

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311071

基于铯光泵磁力仪的地震地磁矢量测量系统*

居海华^{1,2}, 张乐³, 夏忠¹, 张岑¹, 应允翔⁴

(1. 江苏省地震局 南京 210014; 2. 中国地质大学自动化学院 武汉 430074;
3. 北京海迈格科技有限公司 北京 100141; 4. 安徽省地震局 合肥 230071)

摘要:为解决地震地磁矢量观测中质子矢量磁力仪噪声大,长期观测中存在明显漂移,磁通门磁力仪温度效应明显,保温磁房投入大等问题,研制了基于铯光泵磁力仪的地震地磁矢量测量系统,本文详细介绍了其测量原理及仪器结构,设计了混合分量线圈装置,并开展了稳定性分析。研制的样机在蒙城地震台开展了观测实验。结果表明,实验期内记录良好,采样率达到1 Hz,1月份总强度、水平分量和磁偏角月噪声分别为0.01 nT、0.02 nT和0.003',优于地震地磁观测基本网质子矢量磁力仪最好噪声水平,也优于同场地两台磁通门磁力仪的噪声水平和基准网的平均噪声水平。其实验期内水平分量和磁偏角最大漂移分别为1.3 nT和0.16',小于座钟式质子矢量磁力仪基线漂移,具有良好的稳定性。

关键词: 铯光泵磁力仪;分量线圈装置;矢量磁力仪;噪声水平;基线偏离值

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

Seismic geomagnetic vector measurement system based on optically pumped cesium magnetometer

Ju Haihua^{1,2}, Zhang Le³, Xia Zhong¹, Zhang Cen¹, Ying Yunxiang⁴

(1. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China; 2. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Beijing Himag Technology Co., Ltd., Beijing 100141, China; 4. Anhui Earthquake Agency, Hefei 230071, China)

Abstract: To solve the problems of high noise and obvious drift in long-term observation of proton vector magnetometer, obvious temperature effect of fluxgate magnetic field meter and large investment in thermal insulation magnetic room, a seismic geomagnetic vector measurement system based on the optically pumped cesium magnetometer is developed. In this article, the measuring principle and instrument structure are introduced in detail, the mixed-component coil device is designed, and the stability is analyzed. The prototype is tested at the Mengcheng seismic station. The results show that, during the experimental period, the instrument records well, the sampling rate of the experimental instrument reaches 1 Hz, the monthly noise of the total intensity, the horizontal component and the magnetic declination in January are 0.01 nT, 0.02 nT and 0.003', respectively, which are obviously superior to the best noise level of proton vector magnetometers of seismic geomagnetic observation basic network. They are also better than the noise level of two fluxgate magnetic field meters at the same venue and the average noise level of the seismic geomagnetic observation reference network. The maximum drift of the horizontal component and the magnetic declination are 1.3 nT and 0.16', respectively, which is less than the baseline drift of the pedestal-clock proton vector magnetometer, so good stability can be obtained.

Keywords: optically pumped cesium magnetometer; component coil device; vector magnetometer; noise level; baseline deviation

0 引言

地磁场由基本场和变化磁场组成。基本场包含主磁

场和岩石圈磁场。主磁场来自地心偶极子场和非偶极子场,岩石圈磁场来自地壳和上地幔,变化磁场产生于空间电流和地球内部感应电流体系^[1-2]。地磁场是矢量场,研究认为不同来源的变化会影响这个矢量场的不同分量,

收稿日期:2023-02-20 Received Date: 2023-02-20

* 基金项目:中国地震局地震科技星火计划项目(XH21011)、徐州市重点研发计划(社会发展)(KC20185)项目资助

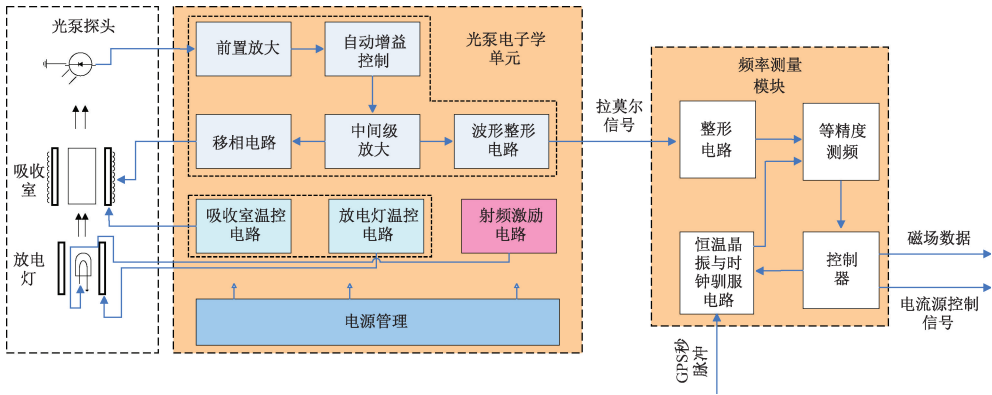


图 3 铯光泵磁力仪组成

Fig. 3 Composition of optically pumped cesium magnetometer

1.2 水平分量 H 的测量原理

水平分量 H 采用补偿的方法获得^[1-2]。补偿线圈产生与垂直分量 Z 方向相反、大小相等的人工补偿磁场,总强度与人工补偿磁场的合成磁场为水平分量 H 。测量前,先调整补偿线圈的轴线方向至竖直向下,通过线圈常数和区域垂直分量概值,计算得到补偿电流的大至范围。如图 4 所示,竖直向上的人工补偿磁场 Z_a 大于垂直分量 Z 引入的过补偿或竖直向上的人工补偿磁场 Z_b 小于垂直分量引入的欠补偿,都会造成合成磁场 H' 和 H'' 大于水平分量 H 。在磁场平静期内,补偿电流源以小步进扫描设置区间,将合成磁场最小测量值时的电流作为补偿电流,然后采用标量磁力仪测得水平分量 H 的大小。

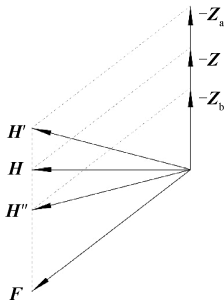


图 4 补偿法水平分量测量

Fig. 4 Horizontal component measurement based on compensation method

1.3 磁偏角 D 测量原理

水平分量 H 与地理北 N 的夹角为磁偏角 D 。初始安装时偏置线圈轴线指向磁东西方向,初始水平分量 H_0 的方向为 N_m , D_0 为 N_m 与真北方向 N 的夹角。测量时,偏置电流源设定一个电流 I_c ,并快速变换电流方向,在偏置线圈中交替产生大小等于 C 方向相反的偏置磁场 C_+ 、 C_- ,偏置磁场 C_+ 、 C_- 与地磁水平分量 H 的合成磁场为

R_+ 、 R_- 、 θ 为 N_m 与 H 的夹角, D 、 H 、 C 、 C_+ 、 C_- 、 R_+ 、 R_- 的大小分别为 D 、 H 、 C 、 C_+ 、 C_- 、 R_+ 、 R_- ,如图 5 所示,此时:

$$R_+^2 = H^2 + C_+^2 + 2HC_+ \sin \theta \quad (2)$$

$$R_-^2 = H^2 + C_-^2 - 2HC_- \sin \theta \quad (3)$$

由于 $C_+ = C_- = C$,则:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{R_+^2 - R_-^2}{4HC}\right) \quad (4)$$

其中:

$$C = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{R_+^2 + R_-^2 - 2H^2} \quad (5)$$

则有:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{R_+^2 - R_-^2}{2\sqrt{2}H\sqrt{R_+^2 + R_-^2 - 2H^2}}\right) \quad (6)$$

$$D = D_0 + \theta \quad (7)$$

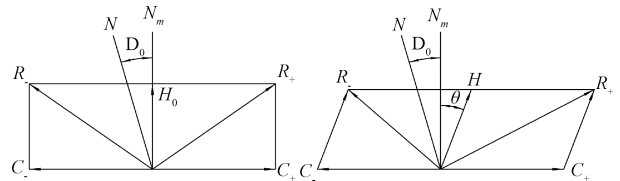


图 5 偏置法磁偏角测量

Fig. 5 Magnetic declination measurement based on bias method

这种测量磁偏角的方法无需考虑偏置电流的精度和长期稳定性,只需要同一个测量周期内正反向偏置电流大小相等^[15]。公式中的 D_0 需要通过地磁绝对观测方法获得。

2 铯光泵矢量磁力仪

2.1 仪器整体结构和测控系统

铯光泵矢量磁力仪分为 5 个部分,分别为铯光泵磁力仪、混合分量线圈装置、可控电流源、嵌入式工控机

和全球定位系统(global positioning system, GPS)授时系统。频率计部分采用了现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)模块,恒温晶振作为计数时钟。FPGA模块在进行拉莫尔信号频率采集的同时,控制了所有的测量时序,给每个磁场测量数据打上了时段标记。GPS授时系统用于电流源和FPGA模块之间的同步,也用于恒温晶振的驯服。双通道低噪声可控电流源用于垂直磁场的补偿和产生快速切换的偏置磁场。工控机通过网口实时读取FPGA模块输出的磁场数据,通过数据中的标记区分一个周期中的各个时段,计算出地磁三分量结果。同时工控机提供了存储和通讯服务。仪器结构框图如图6所示。

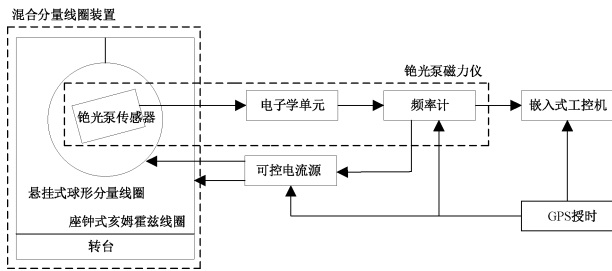
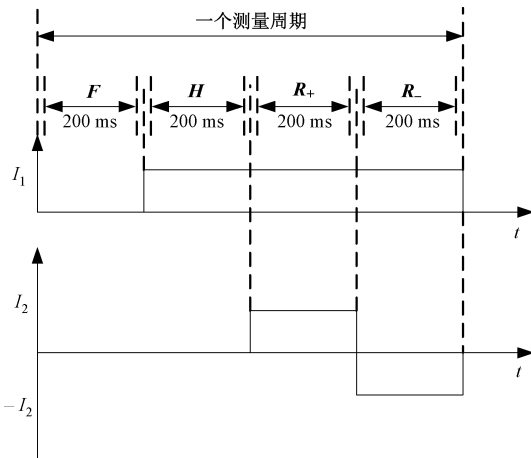


图6 仪器结构框图

Fig. 6 Structure block diagram of the instrument

电流源每个秒周期内提供4种电流模式,以GPS秒脉冲同步,每种电流模式持续250ms,考虑到电子开关的速度和线圈电流克服互感所需要的时间,每个时段内有效测量时间为200ms,FPGA测量对应时段内的磁场大小,分别获得 F 、 H 、 R_+ 、 R_- 的大小,计算出磁偏角 D 的大小,以获得秒采样的地磁矢量观测结果。电流源测量时序如图7所示。



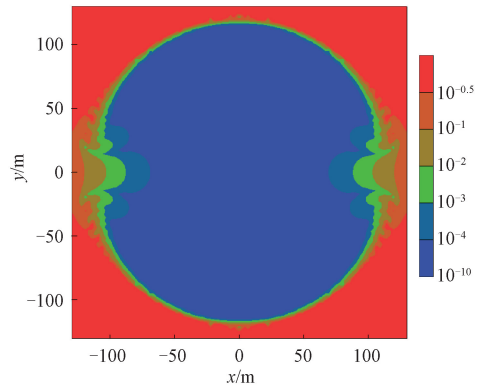
I_1 :补偿电流, I_2 :偏置电流

图7 测量时序

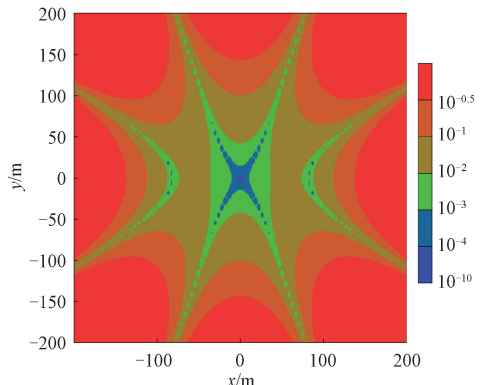
Fig. 7 Measurement timing

2.2 分量线圈设计

均匀磁场一般由亥姆霍兹线圈、共轴三线圈、布朗贝克线圈、球形线圈等产生,在获得相同磁场均匀区时,密绕的球形线圈具有较小的体积^[16],易于悬挂,亥姆霍兹线圈结构简单,易于加工和组装。设计的分量线圈采用了座钟式亥姆霍兹线圈作为偏置线圈,采用了密绕的球形线圈作为补偿线圈,球形线圈悬挂于亥姆霍兹线圈的中心。球形线圈的直径为240mm,间距为4mm,亥姆霍兹线圈直径为400mm,间距200mm。计算出每一个载流线圈对磁场均匀度的影响,并进行叠加,分别获得两组线圈产生的磁场均匀度的分布结果^[2],均呈沿线圈轴线空间对称分布,图8所示为两组线圈纵截面磁场均匀度等值线图, x 轴为线圈轴线, y 轴为纵截面上垂直于线圈轴的轴线。在线圈人工磁场均匀区的均匀度要求优于 10^{-3} 时,设计的球形线圈均匀区远大于亥姆霍兹线圈的均匀区,保证了悬挂的球形线圈在姿态调整后,均匀区仍可以完全覆盖亥姆霍兹线圈的均匀区。两组线圈的均匀区都能覆盖铯光泵磁探头内吸收室直径25mm、长25mm的区域,满足矢量磁力仪探头的工作要求。



(a) 球形线圈产生的磁场均匀度等值线图
(a) Contour map of uniformity of magnetic field generated by spherical coil



(b) 亥姆霍兹线圈产生的磁场均匀度等值线图
(b) Contour map of uniformity of magnetic field generated by Helmholtz coil

图8 人工磁场均匀度等值线图

Fig. 8 Contour map of artificial magnetic field uniformity

亥姆霍兹线圈采用无磁铝合金材料作为骨架,加工较为容易。球形线圈骨架为避免对磁场的屏蔽和涡流效应,一般采用非金属材料。由于采用传统工程塑料加工的球形线圈骨架在长期观测中易产生变形,给补偿线圈产生人工磁场的噪声和姿态的长期稳定都带来很大影响,为提高线圈骨架的尺寸稳定性,定制了玻璃纤维增强复合材料,采用钢模压铸成半球形毛坯,时效处理后加工组装成球形线圈,使得非金属材料的球形线圈具有较好的稳定性。

2.3 混合线圈装置结构

分量线圈装置主要结构为1组座钟式亥姆霍兹线圈、1组悬挂式球形线圈和1个一维无磁转台。如图9所示,外侧为亥姆霍兹结构的偏置线圈,轴线近东西向,用于产生偏置磁场,安装于具有刻度盘、底脚螺丝、锁紧装置和水准器的无磁转台上,采用安装螺钉调节线圈轴向倾角,结合转台和可调节的水准器调节线圈姿态。居内的线圈为球形补偿线圈,线圈轴线竖直向下,用于产生补偿磁场。球形线圈安装于采用两层碳纤维弹片的悬挂装置下,上下两层的碳纤维弹片相互垂直,上层碳纤维弹片安装于东西方向,下层碳纤维弹片安装于南北方向。碳纤维弹片可拆卸,方便运输和现场安装。球形线圈底部安装有配重和阻尼装置,配重用来自调整补偿线圈的重心分布,结合转台调节补偿线圈的姿态。

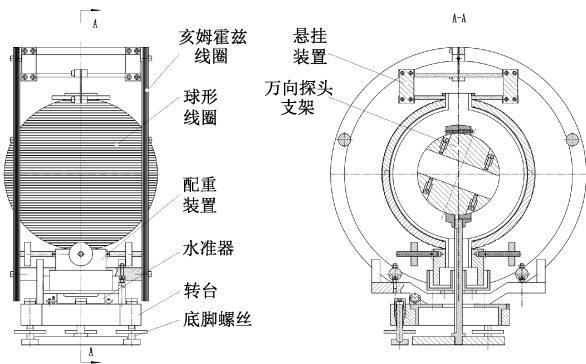


图9 混合线圈装置结构

Fig. 9 Structure of hybrid coil assembly

如图9所示,本文还设计了一个万向的探头支架,根据不同纬度来调整铯光泵磁探头的方向,使得总强度和所有合成磁场避开铯光泵磁探头的测量死区。支架杆上留有走探头线的线槽,探头线引出避开了悬挂线圈,避免了传感器与线圈一体时,探头引出线,特别是同轴电缆线对悬挂线圈姿态的影响。探头支架与线圈装置分离,避免线圈姿态调节时,线圈转动引起探头方向的变化而进入测量死区或引入传感器转向误差。

2.4 混合线圈装置稳定性分析

在长期观测中传统座钟式线圈装置会因为观测墩微量沉降、机械结构微小变形等原因造成线圈姿态的微小变化^[17],改变了人工磁场的方向,从而对分量观测带来明显影响。改进的整体悬挂式线圈装置虽然对微小倾斜不敏感^[12],但悬挂的线圈易受气流扰动、机械振动等原因造成整体线圈的微小转动,给磁偏角测量带来较大影响,从而影响了仪器长期观测的稳定性。

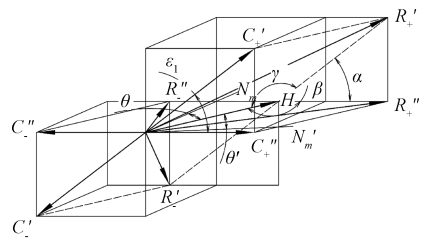
混合线圈装置采用了座钟式偏置线圈和悬挂式补偿线圈。悬挂的补偿线圈姿态主要取决于线圈重心位置,装置的微小倾斜不会改变线圈的姿态。考虑到悬挂引入的微小转动,在线圈轴线竖直向下时,仅补偿线圈的微小转动不影响分量的测量结果。本文着重分析微小倾斜引起偏置线圈姿态变化对观测结果的影响。

偏置线圈姿态发生微小倾斜时,悬挂的补偿线圈姿态不变,不会影响补偿磁场的大小和方向,因此不会对水平分量观测结果产生影响。

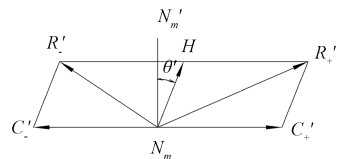
偏置线圈沿 N_m 倾斜 ε_1 ,沿垂直 N_m 倾斜 ε_2 时,有:

1) 沿垂直 N_m 倾斜 ε_2 ,测量过程中不影响 C_+ 、 C_- 的大小和方向,因此不会对相对磁偏角 θ 的观测结果产生影响。

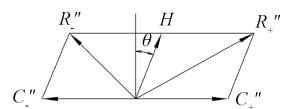
2) 沿 N_m 倾斜 ε_1 时,如图10所示,倾斜后的人工偏置磁场为 C'_+ 、 C'_- ,与 H 的合成磁场为 R'_+ 、 R'_- ,其中 C'_+ 、 C'_- 在水平面上的投影为 C''_+ 、 C''_- , R'_+ 、 R'_- 在水平面上的投影为 R''_+ 、 R''_- ,倾斜后的初始磁场 H_0' 的方向 N'_m 在 C'_+ 、 C'_- 和 H 构建的平面内,且垂直 C'_+ 、 C'_- 、 H 与 N'_m 夹角为 θ' 。



(a) 混合线圈装置倾斜后磁场矢量的空间位置
(a) Spatial location of the vector magnetic field after tilting the hybrid coil assembly



(b) 人工磁场与水平分量的矢量合成
(b) Vector synthesis of artificial magnetic field and horizontal component



(c) 矢量合成在水平面上的投影
(c) Projection of vector synthesis on a horizontal plane

图10 混合线圈装置姿态倾斜影响

Fig. 10 Inclined posture effect of hybrid coil assembly

根据三余弦定理则有:

$$\cos \gamma = \cos \alpha \cdot \cos \beta \quad (8)$$

且有:

$$\alpha = \varepsilon_1, \gamma = \theta' + 90^\circ, \beta = \theta + 90^\circ$$

得到:

$$\sin \theta' = \cos \varepsilon_1 \cdot \sin \theta \quad (9)$$

θ 和 θ' 很小时,有:

$$\sin \theta' \approx \theta'$$

$$\sin \theta \approx \theta$$

所以:

$$\theta' = \theta \cdot \cos \varepsilon_1 \quad (10)$$

则,由偏置线圈倾斜引入的磁偏角测量误差 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \theta - \theta' \quad (11)$$

$$\Delta\theta = \theta \cdot (1 - \cos \varepsilon_1) \quad (12)$$

仪器正常工作时, ε_1 远小于 $60'$, θ 通常不大于 $20'$,

则有:

$$\Delta\theta < 0.003' \quad (13)$$

可见,设计的混合线圈装置微小倾斜对观测结果的影响极小,在长期观测中具有较好的稳定性。

2.5 电流源噪声影响分析

测量系统的电流源采用双通道结构,由补偿电流源模块和偏置电流源模块组成,分别给补偿线圈和偏置线圈提供程控电流以产生周期性的可控人工磁场。由于设计的线圈产生的人工磁场与电流成正比,电流噪声会直接影响人工磁场的噪声,从而影响到水平分量和磁偏角的噪声。

采用补偿法测量水平分量时,由于补偿电流产生的磁场方向与水平分量相垂直,水平分量的噪声受电流源噪声的影响较小。在偏置方法中,电流源的噪声会给一个周期内正、反向合成磁场带来影响,因此,增加了磁偏角的噪声。设计的补偿电流源模块采用了 P 沟道 MOSFET,偏置电流源模块采用了低噪声 JFET,偏置电压采用了锂电池提供,以降低电流噪声,偏置电流源的切换采用了低延迟的电子转换开关,减少了正反向切换时间。根据拟开展实验地磁场垂直分量的大小和线圈常数,估算补偿电流约为 172 mA,偏置电流设置为 100 mA,通过仿真得到,10 Hz 以内补偿电流 RMS 噪声小于 220 nA,偏置电流 RMS 噪声小于 150 nA,计算得到引入水平分量噪声值小于 0.001 nT,引入的磁偏角噪声值小于 $0.0018'$ 。

3 观测实验安装和调试

3.1 实验场地

研制的仪器选取蒙城地震台地磁观测区开展观测实验。蒙城地震台为地磁国家二类台,在网运行有两套磁通门磁力仪和磁通门经纬仪,产出有连续观测的地磁三分量相对数据和每周两次的地磁人工绝对观测结果为观

测实验提供了对比观测数据。本文在蒙城地震台地磁观测区内建设了无磁观测房和观测墩,搭建了一套测试平台,如图 11 所示。考虑到仪器工作时会对外产生磁场,为避免影响在网运行仪器,新建的磁房距离在网运行仪器都大于 20 m。



图 11 研制仪器观测实验场景

Fig. 11 Developed instrument observation experiment scene

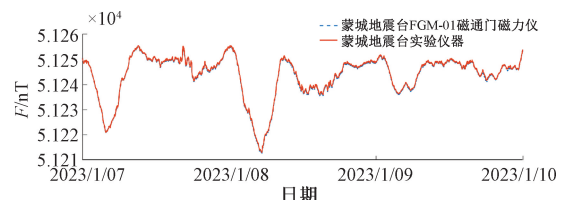
3.2 仪器安装调试

混合线圈装置和铯光泵电子学单元安装在磁房,其中线圈装置置于观测墩墩面上,并分别对两组线圈姿态进行了调节。主机安装在机房,采用 UPS 电源供电,保证实验数据的连续。通过蒙城台磁偏角的绝对观测结果,得到实验仪器安装初始位置与真北的夹角 D_0 为 -6.055° 。

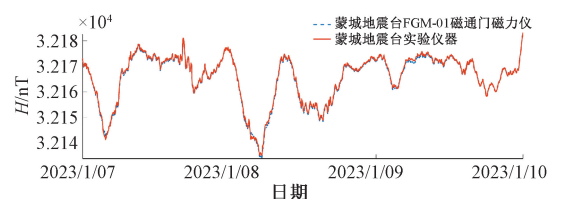
4 实验结果

4.1 数据处理和噪声计算

针对实验场地的地电观测干扰、高压直流干扰、人为干扰等典型干扰,对实验仪器观测数据进行了预处理,剔除典型干扰数据。图 12 所示为蒙城地震台实验仪器 2023 年 1 月 7 日~9 日连续 72 h 的观测曲线和同时段 FGM-01 磁通门磁力仪观测数据做基线改正后计算得到的总强度 F 、水平分量 H 和磁偏角 D 的数据曲线。



(a) F 分量观测曲线
(a) F -component observation curve



(b) H 分量观测曲线
(b) H -component observation curve

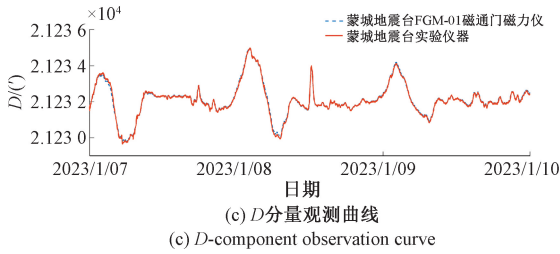


图 12 蒙城地震台实验仪器与 FGM-01 磁通门磁力仪对比观测曲线

Fig. 12 Observation curves between experimental instrument and FGM-01 fluxgate magnetometer at Mengcheng seismic station

为了考察实验仪器的噪声水平,采用国家地磁台网中心《电磁学科观测资料质量评比办法》中的噪声计算方法,计算了 2023 年 1 月份实验仪器总强度、水平分量、磁偏角噪声值,如表 1 所示。表 1 中同时给出了国家地磁台网中心公布的同时期蒙城地震台两台磁通门磁力仪噪声值和全国地磁基准网的平均噪声值。

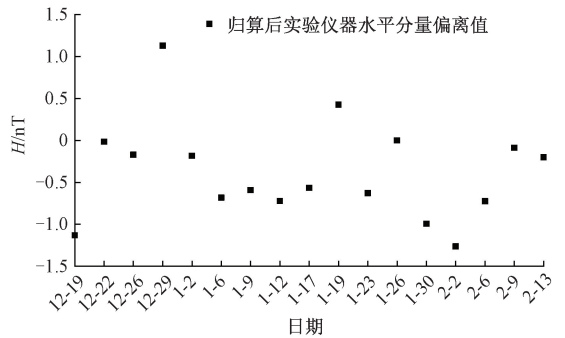
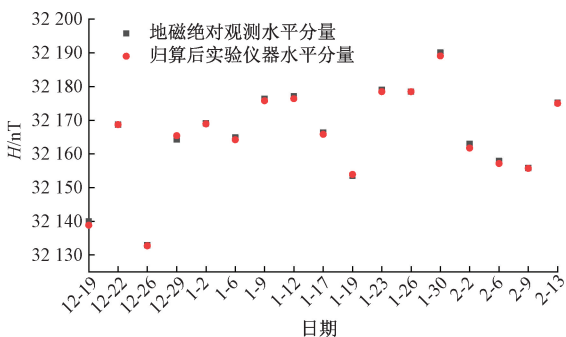
表 1 观测仪器 2023 年 1 月份噪声值

Table 1 Noise value of observation instrument in January 2023

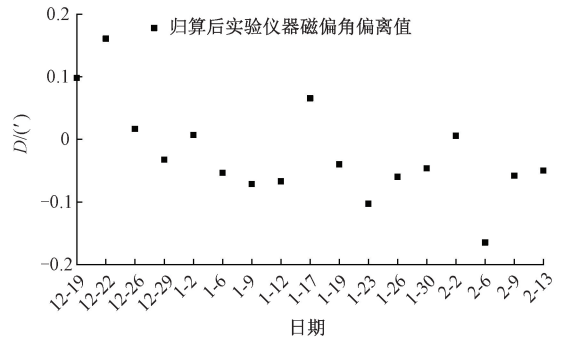
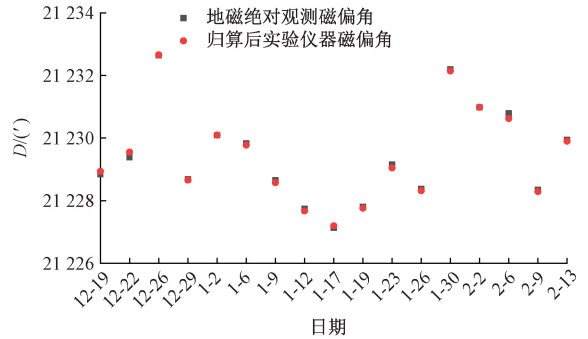
仪器	总强度 噪声/nT	水平分量 噪声/nT	磁偏角 噪声/(')
实验仪器	0.01	0.02	0.003
蒙城地震台 FGM-01 磁通门磁力仪	0.04	0.05	0.004
蒙城地震台 GM4 磁通门磁力仪	0.08	0.08	0.006
地磁基准网磁通门磁力仪	0.05	0.06	0.004

4.2 混合线圈装置稳定性考察

为了考察实验仪器观测装置的稳定性,对实验观测期 2022 年 12 月 16 日~2023 年 2 月 15 日 2 个月的观测数据进行了分析。把实验数据归算至台站地磁绝对观测标准墩^[18],以每周 2 次的人工地磁绝对观测结果为基线计算对应时间实验仪器的偏离值,如图 13 所示。总强度为绝对观测,不会因观测装置影响产生漂移^[19]。



(a) Value and deviation value of horizontal component



(b) Value and deviation value of magnetic declination

图 13 实验仪器水平分量和磁偏角及偏离值

Fig. 13 Horizontal component and magnetic declination value and deviation value of the experimental instrument

5 结 论

本文首先阐述了矢量磁力仪的工作原理,介绍仪器构成和测量时序,并给出了仪器结构,分析了仪器结构的稳定性和电流源噪声对观测结果的影响,最后在地磁台站开展实验观测,验证研制矢量测量仪的性能。实验结果分析如下:

1) 实验仪器记录良好,观测日变形态正常,秒周期内可以获得低噪声的三分量观测结果,实验期内 2023 年 1 月份总强度、水平分量和磁偏角的噪声分别为 0.01 nT、0.02 nT 和 0.003',明显优于地震地磁基本站质子矢量磁

力仪观测台网的最好噪声水平,优于同场地两台磁通门磁力仪的噪声水平,也优于地震地磁基准观测台网的平均噪声水平。分析认为与质子矢量磁力仪相比,由于铯光泵磁力仪具有远低于质子磁力仪的噪声水平,相同的补偿和偏置方法下,可以获得更低的噪声水平。与三分量磁通磁力仪观测对比,虽然铯光泵矢量磁力仪秒周期内各分量分时段观测,观测时间仅为 200 ms,但是由于铯光泵磁力仪测量噪声低于磁通门磁力仪,在低噪声的电流补偿和偏置下,仍可以获得优于磁通磁力仪噪声的结果。

2) 实验仪器的分量噪声大于总强度噪声,分析认为主要受线圈磁场均匀度和电流源噪声的影响,后期可以进一步控制电流源噪声水平,特别是偏置电流源的噪声水平,增大线圈尺寸和控制线圈装配误差,也可以测量周期内相对减少总强度观测时间,增加分量的观测时间。

3) 2个月的实验观测期内,实验仪器的水平分量基线偏离最大分别为 1.3 nT,磁偏角的基线偏离最大为 0.16',相对于目前台网应用的座钟式质子矢量磁力仪基线偏离明显减小^[20],特别是实验仪器都是安装在刚刚新建的简易观测墩上,并且实验仪器数据的基线偏离中还有人绝对观测误差的贡献。

因此,本文研制的基于铯光泵磁力仪地震地磁矢量测量系统具有较低的噪声和较好的稳定性,且无需保温磁房,适合于地震地磁台站的连续观测,需要的人工校准周期更长,降低了观测墩的建设要求,也极大地降低了地磁基准站的建设成本,具有较好的应用前景。

本文将铯光泵磁力仪与混合分量线圈装置组合构成矢量磁力仪,从而实现秒周期、高稳定性、低噪声的地磁场三分量记录。这种结构和测控系统也可以应用于 OVERHAUSER 磁力仪、铯氦混合光泵磁力仪等其它量子磁力仪构成的矢量磁力仪^[21-25],以应用于不同的观测场合。

参考文献

- [1] 徐文耀. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2009.
- XU W Y. Physics of electromagnetic phenomena of the earth [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2009.
- [2] 中国地震局监测预报司. 地震电磁数字观测技术[M]. 北京:地震出版社,2002.
- Monitoring and Forecasting Department of China Earthquake Administration. Seismic electromagnetic digital observation technology [M]. Beijing: Seismological Press, 2002.
- [3] 赵旭东,何宇飞,李琪,等. 基于中国地磁台网数据的太阳静日期间地磁场 Z 分量日变化幅度分析[J]. 地球物理学报,2022,65(10):3728-3742.
- ZHAO X D, HE X F, LI Q, et al. Analysis of the geomagnetic component Z daily variation amplitude based on the geomagnetic network of China during solar quiet days[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022,65(10):3728-3742.
- [4] 王振东,王粲,袁浩浩,等. 中国及邻近地区地磁长期变化分析[J]. 地震研究,2019,42(1):102-111.
- WANG ZH D, WANG C, YUAN J H, et al. Analysis of geomagnetic secular variation in China and its neighboring regions[J]. Journal of Seismological Research, 2019, 42(1):102-111.
- [5] 冯志生,姜楚峰,冯丽丽,等. 短期重现性地磁日变化感应电流集中分布与地震关系初步研究[J]. 中国地震,2020,36(3):502-516.
- FENG ZH SH, JIANG CH F, FENG L L, et al. A preliminary study on relationship between induced current of geomagnetic diurnal variation with short-term reproducibility concentration distribution and earthquakes[J]. Earthquake Research in China, 2020, 36(3):502-516.
- [6] 戴勇,冯志生,吴迎燕,等. 地磁日变化感应电流异常与地震的成组特征初步分析[J]. 中国地震,2022,38(2):199-212.
- DAI Y, FENG ZH SH, WU Y Y, et al. Preliminary analysis of grouping characteristics between induced current anomalies by geomagnetic diurnal and earthquake[J]. Earthquake Research in China, 2022, 38(2):199-212.
- [7] 冯志生,倪晓寅,戴苗,等. 地震地磁日变化预测指标体系建设进展[J]. 国际地震动态,2019(8):11-12.
- FENG ZH SH, NI X Y, DAI M, et al. Progress in the construction of earthquake geomagnetic diurnal variation prediction index system [J]. Recent Developments in World Seismology, 2019(8):11-12.
- [8] 李琪. 国内外地磁台网观测能力评估[J]. 国际地震动态,2007,345(9):20-28.
- LI Q. Investigation of geomagnetic observatory networks both at home and abroad [J]. Recent Developments in World Seismology, 2007,345(9):20-28.
- [9] 夏忠,稽才建,冯志生,等. FHD 分量核旋仪观测系统的抗干扰技术[J]. 地震研究,2005,28(1):102-107.
- XIA ZH, JI C J, FENG ZH SH, et al. Anti-jamming

- technique for the observation system of FHD-component nuclear precession magnetometer [J]. *Journal of Seismological Research*, 2005,28(1): 102-107.
- [10] 董浩斌,张昌达.量子磁力仪再评说[J].*工程地球物理学报*,2010,4(7):460-470.
DONG H B, ZHANG CH D. Review of quantum magnetometer [J]. *Journal of Engineering Geophysics*, 2010,4(7):460-470.
- [11] 居海华,冯志生,于华,等.悬挂式球形分量线圈研制简介[J].*地震*,2009,29(4):139-145.
JU H H, FENG ZH SH, YU H, et al. Development of suspended spherical component coil [J]. *Earthquake*, 2009,29(4):139-145.
- [12] 于凤军.球形线圈磁场均匀性的研究[J].*大学物理*, 2012, 31(6):13-17.
YU F J. Investigation on the homogeneity of magnetic field in spherical coils [J]. *College Physics*, 2012, 31(6):13-17.
- [13] 张伟.高均匀度磁场线圈的设计[J].*计量学报*,2010, 31(5):404-407.
ZHANG W. The design of magnetic coil with high homogeneity [J]. *Acta Metrologica Sinica*,2010,31(5):404-407.
- [14] 刘雷松,张乐,卢远添,等.铯光泵磁力仪光电检测电路噪声特性研究[J].*仪器仪表学报*,2018,39(9):203-210.
LIU L S, ZHANG L, LU Y T, et al. Research on noise characteristics of the photoelectric detection circuit of optically pumped cesium magnetometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018,39(9):203-210.
- [15] 冯志生,杨冬梅,夏忠,等.分量核旋仪偏置电流对磁偏角测量的影响分析[J].*地震*, 2002, 22(2):60-66.
FENG ZH SH, YANG D M, XIA ZH, et al. Analysis of observation error of the declination with bias current by vector proton precession magnetometer [J]. *Earthquake*, 2002, 22(2):60-66.
- [16] 王晓美,滕云田,范晓勇,等.基于OVERHAUSER效应磁探头的矢量磁场测量仪[J].*仪器仪表学报*,2018, 39(8):91-97.
WANG X M, TENG Y T, FAN X Y, et al. Vector magnetic field measuring instrument based on OVERHAUSER effect magnetic probe [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2018,39(8):91-97.
- [17] 冯志生,夏忠,梅卫萍,等.FHD磁力仪分量线圈装置误差对磁偏角观测的影响分析[J].*地震*,2003, 23(4):97-103.
FENG ZH SH, XIA ZH, MEI W P, et al. Impact analysis of component coil device error of magnetometer on magnetic declination observation [J]. *Earthquake*, 2003,23(4):97-103.
- [18] 姚休义,滕云田,杨冬梅,等.地磁观测数据重构技术研究[J].*地震学报*,2016,38(6):878-888,959.
YAO X Y, TENG Y T, YANG D M, et al. Research on reconstruction technology of geomagnetic observation data [J]. *Earthquake Science*, 2016, 38(6):878-888, 959.
- [19] 居海华,夏忠,宫杰,等.基于分体悬挂式球形线圈的质子矢量磁场测量仪[J].*仪器仪表学报*,2022, 43(7):17-25.
JU H H, XIA ZH, GONG J, et al. Proton vector magnetometer base on split-suspension spherical coil [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022,43(7):17-25.
- [20] 陆镜辉,黎晓之,邱洪伟,等.肇庆地磁台dIdD矢量磁力仪与GM3相对记录仪的对比分析研究[J].*华南地震*,2007,27(2):76-85.
LU J H, LI X ZH, QIU H W, et al. Comparative analysis of dIdD vector magnetometer and GM3 relative recorder at Zhaoqing geomagnetic station [J]. *South China Journal of Seismology*, 2007,27(2):76-85.
- [21] 葛健,陆承达,董浩斌,等.基于Overhauser传感器的近地表UXO磁梯度法探测技术[J].*仪器仪表学报*, 2015,36(5):961-974.
GE J, LU CH D, DONG H B, et al. Near-surface UXO magnetic gradient method based on Overhauser sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015,36(5):961-974.
- [22] GE J, WANG R, DONG H, et al. A multi-parameter integrated magnetometer based on combination of scalar and vector fields [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(2):2044-2054.
- [23] PULZ E, JACKEL K H, LINTHE H J. A new optically pumped tandem magnetometer: Principles and experiences [J]. *Measurement Science & Technology*, 1999,10(11):1025-1031.
- [24] PULZ E, JACKEL K H, BRONKALLA O. A quasi absolute optically pumped magnetometer for the permanent recording of the earth's magnetic field vector (OPC) [J]. *Data Science Journal*,2011:109-116.

- [25] 葛健,赵志卓,董浩斌,等. 直流脉冲极化质子旋进磁力仪磁场传感器的设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4):850-858.

GE J, ZHAO ZH ZH, DONG H B, et al. Design of the magnetic field sensor for proton precession magnetometer based on DC pulse polarization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(4):850-858.

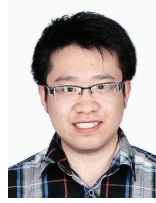
作者简介



居海华,2003年于南京农业大学获得学士学位,2010年于中国科学技术大学获得硕士学位,现为江苏省地震局高级工程师,主要研究方向为磁测传感器研制和地磁观测技术研究。

E-mail: juhaihua@sina.com

Ju Haihua received his B.Sc. degree from Nanjing Agricultural University in 2003, and received his M.Sc. degree from University of Science and Technology of China in 2010. He is currently a senior engineer at Jiangsu Earthquake Agency. His main research interests include magnetic sensor and geomagnetic observatory technology.



张乐(通信作者),2010年于中国地质大学(武汉)获得学士学位,2013年于中国地质大学(武汉)获得硕士学位,现为北京海迈格科技有限公司工程师,主要研究方向为磁测传感器和无人机航磁测量系统。

E-mail: zhangle@himagtech.com

Zhang Le (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 2010 and M.Sc. degree in 2013 both from China University of Geosciences, Wuhan. He is currently an engineer at Beijing Himag Technology Co., Ltd. His main research interests include magnetic sensor and unmanned aerial vehicle aeromagnetic measurement system.



应允翔,2011年于阜阳师范大学获得学士学位,现为安徽省地震局工程师,主要研究方向为地磁观测研究。

E-mail: 358900028@qq.com

Ying Yunxiang received his B.Sc. degree from Fuyang Normal University in 2011. He is currently an engineer at Anhui Earthquake Agency. His main research interest is geomagnetic observatory technology.