

电能质量监测第2部分： 符合标准的电能质量仪表的 设计考虑因素

Jose Mendia, 产品应用高级工程师

摘要

本文介绍如何借助即用型平台加快开发速度，高效设计符合标准的电能质量(PQ)测量仪表。文中详细探讨设计A类和S类电能表的不同解决方案，包括新的S类电能质量测量集成解决方案，该方案可大幅缩短电能质量监测产品的开发时间并降低成本。文章“[电能质量监测第1部分：符合标准的电能质量测量的重要性](#)”详细阐述了电能质量IEC标准及其参数。

实施电能质量解决方案面临的挑战

图1显示了用于测量电能质量的仪表所包含的基本组件。首先，电流和电压传感器必须支持该仪器的工作范围，且输入信号应根据模数转换器(ADC)输入的动态范围进行调整。传统传感器是导致测量结果不准确的第一个来源，因此，正确选择传感器至关重要。然后，信号传输至ADC；其各种特性，例如偏置、增益和非线性度误差成为导致测量结果不准确的第二个来源。正确选择ADC来执行此功能，这是设计电能质量仪表时的一大难点。最后，必须开发一系列信号处理算法，以便从输入信号获取电气和电能质量测量结果。

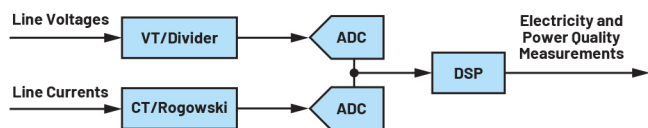


图1. 电能质量测量仪表的主要组件。

电压和电流传感器

电能质量仪表的位置和应用不同，标称电源电压(U_{NOM})、标称电流(I_{NOM})和频率也会不同。除了仪表测得的标称值，IEC 61000-4-7标准要求电能质量测量仪表达到表1所示的精度；因此，在选择传感器时，必须确保在使用该传感器后，仪器能够达到要求的测量精度。

表1. IEC 61000-4-7标准指定的电流、电压和电能测量精度要求

类别	测量	条件	最大误差
A	电压	$U_M \geq 1\% U_{NOM}$	$\pm 5\% U_M$
		$U_M < 1\% U_{NOM}$	$\pm 0.05\% U_{NOM}$
	电流	$I_M \geq 3\% I_{NOM}$ $I_M < 3\% I_{NOM}$	$\pm 5\% I_M$ $\pm 0.15\% I_{NOM}$
S	电能	$P_M \geq 150 \text{ W}$ $P_M < 150 \text{ W}$	$\pm 1\% P_M$ $\pm 1.5 \text{ W}$
	电压	$U_M \geq 3\% U_{NOM}$ $U_M < 3\% U_{NOM}$	$\pm 5\% U_M$ $\pm 0.15\% U_{NOM}$
	电流	$I_M \geq 10\% I_{NOM}$	$\pm 5\% I_M$
		$I_M < 10\% I_{NOM}$	$\pm 0.15\% I_{NOM}$

I_{NOM} : 测量仪表的标称电流范围

U_{NOM} : 测量仪表的标称电压范围

U_M 、 I_M 和 P_M : 测量值

IEC61000-4-7标准推荐在设计输入电路时，采用这些标称电压(U_{NOM})和标称电流(I_{NOM})：

- ▶ 对于50 Hz系统：66 V、115 V、230 V、400 V、690 V
- ▶ 对于60 Hz系统：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，在连续施加 $1.2 \times U_{NOM}$ 和 I_{NOM} 时，用于测量电压和电流的传感器的特性和精度必须保持不变。对仪器施加四倍标称电压信号或1 kV rms（以低值为准）1秒，不得导致任何损坏。同样，对仪器施加 $10 \times I_{NOM}$ 1秒，不得导致任何损坏。

模数转换器

尽管IEC 61000-4-30标准未明确给出最低采样速率要求，但ADC的采样速率必须足以测量一些振荡和快速的电能质量现象。采样速率如果不足，会导致电能质量事件分类出错，或无法检测到事件。IEC 61000-4-30标准规定，仪表的电压和电流传感器应该能够支持高达9 kHz。因此，必须按照信号分析规则选择ADC的采样频率，以测量高达9 kHz（包含在内）的能量谱分量。图2显示在采样速率不足时会造成的后果。左上方的波形每10个周期(200 ms)包含64个样本，右上方的波形每10个周期包含1024个样本。如图2所示，左上图显示电压突降事件，右上图则显示这种突降是由瞬变引起的。

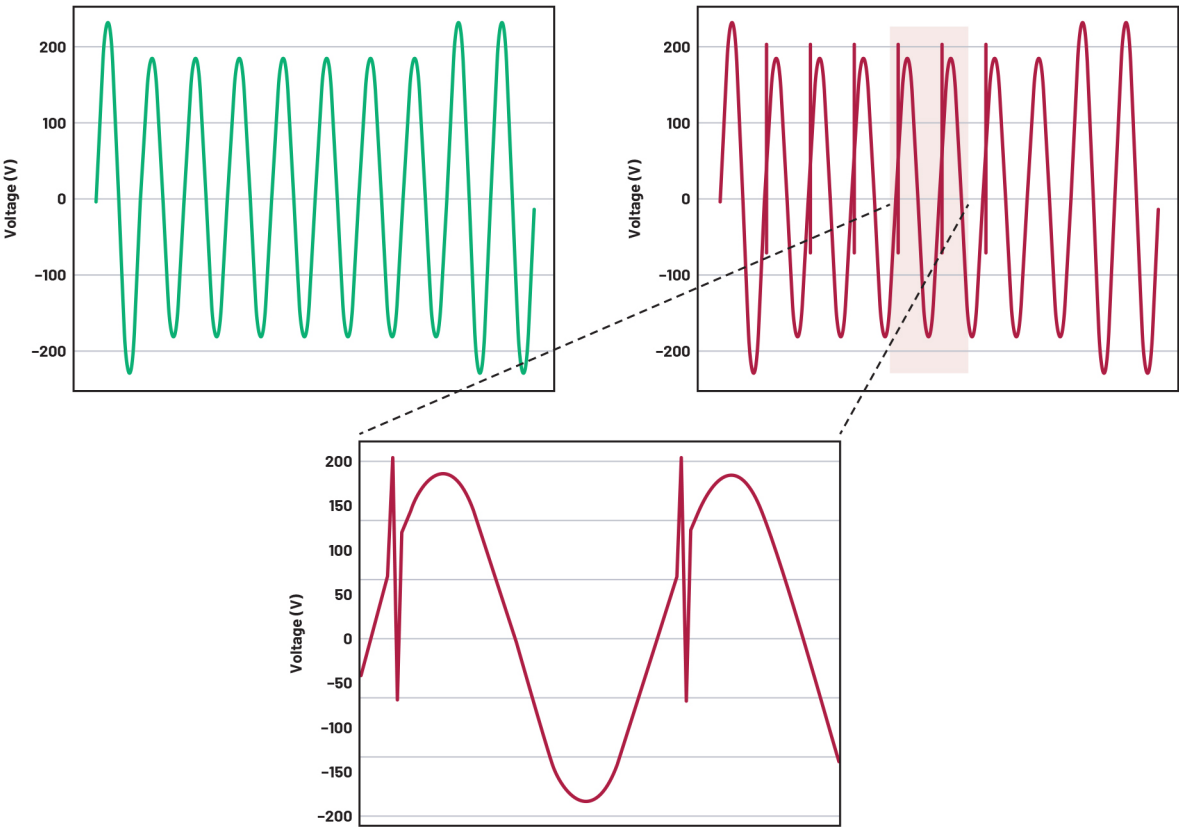


图 2. ADC 采样速率会影响电能质量测量。

IEC标准适用于单相和三相系统，因此，所选的ADC必须能够同时对规定数量的电压和电流通道采样。能够同时对仪表上的所有电压和电流通道执行测量，这样就能检查所有参数并在发生电能质量事件时，立即触发这些参数。

数字信号处理(DSP)

尽管为电能质量测量应用选择传感器和ADC需要付出全面的工程努力，但毫无疑问，开发算法来处理ADC原始测量数据才是电能质量测量过程中最费时间和资源的任务。要构建符合标准的仪表，必须选择正确的DSP硬件，还必须开发基于波形样本计算电能质量参数的算法并进行适当测试。这项标准不止要求进行计算，还要求基于不同的时间进行整合，要求A类的时间精度小于±1秒/24小时，S类的时间精度小于±5秒/24小时。这些算法必须执行谐波分析。此外，电能质量参数依赖快速傅立叶变换(FFT)分析（谐波、间谐波、电源信号电压、失衡），但这种分析很难实施。FFT分析要求以最低每200 ms（10个周期）1024个样本的速率对波形进行采样。要按规定的速率对ADC的原始波形重采样，必须非常小心，以免造成谐波失真和混叠。

算法开发完成之后，IEC标准要求仪表必须通过400多项测试，才能获得完全认证。

图3所示的框图显示了DSP系统进行电能质量测量时所需的最相关功能。

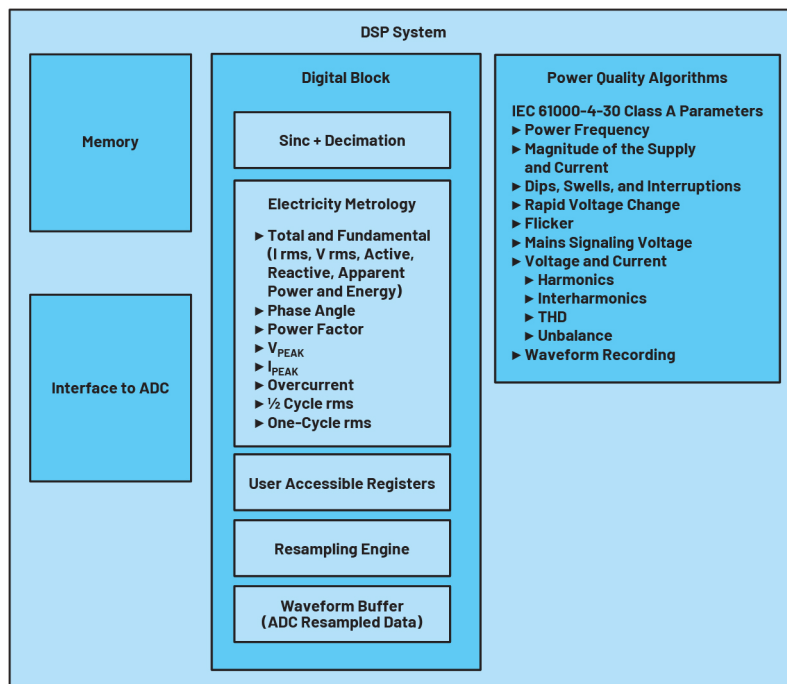


图3. 框图：DSP 电能质量系统的相关功能。

ADI公司的电能质量测量解决方案

多通道同步采样ADC，符合IEC 61000-4-30 A类标准

在开发A类PQ仪表时，我们需要考虑精度、通道数量和采样速率要求，所以我们推荐使用AD777x和AD7606x系列产品来进行信号链/系统的ADC转换。注意，这些解决方案只提供来自输入信号的原始数字化数据。必须开发DSP系统，以获取通过认证的PQ测量结果。

AD777x系列 Σ - Δ ADC

AD777x是8通道、24位同步采样ADC系列器件。片内集成8个完整的 Σ - Δ ADC，提供16 kSPS/32 kSPS/128 kSPS采样速率。AD777x提供低输入电流，允许直接连接传感器。每个输入通道都有一个增益为1、2、4和8的可编程增益级，可将低幅度传感器输出映射到满量程ADC输入范围，从而尽量扩大信号链的动态范围。AD777x支持1 V至3.6 V V_{REF} 电压，模拟输入范围为0 V至2.5 V或者 ± 1.25 V。模拟输入可配置为接受真差分、伪差分或单端信号以匹配不同的传感器输出配置。采样速率转换器可以用来对AD7770进行精细分辨率控制，还可用于线路频率变化为0.01 Hz时，需要ODR分辨率用于保持采样频率跟随维持相干性的应用。AD777x还提供5 kHz 大信号输入带宽（AD7771为10 kHz）。通过SPI提供的数据输出和SPI通信接口还可配置用于输出 Σ - Δ ADC转换数据。其温度范围为-40°C至+105°C，采用3.3 V或 ± 1.65 V电源时，最高可达到+125°C。

图4显示了PQ仪器使用的AD777x系列ADC的典型3相应系统框图，其中使用电流互感器作为电流传感器，且使用电阻分压器作为电压传感器。

AD7606x系列16/18位ADC数据采集系统

AD7606x是8通道16/18位同步采样模数数据采集系统(DAS)系列。每个通道均包含模拟输入箝位保护、可编程增益放大器(PGA)、低通滤波器、16/18位逐次逼近型(SAR) ADC。AD7606x还内置灵活的数字滤波器、低漂移2.5 V精密基准电压源和基准电压缓冲器，可驱动ADC及灵活的并行和串行接口。

AD7606B采用5 V单电源供电，支持 ± 10 V、 ± 5 V和 ± 2.5 V真双极性输入范围，所有通道均能以800 kSPS (AD7606B)/1 MSPS (AD7606C)的吞吐速率采样。输入箝位保护容忍不同的电压输入，它们是用户可选的模拟输入范围（ ± 20 V、 ± 12.5 V、 ± 10 V、 ± 5 V和 ± 2.5 V）。AD7606x采用单个5 V模拟电源供电。它采用单电源工作方式，具有片内滤波和高输入阻抗，因此无需采用需要双极性电源的外部驱动运算放大器。

在软件模式下，可以使用以下先进功能：

- ▶ 额外的过采样(OS)选项，高达 $OS \times 256$
- ▶ 每通道的系统增益、系统失调和系统相位校准
- ▶ 模拟输入开路检测器
- ▶ 用于诊断的多路复用器
- ▶ 监控功能：SPI无效读/写、循环冗余校验(CRC)、过压和欠压事件、忙卡监控和复位检测

图4显示了适用于电能质量仪表的AD7606x系列ADC的典型3相应系统框图，其中使用电流互感器作为电流传感器，且使用电阻分压器作为电压传感器。

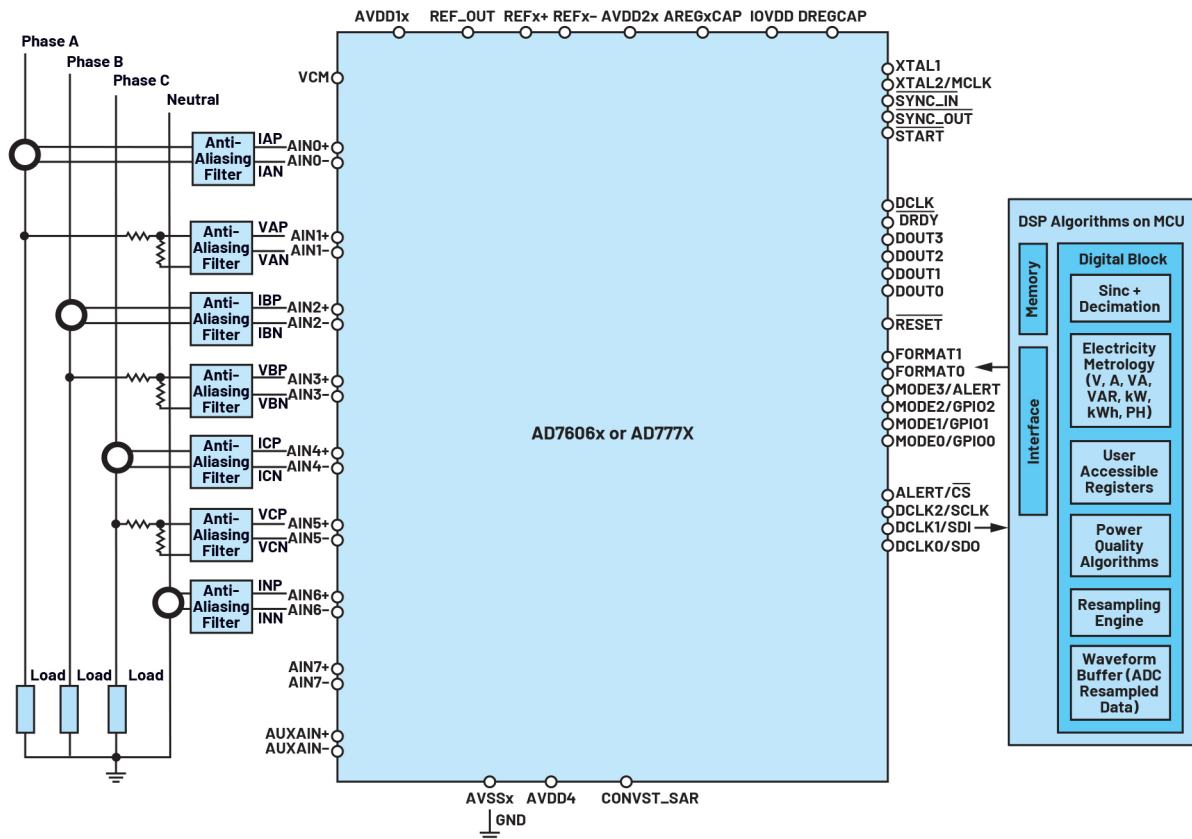


图 4. AD777X 和 AD7606x 系列 ADC 的电能质量 3 相应用系统框图。

ADI公司预认证的IEC S类电能质量解决方案

ADE9430是一款高精度、全集成式多相电能计量IC，结合主机微控制器上运行的ADSW-PQ-CLS软件库，共同构成符合IEC 61000-4-30 S类标准的完整解决方案。通过集成大幅缩短了PQ监控产品的开发时间，且降低了成本。ADE9430 + ADSW-PQ-CLS解决方案紧集成采集引擎和计算引擎，简化了电能和PQ监控系统的实现和认证。图5显示了适用于电能质量仪表的ADE9430 + ADSW-PQ-CLS解决方案的3相应用系统框图，其中使用电流互感器作为电流传感器，且使用电阻分压器作为电压传感器。

ADE9430 S类电能质量模拟前端

ADE9430集成七个输入通道，可在三相系统或多达三个单相系统上使用。配合外部模拟积分器使用时，该器件支持使用电流互感器(CT)或罗氏线圈来进行电流测量。它提供集成式模拟前端来进行电能质量监控和电能计量。ADE9430与ADE9000和ADE9078引脚兼容，提供同等的模拟和计量性能。具有以下特性：

- ▶ 7个高性能24位 Σ - Δ ADC
- ▶ 101 dB SNR
- ▶ 宽输入电压范围： $\pm 1V$ ，707 mV rms，满量程，增益为1
- ▶ 差分输入

- ▶ 0.2级精度计量
- ▶ 1周期rms、线路频率、过零、先进计量方法
- ▶ 波形缓冲器
- ▶ 连续重采样数据：每10/12线路周期1024点
- ▶ 先进计量方法覆盖50 Hz和60 Hz基波频率
- ▶ 支持有功电能标准：IEC 62053-21和IEC 62053-22；EN 50470-3 OIML R46；以及ANSI C12.20
- ▶ 支持无功电能标准：IEC 62053-23、IEC 62053-24
- ▶ 高速通信端口：20 MHz串行端口接口(SPI)

ADSW-PQ-CLS软件库

ADSW-PQ-CLS软件库专用于与ADE9430集成，以生成符合IEC 61000-4-30标准的S类PQ测量值。它采用了IEC 61000-4-30中定义的有关S类仪器的所有参数。用户可以决定使用哪些PQ参数。此库需要低CPU/RAM资源，且与内核/OS无关（最低需要采用Arm®Cortex®-M）。支持的MCU架构包括Arm Cortex-M0、Cortex-M0+、Cortex-M1、Cortex-M3和Cortex-M4。在提供给最终用户时，该库以CMSIS-PACK文件(.pack)的形式提供，兼容Keil Microvision、IAR Embedded Workbench（8.x版本），或者ADI公司的CrossCore® Embedded Studio。在购买ADE9430时，会随附提供该软件库的许可证。提供一个PC串行命令行接口(CLI)示例，用于评估该库及其功能。图6显示此CLI如何显示PQ参数。

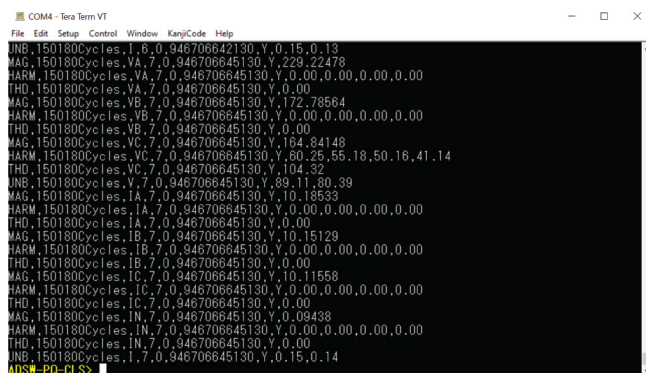
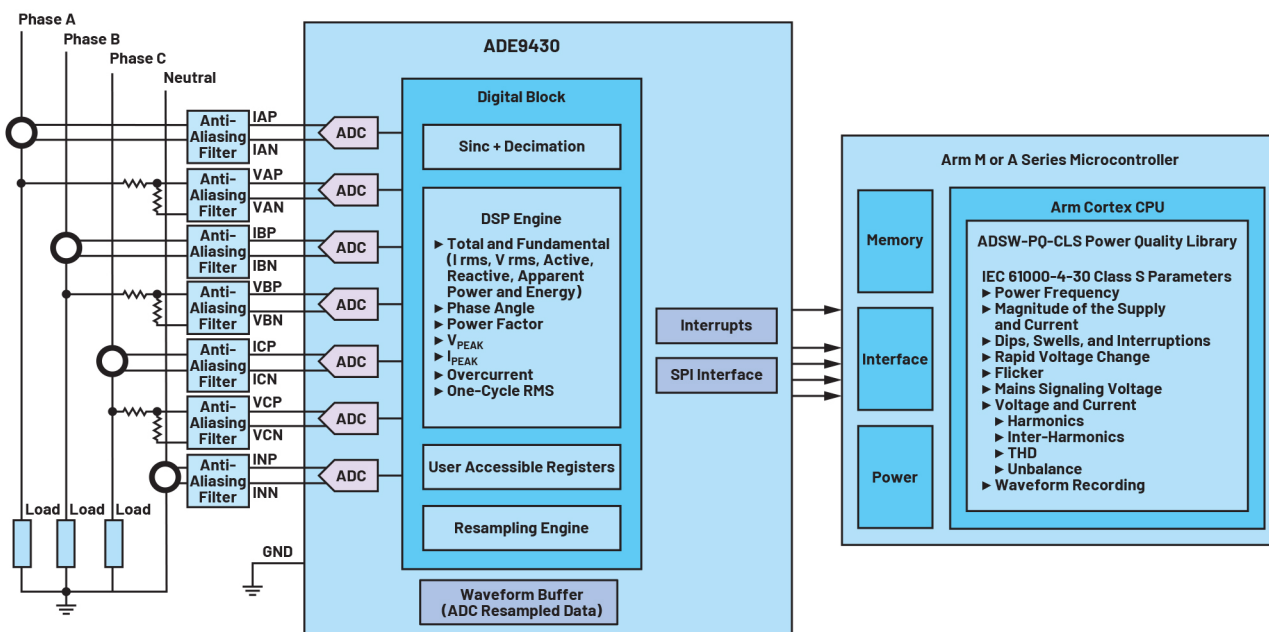


图 6. ADSW-PQ-CLS 软件库串行 CLI 接口。

ADE9xxx系列电能质量功能汇总

表2. ADE9xxx系列电能计量IC的电能和电能质量特性；S类
数值表示功能符合IEC 61000-4-30 S类标准

参数	ADE9078 电表计量	ADE9000 电能质量	ADE9430 + ADSW-PQ-CLS
瓦特、瓦时	✓	✓	✓
I rms、V rms、VA、 VA-hr	✓	✓	✓
总VAR、VAR-hr	✓	✓	✓
基波无功功率、 VAR-hr	✓	✓	✓
功率因数	✓	✓	✓
电流相位角	✓	✓	✓

参数	ADE9078 电表计量	ADE9000 电能质量	ADE9430 + ADSW-PQ-CLS
电压相位角	✓	✓	✓
线路频率—3	✓	✓	S类
相序检测	✓	✓	✓
1/2周期rms	—	✓	—
1周期rms	—	✓	S类
10/12周期rms	—	✓	S类
150/180周期rms	—	—	S类
突降/突升	—	✓	S类
中断	—	—	S类
过流	—	✓	✓
基波功率瓦特、 瓦时、VA、VA-hr	—	✓	✓
快速电压变化	—	—	S类
上/下偏差	—	—	S类
闪变	—	—	S类
电压/电流失衡	—	—	S类
电压/电流谐波、 间谐波	—	—	S类最高达到 第40位
ITHD、VTHD	—	✓	S类

参数	ADE9078 电表计量	ADE9000 电能质量	ADE9430 + ADSW-PQ-CLS
电源信号电压	—	—	S类 (<3 kHz)
基波I rms、V rms	—	✓	✓
数据速率	16 kSPS/4 kSPS	32 kSPS/8 kSPS	32 kSPS/8 kSPS
重采样数据	64 pts/cycle	128 pts/cycle	128 pts/周期, 或者1024 pts/ (10/12周期)
最大SPI频率	10 MHz	20 MHz	20 MHz

ADE9430评估套件

EVAL-ADE9430ARDZ能够使用ADE9430和ADSW-PQ-CLS电能质量库，快速评估和构建电能和S类功率质量测量系统的原型。提供的功率质量库和应用示例能够帮助简化大型系统的实现。此套件提供即插即用型体验，易于使用，可用于测试3相电气系统的电能质量参数。

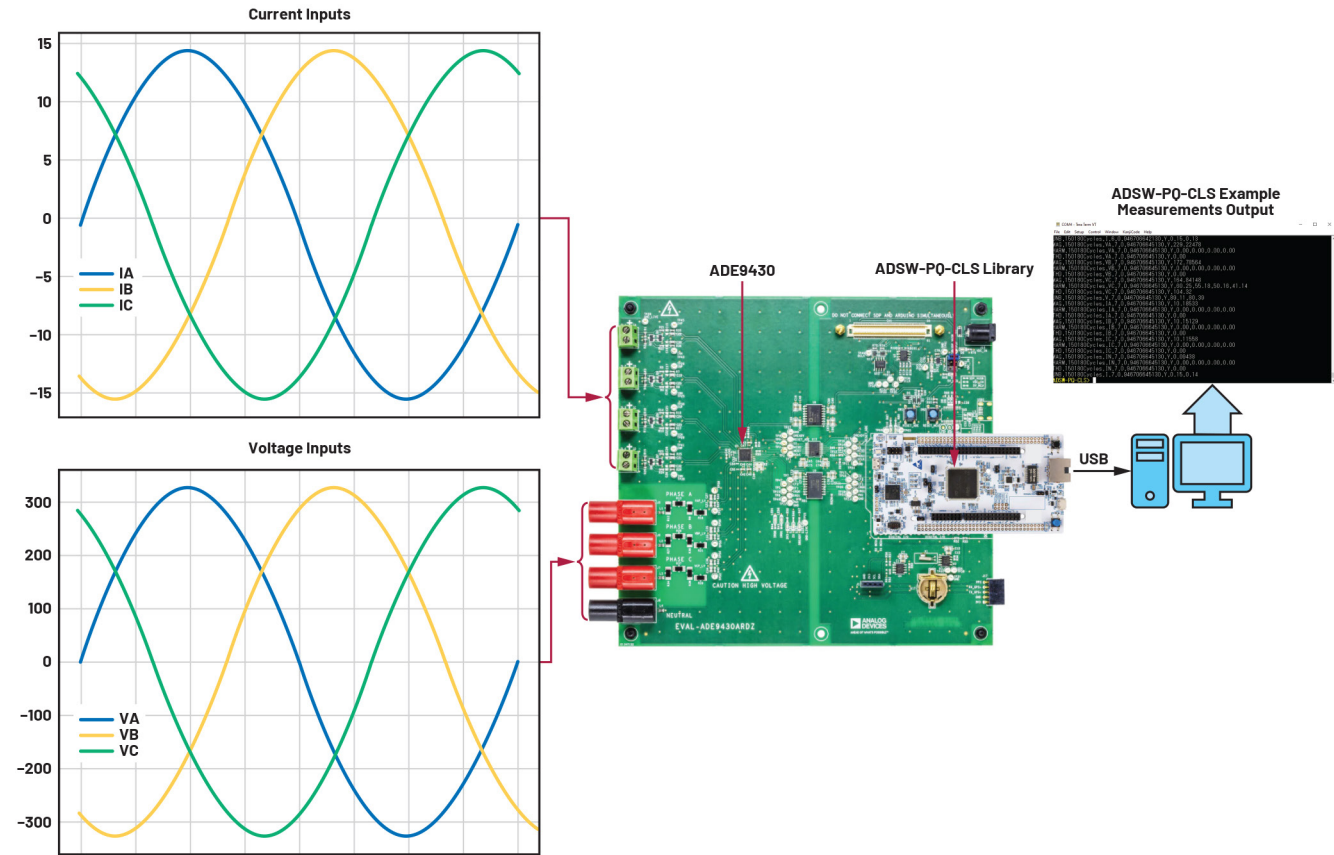


图 7. 连接至 PC 的 EVAL-ADE9430ARDZ 的框图。

此套件具有如下硬件特性:

- ▶ 电流互感器输入
- ▶ 高压/电流输入
- ▶ 240 V rms标称值（采用分压器）
- ▶ 80 A rms最大值（采用提供的CT传感器）
- ▶ 2.5 kV隔离
- ▶ 板载RTC，用于标记测量时间
- ▶ 预先通过IEC 61000-4-30 S类认证（需要用户进行校准）
- ▶ ADSW-PQ-CLS库和示例应用（在Arm Cortex-M4 MCU上运行）
- ▶ 与PC之间的串行CLI，用于进行配置，并记录电能质量参数

图7显示在PC上使用EVAL-ADE9430ARDZ需要进行的连接。

EVAL-ADE9430ARDZ由一个PCB（具有4个电流和3个电压 + 零线输入连接器）、板载ADE9430、隔离器、实时时钟）、一个Cortex-M4 STM NUCLEO413ZH开发板（包含ADSW-PQ-CLS库的示例应用）和三个电流传感器组成。

认证

ADE9430 + ADSW-PQ-CLS解决方案已通过认证，可以按照IEC 61000-4-30 S类标准的要求准确测量电能质量参数。

结论

设计符合标准的电能质量表是一项颇具挑战性的任务。为了减少构建符合IEC 61000-4-30 S类标准的PQ测量仪表的时间和工程资源，我们提供了ADE9430 + ADSW-PQ-CLS解决方案，该方案为设计人员提供即用型平台，可加快开发速度，并帮助解决多项关键设计挑战。



作者简介

Jose Mendia拥有电子和计算机科学工程学士学位，于2016年加入ADI公司的能源和工业系统部。目前，他是爱丁堡英国设计中心的产品应用高级工程师。

参考资料

¹ “IEC 61000-4-30:2015: 电磁兼容性(EMC)第4-30部分: 测试和测量技术——电能质量测量方法。” International Electrotechnical Commission, February 2015.

