

Application Note

CT MRI 和工业系统中电源模块和电力电子器件的温度监测



Bill Xu, Wendy Wang, Rannie Zhou

摘要

IGBT、SIC-MOSFET、GaN-FET、MOSFET 等电源模块和功率器件广泛应用于医疗系统、工业系统和电动汽车系统，旨在生成驱动 X 射线管的高压电源，或驱动电动汽车的大电容电机，并将太阳能电池板的直流电压转换为交流电压，然后馈入电网。在所有这些系统中，一大难点是监测电源模块的温度以确保系统安全、可靠地运行。在此类系统中，温度传感器必须靠近电源模块或散热器布置，方可获得电源模块的精确温度。但这些系统的电源模块通常在高压电源下运行，散热器存在与高压总线的高压短路风险。这种潜在风险要求将温度监测系统与电源模块隔离，以确保控制系统的安全。另一个难点是，温度传感器必须与散热器或电源模块一起安装。第三个难点是低成本和紧凑尺寸。本应用手册介绍了几种温度监测方法，可满足电源模块温度监测要求。

内容

1 简介.....	2
1.1 电源模块和电力电子器件的温度监测.....	2
1.2 监测功率器件温度时需要考虑的关键因素.....	3
2 监测电源模块温度的方法.....	4
2.1 采用通孔式数字温度传感器的温度监测.....	4
2.2 采用模拟温度传感器和隔离式放大器的温度监测.....	4
2.3 采用 NTC 热敏电阻的温度监测.....	6
3 总结.....	8
4 参考资料.....	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

IGBT、SIC-MOSFET、GaN-MOSFET 等电源模块广泛应用于医疗、工业和电动汽车系统。在 X 射线、CT 或 MRI 系统中，设计人员使用 IGBT 或 SIC-MOSFET 生成大电容高压电源，以驱动 X 射线管或功率梯度放大器。在电网系统中，工程师使用 IGBT 或 SIC-MOSFET 将太阳能电池板的直流电压转换为交流电压，然后馈入电网。在电动汽车系统中，工程师使用 SIC-MOSFET 或 IGBT 来驱动电机。在所有这些系统中，电源模块均会产生大量热量，如果设计人员未能正确分散热量，则可能会增加故障率并降低系统可靠性。为确保电力电子系统的安全运行，设计人员通常必须监测电源模块的温度，防止电源模块发生故障，进而提高系统可靠性。

1.1 电源模块和电力电子器件的温度监测

许多先进电源模块均集成了一到三个 NTC 内部热敏电阻，用于精密监测 IGBT 或 SIC-MOSFET 的内部温度。请参阅图 1-1 和图 1-2。然而，大多数分立式电力电子器件并未集成温度传感器。在实际设计中，工程师需要监测散热器的温度或功率器件的表面温度，以推断出 IGBT 或 MOSFET 的结温。一般而言，散热器安装在电力电子器件的散热焊盘上，其可能会短接到高压总线。由于温度传感器安装在散热器或电力电子器件上，因此需要温度监测电路必须确保控制系统的安全。

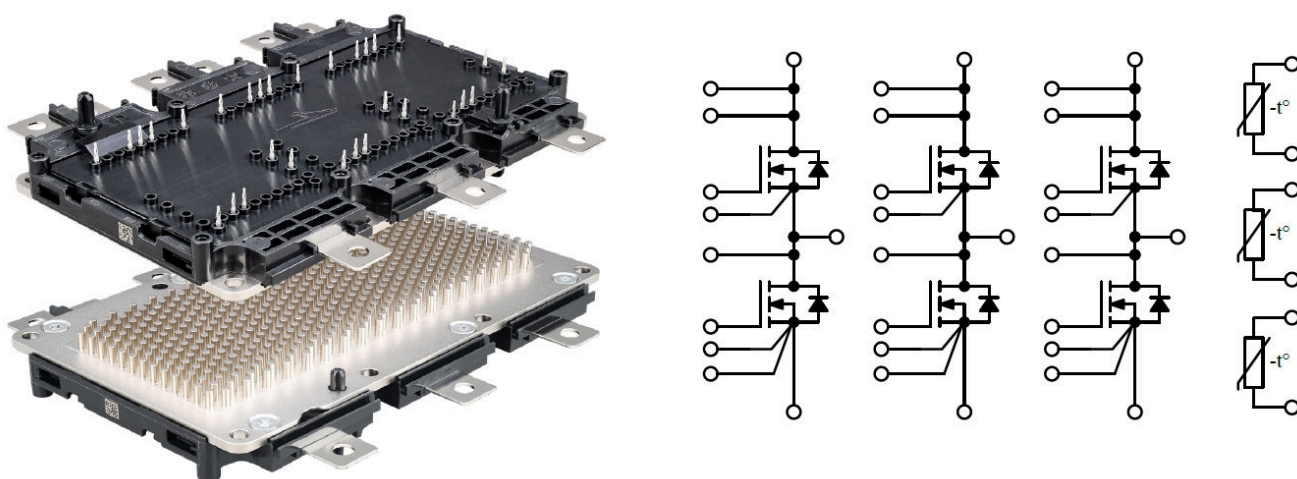


图 1-1. Wolfspeed SIC-MOSFET ECB2R1M12YM3

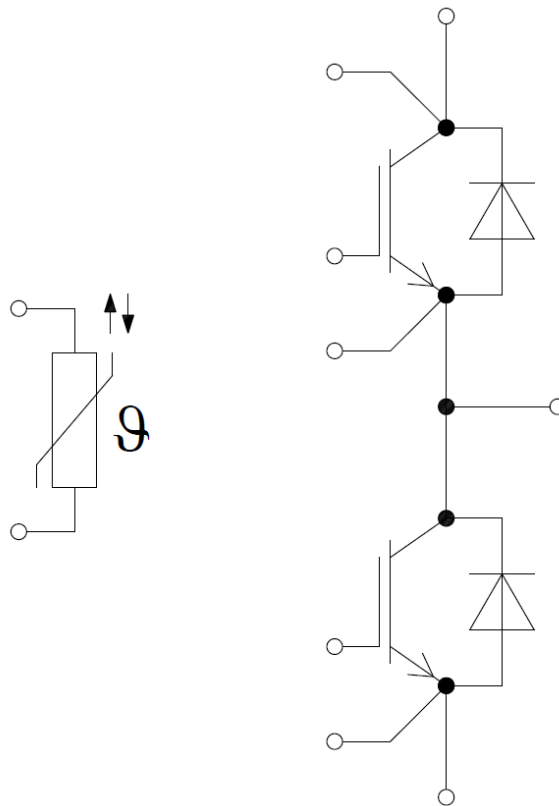


图 1-2. Infineon IGBT FF300R12ME7_B11

1.2 监测功率器件温度时需要考虑的关键因素

为监测电力电子器件的温度，设计人员必须首先考虑安全性，因为传感器可能会因高总线电压而短路。第二个因素是选择可轻松安装到散热器或功率器件的温度传感器。市场上有很多温度传感器，但其中许多温度传感器都是表面贴装传感器，无法轻松安装到散热器或功率器件。第三个因素是合适精度、简单电路等。

2 监测电源模块温度的方法

TI 可提供多种温度传感器和信号调节电路，助力满足电源模块温度监测的要求。由于这些温度传感器采用不同封装，设计人员可选用通孔式封装，以便轻松安装到散热器或功率器件。本应用的下列章节介绍了在受限安全和简便安装要求下，监测散热器或功率器件温度的三种方法。

2.1 采用通孔式数字温度传感器的温度监测

监测散热器或功率器件温度的第一种方法是搭配使用数字温度传感器和数字隔离器。**LMT01** 是一款高精度、2 引脚通孔式或表面贴装温度传感器，配有脉冲计数电流环路接口，因此该传感器非常适合用于散热器或功率器件的温度监测。**LMT01** 数字脉冲计数输出可在宽温范围内实现高精度，因此无需考虑集成的 ADC 质量或可用性，即可搭配任何 MCU 或 FPGA 使用，同时显著减少软件开销。TI 的 **LMT01** 器件无需系统校准、硬件和软件补偿，即可在 -20°C 至 $+90^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内实现最大 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 精度和超高分辨率 (0.0625°C)。

LMT01 温度输出通过单线传输，并使用通常从 $34\mu\text{A}$ (0) 变化为 $125\mu\text{A}$ (1) 的电流脉冲序列。然后，使用简单电阻器将电流脉冲转换为电压。使用 $10\text{k}\Omega$ 电阻器时，输出电压电平范围通常为 340mV 至 1.25V 。使用简单的微控制器比较器或外部晶体管将此信号转换为有效逻辑电平，可供 MCU 或 FPGA 通过 GPIO 引脚正确处理。对于监测有安全限制的功率器件温度，必须在 MCU/FPGA 和散热器或功率器件之间使用数字隔离器。建议的系统解决方案如 **图 2-1** 所示。本示例选用了 **ISOW7821** 数字隔离器。**ISOW7821** 集成了一个隔离式高效电源，其能够在 3.3V 电压下提供 75mA 电流，足以供 **LMT01** 供电。

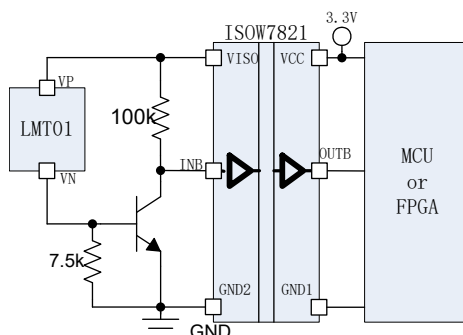


图 2-1. 使用 LMT01 监测电力电子模块温度

设计人员可以使用两种不同的方法从 **LMT01** 获取温度。第一种方法精度最低并使用一阶公式，第二种方法精度最高，采用查找表 (LUT) 数值的线性插值法。对于功率器件的温度监测，一阶公式的精确度就足以接受。如果设计人员所需精度小于 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ ，则必须使用查找表方法。输出传递函数为线性，可以使用 **方程式 1** 进行近似计算

$$Temp = \left(\frac{PC}{4096} \times 256^{\circ}\text{C} \right) - 50^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

其中：PC 是脉冲计数，Temp 是温度读数。

LMT01 实现温度到数字转换的用时加上脉冲序列时间间隔为的总时间为 104ms (最大值)。如果持续供电，脉冲序列输出每 104ms (最大值) 重复一次。这对于温度监测而言已经足够，因为温度变化通常较慢。

2.2 采用模拟温度传感器和隔离式放大器的温度监测

设计人员还可采用第二种方法，即使用配备隔离式放大器的模拟温度传感器来测量散热器或电源器件的温度。**LM35** 是一款精密集成电路温度传感器，其输出电压与摄氏温度呈线性比例关系。相较于以开尔文温标校准的线性温度传感器，**LM35** 器件更具优势，因为用户无需从输出端扣除较大恒定电压即可获得便捷的摄氏度线性关系。**LM35** 不需要进行任何外部校准或修整，即可在室温下实现 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 的典型精度，并可在 -55°C 到 $+150^{\circ}\text{C}$ 的整个温度范围实现 $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ 精度。**LM35** 的输出电压和环境温度之间的函数关系如 **方程式 2** 所示。

$$V_{out} = 10\text{mV}/^{\circ}\text{C} \times T \quad (2)$$

其中： V_{OUT} 是 LM35 的输出电压、 T 是以 $^{\circ}\text{C}$ 为单位的温度。LM35 的特性专为诸多通用温度检测应用和远程温度检测应用而设计。多种封装选项让应用更灵活。要检测散热器或功率器件的温度，请选用 TO92 或 TO220 封装以实现简单安装。

功率器件通常在高压系统中运行。为安全监测功率器件温度，高压和控制系统之间进行了隔离。AMC1350 是一款隔离式精密放大器，此放大器的输出与输入电路由抗电磁干扰性能极强的隔离栅隔开。 $\pm 5\text{V}$ 输入范围有助于 AMC1350 适配大多数模拟温度传感器。AMC1350 是专为该应用设计的器件。为实现 AMC1350 和 LM35 的输入侧供电，本示例选用了 UCC33420 隔离式电源模块。推荐设计采用了 LM35、AMC1350 和 UCC33420，如图 2-2 所示。TLA2022 是一款具有 IIC 接口的 12 位差分输入 SAR ADC。

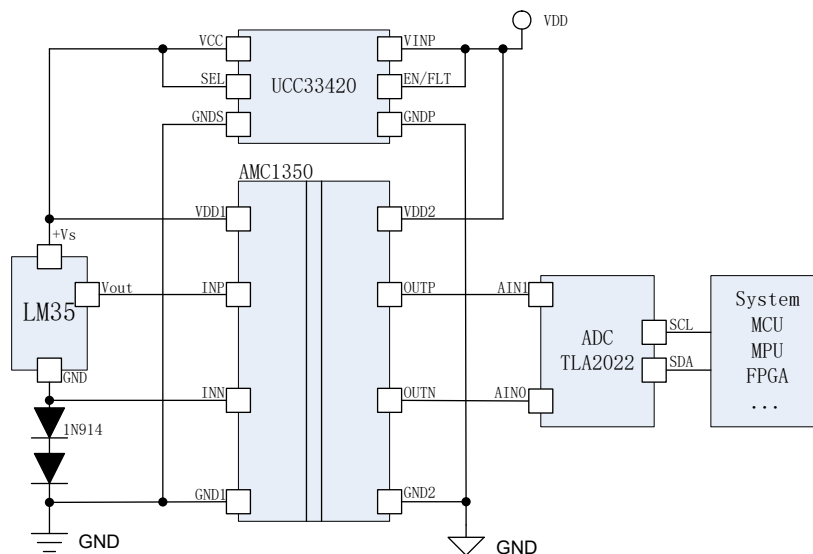


图 2-2. 使用 LM35 模拟温度传感器检测电力电子器件温度

2.3 采用 NTC 热敏电阻的温度监测

在许多大容量电力电子设备中，功率器件集成了一个或三个 NTC 来监测自身温度，助力提高系统可靠性。由此即无需温度传感器，但需使用外部信号调节电路。用于测量 NTC 电阻的传统信号调节电路是电阻分压器或电桥电路。请参阅图 2-3 和图 2-4。这两种电路均需外部精密电压基准，进而导致成本增加，封装尺寸较大。第二个问题是基准电压和输出之间的非线性关系。对于电阻分压器，高共模电压是另一个问题，这会导致分辨率降低。对于电桥电路，需要外部仪表放大器，这也会增加成本。

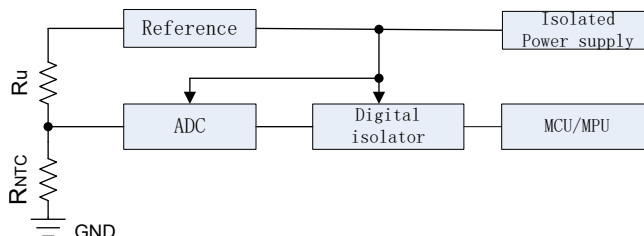


图 2-3. 用于监测配备内部 NTC 电阻器的电力电子器件温度的电阻分压器方框图

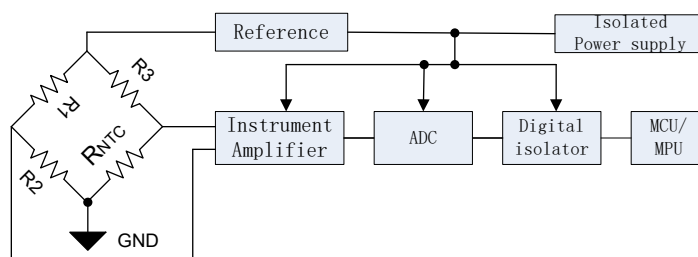


图 2-4. 用于监测配备内部 NTC 电阻器的电力电子器件温度的电桥方框图

ADS124S08 是一款具有 24 位分辨率的 12 通道输入 ADC，集成了两个可调恒流源，用于激励 NTC 和补偿导线电阻。ADS124S08 支持直连 3 个 NTC。任何时刻仅限对单个 NTC 进行测试。对于余下不进行测试的 NTC，必须关断其对应通道的内部 MUX。请参阅图 2-5 了解系统设计。ISOW7741 是一款集成电源模块的数字隔离器，可用于为 ADS124S08 供电。ISOW7741 的第二个功能可与 ISO7720 数字隔离器配合使用，用于连接 ADS124S08 SPI 接口。

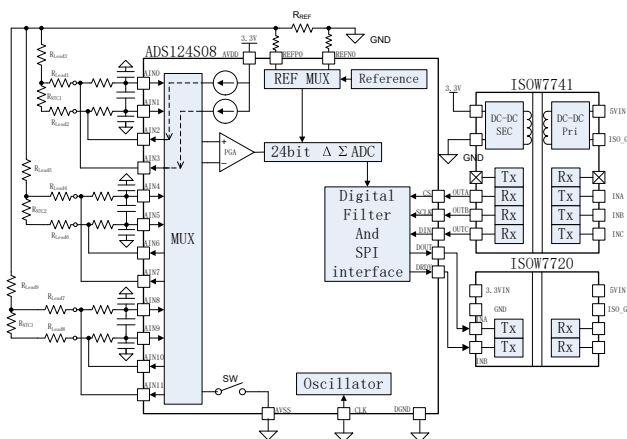


图 2-5. ADS124S08 与电力电子器件的三个内部 NTC 相连

请参阅 ADS124S08 数据表。基准电阻器与 NTC 电阻之间的函数关系如 方程式 3 所示

$$D = \frac{V_{NTC}}{V_{REF}} \times 2^{24} = \frac{I_{Excite} \times R_{NTC}}{2 \times I_{Excite} \times R_{REF}} \times 2^{24} = \frac{R_{NTC}}{R_{REF}} \times 2^{23} \quad (3)$$

因此：

$$R_{NTC} = \frac{D}{2^{23}} \times R_{REF} \quad (4)$$

如果电源模块仅集成了一个 NTC 用于温度监测，则设计首选 ADS122C04。此器件类似于 ADS124S08，但具有 4 通道输入并集成了两个恒流源，用于激励 NTC 和 IIC 以连接 MCU 或 FPGA。ISO1642 是用于安全操作 ADS122C04 的首选数字隔离器。NTC 电阻的获取函数与 ADS124S08 完全相同。如需了解更多信息，请参阅 ADS122C04 数据表。图 2-6 展示了半桥 IGBT 的温度监测系统设计。

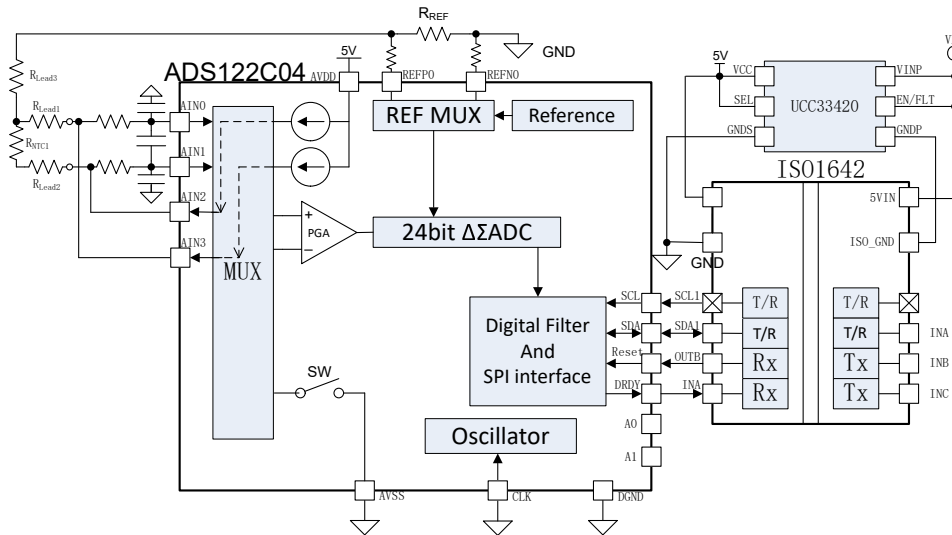


图 2-6. ADS122C04 与电力电子器件的内部 NTC 相连

3 总结

监测电源模块和功率器件温度对于确保电力电子系统的安全运行至关重要，尤其是对于大容量电力电子系统。对于没有集成温度传感器的功率器件，LMT01 和 LM35 是首选的高精度温度传感器，可轻松安装到散热器或功率器件。对于集成了 NTC 的电源模块，ADS124S08 和 ADS122C04 是首选的信号调节电路，可实现更佳线性度、更高精度、导线补偿、集成激励恒流源以及小型封装。如需了解详情，请参阅相关数据表。TI 可提供一系列与 ADS124S08 类似的 ADC，但具有不同的分辨率、输入通道和接口，助力满足客户其他要求。有关更多详细信息，请咨询 FAE 或访问。

4 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[RTD 测量基本指南](#) 应用手册。
2. 德州仪器 (TI)，[使用 NTC 和 RTD 设计温度监测系统](#)，应用手册。
3. 德州仪器 (TI)，配备脉冲计数接口的 [配备脉冲计数接口的 LMT01 0.5°C 精度 2 引脚数字输出温度传感器](#)，数据表。
4. 德州仪器 (TI)，[ISOW7821 具有集成式高效低发射直流/直流转换器的高性能 5000VRMS 增强型双通道数字隔离器](#)，数据表。
5. 德州仪器 (TI)，[LM35 精密摄氏温度传感器](#)，数据表
6. 德州仪器 (TI)，[UCC33420 超小型、1.5W、5.0V、3kVRMS 隔离式工业直流/直流模块](#)，数据表。
7. 德州仪器 (TI)，[AMC1350 精密、±5V 输入、增强型隔离式放大器](#)，数据表
8. 德州仪器 (TI)，[ADS124S0x 具有 PGA 和电压基准的低功耗、低噪声、高集成度、6 通道和 12 通道 4kSPS 24 位 \$\Delta\$ - \$\Sigma\$ ADC](#)，数据表。
9. 德州仪器 (TI)，[ISOW774x 具有集成式低发射、低噪声直流/直流转换器的四通道数字隔离器](#)，数据表
10. 德州仪器 (TI)，[ISO772x EMC 性能优异的高速、增强型和基础型双通道数字隔离器](#)，数据表。
11. 德州仪器 (TI)，[ADS122C04 具有 I2C 接口的 24 位 4 通道 2kSPS \$\Delta\$ - \$\Sigma\$ ADC](#)
12. 德州仪器 (TI)，[具有增强型 EMC 和 GPIO 的 ISO164x 热插拔双向 I2C 隔离器](#)，数据表。
13. 德州仪器 (TI)，[TLA202x 成本经优化的超小型 12 位系统监测 ADC](#)，数据表。

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、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