

校准基于ADE7880的三相电表

作者: Aileen Ritchie

简介

本应用笔记说明如何校准ADE7880，详细描述了校准程序，包括如何计算每项常数的公式和示例。

ADE7880是一款高精度、三相电能计量IC，采用串行接口，并提供三路灵活的脉冲输出。ADE7880器件内置多个二阶 Σ - Δ 型模数转换器(ADC)、数字积分器、基准电压源电路及所有必需的信号处理电路，实现总(基波和谐波)有

功/视在功率测量和有效值计算，以及基波有功/无功功率测量。此外，ADE7880可以计算相和零线电流以及相电压上的谐波有效值、有功/无功/视在功率，以及所有相的各谐波上功率因数和谐波失真。同时可针对所有电流和电压计算总谐波失真加噪声(THD+N)。

目录

简介.....	1	增益匹配.....	7
修订历史.....	2	功率校准.....	8
校准基础知识.....	3	相位校准(可选).....	8
校准步骤.....	3	电流和电压有效值.....	10
校准方法(CF输出或寄存器).....	3	利用电能寄存器进行校准.....	12
校准设置.....	4	增益匹配.....	12
校准输入.....	4	相位校准(可选).....	12
所需寄存器设置.....	5	功率增益校准.....	13
利用CF脉冲输出进行校准.....	6	电流和电压有效值.....	15

修订历史

2013年3月—修订版0至修订版A

修改标题.....	1
-----------	---

2012年11月—修订版0：初始版

校准基础知识

为获得精确读数，去除外部元件或内部基准电压的电表间差异，ADE7880需要校准。虽然每个电表都要校准，但这是一个简单的过程，可以快速完成。

校准步骤

使用ADE7880设计电表时，最多需要三个校准阶段：增益、相位和失调。根据外部配置和电表级别，可省略一个或多个阶段。

表1提供了特定配置通常需要哪些校准步骤的指导。由于要求和性能因设计而异，表1仅作为一般指导原则。决定是否需要进行任何其他校准步骤前，应评估电表性能。

校准方法(CF输出或寄存器)

ADE7880可通过读取内部电能寄存器或测量外部校准频率(CF)输出脉冲来校准。两种测量方法之间的关系如图1所示。

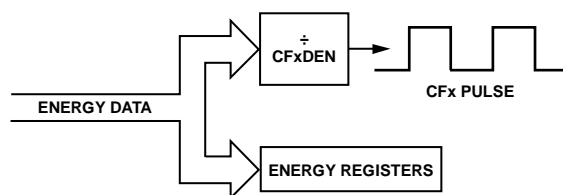


图1. 获取电能数据

如图1所示，电能寄存器数据和CFx输出数据通过CFxDEN寄存器的因数相关。

$$CFxOutput (Hz) = 1/CFxDEN \times \text{电能寄存器(更新速率)}$$

是否使用CF或电能寄存器校准的决策取决于应用和可用的基准设备(参见“校准设置”部分)。

如果电表规格需要针对特定电表常数校准，通常使用CF输出引脚。如果不使用CF输出引脚，且设计中未指定电表常数，寄存器可能是更方便的方法。校准电能寄存器可在CF输出引脚上产生精确读数，反之亦然。两种方法的精度水平不相上下。

表1. 典型校准步骤

校准阶段	典型要求
增益校准	始终需要。
相位校准	采用的电流传感器(例如电流互感器或罗氏线圈)引起相位延迟时，通常需要此步骤。 若电流传感器不引起延迟，则通常不需要。
失调校准	在大动态范围内追求高精度时，通常需要。 其他电表设计通常不需要。

校准设置

有两种设置可用于校准ADE7880：基准电表或精确源。使用基准电表时，必须使用CF输出校准法。使用精确源时，CF输出或电能寄存器均可使用。有关两种校准设置的更多信息，请参见“基准电表”部分和“精确源”部分。

基准电表

最常用的校准方法使用外部基准电表来确定所需的补偿。如果使用基准电表，必须使用CF输出，这是因为基准电表要根据CF脉冲确定误差(参见图2)。基准电表应比最终电表所需的规格更精确。

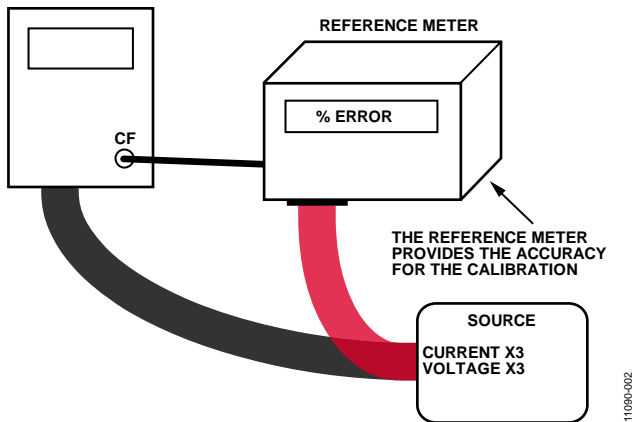


图2. 基准电表配置

使用基准电表时，需要源为电表提供所需输入；不过源精度并不重要，因为决定校准结果的是基准电表。通常，基准电表比精确源更经济，因此是最常用的校准方法。

精确源

第二种校准方法是使用精确源执行校准。如果使用精确源，CF输出或电能寄存器均可用于获取电能数据。精确源必须能够提供可控制的电压和电流输入，且精度高于最终电表所需规格。图3显示采用精确源的典型设置。

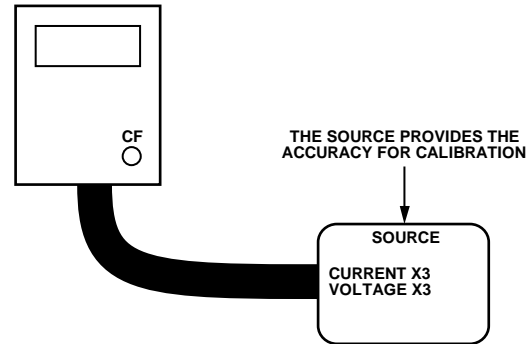


图3. 精确源

精确源通常比基准电表更昂贵，因此是不太常用的校准方法。

校准输入

如表1所示，最多需要三个校准步骤。每个校准步骤都需要进行一项单独的测量并进行校准。为了能够提取单独的增益、相位和失调误差，通常需要三组不同的输入条件。表2显示了上述情况。

表2. 典型输入条件

校准步骤	输入电压	输入电流	功率因数
相位	标称值	标称值	0.5
增益	标称值	标称值	1
失调	标称值	最小值	1

其中：

标称电压通常为110 V或220 V。

标称电流通常为最大电流的1/10左右，例如10 A。

最小电流是指电表中指定的最小电流，但同时还要保持在ADE7880的测量规格范围内，例如100 mA。

为了加快校准过程并最大限度地减少输入条件的数量，也可以在功率因数为0.5的情况下执行增益校准。这样可以是一个校准点同时用于增益校准和相位校准。在许多情况下，这会将总的校准程序减少为一个点，因为失调校准并非始终需要的。

表3显示了修改后的校准条件。

表3. 修改后的输入条件

校准步骤	输入电压	输入电流	功率因数
相位	标称值	标称值	0.5
增益	标称值	标称值	0.5
失调	标称值	最小值	1

使用表3所示的输入条件时，要让所用的功率因数尽可能接近0.5并且保持不变，这一点很重要。注意，可以使用感性或容性负载。本应用笔记提供了利用表3中显示的修改后的输入条件进行的示例计算。

所需寄存器设置

校准ADE7880前，必须先配置一组寄存器。这些寄存器如表4所列。有关这些寄存器的详细信息，请参见ADE7880数据手册。

表4 校准前所需的默认寄存器

寄存器地址	寄存器名称	寄存器描述	建议值	备注
0xEA02	WTHR	阈值寄存器(有功功率)	0x03	有关修改此常数的详情，请参见ADE7880数据手册中的公式26。
0xEA03	VARTHR	阈值寄存器(无功功率)	0x03	有关修改此常数的详情，请参见ADE7880数据手册中的公式37。
0xEA04	VATHR	阈值寄存器(视在功率)	0x03	有关修改此常数的详情，请参见ADE7880数据手册中的公式44。
0x4388	DICOEFF	数字积分器算法； 仅使用di/dt传感器时需要	0xFFF8000	只在使用罗氏线圈时需要
0x439F	VLEVEL	用于仅基波计算的阈值寄存器	0x38000	有关修改此常数的详情，请参见ADE7880数据手册中的公式22。
0xE60E	COMPmode[14] (SELFREQ)	用于仅基波测量的50 Hz或 60 Hz选择	50 Hz 0 60 Hz 1	是仅基波读数所必需的。

利用CF脉冲输出进行校准

利用脉冲输出进行校准时，CF_x引脚必须配置为输出正校准的测量值和通道。例如，在通道A上校准有功功率时，应该将CF1、CF2或CF3配置为与通道A上的有功功率成正比。这可通过设置CFMODE寄存器(地址0xE610)的位0至位8以及COMPmode寄存器(地址0xE60E)的位0至位8来实现。可使用CF1、CF2或CF3。

要提高校准速度，可在CF1、CF2和CF3上同时输出多个不同测量值或通道，并行执行的校准最多为三项。这样一来，可以同时校准所有三个相。

图4显示了功率测量的校准流程。使用该流程确定校准程序。

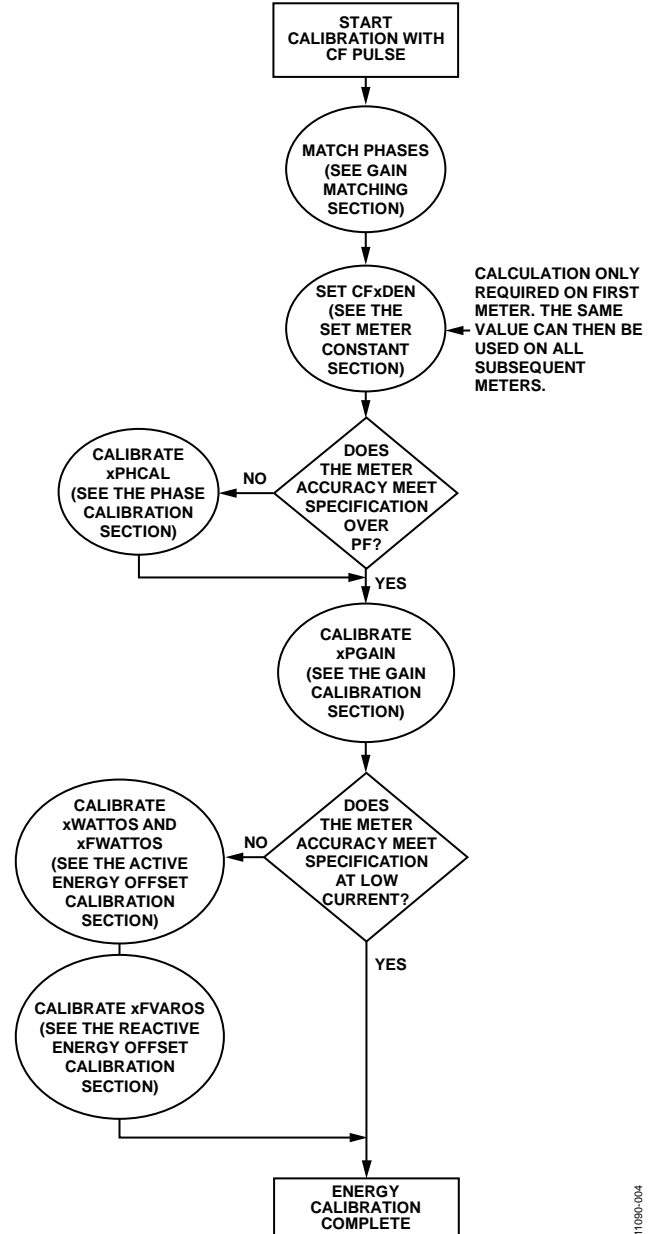


图4. 功率校准流程

增益匹配

表5. xGAIN

校准寄存器	地址
AIGAIN	0x4380
BIGAIN	0x4382
CIGAIN	0x4384
AVGAIN	0x4381
BVGAIN	0x4383
CVGAIN	0x4385

在校准之前匹配所有三个相是很方便的。匹配这些相会使计算更加容易，因为CF输出上的一个脉冲对各相都具有相同权重。建议将执行相位匹配作为第一个校准步骤。

为了将相电流B和相电流C与相电流A匹配，应该对所有相电流施加相同的固定输入电流。由于电表尚未校准，建议施加信号的幅度在满量程与100:1之间。然后，电流有效值读数可用于确定相电流之间是否存在任何误差。随后可使用BIGAIN寄存器(地址0x4382)和CIGAIN寄存器(地址0x4384)校正此误差。

以下公式描述了如何用BIGAIN寄存器和CIGAIN寄存器分别调节BIRMS读数和CIRMS读数，以便匹配AIRMS读数：

$$BIGAIN = 2^{23} \times \left[\frac{AIRMS}{BIRMS} - 1 \right]$$

$$CIGAIN = 2^{23} \times \left[\frac{AIRMS}{CIRMS} - 1 \right]$$

建议与过零中断事件同步进行xIRMS测量，这样可以减少纹波。此外还建议执行一些均值计算，以便获取更稳定的读数。

随后可将相同程序用于电压通道，以匹配xVRMS读数。可使用电压通道增益寄存器BVGAIN(地址0x4383)和CVGAIN(地址0x4385)，从而分别将BVRMS和CVRMS与AVRMS测量值进行匹配。

$$BVGAIN = 2^{23} \times \left[\frac{AVRMS}{BVRMS} - 1 \right]$$

$$CVGAIN = 2^{23} \times \left[\frac{AVRMS}{CVRMS} - 1 \right]$$

完成此步骤后，所有的相电流和所有的相电压都会拥有同样的权重。

功率校准

表6. CFxDEN

校准寄存器	地址
CF1DEN	0xE611
CF2DEN	0xE612
CF3DEN	0xE613

CFx脉冲输出可配置为每个脉冲代表kWh的一部分。此关系称为电表常数。通常，设计规格需要提供特定电表常数，以便允许公用事业公司验证不同制造商电表的精度。典型电表常数为1600 imp/kWh、3200 imp/kWh和6400 imp/kWh。如果设计不需要特定电表常数的电表，可选择任意值。

CFx输出使用除法器CFxDEN来配置。该除法器根据电表常数以及电流和电压通道上的标称比例进行计算。

假定需要3200 imp/kWh的电表常数，可在给定负载下确定预期CFx。

在220 V和10 A负载下，功率因数为0.5，则CFx输出频率计算如下：

$$CF_{\text{预期}} = \frac{\text{电表常数 [imp/kWh]} \times \text{负载 [kW]}}{3600 \text{ s/h}}$$

$$CF_{\text{预期}} = \frac{3200 \text{ imp/kWh} \times 220 \text{ V} \times 10 \text{ A} / 1000 \times \cos(60)}{3600 \text{ s/h}} = 0.97778 \text{ Hz}$$

选择CFxDEN，在给定负载条件下获得0.97778的频率。这可以通过确定输入引脚上的量程来完成。

图5显示了标准电压通道输入网络。

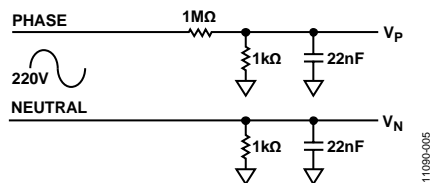


图5. 电压通道输入

$$V_p = V_{\text{INPUT_MAX}} \times \frac{1 \text{ k}\Omega}{(1000 + 1) \text{ k}\Omega} = (220 \text{ V} \times \sqrt{2}) \times \frac{1}{(1000 + 1)} = 0.311 \text{ mV}$$

$$V_{\text{AS\% OF FULLSCALE}} = \frac{0.311}{0.5} \times 100 = 62.29\%$$

在220 V rms的电压通道幅度下，输入以满量程的62.29%工作。图6显示了典型的电流通道配置。假设CT匝数比为

2500:1，负载电阻为20 Ω，电流通道幅度为10 A rms，则输入端以满量程的16%工作。

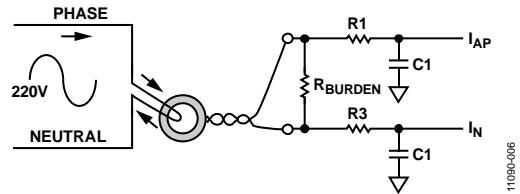


图6. 电流通道输入

$$I_{\text{CT副边}} = 10 \text{ A} / 2500 = 0.004 \text{ A}$$

$$V_{\text{负载两端}} = I \times R = 0.004 \times 20 = 0.08 \text{ V}$$

$$I_{\text{满量程的百分比}} = \frac{0.08}{0.5} \times 100 = 16\%$$

根据ADE7880数据手册，假设WTHR=3，那么，采用满量程模拟输入时，最大CFx输出为68.818 kHz。应用的PF为0.5时，此结果将减小到34.409 kHz。要在给定的220 V、10 A且PF=0.5的输入条件下获得0.9778 Hz，CF分母应设置为0xDB3，如下所示：

$$CFxDEN = \frac{\text{输出频率}_{\text{满量程}} \times V_{\text{工作百分比}} \times I_{\text{工作百分比}}}{CF_{\text{预期}}}$$

$$CFxDEN = \frac{34.409 \text{ kHz} \times 62.29\% \times 16\%}{0.97778 \text{ Hz}} = 0xDB3$$

记住，在上述条件下，向CFxDEN寄存器中写入0xDB3可将CF输出设置为约0.97778 Hz。此CFxDEN设置现在可在每个电表上使用。增益校准方法可提供分辨率更高的校准，应在每个电表上执行，确保精确满足0.97778 Hz。

相位校准(可选)

表7. xPHCAL

校准寄存器	地址
APHCAL	0xE614
BPHCAL	0xE615
CPHCAL	0xE616

使用电流互感器(CT)时需要相位校准，以消除传感器引起的任何相移。CT可增加显著相移，在低功率因数下引起较大误差。如果使用的电流传感器不引起相位延迟，则通常不需要校准，因为ADE7880具有很好的相位匹配度。

理想情况下相位校准使用感性或容性负载，以0.5的功率因数来执行。如果该负载不可用，可选择另一功率因数。为获得最佳结果，功率因数应尽可能接近0.5。为了在一个步骤中利用一次读数执行相位校准，必须同时测量有功功率和无功率。以下公式表明了如何确定相位误差(单位为度)。

$$\text{误差}(\text{°}) = \tan^{-1} \left(\frac{CF_{\text{有功}} \sin(\varphi) - CF_{\text{无功}} \cos(\varphi)}{CF_{\text{无功}} \sin(\varphi) + CF_{\text{有功}} \cos(\varphi)} \right)$$

其中：

φ 表示电压与电流间的角度(单位为度)。

确定误差度数之后，可利用以下公式来确定所需的相位补偿。

$$\text{相位分辨率} = \left(\frac{360^\circ \times f}{1.024 \text{ MHz}} \right)$$

$$\text{相位补偿} = \text{abs} \left(\frac{\text{误差}(\text{°})}{\text{相位分辨率}} \right)$$

其中：

f 表示线路频率。

注意，APHCAL寄存器的格式如下：如果误差度数值为正，则必须向计算出的相位补偿值加上512d值，然后才能写入APHCAL寄存器中。

APHCAL =

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{误差}(\text{°}) \leq 0, \Rightarrow \text{APHCAL} = \text{相位补偿} \\ \text{误差}(\text{°}) > 0, \Rightarrow \text{APHCAL} = \text{相位补偿} + 512 \end{array} \right\}$$

例如，在220 V、10 A负载下，功率因数为0.5，如果总的有功功率CFx输出频率为0.9709 Hz，仅基波无功功率CFx输出频率为1.7347 Hz：

$$\text{误差}(\text{°}) = \tan^{-1} \left(\frac{0.9709 \sin(60) - 1.7347 \cos(60)}{1.7347 \sin(60) + 0.9709 \cos(60)} \right) = -0.76^\circ$$

假设线路频率为50 Hz，则可通过以下公式确定APHCAL补偿

相位补偿 =

$$\text{abs} \left[\left(\frac{-0.76}{360^\circ \times 50} \right) \times 1.024 \text{ MHz} \right] = 0 \times 2B$$

APHCAL = 相位补偿 = $0 \times 2B$

根据用于相A、B和C的电流传感器，APHCAL和BPHCAL可能需要不同的相位校准值。

增益校准

表8. xPGAIN

校准寄存器	地址
APGAIN	0x4389
BPGAIN	0x438B
CPGAIN	0x438D

功率增益校准的目的是补偿小增益误差，这由内部基准电压源和外部元件的器件间差异(例如晶体造成的时间误差)引起。每个电表都需要增益校准，并使用标称电压和电流输入，以功率因数0.5来执行。总有功功率、基波有功功率、无功功率和视在功率均在内部进行增益匹配。因此，需要通过一个增益校准步骤来校准单个相上的所有功率。本部分介绍如何利用总有功功率校准增益；但是，也可以在CFx输出端输出其他任意功率值，以便进行校准。

如表6所述，预期CF输出由电表常数决定。测量实际CF输出，并使用APGAIN寄存器调节任何误差。以下公式描述了这种关系：

$$APGAIN = 2^{23} \times \left[\frac{CF_{\text{EXPECTED}}}{CF_{\text{ACTUAL}}} - 1 \right]$$

使用以上示例，在220 V和10 A负载下，预期CF为0.97778 Hz。假设实际测得的CF为0.9937 Hz，则APGAIN用下式计算

$$APGAIN = 2^{23} \times \left[\frac{0.97778}{0.9937} - 1 \right] = 0x\text{FDF3B0}$$

BPGAIN和CPGAIN寄存器分别控制相B和相C的增益校准。假定通道正确匹配，如“增益匹配”部分所述，以上程序不需要为相B或相C重复。将为APGAIN算出的值写入BPGAIN和CPGAIN中，以便获得精确的结果。只是基波无功功率和视在功率也受xPGAIN校准的影响。由于所有功率计算都在内部进行增益匹配，因此设置xPGAIN寄存器将会对所有功率测量结果进行增益校准。

总有功功率和仅基波有功功率的失调校准(可选)

表9. xWATTOS

校准寄存器	地址
AWATTOS	0x438A
BWATTOS	0x438C
CWATTOS	0x438E
AFWATTOS	0x43A2
BFWATTOS	0x43A3
CFWATTOS	0x43A4

有功功率失调校准仅适用于低负载下的精度在失调校准前超出所需规格的情况。

为了校正任何在低电流水平下可能降低测量精度的电压/电流通道串扰，应执行有功功率失调校准。应用最小预期电流信号，以便测量并消除失调幅度。切勿在输入端接地时执行失调校准，因为精确测量失调必须使用低电平信号。

AN-1171

此示例中，施加100 mA的输入电流以执行失调校准。当电压通道输入为220 V、功率因数为1时，预期CFx输出频率由下式确定：

$$CF_{EXPECTED} = \frac{3200 \text{ imp/kWh} \times 220 \text{ V} \times 0.1 \text{ A} / 1000 \times \cos(0)}{3600 \text{ s/h}} \\ = 0.0195556 \text{ Hz}$$

如果实际CF频率为0.01947，则失调引起的误差百分比由下式决定：

$$\% \text{ 误差} = \frac{0.01947 - 0.0195556}{0.0195556} = -0.4377\%$$

功率测量中的失调依据以下公式校正：

$$AWATTOS = \\ -\% \text{ 误差} \times CF_{预期} \times CFxDEN \times \frac{\text{阈值}}{8 \text{ kHz} \times 128}$$

其中“阈值”由8位WTHR寄存器连接至相当于0的内部27位得到的值形成。

因此，如果WTHR设置为默认值3h，阈值将为18000000h。

$$AWATTOS = \\ -0.004377 \times 0.0195556 \times 0xDB3 \times \frac{0x18000000}{8 \text{ kHz} \times 128} \\ = 0x76$$

就像AWATTOS寄存器影响总有功功率失调一样，AFWATTOS寄存器也以相同方式影响着仅基波有功功率失调。通常，为AWATTOS计算出的同一个值可以写入AFWATTOS中，以便进行精确的计算。

根据电路板布局和电表设计中的串扰，相位B和相位C可能需要不同的失调校准。对于相位B，可通过BWATTOS和BFWATTOS寄存器实现；对于相位C，则可通过CWATTOS和CFWATTOS寄存器实现。

无功功率失调校准(可选)

通常，为xWATTOS寄存器计算的值也可用于xVAROS寄存器，以便得到精确的结果。

表10. xFVAROS

校准寄存器	地址
AFVAROS	0x43A5
BFVAROS	0x43A6
CFVAROS	0x43A7

仅基波无功功率失调校准仅适用于低负载下的精度在失调校准前超出所需规格的情况。

为了校正任何在低电流水平下可能降低测量精度的电压/电流通道的串扰，应执行仅基波无功功率失调校准。必须在功率因数0下施加低电平电流信号，以便测量并消除失调幅度。

与总有功功率及基波有功功率类似，仅基波无功功率失调可根据以下公式校正：

$$AFVAROS = \\ -\% \text{ 误差} \times VARCF_{预期} \times CFxDEN \times \frac{\text{阈值}}{8 \text{ kHz} \times 128}$$

其中“阈值”由8位WTHR寄存器连接至相当于0的内部27位得到的值形成。因此，如果WTHR设置为默认值3h，阈值将为18000000h。

根据电路板布局和电表设计中的串扰，相B和相C可能需要不同的失调校准。这一点分别可通过BFVAROS和CFVAROS寄存器实现。就像AFVAROS影响通道A的仅基波无功功率CF输出一样，BFVAROS和CFVAROS也以相同方式校正相B和相C的仅基波无功功率CF输出。

谐波失调校准

无需校准单独的谐波测量即可实现额定精度。

电流和电压有效值

校准电压和电流有效值仅适用于需要瞬时有效值读数的情况。使用瞬时有效值寄存器读数执行有效值校准。可从AIRMS寄存器、BIRMS寄存器和CIRMS寄存器获得电流读数。可从AVRMS寄存器、BVRMS寄存器和CVRMS寄存器获得电压读数。本校准不使用CFx脉冲输出。为增加稳定性，将有效值寄存器读数与ZX测量同步。这将减少由内部滤波不理想引起的读数内纹波效应。有关过零检测的详情，请参见ADE7880数据手册。

有效值增益

假设已按照“增益匹配”部分所述执行通道匹配，对于xIRMS或xVRMS测量，则应无需进一步的增益校准。利用V/LSB和Amps/LSB常数，可以将xIRMS和xVRMS寄存器的读数转换为单位分别为安培和伏特的电流和电压值。此程序由微控制器执行，得到的常数必须存储在微控制器中。可通过以下公式计算这些常数：

$$V \text{ 常数 [V/LSB]} = \frac{\text{输入电压 [V]}}{VRMS \text{ [LSB]}}$$

$$I \text{ 常数 [Amps/LSB]} = \frac{\text{输入电流 [A]}}{IRMS \text{ [LSB]}}$$

由于所有电表上的所有相位都匹配，因此同一常数可用于所有电表上的所有电流有效值和电压有效值读数。此常数应该存储在微控制器中。如果不方便存储此常数或需要一个常数，则可利用xIGAIN和xVGAIN寄存器调节常数。

$$xVGAIN = \frac{\text{输入电压 [V]} \times 2^{23}}{V \text{ 常数 [V/LSB]} \times xVRMS \text{ [LSB]}}$$

$$xIGAIN = \frac{\text{输入电流 [I]} \times 2^{23}}{I \text{ 常数 [Amps/LSB]} \times xIRMS \text{ [LSB]}}$$

注意，对xIGAIN寄存器和xVGAIN寄存器的任意调节都会影响所有测量，包括有功功率和无功功率。因此，对xIGAIN或xVAGIN寄存器的任意调节都应该在校准功率之前进行。

有效值失调

表11. xRMSOS

校准寄存器	地址
AIRMSOS	0x438F
AVRMSOS	0x4390
BIRMSOS	0x4391
BVRMSOS	0x4392
CIRMSOS	0x4393
CVRMSOS	0x4394

为在低信号电平下获得精确读数，可能必须校准电流和电压有效值失调。该校准使用内部xVRMSOS和xIRMSOS寄存器来完成，寄存器在平方根函数前应用失调。补偿系数通过应用下式来确定：

$$xVRMSOS = \frac{xVRMS_{EXPECTED}^2 - xVRMS_{ACTUAL}^2}{128}$$

$$xIRMSOS = \frac{xIRMS_{EXPECTED}^2 - xIRMS_{ACTUAL}^2}{128}$$

如图7所示，有效值失调校准基于两点，其中预期读数使用标称输入从有效值测量值导出。

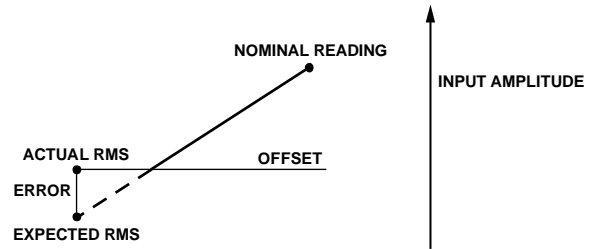


图7. 有效值读数

11090-007

有效值测量结果是在1000:1的动态范围内指定的。这是让测量保持精确的最小输入电平，也是应进行失调校准的最小点。此示例中，电压有效值失调在22 V下校准，电流有效值失调在100 mA下校准。为确定预期有效值读数，以标称电流和标称电压执行测量。接着该读数应按比例缩小，以获得校准点的预期值。

例如：

$I_{\text{标称}}$ (10 A)时的读数为613390

I_{CAL} (100 mA)时的预期读数为 $(0.1/10) \times 613390 = 6134$

I_{CAL} (100 mA)时获得的实际读数为6349

因此，

$$IRMSOS = \frac{6134^2 - 6349^2}{128} = 0xFFAE18$$

电压有效值失调以类似方式进行校准。

例如：

$V_{\text{标称}}$ (220 V)时的读数为2273500

V_{CAL} (22 V)时的预期读数为 $(22/220) \times 2273500 = 227350$

V_{CAL} (22 V)时获得的实际读数为226595

因此，

$$VRMSOS = \frac{227350^2 - 226595^2}{128} = 0x28DB3E$$

利用电能寄存器进行校准

本部分说明使用内部电能寄存器时的校准程序和计算。内部电能寄存器通过SPI或I2C接口提供接入电能计量测量(详情参见ADE7880数据手册)。

如果使用内部电能寄存器来校准,应使用精确源。通过内部寄存器校准通常在最终电表设计不需要CF脉冲时执行。图1显示了CF输出与电能寄存器间的关系。图8显示了功率测量的校准流程。使用该流程图确定校准程序。

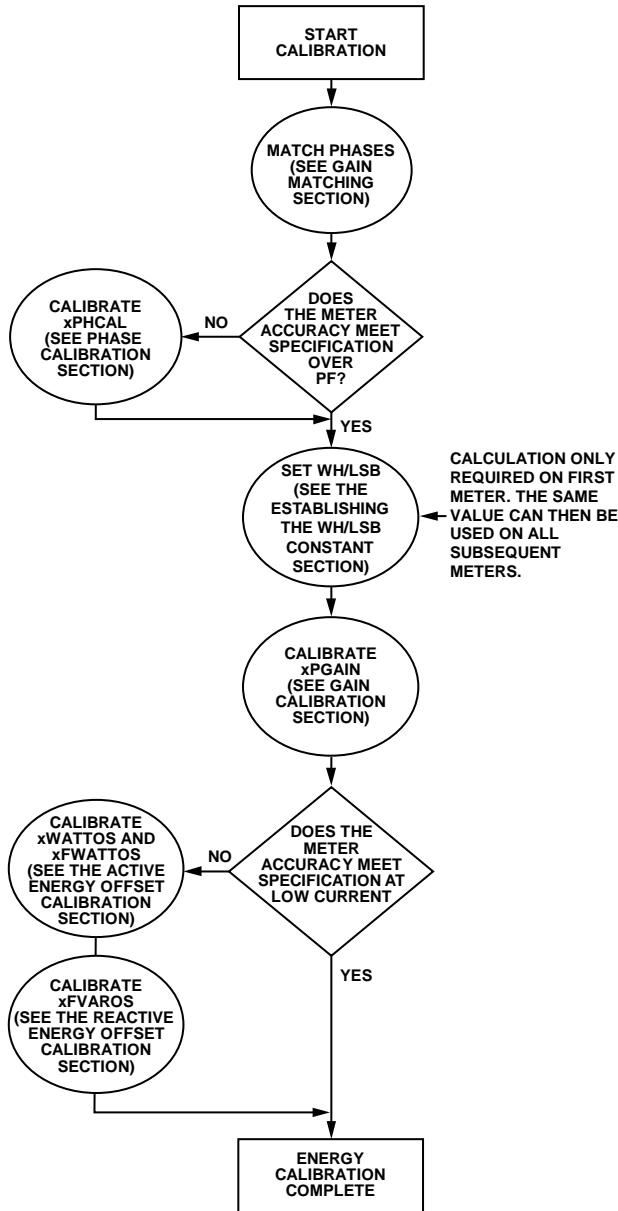


图8. 有功功率校准流程

增益匹配

在校准之前匹配所有三个相位是很方便的。匹配这些相位会使计算更加容易,因为功率中的一个位对每个相位都具有相同权重。建议将执行相位匹配作为第一个校准步骤。有关匹配相位的详情,请参见“增益匹配”部分。

相位校准(可选)

表12. xPHCAL

校准寄存器	地址
APHCAL	0xE614
BPHCAL	0xE615
CPHCAL	0xE616

如果当前正使用的传感器会引起相移,则需进行相位校准。CT可增加显著相移,在低功率因数下引起较大误差。相位校准应在增益或失调校准前进行,因为较大的相位校正会改变ADE7880的增益响应。

相位校准可使用单个感性或容性负载,以0.5的功率因数来执行。如果该负载不可用,可选择另一功率因数;但是,为获得最佳结果,功率因数应尽可能接近0.5。以下公式说明了如何确定相位误差度数,其中φ表示电压与电流间的角度(单位为度)。

$$\text{误差}(\text{°}) = \tan^{-1} \left(\frac{AWATTHR \sin(\varphi) - AVARHR \cos(\varphi)}{AVARHR \sin(\varphi) + AWATTHR \cos(\varphi)} \right)$$

其中:

φ表示电压与电流间的角度(单位为度)。

确定误差度数之后,可利用以下公式来确定所需的相位补偿:

$$\text{相位分辨率} = \left(\frac{360 \times f}{1.024 \text{ MHz}} \right)$$

$$\text{相位补偿} = \text{abs} \left(\frac{\text{误差}(\text{°})}{\text{相位分辨率}} \right)$$

其中:

f表示线路频率。

注意,APHCAL寄存器的格式如下:如果误差度数值为正,则必须向计算出的相位补偿值加上512d值,然后才能写入APHCAL寄存器中。

11096-008

$$\text{APHCAL} = \begin{cases} \text{误差}(\circ) \leq 0, \Rightarrow \text{APHCAL} = \text{相位补偿} \\ \text{误差}(\circ) > 0, \Rightarrow \text{APHCAL} = \text{相位补偿} + 512 \end{cases}$$

例如，假设在220 V、10 A的负载下，功率因数为0.5，AWATTHR值为3384，AVARHR为5663，则误差度数计算如下：

$$\text{误差}(\circ) = \tan^{-1} \left(\frac{3384 \sin(60) - 5663 \cos(60)}{5663 \sin(60) + 3384 \cos(60)} \right) = +0.86^\circ$$

假设线路频率为50 Hz，则可通过以下公式确定APHCAL补偿：

相位补偿 =

$$\text{abs} \left[\left(\frac{+0.86}{360^\circ \times 50} \right) \times 1.024 \text{ MHz} \right] = 0 \times 31$$

$$\text{APHCAL} = \text{相位补偿} + 512 = 0 \times 231$$

根据用于相A、B和C的电流传感器，APHCAL、BPHCAL和CPHCAL可能需要不同的相位校准值。

建立Wh/LSB常数—仅适用于第一个电表

校准第一个电表时，必须确定Wh/LSB。Wh/LSB常数用于在有功功率寄存器内设置每个LSB的权重。该常数可将电能寄存器读数转换为真实值。

建立后，同样的Wh/LSB电表可用于后续每个电表。通常会在设计规格中指明电能寄存器内每个LSB的加权。如果未提供规格，则用户可以选择加权。可以使用下式来确定Wh/LSB常数：

$$\text{Wh / LSB} = \frac{\text{负载 (W)} \times \text{累加时间(秒)}}{x\text{WATTHR} \times 3600}$$

其中：

“累加时间”是线路周期累加时间。

$x\text{WATTHR}$ 是累加时间过去后的电能寄存器读数。

例如，如果线路周期值设置为100，输入信号频率为50 Hz，假设针对过零检测只选择了一个相(LCYCMODE位4:6)，则累加时间为1秒($0.5 \times (1/50) \times 100$)。在220 V、10 A的负载下，功率因数为0.5时，这会产生3299的AWATTHR读数。Wh/LSB常数的计算如下：

$$\text{Wh / LSB} = \frac{220 \text{ V} \times 10 \text{ A} \times \cos(60) \times 1 \text{ sec}}{3299 \times 3600} = 9.6262 \times 10^{-5}$$

如果用户希望调节常数以满足特定规格，或将常数四舍五入得更易于存储，则可使用APGAIN寄存器。APGAIN寄

存器可用于将Wh/LSB常数修改±100%。APGAIN寄存器会影响AWATTHR寄存器，如下式所示：

$$\text{APGAIN} = 2^{23} \times \left[\frac{\text{AWATTHR}_{\text{预期}}}{\text{AWATTHR}_{\text{实际}}} - 1 \right]$$

为实现不同的电表常数，必须根据所需的Wh/LSB改变AWATTHR读数。

$$\text{AWATTHR}_{\text{预期}} = \frac{\text{负载 (W)} \times \text{累加时间(秒)}}{\text{Wh / LSB} \times 3600}$$

例如，要将先前计算的Wh/LSB常数 9.6262×10^{-5} 改为 9×10^{-5} ，以方便存储，所需的AWATTHR读数为

$$\text{AWATTHR}_{\text{预期}} = \frac{220 \text{ V} \times 10 \text{ A} \times \cos(60) \times 1 \text{ sec}}{9 \times 10^{-5} \times 3600} = 3395 \text{ d}$$

因此，所需的PWGAIN值为

$$\text{APGAIN} = 2^{23} \times \left[\frac{3395}{3299} - 1 \right] = 0 \times 3 \text{ AF} 52$$

功率增益校准

表13. xPGAIN

校准寄存器	地址
APGAIN	0x4389
BPGAIN	0x438B
CPGAIN	0x438D

有功功率增益校准的目的是补偿小增益误差，这由内部基准电压和外部元件的器件间差异(例如晶体造成的时间误差)引起。每个电表都需要增益校准，并使用标称电压和电流输入，以功率因数0.5来执行。总有功功率、基波有功功率、无功功率和视在功率均在内部进行增益匹配。因此，需要通过一个增益校准步骤来校准单个相位上的所有功率。

为简明起见，建议校准所有电表以使用相同的Wh/LSB值，且应在第一个电表中设置，如“建立Wh/LSB常数——仅适用于第一个电表部分所述。”使用下式确定AWATTHR寄存器内的预期读数：

$$\text{AWATTHR}_{\text{预期}} = \frac{\text{负载 (W)} \times \text{累加时间(秒)}}{\text{Wh / LSB} \times 3600 \text{ s / h}}$$

实际值可从AWATTHR寄存器读取，而APGAIN寄存器可用于校正任何误差。以下公式显示了如何利用APGAIN调节AWATTHR读数：

$$\text{APGAIN} = 2^{23} \times \left[\frac{\text{AWATTHR}_{\text{EXPECTED}}}{\text{AWATTHR}_{\text{ACTUAL}}} - 1 \right]$$

AN-1171

根据以上示例，在220 V、10 A的负载下，预期AWATTHR读数为3395d。假定实际AWATTHR读数为3380d，则APGAIN计算如下

$$AWGAIN = 2^{23} \times \left[\frac{3395}{3380} - 1 \right] = 0x916C$$

注意，相位B和相位C的增益校准分别由BPGAIN和CPGAIN寄存器控制。假定通道正确匹配，如“增益匹配”部分所述，以上程序不需要为其他通道重复。

将为APGAIN算出的值写入BPGAIN和CWGAIN中，以便获得精确的结果。由于所有功率计算都在内部进行增益匹配，因此设置xPGAIN寄存器将会对所有功率测量结果进行增益校准。

总有功率和仅基波有功功率的失调校准(可选)

表14. xWATTOS

校准寄存器	地址
AWATTOS	0x438A
BWATTOS	0x438C
CWATTOS	0x438E
AFWATTOS	0x43A2
BFWATTOS	0x43A3
CFWATTOS	0x43A4

总有功率和仅基波有功功率的失调校准仅适用于低负载下的精度在失调校准前超出所需规格的情况。

为了校正任何在低电流水平下可能降低测量精度的电压/电流通道串扰，应执行有功功率失调校准。必须施加小电流信号，以便测量并消除失调幅度。

执行失调校准时，通常需要增加累加时间以尽可能减少分辨率误差。因为线路周期累加模式在固定时间内累加电能，结果精确至±1 LSB。如果xWATTHR寄存器内累加的位数在此时间后较小，±1 LSB误差可导致输出端的较大误差。例如，如果xWATTHR寄存器内仅累加10位，分辨率误差为10%。将累加位数增加至1000可将分辨率误差降低至0.1%。

以下示例中，将LINECYC设置为5000个半线路周期，并施加100 mA的输入电流。当电压通道输入为220 V、功率因数为1时，预期AWATTHR读数由下式决定

$$AWATTHR_{EXPECTED} = \frac{220 \text{ V} \times 0.1 \text{ A} \times \cos(0) \times 50 \text{ sec}}{9 \times 10^{-5} \times 3600} = 3395$$

如果100 mA负载下的实际AWATTHR寄存器读数为3380，失调引起的误差百分比将由下式决定

$$\% \text{误差} = \frac{3380 - 3395}{3395} = -0.44\%$$

功率测量中的失调依据下式校正：

$$AWATTOS = -\% \text{误差} \times \frac{AWATTHR_{预期}}{\text{累加时间(秒)}} \times \frac{\text{阈值}}{8 \text{ kHz} \times 128}$$

其中：

“阈值”由8位WTHR寄存器连接至相当于0的内部27位得到的值形成。因此，如果WTHR设置为默认值3h，阈值将为18000000h。

$$AWATTOS = 0.0044 \times \frac{3395}{50} \times \frac{0x18000000}{8 \text{ kHz} \times 128} = 0x76$$

就像AWATTOS寄存器影响总有功率失调一样，AFWATTOS寄存器也以相同方式影响着仅基波有功功率失调。

根据电路板布局 and 电表设计中的串扰，相B和相C可能需要不同的失调校准。对于相B，可通过BWATTOS和BFWATTOS寄存器实现；对于相C，则可通过CWATTOS和CFWATTOS寄存器实现。

仅基波无功功率失调校准

表15. xFVAROS

校准寄存器	地址
AFVAROS	0x43A5
BFVAROS	0x43A6
CFVAROS	0x43A7

仅基波无功功率失调校准仅适用于低负载下的精度在失调校准前超出所需规格的情况。

为了校正任何在低电流水平下可能降低测量精度的电压/电流通道串扰，应执行无功功率失调校准。必须施加小电流信号，以便测量并消除失调幅度。

执行失调校准时，通常需要增加累加时间以尽可能减少分辨率误差。因为线路周期累加模式在固定时间内累加电能，结果精确至±1 LSB。如果xVARHR寄存器内累加的位数在此时间后较小，±1 LSB误差可导致输出端的较大误差。

例如，如果xVARHR寄存器内仅累加10位，分辨率误差为10%。将累加位数增加至1000可将分辨率误差降低至0.1%。预期xVARHR读数按以下公式确定

$$A_{VARHR_{预期}} = \frac{\text{负载 (VAR)} \times \text{累加时间(秒)}}{\text{VARhr} / \text{LSB} \times 3600 \text{ s/h}}$$

无功功率测量中的失调依据以下公式校正：

$$A_{WATTOS} = -\% \text{误差} \times \frac{A_{FVARHR_{预期}} \times \text{阈值}}{\text{累加时间(秒)} \times 8 \text{ kHz} \times 128}$$

其中：

“阈值”由8位WTHR寄存器连接至相当于0的内部27位得到的值形成。

因此，如果WTHR设置为默认值3h，阈值将为18000000h。

注意，根据电路板布局和电表设计中的串扰，相B和相C可能需要不同的失调校准。这一点可通过BFVAROS和CFVAROS寄存器实现。这些寄存器校正相应xVARTHR寄存器读数的方式与AFVAROS影响AWATTHR寄存器读数的方式相同。

谐波失调校准

无需校准单独的谐波测量即可实现额定精度。

电流和电压有效值

校准电压和电流有效值仅适用于需要瞬时有效值读数的情况。使用瞬时有效值寄存器读数执行有效值校准。有关校准电流和电压有效值的详情，请参见“电流和电压有效值”部分。

注释