

面向地磁探测的平面三轴 GMI 磁传感器磁场信号解算方法及验证

晋芳^{1,2,3*}, 江锦鹏^{1,2,3}, 鲁佳琦^{1,2,3}, 朱晓渝^{1,2,3}, 王世恒^{1,2,3}, 董凯锋^{1,2,3}, 宋俊磊^{1,2,3}, 莫文琴^{1,2,3}

1.中国地质大学(武汉)自动化学院, 武汉, 430074

2.复杂系统先进控制与智能化湖北省重点实验室, 武汉, 430074

3.地球探测智能化技术教育部工程研究中心, 武汉, 430074

摘要: 地磁场在地球内部具有稳定分布, 其方向和强度可作为天然参考基准。地磁探测技术为深地、水下等复杂环境提供了可靠的导航解决方案, 尤其在自主性、隐蔽性和抗干扰能力方面优势显著。地磁导航探测中多采用三轴磁传感器获取空间磁场分布信息, 从而反演得到位置信息, 因此三轴磁传感器精度是地磁导航探测的关键性能指标之一。然而, 传统三轴磁传感器由于体积大、制备工艺复杂、正交性难以保证, 常引入测量误差且不易校正, 制约了其精度的提升。为此, 本文提出了一种基于磁力线变轨和磁力线聚集原理的平面三轴 GMI 磁传感器设计方案。该设计将三个磁探头在平面内呈正交排列, 通过磁力线变轨结构实现三维磁场的平面化测量, 有效避免常规三轴磁传感器正交性难以保证带来的误差。文中对构建的三轴磁探头进行了仿真分析, 解析了各探头信号构成, 并推导出相应的信号解算方法。实验结果表明, 该传感器测量范围达 $\pm 370 \mu\text{T}$, X、Y、Z 三个方向的输出电压灵敏度分别为 1416V/T、1424V/T 和 628.3V/T。本方案在保障测量精度的同时, 实现了三维磁场的平面化集成测量, 尤其提升了 Z 方向的检测精度, 为高性能三轴磁传感器的发展提供了新路径。

关键词: 地磁场探测; 地磁导航; 平面三轴 GMI 磁传感器; 磁力线变轨

中图分类号: P318.6, TP212

收稿日期: 2025-11-15

Method for Decoding Magnetic Field Signals from Planar Triaxial GMI Magnetic Sensors for Terrestrial Magnetic Surveys and Its Validation

JIN Fang^{1,2,3*}, JIANG JinPeng^{1,2,3}, LU JiaQi^{1,2,3}, ZHU XiaoYu^{1,2,3}, WANG ShiHeng^{1,2,3},
DONG KaiFeng^{1,2,3}, SONG JunLei^{1,2,3}, MO WenQin^{1,2,3}

1 School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan, 430074, China

2 Hubei key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, Wuhan, 430074, China

3 Engineering Research Center of Intelligent Technology for Geo-Exploration, Ministry of Education, Wuhan, 430074, China

Abstract: The geomagnetic field exhibits a stable distribution within the Earth's interior, with its direction and intensity serving as a natural reference benchmark. Geomagnetic detection technology provides reliable navigation solutions for complex environments such as deep underground and underwater settings, demonstrating particular advantages in autonomy, concealment, and interference resistance. In geomagnetic navigation detection, triaxial magnetometers are commonly used to acquire the spatial distribution information of the magnetic field, thereby inverting position information. Hence, the accuracy of triaxial magnetometers is one of the key performance indicators in geomagnetic navigation detection. However, conventional triaxial magnetic sensors suffer from large size, complex fabrication processes, and difficulty in ensuring orthogonality. These factors frequently introduce measurement errors that are challenging to correct, thereby limiting precision improvements. To address this, this paper proposes a planar triaxial GMI magnetic sensor design based on the principles of magnetic flux line reorientation and magnetic flux line aggregation. This design orthogonally arranges three magnetic probes within a plane. By employing a magnetic flux line deflection structure, it enables planar measurement of three-dimensional magnetic fields, effectively mitigating errors arising from the inherent orthogonality challenges of conventional triaxial sensors. The constructed triaxial magnetic probes underwent simulation analysis, with the signal composition of

基金项目 湖北省自然科学基金面上项目 (No.2023AFB632), 湖北省教育厅指导性项目 (No.B2023242)

作者简介: 晋芳 (1978-), 副教授, 从事地磁探测, 高精度磁导航传感器研制, E-mail: jinfang78@cug.edu.cn

*通讯作者: 晋芳, ORCID: 0000-0003-0774-788X, E-mail: jinfang78@cug.edu.cn

each probe resolved and corresponding signal calculation methods derived. Experimental results demonstrate a measurement range of $\pm 370 \mu\text{T}$, with output voltage sensitivities of 1416 V/T, 1424 V/T, and 628.3 V/T for the X, Y, and Z axes respectively. This approach achieves planar integrated measurement of three-dimensional magnetic fields while maintaining measurement accuracy, notably enhancing detection precision in the Z-direction. It thus provides a novel pathway for developing high-performance triaxial magnetic sensors.

Key words: Geomagnetic Field Detection, Earth-magnetism Navigation, Planar Triaxial GMI Magnetic Sensor; Magnetic Flux Redirection

1 引言

地磁场作为地球固有的物理场,其方向与强度(如总场强度 T 、磁偏角 D 等)在近地空间具有稳定的空间分布特征,可为导航定位提供天然的基准参考(郑永飞等, 2024; 李永祥等, 2021)。由于地磁场长期变化缓慢,地磁的导航系统在短时间内误差累积性,相较于惯性导航系统等目前常用导航方式,具有更高的长期稳定性和无累计误差的优势(张敏等, 2020; 王喜珍等, 2024)。因此,地磁探测技术为深地、水下等复杂环境提供了可靠的导航解决方案,尤其在自主性、隐蔽性和抗干扰能力方面优势显著(蒲秀浪等, 2024)。为实现高精度地磁匹配导航,关键在于解决三个方面的问题:导航区域地磁数据库的建立、载体上磁力仪实时测量精度的提升,以及地磁匹配算法的优化(李婷等, 2014)。

对于其中的第二个关键问题:提升磁力仪实时测量精度,其重点在于高精度地磁探测仪器的研制,关键体现在仪器磁传感器的灵敏度和噪声水平两大核心指标。目前常用的地磁探测仪器主要分为地磁总场探测仪和矢量磁场探测两大类。地磁总场探测仪主要有质子旋进磁力仪和光泵磁力仪等,其中质子旋进磁力仪广泛应用于地磁观测台和地面资源勘探中,它能够提供连续、长期和高精度的地磁总场绝对观测值(邢奥成等, 2025; 段金松等, 2014);光泵磁力计则广泛应用在航空磁测中,将光泵磁力仪搭载于飞机或无人机上,能够进行大范围、快速的磁场数据采集(张全哲等, 2024)。这些磁力仪虽然能够实现高精度地磁场测量,但只能测量磁场总场这一标量值,无法直接提供地磁场矢量信息,这提高了后续磁场定位的难度(孙君嵩等, 2025)。因此,在地磁导航中,采用矢量磁场探测仪器获取高精度地磁场矢量信息对后续利用地磁场矢量场进行姿态确定和方向导航至关重要(马彦宁等, 2024),在地磁探测领域受到关注(葛丽丽等, 2017; 张青杉等, 2025)。

然而,目前常规的三轴矢量磁传感器:三轴磁通门磁力仪、三轴 AMR 磁力仪和三轴 TMR 磁力仪

(江胜华等, 2025; 裴华刚等, 2025; 赵德华等, 2025)存在体积大、制备工艺复杂、正交性难以保证等问题(赵云琨等, 2025)。Lu 等人设计了一款具有平面结构的三轴磁通门磁强计(Lu *et al.*, 2015; Luong *et al.*, 2017),但由于导磁器对 Z 轴磁场的转换效率较低,该传感器的灵敏度表现不佳。Lai 等科研人员提出了一种方案(Lai *et al.*, 2015),旨在同一基底上实现 AMR 和软磁块阵列的集成。然而,由于 AMR 自身灵敏度相对较低,从而制约了最终所能达成的性能指标。Trinh 等人(Trinh *et al.*, 2017)在 PCB 板上使用高磁导率、低磁滞的 Ni-Zn 铁氧体对磁场的弯曲效应,制作了平面三轴 GMR 磁传感器,其采用三个角度相差 120° 的 GMR 探头实现了磁场三轴测量,但该方法还是存在对 Z 轴磁场的磁场转换效率不足的问题。

为解决上述问题,本文基于磁力线变轨和磁力线聚集原理提出了一种平面三轴 GMI 磁传感器设计方案,旨在实现三维矢量磁场的平面化测量,规避常规三轴磁传感器正交性难以保证带来的误差。本文首先对探头结构进行了仿真,分析了各探头的信号组成,推导出相应的信号解算方法,接着以此为基础完成了平面三轴 GMI 磁传感器硬件电路的设计,最后通过搭建专门测试平台进行了实验验证。

2 平面三轴 GMI 传感器磁场信号解算方法研究

为了克服三轴磁传感器正交性误差,本文依据基于磁力线变轨和磁力线聚集原理,设计了一种能够实现矢量磁场测量的平面三轴磁探头结构,并在设计的平面三轴磁探头结构基础上仿真分析了 X 轴探头、Y 轴探头和 X-Z 轴探头的响应与外部磁场的关系,最后推导出平面三轴 GMI 磁传感器三轴磁场解算方法,实现对矢量磁场信息的获取。

2.1 平面三轴 GMI 传感器探头的结构设计

本文设计的平面三轴 GMI 磁传感器采用了一

种不同于常规三轴 GMI 磁传感器的设计思路,不再采用三个单轴磁传感器相互正交组成的结构。在该设计中, Z 方向磁场的测量基于磁力线变轨原理,通过引入磁力线变轨结构,将 Z 方向磁场引导至 X-Y 平面内进行检测。传感器由 X 轴探头、Y 轴探头和 X-Z 探头组成,三者沿平面呈 90°夹角排列。各探头所使用的敏感材料尺寸一致,均为宽度 10mm、长度 1mm、厚度 0.5mm 的钴基非晶薄带做为磁芯,其模型结构如图 1(a)所示。X 轴探头直接测量 X 方向磁场, Y 轴探头直接测量 Y 方向磁场,而 X-Z 轴探头测量的是 X 方向磁场和磁力线变轨结构对 Z 方向磁场导向 X 方向的耦合磁场。值得注意的是, X-Z 探头所测得的 X 方向磁场分量与 X 轴探头测得的 X 方向磁场具有相同的方向。

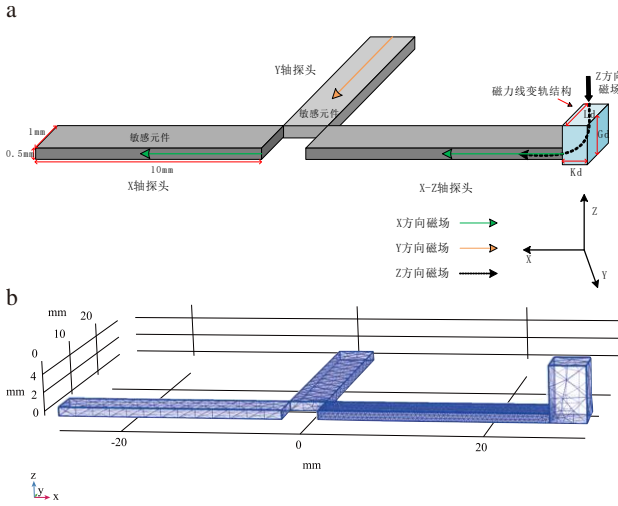


图 1 (a)平面三轴 GMI 磁传感器三轴磁探头的模型构建图, (b)网格剖分图

Fig.1 (a)Model Construction Diagram for the Planar Triaxial GMI Magnetic Sensor Triaxial Magnetic Probe, (b)Grid partition diagram

2.2 平面三轴 GMI 传感器探头的结构设计

本文使用分析软件 COMSOL Multiphysics 对已构建的平面三轴磁传感磁探头模型进行结构仿真,对其各部分探头检测到的信号组成进行分析,其仿真网格剖分图如图 1(b)所示,钴基非晶薄带尺寸与模型保持一致,变轨结构的水平宽度、高度和相对磁导率选定为 3mm、14mm 和 5000。

将平面三轴 GMI 磁传感器三轴磁探头置于空气中,依次对每个探头施加沿 X、Y、Z 轴负方向、大小从 0 逐渐增大至 200 A/m 的磁场。以各探头敏感材料中磁通密度模的平均值作为监测量,将仿真计算结果导出并绘图,得到如图 2 所示的结果。从图 2 (b)中可以看出,当加入 Y 方向的磁场激励时,

Y 轴探头能够对均匀变化的 Y 方向磁场产生线性响应,且 Y 方向磁场对 X 轴探头和 X-Z 轴探头几乎无影响;从图 2(c)中可以看出,当加入 Z 方向的磁场激励时, X-Z 轴探头能够对均匀变化的 Z 方向的磁场产生响应,且 Z 方向磁场的变化对 X 轴探头和 Y 轴探头几乎无影响。说明本文设计的平面探头结构的轴间正交性误差影响较小;从图 2(a)中可以看出,当加入 X 方向的磁场激励时, X 方向和 X-Z 方向探头均有明显响应输出,但输出曲线的斜率有差异,这是由于磁力线变轨模块的影响,因此可以利用这种差异完成对该平面化探头的信号解算。本文所设计的磁探头结构具有良好的磁场响应特性,三个探头能够独立实现功能,且测量结果互不干扰;但也观察到,磁力线变轨结构对 X 方向磁场存在一定影响。

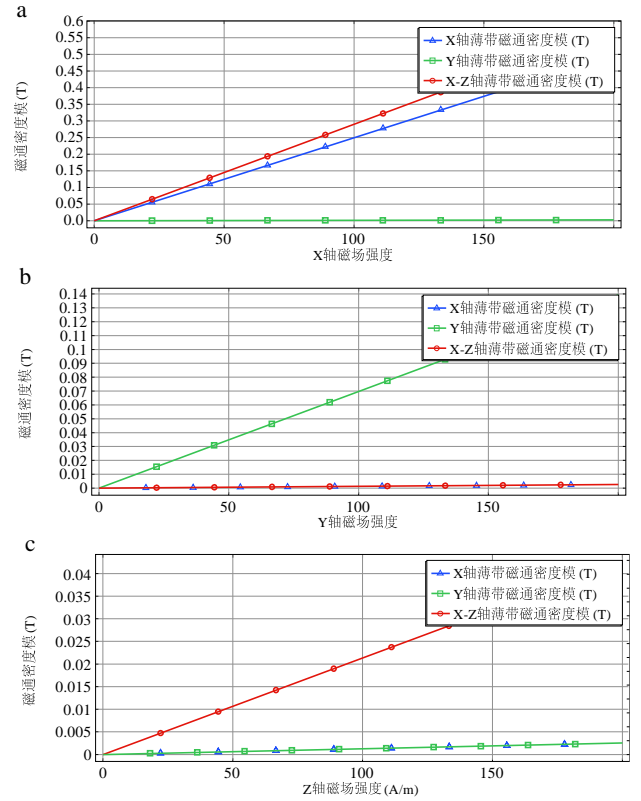


图 2 (a)X 方向磁场下各探头敏感材料磁通密度变化, (b)Y 方向磁场下各探头敏感材料磁通密度变化, (c)Z 方向磁场下各探头敏感材料磁通密度变化

Fig.2 (a)Variation in magnetic flux density in the sensing materials of each probe subjected to an X-direction magnetic field ; (b)Y-direction magnetic field ; and (c)Z-direction magnetic field

2.3 磁场解算方法

通过对三轴磁探头仿真结果的分析可知, X 轴探头可以直接探测 X 方向磁场强度, 磁场大小为

$B(x)$, Y 轴探头可以直接探测 Y 方向磁场强度, 磁场大小为 $B(y)$, 而 Z 方向磁场强度 $B(z)$ 需通过解算方法推导得到。由于 X-Z 轴探头输出由于受到 X 方向磁场和经磁力线变轨后 Z 方向磁场的共同影响, 因此需依据磁力线变轨结构对 X-Z 轴探头输出信号的影响关系来推导 Z 方向磁场大小 (Lu *et al.*, 2024)。现在将 X 方向磁场作用下有磁力线变轨结构时 X-Z 轴探头探测的磁场强度为 $B_{x1}(x-z)$, 没有磁力线变轨结构时 X-Z 轴探头探测的磁场强度为 $B_{x2}(x-z)$, 磁力线变轨结构对 X-Z 轴探头探测的磁场强度影响记为 $B(n)$, 那么在有无磁力线变轨结构时探头探测到的磁场强度有如下关系式:

$$\frac{B_{x1}(x-z) - B_{x2}(x-z)}{B(x)} = \frac{B(n)}{B(x)} \quad (1)$$

代入仿真数据计算可以得到其计算结果为常数, 令其为 k 。现在令有磁力线变轨结构时 X-Z 轴探头电压输出为 V_{x-z1} , 探头灵敏度为 S_1 , 没有磁力线变轨结构时 X-Z 轴探头电压输出 V_{x-z2} , 探头灵敏度为 S_2 , 可以得 X-Z 轴探头电压输出与被测磁场的关系为:

$$V_{x-z1} = S_1 B_{x1}(x-z) \quad (2)$$

$$V_{x-z2} = S_2 B_{x2}(x-z) \quad (3)$$

那么可得磁力线变轨结构对 X-Z 轴探头输出影响的 k 与探头电压输出和被测磁场的关系为:

$$k = \frac{V_{x-z1}S_2 - V_{x-z2}S_1}{B(x)S_1S_2} \quad (4)$$

假设三轴磁探头灵敏度 S_x 、 S_y 、 S_{x-z} 在一定范围内线性, 可以得各个探头电压输出 V_x 、 V_y 、 V_{x-z} 与被测磁场的关系并推导出三分量的表达式:

$$B(x) = \frac{V_x}{S_x} \quad (5)$$

$$B(y) = \frac{V_y}{S_y} \quad (6)$$

$$B(z) = \frac{V_{x-z}S_x - (k+1)V_xS_{x-z}}{S_{x-z}S_x\gamma} \quad (7)$$

其中, $B(z)$ 为 Z 方向磁场强度, γ 为磁力线变轨结构的变轨系数, 且 $\gamma = B(x)/B(z)$, 可以通过测试计算得到, 因此矢量磁场信息 $B(x)$ 、 $B(y)$ 、 $B(z)$ 都可以通过测试数据计算得到, 至此就完成了对平面三轴 GMI 磁传感器三轴磁探头的信号解算工作。

3 硬件电路设计与测试平台搭建

为了验证设计的探头结构和磁场信号解算方法的有效性, 本节设计了平面三轴 GMI 传感器硬件电

路, 并搭建了性能测试平台, 来测试平面三轴 GMI 磁传感器的测量范围、灵敏度和噪声水平。

3.1 硬件电路设计

平面三轴 GMI 磁传感器的硬件电路设计主要包括激励、探头与信号处理三大模块, 整体结构如图 3 所示。激励模块包含生成正弦电压信号的信号发生电路, 将正弦电压信号转换为频率和幅值恒定的激励电流的 $v-i$ 转换电路, 激励敏感材料产生直流偏置磁场的直流偏置电路。

探头部分主要由敏感材料和磁力线变轨结构组成, 其中将感应线圈作为磁电信号转换的核心单元。针对 GMI 传感器探头输出信号的特点, 设计了相应的信号处理模块, 该模块由线圈谐振与滤波电路以及有效值检测电路组成。线圈谐振与滤波电路首先将探头输出信号转换为可测量的正弦电压信号, 随后由有效值检测电路对其进行精确测量。

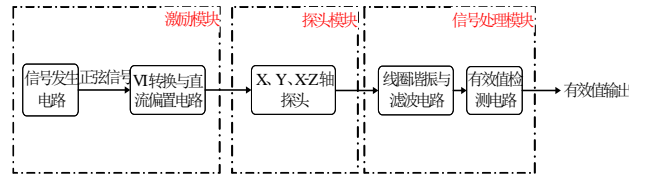


图 3 平面三轴 GMI 磁传感器电路结构框图

Fig.3 Circuit Block Diagram of a Planar Tri-axial GMI Magnetic Sensor

3.2 性能测试平台搭建

本文设计的平面三轴 GMI 传感器主要面向地磁探测应用, 由于地球磁场为弱矢量场, 为满足测试需求, 在构建矢量磁场发生平台的同时引入了磁屏蔽装置。该平台通过三台电源分别驱动 X、Y、Z 轴线圈, 可在各轴中心产生范围达 $\pm 550\mu T$ 的磁场, 最小步进约为 5.5 nT , 能够有效模拟地磁场及其异常波动。传感器置于线圈均匀区内的平台上, 通过调节电源输出电流即可精确控制目标磁场。在磁场平台基础上, 进一步搭建了传感器噪声性能测试系统, 如图 4 所示, 该系统将传感器置于屏蔽筒内的线圈均匀区中, 由信号发生电路提供激励, 并使用频谱分析仪测量其电压噪声谱密度。

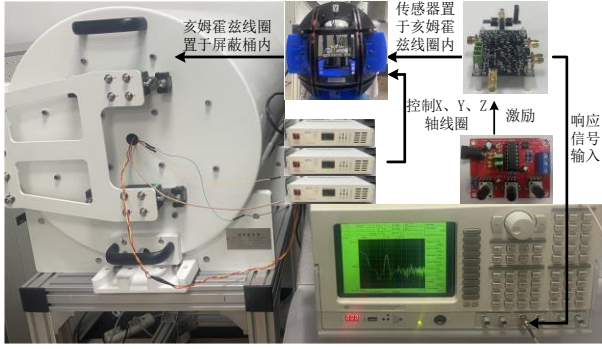


图 4 性能测试平台实物图

Fig.4 Physical diagram of the performance testing platform

4 测试结果

利用搭建的矢量磁场发生平台，在较宽磁场范围内测试了平面三轴 GMI 磁传感器各轴探头的响应特性，完成了测量范围与灵敏度性能、噪声性能和磁力线变轨结构性能三方面的性能测试。

4.1 测量范围与灵敏度性能测试

使用三台电流源分别控制三个方向的线圈产生的磁场强度大小，可得到任意方向的矢量外加磁场。然后依次测量各探头的输出响应，并通过 PC 端上

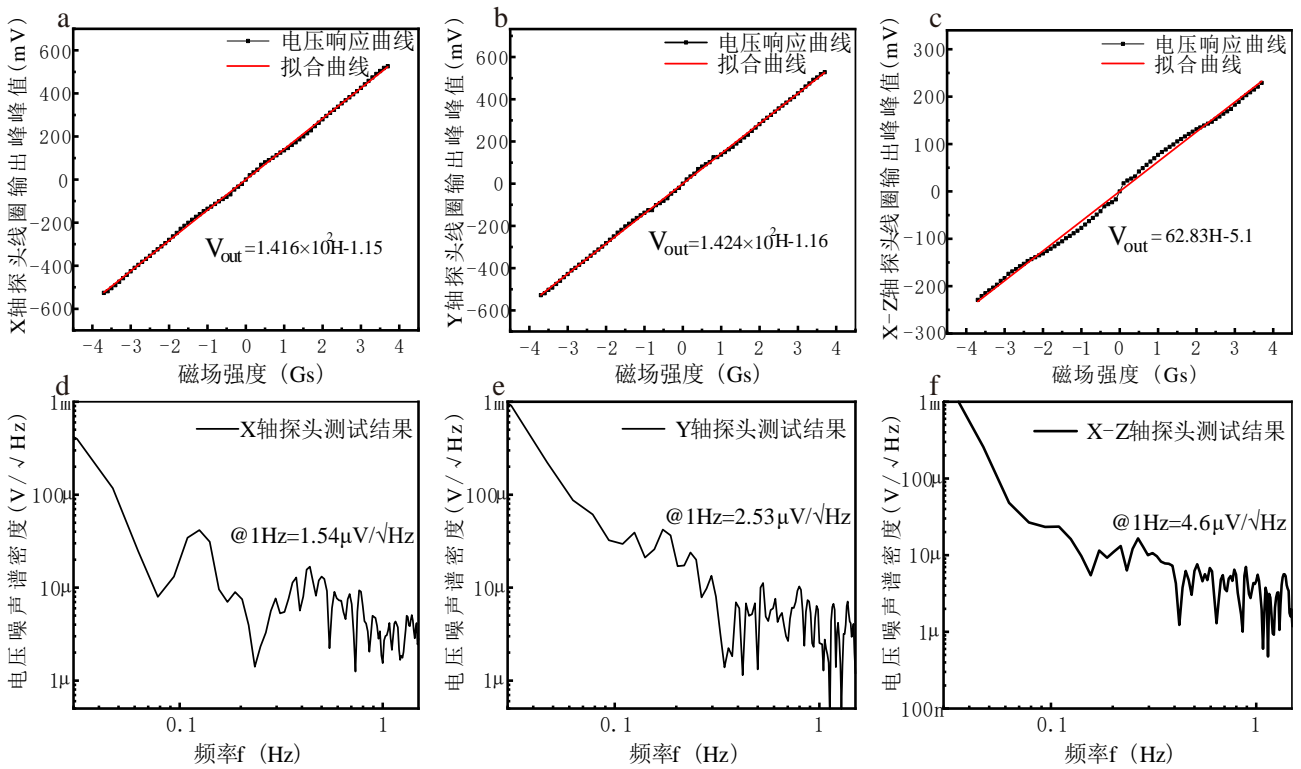


图 5 (a)X 轴探头输出 V-H 曲线, (b)Y 轴探头输出 V-H 曲线, (c)X-Z 轴探头输出 V-H 曲线, (d)X 轴输出电压噪声谱密度, (e)Y 轴输出电压噪声谱密度, (f)X-Z 轴输出电压噪声谱密度

Fig.5 V-H curves of the (a)X-axis probe ; (b)Y-axis probe ; and (c)Z-axis probe ; Output voltage noise spectral density of the (d)X-axis probe ; (e)Y-axis probe; and (f)Z-axis probe

位机实现数据自动采集，得到各探头的电压 - 磁场 ($V-H$) 曲线，如图 5(a)、(b)和(c)所示，分别展示了 X 轴、Y 轴及 X-Z 轴探头的线圈输出响应及其线性拟合结果。

根据图像所示，X轴、Y轴及X-Z轴探头线圈的线性响应区间约为 $\pm 370 \mu T$ 。线性拟合结果表明，磁场强度 (H ，单位 μT) 与输出电压 (单位 mV) 之间具有良好的线性关系，拟合相关系数 R^2 分别为 0.9996、0.9995 和 0.9996。根据图中拟合出的磁场强度与输出电压的线性表达式，计算得到X、Y方向

探头及通过X-Z轴探头解算的Z轴方向电压灵敏度分别为 $S_x = 1416 V/T$ 、 $S_y = 1424 V/T$ 和 $S_{x-z} = 628.3 V/T$ 。测试结果显示，受到探头磁芯材料特性差异和安装误差的影响，其X轴与Y轴探头的线性度与灵敏度略有差异；而X-Z轴探头在Z方向上的灵敏度及线性度较X、Y轴探头明显偏低，该差异与磁力线变轨结构的变轨系数密切相关，变轨系数的大小直接影响Z方向的传感性能。

4.2 噪声性能测试

在传感器噪声性能测试中，将传感器置于未施加测试磁场的屏蔽筒内，采用 SR780 频谱分析仪对其输出电压信号进行频谱分析。通常将 1 Hz 处的噪声水平作为 $1/f$ 噪声的评估指标。本文分别对 X 轴探头、Y 轴探头及 X-Z 轴探头在 0~1.56 Hz 频带内的噪声进行了分析，以评估其低频噪声性能，结果如图 5(d)、(e)、(f) 所示。频谱分析仪测量结果表明，在 1 Hz 处，X 轴探头的噪声水平为 $1.54\mu V/\sqrt{Hz}$ ，Y 轴探头为 $2.53\mu V/\sqrt{Hz}$ ，X-Z 轴探头为 $4.6\mu V/\sqrt{Hz}$ 。X 轴与 Y 轴探头的噪声水平因探头磁芯材料特性差异和安装误差的影响存在一定差异，而 X-Z 轴探头输出受磁力线变轨结构影响，其输出噪声水平明显高于 X、Y 轴探头。

4.3 磁力线变轨结构性能测试

在完成平面三轴 GMI 传感器的性能测试后，需进一步评估磁力线变轨结构的性能。利用三维磁场发生平台，在 Z 方向磁场作用下测试传感器磁探头的响应特性，并基于测量结果计算变轨系数。测试中，通过调节三维亥姆霍兹线圈的激励电流来改变磁场强度，仅对传感器施加 Z 方向磁场，X 轴与 Y 轴探头均未产生响应，此时 X-Z 轴探头测得 Z 方向磁场，其输出电压记为 V_{x-z1} 。随后，移除磁力线变轨结构，调节 X 方向线圈的激励电流，单独施加 X 方向磁场，此时 X-Z 轴探头测得 X 方向磁场，输出电压记为 V_{x-z2} 。采用同一磁探头进行测量，确保探头灵敏度 S_{x-z} 保持一致。

实验测得 X-Z 轴探头的输出电压 V_{x-z1} 和 V_{x-z2} 如图 6(a) 所示。由于 V_{x-z2} 在 $\pm 370\mu T$ 范围内表现出良好的线性特性，因此在此区间内对响应曲线进行拟合，图 6(b) 为 X-Z 轴探头输出 V_{x-z1} 、 V_{x-z2} 的响应曲线及拟合曲线。从图中 X-Z 轴探头输出的响应曲线 V_{x-z1} 、 V_{x-z2} 线性表达式，可以计算出变轨系数 γ 为：

$$\gamma = \frac{B(x)}{B(z)} = \frac{62.83}{140.8} = 0.446 \quad (8)$$

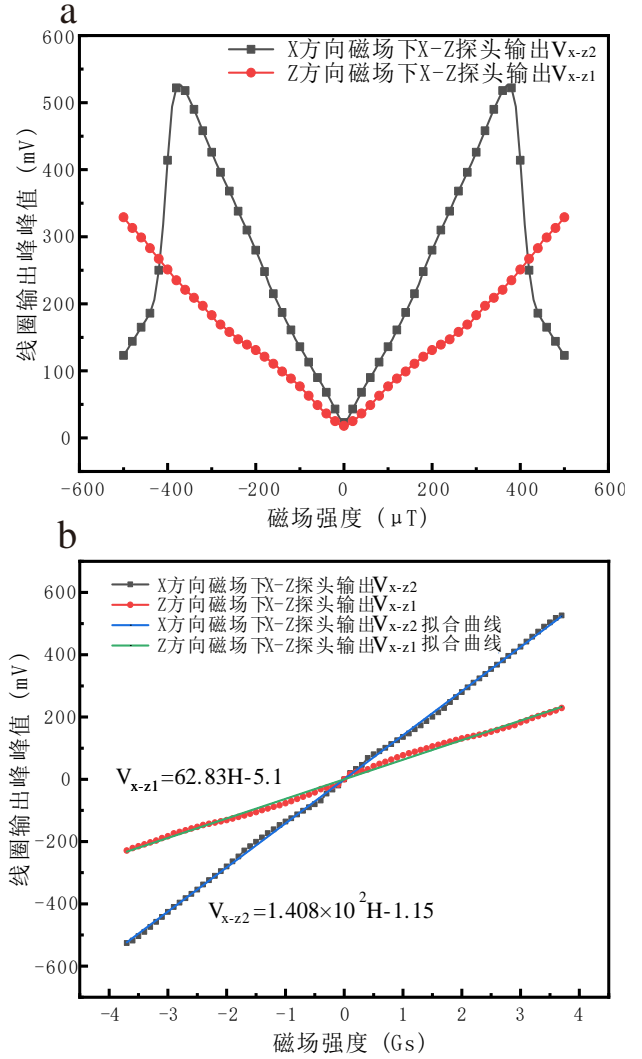


图 6 (a)X-Z 轴探头输出 V_{x-z1} 和 V_{x-z2} ; (b) $\pm 370\mu T$ 范围内 X-Z 轴探头输出 V_{x-z1} 、 V_{x-z2} 的响应曲线及拟合曲线

Fig.6 (a)Outputs V_{x-z1} and V_{x-z2} of the X-Z axis probe; (b) Their response and fitting curves within a range of $\pm 370 \mu T$

在通过仿真计算获得变轨系数 γ 后，需进一步测定磁力线变轨结构对探头输出影响的比例系数 k 。实验中，通过调节三维亥姆霍兹线圈，分别测量在有磁力线变轨结构情况下，传感器 X-Z 轴探头的输出响应，其输出特性及拟合曲线如图 7 所示。

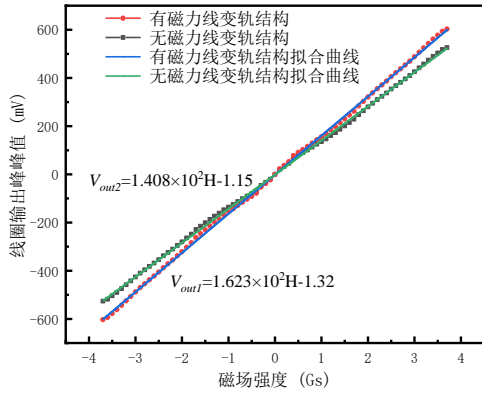


图 7 有无磁力线变轨结构的 X-Z 轴探头线圈输出响应曲线及拟合曲线

Fig.7 Output response curves and fitted curves of X-Z axis probe coils with and without magnetic flux line deflection structures

由图可知，有无磁力线变轨结构时 X-Z 轴探头的输出响应线性拟合表达式分别为

$$V_{out1} = 1.623 \times 10^2 H - 1.32 \quad (9)$$

$$V_{out2} = 1.408 \times 10^2 H - 1.15 \quad (10)$$

可得出两次测量探头灵敏度分别为 $S_1 = 1623V/T$ 、 $S_2 = 1408V/T$ 。基于公式 (4)，可进一步计算出 k 值为：

$$k = \frac{V_{out1}S_2 - V_{out2}S_1}{B(x)S_1S_2} = 0.148 \quad (11)$$

通过测试计算出磁力线变轨结构的变轨系数 $\gamma = 0.446$ ，磁力线变轨结构对探头输出影响 $k = 0.148$ ，进一步通过解算方法中的式 (7) 计算，可以得到 Z 方向磁场强度 $B(z)$ 的计算值。

为了验证 Z 方向磁场强度 $B(z)$ 计算值的准确性，通过实验测试与计算值进行了误差分析。测试方法与测试各个探头的响应相同，给传感器探头施加任意方向矢量磁场，可在 X 轴、Y 轴和 X-Z 轴探头分别得到测试响应输出。由于 X-Z 轴探头对 X 分量磁场和 Z 分量磁场均有响应，根据式 (7) 和式 (5) 可以推导出 X-Z 轴探头线圈输出响应的计算值曲线，经测试 X-Z 轴探头线圈的实际输出。其响应测量值曲线与计算值对比曲线如图 8 所示。

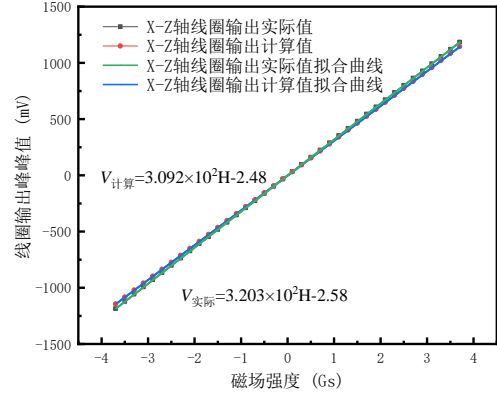


图 8 X-Z 轴探头线圈输出响应测量值与计算值对比曲线

Fig.8 Comparison curve of measured versus calculated values for X-Z axis probe coil output response

图中可以看出 X-Z 轴探头线圈输出响应的测量值与计算值曲线的斜率有一定的误差，但趋势基本保持一致，可以验证磁力线变轨结构对探头输出影响 k 值和变轨系数 γ 测试值的正确性。将磁力线变轨结构对探头输出影响 k 值和变轨系数 γ 代入图中 X-Z 轴线圈输出测量值与计算值拟合曲线，计算可得，X-Z 轴探头测量值灵敏度 $S_{x-z} = 2003V/T$ 和计算值灵敏度 $S_{x-z} = 1940V/T$ ，则磁场实际测量值与计算值在 $\pm 370\mu T$ 范围内的相对误差 Er 如式 (12) 所示：

$$Er = \left| \frac{V_{测量} - V_{计算}}{V_{测量}} \right| \times 100\% = 3.48\% \quad (12)$$

经计算得到平面三轴 GMI 磁传感器的实际测量值与计算值在 $\pm 370\mu T$ 范围内的相对误差不超过 3.48%，造成这一误差的原因可能是磁力线变轨结构安装工艺带来的误差、屏蔽筒内剩磁造成的误差等。

综合以上性能指标，将论文设计的平面三轴 GMI 磁传感器与 Lu 团队制作的平面结构磁通门磁强计、Lai 团队制作的 AMR 传感器、Trinh 团队制作的平面三轴 GMR 传感器进行对比，其性能参数对比如表 1 所示。

表 1 磁传感器性能参数对比表

Table 1 Magnetic Sensor Performance Parameters Comparison Table

传感器型号	X,Y 方向灵敏度 (V/T)	Z 方向灵敏度 (V/T)	变轨系数	磁噪声水平 (nT/ \sqrt{Hz})
本文设计的平面三轴 GMI 磁传感器	$S_x = 1416$ $S_y = 1424$	628.3	0.446	X 方向噪声 1.09 Z 方向噪声 7.38
Lu 团队的平面结构磁通门传感器	122.4	11.6	0.094	X 方向噪声 0.11 Z 方向噪声 6.29
Lai 团队的 AMR 传感器	15~60	0.84	---	4.7

Trinh 团队的平面三轴 GMR 传感器	108	74	---	0.10
-----------------------	-----	----	-----	------

基于表 1 所列各团队传感器的性能参数比较, 本论文所设计的传感器在灵敏度方面优于以上三个团队的方案; 磁力线变轨系数也优于 Lu 团队的性能, 在磁噪声水平方面, 本设计略高于其他团队。

5 结论

本文基于磁力线变轨和磁力线聚集原理提出了一种矢量磁场的平面化测量方法。通过构建三轴磁探头模型并进行仿真分析, 推导出相应的信号解算方法, 完成了磁探头结构与硬件电路的设计, 并对设计的平面三轴 GMI 磁传感器性能进行了测试。测试结果表明, 所设计的平面三轴 GMI 磁传感器性能达到: 测量范围为 $\pm 370\mu T$, 传感器 X 方向、Y 方向和 Z 方向的输出电压灵敏度分别为 $S_x = 1416 V/T$ 、 $S_y = 1424 V/T$ 、 $S_{x-z} = 628.3 V/T$ 。在 1 Hz 处, X 轴探头、Y 轴探头和 X-Z 轴探头输出噪声水平分别为 $1.54\mu V/\sqrt{Hz}$ 、 $2.53\mu V/\sqrt{Hz}$ 、 $4.6\mu V/\sqrt{Hz}$, 能够在不依赖三轴严格正交的情况下实现三维磁场的有效测量, 为三维磁场平面化测量技术的实现及 Z 方向磁场测量精度的提升提供了可行路径, 也为获取高精度地磁矢量探测提供了更为有效的方法, 显著提升了测量的精度与可靠性。

References

- Duan, J. S., Liang, S. H., Qi, N., et al., 2014. Development and Application of HD-2010 Proton Precession Magnetometer. *World Nuclear Geoscience*, 31(02): 115-119. <https://doi.org/CNKI:SUN:GWYD.0.2014-02-011>.
- Ge, L. L., Ren, Q. Y., Zhao, H., 2017. Design and Performance Test of High-Precision Magnetoresistive Magnetometer for Space Application. *Spacecraft Environment Engineering*, 34(02): 166-170. <https://doi.org/CNKI:SUN:HTHJ.0.2017-02-010>
- Jiang, S. H., Li, X. Q., Chen, B., et al., 2025. Wire Rope Broken Wire Detection Method Based on Magnetic Field Gradient and Energy Method. *China Measurement & Test*, 51(06): 40-48. <https://doi.org/CNKI:SUN:SYCS.0.2025-06-005>
- Lai, W. M., Hsu, F. M., Sung, W. L., et al., 2015. Monolithic integration of micro magnetic pillar array with a anisotropic magneto-resistive (AMR) structure for out-of-plane magnetic field detection. In 2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 901 - 904. <https://doi.org/10.1109/memsys.2015.7051105>
- Li, T., Zhang, J. S., Wang, S. C., et al., 2014. Selection Criterion of Geomagnetic Matching Area Based on Improved Geomagnetic Entropy. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 34(05): 151-155. <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2014.05.068>
- Li, Y. X., Liu, X. Y., 2021. Paleomagnetic Field Research: Challenges and Opportunities. *Acta Geologica Sinica*, 95(01): 64-74. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021015>
- Lu, C. C., Huang, J. 2015. A 3-Axis Miniature Magnetic Sensor Based on a Planar Fluxgate Magnetometer with an Orthogonal Fluxguide. *Sensors*, 15(6), 14727 - 14744. <https://doi.org/10.3390/s150614727>
- Lu, J. Q., Jin, F., Dong, K. F., et al., 2024. Simulation and Experiment of Planar Magnetic Sensor. 2024 Academic Conference of China Instrument and Control Society (ACCIS), Chengdu, China, 497 - 501. <https://doi.org/10.1109/accis62068.2024.10948699>
- Luong, V. S., Su, Y. H., Lu, C. C., et al., 2017. Planarization, Fabrication, and characterization of Three-Dimensional Magnetic Field Sensors. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 17(1), 11 - 25. <https://doi.org/10.1109/tnano.2017.2660062>
- Ma, Y. N., Wang, Y. G., 2024. Scalar Magnetic Field Measurement Method for SERF Magnetometer Based on Pump Light Modulation. *Flight Control & Detection*, 7 (06): 82-88.
- Pei, H. G., Zhang, H. B., Ouyang, J., et al., 2025. Error Compensation Method for Anisotropic Magnetoresistive Sensors. *Ship Electronic Engineering*, 45(07): 181-186. <https://doi.org/CNKI:SUN:JCGC.0.2025-07-036>
- Pu, X. L., Yang, Y. H., Liu, Y., 2024. A Review of Space-based Mineral Exploration: A New Direction for Mineral Resources Exploration. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43(06): 1280-1303.
- Sun, J. S., Wu, Y. Y., Li, H. Y., et al., 2025. Research on Taylor Polynomial Model Based on Proton Vector Magnetometer Stations in Jiangsu Area. *Earthquake*, 45 (3): 168-179. <https://doi.org/10.12196/j.issn.1000-3274.2025.03.011>
- Trinh, X., Jeng, J., Lu, C. C., et al., 2017. Miniature Tri-Axis magnetometer with In-Plane GMR sensors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11), 1 - 4. <https://doi.org/10.1109/tmag.2017.2696243>
- Wang, X. Z., Feng, Z. S., Ju, H. H., et al., 2024. The Inductive Magnetometer of the Meridian Project II. *Review*

- ews of Geophysics and Planetary Physics, 55(01): 31-36. <https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2023-015>
- Xing, A. C., Li, H. B., Kan, B. X., et al., 2025. Key Technologies and Development Trends of Marine Geomagnetic Navigation. *Navigation Positioning and Timing*, 12(02): 1-14. <https://doi.org/10.19306/j.cnki.2095-8110.2025.02.001>
- Zhang, M., Zhao, S. Z., Jia, L., et al., 2020. Application of Polarization Method in Extracting Seismo-Magnetic Anomaly Information. *Progress in Geophysics*, 35(02): 488-494.
- Zhang, Q. S., Dong, G. W., An, N., et al., 2025. A New Idea of Integrated Calibration Method for Airborne Magnetic Vector Measurement Device. *Geological Review*, 71(S1): 243-246. <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2025.s1.089>
- Zhang, Q. Z., Zou, S., Zhang, H., 2024. Application and Progress of Residual Magnetism Measurement Based on Electron Paramagnetic Resonance Spectroscopy. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 44(01): 22-28. <https://doi.org/CNKI:SUN:GUAN.0.2024-01-003>
- Zhao, D. H., Liu, Z. J., Zhao, Y. Y., et al., 2025. Measurement of Impact Current Based on Non-Magnetic Ring TMR Sensor. *High Voltage Apparatus*, 61(08): 120-127. <https://doi.org/10.13296/j.1001-1609.hva.2025.08.016>
- Zhao, Y. K., Kong, M., Liu, L., et al., 2025. Research on Space Magnetic Particle Pose Measurement System and Sensor Calibration. *China Measurement & Test*, 51(04): 109-115.
- Zheng, Y. F., Guo, Z. T., Jiao, N. Z., et al., 2024. A holistic perspective on Earth system science. *Science in China: Earth Science*, 54(10): 3065-3090.
- 裴华刚,张海波,欧阳君,等,2025.各向异性磁阻传感器误差补偿方法.舰船电子工程,45(07),181-186.
- 蒲秀浪,杨宇红,刘耘,2024.太空找矿综述:矿产资源勘探新方向.矿物岩石地球化学通报,43(06),1280-1303.
- 孙君嵩,吴迎燕,李鸿宇,等,2025.基于江苏地区质子矢量磁力仪台站的泰勒多项式模型研究.地震,45(3):168-179.
- 王喜珍,冯志生,居海华,等,2024.子午工程二期感应式磁力仪.地球与行星物理论评,55(01),31-36.
- 邢奥成,李海兵,阚宝玺,等,2025.海洋地磁导航关键技术及发展趋势.导航定位与授时,12(02),1-14.
- 张敏,赵石柱,贾路,等,2020.极化法在提取震磁异常信息方面的应用.地球物理学进展,35(02),488-494.
- 张青杉,董根旺,安娜,等,2025.航空磁矢量测量装置集成检校方法新思路.地质论评,71(S1),243-246.
- 张全哲,邹升,张红,2024.基于电子顺磁共振谱的残磁测量应用及进展.光谱学与光谱分析,44(01),22-28.
- 赵德华,刘召杰,赵莹莹,等,2025.基于无磁环 TMR 传感器的冲击电流测量.高压电器,61(08),120-127.
- 赵云琨,孔明,刘璐,等,2025.空间磁颗粒位姿测量系统与传感器标定研究.中国测试,51(04),109-115.
- 郑永飞,郭正堂,焦念志,等,2024.地球系统科学研究态势.中国科学:地球科学,54(10),3065-3090.

中文参考文献

- 段金松,梁树红,齐宁,等,2014.HD-2010 质子旋进磁力仪的研制与应用.世界核地质科学,31(02),115-119.
- 葛丽丽,任琼英,赵华,2017.面向空间应用的高精度磁阻磁强计设计及性能测试.航天器环境工程,34(02),166-170.
- 江胜华,李潇庆,陈斌,等,2025.基于磁场梯度和能量法的钢丝绳断丝检测方法.中国测试,51(06),40-48.
- 李婷,张金生,王仕成,等,2014.基于改进地磁熵的地磁适配区选择准则.大地测量与地球动力学,34(05),151-155.
- 李永祥,刘欣宇,2021.古地磁场研究:挑战与机遇.地质学报,95(01),64-74.
- 马彦宁,王耀国,2024.基于抽运光调制的 SERF 磁强计标量磁场测量方法.飞控与探测,7(06),82-88.