

## 校准基于ADE7816的单相电表

作者: Aileen Ritchie

### 简介

本应用笔记说明如何校准ADE7816，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。

ADE7816是一款高精度多通道计量IC，能够同时在多达6个电流通道上测量电能。

它可以测量多种电能，包括有功和无功电能，并能提供电流和电压有效值读数。另外提供各种电能质量功能，包括无负载、反向功率和角度测量。ADE7816可以通过一个SPI、I<sup>2</sup>C或高速数据采集(HSDC)接口进行访问。

## 目录

简介.....	1	相位校准.....	5
修订历史.....	2	建立Wh/LSB常数—仅第一块电表.....	6
校准基础知识.....	3	有功电能增益校准.....	6
校准步骤.....	3	无功电能增益校准.....	7
校准设置.....	3	高级电能失调校准(可选).....	7
所需寄存器设置.....	4	电流和电压有效值.....	8
电能校准.....	5		
电流通道的增益匹配.....	5		

## 修订历史

2012年5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，ADE7816需要校准。虽然每个电表都要校准，但这只是一个简单的过程，可以快速完成。

为了获得精确读数，有功、无功电能以及电流和电压有效值必须进行校准。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。

电能计量寄存器通过SPI或I2C接口访问(详情参见ADE7816数据手册)。校准有功和无功电能读数时，应采用线周期累计模式。有关线周期累计模式的详细信息，参见ADE7816数据手册。

### 校准步骤

使用ADE7816设计电表时，最多需要三个校准阶段：增益、相位和失调。这些阶段必须针对每次测量单独进行。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。决定是否需要任何其他校准步骤前，应评估电表性能。

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	采用的传感器引起相位延迟时需要。 若传感器不引起相位延迟，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

### 精确源

校准ADE7816时必须采用精确源。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1显示采用精确源的典型设置。

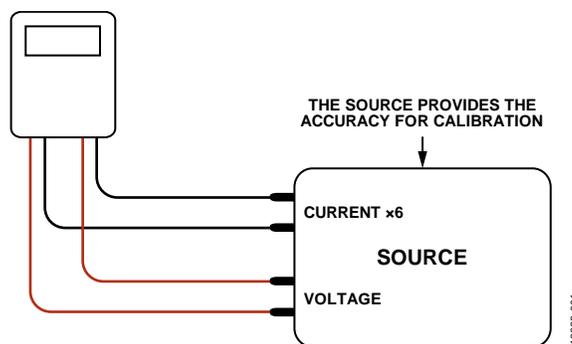


图1. 精确源

理想情况下，可以同时校准6个电流通道。如果无法做到这一点，每个通道可以单独校准。应多加注意隔离及验证板级通道间串扰，以便实现最佳性能。

### 所需输入条件

增益和相位校准步骤可采用一组输入来实现。将电压设为标称值，通常为110 V或220 V。电流也应设为标称值，如10 A。建议将电流设为电表最大电流的十分之一左右。施加的电流和电压功率因数为0.5。负载可为容性或感性。设置校准输入时的关键因素是确定施加在电表上的是什么。例如，只要确定施加在电表上的是什么，使用0.45的功率因数也没问题。

如果需要进行失调校准，就必须以最小电流施加第二个负载。电压仍应保持在标称电平，功率因数为0.5。

# AN-1152

## 所需寄存器设置

校准ADE7816前，必须先配置一组默认寄存器。这些寄存器如表2所列。有关这些寄存器的详细信息，请参见ADE7816数据手册。

表2. 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	所需值
0x43AB	WTHR1	阈值寄存器(有功电能)	0x000002
0x43AC	WTHRO	阈值寄存器(有功电能)	0x000000
0x43AD	VARTHR1	阈值寄存器(无功电能)	0x000002
0x43AE	VARTHRO	阈值寄存器(无功电能)	0x000000
0x43B1	PCF_A_COEFF	相位校准寄存器(电流通道A)	0x400CA4 (50 Hz)
0x43B2	PCF_B_COEFF	相位校准寄存器(电流通道B)	0x400CA4 (50 Hz)
0x43B3	PCF_C_COEFF	相位校准寄存器(电流通道C)	0x400CA4 (50 Hz)
0x43B4	PCF_D_COEFF	相位校准寄存器(电流通道D)	0x400CA4 (50 Hz)
0x43B5	PCF_E_COEFF	相位校准寄存器(电流通道E)	0x400CA4 (50 Hz)
0x43B6	PCF_F_COEFF	相位校准寄存器(电流通道F)	0x400CA4 (50 Hz)
0x4388	DICOEFF	数字积分器算法；仅使用di/dt传感器时需要	0xFFF8000

## 电能校准

图2显示了电能测量的校准流程。使用该流程确定校准程序。

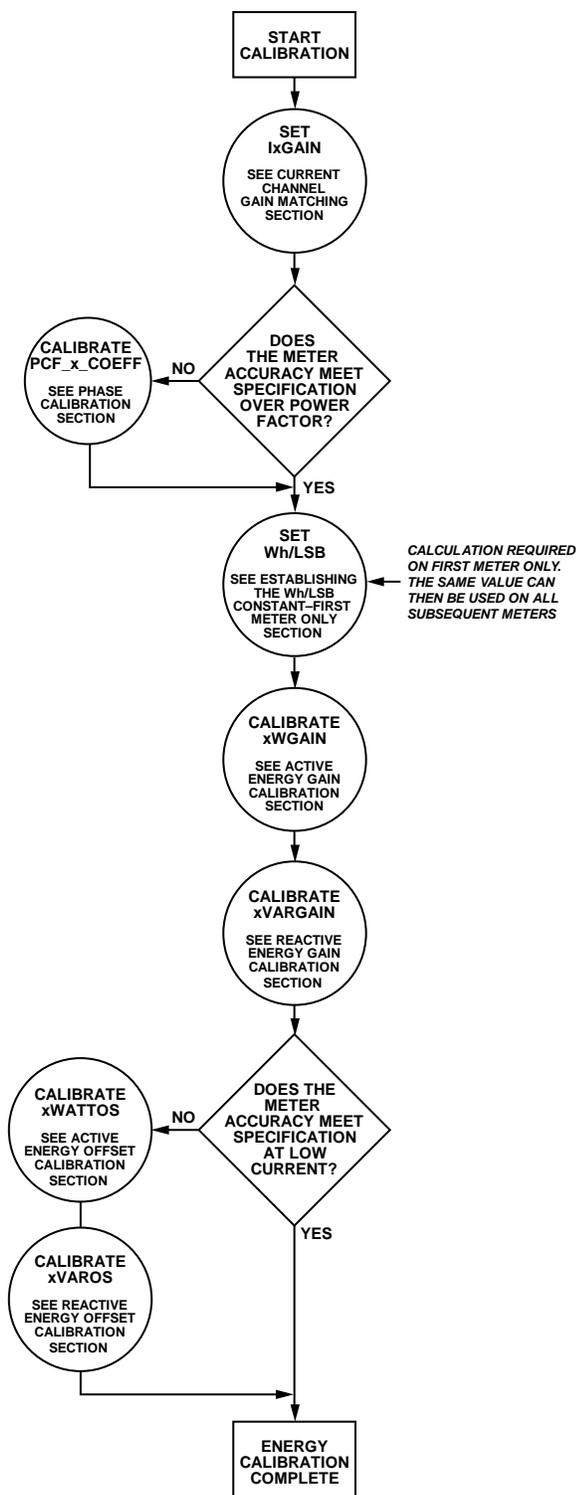


图2. 有功电能校准流程

### 电流通道增益匹配

ADE7816有6个电流通道，因此很方便在校准前对其全部完成匹配。匹配电流通道会使计算更加容易，因为有效值和电能寄存器中的一位对每个通道具有同等权重。建议将执行通道匹配作为第一个校准步骤。

如需匹配6个电流通道，应遵照“设置IxGain寄存器”部分所示的步骤。

### 设置IxGain寄存器

如需匹配6个通道，应向所有6个通道施加相同的固定电流。该电流应为“所需输入条件”部分所述的标称电流。电流有效值读数可用于确定6个通道间是否存在任何误差。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，参见ADE7816数据手册。

应将一个通道(如通道A)用作参考通道。然后，可使用IBGAIN(地址0x4382)、ICGAIN(地址0x4383)、IDGAIN(地址0x4384)、IEGAIN(地址0x4385)和IFGAIN(地址0x4386)来校正与通道A的不匹配情况。以下公式说明了如何使用IxGAIN寄存器调整IxRMS读数，使之匹配IARMS的读数：

$$IxGAIN = 2^{23} \times \left[ \frac{IARMS}{IxRMS} - 1 \right]$$

所有IxGAIN寄存器设置完毕后，6个通道应在恒定输入下产生完全相同的IxRMS读数。

### 相位校准

当使用的电流传感器引起相移时，需要进行相位校准。电流互感器可增加显著相移，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，因为大相位校正会改变ADE7816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。以下公式表明了如何确定相位误差(单位为度)：

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

$\varphi$ 表示电压与电流间的角度(单位为度)。

10668-002

# AN-1152

例如，如果设置500个半线路周期的LINECYC值，输入信号频率为50 Hz，则累加时间为5秒( $0.5 \times (1/50) \times 500$ )。假设220 V、10 A、功率因数0.5(感性)的负载产生的AWATTHR读数为1870，AVARHR读数为-3328，误差(单位为度)可按以下公式确定：

$$\begin{aligned} \text{Error(degrees)} &= \tan^{-1} \left( \frac{1870 \sin(-60) + 3328 \cos(-60)}{-3328 \sin(-60) + 1870 \cos(-60)} \right) \\ &= 0.668^\circ \end{aligned}$$

ADE7816采用所有的带通滤波器来精确增加电流通道相对电压通道提前或延迟的时间。6个电流通道均含有独立的滤波器。为了调整延迟或提前的时间，必须调整这些滤波器的系数。等式1、2、3显示了系数与相位偏移的对应情况(单位为弧度)。

$$\text{PCF}_x\text{\_COEFF}_{\text{FRACTION}} = \frac{\sin(\text{error}(\theta) + 3\omega) - \sin \omega}{\sin(\text{error}(\theta) + 4\omega)} \quad (1)$$

其中误差( $\theta$ )是相位误差(单位为度)。

$$\omega = 2\pi \frac{\text{Linefreq (Hz)}}{8000}$$

若 $\text{PCF}_x\text{\_COEFF} \geq 0$ ，则

$$\text{PCF}_x\text{\_COEFF} = 2^{23} \times \text{PCF}_x\text{\_COEFF}_{\text{FRACTION}} \quad (2)$$

若 $\text{PCF}_x\text{\_COEFF} < 0$ ，则

$$\text{PCF}_x\text{\_COEFF} = (2^{23} + 2^{28}) \times \text{PCF}_x\text{\_COEFF}_{\text{FRACTION}} \quad (3)$$

使用前一个例子，所需的相位调整 $\theta$ 为 $0.668^\circ$ 。

$\text{PCF}_A\text{\_COEFF}$ 寄存器设置可按以下公式计算：

$$\omega = 2\pi \frac{50}{8000} = 0.039$$

$$\begin{aligned} \text{PCF}_A\text{\_COEFF}_{\text{FRACTION}} &= \\ \frac{\sin(0.668 + 3\omega) - \sin \omega}{\sin(0.668 + 4\omega)} &= 0x53502 \end{aligned}$$

$$\text{PCF}_A\text{\_COEFF} = 2^{23} \times 0x53502 = 0x447B89$$

ADI公司提供了一份电子表格以简化计算。请访问：

[http://www.analog.com/ADE7816\\_tools\\_software\\_simulation](http://www.analog.com/ADE7816_tools_software_simulation)。

根据使用的电流传感器，6个通道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常数。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：

$$\text{Wh/LSB} = \frac{\text{Load (W)} \times \text{Accumulation Time (sec)}}{\text{AWATTHR} \times 3600 \text{ sec/hr}}$$

其中：

累加时间是线周期累加时间。AWATTHR是累加时间过去后的电能寄存器读数。

例如，如果设置500个半线路周期的LINECYC值，输入信号频率为50 Hz，则累加时间为5秒( $0.5 \times (1/50) \times 500$ )。假定220 V和10 A负载产生1909的AWATTHR读数，Wh/LSB常数可用下式计算：

$$\text{Wh/LSB} = \frac{220 \text{ V} \times 10 \text{ A} \times \cos(60) \times 5 \text{ sec}}{1909 \times 3600} = 8 \times 10^{-4}$$

如果要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AWATTHR寄存器，如下式所示：

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

为获得不同的电表常数，根据所需的Wh/LSB改变AWATTHR读数。

$$\begin{aligned} \text{AWATTHR}_{\text{EXPECTED}} &= \\ \frac{\text{Load (W)} \times \text{Accumulation Time (sec)}}{\text{Wh/LSB} \times 3600 \text{ sec/hr}} \end{aligned}$$

例如，如需将先前计算的Wh/LSB常数改为 $9 \times 10^{-4}$ ，期望的AWATTHR读数为：

$$\begin{aligned} \text{AWATTHR}_{\text{EXPECTED}} &= \\ \frac{220 \text{ V} \times 10 \text{ A} \times \cos(60) \times 5 \text{ sec}}{9 \times 10^{-4} \times 3600 \text{ sec/hr}} &= 1698 \text{ decimal} \end{aligned}$$

该调节可使用AWGAIN寄存器完成，如“有功电能增益校准”部分所述。

## 有功电能增益校准

有功电能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，如前文所述。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：

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

实际值可从AWATTHR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AWATTHR读数的方式：

$$AWGAIN = 2^{23} \times \left[ \frac{AWATTHR_{EXPECTED}}{AWATTHR_{ACTUAL}} - 1 \right]$$

使用以上示例，在220 V和10 A负载下，预期AWATTHR读数为1698(十进制)。假定实际AWATTHR读数为1600(十进制)，AWGAIN用下式计算：

$$AWGAIN = 2^{23} \times \left[ \frac{1698}{1600} - 1 \right] = 0x7D70A$$

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

### 无功电能增益校准

由于ADE7816有功和无功电能测量高度匹配，不一定需要单独校准无功电能增益。大多数情况下，可将“有功电能增益校准”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，可单独校准无功电能。应使用标称输入，以功率因数0.5执行无功电能校准，如前文所述。无功电能校准方式与有功电能校准类似，首先确定预期xVARHR输出。

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

然后通过下式确定补偿：

$$AVARGAIN = 2^{23} \times \left[ \frac{RENERGYA_{EXPECTED}}{RENERGYA_{ACTUAL}} - 1 \right]$$

请注意，通道B至通道F的增益校准由BVARGAIN、CVARGAIN、EVARGAIN和FVARGAIN寄存器控制。假定通道正确匹配，如“电流通道增益匹配”部分所述，以上程序不需要为其他通道重复。将针对AVARGAIN的计算值写

入BVARGAIN、CVARGAIN、EVARGAIN和FVARGAIN即可获得精确结果。

### 高级电能功率失调校准(可选)

#### 有功电能失调校准

有功电能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，应执行有功电能失调校准。必须施加低电流信号，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值设置为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0.5时，预期AWATTHR读数由下式决定：

$$AWATTHR_{EXPECTED} = \frac{220 \text{ V} \times 0.1 \text{ A} \times \cos(60) \times 50 \text{ sec}}{3 \times 10^{-5} \times 3600} = 169$$

如果100 mA负载下的实际AWATTHR寄存器读数为165，失调引起的误差百分比由下式决定：

$$\%Error = \frac{165 - 169}{169} = -2.8\%$$

功率测量中的失调依据下式校正：

$$AWATTOS = -\%error \times \frac{AWATTHR_{EXPECTED}}{AccumulationTime (sec)} \times \frac{WHTHR}{8 \text{ kHz}}$$

$$AWATTOS = 0.028 \times \frac{169}{50} \times \frac{0x2000000}{8 \text{ kHz}} = 0x18E$$

请注意，根据电路板布局和电表设计中的串扰，通道B至通道F可能需要独立于通道A的失调校准。这可以通过BWATTOS、CWATTOS、DWATTOS、EWATTOS和FWATTOS寄存器来实现。这些寄存器校正相应xWATTHR寄存器读数的方式与AWATTOS影响AWATTHR寄存器读数的方式相同。

## 无功电能失调校准

无功电能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，应执行无功电能失调校准。必须施加低电流信号，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：

$$A_{VARHR}_{EXPECTED} = \frac{Load (VAR) \times Accumulation Time (sec)}{VARhr / LSB \times 3600 \text{ sec/hr}}$$

无功电能测量中的失调依据以下公式校正：

$$A_{VAROS} = -\%Error \times \frac{RENERGYA_{EXPECTED}}{Accumulation Time (sec)} \times \frac{WTHR}{8 \text{ kHz}}$$

请注意，根据电路板布局和电表设计中的串扰，通道B至通道F可能需要独立于通道A的失调校准。这可以通过BVAROS、CVAROS、DVAROS、EVAROS和FVAROS寄存器来实现。这些寄存器校正相应xVARHR寄存器读数的方式与AVAROS影响AVARHR寄存器读数的方式相同。

## 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。有效值校准不影响有功和无功电能的性能。

使用瞬时有效值寄存器读数执行有效值校准。读数可从IxRMS寄存器和VRMS寄存器获得。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，参见ADE7816数据手册。

电流和电压有效值读数需要增益校准，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。

## 有效值增益

在补偿器件间差异时，有效值增益常数将有效值读数(单位为LSB)转换为电流或电压值(单位为安培或伏特)。电压和电流有效值常数在固定负载条件下，通过将有效值寄存器内的LSB数除以输入幅度来确定。

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

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

如果电流通道已根据“电流通道增益匹配”部分所述的程序正确匹配，所有的电流通道(通道A至F)都应拥有相同的I常数。

为在固件内发生转换时保持全分辨率，电压和电流有效值常数可乘以常数k。因为十六进制数使用定点乘法，所以使用乘法系数k，可使转换和存储有效值读数时保持分辨率。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，说明如何将电压有效值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3,400,000(十进制)。

$$V \text{ Constant} = \frac{220 \text{ V}}{3,400,000} \times 100 \times 2^{16} = 0x1A8$$

将伏特/LSB常数乘以系数 $100 \times 2^{16}$ ，以便在使用定点乘法时保持精度。V常数为0x1A8。

下式提供了另一示例，显示如何生成电流有效值增益常数。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400,000。

$$I \text{ Constant} = \frac{10 \text{ A}}{400,000} \times 1000 \times 2^{16} = 0x666$$

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0x666。

### 有效值失调

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有效值失调。该校准使用内部VRMSOS和IxRMSOS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：

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

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

如图3所示，有效值失调校准基于两点，其中预期读数由标称输入的有效值测量值获得。

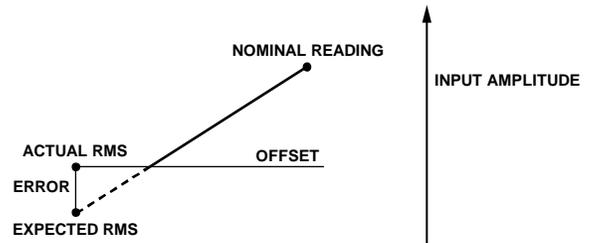


图3. 有效值失调补偿

10686-003

**注释**

**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。