

## Silicon Temperature Sensing with Precision—An Autobiographical Look at Measuring Temperature to $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

### 精准的硅芯片温度检测——显示测量精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

作者：ADI公司 Simon Bramble，现场应用工程师

#### 摘要

本文检验最新一代硅芯片温度传感器的准确性。这些传感器提供数字输出，无需线性化，支持小封装尺寸和低功耗。其中许多具备报警功能，以提醒系统存在潜在故障。

#### 简介

电子行业对精度的要求越来越高，温度检测也不例外。目前市面上有许多温度检测解决方案，每一种都有其优缺点。硅芯片温度传感器，线性度相对较高，而且精度远超其他解决方案。但是，硅芯片温度检测领域的最新进展意味着，使用硅芯片解决方案将可以实现高分辨率和高精度。

#### 新冰箱

那时正是2020年3月，英国即将进入封锁状态。全球都在囤积食物，以防超市关门，而未来似乎充满不确定。就在这种时候，Bramble家的冰箱罢工了。满脑子都回响着Kenny Rogers单曲“露西尔”中的歌词“你怎么选择在这样一个时刻离开我”，我们开始在网上搜索新的替代品。

几天后，新冰箱送来了，前面板上有数字温度显示，完全符合Bramble太太的需求。建议的设置温度为 $-18^{\circ}\text{C}$ ，一个小时后，冰箱达到了所需的温度，可以开始存放食物了。我有点怀疑温度读数的准确性，但只要能够冷冻食物，我对此也不太在意。但问题是：我是一名工程师，有一颗热衷探索的心，在连续几天面对新冰箱毫无变化的数字读数后，我崩溃了。我必须测试一下这件新电器的精度。

#### 温度传感器

工业应用中使用的温度传感器种类繁多，各有其优缺点。鉴于有许多文本详细介绍了各种温度传感器的操作，我不再赘述，只是提供一些总结。

#### 热电偶

热电偶提供了一种低成本、中等精度的高温测量方案。正如Thomas Seebeck在1821年发现的那样，它们基于两个结点之间产生的电压，每个结点都由不同的金属构成，放置于不同温度环境下。对于K型热电偶（由镍铬合金和镍铝金合金制成）来说，它输出约 $41\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 的电压，可用于测量超过 $1000^{\circ}\text{C}$ 的温度。但是，塞贝克效应依赖于两个结点之间的温度差，因此，在热端测量相关温度时，冷端必须持续测量已知的温度。讽刺的是，在冷端需要另一个温度传感器来测量温度，ADI公司AD8494这样的器件正好能够完全解决这个问题。热电偶本身的体积很小，所以热质很低，能够快速响应温度变化。

#### RTD

行业广泛使用电阻温度检测器(RTD)来测量中温( $<500^{\circ}\text{C}$ )。这些器件由一种电阻会随温度的变化呈正变化的金属元素组成，最常见的是铂(Pt)。事实上，PT100传感器是行业中使用最广泛的RTD，因使用材料铂制成，且在 $0^{\circ}\text{C}$ 时电阻

为100 Ω而得名。虽然这些器件无法测量热电偶那样的高温，但它们具有高线性度，且重复性较好。PT100需要精确的驱动电流，从而在传感器上产生一个与温度成比例的准确的压降。PT100连接线的电阻导致传感器的电阻测量出现误差，所以开尔文连接是最典型的传感器使用方法，因此出现3线或4线传感器。

## 热敏电阻

如果需要低成本的解决方案，且温度范围较低，那么使用热敏电阻通常就足够了。这些器件线性化程度很低，具有斯坦哈特方程的特征，电阻随温度升高而减小。热敏电阻的优点是，电阻会在小幅温度变化下呈现大幅变化，所以，尽管它具有非线性，但仍然可以达到很高的精度。热敏电阻还提供快速的热响应。单个热敏电阻的非线性是明确定义的，所以可以使用LTC2986这类的组件来进行校准。

## 二极管随处可见，但(V<sub>be</sub>)压降至吸电流并非如此...

为了测试这个新家电的准确性，最终我选择使用硅芯片温度传感器。它们到手即用，无需冷端温度补偿或线性化，可以提供模拟和数字输出，且预先经过校准。但是，直到最近，它们都只能提供中等准确性。虽然足以指示电子设备的健康状态，但它们一直不够精准，无法测量（例如）体温，体温测量通常需要达到±0.1°C的精度（根据ASTM E1112标准）。但是ADI公司最近发布的ADT7422和ADT7320硅芯片温度传感器改变了这一状况，它们的测量分辨率分别为±0.1°C和±0.2°C。

硅芯片温度传感器利用晶体管的V<sub>be</sub>的温度依赖性，根据莫尔方程，约为：

$$I_c = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_{be}}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1) \quad \text{其中 } I_c \text{ 为集电极电流，} I_s \text{ 为晶体管的反向饱和电流，} q \text{ 为电子上的电荷 (} 1.602 \times 10^{-19} \text{ 库仑)，} k \text{ 为玻尔兹曼常数 (} 1.38$$

× 10<sup>-23</sup>)，T为绝对温度。

方程1中集电极电流的表达式也适用于二极管中的电流，那么为什么每个应用电路都使用晶体管而不是二极管呢？事实上，二极管中的电流还包括电子通过pn结的耗尽区与空穴重新结合所产生的复合电流，这表明二极管电流与V<sub>be</sub>和温度具有非线性关系。这种电流也出现在双极晶体管中，但流入晶体管的基极，不会出现在集电极电流中，因此非线性程度要低得多。

整合上述因素可以得出

$$V_{be} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{I_c}{I_s} + 1 \right] \quad (2)$$

与I<sub>c</sub>相比，I<sub>s</sub>很小，所以我们可以忽略方程2中的1项。我们现在可以看到，V<sub>be</sub>根据I<sub>c</sub>中的对数变化呈线性变化。我们也可以看到，如果I<sub>c</sub>和I<sub>s</sub>是常数，那么V<sub>be</sub>随温度呈线性变化，因为k和q也是常数。在晶体管中施加恒定的集电极电流，并测量V<sub>be</sub>如何随温度变化，这项任务很简单。

I<sub>s</sub>与晶体管的几何形状有关，并且对温度有很强的依赖性。和许多硅芯片器件一样，温度每上升10°C，其值就会翻倍。虽然ln函数降低了电流变化的影响，但仍然存在V<sub>be</sub>的绝对值随晶体管的变化而变化的问题，因此需要校准。所以，实际的硅芯片温度传感器使用两个完全相同的晶体管，迫使1 I<sub>c</sub>集电极电流进入一个晶体管，10 I<sub>c</sub>进入另一个。我们能在集成电路中轻松生成完全相同的晶体管和精准的比率电流，所以大多数硅芯片传感器都使用这种结构。电流的对数变化会引起V<sub>be</sub>出现线性变化，然后测量V<sub>be</sub>的差值。

由方程2可知，对于温度相同的两个晶体管，其 $V_{be}$ 的差值为

$$\Delta V_{be} = \frac{kT}{q} \ln \left[ 10 \frac{I_c}{I_s} \right] - \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{I_c}{I_s} \right]$$

$$\Delta V_{be} = \frac{kT}{q} \left\{ \ln \left[ 10 \frac{I_c}{I_s} \right] - \ln \left[ \frac{I_c}{I_s} \right] \right\}$$

这是因为

$$\ln A - \ln B = \ln \left[ \frac{A}{B} \right]$$

我们可以看出

$$\Delta V_{be} = \frac{kT}{q} \{ \ln 10 \}$$

通过使不同的电流通过每个晶体管并测量 $V_{be}$ 的差值，我们消除了非线性 $I_s$ 项、不同的 $V_{be}$ 的影响，以及与晶体管的几何形状相关的所有其他非线性效应。因为 $k$ 、 $q$ 和 $\ln 10$ 都是常数，所以 $V_{be}$ 的变化与绝对温度(PTAT)成正比。当电流差为10倍时，两个 $V_{be}$ 的电流差在大约 $198 \mu V/^\circ C$ 时随温度呈线性变化。参见图1查看实现这一效果的简单电路。

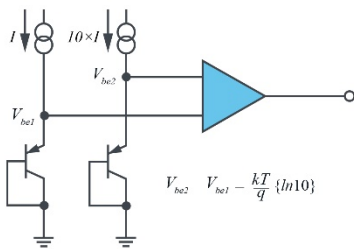


图1. 测量温度的基本电路。

必须慎重选择图1中的电流。如果电流过高，在晶体管的整个内部电阻范围内，会出现很高的自发热和压降，从而影响测量结果。如果电流过低，晶体管内部的漏电流会增大误差。

还应注意的是，前面的方程都与晶体管的集电极电流有关，而在图1中，晶体管中注入的是恒定的发射极电流。在设计晶体管时，可以明确确定集电极和发射极电流之间的比例（且接近整数），这样集电极电流与发射极电流成比例。

这还只是开始。要使硅芯片温度传感器达到 $\pm 0.1^\circ C$ 的精度，还需要大量的表征和微调。

### 是一只鸟？还是一架飞机？

不，这是一个超级温度计。是的，它们确实存在。需要将未校准的硅芯片温度传感器放入装满硅油的浴缸中，准确加热到所需的温度，然后使用超级温度计进行测量。这些器件的测量精度可以精确到超过小数点后五位。将传感器内部的保险丝熔断，以调整温度传感器的增益，从而利用方程 $y = mx + c$ 将其输出线性化。硅油提供非常均匀的温度，因此可以在一个周期内校准许多器件。

ADT7422在25°C至50°C温度范围内的精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。这个温度范围以典型的38°C体温为中心，使得ADT7422非常适合用于精准监测生命体征。在工业应用中使用时，我们对ADT7320进行了调整，使其精度达到 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ，但温度范围扩大到-10°C到+85°C。

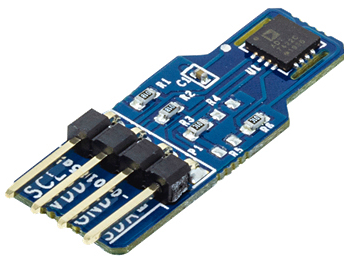


图2. 安装在0.8 mm厚的PCB上的ADT7422。

但是，硅芯片温度传感器的校准并不是唯一的问题。采用极其精确的基准电压时，裸片上的压力会破坏传感器的精度，以及PCB的热膨胀、引线框架、模塑和裸露焊盘，所有这些都需要考虑。焊接工艺本身也有问题。焊料回流工艺会使零件的温度提高到260°C，导致塑料封装软化，裸片的引线框架变形，这样当零件冷却，塑料变硬时，机械应力会被封存在裸片中。ADI公司的工程师花了好几个月的时间进行细致的实验，最终发现0.8 mm的PCB厚度最为合适，即使在焊接之后，也可以达到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的精度。

### 那么香肠的温度到底有多低？

我将ADT7320连接到一个微控制器和一个LCD显示器上，并编写了几百行C语言代码来初始化传感器和提取数据——可以通过在DIN引脚上连续写入32个1s来轻松初始化这个部分。配置寄存器被设置为使ADT7320以16位精度连续转换。从ADT7320上读取数据之后，至少需要等待240 ms的延迟之后，才会发生下一次转换。为了便于使用非常低端的微控制器，所以我手动编写了SPI。我将ADT7320放在冰箱里大约30分钟，以获取新冰箱的准确温度。图3显示冰箱的温度为-18.83°C。

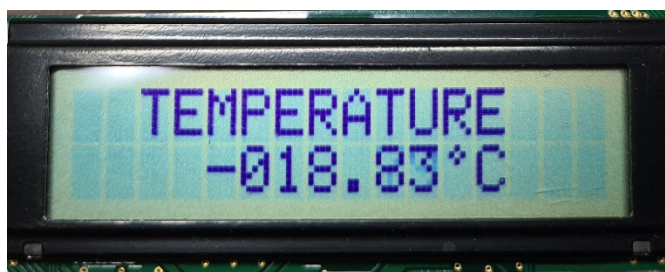


图3. 冰箱的温度为-18.83°C。

这种精度给我留下了非常深刻的印象，虽然存储食品并不需要达到这种温度精度等级。然后，在英国夏季的某一天，我测量了办公室内的温度。如图4所示，温度为22.87°C。



图4. 办公室的温度为22.87°C。

## 结论

硅芯片温度传感器已取得长足进步，变得非常精确，能够实现非常高的生命体征监测精度。虽然它们内部的技术都是基于成熟的原理，但要使它们达到亚度精度水平，还是需要付出巨大的努力。即使达到了这种精度水平，机械应力和焊接也很容易抹掉数小时校准所取得的成果。

ADT7320和ADT7422代表了多年来达到亚度级精度温度表征的技术顶峰，即使是在焊接到PCB上之后。

## 参考资料

Horowitz, Paul和Winfield Hill。 *电子的艺术*。剑桥大学出版社，2015年4月。

Huijsing, Johan和Michiel Pertijis。 *采用CMOS技术的精密温度传感器*。Springer，2006年。

*模拟电路设计*，第2卷，第32章。凌力尔特，2012年12月。

AD590数据手册。ADI公司，2013年1月。

ADT5912数据手册（即将发布）。ADI公司

## 作者简介

Simon Bramble于1991年毕业于伦敦布鲁内尔大学，拥有电气工程和电子学学位，专门从事模拟电子器件和电源工作。他的职业生涯主要从事模拟电子器件工作，就职于凌力尔特（现为ADI公司的一部分）。联系方式：

[simon.bramble@analog.com](mailto:simon.bramble@analog.com)。