

ZHOU Bin, XUE Yongliang, TAO Ran, CHENG Bingjun, WANG Zidong, ZHANG Haibo, WU Xinzhe. Design and Verification of Wide-band Search Coil Magnetometer Based on Transimpedance Preamplifier (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, 44(1): 169–177. DOI:10.11728/cjss2024.01.2022–0073

基于跨阻抗前置放大器的宽频带感应式磁传感器的设计与验证*

周 斌^{1,2} 薛永亮^{1,2} 陶 然^{1,2,3} 程炳钧^{1,2}
王子栋^{1,2,4} 张海波⁵ 吴新哲⁵

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气重点实验室 北京 100190)

3(中科飞特(山东)科技有限公司 聊城 250003)

4(中国科学院大学 北京 100049)

5(宜昌测试技术研究所 宜昌 100101)

摘 要 本文建立了一种基于跨阻抗前置放大器的磁传感器信号传递模型,并在该模型的基础上推导出磁传感器的灵敏度和噪声理论值。根据理论推导的结果,进一步研究了感应式磁传感器设计方法,以带宽 0.01~10 kHz,噪声 $1 \text{ fT}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ (1~10 kHz) 作为设计目标设计了一个感应式磁传感器,并对这一传感器进行了性能验证试验。在处理频率响应测试数据时设计了一种基于信号调制的处理方法,有效提取特定频率得到幅值和相位,并降低了随机噪声的干扰,磁传感器-3 dB 带宽达到了 0.01~10 kHz。在评估传感器噪声时,采用双探头差分的方法消除了环境的干扰,设计了相位差分析的评估方法,确认在哪些频带双探头探测的信号是同源的,在这些频带采用差分法评估是有效的。评估的结果是,传感器在 1~10 kHz 实现了 $1 \text{ fT}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 噪声水平。

关键词 感应式磁传感器, 搜索线圈, 跨阻抗放大器, 传递函数, 噪声, 数据处理

中图分类号 V443

Design and Verification of Wide-band Search Coil Magnetometer Based on Transimpedance Preamplifier

ZHOU Bin^{1,2} XUE Yongliang^{1,2} TAO Ran^{1,2,3} CHENG Bingjun^{1,2}
WANG Zidong^{1,2,4} ZHANG Haibo⁵ WU Xinzhe⁵

1(State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(Zhongke Feite (Shandong) Technology Co., Ltd., Liaocheng 250003)

* 民用航天技术预先研究项目资助 (D050103)

2023-03-20 收到原稿, 2023-05-25 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

4(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

5(Yichang Testing Technology Research Institute, Yichang 443003)

Abstract The search coil magnetometer is widely used in space exploration and geological prospecting due to its high sensitivity and low noise level. This study presents a search coil sensor based on a transimpedance preamplifier to achieve a wide frequency bandwidth. The sensor directly connects the output signal of the inductive coil to the transimpedance preamplifier, which converts the AC magnetic field signal into an electrical signal. A signal transfer model of a magnetic sensor based on a transimpedance preamplifier is established, and the theoretical formula for sensitivity and noise is deduced. The search coil sensor is designed and developed using this formula to achieve a bandwidth of 0.01~10 kHz and a noise level of $1 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ at 1~10 kHz. A signal modulation method evaluates the sensor's performance for efficient amplitude and phase extraction at a specific frequency. The dual sensor differential method eliminates environmental interference during sensor noise assessment, and a phase difference analysis evaluates the homologous frequency bands of signals detected by two probes. As a result, the sensor achieves a $1 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ noise level in the 1 kHz to 10 kHz range.

Key words Inductive magnetic sensor, Search coil, Transimpedance amplifier, Transfer function, Noise, Data processing

0 引言

在地球科学相关研究领域中,磁场的低频交流变化是一种重要的信号.对交流磁场信号最有效的探测手段是感应式磁传感器,即搜索线圈磁强计(Search Coil Magnetometer, SCM).这种传感器是基于法拉第电磁感应定律进行工作的^[1].传感器内部具有高导磁率的磁芯将空间环境的磁通量聚拢在其中,实现对空间磁场变化的放大.磁芯外部缠绕的螺线管线圈,将线圈内部磁通量的变化转换为电信号,电信号在通过前置放大电路后的电压信号供外部的数据采集系统进行测量.这种传感器在空间科学和地球物理研究领域中的应用非常广泛.

在空间科学研究领域,空间磁场的交流波动与大量的空间物理现象相关,是空间科学研究的有效手段.空间科学探测卫星使用 SCM 探测 100 kHz 以下的交流磁场波动.例如对地球磁层探测的 CLUSTER 卫星^[2]、THEMIS 卫星^[3],探测电离层的 DEMETER 卫星^[4]、张衡一号卫星^[5],探测辐射带的 RBSP 卫星^[6],探测太阳的 Parker 卫星^[7]等,都部署了三分量 SCM 传感器.大多数 SCM 传感器探测频带在 0.01~10 kHz 附近,最低噪声水平在 $10 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 量级.空间探测载荷多数采用反馈式前置放大电路,部分采用跨阻抗放大电路.反馈式放大电路有助于在

有限的资源下尽可能在局部频带提高灵敏度和降低噪声,其灵敏度频率响应曲线形成明显的倒 V 型结构.

在地球物理研究领域,磁法是最传统的地质勘探手段,例如大地电磁法(MT)、音频大地电磁法(AMT)、时间域电磁法(TEM),感应式磁传感器作为交流磁场探测传感器在其中起着非常重要的作用^[8].中国近几年在感应式磁传感器的研发方面取得了大量成果,Liu 等^[9]和 Zhu 等^[10]分别针对 TEM 应用和基于负反馈结构的感应式磁传感器进行了研究,Wang 等^[11]在 2019 年研制的感应式磁传感器噪声达到 $0.5 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2} @ 1 \text{ kHz}$.这些传感器均采用了反馈式前置放大器.

感应式磁场传感器及其前置放大电路共同作用形成了灵敏度曲线的 Λ 型结构.虽然不同频率的探测信号可以通过幅值和频率校正还原,但是过窄的灵敏度曲线,仍然会对较宽频带的目标探测带来应用上的不便.从应用角度而言,更希望传感器在频带内具备相对稳定的灵敏度和噪声.在感应式磁力仪的前置放大器方案中除了反馈式以外还有跨阻抗前置放大器方案^[12].

跨阻抗放大器(TIA)是将传感器电流信号转换为电压信号的一种前置放大器方案.这种放大器形式具有非常高的带宽,在感应式磁传感器上的应用能够

实现更宽和更加平坦的灵敏度响应曲线. 在实际应用中, 跨阻抗前置放大器并不多见, 主要原因可能是设计者更看重更高的灵敏度和更低的噪声水平, 针对这一点反馈式前置放大器更有优势. 但是跨阻抗前置放大器的结构形式简单, 更容易降低传感器成本, 提高可靠性. 在空间应用中, 其对线束的需求更少也是很重要的优点. 日本的 Ozaki 等^[13]详细研究了这种传感器, 并将其应用于探测地球辐射带的 Arase 卫星上, 其噪声达到 $10 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2} @ 1 \text{ kHz}$.

本文提出了一种前置放大器方案与磁传感器耦合电路模型, 研究其理论响应曲线及理论噪声模型; 以 $0.001 \sim 10 \text{ kHz}$ 范围噪声在 $1 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 以内为目标设计磁传感器; 设计响应曲线和噪声测试方法, 其中基于相位差分析的噪声测试方法允许在常规试验条件下充分验证低噪声磁传感器的性能指标.

1 基于跨阻抗前置放大器的磁传感器电路建模

感应式磁传感器的主要结构是一个磁感应线圈, 其是采用铜芯漆包线缠绕在高导磁性材料磁芯上的一个螺线管线圈. 从电路模型的角度上看, 磁感应线圈整体上接近一个电感. 考虑到漆包线内的导体本身具有一定的电阻, 漆包线相邻绕组间和线圈层间都存在一定的电容效应, 感应线圈的电路模型可以简化为图 1(a) 所示的电阻、电感和电容混合的电路. 其中磁感应线圈的电感、电阻和电容参数与磁芯材料特性以及磁芯和绕线的几何参数相关, 即^[12]

$$R = \rho N \frac{[d + N(d_w + 2t)^2 / l_w]}{d_w^2}, \quad (1)$$

$$C = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r l_w}{t(n_l - 1)} [d + 2n_l(d_m + 2t)], \quad (2)$$

$$L = \lambda \frac{N^2 \mu_0 \mu_{\text{app}} S}{l}. \quad (3)$$

其中, ρ 为铜的电导率, N 为线圈匝数, d 为绕线骨架直径, d_w 为铜线直径, t 为铜线绝缘层厚度, l 为磁芯长度, l_w 为绕线长度, n_l 为绕线层数, μ_{app} 为磁芯的名义磁导率, S 为磁芯截面面积, $\lambda = \left(\frac{l}{l_w}\right)^{2/5}$ 为校正系数.

在实际的传感器研制中, 电阻和电感的计算比较

准确, 电容理论计算与实际测量结果往往有较大的差异. 主要原因是式 (2) 考虑的是层间的电容, 没有将绕组间的电容考虑进去. 而实际绕线时电容与绕线工艺的关系非常密切, 通过间距和填充材料的选择可以调整磁感应线圈电容. 在传递函数和噪声的设计中, 传感器的电感、电阻和电容应以实际绕制后的测量值为准.

磁感应线圈的基本原理是法拉第感应定律, 变化磁场将产生变化感应电动势, 所以信号输入源相当于一个交流电压源. 根据感应线圈的电路模型, 输出信号的频率响应曲线如图 1(b) 所示, 中心频率为 $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. 在这个频点上, 磁感应线圈具有非常高的灵敏度, 但是在中心频点两侧, 灵敏度迅速下降. 只有连接到前置放大器之后, 整体的灵敏度曲线才会展宽, 以达到探测频带的要求.

跨阻抗前置放大器利用运算放大器对感应线圈上的电流信号直接进行放大测量. 这种电路不对磁芯进行反馈, 整体电路简化模型如图 2(a) 所示. 从信号传递的角度而言, 这个电路中感应线圈的分布电容是不起作用的, 感应线圈的感应电流进入反馈环节后在输出端产生输出电压, 信号传递过程如图 2(b) 所示. 在不考虑各项噪声信号的情况下, 以磁场为输入信号, 电压为输出信号的传递函数如下:

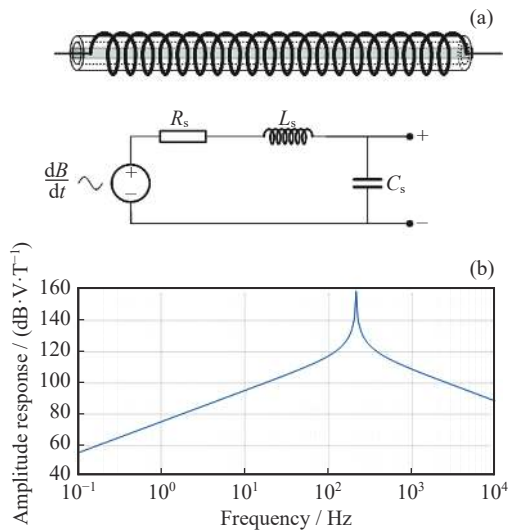


图 1 磁感应线圈的 RLC 电路模型 (a) 及其灵敏度曲线 (b)

Fig. 1 RLC circuit model (a) and the magnetic induction coil and its sensitivity curve (b)

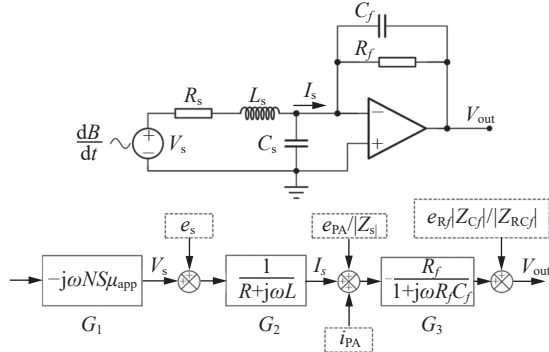


图 2 跨阻抗前置放大器与磁感应线圈电路 (a)
及系统传递 (b)

Fig. 2 Circuit block diagram (a) and system transfer block diagram (b) of the transimpedance preamplifier and magnetic induction coil. The introduction of noise is also pointed out in (b)

$$T(j\omega) = \frac{V_{out}}{B} = -\frac{R_f}{R} \frac{j\omega N S \mu_{app}}{\left(1 + \frac{L}{R} j\omega\right)(1 + R_f C_f j\omega)}. \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出, 跨阻抗前置放大器和感应线圈耦合后的传递函数形式是一个带通滤波函数. 其低频截止频率主要由感应线圈自身特性决定, 而高频特性主要由放大器的反馈电阻和电容决定.

从图 2(b) 可以看出, 传感器的噪声主要来源于绕组线圈的热噪声、运算放大器的输入电流噪声和输入电压噪声以及反馈电阻的热噪声, 即

$$n_{e_s} = \frac{e_s |G_2| |G_3|}{|T|} = \sqrt{4kTR} \times \frac{1}{\omega N S \mu_{app}}, \quad (5)$$

$$n_{e_{PA}} = \frac{e_{PA} |G_3|}{|Z_s| |T|} = e_{PA} \times \frac{\sqrt{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}}{\omega N S \mu_{app}}, \quad (6)$$

$$n_{i_{PA}} = \frac{i_{PA} |G_3|}{|T|} = i_{PA} R \times \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}}{\omega N S \mu_{app}}, \quad (7)$$

$$n_{e_{R_f}} = \frac{e_{R_f} |Z_{C_f}|}{|Z_{R_f} C_f| |T|} = \frac{R}{R_f} \times \sqrt{4kTR_f} \times \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}}{\omega N S \mu_{app}}. \quad (8)$$

最终输出的噪声能量是这 4 部分噪声能量的线性叠加, 即

$$n_{out}^2 = n_{e_s}^2 + n_{e_{PA}}^2 + n_{i_{PA}}^2 + n_{e_{R_f}}^2. \quad (9)$$

感应式磁传感器的传递函数和噪声理论模型是进一步设计的基础.

2 磁传感器的设计

根据式 (4) 传递函数可以得到磁传感器灵敏度曲线上的特征参数, 在传感器设计时通过指标可以反向推导出所需感应线圈、放大器和放大电阻电容的参数范围, 传感器灵敏度的特征参数主要包括以下四点.

(1) 磁传感器的低频边界频率主要由磁棒决定:

$$f_L \approx \frac{R}{2\pi L}.$$

(2) 磁传感器的高频边界频率主要由前置放大器

$$\text{决定: } f_H \approx \frac{1}{2\pi R_f C_f}.$$

(3) 磁传感器对数坐标下的中心频点

$$f_{center} = \frac{\sqrt{R}}{2\pi \sqrt{R_f L C_f}}.$$

(4) 在中心频点上磁传感器产生最大灵敏度, 同时也是整个带内灵敏度的整体近似值

$$|T_{max}| = \frac{R_f}{R} \frac{N S \mu_{app}}{\left(\frac{L}{R} + R_f C_f\right)}.$$

磁传感器的总噪声主要体现为 4 种噪声中占优势的那一个, 因此在优化参数时应主要针对最大的噪声源进行. 传感器内阻热噪声随频率升高而线性下降, 降低线圈阻值可以有效降低这一噪声. 放大器电压噪声在感应线圈的谐振频点上存在最低值, 设计上可以将这一点作为信噪比最高的频点. 需要注意的是, 感应线圈的等效电容不会影响到传递函数 T , 通过并联电容的方式可以适当调整线圈中心频点位置, 从而调整最低噪声的频点, 而不影响整体的灵敏度曲线. 放大器的电流噪声和放大器反馈电阻噪声的形式是类似的, 在频率大于低频边界频率后趋于平坦, 分别逼近为 $\frac{\lambda N \mu_0 i_{PA}}{l}$ 和 $\frac{\lambda N \mu_0}{l} \sqrt{\frac{4\pi f}{R_f}}$. 如果放大器电压噪声在谐振点时可以做到足够低, 那么趋于平坦的电流噪声和放大电阻噪声就是决定磁传感器最低噪声的主要因素.

当前设计的磁传感器的目标是带宽在 0.010~10 kHz, 其中 1~10 kHz 噪声为 $1 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. 根据这一目标参数, 结合前面讨论的特征参数的近似公式, 可以反向推导确定线圈的电感、电容、电阻和运算放

大器噪声等参数之间的约束关系, 并根据这些参数设计磁传感器结构以及选型. 其中运算放大器的电压噪

表 1 宽频磁传感器参数表

Table 1 Broadband magnetic sensor parameter table

线圈参数	取值
磁芯相对磁导率	8.2×10^4
磁芯长度/mm	1000
绕线骨架长度/mm	700
绕线匝数	4200
放大器电压噪声/($\text{nV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$)	4
放大器电流噪声/($\text{fA} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$)	10
反馈电阻/ $\text{k}\Omega$	470
反馈电容/ pF	10

声和电流噪声中任何一种噪声过高, 都会抬升传感器输出噪声, 需要选择电压和电流噪声都较低的运算放大器. 主要的设计参数列于表 1, 根据这些设计参数理论计算的传递函数曲线和噪声曲线如图 3 所示, 设计结果与目标一致.

在这套磁传感器的设计参数基础上, 根据式 (4)~(9) 可以计算出理论灵敏度曲线和噪声曲线 (见图 3), 结果满足在中心频点 1 kHz 处达到 $1 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的设计目标.

3 磁传感器测试

根据设计研制完成的感应式磁传感器, 在螺线管线圈和屏蔽筒内完成频率响应测试和噪声测试, 传感器实物和测试设备如图 4 所示.

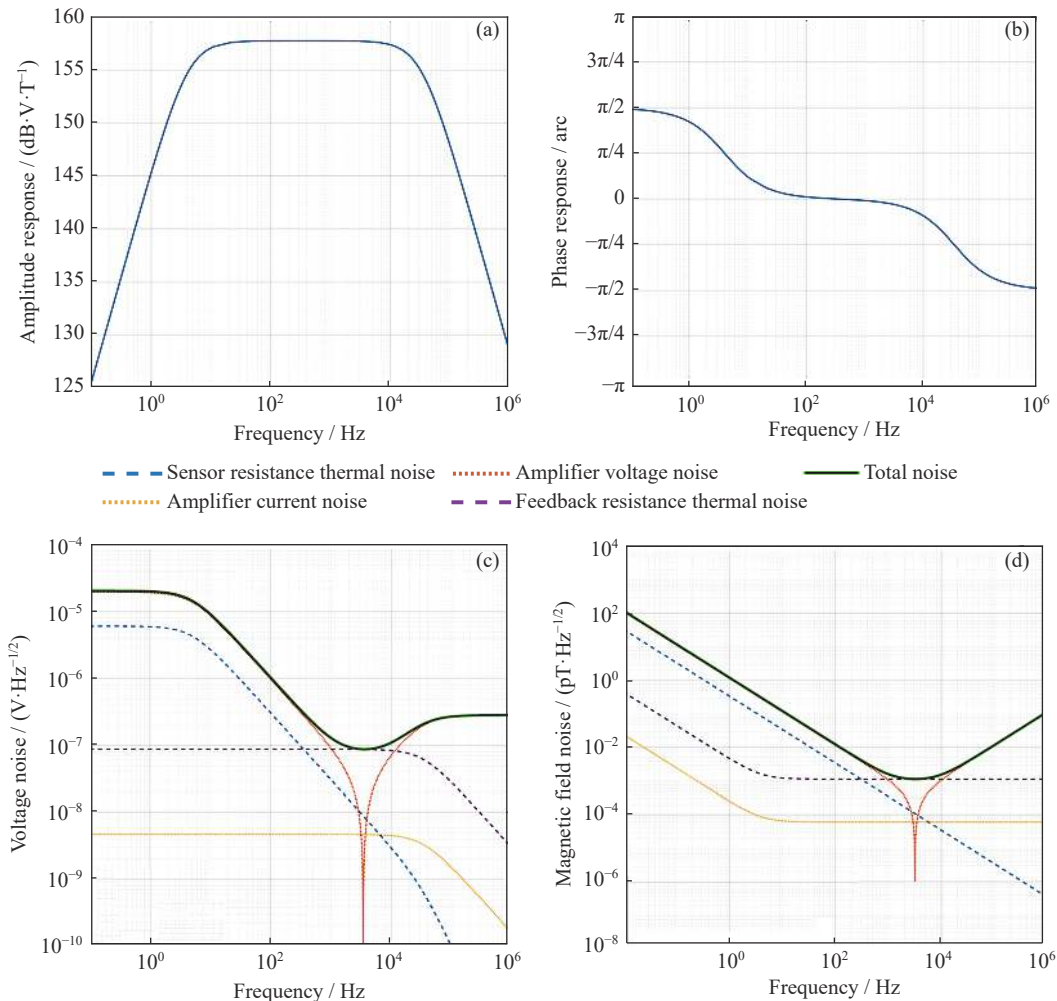


图 3 传感器参数理论计算结果

Fig. 3 Theoretical calculation results of sensor parameters

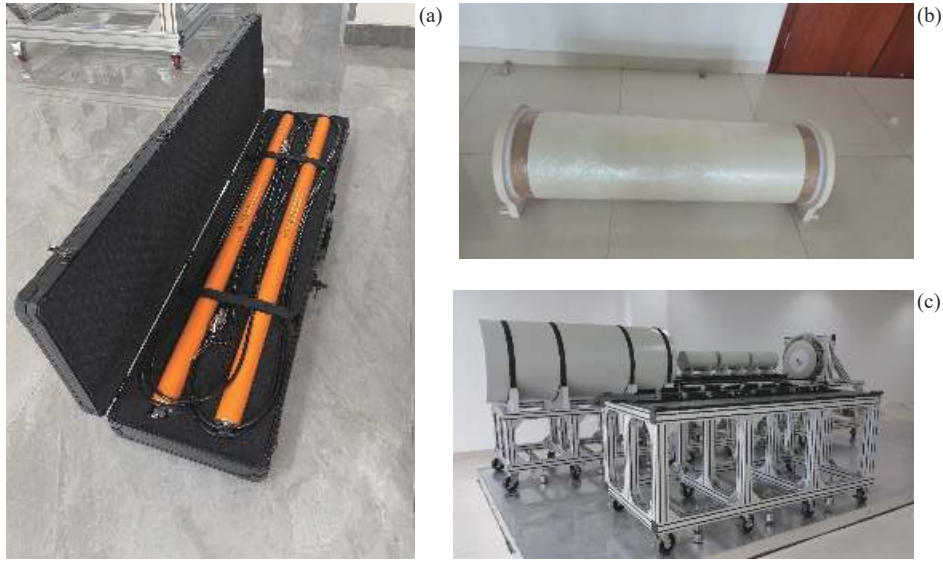


图4 感应式磁传感器样机及测试设备. (a) 感应式磁传感器样机, (b) 频率响应实验的螺线管线圈, (c) 噪声测试磁屏蔽筒

Fig. 4 Search coil magnetometer prototype and test equipment. (a) The search coil magnetometer prototype, (b) the solenoid coil used in frequency response testing, (c) the magnetic shield cylinder used in noise testing

3.1 频率响应测试

频率响应测试主要是测试磁传感器对不同频率信号的幅值和相位响应, 幅值响应是输出电压与输入磁场信号的比值, 相位响应是指输出电压与输入磁场相位之差. 这个试验在螺线管线圈内进行, 螺线管长度为 1 m, 直径为 0.2 m. 试验布局如图 5 所示, 由信号发生器施加的正弦波通过一个电阻进入螺线管, 磁传感器利用工装将其部署在螺线管中心. 电阻两端的差分电压信号反映了进入螺线管的电流值, 与螺线管线圈内的磁场强度大小成正比. 电流信号 I 和磁场测量信号 V 都进入差分信号采集器进行同步采样.

I 和 V 这两个信号理论上施加的是正弦信号, 但是各自带有一定的噪声, 二者的幅值 A 和相位 α 在磁传感器内部传递后均会有所不同. 这两个信号的表达式如下:

$$\begin{cases} I(t) = A_I \sin(2\pi ft + \alpha_I) + \Delta_I, \\ V(t) = A_V \sin(2\pi ft + \alpha_V) + \Delta_V. \end{cases} \quad (10)$$

频率响应数据处理算法, 是通过采样信号进行正弦和余弦调制后, 根据调制后信号的直流量的关系计算相位和幅值, 具体步骤如下.

步骤 1 通过以已知的 f 为中心进行一定范围扫描的方式, 确定采样信号的频点准确位置.

步骤 2 利用一个与采样信号等长的理想正弦信

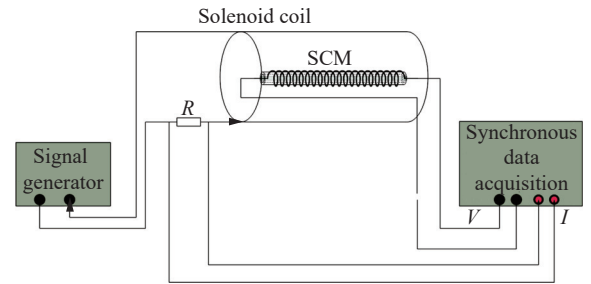


图5 频率响应测试试验部署

Fig. 5 Frequency response test deployment diagram

号和余弦信号分别与 I 和 V 信号相乘, 有

$$\begin{cases} I(t) \sin(2\pi ft) = \frac{1}{2} A_I \cos(\alpha_I) - \\ \quad \frac{1}{2} A_I \cos(4\pi ft + \alpha_I) + \Delta_I \sin(2\pi ft), \\ I(t) \cos(2\pi ft) = \frac{1}{2} A_I \sin(\alpha_I) + \\ \quad \frac{1}{2} A_I \sin(4\pi ft + \alpha_I) + \Delta_I \cos(2\pi ft), \\ V(t) \sin(2\pi ft) = \frac{1}{2} A_V \cos(\alpha_V) - \\ \quad \frac{1}{2} A_V \cos(4\pi ft + \alpha_V) + \Delta_V \sin(2\pi ft), \\ V(t) \cos(2\pi ft) = \frac{1}{2} A_V \sin(\alpha_V) + \\ \quad \frac{1}{2} A_V \sin(4\pi ft + \alpha_V) + \Delta_V \cos(2\pi ft). \end{cases} \quad (11)$$

这样处理后干扰信号 I 中只有 f 频点的能量会产生影响.

步骤 3 取调制信号的直流分量, 利用三角函数计算这个频点的相位, 再进一步计算幅值. 根据输入和输出信号的幅值、相位, 可以得到频率的幅值响应和相位响应, 即

$$\begin{cases} \alpha_I(f) = \arctan \left(\frac{|A_I(t) \cos(2\pi ft)|_{DC}}{|A_I(t) \sin(2\pi ft)|_{DC}} \right) \\ I(f) = 2 |A_I(t) \cos(2\pi ft)|_{DC} / \sin(\alpha_I) \\ \alpha_V(f) = \arctan \left(\frac{|A_V(t) \cos(2\pi ft)|_{DC}}{|A_V(t) \sin(2\pi ft)|_{DC}} \right) \\ V(f) = 2 |A_V(t) \cos(2\pi ft)|_{DC} / \sin(\alpha_V) \end{cases} \Rightarrow (12)$$

$$\begin{cases} |T(f)| = \frac{V(f)}{I(f)c}, \\ \angle T(f) = \alpha_V - \alpha_I. \end{cases}$$

其中, c 为预先标定的螺线管线圈常数. 按照以上算法对频率响应测试数据进行处理, 并对比理论计算结果 (如图 6 所示), 可见实际测量的灵敏度曲线和相位曲线与理论计算结果一致性符合得很好, 幅值响应平均误差小于 5%, 相位响应平均误差小于 1° . 幅值响应整体略微偏小, 可能的原因是螺线管线圈和传感器的尺寸相当, 而在螺线管轴向开口边缘处, 相比中心磁场要衰减一半左右, 这使得传感器观测到的磁场变化整体上比按线圈常数施加的磁场略小.

3.2 噪声测试

磁传感器噪声测试需要在整个频带范围内都具有极低噪声的环境, 一般选择在野外、屏蔽房或者室内屏蔽筒中获取这样的环境.

试验采用差分测量方法在屏蔽筒内对传感器噪声进行测试, 如图 7 所示. 一般来说屏蔽筒内很难直接达到 $1 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的噪声水平, 本文利用差分法进行传感器噪声谱的分析.

采用差分法对传感器噪声进行评估需要具备两个条件, 一是传感器的幅值和相位的频率响应一致, 二是两个传感器所测量到的外部环境干扰一致. 第一个条件是容易设计和验证的, 在传感器的设计和研制上可以采用相同的参数和工艺, 并且通过频率响应标定, 可以确认两个传感器的一致性. 本文采用一种相位差分析的方法判断探测的信号是否同源.

当外部信号大于传感器本底噪声时, 将反映在传感器的频谱中. 由于两个传感器是一致的, 在进行同

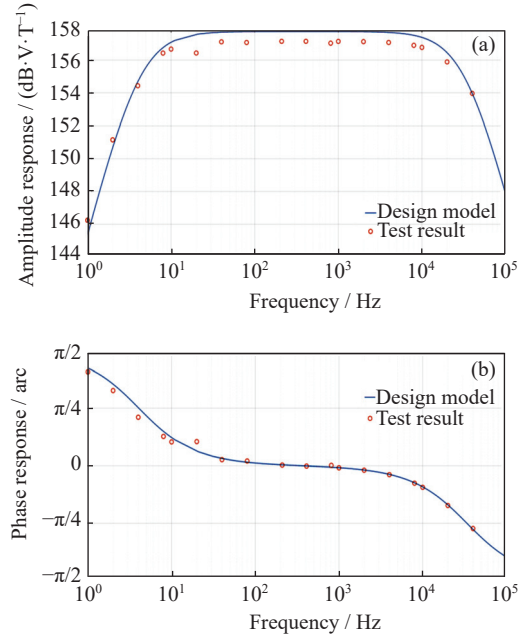


图 6 频率响应测试结果与理论计算结果的对比

Fig. 6 Comparison of frequency response test results with theoretical calculation results

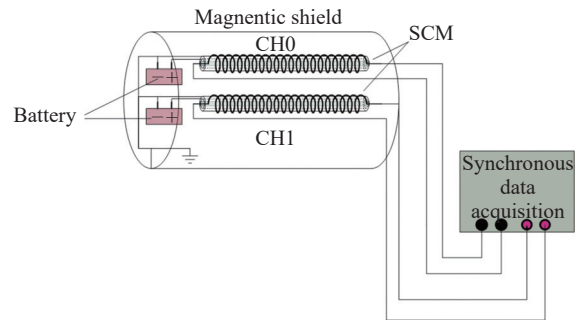


图 7 噪声测试试验部署

Fig. 7 Noise test deployment diagram

步采样后, 两个传感器在这个频带上的幅值和相位应该是相同的. 由于两个传感器的随机噪声本底相似, 所以很难用幅值判断是否探测到同源信号. 但是随机噪声信号的相位差是随机的, 所以用相位差统计可以对同源信号进行识别. 一般来说两个传感器对同源信号探测的频谱相位差在 0 相位附近. 识别算法步骤如下.

步骤 1 分别对两个传感器的信号 x_1 和 x_2 进行 DFT 变换, 得到每个频率点的相位值 $p_1(f)$ 和 $p_2(f)$.

步骤 2 将相位进行差分得到 $p_{\text{diff}}(f)$, 按照一定的频段 $F = [f_1, f_2]$ 进行统计. 频段的长度需要选择适当, 带内频点需要足够多, 以具备一定的统计意义.

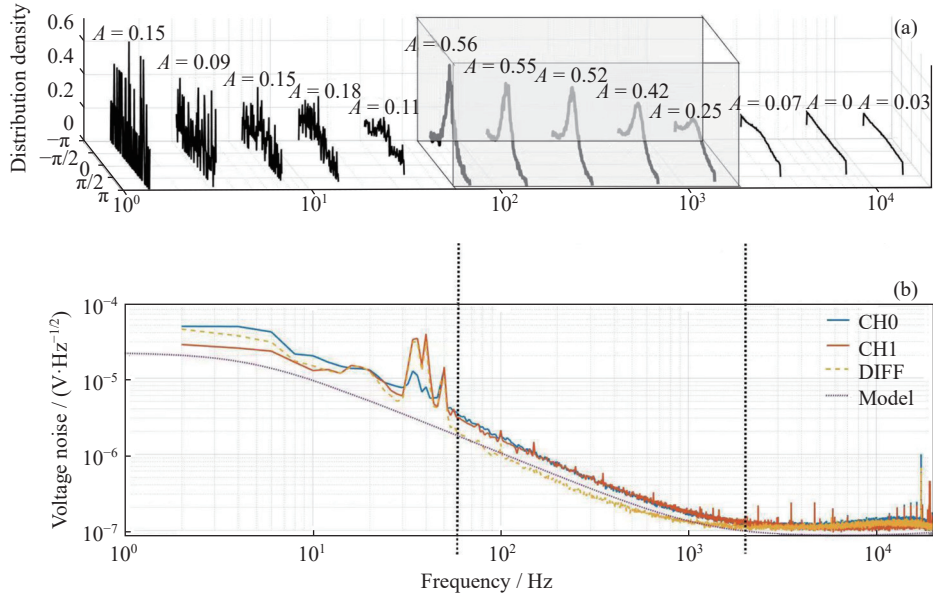


图8 二个磁传感器信号相位差分析与差分噪声分析结果

Fig. 8 Results of the phase difference analysis and differential noise analysis of the two magnetic sensor signals

步骤3 绘制出相位差的分布 $d_{p_{\text{diff}}}(\theta)$, 并将其平移到 $[-\pi, \pi]$ 内.

步骤4 建立一个幅值为1的正弦信号S1, 取10个周期, 每个周期的采样数与 $d_{p_{\text{diff}}}(\theta)$ 的相位采样数相同, 用 $d_{p_{\text{diff}}}(\theta)$ 和S1进行卷积得到S2, 对S2进行傅里叶变换, 取 $\pi/5$ 处的幅值 A .

当相位分布完全随机时, $A=0$; 如果相位分布集中在一个相位点上, 那么 $A=1$. 根据 A 的大小可以判断相位集中的程度. 根据经验 $A \geq 0.2$ 时认为, 信号1和信号2在频段 F 内, 相位具有相关性.

图8给出了不同频段上的相位统计结果, 可以看到, 在 $0.05 \sim 2$ kHz 以内的频谱上, 相位差分析的 A 值均大于 0.25, 两个传感器探测的信号在这一频段上具有明显的相位一致性. 而在其他频段上, 两个传感器探测到的信号相位更倾向于随机. 这说明在 $0.05 \sim 2$ kHz 频段上两个传感器探测到了相同的信号, 可以采用差分法分析传感器噪声.

采用差分法分析传感器噪声, 有

$$\begin{aligned} x(t) &= x_{\text{sig}}(t) + \delta(t), \\ X(f) &= X_{\text{sig}}(f) + \Delta(f), \\ X_1(f) - X_2(f) &= \Delta_1(f) - \Delta_2(f) \approx \sqrt{2}\Delta(f). \end{aligned} \quad (13)$$

差分后频谱上的噪声功率谱密度相当于两个传感器噪声的叠加, 在两个传感器噪声相当的情况下可

以评估出单个传感器在这个频段上的噪声水平.

噪声评估的结果表明, 整体上噪声评估与理论计算一致性较好, 在 $1 \sim 10$ kHz 频带范围内的噪声控制在 $1 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 以下. 在小于 50 Hz 的低频, 两个传感器的噪声水平略高于理论值, 可能的原因是放大器本身低频噪声的增大. 对于 2 kHz 以上的信号, 可能由于外部干扰已经低于传感器噪声水平, 差分的作用也不明显.

4 结论

研究的基于跨阻抗放大器的感应式磁传感器可以有效提高最佳灵敏度宽度, 有利于宽频带磁场探测的实现. 通过对跨阻抗前置放大器感应式磁传感器信号传递模型和噪声模型的详细推导和分析, 基于理论模型推导出跨阻抗放大器感应式磁传感器各种特征参数的理论值, 进而指导这种传感器的设计. 在文中以探测带宽 $0.010 \sim 10$ kHz, 其中 $1 \sim 10$ kHz 频带上噪声为 $1 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的设计目标为例, 设计了感应式磁传感器. 通过实验室测试验证, 磁传感器的性能指标与设计值具有较高的一致性. 对于频率响应测试数据的处理, 研究了基于交流调制的频率信号检测算法, 可以有效从同步采样的信号中计算指定频点的幅值和相位响应, 从而得到传感器自身的幅值响应和相位

响应. 针对噪声测试数据的处理, 提出了一种相位差分分析方法, 可以有效评价在一定频率带宽内信号相位的一致性. 通过这一方法可以确定双传感器在某个频段上的信号是否为外部同源, 确定这一频段是否适用差分法分析传感器噪声. 通过双传感器差分法, 有效抑制了环境噪声干扰, 实现了对感应式磁传感器超低噪声的准确评估. 这种对于宽频带设计更适合的基于跨阻抗前置放大器感应式磁传感器将在空间探测、地质勘探领域具有广泛应用前景.

参考文献

- [1] TUMANSKI S. Induction coil sensors – a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, **18**(3): R31
- [2] ROBERT P, CORNILLEAU-WEHRLIN N, PIBERNE R, *et al*. CLUSTER-STAFF search coil magnetometer calibration – comparisons with FGM[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2014, **3**(2): 153-177
- [3] ROUX A, LE CONTEL O, COILLOT C, *et al*. The search coil magnetometer for THEMIS[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **141**(1/2/3/4): 265-275
- [4] PARROT M, BENOIST D, BERTHELIER J J, *et al*. The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: scientific objectives, description and first results[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**(5): 441-455
- [5] CAO J B, ZENG L, ZHAN F, *et al*. The electromagnetic wave experiment for CSES mission: search coil magnetometer[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, **61**(5): 653-658
- [6] WYGANT J R, BONNELL J W, GOETZ K, *et al*. The electric field and waves instruments on the radiation belt storm probes mission[J]. *Space Science Reviews*, 2013, **179**(1/2/3/4): 183-220
- [7] BALE S D, GOETZ K, HARVEY P R, *et al*. The FIELDS instrument suite for solar probe plus: measuring the coronal plasma and magnetic field, plasma waves and turbulence, and radio signatures of solar transients[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **204**(1/2/3/4): 49-82
- [8] JU Hanji, ZHU Wanhua, FANG Guangyou. A review on ferromagnetic induction coil sensors[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, **25**(5): 1870-1876 (巨汉基, 朱万华, 方广有. 磁芯感应线圈传感器综述 [J]. *地球物理学进展*, 2010, **25**(5): 1870-1876)
- [9] LIU Kai, MI Xiaoli, ZHU Wanhua, *et al*. A design of high sensitivity induction magnetometer for TEM[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(10): 3485-3492 (刘凯, 米晓利, 朱万华, 等. 一种用于 TEM 高灵敏度感应式磁场传感器设计 [J]. *地球物理学报*, 2014, **57**(10): 3485-3492)
- [10] ZHU Wanhua, DI Qingyun, LIU Leisong, *et al*. Development of search coil magnetometer based on magnetic flux negative feedback structure[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(11): 3683-3689 (朱万华, 底青云, 刘雷松, 等. 基于磁通负反馈结构的高灵敏度感应式磁场传感器研制 [J]. *地球物理学报*, 2013, **56**(11): 3683-3689)
- [11] WANG Yong, NAI Lei, NIU Jianjun, *et al*. Experimental study on high-sensitivity induction magnetometer[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, **62**(10): 3760-3771 (王勇, 仵磊, 牛建军, 等. 高灵敏度感应式磁传感器测试研究 [J]. *地球物理学报*, 2019, **62**(10): 3760-3771)
- [12] COILLOT C, LEROY P. Induction magnetometers principle, modeling and ways of improvement[M]//KUANG K. *Magnetic Sensors - Principles and Applications*. Rijeka: InTech, 2012
- [13] OZAKI M, YAGITANI S, KOJIMA H, *et al*. Current-sensitive CMOS preamplifier for investigating space plasma waves by magnetic search coils[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, **14**(2): 421-429

作者简介



周 斌 男, 1979 年 10 月出生于辽宁沈阳. 现为中国科学院国家空间科学中心正高级工程师, 主要研究方向为空间磁场与电场探测技术研究.