

電能品質監測第 2 部分

符合標準電能品質儀錶的設計考慮因素

本文介紹如何借助即用型平台加快開發速度，高效設計符合標準的電能品質 (PQ) 測量儀錶，同時詳細探討設計 A 類和 S 類電能表的不同解決方案，包括新的 S 類電能品質測量整合解決方案，該方案可大幅縮短電能品質監測產品的開發時間並降低成本。文章「電能品質監測第 1 部分：符合標準的電能品質測量的重要性」詳細闡述了電能品質 IEC 標準及其參數。

■作者：Jose Mendia / ADI 資深產品應用工程師

建置電能品質解決方案的挑戰

圖 1 顯示了用於測量電能品質的儀錶所包含的

基本元件。首先，電流和電壓感測器必須支援該儀器的工作範圍，且輸入訊號應能根據類比數位轉換器 (ADC) 輸入的動態範圍進行調整。傳統感測器是導致測量結果不準確的第一個來源；因此，正確選擇感測器非常重要。然後，訊號傳輸至 ADC；其各種特性，例如偏置、增益和非線性度誤差成為導致測量結果不準確的第二個來源。正確選擇 ADC 來執行此功能，這是設計電能品質儀錶時的一大難點。最後，必須開發一系列訊號處理演算法，以便從輸入訊號獲取電氣和電能品質測量結果。

電壓和電流感測器

電能品質儀錶的位置和應用不同，標稱電源電壓 (U_{NOM})、標稱電流 (I_{NOM}) 和頻率也會不

同。除了儀錶測得的標稱值，IEC 61000-4-7 標準要求電能品質測量儀錶達到表 1 所示的精度；因此，

圖 1: 電能品質測量儀錶的主要元件。

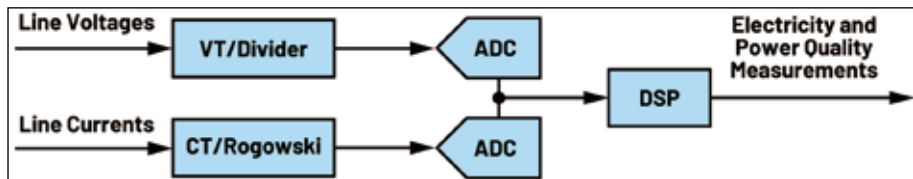


表 1: IEC 61000-4-7 標準指定的電流、電壓和電能測量精度要求

類別	測量	條件	最大誤差
A	電壓	$U_H \geq 1\% U_{NOM}$	$\pm 5\% U_H$
		$U_H < 1\% U_{NOM}$	$\pm 0.05\% U_{NOM}$
	電流	$I_H \geq 3\% I_{NOM}$	$\pm 5\% I_H$
$I_H < 3\% I_{NOM}$		$\pm 0.15\% I_{NOM}$	
S	電壓	$P_H \geq 150 \text{ W}$	$\pm 1\% P_H$
		$P_H < 150 \text{ W}$	$\pm 1.5 \text{ W}$
S	電流	$U_H \geq 3\% U_{NOM}$	$\pm 5\% U_H$
		$U_H < 3\% U_{NOM}$	$\pm 0.15\% U_{NOM}$
S	電流	$I_H \geq 10\% I_{NOM}$	$\pm 5\% I_H$
		$I_H < 10\% I_{NOM}$	$\pm 0.15\% I_{NOM}$

I_{NOM} ：測量儀錶的標稱電流範圍

U_{NOM} ：測量儀錶的標稱電壓範圍

U_M 、 I_M 和 P_M ：測量值

在選擇感測器時，必須確保在使用該感測器後，儀器能夠達到要求的測量精度。

IEC61000-4-7¹ 標準推薦在設計輸入電路時，採用這些標稱電壓 (U_{NOM}) 和標稱電流 (I_{NOM})：

■對於 50 Hz 系統：66 V、115 V、230 V、400 V、690 V

■對於 60 Hz 系統：69 V、120 V、240 V、277 V、347 V、480 V、600 V

■0.1 A、0.2 A、0.5 A、1 A、2 A、5 A、10 A、20 A、50 A、100 A

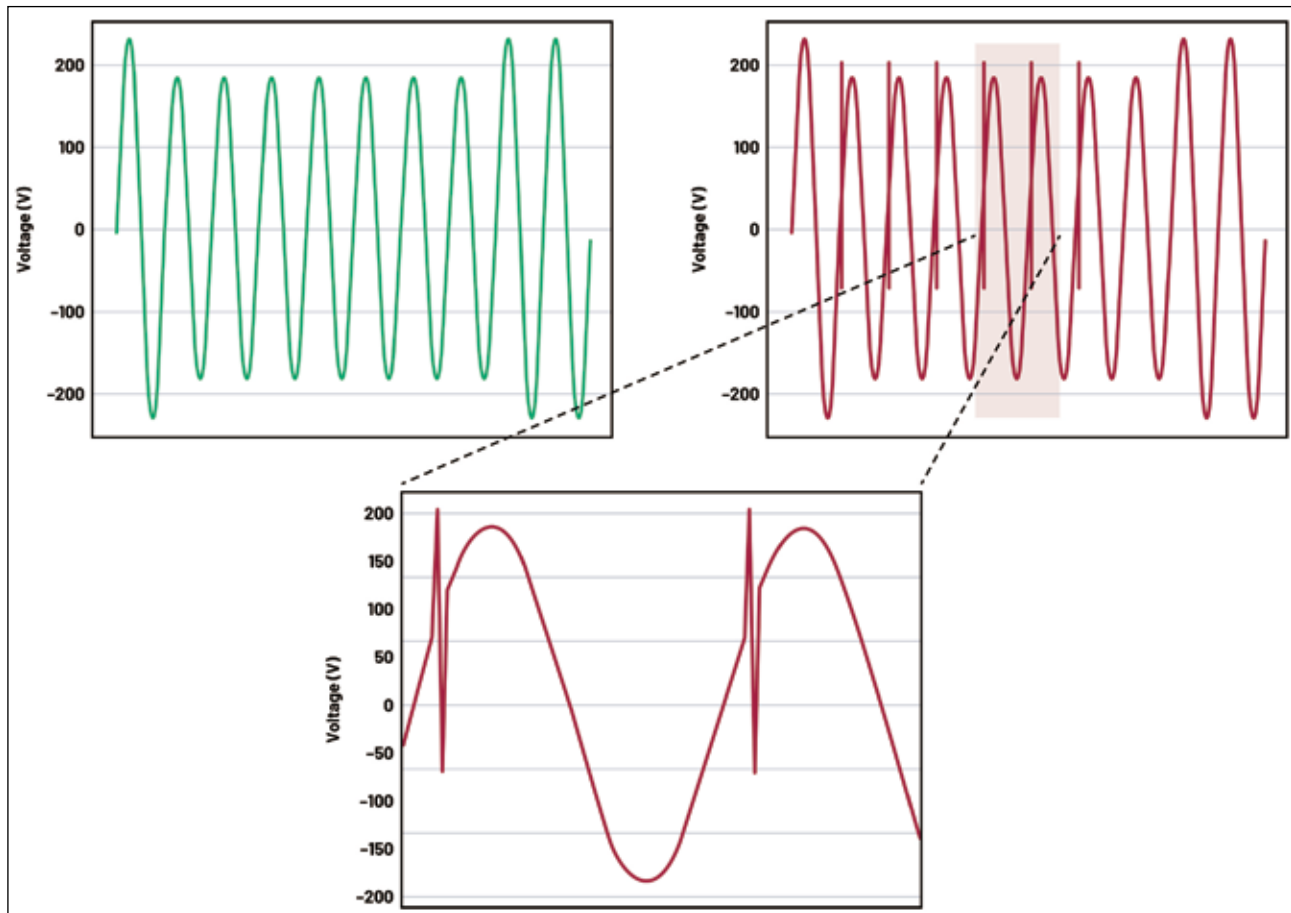
此外，在連續施加 $1.2 \times U_{NOM}$ 和 I_{NOM} 時，用於測量電壓和電流的感測器的特性和精度必須保持不變。對儀器施加四倍標稱電壓訊號或 1 kV rms (以低值為準) 1 秒，不得導致任何損壞。同樣，對儀器施加 $10 \times I_{NOM}$ 1 秒，不得導致任何損壞。

類比數位轉換器

儘管 IEC 61000-4-30 標準未明確提出最低採樣速率要求，但 ADC 的採樣速率必須足以測量一些振盪和快速的電能品質現象。採樣速率如果不足，會導致電能品質事件分類出錯或無法檢測到事件。IEC 61000-4-30 標準規定，儀錶的電壓和電流感測器應該能夠支援高達 9 kHz。因此，必須按照訊號分析規則選擇 ADC 的採樣頻率，以測量高達 9 kHz (包含在內) 的能量譜分量。圖 2 顯示在採樣速率不足時會造成的後果。左上方的波形每 10 個週期 (200 ms) 包含 64 個樣本，右上方的波形每 10 個週期包含 1024 個樣本。如圖 2 所示，左上圖顯示電壓突降事件，右上圖則顯示此種突降是由瞬變引起的。

IEC 標準適用於單相和三相系統；因此，所選的 ADC 必須能夠同時對規定數量的電壓和電流通道採樣。能夠同時對儀錶上的所有電壓和電流通道軌

圖 2: ADC 採樣速率會影響電能品質測量。



行測量，如此就能檢查所有參數並在發生電能品質事件時，立即觸發這些參數。

數位訊號處理 (DSP)

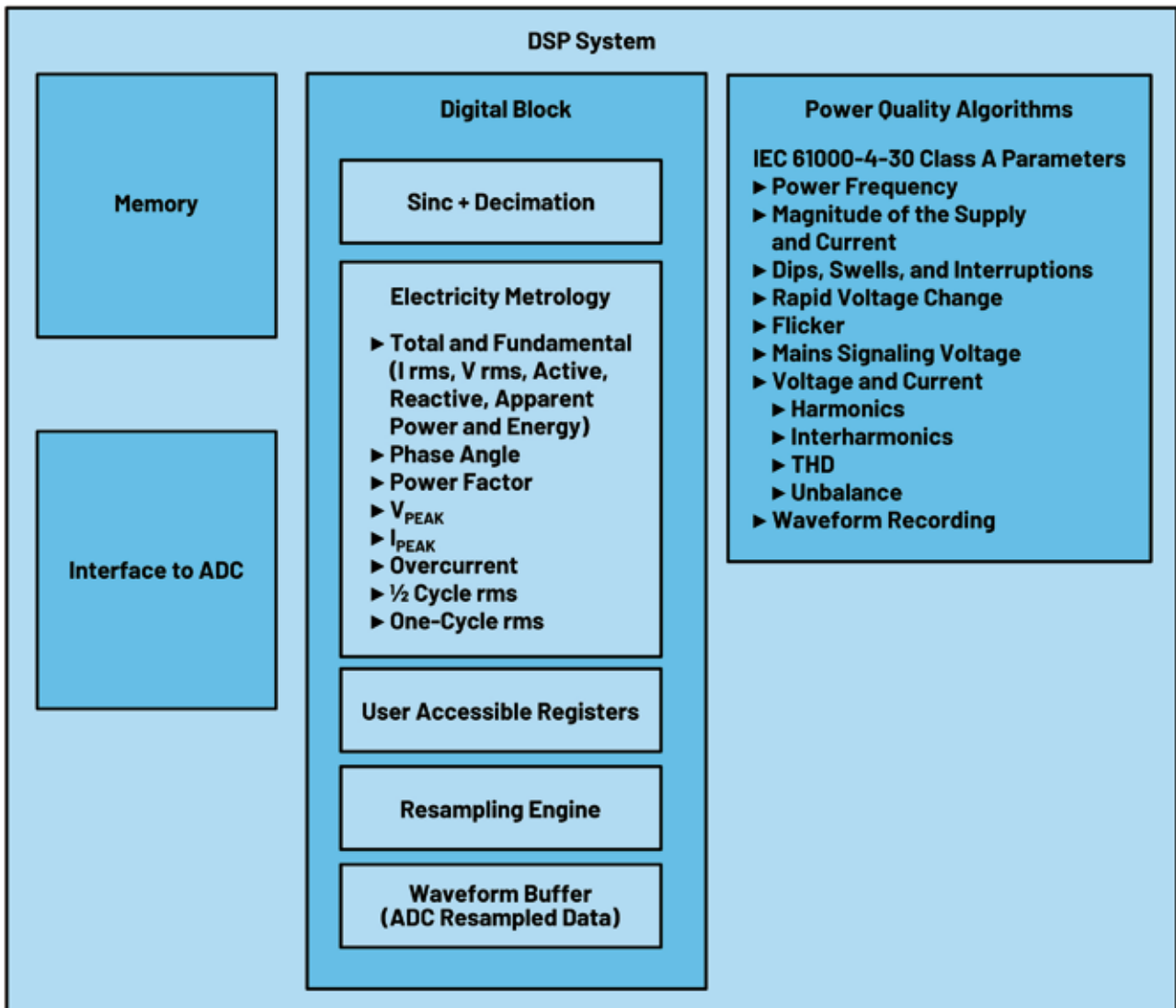
儘管為電能品質測量應用選擇感測器和 ADC 需要付出全面的工程努力，但毫無疑問，開發演算法來處理 ADC 原始測量資料才是電能品質測量過程中最費時間和資源的任務。要建構符合標準的儀錶，必須選擇正確的 DSP 硬體，還必須開發基於波形樣本計算電能品質參數的演算法並進行適當測試。這項標準不止要求計算，還要求基於不同的時間進行整合，要求 A 類的時間精度小於 ± 1 秒 /24 小時，

S 類的時間精度小於 ± 5 秒 /24 小時。這些演算法必須執行諧波分析。此外，電能品質參數依賴快速傅立葉轉換 (FFT) 分析 (諧波、間諧波、電源訊號電壓、失衡)，但此種分析很難進行。FFT 分析要求以最低每 200 ms (10 個週期) 1024 個樣本的速率對波形進行採樣。要按規定的速率對 ADC 的原始波形重採樣，必須非常小心，以免造成諧波失真和混疊。

演算法開發完成之後，IEC 標準要求儀錶必須通過 400 多項測試，才能獲得完全認證。

圖 3 所示的框圖顯示了 DSP 系統進行電能品質測量時所需的最相關功能。

圖 3: 框圖：DSP 電能品質系統的相關功能。



ADI 電能品質測量解決方案

多通道同步採樣 ADC，符合 IEC 61000-4-30 A 類標準開發 A 類 PQ 儀錶時，我們需要考慮精度、通道數量和採樣速率要求，所以我們推薦使用 AD777x 和 AD7606x 系列產品來進行訊號鏈 / 系統的 ADC 轉換。注意，這些解決方案只提供來自輸入訊號的原始數位化資料。必須開發 DSP 系統，以獲取通過認證的 PQ 測量結果。

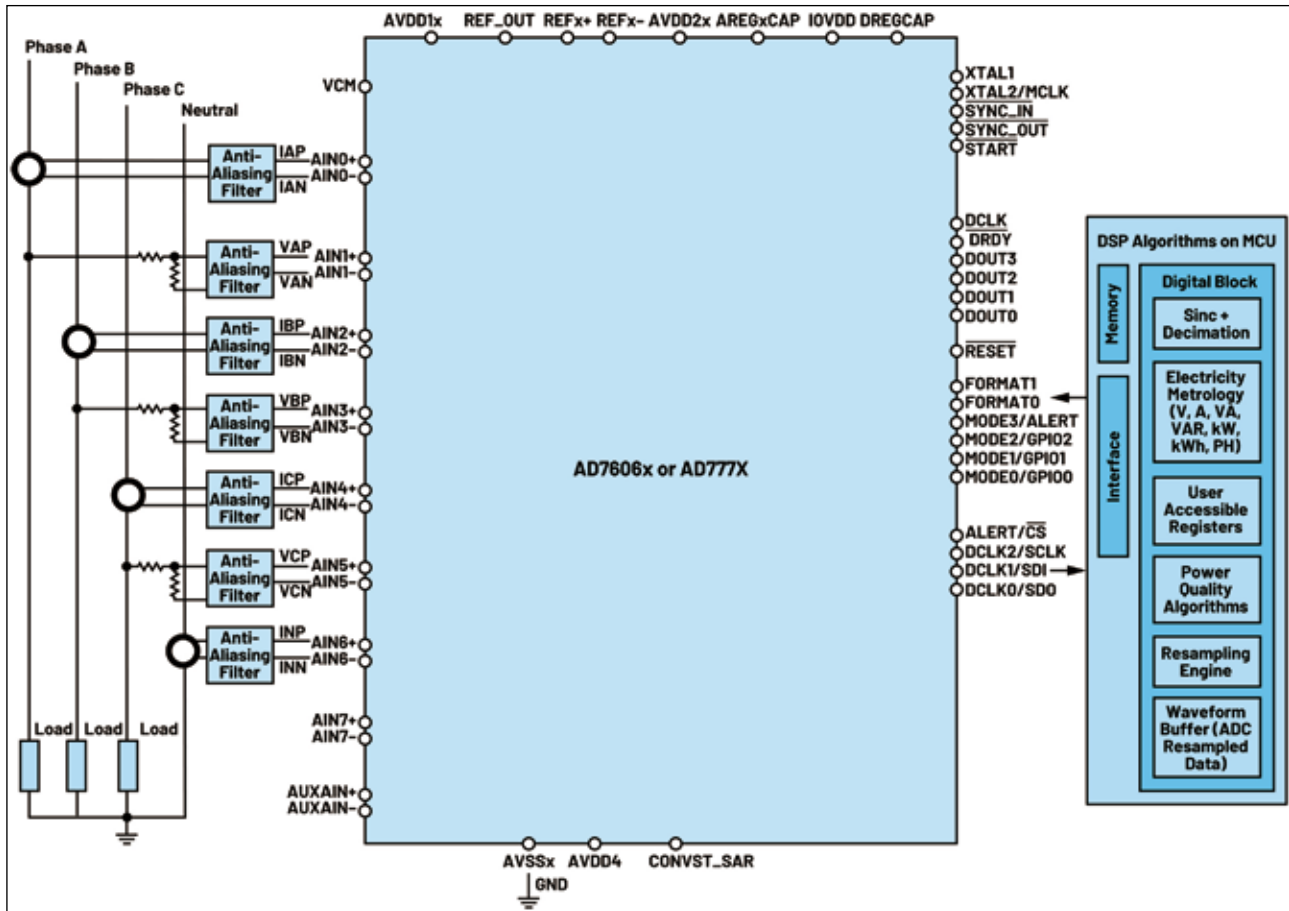
AD777x 系列 $\Sigma - \Delta$ ADC

AD777x 是 8 通道、24 位元同步採樣 ADC 系列元件。晶片內整合 8 個完整的 $\Sigma - \Delta$ ADC，提供 16 kSPS/32 kSPS/128 kSPS 採樣速率。AD777x 提供低輸入電流，允許直接連接感測器。每個輸入通道都有一個增益為 1、2、4 和 8 的可編程增益級，可將低幅度感測器輸出映射到滿量程 ADC 輸入範

圍，從而儘量擴大訊號鏈的動態範圍。AD777x 支援 1 V 至 3.6 V VREF 電壓，類比輸入範圍為 0 V 至 2.5 V 或者 ± 1.25 V。類比輸入可配置為接受真差分、偽差分或單端訊號以匹配不同的感測器輸出配置。採樣速率轉換器可以用來對 AD7770 進行精細解析度控制，還可用於線路頻率變化為 0.01 Hz 時，需要 ODR 解析度用於保持採樣頻率跟隨維持相干性的應用。AD777x 並提供 5 kHz 大訊號輸入頻寬 (AD7771 為 10 kHz)。透過 SPI 提供的資料輸出和 SPI 通訊介面還可配置用於輸出 $\Sigma - \Delta$ ADC 轉換資料。其溫度範圍為 -40°C 至 $+105^{\circ}\text{C}$ ，採用 3.3 V 或 ± 1.65 V 電源時，最高可達到 $+125^{\circ}\text{C}$ 。

圖 4 顯示了 PQ 儀器使用的 AD777x 系列 ADC 的典型 3 相應用系統框圖，其中使用電流互感器作為電流感測器，且使用電阻分壓器作為電壓感測器。

圖 4: AD777X 和 AD7606x 系列 ADC 的電能品質 3 相應用系統框圖。



AD7606x 系列 16/18 位元 ADC 數據採集系統

AD7606x 是 8 通道 16/18 位元同步採樣類比數位數據採集系統 (DAS) 系列。每個通道均包含類比輸入箝位保護、可編程增益放大器 (PGA)、低通濾波器、16/18 位元逐次逼近型 (SAR) ADC。AD7606x 並內建彈性的數位濾波器、低漂移 2.5 V 精密基準電壓源和基準電壓緩衝器，可驅動 ADC 及彈性的並行和序列介面。

AD7606B 採用 5 V 單電源供電，支援 $\pm 10\text{ V}$ 、 $\pm 5\text{ V}$ 和 $\pm 2.5\text{ V}$ 真雙極性輸入範圍，所有通道均能以 800 kSPS (AD7606B)/1 MSPS (AD7606C) 的吞吐速率採樣。輸入箝位保護容忍不同的電壓輸入，它們是使用者可選的類比輸入範圍 ($\pm 20\text{ V}$ 、 $\pm 12.5\text{ V}$ 、 $\pm 10\text{ V}$ 、 $\pm 5\text{ V}$ 和 $\pm 2.5\text{ V}$)。AD7606x 採用單一 5 V 類比電源供電。其採用單電源工作方式，具有晶片內濾波和高輸入阻抗，因此無需採用需要雙極性電源的外部驅動運算放大器。

在軟體模式下，可以使用以下先進功能：

- 額外的過採樣 (OS) 選項，高達 $OS \times 256$
- 每通道的系統增益、系統失調和系統相位校準
- 類比輸入開路檢測器
- 用於診斷的多工器
- 監控功能：SPI 無效讀 / 寫、迴圈冗餘校驗 (CRC)、過壓和欠壓事件、忙卡監控和復位檢測

圖 4 顯示了適用於電能品質儀錶的 AD7606x 系列 ADC 的典型 3 相應用系統框圖，其中使用電流互感器作為電流感測器，且使用電阻分壓器作為電壓感測器。

ADI 預認證的 IEC S 類電能品質解決方案

ADE9430 為一款高精度、全整合式多相電能計量 IC，結合主機微控制器上運作的 ADSW-PQ-CLS 軟體庫，共同構成符合 IEC 61000-4-30 S 類標準的完整解決方案。透過整合大幅縮短了 PQ 監控產品的開發時間，且降低了成本。ADE9430 + ADSW-

PQ-CLS 解決方案緊密整合採集引擎和計算引擎，簡化了電能和 PQ 監控系統的實現和認證。圖 5 顯示了適用於電能品質儀錶的 ADE9430 + ADSW-PQ-CLS 解決方案的 3 相應用系統框圖，其中使用電流互感器作為電流感測器，且使用電阻分壓器作為電壓感測器。

ADE9430 S 類電能品質類比前端

ADE9430 整合七個輸入通道，可在三相系統或多達三個單相系統上使用。配合外部模擬積分器使用時，該元件支援使用電流互感器 (CT) 或羅氏線圈來進行電流測量，並提供整合式類比前端進行電能品質監控和電能計量。ADE9430 與 ADE9000 和 ADE9078 接腳相容，提供同等的類比和計量性能，特性如下：

- 7 個高性能 24 位元 $\Sigma - \Delta$ ADC
- 101 dB SNR
- 寬廣輸入電壓範圍： $\pm 1\text{ V}$ ，707 mV rms，滿量程，增益為 1
- 差分輸入
- 0.2 級精度計量
- 1 週期 rms、線路頻率、過零、先進計量方法
- 波形緩衝器
- 連續重採樣資料：每 10/12 線路週期 1024 點
- 先進計量方法覆蓋 50 Hz 和 60 Hz 基波頻率
- 支援有功電能標準：IEC 62053-21 和 IEC 62053-22；EN 50470-3 OIML R46；以及 ANSI C12.20
- 支援無功電能標準：IEC 62053-23、IEC 62053-24
- 高速通訊連接埠：20 MHz 序列埠介面 (SPI)

ADSW-PQ-CLS 軟體庫

ADSW-PQ-CLS 軟體庫專用於與 ADE9430 整合，以產生符合 IEC 61000-4-30 標準的 S 類 PQ 測量值。其採用了 IEC 61000-4-30 中定義的有關 S 類儀器的所有參數。用戶可以決定使用哪些 PQ 參數。此庫需要低 CPU/RAM 資源，且與核心 / OS 無關

(最低需要採用 Arm Cortex-M)。支援的 MCU 架構包括 Arm Cortex-M0、Cortex-M0+、Cortex-M1、Cortex-M3 和 Cortex-M4。在提供給最終用戶時，該庫以 CMSIS-PACK 檔 (.pack) 的形式提供，相容 Keil Microvision、IAR Embedded Workbench

(8.x 版本)，或者 ADI 的 CrossCore Embedded Studio。在購買 ADE9430 時，會隨附提供該軟體庫的許可證。提供一個 PC 串列命令列介面 (CLI) 示例，用於評估該庫及其功能。圖 6 顯示此 CLI 如何顯示 PQ 參數。

圖 5: ADE9430 和 ADSW-PQ-CLS PQ 3 相系統框圖。

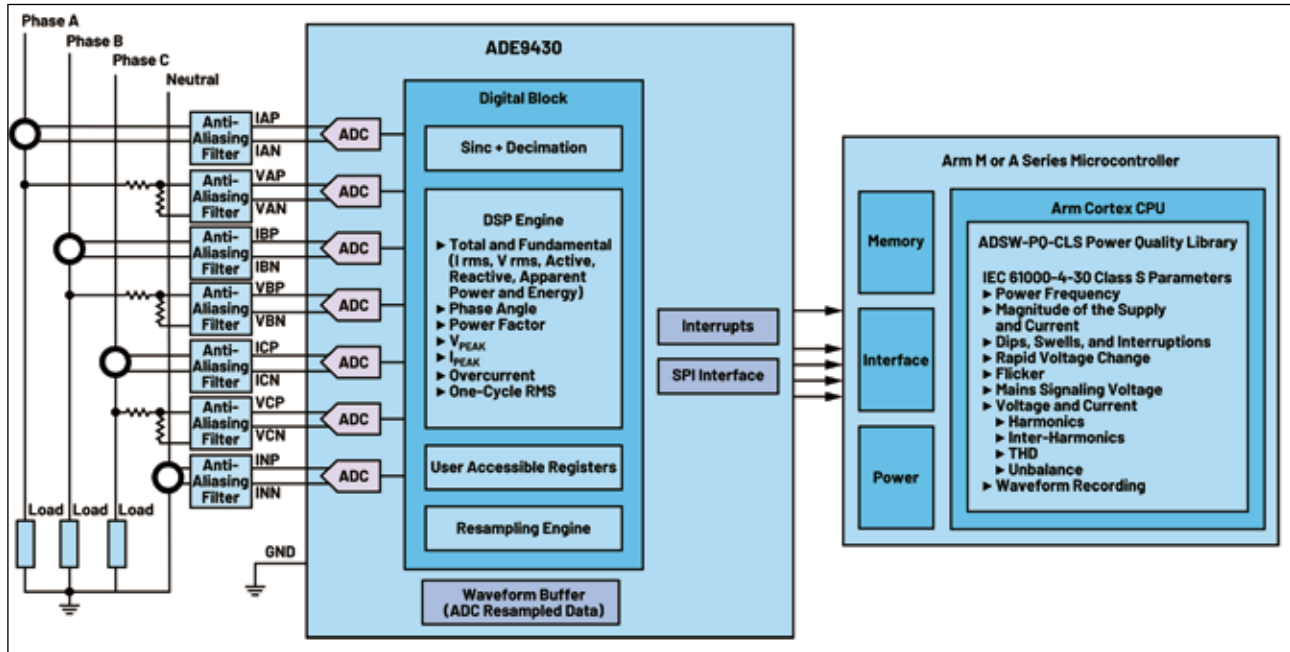


圖 6: ADSW-PQ-CLS 軟體庫串列 CLI 介面。

```

COM4 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window KanjiCode Help
UNB,150180Cycles,1,6,0,946706642130,Y,0.15,0.13
MAG,150180Cycles,VA,7,0,946706645130,Y,229.22478
HARM,150180Cycles,VA,7,0,946706645130,Y,0.00,0.00,0.00,0.00
THD,150180Cycles,VA,7,0,946706645130,Y,0.00
MAG,150180Cycles,VB,7,0,946706645130,Y,172.78564
HARM,150180Cycles,VB,7,0,946706645130,Y,0.00,0.00,0.00,0.00
THD,150180Cycles,VB,7,0,946706645130,Y,0.00
MAG,150180Cycles,VC,7,0,946706645130,Y,164.84148
HARM,150180Cycles,VC,7,0,946706645130,Y,60.25,55.18,50.16,41.14
THD,150180Cycles,VC,7,0,946706645130,Y,104.32
UNB,150180Cycles,V,7,0,946706645130,Y,89.11,80.39
MAG,150180Cycles,IA,7,0,946706645130,Y,10.18533
HARM,150180Cycles,IA,7,0,946706645130,Y,0.00,0.00,0.00,0.00
THD,150180Cycles,IA,7,0,946706645130,Y,0.00
MAG,150180Cycles,IB,7,0,946706645130,Y,10.15129
HARM,150180Cycles,IB,7,0,946706645130,Y,0.00,0.00,0.00,0.00
THD,150180Cycles,IB,7,0,946706645130,Y,0.00
MAG,150180Cycles,IC,7,0,946706645130,Y,10.11558
HARM,150180Cycles,IC,7,0,946706645130,Y,0.00,0.00,0.00,0.00
THD,150180Cycles,IC,7,0,946706645130,Y,0.00
MAG,150180Cycles,IN,7,0,946706645130,Y,0.09438
HARM,150180Cycles,IN,7,0,946706645130,Y,0.00,0.00,0.00,0.00
THD,150180Cycles,IN,7,0,946706645130,Y,0.00
UNB,150180Cycles,I,7,0,946706645130,Y,0.15,0.14
ADSW-PQ-CLS>
    
```

ADE9xxx 系列電能品質功能匯總

表 2: ADE9xxx 系列電能計量 IC 的電能和電能品質特性；S 類數值表示功能符合 IEC 61000-4-30 S 類標準

參數	ADE9078 電錶計量	ADE9000 電能品質	ADE9430 + ADSW-PQ-CLS
瓦特、瓦時	✓	✓	✓
I rms、V rms、VA、VA-hr	✓	✓	✓
總 VAR、VAR-hr	✓	✓	✓
基波無功功率、VAR-hr	✓	✓	✓
功率因數	✓	✓	✓
電流相位角	✓	✓	✓
電壓相位角	✓	✓	✓
線路頻率	—	—3	S 類
相序檢測	✓	✓	✓
1/2 週期 rms	—	—	✓
1 週期 rms	—	✓	S 類
10/12 週期 rms	—	✓	S 類
150/180 週期 rms	—	—	S 類
突降 / 突升	—	✓	S 類
中斷	—	—	S 類
過流	—	✓	✓
基波功率瓦特、瓦時、VA、VA-hr	—	✓	✓
快速電壓變化	—	—	S 類
上 / 下偏差	—	—	S 類
閃變	—	—	S 類
電壓 / 電流失衡	—	—	S 類
電壓 / 電流諧波、間諧波	—	—	S 類最高達到第 40 位
ITHD、VTHD	—	✓	S 類
電源訊號電壓	—	—	S 類 (<3 kHz)
基波 I rms、V rms	—	✓	✓
資料速率	16 kSPS/4 kSPS	32 kSPS/8 kSPS	32 kSPS/8 kSPS
重採樣數據	64 pts/cycle	128 pts/cycle	128 pts/ 週期，或者 1024 pts/ (10/12 週期)
最大 SPI 頻率	10 MHz	20 MHz	20 MHz

ADE9430 評估套件

EVAL-ADE9430ARDZ 能夠使用 ADE9430 和 ADSW-PQ-CLS 電能品質庫，快速評估和建構電能和 S 類功率品質測量系統的原型。提供的功率品質庫和應用示例能夠協助簡化大型系統的實現。此

套件提供隨插即用型體驗，易於使用，可用於測試 3 相電氣系統的電能品質參數。

此套件具有如下硬體特性：

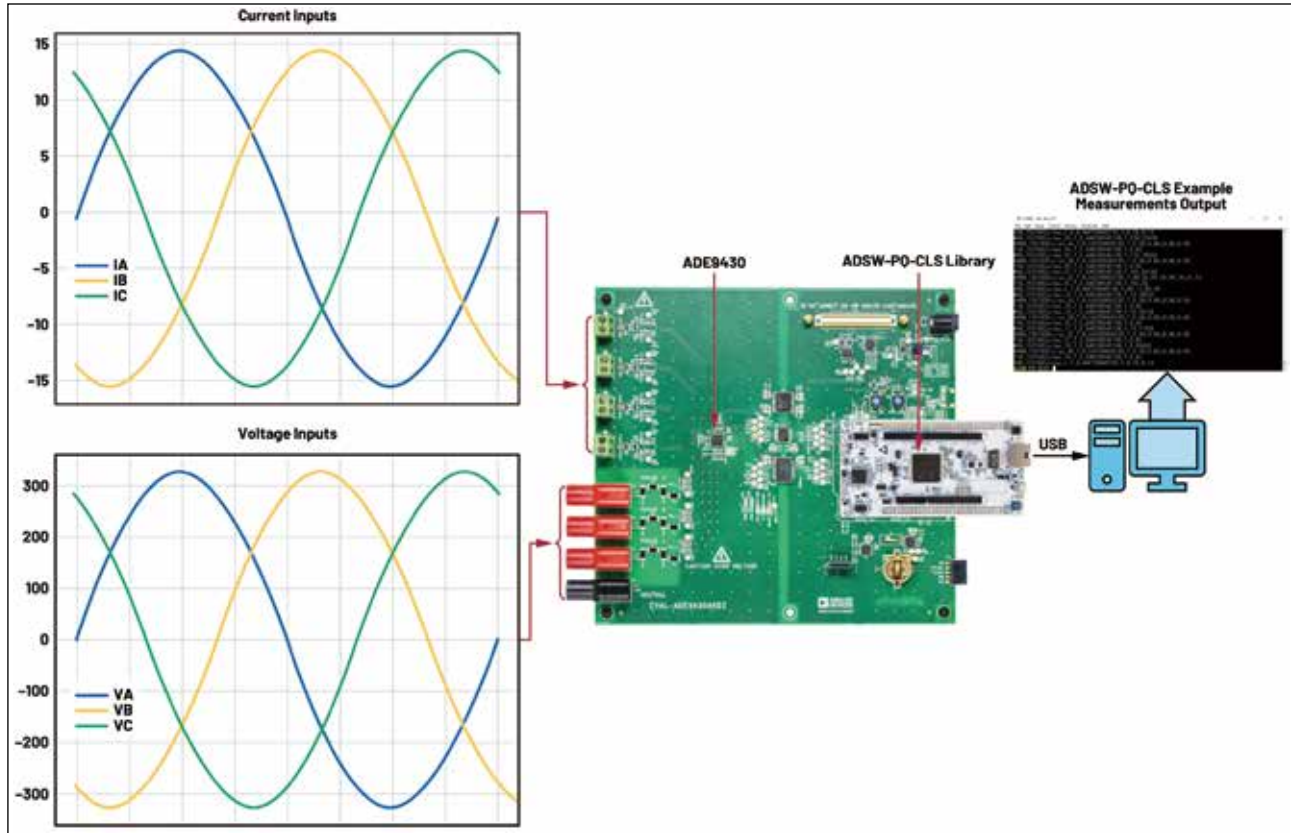
- 電流互感器輸入
- 高壓 / 電流輸入
- 240 V rms 標稱值 (採用分壓器)
- 80 A rms 最大值 (採用提供的 CT 感測器)
- 2.5 kV 隔離
- 板載 RTC，用於標記測量時間
- 預先通過 IEC 61000-4-30 S 類認證 (需要使用者進行校準)
- ADSW-PQ-CLS 庫和示例應用 (在 Arm Cortex-M4 MCU 上運作)
- 與 PC 之間的串列 CLI，用於進行配置，並記錄電能品質參數

圖 7 顯示在 PC 上使用 EVAL-ADE9430ARDZ 需要進行的連接。

EVAL - ADE9430ARDZ 由一個 PCB (具有 4 個電流和

3 個電壓 + 零線輸入連接器)、板載 ADE9430、隔離器、即時時脈)、一個 Cortex-M4 STM NUCLEO-413ZH 開發板 (包含 ADSW-PQ-CLS 庫的示例應用) 和三個電流感測器組成。

圖 7: 連接至 PC 的 EVAL-ADE9430ARDZ 的框圖。



認證


ADE9430 + ADSW-PQ-CLS 解決方案已通過認證，可以按照 IEC 61000-4-30 S 類標準的要求準確測量電能品質參數。

結論

設計符合標準的電能品質表是一項頗具挑戰性的任務。為了減少建構符合 IEC 61000-4-30 S 類標準的 PQ 測量儀錶的時間和工程資源，我們提供了

ADE9430 + ADSW-PQ-CLS 解決方案，該方案為設計人員提供即用型平台，可加快開發速度，並協助解決多項關鍵設計挑戰。

參考電路

¹「IEC 61000-4-30:2015：電磁相容性 (EMC) 第 4-30 部分：測試和測量技術——電能品質測量方法」。International Electrotechnical Commission, February 2015。 

COMPOTECHAsia 臉書

每週一、三、五與您分享精彩內容

<https://www.facebook.com/lookcompotech>