

胡秀娟, 李西京, 王静, 李细顺, 畅国平, 王秀敏, 宋昭, 罗娜, 解真. 2016. 仪器定向误差对地磁日变化记录准确度的影响研究. 地震学报, 38(1): 130-137. doi:10.11939/jass.2016.01.013.

Hu X J, Li X J, Wang J, Li X S, Chang G P, Wang X M, Song Z, Luo N, Xie Z. 2016. Influences of instrument orientation error on the accuracy of daily variation of geomagnetic record. Acta Seismologica Sinica, 38(1): 130-137. doi:10.11939/jass.2016.01.013.

## 仪器定向误差对地磁日变化记录 准确度的影响研究<sup>\*</sup>

胡秀娟<sup>1,†</sup> 李西京<sup>2)</sup> 王 静<sup>1)</sup> 李细顺<sup>1)</sup> 畅国平<sup>1)</sup>  
王秀敏<sup>1)</sup> 宋 昭<sup>1)</sup> 罗 娜<sup>1)</sup> 解 真<sup>1)</sup>

1) 中国河北邢台 054000 河北省地震局红山磁台

2) 中国陕西咸阳 712000 陕西省地震局乾陵磁台

**摘要** 基于红山磁台磁通门磁力仪 GM4-2 记录的日变化数据, 提出了一种减小仪器定向误差的方法, 即  $D$  要素磁轴零场漂移  $S_0$  校正法. 首先基于零场漂移  $S_0$  测量原理, 试制测量工具无磁旋转平台, 并对磁力仪 GM4-2 零场漂移  $S_0$  值进行测量, 得出该值约为 1024.7 nT; 然后在重新定向时对该数值进行误差校正; 最后将校正后的零场漂移  $S_0$  值应用到理论日变化数据和定向后的实际日变化数据中. 结果表明,  $D$  要素磁轴零场漂移  $S_0$  是产生定向误差的主要因素, 经过零场漂移  $S_0$  校正后的日变化数据与理论日变化数据一致, 消除了由定向误差所造成的日变化畸变, 从而能更真实地反映地磁场变化.

**关键词** 磁通门磁力仪 GM4-2 定向 零场漂移  $S_0$  无磁旋转平台

doi:10.11939/jass.2016.01.013 中图分类号: P318.6, TH762.3 文献标志码: A

## Influences of instrument orientation error on the accuracy of daily variation of geomagnetic record

Hu Xiujuan<sup>1,†</sup> Li Xijing<sup>2)</sup> Wang Jing<sup>1)</sup> Li Xishun<sup>1)</sup> Chang Guoping<sup>1)</sup>  
Wang Xiumin<sup>1)</sup> Song Zhao<sup>1)</sup> Luo Na<sup>1)</sup> Xie Zhen<sup>1)</sup>

1) Hongshan Geomagnetic Observatory, Earthquake Administration of Hebei Province,  
Hebei Xingtai 054000, China

2) Qianling Geomagnetic Observatory, Earthquake Administration of Shaanxi Province,  
Shaanxi Xianyang 712000, China

**Abstract:** Based on the daily variation of geomagnetic data recorded by fluxgate magnetometer GM4-2 at Hongshan geomagnetic observatory, this paper proposes a method for eliminating instrument orientation error, namely the correction method for magnetic axis zero drift  $S_0$  of  $D$  element. First, based on the measurement theory of magnetic axis zero drift  $S_0$ , a rotation platform without

<sup>\*</sup> 基金项目 河北省地震局三结合课题(DZ20150424093)和中国地震局行业标准(054219)共同资助.

收稿日期 2015-03-13 收到初稿, 2015-05-17 决定采用修改稿.

<sup>†</sup> 通讯作者 e-mail: 47982934@qq.com

magnetism has been trial-produced to measure the  $S_0$ , which is about 1024.7 nT for the GM4-2. Then, we correct the error of  $S_0$  value in reorientation. Finally, the  $S_0$  value is applied to both theoretical daily variation and daily variation recorded by the instrument after orientation. The results show that the magnetic axis zero drift  $S_0$  of  $D$  element is the main factor for the orientation error. The daily variation recorded by the instrument after orientation are consistent with the theoretical daily variation, thus eliminating the daily variation distortion caused by the orientation error, and reflecting the geomagnetic field variation more realistically.

**Key words:** fluxgate magnetometer GM4-2; orientation; the magnetic axis zero drift  $S_0$ ; rotation platform without magnetism

## 引言

地磁场日变化是指由相对记录仪器记录的以一个太阳日为周期、依赖于地方太阳时的磁场变化。该日变化由电离层中电流及其在地球内部的感应电流所产生，是地球变化磁场的重要组成部分，包含空间和地球内部各种电磁过程丰富的信息(陈化然等，2009)。

目前，数字地磁台站记录日变化主流仪器为 GM4 型磁通门磁力仪，主要测量地磁场水平分量  $H$ 、垂直分量  $Z$  和磁偏角  $D$  的相对变化(王晓美等，2008)。受仪器线性度和磁轴定向准确度、正交度等因素的影响，仪器记录到的地磁场日变化与地磁场的真实变化存在一定误差，并且每个台站和每套仪器的误差均不相同(张素琴，杨冬梅，2011)。

本文将红山地磁台磁通门磁力仪 GM4-2 记录的  $D$  要素日变化出现畸变为例，分析定向误差对日变化记录的影响。在  $D$  要素磁轴零场漂移  $S_0$  值未知的情况下，根据零场漂移  $S_0$  测量原理，试制测量装置，并在红山地磁台相对记录室进行多次零场漂移  $S_0$  测量实验。测出  $S_0$  值后，在重新定向时进行零场漂移  $S_0$  校正，以对比分析定向前、后的  $D$  要素日变化观测数据。

## 1 台站及仪器概况

红山地磁台位于河北省隆尧县山口镇北部，始建于 1966 年邢台  $M_s 6.8$  地震之后，属于国家基准地磁台。该台站远离城镇和村庄，周围地势平坦，无明显干扰源，是绝佳的地磁观测场所。地磁相对记录室于 2006 年建成并投入使用，记录室为地下双层石拱顶石灰石磁房，室内共 4 个仪器墩，墩号自东向西依次排列，室内磁场水平梯度  $\Delta F_h \leq 1.0$  nT/m，年温差  $\leq 8^\circ\text{C}$ (胡秀娟等，2014a)。磁通门磁力仪 GM4-1 安装在 2 号墩，于 2006 年 9 月开始观测；GM4-2 安装在 1 号墩，于 2013 年 7 月开始观测。地磁绝对观测室于 2000 年建成并投入使用，2009 年 5 月安装了绝对观测仪器 MINGEO-DIM 磁通门经纬仪，用于观测磁偏角  $D$  和磁倾角  $I$  的绝对值，与 GM4 磁通门磁力仪组成一套完整的地磁场数字化观测系统。

## 2 资料分析

图 1 为 2014 年 3—9 月红山台磁力仪 GM4-1 和 GM4-2 记录的  $D$  要素基线值，包括实测值和采用值，绝对观测仪为同一台 MINGEO-DIM 磁通门经纬仪。基线值能够同时反映

出相对记录仪器和绝对观测仪器的工作状态,相对记录仪器工作不正常及绝对观测误差等问题均可以表现在基线值上(程安龙,1993).由图 1a 可以看出,磁力仪 GM4-1 基线值曲线平滑,同日观测的两个基线值或相邻观测日  $D_B$  之差均未出现超过  $0.10'$  的情况.由图 1b 可以看出,磁力仪 GM4-2 基线值曲线多次出现不明原因的跳动,3 月 10—14 日相邻观测日  $D_B$  之差为  $0.30'$ ,之后还多次出现相邻观测日  $D_B$  之差超过  $0.15'$  的情况,核实相应日期的日变化记录数据时并未发现干扰,由此判断可能是磁力仪 GM4-2 的记录出现错误.

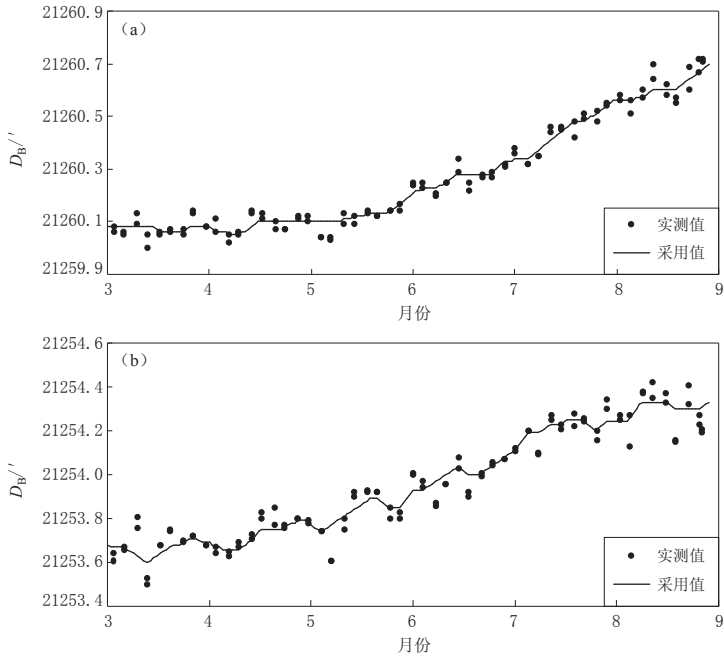


图 1 2014 年 3—9 月红山台磁力仪 GM4-1(a)和 GM4-2(b)  $D$  要素基线值曲线  
Fig. 1 Curves of baseline values of  $D$  element of fluxgate magnetometer GM4-1 (a) and GM4-2 (b) at Hongshan station during March to September in 2014

同台多仪器平行观测的优势之一是可以通过两套仪器数据一致性的对比发现观测中的问题.由图 1a 可以看出,磁力仪 GM4-1 基线值相对稳定,可以将其观测数据作为标准来考察磁力仪 GM4-2 观测数据的质量.选取磁静日(2014 年 9 月 10 日)两套磁通门磁力仪记录的日变化数据,分析  $D$  要素差值变化(图 2a).可以看出,  $D$  要素日变化差值曲线的变化幅度约为  $2.5 \text{ nT}$ .与当日磁力仪 GM4-1 的  $H$  分量日变化曲线(图 2b)对比可以看出,  $D$  要素差值曲线的变化形态与  $H$  分量日变化形态一致,只是幅度不同.由此可知,磁力仪 GM4-2 的  $D$  要素记录中实际上含有  $H$  分量.

前期在研究地磁场长期变化对探头定向产生的影响时观察到,仪器在绝对测量状态下对  $D$  要素进行定向时,  $D$  要素的输出值为  $-50 \sim 50 \text{ nT}$ ,其中包含  $D$  要素磁轴零场漂移  $S_0$  的数值,势必会造成定向误差,影响定向准确度(胡秀娟等,2014b).图 1 和图 2 所反映出的问题是否由定向误差所造成呢?针对该问题,下面我们主要从定向准确度角度对日变化记录的影响进行分析.

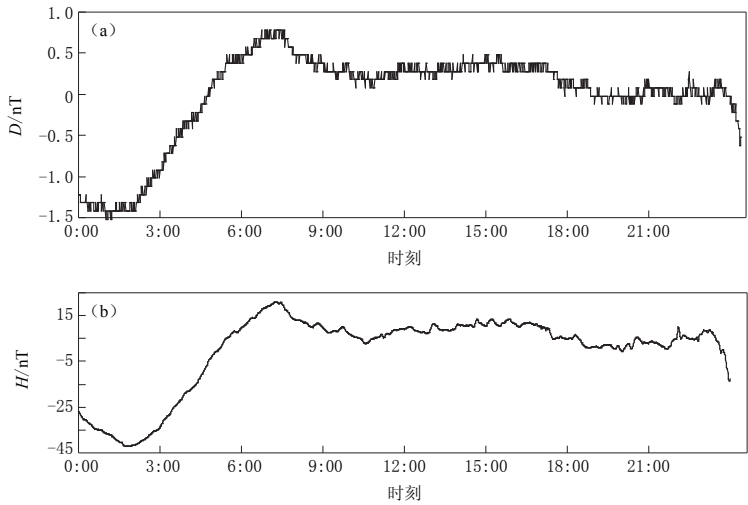


图 2 磁力仪 GM4-1 和 GM4-2 记录的 2014 年 9 月 10 日  $D$  要素日变化差值曲线(a)和磁力仪 GM4-2 记录的  $H$  分量日变化曲线(b)

Fig. 2 The daily variation differential curves of  $D$  element recorded by two fluxgate magnetometers GM4-1 and GM4-2 (a) and the daily variation curve of  $H$  component recorded by GM4-2 (b) on September 10, 2014

3 仪器定向过程中存在的问题与分析

磁通门磁力仪 GM4 定向是指探头传感器方向与被测磁场方向一致(朱兆才, 2004). 目前, 对磁通门磁力仪 GM4 定向的步骤为: ① 选择磁静日, 调平仪器底座, 确定垂直分量  $Z$  的定向; ② 将仪器状态由相对记录切换到绝对测量状态, 水平旋转仪器, 将磁偏角  $D$  的输出值控制在  $-50\sim 50$  nT 范围内, 确定  $D$  要素的定向; ③ 水平分量  $H$  的定向由  $D$  要素确定.

由于仪器在绝对测量状态下对  $D$  要素进行定向时,  $D$  要素的输出值为  $-50\sim 50$  nT, 其中包含了  $D$  磁轴零场漂移  $S_0$  的数值(胡秀娟等, 2014b), 所以需测出  $S_0$  值. 基于零场漂移  $S_0$  测量原理, 本文试制了  $S_0$  值测量工具.

3.1 零场漂移  $S_0$  测量原理与测量工具

假设  $D$  磁轴零场漂移值为  $S_0$ , 磁场  $H$  在  $D$  磁轴上的投影值为  $S$ , 如图 3a 所示. 图中,  $A$  为磁东方向,  $B$  为磁北方向,  $C$  为零场漂移  $S_0$  存在时  $D$  要素输出值为零时磁轴的位置, 此时  $D$  要素的输出值为  $S_0 - S$ ; 将  $D$  磁轴水平转动  $180^\circ$ (图 3b), 此时  $D$  要素的输出值为  $S_0 + S$ . 通过计算可得出零场漂移  $S_0$  值. 实际测量中, 应尽量选择磁场平静时段, 可保证  $D$  磁轴在转动  $180^\circ$  时磁场  $H$  不变; 另外, 零场漂移  $S_0$  受温度影响, 应尽量选择温度稳定的时段, 可保证零场漂移  $S_0$  值不变.

由于磁通门磁力仪 GM4 探头本身没有刻度, 给实际测量带来困难. 最先使用的测量工具为纸质度盘, 但很难保证  $D$  磁轴准确转动  $180^\circ$ , 测量误差较大. 而后制作了无磁旋转平台, 该平台主要由 FHD 仪器底盘和正方形不锈钢钢板两部分构成, 其中正方形不锈钢钢板固定在 FHD 仪器底座上. 测量时将探头放置在钢板上, 通过调整 FHD 仪器底盘内的刻度对  $D$  磁轴进行旋转, 从而提高测量精度.

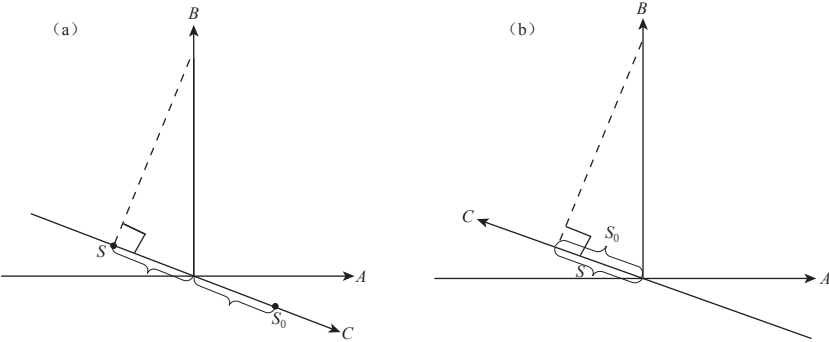


图 3  $D$  磁轴定向位置(a)及其旋转  $180^\circ$ 位置(b)处零场漂移  $S_0$  计算示意图  
Fig. 3 The calculating schematic diagram of zero drift  $S_0$  of  $D$  magnetic axis at the orientation position (a) and that after rotating  $180^\circ$  (b)

3.2 零场漂移  $S_0$  测量结果

在红山台相对记录室对磁力仪 GM4-2 共进行 3 次零场漂移  $S_0$  的测量实验,时间分别为 2014 年 9 月 11 日、9 月 25 日和 9 月 28 日. 第一次实验使用无磁旋转平台,测量数据为 18 组,计算出零场漂移  $S_0$  值为 972.2 nT. 对于测量的较大数值,应考虑是否由于平台操作方法不当等原因所致. 9 月 25 日使用纸质度盘进行第二次实验,测量数据为 9 组,计算出零场漂移  $S_0$  值为 1009.9 nT.

对比两种测量工具测得的数据可以看出,纸质度盘较无磁旋转度盘精度稍差,但其均显示零场漂移  $S_0$  数值较大,为定向时最佳输出值的几十倍. 为此与仪器厂家进行沟通,建议仪器在“相对状态”下,且同时不给  $H$  分量和  $Z$  分量加补偿值时进行测量. 基于上述改变,9 月 28 日使用无磁旋转平台进行第三次零场漂移  $S_0$  测量,测量数据为 7 组,测量结果如表 1 所示.

表 1 2014 年 9 月 28 日红山台磁力仪 GM4-2 零场漂移  $S_0$  测量结果

Table 1 Measurement results of the magnetic axis zero drift  $S_0$  of fluxgate magnetometer GM4-2 at Hongshan station on September 28, 2014

组数	$D_1/\text{nT}$	$D_2/\text{nT}$	$S_0/\text{nT}$	组数	$D_1/\text{nT}$	$D_2/\text{nT}$	$S_0/\text{nT}$
1	146	1908	1027	5	-158	2222	1032
2	-26	2098	1036	6	-251	2276	1012
3	-259	2314	1029	7	-279	2319	1020
4	-32	2066	1017				

注:  $D_1$  和  $D_2$  分别为图 3a, b 的  $D$  要素输出值.

3.3 定向误差对磁力仪 GM4-2 日变化记录的影响

由表 1 可计算出磁力仪 GM4-2 的零场漂移  $S_0=1024.7$  nT, 将其换算成角度, 即

$$\alpha = \arcsin \frac{S_0}{H}, \tag{1}$$

式中,  $H$  取  $H$  分量年均值. 已知红山地磁台  $H$  值为 2 万 9800 nT, 可计算出  $\alpha$  值约为  $2^\circ$ .

以定向误差角度为  $2^\circ$  进行理论分析, 所得  $D$  要素日变化畸变如图 4 所示. 可以看出, 由于定向误差的存在,  $D$  要素日变化出现畸变, 其实测值并非真实值, 理论上  $D$  要素值应为  $H$  分量和  $D$  要素实测值在真实的  $D$  要素方向上投影之和, 即

$$D_{理} = H'_{测} \sin\alpha + D'_{测} \cos\alpha, \tag{2}$$

根据式(2)计算得出 2014 年 9 月 10 日磁力仪 GM4-2 的  $D$  要素理论日变化数据,同时选取 2014 年 9 月 10 日和 10 月 6 日磁力仪 GM4-2 的  $D$  要素实测日变化数据,分别与磁力仪 GM4-1 的  $D$  要素相对应日期的日变化数据进行差值比较,差值曲线如图 5 所示,其中 9 月 10 日为未经过定向误差校正的数据,10 月 6 日为经过定向误差校正的数据.可以看出,9 月 10 日实测日变化的差值(黑色曲线)变化幅度较大,约为 2.5 nT;通过理论计算后,日变化的差值(红色曲线)变化幅度较小,约为 1.0 nT;10 月 6 日实测日变化差值曲线(绿色曲线)与理论差值曲线变化趋势和变化幅度一致.结果表明,磁力仪 GM4-2 定向时经过零场漂移  $S_0$  校正后的观测数据能够消除定向误差所造成的日变化畸变.

地磁日变化记录准确度标定是为了定量考察地磁仪器记录到的地磁日变化的准确程度.

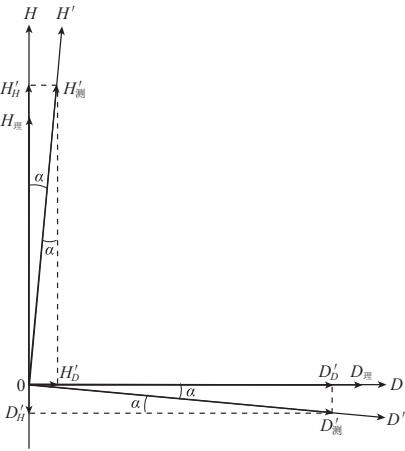


图 4 2°定向误差角度所造成的  $D$  要素日变化畸变示意图.  $H$  和  $D$  为理论日变化数据,  $H'$  和  $D'$  为实测日变化数据

Fig. 4 Schematic diagram of abnormal daily variation of  $D$  element caused by the orientation error angle  $2^\circ$ .  $H$  and  $D$  are the theoretical daily variation,  $H'$  and  $D'$  are the measured ones

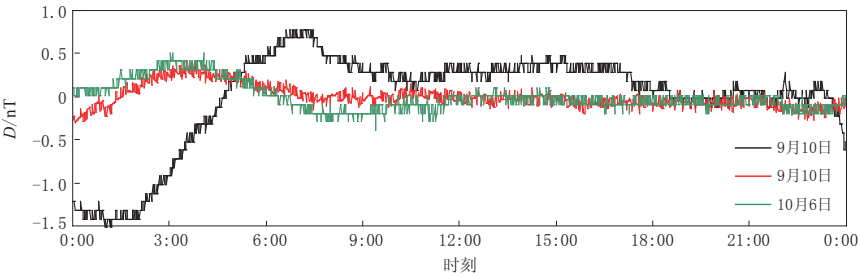


图 5  $D$  要素实测(黑色和绿色)及理论日变化差值曲线(红色)

Fig. 5 The measured daily variation differential curves of  $D$  element on September 10 (black line) and October 6 (green line) and the theoretical one on September 10 (red line)

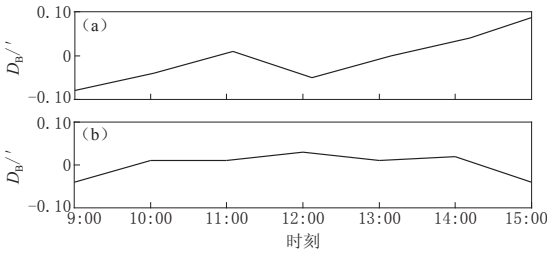


图 6 磁力仪 GM4-2 定向前(a)、后(b)日变化标定曲线  
Fig. 6 The calibration curves of daily variation for fluxgate magnetometer GM4-2 before (a) and after orientation (b)

具体作法为：在选定的一天地方时 09:00—15:00,每隔 1 小时进行一次绝对观测,每次观测取得两组有效数据,然后比较基线值的变化(张素琴,杨冬梅,2011). 8 月 29 日对磁力仪 GM4-2 进行了一次日变化标定,通过实验确定定向误差后对该仪器进行重新定向; 9 月 29 日对磁力仪 GM4-2 又进行了一次日变化标定,并对比了两次标定结果,如图 6 所示.

衡量基线值的精度和稳定性,主要通过计算基线值的标准偏差和变化幅度.标准偏差既能反映观测误差的大小,也能反映记录仪器工作状态的好坏(高玉芬等,1991).从图 6a 可以看出,定向前  $D_B$  的标准偏差为  $0.06'$ ,在整个观测时段内  $D_B$  变化幅度超过  $0.10'$ ,最大可达  $0.18'$ ;从图 6b 可以看出,定向后  $D_B$  的标准偏差为  $0.03'$ ,在整个观测时段内  $D_B$  变化幅度不超过  $0.10'$ ,最大为  $0.08'$ .这说明,磁力仪 GM4-2 定向时经过零场漂移  $S_0$  校正后的观测数据更能真实地反映地磁场的日变化.

## 4 讨论与结论

仪器正确定向是保证地磁场日变化记录准确的一个重要环节,磁通门磁力仪在绝对状态下, $D$  要素磁轴零场漂移  $S_0$  是影响其定向精度的主要因素,但是仪器参数尚未给出该数值.本文结合零场漂移  $S_0$  测量原理,制作了无磁旋转平台,对红山台磁力仪 GM4-2 进行了多次零场漂移  $S_0$  值测量.在测量过程中,定向应在软件界面标识为“相对状态”,并在将  $H$  分量和  $Z$  分量补偿值设置为 0 的状态下进行.

由红山台磁力仪 GM4-2 多次零场漂移  $S_0$  值测量结果可知,该  $S_0$  值为  $1024.7$  nT,是定向输出值( $-50$ — $50$  nT)的 20 倍,所以需对零场漂移  $S_0$  值进行校正,使  $D$  要素的输出值为  $(1024.7 \pm 50)$  nT.对比定向前后  $D$  要素观测数据可知,经过零场漂移  $S_0$  校正后的日变化数据与理论日变化数据一致,能够消除由定向误差所造成的  $D$  要素日变化畸变.在此基础上通过定向前后日变化标定结果对该结论给予了验证.

地磁台站的首要任务是取得连续、完整、可靠的观测数据,本文研究为地磁台站磁通门磁力仪 GM4 的正确定向提供了参考依据.地磁场日变化记录准确度除受定向误差影响外,还受其它因素影响.解决定向问题后,后续将继续考察仪器正交度对日变化记录的影响及其校正方法.

杨冬梅研究员提出零场漂移  $S_0$  测量原理及具体实验步骤,乾陵台李西京高级工程师提供自制测量装置,作者在此一并表示衷心感谢!

## 参 考 文 献

- 陈化然,杜爱民,王亚丽,杨冬梅,张素琴,李琪,赵旭东,刘晓灿,朱荣,何宇飞,马君钊,王建国. 2009. 地磁低点位移与地磁场等效电流体系关系的初步研究[J]. 地震学报, **31**(1): 59–67.
- Chen H R, Du A M, Wang Y L, Yang D M, Zhang S Q, Li Q, Zhao X D, Liu X C, Zhu R, Hu Y F, Ma J Z, Wang J G. 2009. A preliminary study on the relation between the geomagnetic “lowest shift” phenomenon and the equivalent current system[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(1): 59–67 (in Chinese).
- 程安龙. 1993. 关于基线值拟合问题的讨论[J]. 地震地磁观测与研究, **14**(2): 54–57.
- Cheng A L. 1993. The discussion about curve fit base-line values[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **14**(2): 54–57 (in Chinese).
- 高玉芬,程安龙,赵永芬,周锦屏. 1991. 地磁台基线值分析[J]. 地震地磁观测与研究, **12**(2): 3–10.
- Gao Y F, Cheng A L, Zhao Y F, Zhou J P. 1991. Baseline analysis for geomagnetic observatory[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **12**(2): 3–10 (in Chinese).
- 胡秀娟,李细顺,王利兵,王静,畅国平,王秀敏,梁斌. 2014a. 红山台磁通门磁力仪观测数据对比分析[J]. 华北地震科学, **32**(2): 68–72.
- Hu X J, Li X S, Wang L B, Wang J, Chang G P, Wang X M, Liang B. 2014a. Contrastive analysis of fluxgate magne-

- tometer observation at Hongshan seismic station[J]. *North China Earthquake Sciences*, **32**(2): 68–72 (in Chinese).
- 胡秀娟, 杨冬梅, 王静, 李细顺, 畅国平, 王利兵, 王秀敏, 张素琴, 舒雷. 2014b. 磁通门磁力仪 GM4 定向方法的研究[J]. 震灾防御技术, **9**(增刊): 609–614.
- Hu X J, Yang D M, Wang J, Li X S, Chang G P, Wang L B, Wang X M, Zhang S Q, Shu L. 2014b. Research on the orientation method using fluxgate magnetometer[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **9**(Suppl): 609–614 (in Chinese).
- 王晓美, 腾云田, 王喜珍, 王晨, 吴琼. 2008. GM4 型磁通门磁力仪性能检验方法[J]. 地震地磁观测与研究, **29**(6): 88–94.
- Wang X M, Teng Y T, Wang X Z, Wang C, Wu Q. 2008. The test method for the performance of fluxgate magnetometer[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **29**(6): 88–94 (in Chinese).
- 张素琴, 杨冬梅. 2011. 地磁日变化记录准确度标定结果分析[J]. 地震地磁观测与研究, **32**(5): 60–65.
- Zhang S Q, Yang D M. 2011. Study on the stability and accuracy of baseline values measured during the calibrating time[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **32**(5): 60–65 (in Chinese).
- 朱兆才. 2004. 三分量磁通门磁变仪探头正交误差对定向的影响[J]. 东北地震研究, **20**(2): 70–75.
- Zhu Z C. 2004. Effects on the right-angled error of the three-component flux gate magnetometer exploring head to the sense of orientation[J]. *Seismological Research of Northeast China*, **20**(2): 70–75 (in Chinese).