

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311391

# 一种宽工作温度范围的高灵敏度铯原子磁传感器\*

卢远添<sup>1,2</sup>, 刘雷松<sup>1</sup>, 朱万华<sup>1</sup>, 方广有<sup>1</sup>, 张晓娟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院空天信息研究院电磁辐射与探测重点实验室 北京 100190;

2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

**摘要:**针对航空平台磁异常探测应用需求,研制了一种宽工作温度范围的高灵敏度铯原子磁传感器,解决了现有传感器存在的工作温度范围小、低温下易磁场失锁等问题。利用温度反馈机制对铯原子灯激发源进行实时补偿,提高了原子磁传感器的稳定性和工作温度范围,铯原子灯输出光功率稳定性由2.10(标准差)提升至0.62,传感器工作温度范围由-20℃~60℃提升至-50℃~70℃。基于低噪声铯原子灯和窄线宽铯原子吸收室技术,该文开展了铯原子磁传感器整机设计与参数优化,研制出高灵敏度铯原子磁传感器样机。测试结果表明,在常温及地磁背景下的实际测量灵敏度达 $140 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ Hz}$ ,指标优于同类国际先进水平产品G-824A型铯原子磁传感器。

**关键词:**磁异常探测;原子磁传感器;磁共振

**中图分类号:** TH762 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## A high sensitivity cesium atomic magnetometer with a wide operating temperature range

Lu Yuantian<sup>1,2</sup>, Liu Leisong<sup>1</sup>, Zhu Wanhua<sup>1</sup>, Fang Guangyou<sup>1</sup>, Zhang Xiaojuan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A high sensitivity cesium atomic magnetometer with wide temperature characteristics is developed to meet the magnetic anomaly detection application requirements on an airborne platform. The problems of existing sensors such as small operating temperature range and easy magnetic field lock-out at low temperature. The temperature feedback mechanism is utilized to compensate the excitation source of the cesium atomic lamp in real time, and the atomic magnetic sensor's stability and working temperature range is improved. The stability of the output optical power of cesium atomic lamp is increased from 2.10 (standard deviation) to 0.62, and the operating temperature range of the sensor is increased from -20℃~60℃ to -50℃~70℃. The design and parameter optimization of cesium atomic magnetic sensor are presented, which are based on low-noise cesium atomic lamp and a cesium vapor cell with a narrow bandwidth. A prototype of high sensitivity cesium atomic magnetometer is developed. Test results show that the cesium atomic magnetometer prototype's measured sensitivity in the geomagnetic background is around  $140 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ Hz}$ , which is better than that of comparable worldwide commercial items (Geometrics G-824A cesium atomic magnetometer).

**Keywords:** magnetic anomaly detection; atomic magnetometer; magnetic resonance

## 0 引 言

磁场是一个基本物理量,在许多基础学科和应用学科领域,比如地球物理学<sup>[1]</sup>、考古学<sup>[2]</sup>、宇宙物理学<sup>[3]</sup>和

生物物理学<sup>[4]</sup>等,微弱磁场的精确测量是解决很多科学问题的关键。常见的弱磁传感器包括原子磁传感器<sup>[5]</sup>、感应式磁传感器<sup>[6]</sup>、磁通门<sup>[7]</sup>、质子磁力仪<sup>[8]</sup>和超导磁力仪<sup>[9]</sup>等,各种弱磁传感器因其特点的不同,在不同领域有广泛应用。

收稿日期:2023-05-05 Received Date: 2023-05-05

\* 基金项目:科技部重点研发计划(2021YFB3900202)项目资助

原子磁传感器是基于原子自旋和光泵磁共振原理的量子精密测量传感器,具有灵敏度高、绝对精度高、不易受平台姿态影响等优点,被认为是地球磁场测量应用中灵敏度最高的标量磁传感器<sup>[10]</sup>,目前它是水下目标探测<sup>[11-12]</sup>、靶场未爆物探测<sup>[13]</sup>和航空物探<sup>[14]</sup>等运动平台磁探测应用装备的核心传感器。1962年,Bloom等<sup>[15]</sup>基于光泵磁共振探测方法,成功研制第一台基于碱金属元素的原子磁传感器。美国 Geometrics 公司于2014年推出了 G-824A 型铯光泵磁力仪,灵敏度达  $0.3 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[16]</sup>。中科院空天院于2020年报道了一种高灵敏度铯原子磁传感器,灵敏度达  $0.6 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[17]</sup>。美国 Quspin 公司基于无磁 VCSEL 激光器和 MEMS 原子吸收室技术,于2017年推出了一种 QTFM 型芯片级铯原子磁传感器,灵敏度约  $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,功耗小于  $3 \text{ W}$ <sup>[18]</sup>。G-824A 和 QTFM 代表了目前原子磁传感器的两个技术发展方向,前者是向更高灵敏度发展,以提高传感器及其探测系统的探测能力,后者是向低功耗、小型化发展,以适应无人平台磁探测系统的应用需求,两者在不同的应用场景都有广泛的应用前景。因此,开展高灵敏度的原子磁传感器技术研究,并提高其工程应用适应性,对提高磁探仪系统的探测能力具有重要的意义。

本文针对运动平台磁异常探测的应用需求,提出了一种宽幅工作温度范围的高灵敏度铯原子磁传感器。通过引入温度反馈机制,大幅减小了铯原子灯激发源频率和输出功率随温度变化的波动范围,解决了低温下传感器启动慢或无法工作的问题。针对铯原子灯泵浦的铯原子磁传感器,提出了新的方法对传感器灵敏度影响参数进行优化。本文开展了原子磁传感器的设计、仿真与集成,并对样机进行了性能测试,测试结果与理论分析基本吻合,验证了该传感器应用于磁异常探测应用的先进性和可靠性。

## 1 传感器组成与设计

铯原子磁传感器主要包括探头组件和电子单元组件两部分。

### 1.1 探头组件

如图1所示,探头组件主要由铯原子灯、光学组件、铯原子吸收室、光电探测器等模块组成。

图2铯原子磁传感器的工作原理示意图,铯原子灯发出的光经准直、滤光、偏振后形成圆偏振光,偏振光通过光泵作用使铯吸收室中的铯原子发生极化。在有外磁场  $B$  存在时,铯原子宏观极化矢量会沿着外磁场方向进动,其进动频率称为拉莫尔频率,且进动频率  $\omega = \gamma B$  ( $\gamma$  是原子的旋磁比)。此时,若在垂直于  $B$  方向添加反馈磁场  $B(t)$ ,改变反馈磁场的频率会改变极化矢量的大小

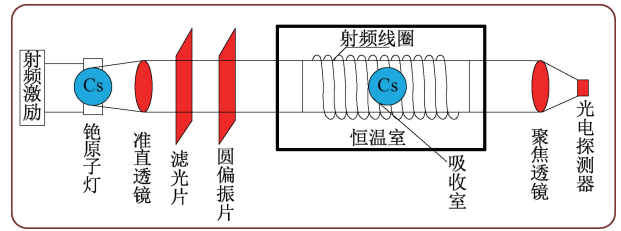
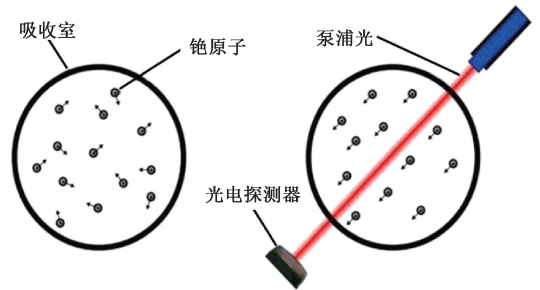


图1 传感器探头示意图

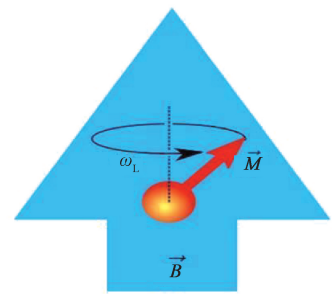
Fig. 1 Schematic diagram of the sensor probe

及进动过程,当反馈磁场频率等于拉莫尔频率时,极化矢量最大,即发生“磁共振”现象。磁共振时,吸收室对光的吸收系数最小,该调制光信号可以被光电探测器检测到,整个过程称为光学检测磁共振。通过使反馈磁场始终保持在磁共振状态,可连续跟踪拉莫尔频率,进而实现测量外磁场的目的。

第1步:光泵过程



第2步:拉莫尔进动



第3步:光探测与磁共振

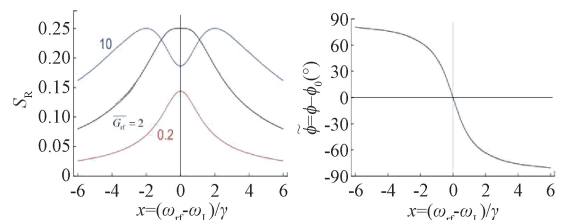


图2 铯原子磁传感器测磁原理

Fig. 2 Principle of cesium atomic magnetometer

### 1.2 电子单元组件

电子单元组件为传感器探头提供铯原子灯射频激励、原子灯及原子吸收室温控和拉莫尔信号处理等功能,

并将磁场数据输出给采集与控制单元,主要分为3个部分:射频激励电路、温控电路、信号处理电路。

### 1) 射频激励电路

目前商用的碱金属类原子磁传感器工作温度范围约为 $-20^{\circ}\text{C}$ ~ $60^{\circ}\text{C}$ ,当环境温度低于 $-20^{\circ}\text{C}$ 时,存在启动很慢、甚至无法正常工作的问题,其根本原因是低温下光源无法工作,从而导致原子磁传感器难以满足国防应用或野外作业需求。常规情况下,射频激励电路的压控振荡器输出频率随温度的升高而降低,同时功率放大器输出功率随温度的升高而增大。为了解决传感器的温度适应性问题,引入了温度反馈机制,以提高保持输出功率的稳定性。如图3所示,电路中引入负温度系数热敏电阻(negative temperature coefficient, NTC),将热敏电阻与控制压控振荡器频率和功率放大器功率的分压电阻并联,通过控制分压电阻两端电压,对输出频率和输出功率进行动态调节。例如,当环境温度升高时,热敏电阻阻值减小,使其对应两端的电阻分压降低,而压控振荡器输出频率随电阻分压的减小而增大,射频功放的输出功率随电阻分压的减小而减小,可见NTC热敏电阻的引入对射频激发的频率及功率随温度的漂移起到了温度补偿作用,最终可起到提高射频输出稳定性目的。

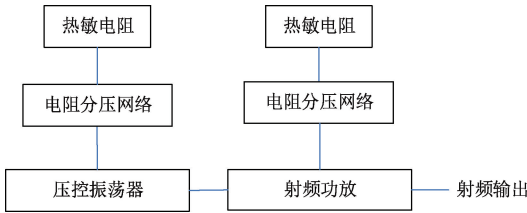


图3 铯原子灯的温度反馈机制

Fig. 3 Temperature feedback mechanism of Cesium lamp

### 2) 温控电路

本电路含有两个温控电路模块,分别对铯原子灯和铯原子吸收室进行温度控制,两个模块设计方案相同。为避免对磁场测量产生干扰,采用交流加热方式,通过信号发生器产生交流加热信号,并通过音频功放电路驱动探头内部的无磁加热丝。温度检测电路负责检测加热温度,恒温控制电路完成比例积分(proportional integral, PI)控制,通过改变信号发生器幅值来控制音频功放输出功率,进而控制加热温度。

### 3) 信号处理电路

本文采用自激振荡式磁信号处理技术,拉莫尔信号首先经过前置放大器处理后,通过自动增益控制(auto gain control, AGC)进行稳幅,随后进行中间级放大,之后经过 $90^{\circ}$ 移相电路送入探头内部的反馈线圈,通过正反馈实现自激振荡。同时,中间级输出信号通过比较器后整形成方波,输出给频率测量电路,进而得到对应的外界磁场值。

## 2 核心部件制备与参数优化

铯原子灯和铯原子吸收室是铯原子磁传感器的核心部件,二者从根本上决定了传感器的灵敏度和寿命。本文重点对长弛豫时间铯原子吸收室进行了仿真设计,对铯原子灯的温度适应性进行了改进与优化,据此完成两大核心部件的制备,并进行铯原子磁传感器的集成与参数优化。

### 2.1 铯原子吸收室仿真设计与制备

对真空未镀膜的铯原子吸收室而言,当饱和蒸汽压小于 $1\text{ mTorr}$ 时,气态铯原子平均自由程远大于气室尺寸,因此铯原子在互相碰撞之前会跟吸收室内壁碰撞从而退极化,自旋弛豫时间等于与内壁发生两次碰撞的时间间隔。当充有缓冲气体(He, Ne, Ar, Kr等)时,铯原子与缓冲气体相撞会减缓铯原子向内壁的扩散运动,同时增大铯原子之间的平均自由程,从而增大自旋弛豫时间。因镀石蜡的原子吸收室难以适用于野外工程应用,本文只考虑充缓冲气体的原子吸收室设计。

利用含有一个吸收项的扩散方程来对铯原子在缓冲气体中的分布进行建模<sup>[19]</sup>:

$$\frac{\partial n[x, y, z, t]}{\partial t} = D \nabla^2 n[x, y, z, t] - k \cdot n[x, y, z, t] \quad (1)$$

$n$ 为气态铯原子浓度的空间及时间分布, $D = D_0 p_0 / p$ 为某饱和蒸汽压下的气态铯原子的扩散系数,系数 $k$ 为铯原子与缓冲气体原子碰撞退极化的速率:

$$k = N \sigma \bar{v}_{rel} = N_0 \frac{p}{p_0} \sigma \bar{v}_{rel} \quad (2)$$

其中, $N$ 为缓冲气体浓度, $p$ 为缓冲气体压强, $N_0$ 为标准大气压 $p_0$ 下缓冲气体浓度, $\sigma$ 为铯原子与缓冲气体相撞的退极化截面, $\bar{v}_{rel}$ 为铯原子与缓冲气体运动的相对速度。

考虑圆柱形吸收室,长度 $L = 25\text{ mm}$ ,直径 $25\text{ mm}$ ,加热后温度 $319\text{ K}$ 左右,通过求解圆柱形坐标系下的偏微分方程,基于一阶贝塞尔函数得到气态铯原子浓度分布为:

$$n[r, z, t] = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} A_{ij} e^{-[(\mu_i^2 + \nu_j^2) D + k] t} J_0(\mu_i r) \cos(\nu_j z) \quad (3)$$

其中, $\nu_j = (2j - 1)\pi/L$ , $J_0(\mu_i a) = 0$ 与尺寸有关,由于初态浓度分布未知,因此只取一阶模,从而得到自旋弛豫时间为:

$$\tau = \frac{1}{(\mu_1^2 + \nu_1^2) D_0 \frac{p_0}{p} + N_0 \sigma \bar{v}_{rel} \frac{p}{p_0}} \quad (4)$$

根据铯原子在不同缓冲气体下的扩散系数与碰撞退极化截面数据<sup>[20]</sup>。由此求出不同参数下的铯原子本征

自旋弛豫时间理论值,如图4所示。由图4可得,当铯吸收室工作温度为46℃时,充入约70 Torr 氦气可获得最佳弛豫时间,约44.56 ms(22.44 Hz)。

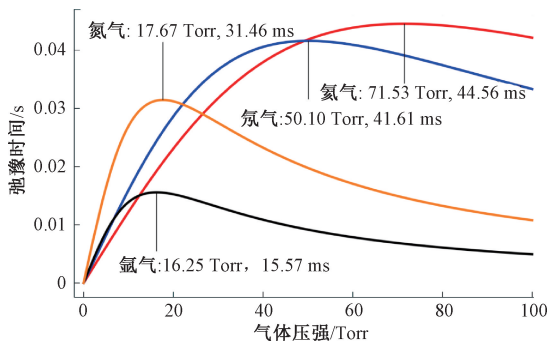


图4 铯原子在不同缓冲气体下本征弛豫时间仿真  
Fig. 4 Simulation of longitudinal relaxation time of Cesium atoms under different buffer gases

基于铯原子吸收室弛豫时间的仿真设计结果,完成了铯原子吸收室的制备,实物如图5所示。

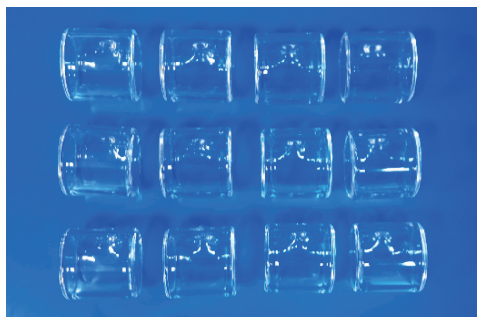


图5 铯原子吸收室样品

Fig. 5 Samples of Cesium atomic absorption cells

与无缓冲气体的铯吸收室相比,由于原子间相互碰撞展宽作用,充入缓冲气体的铯吸收室的铯原子吸收谱线会被展宽,且中心频率会产生一定频移,其频移大小与缓冲气体的压强呈正比,利用该关系可反演原子吸收室的实际充入压强精度<sup>[21]</sup>。图6为缓冲气体标称充入压强与实测压强的比较图,可见当缓冲气体标称充入压强分别为100 Torr、150 Torr、200 Torr、250 Torr、300 Torr时,根据吸收谱线压致增宽与频移特性实测的压强分别约为102 Torr、161 Torr、203 Torr、242 Torr、303 Torr,二者高度一致,实际充入压强误差小于8%。

利用自由弛豫拟合法对制备的吸收室本征弛豫时间进行了测试<sup>[22]</sup>。如图7所示,在与仿真相通的参数(气室尺寸 $\Phi 25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ ,温度46℃)下,充入70 Torr 氦气的铯原子吸收室弛豫时间约为24.03 Hz,与仿真结果

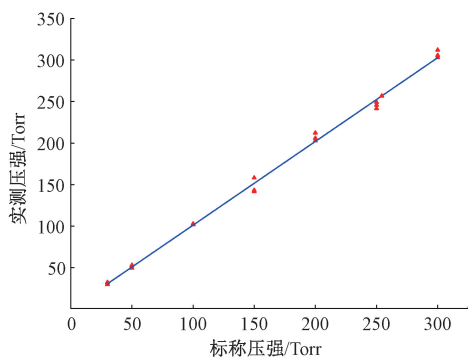


图6 原子吸收室标称充入压强与实际压强比较

Fig. 6 Comparison of nominal pressure and actual pressure

(22.44 Hz)基本一致。不同的是,仿真结果未考虑外磁场对吸收室弛豫时间的影响,而实测过程中施加的外磁场约为 $1\ \mu\text{T}$ ,这是实测的弛豫时间略大于仿真结果的可能原因。

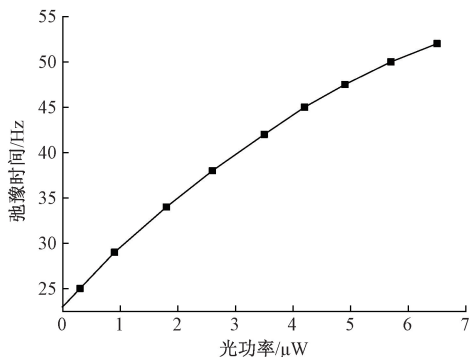


图7 铯原子吸收室本征弛豫时间测试

Fig. 7 Measurement of intrinsic relaxation time of Cesium atomic absorption cell

## 2.2 铯原子灯温度适应性改进

对于常规的碱金属原子灯泵类原子磁传感器而言,其工作温度范围主要受限于光源的正常工作温度范围。而限制铯原子灯工作温度范围的主要因素是射频激励源参数(激励频率或功率)易随温度变化产生波动,从而造成激励源与负载(铯灯泡)发生失谐。要实现铯原子灯泡的正常工作,必须保证射频激励源(激发频率与功率)与铯原子灯的匹配。首先射频激励源的激发频率需稳定在铯原子灯的谐振频率附近,否则原子灯无法注入能量,其次射频输出功率需保持恒定,功率偏低则原子灯无法点亮,功率偏高则会影响原子灯的输出谱线分布特性,使原子灯的输出信噪比大大降低。通过引入温度反馈机制,本文对铯原子灯输出的温度特性进行了改进,图8为改进后的铯原子灯实物。图9~11分别给出了铯原子灯改进前后的射频激发频率、射频输出功率和铯原子灯输出光功率的变化情况,3个图是在同一温度变化箱的温

控条件下测得的数据。改进前,当环境温度从-50℃~+70℃变化时,射频激发频率随温度升高而减小,输出功率随温度升高而增大,当温度低于-20℃时,铯原子灯输出光功率小于 2 mW,传感器因探头未获得足够的泵浦光功率而失效。改进后,当环境温度从-50℃~+70℃变化时,射频激发频率和输出功率波动幅度大幅减小,且输出光功率则基本稳定在 3 mW 以上。

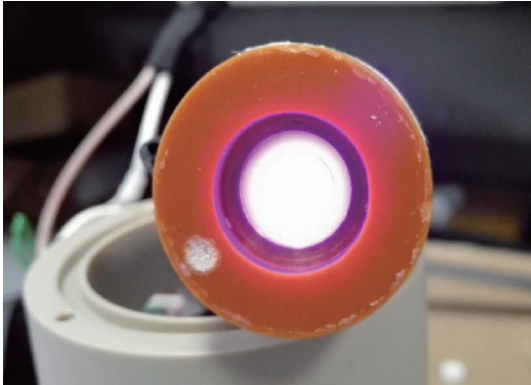


图 8 铯原子灯实物

Fig. 8 Prototype of Cesium lamp

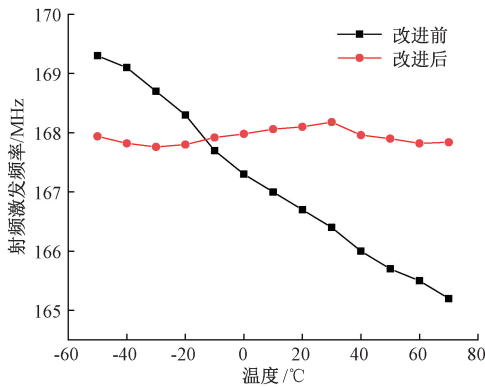


图 9 铯原子灯射频激发频率变化

Fig. 9 Variation of RF frequency of Cesium lamp excitation

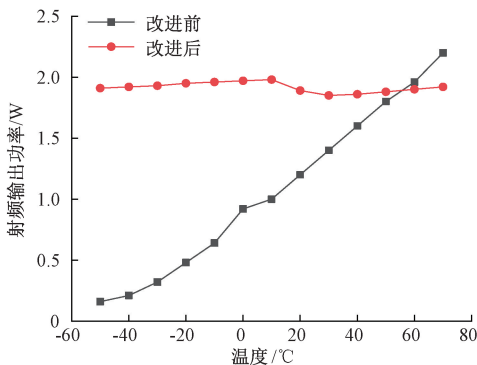


图 10 铯原子灯射频输出功率变化

Fig. 10 Variation of RF power of Cesium lamp excitation

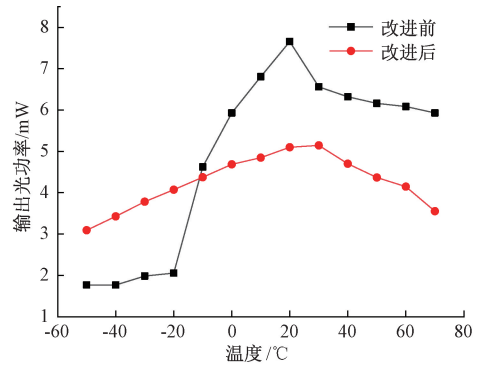


图 11 铯原子灯输出光功率变化

Fig. 11 Variation of output power of Cesium lamp

表 1 列出了改进前后的各参数标准差的变化情况,在设计的-50℃~+70℃的工作温度范围内,射频激发频率稳定性由 1.34 提高到 0.06,射频输出功率稳定性从 0.66 提高到 0.04,输出光功率的稳定性由 2.10 提高到 0.62,铯原子灯的输出稳定性得到大幅提升。

表 1 铯原子灯改进前后的输出特性波动(标准差)比较

Table 1 Comparison of output Fluctuation (standard deviation) before and after Improvement of Cesium lamp

状态	射频激发频率变化	射频输出功率变化	输出光功率变化
改进前	1.34	0.66	2.10
改进后	0.06	0.04	0.62

### 2.3 灵敏度影响参数优化

对磁异常探测应用而言,灵敏度是原子磁传感器的最重要指标,其物理含义是磁传感器可以探测到的最小磁场变化量。原子磁传感器灵敏度  $\delta_B$  可表示为<sup>[23]</sup>:

$$\delta_B = \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta\nu}{S/N} \quad (5)$$

其中,  $\gamma$  为旋磁比,对铯原子  $\gamma \approx 3.5 \text{ Hz/nT}$ ,  $\Delta\nu$  为磁共振线宽(半高半宽),  $S$  为磁共振信号幅度,  $N$  为磁共振信号噪声底(平坦部分)。可见提高原子磁传感器的灵敏度主要有如下技术途径:

1) 降低吸收室磁共振线宽  $\Delta\nu$ : 磁共振线宽与吸收室参数(尺寸、缓冲气体种类及压强)、光功率、反馈磁场大小等参数有关。上一节已对原子吸收室的尺寸和缓冲气体规格进行了仿真设计,以下重点分析吸收室工作温度对传感器灵敏度的影响。

2) 增加拉莫尔信号幅度  $S$ : 信号幅度通常也与吸收室参数、光功率、反馈磁场大小等参数有关,但影响趋势通常与其对磁共振线宽的影响趋势相反,呈相互制约关系。例如,通过提高光源功率可以增强拉莫尔信号幅度,但会造成共振线宽的展宽。通过提高吸收室工作温度可

以增大原子数密度,进而增大拉莫尔信号幅度,但原子运动速度也会加快,弛豫时间也会相应缩短,不利于提高传感器灵敏度。因此需对设计参数进行优化。

3)降低系统噪声  $N$ : 系统噪声主要包括光源噪声和电路噪声(包括探测器暗电流噪声、反馈电阻噪声、放大器电压电流噪声等)两部分。对于基于铯原子灯的磁传感器工作系统来说,光源噪声远高于电路噪声<sup>[17]</sup>,而光源噪声主要取决于铯原子灯的光子散粒噪声(正比与光电流大小)<sup>[24]</sup>,因此系统噪声主要决定于光源的光子散粒噪声。

围绕着原子磁传感器灵敏度的提升,开展了传感器探头设计参数的优化,重点研究了反馈磁场大小和吸收室温度等对传感器灵敏度的影响。对于铯原子灯激励的磁传感器系统来说,原子灯的调谐范围较小,相比于磁共振线宽和信号幅值的变化,系统本底噪声的波动可忽略。图12为利用频谱仪(型号HF2LI)测试了本文所研制的低噪声铯原子灯噪声,平坦部分约为  $90 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,综合电路噪声的分析<sup>[17]</sup>,可认为传感器的系统噪声  $N$  约为  $90 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。由于工作温度对磁共振线宽和信号幅值的影响趋势方向相反,令  $\beta = \Delta\nu/S$ ,  $\beta$  为任意单位(AU),本文提出以  $\beta$  值大小来评估铯原子灯激励的铯原子磁传感器灵敏度优劣, $\beta$  值越小,传感器的灵敏度越高,反之则越低。

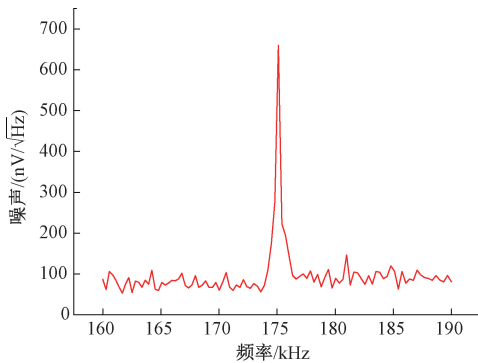


图12 铯原子灯噪声测试结果

Fig. 12 The test result of of Cesium lamp's noise

如图13所示,分别给出了在反馈磁场不变(1.5 V)情况下,磁共振线宽、信号幅值和  $\beta$  值随吸收室工作温度变化的关系曲线。随着工作温度的升高,三者均存在最优值,但最佳温度点不尽相同,磁共振线宽约在 48℃ 获得最优值,信号幅值在 54℃ 获得最优值,而  $\beta$  最优值则为 52℃。根据式(5),比较3个工作温度点对应的传感器灵敏度,如表2所示。可见,在 52℃ 工作温度下,传感器获得最优灵敏度,约为  $108.4 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,与  $\beta$  值最优工作温度点位置一致。

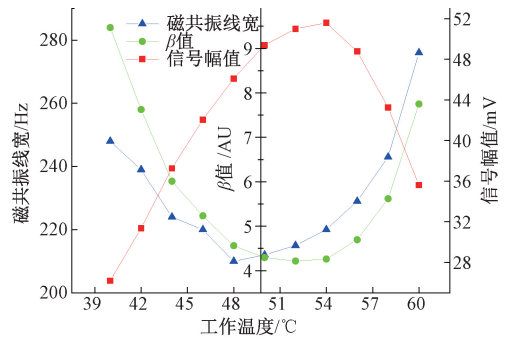


图13 磁共振线宽及信号幅值与工作温度关系

Fig. 13 Magnetic resonance linewidth and signal amplitude depend on different operating temperatures

表2 不同工作温度下的磁传感器灵敏度

Table 2 Magnetometer sensitivity depends on different operating temperatures

工作温度 /℃	磁共振线宽 /Hz	信号幅值 /mV	$\beta$ 值 /AU	灵敏度 /(fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ )
48	210	46.10	4.56	117.1
52	215	51.00	4.22	108.4
54	220	51.58	4.26	109.7

图14给出了在吸收室工作温度(52℃)一定情况下,原子传感器磁共振线宽、信号幅值和  $\beta$  值在不同反馈磁场幅值下的变化情况。可见,磁共振线宽和信号幅值均随反馈磁场幅值的增大而增大, $\beta$  值则均存在最小值。当反馈磁场幅值为 1.8 V 时,传感器获得最优灵敏度,约为  $100.3 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,该工作点与  $\beta$  最小值对应的反馈磁场值一致。

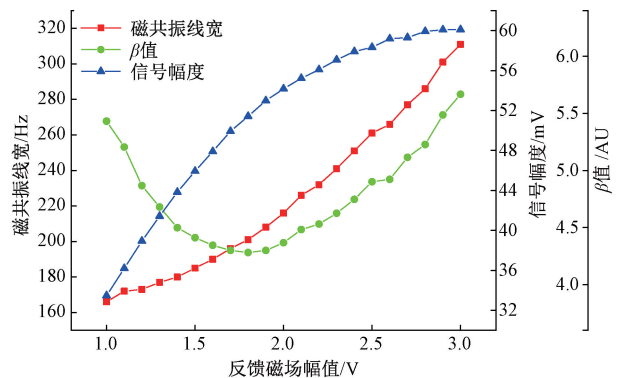


图14 磁共振线宽及信号幅值与反馈磁场关系

Fig. 14 Magnetic resonance linewidth and signal amplitude depend on different feedback magnetic fields

在完成传感器参数优化后,利用标准磁场产生装置(型号LC-CPBT-W7)对铯原子磁传感器样机的灵敏

度进行了实际测试。由于环境噪声大于传感器的固有噪声,利用两个传感器做平行试验,通过自相关处理后可将环境噪声基本扣除,以此来评估每个传感器的噪声水平。测试场景如图 15 所示,探头置于标准磁场产生装置均匀区内,电子单元放于屏蔽筒外,待测标准磁场约为 50 000 nT。

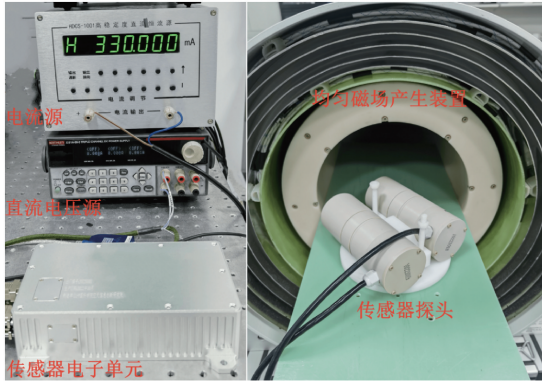


图 15 传感器灵敏度测试场景

Fig. 15 Scenario of magnetometer sensitivity testing

测试结果如图 16 所示,红线和蓝线分别为探头 1 和探头 2 的自功率谱曲线,黑线为两探头做自相关后的功率谱曲线。可见在 1 Hz 处,传感器的灵敏度约为  $140 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,结果与前述所采用的间接测试方法基本相符。实测结果略低于间接测试方法的主要原因可能是即使采用自相关方法,也无法把环境噪声完全消除。

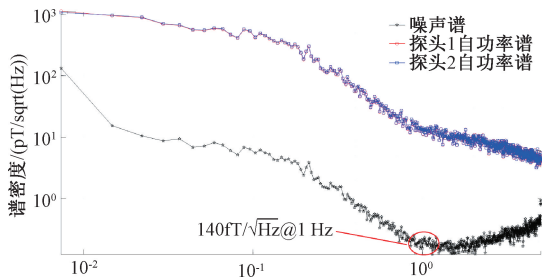


图 16 铯原子磁传感器灵敏度测试结果

Fig. 16 Results of magnetometer sensitivity testing

### 3 结 论

本文针对航空磁测应用需求,利用温度反馈机制解决铯原子灯低温无法工作的问题,提出并研制了一种宽幅工作温度范围的高灵敏度铯原子磁传感器。经测试,传感器的工作温度范围达到  $-50^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$ ,工作温度范围内铯原子灯输出光功率稳定性由  $2.10$  (标准差) 提升至  $0.62$ 。在  $50\,000 \text{ nT}$  背景磁场下,铯原子磁传感器实测灵敏度达  $140 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ Hz}$ ,指标水平优于目前国际最先进的商用产品(G-824A)。

### 参考文献

- [1] HERNDON J. Origin of earth's magnetic field, its nature and behavior, geophysical consequences, and danger to humanity: A logical progression of discoveries review[J]. 2022, 10(6): 529-562.
- [2] CHEN Q, SUN Q, LIAO L, et al. Magnetic characteristics of Chinese archaeological bricks and their implications for archaeomagnetism[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11:1272317.
- [3] LE G, KNIPP D, RASTÄTTER L, et al. Next generation magnetic field measurements from low-earth orbit satellites enable enhanced space weather operations[J]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2022, 9: 1076892.
- [4] ROMALIS M. Optically pumped magnetometers for biomagnetic measurements [M]. Flexible High Performance Magnetic Field Sensors; On-Scalp Magnetoencephalography and Other Applications. Cham: Springer International Publishing, 2022: 3-15.
- [5] OELSNER G, IJSSELSTEIJN R, SCHOLTES T, et al. Integrated optically pumped magnetometer for measurements within earth's magnetic field[J]. Physical Review Applied, 2022, 17(2): 024034.
- [6] LI W, HUANG P, DING Z, et al. Parameter optimization for the induction magnetometer of 10 kHz to 100 kHz[J]. IEEE Access, 2022, 10: 21169-21177.
- [7] HRAKOVA D, RIPKA P, KMJE Ć T. Enhancing performance of fluxgate sensors using annealed nanocrystalline core [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 59(9): 1-9.
- [8] MA N, CHEN S, ZHANG S. Proton magnetometer sensor design and its performance [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 734: 012028.
- [9] SAARI M, SAKAI K, KIWA T, et al. A sensitive magnetometer utilizing high-Tc SQUID for magnetic property characterization[J]. Microsystem Technologies, 2021, 27: 1-8.
- [10] ALEXANDROV E B. Recent progress in optically pumped magnetometers [J]. Physica Scripta, 2003, 2003(T105): 27.
- [11] FENG Y, ZHANG Q, YAOXIN Z, et al. An improved aeromagnetic compensation method robust to geomagnetic gradient[J]. Applied Sciences, 2022, 12: 1490.
- [12] 吕禹萱,雷华明. 磁异常探测中载体干扰磁场 RLS 补偿方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 96-104.

LYU Y X, LEI H M. RLS method for carrier interference

- compensation in magnetic anomaly detection[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(3):96-104.
- [13] ZHENG Y X, LI S, XING K, et al. A novel noise reduction method of uav magnetic survey data based on CEEMDAN, permutation entropy, correlation coefficient and wavelet threshold denoising [J]. *Entropy*, 2022, 36(3):96-104.
- [14] YOUNES M, ATTOU A, ABDELHALIM M, et al. Aeromagnetic data of the Kelâat M'Gouna inlier (Jbel Saghro, Eastern Anti-Atlas, Morocco): Geotectonic and mining implications [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2022, 197: 104744.
- [15] BLOOM A L. Principles of operation of the rubidium vapor magnetometer[J]. *Applied Optics*, 1962, 1(1): 61-8.
- [16] LU Y, ZHAO T, ZHU W, et al. Recent progress of atomic magnetometers for geomagnetic applications [J]. *Sensors*, 2023, 23(11): 5318.
- [17] 刘雷松, 张乐, 卢远添, 等. 铯光泵磁力仪光电检测电路噪声特性研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(9):203-210.
- LIU L S, ZHANG L, LU Y T, et al. Research on noise characteristics of the photoelectric detection circuit of optically pumped cesium magnetometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(9):203-210.
- [18] SUTTER J U, LEWIS O, ROBINSON C, et al. Recording the heart beat of cattle using a gradiometer system of optically pumped magnetometers [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 177: 105651.
- [19] FRANZ F A, E LÜSCHER. Spin relaxation of optically pumped cesium [J]. *Physics Letters*, 1964, 7(4): 277-278.
- [20] LEGOWSKI S. Relaxation of optically pumped cesium atoms by different buffer gases [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1964, 41(5): 1313-1317.
- [21] DRISKELL T, HUANG M, CAMPARO J. Measuring buffer-gas pressure in sealed glass cells: An assessment of the KSK technique [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(7): 928-937.
- [22] SCHOLTES T, WOETZEL S, IJSSELSTEIJN R, et al. Intrinsic relaxation rates of polarized Cs vapor in miniaturized cells [J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(1): 211-28.
- [23] JIMENEZ M R, GRIFFITH W C, WANG Y J, et al. Sensitivity comparison of Mx and frequency-modulated bell-bloom Cs magnetometers in a microfabricated cell[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(2): 372-378.
- [24] GROEGER S, PAZGALEV A S, WEIS A. Comparison of discharge lamp and laser pumped cesium magnetometers[J]. *Applied Physics B*, 2005, 80(6): 645-654.

### 作者简介



卢远添(通信作者), 2005年于西安交通大学获得学士学位, 2008年于中国科学院电子学研究所获得硕士学位, 现为中国科学院空天信息创新研究院副研究员, 主要研究方向为高灵敏度原子磁传感器技术及应用。

E-mail: luyt@aircas.ac.cn

**Lu Yuantian** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2005, received his M. Sc. degree from the Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences (IECAS) in 2008. He is currently an associate research fellow at the Aerospace Information Research Institute (AIR) under the Chinese Academy of Sciences (CAS). His main research interests include high sensitive atomic magnetometer technology and its application.