



地球物理矢量场磁测技术的研究进展

林君, 刁庶, 张洋, 张杨, 赵静*

吉林大学仪器科学与电气工程学院, 地球信息探测仪器教育部重点实验室, 长春 130021

* 联系人, E-mail: zhaojing_8239@jlu.edu.cn

2017-01-08 收稿, 2017-02-27 修回, 2017-02-28 接受, 2017-05-12 网络版发表

国家自然科学基金(41474091)和吉林省科技发展计划(20160520109JH, 20170101065JC)资助

摘要 矢量磁测技术是工程和环境地球物理勘探中最有效的方法之一, 与传统总场强度或总场梯度测量相比, 可同时获取地磁场模量大小和方向信息, 有效减少反演中的多解性, 有助于对磁性体的定量解释, 获得更多更准确的反映场源的信息, 提高目标体的探测分辨率和定位精度. 本文根据不同应用环境, 介绍了地面矢量磁测、井中矢量磁测、海洋矢量磁测、航空矢量磁测及卫星矢量磁测等技术的应用情况和技术特点, 综述了各矢量磁测仪器装备的国内外研究现状. 最后, 分析了矢量磁测技术的发展趋势, 即由单一的总场或总场梯度测量, 转向为多信息的矢量场测量或多参量测量; 从低效率、探测深度浅的地面磁测转向高效率航空、大深度井中或深海目标体的快速定位与探测, 并逐步发展为地面、井中、海洋、航空、卫星联合磁测和解释. 通过各磁测技术和方法的优势互补, 提高地球物理磁场测量精度和反演分辨率.

关键词 矢量磁测, 地球物理勘探, 岩矿体评估, 磁力仪

磁测技术是地球物理方法探测地下资源的基本方法之一, 可以测量总场及其在笛卡儿坐标系下3个方向的矢量场, 具有探测精度高、信息量丰富等特点. 矢量场磁测能够直接进行磁场的径向分量和垂向分量测量, 可以获得更多更精准的反映场源的信息和特点, 提高地下资源的探测分辨率和定位精确度, 因此备受科研工作者的关注.

磁测技术可以分为地面矢量磁测技术、井中矢量磁测技术、海洋矢量磁测技术、航空矢量磁测技术和卫星矢量磁测技术等. 地面矢量磁测技术主要应用于地表水平分布的矿体探测, 由于垂向上不同地质体在地表产生的异常叠加, 从而难以区分深度, 多与其他磁测技术联合探测. 井中矢量磁测技术是以岩石的磁性特征为基础, 测量地磁场3个正交分量, 径向探测范围大, 既能寻找强磁铁矿床, 也能寻找磁性较弱的有色金属, 是探测磁性矿体的一种有效手段.

段, 特别为地球深部矿产资源的勘查(一般惯例用于地下未知物)和评估提供科学依据. 海洋矢量磁测技术是利用船只携带磁力仪在海上进行地磁测量的过程, 在探测水下潜艇、未爆炸武器、磁性障碍物等海洋工程测量和军事测量应用中起着至关重要的作用. 传统的海洋磁测方式是以总场测量为主, 近年来开始利用三分量磁测以够获取更多的地磁信息为海战场提供重要参数. 航空矢量磁测技术主要用于金属矿产远景区内勘查程度较高的已知矿区及其外围、重点找矿靶区、地形复杂且地面勘查较为困难区域, 也可以用于新发现矿区获取磁测数据和资料. 卫星磁测技术可以获取高质量、全球覆盖的磁测数据, 进行全天候、全天时、不间断测量, 从而进行地磁场演变及空间电流运动规律等一系列科学研究.

本文首先与总场测量相比, 阐述矢量磁测的技术特点. 然后根据不同应用环境, 详细综述地面矢量

引用格式: 林君, 刁庶, 张洋, 等. 地球物理矢量场磁测技术的研究进展. 科学通报, 2017, 62: 2606–2618

Lin J, Diao S, Zhang Y, et al. Research progress of geophysical vector magnetic field survey technology (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2606–2618, doi: 10.1360/N972017-00010

磁测技术、井中矢量磁测技术、海洋矢量磁测技术、航空矢量磁测技术及卫星矢量磁测技术的应用情况、技术特点,以及国内外仪器的发展现状对比,最后总结这5种矢量磁测技术的优势和劣势,并讨论其应用前景和发展建议。

1 地面矢量磁测技术

地球本身具有磁性,它及近地空间存在着磁场,该磁场的强度和方向随地点、甚至随时间发生变化。在某一范围内,地表某点的磁场是均匀的,可用地磁要素来表示其方向和大小。地磁要素包括磁偏角 D 、磁倾角 I 、磁场强度 B 及地磁矢量场的水平分量 H 、北分量 B_x 、东分量 B_y 和垂直分量 B_z 等。

地面矢量磁测主要分为固定式测量和移动式测量两种测量方式,其目的均是在地磁场观测中,通过测量地磁要素来分析地磁场特征,主要工作任务是勘察具有磁性异常的矿体、地质构造分区以及为地质填图服务等^[1]。然而,受移动平台的振动和姿态测量单元性能参数的限制,地面移动式的三分量磁测目前并未取得广泛的应用^[2~4]。而固定式测量由于其发展早、易实现,已广泛应用在地震台站的基本台网、地下磁异常源搜索、微弱磁共振信号获取等众多领域。

中国地震局地磁台站基本台网从2003年开始利用磁通门磁力仪检测地震危险区的地磁场变化。通过该方法可以及时发现地震地磁前兆异常,为准确预报地震的发生提供基础信息,同时利用观测到的地磁场强度、地磁倾角、地磁偏角等研究地球基本磁场和地下深部结构。此外还可以利用获得的区域内电离层、亚暴电流及甚低频磁场的高质量观测数据研究空间天气。基本台网中的磁通门磁力仪阵列系统针对野外观测的特殊性,实现了对野外流动观测设备的通信接入、自动识别、监控管理、数据汇集等组网功能。依据地磁场的时间和空间分布特征,布置在基本台网中的每一台三分量磁通门磁力仪通过无线或有线Internet网连接到监控中心,经过一段时间的记录获取大量的地磁原始观测数据,以实现地磁数据的可靠、实时监测。该系统在开展野外地磁短周期观测台阵工作方面发挥了重要作用。然而,受观测场地、供电、通信条件等因素影响会出现观测中断现象,其稳定性还需进一步加强,且地磁台站基本台网所使用的三分量磁通门磁力仪受工作原理的限制,精度不高($<0.1\text{ nT}$),可考虑将SQUID(Superconducting

Quantum Interference Devices)引入到地磁台站的三分量磁测工作以得到更高的灵敏度^[5,6]。

2007年德国耶拿物理高技术研究所(Institute Physical High-Technology, IPHT)利用低温SQUID研制了地面张量磁梯度测量系统^[7],如图1所示。每个系统包括3套子系统,每套子系统的磁测探头由1个SQUID平面梯度计和3个SQUID磁强计组成,用于测量某点的地磁场梯度值,灵敏度为 7 fT/cm 。该系统装配了惯性导航系统,提供俯仰、横滚和偏航等3个姿态数据,用于确定系统位置信息和进行磁测数据姿态校正,定位精度为 5 cm ^[8]。由于其测量对象是磁场矢量分量的梯度,故不受总场测量的限制,所测量的结果能够反映目标体的矢量磁矩信息,且张量元素受地磁场的倾角、偏角影响小,因此计算得到的张量不变量不需要额外的处理即可很好地描述磁异常源。通过区域探测后直接对地下 10 m 以内的磁异常源进行成像,可用于地磁考古和未爆炸物(unexploded ordnance, UXO)的搜索。该系统曾在秘鲁进行了 11000 m^2 区域的实际测量工作,取得了高精度的地面磁测数据,获得了丰富的古地磁和地质信息。

此外,地磁场三分量测量也被应用于地面微弱磁共振信号的获取中。由于微弱的磁共振信号极易被高水平的电磁噪声淹没,通过在地面铺设正交的线圈,采集3个分量的电磁噪声,利用不同分量的相关性进行参考抵消以提取可靠的磁共振信号。基于这一思想,德国学者Costabel和Müller-Petke^[9]选择Brädikow和Barnewitz进行野外实验,并对探测结果进行了比较,其中,Brädikow的电磁干扰以 50 Hz 的

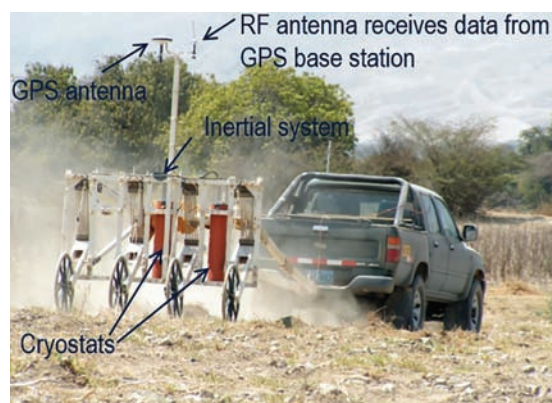


图1 德国耶拿物理高技术研究所研制的地面张量磁梯度测量系统
Figure 1 Ground tensor magnetic gradient measurement system developed by IPHT

基波频率为主,由附近村庄的居民用电产生;Barnewitz的电磁干扰以16.7 Hz的基波频率为主,由3.5 km外的铁路及电力线涡流产生.然后将测得的电磁噪声场的3个分量用于参考消噪,得到了最佳的探测结果,获取的关键参数——初始振幅 E 和横向弛豫时间 T_2^* 的拟合误差最小.

目前,中国地下工程正处于高速发展阶段,而地下工程所面临的地质条件异常复杂,受地质灾害尤其是施工过程中突涌水体的威胁十分严重.磁共振方法是目前世界上最为行之有效的地下水直接探测方法,但由于地下空间狭窄、环境噪声复杂,通风、排水和照明用电、施工机械等设备无法停止,电磁噪声干扰严重,面临着弱信号提取难等问题.为此,吉林大学发明了磁共振三分量消噪装置及消噪方法^[10],提供一种适用于环境噪声复杂,探测空间有限的弱信号获取方法,通过在掌子面前方布设接收线圈,用于获取含噪声的磁共振信号,并在附近正交铺设3个参考线圈,用于采集三分量的电磁噪声,利用不同分量噪声相关性对接收信号中的电磁噪声进行压制可以实现磁共振信号的可靠提取.然而,该内容正处于理论研究阶段,还需开展实际应用研究工作.

2 井中矢量磁测技术

井中矢量磁测技术属于地球物理测井的一种,用于普查勘探磁铁矿床或含有强磁性矿物的多金属矿床,以研究岩石、矿体的磁性为基础,是地面磁测在空间上发展和延伸的井中物探方法.井中矢量磁测可以解决地面磁测不能解决的一些问题,如井底、井旁是否有矿体、矿尾和矿顶的深度位置等,特别是在深部磁性矿床勘探中具有独特的优势.井中磁测避免了地面磁测中受人文干扰与浅层磁性不均匀的影响,且纵向分辨率高.正因为此,井中三分量磁测已成为普查勘探磁铁矿床每孔必测的有效手段^[11,12].井中三分量磁测工作,是在钻孔中沿钻孔方向进行的,通过测量井中不同深度磁场的 X 、 Y 及 Z 三个分量,计算磁异常分量 ΔX 、 ΔY 及 ΔZ ,可以对井旁盲磁性矿、井底盲矿、矿体形状、矿产规模等进行判断和评估^[13~15],三个分量 ΔX 、 ΔY 及 ΔZ 也可以合成总强度异常 ΔT .通过三分量磁力仪可以获得各测点深度,对应深度的井顶角和井斜方位角以及对应深度的磁测水平分量 X 、 Y 和垂直分量 Z .在实际应用中,为了便于分析磁异常的定性定量研究,将 ΔT 分成垂直分量

ΔZ 和径向分量 ΔH , ΔH 又分为垂直于矿体走向的水平分量 $\Delta H_{\perp}$ 和平行于矿体走向的水平分量 $\Delta H_{\parallel}$,从而将磁异常强度与矿体的走向联系起来.通过对磁异常区域的磁垂直分量和径向分量等参数的分析,可以推断井底和井旁有无矿体.

20世纪90年代,德国大陆钻探计划(KTB)在井中磁测的数据处理和反演解释方面都有很大进展;美国、瑞典和加拿大等在磁测仪器设计、数据处理等方面做出了重要贡献.Kuhnke和Musmann^[16]设计了井中磁力仪,分析了井中磁测过程中仪器可能存在问题,并根据耐温特性,研制了不同型号的仪器系统.Bosum等人^[17]分析了井中磁测数据特点,Worm^[18]结合KTBJ井中磁测数据资料进行了岩石磁性模拟研究.Leonardi和Kümpel^[19]利用KTBJ的磁测数据研究地壳结构各向异性,并得到了一些分形特征.Li和Oldenburg^[20]研究了地面和井中的磁测资料,通过联合反演方法提高了探测分辨率.

20世纪60年代中期,原冶金部北京地质研究所王庆乙等人^[21]研制出中国首台晶体管井中三分量磁测系统,采用2个自由度的重力定向,在井中可直接测量垂向坐标系的三分量磁场值,与当时瑞典研制的自由度重力定向的系统相比,在测量精度及实时性方面具有明显优势.到了20世纪70年代中期,该系统已推广应用到26个省、市和自治区,在160个矿区、2000多口钻井进行了探测,勘探到几十至百米的大铁矿几十处^[21~23].

20世纪后期,金属矿推行小口径($\Phi=36$ mm)钻机,受井下探管空间的制约,原有两自由度、两级重力定向精度已难以满足找矿需求,开始引入三轴磁通门磁力仪结合重力加速度计组成的井下三分量磁测系统,但当时的磁通门精度不高,只在一些强磁性铁矿物勘探时开展了少量工作.21世纪初,高精度井中三分量磁测系统的研制成功,为深部找矿及危机矿山深部资源勘查提供了有效手段.如重庆地质仪器厂研制的GJCX-1型高精度井中三分量磁力仪(图2), X 、 Y 方向转向差 ≤ 100 nT, Z 方向转向差 ≤ 50 nT;上海地学仪器研究所研制的JCC3-2(A)型高精度三分量测井仪采用三轴巨型磁阻传感器作为磁敏元件、三轴重力加速度传感器作为定向元件,磁分量灵敏度40 nT、磁分量精度优于100 nT,在当前的国内井中磁测工作中发挥了重要作用.

井中三分量磁测技术具有径向探测范围大的优



图2 GJCX-1型井中三分量磁力仪

Figure 2 Borehole three-component magnetometer GJCX-1

点,为划分钻孔剖面上的磁性岩体或矿体,以及勘探井旁或井底含磁性矿物或与磁性矿物关联的盲矿体提供了一种有效工具,在一定程度上可以对地面磁测的反演进行深度标定,解决地面磁测无法完成的探测工作,尤其是地层深部矿体探测的一种有效方法。但由于井中磁测受钻孔孔径、井温及仪器本身尺寸、体积等因素限制,所采用的磁传感器精度低于地面磁测,总的观测精度也低于地面磁测一个量级。因此,研制更高精度的井中三分量磁测仪器具有重要意义。

3 海洋矢量磁测技术

海洋磁测是获取海洋区域地磁场分布和变化特征信息的主要方式,也是海洋工程测量和军事海道测量的重要内容之一^[24]。海洋磁测最早可追溯到20世纪50年代, Vacquier等人^[25]采用磁通门磁力仪在三大洋进行地磁场测量^[26]。在早期海洋磁测中,主要就是采用磁通门磁力仪。自20世纪80年代起,国际地学界开始了海底地磁观测,布设几十个海底观测站进行海洋大地电磁测量,开展地下矿藏及地球动力

学研究。测量磁场时,将磁力仪置于距海底1 m的三角架上,一般连续记录6个月,采样率0.5 Hz。根据大地电场和磁场与电阻率之间的关系,得到地下电阻率。后来,又出现了人工激发的大地电磁测量方法,如海洋可控源电磁法^[27]。目前,海洋磁测主要采用光泵或Overhauser磁力仪进行水下磁测^[28]。为了减少波浪的影响,磁探头通常在海水面下一定深度,采用拖拽式测量。1997年,日本科学家Seama等人^[29]研发了用于深拖探测的矢量磁力仪,为了确定深海中的拖体位置采用了惯导系统和GPS、短基线的声学测量和压力测量。美国斯克里普斯海洋研究所Gee与Cande^[30]开发了10~12节速度的矢量磁力仪系统,测试结果表明该设备可以确定30~50 nT的水平垂直分量,在低纬度区域使用具有重要意义。美国Geometrics公司在海洋磁力仪研发技术处于国际领先水平,其研发的G-882铯光泵海洋磁力仪如图3(a)所示,绝对精度优于3 nT,量程范围20000~100000 nT。加拿大Marine Magnetics公司研制的SeaSPY海洋磁力仪如图3(b)所示,绝对精度达到0.2 nT,量程范围18000~120000 nT。另外,通过把4个独立的磁力仪组合起来可实现梯度磁测,如图3(c)所示的阵列式海洋磁力仪SeaQuest,可以获取更多精准的参数信息,为检测海洋水下异常提供更可靠依据。

为了识别短极性事件引起的磁异常或其他局部磁性体产生的异常,美国国家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)Ames研究所Blakely等人^[31]开发了磁矢量测量系统; Horner-Johnson和Gordon^[32]通过谱分析方法识别海底磁条带异常,发现航磁测数据比船载总场测量数据具有更好的结果,发展搭载式小型无人潜航器(AUV)进行自主海洋磁测正逐渐成为未来海洋磁测技术的新方向。1995年,美国伍兹霍尔海洋研究

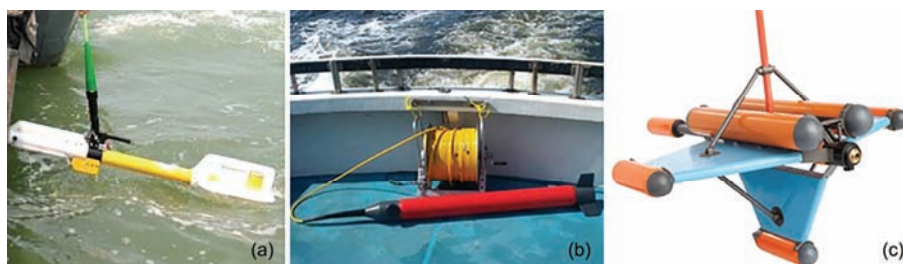


图3 海洋磁力仪照片。(a) G-882 海洋磁力仪; (b) SeaSPY海洋磁力仪; (c) SeaQuest阵列式海洋磁力仪

Figure 3 Photographs of the marine magnetometer. (a) Marine magnetometer G-882; (b) marine magnetometer SeaSPY; (c) marine magnetometers array SeaQuest

所研制了世界第一款用于海洋磁测的无人潜航器 ABE, 主要由电导率探头、温度探头、深度计、摄影机和磁力仪组成, 可长时间深海巡航, 如图4(a)所示. 2012年, Pei等人^[33]研制了一款小型无人潜航器, 并在实测中取得了较为理想的效果; 同年, 美国 Geometrics 公司和 Delaware 大学共同研发了 G-880AUV水下磁探测无人潜航器, 如图4(b)所示, 成功应用于水下未爆炸物探测.

国内海洋磁测工作起步较晚, 最初以引进国外的海洋磁力仪为主, 研究手段也主要集中在仿真和理论计算^[34]. 1993年, 中国科学院南海海洋研究所与美国哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂地质观测台合作进行船载三分量测试, 姚伯初等人^[35]、赵俊峰^[36]、Kido 等人^[37]利用本次测量的数据, 分析了南海北部磁异常的特征和构造, 促进了对该地区地质结构的认识^[35~37]. 近年来, 国内各科研院所和高校加紧了海洋磁力仪设备的研发, 由基本的总磁场测量到矢量场测量, 都取得了突出成果. 2012年, 中国船舶重工集团公司715研究所(简称中船重工715所)研制了 RS-YGB6A型海洋光泵磁力仪, 分辨率达到0.001 nT, 量程范围35000~70000 nT, 工作性能稳定可靠, 被广泛应用于管线探测、水下障碍物排查等海洋工程中. 2014年, 该研究所又推出了 RS-HC3海洋张量磁梯度仪, 系统动态范围为 $\pm 100 \mu\text{T}$, 系统运行可靠, 取得了较好的成果.

海洋磁测系统在军事和海洋工程测量等方面具有及其重要的作用. 国外该方面研究工作起步较早, 技术也较为成熟, 已由传统的拖拽式发展到无人潜航式测量. 相比较而言, 国内起步晚, 直到2012年中船重工715所才推出中国首款海洋磁力仪. “十三五”

期间, 国家将海洋重磁探测系统列为一项重点研发计划, 研制深海环境的重磁勘探拖曳系统, 包括水下重力仪和三分量磁测系统的研制, 研究水下重磁相关数据处理及反演解释技术, 用于油气资源勘探与开发, 寄希望于未来几年海洋磁测技术在国内会有突飞猛进的发展.

4 航空矢量磁测技术

中国地域辽阔, 资源状况与环境条件复杂, 很多自然地理环境如沼泽、森林、沙漠及山区等, 人员设备地面进入不便, 而航空电磁探测系统能够克服地面环境的影响, 具有低成本、勘察速度快、勘察面积广、通用性强等特点, 在物探工作中发挥着重要的作用. 21世纪以前, 航空磁测技术以地磁场总场强度或总场梯度测量为主. 随着磁法勘探理论和方法的不断发展, 推动航空磁测技术由原来的总场强度或梯度测量, 演化到矢量(三分量或梯度张量)测量. 与总场测量相比, 矢量测量可同时获取地磁场模量大小和方向信息, 有效减少反演中的多解性, 有助于对磁性体的定量解释, 提高地下矿体探测分辨率和定位精度, 因而受到地球物理学家们越来越多的关注, 使得矢量磁测成为航空磁测的主要发展方向之一. 仪器设备方面, 目前地球物理领域能够使用的矢量磁力仪有磁通门磁力仪和超导磁力仪(包括低温超导磁力仪和高温超导磁力仪), 由于矢量磁测数据包括磁场值和磁场方向, 而飞行测量完成的数据需要校正到地理坐标系下才可作进一步地处理和解释, 因而需要获取飞行时的系统姿态和方位, 最终的磁测精度取决于磁力仪的精度和姿态测量系统的精度.

澳大利亚必和必拓石油公司和法国斯特拉斯堡大学地球物理研究所是最早从事航空三分量磁测研究的单位. 2003年, 澳大利亚必和必拓石油公司研制了磁通门式航空三分量磁测系统, 并在澳大利亚西部的罗克利条带状含铁建造地区进行了飞行试验, 姿态校正后得到三分量地磁场数据, 姿态校正后的噪声水平在50~100 nT, 取得了良好的地质效果, 目前该系统还在不断改进中^[38]. 2011年, 法国斯特拉斯堡大学地球物理研究所在Maule MX7小型飞机尾翼上安装了两个磁通门磁力仪在孚日山脉进行了20 km $\times$ 30 km的飞行试验, 进行磁补偿后得到两个水平分量的磁场数据, 并结合总场测量结果计算得到垂直分量, 对该地区磁场分布成图后与已知地质资料

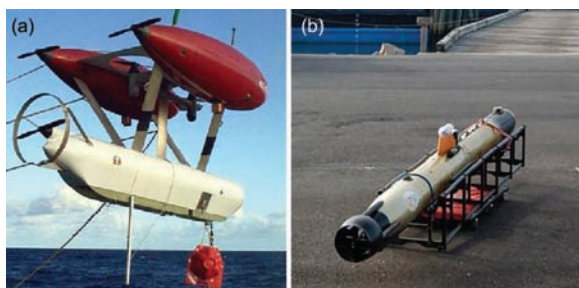


图4 无人潜航器照片. (a) ABE水下无人潜航器; (b) G-880AUV水下磁探测无人潜航器

Figure 4 Photographs of the unmanned underwater vehicle. (a) Unmanned underwater vehicle ABE; (b) unmanned underwater magnetic detection vehicle G-880AUV

基本吻合^[39]。

在“十一五”期间,中国国土资源航空物探遥感中心研制了航空三分量磁测系统,利用三轴磁通门磁力仪和INS/GPS捷联式惯性导航系统进行了验证性试验,并在“十二五”期间挂载到运十二固定翼飞机上进行了飞行测量,如图5所示,取得了良好的地质效果^[40]。

21世纪初,与航空三分量磁测同时发展的另一项矢量磁测技术——航空全张量磁梯度测量成为各国地球物理学家研究和开发的热点。航空全张量磁梯度测量地磁场3个分量的空间变化率共计9个元素,其突出优点包括:由梯度张量算出的不变量等值线图易于解释;可利用偶极子——追踪算法精确确定磁偶极子的深度和水平位置,因此通过全张量磁梯度测量数据可以实现地下磁性地质体和矿体的高精度三维定位,并获取其空间分布信息^[41]。

美国地质调查所(USGS)利用12个磁通门磁力仪组成磁梯度张量测量系统TMGS用来探测未爆炸物UXO,取得了一定效果^[42]。吉林大学采用4个三分量磁通门传感器组成全张量磁梯度探头,并利用球形反馈线圈补偿环境背景磁场使磁通门传感器工作在零磁场附件以提高其测量灵敏度(图6)^[43]。该全张量磁梯度仪在三角翼滑翔机上进行了飞行试验,并获得了初步试验结果。

由于磁通门磁力仪灵敏度较低,进行梯度测量时传感器之间的基线距离要求很大,因此对系统结构要求高,测量精度难以保证,因此灵敏度更高的矢量磁传感器SQUID成为磁梯度张量测量系统的首选。

2005年,美国橡树岭国家实验室(ORNL)着手研究和开发航空全张量磁梯度测量系统,该小组利用



图5 国土资源航空物探遥感中心研制的航空三分量磁测系统

Figure 5 Aero three-component magnetic measurement system developed by China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center (AGRS)

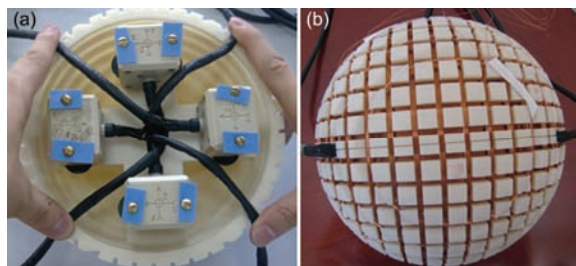


图6 吉林大学研制的磁通门式全张量磁梯度仪。(a) 传感器结构;(b) 反馈线圈

Figure 6 Fluxgate full-tensor magnetic gradiometer developed by Jilin University. (a) Structure of sensors; (b) feedback coils

美国海军现有的高温超导量子干涉器(HTS-SQUID)与该研究所开发的航空地球物理平台结合,组成航空全张量磁梯度测量系统^[44],仅在地面进行了移动式测量试验(图7),未见航空飞行测量的报道。该系统采用了8个高温SQUID传感器固定在一个支架上,通过合理布局组成全张量探头,据报道一次移动测量即可确定等效偶极子位置。

澳大利亚联邦科学与工业研究组织CSIRO利用自主研制的高温SQUID进行航空全张量磁梯度测量系统的开发,采用6个平面SQUID梯度计、6个单分量SQUID磁强计及1个三分量SQUID磁强计安装在一个六棱台上组成张量磁梯度探头,该系统目前正在地面进行模拟探测试验(图8)^[45]。

目前,世界上唯一可实用的航空全张量磁梯度测量系统为德国耶拿物理高技术研究研究所IPHT研制的,该系统共采用9个低温SQUID传感器安装在液氮杜瓦中,其中6个为SQUID平面梯度计,3个为磁强计,同



图7 美国橡树岭国家实验室研制的高温超导全张量磁梯度测量系统地面试验

Figure 7 Ground experiment of the high-temperature superconducting full-tensor magnetic gradiometer developed by ORNL

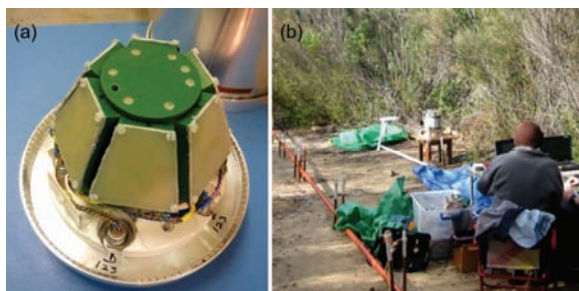


图8 澳大利亚联邦科学与工业研究组织CSIRO研制的高温超导全张量磁梯度测量系统。(a) 磁探头; (b) 系统地面试验

Figure 8 High-temperature superconducting full-tensor magnetic gradiometer developed by CSIRO. (a) The magnetic probe; (b) system experiment on ground

时采用惯性导航系统和差分GPS对测量数据进行姿态校正,系统如图9(a)所示。该系统在南非进行了飞行试验,线距为100 m,吊舱距地面40 m,测量面积为84 km²,取得了世界上首套航空全张量磁梯度测量数据,如图9(b)所示。目前,该研究所正在原系统基础上进行了空气动力学优化,研制第二代航空全张量磁梯度测量系统,如图9(c)所示,以降低运动噪声干扰,进一步提高测量精度^[46]。

“十二五”期间,中国科学院上海微系统与信息技术研究所联合中国科学院遥感与数字地球研究所,利用低温SQUID研制了航空全张量磁梯度测量系统,并在内蒙古进行了飞行测量试验,梯度灵敏度达到50 pT/m,取得了良好的效果。吉林大学利用高温SQUID研制了地面全张量磁梯度测量系统样机,梯度灵敏度为100 pT/m,进行了地面移动式试验^[47],目前正在进行系统小型化,研制适用于无人机飞行平台的全张量磁梯度测量系统。

在航磁三分量测量技术方面,中国的研究工作与其他国家相比,处于“领跑”水平。在“十三五”国家重点研发计划支持下,基于无人机飞行平台的航磁三分量测量系统将走向实用化。而航空全张量磁梯

度系统研制方面,中国的研究还处于“跟跑”阶段,尤其在系统的核心器件SQUID方面,目前主要还是依靠进口,仅中国科学院上海微系统与信息技术研究所自主研制了低温SQUID器件,性能与德国IPHT相比还有一定差距。在航磁三分量测量系统和磁梯度张量系统研制的同时,还需要开展载体磁补偿及三分量、磁梯度张量测量数据的处理方法和反演解释方法的研究,以满足实际飞行测量的需要。此外,与直升机和固定翼等有人飞机相比,无人机具有独特的优势,如人员安全性高、飞行高度低、灵活性强、飞行成本低等,因此开展无人机平台的矢量磁测系统的研制具有很好的发展前景。

5 卫星磁测技术

卫星磁测技术始于1958年苏联发射的第一颗测量地磁场的卫星SPUTNIK-3。该卫星上安装了磁通门磁力仪,但由于不能准确确定磁测仪器方向,只能得到总场强度数据。此后苏联又相继发射的一系列磁测卫星均携带了总场测量磁力仪,如质子旋进磁力仪或光泵磁力仪,因此均不能称为真正意义上的矢量磁测。随着空间磁场测量技术的发展,出现了专门进行地球本底内禀磁场测绘的专业卫星计划,如美国的Magsat卫星计划、丹麦的Ørsted卫星计划、德国的CHAMP卫星计划以及阿根廷的SAC-C卫星计划等。

MAGSAT卫星发射于1979年10月,在轨运行了7个月,搭载了一台铯光泵磁力仪和一台三轴磁通门磁力仪,为首次进行卫星矢量磁测,各分量测量精度优于6 nT,运行在倾角为96.8°的太阳同步轨道,近地点352 km,远地点561 km^[48]。卫星轨道覆盖了除地理极点外的全部地球表面,利用其测量数据编制了全球和一些地区的卫星磁异常图,并进行了地球物理和地质解释。中国学者安振昌等人^[49,50]也利用该卫星资料,结合球冠谐方法,研究了亚洲和非洲等地

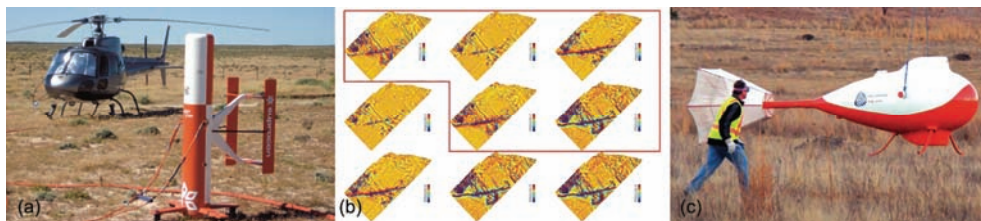


图9 德国IPHT研制的低温超导航空全张量磁梯度测量系统。(a) 第一代系统; (b) 全张量磁梯度测量结果; (c) 第二代系统

Figure 9 Low-temperature superconducting full-tensor magnetic gradient measurement system developed by IPHT. (a) The first generation system; (b) results of the full-tensor magnetic gradient measurement system; (c) the second generation system

区的异常模型,并绘制了卫星磁异常图,定性了解地壳深处及上地幔岩石的磁性特征.由中国大陆和海域MAGSAT理论卫星磁异常图推断出塔里木盆地的上地幔顶部厚约8 km的一层具有强磁性,磁性层上不具有相当于前寒武纪变质岩的磁性,磁性层下部具有相当于镁铁质麻粒岩的磁性.在扬子地台和华北地台上分布正磁异常,在四川盆地之下岩石圈磁性结构与塔里木盆地相似.华北地台没有明显的巨厚磁性层中心,渤海湾坳陷、鄂尔多斯盆地等局部地域的岩石圈磁性结构与塔里木河扬子相同.在松辽盆地,准噶尔盆地、华北-南黄海坳陷等地的岩石圈磁性结构与塔里木和扬子相似.南海海域有明显的卫星磁异常,分布范围广,根据该异常和海上地球物理剖面解释结果,推断南海海盆在壳幔界面上下有较强磁性层,分布面积达数十万平方公里.

Ørsted卫星发射于1999年2月,运行在高度500~850 km的近太阳同步椭圆轨道,轨道周期约100 min.该卫星搭载了一台Overhauser磁力仪和一台三轴磁通门磁力仪.三轴磁通门磁力仪测量地磁矢量场,漂移小于0.5 nT/24 h,Overhauser磁力仪精度优于0.5 nT,用于校准矢量磁力仪.Ørsted卫星的重要科学研究结果之一是证实了地球磁极的漂移,研究结果表明地球磁场的漂移速度近年来有加速的趋势,并有可能处在磁极反转的过程中.依据Ørsted卫星磁异常数据,中国塔里木地台、扬子地台和华北地台均呈现正异常,异常值分别大于4, 2和2 nT,青藏高原呈现负异常,异常值大于-2 nT^[51].

CHAMP卫星发射于2000年7月,搭载了磁通门磁力仪与Overhauser磁力仪,用于地球矢量磁测.由于矢量测量须结合测量时系统的姿态,因此将磁通门传感器与星敏感器探头一起安装在光具座上.为了降低卫星内部电子单元产生的磁场扰动,第二个磁通门传感器安装在相距主探头60 cm的光具座上,构成梯度测量.Overhauser磁力仪作为CHAMP任务的磁场参考标准,为矢量磁场测量提供绝对飞行校准,其绝对精度优于0.5 nT.为了尽量降低卫星剩磁对测量的影响,Overhauser磁力仪安装位于4 m长的伸杆顶端,电子箱位于卫星内部仪器平台上,CHAMP卫星如图10(a)所示^[52].其提供的海量磁测数据,结合先进的岩石圈信号提取方法与建模技术,将岩石圈磁场探测与建模推入了一个新的时代,全球一些研究机构基于该卫星磁测数据构建了多个具有代表

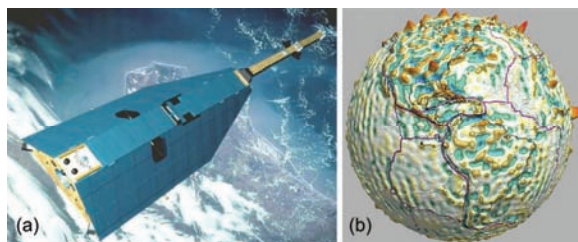


图10 CHAMP卫星(a)和测量的地球地壳场Z分量分布图(b)

Figure 10 The CHAMP satellite (a) and the Z component of the crustal magnetic field measured by CHAMP satellite (b)

性的全球岩石圈磁场模型,如由CHAMP卫星得到的地球地壳场Z分量分布情况,如图10(b)所示.

SAC-C发射于2000年11月,与Ørsted卫星类似,利用氦光泵磁力仪测量总场强度,利用三轴磁通门磁力仪测量地磁场矢量,卫星在距地面702 km的圆形轨道上运行,设计寿命为4年.该卫星用于研究地球大气、电离层和地磁场.由于星象仪和矢量磁力仪连接出现问题,故矢量数据无法使用^[53].

中国科学院空间科学与应用研究中心早在20世纪70年代就开展了星上磁强计的研制工作,曾在实践二号卫星上成功搭载.在2007年5月开始为中国“萤火一号”火星探测器研制主载荷高精度磁强计,探测精度达到0.01 nT,比美国火星全球勘探者(MGS)上的磁通门磁强计精度高50倍(0.5~1 nT).

相较于国外,中国的卫星磁测技术还有一定的差距,近年来随着中国航天事业的快速发展,在卫星发射和回收、一箭多星、低温燃料火箭技术、捆绑火箭技术以及静止轨道卫星发射与测控等许多重要技术领域已跻身世界先进行列,在遥感卫星研制及其应用、通信卫星研制及其应用、载人飞船试验等方面均取得重大成果,也为中国卫星磁测技术带来了发展机遇.

6 五种矢量磁测技术特点

纵观地球物理矢量磁测技术的发展,5种矢量磁测应用范围、技术特点和国内外仪器系统对比如表1所示,地面矢量磁测主要应用于地表水平分布地质探测,是磁测技术最基本的应用领域;由于地面工作环境较平稳,测试仪器精度较高,但在矿产资源探测方面存在无法进行垂直方向探测,工作效率低等问题.井中矢量磁测为勘探地球深部矿体资源提供了强有力的工具,具有探测范围和探测深度大、空间定

表1 矢量磁测应用范围、技术特点和国内外仪器系统对比

Table 1 Application, technology characteristics comparison of the vector magnetic measurement system

矢量磁测	应用范围	技术特点	国际仪器系统	国内仪器系统
地面矢量磁测技术	地震台站的基本台网、地下磁异常源搜索、微弱磁共振信号获取等	发展早、易实现、仪器精度高、性能可靠	德国低温超导全张量磁梯度测量系统	中国地震局地磁台站基本台网的磁通门磁力仪
井中矢量磁测技术	地球深部矿体资源探测	探测深度大、空间定位能力强	德国KTB系统	重庆地质仪器厂研制的GJCX-1型高精度井中三分量磁力仪、上海地学仪器研究所研制的JCC3-2(A)型高精度三分量测井仪
海洋矢量磁测技术	探测水下潜艇、未爆炸武器、磁性障碍物等军事应用及其他海洋工程测量应用	传统采用拖拽方式,逐步转向搭载小型无人潜航器(AUV)	美国Geometrics公司研制的G-882铯光泵海洋磁力仪、加拿大Marine Magnetics公司研制的SeaSPY海洋磁力仪	中国船舶重工集团公司715研究所研制的RS-YGB6A型海洋光泵磁力仪和RS-HC3海洋张量磁梯度仪
航空矢量磁测技术 卫星磁测技术	地质、矿产等高效普查以及地球科学研究	探测速度快、探测效率高以及可以在复杂地形环境下工作,但由于受飞机运动等影响引入新的干扰	德国耶拿物理高技术研究所IPHT、美国橡树岭国家实验室ORNL、澳大利亚联邦科学与工业研究组织CSIRO等研制的超导航空全张量磁梯度测量系统	国土资源航空物探遥感中心研制的航空三分量磁测系统、中国科学院上海微系统与信息技术研究所联合中国科学院遥感与数字地球研究所利用低温SQUID研制了航空全张量磁梯度测量系统、吉林大学利用高温SQUID研制了地面全张量磁梯度测量系统样机
	地球磁场测量,用于建立全球地磁场模型	探测效率高、探测范围广,对空间测量和地球磁场演变研究具有重要意义	美国的Magsat卫星、丹麦的Ørsted卫星、德国的CHAMP卫星以及阿根廷的SAC-C卫星	中国科学院空间科学与应用研究中心为我国“萤火一号”火星探测器研制了高精度星载矢量磁力仪

位能力强等优点;井中矢量磁测仪器方面,国外较为先进的仪器如德国KTB系统,而国内以重庆地质仪器厂研制的GJCX-1型高精度井中三分量磁力仪和上海地学仪器研究所研制的JCC3-2(A)型高精度三分量测井仪为代表.海洋矢量磁测是获取海域地磁场参数及其分布特征的主要手段和方法,是军事海道测量和海洋工程测量的基础,甚至在某些情况下是发现水下目标的唯一有效工具.工作方式由传统的船舶拖拽逐渐转向AUV;仪器方面,美国Geometrics公司研制G-882铯光泵海洋磁力仪和加拿大Marine Magnetics公司研制的SeaSPY海洋磁力仪处于国际领跑地位;虽然国内起步较晚,中国船舶重工集团公司715研究所研制的RS-YGB6A型海洋光泵磁力仪和RS-HC3海洋张量磁梯度仪都取得了很好的应用效果.航空矢量磁测在地质、矿产等高效普查以及地球科学研究工作中发挥着重要作用,探测速度快、探测效率高以及可以在复杂地形环境下工作是其主要特点;仪器方面,国外以澳大利亚、法国和美国研制的

航空磁测仪器为代表.其中,德国IPHT研制的低温超导航空全张量磁梯度测量系统代表国际领先水平.中国国土资源航空物探遥感中心研制的航空三分量磁测系统处于世界领先水平,中国科学院上海微系统与信息技术研究所联合中国科学院遥感与数字地球研究所利用低温SQUID研制了航空全张量磁梯度测量系统并开展了飞行试验,吉林大学利用高温SQUID研制了地面张量磁梯度测量系统样机,都取得了良好的效果.卫星磁测技术从20世纪50年代末开始,以苏联研制的总场强度磁测卫星最为领先,美国Magsat卫星后者居上,成为第一个矢量磁测卫星,并相继出现了丹麦的Ørsted卫星、德国的CHAMP卫星以及阿根廷的SAC-C卫星等矢量磁测卫星.中国在卫星磁测方面起步较晚,但目前也已做了大量探索性工作.

7 总结和展望

矢量场磁测技术能够直接对地磁场进行三分量测量或分量的梯度测量,具有较高的探测分辨率和

定位精确度,因此在岩矿体资源评估、未爆炸物检测以及其他磁异常探测方面具有重要作用。本文主要介绍了地面、井中、海洋、航空及卫星5种矢量磁测技术的应用范围、技术特点及国内外发展现状。地面矢量磁测作为矢量磁测技术的基础方式,技术最为成熟,仪器系统精度高、工作性能可靠,但也存在探测深度浅、工作效率低等问题;井中矢量磁测是勘探地球深部矿体资源强有力的工具,可以解决地面磁测无法完成的探测工作,但由于受钻孔孔径、井温等因素限制其探测精度低于地面磁测仪器;海洋磁测在军事海洋工程及其他海洋工程应用中具有无法取代的作用,其工作方式也由传统的船舶拖拽转向搭载小型无人潜航器AUV,可实现更高效率、方便的水下地磁异常测量;航空矢量磁测具有探测速度快、探测效率高以及可以在复杂地形环境下工作的优势,但由于受飞机载体及机动飞行等因素影响,降低了探测精度,需要同时开展载体磁补偿及三分量、磁梯度张量测量数据的处理方法的研究;卫星磁测可以获取高质量、全球覆盖的磁场数据,技术发展较早,

我国的研究工作与国外相比,起步较晚,但目前也已做了大量探索性工作,需要充分利用我国航天事业发展的机遇,积极开展研究工作。矢量磁测仪器系统方面,国外较为成熟,中国虽然经过几十年的发展,在理论研究与仪器研发方面都取得了可喜的进步,某些成果已达到或接近国际先进水平,但矢量磁测整体水平与先进国家相比,差距还很大,主要表现在仪器测量精度偏低、可靠性差、研究与开发的投入较少,过于依赖国外技术等。

目前,由于每一种磁测方法都有其独特的优势和缺陷,单一的工作方式难以满足探测应用的要求。随着磁测技术及其仪器系统的不断发展,对地磁场的测量也由单一的总场测量,转向为多信息的矢量场测量。其应用领域也在不断扩大,从传统的低效率、探测深度浅的地面磁场转向高效率航空、大深度井中或深海目标体的快速定位与检测,并逐步发展为地面、井中、海洋、航空及卫星联合磁测系统。多种探测方法相结合,优势互补,进一步提高检测精度和反演分辨率是该领域发展的方向。

参考文献

- 1 Xie Y F, Chen H, Li L. The statistics partition of ground magnetic survey and its application effect (in Chinese). Value Eng, 2014, 33: 299-300 [谢一锋, 陈辉, 李龙. 地面磁测统计分区及应用效果. 价值工程, 2014, 33: 299-300]
- 2 Wu T B. The present and future of ground gravimeter and magnetometer in China (in Chinese). Equip Geotech Eng, 2007, 8: 11-16 [吴天彪. 我国地面重磁仪器的现状与前景. 地质装备, 2007, 8: 11-16]
- 3 Huang L Y, Yang H X, Tang Z H, et al. Application of magnetic prospecting methods in volcano rock region of southeastern Zhejiang (in Chinese). Min Resour Geol, 2016, 30: 104-109 [黄立勇, 杨海翔, 唐仲华, 等. 磁法勘探在浙东南火山岩区的应用. 矿产与地质, 2016, 30: 104-109]
- 4 Zhang P, Gong Z Q, Yang S. Application of high-precision magnetic survey for prospecting in Tongyugou copper deposit, Qinghai (in Chinese). Min Explor, 2016, 7: 488-492 [张平, 龚志强, 杨生. 高精度磁法在青海铜峪沟铜矿勘探中的应用. 矿产勘查, 2016, 7: 488-492]
- 5 Wang X M, Teng Y T, Wang C. Development of field array observation technique system with fluxgate magnetometers (in Chinese). Acta Seismol Sin, 2012, 34: 389-396 [王晓美, 滕云田, 王晨. 磁通门磁力仪野外台阵观测技术系统研制. 地震学报, 2012, 34: 389-396]
- 6 Cheng A L. Modern technical album of geomagnetic station and geomagnetic network (in Chinese). Int Seismol Dyn, 1996, 6: 1-23 [程安龙. 地磁台站和地磁台网的现代化技术专辑. 国际地震动态, 1996, 6: 1-23]
- 7 Linzen S, Chwala A, Schultze V, et al. A LTS-SQUID system for archaeological prospection and its practical test in Peru. IEEE T Appl Supercon, 2007, 17: 750-755
- 8 Wu Z C, Liu T Y. Magnetic gradient tensor: Its properties and uses in geophysics (in Chinese). Geol Sci Tech Inform, 2008, 27: 107-110 [吴招才, 刘天佑. 磁力梯度张量测量及应用. 地质科技情报, 2008, 27: 107-110]
- 9 Costabel S, Müller-Petke M. MRS noise investigations with focus on optimizing the measurement setup in the field. In: 5th International meeting on Magnetic Resonance, 2012
- 10 Lin T T, Zhang Y, Lin J, et al. Three-component magnetic resonance noise suppression device and method (in Chinese). PRC Patent, CN201410088813.0, 2014-05-28 [林婷婷, 张杨, 林君. 磁共振三分量消噪装置及消噪方法. 中国专利, CN201410088813.0, 2014-05-28]
- 11 Zhang L X. Review the borehole magnetic survey development (in Chinese). Chin J Eng Geophys, 2007, 4: 375-380 [张丽霞. 井中磁测

- 技术发展述评. 工程地球物理学报, 2007, 4: 375–380]
- 12 Chen T Z, Li W H, Xu S Q, et al. The method of borehole three-component magnetic survey and its effective originally exploration (in Chinese). Prog Geophys, 2008, 23: 892–897 [陈天振, 李卫花, 徐遂勤, 等. 井中三分量磁测方法与效果初探. 地球物理学进展, 2008, 23: 892–897]
- 13 Parker R L, Daniell G J. Interpretation of borehole magnetometer data. J Geophys Res-Solid Earth, 1979, 84: 5467–5479
- 14 Zhang Q, Al-Nuaimy W, Huang Y. Interpretation of borehole magnetometer data for the detection and characterisation of unexploded bombs. J Appl Geophys, 2007, 61: 206–216
- 15 Silva J B C, Hohmann G W. Interpretation of three-component borehole magnetometer data. Geophysics, 1981, 46: 1721–1731
- 16 Kuhnke F, Musmann G. KTB high temperature triaxial magnetometer: Sci Drilling V2, N4, 1991, P166–179. Int J Rock Mech Min Sci, 1992, 29: 234
- 17 Bosum W, Casten U, Fieberg F C, et al. Three-dimensional interpretation of the KTB gravity and magnetic anomalies. J Geophys Res-Solid Earth, 1997, 102: 18307–18321
- 18 Worm H U. Rock magnetism and modeling of magnetic borehole anomalies. KTB Report, 1993, 93: 331–333
- 19 Leonardi S, Kumpel H J. Variability of geophysical log data and the signature of crustal heterogeneities at the KTB. Geophys J Int, 1998, 135: 964–974
- 20 Li Y, Oldenburg D W. Joint inversion of surface and three-component borehole magnetic data. Geophysics, 2000, 65: 540–552
- 21 Wang Q Y, Li X S, Xu L Z. The high-precision borehole three-component magnetic measurement system: An effective tool in search for deep deposits in mines (in Chinese). Geophys Geochem Explor, 2009, 33: 235–239 [王庆乙, 李学圣, 徐立忠. 高精度井中三分量磁测是矿山深部找矿的有效手段. 物探与化探, 2009, 33: 235–239]
- 22 Wang Y G, Ma X G, Wang J W. Prospecting with combination of ground magnetic survey and well logging: A case study of the Galinge XI Orefield in Qinghai Province (in Chinese). Geol Resour, 2014, 23: 92–96 [王永国, 马晓光, 王进文. 井地联合磁测找矿效果——以青海尕斯库勒湖XI矿区为例. 地质与资源, 2014, 23: 92–96]
- 23 Shang J T. Research on key technologies and software implementation of borehole geophysical visualization (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 2015 [尚景涛. 井中物探可视化关键技术及软件实现方法研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 2015]
- 24 Qin Q L. Research on the technical design in marine magnetic survey (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 2015 [秦清亮. 海洋磁力测量技术设计关键技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 2015]
- 25 Vacquier V, Steenland N C, Henderson R G, et al. Interpretation of aeromagnetic maps. Geol Soc Am Memoir, 1951, 47: 1–150
- 26 Wu G C. Research on inversion method of target locating based on magnetic anomaly (in Chinese). Master Dissertation. Changchun: Jilin University, 2015 [吴国超. 基于磁异常的目标体定位反演方法研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 2015]
- 27 Yao B C. Marine geophysics and its impact on development of marine geology. Mar Geol Quat Geol, 2011, 31: 21–27 [姚伯初. 海洋地球物理学和海洋地质学的发展. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31: 21–27]
- 28 Zong F B, Deng R H, Ren L P. A marine magnetometer array system (in Chinese). Hydrogr Surv Chart, 2015, 35: 45–47 [宗发保, 邓瑞辉, 任来平. 一种阵列式海洋磁力测量系统. 海洋测绘, 2015, 35: 45–47]
- 29 Seama N, Yamamoto M, Isezaki N. A newly developed deep-tow three component magnetometer. EOS Trans, 1997, 78: 46
- 30 Gee J S, Cande S C. A surface-towed vector magnetometer. Geophys Res Lett, 2002, 29: 15-1–15-4
- 31 Blakely R J, Cox A, Iufer E J. Vector magnetic data for detecting short polarity intervals in marine magnetic profiles. J Geophys Res, 1973, 78: 6977–6983
- 32 Horner-Johnson B C, Gordon R G. Equatorial Pacific magnetic anomalies identified from vector aeromagnetic data. Geophys J Int, 2003, 155: 547–556
- 33 Pei Y H, Yeo H G, Kang X Y, et al. Magnetic gradiometer on an AUV for buried object detection. In: OCEANS 2010. 1–8
- 34 Wu Z C, Gao J Y, Luo X W, et al. Marine measurement of the three-component geomagnetic field (in Chinese). Prog Geophys, 2011, 3: 902–907 [吴招才, 高金耀, 罗孝文, 等. 海洋地磁三分量测量技术. 地球物理学进展, 2011, 3: 902–907]
- 35 Yao B C, Zeng W J, Hayes D E. Sino US cooperation in the South China Sea geological survey (in Chinese). Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994. 203 [姚伯初, 曾维军, Hayes D E. 中美合作调研南海地质专报. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. 203]
- 36 Zhao J F. Analysis of three-component magnetic data from northern South China Sea Basin (in Chinese). J Trop Oceanogr, 2009, 28: 54–58 [赵俊峰. 南海北部海盆三分量磁测结果分析. 热带海洋学报, 2009, 28: 54–58]
- 37 Kido Y, Suyehiro K, Kinoshita H. Rifting to spreading process along the northern continental margin of the South China Sea. Mar Geophys Res, 2001, 22: 1–15
- 38 Dransfield M. Searchlights for gravity and magnetics. Geophysics, 2015, 80: 27–34
- 39 Munsch M, Fleury S. Scalar, vector, tensor magnetic anomalies: Measurement or computation. Geophys Prospect, 2011, 59: 1035–1045

- 40 Wang Y. Study on aeromagnetic three component detection system (in Chinese). Doctor Dissertation. Changchun: Jilin University, 2015 [王一. 航磁三分量探测系统研究. 博士学位论文 长春: 吉林大学, 2015]
- 41 Zhang C D. Airborne tensor magnetic gradiometer—The latest progress of airborne magneto metric technology (in Chinese). *Chin J Eng Geophys*, 2006, 3: 354–361 [张昌达. 航空磁力梯度张量测量——航空磁测技术的最新进展. *工程地球物理学报*, 2006, 3: 354–361]
- 42 Smith D V, Bracken R E. Field experiments with the tensor magnetic gradiometer system for UXO surveys: A case history. In: SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2004. 806–809
- 43 Sui Y Y, Li G, Wang S L, et al. Compact fluxgate magnetic full-tensor gradiometer with spherical feedback coil. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 014701
- 44 Gamey T J, Starr T, Doll W E, et al. Initial design and testing of a full-tensor airborne SQUID magnetometer for detection of unexploded ordnance. In: SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2004. 798–801
- 45 Keenan S T, Young J A, Foley C P, et al. A high- T_c flip-chip SQUID gradiometer for mobile underwater magnetic sensin. *Supercond Sci Technol*, 2010, 23: 25–29
- 46 Stolz R, Zakosarenko V. Magnetic full-tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications. *Leading Edge*, 2006, 25: 178–180
- 47 Shen M D, Cheng D F, An Z F, et al. Geometry structure optimization of hexagonal pyramidal full tensor magnetic gradient probe. *IEEE T Magn*, 2016, 52: 1–7
- 48 Langel R A, Qusely G, Berbert J, et al. The MAGSAT mission. *Geophys Res Lett*, 1982, 9: 243–245
- 49 An Z C, Tan D H. Spherical cap harmonic analysis of MAGSAT magnetic anomalies over Asia. *Chin J Geophys*, 1998, 41: 168–173 [安振昌, 谭东海. 亚洲 MAGSAT 卫星磁异常冠谐分析. *地球物理学报*, 1998, 41: 168–173]
- 50 An Z C, Rotanova N M, Odintsov S D, et al. Spherical cap harmonic models of MAGSAT magnetic anomalies over Europe and its adjacent region (in Chinese). *Chin J Geophys*, 1998, 41: 468–474 [安振昌, Rotanova N M, Odintsov S D. 欧洲及其邻区 MAGSAT 卫星磁异常冠谐模型. *地球物理学报*, 1998, 41: 468–474]
- 51 Ivers D J, Stening R J, Tutner J, et al. Oersted and MAGSAT scalar anomaly fields. *Earth Planets Space*, 2000, 52: 1213–1225
- 52 Du J S, Chen C, Wang L S. Approximate error estimation of global lithospheric magnetic field models in the era of CHAMP satellite (in Chinese). *Prog Geophys*, 31: 1419–1431 [杜劲松, 陈超, 王林松. CHAMP 卫星时代全球岩石圈磁测模型的近似误差估计. *地球物理学进展*, 2016, 31: 1419–1431]
- 53 Zhou Y L, Ma S Y, Luhr H. An empirical relation to correct storm-time thermospheric mass density modeled by NRLMSISE-00 with CHAMP satellite air drag data. *J Adv Space Res*, 2009, 43: 819–828

Summary for “地球物理矢量场磁测技术的研究进展”

Research progress of geophysical vector magnetic field survey technology

LIN Jun, DIAO Shu, ZHANG Yang, ZHANG Yang & ZHAO Jing^{*}

Key Laboratory for Geophysical Instrument of Ministry of Education, College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130021, China

^{*} Corresponding author, E-mail: zhaojing_8239@jlu.edu.cn

Vector magnetic survey technique is one of the most effective methods for engineering and environmental geophysical exploration. Compared with the traditional geophysical magnetic survey methods, i.e., measurement of the total magnetic field intensity or its gradient, vector magnetic survey can simultaneously obtain the modulus and direction information of the earth magnetic field, which can effectively reduce the multiplicity on data inversion, contribute to the quantitative interpretation of the magnetic body and obtain more precise information and characteristics of magnetic field resource, so as to improve the detection resolution and positioning accuracy of the underground target body. In this paper, based on different application fields, we summarize the application situation, the technical feature and the instrument development of ground vector magnetic survey technique, wells vector magnetic survey technique, marine vector magnetic survey technique, airborne vector magnetic survey technique and satellites vector magnetic survey technique, respectively. As the basic method of the vector magnetic survey technique, ground vector magnetic survey development is the earliest and the technique is the most mature. The accuracy of the instrument system for ground vector magnetic survey is high and the working performance is reliable. But there are also some problems, e.g., the detection depth is shallow and working efficiency is low. Wells vector magnetic survey is one useful tool for the earth's deep mineral resources exploration. It can finish the detection work that the ground vector magnetic measurement can't do. But due to the limit of the bore diameter and the high temperature in well, the detection accuracy of the instrument system is lower than the ground magnetic instrument. Marine vector magnetic survey has the irreplaceable effect in the application of military or other ocean engineering. Its working mode changes from the method of ship drag-and-drop to small unmanned underwater vehicle, which can measure more precise underwater magnetic anomaly. Airborne vector magnetic survey has the superiority of fast detection, high efficiency and strong practicality to geophysical environment, etc. But because of magnetic interference and the posture change of the aircraft carrier, detection accuracy reduces. The study of magnetic compensation and data processing methods of aero three-component and full-tensor magnetic gradient is also needed. Satellites vector magnetic survey can obtain high-quality and whole global magnetic field data. Compared with the research abroad, the development of satellites vector magnetic survey in China is later and the technique is relatively backward although lots of exploration work has been done in recent years. We should take full advantage of the opportunity of China aerospace business development to actively carry out research work for the satellites vector magnetic survey. In conclusion, each magnetic survey method has its unique superiority and defect. Any single method has difficulty meeting the requirement of modern geophysical detection application. With the development of magnetic survey technique and instrument system, the future magnetic survey will change from the traditional work mode, i.e., measuring the total magnetic field intensity or its gradient to the vector information of magnetic field, then to multi-parameter measurements. The magnetic survey application field will change from the traditional ground magnetic survey method with low efficiency and shallow detection depth to high efficient airborne magnetic survey, deep well magnetic survey and abyssal sea magnetic survey, then gradually to the joint detection and interpretation combining with the five kinds of magnetic survey methods mentioned above. Through the combination of a variety of detection methods to realize advantageous complementarities, further improvement of detection accuracy and inversion resolution for earth magnetic field will be implemented.

vector magnetic survey technique, geophysical exploration, rock ore evaluation, magnetometer

doi: 10.1360/N972017-00010