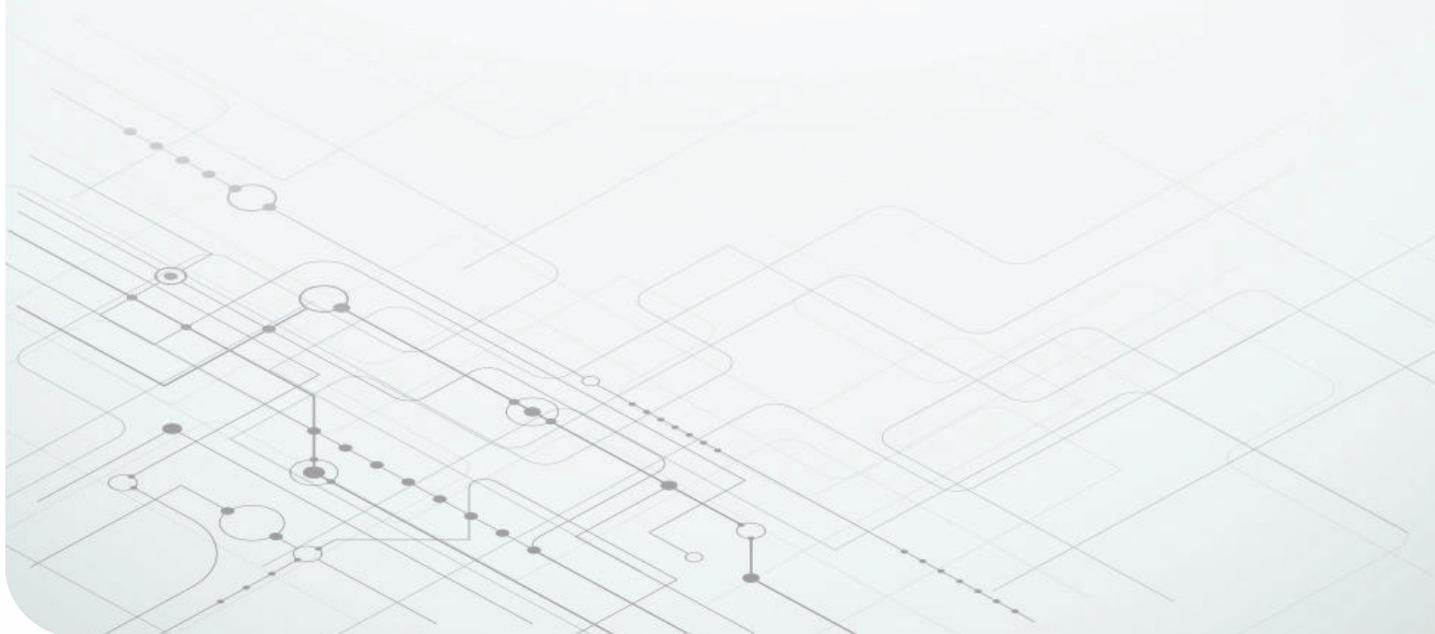


使用热敏电阻进行温度检测



数十亿人每天都在使用各种技术设备，这些技术设备在过去几年里复杂性急剧增加。这意味着这些设备的操作安全现在（并且应该一直）非常重要。所幸的是，设计人员可以通过根据环境温度触发一定的功能来冷却、加热或以其他方式改变系统的性能，从而防止电池着火或元件损坏等热灾难。

温度传感器是每个电子系统的基本构建模块，有助于确保设备在以最高性能运行的同时保障用户安全。温度传感器有多种类型，包括集成电路温度传感器、热敏电阻、热电偶和电阻温度检测器；它们都有各自的优缺点。

本白皮书将重点介绍其中一种常见的温度传感器（即热敏电阻）以及在温度检测应用中使用热敏电阻时的一些重要注意事项，并对两种不同类型的热敏电阻（负温度系数 (NTC) 热敏电阻和硅基线性正温度系数 (PTC) 热敏电阻）进行比较。

热敏电阻（英文为“Thermistor”，是 **thermal resistors** 的缩写）是非常简单的分立式双端子固态器件，其电阻值

会随温度变化，足以使用正确的电路测量变化。与电阻器一样，它们遵循欧姆定律，但热敏电阻的电阻值会随器件所处的温度而变化。

热敏电阻系列树

热敏电阻会随温度的变化而改变其电阻。由于使用不同的半导体材料和制造工艺，热敏电阻可以分为 NTC 或 PTC 类型。随着温度升高，NTC 热敏电阻的阻值会减小，而 PTC 热敏电阻的阻值会增大。如图 1 所示，可以在热敏电阻的工作温度范围内将电阻与温度间的关系 (R-T) 特性进一步概括为线性和非线性特性。

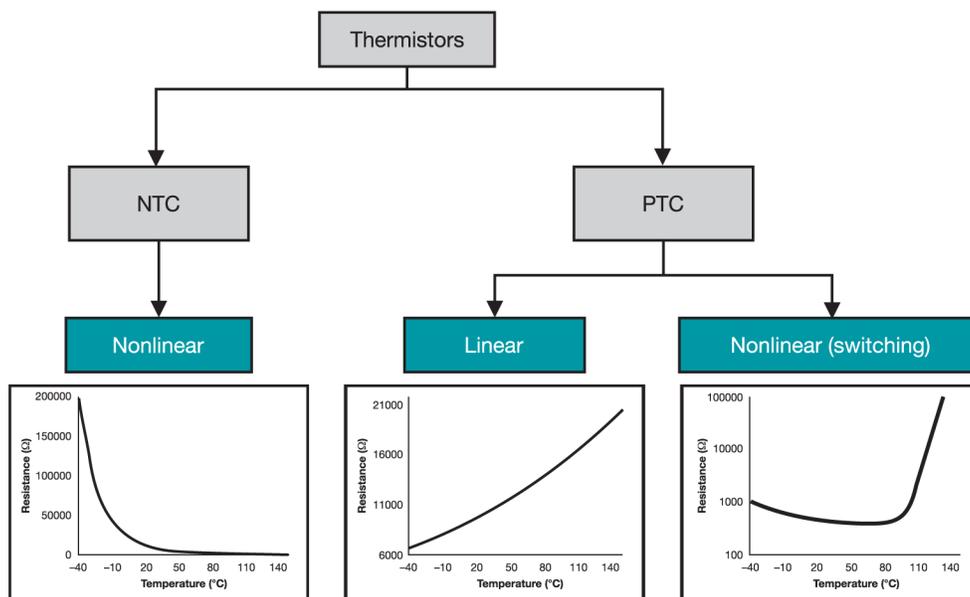


图 1. 热敏电阻系列概述。

NTC 热敏电阻已经问世数十年，由于其价格低廉，因此成为基于热敏电阻的温度检测设计的默认元件。但是，线性

热敏电阻比 NTC 热敏电阻具有优势，因此越来越受欢迎。由硅制成的线性热敏电阻通常称为“硅基电阻”（**硅基热敏电阻**的简称）或 KTY 器件。这些器件属于 PTC 热敏电

阻，因为它们的电阻通常随温度升高而增加。非线性 PTC 热敏电阻通常用于限流应用，因为它们的电阻会从特定温度（称为“居里点”）开始快速增加。由于这一特性，非线性 PTC 热敏电阻通常称为“开关 PTC 热敏电阻”。

常见热敏电阻电路

让我们首先看看这些分立式器件的典型使用情况。由于流经电阻元件的电流会在该元件上产生压降，因此热敏电阻需要外部激励才能运行。

一种简单且经济高效的热敏电阻偏置方法是使用恒定电压源和分压器电路，如图 2 所示。

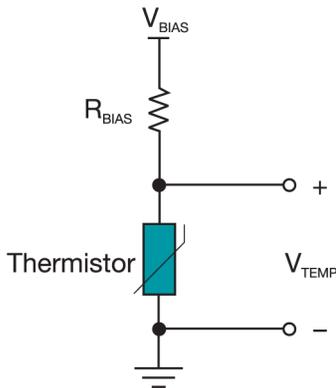


图 2. 分压器配置中的热敏电阻。

随着温度的变化，热敏电阻上的压降 (V_{TEMP}) 将会发生变化。在使用电压源进行设计时，最好使用比例法，这有助于消除电源变化的影响。有关比例法和绝对法的更多信息，请参阅[这篇文章](#)。

另一种常用的偏置电路是恒定电流源的偏置电路，如图 3 所示，它能够更好地控制 V_{TEMP} 灵敏度，以实现高精度并充分利用模数转换器 (ADC) 的满量程范围。

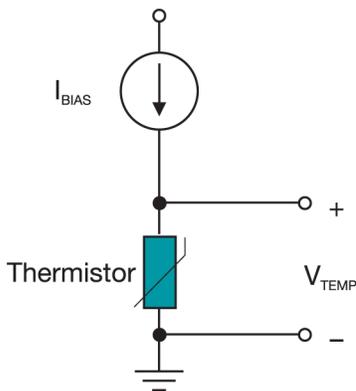


图 3. 使用恒流源偏置的热敏电阻。

V_{TEMP} 电压通常直接馈入 ADC 或通过比较器进行路由，以进行离散阈值检测，如图 4 所示。在 V_{TEMP} 上升到高于由 R_1 和 R_2 设定的阈值电压之前，比较器的输出将保持低电平。当输出变高时，比较器发出过热警告信号。要保持此警报信号，直到温度稳定回指定值（以添加迟滞），您可以使用具有内置迟滞的比较器或向您的设计中添加反馈电阻器。

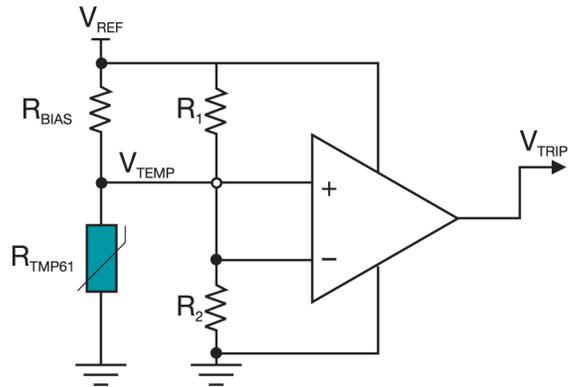


图 4. 使用热敏电阻加比较器进行阈值检测。

您可能更希望热敏电阻具有线性 V_{TEMP} 响应，因为它使软件实现更容易，并可以减少因器件差异而产生的误差。传统上，您必须将多个 NTC 热敏电阻与固定电阻相结合，才能在整个温度范围内实现线性电压响应。使用 NTC 热敏电阻至少需要添加一个并联电阻 (图 5)，才能使 V_{TEMP} 线性化。

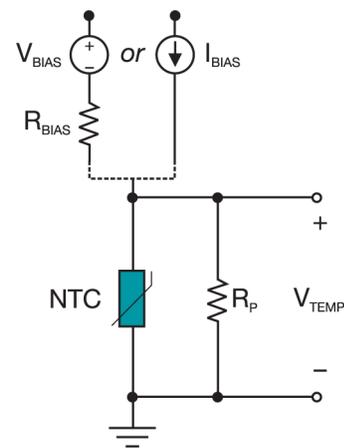


图 5. NTC 加并联电阻来使 V_{TEMP} 线性化。

但线性 PTC 热敏电阻具有固有的线性度。由于具有线性 R-T 曲线，这些器件提供线性 V_{TEMP} 特性，因此不需要任何额外的电路，如图 6 所示。因此，如果您需要在保持线

性 V_{TEMP} 响应的同时节省空间和成本，线性 PTC 热敏电阻可能是更好的选择。

电阻容差和灵敏度

热敏电阻按照其电阻容差进行分类，其中电阻容差是指任何给定温度下的电阻差异 (\pm)。此参数的范围为 0.5% 至 +10%，通常在数据表中列为 25°C 时的电阻容差。选择热敏电阻时，请确保使用制造商 R-T 表中提供的最小、典型和最大电阻值来计算出热敏电阻暴露温度下的电阻容差。此计算很重要，因为当所处温度偏离 25°C 时，传统 NTC 热敏电阻的电阻容差通常远大于数据表中规定的值。在某些情况下，电阻容差可能会从 25°C 时的 $\pm 1\%$ 增加到 -40°C 和 150°C 时高达 $\pm 4\%$ 或更高。

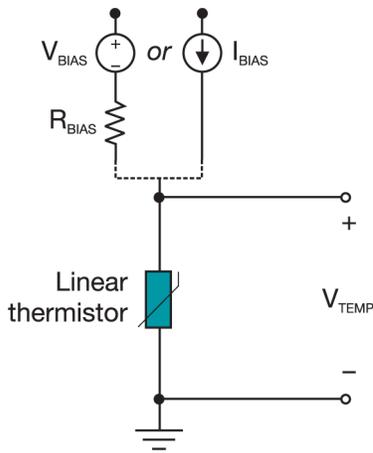


图 6. 线性 PTC 热敏电阻无需并联电阻。

由于其材料成分和一致的电阻灵敏度，硅基线性热敏电阻具有更稳定的电阻容差。与 $\pm 1\%$ NTC 热敏电阻相比，一些 $\pm 1\%$ 硅基线性热敏电阻在 -40°C 和 150°C 下的最大电阻容差最高为 $\pm 1.5\%$ 。与 NTC 热敏电阻在极端温度下的容差达到 $\pm 4\%$ 相比，这是一个很大的差异。

热敏电阻的另一个参数是每摄氏度的电阻变化，也称为灵敏度。如果灵敏度太小而导致 ADC 无法测量，则会影响温度测量的精度。通常，NTC 热敏电阻在低温下具有非常大的灵敏度，因为其电阻会以非线性方式呈指数下降。但是，在高温下，它们的灵敏度会大幅降低，与高电阻容差结合时，可能会导致温度读数不正确。

与 NTC 热敏电阻相比，硅基线性热敏电阻具有更加一致的灵敏度值，可在整个温度范围内实现稳定的测量。硅基线性热敏电阻的灵敏度也比 NTC 热敏电阻的更高，因为

NTC 热敏电阻的灵敏度在温度超过 67°C 时会大幅降低。因此，如果需要精确测量较高的温度，硅基线性热敏电阻会是传统 NTC 热敏电阻的出色替代品。

Calibration

组装过程中最好校准热敏电阻，以获得更准确的温度读数，而这通常是通过测量热敏电阻在已知温度下的输出并实施偏移来实现的。根据热敏电阻的类型和应用的具体温度范围，推荐的校准点数量可能会有所不同。例如，如果需要测量宽温度范围 ($>50^\circ\text{C}$)，NTC 热敏电阻通常需要多个校准点，以减少电阻容差和整个温度范围内灵敏度变化而导致的误差。相反，由于硅的一致性、R-T 特性曲线的线性度和低电阻容差，硅基线性热敏电阻只需要单点校准。

自发热和传感器温漂

每当有电流流过热敏电阻时，热敏电阻就会以热量的形式耗散功率，从而发生自加热。该热量在热敏电阻的核心中产生，会影响测量精度。

热敏电阻可能出现的自发热量取决于以下因素：

- 材料成分。
- 热敏电阻尺寸。
- 流经热敏电阻的电流大小。
- 环境条件，例如传感器周围环境的热传导。
- 电路板布局布线。

从 NTC 热敏电阻的 R-T 特性可以看到，其电阻会随着温度的升高而降低，因此功耗会增加。随着功率的增加，NTC 热敏电阻散发出的热量也会增加，从而导致自发热。另一方面，硅基线性 PTC 热敏电阻的电阻会随着温度的升高而增加，因而功耗会降低。由于它们由硅制成，因此与 NTC 热敏电阻的材料相比，这些器件具有很少的自发热。

除了自发热外，“电阻容差和灵敏度”一节中提到的容差还会导致热敏电阻在使用寿命内发生传感器温漂。传感器温漂规格（应包含在热敏电阻的数据表中）对于器件将使用多年或在恶劣条件下使用的应用非常重要。通常，热敏电阻制造商会在执行加速环境应力测试方法（例如温度和湿度循环）后提供这些规格。因为硅更稳定，硅基线性 PTC 热敏电阻的传感器温漂也比 NTC 热敏电阻小得多。

有关更多信息，请参阅[白皮书](#)“由 NTC 和 PTC 热敏电阻中自发热造成的测量误差”。

常用的软件转换方法

有多种方法可以在软件中将 V_{Temp} 转换为温度值。它们一开始都是一样的：您的代码将从 ADC 读取一个值，并将该值分配给一个变量。然后，您可以计算电阻值并使用多种转换方法之一。

一种常用的方法是使用查找表 (LUT)，其中包括预先填充一系列温度及其预期的电阻值。代码会通过向上或向下舍入来搜索 LUT 中最接近的电阻值，并找到相应的温度值。如果需要更高的精度，可以使用带有插值的 LUT，这时将计算 LUT 中两个值之间的温度，而不是向上或向下舍入，从而获得更准确的读数。

另一种更适合内存感知型应用的温度转换方法是曲线拟合公式，该公式可以准确地表示器件的 R-T 曲线。适用于 NTC 热敏电阻的一种常用方法是使用 Steinhart-Hart 公式（[公式 1](#)）：

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3 \quad (1)$$

其中， T 是以开尔文为单位的温度， R 是计算得出的电阻值， A 、 B 和 C 是计算得出的系数，而 \ln 是自然对数函数。

但是，硅基热敏电阻可以使用简单的四阶多项式回归公式（[公式 2](#)），该公式的处理速度要比 Steinhart-Hart 公式更快：

$$T = A_4 R^4 + A_3 R^3 + A_2 R^2 + A_1 R + A_0 \quad (2)$$

其中， T 是以摄氏度为单位的温度， R 是计算得出的电阻值，而 $A_{(0-4)}$ 是多项式系数。

结论

与传统 NTC 热敏电阻相比，硅基线性热敏电阻具有许多优势。有多种硅基线性热敏电阻可供选择，但与 NTC 热敏电阻相比，其价格是阻止采用的一大障碍。

德州仪器 (TI) 推出了一系列同样采用小型封装且价格与 NTC 热敏电阻相当的硅基线性热敏电阻，从而消除了这一

障碍。[表 1](#) 比较了传统 NTC 热敏电阻和 TI 硅基线性热敏电阻。

硅基线性热敏电阻具有许多性能优势，可在各种工业和汽车应用中提供帮助。有关 TI 硅基线性热敏电阻产品系列的更多信息，请参阅 [TI 热敏电阻页面](#)。

参数	传统 NTC 热敏电阻	TI 硅基线性热敏电阻
物料清单成本	<ul style="list-style-type: none"> 低成本器件 可能需要额外的线性化电路 	<ul style="list-style-type: none"> 低成本器件 无需额外的线性化电路
电阻容差	<ul style="list-style-type: none"> 在极端温度下从 25°C 时的 $\pm 1\%$ 增加到 $\pm 5\%$ 	<ul style="list-style-type: none"> 在极端温度下从 25°C 时的 $\pm 1\%$ 增加到 $\pm 1.5\%$
灵敏度	<ul style="list-style-type: none"> 随着温度升高，灵敏度会显著降低 	<ul style="list-style-type: none"> 在整个温度范围内具有稳定的灵敏度
校准点	<ul style="list-style-type: none"> 宽温度范围应用需要多个校准点 	<ul style="list-style-type: none"> 单点校准适用于整个温度范围
自发热和传感器温漂	<ul style="list-style-type: none"> 随着温度升高，功耗会增加 典型传感器温漂 $< 5\%$ 	<ul style="list-style-type: none"> 随着温度升高，功耗会减少 典型传感器温漂 $< 0.5\%$

表 1. NTC 热敏电阻与硅基线性 PTC 热敏电阻。

其他资源

- [TMP61 数据表](#)
- [模拟设计期刊文章“由 NTC 和 PTC 热敏电阻中自发热造成的测量误差”](#)
- [EE World 在线文章“使用 NTC 和硅基 PTC 热敏电阻进行温度检测时的误差分析：比较比例法和绝对法”](#)

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

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