

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205403

对称式闭环霍尔电流传感器研究与设计*

李雪洋 李岩松 刘 君

(华北电力大学电气与电子工程学院 北京 102206)

摘 要:霍尔传感器是由半导体材料加工而成的有源器件,其输出电压随着温度变化而产生漂移,这限制了其在高精度磁场测量场合的应用。提出了一种新型对称式闭环霍尔电流传感器,对其进行了系统地设计。利用霍尔元件灵敏度的差异设计了输出电压运算电路,分析了对称式闭环电流传感器工作原理并给出了闭环传递函数。电路仿真和样机实验结果表明,对称式闭环霍尔电流传感器具有较好的温度特性,温度系数减小至 0.000 8%/℃。相比其他温度补偿方法,该方法简单易实现,能够实现温度漂移的完全补偿,霍尔元件可以根据测量需要任意选型,不受驱动方式的限制。

关键词: 霍尔电流传感器;对称;温度漂移;闭环反馈

中图分类号: TN98;TM933.14 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Symmetrical closed-loop Hall current sensor research and design

Li Xueyang Li Yansong Liu Jun

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Hall sensors are active devices manufactured from semiconductor materials, their output voltage drifts with temperature change, which limits their application in high-precision magnetic field measurement. A new symmetrical closed loop Hall current sensor is proposed and systematically designed. The output voltage operation circuit is designed based on the sensitivity difference of Hall element, the working principle of symmetrical closed-loop current sensor is analyzed and the closed-loop transfer function is given. The results of circuit simulation and prototype experiment show that the symmetrical closed-loop Hall current sensor has good temperature characteristics, and the temperature coefficient is reduced to 0.000 8%/℃. Compared with other temperature compensation methods, this method is simple and easy to implement, and can realize the complete compensation of temperature drift. Hall components can be selected arbitrarily according to the measurement needs, and are not limited by the driving mode.

Keywords: Hall current sensor; symmetrical; temperature drift; closed-loop feedback

0 引 言

霍尔传感器是由半导体材料加工而成的有源器件,当给霍尔传感器通以电流而外部施加磁场时,霍尔传感器内部载流子会发生偏转,从而形成霍尔电势差,其大小反映了磁场强弱^[1-2]。霍尔传感器作为一种常用的磁敏检测器件,广泛应用于电流检测领域,但是半导体材料的载流子浓度和迁移率通常会随着温度的变化发生较大变化,使霍尔传感器的输出电压成为与温度相关的量^[3],如

灵敏度较高的 InSb 型霍尔传感器的最大温度系数可达 -1.8%/℃^[4]。这一特性限制了其在高精度磁场测量场合的应用。根据霍尔传感器的原理和自身温度特性,有学者提出了恒压供电输入端补偿方法,这种方法容易实现,但是不能控制电源内阻的温度漂移。在此基础上相关学者提出恒流源供电输入端补偿方法和输入输出端同步补偿方法,这些方法可以忽略电源内阻的影响,但是忽略了高次项,仍然不是完全的温度补偿^[5]并且只能工作在恒流模式。为了弥补此缺陷,有学者提出温度传感器采集温度信号与最终输出霍尔电压信号运算后送回信号

处理电路的方法^[6]以及先用最小二乘法对磁场与温度数据进行拟合,再用拟合方程校正所采集的磁场数据的基于曲线拟合的温度补偿方法^[7],这些方法要求温度传感器和霍尔传感器必须安装在同一位置,并且封装尺寸和厚度也要完全一样,否则误差将会很大,实际上很难做到。

鉴于此,本文提出一种新型的对称式闭环霍尔电流传感器,针对二者在同一磁场感应的一对方向相反的电压信号设计了输出信号运算电路,补偿霍尔传感器温度漂移;利用两个霍尔传感器灵敏度的差异反映磁场大小,继而进行闭环反馈。与以上霍尔传感器温度补偿方法相比,对称式闭环霍尔电流传感器只使用了一对霍尔元件,不依赖于热敏电阻、温度传感器等其他元器件,适用于任何驱动方式,即可以根据传感器需求任意选择霍尔元件种类;不存在忽略温度高阶项的问题,补偿误差较小;闭环结构的引入,提高了传感器的输出线性度和电流测量精度。

1 对称式闭环霍尔电流传感器工作原理

1.1 影响霍尔元件灵敏度的因素

霍尔传感器工作的基本原理是霍尔效应原理^[8]如图1所示,霍尔元件通以电流 I ,在垂直外加磁场 B 的作用下,霍尔元件内部的电子在洛伦兹力的作用下发生偏转,由于霍尔元件表面限制,电子不能脱离霍尔元件而在霍尔元件一端积累,同时另一端显示出多余的正电荷,正负电荷积累形成一个横向电场,随着电子积累,直到电场对电子的作用力与磁场对电子的作用力相平衡,形成霍尔电压 V_H ,即:

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

其中, R_H 为霍尔系数, d 为霍尔元件厚度, n 为载流子浓度, q 为电子电荷, ρ 为电阻率, μ 为电子迁移率。

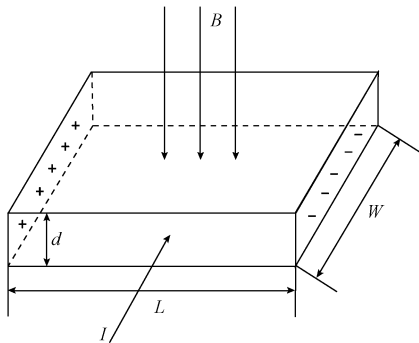


图1 霍尔效应

Fig. 1 Hall effect

霍尔元件电阻为:

$$R = \frac{\rho L}{Wd} \quad (2)$$

代入到式(1)中,有:

$$V_H = \frac{R_H RW}{\rho L} IB = \left(\frac{R_H}{\rho} \right) RI \left(\frac{W}{L} \right) B = \mu V \left(\frac{W}{L} \right) B \quad (3)$$

式(1)为恒流驱动模式下的霍尔电压表达式,式(3)为恒压驱动模式下霍尔电压表达式。

令:

$$S_B = \mu \frac{W}{L} V \quad (4)$$

式中: S_B 称为绝对灵敏度^[9]。 μ 为迁移率,温度和掺杂影响迁移率 μ ,进而影响霍尔元件的灵敏度^[10]。

当有不平衡电压 V_{OS} 存在时,实际测得的霍尔元件输出电压值应表示为:

$$V = V_H + V_{OS} = S_B B + V_{OS} = (S_B + V_{OS}/B) \cdot B = (S_B + S_{OS}) \cdot B \quad (5)$$

通过式(5)的转换,可以形象地看出,不平衡电压的存在,使器件的灵敏度发生了变化。

因为典型的半导体器件技术存在偏差,例如外延生长材料时杂质扩散的不均匀;工艺过程中光刻套刻导致的电极定位误差;封装过程中,外界机械压力会导致半导体载流子迁移率变化,使得电阻率发生变化,从而造成不平衡电压。由此可以得到,尽管在相同的工艺过程中制得了一对霍尔传感器,但这对传感器的电气参数也会有显著的不同^[11]。上述因素都会引起灵敏度的差异^[12]。

1.2 对称式闭环霍尔电流传感器工作原理

利用前述霍尔传感器灵敏度的差异,本文提出一种对称式闭环霍尔电流传感器。如图2所示,并列对称、重叠放置型号相同的一对霍尔元件,使其感应大小相同、方向相反的磁场。对两个霍尔元件施加某一大小的磁场,两个霍尔元件的输出电压分别为 U_P 和 U_N , U_P 为感受到正向磁场的霍尔元件输出的正向电压,大小为正; U_N 为感受到反向磁场的霍尔元件输出的反向电压,大小为负。

$$\begin{aligned} U_P &= U_{Hall}^P(B) + U_{Off}^P \\ U_N &= U_{Hall}^N(B) + U_{Off}^N \end{aligned} \quad (6)$$

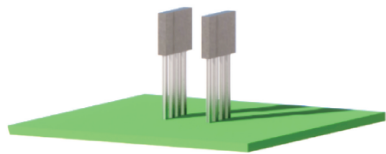


图2 对称式霍尔传感器放置方式

Fig. 2 Symmetrical Hall sensor placement

由于被测电流产生的磁场产生的磁场较为微弱,增大了测量难度,需要在被测电流周围增加含有开口气隙

的磁芯^[13],使被测磁场聚集,对称式霍尔传感器放置到磁芯气隙处感应磁场,输出霍尔电压。如图 3 所示,对称式闭环霍尔电流传感器由对称式霍尔传感器、磁芯、运算电路、放大电路和反馈线圈组成^[14]。

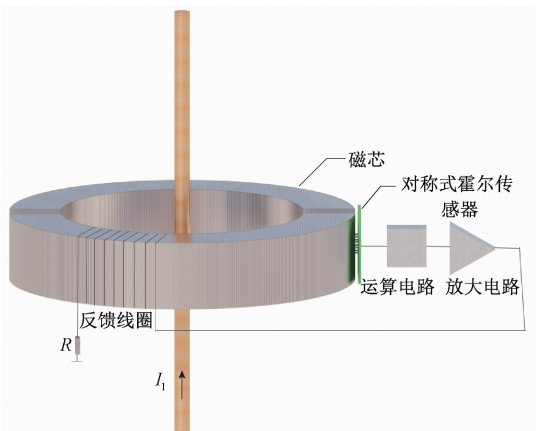


图 3 对称式闭环霍尔电流传感器

Fig. 3 Symmetrical closed loop Hall current sensor

霍尔元件是半导体元件,自身存在温度漂移,所以不同温度下 U_p 和 U_N 的绝对值大小不同。为消除霍尔传感器的温度误差,将 U_p 和 U_N 两个输出信号输入运算电路,由于对称放置的两个霍尔元件灵敏度存在差异,若以一定的规则相加,使两个输出信号并非完全抵消并且能消除温度变化带来的温度漂移,且灵敏度的差异使运算后的最终输出电压信号仍能够反映磁场大小。霍尔元件的输出电压信号通常只有数毫伏至数百毫伏,为了驱动反馈线圈,需经过放大电路进行功率放大,最终输出补偿电流流过反馈线圈,产生的磁场与被测电流产生的磁场方向相反,当两个磁场相等时,对称式闭环霍尔电流传感器达到动态平衡。此时,测量反馈线圈所连电阻两端的电压即可求出反馈电流大小。

根据对称式闭环霍尔电流传感器工作原理,有:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (7)$$

其中, N_1 为被测电流导体(原边线圈)匝数,单根无限长被测导线的 N_1 为 1; I_1 为被测电流; N_2 为反馈线圈匝数, I_2 为反馈线圈中的补偿电流。这样的平衡过程所需的时间不到 1 μs ,具有极快的响应速度^[15]。

2 对称式闭环霍尔电流传感器电路设计

根据第 1 节所述对称式闭环霍尔电流传感器工作原理,设计对称式闭环霍尔电流传感器的电路部分,分别是对称式闭环霍尔电流传感器供电电路、运算电路和反馈电路。

2.1 对称式闭环霍尔电流传感器供电电路

由第 1 节所述,闭环霍尔传感器通过补偿电流 N_1 产

生的磁场与被测电流产生的磁场抵消实现电流测量,位于铁芯气隙的霍尔元件工作在零磁通状态下,因此在选型时尽可能选取高灵敏度和低温度漂移系数的霍尔元件。综合对比分析,本文设计的对称式霍尔电流传感器采用的是一种目前灵敏度最高的 InSb 型霍尔元件,采取恒压驱动模式,这将在保证高精度和线性输出的前提下,大大降低电源设计的复杂程度、传感器的温度漂移和成本。

霍尔元件最大供电电压为 2 V,最优供电电压为 1 V,故采用三端可控精密稳压源芯片 TL432^[16]。TL432 能够稳定输出 1.25 mV 电压,具有 1% 的带隙参考偏差,最大工作温度高达 105 $^{\circ}\text{C}$,温度补偿为 $50 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,能够满足本实验的要求。对称式闭环霍尔电流传感器供电电路原理图如图 4 所示,采用一个 TL432 给两颗霍尔元件供电,两颗霍尔元件并联。

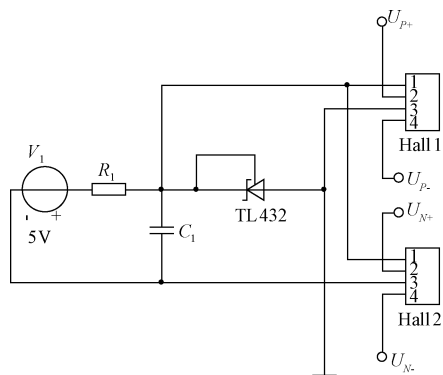


图 4 对称式闭环霍尔电流传感器供电电路原理图

Fig. 4 Symmetrical closed loop Hall current sensor power supply circuit diagram

2.2 对称式闭环霍尔电流传感器运算电路

1) 运算电路执行过程

在某一确定的磁场下,对称式闭环霍尔电流传感器工作感应正向磁场的霍尔元件输出电压 I_1 和感应反向磁场的霍尔元件输出 N_2 随着温度变化而变化。

令:

$$U_o = U_p + aU_N \quad (8)$$

a 是经过运算电路求得的系数,在某一磁场强度下确定系数 I_2 ,在其他任意磁场强度下此系数 I_2 能够使输出 U_o 不随温度变化而变化,于是消除了闭环霍尔传感器的温度漂移。确定 U_N 时的磁场强度为霍尔传感器线性范围最大值的 1/2,因为这样能够保证最大磁场范围的温度补偿。据此,有运算电路执行过程如图 5 所示,运算电路包括 3 部分,分别是对称式闭环霍尔电流传感器除法器电路、采样保持器和乘法器电路以及加法器电路。

其中, $U_{p,a}$ 和 $U_{N,a}$ 是确定系数 a 时的对称式霍尔传感器的输出电压; U_p 和 U_N 是量测被测电流时对称式霍

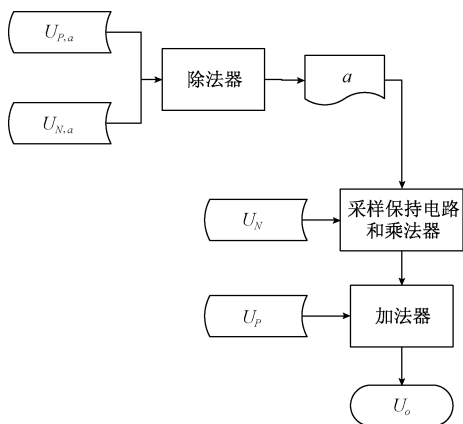


图 5 运算电路执行过程

Fig. 5 Operation circuit execution process

尔传感器的输出电压; a 是对称式闭环霍尔传感器最终输出电压。

2) 除法器电路

模拟除法器采用 AD711 和 AD633 芯片组合实现, 除法函数为:

$$10V \cdot \frac{U_{P+,a} - U_{P-,a}}{U_{N+,a} - U_{N-,a}} = 10V \cdot \frac{U_{P,a}}{U_{N,a}} = 10V \cdot a \quad (9)$$

由于 AD711 是单端输入, 在此之前串联差分电路可以使正方向感受磁场的霍尔元件输出电压信号 $U_{P+,a}$ 和 $U_{P-,a}$ 作差以单端信号输入到 AD711。差分电路中的运算放大器选择低成本、高带宽以及低噪声的精密运算放大器 TLV6001。

除法器电路原理如图 6 所示。

3) 采样保持器和乘法器电路

对称式闭环霍尔电流传感器要求在进行正式测量电流之前, 需要两霍尔元件感应选定的磁场强度(磁场强度大小为霍尔传感器量程的 $1/2$) 确定系数 a 的大小。系数 a 确定之后, 两霍尔元件感应被测电流产生的磁场, 由于该磁场大小与确定系数 a 时选定的磁场大小不同, 因此需要设置采样保持电路, 在磁场发生改变时保持系数 a 大小不变。采样保持电路和乘法器电路如图 7 所示。

在确定系数 a 时, 开关 S1 断开; 在测量被测电流时, 开关 S1 闭合。

模拟乘法器功能函数为:

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10} + Z \quad (10)$$

其中, X_1 为 $10V \cdot a$, X_2 为 0, $10V \cdot \frac{U_{P+,a} - U_{P-,a}}{U_{N+,a} - U_{N-,a}} =$

$10V \cdot \frac{U_{P,a}}{U_{N,a}} = 10V \cdot a$ 为 $U_{P+,a}$, $U_{P-,a}$ 为 U_{N-} , Z 为 0。

4) 加法器电路

加法器电路选用的运算放大器的依然是 TLV6001

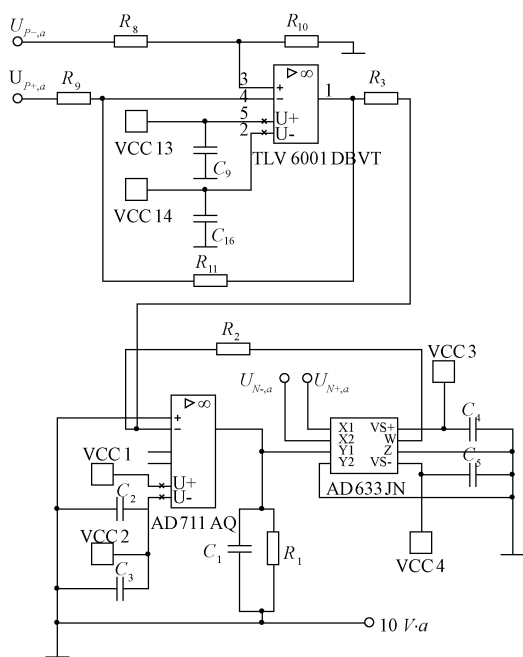


图 6 除法器电路原理

Fig. 6 Divider circuit diagram

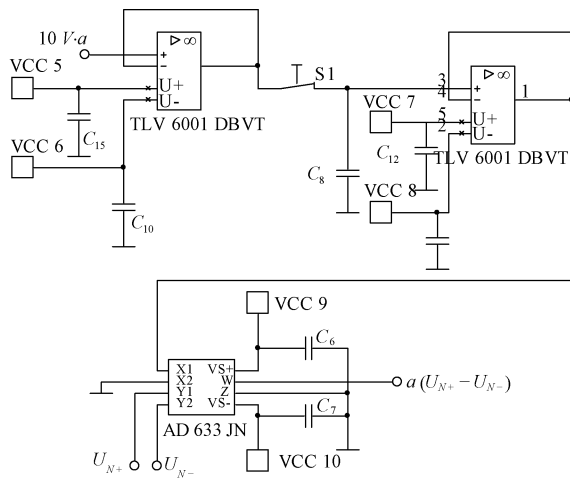


图 7 采样保持电路和乘法器电路原理图

Fig. 7 Sampling hold circuit and multiplier circuit diagram

运算放大器。在电路首段输入 3 个电压信号, 依次是 $a(U_{N+} - U_{N-})$ 、 U_P 、 $-U_P$, R_4 、 R_5 、 R_6 和 R_7 是大小相同的 3 个电阻。第 1 个 TLV6001 实现反相加法得到 $-U_o$ 、 $-U_o$ 为:

$$-U_o = \frac{R7}{R4} \cdot a(U_{N+} - U_{N-}) + \frac{R7}{R5} \cdot U_P + \frac{R7}{R6} \cdot (-U_P) \quad (11)$$

第 2 个 TLV6001 将 $-U_o$ 反相得到 U_o 为:

$$U_o = a(U_{N+} - U_{N-}) + U_{P+} - U_{P-} \quad (12)$$

式中: U_{P+} 、 U_{P-} 、 U_{N+} 、 U_{N-} 均为测量电流磁场大小下的两

霍尔元件感应输出电压大小。图8是加法器电路原理图。

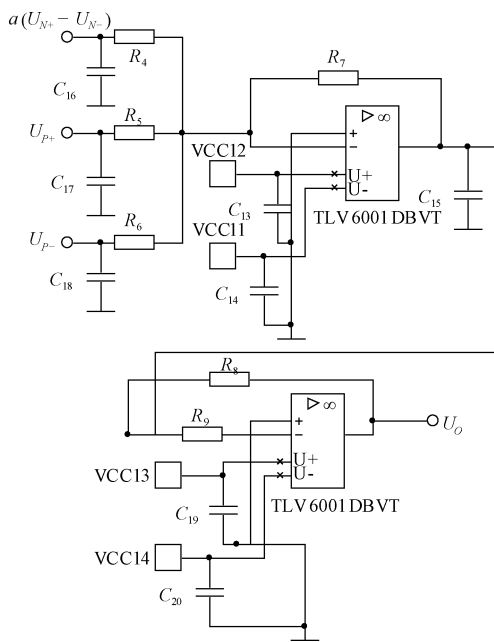


图8 加法器电路原理

Fig.8 Adder circuit diagram

2.3 反馈电路

依据图3建立一个对称式闭环霍尔电流传感器数学模型。设 B_{in} 为原边被测电流在导线周围产生的聚集到磁芯气隙处的磁场； B_c 为反馈电流产生的磁场； V 为对称式闭环霍尔电流传感器供电电压。

于是对称式闭环霍尔电流传感器产生的霍尔电压为：

$$V_H = K_B(B_{in} - B_c) \quad (13)$$

其中：

$$K_B = \mu V \left(\frac{W}{L} \right) \quad (14)$$

在这里定义磁场系数 K_c 为：

$$K_c = \frac{B_c}{i_s} \cong 0.4 \cdot \mu_r \cdot \frac{N_2}{D_c} \quad (\mu T/mA) \quad (15)$$

式中： μ_r 为磁环的相对导磁率； N_2 为补偿线圈匝数； D_c 为磁环的直径。则传感器的传递函数如图9所示。

在图9的传递函数中 B_{in} 为输入磁场（自变量）， I_c 为补偿电流（因变量）， $G_{op}(s)$ 是放大电路传递函数， R 、 R_c 、 sL_c 分别为反馈回路中的取样电阻、反馈线圈的电阻和电抗大小。对于霍尔电流传感器来说，系统开环时会将外界干扰磁场、温度误差、电路其他元器件噪声进一步放大导致传感器的输出特性非线性。因此根据该框图，需建立对称式闭环霍尔电流传感器的数学模型，如式(16)所示。

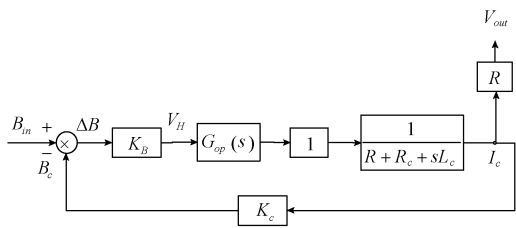


图9 对称式闭环霍尔电流传感器数学模型框图

Fig.9 Block diagram of mathematical model of symmetrical closed-loop Hall current sensor

$$\frac{I_c(s)}{B_{in}(s)} = S_1(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = \frac{1}{H(s) + 1/G(s)} \quad (16)$$

其中：

$$G(s) = \frac{K_B G_{op}(s)}{R + R_c + sL_c} = \frac{K_B}{R + R_c} \cdot \frac{G_{op}(s)}{1 + \tau_c s} \quad (17)$$

其中：

$$\tau_c = \frac{L_c}{R + R_c} \quad (18)$$

$$H(s) = K_c \quad (19)$$

$$G_{op}(s) = \frac{K_{op}}{1 + \tau_{op} s} \quad (20)$$

这里 K_{op} 为放大电路的开环增益； τ_{op} 为运算放大器的时间常数，将式(18)、(19)、(20)代入式(16)中可得：

$$S_1(s) = \frac{I_c(s)}{B_{in}(s)} = \frac{K_B K_{op}}{R_L \tau_{op} \tau_c s^2 + R_L (\tau_{op} + \tau_c) s + (K_c K_B K_{op} + R_L)} \quad (21)$$

其中， $R_L = R + R_c$ 。

对称式闭环霍尔电流传感器从传递函数上来看可以视为一个二阶低通滤波器^[17]，截止频率 f_0 为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K_c K_B K_{op}}{R_L}} \sqrt{\frac{1}{\tau_c \tau_{op}}} \quad (22)$$

并且以 40 dB/十倍频程的衰减率下降。

本文电路使用的电阻均为误差为 1% 的电阻，由式(11)可知，电阻的随机误差会影响输出电压 U_o 的大小。由于对称式霍尔电流传感器采用的是闭环结构，即便存在的电阻误差，使输出电压 U_o 发生了偏移，闭环反馈结构形成的反向磁场是一种动态平衡调节，使气隙中的对称式霍尔传感器感应零磁场，测量结果几乎不受影响。本节所述反馈电路可以消除电阻误差带来的影响，闭环结构的引入提高了传感器的输出线性度和电流测量精度。

根据所建立闭环霍尔电流传感器数学模型为放大电路和反馈电阻选择合适的电阻阻值。闭环霍尔电流传感器

稳定可靠,无暂态磁饱和问题^[18],动态测量范围大,抗干扰能力强^[19],精度可高达 10^{-3} 级甚至更高。

3 实验结果及分析

3.1 单一霍尔元件温度特性

为比较温度特性,现定义霍尔电流传感器温度系数 α :

$$\alpha = \frac{1}{V_H(T_1)} \times \frac{V_H(T_3) - V_H(T_2)}{(T_3 - T_2)} \quad (23)$$

其中, $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = -40^\circ\text{C}$, $T_3 = 80^\circ\text{C}$

为了便于分析对称式闭环霍尔电流传感器各部分工作情况,实验时将对称式闭环霍尔电流传感器供电电路部分和运算电路部分分别制pcb板,放入恒温箱内。供给亥姆霍兹线圈连续可调的直流电流,由亥姆霍兹线圈特性可知,亥姆霍兹线圈在轴中点产生均匀的磁场,磁场强度和通入亥姆霍兹线圈的直流电流大小成正比,两霍尔元件放置于轴中点,垂直于亥姆霍兹线圈产生的匀强磁场。调节恒温箱温度,从 $-40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 每隔 10°C 测量一次对称式闭环霍尔电流传感器输出的正反输出电压。

在同一温度条件下,改变通入亥姆霍兹线圈的直流电流大小,分别测量得到对称式闭环霍尔电流传感器在不同磁场下,单个霍尔元件输出电压随温度变化的关系,如图10所示。可以看出单霍尔元件输出电压随温度升高先增大后减小,同一磁场下,输出电压的最大最小值相差 1.6 mV ,温度系数 α 为 $-0.003\%/^\circ\text{C}$ 。

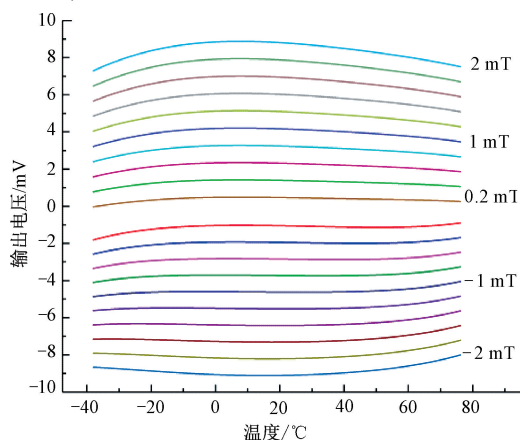


图10 两霍尔元件输出电压随温度变化关系

Fig. 10 The relationship between the output voltage of two Hall elements and temperature

3.2 对称式闭环霍尔电流传感器温度特性

在Multisim 14等电路仿真软件中搭建整体信号运算电路,验证电路的正确性,制作pcb板,搭建实验平台,如图11所示。将对称式霍尔传感器中单霍尔元件输出电

压与运算电路输入端相连。由于亥姆霍兹线圈只能产生 $0 \sim 2\text{ mT}$ 的匀强磁场,因此计算 α 时,对称式闭环霍尔电流传感器应感应 1 mT 的匀强磁场。霍尔传感器芯片容易受静电作用而导致损坏,实验室需特别注意防护^[20]。

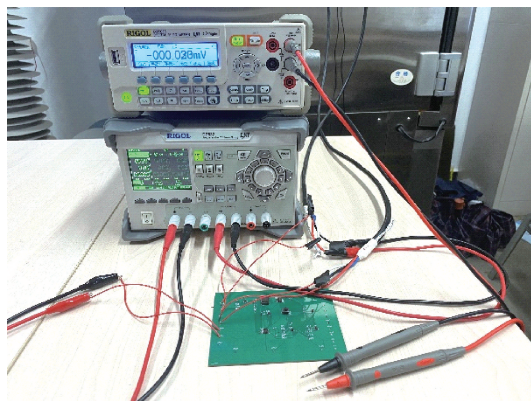


图11 运算电路实验平台

Fig. 11 Operational circuit experimental platform

运算电路最终输出 U_o 随温度变化而变化的关系,如图12所示。可以看出,经过运算电路后的对称式闭环霍尔电流传感器最终输出电压 U_o 仍满足电压随磁场增大而增大的关系,这是因为前述对称式霍尔传感器的两霍尔元件灵敏度不同,反馈时闭环霍尔传感器仍能够正确反映被测电流大小。

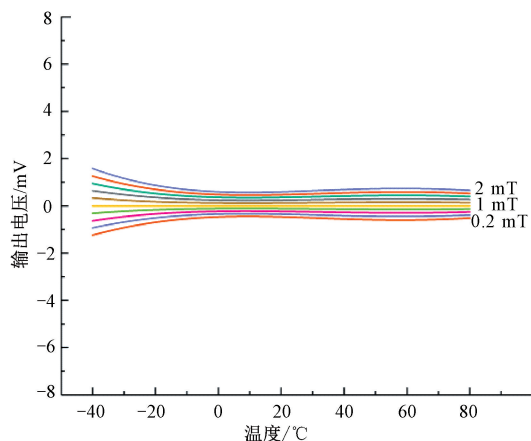


图12 U_o 随温度变化关系

Fig. 12 The relationship between U_o and temperature

同一磁场下,输出电压的最大最小值相差由原来的 1.6 mV 减小到 1.0 mV ,温度系数 α 也减小至 $0.0008\%/^\circ\text{C}$ 。同时注意到,在越接近量程中间磁场(1 mT)的场强下,对称式闭环霍尔电流传感器输出电压 U_o 随温度变化越小。

由表1可以明显看出,对称式闭环霍尔电流传感器的温度系数 α 低于单一霍尔闭环电流传感器。这说明,

对称式闭环霍尔电流传感器可以很大程度上减小温度的影响。

表 1 传感器温度特性比较

Table 1 Comparison of sensor temperature characteristics

	单一霍尔电流传感器	对称式霍尔电流传感器
温度系数 (α)	-0.003%/℃	0.000 8%/℃

4 结 论

本文提出一种旨在减小温漂的新型对称式闭环霍尔电流传感器,设计了输出电压运算电路。与常见的温度补偿方法相比,具有较小的温度漂移且不引入其他温度传感器或热敏电阻,能够实现完全的温度补偿;可以根据测量需求进行霍尔元件选型,不受驱动方式的限制。

搭建了运算电路实验平台,分别测量了两霍尔元件各自的温度特性和对称式闭环霍尔电流传感器经运算电路输出后的输出电压的温度特性,实验结果显示,对称式闭环霍尔电流传感器温度系数 α 减小至 0.000 8%/℃,即几乎不受温度影响。虽然实验时对称式闭环霍尔电流传感器感应磁场强度较小,但由于所选的 InSb 型霍尔传感器灵敏度极高,其结论仍具有普遍意义,这也进一步说明了,本文提出的对称式闭环霍尔电流传感器在微小磁场检测和高精度电流测量方面具有一定的应用潜力。

参考文献

[1] 严嵘,林佳伟,季业,等. 基于磁感原理的非接触多通道电流测试仪的设计与验证[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 68-73.
YAN R, LIN J W, JI Y, et al. Design and verification of non-contact multi-channel current tester based on magnetic induction principle [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(16): 68-73.

[2] 李泽沛,彭延峰,何宽芳,等. 基于 Simulink 的零磁通电流传感器动态误差分析[J]. 电子测量技术, 2020, 43(17): 66-73.
LI Z P, PENG Y F, HE K F, et al. Dynamic error analysis of zero magnetic current sensor based on Simulink [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(17): 66-73.

[3] 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.

[4] HWANG H, PARK D, LEE W, et al. Mathematical models with temperature compensation for InSb and GaAs Hall sensors using linear regression method [C]. 2018 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC). IEEE, 2018: 1-4.

[5] 王锋,刘美全,范江玮. 霍尔传感器温度补偿方法研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 97-99.
WANG F, LIU M Q, FAN J W. Research on the temperature compensation for Hall sensor[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(6): 97-99.

[6] 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): 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.

[7] 刘耐特,赵伟. 车用线性霍尔传感器的温度补偿方法研究[J]. 科技与创新, 2020(15): 34-36.
LIU N T, ZHAO W. Research on temperature compensation method of linear Hall sensor for vehicle[J]. Science and Technology & Innovation, 2020(15): 34-36.

[8] 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.

[9] 梁艳萍,万银龙,王晨光,等. 交流发电机定子换位股线电流测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 161-169.
LIANG Y P, WAN Y L, WANG CH G, et al. Study on measuring method of stator transposed strand current in AC generator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 161-169.

[10] 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.

[11] OSZWALDOWSKI M, EL-AHMAR S. Double Hall sensor structure reducing voltage offset [J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(7): 075005.

[12] 孙昂勃. 高精度霍尔传感器的研究与设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020.
SUN ANG B. Research and design of high precision Hall densor[D]. Xi'an:Xidian University, 2020.

[13] 陈昌鑫,郭文超,冉召会,等. 罗氏线圈与隧道磁阻复合的电流测试方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 151-158.
CHEN CH X, GUO W CH, RAN ZH H, et al. Research on the current measurement technology of the combination of Rogowski coil and tunnel magnetoresistance sensor [J].

- Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 151-158.
- [14] 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.
- [15] 万丽. 航天用高精度霍尔电流传感器开发技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- WAN L. Technology development of an astronautic high precision Hall current sensor [D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [16] 詹贵阳, 曾以成. 具有阈值电压自动设定和调节功能的电压比较器设计及 FPGA 实现[J]. 电子器件, 2021, 44(5): 1084-1089.
- ZHAN G Y, ZENG Y CH. Design and FPGA implementation of voltage comparator with automatic threshold voltage setting and adjust-ing [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021, 44(5): 1084-1089.
- [17] WEISS R, ITZKE A, REITENSPIß J, et al. A novel closed loop current sensor based on a circular array of magnetic field sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 19(7): 2517-2524.
- [18] SAHA A D, JOHN V. Power consumption reduction in high current closed loop Hall effect current sensors using class D amplifier [C]. 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). IEEE, 2016: 1-6.
- [19] JOBLING D. New open-loop current transducers with near closed-loop performance [C]. PCIM Europe 2014; International Exhibition and Conference for Power

Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. VDE, 2014: 1-5.

- [20] 王静, 张菁. 基于 PLC 的静电放电试验系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(3): 65-70.
- WANG J, ZHANG J. Development of electrostatic discharge test system based on PLC [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(3): 65-70.

作者简介



李雪洋, 2020 年于华北电力大学获得学士学位, 现为华北电力大学硕士研究生, 主要研究方向为智能传感技术。

E-mail: lxysunflora@qq.com

Li Xueyang received her B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2020. She is currently a M. Sc. candidate at North China Electric Power University. Her main research interest includes intelligent sensing technology.



李岩松 (通信作者), 1991 于东北电力大学获得学士学位, 2000 年于华北电力大学获得硕士学位, 2004 年于华北电力大学获得博士学位。现为华北电力大学教授, 主要研究方向为智能传感与透明电网、电力系统分析与控制。

E-mail: liyansong811@126.com

Li Yansong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northeast Electric Power University in 1991, M. Sc. degree from North China Electric Power University in 2000 and Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2004. Now he is a professor of North China Electric Power University. His main research interests include intelligent sensing and transparent power grid, power system analysis and control.