

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*

任 焯, 周华根, 刘佳敏, 尹继尧

(上海市地震局, 上海 200062)

摘要: 对上海崇明长江农场井深约 460 m 的深井综合地震观测系统中的地磁观测数据进行质量分析。通过对该系统 2 套地磁仪以及相距约 12 km 的三烈中学台地磁仪的时序图、相关性、频谱以及等效背景噪声水平对比分析, 得出: (1) 上海深井综合地震观测系统中用膨胀水泥固定在井深约 460 m 岩石中的地磁仪工作正常, 未受同一耐压腔体内应变仪、地温计、空隙压计传感器和安装在同一个钻孔内深度为 430 m 左右的地震仪、倾斜仪传感器和系统影响, 且相距 60 m 远的长约 400 m 的井下套管对其相对变化也未产生扰动; (2) 长江农场深井地磁观测的等效背景噪声水平明显小于三烈中学台, 开展深井地磁观测既能节约经费又能获得高于地表的观测数据质量, 是值得推广的建设方式。

关键词: 深井综合地震观测; 地磁观测; 背景噪声; 长江农场台; 三烈中学台

中图分类号: P318.62

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)03-0353-07

0 引言

地震监测预报是我国防震减灾三大工作体系的重要环节之一, 它不仅服务于地震预报, 也是整个地震学的基础。地震预报、震害防御、地震紧急救援和地震学研究都需要地震监测所提供的数据做基础。观测地震前地球物理化学场的变化是地震预报的重要方法。由于地震发生在地球内部, 大多数地震的信号都非常小, 地震监测系统的接收灵敏度很高, 所以地震监测对监测环境都有一定的要求。由于地球物理化学场变化需要长期的资料积累, 监测环境一定要长期相对稳定。

环境干扰直接影响到地表地震观测和研究工作的开展和深入, 合理避开地表人类活动的干扰, 做到防震减灾与经济协调发展, 成为上海地震监测工作今后一段时间内必须解决的问题。此外, 各前兆观测手段震前异常各异, 由于在不同的观测环境安装仪器, 使不同前兆观测手段之间无法进行客观的对比分析, 如果把所有前兆观测手段集中安装在同一观测环境中, 对于前兆异常多学科联合分析起到非常重要的作用。

基于地震预报要求和目前的观测环境, 上海市开展了深井综合地震观测系统项目的建设。目前已建成崇明长江农场站, 两组设备安装在井下不同深度, 其中应变仪、地磁仪、空隙压计、地温计为一组, 安装在井深约 460 m 处, 用膨胀水泥封在井底, 与周围岩石成为一体, 上述 4 种传感器都进行了备份, 可以同时运行; 另一组为倾斜仪和地震计, 安装在井深约 430 m 处, 卡在井壁, 地表安装 GPS 和强震仪。深井中所安装的地磁仪为由英国 Bartington 生产的 MAG-03MC 型地磁仪, 是国内首次在深井中安装地磁仪。地磁传感器是否会受到同一耐压腔体内应变计、地温计、空隙压计探头和安装在同一个钻孔内深度为 430 m 左右的地震计、倾斜仪传感器和系统的影响? 同时是否会受到距其 60 m 远的长约 400 m (第四系覆盖层厚度为 400 m) 井下套管的干扰? 和地表地磁观测相比, 其性能如何? 这些是深井观测系统建成后需要确切知道的问题, 对后续的深井综合地震观测站建设具有重要的参考意义。

基于上述问题, 本文对崇明长江农场深井综合地震观测站 (以下简称 CJNC) 的地磁观测数据进行质量分析, 并和相距约 12 km 的崇明三烈中学

* 收稿日期: 2011-09-07.

基金项目: 上海市深井综合地震观测项目和地震科技星火计划项目 (XH12017Y) 联合资助。

台 (以下简称 SLZX) 地磁观测数据进行对比。

1 资料 and 方案

由于地磁外源场一般都位于电离层以上, 相距不太远的 2 个台的外源场差别不大, 可认为在一定范围内磁场基本是均匀的。利用 CJNC 和 SLZX 台 2011 年 7 月 1~30 日的小时值数据和 2011 年 7 月 2 日秒值数据进行地磁观测质量分析, 方案如下:

(1) 仪器运行情况分析

利用 CJNC 台安装在同一位置的两套同一类型地磁仪和 SLZX 台 GM4 地磁仪记录的地磁观测资料分别进行小时值和秒值相关性分析, 来检测仪器的运行状态和仪器的一致性, 同时进行小时值的功率谱分析, 比较 CJNC 和 SLZX 台地磁日变化等主要周期的差异, 从而判别 CJNC 台地磁仪是否受到周围环境的干扰。

(2) 深井、地表地磁观测数据背景噪声水平对比分析

一般信号的高频成分主要由背景噪声干扰所致, 利用傅立叶变换和逆变换截取出 CJNC 和 SLZX 台地磁观测数据中的高频信息, 对 2011 年 7 月 2 日共 86 400 个数据计算 RMS (均方根) 值, 以此作为两个台站的等效背景噪音水平, 为更客观地比较两者的优劣, 截取 5、10、15、20、25、30 s 以上的高频成分分别进行比较。

CJNC 台地磁仪观测的分量为 Z (垂直向)、 X (东西向) 和 Y (南北向), SLZX 台地磁仪观测的分量为 Z (垂直向)、 H (水平向) 和 D (磁偏角), 因此, 在对两者进行比较分析时, 先将 CJNC 台地磁仪观测数据转换成和 SLZX 相同的观测分量。

2 研究方法

2.1 傅立叶变换和噪声功率谱分析

傅立叶变换能将满足一定条件的某个函数表示成三角函数 (正弦/或余弦函数) 或者它们积分的线性组合。将平方可积的函数 $f(t)$ 表示成复指数函数的积分或级数形式。将频率域的函数 $F(\omega)$ 表示为时间域函数 $f(t)$ 的积分形式, 如

$$F(\omega) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega t} dt. \quad (1)$$

功率谱估计的目的是根据有限数据给出信号、随机过程的频率成分分布的描述。假如随机信号 $x(t)$ 的自相关函数为 $R_x(\tau)$, $R_x(\tau)$ 的 Fourier 变换为

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau. \quad (2)$$

定义 $S_x(f)$ 为 $x(t)$ 的自功率谱密度或自功率谱。因为 $S_x(f)$ 可解释为 $x(t)$ 的平均功率谱相对于频率的分布函数。自功率谱 $S_x(f)$ 包含 $R_x(\tau)$ 的全部信息, 如果随机噪声信号中还有某种频率成分, 可以从自功率谱中看出 (王永革, 2007)。

2.2 RMS (均方根)

利用地磁噪声的 RMS (均方根值) 可以衡量台站的地磁背景噪声水平。用该值衡量噪声水平的优点在于对来自不同噪声源的噪声可按照一个相同的尺度进行比较。地磁噪声均方根值计算公式为 (刘永廷等, 2002)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}. \quad (3)$$

式中, $\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$; n 为测量次数; v_i 为某一点实测地磁噪声值; \bar{v} 为实测地磁噪声均值。

3 结果分析

3.1 仪器运行情况分析

根据上述方案, 对 CJNC 台安装在同一位置的两套地磁仪各分量 2011 年 7 月 1~30 日的小时观测数据进行对比分析 (图 1), 并挑选出 2011 年 7 月 2 日的秒值观测数据作相关性分析 (图 2)。

从图 1 和图 2 可以看出, CJNC 台地磁观测小时值日变化周期明显, 两套地磁仪, 无论是小时值还是秒值基本看不出差异。为进一步识别差异, 对地磁仪进行相关性分析, 参与分析的数据为 2011 年 7 月 1~30 日共 720 个小时值, 以及 2011 年 7 月 2 日共 86 400 个秒值。结果如表 1 所示, 从表中可以得到: (1) 对于 CJNC 台安装在同一位置的 2 套地磁仪各分量, 无论是小时值还是秒值, 其相关程度极高, 最小相关程度与 Z 分量秒值相关,

达到 99.82%，最高相关达到 1；（2）CJNC 和 SLZX 台 2 套地磁仪记录的数据相关性也非常高，其中各分量小时值相关性略低，在 83.41% ~ 90% 之间，而秒值相关性较小时值高，在 94% ~ 99.6% 之间。

对 CJNC 和 SLZX 台的地磁观测数据分别进行频谱分析，从表 1 可知，CJNC 台 2 个地磁仪观测数据几乎相同，因此，只挑选 CJNC1 和 SLZX 台进行对比。由于水平分量无显著周期，故只对垂直

表 1 CJNC 台和 SLZX 台相关系数统计表
Tab. 1 Correlation coefficients statistic of CJNC and SLZX stations

台站	采样率	所用数据 个数	相关系数		
			Z	H	D
CJNC1 和 CJNC2	小时	720	0.999 1	1.000	0.999 7
	秒	86 400	0.998 2	0.998 4	0.999 8
CJNC1 和 SLZX	小时	720	0.900 0	0.834 1	0.886 5
	秒	86 400	0.993 8	0.954 6	0.984 1
CJNC2 和 SLZX	小时	720	0.898 4	0.834 1	0.887 0
	秒	86 400	0.996 0	0.940 0	0.981 4

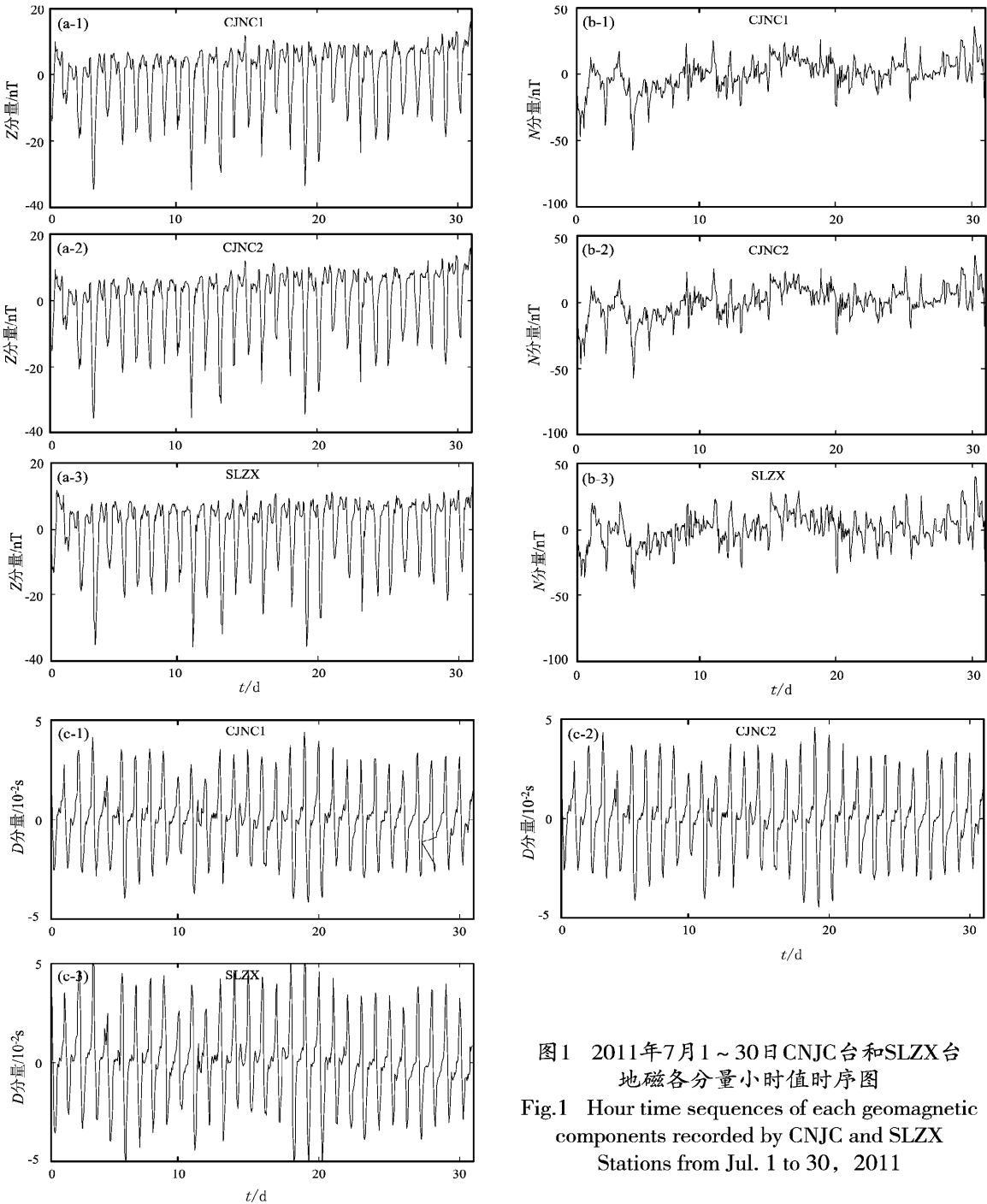


图1 2011年7月1~30日CNJC台和SLZX台地磁各分量小时值时序图
Fig.1 Hour time sequences of each geomagnetic components recorded by CNJC and SLZX Stations from Jul. 1 to 30, 2011

分量、磁偏角分量和地磁总强进行比较,如图3所示,从图中可以看出2个地磁台都有最显著的周期为一天的地磁太阳日变化,此外还有12 h周期和8 h周期,这和Asimopolos等(2010)频谱分析结果是一致的,SLZX台的地磁总强8 h周期不显著。

综上所述,笔者分别从小时值和秒值的时序图分析、CJNC台两套地磁仪和SLZX台地磁

仪相关分析、频谱分析得到,上海深井综合观测系统中用膨胀水泥固定在岩石中的地磁仪目前工作正常,且未受到同一耐压腔体内应变仪、地温、空隙压计探头和安装在同一钻孔内深度约为430 m的地震仪、倾斜仪的系统影响,同时垂直向相距60 m远的长约400 m井下套管对其未产生干扰。

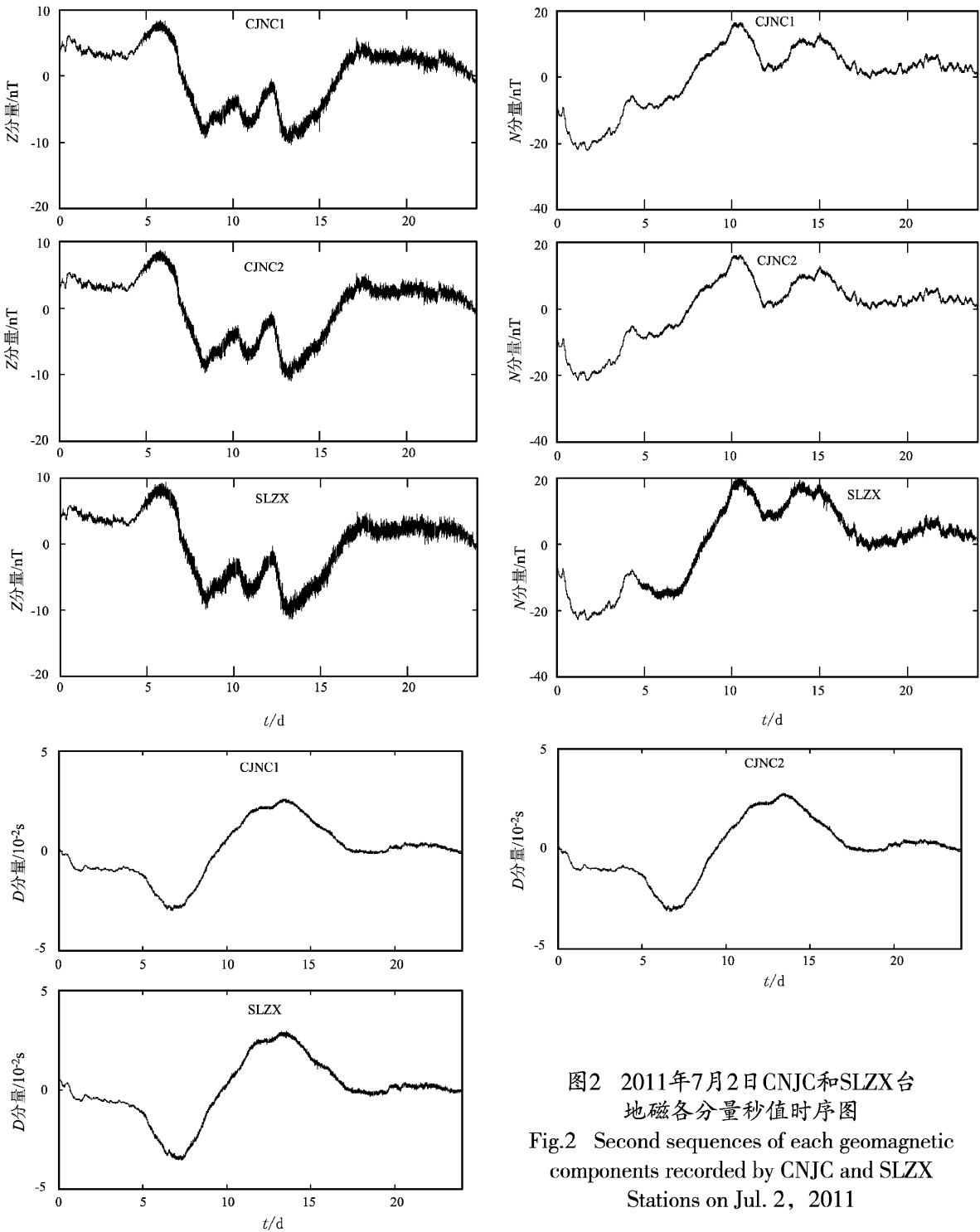


图2 2011年7月2日CNJC和SLZX台地磁各分量秒值时序图
Fig.2 Second sequences of each geomagnetic components recorded by CNJC and SLZX Stations on Jul. 2, 2011

3.2 背景噪声水平对比分析

从图 2 中可以看出，CJNC 台地磁观测数据各分量的时序曲线较 SLZX 台平滑，特别是水平向分量。为进一步量化分析 CJNC 台和 SLZX 台背景噪声的差异，利用傅立叶变换和逆变换截取出 2 个地磁观测数据中的高频信息，计算 2011 年 7 月 2 日共 86 400 个数据的 RMS 值，以此作为 2 个台站的等效背景噪音水平。为更客观地比较两者的优劣，分别截取周期小于 5、10、15、20、25、30 s 的高频成分作为背景噪音进行分析。由于篇幅关系，只给出截取周期小于 5 s 的 CJNC1 台和 SLZX 台地磁观测数据水平分量信号分离过程图（图 4、图 5）。

对各分项分不同截取周期进行信号分离后计算 RMS 值，得到结果如图 6 所示。从图中可以看出：（1）RMS 值随着截取周期的增大而增大，总体呈近似线性增长；（2）CJNC 台 2 套地磁仪的

RMS 值基本相同，表明 2 套仪器具有很高的一致性，同时也表明 2 套地磁仪观测质量可靠，运行正常；（3）CJNC 台地磁观测资料各分量的等效背景噪声 RMS 值明显小于 SLZX 台的 RMS 值。

对于水平分量，截取周期越小，背景噪声 RMS 值相差越大，当截取周期为 5 s 时，SLZX 台背景噪声水平是 CJNC 台近 2.3 倍。对于垂直分量，2 个台的背景噪声水平随着截取周期的变化，基本保持在一个固定水平，为 1.2 倍左右。对于磁偏角，两者背景噪声水平也保持在 1.5 倍左右。

4 结论和讨论

本文主要对上海深井综合地震观测系统中安装在约 460 m 深井中的地磁仪观测数据质量进行分析，并且和相距 12 km 的 SLZX 台 GM4 地磁仪记录的地磁观测数据进行对比，通过长度为 30 d 的小

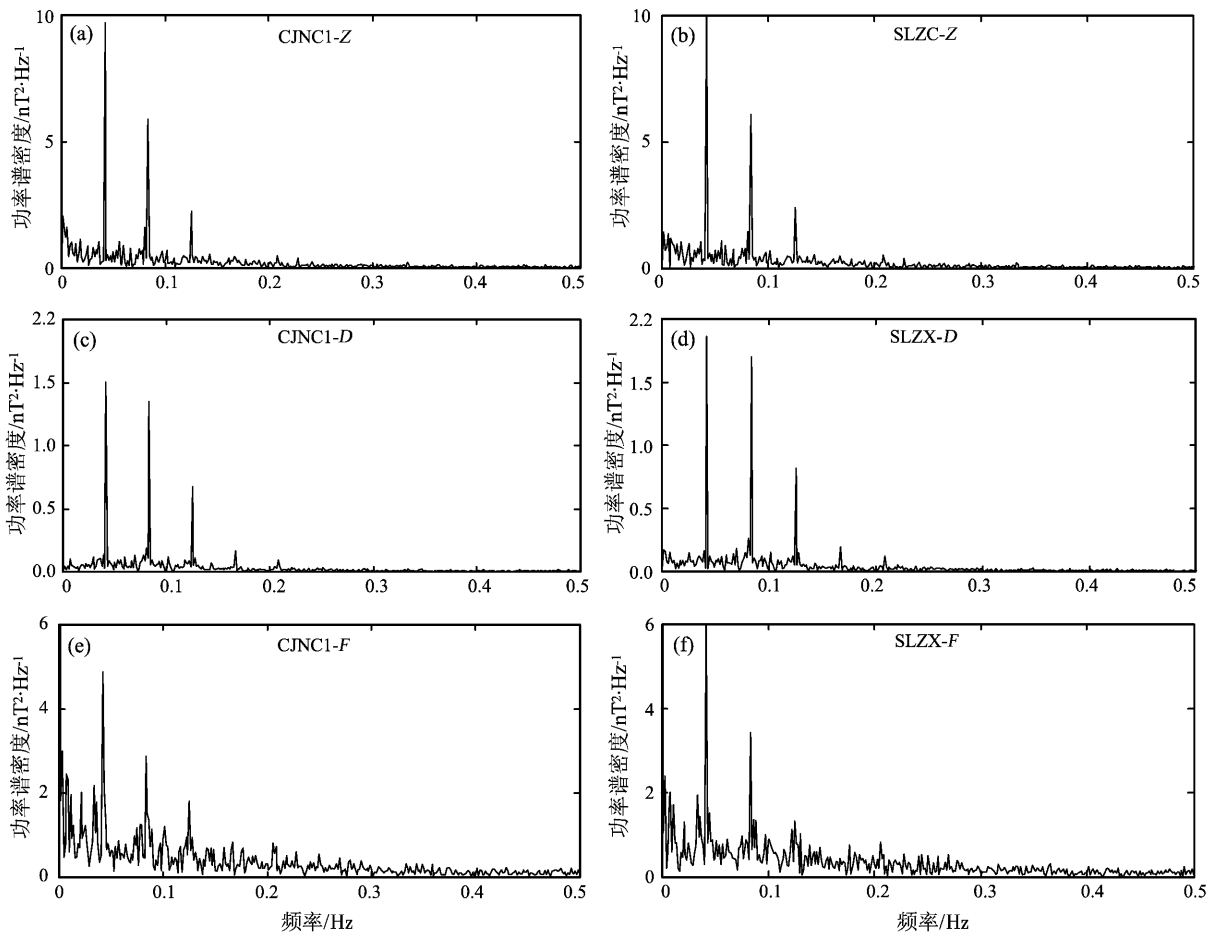


图 3 CJNC1 台和 SLZX 台地磁各分量小时值频谱分析结果（Z：垂直分量；D：磁偏角；F：地磁总强）
Fig. 3 Frequency spectrum of hour time of each geomagnetic components recorded by CJNC1 and SLZX Stations
（Z：vertical component；D：declination；F：geomagnetic total intensity）

时值和长度为一天秒值的观测数据时序图、相关性、频谱分析,以及对比2个台站的等效背景噪声水平,得到以下结论:

(1) 对于 CJNC 台 2 套安装在同一位置的地磁仪,其各分量无论是小时值还是秒值,相关程度极高,在 99.82% ~ 100% 之间,表明该仪器质量可靠,且安装在井深 460 m 里运行正常。

(2) CJNC 台和 SLZX 台地磁仪的相关性也非常高,其中各分量小时值相关性略低,在 83.41% ~ 90% 之间,而秒值相关性较小时值高,在 94% ~ 99.6% 之间,频谱分析结果表明两个地磁台都有最显著的周期为一天的地磁太阳日变化周期,此外还有 12 h 周期和 8 h 周期,表明 CJNC 台仪器未受到周围环境干扰而产生扰动。

(3) 对比 CJNC 台和 SLZX 台地磁仪的等效背景噪声水平,结果表明 CJNC 台地磁观测资料各分量的等效背景噪声 RMS 值明显小于 SLZX 台。对于水平分量当截取周期为 5 s 时,SLZX 台背景噪声水平是 CJNC 台近 2.3 倍。垂直分量,2 个台的背景噪声水平基本保持在 1.2 倍左右;磁偏角,两个台背景噪声水平也保持在近 1.5 倍左右。此外,CJNC 台 2 套深井地磁仪的 RMS 值基本相同,表明两套仪器具有很高的一致性,同时也表明 2 套地磁仪观测质量可靠,运行正常。

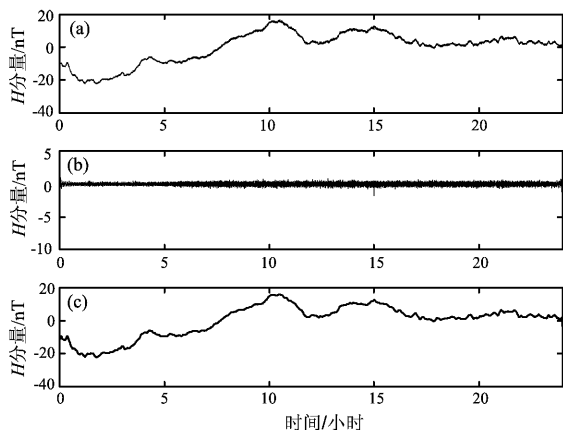


图 4 CNJC1 台水平分量 H 的信号分离过程图
(截取周期: < 5 s)

(a) 原始信号; (b) 分离出的周期小于 5 s 的高频成分时序图; (c) 周期大于 5 s 低频成分时序图

Fig. 4 Separate process of H component recorded by CJNC1 Station (intercepted period is less than 5 seconds)

(a) original signal; (b) separated time series including high frequency component with the period is less than 5 seconds;

(c) time series including low frequency component with the period is more than 5 seconds

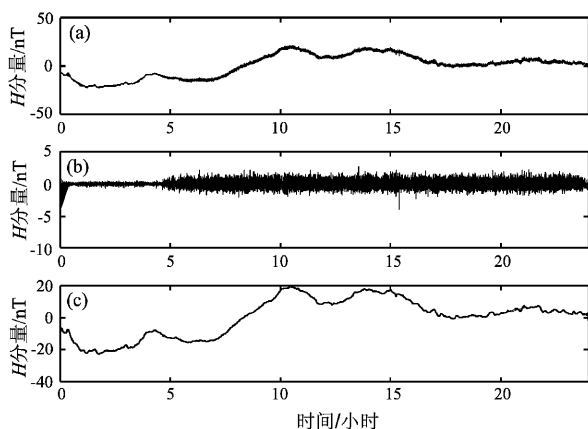


图 5 SLZX 台水平分量 H 的滤信号分离过程
(截取周期: < 5 s)

(a) 原始信号; (b) 分离出的周期小于 5 s 的高频成分时序图; (c) 周期大于 5 s 低频成分时序图

Fig. 5 Separate process of H component recorded by SLZX Station (intercepted period is less than 5 seconds)

(a) original signal; (b) separated time series including high frequency component with the period is less than 5 seconds;

(c) time series including low frequency component with the period is more than 5 seconds

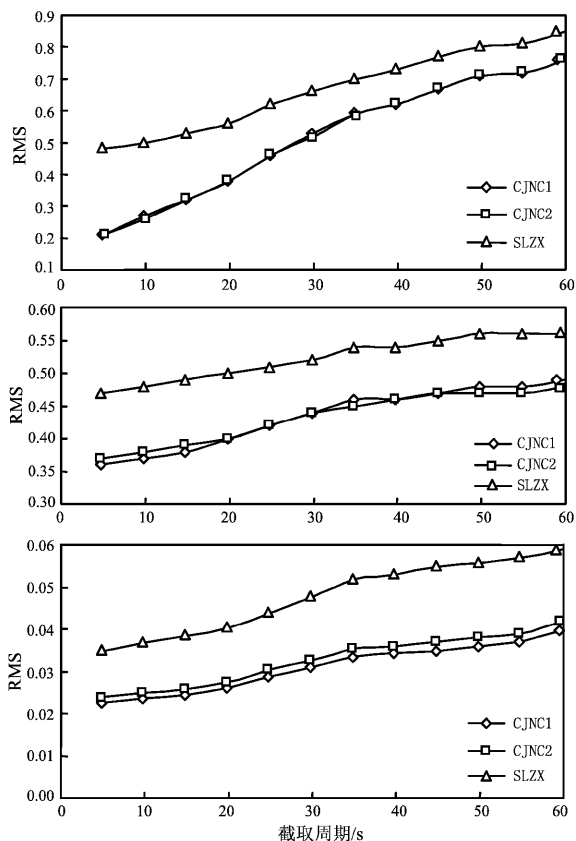


图 6 地磁仪 RMS 值和截取频率关系图

(a) 水平分量; (b) 垂直分量; (c) 磁偏角分量

Fig. 6 Relation between intercepted frequency and RMS of magnetograph

(a) H component; (b) Z component; (c) D component

综上所述,上海深井综合观测系统中用膨胀水泥固定在井深460 m左右岩石中的地磁仪目前工作正常,且未受到同一耐压腔体内应变仪、地温计、空隙压计探头和安装在同一个钻孔内深度为430 m左右的地震仪、倾斜仪的系统影响,同时垂直向相距60 m远的约400 m井下套管对其也未产生干扰。此外,CJNC深井地磁观测的等效背景噪声水平明显小于SLZX台的地表地磁观测。从上述结果可以得到,深井地磁观测数据质量明显高于地表观测,由于地表地磁观测对周围环境要求非常严格,同时观测室的建设要求也非常严格,需要建在非磁异常区,对于类似上海这样的大城市来说,地震地表观测受到了日益严重的干扰且涉

及到征地、观测室建设等费用比较昂贵。因此,开展深井地磁观测既能节约经费又能获得比地表的观测数据质量更高的数据,是值得推广的建设方式。

参考文献:

- 刘永廷,夏爱国,赵庆. 2002. 乌鲁木齐区域数字遥测台网各子台背景噪声分析[J]. 内陆地震,16(4):366-371.
- 万永革. 2007. 数字信号处理的MATLAB实现[M]. 北京:科学出版社.
- Asimopolos L, Pestina A, Asimopolos N S. 2010. Considerations on geomagnetic data analysis [J]. Chinese J Geophys (in Chinese), 53(3):765-772.

Quality Analysis of Geomagnetic Observation Data Recorded by Comprehensive Seismic Observation System in Deep Borehole on Changjiang Farm in Shanghai

REN Ye, ZHOU Hua-gen, LIU Jia-min, YIN Ji-yao

(Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China)

Abstract

We mainly analyzed the quality of geomagnetic observation data recorded by comprehensive seismic observation system which were installed at the depth of 460 m in deep borehole on Changjiang farm in Shanghai. Then we did a comparative analysis of sequence diagram, correlation, frequency spectrum and equivalent background noise of geomagnetic observation data recorded by magnetometers in Changjiang Farm Station (CJNC) and Sanlie Middle School Station (SLZX) which is 12 m apart from the CJNC Station. The result shows that: (1) The magnetometer was installed in well depth of 460 m by expanding cement works normally in the deep borehole comprehensive seismic observation system, and it doesn't interfered not only by the strain meter, geothermometer, pore pressure meter which were installed in the same withstand voltage chamber, but also by the seismometer, tilt meter which were installed at depth of 430 m in the borehole, and it doesn't interfered by down-hole casing with 400 m long at a distance of 60 m. (2) The equivalent background noise of geomagnetic observation data in deep borehole on Changjiang farm is obvious less than that in the surface observation of Sanlie Middle School. Geomagnetic observation in deep borehole not only can save outlay but also can obtain higher quality observation data than the surface observation, so it is worth popularizing.

Key words: comprehensive seismic observation system in deep borehole; geomagnetic; data quality; background noise; Changjiang Farm Station; Sanlie Middle School Station