

Application Note
如何优化航天级温度检测设计



Meredith McKean

摘要

本文深入介绍了如何将德州仪器 (TI) 温度传感器集成到航天系统中，并重点聚焦远程温度传感器，这类传感器在 TI 航天产品系列中占很大一部分。本文首先回顾了航天应用中使用的常见温度传感设计，然后转向远程温度传感的各种用例，并概述了成功实现系统集成的基本设计注意事项。此外，本文还探讨了辐射暴露对远程温度传感器性能的影响。这些结果表明了在航天系统架构中嵌入 TI 远程温度传感器的简便性和有效性，因此可支持为航天任务开发稳健可靠的电子产品。

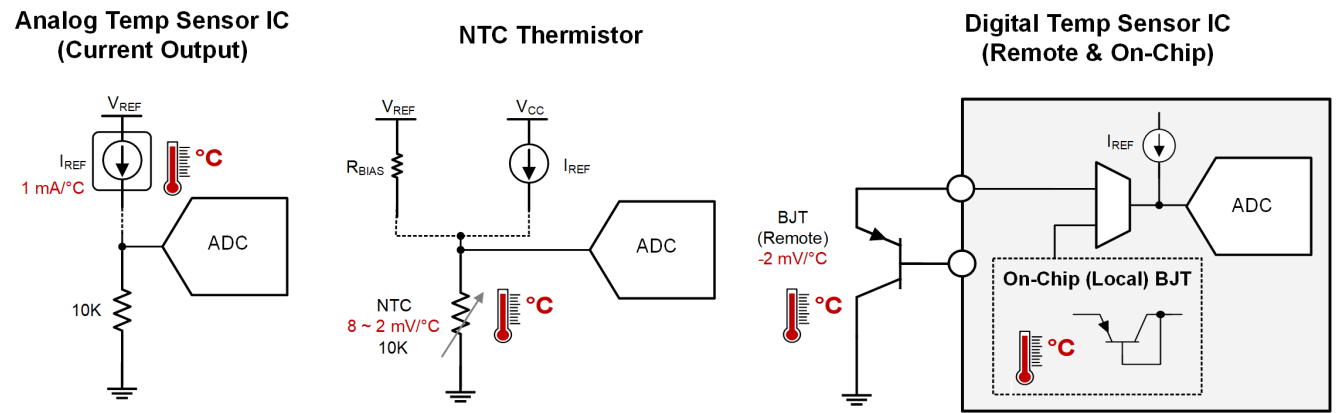


图 1-1. 温度设计对比

内容

1 简介.....	2
2 对比.....	2
3 远程应用用例.....	3
4 默认远程注意事项.....	4
5 β 误差.....	6
6 校准.....	7
7 布局技术.....	9
8 总结.....	10
9 参考资料.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

使用航天级集成电路 (IC) 进行设计，对于为充满挑战的航天环境开发可靠的电子系统至关重要。航天 IC 需通过针对系统要求的辐射暴露测试。在考虑温度传感选项时，航天 IC 提供了集成度更高的设计，并提供经验证的辐射性能数据。本文全面概述了将德州仪器 (TI) 航天温度传感器集成到系统中所需了解的关键信息。在进行航天系统温度设计时，客户倾向于使用三种常见的选择：温度传感器、热敏电阻和 IC/远程结点。温度传感器提供与绝对温度成比例的输出电流。热敏电阻是一种温度敏感电阻，其电阻会随温度发生显著变化。远程结点是双极结型晶体管 (BJT)，其基极-发射极电压随温度变化。在我们的 TI 温度产品系列中，可选购 IC 温度设计方案。TI 航天产品系列中有远程温度传感器。远程温度传感器可从本地芯片和外部通道提供数字温度测量值，这些通道可连接到 PNP 和 NPN 晶体管。此设置允许使用单个集成电路测量整个系统中的多个热点。我们的远程传感器包括集成式模数转换器 (ADC) 和精确测量外部 BJT 温度所需的偏置。远程温度传感器为各种应用提供了一系列设计，本文档详细介绍了最常见的用例。阅读本文后，您将能清晰地了解到将远程温度传感器嵌入系统架构是何等简便。

2 对比

在选择用于航天环境的温度传感器技术时，工程师经常将集成电路温度传感器与传统热敏电阻进行比较。这两种传感器类型都有明显的优点和局限性：

表 2-1. 远程与热敏电阻比较

数字远程传感器	热敏电阻	温度传感器 (电流输出)
产品的已知辐射性能数据	必须进行额外测试，以明确其在辐射环境下的性能	产品的已知辐射性能数据
更高的集成度可降低元件和工程成本	测量温度需要更多元件，包括电流源和 ADC	测量温度需要更多元件，包括电阻器和 ADC
宽温度范围内的线性化	非线性且在高温下精度较低。	宽温度范围内的线性化
无需额外偏置	需要偏置	需要偏置
具有可编程采样，用于读取温度的集成式 ADC	需要为电路板上的多个热点实现大量热敏电阻 (MCU 上需要更多 ADC 或 IO)	需要为电路板上的多个热点实现大量热敏电阻 (MCU 上需要更多 ADC 或 IO)
集成警报功能	必须实现用于警报功能的比较器电路	必须实现用于警报功能的比较器电路

3 远程应用用例

远程温度传感器主要有三种应用：测量电路板的温度、测量附近元件的温度、测量集成二极管的温度以获得片上温度读数。许多集成电路元件（如 FPGA、ADC 和其他片上系统 (SoC)）都在产品内包含用于温度测量的二极管。TI 远程温度传感器直接连接到这些二极管以获得准确的温度读数。当需要测量 SoC 之外电路板周围多个位置的温度时，可以使用基于 BJT 的分立式二极管作为外部温度检测元件。使用 TMP9R00-SP 的单个远程 IC 最多可测量九个不同的位置。使用单个 IC 可提供用于读取全部九个不同位置的集成式模数转换器，从而简化设计过程。远程温度传感器也可仅作为数字本地温度传感器使用。为此，可以选择将 D+ 和 D- 引脚短接在一起，且禁用远程功能。单个温度 IC 可用于测量电路板温度和系统周围的其他热点。下面列出了这些应用的示例以供参考。

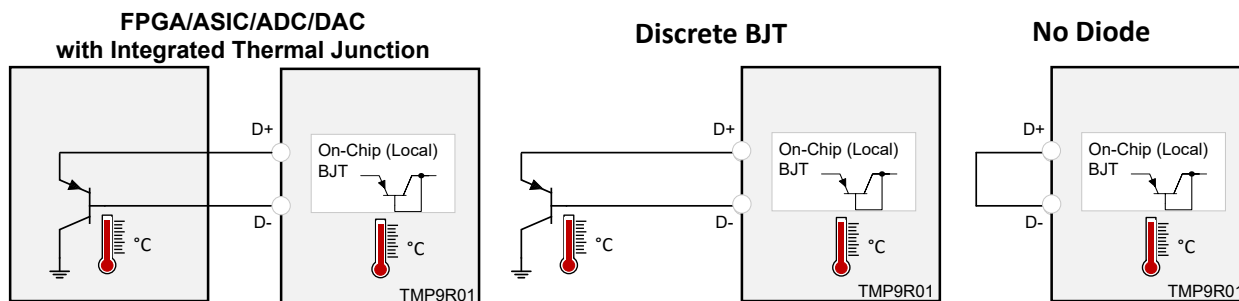


图 3-1. 远程温度传感器应用

表 3-1. 集成 BJT 监测示例

示例	器件	监测远程连接
ALPHA-3P-ADM-VA601-SPACE	TMP9R01-SEP	XQRVC1902 ACAP
ALPHA-3P-VB630-SPACE	TMP9R01-SEP	XQRVE2302 ACAP
ALPHA-XILINX-KU060-SPACE	TMP461-SP	XQRKU060 FPGA
TSW12D1620EVM-CVAL	TMP461-SP	ADC12DJ1620
TIDA-070004	TMP461-SP	ADC12DJ1620
应用手册：RTG4 FPGA：温度监测	TMP461-SP	RTG4 FPGA

表 3-2. 分立式 BJT 监测示例

示例	器件	监测远程连接
TIDA-010197	TMP461-SP	卫星运行状况监测
TIDA-010191	TMP461-SP	健康监测
TIDA-010931	TMP9R00-SP	电池管理

4 默认远程注意事项

默认远程设计注意事项

工程师必须考虑远程传感器的设计参数。TI 远程温度传感器的设计基于[方程式 2](#)中所示的二极管电流与电压关系。这为温度测量提供了简化公式。使用专有方法计算温度。远程温度传感器旨在与 BJT 晶体管匹配。有关选择晶体管的更多信息，请参阅[远程温度传感器晶体管选型指南](#)。

$$\Delta V_{BE} = \left(\frac{\eta k T}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{C2}}{I_{C1}} \right) \quad (1)$$

$$T = \frac{q \Delta V_{BE}}{\eta k \ln \left(\frac{I_{C2}}{I_{C1}} \right)} \quad (2)$$

表 4-1. 变量列表

变量	定义
ΔV_{BE}	(3) 基极和发射极之间的 BJT 上的电压测量
η	(4) n 因数校正参数
q	(5) 电荷
k	(6) 玻尔兹曼常数
$\frac{I_{C2}}{I_{C1}}$	(7) 所选远程传感器的电流方案。这因器件而异。

TI 远程控制会强制 D+ 线路上出现三个或四个电流，用于测量流过远程结点的 VBE 差值。D+ 线的电流被设计到我们的远程传感器中，影响从远程 BJT 收集温度的方式。理想的 D+ 信号如下所示，其中突出显示了有效转换期间的不同电流。理想情况下，TI 建议无需额外的电阻即可将 D+ 和 D- 直接连接到远程 BJT；但是，对于长布线，TI 建议为 D+ 和 D- 信号线添加滤波。请谨慎选择电容和电阻器。大电容或电阻器可能会增加温度测量的误差。有关电容和电阻最大值的更多详细信息，可以使用所需远程温度传感器的数据表查看。

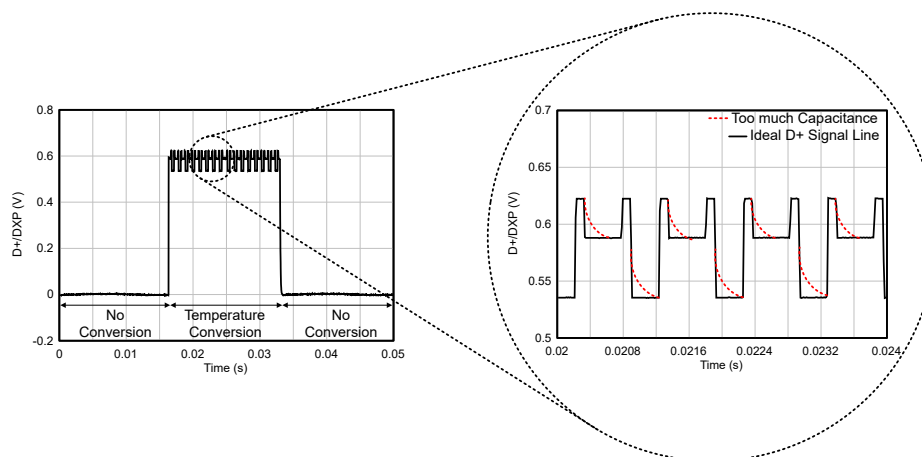


图 4-1. D+ 波形

选择晶体管会影响远程传感器的精度。远程 BJT 结点的关键温度特性为 n 因数、 β 和 V_{BE} 。 n 因数或也称为理想因数，是一个反映基极发射极结点与理想二极管公式接近程度的参数。 β 是集电极和基极之间的电流比。 β 表示集电极电流通过基极时存在的误差。理想情况下，集电极电流等于无漏电发射极电流的晶体管可作为远程结点提供更强的性能。晶体管的 n 因数、正向电流增益和尺寸可能各不相同。TI 远程温度传感器可以校准这些参数，以匹配不同的晶体管。大多数 TI 温度传感器都设计为满足 n 因数为 1.008 的晶体管要求，而不会改变配置设置。数据表中指定了 n 因数。3904 和 3906 PNP/NPN 晶体管的任何型号都是优选，可以无需校准直接与我们的远程传感器匹配。远程结点的误差可能源于以下因素：理想因子差异、 β 变化较大、D+ D- 线路上的大电阻或电容，或长 D+ D- 布线带来的噪声干扰。

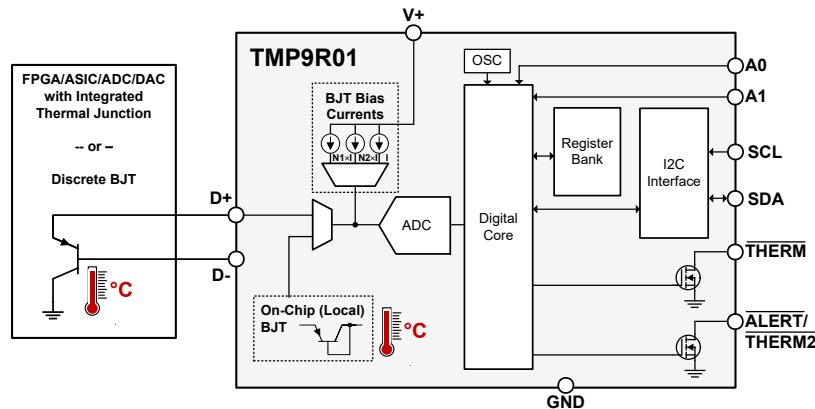


图 4-2. 远程方框图

二极管连接是指基极连接到 NPN 或 PNP BJT 内的集电极。NPN 二极管需采用二极管连接方式。最好在所有引脚可用的情况下连接 PNP。二极管连接的二极管限制了自动 β 校正功能的使用。

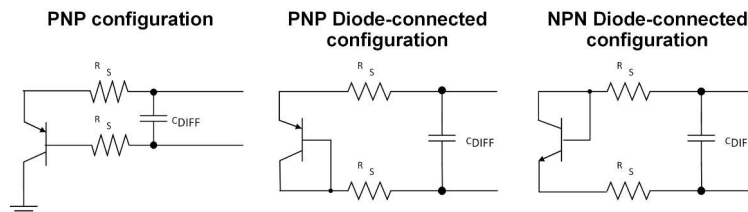


图 4-3. 正确的 PNP 和 NPN 连接

辐射会对温度传感器产生影响，既会导致温度读数出现误差，还会随着时间推移降低其性能。所有 TI 温度传感器均已通过单粒子效应 (SEE) 和电离辐射总剂量效应 (TID) 辐射测试。所有辐射报告都可以在相应的器件产品页面上找到。我们的航天产品系列中大部分都是数字化产品。TMP9R01-SP 是一款数字航天级远程温度传感器，通过 TID 高达 100krad(Si) 的辐射加固保障 (RHA) 和单粒子锁定 (SEL) 抗扰度规格 (LET 为 75MeV-cm²/mg)。由于 TMP9R01-SP 是带寄存器的数字式传感器，因此寄存器中的任何位变化都会导致温度精度发生变化。寄存器中的数据包括配置、 n 因数、偏移和上限/下限设置。在 SEE 报告中，在寄存器中收集数据，并使用警报引脚信号了解辐射条件下器件的完整功能。记录了误差大于 1.5°C 的远程或本地温度输出作为瞬态。当警报/THERM 信号被触发时，记录了一次 SEFI。在温度读数寄存器之外的任何 I2C 寄存器中发生的任何更改都会被记录为翻转。

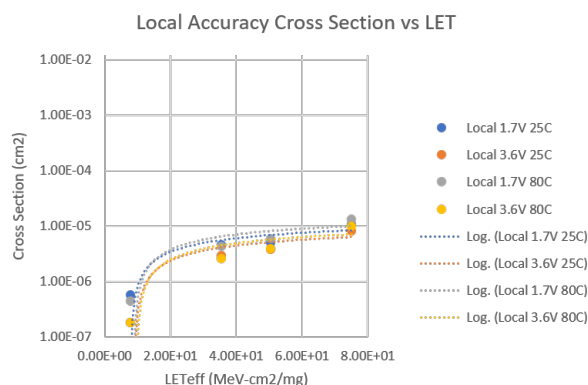


图 4-4. 本地温度精度事件的 Weibull 曲线

5 β 误差

从远程结点测量温度时，β 可能是误差因子。并非所有晶体管都存在 β 问题。β 是集电极和基极之间的电流比。β 表示集电极电流通过基极时存在的误差。低 β 误差往往存在于规模较小的技术中。如前所述，TI 远程温度传感器的核心设计强制 D+ 线路上存在三个或四个电流，用于测量流过远程结点的 VBE 差值。不同的电流会产生不同的 β 测量值。方程式 8 突出显示了双电流架构的 β 与温度结果之间的关系。

$$\Delta V_{be} = \eta V_T \ln \left(\frac{I_{e1} \times \beta_1 / (\beta_1 + 1)}{I_{e2} \times \beta_2 / (\beta_2 + 1)} \right) \quad (8)$$

当 β 项相等时，这些项会抵消，此时不会因 β 而产生额外的误差。误差来自不同电流值的 β 变化。向远程温度传感器增加辐射暴露不得给 BJT 远程温度结果引入额外的 β 误差。Gummel 曲线凸显了 BJT 与远程温度传感器匹配时最理想的 β 特性。匹配晶体管时，TI 建议 BJT 遵循图 5-1 中所示的线性区域内的特性。蓝线代表 β 比率，其数值对应右侧的次 y 轴。红线和灰线则对应左侧的主 y 轴。

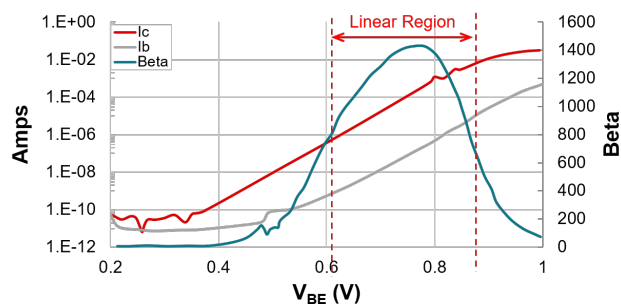


图 5-1. Gummel 曲线

在设计 BJT 时，在确定 BJT 的尺寸以匹配我们的远程结点时，该曲线非常有用。当确定晶体管的尺寸以匹配远程传感器时，TI 建议在远程传感器上设定的 D+ 电流值范围内进行小幅度的 β 变化量测量，如图 5-2 中突出显示。

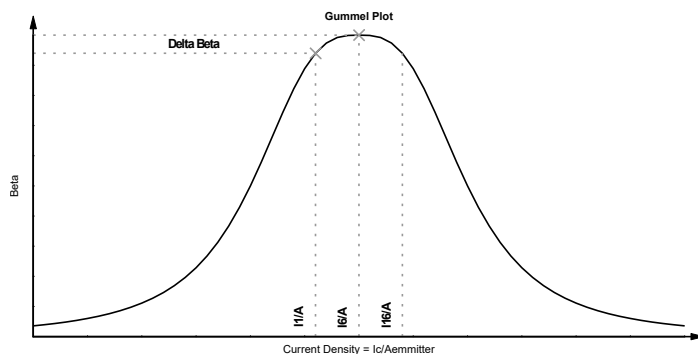


图 5-2. 推荐的 BJT 尺寸

表 5-1. D+ 输出电流值

名称	电流
I1	7.5uA
I6	6x7.5uA
I16	16x7.5uA

6 校准

TI 远程温度传感器可以通过校准寄存器来校正错误。该功能支持传感器与各种不同的 BJT 匹配。如前文所述， n 因数表示基极发射极结点与理想二极管公式的接近程度的误差。 n 因数和偏移可在 TI 远程温度传感器的 I2C 寄存器中进行校正。为了减少这些误差，必须执行以下步骤。调整 n 因数和偏移所需的条件如下：受控温度环境、参考温度测量和远程/结点设置。

1. 通过测量正向压降（约为 0.7V），验证连接引脚以确认是否存在二极管。
2. 将远程/结点设置放置在油浴或烤箱等受控温度环境中。需在该环境中设置参考温度。不得使用油浴或烤箱参考温度。首选的参考方案是在尽可能靠近远程结点的位置使用铂电阻热管理器 (PRT) 或电阻温度检测器 (RTD)。另一种参考方案是使用远程传感器的本地温度芯片。
3. 在受控环境内跨温度收集远程、本地和参考数据的温度。温度范围必须是用户所需的产品范围。
4. 将收集的数据加载到[远程校准工具](#)中，以优化 n 因数和偏移所需的值。
5. 将新的 n 因素和偏移值写入 I2C 寄存器。
6. 重复步骤三，确认性能得到改善。

下面展示了一个使用远程校准工具提高精度的示例：首先突出显示原始数据而不对配置进行任何更改，然后突出显示精度随配置变化而提高的情况。

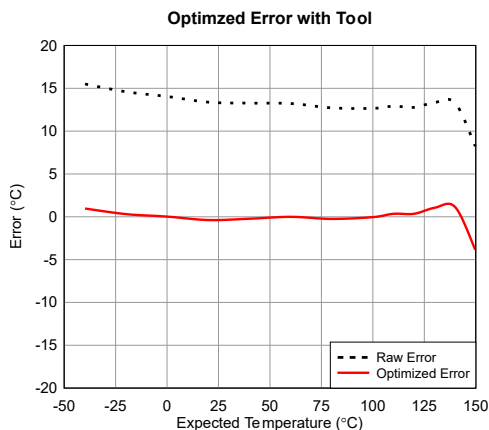


图 6-1. 更改偏移和 n 因数产生的影响

表 6-1. 校准设置

n 因数	偏移
0.994661626	-17.875C
0x1C	0xF710

当 n 因数和偏移是唯一的误差源时，也可以使用以下公式来优化远程器件。N_{expected} 值为 1.008。

$$\begin{aligned}
 Error &= \left(T + 275.15 \right) \times \frac{N_{actual} - N_{expected}}{N_{expected}} \\
 Reported\ T &= \left(T + 273.15 \right) \times \frac{N_{actual}}{N_{expected}} - 273.15 \\
 N_{actual} &= \frac{(T_{reported} + 273.15) \times N_{expected}}{T + 273.15}
 \end{aligned} \tag{9}$$

我们的温度传感器还具有自动串联电阻消除功能。远程温度传感器中的串联电阻消除是用于提高测量精度的一种重要技术，尤其是在涉及长电缆布线并连接到 SOC 的应用中。当传感器与测量系统保持一定距离时，由于导线沿线的压降，连接导线的电阻可能会导致温度读数误差。结点信号路径中的任何电阻都可能导致晶体管的实际 VBE 与温度传感器上测量的 VBE 之间出现压降，从而导致温度偏移。为了减轻这种影响，内部远程传输可以消除 DXP/DXN 信号上的电阻，以消除导线的电阻误差，并允许增加噪声滤除，而不会增加温度误差。该器件可消除总计 1kΩ 的串联电阻。串联电阻消除功能允许直接连接到嵌入式和离散结点。下面的公式突出显示了当 D+ 和 D- 路径中存在电阻时 VBE 测量的额外误差。第一项是串联电阻产生的额外误差。

$$\Delta V_{BE} = I_S R_S + \left(\frac{\eta k T}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{C2}}{I_{C1}} \right) \tag{10}$$

7 布局技术

远程设备使用极低电流测量极小电压；因此必须更大限度地降低器件输入端的噪声。误差源包括电磁干扰 (EMI) 或电感耦合、错误校准和 PCB 布线电阻。为了减少误差，请考虑以下情况：

1. 将远程器件尽可能放置在靠近远程结温传感器的位置
2. D+ 和 D- 布线彼此相邻，并使用接地防护迹线为它们屏蔽附近的信号。如果使用多层 PCB，请将这些布线埋在接地平面或 V+ 平面之间，以屏蔽外部噪声源的影响。TI 建议使用 5mil (0.127mm) PCB 布线。
3. 更大限度地减少铜线与焊料连接导致的额外热电偶结点。如果使用这些结点，请在 D+ 和 D- 连接处进行相同数量的铜线与焊料连接，并在相似位置进行连接，以消除任何热电偶效应。
4. 在远程温度传感器的 V+ 和 GND 之间直接使用 0.1 μ F 的本地旁路电容器。为了实现最佳测量性能，应最大限度减小 D+ 和 D- 之间的滤波器电容，达到 1000pF 或更低。此电容包括远程 BJT 和温度传感器之间的任何电缆电容。
5. 如果远程温度传感器与远程传感器之间的连接已接线，且长度小于 8 英寸 (20.32cm)，请使用双绞线连接。对于长度大于 8 英寸的情况，请使用屏蔽层接地的屏蔽双绞线，尽可能靠近远程 IC 器件。使屏蔽线的远程传感器连接端保持开路，以避免接地回路和拾取 60Hz 噪声。
6. 彻底清洁并清除器件引脚内部和周围的所有焊剂残留物，以避免由于 D+ 和 GND 之间，或 D+ 和 V+ 之间的泄漏路径而导致的温度偏移读数。

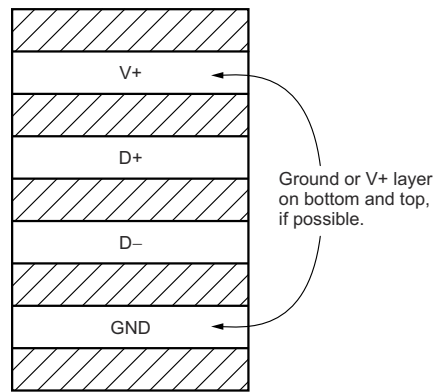


图 7-1. D+ 和 D- 走线的分层建议

使用多通道 EVM，收集数据以确定布线长度与温度传感器精度之间的比率。图 7-2 所示的 EVM 放置在 25C 下具有受控温度环境的油浴中。数据是通过在线 GUI 收集并在文档中报告。远程布线使用屏蔽电缆。如本实验所示，导线长度与远程通道的精度之间未发现显著关联。噪声仍会通过 D+ 和 D- 进行干扰，建议遵循上述所有建议。

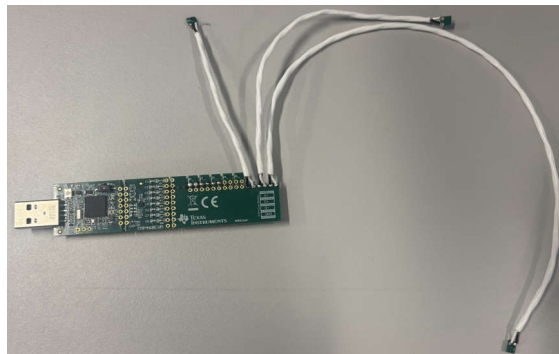


图 7-2. 使用多通道远程 EVM 的测试设置

表 7-1. 跨不同远程长度的误差

	Ch1 误差	Ch2 误差	C3 误差	C4 误差	C5 误差	C6 误差	C7 误差	C8 误差
最大误差	1.125	1.1875	1.125	1	1.0625	1.125	1.0625	1.25

表 7-1. 跨不同远程长度的误差 (续)

	Ch1 误差	Ch2 误差	C3 误差	C4 误差	C5 误差	C6 误差	C7 误差	C8 误差
额外的布线长度	PCB 上					3in	6in	12in

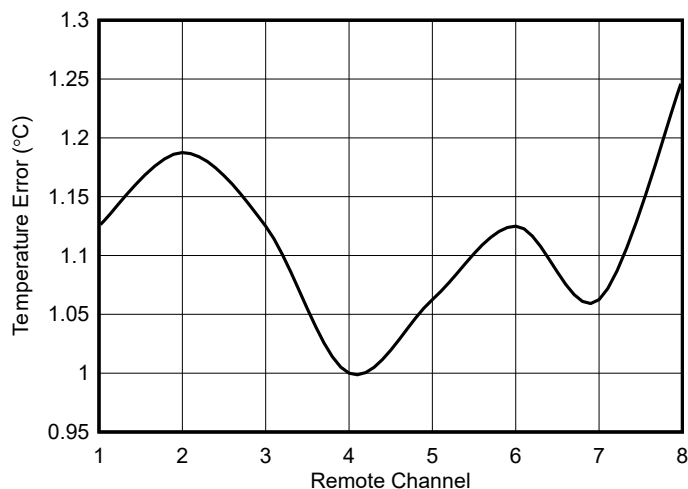


图 7-3. 跨不同远程长度的误差

8 总结

总之，集成德州仪器 (TI) 远程温度传感器为监测航天应用中的关键热环境提供了可靠且有效的设计。本文通过介绍远程温度传感器的常见用例并概述所有设计注意事项，旨在让读者清晰地掌握如何将航天远程温度传感器嵌入到系统中。这些传感器经验证的抗辐射能力和设计灵活性，为开发可靠、可随时执行任务的电子设备提供了重要支持。随着航天任务越来越复杂、持续时间越来越长，采用经验证的远程温度传感设计对于确认系统可靠性和任务成功执行仍然至关重要。

9 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[优化远程二极管温度传感器设计](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[远程温度晶体管传感器选型指南](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[TMP9R01-SP 单粒子效应 \(SEE\) 辐射测试报告](#) 辐射报告。
- 德州仪器 (TI)，[TIDA-070004](#) 产品文件夹。
- 德州仪器 (TI)，[远程校准工具](#) 软件。

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