

弱磁场测量技术进展

李大明

(机械电子工业部哈尔滨电工仪表研究所, 哈尔滨 150040)

黄明哲

(哈尔滨科学技术大学, 哈尔滨 150080)

本文简述了无定向磁强计、感应线圈磁强计、质子磁强计、光泵磁强计、磁通门磁强计、超导量子磁强计等几种弱磁场测量仪器的特点和现状,重点评述了磁通门技术、高温 SQUID 技术等最近发展,介绍了弱磁场测量技术的典型应用。

Abstract

The state-of-art and general features of instruments for measuring weak magnetic fields (such as the nondirectional magnetometer, induced coil magnetometer, proton magnetometer, optical pumping magnetometer, flux-gate magnetometer and superconducting quantum magnetometer) are briefly described. Emphasis is laid on the development of a novel technique used in the flux-gate magnetometer and the liquid nitrogen SQUID. Typical applications of the measuring techniques for weak magnetic fields are given.

一、弱磁场测量的方法和仪器

我国人民引以自豪的指南针的发明,早在公元前三世纪就有记载,但直至 16 世纪以后,

高反射率膜的铜抛物面反射镜组成。系统其它反射镜(约 30 面)皆为镀铜的平面镜。每一激光器的光束被导向到由三个活动镜组成的直立镜组底部。这些反射镜能按要求随意伸缩,把光束引向各区后面的光路。由于从三个区输出的光束高度不同,所以这三束光能叠加起来输出。

A, B 和 C 三区各自备有 He-Ne 准直系统,分别对各区的 CO₂ 主光束系统准直。此外,在各区的光束入口处装有光束快门系统,该系统能快速切断光束,是安全系统的主要组成部分。

机器的控制系统自动化程度高,各区受自

物理

它才真正成为测量磁场的科学仪器。当今科学技术的发展已经形成数十种测量弱磁场的方法和仪器,它们在国民经济、科学技术、军事、医学等领域里发挥了极重要的作用^[1,2]。

本文介绍几种主要的弱磁场测量方法和仪

己的控制系统控制,同时将信号送到室控制器系统。它能识别机器工作系统和外来控制信号,操作易于掌握,在 A 区培训使用的操作者能自动地熟悉 B 区和 C 区的操作。

五、计划进展情况

计划的第一阶段,即 25kW CO₂ 激光室的设计和制造将近完成。与此工作并行的功率 10kW 的加工机制造已进入材料加工阶段。它是为 25kW 加工机第二阶段应用积累经验的。

(焦 飞)

器。这里所说的弱磁场测量仪器是指测量范围在 10^{-4} T 以下、频宽为 0—1Hz 及分辨力高于 10^{-9} T 的磁强计。

1. 无定向磁强计

基于磁针原理的无定向磁强计,应用电子负反馈技术和数字技术后,由于其磁系相当一指零装置,灵敏度只和反馈线圈常数、线圈和磁系的相对位置以及线圈中的电流有关,所以提高了仪器的稳定性和线性度,缩短了读数时间,而且不需计算即可直观数字显示,其分辨力可达 10^{-9} — 10^{-12} T。然而,由于它的调整复杂和对环境条件要求苛刻等,所以只能在固定场所观测。因此在观测地磁日变和记录地磁要素等方面,还大量使用磁变仪之类的机械式磁强计。

2. 感应线圈磁强计

感应线圈磁强计是以法拉第电磁感应定律 $E = 10^{-8}N \frac{d\phi}{dt}$ 为基础的测量方法。对应磁通 ϕ 的变化,在匝数为 N 的流圈中产生感应电压 E 。用感应线圈测量恒定磁场时,可以通过探测线圈的移动、转动和振动等方式而使线圈中的磁通发生变化。其测量的磁场分辨力可达 10^{-12} — 10^{-13} T。

现代的感应线圈磁强计都是利用电子技术把感应电压放大和积分后显示,也可用 V-F 变换器采用数字积分。例如,国产的 CST-4 型数字磁通表,测量磁通量程为 10^{-4} — 10 Wb,分辨力为 10^{-7} Wb,测量的准确度为 $\pm 0.2\%$ 。日本的 TDF-2 型 V-F 式磁通表测量范围为 10^{-6} — 0.1 Wb,测量准确度为 $\pm 0.1\%$ 。美国的 780 型旋转线圈高斯计测量的量程为 2×10^{-4} — 20 T,测量的准确度为 $\pm 0.05\%$ 。

3. 质子磁强计

质子磁强计是利用氢质子样品在被测磁场垂直方向上加极化磁场,当极化磁场突然断开时,探头内的质子样品磁矩将以拉摩频率 ω_L 绕被测的磁场 B 为轴而自由旋进。其磁场为

$$B = \frac{\omega_L}{\gamma},$$

式中 γ 为质子的旋磁比。用此法可以对较弱磁

场进行绝对测量,其测量范围为 10^{-3} — 10^{-9} T,分辨力可达 10^{-10} T。

质子磁强计具有测量准确度高,稳定性好,没有温度漂移等优点,它最适于测量和地磁场有同一量级的恒定磁场,而不适合测量变化磁场。例如,国产的 IGS-2/MP-4 型质子磁力仪,它具有内部可扩展存储器,并可通过接口把数据送至打印机、微机,可自动进行日变改正。人们可用它来测量地球总磁场及梯度。它的总场测量范围为 2×10^4 — 1×10^5 nT,分辨力为 0.1nT。美国的 G801 型磁力仪,测量量程为 $(0.2-1) \times 10^{-4}$ T,测量准确度为 $\pm 0.001\%$ 。

4. 光泵磁强计

光泵法是利用原子的塞曼效应原理,对弱磁场进行绝对测量的一种精密方法。由于光泵磁强计具有灵敏度高、无零点漂移、不需要严格定向、可测量磁场分量等特点,因此自 60 年代以来,在各主要发达国家都先后研制了这种仪器,并用于地质勘探、宇航工程、机载探潜、考古等方面。

光泵磁强计主要用于测量小于 10^{-3} T 的恒定磁场,其分辨力一般可达 10^{-11} T 以上。例如德国的 EISEC 800 型光泵磁强计,测量范围为 $(0.24-0.72) \times 10^{-4}$ T,分辨力为 10^{-11} T。国外还研制了耗电少、体积小及价格低廉的光泵磁强计^[9]。其主要缺点是,由光学系统和气室而构成的探头体积较大,需要用严格的方法保证其稳定性。

5. 磁通门磁强计

磁通门磁强计是利用高导磁材料在传感器线圈系统中的磁饱和特性而测量磁场的仪器。它具有简单、小型、功耗低、测量范围宽、灵敏度高等特点。它适用于测量恒定磁场或缓慢变化的磁场,其测量范围一般在 10^{-3} — 10^{-4} T 以下,分辨力约为 10^{-8} — 10^{-10} T。它可以做成单分量的或三分量的仪器,并可能配置多种用途的探头。磁通门磁强计在工业检测、地质勘探、宇航、军事等方面应用很广泛。例如国产的 CJS 10 型磁强计,测量范围为 $1 \sim 10^3$ nT,分辨力为 1nT。日本的 MB-162 型磁强计,可测三轴向

磁场,测量范围为 $0 - \pm 0.5 \times 10^{-4} \text{T}$,分辨力为 10^{-10}T ,稳定度为 0.1nT/日 .加拿大的 MFM-3 型磁强计,测量范围为 $2 \times 10^{-8} - 10^{-4} \text{T}$,分辨力为 10^{-12}T ,探头有磁聚焦.

6. 超导量子磁强计

超导量子磁强计是利用弱耦合超导体中的约瑟夫森效应原理而测量弱磁场的仪器.它可以测量 0.1T 以下的恒定磁场或交变磁场.超导量子干涉器件 (SQUID) 具有从直流到 10^{12}Hz 范围内的良好频率特性.其中,应用两个超导结的 DC SQUID 的磁场,分辨力可达 $7 \times 10^{-15} \text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$,应用一个超导结的 RF SQUID 的磁场,分辨力为 $10^{-14} \text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$.超导量子磁强计有极高的灵敏度和分辨力,还可用其制成梯度计,在地质勘探、大地测量、计量技术、生物医学等方面有许多应用.

图 1 为几种弱磁场测量仪器的测量范围和应用领域.

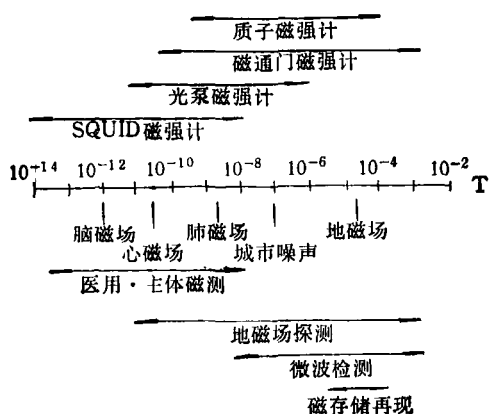


图 1

二、弱磁场测量技术的进展

最近几年来,由于物理学、电子学及计算技术等科学技术的迅速发展,弱磁场测量技术在各方面都有显著的进展.下面就较突出的几例予以说明.

1. 磁通门技术

最近几年磁通门技术在国内外的水平都有所提高.其主要表现是,通用性的磁通门磁强

计由原来的分辨力 1nT 左右提高到 $0.5 - 0.1 \text{nT}$ 左右.例如,利用环形磁芯和 MOSFET 的磁强计^[4],磁场测量范围扩展到 10^{-2}T ,分辨力达 0.1nT ,用于测量心磁.一种用钨坡莫合金铁芯的低功耗便携式 DC 磁强计,其分辨力达 0.1nT ^[5].一种利用非晶态材料的条形磁芯传感器做成的调谐型磁强计^[6],灵敏度为 $12.4 \text{V}/100 \mu\text{T}$,分辨力为 0.13nT ,其量程为 $\pm 300 \mu\text{T}$.还有一种用于测量表面矫顽磁场的磁通门磁强计^[7],其线性度为 0.01% ,分辨力达 0.1nT .国内在“七五”期间,磁通门仪器发展很快.例如,机械电子工业部哈尔滨电工仪表研究所推出了磁通门系列新产品,其中 CJ10 型高灵敏度磁强计分辨力达 0.1nT ,CJ11 型弱磁场测试仪分辨力达 0.5nT .三分量的磁通门磁强计其分辨力为 1nT ^[8].另外,在国内还首次利用磁通门梯度计和微机相结合,研制了 CJX1 型肺磁测试系统,用其可以控制病床床面水平位置,自动补偿地磁场,进行数据处理和存储,可在几分钟之内打印出患者的肺磁图,对于早期诊断尘肺病具有重要意义.

2. 高温 SQUID 技术

继 1986 年拜德诺兹和莫拉教授发现钡铜氧系化合物的高温超导现象之后,曾掀起一股“超导”研究热潮.最近高临界温度 (T_c) 的 SQUID 研究的进展,可以说是这股风潮带来的第一个硕果.点接触的 RF SQUID 已用于液氮温区的磁通测量,其磁通噪声为 $1 \times 10^{-4} \phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$,被用作检流计,其电流灵敏度为 $2 \times 10^{-12} \text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[9].机械电子工业部哈尔滨电工仪表研究所和中国计量科学研究院协作研制了 CJ16 型液氮超导量子干涉仪.复旦大学用点接触的 RF SQUID 研制的相似传感器测量磁化率,其系统的分辨力为 $1.3 \times 10^{-6} \text{emu}$ ^[10].国外也竞相开展了利用 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 材料作干涉器件的高 T_c 超导量子干涉仪的研制工作^[11].美国、日本的两个小组在 TlBaCuO 多晶膜上用光刻法制备了 DC SQUID,在液氮温度下,其噪声系数可分别达到 $6 \times 10^{-30} \text{J/Hz}$ 和 $4 \times 10^{-29} \text{J/Hz}$.北京大学等单位用直流溅射法制

备的微桥 DC SQUID,也观察到干涉现象,因信号太小目前无法用于磁通锁定测量中^[12]。还应当注意的是,在持续几年的高温超导热中,人们并没有完全放弃对低 T_c 的 SQUID 的研究工作。美国生物磁公司正在研制多通道的 SQUID 系统,并推出了 DBS 型的 DC SQUID 测量仪器,它采用薄膜结,能量分辨力为 $3 \times 10^{-30} \text{J/Hz}$,摆率为 $10^6 \phi_0/\text{s}$ 。文献[13,14]研制了 N 个 SQUID 串联的超导量子磁强计及 10 通道的超导量子梯度计系统。机械电子工业部哈尔滨电工仪表研究所研制了液氮温区的 CJ 12 型超导量子干涉仪(用北京大学提供的薄膜隧道结)。中国科学院物理研究所还研制了液氮的 DC SQUID,其磁通噪声为 $1 \times 10^{-4} \phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

3. 其它

文献[15]报道,采用光泵法制成的自由进动磁梯度计,其噪声电平达到 $10^{-14} \text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。利用光纤的磁强计,测量恒定磁场的分辨力可达 $2 \times 10^{-9} \text{T}^{[16]}$ 。利用薄膜磁阻效应的磁强计,可方便地测量恒定或交变的磁场,测量的量程为 $100 \text{nT} \sim 10 \text{mT}$ 。最近,用磁阻效应制作的电子磁罗盘,其传感器尺寸只有 $5 \times 5 \times 2 \text{mm}$,整体也只相当通常的袖珍罗盘大小^[17]。

此外,为解决弱磁场测量中的环境影响,国内已经建成大型磁屏蔽室并投入使用。同时,为了保证弱磁场的测量与计量传递,最近还制订了“恒定弱磁感应强度检定系统”标准。

三、弱磁场测量技术的应用

弱磁场测量技术有两个特点,一是有很高的灵敏度,二是可进行非接触的测量,因此在地球物理、宇航工程、加速器工程、军事工程、生物、医学、工业检测等领域中,它已经成为重要的测量手段。下面仅举几例,可以看出弱磁场测量技术的发展和应用领域的开拓之间的关系密切。

1. 测量空间磁场

测量空间磁场采用磁通门法、感应线圈法

及核旋法。此法可在地质勘探、大地测量、地震预报等方面应用,以测试地磁场及其微变[(2—7) $\times 10^{-7} \text{T}$]。电子显微镜等精密仪器的安装,要求测试环境磁场(例如要求恒定磁场 $H_{\text{DC}} < 5 \times 10^{-6} \text{T}$,其起伏 $\Delta H_{\text{DC}} < 10^{-7} \text{T}$)。某些电子仪器和线路,要求测试其磁场的分布和干扰等。

2. 磁性测量

磁性测量采用磁通门法和感应线圈法。它可用于测试不锈钢管等的磁导率(< 2),测试轴承退磁后的剩磁[(0.2—10) $\times 10^{-4} \text{T}$],测试岩样的磁矩($10^{-7} \sim 10^{-6} \text{A} \cdot \text{m}^2$),还可以用于测试磁性材料的矫顽力(0—100kA/m)。

3. 铁磁探测

铁磁探测采用磁通门法和光泵法。用此法制成的仪器可探测地下管道及电缆接头。某些弱磁场测试仪器还用于考古及海关检查,大量用于测试磁屏效果的检查,要求仪器分辨力为 $10^{-8} \sim 10^{-10} \text{T}$ 。

4. 生物磁测

生物磁测主要采用超导量子干涉法。例如,测试磁性尘肺的肺磁场($> 10^{-9} \text{T}$)。人体的心磁场为 10^{-10}T ,测试心磁图的灵敏度比心电图高 10 倍,并有助于了解人的心理状态。人体的脑磁场为 $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{T}$,脑磁图有助于了解脑细胞群活动与大脑皮层产生的特殊功能之间的关系,目前正受到医学界的重视。

5. 宇航和军事

通常采用磁通门法、光泵法及超导量子干涉法制成的仪器。在人造卫星中,已经几十次用来测试外层空间及星际磁场,并用于人造卫星和火箭的姿态控制,军事上用于探雷、探潜、引爆等,还用多通道的磁通门磁强计测试舰船的消磁效果等。

6. 其他

在机电工业中,利用弱磁场测量仪器可进行无损探伤,测试位移、转速等,还可通过反馈技术进行稳定磁场。在某些场合可以检测车型、车速以及进行交通车辆控制等。

随着弱磁场测量技术应用领域的扩展和电

著名核物理学家邓稼先

唐廷友

(中国科学院数理学部,北京 100864)



中国科学院学部委员
邓稼先研究员

著名核物理学家与核技术专家、中国科学院学部委员邓稼先先生,1991年7月29日已离去我们五年了。在邓稼先先生逝世五周年之际,我们谨以这篇短文,向他表示深切的怀念和崇高的敬意。

邓稼先先生1924年6月25日生于安徽省怀宁县。他出生后不久,其全家便自安徽移居北平。中学时期,他曾在北平崇德中学求学,抗日战争时期为避迫害而前往昆明,后在四川江津国立第九中学高中毕业。1941年,邓稼先先生进入西南联合大学物理系学习,受教于王竹溪、郑华炽等著名教授。他学习刻苦努力,看书、做笔记都非常仔细,1945年以优异成绩毕

业。王竹溪、郑华炽二先生治学严谨,工作一丝不苟,勇于在困难条件下推进科学工作,这给邓稼先先生的科学态度和人品风格以非常重要的影响。1945年北京大学自昆明迁回北平,邓稼先先生被聘任北京大学物理系助教。1948年夏,他怀着“今后国家建设需要人才”的明确目的考入美国印第安纳州的普渡大学物理系研究生院。1950年8月他完成出色论文《氘核的光致分裂》,获得物理学博士学位,并于取得博士学位后第九天即启程返回刚刚解放的祖国。

1950年10月,邓稼先先生被聘为刚成立不久的中国科学院近代物理研究所(后易名为物理研究所)助理研究员,在著名理论物理学家彭桓武先生指导下进行原子核理论研究。此领域当时国内尚属空白,他为填补这块空白进行了开创性的工作。1952年他被提升为副研究员。1954年至1958年兼任中国科学院数理化学部副学术秘书,协助学术秘书钱三强先生、副院长吴有训先生做了大量科学组织领导方面的工作。

子技术的不断发展,弱磁场测量仪器将进一步智能化、系统化和系列化,并将提供多种商品化产品。由于弱磁场测量仪器的明显优点,其发展将突破磁测量的界限,成为多学科的技术手段。

- [1] 李大明,电测与仪表, No.1(1985),35.
- [2] 李大明,电测与仪表, No.10(1989),41.
- [3] W. Happer and T. S. Tang, U. S. Patent, 4,005,355, (1977).
- [4] K. Harada, *IEEE Trans. Magn.*, MAG-5-5 (1989), 3399.
- [5] R. Rabinovici, *IEEE Trans. Magn.*, MAG-25-5 (1989), 3411.
- [6] S. Takeuchi, *IEEE Trans. Magn.*, MAG-20-5 (1984), 1723.
- [7] D. Son, *IEEE Trans. Magn.*, MAG -25-5 (1989),

3420.

- [8] 朱谨权等,电测与仪表, No.4(1989),7.
- [9] Chiao Weu-chuan et al., International Superconductivity Electronics Conference (ISEC' 89), Beijing University, (1989), 501.
- [10] Qiv Jing-wu et al., *Cryogenics*, Supplement, 30-9 (1990), 920.
- [11] J. C. Gallop, *Cryogenics*, 28-10 (1988), 691.
- [12] Wang Shi-guang et al., *IEEE Trans. Magn.*, MAG-25-2 (1989), 893.
- [13] Corp, *IBM Tech Disclosure Bull.*, 29-2 (1986), 510.
- [14] H. E. Hoenig et al., *Cryogenics*, 29-8 (1989), 809.
- [15] F. William et al., *IEEE Trans. Magn.*, MAG-25-5 (1989), 3408.
- [16] 佐藤敏郎等,电子通信学会技术报告, 86-168(1986), 17.
- [17] Heinz Wellhansen, *Elektronik*, 8/14-4 (1989), 85.