

国内氦光泵磁力仪介绍及其应用场景分析

赵宇佳

摘要：氦光泵磁力仪被广泛应用于海洋、航空和地面工程探测定位中。本文阐述了氦光泵磁力仪的原理。基于工程应用的目的，分别介绍国内面向海洋型、航空型和地面型的各型磁力仪的组成、作业安装方式及应用领域，对于工程作业具有指导意义。

关键词：氦光泵；磁力仪；工程应用

一、前言

磁力仪是一种通过探测磁异常以探查铁磁性物体的仪器，它有着不受空气、水流、泥沙及水文条件等影响的特点^[1]，因此对水面、水下、陆地的磁性体均可探测。结合GPS系统，还可实现磁性体的定位。针对水面、水下、陆地的磁性体的探测定位需求，国内发展了海洋型、航空型、地面型各型磁力仪。

国内磁力仪发展中，氦光泵磁力仪发展最早最成熟。本文以氦光泵为例，介绍了国内适用于海陆空的各型磁力仪的发展、作业方式，并分析了各自的应用场景，对于工程作业有指导意义。

二、氦光泵磁力仪的原理

氦光泵磁力仪的原理主要包括塞曼效应、光泵作用和磁共振^[2]。塞曼效应是将点亮的氦灯置于磁场中，进入氦室的光受到磁场的作用，不同能级间跃迁发生分裂，形成多条光谱线的现象。光泵作用就是使用足够能量的光照射，将处于亚稳态非最高能级的原子激发跃迁至激发态，最终返回并稳定、富集在亚稳态最高能级上，以便于光线全部透过吸收室，使检测到的光强最强。磁共振的方法是指通过外加一射频场，能量等于相邻塞曼次能级差、方向与光轴正交，当吸收室透过的光强最弱时，达到共振，可实现对最大信号和磁场值的跟踪。

三、海洋氦光泵磁力仪

(一) 组成

国内海洋氦光泵磁力仪的代表产品包括GB-5A、GB-6、GB-6A型磁力仪等，随着产品的迭代升级，产品的性能也

在提高。图1为GB-6A型海洋氦光泵磁力仪，它采用双光系探头方法，解决了全球适用性问题；将数字式小型化高精度氦光泵磁力仪全部集成在水下拖体内，其控制显示和数据处理由船上的综合处理机实现。同时，将GPS导航定位系统、磁力仪、水深测量仪、压力高度计等集成为综合测量系统，借助相配套的导航和数据采集软件，可实时完成高精度海洋磁法探测^[3]。



图1 GB-6A型海洋氦光泵磁力仪

(二) 作业方式

海洋氦光泵磁力仪通常采用拖曳的方式进行作业^[4]，工作示意图见图2，拖缆一端固定于船尾，另一端系紧拖鱼，放入水中作业。测量船通常选择木船，可避免船体及船上的铁磁性物体对磁力仪的影响。作业时，同时监测水深和拖鱼入水深度，以防止拖鱼触底损坏仪器。

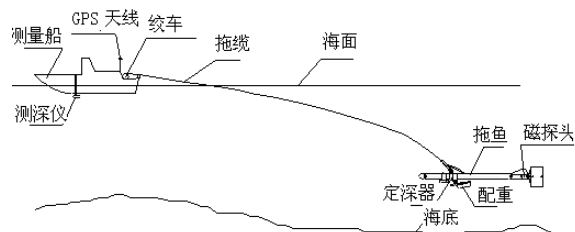


图2 海洋氦光泵磁力仪海上探测示意图



(三) 位置校准

拖鱼的磁探头处是探测的目标位置,从图2可以看出, GPS 定位系统位于船尾,和磁探头仍有一定的距离,为了定位准确,需要将 GPS 位置校正到磁探头处。为了提高位置校准的准确性,通常要求磁力仪探测时,顺流或逆流作业。计拖缆长度为 L , 测量船到水面的距离为 h_1 , 拖鱼入水深度为 h_2 , GPS 天线到船尾的距离为 d , 则 GPS 位置到磁探头的距离 W 为:

$$W = \sqrt{L^2 - (h_1 + h_2)^2} + d \quad (1)$$

(四) 应用场景

海洋氦光泵磁力仪的应用主要在海洋地质勘探、海底铁磁性小目标探测定位和海洋地磁背景场调查三个方面。

对于海洋地质勘探,海洋氦光泵磁力仪的应用领域包括海洋地质构造、海洋资源勘察;配合水文地质、工程地质和环境地质而进行的磁法勘探。

对于海底铁磁性小目标探测定位,海洋氦光泵磁力仪主要用途是:未爆军火、海底水雷的探测与定位^[5];航道、锚地、港口等泥下障碍物的探测与定位;海底管道,海缆路由调查及障碍物探查;沉船和其他各种铁磁体的探测与定位。

四、航空氦光泵磁力仪

(一) 组成

GB-10 航空氦光泵磁力仪的代表产品为 GB-10 型磁力仪。它与三分量磁力仪、数字磁补偿器、GPS 等,组成航磁测量系统。其中,GB-10 型氦光泵磁力仪测量地磁总场,三分量磁力仪测量地磁三分量,后者输出到数字磁补偿,用于自动补偿由地磁总场中飞行器引起的磁干扰^[6],使磁力仪的工作性能在飞行器上得到最大限度的发挥。

(二) 作业方式

航空氦光泵磁力仪通常采用固定安装的方式,结合飞机的磁干扰大小等合理选择安装位置,图3—图6分别是安装于飞机尾部磁探杆内、前伸安装于动力三角翼上、安装于飞机翼尖、垂直安装于四旋翼无人机的示例。



图3 磁力仪安装于飞机尾部磁探杆内



图10 三角翼飞机在作业飞行

图4 磁力仪前伸安装于动力三角翼上



图5 磁力仪安装于飞机翼尖



图6 磁力仪垂直安装于四旋翼无人机

(三) 平台磁干扰补偿

飞机的建造材料不可避免地使用铁磁性物质,这就导致飞机做机动动作时,磁性物质将干扰磁力仪的工作。通常可使用基于 Tolles-Lawson 模型的磁补偿方法来消除平台磁干扰。假设飞机的磁干扰等效为一个磁源,根据干扰的产生机理不同,磁干扰可分为永久场、感应场和涡流场。其中,永久场是由飞机固有铁磁性物体产生,感应场由飞机材料受地磁感应产生,涡流场由飞机结构件切割地磁的磁通量变化引起。磁干扰的组成见公式(2):

$$H_d = H_{pd} + H_{id} + H_{ed} \quad (2)$$

其中, H_d 为总干扰场, H_{pd} 、 H_{id} 、 H_{ed} 分别为永久场、感应场、涡流场。

永久场可以用与飞机轴平行的三个分量来表征,表达

式见公式 (3)。

$$H_{pd} = p_1 \cdot \cos x + p_2 \cdot \cos y + p_3 \cdot \cos z \quad (3)$$

其中, p_1 、 p_2 、 p_3 为永久长的三项补偿系数, $\cos x$ 、 $\cos y$ 、 $\cos z$ 为三个分量余弦, 表达式见公式 (4) — 公式 (6):

$$\cos x = x / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4)$$

$$\cos y = y / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (5)$$

$$\cos z = z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (6)$$

式中, x 、 y 、 z 分量分别为磁通门传感器测得的三个分量。

感应场与地磁场的三个分量 $H_e \cdot \cos x$ 、 $H_e \cdot \cos y$ 、 $H_e \cdot \cos z$ 成比例, 表达式见公式 (7):

$$H_{id} = a_{11} \cdot H_e \cdot \cos x \cos x + a_{12} \cdot H_e \cdot \cos x \cos y + a_{13} \cdot H_e \cdot \cos x \cos z + a_{21} \cdot H_e \cdot \cos y \cos x + a_{22} \cdot H_e \cdot \cos y \cos y + a_{23} \cdot H_e \cdot \cos y \cos z + a_{31} \cdot H_e \cdot \cos z \cos x + a_{32} \cdot H_e \cdot \cos z \cos y + a_{33} \cdot H_e \cdot \cos z \cos z \quad (7)$$

式中, H_e 为地磁总场,

涡流场与各个分量的变化率 $H_e \cdot \cos x'$ 、 $H_e \cdot \cos y'$ 和 $H_e \cdot \cos z'$ 成正比, 表达式见公式 (8):

$$H_{ed} = b_{11} \cdot H_e \cdot \cos x \cos x' + b_{12} \cdot H_e \cdot \cos x \cos y' + b_{13} \cdot H_e \cdot \cos x \cos z' + b_{21} \cdot H_e \cdot \cos y \cos x' + b_{22} \cdot H_e \cdot \cos y \cos y' + b_{23} \cdot H_e \cdot \cos y \cos z' + b_{31} \cdot H_e \cdot \cos z \cos x' + b_{32} \cdot H_e \cdot \cos z \cos y' + b_{33} \cdot H_e \cdot \cos z \cos z' \quad (8)$$

根据地磁总场和磁通门测得的三个分量, 使用上述磁补偿模型, 可以解算磁补偿系数, 进而消除飞机平台自身的磁干扰。地磁总场和磁通门测得的三个分量可以通过设计一组磁补偿飞行来获取。补偿飞行通常按正方形进行, 依次沿北、东、南、西向飞行, 分别做横滚、俯仰、偏航的机动动作。为了避免地表磁场干扰, 补偿飞行应在高空进行。

(四) 应用场景

航空氦光泵磁力仪通常应用于矿产资源勘察, 包括配合地质填图、研究地质构造和普查找矿为主的综合性磁法勘探; 以研究大地构造, 深部构造、区域地质构造为主的区域性磁法勘探; 勘察某种矿产的专属性磁法勘探; 以研究沉积盆地内磁性基底深度及其构造特征, 岩浆岩体分布, 局部构造及含油远景地段等为主的油气磁法勘探等。

五、地面氦光泵磁力仪

(一) 组成

地面便携式磁力仪的代表有 DGB-8 型地面氦光泵磁力仪, 它有着实用简便、价格低廉的优点。该型磁力仪集成了 GPS 定位模块和手持数据采集终端等, 具备定位导航功能, 可用于野外地面矿产资源的勘察。它是一种便携型的数字化磁力仪设备, 由单人携带和操作使用, 在定点和移动过程中测量地磁场及其变化。DGB-8 型地面氦光泵磁力仪及其使用方式如图 7 所示。



图 7 DGB-8 型地面氦光泵磁力仪及其使用方式

(二) 应用场景

地面氦光泵磁力仪通常应用于小区域的地面矿产资源勘察和考古^[7]。在飞行器不能到达的区域, 或者小面积探测区域, 可以作为航空磁力仪的补充。当前, 该型磁力仪已成功应用于良渚古文化科技考古、山东古城墙磁法勘探等。

六、结语

本文基于工程应用的目的, 介绍了国内面向海洋型、航空型和地面型的各型磁力仪的组成、作业安装方式及应用领域。对于工程作业具有指导意义。实际应用中, 可根据磁法探测的目的, 选择适合的设备, 或结合其他仪器, 以达到更好的探测效果。

参考文献

- [1] 吴天彪, 叶庆华. 磁力仪及其应用 [J]. 国外地质勘探技术, 1994 (01): 43-46.
- [2] 何聪. 氦光泵磁敏传感器及其关键电路设计 [R]. 吉林大学, 2014.
- [3] 余恺, 周春水, 王泽冰. 海洋磁力仪在沉舰探测定位中的运用 [J]. 声学与电子工程, 2018 (03): 43-45.
- [4] 王文静, 董慧. 浅谈磁力仪结合多波束测深系统寻找海底金属障碍物的应用技术 [J]. 航海, 2020 (01): 22-24.
- [5] 刘荣林. 海洋磁力仪在某近岸海域未爆弹探测中的应用 [J]. 海洋测绘, 2021, 41 (04): 48-52.
- [6] 王婕, 郭子祺, 刘建英. 固定翼无人机航磁探测系统的磁补偿模型分析 [J]. 航空学报, 2016, 37 (11): 3435-3442.
- [7] 王景然, 顾建松, 梁国庆, 王泽冰, 宗发保, 周波, 官佳. 数字式小型化磁力仪在古石桥考古中的应用 [J]. 声学与电子工程, 2017 (4): 49-51.

(作者单位: 海装上海局驻杭州地区军事代表室)