

### ADP1047/ADP1048的先进功率计量功能

作者: Kevin Huang

#### 简介

能源成本不断提高, 推动数据中心和其它相关的计算业务寻找全方位的智能电源管理策略。此类策略的实现要求准确采集包括电源在内的所有各级的功耗数据。如今, 数字通信技术和智能电源简化了这项任务, 但要实现精确的电能量, 仍然存在一些实际的挑战, 因为电源(除少数例外)不是测量设备。

目前, 某些高端系统实现了交流功率监测, 主要是利用专用的交流功率监控器和仪表。然而, 大多数情况下只能监测总机架功率。由于大多数此类系统需要一个功率因数校正(PFC)级, 以便通过控制环路测量输入电流和电压, 因此考虑在PFC控制器中增加功率计量功能是合理的。

ADP1047/ADP1048是内置精密输入功率计量功能的数字PFC控制器, 可以精确测量输入输出电压、输入电流和功率等。该信息可以通过PMBus接口报告给电源的微控制器。

#### 电路设置和测量

图1显示了交流功率计量接口。输入电流的测量点与PFC电流环路控制所用的测量点相同。如果使用电流检测电阻, 它将测量流经主桥整流器之后的 $R_{SENSE}$ 的回路电流。输入电压通过一个辅助电桥整流器整流, 经分压器(R1和R2)分压后送入ADP1047/ADP1048。使用辅助电桥整流器的优点是, 即使在软启动条件下, 它也能精确测量输入电压。

这种方法在PFC级内测量V和I, 因此, 测量不那么困难, 而且不需要隔离。然而, 输入电桥和EMI滤波器会引起误差。在轻负载下, 当EMI滤波器中的电流与负载电流相当时, 这种误差可能特别明显。通过利用适当的校准算法, 可以减小这些误差。两个一阶 $\Sigma$ - $\Delta$ 模数转换器(ADC)用于检测输入电压和输入电流。ADC的采样频率为1.6 MHz。在每个半交流线路周期结束时, 通过对瞬时值的平方求积分计算真有效值。

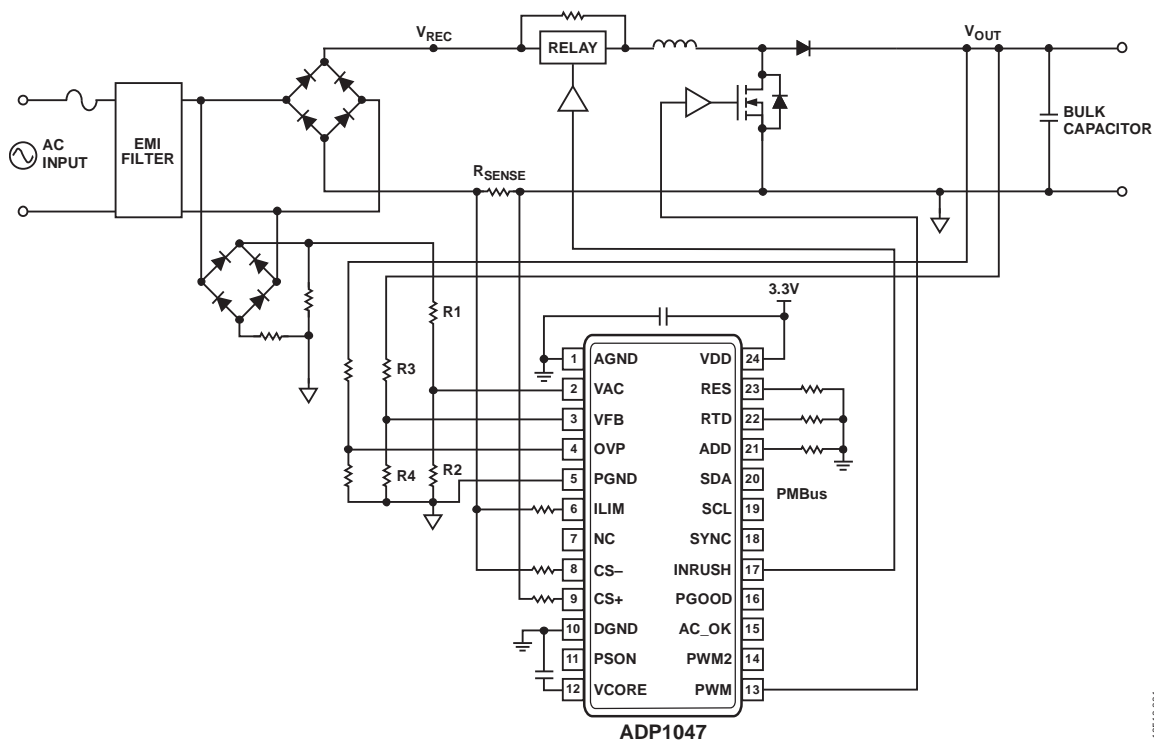


图1. 交流功率计量电路配置

## 目录

简介.....	1	交流线路周期测量.....	5
电路设置和测量.....	1	电压、电流和功率校准.....	5
修订历史.....	2	调整.....	6
测量.....	3	输入电压数字调整.....	6
输入电压测量.....	3	CS ADC数字调整.....	6
输入电流测量.....	3	VFB ADC数字调整.....	7
输入功率测量.....	4	功率计量数字调整.....	7
输出电压测量.....	4	实验结果.....	9

## 修订历史

2012年3月—修订版0：初始版

## 测量

### 输入电压测量

输入电压通过分压器(R1和R2)检测，分压后的电压送入VAC ADC。ADP1047可以根据VAC ADC读数和0xFE3B寄存器中的值(输入电压电阻分压器值)，计算输入电压值。

输入电压以线性格式用一个双字节值报告。Y是一个11位二进制补码整数，N是一个5位二进制补码整数。因此，实际值为 $X = Y \times 2^N$ 。READ\_VIN的指数必须在寄存器0xFE39的位[5:3]中设置。该指数决定最大输入电压；指数设置有3个选项，如表1所示。

表1. VIN指数选项和最大输入电压

寄存器0xFE39位 [5:3]的二进制值	VIN指数(N)	最大输入 电压(V)
101	-3	256
110	-2	512
111	-1	1024

对于85 V rms到265 V rms的通用输入线路，指数应为-2。

分压比 $K_{VIN}$ 同样以线性格式设置：

$$K_{VIN} = (R2 + R1)/R2$$

$K_{VIN}$ 的指数为寄存器0xFE3B的位[13:11]，尾数为寄存器0xFE3B的位[9:0]。可供设置的指数值有5个，如表2所示。

表2.  $K_{VIN}$ 指数选项和最大输入电压分压比

寄存器0xFE3B位 [13:11]的二进制值	$K_{VIN}$ 指数(N)	最大输入 电压分压比
100	-4	64
101	-3	128
110	-2	256
111	-1	512
000	0	1024

如果 $K_{VIN} = 385$ ，指数必须是-1或0。如果指数为-1，尾数应设置为 $2^{10} \times 385/512$ ；如果指数为0，尾数应设置为385。

### 输入电流测量

输入电流检测信号送入CS+和CS-引脚。ADP1047/ADP1048根据CS ADC读数和输入电流检测比IIN\_GSENSE(在寄存器0xFE3C中设置)，计算输入电流值。输入电流检测比 $IIN\_GSENSE = 1/R_{SENSE}$ ，同样以线性格式设置。

IIN\_GSENSE的指数为寄存器0xFE3C的位[15:11]，尾数为寄存器0xFE3C的位[9:0]。可供设置的指数值有9个，表3列出了指数值及相应的最大电流检测比。

表3. IIN\_GSENSE指数选项和最大电流检测比

寄存器0xFE3C位 [15:11]的二进制值	IIN_GSENSE 指数(N)	最大电流 检测比
10110	-10	1
10111	-9	2
11000	-8	4
11001	-7	8
11010	-6	16
11011	-5	32
11100	-4	64
11101	-3	128
11110	-2	256

例如，如果 $R_{SENSE}$ 为50 mΩ，则IIN\_GSENSE为20。为了获得最佳分辨率，应将IIN\_GSENSE指数设置为-5。IIN\_GSENSE的尾数为 $2^{10} \times 20/32$ 。

输入电流以线性格式通过PMBus命令报告。指数(寄存器0xFE39的位[10:6])必须根据额定最大输入电流值设置。要正确报告IIN，必须满足以下条件：

$$IIN\_MAX < 2^{11} \times 2^N$$

因此，

$$N > \log_2 \frac{IIN\_MAX}{2^{11}}$$

表4. IIN指数选项和最大输入电流

寄存器0xFE39位 [10:6]的二进制值	IIN指数(N)	最大输入 电流(A)
10110	-10	2
10111	-9	4
11000	-8	8
11001	-7	16
11010	-6	32
11011	-5	64

# AN-1145

## 输入功率测量

输入功率以线性格式通过PMBus命令报告。可供设置的指数值有8个，指数(寄存器0xFE39的位[2:0])必须根据额定最大输入功率值设置。要正确报告PIN，必须满足以下条件：

$$PIN < 2^{11} \times 2^N$$

因此，

$$N > \log_2 \frac{PIN}{2^{11}}$$

例如，如果最大PIN为600 W，则指数N应大于-2。为了获得最佳分辨率，指数N应为-1。

**表5. PIN指数选项和最大输入功率**

寄存器0xFE39位 [2:0]的二进制值	PIN指数(N)	最大输入 功率
101	-3	256
110	-2	512
111	-1	1024
000	0	2048
001	+1	4096
010	+2	8192
011	+3	16384
100	+4	32768

均值窗口可使用寄存器0xFE3A的位[2:0]在0全线路周期至4096全线路周期范围内编程。在每个均值周期结束时，将平均功率新值写入READ\_PIN寄存器(寄存器0x97)，并可通过接口回读，直至在下一个均值周期结束时被下一个平均值覆盖。

## 输出电压测量

输出电压通过分压器(R3和R4)检测，分压后的电压送入VFB ADC。ADP1047根据VFB ADC读数和0x2A寄存器中设置的VOUT\_SCALE\_MONITOR值(输出电压电阻分压器值)，计算输出电压值。

VOUT\_SCALE\_MONITOR (K)同样以线性格式设置：

$$K = (R3 + R4)/R4$$

K的指数为寄存器0x2A的位[13:11]，尾数为寄存器0x2A的位[9:0]。可供设置的指数值有5个，如表6所示。

**表6. VOUT\_SCALE\_MONITOR指数选项**

寄存器0x2A位 [13:11]的二进制值	K指数 (N)	最大 VOUT_SCALE_MONITOR
100	-4	64
101	-3	128
110	-2	256
111	-1	512
000	0	1024

为获得最佳性能，VFB ADC电压建议设为1 V。因此，如果标称输出电压为385 V，指数应为-1以获得最佳分辨率。

输出电压同样以线性格式报告。READ\_VOUT的指数必须在寄存器0x20的位[2:0]中设置。该指数决定最大输出电压；指数设置有4个选项，如表7所示。

**表7. V<sub>OUT</sub>指数选项和最大输出电压**

寄存器0x20位 [2:0]的二进制值	V <sub>OUT</sub> 指数(N)	最大输出 电压(V)
101	-3	256
110	-2	512
111	-1	1024
000	0	2048

对于385 V或400 V左右的输出电压，指数应为-2。

## 交流线路周期测量

在每个交流线路周期结束时，通过对各线路周期的瞬时值求积分计算输入电压和电流均方根值。线路周期测量是正确确定交流输入电压和电流的均方根值，从而最终确定交流功率有效值的关键步骤。

控制器利用自适应算法确定过零转换，并测量正负方向上连续两次越过自适应阈值的时间间隔。过零点被认定为该时间间隔的中点。测量到过零点后，过零点之间的时间间隔就是交流线路的半周期。这种方法支持多种不同的线路条件，能够可靠地给出线路周期。

对于直流输入系统，ADP1047将MAX\_AC\_PERIOD\_SET的值用作计算所需的周期值。因此，ADP1047也能精确报告直流输入系统的输入电压、电流和功率。

## 电压、电流和功率校准

输入电压和电流可以分别校准，以便最大程度地降低传感器造成的误差和ADC引入的误差。这种校准通过增益和失调整实现。精确校准电流和电压后，仍然可以对功率测量进行进一步校准。这种失调和增益校准可以针对不同的线路条件进行优化，以消除EMI滤波器和输入电桥整流器引入的误差。

ADP1047中的三个 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC具有数字调整功能，如下所示：

- VAC\_ADC用于测量输入电压
- CS\_ADC用于测量输入电流
- VFB\_ADC用于测量反馈电压

在ADP1047/ADP1048数据手册的“电源系统校准和调整”部分，仅讨论了增益调整。本应用笔记讨论如何同时使用增益调整和失调整。

这些数字调整功能使用10个寄存器，下面将讨论这些寄存器的意义以及如何设置。

这11个8位寄存器如下所示：

- VAC ADC失调整(寄存器0xFE53)
- VAC ADC增益调整(寄存器0xFE40)
- CS ADC失调整(寄存器0xFE54和寄存器0xFE7F)
- CS ADC增益调整(寄存器0xFE42和寄存器0xFE7E)
- VFB ADC增益调整(寄存器0xFE41)
- 低线路输入的功率计量失调整寄存器(寄存器0xFE33)
- 低线路输入的功率计量增益调整寄存器(寄存器0xFE34)
- 高线路输入的功率计量失调整寄存器(寄存器0xFE8E)
- 高线路输入的功率计量增益调整寄存器(寄存器0xFE8F)

## 调整

### 输入电压数字调整

VAC ADC失调调整寄存器调整输入电压的失调误差，VAC ADC增益调整寄存器调整输入电压的增益误差。

### 输入电压数字调整寄存器定义

下面是VAC ADC失调调整和VAC ADC增益调整寄存器的定义：

- 失调误差 =  $\left(\frac{VAC\ ADC\ offset\ trim[7:0]}{2^{11}}\right) \times 1.6 \times K_{VIN}$

当VAC ADC失调调整寄存器的位[7:0] = 0x0，失调范围为0；当VAC ADC失调调整寄存器的位[7:0] = 0xFF，失调为满量程输入范围( $1.6\ V \times K_{VIN}$ )的12.5%。

- 当  $1 - \frac{VIN}{VIN\_R} > 0$ ，VAC ADC增益调整[7] = 1

- 当  $1 - \frac{VIN}{VIN\_R} \leq 0$ ，VAC ADC增益调整[7] = 0

其中：

VIN是已校准万用表提供的输入电压读数。

VIN\_R是ADP1047/ADP1048提供的输入电压读数。

- 增益误差 =  $\frac{VAC\ ADC\ gain\ trim[6:0]}{2^{11}}$

当VAC ADC增益调整寄存器的位[7:0] = 0x0，增益误差为0；当VAC ADC增益调整寄存器的位[7:0] = 0xFF，增益误差为-6.2%；当VAC ADC增益调整寄存器的位[7:0] = 0x7F，增益误差为+6.2%。

### 输入电压数字调整步骤

输入电压数字调整的步骤如下：

- 对PFC施加一个零输入电压，读取READ\_VIN寄存器。此外，调整VAC ADC失调调整寄存器值，直到READ\_VIN寄存器的尾数为0。
- 将一块已校准万用表连接到PFC电路的输入端。对PFC电路施加一个110 V交流输入电压，并将负载设置为满负载条件。调整VAC ADC增益调整寄存器，直到READ\_VIN寄存器等于万用表的输入电压读数。

$$VAC\ ADC\ 失调\ 调整[6:0] = \left| \frac{VIN}{VIN\_R} \right| \times 2^{11} - 1$$

### CS ADC数字调整

CS ADC失调调整寄存器调整PFC输入电流的失调误差，CS ADC增益调整寄存器调整PFC输入电流的增益误差。由于CS ADC输入范围有500 mV和750 mV两个选项，因此调整寄存器分别适用于各范围选择。

### CS ADC数字调整寄存器定义

下面是CS ADC失调调整和CS ADC增益调整寄存器的定义：

- 失调误差 =  $\left(\frac{CS\ ADC\ offset\ trim[7:0]}{2^{11}}\right) \times \frac{CS\_RANGE}{R_{SENSE}}$

根据用户的选择，CS\_RANGE为500 mV或750 mV。这些寄存器的位[1]设置CS ADC输入范围。当CS ADC失调调整寄存器的位[7:0] = 0x0，失调范围为0；当CS ADC失调调整寄存器的位[7:0] = 0xFF，失调为满量程输入电流范围( $CS\_RANGE/R_{SENSE}$ )的12.5%。

- 增益误差 =  $\frac{CS\ ADC\ gain\ trim[6:0]}{2^{11}}$

当CS ADC增益调整寄存器的位[7:0] = 0x0，增益误差为0；当CS ADC增益调整寄存器的位[7:0] = 0xFF，增益误差为-6.2%；当CS ADC增益调整寄存器的位[7:0] = 0x7F，增益误差为+6.2%。

### CS ADC数字调整步骤

CS ADC数字调整的步骤如下：

- 将CS ADC增益调整寄存器和CS ADC失调调整寄存器设置为0。使用已校准万用表测量输入电流。
- 对PFC施加一个110 V交流输入电压，将负载设置为满负载的一半，然后读取READ\_IIN；此值为IIN\_Y1。在此条件下，输入电流的万用表读数为IIN\_X1。
- 将负载设置为满负载，然后读取READ\_IIN；此值为IIN\_Y2。在此条件下，输入电流的万用表读数为IIN\_X2。输入电流失调误差为

$$IIN\_OFF\_ERR = \frac{IIN\_X1 \times IIN\_Y2 - IIN\_X2 \times IIN\_Y1}{IIN\_X1 - IIN\_X2}$$

$$CS\ ADC\ 失调\ 调整[7:0] = IIN\_OFF\_ERR \times 2^{11}$$

4. 将负载设置为满负载，然后读取READ\_IIN；此值为IIN\_R。在此条件下，输入电流的万用表读数为IIN。

$$\text{当 } 1 - \frac{IIN}{IIN\_R} > 0, \text{ CS ADC增益调整}[7] = 1$$

$$\text{当 } 1 - \frac{IIN}{IIN\_R} \leq 0, \text{ CS ADC增益调整}[7] = 0$$

$$\text{CS ADC增益调整}[6:0] = \left\lfloor \frac{IIN}{IIN\_R} \right\rfloor \times 2^{11} - 1$$

注意，CS ADC的两个输入范围均可以使用上述调整步骤。

### VFB ADC数字调整

VFB ADC增益调整寄存器调整输出电压的增益误差。未针对输出电压的失调误差设计失调调整寄存器。实际输出电压定义为 $V_{OUT}$ ，理想输出电压定义为 $V_{REF}$ 。

### VFB ADC数字调整寄存器定义

下面是VFB ADC增益调整寄存器的定义：

- 当  $1 - \frac{V_{REF}}{V_{OUT}} > 0$ ，VFB ADC增益调整[7] = 1

- 当  $1 - \frac{V_{REF}}{V_{OUT}} \leq 0$ ，VFB ADC增益调整[7] = 0

- 增益误差 =  $\frac{\text{VFB ADC gain trim}[6:0]}{2^{11}}$

当VFB ADC增益调整寄存器的位[7:0] = 0x0，增益误差为0；当VFB ADC增益调整寄存器的位[7:0] = 0xFF，增益误差为-6.2%；当VFB ADC增益调整寄存器的位[7:0] = 0x7F，增益误差为6.2%。

### VFB ADC数字调整步骤

VFB ADC数字调整的步骤如下：

1. 开启PFC电路。使用校准过的万用表读取输出电压。
2. 调节VFB ADC增益调整寄存器(寄存器0xFE41)，直至电源输出READ\_VOUT寄存器内的确切值(寄存器0x8B)。

$$\text{VFB ADC增益调整}[6:0] = \left\lfloor \frac{V_{REF}}{V_{OUT}} \right\rfloor \times 2^{11} - 1$$

### 功率计量数字调整

低线路输入功率计量失调调整寄存器设计用于校正低线路输入条件下输入功率测量的失调误差。低线路输入功率计量增益调整寄存器设计用于校正低线路输入条件下输入功率测量的增益误差。

高线路输入功率计量失调调整寄存器设计用于校正高线路输入条件下输入功率测量的失调误差。高线路输入功率计量增益调整寄存器设计用于校正高线路输入条件下输入功率测量的增益误差。

这四个寄存器专为用户而设计，用以补偿EMI滤波器和桥式整流器的功率损耗。

### 功率计量数字调整寄存器定义

下面说明低线路输入功率计量失调调整寄存器、低线路输入功率计量增益调整寄存器、高线路输入功率计量失调调整寄存器、高线路输入功率计量增益调整寄存器的定义。

对于低线路输入，

- 失调误差 =

$$\left( \frac{\text{Power Metering Offset Trim for Low Line Input [6:0]}}{2^{11}} \right) \times 1.6 \times K_{VIN} \times \frac{\text{CS\_RANGE}}{\text{RSENSE}}$$

当低线路输入功率计量失调调整寄存器的位[7:0] = 0x0，失调范围为0；当低线路输入功率计量失调调整寄存器的位[7:0] = 0x7F，失调为满功率的+6.2%；当低线路输入功率计量失调调整寄存器的位[7:0] = 0xFF，失调为满功率的-6.2%。

- $P_{FULL}$  (满功率) =  $1.6 \times K_{VIN} \times \frac{\text{CS\_RANGE}}{\text{RSENSE}}$

- 增益误差 =

$$\frac{\text{Power Metering Gain Trim for Low Line Input}[6:0]}{2^{11}}$$

当低线路输入功率计量增益调整寄存器的位[7:0] = 0x0，增益误差为0；当低线路输入功率计量增益调整寄存器的位[7:0] = 0xFF，增益误差为-6.2%；当低线路输入功率计量增益调整寄存器的位[7:0] = 0x7F，增益误差为+6.2%。

对于高线路输入，

- 失调误差 =

$$\left( \frac{\text{Power Metering Offset Trim for High Line Input [6:0]}}{2^{11}} \right) \times$$

$$1.6 \times K_{VIN} \times \frac{CS\_RANGE}{RSENSE}$$

当高线路输入功率计量失调调整寄存器的位[7:0] = 0x0，失调范围为0；当高线路输入功率计量失调调整寄存器的位[7:0] = 0x7F，失调为满功率的+6.2%；当高线路输入功率计量失调调整寄存器的位[7:0] = 0xFF，失调为满功率的-6.2%。

- 增益误差 =

$$\frac{\text{Power Metering Gain Trim for High Line Input [6:0]}}{2^{11}}$$

当高线路输入功率计量增益调整寄存器的位[7:0] = 0x0，增益误差为0；当高线路输入功率计量增益调整寄存器的位[7:0] = 0xFF，增益误差为-6.2%；当高线路输入功率计量增益调整寄存器的位[7:0] = 0x7F，增益误差为+6.2%。

### 功率计量数字调整步骤

功率计量数字调整的步骤如下：

1. 将低线路输入功率计量失调调整寄存器 and 低线路输入功率计量增益调整寄存器设置为0。对PFC电路施加一个110 V交流输入电压。
2. 将负载设置为满负载的20%，读取READ\_PIN寄存器，并将读数记录为 $P_{m1}$ 。将已校准功率计测得的输入功率读数记录为 $P_1$ 。
3. 将负载设置为满负载，读取READ\_PIN寄存器，并将读数记录为 $P_{m2}$ 。将已校准功率计测得的输入功率读数记录为 $P_2$ 。

MEASURED POWER

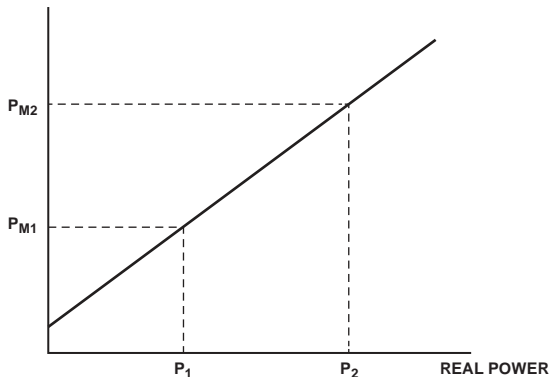


图2. 实测功率与真实功率

10510-002

4. 基于这些数据，失调误差和增益误差可以计算如下：

$$\text{失调误差} = \frac{P_1 P_{m2} - P_2 P_{m1}}{P_1 - P_2}$$

$$\text{增益误差} = \left| \frac{P_1 - P_2}{P_{m1} - P_{m2}} - 1 \right|$$

5. 低线路输入功率计量失调调整寄存器：

$$\text{当 } \frac{P_1 P_{m2} - P_2 P_{m1}}{P_1 - P_2} \geq 0, \text{ 位}[7] = 0.$$

低线路输入功率计量失调调整寄存器：

$$\text{当 } \frac{P_1 P_{m2} - P_2 P_{m1}}{P_1 - P_2} < 0, \text{ 位}[7] = 1.$$

低线路输入功率计量失调调整寄存器：

$$\text{位}[6:0] = \frac{P_1 P_{m2} - P_2 P_{m1}}{P_1 - P_2} \times \frac{2^{11}}{P_{FULL}}$$

低线路输入功率计量增益调整寄存器：

$$\text{当 } 1 - \frac{P_1 - P_2}{P_{m1} - P_{m2}} > 0, \text{ 位}[7] = 1.$$

低线路输入功率计量增益调整寄存器：

$$\text{当 } 1 - \frac{P_1 - P_2}{P_{m1} - P_{m2}} \leq 0, \text{ 位}[7] = 0.$$

低线路输入功率计量增益调整寄存器：

$$\text{位}[6:0] = \left| \frac{P_1 - P_2}{P_{m1} - P_{m2}} - 1 \right| \times 2^{11}.$$

6. 将高线路输入功率计量增益调整寄存器和高线路输入功率计量失调调整寄存器设置为0。对PFC电路施加一个230 V交流输入电压。

7. 重复步骤2至步骤4。

8. 高线路输入功率计量失调调整寄存器：

$$\text{当 } \frac{P_1 P_{m2} - P_2 P_{m1}}{P_1 - P_2} \geq 0, \text{ 位}[7] = 0.$$

高线路输入功率计量失调调整寄存器：

$$\text{当 } \frac{P_1 P_{m2} - P_2 P_{m1}}{P_1 - P_2} < 0, \text{ 位}[7] = 1.$$

高线路输入功率计量失调调整寄存器：

$$\text{位}[6:0] = \frac{P_1 P_{m2} - P_2 P_{m1}}{P_1 - P_2} \times \frac{2^{11}}{P_{FULL}}$$

高线路输入功率计量增益调整寄存器：

$$\text{当 } 1 - \frac{P_1 - P_2}{P_{m1} - P_{m2}} > 0, \text{ 位}[7] = 1.$$

高线路输入功率计量增益调整寄存器：

$$\text{当 } 1 - \frac{P_1 - P_2}{P_{m1} - P_{m2}} \leq 0, \text{ 位}[7] = 0.$$

高线路输入功率计量增益调整寄存器：

$$\text{位}[6:0] = \left| \frac{P_1 - P_2}{P_{m1} - P_{m2}} - 1 \right| \times 2^{11}$$



## 实验结果

测量在利用ADP1047实现的300 W演示板上进行。演示板在CCM模式下以100 kHz频率工作，输出电压调节到385 V。

图3显示了理想输入源和宽输入范围内与商用功率计相比较得出的实测功率误差，测试在25°C室温下进行。图4至图7显示了非理想正弦交流线路电压的实验结果(25°C)。此外，图4至图7还显示了真有效值功率测量的优点，即便是非理想交流线路电压，也能保持高精度。注意，图6所示交流输入源的整流输入电压与直流输入电压大致相似。

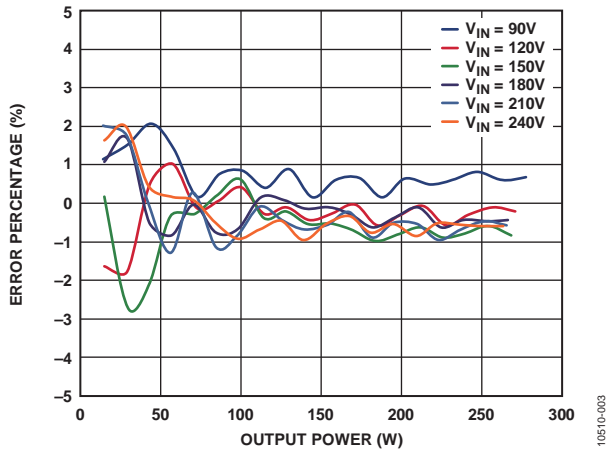


图3. 理想交流输入源下的实测功率误差

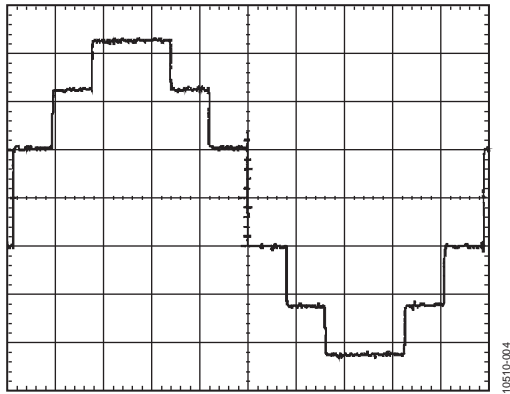


图4. 非理想交流输入源1的波形

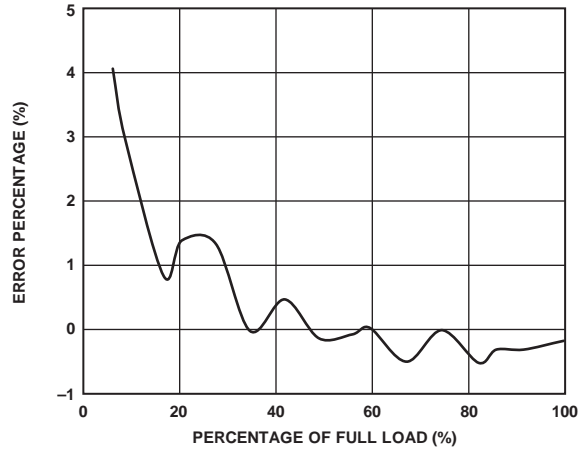


图5. 非理想交流输入源1下的实测功率误差

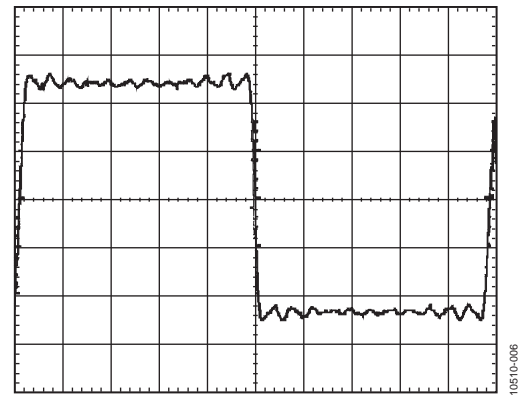


图6. 非理想交流输入源2的波形

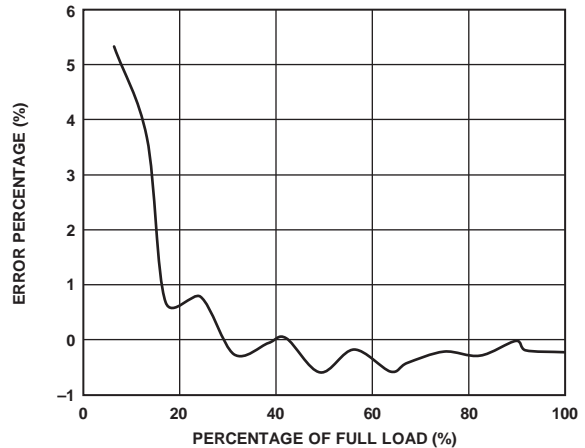


图7. 非理想交流输入源2下的实测功率误差

**注释**

注释

**注释**