

# 一种适用于随钻测量的磁传感器的温漂补偿设计

黄麟皓, 岳步江, 石 林, 石明泉

四川天石和创科技有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年10月27日; 录用日期: 2025年12月10日; 发布日期: 2025年12月19日

## 摘 要

为了降低石油钻井工程中随钻测量(MWD)里磁阻传感器温度漂移对测量精度的影响, 本文专门针对各向异性磁阻效应(AMR)传感器与 $\Sigma$ - $\Delta$  ADC (模数转换器)的接口设计做了研究。硬件方面采用热敏电阻或者高精度温度传感器来监测环境温度; 软件上, 则对零值温度磁场偏移的准一阶近似线性模型做了拓展。电路模拟前端还通过控制双AMR磁传感器的励磁电流和参考电压, 抑制了直流误差, 让系统在 $-5^{\circ}\text{C}$ 到 $175^{\circ}\text{C}$ 的环境下, 能稳定实现双轴磁场采集, 以适应井下设备所处的高温环境。经过标定后, 磁阻传感器的测量误差被控制在满量程 $\pm 0.68\%$ 以内, 这也为MWD系统的方位测量提供了精度保障。

## 关键词

随钻测量, 零值温度漂移, 磁阻传感器,  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC, 温度补偿

# A Temperature Drift Compensation Design for Magnetic Sensors in Measurement While Drilling (MWD)

Linhao Huang, Bujiang Yue, Lin Shi, Mingquan Shi

Aerospace Petroleum Technology Company (APTC), Chengdu Sichuan

Received: October 27, 2025; accepted: December 10, 2025; published: December 19, 2025

## Abstract

To reduce the impact of temperature drift of magnetoresistive sensors on measurement accuracy in Measurement While Drilling (MWD) during oil drilling engineering, this study focuses on the

文章引用: 黄麟皓, 岳步江, 石林, 石明泉. 一种适用于随钻测量的磁传感器的温漂补偿设计[J]. 电气工程, 2025, 13(4): 108-115. DOI: 10.12677/jee.2025.134012

interface design between Anisotropic Magnetoresistive (AMR) sensors and  $\Sigma$ - $\Delta$  Analog-to-Digital Converters (ADCs). In terms of hardware, thermistors or high-precision temperature sensors are used to monitor the ambient temperature. For software, the quasi-first-order approximate linear model for zero-value temperature magnetic field offset is extended. The circuit analog front-end suppresses DC errors by controlling the excitation current and reference voltage of the dual AMR magnetic sensors, enabling the system to stably achieve dual-axis magnetic field acquisition in an environment ranging from  $-5^{\circ}\text{C}$  to  $175^{\circ}\text{C}$ , thus adapting to the high-temperature conditions of downhole equipment. After calibration, the measurement error of the magnetoresistive sensor is controlled within  $\pm 0.68\%$  of the full scale, which provides accuracy assurance for the azimuth measurement of the MWD system.

## Keywords

Measurement While Drilling (MWD), Zero-Value Temperature Drift, Magnetoresistive Sensor,  $\Sigma$ - $\Delta$  Analog-to-Digital Converter ( $\Sigma$ - $\Delta$  ADC), Temperature Compensation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

### 1.1. 研究背景与目的

磁阻传感器因高灵敏度、纳秒级响应速度等优势,在运动控制、医疗检测及随钻测量(MWD)等领域广泛应用。对于其信号的采集, $\Sigma$ - $\Delta$  ADC 是理想选择,因为这类 ADC 精度高、分辨率较高。但磁传感器本身存在几个明显问题:输出信号微弱,容易被噪声干扰,还会受温度漂移影响。本研究针对该种问题,一方面优化 AMR 传感器与  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC 的接口电路,另一方面结合温度补偿技术,最终实现了磁场测量系统精度与稳定性的提升。

### 1.2. 研究现状

众多研究人员在磁阻传感器的温度补偿方面开展了大量研究。多数磁场传感器内部结构已采用桥式敏感结构,结合外部的补偿电路,允许同批次生产的磁敏电阻在有无磁屏蔽的情况下单独分离磁场对电阻的影响,即电阻的温度系数相同,但被屏蔽了磁场的磁敏电阻的阻值不会随磁场的变化而改变,温度对磁敏电阻的影响得以单独测算[1]。

2024 年,中国科技大学在 FPGA(现场可编程门阵列)温度补偿电路的硬件基础上有了新突破,其提出了一套高精度温度补偿方法。该方法结合了三次样条插值、多项式回归和零点自校准技术,能实现大幅提升隧道磁阻传感器(TMR)在不同温度环境下的测量精度,这是磁阻传感器温漂“软硬件混合补偿”的成功范例[2]。

传感器结构[1]、优化软件[3]、硬件[3][4]、软硬件混合补偿[2]等不同技术在消除传感器在复杂温度环境下的温漂对测量精度的削减,应用场景、性能、成本和系统复杂度不同,所选取的方案也应随之变化。

## 2. 实验理论

### 2.1. 磁阻传感器工作原理

磁阻传感器基于磁阻效应工作,外界磁场变化导致传感器电阻值改变,通过检测电路两端电压变化实现磁场测量。其输出为微弱模拟电压信号,需经放大、滤波及模数转换后供微处理器处理[5]。

2.2.  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC 模拟前端特点

$\Sigma$ - $\Delta$  ADC 经过采样、噪声整形和数字滤波实现模 - 数转换，具有高分辨率、低噪声及良好线性度，能有效抑制高频噪声，适合微弱信号的精确采集[6]。

2.3. 温度补偿技术原理

本文中的温度补偿技术可由硬件与软件两种补偿方式实现。硬件补偿常采用热敏元件，在电路板空间上贴近磁阻传感器传递芯片节温，通过微控制器的数据采集确切地反映磁阻阻值变化，以供选取零点温度漂移的准一阶近似模型数据进行修正[7]-[9]。

3. 电路架构

3.1. 整体电路架构

接口电路由磁阻传感器、两个含  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC 的模拟前端及外围电路组成(如图 1)。磁阻传感器输出信号分接两个模拟前端，一个采集传感器信号，另一个控制参考电压以保证稳定工作条件。热敏电阻、温度传感器通过绝缘导热无磁材料灌胶贴近磁阻传感器，其电压变化由单片机 ADC 通道采集，实现温度监测(如图 2)。如图 3 所示电路实物，热敏电阻接入分压电路，阻值随温度变化调整分压比，进而改变 ADC 输入电压，实时反映环境温度。

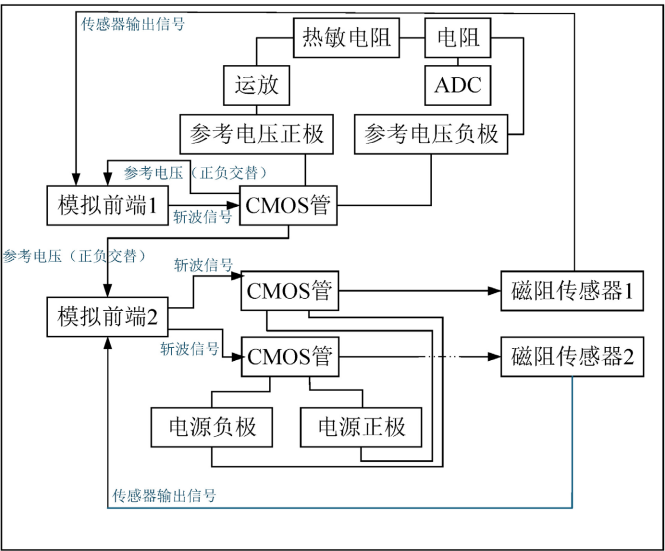


Figure 1. System hardware block diagram  
图 1. 系统硬件框图

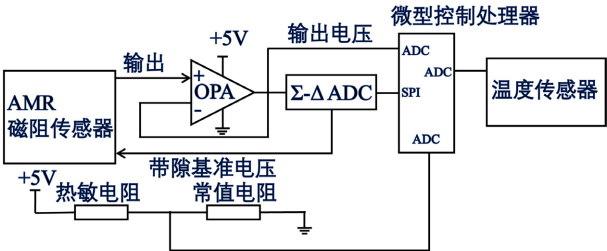
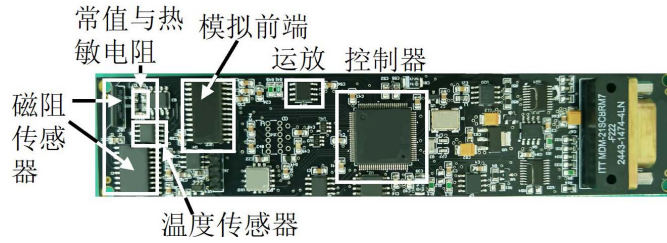


Figure 2. Circuit for measuring the impact of temperature  
图 2. 测算温度影响的电路

测量电路实物见图 3:



**Figure 3.** Measurement circuit with magnetoresistive sensor mounted  
**图 3.** 搭载磁阻传感器的测量电路

### 3.2. 磁阻传感器接口设计

如图 1 所示, 模拟前端的控制信号引脚连接至磁阻传感器的磁畴的复位引脚, 输出非重叠的周期性交变信号, 利用斩波信号抑制磁畴现有的磁扰动, 驱动 AMR 传感器磁畴正向/反向复位。这一电路连接无需额外的正负脉冲输入电路的设计, 降低了电路的复杂度[10]。

另一颗  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC 通过斩波信号引脚连有 CMOS 管, 可控制自身及相邻 ADC 参考电压。p-MOS 管导通时接参考电压正极(2.5 V~5 V), n-MOS 管导通时接负参考电压(接地或-5 V~-2.5 V), 既能灵活调节动态范围与测量精度, 还能抑制温漂影响[11]。

## 4. 实验原理与方案

### 4.1. 温度补偿方案选择

综合成本、复杂度与补偿效果, 采用软硬件结合方案: 硬件通过热敏电阻实时监控温度并调整电路参数, 软件建立温度-输出数学模型修正数据, 在硬件初步补偿基础上进一步优化精度。

### 4.2. 硬件电路设计

采用正温度系数(PTC)磁阻与热敏电阻, 其阻值-温度( $R_T$ - $T$ )特性如下[7]:

$$R_T = R_{n0} \times [1 + (T - 25) \times a_0 \times k_n], \quad (1)$$

其中  $R_{n0}$  为温度为 25℃时桥臂上  $n = 1 \sim 4$  号电阻的阻值,  $a_0$  为电阻的温度系数, 通常由传感器制造商提供, 差异系数  $k_n$  表征温度变化导致的四个电阻元件阻值变化的差异性, 在分析温度零点漂移时预设于 0.95~1.05 间变化。

存在磁阻传感器采用负温度系数(NTC)的磁阻, 其阻值-温度( $R$ - $T$ )特性曲线近似为指数函数关系[12]:

$$R_T = R_0 e^{B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \quad (2)$$

其中  $R_T$  为温度为  $T$  时的电阻值,  $R_0$  为温度  $T_0$  时的电阻值,  $B$  为热敏电阻的材料常数。

### 4.3. 算法补偿

软件补偿基于非线性关系实验数据, 在准一阶线性方程的基础上采用最小二乘法拟合曲线  $V$ - $T$ , 其初始数学模型为:

$$V = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n, \quad (3)$$

相关参数说明如下:  $V$  为补偿前后传感器输出电压, 或名桥臂电压差,  $T$  为环境温度,  $a_0 \sim a_n$  为多项式

系数。实验同样选取准一阶模型修正原始数据以消除温漂影响。采用的实验平台包含测量电路、无磁温度控制箱、信号发生器等部件,环境温度可在 $-20^{\circ}\text{C}$ 至 $175^{\circ}\text{C}$ 之间调节。其中,温箱符合军标 GJB150.3 高温试验方、GJB150.4 低温试验方法,材质为无磁的铝制合金,并非彻底磁屏蔽,配备外置的压缩机制冷、水循环加热模块以及精度为 $0.1^{\circ}\text{C}$ 的铂电阻温度传感器,传感器保护套管为陶瓷套管,测温及控制电路导线为镀锡铜线。

#### 4.4. 实验方案设计

同一批次的磁阻传感器电桥如图 4 所示,  $V_{CC}$  为电桥两端输入电压,

$$\Delta V = V_{CC} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right), \quad (4)$$

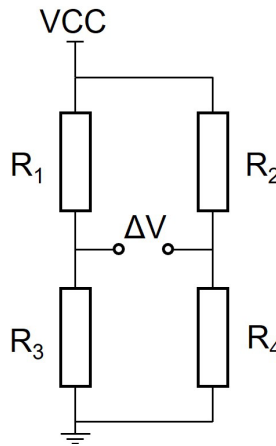


Figure 4. Magnetic resistance bridge structure  
图 4. 磁阻电桥结构

理论上  $R_1 \sim R_4$  初始阻值与温度系数应相同,实际上电阻器件的结构无法实现完全一致,这导致了四个电阻阻值的差异,电桥不再平衡,出现了零位温度漂移[13]。由式(1)及材料特性曲线可将电阻-温度的关系近似视为不过零点的斜线,温度改变,四电阻阻值的不规则变化会导致同样磁场下的电桥电压  $V$  不同,以至于测得磁感应强度大小存在差异。

取得热敏电阻的阻值变化,通过导热胶填充热敏元器件与磁阻传感器间隙,传递结温,代入模型中测算当前温度下的  $\Delta B$ ,直接被磁阻传感器测量值  $B_m$  剪除后即可还原接近于实际的磁感应强度  $B$ 。

根据  $k_n$  关于温度的依赖,北京大学于向前等开展的测试中揭示了同种、甚至同批次电桥式磁阻传感器的  $k_n$  不同,使得  $a$  值的大小、极性存在差异,包括零值温漂随温度递减的情况,即  $a < 1$ 。此时在屏蔽外加磁场的情况下,磁阻传感器的桥臂两端电压随温度的升高而降低[7]。以常温  $25^{\circ}\text{C}$  为起点,原准一阶近似模型如下:

$$V_o = \Delta V \times \left[ \frac{1}{\frac{1 + (T - 25) \times 10^{-5} \times k_1}{1 + (T - 25) \times 10^{-5} \times k_3} + 1} - \frac{1}{\frac{1 + (T - 25) \times 10^{-5} \times k_2}{1 + (T - 25) \times 10^{-5} \times k_4} + 1} \right] [\text{V}], \quad (5)$$

在均方误差  $\leq 5 \text{ nT}$  的高精度磁力计辅助下,于无磁温箱中记录不同温度点磁场测量值,换算为修正后传感器输出电压  $V$ ,据式(5)确定 4 个桥臂电阻  $k_n$  系数,拟合  $\Delta B-T$  曲线,代入  $k_n$  的式(5)即为标定公式,

对不同温度下的  $V$  作差值得到  $V-T$  数据点, 进而绘制  $\Delta B-T$  曲线,  $V$  与补偿后的磁感应强度  $B$  在实验中仅与 ADC 位数有关, 默认为正比关系,  $B = kV$ ,  $k = 0.042 \text{ Gs/mV}$ 。

原准一阶模型、实验测试的温度范围为  $-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ , 鉴于井下可达  $175^\circ\text{C}$  的高温环境, 将温度范围修改为  $-5^\circ\text{C} \sim 175^\circ\text{C}$ ; 且原模型为归一化结果, 未投入实际设计[7], 所以根据修正后的电桥输出电压与磁强计测得的磁感应强度  $B$  对应的输出电压  $V_R$  再次进行线性拟合, 得到标定后的电桥输出电压  $V$ 。采用最小二乘法对 361 组  $(V_R, V_o)$  样本进行线性拟合, 即最小化实测值  $V_R$  与第  $i$  个标定模型计算值  $V_{oi}$  的残差平方和:

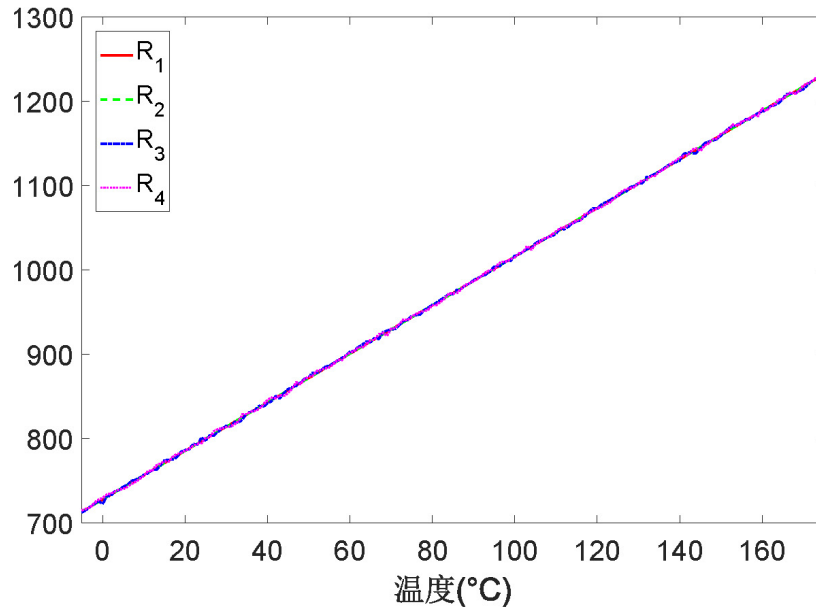
$$\min \sum_{i=1}^{361} (V_R - (AV_{oi} + B))^2, \quad V = AV_o + B \quad (6)$$

式(5)、式(6)在单个磁阻传感器标定的独立时间至少为 3 天的基础上, 具有一定泛用性。式(5)对零点温漂模型化的指导作用从原理上简化了式 6 的阶数。

实验首先选取 4 个同批次的磁阻传感器, 以  $5^\circ\text{C}$  为间隔, 每个温度点保持 20 分钟热平衡后测量、处理得到各自修正后的输出电压值  $V$ , 绘制  $\Delta B-T$  曲线。

其次, 选取其中一个  $\Delta B-T$  特性为正温度系数的传感器, 将系统置于温度控制箱中, 以  $1^\circ\text{C}$  为间隔, 每个温度点保持 10 分钟热平衡后测量磁阻传感器输出电压值  $V$ , 范围为  $-5^\circ\text{C}$  至  $175^\circ\text{C}$ 。对照实验对比热敏电阻与  $\pm 0.1^\circ\text{C} \sim 0.3^\circ\text{C}$  精度温度传感器的补偿效果, 温度范围相同, 记录补偿零点温漂前的磁阻输出电压 - 温度 ( $V-T$ ) 散点数据。

## 5. 实验结果分析



**Figure 5.** Resistance-temperature ( $R_T-T$ ) characteristic curve of the bridge arm of the magnetoresistive sensor

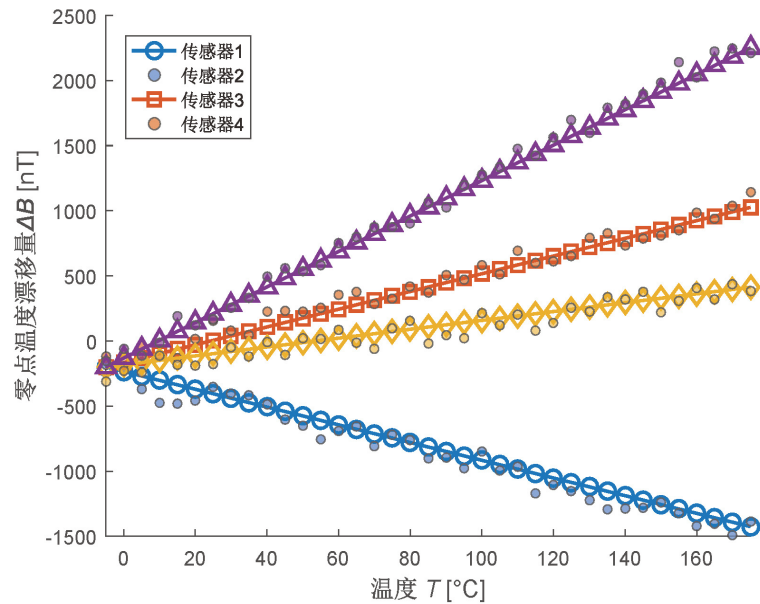
**图 5.** 磁阻传感器桥臂电阻 - 温度 ( $R_T-T$ ) 特性曲线

上图 5 为桥臂电阻 - 温度 ( $R_T-T$ ) 特性曲线, 由  $R_1$ 、 $R_2$  反算  $R_3$ 、 $R_4$ , 结果显示: 镍铁合金磁阻在  $300^\circ\text{C}$  前阻值与温度近似线性, 但  $R_3$ 、 $R_4$  阻值波动是零点温漂的主要来源, 且个体差异显著。表 1 记载了第一个实验四磁阻传感器电桥电阻的温度差异系数, 图 6 为零点温漂位移 - 温度 ( $\Delta B-T$ ) 特性曲线。

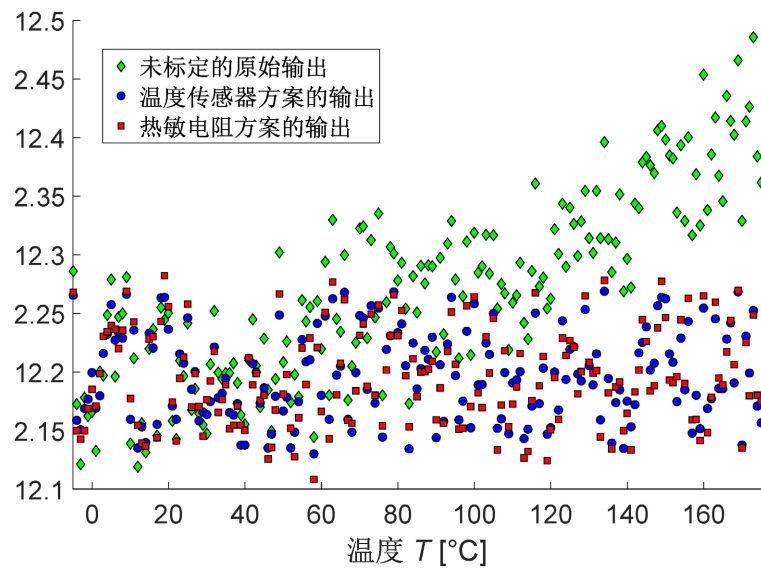


**Table 1.** The coefficient difference in sensor magnetoresistance temperature  
**表 1.** 传感器磁阻温度差异系数

传感器序号	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
1	0.99	1.01	1.03	0.98
2	1.01	0.99	0.98	1.03
3	1.01	0.98	0.95	1.02
4	1.03	0.96	0.96	1.02



**Figure 6.** Zero-point temperature drift-temperature ( $\Delta B$ - $T$ ) curve  
**图 6.** 零点温度漂移量 - 温度( $\Delta B$ - $T$ )曲线



**Figure 7.** Scatter plot of output voltage of magnetoresistive sensor-temperature ( $V$ - $T$ )  
**图 7.** 磁阻传感器输出电压 - 温度( $V$ - $T$ )散点

第二次拟合、还原的电桥输出电压为  $V = 0.982V_0 + 203$  [mV]，上图 6 即两次拟合后的结果。

在无磁温箱环境下，地磁场的磁感应强度经磁强计测得为 0.5082~0.5084 Gs，理论换算对应传感器的差分输出电压为 12.197~12.202 mV。如图 7 所示，传感器 3 的对比实验中，随着温度的升高，磁阻电桥的输出电压发生偏移，升至 175℃时，未修正的输出电压值增加了约 0.3 mV，对应的磁场变化达到 800 nT。采用热敏电阻补偿方案的磁阻测量精度为 0.680%，而采用高精度温度传感器方案精度为 0.548%，后者较前者的精度提升 19.5%。

对比文献[6]，其在 25℃~85℃中低温段精度极高( $\approx \pm 0.01\%$ )，但完全未适配高温。本文是专门针对 MWD 高温需求设计的方案，电路实体在 175℃下工作时间可达 48 h，填补了常规方式未用于高温段应用的空白。

涉及到在钻井工程应用中的探管姿态测量，可选用温度传感器方案的测量电路保证稳定性；热敏电阻方案则可以用于商用物联网产品平衡成本与精度。

## 6. 结论与展望

本文针对 MWD 系统的 AMR 磁阻传感器温漂问题，设计 AMR 传感器  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC 接口电路，结合硬件温度监测和软件准一阶线性补偿模型，实现-5℃至 175℃宽温度范围下双轴磁场的精确测量，补偿后精度达 0.68%，提升了 MWD 系统方位测量的精度与稳定性。后续将聚焦工程化应用，开展高温、振动与转动测试及实验井方位测量精度验证。

## 参考文献

- [1] 杨燕平, 刘静, 刘瑞敏, 全杰, 王兴隆, 杨智勇. GMR 电流传感器温度稳定性研究[J]. 软件, 2017, 38(9): 164-168.
- [2] Wu, J., Zhou, K., Jin, Q., Lu, B., Jin, Z. and Chen, J. (2024) A High-Precision Temperature Compensation Method for TMR Weak Current Sensors Based on FPGA. *Micromachines*, **15**, Article 1407. <https://doi.org/10.3390/mi15121407>
- [3] 陈秋霖, 许永鹏, 赵思诚. 一种基于 TMR 传感器的灵敏度补偿方法和系统[P]. 中国专利, CN119270173A. 2025-01-07.
- [4] 梅健, 邓磊, 李昂阳, 等. 一种隧穿磁阻传感电路[P]. 中国专利, CN120085231A. 2025-01-07.
- [5] 曲皎, 王红亮, 童一飞. 高精度桥式传感器信号调理电路设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2019(4): 20-23+28.
- [6] Shtargot, J. (2010) Signal Conditioning for a Sigma-Delta ADCs in Industrial Multichannel Data Acquisition Systems.
- [7] 于向前, 刘斯, 肖池阶, 等. 惠斯通电桥式磁阻传感器的零位温度漂移研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 401-406.
- [8] Ramírez-Muñoz, D., García-Gil, R., Cardoso, S. and Freitas, P. (2024) Characterization of Magnetoresistive Shunts and Its Sensitivity Temperature Compensation. *Sensors*, **24**, Article 3047. <https://doi.org/10.3390/s24103047>
- [9] 刘九卿. 应变式称重传感器电路补偿与调整的理论基础[J]. 衡器, 2023, 52(4): 5-15+52.
- [10] 王晨宇. 基于斩波技术的霍尔传感器设计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- [11] 卓琳, 邵杰, 任凤霞, 等. 一种高精度 CMOS 温度传感器校准电路[J]. 电子与封装, 2023, 23(6): 65-69.
- [12] 孙运旺, 李林功. 传感器技术与应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [13] Vopalensky, M. and Platil, A. (2013) Temperature Drift of Offset and Sensitivity in Full-Bridge Magnetoresistive Sensors. *IEEE Transactions on Magnetics*, **49**, 136-139. <https://doi.org/10.1109/tmag.2012.2220535>