

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306391

适用于霍尔电流传感器的温漂补偿电路设计*

王兰雨 陈红梅 张昊哲

(合肥工业大学微电子设计研究所 合肥 230601)

摘要:霍尔电流传感器中存在的温漂会影响传感器的精度,特别是在极端高温和低温下影响更加明显,这限制了霍尔传感器应用的场合。针对该问题本文设计实现了一种适用于霍尔电流传感器的宽温度范围温漂补偿电路。温漂补偿电路通过将增益补偿与带隙补偿相结合,在霍尔电压放大电路中采用与霍尔元件形状材料均一致的负载电阻,补偿了霍尔元件的温漂误差;同时利用带隙基准电路产生的高低温补偿电流实现对放大器电路的尾电流的温度补偿,使得霍尔电流传感器可以在更宽的温度范围内保持灵敏度稳定。采用GF0.18 μm BiCMOS工艺制程,仿真验证表明,在5 V电源电压下,电路在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的宽温度范围内,灵敏度温漂误差小于0.3%,温漂系数达到35 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。相较于其他温度补偿设计,该设计实现了对霍尔传感器高阶温度误差的补偿,使得霍尔传感器具有更宽的工作温度范围以及更小的温漂误差,且不需要额外的数字处理电路,具有较高的工程应用价值。

关键词:霍尔电流传感器;温漂补偿;增益补偿;带隙补偿

中图分类号: TN98; TN929.52

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 470.4017

Design of temperature drift compensation circuit for Hall current sensor

Wang Lanyu Chen Hongmei Zhang Haozhe

(Institute of VLSI Design, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: The temperature drift in Hall current sensors can affect the accuracy of the sensor, especially in extreme high and low temperatures, which limits the application of Hall sensors. This article designs and implements a wide temperature range temperature drift compensation circuit suitable for Hall current sensors to address this issue. The temperature drift compensation circuit compensates for the temperature drift error of the Hall element by combining gain compensation with bandgap compensation, and using a load resistor that is consistent with the shape and material of the Hall element in the Hall voltage amplification circuit. At the same time, using the high and low temperature compensation current generated by the bandgap reference circuit to achieve temperature compensation for the tail current of the amplifier circuit, the Hall current sensor can maintain sensitivity stability over a wider temperature range. Adopting GF0.18 μm BiCMOS process, simulation verification shows that under a 5 V power supply voltage, the circuit has a wide temperature range of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, a sensitivity temperature drift error of less than 0.3%, and a temperature drift coefficient of 35 ppm/ $^{\circ}\text{C}$. Compared to other temperature compensation designs, this design achieves compensation for high-order temperature errors of Hall sensors, resulting in a wider operating temperature range and smaller temperature drift errors. It does not require additional digital processing circuits and has high engineering application value.

Keywords: Hall current sensor; temperature drift compensation; gain compensation; band gap compensation

0 引言

当今电流传感器在工业中有着广泛的应用^[1-3]。电流传感器有很多种类,如电流互感器、并联电阻器和霍尔电流传感器等。在这些传感器中,霍尔电流传感器具有线性度好、精度高、测量范围宽、输入输出隔离度、寿命长、成本低等优点,被广泛应用于电流测量中^[4-10]。然而,由于霍尔电流传感器中霍尔元件的材料大多采用半导体材料,其载流子浓度与载流子迁移率会受到环境温度影响很大,从而导致霍尔元件的输出电压会随着温度变化,使得霍尔电流传感器的灵敏度温漂大大升高^[11-12]。要使霍尔电流传感器能够在各种环境温度下完成高精度检测,则必须要采用温度补偿的方法来降低霍尔电流传感器的温度漂移。

国内外学者对霍尔电流传感器的温漂补偿都开展过研究^[13-20]。文献[13]提出在霍尔元件回路中串联热敏电阻,使回路电流随温度改变,利用回路电流的温度系数与霍尔元件的温度系数相反,从而抵消掉霍尔元件温度系数带来的温漂,但是实际情况中很难做到热敏电阻的温度系数和霍尔元件温度系数完全一致,这种方法在实际应用中的补偿效果十分有限。文献[14]提出在霍尔电流传感器芯片内部集成一个参考磁线圈,通过该线圈来产生一个连续灵敏度的参考磁场,通过闭环反馈的方式实时对温漂进行补偿。这种方法可以有效地补偿温度漂移误差,但代价是产生较高的电流消耗,以及消耗较多的芯片面积,响应速度也较低,并且该方法并没有考虑参考磁场的温漂。文献[15]提出通过温度传感器采集温度信号与霍尔电压信号送到数字处理电路进行运算,通过算法拟合后将补偿后的信号输出,但这种方法需要额外的温度传感器以及数字处理电路,提高了芯片的功耗和成本。

针对以上霍尔电流传感器温漂补偿方法的不足,本文设计一种新型的霍尔电流传感器温漂补偿电路,通过将增益补偿与带隙补偿相结合,在霍尔电压放大电路中采用与霍尔元件形状材料均一致的负载电阻,补偿了霍尔元件的温漂误差;同时利用带隙基准电路产生的高低温补偿电流实现对放大器电路的尾电流的温度补偿,实现了对霍尔传感器高阶温度误差的补偿,使得霍尔电流传感器可以在更宽的温度范围内保持灵敏度稳定。

1 霍尔电流传感器温漂补偿电路基本原理

1.1 霍尔元件温漂影响因素

霍尔传感器是利用霍尔效应进行电流或者磁场检测的器件^[16]。霍尔效应的基本原理如图1所示,在霍尔元

件的两端施加电压 V_c , 电流 I 流过霍尔元件, 当在垂直方向上施加磁感应强度为 B 的磁场时, 此时霍尔元件中电子会在洛伦兹力的作用下向霍尔元件的一侧积累, 从而在霍尔元件的横向方向上产生电场, 当电子累积产生的电场对电子的作用力与洛伦兹力平衡时, 霍尔元件两侧形成的电势差即为霍尔电压 V_H , 当流过霍尔元件的电流恒定时, 霍尔电压 V_H 表达式为:

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

其中, q 为电子电荷, n 为载流子浓度, d 为霍尔元件厚度, ρ 为霍尔元件电阻率。当霍尔元件两端施加的电压 V_c 恒定时, 霍尔元件的电阻为 $R_H = \rho l/wd$, 则霍尔电压 V_H 可表示为:

$$V_H = \frac{\rho\mu}{dR_H}V_cB = \frac{\mu w}{l}V_cB \quad (2)$$

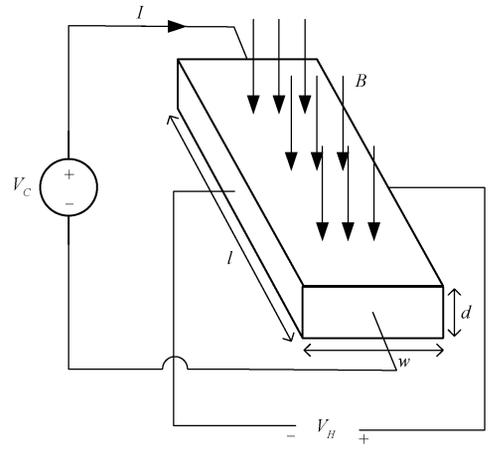


图1 霍尔效应原理

Fig. 1 Hall effect principle

由于霍尔传感器中霍尔元件的材料大多采用半导体材料,其载流子浓度与载流子迁移率受环境温度影响很大,从而导致霍尔元件的输出电压会跟随温度变化,使得霍尔电流传感器的灵敏度温漂大大升高。

由式(1)和(2)可得,霍尔元件无论是处于恒流还是恒压下,其输出霍尔电压 V_H 与载流子迁移率 μ 相关,而载流子迁移率 μ 受到温度与掺杂浓度的影响,进而影响整个霍尔传感器芯片的灵敏度^[17]。图2为霍尔元件在 $V_c = 5\text{ V}$, 施加磁感应强度 B 为 200 G 时,霍尔电压输出 V_H 随温度变化曲线。可以看到,在恒压条件下,霍尔电压的输出与温度呈负相关,且随温度变化的幅度很大,所以必须要进行温度补偿,才能保证霍尔传感器电路可以在不同温度条件下正常工作。

1.2 增益补偿电路原理

在一些传统的霍尔电流传感器温漂补偿方法中,如电阻补偿技术^[13]或电流补偿技术^[18],都是直接对霍尔元

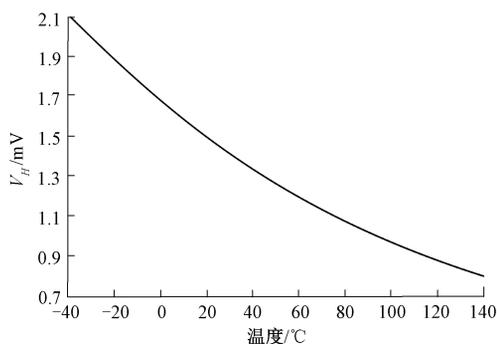


图 2 霍尔电压 V_H 随温度变化曲线

Fig. 2 Hall voltage V_H versus temperature curve

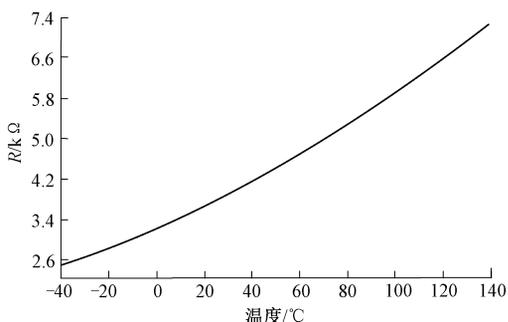


图 4 霍尔元件等效电阻阻值随温度变化曲线

Fig. 4 Curve of equivalent resistance value of Hall element changing with temperature

件输出时的霍尔电压 V_H 进行补偿,然后将补偿后的霍尔电压输入到后级放大器中放大后输出,最使得霍尔电流传感器芯片的输出不随温度变化。这种方法可以将霍尔元件的温漂消除,但是后级放大器的增益会存在一定的温漂,导致最终传感器电路的灵敏度存在温漂误差。

本文首先尝试利用增益补偿的原理消除温漂误差影响,具体实现结构如图 3 所示。霍尔电流传感器的输出为 V_{out} ,其值为霍尔盘产生的霍尔电压 V_H 与后级运算放大器的增益 A 的乘积,只需要让霍尔电压 V_H 随温度变化的趋势和运放增益 A 随温度变化的趋势相反,那么两者的乘积就不随温度变化,从而使输出 V_{out} 的温漂大大降低。

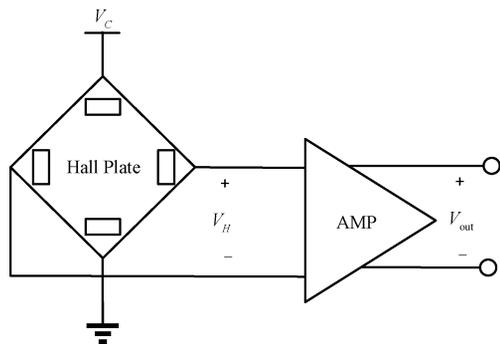


图 3 增益补偿霍尔电流传感器结构

Fig. 3 Structure of gain compensated Hall current sensor

由式(2)可知,在霍尔元件恒压偏置下,霍尔电压的输出 V_H 为负温度系数;图 4 所示为霍尔元件的等效电阻随温度的变化曲线,可以看出随着温度升高而升高,阻抗具有正温度特性;当用该霍尔元件做放大器的负载电阻,则可以得到增益为正温度系数的运放。本文放大电路的负载采用与霍尔元件形状材料均一致,从而使得运放增益的温度系数与霍尔电压的温度系数相互抵消,同时解决了霍尔元件和后级放大器的温漂误差的问题,有效降低了整个霍尔电流传感器放大电路的温漂误差。

本文采用的霍尔电流传感器增益补偿电路的电路图如图 5 所示。电路由霍尔盘和开环运算放大器构成。开环运放的输入对管(Q1 和 Q2)为三极管,可有效降低电路本身带来的噪声;运放的负载电阻为与霍尔盘形状材料均一致的负载电阻,则该运放的增益可表示为:

$$A_v = g_m \cdot 2R_H \tag{3}$$

联立式(2),则霍尔电流传感器的输出 V_{out} 为:

$$V_{out} = V_H \cdot A_v = \frac{2\rho\mu}{d} V_C B \cdot g_m \tag{4}$$

由式(4)可得,霍尔电流传感器电路的输出与霍尔元件的等效电阻无关,而霍尔元件的电阻率 ρ 与载流子迁移率 μ 的温度系数相反,在一定温度范围内相互抵消,只要保证三极管的跨导 g_m 不随温度变化,就能使霍尔电流传感器的输出 V_{out} 不随温度变化。三极管的跨导 g_m 可表示为:

$$g_m = \frac{I_{bias} q}{kT} \tag{5}$$

由式(5)可知,若要使三极管的跨导与温度无关,则必须通过调节电流 I_{bias} ,使之与温度成正比,消除温度参数。由图 4 所示的增益温漂补偿的电路中,运放的尾电流 I_{bias} 是利用带隙原理产生的与温度成正比的 I_{PTAT} 电流,其大小设为 αT (α 为常数),此时三极管跨导为:

$$g_m = \frac{I_{bias} q}{kT} = \frac{\alpha T q}{kT} = \frac{\alpha q}{k} \tag{6}$$

由式(6)可得,此时三极管的跨导与温度无关,传感器的输出 V_{out} 为:

$$V_{out} = \frac{2\rho\mu}{d} V_C B \cdot g_m = \frac{2\rho\mu\alpha q}{dk} V_C B \tag{7}$$

由式(7)可看出此时霍尔电流传感器输出电压的相关参数中,只有电阻率 ρ 与载流子迁移率 μ 与温度相关,且它们的温度系数相反,在一定温度范围内可相互抵消,其他参数均与温度无关,这有效减小了霍尔电流传感器输出的温漂误差。

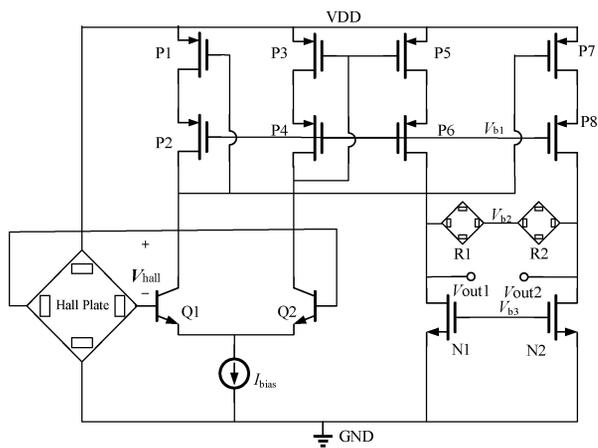


图5 增益补偿霍尔电流传感器电路

Fig. 5 Circuit diagram of gain compensated Hall current sensor

1.3 带隙补偿电路原理

由增益补偿的原理可知,当运放的尾电流与绝对温

度成正比时,三极管的跨导与温度无关,又因为霍尔元件电阻率 ρ 与载流子迁移率 μ 的温度系数相反,电阻率 $\rho \propto T$, 载流子迁移率 $\mu \propto -T$, 所以它们的乘积 $\rho\mu \propto -T^2$, 在温度范围较小时,其温漂误差相互抵消,霍尔电流传感器的输出温漂误差很小;而当温度范围比较大时,当温度处于低温或者高温时,其温漂误差又会变得很大,所以必须分别对高温和低温部分分别进行补偿。

由于电阻率与载流子迁移率的乘积 $\rho\mu \propto -T^2$, 所以当温度处于低温和高温时,霍尔电流传感器的输出会相对偏小。为了补偿这部分的温漂误差,可以在低温和高温时使运放的增益变得偏大,而这可以通过补偿尾电流源 I_{bias} 来实现。本文基于带隙补偿的原理,设计了如图6所示的尾电流源补偿电路,实现了对电流 I_{bias} 的高低温度补偿,进而使整个霍尔电流传感器的工作温度范围进一步扩大。

图6所示的 I_{bias} 电流补偿电路包括3个部分,分别是PTAT电流生成电路、高温补偿电路和低温补偿电路。

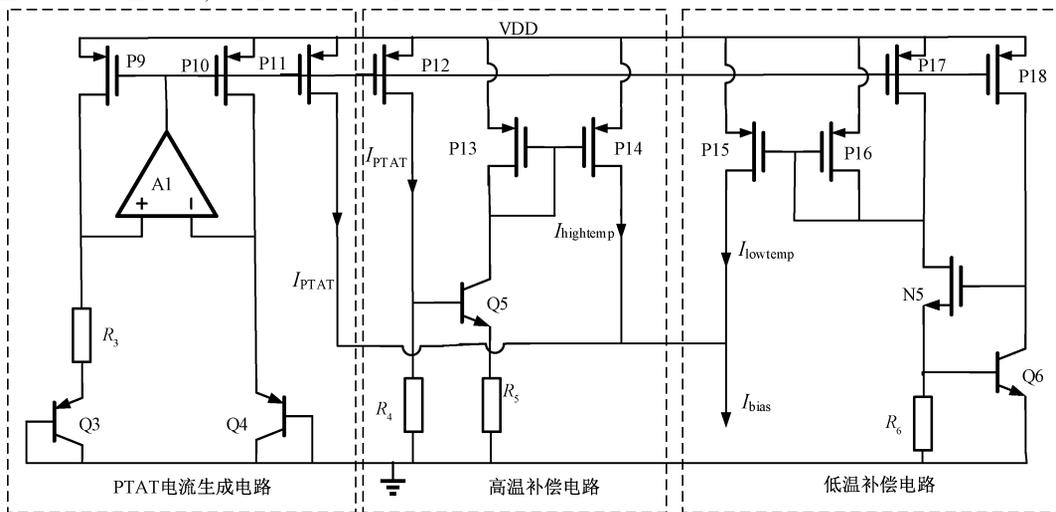


图6 本文提出的 I_{bias} 电流补偿电路

Fig. 6 The I_{bias} current compensation circuit proposed in this paper

PTAT 电流生成电路由三极管 Q3 和 Q4、电阻 R_3 、放大器 A1, PMOS 管 P9~P11 组成。当电源电压上电后,运放 A1 的输入端被钳位,两端电压相等,又由于三极管 Q3 与 Q4 的并联比例为 1 : 8, 所以 R_3 上的电压为 ΔV_{BE} , 且该电压为 PTAT 电压, 流过 R_3 的电流即为 PTAT 电流, 其值为:

$$I_{PTAT} = \frac{\Delta V_{BE}}{R_3} = 2V_T \ln 8 / R_3 \quad (8)$$

生成的 I_{PTAT} 电流的大小可通过 R_3 来控制, 该电流通过电流镜分别复制到高温补偿电路和低温补偿电路, 通过其他电路功能分别产生高温补偿电流和低温补偿电流。

高温补偿电路由三极管 Q5、PMOS 管 P12~P14、电阻 R_4 和 R_5 组成; PTAT 电流通过电流镜复制到 P12 的漏极, 该电流通过 R_4 后, 会在 Q5 的基极产生一个 PTAT 电压。当温度处于高温时, Q5 基极电压大于阈值电压时便会导通, 会在集电极产生高温补偿电流 $I_{hightemp}$, 该高温补偿电流通过 P13 和 P14 组成的电流镜复制到输出端, 高温补偿电流的 $I_{hightemp}$ 大小可通过 R_5 来控制。当温度处于低温时, Q5 的基极电压小于阈值电压, Q5 不导通, 高温补偿电路不工作。

低温补偿电路由三极管 Q6, PMOS 管 P15~P18, NMOS 管 N5, 电阻 R_6 组成; PTAT 电流通过电流镜复制到 P17 的漏极, 当温度较低时, P18 的漏极为高电位, 此

时 N5 导通,此时流经 R_6 的电流大小为 V_{BE6}/R_6 ,由于 V_{BE6} 为负温度系数电压,所以该电流为负温度系数电流。因为流经 N5 漏极的电流有两支,其中一支为 P17 的漏极电流,该电流为 αI_{PTAT} , α 为电流镜的镜像比例。流经 N5 源极的电流大小为 V_{BE6}/R_6 ,流经 N5 漏极的另一支电流即为低温补偿电流 $I_{lowtemp}$,其值为:

$$I_{lowtemp} = \frac{V_{BE6}}{R_6} - I_{PTAT} \quad (9)$$

低温补偿电流 $I_{lowtemp}$ 通过 P15 和 P16 组成的电流镜复制到输出端,该电流大小可通过 $R6$ 来控制。当温度处于高温时,Q6 的基极电压增大,此时 Q6 导通,Q6 的集电极被拉低到低电位,此时 N5 关断,低温补偿电路不工作。

PTAT 电流 I_{PTAT} 、高温补偿电流 $I_{hightemp}$ 和低温补偿电流 $I_{lowtemp}$ 3 个电流共同输出,组成运放的尾电流 I_{bias} ,在补偿后的尾电流 I_{bias} 的作用下,霍尔电流传感器电路的温漂误差进一步降低,可在更宽的温度范围内应用。

2 电路仿真与分析

为了验证本文提出的霍尔电流传感器温漂补偿电路设计,采用了 GF0.18 μm BiCMOS 工艺对整个霍尔电流传感器电路进行版图设计并进行后仿真验证。霍尔电流传感器电路版图如图 7 所示。

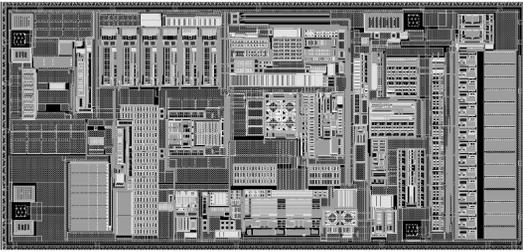


图 7 应用本文温度补偿设计的霍尔电流传感器电路版图
Fig. 7 Circuit layout of Hall current sensor designed using temperature compensation in this paper

通过合理设定 R_6 的阻值,使低温补偿电路约在 6 $^{\circ}\text{C}$ 时关断;设定 R_4 的阻值,使高温补偿电路约在 80 $^{\circ}\text{C}$ 时开启。高温补偿电流 $I_{hightemp}$ 和低温补偿电流 $I_{lowtemp}$ 随温度变化的曲线如图 8 所示;无高低温补偿的电流 I_{PTAT} 与有高低温补偿的电流 I_{bias} 随温度变化的曲线如图 9 所示,仿真结果显示,高低温补偿电路会在 6 $^{\circ}\text{C}$ 以下以及 80 $^{\circ}\text{C}$ 以上的温度范围内对运放电路尾电流有额外的电流补偿。

霍尔电流传感器灵敏度(SENS)表达式为:

$$SENS = \frac{V_{out} - V_{REF}}{B} \quad (10)$$

其中, B 为施加磁场的磁感应强度, V_{out} 为在相应磁

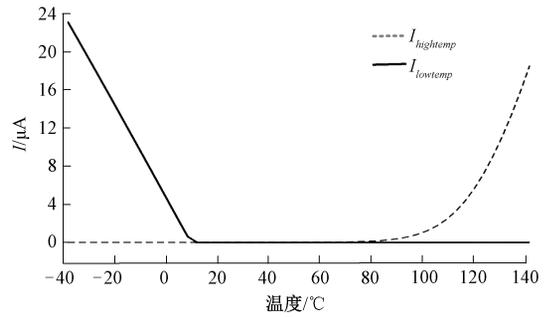


图 8 高温补偿电流与低温补偿电流随温度变化曲线
Fig. 8 Temperature dependent curve of high temperature compensation current and low temperature compensation current

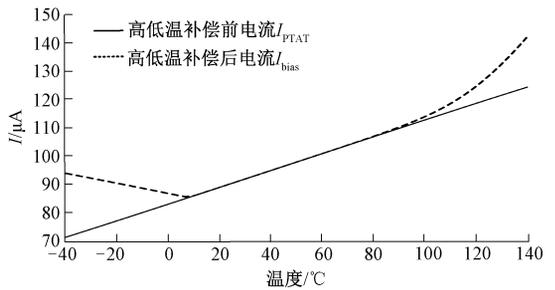


图 9 高低温补偿前后的尾电流随温度变化曲线
Fig. 9 Temperature dependence curve of tail current before and after high and low temperature compensation

感应强度下霍尔电流传感器的输出, V_{REF} 为磁感应强度为 0 时的输出。

霍尔电流传感器灵敏度温漂系数 (TC_{SENS}) 表达式为:

$$TC_{SENS} = \frac{SENS_{MAX} - SENS_{MIN}}{SENS_{T0} (T_{MAX} - T_{MIN})} \quad (11)$$

其中, $SENS_{MAX}$ 和 $SENS_{MIN}$ 分别为最大和最小灵敏度, $SENS_{T0}$ 为 27 $^{\circ}\text{C}$ 时的灵敏度, T_{MAX} 和 T_{MIN} 分别表示最大和最小温度。

在电源电压为 5 V,施加磁场幅值为 200 G 时,当霍尔电流传感器不做任何温度补偿时,其灵敏度温漂如图 10 所示。可见在 -40 $^{\circ}\text{C}$ 时,传感器的灵敏度最大,为 10.921 mV/G;在 140 $^{\circ}\text{C}$ 时,传感器的灵敏度最小,为 7.174 mV/G。以 27 $^{\circ}\text{C}$ 时的灵敏度为基准,不做任何补偿措施的霍尔电流传感器的温漂在 -20% ~ 23% 之间,温漂系数为 2338 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

在电源电压为 5 V,施加磁场幅值为 200 G 时,只做了增益补偿和做了增益补偿+带隙补偿霍尔电流传感器的灵敏度温漂曲线如图 11 所示。后仿真结果显示,当霍尔电流传感器只采用增益补偿时,在 -40 $^{\circ}\text{C}$ 时,传感器的灵敏度最小,为 8.61 mV/G;在 50 $^{\circ}\text{C}$ 时,传感器的灵敏度

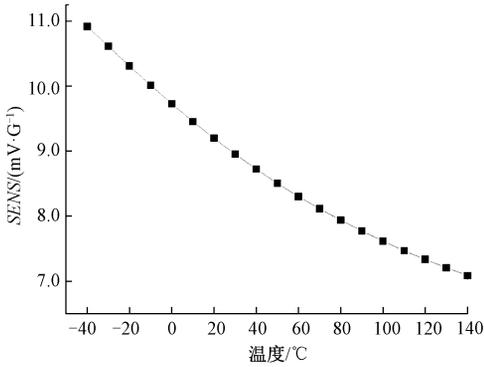


图 10 无任何补偿电路的霍尔电流传感器灵敏度温漂曲线
Fig. 10 Sensitivity temperature drift curve of Hall current sensor without any compensation circuit

达到最大,为 8.89 mV/G,此时霍尔电流传感器的温漂在 $-2\% \sim 1\%$ 之间,温漂系数为 150 ppm/°C,相较于无补偿地霍尔电流传感器,温漂被极大地减小。当霍尔电流传感器采用增益补偿+带隙补偿的方法时,在 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时,传感器的灵敏度最小,为 8.85 mV/G;在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时,传感器的灵敏度达到最大,为 8.89 mV/G,此时霍尔电流传感器的温漂在 $-0.1\% \sim 0.3\%$ 之间,温漂系数为 35 ppm/°C,相较于只做了增益补偿的霍尔电流传感器,温漂进一步被极大地减小,温漂性能提高 76%。

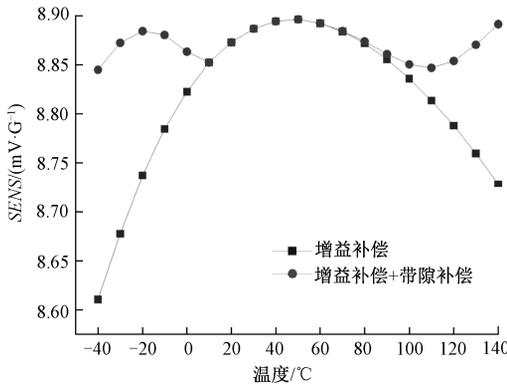


图 11 只做增益补偿的灵敏度温漂曲线与增益补偿+带隙补偿后的灵敏度温漂曲线
Fig. 11 Sensitivity temperature drift curve for gain compensation only and sensitivity temperature drift curve for gain compensation & band gap compensation

为了验证该温度补偿电路能够在不同幅值的磁场条件下也拥有良好的温度补偿效果,通过施加不同幅值的磁场,分别仿真验证只做增益补偿与增益补偿+带隙补偿后的霍尔电流传感器的灵敏度,仿真结果如图 12 和 13 所示。可以看到,随着所施加磁场的幅值逐渐增大,在两种补偿结构下的霍尔电流传感器的输出也同时增大,对

应的温漂误差幅值也随之增大,但温漂幅值与霍尔传感器的输出之比仍保持不变。以 $27\text{ }^\circ\text{C}$ 时的输出电压为参考,只做增益补偿的霍尔电流传感器的温漂为 1.5%,温漂系数在不同磁场下仍在 150 ppm/°C 左右。增益补偿+带隙补偿后的霍尔电流传感器的温漂为 0.3%,温漂系数在不同磁场下仍为 35 ppm/°C。

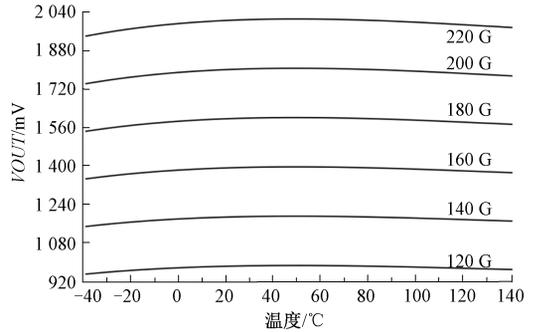


图 12 只做增益补偿的霍尔电流传感器在不同幅值磁场下的输出
Fig. 12 Output of Hall current sensors with only gain compensation under different amplitude magnetic fields

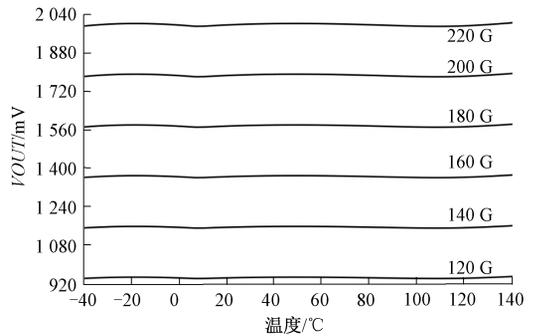


图 13 增益补偿+带隙补偿后的霍尔电流传感器在不同幅值磁场下的输出
Fig. 13 Output of Hall current sensors with gain compensation & band gap compensation under different amplitude magnetic fields

霍尔电流传感器芯片的测试验证平台如图 14 所示。流片后的霍尔传感器芯片被装在一个被导线贯穿的特制塑胶外壳中,通过在导线中通过不同大小的电流,由于电流的磁效应,即可在霍尔电流传感器芯片上产生不同大小的磁场。测试电流由外部电流源输入,将示波器接到芯片的输出引脚即可得到此时霍尔电流传感器的输出。

以常温 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的输出为基准,测量不同温度下的霍尔电流传感器芯片输出的温漂电压如图 15 所示。可以看到,随着外部磁场的增加,温漂电压也会随之增加,这是由于霍尔传感器的输出与磁场大小成线性关系,而在不同磁场下,温漂的大小相对于霍尔电流传感器的输出

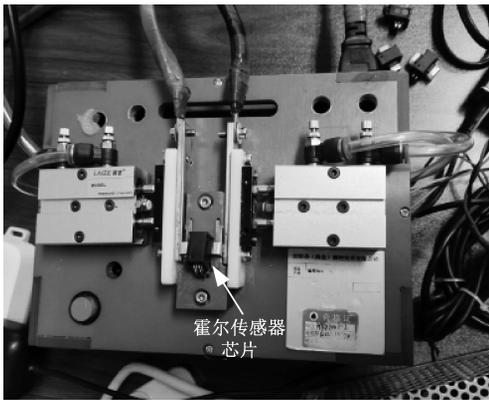


图 14 霍尔电流传感器测试验证平台

Fig. 14 Hall current sensor testing and verification platform

是几乎保持不变的。由测试结果可以看到,霍尔电流传感器在-40℃、40℃和100℃这几个点的温漂相对较大,但计算后的灵敏度温漂仍然保持在±0.3%以内,并且温漂大小随温度变化的趋势与仿真结果一致,从而验证了本文霍尔传感器温漂补偿方法的有效性。

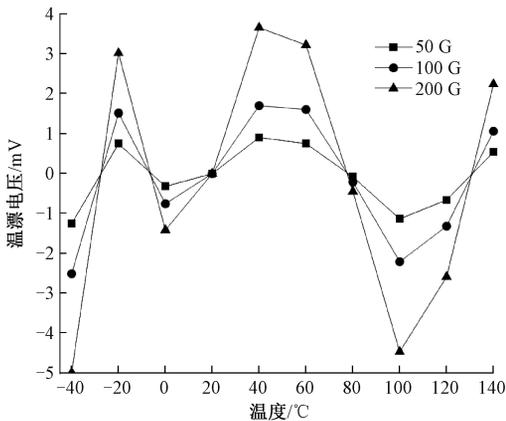


图 15 霍尔电流传感器的温漂测试

Fig. 15 Test and verification of temperature drift of Hall current sensor

本文与其他文献中霍尔电流传感器的参数对比如表 1 所示。可以看出,在电路工作温度范围、温度系数度、灵敏度温漂方面,应用本文温漂补偿设计的霍尔电流传感器电路性能均有较大提升。

表 1 本文与其他文献霍尔电流传感器的性能对比

Table 1 Comparison of the performance of Hall current sensors with other literature

参数	[13]	[19]	[20]	本文
电源电压/V	3.3	5	5	5
温度范围/℃	-40-125	-40-85	-40-125	-40-140
温度系数/(ppm/℃)	76	68	-	35
灵敏度温漂	1%	0.7%	0.6%	0.3%

3 结 论

本文设计了一种适用于霍尔电流传感器的宽温度范围温漂补偿电路。温漂补偿电路通过将增益补偿与带隙补偿相结合,在霍尔电压放大电路中采用与霍尔元件形状材料均一致的负载电阻,补偿了霍尔元件的温漂误差;同时利用带隙基准电路产生的高低温补偿电流实现对放大器电路的尾电流的温度补偿,实现对霍尔电流传感器高阶温度误差的补偿,使得霍尔电流传感器可以在更宽的温度范围内保持灵敏度稳定。仿真和测试结果显示,在 5 V 电源电压下,电路在-40℃~140℃的温度范围内,灵敏度温漂小于 0.3%,温漂系数达到 35 ppm/℃。相较于其他温度补偿设计,本文的温度补偿设计在对整体电路进行温度补偿的基础上,又针对极端高低温的情况对电路做了二次补偿,使得霍尔传感器具有更宽的工作温度范围以及更小的温漂误差。本文的温度补偿设计不需要额外的数字处理电路,这降低了芯片的成本和复杂度,具有较高的工程应用价值。

参考文献

[1] 严加斌,朱峰,李军,等. 高速动车组速度传感器的电磁干扰测试与分析[J]. 电子测量与仪器学报,2015, 29(3):433-438.
 YAN J B,ZHU F,L I J,et al. Electromagnetic interference measurement and analysis of high-speed electric multiple units speed sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (3) : 433-438.

[2] 肖国焘,徐志伟,黄伟,等. 基于 LabVIEW 的变体机翼控制系统研究[J]. 国外电子测量技术,2014,33(5) : 80-85.
 XIAO G T,XU ZH W,HUANG W,et al. Research on control system of a morphing wing based on LabVIEW[J]. Metrology & Measurement Technique,2014,33 (5) : 80-85.

[3] MOUSMI A,ABBOU A,HOUM Y E. Binary diagnosis of Hall effect sensors in brushless DC motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(4) : 3859-3868.

[4] 王冰,蒋磊,宋福明,等. 30 kA 闭环式集成霍尔电流传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(11): 188-193.
 WANG B,JIANG L,SONG F M,et al. 30 kA closed-loop integrated Hall current sensor design [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(11):188-193.

[5] 李雪洋,李岩松,刘君. 对称式闭环霍尔电流传感器研究与设计[J]. 电子测量与仪器学报,2022, 36(8):

- 69-76.
- LI X Y, LI Y S, LI J. Symmetrical closed-loop Hall current sensor research and design [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8):69-76.
- [6] TANG Y, ZHU F. Measurement and suppression of electromagnetic interference to speed sensor of CRH380BL electric multiple unit [C]. International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium in China. IEEE, 2017.
- [7] LIANG L, ZHENZE L, LILI C, et al. Research on wearable lower limbs control system based on LabVIEW [C]. 2020 International Conference on Intelligent Computing and Human-Computer Interaction (ICHCI). IEEE, 2020; 10-16.
- [8] SUN C, WEN Y, PING L, et al. Self-contained wireless Hall current sensor applied for two-wire zip-cords [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7):1-4.
- [9] AUSSERLECHNER U, MOTZ M, HOLLIBER M. Compensation of the Piezo-Hall effect in integrated Hall sensors on (100)-Si [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(11):1475-1482.
- [10] 武旭, 王林森, 居鹏. 闭环霍尔电流传感器的硬件电路设计 [J]. 传感器与微系统, 2018, 37(11):73-76.
- WU X, WANG L S, JU P. Hardware circuit design of closed-loop Hall current sensor [J]. Sensors and Microsystems, 2018, 37(11):73-76.
- [11] 李平, 赵仁涛, 铁军, 等. 金属水溶液电解电极电流在线测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6):253-260.
- LI P, ZHAO R T, TIE J, et al. An on-line measurement method for electrode current of metal aqueous solution electrolysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6):253-260.
- [12] HEIDARI H, BONIZZONI E, GATTI U, et al. A 0.18 μm CMOS current-mode Hall magnetic sensor with very low bias current and high sensitive front-end [C]. Sensors, 2014 IEEE. IEEE, 2014; 1467-1470.
- [13] MO S, WEI R, ZENG Z, et al. A multiple-sensitivity Hall sensor featuring a low-cost temperature compensation circuit [J]. Microelectronics Journal, 2021, 113:105067.
- [14] AJBL A, PASTRE M, KAYAL M. A fully integrated Hall sensor microsystem for contactless current measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(6):2271-2278.
- [15] 国旗, 傅鹏, 蒋力. 霍尔传感器温度温漂补偿电路设计 [J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(4):129-132.
- GUO Q, FU P, JIANG L. Design of temperature compensation for Hall sensor [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(4):129-132.
- [16] LIU B, SUN Y, DING Y, et al. Low-power and high-sensitivity system-on-chip Hall effect sensor [C]. 2017 IEEE Sensors. IEEE, 2017: 1-3.
- [17] YOSHIKAWA A, TADOKORO D, YAMAGUCHI Y, et al. Magnetic field sensitivity of poly-Si Hall device improved by high voltage application [C]. 2014 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK). IEEE, 2014: 1-2.
- [18] MOTZ M, AUSSERLECHNER U, BRESCH M, et al. A miniature digital current sensor with differential Hall probes using enhanced chopping techniques and mechanical stress compensation [C]. IEEE Sensors. IEEE, 2012.
- [19] GIRGIN A, BILMEZ M, AMIN H Y, et al. A silicon Hall sensor SoC for current sensors [J]. Microelectronics Journal, 2019, 90: 12-18.
- [20] HUBER S, LETEN W, ACKERMANN M, et al. A fully integrated analog compensation for the piezo-Hall effect in a CMOS single-chip Hall sensor microsystem [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 15(5):2924-2933.

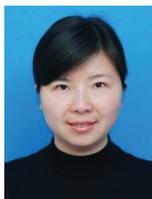
作者简介



王兰雨, 2020 年于合肥工业大学获得集成电路设计与集成系统学士学位, 现为合肥工业大学在读硕士, 主要研究方向为混合信号电路设计。

E-mail: 1169509802@qq.com

Wang Lanyu received the B. Sc. degree in Integrated Circuit Design and Integrated System from Hefei University of Technology in 2020. He is now a M. Sc. candidate in Circuits and Systems from Hefei University of Technology. His main research interest includes mixed signal circuit design.



陈红梅 (通信作者), 2008 年于华中科技大学获得电子科学与技术学士学位, 2011 年于华中科技大学获得微电子学与固体物理学硕士学位, 2017 年于中国科学技术大学获得电路与系统博士学位, 现为合肥工业大学讲师, 主要研究方向为 CMOS 混合信号

电路、A/D 和 D/A 转换器、传感器接口。

E-mail: hmchen@hfut.edu.cn

Chen Hongmei (Corresponding author) received her B. Sc. degree in Electronic Science and Technology in 2008 and the M. Sc. degree in Microelectronics and Solid State Electronics in 2011, both from Huazhong Science & Technology University. She received the Ph. D. degree in Circuits and Systems at University of Science & Technology of China in 2017. She is now a lecturer with the Hefei university of technology. Her main research interests include CMOS mixed-signal circuits, A/D and D/A converters, and sensor interface.