

在3P4WY形系统中添加中心线衰减网络的影响

作者: Hariharan Mani

简介

在三相四线(3P4W)Y形配置中, 包含三相相电压及中心线。每个相电压都是相对于中心线进行测量的。相电压的大小通常为220 V rms或110 V rms。每两相相电压间呈120°相移。一种常见做法是每相相电压输入上用一个衰减网络, 把220 V/110 V信号降压至足够小的信号, 以便能进入ADExxxx计量IC。(ADExxxx表示ADI公司的三相AFE, 比如[ADE7854](#)、[ADE7858](#)、[ADE7868](#)、[ADE7878](#)、[ADE7854A](#)、[ADE7858A](#)、[ADE7868A](#)、[ADE7878A](#)、[ADE7880](#)、[ADE7758](#)、

[ADE7754](#)、[ADE7762](#)和[ADE7752A](#)。)中心线通常用作ADExxxx IC的接地基准。图1所示为典型的3P4W Y形配置电压衰减网络设置。

然而, 在某些情况下, 不能把中心线当作接地基准。在这种情况下, 向无线添加一个衰减网络, 从而在零线与ADExxxx地之间形成一个大电阻, 如图3所示。本应用笔记将分析在3P4W Y形系统中添加一个零线衰减网络对性能的影响。

目录

简介.....	1	标准3P4W配置.....	6
修订历史.....	2	中心线串联电阻的3P4W配置.....	7
问题描述.....	3	实验室测试.....	9
电压通道ADC.....	4	仿真测试：特殊情况.....	10
仿真测试基准.....	5	结论.....	11
电压幅度不平衡.....	6		

修订历史

2014年10月—修订版0：初始版

问题描述

图1所示为标准3P4W Y形配置设置。为简明起见，图中只显示了电压通道连接。有衰减网络连接所有三条相位线，中心线被当作ADExxxx IC的地。

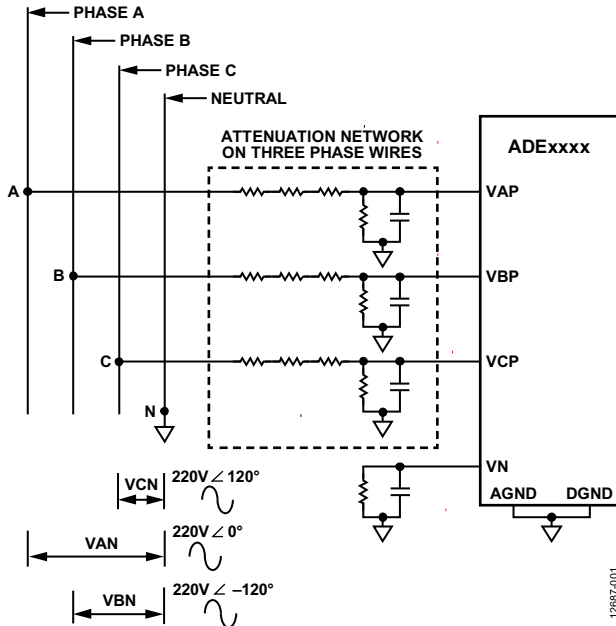


图1. 标准3P4W Y形配置电压连接

在某些情况下，不能把零线当作接地基准。提出这一要求的原因有多种。两个主要原因如下：

1. 某些电表会进行安全测试，在此过程中，相位线会与中心线交换。如果A相与中心线交换，在图1中，系统接地基准现在为220 V。系统组件(如电源单元)往往不能处理这种情况。因此，把中心线当作接地基准并不合适。
2. 出于安全考虑，计量系统中的通信模块与高电压是相隔离的。根据应用、电表设计、标准等，有不同类型的隔离要求。如果只需要一个层次的功能隔离，则仅隔离系统地与中心线即可。这里的假设条件是，系统中使用的带隔离的电流传感器(如电流互感器)。图2所示为一种典型的计量系统。在本例中，电流也与零线相隔离。还有些情况下，系统要求两个层次的隔离：安全(电流)隔离和功能隔离。安全隔离一般通过在MCU与通信模块之间实施充分的数据和电源隔离来实现。功能隔离通过隔离中心线和MCU地来实现。

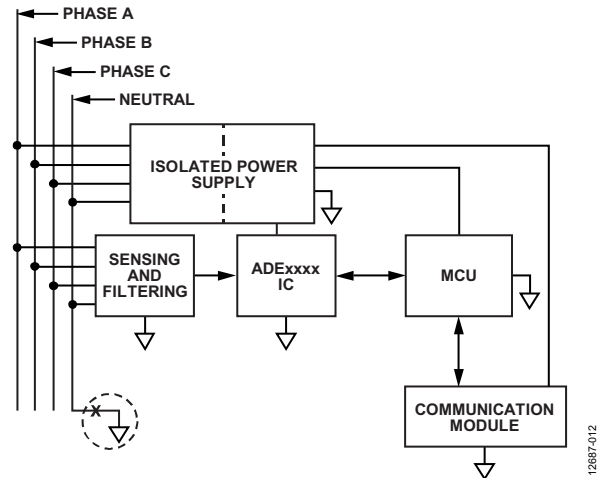


图2. 3P4W计量系统隔离要求

如果不能通过系统级修正来克服这些限制，电表设计师一般会同时在中心线上装一个衰减网络，该网络可使系统地保持与中心线不同的电位。

中心线上的衰减网络电阻会在中心线与ADExxxx IC地之间形成一个大电阻。该电阻称为中心线串联电阻。图3所示为系统中的电压连接外加中心线串联电阻。

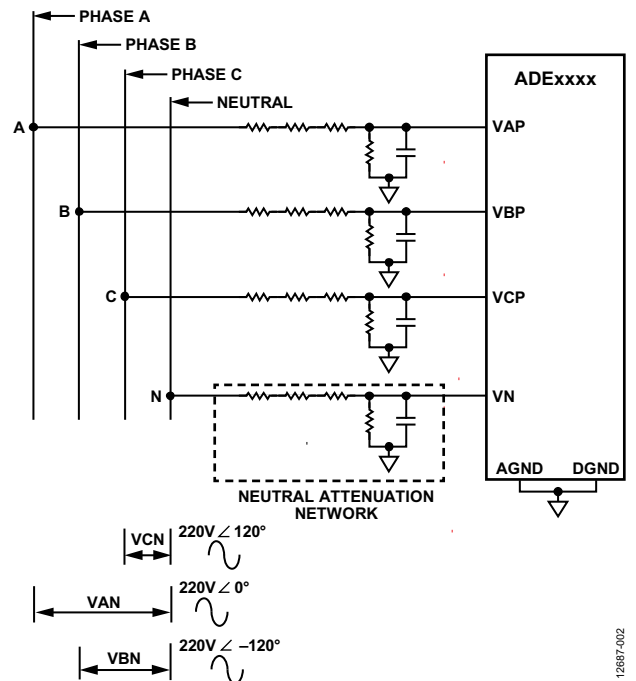


图3. 中心线上带衰减网络的3P4W Y形配置电压连接

高电压隔离的另一种常见方法是使用电压互感器；然而，电压互感器并非最佳选择，因为它们会增加电表设计的成本和体积。

电压通道ADC

在计量应用中，电压信号一般都是单端信号。因此，ADExxxx IC中的三个电压通道模数转换器(ADC)都共用一个输入端子(VN引脚)，如图4所示。

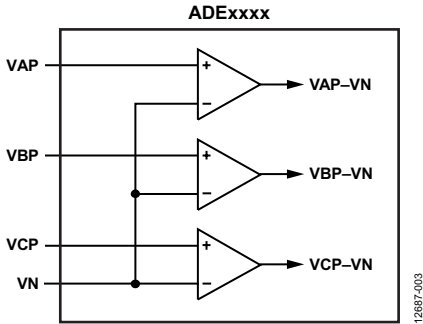


图4. 三相ADExxxx IC中的电压通道ADC配置

在图4中，VAP、VBP、VCP和VN表示ADExxxx IC输入引脚。VAP、VBP和VCP引脚接受来自相电压的降压电压信号，如图5和图6所示。ADExxxx IC的AGND和DGND引脚(如图5和图6所示)连接着系统的地电位。如果中心线接地，ADExxxx IC的VN引脚也会保持该电位，如图5所示。如果中心线连接衰减网络，降压后的中心线信号在VN引脚可用，如图6所示。

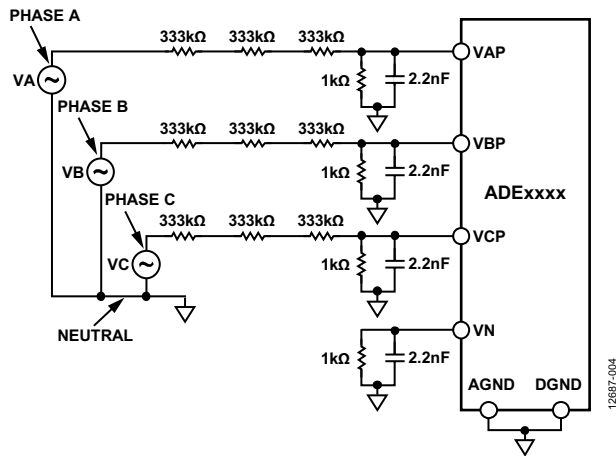


图5. 3P4W Y形系统：中心线接地

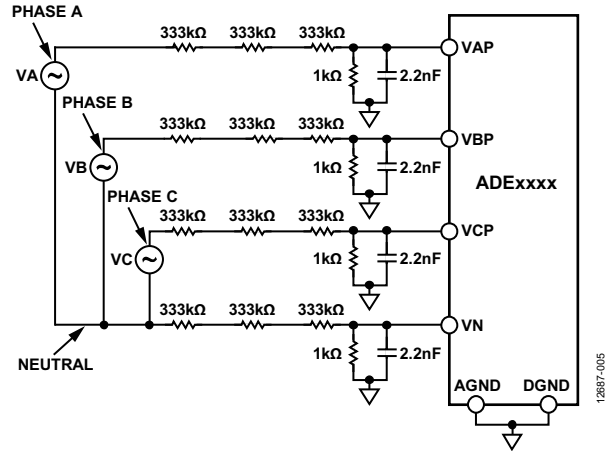


图6. 3P4W Y形系统：中心线串联电阻

要从ADExxxx IC获得有效的结果，必须了解输入引脚端的信号限制。相对于输入电压引脚，需要达到的条件如下：

1. VAP/VBP/VCP和VN之间的交流电位差不得大于 ± 500 mV峰值(353.55 mV rms)。
2. VAP/VBP/VCP和AGND之间的交流电位差不得大于 ± 500 mV峰值(353.55 mV rms)。
3. 类似地，VN和AGND之间的交流电位差不得大于 ± 500 mV峰值(353.55 mV rms)。尽管相对于AGND，VN最大可为 ± 500 mV峰值(353.55 mV rms)，但是，最好使VN等于AGND，因为VN是全部三个电压通道ADC所共用的(见图4)。

在3P4W系统中，前面的第三个条件对于中心线电阻的使用相关性最大。在如图5所示配置中，VN和AGND电位相同。然而，当系统中存在中心线串联电阻时(如图6所示)，VN不等于AGND。相位电压中如果存在任何不平衡，结果会导致VN - AGND电位差不等于零，从而导致测量误差。

仿真测试基准

为了了解在零线中设置串联电阻的影响，我们用ADIsimPE软件设置了一个仿真测试基准。仿真测试基准(对应于图5)的设置如图7所示。同时考虑了ADExxxx IC电压通道输入引脚处的输入阻抗，这一点体现在元件R9至R12以及C5至C8的使用上。以ADE7880 IC为例，所有仿真中都使用了其最小输入阻抗。图7中的VA、VB和VC分别为A相、B相和C相

电压。ADExxxx IC的电压输入引脚VAP、VBP、VCP和VN分别表示VAP_pin、VBP_pin、VCP_pin和VN_pin。ADExxxx IC的地表示为AGND_pin。用于测量VAP - VN、VBP - VN和VCP - VN电位差的示波器分别表示为VAN、VBN、VCN。VAG、VBG、VCG和VNG示波器分别测量VAP、VBP、VCP和VN引脚上相对于地的电压信号。

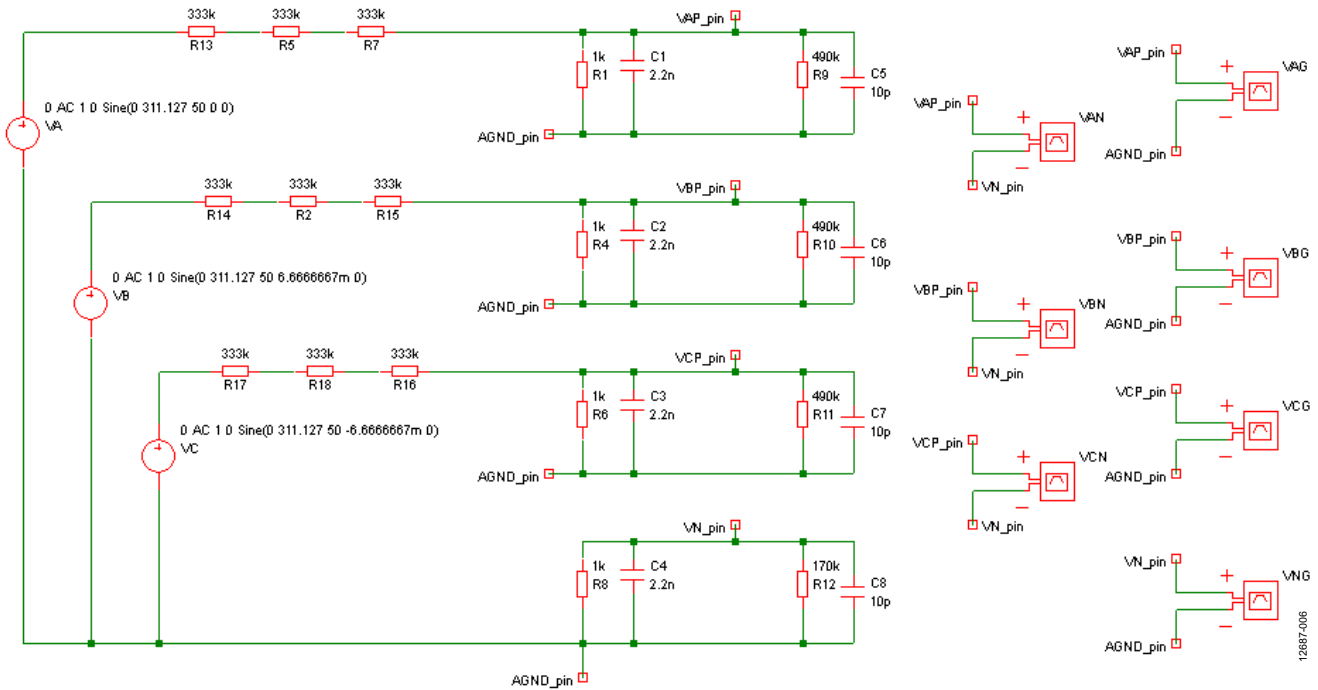


图7. 仿真测试基准：标准3P4W Y形设置

电压幅度不平衡

全部三个相位电压VA、VB和VC一般具有相同的幅度，相互之间刚好呈120°相移(见图8)。在这种情况下，我们说电压是平衡的，它们的向量和等于零。然而，在现实中，负载并不完全平衡，因而会导致相电压不平衡。电压不平衡可能是幅度或相位差导致的，也可能是二者共同作用的结果。当三个相电压不相互相等时，就会出现电压幅度不平衡。当相电压相互之间的相移角度不等于120°时，就会出现电压相位不平衡。在本应用笔记中，我们只考虑电压幅度不平衡问题。

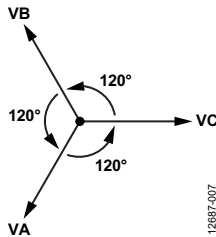


图8. 展示三个相位电压的相量示意图

要了解电压不平衡，需要了解几个定义。根据本应用笔记的需要，这里定义两个项：百分比幅度不平衡和总幅度不平衡。

百分比幅度不平衡定义为，偏离平均rms电压的绝对最大偏差，表示为平均rms电压的百分比。

$$\text{百分比幅度不平衡} = \frac{\text{Max} \left\{ |V_{MAX} - V_{AVG}|, |V_{MIN} - V_{AVG}| \right\}}{V_{AVG}} \times 100\%$$

其中：

V_{MAX} 为三个相电压rms值VA、VB和VC的最大幅度。

V_{MIN} 为三个相电压rms值VA、VB和VC的最小幅度。

V_{AVG} 为三个相电压rms值VA、VB和VC的平均幅度。

总幅度不平衡定义为偏离平均rms电压的所有绝对偏差之和，单位为伏特。

$$\text{总幅度不平衡} = |VA - V_{AVG}| + |VB - V_{AVG}| + |VC - V_{AVG}| \text{ V}$$

例如，如果 $|VA| = 220 \text{ V}$ 、 $|VB| = 165 \text{ V}$ 且 $|VC| = 275 \text{ V}$ ，则百分比幅度不平衡的计算方法如下：

$$\text{百分比幅度不平衡} = \frac{\text{Max} \left\{ |275 - 220|, |165 - 220| \right\}}{220} \times 100\%$$

$$\text{百分比幅度不平衡} = (55/220) \times 100\%$$

$$\% \text{百分比幅度不平衡} = 25\%$$

总幅度不平衡计算方法如下：

$$\text{总幅度不平衡} = |220 - 220| + |165 - 220| + |275 - 220| \text{ V}$$

$$\text{总幅度不平衡} = 55 + 55 \text{ V}$$

$$\text{总幅度不平衡} = 110 \text{ V}$$

本应用笔记后面在提到系统中的电压幅度不平衡量时会用到这两个量。

标准3P4W配置

我们模拟了图5所示标准3P4W电压通道配置，并测量了VAP、VBP、VCP和VN引脚相对于AGND的电压信号幅度和相位。同时记录了相对于VN的VAP、VBP和VCP信号。

三相线上的每个衰减网络都由三个333 kΩ电阻和一个1 kΩ电阻构成。这种配置(如图5所示)可为相位电压提供1000:1的衰减。所提供的三个相位电压为

$$|VA| = 220 \text{ V}; \angle VA = 0^\circ$$

$$|VB| = 220 \text{ V}; \angle VB = -120^\circ$$

$$|VC| = 220 \text{ V}; \angle VC = +120^\circ$$

这些相电压在幅度上相等，与其他电压呈120°相移，结果表明，系统是平衡的。图5中，三个电压源VA、VB和VC的共用节点表示3P4W系统中的中心线。

ADExxxx IC输入引脚处的电压信号为

$$|VAP - VN| = 214.6 \text{ mV rms}; \angle(VAP - VN) = 0^\circ$$

$$|VBP - VN| = 214.6 \text{ mV rms}; \angle(VBP - VN) = -120^\circ$$

$$|VCP - VN| = 214.6 \text{ mV rms}; \angle(VCP - VN) = +120^\circ$$

输入引脚处相对于AGND电位的信号为

$$|VAP - AGND| = 214.6 \text{ mV rms}; \angle(VAP - AGND) = 0^\circ$$

$$|VBP - AGND| = 214.6 \text{ mV rms}; \angle(VBP - AGND) = -120^\circ$$

$$|VCP - AGND| = 214.6 \text{ mV rms}; \angle(VCP - AGND) = +120^\circ$$

$$|VN - AGND| = 0 \text{ V}; \angle(VN - AGND) = 0^\circ$$

中心线串联电阻的3P4W配置

我们对仿真测试基准进行了修改，在中心线上串联分压电阻，如图6所示。

我们为本配置提供了与标准3P4W配置相同的平衡相电压输入。相对于VN的观测电压信号VAP、VBP和VCP，以及相对于AGND的VAP、VBP、VCP和VN与标准3P4W配置相同。这一结果表明，当系统平衡时，增加中心线串联电阻后，并未对系统性能造成显著影响。为了了解不平衡系统中零线串联电阻的影响，我们模拟了以下条件：

1. 断开B相和C相(悬空)
2. B相和C相连接零线
3. $|V_A| = 220\text{ V}$, $|V_B| = 240\text{ V}$, $|V_C| = 240\text{ V}$
4. $|V_A| = 220\text{ V}$, $|V_B| = 20\text{ V}$, $|V_C| = 20\text{ V}$

情形1：断开B相和C相

当B相和C相断开或悬空时，仿真测试基准与图9中所示结果类似。

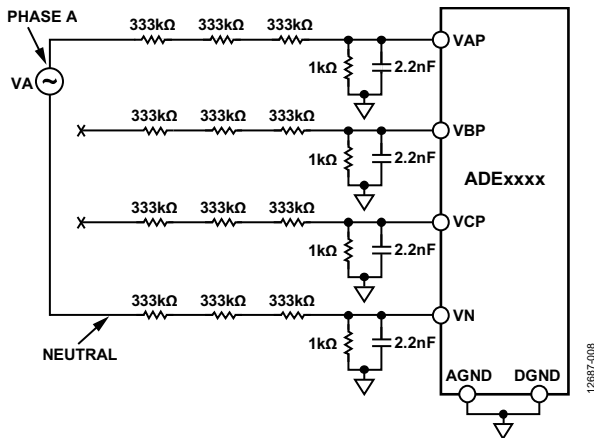


图9. 断开B相和C相(情形1)

施加于A相的电压信号为

$$|V_A| = 220\text{ V}; \angle V_A = 0^\circ$$

ADExxxx IC输入引脚处的电压信号为

$$|V_{AP} - V_N| = 214.2\text{ mV rms}; \angle(V_{AP} - V_N) = 0^\circ$$

$$|V_{BP} - V_N| = 106.9\text{ mV rms}; \angle(V_{BP} - V_N) = 0^\circ$$

$$|V_{CP} - V_N| = 106.9\text{ mV rms}; \angle(V_{CP} - V_N) = 0^\circ$$

输入引脚处相对于AGND电位的信号为

$$|V_{AP} - \text{AGND}| = 107.3\text{ mV rms}; \angle(V_{AP} - \text{AGND}) = 0^\circ$$

$$|V_{BP} - \text{AGND}| = 0\text{ V}; \angle(V_{BP} - \text{AGND}) = 0^\circ$$

$$|V_{CP} - \text{AGND}| = 0\text{ V}; \angle(V_{CP} - \text{AGND}) = 0^\circ$$

$$|V_N - \text{AGND}| = 107.3\text{ mV rms}; \angle(V_N - \text{AGND}) = 180^\circ$$

这些结果表明，ADExxxx IC测量到的电压信号为

- A相电压：219.6 V, $\angle 0^\circ$ (-0.2% 增益误差)
- B相电压：109.8 V, $\angle 0^\circ$ (预期值：0 V)
- C相电压：109.8 V, $\angle 0^\circ$ (预期值：0 V)

当仅存在A相电压时，VAP和VN引脚上存在的电压为差分反相信号。受配置影响，A相电压测量结果中观察到-0.2%的增益误差。由于VN引脚是所有相位电压共有的，因此，VN引脚上的电压会影响ADExxxx IC的B相和C相电压测量结果。这种情况下，VN不等于AGND，因此，VN引脚上存在的信号相移 180° ，并出现在B相和C相电压测量结果上。此时，由ADExxxx IC计算的B相和C相电压含有较大的误差，因为VN引脚上的信号由A相电压信号的一半构成。

为了避免断开相位上得到无效的结果，每当进行测量时，都要监控电压的相位角，以确保所有相电压相互间呈 120° 相移。这种情况下，B相和C相电压信号与A相电压信号同相，因而表明，必须放弃来自B相和C相的电压相关测量结果。

情形2：B相和C相连接中心线

当只存在A相时，如情形1所示：B相和C相断开，B相和C相连接中心线而非悬空，可以消除B相和C相测量结果中观察到的多数误差。图10所示为设置示意图。

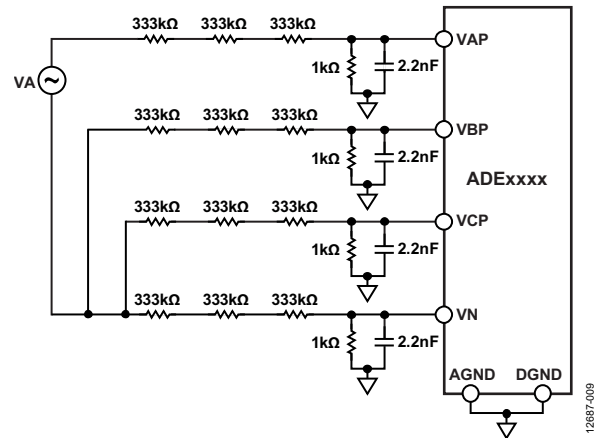


图10. B相和C相连接中心线(情形2)

施加于A相的电压信号为

$$|V_A| = 220\text{ V}; \angle V_A = 0^\circ$$

ADExxxx IC输入引脚处的电压信号为

$$|V_{AP} - V_N| = 214.3\text{ mV rms}; \angle(V_{AP} - V_N) = 0^\circ$$

$$|V_{BP} - V_N| = 0.21\text{ mV rms}; \angle(V_{BP} - V_N) = 180^\circ$$

$$|V_{CP} - V_N| = 0.21\text{ mV rms}; \angle(V_{CP} - V_N) = 180^\circ$$

输入引脚处相对于AGND电位的信号为

$$\begin{aligned} |VAP - AGND| &= 160.9 \text{ mV rms}; \angle(VAP - AGND) = 0^\circ \\ |VBP - AGND| &= 53.6 \text{ mV rms}; \angle(VBP - AGND) = 180^\circ \\ |VCP - AGND| &= 53.6 \text{ mV rms}; \angle(VCP - AGND) = 180^\circ \\ |VN - AGND| &= 53.4 \text{ mV rms}; \angle(VN - AGND) = 180^\circ \end{aligned}$$

这些结果表明，ADExxxx IC测量到的电压信号为

- A相电压：219.8 V, $\angle 0^\circ$ (-0.1%增益误差)
- B相电压：0.22 V, $\angle 180^\circ$ (预期值：0 V)
- C相电压：0.22 V, $\angle 180^\circ$ (预期值：0 V)

在本配置中，由于B相、C相和中心线上的信号都有着类似的信号路径，因此，ADExxxx IC输入引脚端观察到的B相和C相电压信号更接近真实值。与前面的情形不同(B相和C相上观察到的电压信号为A相电压信号的一半)，这种配置中的B相和C相电压测量结果代表着超小的信号，约为 $(VAP - VN)/1000$ 。B相和C相上的电压信号与A相电压呈 180° 反相。由于B相和C相电压不与A相电压呈 120° 相移，因此，B相和C相电压的相位角可以用来指示应用中的这些相位电压已经连接中线。这里，A相测量结果中的增益误差为-0.1%。

情形3：|VA| = 220 V, |VB| = 240 V, |VC| = 240 V

在情形3中，我们并未完全消除相位电压，相反，我们模拟了电压幅度不平衡，把不同幅度不同的电压信号施加至VB和VC(相对于VA)。此时，施加的电压信号为

$$\begin{aligned} |VA| &= 220 \text{ V}; \angle VA = 0^\circ \\ |VB| &= 240 \text{ V}; \angle VB = -120^\circ \\ |VC| &= 240 \text{ V}; \angle VC = +120^\circ \end{aligned}$$

该条件表示，电压幅度不平衡为9%，总幅度不平衡为40 V。我们根据图6所示配置确立了仿真测试基准。

ADExxxx IC输入引脚处的电压信号为

$$\begin{aligned} |VAP - VN| &= 214.6 \text{ mV rms}; \angle(VAP - VN) = 0^\circ \\ |VBP - VN| &= 234.1 \text{ mV rms}; \angle(VBP - VN) = -119.9^\circ \\ |VCP - VN| &= 234.1 \text{ mV rms}; \angle(VCP - VN) = +120.1^\circ \end{aligned}$$

输入引脚处相对于AGND电位的信号为

$$\begin{aligned} |VAP - AGND| &= 219.5 \text{ mV rms}; \angle(VAP - AGND) = 0^\circ \\ |VBP - AGND| &= 231.7 \text{ mV rms}; \angle(VBP - AGND) = -119^\circ \\ |VCP - AGND| &= 231.7 \text{ mV rms}; \angle(VCP - AGND) = +121^\circ \\ |VN - AGND| &= 4.86 \text{ mV rms}; \angle(VN - AGND) = -118^\circ \end{aligned}$$

这些结果表明，ADExxxx IC测量到的电压信号为

- A相电压：220 V, $\angle 0^\circ$ (无误差)
- B相电压：240 V, $\angle -119.9^\circ$ (相位误差：+0.1°)
- C相电压：240 V, $\angle +120.1^\circ$ (相位误差：+0.1°)

在模拟这样的不平衡时，A相、B相和C相测量结果中并未观察到显著的增益误差；然而，在B相和C相电压中却观察到了 0.1° 的相位误差。

情形4：|VA| = 220 V, |VB| = 20 V, |VC| = 20 V

情形4中，我们考虑了较大的电压幅度不平衡。施加的电压信号为

$$\begin{aligned} |VA| &= 220 \text{ V}; \angle VA = 0^\circ \\ |VB| &= 20 \text{ V}; \angle VB = -120^\circ \\ |VC| &= 20 \text{ V}; \angle VC = +120^\circ \end{aligned}$$

这里我们考虑了91%的电压幅度不平衡，总幅度不平衡为400 V。尽管这一水平的不平衡并无实际意义，我们仍然进行了模拟，以便了解系统中的大电压幅度不平衡会产生什么样的影响。我们根据图6所示配置设置了仿真测试基准。

ADExxxx IC输入引脚处的电压信号为

$$\begin{aligned} |VAP - VN| &= 214.4 \text{ mV rms}; \angle(VAP - VN) = 0^\circ \\ |VBP - VN| &= 19.6 \text{ mV rms}; \angle(VBP - VN) = -120.6^\circ \\ |VCP - VN| &= 19.6 \text{ mV rms}; \angle(VCP - VN) = +120.6^\circ \end{aligned}$$

输入引脚处相对于AGND电位的信号为

$$\begin{aligned} |VAP - AGND| &= 165.8 \text{ mV rms}; \angle(VAP - AGND) = 0^\circ \\ |VBP - AGND| &= 60.9 \text{ mV rms}; \angle(VBP - AGND) = -164^\circ \\ |VCP - AGND| &= 60.9 \text{ mV rms}; \angle(VCP - AGND) = +164^\circ \\ |VN - AGND| &= 48.6 \text{ mV rms}; \angle(VN - AGND) = 180^\circ \end{aligned}$$

这些结果表明，ADExxxx IC测量到的电压信号为

- A相电压：219.8 V, $\angle 0^\circ$ (-0.1%增益误差)
- B相电压：20.1 V, $\angle -120.6^\circ$ (+0.5%增益误差；-0.6°相位误差)
- C相电压：20.1 V, $\angle +120.6^\circ$ (+0.5%增益误差；+0.6°相位误差)

当系统中存在这样的大电压幅度不平衡时，B相和C相电压上因配置导致的增益误差为0.5%。这些测量结果的相位误差也为 0.6° 。A相电压测量结果的增益误差为-0.1%。

实验室测试

为了验证仿真结果并了解真实元件的影响，我们用一款多相电表IC ADE7880在实验室中进行了测试。

测试中使用的是ADE7880评估板和一个三相Rotek精密源。有关ADE7880评估板的详情，请参阅ADE7880评估板用户指南UG-356。为了在配置中引入中心线串联电阻，我们进行了下列改动(见图11)：

- 拆下1 k Ω 电阻(图1中的R25)，并将其焊接到评估板上的C25上方。
- 作为1 k Ω R25电阻的替代，焊接了一个1 M Ω 电阻。

ADE7880评估板电压通道连接上的跳线状态为

- JP7A、JP7B、JP7C、JP7N = 开路
- JP9A、JP9B、JP9C = 闭合
- JP8A、JP8B、JP8C = 引脚1和引脚2

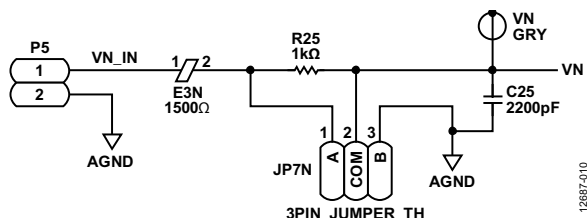


图11. 零线电压连接(ADE7880评估板)

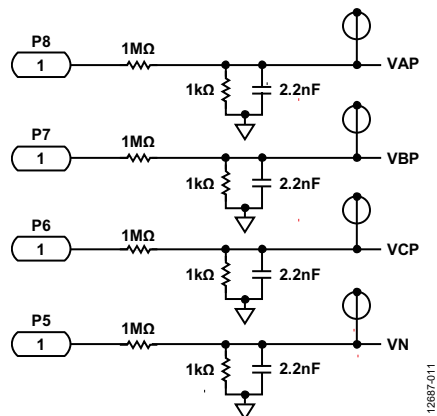


图12. 电压通道配置的最终示意图

P8、P7、P6和P5连接器的引脚1分别连接A相、B相、C相和零线，如图12所示。

我们记录了每种情形下来自ADE7880 IC的电压rms测量结果，用以量化观察到的增益误差。记录了100 rms的读数，并求出结果的均值，以得到每种情形下的rms值。

测量了所有相位和零线信号路径上的1 M Ω 和1 k Ω 电阻，结果为

- A相 = 1.001 M Ω ；1.009 k Ω
- B相 = 999 k Ω ；1.002 k Ω
- C相 = 1.002 Ω ；0.997 k Ω
- 零线 = 950 k Ω ；1.01 k Ω

我们在每条线的信号路径上用了一个电阻，替代三个333 k Ω 电阻(见图6)，由此重复进行所有仿真情形。没有使用示意图中的1 M Ω 和1 k Ω 电阻，而是使用了实测值的电阻。使用真实电阻值是必要的，因为在存在电压幅度不平衡时，衰减网络比的不匹配会导致更多误差。

实验室和仿真测试结果如表1所示。我们以平衡情形的测量结果以及零线串联电阻为基准，计算了不平衡情形下的增益误差。

从表1可以看出，仿真和实验室测试非常接近。观察从评估板测量得到的电阻值，所有电阻均为1%容差电阻，中心线上的1 M Ω 电阻(实际为950 k Ω)除外，其容差为5%。该电阻是无线电的主体，也是所有相位电压测量值所共有的。因此，该电阻宽松的容差规格对存在电压幅度不平衡的所有相位的性能造成了不利影响。如果A相的1 M Ω 电阻容差为5%，所有其他电阻容差为1%，则当存在电压幅度不平衡时，由误差网络不匹配导致的影响只是在A相结果中最严重。

表1. 实验室和仿真结果比较

不平衡情形	RMS测量结果中的增益误差					
	AVRMS		BVRMS		CVRMS	
	电路	仿真	电路	仿真	电路	仿真
情形1: 断开B相和C相	+2.00%	+2.38%	N/A ¹	N/A ¹	N/A ¹	N/A ¹
情形2: B相和C相连接零线	+0.96%	+1.21%	N/A ¹	N/A ¹	N/A ¹	N/A ¹
情形3: VA = 220 V; VB = VC = 240 V	-0.10%	-0.14%	+0.15%	+0.04%	+0.15%	+0.25%
情形4: VA = 220 V; VB = VC = 20 V	+1.17%	+1.12%	-7.37%	-5.17%	-9.61%	-5.42%

¹ N/A = 不适用。B相和C相在情形1和情形2中的预期电压为0V。因此，表中未显示误差。有关情形1和情形2中B相和C相电压信号误差的详情，请参阅各种情形相应部分的内容。

AN-1334

仿真测试：特殊情况

由于仿真结果非常接近实验室结果，所以我们进行了进一步的测试，以更好地了解在25%电压幅度不平衡条件下的误差。当存在25%的电压幅度不平衡时，总幅度不平衡为110 V，我们在三个不同的条件下模拟了增益误差和相位误差，结果如表2所示。这些仿真情形下考察的是容差为1%

的电阻。构成衰减网络的电阻为

- A相：三个336.33 kΩ电阻和一个990 Ω电阻
- B相：三个329.67 kΩ电阻和一个1.01 kΩ电阻
- C相：三个333 kΩ电阻和一个1 kΩ电阻
- 中线：三个333 kΩ电阻和一个1 kΩ电阻

表2. 仿真结果：25%电压幅度不平衡(容差为1%的电阻)

不平衡情形	A相电压		B相电压		C相电压	
	增益误差	相位误差	增益误差	相位误差	增益误差	相位误差
$ V_A = 275 \text{ V}, V_B = 220 \text{ V}, V_C = 165 \text{ V}$	0.12%	0°	0.00%	-0.1°	0.03%	0°
$ V_A = 165 \text{ V}, V_B = 275 \text{ V}, V_C = 220 \text{ V}$	-0.14%	0°	-0.19%	-2.3°	0.00%	0°
$ V_A = 220 \text{ V}, V_B = 165 \text{ V}, V_C = 275 \text{ V}$	0.00%	0°	0.26%	0°	-0.02%	0°

结论

我们借助仿真和实验室测试结果，分析了在3P4W Y形系统中使用中心线串联电阻对性能产生的影响，结果表明：

1. 相比标准3P4W配置(标准配置见图5)，当相位平衡时，未观察到性能下降情况。
2. 通过在所有相位上提供平衡测试电压信号对3P4W Y形电表设置进行校准，甚至在逐个校准相位时。
3. 当存在电压幅度不平衡时，可能观察到增益误差和相位误差，具体取决于不平衡量和衰减网络比不匹配情况。
4. 当存在25%的电压幅度不平衡时，如果使用的是1%容差的电阻，最大预期增益误差为0.26%，最大预期相位误差为 -2.3° 。如果一个电压测量结果存在0.26%的增益误差和 -2.3° 的相位误差，则有源电能测量结果的误差为：PF为1时误差为0.18%，PF为0.5时误差为 -6.8% ，PF为0.2时误差为 -20% 。
5. 使用额定容差值较小的电阻可在不平衡条件下获得更好的性能。
6. 本应用笔记中基于实验室和仿真测试结果提供的误差并未考虑性能随温度下降的情况。
7. 电压相位不平衡(即相位电压相互之间的相移角度不等于 120°)并不常见。本应用笔记未考虑这种不平衡情形下中心线串联电阻的影响。