

量子磁力仪研究和开发近况

张 昌 达

(中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:介绍了核子旋进磁力仪、欧弗豪泽磁力仪、光泵磁力仪、超导磁力仪和原子磁力仪研究和开发近况,提出了开展研究工作的建议。

关键词:核子旋进磁力仪;欧弗豪泽磁力仪;光泵磁力仪;超导磁力仪;原子磁力仪

中图分类号: P631.2⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2005)04-0283-05

1 原理概述

自从 20 世纪 50 年代中期第一种量子磁力仪——核子旋进磁力仪问世以来,量子磁力仪的研究和开发工作十分活跃,出现了各种各样的量子磁力仪,磁力仪的准确度、灵敏度和分辨率不断提高,而重量和能耗却大幅度减少。空间探测的需要(测量磁场是一个主要项目)、军事技术的需要(以磁通门为首的现代磁力仪发端于此)、地质调查和矿产资源勘查的需要、医学诊断和生物磁学研究的需要,以及其他各方面的需要是推动磁力仪研究开发的强劲动力。物理学基础理论研究成果构筑的宽广而坚实的基础和电子技术的飞速进步,为研究和开发提供了良好的条件。

为了测定磁场,核子旋进磁力仪利用了氢原子核(即质子)和氦 3(³He)核的自旋,欧弗豪泽效应磁力仪(Overhauser effect magnetometer, OVM)是利用电子的自旋使质子自旋极化(整齐排列,磁化)。在富含质子的“溶剂”中加入某种自由基(free radical),自由基电子和溶剂的质子之间有弱标量耦合,自由基电子的极化使溶剂中质子的自旋强烈极化。光泵磁力仪利用了某些气态碱金属(钾、铷、铯)原子电子壳层结构最外层未配对电子和氦 4(⁴He)原子(亚稳态正氦)的电子的自旋。在氦 3 磁力仪中核自旋的极化是用光泵的方法完成的。超导磁力仪利用超导体的量子干涉现象(超导量子干涉磁力仪 superconducting quantum interference device, SQUID)^[1-4]。正在研究和开发中的电子自旋共振(electron spin resonance, ESR)磁力仪利用了某些固态有机自由原子团或自由基中电子的自旋^[5,6]。

另一种正在研究和开发中的原子磁力仪和光泵磁力仪一样,也是利用某些气态碱金属(钾)原子电子的自旋,不过牵涉到的方法原理有些不同,更复杂一些,完全利用光学方法检测磁场^[7,8]。

凡是利用微观世界中与磁场有关的现象(这些现象要用量子理论解释)来测量磁场的仪器,都可称为量子磁力仪,从这个意义上说,以上列举的这些磁力仪,都是量子磁力仪。不过在习惯上,人们把核子旋进磁力仪和光泵磁力仪称为量子磁力仪。这两类磁力仪都是利用亚原子粒子(质子、电子)的自旋。在外磁场中,自旋有若干个离散的取向,与此相对应,原来的能级简并(degeneracy)解除,分裂成若干个磁次能级,相邻的 2 个磁次能级之间的能量差(ΔE)与外磁场磁感应强度(B)成比例($\Delta E = h\gamma/(2\pi B)$, h 是普朗克常数, γ 是粒子的旋磁比,是一个已知的物理学常数)。用适当的方法使相邻的 2 个磁次能级上粒子分布数目发生反常,则粒子将会在 2 个磁次能级之间跃迁,吸收或发射电磁辐射,这种电磁辐射的频率(ν)与相邻的 2 个磁次能级之间的能量差成正比(爱因斯坦关系式 $\Delta E = h\nu$),测出这种电磁辐射的频率,即可得到磁场值 [$B = (2\pi/\gamma)\nu$]。

2 几个参数和磁感应强度单位

我们先说明磁力仪几个参数的含义和磁感应强度单位。磁力仪的性能由测量参数确定,这些参数包括灵敏度、分辨率、(绝对)准确度等,正确理解这些参数的含义,可以帮助我们避免误解和混淆,评估制造厂家的技术指标,合理地使用仪器进行磁测。绝对准确度(absolute accuracy),又简称为准确度,

指测得的值和真值之间最大的差值。真值是可知而未知的,谁也不知道它究竟是多少,因此只能确定一个范围,我们知道真值必定落在这个范围之内。考虑确定磁场时牵涉到的各种因素和它们的准确度,我们就可以划定这个范围。灵敏度(sensitivity)是衡量对同一磁场强度进行重复读数的相对不确定度的一个统计数值。它定义为均方根(r. m. s.)每单位(频)带宽平方根($\text{Hz}^{1/2}$)。例如,灵敏度为 $1 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$ 表示众多读数围绕某一固定值(标准值)有每单位(频)带宽平方根($\text{Hz}^{1/2}$) 1 pT r. m. s. 的离散值(根据噪声的特点,大约有 $3\sim 4 \text{ pT}$ 的峰-峰值)。简言之,灵敏度是衡量重复测定磁场离散程度的一个统计数值。灵敏度数值愈小,仪器愈灵敏。分辨力(率)(resolution),指测量装置可以分辨的最小频率变化或最小的磁场变化。一般来说,它的数值比灵敏度的数值小一个数量级,又称为计数器或显示器分辨力。需要提起注意的是,有的科学家将此处所说的灵敏度称为分辨率,有的科学家则将此处所说的分辨率称为灵敏度,阅读时要注意术语的确切含义。

伽马和纳特是大家所熟悉的单位,它们之间的关系说明如下。过去,测量磁场强度的单位是奥斯特(Oersted, Oe),现在采用和推广国际单位制(SI)。测量磁感应强度(磁通量密度)的单位是特斯拉(Tesla, T)或高斯(Gauss, Gs)。在真空中磁场强度和磁感应强度在数值上相等。因此有: $79.6 \text{ A/m} = 1 \text{ Oe}$, $1 \text{ Oe} = 10^5 \text{ gamma}(\gamma)$, $1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs}$, $1 \text{ Gs} = 1 \text{ Oe}$ (在真空中), $1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T} = 1 \text{ gamma}$ 。现在磁力仪的灵敏度提高了许多,有时“nT”这个单位也嫌太大,一些更小的单位经常出现。换算关系为: $1 \text{ T}(\text{特斯拉}) = 10^9 \text{ nT}(\text{纳特}) = 10^{12} \text{ pT}(\text{皮特}) = 10^{15} \text{ fT}(\text{飞特}) = 10^{18} \text{ aT}(\text{阿特})$ 。

以下论述量子磁力仪研究和开发的 5 项新成果(标题 3~7)。

3 经典的核子旋进磁力仪有所创新

质子磁力仪问世 50 年以来,得到广泛的应用,现在还未退役。这种磁力仪采用间断测量方式,在每秒一次读数时,灵敏度为 0.1 nT ,地面仪器的准确度为 1 nT 。由于定向要求不严,这种仪器没有全向的传感器,操作很简便,价格最便宜,性能稳定耐用,广泛用于海洋、地面和台站观测。

质子磁力仪的进一步发展是利用动态极化或欧弗豪泽效应的质子磁力仪,简称欧弗豪泽磁力仪。1953 年 A. W. Overhauser 首先研究了金属中电子

顺磁共振饱和或电子的定向排列会导致核子的强烈极化的效应,这种效应就以他的姓氏命名。后来法国科学家 A. Abragam 详细研究了非金属和顺磁离子溶液中的欧弗豪泽效应。20 世纪 60 年代初, A. Abragam 和另一位法国科学家 I. Solomon 在加拿大和美国申请了关于利用 Overhauser 效应制造磁力仪的专利。A. Abragam 撰写了一本关于 NMR 的经典著作, Solomon I. 推导出了以他的姓氏命名的 Solomon 方程式,由这个方程式的解可看到 Overhauser 效应。因此也有人将这种磁力仪称为欧弗豪泽-阿布拉姆质子磁力仪。在上个世纪 60 年代到 80 年代,法国、加拿大和苏联先后制成了航空和地面欧弗豪泽磁力仪。在上个世纪 90 年代初,法国原子能署的电子技术和仪器实验室(LETI)制成的一种欧弗豪泽磁力仪,测量磁场的准确度为 0.1 nT ,灵敏度达到 $10 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}$,没有盲区,方向误差小于 0.1 nT ,功耗小,可长期稳定工作。1999 年丹麦发射的 Oersted 卫星和德国 2000 年发射的 CHAMP 卫星都采用这个实验室设计制造的欧弗豪泽磁力仪。法国反潜飞机和直升飞机都采用这个实验室设计制造的欧弗豪泽磁力仪。现在加拿大和俄罗斯的一些厂家和实验室设计制造各种用途的欧弗豪泽磁力仪,有的厂家还设计了质子振荡器,进行连续观测^[9-11]。加拿大 Marine Magnetics 公司制造的欧弗豪泽海洋磁力仪 SeaSpy,绝对准确度为 0.2 nT ,灵敏度为 0.01 nT ,分辨率为 0.001 nT ,没有盲区和方向误差^[12]。

还有一种核子旋进磁力仪是氦 3 (^3He) 磁力仪, ^3He 核的自旋 $I=1/2$,旋磁比 $\gamma_{^3\text{He}}=0.032 \text{ Hz/nT}$,采用光泵方法使氦 3 的核极化,由于工作谱线很窄,可以把仪器的灵敏度做得很高。俄罗斯科学院院士、著名物理学家、量子磁测专家 E. B. Alexandrov 最近著文指出,近 10 年来,光泵磁力仪 3 个主要进步之一是(激光)光泵氦 3 自由旋进磁力仪绝对准确度最高(笔者估计达到约 10 pT),功耗最低。目前这种磁力仪仅在实验室中进行研究,在极少数台站中进行观测^[13,14]。

4 不断改进的超导量子干涉磁力仪仍有优势

超导量子干涉磁力仪(SQUID)是一种矢量磁力仪,它的优势是灵敏度高。在液氦温度下(4°K)用低温超导体制成的 SQUID,灵敏度可达 $1 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$;量程可达 $0\sim n\times 10^{-5} \text{ nT}$ 的磁场;SQUID 频带很宽,频率响应从 $0\sim 10^6 \text{ Hz}$ 。在地球物理学方

面,可用于航空和地面电磁法中,可制成航空磁梯度仪,可用来研究地磁场的微扰,可用于地震预报,地热调查;还可用来测量磁性十分微弱的岩石标本的磁性,可用于机场的安全检查。在生物磁学方面,可记录头脑频率最高的辐射,脑磁图(magneto encephalo graphy,MEG)的瞬时分辨力很好。由于高温超导体(HTC)研究取得的成果,利用 Ybaco 高温超导体制成的 SQUID,可在液氮温度下(77°K)工作,可以测量几十 fT 的磁场,为 SQUID 的推广应用前进了一步。在时间域电磁法(TEM)中利用 HTC SQUID 磁力仪测量 $B(t)$,而在传统的 TEM 法中用感应线圈测量 $dB(t)/dt$, $B(t)$ 比 $dB(t)/dt$ 衰减缓慢,因而对响应曲线的后半段测得比较精细,这样,探测深度就比较大。在 20 世纪 90 年代,在澳大利亚、德国和中国,利用 HTC SQUID 系统进行了地面和/或航空瞬变电磁法试验,取得了初步成功。航空 TEM 使用的 SQUID 磁力仪主要指标如下:在地磁场中无屏蔽条件下工作时白噪声为 350 fT/Hz^{1/2},带宽为 100 kHz,动态范围 110 dB;对于三轴系统,包括杜瓦瓶和电子装置,重量小于 3 kg,可见小型化取得很大进展。地面 TEM 使用的 HTC SQUID 矢量磁力仪,灵敏度约为 40 fT/Hz^{1/2},杜瓦瓶一次装满液氮后,可连续工作几天,动态范围 130 dB,频带宽度从 DC 到 20 kHz。由于 HTC SQUID 磁力仪灵敏度很高,频带很宽,因而有的地球物理学家将它用于可控源音频大地电磁法。也有地球物理学家将它用于射频磁测深(radio magnetic sounding, RMS)测量无线电台发射的频率范围为 10 ~1 600 kHz 信号的磁场分布,可以确定地表 100 m 以内地层的导电率,以帮助解决土质、水文和环境问题^[15-17]。

5 激光器代替无极放电灯作光泵光源

20 世纪 90 年代初,法国 LETI 就用可调谐的激光器代替氪灯制成激光光泵氪磁力仪,由于谱线选择性较好,激光又比氪灯的光要强,因此提高了磁力仪的灵敏度,达到 10 pT/Hz^{1/2},各向同性(isotropy)为 10 pT。美国珀拉托密克公司(Polatonic, Inc.)的 R. Slcum 博士申请了专利:利用二极管激光器作为氪同位素光泵磁力仪光源。该公司有几项创新:用单一激光光源全方位测量磁场;与用氪灯作光源相比,灵敏度提高一个级次,达到 sub-pT 范围;用单一传感器测量矢量的分量和模量,以分量模式工作时,产生与磁场矢量的 3 个互相垂直的分量成比例的 3 个电压,测量矢量场的准确度优于 0.

1%。以标量模式工作时,测量与磁场模量成比例的拉莫尔旋进频率,测量标量的绝对准确度优于 0.001%。坡拉托密克公司称,该公司的激光(光泵)磁力仪(P-2000 激光(光泵)磁力仪灵敏度为 100 fT/Hz^{1/2})比美国海军现在使用的航空探测潜艇的 AN/ASQ-81 MAD(magnetic anomaly detection 磁异常探测)装置的灵敏度和准确度高一个量级^[18,19]。

在光泵磁力仪中利用可调谐半导体激光器代替高频激发的灯室作为光泵的光源(⁴He,Cs,K,³He 均有报导),相比之下,提高了灵敏度一个级次以上。最新的激光光泵氪(⁴He)磁力仪的灵敏度已突破 1 pT/Hz^{1/2}的界限,达到 0.4 pT/Hz^{1/2},而用高频激发的灯室作为光泵的光源的氪 4 航空磁力仪的灵敏度大约是 20 pT/Hz^{1/2}。美国海军准备用激光光泵氪 4 磁力仪代替现在在反潜飞机上使用的用高频激发的灯室作为光泵的光源的氪 4 磁力仪。我们在第 3 段中已提到,激光光泵氪 3 核子旋进磁力仪灵敏度和准确度均有提高。

利用可调谐半导体激光器作为光泵光源的钾(K)光泵磁力仪正在追赶 SQUID,可以测得心磁图(magneto cardio gram,MCG)。

瑞士 Fribourg 大学的 G. Bison 等研制成激光光泵铯(Cs)磁力仪,这台光泵磁力仪的灵敏度是 63 fT / Hz^{1/2},140 Hz 的带宽,空间分辨率 28 mm^[20]。

6 光泵磁力仪家族新成员钾光泵磁力仪性能优异

核子旋进磁力仪和光泵磁力仪的灵敏度与工作谱线的宽度成正比,钾的谱线很窄,约为 0.1~1.0 nT,因此用钾作工作物质,可以制成灵敏度很高的磁力仪。钾的谱线间距较大,彼此不重叠,因此方向误差很小,而且无须标定。这种磁力仪的绝对准确度优于 0.1 nT。在实验室里,钾磁力仪的噪声水平低于 0.05 pT,可追踪 1 000 Hz 的变化磁场。

E. B. Alexandrov 院士领导的俄罗斯瓦维诺夫国立光学研究所和 MagTec 公司研制了上述高精度量子磁力仪,供应俄罗斯国内。至于在俄罗斯以外,他们推荐加拿大 GEM SYSTEMS 公司的产品。加拿大 GEM SYSTEMS 公司,制成了系列钾光泵磁力仪,例如,可用于地面磁场和航空磁测的 GSMP20 钾光泵磁力仪,最快取样率为 20 Hz,灵敏度为 0.000 03 nT,即 0.03 pT 或 30 fT。在 0.02 ~0.2 Hz 频率范围内,噪声包络为 0.03 pT r. m. s。传感器定向要求为偏离磁场方向 45°±35°以内。

7 检验基本理论、用途广泛的原子磁力仪初现端倪

美国普林斯顿大学的 M. V. Romalis 研究小组最近研制成功一种灵敏度极高的原子磁力仪^[7]。由激光器产生的一定频率的偏振激光束照射气态钾原子,使钾原子跃迁到高能级产生极化,待测的外磁场使原子的极化发生演变,即原子的磁矩绕着磁场方向旋进,用另一束激光来检测上述演变,即可测定磁场。因此有人将这种磁力仪称为全光学磁力仪(all-optical atomic magnetometer)。这只是简略地描述其原理,实际上还采取一些巧妙的措施达到测量磁场的目的。这种磁力仪又称为无自旋交互弛豫磁力仪(the spin exchange relaxation free (SERF) magnetometer)。这台磁力仪的灵敏度是 $1 \text{ fT/Hz}^{1/2}$,空间分辨率为 2 mm 。M. V. Romalis 研究小组的理论分析表明,这种磁力仪的灵敏度可提高到 $(10^{-2} \sim 10^{-3}) \text{ fT/Hz}^{1/2}$,空间分辨率也可进一步提高。将来在心脏磁测(测绘心磁图)(magneto cardio graphy, MCG)和人脑磁测(测绘脑磁图)(magneto encephalo graphy, MEG)方面,原子磁力仪的性能可能超越需要低温条件的 SQUID。前已提及,现在光泵磁力仪已成功地测绘出心脏产生的磁场,磁场幅度为 0.1 nT 。人脑的磁场很弱,只有几个 fT 。高灵敏度的原子磁力仪,用途很广,M. V. Romalis 的主要目的是用它来进行 CPT 违背实验(CPT violation experiment)。CPT 是电荷共轭、空间和时间 3 种变换的综合(总称)。传统的物理学基本理论在 CPT 变换下是守恒的,有的物理学基本理论(例如弦论)在 CPT 变换下是不守恒的。CPT 违背实验可对这些理论进行检验^[12,22]。在应用方面,除了一般的磁测,M. V. Romalis 说他们的磁力仪还可用于军事侦察。美国海军部门公布了一些需要研究的课题,其中一个课题是:“研究开发可以在一个活动平台上测量低于 1 fT 水平的磁场的磁力仪新技术”,并说,“海军要求,在探寻具有磁性特征的目标时,提高探测概率,增大投射距离(大于 $9\,000 \text{ ft}$,约合 $2\,743 \text{ m}$)。据一份美国海军学院的文献说,飞机探测潜艇的距离(斜距)约为 500 m 。为了完成上述任务,必须能够在运动是主要噪声源的环境下,探测 1 fT 的磁异常,这种磁力仪还可用于机场安全检查和医学诊断(MRI,NMR)等领域。”笔者分析了有关资料后以为,这个课题的策划者似乎青睐于 M. V. Romalis 小组研制成功的 sub-fT 级原子磁力仪。特瑞斯坦技术公司(Tristan Technologies, Inc.)与 Ro-

malis 教授共同提出根据上述独一无二的极灵敏的原子磁力仪技术开发磁异常探测(MAD)系统。此外,还有 2 家公司提出了各自的新型磁力仪设计:珀拉托密克公司提出反潜战用的新型光学方法驱动的自旋旋进磁力仪;西南科学公司(Southwest Sciences, Inc.)提出根据频率调制磁学-光学转动原理设计的灵敏磁力仪,转动率与磁场成比例,用极化测定方法测量。笔者认为,这 3 家公司都是受 Romalis 教授发明的原子磁力仪的启发,进行多路探索,以尽快达到美国海军提出的目标。

8 建议

磁力仪用途很广,在国民经济建设、空间探测、科学研究以及国防建设方面需要数量很多的各种不同性能的磁力仪。可以进口一些,但不能依赖进口,因为性能稍好的磁力仪是禁运的,拿钱也买不到。例如,有的国家将噪声水平低于某个限度或灵敏度优于某个限度的超导、光泵和核子旋进(质子/欧弗豪泽)磁力仪列入出口货物管制清单。因此,为了满足各方面的需要,应该投入一定的人力和资金,开展先进磁力仪的研究和开发。

我国的大学、地质调查部门所属单位和有关科研机构,在质子磁力仪、氦光泵磁力仪、SQUID 和磁通门磁力仪的研究和开发方面进行了长期的、富有成果的工作。地质调查部门所属的航空地球物理单位利用氦光泵磁力仪在我国大陆(包括西藏高原)和海区进行了高精度的航空磁测,取得了十分宝贵的磁测资料。

笔者认为,要重视原有的研究和开发工作所取得的成果和积累的经验,要适当安排,保持研究和开发工作的连续性。在国内展开各单位的协作,在国际上争取与有关国家开展技术合作或技术引进。可以考虑在以下几个方面开展工作:①在质子磁力仪的基础上,开展 Overhauser 效应磁力仪的研制工作;②开展在氦光泵磁力仪中,用激光作光源代替氦灯的研究工作,同时研究用氦光泵磁力仪既测标量又测矢量的方案;③开展利用 HTS SQUID 进行地面电磁法的研究工作;④研究用于空间探测的三分量磁通门磁力仪;⑤研制激光光泵钾磁力仪。

参考文献:

- [1] 秦葆珊,张昌达.高精度磁法勘探[M].长沙:中南工业大学出版社,1988.
- [2] 陈文升.核磁共振地球物理仪器原理[M].北京:地质出版社,1992.
- [3] Никитский В Е, Глебовский Ю С. Магниторазведка [M].

Москва:НЕДРА, 1990.

[4] Hrvoic I, Hollyer G M. A brief review of quantum magnetometers[OL]. <http://www.gemsys.ca>.

[5] Kernevez N, Glenat H. Description of a high sensitivity CW scalar DNP-NMR Magnetometer[J]. IEEE Trans Mag, 1991, 27(6):5402—5404.

[6] Kernevez N. Weak field NMR and ESR spectrometers and magnetometers[J]. IEEE Trans Mag, 1992, 28(5): 3054—3059.

[7] Kominis I K, W Kornak T, Romalis M V, et al. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer[J]. Nature, 2003, 422(6932):596—599.

[8] Allred J, Kornack T, Romalis M, et al. A high-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation[J]. Phys Rev Lett, 2002, 89, 130—801.

[9] Bock R. Science Instrument of the CHAMP[OL]. http://www.gfz-potsdam.de/pb1/op/champ/systems/index__SYS-TEMS.html, 2000.

[10] Hrvoic I. Overhauser Magnetometers For Measurement of the Earth’s Magnetic Field[OL]. <http://www.gemsys.ca>.

[11] 张昌达. 德国地球科学卫星 CHAMP 上的一种磁力仪——欧弗豪泽效应质子磁力仪[A]. 张永刚, 孙延军, 李庆红, 张卫国. 第二届海洋强国战略论坛——军事海洋与技术论文集[C]. 中国海洋学会, 青岛, 2003.

[12] Hrvoic D. SeaSPY overhauser magnetometer, Technical application guide[OL]. <http://www.marinemagnetics.com>.

[13] Gilles H, Monfort Y, Hamel J. ³He maser for earth magnetic field measurement, Review of Scientific Instruments, 2003, 74(10):4515—4520.

[14] Alexandrov E B. Recent Progress in Optically Pumped Magnetometers (Abstract) [J]. Physica Scripta Online, 2003, 105(27).

[15] Wang S G, Zhang L H, Wang G H, et al. Applications of high temperature superconducting interference devices in transient electromagnetic method for magnetotelluric soundings [J]. Physica C, 1997, 282—287, 411—414.

[16] Lee J B, Dart D L, Foley C P, et al. Airborne TEM surveying with a SQUID magnetometer sensor[J]. Geophysics, 2002, 67(2):468—477.

[17] Panaitov G, Bick M, Zhang Y, et al. Peculiarities of SQUID magnetomer application in TEM[J]. Geophysics, 2002, 67(3): 739—745.

[18] Slocum R E, Schearer L D, Tin P, et al. Nd:LNA laser optical pumping of ⁴He—Application to space magnetometers[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64:6615—6617.

[19] Gilles H, Hamel J, Chéron B. Laser pumped ⁴He magnetometer [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(5): 2253—2260.

[20] Bison G, Wynands R, Weis A. A laser-pumped (Cs) magnetometer for the mapping of human cardiomagnetic fields[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2003, 76(3):325—328.

[21] Schultz S. New device explores frontiers of the universe and the brain[J]. Princeton Bulletin Weekly, 2004, 93(20):22.

[22] Budker D. A new spin on magnetometry[J]. Nature, 2003, 422(6932):574—575.

RECENT ADVANCES IN THE RESEARCH AND DEVELOPMENT
OF QUANTUM MAGNETOMETERS

ZHANG Chang-da

(Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, recent advances in the research and development of quantum magnetometers have been described together with some suggestions on further research work.

Key words: nuclear precession magnetometer; overhauser magnetometer; superconducting magnetometer; optical pumping magnetometer; atomic magnetometer

作者简介:张昌达(1933—),男,武汉市人,教授。1954年毕业于吉林大学物理系,1955年毕业于长春地质学院物探系研究生班。目前正致力于物探新方法研究,已发表论文 40 余篇。