

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108984

基于分体悬挂式球形线圈的质子矢量磁场测量仪*

居海华¹, 夏忠¹, 宫杰¹, 应允翔², 张岑¹

(1. 江苏省地震局 南京 210014; 2. 安徽省地震局 合肥 230071)

摘要:为解决座钟式矢量磁力仪长期稳定性差,以及一体化悬挂式球形分量线圈相互干扰、分量噪声大等实际问题,提出了基于分体悬挂式球形线圈的质子矢量磁场测量仪,详细介绍其测量原理及仪器结构。此外设计了低成本简易观测仓,两套样机在蒙城地震台开展了一年的对比观测实验。结果表明,仪器 I 总强度、水平分量和磁偏角噪声为 0.23 nT、0.24 nT、2.97", 仪器 II 为 0.28 nT、0.26 nT、3.29", 均优于台网平均噪声水平,其中仪器 I 总强度和水平分量噪声优于台网最低噪声。两套仪器水平分量基线偏离最大为 6.5 nT、4.7 nT,磁偏角基线偏离最大为 0.67'、0.54', 明显小于座钟式磁力仪平均水平,具有良好稳定性。

关键词: 质子矢量磁力仪; 分体悬挂; 简易观测仓; 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

Proton vector magnetometer based on split-suspension spherical coil

Ju Haihua¹, Xia Zhong¹, Gong Jie¹, Ying Yunxiang², Zhang Cen¹

(1. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China; 2. Anhui Earthquake Agency, Hefei 230071, China)

Abstract: To solve the practical problems such as poor long-term stability and large zero drift of clock-type vector magnetometer, mutual interference and high component noise of integrated suspended spherical coils, a proton vector magnetometer based on split-suspension spherical coil is proposed. The measuring principle and instrument structure are emphatically introduced. In addition, a new type of low-cost simple observation chamber is designed, and an one-year comparative observation experiment is implemented at Mengcheng seismic station using the two successfully developed prototypes. Results show that, total field noise, horizontal component noise and magnetic declination noise of prototype I are 0.23 nT, 0.24 nT, and 2.97", and those values of prototype II is 0.28 nT, 0.26 nT, and 3.29", which are lower than the average noise level of national network. The total field noise and horizontal component noise of prototype I are better than the lowest noise of the network. The maximum horizontal components baseline deviation of two prototypes in a year is 6.5 nT and 4.7 nT, respectively. The maximum baseline deviation values of magnetic declination are 0.67' and 0.54', which are obviously lower than the baseline deviation average level of clock-type vector magnetometer of the network. The proton vector magnetometer based on split-suspension spherical coil has great stability.

Keywords: proton vector magnetometer; split-suspension; simple observation chamber; noise level; baseline deviation

0 引 言

地球磁场由地磁基本场和变化磁场组成。地磁基本场包含主磁场、岩石圈磁场。主磁场来自地心偶极子场和非偶极子场组成,岩石圈磁场来自地壳和上地幔,变化磁场由空间电流体系及其地球内部的感应电流体系产

生。我国地磁观测历史悠久,经过近几十年的发展,已基本建成相对均匀覆盖全国、局部有所加密的站网布局,在中国大陆地磁背景场、强震中短期地点判定、国防安全、矿产资源勘探等方面发挥了重要作用^[1-2]。

地震地磁定点观测的台网分为基准网和基本网。基准网的主要功能是监测全国地磁基本场及其长期变化,配置有地磁绝对观测仪器和相对观测仪器,通常采用三

收稿日期:2021-12-05 Received Date: 2021-12-05

* 基金项目:中国大陆综合地球物理场观测仪器研发专项(Y201702)、中国地震局地震科技星火计划项目(XH211003)、徐州市重点研发计划(社会发展)(KC20185)项目资助

分量磁通门磁力仪、人工观测的磁通门经纬仪和 OVERHAUSER 磁力仪组合观测^[3]。因人工观测限制和磁通门磁力仪观测需建设保温地磁房投资较大等原因,基准网台站建设规模受到一定的限制。基本网的主要功能是在全国地磁基本场基础上监测变化磁场及其短周期变化,配置连续记录地磁场要素随时间变化情况的相对观测仪器和总强度绝对观测仪器,通常采用总强度 F 、水平分量 H 和磁偏角 D (FHD) 质子矢量磁力仪观测^[4]。

FHD 质子矢量磁力仪是由质子旋进磁力仪和座钟式亥姆霍兹矢量线圈组合而成的连续观测三分量矢量磁力仪,每分钟自动获得 F 、 H 和 D 一组观测值,总强度 F 为绝对观测,并定期通过人工转动亥姆霍兹矢量线圈可以测量 H 水平分量的转向差,从而获得 H 分量的准绝对观测值。虽然 FHD 质子矢量磁力仪每分钟只能获得一组观测值,但其仪器价格低廉、工作可靠、对温度系不敏感,无需保温磁房,整体投入少^[5],因此被广泛应用于地震地磁基本站。目前在网运行的 FHD 质子矢量磁力仪在长期观测中也发现一些问题,主要问题是其亥姆霍兹分量线圈支撑在底座上,在长期无人干预时线圈会发生倾斜, H 和 D 观测值的长期稳定性受到较大影响,大多超过 10 nT/年 ^[6],新建设观测墩安装的仪器零漂更大。为了减小观测墩对质子矢量磁力仪观测的影响,文献^[7-8]成功研制了一体化悬挂式球形分量线圈,有效改善了质子矢量磁力仪稳定性问题,但一体化悬挂式球形分量线圈的两组线圈在观测时存在一定的相互干扰,分量噪声明显偏大,并且悬挂的两组正交球形线圈台站人员的拆装存在较大的困难。此外,采用的单杆的悬挂结构,线圈姿态受温度影响存在微小的旋转变化的,磁偏角长期观测时仍可能存在不稳定性。

本文在中国大陆综合地球物理场观测仪器研发专项“FHD 质子矢量磁力仪的升级和优化”的资助下,开展分体悬挂式质子矢量磁力仪的研制,并设计了一种低成本简易观测仓,在蒙城地磁基准台开展了对比观测实验。文中首先详细阐述分体悬挂式质子矢量磁力仪的观测原理、仪器整体结构和测控系统,介绍了实验场地和简易新型观测仓,最后通过台站试运行的观测数据,计算分析了实验样机的性能。

1 矢量磁场的测量方法

地磁场是一个矢量场,如图 1 所示,地震地磁观测中通常可采用地磁场矢量 F 、 H 、 D 3 个独立分量描述地磁场, F 为地磁场总强度;水平分量 H 为地磁场 F 在水平面上的投影;磁偏角 D 是地磁水平分量 H 与其在地理北向的投影 X 的夹角,也是磁子午面与地理子午面的夹角,向东为正^[1]。

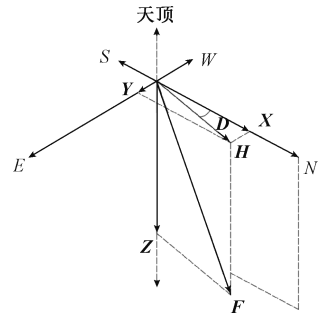


图 1 地理坐标系中地磁场各要素的定义和表示符号
Fig. 1 Definition and representation symbols of geomagnetic field elements in geographic coordinates

本文研制的质子矢量磁力仪是一种连续记录地磁场总强度 F 、水平分量 H 和磁偏角 D 相对变化量的仪器。

1.1 总强度 F 的测量原理

富含氢原子的煤油等溶液中的质子经人工磁场磁化后,沿磁东西方向排列而产生磁矩,在人工磁场切断后,其磁矩的方向由人工场方向逐渐趋向地磁场方向,在这个过程中,产生拉莫尔旋进,其旋进频率与地磁场强度成正比。本文通过测量拉莫尔旋进频率获得总强度 F 的大小^[2]。

1.2 水平分量 H 的测量原理

水平分量 H 采用 Nelson 方法获得,使地磁场的垂直分量 Z 被大小相等、方向相反的补偿磁场抵消,剩余的垂直分量 H 用标量磁力仪进行测量。调整补偿线圈使得其轴线垂直向下,并通过补偿电流。如图 2 所示,首先产生大小大致为 $2Z$ 、方向与 Z 相反的磁场,测量这时的总强度 F' ,调整电流值,使得 F' 与 F 相等,取该电流的 $1/2$ 作为抵消垂直分量的补偿电流,就能够得到地磁场 H 分量的值^[9]。

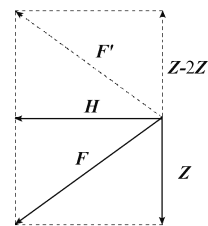


图 2 水平分量测量原理

Fig. 2 Principle of horizontal component measurement

1.3 分体结构的磁偏角 D 测量原理

磁偏角 D 是磁子午面与真子午面的夹角,也可看做是水平分量 H 与真北方向的夹角。为了使单线圈能够测量磁偏角,本文创新了一种测量方法。测量磁偏角的偏置线圈轴线指向磁东西方向,线圈内给定一个电流 I_c ,

并快速切换正负,交替产生两个大小等于 C 方向相反的人工偏置磁场 C_+ 、 C_- ,偏置磁场 C_+ 、 C_- 与地磁总强度 F 的合成磁场为 R_+ 、 R_- ,如图3所示,其中 φ 为 F_0 与 F 的夹角, θ 为 H_0 与 H 的夹角,此时:

$$R_+^2 = F^2 + C_+^2 + 2FC_+ \sin\varphi \quad (1)$$

$$R_-^2 = F^2 + C_-^2 + 2FC_- \sin\varphi \quad (2)$$

由于 $C_+ = C_- = C$, $\sin\varphi = H \sin\theta$,

$$\theta = \arcsin\left(\frac{R_+^2 - R_-^2}{4HC}\right) \quad (3)$$

其中:

$$C = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{R_+^2 + R_-^2 - 2F^2} \quad (4)$$

代入可得:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{R_+^2 - R_-^2}{2\sqrt{2}H\sqrt{R_+^2 + R_-^2 - 2F^2}}\right) \quad (5)$$

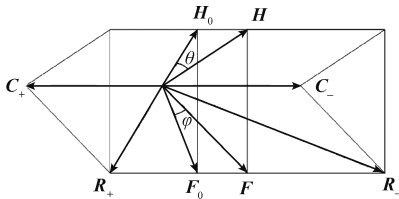


图3 磁偏角偏置测量原理

Fig. 3 Principle of magnetic declination measurement

采用上述方法可以获得水平分量 H 和磁偏角 D 的相对变化,与传统方法不同的是两组线圈可以独立观测^[10]。

2 分体悬挂式质子矢量磁力仪

2.1 仪器结构

仪器由探头、两组独立悬挂的分量线圈、两组极化测频模块、两组单片机、电流源模块和工控主机组成。两组悬挂式球形分量线圈组成分量线圈系统,在低噪声的直流电源激励下可以在探头工作区域产生可控的人工均匀磁场。单片机和极化测频模块组成测控系统,控制电流源输出、探头的极化和测频,从而获得探头区域在各个时序下的磁场大小。探头和测控系统都采用双通道设计,两个单片机分别负责两个通道的测控,并相互同步。工控主机采用 ARM 构架的工控机,通过串口协同两个单片机工作,并接收单片机传送的观测数据,进行数据的计算、存储,并提供网络服务。

2.2 小型化球形分量线圈设计

研究表明相比亥姆霍兹线圈、螺线管线圈等地磁分量线圈系统常用的线圈而言,在产生相同均匀度空间要

求下,密绕的球形分量线圈具有更小的体积^[11],更有利于线圈的悬挂和线圈系统整体小型化的需求。

综合考虑探头尺寸、悬挂结构等,本文设计的球形分量线圈分布在直径为 240 mm 的球面上,线圈间距为 4 mm。密绕的球形分量线圈可以把每一个载流线圈对标量磁探头工作区域均匀场影响进行分析,然后进行叠加获得探头工作区域人工磁场分布^[12],如图4所示,虚线内为探头工作区域。均匀度优于 10^{-4} 的区域大于中心直径 100 mm 长 100 mm 的圆柱体,满足质子磁力仪探头的工作要求。

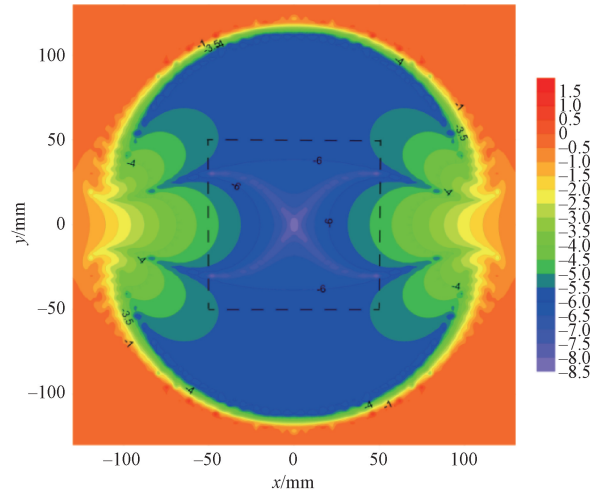


图4 球形线圈人工磁场均匀空间分布图

Fig. 4 Uniform spatial distribution of artificial magnetic field of spherical coil

球形分量线圈骨架稳定性直接影响了线圈系统的均匀度和长期姿态的稳定,综合考虑非金属材料的强度、尺寸稳定性、易成型、易加工性等方面,本文定制了玻纤增强工程材料作为骨架材料,采用钢模压铸成球形毛坯,时效处理后采用数控加工中心加工而成。非金属材料球形线圈骨架尺寸稳定性对线圈产生人工磁场的噪声影响至关重要。

2.3 分体悬挂式球形分量线圈结构设计

分体悬挂式球形分量线圈系统采用了两组独立的悬挂式球形分量线圈。图5所示是本文设计的线圈系统的示意图。右侧线圈为球形补偿线圈,轴线垂直地面,提供补偿磁场,左侧线圈为球形偏置线圈,轴线近东西向,提供偏置磁场。两组线圈分别采用安装有碳纤维杆的悬挂装置独立悬挂,碳纤维杆可拆卸,方便运输和现场安装。补偿线圈的悬挂组件分为上下两层,一层碳纤维杆安装于东西向,一层碳纤维杆安装于南北向。偏置线圈采用单层悬挂,纤维杆安装于南北方向。悬挂组件保证了线圈系统随重力倾斜的自由度,约束其转动的自由度。两组悬挂组件与线圈之间采用支架固定,减小线圈受力变

形。两组线圈都安装了无磁刻度转盘和锁紧装置,线圈底部安装有配重和阻尼装置。两组线圈姿态利用转盘和配重来调整。其中补偿线圈通过控制各个方向的转向差来调整线圈轴线的垂直向下,偏置线圈先通过转向系统把线圈轴向调整到磁北方向,通过减小线圈测量垂直分量与计算得到垂直分量的差来控制线圈姿态。由于采用悬挂系统,在调整线圈姿态过程中,线圈姿态主要受其重心分布相关,姿态调整主要利用线圈的配重来调节线圈的重心分布,转轴微量倾斜误差和底座水平度对其影响都极小,大大降低了线圈系统转台的精度和观测墩稳定的要求^[13-14]。

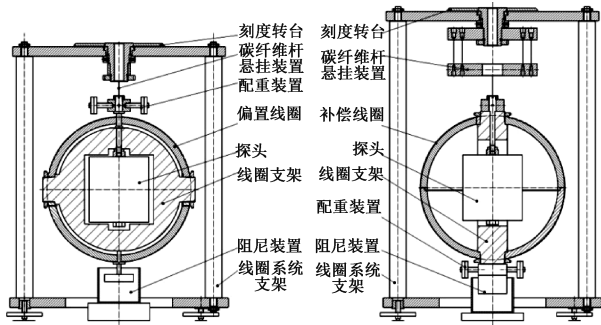


图5 分体悬挂式球形分量线圈结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of split-suspension spherical component coil

2.4 仪器工作方式和测控时序

由于采用了分体结构,两组线圈分别独立观测,考虑探头极化和线圈产生磁场间的相互影响,仪器工作方式设置有两种。方式1 两组线圈相距大于 10 m^[10],两组线圈工作时互不影响,可以同时开展分量观测,增加了单个周期分量测量的次数;方式2 两组线圈置于同一观测墩,两组线圈错时观测,避免相互影响,能够直接替换目前地震地磁台站在网运行的质子矢量磁力仪。两种工作方式的测量时序,如图6所示。

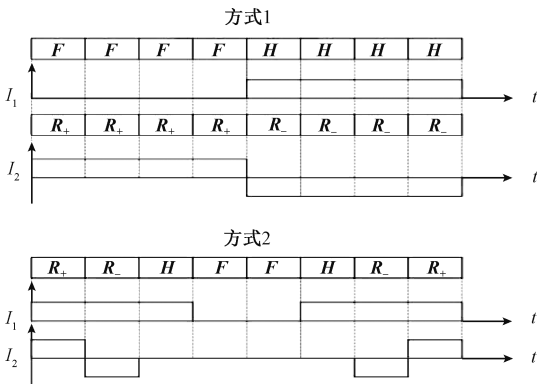


图6 两种工作方式的测量时序

Fig. 6 Measurement timing of two working modes

3 观测实验设计和安装

3.1 简易观测仓设计

实验仪器采用了悬挂方案,对观测墩的漂移不敏感,且质子磁力仪温度系数较小,因此本文设计了低成本的简易观测仓用于观测实验。采用弱磁水泥建造简易观测基础,嵌入人造石板搭建观测墩体。外罩采用双层玻璃钢夹保温蜂窝板结构,外型呈圆柱状,底部采用黄铜板加固,采用无磁铜螺母和预埋铜螺栓固定,顶部为球面,整体具有较大的强度,可抗大风。外罩设计有通风孔和防虫网,如图7所示。安装时在线圈外侧设置有亚克力保护罩,进一步减小风扰。简易观测仓整体结构简单,成本低廉,方便拆装,特别适合地磁矢量观测站的快速搭建,利于推广应用。

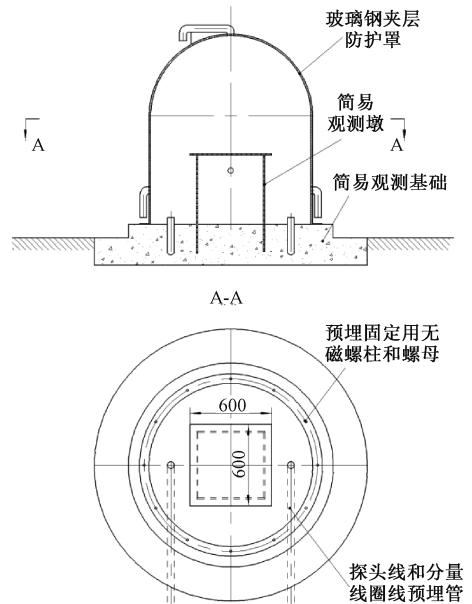


图7 简易观测仓示意图(mm)

Fig. 7 Schematic diagram of simple observation chamber(mm)

3.2 实验场地改造和仪器安装

选取蒙城地震台地磁观测场地开展观测实验。蒙城地震台为地磁国家二类台,已有的地磁观测项目为绝对观测、相对记录和定点核旋观测。相对记录和定点核旋观测为连续观测,绝对观测一般每周测量两次。台站的组合观测为本文观测实验提供了对比观测数据。

在台站的地磁观测场地内新建了两个简易地磁观测仓,并对原有一个空置地磁房进行了改造。两个观测仓、改造的磁房以及台站在用观测磁房之间的距离均>10 m,以避免相互干扰。观测实验从2020年1月~2020年12月,安装了两台实验仪器,实验仪器I的两组线圈系统分别安装在两个简易观测仓内的简易观测墩上,采用方式1的工作方式。实验仪器II的两组线圈安装在同一

个改造后的磁房内两个观测墩上,采用方式 2 的工作方式,如图 8 所示。两台实验仪器的主机都置于仪器房内,并采用 UPS 电源供电,保证实验数据的连续。

4 实验结果

4.1 数据处理和噪声计算

实验仪器观测数据进行了预处理,主要剔除同场地地电观测干扰、高压直流干扰、人为干扰以及台站施工干扰等。图 9 所示为两台研制测量仪在蒙城地震台 2020 年 1 月 23 日~25 日连续 72 h 的观测曲线和同时段近纬度高邮地震台在网运行同类型仪器观测数据曲线。



图 8 研制的地磁矢量测量仪架设在蒙城地震台
Fig. 8 The prototype system set up at Mengcheng geomagnetic station

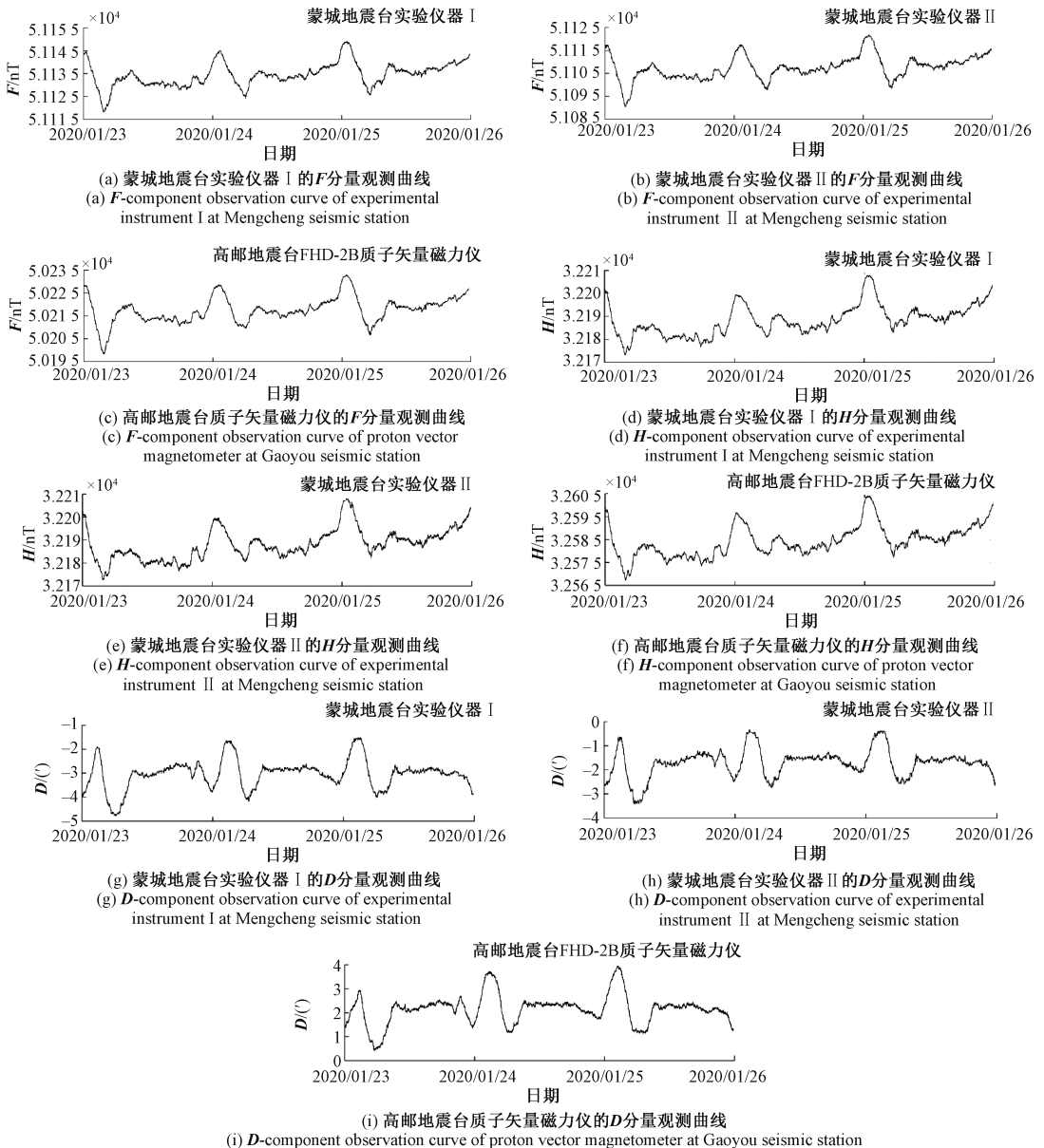


图 9 研制的地磁矢量测量仪与台站质子磁力仪 F 、 H 、 D 3 分量的观测曲线

Fig. 9 F 、 H 、 D observation curves between developed instrument and proton vector magnetometer at the station

为了验证实验仪器的噪声水平,采用中国地震局地磁学科组《数字地磁台网观测资料质量评比办法》中的计算方法,分别计算 2020 年全年两台实验仪器预处理后的实验数据每个月的噪声水平,求其平均值,计算了同期全网噪声最低的高邮台同类仪器 FHD-2B 质子矢量磁力仪产出三分量数据的噪声水平和全国 FHD-2B 质子矢量磁力仪观测台网平均噪声水平,结果如表 1 所示。

4.2 稳定性考察

为了考察实验仪器观测装置的稳定性,分别计算了实验期内两台实验仪器和蒙城地震台地磁组合观测每个月水平分量和相对磁偏角的子夜均值,并把实验数据归算至台站地磁组合观测标准墩^[15],以地磁台站地磁组合

表 1 仪器实验期噪声平均值

Table 1 Average noise value of instrument during experiment

仪器	总强度噪声 /nT	水平分量噪声 /nT	磁偏角噪声 /(°)
实验仪器 I	0.23	0.24	2.97
实验仪器 II	0.28	0.26	3.29
高邮台 FHD 磁力仪	0.26	0.39	2.77
FHD 台网磁力仪	0.33	0.52	4.64

观测的结果为基线计算实验仪器的偏离值,如图 10 所示。总强度为绝对观测,不会因观测装置影响产生漂移。

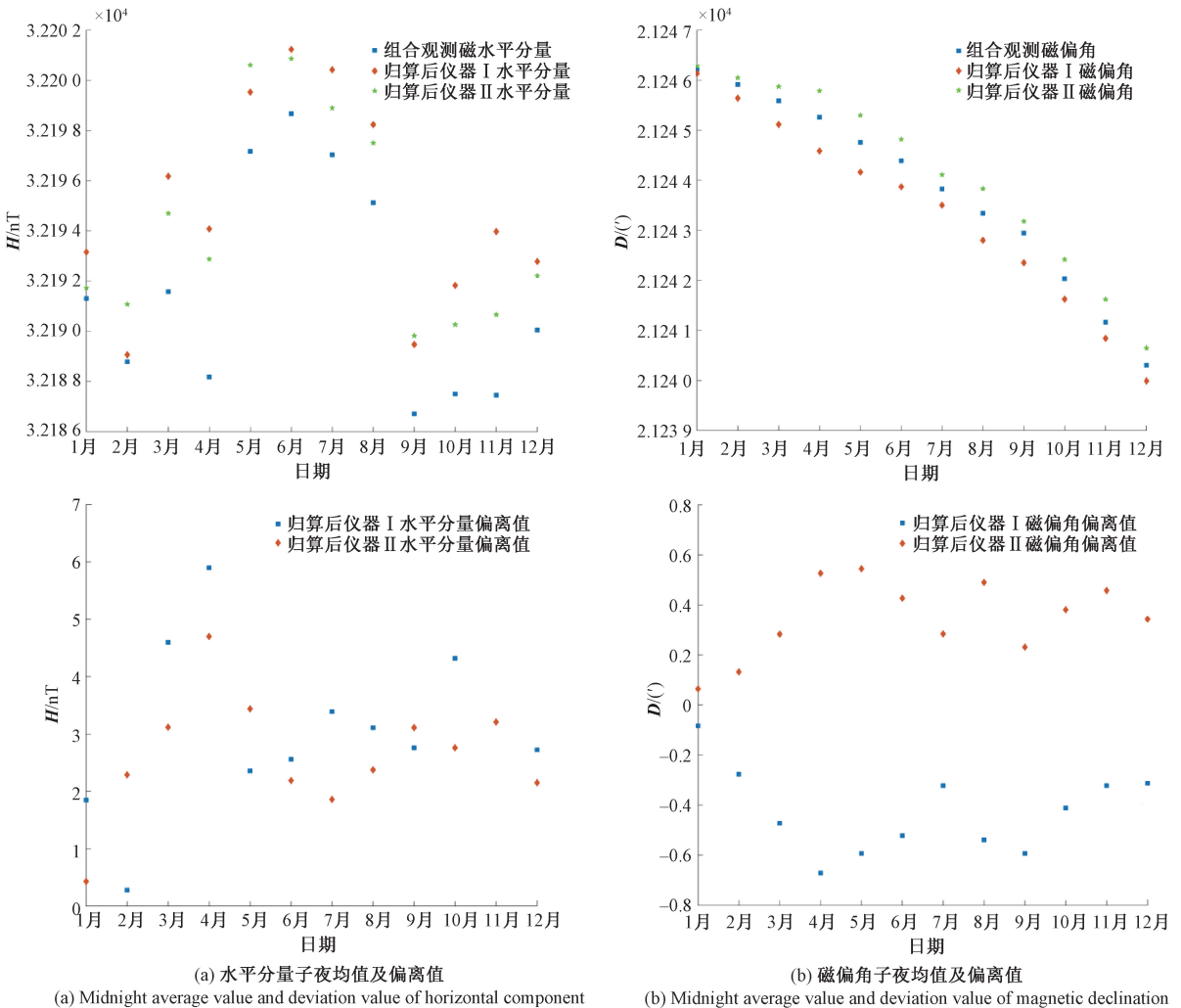


图 10 水平分量和磁偏角子夜均值及偏离值

Fig. 10 Midnight average value and deviation of horizontal component and magnetic declination

5 结 论

本文首先提出基于标量磁力仪测量矢量磁场的工作原理,对分体线圈获得分量计算公式进行详细的阐述,并给出了仪器结构和两种测量方式,介绍了地磁简易观测仓结构,最后在地磁台站同时开展磁房观测和简易观测仓观测,验证研制矢量测量仪的性能和简易观测仓的实用性。实验结果分析如下:

1) 两台实验仪器记录良好,观测日变形态正常,实验仪器 I 总强度、水平分量和磁偏角的噪声分别为 0.23 nT、0.24 nT、2.97",实验仪器 II 总强度、水平分量和磁偏角的噪声分别为 0.28 nT、0.26 nT、3.29",两台实验仪器的三分量噪声水平均明显优于质子矢量磁力仪台网同时段总强度、水平分量和磁偏角平均 0.33 nT、0.52 nT、4.64"的噪声水平。安装于简易观测仓采用方式 1 工作的实验仪器 I,其总强度和水平分量噪声优于台网同时段总强度和水平分量最低 0.26 nT、0.39 nT 的噪声水平,分析认为主要原因是方式 1 工作的实验仪器 I 一个测量周期内单个分量可以获得更多的测量时间。磁偏角噪声与台网同时段最低 2.77"的噪声相当,分析认为虽然提高了合成磁场的单个周期中的测量次数,但采用偏置方法测量磁偏角时,在噪声控制方面采用偏置磁场与水平分量合成的方法比与总强度合成更有优势,因此实验仪器 I 的磁偏角噪声没有明显提升,但仍明显好于台网的平均水平。安装于改造磁房采用方式 2 工作的实验仪器 II 除水平分量外其他各分量噪声与在网运行的同类仪器噪声基本相当,其中水平分量噪声水平略优。分析认为分体的球形分量线圈在人工磁场均匀度、电流关闭后线圈对测量总强度影响等方面具有一定的优势。

2) 在一年的实验观测中两台实验仪器的水平分量基线偏离最大分别为 6.5 nT 和 4.7 nT,磁偏角的基线偏离最大分别为 0.67'(约 6.1 nT)和 0.54'(约 4.9 nT),相对于目前台网应用的座钟式 FHD 质子矢量磁力仪基线偏离明显减小,特别是实验仪器都是安装在刚刚新建的观测墩和简易观测仓内的简易观测墩上,并且这里实验仪器数据的基线偏离中也有人工绝对观测误差的贡献,以及相对观测仪器格值等因素的影响。实验结果中简易观测仓内观测数据的偏移略大于改造磁房内的观测数据,分析认为探头和线圈同固定在一个内支架上,并且探头较重且非对称设计,温度变化对探头的重心分布产生影

响,从而影响观测结果。此外,实验观测前,也发现质地较硬的探头线对悬挂装置影响较大,对探头线近传感器端采用软线进行改造后,效果明显。因此,分体悬挂式质子矢量磁力仪线圈系统的结构仍有进一步的改进空间,但这种方案在噪声和漂移的控制方面仍具有明显的优势。

3) 实验观测期内安装于简易观测仓内的实验仪器在噪声和漂移指标上,明显优于目前质子矢量观测台网的平均水平,接近台网观测中最好的水平。相比较目前质子矢量地磁观测台网中建设标准质子矢量磁力仪磁房和地磁观测墩,采用悬挂式质子矢量磁力仪和简易观测仓观测,无需建设标准质子矢量磁力仪磁房和地磁观测墩,在成本上具有很大的优势,也避免了台站在建设地磁房时遇到的诸多困难,且可解决地磁受干扰迁建和重点危险区地磁矢量观测的快速布设等问题。当然采用了分体结构,两组线圈需相距 10 m,增加了场地的需求,台站设计时需要注意。

本文将分体悬挂式线圈结构和测量方法应用于旋进式质子磁力仪构成矢量磁力仪,实现了分钟采样的地磁三分量记录。这种结构和方法同样也可以应用于更高采样率、更高灵敏度的 OVERHAUSER 磁力仪、光泵磁力仪等标量磁力仪构成矢量磁力仪,实现秒周期的三分量记录^[16-18]。其优点在于减少测量周期内单个线圈内电流切换的次数,并且避免了两组线圈之间的相互影响。目前我们已将这种方法应用于铯光泵矢量磁力仪的研制中,并取得较好的进展。

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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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 interference technology of FHD component nuclear gyrometer observation system [J]. *Journal of Seismological Research*, 2005,28(1):102-107.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 冯志生, 于华, 居海华, 等. 悬挂式球形分量线圈的研制[J]. *国际地震动态*,2008,11:105.
- FENG ZH SH, YU H, JU H H, et al. Development of suspended spherical component coil [J]. *Recent Developments in World Seismology*,2008,11:105.
- [9] JANKOWSKI J, SUCKSDORFF C. Guide for magnetic measurements and observatory practice [M]. Boulder: International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 1996.
- [10] 居海华, 冯志生, 夏忠, 等. 一种基于分体式悬挂球形线圈的地磁测量方法 [P]. CN109471184B, 2020-10-02.
- JU H H, FENG ZH SH, XIA ZH, et al. A geomagnetic measurement method based on split-suspension spherical coil [P]. CN109471184B,2020-10-02.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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. Impact analysis of bias current of component nuclear gyrometer on magnetic declination measurement [J]. *Earthquake*, 2002, 22(2):60-66.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [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] 张策, 滕云田, 张涛, 等. 自动磁通门经纬仪多参量误差补偿算法 [J]. *仪器仪表学报*,2020,41(6):85-93.

ZHANG C, TENG Y T, ZHANG T, et al. Multi-parameter error compensation algorithm for automatic fluxgate theodolite [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2020, 41(6): 85-93.

- [18] 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



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.



夏忠 (通信作者), 1990年毕业于东南大学, 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: jsxiazhong@sina.com

Xia Zhong (Corresponding author) graduated from Southeast University in 1990. He is currently a senior engineer at Jiangsu Earthquake Agency. His main research interests include magnetic sensor and geomagnetic observatory technology.



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.