

摘要：闭环霍尔电压传感器作为一种低成本、高可靠的电压测量器件，在轨道交通和工业控制领域应用广泛。其原边线圈由漆包线绕制，匝数为数万匝，原边线圈阻值的温度漂移造成传感器的增益温漂和全温度范围精度的下降。为了提高传感器全温度范围的精度，文章基于原边线圈阻值温漂特性提出了一种新型温度补偿电路，应用仿真工具，结合闭环霍尔电压传感器进行了理论计算和分析，将计算结果与试验测试数据进行对比，证明经过该补偿电路的补偿，闭环霍尔电压传感器的增益温漂得到了明显的改善，从而将闭环霍尔电压传感器的全温度范围精度提高 0.9 个百分点。该项技术弥补了闭环霍尔电压传感器增益温漂短板，使其具备应用于能耗记录等高精度应用领域的条件。

关键词：电压传感器；温度补偿；热敏电阻；增益温漂

中图分类号：TN702 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2021)03-0020-06

收稿日期：2021-01-05

# 闭环霍尔电压传感器增益温漂补偿技术

王庆欢 郑良广 郑华雄 任浩

宁波中车时代传感技术有限公司，浙江宁波 315021

## 0 引言

电力监控系统是轨道交通、工业控制和新能源等领域实现智能化的重要一环。电力监控系统检测和测量的主要电量参数是电压和电流。电压检测方法分为非隔离检测和隔离检测，其中，隔离检测法主要包括闭环霍尔电压传感器、光耦隔离电压传感器、磁通门电压传感器、无源电压传感器和数字隔离电压传感器等。

闭环霍尔电压传感器作为传统的磁隔离式电压传感器，在测量精度和隔离电压方面一直表现不错，基本误差小于 0.7%，线性度小于 0.1%，但在 2 kV 以上电压测量领域，随着线圈匝数不断增加，线圈绕制的成本增加、产品体积增加、动态特性变差、原边功耗增加、增益温漂变大等问题逐渐凸显出来。

本文通过设计一种温漂补偿电路，实现对闭环霍尔电压传感器的增益温漂补偿。

## 1 闭环霍尔电压传感器简介

闭环霍尔电压传感器是基于霍尔效应的传感器。

霍尔效应是存在于导电材料中的电流和磁场相互作用下产生电动势的效应<sup>[1-3]</sup>。如图 1 所示，在半导体材料的两端通一定的电流  $I_c$ ，在薄片的垂直方向施加磁感应强度为  $B$  的磁场，则在垂直电流和磁场的方向上将产生电势差为  $V_H$  的霍尔电压，霍尔电压  $V_H$  与霍尔电流  $I_c$  及磁感应强度  $B$  的乘积成正比，即：

$$V_H = K \cdot I_c \cdot B \quad (1)$$

式中， $K = R_H / d$ ， $K$  称为灵敏度， $R_H$  称为霍尔系数，由半导体材料的性质决定， $d$  为半导体材料的厚度。

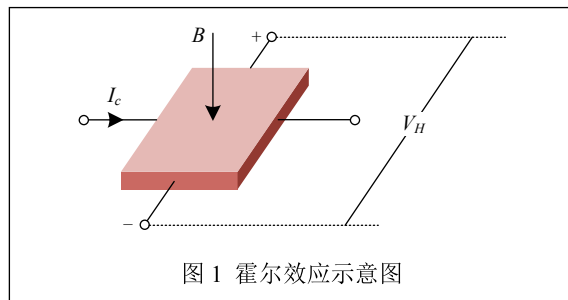


图 1 霍尔效应示意图

闭环霍尔电压传感器工作原理如图 2 所示，为了提高精度和抗外界磁场干扰能力，一般会采用铁芯聚

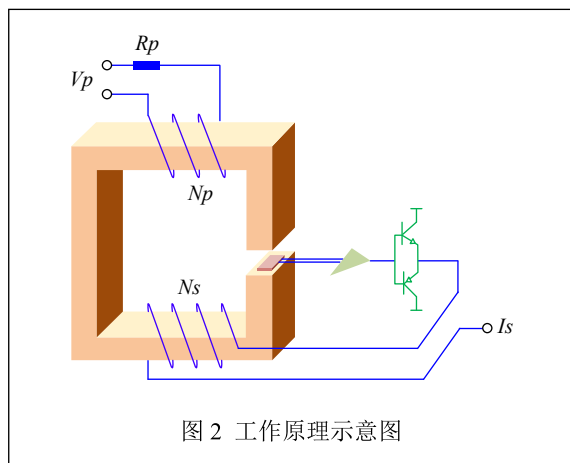


图2 工作原理示意图

磁，铁芯形状一般为圆形或方形，铁芯需要开气隙，霍尔元件处于气隙中并垂直于磁路方向。通过原边电阻  $R_p$  将被测电压  $V_p$  转化为被测电流  $I_p$ ，被测电流  $I_p$  流过原边线圈在铁芯中产生的磁场使霍尔元件产生霍尔输出电压  $V_H$ ，经过放大电路放大后，驱动次边线圈（运放驱动能力有限，一般需要使用功率管增加驱动能力），产生输出电流  $I_s$ ，输出电流  $I_s$  流过次边线圈在铁芯中产生的磁场抵消被测电流  $I_p$  产生的磁场，使铁芯处于零磁通状态<sup>[4-6]</sup>，原边线圈和次边线圈均绕制在铁芯上。因此，输出电流  $I_s$  与被测电压  $V_p$  成正比，即：

$$I_s = V_p / R_p \cdot N_p / N_s \quad (2)$$

其中， $N_p$ ——原边线圈匝数；

$N_s$ ——次边线圈匝数。

## 2 增益温漂问题

实际工程应用中，闭环霍尔电压传感器的原边线圈并不是理想线圈，其阻值为  $R_L$ ，同时原边线圈两端并联有保护电阻  $R_2$ 。

原边等效电路如图3所示，被测电流  $I_p$  分为  $I_2$  和  $I_L$  两部分，而  $I_L$  为流过原边线圈的电流。根据欧姆定律计算出：

$$I_L = \frac{V_p R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_L + R_2 R_L} \quad (3)$$

$$I_s = I_L \cdot \frac{N_p}{N_s} \quad (4)$$

闭环霍尔电压传感器的原边线圈通常使用的是铜质漆包线，温度系数约为  $0.39\%/^{\circ}\text{C}$ ，而闭环霍尔电压

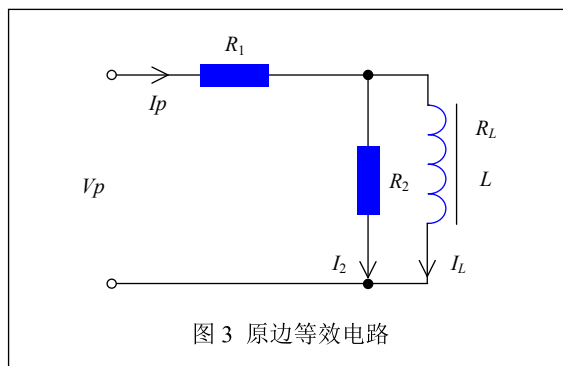


图3 原边等效电路

传感器的工作范围一般为  $-40 \sim +85^{\circ}\text{C}$ ，因此，线圈阻值  $R_L$  在全温度范围内漂移量可达  $48.75\%$ ，根据公式(3)，线圈阻值  $R_L$  的漂移导致闭环霍尔电压传感器增益的漂移。

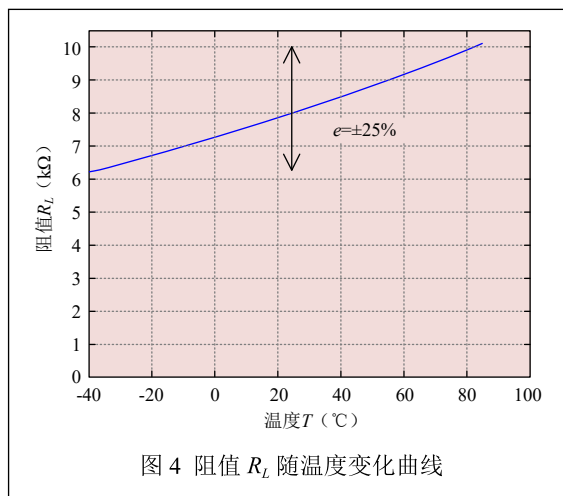
以常见的  $2,000\text{ V}$  闭环霍尔电压传感器为例， $V_p = 2,000\text{ V}$ ， $N_p/N_s = 20,000:2,000$ ， $R_2 = 220\text{ k}\Omega$ ， $I_{sm} = 50\text{ mA}$ 。

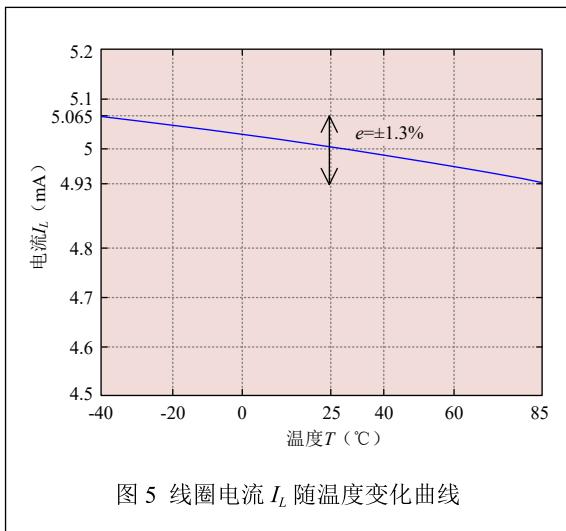
常温 ( $+25^{\circ}\text{C}$ ) 时，原边线圈阻值  $R_L = 8\text{ k}\Omega$ ， $I_s = 50\text{ mA}$ ，根据公式(3)、(4)计算， $I_{L0} = 5\text{ mA}$ ， $R_1 = 378\text{ k}\Omega$ 。

当温度为  $-40^{\circ}\text{C}$  时， $R_L = 8\text{ k}\Omega \times (1 + 0.39\%)^{-40-25} = 6.21\text{ k}\Omega$ ， $R_1 = 378\text{ k}\Omega$ ， $R_2 = 220\text{ k}\Omega$ ，代入公式(3)可得， $I_L = 5.065\text{ mA}$ ，增益温漂为  $G = (I_L - I_{L0})/I_{L0} \times 100\% = 1.3\%$ 。

当温度为  $+85^{\circ}\text{C}$  时， $R_L = 8\text{ k}\Omega \times (1 + 0.39\%)^{85-25} = 10.1\text{ k}\Omega$ ， $R_1 = 378\text{ k}\Omega$ ， $R_2 = 220\text{ k}\Omega$ ，代入式(3)可得， $I_L = 4.934\text{ mA}$ ，增益温漂为  $G = (I_L - I_{L0})/I_{L0} \times 100\% = -1.3\%$ 。

利用仿真工具对全温度范围内  $R_L$  阻值变化及线圈电流  $I_L$  变化进行计算，分别如图4、图5所示。

图4 阻值  $R_L$  随温度变化曲线



综上，上述 2,000 V 闭环霍尔电压传感器在  $-40 \sim +85 \text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内的增益温漂为  $\pm 1.3\%$ 。

### 3 增益温漂补偿电路

由于  $R_L$  的温度系数为正，需选用负温度系数的热敏电阻进行补偿，而热敏电阻温度系数一般为指数级，很难与  $R_L$  的温度系数匹配。为了实现温度系数的匹配，本文采用普通金属膜电阻与热敏电阻并联的形式，增益温漂补偿电路如图 6 所示。为了扩展温度范围，采用两个补偿单元相串联。补偿单元 1 由普通电阻  $R_{s1}$  与热敏电阻  $R_{n1}$  并联而成；补偿单元 2 由普通电阻  $R_{s2}$  与热敏电阻  $R_{n2}$  并联而成， $R_{n1}$  阻值较小， $R_{n2}$  阻值较大，在高温时， $R_{n1}$  阻值几乎为 0，主要由补偿单元 2 发挥温度补偿作用；在低温时， $R_{n2}$  阻值远大于  $R_{s2}$ ，补偿单元 2 阻值近似为  $R_{s2}$ ，主要由补偿单元 1 发挥补偿作用。

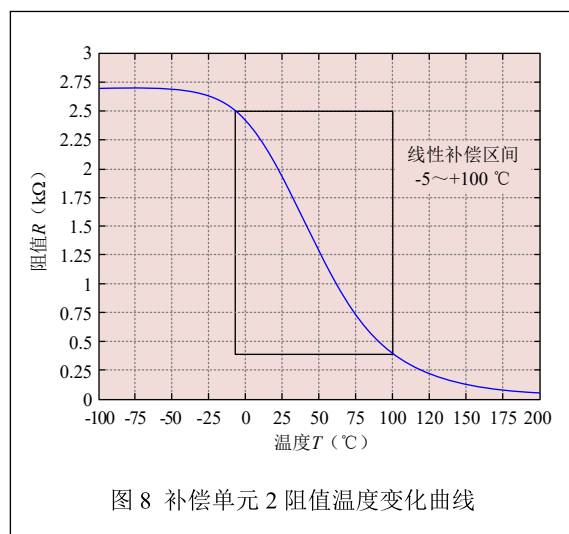
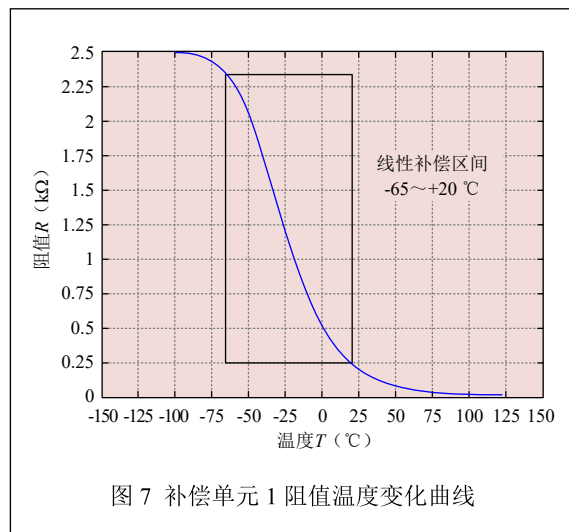
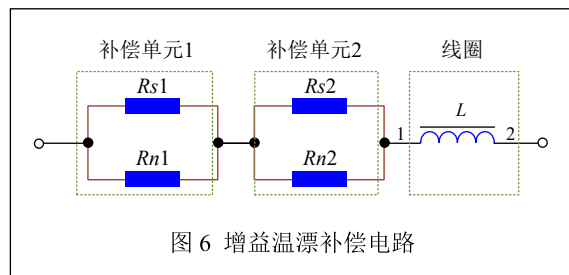
不同补偿单元各自在对应温度区间发挥补偿作用，可以实现在很宽温度范围内获得理想的补偿效果。例如，按如下参数设置补偿单元：

补偿单元 1： $R_{s1}$  为普通电阻，阻值为  $2.5 \text{ k}\Omega$ ， $R_{n1}$  为负温度系数热敏电阻，阻值为  $0.22 \text{ k}\Omega$  ( $@25 \text{ }^\circ\text{C}$ )， $B$  常数为  $3,500 \text{ K}$ ，利用仿真工具计算补偿单元 1 的线性补偿区间为  $-65 \sim +20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，如图 7 所示。

补偿单元 2： $R_{s2}$  为普通电阻，阻值为  $2.7 \text{ k}\Omega$ ， $R_{n2}$  为负温度系数热敏电阻，阻值为  $6.8 \text{ k}\Omega$  ( $@25 \text{ }^\circ\text{C}$ )，

$B$  常数为  $3950 \text{ K}$ ，利用仿真工具计算补偿单元 2 的线性补偿区间为  $-5 \sim +100 \text{ }^\circ\text{C}$ ，如图 8 所示。

将补偿单元 1 与补偿单元 2 串联组成增益温漂补偿电路，利用仿真工具计算线性补偿区间为  $-65 \sim +100 \text{ }^\circ\text{C}$ ，从而实现了线性补偿区间的扩展，如图 9 所示。



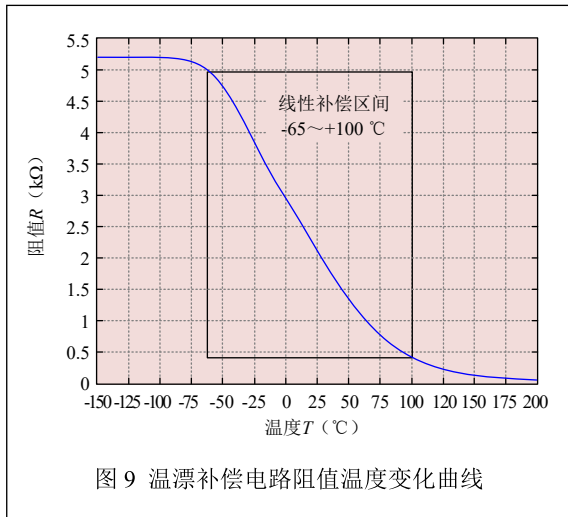


图9 温漂补偿电路阻值温度变化曲线

另外，与单纯采用热敏电阻补偿的技术相比，该增益温漂补偿电路还具有限制热敏电阻功耗和电压的作用。

以补偿单元 1 为例，热敏电阻  $R_{n1}$  的功耗为：

$$P_{n1} = \left( \frac{R_{s1} R_{n1}}{R_{s1} + R_{n1}} \cdot I \right)^2 / R_{n1} \quad (5)$$

其中， $R_{s1} + R_{n1} \geq 2\sqrt{R_{s1} R_{n1}}$ ，所以  $P_{n1} \leq \frac{1}{4} I^2 R_{s1}$ 。

热敏电阻  $R_{n1}$  的电压为：

$$V_{n1} = I \cdot (R_{s1} // R_{n1}) \leq I \cdot R_{s1} \quad (6)$$

因此，当线圈组件中通以一定电流  $I$  时，在  $-40 \sim +85$  °C 温度范围内，热敏电阻  $R_{n1}$  的功耗和电压均可控，不会因为过热或过压损坏，从而保证了可靠性。

#### 4 计算与仿真

根据热敏电阻技术手册，温度为  $T$  时，热敏电阻阻值大小为：

$$R_n = R_{n0} \times e^{B \times (1/(T+273) - 1/(25+273))} \quad (7)$$

其中， $R_{n0}$ ——热敏电阻在  $+25$  °C 的阻值；

$B$ ——热敏电阻的  $B$  常数。

增加补偿电路后，线圈组件的阻值为：

$$R = R_L + R_{s1} // R_{n1} + R_{s2} // R_{n2} \quad (8)$$

根据公式 (7)、(8)，利用仿真工具计算出能达到较理想补偿效果的参数组合。

以上述 2,000 V 闭环霍尔电压传感器为例，经过

仿真工具计算得出， $R_{s1}$ 、 $R_{s2}$ 、 $R_{n1}$ 、 $R_{n2}$  按以下参数取值时，可实现较理想的补偿效果。

$R_{s1} = 2.5$  kΩ， $R_{n1}$  为 NTC 热敏电阻，阻值为  $0.22$  kΩ (@25 °C)， $B$  常数为  $3500$  K；

$R_{s2} = 2.7$  kΩ， $R_{n2}$  为 NTC 热敏电阻，阻值为  $6.8$  kΩ (@25 °C)， $B$  常数为  $3950$  K。

根据公式 (7)、(8) 得出：

+25 °C 时，线圈组件（带补偿电路）的阻值大小为  $R = 10.13$  kΩ；

-40 °C 时，线圈组件（带补偿电路）的阻值大小为  $R = 10.63$  kΩ；

+85 °C 时，线圈组件（带补偿电路）的阻值大小为  $R = 10.71$  kΩ。

利用仿真工具计算出线圈组件的温度变化曲线如图 10 所示。

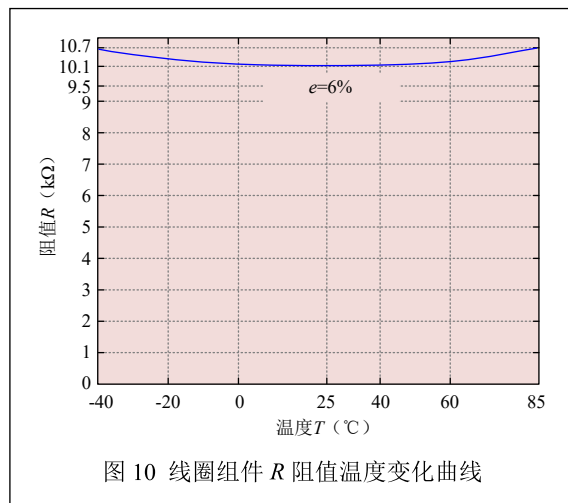


图10 线圈组件 R 阻值温度变化曲线

增加补偿电路后计算该电压传感器的增益温漂：

常温 (+25 °C) 时，线圈组件  $R = 10.13$  kΩ，被测电流  $I_{L0} = 5$  mA， $R_2 = 220$  kΩ，以  $R$  替代  $R_L$ ，由公式 (3) 得， $R_1 = 373$  kΩ；

当温度为  $-40$  °C 时， $R = 10.63$  kΩ， $R_1 = 373$  kΩ， $R_2 = 220$  kΩ，以  $R$  替代  $R_L$ ，代入式 (3) 可得， $I_L = 4.979$  mA，增益温漂为  $G = (I_L - I_{L0}) / I_{L0} \times 100\% = -0.4\%$ ；

当温度为  $+85$  °C 时， $R = 10.71$  kΩ， $R_1 = 373$  kΩ， $R_2 = 220$  kΩ，以  $R$  替代  $R_L$ ，代入式 (3) 可得， $I_L = 4.978$  mA，增益温漂为  $G = (I_L - I_{L0}) / I_{L0} \times 100\% = -0.45\%$ 。

利用仿真工具计算出线圈电流  $I_L$  的温度变化曲线如图 11 所示。

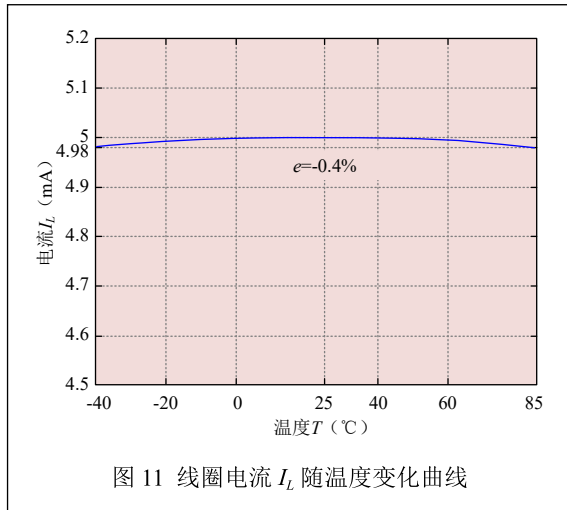


图 11 线圈电流  $I_L$  随温度变化曲线

对比增加补偿电路前的增益温漂 ( $\pm 1.3\%$ ) 和增加补偿电路后的增益温漂 ( $-0.4\%$ )，补偿效果相当理想。

### 5 试验验证

按照以上参数，试制出 8 只增加增益补偿电路的 2,000 V 闭环霍尔电压传感器并进行测试，测试数据如表 1 ~ 表 3 所示。

由表 1 ~ 表 3 数据可知，增加补偿电路后，增益温漂变化的最大值为  $-0.34\%$ ，与理论计算值 ( $-0.4\%$ ) 一致。

### 6 结束语

文中通过设计一款增益温漂补偿电路将闭环霍尔电压传感器在  $-40 \sim +85$  °C 温度范围内的增益温漂由原来的  $\pm 1.3\%$  降低至  $-0.4\%$ ，补偿效果明显。

同时，该增益温漂补偿电路的补偿单元中热敏电阻  $R_{n1}$  在全温度范围内的功耗  $P_{n1} \leq I^2 R_{s1}/4$ ，电压  $V_{n1} \leq I \cdot R_{s1}$ ，功耗和电压均可控，从而保证了热敏电阻不会因过热和过压损坏，进而保证了可靠性。

基于该增益温漂补偿电路的闭环式霍尔电压传感器全温度范围内的精度可领先同类传感器 0.9 个百分点，已应用于能耗记录等精密电压监测领域。

### 参考文献

- [1] 郁有文, 常健, 程继红. 传感器原理及工程应用 [M]. 第 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 119-124.
- [2] 顾丹. 霍尔效应在霍尔传感器信号中的应用分析 [J]. 数字技术与应用, 2016(3): 97.
- [3] 李萍, 罗云. 高端霍尔传感器关键技术的研究 [J]. 天津科技, 2020, 47(1): 20-23.
- [4] 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(9): 1-5.
- [5] 潘峽, 许留伟, 蒋力. 一种零磁通霍尔电流传感器驱动电

表 1 常温 (+25 °C) 数据 (单位: mA)

No.	零点	满量程	增益
01	0.01	49.98	49.97
02	0.04	50.07	50.03
03	-0.04	49.96	50.00
04	0.01	50.00	49.99
05	0.04	50.00	49.96
06	-0.05	49.95	50.00
07	0.05	50.05	50.00
08	0.02	50.08	50.06

备注: 增益 = 满量程 - 零点 |

表 2 +85 °C 数据 (单位: mA)

No.	零点	满量程	增益	增益温漂
01	0.02	49.96	49.94	-0.06%
02	0.12	50.01	49.89	-0.28%
03	-0.08	49.89	49.97	-0.06%
04	0.01	49.95	49.94	-0.10%
05	0.10	49.99	49.89	-0.14%
06	-0.20	49.75	49.95	-0.10%
07	0.03	50.02	49.99	-0.02%
08	0.08	50.10	50.02	-0.08%

备注: 增益温漂 = (增益 - 常温增益) / 常温增益  $\times 100\%$

表 3 -40 °C 数据 (单位: mA)

No.	零点	满量程	增益	增益温漂
01	0.03	49.90	49.87	-0.20%
02	0.15	50.01	49.86	-0.34%
03	0.30	50.20	49.90	-0.20%
04	-0.11	49.76	49.87	-0.24%
05	-0.10	49.80	49.90	-0.12%
06	0.21	50.09	49.88	-0.24%
07	0.31	50.23	49.92	-0.16%
08	-0.12	49.86	50.98	-0.16%

路设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2018(2): 28-30.

[6] 秦文康, 徐习东, 许烽. 霍尔电流传感器数学模型及其非线性传变分析 [J]. 能源工程, 2020(3): 21-27.

### Compensation of Closed-loop Voltage Sensors' Gain Drift

WANG Qinghuan, ZHENG Lianguang, ZHENG Huaxiong,  
REN Hao

(Ningbo CRRC Times Transducer Technology Co., Ltd., Ningbo  
315021, China)

**Abstract:** As a low-cost, high-reliability voltage measure device, closed-loop voltage sensors were used in rail transit and industrial control fields. The primary coil was wound by enameled wire, and the number of turns was ten thousands. The temperature drift of the resistor of the primary coil caused the gain temperature drift and the decrease of the accuracy of the full temperature range. In order to improve the accuracy of the full temperature range, the paper built a new temperature compensation circuit, and used it to calculate and analysis the closed loop voltage sensors' gain drift, and compared the calculated result with experimental data to prove that the compensation circuit has improved the gain drift and improved the full temperature range accuracy of the closed-loop voltage sensors by 0.9%. The technology made up for the short board of the closed-loop voltage sensors' gain drift, making it suitable for use in high-precision applications such as energy consumption recording.

**Key words:** voltage sensor; temperature compensation; thermistor; gain drift

### 作者简介

王庆欢: 宁波中车时代传感技术有限公司, 工程师, 主要从事电量传感器研发工作。

通信地址: 浙江省宁波市江北区振甬路 138 号

邮编: 315021 邮箱: wangqhl@csrzic.com

郑良广: 宁波中车时代传感技术有限公司, 工程师, 主要从事电量传感器研发工作。

郑华雄: 宁波中车时代传感技术有限公司, 工程师, 主要从事电量传感器研发工作。

任浩: 宁波中车时代传感技术有限公司, 工程师, 主要从事电量传感器研发工作。