

校准隔离计量芯片组ADE7978和ADE7932/ADE7933

作者: Petre Minciunescu

简介

图1显示了一个基于隔离计量芯片组ADE7978和ADE7932/ADE7933构建的三相电表的基本结构。只需要一个3.3 V电源为该芯片组供电。A相、B相和C相ADE7932/ADE7933隔离ADC利用分流电阻检测相电流，并利用电阻分压器检测相位至零线电压。

零线ADE7932/ADE7933利用分流电阻检测零线电流，并利用电阻分压器测量零线至地电压。这是可选的，不是所有三相电表都要监控零线电流和零线至地电压。

微控制器通过I²C或SPI通信管理ADE7978。本应用笔记介绍校准该电表的过程。虽然这款电表使用三相四线配置，但校准流程无需更改便可用于其他配置。

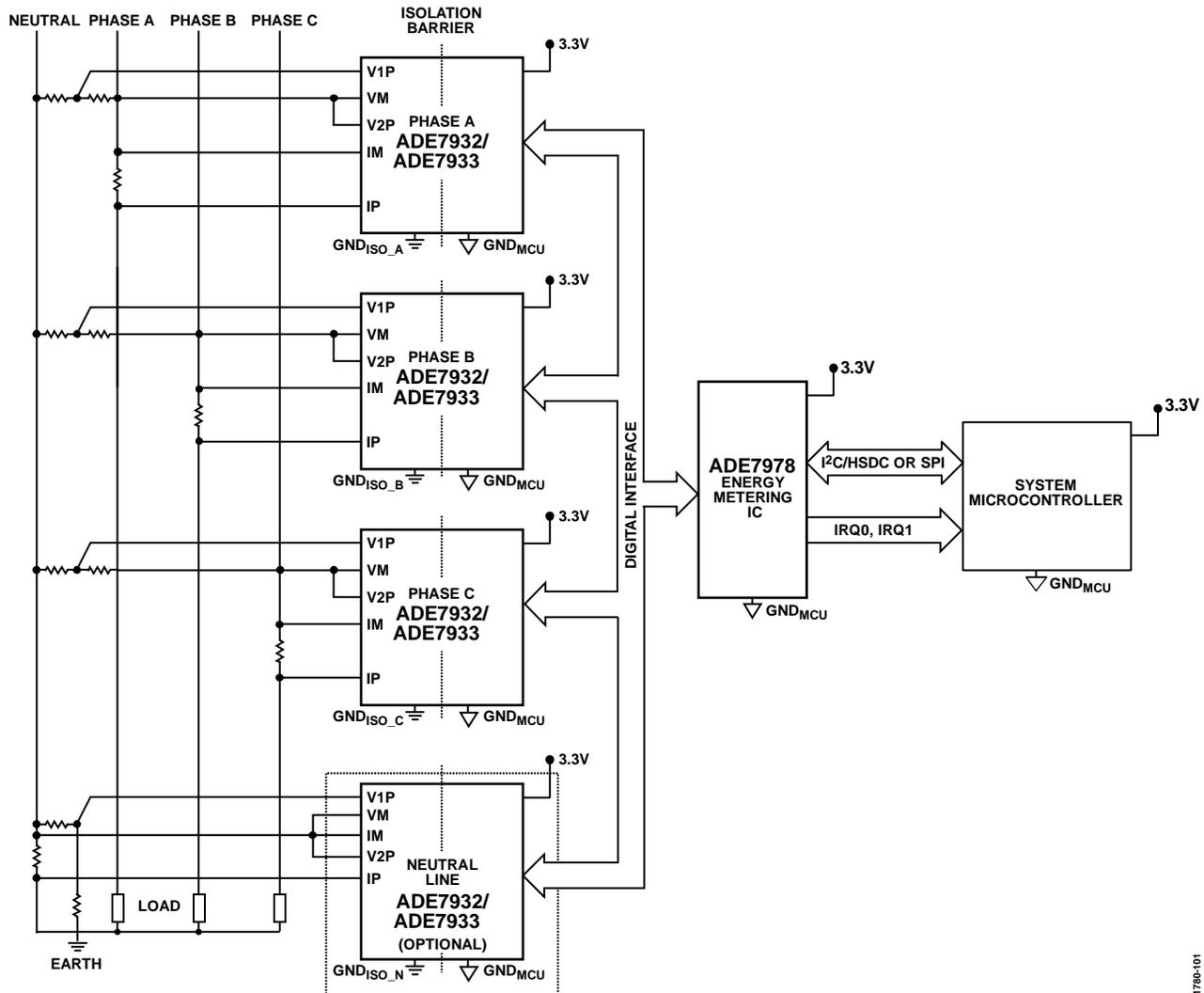


图1. 利用ADE7978和ADE7932/ADE7933芯片组构建的带分流电阻的三相电表

目录

简介	1	总无功电能和基波无功电能的失调校准(可选).....	10
修订历史	2	电流和电压有效值.....	11
校准基础知识.....	3	利用电能寄存器进行校准	13
校准步骤.....	3	增益匹配.....	14
校准方法(CF输出或寄存器)	3	相位校准(可选).....	14
校准设置.....	4	确定Wh/LSB常数—仅适用于第一个电表.....	14
校准输入.....	4	电能增益校准	15
所需寄存器设置.....	5	总有功电能和基波有功电能的失调校准(可选).....	15
利用CF脉冲输出进行校准	6	总无功电能和基波无功电能的失调校准	16
增益匹配.....	7	计算带符号小数的十六进制表示.....	16
电能校准.....	7		
相位校准(可选).....	9		
增益校准.....	9		
总有功电能和基波有功电能的失调校准(可选).....	10		

修订历史

2013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，隔离计量芯片组ADE7978和ADE7932/ADE7933需要校准。每只电表都需要校准，不过这是一个简单的过程，可以快速完成。

校准步骤

使用隔离计量芯片组ADE7978和ADE7932/ADE7933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类别，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。

校准方法(CF输出或寄存器)

隔离计量芯片组ADE7978和ADE7932/ADE7933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2所示。

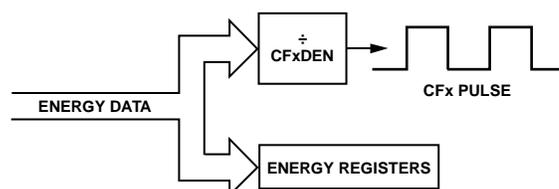


图2. 获取电能数据

如图2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。

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

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	分流电阻不会引入任何相位延迟，因此一般不需要。
失调校准	电表设计通常不需要。在大动态范围内追求高精度时，通常需要。

校准设置

有两种校准设置可用于校准隔离计量芯片组 [ADE7978](#) 和 [ADE7932/ADE7933](#)：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，可以使用CF输出或电能寄存器。两种校准设置的更多信息参见“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3)。基准电表应比最终电表所需的规格更精确。

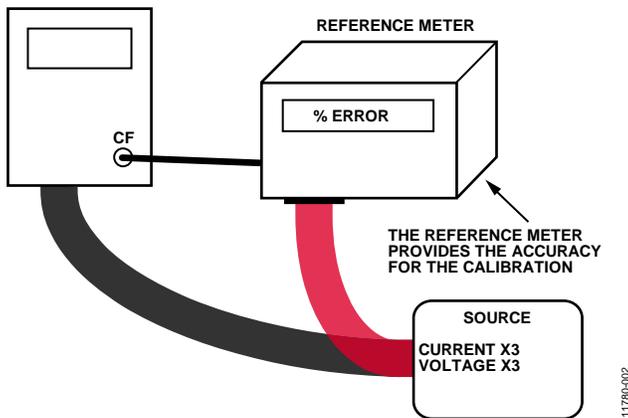


图3. 基准电表配置

使用基准电表时，需要信号源为电表提供所需输入；不过信号源精度并不重要，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。使用精确源时，可以使用CF输出或电能寄存器获取电能数据。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要求的精度。图4显示采用精确源的典型设置。

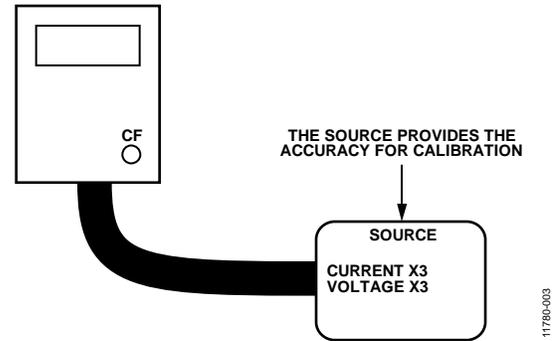


图4. 精确源

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计算。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，如表2所示。

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

标称电压 V_n 通常为110 V或220 V。标称电流 I_n 通常为10 A左右，是最大电流 I_{max} (考虑100 A)的1/10。

最小电流 I_{min} 是指电表指定的最小电流，但同时还要保持在隔离计量芯片组 [ADE7978](#) 和 [ADE7932/ADE7933](#) 的测量规格范围内，例如100 mA。

芯片组利用分流电阻检测电流。分流电阻不会引起相位延迟。只有电流测量硬件路径中的抗混叠滤波器会引入很小的延迟。但是，由于电压测量硬件路径也会使用同样的抗混叠滤波器，因此在电流和电压测量之间不会引起任何相位延迟。所以，使用隔离计量芯片组 [ADE7978](#) 和 [ADE7932/ADE7933](#)时通常不需要相位校准。

增益校准以功率因数1来执行。

如果仍要进行相位校准，最好以0.5的功率因数与增益校准一起执行。这样可以一个校准点同时用于增益校准和相位校准。

表3显示了需要相位校准时的校准条件。

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中显示的修改输入条件进行的示例计算。

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	在相位总/基波有功电能数据路径中使用的阈值。	0x03	有关修改此常数的详情，参见 ADE7978/ADE7933/ADE7932 数据手册。
0xEA03	VARTHR	在相位总/基波无功电能数据路径中使用的阈值。	0x03	有关修改此常数的详情，参见 ADE7978/ADE7933/ADE7932 数据手册。
0xEA04	VATHR	在相位视在电能数据路径中使用的阈值。	0x03	有关修改此常数的详情，参见 ADE7978/ADE7933/ADE7932 数据手册。
0x43A2	VLEVEL	基波有功和无功率算法中使用的寄存器。	0x58604A	有关修改此常数的详情，参见 ADE7978/ADE7933/ADE7932 数据手册。 这是仅基波读数所必需的。 参见“所需寄存器设置”部分中的相关注释和公式。
0xE60E	COMPMODE, Bit 14 (SELFREQ)	用于仅基波测量的50 Hz或60 Hz选择。	50 Hz 0 60 Hz 1	这是基波有功和无功率读数所必需的。

所需寄存器设置

校准隔离计量芯片组[ADE7978](#)和[ADE7932/ADE7933](#)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[ADE7978/ADE7933/ADE7932](#)数据手册。

注意，关于VLEVEL默认值，[ADE7978/ADE7933/ADE7932](#)数据手册建议使用以下公式：

$$VLEVEL = \frac{V_{FS}}{V_n} \times 4 \times 10^6$$

对于EVAL-ADE7978EBZ评估板， $V_{FS} = 318.55 \text{ V}$ ， $V_n = 220 \text{ V}$ ，因此 $VLEVEL = 5791818 = 0x58604A$ 。

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上校准有功电能时，应该将CF1、CF2或CF3配置为与通道A上的总有功功率成正比。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引脚。

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，并行地执行最多三次校准。这样，所有三相可以同时校准。

图5显示了电能测量的校准流程。使用该流程确定校准程序。

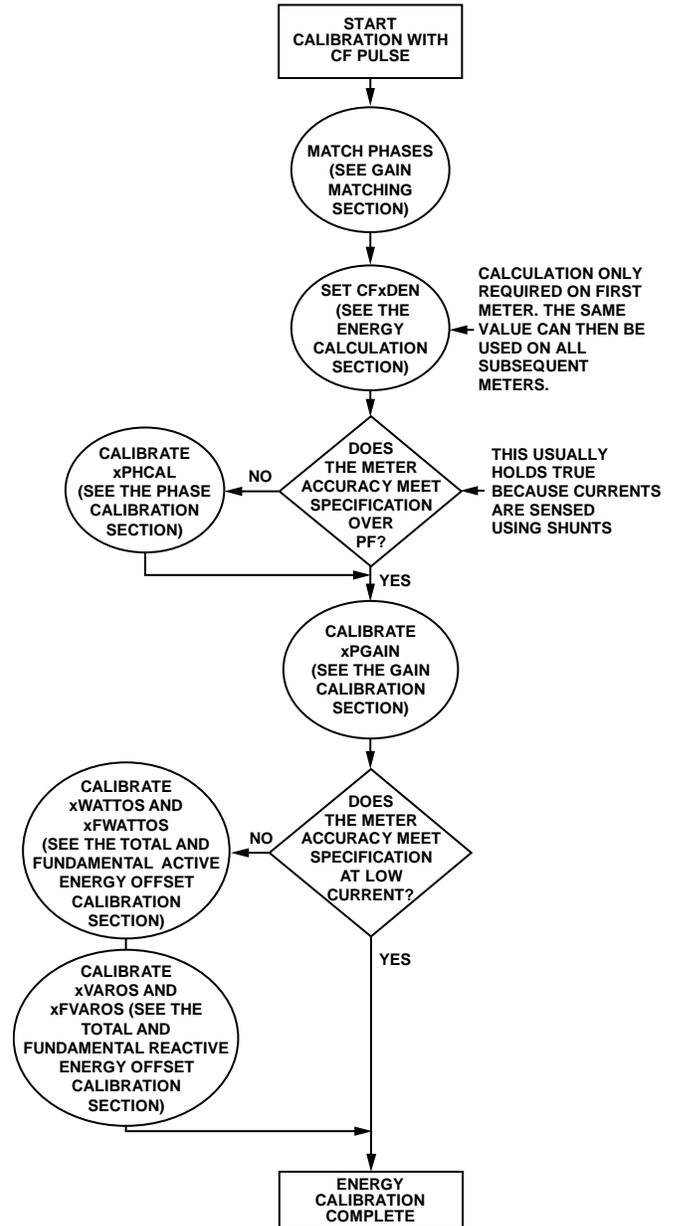


图5. 利用CF脉冲输出进行电能校准

增益匹配

表5. 用于增益匹配的xGAIN寄存器

校准寄存器	地址
AIGAIN	0x4380
BIGAIN	0x4383
CIGAIN	0x4386
NIGAIN	0x4389
AVGAIN	0x4381
AV2GAIN(使用ADE7933时)	0x4382
BVGAIN	0x4384
BV2GAIN(使用ADE7933时)	0x4385
CVGAIN	0x4387
CV2GAIN(使用ADE7933时)	0x4388
NVGAIN	0x438A
NV2GAIN(使用ADE7933时)	0x438B

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输出的一个脉冲对每个相都具有相同权重。建议将执行相匹配作为第一个校准步骤。

为了将相电流B、相电流C和零线电流N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。通常，提供标称电流便可满足该条件。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0x4383)、CIGAIN寄存器(地址0x4386)和NIGAIN寄存器(地址0x4389)校正此误差。

以下公式描述了如何用BIGAIN寄存器、CIGAIN寄存器和NIGAIN寄存器调整BIRMS、CIRMS和NIRMS读数，以便匹配AIRMS读数：

$$AIGAIN = 0x000000$$

$$BIGAIN = \frac{AIRMS}{BIRMS} - 1$$

$$CIGAIN = \frac{AIRMS}{CIRMS} - 1$$

$$NIGAIN = \frac{AIRMS}{NIRMS} - 1$$

结果是正的或负的小数。写入BIGAIN和CIGAIN寄存器的实际值是十六进制代码。本部分中，所有校准寄存器都是正的或负的小数，因此适用同样的规则。有关如何计算十六进制表示的详情，参见“计算带符号小数的十六进制表示”部分。

建议按照如下方式获取xIRMS测量值以确保结果的稳定性(x = A、B、C或N)：

- 1秒内每个线周期至少读取一次xIRMS有效值寄存器。
- 求读数平均值以获得有效值。

随后可将相同程序用于电压通道，以匹配xVRMS和xV2RMS(使用ADE7933时)读数。可使用电压通道增益寄存器AV2GAIN(地址0x4382)、BVGAIN(地址0x4384)、BV2GAIN(地址0x4385)、CVGAIN(地址0x4387)、CV2GAIN(地址0x4388)、NVGAIN(地址0x438A)和NV2GAIN(地址0x438B)，从而分别将AV2RMS、BVRMS、BV2RMS、CVRMS、CV2RMS、NVRMS和NV2RMS与AVRMS测量值进行匹配。

$$AVGAIN = 0x000000$$

$$AV2GAIN = \frac{AVRMS}{AV2RMS} - 1$$

$$BVGAIN = \frac{AVRMS}{BVRMS} - 1$$

$$BV2GAIN = \frac{AVRMS}{BV2RMS} - 1$$

$$CVGAIN = \frac{AVRMS}{CVRMS} - 1$$

$$CV2GAIN = \frac{AVRMS}{CV2RMS} - 1$$

$$NVGAIN = \frac{AVRMS}{NVRMS} - 1$$

$$NV2GAIN = \frac{AVRMS}{NV2RMS} - 1$$

完成此步骤后，所有相电流和所有电压都会拥有同样的权重。

电能校准

表6. 用于电能校准的CFxDEN寄存器

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一千瓦时(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。

AN-1259

CFx输出使用除法器CFxDEN(x = 1、2或3)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负载且功率因数为0.5的条件下，CF输出频率计算如下：

$$CF_{EXPECTED} = \frac{\text{Meter Constant (imp/kWh)} \times \text{Load (kV)}}{3600 \text{ s/h}}$$

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

$$= 0.97778 \text{ Hz}$$

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

图6所示为EVAL-ADE7978EBZ评估板使用的电压通道输入网络。

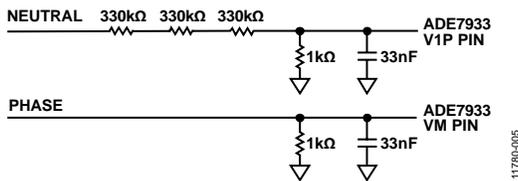


图6. 电压通道输入

$$V_p = V_{INPUT_MAX} \times \frac{1 \text{ k}\Omega}{(990 + 1) \text{ k}\Omega} = (220 \text{ V} \times \sqrt{2}) \times \frac{1}{991} = 314 \text{ mV}$$

$$V_{AS\%OF\ FULLSCALE} = \frac{0.314}{0.5} \times 100 = 62.8\%$$

在220 V rms的电压通道幅度下，输入以满量程的62.8%工作。图7显示了电流通道配置。

假设目标满量程电流为120 A，比最大电流 $I_{max}=100 \text{ A}$ 大20%，则必须使用

$$R_s = \frac{31.25 \times 10^{-3}}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{120} \cong 180 \mu\Omega$$

的分流电阻来检测相电流。这意味着10 A标称电流 I_n 以满量程的8.15%工作。

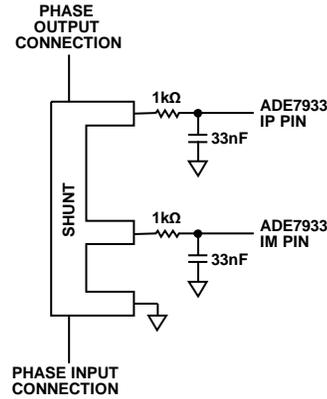


图7. 电流通道输入

$$V_{ACROSS\ SHUNT} = 10 \times \sqrt{2} \times 180 \times 10^{-6} = 2.546 \text{ mV}$$

$$I_{AS\%of\ FULLSCALE} = \frac{2.546 \times 10^{-3}}{31.25 \times 10^{-3}} \times 100 = 8.15\%$$

根据ADE7978/ADE7933/ADE7932数据手册，采用满量程模拟输入时，假设WTHR = 3，则最大CFx输出为68.8 kHz。

应用0.5的PF时，它降低至34.4 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0x709，如下所示：

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

$$CFxDEN = \frac{34.4 \text{ kHz} \times 62.8 \times 10^{-2} \times 8.15 \times 10^{-2}}{0.97778 \text{ Hz}} = 1801 = 0x709$$

记住，在上述条件下，向CFxDEN寄存器中写入0x709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)

注意，ADE7932/ADE7933利用分流电阻检测相电流，因此通常无需执行相位校准。在仍需相位校准的某些情况下，可使用本部分所述的程序作为参考。表7列出了用于校准相位的寄存器。

表7. 用于相位校准的xPHCAL寄存器

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

相位校准最好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功率。以下公式表明了如何确定相位误差(单位为度)：

$$Error(^{\circ}) = -\tan^{-1}\left(\frac{CF_{Active} \times \sin(\varphi) - CF_{Reactive} \times \cos(\varphi)}{CF_{Active} \times \cos(\varphi) + CF_{Reactive} \times \sin(\varphi)}\right)$$

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：

$$PhaseResolution = \left(\frac{360^{\circ} \times f}{1.024 \text{ MHz}}\right)$$

$$PhaseCompensation = \text{abs}\left(\frac{Error(^{\circ})}{PhaseResolution}\right)$$

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。

$$APHCAL = \begin{cases} Error(^{\circ}) \leq 0, \Rightarrow APHCAL = PhaseCompensation \\ Error(^{\circ}) > 0, \Rightarrow APHCAL = PhaseCompensation + 512 \end{cases}$$

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

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

假设线路频率为50 Hz，则可通过以下公式确定APHCAL补偿

$$PhaseCompensation =$$

$$\text{abs}\left[\left(\frac{0.76}{360^{\circ} \times 50}\right) \times 1.024 \text{ MHz}\right] = 43 = 0x2B$$

$$APHCAL = PhaseCompensation = 43 = 0x2B$$

增益校准

表8列出了用于校准电能增益的寄存器。

表8. 用于增益校准的xPGAIN寄存器

校准寄存器	地址
APGAIN	0x4399
BPGAIN	0x439A
CPGAIN	0x439B

电能增益校准的目的是补偿因内部和外部器件间差异而引起的小增益误差。

- ADE7933 ADC增益
- 分流电阻值
- 分压器值
- ADE7978晶体频率误差

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/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。

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“电能校准”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APGAIN寄存器调节任何误差。以下公式描述了这种关系：

$$APGAIN = \frac{CF_{EXPECTED}}{CF_{ACTUAL}} - 1$$

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

$$APGAIN = \frac{0.97778}{0.9937} - 1 = -0.016$$

用十六进制表示，APGAIN = 0xFDF3B6。有关将小数换算为十六进制数的详情，参见“计算带符号小数的十六进制表示”部分。

BPGAIN和CPGAIN寄存器分别控制相位B和相位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

程序不需要对B相或C相重复。将为APGAIN算出的值写入BPGAIN和CPGAIN中，以便获得精确的结果。总/基波无功电能和视在电能也受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寄存器将会对所有电能测量结果进行增益校准。

总有功电能和基波有功电能的失调校准(可选)

表9列出了用于校准总/基波有功电能寄存器的ADE7978寄存器。

表9. 用于有功电能失调校准的xWATTOS寄存器

校准寄存器	地址
AWATTOS	0x439C
BWATTOS	0x439D
CWATTOS	0x439E
AFWATTOS	0x43A3
BFWATTOS	0x43A4
CFWATTOS	0x43A5

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。必须施加预期最小电流信号，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、功率系数为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：

$$\%Error = \frac{0.01947 - 0.0195556}{0.0195556} = -0.4377\%$$

功率测量中的失调依据以下公式校正：

$$AWATTOS = -\%Error \times CF_{EXPECTED} \times CFxDEN \times \frac{Threshold}{1.024 \text{ MHz}}$$

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 $3 \times 2^{27} = 402653184 = 0x18000000$ 。

$$AWATTOS = 0.004377 \times 0.0195556 \times 1801 \times \frac{402653184}{1024000} = 61 = 0x3D$$

就像AWATTOS寄存器影响总有功电能失调一样，AFWATTOS寄存器也以相同方式影响着仅基波有功电能失调。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，B相和C相可能需要不同的失调校准。对于B相，可通过BWATTOS和BFWATTOS寄存器实现；对于C相，则可通过CWATTOS和CFWATTOS寄存器实现。

总无功电能和基波无功电能的失调校准(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. 用于无功电能失调校准的xFVAROS寄存器

校准寄存器	地址
AVAROS	0x439F
BVAROS	0x43A0
CVAROS	0x43A1
AFVAROS	0x43A6
BFVAROS	0x43A7
CFVAROS	0x43A8

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。必须在功率因数0下施加小电流信号，以便测量并消除失调幅度。

与总有功电能及基波有功电能类似，总/基波无功电能失调可根据以下公式校正：

$$AFVAROS = -\%Error \times CF_{EXPECTED} \times CFxDEN \times \frac{Threshold}{1.024 \text{ MHz}}$$

其中，“阈值”由8位VARTHR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VARTHR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，B相和C相可能需要不同的失调校准。对于B相，可通过BVAROS和BFVAROS寄存器实现；对于C相，可通过CVAROS和CFVAROS寄存器实现。

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。

- 相电流读数可从AIRMS寄存器、BIRMS寄存器、CIRMS寄存器和NIRMS寄存器获得。
- 相电压读数可从AVRMS寄存器、BVRMS寄存器、CVRMS寄存器和NVRMS寄存器获得。
- V2通道有效值读数可从AV2RMS寄存器、BV2RMS寄存器、CV2RMS寄存器和NV2RMS寄存器获得。
- 相电流和相电压的基波有效值可从AFIRMS寄存器(地址0xE537)、BFIRMS寄存器(地址0xE539)、CFIRMS寄存器(地址0xE53B)、AFVRMS寄存器(地址0xE538)、BFVRMS寄存器(地址0xE53A)和CFVRMS寄存器(地址0xE53C)获得。本校准不使用CFx脉冲输出。

建议按照如下方式获取xIRMS、xFIRMS、xVRMS、xFVRMS和xV2RMS(仅ADE7933)测量值以确保结果的稳定性:

- 1秒内每个线周期至少读取一次xIRMS、xFIRMS、xVRMS、xFVRMS和xV2RMS(仅ADE7933)有效值寄存器。
- 求读数平均值以获得有效值。

有效值增益

假设已按照“增益匹配”部分所述执行通道匹配, 则对于xIRMS、xFIRMS、xVRMS、xFVRMS或xV2RMS(使用ADE7933时)测量, 无需进一步的增益校准。利用V/LSB和Amps/LSB常数, 可以将xIRMS、xFIRMS、xVRMS、xFVRMS和xV2RMS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。这些常数可通过以下公式计算:

$$V \text{ Constant (V/LSB)} = \frac{\text{Voltage Input (V)}}{\text{VRMS (LSBs)}}$$

$$I \text{ Constant (V/LSB)} = \frac{\text{Current Input (A)}}{\text{IRMS (LSBs)}}$$

V常数适用于xVRMS、xFVRMS和xV2RMS寄存器, I常数适用于xIRMS和xFIRMS寄存器。

由于所有电表上的所有相都匹配, 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。此常数应存储在微控制器中。如果不方便存储此常数或需要另一个常数, 则可利用xIGAIN、xVGAIN和xV2GAIN(使用ADE7933时)寄存器调节常数。注意, 在这种情况下, xIGAIN和xVGAIN寄存器补偿ADE7932/ADE7933 ADC增益、分流电阻和分压器值在有功和无功电能数据路径中引起的增益误差。因此, 电能校准仅需补偿ADE7978晶体频率误差。调整xIGAIN或xVGAIN寄存器后, 执行电能校准。

$$xVGAIN = \frac{\text{Voltage Input (V)} \times 2^{23}}{V \text{ Constant (Volts / LSB)} \times xVRMS(\text{LSBs})}$$

$$xV2GAIN = \frac{\text{Voltage Input (V)} \times 2^{23}}{V \text{ Constant (Volts / LSB)} \times xV2RMS(\text{LSBs})}$$

$$xIGAIN = \frac{\text{Current Input (I)} \times 2^{23}}{I \text{ Constant (Amp / LSB)} \times xIRMS(\text{LSBs})}$$

有效值失调

为在低信号电平下获得精确读数, 可能需要校准电流和电压有效值失调。该校准使用内部xIRMSOS、xFIRMSOS、xVRMSOS、xFVRMSOS和xV2RMSOS(使用ADE7933时)寄存器来完成, 寄存器在平方根函数前应用失调。

表11. 用于有效值失调校准的xRMSOS寄存器

校准寄存器	地址
AIRMSOS	0x438C
AVRMSOS	0x438D
AV2RMSOS(使用ADE7933时)	0x438E
BIRMSOS	0x438F
BVRMSOS	0x4390
BV2RMSOS(使用ADE7933时)	0x4391
CIRMSOS	0x4392
CVRMSOS	0x4393
CV2RMSOS(使用ADE7933时)	0x4394
NIRMSOS	0x4395
NVRMSOS	0x4396
NV2RMSOS(使用ADE7933时)	0x4397
AFIRMSOS	0x43A9
BFIRMSOS	0x43AA
CFIRMSOS	0x43AB
AFVRMSOS	0x43AC
BFVRMSOS	0x43AD
CFVRMSOS	0x43AE

补偿系数通过应用下式来确定：

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

$$xFIRMSOS = \frac{xFIRMS_{EXPECTED}^2 - xFIRMS_{ACTUAL}^2}{128}$$

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

$$xFVRMSOS = \frac{xFVRMS_{EXPECTED}^2 - xFVRMS_{ACTUAL}^2}{128}$$

$$xV2RMSOS = \frac{xV2RMS_{EXPECTED}^2 - xV2RMS_{ACTUAL}^2}{128}$$

如图8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。

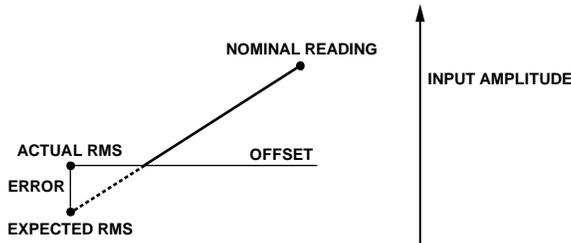


图8. 有效值读数

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，对A相：

读取 $I_{NOMINAL}$ (10 A)时的AIRMSOS寄存器为315184

I_{CAL} (100 mA)时的预期读数为 $(0.1/10) \times 315184 = 3152$

I_{CAL} (100 mA)时获得的实际AIRMS读数为3907

因此，

$$AIRMSOS = \frac{3152^2 - 3907^2}{128} = -41637 = 0xFF5D5B$$

电压有效值失调以类似方式进行校准。

例如，对A相：

读取 $V_{NOMINAL}$ (220 V)时的AVRMS寄存器为2391362

V_{CAL} (22 V)时的预期读数为 $(22/220) \times 2391362 = 239136$

V_{CAL} (22 V)时获得的实际AVRMS读数为239153

因此，

$$AVRMSOS = \frac{239136^2 - 239153^2}{128} = -63523 = 0xFF07DD$$

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接口提供电能计量测量结果(详情参见ADE7978和ADE7932/ADE7933数据手册)。

使用内部电能寄存器来校准时, 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2显示了CF输出与电能寄存器间的关系。图9显示了电能测

量的校准流程。使用图9中的流程图确定校准程序。

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。有关如何校准电流和电压有效值的详情, 参见“电流和电压有效值”部分。

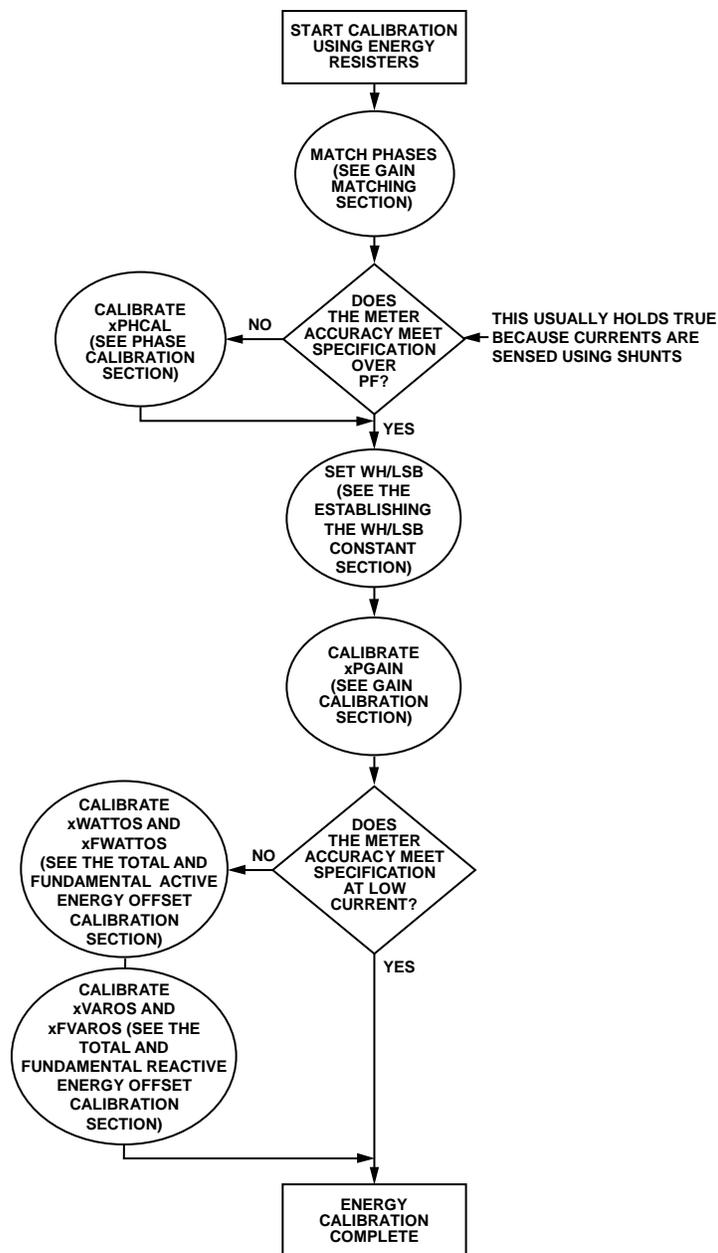


图9. 利用电能寄存器进行电能校准

11750-008

增益匹配

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，因为电能寄存器的一位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。有关匹配相位的详情，请参见“增益匹配”部分。

相位校准(可选)

注意，ADE7932/ADE7933利用分流电阻检测相电流，因此通常无需执行相位校准。在仍需相位校准的情况下，可使用本部分所述的程序作为参考。表12列出了用于校准相位的寄存器。

表12. 用于相位校准的xPHCAL寄存器

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

相位校准最好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功率。以下公式表明了如何确定相位误差(单位为度)：

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

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：

$$PhaseResolution = \left(\frac{360^{\circ} \times f}{1.024 \text{ MHz}}\right)$$

$$PhaseCompensation = abs\left(\frac{Error(^{\circ})}{PhaseResolution}\right)$$

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 =

$$\begin{cases} Error(^{\circ}) \leq 0, \Rightarrow APHCAL = PhaseCompensation \\ Error(^{\circ}) > 0, \Rightarrow APHCAL = PhaseCompensation + 512 \end{cases}$$

例如，假设在220V、10A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：

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

假设线路频率为50Hz，则可通过以下公式确定APHCAL补偿：

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

确定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常数用于设置有功电能寄存器中每个LSB的权重。该常数可将电能寄存器读数转换为真实值。

确定后，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的权重。如果未指明，用户可以选择权重。可以使用下式来确定Wh/LSB常数：

$$Wh/LSB = \frac{Load(W) \times AccumulationTime(sec)}{xWATTHR \times 3600}$$

其中：

“累加时间”是线路周期累加时间。

$xWATTHR$ 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50Hz，假设针对过零检测只选择了一个相位(LCYCMODE位[3:5])，则累加时间为1秒($0.5 \times (1/50) \times 100$)。在220V、10A的负载下，功率因数为0.5时，会产生3299的AWATTHR读数。Wh/LSB常数的计算如下：

$$Wh/LSB = \frac{220 \text{ V} \times 10 \text{ A} \times \cos(60) \times 1 \text{ sec}}{3299 \times 3600} = 9.262 \times 10^{-5}$$

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 $\pm 100\%$ 。APGAIN寄存器会影响AWATTHR寄存器，如下式所示：

$$APGAIN = \frac{AWATTHR_{EXPECTED}}{AWATTHR_{ACTUAL}} - 1$$

为实现不同的电表常数，必须根据所需的Wh/LSB改变AWATTHR读数。

$$AWATTHR_{Expected} = \frac{Load(W) \times AccumulationTime(sec)}{Wh/LSB \times 3600}$$

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

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

因此，所需的APGAIN值为

$$APGAIN = 2^{23} \times \left(\frac{3395}{3299} - 1 \right) = 244106 = 0x3B98A$$

电能增益校准

电能增益校准的目的是补偿因内部和外部器件间差异而引起的小增益误差。

- ADE7933 ADC增益
- 分流电阻值
- 分压器值
- ADE7978晶体频率误差

表13. 用于电能增益校准的xPGAIN寄存器

校准寄存器	地址
APGAIN	0x4399
BPGAIN	0x439A
CPGAIN	0x439B

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/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“确定Wh/LSB常数——仅适用于第一个电表”部分所述。使用下式确定AWATTHR寄存器的预期读数：

$$AWATTHR_{EXPECTED} = \frac{Load(W) \times AccumulationTime(sec)}{Wh/LSB \times 3600 s/h}$$

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。下式显示如何使用APGAIN来调节AWATTHR读数：

$$APGAIN = \frac{AWATTHR_{EXPECTED}}{AWATTHR_{ACTUAL}} - 1$$

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

$$APGAIN = 2^{23} \times \left(\frac{3395}{3380} - 1 \right) = 37228 = 0x916C$$

注意，B相和C相的增益校准分别由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CPGAIN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。

总有功电能和基波有功电能的失调校准(可选)

总/基波有功电能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。

表14. 用于有功电能失调校准的xWATTOS寄存器

校准寄存器	地址
AWATTOS	0x439C
BWATTOS	0x439D
CWATTOS	0x439E
AFWATTOS	0x43A3
BFWATTOS	0x43A4
CFWATTOS	0x43A5

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=10，分辨率误差将为10%。将累加位数增加至xWATTHR = 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、功率系数为1时，预期AWATTHR读数由下式决定：

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

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由下式确定：

$$\%Error = \frac{3380 - 3395}{3395} = -0.44\%$$

功率测量中的失调依据以下公式校正：

$$AWATTOS = -\%Error \times \frac{AWATTHR_{EXPECTED}}{AccumulationTime(sec)} \times \frac{Threshold}{1.024 MHz}$$

其中：

“阈值”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0x18000000 = 402653184。

$$AWATTOS = 0.0044 \times \frac{3395}{50} \times \frac{402653184}{1024000} = 117 = 0x75$$

就像AWATTOS寄存器影响总有功电能失调一样，AFWATTOS寄存器也以相同方式影响着基波有功电能失调。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，B相和C相可能需要不同的失调校准。对于B相，可通过BWATTOS和BFWATTOS寄存器实现；对于C相，则可通过CWATTOS和CFWATTOS寄存器实现。

总无功电能和基波无功电能的失调校准

基波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。

表 15. 用于无功电能失调校准的xFVAROS寄存器

校准寄存器	地址
AVAROS	0x439F
BVAROS	0x43A0
CVAROS	0x43A1
AFVAROS	0x43A6
BFVAROS	0x43A7
CFVAROS	0x43A8

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 = 10，分辨率误差将为10%。将累加位数增加至xVARHR = 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：

$$AVARHR_{EXPECTED} = \frac{Load(var) \times AccumulationTime(sec)}{var hr / LSB \times 3600 s/h}$$

无功电能测量中的失调依据以下公式校正：

$$AVAROS = -\%Error \times \frac{AVARHR_{EXPECTED}}{AccumulationTime(sec)} \times \frac{Threshold}{1.024 MHz}$$

其中：

“阈值”由8位VARTHR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VARTHR设置为默认值3h，阈值将为18000000h。

就像AVAROS寄存器影响总无功电能失调一样，AFVAROS寄存器也以相同方式影响着基波无功电能失调。通常，为AVAROS计算出的同一个值可以写入AFVAROS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，B相和C相可能需要不同的失调校准。对于B相，可通过BVAROS和BFVAROS寄存器实现；对于C相，可通过CVAROS和CFVAROS寄存器实现。

计算带符号小数的十六进制表示

ADE7978的许多校准寄存器是24位带符号数值。小于1的正数x的十六进制表示X为：

$$X = x \times 2^{23}$$

大于-1的负数x的十六进制表示X为：

$$X = 2^{24} + (x \times 2^{23})$$

I²C指最初由Philips Semiconductors(现为NXP Semiconductors)开发的一种通信协议。