

Application Note

基于 MSPM0 的自校准电流检测解决方案



Eason Zhou

摘要

本应用手册旨在介绍基于 MSPM0 内部 OPA 的自校准、高精度、低成本电流检测解决方案。本文档介绍了与 MSPM0 内部 OPA 使用方法配对的校准方法。最后，它还展示了不同温度下的测试性能。

本应用手册中讨论的工程配套资料可从以下 URL 下载：<https://www.ti.com/cn/lit/zip/slaaee6>。

内容

1 引言	2
2 硬件简介	4
3 软件简介	5
4 测量仪表 GUI 简介	5
5 电流检测和校准方法	7
5.1 MSPM0 OPA 简介	7
5.2 电流检测方法	9
5.3 电流校准方法	9
6 解决方案评估步骤	11
6.1 第 1 步：硬件准备	11
6.2 步骤 2：评估	11
7 MSPM0 测量仪表解决方案测试结果	12
7.1 校准测试结果	12
7.2 电流检测结果	13
7.3 电流消耗测试	15
8 解决方案摘要和改进方向	16
8.1 分流电阻器	16
8.2 ADC 及其基准	16
8.3 运行时间校准	16

插图清单

图 1-1. MSPM0 电流检测硬件板	2
图 1-2. MSPM0 电流检测软件工程	3
图 1-3. MSPM0 测量仪表 GUI 工程	3
图 2-1. MSPM0 测量仪表板方框图	4
图 2-2. 测量仪表板说明	5
图 3-1. 软件工程视图	5
图 4-1. MCU COM Tool 功能	6
图 4-2. SM COM Tool 功能	6
图 5-1. 电流检测方框图	7
图 5-2. MSPM0 OPA 限制	8
图 5-3. MSPM0 斩波器功能	8
图 5-4. 电流校准结构	10
图 6-1. 模式设置	11
图 6-2. 硬件设置和连接	12
图 7-1. 25°C 下的 (R1+R2)/R1 测试数据	12
图 7-2. 25°C 下的 OPA1 失调电压测试数据	12
图 7-3. 25°C 下的 (R3+R4)/R3 测试数据	13

图 7-4. 在 25°C 下测试和计算得出的 Vref.....	13
图 7-5. 25°C 下的电流测试图形及其误差.....	14
图 7-6. 0°C 下且校准温度为 25°C 时的电流测试.....	14
图 7-7. 0°C 下且校准温度为 0°C 时的电流测试.....	14
图 7-8. 50°C 下且校准温度为 25°C 时的电流测试.....	15
图 7-9. 50°C 下且校准温度为 50°C 时的电流测试.....	15
图 7-10. 电流消耗.....	15
图 8-1. 运行时校准硬件结构.....	16

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

此解决方案的特点如下所示：

- 支持双向电流检测。
- 可以自校准 OPA 的电压失调和增益设置。
- 可以进行动态增益设置，以在低电流到高电流范围内达到很高的精度。
- 在 $\pm 2A$ 负载下，室温下的检测误差可达到 $\pm 0.25\%$ 。
- 采样速率为 1Hz 时，电流消耗可达 $8 \mu A$ 。

此解决方案主要是针对 MSPM0 测量仪表解决方案而开发，下一节介绍了如何检测和测试电池的放电和充电电流。对于其他电流检测用例，您也可以将此注意事项作为参考。

该解决方案由三部分组成。MSPM0 测量仪表解决方案重复使用所有软件和硬件。所有这些都可在 [MSPM0 电流检测开发软件包](#) 中找到。您也可以在 SDK 下找到 MCU 代码 (mspm0_sdk_xxx\examples\nortos\LP_MSPM0L1306\battery_gauge)。

- 硬件板用于评估集成了 MSPM0L130x 的电流检测解决方案。

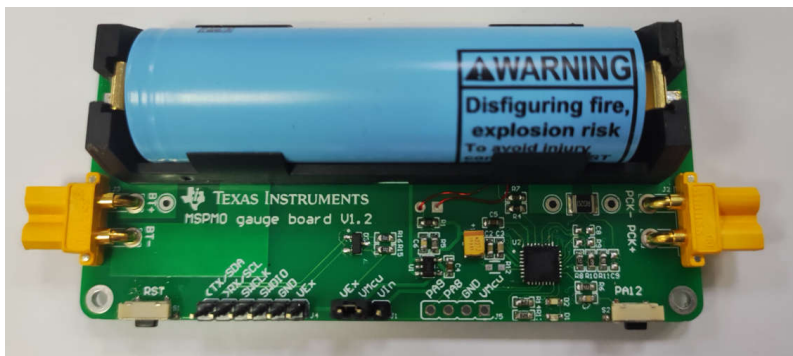


图 1-1. MSPM0 电流检测硬件板

- 它是基于 MSPM0L130x 的软件工程。

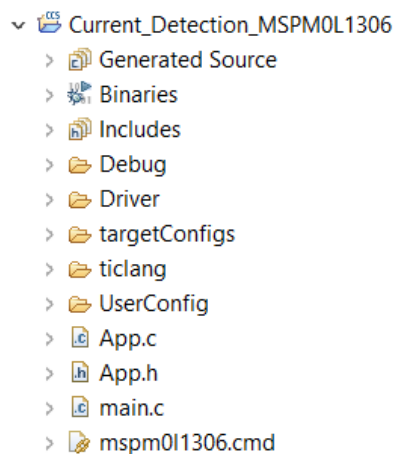


图 1-2. MSPM0 电流检测软件工程

- 这是 GUI。它是用 Python 编写的，主要用于从电路板读取测试数据。

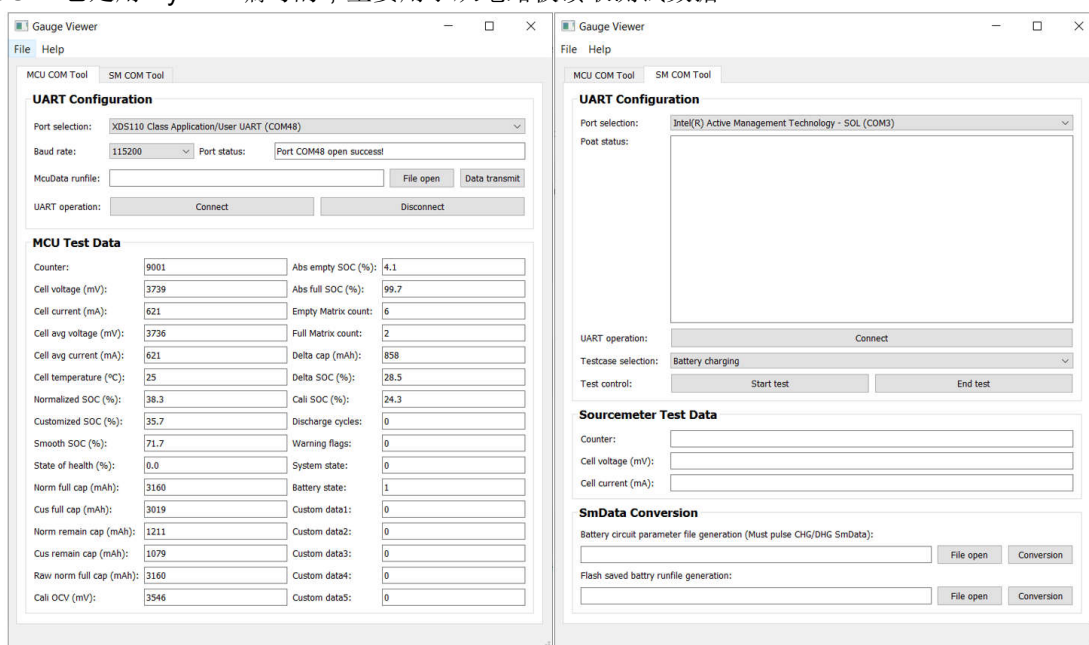


图 1-3. MSPM0 测量仪表 GUI 工程

2 硬件简介

图 2-1 是一个硬件简要方框图，展示了本演示使用的所有引脚。该解决方案演示了如何测试 ADC 通道 13 的电流、ADC 通道 5 的温度以及 ADC 通道 1 的电压。

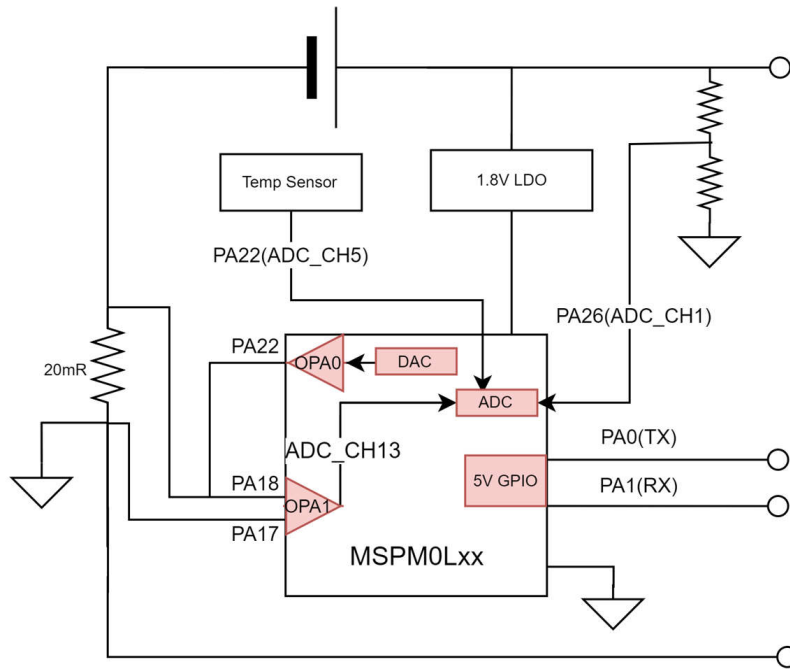


图 2-1. MSPM0 测量仪表板方框图

此设计可以使用以下 MSPM0 特性：

- 用于温度、电流和电压检测的高精度 12 位 ADC。
- 用于电流检测的集成高精密斩波器 OPA。
- 具有 UART 或 I2C 功能的 5V 容限开漏 I/O，可在不同电源轨下与主器件通信。
- 低至 1.62V 的工作电压，支持单节电池全电压范围。
- 低至 1.1 μ A 待机电流，具有 SRAM 保持功能，适用于电池应用。

在这里，我们简要介绍硬件板及其使用方法。对于电池，您可以将其插入默认插座或连接到备用电池电源输入。调试和 UART COM 端口用于连接到可下载代码或与 GUI 通信的 PC。

备注

注意 MCU 电源开关供电跳线。为了进行下载，请将 VMCU 连接到 VEx，然后为 MCU 提供 3.3V 电压，这样可以确保电压与调试器匹配。为了进行评估，请将 VMCU 连接到 Vin，然后为 MCU 提供 1.8V LDO。这样可以确保出色的模拟性能。

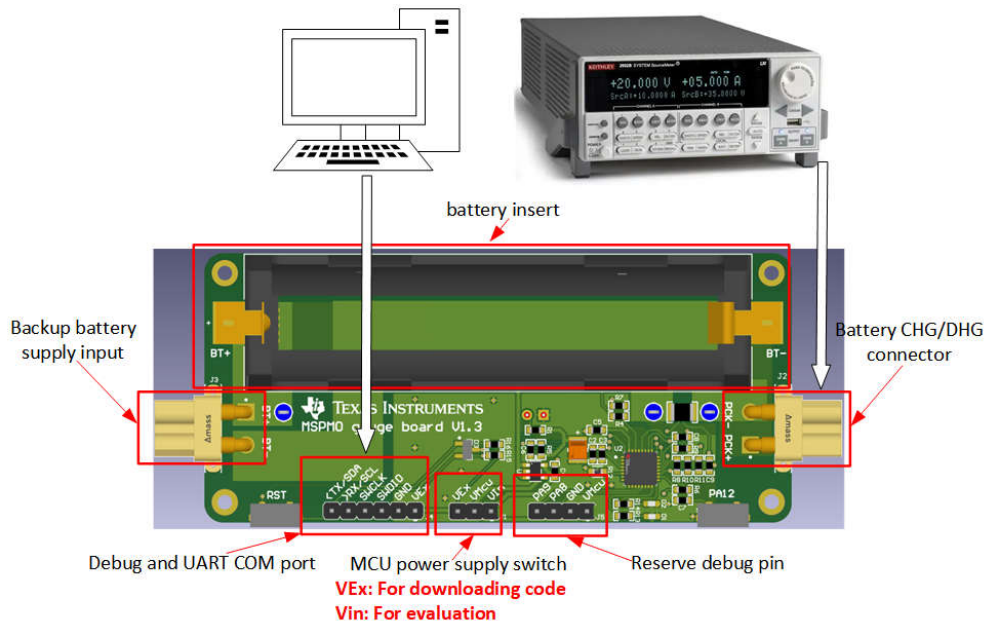


图 2-2. 测量仪表板说明

3 软件简介

图 3-1 展示了软件工程。与电流检测相关的工程和文件有四个部分。所有 MSPM0 工程的其他文件都是相同的。

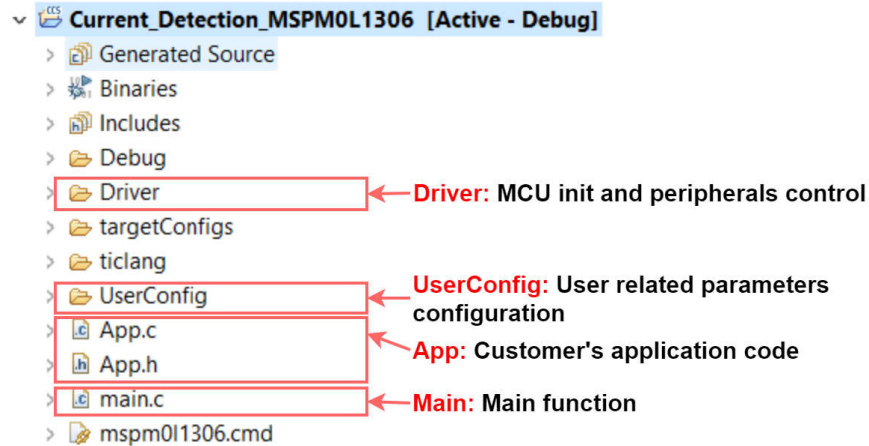


图 3-1. 软件工程视图

对于 UserConfig 部分，它包含在节 6.2 中。对于 Driver 部分，它包括所有 MSPM0 外设初始化和低级函数。节 5 介绍了电流检测工作原理。对于 App 部分，它包含高级软件函数调用，客户可以在这里自定义自己的函数。对于 Main 部分，它包含最高的系统功能代码。

4 测量仪表 GUI 简介

在本演示中，测量仪表 GUI 将用于记录 MCU 数据、运行电池测试用例和执行数据转换。此 GUI 有两页。第一页是 MCU COM Tool，用于与 MSPM0 进行通信并记录 MCU 传送的电池运行数据。第二页是 SM COM Tool，用于与源表进行通信、运行电池测试用例并记录源表发出的测试数据。

用于电流检测的功能是从 MCU 接收电池运行数据，如图 4-1 的功能 1 所示。SM COM Tool 中的电池测试用例完成后，或者您通过按下“Disconnect”按钮停止测试后，数据会自动保存在名为“time-McuData.xlsx”的 Excel 文件中。

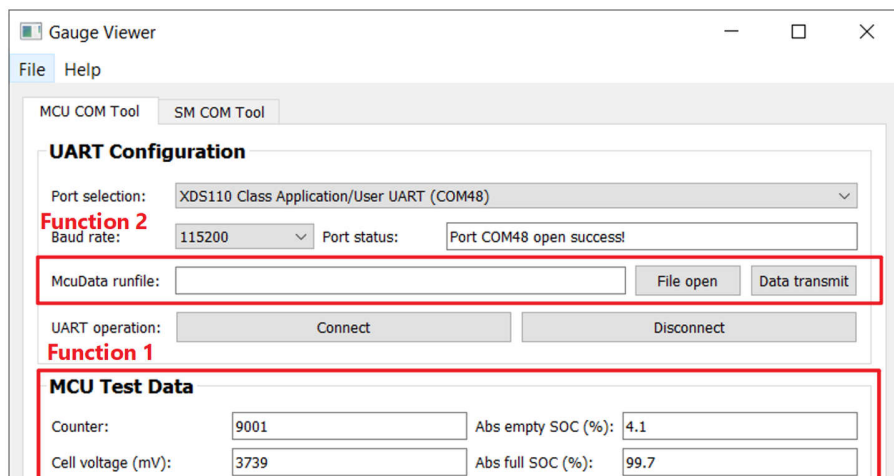


图 4-1. MCU COM Tool 功能

对于 SM COM Tool，用于电流检测的功能是功能 1，如图 4-2 所示。它用于控制源表来运行电池测试用例，从而测试电流检测性能并在 GUI 上显示由源表测量到的数据。测试完成后，从源表发送的记录数据将保存在名为“time-SmData.xlsx”的 Excel 文件中。如果要重新创建此部分，对于软件，至少需要安装 NI_VISA。对于硬件，需要购买一个 USB 转 RS232 导线和 Keithley 2602A 源表。

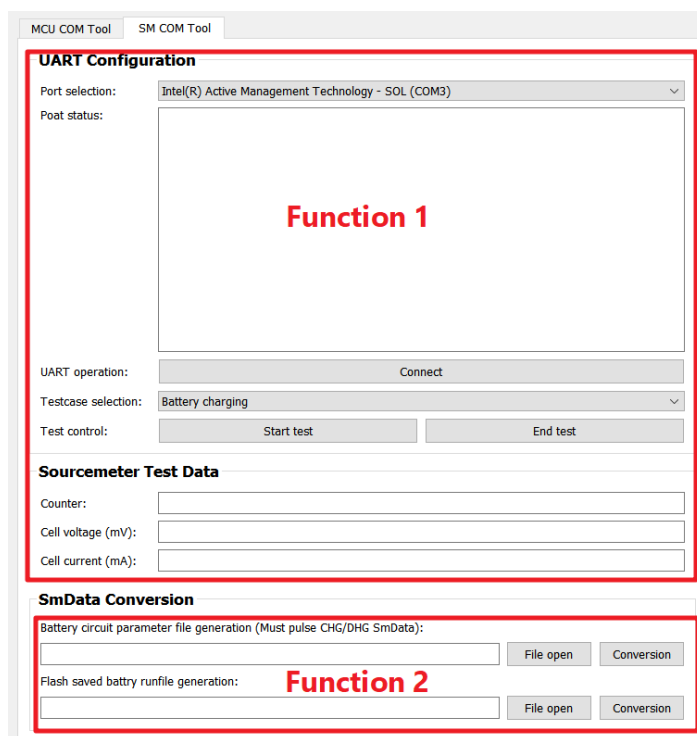


图 4-2. SM COM Tool 功能

5 电流检测和校准方法

这是电流检测方框图。我们可以看到此解决方案利用了：

- 两个高精度内部 OPA。一个 OPA 用作 DAC 的缓冲器。另一个用于为分流电阻两端的电压生成增益。
- 一个内部 DAC。用于为与 OPA0 配对的电流检测生成动态偏置电压。
- 灵活的内部增益，这是实现不同检测范围的关键点。如果您增加增益，则检测范围会变小，但其分辨率也会增加。
- 内部 SAR ADC。用于校准和检测 OPA0 的电压输出。

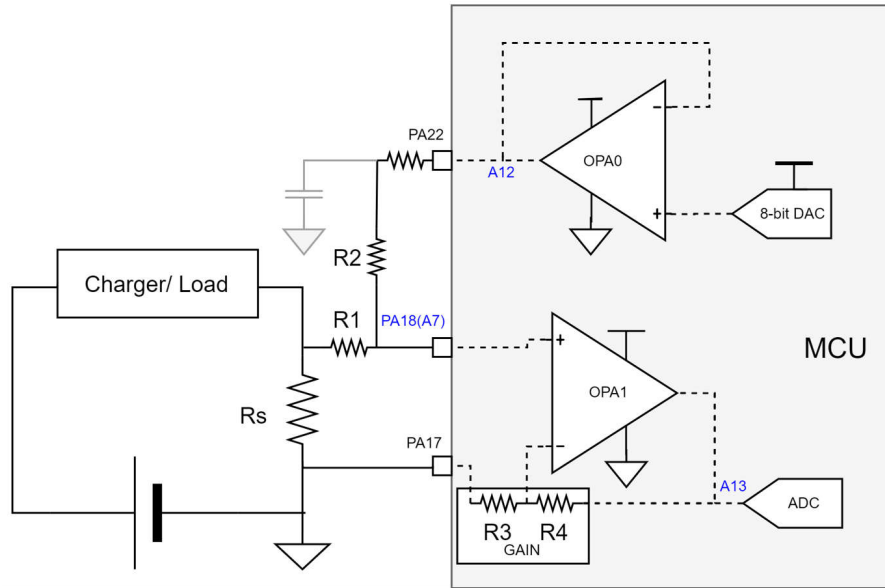


图 5-1. 电流检测方框图

5.1 MSPM0 OPA 简介

本部分介绍了 MSPM0 OPA 参数，可帮助您更好地了解如何获得出色的 OPA 性能以及 OPA 限制是什么。

5.1.1 OPA 输入和输出限制

OPA 有一些与运行限制相关的参数。如果超出这些参数，OPA 的线性度将最差。这意味着检测电流被限制在一定的范围内。

主要参数是共模电压范围和电压输出摆幅。图 5-2 展示了当 VDD 设置为 1.8V 且 RRI=1 时 MSPM0L130x 的限制值。对于此器件，要达到数据表上的典型开环电压增益值，应将输出电压控制在比电压输出摆幅范围更小的电压范围 (0.3V ~ VDD-0.3V) 内。如果高于此范围，则开环增益将减小。在本电流检测演示中，它未考虑影响小于其他两个参数的开环增益，尤其是在低增益设置下。

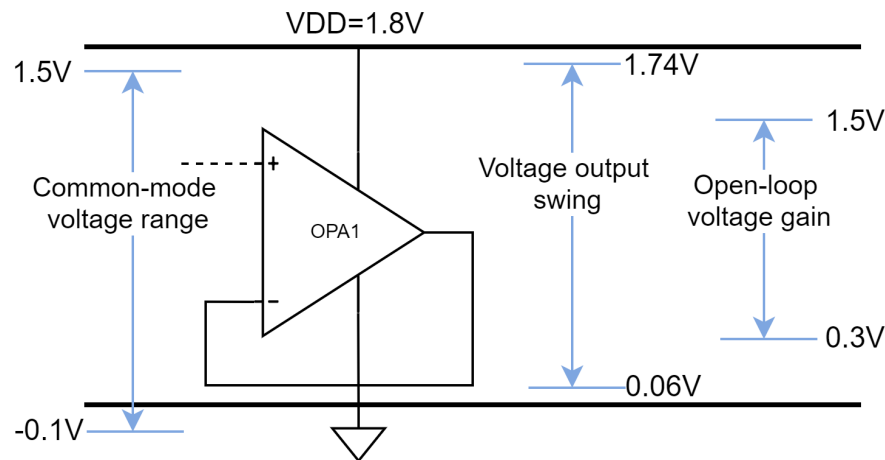


图 5-2. MSPM0 OPA 限制

5.1.2 OPA 精度影响

OPA 增益精度受三个参数的影响：

- 第一个是输入偏置电流。
- 第二个是输入直流电压失调。
- 第三个是 OPA 噪声。

由于 MSPM0 OPA 使用 CMOS 技术，因此栅极与传导通道物理隔离，从而产生真正具有高阻抗的输入。它的输入偏置电流参数主要是来自 ESD 结构、保护二极管和/或寄生结的泄漏电流的组合。这意味着，输入偏置电流可以有正电流或负电流，具体取决于条件。与双极放大器实现方案不同，在该硬件设计中，这就是 OPA 同相输入未使用匹配电阻器的原因。从计算结果可以看出，偏置电流对 OPA 输出的影响低于 1mV，也可以在稍后进行校准。

对于输入电压失调，斩波功能更有助于降低其影响。启用斩波功能后，最大输入失调电压从 3.5mV 变为 0.5mV，如 MSPM0L1306 数据表的第 7.17 章所示。斩波功能通过调制输入信号和解调输出信号来实现这一结果。对于输入信号，它在调制和解调后将保持不变。对于输入电压失调，它在信号调制后开始生效，并将与信号一起进行解调。因此，斩波功能会将直流电压输入失调更改为交流电压输出失调，而不会影响输入信号。

对于 MSPM0 上的 OPA，它具有一个 ADC 辅助斩波模式。启用 ADC 硬件过采样后，斩波频率由 ADC 采样频率控制（请参阅图 5-3）。由于硬件采样时间是一个偶数，正电压输出失调和负电压输出失调的采样时间将是相同的。在最终均值计算之后，可以通过数字滤波器消除交流电压失调，这意味着您不再需要硬件滤波器！由于斩波技术无法真正消除电压失调，因此在计算输出电压范围时，除了电压输出摆幅范围限制外，还需要考虑电压失调。正如电流检测演示中显示的电压失调校准，电压失调参数主要影响检测电流范围。

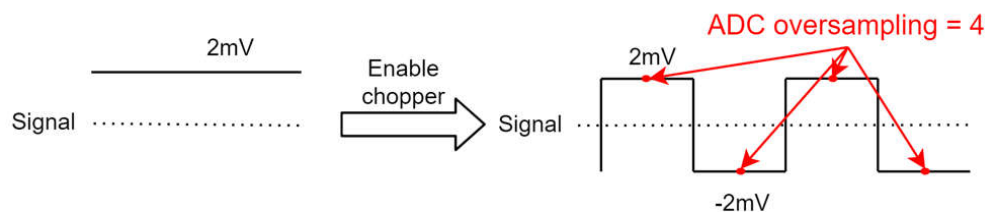


图 5-3. MSPM0 斩波器功能

OPA 噪声是主要影响电流检测性能的关键参数。但是，在启用斩波功能之后，您可以有效地降低部分噪声（ $1/f$ 噪声），因为斩波会将基带信号移至超出输入级 $1/f$ 区域的斩波频率。与软件均值计算滤波器配合使用时，您可以将总交流噪声控制在可接受的水平。

5.2 电流检测方法

在本部分中，我们将使用公式来说明如何通过更改图 5-1 中 R3 和 R4 的电阻值，采用动态增益设置进行电流检测。

方程式 1 展示了 OPA1 输出电压。I 是要测试的电流。Voffset 包含电压失调和偏置电流的影响。

$$V_o = \left(\frac{V_{DAC} + OPA0 - I R_S}{R_1 + R_2} R_1 + I R_S \right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) + V_{offset} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{DAC} + OPA0 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} I R_S \right) \frac{R_3 + R_4}{R_3} + V_{offset} \quad (1)$$

当 I = 0 时，记录 OPA1 输出电压作为电流计算的基准。这里使用 Vref 在方程式 2 中表示它。

$$V_{ref} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{R_3 + R_4}{R_3} V_{DAC} + OPA0 + V_{offset} \quad (2)$$

当 I ≠ 0 时，OPA1 输出电压和 Vref 之间的差值将如方程式 3 所示。

$$V_o - V_{ref} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{R_3 + R_4}{R_3} I R_S \quad (3)$$

进行这种减法后，您可以消除 Voffset 影响，并且可以使用方程式 4 计算电流。

$$I = \frac{V_o - V_{ref}}{R_S} \frac{R_3}{R_4 + R_3} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (4)$$

更改增益时需要考虑的是共模电压 (Vc)，因为更改增益设置会导致结构不对称。如果将 Vc 考虑在内，OPA1 输出电压可以如方程式 5 中所示。

$$V_o = \left(\frac{V_{DAC} + OPA0 - I R_S - V_c}{R_1 + R_2} R_1 + I R_S + V_c - V_c \right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) + V_{offset} + V_c = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{DAC} + OPA0 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} I R_S \right) \frac{R_3 + R_4}{R_3} + V_{offset} + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{R_3 + R_4}{R_3} - 1 \right) V_c \quad (5)$$

要控制结构不匹配的影响，需要控制 Vc 的电压电平。这就是为什么您需要将 MCU GND 分配给靠近 PCB 布局上 Rs 的位置。

5.3 电流校准方法

本节介绍了如何使用 ADC 对电路进行校准，以获得更准确的结果。

要实现此校准，您需要对外设设置进行一些更改。有关这些工作结构和使用的 ADC 通道，请参阅图 5-4。为了进行总体校准，建议在 0 负载/充电器下进行。否则，它会影响增益系数校准精度。有关 MCU 上电后无法确保电流为 0 的情况，请参阅节 8.3 获取详细说明。以下部分展示了实际代码校准流程之后的每个校准细节。

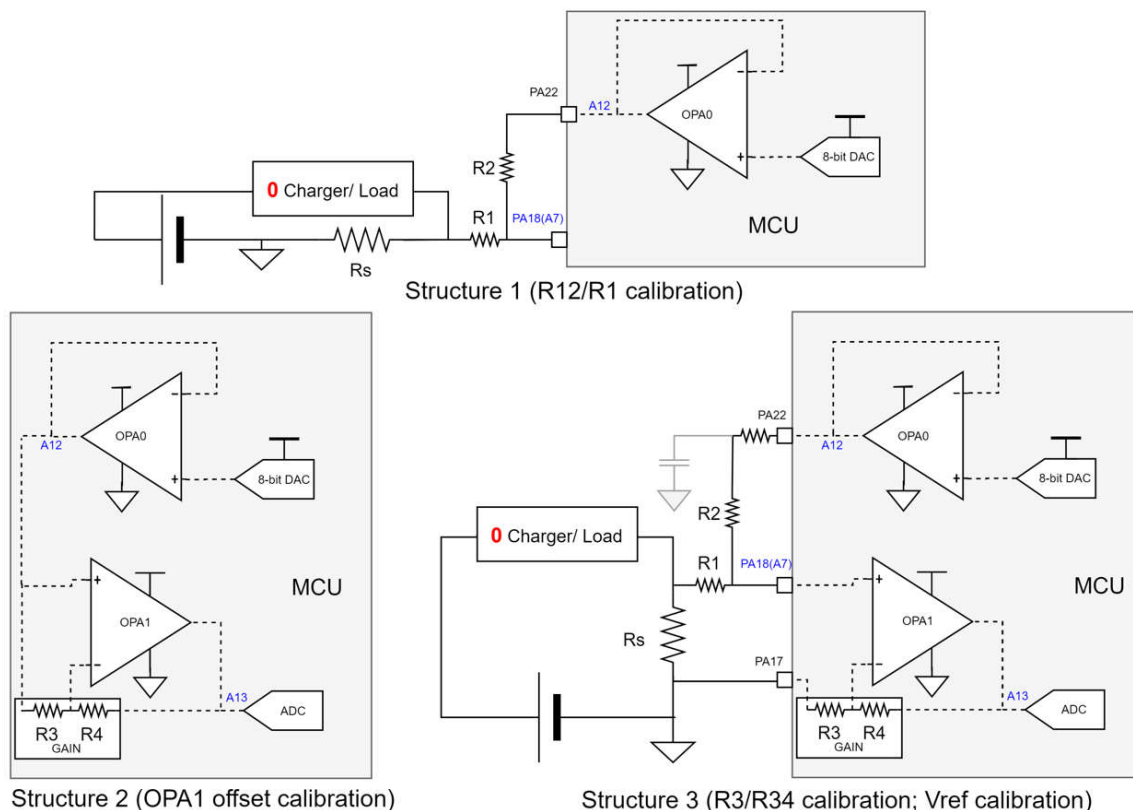


图 5-4. 电流校准结构

5.3.1 (R1+R2)/R2 校准

如需更多信息，请参阅图 5-4 中的结构 1。ADC 通道 12 和 ADC 通道 7 用于测试电压除以 R1 和 R2 的值。您还将增大 DAC 输出，使 OPA1 输出接近 ADC 满量程，从而提高精度。为了降低 GPIO 布线对电阻的影响，选择直接测试 OPA0 内部 ADC 布线的电压，而非 GPIO 输出 (PA22/A4) 端的电压。方程式 6 是基于 ADC 检测到的数据的校准公式：

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{N_{A12}}{N_{A12} - N_{A7}} \quad (6)$$

在此电流检测演示中，VDD=1.8V 且所选内部基准为 1.4V。为了在 GAIN32 和 GAIN16 设置与 DAC 变化成对的情况下获得较高的可变 OPA1 电压输出范围，我们选择使 (R1+R2)/R1 = 8。

5.3.2 OPA1 Voffset 校准

之所以要进行 Voffset 校准，是因为您希望在校准 R3/(R4+R3) 时降低其影响。如需更多信息，请参阅图 5-4 中的结构 2。您将更改 OPA1 输入上的信号连接，从 GND(MSEL) 和 PA18(PSEL) 更改为 OPA0 输出 (MSEL 和 PSEL)。通过比较 OPA0 和 OPA1 输出端的电压，您可以了解 OPA1 输出失调电压。在本演示中，使用了两种不同的增益设置，您还需要进行两次失调电压校准。方程式 7 展示了基于 ADC 检测数据的公式。

$$N_{Voffset} = N_{A13} - N_{A12} \quad (7)$$

虽然这会增加某种增益误差 (因为 R3 值与差分结构略有不同)，但我们更改该结构的关键原因是 Voffset 误差是可以接受的 (这是因为在斩波之后输出电压失调很小)，并且需要 DAC 偏移 (因为电压失调可能是双向的)。

5.3.3 R3/(R4+R3) 校准

如需更多信息，请参阅图 5-4 中的结构 3。R3/(R4+R3) 校准结构与最终电流测试的结构相同。区别在于 DAC 输出增加，以使 OPA1 输出接近 ADC 满量程，从而获得更高的精度。不用测试 PA18 处的电压，而是使用校准后的

(R1+R2)/R1 值和 A12 处的检测结果来计算 PA18 电压。与直接将 OPA0 连接到 PSEL MUX 相比，这有助于提高分辨率并降低 DAC 噪声。对于本演示，您还需要进行两个不同的 R3/(R4+R3) 校准。方程式 8 展示了基于 ADC 检测数据的公式。

$$\frac{R_3}{R_4 + R_3} = \frac{\frac{R_1}{R_1 + R_2} * N_{A12}}{N_{A13} - N_{Voffset}} \quad (8)$$

5.3.4 Vref 校准

对于 Vref 校准，您将 OPA1 输出电压控制为接近 1/2 ADC 基准电压，然后保存该值。如需更多信息，请参阅图 5-4 中的结构 3。外设设置与最终电流检测结构相同。在本演示中，使用了两个增益设置，需要保存两个 Vref 校准结果。

6 解决方案评估步骤

6.1 第 1 步：硬件准备

如果要评估此整体解决方案，需要先设计测量仪表板。

为了测试和评估电流检测性能，您还需要准备源表或其他电池测试机来控制电池充电和放电。

6.2 步骤 2：评估

开始之前，UserConfig.h 中有一些与评估相关的设置。

```
UserConfig.h ×
6 // #define DEBUG //Transmit calculated data to COM port
7 // *****Algorithm data output mode selection*****
8 // #define OUTPUT_MODE (NO_OUTPUT)
9 #define OUTPUT_MODE (UART_OUTPUT)
10
11 // *****Customized configuration settings*****
12 #define VCELL_FACTOR (3.2)
13 #define SHUNT_RESISTOR_VALUE_R (0.02)
14 #define NTC_PAIR_RESISTOR_VALUE (10000)
15 #define ADC_AVERAGE_TIMES (2)
16 #define ADC_SAMPLE_TIME (10)
17 #define CURT_CALI_TEMP_THD (5)
```

图 6-1. 模式设置

如果您启用“DEBUG”的定义，则可以看到 UART1 输出的电流校准数据。

对于不同的输出模式，“UART_OUTPUT”意味着通过 UART1 实现数据输出。然后，您可以在 GUI 上观察运行参数。“NO_OUTPUT”意味着终止 UART 数据输出。

对于自定义配置设置，您可能需要根据硬件设置更改“VCELL_FACTOR”、“SHUNT_RESISTOR_VALUE_R”和“NTC_PAIR_RESISTOR_VALUE”。

图 6-2 展示了硬件测试设置。您需要 MSPM0 测量仪表板和真实电池进行测试。您可以将电池插入插座并在 J2 上对其充电或放电。您还可以将电源直接连接到 J3。

检测数据 (Vcell、Icell 和 Tcell) 来自 MSPM0 模拟外设。然后，它通过 J4 上的 UART1 将数据发送到 GUI。GUI 可以帮助记录电池运行数据，以便进一步分析。

为了确保编程引脚的电压与 MUC 的调试端口匹配，在对 MSPM0 进行编程时，请使用跳线将 J1 上的 VMCU 和 VEx 连接起来。由于 UART1 端口支持高达 5V 的输入和输出电压，因此在评估时，可使用跳线将 J1 上的 VMCU 和 VIn 连接起来。

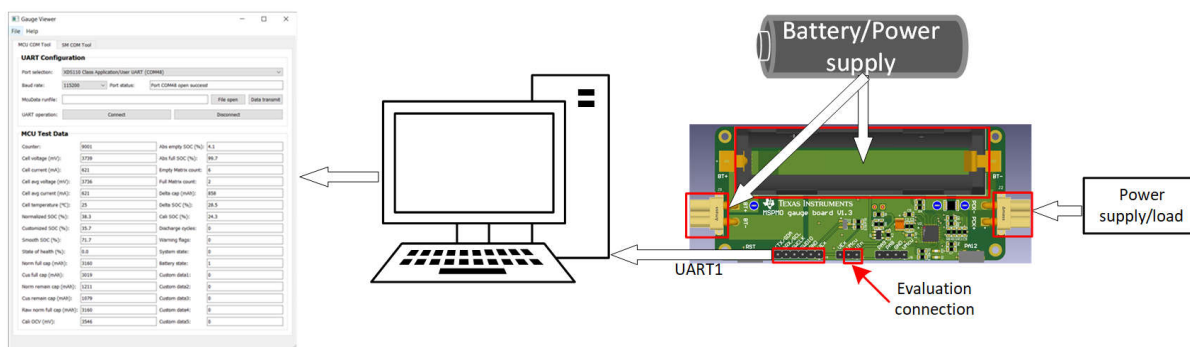


图 6-2. 硬件设置和连接

7 MSPM0 测量仪表解决方案测试结果

7.1 校准测试结果

启用“DEBUG”后，可以通过 UART1 输出校准数据。此数据有助于评估校准误差。此部分中显示的数据均来自一个电源电压为 1.8V 的 MSPM0L1306，以及 25°C 下具有 1.4V 内部基准电压的 12 位 ADC。

图 7-1 展示了 $(R1+R2)/R1$ 的测试数据。您可以看到值波动为 $\pm 0.13\%$ 。

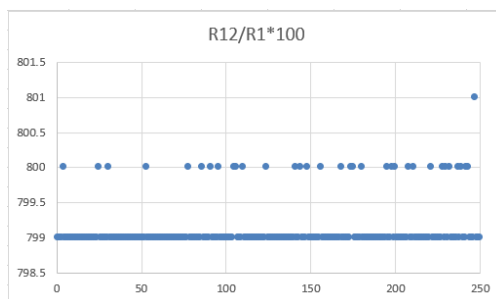


图 7-1. 25°C 下的 $(R1+R2)/R1$ 测试数据

图 7-2 展示了具有不同增益的电压输出失调。它们均低于 0.7mV。

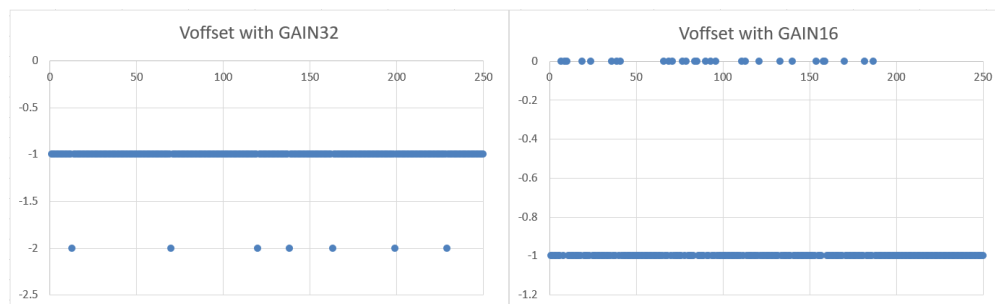


图 7-2. 25°C 下的 OPA1 失调电压测试数据

图 7-3 展示了 $(R3+R4)/R3$ 的测试数据。可以看到 GAIN32 下的值波动为 $\pm 0.11\%$ 。对于 GAIN16，该值为 $\pm 0.13\%$ 。

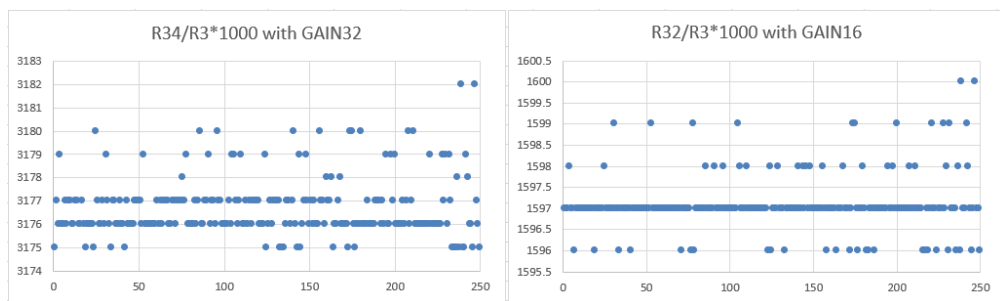


图 7-3. 25°C 下的 $(R3+R4)/R3$ 测试数据

要评估校准精度，请在电流为 0 时比较通过方程式 2 计算出的 V_{ref} 和通过 ADC 通道 13 接受测试的 V_{ref} 。请注意，测试数据是来自具有 1.4V 基准电压的 12 位 ADC 的原始数据。 V_{ref} 大约为 0.7V，接近 $\frac{1}{2}$ ADC 基准。

您可以看到，在两种增益设置中，接受测试的 V_{ref} 几乎只发生了 1 或 2 个 ADC 计数变化。如果您将被测试的 V_{ref} 视为 GAIN32 设置的准确值，计算得出的最大 V_{ref} 误差大约为 0.2%。对于 GAIN16 设置，约为 0.15%。

从这些结果中可以看出，自校准结构非常稳定且精度非常高。

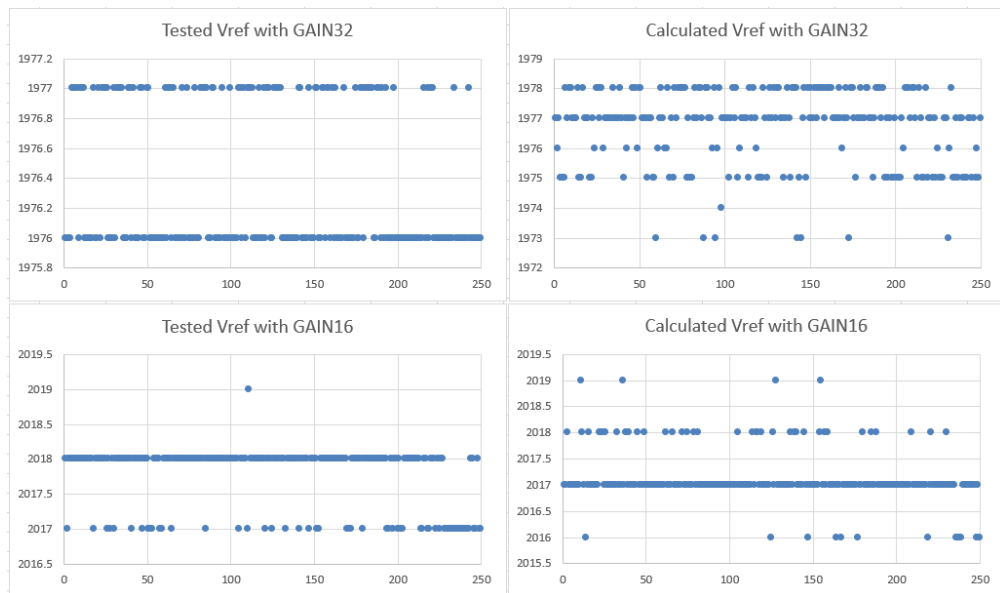


图 7-4. 在 25°C 下测试和计算得出的 V_{ref}

7.2 电流检测结果

本节介绍了 MSPM0 在不同温度下同时使用源表时的电流检测测试性能。在此电流检测演示中，所用的分流电阻为 20mR。当电流达到大约 1A 时，增益设置从 GAIN32 变为 GAIN16，当电流达到大约 0.7A 时，增益设置从 GAIN16 变为 GAIN32。

为了达到更高的电流检测分辨率，可以使用较大的电阻值，但在增益方面，该解决方案受到最大内部增益 (32x) 的限制。

7.2.1 在 25°C 下测试

图 7-5 展示了 25°C 下的电流测试图形（左）和检测误差（右）。您会发现此解决方案可以将 $\pm 2000\text{mA}$ 范围电流的误差控制在 5mA 以内。在 $\pm 2000\text{mA}$ 时，误差百分比低于 $\pm 0.25\%$ 。

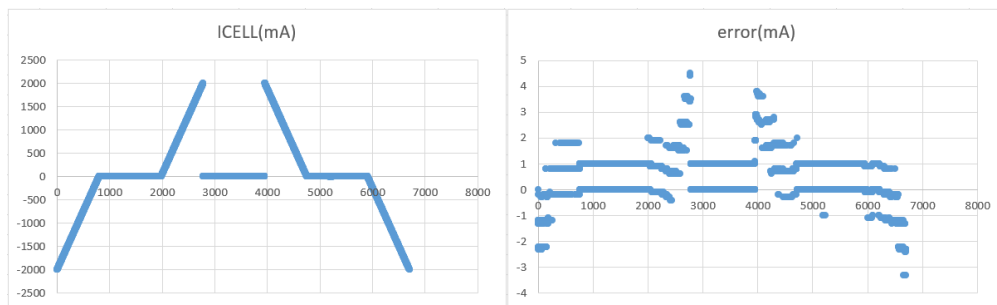


图 7-5. 25°C 下的电流测试图形及其误差

7.2.2 在 0°C 下测试

图 7-6 展示了 0°C 下的电流测试图形 (左) 和检测误差 (右)。但是, 增益系数是在 25°C 时获得的。这就是您为什么发现电流为 0 时偏移为 4mA 的原因。在将此 4mA 电流传输到输出电压漂移并与 V_{ref} 进行比较后, 您可以评估增益系数漂移约为 0.4% ($V_{ref}=700\text{mV}$ 时, 输出电压漂移约为 2.56mV)。

在这种情况下, 您会发现此解决方案可以将 $\pm 2000\text{mA}$ 范围电流的误差控制在 22mA 以内。在 $\pm 2000\text{mA}$ 时, 误差百分比低于 $\pm 1.1\%$ 。

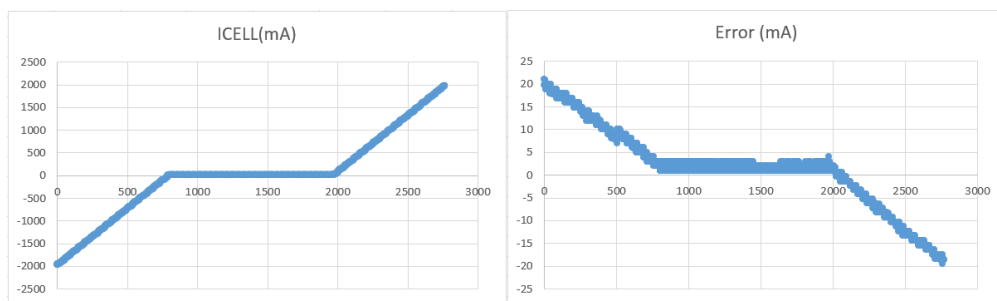


图 7-6. 0°C 下且校准温度为 25°C 时的电流测试

看看在 0°C 下执行增益系数校准时会发生什么情况。您会发现失调电流降至 3mA。不过, $\pm 2000\text{mA}$ 范围电流的误差可达到 25mA。在 $\pm 2000\text{mA}$ 时, 误差低于 $\pm 1.3\%$ 。

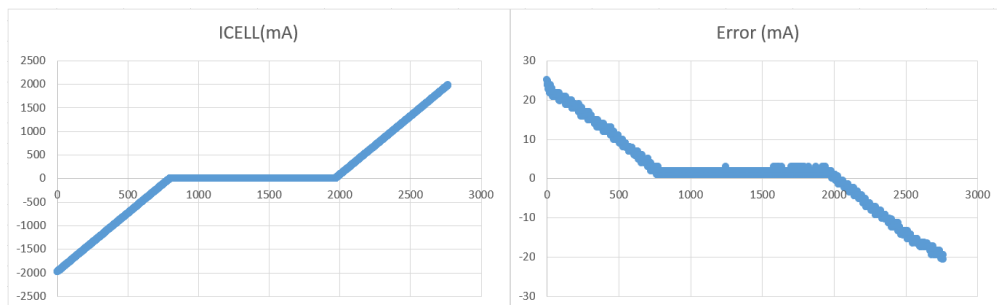


图 7-7. 0°C 下且校准温度为 0°C 时的电流测试

您将看到, 当增益系数低于 0°C 时, 电流检测误差增大。考虑到增益系数漂移, 您可以假设增加的误差取决于分流器电阻值漂移。

7.2.3 在 50°C 下测试

图 7-8 展示了 50°C 下的电流测试图形 (左) 和检测误差 (右), 以及在 25°C 下获得的增益系数。在这个高温下, 失调电流与室温下的失调电流相同。您可以假设增益系数几乎没有变化。

在这种情况下, 您会发现此解决方案可以将 $\pm 2000\text{mA}$ 范围电流的误差控制在 11mA 以内。在 $\pm 2000\text{mA}$ 时, 误差低于 $\pm 0.6\%$ 。

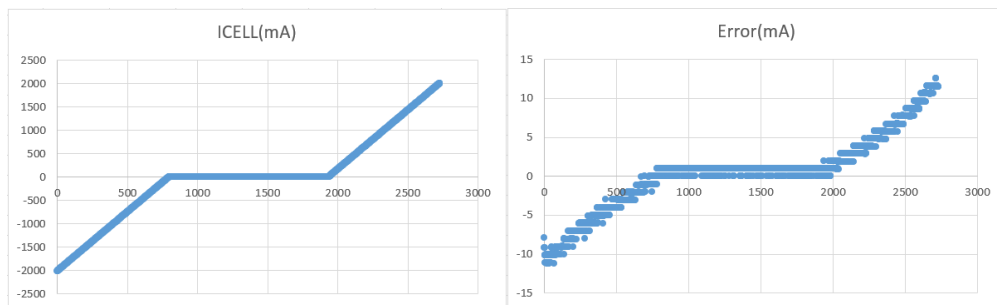


图 7-8. 50°C 下且校准温度为 25°C 时的电流测试

看看在 50°C 下执行增益系数校准时会发生什么情况。您会发现失调电流仅降低了一点点。 $\pm 2000\text{mA}$ 范围电流的误差可达到 9.5mA。在 $\pm 2000\text{mA}$ 时，误差百分比低于 $\pm 0.5\%$ 。

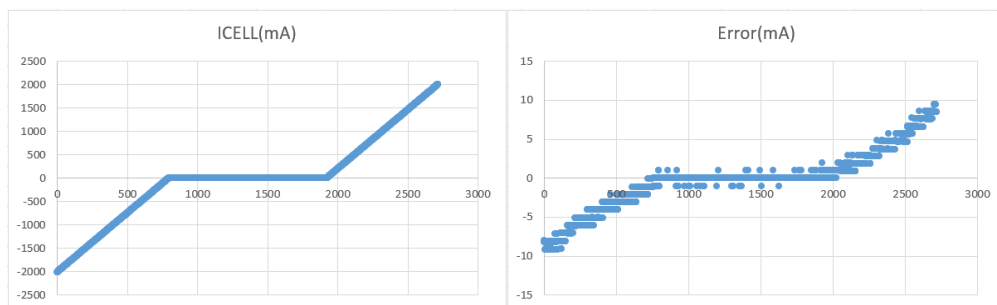


图 7-9. 50°C 下且校准温度为 50°C 时的电流测试

7.2.4 结论

通过上面显示的测试，可从节 7.1 获知计算得出的增益系数只有大约 0.2% 的误差/偏移。因此，我们做出如下假设：

- 随温度变化而增加的误差主要取决于分流器电阻值漂移。
- 如果可以仔细处理分流电阻器的温度变化，该解决方案可提供在整个温度范围内误差小于 1% 的高精度电流检测解决方案。

7.3 电流消耗测试

图 7-10 展示了在 NO_OUTPUT 模式下移除钽电容器、温度传感器和分压器电阻器后的电流测试结果。您只需要显示检测器件的 MCU 功耗。如果客户希望通过完整的硬件设置实现相同的性能，请使用 MOSFET 或双极控制电阻分压器的电压电源。

EnergyTrace™ Profile	
Name	Live
System	
Time	35 sec
Energy	0.786 mJ
Power	
Mean	0.0252 mW
Min	0.0069 mW
Max	5.6453 mW
Voltage	
Mean	3.3000 V
Current	
Mean	0.0076 mA
Min	0.0021 mA
Max	1.7107 mA

图 7-10. 电流消耗

8 解决方案摘要和改进方向

从上面的测试中可以看出，这种解决方案可确保在大电流检测范围内实现高精度，无需任何工厂校准即可满足 BMS 等一些常见应用的要求。

不过，该解决方案仍有一些无法自动校准的误差源。

8.1 分流电阻器

分流电阻器在整个温度范围内的精度会严重影响电流检测精度。为了减小此误差，建议添加一个 NTC 来测试分流器电阻器的温度，然后进行温度补偿。

8.2 ADC 及其基准

ADC 直流误差源 (INL、DNL、增益、失调电压) 会影响校准精度。然而，失调电压误差产生的影响最大，尤其是对于低电压检测而言。对于 MSPM0L130x，使用内部基准时的最大失调电压误差为 -3.5mV 。如果使用的基准为 1.4V ，则约 9LSB 的误差是由 ADC 失调电压引起的。为了降低这种误差的影响，您需要进行额外的 ADC 失调电压校准。

ADC 基准误差也受到与增益误差相同的影响。对于 MSPM0L130x，最大基准误差为 $\pm 1.5\%$ 。为了减少这个误差的影响，您可以进行额外的 ADC 基准校准，或使用外部基准。

也就是说，所有 ADC 误差都不能自动校准，因此增加了成本。

8.3 运行时间校准

由于本演示仅在首次上电时进行校准，因此如果温度发生变化，增益系数和 V_{offset} 也会受到影响。如果您希望实现运行时校准，通电电流不能为 0，尤其是对于系统端的 MCU。可以使用图 8-1 中所示的结构。

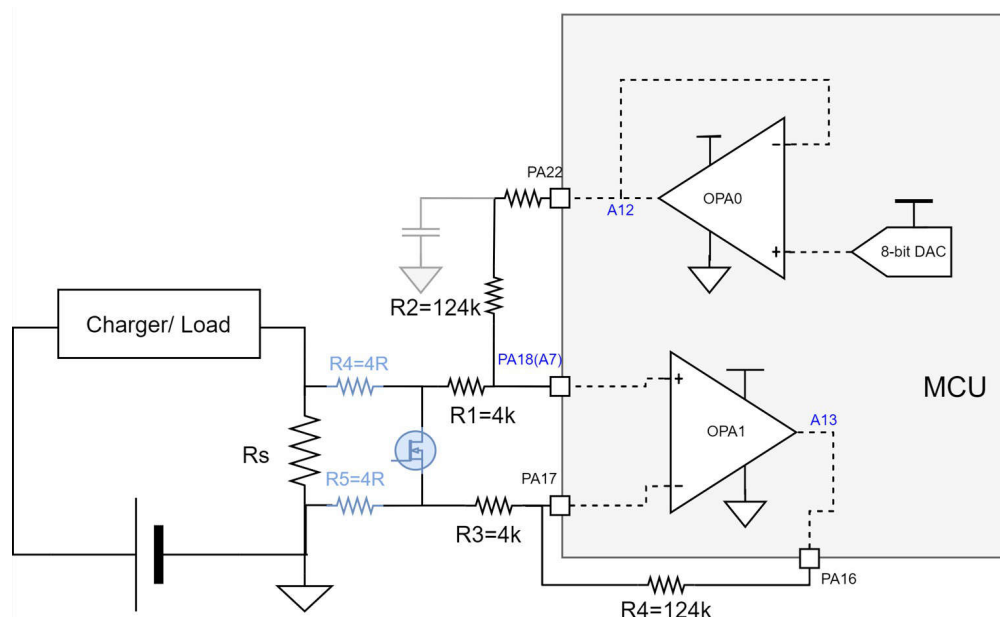


图 8-1. 运行时校准硬件结构

在该结构中，校准期间应启用 MOSFET。Rs 两端的电流由 R4 和 R5 分压，这被视为放大器的共模输入电压。从方程式 5 可以看出，R1、R2、R3 和 R4 之间的不匹配会导致共模电压对 OPA 输出产生很大影响。因此，您应该确保 $R2=R4$ 且 $R3=R1$ 。由于内部增益具有较大的增益误差 (GAIN32 为 2.7%)，因此请改用外部增益。

对于 V_{offset} 校准，它可以使用通过内部增益校准的 V_{offset} 来模拟真实的 V_{offset} 。对于 $R3/(R3+R4)$ 校准，可以通过检测 ADC 通道 7 和 ADC 通道 13 上的电压来完成。对于 $(R1+R2)/R2$ 校准，您可以在开始时使用默认值，并在负载电流较低且可以忽略误差影响时进行校准。建议您不要在校准时使用另一个 ADC 来检测 Rs 两端的电

压，以弥补负载电流产生的误差。首先，该检测电压仅在放电模式下为正。其次，测试结果受 ADC 失调电压误差的影响。

重要声明和免责声明

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任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司