

磁通门传感器开环测量温漂特性*

蒋 娇^{1,2} 周 斌¹

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

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 磁通门传感器具有随温度测量漂移的效应,在对磁通门传感器开环和闭环测量电路的原理进行分析后,研究了开环测量状态下磁通门传感器自身特性随温度变化的规律,为闭环测量的温漂抑制提供了试验依据.根据磁通门基本原理,推导了开环测量和闭环测量的电路传递函数,分析出开环测量的误差因素相比闭环测量更能直接反映出传感器自身特性.通过双运放带通滤波器选通二次谐波并进行锁相放大测量,可有效实现磁通门开环信号幅值与相位的测量.根据磁通门传感器不同性能参数的特点,设计性能温度试验.在 $-40\sim+80^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,试验结果表明,磁通门传感器的零点漂移不超过 $\pm 0.5\text{ nT}$,信号相位漂移达到 60° ,开环增益变化为 $\pm 5\%$ 左右,噪声在 $4\sim 7\text{ pT}\cdot\text{Hz}^{1/2}@1\text{ Hz}$ 之间.磁通门传感器开环测量仅信号相位出现了显著变化,而闭环测量中相敏解调环节对信号相位具有高度敏感性,通过试验可见磁通门信号相位漂移会导致闭环测量的零点出现显著漂移.

关键词 磁通门传感器, 温度漂移, 开环测量, 标定试验, 锁相放大

中图分类号 TP212

Temperature Drift Performance of Fluxgate Sensor with Open-loop Measurement

JIANG Jiao^{1,2} ZHOU Bin¹

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 fluxgate sensor exhibits a significant temperature effect in its practical applications. This paper presents an in-depth analysis of the working principles of both open-loop and closed-loop measurement circuits commonly used with magnetic fluxgate sensors. Based on this theoretical foundation, the study focuses on how the sensor's intrinsic characteristics vary with temperature under open-loop conditions. The objective is to provide experimental evidence that can guide the design and optimization of temperature drift suppression techniques in closed-loop configurations. By building upon the fundamental operational principles of the magnetic fluxgate sensor, the paper derives and compares the circuit transfer functions for both open-loop and closed-loop measurement systems. It is demonstra-

* 国家自然科学基金项目资助 (42374228)

2025-04-11 收到原稿, 2025-08-17 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ted that the error sources present in open-loop measurements are more directly reflective of the sensor's own performance characteristics, as they are not masked by feedback mechanisms inherent in closed-loop designs. To achieve accurate and reliable open-loop signal detection, a dual-operational amplifier (dual-op-amp) bandpass filter was employed to isolate the second harmonic signal, followed by phase-locked amplification to precisely measure both the amplitude and phase of the open-loop output. Performance temperature tests were designed based on the distinct behaviors of different sensor parameters under thermal variation. Experimental results obtained over a temperature range from -40°C to $+80^{\circ}\text{C}$ show that the zero-point drift of the magnetic fluxgate sensor remains within $\pm 0.5\text{ nT}$, while the phase shift reaches up to 60° . Additionally, the open-loop gain varies by approximately $\pm 5\%$, and the noise level fluctuates between $4\sim 7\text{ pT}\cdot\text{Hz}^{1/2}$ at 1 Hz . Although the signal phase is the only parameter that undergoes a substantial change in open-loop measurements, the phase-sensitive demodulation mechanism in closed-loop systems is highly responsive to such variations. Consequently, the observed phase drift has been experimentally verified to result in significant zero-point drift in closed-loop measurements.

Key words Fluxgate sensor, Temperature drift, Open-loop measurement, Calibration test, Phase-locked amplification

0 引言

磁通门磁强计是基于法拉第电磁感应定律实现矢量磁场探测的仪器,被广泛应用在地质勘探、工业检测、空间探测等领域^[1].磁通门传感器的探头主要由磁芯和线圈绕组(激励线圈、感应线圈、反馈线圈)构成,具有体积小、结构稳定、可靠性高、相对误差小等特点^[2].但是,磁通门磁强计均具有一定的温度漂移效应,制约了这种仪器的应用^[3].

磁通门磁强计在应用中面临的温度环境可能非常复杂.在地面监测(例如地磁台站)和野外勘探中,环境温度的日变化往往可以达到十几摄氏度,一年以上长期变化则更为可观^[4].在飞机、气球、卫星等飞行器上,安装在飞行器舱体外部的磁通门传感器的温度变化可能达到 100°C 以上^[5-7].磁通门磁强计的温度漂移特性会造成磁场观测数据质量的下降,在应用中必须要考虑温度对测量的影响,并采取相应的温漂抑制措施.

针对磁通门磁强计温度效应问题,在过去的几十年里,从传感器性能、电路设计、材料控制等不同层面均有研究.Gordon等^[8]的温度试验结果表明,随着温度从 -30°C 变化到 60°C ,磁通门传感器的探测基准变化仅有 0.35 nT ,且探测基准变化与探头结构设计也有关联.Ripka^[9]研究了磁通门磁强计的温度特性,发现磁芯材料、线圈、电子器件均会受到温度的影响,从而导致磁通门磁强计的增益系数和零点产生偏移.

Nishio等^[10]针对BepiColombo号水星探测任务的磁通门磁强计开展了更为系统的温度影响试验,试验观察到非常大的相位漂移,在 $-80\sim +120^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内,传感器相位漂移将近 50° .也有研究从电路设计层面进行优化设计,提高磁通门磁强计温度稳定性的研究.Primdahl^[11]为磁通门磁强计设计了温度补偿电路,利用反馈线圈电阻的温度变化来补偿反馈线圈系数的温度依赖性,这种方法对电子元件之间的匹配要求较高.Murata等^[12]研究了一种在激励和反馈进行交流调制的方法,以提高仪器整体的噪声水平和稳定度,从试验结果来看,传感器整体的基准温度系数仍在 $0.1\text{ nT}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$.另外,降低传感器硬件级别的温度效应也是一种可取的方法.Rühmer等^[13]研究了电子元件与磁芯材料的温度特性,使磁通门传感器工作温度可达 250°C .Miles等^[14]研究了传感器绕组和底座支撑材料对增益系数的影响,从而给出相应材料的选择建议.Ugur等^[15]分析了磁通门传感器磁芯在 $-50\sim +85^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的温度依赖性,研究发现,采用基于细金属型合金和高温合金的磁芯材料进行适当的退火处理,可以显著提高磁通门传感器的性能.

为了保证信号输出的线性度,实际应用中的磁通门磁强计信号处理电路一般是闭环反馈式结构,传感器本身的增益、零点、相位、噪声等参数,与电路相关参数耦合在一起,共同影响输出.以往的磁通门温度特性研究中,有些是针对磁通门传感器的线圈系统,有些是针对完整的信号处理电路,研究结论差异性较

大. 本研究将以磁通门传感器线圈系统 (简称磁通门传感器) 作为研究对象, 采用开环测量系统, 避免各项参数的相互耦合, 探究磁通门传感器各项性能参数的温度效应, 将有助于分析和提高磁通门传感器的温度稳定性.

1 测量原理与温度特性

1.1 磁通门传感器原理

磁通门磁强计 (Fluxgate Magnetometer) 通过软磁材料的磁导率随外加磁场呈非线性变化的特性来测量弱磁场, 具有重量轻、可靠性高、灵敏度高等诸多优点. 磁通门磁强计由探头和信号处理电路两部分构成, 单磁芯探头结构如图 1 所示, 由磁芯、激励线圈、感应线圈组成. 传感器磁芯的软磁材料在激励电流作用下周期性饱和, 当存在外界磁场时, 磁芯内的磁通平衡发生变化, 感应线圈中感应出与外界环境磁场强度成比例的二次谐波信号.

根据法拉第电磁感应定律, 感应线圈上的感应电动势可以表示为

$$e = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} (\mu H_d S). \quad (1)$$

其中, N_2 为感应线圈匝数, μ 为磁芯磁导率, H_d 为激励磁场, S 为磁芯横截面积.

假设交流激励磁场形式为余弦信号, 其表达式为

$$H_d = H_m \cos 2\pi f_1 t. \quad (2)$$

其中, H_m 为激励磁场强度幅值, f_1 为激励信号频率.

传感器工作在外界环境中, 作用于磁芯轴向上的磁场, 除激励磁场外还有外界环境磁场 H_0 , 式 (2) 中 H_d 在交流变化的基础上还有 H_0 引起的直流分量, 带入式 (1) 可得

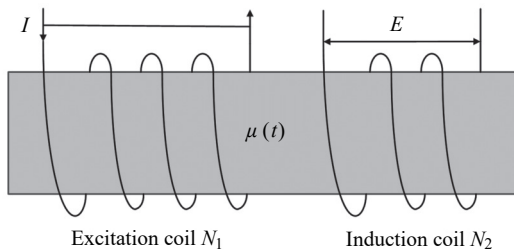


图 1 单磁芯磁通门传感器探头结构

Fig. 1 Schematic diagram of the single-core probe structure

$$e = 2\pi f_1 \mu N_2 S H_m \sin 2\pi f_1 t -$$

$$N_2 S H_m \cos 2\pi f_1 t \frac{d\mu(t)}{dt} - N_2 S H_0 \frac{d\mu(t)}{dt}. \quad (3)$$

激励磁场瞬时值的周期性变化会引起磁芯磁导率 $\mu(t)$ 的周期性变化, 而磁导率无正负之分, 所以 $\mu(t)$ 为偶函数, 其变化频率为激励信号频率的 2 倍. 当外界环境磁场 H_0 比激励磁场强度幅值 H_m 和磁芯饱和磁场强度 H_s 小时, 可以忽略其对磁芯磁导率 $\mu(t)$ 的影响, 将 $\mu(t)$ 展开为傅里叶级数代入式 (3) 可知, 前两项与激励磁场 H_d 相关的感应电动势是奇次谐波, 而与外界环境磁场 H_0 相关的感应电动势为偶次谐波, 可表示为

$$e(H_0) = -2\pi f_1 N_2 S H_0 (2\mu_{2m} \sin 4\pi f_1 t + 4\mu_{4m} \sin 8\pi f_1 t + 6\mu_{6m} \sin 12\pi f_1 t + \dots). \quad (4)$$

其中, μ_{2m} , μ_{4m} 为磁芯磁导率的各次谐波分量幅值.

感应线圈的偶次谐波分量包含了外界环境磁场信息, 且大小与环境磁场强度 H_0 成正比, 可将其作为环境磁场强度的度量. 磁芯偶次谐波分量中二次谐波的幅值最大, 且信号稳定性最好, 在工程中常通过调制解调二次谐波分量来实现磁通门传感器的磁场测量. 单磁芯磁通门传感器数学模型可以较好地解释磁通门工作原理, 在实际应用中, 为了降低探头变压器效应引起的奇次干扰信号, 一般采用闭合磁路磁芯探头结构. 理想情况下, 闭合磁芯对称部分的形状尺寸和电磁参数完全一致, 激励磁场在感应线圈中的感应电动势即会互相抵消, 而环境磁场在感应线圈中的感应电动势则相互叠加, 从而提升了磁通门传感器的信噪比.

1.2 开环与闭环测量原理

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, 即为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, 即为磁通门传感器的闭环测量方法.

磁通门传感器开环系统功能框图如图 2 所示. 外界磁场在磁通门探头轴向分量 H_0 经探头转换为磁通门信号, 经前置放大器、相敏检波器、低通滤波器处理后, 得到能够表征被测磁场特性的模拟电

压信号. 由于材料工艺等非理想因素的限制, 探头结构内部本身存在磁场零点偏移量, 在图中表示为 ΔH_1 . 在磁通门传感器的信号处理过程中, 对于二次谐波分量来说, 探头转换、前置放大、相敏检波、低通滤波均可以看作比例环节, 这里将其传递函数 $G_1(s), G_2(s), G_3(s), G_4(s)$ 分别简化记为 G_1, G_2, G_3, G_4 . 推导开环测量输出, 可表示为

$$V = (H + \Delta H_1) G_1 G_2 G_3 G_4. \quad (5)$$

从 1.1 节中磁通门传感器的工作原理可以看出, 开环测量状态下, 环境磁场在磁芯中建立的磁场强度与磁芯饱和和磁场强度及激励磁场强度具有可比性, 磁滞曲线的非线性特征的影响相对较大. 闭环系统加入负反馈电路, 磁芯在零场附近的磁滞曲线更接近线性, 反馈线圈内部磁场与电流的关系也是线性的, 相比于开环系统, 闭环磁通门信号处理具有更好的线性输出表现, 系统工作状态更加稳定可靠.

磁通门传感器闭环系统功能原理如图 3 所示. 积分电路建立闭环系统平衡, 在实际工作中, 积分器需要一个极小的偏置电压信号 ΔV 建立平衡, 使反馈电路达到稳定状态. 闭环系统的应用中, 实际的反馈磁

场并不一定可以完全补偿原磁场, 因此, 探头内部剩余场在零场附近但不严格为零, 即存在一个较小的磁场零点偏移量 ΔH_2 . 推导闭环系统传递函数, 将信号处理过程中探头转换、前置放大、相敏检波、反馈电路的传递函数 $G_1(s), G_2(s), G_3(s), G_5(s)$ 分别简化记为 G_1, G_2, G_3, G_5 , 积分器传递函数为 $G(s) = \frac{1}{s}$. 闭环系统传递函数为

$$\frac{[(H - VG_5 + \Delta H_1 + \Delta H_2) G_1 G_2 G_3 - \Delta V]}{s} = V. \quad (6)$$

推导可得闭环测量系统输出为

$$V = \frac{HG_1 G_2 G_3 + \Delta H_1 G_1 G_2 G_3 + \Delta H_2 G_1 G_2 G_3 - \Delta V}{s + G_1 G_2 G_3 G_5}. \quad (7)$$

闭环测量零点偏移的影响因素包括 $\Delta H_1, \Delta H_2, \Delta V$, 开环测量得到的磁通门探头零点偏移 ΔH_1 会直接影响闭环系统零点偏移. 从式 (7) 可以看出, 开环增益系数 G_1, G_2, G_3 也会影响闭环测量输出. 此外, 根据相敏检波原理, 在相敏检波环节中, 参考信号和二次谐波信号相对相位量产生变化时, 会直接影响直流量, 相当于改变了相敏解调环节的增益 G_3 . 因此, 开

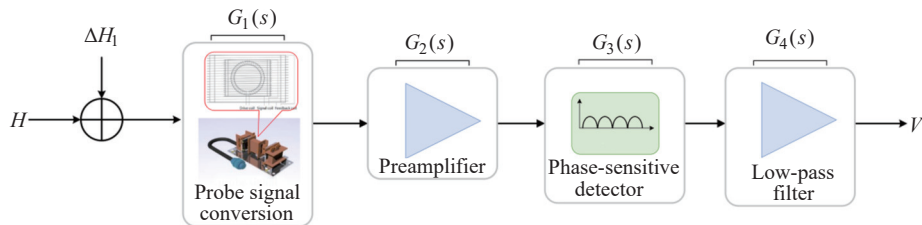


图 2 磁通门传感器开环系统功能

Fig. 2 Functional block diagram of the open-loop magnetic fluxgate sensor

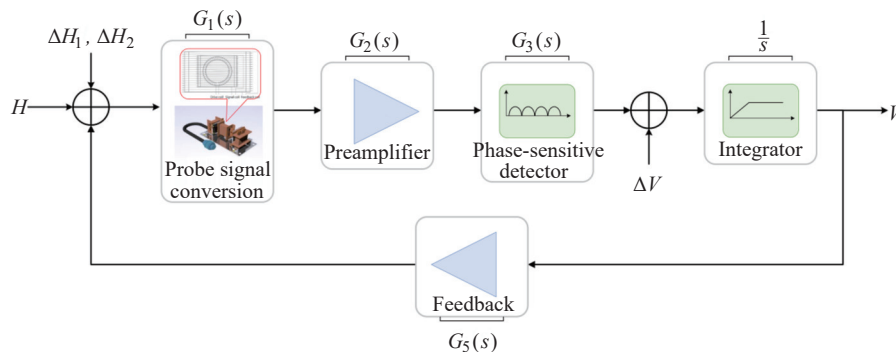


图 3 磁通门传感器闭环系统功能

Fig. 3 Functional block diagram of the closed-loop magnetic fluxgate sensor

环系统的相位偏移会对反馈式闭环系统磁场测量值造成影响. 综上可知, 开环系统零点、增益系数、相位均会影响闭环系统磁场测量值, 因此开环条件下, 各参量温度漂移情况对闭环工作稳定性考量具有重要参考意义.

1.3 温度特性

从式 (4) 可以看出, 磁通门传感器信号的大小与磁芯的磁导率、横截面积等参数有关, 磁芯物理特性的变化会造成相应的磁场测量误差. 磁芯的磁性材料具有一定的温度系数, 随着温度的升高, 饱和磁通密度减小, 矫顽力 H_c 和剩磁参数 B_r 发生变化, 磁滞回线的饱和深度随温度的升高而加深, 磁化速率随着温度的升高而减缓^[16]. 材料磁滞回线的变化, 引起式 (4) 中磁导率偶次谐波分量系数的变化, 从而导致磁通门传感器测量结果产生温度漂移. 在磁芯材料的机械加工和热处理过程中, 材料内部的不均匀会导致磁芯内部的磁导率不均匀, 从而产生奇次谐波噪声和零点偏移现象. 磁芯的框架由于热膨胀系数与磁芯不完全相同, 也会由于温度变化, 热胀冷缩产生形变, 导致额外的应力, 从而对信号造成影响. 总之, 诸多材料和结构因素均会造成磁通门传感器探头温度效应的产生.

从激励源产生的激励磁场 H_d 的角度来看, 激励线圈的阻抗随温度变化会造成 H_d 的幅值和相位发生变化, 从而改变感应信号的幅值和相位. 温度变化时, 根据材料温度特性, 激励线圈的电阻随温度的降低而变小, 线圈绕组在热胀冷缩作用下产生的间距疏密变化会改变激励线圈的电容, 磁芯材料的温度效应会改变线圈的电感. 最终, 由激励信号产生的磁通变化的幅值和相位随着激励线圈阻抗的变化而变化, 进一步影响到感应电动势的幅值和阻抗.

磁通门传感器输出信号的增益、零点、相位和噪声是其基本特性, 下面对这几种参数随传感器温度变化的特性以开环测量形式进行试验.

2 温度效应试验

2.1 测量系统

温度效应试验测量系统由前置仪表放大电路、双运放带通滤波器 (Dual Amplifier Band-Pass, DABP) 及锁相放大器组成, 系统结构如图 4 所示.

采用仪表放大器作为前置放大器, 其具有高输入阻抗、高共模抑制比 (CMRR)、低噪声和可调增益等特点. 利用 π 型阻抗匹配网络对信号进行交流耦合后输入仪表放大器, 可以有效抑制共模干扰.

传感器信号中除了偶次谐波有效信号, 还包含大量不随磁场变化的奇次谐波. 在研究传感器温漂特性时, 往往在较弱磁场环境中进行, 奇次谐波远大于偶次谐波, 在有限的动态信号采集能力下, 无法有效分辨微弱的偶次谐波变化. 采用双运放带通滤波器 (Dual Amplifier Band-Pass, DABP) 电路, 可以实现对二次谐波的有效选通, 而一次以及三次以上谐波在通过 DABP 后将大幅度衰减. 该电路是结构紧凑的两级反馈电路, 基本电路如图 5 所示.

当运放为理想运放时, DABP 的传输函数为

$$H(s) = \frac{\frac{2s}{R_1 C_1}}{s^2 + \frac{s}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}} = \frac{2}{s R_1 C_1 + 1 + \frac{R_1}{s R_2 R_3 C_2}}. \quad (8)$$

DABP 的中心频率 f_0 、带宽 B 、品质因素 Q 、通带增益 H_{OBP} 分别为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \omega_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}, \quad (9)$$

$$B = \frac{1}{R_1 C_1}, \quad (10)$$

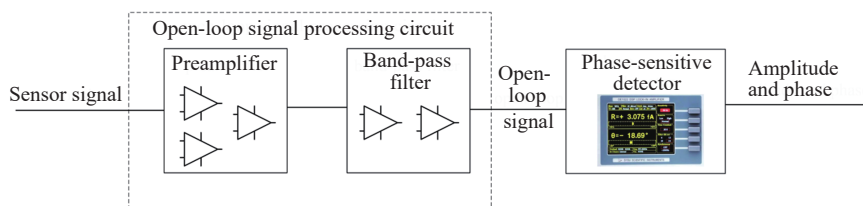


图 4 开环测量系统结构

Fig. 4 Open-loop measurement system

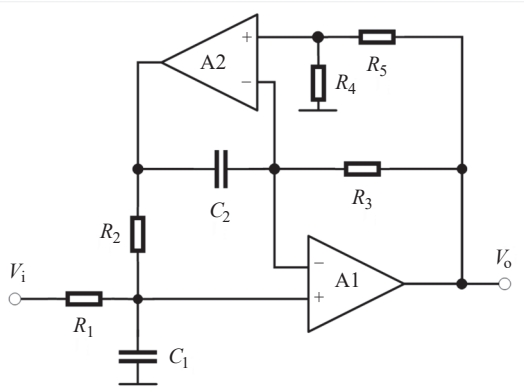


图5 双运放带通滤波器电路

Fig. 5 Dual operational amplifier band-pass filter circuit

$$Q = \frac{\omega_0}{B} = R_1 \sqrt{\frac{C_1}{R_2 R_3 C_2}}, \quad (11)$$

$$H_{\text{OBP}} = 2. \quad (12)$$

根据式(9)~(12)可知, DABP的理论增益固定为2, 通过电阻和电容可调节滤波器的中心频率、品质因数及带宽参数, 可通过电路匹配实现窄带有源滤波。

为了避免电阻器和电容器的标称值误差引发带通滤波器中心频点不准确和带外衰减过快的问题, 电路采用两个双运放带通滤波器串联, 设计中心频点分别位于20 kHz的两侧, 以确保二次谐波分量有效通过带通滤波器的中心频带。第一个DABP的电器参数为 $R_1 = 3000 \Omega$, $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 116 \Omega$, $C_1 = C_2 = 68 \text{ nF}$, 中心频率为19.8 kHz。第二个DABP的电器参数为 $R_1 = 3000 \Omega$, $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 118 \Omega$, $C_1 = C_2 = 68 \text{ nF}$, 中心频率为20.2 kHz。图6为双DABP电路的伯德图, 实现了中心频率为20 kHz的带通滤波器, 中心频点增益约为12 dB, 10 kHz及30 kHz的谐波信号分别衰减至-50 dB和-40 dB附近, 实现了对二次谐波的有效选通。DABP作为带通滤波器, 中心频点相位随频率变化较快, 容易随电路温度变化出现漂移。本文探究的是磁通门信号相位的相对变化, 在试验过程中, 对电子学箱采取了保温措施, 以保证DABP模块的相位稳定。

探头信号经开环信号处理电路后, 输出为模拟电压信号, 由数字锁相放大器提取。这是一种基于相干检测原理的微弱信号测量装置, 广泛应用于高精度信号检测领域。其利用两个正交参考交流信号对目标信号进行解调, 解调后的直流信号为

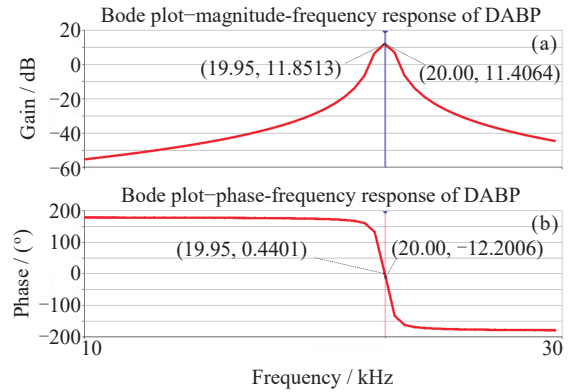


图6 双DABP电路伯德图

Fig. 6 Double DABP circuit bode plot

$$I = \frac{1}{2} AC \cos(\varphi - \varphi_r), \quad (13)$$

$$Q = \frac{1}{2} AC \sin(\varphi - \varphi_r). \quad (14)$$

其中, A 和 φ 为输入信号幅值与相位, C 和 φ_r 为参考信号幅值与相位。对解调后的直流信号进一步处理后, 可以得到信号相位和幅值信息, 其表达式为

$$V(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} = \frac{1}{2} AC, \quad (15)$$

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_r = \arctan\left(\frac{Q}{I}\right). \quad (16)$$

其中, 幅值 $V(t)$ 表示磁场大小; 相位 $\Delta\varphi$ 为相对相位, 当磁场方向变化时, 相位会出现 180° 的增量。

2.2 无磁温度试验

为了准确测试增益系数、相位、零点偏移和噪声水平随温度的变化特性, 试验过程中尽可能减少外界磁场的干扰。温度试验均设置在磁屏蔽环境中进行, 试验系统的具体部署情况如图7所示。

无磁温度试验中的磁通门传感器采用与张衡一号电磁监测试验卫星相同工艺的传感器, 在 $-20 \sim +60^\circ\text{C}$ 的温度变化范围内, 探头随温度的基准漂移约为 $2 \text{ nT}^{[17]}$ 。为了降低传感器自身性能对结果可能造成的影响, 其各组件性能经过严格标定和性能测试。

2.2.1 零点和相位的温度漂移

零点和相位的温度漂移试验部署示意图如图7(a)所示。为了避免环境磁场变化对试验的影响, 试验将采用旋转传感器消除环境磁场的方法, 如图8所示。试验在大型磁屏蔽室中温度试验箱内开展, 内部磁场强度在 $100 \sim 200 \text{ nT}$ 之间。通过对传感器的旋

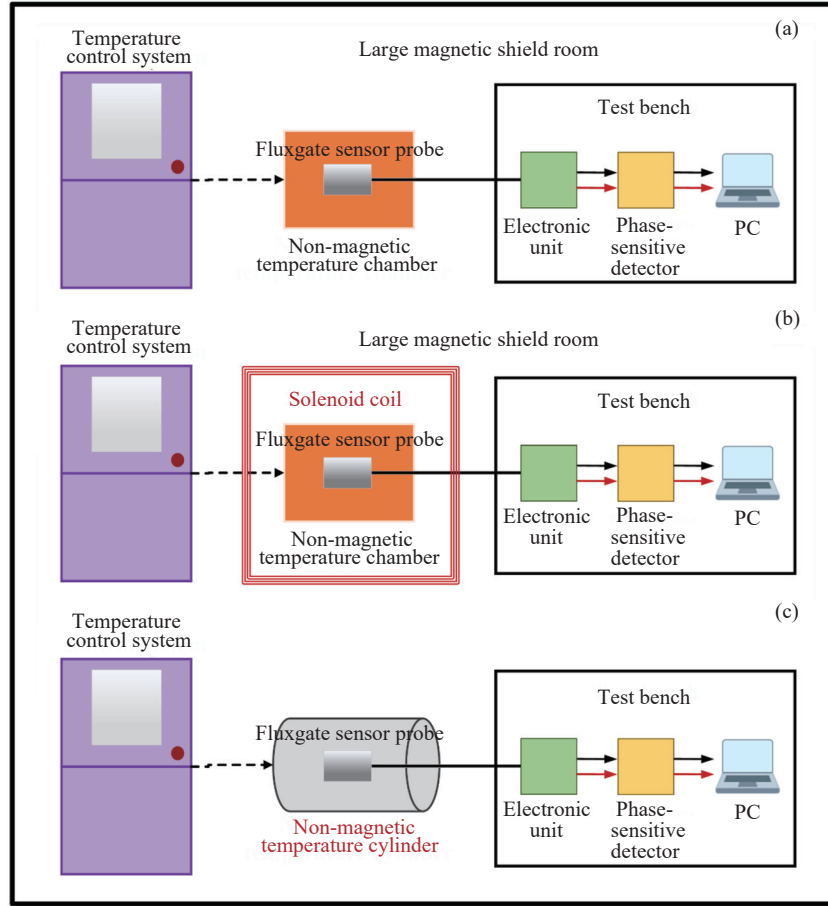


图 7 试验系统部署情况

Fig. 7 Deployment of the experimental system

转, 计算正向传感器测量结果 B_0 和反向传感器测量结果 B_{180} , 其表达式为

$$B_0 = B_E + B_{\text{offset}}, \quad (17)$$

$$B_{180} = -B_E + B_{\text{offset}}. \quad (18)$$

其中, B_E 为环境磁场, B_{offset} 为传感器零点. 由式 (17)(18) 可得 B_{offset} 的表达式为

$$B_{\text{offset}} = \frac{B_0 + B_{180}}{2}. \quad (19)$$

磁通门传感器置于无磁温箱内, 温度控制系统可实现对温箱内温度的调控. 温度测试范围为 $-40 \sim +80^\circ\text{C}$, 采用温度循环方式进行测试, 以 20°C 为步长调节温度, 共测量 7 个温度点 ($-40, -20, 0, 20, 40, 60, 80^\circ\text{C}$) 的磁场零点和相位数据.

2.2.2 增益系数的温度漂移

增益系数的温度漂移试验部署如图 7(b) 所示. 无磁温箱外部布设了三轴线圈, 通过调节电流可在线

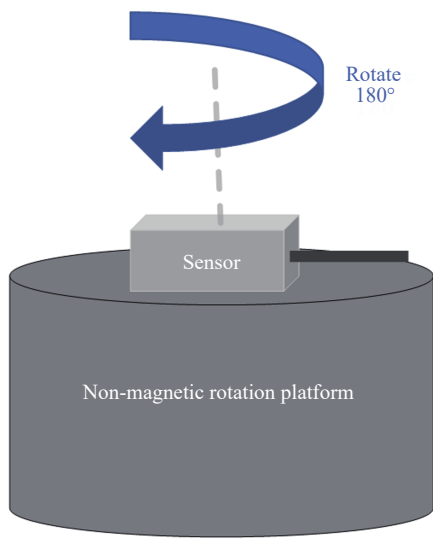


图 8 零点旋转测量方法

Fig. 8 Offset rotation measurement method

圈内部施加指定大小和方向的磁场. 增益系数的测试中, 传感器轴向与标准磁场施加方向保持对齐. 试验前利用线圈将传感器放置位置的磁场补偿到零. 开环磁通门传感器的线性度较差, 因此试验中选取磁场近似为 0 时的增益系数作为测量基准, 并通过对传感器施加 ± 50 nT 的磁场来近似实现这一零场条件. 增益系数的温度漂移试验温度变化范围为 $-40 \sim +80$ $^{\circ}\text{C}$, 以 20 $^{\circ}\text{C}$ 为步长调节温度.

2.2.3 噪声的温度漂移

噪声的温度漂移试验部署如图 7(c) 所示. 作为一种高灵敏度弱磁信号测量仪器, 磁通门传感器对其所处环境中各种背景磁场的变化十分敏感, 采用多层坡莫合金制成的磁屏蔽筒产生均匀、平稳的近零磁场空间. 在屏蔽筒内放置无磁温筒, 可实现磁通门传感器噪声的温度漂移试验, 传感器所在磁场环境在 3 nT 以内. 在 $-40 \sim +80$ $^{\circ}\text{C}$ 的温度变化区间内以 20 $^{\circ}\text{C}$ 为步长调节温度, 温度保温 1 h 后记录磁场数据, 对每个温度点进行循环重复试验. 由于温控电路系统会引起额外的磁场噪声, 故在温度到达目标温度点后, 先对温控系统断电, 再采集开环信号.

3 结果讨论与分析

3.1 零点偏移

图 9 给出了磁通门传感器在不同温度点下, 测量零点相对于 20 $^{\circ}\text{C}$ 标准的偏移量变化情况. 在 $-40 \sim 80$ $^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内, 磁通门传感器开环测量零点偏移的整体变化幅度较小, 整体保持在 ± 0.5 nT 范围内, 表明磁通门传感器自身的零点温度漂移并不显著.

3.2 相位偏移

图 10 给出了信号相位随温度变化的情况. 设置 20 $^{\circ}\text{C}$ 的相位为基准, $-40 \sim 80$ $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 相位变化幅度达到了 60° , 呈现单调变化的特性, 漂移率在高温区域较小, 而在低温区域较大. 在磁通门闭环信号处理电路中, 相敏解调过程对信号相位极为敏感, 试验中所展现出的传感器信号相位变化的影响较显著.

为了验证磁通门传感器相位偏移对闭环平衡时零点的影响, 开展了相位补充试验. 在磁通门磁强计闭环系统中, 利用单片机技术对相敏检波基准信号进行相位控制和调整, 将相位偏移作为变化因素, 考量其对零点偏移的影响.

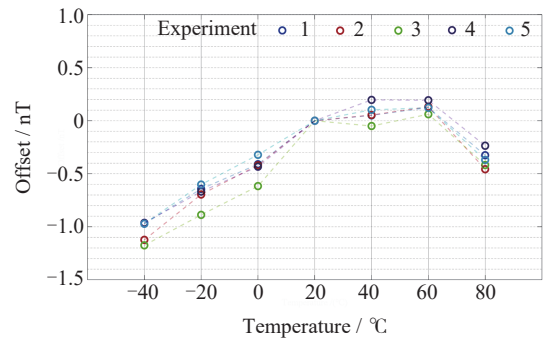


图 9 零点偏移随温度变化情况

Fig. 9 Offset drift versus temperature

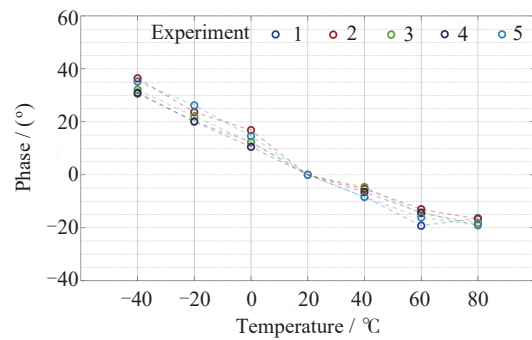


图 10 相位偏移随温度变化情况

Fig. 10 Phase drift versus temperature

图 11 所示为试验得到的零点偏移随相位变化曲线. 试验结果表明, 在 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的相位变化范围内, 磁通门磁强计零点随相位变化产生了较为明显的偏移, 最大零点偏移达 5 nT. 随着输入信号和相敏检波参考信号相位差的增大, 零点偏移有线性增大的趋势. 试验结果表明, 相位偏移会带来明显的零点偏移.

3.3 增益系数

图 12 给出了增益系数随温度变化的特性曲线. 在考虑了前置放大器增益和双运放带通滤波器增益后, 总的开环增益达到了 2.2×10^6 $\text{V} \cdot \text{T}^{-1}$. 试验结果显示, 增益变化在 $\pm 5\%$ 左右, 增益系数以 20 $^{\circ}\text{C}$ 为峰值, 在高温和低温两侧均呈现出下降趋势. 这种变化可能是由磁通门传感器探头的多方面温度特性引起的. 磁通门探头的灵敏度主要取决于磁芯材料的横截面积、激励信号的频率以及信号线圈的匝数等因素. 随着温度的变化, 传感器磁芯、线圈及骨架等部件的物理参数和电气性能也会发生变化, 从而导致增益系数的温度漂移现象.

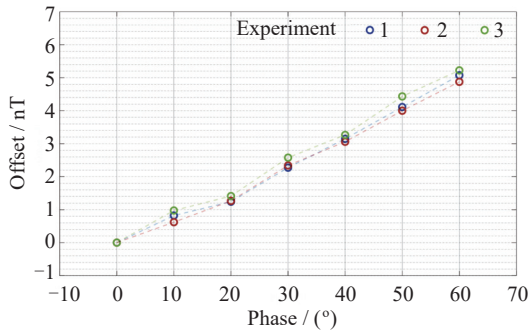


图 11 零点偏移随相位偏移变化情况

Fig. 11 Offset drift versus phase drift

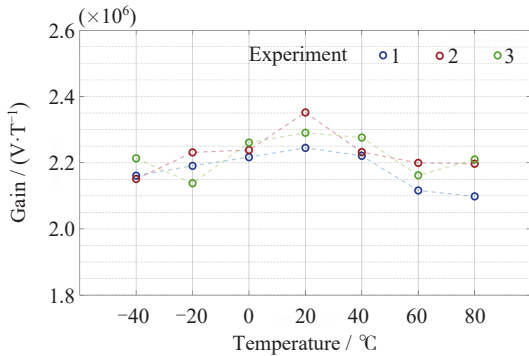


图 12 增益系数随温度变化情况

Fig. 12 Gain versus temperature

3.4 噪声水平

图 13 给出了噪声水平随温度变化的特性. 在 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 的温度区间内, 噪声水平未表现出显著变化. 在高温条件下噪声性能表现更佳, 低温条件下性能有所下降, 但仍保持在 $7\text{ pT}\cdot\text{Hz}^{1/2}$ @1 Hz 以下, 噪声水平较稳定. 2007 年, 日本 Nishio 等^[10] 的试验结果也有类似现象. 开环测量中, 传感器信号和噪声主要来源于磁芯材料. 在磁通门传感器中, 线圈、骨架以及磁芯的材料不一致, 导致热膨胀系数存在差异, 在高低温变化过程中, 材料的内部应力会发生变化. 磁通门的噪声成因中, 巴克豪森噪声与材料应力相关, 压应力和张应力对于噪声的影响不同^[18]. 开环噪声的这种变化特性, 可能与材料应力变化有关. 在高温条件下, 张应力增大, 材料的膨胀拉伸导致线圈与线圈之间、线圈与磁芯之间的距离增加, 从而减少额外应力引起的结构变形, 巴克豪森噪声减小, 噪声水平因此得到改善; 而在低温条件下, 压应力增大, 材料的收缩可能导致线圈与磁芯之间的接触更加紧密, 从

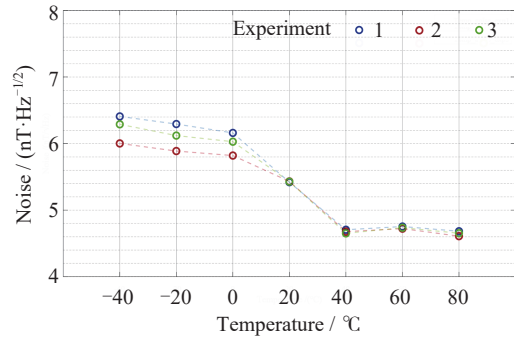


图 13 噪声水平随温度变化情况

Fig. 13 Noise versus temperature

而增加额外应力, 巴克豪森噪声增大, 导致噪声水平上升.

4 结论

在 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 采用开环测量方法对磁通门传感器在不同温度下的零点漂移、相位漂移、增益变化及噪声特性进行了系统试验, 获得了其关键参数随温度变化的漂移曲线. 实验结果表明, 在该温度区间内, 传感器自身的零点漂移控制在 $\pm 0.5\text{ nT}$ 以内, 增益系数的变化幅度不超过 $\pm 5\%$, 噪声水平稳定在 $4\sim 7\text{ pT}\cdot\text{Hz}^{1/2}$ @1 Hz, 仅有信号的相位表现出显著的温度依赖性, 整体温度域内的变化达到 60° . 试验结果的趋势与 Nishio 等^[10] 以及 Gordon 等^[8] 的研究结果一致, 试验结果均表明, 磁通门传感器在开环测量时零点漂移具有良好的温度稳定性.

在实际应用中, 闭环处理后的磁通门磁强计普遍表现出较大的温度漂移现象. 考虑到传感器探头信号相位需与电子学箱中的相敏解调参考信号严格匹配. 研究认为, 温漂的主要成因是传感器输出信号的相位随温度发生偏移, 导致其与解调参考信号之间的相位失配, 从而在闭环测量中引起零点漂移.

基于已有的试验经验, 从磁通门传感器的开环测量原理出发, 系统分析了其在不同温度条件下的响应特性, 旨在为后续闭环系统中零点漂移的有效抑制提供试验依据与理论支撑. 该研究对于提升磁通门传感器在地面资源勘探、深空探测等复杂温度环境下的应用可靠性与适应性具有重要意义, 有助于推动其在各种复杂环境中的广泛应用.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] 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
- [2] TRIGONA C, SINATRA V, ANDÒ B, *et al.* Flexible micro-wire residence times difference fluxgate magnetometer[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, **66**(3): 559-568
- [3] GREENE K, HANSEN C T, MILES D M. On the impact of thermal gradients across fluxgate sensors on *in situ* magnetic field measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(6), e2023JA031369
- [4] CHE Mengqi, YING Yunxiang, WANG Jilin, *et al.* Analysis of the relationship between the quality of geomagnetic observation and temperature[J]. *Science & Technology Information*, 2020, **18**(33): 50-52 (车濛琪, 应允翔, 汪继林, 等. 地磁观测质量与温度的关系分析 [J]. *科技资讯*, 2020, **18**(33): 50-52)
- [5] HERCEG M, JØRGENSEN P S, JØRGENSEN J L, *et al.* Swarm optical bench stability[C]//Proceedings of the European Geosciences Union General Assembly 2018. Vienna: DTU Orbit, 2018
- [6] LI Ping, XU Zhifang, FAN Guangzhou, *et al.* Study on quality control of radiosonde temperature[J]. *Meteorological Monthly*, 2013, **39**(12): 1626-1634 (李平, 徐枝芳, 范广洲, 等. 探空温度资料质量控制技术研究 [J]. *气象*, 2013, **39**(12): 1626-1634)
- [7] SUNDU H, DÖNER N. Detailed thermal design and control of an observation satellite in low earth orbit[J]. *European Mechanical Science*, 2020, **4**(4): 171-178
- [8] GORDON D, LUNDSTEN R, CHIARODO R, *et al.* A fluxgate sensor of high stability for low field magnetometry[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1968, **4**(3): 397-401
- [9] RIPKA P. Magnetic sensors and magnetometers[J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, **13**(4): 645
- [10] NISHIO Y, TOHYAMA F, ONISHI N. The sensor temperature characteristics of a fluxgate magnetometer by a wide-range temperature test for a Mercury exploration satellite[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, **18**(8): 2721-2730
- [11] PRIMDAHL F. Temperature compensation of fluxgate magnetometers[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1970, **6**(4): 819-822
- [12] MURATA N, KARO H, SASADA I, *et al.* Fundamental mode orthogonal fluxgate magnetometer applicable for measurements of DC and low-frequency magnetic fields[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, **18**(7): 2705-2712
- [13] RÜHMER D, BÖGEHOLZ S, LUDWIG F, *et al.* Vector fluxgate magnetometer for high operation temperatures up to 250°C[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, **228**: 118-124
- [14] MILES D M, MANN I R, KALE A, *et al.* The effect of winding and core support material on the thermal gain dependence of a fluxgate magnetometer sensor[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2017, **6**(2): 377-396
- [15] Ugur T, Peter Š, Hava C, *et al.*, Optimization of the temperature stability of fluxgate sensors for space applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**(3): 2749-2756
- [16] YANG R P, LIU H, GE J, *et al.* Temperature compensation method of fluxgate sensor based on polynomial fitting[OL]. arXiv preprint arXiv: 2401.13321, 2024
- [17] ZHOU Bin, CHENG Bingjun. Development and calibration of high-precision magnetometer of the China Seismo-Electromagnetic satellite[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(S1): 64-73 (周斌, 程炳钧. 电磁监测试验卫星 (张衡一号) 高精度磁强计研制与标定 [J]. *遥感学报*, 2018, **22**(S1): 64-73)
- [18] JILES D C. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect[J]. *Czechoslovak Journal of Physics*, 2000, **50**(8): 893-924

作者简介



蒋 娇 女, 1999 年 8 月出生于四川省遂宁市, 现为中国科学院国家空间科学中心硕士研究生, 主要研究方向为磁通门磁强计的温度效应等。
E-mail: jiangjiao0806@163.com



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