

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514024

铯光泵原子磁力仪研制及应用验证*

史彦超^{1,2}, 缪培贤^{1,2}, 蔡志伟^{1,2}, 杨旭红^{1,2}, 张金海^{1,2}

(1. 兰州空间技术物理研究所 兰州 730000; 2. 真空技术与物理全国重点实验室 兰州 730000)

摘要: 铯光泵原子磁力仪是一种基于光泵浦与磁共振效应的量子精密测量设备,通过谱灯激发铯原子并探测其自旋拉莫尔进动实现磁场测量。该设备具有测量灵敏度高、响应速度快、结构紧凑等优势,广泛应用于地质勘探、资源探测及国防安全等领域。系统开展了铯光泵原子磁力仪的整机研制工作,解析了设备的核心工作原理,并突破了3项关键技术:1)磁洁净探头设计,通过优化探头几何结构与材料,有效抑制外部干扰磁场,提升测量信噪比;2)无磁恒温控制系统,采用高精度温控模块设计,确保原子极化过程的稳定性;3)低相位噪声自激振荡电路,通过优化电路参数与反馈控制策略,降低系统噪声,提升测量灵敏度。在整机集成过程中,完成了谱灯光源、传感器探头及信号处理模块的协同优化,并通过国家计量机构校准验证了性能指标;测量范围覆盖10 000~120 000 nT,灵敏度达0.6 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$,技术参数达到国际先进水平。野外环境实测结果表明,该设备在地磁复杂的场景下仍能保持稳定性能,有效满足弱磁探测领域对高精度、高可靠性的需求。本研究为国产高精度磁测装备的自主化提供了技术支撑,对推动量子精密测量技术在资源勘探与国防领域的应用具有重要意义。

关键词: 铯光泵磁力仪; 磁场测量范围; 灵敏度; 地磁测量

中图分类号: TH762

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460·40

Development and application of the cesium optically pumped atomic magnetometer

Shi Yanchao^{1,2}, Miao Peixian^{1,2}, Cai Zhiwei^{1,2}, Yang Xuhong^{1,2}, Zhang Jinhai^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China; 2. National Key Laboratory on Vacuum Technology and Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The cesium optically pumped atomic magnetometer is a quantum precision measurement device that operates based on optical pumping and magnetic resonance effects. It detects magnetic fields by exciting cesium atoms with a spectral lamp and probing their spin Larmor precession. This device exhibits advantages such as high measurement sensitivity, rapid response, and compact structure, and is widely applied in geophysical exploration, resource detection, and national defense security. This study systematically investigates the development of the cesium optically pumped atomic magnetometer, focusing on the core operational principles and breakthroughs in three key technologies: 1) The design of a magnetically clean probe, which optimizes the geometric structure and material to suppress external magnetic interference and enhance signal-to-noise ratio; 2) A magnetic-free temperature control system, employing high-precision temperature regulation modules to ensure the stability of atomic polarization; and 3) A low-phase-noise self-oscillating circuit, achieved through optimization of circuit parameters and feedback control strategies to minimize system noise and improve measurement sensitivity. During the integrated system development, the spectral lamp, sensor probe, and signal processing modules were co-optimized. Performance metrics were verified through calibration by 1st Class Weak Magnetic Metering Station of National Defense Metrology Station, demonstrating a measurement range of 10 000~120 000 nT and a sensitivity of 0.6 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$, which meet international advanced standards. Field tests under complex geomagnetic conditions confirmed the device's stable performance, effectively addressing the demands of weak magnetic field detection for high precision and reliability. This research provides technical support for the domestic development of high-precision magnetic measurement equipment and contributes to the advancement of quantum precision measurement

收稿日期: 2025-05-11 Received Date: 2025-05-11

* 基金项目: 甘肃省科技计划项目(24YFGA055)、国家自然科学基金项目(12104198)、甘肃省人才项目(2025QNGR48)、中国航天科技集团有限公司钱学森青年创新基金项目(2023-36)资助

technologies in resource exploration and national defense applications.

Keywords: cesium optically pumped atomic magnetometer; magnetic measurement range; sensitivity; geomagnetic measurement

0 引 言

磁场测量技术是研究磁现象和有关物理现象的重要手段。高精度的弱磁测量技术已广泛应用于矿产勘探、海洋磁测、航空物探、军事磁异反潜等领域^[1-4]。国际上目前常用的弱磁测量仪器主要为磁通门磁力仪、质子磁力仪、原子磁力仪、超导磁力仪、光泵磁力仪。各类磁力仪因工作原理和技术指标不同而偏重于不同的应用领域^[5-11]。光泵磁力仪是目前地磁强度范围下实用性能较好的磁力仪,该类磁力仪基于光泵浦与磁共振效应实现磁场测量功能^[12]。与其他种类磁力仪相比,光泵磁力仪具有无零点漂移、采样率高、可连续测量,无需校准标定等优点^[5]。

目前工程应用程度较高的光泵磁力仪按照工作介质不同可分为氦、钾、铯光泵磁力仪^[13-15],其中氦、钾光泵磁力仪一般采用锁定跟踪式方案^[13],系统响应速度较慢,且在测量快速变化或剧烈波动的磁场时易失锁,因此该类产品主要用于地面平台。铯光泵原子磁力仪一般选用自激振荡方案^[14],响应速度较快,可应用于车载、机载等移动平台,具有更为丰富的应用场景。目前国际上具有代表性的铯光泵磁力仪产品主要为加拿大 Scintrex 公司生产的 CS-3 型、CS-L 型、CS-VL 型铯光泵原子磁力仪,以及美国 Geometrics 公司生产的 G822A 型航空铯光泵原子磁力仪、G-882 海洋铯光泵原子磁力仪、G-858 型手持式铯光泵磁力仪、MagArrow 无人机载铯光泵磁力仪,上述型号的磁力仪产品均具有高灵敏度和低噪声的特点,已应用于航空、海洋和地面测量等诸多领域^[16]。目前美国和加拿大均规定灵敏度优于 20 pT 的磁力仪对我国严格禁运。

近年来,国内铯光泵磁力仪的研发与生产取得了显著进展,尤其是在高精度磁场测量领域。国内研究团队已成功研制出磁场测量范围为 20 000 ~ 100 000 nT、峰-峰噪声值低至 0.001 7 nT 的铯光泵磁力仪整机,满足了高精度磁场测量的需求^[17]。然而,尽管技术不断突破,国产铯光泵磁力仪在抗干扰能力和环境适应性方面仍与国际先进水平存在一定差距,特别是在航空导航等高端应用领域,市场占有率较低^[18]。随着国内对高精度磁场测量设备需求的增长,尤其是在深部矿产资源勘探和航空导航领域,铯光泵磁力仪的市场需求呈现上升趋势。

兰州空间技术物理研究所针对国内磁场测量领域对高性能碱金属光泵磁力仪的迫切需求现状,对标国际先进磁场测量产品,开展了铯光泵磁力仪研制工作,在研制

过程中突破磁洁净探头设计、无磁恒温控制与低相位噪声自激振荡 3 项关键技术,完成了磁力仪整机标准化、便携化集成。磁力仪技术指标经国防科技工业弱磁一级计量站校准达到国际先进产品水平。磁力仪在野外环境下完成地磁测量应用验证。

1 工作原理

铯光泵磁力仪选用铯原子作为工作介质,采用光泵浦技术和光磁共振实现磁场测量功能。

在外界弱磁场作用下,铯原子的超精细能级结构产生塞曼分裂,塞曼子能级之间的间距与外磁场强度成正比,通过测量塞曼能级跃迁频率即可确定外磁场强度。

在热平衡状态下,粒子能级布居遵守玻耳兹曼分布,对外部磁场的响应非常微弱,难以实现磁场测量功能。光泵浦技术通过光与原子的相互作用使得原子遵循选择定则在磁子能级之间跃迁最后汇聚到基态能级磁量子数绝对值最大的态上,使原子布居在宏观上呈现偏极化状态,从而显著增强跃迁信号强度。以铯原子为例,在左旋圆偏振光照射下,铯原子跃迁磁量子数变化为 $\Delta m_F = +1$,基态中除 $m_F = +4$ 以外的各能级上的原子被激发到 $6^2P_{3/2}$ 的各态上,跃迁过程如图 1 所示。处于激发态的原子通过自发跃迁返回到基态,而返回到基态各能级上的几率基本相等。由于泵浦光持续存在,最终原子将全部被泵浦至 $|F = 4, m_F = +4|$ 能级,完成偏极化态原子制备^[15]。此时,在垂直于外磁场的方向上加一个

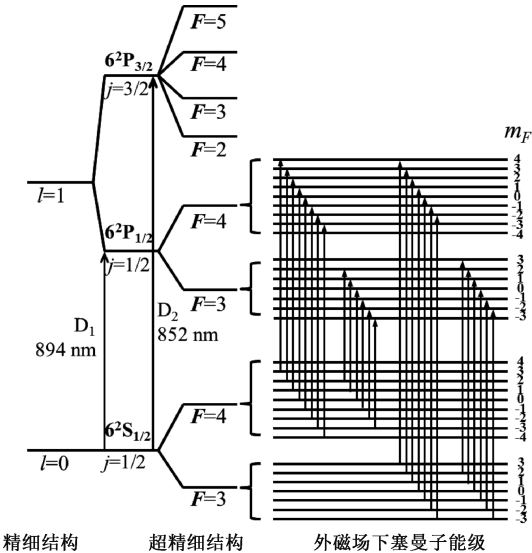


图 1 铯原子能级结构

Fig. 1 Cesium atomic energy level

射频磁场,当射频磁场的频率等于相邻塞曼子能级间的跃迁频率时,将产生磁共振,造成去取向效应,从而使塞曼子能级上的原子产生受激跃迁。而由于泵浦光的存在,原子会重新吸收光跃迁到激发态,从宏观上可通过观察光吸收现象而确定此时的射频场频率,进而确定外界磁场强度^[14]。

磁共振信号通过探测透过铯原子蒸汽的泵浦光强度变化实现。当射频频率满足共振条件时,原子对特定偏振态泵浦光的吸收能力显著增强,导致透射光强度在共振点快速下降,该光强变化由高灵敏度光电探测器实时监测并转换为电信号。

磁力仪采用自激振荡工作模式^[14]实现高灵敏度磁场测量。光电探测器输出的共振信号经选频放大后,被直接反馈至产生射频磁场线圈。当环路增益 >1 且相位条件匹配时,系统在原子塞曼跃迁频率处自发建立并维持稳定的射频振荡。此振荡频率精确且唯一地对应于外磁场作用下的塞曼子能级间跃迁频率,通过高精度频率计直接测量该频率即可实时、连续地确定外界磁场强度。

为实现磁场信号的高质量测量,在铯光泵磁力仪设计过程中对光泵浦、振荡回路、信号探测和环境温度进行了精细控制。选用具备足够光强和优异光强稳定性的铯谱灯作为光源,其发出的光包含 894 nm 的 D_1 线和 852 nm 的 D_2 线。由于 D_1 线泵浦的最大极化值是 D_2 线泵浦的 2 倍^[19],仪器选用 D_1 线泵浦以实现最高泵浦效率和更强的磁共振信号幅度。自激振荡电路经优化设计,反馈回路的增益和相位特性确保系统仅在原子共振频率附近极窄带宽内起振并维持低相位噪声的稳定振荡,配合选频放大器中心频率和通带宽度的优化设置,在最大化信号强度的同时有效抑制带外噪声,保障高分辨率磁场测量。光电探测器具备高响应速度和灵敏度以准确捕捉透射光强变化,前置放大器具有极低噪声特性,显著降低了光信号采集放大过程中的额外电子学噪声,提升了系统整体信噪比和探测灵敏度。铯谱灯和铯原子吸收气室均采用无磁恒温控制技术,严格维持工作温度恒定,以抑制因温度波动引起的原子密度变化、共振信号幅度漂移及线宽变化,确保测量精度和长时间工作稳定性。

2 技术方案

兰州空间技术物理研究所研制的铯光泵磁力仪选用自激振荡 M_x 模式^[14]实现磁场测量功能。该方案技术优势在于磁力仪光检信号直接输出等于拉莫尔频率的正弦振荡信号,与激励磁场形成闭合回路,可以自激响应外界磁场的变化,当外界磁场突变较大时也不会存在失锁的问题。铯光泵磁力仪结构框图如图 2 所示,整体系统可

分为探头和电路两大部分。其中探头是通过铯原子量子效应实现磁场-信号转换的物理部分,内部集成了由铯谱灯、透镜、偏振元件、 $1/4$ 波片、吸收泡、加热组件、射频线圈、光检元件组成的磁洁净光学系统。

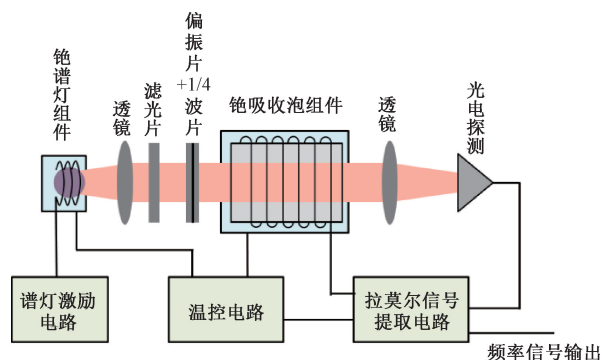


图2 铯光泵原子磁力仪系统结构

Fig. 2 Optically pumped atomic cesium magnetometer

磁力仪工作过程为:铯谱灯经激励后发出包含波长为 894 nm 的 D_1 和波长为 852 nm 的 D_2 线的光束;光束通过透镜准直后平行于光轴;再通过滤光片筛选出仅包含 D_1 线的单色光;随后偏振片将单色光转变成线偏振光;经 $\lambda/4$ 玻片后变成圆偏振光。圆偏振光照射到铯吸收泡内发生光泵作用,经过一段时间(光泵时间)后使铯原子都处于基态的同一个塞曼子能级上,即发生了原子的偏极化,该过程中一部分光强被铯原子吸收。而铯吸收泡外加的射频磁场使发生偏极化的铯原子去极化并重新吸收光强。此时光轴方向的光强是一个以射频磁场频率变化的调制信号。光线通过吸收泡后经过透镜聚焦于光电探测器件上,光敏器件检测交变的光信号并转变为电信号,电信号经拉莫尔信号提取电路实现信号放大和移相以后加到射频线圈上形成反馈回路,系统发生自激振荡。振荡稳定时,射频磁场频率等于塞曼跃迁频率(拉莫尔进动频率),通过检测此时的信号频率即可确定被测外磁场强度。

磁力仪探头作为磁场测量的核心敏感单元,其性能直接决定系统技术指标上限。探头采用全无磁材料体系设计,所有光学组件均选用特种胶木复合材料精密加工而成,通过尼龙螺钉与环氧胶接复合工艺实现微应力固定。该设计在消除铁磁性干扰的同时,确保光学元件相对位置稳定性,为高精度的量子极化态制备提供高洁净度物理环境。

谱灯和吸收泡是物理探头中的 2 个关键组件,其中谱灯作为光源直接决定光泵浦的效率以及光电探测输出信号的大小,吸收泡中的铯原子是产生光泵浦效应和磁共振效应的工作介质,因此谱灯发光模式改进和吸收泡工作参数优化是实现高精度磁力仪的重要研究内容。

铯谱灯主要由发光灯泡、射频激励线圈和加热模块组成,采用发射天线模式激励线圈产生约 165 MHz 的射频场激励灯泡发光,球形灯泡通过精密螺纹杆固定于射频线圈中心。谱灯整体遵循磁洁净规范,并采用无磁加热技术维持工作温度稳定性。通过谱灯激励电路调节射频频率及功率,确保铯谱灯工作于环模状态^[20]且发光稳定,铯谱灯环模发光照如图 3 所示。

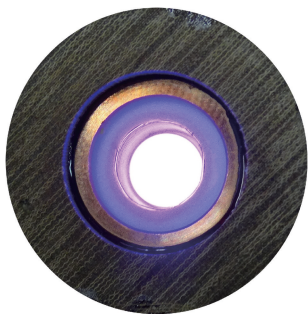


图 3 铯谱灯环模发光照

Fig. 3 Photograph of the cesium lamp operating in its ring mode

铯吸收泡选用透光率高的柱状玻璃气室,气室内充有铯金属及缓冲气体。缓冲气体的作用是减少极化铯原子与吸收泡内壁的碰撞几率,降低因碰撞带来的弛豫效应,提高铯原子泵浦效率,同时能避免辐射陷阱现象。磁力仪研制过程中通过试验对铯吸收泡的尺寸、铯金属含量、缓冲气体种类、配比、气压等参数进行优化,最终确定吸收泡尺寸为 $\Phi 25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,内部充有特定气压的 N_2 作为缓冲气体。吸收泡实物照片如图 4 所示。



图 4 吸收泡实物照

Fig. 4 Photograph of the absorption cell

铯光泵磁力仪的电子学系统结构框图如图 5 所示。电子学系统按功能主要分为谱灯射频激励电路、控温电路、拉莫尔信号处理电路等模块。

在谱灯点亮过程中,如何确保振荡频率稳定性、光谱线形对称性及环模发光模式控制是激励电路设计的技术难题。本研究基于科尔皮兹(Colpitts)振荡电路架构^[21],

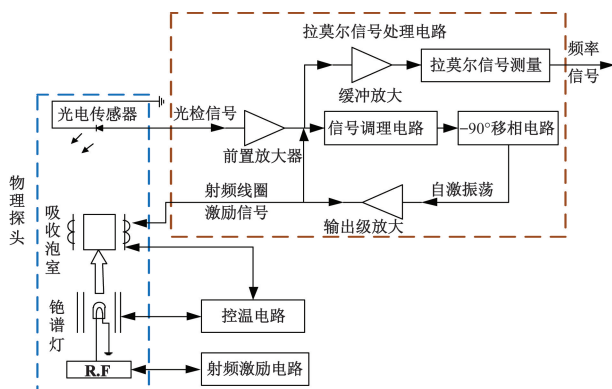


图 5 电子学系统结构

Fig. 5 The electronic circuit system

提出的优化设计方案如图 6 所示。该电路以共基极组态的高频大功率晶体管为核心器件,结合集电极-基极偏置网络实现信号放大与相位补偿的协同控制,通过双电容单电感构成的谐振回路。电路设计重点在于通过空气可变电容器 C1 的调节实现振荡频率在 165 MHz 附近的连续可调性,同时通过科尔皮兹电路结构优化实现频率调节与反馈系数的独立控制,从而提升频率稳定性。为抑制温度漂移对振荡性能的影响,电路选用温度系数低、漏电流小的空气电容作为关键元件,配合单层密绕电感线圈优化回路 Q 值,降低损耗与温度敏感性,针对不同铯灯泡及灯室,增强了电路可调试性。针对电源波动对振荡电路的干扰,谱灯激励电路配套引入 3 端稳压源与多级滤波电路,有效保障振荡电路的供电稳定性。此外,谱灯通过恒温控制模块将铯灯泡工作温度维持在环模发光状态,配合反馈电阻与晶体管 Q1 工作点的精确调节,实现激励功率与灯泡寿命的动态平衡。实验结果表明,该设计方案在保证光谱线形对称性的同时,显著提升了光强稳定性,为高稳铯光泵磁力仪提供了可靠的激励源。

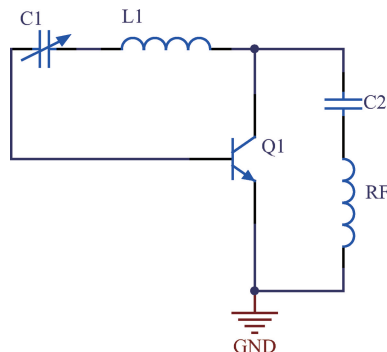


图 6 铯谱灯激励振荡电路原理

Fig. 6 The excitation oscillation circuit for cesium spectral lamp

自激式铯光泵原子磁力仪的拉莫尔信号处理电路设计面临微弱光磁共振信号检测、高信噪比要求、相位精确

控制及宽频带稳定性等技术难点, 本文通过微弱信号的有效提取与电流-电压 (I - V) 转换, 实现了光电检测电路的阻抗匹配与噪声抑制, 保障了移相反馈回路的相位调整精度以及自激振荡的起振条件与频率稳定性, 最终实现低相位噪声自激振荡。该技术的核心在于构建高精度、高稳定性的振荡环路以匹配物理探头中原子系统的拉莫尔频率。

在该电路具体设计方案中, 针对微弱光磁共振信号 (mV 级别) 的检测需求, 系统选用高输入阻抗、低噪声的前置放大器实现信号源与负载的阻抗匹配, 通过差分放大结构抑制共模干扰并提升信号保真度, 同时结合自动增益控制 (automatic gain control, AGC) 功能确保输出信号动态范围的稳定性。移相反馈环节通过模拟开关控制射频线圈的接通状态, 利用差分运放与 RC 网络实现 -90° 相位调整, 以满足自激振荡的相位条件。为适应 $35 \sim 350 \text{ kHz}$ 的工作频段, 电路设计中兼顾通带平坦性与噪声抑制能力需求, 通过多级放大 (前置放大、中间级放大) 逐步提升信号幅度, 确保满足自激条件。最终, 通过比较器将自激振荡形成的正弦波转换为方波信号输出, 供后续频率计实现磁场强度的量化测量。电路模块设计集成了噪声抑制、相位精确控制与动态范围优化等功能, 保障了系统在宽频带范围内的稳定性和测量精度, 为高精度磁力探测提供了鲁棒性技术支撑。

磁力仪正常工作时, 铯谱灯与吸收泡需要加热以维持工作温度, 在设计控温电路时需通过闭环反馈精准调控温度波动, 同时避免加热过程对磁场测量的干扰。针对谱灯和吸收泡的差异化温控要求, 本文提出了无磁恒温控制技术, 通过双通道协同控温设计, 在温度稳定性、磁场干扰抑制及动态响应等多方面实现协同优化。

针对铯谱灯温控需求, 控温电路采用如图 7 所示的脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 驱动技术方案^[22]。系统采用双绞加热丝密绕于灯身结构, 通过铜箔覆盖消除杂散磁场干扰, 交流信号产生电路采用 PWM 控制芯片生成 11 kHz 的方波信号, 驱动桥接负载功率放大电路 (bridge-tied load, BTL) 调节开关时间比率维持频率稳定性, 从而精确控制加热电流的输出, 利用三极管与金属氧化物半导体场效应晶体管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET) 组合实现功率放大以调节加热丝电流, 从而维持恒定温度。加热温度高低可通过加热丝电阻阻值来反馈, 信号调理电路采用滤波电路结合运算放大器构成的积分电路, 对加热丝电阻进行采集与处理, 经过 AGC 信号放大电路自动调节 PWM 信号的产生及关断, 最终通过功率放大电路在加热丝上的电流形成闭环反馈控制, 实现预期的控温效果。该控温电路设计方案能够确保灯温在复杂工况中保持稳定。

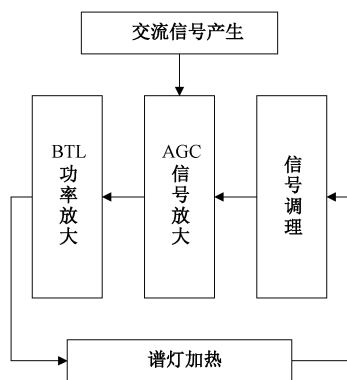


图 7 铯谱灯控温电路原理

Fig. 7 The temperature control circuit for the cesium lamp

吸收泡控温电路选用同样基于闭环反馈架构的自动增益控制技术, 在温度变化的同时自动改变加热丝加热功率, 实现连续平滑的温度调节。系统将双绞加热电阻丝密绕于玻璃气室外壁, 加热过程通过函数信号发生器产生 11 kHz 的正弦交流信号, 叠加至直流电源后驱动互补功率输出电路, 利用大功率三极管与场效应管构成的驱动电路实现加热丝功率调节信号。信号调理电路及 AGC 信号放大电路采用滤波电路结合运算放大器构成积分电路对加热丝电流信号进行采集及自动增益调整, 并控制交流信号发生器产生的正弦波信号, 最终通过互补功率放大电路作用于加热丝, 形成闭环反馈控制。吸收泡外裹保温材料提升温度均匀性。

根据上述无磁恒温控制技术方案, 铯谱灯工作温度可稳定在 80°C , 吸收泡温度稳定在 55°C , 铯光泵磁力仪性能指标稳定。谱灯和吸收泡工作温度变化如图 8 所示。

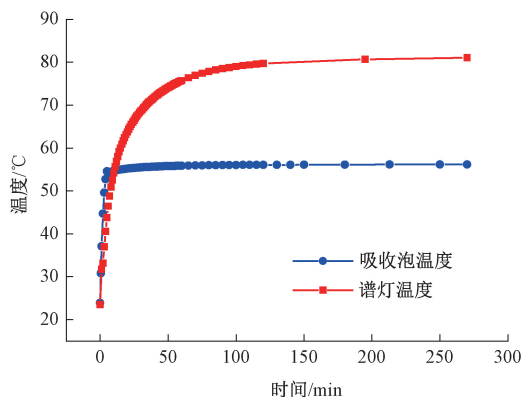


图 8 铯谱灯和吸收泡工作温度变化曲线

Fig. 8 Operating temperature variation curves if the cesium spectral lamp and absorption cell

研制的铯光泵磁力仪整机实物照如图 9 所示。其中左侧物理探头内所有组件和外壳均使用无磁材料加工。

右侧电子学部分内含集成印制电路板 (printed circuit board, PCB) 及其固定结构,外壳使用金属材料进行屏蔽。为消除磁力仪正常工作时自身静态磁场干扰,探头与电子学系统通过 3~5 m 长距无磁线缆进行连接。



图9 研制铯光泵磁力仪实物

Fig. 9 Photograph of designed optically pumped atomic cesium magnetometer

3 指标校准

3.1 校准方案

铯光泵磁力仪的技术指标在国防科技工业弱磁一级计量站完成校准。该站建有用于磁传感器计量与标定的地磁噪声补偿系统^[23],同时具备噪声抑制和磁场复现功能,可将复现磁场的噪声被抑制到极低水平。基于地磁噪声补偿系统搭建的铯光泵磁力仪指标测试系统如图 10 所示。

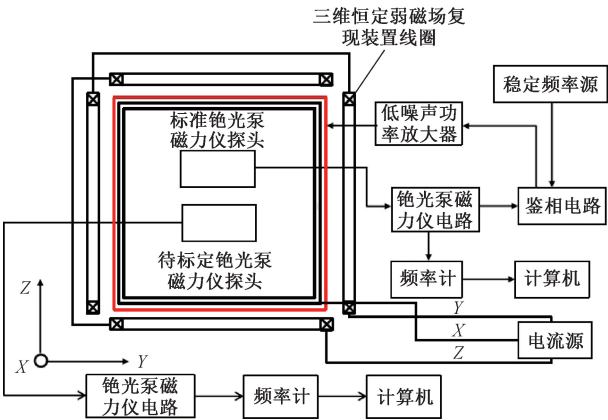


图10 铯光泵磁力仪技术指标测试系统

Fig. 10 The measurement system of the optically pumped magnetometer

依照铯光泵磁力仪校准流程,铯光泵磁力仪完成开机预热后,地磁噪声补偿系统复现出噪声极低的待测磁场,在磁场均匀区中同时放置标准铯光泵磁力仪探头和待测铯光泵磁力仪探头。为避免两探头之间的相互影响,探头保持大约 1 m 的间距平行摆放,探头与均匀区内磁场成 45° 夹角。

3.2 校准结果

铯光泵磁力仪的关键技术指标包含灵敏度、量程、示值误差、不确定度等多项指标^[24]。灵敏度水平标志着铯光泵磁力仪对外界磁场波动的最小探测能力;量程代表着磁力仪磁场测量范围的上下限,直接决定磁力仪的具体应用领域;示值误差指的是待测磁力仪与基准磁力仪对同一磁场测量结果的偏差,标志着磁力仪对磁场测量结果的准确程度。国防科技工业弱磁一级计量站依据《JJF(军工)55-2014 原子式磁强计校准规范》^[25]对铯光泵磁力仪技术指标进行了校准。

1) 量程

根据校准需要,启动恒定弱磁场复现装置、标准磁力仪及待校准铯光泵磁力仪,完成设备预热后由恒定弱磁场复现装置复现出特定磁感应强度的恒定磁场,铯光泵磁力仪探头置于磁场均匀区,示值稳定后记录待校准铯光泵磁力仪的磁感应强度测量结果。经验证,铯光泵磁力仪能稳定响应 10 000~120 000 nT 范围的磁场变化,部分测量结果如图 11 所示。

2) 时漂

设备完成开机预热后,恒定弱磁场复现装置复现 50 000 nT 左右的稳定磁场,待校准铯光泵磁力仪置于磁场均匀区,保持稳定磁场不变,自动连续记录被校磁力仪的磁感应轻度测量示值,观测时间一般为 30 min。完成记录后,依据记录数据找出磁场测量最大值及最小值,确定时漂。被校铯光泵磁力仪连续 30 min 的测量数据如图 12 所示。

时漂计算公式如式(1)所示。

B_{TD} = \max\{B_i\} |_{i=1 \sim n} - \min\{B_i\} |_{i=1 \sim n} \tag{1}

式中: B_{TD} 为被校磁力仪时漂; B_i 为被校磁力仪的第 i 个读数; n 为被校磁力仪读数的个数。

依据测量数据及计算结果,铯光泵磁力仪时漂测试指标如表 1 所示。

表 1 铯光泵磁力仪时漂指标					
Table 1 Time drift of the optically pumped magnetometer					
磁力仪 采样 率/Hz	测量 时长/ h	被校磁力 仪示值 B _i /nT	时漂 B _{TD} /nT	测量不确 定度 U/nT (k=2)	
1	0.5	最大值	50 408.74	0.02	0.01
		最小值	50 408.72		

3) 灵敏度

灵敏度指标反映磁力仪探测外界磁场波动的最小变化量,该指标与磁力仪在探测频段内的总磁场噪声有关。总噪声包含仪器本身磁场噪声值与外界环境磁场噪

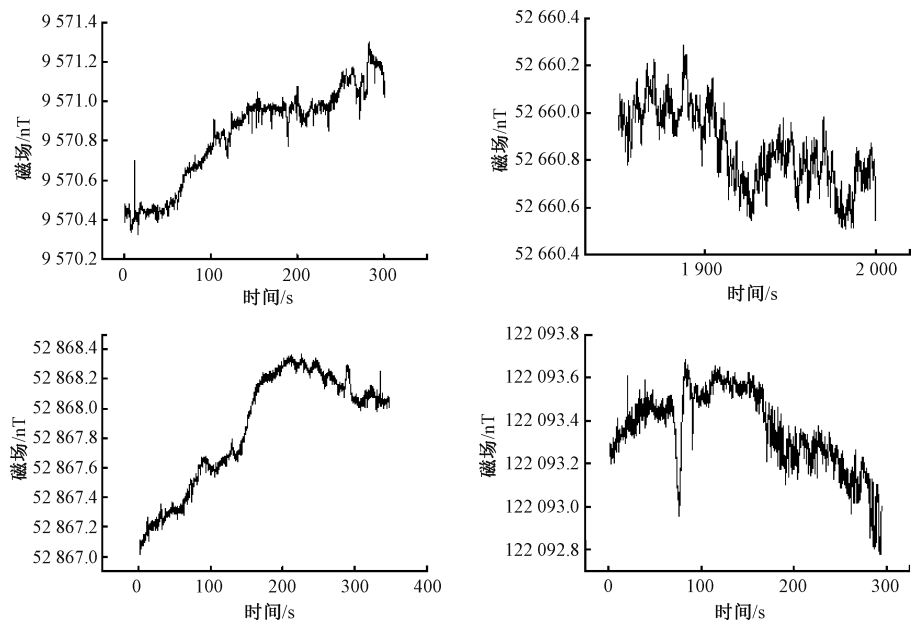


图 11 铯光磁力仪测量范围

Fig. 11 Measurement range of designed optically pumped cesium atomic magnetometer

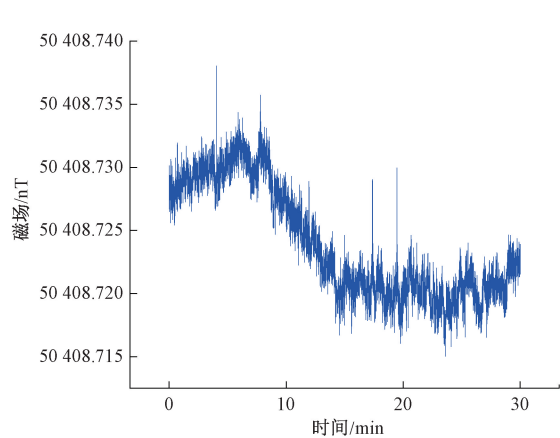


图 12 铯光泵磁力仪时漂测量结果

Fig. 12 Time drift of designed optically pumped magnetometer

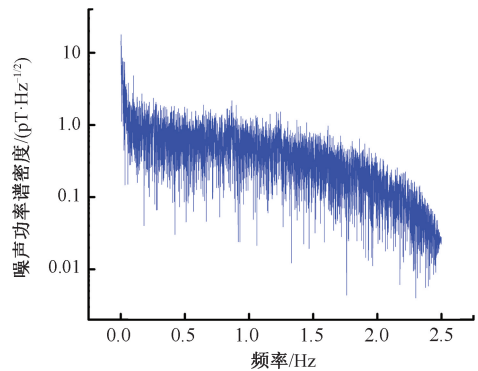


图 13 铯光泵磁力仪噪声功率谱密度

Fig. 13 Noise power density of designed optically pumped magnetometer

声值,由于磁力仪测量的外界磁场一般为地磁信号,仪器与外界噪声不相关,因此磁力仪灵敏度只受仪器噪声限值。噪声在频域上可用某个频点或一定频段的噪声谱密度噪声功率谱密度表征。

铯光泵磁力仪连续测量 30 min 的磁场信号(如图 12 所示),通过噪声功率谱密度方法进行处理,数据处理结果如图 13 所示,取 1 Hz 频点处前后各 10 个数据进行平均,获得该磁力仪系统磁场测量能够达到的灵敏度指标为 $0.6 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

4) 示值误差

示值误差由自身误差和漂移等组成。在国防科技工业弱磁一级计量站校准过程中,使用光泵磁力仪与作为基准磁力仪的质子磁力仪 GSM-19 对相同磁场进行测量,对光泵磁力仪的示值误差进行了校准。示值误差计算公式如式(2)所示。

$$\Delta B = B_R - B_S \tag{2}$$

式中: ΔB 为磁感应强度示值误差; B_R 为被校铯光泵磁力仪的磁感应强度测量示值; B_S 为标准质子磁力仪磁感应强度测量示值。

依据现场测试数据,铯光泵磁力仪与质子磁力仪的示值误差比对结果如表 2 所示。

表 2 示值误差比对结果

Table 2 Indicating error of the optically pumped magnetometer

标准磁场 B_S/nT	铯光泵磁力仪 示值 B_R/nT	示值误差	测量不确定度 $U/\text{nT}(k=2)$
40 506.8	40 506.5	-0.3	
50 431.4	50 431.4	0	
60 397.3	60 397.2	-0.1	0.8
70 377.9	70 378.6	0.7	
80 361.6	80 362.0	0.4	

4 应用验证

磁力仪在实际应用中的工作表现是评价产品性能的重要依据,兰州空间技术物理研究所研制的铯光泵磁力仪以开展并完成了多种环境下的应用验证,测试地点包含室内、深山、地磁台站等多种典型场景。

深山环境由于远离公路与村庄,人为干扰因素较少,地磁环境较为平稳,是地磁测量的理想地点,深山地区也是磁法勘探的主要应用场景。兰州空间技术物理研究所通过与甘肃省有色金属地质勘查局兰州矿产勘查院合作,在陇南市宕昌线深山中完成了铯光泵磁力仪与 GSM-19T 质子磁力仪的地磁测量对比,比测结果如图 14 所示。在测试时铯光泵磁力仪与质子磁力仪互相隔约 10 m 的距离,呈三角形分布放置。由于位置差异,3 台磁力仪测量到的地磁基线存在一定差异,但对地磁日变及波动情况测量结果一致性良好。

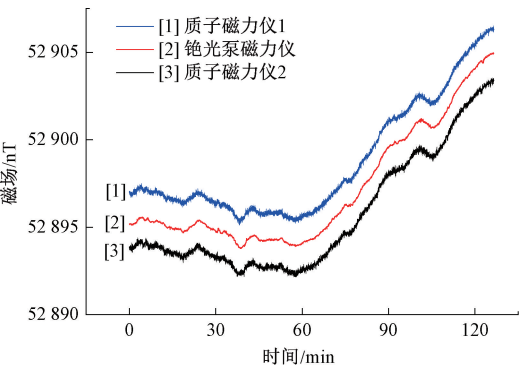


图 14 铯光泵磁力仪深山环境地磁测量结果

Fig. 14 Comparison of geomagnetic field measurement results using different magnetometers in mountain environment

兰州空间技术物理研究所研制的铯光泵磁力仪在甘肃省地震局兰州观象台进行了为期近一个月的长期连续测量,铯光泵磁力仪与兰州台站现有的地磁三分量 (field-horizontal-declination, FHD) 质子磁力仪、M15 地磁

总场与分量测量系统测量的地磁波动结果如图 15 所示。在测试时 FHD 磁力仪测量采样率为 60 s, M15 地磁总场与分量测量系统采样率为 1 Hz, 铯光泵磁力仪采样率为 5 Hz, 铯光泵磁力仪较另外两种磁力仪具备更高的采样率及灵敏度。值得注意的是,由于兰州观象台受地铁运行影响,导致日间地磁测量波动较为剧烈,峰峰值波动可达 10 nT, 而铯光泵磁力仪能够精确测量微弱磁异常信号变化。

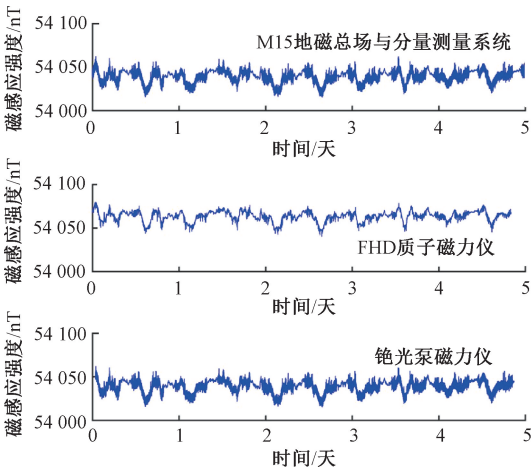


图 15 铯光泵磁力仪与地磁台站测量装置对地磁场测量结果
Fig. 15 Comparison of geomagnetic field measurement results among cesium atomic magnetometer and geomagnetic station measuring devices

依据上述测量结果,研制铯光泵磁力仪在实际应用中表现优异,具有高精度、高灵敏度、多功能性和广泛的适用范围,能够在各种复杂环境中提供可靠的测量结果。

5 结 论

本研究介绍了兰州空间技术物理研究所铯光泵磁力仪的研制进展,重点描述了铯光泵磁力仪的工作原理、技术方案、校准指标和应用验证等情况。铯光泵磁力仪完成了谱灯发光模式调节、吸收泡工作参数优化、结构设计优化等研究内容,攻克了磁洁净探头设计、无磁恒温控制与低相位噪声自激振荡 3 项关键技术,完成了磁力仪的整机集成与测试验证。磁力仪量程达到 10 000~120 000 nT, 灵敏度指标达到 0.6 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 磁力仪整体技术指标先进,长期工作稳定性良好,能够满足实际场景对高精度磁测仪器的需求。

参考文献

[1] 王学锋, 邓意成, 徐强锋, 等. 宇航用原子磁力仪研究与应用进展[J], 前瞻科技, 2022, 1(1): 159-168.
WANG X F, DENG Y CH, XU Q F, et al. Research

- and application progress of atomic magnetometers for aerospace[J]. *Science and Technology Foresight*, 2022, 1(1): 159-168.
- [2] BUDKER D, JACKSON KIMBALL D F. *Optical magnetometry*[M]. Cambridge University Press, 2013.
- [3] NABIGHIAN M N, GRAUCH V J S, HANSEN R O, et al. The historical development of the magnetic method in exploration[J]. *Geophysics*, 2005, 70(6): 33ND-61ND.
- [4] 张朝阳, 刘济民, 杨林. 磁探潜关键技术现状及发展趋势[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(1): 18-27.
ZHANG ZH Y, LIU J M, YANG L. Situation and development trend of the key technology of magnetic submarine exploration [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(1): 18-27.
- [5] 董浩斌, 张昌达. 量子磁力仪再评说[J]. *工程地球物理学报*, 2010, 7(4): 460-470.
DONG H B, ZHANG CH D. A further review of the quantum magnetometers[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2010, 7(4): 460-470.
- [6] 倪小静, 杨超云. 超导量子干涉器(SQUID)原理及应用[J]. *物理与工程*, 2007, 17(6): 28-30, 37.
NI X J, YANG CH Y. The principle and applications of superconducting quantum interference devices (SQUID)[J]. *Physics and Engineering*, 2007, 17(6): 28-30, 37.
- [7] 赵志鹏, 董浩斌. 低功耗高精度质子旋进式磁力仪的设计[J]. *石油仪器*, 2007, 21(2): 13-15, 97.
ZHAO ZH P, DONG H B. Design of the low power consumption and high precision proton magnetometer[J]. *Petroleum Instruments*, 2007, 21(2): 13-15, 97.
- [8] 陈卓琳, 胡星星, 滕云田, 等. 大动态范围磁通门磁力仪及其在定向误差校正中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(1): 81-89.
CHEN ZH L, HU X X, TENG Y T, et al. Fluxgate magnetometer with large dynamic range and its application in orientation error correction [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(1): 81-89.
- [9] 耿佳琪, 赵龙, 仇如嘉, 等. 金刚石 NV 色心磁力仪测磁性能优化[J]. *电子测量技术*, 2024, 47(17): 115-122.
GENG J Q, ZHAO L, QIU R J, et al. Optimization of magnetic properties measured by diamond nitrogen-vacancy color-centered magnetometer [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(17): 115-122.
- [10] 居海华, 张乐, 夏忠, 等. 基于铯光泵磁力仪的地震地磁矢量测量系统[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(9): 111-120.
JU H H, ZHANG L, XIA ZH, et al. Seismic geomagnetic vector measurement system based on optically pumped cesium magnetometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(9): 111-120.
- [11] 胡敏, 董海峰, 江唯鸣, 等. 高频调制矢量原子磁力仪综述[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(2): 1-14.
HU M, DONG H F, JIANG W M, et al. Review of high frequency modulation vector atomic magnetometers [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(2): 1-14.
- [12] 李胜, 周超. 原子磁力仪的量子物理基础[J]. *计测技术*, 2023, 43(4): 95-102.
LI SH, ZHOU CH. Quantum fundamentals of atomic magnetometer[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(4): 95-102.
- [13] 胡睿帆. 数字式氦光泵磁力仪的工程样机设计[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
HU R F. Design of engineering prototype for digital helium optically pumped magnetometer[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [14] 胡瑶. 自激式激光泵浦铯原子磁力仪的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2018.
HU Y. Research on the self-oscillating laser pumped Cs atomic magnetometer[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2018.
- [15] 张杨, 康崇, 孙伟民, 等. 基于超精细结构下的激光光泵铯磁力仪的理论研究[J]. *光学与光电技术*, 2010, 8(2): 54-57.
ZHANG Y, KANG CH, SUN W M, et al. Laser pumping Cs atom high-resolution magnetometer of theory research based on hyperfine structure [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, 8(2): 54-57.
- [16] BONA K, SEULKI L, GYESOON P, et al. Development of an unmanned airship for magnetic exploration [J]. *Exploration Geophysics (Melbourne)*, 2021, 52(4): 462-467.
- [17] 孙兵锋, 安芳芳, 王植彬, 等. 铯光泵原子磁强计研制进展[J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(5): 65-69.
SUN B F, AN F F, WANG ZH B, et al. Development of an optically pumped cesium atomic magnetometer [J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2017, 4(5): 65-69.

- [18] 林君, 嵇艳鞠, 赵静, 等. 量子地球物理深部探测技术及装备发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 156-166.
- LIN J, JI Y J, ZHAO J, et al. Development strategy of quantum-based deep geophysical exploration technology and equipment [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 156-166.
- [19] SELTZER S J. Developments in alkali-metal atomic magnetometry [D]. New Jersey: Princeton University, 2008.
- [20] CAMPARO J C, MACKAY R. Spectral mode changes in an alkali rf discharge[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(5): 053303.
- [21] AZADMEHR M, PAPROTNY I, MARCHETTI L. 100 years of Colpitts oscillators: Ontology review of common oscillator circuit topologies [J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2020, 20(4): 8-27.
- [22] 李永东. 脉宽调制 (PWM) 技术—回顾、现状及展望[J]. 电气传动, 1996, 3: 2-12.
- LI Y D. PWM control technique—state of arts and trends[J]. Electric Drive, 1996, 3: 2-12.
- [23] 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.
- XIE Y, LUO F X, ZHANG F, et al. Geomagnetic noise compensation technology based on cesium optical-pumping magnetometer [J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(1): 26-31.
- [24] 彭翔, 郭弘. 光泵原子磁力仪技术[J]. 导航与控制, 2022, 21(22): 101-121, 198.
- PENG X, GUO H, Techniques in optically-pumped atomic magnetometer[J]. Navigation and Control, 2022, 21(22): 101-121, 198.
- [25] 国防科技工业弱磁一级计量站. JJF(军工)55-2014 原子式磁强计校准规范[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2014: 1-16.
- 1st Class Weak Magnetic Metering Station of NDM. JJF 55-2014 Calibration specification for atomic magnetometer[S]. Beijing: The State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, 2014: 1-16.

作者简介



史彦超(通信作者), 2012 年于兰州大学获得学士学位, 2019 年于兰州大学获得博士学位, 现为兰州空间技术物理研究所高级工程师, 主要研究方向为原子磁力仪技术。

E-mail: shiyach08@yeah.net

Shi Yanchao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Lanzhou University in 2012, received his Ph. D. degree from Lanzhou University in 2019. Now he is a senior engineer at Lanzhou Institute of Physics. His main research interest includes atomic magnetometer.