

# 海洋磁力仪的原理与技术指标对比分析

裴彦良<sup>1,2</sup>, 梁瑞才<sup>1,2</sup>, 刘晨光<sup>1,2</sup>, 韩国忠<sup>1,2</sup>, 李正光<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 针对现今世界市场上海洋磁力仪产品型号较多、技术指标复杂、应用范围不尽相同, 产品的选用存在一定困难等问题, 分别介绍了 3 种不同类型的磁力仪的工作原理, 具体对比分析了各种磁力仪的技术指标, 并简单介绍了磁力仪的应用及梯度仪组合方式。结果表明标准质子旋进式海洋磁力仪灵敏度较低, 存在进向误差, 但无死区, 价格最为低廉, 适合于对灵敏度要求不高的工程和科研地球物理调查。Overhauser 海洋磁力仪的灵敏度高, 无进向误差, 无死区, 价格便宜, 适合于大多数工程和科研地球物理调查。光泵式海洋磁力仪灵敏度和采样率最高, 梯度容忍度最大, 但存在死区和进向误差问题, 适用于高精度的海洋磁力梯度调查和航空磁力调查。分析结果显示: 各种类型的磁力仪各有优势, 具体选用应以具体情况而定。

**关键词:** 海洋磁力仪; 梯度仪; 质子旋进; Overhauser 海洋磁力仪; 光泵; 技术指标

中图分类号: P318.63

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2005)12-0004-05

磁法勘察一直是地球物理调查的重要内容, 特别是在海洋地球物理调查中, 由于海上地震勘察耗资巨大, 大面积地震调查比较困难, 所以磁法勘察就更为重要。世界各国对海洋调查越来越重视, 磁法勘察仪器也得以快速发展。磁力仪按工作原理可以分为质子旋进式、欧弗豪塞(Overhauser)式和光泵式等 3 种不同类型。经过几十年的发展, 海洋磁力仪在灵敏度、分辨率和精度等方面有了很大提高, 并出现了多种类型的海洋磁力梯度仪。现在生产磁力仪的厂家主要有中国船舶重工集团公司第七研究院第七一五研究所, 美国 GEOMETRICS 公司, 加拿大 Marine Magnetics 公司, 加拿大 GEM System 公司和法国 Geomag S.A.R.L 公司等, 这些公司分别侧重于生产和研发其中一种或两种类型的磁力仪并各具特色。作者简单介绍磁力仪的应用及梯度仪组合方式, 介绍 3 种不同类型的磁力仪的工作原理, 对比分析 3 种类型磁力仪的技术指标。

## 1 工作原理

质子旋进式磁力仪和光泵式磁力仪是磁力仪的两种基本类型, 它们的工作原理完全不同, 而 Overhauser 磁力仪是对质子旋进式磁力仪的发展, 并不是磁力仪一种独立的类型, 下面分别介绍这 3 种磁力仪的工作原理。

### 1.1 质子旋进式磁力仪工作原理

标准质子旋进式磁力仪原理框图如图 1 所示, 其传感器内装有少量富质子(氢原子核)的液体(例如煤油或甲醇), 在这些富含氢原子核的液体中, 其它分子的电子轨道磁矩和自旋磁矩、原子核自旋磁矩都对地彼此抵消, 只有氢原子核的自旋磁矩没有抵消, 并显示微弱的磁矩。在外磁场为零时, 氢原子磁矩是任意取向的。如果在液体的周围加有强大的人造磁场(由线圈产生), 此磁场引起液体内大多数质子自旋方向偏向一方, 自旋轴都将转至人造磁场方向上定向排列。如果人造磁场突然消失, 这时氢原子将在原有的自旋惯性和地磁场力的共同作用下, 以相同相位绕地磁场方向进动, 即质子旋进。质子旋进初始阶段因相位相同, 显示出宏观的磁性, 它周期性地切割在容器外的线圈, 产生电感应信号, 其频率和质子旋进频率相同。由于热搅动的作用, 进动的一致性将下降, 从而导致电感应信号随之急剧下降, 所以要在信噪比

收稿日期: 2003-12-17; 修回日期: 2005-03-01

基金项目: 国际海底区域研究开发项目(DY105-03-01-05)

作者简介: 裴彦良(1977-), 男, 河北廊坊人, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋地球物理研究, 电话: 0532-88967483, E-mail: peiyanliang@fio.org.cn

较高的时候,也就是衰变的前 0.5 s 测量质子旋进频率。质子旋进频率和地磁场有如下关系:

$$T = 23.4874f$$

式中  $f$  是质子旋进频率,  $T$  是地磁场,单位为 nT。此式表明  $T$  与  $f$  成正比,只要测量旋进信号的频率,就可以得到地磁场的大小。

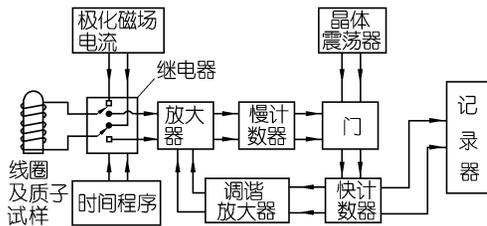


图 1 质子旋进式磁力仪原理框图

Fig. 1 Block diagram of a proton precession magnetometer

美国 GEOMETRICS 公司 70 年代生产的 G-801 磁力仪和最新生产的 G-877 磁力仪均属于质子旋进式海洋磁力仪。

### 1.2 Overhauser 磁力仪工作原理

如前所述,Overhauser 磁力仪是在上述质子旋进式磁力仪基础上发展而来的一种磁力仪,尽管它仍基于质子自旋共振原理,但 Overhauser 磁力仪在多方面与标准质子旋进式磁力仪相比有很大改进。

Overhauser 磁力仪和质子磁力仪之间的明显不同点是 Overhauser 效应通过电子-质子耦合现象达到质子极化的目的。一种经过特殊加工的含有一种自由放射性原子(带有一个游离电子的原子)的化学试剂被加入到富质子液体中。当被暴露于特定跃迁能级相应的低频射频射线中时,游离电子很容易被有效地激发。这时它并不辐射出射线以释放能量,而是将能量传送给附近的质子。这就可以不用施加强大的人造磁场来极化质子。这一点的重要性在于 Overhauser 磁力仪最大输出信号取决于 Overhauser 化学试剂的设计,而不是取决于输入传感器的能量。因此,只使用 1~2 W 的能量磁力仪传感器就可以产生清楚的强大的进动信号。而标准质子磁力仪则即使耗费数百瓦的能量也不能产生相同能级的信号。

Overhauser 磁力仪的另外一个优点是传感器的极化可以和进动信号的测量同时进行。这成倍提高了该磁力仪的可用信息量,比标准质子磁力仪的采样频率更高。

因为 Overhauser 磁力仪和标准质子磁力仪同样是测量质子共振谱线,所以它们具有同样出色的精度和长期稳定性特征。除此以外,Overhauser 磁力仪带宽更大,耗电更少,灵敏度比标准质子磁力仪高一个数量级。

加拿大 Marine Magnetics 公司生产的 SeaSPY 磁力仪、加拿大 GEM System 公司生产的 GSM-19M 浅拖海洋磁力仪以及法国 Geomag SARL 公司生产的 SMM-III 海洋磁力仪都属于这种 Overhauser 磁力仪。

### 1.3 光泵磁力仪基本原理

光泵磁力仪建立在塞曼效应基础之上,图 2 所示为光泵磁力仪原理框图。一个装有碱金属蒸气的容器(吸收室)是光泵磁力仪的核心部件。光源产生的光线经过透镜、滤镜和偏振片后形成红外圆偏振光,偏振光随即通过吸收室,之后光束聚焦在一个红外光检测器上。

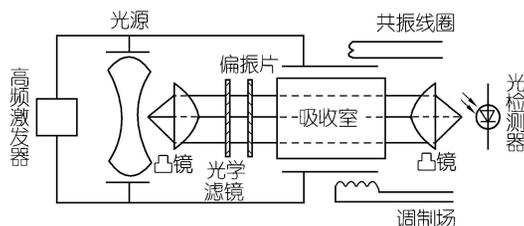


图 2 光泵磁力仪原理框图

Fig. 2 Block diagram of an optically pumped magnetometer

红外圆偏振光进入吸收室后,光子将撞击到碱金属原子。如果碱金属原子拥有相对于光子合适的自旋方向,光子将被捕获并使得碱金属原子从一个能级跃迁到另一个高能级,光子被捕获使得光束强度被削弱。一旦大多数碱金属原子已经吸收过光子并处于不能再吸收其它光子的状态,则吸收室所吸收的光线将大幅度减少,并将有最多的光线击中光检测器。

这时如果有具特定频率的震荡电磁场进入吸收室内,原子将被重新激发至能够吸收光子的方向上,这时将有最少的光线击中光检测器。这个特定频率被叫做拉莫尔频率( $f$ ),拉莫尔频率与环境磁场有着精确的比例关系,因而可以通过测量光检测器上光强度最弱时的震荡电磁场的频率来测量环境磁场  $T$  的大小。即

$$T = Kf$$

式中  $T$  为被测环境磁场,  $f$  为拉莫尔频率,  $K$  为比例因子。  $K$  对于特定的碱金属来说为一常数,  $K$  因碱金属的不同而改变。

当外磁场  $T$  变化时, 改变此振荡电磁场的频率, 使其始终维持通过吸收室的光线最弱, 即使振荡电磁场的频率自动跟踪外磁场的变化, 从而实现对外磁场  $T$  的连续自动测量。

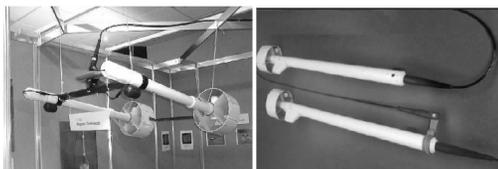
各种光泵磁力仪传感器吸收室内的碱金属可能不同, 现在使用的有钾、钠、铯、铷等。另外吸收室内也可以使用某些惰性气体例如氩。

中国船舶重工集团公司第七研究院第七一五所研制的 GB-5, GB-6 磁力仪和美国 GEOMETRICS 公司生产的 G-880, G-881 磁力仪都是光泵式海洋磁力仪, 前者是氩光泵磁力仪后者是铯光泵磁力仪。根据有关文献报道, 钾光泵磁力仪在灵敏度、绝对精度和采样速度等方面比铯光泵磁力仪有着更为出色的表现, 但现在钾光泵磁力仪多用于陆地和航空磁法勘察, 笔者尚未见到钾光泵海洋磁力仪。

## 2 海洋磁力仪的应用及梯度仪组合方式

海洋磁力仪的应用范围很广, 除了包括科研方面的常规地球物理调查外, 在工程方面的应用也越来越广泛, 在各种路由调查中一定要做的如海底油气管线、海底光缆及通讯电缆调查, 在海洋石油工业中的钻探井场调查, 事故处理方面海底沉船、失事飞机的寻测。在环境保护方面, 对河流、湖泊、港口的污染沉积物探测等等。磁力仪在军事上的作用也越来越受到重视, 如在反潜、搜寻海底军火等方面的应用。

另外, 为了消除日变的影响、削弱涌浪噪音和提高磁性体探测效率, 可以使用磁力梯度仪。由于三维地磁场有 3 个梯度方向可以测量, 即垂直方向、水平方向(垂直于航迹方向)和经度方向(沿航迹方向), 这样一维梯度仪的组合方式也就有垂直组合、水平横向组合(图 3a)、水平纵向组合(图 3b) 3 种。垂直组合梯度仪可以用于测定电缆管线等磁性体的埋深, 水平横向组合的梯度仪在追踪电缆管线等磁性体时可以减少拖曳深度, 水平纵向组合的梯度仪削弱地质体的影响而突出沉船、炸弹等块状磁性体, 用在环境调查方面可以突出浅层沉积削弱深层地质体影响。二维梯度仪(图 3c)可以同时确定磁源的位置和埋深, 而三维梯度仪(图 3d)则可以在确定磁源三维空间位置的同时确定磁性体的大小。



(a)

(b)



(c)



(d)

图 3 海洋梯度仪组合方式

Fig.3 Combined modes of the gradiometer

(a) 横向组合的一维梯度仪; (b) 纵向组合的一维梯度仪; (c) 二维梯度仪; (d) 三维梯度仪

(a) a transverse one dimensional gradiometer; (b) a longitudinal one dimensional gradiometer; (c) a two dimensional gradiometer; (d) a three dimensional gradiometer

## 3 磁力仪性能指标及几种典型磁力仪性能指标的对比

由于磁力仪的性能指标参数较多, 为了便于理解, 下面对其中主要几项进行介绍。

分辨率是指磁力仪在规定测量范围内可能检测出的磁场最小变化量的能力。分辨率由测量结果有效位的位数反映, 一般情况下其数值比灵敏度的数值高一个数量级。

灵敏度是指在相同磁场强度条件下重复读数的相对不确定性的统计值, 是传感器基本噪音电平的直接函数。

漂移是指在实际磁场没有变化的情况下磁力仪的输出随时间或温度的改变。漂移既可能是传感器引起的漂移也可能是电子电路引起的漂移。

进向误差是指磁场方向相对于磁力仪传感器的改变而引起的磁力仪输出的改变。引起这种现象的原因有两种。

一是在磁力仪拖曳系统中存在感生偶极子, 这将改变传感器位置处的磁通密度。只要磁力仪系统整体设计精良, 这种原因引起的进向误差是可以完全消除的。

二是由于磁力仪传感器的物理原理引起的, 这是无法消除的, 例如一些光泵磁力仪本身便固有进向误差。

在二维测量时,通过在垂直主测线方向上布设一条或多条联络测线的方法,可以对进向误差进行部分的补偿。

梯度容忍度是指磁力仪能够正常工作时各种所允许的最大梯度。当所测量磁场的梯度超过此最大值时,磁力仪的输出将产生混乱,这时的磁力仪读数是没意义的。

死区是指磁力仪传感器方向相对于环境磁场方向的旋转角度,在这个角度内传感器不能产生信号,

此时磁力仪将无法进行磁场测量。标准质子旋进磁力仪和 Overhauser 磁力仪均没有死区问题,传感器产生的信号完全与磁场方向无关。死区是光泵磁力仪特有的问题,因为其操作原理的限制,光泵磁力仪的死区无法消除。

在拖曳式海洋调查中,死区将限制磁力仪可以拖曳的方向。图 4 所示为某光泵磁力仪的死区示意图,地磁场与传感器光轴夹角在  $(0^\circ, 15^\circ)$  和  $(75^\circ, 90^\circ)$  范围内为此磁力仪的死区。

表 1 3 种类型磁力仪技术指标对比

Tab. 1 Specification contrast of the three types of magnetometer

型号	工作原理	分辨率 (nT)	灵敏度 (nT)	绝对精度 (nT)	梯度容忍度 (nT/m)	死区 ( $^\circ$ )	进向误差 (nT)	温度漂移 (nT/ $^\circ$ C)	耗电 (W)	采样速度 (Hz)
G877	标准质子旋进	0.1	0.1 (在 3Hz)	< 1	-	无	$\pm 1$	-	48~64	0.1~3
SeaSPY	质子旋进 Overhauser 效应	0.001	0.01	0.2	> 10 000	无	无	无	1~3	0.1~4
G880	铯光泵	0.001	0.01 (在 1Hz)	$\pm 2$	> 20 000	0~15 75~90	< $\pm 0.5$	0.05	150	0.1~10

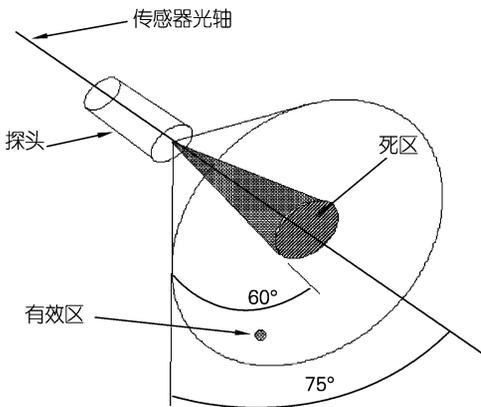


图 4 光泵磁力仪死区示意图

Fig. 4 Dead zoon of a optically pumped magnetometer

表 1 列出了 3 种类型磁力仪典型产品的性能指标,其中所标数值均为仪器生产厂家的标称值。

由表 1 所列数据可以对各种类型磁力仪的性能有一个大概的了解,下面做一个小结。

标准质子旋进式海洋磁力仪是 3 种磁力仪中应用最早的一种磁力仪,其灵敏度可达 0.1 nT,一般无死区,一般有进向误差,采样率一般较低但现在也已经可以达到 3 Hz,价格最为低廉,适合于对灵敏度要

求不高的工程和科研地球物理调查。

Overhauser 海洋磁力仪的灵敏度可达 0.01 nT,无死区,无进向误差,采样率可达 4 Hz,耗电很低,操作简单,价格便宜,适合于大多数工程和科研地球物理调查。但在磁场梯度很大的情况下,质子旋进信号可能急剧下降从而导致仪器读数不可用。另外由于传感器输出信号的幅值大约在微伏级,频率为几千赫兹,而且测量精度必须大于 0.04 Hz,这样如果附近有交变电磁场的影响,将无法测量传感器输出的信号导致仪器不可用。

光泵式海洋磁力仪灵敏度可达 0.01 nT 或更高(钾光泵磁力仪),梯度容忍度远大于质子旋进式磁力仪,采样速率可达 10 Hz 或更高,由于工作原理的限制一般有死区和进向误差。在对灵敏度要求较高的海洋磁力梯度调查等领域应用较多。另外,质子磁力仪要求有 20 000 nT 或更高强度的磁场才能提供稳定的读数,而光泵磁力仪能够记录只有几个 nT 强度的环境场,因此可以使用在太空磁力勘测上。

#### 4 结语

标准质子旋进式海洋磁力仪由于其灵敏度较低,在国内海洋工程和科研地球物理调查中已经较少使用。光泵磁力仪和 Overhauser 磁力仪是现在比较主

流的两类磁力仪,在国内最近几年以来已经开始广泛应用。光泵磁力仪和 Overhauser 磁力仪在市场上相互竞争比较激烈,双方均试图说明自己是最好的,例如 GEOMETRICS 公司就对自己的 G881 铯光泵磁力仪及另外厂家的 Overhauser 磁力仪进行了对比测试,只不过由于合法性的争议测试结果至今尚未发布。但总体来说,这两种类型的磁力仪各有优势,Overhauser 磁力仪一般小巧轻便,价格适宜,而光泵磁力仪采样速度更高一些,梯度容忍度更大一些,因此具体选用应以具体情况而定。

参考文献:

[1] 史 涛. 地球物理学基础[M]. 北京:北京大学出版社,

2002. 127-129.

- [2] 林 君. 地球物理弱磁测量仪器进展[J]. 石油仪器, 1997, 11(2): 7-11.
- [3] 钟献盛,裴彦良. 应用磁力仪探测海底电缆方法的探讨[J]. 海洋科学, 2001, 25(9): 10-11.
- [4] Jones E J W. Marine Geophysics[M]. England: John Wiley & Sons LTD, 1999. 166-170.
- [5] Boyce J, Pozza M, Bill M. High-resolution magnetic mapping of contaminated sediments in urbanized environments[J]. *The Leading Edge*, 2001, 20(8): 886-889.
- [6] 管志宁,郝天珧,姚长利. 21 世纪重力与磁法勘探的展望[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 237-244.

## Principle of marine magnetometer and specification comparative analysis

PEI Yan-liang<sup>1,2</sup>, LIANG Rui-cai<sup>1,2</sup>, LIU Chen-guang<sup>1,2</sup>, HAN Guo-zhong<sup>1,2</sup>, LI Zheng-guang<sup>1,2</sup>

(1. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: Dec., 17, 2003

**Key words:** marine magnetometer; gradiometer; proton precession; Overhauser's marine magnetometer; optically pump; specifications

**Abstract:** There are many types of marine magnetometers in the globe market. The specifications of them are complex and the application fields are diverse, so there are difficulties in choosing and using the magnetometer products. In this paper the authors introduce the operational principles of three types of magnetometers, and analyze the specifications concretely, and brief the applications of magnetometer and the combined modes of the gradiometer. There are low sensitivity and heading error for a proton precession magnetometer. But there is no dead zone and the price of it is the lowest. It is suitable for the projects and geophysical research surveys which do not demand high sensitivity. There are high sensitivity, no head error, no dead zone for an Overhauser magnetometer. And the price of it is not so high. It is suitable for most of the projects and geophysical research surveys. There are far higher sensitivity and sample rate and gradient tolerance for an optically pumped magnetometer. But there are dead zone and head error for it. It is suitable for high precision marine magnetic gradient surveys and aeromagnetic surveys. The analysis result demonstrates that there is its own superiority with each type of magnetometer and we should choose magnetometer according to concrete situation.

( 本文编辑: 刘珊珊)