

# 高灵敏度矢量原子磁力仪研究进展概述



陈文<sup>1,2</sup>, 高颖<sup>1</sup>, 蒋志远<sup>1\*</sup>, 屈继峰<sup>1</sup>

1. 中国计量科学研究院, 北京 100029

2. 中国计量大学, 杭州 310018

**【摘要】** 磁场作为一个矢量场, 具有大小和方向信息, 如何在现有标量原子磁力仪中实现磁场矢量的高精度测量, 已经成为了原子磁力仪研究的一个重要方向。在单一原子磁力仪中同时实现磁场大小和方向的探测, 一方面可以获得更多的磁场信息, 更全面与准确的表征磁源, 另一方面可以减小移动平台中磁测装置体积。将矢量原子磁力仪分为配置外加磁场与全光探测两条技术路线, 介绍了高灵敏度矢量原子磁力仪的基本原理、国内外研究现状以及未来的研究方向。对几种主要的矢量磁力仪技术路线进行了介绍和归纳, 包括外加磁场补偿法、偏置磁场调制法、射频场佛克托效应 (Voigt Effect) 法、电磁感应透明 (EIT) 探测法以及 Bell-Bloom 全光测量法等, 并对高灵敏度矢量原子磁力仪在未来的发展方向和应用前景进行了展望。

**【关键词】** 原子磁力仪; 磁场矢量; 外加调制场; 射频场; 全光探测

**DOI:** 10.12338/j.issn.2096-9015.2021.0651

**【引用本文】** 陈文, 高颖, 蒋志远, 等. 高灵敏度矢量原子磁力仪研究进展概述 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(4): 19-25, 39.

## Reviews of the Research Progress of High-Sensitivity Vector Atomic Magnetometer

CHEN Wen<sup>1,2</sup>, GAO Ying<sup>1</sup>, JIANG Zhiyuan<sup>1</sup>, QU Jifeng<sup>1</sup>

1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

2. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Corresponding author: JIANG Zhiyuan, Email: jiangzhiyuan@nim.ac.cn

**【Abstract】** Magnetic field as a vector field with magnitude and direction information, how to achieve high-precision measurement of the magnetic field vector in the existing atomic magnetometer has become an important research direction of the atomic magnetometer. The simultaneous detection of the magnitude and direction of the magnetic field in a single atomic magnetometer unit not only can obtain more magnetic field information and characterize the magnetic source more comprehensively and accurately but also reduces the size of the magnetic measurement device in the mobile platform. This paper divides the vector atomic magnetometer into two technical routes: configuration of applied magnetic field and all-optical detection, and introduces the basic principles, the current research status at home and abroad, and the future research directions of the vector atomic magnetometer. Several major vector magnetometer technical methods are introduced and summarized, including the applied magnetic field compensation method, bias magnetic field modulation method, external radio frequency field measurement method, electromagnetic induction transparent (EIT) detection method, the Bell-Bloom all-optical measurement method, etc. Finally, the future development direction and measurement application prospects of the high-sensitivity vector atomic magnetometer are prospected.

**【Key words】** atomic magnetometer, magnetic field vector, additional modulation field, RF field, all-optical detection

## 0 引言

在对地球以及自然界的不断探索中, 磁场的测量始终伴随着人类文明的进程, 尤其随着科学技术

的不断进步, 精密的磁场测量在地球物理勘探、航空航天、生物医学和基础物理等领域发挥着越来越重要的作用<sup>[1-4]</sup>。光学原子磁力仪凭借其高灵敏

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (61805226)。

作者简介: 陈文 (1994-), 中国计量科学研究院联合培养研究生, 研究方向: 原子磁力仪, 邮箱: Chenw@cjl.ac.cn; 通讯作者: 蒋志远 (1986-), 中国计量科学研究院副研究员, 研究方向: 芯片级量子器件, 邮箱: jiangzhiyuan@nim.ac.cn。

度、宽量程、低成本、小体积等优点,逐步成为磁场量子化传感走向实用化的重要技术路线。为了更深层次地研究磁异常源的基本特征,获得更全面的磁场信息,就必须在高灵敏度原子磁力仪的基础上进一步发展磁场测量技术。高精度磁场测量不仅包括磁场大小信息,还包括了磁场方向信息<sup>[5]</sup>,在实际应用中,磁场方向的测量可用于磁异常源的探测、空间磁场的表征、永久电偶极矩(Electric Dipole Moments, EDM)的测量等。早期实验室研制的原子磁力仪大多数是标量磁力仪,其只能测量出磁场的大小,不能准确的获取磁场方向。近年来,随着应用场景中对高灵敏度矢量原子磁力仪的迫切需求,原子磁力仪也在现有基础上逐步发展出了一系列矢量磁场测量的技术路线。

目前商品化的矢量磁力仪主要是传统的三轴磁通门<sup>[6-7]</sup>,其结构简单结实、体积小、重量轻、功耗低且使用方便,作为便携式磁场测试仪器,广泛应用于多种场景,例如潜艇探测、磁场波动监测,以及航天任务中太空磁异常测量。随着国防与航天领域对更高准确度和灵敏度磁场测量技术的需求,磁通门磁力仪的不足逐渐凸显,首先磁通门在使用过程中,其零点会随时间、温度、机械应力、电磁环境等外界因素变化发生漂移,导致实验数据的准确性、一致性变差;其次,在地球磁测卫星或航磁中,需要采用高灵敏度的标量磁力仪校准三轴磁通门,而灵敏度较差的磁通门磁力仪只能用于确认航磁中磁场方向信息,导致航磁搭载的传感器数量增多;此外,随着探测距离的增加,应用领域的拓展,对磁力仪灵敏度的要求逐步提升,而磁通门的灵敏度受限于工作原理和结构,难以进一步提升<sup>[8]</sup>。与之相比,原子磁力仪<sup>[9]</sup>不仅无零漂,还有着非常高的灵敏度,这使得基于原子磁力仪的高精度矢量磁力仪拥有着很好的发展前景。目前多种矢量原子磁力仪的设计方案,基本都是基于传统的标量原子磁力仪发展而来。

在过去的十年中,原子磁力仪的发展使得室温设备的灵敏度可与超导量子干涉仪(SQUID)<sup>[10-12]</sup>相媲美,但超导量子干涉仪(SQUID)作为商用产品中灵敏度最高的磁力仪,其环境要求较高,需要液氮或液氮制冷,并且结构复杂、体积庞大且设备维护费用高昂。原子磁力仪结构相对简单,工作温度要求较低,更容易小型化,实现工业化制造。同时,随着磁场测量技术的进步也使得商用设备的尺寸、重量和功耗减小了一个数量级,在民用以及军事领域

中具备非常广阔的前景。近年来,已经有多种基于标量原子磁力仪的矢量探测方案,包括外加磁场补偿法、偏置磁场调制法、外加射频场测量法、电磁感应透明(EIT)探测法、Bell-Bloom全光测量法等技术路线,本文将针对这些方法分别对相应的矢量原子磁力仪方案进行综述。

## 1 高精度矢量原子磁力仪研究现状

### 1.1 配置外加场的矢量磁力仪

国内外的一些研究成果中对原子磁力仪方向信息的提取进行了研究,通常需要在原有磁场的基础上叠加一个微小的偏置磁场或额外的射频场。如在标量磁力仪  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴方向上安装单独的线圈,用来诱导每个轴方向上磁场的调制,从而提供有关  $B_x$ 、 $B_y$  方向上的磁场信息,进而确定磁场  $B$  的方向信息<sup>[13-15]</sup>。然而,这种矢量探测方案的精确度在很大程度上依赖于从实验信号中提取磁场方向的数学模型(描述原子与场的相互作用模型和光场传播模型),同时也需要大小和方向精度都非常高的偏置场。以下就这类配置外加场的矢量磁力仪展开介绍。

#### 1.1.1 外加磁场补偿法

外加磁场补偿法是矢量磁场测量方法中最常见方法,其基本原理是在标量磁力仪的基础上,添加不同频率的调制磁场于平面互相垂直的两个方向,并通过获取其中某一方向的磁场调制信号,即基于该方向的补偿磁场信号,进而测量另一方向的磁场信号,因此也可被称为磁场交叉调制法。2004年,美国普林斯顿大学 Seltzer 等<sup>[16]</sup>利用该方法实现了基于 SERF 磁力仪的三维矢量磁力仪,能够同时并且独立地测量所有三个分量的磁场。其原理基于零磁共振<sup>[17]</sup>,当外磁场较大时,输出信号很小,对实验结果影响很大,因此采用正交三轴线圈对外磁场进行补偿,使磁力仪中的原子气室所在位置的总场保持在接近零的状态,从而抑制自旋交换碰撞引起的展宽<sup>[18]</sup>。此外可以进一步加热使原子处于无自旋交换弛豫态(Spin Exchange Relaxation Free, SERF),以此来延长原子的弛豫时间。因此, SERF 磁力仪的本质实际上是基于共振谱线宽度压窄的技术。SERF 磁力仪的灵敏度已经超越了超导量子干涉仪(SQUID),成为了当世灵敏度最高的磁力仪<sup>[19]</sup>,预期其理论上的灵敏度最高可达到  $1 \text{ aT/Hz}^{1/2}$ <sup>[20]</sup>。目前,美国国家标准与技术研究院(NIST)已研制出能工作在 SERF 矢量场下的芯片级磁力仪<sup>[21]</sup>。

Bloch 方程通常可以用来描述原子自旋极化的演化过程, 如式(1)所示。

$$\frac{dS}{dt} = \gamma S \times B + R(S_0 - S) - \frac{S}{T_2} \quad (1)$$

式中,  $S$  为自旋极化率;  $\gamma$  为磁旋比;  $R$  为泵浦速率;  $B$  可分为  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$ 、 $B_1 \sin \omega t$ ;  $T_2$  为自旋交换碰撞的横向弛豫时间。对该式进一步分析可发现, 当  $\omega = \gamma B_0$  时, 自旋极化率  $S$  会产生同频的共振, 基于这一共振原理可以测量出  $B_0$  和  $B_1$ ,  $B_0$  为外磁场大小,  $B_1$  为某一方向的磁场大小。

Seltzera 等设计的基于 SERF 磁力仪的三维矢量磁力仪光路结构示意图如图 1 所示, 其利用磁场交叉调制法测量抽运光和检测光所在平面垂直方向

的自旋极化率, 如式(2)所示。

$$S_x \propto B_y + \gamma T_2 B_x B_z \quad (2)$$

式中,  $B_x$  为抽运光方向的磁场;  $B_y$  为检测光方向的磁场。分别在抽运光和检测光方向增加不同频率的调制磁场, 式(2)进一步变成了式(3)。

$$S_x \propto B_y + \gamma T_2 B_{zm} B_x \sin \omega_{zm} t + \gamma T_2 B_{xm} B_z \sin \omega_{xm} t + \gamma T_2 B_x B_z + \gamma T_2 B_{xm} B_{zm} \sin \omega_{xm} t \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B_x &= B_{x0} + B_{xm} \sin(\omega_x t) \\ B_z &= B_{z0} + B_{zm} \sin(\omega_z t) \end{aligned} \quad (4)$$

式(3)中,  $B_{xm}$  和  $\omega_{xm}$  分别为沿  $x$  方向调制磁场的大小和频率;  $B_{zm}$  和  $\omega_{zm}$  分别为沿  $z$  方向调制磁场的大小和频率。式(4)中,  $B_{x0}$  和  $B_{z0}$  分别为沿  $x$  方向磁场和沿  $z$  方向外界磁场的大小。

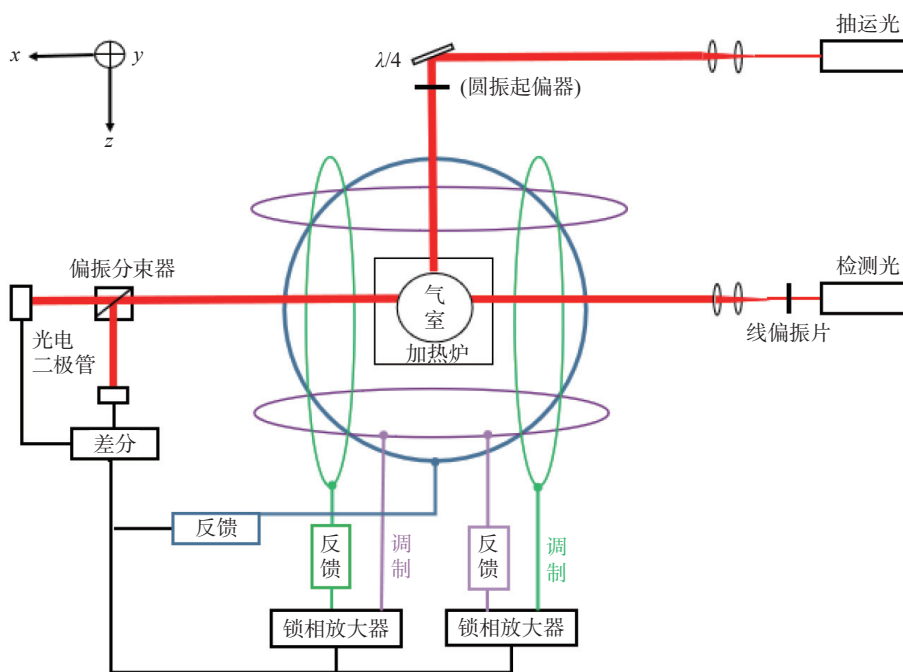


图 1 基于 SERF 磁力仪的矢量磁力仪光路结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of optical path structure of vector magnetometer based on SERF magnetometer

从式(3)中可以看出, 将  $\omega_{xm}$  和  $\omega_{zm}$  作为被测信号  $S_x$  的参考信号进行锁相解调, 能够得到沿  $x$  方向的磁场信息  $B_x$  与沿  $z$  方向的磁场信息  $B_z$ , 即通过控制  $z$  方向的调制信号对  $x$  方向的磁场进行测量, 控制  $x$  方向的调制信号对  $z$  方向的磁场进行测量<sup>[22]</sup>。

该 SERF 磁力仪还可以通过增加反馈系统实现自激振荡, 以此提升磁力仪的灵敏度。在反馈电流较大的情况下, 标量磁力的测量性能不再是限制磁力仪灵敏度的主要因素, 使其产生偏置磁场的电流源的噪声水平才是影响磁力仪灵敏度的关键<sup>[23]</sup>。

此外, 由于该方法需要线圈对外磁场进行完全补偿, 其补偿磁场实际就是待测磁场, 因此测量结果将会受到外界补偿磁场准确度与稳定性的直接影响。

### 1.1.2 偏置磁场调制法

另一种方案是外加偏置磁场进行调制, 利用 RF 信号实现共振, 通过同一频率的不同谐波因素或不同的频率因素获取磁场的矢量信息<sup>[24]</sup>。如图 2 所示, 需要预先确认磁场的大致方向, 使抽运光的方向和磁场方向相同, 检测光方向和磁场方向垂直, 施加 RF 信号与磁场方向垂直, 从而使原子自旋极化

方向发生偏转,产生绕磁场方向的进动,利用检测光的信号,令 RF 信号的频率与磁场对应的拉莫尔进动频率保持共振。若此时磁场方向不发生变化,抽运光就不会受到自旋极化进动的影响;若出现了和初始磁场方向垂直的横向磁场,则自旋进动的旋转面将会发生偏转,进而产生了自旋极化率在抽运光方向交变的投影,其频率等于自旋进动的频率。抽运光输出的幅值和相位,会被自旋进动和横向磁场引起的交变投影所调制,横向磁场的大小与方向分别由抽运光信号输出的幅值与相位所决定<sup>[25]</sup>。因此,利用锁相放大器解调抽运光信号,就能得到两个正交的横向磁场值。由于测量出的横向磁场线性范围较小,在实际应用中,通常使用闭环线圈补偿横向磁场,这也导致最终测量磁场的精确度会受到补偿磁场准确度的影响。2011年,俄罗斯科学院的 Vershovskii 等<sup>[26]</sup>为提高磁场测量的准确度制定了改进的方案,基于开环信号对抽运光的方向进行调整,使其与总磁场保持一致,从而消除了闭环线圈对横向磁场的补偿。

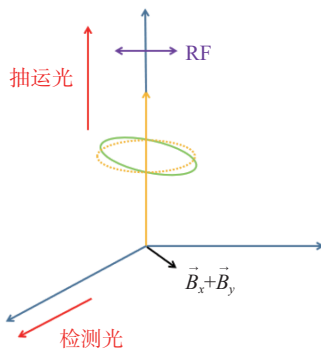


图2 外加偏置磁场的光路结构与原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the optical path structure and principle of the applied bias magnetic field

在双共振磁力仪中,原子自旋在静态场中的演化是通过对频率  $\omega_{RF}$  调制进行的。当频率  $\omega_{RF}$  等于原子拉莫尔进动频率,即  $\omega_{RF} = \omega_L = \gamma|B_0|$  时,产生共振响应,  $\gamma$  为被探测原子的磁旋比。2018年, Ingleby 等<sup>[27]</sup>基于双共振的原理,通过调制检测光的信号,使 RF 信号频率与磁场对应的拉莫尔进动频率保持共振,从中解调出一倍频以及二倍频的振幅和相位,最终计算出磁场的大小和方向信息,实验结果对磁场的振幅灵敏度为  $1.7 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ ,角度灵敏度为  $0.63 \text{ mrad/Hz}^{1/2}$ 。但该双共振原子磁力仪的方案在传感器的实际应用中也存在一些缺陷,如观测中会存在一定的死区,在某些位置两者的信号振幅

都降为零,致使观测的相位信号没有随磁场方向的变化而改变,并且这些死区不一定与信号幅度死区重合。

在外加单个射频场的情况下,也可利用光学共振失谐的探测光进行测量。2019年, Pyragius 等<sup>[28]</sup>设计出了基于佛克托效应 (Voigt Effect) 的三轴矢量原子磁力仪方案,在单个射频场存在的情况下,利用与光学共振失谐的探测光进行测量,通过极化零差测量原子自旋产生的线性双折射,得到射频修饰频率的一次谐波和二次谐波处产生调制的偏振信号,此时这些谐波的正交点就可以映射出外部磁场的矢量信息。该方法使用单光束测量,便于集成系统。

## 1.2 全光矢量原子磁力仪

外加偏置磁场或射频场的矢量磁力仪,在容易受到外界磁场干扰的环境中无法使用,譬如对 EDM 的测量等。采用全光矢量原子磁力仪,不仅可以消除此类影响,还可以避免射频驱动环境中串扰的问题<sup>[29]</sup>。并且在实际操作中,这种磁力仪更容易校准激光器中光束的方向,以及更好地控制光和原子相互作用的区域。

在标量原子磁力仪的基础上,利用磁力仪对方向误差极力消除的效应,可实现磁场的矢量测量。2010年,俄罗斯新西伯利亚州立大学 Yudin 等<sup>[30]</sup>研究了基于电磁感应透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 的矢量原子磁力仪。该 EIT 矢量磁力仪利用线偏振双色场中光与原子相互作用的对称性,以及高对比度 EIT 共振的特性,对磁场的方向信息进行测量。由于标量磁力仪工作在任意方向上都具有最大的灵敏度与准确度,因此该 EIT 矢量磁力仪不存在“死区”,但该方法无法将消除的方向误差信息放大,造成磁场方向测量的精确度有限<sup>[31]</sup>。

1961年, Bell 与 Bloom 通过对激光泵浦速率的调制实现一种可直接产生横向极化的磁力仪,称为 Bell-Bloom 原子磁力仪<sup>[32-33]</sup>。Bell-Bloom 原子磁力仪的基本原理是测量原子磁矩在外磁场中的拉莫尔进动频率来实现待测磁场的测量。使用圆偏振泵浦光,令碱金属原子产生自旋极化,在磁矩作用下使被极化原子围绕待测磁场作拉莫尔进动,这时碱金属原子的光学特性发生改变,利用与原子跃迁频率共振的线偏振光来检测介质的圆二向色性,发现线偏振光的偏振方向发生偏转。一般圆偏振泵浦光的方向与外磁场的方向相互垂直,当对泵浦光光强进

行幅度调制时,若调制频率接近原子在外磁场下的拉莫尔进动频率时,泵浦光在横向方向上的极化最大,此时检测光偏振方向的偏转角度最大,利用拉莫尔进动频率与磁场的关系可求出待测磁场值。

传统的 Bell-Bloom 原子磁力仪只能测得磁场的大小信息,是一种标量磁力仪。2014 年,美国伯克利大学 Patton 等<sup>[34]</sup>在 Bell-Bloom 磁力仪的基础上,提出一种利用斯塔克斯效应产生移频光等效偏置磁场的方法,该方法利用虚拟磁场代替线圈磁场,目的是实现全光的磁场矢量探测。其不需要对外界磁场进行补偿,可以直接得到磁场的方向信息,但是这个方法需要额外增加两个功率比较强的移频光,只是在一个既定的平面内进行方向的探测,无法实现空间的矢量探测,所以无法真正最后应用在小量化的矢量磁力仪中。其原理如图 3 所示<sup>[35]</sup>,在一个二维平面内利用两个彼此正交的线圈,同时产生相互正交的磁场  $B_1$  和  $B_2$ ,在第一个线圈对磁场  $B_1$  产生影响时,总磁场  $B_0$  变化为  $\Delta B_{01}$ ,  $\Delta B_{01} \approx B_1 \sin \theta$ ,第二个线圈对磁场  $B_2$  产生影响时,总磁场变化为  $\Delta B_{02}$ ,  $\Delta B_{02} \approx B_2 \cos \theta$ ,当我们令  $B_1$  与  $B_2$  相等时,总磁场的方位角度  $\theta$  与  $\Delta B_{01}$ 、 $\Delta B_{02}$  的关系可以表示为:  $\theta = \arctan(\Delta B_{01}/\Delta B_{02})$ 。

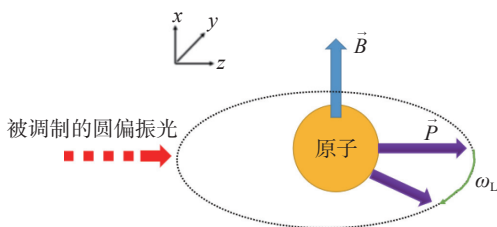


图 3 Bell-Bloom 磁力仪原理图  
Fig.3 Schematic diagram of Bell-Bloom magnetometer

为使实验结果总磁场的方位角度准确度更高,就必须对正交的两个磁场  $B_1$  和  $B_2$  进行调制,进而对  $B_0$  的信号也进行解调,最终得到  $\Delta B_{01}$ 、 $\Delta B_{02}$ 。

在 Bell-Bloom 磁力仪的基础上,加入第二束检测光,可实现原子磁力仪的矢量探测。2017 年,哈尔滨工程大学的 SUN 等<sup>[36]</sup>基于该方案,研制了一种双检测光结构的全光矢量铯原子磁力仪,其振幅灵敏度为  $80 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ ,角度灵敏度为  $0.1^\circ/\text{Hz}^{1/2}$ 。该磁力仪测量原子磁矩在外磁场中做拉莫尔运动的进动频率,以及进动投影的相移和振幅比,根据待测磁场方向与进动投影相位角的关系提取磁场的方向信息,原理图如图 4 所示。但同样的,该磁力仪只适用于二维平面内的磁场测量,仅能提供特定方向上的

磁场信息。

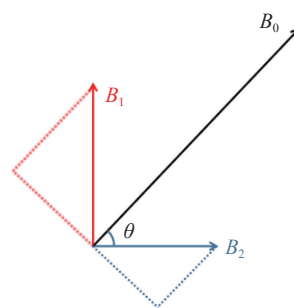


图 4 二维平面内的磁场投影原理示意图  
Fig.4 Schematic diagram of the principle of magnetic projection in two-dimensional plane

此外,科学家们还提出了一种矢量全光原子磁力仪方案,在初始配置中,需要使用者提前知道磁场的大致方位,令检测光的方向和磁场的方向平行,运用 AOM 调制的抽运光的输出信号将输出频率锁定在磁场对应的共振频率中。2015 年,北京航空航天大学 HUANG 等<sup>[37]</sup>研制了基于自旋进动调制的三轴全光原子磁力仪,其存在一个强度调制的泵浦光和一个正交的探测光,利用泵浦光的共振来测量主场分量,并使用自旋进动调制的探测光的光学旋转来同时测量横向磁场的信息。当横向磁场不存在时,检测光对自旋进动毫无反应,而当横向磁场存在时,自旋进动将会对检测光进行调制,调制的幅值和相位将决定横向磁场的大小和方向,最后运用锁相放大器解调可得到两个相互正交的横向磁场。该全光原子磁力仪系统不需要 RF 信号以及任何调制场与射频场,其结构简单,基本光路结构示意图如图 5 所示。但该系统主要是用来针对正交系统中的某个方向,还是没有达到空间的磁场矢量探测。

2020 年,中国科学技术大学的研究团队<sup>[38]</sup>通过结合基于两束相互垂直的泵浦光的双 Bell-Bloom 抽运结构以及多反射腔,实现对磁场信息的完整测量。该磁力仪无需附加额外的射频调制,可同时进行磁场大小和方向的测量。在任意磁场方向下,Bell-Bloom 磁力仪配置方案如图 6(a)所示,探测光沿  $y$  方向,泵浦光沿  $z$  方向,磁场  $B$  与泵浦光  $z$  方向、 $xy$  平面的两个方向角为  $[\psi_z, \theta_{xy}]$ 。

对泵浦光进行幅度调制,当频率  $\omega$  与原子拉莫尔进动频率  $\omega_L$  相等时,原子极化矢量大部分将在垂直于磁场方向的平面上被泵浦,即图 6(a)中的  $x'y'$  平面。

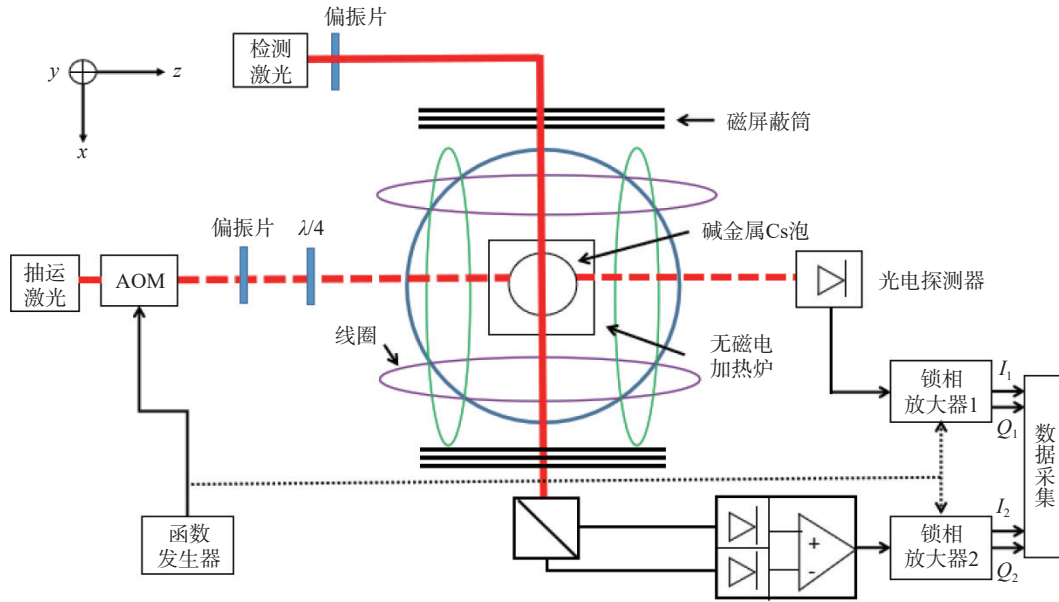


图5 基本光路结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of basic optical path structure

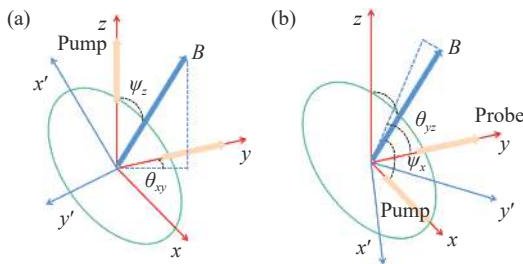


图6 两种不同的 Bell-Bloom 磁力仪配置方案

Fig.6 Two configurations of Bell-Bloom magnetometers with pumping beams

当抽运光光强的调制频率和原子拉莫尔进动频率接近共振时,原子在探测光方向  $y$  轴的极化投影为式(5)。

$$P_y = \frac{a_1 \sin \psi_z \sqrt{\cos^2 \psi_z \cos^2 \theta_{xy} + \sin^2 \theta_{xy}}}{2R} \sin(\omega t + \sigma_1) \quad (5)$$

此时  $\sigma_1$  是调制的原子信号和对应的驱动泵浦光之间的相位差,表达式为式(6)。

$$\sigma_1 = \cot^{-1}(\cos \psi_z \cot \theta_{xy}) + \beta \quad (6)$$

通过信号解调,得到磁场的幅值和相位信息。随后在  $x$  轴方向增加第二道泵浦光,如图6(b)所示,此时磁场  $B$  与泵浦光  $x$  方向、 $yz$  平面的两个方向角为  $[\psi_x, \theta_{yz}]$ 。使用同样的分析方法可得另外一个相位输出为式(7)。

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= \cot^{-1}(\cos \psi_x \cot \theta_{yz}) + \beta \\ &= \cot^{-1}\left(-\frac{1}{2} \sin \psi_z \tan \psi_z \sin 2\theta_{xy}\right) + \beta \end{aligned} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可以看出,每一个方程在球坐标下可定义一条曲线,两条曲线会在球坐标中存在一个交点,而磁场的方向就指向这个交点,即通过测量  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的相位信息,可得到磁场的方向信息。

## 2 结论

本文就外加偏置磁场或射频场、全光磁场矢量探测等方案,对高灵敏度矢量原子磁力仪的原理和研究现状进行了整理与介绍。这些磁力仪的矢量探测方案各有利弊。其中,使用外加磁场补偿可在零磁场下工作,但测量结果会受到外界补偿磁场的直接影响;使用偏置磁场调制准确度较高,但矢量测量存在一定的死区;射频场佛克托效应(Voigt Effect)法器件较少,便于集成系统,但灵敏度受射频共振的线宽和其他因素的限制;使用电磁感应透明(EIT)测量不存在死区,但磁场矢量测量的精度有限;使用 Bell-Bloom 全光测量可在原有高灵敏度标量探测的基础上实现磁场矢量信息提取,不需要增加原有系统的复杂程度而实现磁场大小和方向的同步探测,是一种相对理想的磁场矢量探测方案。此外,与外加偏置磁场或射频场的矢量磁力仪相比,使用全光测量的矢量磁力仪无需外加线圈,在避免了外界磁场干扰的同时,减小了磁力仪系统的体积,成为了未

来小型化矢量原子磁力仪主要的发展方向。对于实际应用来说,目前矢量原子磁力仪仍然缺乏成熟的技术方案,核心器件与整机体积仍然较大,极大的限制其应用。因此,以美国国防部高级研究计划局(DARPA)为代表的研究机构已经把矢量探测作为原子磁力仪下一阶段的发展重点,在高灵敏度的基础上提出了小体积、轻量化、低功耗的发展目标。

建立能够实现高灵敏度矢量探测的小型化原子磁力仪不仅能够提供更丰富的信息,并且能够最大程度地减少应用场景中磁场测量装置的数量,从长远看可精确针对以下需求:

1)在地球磁测卫星或航磁中,通常要分别搭载矢量以及标量磁力仪,采用高灵敏度的标量磁力仪校准三轴磁通门,灵敏度较差的磁通门磁力仪用于确认航磁中磁场方向信息,而在同一平台实现高灵敏度矢量探测,可降低对传统磁通门传感器的依赖以及减少航磁搭载的传感器数量。

2)在军事及民用磁异常探测中,通常都是需要在一个地磁背景中分辨磁异常信号,异常信号通常会带来磁场矢量的变化。提高矢量磁力仪的测量范围以及角度灵敏度,能够更好的在地磁场范围内进行高精度的磁场测量以及定位磁异常源,可应用于地磁观测站、空间磁监测以及磁异常源的追踪定位。

参考文献

[1] 刘腾. 航空反潜的现状和发展综述 [J]. *中国新通信*, 2019, 21(8): 74-77.

[2] 王光源, 马海洋, 章尧卿. 航空磁探仪探潜目标磁梯度定位方法 [J]. *兵工自动化*, 2011, 30(1): 32-34,38.

[3] 董鹏, 孙哲, 邹念洋, 等. 国外磁探潜装表现状及发展趋势 [J]. *舰船科学技术*, 2018, 40(11): 166-169.

[4] 沈平子, 贺青, 张钟华, 等. 电磁计量单位制沿革 [J]. *计量技术*, 2019(5): 36-42,80.

[5] 唐列娟, 殷恭维, 林钢. 磁通门磁力计测地磁研究 [J]. *传感器与微系统*, 2006, 25(10): 10-12.

[6] Le Maire P, Bertrand L, Munsch M, *et al.* Aerial magnetic mapping with an unmanned aerial vehicle and a fluxgate magnetometer: A new method for rapid mapping and upscaling from the field to regional scale[J]. *Geophysical Prospecting*, 2020, 68(7): 2307-2319.

[7] 丁鸿佳, 隋厚堂. 磁通门磁力仪和探头研制的最新进展 [J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(4): 743-745.

[8] Koch R H, Deak J G, Grinstein G. Fundamental limits to magnetic-field sensitivity of flux-gate magnetic-field sensors[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 75(24): 3862-3864.

[9] 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.

[10] Kleiner R, Koelle D, Ludwig F, *et al.* Superconducting quantum interference devices: State of the art and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(10): 1534-1548.

[11] Hong T, Wang H, Zhang Y, *et al.* Flux modulation scheme for direct current SQUID readout revisited[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(6): 062601.

[12] Crété D, Sène A, Labbé A, *et al.* Evaluation of Josephson junction parameter dispersion effects in arrays of HTS SQUIDS[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(7): 1-6.

[13] 谢胤, 罗方雪, 张樊, 等. 基于铯光泵磁力仪的地磁噪声补偿技术 [J]. *计测技术*, 2022, 42(1): 26-31.

[14] Alexandrov E B, Balabas M V, Kulyasov V N, *et al.* Three-component variometer based on a scalar potassium sensor[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(5): 918-922.

[15] Gravrand O, Khokhlov A, JL L M, *et al.* On the calibration of a vectorial 4He pumped magnetometer[J]. *Earth, planets and space*, 2001, 53(10): 949-958.

[16] Seltzer S J, Romalis M V. Unshielded three-axis vector operation of a spin-exchange-relaxation-free atomic magnetometer[J]. *Applied physics letters*, 2004, 85(20): 4804-4806.

[17] Allred J C, Lyman R N, Kornack T W, *et al.* High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation[J]. *Physical review letters*, 2002, 89(13): 130801.

[18] Happer W, Tang H. Spin-exchange shift and narrowing of magnetic resonance lines in optically pumped alkali vapors[J]. *Physical Review Letters*, 1973, 31(5): 273.

[19] Dang H B, Maloof A C, Romalis M V. Ultrahigh sensitivity magnetic field and magnetization measurements with an atomic magnetometer[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(15): 151110.

[20] Kominis I K, Kornack T W, Allred J C, *et al.* A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer[J]. *Nature*, 2003, 422(6932): 596-599.

[21] 贺青, 邵海明, 梁成斌. 电磁计量学研究进展评述 [J]. *计量学报*, 2021, 42(11): 1543-1552.

[22] 董海峰, 李继民. 三轴矢量原子磁力仪综述 [J]. *导航与控制*, 2018, 17(5): 18-25.

[23] Seltzer S J. *Developments in alkali-metal atomic magnetometry*[M]. Princeton: Princeton University, 2008.

[24] Zigdon T, Wilson-Gordon A D, Guttikonda S, *et al.* Nonlinear magneto-optical rotation in the presence of a radio-frequency field[J]. *Optics express*, 2010, 18(25): 25494-25508.

[25] Fairweather A J, Usher M J. A vector rubidium magnetometer[J]. *Journal of Physics E:Scientific Instruments*, 1972, 5(10): 986.

[26] Vershovskii A K. Project of laser-pumped quantum mx magnetometer[J]. *Technical Physics Letters*, 2011, 37(2): 140-143.

[27] Ingleby S J, O'Dwyer C, Griffin P F, *et al.* Vector magnetometry exploiting phase-geometry effects in a double-resonance alignment magnetometer[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(3): 034035.