磁通门传感器低噪声解调技术研究

赵柏[1 2] 周斌[1*] 程炳钧[1] 赵硕[1 2] 罗丹[1 2]

1(太阳活动与空间天气全国重点实验室，中国科学院国家空间科学中心，中国科学院，北京 100190)

2(中国科学院大学，北京 100049)

摘 要 磁通门传感器的磁芯磁特性决定了在单频激励时就可以产生多个谐波频率的信号，它们都可以正确反映磁场的大小。本文基于磁通门开环状态下的各谐波信号的噪声测试，研究磁通门磁强计信号解调优化方法，以达到最优的系统噪声水平。首先对磁通门传感器的噪声进行理论分析，进而设计探头谐波、开环与闭环磁强计实验，测试各偶次谐波的性能参数，对比正弦方波解调效果并探究相位偏差的影响，最后基于拉格朗日乘数法推导多谐波最优解调比例。实验结果表明，方波解调相较正弦波解调优势显著，开环磁噪声降低 14.6%、闭环降低 27%，且相位偏差需控制在 25°内才能保持方波解调的噪声优势。最终推导得到二次、六次、十次谐波的最优解调比例约为 1:2:0.5，实现了电压噪声抑制与增益保持的最优权衡。

关键词 磁通门传感器 解调技术 磁噪声

中图分类号

最新录用

Research on Low-Noise Demodulation Technology for Fluxgate Sensors

ZHAO Bai[1 2] ZHOU Bin[1]* Cheng BingJun[1] ZHAO Shuo[1 2] LUO Dan[1 2]

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

2*(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049*)*

Abstract： The magnetic properties of the fluxgate sensor core determine that signals at multiple harmonic frequencies can be generated under single-frequency excitation, all of which can accurately reflect the magnitude of the measured magnetic field. Based on the noise characterization of each harmonic signal of the fluxgate in the open-loop configuration, this paper investigates the optimization method for signal demodulation of fluxgate magnetometers to achieve the optimal system noise performance. First, a theoretical analysis of the noise characteristics of fluxgate sensors is performed. Subsequently, experiments including probe harmonic characterization, open-loop and closed-loop magnetometer performance tests are

*基金项目：国家自然科学基金（42374228）
投稿日期：2026. 3. 14
E-mail：zhaobai23@mails.ucas.ac.cn

designed to measure the performance parameters of each even harmonic, compare the demodulation performance of sinusoidal and square-wave signals, and explore the influence of phase deviation on demodulation performance. Finally, the optimal demodulation ratio for multi-harmonic signals is derived based on the Lagrange multiplier method. The experimental results demonstrate that square-wave demodulation has significant advantages over sinusoidal demodulation: the magnetic noise is reduced by 14.6% in the open-loop configuration and by 27% in the closed-loop configuration. In addition, the phase deviation must be controlled within 25° to preserve the noise advantage of square-wave demodulation. The optimal demodulation ratio of the 2nd, 6th, and 10th harmonics is finally derived to be approximately 1:2:0.5, which achieves the optimal trade-off between voltage noise suppression and gain retention.

Keywords fluxgate sensor; demodulation technology; magnetic noise

0 引言

磁通门传感器作为一种高灵敏度的弱磁测量器件，凭借其测量精度高、功耗低、抗干扰能力强等优势，被广泛应用于地磁勘探、工业检测、航空航天、海洋监测等领域[1,2]。其核心原理是基于软磁材料的非线性磁化特性，通过提取与外部被测磁场成正比的偶次谐波信号幅值实现磁场测量。交流信号幅值的提取采用相敏解调电路、噪声特性直接决定了传感器的最终测量精度，因此优化解调策略、抑制系统噪声成为磁通门传感器研发的核心问题。

磁通门磁强计可分为模拟信号处理和数字信号处理两大类[3]。磁通门磁强计早期发展以模拟信号处理为主，并很快形成较为成熟的信号处理框架利用模拟开关设计相敏解调电路，等效为方波解调。这种相敏解调电路硬件电路简洁，工程化成本低、适配性强[4]；随着数字电子技术的发展，全数字信号处理磁通门磁强计逐步发展起来，信号处理数字化使得相敏解调的形式可以多样化[5]。普遍认为磁通门信号谐波中，激励基频的偶次谐波信号质量最优，所以锁定单一频点的正弦波解调在数字磁强计中普遍使用。目前，尚未有对两种解调方式的定量分析。

这解调方式的选择本质上是对磁通门传感器多个谐波信号的组合应用，良好的组合应用可以进一步降低传感器噪声，这对于已经很成熟磁通门磁强计进一步提升性能指标提供了一种新的技术手段，对于磁通门磁强计的设计与应用有着重要的意义。

本文以坡莫合金为磁芯的磁通门传感器为研究对象[6]，从工作原理、噪声分析、解调机制出发，通过实验与理论结合的方式展开研究。首先分析磁通门传感器的磁化与解调原理[7]，明确噪声的来源及表征方法；随后设计探头谐波特性、开环与闭环磁强计系列实验，定量测试偶次谐波的电压噪声与增益特性，对比正弦波与方波解调在开环、闭环架构下的系统性能；再探究相位偏差对方波解调系统噪声的影响规律；最后基于拉格朗日乘数法推导多谐波解调的最优比例系数，实现“电压噪声抑制”与“提高增益”的最优权衡。本文的研究成果为磁通门传感器的低噪声解调电路设计、性能优化提供了实验依据与理论支撑，对提升弱磁测量精度具有重要的工程实践意义。

1 磁通门传感器工作原理

1.1 磁通门传感器原理

磁通门磁强计的核心由高磁导率软磁材料(如坡莫合金)磁芯及缠绕其上的激励线圈、感应线圈构成[6,8]。激励线圈使磁芯磁导率随激励信号周期性变化，感应线圈则耦合磁芯磁通变化，输出感应电动势[8]。根据法拉第电磁感应定律及磁芯非线性磁化特性，感应电动势可展开为谐波叠加形式：

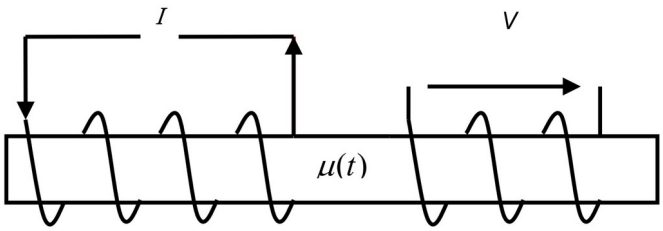


图 1 磁通门磁强计线圈示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fluxgate magnetometer coil

$$V=-2\pi f_1 N_2 S H_0(2\mu_{2m}\sin 4\pi f_1 t++4\mu_{4m}\sin 8\pi f_1 t+6\mu_{6m}\sin 12\pi f_1 t+\ldots¿) \quad (1-1)$$

式（1-1）中，f_1为激励基波频率，N_2为感应线圈匝数，S为磁芯有效截面积，H_0为被测磁场强度，μ_{2m}、μ_{4m}、μ_{6m}为磁导率函数傅里叶展开对应谐波幅值常量。该式表明：感应电动势V仅含激励基波频率的偶数次谐波，且幅值与被测磁场强度H_0呈线性关系，这是磁通门检测的核心依据[8,9]。

1.2 磁通门传感器噪声分析

磁通门磁强计的内源性噪声分为磁噪声与电子学噪声。磁噪声源于磁芯材料的微观磁化过程，主要包括呈低频 1/f 特性的巴克豪森噪声、由机械振动引入特定峰值的磁致伸缩噪声以及热涨落引起的热磁噪声[10]。电子学噪声来自电子元件的物理扰动，涵盖热噪声、散粒噪声、1/f 噪声和相位噪声[11]。为定量分析噪声性能，常采用噪声功率谱密度（PSD，单位 nT²/Hz）或其平方根噪声谱密度（单位$nT/\sqrt{Hz}$）描述频域分布。典型噪声谱在低频段呈 1/f 特性（由巴克豪森噪声和电子器件 1/f 噪声主导），高频段进入白噪声区域（由热噪声、散粒噪声等主导）。评估时通常关注 1 Hz 处的噪声谱密度值，因其综合反映了 1/f 噪声与白噪声水平。

磁通门传感器的信号处理电路的结构，有开环系统与闭环系统之分。在磁场测量时，激

励线圈施加交变电流使磁芯周期性饱和，感应线圈将磁信号转换为电信号，输出的偶次谐波信号作为被测磁场的量度，这是磁通门传感器的开环测量方法。在实际应用中，往往利用反馈线圈实现二阶控制系统，传感器内部保持在零场状态，磁场测量转换为对反馈电流的测量，这就是磁通门传感器的闭环测量方法[11]。

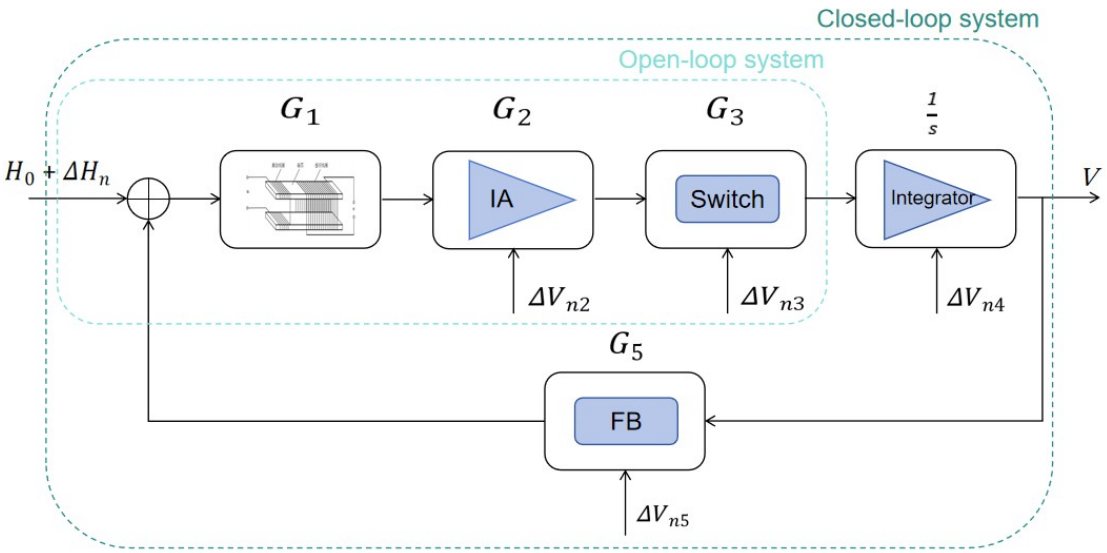


图 2 磁强计开环与闭环系统

Fig. 2 Open-loop and closed-loop systems of magnetometer

磁通门传感器开环系统与闭环系统功能框图如图 2 所示。噪声可分为传感器引入噪声，可视为磁噪声ΔH_n，和电路引入噪声。按电路模块拆分，共 4 个独立噪声源：仪表放大器引入的电压噪声ΔV_{n2}；相敏解调器引入的电压噪声ΔV_{n3}；积分器引入的电压噪声ΔV_{n4}以及反馈电路输出电压噪声 ΔV_{n5}。

可以得出开环系统的输出V_O[9]：

$$V_O=\left(H+\Delta H_n\right)G_1G_2G_3+\Delta V_{n2}G_2G_3+\Delta V_{n3}G_3 \tag{1-2}$$

磁噪声N（等效输入磁场噪声）是磁通门性能的最终评价指标，其定义为输出电压噪声与系统增益的比值：

$$N_{total}=\frac{\Delta V_{total}}{G} \tag{1-3}$$

开环系统的增益为$G_o=G_1G_2G_3$，各噪声源叠加到输出端的电压噪声$\Delta V_{total,o}$由探头磁噪声$\Delta H_nG_1G_2G_3$、仪表放大器引入的噪声$\Delta V_{n2}G_2G_3$、相敏解调器引入的噪声$\Delta V_{n3}G_3$组成；根据式（1-3）可计算出开环系统磁噪声N_o：

$$N_o=\sqrt{\Delta H_n^2+\left(\frac{\Delta V_{n2}}{G_1}\right)^2+\left(\frac{\Delta V_{n3}}{G_1G_2}\right)^2} \tag{1-4}$$

而系统中的增益G_1、G_2都较高，有效减小了电子学中引入的噪声，而探头噪声ΔH_n无法通过改变增益使之减小，因此开环系统的噪声主要由探头磁噪声ΔH_n组成。

闭环系统的输出V_c[9]：

$$V_c=\frac{G_1G_2G_3\left(H+\Delta H_n\right)+G_2G_3\Delta V_{n2}+G_3\Delta V_{n3}+\Delta V_{n4}-G_1G_2G_3G_5\Delta V_{n5}}{s+G_1G_2G_3G_5} \tag{1-5}$$

最新录用

磁通门传感器输出关注滤波后的低频直流量，因此可视为 s=0，闭环增益G_c为：

$$G_c=\frac{1}{G_5} \tag{1-6}$$

闭环各噪声源叠加到输出端的电压噪声$\Delta V_{total,c}$为探头磁噪声$\frac{\Delta H_n}{G_5}$、仪表放大器引入的噪声$\frac{\Delta V_{n2}}{G_1G_5}$、相敏解调器引入的噪声$\frac{\Delta V_{n3}}{G_1G_2G_5}$、积分器引入的噪声$\frac{\Delta V_{n4}}{G_1G_2G_3G_5}$、反馈回路噪声$\Delta V_{n5}$。根据式（1-3）可计算出闭环系统磁噪声$N_c$：

$$N_c=\sqrt{\Delta H_n^2+\left(\frac{\Delta V_{n2}}{G_1}\right)^2+\left(\frac{\Delta V_{n3}}{G_1G_2}\right)^2+\left(\frac{\Delta V_{n4}}{G_1G_2G_3}\right)^2+\left(G_5\cdot\Delta V_{n5}\right)^2} \tag{1-7}$$

从式（1-4）（1-7）可以看出，闭环系统中电子学引入的噪声可以通过改变各个部分的增益来降低，而探头噪声ΔH_n无法通过调节增益来降低。调节各环节的增益，使整个系统的噪声尽可能小，此时开环与闭环解调的噪声都主要来源于探头噪声ΔH_n，且开环噪声与闭环噪声近乎相等。因此研究开环噪声对研究闭环噪声有着重要的指导意义。

1.3 磁通门传感器解调原理分析

感应线圈的总输出包含两类信号：其一是外磁场H_0引入的偶次谐波(以二次谐波作为代表)，其二是驱动磁场由于磁芯由于工艺、因为时间而造成的机械偏差等未抵消掉的奇次谐波。磁通门的解调本质是“从谐波中提取与外磁场成正比的直流信号”。

由（1-1）得出的结论，第 n 次谐波的磁通门调制信号V_n为：

$$V_n=k_nH_0\sin\left(2n\omega_0t\right) \tag{1-8}$$

式中 ω_0 是磁通门传感器激励信号角频率，频率f_1满足$\omega_0=2\pi f_1$，式中k_n为原式中常量的简化$k_n=-2\pi nf_1N_2S\cdot2n\mu_n$。

调制信号与正弦参考信号相乘，可以得到解调后的信号$V_{\prod,n}$，其中直流部分是被采集的磁场信号，而解调后的高次谐波部分将被滤波器消除。这一谐波解调后的增益为$Gn'=\frac{1}{2}k_nA_{\sin}$。

$$V_{\prod,n}=A_{\sin}\sin\left(2n\omega_0t\right)\cdot V_n \tag{1-9}$$

当磁通门信号中的多个谐波同时被解调时，总增益G_{total}是多个谐波增益的线性叠加，见式（1-10），α_n代表不同谐波的幅值比例参数，总增益G_{total}为：

$$G_{total}=\sum_{n=1,2,3\ldots}\alpha_n G_n^{'} \quad (1-10)$$

磁通门每个谐波的信号解调过程汇总都会引入随机噪声ΔV_n，噪声遵循均方根（功率叠加）原则，因此输出噪声有效值ΔV_{total}为：

$$\Delta V_{total}=\sqrt{\sum_{n=1,2,3\ldots}\left(\alpha_n \Delta V_n\right)^2} \quad (1-11)$$

由式（1-3）可得出总磁噪声N_{total}，均方根叠加的噪声与线性叠加的增益比值在设置好合适的比例系数，一般可以小于单一谐波的噪声与增益比值

以方波为例 2nω 的方波，存在 1:1/3:1/5…的奇次谐波，那么用方波进行解调，磁强计的噪声为式（1-12）。

$$N=\frac{\sqrt{\left(\Delta V_1\right)^2+\left(\frac{1}{3}\Delta V_3\right)^2+\left(\frac{1}{5}\Delta V_5\right)^2+\ldots}}{G_1^{'}+\frac{1}{3}G_3^{'}+\frac{1}{5}G_5^{'}+\ldots} \quad (1-12)$$

根据（1-12）可见，方波解调虽然耦合了多个谐波信号，但是只要多个谐波信号的噪声水平相当，很有可能方波解调的整体噪声水平要优于单一谐波解调的噪声。具体的，要根据每个单一谐波解调的增益和噪声水平进行评估，后续的试验将对此进行验证。

1.4 调制信号相位偏差对解调性能影响

相敏解调中的参考信号和磁通门谐波信号之间不可避免会存在一定的相位偏差，这种相位偏差造成的结果如式（1-13）所示，增益将有所降低多了一个 cos(nΔφ)的系数，但是针对单谐波的噪声是没有增加的。

$$V_{\prod,n} \quad A\sin\left(2n\omega_0 t+2n\Delta\phi\right)\cdot\left(V n+\Delta V\right) \quad (1-13)$$

那么针对多谐波解调叠加的系统来说，相位的变化相当于改变了增益和噪声的比例关系如式（1-14），自然改变了最终测量噪声的大小，在相位差异足够小的情况下，它更趋近于 2nω 谐波的噪声。

$$N=\frac{\sqrt{\sum_{n=1,2,3\ldots}\left(\alpha_n \Delta V_n \cos\left(n\Delta\phi\right)\right)^2}}{\sum_{n=1,2,3\ldots}\alpha_n G_n^{'}\cos\left(n\Delta\phi\right)} \quad (1-14)$$

那么，可以根据单一谐波的噪声和增益，可以分析出当相位足够小的时候预期的噪声，同时也可计算得出在不同相位偏差时的噪声变化情况。

2 探头感应信号谐波实验

采用 10 kHz 方波作为激励信号，相比于正弦波激励，方波激励电路实现简单、驱动效率高，且方波信号天然包含丰富的奇次谐波分量，经磁芯非线性调制后会产生大量偶次谐波输出。

激励电路采用“FPGA 生成数字方波 + MAX4426 mosfet 驱动器”的架构：FPGA 输出

3.3 V、10 kHz 的标准 50%占空比方波信号，经 MAX4426 功率放大至±15 V 幅值后，通过“串联 LC+并联 LC”的双谐振电路进一步提高驱动能力，对并联 LC 的调谐电容进行调整使驱动电流达到最优，峰峰值约 1000 mA。

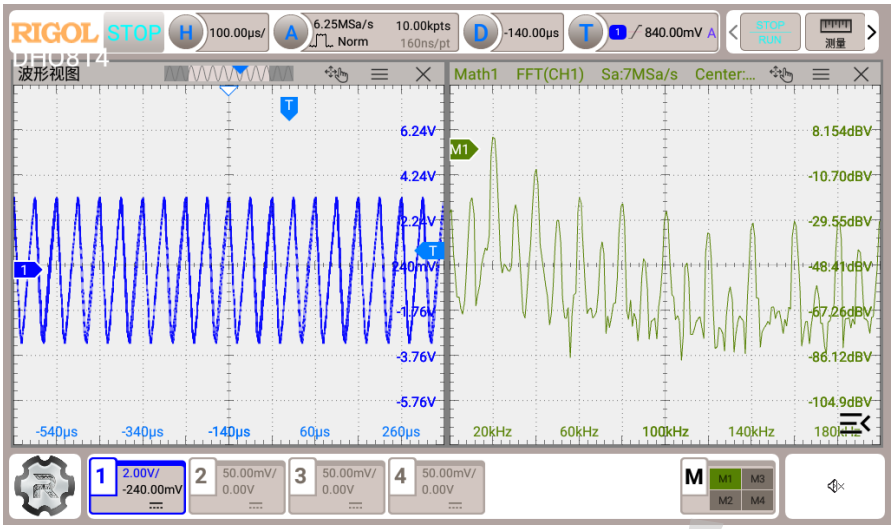


图 3 探头信号波形与频谱

Fig. 3 Probe signal waveform and frequency spectrum

图示为在 10 khz 激励、62500 nT 的磁场下探头输出信号经过前置滤波与放大后的波形，偶次谐波（20 khz、40 khz、60 khz...）代表了所测磁场的大小。为了研究解调过程的噪声，有必要先研究磁强计探头经过仪表放大后的信号噪声，分别分析未经解调的输出信号的各次谐波噪声情况。

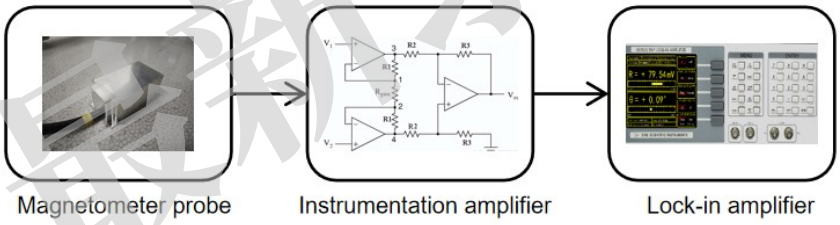


图 4 探头谐波测试系统

Fig. 4 Probe harmonic test system

开环测量环路结构如图 4，由前置滤波、仪表放大电路与锁相放大器构成，在常用的模拟磁通门磁强计中，对输出信号的相敏解调通常采用模拟乘法器来实现，而在该实验中，为了研究解调前信号的噪声，选择采用锁相放大器来直接测量偶次谐波的信号。

锁相放大器是一种基于正交 IQ 解调原理的微弱信号测量仪器，正交锁相放大器是一种基于同步解调原理（如图 4）、用于从强噪声中提取特定频率微弱信号的精密仪器。其核心是通过双通道互相关运算实现矢量测量。

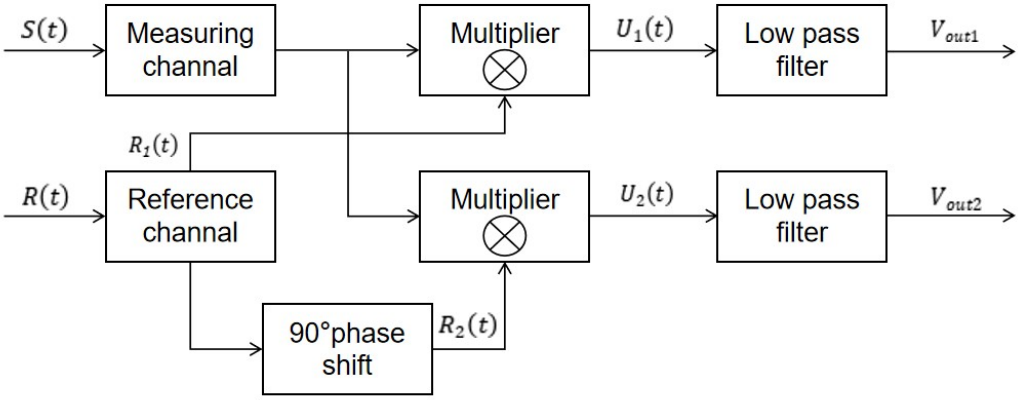


图 5 锁相放大器原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the lock-in amplifier principle

锁相放大器的噪声为 $5nV/\sqrt{Hz}$，对整体的噪声影响较小，可以看作直接提取测量输出信号的单个谐波，来评估解调前感应信号各偶次谐波的噪声情况。

实验结果如下，图 6 为锁相放大器解调后的各谐波的电压噪声情况，图 7 为 0-31250 nT 的磁场下测得的灵敏度曲线，表 1 是综合图 6 图 7，计算各谐波的磁噪声。

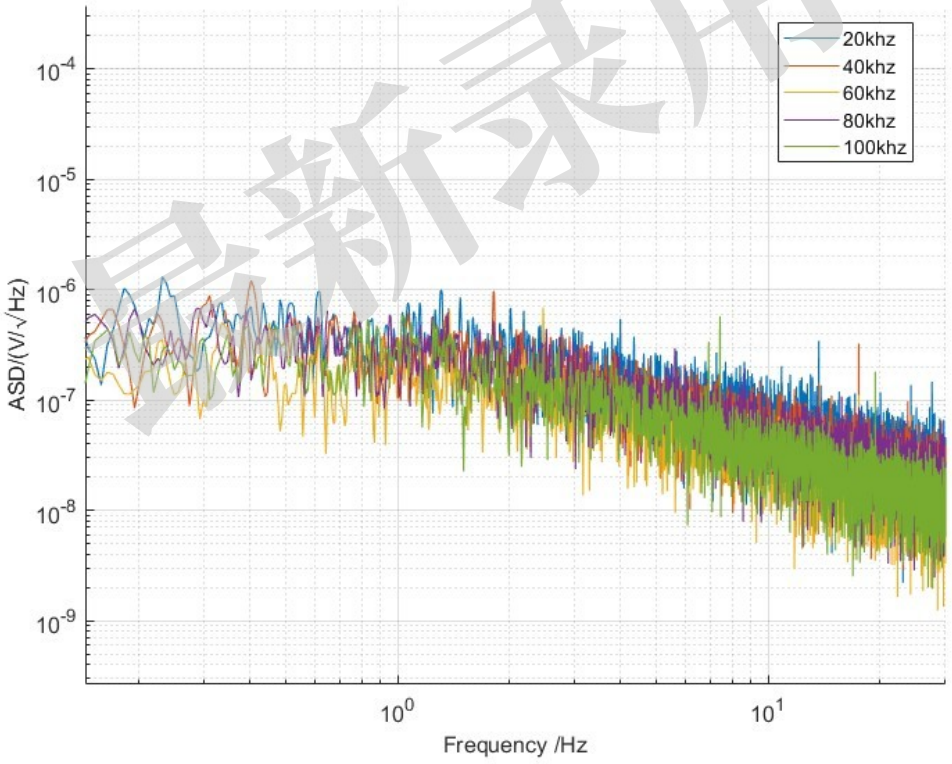


图 6 各谐波电压噪声功率谱密度

Fig. 6 Power spectral density of each harmonic voltage noise

最新录用

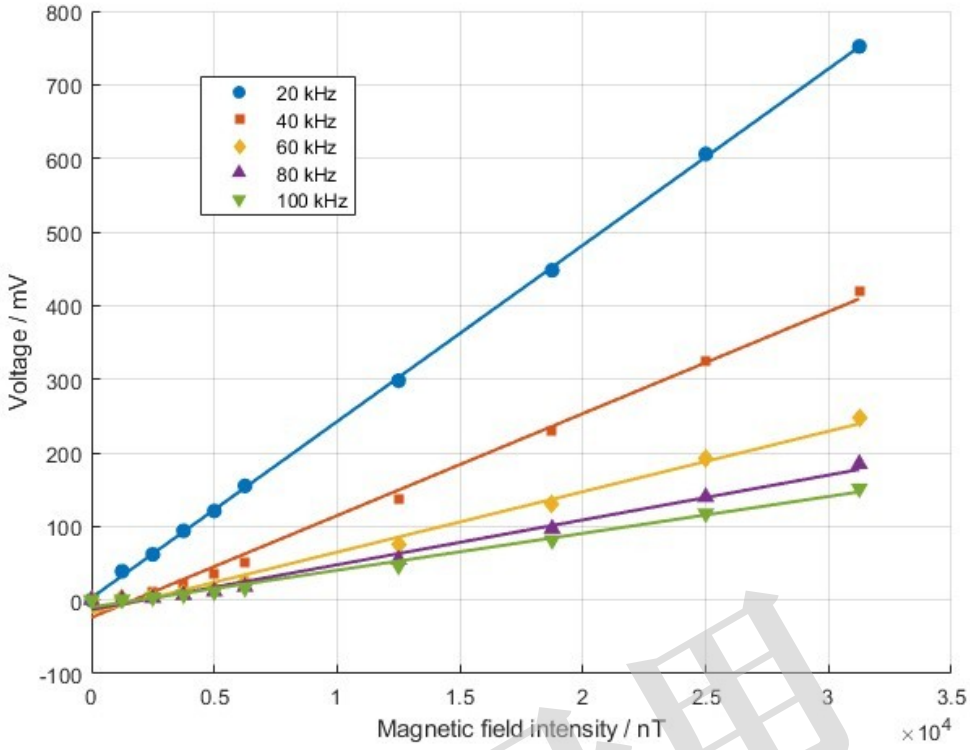


图 7 探头各谐波灵敏度

Fig. 7 Harmonic sensitivity of the probe

表 1 探头各谐波噪声分析

谐波频率 kHz	电压噪声$nV/\sqrt{Hz}$	灵敏度 uV/nT	磁噪声$pT/\sqrt{Hz}$
20	495	24	20.63
40	451	13.9	32.45
60	226	10.3	21.94
80	271	7.1	38.17
100	365	6.3	57.9

图 6 图 7 分别是磁场测量噪声功率谱密度与各谐波灵敏度，谐波阶数越高，灵敏度越低，但是电压噪声却没有呈现等比例变化，20 khz 谐波有最好的灵敏度与最佳的磁噪声表现，60 khz 有最好的电压噪声，高次谐波线性度表现相比于二次谐波较差。转换到磁噪声 20 kHz 噪声最小为 20.63 $pT/\sqrt{Hz}$，100 kHz 噪声最大。

在该实验中已调整增益以尽可能减少电路噪声对整体噪声的影响，此时测出的值与当前商用的磁通门磁强计仍有一定差距，本实验中采用的自制探头为实验室常规坡莫合金环形磁芯结构，噪声性能差距可能来源于磁芯的材料、绕制工艺等方面。

3 磁通门磁强计噪声特性验证实验

3.1 开环增益测试

试验系统由磁通门磁强计探头、信号调理与解调模块、闭环反馈模块及数据采集与分析系统四部分构成，探头感应信号经π型滤波后，由仪表放大器完成放大，再通过模拟乘

最新录用

法器实现解调；通过转电流（V-I）反馈电路，构成闭环负反馈控制。数据采集系统本底噪声为 $400nV/\sqrt{Hz}$。

断开积分器与反馈回路，将模拟乘法器的解调输出直接接入数据采集仪，形成磁通门开环测试电路，测试其开环的增益关系。磁通门传感器放置在无矩线圈内，并对准线圈轴向，通过对无矩线圈施加磁场。在每个磁场条件下分别采用方波与正弦波作为参考信号对磁通门信号进行解调，结果如图 8 所示。

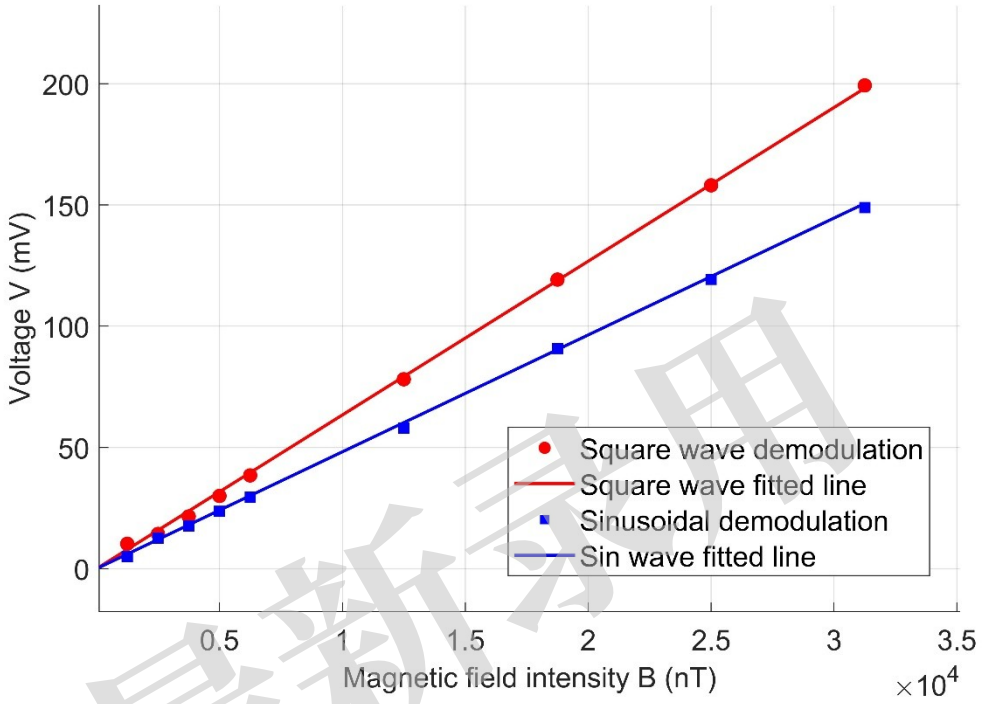


图 8 方波与正弦解调开环增益

Fig. 8 Open-loop gain of square-wave and sinusoidal demodulation

开环磁通门磁强计的实测结果表明，可见方波解调得到的开环增益显著高于正弦波解调，正弦波解调开环增益为 24.5 μV/nT，方波解调开环增益为 32.1 μV/nT。

根据公式（1-10），结合表 1 的磁通门谐波实测参数对方波解调信号只考虑磁通门传感器二次谐波、六次谐波与十次谐波，组合解调的系统增益可达 28.69 μV/nT，考虑到更高次谐波的作用，实测方波解调的开环增益与多个单谐波解调开环增益的叠加基本一致。

3.2 闭环噪声测试

搭建磁通门反馈信号处理电路，反馈增益为 650 μV/nT。调整相敏解调参考信号相位，使开环信号达到最大值，作为相对相位匹配的标志。磁通门闭环电路噪声如图 9 所示。

最新录用

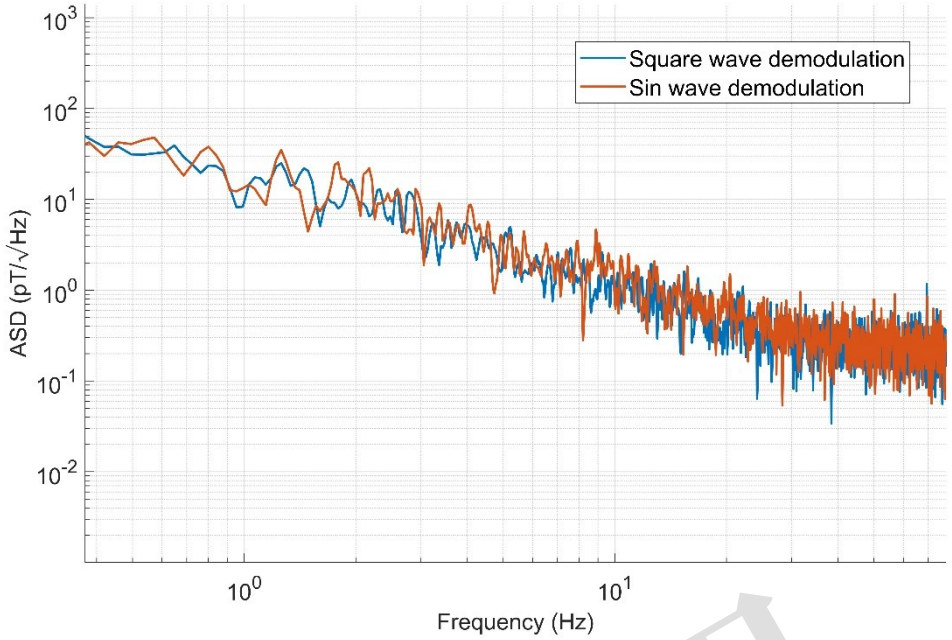


图 9 方波与正弦解调闭环磁强计磁噪声

Fig. 9 Magnetic noise of closed-loop magnetometer with square-wave and sinusoidal demodulation

方波闭环输出电压噪声为 12.5$\mu V/\sqrt{Hz}$，对应的磁场噪声 19.2 $pT/\sqrt{Hz}$。而正弦波解调 15.9$\mu V/\sqrt{Hz}$，对应磁场噪声约为 24.4 $pT/\sqrt{Hz}$。根据式（1-2）和表 1 测试的单频点解调增益和噪声参数，当 2ω 谐波的噪声为 20.63 $pT/\sqrt{Hz}$的时候，理论计算方波解调后开环噪声为 17.6 $pT/\sqrt{Hz}$。而根据式（1-4）（1-7）闭环噪声约等于开环噪声，本试验结果与预期基本相符。这说明一般情况下方波解调方式可以比单频点正弦解调实现更低的噪声。

4 相位偏移与系统噪声实验

在实际工程应用中，激励信号传输、电路延迟、元器件参数离散性等因素均会导致感应信号与解调参考信号之间产生相位偏差，而方波解调的多谐波叠加特性使其对相位偏差的敏感度与单频正弦波解调存在显著差异。为量化相位偏差对解调系统性能的影响规律，明确方波解调保持噪声优势的相位控制阈值，本实验基于前文推导的相位偏差理论模型，结合实测谐波参数完成理论计算，并通过闭环实验平台完成实测验证。

实验过程中，保持硬件电路、激励信号幅值、被测磁场等基础实验条件与 2.2 节闭环测试完全一致，仅通过高精度信号源调整解调参考信号的相位，在 0°~30° 区间内设置多组相位偏差梯度，分别测试不同相位偏差下，方波解调系统的总输出电压噪声、系统总灵敏度，进而计算得到对应等效输入磁噪声，最终拟合得到相位偏差与系统噪声性能的关联规律，并与理论计算结果进行对比验证。

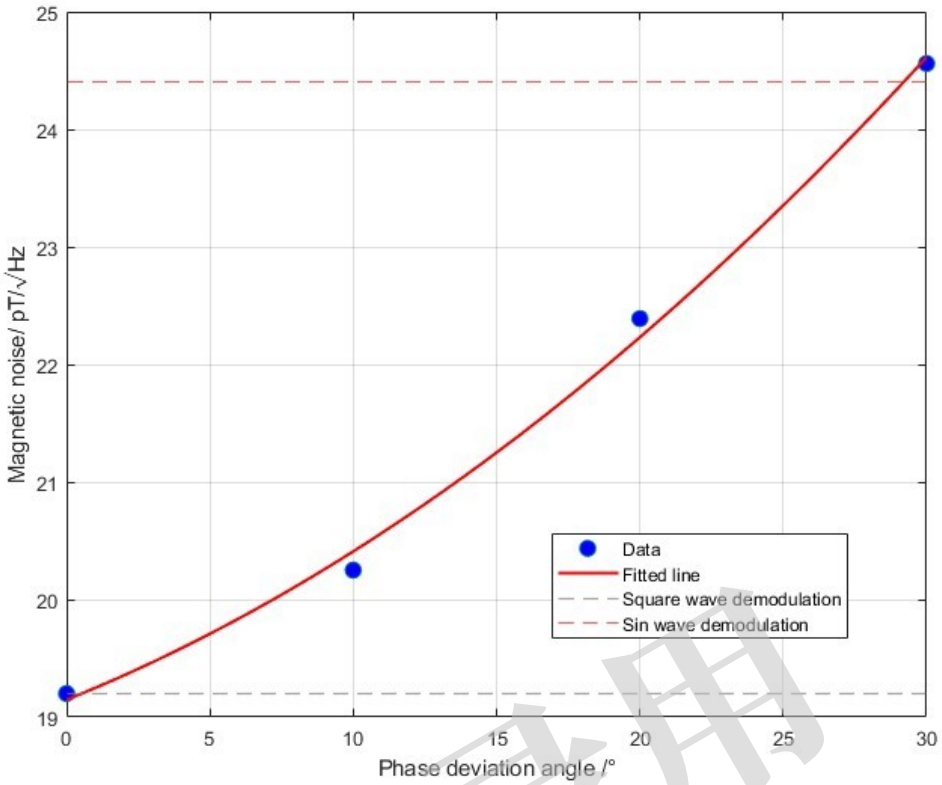


图 10 相位偏差与闭环系统噪声关系图

Fig. 10 Phase deviation vs. closed-loop system noise diagram

图 11 为不同相位偏移下磁噪声的大小。能明显看出随着相位差变大，系统噪声逐渐变差。在理论计算中当相位差超过 25°时，方波解调的噪声大于正弦解调。而在实际实验中在相位差变得更大（30°）时，方波解调的噪声达到了 24.56$pT/\sqrt{Hz}$，已大于正弦解调的噪声。根据表 1 的数据，由（1-14）式可以计算出理论开环磁噪声随相位的变化，在无偏差时的噪声 17.6 $pT/\sqrt{Hz}$，随相位偏差增大，磁噪声升高的趋势与实测曲线相同，最终在 25°点处，方波解调与正弦解调的理论开环噪声相当。可以看出实测结果与理论计算基本相符。

5 解调信号最优化研究

根据试验，方波调制得到磁场测量噪声优于单频正弦波调制的结果，但是方波所使用的多个谐波频点以及增益系数是由方波自身特性决定，多谐波信号的系数并非最优解。可以调整谐波之间的系数，有望实现磁通门噪声的最小化。多谐波解调的噪声公式见（1-12），以方波的前三次谐波为例，建立使噪声最小的最优化模型。

由于要求解的是三个谐波的比例问题，不妨令$\alpha_1=1$。根据公式（1-2）得到总磁噪声为:

$$N_{total}=\frac{\Delta V_{total}}{G_{total}}=\frac{\sqrt{(\Delta V_{n1})^2+(\alpha_2\Delta V_{n2})^2+(\alpha_3\Delta V_{n3})^2}}{G_1+\alpha_2 G_2+\alpha_3 G_3} \quad (5-1)$$

为求此时系统磁噪声最小值，问题可写为在约束 $g(\alpha_2,\alpha_3)=G_1+\alpha_2 G_2+\alpha_3 G_3-1=0$ 下，最小化目标函数 $h(\alpha_2,\alpha_3)=(\Delta V_{n1})^2+(\alpha_2\Delta V_{n2})^2+(\alpha_3\Delta V_{n3})^2$。

$\alpha_2,\alpha_3\geq 0$。为求解该约束优化问题，采用拉格朗日乘数法，构造拉格朗日函数 L：

$$L(\alpha_2,\alpha_3,\lambda)=(\Delta V_{n1})^2+(\alpha_2\Delta V_{n2})^2+(\alpha_3\Delta V_{n3})^2-\lambda(G¿¿1+\alpha_2 G_2+\alpha_3 G_3-1)¿ \quad (5-2)$$

分别对 α_2、α_3 与 λ 求偏导并令其等于 0，化简后可得最优比例系数的满足条件：

$$\alpha_2=\frac{G_2}{G_1}\cdot\frac{(\Delta V_{n1})^2}{(\Delta V_{n2})^2},\alpha_3=\frac{G_3}{G_1}\cdot\frac{(\Delta V_{n1})^2}{(\Delta V_{n3})^2} \quad (5-3)$$

该条件表明，最优比例系数的分配需满足“各次谐波的比例系数与自身灵敏度成正比，与自身噪声平方成反比”,即增益越高、噪声越低的谐波，应分配越大的比例系数以充分发挥其性能优势。将探头谐波参数带入上式，可推导出各次谐波的最优比例系数：$\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3=1:2.06:0.48\approx 1:2:0.5$。

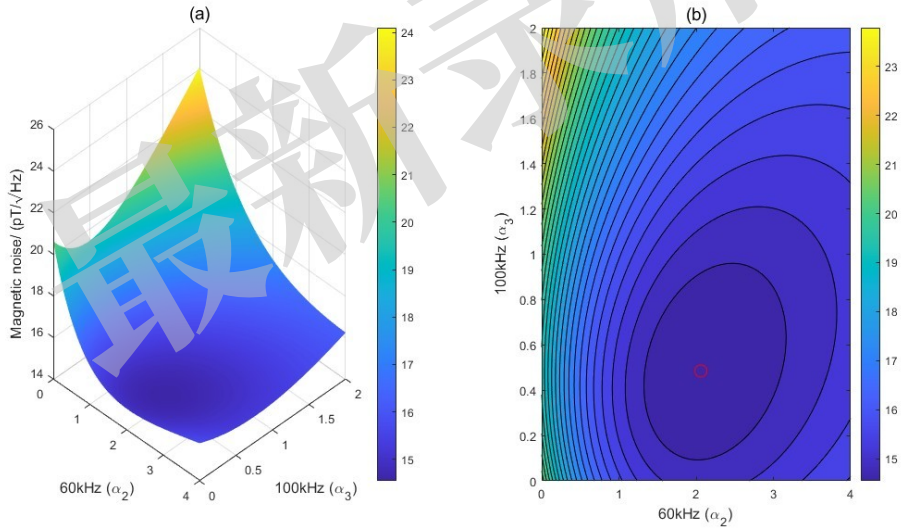


图 11 最优谐波比例可视化图

Fig. 11 Visualization diagram of optimal harmonic ratio

图 11 为不同比例下的系统噪声图，计算得出，在最佳比例 $\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3=¿1:2:0.5$ 的情况下，系统噪声最小为 14.55 $pT/\sqrt{Hz}$，较方波解调噪声可以进一步降低 20%。

在实际电路实现中，该优化方法可广泛应用在模拟与数字磁强计中，在模拟磁强计中，可使用 FPGA 生成加权后的解调信号，在乘法器与放大后的信号进行解调，然后滤波反馈，工程实现难度低、成本可控。在数字磁强计中，将探头感应信号经高精度高速 ADC 采样后，在 FPGA 或 DSP 中生成三路与对应谐波同频同相的正交参考信号，分别与采样信号相乘后经数字低通滤波得到各谐波的幅值，再按照最优比例加权求和得到最终解调结果。

本文实验中采用的方波解调本质上是多谐波解调的一种特殊形式，其通过方波参考信

号的固有谐波分量自动实现了各次谐波的加权叠加，验证了多谐波解调的可行性；而本文提出的最优比例解调则是对方波解调的进一步优化，可通过上述两种电路架构便捷实现。

6 结论

本文围绕磁通门传感器解调策略优化与噪声抑制展开了系统的理论分析与实验研究，厘清了解调方式、相位偏差、多谐波比例对传感器噪声与灵敏度的影响规律，解决了方波解调中“增益-电压噪声”的权衡问题，推导得到多谐波解调的最优比例方案，为磁通门传感器的低噪声设计提供了关键的实验依据与理论方法，主要研究结论如下：

定量验证了方波解调相对正弦波解调的性能优势，开环架构下方波解调的磁噪声降低14.6%；闭环架构下方波解调的磁噪声（19.2 $pT/\sqrt{Hz}$）较正弦波解调（24.4 $pT/\sqrt{Hz}$）降低 27%。

揭示了相位偏差对方波解调系统的影响规律，方波解调的总灵敏度与总电压噪声均随相位偏差的增大而降低，且系统磁噪声随相位偏差的增大逐渐变差。相位偏差超过 25° 后，方波解调的噪声负面影响凸显，磁噪声反而高于正弦波解调。该结果明确了磁通门传感器解调系统的相位校准阈值，为实际电路中相位调节提供了量化标准，需将相位偏差控制在 25° 以内以保证方波解调的性能优势。

推导得到多谐波解调的最优比例分配方案，以总磁单位噪声最小为优化目标，结合拉格朗日乘数法与约束条件，得出 20 kHz、60 kHz、100 kHz 谐波的最优比例系数约为 1:2:0.5，能充分发挥各次谐波的性能优势，实现电压噪声抑制与灵敏度保持的最优权衡。该优化方案突破了单谐波解调的性能瓶颈，为磁通门传感器解调电路的进一步优化提供了新的设计思路。

该实验仍存在可提升的空间：实验得出的闭环噪声（19.2 $pT/\sqrt{Hz}$）与商用磁通门磁强计（10 $pT/\sqrt{Hz}$）仍有一定差距，该差距来源于探头磁芯带来的无法通过改变增益减小的探头噪声。这与本文的研究内容并不矛盾，文中提出的优化方法对于各种磁芯有普适性：若将本文提出的不同解调方式应用于正弦波解调能达到 10 pT/√Hz 水平的高端硬件平台，理论上可将其噪声进一步降低至 7.3 pT/√Hz 左右。下一步目标优化磁通门传感器的探头，将整个系统的噪声降低至优秀的标准，以使结果更加具有信服力。

当前数字磁通门磁强计正迎来技术发展与应用拓展的黄金时期，在高精度弱磁测量领域的应用需求与技术迭代蒸蒸日上，数字化、高集成、低噪声已成为其核心发展方向。未来，可将本次研究所得最优解调比例系数，与数字滤波、数字锁相、自适应相位校准等先进数字信号处理技术深度融合，充分发挥数字技术的精准调控、灵活适配与集成化优势，开发新一代高集成度、低噪声的全数字磁通门磁强计。

参考文献

[1] PRIMDAHL F. The fluxgate magnetometer[J]. *Journal of Physics E*: *Scientific Instruments*, 1979, **12**(4): 241-253

[2] WEI S R, LIAO X Q, ZHANG H, *et al*. Recent progress of fluxgate magnetic sensors: basic research and application[J]. *Sensors*, 2021, **21**(4): 1500

[3] RIPKA P. Advances in fluxgate sensors[J]. *Sensors and Actuators A*: *Physical*, 2003, **106**(1/2/3): 8-14

[4] BUTTA M, SASADA I. Sources of noise in a magnetometer based on orthogonal fluxgate operated in fundamental mode[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, **48**(4): 1508-1511

[5] OGBUOKEBE S K, ALAPA F, IBEKWE N, *et al*. Design and simulation of fluxgate sensor drive electronics for satellite communications[J]. *International Journal of Informatics and Data Science Research*, 2025, **2**(9): 23-31

[6] PAN Ao'lin, DU Aimin. Research development of fluxgate sensor[J]. *Progress in Geophysics*, 2025, **40**(5): 2247-2264 (潘奥霖, 杜爱民. 磁通门传感器的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2025, **40**(5): 2247-2264)

[7] STRANGEWAY R J, CAO H, ORRILL E, *et al*. The TRACERS fluxgate magnetometer (MAG)[J]. *Space Science Reviews*, 2025, **221**(6): 84

[8] LI Fang. Design and Research on Flux-Gate Instrument[D]. Changchun: Jilin University, 2014 (李芳. 磁通门磁力仪的设计与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014)

[9] JIANG Jiao, ZHOU Bin. Temperature drift performance of fluxgate sensor with open-loop measurement[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(3): 1-10. DOI: 10.11728/cjss2026.03.2025-0055 (蒋娇, 周斌. 磁通门传感器开环测量温漂特性[J]. 空间科学学报, 2026, **46**(3): 1-10. DOI: 10.11728/cjss2026.03.2025-0055)

[10] RIPKA P. Review of fluxgate sensors[J]. *Sensors and Actuators A*: *Physical*, 1992, **33**(3): 129-141

[11] WANG W B, YANG S L, SU H S. Magnetic field measurement using resonance frequency-optimized fluxgate sensors[C]//2025 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSS). Yinchuan: IEEE, 2025: 380-383

最新录用



赵柏 男，1999 年 4 月出生于山东省青岛市，中国科学院国家空间科学中心毕业生，主要研究方向为磁通门传感器的噪声指标优化。
Email: 15526861896@163.com



周斌(通信作者) 男，1979 年 10 月出生于辽宁沈阳，中国科学院国家空间科学中心教授级正高级工程师，博士生导师，主要从事空间环境磁场、电场探测技术研究。
Email: zhoubin@nssc.cn

最新录用