

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2020.01.012

基于STM32的开环霍尔电流传感器的温度 补偿研究

谢志远, 顾育先

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北保定, 071000)

摘 要: 研究了一种基于软件补偿结合恒流源补偿的改进温度补偿方法,应用单片机、恒流源、数字温度传感器、乘法器等硬件电路,对传统软件补偿进行了优化,补偿效果较传统恒流源补偿有了明显提升,“温漂”整体下降了约13.7%。在传统的温度补偿方法如热敏元件补偿、恒流源补偿、软件补偿等方式上做了补充,对于霍尔电流传感器精度的提升及实际生产需求的满足有重要意义。

关键词: 直流电流检测;霍尔传感器;温度补偿;单片机;数字温度传感器

中图分类号: TH744.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2020)01-0063-07

Research on Temperature Compensation of Open-loop Hall Current Sensor Based on STM32

XIE Zhiyuan, GU Yuxian

(College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding
Hebei 071000, CHN)

Abstract: An improved temperature compensation method based on software compensation combined with constant current source compensation was studied. Hardware circuits were used by this study, such as single-chip microcomputers, constant current sources, digital temperature sensors and multipliers to optimize traditional software compensation. The compensation effect was better than traditional constant current. The source compensation has been significantly improved, and the overall "temperature drift" has dropped about 13.7%. The traditional temperature compensation methods, such as thermal element compensation, constant current source compensation and software compensation, were also supplemented. It was of great significance to improve the accuracy of Hall current sensors and meet the actual production requirements.

Key words: DC current detection; Hall sensor; temperature compensation; single chip micro-computer; digital temperature sensor

收稿日期:2019-09-20

作者简介:谢志远(1964—),男,教授,博导,主要研究方向为配电网自动化、信号与信息处理;

顾育先(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为霍尔传感器的测量及组网研究。(E-mail:ggyyxx128@163.com)

引 言

随着光伏发电和风力发电等新能源系统的发展以及基站、电动汽车和部分工业供电需求的增长,对直流电量的测量要求也越来越高^[1],霍尔电流传感器因为满足快速、准确、实时的电流测量要求,被广泛运用,尤其是开环霍尔电流传感器。开环霍尔电流传感器电路结构形式简单,使用到的元器件数量少,具有较高的可靠性和性价比^[2]。

由于霍尔传感器的测量受诸多因素的影响,主要包括元件材料和工艺、零位误差和温度变化等^[1]。霍尔元件测量精度受温度的影响(又称“温漂”现象)不可忽视。2007年,卢文科等人提出了一种基于数据融合技术的温度补偿算法,即求出了磁感应强度、霍尔电压、温度三者之间的函数关系^[3]。在此基础上可采取恒流驱动电路^[4-5],在霍尔元件输入端口并联电阻的方式,进行温度补偿^[6-9],使霍尔传感器的温度补偿技术得到了应用。文章主要研究应用STM32单片机在霍尔元件输出端通过电压补偿的方式来消除“温漂”。

1 开环霍尔电流传感器的原理

1.1 霍尔效应

图1所示为一个由半导体薄片构成的霍尔元件,厚度为 d ,将其通电后,施加一个垂直于电流 I 的磁场 B ,导体中电子(载流子)于电流反向移动,在洛伦兹力的作用下发生偏移,从而产生电场。载流子在洛伦兹力和电场的共同作用下,于导体两端形成一个稳定电动势 U ,也称为霍尔电动势。

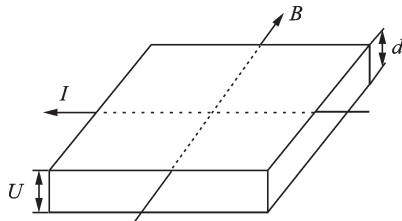


图1 霍尔效应原理图

Fig.1 Schematic of Hall effect

霍尔电动势与磁场成一定的比例关系,如公式(1)所示:

$$U = KIB = \frac{RIB}{d} \quad (1)$$

其中 U 为霍尔电动势, I 为霍尔元件的驱动电流, B

为磁环气隙或者说通过霍尔元件的磁场强度, R 为霍尔系数, d 为霍尔元件厚度也可以近似于磁环气隙的尺寸,而 $K=U/d$ 为霍尔元件的灵敏度,往往受温度影响。

1.2 基于霍尔效应的开环电流传感器

开环霍尔电流传感器可以说是对霍尔效应最直接的应用。开环的霍尔电流传感器由磁芯、霍尔元件、驱动电路(恒流)、放大电路和电流测量调零电路组成,待测电流通过磁芯,引起元件内部磁场变化,产生与待测电流成正比的霍尔电压^[10],如图2所示。

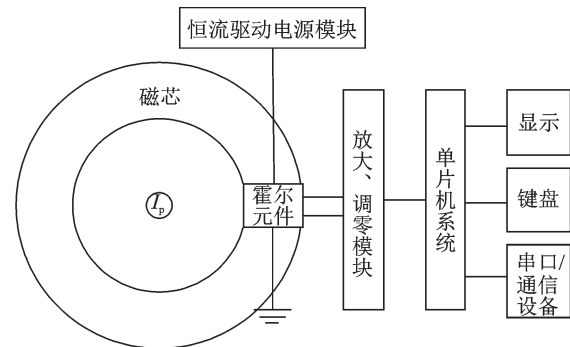


图2 霍尔传感器大致模块图

Fig.2 Block diagram of a Hall sensor

开环霍尔电流传感器的局部结构如图3所示。

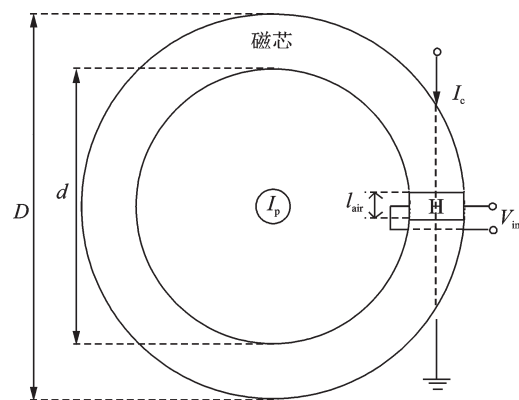


图3 开环霍尔传感器结构

Fig.3 Structure of open-loop Hall sensor

被测电流 I_p 通过磁芯于气隙产生的磁感应强度 B 为公式(2)所示:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{I_p}{\pi \left(\frac{D+d}{2} \right) - l_{air} + \mu_r l_{air}} \quad (2)$$

其中 μ_0 为真空磁导率, μ_r 为磁芯的相对磁导率, l_{air} 为气隙尺寸, D 为磁环外直径, d 为磁环内直径。因为

μ_r 非常大,所以 $\mu_r l_{air}$ 远大于 $(D+d)\pi/2-l_{air}$,公式(2)可以写成公式(3):

$$B = u_0 \frac{I_p}{l_{air}} \quad (3)$$

而霍尔元件将磁环聚合通电导线周围产生的磁场转换为mV级的电压信号,如公式(4)所示:

$$V_{in} = KI_c B \quad (4)$$

霍尔元件可以有两种电源驱动方式,恒压驱动电路的特点是施加于霍尔元件输入端的驱动电压恒定不变,但是驱动电流会发生变化;恒流驱动电路则让霍尔电流 I_c 保持一个恒定值,这样可以一定程度上忽视元件内阻的变化。根据研究结果可知,InSb材料制作的霍尔传感器采用恒压驱动方式,其输出电压因温度的变化比恒流驱动时小得多;对于GaAs材料的霍尔元件,采用恒流驱动,这样“温漂”影响较小。文章采用GaAs材料的霍尔元件,设计的恒流驱动电路如图4所示^[11-12],使用三端稳压管 K_4 来减少温度变化带来的影响,在任何温度下让 I_c 保持一个恒定值^[13-15]。

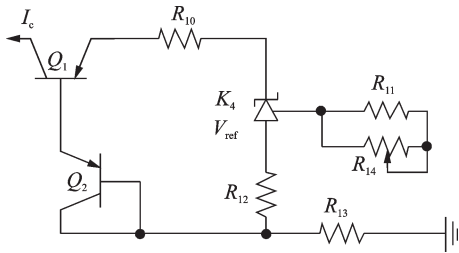


图4 恒流驱动电路

Fig.4 Constant current driving circuit

以砷化镓为材料的霍尔元件温度系数为 $-0.06\%/^{\circ}\text{C}$,三极管PN节温漂^[16]为 $-2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$,为了方便下文用芯片进行补偿,一般来说,调节 R_{14} 使电流大约在 5mA 左右,驱动电流为公式(5)所示:

$$I_c = \frac{V_{CC} - V_{R13} - 2V_{be}}{R_{10}} = \frac{V_{ref}}{R_{10}R_{12}} \left(\frac{R_{11}R_{14}}{R_{11} + R_{14}} + R_{12} \right) - \frac{2V_{be}}{R_{10}} \quad (5)$$

由于霍尔元件输出的霍尔电压均为mV级,所以需要适当的电压放大,为了提高测量精度,减小失调电压和失调电流对测量的影响,电路参数应对称。放大电路采用桥式测量放大电路,对 V_{in} 进行电压放大,输出电压 V_{out} ,电路如图5所示^[17-18]。

放大电路中运用了差分放大和比例放大,差分放大输出部分采用甲乙类对称放大器,用于减小测量电路的非线性失真,电阻参数 $R_2=R_3, R_4=R_5$,

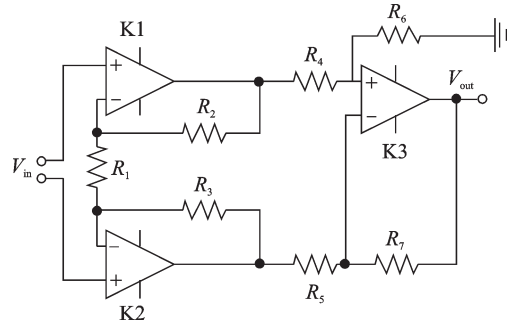


图5 测量放大电路

Fig.5 Measurement amplifier circuit

$R_6=R_7$,放大电路的增益为公式(6)所示。

$$A = \frac{R_7}{R_5} \left(1 + \frac{2R_3}{R_1} \right) \quad (6)$$

有时霍尔元件在待测电流为零时,也可以读取到微弱的电压,经过放大后往往可以达到 $5\sim 10\text{mV}$ 。这一直流分量,往往会影响到测量精度,被称为零点电动势。所以研究中在测量放大电路时再加入了测量调零电路,可以大大减少和抑制零点电动势,调零放大电路如图6所示,考虑到实际情况中,负电压很难获得,故利用 V_{0+} 和 V_{0-} 两个正补偿电压进行“零漂”补偿^[19]。

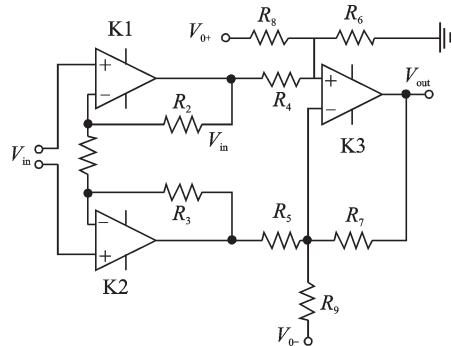


图6 调零放大电路

Fig.6 Zeroing amplifier circuit

放大电路中加入了调零电路,使被测电流为零时不再产生输出电压 V_{out} ,电阻参数 $R_2=R_3, R_4=R_5, R_6=R_7, R_8=R_9$ 。 V_{0+} 和 V_{0-} 通过正负两个方向调节磁感应强度为0时的电压输出 V_{out} ,解决零漂问题,提高测量精度,输出电压为公式(7)所示。

$$V_{out} = \left(\frac{1 + \frac{2R_3}{R_1}}{R_5} V_{in} + \frac{V_{0+} - V_{0-}}{R_9} \right) R_7 \quad (7)$$

当 $I_p=0$,由于霍尔元件内部“零漂”导致 $V_{in} \neq 0$ 时,可以通过调节调零电压 V_{0+} 和 V_{0-} 使公式(7)中的输出电压 V_{out} 尽量接近于零,以达到消除霍尔元

件的“零漂”的效果。

2 温度补偿方式的对比

2.1 恒流源并联电阻法

霍尔元件在常温的时候,其线性表现很好,用于测量直流电流时,可以准确迅速地输出与未知电流成线性关系的电压。环境温度变化时,其灵敏度和内阻均会受到影响,如公式(8)和公式(9)所示:

$$K_{HTc} = K_{HT0} [1 + \alpha(T_c - T_0)] \quad (8)$$

$$R_{HTc} = R_{HT0} [1 + \beta(T_c - T_0)] \quad (9)$$

其中 α 是灵敏度温度系数, β 是内阻温度系数。

只要在不同温度下,相同被测电流得到的霍尔电压相同,满足公式(10),即可以消除温度变化带来的影响,即消除“温漂”。

$$V_{outT0} = V_{outTC} \quad (10)$$

公式(10)可写成公式(11):

$$K_{HT0} I_{HT0} B = K_{HTc} I_{HTc} B \quad (11)$$

目前比较可靠的方法是在霍尔元件的恒流源驱动电路中并联电阻,利用分流的方式,改变霍尔元件的输入电流,如图7所示。

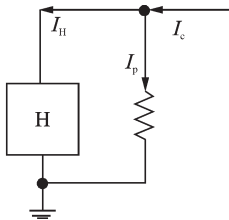


图7 并联电阻补偿法

Fig.7 Parallel resistance compensation method

根据基尔霍夫电流定理可知 $I_H R_H = I_p R_p$, $I_p = I_c - I_H$ 以及 $I_H = (I_c R_p) / (R_p + R_H)$ 。

在温度为 T_0 时有公式(12):

$$I_{HT0} = \frac{I_c R_p}{R_p + R_{HT0}} \quad (12)$$

在温度为 T_c 时,根据公式(9),有公式(13):

$$I_{HTc} = \frac{I_c R_p}{R_p + R_{HT0} [1 + \beta(T_c - T_0)]} \quad (13)$$

当满足公式(8)时,不管温度如何变化,霍尔元件都可以保持温度 T_0 时的线性特性,可推导出公式(14)。

$$R_p = R_{HT0} \frac{\beta - \alpha}{\alpha} \quad (14)$$

并联的这个电阻器通过分流的方式可以让霍尔元件在任何温度下,保持 T_0 时的线性特性。然而在实际生产中无法做到精准地测量每一个元件的灵敏度温度系数和内阻温度系数,不同器件系数的微小参数差别会造成的较大误差。

2.2 加法器补偿法

在使用单片机补偿时,如果霍尔元件的驱动采用恒流源的方式,让驱动电流 I_c 保持不变,就可以忽略温度造成的霍尔元件的内阻变化。

这样为了满足公式(10),在霍尔输出侧放大电路后加入补偿电压即可,补偿电压为正值且小于单片机内部电压参考值,如图8所示,当 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$ 时, $V_{out}' = V_{out} + V_0$ 。

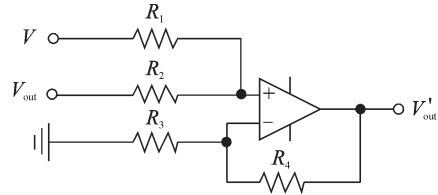


图8 输出端补偿法

Fig.8 Output compensation method

根据公式(4),可推导出公式(15),其中A为公式(6)中放大电路的增益:

$$AK_{HT0} I_c B + V = AK_{HTc} I_c B \quad (15)$$

根据公式(8),可知公式(16):

$$AK_{HT0} I_c B + V = AK_{HT0} [1 + \alpha(T_c - T_0)] I_c B \quad (16)$$

公式(16)可改写为公式(17):

$$V_{outT0} + V = V_{outT0} [1 + \alpha(T_c - T_0)] \quad (17)$$

公式(17)中变量 V 受 V_{outT0} 和 T_c 这两个变量的影响,使补偿电压 V 在编程过程中的复杂程度大大增加,需要时刻提取出变量 V_{outT0} ,加剧了系统的负担,增加了系统的延时。

可以通过外部硬件来减少补偿值算法的复杂度,让补偿电压 V 仅与一个变量 T_c 有关,而与 V_{outT0} 无关,这样可以使补偿值保持线性。

2.3 基于乘法器的改进补偿法

选用乘法器集成元件来简化电路,如AD835^[20],这是一款完整的四象限电压输出模拟乘法器,在不考虑成本的情况下,完全符合要求。X、Y两端输入电压范围为 $-1\text{V} \sim +1\text{V}$,带宽250

MHz, W端输出电压的范围为-2.5 V~+2.5 V,符合单片机STM32中ADC电压输入范围0~3.3 V的要求,工作温度为-40 ℃~80 ℃,电流消耗25 mA,电源电压±5 V,和文中研究采用的霍尔元件相同,精度更是达到±0.1%,完成 $W=XY+Z$ 的工作。

由于AD835的X,Y端输入电压范围有-1 V~+1 V的电压限制,在设计时需要考虑这一点。如图9所示,用X端口输入霍尔传感器的输出电压,可以通过改变放大器倍数的方式,将输入范围控制在0 V~+1 V;用Y端口来输入STM32的补偿电压,正常工作时的电压输出范围在0~3.3 V,把 T_c 设置为80 ℃,此时Y端口中 $1+\alpha(T_c-T_0)$ 的补偿值电压范围在0.928~1 V,符合Y端口的电压输入范围。

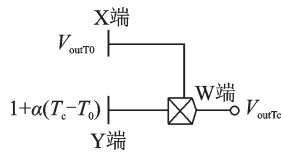


图9 乘法器改进

Fig.9 Multiplier improvement

补充说明,文中主要使用STM32F1系列中的增强型STM32F103RCT6作为霍尔电流传感器的CPU^[21-22]。STM32F103RCT6是一种嵌入式微控制器的集成电路,芯体尺寸是32位,速度是72 MHz,程序存储器容量是256 KB,程序存储器类型是FLASH, RAM容量是48 K。STM32F103RCT6具有相当高的数据处理能力和可靠性,在近几年备受关注。

2.4 恒流并联电阻法的有效性分析

有无温补的情况下,在-40 ℃、20 ℃、0 ℃、20 ℃、40 ℃、60 ℃、80 ℃时,分别对0 A、200 A、400 A、600 A、800 A、1 000 A进行测量对比,数据如表1、表2所示,为了更加直观,两种测量都用了同一个霍尔电流传感器。

实验结果显而易见,没有温度补偿时,霍尔元件的“温漂”会随着测量电流的增大而增大,以至于无法忽略其存在,会对生产测量带来很大的误差,而恒流源并联电阻的方式确实能大大降低“温漂”,说明了恒流源并联补偿的有效性,证明了软件补偿使用恒流源的可行性。

表1 不同温度和电流条件下无温度补偿时的测量结果与温漂

Tab.1 Measurement results and temperature drift without temperature compensation under different temperature and current conditions

待测电流/A	0	200	400	600	800	1000
温度/(℃)	输出电压/mV					
-40	6	170	337	503	670	833
-20	4	168	333	498	662	824
0	5	166	329	492	654	814
20	5	164	325	486	646	804
40	5	162	321	480	638	794
60	4	160	317	474	631	785
80	4	158	313	469	623	775
温漂/(mV·℃ ⁻¹)	-0.01	-0.1	-0.2	-0.29	-0.39	-0.49

表2 不同温度和电流条件下恒流并联电阻法的测量结果与温漂

Tab.2 Measurement results and temperature drift of constant current parallel resistance method under different temperature and current conditions

待测电流/A	0	200	400	600	800	1000
温度/(℃)	输出电压/mV					
-40	5	164	327	489	650	810
-20	4	164	326	486	648	808
0	5	162	324	485	646	806
20	5	163	324	485	645	805
40	4	162	323	484	643	803
60	4	161	322	482	642	801
80	3	160	321	481	640	799
温漂/(mV·℃ ⁻¹)	-0.01	-0.03	-0.05	-0.06	-0.08	-0.09

3 基于乘法器改进的新型温度补偿法设计与测试

3.1 硬件设计

利用单片机STM32F103RCT6来解决霍尔元件的“温漂”问题,其中的研究与设计主要分硬件和软件两部分,本节先讨论下设备硬件部分,硬件设备的大体框图如图10所示。

文中温度传感器采用DS18B20,DS18B20是常用的数字温度传感器^[23-25],其输出的是数字信号,不用额外模数转换,方便单片机采集数据,具有体积小,硬件开销低,抗干扰能力强,精度高的特点。DS18B20数字温度传感器接线方便,封装成后可应用于多种场合,测温范围-55 ℃~125 ℃,符合实际需求。

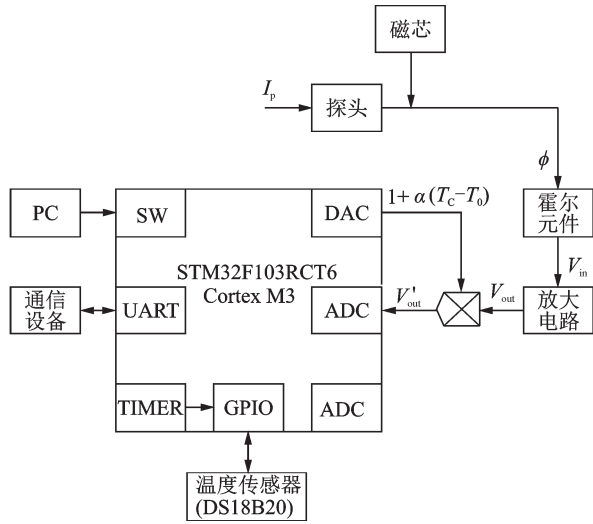


图 10 设备简图

Fig.10 Equipment sketch

封装后的 DS18B20 可用于电缆沟测温,高炉水循环测温,锅炉测温,机房测温,农业大棚测温,洁净室测温,弹药库测温等各种非极限温度场合,可以根据应用场合的不同而改变其外观。耐磨耐碰,体积小,封装形式多样,使用方便,适用于各种狭小空间的数字测温和控制领域。

3.2 软件设计

软件部分用 C 语言编写,在软件 keil u5 中创建工程进行编写^[26],通过 SW 端口 RS-232 串口写入 STM32F103RCT6 中,来实现单片机的功能。软件包括外部按键输入程序、定时中断程序、AD 采样程序、温度采集程序、DA 输出程序、SPI 串行通讯程序、LED 显示程序等。

软件的具体流程为使能、初始化后打开 DS18B20 采集温度,经过 DAC 转化为模拟信号,通过外部硬件补偿,再启动 ADC 采集补偿过的数据,对采集的数据通过简单的程序进行检测,防止出现断路或者超负荷(超过 3.3 V)的情况。根据实际场地需要,搭建无线设备组网传输,系统部分的框图如图 11 所示。

3.3 测量结果

和上文中的测量方式一样,连接设备后,借助恒温箱在 -40 °C、20 °C、0 °C、20 °C、40 °C、60 °C、80 °C 时,分别对 0 A、200 A、400 A、600 A、800 A、1 000 A 进行测量,结果如表 3 所示。

数据柱状图可以更加直观地比较无补偿、并联电阻补偿和软件补偿这三种条件下的温漂情况,进

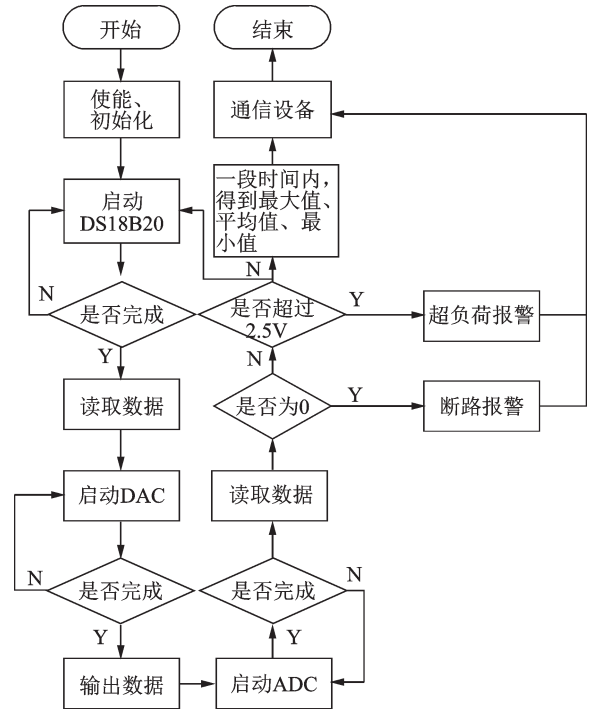


图 11 软件框图

Fig.11 Software block diagram

表 3 不同温度和电流条件下恒流软件补偿法的测量结果与温漂

Tab.3 Measurement results and temperature drift of constant current software compensation method under different temperature and current conditions

测量电流/A	0	200	400	600	800	1 000
温度/(°C)	输出电压 /mV					
-40	6	164	326	488	649	809
-20	4	164	325	486	648	808
0	5	162	324	485	646	806
20	5	163	324	485	645	805
40	4	162	323	484	643	803
60	4	162	322	483	642	801
80	3	161	322	481	642	800
温漂/(mV·°C ⁻¹)	-0.02	-0.02	-0.03	-0.05	-0.07	-0.08

而分析结果,见图 12。

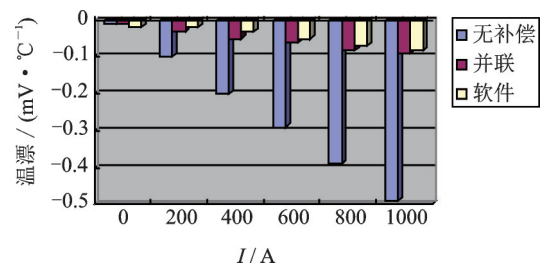


图 12 补偿效果对比图

Fig.12 Contrast chart of compensation effectiveness

根据柱状图可以得出结论,随着待测电流的增长,三种测量方式的“温漂”均有不同程度的增长。在不考虑软件延迟的情况下,使用的带有恒流源驱动电路的软件补偿法比恒流源并联电阻的补偿方式测量精度还要高一些,消除“温漂”的效果也更好一些,同时也可以更好解决霍尔传感器因为生产因素造成误差的问题,更加智能化地进行数据测量。

4 结束语

文章研究了霍尔电流传感器的温度补偿方法,以传统温度补偿方法为基础,应用STM32单片机和模拟乘法器AD835等硬件电路,设计了一种新型软件温度补偿方式,对软件补偿的补偿算法进行改进,比较了没有温度补偿、传统温度补偿方式和新型温度补偿方式在不同温度和不同电流下的补偿效果。

实验结果表明和传统温度补偿方式相比,改进的温度补偿算法其温度补偿效果有了明显的改善。然而成本也随着大量硬件的使用而上升,将霍尔电流传感器、放大器、单片机、乘法器、通信设备等器件集成化设计应用时,成本过高的问题亟待解决。

参 考 文 献

- [1] 朱博楠. 智能直流小电流传感器的研究[D]. 吉林:东北电力大学, 2014.
- [2] 宋晓辉, 薛迎春. 新型非接触式电流传感器[J]. 国外电子元件, 2006, 01: 74-75.
- [3] Lu W K, Hu X M, Zhu C C, et al. Temperature compensation of Hall element[J]. Measurement, 2007, 40(3): 283-287
- [4] 张建军. 霍尔电流传感器设计关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [5] 王昱皓, 钟贻兵, 时圣利. 高可靠霍尔电流传感器的研究和应用[J]. 新型工业化, 2015, 5(11): 8-12.
- [6] Paun M A, Sallèse J M, Kayal Maher. Temperature considerations on Hall Effect sensors current-related sensitivity behaviour[J]. Analog Integr. Circ. Sig. Process, 2013, 77(3): 355-364.
- [7] 高敏, 卢文科, 孙仁涛. 基于二维回归分析法的霍尔电流传感器温度补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(02): 100-104.
- [8] 罗志强, 阳桂蓉, 王进. 霍尔传感器温度补偿电路设计[J]. 兵工自动化, 2014, 33(10): 87-96.
- [9] 阳桂蓉, 罗志强, 王进. 直测式霍尔传感器稳定因素探讨[J]. 兵工自动化, 2014, 33(05): 84-87.
- [10] Pastre M, Kayal M, Blanchard H. A Hall sensor analog front end for current measurement with continuous gain calibration [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(5): 860-867.
- [11] 王学文. 双三极管恒流源电路实验解析[N]. 电子报, 2018-11-04(006).
- [12] 常仁贺. 基于不对称半桥的恒流源设计与研究[D]. 合肥:安徽工业大学, 2017.
- [13] 李骏霄, 王雪梅, 许哲, 等. 高精度小电流恒流源的设计与实现[J]. 中国测试, 2017, 43(08): 136-144.
- [14] 卫永琴, 高建峰. 一种恒流源电路的巧妙设计[J]. 仪器仪表学报, 2006(09): 1170-1172.
- [15] 李宏生, 万德钧. 一种高精度恒流源的设计与分析[J]. 光学精密工程, 1996(06): 89-96.
- [16] 张少芳. 塑封三极管的温升问题分析[J]. 电子元件应用, 2009, 11(12): 87-88+91.
- [17] Hongyuan Shen. Innovation and entrepreneurship based on differential amplifier circuit teaching[C]. Science and Engineering Research Center. Proceedings of 2019 5th International Conference on Education Reform and Modern Management (ERMM) 2019, Shanghai China, 2019: 74-77.
- [18] 张学文, 司佑全. 差分比例运算电路增益调整与控制分析[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版), 2019, 39(02): 77-81.
- [19] 赖俊驹, 彭浩, 胡金磊, 等. 基于闭环霍尔效应的电流传感器设计[J]. 新型工业化, 2018, 8(09): 1-5.
- [20] 陈阔. 电流型线性超宽带四象限模拟乘法器的设计[D]. 南京:东南大学, 2018.
- [21] 向继文, 刘昕, 陈善荣. 基于DS18B20的数字温度计设计与仿真[J]. 电脑与信息技术, 2019, 27(01): 47-50.
- [22] Liu F, Zhao H. The design of WiFi-based smart home communication hardware adapter[C]. 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Qinhuangdao, China, 2015: 1193-1197.
- [23] 李秋双. 基于STM32芯片的电能质量在线检测装置的设计与实现[D]. 青岛:青岛大学, 2013.
- [24] 罗小敏, 麻淑婉, 金长华, 等. 基于DS18B20温度传感器测温系统的研究与设计[J]. 轻工科技, 2019, 35(01): 50-51+103.
- [25] 薛晓珍. 基于DS18B20温度控制器的设计[J]. 机械管理开发, 2018, 33(12): 201-202+248.
- [26] 夏传东. 浅谈ST-LINK调试器的时间线调试技巧[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2017, 17(08): 25-28.

(上接第56页)

- [4] 李子轩. 平板显示用复合光学膜的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- [5] 刘丽梅. 关于超薄LED背光模组设计探讨[J]. 信息通信, 2019, (4): 155-156.
- [6] 陈仁军. 特种液晶显示器背光源研究[J]. 光电子技术, 2010, 30(3): 211-215.
- [7] 金鹏, 叶浩. LightTools在LED背光设计中的应用[J]. 现代显示, 2010, (2): 9-12.
- [8] 骆健忠, 陈哲, 张永林, 等. 侧光平板式导光板散射网点设计及仿真分析[J]. 液晶与显示, 2006, 21(3): 206-213.
- [9] 马红星, 陆小松. 满足夜视兼容显示应用的三色LED背光配色方法[J]. 液晶与显示, 2015, 30(02): 365-368.
- [10] 焦焱. 机载液晶显示模块的背光模组设计与研究[D]. 芜湖:安徽师范大学, 2017.
- [11] 焦焱, 屈军, 赵小珍, 等. 基于凹槽导光板的背光源设计[J]. 光电子技术, 2017, 37(1): 17-20.
- [12] GJB 8267-2014, 液晶显示模块测试方法[S].