

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.12.006

一种用于霍尔传感器的可编程增益放大器

张昊哲^{1,2}, 陈红梅^{1,2}, 范凯欣^{1,2}, 尹勇生^{1,2}

(1. 合肥工业大学 微电子设计研究所, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 教育部 IC 设计网上合作研究中心, 安徽 合肥 230601)

摘要: 文章设计一种用于霍尔传感器的高线性可编程增益放大器(programmable gain amplifier, PGA)。该 PGA 采用两级结构: 第 1 级为增益可变的基于对称型跨导放大器的开环放大器, 可实现增益控制与较高的响应速度; 第 2 级为仪表放大器, 可实现极高的共模抑制比(common-mode rejection ratio, CMRR)。为实现 $-40\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内稳定的增益, 采用霍尔器件作为第 1 级的负载, 利用霍尔器件的正温度电阻特性对霍尔电压的负温度系数进行补偿, 并引入高阶温度补偿, 使得高温段和低温段的灵敏度温漂进一步降低; 为适应较宽的检测范围, 设计可通过单引脚编程的熔丝修调电路来调节 PGA 的增益, 并在 GF 180 nm BiCMOS 工艺下完成整体电路的设计与仿真。后仿结果表明: PGA 的增益可调范围为 46.4~65.5 dB, 灵敏度可调范围为 1.5~15.8 mV/G; 在 $-40\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工作温度范围内, 灵敏度的线性误差小于 0.40%, 温度漂移小于 0.30%。

关键词: 可编程增益放大器(PGA); 温度补偿; 高线性度; 霍尔传感器

中图分类号: TN433 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)12-1615-06

A programmable gain amplifier for Hall sensor

ZHANG Haozhe^{1,2}, CHEN Hongmei^{1,2}, FAN Kaixin^{1,2}, YIN Yongsheng^{1,2}

(1. Institute of VLSI Design, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. IC Design Web-cooperation Research Center of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: This work presents a high linearity programmable gain amplifier(PGA) for Hall sensor. The PGA contains a two-stage structure; the first stage is an open-loop programmable amplifier based on symmetrical operational transconductance amplifier, which enables gain control and high response speed; the second stage is an instrumentation amplifier, which achieves extremely high common-mode rejection ratio(CMRR). To achieve a constant gain over a wide temperature range of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, the resistance of Hall devices with a positive temperature coefficient is used as the loads of the first stage to compensate for the temperature variation of input signal from Hall plates, and a high-order temperature compensation is introduced to further reduce the temperature drift of sensitivity at high and low temperature ranges. To accommodate a wide input signal range, a single-pin programmable fuse trimming circuit is introduced to adjust the gain of the PGA. This work was designed and simulated in GF 180 nm BiCMOS process. The post-simulation results show that the gain range of PGA is from 46.4 dB to 65.5 dB, and the range of the sensitivity can be controlled from 1.5 mV/G to 15.8 mV/G. The linearity error is below 0.40% and the temperature drift of sensitivity is below 0.30% in the operation temperature range of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: programmable gain amplifier(PGA); temperature compensation; high linearity; Hall sensor

收稿日期:2023-05-01;修回日期:2023-08-31

基金项目:安徽省重点研究与开发计划资助项目(202104g01020008)

作者简介:张昊哲(1999—),男,山东泰安人,合肥工业大学硕士生;

陈红梅(1986—),女,湖北咸宁人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:hmchen@hfut.edu.cn.

随着汽车工业与精密仪表的不断发展,霍尔传感器因具有良好的精度与线性度、检测端与输出端高度隔离、低功耗以及易于集成等优点而得到广泛的应用。霍尔传感器分为开环式和闭环式,相较于闭环式霍尔传感器,开环式霍尔传感器不需要额外的线圈以及驱动它的高功率放大器,因此具有更低的功耗、更小的尺寸、更低的成本、更广的检测范围。但传统的开环式霍尔传感器存在精度线性度较差、响应速度较慢、温漂较大等一系列问题,严重限制开环霍尔传感器的性能^[1-4]。

霍尔传感器电路的系统框图如图 1 所示。其中可编程增益放大器(programmable gain amplifier, PGA)对霍尔盘感测磁场输出的小信号进行线性放大,但是霍尔盘输出的霍尔电压受温度影响大,导致霍尔传感器灵敏度出现温度漂移。近年来,针对这一问题提出了几种解决方案。文献[5]提出在霍尔元件的回路中串联一个热敏电阻,使回路电流随温度变化,且回路电流的温度系数与霍尔元件的温度系数相反,以抵消霍尔元件温度系数引起的温度漂移;然而在实际生产中,串联热敏电阻的温度系数与霍尔元件的温度系数很难保证完全一致,使得温度漂移补偿的效果非常有限。文献[6]提出在霍尔传感器芯片内部集成一个磁线圈,产生一个基准磁场,从而可以更准确地补偿温度漂移误差;但代价是产生更高的功耗和占用更大的芯片面积。文献[7]提出将温度传感器采集的温度信号和霍尔电压信号送入数字处理电路进行计算,算法拟合后输出补偿信号;但这种方法需要额外的温度传感器和数字处理电路。文献[8]提出一种对前端读出电路进行增益补偿的方案,使得前端读出放大器增益的温度系数与霍尔电压的温度系数相互抵消,从而实现较宽温度下的稳定增益。

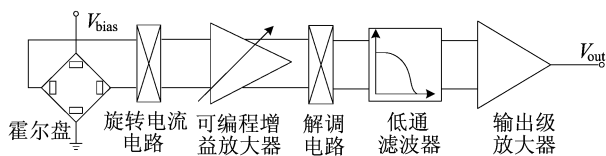


图 1 霍尔传感器系统框图

本文设计一种用于霍尔传感器的带有温度补偿与熔丝修调的 PGA。该 PGA 为两级结构:第 1 级为增益可调级,采用跨导放大器级联比例电流镜的结构,跨导放大器的跨导与其尾电流相关,因此可以通过补偿尾电流来调整跨导,采用与

霍尔盘形状和材料相同的霍尔元件作为第 1 级放大器的负载电阻,利用霍尔元件阻值的正温度系数抵消霍尔盘输出的霍尔电压的负温度系数,同时采用高阶温度补偿对放大器尾电流源的高低温进行补偿,进一步保证霍尔传感器电路在宽温度范围内灵敏度稳定;第 2 级为固定增益级,提供较高的增益放大倍数和较高的共模抑制比。

1 带温度补偿的可编程增益放大器

近年来人们对不同 PGA 拓扑结构进行了广泛研究,如基于反馈电阻网络的闭环 PGA^[9]、跨导可变的 PGA^[10]、负载可变的 PGA^[11] 以及基于对称型跨导放大器的开环 PGA^[12] 等。其中,基于对称型跨导放大器的开环 PGA 可以实现高响应速度,并在增益变化时能保证带宽的稳定性,且相较于密勒型跨导放大器,其结构更加对称,因此具有更好的匹配性,能提供更好的失调和共模抑制比(common-mode rejection ratio, CMRR)特性。

1.1 可编程增益放大器 PGA 的设计

本文设计的 PGA 为两级结构,如图 2 所示。第 1 级为开环对称型跨导放大器,可实现增益的调整,同时其带宽不受增益改变的影响;第 2 级为闭环仪表放大器,可实现极高的 CMRR 和强大的带载能力。

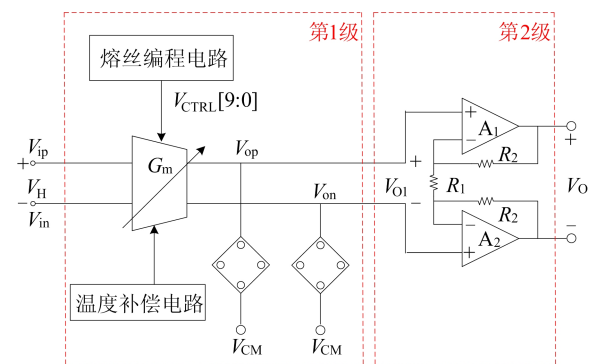


图 2 可编程增益放大器 PGA 系统架构

第 1 级的具体结构如图 3 所示,输入级采用比 MOS 晶体管线性度更好、闪烁噪声更低的双极型晶体管 Q_1 和 Q_2 。此外,引入射极负反馈电阻以提高开环 PGA 的线性度。双极晶体管的等效跨导 G_m 的表达式为:

$$G_m \cong \frac{g_m}{1 + g_m R_E} \quad (1)$$

其中: R_E 为射极负反馈电阻; g_m 为双极晶体管的跨导。 R_E 越大,射极负反馈越强, G_m 线性度越高,但 G_m 的值越小,因此 R_E 值需要两者兼顾,本

文设计中取 R_E 值为 $2.5\text{ k}\Omega$ 。

串联比例电流镜 $M_{1a}, M_{1b}, \dots, M_{1n}, M_{1b}$ 提供一个电流因子 M , 此时流过作为放大器负载的霍尔电阻 R_{LOAD} 的小信号电流为 M 倍的 i_c , 因此第 1 级增益表达式为:

$$A_{V1} = G_m R_m = G_m (MR_{LOAD}) = \frac{g_m (MR_{LOAD})}{1 + g_m R_E} \quad (2)$$

其中: G_m 为第 1 级放大器的等效跨导; R_m 为第 1 级放大器的等效负载。为适应宽输入检测范围, 第 1 级增益可通过 10 位数字逻辑信号 $V_{CTRL}[9:0]$ 控制各支路电流镜的开启与关断, 进而调节比例系数 M 来实现调节。

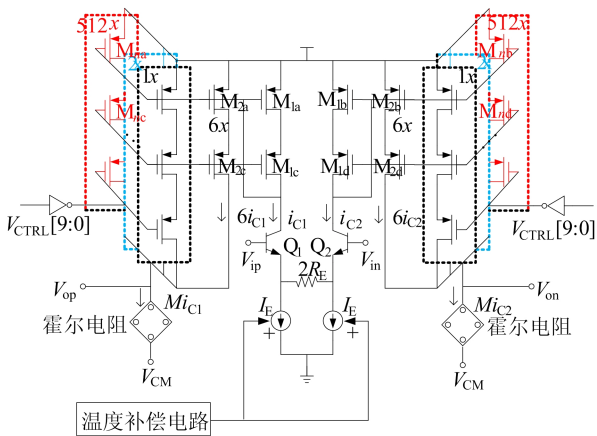


图 3 第 1 级电路结构

本设计中 PGA 的第 2 级结构如图 4 所示, 它是一个典型的仪器放大器结构, 具有高输入阻抗、低输出阻抗、精确的增益以及极高的 CMRR。

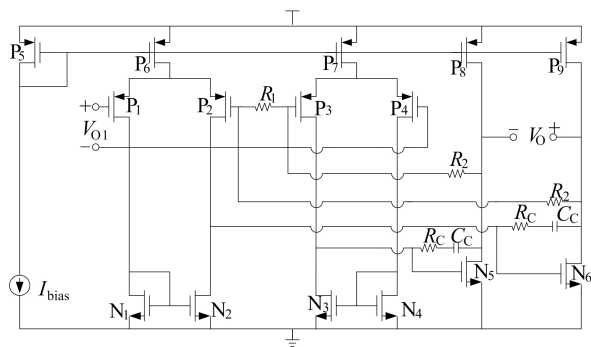


图 4 第 2 级电路结构

图 2 中的运放 A_1 和 A_2 都采用了常见的二级密勒补偿运放结构, 可以同时确保高增益和宽输出摆幅。第 2 级的增益可以表示为:

$$A_{V2} = 1 + 2R_2/R_1 \quad (3)$$

其中, R_2/R_1 在本文中设定为 10, 这样既能保

证增益, 也能确保足够的带宽。

1.2 温度补偿电路设计

霍尔盘的温漂和双极晶体管的 g_m 随温度的变化会极大影响电流传感器的测量精度, 因此在本设计中使用一个正温度系数的电阻作为负载, 以抵消霍尔盘输出霍尔电压 V_H 负温度系数的温度漂移, 并使用额外的高低温度补偿电路来补偿第 1 级放大器的尾电流源, 以实现双极晶体管的恒定跨导, 具体实现如下。

霍尔盘在恒定电压 V_{bias} 偏置下的霍尔电压 V_H 可以表示为:

$$V_H = \omega V_{bias} \mu_n / l \quad (4)$$

其中: ω 为霍尔元件的宽度; l 为霍尔元件的长度; μ_n 为载流子迁移率。由于载流子迁移率 μ_n 与温度呈负相关, 霍尔板在恒定电压 V_{bias} 下的输出电压 V_H 与温度呈负相关, 如图 5 所示。

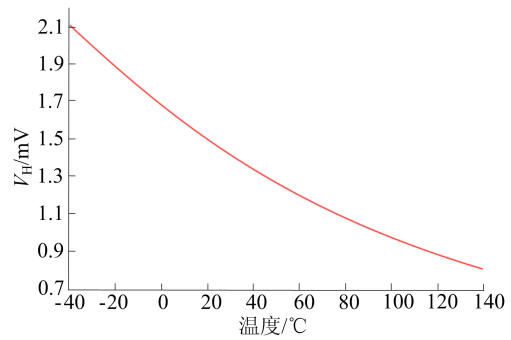


图 5 霍尔电压 V_H 随温度变化的曲线

在此工艺下, 霍尔元件的电阻可以表示为:

$$R_H = 1/(\mu_n q n w d) \quad (5)$$

其中: q 为电子的电荷; n 为载流子浓度; d 为霍尔元件的厚度。霍尔电阻 R_H 随温度变化的曲线如图 6 所示, 可以看出, R_H 具有正温度特性。

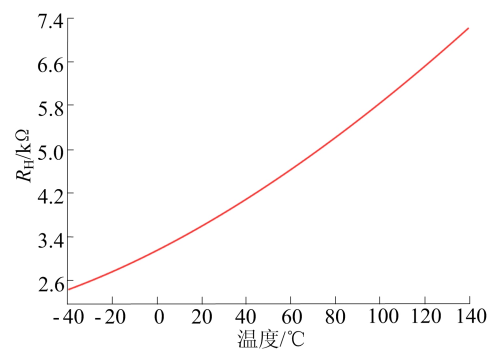


图 6 霍尔电阻 R_H 随温度变化的曲线

故本文尝试使用霍尔元件作为 R_{LOAD} , 以抵消 V_H 的负温度系数, 此时 PGA 的输出 V_{out} 为:

$$V_{out} = V_H M G_m R_E = M G_m \alpha \mu_n B \gamma / \mu_n = \alpha \gamma M G_m B \quad (6)$$

其中: $\alpha = V_{bias} \tau / l$; $\gamma = 1 / (q n w d)$; B 为磁感应强度。

在本设计中,双极晶体管的跨导 g_m 与温度呈负相关,可以表示为:

$$g_m = I_C q / (kT) \quad (7)$$

其中, $q / (kT)$ 表示热电压倒数; I_C 为集电极电流。

因此本文尝试使用 I_{PTAT} 作为尾电流源 I_E , 用来抵消双极晶体管跨导 g_m 的负温度系数, 此过程可以表示为:

$$g_m = \frac{I_C q}{kT} = \frac{\alpha_F I_{PTAT} q}{kT} \quad (8)$$

其中, $\alpha_F = \beta / (1 + \beta)$, β 为双极型晶体管的电流放大倍数。然而, 仅靠这种线性补偿是不够的, 在温度过高或过低时, 由于非线性特性, 补偿效果非常有限。因此, 有必要在超低温度和超高温下添加额外的高阶温度补偿。

整体的高、低温补偿电路如图 7 所示。

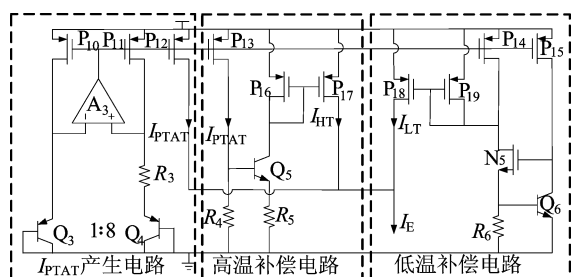


图 7 高、低温补偿电路

高阶温度补偿电路包括 3 个部分, 即 I_{PTAT} 生成电路、高温补偿电路和低温补偿电路。 I_{PTAT} 生成电路由双极晶体管 Q_3 和 Q_4 、电阻(器) R_3 、运算放大器 A_3 以及电流镜 P_{10} 、 P_{11} 、 P_{12} 组成。晶体管 Q_3 和 Q_4 的并联比例为 1 : 8。电阻 R_3 上的电压为与温度正相关的电压 ΔV_{BE} , 从而产生正温度系数电流 I_{PTAT} 。 I_{PTAT} 的表达式为:

$$I_{PTAT} = \frac{\Delta V_{BE}}{R_3} = \frac{V_T \ln 8}{R_3} \quad (9)$$

其中, V_T 为热电压。 I_{PTAT} 通过电流镜复制到高温补偿电路和低温补偿电路, 分别生成高温补偿电流和低温补偿电流。

高温补偿电路由晶体管 Q_5 、 P_{13} 、 P_{16} 、 P_{17} 和电阻 R_4 、 R_5 组成。 I_{PTAT} 通过电流镜复制到 P_{13} 的漏极, I_{PTAT} 电流经过 R_4 产生与温度正相关的电压作为三极管 Q_5 的基极电压。当温度较高时, Q_5 的基极电压高于其阈值电压, 此时 Q_5 导通, Q_5 的集电极产生额外的高温补偿电流 I_{HT} ; I_{HT} 通过

电流镜 P_{16} 和 P_{17} 复制作为 PGA 第 1 级中输入对管 Q_1 和 Q_2 的尾电流。其中, 可以通过调节电阻 R_5 的阻值 R_5 来调整 I_{HT} 的值。而当温度较低时, Q_5 的基极电压低于阈值电压, Q_5 不导通, 高温补偿电路关闭。 I_{HT} 的表达式为:

$$I_{HT} = \frac{I_{PTAT} R_4 - V_{BE5}}{R_5} \quad (10)$$

低温补偿电路由晶体管 Q_6 、 N_1 、 P_{14} 、 P_{15} 、 P_{18} 、 P_{19} 和电阻 R_6 组成。 I_{PTAT} 通过电流镜复制到 P_{15} 的漏极。当温度较低时, P_{14} 的漏极电压为高电平, 此时 N_5 导通。通过电阻 R_6 的电流可表示为 $\Delta V_{BE6} / R_6$, 由于流过 P_{14} 的电流值为 I_{PTAT} , 因此 I_{LT} 的表达式为:

$$I_{LT} = \Delta V_{BE6} / R_6 - I_{PTAT} \quad (11)$$

通过调节阻值 R_6 可以调整 I_{LT} 。当温度较高时, Q_6 的基极电压升高, 使 Q_6 导通, Q_6 的集电极电压降低, 从而导致 N_5 进入截止区, 此时低温补偿电路不工作。综上, PGA 第 1 级输入对管的尾电流 I_E 的表达式为:

$$I_E = \begin{cases} I_{PTAT} + I_{HT}, & T > T_H; \\ I_{PTAT}, & T_H \geq T > T_L; \\ I_{PTAT} + I_{LT}, & T \leq T_L \end{cases} \quad (12)$$

高阶补偿后的三极管跨导 g_m 可以在更宽的温度范围内保持相对恒定, 从而使得霍尔传感器电路的温度漂移误差在更宽的温度范围内得到进一步减小。

1.3 熔丝编程电路设计

霍尔传感器在各个领域被广泛应用, 能够处理不同大小的磁场或电流。为了确保在各种情况下都具有足够的精度, 霍尔传感器的灵敏度应具备可调性。此外, 设备封装和机械应力可能在传感器封装和使用过程中引入一些额外的偏移, 因此还需要编程调整方法来调节霍尔传感器的灵敏度。本节将介绍熔丝编程电路的设计^[13]。

熔丝编程电路原理图如图 8 所示。熔丝编程电路由编程信号写入电路、时钟提取电路、移位寄存器和熔丝阵列电路 4 个部分组成。从 VDD 端口输入的外部串行 16 位归零码编程信号通过编程信号写入电路转换为数字逻辑电路可以识别的高低电平信号; 转换后的信号被用作移位寄存器的输入; 同时时钟提取电路从归零码信号中提取时钟信号作为移位寄存器的时钟信号 CP; 移位寄存器将 16 位串行信号转换为 16 位并行信号。16 位并行信号包括 5 位模式判断信号、10 位编程信号和 1 位空信号。若 5 位模式判断信号为

01100,则一次性可编程电路进入测试模式;在测试模式中,PGA 的增益可以通过 10 位编程信号控制。若 PGA 的增益符合规格要求,则 5 位模式选择信号变为 00110,可以控制电路进入编程模式,将 10 位编程信号存储到熔丝阵列电路中,控制熔丝的熔断与否以调整 PGA 的增益。

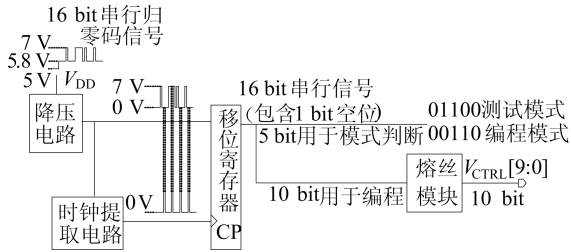


图 8 熔丝编程电路原理图

2 仿真结果

霍尔传感器版图如图 9 所示,其中显示了所提出的 PGA、温度补偿电路以及熔丝编程电路的布局。整个霍尔传感器的尺寸为 1.95 mm × 0.95 mm。本设计基于 GF 180 nm BiCMOS 工艺,直流功耗为 10 mA,供电电压为 5 V。

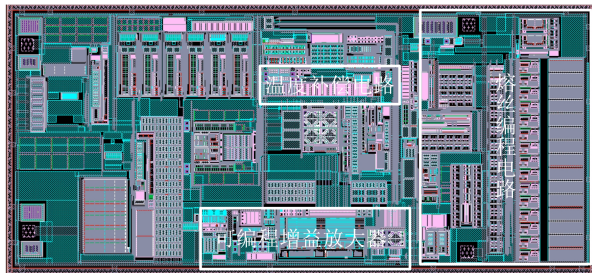


图 9 霍尔传感器版图

在 $-220 \times 10^{-4} \sim 220 \times 10^{-4}$ T 磁场输入下 PGA 的输出电压如图 10 所示。

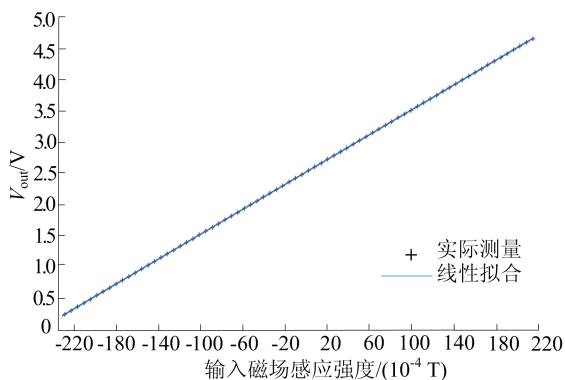


图 10 霍尔传感器线性度曲线

图 10 中各点表示不同输入磁感应强度下的输

出电压值,通过 MATLAB 将各点利用最小二乘法拟合成一条直线。从图 10 可以看出,随着磁场的变化,输出电压呈线性变化,线性误差不超过 0.40%。

PGA 的增益可调范围如图 11 所示。从图 11 可以看出,增益可调范围为 20.0~39.2 dB,控制霍尔传感器的灵敏度范围为 1.5~15.8 mV/G。

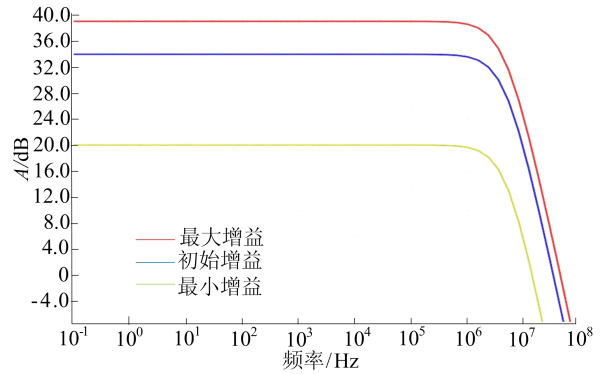


图 11 PGA 的增益可调范围

在没有任何补偿的情况下 PGA 灵敏度的温度漂移如图 12 所示。从图 12 可以看出,随着温度的变化,温度漂移的影响十分显著。

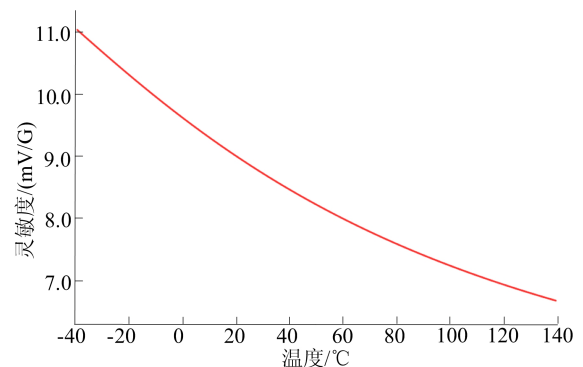


图 12 无补偿状态下的 PGA 灵敏度温漂

仅经温度系数补偿后的灵敏度温漂与经过额外高温补偿后的灵敏度温漂如图 13 所示。

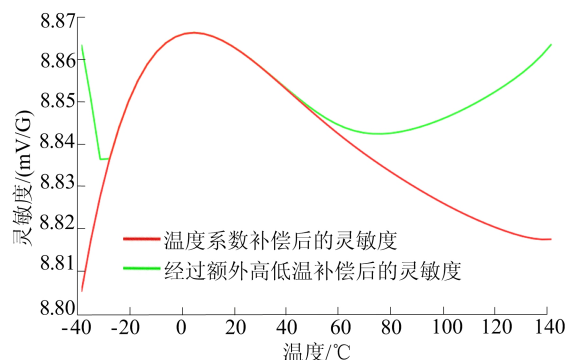


图 13 补偿后的 PGA 灵敏度温漂

从图 13 可以看出:在经过温度系数补偿后,PGA 的灵敏度温漂显著降低;加入额外的高低温补偿后,灵敏度温漂进一步降低,温度系数达到了 $2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

本文设计的 PGA 性能及其与其他最近设计的 PGA 性能的比较见表 1 所列。由表 1 可知,与其他设计相比,本文设计的 PGA 在较宽的温度范围内具有最小的温度漂移和线性误差。

表 1 本文 PGA 性能及其与其他 PGA 性能的比较

PGA	工艺	灵敏度范围/ (mV/G)	工作温度范围/ °C	灵敏度温漂/ %	温度系数/ ($10^{-6} / ^\circ\text{C}$)	线性度误差/ %
文献[5]	180 nm CMOS	—	-40~125	1.00	76	1.50
文献[6]	180 nm BCD	1.1	-40~85	1.67	68	0.70
文献[14]	350 nm CMOS	0.5~90.0	-40~125	0.50	—	—
本文	180 nm BICMOS	1.5~15.8	-40~140	0.30	20	0.40

3 结 论

本文设计了一种用于霍尔传感器的具有温度补偿的高线性度 PGA。霍尔板的温度漂移误差通过使用与霍尔元件相同的形状和材料进行补偿;同时,通过对第 1 级放大器电路尾电流的高低温补偿,进一步优化了 PGA 电路的温度特性。仿真结果表明,在 5 V 电源电压下,电路灵敏度温度漂移小于 0.30%,线性误差低于 0.40%。在 -40~140 °C 温度范围内,温度漂移系数达到 $2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,实现了较宽的工作温度范围和较小的灵敏度温度漂移误差,并且该设计不需要额外的数字处理电路,具有很高的工程应用价值。

[参 考 文 献]

- crossystems (ICICM). [S. l.]:IEEE,2021:36-39.
- [5] 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.
- [6] AJBL A, PASTRE M, KAYAL M. A fully integrated Hall sensor microsystem for contactless current measurement [C]//2012 IEEE Sensors. [S. l.]:IEEE,2012:2271-2278.
- [7] 国旗,傅鹏,蒋力. 霍尔传感器温度漂移补偿电路设计[J]. *强激光与粒子束*,2017,29(4):125-128.
- [8] 王兰雨,陈红梅,张昊哲. 适用于霍尔电流传感器的温漂补偿电路设计[J]. *电子测量与仪器学报*,2023,37(9):8-15.
- [9] HSU C, WU J. A highly linear 125 mHz CMOS switched-resistor programmable-gain amplifier[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*,2003,38:1663-1670.
- [10] KUMAR T B, MA K, YEO K S, et al. A 35 mW 30 dB gain control range current mode programmable gain amplifier with DC offset cancellation[C]//2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014). [S. l.]:IEEE,2014:6848289.
- [11] MARTINS T A, SALDANA J, VAN NOIJE W. A programmable gain amplifier for load demodulation channel in an NFC reader chip[C]//2018 31st Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI). [S. l.]:IEEE,2018:8533230.
- [12] SANSEN W M C. *Analog design essentials*[M]. Berlin: Springer,2006.
- [13] HSU C H, LIN Y T, YANG E S, et al. One time programmable (OTP) memory[C]//International Series on Advances in Solid State Electronics and Technology, Logic Non-Volatile Memory. [S. l.]:IEEE,2014:14-92.
- [14] GIRGIN A, BILMEZ M, AMIN H Y, et al. A silicon Hall sensor SoC for current sensors[J]. *Microelectronics Journal*,2019,90:12-18.
- [1] JIN M, CHO J, SEO H, et al. Design of magnetic Hall sensor for current sensing in a standard CMOS process[C]//2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia). [S. l.]:IEEE,2022:9954685.
- [2] HU X, XU Y, XU J. A low-offset current-mode CMOS vertical Hall sensor microsystem with four-phase spinning current technique[C]//2018 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC). [S. l.]:IEEE,2018:8369320.
- [3] HEIDARI H, BONIZZONI E, GATTI U, et al. A current-mode CMOS integrated microsystem for current spinning magnetic Hall sensors[C]//2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). [S. l.]:IEEE,2014:678-681.
- [4] YUAN B, XIAO L, YING J, et al. Low-offset CMOS analog amplitude calculation circuit in Hall angle sensor[C]//2021 6th International Conference on Integrated Circuits and Mi-

(责任编辑 胡亚敏)