

嫦娥 7 号月表磁场测量仪定标方法

王磊^{1,2}, 张莹^{1,2}, 葛亚松^{1,2}, 杜爱民^{1,2}, 李海英³, 孙树全^{1,2}, 赵琳^{1,2}, 李智^{1,2}, 冯晓^{1,2},
樊津桥^{1,2}

1 (中国科学院地质与地球物理研究所 深层油气理论与智能勘探开发重点实验室, 北京 100029)

2(中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049)

3(中国科学院国家天文台, 北京 100101)

摘要 月球磁场研究对揭示行星磁场演化规律、完善行星科学理论体系意义重大。嫦娥七号巡视器搭载的磁通门磁强计是获取月表磁场数据的核心载荷, 为保障测量精度, 需开展全面的地面标定和测试。本研究针对磁强计线性度、噪声与分辨率、矢量测量误差及温度稳定性等关键指标, 采用针对性方法标定。结果表明, 两个探头三分量量程均达 ± 2000 nT 设计要求, 线性误差优于 0.34 nT; 各轴噪声水平优于 10 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz; 非正交度校正至 $30''$ 以内, 比例因子误差低于 0.03%; 标定后的零偏温漂不确定度优于 1.5 nT, 比例因子温漂换算的磁场误差优于 0.06 nT。上述标定工作显著提升了磁强计的测量精度与可靠性, 为嫦娥七号月球南极磁场探测提供了坚实技术保障, 可为月表磁异常与磁场演化研究提供支撑, 也为后续深空磁场探测的仪器标定提供了技术参考与实践经验。

关键词 月球磁场; 磁通门磁强计; 地面标定; 线性度; 噪声; 旋转标定; 温度稳定性

* 国家自然科学基金项目(42404188)项目资助

Calibration Methods for the Lunar Surface Magnetic Field

Measuring Instrument of Chang'e-7

Wang Lei^{1,2}, Zhang Ying^{1,2}, Ge Yasong^{1,2}, Du Aimin^{1,2}, Li Haiying³, Sun Shuquan^{1,2},
Zhaolin^{1,2}, Li Zhi^{1,2}, Feng Xiao^{1,2}, Fan Jinqiao^{1,2}

1 (Key Laboratory of Deep Petroleum Intelligent Exploration and Development, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

2 (College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3 (National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract The investigation of the lunar magnetic field holds considerable importance for elucidating the evolutionary principles governing planetary magnetic fields and for enhancing the theoretical framework of planetary science. Within the context of the Chang'e-7 mission, China's key lunar exploration program targeting the lunar south pole, the fluxgate magnetometer installed on the rover serves as the primary instrument for acquiring high-precision in-situ magnetic field data from the lunar surface. To ensure the precision of its measurements and stability in the harsh lunar environment, it is imperative to conduct comprehensive pre-flight calibration and testing procedures. This study employs a range of targeted methodologies based on standard magnetic field calibration systems to calibrate the fluxgate magnetometer, focusing on critical performance metrics such as linearity, noise and resolution, vector measurement error, and temperature stability. The outcomes of the pre-flight calibration and testing indicate that the three-component ranges of both probes conform to the design specification of ± 2000 nT, with a linear error of less than 0.34 nT. The noise density for each axis is recorded at below 10 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz, and the resolution is superior to 0.01 nT. Non-orthogonality has been corrected to within 30", and the scale factor error is less than 0.03%. Additionally, after calibration, the uncertainty of the offset temperature drift is better than 1.5 nT, and the uncertainty of the scale factor temperature drift, when converted into a magnetic field error, is better than 0.06 nT. All metrics fully meet the mission's design requirements. This calibration effort significantly enhances the measurement accuracy and reliability of the magnetometer. The findings provide a robust technical foundation for the lunar south pole magnetic field detection mission of Chang'e-7, facilitating a deeper investigation into the formation mechanisms of lunar surface magnetic anomalies and the evolutionary history of the lunar magnetic field. Furthermore, this research offers valuable technical insights and practical experiences for the calibration of instruments in future lunar and planetary magnetic field detection missions.

Key words Lunar magnetic field; Fluxgate magnetometer; Pre-flight calibration; Linearity; Noise; Rotation calibration; Temperature stability

0 引言

自 20 世纪中叶人类开启太空探索时代以来,月球作为地球唯一的天然卫星,始终是深空探测的前沿阵地。从 1959 年苏联“月球 2 号”首次撞击月球,成为人类首个抵达地外天体的探测器,到 1966 年“月球 9 号”实现首次月面软着陆,苏联在早期月球探测中取得了开创性成果^[1,2]。随后,美国阿波罗计划于 1969 年至 1972 年间,6 次成功将人类送上月球表面,带回了大量珍贵的月壤与岩石样本,极大推动了月球科学的发展^[3,4]。进入 21 世纪,中国嫦娥系列探测器稳步推进,嫦娥三号实现我国首次月面软着陆与巡视勘察,嫦娥四号更是创造了人类探

测器首次在月球背面软着陆的壮举。这些里程碑式的探测任务，使人类对月球的认知不断深化^[5,6]。然而，针对月球表面磁异常的形成机制、月球发电机磁场的演化规律等重大科学问题，目前国内外学界仍存在诸多争议，其关键物理过程与内在演化机理尚未形成完备、自洽的理论体系。上述问题不仅是厘清月球整体演化历史的核心约束，更是揭示行星磁场形成与演化普遍规律的关键，对完善行星科学理论体系具有极为重要的科学价值^[7]。

当前，国际科学界对月球磁场的研究热情持续高涨。例如，美国宇航局（NASA）计划在未来重返月球的“阿尔忒弥斯”计划中，将月球磁场研究作为重要科学目标之一，期望通过新的探测任务获取更精确的磁场数据。欧洲空间局（ESA）也在积极筹备月球探测项目，致力于深入探索月球磁异常区域。月球磁场环境与地球存在显著差异，其表面磁场呈现极端复杂且不均衡的分布特征。在广袤的月表，磁场强度大多不足 10 nT，仅为地球磁场的百万分之一；但在南极-艾特肯盆地、雨海盆地等特殊区域，局部磁异常现象突出，磁场强度峰值可达数百纳特^[8,9]。同位素分析与地质研究表明，在月球早期（约 42 亿至 35 亿年前），其内部或存在类似地球的发电机效应，形成全球性磁场。随着月球内部冷却、核心活动停滞，这一磁场逐渐衰减消失^[10,11,12]。精确的月球磁场测量数据，成为揭示月表磁异常分布、追溯磁场演化、解析磁场与地质构造关系以及探究太阳风与月表磁异常相互作用机制的核心依据。

磁通门磁强计凭借成熟的技术体系和体积小、重量轻、功耗低、噪声小、分辨率高等优势，在深空磁场探测领域扮演着不可或缺的角色。以美国“阿波罗”任务为例，其搭载的磁通门磁强计首次实现了月球表面磁场的原位测量，为后续研究奠定了基础^[13]。在“月球勘探者”号探测器任务中，磁通门磁强计绘制了首幅全球月球磁场图，极大拓展了人类对月球磁场分布的认知^[14]。在即将开展的中国探月工程四期嫦娥七号任务中，月表磁场探测仪将肩负获取月球南极区域剩余磁场及其梯度分布规律的重任^[15]。其科学目标聚焦月球南极区域：一是获取沙克尔顿坑等着陆区月表剩余磁场及梯度分布，填补卫星轨道覆盖空白，分辨率达 10 pT 以识别 1 nT 量级岩石圈剩磁；二是与环月磁强计开展天月联合观测，捕捉 0.01~10 Hz 频段 ULF 波以解析磁层-电离层耦合机制，探测月表磁异常“微磁层”与太阳风相互作用，验证涡旋结构底部磁场精细特征。月表磁场测量仪由两

个磁通门传感器探头、伸杆和电子学单元组成，整体重量约 3.8 kg，功耗<6.5 W，具备月夜生存能力。两个磁通门传感器探头分别位于伸杆的顶端、距离顶端 30 cm 处的位置，伸杆长度约为 1.8 m，伸展机构展开后将磁通门传感器远离月球巡视器平台，最大程度降低月球巡视器对传感器磁场测量的干扰。嫦娥七号搭载的月表磁场探测仪探头主要由激励线圈、感应线圈、反馈线圈、线圈骨架和热敏电阻构成（如图 1 所示），探头采用亥姆霍兹补偿线圈结构，这种高精度的三轴同心结构传感器可实现空间中磁场的同点测量，能够消除梯度场带来的三轴矢量测量偏差，具有分辨率高、噪声水平低、稳定性好的优点。电子学单元采用了数字化全反馈电路，主要由电源模块、激励模块、信号采集模块、反馈模块、温度模块、FPGA 主控和处理模块以及通信接口 7 个部分组成。电子学单元给探头提供激励信号，使探头的磁芯处于周期性饱和状态，同时完成磁场信号采集、反馈计算和指令通讯功能。月表磁场测量仪拟实现的量程为 ± 2000 nT，线性误差小于 1 nT，噪声优于 $10 \text{ pT} \sqrt{\text{Hz}} @ 1\text{Hz}$ ，磁场矢量测量正交度误差小于 0.5° ，从而能够实现高精度的磁场矢量测量。这种基于数字全反馈电路和环型磁芯传感器技术的磁通门磁强计在国际和国内的深空探测任务中得到了广泛的运用^[16-21]。

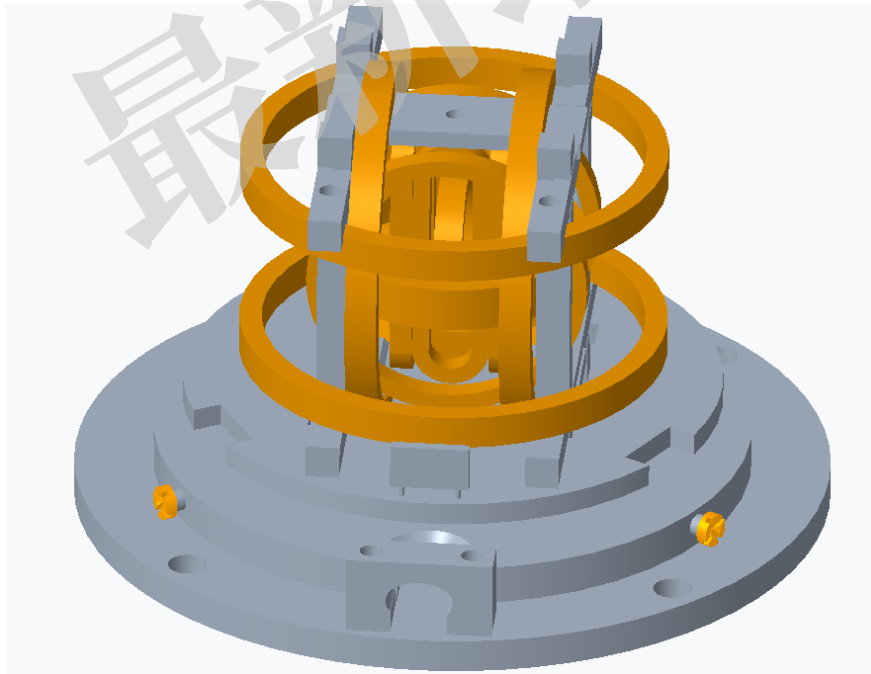


图 1 三轴同心磁通门传感器

Fig1. Three-axis concentric fluxgate sensor

然而，受精密加工工艺和复杂安装环境限制，磁通门磁强计的三维磁轴难以

达到理想正交状态，由此产生的角度误差会影响测量准确性。同时，传感器材料特性、电子学系统参数波动以及月球表面极端环境，会导致测量数据出现非线性误差、本底噪声和温度漂移等问题。例如，在月球昼夜温差高达 300°C 以上的极端环境下，磁通门磁强计的性能会受到显著影响。为获取高精度、高可信度的磁场探测数据，必须对仪器的线性度、噪声水平及温度稳定性开展系统标定工作。本文将围绕月表磁场测量仪的标定方法、关键技术及实验结果展开深入研究，旨在为月球磁场探测任务提供可靠的技术与数据支撑，助力破解月球磁场的科学谜题。

1 月表磁场测量仪标定测试方法

1.1 线性度和量程测试

月表磁场测量仪作为月球磁场特性研究的核心载荷，其搭载的磁通门磁强计测量精度直接决定了科学数据的可靠性与有效性。线性度量程测试要求环境磁场稳定且能提供标准磁场。本试验依托 710 国防弱磁一级计量站开展，该站点是经国家国防科技工业局行政许可认证的国防法定一级计量技术机构，具备弱磁参数测量的法定计量资质，可提供满足深空探测仪器标定要求的高精度测试环境。

稳定的磁场环境采用高精度标准加场线圈系统构建，线圈系统由亥姆霍兹加场线圈与低纹波直流稳压电源组成，能够产生空间分布均匀、方向可控且稳定性优异的磁场。在地磁场环境中，通过调节线圈电流，产生与地磁场大小相等、方向相反的补偿磁场，抵消地磁场。在此基础上，叠加额外的恒定控制电流，使线圈输出稳定可控的目标恒定磁场。搭配高精度恒流源保障电流稳定性，可在其中心均匀区内，获得不受地磁场波动影响的恒定叠加场，满足精密磁测量与实验的加场需求。试验时将月表磁场测量仪置于线圈系统中心，通过优化线圈结构与电源参数，确保磁场均匀度优于 0.1% 。该亥姆霍兹加场线圈系统的具体性能参数为：磁场范围 $-100\mu\text{T}\sim 100\mu\text{T}$ ，均匀区尺寸为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ ，均匀区磁场变化 $< 0.1\text{ nT}$ ，非线性度优于 1×10^{-5} ，满足测试需求。

采用三轴无磁转台调整待标磁强计姿态，使磁强计 X/Y/Z 轴分别与亥姆霍兹线圈的磁场方向对齐：通过已标定矢量磁强计监测线圈磁场方向，调整转台角度至磁强计单轴输出最大、其他轴输出最小。在 $\pm 2200\text{ nT}$ 全量程内，采用“分步线性加场”策略：零场附近步长为 400 nT ，其余区间步长为 200 nT 。在每个磁

场强度设定点，保持磁场稳定输出 30 秒，利用高精度数据采集系统同步记录磁强计三个分量的测量数据。通过延长数据采集时间，有效抑制随机噪声干扰，提升测量数据的信噪比与统计可靠性。

数据处理过程中，基于最小二乘法原理构建线性拟合模型。采用 $B_0=A*B_x+C$ 作为拟合公式，其中， B_0 代表由标准线圈系统产生的参考磁场值； B_x 为磁强计的实测磁场值； A 为比例因子，反映磁强计输出信号与实际磁场强度的比例关系； C 为零偏，用于修正磁强计在零磁场环境下的输出偏差。通过最小二乘法等优化算法对公式进行拟合，获取最佳的 A 和 C 参数值，从而建立磁强计测量值与标准磁场值之间的准确线性关系。将磁强计的测量数据与标准磁场数据进行对比分析，计算各探头在 X、Y、Z 轴方向上的线性度与量程指标。线性度通过计算测量值与标准值之间的最大偏差来表征。月表磁场测量仪的单轴量程为 (B_{min}, B_{max}) ，线性度为测量值与拟合直线的最大偏差 ΔB_{max} 除以满量程输出，计算方式为

$$\text{线性度} = \Delta B_{max} / |B_{max} - B_{min}| \quad (1-1)$$

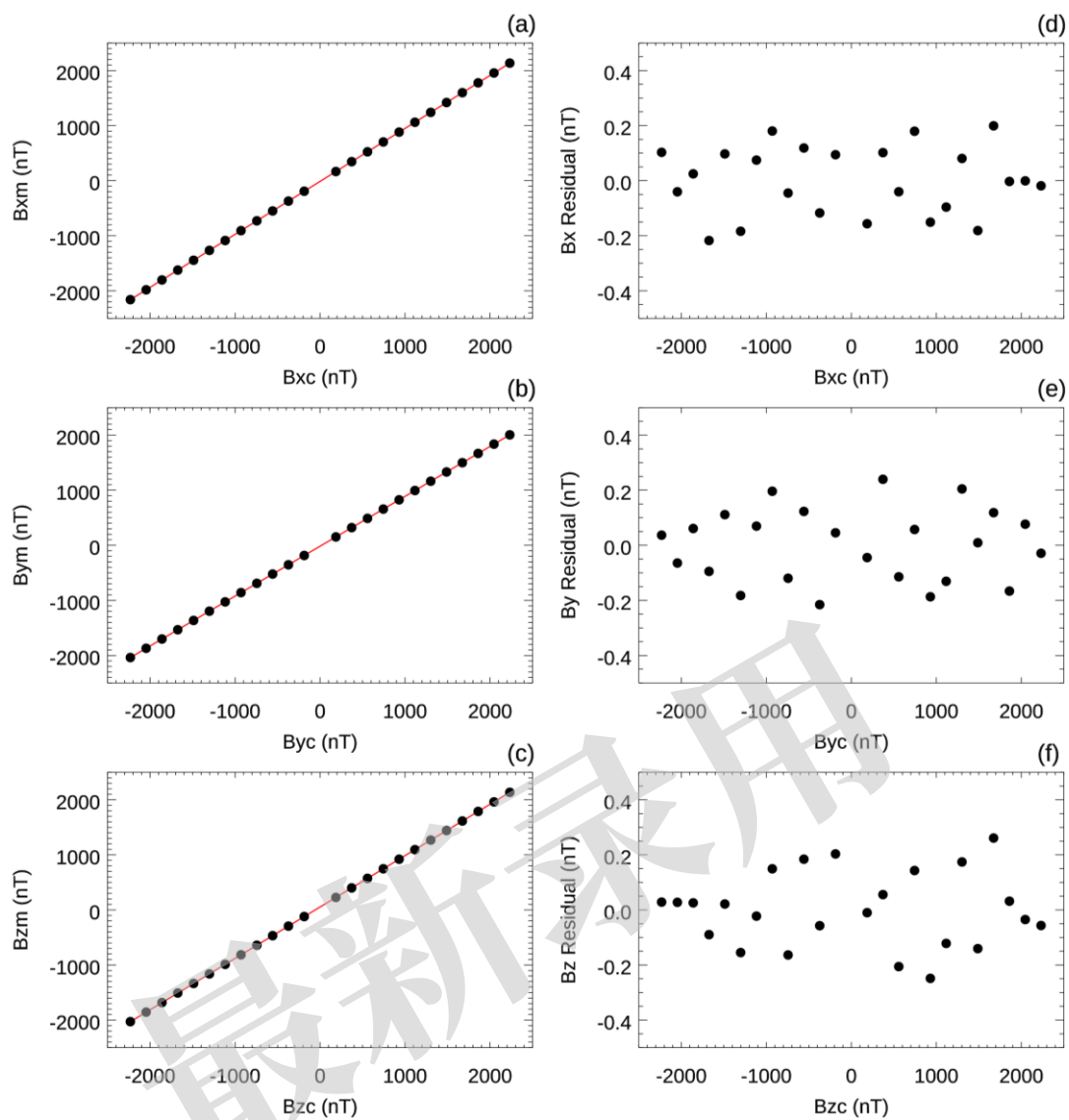


图 2 探头 1 线性度和残差分布

Fig. 2 Linearity and residual distribution of Probe 1

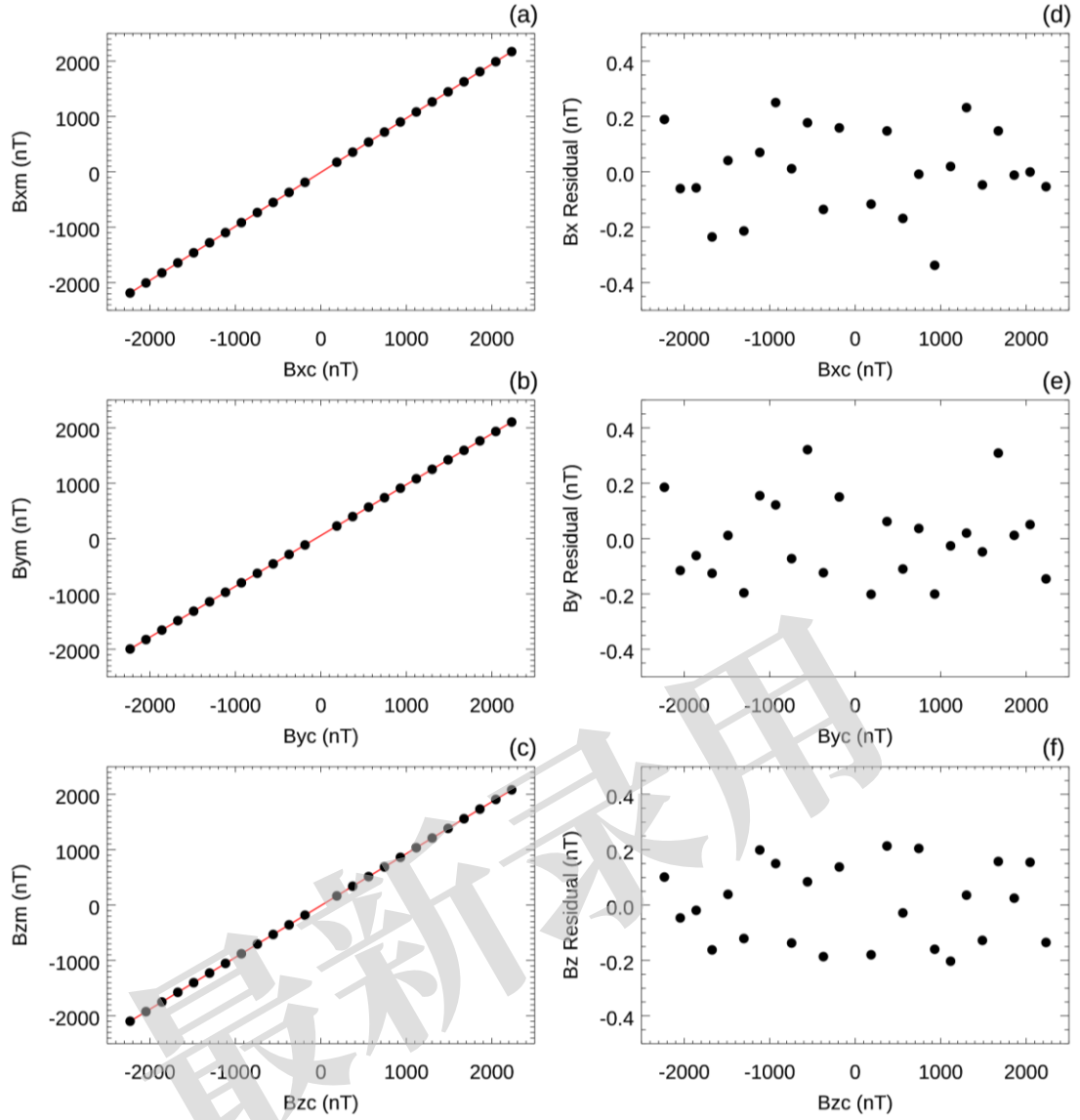


图 3 探头 3 线性度和残差分布

Fig. 3 Linearity and residual distribution of Probe 2

图 2 和图 3 展示了月表磁场测量仪探头 1 和 2 的地面加场试验结果。结果表明，两个探头的三分量量程均达到 ± 2000 nT 的设计要求，满足月球磁场探测的实际需求。详细的线性度分析表明，探头 1 在 X、Y、Z 轴的最大线性误差分别为 0.22 nT、0.24 nT、0.26 nT；探头 2 对应轴的线性误差为 0.34 nT、0.32 nT、0.21 nT（表 1）。这些指标验证了磁强计在全量程范围内的高精度线性响应特性，为月球磁场的定量分析提供了可靠保障。

表 1 线性度和线性误差标定结果
Table 1 Calibration results of linearity and linear error

仪器编号	轴向	线性偏差 /(nT)	线性度
探头 1	X	0.22	5.5×10^{-5}
	Y	0.24	6.0×10^{-5}
	Z	0.26	6.5×10^{-5}
探头 2	X	0.34	8.5×10^{-5}
	Y	0.32	8.0×10^{-5}
	Z	0.21	5.25×10^{-5}

1.2 噪声测试

月球表面磁场强度微弱，对磁强计的噪声水平与分辨率提出了极高要求。为精确表征磁通门磁强计的本底噪声特性，试验环境噪声需低于仪器噪声，本研究在 710 弱磁一级计量站，该站点专业弱磁测试条件保障试验需求。

实际测试中，选用 1.6 m 多层坡莫合金磁屏蔽筒降低环境磁场干扰，屏蔽桶中心区域剩磁 ≤ 1 nT，峰峰值噪声 ≤ 0.1 nT，为噪声测量提供理想零场条件，确保测试环境噪声在 0.01 nT 以下。

选取采样率为 128 Hz 的稳定观测数据作为分析样本（图 4），以确保覆盖磁强计工作频段的噪声分析需求。为精准评估磁强计的本底噪声，本研究参考国际主流空间磁场探测任务的标定规范^[22,23]，采用了标准化的频率特性分析流程。基于 Hanning 窗的 Welch 功率谱密度估计法，将信号划分为 50%重叠的子段进行频域变换，并对功率谱结果进行等效噪声带宽归一化，消除窗函数对谱线幅值的影响，保证噪声功率谱密度计算的物理准确性。为有效抑制实验室环境中的瞬态电磁干扰，本研究采用平均功率谱密度（Mean PSD）作为统计期望值，并取其平方根获得振幅谱密度（ASD，图 5）。最终以 1 Hz 处的幅度谱密度值作为衡量磁通门磁强计性能的本底噪声指标。

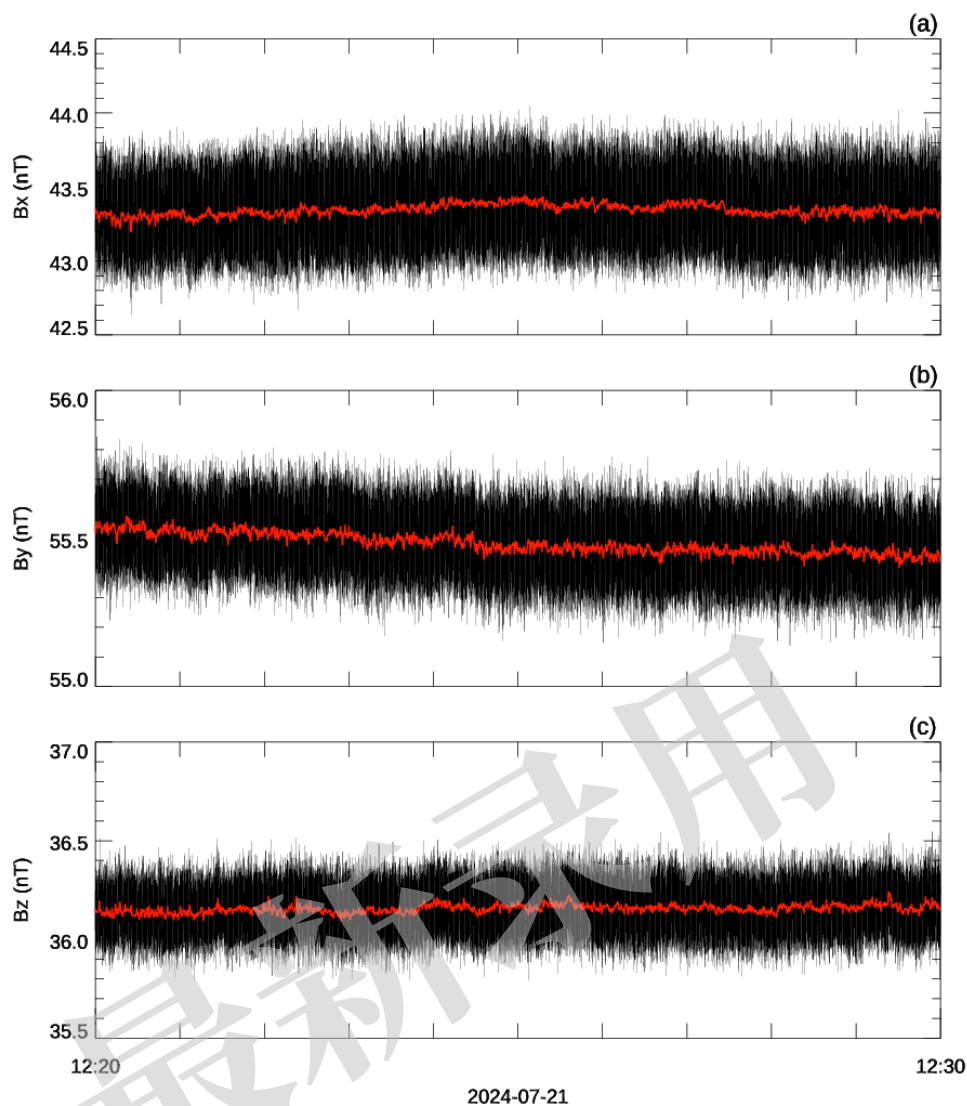


图 4 探头 1 磁场时域信号，黑线和红线分别是采样率为 128 Hz 的原始信号和平滑后的 1 Hz 信号

Fig. 4 Magnetic field time-domain signals of Probe 1: the black line and red lines represent the original signal with a sampling rate of 128 Hz and the smoothed 1 Hz signal, respectively

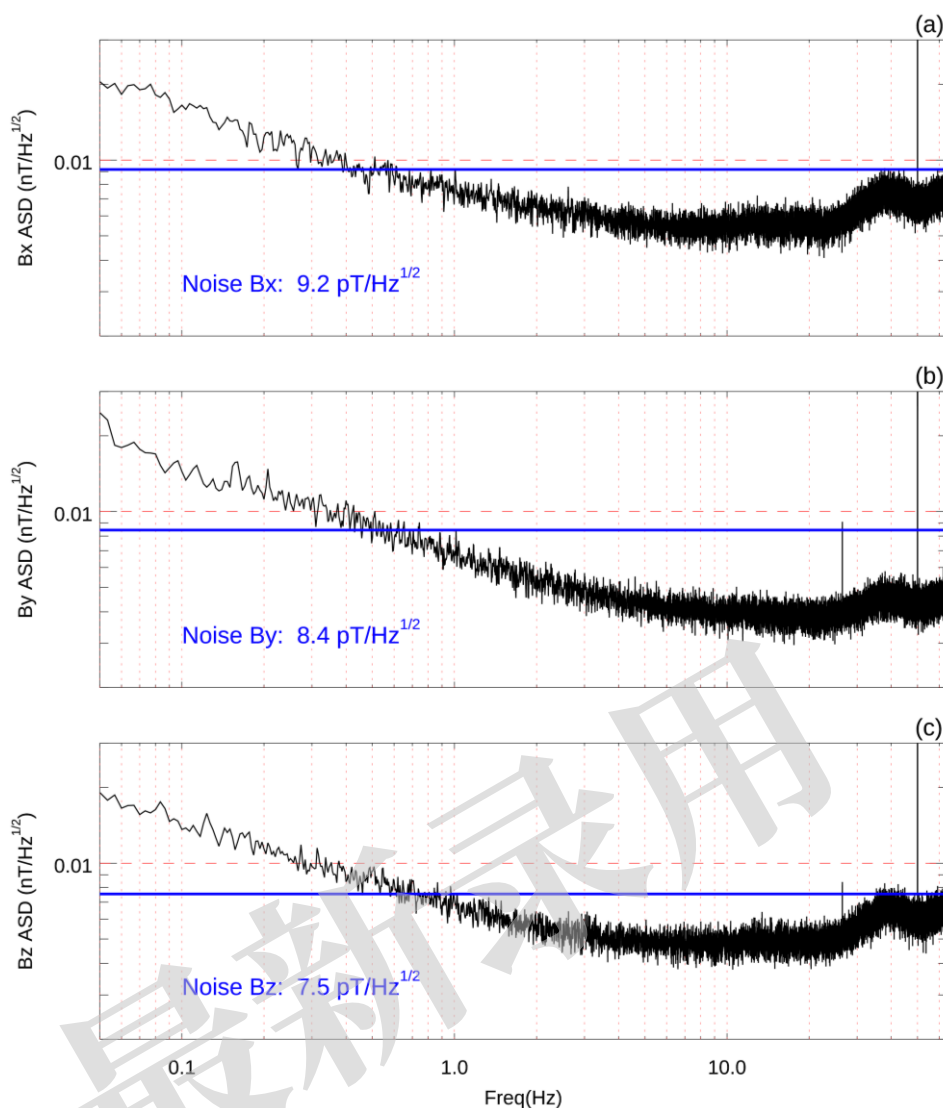


图 5 探头 1 磁场噪声幅度谱密度

Fig. 5 Magnetic field noise amplitude spectral density of Probe 1

结果显示探头 1 在 X、Y、Z 三轴 1 Hz 处的振幅谱密度 (ASD) 指标分别为 9.2 pT/√Hz、8.4 pT/√Hz 和 7.5 pT/√Hz；探头 2 对应轴 1 Hz 处的振幅谱密度分别为 9.1 pT/√Hz、5.9 pT/√Hz 和 7.1 pT/√Hz (表 2)。基于噪声水平计算得到的分辨率指标均优于 10 pT/√Hz @1Hz，表明该磁强计具备探测月球微弱磁场信号的能力，能够有效区分真实磁场信号与本底噪声。

表 2 噪声和分辨率测试结果
Table 2 Noise and resolution test results

仪器编号	轴向	噪声 B_N $/(pT/Hz^{1/2}@1Hz)$	分辨率 δ $/(pT)$
探头 1	X	9.2	9.2
	Y	8.4	8.4
	Z	7.5	7.5
探头 2	X	9.1	9.1
	Y	5.9	5.9
	Z	7.1	7.1

1.3 旋转标定

月球磁场的矢量特性包含丰富的科学信息，但磁通门磁强计在制造与装配过程中存在的非正交误差、刻度因子偏差及零偏等问题，严重影响磁场矢量测量的准确性。旋转标定是一种常用的磁通门磁强计标定方法，通过传感器在空间中的旋转运动采集多方向数据，进行误差参数计算^[24,25]。为实现高精度的磁场矢量标定，需稳定可控的背景磁场环境，避免环境磁场波动对多方向矢量数据采集的干扰，保障标定精度。标定试验于十三陵地磁台站，利用亥姆霍兹加场线圈搭建可控标准磁场环境，该线圈系统的性能参数与 1.1 节试验装置保持一致。

鉴于月表磁场测量仪量程为 ± 2000 nT，试验中将其置于亥姆霍兹加场线圈内，通过标准线圈配合直流稳压电源产生稳定磁场，采用“传感器旋转+固定磁场”模式模拟旋转加场——即模拟探头在稳定磁场环境中绕三轴旋转的测量场景。需注意的是，亥姆霍兹线圈与磁通门类似，同样存在非正交误差、刻度因子偏差及零偏漂移等固有问题，因此需先对线圈系统进行标定：将 Overhauser 质子磁强计（量程 20000~100000 nT）置于线圈系统中心位置，对线圈输入旋转加场信号，设定总场强度为 50000 nT，使磁场矢量方向在三维空间均匀分布于单位球面；利用质子磁强计的高精度数据对线圈进行标定，反演计算其线性因子、正交度及零偏参数，具体结果如表 3 所示。完成线圈标定后，将待标月表磁场测量仪探头置于线圈均匀区中心，对线圈系统施加总场为 1000 nT 的旋转加场，在 0° - 360° 范围内以 20° 为间隔进行模拟旋转测量，每个角度位置停留 1 分钟采集稳定数据。随后，基于已得到的亥姆霍兹线圈标定参数，对线圈产生的磁场进行校正，以校

正后的磁场数据作为基准场，完成待标月表磁场测量仪的旋转标定。过程中通过冗余测量与数据验证算法剔除异常数据点，保障标定数据可靠性；再基于旋转标定算法，采用迭代最小二乘法优化目标函数，最终求解得到仪器的线性系数、正交度系数及零偏。

在理想传感器正交坐标系下，磁通门磁强计的测量值 $\mathbf{B}_{\text{FGM}}$ 与真实磁场强度 $\mathbf{B}_{\text{tr}}$ 之间的关系为

$$\mathbf{B}_{\text{FGM}} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{B}_{\text{tr}} + \mathbf{b} \quad (1-2)$$

因此，

$$\mathbf{B}_{\text{tr}} = \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{S}^{-1} \cdot (\mathbf{B}_{\text{FGM}} - \mathbf{b}) \quad (1-3)$$

其中，仪器的零偏为

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (1-4)$$

刻度因子矩阵为

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix} \quad (1-5)$$

非正交度矩阵为

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\sin u_1 & \cos u_1 & 0 \\ \sin u_2 & \sin u_3 & \sqrt{1 - \sin^2 u_2 - \sin^2 u_3} \end{pmatrix} \quad (1-6)$$

则有

$$|\mathbf{B}_{\text{tr}}| = \sqrt{\mathbf{B}_{\text{tr}}^T \cdot \mathbf{B}_{\text{tr}}} = \sqrt{(\mathbf{B}_{\text{FGM}} - \mathbf{b})^T \cdot \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{P}^{-1})^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{B}_{\text{FGM}} - \mathbf{b})} \quad (1-7)$$

通过迭代最小二乘使得目标函数最小，即可计算仪器零偏、刻度因子以及非正交度系数，目标函数为

$$\chi^2 = \sum (B_{tr}(\mathbf{B}_{\text{FGM}}, \mathbf{m}) - |\mathbf{B}_{\text{tr}}|)^2 = \text{Min} \quad (1-8)$$

其中， $B_{tr}(\mathbf{B}_{\text{FGM}}, \mathbf{m})$ 为磁通门磁强计输出， $\mathbf{m} = (b_1, b_2, b_3, S_1, S_2, S_3, u_1, u_2, u_3)^T$ ， $|\mathbf{B}_{\text{tr}}|$ 为真实磁场强度测量值。

表 3 亥姆霍兹加场线圈标定参数

Table 3 Calibration parameters of Helmholtz magnetic field coil

轴向	比例因子	零偏/(nT)	正交轴夹角	非正交度 (°)
X	0.99999925	9.47	X-Y 夹角	0.015
Y	0.99981310	16.15	X-Z 夹角	0.022
Z	0.99990547	-13.09	Y-Z 夹角	0.012

将探头 1 和探头 2 旋转标定试验数据进行旋转标定可计算出比例因子、零偏以及非正交度，图 6 给出了探头 1 第一次标定的结果。将计算出的标定系数代入到测量结果中，通过第二次旋转标定（结果如图 7），可检验标定参数的可靠性和标定后的仪器性能指标。标定后比例因子、零偏以及非正交度，计算结果如表 4 和表 5 所示。标定结果显示，两个探头经校正后的非正交度均优于 $30''$ 。标定后总场残差在 $\pm 5\text{nT}$ 波动，误差来源主要包括几个方面：①未被模拟的线圈和磁强计的非线性信号；②线圈和磁强计非正交度补偿误差；③标定期间的背景磁场波动；④总场参考源仪器误差；⑤迭代最小二乘算法数值计算误差。旋转标定有效提升了磁强计的矢量测量精度，为月球磁场探测提供了高精度的数据支撑。

最新录用

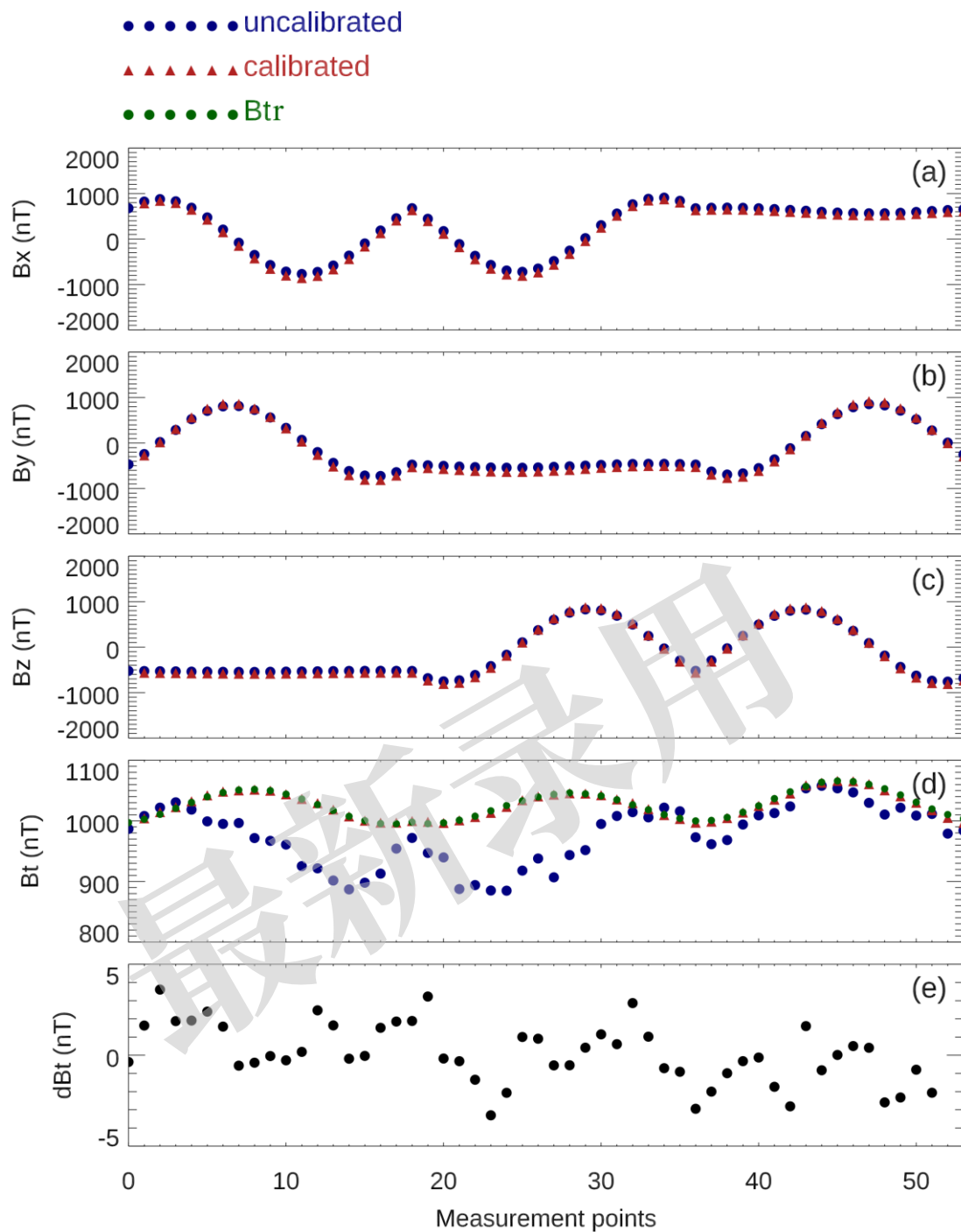


图 6 探头 1 第一次标定结果。从上到下依次为磁场 x 、 y 、 z 三分量；总场（蓝点：标定前的磁场值，绿点：亥姆霍兹线圈参数校正后的已标定矢量磁强计的基准场 B_t ，红色三角符号：标定后的总场值）；标定后磁强计总场值与基准场 B_t 的差值残差

Fig 6 First calibration results of Probe 1. From top to bottom are the x , y , z components of the magnetic field; total field (blue dots: magnetic field values before calibration, green dots: calibrated-magnetometer magnetic field reference field after Helmholtz coil parameter correction, red triangles: total field values after calibration); residual of calibrated total field and B_t

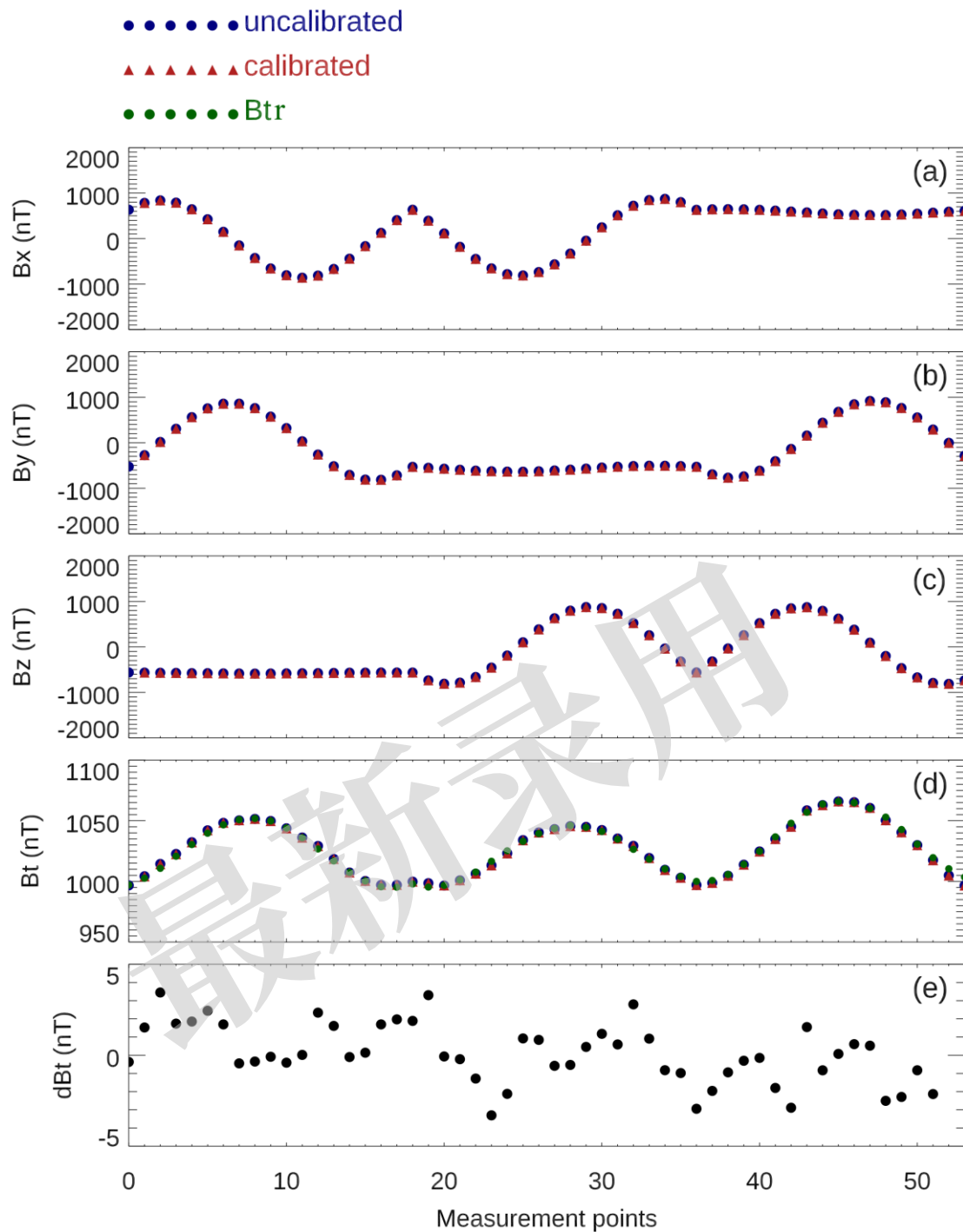


图 7 探头 1 第二次标定结果

Fig 7 The second calibration results of Probe 1

表 4 比例因子和零偏参数标定结果

Table 4 Calibration results of scale factor and offset parameters

仪器编号	轴向	比例因子	零偏标定重复性 误差/(nT)
探头 1	X	1.0002376	-0.009
	Y	0.99977283	0.012
	Z	0.99998964	0.007

探头 2	X	1.0001449	-0.011
	Y	0.99991841	-0.028
	Z	0.99993670	0.003

表 5 非正交度标定结果

Table 5 Calibration results of non-orthogonality

仪器编号	正交轴夹角	非正交标定重复性 误差/(°)
探头 1	X-Y 夹角	-5.22
	X-Z 夹角	0.35
	Y-Z 夹角	-15.32
探头 2	X-Y 夹角	-5.71
	X-Z 夹角	-0.82
	Y-Z 夹角	-29.35

1.4 温度稳定性试验

月球表面极端的温度环境对磁强计的温度稳定性提出了严苛挑战。为确保磁强计在全温区的测量精度，温度稳定性试验需要无磁温控环境测试仪器零偏以及刻度因子随温度的变化。实验测试在空间中心无磁温控试验装置中运行，对零偏的温度稳定性测试，将磁强计探头放置于磁屏蔽桶中，采用液氮制冷和热风加热的方式进行温度控制；对于刻度因子的温度稳定性试验，将探头放置于亥姆霍兹线圈中的无磁温控箱内，亥姆霍兹线圈放置于磁屏蔽屋内，消除环境干扰；磁强计电子学单元可放置于高低温箱内，温度范围 $-40^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$ ，温度稳定性 $<1^{\circ}\text{C}$ ，用于对磁强计电子学模块进行温度调控，从而实现不同电子学温度、不同探头温度下的温度稳定性测试。

(1) 仪器零偏 offset 温漂

对电子学箱 -25°C 、 -5°C 、 15°C 、 35°C 、 60°C 下探头 X 轴向在 $-85^{\circ}\text{C}\sim+75^{\circ}\text{C}$ 下的各个测试点的零场下的数据进行平均处理，得到各个温度测试点下的基值，对不同探头温度下的基值进行多项式拟合，确定出 5 个电子学温度下零偏随温度的变化量 $\Delta b_x = F_{bx}(T)$ 的函数， $F_{bx}(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + \dots + a_n \cdot T^n$ 。通过获取的多项式拟合系数，可对零偏的温漂进行修正，修正后的残差范围除以温度变化范围，即为磁强计零偏随温度变化的稳定性。图 8 以探头 1 的 X 轴为例，展示了零偏随探头温度及电子学温度的变化，其多项式拟合曲线及测量值与拟合值的残差分布。同样的处理方法可以得到 Y 和 Z 轴向的零偏随温度的变化量。标定后 offset 随探头温度(T_s)和电子学单元温度(T_e)变化的不确定度评估方法如

下:

$$\Delta\text{offset} = \text{offset}_{\text{原始}} - \text{offset}_{\text{多项式拟合修正}} \quad (1-9)$$

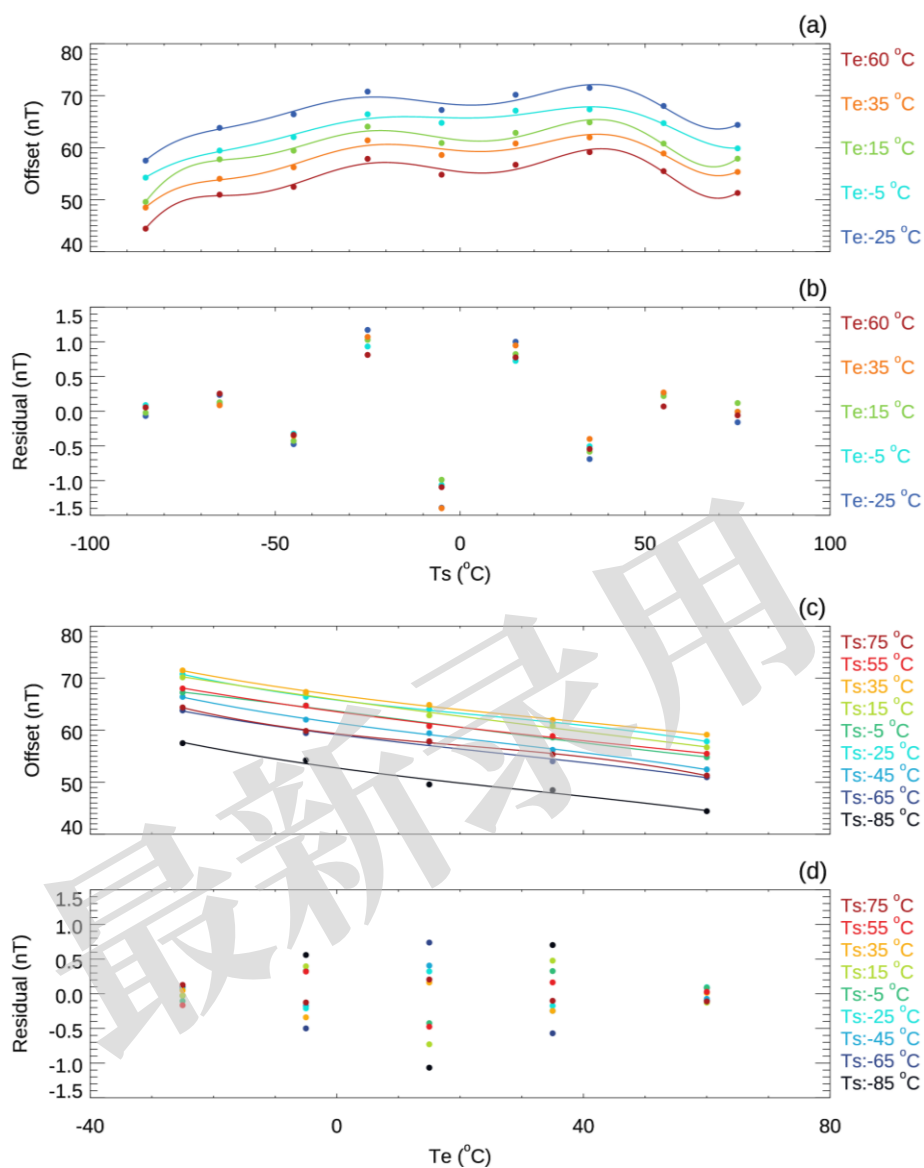


图 8 探头 1 X 轴 offset 随探头温度及电子学温度的变化

Fig 8 Variation of X-axis offset of Probe 1 with probe temperature and electronics temperature

两探头各轴向计算得到的零偏随温度变化的标定如表 6 所示, 标定后零偏的最大不确定度不超过 1.5 nT。

表 6 Offset 温漂标定结果
Table 6 Calibration results of offset temperature drift

仪器编号	轴向	$\max(\Delta\text{offset}(T_s))$ (nT)	$\max(\Delta\text{offset}(T_e))$ (nT)
探头 1	X	1.39	1.06
	Y	1.21	0.91

探头 2	Z	1.42	0.99
	X	1.24	1.06
	Y	1.42	0.81
	Z	1.34	0.80

(2) 仪器比例因子 scale 温漂

对电子学箱-25℃、-5℃、15℃、35℃、60℃下探头 X 轴向在-85℃~+75℃下的各个测试点的加场下的数据进行线性拟合处理,得到各个温度测试点下的比例因子,对不同探头温度下的比例因子进行多项式拟合,确定出 5 个电子学温度下比例因子随温度的变化量 $\Delta S_x = F_{sx}(T)$ 的函数, $F_{sx}(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + \dots + a_n \cdot T^n$ 。同样的处理方法可以得到 Y 和 Z 轴向的比例因子随温度的变化量。

通过在不同温度下的加场试验,可以得到探头 1 和探头 2 的 X、Y、Z 三分量随探头温度的变化。为了实现 Scale 温漂的标定,我们对不同探头温度下的 scale 进行多项式拟合,确定出不同电子学温度下比例因子随温度的变化关系式。不同的电子学温度下, scale 相对于探头温度和电子学温度的变化率为

$$\frac{dscale}{dT_s} = \frac{\max(scale(T_s)) - \min(scale(T_s))}{\max(T_s) - \min(T_s)} \quad (1-10)$$

表 7 给出不同电子学温度下比例因子 scale 相对于探头温度的变化率,最大变化率为 $-20.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。图 9 以探头 1 的 X 轴为例给出了相对于探头温度和电子学单元温度的多项式拟合结果及残差分布。

标定后 scale 随探头温度(T_s)和电子学单元温度(T_e)变化的不确定度评估方法如下:

$$\Delta scale = scale_{\text{原始}} - scale_{\text{多项式拟合修正}} \quad (1-11)$$

表 7 Scale 相对于探头温度的变化率 (温漂系数)

Table 7 The variation rate of Scale relative to the temperature of Probe 1

		dScale/dT / ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)				
电子学温度/ $(^{\circ}\text{C})$		-25	-5	15	35	60
探头 1	X 轴	-20.8	-20.0	-18.4	-19.4	-19.5
	Y 轴	-15.5	-14.7	-13.4	-14.7	-14.7
	Z 轴	-15.5	-14.5	-13.5	-14.1	-14.5
探头 2	X 轴	-19.1	-18.2	-18.1	-18.3	-17.6
	Y 轴	-14.5	-14.6	-14.5	-15.2	-13.6
	Z 轴	-13.2	-14.2	-14.7	-14.6	-15.4

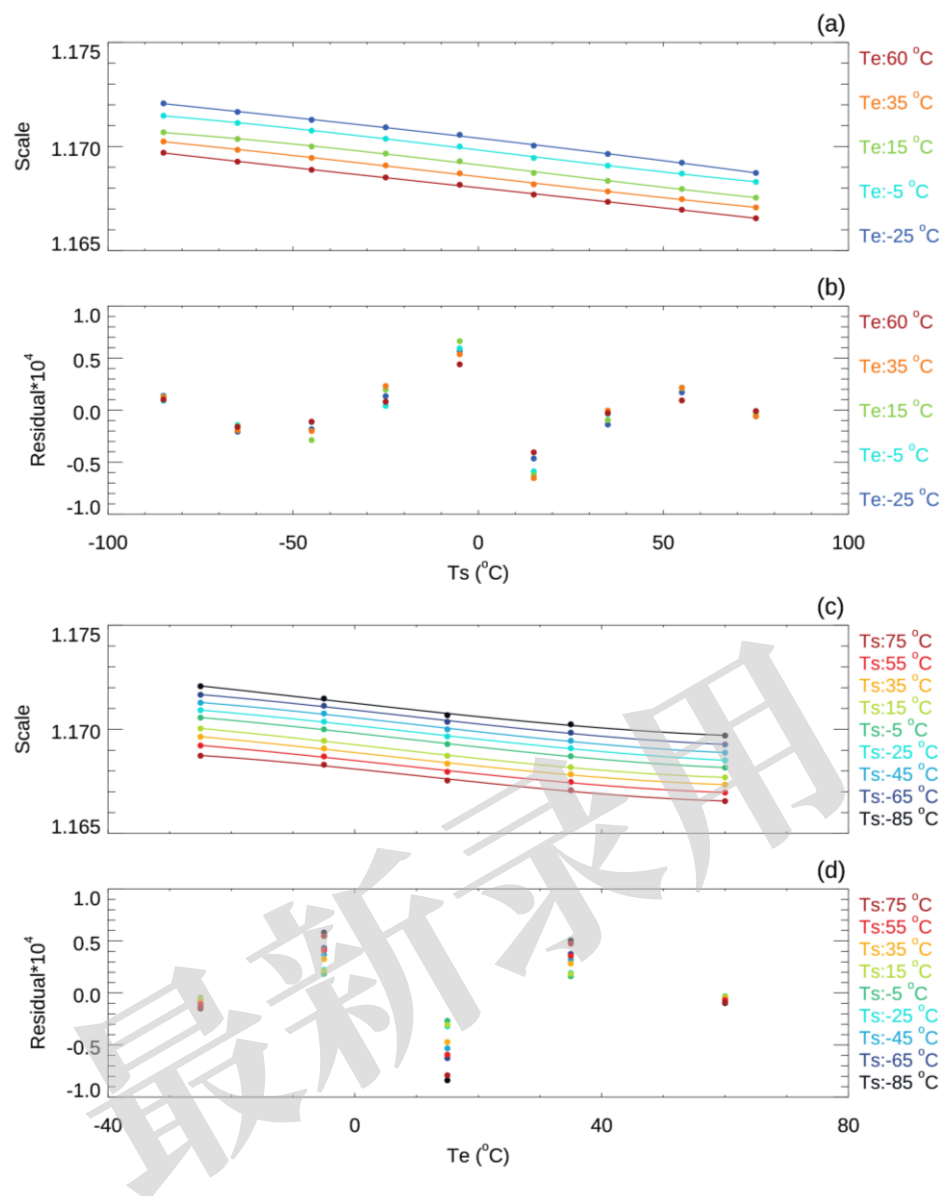


图 9 探头 1 X 轴 Scale 随探头温度及电子学温度的变化

Fig 9 Variation of X-axis scale of Probe 1 with probe temperature and electronics temperature

月球表面磁场最大约为 200nT, 将 Scale 的最大残差转换为 nT, 计算公式为: $\text{Max}|\Delta\text{Scale}|*200\text{nT}$ 。各轴向 Scale 温漂残差结果见表 9, 温漂标定后的残差最大值换算为磁场均小于 0.06 nT。

表 9 Scale 温漂标定结果

Table 9 Calibration results of offset temperature drift

仪器编号	轴向	$\text{max}(\Delta\text{scale}(T_s))$	$\text{max}(\Delta\text{scale}(T_e))$
探头 1	X	0.63×10^{-4}	0.58×10^{-4}
	Y	0.60×10^{-4}	0.19×10^{-3}
	Z	0.54×10^{-4}	0.28×10^{-3}

探头 2	X	0.61×10^{-4}	0.18×10^{-3}
	Y	0.58×10^{-4}	0.47×10^{-4}
	Z	0.50×10^{-4}	0.29×10^{-3}

2 结论

本研究围绕嫦娥七号任务月表磁场测量仪的磁通门磁强计开展了系统性标定工作，旨在为月球磁场探测提供高精度、高可靠性的数据支撑。针对磁通门磁强计线性度、噪声、矢量测量误差及温度稳定性等关键性能指标，设计并实施了系列地面标定和测试实验。

在线性度和量程标定中，通过搭建高精度标准加场线圈系统，在 ± 2000 nT 量程内以固定间隔线性加场，利用最小二乘法构建拟合模型，结果表明两个探头三分量量程均达设计要求，线性误差优于 0.34 nT，确保了磁强计输出与实际磁场强度的高度线性关系。磁强计的噪声与分辨率标定在高性能磁屏蔽环境下完成。通过采用 Welch 功率谱密度估计算法，对实测数据进行分析，结果显示磁强计在 1Hz 处的振幅谱密度优于 $10 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。该指标充分验证了磁强计对月球表面微弱磁场信号的精密探测能力。旋转标定基于误差补偿模型，利用高精度旋转平台实验，将探头非正交度校正至 $30''$ 以内，刻度因子误差优于 0.03%，总场测量误差显著降低，实现了高精度磁场矢量测量。温度稳定性试验构建双温区测试系统，覆盖 -85°C 至 75°C 温度范围，通过零偏和比例因子温漂分析，建立温度补偿模型，最终标定后的温漂不确定度不超过 1.5 nT，保障了磁强计在月球极端温度环境下的稳定测量性能。

上述标定工作有效解决了磁通门磁强计在非线性误差、本底噪声、非正交偏差及温度漂移等方面的问题，全面提升了仪器测量精度与可靠性。研究成果将为嫦娥七号月球南极磁场探测任务提供坚实技术保障，有助于深入揭示月球表面磁异常形成机制、追溯月球磁场演化历史，对完善行星磁场理论体系、推动月球科学研究发展具有重要意义，同时也为后续深空磁场探测任务的仪器标定工作提供了技术参考与实践经验。

参考文献

- [1] JAFFE L D, SCOTT R F. Lunar surface strength: implications of Luna 9 landing[J]. *Science*, 1966, **153**(3734): 407-408
- [2] DOLGINOV Sh Sh, EROSHENKO E G, ZHUZGOV L N, *et al.* Magnetic field measurement in the Moon's neighbourhood at Luna-10 satellite[J]. *Dokl Akad Nauk SSSR*, 1966, **170**(3): 574-577 (in Russian) (查阅网上资料, 未找到本条文献, 请确认) (说明: 该文献为 1966 年俄文原版文献, 未被主流数据库收录, 但其英译本记录可查见于《美国政府出版物目录》(1967 年, 编号 TT 66-35221)。作为月球探测的重要历史数据, 本文需保留该引用。为此, 我已在修改稿中将作者缩写规范为“DOLGINOV Sh Sh”, 并在文末补充“(in Russian)”以标明语种, 消除歧义。)
- [3] Apollo 15 Preliminary Examination Team. The Apollo 15 lunar samples: a preliminary description[J]. *Science*, 1972, **175**(4020): 363-375
- [4] TAYLOR S R. Lunar Science: A post-Apollo View: Scientific Results and Insights from the Lunar Samples[M]. New York: Pergamon Press, 2013
- [5] LI C L, LIU J J, REN X, *et al.* The Chang'E 3 mission overview[J]. *Space Science Reviews*, 2015, **190**(1): 85-101
- [6] JIA Y Z, ZOU Y L, PING J S, *et al.* The scientific objectives and payloads of Chang'E-4 mission[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, **162**: 207-215
- [7] LUO H, WANG H P, CAI S H, *et al.* Evolution of the lunar magnetic field[J]. *Space: Science & Technology*, 2024, 4: 0155
- [8] HOOD L L, SCHUBERT G. Lunar magnetic anomalies and surface optical properties[J]. *Science*, 1980, **208**(4439): 49-51
- [9] TSUNAKAWA H, TAKAHASHI F, SHIMIZU H, *et al.* Surface vector mapping of magnetic anomalies over the moon using Kaguya and lunar prospector observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, **120**(6): 1160-1185
- [10] CISOWSKI S M, COLLINSON D W, RUNCORN S K, *et al.* A review of lunar paleointensity data and implications for the origin of lunar magnetism[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1983, **88**(S02): A691-A704

[11] WEISS B P, TIKOO S M. The lunar dynamo[J]. *Science*, 2014, **346**(6214): 1246753

[12] STRAUSS B E, TIKOO S M, GROSS J, *et al.* Constraining the decline of the lunar dynamo field at ≈ 3.1 Ga through paleomagnetic analyses of Apollo 12 mare basalts[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, **126**(3): e2020JE006715

[13] DYAL P, PARKIN C W, DAILY W D. Magnetism and the interior of the moon[J]. *Reviews of Geophysics*, 1974, **12**(4): 568-591

[14] HOOD L L, ZAKHARIAN A, HALEKAS J, *et al.* Initial mapping and interpretation of lunar crustal magnetic anomalies using Lunar Prospector magnetometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, **106**(E11): 27825-27839

[15] WANG C, JIA Y Z, XUE C B, *et al.* Scientific objectives and payload configuration of the Chang'E-7 mission[J]. *National Science Review*, 2024, **11**(2): nwad329

[16] ZHANG T L, BAUMJOHANN W, DELVA M, *et al.* Magnetic field investigation of the Venus plasma environment: expected new results from Venus Express[J]. *Planet and Space Science*, 2006, **54**(13/14): 1336-1343

[17] AUSTER H U, APATHY I, BERGHOFER G, *et al.* ROMAP: rosetta magnetometer and plasma monitor[J]. *Space Science Reviews*, 2007, **128**(1/2/3/4): 221-240

[18] AUSTER H U, GLASSMEIE K H, MAGNES W, *et al.* The THEMIS fluxgate magnetometer[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **141**(1/2/3/4): 235-264

[19] HERČÍK D, AUSTER H U, BLUM J, *et al.* The MASCOT magnetometer[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **208**(1): 433-449

[20] ZHAO Lin, ZHAO Aimin, QIAO Donghai, *et al.* The ROVER fluxgate magnetometer[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, **5**(5): 472-477 (赵琳, 杜爱民, 乔东海, 等. 火星车磁通门磁强计技术[J]. 深空探测学报, 2018, **5**(5): 472-477)

[21] DU A M, ZHANG Y, LI H Y, *et al.* The Chinese Mars ROVER fluxgate

magnetometers[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(8): 135

[22] HORBURY T S, O'BRIEN H, CARRASCO BLAZQUEZ I, *et al.* The Solar Orbiter magnetometer[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, **642**(11): A9

[23] ELZENHEIMER E, KNAPPE-GRÜNEBERG S, ZERFOWSKI J, *et al.* Key metrics and experimental test bench for assessing highly sensitive magnetometers in research[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, **25**(2): 2432-2455

[24] RISBO T, BRAUER P, MERAYO J M G, *et al.* Ørsted pre-flight magnetometer calibration mission[J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, **14**(5): 674-688

[25] OLSEN N, HOLME R, HULOT G, *et al.* Ørsted initial field model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(22): 3607-3610

作者简介



王磊 男, 1991 年 2 月出生于河南省周口市, 现为中国科学院地质与地球物理研究所特聘副研究员, 硕士生导师。主要研究方向为行星磁场探测与行星磁层动力学过程等。

E-mail: wlei@mail.iggcas.ac.cn



张莹 (通信作者) 女, 1979 年 4 月出生于山东省聊城市, 现为中国科学院地质与地球物理研究所副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为地球与行星磁场探测研究等。

E-mail: yzhang@mail.iggcas.ac.cn