

基于热敏电阻的 温度检测系统—— 第1部分：设计挑战和 电路配置

Jellenie Rodriguez, 应用工程师

Mary McCarthy, 工程师

简介

本系列文章分为两部分，这是第1部分。本部分首先讨论基于热敏电阻的温度测量系统的历史和设计挑战，以及它与基于电阻温度检测器(RTD)的温度测量系统的比较。此外，本文还会简要介绍热敏电阻选择、配置权衡，以及 Σ - Δ 模数转换器(ADC)在该应用领域中的重要作用。第2部分将详细介绍如何优化和评估基于热敏电阻的最终测量系统。

热敏电阻与RTD

正如文章“[如何选择并设计理想RTD温度检测系统](#)”中所讨论的，RTD是一种电阻值随温度变化的电阻器。热敏电阻的工作方式与RTD类似。RTD仅有正温度系数，热敏电阻则不同，既可以有正温度系数，也可以有负温度系数。负温度系数(NTC)热敏电阻的阻值会随着温度升高而减小，而正温度系数(PTC)热敏电阻的阻值会随着温度升高而增大。图1显示了典型NTC和PTC热敏电阻的响应特性，以及它们与RTD曲线的比较。

在温度范围方面，RTD曲线接近线性，而热敏电阻具有非线性（指数）特性，因此前者覆盖的温度范围（通常为-200°C至+850°C）比后者要宽得多。RTD通常提供众所周知的标准化曲线，而热敏电阻曲线则因制造商而异。我们将在本文的“热敏电阻选择指南”部分详细讨论这一点。

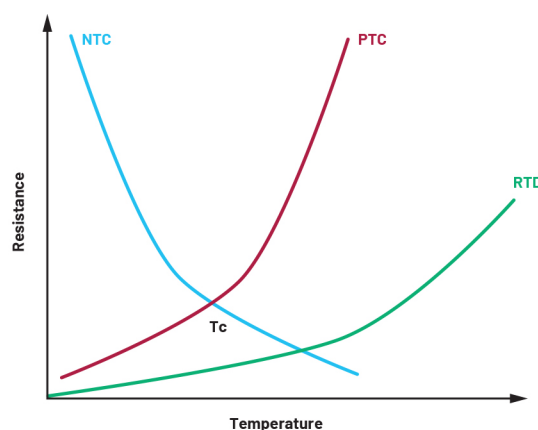


图1. 热敏电阻与RTD的响应特性比较

热敏电阻由复合材料——通常是陶瓷、聚合物或半导体（通常是金属氧化物）——制成，与由纯金属（铂、镍或铜）制成的RTD相比，前者要小得多且更便宜，但不如后者坚固。热敏电阻能够比RTD更快地检测温度变化，从而提供更快的反馈。因此，热敏电阻传感器常用于要求低成本、小尺寸、更快响应速度、更高灵敏度且温度范围受限的应用，例如监控电子设备、家庭和楼宇控制、科学实验室，或商业或工业应用中的热电偶所使用的冷端补偿。

在大多数情况下，精密温度测量应用使用NTC热敏电阻，而非PTC热敏电阻。有一些PTC热敏电阻被用于过流输入保护电路，或用作安全应用的可复位保险丝。PTC热敏电阻的电阻-温度曲线在达到其切换点（或居里点）之前有一个非常小的NTC区域；超过切换点之后，在几摄氏度的范围内，其电阻会急剧增加几个数量级。因此，在过流情况下，PTC热敏电阻在超过切换温度后会产生大量自发热，其电阻会急剧增加，导致输入系统的电流减少，从而防止系统发生损坏。PTC热敏电阻的切换点通常在60°C和120°C之间，因此它不适合用在宽温度范围应用中监控温度测量结果。本文重点介绍能够测量或监控-80°C至+150°C温度范围的NTC热敏电阻。NTC热敏电阻在25°C时的标称电阻从几欧姆到10 MΩ不等。如图1所示，与RTD相比，热敏电阻每摄氏度的电阻变化更为显著。热敏电阻的高灵敏度和高电阻值使得其前端电路比RTD要简单得多，因为热敏电阻不需要任何特殊的接线配置（例如3线或4线）来补偿引线电阻。热敏电阻设计仅使用简单的2线配置。

表1显示了RTD、NTC和PTC热敏电阻的优缺点。

表1. 热敏电阻与RTD

参数	NTC热敏电阻	PTC热敏电阻	RTD
温度范围	-80°C至+300°C	60°C至120°C	-200°C至+850°C
温度系数	负	正	正
线性度	指数式	指数式	接近线性
灵敏度	高	高	低
响应时间	快速	快速	慢速
激励	必需	必需	必需
自发热	是	是	是
接线配置	2线	2线	2线、3线、4线
成本	便宜到中等	便宜	中等到昂贵
尺寸	小	小	中

基于热敏电阻的温度测量挑战

高精度的热敏电阻温度测量需要精密信号调理、模数转换、线性化和补偿，如图2所示。尽管信号链看起来简单明了，但其中涉及的几个复杂因素也会影响整个系统的电路板尺寸、成本和性能。ADI精密ADC产品组合中有几种集成解决方案，例如AD7124-4/AD7124-8，它们能为温度系统设计带来多方面好处，应用所需的大部分构建模块都已内置。但是，设计和优化基于热敏电阻的温度测量解决方案涉及到多种挑战。

挑战包括：

- ▶ 市场上有各种各样的热敏电阻。
 - 如何为具体应用选择合适的热敏电阻？
- ▶ 与RTD一样，热敏电阻是无源器件，自身不会产生电气输出。使用激励电流或电压来测量传感器的电阻，即让一个小电流经过传感器以产生电压。
 - 如何选择电流/电压？
 - 热敏电阻信号应如何调理？
 - 如何调整上述变量，以便在规格范围内使用转换器或其他构建模块？
- 在一个系统中连接多个热敏电阻：传感器如何连接？不同传感器之间是否能共享一些模块？对系统整体性能有何影响？
- ▶ 热敏电阻的一个主要问题是其非线性响应和系统精度。
 - 设计的预期误差是多少？
 - 使用哪些线性化和补偿技术来实现目标性能？

本文将讨论所有这些挑战，并就如何解决这些问题和进一步简化此类系统的设计过程提供建议。

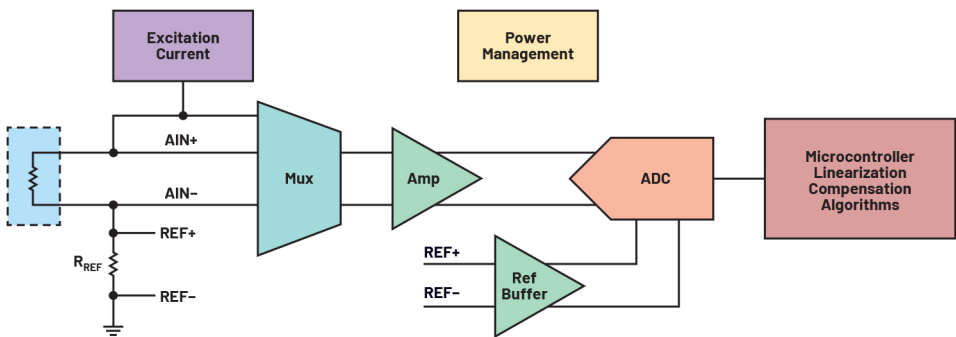


图 2. 典型 NTC 热敏电阻测量信号链模块

热敏电阻选择指南

当今市场上有很多NTC热敏电阻可供选择，为具体应用选择特定的热敏电阻可能相当具有挑战性。请注意，热敏电阻按其标称值列出，即25°C时的标称电阻。因此，10 kΩ热敏电阻在25°C时的标称电阻为10 kΩ。热敏电阻的标称或基本电阻值从几欧姆到10 MΩ不等。标称电阻较低（10 kΩ或更低）的热敏电阻，支持的温度范围通常也较低，例如-50°C至+70°C。标称电阻较高的热敏电阻，可支持最高300°C的温度。

热敏电阻元件由金属氧化物制成。热敏电阻有珠状、径向和SMD等形式。珠状热敏电阻采用环氧树脂涂层或玻璃封装，以提供额外保护。环氧树脂涂层珠状热敏电阻、径向和SMD热敏电阻适用于最高150°C的温度。玻璃涂层珠状热敏电阻适用于高温测量。所有类型热敏电阻的涂层/封装还能防止腐蚀。一些热敏电阻还具有额外的外壳，以在恶劣环境中提供进一步的保护。与径向/SMD热敏电阻相比，珠状热敏电阻具有更快的响应时间。然而，后者不如前者那么稳健。因此，使用何种热敏电阻取决于最终应用和热敏电阻所处的环境。热敏电阻的长期稳定性取决于制造材料及其封装和结构。例如，环氧树脂涂层的NTC热敏电阻每年可能变化0.2°C，而密封的热敏电阻每年仅变化0.02°C。

不同热敏电阻有不同的精度。标准热敏电阻的精度通常为0.5°C至1.5°C。热敏电阻的标称电阻值和β值（25°C至50°C/85°C关系）有一个容差。请注意，热敏电阻的β值取决于制造商。例如，不同制造商生产的10 kΩ NTC热敏电阻会有不同的β值。对于较高精度的系统，可以使用Omegatm 44xxx系列等热敏电阻。在0°C至70°C的温度范围内，其精度为0.1°C或0.2°C。因此，所测量的温度范围以及该温度范围内所需的精度决定了一个热敏电阻是否适合特定应用。请注意，Omegatm 44xxx系列的精度越高，其成本也越高。

因此，使用何种热敏电阻取决于：

- ▶ 被测温度范围
- ▶ 精度要求
- ▶ 使用热敏电阻的环境
- ▶ 长期稳定性

线性化：β与Steinhart-Hart方程

为了将电阻转换为摄氏度，通常使用β值。知道两个温度点以及每个温度点对应的电阻，便可确定β值。

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{R_{T1}}{R_{T2}}\right)}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \quad (1)$$

其中：

R_{T1} = 温度1时的电阻

R_{T2} = 温度2时的电阻

T_1 = 温度1(K)

T_2 = 温度2(K)

热敏电阻的数据手册通常会列出两种情况的β值：

- ▶ 两个温度分别为25°C和50°C
- ▶ 两个温度分别为25°C和85°C

用户使用接近设计所用温度范围的β值。大多数热敏电阻数据手册在列出β值的同时，还会列出25°C时的电阻容差和β值的容差。

较高精度的热敏电阻（如Omegatm 44xxx系列）和较高精度的最终解决方案使用Steinhart-Hart方程将电阻转换为摄氏度。公式2需要三个常数A、B和C，这些常数同样由传感器制造商提供。公式的系数是利用三个温度点生成的，因此所得公式尽可能减少了线性化引入的误差（线性化引起的误差通常为0.02°C）。

$$T = \frac{1}{A + B \ln(R) + C [\ln(R)]^3} \quad (2)$$

其中：

A、B、C是从三个温度测试点得出的常数。

R = 热敏电阻的阻值，单位为Ω

T = 温度，单位为K

电流/电压激励

图3显示了传感器的电流激励。将激励电流作用于热敏电阻，并将相同电流作用于精密电阻；精密电阻用作测量的参考。参考电阻的值必须大于或等于热敏电阻的最高电阻值（取决于系统中测量的最低温度）。选择激励电流的大小时，同样要考虑热敏电阻的最大电阻值，以确保传感器和参考电阻两端产生的电压始终处于电子设备可接受的水平。激励电流源需要一定的裕量或输出顺从性。如果热敏电阻在所测量的最低温度时具有较大电阻，则激励电流值将非常低。因此，高温下热敏电阻两端产生的电压很小。为了优化这些低电平信号的测量，可以使用可编程增益级。然而，增益需要动态编程，因为来自热敏电阻的信号电平会随温度发生显著变化。

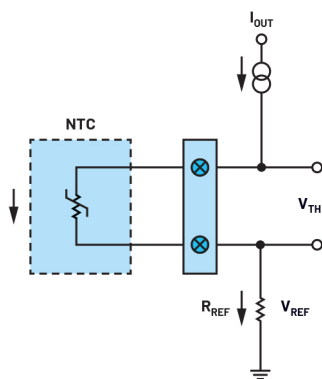


图 3. 热敏电阻的电流激励

另一个方案是设置增益但使用动态激励电流。当来自热敏电阻的信号电平发生变化时，激励电流值也会动态变化，使得热敏电阻两端产生的电压处于电子设备的额定输入范围内。用户必须确保参考电阻两端产生的电压也处于电子设备可接受的水平。这两种方案都需要高水平的控制，持续监测热敏电阻两端的电压，以确保信号能被电子设备测量。有没有更简单的方案？我们来看看电压激励。

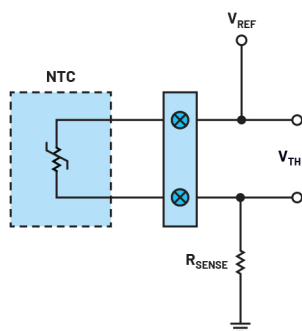


图 4. 热敏电阻的电压激励

当热敏电阻由恒定电压激励时，通过热敏电阻的电流将随着热敏电阻阻值的变化而自动缩放。现在使用精密检测电阻，而不使用参考电阻，其目的是计算流过热敏电阻的电流，这样就能计算出热敏电阻的阻值。由于激励电压也用作ADC基准电压，因此无需增益级。处理器无需监控热敏电阻两端的电压，无需确定该信号电平能否被电子设备测量，也无需计算要将增益/激励电流调整到什么值。这是本文中使用的方法。

热敏电阻阻值范围/激励

如果热敏电阻的标称电阻和阻值范围较小，那么电压或电流激励均可使用。在这种情况下，激励电流和增益可以是固定值。电路将如图3所示。这种方法很有用，因为流过传感器和参考电阻的电流是可控的，这在低功耗应用中很有价值。此外，热敏电阻的自发热也极小。

对标称电阻较低的热敏电阻也可以使用电压激励。但是，用户必须确保通过传感器的电流对于传感器本身或应用而言任何时候都不能太大。

当使用标称电阻和温度范围均较大的热敏电阻时，电压激励会使系统更容易实现。较大标称电阻确保标称电流处于合理水平。但是，设计人员需要确保电流在应用支持的整个温度范围内处于可接受的水平。

Σ-Δ ADC在基于热敏电阻的应用中的重要作用

当设计热敏电阻测量系统时，Σ-Δ ADC能提供多方面优势。首先，Σ-Δ型ADC能够对模拟输入过采样，从而尽可能地减少外部滤波，只需要简单的RC滤波器。另外，它们支持灵活地选择滤波器类型和输出数据速率。在采用市电供电的设计中，内置数字滤波可用来抑制交流电源的干扰。AD7124-4/AD7124-8等24位器件的峰峰值分辨率21.7位（最大值），因此它们能提供高分辨率。

其他优点包括：

- ▶ 宽共模范围的模拟输入
- ▶ 宽共模范围的基准输入
- ▶ 能够支持比率式配置

有些Σ-Δ型ADC集成了很多功能，包括：

- ▶ PGA
- ▶ 内部基准电压源
- ▶ 基准电压源/模拟输入缓冲器
- ▶ 校准功能

使用Σ-Δ ADC可大幅简化热敏电阻设计，减少BOM，降低系统成本，缩小电路板空间，并缩短产品上市时间。

本文将AD7124-4/AD7124-8用作ADC，它们是集成PGA、嵌入式基准电压源、模拟输入和基准电压缓冲器的低噪声、低电流精密ADC。

热敏电阻电路配置——比率式配置

无论使用激励电流还是激励电压，都建议使用比率式配置，其中基准电压和传感器电压是从同一激励源获得。这意味着激励源的任何变化都不会影响测量的精度。

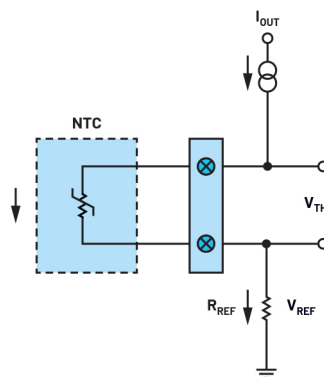


图 5. 恒流源配置

图5显示，恒定激励电流为热敏电阻和精密电阻 R_{REF} 供电， R_{REF} 上产生的电压就是热敏电阻测量的基准电压。激励电流不需要非常准确，稳定性不需要太高，因为在此配置中，激励电流的任何误差都会被抵消。激励电流通常比电压激励更受欢迎，原因是它能出色地控制灵敏度，而且当传感器位于远程地点时，它具有更好的抗扰度。这种类型的偏置技术常用于电阻值较低的RTD或热敏电阻。但是，对于电阻值较大且灵敏度较高的热敏电阻，温度变化所产生的信号电平会较大，因此应使用电压激励。例如，一个10 k Ω 热敏电阻在25 $^{\circ}\text{C}$ 时的阻值为10 k Ω ，而在-50 $^{\circ}\text{C}$ 时，NTC热敏电阻的阻值为441.117 k Ω 。AD7124-4/AD7124-8提供的50 μA 最小激励电流可产生的电压为441.117 k $\Omega \times 50 \mu\text{A} = 22 \text{ V}$ ，此电压过高，超出了该应用领域中使用的大多数ADC的工作范围。热敏电阻通常还连接到电子设备或位于电子设备附近，因此不需要激励电流的抗噪优势。

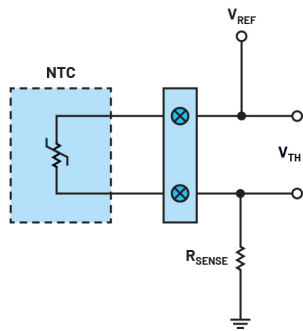


图6. 分压电路配置

图6显示了用于在NTC热敏电阻两端产生电压的恒定激励电压。以分压器电路的形式添加一个串联检测电阻，会限制热敏电阻在最小电阻值时流经其中的电流。在此配置中，在25 $^{\circ}\text{C}$ 的基本温度时，检测电阻 R_{SENSE} 的值必须等于热敏电阻的电阻值，以便将它处于25 $^{\circ}\text{C}$ 标称温度时的输出电压设置为基准电压的中间值。同样，如果使用25 $^{\circ}\text{C}$ 时阻值为10 k Ω 的10 k Ω 热敏电阻，则 R_{SENSE} 必须等于10 k Ω 。当温度改变时，NTC热敏电阻的阻值也会改变，热敏电阻两端的激励电压的一小部分也发生改变，从而产生与成NTC热敏电阻阻值比例的输出电压。

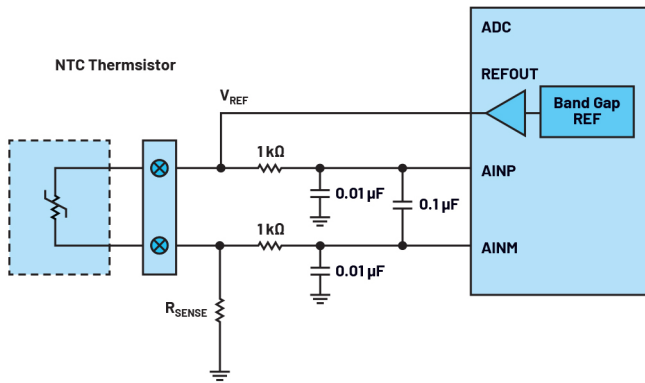


图7. 热敏电阻比率式配置测量

如果选择用来为热敏电阻和/或 R_{SENSE} 供电的基准电压与用于测量的ADC基准电压相同，则系统就是比率式测量配置（图7），任何与激励电压源相关的误差都会被消除。

请注意，检测电阻（电压激励）或参考电阻（电流激励）的初始容差和漂移必须很低，因为这两个变量均会影响系统总体精度。

当使用多个热敏电阻时，可以使用单个激励电压。但是，每个热敏电阻必须有自己的精密检测电阻，如图8所示。另一个方案是使用低导通电阻的外部多路复用器或开关，从而支持共享单个精密检测电阻。采用这种配置时，每个热敏电阻在测量时都需要一定的建立时间。

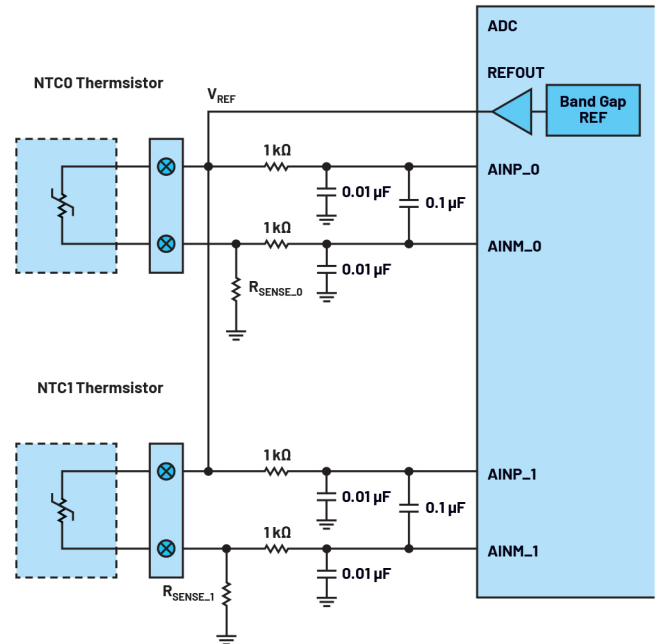


图8. 多个热敏电阻的模拟输入配置测量

总之，设计基于热敏电阻的温度系统时需要关注多个方面：传感器选择，传感器连接，元器件选择的权衡，ADC配置，以及这些不同变量如何影响系统整体精度。本系列的下一篇文章将解释如何优化系统设计和整体系统误差预算以实现目标性能。



作者简介

Jellenie Rodriguez是ADI公司精密转换器技术部的一名应用工程师。她主要关注用于直流测量的精密 Σ - Δ 型ADC。她于2012年加入ADI公司，2011年毕业于San Sebastian College-Recoletos de Cavite，获得电子工程学士学位。



作者简介

Mary McCarthy是ADI公司应用工程师。她于1991年加入ADI公司，在爱尔兰科克市的线性与精密技术应用部工作，主要关注精密 Δ - Σ 型转换器。她于1991年毕业于科克大学，获得电子与电气工程学士学位。

