

ADE7816工作原理

作者: Aileen Ritchie

简介

ADE7816是一款多通道电能计量IC，可以同时测量多达6个电流通道和1个电压通道。ADE7816可提供所有通道的有功和无功电能以及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适合各种计量应用，包括智能电表、配电单元和家庭电能监控器。

本应用笔记提供有关ADE7816电能和有效值计算的理论知识，应当作为ADE7816数据手册的补充文件使用。

图1显示ADE7816的一个电压和电流通道对的信号路径。ADE7816具有6个独立的电能信号路径，因此，该信号路径复制6次。按顺序提供在数据路径的各模块的详细信息，重点说明测量背后的理论。本应用笔记分为两部分：第一部分提供有关模数转换和滤波器的详细信息，第二部分说明数字信号处理。

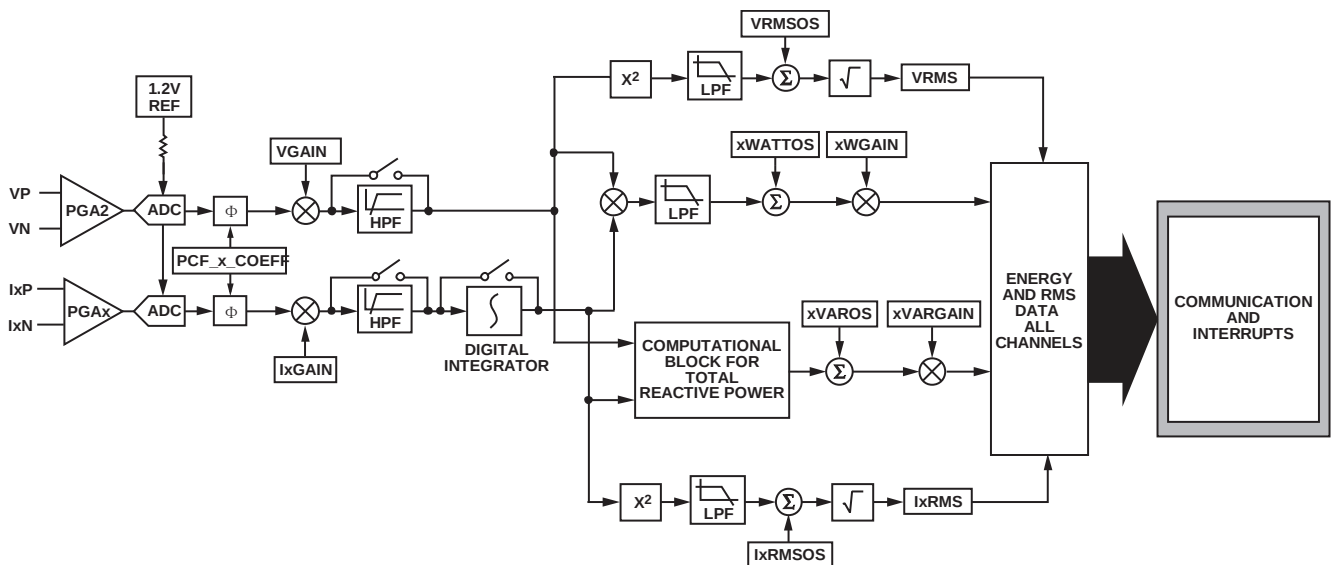


图1. 信号路径

10449-001

目录

简介	1	数字处理	6
修订历史	2	总有功功率计算	6
模数转换和滤波	3	无功功率	7
模数转换	4	有效值	8
数字积分器(仅电流通道)	5		

修订历史

2012年2月—修订版0：初始版

模数转换和滤波

本部分重点说明ADE7816电能计量IC的模拟部分及相关的滤波，包括模数转换、高通滤波器和积分器(仅电流通道)。图2和图3分别显示电流和电压通道的模数转换器与滤波器部分的信号路径。如图所示，除了仅电流通道含有数

字积分器之外，电流和电压通道的信号路径完全一致。积分器允许芯片直接连接到罗氏线圈电流传感器(详情参见“数字积分器(仅电流通道)”部分)。

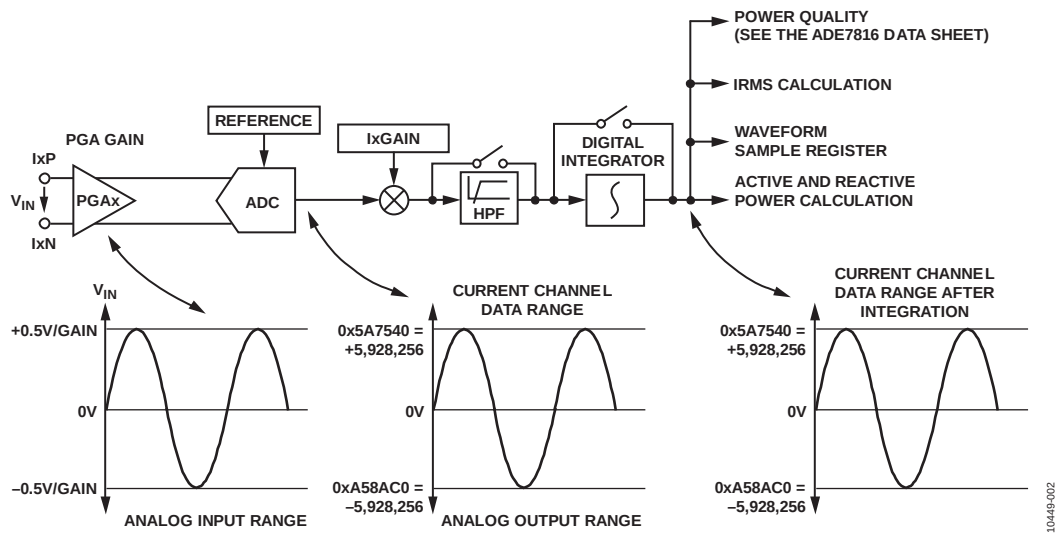


图2. 电流通道信号路径

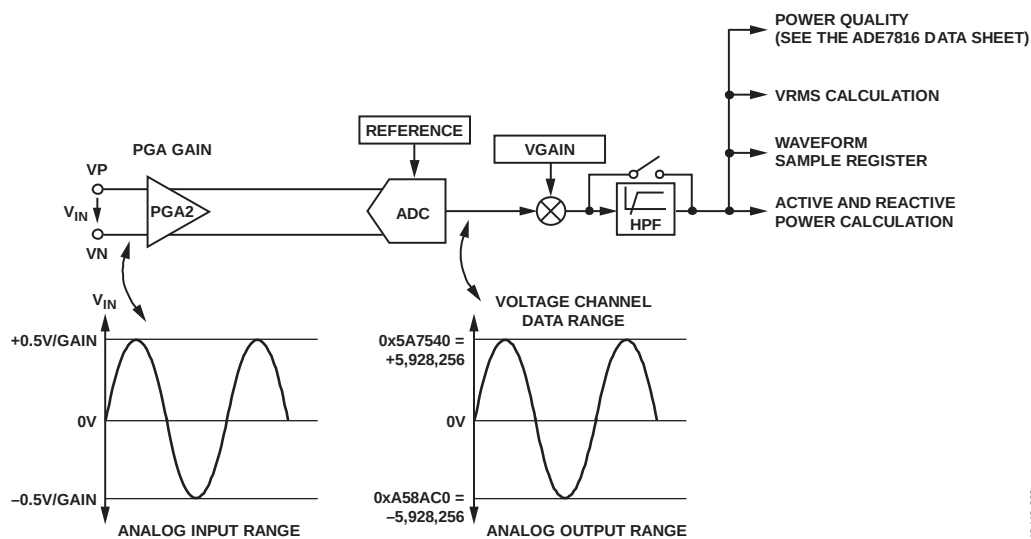


图3. 电压通道信号路径

模数转换

ADE7816内置 Σ - Δ 型模数转换器(ADC)，用以将输入的模拟信号转换为数字位流。当ADE7816完全上电时，所有ADC均有效。

为简明起见，图4显示的是一阶 Σ - Δ 型ADC框图。该转换器由 Σ - Δ 型调制器和数字低通滤波器组成。

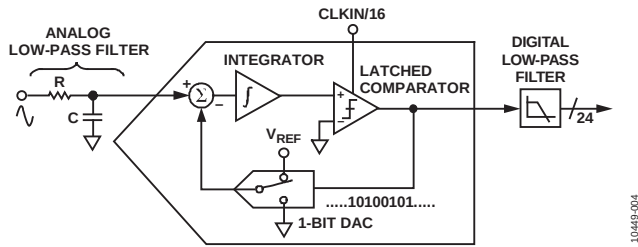


图4. 一阶 Σ - Δ 型ADC- Δ ADC

Σ - Δ 型调制器以一定的速率将输入信号转换成由1和0构成的连续串行流，其中速率由采样时钟决定。在ADE7816中，采样时钟等于1.024 MHz (CLKIN/16)。接着，通过串行数据流驱动反馈环路中的1位DAC，然后从输入信号中减去DAC输出。如果环路增益足够高，DAC输出的平均值（以及相应的位流）就会接近输入信号电平的平均值。对于一个采样间隔内任意给定输入值，1位ADC的输出数据几乎毫无意义。只有对大量样本进行平均，才能获得有意义的结果。该均值操作在ADC的第二部分——数字低通滤波器中执行。通过求取调制器输出的大量位的平均值，低通滤波器产生与输入信号电平成比例的24位数据字。

Σ - Δ 型转换器利用两种方法通过1位转换技术实现高分辨率。第一种方法就是过采样。过采样意味着信号的采样速率(频率)比目标带宽高出许多倍。例如，ADE7816的采样速率为1.024 MHz，而目标带宽为40 Hz至2 kHz。过采样具有将量化噪声(采样引起的噪声)散布于更宽带宽的效果。通过将噪声更加稀疏地分散到更宽的带宽上，目标频段内的量化噪声会有所降低，如图5所示。不过，仅采用过采样技术并不足以改善目标频段内的信噪比(SNR)。例如，仅仅为了让SNR增加6 dB(1位)，过采样系数就需要达到4。为了将过采样率控制在合理范围内，就需要对量化噪声进

行整形，从而使得大多数噪声位于较高频率中。在 Σ - Δ 型调制器中，噪声是通过积分器进行整形的，该积分器对量化噪声具有高通型响应。这即是用于实现高分辨率的第二种方法。其结果是大部分噪声位于较高频率，可以通过数字低通滤波器予以消除。噪声整形如图5所示。

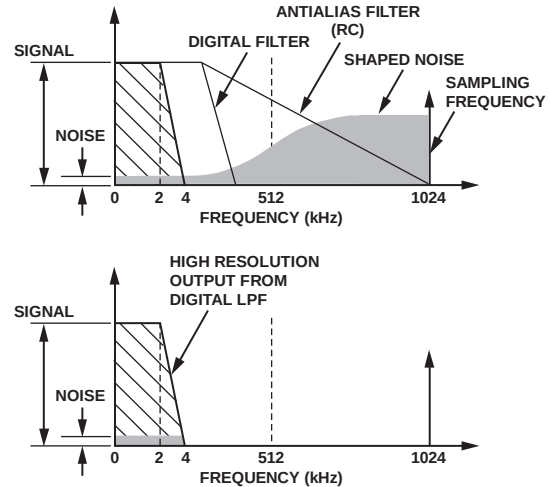


图5. 模拟调制器中通过过采样和噪声整形实现降噪

ADC传递函数

ADE7816中的所有ADC都可以针对相同的输入信号电平产生相似的24位有符号输出码。24位有符号输出码以8 kSPS(每秒千个样本)的固定速率提供。当输入为满量程输入信号0.5 V且内部基准电压为1.2 V时，ADC输出码约为5,928,256 (0x5A7540)，如图2和图3所示。ADC的输出码范围为0x800000 (-8,388,608)至0x7FFFFF (+8,388,607)；这相当于输入信号电平为 ± 0.707 V。不过，为了获得额定性能，请勿超过 ± 0.5 V的标称范围；只有当输入信号低于 ± 0.5 V时，才能够保证ADC性能。

高通滤波器(HPF)

ADC输出可能包含直流失调。这一失调可导致功率和有效值计算出现误差。相位电流、零线电流和相位电压的信号路径中放置了高通滤波器(HPF)。HPF可消除电流或电压通道的任何直流失调，其截止频率为0.2 Hz。

数字积分器(仅电流通道)

内部数字积分器设计用来配合罗氏线圈或其它微分(di/dt)传感器使用。di/dt传感器可检测交流电流引起的磁场变化。图6显示了di/dt电流传感器的工作原理。

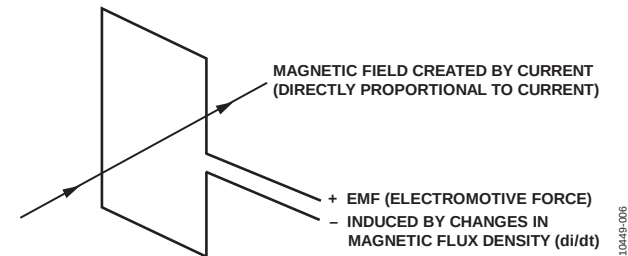


图6. di/dt电流传感器的工作原理

电流感生磁场的磁通密度与电流的幅度成正比。当穿过导线环路的磁通密度发生变化时，环路两端之间即会产生电动势(EMF)。EMF是一种与电流di/dt成正比的电压信号。di/dt电流传感器的电压输出取决于带电导线和di/dt传感器之间的互感情况。

由于di/dt传感器的作用，电流信号必须经过滤波才可用于功率测量。每个电流通道上均内置一个数字积分器，用于恢复来自di/dt传感器的电流信号。数字积分器默认禁用，若要使能，须将CONFIG寄存器的位0 (INTEN)置1(参见ADE7816数据手册)。图7和图8显示了数字积分器的幅度和相位响应。

当数字积分器关闭时，ADE7816可以直接与电流互感器(CT)等传统电流传感器配合使用。

请注意，积分器具有-20 dB/十倍频程的衰减和大约-90°的相移。与di/dt传感器结合使用时，所产生的幅度和相位响

应在目标频段上应该具有平坦增益。不过，di/dt传感器具有20 dB/十倍频程的增益，并会产生相当多的高频噪声。因此，至少需要二阶抗混叠滤波器，以免ADC采样时目标频段再次出现噪声混叠(参见ADE7816数据手册)。

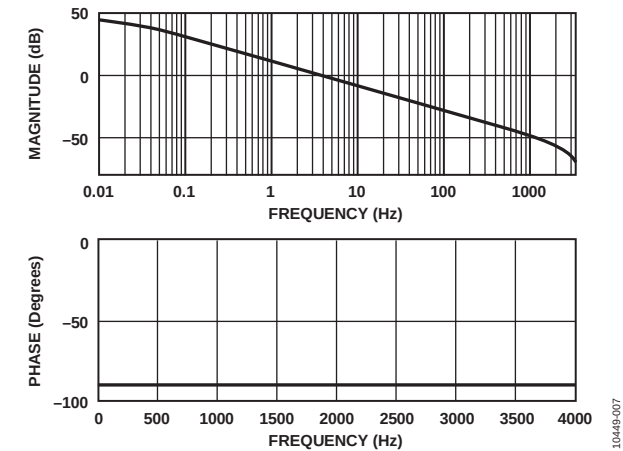


图6. di/dt电流传感器的工作原理

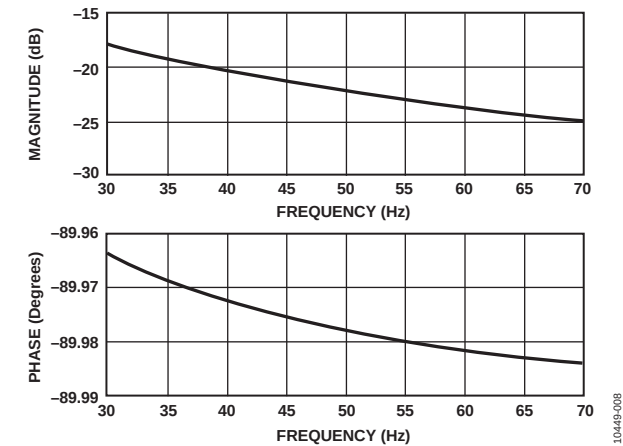


图8. 数字积分器的组合增益和相位响应
(30 Hz至70 Hz)

数字处理

ADE7816内置固定功能数字信号处理器(DSP)，可以计算所有功率和有效值。它含有程序存储器ROM和数据存储器RAM。

用于功率和有效值计算的程序存储在程序存储器ROM中，该处理器每8 kHz执行一次该程序。

总有功功率计算

功率定义为电能从电源流向负载的速率，并通过产生电压和电流波形来表示。所得波形称为瞬时功率信号，并等于每一瞬间的电能流动速率。功率的单位为瓦或焦耳/秒。如果交流系统的电源电压为 $v(t)$ 、电流为 $i(t)$ ，且两者都包含谐波，则

$$v(t) = \sum_{k=1}^{\infty} V_k \sqrt{2} \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (1)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sqrt{2} \sin(k\omega t + \gamma_k)$$

其中：

V_k 和 I_k 分别是各谐波的电压和电流有效值。

φ_k 和 γ_k 分别是各谐波的相位延迟。

交流系统中的瞬时功率为：

$$\begin{aligned} p(t) = v(t) \times i(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \cos(\varphi_k - \gamma_k) \\ &- \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \cos(2k\omega t + \varphi_k + \gamma_k) + \sum_{\substack{k,m=1 \\ k \neq m}}^{\infty} I_m \{ \cos[(k-m)\omega t \\ &+ \varphi_k - \gamma_m] - \cos[(k+m)\omega t + \varphi_k + \gamma_m] \} \end{aligned} \quad (2)$$

整数线路周期(n)内的平均功率用公式3表示。

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t) dt = \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \cos(\varphi_k - \gamma_k) \quad (3)$$

其中：

T 是线路周期时长。

P 称为总有功功率或总实际功率。

请注意，总有功功率等于公式2中瞬时功率信号 $p(t)$ 的直流成分，即：

$$\sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \cos(\varphi_k - \gamma_k)$$

该表达式用于计算ADE7816中各通道的总有功功率。

ADE7816计算各通道总有功功率的方法如下：首先将各通道的电流和电压相乘，然后利用低通滤波器(LPF)提取瞬时功率信号中的直流成分，如图11所示。

如果电压和电流仅包含基波成分、同相(即 $\varphi_1 = \gamma_1 = 0$)，并且对应于满量程ADC输入，那么两者相乘将得到具有直流成分 $V_1 \times I_1$ 和正弦波成分 $V_1 \times I_1 \cos(2\omega t)$ 的瞬时功率信号。图9显示了对应的波形。

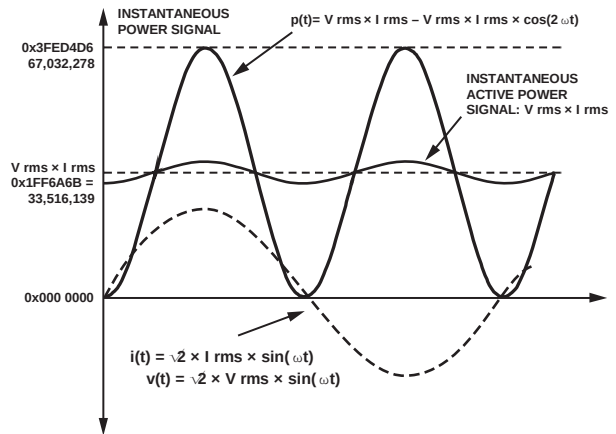


图9. 有功功率计算

由于LPF在频率响应特性上并不具有理想的滤波器(参见图10)，因此有功功率信号会因瞬时功率信号而出现一些纹波。该纹波为正弦波形，频率等于线路频率的两倍。由于纹波本质上是正弦波，因此在对有功功率信号进行一段时间的积分来计算电能时，纹波会被移除。

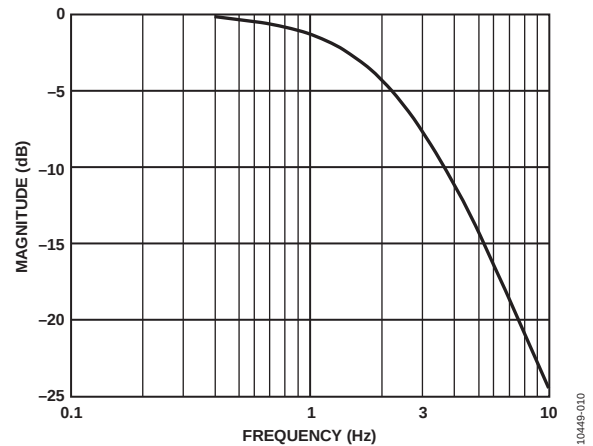


图10. LPF(用于对各相上的瞬时功率进行滤波)的频率响应

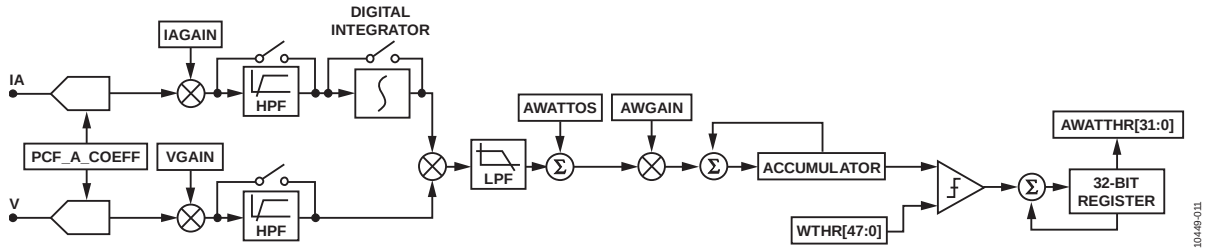


图11. 有功电能数据路径

有功电能计算

如上文所述，功率定义为电能流动的速率，用数学公式表示即为：

$$\text{功率} = \frac{d\text{Energy}}{dt} \quad (4)$$

而电能是功率的积分，如下所示：

$$\text{电能} = \int p(t) dt \quad (5)$$

有功电能累计是一种带符号的操作。减去负电能，加上正电能，得到总电能。

ADE7816相对于时间累计功率，从而计算电能。这种离散时间累加或相加相当于在连续时间内进行积分处理，如下文的公式6所示。

$$\text{电能} = \int p(t) dt = \lim_{T \rightarrow 0} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} p(nT) \times T \right\} \quad (6)$$

其中：

n 为离散时间采样数。

T 为采样周期。

累计分两阶段执行(见图11)：首先通过内部阈值，然后在外部寄存器中累计。关于设置内部阈值的更多信息，请参阅ADE7816数据手册。

无功功率

ADE7816可以计算各通道的总无功功率。无功功率包括电压和电流的所有基波和谐波成分。包含电抗元件(电感或电容)的负载会导致施加的交流电压和所产生的电流之间出现相位差。与电抗元件相关的功率称为无功功率，其单位为VAR。无功功率是指电压和电流信号之一的所有谐波成分发生90°相移时产生的电压和电流波形。

公式7给出了交流系统中电流通道出现了+90°的相移时，瞬时无功功率信号的表达式。

$$v(t) = \sum_{k=1}^{\infty} V_k \sqrt{2} \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (7)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sqrt{2} \sin(k\omega t + \gamma_k) \quad (8)$$

$$i'(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sqrt{2} \sin\left(k\omega t + \gamma_k + \frac{\pi}{2}\right)$$

其中， $i'(t)$ 为所有谐波成分出现90°相移的电流波形。

而瞬时无功功率 $q(t)$ 可以表示为：

$$q(t) = v(t) \times i'(t) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} q(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \times 2 \sin(k\omega t + \varphi_k) \times \sin(k\omega t + \gamma_k + \frac{\pi}{2}) \\ &+ \sum_{\substack{k,m=1 \\ k \neq m}}^{\infty} V_k I_m \times 2 \sin(k\omega t + \varphi_k) \times \sin(m\omega t + \gamma_m + \frac{\pi}{2}) \end{aligned}$$

请注意， $q(t)$ 可改写为：

$$\begin{aligned} q(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \left\{ \cos\left(\varphi_k - \gamma_k - \frac{\pi}{2}\right) \right. \\ &\quad \left. - \cos\left(2k\omega t + \varphi_k + \gamma_k + \frac{\pi}{2}\right) \right\} \\ &+ \sum_{\substack{k,m=1 \\ k \neq m}}^{\infty} V_k I_m \left\{ \cos\left[(k-m)\omega t + \varphi_k - \gamma_k - \frac{\pi}{2}\right] \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

整数个线周期(n)内的平均总无功功率通过公式11计算得出。

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{nT} \int_0^{nT} q(t) dt = \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \cos\left(\varphi_k - \gamma_k - \frac{\pi}{2}\right) \\ Q &= \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \sin(\varphi_k - \gamma_k) \end{aligned} \quad (11)$$

其中：

T 为线路周期时长， Q 称为总无功功率。请注意，总无功功率等于公式10中瞬时无功功率信号 $q(t)$ 的直流成分，即：

$$\sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \sin(\varphi_k - \gamma_k)$$

可利用该关系式计算各通道总无功功率。瞬时无功功率信号是各相中 $q(t)$ 电压信号的每个谐波乘以电流信号的对应90°相移谐波而产生的。

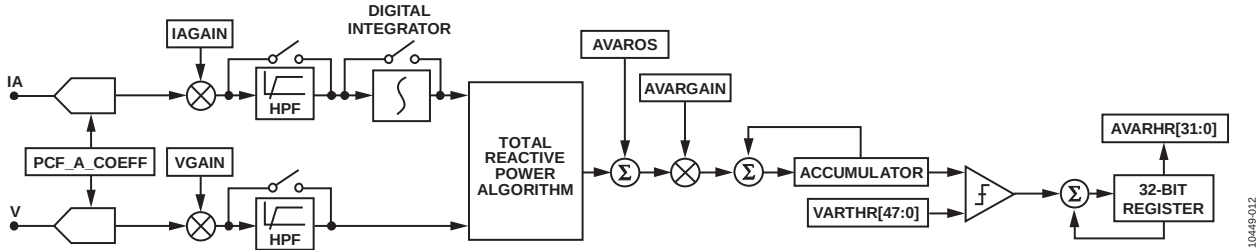
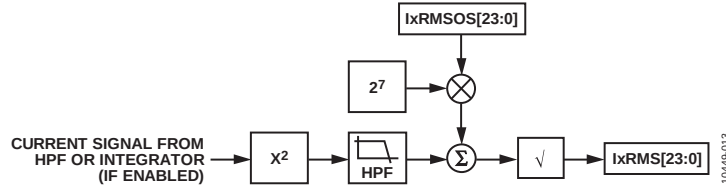


图12. 无功电能数据路径

图13. I_{RMS} 信号路径

无功电能计算

无功电能是无功功率的积分形式。

$$\text{无功电能} = \int q(t) dt \quad (12)$$

无功电能累计是一种带符号的操作。负电能会从无功电能成分中减去。

与有功功率类似，ADE7816分两个阶段实现无功功率信号的积分处理(参见ADE7816数据手册)。

有效值

有效值(rms)衡量交流信号的幅度。可以分别从实用角度和数学角度予以定义。从实用角度定义，一个交流信号的有效值等于在负载上产生同等功率所需的直流流量。从数学角度来看，连续信号 $f(t)$ 的有效值(均方根)定义如下：

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t f^2(t) dt} \quad (13)$$

对于时间采样信号，有效值(均方根)计算涉及求信号的平方、求平均值，然后获得平方根。

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f^2[n]} \quad (14)$$

公式14表明，对于包含谐波的信号，有效值计算会包含所有谐波成分，而不仅仅是基波。ADE7816利用低通滤波器对输入信号的平方值求平均，然后求取结果的平方根。用数学公式表示就是：

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} F_k \sqrt{2} \sin(k\omega t + \gamma_k) \quad (15)$$

然后

$$f^2(t) = \sum_{k=1}^{\infty} F_k^2 - \sum_{k=1}^{\infty} F_k^2 \cos(2k\omega t + \gamma_k) + 2 \sum_{\substack{k,m=1 \\ k \neq m}}^{\infty} F_k \times F_m \sin(k\omega t + \gamma_k) \times \sin(m\omega t + \gamma_m) \quad (16)$$

经过LPF并取得平方根后， $f(t)$ 的有效值即可通过下式获得：

$$F = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} F_k^2} \quad (17)$$

电流和电压通道的有效值计算可利用同样的方法执行。图13给出了 I_{rms} 测量的功能框图。