five stations, explores not only the daily change of geoelectric field and geomagnetic field but also the distinction and contrast of these observations in terms of all kinds of interference, and provides mutual references for the analysis of observation data. It can increase the timeliness and accuracy in the process of observation data analysis, and thus improves the inner quality of observation data, making it more practical in seismic monitoring and earthquake prediction.

Key words: The Shandong area Geoelectric field Geomagnetic field Comparative analysis