质子旋进式海洋地磁日变站的设计与实现

李先锋[1,2,3]，郑彦鹏[1,2,3*]，华清峰[1,2,3]，刘 凯[1,2,3]，马 龙[1,2,3]，张林清[1,2,3]

（1. 自然资源部 第一海洋研究所，山东 青岛 266061；2. 自然资源部 海洋地质与成矿作用重点实验室，山东 青岛 266061；
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室，山东 青岛 266061）

摘 要：目前国内在深远海地磁测量中普遍采用潜标加挂磁力仪的作业方式测量地磁日变，针对其布放、回收操作复杂且劳动强度大的缺点，设计了一套新的一体化便携式质子旋进式海洋地磁日变站。基于质子旋进式地磁测量的工作原理，采用多周期同步测量法和线性插值的过零数频算法提高了拉莫尔旋进信号的测频精度；在现有声学释放系统的基础上对声学应答和释放过程进行了改进，采用 Goertzel 算法提高了声学释放信号频率检测的计算效率和可靠性；将研制的仪器与国际商用仪器进行了陆地对比测试和海上实验。结果表明，研制的海洋地磁日变站性能指标满足海洋地磁测量数据的日变改正精度要求，可靠性高，而且海上操作便捷，可替代传统的海洋地磁日变测量的作业方式。

关键词：海洋地磁日变站；一体化；质子旋进式原理；海洋地磁测量

中图分类号：P716 **文献标识码：**A **文章编号：**1671-6647(2020)03-0446-09

doi：10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.007

引用格式：LI X F, ZHENG Y P, HUA Q F, et al. Design and implementation of proton precession marine geomagnetic base station[J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(3): 446-454. 李先锋，郑彦鹏，华清峰，等. 质子旋进式海洋地磁日变站的设计与实现[J]. 海洋科学进展，2019，37(3)：446-454.

质子旋进式磁力仪作为应用较为普遍的地磁测量仪器，已被广泛用于资源勘查、工程勘察和地磁日变观测等领域[1-2]。海洋地磁日变作为海洋地磁测量中最主要的误差源之一，地磁日变测量的数据质量对于提高海洋地磁测量数据的精度至关重要[3-5]。根据海洋调查规范有关海洋地磁测量的要求，地磁日变站的有效控制范围＜300 km[6-7]，对于深远海地区，由于远离大陆，海洋地磁测量期间只能就近布设海洋地磁日变站以获得有效的地磁日变观测值。

目前，全球仅加拿大 Marine Magnetics 公司实现了海洋地磁日变站的商业化，在远海地磁调查中国内普遍使用该公司的 Sentinel 地磁日变站，但该仪器自身不具备自动回收功能，需采用潜标的作业方式：将 Sentinel 地磁日变站固定在凯夫拉绳上，其上连接浮球，其下连接声学释放器和承重块，整套系统投放到海底，在回收时使用声学释放器抛掉承重块，利用浮球的浮力将仪器浮到海面进行回收。而投放潜标需要的部件较多，操作复杂，一旦某些操作细节被忽略会造成设备损坏、回收失败甚至设备丢失，导致地磁日变数据的缺失，进而影响海洋地磁测量的数据精度[8]。另外，Sentinel 地磁日变站还存在电池容量有限、无状态监测信息等问题，在海上使用过程中，极易出现突然中断工作的情况且事后无法获知具体的故障原因。因此，亟需设计一套便携式海洋地磁日变站以简化海上作业方式，并能满足海上地磁日变测量的精度要求。

收稿日期：2019-04-04

资助项目：青岛海洋科学与技术试点国家实验室开放基金项目——基于移动载体的高精度海洋地磁矢量一体化测量技术研究（QNLM2016ORP0201）；中国大洋矿产资源研究开发协会项目——大西洋靶区多金属硫化物调查区综合地球物理异常与找矿应用（DY135-S2-2-04）；青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山科技创新计划——新型海底地磁日变站（2015ASKJ03-03-03）和深海资源勘查技术与装备体系发展战略研究（2016ASKJ15-02）；泰山学者工程专项（TSPD20161007）；国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合基金项目——海洋地质过程与环境（U1606401）

作者简介：李先锋（1988-），男，助理工程师，硕士，主要从事海洋地球物理探测技术与设备研制方面研究. E-mail：xflee@fio.org.cn

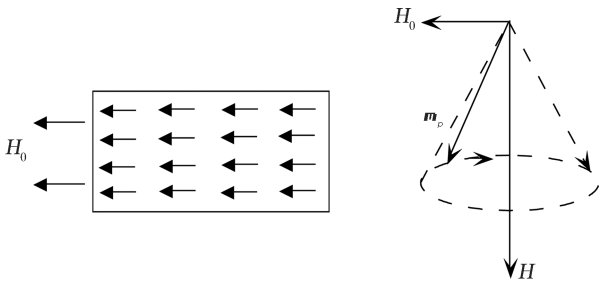
* **通讯作者：**郑彦鹏（1972-），男，研究员，博士，主要从事海洋地球物理方面研究. E-mail：zhengyp@fio.org.cn

（陈 靖 编辑）

前人研究表明，采用高集成度的电子器件和数据算法可以提高地磁测量的数据精度[9-10]，本文基于质子旋进式地磁测量工作原理，采用一体化结构设计思路，将地磁测量、声学释放器、耐压舱、浮球和承重块等集成为一体，设计并研制了一套新型海洋地磁日变站。其具有小巧便携，海上操作、投放和回收简单的优点，并且测量精度能满足海洋地磁测量的精度要求。

1　质子旋进式地磁测量工作原理

质子旋进式地磁测量的工作原理是利用静态激发质子在地磁场内的拉莫尔进动效应测量地磁场[11]。质子旋进式地磁传感器由无磁性的保护外壳、富含氢的液体（酒精、煤油等）和置于其中的线圈组成[12]，当地磁传感器未受到外界磁场作用时，液体的质子磁矩指向无规则性，不表现宏观磁矩。当受到外界垂直于地磁场 T 方向的磁场 H_0 时，液体的质子磁矩将按外界磁场 H_0 方向排列（图 1a），这被称为极化过程[13-16]。当切断外界磁场 H_0，则地磁场对质子有 $\mu_p \times T$ 的力矩作用，试图将质子拉回到地磁场方向。质子在自旋和地磁场 H 对其力矩作用下，质子磁矩 μ_p 将绕着地磁场 T 的方向做旋进运动（图 1b），称为拉莫尔旋进[13-16]。



(a)传感器中质子磁矩按外磁场方向排列　　(b)拉莫尔旋进

图 1　质子旋进示意图

Fig.1　Schematic diagram of proton precession

理论研究表明，质子旋进的角速度 ω 与地磁场 H 的关系：

$$\omega = \gamma_p \cdot H, \tag{1}$$

式中：γ_p 为质子磁旋比[10]，$\gamma_p = 2.675\ 12 \times 10^8\ H^{-1} \cdot s^{-1}$。

又因 $\omega = 2\pi f$，则有：

$$H = \frac{2\pi}{\gamma_p} \cdot f \approx 23.487\ 4f, \tag{2}$$

式中：H 的单位为 nT。该式表明，只要准确测量拉莫尔旋进信号的频率 f，乘以常数，就能得到地磁场的值[10]。

由于地磁场很微弱，并且被测的拉莫尔旋进信号的幅度具有衰减性，为测得旋进信号的频率 f，通常采用预极化方法来建立质子宏观磁矩，以增强信号的幅度。具体做法：1）用圆柱形的无磁性容器装满富含氢的液体（酒精、煤油等），在容器的周围绕上极化线圈和测量线圈（或共用一个线圈），使线圈轴向垂直于地磁场 H 方向；2）给线圈通电流，使其内产生沿线圈方向 $n \times 10^4$ A/m 的极化磁场 H_0，其方向沿线圈方向，在极化磁场作用下，容器内液体中质子磁矩沿极化磁场方向排列，形成宏观磁矩；3）切断电流，质子磁矩以拉莫尔旋进频率绕地磁场旋进并切割线圈，使线圈环绕面积中的磁通量发生变化而产生感应电动势；4）通过测量感应电压的频率，即可测出地磁场 H 的值[13-16]。

2　仪器系统设计与研制

本文设计与研制的海洋地磁日变站主要由耐压舱、主控制系统、地磁传感器及测量单元、声学释放系统（含换能器、声学应答和执行电路、释放装置）、电池组、承重块等组成。除声学换能器和释放装置外，仪器的所有电路部分均放置于直径 17 in、耐压 6 000 m 水深的玻璃浮球中，玻璃浮球作为仪器的耐压舱，同时为仪器回收提供浮力；将地磁传感器单独放置于用钛合金加工的耐压舱中，并用钛合金杆将其固定在玻璃浮球保护外壳上以减少仪器电池及电路部分对地磁传感器的干扰。声学换能器固定在浮球保护外壳的正上方、传

感器的下方，减小声信号接收盲区；释放装置固定在浮球保护壳的正下方与承重块连接。仪器内部与外部（如声学换能器、释放装置）的连接、充电、数据下载等均通过水密接插件和水密线连接。仪器的整体结构及关键组成部分见图 2。

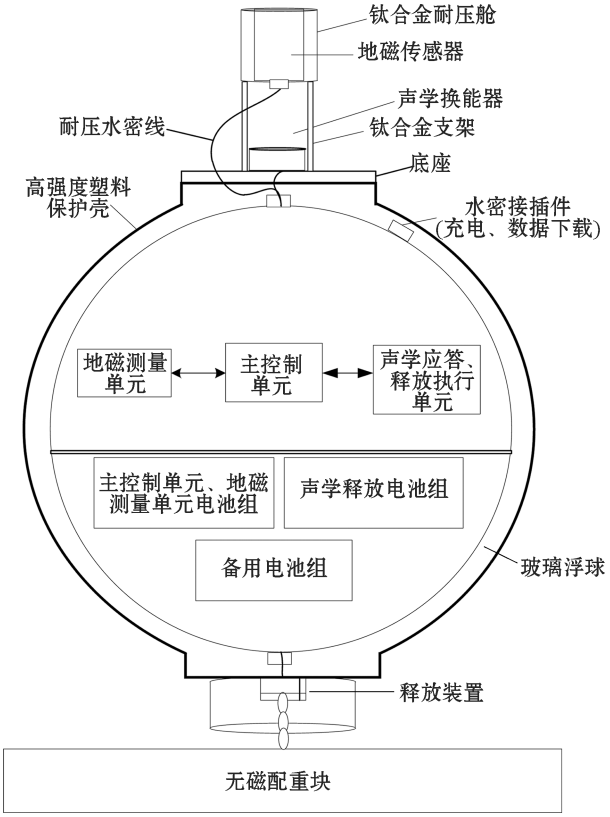


图 2 海洋地磁日变站结构

Fig.2 Schematic diagram of marine geomagnetic base station

2.1 主控制系统

主控制系统为仪器的核心，采用低功耗、高性能的 32 位微处理器，具有丰富的外设和数据处理能力，能够方便地实现外围器件的控制和功能扩展。由图 3 可知，主控制系统的功能包括：1）地磁场测量，控制极化电路极化地磁传感器产生拉莫尔旋进信号，测量并获取地磁场值；2）数据传输及存储，仪器工作前，通过无线传输获取工作参数并返回仪器状态信息，使用内置 GPS 模块校准仪器时间；仪器工作中，将地磁场数据存储在低功耗的非易失性存储器中；工作结束后，通过 USB 将数据传输给外部；3）状态监测，仪器在工作时，定时对玻璃耐压舱的气压、温度、电池电压、声学释放执行单元状态等进行检测，用来监测仪器密封性、

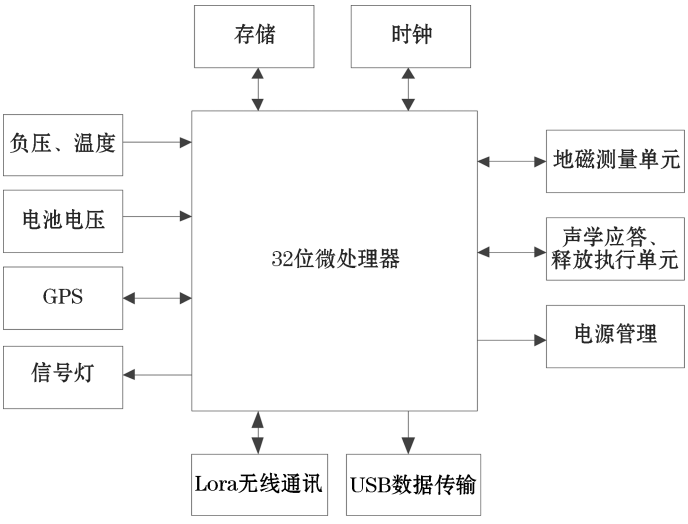


图 3 主控制系统结构

Fig.3 Schematic diagram of main control system

电池电量和释放状态等并写入日志文件；4）电源管理，为了提高仪器的可靠性，仪器使用 3 组电池：声学释放系统使用单独的电池组以保证仪器回收的成功率；仪器正常工作时，使用主控制系统、地磁测量单元电池组；当主控制系统检测到此电池的电压低于设定值时，关闭地磁测量单元并使用备用电池以保证主控制系统的正常运行；5）仪器定时释放，为了提高仪器的可靠性，设计了定时释放功能。仪器在下水前设置定时释放时间，当定时释放时间到达时，主控制系统将发送释放信号给释放执行电路实现仪器的自动回收。并且仪器在释放时，释放执行电路产生脉冲信号并发送给主控制系统，主控制系统打开 GPS、无线传输模块和信号灯。无线传输模块将仪器到达海面时的 GPS 位置发送给船上接收端进行仪器定位，信号灯便于夜间寻找。其中，无线传输采用低功耗、传输距离远的 Lora 通讯技术，最大传输距离 10 km，可以满足海上搜寻要求。

2.2　地磁测量单元

地磁测量单元主要由地磁传感器、极化电路、配谐电路、前置放大、信号调理电路和频率计组成（图 4）。主控制系统控制地磁测量单元的极化电路为地磁传感器提供约 0.85 A 的短时间极化直流脉冲电流；通过采用快速开关，能在一个周期的拉莫尔旋进信号中快速地关断电流而不影响信号的测量。地磁传感器产生的拉莫尔旋进信号进入配谐电路进行选频放大，经过滤波、放大等信号调理后，依次进入高精度频率计和 ADC，利用频率计获取高精度的地磁场值，利用 ADC 获取拉莫尔旋进信号进行峰值检测，使用快速跟踪算法实现仪器测量量程内的自动配谐[15]。

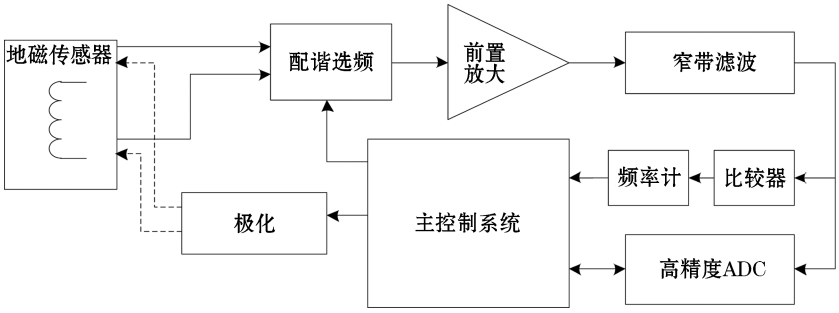


图 4　地磁测量单元结构

Fig.4　Schematic diagram of geomagnetic measurement unit

地磁传感器通过极化产生的 μV 级拉莫尔旋进信号经过串联谐振电路获取信噪比较高的原始信号，通过前置放大将微弱信号放大到比较器的门限电压，经过窄带滤波器滤除通频带的谐波干扰和减少毛刺，提高信噪比[16]。然后信号分为 2 路：一路信号进入比较器转换成相同频率的方波，再进入频率计测量频率；另一路信号进入高精度 ADC 进行峰值检测[14]。

频率计是地磁测量单元的关键，本仪器采用多周期同步测量法提高测频精度[17]。设输入信号频率为 f_x，时钟基准信号频率为 f_s，2 个计数器 A 和计数器 B 在同一闸门时间 t 分别对 f_s 和 f_s 进行计数，计数器 A 和计数器 B 的值分别为 N_x 和 N_s[18-20]，则输入信号频率 f_x 和周期 T_x 分别为：

$$f_x = \frac{N_x}{N_s} \times f_s ; \tag{3}$$

$$T_x = \frac{N_s}{N_x} \times t , \tag{4}$$

式中：$t = 1/f_s$。N_x 无（±1）量化误差，N_s 有（±1）量化误差，由于 f_s 很高，所以 N_s 的量化误差的相对值（$\pm 1/N_s$）很小，且与被测频率 f_x 无关[18-19]，因此，在整个测频范围内，能够实现等精度测量，选用集成有 PLL 模块的高性能、高集成度的 FPGA 芯片对外部高频率的晶振倍频获得更高的基准频率。

为了进一步提高测量精度，在每个极化周期测量过程中，采用线性插值的过零数频方法[20]，充分利用

FPGA 并行处理能力，10 个通道同步采集拉莫尔旋进信号频率和基准时钟频率值取平均值。

2.3 声学释放系统

声学释放系统由声学换能器、声学应答及释放执行电路、金属熔断丝和释放装置等组成。声学应答是仪器实现回收的关键部件[21]，声学应答电路采用 8 位 FSK 数字编码，如果输入信号频率 1，则编码解调电路输出为低电平，如果输入信号频率 2 则为高电平，释放执行电路进入工作，其原理如图 5。FSK 编码用以检测信号中是否含有对应的频率信号，由于不需要计算全部 DFT 系数，而只需要计算这 2 个频率上的系数，故采用 Goertzel 算法，该算法一次仅计算一个频率点的傅里叶分量，可以实现更高的计算效率[22-23]，Goertzel 算法流程如图 6 所示。

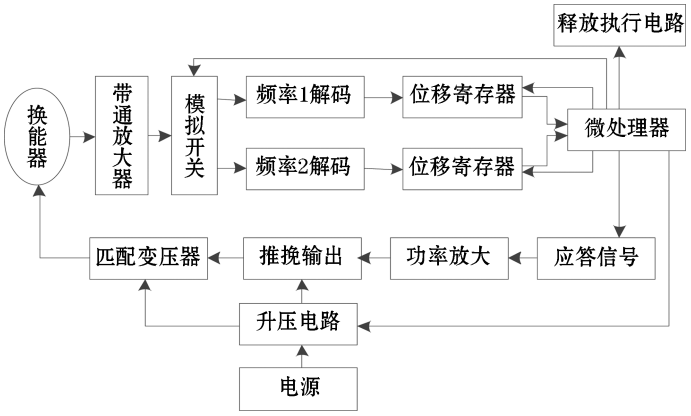


图 5 声学应答、执行电路原理

Fig.5 Schematic diagram of acoustic response and execution circuit

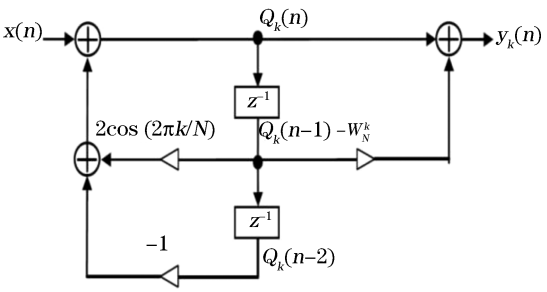


图 6 Goertzel 算法流程

Fig.6 Flow chart of Goertzel algorithm

释放装置包括耐腐蚀的圆形和方形尼龙块、绕线柱、活动承重杆及正、负电极。其中，用螺钉将圆形尼龙块固定在高强度塑料保护外壳的下部，方环形尼龙块固定在圆形尼龙块上，其中一面有 2 个接线柱用做正、负电极分别与金属熔断丝两端连接。在活动承重杆上加挂无磁性承重块，将金属熔断丝缠绕正、负电极和绕线柱，再在正极处压紧，承重块将和仪器固定在一起。

当仪器收到船上甲板单元发送的释放命令或仪器设置的自动回收时间到达时，声学应答单元将启动释放执行电路给释放装置通电并打开信号灯，同时反馈给主控制系统同步打开 GPS 和 Lora 无线通讯模块。金属熔断丝在海水的作用下发生电化学腐蚀，5～10 min 后断裂，活动承重杆脱落，仪器与承重块分离，仪器在玻璃浮球浮力的作用下浮到海面，通过信号灯、无线传输模块传回的仪器 GPS 位置回收仪器。

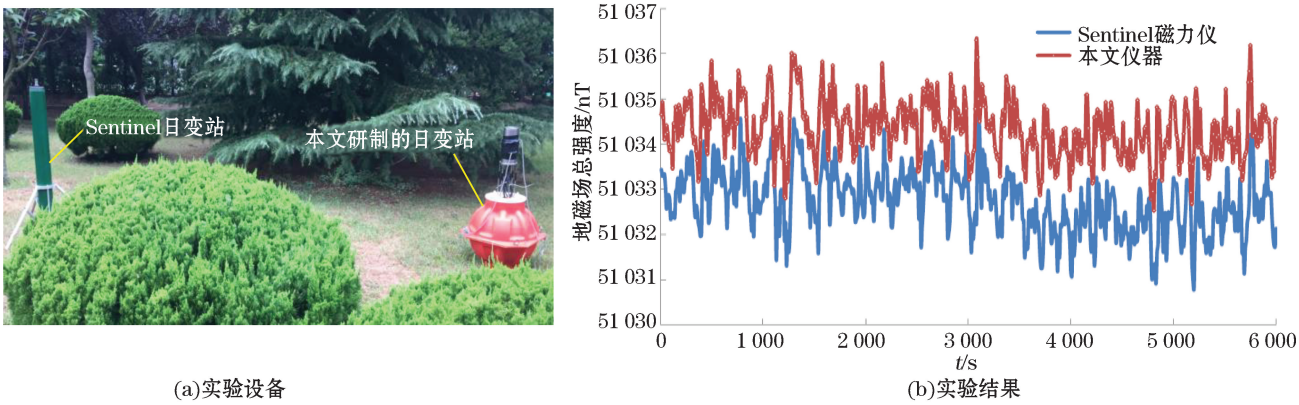
3 试验及结果分析

3.1 陆地对比测试

为了验证仪器地磁测量的性能，将本文研制的仪器与加拿大的 Sentinel 地磁日变站在青岛某地进行了室外对比测试。在测试前对测试区域进行测量，选择磁场干扰和梯度变化小的地点。为避免仪器间的相互干扰，2 台仪器相距 5 m(图 7a)，在工作前，对仪器进行时间同步校准，每隔 10 s 测量一次数据，记录同一段时间内的地磁场测量值并计算仪器的测量精度。测量精度 ε 计算式[24]为：

$$\varepsilon=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(H_i-\overline{H})^2}{2(n-1)}}\ , \tag{5}$$

式中：H_i 为磁力仪第 i 次测量值，$\overline{H}$ 为一组测量值的算术平均值，n 为测量次数。



(a)实验设备　　(b)实验结果

图 7　陆地对比测试

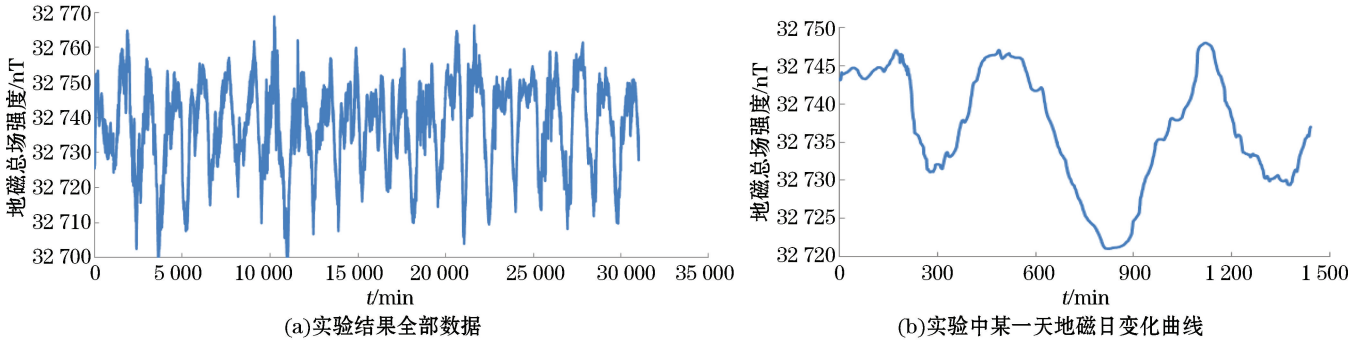
Fig.7　Outdoor comparison test

由图 7 可知，2 台仪器测得的地磁场数值曲线变化几乎一致，变化趋势大致相同。通过计算各自的平均值以消除 2 台仪器安放点不同引起的磁场测量固定差值，然后分别做均方差处理。经计算 Sentinel 地磁日变站的精度为 0.193 nT，本文仪器精度为 0.239 nT。另外选取两组数据，第 1 组为图 7b 中横轴为 2 000 附近的 100 个样本点，第 2 组为横轴 5 000 附近 100 个样本点，经计算 Sentinel 地磁日变站的精度为 0.191 nT 和 0.195 nT，本仪器的精度分别为 0.237 nT 和 0.242 nT，两台仪器均方差差值计算结果均为 0.05 nT 左右。证明本仪器测量精度良好，接近商业地磁日变站的测量精度。

另外，为了验证仪器声学释放系统的功能和可靠性，分别在室内水槽和码头做了多次释放试验，均能成功通讯和释放，证明声学释放系统工作正常，能保证仪器的顺利回收。

3.2　海上试验

为了验证仪器的整体性能，于 2018-01 搭载“向阳红 01”船在南极某海域进行了海上试验，试验海域水深 2 436 m，仪器每隔 1 min 测量一次。为防止仪器在投放过程中与 Sentinel 地磁日变站潜标系统发生碰撞，2 台仪器的投放点距离 500 m。仪器于 2018-01-06 布放，2018-01-28 成功回收，仪器回收后发现 Sentinel 地磁日变站测量的数据跳动超出正常变化范围(>1 000 nT)且无规律，该数据无法正常使用，本文仪器测量数据正常，数据结果见图 8。



(a)实验结果全部数据　　(b)实验中某一天地磁日变化曲线

图 8　海上实验结果

Fig.8　The experiment results at sea

由图 8a 可知，本文仪器测量的地磁场数据连续，无明显跳点；抽取其中某一天的数据，从图 8b 可以看

出,本文仪器测量的地磁场数据平缓,无明显毛刺和跳点,稳定性较好。经计算本文仪器的精度,整个试验期间数据的精度为 0.273 nT,图 8b 某一天数据的精度为 0.212 nT,经分析是由于海上试验地点位于高纬度地区,地磁日变化剧烈,测量的地磁场数值日均值变化大,导致长周期测量的精度较短周期测量的精度差。但本文仪器能较好地反映该地区地磁日变化特点,且长期测量的精度满足海上地磁测量的精度要求。但本文仪器能较好地反映该地区地磁日变化特点,且长期测量的精度满足海上地磁测量的精度要求。

4 结 语

基于质子旋进式地磁测量的工作原理,采用一体化结构的设计思路,设计并研制了一套质子旋进式海洋地磁日变站,实现了测量单元与声学释放系统独立工作,保证了海上作业的便携性和可靠性。通过与商业仪器的陆地对比测试和海上试验,验证了仪器测量性能可以满足设计要求,能有效提高海上作业效率、降低劳动强度。本研究工作可为海洋地磁日变站的进一步发展提供参考,从而促进我国关键仪器设备国产化的进程。

参考文献(References):

[1] LENZ J, EDELSTEIN S. Magnetic sensors and their applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 631-649.

[2] ACUNA M H. Space-based magnetometers[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(11): 3717-3736.

[3] BIAN G L, ZHAI G J, LIU Y C, et al. Determination of heading errors in marine magnetic gradient survey[J]. Ocean Technology, 2010, 29(2): 81-84. 卞光浪, 翟国君, 刘雁春, 等. 海洋磁力梯度测量中船磁影响的精确校正方法[J]. 海洋技术学报, 2010, 29(2): 81-84.

[4] BIAN G L, LIU Y C, ZHAI G J, et al. Base value reduction methods with muti-station diurnal variation correction in marine magnetic survey[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2009, 29(6): 5-8. 卞光浪, 刘雁春, 翟国君, 等. 海洋磁力测量中多站地磁日变改正基值归算[J]. 海洋测绘, 2009, 29(6): 5-8.

[5] National center of ocean standards and metrology. Specification for oceanographic survey: part 8 Marine geology and geophysics survey: GB/T 12763.8—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. 国家海洋标准计量中心. 海洋调查规范: 第 8 部分 海洋地质地球物理调查: GB/T 12763.8—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

[6] BIAN G L, ZHAI G J, LIU Y C, et al. Effective operating range of base stations in marine geomagnetic survey[J]. 2010, 25(3): 817-822. 卞光浪, 翟国君, 刘雁春, 等. 海洋磁力测量中地磁日变站有效控制范围确定[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 817-822.

[7] ZHANG X X, ZHENG Y P, PEI Y L, et al. Design and application of geomagnetic daily variation observation system in deep sea seamount[J]. 2018, 36(4): 570-577. 张学贤, 郑彦鹏, 裴彦良, 等. 深海海山区地磁日变观测系统设计及应用[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(4): 570-577.

[8] SHAO G, DING T. Technology for safety laying the geomagnetism observation mooring system on the seafloor[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2013, 33(1): 69-71. 邵关, 丁涛. 海底地磁日变观测站安全布放技术[J]. 海洋测绘, 2013, 33(1): 69-71.

[9] LU J A, CHAI J Y, XU X, et al. The study on the deep sea magnetic diurnal variation system[J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(4): 392-395. 陆敬安, 柴剑勇, 徐行, 等. 深海磁日变观测系统研究[J]. 海洋通报, 2010, 29(4): 392-395.

[10] DENISOV A Y, DENISOVA O V, SAPUNOV V A, et al. Measurement quality estimation of proton precession magnetometers[J]. Earth Planets & Space, 2006, 58(6): 707-710.

[11] DENISOV A Y, SAPUNOV V A, RUBINSTEIN B. Broadband mode in proton-precession magnetometers with signal processing regression methods[J]. Measurement Science & Technology, 2014, 25(5): 55103-55108.

[12] GUAN Z N. Geomagnetic field and magnetic exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 23. 管志宁. 地磁场与磁力勘探[M]. 北京:地质出版社, 2005: 23.

[13] PEI Y L, LIANG R C, LIU C G, et al. Principle of marine magnetometer and specification comparative analysis[J]. Marine Sciences, 2005, 29(12): 4-8. 裴彦良, 梁瑞才, 刘晨光, 等. 海洋磁力仪的原理与技术指标对比分析[J]. 海洋科学, 2005, 29(12): 4-8.

[14] ZHAO Z P, DONG H B. Design of the low power consumption and high precision proton magnetometer[J]. Petroleum Instrument, 2007, 21(2): 13-15. 赵志鹏, 董浩斌. 低功耗高精度质子旋进式磁力仪的设计[J]. 石油仪器, 2007, 21(2): 13-15.

[15] GE J, ZHAO Z Z, DONG H B, et al. Design of the magnetic field sensor for proton precession magnetometer based on DC pulse polari-

zation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 4(35): 850-858. 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.

[16] GE J, LU C D, DONG H B, et al. The detection technology of near-surface UXO based on magnetic gradient method and overhauser sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 961-974. 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.

[17] LIU H, DONG H B, GE J, et al. Magnetic field gradient detector based on the nuclear overhauser effect[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 592-600. 刘欢, 董浩斌, 葛健, 等. 基于 Overhauser 效应的磁场梯度探测器[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 592-600.

[18] MA X G, JIAO Y. Improvement on traditional frequency measurement methods[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(增刊 1): 120-121. 马献果, 焦阳. 频率测量方法的改进[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(s1): 120-121.

[19] GUO H Q. The analyses of improving the measuring accuracy by electronically count measuring the frequency[J]. Journal of Qinghai Normal University (Natural Science), 2006, 22(1): 24-26. 郭海青. 电子计数法测频提高测量精度的分析[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2006, 22(1): 24-26.

[20] ZHANG S, ZHOU Q W, CHEN S D, et al. Design of JPM-1 proton magnetometer based on DSP[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2014, 32(5): 509-515. 张爽, 周前伟, 陈曙东, 等. 基于 DSP 的 JPM-1 型质子磁力仪研制[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2014, 32(5): 509-515.

[21] JIA L SH, LI J J, FENG ZH T, et al. Design and realization of deep-sea reliable acoustic releaser[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(12): 1-3. 贾立双, 李家军, 冯志涛, 等. 深海高可靠声学应答释放器设计与实现[J]. 电子设计工程, 2015, 23(12): 1-3.

[22] WANG W B, ZHU Q P, XU X Y, et al. An improved realization structure for Goertzel algorithm[J]. Journal of Wuhan University (Science Edition), 2007, 53(3): 375-378. 王卫兵, 朱秋萍, 徐心毅, 等. Goertzel 算法的一种改进计算结构[J]. 武汉大学学报 (理学版), 2007, 53(3): 375-378.

[23] SYSEL P. Goertzel algorithm generalized to non-integer multiples of fundamental frequency[J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 2012(1): 56.

[24] The ministry of geological minerals of the People's Republic of China. The general technical condition of portable proton magnetometer: DZ/T 0140—1994[S]. Beijing: Standard of geological mineral industry of the People's Republic of China, 1994. 中华人民共和国地质矿产部. 便携式质子磁力仪通用技术条件: DZ/T 0140—1994[S]. 北京:中华人民共和国地质矿产行业标准, 1994.

Design and Implementation of Proton Precession Marine Geomagnetic Base Station

LI Xian-feng[1,2,3], ZHENG Yan-peng[1,2,3], HUA Qing-feng[1,2,3], LIU Kai[1,2,3], MA Long[1,2,3], ZHANG Lin-qing[1,2,3]

(1. *First Institute of Oceanography, MNR*, Qingdao 266061, China;
2. *Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, MNR*, Qingdao 266061, China;
3. *Laboratory for Marine Geology, Pilot Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao)*, Qingdao 266061, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of complex operation (deployment, release and recovery) and high labor intensity for geomagnetic diurnal variation measurement with magnetometer attached to anchorage system by submarine buoy during deep-sea magnetic survey, it need to design an integrated and portable proton precession marine geomagnetic base station. This paper introduces the basic working principle of proton precession geomagnetic measurement, and elaborates the main control system, geomagnetic measurement unit and acoustic release system of the instrument. The frequency measurement accuracy for the Larmor precession signal is improved by using multi-period synchronous measurement method and linear interpolation zero-crossing frequency algorithm. Goertzel algorithm is used to improve the computational efficiency and reliability for acoustic response and release. Then the instrument and commercial instruments are tested on land and at sea. The results show that the performance of the instrument can meet the accuracy requirements of deep-sea magnetic diurnal variation correction measurement, and the operation at sea is convenient and reliable. It proves the validity of the integrated design of marine geomagnetic base station based on proton precession in marine geomagnetic diurnal variation measurement.

Key words: geomagnetic diurnal variation; proton precession; geomagnetic base station; integration; portable

Received: April 4, 2019