

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.05.011

铯光泵原子磁强计研制进展

孙兵锋, 安芳芳, 王植彬, 杜伦宇, 曹远洪, 杨林

(成都天奥电子股份有限公司, 成都 611731)

摘要: 铯光泵原子磁强计利用极化铯原子自旋拉莫尔相干进动探测和测量磁场, 具有精度高、响应快等特点。围绕铯光泵原子磁强计的技术特点, 重点介绍了其工作原理及研制工作, 实现了一款铯光泵原子磁强计整机。测试结果表明, 该款磁强计磁场测量范围为 20000~100000nT, 峰-峰噪声值为 0.0017nT, 能满足磁异常探测对高精度磁强计的需求。

关键词: 铯光泵原子磁强计; 拉莫尔相干进动; 磁场测量范围; 峰-峰噪声

中图分类号: U666.12

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2017)05-0065-05

Development of an Optically Pumped Cesium Atomic Magnetometer

SUN Bing-feng, AN Fang-fang, WANG Zhi-bin, DU Lun-yu, CAO Yuan-hong, YANG Lin

(Chengdu Space on Electronic Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: The optically pumped cesium atomic magnetometer detects and measures magnetic fields by using the Larmor coherent precession of polarized cesium atomic spins, which features high sensitivity, fast response. Due to its technical features, the principle of operation and the development work is mainly introduced, then a cesium atomic magnetometer prototype is realized. The test results showed that its operating range is from 20000nT to 100000nT, and noise of peak-to-peak is 0.0017nT, which can be applied to a high performance magnetometer, and meet the demand for magnetic-anomaly detection.

Key words: Optically pumped cesium atomic magnetometer; Larmor coherent precession; Measurement range of the magnetic field; Noise of peak-to-peak

0 引言

高精度弱磁探测是采用测量地球磁场或者磁性目标磁场的方式, 将磁信息变化量转变成电信号输出, 通过信号处理与分析获取有效信息, 实现目标磁场的有效探测。高精度弱磁探测技术已广泛应用于航空反潜、地磁匹配导航、资源勘探、医学检测、科学研究等领域, 其核心部件就是高精度磁强计^[1-3]。

高精度磁强计按其功能和操作原理可分为矢量磁强计和标量磁强计。矢量磁强计能测量外界磁场三维空间的大小和方向, 标量磁强计能测量磁场绝对值大小但不能测量磁场方向。已工程化应用的矢量磁强计有磁通门磁强计、超导量子干涉仪(SQUID)等。磁通门磁强计最好精度仅为 0.1nT 左右, 很难满足高精度磁探测需求。超导量子干涉仪探测精度可达几十 fT, 但装置复杂, 体积笨重, 需要液氮冷却, 工作环境要求和维护成本较高^[4]。

收稿日期: 2017-06-05; 修订日期: 2017-07-12

作者简介: 孙兵锋(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事量子频标、量子传感技术方面的研究。

E-mail: sbf337508@163.com

量子磁强计(除超导量子干涉仪外)一般属于标量磁强计,主要包括质子磁强计、(氦、铷、铯、钾)光泵原子磁强计等,这类磁强计探测精度较高,可达几 pT 水平。质子磁强计因其工作机理的原因,不能进行持续的磁场测量,限制了其应用领域。氦、铯、钾光泵原子磁强计是当今工程化应用最广的三种磁强计,但氦、钾光泵原子磁强计一般采用锁定跟踪方案,系统响应时间较慢。铯光泵原子磁强计一般采用自激型振荡方案,系统响应时间极快,特别适合搭载于快速移动平台,因此也成为国内外众多研究机构的研究重点,纷纷推出了系列产品,例如加拿大 Scintrex 公司生产的 CS-3 型铯光泵原子磁强计^[5]、美国 Geometrics 公司生产的 G-822A、G-858 型航空铯光泵原子磁强计、G-882 海洋铯光泵原子磁强计,探测精度均可达几 pT^[6]。这些产品被广泛应用于反潜和资源勘探等领域,但这种高精度磁强计对我国是完全禁运的。

成都天奥电子股份有限公司针对我国航空反潜和资源探测对高精度原子磁强计的迫切需求,开展了铯光泵原子磁强计研制工作,已取得了较大的进展,部分产品已开始提交用户试用。

1 工作原理

碱金属原子(钾、铷、铯)蒸气处于微弱环境磁场中时会产生 Zeeman 分裂,由 Breit-Rabi 方程中与磁场相关的线性项可知,磁矩为零的两相邻 Zeeman 子能级间的跃迁频率大小与外磁场大小呈线性关系。因此,对外界磁场的测量可转换为对原子相邻 Zeeman 能级跃迁频率的测量,这就是碱金属原子磁强计的基本原理。

当原子能级布居数遵从 Boltzmann 分布时,原子能级间跃迁信号极低,无法实现对原子 Zeeman 频率的测量。利用光抽运可实现原子基态 Zeeman 能级粒子数布居最大偏极化,提高原子能级间信号跃迁强度,与光检测相结合能提高信号检测效率,实现高信噪比。

铯原子在光谱灯振荡线圈激励下发出 D1 (894nm) 和 D2 (852nm) 近红外光谱谱线。据文献报道^[7],采用 D2 谱线抽运,吸收泡中铯原子偏极化率仅为采用 D1 谱线抽运率的一半,这样 D2 谱线就须采用滤光片进行滤除。当吸收泡中铯原子处于恒定弱磁场条件下,基态 $F=4$ 能级上原子磁矩会发生空间量子化取向而产生 9 条 Zeeman 子能级。

图 1 所示为铯原子 D1 谱线 894nm 以左旋圆偏振 (σ^+) 光抽运时的能级跃迁图,单色性较好的 D1 光在吸收泡中与铯蒸气原子相互作用,将铯原子抽运到 $|F=4, m_F=4\rangle$ 能级上,实现最大原子偏极化。极化的原子在相邻子能级间跃迁即为 Zeeman 跃迁,跃迁频率为原子磁矩绕外界磁场相干进动的 Larmor 频率 ω_L ,在忽略 Breit-Rabi 方程高阶项时, ω_L 正比于外界磁场 B ,即

$$\omega_L = \gamma B \quad (1)$$

式(1)中, γ 为旋磁比。这样,通过测量铯原子跃迁频率即可实现外界磁场测量。

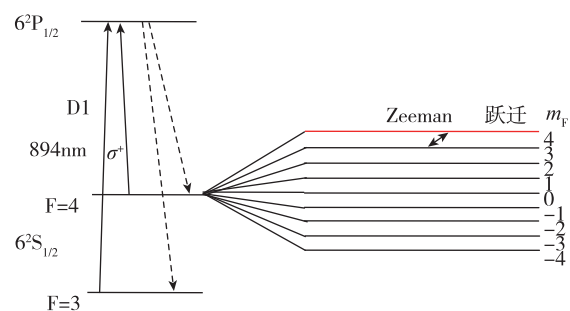


图 1 铯原子光抽运能级跃迁结构

Fig. 1 Energy transitions of an cesium atom with optical pumping

2 铯光泵原子磁强计研制

2.1 系统方案设计

铯光泵原子磁强计主要是由铯光谱灯、光学镜片、原子吸收泡、射频线圈、光电池及电子线路构成。本系统采用的是单束光抽运自激振荡 M_x 模式,方案设计如图 2 所示^[8]。

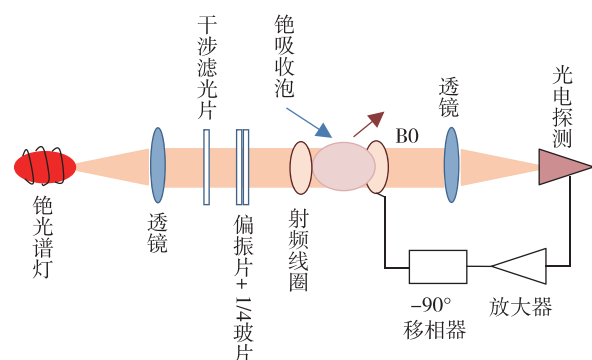


图 2 自激型铯原子磁强计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a self-oscillating magnetometer with cesium vapor

铯光谱灯在振荡线圈激励下发出 D1、D2 光谱线,经第一个透镜准直扩束后变为平行光束;干涉滤光片滤除 D2 线,只让 D1 谱线通过,D1 谱线经偏振片变成线偏振光,再经 1/4 玻片变成圆偏振光入射到原子吸收泡中与铯蒸气原子相互作用,并产生光-磁共振效应。共振信息经第二个透镜后入射到光电探测器,经信号提取电路放大处理和 -90° 移相器移相后反馈到射频线圈形成持续振荡。

2.2 量子探头设计

量子探头是铯光泵原子磁强计的核心,是探测外界环境磁场的敏感部位,决定了原子磁强计的测量精度。其中,铯光谱灯和铯原子吸收泡又是量子探头的 2 个关键部件,铯光谱灯设计必须实现最大光抽运效率,铯原子吸收泡设计必须提高铯原子弛豫率,实现窄线宽共振谱线。下面分别对两关键部件的设计进行介绍。

2.2.1 铯光谱灯

铯光谱灯是铯光泵原子磁强计的选态光源,其作用是通过光抽运将铯蒸气原子抽运到基态磁量子数最大的子能级上。铯光谱灯是一种无极放电灯^[9],利用了一定功率的射频信号激励灯泡中起辉气体电离,产生电子和离子。高速运动的电子和离子通过碰撞将起辉气体分子激发到激发态。处于激发态的起辉气体分子通过碰撞将灯泡中铯蒸气原子激发到激发态,激发态铯原子自发辐射回到基态时发出荧光。

铯光谱灯主要是由铯发光泡、射频激励和加热恒温电路组成。铯发光泡材料必须是抗碱性好的玻璃,可有效避免铯金属原子与玻璃含碱杂质发生化学反应,提高发光泡使用寿命;射频激励电路保证光谱灯短时间内正常起辉和输出光强稳定;恒温加热保证灯室内部温度稳定,降低环境温度影响,同样也实现光强稳定输出。

当发光泡处于环模状态时光抽运效率最高,环模发光特点是铯原子发光泡呈现紫红色,且泡壁边缘有一明亮的光圈,该模式下主要是铯原子被电离发光,缓冲气体发光基本被抑制。铯光谱灯环模发光特征如图 3 所示。

2.2.2 铯原子吸收泡

铯原子吸收泡是光抽运跃迁与射频磁共振的场所。吸收泡研制重点就是如何提高铯原子相干弛豫时间,实现窄线宽吸收谱线,提高信噪比。因此,要设计出完全合格的原子吸收泡,必须从制作

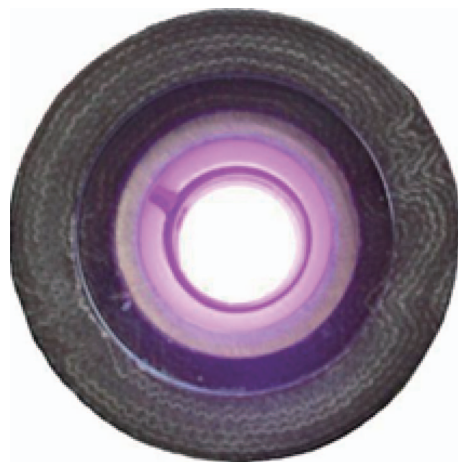


图 3 铯光谱灯环模发光特征

Fig. 3 The ring mode characteristics of cesium spectrum lamp

吸收泡的玻璃材料,以及充制工艺方面开展研究。

吸收泡须要采用光透过率高的无碱玻璃材料。光透过率高会提高光抽运效率,玻璃泡抗碱性好会降低铯金属原子消耗量,提高吸收泡使用寿命。

吸收泡充制工艺主要是从铯金属充入量、缓冲气体的种类、配比、气压大小等几方面予以考虑。铯金属充制要适量,充入量过多,剩余铯金属会凝结在吸收泡端面而影响透光性;充入量过少,原子蒸气密度不够,会降低信噪比。另外,铯蒸气原子与泡壁碰撞会降低原子弛豫时间,缓冲气体的充入是将铯原子囚禁在小范围内运动,大大减小铯原子与玻璃泡壁碰撞几率,是提高铯蒸气原子弛豫时间的重要手段之一。图 4 所示为碱金属原子与缓冲气体作用过程示意图。另外,缓冲气体的充入也会带来铯蒸气原子与缓冲气体碰撞、铯原子间自旋交换率增大导致弛豫时间缩短的负面现象。因此,缓冲气体种类、配比、气压大小的研究与分析是铯原子吸收泡研制的重要环节。

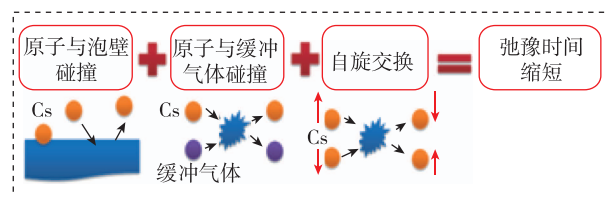


图 4 碱金属原子与缓冲气体作用过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram interaction of alkali-metal atomic with buffer gas

经多次试验验证,向吸收泡内充制一定量的铯金属和特定种类、特定比例和气压的缓冲气体,能

明显提高原子弛豫时间,可以将吸收泡原子共振谱线压窄到百 Hz 量级,满足系统高精度弱磁探测需求。

2.3 电路系统设计

电路系统设计是铯光泵原子磁强计又一重要点,主要由灯振荡电路、Larmor 信号提取电路、南北半球转换电路、温控电路、电源电路组成,如图 5 所示。

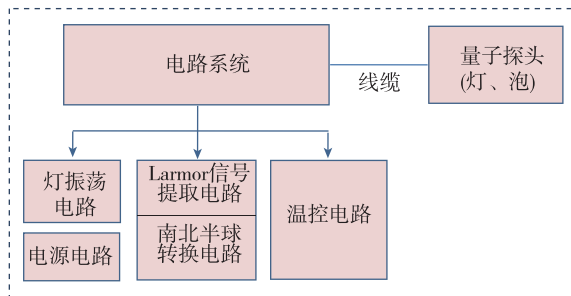


图 5 铯光泵原子磁强计电路系统组成

Fig. 5 The construction of circuit system for cesium optically pumped magnetometer

铯光谱灯振荡电路采用的是一种稳定性好的电感三点式高频振荡电路,振荡频率大约为 165MHz,用于激励泡内的铯蒸气原子发光。Larmor 信号提取电路是将带有磁场信息的共振信号有效提取、放大。南北半球转换电路用于使磁强计在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 转角范围内均能正常工作。温控电路用于灯温控制和吸收泡温度控制,研究表明,灯温控制到约 80°C 可获得足够和稳定的抽运光强,吸收泡温度控制到 55°C 能实现合适的原子蒸气密度,对提高信噪比有利。

为方便调试,设计时将元器件全部放在 PCB 电路板正面位置。为降低干扰,关键信号线在走线时尽量保证路径简短,Larmor 信号提取与放大反馈布线应严格按照信号流向予以布线。

2.4 整机设计

铯光泵原子磁强计作为感知外界环境磁场的敏感元件,为克服自身静态磁场干扰的影响。在整机设计时,采用了量子探头和电子线路分离的办法,两部分采用了 3~5m 长无磁屏蔽线缆进行电气连接,所有电子线路都放置于金属筒中进行屏蔽。量子探头外壳采用无磁塑料材料进行封装。另外,铯光谱灯、各光学镜片、原子吸收泡、光电池均是采用刚性无磁非金属连接和固定。为方便装配,量子

探头、电路系统外形采用的是圆柱形结构。研制出的铯光泵原子磁强计如图 6 所示。



图 6 铯光泵原子磁强计实物图

Fig. 6 Photograph of the optically pumped cesium atomic magnetometer

3 测试方案及结果

3.1 测试方案

利用研制出的铯光泵原子磁强计进行指标测试,测试方案如图 7 所示^[10]。

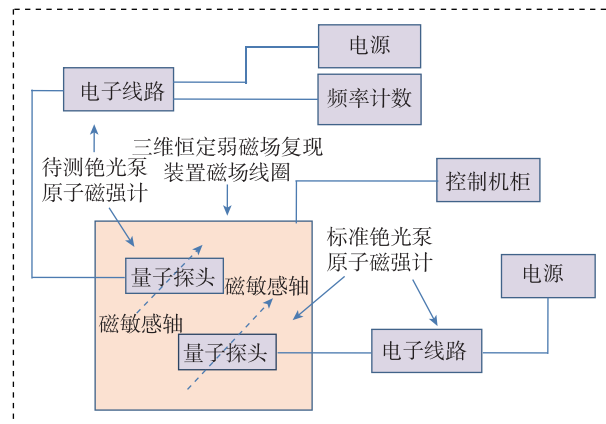


图 7 铯光泵原子磁强计测试方案

Fig. 7 Measurement scheme for cesium optically pumped magnetometer

按图 7 连接好铯光泵磁强计和外界各设备,采用 +28VDC 供电,预热 30min 以上。由恒定弱磁场复现装置复现待测磁场,然后开启磁场补偿系统,实现复现装置内部磁场稳定。保持磁场稳定不变,在恒定弱磁场复现装置的磁场均匀区内放置被测铯光泵磁强计和标准铯光泵磁强计。为防止两磁强计量子探头相互串扰,两量子探头间垂直相距 $0.3\sim 0.4\text{m}$,且位置平行并相对摆放,为使量子探头

所测磁场均匀区内信噪比最大,两量子探头摆放方向与均匀区内磁敏感(地磁场方向)轴成 45° 角。

3.2 测试结果

磁场测量范围和峰-峰噪声是评价磁强计性能的2个关键技术指标。测量范围越宽,磁强计应用领域越广泛;峰-峰噪声是磁强计自身本底噪声,该噪声越小,系统探测精度就越高,应用领域也越广泛。

3.2.1 磁场测量范围

恒定弱磁场复现装置分别复现出20000nT、50000nT、100000nT的三点磁场值,开启磁场补偿系统,实现复现装置内部磁场稳定。经测试,待测铯光泵原子磁强计同样能分别稳定响应20000nT、50000nT、100000nT磁场值,表明该磁强计能实现范围20000~100000nT的磁场测量。

3.2.2 峰-峰噪声

采用PC机通过频率计数器采集铯光泵磁强计的Larmor频率信号。每次频率信号采集时,设置频率计数器采样率为1Hz,PC机则连续记录频率计数器采集的频率值,记录数据不少于11个。按式(2)计算以峰-峰值形式表现的磁场噪声。

$$\max\{f_i\}_{i=1-n} - \min\{f_i\}_{i=1-n} = 3.498572\Delta B_N \quad (2)$$

式中: ΔB_N 为磁场噪声,单位nT; f_i 为被测磁传感器的第*i*个频率读数, $i=1, 2, \dots, n$; n 为被测磁传感器的频率读数个数。

根据式(2)计算磁场噪声值 ΔB_N 。

经计算统计,铯光泵原子磁强计在磁场范围20000~100000nT的磁场条件下,噪声峰-峰值结果为0.0017nT。

4 结论

详细介绍了铯光泵原子磁强计的工作原理,采用单束光抽运自激振荡方案,实现了一款高精度磁强计整机。研究表明,提高铯原子极化率是实现该磁强计高精度探测的关键技术途径,极化率越高信

噪比会越高。提高铯原子极化率有三种途径,一是使发光泡处于光抽运效率最高的环模状态;二是增大吸收泡内铯原子弛豫时间,压窄共振谱线线宽;三是降低电路系统噪声,采用无磁技术设计,减小量子探头自身静态磁场干扰。

对设计出的磁强计进行指标测试,磁场测量范围为20000~100000nT,峰-峰噪声值为0.0017nT,指标略高于国外同类产品,能满足目前磁异常探测对高精度磁强计的需求。

参考文献

- [1] Dalichaouch Y, Czipott P V, Perry A R. Magnetic sensors for battlefield applications [C]//Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls. International Society for Optics and Photonics, 2001: 129-134.
- [2] Hirota M, Furuse T, Ebana K, et al. Magnetic detection of a surface ship by an airborne LTS SQUID MAD [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11(1): 884-887.
- [3] Wooldridge A. Review of modern magnetic gradiometer surveys [C]// Proceedings of the SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists, 2004.
- [4] 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.
- [5] Scintres CS-3 Cesium Magnetometer [DB/OL]. <http://www.scintrexltd.com>.
- [6] <http://www.geometicsltd.com>.
- [7] Seltzer S J. Developments in alkali-mental atomic magnetometry [D]. Princeton University, 2008: 23-25.
- [8] Yabuzaki T, Ogawa T. Frequency shifts of self-oscillating magnetometer with cesium vapor [J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(3): 1342-1355.
- [9] 王义遒, 王庆吉, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [10] JJF 55-2014 原子式磁强计校准规范[S]. 国家国防科技工业局, 2014.