

*Application Note***借助 BQ769x2 和 TMP6x 提高电池管理系统的温度测量性能**

Kian Lin

摘要

实现快速准确的温度测量对于电池管理系统 (BMS) 至关重要，可确保电池免受异常情况的影响。BMS 需要为多串电池包提供足够的温度测量通道。一些标准（如 GB/T 34131-2023）要求测量每个单节电池的温度，确保从 -20°C 到 65°C 的误差小于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

本文档向用户演示如何使用 BQ769x2 串联电池监测器和 TMP6x 线性热敏电阻扩展热敏电阻测量通道并提高温度测量精度。

内容

1 简介	2
2 BQ769x2 温度测量系统	3
3 用于扩展热敏电阻测量通道的多路复用器	4
4 使用 TMP6x 计算温度	6
5 提高温度测量精度	7
5.1 多路复用器选择	7
5.2 热敏电阻引脚上的电容器	7
5.3 修复电阻器校准	8
5.4 测试结果	9
6 摘要	9
7 参考资料	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

电池的工作温度在电池性能、充电、放电和使用寿命方面发挥着重要作用。长时间暴露在高温下会加速老化，并可能导致热失控和爆炸。相反，低温会增加电池电阻，从而导致充电容量显著下降。通常建议锂离子电池在 0-45°C 充电温度范围和 -20-6°C 放电温度范围内工作。

为了解决这个问题，可使用 **BMS** 来监测来自电池的温度数据，然后将数据传输到主机微控制器以调节电池温度。建议使用硅基线性热敏电阻 **TMP61**，该热敏电阻在 0°C 到 70°C 之间的容差为 $\pm 1\%$ ，并具有 -65°C 到 150°C 的宽工作范围。专为锂离子、锂聚合物或磷酸铁锂电池应用而设计的 **BQ76972** 高精度电池组监控与保护器可用于测量 **TMP61** 电压。

BQ76972 器件可支持高达九次外部热敏电阻测量。但是，在多电池数应用中，系统需要更多通道来测量单节电池的温度。多路复用器电路可与 **BQ76972** 一起使用，以支持更多次热敏电阻测量。

本文档介绍了扩展温度测量通道和提高测量精度的设计注意事项。

2 BQ769x2 温度测量系统

BQ769x2 可以在多功能引脚 (TS1、TS2、TS3、CFETOFF、DFETOFF、ALERT、HDQ、DCHG 和 DDSG) 上支持多达九个外部热敏电阻。所有九个引脚都通过内部多路复用器连接到一个内部上拉电阻器，这意味着一次只有一个热敏电阻从辅助电源汲取电流，这样可以在使用多个热敏电阻时实现最低的电流消耗。

内部上拉电阻器有两个选项，可以将上拉电阻器设置为 $18\text{k}\Omega$ 或 $180\text{k}\Omega$ (或者根本不设置)。电阻器的阻值是在工厂生产中测量的，并存储在器件内，以便在温度计算时使用。图 2-1 所示为 BQ769x2 温度管理系统方框图。

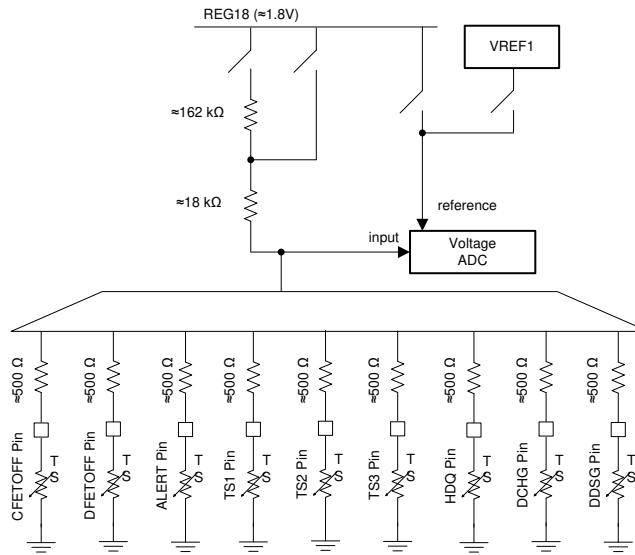


图 2-1. BQ769x2 温度测量系统

通过将特定系数写入温度模型寄存器或使用主机微控制器读取测得的电压原始计数，可以使用 BQ769x2 内部多项式来计算配置为热敏电阻输入的引脚的温度。

电压原始计数在由多个测量槽组成的连续重复测量循环中进行测量，如 图 2-2 所示。

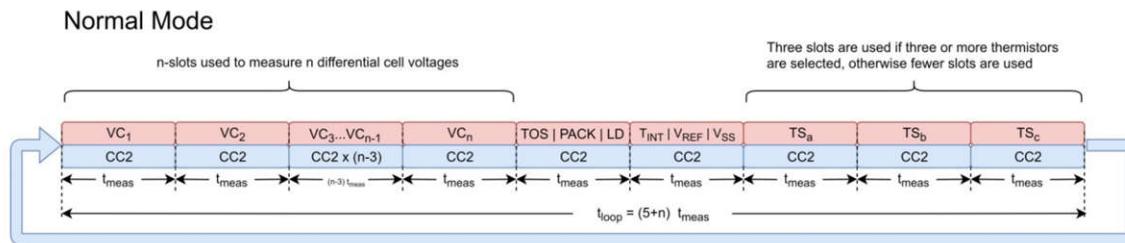


图 2-2. BQ769x2 正常模式测量环路

每个测量环路 (ADCSCAN) 包含多达 21 个测量时隙。仅当引脚配置为热敏电阻输入或 ADCIN 时，才能将最后三个插槽用于多功能引脚测量。九个引脚 (如果配置为热敏电阻输入或 ADCIN) 按照 CFETOFF、DFETOFF、ALERT、TS1、TS2、TS3、HDQ、DCHG 和 DDSG 的顺序进行测量，这些引脚利用三个测量回路作为一个 FULLSCAN 周期来收集完整数据。tmeas 时隙时间默认值为 3ms，不过可以通过设置 [FASTADC] 位将该时间缩短为 1.5ms，但转换分辨率会降低。一个 ADCSCAN 需要 31.5ms (FASTADC = 1) 或 63ms (FASTADC = 0)，因此一个 FULLSCAN 需要 94.5ms (FASTADC = 1) 或 189ms (FASTADC = 0)。内部温度多项式每 250ms 计算一次。

3 用于扩展热敏电阻测量通道的多路复用器

这些引脚中的大多数还可以支持系统中可能需要的其他功能，例如主机处理器的警报中断或用于 FET 关断的硬件引脚控制。如果应用需要的热敏电阻数量超过 BQ76972 本身能够支持的数量，则可以包含额外的多路复用器电路来实现这一点，如图 3-1 所示。

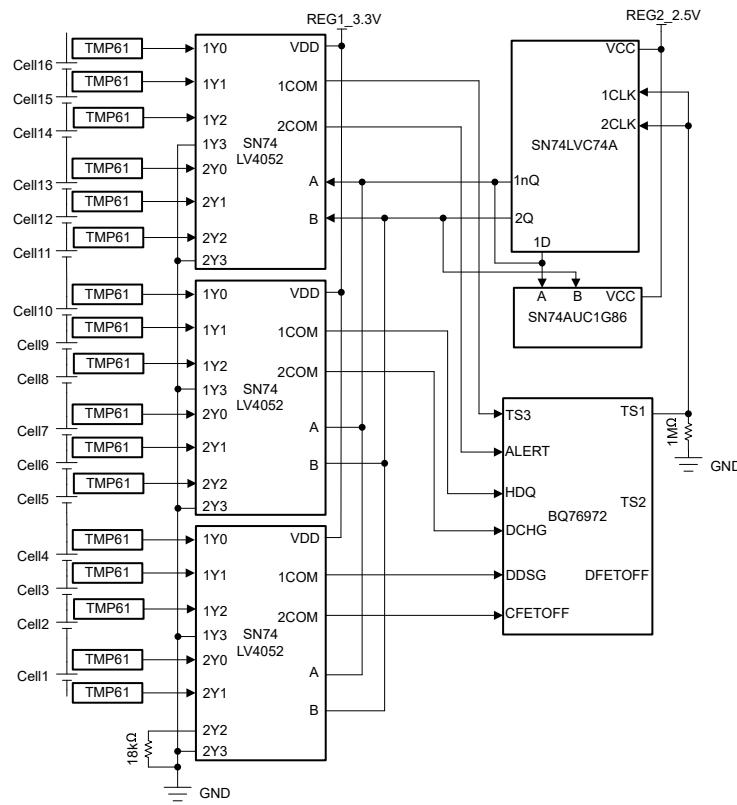


图 3-1. 热敏电阻多路复用器方框图

六个多功能引脚由 4:1 多路复用器进行多路复用，因此一个 BQ76972 在该配置下总共能够测量 17 个热敏电阻、1 个固定电阻和 6 个接地电压。TS2 引脚保留用于唤醒功能，DEFTOFF 引脚用于 MOSFET 充电和放电快速关断。如果设计人员希望保留某些引脚用于其他目的，也有许多型号可供选择。可以根据本节其余部分中演示的基本原理来修改这些电路。

由于该设计将 9 个引脚配置为热敏电阻输入，因此该设计需要 3 个 ADCSCAN 来测量 9 个引脚，称为 FULLSCAN。一个 FULLSCAN 周期持续时间约为 94.5ms (FASTADC = 1) 或 189ms (FASTADC = 0)。该设计使用 4:1 多路复用器来测量 17 个热敏电阻，因此一个完整的温度检测周期 (FULLTEMP) 需要大约 378ms (FASTADC = 1) 或 756ms (FASTADC = 0)。如需了解更多信息，请参阅 [提高电池监测系统中的电压测量精度](#)。

多路复用器更改的时间需要与 BQ76972 的常规测量环路进行一些协调，以避免在测量过程中因更改多路复用器而导致测量中断。此设计使用一种方法来自动控制更改多路复用器的时间，如图 3-1 所示。TS1 引脚可与 $1M\Omega$ 电阻器一起用于为计数为 0 至 3 的外部二进制计数器生成时钟信号。二进制计数器可以简单地由双通道 D 型触发器和或门构建而成，如图 3-2 中所示。

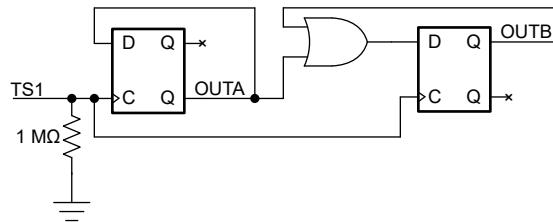


图 3-2. 二进制计数器

图 3-3 显示了 FASTADC=1 时二进制计数器的输出信号。

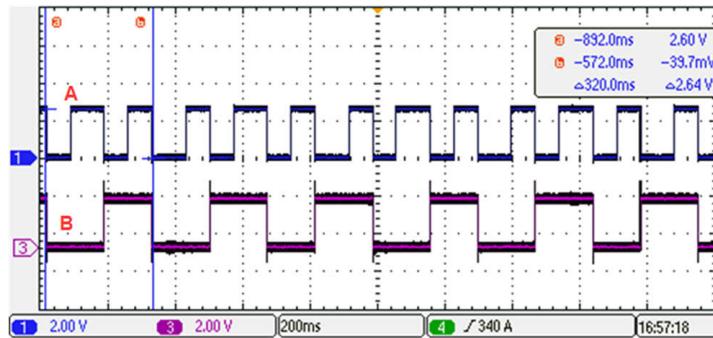


图 3-3. 二进制计数器输出信号

计数控制一个多路复用器，该多路复用器将每个多路复用器上的 3 个热敏电阻和 1 个接地端切换到 6 个引脚之一，因此最多支持总共 18 个热敏电阻。接地通道用于多路复用器电路诊断，这意味着如果您可以在一个引脚上看到每四次测量一次接地检测，则多路复用器会正常工作。18 个通道中的一个连接到高精度固定电阻器，用于温度测量校准。

按照 CFETOFF、DFETOFF、ALERT、TS1、TS2、TS3、HDQ、DCHG 和 DDSG 的顺序测量 9 个引脚，但 BQ76972 仅测量配置为热敏电阻输入的引脚。由于 TS1 用作时钟输入，TS2 不用作实际的热敏电阻，以避免任何可能影响测量的多路复用器稳定瞬变，因为 TS2 是在 TS1 引脚之后立即测量。用户需要通过主机微控制器实施与热敏电阻相关的温度保护，因为 BQ76972 的引脚温度在 3 个热敏电阻和 1 个接地端之间变化。

由于多路复用器每 FULLSCAN 周期切换一次，并且与内部多项式计算周期不同步，因此用户需要使用 ADC 原始数据而不是内部温度多项式来计算温度。若要使用 ADC 原始数据计算温度，用户可以执行以下操作：

1. 从 BQ769x2 中读取存储的上拉和焊盘电阻 R_{pu} 和 R_{pad} 。
2. 可在 **Settings:Configuration:ALERT Pin Config**、**CFETOFF Pin Config**、**DFETOFF Pin Config**、**TS1 Config**、**TS2 Config**、**TS3 Config**、**HDQ Pin Config**、**DCHG Pin Config** 和 **DDSG Pin Config** 配置寄存器中，通过配置选定多功能引脚来测量电阻器。
3. 设置 **Settings:Alarm:Default Alarm Mask** 寄存器中的 FULLSCAN 屏蔽位。
4. 通过监测 `0x62 Alarm Status()|FULLSCAN` 位，等待一个测量周期完成。
5. 发送 `0x0076 DASTATUS6()` 和 `0x0077 DASTATUS7()` 子命令来读取多功能引脚的原始 ADC 计数。
6. 将原始 ADC 计数乘以 $0.358 \mu V$ LSB 可获得测得的热敏电阻电压 V_{sense} 。在每个 FULLTEMP 周期， V_{sense} 会有一次变为大约 0V。
7. 从 V_{sense} 、 R_{pu} 、 R_{pad} 和多路复用器开关电阻 R_{on} 反向计算热敏电阻 R_T ，然后将 R_T 转换为微控制器中的温度值。

4 使用 TMP6x 计算温度

硅基线性热敏电阻具有线性正温度系数 (PTC) , 本设计中使用 TMP61 , 以提高温度测量精度。TMP61 在整个温度范围内都具有良好的线性行为示。与纯阻性器件 NTC 不同 , TMP61 电阻受器件中电流的影响 , 并且电阻会随温度变化而变化。[TMP6 热敏电阻设计](#)仅提供带有固定 $10\text{k}\Omega$ 偏置电阻的 TMP61 的 R-T 表 , 因此如果使用 BQ769x2 来测量 TMP6x , 用户需要使用 TI 提供的特定 R-T 表。

若要将 V_{sense} 转换为温度 , 常用的软件方法之一是使用查询表。这种方法可帮助简化 R-T 表设置 , 但对 MCU 的闪存要求很高 , 并且需要冗长的数组解析程序。由于容差变化和温度系数等系统误差可能导致偏离 R-T 表 , 因此该方法也可能是不准确的。

但是 , 如[方程式 1](#) 中所示 , 使用 TMP6 线性热敏电阻时 , 5 阶多项式回归模型是一种更好的转换算法 :

$$T = A5 \times R_T^5 + A4 \times R_T^4 + A3 \times R_T^3 + A2 \times R_T^2 + A1 \times R_T + A0 \quad (1)$$

其中 T 是温度 (摄氏度) ; R 是测量到的电阻值 ; A0-A5 是计算得出的多项式系数。R_T 根据 V_{sense} 、 R_{pu} 、 R_{pad} 和 R_{on} 反向计算得出 , 如[方程式 2](#) 所示 :

$$R_T = \frac{V_{sense}}{1.8 - V_{sense}} \times R_{pu} - R_{pad} - R_{on} \quad (2)$$

为了获得系数值 , 执行 5 阶多项式拟合可在 R-T 表中获得一系列数据点的最佳拟合。根据 TMP61DEC 封装的 R-T 表、这些系数为 :

- A0 = - 3.513960E+02
- A1 = 9.021910E-02
- A2 = - 1.011904E-05
- A3 = 7.112242E-10
- A4 = - 2.612301E-14
- A5 = 3.863465E-19

这些系数仅适用于 1.8V 偏置电压、 $18\text{k}\Omega$ 上拉电阻器和 TMP61DEC 封装。

5 提高温度测量精度

TMP61 在 [如何使用低成本 TMP6x 线性热敏电阻在整个温度范围内实现 \$\pm 1^\circ\text{C}\$ 精度或更高精确度](#)一文中展示了实现高精确度所需的方法，其中包括：

- 如何执行单点偏移校正，以消除 TMP6x 和热敏电阻偏置电路中其他元件的容差误差。
- 如何实施过采样和软件滤波，以降低噪声和提高测量精度。

除了这些方法外，还可以实施其他系统级注意事项来提高温度测量精度。

5.1 多路复用器选择

多路复用器的选择还会影响温度测量的精度。主要规格和特性包括导通电阻 (R_{ON})、导通电容 (C_{ON}) 以及导通和关断漏电流 (I_{ON} 、 I_{OFF})。导通电阻会影响信号损失和衰减，必须考虑采用较低的 R_{ON} 折衷方案。总电容会影响响应时间、趋稳时间和扇出限值，故必须加予考虑。无论是开关打开还是关断，泄漏电流都会导致直流误差，但只有导通漏电流会在 [图 3-1](#) 配置中引入误差。

用户可以选择精密多路复用器，以便显著减少多路复用器产生的误差和信号失真。例如，TMUX1109 是一款具有典型 $2.5\Omega R_{ON}$ 、 $35\text{pF } C_{ON}$ 和 $3\text{nA } I_{ON}$ 的双通道精密多路复用器，可用作 SN74LV4052A 的替代器件。

5.2 热敏电阻引脚上的电容器

由于热敏电阻通常与电池相连，并且可能需要长导线连接回 BQ769x2，因此在热敏电阻引脚和器件 VSS 之间添加一个电容器可能会对过滤意外的噪声有所帮助。但是，切勿使用过大的电容值，因为当热敏电阻发生偏置以及在对其进行定期测量时，这会影响趋稳时间。BQ769x2 数据表中推荐的一般规则是将电路的时间常数保持在测量时间的 5% 以下。当 **Settings:Configuration:Power Config[FASTADC] = 0** 时，测量时间约为 3ms，当 **[FASTADC] = 1** 时，测量时间减半，大约为 1.5ms。

为了提高温度测量精度，建议根据测试结果，使用较小的电容值。在使用 1nF 滤波电容测量固定 $18\text{k}\Omega$ 电阻时，可以在 [图 5-1](#) 中观察到热敏电阻引脚电压的信号边沿变慢。这会导致 2mV 电压测量误差，进而影响温度测量精度。[图 5-2](#) 演示了将电容降低到 220pF 的结果。测得的电压接近引脚上没有电容器的值。

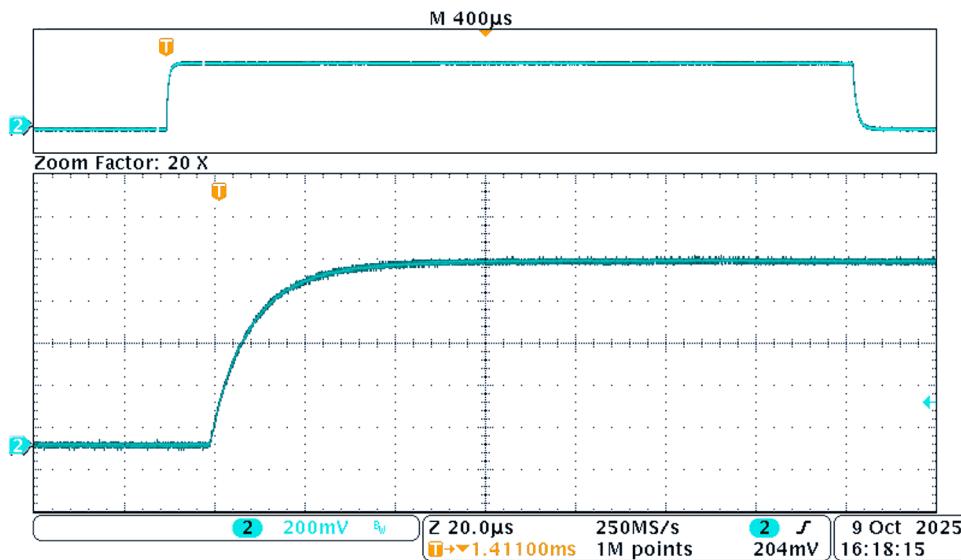


图 5-1. 具有 1nF 电容的热敏电阻引脚电压、 $18\text{k}\Omega$ 固定电阻

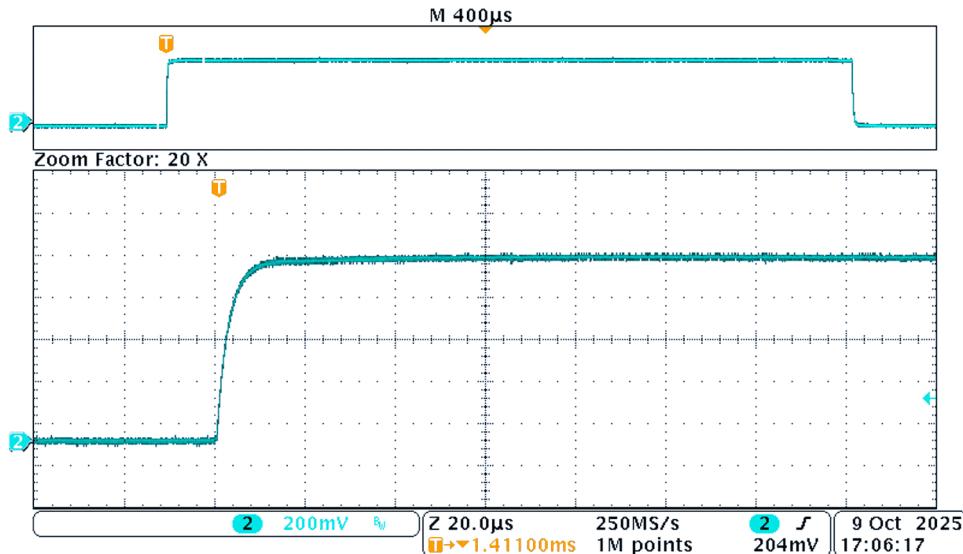


图 5-2. 具有 220pF 电容的热敏电阻引脚电压、18kΩ 固定电阻

5.3 修复电阻器校准

在 -40 至 125°C 温度范围内，TMP61 的电阻变化范围为 6kΩ 至 18kΩ，对应的电压范围为 0.45 至 0.9V。与 -0.2 至 5.5V 的 ADC 输入范围相比，测量电压范围很窄，因此 ADC 引起的误差没有太大差异。

其中一个热敏电阻引脚上的固定电阻可用于校准 ADC 误差。为了提高精度，建议使用具有低电阻容差和温度系数的电阻器。

本文档使用不同的固定值电阻测试实际电压和理论电压之间的误差；结果列于 表 5-1 中。

表 5-1. 具有固定电阻的 ADC 误差

测量电压	电阻	理论电压	电压误差
508.18mV	6,796 Ω	510.38mV	2.20mV
687.82mV	11,006 Ω	690.28mV	2.46mV
896.25mV	17,960 Ω	898.45mV	2.20mV

每次测量的 ADC 误差没有很大差异。因此，可以通过在每次测量中添加相同的 ADC 误差来校准测量电压。

5.4 测试结果

TMP6x 热敏电阻的独特之处在于，与传统负温度系数 (NTC) 热敏电阻相比，这些热敏电阻在整个温度范围内具有相当一致的误差。因此，在本文档中，只需减去单个温度点处的误差，即可在整个温度范围内校准 TMP61 容差误差。

使用固定电阻器校准 ADC 误差以及通过在 0°C 执行单点偏移校正来校准 TMP61 容差误差后，测得的温度误差如图 5-3 中所示。在 -20°C 到 125°C 温度范围内，误差小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

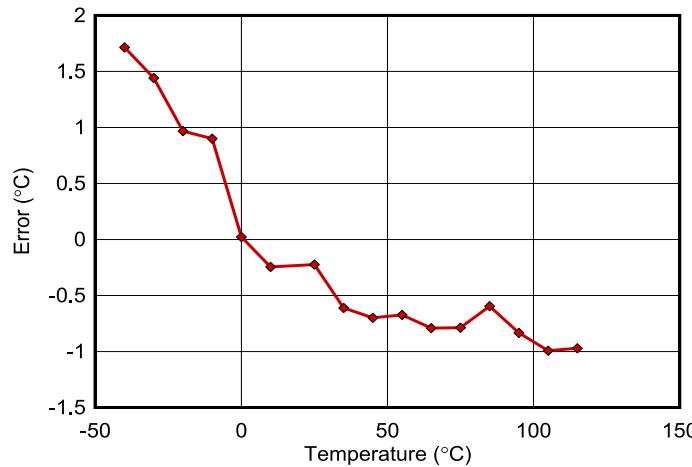


图 5-3. 温度测量精度测试结果

6 摘要

本文档介绍了使用 BQ769x2 和 TMP6x 测量温度时的设计注意事项。采用推荐的校准方法后，测试结果显示在 -20°C 到 125°C 温度测量范围内的误差小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

7 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[BQ769x2 技术参考手册](#)，技术参考手册。
- 德州仪器 (TI)，[NTC 热敏电阻至 TMP6 线性热敏电阻更换指南](#)，用户指南。
- 德州仪器 (TI)，[如何使用低成本 TMP6x 线性热敏电阻在整个温度范围内实现 \$\pm 1^{\circ}\text{C}\$ 精度或更高精度](#)，应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[提高电池监测系统中的电压测量精度](#)，应用手册。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#))、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025 , 德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期 : 2025 年 10 月