

## 基于磁性传感器的低失调温度补偿接口电路设计

樊华<sup>①②③</sup> 常伟鹏<sup>②</sup> 王策<sup>④</sup> 李国<sup>④</sup> 刘建明<sup>④</sup>  
李宗霖<sup>④</sup> 魏琦<sup>\*⑤</sup> 冯全源<sup>⑥</sup>

<sup>①</sup>(电子科技大学重庆微电子产业技术研究院 重庆 401331)

<sup>②</sup>(电子科技大学集成电路科学与工程学院(示范性微电子学院) 成都 611731)

<sup>③</sup>(电子科技大学广东电子信息工程研究院 东莞 523808)

<sup>④</sup>(成都华微电子科技股份有限公司 成都 610041)

<sup>⑤</sup>(清华大学精密仪器系 北京 100084)

<sup>⑥</sup>(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 611756)

**摘要:** 面向磁性传感器在物联网(IoT)技术中的广泛应用, 该文基于180 nm CMOS工艺设计了一种具有低失调电压, 低温度漂移特性的霍尔传感器接口电路。针对霍尔传感器灵敏度的温度漂移特性, 该文设计了一种感温电路并与查表法相结合, 调节可编程增益放大器(PGA)的增益有效地降低了霍尔传感器的温度系数(TC)。在此基础上, 通过在信号主通路中使用相关双采样(CDS)技术, 极大程度上消除了霍尔传感器的失调电压。仿真结果表明, 在-40°C~125°C温度范围内, 霍尔传感器的TC从966.4 ppm/°C减小到了58.1 ppm/°C。信号主通路的流片结果表明, 霍尔传感器的失调电压从25 mV左右减小到了4 mV左右, 霍尔传感器的非线性误差为0.50%。芯片的总面积为0.69 mm<sup>2</sup>。

**关键词:** 霍尔传感器; 接口电路; 温度补偿; 低失调电压

中图分类号: TN43

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)04-1521-08

DOI: 10.11999/JEIT230601

## Design of Low Offset Temperature Compensation Interface Circuit Based on Magnetic Sensor

FAN Hua<sup>①②③</sup> CHANG Weipeng<sup>②</sup> WANG Ce<sup>④</sup> LI Guo<sup>④</sup> LIU Jianming<sup>④</sup>  
LI Zonglin<sup>④</sup> WEI Qi<sup>\*⑤</sup> FENG Quanyuan<sup>⑥</sup>

<sup>①</sup>(Chongqing Institute of Microelectronics Industry Technology, UESTC, Chongqing 401331, China)

<sup>②</sup>(School of Integrated Circuit Science and Engineering, University of Electronic Science And Technology of China, Chengdu 611731, China)

<sup>③</sup>(Guangdong Institute of Electronic Information Engineering, UESTC, Dongguan 523808, China)

<sup>④</sup>(Chengdu Sino Microelectronics Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

<sup>⑤</sup>(Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

<sup>⑥</sup>(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** Considering the widespread application of magnetic sensors in the Internet of Things (IoT), a Hall sensor readout interface circuit with low offset voltage and low-temperature drift characteristics based on a 180 nm CMOS process is designed in this work. In response to the temperature drift characteristic of the Hall sensor sensitivity, a temperature sensing circuit that is combined with the table lookup method to adjust the

收稿日期: 2023-06-16; 改回日期: 2023-09-22; 网络出版: 2023-09-28

\*通信作者: 魏琦 [weiqi@tsinghua.edu.cn](mailto:weiqi@tsinghua.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金(62371109, 62090012), 重庆市自然科学基金(2022NSCQ-MSX5348), 中央高校基本科研业务费专项资金(ZY-GX2021YGLH203), 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515010041), 四川省科技计划(2022YFG0164)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62371109, 62090012), The Natural Science Foundation of Chongqing (2022NSCQ-MSX5348), Fundamental Research Funds for the Central Universities (ZYGX2021YGLH203), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2023A1515010041), Sichuan Provincial Science and Technology Plan (2022YFG0164)

gain of the Programmable Gain Amplifier (PGA) is designed, which effectively reduces the Temperature Coefficient (TC) of the Hall sensor. On this basis, the offset voltage of the Hall sensor is greatly eliminated by the use of Correlated Double Sampling (CDS) technology in the main signal channel. The simulation results show that the TC of the Hall sensor is decreased from 966.4 ppm/°C to 58.1 ppm/°C in the temperature range of -40°C~125°C. The chip measurement results of the main signal channel show that the offset voltage of the Hall sensor is reduced from about 25 mV to about 4 mV and the nonlinear error of the Hall sensor is 0.50%, which occupies an active area of 0.69 mm<sup>2</sup>.

**Key words:** Hall sensor; Readout interface circuit; Temperature compensation; Low offset voltage

## 1 引言

伴随着物联网技术的蓬勃发展,传感器作为连接自然界与人类信息世界的桥梁,与人们的日常生活息息相关。包括霍尔传感器<sup>[1-3]</sup>、各向异性磁阻传感器<sup>[4,5]</sup>、隧道磁阻传感器<sup>[6-8]</sup>和巨磁阻传感器<sup>[9,10]</sup>在内的磁传感器,因其体积小、成本低、应用范围广等特点<sup>[11]</sup>,成为传感器领域中的重要组成部分。由于霍尔传感器不仅可以检测较大范围的磁场而且与标准CMOS工艺兼容,可以与后续信号处理电路集成在同一块芯片上,在磁传感器市场中占比最高。

霍尔效应<sup>[12]</sup>是霍尔传感器的基本工作原理。相比于其他磁传感器,其工作时的温度漂移特性十分凸显,具体表现为灵敏度的温度漂移特性和失调电压的温度漂移特性。如图1所示,霍尔传感器通常在恒定电流的偏置下工作。在理想情况下,对于一个霍尔传感器,流过霍尔传感器的电流一定时,霍尔电压( $V_H$ )与磁场的大小成正比。然而,由于霍尔传感器自身的电阻率、载流子浓度、载流子迁移率等特性都与温度相关, $V_H$ 和失调电压( $V_{off}$ )都会具有温度漂移特性,从而产生测量误差。因此,对霍尔传感器的灵敏度进行温度补偿和消除 $V_{off}$ 的影响十分必要。

对于霍尔传感器灵敏度的温度漂移特性,文献<sup>[13]</sup>利用线性插值的方法对霍尔传感器进行温度补偿,在-40°C~150°C温度范围内将霍尔传感器的温度系数(Temperature Coefficient, TC)降低到了316 ppm/°C。该方法只需要记录少量温度点下的数据就可以实现全温度域的校准,有效降低了

工作量,但是该方法的补偿效果有限,适用于对TC要求不高的场景。本文提出一种查表法对霍尔传感器进行温度补偿,通过在各个温度点下调节可编程增益放大器的增益来减小 $V_H$ 的温度漂移特性。仿真结果表明,补偿过后 $V_H$ 的TC为58.1 ppm/°C,有效提高了温度补偿的精确度。本方法并不仅限于对霍尔传感器的温度补偿,对于其他电路的温度补偿同样适用。

对于霍尔传感器 $V_{off}$ 的温度漂移特性,本文将旋转电流技术和相关双采样<sup>[14]</sup>(Correlated Double Sampling, CDS)技术相结合,有效地消除了 $V_{off}$ 。流片测试结果表明,在常温下,霍尔传感器的 $V_{off}$ 从25 mV左右降低到了4 mV左右。

CMOS温度传感器<sup>[15-17]</sup>具有精度高、性能稳定、成本低等优势,在各种芯片的温漂校准中都有应用。考虑到在对霍尔传感器进行温度补偿时,温度传感器不需要有过高的精度,只需要有严格的线性度和单调性,本文设计了一种结构较为简单的感温电路,节省了电路面积和功耗。

## 2 接口电路原理与架构

根据霍尔效应,对于一定的偏置电流 $I$ 和磁场 $B$ ,霍尔传感器的输出可以写为

$$V_H = \frac{\rho\mu}{W}IB \quad (1)$$

其中, $\rho$ 和 $\mu$ 分别为制作霍尔传感器材料的电阻率和载流子迁移率, $W$ 为材料的厚度。

对于霍尔传感器的结构,一般分为垂直型和水平型两种。垂直型和水平型的霍尔传感器分别可检测水平和垂直方向的磁场。与垂直型霍尔传感器相比,后者的结构较简单,便于制作。如图2所示,水平型霍尔传感器一般为对称的十字形或正方形,本文将针对十字形霍尔传感器进行研究。由于其对称的结构,无论从A端和C端通入电流还是从B端和D端通入电流,霍尔传感器输出的 $V_H$ 大小相同,极性取决于电流的方向。

文献<sup>[18]</sup>对霍尔传感器灵敏度的温度漂移特性进行了详细说明。施加恒定电流偏置后,其灵敏度 $S$ 对于室温 $T_0$ 的变化率 $\gamma$ 为

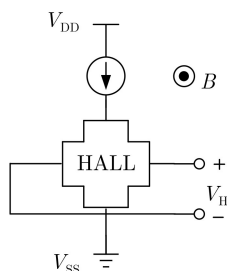


图1 恒定电流偏置下的霍尔传感器

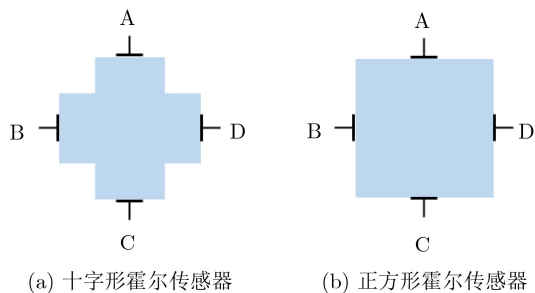


图2 常见的水平型霍尔传感器结构

$$\gamma = \frac{S(T) - S(T_0)}{S(T_0)} \quad (2)$$

其中,  $T$ 为热力学温度。根据文献[18]中的实测数据进行2次拟合, 得到 $\gamma$ 的表达式为

$$\gamma = 4 \times 10^{-5}T^2 - 2.026T + 4.274 \quad (3)$$

将得到的电流灵敏度TC的参数模型用于Verilog-A建模仿真作为参考。仿真结果如图3所示, 结果表明随温度升高,  $V_H$ 先减小后增大, 通常, 计算TC的公式为

$$TC = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{target}}(T_{\max} - T_{\min})} \times 10^6 \quad (4)$$

其中,  $V_{\max}$ 和 $V_{\min}$ 分别为在整个温度范围内输出的最大电压和最小电压。 $V_{\text{target}}$ 为设计中的目标电压(本文取27°C时的电压)。 $T_{\max}$ 与 $T_{\min}$ 分别为最大温度和最小温度。计算得到图3中 $V_H$ 的TC为966.4 ppm/°C。

图4为本文设计的接口电路的结构框图。霍尔传感器被偏置在恒定电流下, 通过旋转电流电路,  $V_H$ 被调制到高频, 而 $V_{\text{off}}$ 仍处于低频。温度传感器根据环境温度产生与温度成正比的电压信号 $V_{\text{temp}}$ , 在该电压被8-bit 模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC) (Verilog-A建模) 转换成数字信号temp<7:0>后, 寄存器(Verilog建模) 根据信号temp<7:0>控制可编程增益放大器(Programmable Gain Amplifier, PGA) 的增益。放大的信号通过

CDS电路消除 $V_{\text{off}}$ , 最终, 信号经过减法器 and 采样电路后被输出。带隙基准(BandGap Reference, BGR) 电路向减法器提供基准电压 $V_{\text{offset}}$ 。这样,  $V_H$ 将会具有更小的温度系数。

### 3 核心电路设计

#### 3.1 BGR

本文中设计的BGR电路如图5所示。图5中,  $M_1, M_2, M_3, M_4$ 构成共源共栅电流镜, 使得左右两条支路的电流相同。因此,  $Q_1$ 和 $Q_2$ 的集电极电流 $I_{C1}$ 和 $I_{C2}$ 相同, 即

$$I_{C1} = I_{C2} \quad (5)$$

将 $Q_1, Q_2$ 的发射截面积设置为1:n, 得到

$$I_{S2} = nI_{S1} \quad (6)$$

其中,  $I_{S1}$ 和 $I_{S2}$ 分别为 $Q_1$ 和 $Q_2$ 的反向饱和电流。因此,  $Q_2$ 的基极-发射极电压 $V_{BE2}$ 可以表示为

$$V_{BE2} = V_T \ln \left( \frac{I_{C2}}{I_{S2}} \right) = V_T \ln \left( \frac{I_{C2}}{nI_{S1}} \right) \quad (7)$$

其中,  $V_T$ 为热电压, 在常温下约为0.026 V。运算放大器 $A_1$ 的钳位作用使X点和Y点的电压相同, 因此

$$V_X = V_Y = V_{BE1} = V_T \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_{S1}} \right) \quad (8)$$

显然, 流过 $R_4$ 的电流可以表示为

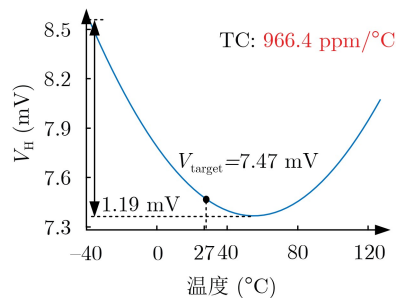


图3 霍尔电压的温度特性

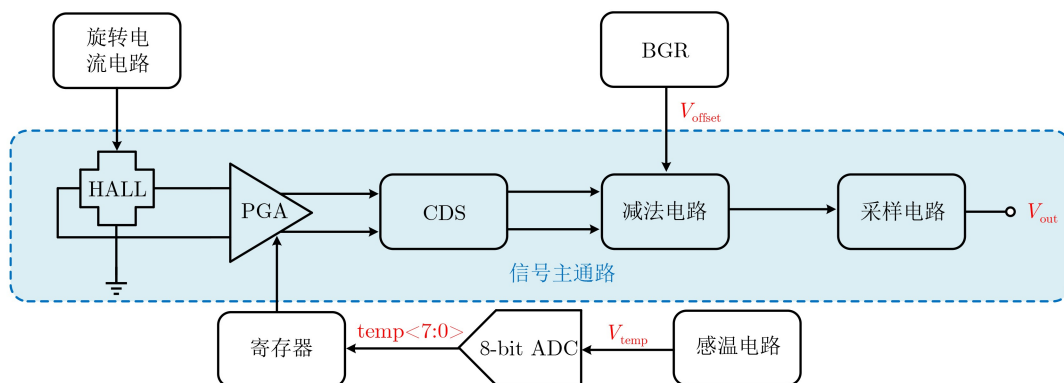


图4 整体电路结构框图

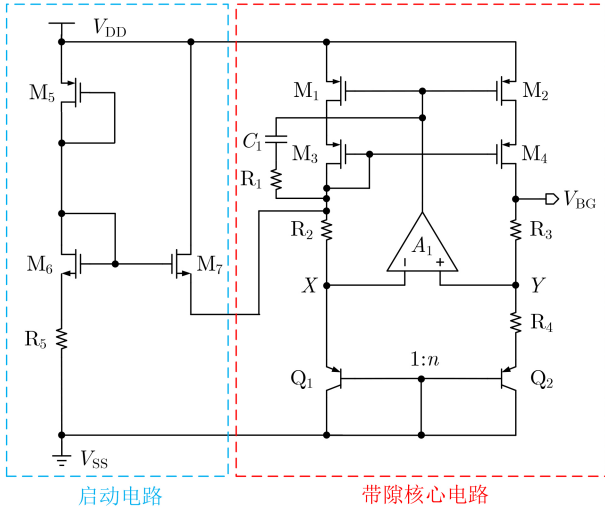


图5 带隙基准

$$\begin{aligned} I_{R_4} &= \frac{V_Y - V_{BE2}}{R_4} \\ &= \frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R_4} = \frac{V_T \ln n}{R_4} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)表明, 由于 $V_T$ 与温度成正比, 所以 $I_{R_4}$ 与温度也成正比。将 $R_3$ 和 $R_4$ 两端的电压与 $V_{BE2}$ 相加, 得到BGR输出 $V_{BG}$ 的表达式为

$$\begin{aligned} V_{BG} &= I_{R_4}(R_3 + R_4) + V_{BE2} \\ &= \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) V_T \ln n + V_T \ln \left(\frac{I_{C2}}{I_{S2}}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, 第1项的TC为正, 第2项的TC为负, 理想情况下, 调节 $R_3$ 和 $R_4$ 的大小可以使两个TC互补, 从而使 $V_{BG}$ 的TC为0。

考虑到运算放大器 $A_1$ 能够正常工作, 在 $A_1$ 的输出端增加电容 $C_1$ 和电阻 $R_1$ , 以调节零极点, 保证足够的环路增益和相位裕度, 提高电路的稳定性。

图6为不同工艺角下BGR输出随温度变化的仿真结果。根据式(4), 在 $-40 \sim 125^\circ\text{C}$ 的温度范围内, tt, ff, ss, fs和sf角的TC分别为24.3, 22.0, 33.7, 22.9和24.3 ppm/ $^\circ\text{C}$ 。

### 3.2 感温电路

式(9)表明,  $I_{R_4}$ 与温度成正比。考虑到本设计中感温电路的输出不需要太高的精度, 只需要严格的线性度和单调性, 将 $I_{R_4}$ 通过一个固定电阻后就可以得到与温度成正比的电压。本文设计的感温电路如图7所示。

$M_5$ 与 $M_2$ 构成电流镜,  $M_5$ 复制 $M_2$ 所在支路的电流。利用运算放大器 $A_2$ 进行钳位, 使得 $M_5$ 和 $M_2$ 的漏源电压保持一致, 提高复制电流的精确性。电容 $C_2$ , 电阻 $R_5$ 与电容 $C_1$ , 电阻 $R_1$ 的作用一致, 对运算放大器输出端的零极点进行调节, 提高电路的稳

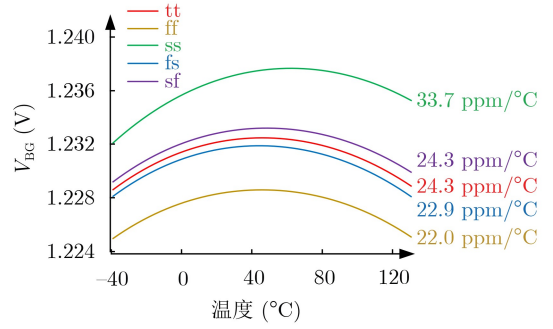


图6 带隙基准电路仿真结果

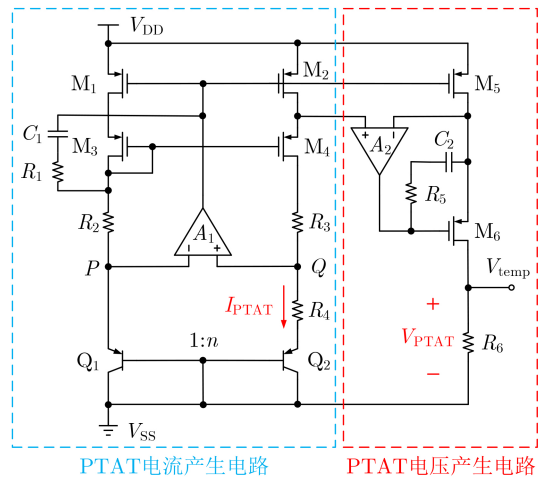


图7 感温电路

定性。 $M_5$ 复制过来的电流会流入电阻 $R_6$ , 所以感温电路的输出 $V_{temp}$ 可以表示为

$$V_{temp} = \frac{R_6}{R_4} V_T \ln n \quad (11)$$

选取 $R_4$ 与 $R_6$ 为同类型的电阻,  $V_{temp}$ 就与温度成正比。

图8为感温电路的仿真结果。在 $-40 \sim 125^\circ\text{C}$ 的温度范围内,  $V_{temp}$ 与温度成正比。 $V_{temp}$ 的变化范围为1.80 ~ 3.24 V, 灵敏度(图8中直线的斜率)为8.73 mV/ $^\circ\text{C}$ 。通过对仿真数据进行线性函数拟合, 理想条件下温度传感电路的输出表达式为

$$V_{ideal} = 0.00873T + 2.5103 \quad (12)$$

通常, 计算非线性误差的公式为

$$\delta = \frac{\Delta Y_{max}}{Y} \times 100\% \quad (13)$$

其中,  $\Delta Y_{max}$ 为实际输出与理想输出之间的最大差值,  $Y$ 为满量程输出。计算得到感温电路的非线性误差为0.22%, 在整个温度范围内的温度误差为 $0.36^\circ\text{C}$  ( $0.22\% \times 165^\circ\text{C}$ )。本文使用的8位ADC分辨率为 $0.64^\circ\text{C}$ , 因此, 感温电路引起的误差小于 $0.64^\circ\text{C}$ 即可。

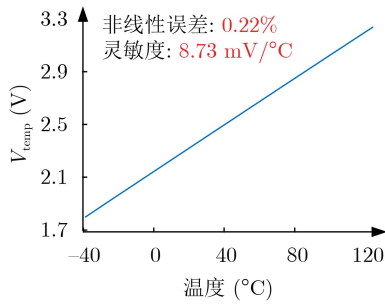


图8 感温电路仿真结果

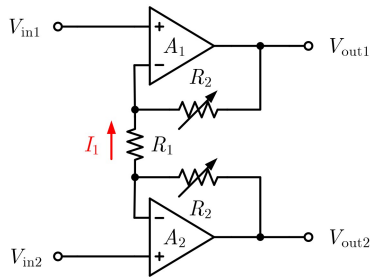


图9 PGA

### 3.3 PGA

本文设计的PGA如图9所示。假设流过电阻  $R_1$  的电流为  $I_1$ ， $A_1$ 和 $A_2$ 均为理想运算放大器，可以得到表达式为

$$I_1 = \frac{V_{in2} - V_{in1}}{R_1} \quad (14)$$

$$V_{out2} = V_{in2} + I_1 R_2 \quad (15)$$

$$V_{out1} = V_{in1} - I_1 R_2 \quad (16)$$

因此，PGA的增益为

$$A_V = \frac{V_{out2} - V_{out1}}{V_{in2} - V_{in1}} = 1 + \frac{2R_2}{R_1} \quad (17)$$

式(17)表明，PGA的增益可以通过改变电阻  $R_2$  的大小进行调节。因此，基于环境温度的不同对  $V_H$  进行不同倍数的放大就可以减小  $V_H$  的TC。

表1列出了在温度补偿时各个信号在部分温度范围下的响应。通常情况下由霍尔传感器直接生成的  $V_H$  在毫伏量级，将  $V_H$  在不同温度下都放大到150 mV 为目标。以  $-40^\circ\text{C} \sim -39.21^\circ\text{C}$  这个温度段为例，感温电路输出的信号  $V_{temp}$  的范围在1.792~1.806 V 之间，对应于ADC的一个最低有效位。此时ADC 的输出temp<7:0>为1001 0110。将该温度下的  $V_H$  与150 mV比较，得到PGA的增益为36。最后，将1001 0110作为寄存器的地址，增益作为该地址下的储存的信息，将二者同时写入寄存器后就完成了温度  $-40^\circ\text{C} \sim -39.21^\circ\text{C}$  的温度补偿。如此反复，就可以完成整个温度范围内的校准。

图10为温度补偿电路的仿真结果。图10(b)为

表1 各信号对温度的相应

温度范围 (°C)	$V_{temp}$ 范围(V)	temp<7:0>	$V_H$ (mV)	增益
-40~-39.21	1.792~1.806	1001 0110	4.76	31
-20.35~-18.79	1.968~1.982	1010 0011	4.35	35
-1.49~0.07	2.144~2.158	1010 1111	4.06	37
39.36~40.92	2.494~2.508	1100 1001	3.71	40
59.79~61.35	2.668~2.682	1101 0110	3.70	40
78.65~80.21	2.842~2.856	1110 0010	3.79	40
119.52~121.08	3.189~3.203	1111 1100	4.27	35
124.22~125	3.232~3.246	1111 1111	4.35	34

经过温度补偿后霍尔传感器分别在50 mT和100 mT 磁场下的输出结果。

根据式(4)，通过温漂校准后，霍尔传感器的TC从966.4 ppm/°C降低到了58.1 ppm/°C。该文对温度补偿电路只进行了仿真，没有流片测试。

### 3.4 旋转电流电路

本文设计的旋转电流电路如图11所示。为方便后续CDS电路对  $V_{off}$  的消除，该电路通过将电流周期性地通入霍尔传感器的不同端口实现对  $V_H$  和  $V_{off}$  的调制。

当clk1为高电平，clk2为低电平时，电流从霍尔传感器的A端流入，C端流出。输出正极  $V_P$  和输出负极  $V_N$  分别与霍尔传感器的D端和B端相连。此时，输出结果为

$$V_{H1} = V_P - V_N = V_D - V_B = V_H + V_{off} \quad (18)$$

同理，当clk1为高电平，clk2为低电平时，输出结果为

$$V_{H2} = V_P - V_N = V_C - V_A = -V_H + V_{off} \quad (19)$$

式(18)、式(19)表明，经过旋转电流电路的调制， $V_H$  变为交流信号， $V_{off}$  仍为直流信号。

图12为旋转电流电路的仿真结果。根据式(18)和式(19)，计  $V_{off}$  的值为36 mV。

## 4 流片测试结果

本文对霍尔传感器主通路进行了流片测试，总芯片面积为0.69 mm<sup>2</sup>。图13为芯片的显微镜照片。

本节将使用印刷电路板对  $V_{off}$  和霍尔传感器主通路的TC，以及霍尔传感器的线性度进行测试。主要测试仪器包括电源、信号发生器、电磁铁和数字万用表。图14为测试的示意图。

表2列出了  $V_{off}$  的测试结果。数据表明， $V_{off}$  随温度的升高而降低，温度漂移特性明显。因此，在对霍尔传感器进行温度补偿时对  $V_{off}$  尽可能地消除是必要的。

表3列出了相应的测试结果，结果表明CDS电

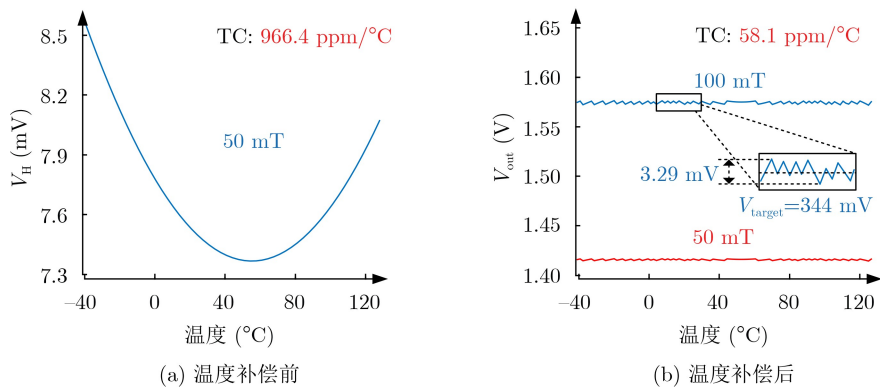


图 10 温度补偿电路仿真结果

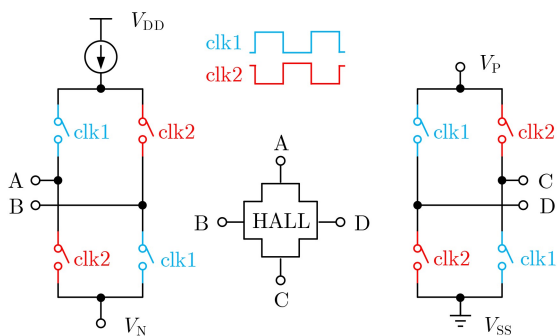


图 11 旋转电流电路

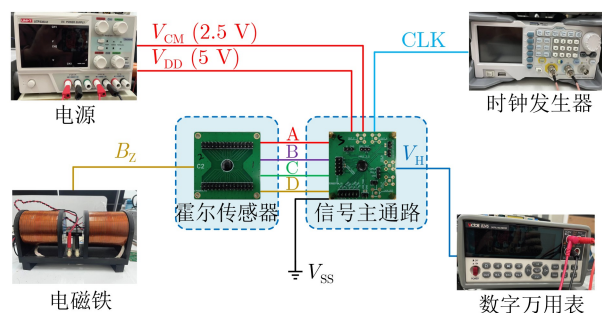


图 14 测试示意图

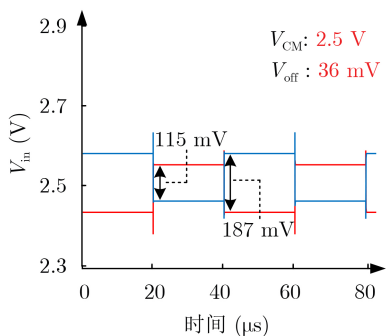


图 12 旋转电流电路仿真结果

表 2  $V_{off}$  的高低温测试结果(mV)

	-40°C	-20°C	0°C	20°C	40°C
$V_{off1}$	49.59	42.21	33.05	21.94	11.75
$V_{off2}$	72.45	53.87	30.74	20.39	11.32
$V_{off3}$	69.15	50.92	33.75	23.05	12.26

表 3 CDS电路测试结果(mV)

	失调电压消除前	失调电压消除后
$V_{off1}$	24.9	4
$V_{off2}$	25.4	4
$V_{off3}$	24.2	2

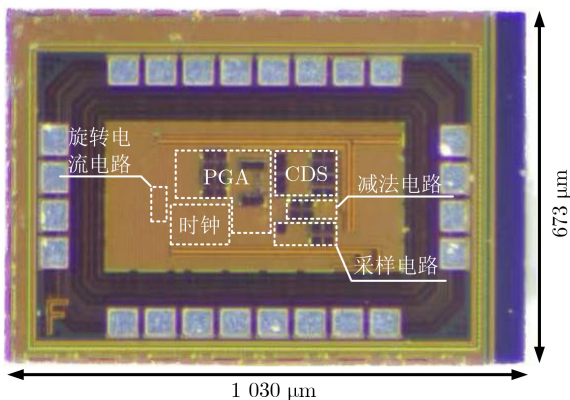


图 13 芯片显微镜照片

路将霍尔传感器的大部分  $V_{off}$  消除，只剩下约 4 mV 的残余失调。

根据测试数据拟合出的线性度图线如图15所示。结果表明，霍尔传感器的线性度良好，参照式(13)中的计算方法，霍尔传感器的非线性误差仅为0.50%。

表4列出了本设计与相关工作的性能参数对比，本文设计的接口电路在功耗、面积和温度系数上具有一定优势。

### 5 结论

本文设计了一种低失调并具有温度补偿功能的磁性传感器接口电路。使用查表法，通过PGA根据温度调节增益对霍尔传感器进行了温漂校准，同时利用CDS电路消除了霍尔传感器大部分的失调电

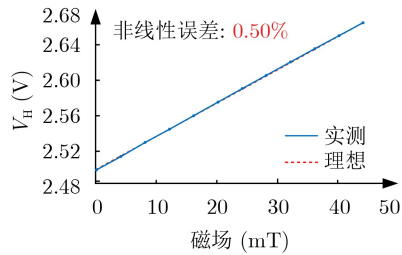


图 15 霍尔传感器线性度拟合图线

表 4 本设计与相关工作性能对比

	本设计	文献[13]	文献[19]	文献[20]
工艺 (nm)	180	180	800	130
电源电压 (V)	5	5~18	5	3~5.5
功耗 (mW)	20.8	—	28	—
面积 (mm <sup>2</sup> )	0.69	5	0.95	1.12
TC (ppm/°C)	58.1	316	—	—

压。整体电路采用180 nm CMOS工艺实现。仿真结果表明，在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ 温度范围内，霍尔传感器的TC从966.4 ppm/°C降低到了58.1 ppm/°C。信号主通路的流片测试结果表明CDS电路将霍尔传感器的失调电压从25 mV左右降低到4 mV左右，霍尔传感器的非线性误差为0.50%。

### 参 考 文 献

- [1] LOZANOVA S V and ROUMENIN C S. Silicon hall-effect multisensor[C]. 2020 XI National Conference with International Participation, Sofia, Bulgaria, 2020: 1–4. doi: [10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305138](https://doi.org/10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305138).
- [2] CRESCENTINI M, SYEDA S F, and GIBIINO G P. Hall-effect current sensors: Principles of operation and implementation techniques[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(11): 10137–10151. doi: [10.1109/JSEN.2021.3119766](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3119766).
- [3] DAS P T, NHALIL H, SCHULTZ M, et al. Detection of low-frequency magnetic fields down to sub-pT resolution with planar-hall effect sensors[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2021, 5(1): 1500104. doi: [10.1109/LSENS.2020.3046632](https://doi.org/10.1109/LSENS.2020.3046632).
- [4] SPINELLI A S, MINOTTI P, LAGHI G, et al. Simple model for the performance of realistic AMR magnetic field sensors[C]. The 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Anchorage, AK, 2015: 2204–2207. doi: [10.1109/TRANSDUCERS.2015.7181398](https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2015.7181398).
- [5] HADJIGEORGIOU N, HRISTOFOROU E, and SOTIRIADIS P P. Closed-loop current-feedback, signal-chopped, low noise AMR sensor with high linearity[C]. The 6th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies, Thessaloniki, Greece, 2017: 1–4. doi: [10.1109/MOCAST.2017.7937679](https://doi.org/10.1109/MOCAST.2017.7937679).
- [6] YAN Shaohua, ZHOU Zitong, YANG Yaodi, et al. Developments and applications of tunneling magnetoresistance sensors[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2022, 27(3): 443–454. doi: [10.26599/TST.2021.9010061](https://doi.org/10.26599/TST.2021.9010061).
- [7] BHASKARRAO N K, ANOOP C S, and DUTTA P K. A novel linearizing signal conditioner for half-bridge-based TMR angle sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 3216–3224. doi: [10.1109/JSEN.2020.3023089](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3023089).
- [8] XU Xiaopeng, LIU Tingzhang, ZHU Min, et al. New small-volume high-precision TMR busbar DC current sensor[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, 56(2): 4000105. doi: [10.1109/TMAG.2019.2953671](https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2953671).
- [9] FU Peiyuan and ZHENG Feng. A new GMR sensor based on gradient magnetic field detection for DC and wide-band current measurement[C]. 2022 IEEE Region 10 Symposium, Mumbai, India, 2022: 1–6. doi: [10.1109/TENSYPMP54529.2022.9864570](https://doi.org/10.1109/TENSYPMP54529.2022.9864570).
- [10] STETCO E M, AUREL POP O, and GRAMA A. Simulation model of a GMR based current sensor[C]. 2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging, Pitesti, Romania, 2020: 17–20. doi: [10.1109/SIITME50350.2020.9292159](https://doi.org/10.1109/SIITME50350.2020.9292159).
- [11] RIPKA P and JANOSEK M. Advances in magnetic field sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(6): 1108–1116. doi: [10.1109/JSEN.2010.2043429](https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2043429).
- [12] HALL E H. On a new action of the magnet on electric currents[J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1880, 9(55): 225–230. doi: [10.1080/14786448008626828](https://doi.org/10.1080/14786448008626828).
- [13] 蔚道嘉. 低噪声线性霍尔传感器的研究与设计[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2020.  
WEI Daojia. Research on and design of low noise linear hall sensor[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2020.
- [14] 胡杏杏. 电流模式的高灵敏度CMOS霍尔传感器研究与实现[D]. [硕士学位论文], 南京邮电大学, 2020.  
HU Xingxing. Research and implementation of high-sensitivity CMOS integrated hall sensor based on the current-mode[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [15] LEI Kameng, MAK P I, and MARTINS R P. A 0.45-V 3.3- $\mu\text{W}$  resistor-based temperature sensor achieving 10mK resolution in 65-nm CMOS[C]. 2021 IEEE International Conference on Integrated Circuits, Technologies and Applications, Zhuhai, China, 2021: 127–128. doi: [10.1109/ICTA53157.2021.9661638](https://doi.org/10.1109/ICTA53157.2021.9661638).
- [16] WANG Bo, LAW M K, and BERMAK A. A BJT-Based CMOS Temperature Sensor Achieving an Inaccuracy of  $\pm 0.45^{\circ}\text{C}$  ( $3\sigma$ ) from  $-50^{\circ}\text{C}$  to  $180^{\circ}\text{C}$  and a resolution-FoM of 7.2 pJ. K<sup>2</sup> at  $150^{\circ}\text{C}$ [C]. 2022 IEEE International Solid-

- State Circuits Conference, San Francisco, USA, 2022: 72–74. doi: [10.1109/ISSCC42614.2022.9731647](https://doi.org/10.1109/ISSCC42614.2022.9731647).
- [17] TANG Zhong, FANG Yun, YU Xiaopeng, *et al.* A 1-V diode-based temperature sensor with a resolution FoM of  $3.1\text{pJ}\cdot\text{K}^2$  in 55nm CMOS[C]. 2021 IEEE Custom Integrated Circuits Conference, Austin, USA, 2021: 1–2. doi: [10.1109/CICC51472.2021.9431564](https://doi.org/10.1109/CICC51472.2021.9431564).
- [18] PAUN M A, SALLESE J M, and KAYAL M. Temperature considerations on Hall Effect sensors current-related sensitivity behaviour[C]. The 19th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems, Seville, Spain, 2012: 201–204. doi: [10.1109/ICECS.2012.6463766](https://doi.org/10.1109/ICECS.2012.6463766).
- [19] CHEN Xiaoqing, XU Yue, XIE Xiaopeng, *et al.* A novel Hall dynamic offset cancellation circuit based on four-phase spinning current technique[C]. 2015 China Semiconductor Technology International Conference, Shanghai, China, 2015: 1–3. doi: [10.1109/CSTIC.2015.7153483](https://doi.org/10.1109/CSTIC.2015.7153483).
- [20] KEIL M, JANSCHITZ J G, and MOTZ M. A Hall effect magnetic sensor with ratiometric output, utilizing a self-regulating chopped amplifier for compensation of offset, temperature and lifetime drift effects[C]. 2022 Austrochip Workshop on Microelectronics, Villach, Austria, 2022: 1–4. doi: [10.1109/Austrochip56145.2022.9940799](https://doi.org/10.1109/Austrochip56145.2022.9940799).
- 樊 华: 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高端传感器芯片设计、高精度数据转换器芯片设计.
- 常伟鹏: 男, 硕士生, 研究方向为集成电路工程.
- 王 策: 男, 硕士, 研究员, 研究方向为集成电路测试.
- 李 国: 男, 硕士, 高级工程师, 副总工程师, 博士生导师, 研究方向为高性能集成电路设计.
- 刘建明: 男, 硕士, 研究方向为集成电路的设计、应用和测试.
- 李宗霖: 男, 硕士, 研究方向为集成电路芯片设计.
- 魏 琦: 男, 博士, 副研究员, 研究方向为MEMS惯性传感器、专用集成电路设计和高性能数据转换器.
- 冯全源: 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为模拟集成电路芯片设计、面向通信的超宽频带多模可编程射频芯片研发等.

责任编辑: 余 蓉