

专题: 应用磁学

量子磁强计在电磁测量领域的应用及展望*

缪培贤[†] 史彦超 蔡志伟 杨旭红 徐子焜 涂建辉 陈江 杨炜

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

(2025年11月29日收到; 2026年1月6日收到修改稿)

自21世纪以来, 量子磁强计技术的发展和产品的普及正孕育着磁产业的变革, 量子磁强计技术与低空经济融合发展的态势正促进磁学向智能系统新业态赋能, 研究编制和更新迭代与磁测相关的标准和校准规范是未来磁产业健康高质量发展的前提和保障. 本文介绍利用原子磁强计在恒定磁场测量、直流电流测量、软磁样品矫顽力测量等方面开展的工作, 展示量子磁强计在电磁计量、磁性材料表征等领域的应用潜能, 同时指出量子磁强计磁感应强度示值的准确度校准与工作物质旋磁比的校准高度相关, 量子磁强计输出量值的统一是航空磁测技术规范中高分辨航磁测量精度优于 ± 1 nT的前提条件, 量子磁强计磁感应强度示值的稳定度校准涉及复现磁场噪声的抑制和磁场噪声的准确测量, 用量子磁强计实现电流量值溯源和传递的重要计量工作是磁强计工作介质旋磁比的校准和线圈系数的校准, 利用量子磁强计测量软磁样品磁特性具有高复现性的技术优势. 上述结论对相关校准规范和标准的研究编制和更新迭代提供了思路和参考.

关键词: 原子磁强计, 磁场测量, 电流测量, 拉莫尔进动**DOI:** 10.7498/aps.75.20251624**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251624

1 引言

2021年底, 国务院发布了《计量发展规划(2021—2035年)》, 规划中反复提及“量子”关键词, 指出要实施“量子度量衡”计划, 重点研究基于量子效应和物理常数的量子计量技术及计量基准. 第26届国际计量大会批准了全部以自然常数重新定义的国际单位制^[1], 新定义并未指定具体的计量器具, 为了完善不间断量值溯源链与检测过程控制的计量保证体系, 需研究具备实用性、工程可行性和量值传递扁平化属性的计量器具. 一方面, 在国际单位制的7个基本单位中与电磁物理量有关的是电流单位安培, 它用基本电荷常数 e 定义, 与电流单位复现关联的物理效应是单电子隧道效应^[2,3], 然而利用该效应在工程上难以复现和传递微安至安

培范围内的电流, 实用性不强. 另一方面, 各类磁传感器、磁性材料表征手段和智能磁测系统支撑着未来磁产业的高质量发展, 应通过量子计量基准与信息技术的结合实现量值传递扁平化, 使量值传递链条更短、速度更快、测量结果更准更稳. 21世纪以来量子磁强计技术蓬勃发展, 国内外报道的量子磁强计包含质子磁强计、相干布居囚禁(coherent population trapping, CPT)原子磁强计、 M_z 和 M_x 光泵磁强计、无自旋交换弛豫(spin-exchange relaxation free, SERF)原子磁强计、非线性磁光旋转(nonlinear magneto-optical rotation, NMOR)原子磁强计、氮空位金刚石(nitrogen-vacancy diamond, NV Diamond)磁强计、超导磁强计(superconducting quantum interference devices, SQUID)等^[4,5]. 国家市场监督管理总局于2025年发布了质子磁强计校准规范^[6], 适用于磁场测量范围为20—100 μ T

* 国家自然科学基金(批准号: 12104198)、甘肃省科技计划(批准号: 24ZDGA004, 24YFGA055)、甘肃省人才项目(批准号: 2025QNGR48)和中国航天科技集团有限公司钱学森青年创新基金项目(批准号: 2023-36)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: miaopeixian@163.com

的质子旋进磁强计和 Overhauser 磁强计的校准, 计量特性中最大允许误差的绝对值不大于 3 nT, 峰峰值不大于 1 nT, 时漂不大于 3 nT, 噪声校准时工作区的波动峰峰值不超过 10 pT. 国家国防科技工业局于 2014 年发布了原子式磁强计校准规范^[7], 适用于测量范围为 20—100 μ T 的光泵磁强计、原子光学磁强计等原子式磁强计的校准, 恒定弱磁场复现装置的噪声不大于 20 pT, 时漂不大于 40 pT. 传统高量程磁强计用“(1 mT—2.5 T) 磁强计校准规范^[8]”来校准, 磁通门磁强计校准规范^[9]的磁场测量范围是-250—250 μ T, 这两项校准规范分别隐含磁感应强度示值的最大允许误差的绝对值与标准磁场的比值不超过 10% 和不超过 1%. 在磁性材料测量领域, 一些磁特性测量的国家标准并未直接与量子效应关联起来, 例如“电磁纯铁及软磁合金矫顽力的抛移测量方法^[10]”和“在开磁路中测量磁性材料矫顽力的方法^[11]”用到冲击检流计、磁通门、霍尔探头等传统测量手段, 矫顽力测量再现性用相对标准偏差表示通常小于或等于 5%, 未来在这些测量方法中有待引入合适的量子磁强计用于提高测量再现性. 航空磁测技术是磁学向智能系统赋能的典型代表, 2010 年发布的航空磁测技术规范^[12]推动了国内无人机航磁技术的发展, 高分辨航磁测量总精度优于 ± 1 nT, 一般优选高灵敏度的量子磁强计. 本文首先介绍电磁物理量的量值溯源和量值传递与频率测量的关联, 其次介绍利用抽运-检测型原子磁强计和铯光泵磁强计在电磁测量领域开展的实验研究, 通过与现有标准或校准规范比较, 展示这两种原子磁强计在电磁计量、磁性材料表征、磁性目标探测等领域的应用潜力和技术优势.

2 磁感应强度测量技术与原子频标技术的关联

实际电磁物理量的复现和传递工作中磁感应

强度的量值准确度水平最高^[2]. 目前磁计量体系用基本物理常数质子旋磁比作为基准, 氦、钾、铷、铯原子的旋磁比一般可通过实验溯源至质子旋磁比^[2,13]. 在质子磁强计校准规范^[6]中, 要求用于测量标准复现磁场的标准磁强计的示值分辨力不低于 0.01 nT, 磁感应强度最大允许误差应不超过被校质子磁强计最大允许误差的三分之一, 铯-氦光泵磁强计是标准磁强计的可选方案. 俄罗斯计量院 2000 年搭建的铯-氦光泵磁强计的磁场测量范围为 10—100 μ T, 准确度达到 0.003—0.03 nT 的量级^[14], 该装置是目前公开报道的准确度水平最高的基准磁场装置. 中国计量科学研究所和中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所正在开展激光泵浦的铯-氦磁强计的研制, 2023 年报道的铯-氦磁强计的噪声峰峰值优于 0.02 nT^[15].

国际上测量最准确的物理量是频率, 将电磁物理量的量值溯源和量值传递与频率测量直接关联起来是未来电磁计量发展的趋势. 原子频标技术将原子内部微观运动的跃迁作为时间频率标准, 根据现有技术进展, 原子中的跃迁包含几百太赫兹量级的光频跃迁、几千兆赫兹量级的微波跃迁和几十赫兹至兆赫兹的塞曼跃迁, 对应的典型应用分别为光钟、微波原子钟和基于原子磁强计的恒流源装置. 图 1 示出了按照频率范围分类原子中跃迁的示意简图, 需注意频率范围划分并不严格, 例如塞曼跃迁示意的频率范围对应的磁感应强度小于 100 μ T, 晶振、微波跃迁和光频跃迁区域实际应是离散分布的. 自激振荡锁频技术可将塞曼跃迁对应的频率锁定至晶振频率, 用于实现基于原子磁强计的恒流源装置^[16,17]; 微波频率合成技术将晶振频率和微波跃迁频率关联起来, 它是研制微波原子钟所需的关键技术; 光学频率梳技术是联系微波跃迁和光频跃迁的桥梁^[18]. 图 1 中塞曼跃迁主要对应着质子磁强计、氦光泵磁强计、各类碱金属光泵磁强计等产品

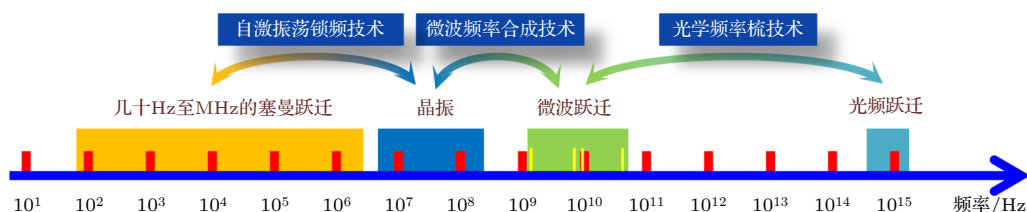


图 1 不同频率范围内原子中跃迁的示意简图

Fig. 1. Schematic diagram of transitions in atoms within different frequency ranges.

范围内的磁场时对应频率在 851.5—5109.2 Hz 范围内, 氦光泵磁强计产品测量 20000—100000 nT 范围内的磁场时对应频率在 0.56—2.8 MHz 范围内, 钾、铷、铯光泵磁强计产品测量 10000—100000 nT 范围内的磁场时对应频率在 35—700 kHz 范围内. 现有商用微波原子钟主要包含氢钟、铷钟和铯钟, 国内正在攻关下一代导航用的汞离子微波钟, 上述四种微波钟的跃迁频率依次分别为 1.4 GHz, 6.8 GHz, 9.2 GHz 和 40.5 GHz, 其频率用黄色线条标记在图 1 所示的微波跃迁区域. 国际上报道了 ^{171}Yb , ^{174}Yb , ^{87}Sr , ^{199}Hg 等中性原子光晶格钟和 $^{27}\text{Al}^+$, $^{40}\text{Ca}^+$, $^{88}\text{Sr}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$, $^{199}\text{Hg}^+$ 等离子光钟, 它们的跃迁频率在 400—1500 THz 范围内, 对应波长在 200—750 nm 范围内. 从实验和技术的角度分析, 塞曼跃迁、微波跃迁和光频跃迁都是特定物理场中的原子与特定频率的电磁波发生共振吸收的一种自然现象, 利用自激振荡锁频、微波频率合成和光学频率梳能够关联不同频段的跃迁, 不但显著提高频率测量的准确度, 而且为电磁计量方法的改进提供了技术保障.

3 磁场计量相关问题的分析

质子磁强计校准规范^[6]和原子式磁强计校准规范^[7]均采用替代法来校准磁感应强度示值误差: 标准磁场复现系统复现校准点的标准磁场, 通过比较标准磁强计与被校磁强计的磁感应强度示值, 得到被校磁强计的磁感应强度示值误差. 准确度和稳定性是衡量测量系统性能的重要指标, 前者是指测量值与真实值之间的接近程度, 后者是指系统在一段时间内保持其输出测量值不变的能力. 磁传感器准确度的校准对标准磁场工作区内各点的磁场差值有较高要求, 例如质子磁强计校准规范^[6]中规定工作区应大于被校质子磁强计的探头尺寸, 工作区内各点的磁场差值应不大于 0.1 nT, 城市中利用磁屏蔽筒复现磁场时很难满足该条件, 因此磁强计测量值的准确度一般在专业计量机构的基准磁场装置中进行评估. 原子式磁强计校准规范^[7]中噪声和时漂技术指标反映了磁强计的稳定性, 其中噪声用测量恒定磁场时的峰峰值或功率谱密度 (power spectral density, PSD) 评估, 时漂用 30 min 时长内磁感应强度测量示值的最大值和最小值的差值来评估. 与质子磁强计校准规范^[6]和原子式磁强计

校准规范^[7]相比较, 可在基于磁屏蔽筒的复现磁场装置中探索拓宽量子磁强计量程和提高量子磁强计测量值稳定度的技术方案. 后文围绕标量磁场测量中量子磁强计的校准、恒定复现磁场噪声的测量来讨论磁场测量的准确度和稳定度问题.

3.1 标量磁场的测量与量子磁强计的校准

测量标量绝对磁场的质子磁强计和若干原子磁强计的基本原理是磁共振效应或拉莫尔进动效应, 利用的表达式是

$$B = (2\pi/\gamma)f, \quad (1)$$

式中, B 是磁感应强度 (或简称为磁场), γ 是质子或原子的旋磁比, f 是磁共振频率或拉莫尔进动频率. 从 (1) 式可知, 如果利用原子频标技术获得足够高的频率测量准确度, 那么质子磁强计和若干原子磁强计的校准实际上只能微调质子或原子的旋磁比 γ . 值得注意的是, 质子磁强计校准规范^[6]和原子式磁强计校准规范^[7]均采用替代法来校准磁感应强度示值误差, 但是没有规定减小磁感应强度示值误差的具体方法, 即不包含旋磁比较准的内容.

兰州空间技术物理研究所研制了自激振荡型 M_x 铯光泵磁强计^[19], 研制过程中铯原子的旋磁比采用加拿大 SCINTREX 公司 Cs-3 光泵磁强计产品册中的数值, 即 $\gamma/2\pi$ 的值为 3.49857 Hz/nT, 在国防科技工业弱磁一级计量站依据原子式磁强计校准规范^[7]进行校准时, 第一组测量值如表 1 所列. 表 1 中标准磁场从约 40.5 μT 增加至约 80.4 μT , 铯光泵磁强计的示值与质子磁强计所测标准磁场的误差从 -7.68 nT 增加至 -15.26 nT, 示值误差的绝对值与标准磁场的比值约为 1.9×10^{-4} . 参考 (1) 式, 令校准前铯光泵磁强计示值 B_1 和校准前旋磁比 γ_1 的关系式为 $B_1 = (2\pi/\gamma_1)f$, 令校准后铯光泵磁强计示值 B_0 和校准后的旋磁比 γ_0 的关系式为 $B_0 = (2\pi/\gamma_0)f$, 则 $B_1/B_0 = \gamma_0/\gamma_1$, 即 $\gamma_0 = (B_1 \times \gamma_1)/B_0$. 校准后铯光泵磁强计示值 B_0 应与质子磁强计测量的标准磁场相等, 取表 1 中最大的校准点, $B_1/B_0 = 80344.38/80359.64 = 0.99981$, 则 $\gamma_0/2\pi = 3.49857 \times 0.99981 \text{ Hz/nT} = 3.49791 \text{ Hz/nT}$. 在铯原子磁强计测量软件中将 $\gamma/2\pi$ 的值从 3.49857 Hz/nT 修改为 3.49791 Hz/nT 后, 第二组测量值如表 2 所列, 在 40.5—80.4 μT 范围内铯光泵磁强计的示值与质子磁强计所测标准磁场

的误差小于 1 nT, 示值误差的绝对值与标准磁场的比值小于 1.0×10^{-5} . 原子式磁强计校准规范^[7]中磁感应强度的示值误差未设上限, 本文只能参考质子磁强计校准规范^[6]的计量特性规定来讨论上述铯光泵磁强计的校准效果, 相关讨论遵循测量误差随着测量值增大而增大的规律. 质子磁强计校准规范^[6]中计量特性规定, 在测量范围 20—100 μT 内磁感应强度最大允许误差的绝对值不大于 3 nT, 那么允许误差的绝对值与标准磁场上限的比值不大于 3.0×10^{-5} , 表 2 所列值误差的绝对值与标准磁场的比值小于 1.0×10^{-5} , 一定程度上表明铯光泵磁强计的校准效果良好. (1 mT—2.5 T) 磁强计校准规范^[8]和磁通门磁强计校准规范^[9]中计量特性分别隐含磁感应强度示值的最大允许误差的绝对值与标准磁场的比值不超过 10% 和不超过 1%, 结合上述讨论, 表明传统磁通门、霍尔探头等磁强计的准确度要低于质子磁强计和铯光泵磁强计.

表 1 旋磁比校准前铯光泵磁强计测量的一组磁场值
Table 1. A set of values measured by a cesium magnetometer before the gyromagnetic ratio is calibrated.

序号	利用质子磁强计测量的标准磁场/nT	铯光泵磁强计示值/nT	示值误差/nT	$\frac{ \text{示值误差} }{\text{标准磁场}} \times 10^{-4}$
1	40515.67	40507.99	-7.68	1.90
2	50418.34	50408.73	-9.61	1.91
3	60394.41	60382.68	-11.73	1.94
4	70375.19	70362.33	-12.86	1.83
5	80359.64	80344.38	-15.26	1.90

表 2 旋磁比校准后铯光泵磁强计测量的一组磁场值
Table 2. A set of values measured by a cesium magnetometer after the gyromagnetic ratio is calibrated.

序号	利用质子磁强计测量的标准磁场/nT	铯光泵磁强计示值/nT	示值误差/nT	$\frac{ \text{示值误差} }{\text{标准磁场}} \times 10^{-7}$
1	40506.79	40506.52	-0.27	66.66
2	50431.39	50431.37	-0.02	3.97
3	60397.27	60397.19	-0.08	13.25
4	70377.92	70378.55	0.63	89.52
5	80361.55	80361.99	0.44	54.75

铯光泵磁强计校准示例表明, 不同厂家铯光泵磁强计产品的旋磁比有差别, 例如文献^[4]中与铯原子旋磁比相关的 $\gamma/2\pi$ 的值为 3.49862 Hz/nT, 与上述 3.49857 Hz/nT 和 3.49791 Hz/nT 均有差别. 产品生产工艺的不确定性导致同一厂家生产的不同铯光泵磁强计产品的旋磁比也会有差别, 在确

保频率测量具有较高准确度的前提下, 校准同一批次产品或不同批次产品的旋磁比, 可通过分析旋磁比数值的离散程度来评估生产线工艺的稳定性. 国防科技工业弱磁一级计量站校准进口铯光泵磁强计时示值误差一般为 1 nT—40 nT, 只有更改产品处理软件中的旋磁比数值才能使示值误差小于 1 nT, 实现各产品输出磁场量值的统一. 如果铯光泵磁强计校准过程中规定产品都使用相同的旋磁比, 忽视示值误差的存在, 那磁强计校准就失去了校准意义. 国内专业计量机构未来依据质子磁强计校准规范^[6]校准国内不同生产厂商的产品时, 在确保频率测量具有较高准确度的前提下, 也会面临修改各产品质子旋磁比的情况, 有必要制定科学合理的计量管理措施来维护以质子旋磁比基本物理常数作为基准的磁计量体系.

3.2 磁噪声的测量与低噪声磁场的复现

表达式 (1) 中频率 f 的测量方法与量子磁强计测量值的准确度和稳定度均有关, 利用磁屏蔽筒和筒内载流线圈复现磁场时无法分析量子磁强计测量值的准确度, 因此只能讨论频率测量方法对量子磁强计测量值稳定性的影响. 频率 f 的测量从物理实现上可分为主动测量和被动测量, 前者是通过主动扫频测量磁共振吸收峰后取信号峰值对应的频率, 后者是在磁矩自激振荡或自由弛豫条件下通过弱测量被动感知拉莫尔进动信号, 然后测量其频率.

M_z 光泵原子磁强计、CPT 原子磁强计、铯-氩光泵磁强计都是通过主动扫频测量磁共振信号的峰值频率, 用于磁场锁定的主动式比例-积分-微分 (PID) 的反馈控制会影响磁强计对外界磁场的快速响应, 不合理的参数设置会出现磁强计噪声水平低于复现磁场噪声的情况^[20], 因此这类磁强计难以准确测量复现磁场的噪声. 例如, 本课题组^[20]采用是德科技有限公司 (Keysight Technology) 的 B2912A 型精密电流源在磁屏蔽筒内产生 10000 nT 的待测磁场, 由计算机中的 LabVIEW 程序直接从 B2912A 仪表读取其电流值并换算成磁场值, 分析功率谱密度得本底磁场噪声为 12.05 pT/Hz^{1/2}; M_z 光泵原子磁强计可通过牺牲对变化磁场的快速响应而获得低于 1 pT/Hz^{1/2} 的灵敏度指标, 实际上变得“不灵敏”了.

兰州空间技术物理研究所研制的铯光泵磁强计^[19]和抽运-检测型铷原子磁强计^[21]都属于被动

测量拉莫尔进动频率的情况. 自激振荡型 M_x 铯光泵磁强计^[19]产生振幅保持不变的拉莫尔进动正弦信号, 通过比较器将正弦信号转换为方波信号以提高频率测量精度, 在国防科技工业弱磁一级计量站校准的量程为 10—120 μT , 当测量 50.4 μT 恒定磁场时由功率谱密度分析得噪声为 0.6 $\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ (@1 Hz), 因此铯光泵磁强计的测量、采样率、噪声水平均优于质子磁强计. 抽运-检测型铷原子磁强计^[21]工作的物理过程与质子磁强计^[22]相似, 它们均极化工作介质后测得振幅衰减的拉莫尔进动信号, 抽运-检测型铷原子磁强计量程覆盖 0.1—100 μT , 可测量复现磁场中由精密电流源噪声引入的本底磁场噪声^[20-21,23], 当测量 500 nT 恒定磁场时由功率谱密度分析得噪声为 0.2 $\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ (@1 Hz), 其测量、采样率、噪声水平也要优于质子磁强计. 文献^[21]和文献^[23]分别报道了随着 B2912A 精密电流源输出电流增加并自动切换量程时抽运-检测型铷原子磁强计测得复现磁场的噪声呈台阶变化, B2912 A 电流源在 105 mA 量程切换前后分别产生 5000 nT 和 6000 nT 磁场时, 复现磁场噪声从约 1 $\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ (@1 Hz) 跳跃至超过 10 $\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ (@1 Hz). 为了对比铯光泵磁强计和抽运-检测型铷原子磁强计测量复现磁场噪声的能力, 适当增大线圈系数, 当 B2912 A 电流源在 50—150 mA 范围内输出电流时两种磁强计对复现磁场噪声测量的比较结果如图 2 所示. B2912A 电流源在 105 mA 处切换量程, 当输出电流小于 105 mA, 两种磁强计测得复现磁场噪声在 4—8 $\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ (@1 Hz) 范

围内; 当输出电流大于 105 mA, 两种磁强计测得复现磁场噪声在 50—80 $\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ (@1 Hz) 范围内; 当输出电流分别为 90 mA 和 110 mA 时, 抽运-检测型铷原子磁强计测得的磁场峰峰值分别为 0.1 nT 和 1 nT; 电流源量程切换前后复现磁场的峰峰值和噪声均相差一个数量级, 在复现磁场噪声测量方面抽运-检测型铷原子磁强计要优于铯光泵磁强计. 需要说明的是, 抽运-检测型铷原子磁强计测量软件中傅里叶变换自由弛豫信号时采用矩形窗处理, 它是牺牲测量磁场准确度为代价去提高复现磁场噪声测量的准确性^[23].

自激振荡型 M_x 铯光泵磁强计通常被用于研制低噪声恒流源^[17]或补偿地磁噪声^[24], 其基本原理是利用地磁屏蔽装置、磁场线圈、压控电流源、晶振(或原子钟)、铯光泵磁强计和鉴相电路构成锁相环, 锁定后动态调整压控电流源向磁场线圈施加的电流, 使铯光泵磁强计拉莫尔进动信号的频率和相位严格匹配由晶振或原子钟产生的标准信号, 进而降低电流噪声或补偿地磁噪声. 北京大学 Shen 等^[17]研制的低噪声恒流源输出 50 mA 电流时其峰峰值约 10 nA, 该峰峰值与电流量值的比值为 2×10^{-7} . 国防科技工业弱磁一级计量站谢胤等^[24]利用铯光泵磁强计补偿地磁噪声, 当复现磁场为 20 μT 时峰峰值约 3 pT, 该峰峰值与复现磁场的比值为 1.5×10^{-7} . 本课题组也利用铯光泵磁强计抑制磁屏蔽筒内复现磁场的噪声, 其中压控电流源选用 Thorlabs 的 LDC201 CU 电流源, 测量结果如图 3 所示. 当锁相环路未锁定时, 设定复现磁场为 12240.64 nT,

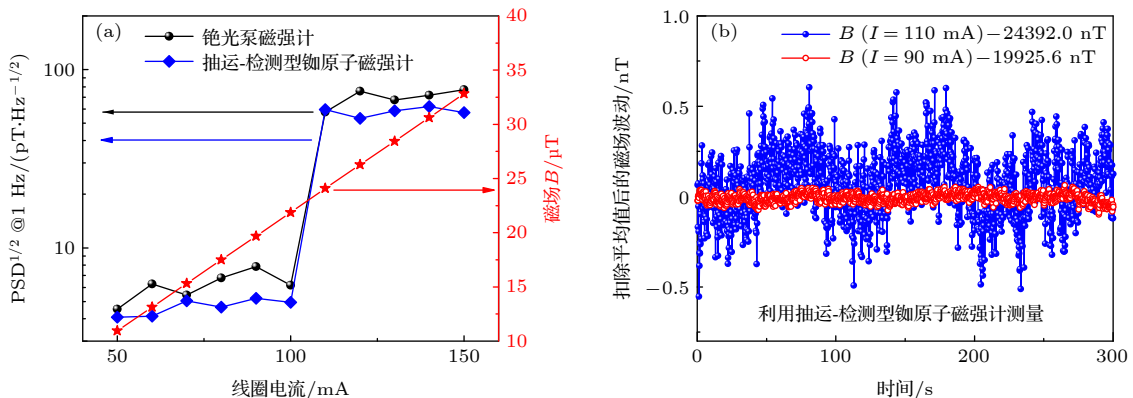


图 2 铯光泵磁强计和抽运-检测型铷原子磁强计对复现磁场噪声的测量 (a) 磁场大小和噪声与线圈电流的依赖关系; (b) 电流源输出 90 mA 或 110 mA 电流时抽运-检测型铷原子磁强计测得的磁场值

Fig. 2. Measurements of reproduced magnetic field noise by a cesium magnetometer and a pump-probe rubidium magnetometer: (a) The dependence of magnetic field strength and noise on coil current; (b) the magnetic field values measured by a pump-probe rubidium magnetometer when the current source outputs a current of 90 mA or 110 mA.

此时峰峰值约 60 pT, 峰峰值与复现磁场的比值为 4.9×10^{-6} , 半小时磁场数据由功率谱密度分析得其噪声为 $3.1 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}(@1 \text{ Hz})$; 当锁相环路锁定之后, 复现磁场跃变至 12261.494 nT , 此时峰峰值约 4 pT, 峰峰值与复现磁场的比值为 3.3×10^{-7} , 半小时磁场数据由功率谱密度分析得其噪声为 $0.1 \text{ pT}/\text{Hz}^{1/2}(@1 \text{ Hz})$. 可见, 复现恒定磁场时采用自激振荡锁频技术能抑制噪声, 降低漂移, 为磁强计噪声评估创造良好条件.

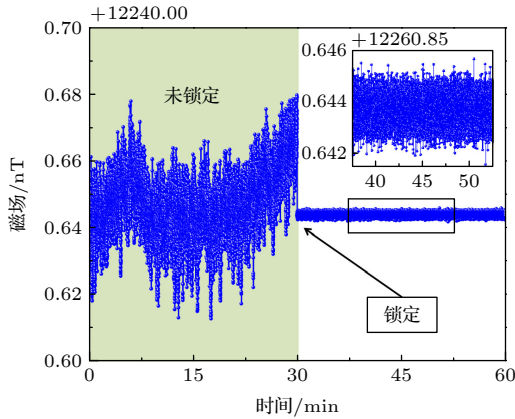


图 3 利用铯光泵磁强计抑制复现磁场的噪声和漂移
Fig. 3. Suppressing noise and drift in reproduced magnetic fields using cesium magnetometer.

3.3 关于磁场计量的讨论和改进建议

我国 2025 年发布质子磁强计校准规范^[6]之后, 随着国内生产质子磁强计厂家数量增多, 2025 年之前用基本物理常数质子旋磁比作为基准的磁计量体系将面临挑战. 一方面, 磁计量体系迫切需求更高准确度的基准磁强计, 例如发展铯-氦光泵磁强计, 但是如何通过实验确定氦原子的旋磁比成为比较棘手的难题. 另一方面, 随着质子磁强计校准规范的实施, 质子磁强计产品的旋磁比变成被频繁校准的物理量, 在国际国内同时选取不同厂家生产的质子磁强计进行定期比测将变得必要且重要.

国际科技数据委员会 (CODATA) 每四年发布一次质子旋磁比的最新数值, 它是通过对世界范围内的测量数据进行平差后获得^[2]. 不同厂家研制质子磁强计时软件或算法设计中应选用国际推荐的质子旋磁比, 在确保频率测量具有较高准确度的前提下, 可在高稳定度的复现磁场中测试各厂家生产的质子磁强计产品并统计测量磁场值, 去除偏离较大的磁场值后将其余测量磁场值求平均值, 然后

以平均值校准各产品的质子旋磁比, 最后取质子旋磁比最接近国际推荐值的若干产品作为一段时间内磁感应强度计量的基准磁强计, 同时利用这些基准磁强计校准专业机构的铯-氦光泵磁强计的旋磁比, 这样既维护了以基本物理常数质子旋磁比作为基准的磁计量体系, 又推动磁计量体系向更高技术水平方向发展. 相比质子磁强计, 被动测量拉莫尔进动信号的抽运-检测型原子磁强计和铯光泵磁强计具有更宽的量程和更高的短期稳定性, 相关磁强计产品是磁计量体系的重要补充.

目前公布的磁强计校准规范一般测量标量磁场, 不涉及矢量磁场的产生和测量, 有待发展与矢量磁强计相关的校准规范. 江苏省地震局居海华等^[25,26]基于球形线圈开发了适用于地磁台站的矢量磁场测量仪, 其中标量磁强计可选用质子磁强计或铯光泵磁强计, 分别能够实现分钟采样或秒采样的地磁三分量记录. 2022 年至 2024 年由江苏地震局牵头、多家单位参与研究编写了“质子矢量磁力仪校准规范”, 撰稿本文时该校准规范还未正式发布. 兰州空间技术物理研究所基于磁场旋转调制法研制了一种低盲区三轴矢量原子磁强计^[27], 测量 $40 \mu\text{T}$ 附近矢量磁场时其总场测量灵敏度小于 $1 \text{ nT}/\text{Hz}^{1/2}(@0.1 \text{ Hz})$, 角度测量灵敏度小于 $0.1^\circ/\text{Hz}^{1/2}(@0.1 \text{ Hz})$, 空间立体角测量盲区占比低于 12%. 基于磁场旋转调制法的矢量原子磁强计有潜力应用于运动平台, 相比仅适用于地磁台站的静置矢量磁场测量仪^[25,26]有技术优势, 未来可作为矢量原子磁强计校准规范研究编制的参考.

4 电流测量相关问题分析

国家质量监督检验检疫总局于 2016 年发布了“直流稳定电源校准规范^[28]”, 计量特性显示直流稳定电源工作在稳流模式时, 输出电流短期稳定性在 0.001%—1%. 为实施“量子度量衡”计划, 有必要基于量子效应研究电流测量方法和校准方法. 分别基于约瑟夫森效应、量子化霍尔效应和单电子隧道效应的量子电压、量子电阻和量子电流标准形成电学计量的量子三角形^[3], 原理上电流单位既可用单电子隧道效应复现, 也可用量子电压和量子电阻的比值复现^[2], 然而这两种复现方法在技术实现和量值扁平化传递方面存在困难. 一方面, 单电子隧道效应每秒吞吐 10^6 个电子时产生的电流仅在皮安量

级,与可精密测量的微安量级小电流还相差 6 个数量级^[3],因此单电子隧道效应很难用于复现和传递微安至安培范围内的电流;通过约瑟夫森结和量子化霍尔电阻器件的电流一般都小于 1 mA,量子电压和量子电阻基准装置也不能直接复现和传递毫安至安培量级的电流.另一方面,国内还未有管理机构发布约瑟夫森结、量子化霍尔电阻器件和单电子隧道效应器件的校准规范,意味着利用这些核心器件开展电流量值传递的市场条件还不成熟.我国早期磁感应强度基准装置利用石英或陶瓷基准线圈复现磁场量值,通过精密测量通入线圈的电流和精密测量线圈的几何参数后计算出线圈系数,然后计算出磁感应强度^[13];反过来,可用质子磁强计和计算线圈实物测量电流,例如 20 世纪末中国计量科学研究院通过质子旋磁比绝对测量电流^[2].选用更高稳定度的量子磁强计有潜力提高电流输出的稳定度,例如 1999 年俄罗斯和韩国科研人员利用氦原子磁强计复现了 0.1—1 A 范围内的电流^[29],将 1 A 的输出电流稳定在 2×10^{-8} 水平;2021 年德国、比利时和瑞士的科研人员利用铯光泵和钾光泵磁强计研制了一套超稳电流源系统,将 20 mA 的输出电流稳定在 5×10^{-9} 的水平^[30];2020 年之后国内北京大学^[17]和国防科技大学^[31]等单位也利用原子磁强计开展了与电流源噪声抑制相关的技术研究.随着利用量子磁强计测量电流方法的普及,利用磁计量体系中相关校准规范讨论电流测量和校准是有必要的.

4.1 磁计量体系中与电流测量相关的校准规范

利用量子磁强计开展电流复现、测量或噪声抑制研究时,一般都需配套地磁屏蔽装置和标准线圈.假设标准线圈的线圈系数为 C ,那么载流标准线圈磁场均匀区的磁场 B 与电流 I 的关系可简写为

$$B = CI. \quad (2)$$

结合 (1) 式,可得电流 I 与磁共振频率或拉莫尔进动频率 f 之间的关系:

$$I = 2\pi f / (\gamma C). \quad (3)$$

在确保频率测量具有较高准确度的前提下,未来基于 (3) 式的电流传感器的校准将转换为磁强计工作介质旋磁比 γ 的校准和线圈系数 C 的校准.量

子磁强计工作介质旋磁比的校准可在质子磁强计校准规范^[6]和原子式磁强计校准规范^[7]基础上改进,这里重点讨论线圈系数的校准.

为保证电流量值复现的准确性,线圈系数 C 原则上可通过实验溯源至约瑟夫森效应、量子化霍尔效应和拉莫尔进动效应三种量子自然基准^[32],具体实施时利用量子电压和量子电阻基准产生一系列标准小电流,将它们通入线圈后产生一系列磁场,量子磁强计测得这些磁场后,利用 (3) 式线性拟合出线圈系数.这种线圈系数测量方法^[32]是否可行还有待通过大量试验验证.一方面,利用量子电压和量子电阻基准产生标准电流的方法目前缺乏相关文献报道和校准规范约束,有待通过大量试验充分验证.另一方面,未来有必要针对基于量子磁强计的电流测量装置专门研究编制基于量子磁强计的恒定磁场线圈校准规范,以显著提高线圈系数测量的复现性.国家市场监督管理总局 2021 年发布了“恒定磁场线圈校准规范^[33]”,该校准规范利用标准磁强计测量载流线圈均匀区的磁场,线圈系数最大误差不超过 10%.由于校准规范中标准磁强计可选霍尔探头等传统磁强计,而这些传统磁强计校准规范要求磁感应强度示值的最大允许误差的绝对值与标准磁场的比值不超过 10%^[8],这可能是线圈系数最大误差不超过 10% 的原因.本课题组^[32]利用是德科技 (Keysight Technology) B2912A 型精密电流源向待标定线圈输入 1—5 mA 的电流,利用抽运-检测型铷原子磁强计测量载流线圈在其均匀区产生的磁场,11 次测量得线圈系数平均值为 52.4355 nT/mA,重复测量的相对标准偏差为 7.7155×10^{-5} .可见,“恒定磁场线圈校准规范^[32]”中标准磁强计仅选用量子磁强计时有潜力提高测量复现性,降低测量误差.线圈系数 C 原则上也可基于毕奥-萨伐尔定律,通过精密测量线圈的几何参数后计算出来,这种实物基准又称计算线圈^[13],以石英或陶瓷作为骨架绕制的线圈,据报道最佳状态下线圈系数的相对测量不确定度优于 10^{-7} .未来有必要研究制定这种特殊计算线圈的校准规范,计算线圈实物可应用于对精密测量有需求的省级计量研究院、航空航天研究所等.

利用量子磁强计开展电流量值的溯源和传递,为追求高准确度应在专业计量机构的磁感应强度基准装置中进行研究,此时利用三轴载流标准线圈屏蔽地磁场,周围无磁性材料.在城市中利用量子

磁强计开展电流测量或噪声抑制研究时,可利用磁屏蔽筒屏蔽地磁场,此时磁屏蔽筒内剩余磁场会降低电流测量的准确度,一般不影响电流测量的稳定度.国家市场监督管理总局于2024年发布“直流磁屏蔽筒校准规范^[34]”,磁屏蔽筒内剩余磁场一般小于100 nT.

4.2 磁感应强度计量向电流计量发展需改进的校准规范

根据(3)式做好量子磁强计工作介质旋磁比 γ 的校准和线圈系数 C 的校准,能够建立基于磁计量的电计量体系,促进电磁计量融合发展.国家市场监督管理总局近五年内发布了质子磁强计校准规范^[6]、恒定磁场线圈校准规范^[33]和直流磁屏蔽筒校准规范^[34],结合国家国防科技工业局2014年发布的原子式磁强计校准规范^[7],为磁计量向电计量发展创造了条件,但仍然存在不足.

第一,质子磁强计校准规范^[6]和原子式磁强计校准规范^[7]中未明确规定量子磁强计工作介质旋磁比 γ 的校准过程,有待改进.量子磁强计输出磁场量值的统一是电流量值统一的前提.

第二,为确保电流量值溯源和复现的准确性,要尽量提高线圈系数测量的准确性.可在恒定磁场线圈校准规范^[33]中选用磁场标量法或标准线圈法来校准线圈系数,其中磁场标量法中选用高准确度的质子磁强计或铯-氦磁强计,标准线圈法中选用高灵敏度的绝对量子磁强计作为指零磁强计,电流测试仪的测量值由量子电压和量子电阻传递.也可专门制定应用于电流复现、传递和校准用的计算线圈实物校准规范,根据毕奥-萨伐尔定律,通过精密测量实物线圈的尺寸计算出线圈系数,其量值最终溯源至长度测量,避开了量子电压和量子电阻基准的测量.

第三,为准确评估电流的稳定度,建议选用具备准确测量复现磁场噪声能力的量子磁强计.前文所述主动扫频测量磁共振吸收峰的量子磁强计可通过不合理的参数设置得到磁强计噪声水平低于复现磁场噪声的结果,导致获得过高的电流稳定度.建议选用被动感知拉莫尔进动信号的铯光泵磁强计和抽运-检测型磁强计,同时实现复现磁场噪声和电流噪声的准确测量.

在恒定磁场线圈校准规范^[33]的标准线圈法中若要选用高灵敏度绝对量子磁强计作为指零磁强

计,需额外配备一个本底磁场线圈产生本底磁场,该本底磁场作为标准磁场线圈和被校磁场线圈的“零点磁场”,以确保量子磁强计正常工作.已知标准磁场线圈和被校磁场线圈的线圈系数后,标准线圈法所述装置可拓展为电流比较仪装置,实现电流量值传递.本课题组^[32]报道了基于抽运-检测型铷原子磁强计的电流比较仪装置,装置示意图如图4所示.在磁屏蔽筒内放置3个同轴标准线圈,其中恒流源和与其相连的标准线圈1被用于产生恒定的本底磁场 B_0 ,该磁场作为电流比较的平衡条件;与已标定电流源和待标定电流源分别相连的标准线圈2和标准线圈3用于实现电流比较,当改变待标定电流源的输出电流时,动态改变已标定电流源的输出电流使抽运-检测型铷原子磁强计测量磁场值为 B_0 ,使电流比较达到平衡.利用这种电流比较仪装置可实现微安至安培范围内电流的传递^[32],已标定电流源和待标定电流源分别选用是德科技生产的B2912A型和B2962A型电流源,0.001—100 μA 范围内11次电流比较实验结果如图5所示,10—100 μA 范围内电流值的标准偏差保持在0.1 μA 左右,电流比较仪动态平衡时抽运-检测型铷原子磁强计测得本底磁场为500 nT,磁场波动峰峰值小于2 pT.

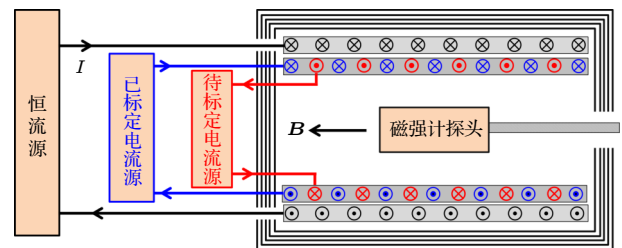


图4 基于量子磁强计的电流比较仪装置示意图^[32]

Fig. 4. Schematic diagram of current comparator device based on quantum magnetometer^[32].

5 软磁材料磁特性曲线测量

原子磁强计在弱磁测量领域具有技术优势,近年来已应用于磁性颗粒探测^[35,36]、脑磁心磁测量^[37,38]、星载材料极弱剩磁测量^[39]、软磁材料磁特性测量^[40-42]等领域.岩石和土壤的剩余磁化强度、磁化率、磁滞等参数的高精度测量对研究古地磁环境、月球等星体起源及其地质演化过程具有重要意义^[38];地磁科考类卫星的磁洁净控制需研究新

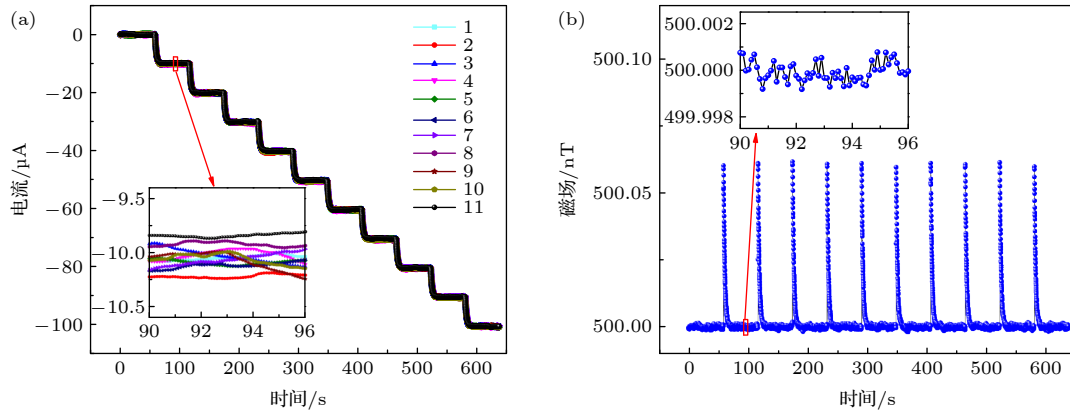


图 5 电流比较仪在 0.001—100 μA 范围内电流比较的实验结果 (a) B2912A 电流源输出的补偿电流值; (b) 电流比较仪工作时抽运-检测型铷原子磁强计测得的磁场值

Fig. 5. Experimental results of the current comparator in the range of 0.001—100 μA : (a) Compensation current values output by B2912A current source; (b) the magnetic field values measured by a pump-probe rubidium magnetometer during the operation of the current comparator.

方法以完成光学平台、伸杆、热控舱材料及部件的极弱剩磁测量, 以及充、退磁后的剩磁变化评估^[39]; 考虑到岩石、土壤和卫星部组件处于很宽的温度环境, 实际需开发兼具变温、充退磁、高灵敏度弱磁测量功能的仪器设备. 本课题组^[40–42]在开磁路中利用抽运-检测型铷原子磁强计测量了相同带状坡莫合金软磁样品的矫顽力^[40]、剩磁矫顽力^[41]、磁矩和磁特性曲线^[42], 其中软磁样品矫顽力的测量再现性以相对标准偏差表示为 0.16%, 剩磁矫顽力测量再现性以相对标准偏差表示为 0.05%。“电磁纯铁及软磁合金矫顽力的抛移测量方法^[10]”和“在开磁路中测量磁性材料矫顽力的方法^[11]”用到冲击检流计、磁通门、霍尔探头等传统测量手段, 矫顽力测量再现性用相对标准偏差表示通常小于或等于 5%. 本课题组^[40]在开磁路中利用霍尔探头测量相同软磁样品的矫顽力, 其再现性以相对标准偏差表示为 3.53%, 表明在开磁路测量方法中用抽运-检测型原子磁强计测量相同软磁样品的矫顽力的再现性比用霍尔探头提高一个数量级. 本文在前期实验装置基础上, 展示样品室具备变温功能后的测量结果.

测量软磁样品磁特性曲线的新实验装置示意图如图 6 所示, 磁化线圈的线圈系数为 8078.15 nT/mA, 该值由磁通门标定; 文献^[40]所述实验装置的样品室被替换为 L 型液氮恒温器, 为软磁样品磁特性测试提供低温环境. 磁屏蔽筒中的本底磁场、磁化线圈和软磁样品在铷泡空间位置产生的磁场均平行于磁屏蔽筒的轴线方向; 扫描磁化线圈中的电流

实现软磁样品的磁化和退磁, 用抽运-检测型铷原子磁强计分别在磁化线圈中有样品和无样品的条件下测量铷泡空间位置处的磁场; 在相等电流值条件下, 用有样品测得的磁场值减去无样品测得的磁场值, 获得软磁样品在铷泡空间位置产生的磁场, 用软磁样品在铷泡位置处产生磁场为零来判定其磁化强度由饱和值减小到零的条件, 用磁滞回线计算出样品的平均矫顽力. 不同温度条件下利用抽运-检测型铷原子磁强计测量软磁样品矫顽力的实验结果如图 7 所示, 软磁样品与文献^[40–42]所述带状坡莫合金软磁样品相同, 温度分别设定为 100, 150, 200, 250 和 300 K. 载流本底磁场线圈产生的本底磁场被设定为 1000 nT, 磁化线圈中电流从 +1 A 扫描至 -1 A, 再从 -1 A 扫描至 +1 A, 磁化线圈中电流为 ± 1 A 时样品处产生磁场的绝对值超过 8 mT, 该磁场能够将软磁样品磁化至饱和^[40,41].

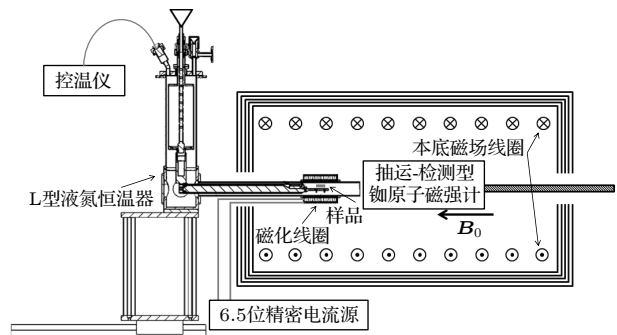


图 6 测量软磁样品磁特性曲线的实验装置示意图

Fig. 6. Schematic diagram of experimental device for measuring the magnetic characteristic curves of soft magnetic samples.

图 7(a) 显示不同温度条件下磁化线圈中有样品或无样品时抽运-检测型铷原子磁强计测得的数据曲线, 图 7(b) 显示扣除本底磁场后得到的低场部分磁滞回线, 软磁样品的矫顽力和磁滞回线的偏置分别显示在图 7(c) 和图 7(d) 中. 软磁样品温度从 100 K 增加至 300 K, 其矫顽力从 58.59 A/m 降低至 41.02 A/m, 磁滞回线的偏置均在 5 A/m 附近波动. 特殊地, 当软磁样品温度为 300 K 时重复测量十次, 实验结果如图 8 所示, 矫顽力平均值为 41.03 A/m, 测量再现性以相对标准偏差表示为 0.17%, 矫顽力平均值和测量再现性与文献 [40] 报道的 40.63 A/m 和 0.16% 基本一致. 文献 [40] 中样品在室温条件下测量, 由于缺乏样品恒温控制系统, 磁化线圈发热会导致样品温度升高, 这是文献 [40] 所述矫顽力平均值比图 8(b) 矫顽力平均值偏低的可能原因.

图 6 所示实验装置可用于测量软磁样品的剩磁矫顽力和磁矩. 例如在磁屏蔽筒中扫描通入磁化线圈的脉冲电流, 置于磁化线圈中的软磁样品被磁化

和退磁, 利用抽运-检测型铷原子磁力仪监测软磁样品的剩磁状态, 根据剩磁回线计算出样品的平均剩磁矫顽力 [41]. 图 6 所示 L 型液氮恒温器置于滑轨上, 基于位移法可测量软磁样品的磁矩 [42], 再依据软磁样品在铷泡位置产生的磁场与其磁矩呈正比的关系, 在恒温条件下可利用软磁样品的饱和和剩余磁矩值对其剩磁回线和低场部分磁滞回线进行标定 [42]. 图 6 所示的实验装置兼具变温、充退磁、高灵敏度弱磁测量功能, 一方面可用于岩石、土壤和卫星材料的磁特性测量, 在环境磁学、古地磁学和卫星磁洁净控制等领域具有应用潜能, 另一方面对软磁材料磁特性表征相关校准规范的更新迭代提供了思路和参考.

6 无人机航磁测量

低空经济和量子科技分别是我国现阶段明确的战略性新兴产业和未来产业, 无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 搭载量子磁强计形成无人机航磁测量系统, 促进了低空飞行与量子磁测产业的

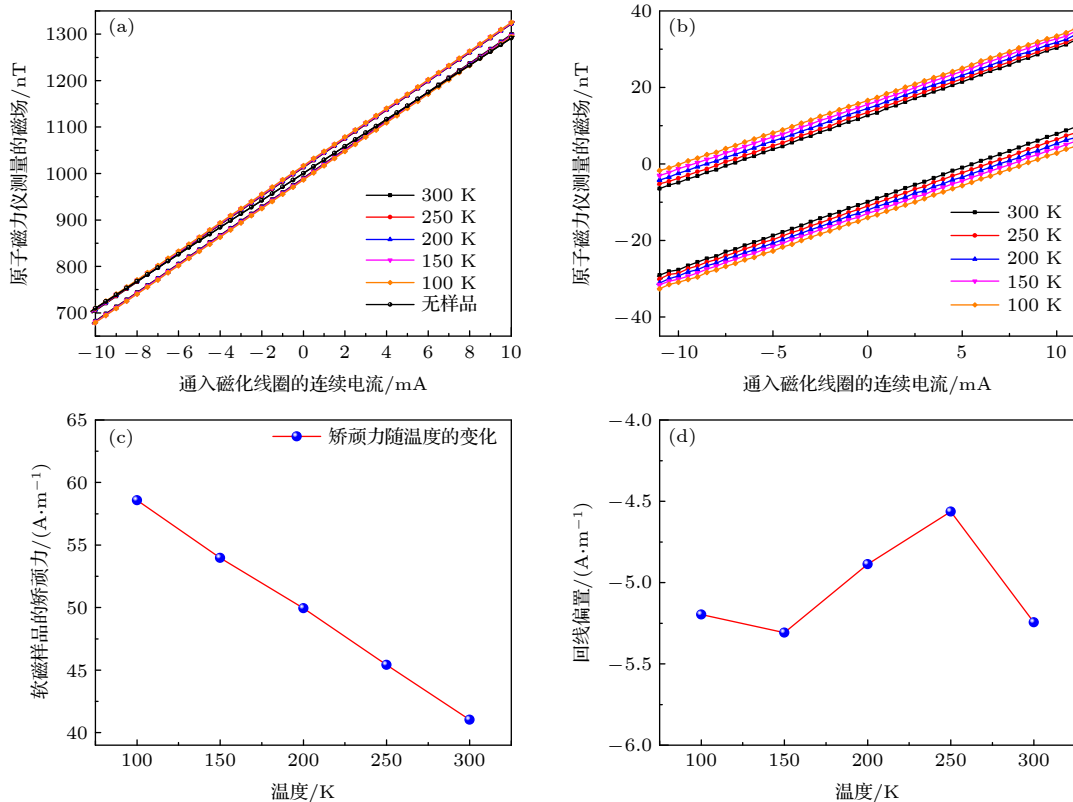


图 7 不同温度条件下利用抽运-检测型铷原子磁强计测量软磁样品矫顽力的实验结果 (a) 用抽运-检测型原子磁强计测量的数据曲线; (b) 软磁样品的磁滞回线; (c) 软磁样品的矫顽力; (d) 磁滞回线的偏置

Fig. 7. Experimental results of measuring the coercivity of a soft magnetic sample at different temperatures using a pump-probe rubidium magnetometer: (a) Curves measured by the magnetometer; (b) hysteresis loops of the soft magnetic sample; (c) coercivity of the soft magnetic sample; (d) bias of the hysteresis loop.

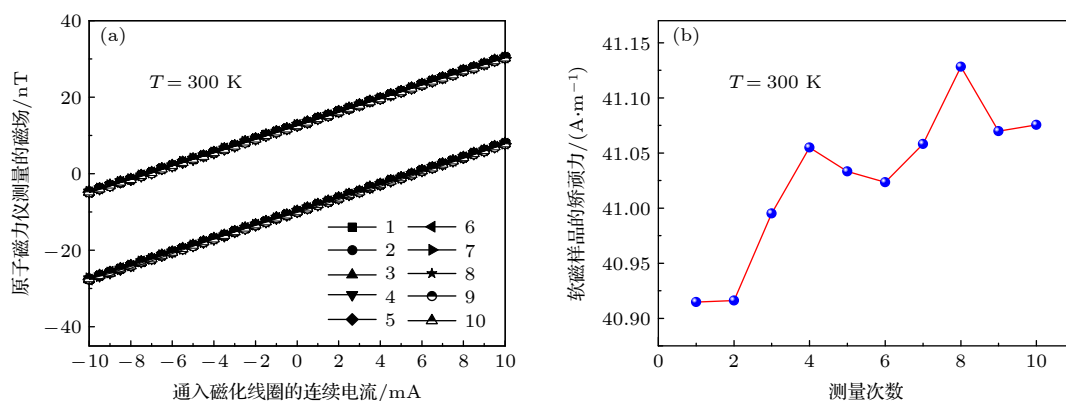


图 8 温度为 300 K 时软磁样品矫顽力测量结果的复现性 (a) 软磁样品的磁滞回线; (b) 磁滞回线的偏置

Fig. 8. Reproducibility of coercivity measurement of a soft magnetic sample at 300 K: (a) Hysteresis loops of the soft magnetic sample; (b) coercivity of the soft magnetic sample.

有机融合, 正孵化着低空综合发展新业态, 例如无人机航磁测量系统被应用于未爆军火探测^[43]、矿产资源勘探^[44]等军事和民用领域. 2010 年发布的航空磁测技术规范^[12]规定高分辨航磁测量总精度优于 $\pm 1\text{ nT}$ 、磁补偿标准差优于 $\pm 0.08\text{ nT}$ 、飞行高度在 150 m 以内等技术要求, 考虑到大面积地磁基准图绘制需同时使用多套无人机航磁测量系统分区作业, 多台量子磁强计输出量值的一致性直接决定后续地磁基准图拼接和处理的精度, 反过来对量子磁强计的校准提出了更高的要求. 高分辨航磁测量总精度优于 $\pm 1\text{ nT}$, 要求多台量子磁强计被校准后测量磁感应强度的示值误差绝对值小于 1 nT, 这为航空磁测用量子磁强计校准规范的研究编制提供了参考, 航空磁测用量子磁强计校准规范可在质子磁强计校准规范^[6]和原子式磁强计校准规范^[7]基础上进行改进, 校准规范中工作介质旋磁比 γ 的校准是必不可少的内容. 兰州空间技术物理研究所具备铯光泵磁强计自主研发和生产能力^[19], 已开展未爆弹模拟件磁异常的航磁测量试验, 为后续大面积地磁基准图绘制相关研究积累了技术基础.

7 总结和展望

本文结合原子磁强计在电磁测量领域开展的相关研究, 对相关校准规范和国家标准的更新迭代提供思路和参考. 针对恒定磁场和直流电流测量的准确性校准, 以及提升大面积地磁基准图拼接和处理的精度, 质子磁强计或原子磁强计校准规范中有待增加工作介质旋磁比 γ 校准的细节. 针对恒定磁

场和直流电流测量的稳定性校准, 建议选用被动感知拉莫尔进动信号的自激振荡型铯光泵磁强计或抽运-检测型原子磁强计, 它们能够准确测量复现磁场或复现电流的噪声, 避免出现噪声测量失真的情况. 利用质子磁强计或原子磁强计实现电流量值的溯源和传递, 重要计量工作是磁强计工作介质旋磁比 γ 的校准和线圈系数 C 的校准, 有待研究编制计算线圈校准规范或改进恒定磁场线圈校准规范. 原子磁强计在软磁材料磁特性表征、土壤和岩石样品磁特性表征、卫星磁洁净控制等方面具有应用潜能, 有待研究和编制新的标准或校准规范.

量子概念的提出是为了解释黑体辐射和原子光谱, 其物理本质与原子或分子的稳定结构有关, 量子磁强计附带“量子”属性, 其含义是磁强计工作物质涉及稳定的分子结构或原子结构. 从校准规范研究、编制和应用实施的角度分析, 任何测量仪器或设备的测量准确度和稳定度的评估均需与其他具备相同测量功能的仪器设备进行频繁的比测, 不能潜意识认为与量子效应匹配的物理常数是恒定不变的. 通过量子磁强计校准规范的大量实践, 分析磁强计旋磁比与工作物质状态的关联是值得研究探索的方向, 例如研究原子气室内缓冲气体压强等工艺参数是否在产品旋磁比数值有关. 本文仅介绍了量子磁强计在稳定磁场和直流电流测量中的应用, 通过深入研究电磁场与原子磁共振塞曼跃迁内态演化细节的关联, 交变磁场和交变电流测量方法的提出、仪器设备的研制和校准规范的编制也是值得研究探索的方向.

参考文献

- [1] Yuan Z D 2019 *China Terminology* **21** 28 (in Chinese) [原遵东 2019 中国科技术语 **21** 28]
- [2] He Q, Shao H M, Liang C B 2021 *Acta Metrol. Sin.* **42** 1543 (in Chinese) [贺青, 邵海明, 梁成斌 2021 计量学报 **42** 1543]
- [3] Zhang Z H 2002 *Meas. Control Technol.* **21** 1 (in Chinese) [张钟华 2002 测控技术 **21** 1]
- [4] Dong H B, Zhang C D 2010 *Chin. J. Eng. Geophys.* **7** 460 (in Chinese) [董浩斌, 张昌达 2010 工程地球物理学报 **7** 460]
- [5] Liu G B, Sun X P, Gu S H, Feng J W, Zhou X 2012 *Physics* **41** 803 (in Chinese) [刘国宾, 孙献平, 顾思洪, 冯继文, 周欣 2012 物理 **41** 803]
- [6] JJF 2229-2025 *Calibration Specification for Proton Magnetometer* pp1-8 (in Chinese) [JJF 2229-2025 质子磁强计校准规范 第1—8页]
- [7] JJF 55-2014 *Calibration Specification for Atomic Magnetometer* pp1-8 (in Chinese) [JJF(军工) 55-2014 原子式磁强计校准规范 第1—8页]
- [8] JJF 1832-2020 *Calibration Specification for (1mT-2.5T) Magnetometers* p2 (in Chinese) [JJF 1832-2020 (1 mT—2.5 T) 磁强计校准规范 第2页]
- [9] JJF 1519-2015 *Calibration Specification for Fluxgate Magnetometer* p2 (in Chinese) [JJF 1519-2015 磁通门磁强计校准规范 第2页]
- [10] GB/T 3656-2022 *Methods of Coercivity Measurement for Magnetic Iron and Magnetically Soft Alloy by Pulling out Procedure* pp1-6 (in Chinese) [GB/T 3656-2022 电磁纯铁及软合金矫顽力的抛移测量方法 第1—6页]
- [11] GB/T 13888-2009/IEC 60404-7: 1982 *Method of Measurement of the Coercivity of Magnetic Materials in an Open Magnetic Circuit* pp2-4 (in Chinese) [GB/T 13888-2009/IEC 60404-7: 1982 在开磁路中测量磁性材料矫顽力的方法 第2—4页]
- [12] DZ/T 0142-2010 *Criterion of Aeromagnetic Survey* p1 (in Chinese) [DZ/T 0142-2010 航空磁测技术规范 第1页]
- [13] Fu J Q, Zhang W, He Q 2019 *Acta Metrol. Sin.* **40** 700 (in Chinese) [伏吉庆, 张伟, 贺青 2019 计量学报 **40** 700]
- [14] Shifrin V Y, Alexandrov E B, Chikvadze T I, Kalabin V N, Yakobson N N, Khorev V N, Park P G 2000 *Metrologia* **37** 219
- [15] Fu J Q, Kong J, Cheng H F 2023 *J. Astronaut. Metrol. Meas.* **43** 52 (in Chinese) [伏吉庆, 孔嘉, 程华富 2023 宇航计测技术 **43** 52]
- [16] Shifrin V Y, Kim C G, Park P G 1996 *Rev. Sci. Instrum.* **67** 833
- [17] Shen L, Zhang R, Wu T, Peng X, Yu S, Chen J B, Guo H 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 084701
- [18] Li T C 2006 *Acta Metrol. Sin.* **27** 1 (in Chinese) [李天初 2006 计量学报 **27** 1]
- [19] Shi Y C, Miao P X, Cai Z W, Yang X H, Zhang J H 2025 *Chin. J. Sci. Instrum.* **46** 83 (in Chinese) [史彦超, 缪培贤, 蔡志伟, 杨旭红, 张金海 2025 仪器仪表学报 **46** 83]
- [20] Miao P X, Yang S Y, Cui J Z, Liu Z D 2020 *Vac. Cryogen.* **26** 494 (in Chinese) [缪培贤, 杨世宇, 崔敬忠, 刘志栋 2020 真空与低温 **26** 494]
- [21] Miao P X, Yang S Y, Wang J X, Lian J Q, Tu J H, Yang W, Cui J Z 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 160701 (in Chinese) [缪培贤, 杨世宇, 王剑祥, 廉吉庆, 涂建辉, 杨炜, 崔敬忠 2017 物理学报 **66** 160701]
- [22] Luo W, Hu X Y, Ge J, Liu L C, She J H, Dong H B 2024 *Chin. J. Geophys.* **67** 4583 (in Chinese) [罗望, 胡祥云, 葛健, 刘立超, 余锦华, 董浩斌 2024 地球物理学报 **67** 4583]
- [23] Chen D Y, Miao P X, Shi Y C, Cui J Z, Liu Z D, Chen J, Wang K 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 024202 (in Chinese) [陈大勇, 缪培贤, 史彦超, 崔敬忠, 刘志栋, 陈江, 王宽 2022 物理学报 **71** 024202]
- [24] Xie Y, Luo F X, Zhang F, Wang L, Liu Z X 2022 *Metrol. Meas. Technol.* **42** 26 (in Chinese) [谢胤, 罗方雪, 张樊, 王羚, 柳占新 2022 计测技术 **42** 26]
- [25] Ju H H, Zhang L, Xia Z, Zhang C, Ying Y X 2022 *Chin. J. Sci. Instrum.* **43** 17 (in Chinese) [居海华, 夏忠, 宫杰, 应允翔, 张岑 2022 仪器仪表学报 **43** 17]
- [26] Ju H H, Zhang L, Xia Z, Zhang C, Ying Y X 2023 *Chin. J. Sci. Instrum.* **44** 111 (in Chinese) [居海华, 张乐, 夏忠, 张岑, 应允翔 2023 仪器仪表学报 **44** 111]
- [27] Miao P X, Liu Z D, Chen D Y, Shi Y C, Yang S Y, Cai Z W, Yang X H 2025 *Opt. Precis. Eng.* **33** 568 (in Chinese) [缪培贤, 刘志栋, 陈大勇, 史彦超, 杨世宇, 蔡志伟, 杨旭红 2025 光学精密工程 **33** 568]
- [28] JJF1597-2016 *Calibration Specification for DC Stabilized Power Supplies* p3 (in Chinese) [JJF1597-2016 直流稳定电源校准规范 第3页]
- [29] Shifrin V Y, Khorev V N, Park P G 1999 *Metrologia* **36** 171
- [30] Koss P A, Dinani R T, Bienstman L, Bison G, Severijns 2021 *Phys. Rev. Appl.* **16** 014011
- [31] Zheng J T, Zhang Y, Yu Z Y, Xiong Z Q, Luo H, Wang Z G 2023 *Chin. Phys. B* **32** 040601
- [32] Shi Y C, Miao P X, Chen D Y, Zhang J H, Cai Z W, Yang X H 2023 *Vac. Cryogen.* **29** 209 (in Chinese) [史彦超, 缪培贤, 陈大勇, 张金海, 蔡志伟, 杨旭红 2023 真空与低温 **29** 209]
- [33] JJF 1906-2021 *Calibration Specification for Constant Magnetic Field Coils* pp1-7 (in Chinese) [JJF 1906-2021 恒定磁场线圈校准规范 第1—7页]
- [34] JJF 2147-2024 *Calibration Specification for DC Magnetic Shielding Cylinders* pp1-4 (in Chinese) [JJF 2147-2024 直流磁屏蔽筒校准规范 第1—4页]
- [35] Everaert K, Sander T, Körber R, Löwa N, Waeyenberge B V, Leliaert J, Wiekhorst F 2023 *Nanoscale Adv.* **5** 2341
- [36] He X, Ma Y L, Chen Y H, Xu Z Y, Li Y X, Wu L Y, Ruan Y, Zheng W Q, Li K, Lin Q 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 073702
- [37] Wu K, He R 2025 *Nanotechnology* **36** 152501
- [38] Fang J C, Wei K, Jiang L, Xiang M, Lu J X 2022 *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* **43** 527752 (in Chinese) [房建成, 魏凯, 江雷, 向岷, 陆吉玺 2022 航空学报 **43** 527752]
- [39] Meng L F, Xu C Q, Chen J G, Xiao Q, Liu C B, Zhou B, Zhang T L 2024 *J. Harbin Eng. Univ.* **45** 1514 (in Chinese) [孟立飞, 徐超群, 陈金刚, 肖琦, 刘超波, 周斌, 张铁龙 2024 哈尔滨工程大学学报 **45** 1514]
- [40] Miao P X, Wang T, Shi Y C, Gao X C, Cai Z W, Chai G Z, Chen D Y, Wang J B 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 244206 (in Chinese) [缪培贤, 王涛, 史彦超, 高存绪, 蔡志伟, 柴国志, 陈大勇, 王建波 2022 物理学报 **71** 244206]
- [41] Miao P X, Yang X H, Zhang J H, Cai Z W, Shi Y C, Chen D Y, Liu Z D 2023 *Vac. Cryogen.* **29** 562 (in Chinese) [缪培贤, 杨旭红, 张金海, 蔡志伟, 史彦超, 陈大勇, 刘志栋 2023 真空与低温 **29** 562]
- [42] Miao P X, Liang X, Shi Y C, Cai Z W, Du K, Dai H, Liu Z D, Chen J 2025 *Vac. Cryogen.* **31** 187 (in Chinese) [缪培贤, 梁星, 史彦超, 蔡志伟, 杜康, 代虎, 刘志栋, 陈江 2025 真空与低温 **31** 187]
- [43] Shen Y, Chen Z Y, Gao J Q, Zhang P F, Yang X B 2025 *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **22** 7502705
- [44] Liu J X, Liu H P, Liu R, Xue J Q, Li Y H, Wang F 2023 *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **33** 1150

SPECIAL TOPIC—Applied magnetism

Applications and prospects of quantum magnetometer in electromagnetic measurement*

MIAO Peixian[†] SHI Yanchao CAI Zhiwei YANG Xuhong XU Zihan
TU Jianhui CHEN Jiang YANG Wei

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

(Received 29 November 2025; revised manuscript received 6 January 2026)

Abstract

The researches on measuring constant magnetic field, DC current and soft magnetic sample's coercivity by using atomic magnetometers are reported in this article. The accuracy and stability of the above measurements are also discussed.

The indication values of proton magnetometers and atomic magnetometers are directly proportional to the magnetic resonance frequency or Larmor precession frequency, and inversely proportional to the gyromagnetic ratio γ of protons or atoms. For the accuracy calibration of magnetometers, if the frequency measurement accuracy is high enough by using the atomic frequency standard technology, the calibration of proton magnetometers and atomic magnetometers will be transformed into the calibration of the gyromagnetic ratio γ of the working medium. The self-developed cesium magnetometer is calibrated in the magnetic induction intensity reference device. When the value of $\gamma/2\pi$ is set to 3.49857 Hz/nT, the standard magnetic field increases from 40.5 to 80.4 μT , the error between the indication of the cesium magnetometer and the standard magnetic field measured by the proton magnetometer increases from -7.68 to -15.26 nT, and the ratio of the absolute value of the indication error to the standard magnetic field is about 1.9×10^{-4} . After modifying the value of $\gamma/2\pi$ from 3.49857 to 3.49791 Hz/nT in the cesium magnetometer's software, the indication error is less than 1 nT in the range of 40.5–80.4 μT , and the ratio of the absolute value of indication error to the standard magnetic field is less than 1.0×10^{-5} .

For the stability calibration of constant magnetic field and DC current, it is recommended to use self-excited oscillation cesium magnetometer or pump-probe atomic magnetometer, which can accurately measure the noise of reproduced magnetic field or reproduced current and avoid noise measurement distortion. We have verified the measurement capability of cesium magnetometer and pump probe rubidium magnetometer to measure magnetic field noise jumps by switching the B2912A current source range. We also use a phase-locked loop consisting of a magnetic shielding tube, magnetic field coil, voltage controlled current source, crystal oscillator, cesium magnetometer, and phase detection circuit to suppress the noise of reproduced magnetic field. When the magnetic field reproduced by the phase-locked loop is 12261.5 nT, the ratio of peak-to-peak value to the reproduced magnetic field reaches 3.3×10^{-7} , and the noise of the reproduced magnetic field is 0.1 pT/Hz^{1/2} at 1 Hz.

To ensure traceability and accurate transmission of current values by using quantum magnetometers, the calibrations of the gyromagnetic ratio of the working medium and the coil coefficient are important metrological tasks. It is necessary to study and develop calibration specification for calculating coils or improve the

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12104198), the Science and Technology Program Project of Gansu Province, China (Grant Nos. 24ZDGA004, 24YFGA055), the Talent Project of Gansu Province, China (Grant No. 2025QNGR48), and the Qian Xuesen Youth Innovation Fund of CASC, China (Grant No. 2023-36).

[†] Corresponding author. E-mail: miaopeixian@163.com

calibration specification for constant magnetic field coils.

The coercivity of a soft magnetic sample is measured by a pump-probe rubidium magnetometer. When the temperature of the soft magnetic sample increases from 100 to 300 K, the coercivity decreases from 58.59 to 41.02 A/m, and the bias of hysteresis loops fluctuates around 5 A/m. When the temperature of the soft magnetic sample is 300 K, the coercivity is measured repeatedly ten times, and the measurement reproducibility is expressed as 0.17% by relative standard deviation. Related methods have the potential to be applied in the characterization of magnetic properties of soil and rock samples, as well as in satellite magnetic cleanliness control, among other applications.

The precision of high-resolution aero magnetic measurement in Criterion of Aeromagnetic Survey is better than ± 1 nT. When drawing a large-area geomagnetic reference map, multiple sets of UAV aeromagnetic measurement systems need to be used simultaneously. The consistency of output values from multiple atomic magnetometers directly determines the accuracy of subsequent geomagnetic reference map splicing and processing. We suggest that the calibration of the working medium gyromagnetic ratio should be added to the proton magnetometer or atomic magnetometer calibration specification.

This article provides ideas and references for the research, development, and updating of calibration specifications and standards related to electromagnetic measurement.

Keywords: atomic magnetometer, magnetic field measurement, current measurement, Larmor precession

DOI: [10.7498/aps.75.20251624](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251624)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251624](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251624)



量子磁强计在电磁测量领域的应用及展望

缪培贤 史彦超 蔡志伟 杨旭红 徐子焱 涂建辉 陈江 杨炜

Applications and prospects of quantum magnetometer in electromagnetic measurement

MIAO Peixian SHI Yanchao CAI Zhiwei YANG Xuhong XU Zihan TU Jianhui CHEN Jiang YANG Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 060804 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251624

CSTR: 32037.14.aps.75.20251624

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251624>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

抽运-检测型原子磁力仪对电流源噪声的测量

Measurement of noise of current source by pump-probe atomic magnetometer

物理学报. 2022, 71(2): 024202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211122>

在开磁路中利用抽运-检测型铷原子磁力仪测量软磁材料的矫顽力

Measurement of coercivity of soft magnetic materials in open magnetic circuit by pump-probe rubidium atomic magnetometer

物理学报. 2022, 71(24): 244206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221618>

基于冷原子磁场调控的光量子存储

Optical quantum storage of cold atomic ensemble controlled by magnetic field

物理学报. 2026, 75(4): 244206 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251399>

真空封装含Herriott多反射腔原子气室及其在原子磁力仪中的应用

Atomic vapor cells with Herriott-cavity sealed under vacuum and their applications in atomic magnetometry

物理学报. 2025, 74(11): 110702 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250220>

极化中子散射零磁场屏蔽体的有限元分析

Finite element analysis of zero magnetic field shielding for polarized neutron scattering

物理学报. 2023, 72(14): 142801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230559>

基于铁磁扭摆振子的磁场测量及其应用

Ferromagnetic torsional oscillator based magnetic field measurement and its applications

物理学报. 2025, 74(3): 030701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241538>