

**Circuits from the Lab™**  
Reference Circuits

*Circuits from the Lab™ reference circuits are engineered and tested for quick and easy system integration to help solve today's analog, mixed-signal, and RF design challenges. For more information and/or support, visit [www.analog.com/CN0267](http://www.analog.com/CN0267).*

### 连接/参考器件

|          |                         |
|----------|-------------------------|
| ADuCM360 | 低功耗、精密模拟微控制器            |
| AD5421   | 16位、环路供电、4 mA至20 mA DAC |
| AD5700   | 低功耗HART调制解调器            |

## 具有HART接口的完整4 mA至20 mA环路供电现场仪表

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[CN0267电路评估板\(DEMO-AD5700D2Z\)](#)

#### 设计和文件汇总

[原理图](#)、[布局文件](#)、[物料清单](#)、[代码示例](#)

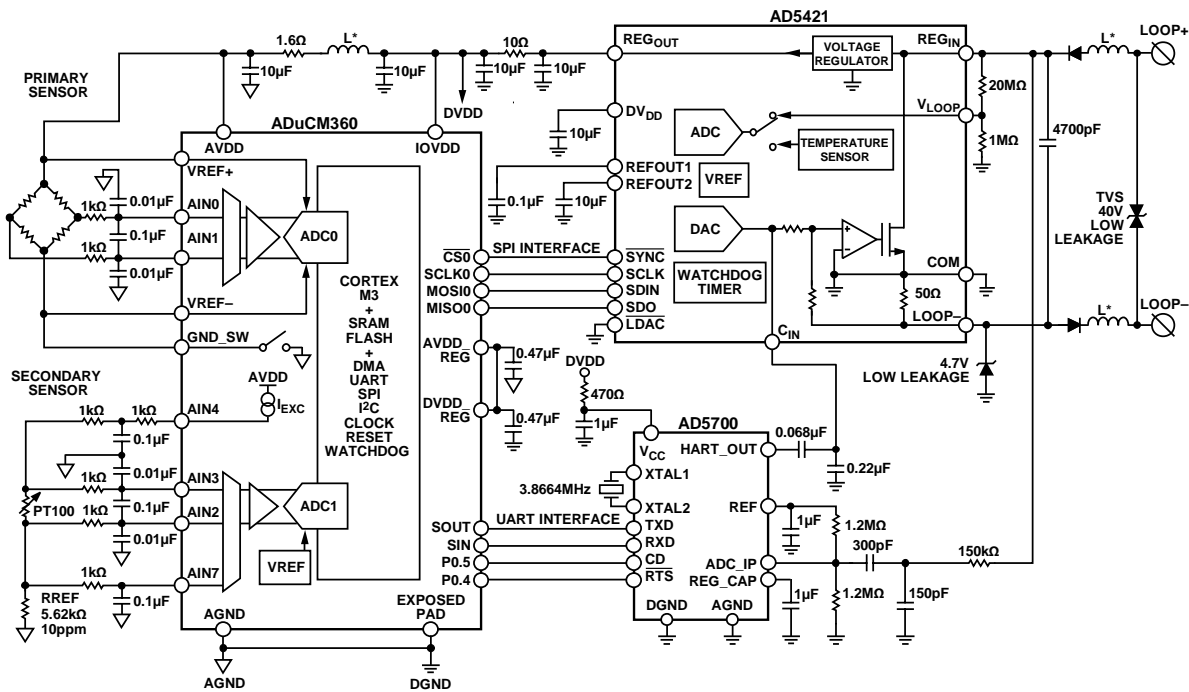
### 电路功能与优势

图1所示电路是一款完整的智能工业环路供电现场仪器，提供4 mA至20 mA模拟输出和可寻址远程传感器高速通道(HART®)接口。HART是一种数字双向通信，可在4 mA至20 mA模拟电流信号之上调制一个1 mA峰峰值频移键控(FSK)信号。

它可实现众多功能，例如远程校准、故障查询和过程变量传输；这些功能在诸如温度和压力控制等应用中是必须的。

该电路已通过兼容性测试和验证，并通过了HART通信基金会(HCF)的注册。这一成功注册可让电路设计人员极其放心地使用电路中的一个或全部元件。

该电路使用了超低功耗精密模拟微控制器ADuCM360、4 mA至20 mA 16位环路供电数模转换器(DAC) AD5421，以及业界功耗最低、尺寸最小的HART兼容型IC调制解调器AD5700。



- NOTES  
1. L\* = FERRITE BEAD, 0.3Ω @ DC, 1kΩ @ 100MHz.  
2. THE ADuCM360 EXPOSED PAD IS CONNECTED TO DGND.

图1. 具有HART接口的4 mA至20 mA环路供电现场仪器(原理示意图: 未显示所有连接和去耦)

### Rev. A

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)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 [www.analog.com](http://www.analog.com)  
Fax: 781.461.3113 ©2012–2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## 电路描述

### 模拟前端接口

ADuCM360模拟前端集成双通道、高性能、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型模数转换器(ADC)。同时还集成了可编程增益仪表放大器、精密带隙基准电压源、可编程电流源、灵活的多路复用器以及其它许多特性。该器件允许直接与多个模拟传感器对接,如压力传感器电桥、电阻式温度传感器、热电偶以及工业用途的其它各类传感器。

图1表示连接主要桥式传感器与辅助电阻式温度传感器的示例电路。而ADuCM360具有灵活的前端,允许进行除此之外的其它各种配置,满足各种类型的精密模拟传感器应用要求。

### 主传感器输入

ADuCM360的片内ADC0测量现场仪器的主传感器,在图1中表示为桥式传感器。该传感器通过一个RC滤波器网络连接至模拟输入引脚AIN0和AIN1,以便增强系统抵抗电磁干扰的能力。共模滤波器带宽约为16 kHz,差模带宽为800 Hz。

ADuCM360的VREF+和VREF-基准电压输入检测电桥的激励电压并启动电路的比率工作模式,使测量独立于传感器电源电压的确切值。若应用需要,则片内接地开关可动态断开电桥的激励电压,降低功耗。

### 辅助传感器输入

本电路使用100  $\Omega$ 铂(Pt)电阻温度检测器(RTD)作为辅助传感器。RTD能够检测主传感器的温度,因此,如果必要,可对主传感器进行温度补偿。

ADuCM360可编程电流源通过AIN4引脚为RTD提供电源。ADuCM360上的ADC1利用配置为差分输入的AIN3和AIN2引脚,测量RTD的电压。利用精密电阻(RREF),对流过RTD的确切电流值进行检测,并使用ADC1的AIN7引脚测得。ADC1使用片内带隙基准电压源。

## 数字数据处理、算法和通信

所有现场仪器的数字功能均由ADuCM360 32位ARM Cortex™ M3 RISC处理器提供,该处理器集成128k字节非易失性flash/EE存储器、8k字节SRAM,以及一个支持有线(2 $\times$  SPI、UART、I<sup>2</sup>C)通信外设的11通道直接存储器访问(DMA)控制器。

演示软件可进行初始化和配置、处理来自模拟输入的数据、控制模拟输出,并进行HART通信。

### 模拟输出

AD5421集成16位低功耗精密DAC,该DAC带4 mA至20 mA环路供电输出驱动器,可提供现场仪器模拟输出所需的全部功能。

AD5421通过SPI接口与ADuCM360控制器对接。

AD5421还集成了一系列与4 mA至20 mA环路相关的诊断功能。辅助ADC可通过连接至V<sub>LOOP</sub>引脚上的20 M $\Omega$ /1 M $\Omega$ 电阻分压器测量仪器环路端的电压。该ADC还可通过集成式传感器测量芯片温度。ADuCM360控制器可配置并读取AD5421的全部诊断数据,但AD5421也可采用自主工作方式。

例如,若控制器和AD5421之间的通信发生故障,AD5421将在一段时间后自动设置其模拟输出为3.2 mA报警电流。此报警电流将现场仪器工作故障这一情况汇报给主机。

输出电流值的任何改变都受到软件的控制,以防对HART通信产生干扰。(参见“模拟变化率”部分)。

### HART通信

AD5700集成完整的HART FSK调制解调器。该调制解调器通过标准UART接口,伴随请求发送(RTS)和载波检测(CD)信号实现与ADuCM360控制器的连接。

HART输出通过0.068  $\mu$ F/0.22  $\mu$ F容性分压器调整至所需幅度,并耦合至AD5421的CIN引脚,然后与DAC输出一同驱动和调制输出电流。

HART输入通过一个简单的无源RC滤波器,从LOOP+端耦合至AD5700的ADC\_IP引脚。RC滤波器作为第一级,用作HART解调器的带通滤波器,同时增强系统抵抗电磁干扰的能力——这对于稳定工作在恶劣工业环境中的应用而言非常重要。

AD5700低功耗振荡器采用与XTAL1和XTAL2引脚直接相连的3.8664 MHz外部晶振,产生HART调制解调器的时钟。

## 输出保护

瞬变电压抑制器(TVS)保护4 mA至20 mA HART接口免受电压影响。其额定电压不应超过AD5421在REG<sub>IN</sub>引脚上的60 V绝对最大电压。请注意, TVS泄漏电流可能会影响电流输出精度; 因此, 选用此器件时, 需关注一定环路电压和温度范围下的泄漏电流。

可使用外部耗尽型FET与AD5421搭配工作, 提高环路电压最大值。

本电路具有保护功能, 通过与环路输出相串联的一对二极管保护电路免受极性反转的影响。

铁氧体磁珠与环路串联, 该串联部分与4700 pF电容一同提升系统的EMC性能。由于HART网络的规格限制, 请勿在环路端点处使用更高数值的电容。

4.7 V低泄露齐纳二极管保护AD5421的片内50 Ω环路检测电阻免受AD5421的COM引脚和LOOP-引脚间意料之外的外部电压影响(例如, 对ADuCM360编程或调试电路时)。

## 电源和电源管理

包括传感器驱动电流在内的完整现场仪器电路必须工作在4 mA至20 mA环路提供的限量电源下。这对所有环路供电现场仪器设计而言, 都是一个普遍的难题。图1中的电路提供了低功耗以及高性能解决方案的一个实例。应用中用到的全部三个集成电路均针对低功耗而设计, 并且电路依靠各自的集成特性提供灵活的电源管理结构和性能最优的环路供电解决方案。

AD5421采用4 mA至20 mA环路电压供电, 为电路的其余部分提供经过调节的低电压。AD5421的REG<sub>OUT</sub>电压在1.8 V至12 V范围内引脚可编程, 具体电压值取决于电路要求。图1中的电路采用3.3 V电源电压选项, 作为所用输入传感器的一个实例。然而, 由于ADuCM360和AD5700具有更宽的电源电压范围, 因此可采用不同的电源电压, 以满足应用要求。

REG<sub>OUT</sub> RC滤波器(10 μF/10 Ω/10 μF)有助于防止传感器模拟前端受到来自环路的任何干扰的影响。它还能防止电路产生的任何干扰(尤其是控制器和数字电路产生的干扰)回流耦合至环路, 这对于可靠的HART通信而言非常重要。

AD5700 HART调制解调器通过一个额外的RC滤波器供电(470 Ω/1 μF)。该滤波器在环路供电应用中的作用非常重要, 因为它可防止AD5700的电流噪声与4 mA至20 mA环路输出进行耦合; 若非如此, 将影响HART通信。在静默测试期间, 特地通过HART带内噪声解决4 mA至20 mA环路噪声性能问题。AD5700调制解调器使用外部晶振, 以及通过XTAL1和XTAL2接地的8.2 pF电容, 在使用最低功耗中电容是选加的。

ADuCM360具有极为灵活的内部电源管理功能, 提供所有内部模块的许多供电和时钟选项, 并且当软件调用时, 允许针对特定的仪器应用, 在要求的性能、性能和功耗之间取得最佳平衡。请参考ADuCM360产品页面和AN-1111应用指南。

模拟前端AVDD通过另一个滤波器(10 μF/铁氧体磁珠/1.6 Ω/10 μF)供电, 以便最大程度针对低压传感器信号减少电源噪声, 获得更佳性能。

ADuCM360的GND\_SW接地开关引脚控制主传感器的激励和电源。仪器上电时, 开关默认为关闭。这一默认设定允许在开启传感器之前对系统进行全面配置, 包括适当的电源模式, 从而最大程度降低4 mA至20 mA环路输出上可能存在的任何上电尖峰。

类似地, 辅助传感器采用ADuCM360的可编程电流源供电, 因此可通过软件完全控制其电源输入。

## ADuCM360软件

可在CN-0267设计支持包中找到演示本电路功能和性能的基本代码示例。

代码示例包括基本HART从机命令响应, 用于演示硬件的功能和特性。代码示例不包括HART通信的协议层。

## 常见变化

ADuCM360具有一个高性能且非常灵活的模拟前端, 提供12个模拟输入引脚以及供基准电压源和接地开关使用的额外引脚。它允许与多个各类模拟传感器直接接口, 比如任意的阻性桥式传感器、电阻式温度传感器或热电偶。由于可用于几乎所有的传感器现场仪器, 这款现场仪器解决方案并不局限于温度补偿型压力测量。

在模拟前端只需一个Σ-Δ型ADC的应用中, 可使用ADuCM361替换ADuCM360。除了没有第二个ADC, ADuCM361提供ADuCM360的所有特性。

ADuCM361片内DAC和外部晶体管可用于控制4 mA至20 mA环路，详情请参见CN-0300。

AD5421可通过保护电路直接与环路相连。也可在AD5421和环路电源之间连接一个耗尽型N沟道MOSFET，如图2所示。由于在本配置中使用额外MOSFET，因此可将AD5421上的电压降保持在12 V左右，降低AD5421封装的功耗，并增加4 mA至20 mA模拟输出精度。它还可将环路允许的最大电压提升至MOSFET的额定电平值。额外的MOSFET对HART通信无影响。

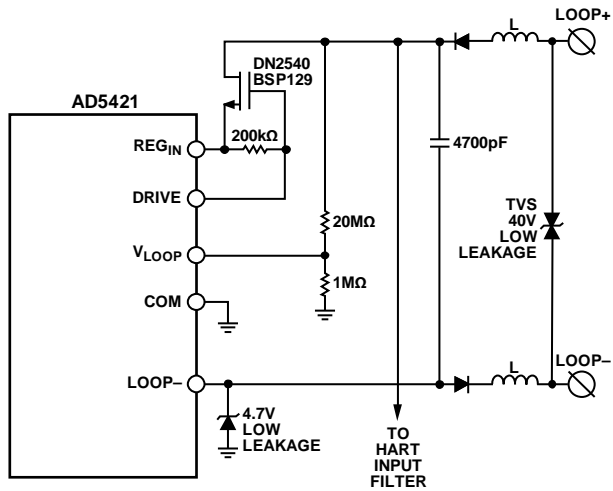


图2. MOSEFT连接至AD5421环路电源

本电路中，AD5700与3.8664 MHz晶振共同使用，形成具有最低功耗的配置。作为替代方案，AD5700-1可配合0.5 %精度的集成式内部振荡器使用。与晶体振荡器相比，内部振荡器最多会增加225 μA调制解调器电源电流，但因为无需使用外部晶体，因此该方案同时节省了成本，降低了所需的电路板面积。

对于非环路供电的应用，则AD5410、AD5420、AD5422或AD5755是针对4 mA至20 mA DAC不错的选择。

## 电路评估与测试

### 电路硬件

图1中的电路基于图3中的DEMO-AD5700D2Z印刷电路板构建。

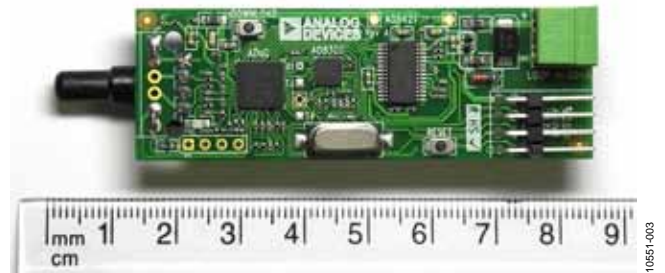


图3. DEMO-AD5700D2Z印刷电路板(未显示压力传感器)

DEMO-AD5700D2Z电路板具有一些额外的特性，方便进行系统评估。连接器具有0.1英寸的引脚间距，允许使用可选的主级和次级传感器连接。HART兼容性测试可能需要用到HART RTS和DC信号的测试点。

DEMO-AD5700D2Z边沿上的连接器使ADuCM360信号线和UART下载/调试信号可被访问，让软件开发、代码下载和在线调试与仿真更为便捷。连接器带有小型的连接头扩展器(随DEMO-AD5700D2Z板一同提供)，兼容ADI的所有基于Cortex-M3的开发工具，例如EVAL-ADuCM360QSPZ评估套件(该评估套件不随DEMO-AD5700D2Z板提供)。

图1的简化框图中未显示这些特性；然而，可在CN-0267设计支持包中的完整电路图上看到它们。设计支持包还包括完整的现场仪器C语言代码示例，用来对全部硬件模块和电路特性进行完整的验证与评估，并对HART接口的功能性提供一定程度的验证。有关HART接口规格和资源的详细信息，请联系HART通信基金会。

### HART兼容性

DEMO-AD5700D2Z已通过HART FSK物理层规范(HCF\_SPEC-054，修订版8.1)的兼容性验证，该验证采用HART物理层测试规范(HCF\_TEST-2，修订版2.2)中的方法和设备。本电路板已提交HART通信基金会，并成功注册。

可在HART通信基金会(HFC)网站上找到该注册电路，产品目录为：[DEMO-AD5700D2Z](#)。

涉及的两项测试为：静默期间的输出噪声和模拟变化率。



### 静默期间的输出噪声测试

当HART设备没有进行传输(静默)时, 噪声不应耦合至网络上。噪声过高可能会干扰设备本身或网络上的其它设备对HART信号的接收。

对于在环路中的500 Ω负载上测得的电压噪声, 其包含的宽带噪声和HART扩展频带中的相关噪声总和不能超过2.2 mV rms。此外, HART扩展频带外的噪声不应超过138 mV rms。

500 Ω负载上的噪声采用真均方根测量仪测得。此噪声作为带外噪声直接进行测量, 作为带内噪声通过HCF\_TOOL-31滤波器测量。也可使用示波器来检查噪声波形。

在最差情况下进行噪声测量, 即4 mA输出电流。图4显示捕获的噪声波形, 结果总结在表1中。

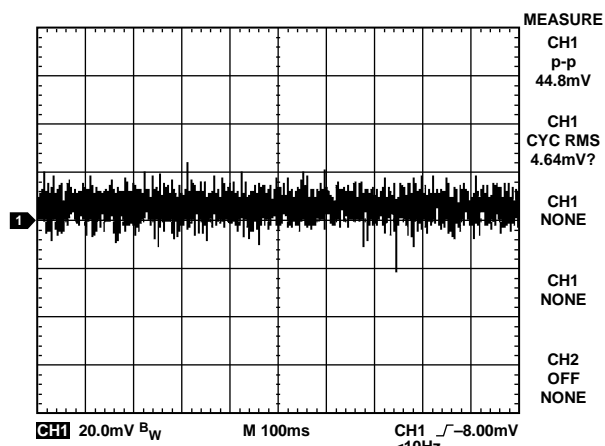


图4. 静默波形下的输出噪声

表1. 静默时的输出噪声

| 输出噪声     | 测得值 (mV) | 测得值 (mV) |
|----------|----------|----------|
| 扩展频率范围以外 | 4.13     | <138     |
| 扩展频率范围以内 | 1.03     | <2.2     |

### 模拟变化率测试

此规范可确保当设备调节模拟输出电流时, 模拟电流的最大变化率不会干扰HART通信。电流的阶跃变化会扰乱HART信号传输。

最差情况下的模拟输出电流变化一定不能产生高于15 mV峰值电压的干扰, 此数值在HART扩展频带下, 通过对500 Ω负载进行测量得到。

AD5421 DAC和输出驱动器相对较快。因此, 为了满足所需的系统规格, 可将AD5421的硬件压摆率限值与ADuCM360软件中的数字滤波器相结合, 控制输出电流的变化。

通过与AD5421的 $C_{IN}$ 引脚相连的电容器, 设置硬件压摆率限值。当模拟输出电流值需要改变较大的步进时, ADuCM360软件将发送到AD5421 DAC的输出电流变化分割成数个较小的步进。

使用一个示波器执行该测试, 并通过HCF\_TOOL-31滤波器耦合至500 Ω负载。

结果如图5所示。波形CH1显示4 mA和20 mA之间的周期性步进, 直接在500 Ω负载上测得。波形CH2是HCF\_TOOL-31滤波器输出端捕获的信号, 将其放大10倍, 并处于150 mV峰值限制之内。

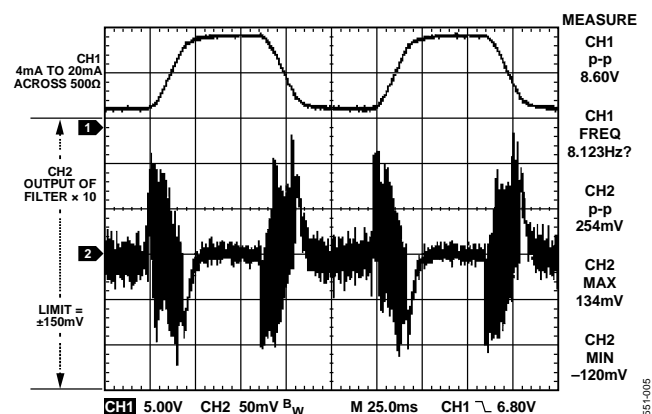


图5. 模拟变化率波形

### 电路功耗

使用两种方法来评估电路功耗性能。

在第一种方法中, 测量来自AD5421集成式电压调节器的输出电流。

考虑到最小模拟输出电流为4 mA, 并且HART输出直流调制峰值为0.5 mA, 则电路在正常工作模式下消耗的最大电流必须低于3.5 mA。AD5421自身工作需消耗0.3 mA的最大电流, 因此留给AD5421 REG<sub>OUT</sub>输出的最大电流约为3.2 mA。

为了便于进行在线测量, DEMO-AD5700D2Z在10 Ω电阻两侧的REG<sub>OUT</sub>输出滤波器中均有测试点(T5, T6), 如图6所示。此设置允许对电阻上的压降进行测量, 并对电流进行计算, 而无需打断电源电流或干扰电路。

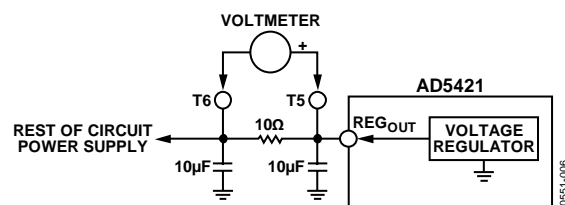


图6. 使用测试点测量AD5421 REG<sub>OUT</sub>电流

结果显示在表2中，测量条件如下：

- $REG_{OUT} = 3.3\text{ V}$
- ADuCM360 M3内核时钟 = 2 MHz
- 两个ADC每秒均转换50个样本
- ADC0的两个缓冲器均开启，增益 = 8
- ADC1的两个缓冲器均开启，增益 = 16
- RTD激励电流 = 200  $\mu\text{A}$
- SPI与AD5421通信的串行时钟 = 100 kHz
- HART通信

电路及所有相关模拟和数字模块(包括输入传感器)的功耗在环路电流最小值为4 mA时，许可的预算之内。

**表2. AD5421的电源电流( $REG_{OUT} = 3.3\text{ V}$ )**

| 输入传感器                                   | T5至T6电压最大值(mV) | $REG_{OUT}$ 电流最大值(mA) |
|---|----------------|-----------------------|
| 无                                       | 24.4           | 2.44                  |
| 24PCDFA6D(3.3 V时为5 k $\Omega$ 、0.66 mA) | 31.0           | 3.10                  |

在评估电路功耗的第二种方法中，电路经验证正常工作，执行HART通信任务时的模拟输出电流设置为4 mA最小值。结果显示电路提供4 mA电流，且HART输出信号不失真。

### 主传感器输入性能

ADuCM360片内集成大部分模拟前端，因此模拟输入的性能主要由ADuCM360的规格决定。

噪声电平是受模拟前端与板上其余电路部分交互干扰的主要因素。因此，测试主要针对噪声以及相关的系统分辨率性能。

该演示配置为从主模拟输入通过HART通信发送数据，数值以压力表示，单位为kPa。捕获100个样本，完成基本数据分析以便量化性能。两项测试包括：

- 第一项测试将标准压力传感器(Honeywell 24PCDFA6D)直接焊接至电路板上。
- 第二项测试采用由一组固定和可变电阻生成的主输入信号执行，如图7所示。

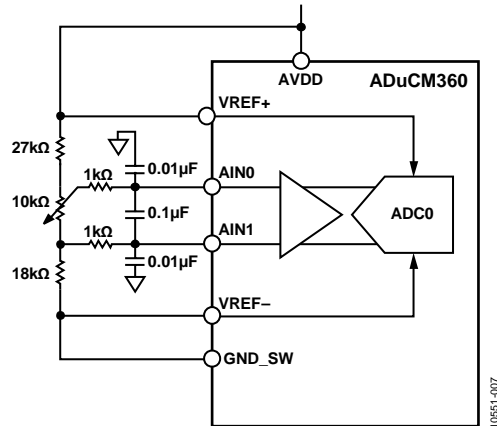


图7. 由一组电阻生成的主输入信号

性能总结见表3，图8和图9显示信号曲线图。

**表3. 主传感器输入噪声和分辨率**

| 参数          | 压力传感器    | 阻性网络     |
|-------------|----------|----------|
| 满量程         | 207 kPa  | 246 kPa  |
| 均方根噪声       | 1.3 Pa   | 0.68 Pa  |
| 峰峰值噪声       | 6.8 Pa   | 3.6 Pa   |
| 有效分辨率(rms)  | 17.2 bit | 18.5 bit |
| 无噪声分辨率(p-p) | 14.9 bit | 16.1 bit |

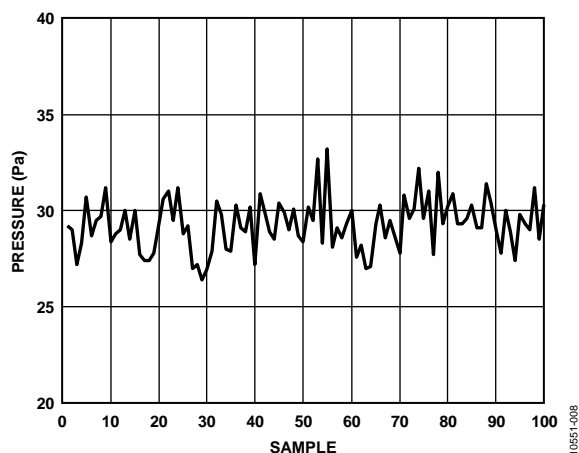


图8. 压力传感器输入信号曲线图

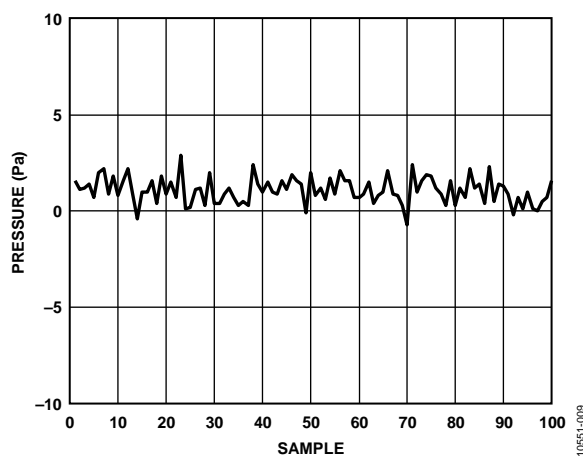


图9. 阻性网络作为主输入信号的曲线图

### 辅助传感器输入性能

辅助传感器输入性能与主传感器类似，辅助传感器输入的性能主要由ADuCM360的模拟前端决定(噪声性能除外)。

模拟输入配置为通过HART通信路径向主机发送温度数据(以°C表示)。对100个样本执行两项测试，以便进行性能的量化分析。

第一项测试采用板载100 Ω铂电阻传感器进行，第二项测试则采用标准(固定)100 Ω ± 1%电阻代替板载传感器进行。

性能总结见表4，图10和图11显示信号曲线图。

**表4. 辅助传感器输入噪声性能**

| 参数    | 压力传感器   | 阻性网络    |
|-------|---------|---------|
| 均方根噪声 | 0.037°C | 0.033°C |
| 峰峰值噪声 | 0.19°C  | 0.16°C  |

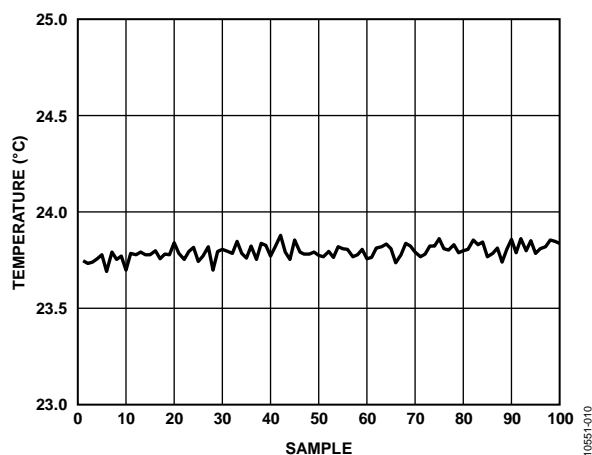


图10. RTD(100 Ω铂电阻)传感器输入信号曲线图

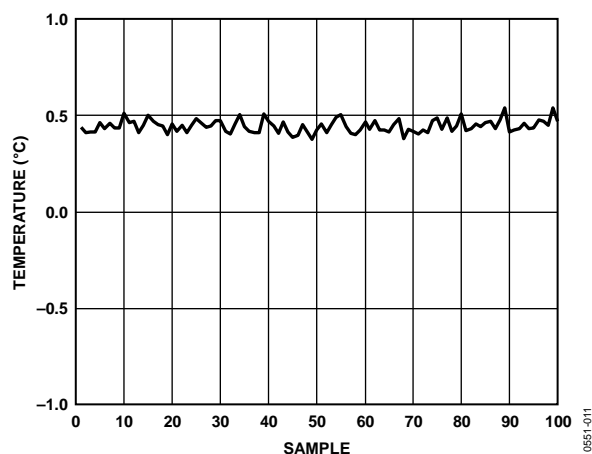


图11. 固定100 Ω ± 1%电阻用作辅助输入的信号曲线图

## 了解详情

CN-0267 Design Support Package:

<http://www.analog.com/CN0267-DesignSupport>

CN-0270, *Complete 4 mA to 20 mA HART Solution*

CN-0278, *Complete 4 mA to 20 mA HART Solution with Additional Voltage Output Capability*

CN-0300, *Complete Closed-Loop Precision Analog Microcontroller Thermocouple Measurement System with 4 mA to 20 mA Output*

AN-1111, *Options for Minimizing Power Consumption When Using the ADuCM360/ADuCM361*

HART® Communication Foundation

## 数据手册和评估板

[ADuCM360 Data Sheet and Evaluation Board](#)

[AD5421 Data Sheet and Evaluation Boards](#)

[AD5700 Data Sheet and Evaluation Board](#)

## 修订历史

**2013年2月—修订版0至修订版A**

更改“电路硬件”部分和图3标题 .....4

**2012年12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.

©2012–2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN10551sc-0-2/13(A)

