**引用格式**:余佶成,周峰,殷小东,等.高性能非接触式mA级隧穿磁阻电流传感器的设计与实现[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):213-220.
**Citation**: YU Jicheng, ZHOU Feng, YIN Xiaodong, et al. Design and development of non-contact mA-class tunneling magnetoresistance current sensor with high performance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):213-220.

# 高性能非接触式mA级隧穿磁阻电流传感器的设计与实现

余佶成[1],周　峰[1],殷小东[1],岳长喜[1],梁思远[1],张嘉祺[2],
刘佳乐[2],李　磊[2],胡晓旭[3]

(1.中国电力科学研究院,湖北 武汉 430074;2.南京理工大学自动化学院,江苏 南京 210094;
3.国网福建营销服务中心,福建 福州 350013)

**摘　要**:及时准确地监测泄漏电流,是实现电气设备绝缘监测和故障预警、保障电网安全稳定运行的基础。随着可再生能源和电力电子设备的广泛应用,泄漏电流的测量需在不影响设备正常工作的情况下实现mA级准确测量。隧穿磁阻(tunneling magnetoresistive,TMR)技术通过量子隧穿效应感应待测电流激发出的磁场,其独特的材料结构赋予其超低功耗和微弱电流检测能力,为该传感器设计提供了核心支撑。先基于TMR工作原理,构建了适用于mA级非接触式测量的电流传感结构。然后,针对TMR传感器在复杂温度环境下的灵敏度温漂问题,创新性地提出一种基于三次样条插值的软件补偿方法,通过对传感器在不同温度下的输出数据进行拟合,获得连续的灵敏度补偿曲线,显著提升传感器的温度稳定性,并优化设计了传感器的聚磁环和信号处理电路。最后,通过研制样机进行实验,证明在±250 mA电流范围下,所设计的高性能非接触式mA级TMR电流传感器能够以0.2%FS精准测量电流,温漂系数低至106.3 ppm/℃,较传统硬件补偿方法(387.9 ppm/℃)降低了约73%,大幅抑制了环境温度影响,且灵敏度为9.994 V/A,满足电网安全运行、绝缘检测等领域的微弱电流测量需求。

**关　键　词**:非接触式,电流传感器,隧穿磁阻,mA级电流,聚磁环
**DOI**:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.021　　**中图分类号**:TM933　　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0213-08

# Design and development of non-contact mA-class tunneling magnetoresistance current sensor with high performance

YU Jicheng[1], ZHOU Feng[1], YIN Xiaodong[1], YUE Changxi[1],
LIANG Siyuan[1], ZHANG Jiaqi[2], LIU Jiale[2], LI Lei[2], HU Xiaoxu[3]

(1.China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2.School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 3.State Grid Fujian Marketing Service Center, Fuzhou 350013, China)

**Abstract**: Timely and accurate monitoring of leakage current is the foundation for achieving insulation monitoring and fault early warning of electrical equipment and ensuring the safe and stable operation of the power grid. With the wide application of renewable energy and power electronic equipment, the measurement of leakage current needs to achieve mA-level accurate measurement without affecting the normal operation of equipment. Tunneling magnetoresistance (TMR) technology senses the magnetic field generated by the current to be measured through the quantum tunneling effect. Its unique material structure endows it with ultra-low power consumption and weak current detection capabilities, providing core support for the sensor design in this paper. This paper first constructs a current sensing structure suitable for mA-level non-contact measurement based on the working principle of TMR. Second, to address the sensitivity

**收稿日期**:2025-03-22;**修回日期**:2025-06-04
**基金项目**:国家自然科学基金(52307020);湖北省自然科学基金(2023AFB074);国网福建省电力有限公司科技项目(B3130X24000F)
**通信作者**:余佶成(1988—),男,博士,高级工程师,主要从事电力系统智能量测方面的研究;E-mail:yujicheng@epri.sgcc.com.cn,

temperature drift problem of TMR sensors in complex temperature environments, an innovative software compensation method based on cubic spline interpolation is proposed. By fitting the output data of the sensor at different temperatures, a continuous sensitivity compensation curve is obtained, significantly improving the temperature stability of the sensor. The magnetic ring and signal processing circuit of the sensor are optimized and designed. Finally, through the development of a prototype for experiments, it is proved that within the current range of ±250 mA, the designed high-performance non-contact mA-class TMR current sensor can accurately measure the current at 0.2%FS, with a temperature drift coefficient as low as 106.3 ppm/℃, which is approximately 73% lower than that in the traditional hardware compensation method (387.9 ppm/℃). It significantly suppresses the influence of environmental temperature, and the sensitivity is 9.994 V/A, meeting the requirements of weak current measurement in fields such as safe operation of power grids and insulation detection.

**Key words**: non-contact; current sensor; tunneling magnetoresistance; mA-class current; magnetic ring

在现代电力系统中,绝缘设备的状态监测对于确保电网安全至关重要,而泄漏电流的测量则是评估绝缘性能的重要手段。根据不同的工作环境和设备特性,泄漏电流可能在微安(μA)级至百毫安(mA)级范围内波动[1-3]。因此,研发一种精确度高、稳定性强的小电流传感器,以满足电网对高精度测量的需求,是当前研究的重要方向[4-6]。

目前的电流测量方法分为2种,即接触式和非接触式测量,也有学者称之为侵入式和非侵入式测量。接触式测量方法,如分流器,尽管其结构简单,但因其须直接接入被测电路,可能引入额外的电路参数变化,影响测量精度,并可能对绝缘设备的电气性能产生干扰。相比之下,非接触式测量方法(如磁调制传感器、磁光晶体传感器、霍尔电流传感器等)更适合电力系统的绝缘监测,但其各自存在一定的局限性,如温度敏感性、信号处理复杂度等。

当前非接触式电流传感技术中,闭环磁调制传感器虽具有很高的精度,但其体积庞大且功耗较高,难以满足紧凑型的安装需求;磁光晶体传感器凭借光学隔离特性在特高压领域有所应用,但极易受温度影响,导致使用稳定性不足;霍尔传感器存在明显缺点,如灵敏度较低,且极易受温度影响,在微弱电流测量领域难以应用[7-9]。

随着新型磁阻传感技术的快速发展,非接触式电流检测领域正迎来重大技术变革。磁阻器件已从早期的各向异性磁阻(anisotropic magnetoresistance, AMR)器件,发展到巨磁阻(giant magnetoresistance, GMR)器件,直至当前最具前沿性的隧穿磁阻(tunnel magnetoresistance, TMR)器件。TMR器件凭借其材料和结构特点,在关键技术上得到显著突破:其灵敏度可达传统AMR器件的20倍以上,兼具体积小和极低的功耗特性,在交直流测量领域表现优异[10-14]。然而,当前针对非接触式测量在微弱电流领域的研究仍较为有限,进一步优化其性能以适应更精密的测量需求仍是亟待解决的问题。

文献[15]验证了以TMR元件为基础的电流传感器在μA级电流检测的可行性,但未解决几何结构导致的测量问题。文献[16]通过将TMR元件与微机电系统工艺结合,使得传感器微弱电流检测分辨率得到显著提升,但其制作工艺过于复杂有待优化,且未考虑温度对TMR元件性能的影响。文献[17]通过将TMR芯片和低噪声电路相结合,实现了智能电网中微弱电流的高精度、宽频带测量,且通过研制样机验证了其具有微弱电流测量能力,但忽略了温度对TMR元件以及传感器系统的影响。文献[18]基于零磁通原理设计了闭环TMR小电流传感器,具有较高的测量精度,可达0.7%,但未研制样机。

综上所述,随着磁阻元件的发展,非接触式磁阻电流传感器在电力系统、智能电网及工业自动化等领域得到了广泛研究,并在高精度电流测量方面展现出优越性能。然而,目前针对小电流测量的研究较少,尤其是在低噪声、高灵敏度测量方面仍存在技术瓶颈。多维科技TMR2901芯片凭借其高灵敏度(250 mV/V/mT)、低非线性度(0.3%FS)及开环结构适配性,成为解决这些问题的理想选择。本文基于此芯片研究并设计了一种非接触式TMR微弱电流传感器,通过优化传感器结构和信号处理方法,提高了测量精度和稳定性。该传感器能够有效检测电力系统中的微弱泄漏电流,适用于配电网、变电站等关键场景,为电网的安全监测提供技术支撑。

## 1 结构选择与工作原理

传统TMR电流传感器多采用闭环结构,但其

反馈线圈引入的噪声在mA级测量中显著降低信噪比。因此，本文选用带聚磁环的开环结构，如图1所示。其中，$R$、$r$分别为聚磁环的外径和内径，$d$为气隙宽度，$\mu_r$为相对磁导率，$u_{out}$为传感器输出电压信号。针对其灵敏度温度漂移问题，提出了基于三次样条插值拟合的温漂补偿方法，并优化设计了传感器的聚磁环和信号处理电路，在保持结构简洁性的同时，提高了电流传感器的灵敏度，增强了其对微弱电流的检测能力。

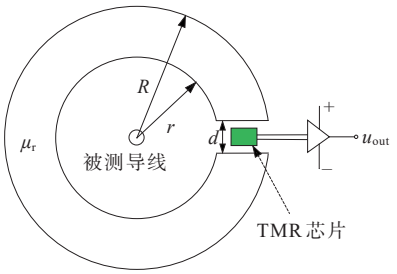


**图1**　带聚磁环的开环TMR电流传感器

**Figure 1**　Open-loop TMR current sensor with a magnetic ring

在分析聚磁环的磁场分布时，可以利用磁感应强度在不同介质中的边界条件。考虑到空气与聚磁环材料的磁导率存在显著差异，在忽略漏磁通的情况下，假设气隙与聚磁环内磁感应强度相等，即

$$\begin{cases} B_d = B_1 \\ \mu_0 H_d = \mu_0 \mu_r H_1 \end{cases} \tag{1}$$

式中，$B_d$、$H_d$分别为气隙中的磁感应强度和磁场强度；$B_1$、$H_1$分别为聚磁环中的磁感应强度和磁场强度；$\mu_0$为真空磁导率。

安培环路定理描述了电流和磁场之间的积分关系，即

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI \tag{2}$$

由于闭合磁路包含聚磁环和气隙，则式(2)进一步推导为

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = NIH_d d + H_1(2\pi R - d) = NI \tag{3}$$

结合磁感应强度的定义，得气隙磁感应强度为

$$B_d = \mu_0 \cdot \frac{\mu_r NI}{\mu_r d + 2\pi s - d} \tag{4}$$

其中，定义$s=(r+R)/2$。设穿过聚磁环的导线匝数为1，可得

$$B_d = \mu_0 \cdot \frac{\mu_r I}{\mu_r d + 2\pi s - d} \tag{5}$$

由毕奥-萨伐尔定律，在距离待测导线a处的磁感应强度为

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \tag{6}$$

结合式(5)、(6)，可得：

$$\frac{B_d}{B_1} = \frac{2\pi a \mu_r}{\mu_r d + 2\pi s - d} \approx \frac{2\pi a}{d} \tag{7}$$

由于聚磁环一般采用铁氧体或铁基纳米合金材料，考虑其有很高的磁导率，有

$$\mu_r d \gg 2\pi s - d \tag{8}$$

因此，将式(7)可改写为

$$B_d = \mu_0 \cdot \frac{\mu_r I}{\mu_r d + 2\pi s - d} \approx \mu_0 \cdot \frac{I}{d} \tag{9}$$

## 2　温度补偿分析

为了改善TMR电流传感器在不同温度环境下的稳定性，本文提出了一种软件修正优化方案。在软件层面，引入了基于三次样条插值的方法，以构建更平滑的灵敏度温漂补偿曲线，使补偿效果更具鲁棒性。

相较于传统的线性拟合方法，三次样条插值法具有较高的拟合精度，能够在更大范围的温度变化下提供精细的补偿校正，从而提高传感器的温度适应性，保证其在复杂环境下的测量精度。三次样条插值法的原理如下：在给定一组数据点$(x_0, y_0)$，$(x_1, y_1)$，…，$(x_n, y_n)$的情况下，构造的三次样条插值函数表达式为

$$S(x) = \begin{cases} S_1(x) = a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + d_1, x \in [x_1, x_2] \\ \vdots \\ S_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i, x \in [x_i, x_{i+1}] \\ \vdots \\ S_{n-1}(x) = a_{n-1} x^3 + b_{n-1} x^2 + c_{n-1} x + d_{n-1}, \\ \quad x \in [x_{n-1}, x_n] \end{cases} \tag{10}$$

式中，$a_i$、$b_i$、$c_i$、$d_i$为每个子区间$[x_i, x_{i+1}]$上三次多项式的参数。

设$A_i = S''(x_i)$，$h_i = x_{i+1} - x_i$。由于三次样条差值函数具有导数连续特征，可得

$$S_i''(x) = A_i \frac{x_{i+1} - x}{h_i} + A_{i+1} \frac{x - x_i}{h_i} \tag{11}$$

对式(11)连续积分，可得

$$S_i'(x) = -A_i \frac{(x_{i+1} - x)^2}{2h_i} + A_{i+1} \frac{(x - x_i)^2}{2h_i} + B_i \tag{12}$$

$$S_i(x)=A_i\frac{(x_{i+1}-x)^3}{6h_i}+A_{i+1}\frac{(x-x_i)^3}{6h_i}+B_i(x-x_i)+C_i \tag{13}$$

其中，系数$B_i$、$C_i$分别为

$$B_i=\frac{y_{i+1}-y_i}{h_i}-\frac{h_i}{6}(A_{i+1}-A_i) \tag{14}$$

$$C_i=y_i-A_i\frac{h_i^2}{6} \tag{15}$$

将式(14)代入式(12)可得

$$S_i'(x)=-A_i\frac{(x_{i+1}-x)^2}{2h_i}+A_{i+1}\frac{(x-x_i)^2}{2h_i}+\frac{y_{i+1}-y_i}{h_i}-\frac{h_i}{6}(A_{i+1}-A_i) \tag{16}$$

考虑到插值函数的连续性，有

$$m_{i-1}h_{i-1}+2m_i(h_{i-1}+h_i)+m_{i+1}h_i=6\left[\frac{f(x_{i+1})-f(x_i)}{h_i}-\frac{f(x_i)-f(x_{i-1})}{h_{i-1}}\right] \tag{17}$$

通过约束三阶导数的连续性条件，即让$S(x)$三阶导数在每个插值点处匹配，可建立方程求解$A_i$，最终确定三次样条插值的所有系数[19]。

本文采用上述方法对传感器在不同温度下的输出数据进行拟合，获得连续的温度灵敏度补偿曲线，以提高传感器的温度稳定性。

## 3 聚磁环和信号处理电路设计

### 3.1 聚磁环设计

基于聚磁环的TMR电流传感器，其聚磁环能较好地放大待测电流激发出的磁感应强度，针对微弱电流传感，强有力地提高了传感器的灵敏度，并在一定程度上能够屏蔽空间中的干扰磁场。

#### 3.1.1 聚磁环的气隙长度

为了放大待测电流激发出的磁场，气隙长度应越小越好。考虑到TMR2901芯片的封装尺寸、气隙中的放置空间、PCB的布线等因素，结合Maxwell仿真结果，设定聚磁环的气隙长度为4 mm。

#### 3.1.2 聚磁环的气隙横截面

TMR元件所处位置的磁场分布均匀性，即气隙中磁场分布的均匀性很大程度影响了TMR电流传感器的测量精准度[20]。本文通过引入磁场均匀系数$\gamma$来量化评估均匀性，其定义为观测区域内磁感应强度差与中心值$B_0$的比值，即

$$\gamma=\frac{\max\{|B_0-B_{\max}|,|B_0-B_{\min}|\}}{B_0} \tag{18}$$

式中，$B_{\min}$、$B_{\max}$分别为观测区域内磁感应强度的最小值、最大值。

当气隙横截面尺寸逐渐增大时，$\gamma$值呈现明显的衰减特性，即聚磁环横截面尺寸越大，磁场均匀性越好。但气隙横截面尺寸越大也意味着磁芯的体积、重量越大，导致成本增加。综合考虑，设定气隙横截面尺寸为10 mm×10 mm，此时$\gamma$为0.006 2。

### 3.2 信号处理电路设计

#### 3.2.1 供电模块电路

为了满足传感器系统的电源需求，本设计采用+12 V锂电池作为供电来源。设计放大电路、偏置电路及滤波电路均采用+5 V供电，温度补偿电路的电源电压设定为+9 V。为确保电源质量并实现稳压转换，系统选用了ADP7118稳压器进行电压调节，具体电路如图2所示。

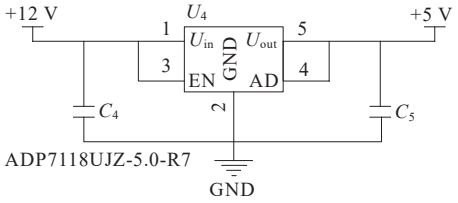


**图2** +12 V转+5 V电压的电路

**Figure 2** Circuit diagram of +12 V to +5 V voltage

#### 3.2.2 放大电路

由于TMR芯片产生的输出信号非常微弱，因此需要对输出信号进行放大。本文选用如图3所示的三运放结构仪表放大器INA333，其特点是具有高输入阻抗和高的共模抑制比。

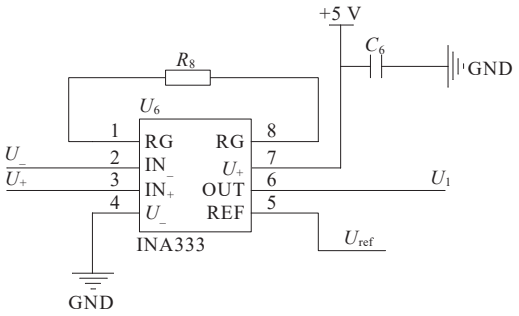


**图3** INA333的电路连接图

**Figure 3** Circuit connection diagram of INA333

#### 3.2.3 偏置电路

由于制造工艺的局限性，TMR惠斯通电桥的4个桥臂电阻值难以实现完全匹配，造成未施加外界磁场条件下输出非零电压。此外，信号处理电路及环境中的电磁干扰会进一步加剧输出偏置。为消除这些影响并确保电流测量时输出保持单极性，设计如图4所示的偏置电路。

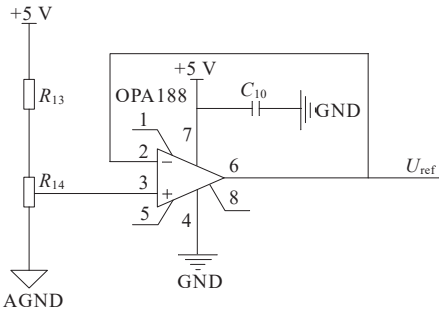


**图 4**　偏置电路的电路连接图

**Figure 4**　Circuit connection diagram of bias circuit

3.2.4　滤波电路

为了确保待测信号的完整与信噪比要求，需要设计滤波电路以避免受到噪声信号的干扰。本文设计巴特沃斯低通滤波电路如图 5 所示，截止频率为 5 kHz。

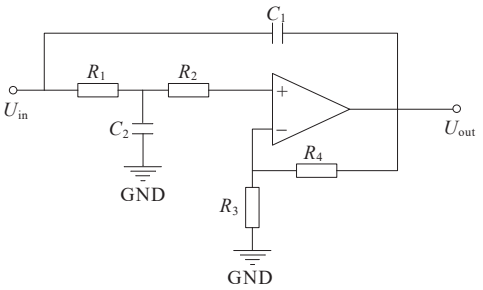


**图 5**　有源二阶巴特沃斯低通滤波电路

**Figure 5**　Active second-order Butterworth low-pass filter circuit

## 4　实验验证

### 4.1　直流性能测试

直流实验示意图如图 6 所示。测试系统选用 ITECH IT6302 直流电源，该设备具有 10 mV/1 mA 的高分辨率，并具备良好的测量精度以及高的稳定性；测量部分采用 KEYSIGH-34401 A 台式万用表，显示精度可达 0.0035%；采用 UT61E+ 数字万用表，最小分辨率可达 0.01 mV，以满足测量需求。为提供稳定精准的参考值，选用 RX70 型

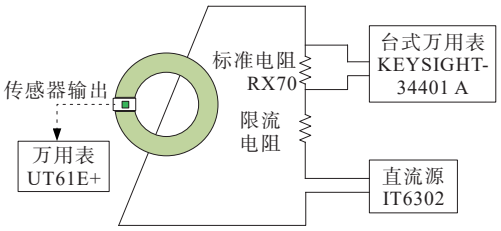


**图 6**　直流性能测试系统示意图

**Figure 6**　Schematic of DC performance test system

精密绕线电阻器，该电阻阻值为 5 Ω，额定功率为 3 W，具备 ±0.01% 的阻值精度和优异的温度稳定性。

4.1.1　传感器量程测试

电流采用阶梯式加载，步长为 20 mA，直到传感器饱和，输出不再变化。量程测试结果如图 7 所示，从实验结果可知，所设计电流传感器量程为 ±250 mA。

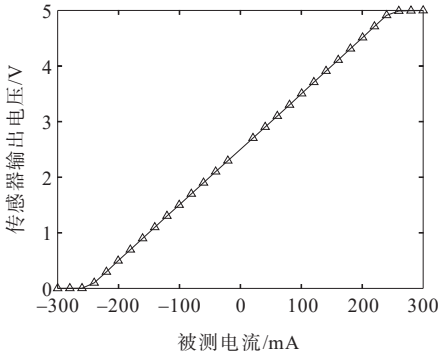


**图 7**　量程测试结果

**Figure 7**　Test results of measuring range

4.1.2　线性度分析

为验证所设计传感器在复杂环境下的线性度，实验采用阶梯式电流加载，步长为 20 mA，范围从 −200 mA 至 200 mA，实验重复 3 次，以确保实验数据的合理性和可靠性。

利用 MATLAB 软件对实验数据进行线性拟合，结果如图 8 所示。通过 MATLAB 的 cftool 工具对数据集进行分析，拟合得到的输入、输出关系可表示为

$$V = 0.009\,994I + 2.503 \tag{19}$$

通过式(19)可得，所设计的微电流传感器的灵敏度为 9.994 V/A。实验结果表明，该传感器符合设计预期。

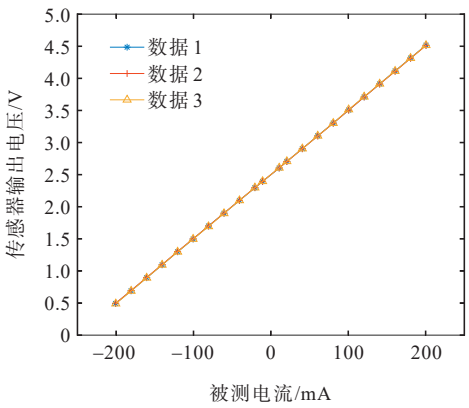


**图 8**　输入输出特性曲线

**Figure 8**　Input and output characteristic curve

#### 4.1.3 误差分析

测量偏差如图9所示。可知，3组测量数据中，测量偏差均控制在±1 mA范围内，其中测量最大偏差值为0.847 9 mA。为评估传感器的测量精度，采用满量程精度作为评价指标，即

$$a=\frac{\Delta}{Y_{\mathrm{FS}}}\times 100\% \tag{20}$$

其中，$\Delta$为最大测量偏差，$Y_{\mathrm{FS}}$为传感器量程。根据测量数据计算可得，该TMR微电流传感器的满量程精度达到0.212%FS，表明其测量性能良好。

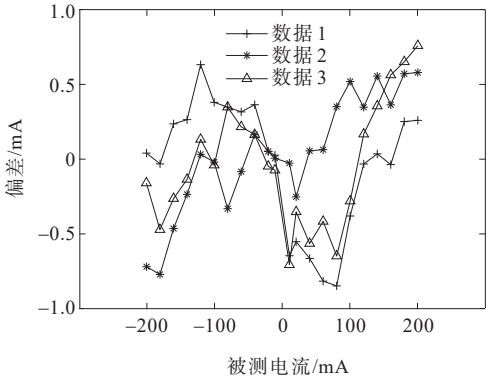


**图9** 测量偏差

**Figure 9** Measurement deviation

将本文设计的传感器与莱姆公司的CTSR0.3-P和江苏多维公司的TMR7401电流传感器进行对比分析，如表1所示。所设计的TMR微电流传感器的测量误差均小于1%，测量准确度优于TMR7401和CTSR 0.3-P电流传感器的。

**表1** 3种传感器直流准确度误差分析

**Table 1** Error analysis of DC accuracy of three kinds of sensors

| 实测电流值/mA | 直流准确度误差/% | | |
|---|---|---|---|
| | 本文传感器 | CTSR 0.3-P | TMR7401 |
| 50.60 | 0.87 | 1.34 | 1.10 |
| 100.64 | 0.41 | 1.12 | 0.99 |
| 150.62 | 0.62 | 1.50 | 1.24 |
| 200.66 | 0.23 | 1.03 | 0.96 |

#### 4.1.4 微电流测试

为评估本文设计的传感器对微弱电流的检测能力和测量精度，设计微弱电流测量实验。调节ITECH IT6302直流源，使其电流输出范围覆盖0～10 mA，并以1 mA的步长逐级变化，电流实际值通过标准电阻标定。实验结果如图10所示，证明本文所设计的传感器具有较好的微弱电流检测能力。

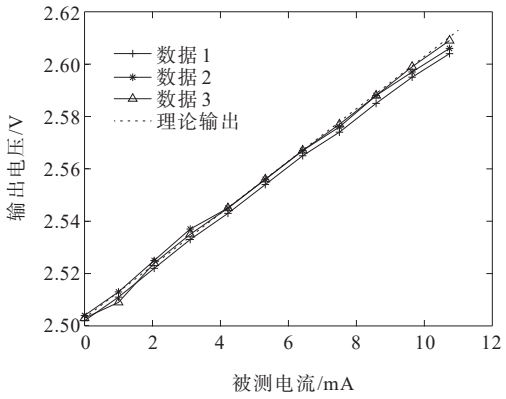


**图10** 0～10 mA范围测量结果

**Figure 10** Measurement results from 0 to 10 mA

### 4.2 温度补偿效果测试

图11对比了无补偿、硬件补偿和本文设计的软件补偿效果。通过对3种补偿情况的对比可见，本文设计的软件补偿效果最佳。为了评估温度对TMR灵敏度的影响，定义灵敏度温漂系数(temperature coefficient sensitivity，TCS)$\alpha_{\mathrm{TCS}}$为

$$\alpha_{\mathrm{TCS}}=\frac{S_{\max}-S_{\min}}{S(T_0)(T_{\max}-T_{\min})}\times 10^6\ \mathrm{ppm/℃} \tag{21}$$

式中，$S(T_0)$为25 ℃时传感器的灵敏度。通过计算得到如表2所示的3种情况下传感器的TCS，证实了本文所提出的软件补偿方法具有很好的灵敏度温漂抑制效果。

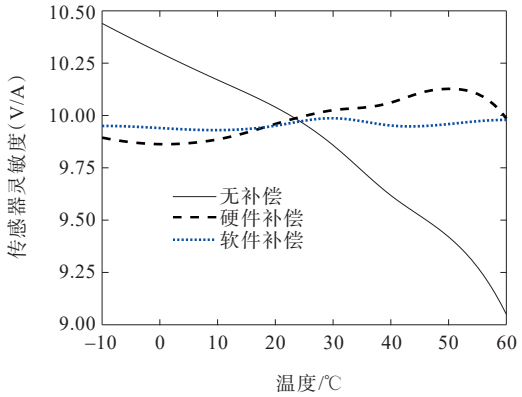


**图11** 无补偿、硬件补偿与软件补偿效果对比

**Figure 11** Comparison of effects of no compensation, hardware compensation, and software compensation

**表2** 不同情况下传感器的TCS

**Table 2** TCS of sensors under different conditions

| 情况 | $\alpha_{\mathrm{TCS}}$/(ppm·℃$^{-1}$) |
|---|---|
| 无补偿 | 1793.9 |
| 硬件补偿 | 387.9 |
| 软件补偿 | 106.3 |

## 5 结语

本文以微弱电流的测量为研究目标，提出一种基于TMR的非接触式微弱电流传感器设计方案，重点研究了TMR传感器的工作原理、聚磁环设计、供电电路与放大电路设计、温度补偿方法以及偏置电路设计等内容。本文成功研制带有聚磁环的非接触式TMR微弱电流传感器，并通过实验验证了该传感器具有优异的性能。所设计的传感器具有±250 mA量程，在±200 mA量程内灵敏度为9.994 V/A，满量程精度为0.212%FS，采用的软件补偿方案将TCS由1 793.9 ppm/℃降为106.3 ppm/℃，补偿效果优异。本文所设计的带有聚磁环的非接触式TMR微弱电流传感器，能够满足电网安全运行、绝缘检测等领域的微弱电流测量需求。

**参考文献：**


[1] 王陆璐，左中秋，吴成成，等. 避雷器泄漏电流测量原理分析及内置式监测装置研制[J]. 高压电器，2024，60(8): 174-182.
WANG Lulu, ZUO Zhongqiu, WU Chengcheng, et al. Analysis of leakage current measurement principle of lightning arrester and development of built-in monitoring device[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 174-182.

[2] WU Y, ZHANG P J. A novel online monitoring scheme for underground power cable insulation based on common-mode leakage current measurement[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 13586-13596.

[3] 蒋兴良，赵世华，毕茂强，等. 污秽绝缘子闪络特性与泄漏电流特性研究[J]. 中国电机工程学报，2013，33(31): 220-226.
JIANG Xingliang, ZHAO Shihua, BI Maoqiang, et al. Study on flashover characteristics and leakage current characteristics of polluted insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 220-226.

[4] 刘鑫，袁明哲，黄寅，等. 基于无线同步通信的变电站漏电流检测系统研究[J]. 四川电力技术，2024，47(1): 98-104.
LIU Xin, YUAN Mingzhe, HUANG Yin, et al. Research on substation leakage current detection system based on wireless synchronous communication[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2024, 47(1): 98-104.

[5] 陈小娣，王俊雄，安韵竹，等. 基于改进经验模态分解的泄漏电流去噪方法[J]. 电力科学与技术学报，2023，38(6): 115-122.
CHEN Xiaodi, WANG Junxiong, AN Yunzhu, et al. A method for leakage current denoising based on improved empirical mode decomposition[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 115-122.

[6] LEI M, PENG T, ZHOU F, et al. Optimal design and implementation of tunnelling magnetoresistance based small current sensor with temperature compensation[J]. Energy Reports, 2022, 8: 137-146.

[7] 程兴国，但强，孙珍军，等. 一种新型闭环式双铁芯霍尔电流传感器的建模与实现[J]. 传感器与微系统，2013，32(11): 68-70.
CHENG Xingguo, DAN Qiang, SUN Zhenjun, et al. Modeling and implementation of a novel closed-loop Hall current sensor using dual iron-core[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(11): 68-70.

[8] YU J C, LONG Z Z, LIANG S Y, et al. Optimal design of dual air-gap closed-loop TMR current sensor based on minimum magnetic field uniformity coefficient[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 239.

[9] 韩世杰，吕泽钦，隋浩冉，等. 基于EFPI传感器的GIS局部放电模式识别研究[J]. 电力工程技术，2022，41(1): 149-155.
HAN Shijie, LYU Zeqin, SUI Haoran, et al. Research on GIS partial discharge pattern recognition based on EFPI sensor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1):149-155.

[10] 俞智浩，王杰，陈万达，等. [J]. 电力电子技术，2022，56(1): 51-53+78.
YU Zhihao, WANG Jie, CHEN Wanda, et al. Micro contactless high voltage current sensor based on TMR [J]. Power Electronics, 2022, 56(1): 51-53+78.

[11] ZHANG Z S, TAO M, YUAN H Q. A parking occupancy detection algorithm based on AMR sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2): 1261-1269.

[12] 李胜男，高源，何廷一，等. 新能源临界短路比对电网运行参数灵敏度分析方法[J]. 智慧电力，2023，51(5): 96-102.
LI Shengnan, GAO Yuan, HE Tingyi, et al. Sensitivity analysis method for critical short circuit ratio of new energy to power grid operating parameters[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 96-102.

[13] ZHANG H Q, LI F F, GUO H, et al. Current measurement with 3-D coreless TMR sensor array for inclined conductor[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(16): 6684-6690.

[14] 李东昇，程武山. 基于TMR磁传感器的电力系统大电流测量[J]. 传感器与微系统，2013，32(12): 131-134+141.
LI Dongsheng, CHENG Wushan. Large current

measurement of power system based on TMR magnetic sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(12): 131-134+141.

[15] PHAN K L, BOEVE H, VANHELMONT F, et al. Geometry optimization of TMR current sensors for on-chip IC testing[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 3685-3687.

[16] 王峥, 郭海平, 庞振江, 等. TMR单芯片微弱电流传感器的研制[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 129-133.
WANG Zheng, GUO Haiping, PANG Zhenjiang, et al. Study and manufacture of TMR single chip weak current sensor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(17): 129-133.

[17] 胡军, 王博, 盛新富, 等. 基于隧穿磁阻效应的宽频微小量程电流传感器设计及噪声分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2545-2553.
HU Jun, WANG Bo, SHENG Xinfu, et al. Design and noise analysis of weak current sensor with broadband based on tunneling magnetoresistance effect[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2545-2553.

[18] SONG J K, ZHANG G Q, NIE Y, et al. Design and Simulation of a magnetic balance weak current sensor based on TMR[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1617(1): 012038.

[19] 王冰冰, 李淮江. 基于三次样条插值的硅压阻式压力传感器的温度补偿[J]. 传感技术学报, 2015(7): 1003-1007.
WANG Bingbing, LI Huaijiang. Temperature compensation of piezoresistive pressure sensor based on the interpolation of third order splines[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015(7): 1003-1007.

[20] 史轮, 孙冲, 石振刚, 等. 闭环隧道磁电阻电流传感器仿真分析与验证[J]. 南京理工大学学报, 2021, 45(3): 338-343.
SHI Lun, SUN Chong, SHI Zhengang, et al. Simulation analysis and verification for closed-loop tunneling magnetoresistance current sensor[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology,2021,45(3):338-343.