

## 校准基于ADE7953的单相电表

作者: Aileen Ritchie

### 简介

本应用笔记说明如何校准ADE7953，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。

ADE7953是一款高精度单相计量IC，可同时测量火线电流

和零线电流。它可以测量各种功率，包括有功、无功和视在功率，并能提供电流和电压均方根读数。另外提供多样的电能检测功能，包括无负载、反向功率情形下的测量，另外还包括直接功率因数测量。ADE7953可以通过SPI、I<sup>2</sup>C和UART接口进行访问。

目录

简介 .....	1	使用CF输出校准电流和电压均方根 .....	8
修订历史 .....	2	使用CF输出进行视在功率校准 .....	9
校准ADE7953 .....	3	使用CF输出设计防窃电电表.....	10
校准步骤 .....	3	校准内部电能寄存器 .....	11
校准方法(CF输出或寄存器).....	3	使用电能寄存器进行有功功率校准 .....	11
校准设置 .....	4	使用电能寄存器进行电流通道B增益匹配 .....	11
校准CF脉冲输出 .....	5	使用电能寄存器进行无功功率校准 .....	13
使用CF输出进行有功功率校准 .....	5	使用电能寄存器校准电流和电压均方根 .....	14
使用CF输出进行电流通道B增益匹配 .....	5	使用电能寄存器进行视在功率校准 .....	14
使用CF输出进行无功功率校准 .....	7		

修订历史

2011年6月—修订版0：初始版

# 校准ADE7953

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，ADE7953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ADE7953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，该表仅作为一般指导原则。决定是否需要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)

ADE7953可通过读取内部电能寄存器或测量外部CF输出脉冲来校准。两种测量方法之间的关系如图1所示。

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

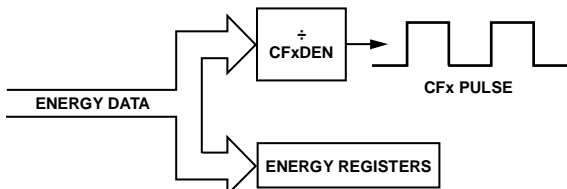


图1. 获取电能数据

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

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校准设备(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	使用CT时通常需要。 使用分流时不一定需要。
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

两种校准设置可用于校准ADE7953：标准参考电表和标准参考源。使用标准参考电表时，必须使用CF输出校准法。使用标准参考源时，CF输出或电能寄存器均可使用。两种校准设置的更多信息参见“标准参考电表”部分和“标准参考源”部分。

标准参考电表

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

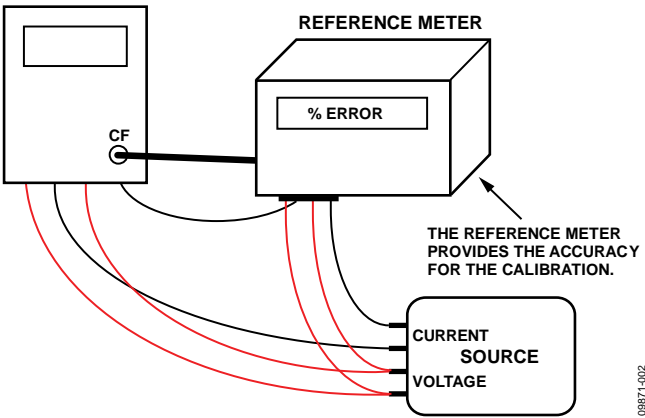


图2. 标准参考电表配置

使用标准参考电表时，需要来源为电表提供所需输入；不过来源精度并不重要，因为决定校准结果的是标准参考电表。通常，标准参考电表比标准参考源更经济，因此是最常用的校准方法。

标准参考源

第二种校准方法是使用标准参考源执行校准。如果使用标准参考源，CF输出或电能寄存器均可用于获取电能数据。标准参考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显示采用标准参考源的典型设置。

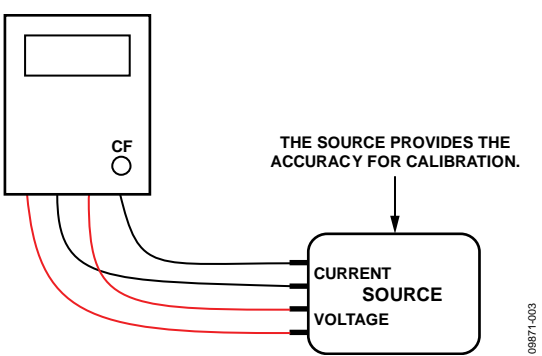


图3. 标准参考源

标准参考源通常比标准参考电表更昂贵，因此是不太常用的校准方法。

“校准CF脉冲输出”部分解释如何使用CF脉冲进行校准，“校准内部电能寄存器”部分解释如何使用电能寄存器进行校准。

## 校准CF脉冲输出

为了获得精确读数，有功、无功和视在功率以及电流和电压均方根必须进行校准。所有信号路径都是独立的，因此应对完成电表所需的测量值执行校准。

使用脉冲输出进行校准时，CFx引脚必须配置为输出正确的测量值以及用于该特定校准的通道。例如，在通道A上校准有功功率时，应将CF1或CF2配置为与通道A上的有功功率成正比。这可以通过设置ADE7953 CFMODE寄存器的位0至位7(地址0x107)来实现。CF1或CF2均可使用。要提高校准速度，可在CF1和CF2上同时输出两个不同测量值或通道，并行地执行两次校准。

### 使用CF输出进行有功功率校准

图4显示了有功功率测量的校准流程。使用该流程确定校准程序。

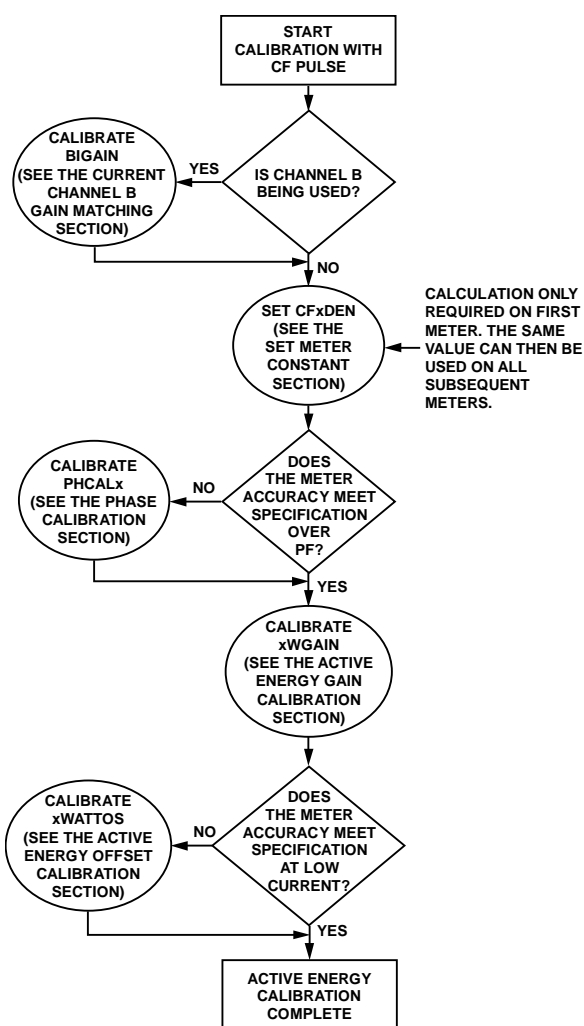


图4. 有功功率校准流程

### 使用CF输出进行电流通道B增益匹配

当使用第二个电流输入通道(通道B)时，可以很方便地将输出与通道A相匹配。匹配这些通道会使计算更加容易，因为电能寄存器内的一位与CF输出上的一个脉冲对各通道具有相同权重。建议将执行通道匹配作为第一个校准步骤。

为了匹配电流通道B与通道A，应对两个通道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。电流均方根读数可用于确定两个通道间是否存在任何误差。此误差随后可使用ADE7953 BIGAIN寄存器校正(地址0x28C和地址0x38C)。以下公式描述如何用BIGAIN寄存器调节IRMSB读数以匹配IRMSA：

$$BIGAIN = \left[ 0x400000 \times \frac{IRMSA}{IRMSB} \right]$$

如果在均方根测量值中发现显著读数差异，可通过额外滤波来改善校准精度。将CONFIG寄存器内的PWR\_LPF\_SEL位(地址0x102)设置为11b便可实现此滤波。

### 设置电表常数

使用ADE7953的内部寄存器，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1，则CFx输出频率计算如下：

$$CF_{EXPECTED} = \frac{Meter\ Constant [imp/kWh] \times Load [kW]}{3600 s/h}$$

$$CF_{EXPECTED} = \frac{3200\ imp/kWh \times 220\ V \times 10\ A / 1000 \times \cos(0)}{3600 s/h}$$

$$= 1.95556\ Hz$$

选择CFxDEN，在给定负载条件下获得1.9556 Hz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。

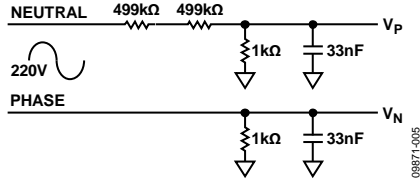


图5. 电压通道输入

$$V_P = V_{INPUT\_MAX} \times \frac{1 \text{ k}\Omega}{(2 \times 499 + 1) \text{ k}\Omega} =$$

$$(220 \text{ V} \times \sqrt{2}) \times \frac{1}{(2 \times 499 + 1)} = 0.311 \text{ mV}$$

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

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ADE7953电流通道配置。电流通道幅度为10 A rms，内部增益为16时，输入以满量程的15.84%工作。

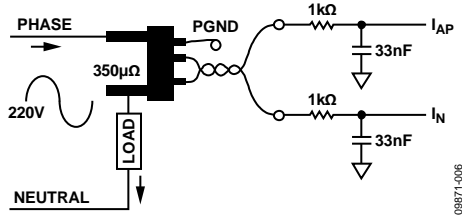


图6. 电流通道输入

$$V_{ACROSS \text{ SHUNT}} = I \times R$$

$$= (10 \times \sqrt{2}) \times (350 \times 10^{-6}) = 0.0495 \text{ V}$$

$$= X \text{ Gain } 16 = 0.0495 \times 16 = 0.079 \text{ V}$$

$$I_{AS \% \text{ OF FULL SCALE}} = \frac{0.079}{5.0} \times 100 = 15.84\%$$

根据ADE7953数据手册，满量程输入下的预期CFx引脚输出频率为210 kHz。

要用给定的220 V、10 A输入获得1.9556 Hz，CF分母应设置为0x2963，如下所示：

$$CFxDEN = \frac{Output \text{ Freq}_{FULLSCALE} \times V_{OPERATING\%} \times I_{OPERATING\%}}{CF_{EXPECTED}}$$

$$CFxDEN = \frac{210 \text{ kHz} \times 62.29\% \times 15.84\%}{1.9556 \text{ Hz}} = 0x2963$$

如上所示，在前述条件下，将0x2963写入CFxDEN寄存器可将CF输出设置为约1.9556 Hz。此CFxDEN设置现在可在每个电表上使用。有功功率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1.9556 Hz。

### 相位校准（可选）

使用电流变压器(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。如果使用不同类型的传感器，例如低电阻分流，就不一定需要相位校准。

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。以下公式概述了确定相位补偿的方式：

$$PHCALA = - \left( \frac{\cos^{-1} \left( \frac{CF_{ACTUAL} \cos(\phi)}{CF_{EXPECTED}} \right) - \phi}{360^\circ \times f} \right) \times 893.85 \text{ kHz}$$

其中：

f表示线路频率。

φ表示电压与电流间的角度（单位为度）。

在220 V、10 A负载下，功率因数为0.5，预期CFx引脚输出频率正好是先前计算值的一半。

$$CF_{EXPECTED} = \frac{3200 \text{ imp/kWh} \times 220 \text{ V} \times 10 \text{ A} / 1000 \times \cos(60)}{3600 \text{ s/h}} = 0.9778 \text{ Hz}$$

假定测得CF为0.98 Hz，线路频率为50 Hz，PHCALA补偿可通过下式确定：

$$PHCALA = \left( \frac{\cos^{-1} \left( \frac{0.98 \cos(60)}{0.9778} \right) - 60}{360 \times 50} \right) \times 893.85 \text{ kHz} = 0xFFFFFC$$

请注意，PHCALx寄存器具有10位符号幅度格式，因此应将十六进制数0xFFFFFC作为0x203输入PHCALx寄存器。

根据用于电流通道A和通道B的电流传感器，PHCALA和PHCALB可能需要不同相位校准值。

## 有功功率增益校准

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1来执行。如“设置电表常数”部分所述，预期CF输出由电表常数决定。测量实际CF输出，并使用AWGAIN寄存器调节任何误差。该关系式如下：

$$AWGAIN = \left[ 0x400000 \times \frac{CF_{EXPECTED}}{CF_{ACTUAL}} \right]$$

使用以上示例，在220 V和10 A负载下，预期CF为1.9556 Hz。假定实际测得CF为2.2238 Hz，AWGAIN用下式计算：

$$AWGAIN = \left[ 0x400000 \times \frac{1.9556}{2.2238} \right] = 0x384804$$

BWGAIN寄存器控制通道B的增益校准。假定通道正确匹配，如“电流通道B增益匹配”部分所述，以上程序不需要为通道B重复。将针对AWGAIN的计算值写入BWGAIN即可获得精确结果。

## 有功功率失调校准（可选）

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。

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100 mA和220 V负载下的实际CF频率为0.020 Hz，失调引起的误差百分比由下式确定：

$$\%Error = \frac{0.02000 - 0.0195556}{0.0195556} = 2.273\%$$

功率测量中的失调依据以下公式校正：

$$\begin{aligned} AWATTOS &= \\ \%Error \times CF_{EXPECTED} \times CFxDEN &\times \frac{0x14000000}{128 \times 6.99 \text{ kHz}} \times 2^5 \\ AWATTOS &= \\ 0.02273 \times 0.0195556 - 0x2963 &\times \frac{0x14000000}{128 \times 6.99 \text{ kHz}} \times 2^5 \\ &= 0xFF233B \end{aligned}$$

根据电路板布局和电表设计中的串扰，通道B可能需要独立于通道A的失调校准，可通过BWATTOS寄存器来实现。由于AWATTOS影响通道A有功功率CF输出，BWATTOS以相同方式校正通道B有功功率CF输出。

## 使用CF输出进行无功功率校准

### VAR增益

由于ADE7953有功和无功功率测量高度匹配，不一定需要单独校准无功功率增益。大多数情况下，如“有功功率增益校准”部分所述，可将针对AWGAIN计算的值写入AVARGAIN寄存器，以保持相同的电表常数。

如果需要不同电表常数或进一步校准，可单独校准无功功率。使用标称输入和功率因数0执行无功功率校准，以最大化功率输出。将CFx脉冲输出配置为输出无功功率。这可以通过设置ADE7953 CFMODE寄存器的位0至位7（地址0x107）来完成。无功功率校准方式与有功功率类似，首先确定预期CFx输出。

$$\begin{aligned} VARCF_{EXPECTED} &= \\ \frac{\text{Meter Constant}[\text{imp/kVARh}] \times \text{Load}[\text{kVAR}]}{3600 \text{ s/h}} \end{aligned}$$

然后通过下式确定补偿：

$$AVARGAIN = \left[ 0x400000 \times \frac{VARCF_{EXPECTED}}{VARCF_{ACTUAL}} \right]$$

通道B的无功功率增益校准由BVARGAIN寄存器控制。假定通道正确匹配，如“电流通道B增益匹配”部分所述，可将相同值写入BVARGAIN寄存器以实现精确结果。



## 高级无功校准

### VAR失调(可选)

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。

此示例中，施加100 A的输入电流以执行失调校准。如标称电压通道输入为220 V，预期CF输出频率由下式确定：

$$\begin{aligned} \text{VARCF}_{\text{EXPECTED}} &= \frac{3200 \text{ imp/kWh} \times 220 \text{ V} \times 0.1 \text{ A} / 1000}{3600 \text{ s/h}} \\ &= 0.0195556 \text{ Hz} \end{aligned}$$

如果100 mA和220 V负载下的实际CF频率为0.02050 Hz，失调引起的误差百分比由下式确定：

$$\% \text{Error} = \frac{0.020500 - 0.0195556}{0.0195556} = 4.829\%$$

无功测量中的失调依据以下公式校正：

$$\begin{aligned} \text{AVAROS} &= \% \text{Error} \times \text{VARCF}_{\text{EXPECTED}} \\ \text{CFxDEN} &\times \frac{0x14000000}{128 \times 6.99 \text{ kHz}} \times 2^5 \\ \text{AVAROS} &= 0.04829 \times 0.0195556 - 0x2963 \times \frac{0x14000000}{128 \times 6.99 \text{ kHz}} \times 2^5 \\ &= 0x\text{FFEAF8} \end{aligned}$$

根据电路板布局和电表设计中的串扰，通道B可能需要独立于通道A的失调校准，可通过BVAROS寄存器来实现。由于AVAROS影响通道A无功功率CF输出，BVAROS以相同方式校正通道B无功功率CF输出。

### 使用CF输出校准电流和电压均方根

校准电压和电流均方根仅适用于需要瞬时均方根读数的情况。均方根校准不影响有功和无功功率的性能。

使用瞬时均方根寄存器读数执行均方根校准。读数可从IRMSA寄存器、IRMSB寄存器和VRMS寄存器获得。本

校准不使用CFx脉冲输出。为增加稳定性，将均方根寄存器读数与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。有关零交越检测的详情，参见ADE7953数据手册。为进一步增加稳定性，可通过额外内部滤波来改善校准精度。此滤波通过设置CONFIG寄存器内的PWR\_LPF\_SEL位(地址0x102)来实现。

电流和电压均方根读数需要增益校准，以补偿任何器件间差异。每个电表也可能需要失调校准，以消除在低信号输入下可能降低读数精度的串扰。对于均方根读数无内部增益校准寄存器，因此增益调节是在微控制器固件内执行。

### RMS增益

如前所述，电流和电压均方根增益常数均在固件内计算和实施。在补偿器件间差异时，均方根增益常数将均方根读数(单位为LSB)转换为电流或电压值(单位为安培或伏特)。电压和电流均方根常数在固定负载条件下，通过将均方根寄存器内的LSB数除以输入幅度来确定。

$$V \text{ Constant} [\text{V/LSB}] = \frac{\text{Voltage Input} [\text{V}]}{\text{VRMS} [\text{LSBs}]} \times k$$

$$I \text{ Constant} [\text{Amps/LSB}] = \frac{\text{Current Input} [\text{A}]}{\text{IRMS} [\text{LSBs}]} \times k$$

为在固件内发生转换时保持全分辨率，电压和电流均方根常数可乘以常数k。因为十六进制数使用定点乘法，所以使用乘法系数k，可使转换和存储均方根读数时保持分辨率。执行十六至二进制编码十进制转换以进行显示前，需要将读数转换为十六进制格式。

下式提供了一个示例，说明如何将电压均方根寄存器读数转换为伏特值，同时保持小数点后一位分辨率。此示例中，施加220 V，产生VRMS寄存器读数5400000d。

$$V \text{ Constant} = \frac{220 \text{ V}}{5400000} \times 100 \times 2^{16} = 0x10B$$

将伏特/LSB常数乘以系数100 × 2<sup>16</sup>，以便在使用定点乘法时保持精度。V常数为0x10B。



下式提供了另一示例，显示如何生成电流均方根增益信号常数。此示例中，最终LCD显示器测量值精确至小数点后两位数。施加10 A的电流输入，产生IRMS读数1700000。

$$I \text{ Constant} = \frac{10 \text{ A}}{1700000} \times 1000 \times 2^{16} = 0x181$$

将安培/LSB常数乘以系数 $1000 \times 2^{16}$ ，以便在转换中保持所需精度。最终I常数为0x181。

### RMS失调

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均方根失调。该校准使用内部VRMSOS和IRMSOS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：

$$VRMSOS = \frac{VRMS_{EXPECTED}^2 - VRMS_{ACTUAL}^2}{2^{12}}$$

$$IRMSOS = \frac{IRMS_{EXPECTED}^2 - IRMS_{ACTUAL}^2}{2^{12}}$$

如图7所示，均方根失调校准基于两点，其中预期读数使用标称输入从均方根测量值导出。

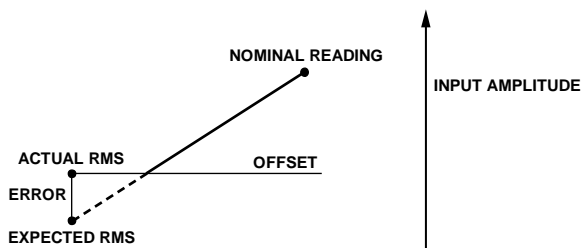


图7. 均方根读数

电流通道A均方根测量的额定动态范围为1000:1。电流通道B均方根和电压通道均方根测量的额定动态范围为500:1。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，电压均方根失调在175 V下校准，电流均方根失调在100 mA下校准。为确定预期均方根读数，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：

INOMINAL (10 A) = 1700000时的读数

ICAL(100 mA) =  $(0.1/10) \times 1700000 = 17000$ 时的预期读数

ICAL(100 mA) = 17250时获得的实际读数

因此

$$IRMSOS = \frac{17000^2 - 17250^2}{4096} = 0xF7D6$$

电压均方根失调以类似方式进行校准。

例如：

VNOMINAL (220 V) = 5400000时的读数

VCAL (175 V) =  $(175/220) \times 5700000 = 4295454$ 时的预期读数

VCAL (175 V) = 4295400时获得的实际读数

因此，

$$VRMSOS = \frac{4295454^2 - 4295400^2}{4096} = 0x113258$$

### 使用CF输出进行视在功率校准

#### VA增益

由于ADE7953有功和视在功率测量高度匹配，不一定需要单独校准视在功率增益。大多数情况下，可将“有功功率增益校准”部分中针对AWGAIN计算的值写入AVAGAIN寄存器，以保持相同的电表常数。

如果需要不同电表常数或进一步校准，可单独校准视在功率。使用标称输入，以功率因数1执行视在功率校准。配置CFx脉冲输出对输出视在功率，这可以通过设置CFMODE寄存器的位0至位7(地址0x107)来实现。视在功率校准方式与有功功率校准类似，首先用下式确定预期CF输出：

$$VACF_{EXPECTED} = \frac{\text{Meter Constant [imp/kVAh]} \times \text{Load [kVA]}}{3600 \text{ s/h}}$$

然后通过下式确定补偿：

$$AVAGAIN = \left[ 0x400000 \times \frac{VACF_{EXPECTED}}{VACF_{ACTUAL}} \right]$$

请注意，通道B的视在功率增益校准由BVAGAIN寄存器控制。假定通道正确匹配，如“电流通道B增益匹配”部分所述，可将相同值写入BVAGAIN寄存器以获得精确结果。

## 高级视在校准

### VA失调(可选)

VA失调校准仅适用于低负载下的精度超出所需规格的情况。

由于视在功率从瞬时电压和电流均方根读数的乘积导出，因此必须通过校准IRMS和VRMS失调补偿消除视在功率失调。如果需要额外校准或未使用IRMS和VRMS，可使用AVAOS寄存器。视在功率失调补偿执行方式与有功和无功失调补偿类似，应使用低电平电流信号，以功率因数1来执行。以下公式描述AVAOS寄存器如何补偿通道A视在功率测量中的误差。

AVAOS =

$$\%Error \times CF_{EXPECTED} \times CFxDEN \times \frac{0x14000000}{128 \times 6.99 \text{ k}\Omega} \times 2^5$$

请注意，根据电路板布局和电表设计中的串扰，通道B可能需要独立于通道A的失调校准。这可以通过BVAOS寄存器来实现。由于AVAOS影响通道A视在功率CF输出，BVAOS以相同方式校正通道B视在功率CF输出。

## 使用CF输出设计防窃电电表

### 零线断线校准

此校准步骤仅适用于设计防窃电电表的情况，需要在无零线连接的前提下执行。零线断线校准应在已校准电流均方根测量值后执行。

当电压通道降至特定阈值以下时，便进入零线断线条件。可启用SAG检测和零交越超时来检测该事件(参见[ADE7953](#)数据手册)。由于电压未到达电表，此时不会消耗电流。如果电流有消耗，则存在窃电篡改。在此条件下，[ADE7953](#)可根据电流均方根读数测量功率，从而继续计费。将[ADE7953](#)配置为在此条件下工作的方法有两种。第

一种是在CF输出端输出IRMS。这可以使用CFMODE寄存器来完成。第二种选择是将IRMS信号重新引导至视在功率路径。这样，在提供CF输出的同时，IRMS可在APENERGYx寄存器内累加。该方法通过设置ACCMODE寄存器内的位8和位9来实现。

为确保在这些条件下保持CFx脉冲权重，可修改CFxDEN以提供正确的电表常数。

当以零线断线模式工作时，电压幅度和脉冲角度是未知的，所以必须假设。预期CFx输出频率同样应基于先前校准步骤中确定的电表常数，此例中为3200 imp/kWh。对于此示例，假定电压为240 V，相位角为30°。预期CF输出频率如前所述确定。

$$CF_{EXPECTED} = \frac{\text{Meter Constant [imp/kWh]} \times \text{Load [kW]}}{3600 \text{ s/h}}$$

$$CF_{EXPECTED} = \frac{3200 \text{ imp/kWh} \times 240 \text{ V} \times 10 \text{ A} / 100\% \times \cos(30)}{3600 \text{ s/h}}$$

$$= 1.84752 \text{ Hz}$$

为调节CFx输出频率以获得零线断线工作条件，必须根据新的预期CFx频率缩放CFxDEN。

$$\frac{1}{CFxDEN_{MN}} = \frac{CF_{EXPECTED}}{CF_{ACTUAL}} \times \frac{1}{CFxDEN}$$

例如，假定在零线断线模式中测得的CFx为1.954 Hz，根据先前计算，电流CFxDEN = 0x2963。

$$\frac{1}{CFxDEN_{MN}} = \frac{1.84752}{1.954} \times \frac{1}{10595} = \frac{BC5}{2 \times 0}$$

零线断线模式CFxDEN只能在以零线断线模式工作时，通过编程写入CFxDEN寄存器。

## 校准内部电能寄存器

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/I2C或UART接口提供接入电能计量测量(详情参见ADE7953数据手册)。

如果使用内部电能寄存器来校准,应使用标准参考源。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。

### 使用电能寄存器进行有功功率校准

图8显示了有功功率测量的校准流程。使用该流程确定校准程序。

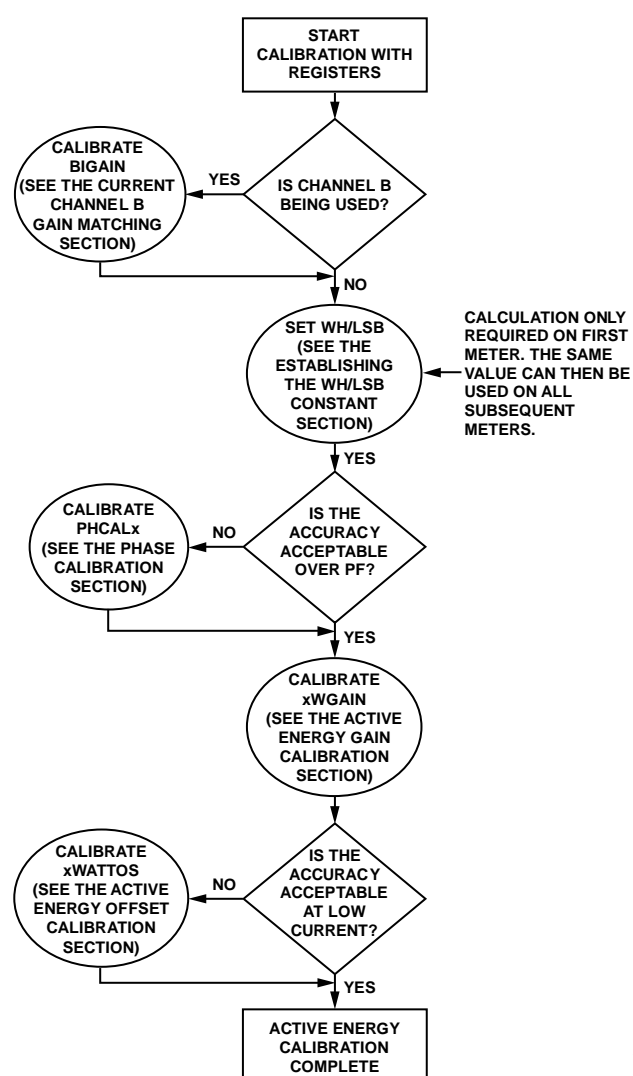


图8. 有功功率校准流程 - 寄存器

### 使用电能寄存器进行电流通道B增益匹配

使用第二个电流输入通道(电流通道B)时,将输出与通道A匹配较为方便。匹配这些通道会使计算更加容易,因为电能寄存器内的一位与CF输出上的一个脉冲对各通道具有相同权重。建议将执行通道匹配作为第一个校准步骤。

为匹配通道B与通道A,请遵循“电流通道B增益匹配”部分所述的程序。

### 建立Wh/LSB常数 - 仅适用于第一个电表

当校准第一个电表时,应确定Wh/LSB。Wh/LSB常数用于在有功电能寄存器内设置每个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。可以使用下式来确定Wh/LSB常数:

$$Wh/LSB = \frac{Load(W) \times Accumulation Time(sec)}{AENERGYx \times 3600s/h}$$

其中:

累加时间是线路周期累加时间。

AENERGYx是累加时间过去后的电能寄存器读数。

例如,如果设置100个半线路周期的LINECYC值,输入信号频率为50 Hz,则累加时间为1秒( $0.5 \times (1/50) \times 100$ )。假定220 V和10 A负载产生20398的AENERGYx读数,Wh/LSB常数可用下式计算:

$$Wh/LSB = \frac{220 V \times 10 A \times \cos(0) \times 1sec}{20398 \times 3600} = 2.9959 \times 10^{-5}$$

如果用户希望调节常数以满足特定规格或使常数更易于存储,可使用AWGAIN寄存器。AWGAIN寄存器可用于将Wh/LSB常数修改 $\pm 50\%$ 。AWGAIN寄存器会影响AENERGYA寄存器,如下式所示:

$$AWGAIN = \left[ 0x400000 \times \frac{AENERGYA_{EXPECTED}}{AENERGYA_{ACTUAL}} \right]$$

为实现不同的电表常数,根据所需的Wh/LSB改变AENERGYA读数。

$$AENERGYA_{EXPECTED} = \frac{Load(W) \times Accumulation Time(sec)}{Wh/LSB \times 3600s/h}$$

08871-008

例如，如果需要将先前计算的Wh/LSB常数 $2.99959 \times 10^{-5}$ 改为 $3 \times 10^{-5}$ 以便存储，所需的AENERGYA读数为：

$$AENERGYA_{EXPECTED} = \frac{220\text{ V} \times 10\text{ A} \times \cos(0) \times 1\text{ sec}}{3 \times 10^{-5} \times 3600\text{ s/h}} = 20370\text{ d}$$

该调节可使用AWGAIN寄存器完成，如“有功功率增益校准”部分所述。

### 相位校准(可选)

使用电流变压器CT时需要相位校准，以消除传感器引起的相移。CT可增加显著相移，在低功率因数下引起较大误差。如果使用不同类型的传感器，例如低电阻分流，就不一定需要相位校准。

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。下式概述如何确定相位补偿，其中f表示线路频率，φ表示电压与电流间的角度(单位为度)。

$$PHCALX = \left[ \cos^{-1} \left( \frac{AENERGY_{ACTUAL} \cos(\phi)^{\theta}}{AENERGY_{EXPECTED}} \right) - \phi^{\theta} \right] \times 893.85\text{ kHz}$$

例如，在220 V、10 A负载下，功率因数为0.5，预期AENERGYx读数正好是先前计算值的一半。

$$AENERGYx_{EXPECTED} = \frac{220\text{ V} \times 10\text{ Amps} \times \cos(60) \times 1\text{ sec}}{3 \times 10^{-5} \times 3600\text{ s/h}} = 10185\text{ d}$$

假定AENERGYx寄存器读数为10141，线路频率为50 Hz，PHCALx补偿可通过下式确定：

$$PHCALx = \left[ \cos^{-1} \left( \frac{10141 \times \cos(60)}{10185} \right) - 60 \right] \times 893.85\text{ kHz} = 0x07$$

请注意，PHCALx寄存器采用10位符号幅度格式。

根据用于通道A和通道B的电流传感器，PHCALA和PHCALB可能需要不同的相位校准值。

### 有功功率增益校准

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1来执行。为简明起见，建议校准所有电表以使用相同Wh/LSB值。使用下式确定AENERGYA寄存器内的预期读数：

$$AENERGYA_{EXPECTED} = \frac{\text{Load (W)} \times \text{Accumulation Time (sec)}}{\text{Wh/LSB} \times 3600\text{ s/h}}$$

实际值可从AENERGYx寄存器读取，而AWGAIN寄存器可用于校正任何误差。下式显示AWGAIN用于调节AENERGYA读数的方式：

$$AWGAIN = \left\lceil 0x400000 \times \frac{AENERGYA_{EXPECTED}}{AENERGYA_{ACTUAL}} \right\rceil$$

使用以上示例，在220 V和10 A负载下，预期AENERGYA读数为20370。假定实际AENERGYA读数为20073，AWGAIN用下式计算：

$$AWGAIN = \left\lceil 0x400000 \times \frac{20370}{20073} \right\rceil = 0x40F26A$$

请注意，通道B的增益校准由BWGAIN寄存器控制。假定通道正确匹配，如“电流通道B增益匹配”部分所述，以上程序不需要为通道B重复。将针对AWGAIN的计算值写入BWGAIN即可获得精确结果。

### 有功功率失调校准(可选)

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。必须施加低电平电流信号，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来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AENERGYx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AENERGYx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1000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AENERGYA读数由下式决定：

$$AENERGYA_{EXPECTED} = \frac{220 \text{ V} \times 0.1 \text{ Amps} \times \cos(0) \times 10 \text{ sec}}{3 \times 10^{-5} \times 3600} = 2037$$

如果100 mA负载下的实际AENERGYA寄存器读数为1987，失调引起的误差百分比由下式决定：

$$\%Error = \frac{1987 - 2037}{2037} = -2.454\%$$

功率测量中的失调依据下式校正：

$$AWATTOS = -\%Error \times \frac{AENERGYA_{EXPECTED}}{\text{Accumulation Time (sec)}} \times \frac{0x14000000}{128 \times 6.99 \text{ kHz}} \times 2^5$$

$$AWATTOS = 0.02454 \times \frac{2037}{10} \times \frac{0x14000000}{128 \times 6.99 \text{ kHz}} \times 2^5 = 0x00E956$$

请注意，根据电路板布局和电表设计中的串扰，通道B可能需要独立于通道A的失调校准。这可以通过BWATTOS寄存器来实现。BWATTOS校正AENERGYB寄存器读数的方式与AWATTOS影响AENERGYA寄存器读数的方式相同。

## 使用电能寄存器进行无功功率校准

### VAR增益

由于ADE7953有功和无功功率测量高度匹配，不一定需要单独校准无功功率增益。大多数情况下，可将“有功功率增益校准”部分中针对AWGAIN计算的值写入AVARGAIN寄存器，以保持相同的VARhr/LSB常数。

如果需要不同LSB权重(即VARhr/LSB常数)或进一步校准，可单独校准无功功率。应使用标称输入，以功率因数0执行无功功率校准，以最大化功率输出。无功功率校准方式与有功功率校准类似，首先确定预期RENERGYx输出。

$$RENERGYx_{EXPECTED} = \frac{\text{Load (VAR)} \times \text{Accumulation Time (sec)}}{\text{VARhr / LSB} \times 3600s/h}$$

然后通过下式确定补偿：

$$AVARGAIN = \left[ 0x400000 \times \frac{RENERGYA_{EXPECTED}}{RENERGYA_{ACTUAL}} \right]$$

请注意，通道B的无功功率增益校准由BVARGAIN寄存器控制。假定通道正确匹配，如“电流通道B增益匹配”部分所述，可将相同值写入BVARGAIN寄存器以实现精确结果。

### 高级无功校准

#### VAR失调(可选)

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。

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RENERGYx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RENERGYx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%。此示例中，将LINECYC设置为1000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0时，预期RENERGYA读数由下式决定：

$$RENERGYA_{EXPECTED} = \frac{220 \text{ V} \times 0.1 \text{ Amps} \times \sin(90) \times 10 \text{ sec}}{3 \times 10^{-5} \times 3600} = 2037d$$

如果实际RENERGYA读数为2044，失调引起的误差百分比由下式决定：

$$\%Error = \frac{2044 - 2037}{2037} = 0.343\%$$

无功功率测量中的失调依据以下公式校正：

$$AVAROS = -\%Error \times \frac{RENERGYA_{EXPECTED}}{\text{Accumulation Time (sec)}} \times \frac{0x14000000}{128 \times 6.99 \text{ kHz}} \times 2^5$$

$$AVAROS = -0.00343 \times \frac{2037}{10} \times \frac{0x14000000}{128 \times 6.99 \text{ kHz}} \times 2^5 = 0xFFDF3Fh$$

请注意，根据电路板布局和电表设计中的串扰，通道B可能需要独立于通道A的失调校准。这可以通过BVAROS寄存器来实现。BVAROS校正RENERGYB寄存器读数的方式与AVAROS寄存器影响RENERGYA寄存器读数的方式相同。

## 使用电能寄存器校准电流和电压均方根

有关如何校准IRMSA、IRMSB和VRMS测量值的详情，参见“电流和电压均方根”部分。

## 使用电能寄存器进行视在功率校准

### VA增益

由于ADE7953有功和视在功率测量高度匹配，不一定需要单独校准视在功率增益。大多数情况下，可将“有功功率增益校准”部分中针对AWGAIN计算的值写入AVAGAIN寄存器，以保持相同的VAhr/LSB电表常数。

如果需要不同LSB权重(即VAhr/LSB常数)或进一步校准，可单独校准视在功率。使用标称输入，以功率因数1执行视在功率校准。视在功率校准方式与有功功率校准类似，首先确定预期功率读数。

$$APENERGYA_{EXPECTED} = \frac{Load (VA) \times Accumulation Time (sec)}{VAhr / LSB \times 3600s/h}$$

然后通过下式确定补偿：

$$AVAGAIN = \left[ 0x400000 \times \frac{VACF_{EXPECTED}}{VACF_{ACTUAL}} \right]$$

请注意，通道B的视在功率增益校准由BVAGAIN寄存器控制。假定通道正确匹配，如“电流通道B增益匹配”部分所述，可将相同值写入BVAGAIN寄存器以实现精确结果。

## 高级视在校准

### VA失调(可选)

VA失调校准仅适用于低负载下的精度超出所需规格的情况。

由于视在功率从瞬时电压和电流均方根读数的乘积导出，因此必须通过校准IRMS和VRMS失调补偿消除视在功率失调。如果需要额外校准或未使用IRMS和VRMS测量值，可使用AVAOS寄存器。视在功率失调补偿执行方式与有功和无功失调补偿类似，应使用低电平电流信号，以功率因数1来执行。以下公式描述AVOS寄存器如何补偿通道A视在功率测量中的误差。

$$AVAOS = - \%Error \times \frac{APENERGYA_{EXPECTED}}{Accumulation Time (sec)} \times \frac{0x14000000}{128 \times 6.99 \text{ kHz}} \times 2^5$$

请注意，根据电路板布局和电表设计中的串扰，通道B可能需要独立于通道A的失调校准。这可以通过BVAOS寄存器来实现。BVAOS校正APENERGYB寄存器读数的方式与AVAOS寄存器影响APENERGYA寄存器读数的方式相同。



注释

## 注释

I<sup>2</sup>C指最初由Philips Semiconductors(现为NXP Semiconductors)开发的一种通信协议。