

陈幸莲, 徐 行, 柴剑勇, 等. 广东阳江深井地磁观测系统研究与数据分析[J]. 华南地震, 2017, 37(3): 81–89. [CHEN Xinglian, XU Xing, CHAI Jianyong, et al. Research and Data Analysis of the Deep Borehole Geomagnetic Observation System in Yangjiang City, Guangdong Province[J]. South China journal of seismology, 2017, 37(3): 81–89.]

广东阳江深井地磁观测系统研究与数据分析

陈幸莲¹, 徐 行², 柴剑勇³, 王雄健¹, 廖开训², 黄 晖³

(1. 广东省地震局阳江地震台, 广东 阳江 529500; 2. 广州海洋地质调查局, 广州 510070;
3. 广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 通过对阳江深井地磁观测系统所测到的地球磁场总场强度值数据与附近地面的流动地磁观测台、广东肇庆地磁基准台以及其它地磁台站的进行对比分析, 结果表明: 阳江深井地磁观测系统的地磁场总场强度记录数据与附近地面观测的相近。深井地磁观测技术和方法有效地过滤了附近的表面高频电磁干扰, 并在一定程度上对远处的中国南方电网的“糯广线”的高压直流干扰也起到了压制作用。在磁扰弱时, 深处地下 200 m 的地磁观测受围岩的感应地磁场影响不大; 但当磁扰剧烈时, 会受一定程度的感应地磁场影响。广东阳江深井地磁观测技术和方法的实践为深井地磁观测技术发展做了有益的尝试。

关键词: 深井; 地磁场; 观测; 深井地磁观测系统

中图分类号: P315.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2017) 03-0081-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.03.012

Research and Data Analysis of the Deep Borehole Geomagnetic Observation System in Yangjiang City, Guangdong Province

CHEN Xinglian¹, XU Xing², CHAI Jianyong³, WANG Xiongjian¹,
LIAO Kaixun², HUANG Hui³

(1. Yangjiang Earthquake Agency, Yangjiang 529500, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 3. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

Abstract: The use of deep borehole geomagnetic observation system is the main method to solve the ground noise interference and improve the quality of geomagnetic observation. Yangjiang deep borehole geomagnetic observation system has measured the total field strength data of the earth's magnetic field. This paper will compare the measured data with the nearby mobile geomagnetic observatory in ground surface, the Zhaoqing

收稿日期: 2017-02-10

基金项目: 中国地震局“地震监测、预测、科研三结合课题”(CEA-KC/3JH-161903); 国家重大仪器研发专项“海洋地磁场矢量测量仪开发与应用”项目(2014YQ100087)联合资助。

作者简介: 陈幸莲 (1980-), 女, 工程师, 从事地球物理观测工作。

E-mail: 59272742@qq.com.

通讯作者: 徐 行 (1963-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事海洋地球物理探测技术方法研究。

E-mail: gz_xuxing@163.com

geomagnetic reference station in Guangdong and other geomagnetic stations. The results show that the total field strength data of the geomagnetic field of the Yangjiang deep borehole geomagnetic observation system is similar to those of the nearby ground observation. When the geomagnetic field is calm or the magnetic disturbance is weak, the geomagnetic observation of the underground at 200 meters will not be affected by the induced geomagnetic field of the surrounding rock. However, when the magnetic disturbance is severe, it will be affected by a certain degree of induced geomagnetic field. Deep borehole geomagnetic observation technology effectively filters out the nearby surface of high-frequency electromagnetic interference, and to a certain extent, it also plays a repressive effect to the high-voltage DC interference of the distant China Southern Power Grid "waxy wide line".

Keywords: Deep borehole; Geomagnetic observation; Magnetic disturbance; Deep borehole geomagnetic observation system

0 引言

随着我国国民经济建设的高速发展,国家与地方投入建设了一些大规模基础设施,包括高速铁路、高速公路、电网和经济开发区等。这些建设一方面使得不少原本地磁场观测环境相对较好、电磁背景相对“安静”的地磁台站受到这些使用电力驱动的干扰源影响,另一方面也使得适合于地磁观测台站建设的场地^[1-2]也越来越稀缺。然而,地磁学对认识地球和人类生存环境具有重要意义,地磁观测又是地磁学研究中的一个重要环节;国内和国际学术界高度重视持续开展高质量的地磁观测工作。面对日益变化的观测环境挑战,观测技术和方法的创新就显得格外重要和迫切。国外的科学实践结果表明^[3-4],开展深井观测是解决地面噪音干扰、提高地磁观测质量的主要途径。

近十多年来,我国科技工作者一直探索深井地磁观测技术和方法。上海市地震局在广东珠海市泰德企业公司的技术支持下,先后于2011年和2012年在上海崇明和浦东中心台两地分别建立了两个深井综合地震观测系统,在深井中安装了英国Bartington公司生产的MAG-03MC型磁通门地磁仪。上海崇明长江农场的深井(井深为460 m)建设完成后,在相距井口12 km的上海三烈中学,用GM4磁通门磁力仪,在地面进行了30 h的对比观测。相关的结果分析表明:深井地磁观测数据质量明显高于地表观测^[6-7]。广东省阳江地震局采用自主知识产权的地磁总场测量技术,于2010年建立了国内第一个采用地磁场绝对观测技术、钻井深度为200 m的深井地磁观测系统^[8]。自系统运行以来,整个地磁观测系统的设备运行稳定、正常。

为深入开展深井地磁观测技术和方法研究,针对着深井地磁观测系统存在的一些技术疑问,

例如,广东阳江地震局的深井地磁观测井内所采集的地磁场总场强值数据与井口附近的地面观测数据存在差异吗?与相距100 km的广东肇庆地磁基准台(下文简称肇庆台)观测数据相比较又怎么样?对压制地面电磁干扰效果如何?本文将对阳江深井地磁观测系统(下文简称阳江台)的介绍,通过比测和数据分析,总结深井地磁观测数据的技术特点,为我国进一步推广深井地磁观测技术提供科学依据。

1 阳江深井地磁观测系统的简介

阳江台建于2009年,整个观测系统的结构示意图如图1所示。观测井距离广东省阳江市地震局办公大楼仅为15 m。该系统主要由二部分组成:①200 m深的观测钻孔;②地磁观测系统。包括:全向性质子磁传感器;主机、数传单元和配套软件程序;供电单元;电缆。

井口位置为21.864°N, 118.97°E。观测井的孔深为200 m,观测井的地层剖面自上而下是:0~4米,为人工填土;4~7.2 m,为黑云母变粒岩的中风化层;7.2~200 m为微风化的黑云母变粒岩。开孔为168 mm,终孔直径为130 mm。为防止人工填土和微风化层碎石和泥土塌落井底,在最上面有20 m钻井地层中,使用了无缝钢管进行护壁。

地磁仪的主要技术指标:磁力仪的传感器为全向性;观测精度:优于0.2 nT;分辨率 ± 0.05 nT;场值调谐方式:256级自动跟踪配谐;测量间隔:10 s、20 s、30 s、60 s可调;存储容量:90 d(13万组数);主机时钟精度:优于 ± 0.5 s/d;接口:RS-232;整机测量功耗:小于0.25 W;主机电源(电池)及其供电能力:7.2V75Ah锂电池组,连续正常供电90 d。传感器与设备的连接采用的

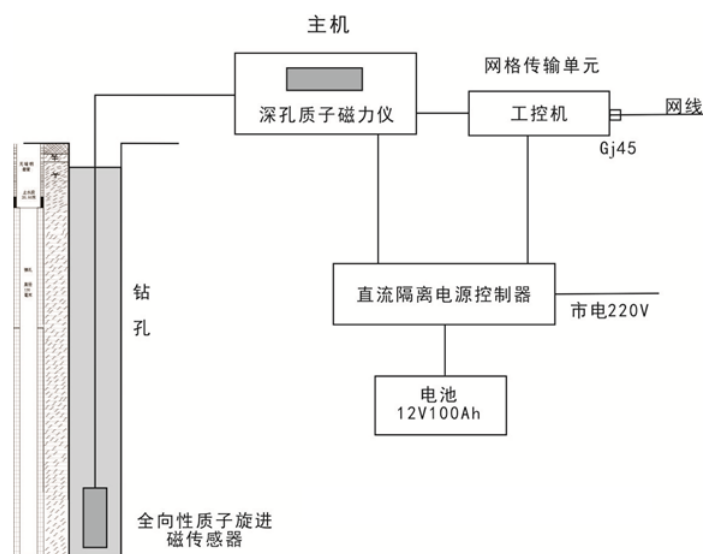


图1 广东省阳江深井地磁观测系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of deep borehole geomagnetic observation system in Yangjiang city, Guangdong Province

国产的水密电缆。由于该电缆适用于深海设备连接的，具有耐腐蚀、水密和抗高压的特性。地磁观测单元仪器的主要技术指标满足地震行业标准中的设备配置的相关技术要求。

2 与附近的地面地磁观测数据对比

为了验证深井地磁观测数据与井口附近地面的同类设备观测数据是否存在差异，我们于2016年2月17至18日进行了井中和地面对比试验。为了确保无人值守磁力仪取得完整记录，本次实验一次用4台加拿大GEM公司生产的SENTNEL Overhouser 质子增强型磁力仪，分别布放在广东阳江市实验小学和阳江地震局双捷观测站，每个测点放2台磁力仪。加拿大GEM公司生产的SENTNEL Overhouser 质子增强型磁力仪是一种无人值守型、海和陆两用，专用于磁法勘探中地磁日变观测的辅助设备。其主要技术指标为：直接测程：18 000~120 000 nT，灵敏度：0.015 nT，分辨率：0.001 nT，绝对精度：0.2 nT；工作温度范围在-25℃~+60℃之间，工作水深可达6 000 m，数据存储量为 1×10^7 个读数，数据采样率可达10 Hz，无方向性误差，无温度漂移，无测量盲区。广东阳江深井地磁观测系统与附近的两个地面地磁观测点的相对位置示意图见图2所示。

在设置流动观测台中，首先在阳江地震局深井地磁观测系统的井口附近篮球场上布放了观测仪器，但由于磁力仪在强电磁干扰下无法正常工

作，然后将设备移到距离井口450 m的阳江实验小学操场(21.864 1°N, 111.973°E)后方可正常工作。小学台与阳江台之间相距420 m。广东阳江市实验小学中的两台SENTNEL 磁力仪系列号分别为7093和7094，下文简称小学台。观测时间为北京时间2016年2月17日15:03至18日15:40，2台SENTNEL Overhouser 质子增强型磁力仪均有完整的野外记录，总共观测记录时间超过24 h。最后，在阳江地震局双捷观测站中(21.907 2°N, 111.932 2°E)，下文简称双捷台，布放2台SENTNEL 磁力仪，系列号分布为7060和7022。观测时间为北京时间2016年2月17日16:02至18日16:37，总共记录时间为24 h 35 min。双捷台与阳江台之间相距6 km。在双捷台上的2台磁力仪的野外记录完整。

小学台和双捷台之中的2套SENTNEL Overhouser 质子增强型磁力仪工作稳定、相应的野外观测数据一致。在资料整理过程中，小学台选用了系列号7093磁力仪的数据作为本文的研究资料，而双捷台选用系列号7022磁力仪。通过对比分析，三个测点仪器记录的数据质量评估为：阳江台的数据质量等级为中等；双捷台的数据质量等级为优等，偶尔有地电干扰；小学台的数据质量等级为差。资料质量等级受地磁场梯度、信号强度影响，主要原因是观测场地的地磁干扰。阳江台与附近的两个地面地磁观测数据对比图见图3和图4所示。

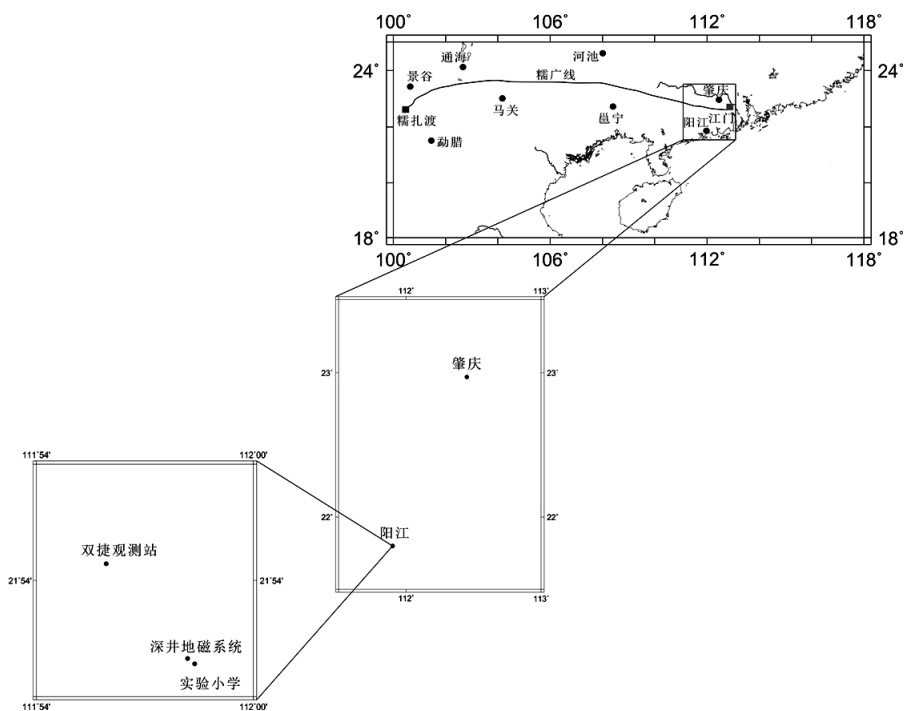


图 2 研究区域中的地磁观测点位置示意图。

Fig.2 Location of the geomagnetic observation point in the study area

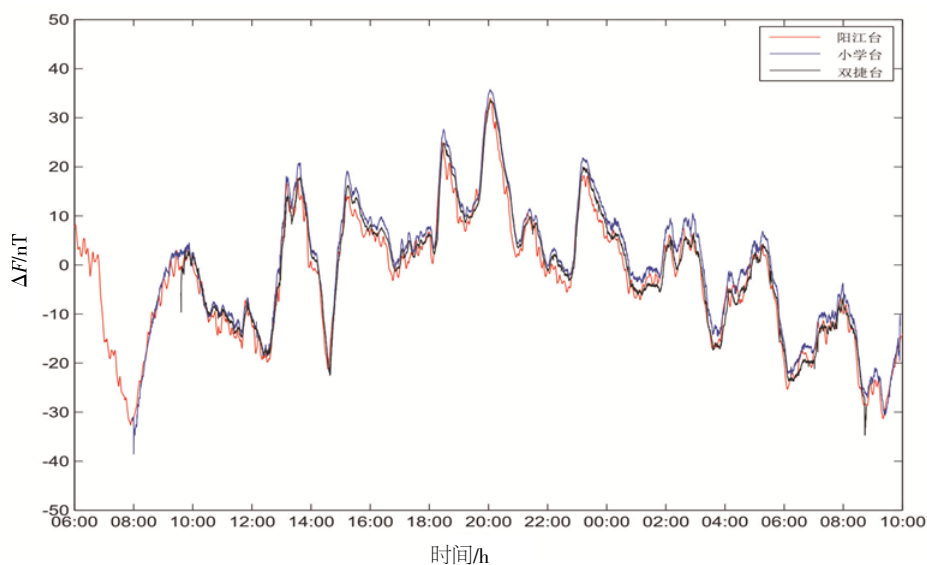


图 3 阳江台与小学台、双捷台的三台仪器的地磁场总强度 ΔF 变化图

Fig.3 Total geomagnetic field ΔF changes map of Yangjiang station, Xiaoxue station and Shuangjie station

从图 3 和图 4 中可以看出, 对比观测期间的变化地磁场活动激烈, 记录中的最大值与最小值之间相差约 70 nT。在这样的磁扰活动期间开展台与台的数据对比具有较强的说服力。两套海陆 SENTNEL Overhouser 磁力仪的仪器精度明显高于深井地磁观测系统。从整体上看, 三套设备记录的地磁场变化数据在形态、变化幅度和相位上大致相同, 但同时也存在着较小的差异。

3 与相邻地磁台站的观测数据对比

3.1 与广东肇庆地磁台的观测数据对比

将安装在地面以下 200 m 黑云母变粒岩深井中磁力仪的观测数据, 与相距 100 km 之外的广东肇庆地磁基准台(图 2)观测数据进行对比分析, 考察不同磁扰强度或在不同地磁场活动水平下观测数据之间的差异特征。根据肇庆台的地磁观测记

录的历史数据的 K 指数，选择了磁静日、磁扰日和磁暴日三个典型时间段的观测记录数据进行了分类对比。相关的对比时间的和对应的 K 指数见表 1 所示。

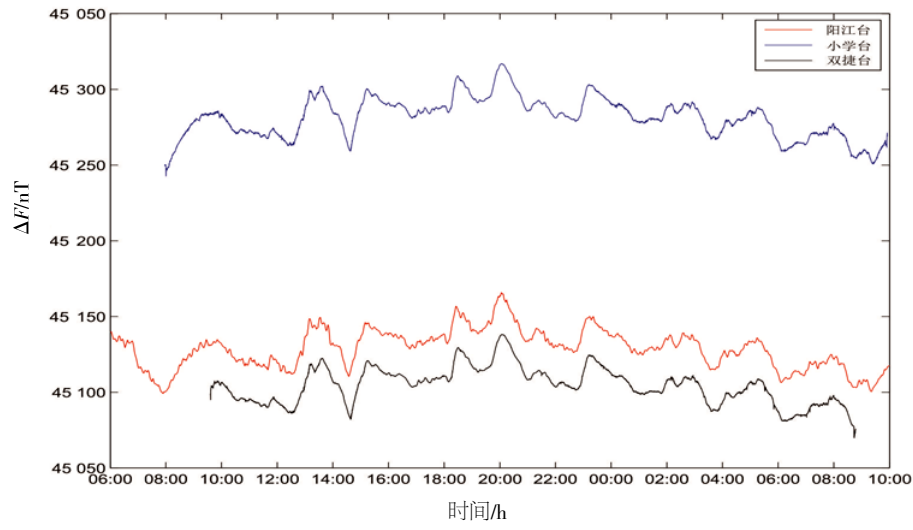


图 4 阳江台与小学台、双捷台的三台仪器地磁场总强度 F 变化图

Fig.4 Total geomagnetic field F changes map of Yangjiang station, Xiaoxue station and Shuangjie station

表 1 与肇庆台相比较时间段的 K 指数表

Table 1 The table of K -Exponential comparison with Zhaoqing station

时间	台站	POINTID	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K 总和
2016-02-16	肇庆	FGM-01[6]	4	2	3	4	5	4	5	3	30
2016-03-04	肇庆	FGM-01[6]	2	1	1	1	0	1	0	1	7
2015-03-17	肇庆	FGM-01[6]	4	6	7	6	6	6	6	6	47

图 5 为 2016 年 3 月 4 日磁静日期间阳江台与肇庆台观测记录的对比曲线；图 6 为 2016 年 2 月 16 日磁扰日期间两台观测数据的对比曲线；图 7 为 2016 年 2 月 16 日强磁扰（中烈磁暴）期间观测数据的对比曲线。

总体上，在不同磁扰强度作用下，阳江台的地磁场总场强值记录数据与远处的肇庆台结果的基本相近。但在 2 月 16 日 06:00 与 17:45 左右，在变化幅度的最大值和最小值出现时，两者之间也出现了一些偏差。

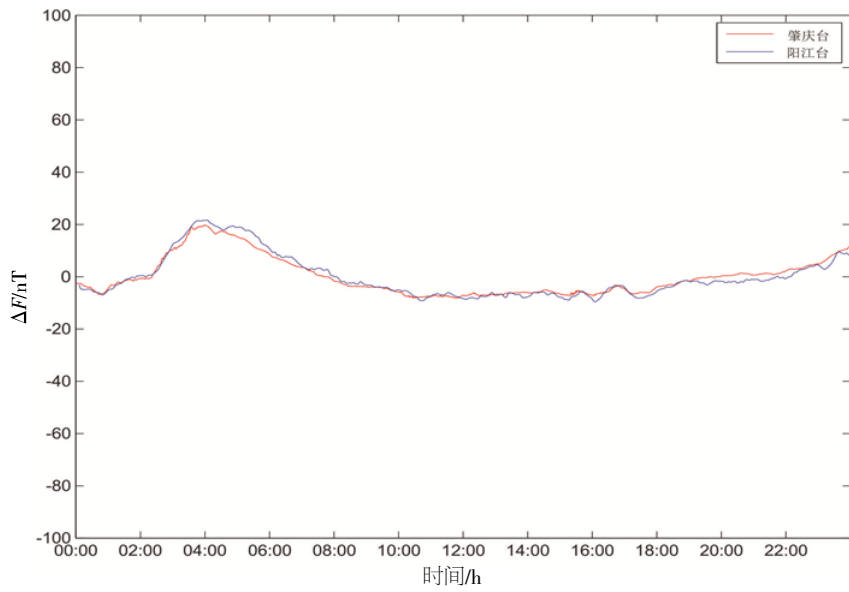


图 5 2016 年 3 月 4 日的阳江与肇庆两台的 ΔF 对比曲线(磁静日)

Fig.5 ΔF contrast curve of Yangjiang station and Zhaoqing station on March 4th, 2016 (magnetically quiet day)

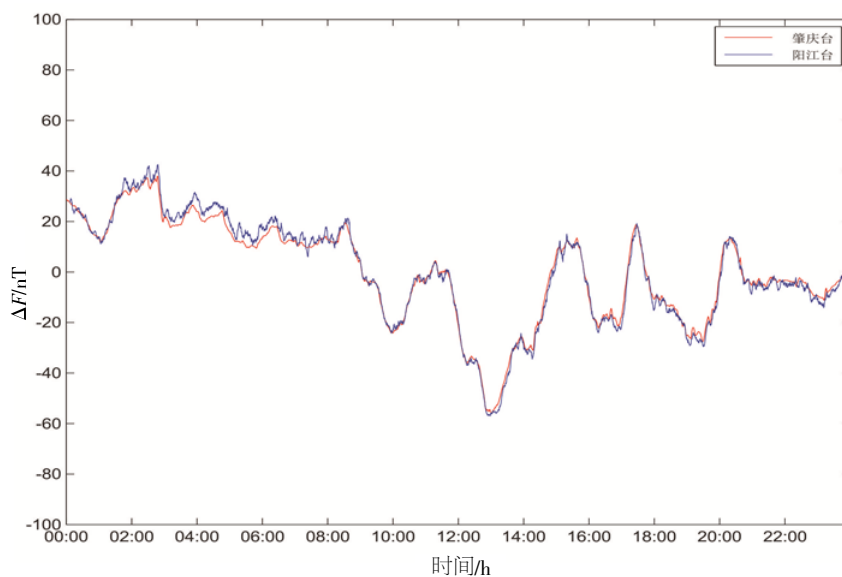


图6 2016年2月16日的阳江与肇庆两台的 ΔF 曲线(磁扰日)

Fig.6 ΔF contrast curve of Yangjiang station and Zhaoqing station

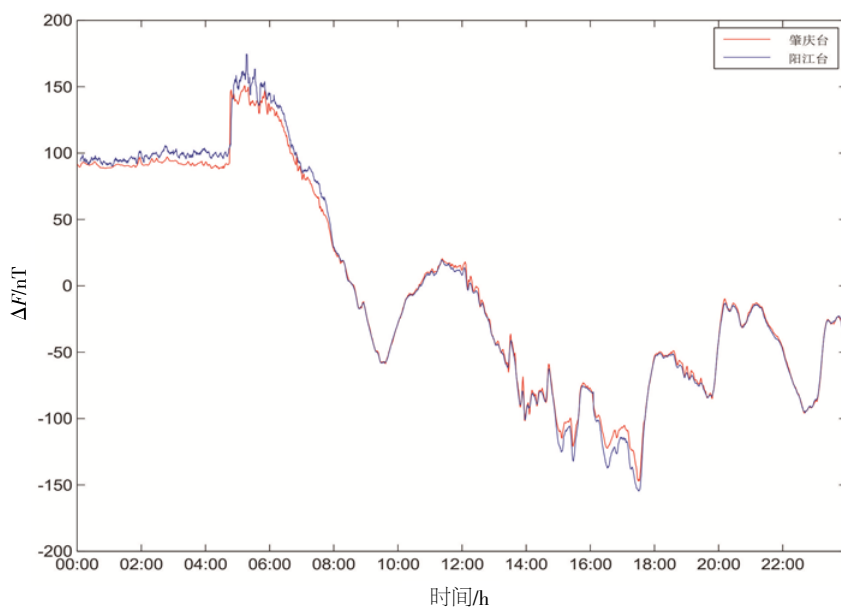


图7 2015年2月16日的阳江与肇庆两台的 ΔF 对比曲线(磁暴日)

Fig.7 ΔF contrast curve of Yangjiang station and Zhaoqing station on February 16th, 2015 (magnetic storm)

3.2 与“糯广线”附近的地磁台观测数据对比

在开展阳江深井地磁观测系统与周边的地磁台对比观测过程中,除关注受地面高频电磁干扰影响程度之外,同样关注深井地磁观测对于高压直流电干扰的抑制能力。中国南方电网的糯扎渡电站送电广东 ± 800 kV 直流输电线路工程(简称“糯广线”)的起点为云南糯扎渡,终点为广东江门,全长 1 413 km。肇庆、河池、马关和通海四个台站分布在电网北侧,邕宁、勐腊和广东阳江台位于电网的南侧,台站分布图见图 2 所示。其

中,阳江台与“糯广线”相距为 110 km 左右,与广东江门变流站相距约为 140 km。2016 年 3 月 8 日 10:10 至 10:40 时间段中“糯广线”沿途的地磁观测台站的 ΔF 对比曲线如图 8 所示。显然,除阳江台之外,沿线地磁台站的各个台站都受“糯广线”的高压线路直接干扰影响。

4 讨论

4.1 深井地磁系统对地表电磁干扰的压制能力分析

地磁观测中的干扰噪声可分为观测系统干扰

噪声和人工电磁源干扰噪声。前者主要由观测仪器布置不当所造成,一般可以通过改善仪器装置等给予消除,后者指观测点周边由人工电磁环境改变造成的电磁场干扰噪声,如超高压直流输电线、由直流供电的城市轨道交通系统或者其他各种工业游散电流所造成的。

经过近 24 h 的比测,从图 4 的曲线上,我们可以看到井口地面的总场强值总体上要深井地磁观测系统的记录值高出 150 nT;此外,分析小学台的原始记录中,发现原始数据中绝大多数都出现了 G(梯度大)和 S(信号微弱)的质量等级信息标识符号。双捷台距离阳江台 6 km,除了附近安装有高压变压器之外,周边无工厂和居民住宅,观

测场地条件相对好一些。其观测记录的原始数据中没有出现“信号微弱”或“梯度大”等质量标识符号。从图 3 和图 4 的对比曲线中,双捷台与阳江台和小学台的记录相比较,小学台地磁场总场强度值比阳江台高出 150 nT 之多,而双捷台地磁场总场强度值要比深井小 25 nT。三个观测台的记录曲线变化形态、幅度和相位基本一致。次日上午九点之后,双捷台与小学台的仪器记录不再一样,学校的磁测变化幅度要比记录双捷观测站的记录再大一些,直至下午三点之后才恢复以往。由于比测期间为学校放假期间,说明有差异的时间段内校内有人启动过电器,产生了一个附加的干扰源。

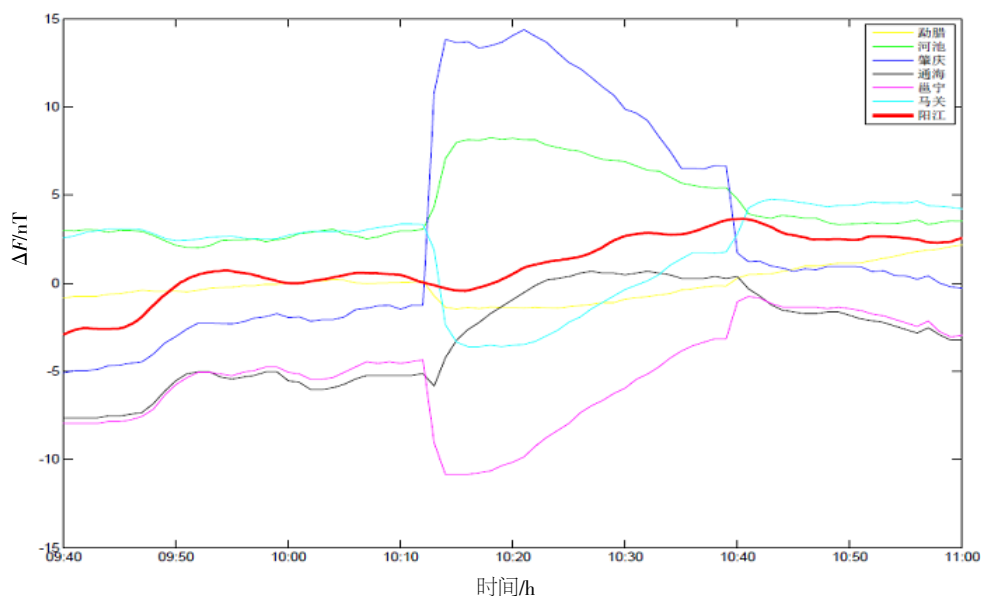


图 8 “糯广线”沿途的地磁观测台站的 ΔF 对比曲线(2016 年 3 月 8 日)

Fig.8 ΔF contrast curve of the geomagnetic observation station along "waxy wide line"(March 8th, 2016)

在地面与深井地磁比测期间,相邻的肇庆台的磁情指标 K 总和达为 30,属于磁扰活跃时间段。本次比测工作结果表明:在变化磁场比较大的情况下,深井地磁观测系统和地面观测记录的差异只在他们的基值不同,质量等级不同,但其变化幅度和相位变化曲线形态相近;深井地磁观测的结果与附近的地面观测结果基本一致。又由于阳江台的设备基于质子旋进磁力仪的工作原理,并处于市区内的高地磁干扰环境下,在数据分析中也发现深井内部的地磁观测仪器等级不如双捷台 Overhouser 磁力仪的观测结果,还存在着一些微弱的干扰信号。因此,建议今后的深井地磁观测井建设应布设到电磁干扰小的场地中,以降低深井自身结构问题对环境带来的影响。

4.2 对于高压直流电干扰的抑制能力分析

我国电网目前采用的“高压直流输电技术”可以最大限度地降低能源损耗。由于高压直流输电采用双线回路技术,在正常运行状况下不会对磁场造成干扰;但在新线路调试阶段及运行过程中难免会产生故障,这两种状态都会造成不平衡电流出现,这种电流一般高达数千安培。高压直流输电线路上的不平衡电流将对其周围产生一个较大的附加磁场,对该范围内的地磁观测造成很大的干扰^[9],对输电线路两侧 300 km 范围内电磁观测的影响尤为显著^[10];因而,电网沿线的地磁观测台站的观测记录中会出现强烈的电磁干扰。高压直流输电对地磁干扰具有以下特征:① 同一个干扰事件中,干扰范围内的台站同时出现台阶或

尖峰；② 垂直分量干扰明显大于水平分量干扰；③ 输电线路两侧台站垂直分量干扰方向相反，同侧干扰方向相同；④ 干扰幅度随台站距离干扰线路的视距离变大而逐渐减弱，与输电线路中的不平衡电流大小成正比。同一条干扰线路不同的干扰事件对各台站干扰幅度的比值相同^[4]。

中国南方电网的“糯广线”横跨云贵粤三省，受高压直流输电不平衡电流产生的各类附加磁干扰影响的台站通常是景谷县、肇庆、通海、河池，邕宁、马关、勐腊。图 8 中，“糯广线”沿途地磁台在 2016 年 3 月 8 日 18:24 均受到不同程度的直流输电不平衡电流产生电磁干扰时，电网北侧的肇庆、河池、马关和通海台站的地磁场总场记录数据中均出现了向上突变，电网南侧的邕宁、勐腊台的记录也相应出现向下突变，而广东阳江台的记录反映不明显。虽然，地磁场总场受高压直流干扰的影响不如垂直分量 Z 灵敏，但此次干扰中，沿线的地面观测台站均出现了不同幅度的反应。阳江台的记录受影响不明显也许是深井中的地磁观测对于压制远方的高压直流起了作用。但在上海深井地磁观测记录中，对张江深井台的各个分量分析，深井地磁观测数据受不远处的轨道交通干扰比较明显^[7]。这也许是在一定距离下深井地磁观测对于高压直流干扰的影响具有一定的压制作用。

表 2 广东阳江深井地磁观测系统围岩的岩石磁性测量结果表

Table 2 Rock magnetic measurement results table of the surrounding rock in the deep borehole geomagnetic observation system in Yangjiang city, Guangdong Province

样品号	深度/m	剩磁/($A \cdot m^{-1}$)	质量磁化率/($m^3 \cdot kg^{-1}$)
2#	13.9	1.64E-04	5.57616E-06
8#	74.5	9.01E-05	1.03429E-05
11#	106.1	2.16E-05	9.47253E-06
13#	126.0	4.32E-04	6.51938E-07
17#	163.3	1.22E-04	5.86486E-07
20#	198.9	5.00E-05	7.30435E-06

从图 5、6 和 7 中可见，除了在中烈磁暴期间的最大和最小值下，深井站的观测记录与肇庆台的地磁场总场值幅度上有所区别之外。在一般的磁扰情况下，深井站与肇庆站的观测记录在幅度、相位和形态上十分接近。作者曾通过开展在深海中 4 000 m 长的地磁观测潜标的科学实验表明^[3]，当在磁扰不严重的情况下，处于潜标中浅层和深层位置的磁力仪所记录的变化地磁场在幅度、相位和形态上比较相似；而在磁扰大的情况下，两者之间有明显的差异。

这两项的科学研究中均出现了类似的情况。

4.3 内部感应场的特征

从电磁场位理论分析变化磁场时可以发现，一些变化磁场的信息总是由外源场和内源场两部分组成，其中起源于地表以上的外源场占三分之二，而起源于地表以下的内源场占三分之一。

为了更好地讨论深井地磁观测系统中传感器所处的岩层的介质环境对测量数据的影响，分别选取了 2、8、11、13、17 和 20 号六块样品进行了剩余磁性的测量和岩石磁化率的测量。岩石磁性参数的测量工作在中国科学院南海海洋研究所古地磁实验室完成的。使用捷克 AGICO 公司的 MFKB 卡帕桥测试所有样品的磁化率，测试频率为 1 kHz，磁场强度为 400 A/m，灵敏度为 10^{-8} SI。样品的剩磁测试在美国 2G 公司生产的 755 R 超导磁力仪上进行。由于样品非标准样品，因此测量了样品的质量，最后换算成质量磁化率。阳江深井地磁观测系统围岩的磁性测量结果见表 2，平均剩磁为 1.47E-04(A/m)，平均质量磁化率为 5.66E-06(m^3/kg) 与其他区域的黑云母片岩或黑云母变粒岩的磁性很弱^[12]的结果雷同。在华南地区其他火成岩或红层的场址选择中，选择在黑云母变粒岩体中建设深井地磁观测系统是一个很好的地磁场观测场地选择。

相比之下，深井站受感应磁测的影响要小一些。这种情况的解释是：① 处于观测井中 200 m 深度的位置上传感器对于观测频段的变化磁场的穿透影响不大；② 磁力仪传感器围岩的磁学物性参数显示弱磁学介质，不利于产生较大的感应磁场；③ 流体介质与固体介质对于变化磁场所产生的感应磁测有所差异。

为了进一步分析不同介质中的地磁场记录特征，地磁场矢量观测的结果会更有说服力。这有待于深井地磁观测中一些技术难关的克服，例如矢量观测中传感器的姿态确定、传感器的小型化等。

5 结语

本文通过开展阳江深井地磁观测系统观测数据记录与附近地面的流动地磁观测台、广东肇庆地磁基准台以及中国南方电网的“糯广线”沿线几个地磁台站的观测数据比测与数据分析,得到以下几个结论:

(1) 深井地磁观测系统的地磁场总场强度观测数据与附近的地面观测站的比测表明:两者之间的地磁场总场强值和数据质量等级有差异,但其变化幅度和相位变化很一致;说明深井内观测方法对于压制表面地磁干扰具有良好的效果。

(2) 分析包括广东肇庆地磁基准台在内的中国南方电网的“糯广线”沿线地磁台站的观测结果,当高压直流线路出现强干扰的情况下,沿线的地磁台均受到明显的干扰,但阳江深井地磁观测记录中的干扰不明显,可认为深井地磁观测在一定程度上抑制了远处的高压直流干扰的影响。

(3) 通过对阳江和肇庆两台的历史数据对比分析,在磁扰小的时候,深处地下 200 m 的地磁观测受到围岩的感应地磁场影响不大;但当磁扰剧烈时,出现一定程度的感应地磁场影响,这与深海水体中的地磁观测结果^[13]相似。

(4) 广东阳江深井地磁观测系统建设与成功运行实践证明,深井地磁观测技术对于在高干扰环境下开展地磁观测是可行的,值得推广。需要指出的是:进一步发展和完善深井地磁观测技术中还面临着很多的技术难关。例如,深井地磁场矢量观测技术问题,这涉及到传感器的姿态确定、传感器的小型化等等。因此,需要更多的学者和专家来关注和支持该项技术的进步和发展。

参考文献:

- [1] 中国地震局. 地震台站观测环境技术要求第2部分(电磁观测):GB/T 19531.2-2004 [S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [2] 中国地震局. 地震台站建设规范地磁台站:DB/T9-2004 [S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [3] 苏恺之,李海亮,张钧,等. 钻孔地应变观测新进展[M]. 北京:地震出版社,2003.
- [4] 徐纪人,赵志新,许志琴,等. 大陆科学钻探与深井地球物理长期观测研究最新进展 [J]. 地质通报,2004,23(8):721-727.
- [5] 马京杰,李宏,马相波. 深井地震综合观测系统集成[J]. 地震地磁观测与研究,2013,34(3/4):166-169.
- [6] 任烨,周华根,刘佳敏,等. 上海崇明长江农场深井综合地震观测系统地磁观测数据质量分析 [J]. 地震研究,2012,35(3):353-359.
- [7] 李伟,赵文舟,尹继尧,上海深井地震综合观测地磁资料分析[J]. 地震地磁观测与研究,2013,34(3/4):89-95.
- [8] 柴剑勇,黄晖,王雄健. 深井地磁场强观测系统的研究[C]//2011 中国地震学会地震电磁学专业委员会换届暨学术研讨会摘要集. 北京:中国地震学会地震电磁学专业委员会,2011.
- [9] 沈红会,周加新,张秀霞,等. 直流输电对江苏地磁观测的影响分析[J]. 地震地磁观测与研究,2005,26(5):65-70.
- [10] 殷翔,赵卫红,张秀霞,等. 高压直流输电对全国地磁台站的影响概况[J]. 山西地震,2015,42(3):14-22.
- [11] 蒋延林,张秀霞,陈俊. 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.
- [12] 欧阳玉飞,刘继顺,韩海涛,等. 新疆阿尔泰地区蒙库-可可塔勒铁矿带 C7 磁异常地面查证效果及铁矿远景 [J]. 物探与化探,2009,33(3):266-269.
- [13] 徐行,赵旭东,王功祥,等. 南海西南次海盆深海地磁观测潜标的数据分析 [J]. 地球物理学报,2017,60(3):1179-1188.
- [14] 徐文耀. 地球电磁现象物理学[M]. 北京:中国科学技术大学出版社,2009.