



工业和信息化部“十二五”规划教材

光学原子 磁力仪

GUANGXUEYUANZICILIIYI

孙伟民 刘双强 赵文辉 张军海 编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

光学原子磁力仪

孙伟民 刘双强 赵文辉 张军海 编著

内容简介

本书首先对原子磁力仪的用途和国内外发展现状进行了介绍,在此基础上将作者近几年对原子磁力仪的研究融入其中。全书共分为九章,较为系统地对原子磁力仪的工作原理、理论基础、激光稳频技术、磁屏蔽装置和无磁加热装置的制作、非线性磁光共振光谱、微小偏转角的检测方法等方面进行了研究。书中还着重介绍了一种 Bell-Bloom 型磁力仪,实现了一整套原子磁力仪系统的运行。

本书可作为光学工程、仪器科学与技术等学科、专业的本科生或研究生教材,也可作为量子光学、原子物理研究方向的研究生和相关专业领域工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

光学原子磁力仪/孙伟民等编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2015.8

ISBN 978 - 7 - 5661 - 1121 - 0

I. ①光… II. ①孙… III. ①光泵磁强计 - 研究②原子磁强计 - 研究 IV. ①TM936.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 181523 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 mm × 1092 mm 1/16
印 张 9
字 数 230 千字
版 次 2015 年 8 月第 1 版
印 次 2015 年 8 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前言

近年来,微弱磁场的高精确测量作为研究磁体、分析物质形态及性质的一种重要手段已经获得了广泛地应用,如医学中通过生物体磁场的测量来诊断病情、地质勘查中地形地貌的研究、工艺加工中材料缺陷的检测和矿产油气勘察、水下磁性目标定位以及考古学等领域。目前已广泛应用并技术比较成熟的磁力仪种类包括磁通门磁力仪、核子旋进磁力仪、光泵磁力仪和超导磁力仪等,虽然这些磁力仪的灵敏度都比较高,但是出于弱磁探测领域对磁力仪设备的迫切需求,使得获取更高水平的磁测灵敏度成为当今磁力仪发展的必然趋势。在众多的磁场测量技术中,近十年来迅速发展的新型原子磁力仪拥有目前最高的测磁灵敏度,因此其开始了迅速地发展。

目前国外研制的原子磁力仪试验样机在灵敏度水平上已经突破了现有的其他种类磁力仪,但是原子磁力仪在国内尚处于起步阶段。由于高灵敏度、高精度磁场测量的重要性,国内越来越多的研究机构介入了这个领域。我们在开展这项研究工作时发现,国内在这方面的教材目前还是空白,只能靠阅读国外文献进行摸索,因而使工作进展缓慢。为了使国内同行师生开展类似研究时可以少走弯路,我们编著了本书供教师和研究生们参考。

本书是基于项目组前期多年从事的原子磁力仪研究工作进行的总结,在多名教师、同学的辛勤工作基础上总结而成,在此对刘强博士、曾宪金博士、李庆萌博士的工作表示感谢。

由于作者知识水平有限,本书尚有很多不系统、不完备的地方,将随着研究工作的深入逐步修正,也敬请广大读者批评指正。

本书在撰写过程中参考了国内外一些专家学者的论著,特别是部分内容借鉴了美国加州大学伯克利分校的 Dmitry Budker 教授撰写的 *Optical Magnetometry*,在此一并表示感谢!

编著者
2015年6月

目 录

02	第 1 章 绪论	1
15	1.1 地质调查	1
17	1.2 地震预测	3
17	1.3 心磁脑磁测量	5
17	1.4 工业领域的应用	8
18	1.5 其他应用	9
18	参考文献	9
19	第 2 章 量子磁力仪及其发展	14
19	2.1 核子旋进磁力仪	14
19	2.2 光泵原子磁力仪	16
19	2.3 超导量子干涉磁力仪	18
19	2.4 新型原子磁力仪	19
19	参考文献	29
20	第 3 章 铯原子磁力仪的理论基础	39
20	3.1 碱金属原子	39
20	3.2 铯原子在外磁场中的运动	40
20	3.3 激光泵浦与原子极化过程	43
20	3.4 原子自旋极化的光学检测	47
20	3.5 原子气室中的碰撞弛豫	49
20	3.6 光谱线型及宽度	53
20	参考文献	58

第4章 激光器与稳频技术	59
4.1 激光器的选择	59
4.2 饱和吸收谱稳频技术	60
4.3 消多普勒极化谱技术	63
4.4 线性磁光效应稳频技术	66
参考文献	71
第5章 Bell - Bloom 磁力仪共振光谱	73
5.1 Bell - Bloom 磁力仪基本原理	73
5.2 弱磁场下磁力仪共振光谱的研究	78
5.3 强磁场下磁力仪共振光谱的研究	82
参考文献	89
第6章 非线性磁光共振光谱	91
6.1 非线性磁光效应基本原理	91
6.2 实验装置与测试	92
6.3 NMOR 共振光谱的影响因素	94
6.4 NMOR 共振光谱用于磁场测量	102
参考文献	104
第7章 磁屏蔽装置	106
7.1 磁屏蔽装置简介	106
7.2 磁屏蔽装置的屏蔽系数	108
7.3 磁屏蔽装置参数优化	114
7.4 圆柱形屏蔽装置的轴向磁场分布	118
7.5 本章小结	120
参考文献	120



第 8 章 无磁热气流加热温控装置	122
8.1 几种加热方式的对比分析	122
8.2 热气流加热系统的设计与测试	123
8.3 光纤光栅测温系统	124
8.4 本章小结	126
参考文献	126
第 9 章 两种微小偏转角检测方法	127
9.1 分光束检测法	127
9.2 法拉第调制技术	131
9.3 本章小结	135
参考文献	135

第1章 绪 论

磁场作为磁性物体的一种重要特征,是最早被人类认识的物理现象之一。小到分子、原子,大到地球、星际空间,都蕴含着丰富多样的磁场信息。因此,对磁场的测量就成为认识物理世界的一项重要技术手段。早在2000多年前,我国在战国时期就发明了司南,这是人类历史上最原始的磁场测量仪器。12世纪初,我国已经将磁罗盘用于远海航行。随着科技的进步,人类对磁场的理论及其所反映的物体信息的认识不断深入,高精度的磁场测量技术也随之得到了极大的发展。近几十年来,对磁场的高精度测量已广泛地应用于地球科学、生物医学和基础物理科学等领域。

1.1 地质调查

磁探测方法最主要的应用就是在地质调查、油气和矿产资源勘察等方面。磁法勘探是物探方法中最古老的一种,其原理是磁性岩体和矿体由于本身的磁性会产生相应的磁场,从而使局部地球磁场产生变化。人们通过探测和研究不同位置处的磁异常来发现矿产资源分布和研究地质结构。早在17世纪,人们就利用磁罗盘直接找磁铁矿。在第二次世界大战后,航空测磁法得到广泛采用,用于测量大面积的磁场分布。在地质填图时,磁法勘探可划分出各种岩石的分布范围,研究沉积岩下面的基底构造,还可直接用来寻找磁铁矿床,并将其作为一种辅助手段绘制地质图和测定基底构造。图1.1是在新疆西天山地区某处的航磁测量中得到的磁异常图^[1-3]。在磁法勘察中,石油勘察和矿产勘察的侧重点不同,石油勘察主要测定基底深度,并充分利用能反映出基底表面局部地势的微弱异常来进行定量分析。所观察到的异常越弱,说明所测深度越大,基底深度图就会越准确。因此,石油磁法勘察要求提高磁力仪的分辨力^[4]。

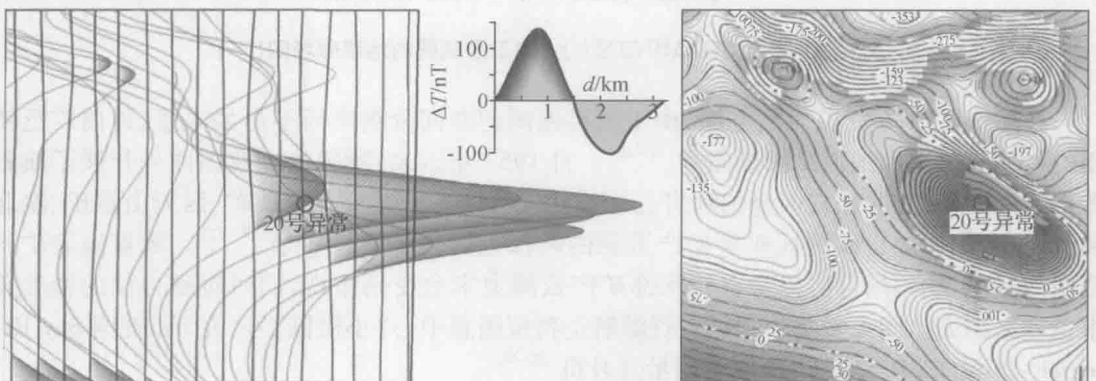


图 1.1 航磁异常剖面平面(左)和等值线平面(右)特征图

对于大范围地质结构和地球磁场研究,卫星磁测提供了一个很好的平台。自1958年苏联发射了第一颗载有磁力仪的卫星Sputnik-3以来,人类开始通过卫星磁测数据来研究全球地质结构^[5-7]。2000年7月,德国发射了一颗重磁两用卫星,工作在距离地球300 km到454 km的低轨道上,该卫星携带了两种磁力仪,分别用于测量地磁场的标量和矢量信息,比

之前的 MAGSAT 地磁卫星的磁场测量准确度高了一个量级^[8-10]。图 1.2 是德国发射的 CHAMP 卫星和卫星测得的地球磁场图^[11-12]。图 1.3 是卫星观测到的中国广西地区磁异常图^[13]。

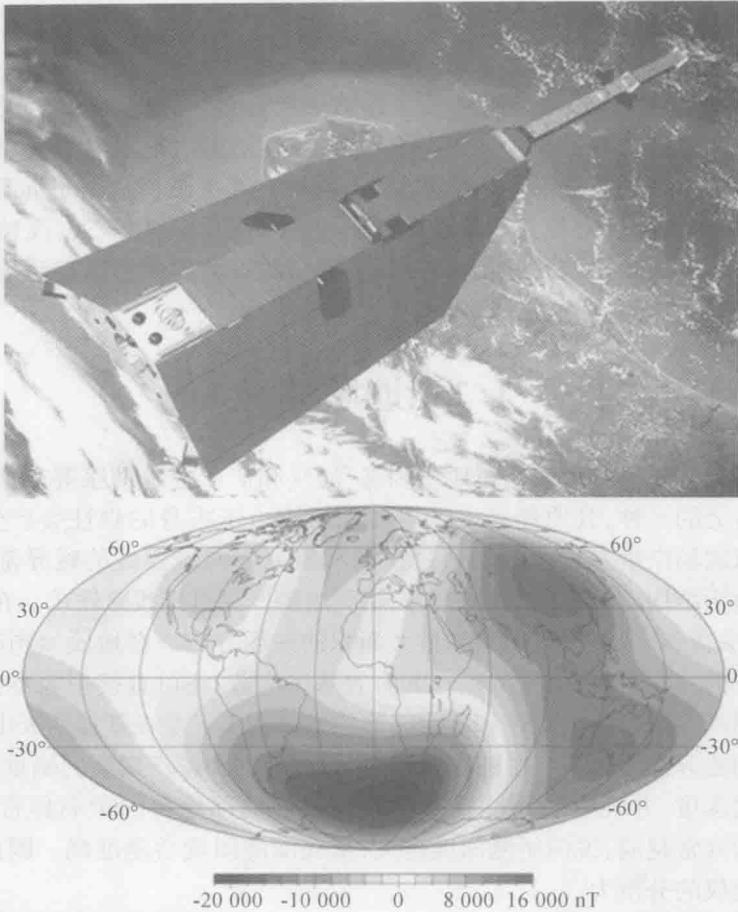


图 1.2 德国 CHAMP 卫星(上)和卫星测得的地球磁场图(下)

在矿产油气等资源探测方面,由于卫星磁测的空间分辨率尚不尽如人意,目前广泛使用的是航空磁测和地面高精度磁测^[14-16]。自 1957 年以来,我国已经在国内外开展了航磁普查和地面磁测,并在辽南金伯利岩、云南镇康铅锌矿、新疆哈密磁铁矿、西天山铜矿、陕北油气、马达加斯加钒钛磁铁矿等矿产资源的勘探上取得了明显效果^[17-22]。随着地表矿产资源的减少,利用局部磁异常寻找深部矿产资源愈来愈受到重视,同时对磁力仪的精度要求也越来越高。图 1.4 是中国国土资源航空物探遥感中心“小松鼠”号(左)和美国 Sky Research 公司的 MD 530F(右)航磁测量直升机^[22-23]。

磁场勘察还是探测古遗存空间分布的主要方法,由于古遗址、墓葬、古建筑及古人类化石本身及所处地层的磁场存在差异,其磁性差异就构成了磁学考古的基础。例如,被火烧过的泥土、石头等具有较强的磁场,比一般的土壤磁性高 1~2 个量级,为考古工作提供了“磁性化石”。由于有机质的腐烂会使土壤中的赤铁矿变为磁铁矿,因此土壤会获得较强的磁性。人为翻动过的土壤因土质结构、密度发生变化或掺入了人工制品的残渣,会使其与周围天然的沉积物之间显出磁性的差别。通过对考古对象的磁异常特征进行分析,可以全

面地认识考古对象^[24-26]。

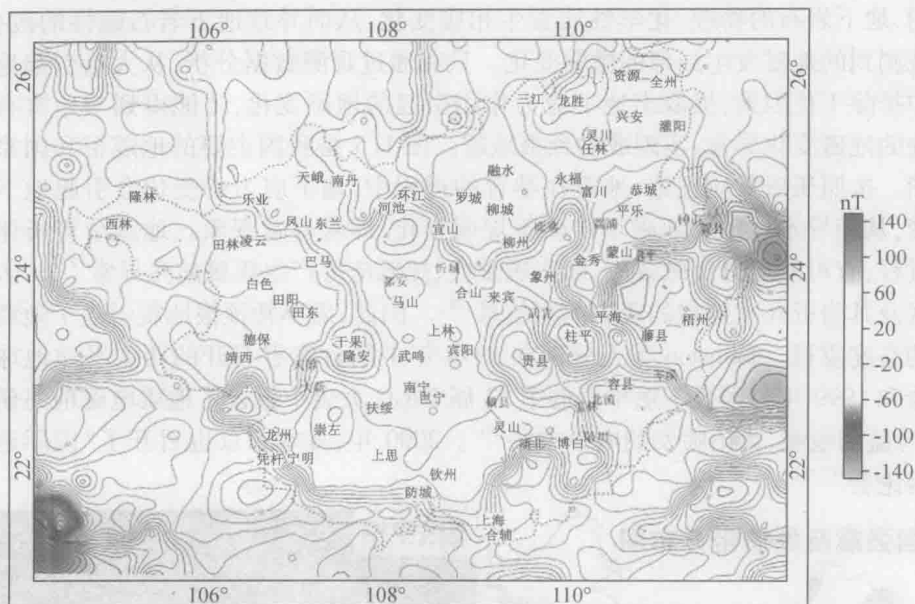


图 1.3 广西地区磁异常分布图

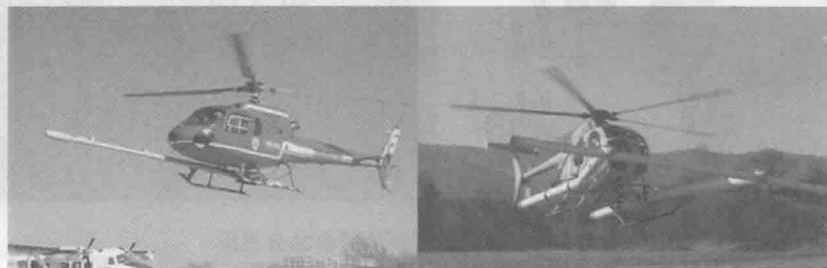


图 1.4 航磁测量直升机实物图

1.2 地震预测

地震灾害的突发性与频发性,给人们的生命财产安全带来了极大的危害。全球每年发生的地震有 550 万次之多,常常引起水灾、火灾以及细菌、有毒气体的泄露和扩散等,还能引起海啸、崩塌、滑坡等很多次生灾害。5·12 汶川大地震给人们的财产带来巨大的损失,也让人们对地震的预报工作提出了很大质疑。研究地震时产生的地球磁场变化是地震监控的一个重要手段。对地震磁现象的研究迄今也有近百年的历史,但到目前为止这仍是一个世界难题。一般认为,地震引起磁场变化的原因主要有两点:一是地震前岩石在地应力作用下出现的“压磁效应”,从而引起地磁场局部变化;二是地应力使岩石被压缩或拉伸,引起电阻率变化,使电磁场有相应的局部变化,此外岩石温度的改变也能使岩石电磁性质改变。因此,利用电磁手段应该可以实现地震的预报。通过长期观测表明,地磁的任何一个分量,在任何一个地方都是不断变化的。变化的原因是多方面的,如与太阳、地球等天体运行有

关的昼夜变化、季节变化、年变化等周期性变化;还有在地震的孕育发展过程中,由于地下应力作用,地下岩石的物理、化学性质发生相应变化,从而导致地下岩石磁性的改变,令在地面上观测到的地磁发生局部的微弱变化。只有通过观测数据分析,从大量引起地磁变化的因素中排除干扰因素,提取出地下应力作用引起的地磁变化,才能得到与地震有关的具有规律性的地磁变化异常,实现成功预报地震。图 1.5 是我国主要的地震带和国家地震台站分布图。按照压磁效应理论,地震在孕育的过程中,地下应力的变化会引起地下岩石磁性的改变,从而导致地球局部磁场产生不规则变化,即磁异常现象。地震孕育所伴随的物理化学过程,有可能通过压磁效应、膨胀磁效应、热效应等产生震磁前兆异常^[27]。表 1.1 是北京地区及其附近几次地震的震磁前兆信息^[28]。因此,磁异常预报地震引起了地震多发国家人们的高度重视。Johnston 等人分别在 1998 年中国台湾省召开的西太平洋地球物理学学术讨论会和 1999 年英国爱丁堡举行的第 22 届 IUGG 大会中报告了地震电磁前兆研究的新进展^[29]与监测地震、火山喷发的电磁方法^[30]。2000 年,日本东京也召开了“国际地震电磁学学术讨论会”^[31]。

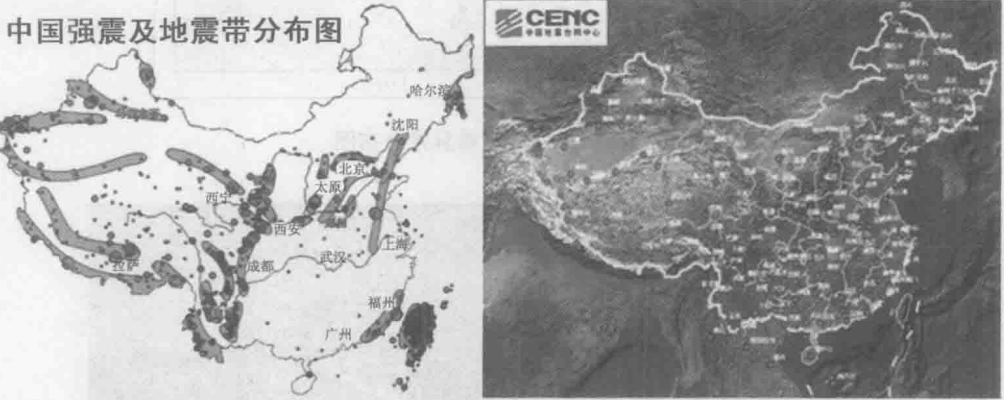


图 1.5 中国地震带和地震台站分布图

表 1.1 北京测网所观察的震磁前兆信息

地震时间(年-月-日)	地震地点	震级/Ms	震中距离/km	前兆时间	磁异常幅值/nT
1976-07-28	唐山	7.8	120	约 1 年	
1982-12-10	马道峪	4.9	30~50	2 个月	2~3
1990-09-22	小汤山	3.7	2	7 天	3
1993-11-18	宝坻	4.5	10	7 个月	5.2
1995-07-20	怀来	4.3	15	3 个月	4.5
1996-12-16	顺义	4.0	10	5 天	3
1998-07-28	宝坻	3.8	10	40 天	3

1978 年 11 月 2 日,苏联通过测量地磁异常变化,以及其他地球物理和地质资料的综合分析,提前 6 小时成功预报了震级为 7 级的阿赖地震^[32]。美国通过两个磁力仪观测到 1992 年 6 月 28 日发生在加州兰德斯 7.3 级地震^[33]。在我国,利用地磁预报地震的方法还在探索阶段中。我国各地的地震台都装配有磁通门磁力仪,正积极地进行以磁报震的可行性

研究^[34-35]。根据地磁异常等震前兆,我国曾成功预报了1975年2月4日的7.3级辽宁海城地震,及时疏散了居民,减少了大量人员伤亡^[36]。由于震前地磁异常幅度小,通常在几个nT到十几个nT之间,因此提高磁力仪的精度对准确地获取地磁异常信息,提高地震预报成功率至关重要。

为了能准确快速地进行地震预测,世界各国都布置了大量的地磁观测台站。图1.6是环太平洋地磁观测台站分布图。

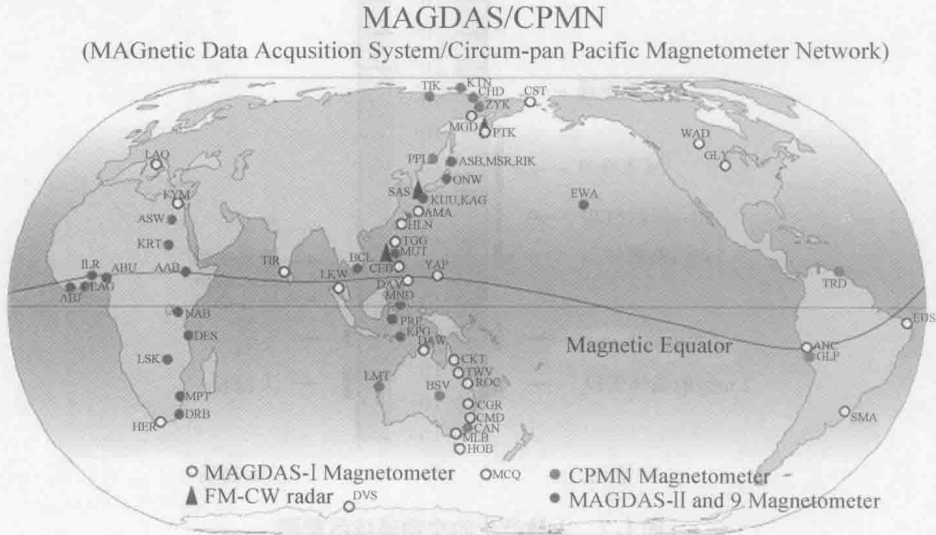


图 1.6 环太平洋地磁观测站分布图

1.3 心磁脑磁测量

在生物医学领域,高灵敏度磁力仪是一种重要的医学辅助诊断仪器。弱磁检测技术在医疗领域的应用是其重要的发展动力,主要包括脑磁^[37]和心磁测量^[38-40],图1.7中给出了人体各部位产生的磁场强度。

大脑是人类身体中最复杂也是最重要的器官。在大脑皮层中约有 10^{10} 个神经细胞,这些细胞是产生各种大脑活动的基本单元。当大脑处于休息状态时,由于钠离子的渗透率小于钾离子,外部神经元膜保持着几十毫伏的电压。当神经细胞受到刺激时,离子的渗透率发生变化,钠离子穿透神经元膜,电压产生反向。这种突然的电压改变会产生电脉冲,沿着神经细胞轴突传播。在轴突的末端,电信号转化成化学信号释放神经递质穿过突触间隙传递给下一个神经细胞。沿着轴突传播的电脉冲会产生非常微弱的磁场(< 100 fT)^[41-42]。人体颅内脑神经组织带电粒子的迁移会在局部产生电流,造成局部磁场变化,目前广泛采用超导磁力仪记录这种随时间变化的磁场变化,称为脑磁图(Magnetoencephalography, MEG)。还可通过刺激脑部神经组织引起磁场的变化,例如采用声信号(听觉诱发脑磁反应,AEFs)、光信号(视觉诱发脑磁反应,VEFs)或电信号(体表感觉诱发脑磁反应,SEFs)进行刺激。在20世纪80年代,国外已经采用超导量子干涉仪测量听觉诱发中潜伏期脑磁反应和听觉诱发脑干磁反应。20世纪90年代初又出现了听觉诱发脑磁图,如图1.8所示^[43]。脑磁测量主要用于癫痫病灶的定位诊断,以及脑梗塞、脑溢血、精神障碍疾病的诊断。脑磁

图目前已广泛应用在癫痫和病灶定位、大脑功能区定位、缺血性脑血管疾病、精神病和心理障碍等疾病的诊断中^[44-47]。图 1.9 详细地描述了 MEG 的优点和应用。从图 1.9 中可以看出,相对于多种诊断手段,MEG 具有最佳的空间和时间分辨率,同时对人体几乎没有损伤^[48]。

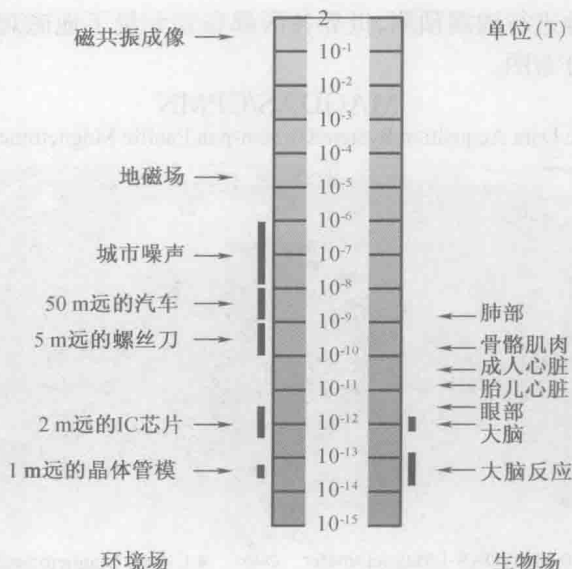


图 1.7 人体产生的生物磁场示意图

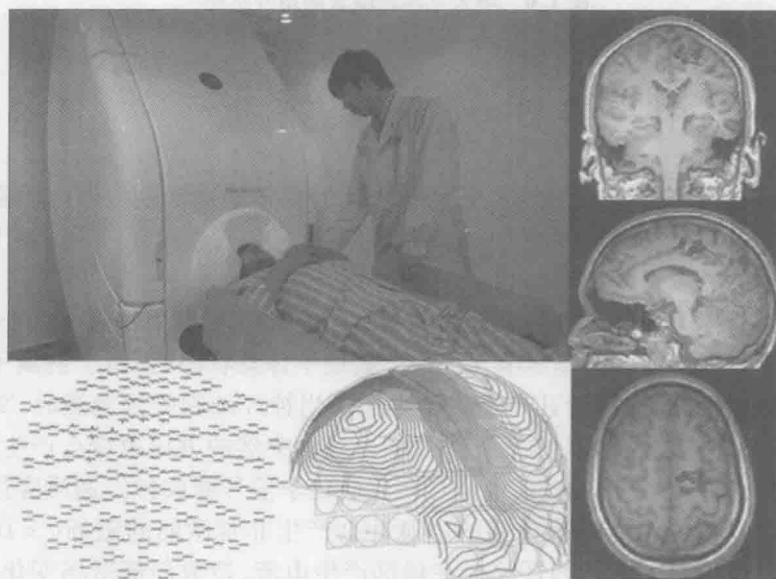


图 1.8 脑磁测量示意图

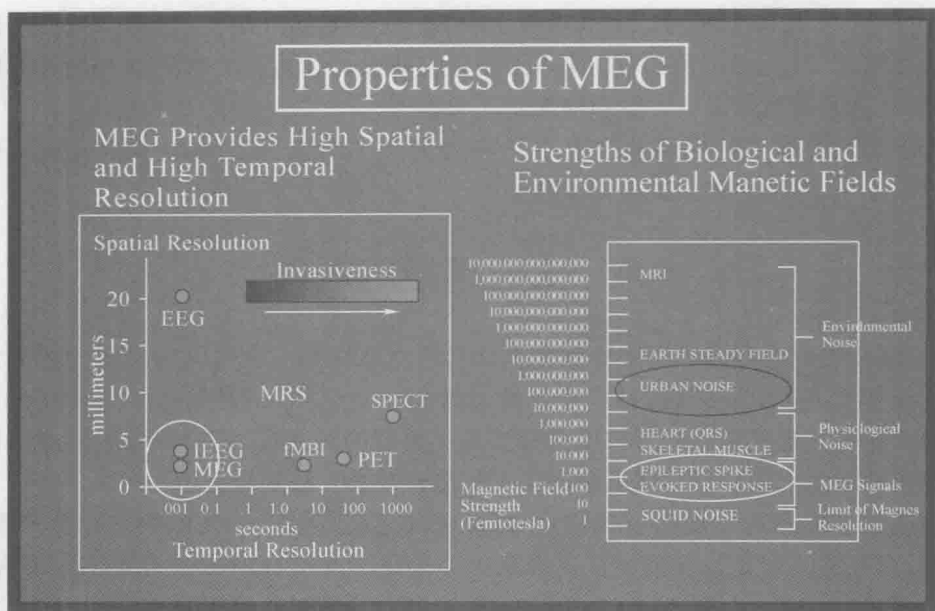


图 1.9 脑磁图的优势和应用示意图

图 1.10 是利用超导量子干涉磁力仪 (Superconducting Quantum Interference Device, SQUID) 进行脑磁图测量的实物图^[49]。

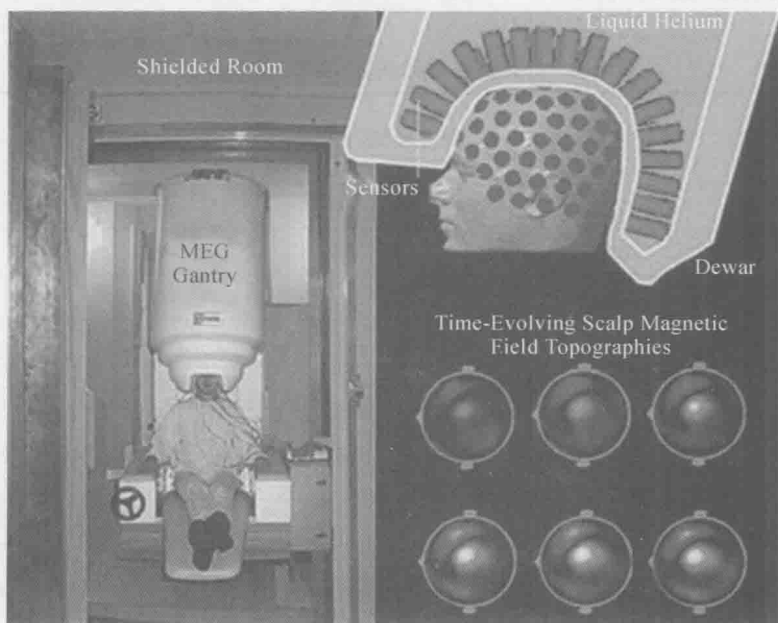


图 1.10 超导磁力仪进行脑磁图测量实物图

除脑磁图外,心磁图 (Magnetocardiography, MCG) 也是非常重要的医学诊断手段。人体心脏的跳动伴随着激活电流的产生,激活电流在周围产生磁场,心磁学即是对该磁场进行测量、分析并给出医学解释。由于传统的心电图只能测量体表不等势两点的电位差,而体表的电势差往往不能推算出体内心电电流的准确分布,因此需要接触式测量。而采用高温

超导磁力仪进行心磁测量则可以实现非接触测量,并且测量准确,可以对心脏损伤部位进行定位。目前,已经用于心脏疾病的诊断,在心肌缺血、冠心病、心律失常和胎儿心脏疾病检测等方面,心磁测量开展了大量的临床研究工作^[50-53]。

随着磁力仪灵敏度的提高和技术的进步,近年来,人们已经开始研究利用高灵敏度磁力仪来定位分子、癌细胞和测量植物磁场等^[54-56]。

1.4 工业领域的应用

在工业领域,磁检测法可用来检测金属材料的内部缺陷。这是因为金属材料在加上微电流后会其周围产生弱磁场,材料存在缺陷处由于其电导率不同,会导致磁场分布不均并产生梯度变化。这种微小的磁梯度可通过高灵敏度的磁力仪来进行检测,从而推断出材料缺陷位置和缺陷程度^[57-58],在高精密仪器制造领域具有重要意义。

随着通信业的迅速发展,只在陆地上铺设各种通信缆线已经无法满足社会的需求,因此超距离、大容量的光缆就被铺设在了海底。但是由于无法在海面上设置固定的标志,同时海底生物游动、地形变化、水流运动以及地震海啸等因素的存在会使光缆位置发生变化,为后期定位施工和维护带来了很大困难。近年来的研究表明,磁异常探测方法作为一种无源检测法,是目前查找定位海底光缆的重要技术手段。中海油集团就利用 Sea SPY 型高分辨率磁力探测系统在南海东部海域进行海底光缆的调查^[59-61]。水下磁探测还可用于水下沉船定位、寻找坠落飞机残骸等^[62-64]。常见磁异常值如下表 1.2 所示。

表 1.2 常见磁性目标在远距离处的磁异常值

目标	质量或尺寸	探测距离/m	磁异常值	
			波动范围	单位
船	1000 t	500	58 ~ 116	PT
铁锚	20 t	500	11 ~ 17	PT
汽车	-	500	0.22 ~ 0.43	PT
管线	30 cm	500	1.7 ~ 3.5	PT
管线	15 cm	500	0.22 ~ 0.43	PT
铁	450 kg	500	27 ~ 54	fT
铁	45 kg	500	2.9 ~ 5.8	fT
铁	4.5 kg	500	0.9 ~ 1.7	fT
炸弹	450 kg	500	0.2 ~ 1.1	PT
炸弹	225 kg	500	16 ~ 164	fT
小型飞机	-	500	6.9 ~ 27.1	fT
手榴弹	-	100	14 ~ 54	fT
铁壳	2 cm	100	2.92 ~ 11.7	fT

1.5 其他应用

高精度磁测技术在海洋工程、大型工程项目选址和基础科学研究等领域也有广泛地应用。在海洋石油钻井平台周边水域通常布满管道和各种线缆,随着时间积累、海浪冲刷等因素,常常相互交叉,给海洋安全作业、船舶停靠等带来隐患。因此,对于海底管线位置的准确探测显得尤为重要。与其他的技术手段相比,高精度磁测拥有快速、准确和经济的优势^[65-67]。除此之外,磁测技术也是水下沉船、失事飞机等水下磁性物体的搜索定位方面最常用的手段^[68-69]。图 1.11 是采用拖曳磁力仪阵列进行水下探测^[70]示意图。在基础科学领域,超高灵敏度磁力仪是研究核四极矩、电荷-宇称-时间反演对称性的重要工具^[71-72]。此外,磁探测法还用于大陆架探测,研究地壳构造和板块结构。2007 年 8 月俄罗斯科考队员乘深海潜器在北冰洋底插上了钛合金的俄罗斯国旗,而证明北冰洋底是其大陆架延伸的依据之一就是地磁勘测技术。

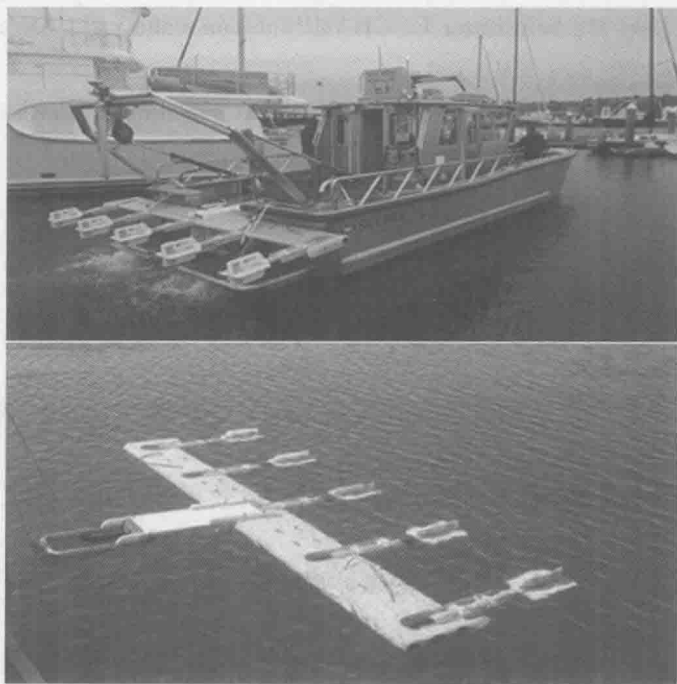


图 1.11 拖曳磁力仪阵列图片

参考文献

- [1] 郑广如,张玄杰,范子良,等.高精度航磁调查在新疆西天山地区的应用[J].物探与化探,2011,35(2):188-191.
- [2] 董杰,李卫东,肖金平,等.河北省八道河航磁低背景场区铁矿地面磁测勘查实例[J].物探与化探,2010,34(5):557-563.
- [3] 张伟庆,张作伦,张鲁新,等.高精度磁法在某铅锌矿体勘查中的应用[J].金属矿山,

2009(4):81-94.

- [4] 朱英. 中国石油航空磁测的进展和展望[J]. 石油物探, 1989, 28(3): 16-21
- [5] 冯彦, 安振昌, 孙涵, 等. 地磁测量卫星[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(6): 1947-1958.
- [6] 张昌达. 卫星磁测的过去·现在·未来[J]. 物探与化探, 2003, 27(5): 329-332.
- [7] Hemant K, Maus S. Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978—2012), 2005, 110(B12).
- [8] 安振昌. 亚洲 MAGSAT 卫星磁异常图[J]. 地球物理学报, 1996, 39(4): 461-469.
- [9] Maus S, Rother M, Holme R, et al. First scalar magnetic anomaly map from CHAMP satellite data indicates weak lithospheric field[J]. Geophysical research letters, 2002, 29(14): 1702.
- [10] 冯万营, 时翔. 德国 CHAMP 地球探测小卫星[J]. 测绘标准化, 2001, 17(2): 28-35.
- [11] Reigber C, Lühr H, Schwintzer P. CHAMP mission status[J]. Advances in Space Research, 2002, 30(2): 129-134.
- [12] Olsen N, Lühr H, Sabaka T J, et al. CHAOS—a model of the Earth's magnetic field derived from CHAMP, Ørsted, and SAC-C magnetic satellite data[J]. Geophysical Journal International, 2006, 166(1): 67-75.
- [13] 陈家联, 张毅, 陈超. 广西地区卫星磁异常与区域地质特征[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(003): 327-332.
- [14] 袁桂琴, 熊盛青, 孟庆敏, 等. 地球物理勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1744-1805.
- [15] 仇铭华. 高精度航空磁测技术及其应用[C]. 1991年中国地球物理学会第七届学术年会论文集, 1991: 124.
- [16] 龙昭陵. 地面高精度磁测在湖南地质找矿中的效果及“九·五”期间的设想[J]. 湖南地质, 1997, 16(1): 42-46.
- [17] 刘世义, 孙吉生. 辽南金伯利岩的磁异常特征[J]. 地质科技情报, 1993, (12): 14-20.
- [18] 李开毕, 杨淑胜, 蔡旭. 高精度磁测在镇康芦子园矿区勘查中的作用及效果[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2012, 34(S2): 157-162.
- [19] 柳建新, 郭振威, 童孝忠, 等. 地面高精度磁法在新疆哈密地区磁铁矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2011, 47(3): 432-438.
- [20] 邵行来, 薛春纪, 严育通, 等. 地面高精度连续磁测在西天山群吉萨依铜矿勘查中的运用[J]. 新疆地质, 2011, 29(3): 342-347.
- [21] 蓝海洋, 郑柱, 王密. 质子旋进磁力仪在钒钛磁铁矿勘查中的应用[J]. 现代矿业, 2009(5): 127-129.
- [22] 张春灌, 王菲菲, 白玉彬, 等. 磁测找油方法及其在陕北油气勘探中的应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1655-1664.
- [23] 于长春, 熊盛青, 刘士毅, 等. 直升机航磁方法在大冶铁矿区深部找矿中的见矿实