

Application Note

闭环恒定功率驱动，可简化加热器元件控制并延长电池寿命



Ivan De Padua, Chris Lande, Jim Perkins, and Dorian Brillet de Cande

摘要

许多应用要求精确控制加热元件的温度。基于温度的闭环控制需要使用热敏电阻或热电偶测量加热器温度。这有时在机械方面具有挑战性并且成本高昂。此外，在电池供电应用中，传统的 PWM 驱动和相关的高电流脉冲会缩短电池寿命和生命周期。

由于电阻随温度变化，加热器温度与电压或电流不呈线性关系。但是，温度与施加的功率接近线性关系。通过实现闭环恒定功率驱动，可以对温度进行控制，只需测量功率，而无需直接测量温度。

此参考设计使用闭环恒定功率拓扑来驱动低阻抗加热器元件。本应用手册包括硬件和软件实现中的选择和挑战。本文档还给出了初步结果，并讨论了这种温度控制方法的优势。

内容

1 传统加热器控制模块.....	2
2 恒定功率加热器控制.....	2
3 硬件实现.....	3
4 软件实现.....	5
5 软件算法流程图.....	6
6 结果.....	7
7 总结和调整.....	9
8 参考资料.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 传统加热器控制模块

传统加热器控制模块使用温度传感器来测量加热元件的温度，如 [图 1-1](#) 所示。此测量值将被反馈并用于调整驱动电路，以改变流经加热元件的电流，从而将温度保持在所需的设定点。采用这种方法会面临多项挑战优势。首先，温度传感器必须安装在靠近或接触加热元件的位置，这从机械角度可能难以实现。其次，高温测量通常需要使用热电偶，这就需要复杂的接口电路。

与电信号的变化相比，温度响应相对较慢，因此通常使用简单的 FET 开关 PWM 以更高的电气频率调制流经加热元件的电流，并允许较慢的热响应充当环路低通滤波器。这种方法运行良好，但快速开关边沿会产生电气噪声。此外，在电池供电系统中，PWM 脉冲期间从电源拉出的大电流脉冲会缩短充电间隔的电池寿命和电池整体寿命。

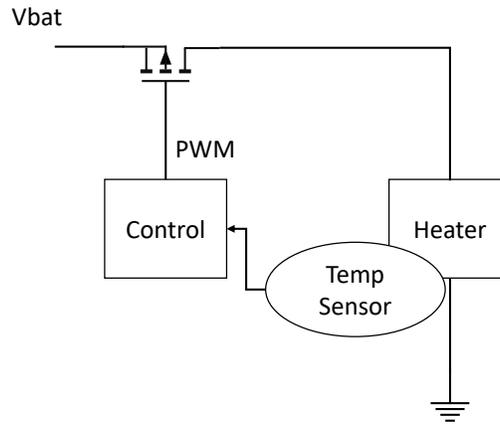


图 1-1. 具有温度传感器的传统加热元件控制环路

2 恒定功率加热器控制

电阻加热元件的温度与所施加的功率成正比。测量电功率在机械上要比测量温度简单得多。以恒定功率驱动元件可提供恒定温度，而调整功率可来调节温度。遗憾的是，加热元件的电阻在不同批次之间会有显著差异，也会随着温度的变化而变化。这意味着需要测量电压和电流，并且需要调整施加的电压，以便在加热器元件电阻发生变化时保持恒定功率，如 [图 2-1](#) 中所示。控制所施加电压的 DC/DC 转换器从电源汲取平均电流，这可以延长电池寿命。

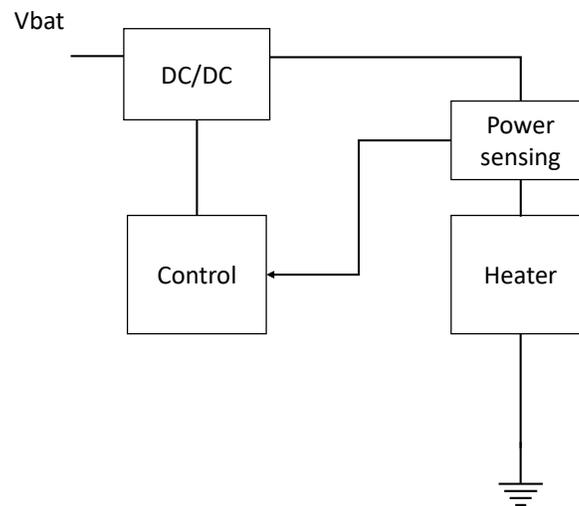


图 2-1. 恒定功率加热器控制

3 硬件实现

恒定功率驱动设计需要使用硬件来测量加热元件上的电压和流经加热元件的电流，从而计算功率。为此，我们采用 **INA234**，这是一款 28V、12 位 I²C 输出电流/电压/功率监测器。在此设计中，该器件直接测量加热元件上的电压以及流经高侧 10mΩ ±1% 1W 检测电阻器的电流。然后，该器件会计算功率并通过 I²C 报告电压、电流和功率值。

在本例中，我们假设 1Ω 加热元件在整个温度和批次范围内的变化幅度为 ±20%。表 3-1 所示为电阻范围内不同功率级别所需的电压和电流。输入电压为 3.3V 至 5.0V。这意味着可在所需的整个范围内使用降压稳压器或降压直流/直流稳压器。施加的电压由 **TPS62868** 进行控制，这是一款具有 4A 输出能力的 2.4V 至 5.5V 输入同步降压转换器。重要的是，该器件由 I²C 控制，因此能够轻松调节输出电压。

表 3-1. 不同功率级别和不同电阻下的电压和电流

功率 (W)	0.8Ω 下的电流 (A)	0.8Ω 下的电压 (V)	1.0Ω 下的电流 (A)	1.0Ω 下的电压 (V)	1.2Ω 下的电流 (A)	1.2Ω 下的电压 (V)
4.0	2.24	1.79	2.00	2.00	1.83	2.19
5.0	2.50	2.00	2.24	2.24	2.04	2.45
6.0	2.74	2.19	2.45	2.45	2.24	2.68
7.0	2.96	2.37	2.65	2.65	2.42	2.90
8.0	3.16	2.53	2.83	2.83	2.58	3.10
9.0	3.35	2.68	3.00	3.00	2.74	3.29

使用 **MSPM0L1306** 通过 I²C 从 **INA234** 读取电压、电流和功率。这款低成本微处理器还负责通过 I²C 调节 **TPS62868** 的输出电压。简化版和完整电路原理图分别如 图 3-2 和 图 3-3 所示。

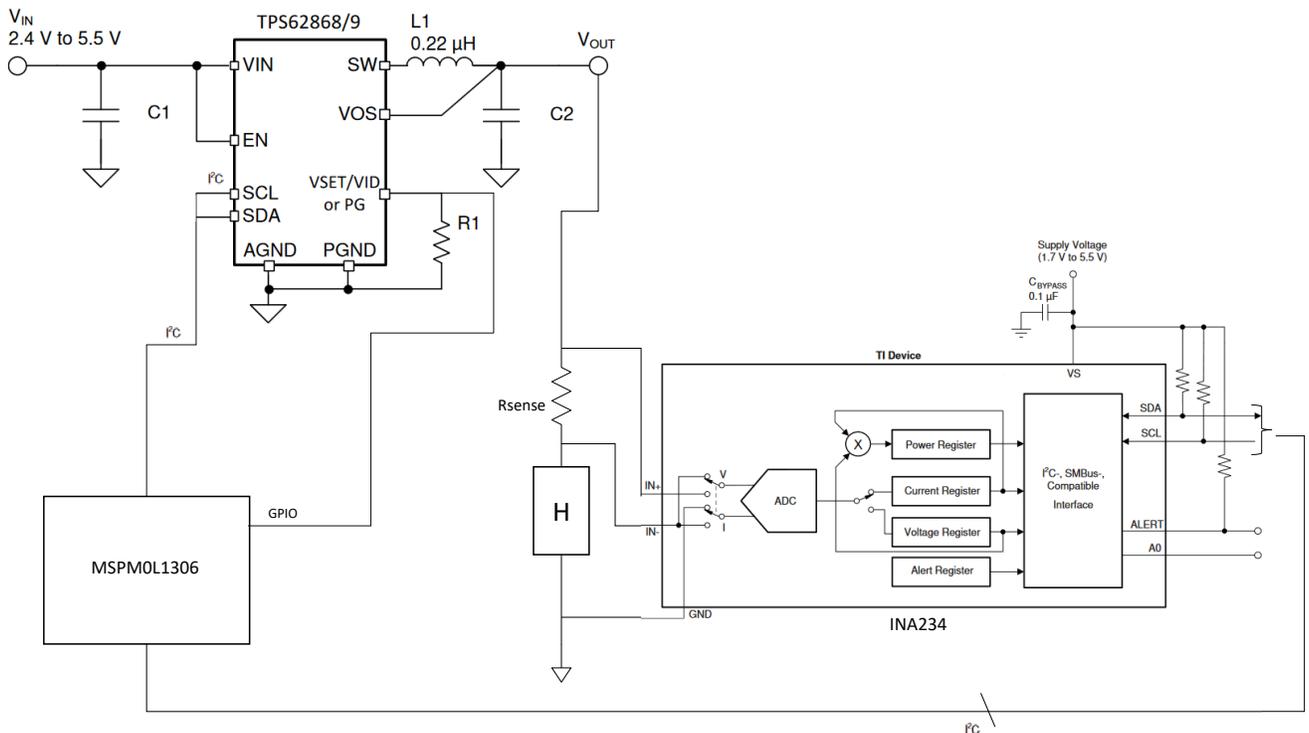


图 3-1. 简化版恒定功率控制原理图

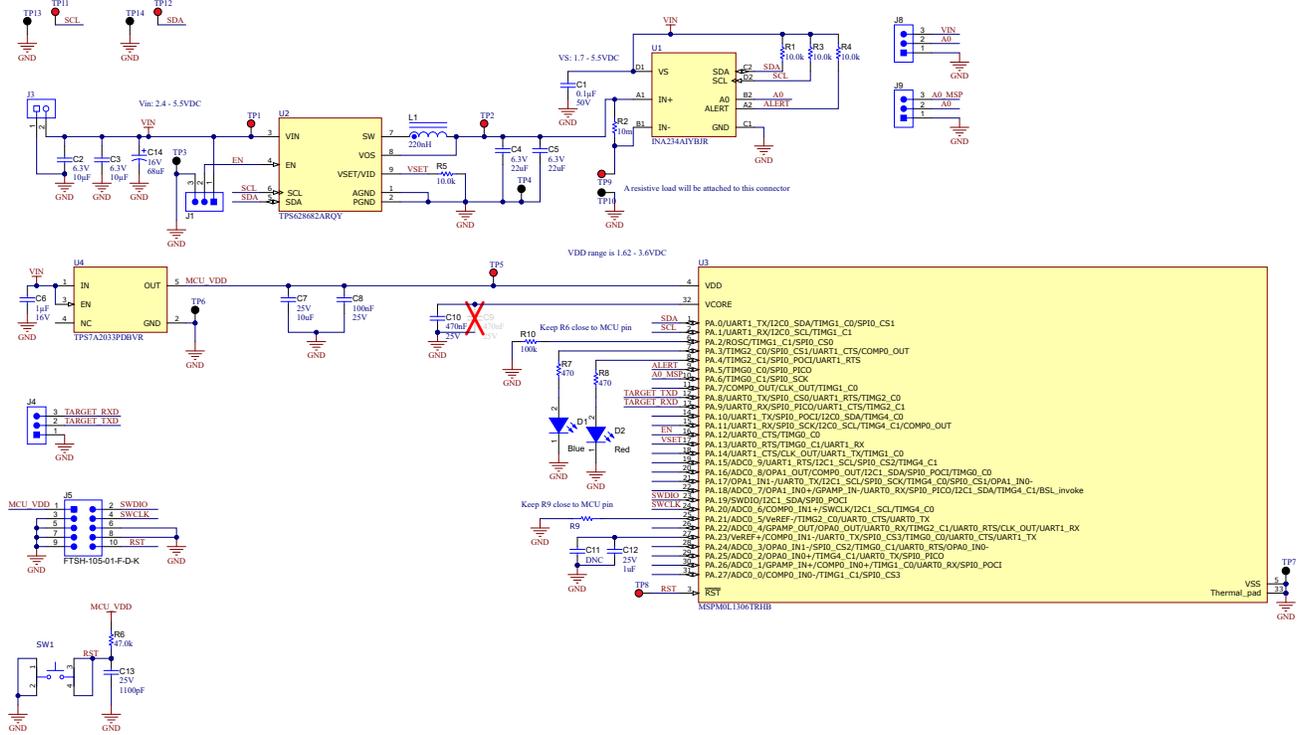


图 3-2. 恒定功率控制原理图



图 3-3. 恒定功率控制 PCBA

4 软件实现

启动时，在 [MSP0L1306](#) 中运行的软件首先初始化 I²C 读取/写入函数，然后通过 I²C 配置 [INA234](#) 和 [TPS62868](#)。然后，MSPM0L1306 能够使用 I²C 从 [INA234](#) 读取负载电阻器中的电压、电流和功率，还可通过 I²C 控制 [TPS62868](#) 的输出电压。

[图 5-1](#) 所示的流程图对恒定功率控制算法进行了说明。第一步是通过 I²C 读取功率 [INA234_getPOWER_W \(INA234\)](#) 并将其存储在 `measuredP` 变量中。将测得的功率与目标功率进行比较，从而计算出功率误差。

校正功率误差所需的电压变化计算为按增益系数 2 缩放的误差。施加应用了一个限制以防止电压过度变化；电压钳位到 ± 5 的范围。

如果测量的功率高于目标功率，该算法通过将测得的输出电压减少计算出的电压阶跃来计算新电压。如果测量的功率低于目标值，则将计算得出的电压阶跃与测量的输出电压相加。然后通过 I²C 将新电压值写入输出电压寄存器来调整 [TPS62868](#) 的输出电压。

5 软件算法流程图

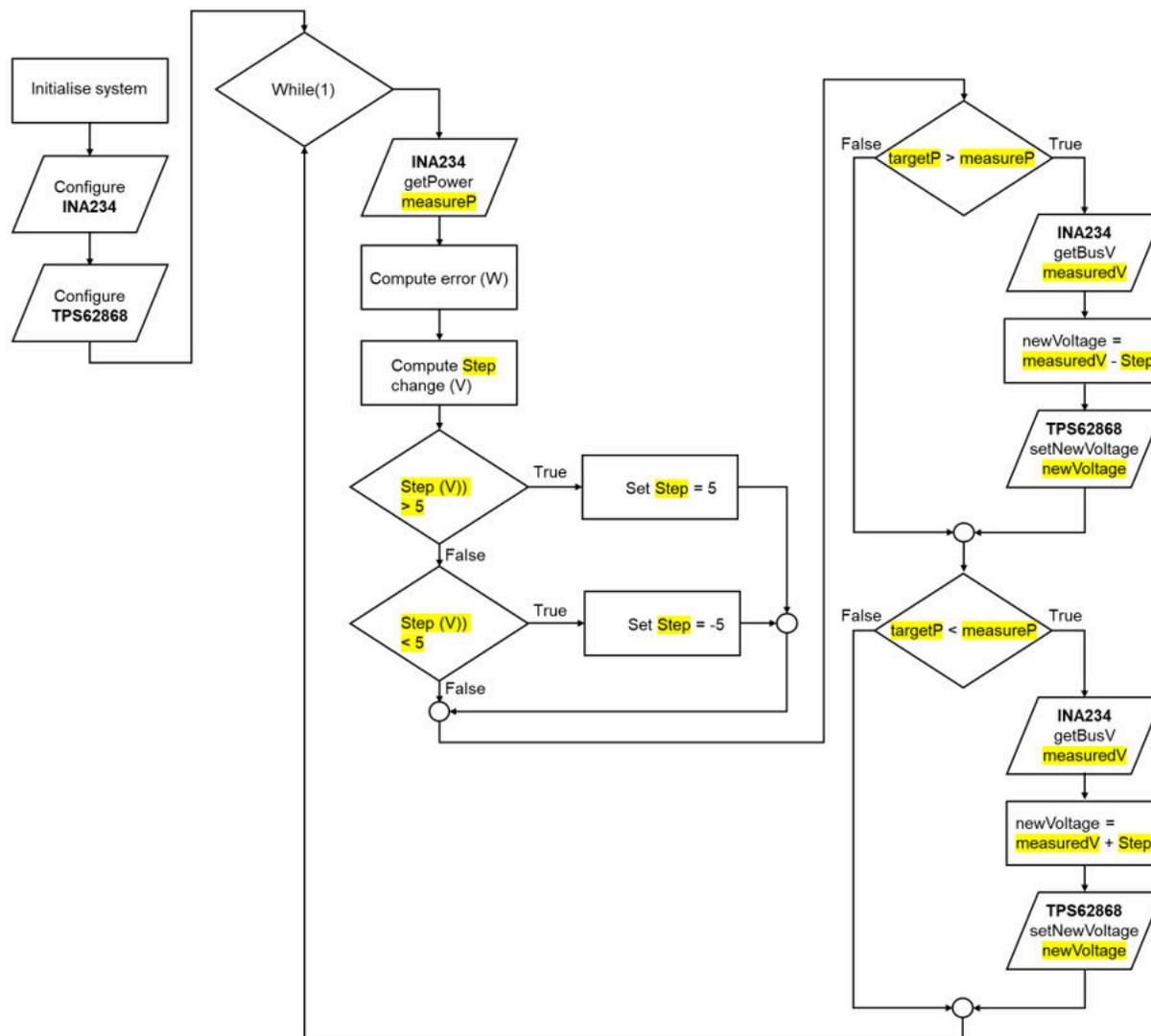


图 5-1. 软件算法流程图

6 结果

图 6-1 展示了 $1.5\ \Omega$ 标称负载电阻器在不同的施加恒定功率值下测得的稳态温度。线性响应表明，恒定功率可用作设置电阻加热元件温度的控制方法。

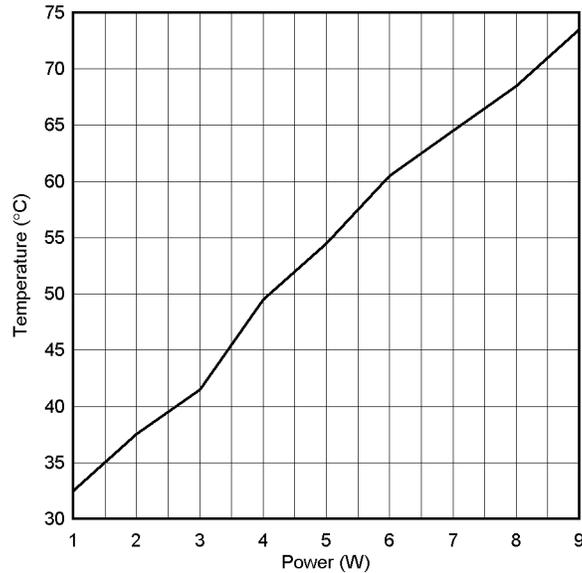


图 6-1. 负载电阻器温度与施加的恒定功率间的关系

图 6-2 展示了使用 $1.5\ \Omega$ 标称负载电阻器以 1W 阶跃在 1W 至 9W 下测得的功率。该环路在每个电平以恒定功率运行 50 秒，每 1 秒测量一次功率。所测功率的绝对变化会随着所需功率级别的增加而增加，但百分比变化相当恒定，如表 6-1 所示，其中展示了测得的级别以及和每个功率级别与标称值相比的变化。恒定功率控制环路将施加到负载上的功率保持在设定级别的 $\pm 3.0\%$ 范围内。

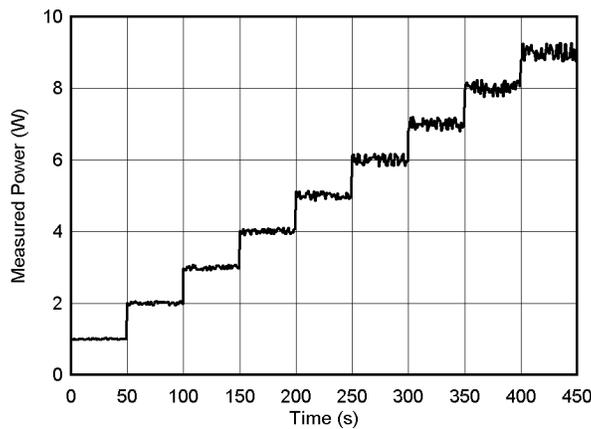


图 6-2. 恒定功率控制阶跃。1W 至 9W，阶跃为 1W。每个功率级别 50 秒

表 6-1. 从 1W 到 9W 的所需功率阶跃的平均测量功率以及最小或最大变化

所需功率 (W)	平均测量功率 (W)	最小测量功率 (W)	最大测量功率 (W)	负变化 (%)	正变化 (%)
1.0	1.0008	0.971	1.029	-2.90	2.90
2.0	2.0073	1.942	2.059	-2.90	2.95
3.0	2.9913	2.911	3.081	-3.00	2.70
4.0	4.0123	3.898	4.116	-2.55	2.90
5.0	5.0108	4.864	5.145	-2.72	2.90
6.0	6.0146	5.840	6.174	-2.67	2.90
7.0	6.9999	6.796	7.204	-2.91	2.91
8.0	8.0209	7.764	8.235	-2.95	2.94
9.0	8.9982	8.752	9.251	-2.76	2.79

图 6-3、图 6-4 和 图 6-5 显示了 1W、5W 和 9W 恒定功率运行条件下所测功率值的更详细图表。

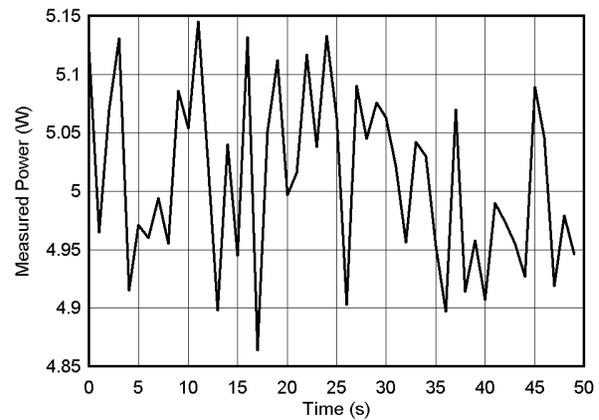
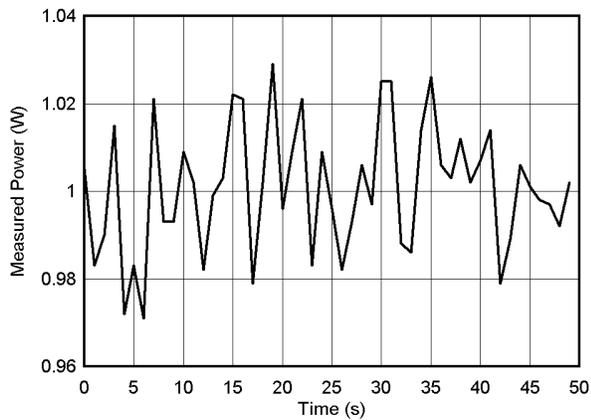


图 6-3. 1W 恒定功率运行条件下 1 秒时间间隔测得的功率

图 6-4. 5W 恒定功率运行条件下 1 秒时间间隔测得的功率

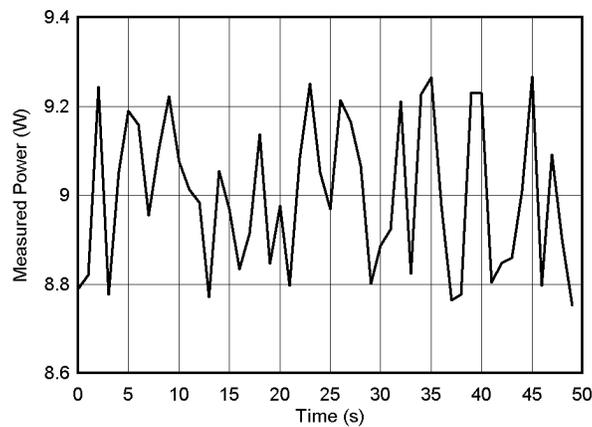


图 6-5. 9W 恒定功率运行条件下 1 秒时间间隔测得的功率

作为恒定功率控制稳健性的附加测试，在 -18°C 至 $+23^{\circ}\text{C}$ 的大致温度范围内，负载以恒定 4W 驱动。随着温度升高，标称 1.5Ω 负载的电阻从 -18°C 时的约 1.33Ω 增加到 $+23^{\circ}\text{C}$ 时的 1.75Ω 。图 6-6 展示了在该温度范围内测得的电流、电压和功率。恒定功率控制算法会在电阻变化时调节电压，以便在整个温度范围内成功地保持功率恒定。在这个温度范围内测得的功率变化为 $+1.5\%$ 至 -2.1% 。

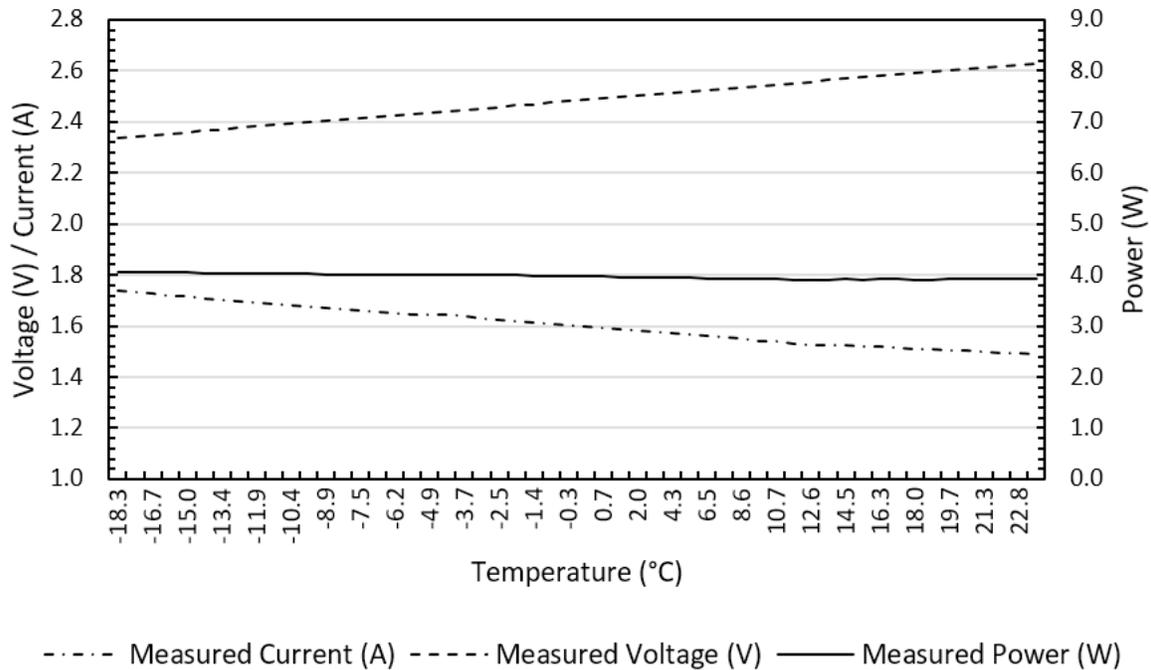


图 6-6. -18°C 至 $+23^{\circ}\text{C}$ 温度范围内测得的电流、电压和功率

7 总结和调整

电阻加热元件能以恒定功率驱动以提供固定温度，而无需测量温度。无论功率级别如何，以及因温度变化引起的负载电阻变化如何，此处所示的闭环恒定功率示例设计均可将负载中测量的功率保持在设定级别的 $\pm 3.0\%$ 以内。在本例中， $\pm 3.0\%$ 的功率变化对应于较低功率 (1W) 下大约 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ 的温度容差，以及较高功率 (9W) 下大约 $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ 的温度容差。温度容差可能因使用的加热元件而异，但可在产品设计过程中进行校准。

如果输入电压范围、加热器电阻或所需的功率意味着需要更高的电流，或者需要升压或降压/升压拓扑，则可以使用其他 I²C 控制型转换器器件。或者，可以通过将经过滤波的 PWM 信号加到 FB 节点来调整标准转换器。

8 参考资料

- 德州仪器 (TI), [INA234 具有 I2C 接口的 28V 12 位电流、电压和功率监测器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI), [TPS62868x 具有 I2C 接口且采用 QFN 封装的 2.4V 至 5.5V 输入、4A/6A 同步降压转换器](#)
- 德州仪器 (TI), [MSPM0 L 系列 32MHz 微控制器](#) 技术参考手册。
- 德州仪器 (TI), [I2C 简介实验室](#)
- 德州仪器 (TI), [MSPM0 生态系统培训系列](#)。MSPM0 Academy 培训。

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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司