

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108707

基于负温度系数热敏电阻温度采样精度研究

陈先樑^{1,3} 姜 钊^{1,2,3} 张 勇^{1,2,3}(1. 宁波普瑞均胜汽车电子有限公司 宁波 315000; 2. 宁波均胜新能源研究院有限公司 宁波 315000;
3. 浙江省汽车电子智能化重点实验室 宁波 315000)

摘要: 为了提升负温度系数热敏电阻温度采样电路的采样精度和速率,针对传统温度采样方案存在的硬件干扰波动大、软件执行效率低以及无法消除不同个体的负温度系数热敏电阻性能差异问题,给出了一种基于优化软硬件性能以及消除温度采样电路整体偏差的方法。通过优化硬件采样电路来消除共因干扰,结合软件的过采样算法并利用 Steinhart-Hart 方程建立精准的数学模型,再对该温度采样模块进行温度标定进一步消除整体偏差。实验结果表明采用该方法使得温度采样精度由原来的 $\pm 1.624\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升到 $\pm 0.030\text{ }^{\circ}\text{C}$,极大的提高了温度采样的精度。

关键词: Steinhart-Hart 方程; NTC; 采样电路; 非线性拟合; 温度标定; 自动校准

中图分类号: TM932 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Research on temperature monitor accuracy based on negative temperature coefficient thermistor

Chen Xianliang^{1,3} Jiang Zhao^{1,2,3} Zhang Yong^{1,2,3}

(1. Ningbo Preh Joyson Automotive Electronics Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

2. Ningbo Joyson Advanced Energy Institute Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

3. Zhejiang Key Laboratory of Automotive Electronics Intelligentization, Ningbo 315000, China)

Abstract: In order to improve the sampling accuracy and rate of the negative temperature coefficient thermistor temperature sampling circuit, in view of the large fluctuation of hardware interference, low software execution efficiency and inability to eliminate the performance differences of the negative temperature coefficient thermistor of different individuals in the traditional temperature sampling scheme, a method based on optimizing the performance of software and hardware and eliminating the overall deviation of the temperature sampling circuit is presented. The common-cause interference is eliminated by optimizing the hardware sampling circuit, combined with the software-oversampling algorithm and using the Steinhart-Hart equation to establish an accurate mathematical model, and then the temperature calibration of the temperature-sampling module is performed to further eliminate the overall deviation. The experimental results show that using this method improves the temperature sampling accuracy from $\pm 1.624\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $\pm 0.030\text{ }^{\circ}\text{C}$, which greatly improves the temperature sampling accuracy.

Keywords: Steinhart-Hart equation; NTC; sampling circuit; non-linear fitting; temperature calibration; automatic calibration

0 引言

负温度系数热敏电阻(negative temperature coefficient thermistor, NTC)作为一种温度传感器,因它具有体积小、成本低、精度高、灵敏度高、响应时间快等优势,使得其在新能源领域对电池的温度监控发挥着重要的作用。随着产业发展电池的能量密度越来越大。为了防止因电池热失控造成安全隐患,人们对电池温度检测的精度和速率都提出了

更高的要求。因此对于 NTC 的温度采样精度的研究具有重要的意义。由于使用 NTC 则必须知道它的温度与电阻值曲线关系,传统的电芯采样方法主要是依据 NTC 厂商给出的 R-T 表(下统称标准 R-T 表),通过查表的方式进行温度计算。该方法虽然操作简单,但是采样误差很大速率低,对于现有的应用显然不满足要求。

2018 年张元飞等^[1]提出基于期望相对温度跟踪控制策略的温度检测系统参数优化调整方法,该方法硬件由惠

收稿日期:2021-12-28

斯通电桥、差分放大器、AD转换器和数字信号采集处理器构成,采用期望相对温度跟踪策略与温度标定方法实现采样精度的提升。

2021年张旺东等^[2]提出基于NTC的双ADC采集系统,该方法是通过切换恒流源电流方向,并使用两路采样电路分别对NTC与参考电阻两端的正反方向电压进行同步采集,再通过Hoge方程进行拟合来提升温度采样精度。

总体而言目前对于提升NTC的温度采样精度的方法主要有两个方面:1)建立R-T数学模型,比如利用最小二乘法^[3-4]、基本对数方程^[5]、Steinhart-Hart方程^[6-9]和Hoge-3方程^[10]等来实现精准模拟NTC的R-T特性曲线;2)改变硬件电路的结构,例如电桥差动线性补偿^[11]、非平衡桥式^[12]、R-C放电方法^[13]以及识别振荡频率^[14]等方法来提升采样精度。一般来说通过优化硬件采样电路的确可以提升一定的采样精度,但提升空间有限与此同时反而带来了硬件电路复杂化可靠和准确度低等问题^[15]。针对国内通过堆砌硬件电路来提高温度采样精度的问题,本文基于最简单的分压电路,采用恒压源方案^[16-17]通过消除基准源偏差,并采用奈奎斯特定理^[18-20]的“过采样方法”来提高NTC的温度采样精度,最后通过特定的温度标定^[21],利用Steinhart-Hart方程进行精确拟合,该方案不仅简化了软硬件,而且通过温度标定消除了NTC与采样电路共同引起的整体偏差,极大地提高了温度采样的精度。

1 传统方案

传统的温度检测电路是依据恒压源输出固定电压,再通过电阻与NTC进行分压,电路如图1所示。

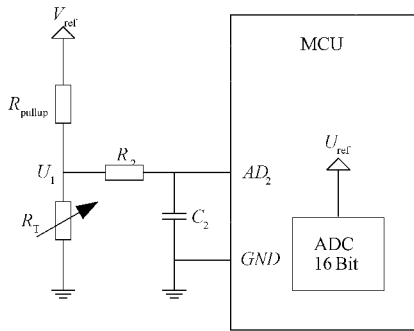


图1 传统温度采样电路

其中, V_{ref} 为高精度基准源输出, R_{pullup} 为分压电阻, U_1 为NTC与 R_{pullup} 分压值, U_{ref} 为MCU内部ADC的基准源, AD_2 为 U_1 的模数转换值, R_2 、 C_2 为低通滤波电路。

根据图1可以罗列如下公式:

$$U_1 = \frac{V_{ref}}{R_{pullup} + R_T} * R_T \quad (1)$$

$$\frac{U_1}{AD_2} = \frac{U_{ref}}{2^{16} - 1} \quad (2)$$

联立式(1)、(2)可得:

$$R_T = \left(\frac{V_{ref} * (2^{16} - 1)}{U_{ref} * AD_2} - 1 \right)^{-1} * R_{pullup} \quad (3)$$

传统方案的温度检测方法是软件通过检测到的 AD_2 值代入式(3)计算出NTC的电阻值 R_T ,然后通过对事先存储在内存中的标准R-T表进行检索并取近似值,从而得到 R_T 所对应的温度值。

在硬件层面通过式(3)可以看出主要有5个因子影响温度采样精度,分别是 V_{ref} 与 U_{ref} 的电压精度,MCU本身的采样偏差 AD_2 ,上拉电阻 R_{pullup} 的精度以及NTC标准R-T表误差。同样在软件算法层面数据量庞大的标准R-T表不仅极大地占用MCU的内存空间,而且并不能真实反映每个NTC的实际R-T值,与此同时软件采用的查表法也降低了温度采样的速度。总而言之使用传统方案在软硬件的层面上对温度采样的精度和速率都展现出很大的局限性。

2 优化方案

针对以上问题,硬件上对图1的电路进行了优化,尽可能地消除共因干扰;算法上优化采样方法,并通过建立精准的R-T数学模型来替代标准R-T表,再通过温度标定进一步消除个体NTC带来的误差。该方案进一步消除了共因干扰,而且极大地优化了MCU内存空间,提高了温度采样速度和精度,具体方案如下。

在传统方案电路图的基础上新增一路对基准源电压的检测 AD_1 ,由于基准源的电压检测与NTC分电压检测使用的是同一个ADC,因此通过计算可以消除ADC采样的共因因子干扰,优化后的温度采样电路如图2所示。

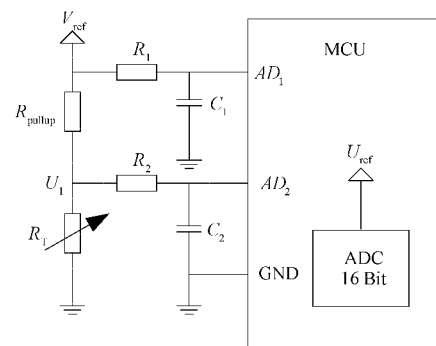


图2 改进后温度采样电路

其中,新增的 AD_1 为 V_{ref} 模数转换值, R_1 、 C_1 为低通滤波电路。根据图2可以罗列如下公式:

$$\frac{V_{ref}}{AD_1} = \frac{U_{ref}}{2^{16} - 1} \quad (4)$$

联立式(3)、(4)可得:

$$R_T = \left(\frac{AD_1}{AD_2} - 1 \right)^{-1} * R_{pullup} \quad (5)$$

从式(5)中可以看出 V_{ref} 与 U_{ref} 的影响已被消除,但还有3个因数会影响到采样精度,分别是MCU本身ADC的

采样偏差 AD_1/AD_2 , 上拉电阻 R_{pullup} 的精度以及 NTC 的 R-T 表误差。

为了进一步减小外围元器件带来的误差 R_{pullup} 采用 25×10^{-6} , 0.1% 电阻; ADC 使用高精度 16 Bit 的 ADIBMS6830 前端采样芯片进行电压采集。 R_T 与温度的偏差采用分段温度标定再利用 Steinhart-Hart 方程进行全温度曲线拟合。

3 过采样

软件算法上可以采用奈奎斯特定理对该连续的模拟量进行过采样, 即在进行模拟-数字信号的转换过程中, 当采样频率 f_s 大于信号中低滤波器的最高频率 f_m 的 2 倍时, 采样之后的数字信号完整地保留了原始信号中的信息, 即可以不失真的恢复出原始的模拟信号。

设过采样率为 OSR , ADC 增加的分辨率为 ΔN 则有:

$$OSR = \frac{f_s}{2 * f_m} \quad (6)$$

$$OSR = 4^{\Delta N} \quad (7)$$

由图 2 可知 V_{ref} 与 U_1 的采样截止频率为:

$$f_m = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad (8)$$

联立式(6)~(8)可得:

$$f_s = \frac{4^{\Delta N}}{\pi * R * C} \quad (9)$$

为了获得 18 Bit 分辨率, 也就是 $\Delta N = 2$ Bit 的增量, 则有:

$$f_s = \frac{16}{\pi * R * C} \quad (10)$$

其中, R, C 为 V_{ref} 与 U_1 的低通滤波电路的电阻值和电容值。

从上式可知, 16 Bit 的 ADC 若要达到 18 Bit 的分辨率, 软件采样频率必须 $\geq f_s$ 。

4 R-T 数学模型建立

由于 NTC 的 R-T 曲线是非线性的, 在之前很多的文献中也提到了各种方法例如基本对数方程、Steinhart-Hart 方程和 Hoge-3 方程, 但使用基本方程拟合出的数据偏差较大, 部分数据还超出了范围, Steinhart-Hart 方程与 Hoge-3 方程相对于前两种的校准方法更精确且拟合精度接近, 但是 Hoge-3 方程有 5 个热敏电阻待求参数计算量大, 对于 MCU 的计算性能要求很高。因此文中是使用 Steinhart-Hart 方程, 计算相对简单, 再通过对温度进行分段计算可以达到很精确的拟合度, 数学模型如下:

$$T = \frac{1}{A + B * \ln(R_T) + C * \ln(R_T)^3} \quad (11)$$

其中, T 为开氏温度; R_T 为 T 温度下 NTC 电阻值。

通过 NTC3 个不同温度下的电阻值 $(R_1, T_1), (R_2, T_2), (R_3, T_3)$ 代入式(11)计算出 A, B, C 三个系数。

$$T_1 = \frac{1}{A + B * \ln(R_1) + C * \ln(R_1)^3} \quad (12)$$

$$T_2 = \frac{1}{A + B * \ln(R_2) + C * \ln(R_2)^3} \quad (13)$$

$$T_3 = \frac{1}{A + B * \ln(R_3) + C * \ln(R_3)^3} \quad (14)$$

设:

$$l_1 = \ln(R_1) \quad (15)$$

$$l_2 = \ln(R_2) \quad (16)$$

$$l_3 = \ln(R_3) \quad (17)$$

$$y_1 = \frac{1}{T_1} \quad (18)$$

$$y_2 = \frac{1}{T_2} \quad (19)$$

$$y_3 = \frac{1}{T_3} \quad (20)$$

设:

$$\gamma_1 = \frac{y_2 - y_1}{l_2 - l_1} \quad (21)$$

$$\gamma_3 = \frac{y_3 - y_1}{l_3 - l_1} \quad (22)$$

联立式(12)~(22)可得:

$$C = \frac{\gamma_3 - \gamma_2}{l_3 - l_2} * \frac{1}{l_1 + l_2 + l_3} \quad (23)$$

$$B = \gamma_2 - C * (l_1^2 + l_1 * l_2 + l_2^2) \quad (24)$$

$$A = y_1 - l_1 * (B + C * l_1^2) \quad (25)$$

经过换算最终得到如下方程:

$$x = \frac{1}{C} * (A - \frac{1}{T + 273.15} \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (26)$$

$$y = \sqrt{(\frac{B}{3C})^3 + (\frac{x}{2})^2} \quad (27)$$

$$R_T = e^{\sqrt[3]{y * \frac{x}{2}} * \sqrt[3]{y + \frac{x}{2}}} \quad (28)$$

式(23)~(28)就是 NTC 的 R-T 数学模型公式, 从中可以看出如果 $(R_1, T_1), (R_2, T_2), (R_3, T_3)$ 取值的间隔越小, 那么在温度 $T_1 \sim T_3$ 范围内 A, B, C 的值越精确, 从而 R_T 也越精确。

5 NTC 偏差值计算

得益于 Steinhart-Hart 方程, 文中可以对该 NTC 本身的温度采样误差进行估算。根据 NTC 规格书可知, 热敏系数 $(B_{25/T})$ 与 R_T 的关系式如下:

$$B_{25/T} = (\frac{1}{25 + 273.15} - \frac{1}{T})^{-1} * \ln(\frac{R_{25}}{R_T}) \quad (29)$$

根据标准 R-T 表, 利用式(29)计算出不同温度 T 对应的 $B_{25/T}$ 值, 再根据 NTC 热敏系数偏差值 σ , 计算出电阻偏差值, 具体方法如下。

设 T 温度下的 NTC 阻值总误差 = t_{tol} , R_T 相对误差 = t_T , 则有:

$$t_{\text{tol}} = \pm \sqrt{t_{25}^2 + t_T^2} \quad (30)$$

$$\sigma = \pm \frac{|B'_{25/T} - B_{25/T}|}{B_{25/T}} * 100\% \quad (31)$$

$$t_T = \pm \frac{|R'_T - R_T|}{R_T} * 100\% \quad (32)$$

联立式(29)~(32)可得:

$$t_{\text{tol}} = \pm \sqrt{t_{25}^2 + [e^{\sigma * B_{25/T} * (\frac{1}{25+273.15} - \frac{1}{T})} - 1]^2} \quad (33)$$

已知 $\sigma = \pm 1\%$, $t_{25} = \pm 1\%$, 文中可以得到不同温度下 NTC 的总电阻偏差值, 如表 1 所示。

表 1 NTC 电阻偏差

| 温度/°C | 标准 R-T 表/ Ω | $B_{25/T}/k$ | $t_{\text{tol}}/\%$ |
|-------|--------------------|--------------|---------------------|
| -40 | 195 652 | 3 180.25 | ± 3.1 |
| -30 | 113 347 | 3 200.16 | ± 2.60 |
| -20 | 68 237 | 3 221.00 | ± 2.15 |
| -10 | 42 506 | 3 243.83 | ± 1.75 |
| 0 | 27 219 | 3 261.87 | ± 1.41 |
| 10 | 17 926 | 3 284.77 | ± 1.16 |
| 20 | 12 081 | 3 303.95 | ± 1.02 |
| 30 | 8 315 | 3 336.70 | ± 1.02 |
| 40 | 5 834 | 3 354.63 | ± 1.14 |
| 50 | 4 161 | 3 379.29 | ± 1.33 |
| 60 | 3 014 | 3 403.33 | ± 1.57 |
| 70 | 2 228 | 3 414.22 | ± 1.81 |
| 80 | 1 669 | 3 428.03 | ± 2.07 |
| 90 | 1 268 | 3 440.00 | ± 2.31 |
| 100 | 974 | 3 455.03 | ± 2.56 |
| 110 | 758 | 3 466.94 | ± 2.80 |
| 120 | 596 | 3 478.81 | ± 3.03 |

从表 1 可以看出, 该 NTC 本身的电阻偏差在全温度范围内呈中间小两边大的趋势, 这是该 NTC 本身的特性决定的。

从式(33)可知, 影响 NTC 精度的参数主要有热敏电阻偏差值 σ 以及 25 °C 条件下的电阻偏差值 t_{25} 。因此可以通过选择性能更好的 NTC 来提升性能, 但作用有限而且相应成本也会增加, 所以这不是最佳方案。

不过温度标定可以很好地解决这一问题, 由于工艺上的原因, 不同个体 NTC 的 R-T 差异也是明显的, 因此所有 NTC 都必须进行标定。

6 温度标定

本文使用电池管理系统(BMS)的温度采样模块, 通过精确控制温箱温度分别记录下不同温度下采样得到的 R_T 值, 再依据 Steinhardt-Hart 方程对 R-T 曲线进行拟合。

本文采用高精度的热电偶作为温度参考, 用于标定 NTC 的电阻值, 抽取 4 个样品进行验证, 其中 1 个样品使

用标准 R-T 表取值, 标记为未标定样品 Y, 然后对剩余的 3 个样品进行温度标定, 标记为标定样品 $Z_1 \sim Z_3$ 。具体操作如下: 1) 将需要标定的样品以及作为温度参考的热电偶的传感器彼此放置的尽可能靠近并固定好; 2) 将该容器放置于密闭的恒温箱中; 3) 启动温箱分别测试并记录 -40 °C ~ 125 °C 的温度与电阻值数据。为了便于与标准 R-T 表进行比较, 以 -40 °C 为起点每间隔 20 °C 取一个数据总计 9 个数据点, 监测数据如表 2 所示。

表 2 标定数据

| 温度/°C | Y/ Ω | 热电偶/°C | Z_1/Ω | Z_2/Ω | Z_3/Ω |
|-------|-------------|---------|--------------|--------------|--------------|
| -40 | 195 652.0 | -39.921 | 199 917.2 | 190 976.3 | 20 0937.7 |
| -20 | 68 236.7 | -19.980 | 69 880.8 | 69 746.6 | 69 739.9 |
| 0 | 27 218.6 | -0.043 | 26 814.4 | 27 568.2 | 27 613.3 |
| 20 | 12 080.5 | 20.004 | 12 204.1 | 12 067.1 | 12 147.6 |
| 40 | 5 833.6 | 40.215 | 5 781.7 | 5 816.5 | 5 810.6 |
| 60 | 3 014.3 | 60.214 | 2 991.6 | 2 992.2 | 2 975.9 |
| 80 | 1 668.5 | 80.176 | 1 648.7 | 1 653.9 | 1 645.5 |
| 100 | 973.8 | 100.256 | 993.3 | 990.8 | 985.8 |
| 120 | 596.4 | 120.163 | 608.9 | 612.2 | 611.5 |

将表 2 每个样品标定的数据以相邻 3 个数据为一组, 为保证数据的连续性, 本文使用上一组的最后一个数据作为下一组的第 1 个数据进行分组总计 4 组数据, 分别代入式(23)~(25)可以得到 $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, A_3, B_3, C_3, A_4, B_4, C_4$ 的参数, 再将 these 参数代入式(26)~(28)即可精确拟合出 -40 °C ~ 125 °C 的 R-T 特性曲线, 具体参数如表 3 所示。

表 3 Steinhardt-Hart 方程拟合数据

| 温度/°C | Y/ Ω | Z_1/Ω | Z_2/Ω | Z_3/Ω |
|-------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| -40 | 195 652.0 | 200 792.4 | 191 773.2 | 201 841.8 |
| -30 | 113 429.7 | 117 032.7 | 114 478.8 | 116 565.8 |
| -20 | 68 236.7 | 69 951.1 | 69 814.2 | 69 809.1 |
| -10 | 42 446.6 | 42 798.2 | 43 426.9 | 43 209.9 |
| 0 | 27 218.6 | 26 761.5 | 27 515.2 | 27 561.8 |
| 10 | 17 928.1 | 17 965.4 | 17 970.8 | 18 080.0 |
| 20 | 12 080.5 | 12 206.0 | 12 069.0 | 12 149.5 |
| 30 | 8 313.4 | 8 388.1 | 8 313.0 | 8 347.5 |
| 40 | 5 833.6 | 5 826.5 | 5 859.0 | 5 853.9 |
| 50 | 4 154.5 | 4 153.8 | 4 161.6 | 4 145.3 |
| 60 | 3 014.3 | 3 011.7 | 3 012.4 | 2 996.0 |
| 70 | 2 224.9 | 2 217.8 | 2 219.4 | 2 206.7 |
| 80 | 1 668.5 | 1 657.0 | 1 662.1 | 1 653.6 |
| 90 | 1 266.5 | 1 284.4 | 1 282.7 | 1 275.5 |
| 100 | 973.8 | 999.6 | 997.1 | 992.1 |
| 110 | 757.8 | 780.6 | 780.3 | 777.5 |
| 120 | 596.4 | 611.3 | 614.6 | 613.8 |

7 测试验证

为了验证该方法的可行性,文章抽取 5 个实验样品进行对比测试,分别是 1 个传统方案样品和 4 个优化方案样品。具体操作如下:1)传统方案的样品标记

为 X;2)4 个优化方案的样品按温度标定章节中的操作步骤 1)~3)执行,并定义未标定的样品标记为 Y 和标定后的 3 个样品分别标记为 Z_1, Z_2, Z_3 ; 3)测试并记录 $-40\text{ }^\circ\text{C} \sim 125\text{ }^\circ\text{C}$ 间隔为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 的数据,数据汇总如表 4 所示。

表 4 温度采样数据对比

| 热电偶 | X | 误差 | Y | 误差 | Z_1 | 误差 | Z_2 | 误差 | Z_3 | 误差 |
|---------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| -39.972 | -39.266 | -0.706 | -40.43 | 0.459 | -39.961 | -0.011 | -39.983 | 0.011 | -39.961 | -0.010 |
| -30.001 | -30.669 | 0.668 | -30.59 | 0.593 | -29.992 | -0.009 | -29.993 | -0.008 | -29.993 | -0.008 |
| -19.920 | -20.517 | 0.597 | -20.42 | 0.503 | -19.914 | -0.006 | -19.926 | 0.006 | -19.926 | 0.006 |
| -10.026 | -9.522 | -0.504 | -10.21 | 0.181 | -10.031 | 0.005 | -10.030 | 0.004 | -10.022 | -0.004 |
| 0.020 | 0.487 | -0.467 | 0.42 | -0.396 | 0.023 | -0.003 | 0.022 | -0.002 | 0.023 | -0.003 |
| 10.034 | 10.453 | -0.419 | 9.98 | 0.052 | 10.035 | -0.001 | 10.033 | 0.001 | 10.033 | 0.001 |
| 20.022 | 20.448 | -0.426 | 19.75 | 0.269 | 20.022 | 0.000 | 20.022 | 0.000 | 20.022 | 0.000 |
| 30.436 | 29.837 | 0.599 | 30.20 | 0.239 | 30.436 | 0.000 | 30.436 | 0.000 | 30.436 | 0.000 |
| 40.024 | 39.067 | 0.957 | 40.06 | -0.036 | 40.023 | 0.001 | 40.023 | 0.001 | 40.023 | 0.001 |
| 50.025 | 50.285 | -0.26 | 50.03 | -0.005 | 50.023 | 0.002 | 50.027 | -0.002 | 50.023 | 0.002 |
| 60.017 | 60.606 | -0.589 | 60.04 | -0.027 | 60.013 | 0.004 | 60.013 | 0.004 | 60.013 | 0.004 |
| 70.023 | 69.181 | 0.842 | 70.13 | -0.108 | 70.029 | -0.006 | 70.029 | -0.006 | 70.017 | 0.006 |
| 80.020 | 81.212 | -1.192 | 80.27 | -0.248 | 80.011 | 0.009 | 80.011 | 0.009 | 80.010 | 0.010 |
| 90.034 | 91.606 | -1.572 | 89.51 | 0.523 | 90.020 | 0.014 | 90.048 | -0.014 | 90.020 | 0.014 |
| 100.037 | 101.136 | -1.099 | 99.02 | 1.020 | 100.056 | -0.019 | 100.056 | -0.019 | 100.057 | -0.020 |
| 110.024 | 111.648 | -1.624 | 108.82 | 1.205 | 110.001 | 0.023 | 110.047 | -0.023 | 110.000 | 0.024 |
| 120.052 | 121.280 | -1.228 | 119.00 | 1.051 | 120.024 | 0.028 | 120.023 | 0.029 | 120.022 | 0.030 |

从测试结果来看,采用传统方案的 X 样品的采样精度为 $\pm 1.624\text{ }^\circ\text{C}$;使用优化方案但未对 NTC 进行标定的 Y 样品采样精度为 $\pm 1.205\text{ }^\circ\text{C}$;使用优化方案并对 NTC 进行标定的 $Z_1 \sim Z_3$ 样品的采样精度为 $\pm 0.030\text{ }^\circ\text{C}$,通过以上数据的对比分析,发现对 NTC 进行温度标定可以极大提高温度采样的精度,所以下一步工作重点在于进一步提升 NTC 温度标定的精度。

8 结 论

结果表明通过优化采样电路的硬件设计以及提高采样频率有助于提高温度采样的精度以及分辨率;同时通过提高 R_{pullup} 电阻的精度,以及对整体的温度采样电路进行温度标定可以进一步消除 NTC 带来的 R-T 差异性;再结合标定数据利用 Steinhart-Hart 方程进行精确拟合从而实现高精度的温度采样功能。

当然这还有很大提升空间,目前在 NTC 标定环节还是采用人工标定的方式,操作繁琐复杂、取样数据点密度偏低,不仅影响 NTC 的标定精度而且也不利于大批量产品的标定工作。因此下一步工作在于实现软件自动标定 NTC,即只需要软件自动设定好恒温箱的温度梯度,同时通过温度采样模块的 MCU 自动读取和记录热电偶温度以

及采样的电阻值,再通过 Steinhart-Hart 方程运算即可自动标定完成。与此同时依托软件自动化,标定的采样数据点取值密度可以更大,因此拟合精度也会越精确,可以进一步提升温度采样的精度,具有极大的应用前景。

参考文献

- [1] 张元飞,樊绍巍,刘宏,等.面向高温的 NTC 温度检测系统设计优化及标定[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(1):18-23.
- [2] 张旺东,姚金城,汤新强,等.基于热敏电阻器的双 ADC 高精度温度采集系统设计[J].仪表技术与传感器,2021(9):43-47,53.
- [3] 胡勇,祝忠明,周潞.NTC 热敏电阻 R-T 特性的线性化研究[J].信息通信,2013,(9):28-29.
- [4] 张鹏超,张强.一种 NTC 热敏电阻校对方程的试验研究[J].传感技术学报,2012,25(2):220-223.
- [5] 邱晓波,单东升,杜峰.热敏电阻温度测量的对数优化曲线拟合法[J].仪表技术与传感器,2008(6):91-92.
- [6] 梅小雨,许昌,魏艳红.基于对数的 NTC 热敏电阻测温系统的设计[J].自动化与仪表,2011,26(5):54-57.
- [7] 闻福三,赵京明,王玲玲,等.基于 Matlab 的 PTC、

- NTC 传感器实验[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(11):69-73.
- [8] 张强, 杨永平. 基于神经网络的 NTC 热敏电阻校正方程的试验研究[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2012, 28(2): 6-9.
- [9] 孙斌, 于聪, 周王超, 等. NTC 热敏电阻特性曲线的拟合方法研究[J]. 中国计量学院学报, 2012, 23(1): 75-79.
- [10] 宋佩君. Matlab 在热敏电阻特性测量实验中的应用[J]. 大学物理实验, 2016, 29(4):78-81.
- [11] 冯岩. NTC 热敏电阻应用于温度检测中的误差线性化研究[J]. 科学技术创新, 2016(14): 69-69.
- [12] 李云辉, 王晓东, 朱小明. 基于 NTC 的非平衡桥式测温电路的误差分析[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11): 51-54.
- [13] 刘二林, 姜香菊. 基于热敏电阻的新型温度检测装置研究与实现[J]. 自动化与仪器仪表, 2010(2):84-86.
- [14] 胡鸿志. 基于新型温度传感器的数字温度计设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(8):741-744.
- [15] 周以琳, 李金亮, 杨勇, 等. NTC 热敏电阻 R-T 特性的高精度补偿[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2010, 31(1):80-82.
- [16] 胡斯, 王国富, 叶金才, 等. 基于非线性温度传感器的高精度测量方案设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(5): 112-115.
- [17] 范寒柏, 谢汉华. 基于 NTC 热敏电阻的三种高精度测温系统研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(11): 1576-1579.
- [18] 于光平, 张昕. 过采样方法与提高 ADC 分辨率的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, 28(2):137-139.
- [19] 王萍, 李小京. 利用过采样法提高 A/D 分辨率和信噪比[J]. 仪器仪表学报, 2002(S1):1-2.
- [20] 黄深喜. 高速奈奎斯特模数转换器频域特性测试方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2010.
- [21] 关奉伟, 刘巨, 于善猛, 等. NTC 热敏电阻的标定及阻温特性研究[J]. 光机电信息, 2011, 28(7): 69-73.

作者简介

陈先樑, 本科, 主要研究方向为新能源汽车电池管理系统。

E-mail: Xianliang.Chen@preh.cn

姜钊, 博士, 主要研究方向为智能驾舱和新能源电控。

E-mail: chris.jiang@preh.cn

张勇, 硕士, 主要研究方向为新能源汽车控制系统。

E-mail: yong.zhang@preh.cn