

连接/参考器件

| | |
|-----------|------------------------|
| AD8226 | 宽电源电压范围、轨到轨输出仪表放大器 |
| ADR02 | 超紧凑、5.0 V精密基准电压源 |
| ADA4091-2 | 精密低功耗、OVP、RRIO双通道运算放大器 |

集成电压或电流驱动的灵活4 mA至20 mA 环路供电压力传感器变送器

评估和设计支持

电路评估板

[CN0289评估板\(EVAL-CN0289-EB1Z\)](#)

设计和集成文件

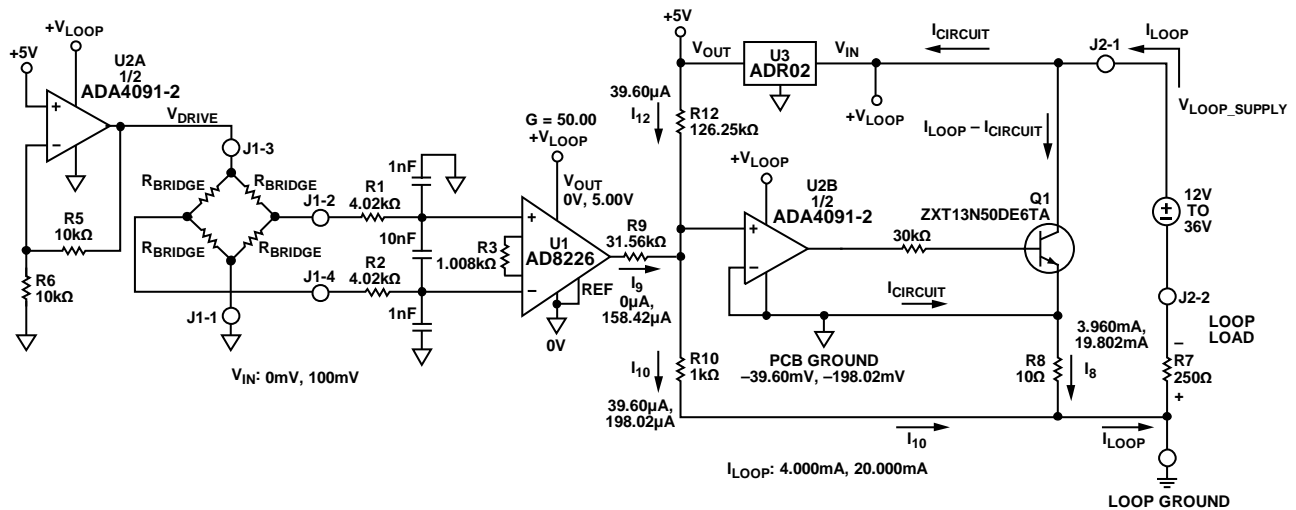
[原理图、布局文件、物料清单](#)

电路功能与优势

图1所示电路是一款鲁棒且灵活的环路供电电流变送器，可将压力传感器的差分电压输出转换为4 mA至20 mA电流输出。

该设计针对各种桥式电压或电流驱动型压力传感器而优化，仅使用了4个有源器件，总不可调整误差低于1%。环路电源电压范围为12 V至36 V。

该电路的输入具有ESD保护功能，并且可提供高于供电轨的电压保护，是工业应用的理想选择。



NOTES

- R8, R10 ARE STANDARD 0.1% VALUES. R5, R6 ARE STANDARD 1% VALUES. R3, R9, R12 ARE CALCULATED VALUES (SEE TEXT).
- VOLTAGES MEASURED WITH RESPECT TO PCB GROUND.

图1. 鲁棒的环路供电压力传感器信号调理电路，具有4 mA至20 mA输出(显示为传感器电压驱动模式)，原理示意图：未显示所有连接和去耦

Rev. 0

Circuits from the Lab™ circuits from Analog Devices have been designed and built by Analog Devices engineers. Standard engineering practices have been employed in the design and construction of each circuit, and their function and performance have been tested and verified in a lab environment at room temperature. However, you are solely responsible for testing the circuit and determining its suitability and applicability for your use and application. Accordingly, in no event shall Analog Devices be liable for direct, indirect, special, incidental, consequential or punitive damages due to any cause whatsoever connected to the use of any Circuits from the Lab circuits. (Continued on last page)

电路描述

该设计提供完整的4 mA至20 mA变送器压力传感器检测解决方案，整个电路由环路供电。有三个重要的电路级：传感器激励驱动、传感器输出放大器和电压-电流转换器。

电路所需总电流为1.82 mA(最大值)，如表1所示。因此，可在不超过4 mA最大可用环路电流的情况下使用电桥驱动电流高达2 mA的压力传感器。

表1. 25°C时最大电路电流

| 元件 | 电流(mA) |
|--------------|--------|
| ADR02 | 0.80 |
| ADA4091-2 | 0.50 |
| AD8226 | 0.43 |
| R5、R6(10 V时) | 0.05 |
| R12(5 V时) | 0.04 |
| 总计 | 1.82 |

传感器激励驱动

需使用电压驱动或电流驱动，具体取决于所选压力传感器。该电路使用一半的ADA4091-2 (U2A)，并通过开关S1选择不同配置，支持两种选项之一。开关S1提供其中一种驱动选择。

激励：电压驱动配置

图2显示S1的电压驱动配置，S1位于PCB上标有VOLTAGE DRIVE处(完整电路布局和原理图参见CN0289设计支持包：<http://www.analog.com/CN0289-DesignSupport>)。

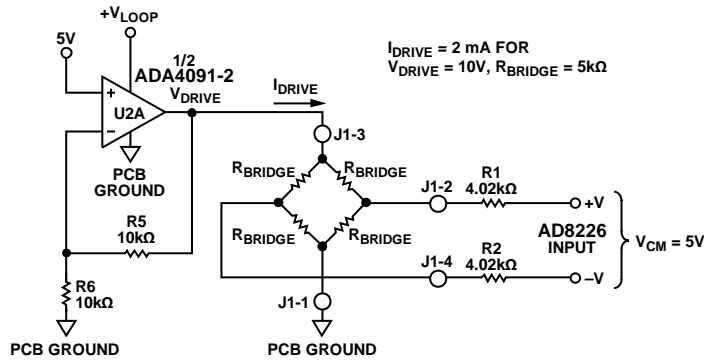


图2. 传感器电压驱动配置($R_{BRIDGE} = 5\text{ k}\Omega$, $V_{DRIVE} = 10\text{ V}$)

电压驱动电路通常配置为10 V电桥驱动电压。在该模式下，允许的最小电桥电阻为：

$$R_{BRIDGE} \geq \frac{2V_{REF}}{2 \text{ mA}} = \frac{10 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 5 \text{ k}\Omega$$

对于低于5 kΩ的电桥电阻而言，可通过移除R6并使用缓冲器配置，将驱动电压降低至5 V。

通过下式选择合适的R6，便可获得驱动电压的其他值：

$$V_{DRIVE} = 5 \text{ V} \left(1 + \frac{R5}{R6} \right)$$

$$R6 = \frac{5 \text{ V} \times R5}{V_{DRIVE} - 5 \text{ V}}$$

其中：

$$\frac{V_{DRIVE}}{R_{BRIDGE}} \geq 2 \text{ mA}$$

请注意，环路电压 V_{LOOP} 应至少比电桥驱动电压高0.2 V，以便让U2A具有足够的裕量。

$$V_{LOOP} \geq V_{DRIVE} + 0.2 \text{ V}$$

激励：电流驱动配置

通过将S1移动至PCB上标有CURRENT DRIVE的位置，便可将电路切换至图3所示的电流驱动配置。

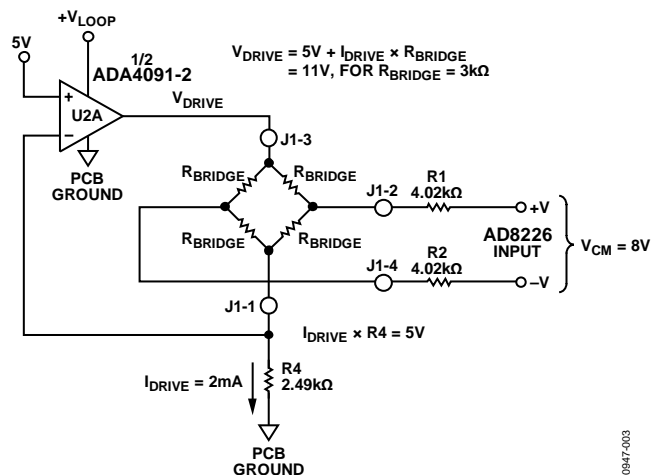


图3. 传感器电流驱动配置($R_{BRIDGE} = 3 \text{ k}\Omega$)

在电流驱动模式中，必须保留最大允许的2 mA电桥驱动电流。电路配置为R4 = 2.49 kΩ且I_{DRIVE} = 2 mA。使用下式选择R4值，可获得较低的I_{DRIVE}值：

$$R4 = \frac{5 \text{ V}}{I_{DRIVE}}$$

通过下式可计算驱动电压V_{DRIVE}：

$$V_{DRIVE} = 5 \text{ V} + I_{DRIVE} \times R_{BRIDGE}$$

U2A电源需要0.2 V裕量，因此：

$$V_{LOOP} \geq V_{DRIVE} + 0.2 \text{ V}$$

在图3中，R_{BRIDGE} = 3 kΩ、I_{DRIVE} = 2 mA、V_{DRIVE} = 11 V、V_{LOOP} ≥ 11.2 V。

该电路选择运算放大器ADA4091-2，因为它具有低功耗(每个放大器250 μA)、低失调电压(250 μV)以及轨到轨输入输出特性。

电桥输出仪表放大器以及增益和失调电阻选择

电桥输出采用带宽为39.6 kHz的共模滤波器(4.02 kΩ、1 nF)以及带宽为2 kHz的差模滤波器(8.04 kΩ、10 nF)滤波。

AD8226是理想的仪表放大器选择，因为它具有低增益误差(0.1%，B级)、低失调(G = 50时58 μV，B级；G = 50时112 μV，A级)、出色的增益非线性度(75 ppm = 0.0075%)以及轨到轨输出特性。

AD8226仪表放大器以系数50 V至5 V放大100 mV FS信号，增益设置电阻R3 = 1.008 kΩ。增益G和R3的关系如下：

$$R3 = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

其中，G = 50，R3 = 1008 Ω。

输出零值环路电流I_{LO} = 4 mA：

$$I_{LO} = I_8 + I_{10}$$

由于R10与R8之比为100:1：

$$I_8 = 100 \times I_{10}$$

合并最后两式可得：

$$I_{LO} = 101 \times I_{10}$$

I_{LO} = 4 mA时，AD8226输出为0 V；失调电阻R12可计算如下：

$$R12 = \frac{V_{REF}}{I_{10}} = \frac{101 \times V_{REF}}{I_{LO}} = \frac{101 \times 5 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 126.25 \text{ k}\Omega$$

若V_{OUT} = 5.00 V，则输出环路电流I_{LH} = 20 mA，因此：

$$I_{LH} = I_8 + I_{10} = 100 \times I_{10} + I_{10} = 101 \times I_{10}$$

$$I_{10} = \frac{I_{LH}}{101} = \frac{20 \text{ mA}}{101} = 198.02 \mu\text{A}$$

流经R12的电流为：

$$I_{12} = \frac{V_{REF}}{R12} = \frac{5 \text{ V}}{126.25 \text{ k}\Omega} = 39.60 \mu\text{A}$$

流经R9的电流为：

$$I_9 = I_{10} - I_{12} = 198.02 \mu\text{A} - 39.60 \mu\text{A} = 158.42 \mu\text{A}$$

R9值可通过下式计算：

$$R9 = \frac{V_{OUT}}{I_9} = \frac{5 \text{ V}}{158.42 \mu\text{A}} = 31.56 \text{ k}\Omega$$

实际使用时，R3、R12和R9的计算值将不作为标准值提供，因此电路所用的实际值将产生固定误差。这些误差可通过下式计算。

电阻R3、R9和R12产生的增益、失调和总误差测量值，以%FSR表示(其中，FSR = 16 mA)：

Gain Error (%FSR) =

$$\left[\left(\frac{1008 \Omega - R3}{1008 \Omega} \right) + \left(\frac{31.56 \text{ k}\Omega - R9}{31.56 \text{ k}\Omega} \right) \right] \times 100\%$$

Offset Error (%FSR) =

$$0.25 \left(\frac{126.25 \text{ k}\Omega - R12}{126.25 \text{ k}\Omega} \right) \times 100\%$$

零电平输出(4 mA)时的总误差^{不受增益误差影响}。

而满量程输出(20 mA)时的总误差可计算如下：

满量程误差 = 增益误差 + 失调误差

实际电路中，必须选择最接近EIA标准的0.1%电阻，因此可得前文所述的固定增益和失调误差。可使用两个0.1%电阻组合，以便更接近计算值。例如，下列0.1%电阻的串联组合非常接近计算值：

- R3 = 1 kΩ + 8.06 Ω = 1008.06 Ω(计算值 = 1008 Ω)
- R9 = 30.9 kΩ + 655 Ω = 31.555k Ω(计算值 = 31.56 kΩ)
- R12 = 124 kΩ + 2.26 kΩ = 126.26 Ω(计算值 = 126.25 Ω)

这些组合的误差计算如下：

- 失调误差 = -0.008% FSR
- 增益误差 = +0.010% FSR
- 满量程误差 = +0.002% FSR

然而在某些情况下，电阻供应商甚至连标准0.1%电阻值都无法提供，因此需进行替换。

例如，EVAL-CN0289-EB1Z评估板提供的电阻值如下：

- R3 = 1000 Ω(计算值 = 1008 Ω)
- R9 = 31.6 kΩ(计算值 = 31.56 kΩ)
- R12 = 124 kΩ(计算值 = 126.25 kΩ)

根据评估板提供的数值，电阻值引起的误差可计算如下：

- 失调误差 = +0.45% FSR
- 增益误差 = +0.66% FSR
- 满量程误差 = +1.11% FSR

基准电压

使用ADR02 5 V基准电压设置电桥的驱动电压或电流，以及设置4 mA零电平失调。其初始精度为0.1%(A级)、0.06%(B级)，并且具有10 μV p-p电压噪声。此外，它将采用高达36 V的电源电压工作，且仅消耗1 mA(最大值)，是环路供电应用的理想选择。

电压电流转换

通过强制数值大小为信号分量(I_s)和失调分量(I_{12})之和的电流流过R10，即可产生4 mA至20 mA输出电流。电流($I_{10} = I_s + I_{12}$)在R10两端产生电压，该电压通过U2B和Q1施加于感测电阻R10。流经R8的电流是流经R10电流的100倍。因此，环路电流ILOOP可由下式算得：

$$I_{LOOP} = I_s + I_{10} = 100 \times I_{10} + I_{10} = 101 \times I_{10}$$

选择的R8 (10 Ω)和R10 (1 kΩ)数值要能够轻松得到0.1%容差。

为了让电路正常工作，电路电流 $I_{CIRCUIT}$ 必须始终低于4 mA的最小环路电流。此外，任何情况下均不得将PCB地与环路地相连，并且PCB地和传感器必须对环路地自由浮空。

受U2B输出控制的双极性NPN晶体管产生环路电流，并且增益应当至少为300，以便最大程度减少线性误差。其击穿电压应至少为50 V。

输出晶体管Q1是一个50 V NPN功率晶体管，25°C时功耗为1.1 W。在20 mA输出电流输入至0 Ω环路负载电阻且 V_{CC} 电源为36 V时，电路具有最差情况下的功耗。这些条件下的Q1功耗为0.68 W。

驱动电路板的电源电压 V_{LOOP} 取决于环路电源 V_{LOOP_SUPPLY} 、环路负载R7和环路电流 I_{LOOP} 。这些数值的關係如下：

$$V_{LOOP} = V_{LOOP_SUPPLY} - R7 \times I_{LOOP}$$

若要使电路正常工作，电源电压 V_{LOOP} 必须大于7 V，以便为ADR02基准电压源提供充分的裕量。

因此，

$$V_{LOOP_SUPPLY} > 7 V + R7 \times I_{LOOP}$$

对于20 mA最大环路电流以及 $R7 = 250 \Omega$ ：

$$V_{LOOP_SUPPLY} > 7 V + 250 \Omega \times 20 \text{ mA} = 12 V$$

最小环路电源电压同样取决于电桥的驱动电路配置。在 $V_{DRIVE} = 10 V$ 的电压驱动模式下，电源电压 V_{LOOP} 必须大于10.2 V，这样U2A才能保持足够的裕量(见图2)。

在电流驱动模式下，电源电压 V_{LOOP} 必须大于11.2 V，这样U2A才能保持足够的裕量(见图3)。

环路电源电压限值为36 V(最大值)。

有源元件的误差分析

表2和表3分别表示系统中因有源元件造成的AD8226和ADR02的A、B级最大误差及RSS误差。请注意，运算放大器ADA4091-2仅在一种等级水平下可用。

表2. 有源器件造成的误差(A级)

| 误差元件 | 误差 | 误差值 | 误差(%FSR) |
|-----------|----|--------|----------|
| AD8226-A | 失调 | 112 μV | 0.11% |
| ADR02-A | 失调 | 0.10% | 0.02% |
| ADA4091-2 | 失调 | 250 μV | 0.16% |
| AD8226-A | 增益 | 0.15% | 0.15% |
| RSS失调 | | | 0.20% |
| RSS增益 | | | 0.15% |
| RSS FS误差 | | | 0.35% |
| 最大失调 | | | 0.29% |
| 最大增益 | | | 0.15% |
| 最大FS误差 | | | 0.44% |

表3. 有源器件造成的误差(B级)

| 误差元件 | 误差 | 误差值 | 误差(%FSR) |
|-----------|----|--------|----------|
| AD8226-B | 失调 | 58 μV | 0.06% |
| ADR02-B | 失调 | 0.06% | 0.01% |
| ADA4091-2 | 失调 | 250 μV | 0.16% |
| AD8226-B | 增益 | 0.10% | 0.10% |
| RSS增益 | | | 0.10% |
| RSS失调 | | | 0.17% |
| RSS FS误差 | | | 0.27% |
| 最大失调 | | | 0.23% |
| 最大增益 | | | 0.10% |
| 最大FS误差 | | | 0.33% |

总电路精度

对电阻容差导致的总误差的合理近似推算是假设每个关键电阻对总误差贡献都相等。5个关键电阻是R3、R8、R9、R10和R12。0.1%电阻导致的最差情况下的容差可造成0.5%总电阻误差最大值。若假定rss误差，则总rss误差为 $0.1\sqrt{5} = 0.224\%$ 。

由于有源器件(A级)造成的误差，需要在之前的最差情况误差之上增加0.5%的最差情况电阻容差误差：

- 失调误差 = $0.29\% + 0.5\% = 0.79\%$
- 增益误差 = $0.15\% + 0.5\% = 0.65\%$
- 满量程误差 = $0.44\% + 0.5\% = 0.94\%$

这些误差假定选用理想电阻，因此误差仅来源于其容差。

虽然电路允许具有1%或更低的总误差，若要求更佳精度，则电路需具备失调和增益调节能力。针对4 mA输出和零电平输入，可通过调整R12来校准失调，然后针对满量程100 mV输入，通过改变R9调节满量程。这两项调节是相互独立的；假定首先进行失调校准。

电路的实际误差数据见图4。总输出误差(%FSR)通过将理想输出电流与测量输出电流的差除以FSR (16 mA)，然后将计算结果乘以100即可算出。

请注意，0 mV与1 mV输入之间的误差由AD8226输出级饱和电压导致，且电路在负载条件下的误差范围为20 mV至100 mV。所有轨到轨输出级均受限于其通过饱和电压(双极性输出)或导通电阻(CMOS输出)达到供电轨的能力。

若输出饱和电压引起的误差导致某些问题的产生，则来自电桥的输入信号可通过在+5 V基准电压与电桥输出的其中一侧之间连接一个适当的电阻而进行偏置。

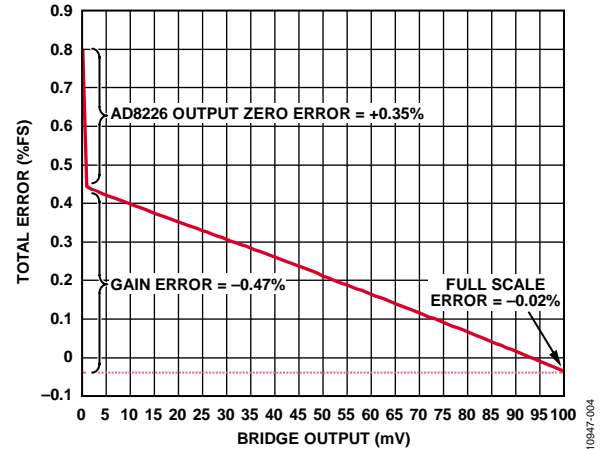


图4. 输出电流(%FSR)的总误差与电桥输出的关系
(3 kΩ电桥, 24 V环路电源)

常见变化

经验证，采用图中所示的元件值，该电路能够稳定地工作，并具有良好的精度。可在这些配置中使用其他基准电压、精密运算放大器和仪表放大器以建立4 mA至20 mA模拟电流输出，用于本电路的其他应用中。

ADA4091-4是四通道版本器件，可用于代替双通道ADA4091-2，提供额外的精密运算放大器。

针对多输入通道应用，还可使用双通道、低成本、宽电源范围仪表放大器AD8426。

针对低电源电压应用，可使用高精度、低功耗、低噪声基准电压源ADR4550代替ADR02。

电路评估与测试

设备要求

- EVAL-CN0289-EB1Z评估板
- Agilent E36311A双直流电源(或等效设备)
- Agilent 3458A万用表(或等效设备)

电流输出测量

评估板的电流输出采用图5中的设置进行测量。测试条件为：

- 环路电源：24 V
- 环路负载：250 Ω
- $R_{\text{BRIDGE}} = 3 \text{ k}\Omega$
- $V_{\text{DRIVE}} = 5 \text{ V}$
- $V_{\text{CM}} = 2.5 \text{ V}$

桥式电阻同时连接仪表放大器的两个输入端，仿真传感器输出。

测试设置的配置与测试

使用图5中的测试设置对电路进行测试。

使用Agilent E36311A双电源产生2.5 V共模电压和0 mV至100 mV差分输入电压。

Agilent 3458A用于测量评估板的实际环路电流输出。

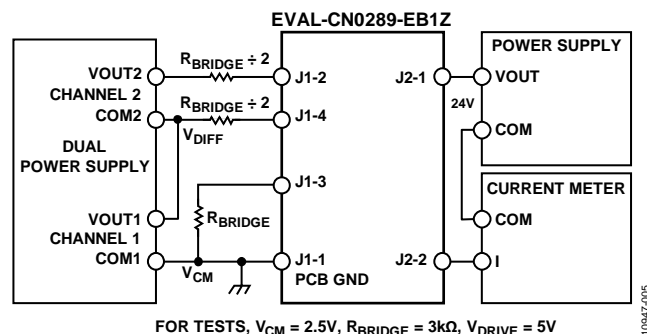


图5. 测试设置功能框图

了解详情

CN-0289 Design Support Package:

<http://www.analog.com/CN0289-DesignSupport>.

MT-031 Tutorial, *Grounding Data Converters and Solving the Mystery of AGND and DGND*. Analog Devices.

MT-035 Tutorial, *Op Amp Inputs, Outputs, Single-Supply, and Rail-to-Rail Issues*. Analog Devices.

MT-065 Tutorial, *In-Amp Noise*. Analog Devices.

MT-066 Tutorial, *In-Amp Bridge Circuit Error Budget Analysis*. Analog Devices.

MT-087 Tutorial, *Voltage References*. Analog Devices.

MT-101 Tutorial, *Decoupling Techniques*. Analog Devices.

Voltage Reference Wizard Design Tool.

数据手册和评估板

CN-0289 Circuit Evaluation Board (EVAL-CN0289-EB1Z)

AD8226 Data Sheet

ADA4091-2 Data Sheet

ADR02 Data Sheet

修订历史

2013年5月—修订版0：初始版

(Continued from first page) Circuits from the Lab circuits are intended only for use with Analog Devices products and are the intellectual property of Analog Devices or its licensors. While you may use the Circuits from the Lab circuits in the design of your product, no other license is granted by implication or otherwise under any patents or other intellectual property by application or use of the Circuits from the Lab circuits. Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, Circuits from the Lab circuits are supplied "as is" and without warranties of any kind, express, implied, or statutory including, but not limited to, any implied warranty of merchantability, noninfringement or fitness for a particular purpose and no responsibility is assumed by Analog Devices for their use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from their use. Analog Devices reserves the right to change any Circuits from the Lab circuits at any time without notice but is under no obligation to do so.

©2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.
CN10947sc-0-5/13(0)

