

一種因應極端高溫環境的高可靠精密資料擷取與控制平台

■作者：Jeff Watson/

ADI 儀器儀錶市場部策略行銷經理

Maithil Pachchigar/

ADI 儀器儀錶與精密技術業務部應用工程師

簡介

在許多惡劣環境系統中，一個不斷成長的趨勢是高精密電子元件離高溫區域越來越近。這一個趨勢背後有多個推動因素，在能源勘探、航空航天、汽車、重工業和其他終端應用中都可體現。¹ 例如，在能源勘探領域，環境溫度增幅為深度的函數，相關設備的典型工作溫度為 175°C 及以上。受尺寸和功率限制，主動冷卻不太實際，熱對流非常有限。在其他系統中，需要把感測器和訊號處理節點置於高溫區域附近，例如發動機、剎車系統或高功率能源轉換電子元件，以提高系統的整體可靠性或降低成本。

從歷史上來看，工程師要為這些應用設計出可靠的高性能電子元件是非常困難的事，因為市場上缺少製造商為這些操作條件生產指定的元件。幸運的是，近年來出現了越來越多的 (IC 和被動) 元件，製造商指定的操作溫度高達 175°C 及以上。另外，最近的參考設計也偏重於性能，將部分這些元件在訊號鏈子系統中結合起來，實現精密資料擷取，以使系統設計者能更快地採用相關技術 (如 CN-0365)，並幫助他們降低設計風險、縮短上市時間。但在此之前，在高溫精密資料擷取方面，距離特性良好、廣泛可用的全功能平台還存在一些差距。

在本文中，我們將介紹一種新型高溫精密資料擷取與處理平台，其操作溫度高達 200°C。該平台包括一個高溫電路元件，以及一個資料擷取前端和微控制器、優化的韌體、資料擷取與分析軟體、原

始程式碼、設計檔、材料清單和測試報告。該平台適合參考設計、快速原型製作和高溫儀器儀錶系統實驗室測試。電路元件的尺寸和結構均經過特別設計，可相容石油天然氣儀器儀錶的尺寸要求，但也可作為其他高溫應用的基礎。

硬體架構概述

油氣勘探中使用的儀器儀錶 (也稱為井下工具) 與許多精密資料擷取與控制平台類似，但對性能和可靠性有著具體的要求，可以作為本參考平台的案例進行研究。在該應用中，系統來自各類感測器的訊號採樣，以收集與周圍地質構造相關的資訊。這些感測器可能是電極、線圈、壓電感測器或其他感測器。加速度計、磁力計和陀螺儀可以提供有關鑽柱的傾角和轉速資訊。這些感測器中有一些的頻寬要求極低，其他感測器則能提供音訊頻率範圍內或以上的資訊。需要使用多個採集通道，還必須在高溫 (一般為 175°C 及以上) 下維持高精度。另外，這些儀器儀錶中很大一部分是採用電池供電，或者可用電能有限，因此，必須具有低功耗和多個工作模式的特點，以實現功耗優化。

在有關電子系統的要求以外，井下應用還存在機械上的限制，可能決定著電子元件的尺寸，也可能會影響元件的封裝和選擇。對於後一個問題，我們將在後面各節裡詳細討論，目前要注意的是，這一段的電路元件一般對電路板寬度有限制。必須將電子元件放在鑽探作業中使用的管狀壓力容器中，

圖 1: 高溫參考平台。

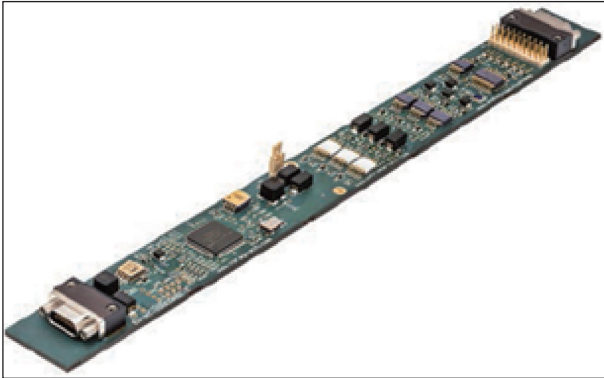


圖 2: 井下電子元件尺寸。



因此其長寬比具有狹長的特點。這種形狀上的特點限制了可用元件的尺寸和密度，也可能限制元件佈局和訊號路由的分割方式，結果可能對高精度電子元件的性能造成影響，因此，要特別注意佈局和其他封裝設計細節。圖 2 所示為一種典型尺寸、裝在一個管狀壓力容器裡的電路元件 (透明，頂部)，裝上電路板後管狀壓力容器的橫截面 (底部)。

本文討論的可靠參考設計平台基於 CN-0365 類比前端參考設計，其目的是為基於高溫低功耗微控制器的精密資料擷取和控制解決方案奠定基礎，使其符合眾多井下儀器儀錶和其他高溫電子元件的要求。基於 AD7981 類比數位 SAR 轉換器，該參考設計展現了一種全功能的系統，帶 2 個高速同步採樣通道和 8 個額外的多工通道，可滿足廣泛的井下工具的資料擷取需求 (共 10

個通道)。該類比前端透過 SPI 埠接入來自聯盟合作夥伴 Vorago Technologies 和 Petromar Technologies 的 VA10800 ARM Cortex -M0。該設計是不斷壯大的 ADI 高溫應用產品和解決方案生態系統裡的最新成員。

採集後，可以在本地處理資料，也可透過 UART 或可選的 RS-485 通訊介面傳輸出去。電路板上的其他配套元件 (包括記憶體、時脈、電源和被動元件) 均為各自供應商指定的、支援高操作溫度的元件，經驗證，這些元件能在 200°C 或以上的溫度下可靠地工作。圖 1 和圖 2 所示為該高溫參考平台的實際電路板圖和高層次功能框圖。圖 2 所示電路板展示的是井下電路板佈局和尺寸，約長 11.4 英寸、寬 1.1 英寸。

CN-0365 應用筆記中全面地介紹了該平台精密資料擷取通道的設計問題。³ 該設計是這個平台上的三個 ADC 輸入的基礎，不過，為了滿足電路板尺寸要求，使平台能在最高 200°C 的溫度下可靠地工作，主要在被動元件選擇方面進行了一些調整和優化。參考採集通道電路如圖 4 所示。有 2 個能在高採樣速率下工作的數位多工通道，每一個都含有一個完整的資料擷取通道 (與 CN-0365 類似)。還有一個類比多工通道，其在輸入之前添加了一個 ADG798 多工器，並針對低輸送量輸入進行了優化。R1 和 R3 為 U1 的同相輸入提供 1.25 V 偏置電壓，防止其在斷開時或者取消選擇多工器時，浮動至模擬輸入

圖 3: 高溫參考平台功能框圖。

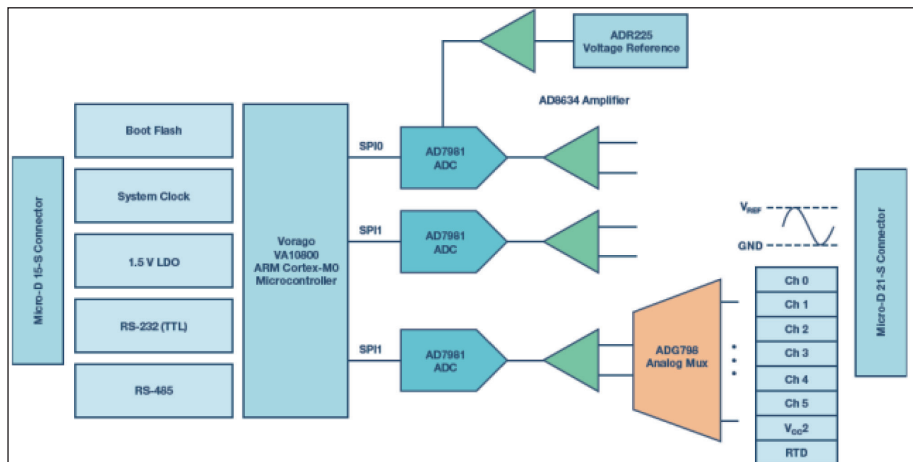
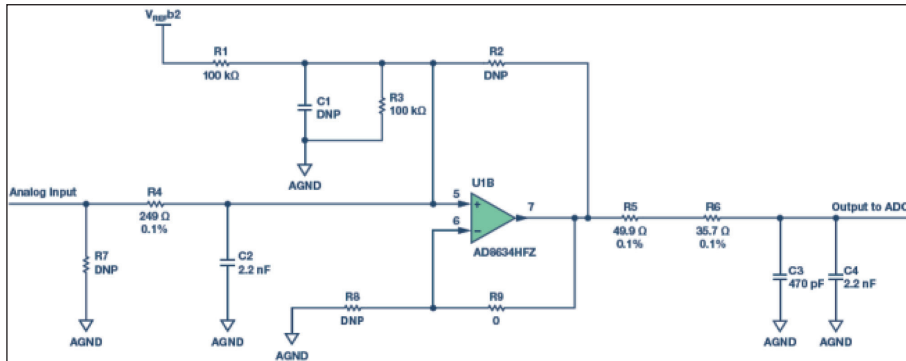


圖 4: ADC 驅動器配置。



的供電軌。可以更改 R8 和 R9，以提高 U1 的增益。R4、R7 和 C1 是抗混疊濾波器，但也可以將它們重新配置為衰減器或交替濾波器配置。R5、R6 和 C4 構成 ADC 驅動器與 ADC 輸入之間的 RC 濾波器，該濾波器的作用是限制到達 ADC 輸入的帶外雜訊量，並衰減來自 ADC 輸入開關電容的反沖電壓。⁴

設計該平台就是為了利用 AD7981 ADC 的多個關鍵特性。這款 16 位、600 kSPS 轉換器能提高超過 85 dB 的典型 SINAD 以及 ± 0.6 LSB 的典型 INL，其中，基準電壓源為 2.5V 且無丟碼。採用 5 V 參考電壓源時，可以實現 90 dB 以上的 SINAD，但在本平台中，為了維持與較低電壓系統的相容性，我們沒有選擇這一規格。由於 ADC 內核在轉換週期之間會自動進入省電狀態，因此，ADC 的功耗會隨輸送量自動線性變化。在使用低採樣速率的轉換器時，這麼做可以達到節能的目的。

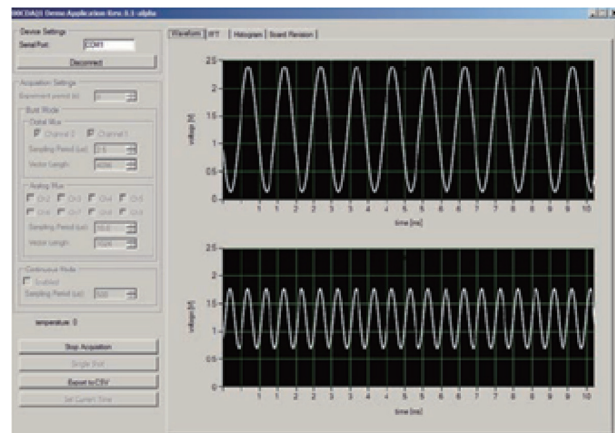
軟體概述：韌體

平台的韌體基於 FreeRTOS 作業系統製成，可以方便地整合任務，如資料處理和其他通訊。我們對代碼進行了優化，以便非多工通道 0 和 1 能高效地完成快速 ADC 轉換，多工通道 2 到 9 的轉換耗時低至 10 μ s。轉換結果可以在本地處理，也可以 2 Mbps 的速率從 UART 通道中傳輸出去。轉換結果緩衝器的大小為 16 kB(8k 次採樣結果)，既可在多個通道之間共用，也可專門供一個通道使用。該韌體以開源格式提供，最終用戶可以對其進行客製，還可將其作為最終應用的基礎。

資料擷取與分析軟體

圖 5 所示為資料擷取與分析軟體，基於 .NET 介面設計，電源元件透過一個 USBUART-TTL 位準轉換器。借助定義明確的協定，可以與硬體(包括控制和資料流程)進行通訊。資料可以在高載模式(burst mode)下採集資料，也可連續採集。另外納入了資料分析功能，以在時域和頻域分析與驗證 SNR、THD 和 SINAD(如 FFT)。也可將資料記錄到檔(如匯出到 Excel)，以便儲存起來或者在其他應用中進行處理。就如韌體一樣，我們免費提供了資料擷取軟體的原始程式碼，最終使用者可以進行客製。

圖 5：資料擷取與分析軟體。



高溫構造

本參考平台採用適合在 200°C 條件下工作的元件和其他材料製成。平台上使用的所有元件均為各自製造商指定的高溫操作組件(另有說明時除外)，並且全球經銷商網路已經開始大量供貨。全部 BOM、PCB 佈局圖和裝配圖紙都隨參考設計包免費提供。

電容

透過 C0G 或 NP0 電介質電容進行小容值的濾波器和去耦。這些電介質電容的溫度係數表現極其平坦，一般而言，其對屈曲應力的耐受性更好。⁵

為使 RC 濾波器具具有高 Q、低溫度係數，並且在變化電壓下具有穩定的電氣特性，建議使用 C0G 或 NP0 型電容。我們用小尺寸 0805 或以上陶瓷元件減小了元件與 PCB 之間的 CTE 失配。出於大量儲存需要，我們選擇了高溫鉭電容，並在尺寸與 ESR 之間進行了平衡。

電阻

設計主體部分採用薄膜 SMT 電阻 (汽車級 PATT 系列)，市場上貨源充足。另外，根據設計需要，針對特定值和尺寸選擇了部分厚膜 SMT 電阻。

連接器

電路板連接著一個額定溫度為 200°C 的 Micro-D，後者常用於高可靠性產業。為了減少訊號串擾，我們對連接器外殼進行了特別處理，將其接地至元件中的 PCB。對於要求最高訊號完整性和最低串擾的應用，則需採用高溫專業連接器 (或者無連接器) 和同軸或遮罩平衡輸入，以減少串擾。

PCB 設計和佈局

在井下應用中宜選擇狹長形的 PCB，因為這些應用裡的電路板必須符合鑽孔和耐壓殼限制要求。選擇的電路板材料是一種耐高溫無鹵聚醯亞胺。指定電路板厚度為 0.093 英寸而非 0.062 英寸的標準厚度，因為如此可以增加剛度和平坦度。

採用鍍金表面處理，其中鍍提供一個壁壘，可防止金屬間增生，金則為接頭焊接提供一個良好的表面。

對於選擇的 0.093 英寸電路板厚度，典型的四層堆疊中有一個約 13 密耳 (mil) 的銅隔離層和一個 60 密耳的大核心。如果是六層結構，則隔離層一般厚 9.5 密耳和 28 密耳。為此，我們採用了六層設計，這樣就可以在每個訊號層設置一個接地層，從而改善雜訊性能。

電源和數位通訊訊號饋入一個連接器，類比訊號則饋入反向連接器。這樣就可以在數位域與類比域之間實現良好的隔離和訊號流。地的分割設在電路板

中間，電源濾波則設於分隔處附近。儘量減少與分隔層相交的數位控制線路，採用串聯端接以減少數位雜訊耦合。用銅網路接線在一個點將數位和類比接地層焊接起來，為驅動源提供一個低阻抗回路。

多工器控制訊號與類比部分長度相同，但其敷設路徑與關鍵類比訊號路徑隔開。在實踐中，這些多工控制線路會與採集資料測量同步改變，從而將串擾效應降至最小。

焊接

選擇 Sn95/Sb05 是為了在 200°C 的操作溫度下提供足夠高的熔點 (>230°C)，同時還考慮了良好的操作性和裝配工廠的現有加工能力。

電路板安裝

我們在這塊電路板上提供安裝柱是出於方便考慮，其僅適用於基準測試或實驗室環境，不適合強衝擊和強震動環境。如果要用於強衝擊和強震動環境，可以先用環氧樹脂把元件固定在電路板上。對於 IDC 接頭等脆弱元件，可以採用密封方式或者從裝配件中移除。在井下或其他惡劣環境中，典型安裝方式是採用導軌安裝系統，用柔性抗衝擊安裝墊圈把整個電路板固定起來。也可以將裝配件完全密封起來並裝入安裝硬體中，然後把安裝硬體固定到底盤或外殼上。

有關相關元件的更多資訊，請參閱《因應高溫電子應用的低功耗資料擷取解決方案》一文。²

性能測試結果

我們對多塊電路板進行了廣泛的測試，以評估其在工作溫度範圍內的典型性能；同時還在 200°C 環境溫度下浸泡了 200 小時，以便測定裝配工藝和電路板的可靠性。

交流和直流訊號鏈性能是基於 SAR ADC 的精密資料擷取系統的一項關鍵精度指標。當 ADC 以 600 kSPS 的速率運行並且工作溫度為 200°C 時，強固的比率式平台的串擾性能可達 -100 dB 以上，最

圖 6: 200°C 下的 FFT 及頻譜分析結果。

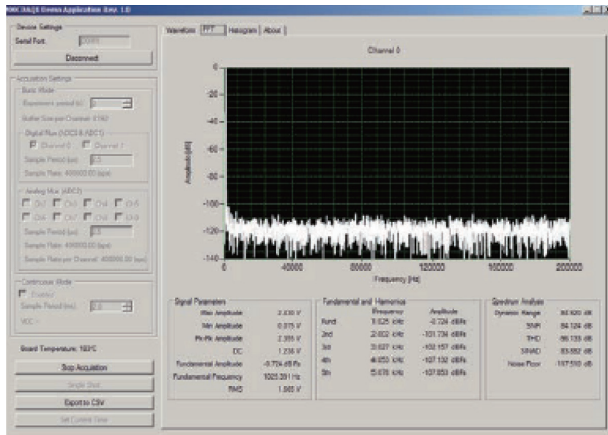


圖 7: 操作溫度範圍內的 SNR 和 SINAD。

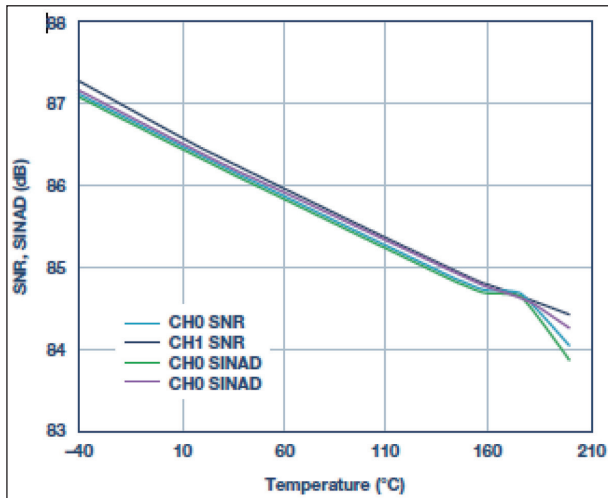
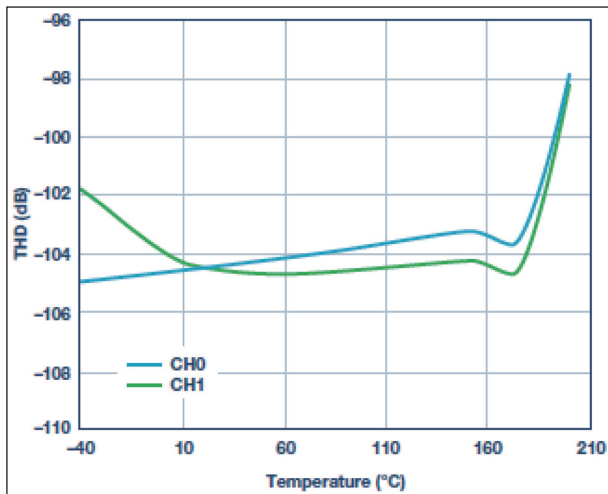


圖 8: 操作溫度範圍內的 THD。

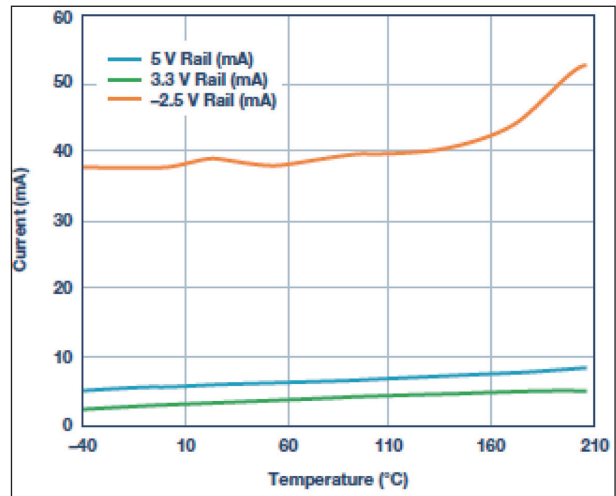


大失調漂移達 ± 60 mV。對於交流測試，是以一個 1 kHz 的低失真音作為輸入訊號，並用 +5 VDC/-2.5 VDC 類比電源為電路板供電。圖 6 所示為該訊號

音在 400 kSPS 下的 FFT 及頻譜分析計算結果。在 200°C 下，SNR 優於 84 dB，THD 達 -96 dB。圖 7 所示為 SNR 和 SINAD，圖 8 所示為採用同一輸入音時，非多工通道在工作溫度範圍內的 THD。

我們測量了類比和數位供電軌在工作溫度範圍內的功耗，結果如圖 9 所示。室溫下的總功耗為 155 mW，200°C 下則增至 225 mW。3.3 V 供電軌上的功耗由以全時脈速率運行的微控制器和一個精密震盪器為主。我們為轉換器設定的突發採樣速率為每秒 8192 個樣本。

圖 9: 2.5 V、3 V 和 5 V 供電軌的功耗



有關額外參數的測試結果請參閱參考平台，其額定參數指標符合 200°C 操作溫度要求。

應用示例

油氣勘探、航空航太和重工業領域的多種應用通過加速度計實現定向和震動檢測。搭載類比輸入的加速度計具有最高的精度，而且非常靈活，能根據應用需要調節感測器輸出。

ADXL206 是一款完整的精密型低功耗雙軸 iMEMS 加速度計，可用於高溫環境。其範圍為 ± 5 g，頻寬範圍為 0.5 Hz 至 2.5 kHz。ADXL206 的輸出以 $\frac{1}{2} V_{CC}$ 為中心，與 V_{CC} 成比率。如果 ADXL206 和 EV-HT-200CDAQ1 共用 V_{CC} (在連接器上提供)，則可以用多工器 S7 通道上的 V_{CC} 基準電壓源清零直流失調和電源漂移。圖 10 為一個示例電路。必

須按 $\frac{1}{2}$ 的比例因數對 ADXL206 的訊號範圍 (0 V 至 5 V) 進行調節，使其與精密資料擷取系統 0 V 至 2.5 V 的範圍相擬合。具體方法，是先緩衝輸出，然後使用資料擷取系統內部的衰減器。C2 和 C3 設定 ADXL206 的頻寬；圖 9 中的例子所示頻寬為 33 Hz。低頻寬應用可以使用多工器輸入；要實現最高的頻寬和精度，可以使用兩個非多工輸入通道。

小結

本文介紹了一種新型、高度整合的強固型精密資料擷取參考平台，EV-HT-200CDAQ1，該平台經過測定，其參數指標符合 200°C 操作溫度要求。借助該平台，高溫電子系統設計者可以在原型製作和評估中使用最先進的元件，從而縮短開發時間和上市時間。

參考文獻

1. Jeff Watson 和 Gustavo Castro，“高溫電子設備對設計和可靠性帶來挑戰”，類比對話，第 46 卷第 4 期，2012 年 4 月。
2. Jeff Watson 和 Maithil Pachchigar，“因應高溫應用的低功耗資料擷取解決方案”，類比對話，第 49 卷第 3 期，2015 年 8 月。
3. CN-0365：因應高溫環境的 16 位元、600 kSPS、低功耗資料擷取系統，ADI 公司，2015 年 6 月。

4. Alan Walsh，“因應精密 SAR 模數轉換器的前端放大器和 RC 濾波器設計”，類比對話，第 46 卷第 4 期，2012 年 12 月。

5. John L. Evans、James R. Thompson、Mark Christopher、Peter Jacobsen 和 R. Wayne Johnson，“不斷變化的汽車環境：高溫電子設備”，《IEEE 電源電子會刊》，第 27 卷第 3 期，2004 年 7 月。

作者介紹：

■ Jeff Watson [jeff.watson@analog.com] 是 ADI 公司儀器儀錶市場部戰略行銷經理，主要負責精密電子測試和測量以及高溫應用。加入 ADI 公司之前，他是地下石油和天然氣儀器儀錶行業以及非公路用車儀器儀錶 / 控制行業的一名設計工程師。他擁有賓州州立大學的電氣工程學士和碩士學位。

■ Maithil Pachchigar [maithil.pachchigar@analog.com] 是 ADI 公司麻薩諸塞州威明頓市儀器儀錶與精密技術業務部門的應用工程師。2010 年加入 ADI 公司以來，他致力於儀器儀錶、工業和醫療健康行業的精密轉換器產品組合工作和客戶支援。自 2005 年以來，Maithil 一直在半導體行業工作，並已獨立及合作發表多篇技術文章。Maithil 於 2003 年獲印度 S.V. 國家技術學院電子工程學士學位，2006 年獲聖約瑟州立大學的電氣工程碩士學位，2010 年獲矽谷大學 MBA 學位。CTA

圖 10：高溫加速度計與 EV-HT-200CDAQ1 的介面。

