

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311567

大动态范围磁通门磁力仪及其在定向误差校正中的应用*

陈卓琳¹, 胡星星¹, 滕云田¹, 刘高川²

(1. 中国地震局地球物理研究所 北京 100081; 2. 中国地震台网中心 北京 100045)

摘要: 仪器定向误差会影响地磁矢量观测数据的准确性, 现有的校正方法需要已知地磁场模量或参考标准仪器, 且难以应用在井下和海洋等无法手动安装调整仪器的情况。本文提出了大动态磁通门磁力仪和在此基础上的欧拉旋转变换的矢量校正方法。该方法可在无需参考标准仪器的情况下, 获得磁通门的定向角度误差并进行自校正测量。在地磁观测台站进行了实验, 结果表明, 当实验仪器定向误差分别设置为4个不同象限区间的大角度时, 校正后与台站比测仪器对应分量的相关系数仍达到0.99以上, B-A图中置信区间长度减小了86%以上, RMS误差降低至15%以下, 论证了该校正方法的有效性, 能够提高地磁台站的观测数据质量, 并为井下和海洋地磁观测的定向提供参考解决方案。

关键词: 大动态磁通门磁力仪; 定向误差; 自校正; Bland-Altman图

中图分类号: TH762 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Fluxgate magnetometer with large dynamic range and its application in orientation error correction

Chen Zhuolin¹, Hu Xingxing¹, Teng Yuntian¹, Liu Gaochuan²

(1. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China; 2. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract: The accuracy of geomagnetic vector observation data will be affected by Instrument orientation error, and the existing correction methods require known geomagnetic field modulus or referring to standard instruments, and are difficult to be applied in downhole and marine situations where manual installation and adjustment of instruments are impossible. A large dynamic fluxgate magnetometer and a vector correction method based on Euler rotation transformation are proposed by the paper. The directional error angle of fluxgate can be obtained and the measurement is self-calibrated by this method without referring to standard instrument. The results show that when the orientation error of experimental instrument is set to the large angle of four different quadrants, the correlation coefficient with the corresponding component of station is still above 0.99 after correction, and the length of confidence interval in the Bland-Altman diagram is reduced by more than 86% and the RMS error is reduced to less than 15%, which proves the effectiveness of this method. Correspondingly, the observation data quality of geomagnetic stations can be improved, and reference solutions for the orientation of downhole and marine geomagnetic observations can be also provided.

Keywords: large dynamic range fluxgate magnetometer; orientation error; self correction; Bland-Altman plot

0 引言

地磁观测是研究地球磁场、地球内部结构、地球内部物理现象及地球空间环境的重要手段^[1], 在地球科学、航空航天、资源探测、交通通信、国防建设、地震研究等领域都有着重要的应用^[2]。磁通门磁力仪是地磁观测台站主

要的分量观测仪器^[3], 需将其按照地磁坐标系进行放置^[4]。但在实际使用中, 磁通门安装时往往会带来姿态误差^[5]。对于地面台站观测, 磁通门探头上安装的高精度水平泡使安装过程中的水平度得到了保证。而定向是在磁静日日变缓慢时段, 使仪器工作在“绝对测量”态下, 调节探头方向使D分量指向磁东且其输出值在 ± 50 nT范围内^[6]。在实际中, 这一操作往往受到仪器D

收稿日期: 2023-06-18 Received Date: 2023-06-18

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1503803)、基本科研业务费(DQJB16B03)项目资助

分量零点开机时的稳定性、探头所处磁环境及操作者经验等众多因素的影响而带来定向误差,并成为安装姿态误差的主要来源。据长期进行地磁观测的台站研究人员的统计,在对台网运行的38套磁通门的观测数据分析时,有定向误差的仪器达到33套,占统计仪器总数的86%^[6]。定向误差的存在严重影响了观测数据质量,如在 D 要素记录中包含有 H 分量^[7]。在井下和海洋地磁观测中,悬挂式磁通门^[8]解决了仪器的水平姿态调节问题,而定向则成为了难题。如何消除以上误差,获得地磁坐标系下准确的观测数据,是实现有效地磁矢量测量的关键。文献[7]基于零场漂移 S_0 测量原理,得到仪器 D 分量的零场偏移,在重定向时对该数值进行校正,大大减小了由于仪器 D 分量零点偏差带来的定向误差,但需要依赖无磁旋转平台。针对磁通门梯度仪中两个磁通门传感器自身的性能参数和摆放方位不一致问题,文献[9-10]通过建立磁通门传感器的自校准和互校准模型,并采用神经网络算法和最小二乘算法对模型参数进行求解,有效降低了磁梯度仪转向差引起的测量误差,实现了磁通门传感器的自标量校准。文献[11-12]使用遗传算法通过多次迭代可以得到最适应目标函数的最优解,达到很高的参数估计精度。但在实际校正时,需要已知地磁场模量或标准参考磁力仪的测量值,给实际应用带来不便。

为了能够在无需参考仪器的情况下,获得观测仪器的定向误差角度并进行自矢量校准,本文设计了大动态范围的磁通门信号检测电路,工作时无需进行背景磁场补偿,可以对各分量进行绝对观测,能够计算出探头在地磁坐标系中的方位角。在此基础上提出一种基于欧拉旋转变换的自矢量校正方法,并在地磁观测台站用实验仪器进行了验证和实验结果分析。

定向误差是磁通门地磁观测中不可避免而又难以解决的问题,本文方法可以仅由仪器自身观测数据计算出准确的定向误差角度,进行矢量校正获得正确的地磁坐标下的观测数据。该方法有助于提高地磁台网的数据质量,尤其是对于无法通过人工手动方式安装调整仪器姿态的情况提供了一种定向误差的自校正方法。

1 关键技术与校正方法

1.1 磁通门传感器工作原理

磁通门传感器是基于法拉第电磁感应原理工作的。利用高导磁软磁铁芯在交变磁场的饱和激励下,磁芯材料的非线性周期性磁化而在感应线圈中产生与被测磁场成正比的调制信号。对于在一根软磁铁芯上缠绕激励线圈和感应线圈的磁通门传感器物理模型,设其横截面积为 S ,磁导率为 $\mu(t)$,周期频率为 f_1 ,感应线圈有效匝数为 N ,轴向环境磁场即待测磁场为 $H_0, \mu_{2m}, \mu_{4m}, \mu_{6m}$ 为

$\mu(t)$ 的各偶次谐波分量幅值则在感应线圈信号中,包含外磁场信息的输出项^[13]如式(1)所示:

$$e(H_0) = -2\pi \times 10^{-8} f_1 N S H_0 (2\mu_{2m} \sin 4\pi f_1 t + 4\mu_{4m} \sin 8\pi f_1 t + 6\mu_{6m} \sin 12\pi f_1 t + \dots) \quad (1)$$

随环境磁场强度而变的有用输出项 $e(H_0)$ 是激励信号的偶次谐波。为消除探头输出中变压器效应的无用感应电势,提高信噪比,通常采用结构对称的双铁心探头,并使它们的激励线圈反向串联,感应线圈同向串联,使变压器效应感应电势相抵消,而磁通门信号叠加。为使双铁心探头的结构参数尽可能的对称,实际中往往采用圆环形或跑道形的铁心结构,并采用二次谐波法和相敏检波电路对磁通门信号进行选择放大和解调。

1.2 大动态范围磁通门信号检测电路设计

在国家地磁台网中,磁通门磁力仪用以记录 Z, H, D 三分量的变化,即作为“相对观测”仪器^[14],其动态范围一般设计为 $\pm 2\,500\text{ nT}$,而背景主磁场通过给传感器的补偿线圈施加反向电流进行补偿抵消。在磁通门定向误差的矢量校正方法中,需要获知各分量的磁场值,设计了GM5型大动态范围的磁通门信号检测电路,其原理框图如图1所示。该系统取消了背景磁场补偿电路,增大反馈系数以减小信号电压灵敏度,扩展动态范围。

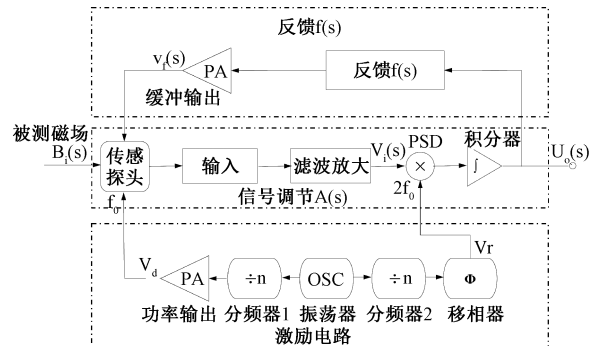


图1 磁通门信号检测电路原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of fluxgate signal detection circuit

在大量程下,降低系统噪声获得高分辨力成为关键。理论上,如式(1)所示,磁通门探头没有灵敏阈限制,其分辨力受磁通门电路对输入信号二次谐波分量的灵敏阈所限^[13]。为降低电路噪声,防止前置放大器的堵塞,提高系统分辨力,输入级采用双T网络带阻滤波电路,并设计无限增益多路反馈型二阶带通滤波放大电路,如图2所示,其输入输出传递函数如式(2)所示。

$$A_u(s) = \frac{-s \cdot \frac{1}{R_1 C_2}}{s^2 + s \cdot \frac{1}{R_3} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) + \frac{1}{R_3 C_1 C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \quad (2)$$

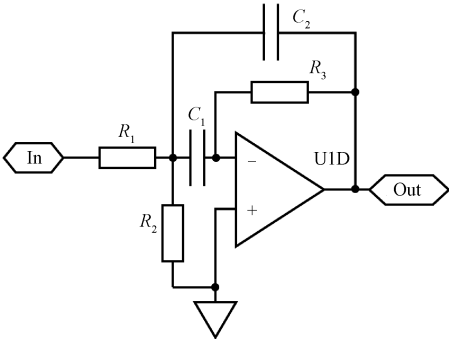


图 2 带通滤波器
Fig. 2 Band-pass filter

同时,由于多级滤波带来较大的附加相移,使相敏检波器效率降低,甚至极性反转导致工作不稳定。因而激励电路采用单片机微处理器作为信号产生电路,并对相敏检波器的参考输入信号进行精密移相。

参考地震行业标准 DB/T 30.1-008《地震观测仪器进网技术要求地磁观测仪第 1 部分:磁通门磁力仪》,用磁屏蔽筒对磁通门进行线性测试,测试范围为仪器测量范围 $\pm 65\,000\text{ nT}$ 的 95%,数据记录如表 1 所示,用最小二乘法拟合的线性曲线如图 3 所示。可以看出,在 $\pm 62\,000\text{ nT}$ 的测试范围内线性误差基本优于 3‰。同时经测试,仪器在零场下的有效值自噪声小于 0.02 nT ,优于地磁台网小于 0.1 nT 的要求。

表 1 线性测试数据
Table 1 Linear test data

标准磁场值 /nT	被测磁场值 /nT	线性度 /‰
61 884	-62 043	-0.147 684 319
52 716	-52 873	-0.052 068 305
43 548	-43 721	-0.329 529 923
34 380	-34 518	0.728 449 522
25 212	-25 365	0.572 685 953
16 044	-16 192	1.485 478 803
6 876	-7 036	2.360 018 264
0	-181.85	-
-6 876	6 672	3.080 398 33
-16 044	15 828	1.794 213 117
-25 212	25 002	0.729 489 591
-34 380	34 157	0.785 265 501
-43 548	43 363	-0.353 564 705
-52 716	52 520	-0.166 770 988
-61 884	61 695	-0.326 190 341

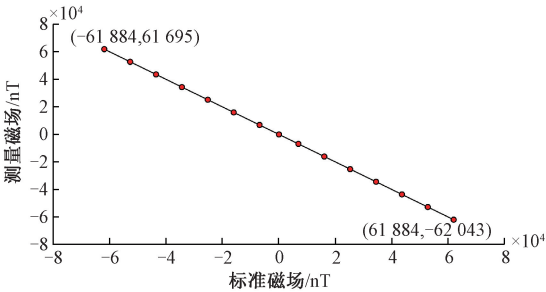


图 3 线性度测试
Fig. 3 Linearity test

2 定向误差校正方法

建立两个正交坐标系去描述定向误差角度:地磁坐标系($O\text{-}XYZ$)和仪器坐标系($O\text{-}X_1Y_1Z_1$),如图 4 所示,定向误差是由仪器以 Z_1 为轴在 X_1OY_1 平面内的偏差角 β 引起的。

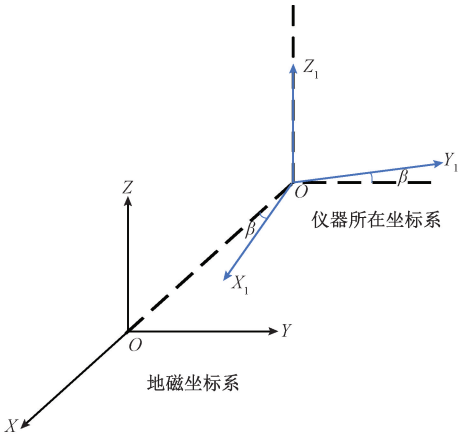


图 4 仪器所在坐标系与理想坐标系之间的定向误差
Fig. 4 Orientation error between the coordinate system where the instrument is located and the ideal coordinate system

基于欧拉定理^[15],仪器坐标系($O\text{-}X_1Y_1Z_1$)经过旋转后转换到地磁坐标系($O\text{-}XYZ$),旋转矩阵 C_z 为:

$$C_z = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

如图 5 所示,是二维坐标系中定向误差角 β 在不同象限的 4 种情况,坐标系 XOY 代表台站观测仪器的地磁水平坐标系,其中 Y 指向磁北方向, X 指向磁东方向;坐标系 X_1OY_1 表示引入定向误差后仪器所在水平坐标系,其中 Y_1 指向仪器 H 分量方向, X_1 指向仪器 D 分量方向, H_1 代表仪器 H 分量测量值, D_1 代表仪器 D 分量测量值。

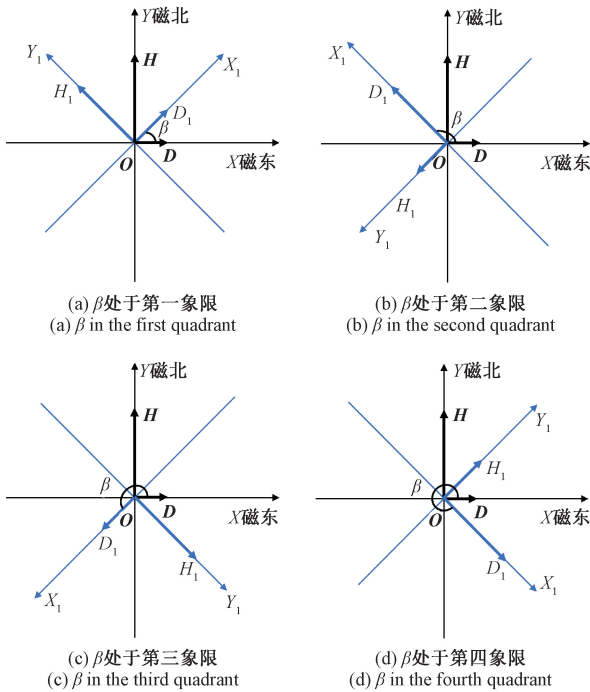


图5 引入定向误差的仪器坐标系

Fig.5 Instrument coordinate system introducing orientation error

如图5(a)和(b)所示,当定向误差角 β 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 或 $(\frac{3\pi}{2}, 2\pi)$ 之间时,此时实验仪器 H 分量测量值 $H_1 > 0$,可得式(4):

$$\beta = \arctan\left(\frac{D_1}{H_1}\right) \quad (4)$$

如图5(c)和(d)所示,当定向误差角 β 在 $(\frac{\pi}{2}, \pi)$ 或 $(\pi, \frac{3\pi}{2})$ 之间时,此时实验仪器 H 分量测量值 $H_1 < 0$,可得式(5):

$$\beta = \pi + \arctan\left(\frac{D_1}{H_1}\right) \quad (5)$$

结合式(3),得到校正公式式(6)、(7):

$$H = H_1 \cos \beta + D_1 \sin \beta \quad (6)$$

$$D = D_1 \cos \beta - H_1 \sin \beta \quad (7)$$

3 台站实验与数据处理

采用本文提出的大动态范围磁通门磁力仪作为实验仪器,该仪器由探头、采集器、主机3个部分组成。其探头结构由3个相互正交的磁通门传感器安装在工字形的无磁铝制骨架上,探头底座有可进行高低调节的底脚和两个相互垂直安置的水平泡,能够保证安装时探头的水

平度,如图6所示。该仪器采用秒采样,噪声有效值小于0.02 nT,动态范围能达到不小于 $\pm 65\,000$ nT,测量时不用进行背景磁场补偿,因而能够获得3个分量的准绝对观测值。为减小姿态角计算误差,实验前在屏蔽筒对各分量零点进行了重新标定。

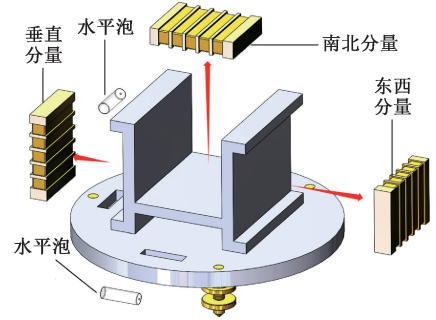


图6 GM5 磁通门磁力仪探头结构

Fig.6 Probe structure of GM5 fluxgate magnetometer

在白家疃国家观象台的半地下地磁观测室内进行实验,探头放置在大理石仪器墩上。该观测室具有较小的温度日变化,可以减小由于温度变化带来的误差。台站离地铁较近,受地铁影响较大,加上台站周边有车辆等人为活动的干扰,因此为减小环境噪声影响,把仪器秒采样数据转换为分数数据。实验时以 D 分量指向磁东建立基准坐标,然后调整探头姿态使 D 分量分别指向不同象限,每次调整姿态后记录一天完整的数据。将实验数据按照以下校正流程处理,如图7所示,计算得到4次偏转角分别为 84.59° 、 154.66° 、 -123.78° 、 -29.25° 。

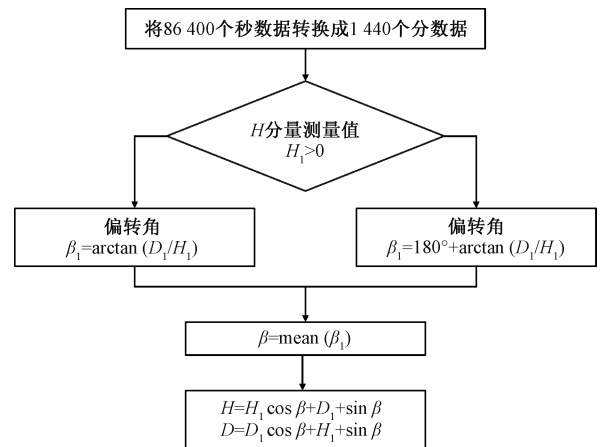


图7 校正流程

Fig.7 Calibration process

4 结果分析

采用台站放置在另一地下观测室的GM4磁通门磁

力仪作为比测仪器,对实验仪器校正后的结果与比测仪器测量数据进行一致性对比分析。该仪器动态范围 $\pm 2\,500\text{ nT}$,噪声小于 0.1 nT ,是台站入网使用仪器,且地下观测室能满足日温差不超过 0.2°C 的台网要求。因为台站磁通门磁力仪主要用以记录地磁场的变化,即进行相对观测,校正前后实验仪器与比测仪器对应分量经去平均值后其日变曲线如图 8、9 所示。下文所有图中(1)、(2)、(3)、(4) 分别代表偏转角为 84.59° 、 154.66° 、 -123.78° 、 -29.25° 。

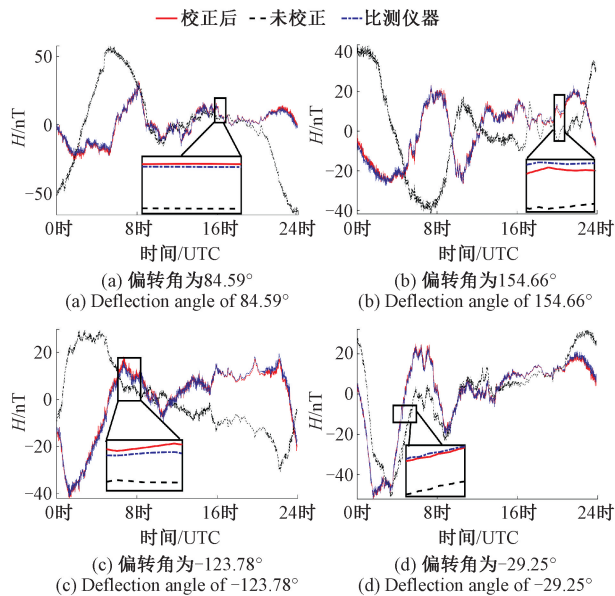


图 8 校正前后实验仪器与比测仪器 H 分量对比图
Fig. 8 Comparing the component H of the experimental and comparative instruments before and after calibration

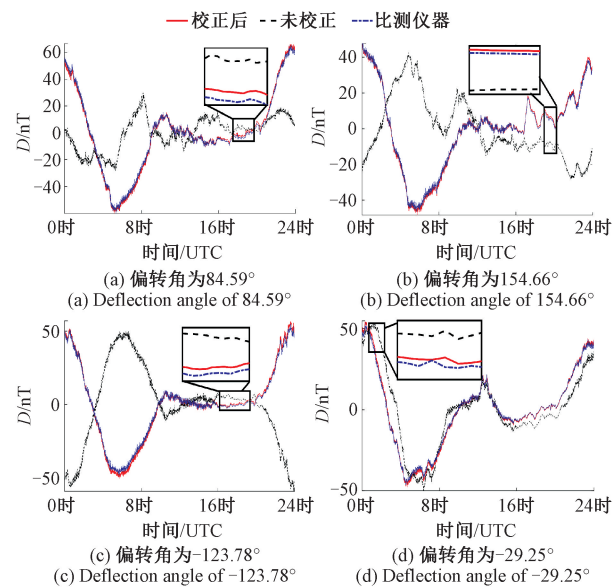


图 9 校正前后实验仪器与比测仪器 D 分量对比图
Fig. 9 Comparing the component D of the experimental and comparative instruments before and after calibration

从图 8、9 中可以看出,由于设置的定向误差角度较大,实验仪器数据与比测仪器数据差异较大,而经矢量校正之后的数据与比测仪器数据有很好的-致性。

为进一步分析校正效果,采用以下 3 种方法对校正前后实验仪器与比测仪器测量数据进行对比分析:皮尔逊相关系数、Bland-Altman (B-A) 图分析、均方根 (root mean square, RMS) 误差对比。

4.1 皮尔逊相关系数

皮尔逊法则是一种经典的相关系数计算方法,主要用于表征线性相关性能,皮尔逊相关系数的值介于 $-1\sim 1$ 之间,绝对值越接近于 1,表明两个变量的相关程度越高^[16],常用于比较地磁矢量观测数据的一致性^[17]。

两个变量之间的皮尔逊相关系数 $\rho_{X,Y}$,如式(8)所示,定义为两个变量之间的协方差 $\text{cov}(X,Y)$ 和标准差 $\sigma_X\sigma_Y$ 的商:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X\sigma_Y}$$

(8)

校正前后皮尔逊相关系数计算结果如表 2 所示。可以看出,经矢量校正后,各分量相关系数都大于 0.99。

表 2 校正前后实验仪器和比测仪器对应分量皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients for the corresponding components of the experimental and comparative instrument before and after calibration				
实验次数	定向误差角度/(°)	分量	相关系数	
			校正前	校正后
1	84.59	H	0.060	0.992
		D	0.232	0.999
2	154.66	H	-0.733	0.994
		D	-0.975	0.999
3	123.78	H	-0.433	0.992
		D	-0.718	0.998
4	-29.75	H	0.805	0.996
		D	0.913	0.999

4.2 B-A 图分析

B-A 图用以揭示具有相同尺度的两个成对变量之间的关系,在评价地磁矢量比测数据一致性时,是对相关系数法的有效补充与扩展,能够直观定量地细化描述差异情况及差异来源,是研究矢量地磁数据姿态校正效果与比测数据一致性的有效方法^[18]。B-A 图的横轴和纵轴分别代表两组数据的平均值和差值,差异的平均值 ± 1.96 倍的标准差为 95%的置信区间。落在置信区间内的数据点越多且没有明显的倾斜规律,置信区间长度越

小时,表明两组数据的一致性越高^[18]。校正前后实验仪器和比测仪器对应分量的 B-A 图如图 10~11 所示。

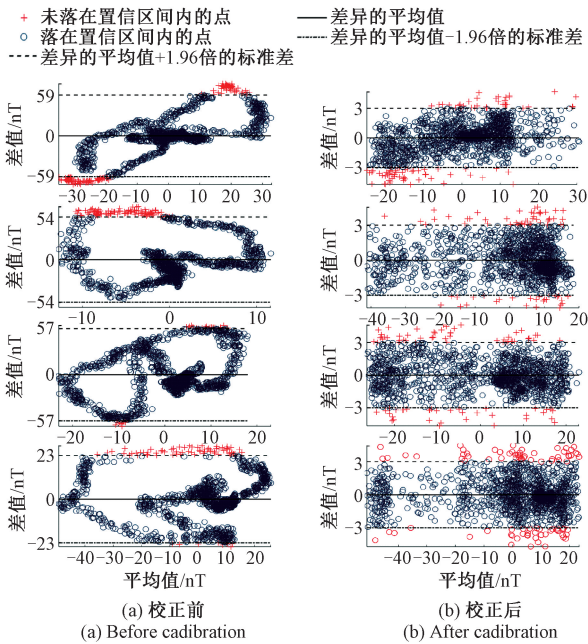


图 10 校正前后实验仪器与比测仪器 H 分量 B-A 对比图
Fig. 10 Comparing B-A of the experimental instrument with the comparative instrument component H before and after calibration

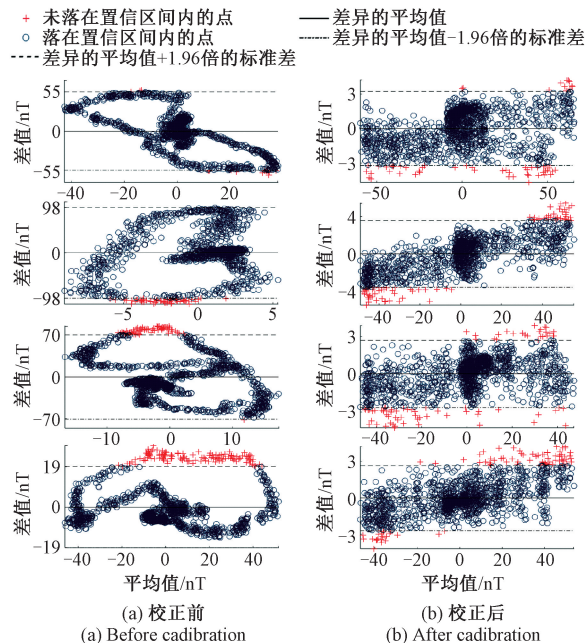


图 11 校正前后实验仪器和比测仪器 D 分量 B-A 对比图
Fig. 11 Comparing B-A of the experimental instrument with the comparative instrument component D before and after calibration

从校正前后实验仪器和比测仪器对应分量的 B-A 图中可以直观地看出,校正前,B-A 图中 H 分量和 D 分量的数据点存在明显的规律分布。校正后,这种分布规律消失,落在置信区间内的数据点分布更趋向于无序。且校正后置信区间长度明显减小,如图 12 所示,无论定向误差角度设置在哪一象限内,经过校正之后对应分量的置信区间长度都能够减小 86% 以上。表明经过校正之后,实验仪器和比测仪器对应分量的一致性得到了很大提高。

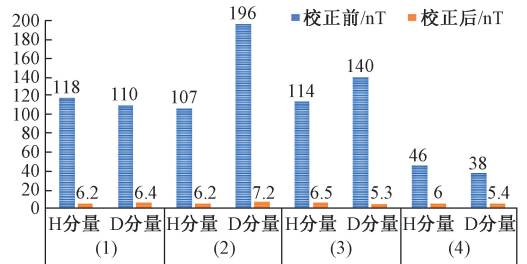


图 12 校正前后实验仪器和比测仪器对应分量 B-A 置信区间长度对比

Fig. 12 Comparing B-A confidence interval length for the corresponding components of the experimental and comparative instruments before and after calibration

4.3 RMS 误差对比

RMS 误差可以用来衡量观测值同真值之间的偏差。在实际测量中,观测次数总是有限的,真值只能用最可信(最佳)值来代替,本文将对观测实验中比测仪器的测量数值作为最佳值来代替。校正后实验仪器测量值和比测仪器参考值的 RMS 误差越小,表明校正的结果越好^[19]。RMS 误差计算公式如式(9)所示:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_i - G_i)^2}{N}} \quad (9)$$

其中, N 为测量数据个数 1 440, A_i 为实验仪器测量数据, G_i 为比测仪器参考数据。校正前后实验仪器和比测仪器对应分量的偏差对比如图 13 所示。

从图 13 可以看出,经过校正之后,两套仪器对应分量差值的时序变化不再呈规律分布,而是受环境噪声和温度影响的近似水平直线。其 RMS 误差对比如表 3 所示,经过校正之后对应分量的 RMS 误差都能够减小至 15% 以下,表明校正后实验仪器测量值和比测仪器参考值的一致性得到大幅提高。

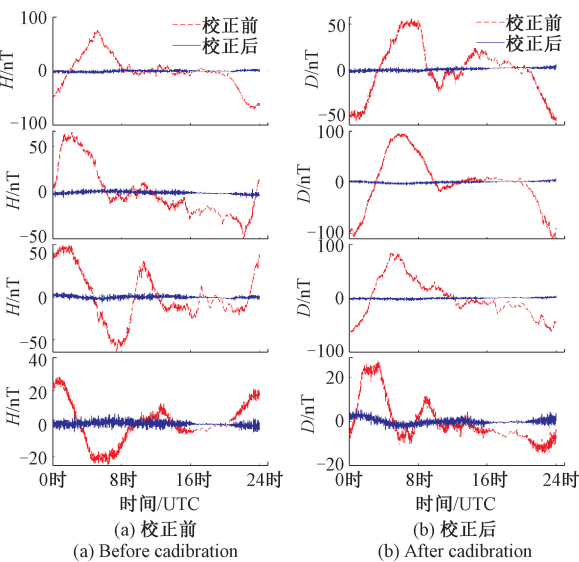


图 13 校正前后实验仪器与比测仪器对应分量偏差对比
Fig. 13 Comparing the deviation of corresponding components between experimental and comparative instrument before and after calibration

表 3 校正前后实验仪器和比测仪器对应分量 RMS 误差对比表
Table 3 Comparing RMS error of the corresponding components of experimental and comparative instrument before and after calibration

实验次数	定向误差角度/(°)	分量	校正前 RMS/nT	校正后 RMS/nT
1	84.59	H	30.174	1.618
		D	28.145	1.658
2	154.66	H	27.284	1.649
		D	50.152	1.855
3	123.78	H	29.326	1.724
		D	35.896	1.420
4	-29.75	H	11.839	1.616
		D	9.812	1.420

5 结 论

磁通门磁力仪是地磁观测台网主要的分量观测仪器。在地磁矢量观测中,仪器安装的姿态误差是影响观测数据准确性的一个关键因素。通过探头上的水平泡指示进行安装调节或采用悬挂式磁通门可以解决水平姿态问题,而定向则成为了难题,尤其是对于井下和海洋地磁观测等无法对探头进行手动安装调整的情况,需要对定

向误差进行数据校正。对于记录地磁变化量的相对观测磁通门,其动态范围只有 $\pm 2\,500\text{ nT}$,工作时要对背景磁场进行补偿,在对定向误差校正时需要标准仪器的测量值为参考,应用不便且难以适用井下和海洋地磁观测。

本文提出的大动态范围磁通门,动态范围为 $\pm 65\,000\text{ nT}$,可直接对地磁场各分量进行绝对测量而不需要进行背景磁场补偿,因而可计算出仪器相对于地磁坐标系的方位角或定向偏差。在此基础上提出了定向误差矢量校正方法,并对仪器探头朝向在不同象限的情况下进行了对比观测验证。结果表明,即使在大角度偏转情况下,实验仪器测量数据经该方法校正后与台站比测仪器仍具有很好的一致性;对应分量的相关系数达到 0.99 以上,B-A 图中置信区间长度减小了 86% 以上,均方根 RMS 误差降低至 15% 以下。这表明本文方法是有效的。

在前述比测实验结果分析中,校正后的 B-A 图仍呈一定的规律分布,RMS 偏差直线也有轻微起伏。这主要是由于受实验条件影响,实验仪器所处半地下观测室有较大的温度日变化,加上实验期间为调整仪器姿态实验人员频繁的进出加大了温度波动并带来了气流扰动,使实验仪器的基线值受到一定影响;还有实验仪器和比测仪器没有进行灵敏度一致性标定、比测仪器自身可能存在微小的定向误差等其他因素的影响。此外,校正后 RMS 偏差值的大小还受到环境噪声如地铁的影响。因此,实现高精度地磁观测时,仍要求仪器具有良好的观测环境。且为减小偏角计算误差对于仪器测量灵敏度的准确性、仪器各分量零点标定均提出较高要求。

本文提出的可工作于绝对观测方式的大动态范围磁通门磁力仪及在此基础上的定向误差矢量校正方法,可解决地磁矢量观测的定向问题。跟一些已有校正方法相比,该方法主要特点在于,在校正过程中不需要已知地磁场模量或其他参考磁力仪的测量值,可以仅由仪器的测量数据计算出偏角并进行在线数据校正。这对于实际观测尤其是野外流动观测具有重要的意义,并使井下和海洋等无法手动安装定向的场合提供了高精度地磁观测实现的可能。

参考文献

[1] KUDIN D V, SOLOVIEV A A, SIDOROV R V, et al. Advanced production of quasi-definitive magnetic observatory data of the INTERMAGNET standard [J].

- Geomagnetism and Aeronomy, 2021, 61(1): 46-59.
- [2] 林君, 刁庶, 张洋, 等. 地球物理矢量场磁测技术的研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62(23): 2606-2618.
- LIN J, DIAO SH, ZHANG Y, et al. Research progress of geophysical vector magnetic field survey technology[J]. Chin Sci Bull, 2017, 62(23): 2606-2618.
- [3] ZHANG S Q, FU C H, ZHANG X X, et al. Data tracking analysis of the geomagnetic fixed-station network in China[J]. Data Science Journal, 2018, 17(3): 13-20.
- [4] SHEN X Y, TENG Y T, HU X X. Design of a low-cost small-size fluxgate sensor[J]. Sensor, 2021, 21(19): 6598-6612.
- [5] 朱兴乐. 三分量磁传感器的水平姿态校正方法[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(8): 64-67, 95.
- ZHU X L. Method for horizontal attitude correction of thriaxial fluxgate magnetometer[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(8): 64-67, 95.
- [6] 胡秀娟, 杨冬梅, 王静, 等. 磁通门磁力仪 GM4 定向方法的研究[J]. 震灾防御技术, 2014, 9(S1): 609-614.
- HU X J, YANG D M, WANG J, et al. Research on the orientation method using fluxgate magnetometer[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9(S1): 609-614.
- [7] 胡秀娟, 李西京, 王静, 等. 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, 2016, 38(1): 130-137, 158.
- HU X J, LI X J, WANG J, et al. Influences of instrument orientation error on the accuracy of daily variation of geomagnetic record[J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(1): 130-137, 158.
- [8] WANG X M, TENG Y T, FAN X Y, et al. Design of a suspended high-stability fluxgate sensor[J]. Meas. Sci. Technol. 2021, 32(6): 065101-1-065101-8.
- [9] 高翔, 严胜刚, 李斌. 三轴磁通门磁梯度仪转向差校正方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1226-1232.
- GAO X, YAN SH G, LI B. Study on the steering differential calibration method for magnetic gradiometer base on tri-axis fluxgate[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1226-1232.
- [10] 龙礼, 黄家才. 基于递推最小二乘法的地磁测量误差校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6): 1440-1446.
- LONG L, HUANG J C. Recursive least square based online error calibration method in geomagnetic detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1440-1446.
- [11] 迟铨, 王丹, 吕俊伟, 等. 基于粒子群遗传算法的三轴磁通门误差校正[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(3): 98-102.
- CHI CH, WANG D, LYU J W, et al. Three axial fluxgate magnetometer error calibration based on PSO-GA algorithm[J]. Journal of Detection & Control, 2021, 43(3): 98-102.
- [12] HE Z B, HU X X, TENG Y T, et al. Characterization of the effects of temperature and instrument drift in long-term comparative geomagnetic vector observations[J]. Atmosphere, 2022, 13(3): 449-464.
- [13] 张学孚, 陆怡良. 磁通门技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 6-8.
- ZHANG X F, LU Y L. Fluxgate technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 6-8.
- [14] 郝雪景, 高龙飞, 苏燕红, 等. 大同地震监测中心站 GM4~XL 磁通门磁力仪观测数据漂移分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2022, 43(2): 71-78.
- HAO X J, GAO L F, SU Y H, et al. The analysis of the causes of GM4-XL observation data drift at datong seismic station[J]. Seismological and geomagnetic observation and research, 2022, 43(2): 71-78.
- [15] 孙仕礼, 刘帅, 金铭. 基于欧拉旋转和极化投影的共形阵列建模方法[J]. 信号处理, 2021, 37(8): 1430-1440.
- SUN SH L, LIU SH, JIN M. Conformal array modeling method based on Euler rotation and polarization projection[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(8): 1430-1440.
- [16] 刘若男, 辛义忠, 李岩. 基于皮尔逊相关系数的动态签名验证方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 279-287.
- LIU R N, XIN Y ZH, LI Y. Dynamic signature verification method based on Pearson correlation coefficient[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 279-287.
- [17] 刘成, 滕云田, 王晓美, 等. 基于遗传算法的磁通门磁力仪观测数据一致性校正[J]. 地球物理学进展, 2022, 43(7): 279-287.

2019,34(2):751-756.

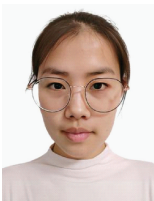
LIU CH, TENG Y T, WANG X M, et al. Consistency correction for the observed data of fluxgate magnetometer based on genetic algorithms[J]. Progress in Geophysics, 2019,34(2):751-756.

[18] HE Z B, HU X X, TENG Y T, et al. Data agreement analysis and correction of comparative geomagnetic vector observations [J]. Earth, Planets and Space, 2022, 74(1):29-47.

[19] 缪林良,米洒洒,王玮琳,等. 航磁矢量测量的误差分析和补偿算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021, 35(12):15-23.

MIAO L L, MI S S, WANG W L, et al. Error analysis and compensation algorithm research of aeromagnetic vector measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,35(12):15-23.

作者简介



陈卓琳,2020 年于防灾科技学院获得学士学位,2023 年于中国地震局地球物理研究所获得硕士学位,主要研究方向为地磁观测技术、磁通门磁力仪研制等。
E-mail:chenzl1692948775@163.com

Chen Zhuolin, received her B. Sc. degree from the Institute of Disaster Prevention Science and Technology in 2020, M. Sc. degree from Institute of Geophysics, China Earthquake Administration in 2023. Her main research interests include geomagnetic observation technology and fluxgate magnetometer development, etc.



胡星星(通信作者),分别在 2007 年和 2016 年于中国地震局地球物理研究所获得硕士学位和博士学位,现为中国地震局地球物理研究所研究员,主要研究方向为地磁观测传感技术、高精度大动态范围地震数据采集技术、MEMS 地震传感技术、结构健康监测等。
E-mail:huxx@cea-igp.ac.cn

Hu Xingxing (Corresponding author), received his M. Sc. and Ph. D. degree both from Institute of Geophysics, China Earthquake Administration in 2007 and 2016, respectively. He is now a researcher in Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. His research interests include geomagnetic observation and sensing technology, high-precision and large-dynamic range seismic data acquisition technology, MEMS seismic sensing technology, structural health monitoring, etc.