

王晓美, 滕云田, 谭婧, 吴琼, 王喆. 2017. 三轴磁通门传感器水平和定向对地磁日变化观测数据的影响. 地震学报, 39(3): 429–435. doi:10.11939/jass.2017.03.012.
Wang X M, Teng Y T, Tan J, Wu Q, Wang Z. 2017. Influencing factors of tri-axial fluxgate sensor horizontal and orientation on the accuracy of geomagnetic variation records. *Acta Seismologica Sinica*, 39(3): 429–435. doi:10.11939/jass.2017.03.012.

三轴磁通门传感器水平和定向对地磁 日变化观测数据的影响^{*}

王晓美^{1),*} 滕云田¹⁾ 谭婧²⁾ 吴琼¹⁾ 王喆¹⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国沈阳 110162 沈阳炮兵学院

摘要 针对多套三轴磁通门传感器在同一观测环境下, 日变化观测曲线不是完全重合, 存在观测数据的不一致性问题, 通过理论计算和地磁台站测试实验, 分析仪器的定向、底座水平与地磁各分量观测数据之间的变化规律并给出其定量关系. 实验结果表明: 若存在定向误差角 α , 则表现为 D 分量的观测曲线中包含了一定比例的 H 分量; 在水平面内, 若存在磁传感器以 H 分量为轴在 ZOD 平面内的旋转夹角 φ , 则表现为 D 分量的观测曲线中包含了一定比例的 Z 分量; 若存在磁传感器以 D 分量为轴在 ZOH 平面内的旋转夹角 θ , 则表现为 H 和 Z 两分量的记录数据中分别包含了一定比例的对方分量成分.

关键词 磁通门传感器 水平定向 误差角度 地磁日变化

doi:10.11939/jass.2017.03.012 中图分类号: P315.62 文献标志码: A

Influencing factors of tri-axial fluxgate sensor horizontal and orientation on the accuracy of geomagnetic variation records

Wang Xiaomei^{1),*} Teng Yuntian¹⁾ Tan Jing²⁾ Wu Qiong¹⁾ Wang Zhe¹⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Shenyang Artillery Academy, Liaoning Province, Shenyang 110162, China

Abstract: According to geomagnetic daily variation records of national geomagnetic observatory network of China, we analyze the observation data inconsistency by multiple sets of tri-axial fluxgate sensors in the same observation environment. Through theoretical calculations and experimental tests on the geomagnetic station, we got the quantitative relationships between instrument horizontal, orientation and each geomagnetic component. The experiment results show: if there is orientation error angle α , the D component observing curve contains a certain proportion of the H component; in the horizontal plane, if the angle φ is formed by magnetic sensor rotating around the H component as axis

* 基金项目 国家自然科学基金项目(41404141)和国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ100817-2)共同资助.

收稿日期 2016-09-22 收到初稿, 2016-11-21 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: xiaomei7978@163.com



in the ZOD plane, the D component observing curve contains a certain proportion of the Z component; if the angle θ is formed by magnetic sensor rotating around the D component as axis in the ZOH plane, the H and Z component observation curves contain a certain proportion of each other component.

Key words: fluxgate sensor; horizontal and orientation; angle error; geomagnetic daily variation record

引言

目前,磁通门传感器已成为地磁日变化观测的典型仪器,广泛应用于地磁观测台站.中国地磁台网经过“九五”、“十五”、“十一五”的升级改造,地磁相对记录已实现数字化、网络化,同时实现了秒数据采集和存储.目前地磁台站的相对记录一般为两套同类型仪器并行观测,以便及时判别观测设备故障和环境干扰,并确保观测数据的连续性和完整性.经过近几年的观测,发现有些台站同类型仪器的日变观测曲线并不是完全重合,而是存在观测数据的不一致性问题,相关人员也曾针对此类问题进行相应的分析.例如:张素琴和杨冬梅(2011)对中国地磁台网中7个地磁台站2009年的日变化准确度标定基线值数据的精度和稳定性进行了分析;胡秀娟等(2016)基于红山地磁台磁通门磁力仪记录的地磁日变化数据,研究了定向误差对地磁日变化记录准确度的影响,结果表明经过零场漂移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;Jankowski和Sucksdoff(1999)在《地磁测量与地磁台站工作指南》中也给出了磁传感器安装定向要求和定向误差角,并提供了对记录的原始数据进行改正计算的方法.就目前研究来看,导致数据不一致主要有3个误差源:其一,观测仪器本身性能.由于受加工和装配工艺水平的限制,难以保证仪器的正交度,同时在仪器调试过程中,自身的格值、温度系数、零点漂移等也会引入误差;其二,仪器安装过程中引入的误差,包括仪器 D 分量定向、底座水平调节难以保证测量坐标系 xoy 平面的绝对水平;其三,观测环境所产生的误差,主要指由于季节变化等引起的观测墩漂移、台站供电系统不稳定等因素所产生的误差(朱昀,董大群,1999;朱兆才,2004;李久春,2008;吴德会,2008).上述研究主要集中在通过日变化的观测数据质量对比获得改进的方法,或是通过安装指南给出具体安装步骤,并未给出误差角与当地地磁场之间的定量关系.

本文拟通过理论计算和地磁台站测试实验,分析观测仪器的定向、水平与地磁各分量观测数据之间的变化规律,并试图给出其定量关系,以便在仪器观测数据一致性分析中给出误差原因并给出解决方案.

1 三轴磁通门传感器定向误差分析

三轴磁通门传感器由3个相同的单轴磁传感器和正交铝骨架组成,按照传感器的磁轴方向与被测地磁场方向重合进行组装,在空间上同点分布、相互正交,分别感应相应的3个正交方向的磁场分量,图1a为中国地震局地球物理研究所自主研发的GM4型磁通门传感器实物图.磁通门磁力仪一般按照地磁坐标进行安装,即磁通门传感器的感应线圈轴向与被测磁场方向一致.所以 H 水平指向磁北, D 为磁北与地理北的夹角, Z 垂直指向地心,记录地磁场 H , D 和 Z 三分量的变化.仪器通过 D 分量进行定向时,要求 D 分量的输

出值处于 $-50 \sim 50$ nT 之间(因磁通门传感器直接测量的是磁场值, 单位为 nT, 所以需要后续的数据处理将磁场值转换成角度值, 本文为直观方便起见采用磁场值单位). 假设磁传感器所在水平面 HOD 与理想坐标系 XOY 的平面绝对水平, 定向误差是由磁传感器以 Z 分量为轴在 HOD 平面内的旋转的夹角 α (见图 1b), 则此夹角为定向误差角. 采用二维坐标系能够更加直观地表示出角度误差所引起的各分量相互之间的影响.

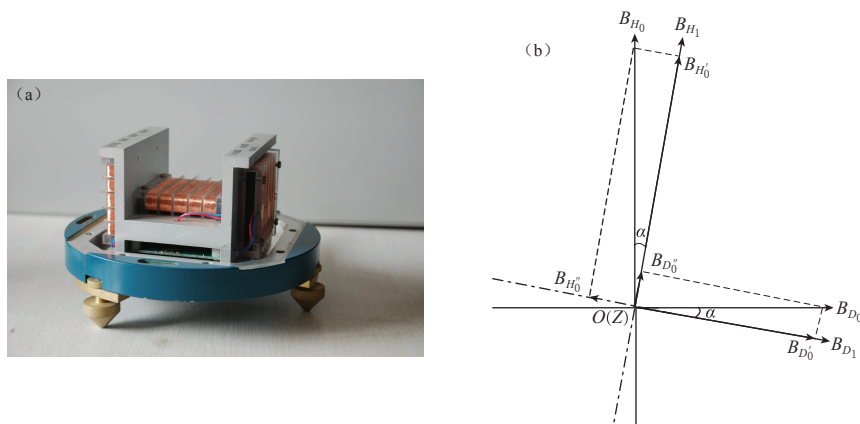


图 1 典型磁通门传感器及磁坐标参考系

(a) 三轴磁通门传感器实物图; (b) 引入定向误差角 α 的磁传感器坐标参考系

Fig. 1 The typical fluxgate sensor and magnetic coordinate reference system

(a) Physical map of tri-axial fluxgate sensor; (b) Coordinate reference system with orientation error angle α

由图 1b 可知, 由于定向误差角 α 的存在, 水平面内的两个分量测量值互相包含了对方成分, 即 D 分量的测量值为真实的 D 分量在测量方向上投影和真实的 H 分量在测量方向上投影之和, 可表示为

$$B_{D_1} = B_{D'_0} - B_{H''_0} = B_{D_0} \cos \alpha - B_{H_0} \sin \alpha, \quad (1)$$

同理, Z 分量的测量值为

$$B_{H_1} = B_{H'_0} + B_{D''_0} = B_{H_0} \cos \alpha + B_{D_0} \sin \alpha, \quad (2)$$

式中, B_{D_0} 和 B_{H_0} 分别为理想坐标系下的磁场 D 和 H 分量值, $B_{D'_0}$ 和 $B_{D''_0}$ 分别为存在定向误差角 α 时 D 分量在 HOD 平面内的投影, $B_{H'_0}$ 和 $B_{H''_0}$ 分别为存在定向误差角 α 时 H 分量在 HOD 平面内的投影.

由于 D 分量值和 α 较小, 故 $B_{D_0} \sin \alpha$ 可以省略. 所以, 若存在定向误差角 α , 则对 D 分量的记录数据影响较大, 表现为 D 分量的观测曲线中包含了与 H 分量成 $\sin \alpha$ 比例的数值.

2 三轴磁通门传感器水平误差分析

非水平的三轴磁通门传感器的坐标参考系(闫辉等, 2006)如图 2 所示. 图中, 三轴磁通门传感器因不能水平放置导致 OD_1 轴与 OD_0 轴之间出现夹角 φ , OH_1 轴与 OH_0 轴之间的夹角为 θ , 这两个角称为水平误差角. 为便于分析, 采用与定向误差分析相同的方法, 即采用二维坐标系更加直观地表示出由于角度误差所引起的各分量相互之间的影响. 假设磁通门传感器所在的 ZOD 平面与理想坐标系 ZOX 的平面在同一平面内, 夹角 φ 即为磁传感器以 H 分量为轴在 ZOD 平面内旋转的夹角, 夹角 θ 则为磁传感器以 D 分量为轴在 ZOH

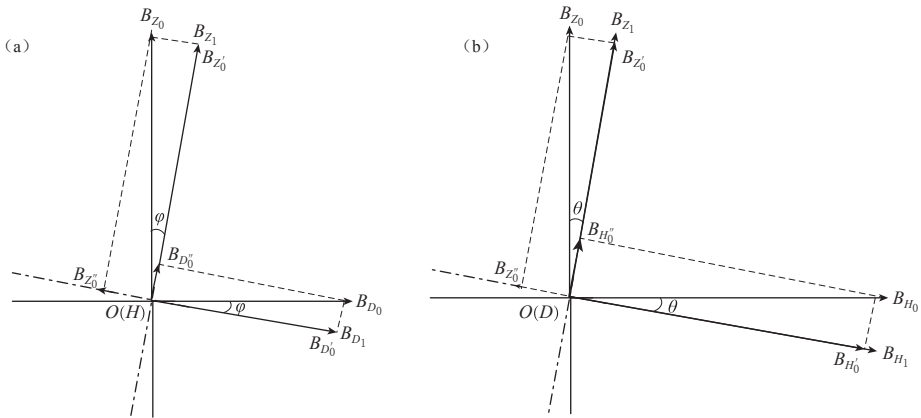


图 2 非水平的磁传感器坐标参考系

(a) 磁传感器以 H 分量为轴在 ZOD 平面内旋转夹角 φ ; (b) 磁传感器以 D 分量为轴在 ZOH 平面内旋转夹角 θ

Fig. 2 Coordinate reference system with horizontal error angle

(a) Angle φ formed by magnetic sensor rotating around H component as an axis in the ZOD plane;

(b) Angle θ formed by magnetic sensor rotating around D component as an axis in the ZOH plane

平面内旋转的夹角。

由图 2a 可知, 由于水平误差角 φ 的存在, ZOD 平面内的 Z 和 D 两个分量的测量值互相包含了对方的成分, 即 D 分量的测量值为真实的 D 分量在测量方向上的投影与真实的 Z 分量在测量方向上的投影之和, 即

$$B_{D_1} = B_{D'_0} - B_{Z'_0} = B_{D_0} \cos\varphi - B_{Z_0} \sin\varphi, \tag{3}$$

同理, Z 分量的测量值为

$$B_{Z_1} = B_{Z'_0} + B_{D'_0} = B_{Z_0} \cos\varphi + B_{D_0} \sin\varphi. \tag{4}$$

由于 D 分量值和 φ 较小, 故 $B_{D_0} \sin\varphi$ 可以省略。所以, 若存在磁传感器绕以 H 分量为轴在 ZOD 平面内旋转的夹角, 则对 D 分量的记录数据影响较大, 表现为 D 分量的观测曲线中包含了一定比例的 Z 分量。

由图 2b 可知, 由于水平误差角 θ 的存在, ZOH 平面内的 Z 和 H 两个分量测量值互相包含了对方成分, 即 H 分量的测量值为真实的 H 分量在测量方向上的投影与真实的 Z 分量在测量方向上的投影之和, 即

$$B_{H_1} = B_{H'_0} - B_{Z'_0} = B_{H_0} \cos\theta - B_{Z_0} \sin\theta, \tag{5}$$

同理, Z 分量的测量值为

$$B_{Z_1} = B_{Z'_0} + B_{H'_0} = B_{Z_0} \cos\theta + B_{H_0} \sin\theta. \tag{6}$$

由于在自然场条件下, H 和 Z 分量的值较大, 故 $B_{Z_0} \sin\theta$ 和 $B_{H_0} \sin\theta$ 不可省略。所以, 若存在磁传感器绕以 D 分量为轴在 ZOH 平面内旋转的夹角, 则 H 和 Z 两分量的记录数据中包含了一定比例的对方分量成分。

综上可知: 若三轴磁通门传感器存在水平误差角 α , 则 D 分量的日变化观测曲线中包含一定比例的 H 分量的日变化; 在水平面内, 若存在磁传感器以 H 分量为轴在 ZOD 平面内旋转的夹角 φ , 则 D 分量的日变化观测曲线中包含了与 Z 分量日变化成 $\sin\varphi$ 比例的数值; 若存在磁传感器以 D 分量为轴在 ZOH 平面内旋转的夹角 θ , 则 H 和 Z 两分量的日变化曲线中包含了与对方分量日变化成 $\sin\theta$ 比例的数值。

3 传感器姿态偏转角度误差测试

本测试在广东省地震局肇庆地磁基准台的地磁矢量记录室内进行。测试中使用了一套 GM4 型磁通门磁力仪，用作被测仪器；一套精度可以达到 0.01° 的姿态测试仪，用于角度的测试；一个角度可调节的无磁支架，用于三维角度的调节，如图 3 所示。

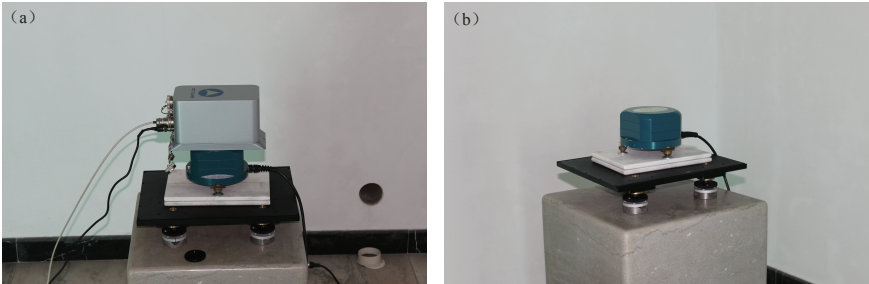


图 3 传感器姿态偏转角度误差测试

(a) 利用姿态测试仪调节角度；(b) 三轴磁通门磁力仪连续观测

Fig. 3 Attitude angle error test of magnetic sensor

(a) The angle adjustment using the attitude indicator; (b) Tri-axial fluxgate magnetometer observation

3.1 定向误差测试

利用高精度姿态测试仪调节地磁坐标下的角度，姿态测试仪的三维角度标注采用偏航角(u_h)、翻滚角(u_r)、俯仰交(u_p)。首先，对三轴磁通门传感器进行初始状态调整，使(u_h , u_r , u_p)= $(90^{\circ}, 0^{\circ}, 0^{\circ})$ ，姿态调整完毕后，将姿态仪移除，令磁通门磁力仪连续记录 1 个小时，此过程为磁力仪稳定状态过程，在此过程中获得初始状态的磁场值，利用肇庆地磁基准台的同类型磁通门磁力仪，可以消除地磁日变化；其次，利用姿态仪使(u_h , u_r , u_p)= $(88^{\circ}, 0^{\circ}, 0^{\circ})$ ，以确保磁传感器所在水平面 HOD 与理想坐标系 XOY 的平面绝对水平，在水平面内绕以 Z 分量为轴顺时针旋转 2° ，姿态调整完毕后，将姿态仪移除，令磁通门磁力仪连续记录 1 个小时；再次，利用姿态仪使(u_h , u_r , u_p)= $(92^{\circ}, 0^{\circ}, 0^{\circ})$ ，以确保磁传感器所在水平面 HOD 与理想坐标系 XOY 的平面绝对水平，在水平面内绕以 Z 分量为轴逆时针旋转 2° ，之后将姿态仪移除，令磁通门磁力仪连续记录 1 个小时。两次调节后将被测磁力仪记录的数据均与肇庆地磁基准台的同类型的磁通门磁力仪进行比较，以消除地磁日变化影响。表 1 为定向误差角导致地磁观测数据变化的实验测试数据。

表 1 定向误差角导致地磁观测数据变化的实验测试数据

Table 1 Testing data of orientation error angle α

磁场分量	初始磁场值 B_0/nT	变化后磁场值 B_c/nT	磁场差值 $\Delta B/\text{nT}$	比例系数 $k/(\text{nT}/^{\circ})$
H	-32.06	-29.12	-2.94	-0.73
Z	-58.31	-43.38	-14.93	-3.73
D	-1301.64	1338.00	-2639.64	659.66

注：磁场差值 $\Delta B=B_c-B_0$ ， $k=\Delta B/\Delta\alpha$ ， $\Delta\alpha=4^{\circ}$ 。

3.2 水平误差测试

水平误差测试过程与定向误差测试相同。首先，保证磁传感器所在平面 ZOD 与理想

坐标系 ZOX 的平面在同一平面内, 磁传感器在 ZOD 平面内绕以 H 分量为轴分别顺时针和逆时针旋转 2° ; 其次, 保证磁传感器所在平面 ZOH 与理想坐标系 ZOY 的平面在同一平面内, 磁传感器在 ZOH 平面内绕以 D 分量为轴分别顺时针和逆时针旋转 2° . 表 2 和表 3 分别列出了水平误差角 φ 和 θ 导致地磁观测数据变化的实验测试数据.

表 2 水平误差角 φ 导致地磁观测数据变化的实验测试数据

Table 2 Testing data of horizontal error angle φ

磁场分量	初始磁场值 B_0/nT	变化后磁场值 B_c/nT	磁场差值 $\Delta B/\text{nT}$	比例系数 $k/(\text{nT}/^\circ)$
H	47.54	-61.47	109.01	27.25
Z	-177.80	-4.57	-173.23	-43.30
D	884.09	-863.15	1747.24	436.81

注: 磁场差值 $\Delta B=B_c-B_0$, $k=\Delta B/\Delta\varphi$, $\Delta\varphi=4^\circ$.

表 3 水平误差角 θ 导致地磁观测数据变化的实验测试数据

Table 3 Testing data of horizontal error angle θ

磁场分量	初始磁场值 B_0/nT	变化后磁场值 B_c/nT	磁场差值 $\Delta B/\text{nT}$	比例系数 $k/(\text{nT}/^\circ)$
H	-951.70	882.03	-1833.73	-458.43
Z	1227.28	-1334.57	2561.85	640.46
D	89.84	0.73	89.11	22.27

注: 磁场差值 $\Delta B=B_c-B_0$, $k=\Delta B/\Delta\theta$, $\Delta\theta=4^\circ$.

肇庆地磁台磁南北 H 分量值约为 $37\,700\text{ nT}$, 垂直 Z 分量值约为 $25\,900\text{ nT}$. 若定向误差角为 1° , 则 D 分量的变化量为 $\Delta B_D=B_{H_0}\sin 1=37\,700\times\sin 1=658\text{ nT}$; 在水平面内, 若存在磁传感器绕以 H 分量为轴在 ZOD 平面内旋转的角度为 1° , 则 D 分量的变化量为 $\Delta B_D=B_{Z_0}\sin 1=25\,900\times\sin 1=452\text{ nT}$, 若存在磁传感器绕以 D 分量为轴在 ZOH 平面内旋转的角度为 1° , 则 H 分量的变化量为 $\Delta B_H=B_{Z_0}\sin 1=25\,900\times\sin 1=452\text{ nT}$, Z 分量的变化量为 $\Delta B_Z=B_{H_0}\sin 1=37\,700\times\sin 1=658\text{ nT}$, 结果表明测试值与理论值吻合.

4 讨论与结论

本文针对三轴磁通门探头因自身的安装方位角和水平角的误差所导致的地磁日变化观测曲线不一致问题, 通过理论计算分析和地磁台站实验测试明确了影响因子, 结果表明: 若 D 分量的日变化差值曲线与 H 分量日变化观测曲线相似, 则表明存在安装方位角的误差; 若 D 分量的日变化差值曲线与 Z 分量日变化观测曲线相似, 则存在磁传感器绕 H 轴在 ZOD 平面内旋转夹角; 若 H 和 Z 两分量的日变化差值曲线与对方分量日变化曲线相似, 则存在磁传感器绕 D 轴在 ZOH 平面内旋转夹角; 同时可以根据差值大小来确定误差角, 该结果可以为提高三轴磁传感器观测数据的可靠性和地磁日变化观测数据的一致性提供理论依据及校正方法.

在实际的地磁场观测中, 可以通过高精度姿态测试仪确定观测仪器在地磁坐标下的各分量角度, 但同时也会导致观测仪器在测试时间段的数据不可用, 即造成缺数现象; 另一种方法是通过一套标准仪器(仪器的正交度、格值均标定已知)与实测仪器的日变化观测的差值曲线来判断误差源, 从而进行相应的误差校正. 若要进一步提高实验结果的准确性, 需对观测仪器的零偏值进行校正, 如何有效在线确定观测仪器的零偏值, 消除观测仪器由

于不正交性引起的横向场则是本研究的下一步工作。

地磁台站测试实验过程中, 在仪器架设安装及数据处理方面得到了广东省地震局肇庆地磁基准台王建格和陆静辉先生的帮助, 作者在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 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[J]. 地震学报, **38**(1): 130–137.
- 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[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(1): 130–137 (in Chinese).
- 李久春. 2008. 三轴磁敏传感器误差分析与校正研究[J]. 测控技术, **27**(8): 11–13, 19.
- Li J C. 2008. Error intelligent modeling and adaptive calibration of tri-axial magnetometer[J]. *Measurement & Control Technology*, **27**(8): 11–13, 19 (in Chinese).
- 吴德会. 2008. 基于 SVR 的三轴磁通门传感器误差修正研究[J]. 传感器与微系统, **27**(6): 43–46.
- Wu D H. 2008. Research on correction of three axis fluxgate sensor based on SVR[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, **27**(6): 43–46 (in Chinese).
- 闫辉, 肖昌汉, 张朝阳. 2006. 三分量磁通门传感器水平修正方法[J]. 电子测量与仪器学报, **20**(6): 90–93.
- Yan H, Xiao C H, Zhang Z Y. 2006. Horizontal calibration to triaxial fluxgate magnetometer[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, **20**(6): 90–93 (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).
- 朱昀, 董大群. 1999. 三轴磁强计转向差的自适应校正[J]. 仪器仪表学报, **20**(4): 392–397.
- Zhu J, Dong D Q. 1999. Adaptive calibration of tri-axial magnetometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, **20**(4): 392–397 (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 fluxgate magnetometer exploring head to the sense of orientation[J]. *Seismological Research of Northeast China*, **20**(2): 70–75 (in Chinese).
- Jankowski J, Sucksdoff C. 1996. *Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice*[S]. Boulder: International Association of Geomagnetism and Aeronomy: 125–128.