

精準的矽晶溫度感測—— 顯示測量精度為 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

本文檢驗最新一代矽晶溫度感測器的準確性。這些感測器提供數位輸出，無需線性化，支援小封裝尺寸和低功耗。其中許多具備警報功能，以提醒系統存在潛在故障。

■作者：Simon Bramble / ADI 現場應用工程師

簡介

電子產業對精度的要求越來越高，溫度感測也不例外。目前市面上具有許多溫度感測解決方案，每一種都有其優缺點。矽晶溫度感測器，線性度相對較高，而且精度遠超其他解決方案。但是，矽晶溫度感測領域的最新進展意味著，使用矽晶解決方案將可以實現高解析度和高精度。

新冰箱

那時正是 2020 年 3 月，英國即將進入封鎖狀態。全球都在囤積食物，以防止超市關門，而未來似乎充滿不確定。就在這種時候，Bramble 家的冰箱罷工了。滿腦子都迴響著 Kenny Rogers 單曲「Lucille」中的歌詞「你怎麼選擇在這樣一個時刻離開我」，我們開始在網路上搜索新的替代品。

幾天後，新的冰箱送來了，面板上有數位溫度顯示，完全符合 Bramble 太太的需求。建議的設定溫度為 -18°C ，一個小時後，冰箱達到了所需的溫度，可以開始存放食物了。我有點懷疑溫度讀數的準確性，但只要能夠冷凍食物，我對此也不太在意。但問題是：我是一名工程師，有一顆熱衷探索的心，在連續幾天面對新冰箱毫無變化的數位讀數後，我崩潰了。我必須測試一下這台新電器的精度。

溫度感測器

工業應用中使用的溫度感測器種類繁多，各有其優缺點。有鑑於文獻均對各種溫度感測器的操作有詳盡的介紹，在此我就不再贅述，只是提供一些總結。

熱電耦

熱電耦提供了一種低成本、中等精度的高溫測量方案。正如 Thomas Seebeck 在 1821 年發現的，它們基於兩個接點之間產生的電壓，每個接點都由不同的金屬構成，放置於不同溫度環境下。對於 K 型熱電耦（由鎳鉻合金和鎳鋁金合金製成）來說，它輸出約 $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 的電壓，可用於測量超過 1000°C 的溫度。但是，塞貝克效應依賴於兩個接點之間的溫度差，因此，在熱端測量相關溫度時，冷端必須持續測量已知的溫度。諷刺的是，在冷端需要另一個溫度感測器來測量溫度，AD8494 這樣的元件正好能夠完全解決這個問題。熱電耦本身的體積很小，所以熱質很低，能夠快速回應溫度變化。

RTD

業界廣泛使用電阻溫度檢測器 (RTD) 來測量中溫 ($<500^{\circ}\text{C}$)。這些元件由一種電阻會隨溫度的變化呈正變化的金屬元素組成，最常見的是鉑 (Pt)。事實上，PT100 感測器是業界使用最廣泛的 RTD，因

使用材料鉑製成，且在 0°C 時電阻為 100 Ω 而得名。雖然這些元件無法測量熱電耦那樣的高溫，但它們具有高線性度，且重複性較好。PT100 需要精確的驅動電流，從而在感測器上產生一個與溫度成比例的準確的壓降。PT100 連接線的電阻導致感測器的電阻測量出現誤差，所以開爾文連接是最典型的感測器使用方法，因此出現 3 線或 4 線感測器。

熱敏電阻

如果需要低成本的解決方案，且溫度範圍較低，那麼使用熱敏電阻通常就足夠了。這些元件線性化程度很低，具有 Steinhart-hart 方程式的特徵，電阻隨溫度升高而減小。熱敏電阻的優點是，電阻會在小幅溫度變化下呈現大幅變化，所以，儘管它具有非線性，但仍然可以達到很高的精度。熱敏電阻還提供快速的熱回應。單一熱敏電阻的非線性是明確定義的，所以可以使用 LTC2986 這類的元件來進行校準。

二極體隨處可見，但 (V_{be}) 壓降至吸電流並非如此 ...

為了測試這個新家電的準確性，最終我選擇使用矽晶溫度感測器。它們到手即用，無需冷端溫度補償或線性化，可以提供類比和數位輸出，且預先經過校準。但是，直到最近，它們都只能提供中等準確性。雖然足以顯示電子設備的健康狀態，但它們一直不夠精準，無法測量（例如）體溫，體溫測量通常需要達到 ±0.1°C 的精度（根據 ASTM E1112 標準）。但是最近發表的 ADT7422 和 ADT7320 矽晶溫度感測器改變了這一狀況，它們的測量解析度分別為 ±0.1°C 和 ±0.2°C。

矽晶溫度感測器利用電晶體的 V_{be} 的溫度依賴性，根據莫爾方程式，約為：

$$I_c = I_s \left[\exp \left(\frac{qV_{be}}{kT} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

其中 I_c 為集電極電流，I_s 為電晶體的反向飽和電流，q 為電子上的電荷 (1.602 × 10⁻¹⁹ 庫侖)，

k 為玻爾茲曼常數 (1.38 × 10⁻²³)，T 為絕對溫度。

方程式 1 中集電極電流的運算式也適用於二極體中的電流，那麼為什麼每個應用電路都使用電晶體而不是二極體呢？事實上，二極體中的電流還包括電子通過 pn 結的耗盡區與空穴重新結合所產生的複合電流，這說明二極體電流與 V_{be} 和溫度具有非線性關係。這種電流也出現在雙極電晶體中，但流入電晶體的基極，不會出現在集電極電流中，因此非線性程度要低得多。

整合上述因素可以得出

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

與 I_c 相比，I_s 很小，所以我們可以忽略方程式 2 中的 1 項。我們現在可以看到，V_{be} 根據 I_c 中的對數變化呈線性變化。我們也可以看到，如果 I_c 和 I_s 是常數，那麼 V_{be} 隨溫度呈線性變化，因為 k 和 q 也是常數。在電晶體中施加恒定的集電極電流，並測量 V_{be} 如何隨溫度變化，這項任務很簡單。

I_s 與電晶體的幾何形狀有關，並且對溫度有很強的依賴性。和許多矽晶元件一樣，溫度每上升 10°C，其值就會翻倍。雖然 ln 函數降低了電流變化的影響，但仍然存在 V_{be} 的絕對值隨電晶體的變化而變化的問題，因此需要校準。所以，實際的矽晶溫度感測器使用兩個完全相同的電晶體，迫使 1 I_c 集電極電流進入一個電晶體，10 I_c 進入另一個。我們能在積體電路中輕鬆產生完全相同的電晶體和精準的比率電流，所以大多數矽晶感測器都使用這種結構。電流的對數變化會引起 V_{be} 出現線性變化，然後測量 V_{be} 的差值。

由方程式 2 可知，對於溫度相同的兩個電晶體，其 V_{be} 的差值為

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

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

這是因為

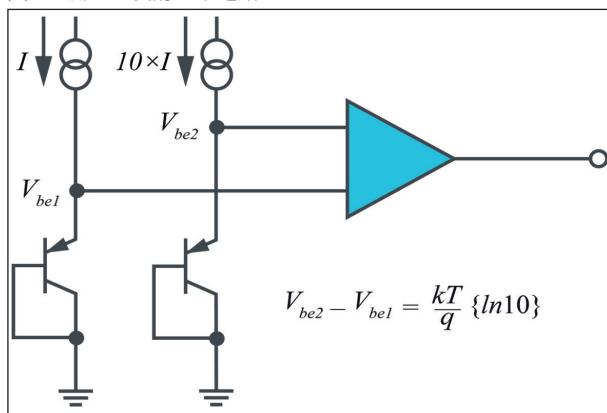
$$\ln A - \ln B = \ln \left[\frac{A}{B} \right]$$

我們可以看出

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

透過使不同的電流通過每個電晶體並測量 V_{be} 的差值，我們消除了非線性 I_s 項、不同的 V_{be} 的影響，以及與電晶體的幾何形狀相關的所有其他非線性效應。因為 k 、 q 和 $\ln 10$ 都是常數，所以 V_{be} 的變化與絕對溫度 (PTAT) 成正比。當電流差為 10 倍時，兩個 V_{be} 的電流差在大約 $198 \mu\text{V}/\text{C}$ 時隨溫度呈線性變化。參見圖 1 查看實現這一個效果的簡單電路。

圖 1：測量溫度的基本電路。



必須慎重選擇圖 1 中的電流。如果電流過高，在電晶體的整個內部電阻範圍內，會出現很高的自發熱和壓降，從而影響測量結果。如果電流過低，電晶體內部的漏電流會增大誤差。

還應注意的是，前面的方程式都與電晶體的集電極電流有關，而在圖 1 中，電晶體中注入的是恒定的發射極電流。在設計電晶體時，可以明確確定集電極和發射極電流之間的比例（且接近整數），這樣集電極電流與發射極電流成比例。

這還只是開始。要使矽晶溫度感測器達到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的精度，還需要大量的表徵和微調。

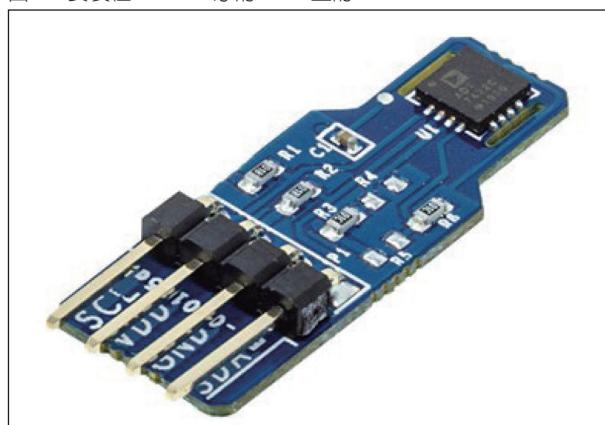
是一隻鳥？還是一架飛機？

不，這是一個超級溫度計。是的，它們確實存在。需要將未校準的矽晶溫度感測器放入裝滿矽油的浴缸中，準確加熱到所需的溫度，然後使用超級溫度計進行測量。這些元件的測量精度可以精確到

超過小數點後五位。將感測器內部的保險絲熔斷，以調整溫度感測器的增益，從而利用方程式 $y = mx + c$ 將其輸出線性化。矽油提供非常均勻的溫度，因此可以在一個週期內校準許多元件。

ADT7422 在 25°C 至 50°C 溫度範圍內的精度為 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。這個溫度範圍以典型的 38°C 體溫為中心，使得 ADT7422 非常適合用於精準監測生命體徵。在工業應用中使用時，我們對 ADT7320 進行了調整，使其精度達到 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ，但溫度範圍擴大到 -10°C 到 $+85^\circ\text{C}$ 。

圖 2：安裝在 0.8 mm 厚的 PCB 上的 ADT7422。



但是，矽晶溫度感測器的校準並不是唯一的問題。採用極其精確的基準電壓時，晶片上的壓力會破壞感測器的精度，以及 PCB 的熱膨脹、引線框架、模塑和外露焊墊，所有這些都需要考慮。焊接製程本身也有問題。焊料回流製程會使零件的溫度提高到 260°C ，導致塑膠封裝軟化，晶片的引線框架變形，這樣當零件冷卻，塑膠變硬時，機械應力會被封存在晶片中。ADI 的工程師花了數個月的時間進行細緻的實驗，最終發現 0.8 mm 的 PCB 厚度最為合適，即使在焊接之後，也可以達到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的精度。

那麼香腸的溫度到底有多低？

我將 ADT7320 連接到一個微控制器和一個 LCD 顯示器上，並編寫了幾百行 C 語言代碼來初始化感測器和存取資料——可以透過在 DIN 接腳上連續寫入 32 個 1s 來輕鬆初始化這個部分。配置寄存器被設定為使 ADT7320 以 16 位元精度連續轉換。

從 ADT7320 上讀取資料之後，至少需要等待 240 ms 的延遲之後，才會發生下一次轉換。為了便於使用非常低端的微控制器，所以我手動編寫了 SPI。我將 ADT7320 放在冰箱裡大約 30 分鐘，以獲取新冰箱的準確溫度。圖 3 顯示冰箱的溫度為 -18.83°C 。

圖 3：冰箱的溫度為 -18.83°C 。



這種精度給我留下了非常深刻的印象，雖然儲存食品並不需要達到這種溫度精度等級。然後，在英國夏季的某一天，我測量了辦公室內的溫度。如圖 4 所示，溫度為 22.87°C 。

圖 4：辦公室的溫度為 22.87°C 。



結論

矽晶溫度感測器已發展多時，並已變得非常精準，而能實現非常高的生命體徵監測精度。雖然它們內部的技術都是基於成熟的原理，但要使它們達到亞度精度水準，還是需要付出巨大的努力。即使達到了這種精度水準，機械應力和焊接也很容易抹滅數小時校準所取得的成果。

ADT7320 和 ADT7422 代表了多年來達到亞度級精度溫度表徵的技術頂峰，即使是在焊接到 PCB 上之後。

參考資料

- Horowitz, Paul 和 Winfield Hill。電子的藝術。劍橋大學出版社，2015 年 4 月。
- Huijsing, Johan 和 Michiel Pertijis。採用 CMOS 技術的精密溫度感測器。Springer，2006 年。
- 類比電路設計，第 2 卷，第 32 章。凌力爾特，2012 年 12 月。
- AD590 數據手冊。ADI，2013 年 1 月。
- ADT5912 資料手冊 (即將發表)。ADI 

高通和 Google 宣布合作擴展 Android 作業系統支援並簡化系統升級

高通技術公司和 Google 今天宣布合作強化並擴展 Project Treble，旨在讓更多搭載高通 Snapdragon 行動平台的裝置能夠運行最新版本的 Android 作業系統。本次強化的目的在於讓 OEM 廠商無需調整高通技術公司晶片組的特定軟體，即可將搭載高通 Snapdragon 行動平台的裝置升級至 Android 作業系統最新版本，並透過通用 Android 軟體分支，針對搭載高通技術公司 Snapdragon 行動平台的裝置進行作業系統升級。這些強化功能旨在減少搭載 Snapdragon 行動平台的裝置升級至最新版本的 Android 作業系統所需的時間和資源。

作為此次與 Google 合作的一部分，高通技術公司現將能利用 Project Treble 的強化功能，從最新推出的 Snapdragon 888 行動平台開始，在所有 Snapdragon 平台上支援四個 Android 作業系統版本和四年安全性升級。這項計畫旨在以更少的資源實現更快速的 Android 作業系統升級，並在搭載 Snapdragon 行動平台的裝置上支援可預測的軟體生命週期，預期將能讓更多搭載 Snapdragon 行動平台的裝置運行最新版本的 Android 作業系統。

Google Android 工程部門副總裁 David Burke 表示：「透過這次與高通技術公司合作，我們期待 Android 用戶能夠在他們的裝置上擁有最新的作業系統升級和更高的安全性。」

高通技術公司產品管理副總裁 Kedar Kondap 表示：「透過 Project Treble 強化功能擴展未來 Snapdragon 行動平台對 Android 作業系統和安全性升級的支援。我們期望透過這次合作，加速搭載 Snapdragon 平台裝置的 Android 作業系統升級速度，同時為終端用戶提供卓越的使用者體驗。」