

Application Note

使用 **ADS131M0x** 进行相位补偿与多器件同步

Josh Brown

摘要

在功率测量系统中，由电流互感器和信号调节电路等测量硬件引入的相位误差，会破坏电压和电流计算的准确性。即使 0.1° 的相位误差，也会产生 0.3% 的测量误差，这种误差在电能计量应用中会显著累积。**ADS131M0x** 是一个包含 2、3、4、6 和 8 通道的同步采样、24 位 $\Delta-\Sigma$ 模数转换器系列，专为精确功率测量而设计。本应用手册适用于开发电能计量、电机控制和电能质量监测系统的设计人员。文中介绍了如何利用 **ADS131M0x** 内置的相位补偿特性来校准外部测量硬件引入的相位误差，以及如何同步多个 **ADS131M0x** 器件来消除器件间的相位偏移。按照本文中的指南，可在基于 **ADS131M0x** 的单器件和多器件系统中实现精确、可靠的功率测量。



内容

1 简介	3
2 什么是相移和相位误差？	4
3 如何使用 ADS131M08 校准输出相位误差	7
3.1 确定相位误差	7
3.2 转换为时间域	7
3.3 转换为调制器时钟周期数	7
3.4 转换为二进制并写入 PHASEn[9:0] 位	8
3.5 相位校准注意事项	8
3.6 相位校准过程总结	8
3.7 使用相位校准特性	9
4 同步 ADS131M0x	11
4.1 ADS131M0x 上的 SYNC/RESET 引脚	11
4.2 时钟信号布线的重要性	11
5 总结	13
6 参考资料	14

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

电能计量、电机控制和电能质量监测系统精确功率测量，要求电压与电流通道之间实现精确的相位对齐。电流互感器 (CT)、信号调节电路或 ADC 等测量硬件的时序失配可能会在这些通道之间引入相位误差，从而影响功率计算的准确性。

ADS131M0x 是一个包含 2、3、4、6 和 8 通道的同步采样、24 位 Δ - Σ 模数转换器系列，专为精确功率测量而设计。两个主要特性解决了基于 ADS131M0x 的系统中的相位误差问题：

- **相位补偿** — CHn_CFG 寄存器中的 PHASEn[9:0] 位可对每个通道施加可编程的相移，补偿外部测量硬件引入的相位误差。
- **多器件同步** — 需要多个 ADS131M0x 器件的更高通道数系统会在器件之间引入额外的未知相移，即使共享相同的时钟源时也是如此。同时对所有器件的 SYNC/RESET 引脚施加脉冲，消除这种器件间相移，为同步转换建立共同的时间基准。

本应用手册阐述了相位误差的来源及其影响，演示了如何使用 ADS131M08 的相位补偿特性，并说明了如何同步多个 ADS131M0x 器件以消除器件间相移。

2 什么是相移和相位误差？

相移是指正弦波沿 x 轴的水平偏移。公式 1 给出了中心位于原点、无相移的标准正弦波公式：

$$1 A(t) = A_{\max} \sin(\omega t) \quad (1)$$

其中：

- $A_{\max}$ 为波的最大振幅
- ωt 为波形的角频率

图 2-1 以图形方式将此公式展示为单个正弦波。

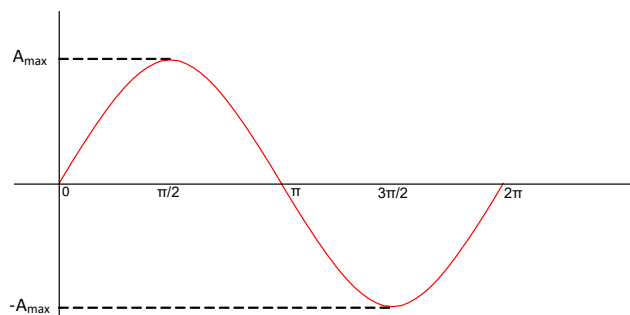


图 2-1. 标准正弦波公式图形

两个测得的正弦波信号之间可能存在相移。该相移用 ϕ 表示，具有相移的正弦波公式由公式 2 给出：

$$2 A(t) = A_{\max} \sin(\omega t \pm \phi) \quad (2)$$

其中：

- $A_{\max}$ 为波形的最大振幅
- ωt 为波形的角频率
- ϕ 为两个波形之间的负载相角，以度或弧度表示

图 2-2 描绘了相移为 ϕ 的两个正弦波。

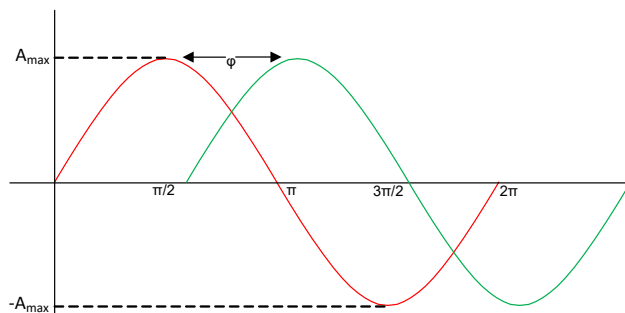


图 2-2. 两个相移为 ϕ 的正弦波图

举例而言，功率测量系统的电压与电流波形之间可能存在负载相角。该相移可分为两个不同的分量：

- 负载相角 (ϕ) — 由负载无功特性引起的预期相移。可使用负载相角来确定功率因数并进行有功功率计算。
- 相位误差 ($\Delta\phi$) — 由测量硬件（如 CT、信号调节电路或 ADC）的时序失配引入的无用相移。与负载相角不同，该分量会干扰功率测量，因此需要进行补偿。

图 2-3 显示了典型的功率测量系统波形，其中绿色为电压信号 $V(t)$ ，红色为电流信号 $I(t)$ ：

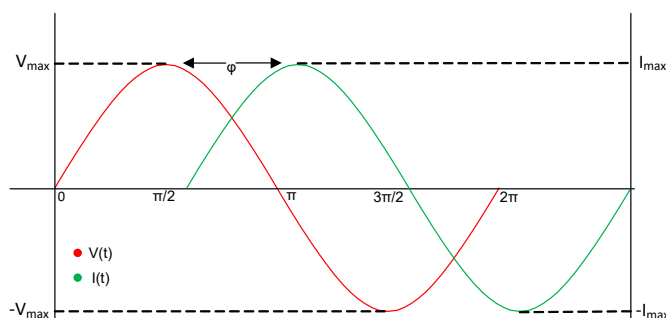


图 2-3. 电压和电流图，相移为 φ

图 2-3 中的信号可表示为：

$$3 \quad V(t) = V_{\max} \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$4 \quad I(t) = I_{\max} \sin(\omega t - \varphi) \quad (4)$$

其中：

- $V_{\max}$ 为最大电压振幅
- $I_{\max}$ 为最大电流振幅

公式 4 表明从角频率中减去了负载相位角，即 $\omega t - \varphi$ 。这种减法使得 $I(t)$ 相对 $V(t)$ 沿 x 轴向右平移，如图 2-3 所示。这种关系称为 $I(t)$ 滞后于 $V(t)$ ，常见于电感负载。当相移表示为 $(\omega t + \varphi)$ 时， $I(t)$ 相对 $V(t)$ 沿 x 轴向左平移。这种关系称为 $I(t)$ 超前于 $V(t)$ ，常见于电容负载。对于纯电阻负载， $\varphi = 0$ ，两个波形对齐。随着负载无功分量的增加， φ 会增加，波形之间的失配程度会加大。

公式 5 利用公式 3 和公式 4 计算瞬时功率 — 即任一时刻的功率值：

$$5 \quad P(t) = V_{\max} \sin(\omega t) * I_{\max} \sin(\omega t - \varphi) \quad (5)$$

公式 5 计算的是仅存在负载相角所导致相移时的理想瞬时功率。不过，如前所述，相位误差也会影响总相移。公式 6 计算的是同时存在负载相角和相位误差所导致相移时的瞬时功率：

$$6 \quad P(t) = V_{\max} \sin(\omega t) * I_{\max} \sin(\omega t - \varphi - \Delta \varphi) \quad (6)$$

其中：

- $\Delta \varphi$ is the phase error from the system measurement hardware (7)

公式 6 给出了单一时刻的功率值，该值会随着电压和电流波形的振荡而变化。因此，实际功率测量系统需对一个完整周期内的瞬时功率求平均值，以确定负载在运行期间消耗的实际功率。对公式 6 在整个周期内求平均值，可得到公式 7 所示的平均实际功率公式：

$$7 \quad P_{\text{real}} = V_{\text{rms}} * I_{\text{rms}} \cos(\varphi + \Delta \varphi) \quad (8)$$

若系统中遗留有未校准的相位误差 $\Delta \varphi$ ，则会给功率测量引入系统误差。公式 8 计算由相位误差引起的功率测量误差：

$$8 \quad \text{Error} = \frac{\cos(\varphi + \Delta \varphi) - \cos(\varphi)}{\cos(\varphi)} * 100\% \quad (9)$$

例如，将公式 8 应用于一个功率因数为 0.5 (相角 60°) 的 50Hz 系统，观察 0.1° 相位误差对功率测量的影响。

$$\% \text{ Error} = \frac{\cos(60 + 0.1) - \cos(60)}{\cos(60)} * 100\% \quad (10)$$

$$\% \text{ Error} = \frac{-0.0015}{0.5} * 100\% \quad (11)$$

$$\% \text{ Error} = -0.3\% \quad (12)$$

0.1° 的相位误差会导致测得功率相对于实际功率产生 0.3% 的误差。1° 的相位误差 (在功率因数为 0.5 时常见于 1.0 级 CT 中) 会导致测得功率相对于实际功率产生 3% 的误差。通过校准消除相位误差，对于确保精确的功率测量至关重要。

3 如何使用 ADS131M08 校准输出相位误差

ADS131M08 是一款 8 通道、24 位同步采样 Δ - Σ ADC。后续章节以 ADS131M08 为例进行说明，但这些信息适用于 ADS131M0x 系列中的所有器件。ADS131M08 提供了一项内置特性，可补偿由 CT 等外部测量硬件引入的相位误差。CHn_CFG 寄存器中的 PHASEn[9:0] 位用于实现相位补偿。将 PHASEn[9:0] 中的 n 替换为特定的通道编号，即可对该通道施加相位调节。本节后续内容将介绍如何计算所需的相移量并将其写入 CHn_CFG 寄存器中的 PHASEn[9:0] 位。

3.1 确定相位误差

确定系统相位误差是实现 ADS131M08 相位补偿特性的第一步。CT、电压互感器 (PT) 以及任何包括放大器和 RC 滤波器的前端电路都可能引入相位误差。本应用手册以 CT 为例演示了相位校准过程，但 ADS131M08 的相位校准特性可以补偿上述任何误差源。CT 通常用在功率测量系统中来测量交流电流。然而，由于磁芯的磁特性，CT 天然会在测得电流和实际电流之间引入相移。CT 制造商通常以弧分或度为单位规定相位误差。表 1 展示了多个 CT 精度等级的相位误差。

精度等级	相位误差 (角分)	相位误差 (度)
0.1	± 5 分	$\pm 0.083^\circ$
0.2	± 10 分	$\pm 0.0167^\circ$
0.5	± 30 分	$\pm 0.5^\circ$
1.0	± 60 分	$\pm 1^\circ$
3.0	± 180 分	$\pm 3^\circ$

表 1. 常见 CT 精度等级规格

计费级电表使用精度等级为 0.2、相位误差为 $\pm 0.0167^\circ$ 的 CT。

3.2 转换为时间域

确定相位误差后，下一步是将其转换为时间域。公式 9 展示了如何将 CT 引起的相位误差转换为时间域：

$$\Delta t = \frac{\Delta \phi}{f \cdot 360^\circ} \quad (13)$$

其中：

- Δt 为延时时间 (秒)
- $\Delta \phi$ 为 CT 引起的相位误差 (度)
- f 为电源线路频率，通常为 50Hz 或 60Hz

假设电源线路频率为 50Hz，将 0.2 级 CT 规格代入公式 9，得到 9.28 的时间偏移：

$$\Delta t = \frac{0.0167^\circ}{50\text{Hz} \cdot 360^\circ} = 9.28\mu\text{s} \quad (14)$$

9.28 μs 表示由标准 0.2 级 CT 的相位误差在系统中引起的时间偏移。

3.3 转换为调制器时钟周期数

将相位补偿值写入 PHASEn[9:0] 寄存器，作为所需调制器时钟周期数 t_{MOD} 的二进制表示。使用公式 10 计算 t_{MOD} 并使用公式 11 计算调制器频率 f_{MOD} 。

$$10 \ t_{\text{MOD}} = \frac{1}{f_{\text{MOD}}} \quad (15)$$

$$11 \ f_{\text{MOD}} = \frac{f_{\text{CLK}}}{2} \quad (16)$$

其中：

- f_{CLK} 是主时钟频率 (ADS131M08 在高分辨率模式下通常为 8.192MHz)
- f_{MOD} 为调制器时钟频率
- t_{MOD} 为调制器时钟周期

公式 12 利用来自 CT 的时间延迟 Δt 和 t_{MOD} ，确定调制器时钟周期数：

$$12 \ N = \frac{\Delta t}{t_{MOD}} \quad (17)$$

其中：

- N 为应写入 CHn_CFG 寄存器 PHASEn[9:0] 位的调制器时钟周期数
- Δt 为来自 CT 的延时时间 (秒)
- t_{MOD} 为调制器时钟周期

针对 0.2 级 CT 的 9.28 μ s 时间偏移，结合公式 10、11 和 12，得到相当于 38 t_{MOD} 的相位延迟：

$$13 \ N = \frac{9.28\mu s}{\left(\frac{2}{8.192MHz}\right)} = 38 \quad (18)$$

3.4 转换为二进制并写入 PHASEn[9:0] 位

ADS131M08 的 PHASEn[9:0] 位接受 10 位二进制补码值，需要将计算出的时钟周期数转换为二进制。使用公式 13 得出 $N = 38 \ t_{MOD}$ ，二进制

值为 00 0010 0110b。此外，ADS131M08 的过采样率 (OSR) 定义了可写入 PHASEn[9:0] 位的值范围，因此会影响相位校准。请参阅 ADS131M08 数据表中的“不同 OSR 设置下的相位校准设定限值”表，确认时钟周期数在对应 OSR 允许的相移范围内。

最后，在完成上述步骤后，通过串行外设接口 (SPI) 将转换得到的二进制值写入 CHn_CFG 寄存器的 PHASEn[9:0] 位。

3.5 相位校准注意事项

使用 ADS131M08 相位校准功能时，有一些重要的注意事项。需要负相移的应用可以向 PHASEn[9:0] 位写入负值。但是，负相移需要额外设置 MODE 寄存器中的 DRDY_SEL[1:0] 位。这些位对 DRDY 进行配置，根据不同的通道条件和转换数据的可用情况对其进行置位。默认情况下，DRDY_SEL = 00b，此时当具有最大正相位校准设置的通道产生新转换结果时，DRDY 即置为有效。如果在未更改 DRDY_SEL 的情况下向 PHASEn 寄存器写入负值，会导致 DRDY 触发时不带偏移。设置 DRDY_SEL = 10b 或 11b，以将 DRDY 配置为当具有最大负相位校准设置的通道产生新转换数据时置为有效。有关 DRDY_SEL 位的更多信息，请参阅 ADS131M08 数据表的“数据就绪 (DRDY)”部分。

使用全局斩波模式时，ADS131M08 的相位校准特性会被禁用。在全局斩波模式下，每次改变输入极性都会复位 ADC 的数字滤波器，这会禁用相位校准特性。具体说明见 ADS131M08 数据表的“全局斩波模式”部分。

当 OSR 低于 2,048 时，若所需相移大于半个采样周期，则需要采取特定步骤。相关步骤请参阅 ADS131M08 数据表的“通道相位校准”部分。

3.6 相位校准过程总结

可通过以下步骤启用 ADS131M08 相位补偿特性：

1. 确定传感器相位误差 (通常以度或角分给出)，如表 1 所示。
2. 使用公式 9 将相位误差转换为时间域，以确定延时时间。
3. 使用公式 10、11 和 12，将延时时间转换为调制器时钟周期数。
4. 将调制器时钟周期数转换为 10 位二进制补码。
5. 将 10 位二进制补码值写入 CHn_CFG 寄存器中对应于目标通道的 PHASEn[9:0] 位。注意：写入负相移值时，将 DRDY_SEL[1:0] 设置为 10b 或 11b。

3.7 使用相位校准特性

下面的示例将一个已启用相位校准的 ADS131M08 通道与未编程任何相位校准的通道进行了比较。图 3-1 重现了两个 ADS131M08 通道的 DRDY 信号：ADS131M08(0) 为红色，ADS131M08(1) 为黑色。

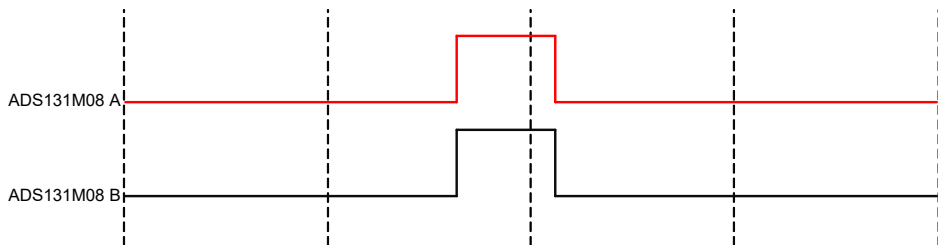


图 3-1. 未施加相位校准的两个通道的 DRDY 信号

这一 DRDY 时序差异等效于图 3-2 所示波形的数字表示，其中负载相角 ϕ 和相位误差 $\Delta\phi$ 同时存在。

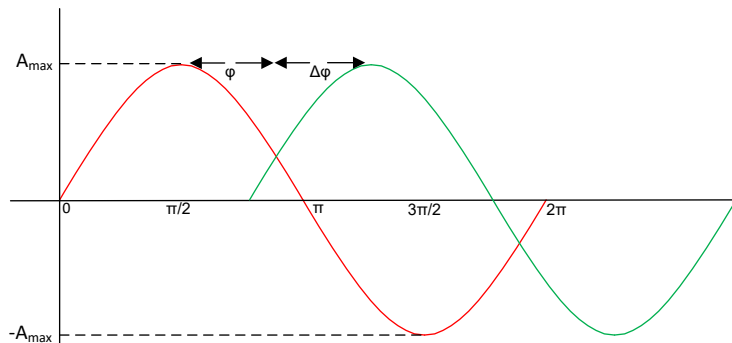


图 3-2. 两个测得的信号，相移为 $\phi + \Delta\phi$

其中 $\Delta\phi$ 是需要通过向 ADS131M08 通道施加相移来消除的无用相位误差。

假设公式 13 得出的 $38t_{MOD}$ ($9.28\mu s$) 已转换为二进制，并已编程到 ADS131M08(0) 的 PHASE0[9:0] 寄存器中。在图 3-3 中展示的 DRDY 信号中，向 ADS131M08(0) 施加了 $9.28\mu s$ 的正相移。

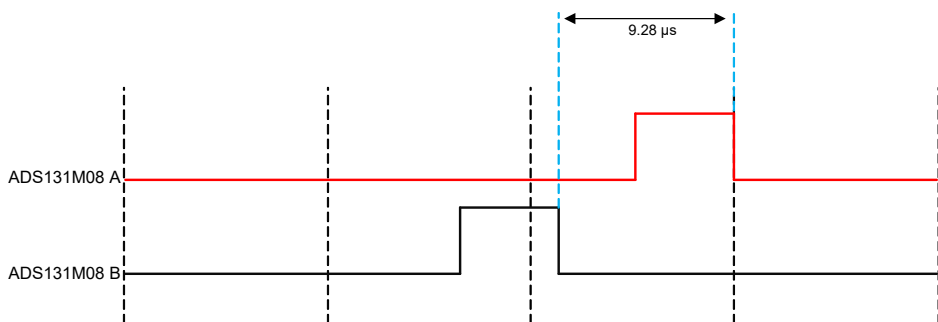


图 3-3. 两个通道的 DRDY 信号，其中在通道 0 上施加了 $9.28\mu s$ 相移

相位误差得到补偿后，所得信号便得到了校正。图 3-4 显示了施加相位补偿后的两个测得信号； $\Delta\phi$ 分量已被移除，仅留下预期的负载相角 ϕ 。

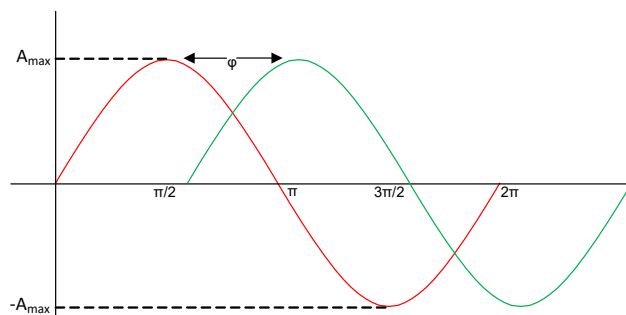


图 3-4. 两个测得的信号，相移为 ϕ

3.7.1 相位校准注意事项示例

有关写入负相移的详细信息，请参阅“相位校准注意事项”部分。在施加负相移之前，必须正确设置 DRDY_SEL[1:0] 位；否则，DRDY 将无法正确置为有效，相移看起来未实施。图 3-5 重现了在未正确设置 DRDY_SEL[1:0] 位的情况下，对图 3-1 中的 ADS131M08(0) 施加负相移后的结果。

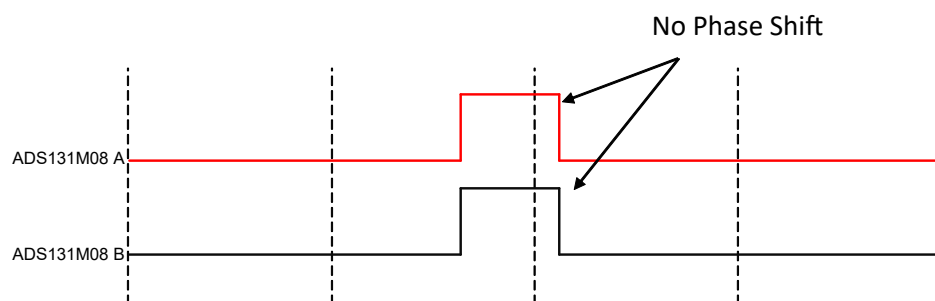


图 3-5. 施加负相位校准且 DRDY_SEL[1:0] 位设置错误时的 DRDY 信号

如果 DRDY_SEL[1:0] 设置不正确，DRDY 信号将无法正确置为有效，ADC 之间将不会出现相移。将 DRDY_SEL[1:0] 设为 10b 或 11b，使 DRDY 信号在具有最大负校准量的通道上置为有效，即可准确反映编程设定的相移。图 3-6 重现了在图 3-1 所示的两个 DRDY 信号之间，为 ADS131M08(0) 编程设定了 -9.28 相移且 DRDY_SEL[1:0] 位正确设置后的相位差。

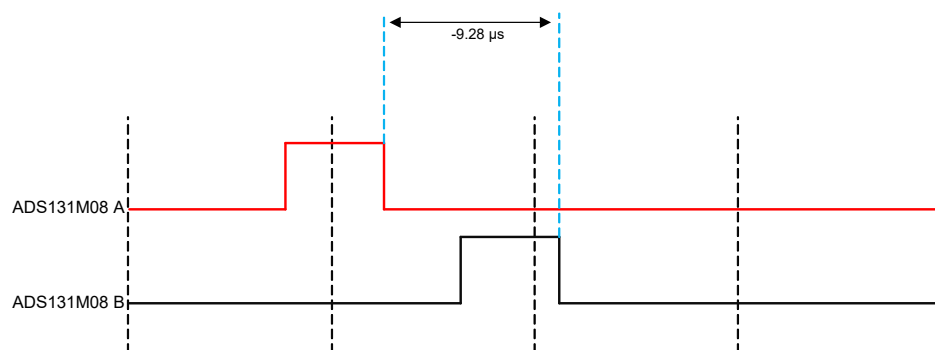


图 3-6. 施加 -9.28μs 相位校准且 DRDY_SEL[1:0] 位设置正确时的 DRDY 信号

4 同步 ADS131M0x

当使用多个未经同步的 ADC 时，相位误差可能源于包括 ADC 在内的测量硬件。例如，需要更高通道数的多组串式太阳能装置，就需要并联多个 ADS131M08 器件。

使用多个 ADS131M08 器件的系统在数据采集前需要先进行 ADC 同步。同步可建立共同的时间基准，确保所有 ADC 同时开始转换。这使得不同器件各通道之间能够进行精确的相位比较。如果不同步，即使共享同一时钟源，每个器件也可能相对于其他器件在任意时刻开始其转换周期。这就会在器件之间产生无法通过校准来可靠补偿的未知相移。图 4-1 重现了共享同一外部时钟但未经同步的两个 ADS131M08 器件的 DRDY 信号。可以注意到，在未同步的情况下，信号下降沿之间存在延迟。

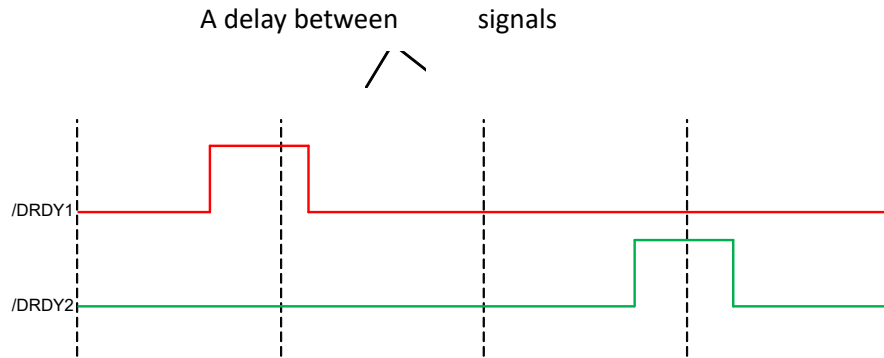


图 4-1. 共享同一外部时钟且未经同步的两个 ADS131M0x 的 DRDY 信号

4.1 ADS131M0x 上的 SYNC/RESET 引脚

ADS131M08 提供了一个 SYNC/RESET 引脚，以实现一种硬件机制，为系统中的所有器件建立共同的时间基准。同时向系统中每个 ADS131M08 的 SYNC/RESET 引脚施加低电平脉冲，可复位每个器件的内部数字滤波器，使所有器件与该 SYNC/RESET 脉冲对齐。在全局斩波模式下，这种同步尤为关键，因为器件在复位后会立即开始转换，同步脉冲与第一次采样之间没有延迟。同步会保留所有相位校准设置，确保先前补偿的测量硬件相位误差（例如 CT 或放大器引入的误差）在所有器件中仍然得到校正。同步之后，所有器件均在完全相同的瞬间对其输入进行采样，从而消除器件间相位误差，实现精确的相位敏感型测量。图 4-2 显示了两个已同步的 ADS131M08 器件的信号，其下降沿之间无延迟。

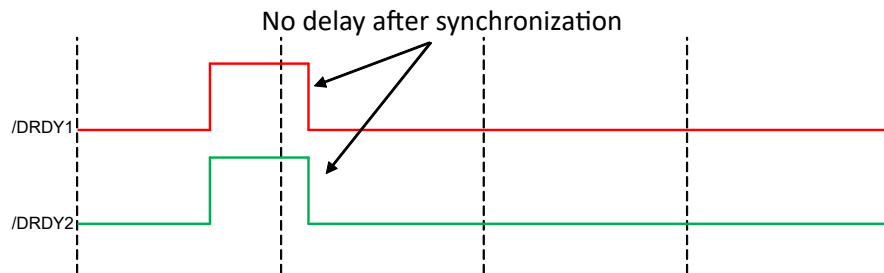


图 4-2. 共享同一外部时钟且同步的两个 ADS131M0x 的 DRDY 信号

4.2 时钟信号布线的重要性

在多 ADC 同步采样系统中，所有 ADC 必须在同一瞬间对其各自的输入信号进行采样。共享的时钟信号可同步所有通道的采样。由于 PCB 时钟布线长度差异导致的 ADC 之间时钟到达时间的任何失配，都会在采样通道之间引入时间偏差。有两种对时钟信号进行布线的选项：一种是单个时钟缓冲器，用于驱动所有 ADC；另一种是来自同一个时钟源的多个独立时钟缓冲器，分别驱动一个独立的 ADC。

对于任一时钟树设计，若时钟走线长度不超过（信号上升时间 $\times$ 5cm/ns），则通常无需源端接串联电阻器。如果超过此时钟长度，则使用串联电阻器源端接时钟布线，以便匹配微带布线的特性阻抗（减去缓冲器输出的特性阻抗）。源端接电阻吸收来自高阻抗时钟输入端的反射能量，防止该能量反弹回输入端并降低噪声容限（即高或低

输入逻辑阈值的差值)。对于快速时钟驱动器，上升时间可以远小于 1ns。使用较大电阻值对 PCB 布线进行过阻尼，以减少时钟信号过冲和下冲，从而增加时钟信号噪声容限。

TI 建议的时钟上升时间为 1ns，以减少多个 ADC 之间的时序差异。此类时序差异是由于工艺容差导致各时钟输入的逻辑阈值电平不同所引起的。

4.2.1 单个时钟缓冲器

在通道数较少的系统中，例如 4 通道配置，可使用单个时钟缓冲器驱动所有 ADC。在单个时钟缓冲器布局中，从时钟缓冲器到 ADC 的 PCB 布线必须具有相等的路径长度，以便尽可能地减小 ADC 之间的采样偏移。鉴于微带 PCB 设计的典型传播延迟为 60ps/cm，时钟布线之间的 5cm 差异会导致 ADC 之间的采样偏移达到 300ps。该采样偏移表现为输入信号中额外的 0.3ns 群延迟，当通道之间的相位角很重要时，必须将其包含在测量误差预算中。除了采样偏移之外，匹配的 PCB 布线长度还可以减少来自 ADC 时钟输入的多条线路反射。多条线路反射会导致过度振铃和过冲，从而降低时钟信号噪声容限。

4.2.2 多个时钟缓冲器

对于通道数超过 4 个的系统，TI 建议为每个 ADC 使用单独的时钟缓冲器。但是，时钟缓冲器可能会引入通道间时钟偏移，这会导致 ADC 之间出现采样偏移。LMK1C1104 等高速时钟缓冲器具有明确规定的 50ps 通道间输出偏移规格。通用逻辑缓冲器通常未指定或具有数纳秒的过大输出偏移规格。这些通用逻辑缓冲器通常可用于低时钟速度，但必须根据特定的应用要求进行评估。

5 总结

精确的功率测量要求在电压与电流通道之间实现精确的相位对齐。通道间哪怕很小的相位误差，也会导致最终计算结果产生较大偏差。在电能计量应用中，这些误差会随时间累积，并可能导致电能报告出现严重不准确。

ADS131M0x 系列通过内置的相位校准特性解决了这一难题。按照本文概述的流程，便可利用相位补偿特性消除功率测量系统中的相位误差。

在 ADS131M0x 中实现相位校准时的主要注意事项包括：

- 使用相位校准会禁用全局斩波模式
- 负相移需要更改 **MODE** 寄存器中的 **DRDY_SEL[1:0]** 位
- 大于半个采样周期的相移需要额外步骤

需要多个 ADS131M0x 器件的高通道数应用还需要进行同步。未经同步的器件，即使共享同一个外部时钟源，彼此之间也会存在未知的相移。同时对所有器件的 **SYNC/RESET** 引脚施加脉冲，可消除这种器件间相移，建立共同的时间基准，并确保所有器件在同一瞬间开始转换。

6 参考资料

1. [ADS131M08 数据表](#)

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月