

## 针对4线式生物隔离阻抗测量应用优化ADuCM350

### 简介

ADuCM350是一款超低功耗集成混合信号计量解决方案，包含一个微控制器子系统用于处理、控制和连接。该处理器子系统基于低功耗ARM® Cortex™-M3处理器，由数字外设、嵌入式SRAM和闪存、一个提供时钟、复位和功耗管理功能的模拟子系统组成。

ADuCM350能够执行2048点单频离散傅里叶变换(DFT)。它获取16位ADC输出作为输入，输出复阻抗的实部和虚部。

利用ADuCM350的可配置开关矩阵，您可以选择2线、3线或4线式阻抗测量。

本应用笔记说明如何设置ADuCM350以利用4线技术最优地测量RC型传感器的阻抗，同时要满足IEC-60601标准。

为了符合IEC-60601标准，ADuCM350与一个外部仪表放大器(AD8226)一同使用，以利用4线测量技术完成高精度绝对测量。

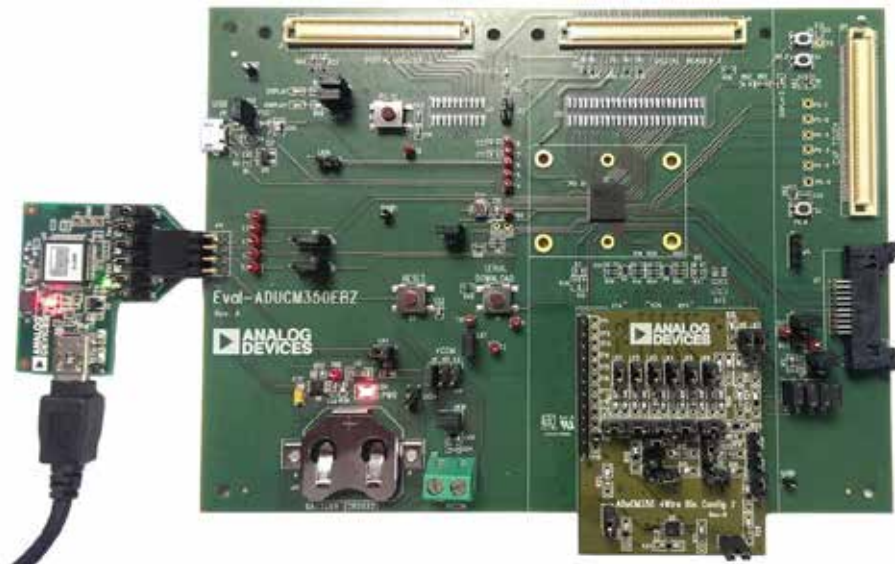


图1. EVAL-ADuCM350EBZ主板和4线生物配置子板

12188-101

## 目录

简介.....	1	传感器配置 .....	10
修订历史.....	2	4线生物隔离网络 .....	10
配置.....	3	AFE优化.....	11
2线系统.....	3	计算RLIMIT电阻.....	11
4线系统.....	3	计算RTIA.....	11
4线生物隔离系统.....	3	计算AD8226的RG.....	11
基本4线式阻抗测量.....	4	计算RCAL .....	12
4线生物隔离方法.....	6	4线生物隔离测量.....	13
基本4线原理.....	6	4线生物配置板的硬件设置.....	13
4线生物隔离原理应用.....	6	4线生物配置板的软件设置.....	13
4线生物隔离解决方案.....	7	4线生物配置板的原理图.....	14
4线生物隔离系统示例.....	10		

## 修订历史

2014年4月—修订版0：初始版

## 配置

针对传感器阻抗测量，ADuCM350提供三种配置。

### 2线系统

若未知阻抗存在变化的接入电阻，则这种配置提供阻抗幅度和阻抗相位的相对精度测量。有关针对2线式阻抗测量优化ADuCM350的详细信息，请参阅AN-1271应用笔记(“针对阻抗转换优化ADuCM350”)。

2线系统测量阻抗幅度和相位的相对精度。

### 4线系统

这种配置提供阻抗幅度和阻抗相位测量的绝对精度，因为校准会消除接入电阻。这种配置不适合需要交流耦合电容来将传感器与器件隔离，即电容与接入电阻串联的情况。

有关针对4线式测量优化ADuCM350的信息，请参阅AN-1271应用笔记(“针对阻抗转换优化ADuCM350”)。

4线系统测量阻抗幅度和相位的绝对精度，但不允许存在隔离电容。

### 4线生物隔离系统

若传感器与器件之间需要隔离电容，则必须使用一个外部仪表放大器来测量传感器上的差分电压。作为一款单芯片解决方案，ADuCM350无法执行此测量，因为若检测(P和N通道)路径上含有隔离电容，会导致电路失稳。

4线生物隔离系统可在含有隔离电容的情况下测量阻抗幅度的绝对精度，但不能进行精确的相位测量。

## 基本4线式阻抗测量

要利用ADuCM350测量未知传感器的阻抗Z，须采用比率式测量技术。

1. 测量已知精密电阻RCAL的阻抗，如图2所示。在RCAL 1处施加一个激励电压，开关矩阵中的相关开关D和P闭合。由此产生的激励电流通过RCAL 2测量，开关矩阵中的相关开关T和N闭合。利用TIA放大器将此电流转换为电压，其中RTIA针对ADC看到的最大电流进行优化，并利用ADC转换为电压。对数据执行2048点Hann采样，以得出阻抗的实部和虚部。
2. 更改开关矩阵配置(如图3所示)，激励传感器并测量相应电流。DFT引擎现在计算未知阻抗Z的实部和虚部。

3. 在内核上利用下式计算未知阻抗幅度：

$$Z_{UNKNOWN\_MAG} = \frac{Z_{MAG}}{RCAL\_MAG} \times RCAL$$

4. 在内核上利用下式计算未知阻抗相位：

$$Z_{UNKNOWN\_PHASE} = Z_{PHASE} - RCAL\_PHASE$$

如果传感器没有隔离要求，那么这种4线式阻抗测量方法可以正常工作。然而，如果4线式测量中需要一个隔离电容(如C<sub>ISO</sub>)与接入电阻R<sub>ACCESS</sub>串联，那么单芯片解决方案无法完成任务。

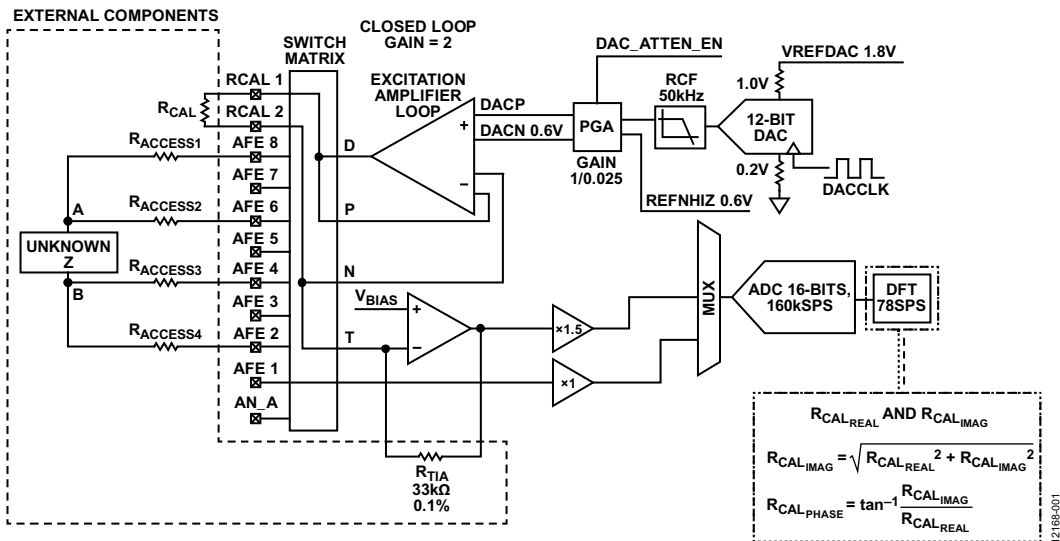


图2. ADuCM350的4线式拓扑—测量RCAL

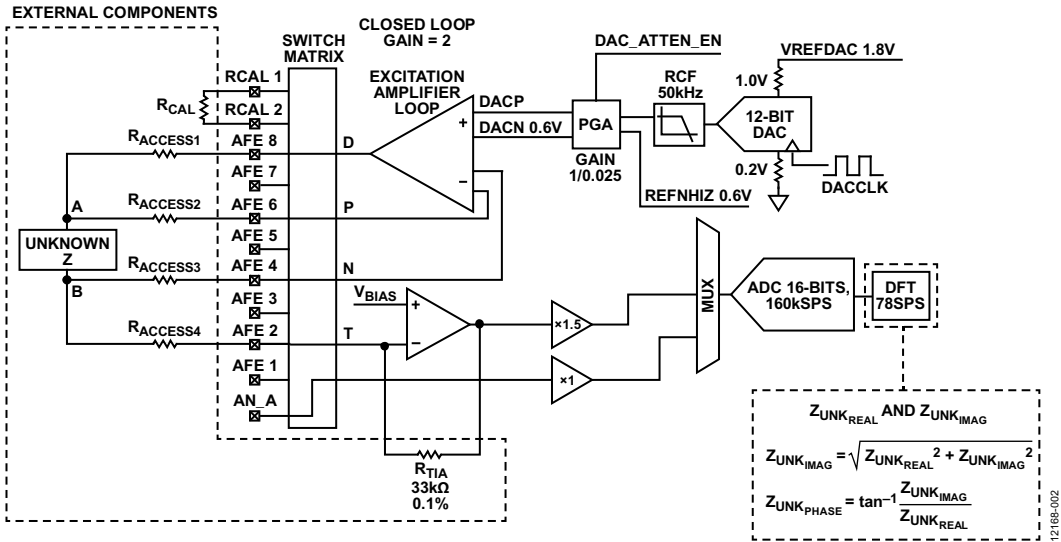


图3. ADuCM350的4线式拓扑—测量Z

## 4线生物隔离方法

### 基本4线原理

经典4线/4引脚检测系统使用一个差分电流源驱动一个已知电流流入传感器。此驱动电流在未知阻抗 $Z$ 上产生一个电位差，利用欧姆定律可测量该电位差：

$$V = I \times R$$

当驱动电流时， $Z$ 的接入线也会引起压降，导致测量不精确。为从 $Z$ 的实际测量结果中消除这一损失，将一对差分检测线连接到 $Z$ ，即图2中标有A和B的两点。

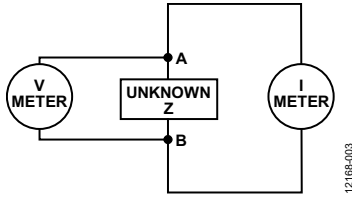


图4. 基本4线拓扑

差分检测线设计有非常高的输入阻抗级，使得没有电流流过其中，因而也就没有压降。这样，阻抗 $Z$ 便可利用以下关系进行测量：

$$Z = V_{METER} / I_{AC}$$

### 4线生物隔离原理应用

另一种方法是使用高精度激励电压源作为驱动信号。将此电压施加到 $Z$ 上，利用高精度电流表测量响应电流(参见图3)。这样，未知阻抗 $Z$ 便可利用以下关系进行测量：

$$Z = V_{METER} / I_{METER}$$

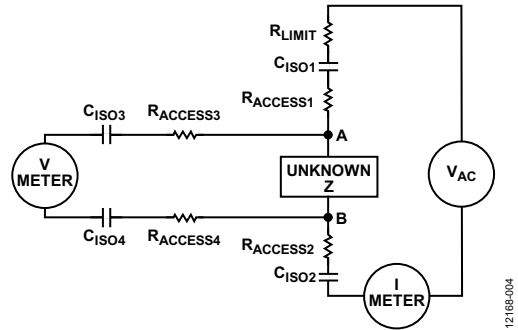


图5. 4线生物隔离拓扑

再看图3，可以利用ADuCM350测量4线阻抗。激励级利用一个已知电压激励传感器，该已知电压可利用内部仪表环路以差分方式精确检测。电流响应通过TIA通道测量并转换为电压。

在实际应用中，例如在受IEC-60601标准规制的应用中， $Z$ （或传感器）允许其上有一个有限的直流电压。对施加于传感器的交流电流的限制更宽松。所选的交流电压源驱动传感器连接以利用ADuCM350 DFT功能。

在图5中， $C_{ISO1}$ 和 $C_{ISO2}$ 是分立式隔离电容，确保传感器上没有直流电压。 $R_{ACCESS1}$ 和 $R_{ACCESS2}$ 是传感器连接固有的接入或引线电阻。 $R_{LIMIT}$ 提供额外的安全性，保证在从测量结果中消除 $R_{ACCESS}$ 电阻的情况下，传感器看到的电流不超过最大容许激励电流。

## 4线生物隔离解决方案

参考图5，需要下列元件：

- 精密交流电压源
- 高精度电流表
- 精密差分电压表

### 精密交流电压源

ADuCM350有一个高精度激励控制环路，可将一个精密交流电压驱动到传感器。内部差分检测配置保证电压源的精度(参见图6)。在可配置开关矩阵中，正检测端P连接驱动端D。使用一个基于DDS的正弦波发生器以通过12位DAC产生交流激励信号。有关发送级的更多信息，请参阅ADuCM350硬件参考手册(UG-587)。

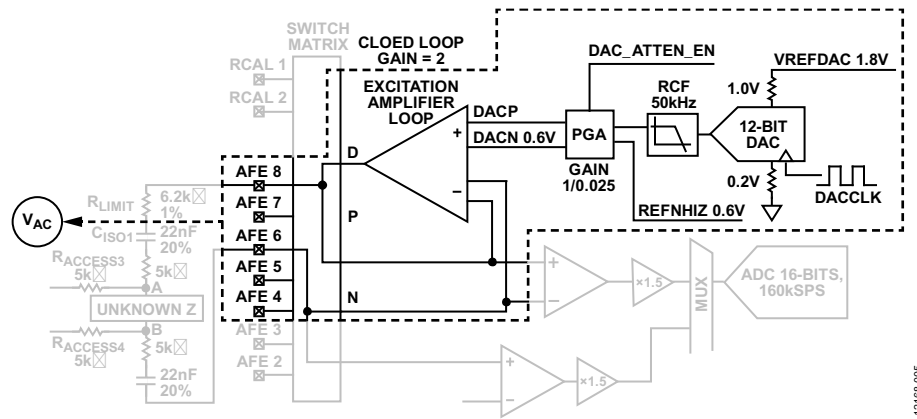


图6. ADuCM350的交流电压源

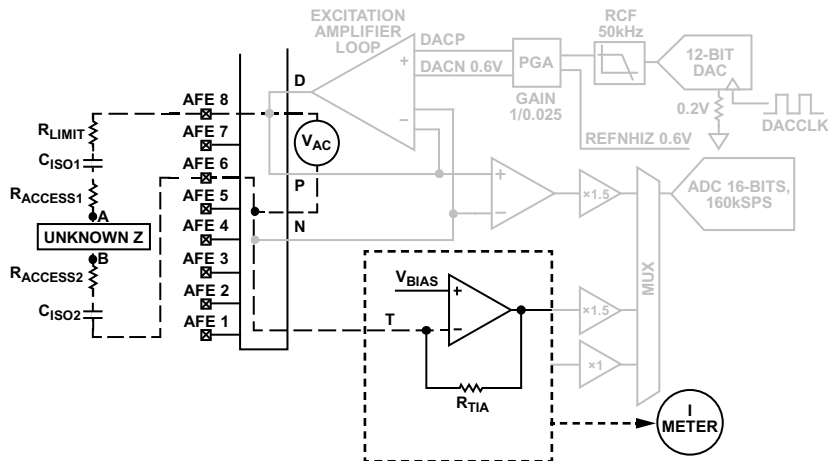


图7. 高精度电流表

### 高精度电流表

ADuCM350利用一个TIA放大器来对高精度ADC的测量结果执行电流到电压转换，其增益由外部电阻 $R_{TIA}$ 设置。TIA通道吸收传感器激励电流，并且精密偏置到1.1 V的共模电压。对测量结果执行有效的模拟和数字滤波，以便抑制干扰和噪声。T和N通道通过开关矩阵连在一起，以便精确检测电流(参见图7)。

ADC利用一个160 kSPS ADC转换电流测量结果。对数据执行2048采样点DFT，计算电流测量结果的实部和虚部。

## 精密差分电压表

为了以差分方式检测传感器上的电压，需要一个具有出色噪声和共模抑制性能的低功耗仪表放大器(参见图8)。本应用选择AD8226，它参考TIA通道上的 $V_{BIAS}$ 电压所设置的系统共模电压。仪表放大器输出通过一个辅助通道(如AN\_A)反馈到ADuCM350。

ADC利用一个160 kSPS ADC转换该辅助电压测量结果。对数据执行2048采样点DFT，计算电压测量结果的实部和虚部。

## 4线生物隔离测量系统框图

图9显示了以下元件的组合：

- 精密交流电压源(ADuCM350激励级)
- 高精度电流表(ADuCM350 TIA通道级)
- 精密差分电压表(AD8226仪表放大器)

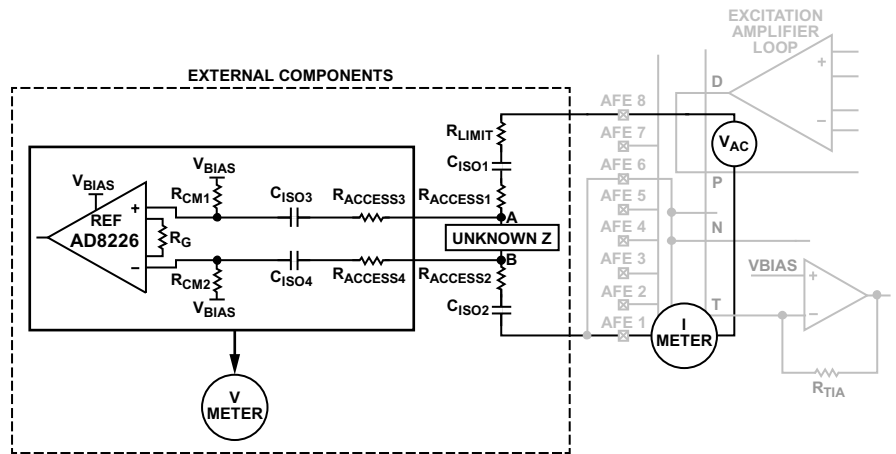


图8. 高精度差分电压表

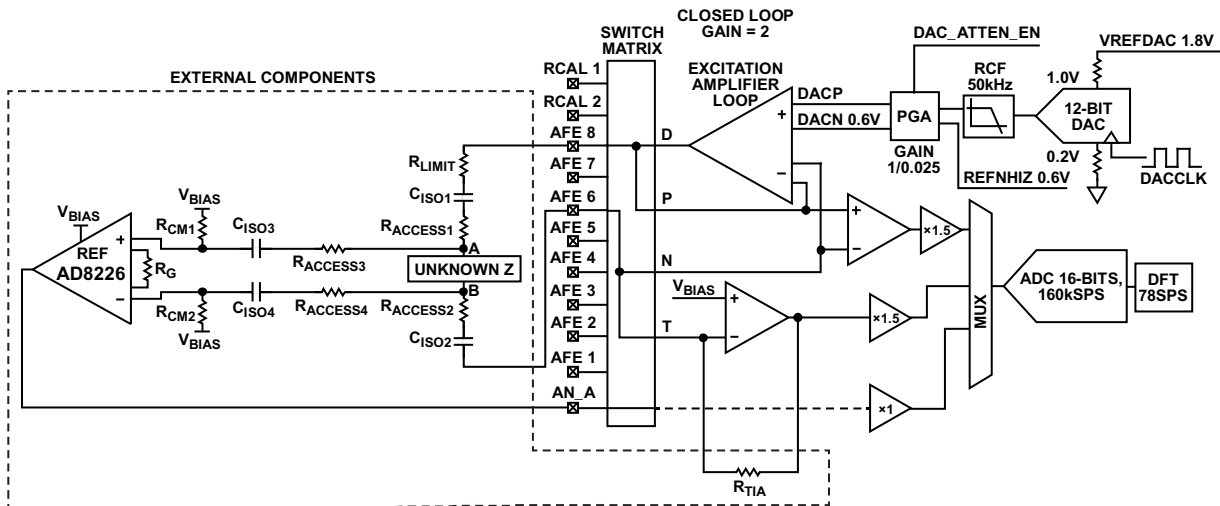


图9. 采用ADuCM350和仪表放大器(AD8226)的4线测量系统



### 如何计算未知阻抗Z

获得电流和电压DFT测量结果之后，器件可以退出AFE序列器并利用以下公式计算传感器的阻抗：

$$\text{电压测量幅度} = \text{SQRT}(r^2 + i^2)$$

$$\text{电压测量相位} = A \text{Tan}(i/r)$$

$$\text{电流测量幅度} = \text{SQRT}(r^2 + i^2)$$

$$\text{电流测量相位} = A \text{Tan}(i/r)$$

其中， $r$ 和 $i$ 分别是电压和电流DFT测量的实部和虚部。

利用欧姆定律计算阻抗 $Z$ ，将电压幅度除以电流幅度，同时要考虑信号链的增益。

$$\begin{aligned} Z(\text{幅度}) = & \\ & (\text{电压幅度}/\text{电流幅度}) \times \\ & (1.5/1.494) \times R_{TIA} \end{aligned}$$

为了便于测量，利用 $R_{TIA}$ 将电流测量值转换为电压。需要考虑增益。

公式中的1.5倍增益是ADuCM350电流测量通道的增益，与之对应ADuCM350电压测量通道的增益是1。

仪表放大器的增益由所选的RG决定。对于AD8226，其由下式确定：

$$RG = (49.4 \text{ k}\Omega)/(G - 1)$$

选择

$$RG = 100 \text{ k}\Omega$$

则增益为1.494。

注意：软件开发套件中的示例考虑了这些公式。

## 4线生物隔离系统示例

### 传感器配置

本应用笔记所述的例子利用图10所示配置测量一个RC型传感器在30 kHz激励信号下的阻抗。注意， $T_{OL}$ 表示容差。

传感器详情如下：

- $C_s = 220 \text{ pF}$
- $R_s = 20 \text{ k}\Omega$
- $R_p = 100 \text{ k}\Omega$

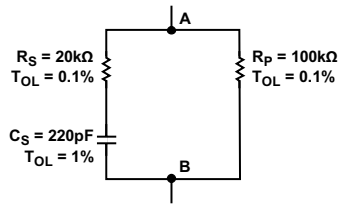


图10. 待测RC传感器

需要计算传感器的总阻抗以验证系统精度。

1. 计算复数和：

$$R_s + C_s = Z_s = 34962 \angle -55.11$$

2. 计算 $Z_s$  || 与

$$R_p = Z_T = 28337.15 \angle -41.66$$

这就是待测RC传感器的总阻抗。

### 4线生物隔离网络

对于该4线示例，选择如下元件：

- 引线接入电阻 $R_{ACCESS} = 4.99 \text{ k}\Omega$
- 隔离电容 $C_{ISO}$ 为47 nF

如果 $Z$ 接近或小于 $R_{ACCESS}$ ，则会发生分压器效应，ADuCM350的带宽受限，因而精度降低(参见图11)。

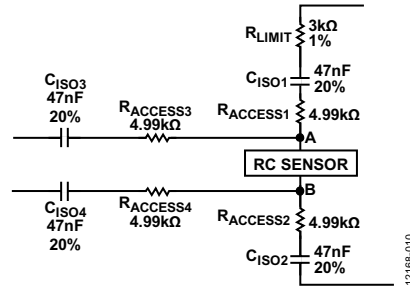


图11. 4线生物隔离测量网络

## AFE优化

通过以下步骤优化ADuCM350:

1. 计算 $R_{LIMIT}$ 电阻。
2. 计算 $R_{TIA}$ 。
3. 计算AD8226的 $R_G$ 。
4. 计算RCAL。

### 计算 $R_{LIMIT}$ 电阻

计算 $R_{LIMIT}$ 电阻时, 注意:

ADuCM350的最大输出电压 = 600 mV峰值

30 kHz时最大容许交流电流为

300  $\mu$ A rms(针对IEC-60601标准) = 424  $\mu$ A峰值

保守一点, 将最大容许交流电流设置为200  $\mu$ A峰值(<50%)。

$R_{LIMIT} \sim 600 \text{ mV peak} / 200 \mu\text{A peak} = 3 \text{ k}\Omega$ 。

此计算忽略了 $C_{ISO}$ , 因为其很小。

### 计算 $R_{TIA}$

$R_{TIA}$ 是TIA的反馈电阻, 用于将电流转换为电压。

TIA看到的最小阻抗/最大电流为

$$Z_{PNMIN} = \sqrt{(Real)^2 + (Sumofimaginary)^2}$$

$$\sqrt{\left( R_{LIMIT} + R_{ACCESS1_{MIN}} + Z_{UNKNOWN_{MIN}} + R_{ACCESS2_{MIN}} \right)^2 + \left( X_{C_{ISO1_{MIN}}} + X_{C_{ISO2_{MIN}}} \right)^2}$$

假设20 k $\Omega$ 为 $Z_{UNKNOWN}$ 的最小阻抗,

$R_{ACCESS1} = R_{ACCESS2} = 4.99 \text{ k}\Omega$

$R_{LIMIT} = 3 \text{ k}\Omega$

$X_{C_{ISO1}} = X_{C_{ISO2}} = 289.37 \Omega$

$Z_{PNMIN} = 32.985 \text{ k}\Omega$

注意:

- 最大信号摆幅为600 mV峰值。
- 流入TIA的最高信号电流 = 600 mV峰值/32.98 k $\Omega$  = 18.19  $\mu$ A峰值。
- TIA输出端的峰值电压(ADuCM350允许的最大值)= 750 mV峰值。
- 对于峰值信号电流, 产生750 mV峰值电压的 $R_{TIA}$ 电阻为:

$$R_{TIA} = 750 \text{ mV} / 18.19 \mu\text{A}$$

$$R_{TIA} = 41.2 \text{ k}\Omega$$

为了防止ADC超范围, 使用1.2的安全系数, 即最小阻抗比下面的指定最小阻抗小1.2倍:

$$32.985 \text{ k}\Omega = 27 \text{ k}\Omega$$

$$\text{包括安全系数的 } R_{TIA} = 41.2 \text{ k}\Omega / 1.2$$

$$R_{TIA} = 34.3 \text{ k}\Omega$$

注意, 本例使用33 k $\Omega$ 。

### 计算AD8226的 $R_G$

传感器的最大阻抗

$$Z_{UNKNOWN_{MAX}} = 28.337 \text{ k}\Omega$$

$R_{TIA}$ 包括一个安全系数以防止ADC超范围。此处也需要这样做, 因此AD8226差分输入上的最大峰值电流要除以系数1.2。

$V_{IN}$ (AD8226)看到的峰值电流 =

(18.19  $\mu$ A峰值)/1.2 = 15.16  $\mu$ A峰值

$V_{IN}$ (AD8226) =

15.16  $\mu$ A峰值  $\times$  28.337 k $\Omega$  = 439.6 mV峰值

AD8226 G = 750 mV峰值/(439.6 mV峰值) = 1.706

如果电压峰峰值再使用一个1.1的安全系数(应用可能不需要), 那么

AD8226 G = 750 mV峰值/(1.1  $\times$  439.6 mV峰值) = 1.55

AD8226 G = 1 + (49.4 k $\Omega$ /RG) = 1.55

RG = (49.4K)/(1.55 - 1) = 89.8 k $\Omega$

选择RG为100 k $\Omega$ , 因为这是标准值。

AD8226G = 1 + (49.4 k $\Omega$ /RG) =

1 + (49.4 k $\Omega$ /100 k $\Omega$ ) = 1.494

注意: AD8226有带宽限制。对于50 kHz频率, 增益以10为限(参见图12)。

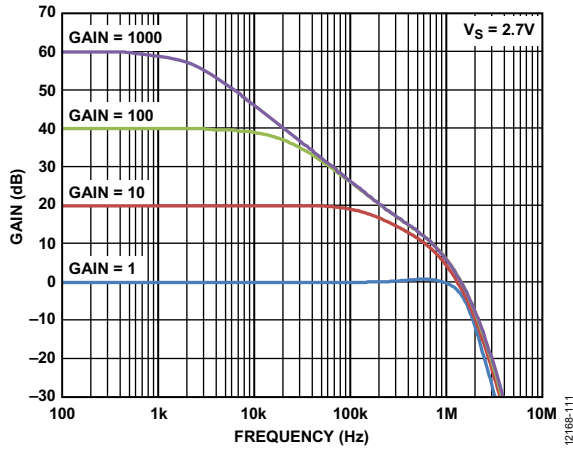


图12. AD8226增益与频率的关系(2.7 V)

## 计算RCAL

辅助通道和TIA通道的校准必须考虑系统的增益。

- 对于电压测量通道，校准辅助通道。
- 对于电流测量通道，校准温度传感器，将结果载入TIA通道的失调和增益寄存器。这样可以确保电压与电流增益之差为1.5。

软件开发套件中的4线生物隔离示例代码已经为用户完成了这一切。

# 4线生物隔离测量

## 4线生物配置板的硬件设置

设置EVAL- ADuCM350EBZ主板时，

- 对于电压测量，插入LK1(辅助通道A)。
- 断开LK6。

对于ADuCM350 4线生物配置板，

- 插入LK7、LK8、LK9和LK10。
- 为测量图10和图11所示的网络，插入LK16、LK17和LK21。结果应当与图13所示相似。

默认情况下，图10和图11所示的4线配置是在4线生物配置板上设置。

## 4线生物配置板的软件设置

### 固件示例

ADuCM350软件开发套件提供的代码设计用于4线生物配置板，以验证本应用笔记所讨论的解决方案。

示例文件夹中的Readme.txt提供了有关测量的更多信息。

1. 下载软件开发套件之后，转到C:\Analog Devices\ADuCM350BBCZ\EVAL-ADUCM350EBZ\examples。
2. 单击BioImpedanceMeasurement\_4Wire文件夹。
3. 单击IAR中的.eww文件。
4. 在下载和调试期间，打开Terminal I/O(终端I/O)窗口读取返回的结果。

## 测量结果

### 阻抗幅度

测量结果 = 28405 Ω

理论值 $Z_T$  = 28337 Ω

但是，计算所用的220 pF Cs有1%的容差。

分析时，测得的电容接近221 pF。

理论上，221 pF的Cs得出的ZT将是28416 Ω，而实测结果为28405 Ω。

更多信息请参见“传感器配置”部分。

### 阻抗相位

目前的4线生物隔离配置不能精确测量相位。

若需要绝对相位测量，请使用单芯片ADuCM350 4线测量配置。注意：这种配置没有隔离电容( $C_{ISO}$ )。

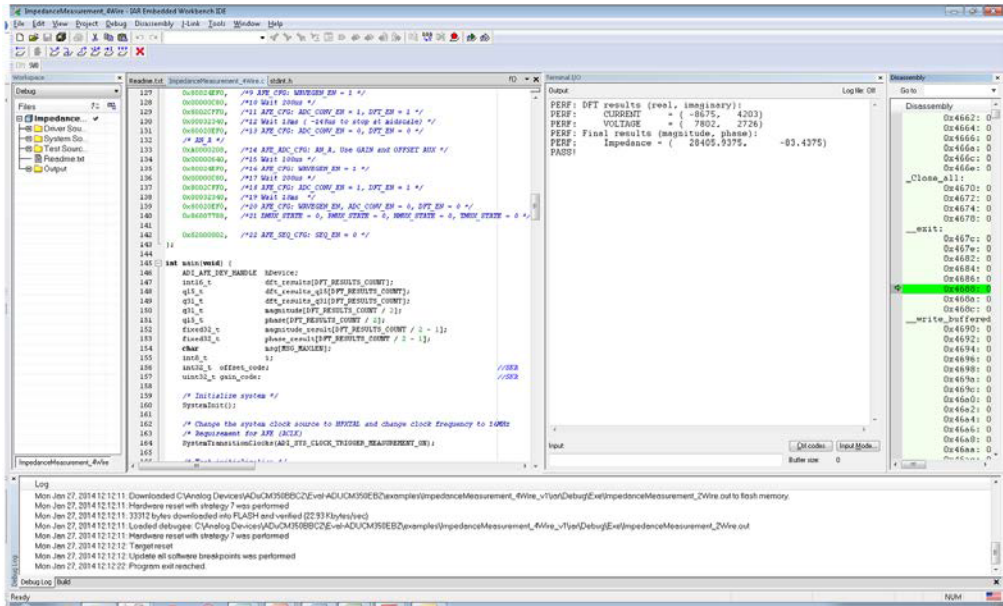


图13. 终端I/O上显示的4线测量结果

## 4线生物配置板的原理图

### MOTHERBOARD CONNECTOR - ALIGN J8 AND J9.

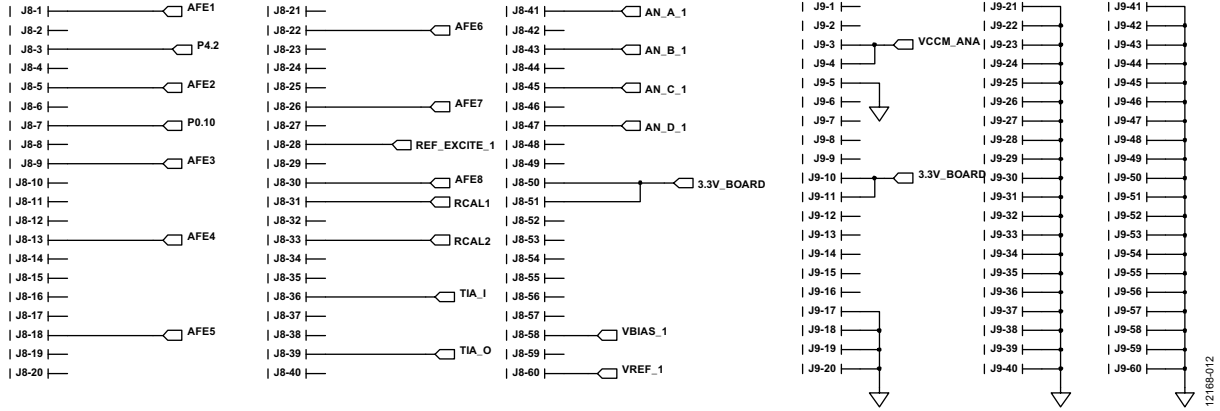
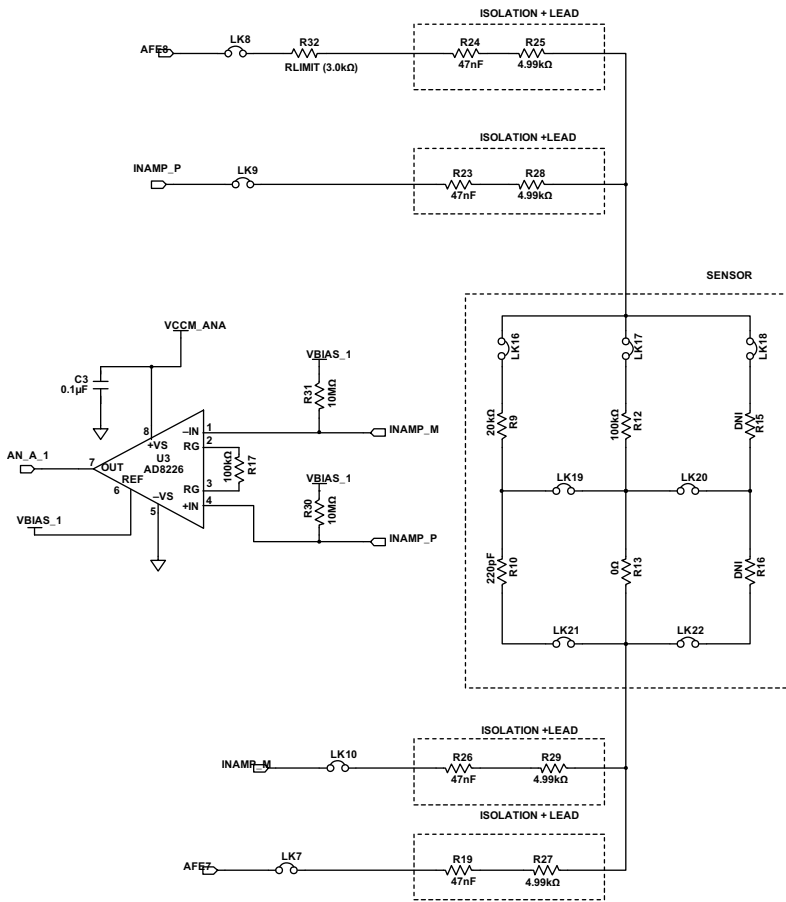


图14. 主板连接器

### 4-WIRE BIO IMPEDANCE CONFIGURATION



### UNCOMMITTED CONFIGURATION

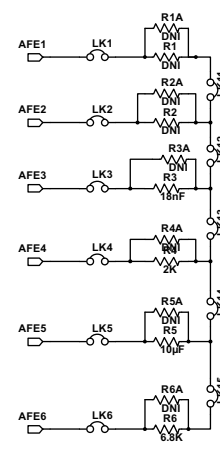


图15. 4线和非专用原理图

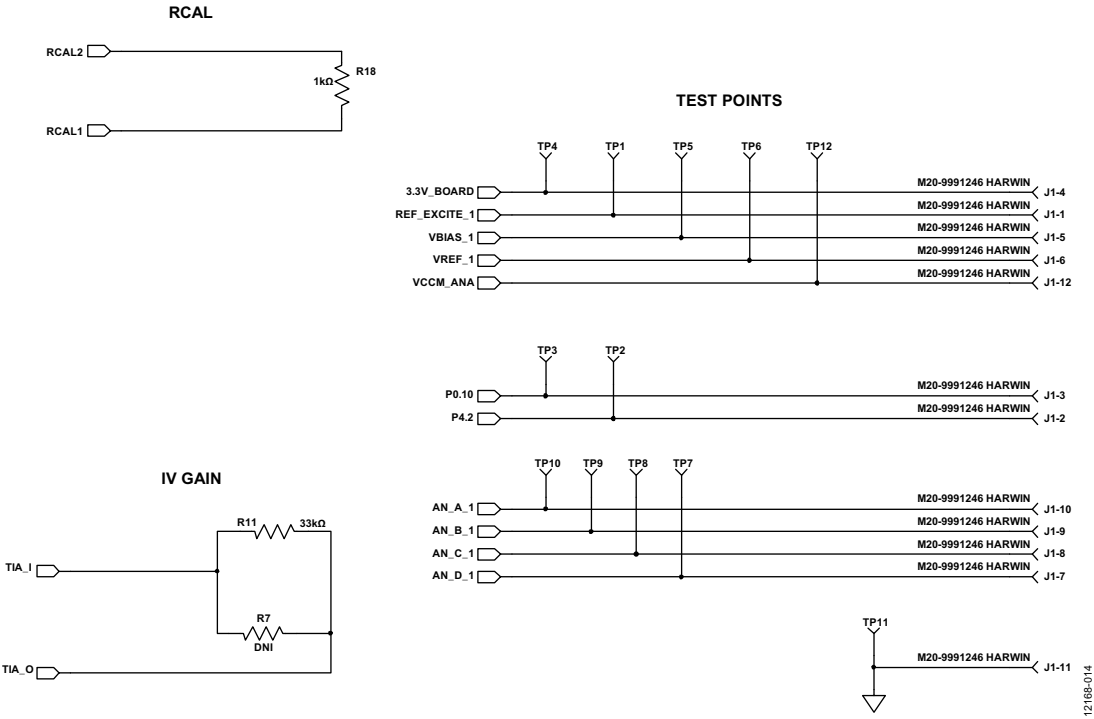


图16. 其他原理图

12/168-014

**注释**