

## $^3\text{He}$ 原子磁强计技术

万双爱, 秦杰, 汪世林, 孙晓光

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

**摘要:**  $^3\text{He}$  原子磁强计利用  $^3\text{He}$  核自旋的拉莫尔进动测量磁场, 具有高精度、小体积等特点, 可以满足未来网络化磁异常探测对高性能磁强计的需求。围绕  $^3\text{He}$  原子磁强计的技术特点, 重点介绍了该磁强计的基本工作原理及其硬件组成, 分析了其理论灵敏度, 给出了该磁强计的国内外研究情况, 最后对该磁强计技术的未来发展进行了展望。

**关键词:**  $^3\text{He}$  磁强计; 原子磁强计; 磁强计; 磁异常探测

**中图分类号:** TN249      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-8110(2015)03-0085-05

### Technology and Progress of Atomic Magnetometer Based on $^3\text{He}$

WAN Shuang-ai, QIN Jie, WANG Shi-lin, SUN Xiao-guang

(Beijing Automation Control Equipment Institute, Beijing 100074, China)

**Abstract:** With the rapid progresses of frontier technologies such as quantum manipulation, atomic magnetometer based on  $^3\text{He}$  nuclear, which features high precision, compact size, has becoming one of the main technologies of developing magnetic anomaly detection in the future. The basic operation principle and typical hardware structure of the atomic magnetometer based on  $^3\text{He}$  are introduced firstly; the theoretical sensitivity is analyzed secondly; the recent progress of the atomic magnetometer based on  $^3\text{He}$  are summarized thirdly; the development of the atomic magnetometer based on  $^3\text{He}$  in the near future are prospected finally.

**Key words:**  $^3\text{He}$  magnetometer; Atomic magnetometer; Magnetometer; Magnetic anomaly detection

## 0 引言

磁异常探测是通过测量磁性物体引起的地球磁力线扰动, 利用磁异常信息探测和识别磁性物体的一种技术; 具有定位精度高、纯被动探测、环境适应性好等优点; 已广泛应用于矿产、潜艇、水雷、地雷的探测定位等军事和民用领域<sup>[1-3]</sup>。

磁异常探测技术主要通过磁强计来获取磁异常强度等信息。由于磁性目标的磁异常强度一般随距离呈 3 次方衰减, 若使探测距离提高 1 倍, 则相应的磁强计灵敏度需增加到原来的 8 倍<sup>[4]</sup>。另一方面, 磁异常信号的频带与探测距离、探测平

台的运动速度相关, 距离越远、运动速度越低, 则信号频带越低。以航空磁异常探测为例, 由于探测距离较远、航空探测平台的飞行速度有限, 使得探测系统获得的潜艇磁异常信号一般处于 0.04~0.4Hz 之间的较低频带范围<sup>[4]</sup>。因此, 磁异常探测用的磁强计, 需要高灵敏与低频高稳定性的统一。近年来, 美国海军提出无人机组网、水面投掷阵列等网络化磁异常探测新模式。采用多架无人机编队缩短一片海域的水下磁性目标搜索时间; 同时, 针对传统全张量矢量梯度探测受制于基线长度过短的难题, 通过无人机编队构造长基线, 无需越顶即可实现对水下磁性目标的高精

收稿日期: 2015-04-03; 修订日期: 2015-04-20。

作者简介: 万双爱 (1984-), 女, 博士, 工程师, 主要从事量子传感技术方面的研究。

E-mail: wsajishe@163.com

度定位,从而大幅提高探测效能。美国新一代反潜机 P-8A 即采用这一思路,未在飞机尾部装备传统的磁异常探潜系统,而是大力发展可发射/投掷的无人机编队、水面阵列磁异常探潜新装备。与传统的磁异常探测相比,这些网络化磁异常探测新手段不仅需要高精度的磁强计,而且由于编队无人机的体积与能源有限,要求磁强计兼具小体积、低功耗等特点<sup>[5-8]</sup>。因此,网络化磁异常探测迫切需要高精度、小体积的磁强计。

原子磁强计是高精度、小体积磁强计的突出代表,利用电子自旋或核自旋在磁场中的拉莫尔进动测量磁场,主要分为电子顺磁共振磁强计与核磁共振磁强计<sup>[9-10]</sup>,其性能对比如表 1 所示。

表 1 原子磁强计的分类与性能

Tab. 1 Atomic magnetometer and the performance

类型		实现的灵敏度	实现的精度
电子顺磁磁强计	SERF 原子磁强计	$1.6 \times 10^{-4} \text{ pT/Hz}^{1/2}$ <sup>[11-12]</sup>	未见报道
	光泵磁强计	$0.3 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ <sup>[13]</sup>	$\pm 150 \text{ pT}$ <sup>[13]</sup>
核磁共振磁强计		$1 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ <sup>[14]</sup>	$\pm 10 \text{ pT}$ <sup>[15]</sup>

注: SERF: Spin Exchange Relaxation Free, 无自旋交换弛豫。

电子自旋的旋磁比相比核自旋的一般高 3 个量级,使得电子自旋对微弱磁场的变化更为敏感。因此,电子顺磁共振磁强计相比核磁共振磁强计易于实现更高的灵敏度。但是,电子自旋的弛豫时间较短,一般在毫秒量级,制约了其低频稳定性的提高;核自旋的弛豫时间较长,一般在秒至小时量级,其低频稳定性较好,易于实现高精度。因此,核磁共振磁强计具有高精度、小体积的发展潜力。核磁共振磁强计根据其使用的不同核自旋及极化方式的不同,可分为质子磁强计、欧弗豪泽 (Overhauser) 磁强计和氦 3 ( $^3\text{He}$ ) 原子磁强计。 $^3\text{He}$  原子磁强计利用  $^3\text{He}$  的核磁矩在外磁场中的拉莫尔进动来测量磁场。 $^3\text{He}$  核自旋的横向弛豫时间很长,可达到小时甚至几十小时量级<sup>[16]</sup>,是上述三类核磁共振磁强计中核自旋弛豫时间最长的磁强计。因此, $^3\text{He}$  原子磁强计理论精度更

高,有望为网络化磁异常探测的实现提供重要的技术途径。

以下重点介绍  $^3\text{He}$  原子磁强计的基本工作原理及其硬件构成,分析其理论灵敏度与关键技术,介绍  $^3\text{He}$  原子磁强计的目前研究情况,最后对  $^3\text{He}$  原子磁强计技术的未来发展进行了展望。

## 1 工作原理

$^3\text{He}$  核自旋具有磁矩,会围绕外磁场进行拉莫尔进动,进动频率  $\omega$  与  $^3\text{He}$  核自旋旋磁比  $\gamma$ 、外磁场的强度  $B$  满足  $\omega = \gamma \cdot B$ 。其中,旋磁比  $\gamma$  为物理常量,通过测量进动频率  $\omega$ ,即可测定磁场。 $^3\text{He}$  原子磁强计的工作原理如图 1 所示。

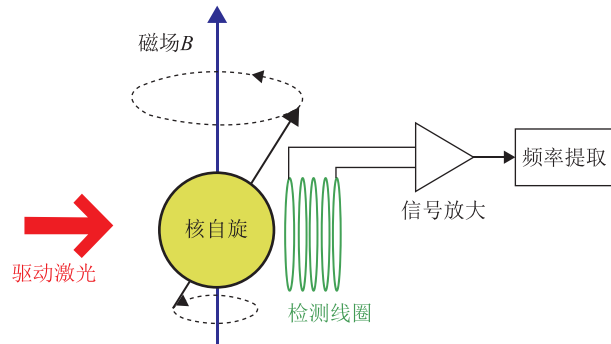


图 1  $^3\text{He}$  原子磁强计的工作原理示意图

Fig. 1 The principle of atomic magnetometer based on  $^3\text{He}$

$^3\text{He}$  核自旋的指向在自然状态下杂乱无章,首先由一定频率的驱动激光照射于气态  $^3\text{He}$  原子上,使  $^3\text{He}$  原子的核自旋产生极化,具备宏观指向。待测的外磁场能够使极化的  $^3\text{He}$  核自旋产生拉莫尔进动,可以通过采用检测线圈来测量这一进动。其原理是在进动过程中, $^3\text{He}$  核自旋磁矩会切割线圈,产生感应电动势信号,采用测频装置测量感应电动势信号的频率,即可求得待测磁场。

根据上述工作原理,典型的  $^3\text{He}$  原子磁强计的硬件构成由以下几部分,各个部件的功能说明如下: 1) 原子气室: 位于整个  $^3\text{He}$  原子磁强计的中心,内部包含用于敏感磁场运动的  $^3\text{He}$  原子以及其他辅助功能气体原子等,是  $^3\text{He}$  原子磁强计的核心敏感单元。2) 驱动激光: 通过激光极化  $^3\text{He}$  核自旋,赋予核自旋以宏观指向,是  $^3\text{He}$  原子磁强计的驱动机构,一般采用圆偏振光。3) 检测线圈: 在

核自旋进动过程中,  $^3\text{He}$ 核自旋磁矩会切割线圈, 产生感应电动势信号, 从而获取核自旋的进动状态, 是 $^3\text{He}$ 原子磁强计的检测机构。4) 主场线圈: 配合驱动激光极化 $^3\text{He}$ 核自旋, 赋予核自旋以宏观方向。5) 光电元件: 包括光学元件、光电元件等, 对驱动激光等功能部件进行精密调节与检测。6) 信号处理单元: 包括前置放大单元、测频单元,  $^3\text{He}$ 核自旋磁矩切割检测线圈产生的感应电动势通常在微伏量级, 为提高测量精度, 需要采用前置放大单元将其放大后进行频率测量。

总体来看,  $^3\text{He}$ 原子磁强计的硬件结构相对简单, 其内部部件一般能够进行小型化加工制造, 为 $^3\text{He}$ 原子磁强计的小型化提供了条件。

## 2 灵敏度分析

根据量子力学的不确定性原理,  $^3\text{He}$ 原子磁强计的理论灵敏度为<sup>[17]</sup>

$$\delta B = \frac{1}{\text{SNR} \cdot \gamma T_2} \quad (1)$$

式中,  $\gamma$ 为 $^3\text{He}$ 核自旋的旋磁比, 具体数值为 $3.24 \times 10^{-2} \text{Hz/nT}$ ;  $T_2$ 为 $^3\text{He}$ 核自旋/的横向弛豫时间,  $\text{SNR}$ 为系统的信噪比。

$^3\text{He}$ 核自旋的横向弛豫时间 $T_2$ 可以表达为<sup>[18]</sup>

$$\frac{1}{T_2} = \frac{8R^4\gamma^2}{175D} |\nabla B_z|^2 \quad (2)$$

式中,  $\nabla B_z$ 为磁场梯度,  $R$ 为原子气室半径,  $D$ 为耗散系数, 与原子气室内的气体压力、温度相关。

在 $^3\text{He}$ 原子磁强计中, 系统的信噪比 $\text{SNR}$ 可以表达为

$$\text{SNR} = \frac{V_{\text{pu}}}{V_{\text{noise}}} \quad (3)$$

式中,  $V_{\text{noise}}$ 为前置放大器的本底噪声、线圈热噪声等,  $V_{\text{pu}}$ 为检测线圈感应电动势。

核自旋在外磁场作用下发生拉莫尔进动产生进动磁场, 检测线圈感应电动势可描述为<sup>[19]</sup>

$$V_{\text{pu}} = NV_N \xi_0 \gamma \frac{h}{4\pi} n_N P_N \omega \sin(\omega t) \quad (4)$$

式中,  $N$ 为检测线圈匝数,  $V_N$ 为原子气室体积,  $\xi_0$ 为单位电流、单位体积产生的磁场(可描述为 $\xi_0 = \frac{\mu_0}{2L}$ , 其中 $\mu_0$ 为真空磁导率,  $L$ 为检测线圈距气

室的距离),  $h$ 为普朗克常数,  $P_N$ 为核自旋极化率,  $\omega$ 为核自旋进动角频率。

由式(1)可知, 提高 $^3\text{He}$ 核自旋的弛豫时间和系统的信噪比, 可以提高 $^3\text{He}$ 原子磁强计的灵敏度。根据式(1)绘制了 $^3\text{He}$ 原子磁强计的灵敏度理论计算曲线, 如图2所示。如当 $^3\text{He}$ 核自旋横向弛豫时间 $T_2 = 1000\text{s}$ , 系统信噪比 $\text{SNR} = 1000$ 时, 利用以上参数在图2中查找, 对应 $^3\text{He}$ 原子磁强计的灵敏度接近 $0.03\text{pT/Hz}^{1/2}$ 。由图2可知, 当 $^3\text{He}$ 核自旋的横向弛豫时间 $T_2$ 达到小时甚至几十小时量级时,  $^3\text{He}$ 原子磁强计的理论灵敏度甚至可达到 $\text{fT}$ 量级。

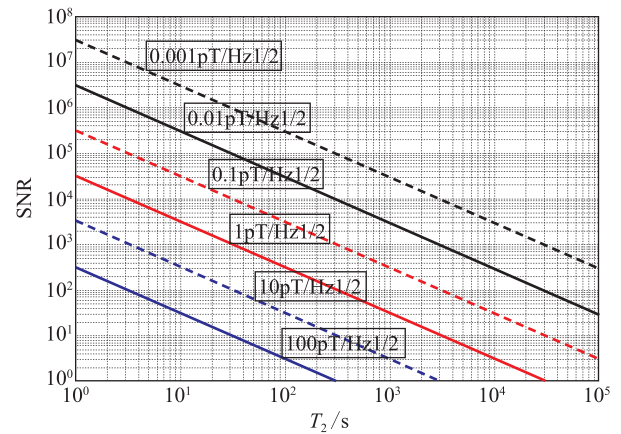


图2  $^3\text{He}$ 原子磁强计磁场测量灵敏度理论计算曲线

Fig. 2 The theoretical sensitivity of  $^3\text{He}$  atomic magnetometer

## 3 国内外研究情况

氦的两种同位素原子 $^3\text{He}$ 和 $^4\text{He}$ , 都是制作原子磁强计的工作物质, $^4\text{He}$ 没有孤立的核磁矩, 主要用来构造电子顺磁共振磁强计, 采用光泵的方法使电子极化, 通常也称为氦光泵磁强计。目前, 国内外在以氦元素作为敏感介质的磁强计中, 研制生产较多的产品主要是光泵磁强计, 如美国 Polatomic 公司研制的氦光泵磁强计 P-2000, 灵敏度优于 $0.1\text{pT}$ 。P-2000 氦光泵磁强计是 Polatomic 公司为美国海军打造的用于反潜作战的高灵敏度磁测设备, 其目前已装备应用到以 P3-C 为代表的多型反潜机, 代表了目前世界上氦光泵磁强计的先进水平<sup>[20-21]</sup>。美国 Polatomic 公司同样研制生产了 $^3\text{He}$

原子磁强计,灵敏度达到  $1\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ ,与氦光泵磁强计相比,主要应用于  $0.001 \sim 0.1\text{Hz}$  的低频段<sup>[14]</sup>。美国 Raytheon Systems 公司在 DARPA 项目的支持下,同样实现  $1\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$  的灵敏度<sup>[23]</sup>。法国 Herve' Gilles 小组在实验室实现了  $20\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$  的灵敏度<sup>[22]</sup>。目前,  $^3\text{He}$  原子磁强计主要能应用于磁异常探测,放置在飞机尾部或投掷入水面;少量的  $^3\text{He}$  原子磁强计放置在台站上,作科学研究之用。随着量子调控技术的发展,国外研究学者采用  $^3\text{He}$  原子磁强计,用于电子的电偶极矩测量、电荷共轭-宇称-时间反演是否守恒等前沿基础物理研究,发挥  $^3\text{He}$  原子磁强计低频段高灵敏的突出优势<sup>[24-27]</sup>。

近年来,在高性能磁异常探测的需求牵引下,国内多家单位开展了  $^3\text{He}$  原子磁强计技术研究。其中,北京自动化控制设备研究所、北京大学等单位针对网络化磁异常探测对高精度、小体积磁强计的需求,开展了  $^3\text{He}$  原子磁强计技术探索的研究。北京自动化控制设备研究所已经研制了  $^3\text{He}$  原子磁强计的原理实验装置(如图3所示),走通了  $^3\text{He}$  核自旋的极化、感应线圈的检测等技术,采用直径  $10\text{mm}$ 、肖特 8252 玻璃自主研制了  $^3\text{He}$  原子气室,实现了  $^3\text{He}$  原子磁强计的原理验证。目前,正在进行原理样机的研制。

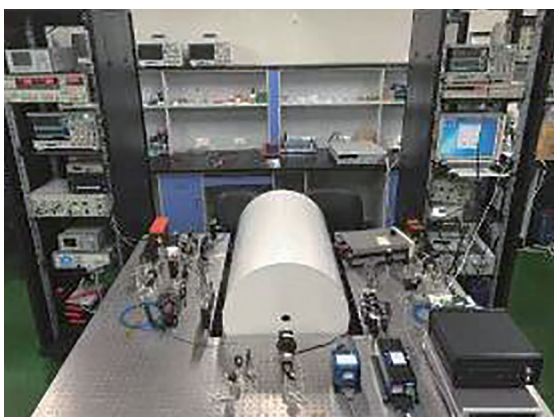


图3 研制的 $^3\text{He}$ 原子磁强计原理实验装置

Fig.3 Experiment platform for  $^3\text{He}$  atomic magnetometer

综上所述,在量子操控等技术快速发展的推动下,  $^3\text{He}$  原子磁强计以其从原理上具有高精度、小体积的突出优势,近年来再次成为国内外学者的研究对象。

#### 4 发展展望

$^3\text{He}$ 核自旋的横向弛豫时间很长,可达到小时甚至几十小时量级,理论精度高,有望为网络化磁异常探测的实现提供重要的技术途径。但 $^3\text{He}$ 核自旋的横向弛豫时间易受磁场梯度影响,因此, $^3\text{He}$ 原子磁强计的主场线圈均匀区设计至关重要,直接影响 $^3\text{He}$ 原子磁强计的精度。另一方面,随着电子的电偶极矩测量、电荷共轭-宇称-时间反演是否守恒等前沿基础物理研究对高精度、小体积 $^3\text{He}$ 原子磁强计的需求,一些新的原子操控技术如自旋光抽运技术应用于 $^3\text{He}$ 原子磁强计中,有望大幅度提高 $^3\text{He}$ 原子磁强计的精度。

我国的 $^3\text{He}$ 原子磁强计技术目前仍处于起步研究阶段,与国外已经实现应用相比,差距较大。主要表现为缺乏 $^3\text{He}$ 核自旋系综的弛豫机理与操控方法认识,以及高性能的核心部件等,需要我国在上述技术难点方面加强相关研究工作,服务于未来网络化磁异常探测的应用需求。

#### 参考文献

- [1] Dalichaouch Y Y, Czipott P V, Alexander R P, Magnetic Sensors for Battlefield Applications. Unattended Ground Sensor Technologies and Applications III, 2001, 4.
- [2] Hirota M, Furuse T, Ebana K, et al. Magnetic detection of a surface ship by an airborne LTS SQUID MAD [C] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2000, 3, 11 (1): 884-887.
- [3] Wooldridge A. Review of Modern Magnetic Gradiometer Surveys [C] // Presented to The 2004 International. Exposition & 74th Annual Meeting in Denver. 2004.
- [4] 张昌达. 关于磁异常探测的若干问题 [J]. 工程地球物理学报, 2007, 4 (6): 549-553.
- [5] Sbir. A low-cost unmanned aerial vehicle with towed miniature atomic magnetometer array [EB/OL]. <http://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/415743>, 2012.
- [6] Sbir. Low-cost compact Magnetometer for Air and In-Water Anti Submarine Warfare [EB/OL]. [http://www.navysbir.com/n10\\_2/N102-134.htm](http://www.navysbir.com/n10_2/N102-134.htm), 2010.
- [7] Sbir. High Sensitivity Tri-Axial Magnetometer [EB/OL]. [http://www.navysbir.com/n13\\_A/navst13a-019.htm](http://www.navysbir.com/n13_A/navst13a-019.htm) 2013.
- [8] Sbir. Fully Integrated Low Size, Weight, and Power (SWaP) and Cost Magnetometers for Air and In-Water Anti Submarine Warfare (ASW) [EB/OL]. <http://www.navysbir.com/>

- n14\_1/N141-004. htm 2014.
- [9] Budker D. Optical magnetometry [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [10] Budker D, Romalis M. Optical magnetometry [J]. Nature Physics, 2007, 3 (4): 227-234.
- [11] Dang H, Maloof A, Romalis M. Ultrahigh sensitivity magnetic field and magnetization measurements with an atomic magnetometer [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97 (15): 151110.
- [12] Wyllie R, Kauer M, Smetana G, et al. Magnetocardiography with a modular spin-exchange relaxation-free atomic magnetometer array [J]. Physics in medicine and biology, 2012, 57 (9): 2619.
- [13] Tumanski S. Modern magnetic field sensors-a review [J]. Przeglad Elektrotechniczny, 2013, 89 (10): 1-10.
- [14] Polatomic, Inc. <http://polatomic.com/>.
- [15] 张昌达. 量子磁力仪研究和开发近况 [J]. 物探与化探, 2005, 29 (4): 283-287.
- [16] Gemmel C, Heil W, Karpuk S, et al. Ultra-sensitive magnetometry based on free precession of nuclear spins [J]. The European Physical Journal D, 2010, 57 (3): 303-320.
- [17] Seltzer S J. Developments in alkali-metal atomic magnetometer [D]. Princeton: Princeton University, 2008.
- [18] Kornack T W. A test of CPT and Lorentz symmetry using a  $\text{K-}^3\text{He}$  co-magnetometer [D]. Princeton: Princeton University, 2005.
- [19] Glenday A G. Progress in tests of fundamental physics using a  $^3\text{He}$  and  $^{129}\text{Xe}$  Zeeman maser [D]. Massachusetts: Harvard University, 2010.
- [20] BobbLC D, Kuhlman G, et al. Advanced Sensors for Airborne Magnetic Measurements [M]. Storming Media, 2001.
- [21] Kuhlman G, Slocum R, Manning J. Battlefield Applications for The Polatomic 2000 Magnetometer/Gradiometer [C] // . Conference Paper , AD -A409283, 2002.
- [22] Herve G.  $^3\text{He}$  maser for earth magnetic field measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74 (10): 4515-4520.
- [23] Charlie H, Andrew O. Laser  $^3\text{He}$  Magnetometer for UGS Applications [C] // . SPIE Conference on Unattended Ground Sensor Technologies and Applications Orlando, 1999. Florida, 3713: 44-53.
- [24] Brown J M, Smullin S J, Kornack T W, et al. New Limit on Lorentz and CPT-Violating Neutron Spin Interactions [J]. Physical Review Letters, 2010, 105: 151604. 1-151604. 4.
- [25] Brown J, Smullin S, Kornack T, et al. New limit on lorentz-and CPT-violating neutron spin interactions [J]. Physical review letters, 2010, 105 (15): 151604.
- [26] Justin M B. A New Limit on Lorentz-and CPT-Violating Neutron Spin Interactions Using a  $\text{K-}^3\text{He}$  Comagnetometer [D]. Princeton: Princeton University, 2011.
- [27] Ma Z, Sorte E, Saam B. Collisional  $^3\text{He}$  and  $^{129}\text{Xe}$  Frequency Shifts in Rb-Noble-Gas Mixtures [J]. Physical Review Letters, 2011, 106 (19): 193005.