



超越一切可能™

**Circuits**  
from the **Lab**®  
Reference Designs

# 参考电路设计

## 仪器仪表选集



Visit [analog.com.cn](http://analog.com.cn)

## Circuits from the Lab® 仪器仪表参考设计

### 简介

电路笔记的仪器仪表选集包含超过48个参考电路设计, 专门用于解决测试和测量应用中的模拟、混合信号和射频(RF)设计挑战。仪器仪表工程师可以将这些电路笔记用作独立解决方案, 或者作为更复杂电路和子系统的基础。

这些电路设计由ADI应用专家针对功能和性能构建和验证, 包括:

- 丰富的文档, 以便与各种应用一起使用。
- 完整的设计和集成文件, 可最大程度减少系统集成方面的问题。
- 经过工厂测试的评估硬件, 可与几个开发平台实现快速原型制作。

这些设计有助于节省时间, 降低设计风险并缩短产品上市时间。

有关我们[参考设计](#)的更多信息, 请访问在线[设计中心](#)。

# 目录

简介 .....	2	CN0079: 利用 16 位电压输出 DAC AD5542/AD5541、基准电压源 ADR421 和自稳零运算放大器 AD8628 实现高精度数模转换 .....	38
修订历史 .....	4	CN0102: 利用内置 PGA 的 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7190 实现精密电子秤设计 .....	42
CN0026: 利用 AD5547/AD5557 DAC 实现精密、单极性、反相转换 .....	5	CN0107: 利用内置 PGA 的 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7780 实现电子秤设计 .....	46
CN0027: 利用 AD5547/AD5557 DAC 实现精密、单极性、同相配置 .....	7	CN0108: 利用内置 PGA 的 20 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7781 实现电子秤设计 .....	49
CN0028: AD5547/AD5557 DAC 的精密、双极性配置 .....	9	CN0109: 利用 500 MSPS/1GSPS DDS AD9958/AD9858 和时钟分配 IC AD9515 实现用于高性能 ADC 的低抖动采样时钟发生器 .....	52
CN0030: AD5390/AD5391/AD5392 通道监控功能 .....	11	CN0112: 利用数字电位计 AD5292 和运算放大器 OP184 构建可变增益同相放大器 .....	55
CN0032: 采用差分 PulSAR ADC AD7982 转换单端信号 .....	13	CN0114: 利用数字电位计 AD5292 和仪表放大器 AD8221 构建低成本、高电压、可编程增益仪表放大器 .....	58
CN0041: 利用低失真差分 ADC 驱动器 AD8138 和 5 MSPS、12 位 SAR ADC AD7356 实现直流耦合、单端转差分转换 .....	15	CN0118: 利用内置 PGA 的 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7191 实现精密电子秤设计 .....	61
CN0042: 在低失真直流耦合应用中驱动双极性 SAR ADC AD7366/AD7367 .....	17	CN0119: 利用内置 PGA 的 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7192 实现精密电子秤设计 .....	64
CN0046: 使用 AD8352 作为高速 ADC 的超低失真差分 RF/IF 前端 .....	19	CN0123: 利用自动校准技术将 16 通道、16 位 DAC AD5360 的失调电压降至 1 mV 以下 .....	68
CN0050: 适合 RF 应用的稳定闭环自动功率控制 .....	22	CN0131: 利用 16 位电压输出 DAC AD5360 提供具有可编程输出范围的 16 通道输出 .....	70
CN0051: 在交流耦合基带应用中驱动 AD9233/AD9246/AD9254 ADC .....	25	CN0133: 利用精密模拟微控制器 ADuC7024 和数字加速度计 ADXL345 检测低 g 加速度 .....	72
CN0052: 利用 8/10/12/14 位 DAC AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 实现单极性、精密直流数模转换 .....	28	CN0140: 高性能、双通道 IF 采样接收机 .....	75
CN0053: 8/10/12/14 位乘法 DAC AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 的精密、双极性配置 .....	31	CN0155: 利用内置 PGA 和交流激励的 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7195 实现精密电子秤设计 .....	79
CN0055: 采用 AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 电流输出 DAC 系列的可编程增益元件 .....	34		
CN0073: 利用 AD5765 DAC 实现高精度、双极性电压输出数模转换 .....	36		

CN0185: 采用隔离式 $\Sigma$ - $\Delta$ 型调制器、隔离式 DC-DC 转换器和有源滤波器的新型模拟/模拟隔离器 .....	82
CN0187: 针对高速、低功耗和 3.3 V 单电源而优化的波峰因数、峰值和均方根 RF 功率测量电路 .....	86
CN0216: 利用 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7791 和外部零漂移放大器 ADA4528-1 实现精密电子秤设计 .....	93
CN0237: 超低功耗、18 位、差分 PulSAR ADC 驱动 .....	98
CN0241: 具有输入过压保护的高边电流检测 .....	103
CN0326: 具有温度补偿的隔离式低功耗 PH 值测试系统 .....	109
CN0357: 使用电化学传感器的低噪声、单电源有毒气体探测器, 集成可编程增益 TIA, 可用于快速原型制作 .....	116
CN0359: 全自动高性能电导率测量系统 .....	121
CN0363: 带可编程增益跨阻放大器和数字同步检波功能的双通道色度计 .....	131
CN0365: 适合高温环境的 16 位、600 kSPS 低功耗数据采集系统 .....	139
CN0370: 16 位单电源 LED 电流驱动器, 积分和差分非线性误差小于 $\pm 1$ LSB .....	146
CN0373: 隔离式 USB 转隔离式 RS-485/隔离式 RS-232 接口 .....	152
CN0376: 适合 PLC/DCS 应用的通道间隔离温度输入(热电偶/RTD) .....	158
CN0381: 采用低功耗、精密、24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC 的全集成式 4 线 RTD 测量系统 .....	165
CN0383: 采用低功耗、精密、24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC 的全集成式 3 线 RTD 测量系统 .....	175
CN0384: 采用低功耗、精密、24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC 的全集成式热电偶测量系统 .....	186
CN0387: 免校准回损测量系统 .....	198

## 修订历史

2017 年 2 月—修订版 0: 初始版

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0026](http://www.analog.com/cn/CN0026)。

## 连接/参考器件

AD5547/ AD5557	双通道、电流输出、并行输入、16/14 位 DAC
ADR03	2.5 V 精密基准电压源
AD8628	轨到轨输入/输出运算放大器

## 利用 AD5547/AD5557 DAC 实现精密、单极性、反相转换

### 电路功能与优势

本电路采用电流输出 DAC AD5547/AD5557、精密基准电压源 ADR03 和运算放大器 AD8628 实现精密、单极性、反相数据转换。它具有精密、低噪声、高速输出电压能力，非常适合过程控制、自动测试设备和数字校准等应用。

### 电路描述

AD5547/AD5557 分别是双通道、精密、16/14 位、乘法、低功耗、电流输出、并行输入数模转换器，采用 2.7 V 至 5.5 V 单电源供电，四象限输出的乘法基准电压为  $\pm 15$  V。内置的四象限电阻有利于电阻匹配和温度跟踪，使多象限应用所需的元件数量降至最少。

本电路使用高精度、高稳定性、2.5 V 精密基准电压源 ADR03。基准电压源的温度系数和长期漂移性能均为要求高精度转换应用的主要考虑因素，因此该器件是理想选择。

本电路的电流电压转换 (I-V) 级中使用了运算放大器。运算放大器的偏置电流和失调电压均为选择精密电流输出 DAC 的重要标准，因此该电路采用具有超低失调电压（典型值为 1  $\mu$ V）和偏置电流（典型值为 30 pA）的 AD8628 自稳零运算放大器。补偿电容 C7 经过优化，可以补偿 DAC 的外部输出电容。

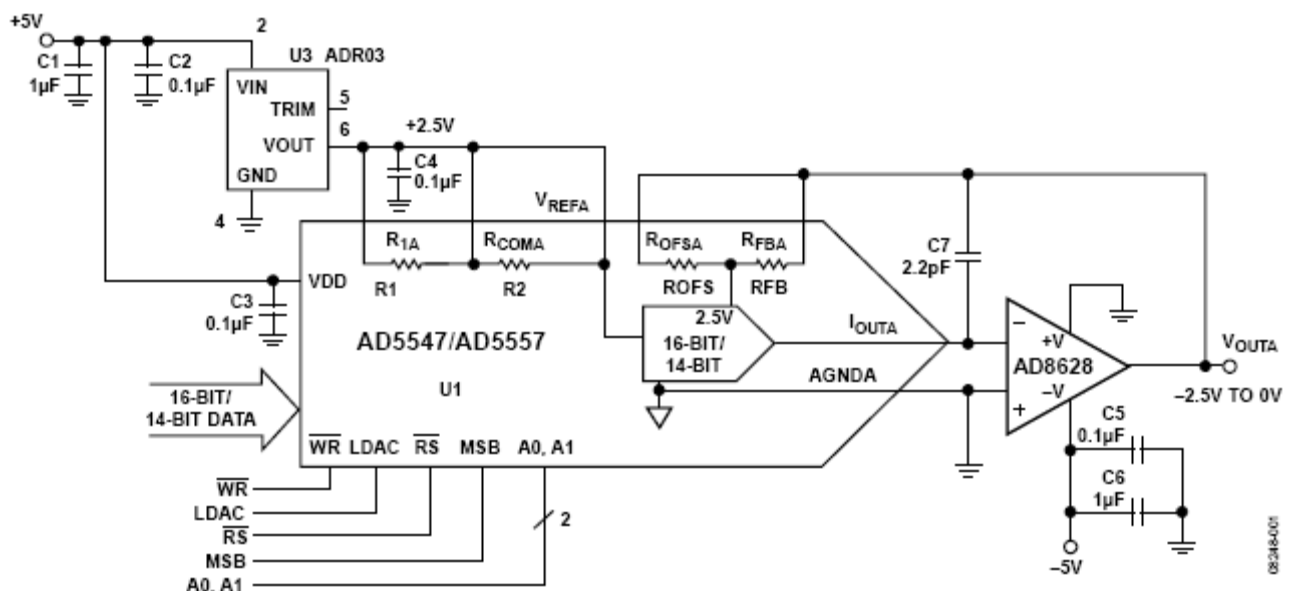


图 1. 单极性二象限乘法模式， $V_{OUT} = 0$  V 至  $-V_{REF}$  (原理示意图)

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2008–2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

请注意, AD8628 具有轨到轨输入和输出级, 但输出只能在任一供电轨几毫伏范围内, 具体值取决于负载电流。对于所示电路, 输出摆幅可达到  $-2.5\text{ V}$  至约  $-1\text{ mV}$ 。

运算放大器的输入失调电压要乘以电路的可变噪声增益 (由于存在 DAC 的代码相关输出电阻)。由于放大器的输入电压失调, 两个相邻数字码之间的噪声增益变化会使输出电压产生步进变化。此输出电压变化与两个代码间所需的输出变化相叠加, 引起差分线性误差; 如果该误差足够大, 可能会导致 DAC 非单调。一般而言, 为了确保沿各代码步进时保持单调性, 输入失调电压应为 LSB 的一小部分。对于 ADR03 和 AD5547, LSB 大小为

$$\frac{2.5\text{ V}}{2^{16}} = 38\text{ }\mu\text{V} \quad (1)$$

自稳零运放 AD8628 的输入失调电压典型值为  $1\text{ }\mu\text{V}$ , 与 LSB 大小相比可忽略不计。

运算放大器的输入偏置电流也会在电压输出上产生失调, 其原因是偏置电流会流经反馈电阻 RFB。就 AD8628 而言, 其输入偏置电流典型值仅为  $30\text{ pA}$ , 流经 RFB 电阻 (通常为  $10\text{ k}\Omega$ ) 时仅产生  $0.3\text{ }\mu\text{V}$  的误差。

AD5547/AD5557 DAC 架构采用电流导引 R-2R 梯形电阻设计, 要求使用外部基准电压源和运放, 以便转换为输出电压。AD5547 的输出电压  $V_{\text{OUT}}$  可通过以下公式计算:

$$V_{\text{OUT}} = \frac{-V_{\text{REF}} \times D}{2^{16}} \quad (2)$$

其中  $D$  为输入码的十进制等效值。AD5557 的输出电压  $V_{\text{OUT}}$  可通过以下公式计算:

$$V_{\text{OUT}} = \frac{-V_{\text{REF}} \times D}{2^{14}} \quad (3)$$

其中  $D$  为输入码的十进制等效值。

## 常见变化

针对多通道应用, 可以使用 AD8628 的双通道版本 [AD8629](#)。

[AD8605](#) 是另一款适合该电流电压转换电路的优秀运算放大器, 它同样具有低失调电压和低偏置电流特性。[ADR01](#) 和 [ADR02](#) 也是低噪声基准电压源, 与 ADR03 同属一个基准电压源系列。其它合适的低噪声基准电压源有 [ADR441](#) 和 [ADR445](#)。基准输入电压的大小受所选运算放大器的轨到轨电压限制。

利用 AD5547/AD5557 DAC 中 R-2R 结构的乘法带宽特性, 这些电路也可以用作可变增益元件。在此配置中, 去除了外部精密基准电压源, 并将要相乘的信号施加于 DAC 的基准输入引脚。

## 更多资料

[ADIsimPower设计工具](#)。

Kester, Walt. [数据转换手册](#)第3章和第7章。ADI公司, 2005。

[指南MT-015: DAC基本架构II: 二进制DAC](#)。ADI公司。

[指南MT-031: 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团](#)。ADI公司。

[指南MT-033: 电压反馈型运算放大器的增益和带宽](#)。ADI公司。

[指南MT-035: 运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题](#)。ADI公司。

[指南MT-055: 斩波稳定 \(自稳零\) 精密运算放大器](#)。ADI公司。

[指南MT-101: 去耦技术](#)。ADI公司。

## 数据手册和评估板

[AD5547数据手册](#)。

[AD5557数据手册](#)。

[AD8628数据手册](#)。

[ADR03数据手册](#)。

## 修订历史

09年5月—修订版0至修订版A

格式更新 .....通用

2008年10月—版本0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

## 连接/参考器件

AD5547/ AD5557	双通道、电流输出、并行输入、16/14 位 DAC
ADR03	精密基准电压源
AD8628	轨到轨输入/输出运算放大器

## 利用 AD5547/AD5557 DAC 实现精密、单极性、同相配置

### 电路功能与优势

本电路采用电流输出 DAC AD5547/AD5557、精密基准电压源 ADR03 和运算放大器 AD8628 实现精密、单极性、同相数据转换。它具有精密、低噪声、高速输出电压能力，非常适合过程控制、自动测试设备和数字校准等应用。

### 电路描述

AD5547/AD5557 分别是双通道、精密、16/14 位、乘法、低功耗、电流输出、并行输入数模转换器，采用 2.7 V 至 5.5 V 单电源供电，四象限输出的乘法基准电压为  $\pm 15$  V。内置的四象限电阻有利于电阻匹配和温度跟踪，使多象限应用所需的元件数量降至最少。

本电路使用高精度、高稳定性、2.5 V 精密基准电压源 ADR03。基准电压源的温度系数和长期漂移性能均为要求高精度转换应用的主要考虑因素，因此该器件是理想选择。

本电路的电流电压转换 (I-V) 级中使用了运算放大器。运算放大器的偏置电流和失调电压均为选择精密电流输出 DAC 的重要标准，因此该电路采用具有超低失调电压（典型值为  $1 \mu\text{V}$ ）和偏置电流（典型值为  $30 \text{ pA}$ ）的 AD8628 自稳零运算放大器。C7 为补偿电容。本应用的 C7 电容值为  $2.2 \text{ pF}$ ，经过优化可以补偿 DAC 的外部输出电容。

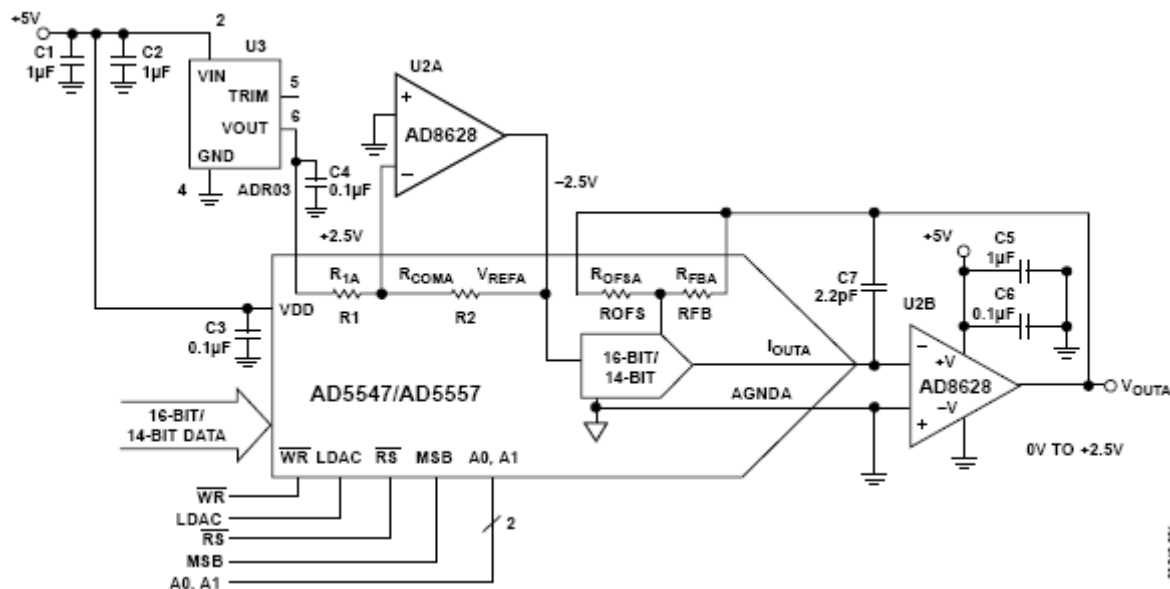


图 1. 单极性二象限乘法模式， $V_{\text{OUT}} = 0 \text{ V}$  至  $+V_{\text{REF}}$ （原理示意图）

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (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/cn](http://www.analog.com/cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2008–2009 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



请注意, AD8628 具有轨到轨输入和输出级, 但输出只能在任一供电轨几毫伏范围内, 具体值取决于负载电流。对于所示电路, 输出摆幅可达到约 +1 mV 至 +2.5 V。

运算放大器的输入失调电压要乘以电路的可变噪声增益 (由于存在 DAC 的代码相关输出电阻)。由于放大器的输入电压失调, 两个相邻数字码之间的噪声增益变化会使输出电压产生步进变化。此输出电压变化与两个代码间所需的输出变化相叠加, 引起差分线性误差; 如果该误差足够大, 可能会导致 DAC 非单调。一般而言, 为了确保沿各代码步进时保持单调性, 输入失调电压应为 LSB 的一小部分。对于 ADR03 和 AD5547, LSB 大小为

$$\frac{2.5 \text{ V}}{2^{16}} = 38 \mu\text{V} \quad (1)$$

自稳零运放 AD8628 的输入失调电压典型值为 1  $\mu\text{V}$ , 与 LSB 大小相比可忽略不计。

运算放大器的输入偏置电流也会在电压输出上产生失调, 其原因是偏置电流会流经反馈电阻 RFB。就 AD8628 而言, 其输入偏置电流典型值仅为 30 pA, 流经 RFB 电阻 (通常为 10 k $\Omega$ ) 时仅产生 0.3  $\mu\text{V}$  的误差。

AD5547/AD5557 DAC 架构采用电流导引 R-2R 梯形电阻设计, 要求使用外部基准电压源和运放, 以便转换为输出电压。AD5547 的输出电压 VOUT 可通过以下公式计算:

$$V_{\text{OUT}} = \frac{+V_{\text{REF}} \times D}{2^{16}} \quad (2)$$

其中 D 为输入码的十进制等效值。AD5557 的输出电压 VOUT 可通过以下公式计算:

$$V_{\text{OUT}} = \frac{+V_{\text{REF}} \times D}{2^{14}} \quad (3)$$

其中 D 为输入码的十进制等效值。

## 常见变化

AD8629 是 AD8628 的双通道版本。AD8605 是另一款适合该电流电压转换电路的优秀运算放大器, 它同样具有低失

调电压和低偏置电流特性。ADR01 和 ADR02 也是低噪声基准电压源, 与 ADR03 同属一个基准电压源系列。其它合适的低噪声基准电压源有 ADR441 和 ADR445。基准输入电压的大小受所选运算放大器的轨到轨电压限制。

利用 AD5547/AD5557 DAC 中 R-2R 结构的乘法带宽特性, 这些电路也可以用作可变增益元件。在此配置中, 去除了外部精密基准电压源, 并将要相乘的信号施加于 DAC 的基准输入引脚。

## 更多资料

ADIsimPower设计工具。

Kester, Walt. 数据转换手册第3章和第7章。ADI公司, 2005。

指南MT-015: DAC基本架构II: 二进制DAC。ADI公司。

指南MT-031: 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-033: 电压反馈型运算放大器的增益和带宽。ADI公司。

指南MT-035: 运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题。ADI公司。

指南MT-055: 斩波稳定 (自稳零) 精密运算放大器。ADI公司。

指南MT-101: 去耦技术。ADI公司。

## 数据手册和评估板

AD5547数据手册。

AD5557数据手册。

AD8628数据手册。

ADR03数据手册。

## 修订历史

09年5月—修订版0至修订版A

格式更新 .....通用

08年10月—修订版0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0028](http://www.analog.com/cn/CN0028)。

### 连接/参考器件

AD5547/ AD5557	双通道、电流输出、并行输入、16/14 位 DAC
AD8512	低噪声、低输入偏置、JFET 运算放大器
ADR01	超紧凑、10.0V 精密基准电压源

## AD5547/AD5557 DAC 的精密、双极性配置

### 电路功能与优势

本电路采用电流输出 DAC AD5547/AD5557、精密基准电压源 ADR01 和运算放大器 AD8512 实现精密、双极性数据转换。它具有精密、低噪声、高速输出电压能力，非常适合过程控制、自动测试设备和数字校准等应用。

### 电路描述

AD5547/AD5557 分别是双通道、精密、16/14 位、乘法、低

功耗、电流输出、并行输入数模转换器，采用 2.7 V 至 5.5 V 单电源供电，四象限输出的乘法基准电压为  $\pm 15$  V。内置的四象限电阻有利于电阻匹配和温度跟踪，使多象限应用所需的元件数量降至最少。

本电路使用高精度、高稳定性、10 V 精密基准电压源 ADR01。基准电压源的温度系数和长期漂移性能均为要求高精度转换应用的主要考虑因素，因此该器件是理想选择。

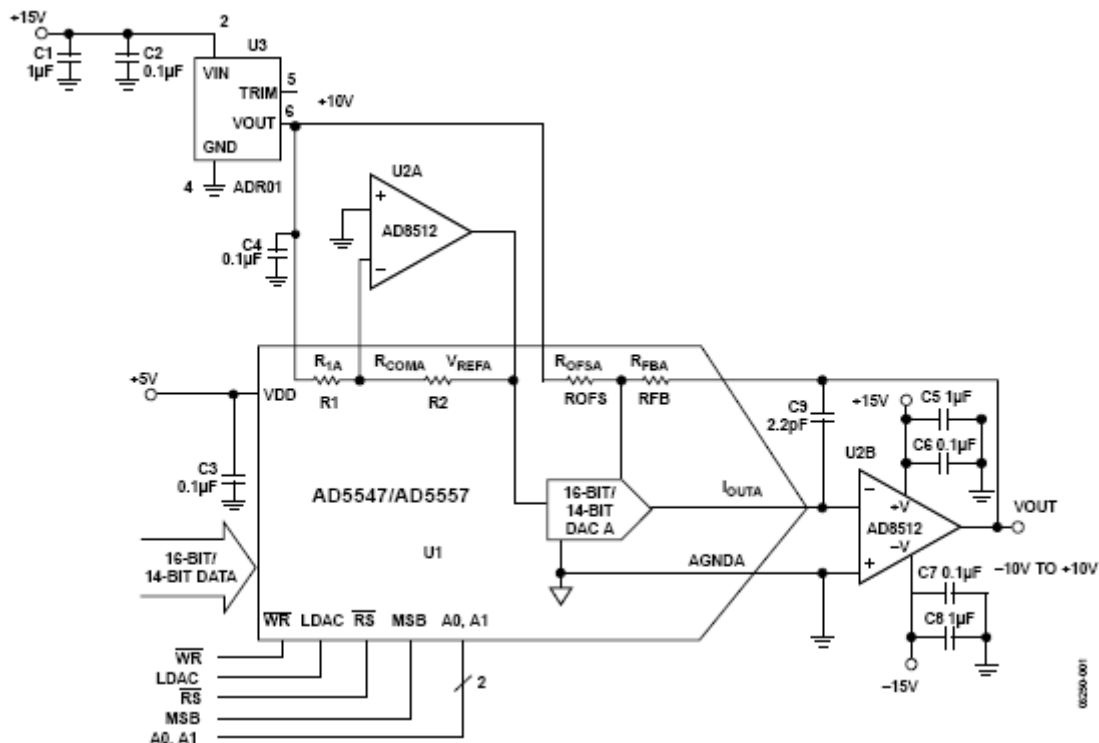


图 1. 四象限乘法模式， $V_{OUT} = -V_{REF}$  至  $+V_{REF}$  (原理示意图)

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (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/cn](http://www.analog.com/cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2008–2009 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

本电路的电流电压转换 (I-V) 级中使用了运算放大器。运算放大器的偏置电流和失调电压均为选择精密电流输出 DAC 的重要标准, 因此该电路采用具有超低失调电压 (B 级器件典型值为 80  $\mu\text{V}$ ) 和偏置电流 (典型值为 25 pA) 的 AD8512 运算放大器。C9 为补偿电容。本应用的 C9 电容值为 2.2 pF, 经过优化可以补偿 DAC 的外部输出电容。

运算放大器的输入失调电压要乘以电路的可变噪声增益 (由于存在 DAC 的代码相关输出阻抗)。由于放大器的输入电压失调, 两个相邻数字码之间的噪声增益变化会使输出电压产生步进变化。此输出电压变化与两个代码间所需的输出变化相叠加, 引起差分线性误差; 如果该误差足够大, 可能会导致 DAC 非单调。一般而言, 为了确保沿各代码步进时保持单调性, 输入失调电压应为 LSB 的一小部分。对于 ADR01 和 AD5547, LSB 大小为

$$\frac{10 \text{ V}}{2^{16}} = 153 \mu\text{V} \quad (1)$$

运算放大器的输入偏置电流也会在电压输出上产生失调, 其原因是偏置电流会流经反馈电阻 RFB。就 AD8512 而言, 其输入偏置电流典型值仅为 25 pA, 流经 RFB 电阻 (通常为 10 k $\Omega$ ) 时仅产生 0.25  $\mu\text{V}$  的误差。

AD5547/AD5557 DAC 架构采用电流导引 R-2R 梯形电阻设计, 要求使用外部基准电压源和运放, 以便转换为输出电压。AD5547 的输出电压 VOUT 可通过以下公式计算:

$$V_{\text{OUT}} = \left[ \frac{V_{\text{REF}} \times D}{2^{16}-1} \right] - V_{\text{REF}} \quad (2)$$

其中 D 为输入码的十进制等效值; 对于 16 位 DAC, D = 0 至 65535。AD5557 的输出电压 VOUT 可通过以下公式计算:

$$V_{\text{OUT}} = \left[ \frac{V_{\text{REF}} \times D}{2^{14}-1} \right] - V_{\text{REF}} \quad (3)$$

其中 D 为输入码的十进制等效值; 对于 14 位 DAC, D = 0 至 16383。

## 常见变化

AD8605 是另一款适合该电流电压转换电路的优秀运算放大器, 它同样具有低失调电压和低偏置电流特性。ADR02 和 ADR03 也是低噪声基准电压源, 与 ADR01 同属一个基准电压源系列。其它合适的低噪声基准电压源有 ADR441 和 ADR445。基准输入电压的大小受所选运算放大器的轨到轨电压限制。

利用 AD5547/AD5557 DAC 中 R-2R 结构的乘法带宽特性, 这些电路也可以用作可变增益元件。在此配置中, 去除了外部精密基准电压源, 并将要相乘的信号施加于 DAC 的基准输入引脚。

## 更多资料

ADIsimPower 设计工具。

Kester, Walt. 数据转换手册第3章和第7章。ADI公司, 2005。

指南MT-015: DAC基本架构II: 二进制DAC。ADI公司。

指南MT-031: 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-033: 电压反馈型运算放大器的增益和带宽。ADI公司。

指南MT-035: 运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题。ADI公司。

指南MT-055: 斩波稳定 (自稳零) 精密运算放大器。ADI公司。

指南MT-101: 去耦技术。ADI公司。

## 数据手册和评估板

AD5547数据手册。

AD5557数据手册。

AD8512数据手册。

ADR01数据手册。

## 修订历史

09年5月—修订版0至修订版A

格式更新 ..... 通用

08年10月—修订版0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



AD7476 ADC 是一款 SAR DAC，提供 12 位分辨率，采用 2.35 V 至 5.25 V 单电源供电，集成基准电压源，具有低功耗、小尺寸特点和串行接口，吞吐速率最高可达 1 MSPS，并提供 6 引脚 SOT-23 封装。该器件的基准电压从 VDD 获得，从而为 ADC 提供最宽的动态输入范围；因此，其模拟输入范围为 0 至 VDD。转换速率由 SCLK 决定，吞吐速率最高可达 1 MSPS。

AD5390/AD5391/AD5392 与 AD7476 组合可提供一个完整的 8 或 16 通道模拟输出控制解决方案，并针对系统调试、故障和诊断分析实现高效监控功能。

AD5390/AD5391/AD5392 和 AD7476 必须具有足够大的电源旁路电容 10  $\mu$ F，与各电源引脚上的 0.1  $\mu$ F 电容并联，并且尽可能靠近封装，最好是正对着器件（图中未显示）。10  $\mu$ F 电容最好为钽电容。0.1  $\mu$ F 电容必须具有低有效串联电阻（ESR）和低有效串联电感（ESL），如高频时提供低阻抗接地路径的普通陶瓷型电容，以便处理内部逻辑开关所引起的瞬态电流。

电源走线必须尽可能宽，以提供低阻抗路径，并减小电源线路上的毛刺效应。时钟等快速开关信号必须利用接地线路屏蔽起来，以免向电路板上的其它器件辐射噪声，并且绝不应靠近模拟信号。SDATA 线路与 SCLK 线路之间布设接地线路有助于降低二者之间的串扰（多层电路板上不需要，因为它有独立的接地层；不过，接地线路有助于分开不同线路）。避免数字信号与模拟信号交叠。电路板相对两侧上的走线应当彼此垂直。这样有助于减小电路板上的馈通效应。推荐使用微带线技术，但这种技术对于双面电路板未必始终可行。采用这种技术时，电路板的元件侧专用于接地层，信号走线则布设在焊接侧。电路板至少需要 4 层才能实现最佳布局 and 性能：一个接地层、一个电源层和两个信号层。

## 常见变化

在监控功能接受较低分辨率转换的应用中，可以使用 AD7476 的引脚兼容产品。[AD7477](#) 提供 10 位分辨率，而 [AD7478](#) 则提供 8 位分辨率。ADR431 基准电压源可以代替 AD780。

## 更多资料

[ADIsimPower 设计工具](#)。

[Kester, Walt. 数据转换手册第3章和第7章。ADI公司，2005。](#)

[指南MT-015：DAC基本架构II：二进制DAC。ADI公司。](#)

[指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。](#)

[指南MT-101：去耦技术。ADI公司。](#)

[基准电压源向导设计工具](#)。

## 数据手册和评估板

[AD5390数据手册](#)。

[AD5391数据手册](#)。

[AD5392数据手册](#)。

[AD7476数据手册](#)。

[AD780数据手册](#)。

[ADR431数据手册](#)。

[AD5390/AD5391/AD5392评估板](#)。

## 修订历史

**09年6月—修订版0至修订版A**

格式更新 .....通用

**08年11月—修订版0：初始版**

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

## 连接/参考器件

AD7982	18 位、1 MSPS PulSAR® 7.0 mW ADC
ADR435	5.0 V 超低噪声 XFET™ 基准电压源
ADA4941-1	单电源、差分 18 位 ADC 驱动器

## 采用差分 PulSAR ADC AD7982 转换单端信号

### 电路功能与优势

许多应用都要求通过高分辨率、差分输入 ADC 来转换单端模拟信号，无论是双极性还是单极性信号。本直流耦合电路可将单端输入信号转换为差分信号，适合驱动 PulSAR 系列 ADC 中的 18 位、1 MSPS 器件 AD7982。该电路采用单端转差分驱动器 ADA4941-1 和超低噪声 5.0 V 基准电压源 ADR435，可以接受许多类型的单端输入信号，包括高压至低压范围内的双极性或单极性信号。整个电路均保持直接耦合。如果需要重点考虑电路板空间，可以采用小封装产品，图 1 所示的所有 IC 均可提供 3 mm × 3 mm LFCSP 或 3 mm × 5 mm MSOP 小型封装。

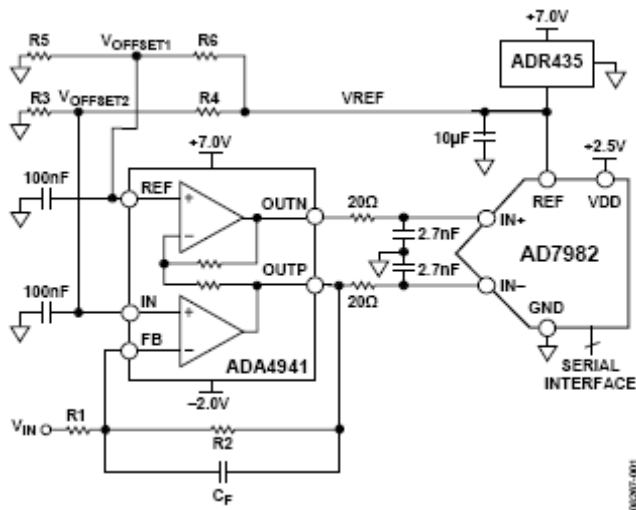


图 1. 单端转差分直流耦合驱动器电路（原理示意图）

### 电路描述

AD7982 的差分输入电压范围由 REF 引脚上的电压设置。当  $V_{REF} = 5\text{ V}$  时，差分输入电压范围为  $\pm V_{REF} = \pm 5\text{ V}$ 。从单端源  $V_{IN}$  到 ADA4941-1 的 OUTP 的电压增益（或衰减）由 R2 与 R1 之比设置。R2 与 R1 之比应等于  $V_{REF}$  与输入电压峰峰值  $V_{IN}$  之比。当单端输入电压峰峰值为 10 V 且  $V_{REF} = 5\text{ V}$  时，R2 与 R1 之比应为 0.5。OUTN 上的信号为 OUTP 信号的反相。R1 的绝对值决定电路的输入阻抗。反馈电容  $C_F$  根据所需的信号带宽选择，后者约为  $1/(2\pi R2 C_F)$ 。20 Ω 电阻与 2.7 nF 电容构成 3 MHz 单极点低通噪声滤波器。

电阻 R3 和 R4 设置 AD7982 的 IN-输入端的共模电压。此共模电压值等于  $V_{OFFSET2} \times (1 + R2/R1)$ ，其中  $V_{OFFSET2} = V_{REF} \times R3/(R3 + R4)$ 。电阻 R5 和 R6 设置 ADC 的 IN+输入端的共模电压。此电压等于  $V_{OFFSET1} = V_{REF} \times R5/(R5 + R6)$ 。ADC 的共模电压（等于  $V_{OFFSET1}$ ）应接近  $V_{REF}/2$ ，这意味着  $R5 = R6$ 。表 1 列出了适合常用输入电压范围的一些标准 1% 允许电阻值。

请注意，ADA4941-1 采用 +7 V 和 -2 V 电源供电。由于各路输出的摆幅必须达到 0 V 至 +5 V，因此正电源电压应比 +5 V 高数百毫伏，负电源电压应比 0 V 低数百毫伏。本电路选择 +7 V 和 -2 V 的电源电压。+7 V 电源还能提供足够的裕量，为 ADR435 供电。只要 ADA4941-1 上的绝对最大值总电源电压不超过 12 V，并且满足 ADR435 的裕量要求，则也可以使用其它电压。

Rev.A

“Circuits from the Lab” 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 “Circuit from the Lab”. (Continued on last page)



表 1. 适合常用输入电压范围的电路值和电压

$V_{IN}$ (V)	$V_{OFFSET1}$ (V)	$V_{OFFSET2}$ (V)	OUTP (V)	OUTN (V)	R1 (k $\Omega$ )	R2 (k $\Omega$ )	R4(k $\Omega$ )	R3, R5, R6 (k $\Omega$ )
+20, -20	2.5	2.203	-0.01, 4.96	5.0, 0.04	8.06	1.00	12.70	10.00
+10, -10	2.5	2.000	0.01, 4.99	4.99, 0.01	4.02	1.00	15.0	10.00
+5, -5	2.5	1.667	0.00, 5.00	5.00, 0.00	2.00	1.00	20.0	10.00

AD7982 需要一个+2.5 V  $V_{DD}$  电源以及一个  $V_{IO}$  电源（图 1 未显示），后者的电压可以在 1.8 V 至 5 V 之间，取决于 I/O 逻辑接口电平。

本电路对电源时序不敏感。在瞬间过压条件下，AD7982 输入端可以承受最高 $\pm 130$  mA 的电流。

AD7982 SPI 兼容串行接口（图 1 未显示）能够利用 SDI 输入，将几个 ADC 以菊花链形式连接到单个三线式总线上，并提供一个可选的忙闲指示。采用独立电源  $V_{IO}$  时，该器件与 1.8V、2.5V、3V 和 5V 逻辑兼容。

为了使本文所讨论的电路达到理想的性能，必须采用出色的布线、接地和去耦技术。至少应采用四层 PCB：一个接地层、一个电源层和两个信号层。

所有 IC 电源引脚都必须采用 0.01  $\mu$ F 至 0.1  $\mu$ F 低电感、多层陶瓷电容 (MLCC) 对接地层去耦（为简明起见，图 1 未显示），并应遵循“进一步阅读”部分所引用 IC 的各数据手册中提出的建议。

有关推荐的布线方式和关键器件位置，应参考产品评估板。请在器件的产品主页上查看（见“进一步阅读”部分）。

## 常见变化

ADR43x 系列基准电压源可以提供与 ADC 接口的各种不同基准电压值。

## 更多资料

Kester, Walt. 2005年。数据转换手册。第6章和第7章。ADI 公司。

Kester, Walt. 2006年。高速系统应用。ADI公司。第2章，“优化数据转换器接口”。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-035：运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题。ADI公司。

指南MT-074：精密ADC用差分驱动器。ADI公司。

指南MT-101：去耦技术。ADI公司。

基准电压源向导设计工具。

## 数据手册和评估板

AD7982数据手册。

AD7982评估板。

ADA4941-1数据手册。

ADR435数据手册。

## 修订历史

09年7月—修订版0至修订版A

格式更新.....通用

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

AD7356	差分输入、双通道、5 MSPS 12 位 SAR ADC
AD8138	低失真差分 ADC 驱动器
OP177	超高精度运算放大器

## 利用低失真差分 ADC 驱动器 AD8138 和 5 MSPS、12 位 SAR ADC AD7356 实现直流耦合、单端转差分转换

### 电路功能与优势

本文所述电路可对 5 MSPS、12 位 SAR ADC AD7356 的双极性输入信号进行直流耦合、单端转差分转换。该电路能够提供充足的建立时间和低阻抗，从而确保 AD7356 实现最高性能。

### 电路描述

差分工作要求采用两个幅值相等、相位相差 180° 且以适当的共模电压为中心的信号同时驱动 ADC 的  $V_{INX+}$  和  $V_{INX-}$ ，并非所有应用都会预先调理信号以供差分工作，因此经常

需要执行单端转差分转换。对 AD7356 进行差分驱动的理想方法是采用 AD8138 之类的差分放大器。该器件可以用作单端转差分放大器或差分转差分放大器。AD8138 还能提供共模电平转换。图 1 显示如何将 AD8138 用作直流耦合应用中的单端转差分放大器。AD8138 的正负输出端通过一对串联电阻分别与 ADC 的相应输入端相连，从而将对 ADC 开关电容输入的负载影响降至最小。AD8138 这种架构使得输出可以在很宽的频率范围内保持高度平衡，而不需要严格匹配的外部元件。图 1 中电路的单端转差分增益等于  $R_F/R_G$ ，其中  $R_F = R_{F1} = R_{F2}$  且  $R_G = R_{G1} = R_{G2}$ 。

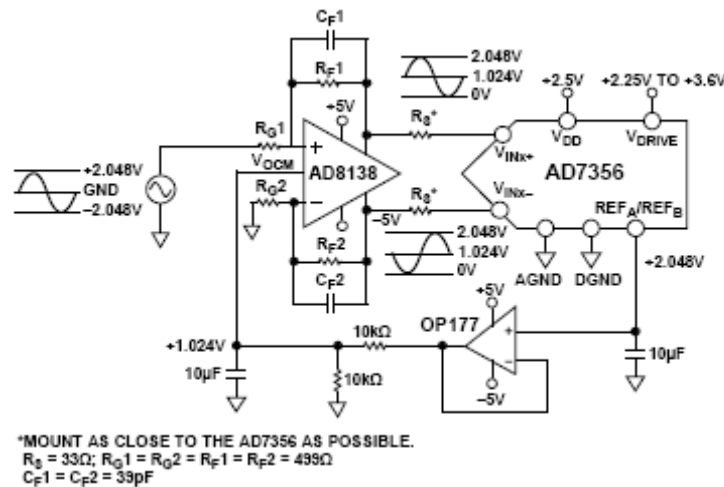


图 1. AD8138 作为直流耦合、单端转差分转换器来驱动 AD7356 差分输入  
(原理示意图：未显示去耦和所有连接)

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)



如果所用的模拟输入源具有零阻抗,则所有四个电阻( $R_{G1}$ 、 $R_{G2}$ 、 $R_{F1}$ 和 $R_{F2}$ )应当如图1所示相同。例如,如果模拟输入源具有 $50\ \Omega$ 阻抗和 $50\ \Omega$ 端接电阻,则 $R_{G2}$ 值应增大 $25\ \Omega$ 以平衡输入端的并联阻抗,从而确保正负模拟输入的增益相同。此外, $R_{F1}$ 和 $R_{F2}$ 也需要略微增大,以补偿因 $R_{G1}$ 和 $R_{G2}$ 增大而导致的增益损失。欲了解端接源状态的完整分析,请参考“ADIsimDiffAmp 交互式设计工具”和“教程 MT-076”。

AD7356 要求驱动器具有非常快的建立时间,因为若要利用串行接口实现 $5\text{ MSPS}$ 吞吐量,采集时间就必须非常短。在转换过程中,AD7356 前端的跟踪保持放大器在第13个SCLK周期的上升沿进入跟踪模式。ADC驱动器必须在跟踪保持放大器返回保持模式之前建立(对于 $5\text{ MSPS}$ 吞吐量、使用 $80\text{ MHz}$  SCLK的AD7356,二者相隔 $38\text{ ns}$ )。AD8138的额定建立时间为 $16\text{ ns}$ ,可满足这一要求。

共模电压由AD8138  $V_{OCM}$ 引脚上施加的电压设置。在图1中, $V_{OCM}$ 连至 $1.024\text{ V}$ 电压,它由AD7356内部 $2.048\text{ V}$ 基准电压源通过分压提供。如果要将AD7356的 $2.048\text{ V}$ 片内基准电压源用于系统中的其它地方,则(如图1所示) $REF_A$ 或 $REF_B$ 的输出必须先经过缓冲。OP177是基准电压源缓冲的理想选择,其精度性能在目前可用的运算放大器中最高。

请注意,图1中的AD8138采用 $5\text{ V}$ 双电源供电,而AD7356的额定电源电压范围为 $2.5\text{ V}$ 至 $3.6\text{ V}$ 。切记,瞬态或上电情况下决不能超过AD7356的最大输入电压限制(请参考“教程 MT-036”)。此外,该电路必须构建在具有较大面积接地层的多层电路板上。为实现最佳性能,必须采用适当的布局、接地和去耦技术(请参考“教程 MT-031”、“教程 MT-101”以及AD7356评估板布局)。

## 常见变化

如需降低成本,可以使用超低失调电压运算放大器 OP07D 代替 OP177。除失调电压特性外,二者的性能相似。另外还可以选用 AD8628 或 AD8638,这两款器件具有非常高的精度和非常低的时间与温度漂移特性。

## 更多资料

指南MT-031: 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-036: 运算放大器输出反相和输入过压保护。ADI公司。

指南MT-074: 精密ADC用差分驱动器。ADI公司。

指南MT-075: 高速ADC用差分驱动器概述。ADI公司。

指南MT-076: 差分驱动器分析。ADI公司。

指南MT-101: 去耦技术。ADI公司。

高速差分ADC驱动器应用规则(模拟对话,第43卷),ADI公司John Ardizonni和Jonathan Pearson,2009年5月。

ADIsimDiffAmp(差分放大器工具),ADI公司。

## 数据手册和评估板

AD7356数据手册。

AD7356评估板。

AD8138数据手册。

OP177数据手册。

OP07D 数据手册。

## 修订历史

### 09年11月—修订版0至修订版A

格式更新.....通用

更改电路笔记标题.....1

### 09年2月—修订版0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

## 连接/参考器件

AD7366/ AD7367	双极性输入、双核 12/14 位、双通道 SAR ADC
AD8021	低噪声、高速放大器

## 在低失真直流耦合应用中驱动双极性 SAR ADC AD7366/AD7367

### 电路功能与优势

本文所述电路可以对工业级直流耦合信号进行单端、低失真采样。图 1 所示驱动器电路针对要求最佳失真性能的应用进行了优化，可提供充足的建立时间和低阻抗，从而确保 AD7366/AD7367 发挥最大性能。

### 电路描述

AD7366 和 AD7367 分别是 12 位和 14 位、1 MSPS、双通道、同时采样 SAR ADC。这些器件总共有四路模拟多路复用输入（每通道两路），采用单端模式工作。AD7366/AD7367 的模拟输入范围可通过编程设置，支持  $\pm 10\text{ V}$ 、 $\pm 5\text{ V}$ 、 $0\text{ V}$  至  $10\text{ V}$ （采用  $2.5\text{ V}$  内部基准电压源）和  $\pm 12\text{ V}$ （采用  $3\text{ V}$  外部基准电压源）。

AD7366-5/AD7367-5 采用 ADI 公司的工业 CMOS 工艺 (iCMOS) 制造，该技术平台兼具低电压和高电压 CMOS 的优点。AD7366/AD7367 的输入电路采用  $\pm 12\text{ V}$  的  $V_{DD}$  和  $V_{SS}$  标称电压工作，而 ADC 其它部分采用  $AV_{CC}$ 、 $DV_{CC}$  和  $+5\text{ V } V_{DRIVE}$ 。利用 iCMOS 工艺，AD7366/AD7367 不仅降低了功耗和封装尺寸，而且能接受高电压双极性信号。

在信号源具有高阻抗的应用中，由于较大的源阻抗会对 ADC 交流性能造成较明显的影响，因此应当先将模拟输入信号进行缓冲，再施加于 AD7366/AD7367 的输入端。选择驱动输入端的运算放大器时，主要取决于特定应用和所选的模拟输入电压范围。驱动器放大器必须能够在不到  $140\text{ ns}$  额定采样时间内，以满量程步进建立至 14 位水平（ $0.0061\%$ ，AD7367）或 12 位水平（ $0.024\%$ ，AD7366）。

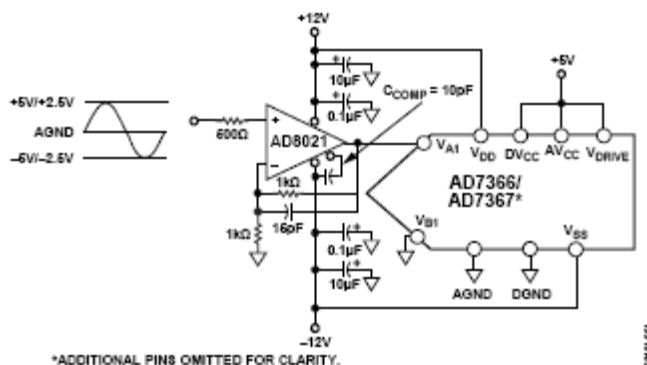


图 1. 采用 AD8021 驱动 AD7366/AD7367 模拟输入的典型连接图  
(原理示意图：未显示去耦和所有连接)

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)

AD8021 电压反馈型放大器具有异常出色的高性能、高速、低噪声和低失真性能，非常适合用作 AD7366/AD7367 的单端输入缓冲器/驱动器。以单端模式工作时，也能满足上述要求。图 1 显示了 AD7366/AD7367 的配置，AD8021 为单端配置。AD8021 需要一个外部补偿 NPO 型电容 ( $C_{COMP}$ )，如图 1 所示。AD8021 采用同相模式连接，增益为 2。AD7366/AD7367 可编程双极性输入电压范围（折合到 AD8021 的输入端）为  $\pm 5\text{ V}$  和  $\pm 2.5\text{ V}$ 。

该电路必须构建在具有较大面积接地层的多层电路板上。为实现最佳性能，必须采用适当的布局、接地和去耦技术（请参考“教程 MT-031”、“教程 MT-101”以及 AD7366/AD7367 评估板布局）。

### 常见变化

在要求双通道器件的高频应用中，可以用 AD8022 代替 AD8021。对于低频应用，推荐使用的运算放大器为 AD797、AD845 和 AD8610。

### 更多资料

指南 MT-031：实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的谜团。ADI 公司。

指南 MT-036：运算放大器输出反相和输入过压保护。ADI 公司。

指南 MT-101：去耦技术。ADI 公司。

### 数据手册和评估板

AD7366 数据手册。

AD7367 数据手册。

AD8021 数据手册。

OP177 数据手册。

AD7366/AD7367 评估板。

### 修订历史

09 年 9 月—修订版 0 至修订版 A

格式更新 ..... 通用

08 年 10 月—修订版 0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

AD8352	超低失真差分射频/中频放大器
AD9445	14 位、105 MSPS/125 MSPS 模数转换器

## 使用 AD8352 作为高速 ADC 的超低失真差分 RF/IF 前端

### 电路功能与优势

这些电路提供利用超低失真差分 RF/IF 放大器 AD8352 驱动高速 ADC 的单端和差分两种配置。AD8352 具备高效驱动 AD9445 等高线性度转换器所必需的增益、隔离与失真性能。无论以差分方式还是单端方式驱动，该器件都能提供平衡输出，从而保持出色的二阶失真水平。

### 电路描述

图 1 和图 2 显示用于驱动 14 位、105 MSPS ADC AD9445 的两种前端电路。图 1 为差分输入配置，图 2 为单端输入配置。

在图 1 所示的差分配置中，输入端 49.9  $\Omega$  电阻为 50  $\Omega$  RF/IF 信号源提供差分输入阻抗。当驱动器距离 AD8352 不超过最大输

入 RF/IF 频率波长的大约八分之一时，不需要阻抗匹配，从而无需这一端接电阻。24  $\Omega$  输出串联电阻用于与 ADC 的输入电容实现隔离，最佳电阻值根据经验而定。图 3 和图 4 的 100 MHz FFT 图显示了采用差分配置的性能效果。

在图 2 所示的单端输入配置中， $V_{IP}$  端的净输入阻抗为  $R_N$  (200  $\Omega$ ) 加上 24.9  $\Omega$  外部平衡电阻，约为 225  $\Omega$ 。这就要求并联一个 64.9  $\Omega$  电阻，以便提供与 50  $\Omega$  源阻抗相匹配的输入阻抗。如果输入反射极小，则不需要此阻抗匹配。需利用 200  $\Omega$  电阻( $R_N$ )来平衡输出电压，使二阶失真最小。

单端配置可提供与输入差分驱动相似的 -3 dB 带宽，并且三阶谐波整体性能下降很少，甚至没有下降。单端、三阶失真

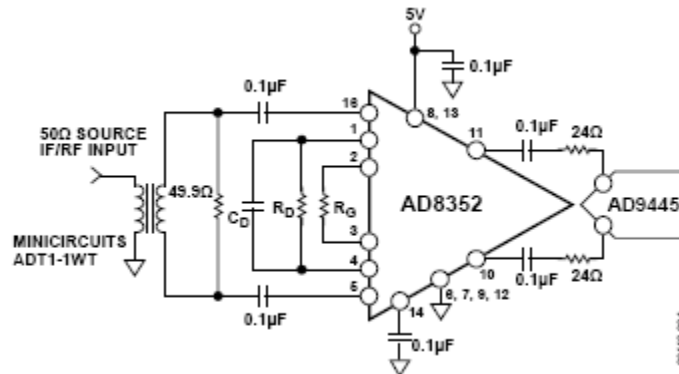


图 1. 驱动 14 位、105MSPS/125MSPS ADC AD9445 的 AD8352 差分输入  
(原理示意图：未显示所有连接)

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2008-2009 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

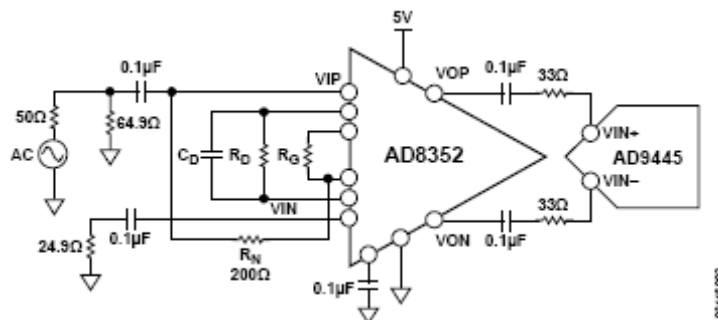
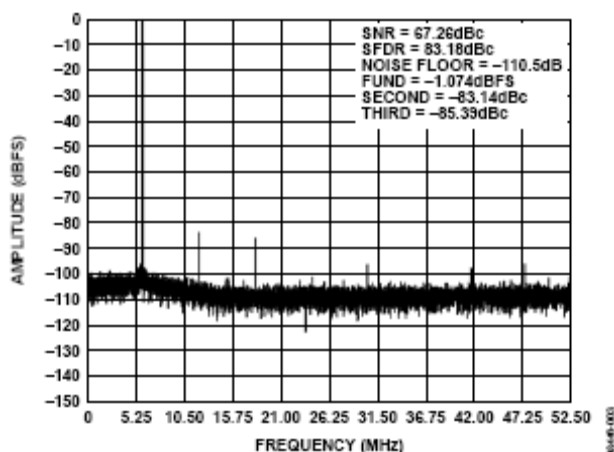


图2. 驱动AD9445 ADC的AD8352单端输入

(原理示意图: 未显示所有连接)

水平与图3和图4的差分FFT图相似。单端电路没有在放大器之前用变压器或巴伦,而在约100 MHz以上频率仍能保持出色的失真性能。不过,在约100 MHz以上频率,当AD8352采用单端方式驱动时,由于相位相关误差,二阶失真会增大。

图3. 单音失真AD8352驱动AD9445; 编码时钟为105 MHz, 模拟输入频率为100 MHz ( $A_V = 10$  dB), 参见图1

两种配置中,  $R_G$  是AD8352的增益设置电阻,  $R_D$  和  $C_D$  则可消除失真。AD9445的差分输入阻抗约为2KΩ, 与5Pf并联, 满量程输入信号要求  $V_{IN+}$  与  $V_{IN-}$  之间具有一个2.0 V峰峰值差分信号( $V_{REF} = 1$  V)。

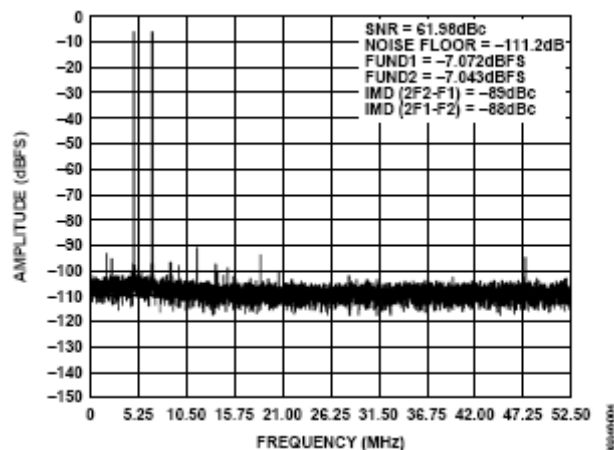
放大器的输出经过交流耦合,可以在ADC输入端提供最佳共模电压。AD9445输入端的共模电压通过内部网络设置为3.5V。如果信号源也要求共模电压超出AD8352的最佳范围,则输入可能需要进行交流耦合。AD8352具有一个  $V_{CM}$  共模引脚,可以均等地变换输入和输出共模电平。提高AD8352的增益会提高系统噪声,因此在不进行滤波的情况下,AD9445的信噪比(在100 MHz输入、 $A_V = 10$  dB条件下,  $SNR = 3.5$  dB)会降低。不过应当注意,只要  $C_D$  和  $R_D$  选择得当,则放大器增益从

3 dB提高至18 dB并不会明显影响失真水平。若配置得当,这些电路的SFDR性能可以优于87 dBc(70 MHz输入)和82 dBc(180 MHz输入)。只要选择适当的  $C_D$  和  $R_D$ ,单端驱动可以获得类似的SFDR性能和三阶交调水平,如上述图中所示。

为了使本文所讨论的电路达到理想的性能,必须采用出色的布线、接地和去耦技术。至少应采用四层PCB: 一层为接地层,一层为电源层,另两层为信号层。

所有IC电源引脚都必须采用0.01 μF至0.1 μF低电感、多层陶瓷电容(MLCC)对接地层去耦(为简明起见,图中未显示),并应遵循各IC数据手册的相关建议。

有关布线方式和关键器件定位的建议,请参考产品评估板,可以通过器件的产品主页或数据手册查询评估板。

图4. 双音交调失真, AD8352驱动AD9445, 采样时钟为105 MSPS, 模拟输入频率为98 MHz和101 MHz,  $A_V = 10$  dB, 参见图1

## 常见变化

对于带通和低通应用，在 ADC 与放大器之间放置抗混叠滤波器是改善整体噪声与宽带失真性能的常见方法。高频滤波要求与滤波器匹配。AD8352 可保持 100  $\Omega$  输出阻抗，远远超过大多数应用要求，非常适合驱动大多数滤波器配置，失真性能则下降很少，甚至没有下降。

可以用高 IP3、低噪声指数 [AD8375](#) 可变增益放大器(VGA)来代替低失真差分放大器 AD8352。AD8375 是一款数字控制、可变增益、宽带放大器，可以在较宽的 24 dB 增益范围内提供精密增益控制，分辨率为 1 dB。[AD8376](#) 是 AD8375 的双通道版本。（请参考[电路笔记 CN-0022 “使用 AD8376 VGA 驱动高 IF 交流耦合应用中的宽带 ADC”](#)）

## 更多资料

[电路笔记 CN-0002：利用 AD8376 VGA 驱动高中频交流耦合应用中的宽带 ADC](#)。ADI 公司。

[指南 MT-031：实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的谜团](#)。ADI 公司。

[指南 MT-073：高速可变增益放大器\(VGA\)](#)，ADI 公司。

[指南 MT-075：高速 ADC 用差分驱动器概述](#)。ADI 公司。

[指南 MT-101：去耦技术](#)。ADI 公司。

## 数据手册和评估板

[AD8352 数据手册](#)。

[AD8375 数据手册](#)。

[AD8376 数据手册](#)。

[AD9445 数据手册](#)。

[AD9445 评估板](#)。

[高速 ADC 评估套件和评估板](#)。

## 修订历史

09 年 8 月—修订版 0 至修订版 A

格式更新.....通用

08 年 10 月—修订版 0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



ADL5330	可变增益放大器(VGA)
AD8318	70 dB 对数检波器/控制器

## 适合 RF 应用的稳定闭环自动功率控制

### 电路功能与优势

本文所述电路利用一个 VGA (ADL5330) 和一个对数检波器 (AD8318) 提供闭环自动功率控制。由于 AD8318 具有较高的温度稳定性，而且 AD8318 RF 检波器可确保 ADL5330 VGA 的输出端具有同样水平的温度稳定性，因此该电路在整个温度范围都能保持稳定。该电路还增加了对数放大器检波器，用来将 ADL5330 从开环可变增益放大器转换为闭环输出功率控制电路。AD8318 与 ADL5330 一样，具有线性 dB 传递函数，因此  $P_{OUT}$  对设定点传递函数也遵循线性 dB 特性。

### 电路描述

虽然可变增益放大器 ADL5330 可提供精确的增益控制，但利用一个自动增益控制(AGC)环路也可以实现对输出功率的精

密调节。图 1 显示在 AGC 环路中工作的 ADL5330。增加对数放大器 AD8318 后，该 AGC 在较宽的输出功率控制范围具有更高的温度稳定性。

ADL5330 VGA 要在 AGC 环路中工作，必须将输出 RF 的样本反馈至检波器（通常利用一个定向耦合器并增加衰减处理）。DAC 将设定点电压施加于检波器的 VSET 输入，同时将 VOUT 与 ADL5330 的 GAIN 引脚相连。根据检波器的 VOUT 与 RF 输入信号之间明确的线性 dB 关系，检波器调节 GAIN 引脚的电压（检波器的 VOUT 引脚为误差放大器输出），直到 RF 输入的电平与所施加的设定电压相对应。GAIN 建立至某一值，使得检波器的输入信号电平与设定电压之间达到适当平衡。

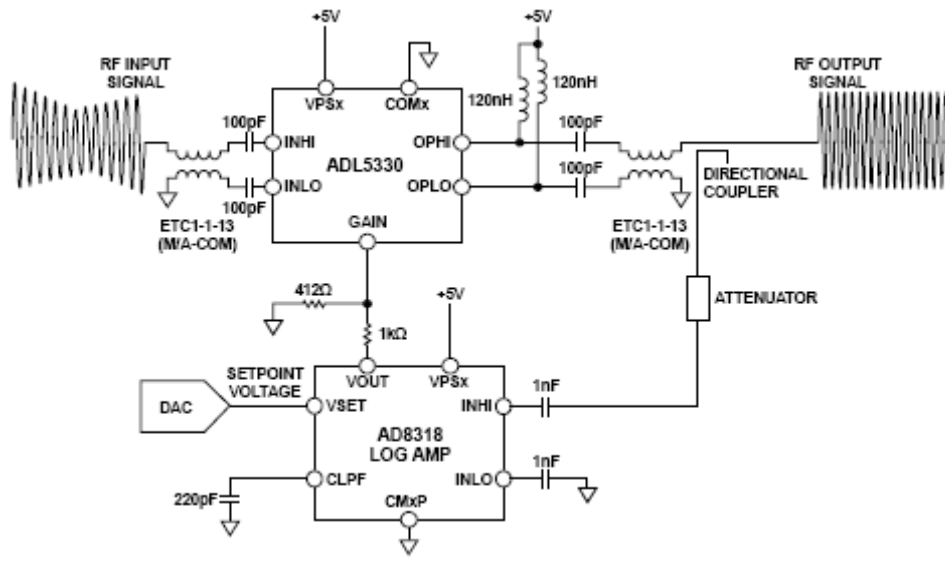


图 1. ADL5330 与 AD8318 配合在自动增益控制环路中工作  
(原理示意图：未显示去耦和所有连接)

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2009 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



AGC 环路中工作的 ADL5330 与 AD8318 的基本连接如图 1 所示。AD8318 是一款 1 MHz 至 8 GHz 精密解调对数放大器，提供较大的检波范围(60 dB)，温度稳定性为  $\pm 0.5$  dB。ADL5330 的增益控制引脚受 AD8318 的输出引脚控制。电压 VOUT 的范围为 0 V 至接近 VPSX。为避免过驱恢复问题，可以用阻性分压器按比例缩小 AD8318 的输出电压，以便与 ADL5330 的 0 V 至 1.4 V 增益控制范围接口。

利用一个 23 dB 的耦合器/衰减器，可以让所需的 VGA 最大输出功率与 AD8318 线性工作范围的上限(900 MHz 时约为 -5 dBm)相匹配。

检波器的误差放大器利用以地为参考的电容引脚 CLPF 对误差信号(电流形式)进行积分。必须将一个电容与 CLPF 相连，用来设置环路带宽，并确保环路稳定性。

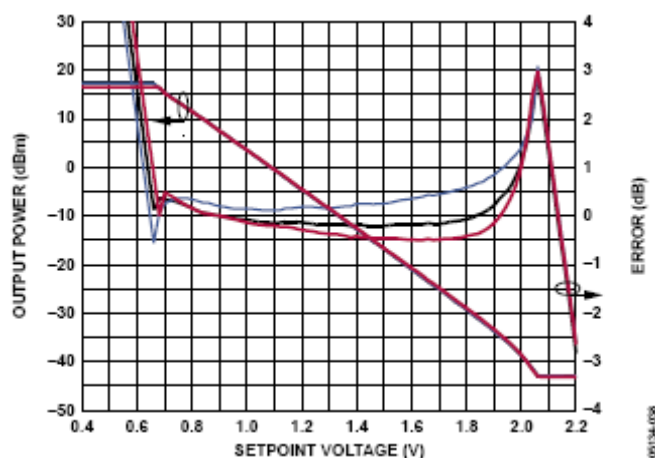


图 2. ADL5330 输出功率与 AD8318 设定点电压关系曲线， $P_{IN} = -1.5$  dBm

图 2 显示针对 900 MHz 正弦波和 -1.5 dBm 输入功率，输出功率与 VSET 电压在整个温度范围的传递函数关系曲线。请注意，AD8318 的功率控制为负向式。减小 VSET 相当于要求 ADL5330 提供更高的信号，因此一般会提高增益(GAIN)。AGC 环路能够控制接近 ADL5330 完整 60 dB 增益控制范围的信号。在通常极为重要的最高功率范围内，其温度性能最精确。在输出功率的最高 40 dB 范围内，整个温度范围的线性一致性误差在  $\pm 0.5$  dB 范围内。

对数放大器所带来的宽带噪声可忽略不计。

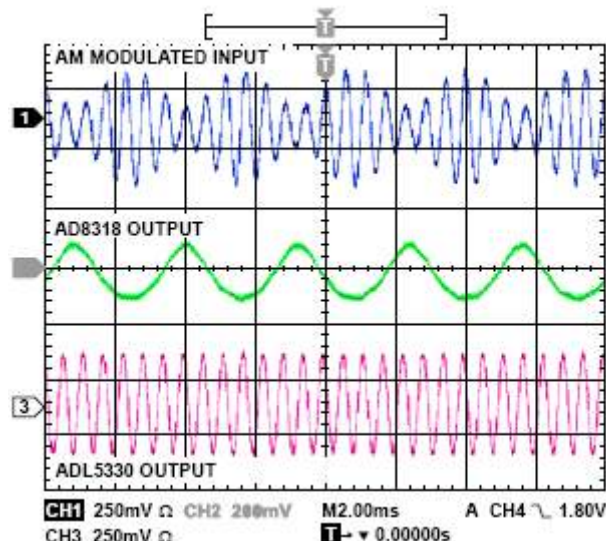


图 3. 显示 AM 调制输入信号的示波器屏幕截图

为使 AGC 环路保持均衡，AD8318 必须跟踪 ADL5330 输出信号的包络，并向 ADL5330 的增益控制输入提供必要的电平。图 3 所示为图 1 中 AGC 环路的示波器屏幕截图。将采用 50% AM 调制的 100 MHz 正弦波施加于 ADL5330。ADL5330 的输出信号为恒定的包络正弦波，其振幅与 AD8318 的设定点电压 1.5 V 相对应。图中还显示了 AD8318 对不断变化的输入包络的增益控制响应。

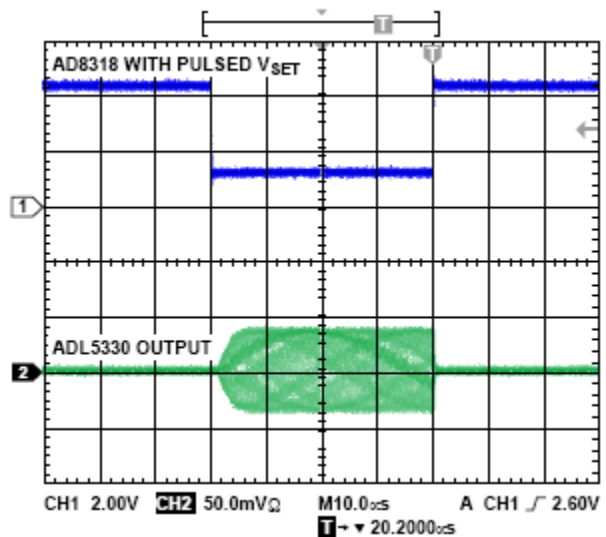


图 4. 显示 ADL5330 输出的示波器屏幕截图

图 4 显示 AGC RF 输出对 VSET 脉冲的响应。当 VSET 降至 1 V 时，AGC 环路以 RF 突发脉冲予以响应。响应时间和信号积分量由 AD8318 CFLT 引脚上的电容控制，这与积分放大器周围的反馈电容类似。电容增加将导致响应速度变慢。

该电路必须构建在具有较大面积接地层的多层电路板上。为实现最佳性能，必须采用适当的布局、接地和去耦技术（请参考教程 MT-031、MT-101 及 ADL5330 和 AD8318 的评估板布局）。

在 ADL5330 和 AD8318 芯片级封装的底面，有一个裸露的压缩焊盘，该焊盘与芯片接地内部相连。将该焊盘焊接至印刷电路板的低阻抗接地层可确保达到额定的电气性能，并可提供散热功能。另外，建议利用过孔将焊盘下方所有层上的接地层拼接在一起，以降低热阻抗。

### 常见变化

该电路可以用来实现恒定功率输出功能（固定设定点、可变输入功率）或可变功率输出功能（可变设定点、固定或可变输入功率）。如果所需的输出功率控制范围较窄，可以用 AD8317（功率检波范围：50 dB）或 AD8319（功率检波范围：45 dB）代替 AD8318 对数放大器（功率检波范围：60 dB）。对于恒定输出功率功能，最低动态范围检波器（AD8319）已足够用，因为环路将始终把检波器的输入功率伺服至恒定水平。

针对发射应用进行优化的 ADL5330 VGA 可以用 AD8368 VGA 代替，后者针对最高 800 MHz 的低频接收应用进行了优化，并提供 34 dB 线性 dB 电压控制可变增益。

### 更多资料

现代通信系统中接收器用自动增益控制环路的设计和工作原理，Dana Whitlow，ADI无线研讨会，第7章，2006年。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-073：高速可变增益放大器(VGA)，ADI公司。

指南MT-077：对数放大器基础知识，ADI公司。

指南MT-078：高速对数放大器，ADI公司。

指南 MT-101：去耦技术。ADI 公司。

### 数据手册和评估板

ADL5330数据手册和评估板。

AD8368数据手册。

AD8318数据手册和评估板。

AD8317数据手册。

AD8319 数据手册。

### 修订历史

#### 09年11月—修订版0至修订版A

格式更新.....	通用
更改电路笔记标题.....	1

#### 08年10月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0051](http://www.analog.com/cn/CN0051)。

## 连接/参考器件

ADA4937-1	超低失真差分 ADC 驱动器
AD9246	14 位、80 MSPS/105 MSPS/125 MSPS ADC

## 在交流耦合基带应用中驱动 AD9233/AD9246/AD9254 ADC

### 电路功能与优势

本文所述电路如图 1 所示，可利用 ADA4937-1 ADC 驱动器将交流耦合、单端输入信号转换为适合驱动 14 位、125 MSPS 模数转换器(ADC) AD9246 的差分信号。ADA4937-1 是一款低噪声、超低失真、高速差分放大器，具有低直流偏置和出色的动态性能。它是分辨率高达 16 位、DC 至 100 MHz、高性能 ADC 的理想驱动器，非常适合各种不同的数据采集和信号处理应用。与以前的模数转换器相比，此电路的功耗与成本均有所降低，适用于通信、仪器仪表和医疗成像等应用。ADA4937-2 是 ADA4937-1 的双通道版本，可在驱动双通道 ADC 时使用。

### 电路描述

AD9246 是一款单芯片、14 位、80 MSPS/105 MSPS/125 MSPS ADC，采用 1.8 V 单电源供电，内置一个高性能采样保持放大器(SHA)和片内基准电压源。利用宽带宽、真差分采样保持放大器(SHA)，用户可以选择包括单端应用在内的各种输入范围和偏移。该器件可用于多路复用系统，在连续通道中切换满量程电平，以及对远超过 ADC 奈奎斯特频率的单通道输入进行采样。

采用差分驱动时，AD9246 能够实现最佳性能。ADA4937-1 不仅提供单端转差分转换，而且提供增益与电平转换。ADA4937-1 的输出共模电压通过在其 VOCM 引脚上连接电阻分压器来设置。如果该引脚置于悬空，则  $V_{OCM}$  电压大约为中间电源电压，由内部分压器设置。

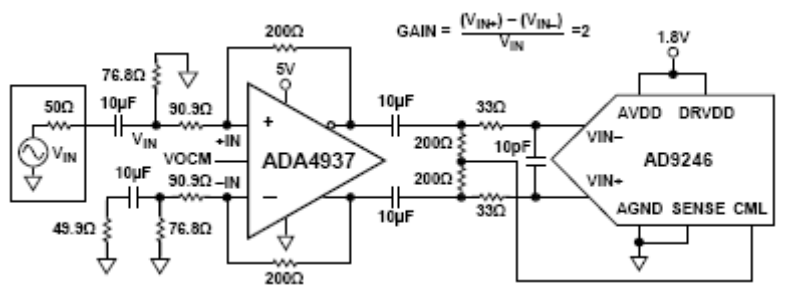


图 1. ADA4937-1 驱动 14 位 ADC AD9246

(原理示意图：未显示去耦和所有连接)

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700  
Fax: 781.461.3113  
[www.analog.com.cn](http://www.analog.com.cn)  
©2009 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

ADA4937-1 采用 5 V 单电源供电, 并针对单端输入转差分输出配置增益为 2。76.8  $\Omega$  端接电阻与单端输入阻抗 137  $\Omega$  并联, 为输入源提供 50  $\Omega$  交流端接。反相输入端的 90.9  $\Omega$  电阻另需与 49.9  $\Omega$  电阻、10  $\mu\text{F}$  电容和 76.8  $\Omega$  电阻相连, 以平衡驱动同相输入端的交流阻抗。欲了解此配置的详尽分析, 请参考“教程 MT-076”。

该信号发生器具有以接地电压为基准的对称双极性输出端。ADA4937-1 的  $V_{\text{OCM}}$  引脚悬空, 因此内部分压器会将输出共模电压设置为中间电源电压。此部分会反馈至求和节点, 且 -IN 和 +IN 偏置 1.14 V。当共模电压为 2.5 V 时, 各 ADA4937-1 输出摆幅为 2.0 V 至 3.0 V, 可针对 1 V 峰峰值单端输入提供 2 V 峰峰值差分输出。

ADC 驱动器的输出交流耦合至一个单极、低通噪声滤波器。该低通滤波器可降低 ADC 输入处的噪声带宽, 并且与 ADC 及驱动器的开关电容输入形成一定程度的隔离。在任何配置中, 分流电容最佳值  $C$  均取决于输入频率和源阻抗, 并且可能需要优化。表 1 列出了适用于 RC 网络的建议值。不过, 这些值取决于输入信号频率, 并可能需要进一步优化。

ADC 的输入共模电压由 AD9246 的 CML 引脚和一对 200  $\Omega$  电阻来设置。在其它应用中, 采用 ADC 的 CML 引脚和 ADA4937-1 的  $V_{\text{OCM}}$  引脚来设置 ADC 的输入共模电压 (请参考“常见变化”部分)。ADA4937-1 采用 ADI 公司的专有硅-锗(SiGe)互补双极性工艺制造, 可实现极低的失真水平, 输入电压噪声仅为 2.2  $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

图 1 所示电路已经过各种输入频率的 -1 dBFS 信号测试。图 2 所示为二次和三次谐波失真(HD2/HD3)与输入频率的关系曲线。

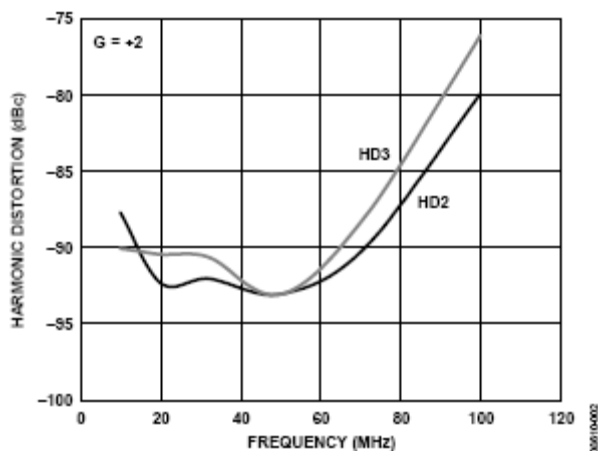


图 2. ADA4937-1 驱动 AD9246 ADC 时的二次谐波失真(HD2)和三次谐波失真(HD3)

本电路必须构建在具有较大面积接地层的多层电路板上。为实现最佳性能, 必须采用适当的布局、接地和去耦技术 (请参考“教程 MT-031”、“教程 MT-101”以及 AD9246 评估板布局)。

为了获得最佳电气和热性能, AD9246 和 ADA4937-1 (LFCSP 封装) 底部的裸露焊盘需要与较大面积接地层相连。铜层应具有数个过孔, 从而实现最为通畅的散热路径, 以便通过 PCB 底部的气流散热。这些过孔应填满或插入焊料。

### 常见变化

AD9246 (14 位、80 MSPS/105 MSPS/125 MSPS) ADC 与 AD9233 (12 位、80 MSPS/105 MSPS/125 MSPS) 和 AD9254 (14 位、150 MSPS) 引脚兼容。

驱动上述 ADC 时, 还可以考虑其它一些放大器配置, 分别为差分交流耦合输入至差分输出、直流耦合单端输入至交流耦合差分输出、直流耦合单端输入至差分输出和直流耦合差分输入至差分输出。

在直流耦合系统中, 驱动器输出共模电压通过 ADA4937-1 的  $V_{\text{OCM}}$  引脚设置。可调输出共模电平使 ADA4937-1 输出能够与 ADC 的输入共模电压相匹配。ADA4937-1 的内部共模反馈环路也可提供出色的输出平衡, 并能抑制偶数阶谐波失真产物。在这些应用中, ADC 的 CML 引脚经常与驱动器的  $V_{\text{OCM}}$  引脚直接相连, 确保实现最佳的 ADC 输入共模电压。在其它应用中,  $V_{\text{OCM}}$  引脚可以采用低阻抗源驱动, 如运算放大器等。也可以让  $V_{\text{OCM}}$  引脚保持浮地, 但通过一个电容来旁路, 这种情况下,  $V_{\text{OCM}}$  电压被设置为两个电源引脚所施加电压的中点。

表 1. RC 网络建议值

输入频率范围 (MHz)	串联电阻 R( $\Omega$ )	差分电容 C(pF)
0 至 70	33	15
70 至 200	33	5
200 至 300	15	5
>300	15	开路 (无电容)

## 更多资料

Rob Reeder和Jim Caserta, 应用工程师问答—36: “宽带数模转换器前端设计考虑II: 用放大器还是用变压器驱动ADC?” (模拟对话41-02) 2007年2月。

指南MT-031: 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-074: 精密ADC用差分驱动器。ADI公司。

指南MT-075: 高速ADC用差分驱动器概述。ADI公司。

指南MT-076: 差分驱动器分析。ADI公司。

指南MT-101: 去耦技术。ADI公司。

“高速差分ADC驱动器应用规则” (模拟对话, 第43卷), ADI公司John Ardizonni和Jonathan Pearson, 2009年5月。

ADIsimDiffAmp (差分放大器工具), ADI公司。

## 数据手册和评估板

ADA4937-1数据手册。

AD9246 数据手册。

AD9246评估板。

## 修订历史

09年11月—修订版0至修订版A

格式更新.....通用

09年2月—修订版0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



### 连接/参考器件

AD5450/AD5451/ AD5452/AD5453	8/10/12/14 位乘法 DAC
OP177	超高精度运算放大器
ADR01	精密、低噪声 10 V 基准电压源

## 利用 8/10/12/14 位 DAC AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 实现单极性、精密直流数模转换

### 电路功能与优势

本文所述电路为一种高性能、单极性、精密 DAC 配置，采用 AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 系列精密乘法 DAC，低噪声、高精度运算放大器 OP177 以及精密基准电压源 ADR01。运算放大器可决定电路的整体直流精度性能，因此高精度、低噪声运算放大器 OP177 非常适用于注重性能的应用。该电路还采用高精度、高稳定性、10 V 精密基准电压源 ADR01。基准电压源的温度系数和长期漂移性能均为要求高精度转换应用的主要考虑因素，所以是此类应用的理想器件。

### 电路描述

该电路采用 CMOS、电流输出 DAC AD5450/AD5451/AD5452/AD5453，可分别提供 8 位、10 位、12 位和 14 位操作。由于这是一款电流输出 DAC，因此需要一个运算放大器在 DAC 的输出端进行电流电压(I-V)转换。运算放大器的偏置电流和失调电压均为选择精密电流输出 DAC 的重要标准，所以该电路采用具有超低失调电压(25  $\mu$ V)和偏置电流(2 nA)的 OP177 运算放大器。OP177 和 AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 可以通过配置，轻松实现二象限乘法操作或单极性输出电压摆幅，如图 1 所示。

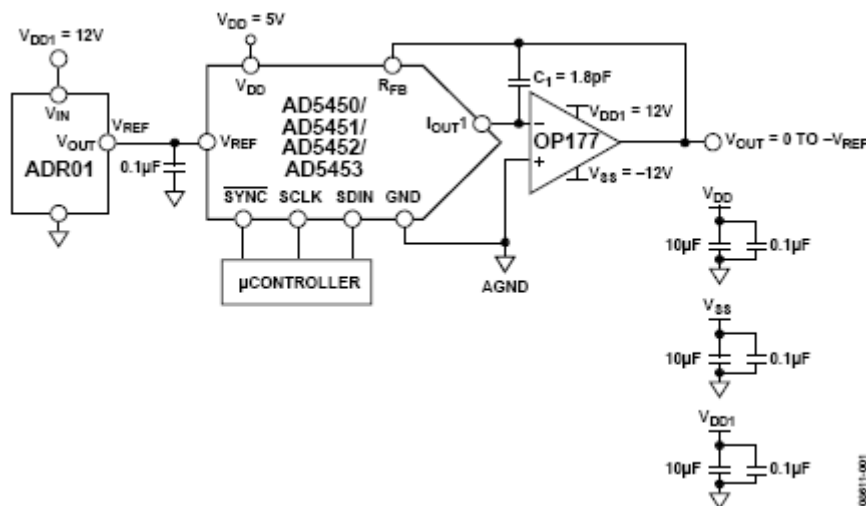


图 1. 单极性精密直流配置 (原理示意图: 未显示去耦和所有连接)

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)

AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 均采用 5 V CMOS 工艺设计, 电源电压  $V_{DD}$  为 2.5 V 至 5.5 V。DAC 接受最高达 10 V 的  $V_{REF}$  输入范围, 如图 1 中的基准电压源 ADR01 所示, 该基准电压源要求最小电源电压( $V_{DD1}$ )为 12 V, 并可采用给输出放大器供电的同一电源电压驱动。

当输出放大器以单极性模式连接时, 输出电压可由下式得出:

$$V_{OUT} = -V_{REF} \times (D/2^N)$$

其中  $D$  为载入 DAC 的数字字,  $N$  为位数;  $D = 0$  至 255 (8 位 AD5450);  $D = 0$  至 1023 (10 位 AD5451);  $D = 0$  至 4095 (12 位 AD5452);  $D = 0$  至 16383 (14 位 AD5453)。

运算放大器的输入失调电压也会和电路的可变增益(由于存在 DAC 的代码相关输出电阻)相乘。由于放大器的输入电压出现失调, 因而两个相邻数字小数之间的噪声增益变化会使输出电压产生步进变化。此输出电压变化与两个代码间所需的输出变化相叠加, 引起差分线性误差; 如果该误差足够大, 可能会导致 DAC 非单调。一般而言, 为了确保整个代码内步进时保持单调性, 输入失调电压应为 LSB 的一小部分。

相对精度或端点非线性是确定 DAC 电路精度性能时运用最广泛的技术之一。它测量一条穿过 DAC 传递函数端点直线的最大偏离量, 测量在零电平和满量程调整之后进行, 一般以 LSB 表示。图 2 显示图 1 中采用 14 位 DAC AD5453 和 OP177 放大器的电路性能。

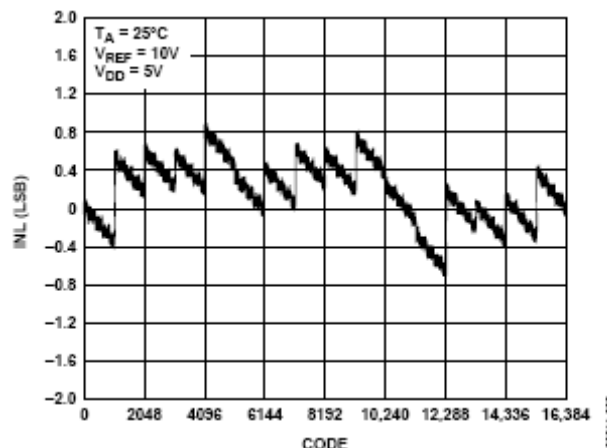


图 2.14 14 位 DAC AD5453 相对精度图

为了使电路正常工作, 必须采用出色的接地、布局 and 去耦技术。所有电源引脚应采用 0.1  $\mu$ F 低电感(低 ESL)陶瓷电容直接对引脚去耦。接地应直接连至大面积接地层。建议对接入 PC 电路板的每个电源, 均采用 1  $\mu$ F 至 10  $\mu$ F 电解电容进行额外去耦。为简明起见, 图 1 中未显示去耦电容。

为了优化高频性能, 电流电压放大器应尽可能靠近 DAC。评估板所用的原理图和布局参见 AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 数据手册。

### 常见变化

OP1177 和 AD8065 均为适合电流电压转换电路的出色的运算放大器产品, 二者皆具有低失调电压和超低偏置电流特性。

10.0 V 输出 ADR01 可以用 ADR02 或 ADR03 代替, 二者均为低噪声基准电压源, 与 ADR01 同属一个基准电压源系列, 分别提供 5.0 V 和 2.5 V 输出。ADR445 和 ADR441 超低噪声基准电压源也是合适的替代器件, 分别提供 5.0 V 和 2.5 V 输出。请注意, 基准输入电压的大小受所选运算放大器的轨到轨电压限制。



## 更多资料

Kester, Walt。数据转换手册第3章和第7章。ADI公司，2005。

指南MT-015：DAC基本架构II：二进制DAC。ADI公司。

指南MT-033：电压反馈型运算放大器的增益和带宽。ADI公司。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-035：运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题。ADI公司。

指南MT-101：去耦技术。ADI公司。

ADIsimPower设计工具。ADI公司。

基准电压源向导设计工具。ADI公司。

## 数据手册和评估板

AD5450/AD5451/AD5452/AD5453数据手册和评估板。

OP177数据手册。

AD8065数据手册。

OP1177数据手册。

ADR01数据手册。

ADR02数据手册。

ADR03数据手册。

ADR441数据手册。

ADR445数据手册。

## 修订历史

09年11月—修订版0至修订版A

格式更新 .....通用

09年1月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

### 连接/参考器件

AD5450/AD5451/ AD5452/AD5453	8/10/12/14 位乘法 DAC
AD8066	双路高性能 FastFET™ 放大器
ADR01	精密、低噪声 10 V 基准电压源

## 8/10/12/14 位乘法 DAC AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 的精密、双极性配置

### 电路功能与优势

本电路为一种双极性、精密 DAC 配置，采用精密乘法 DAC AD5450、AD5451、AD5452 或 AD5453 和低噪声运算放大器 AD8066。DAC 是核心可编程元件，放大器选择则决定精度或速度性能。对于精密、高精度、低噪声应用，可以

用 AD8066 等双路运算放大器来提供电流电压转换和信号调理。驱动  $V_{REF}$  输入需采用 ADR01 等低噪声基准电压源，利用一个低噪声、低带宽输出放大器则可获得最佳输出噪声性能。该电路的主要优势：基准电压输入阻抗恒定、恒定，并且  $V_{REF}$  可以超过 DAC  $V_{DD}$  电源电压。

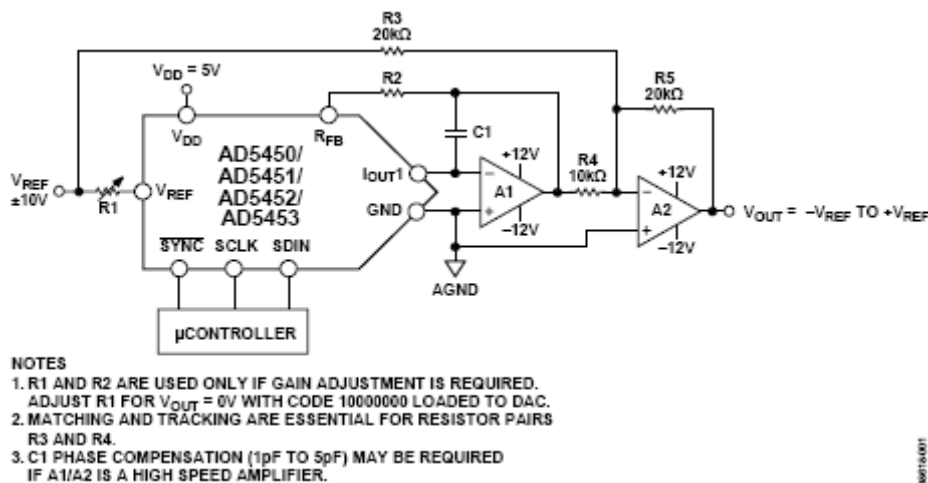


图1. 双极性精密直流转换（原理示意图：未显示去耦和所有连接）

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2009-2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## 电路描述

在许多应用中，可能需要产生全四象限乘法操作或双极性输出摆幅，如图 1 所示。利用以 A1 和 A2 表示的一个双路放大器和一些外部电阻即可轻松实现。在该电路中，放大器 A1 执行电流至电压转换，第二个放大器 A2 提供两倍的增益。利用基准电压提供的偏置电压使外部放大器偏置，便可实现全四象限乘法操作。在直流应用中，驱动基准输入的适用基准电压源是 ADR01，这是一款高精度、高稳定性、10 V 精密基准电压源。基准电压源的温度系数和长期漂移性能均为要求高精度转换应用的主要考虑因素，所以是此类应用的理想器件。

AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 DAC 均采用 5 V CMOS 工艺设计，电源电压  $V_{DD}$  为 2.5 V 至 5.5 V。这些器件可接受最高达 10 V 的  $V_{REF}$  输入范围，如图 1 所示；输出放大器的电源必须是双极性电源，并具有足够的动态余量以适应模拟输出范围  $V_{OUT}$ 。此电路的传递函数显示，当输入代码 D 从代码 0 ( $V_{OUT} = -V_{REF}$ ) 递增至中量程 ( $V_{OUT} = 0 V$ )、满量程 ( $V_{OUT} = +V_{REF}$ ) 时，正负输出电压均会产生。 $V_{OUT}$  以下式表示：

$$V_{OUT} = V_{REF} \times (D/2^{N-1}) - V_{REF}$$

其中：

$N$  为 DAC 的分辨率。

$D$  为载入 DAC 的数字字。 $D = 0$  至 255 (8 位 AD5450)； $D = 0$  至 1023 (10 位 AD5451)； $D = 0$  至 4095 (12 位 AD5452)； $D = 0$  至 16383 (14 位 AD5453)。

此电路的电流电压转换(I-V)级中使用了运算放大器。该运算放大器的电源电压限制了 DAC 可以使用的基准电压。运算放大器的偏置电流和失调电压均为选择精密电流输出 DAC 的重要标准，因此该电路采用具有超低失调电压（典型值 0.4 mV）和偏置电流（典型值 2 pA）的 AD8066 运算放大器。

运算放大器的输入失调电压也会和电路的可变噪声增益（由于存在 DAC 的代码相关输出电阻）相乘。由于放大器的输入电压出现失调，因而两个相邻代码之间的噪声增益变化会使输出电压产生步进变化。此输出电压变化与两个代码间所需的输出变化相叠加，引起差分线性误差；如果该误差足够大，可能会导致 DAC 非单调。

一般而言，为了确保整个代码内步进时保持单调性，输入失调电压应为 LSB 的一小部分。补偿电容 C1 用来防止闭环应用中出现响铃振荡或不稳定问题，可用典型值范围为 1 pF 至 5 pF。

在任何注重精度的电路中，精心考虑电源和接地回路布局有助于确保达到额定性能。印制电路板应采用模拟部分与数字部分分离设计，并限制在某些电路板区域内。如果 DAC 所在系统中有多个器件要求 AGND 至 DGND 连接，则只能在一个点上连接。星形接地点应尽可能靠近器件。

这些 DAC 应具有足够大的电源旁路电容 10  $\mu F$ ，与电源上的 0.1  $\mu F$  电容并联，并且尽可能靠近封装，最好是正对着器件。0.1  $\mu F$  电容应具有低有效串联电阻(ESR)和低有效串联电感(ESI)，与高频时提供低阻抗接地路径的普通陶瓷型电容一样，能够处理内部逻辑开关所引起的瞬态电流。

电源处也应当运用低 ESR 1  $\mu F$  至 10  $\mu F$  钽电容，以便尽可能减少瞬态干扰，并滤除低频纹波。为了优化高频性能，电流电压放大器应尽可能靠近 DAC。

## 常见变化

OP2177 是另一款适合该电流电压转换电路的优秀双路运算放大器，它同样具有低失调电压（典型值 15  $\mu V$ ）和超低偏置电流（典型值 0.5 nA）特性。ADR02 和 ADR03 也是适用的低噪声基准电压源，分别提供 5.0 V 和 2.5 V 输出，与 ADR01 同属一个基准电压源系列。其它适用的低噪声基准电压源是 ADR441 和 ADR445。基准输入电压的大小受所选运算放大器的轨到轨电压限制。

## 更多资料

Kester, Walt。数据转换手册第3章和第7章。ADI公司，2005。

指南MT-015：DAC基本架构II：二进制DAC。ADI公司。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-033：电压反馈型运算放大器的增益和带宽。ADI公司。

指南MT-035：运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题。ADI公司。

指南MT-101：去耦技术。ADI公司。

ADIsimPower设计工具。ADI公司。

基准电压源向导设计工具。ADI公司。

## 数据手册和评估板

AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 数据手册

AD8066 数据手册。

OP2177 数据手册。

ADR01 数据手册。

ADR02 数据手册。

ADR03 数据手册。

ADR441 数据手册。

ADR445 数据手册。

## 修订历史

### 10年1月-修订版0至修订版A

格式更新 .....通用

更改电路描述 ..... 2

### 09年10月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

### 连接/参考器件

<a href="#">AD5450/AD5451/AD5452/AD5453</a>	8/10/12/14 位乘法 DAC
<a href="#">AD8065</a>	高性能 FastFET™ 放大器

## 采用 AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 电流输出 DAC 系列的可编程增益元件

### 电路功能与优势

在要求 DAC 输出电压范围大于输入电压的应用中，可以采用可编程增益电路。本电路利用一个乘法 DAC [AD5450/AD5451/AD5452/AD5453](#) 和一个快速、低失调运算放大器 [AD8065](#) 提供可编程增益功能。最大增益值和温度系数由外部电阻设置，可编程增益分辨率由 DAC 的分辨率设置。

### 电路描述

图 1 所示电路就是推荐用来提高电路增益的方法。R1、R2 和 R3 应具有相似的温度系数，但不必与 DAC 的温度系数

相匹配。在要求增益大于 1 的电路中，推荐使用这种方法。

$$V_{OUT} = -Gain \times V_{IN} \times \frac{D}{2^N} \quad (1)$$

其中 D 为载入 DAC 数字字。D = 0 至 255 (8 位 AD5450)；D = 0 至 1023 (10 位 AD5451)；D = 0 至 4095 (12 位 AD5452)；D = 0 至 16383 (14 位 AD5453)；n 为位数。

该电路的主要优势就是能够利用电阻匹配解决增益温度系数误差问题。外部电阻的温度系数需要彼此匹配，但不必与 DAC 内部梯形电阻的温度系数相匹配。

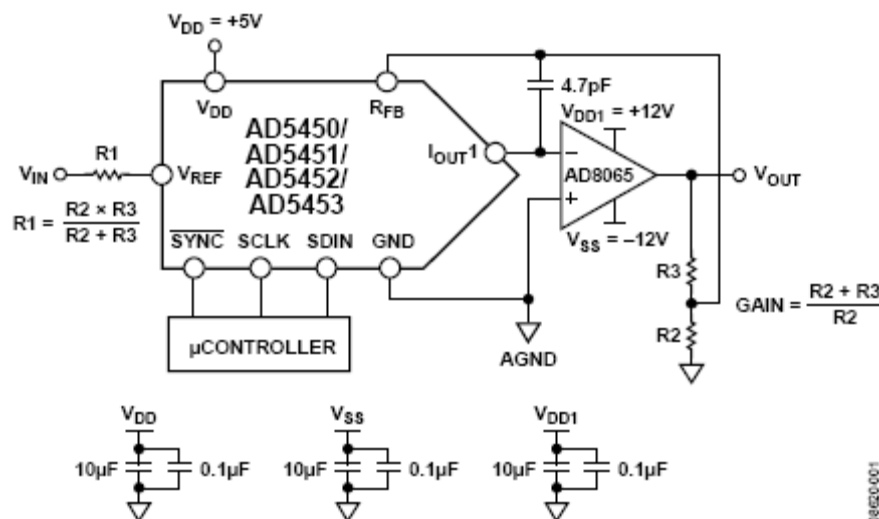


图 1. 采用电流输出 DAC 的可编程增益电路 (原理示意图: 未显示去耦和所有连接)

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)

要求用电阻 R1 是因为 DAC 的输入阻抗与 R1 之和必须等于 RFB 与 R2||R3 之和的总反馈电阻。DAC 的输入阻抗为 RFB，于是

$$R1 + RFB = RFB + R2||R3 \quad (2)$$

$$R1 = R2||R3 \quad (3)$$

R1 和 R2 的值必须适当选择，使得输出电压不超过运算放大器的给定电源电压输出范围。另外还应注意，运算放大器的偏置电流乘以总反馈电阻 (RFB + R2||R3)，即可产生相应的失调电压。因此，R1 和 R2 的值不能太大，否则将对总失调电压产生显著影响。

AD5450/AD5451/AD5452/AD5453 均采用 5 V CMOS 工艺设计，电源电压  $V_{DD1}$  为 2.5 V 至 5.5 V。输出放大器采用双电源电压驱动 ( $V_{DD}/V_{SS}$ )，并且电压需要足够大才能适应电路的模拟输出范围，一般为  $\pm 12$  V 电源。4.7 pF 电容用来防止闭环应用中的响铃振荡或不稳定问题。

运算放大器的输入失调电压也会和电路的可变增益（由于存在 DAC 的代码相关输出电阻）相乘。由于放大器的输入电压出现失调，因而两个相邻数字小数之间的噪声增益变化会使输出电压产生步进变化。此输出电压变化与两个代码间所需的输出变化相叠加，引起差分线性误差；如果该误差足够大，可能会导致 DAC 非单调。AD8065 借助其低输入失调电压和低偏置电流特性可解决这一问题。

## 常见变化

OP1177 是另一款适合该电流电压转换电路的优秀运算放大器，它同样具有低失调电压和超低偏置电流特性。至于基准电压的选择，输入电压会受所选运算放大器的轨到轨电压限制，增益则同样由电阻 R2 和 R3 设置。

## 更多资料

ADIsimPower 设计工具。ADI 公司。

Kester, Walt. *数据转换手册* 第 3 章和第 7 章。ADI 公司，2005。

指南 MT-015: *DAC 基本架构 II: 二进制 DAC*。ADI 公司。

指南 MT-031: *实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的谜团*。ADI 公司。

指南 MT-033: *电压反馈型运算放大器的增益和带宽*。ADI 公司。

指南 MT-035: *运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题*。ADI 公司。

指南 MT-101: *去耦技术*。ADI 公司。

基准电压源向导设计工具。ADI 公司。

## 数据手册和评估板

AD5450 数据手册。

AD5451 数据手册。

AD5452 数据手册。

AD5453 数据手册。

AD8065 数据手册。

OP1177 数据手册。

## 修订历史

09 年 11 月—修订版 0 至修订版 A

格式更新.....通用

09 年 1 月—修订版 0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



### 连接/参考器件

AD5765	完整的四通道、16 位、高精度 DAC
ADR420	4.096 V 精密基准电压源

## 利用 AD5765 DAC 实现高精度、双极性电压输出数模转换

### 电路功能与优势

本电路采用四通道、16 位、串行输入、双极性电压输出 DAC AD5765，可提供高精度、双极性数据转换。它利用精密基准电压源 ADR420 在整个工作温度范围内实现最佳 DAC 性能。该 16 位精密 DAC 所需的外部器件只有基准电压源、电源引脚和基准输入上的去耦电容以及可选的短路电流设置电阻，因此，这种实施方案可以节省成本和电路板空间。本电路非常适合闭环伺服控制和开环控制应用。

### 电路描述

AD5765 是一款高性能数模转换器，可保证单调性，积分非线性(INL)误差为 $\pm 1$  LSB (C 级器件)，噪声低，建立时间为 10  $\mu$ s。在以下电源电压范围内，保证具有额定性能：AVDD 电源电压范围为+4.75 V 至+5.25 V，AVSS 电源电压范围为-4.75 V 至-5.25 V。标称满量程输出电压范围为 $\pm 4.096$  V。

为使该 DAC 在整个工作温度范围内达到最佳性能，必须使用精密基准电压源。AD5765 内置基准电压源缓冲器，因而无需外部正负基准电压源及相关的缓冲器，这样便进一步节省了成本和电路板空间。因为基准输入 (REFAB、REFCD) 上施加的电压用来产生 DAC 内核所用的内部缓冲正负基准电压，所以外部基准电压的任何误差均会通过该器件的输出反映出来。

针对高精度应用选择基准电压源时，需要考虑四种可能的误差源：初始精度、输出电压的温度系数、长期漂移和输出电压噪声。表 1 列出了 ADI 公司的其它 2.048V 精密基准电压源候选产品及其特性。

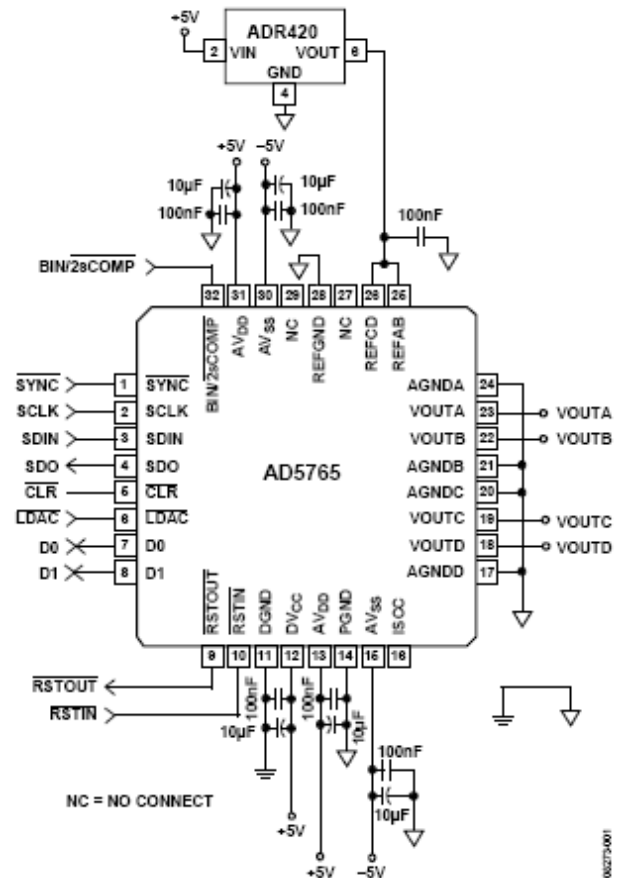


图 1. 采用精密基准电压源的 AD5765 DAC 高精度、双极性配置

Rev.0

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)



表 1：2.048 V 精密基准电压源

产品型号	初始精度 (最大值, mV)	长期漂移 (典型值, ppm)	温度漂移 (最大值, ppm/°C)	0.1 Hz 至 10 Hz 噪声 (典型值, $\mu\text{V}$ 峰峰值)
ADR430	$\pm 1$	40	3	3.5
ADR420	$\pm 1$	50	3	1.75
ADR390	$\pm 4$	50	9	5

在任何注重精度的电路中，精心考虑电源和接地回路布局有助于确保达到额定性能。安装 AD5765 所用的 PCB 必须采用模拟与数字部分分离设计，并限制在电路板的一定区域内。如果 AD5765 所在系统中有多器件要求 AGND 至 DGND 连接，则只能在一个点上连接。星形接地点尽可能靠近器件。AD5765 必须具有足够大的 10  $\mu\text{F}$  电源旁路电容，与每个电源上的 0.1  $\mu\text{F}$  电容并联，并且尽可能靠近封装，最好是正对着该器件。10  $\mu\text{F}$  电容为钽珠型电容。0.1  $\mu\text{F}$  电容必须具有低有效串联电阻(ESR)和低有效串联电感(ESL)，如高频时提供低阻抗接地路径的普通陶瓷型电容，以便处理内部逻辑开关所引起的瞬态电流。

AD5765 的电源走线必须尽可能宽，以提供低阻抗路径，并减小电源线路上的突波效应。时钟等快速开关信号必须利用数字地屏蔽起来，以免向电路板上的其它器件辐射噪声，并且绝不应靠近基准输入。SDIN 线路与 SCLK 线路之间布设接地线路有助于降低二者之间的串扰（多层电路板上不需要，因为它有独立的接地层；不过，接地线路有助于分开不同线路）。基准输入上的噪声必须降至最低，因为这种噪声会被耦合至 DAC 输出。应避免数字信号与模拟信号交叠。电路板相反两侧上的走线必须彼此垂直，这样有助于减小电路板上的馈通效应。推荐使用微带线技术，但这种技术对于双面电路板未必始终可行。采用这种技术时，电路板的元件侧专用于接地层，信号走线则布设在焊接侧。电路板至少需要 4 层才能实现最佳布局 and 性能：一个接地层、一个电源层和两个信号层。

## 更多资料

Kester, Walt. *数据转换手册*第3章和第7章。ADI公司，2005。

指南MT-015：DAC基本架构II：二进制DAC。ADI公司。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-101：去耦技术。ADI公司。

基准电压源向导设计工具。

## 数据手册和评估板

AD5765数据手册。

AD5765评估板。

ADR420 数据手册。

## 修订历史

09 年 6 月—修订版 0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

### 连接/参考器件

AD5542	16 位串行输入电压输出 DAC
ADR421	2.5 V 精密基准电压源
AD8628	自稳零运算放大器

## 利用 16 位电压输出 DAC AD5542/AD5541、基准电压源 ADR421 和自稳零运算放大器 AD8628 实现高精度数模转换

### 电路功能与优势

本电路利用电压输出 DAC AD5542、基准电压源 ADR421BRZ 以及用作基准电压缓冲的自稳零运算放大器 AD8628，可实现精密数据转换。AD8628 基准电压缓冲可提供以前只有昂贵的自稳零或斩波稳定放大器才具有的特性优势。这些零漂移放大器采用 ADI 公司的电路拓扑结构，将低成本与高精度、低噪声特性融为一体。无需外部电容，而且与大多数斩波稳定放大器相关的数字开关噪声大大降低，因此这种放大器是基准电压缓冲的最佳选择。

本电路可实现精密、低功耗、电压输出数模转换。AD5542 有两种工作模式：缓冲模式和非缓冲模式。何种工作模式最佳由具体应用及其建立时间、输入阻抗、噪声等要求而定。可以根据直流精度或快速建立时间要求来选择输出缓冲放大器。如果要求 DAC 驱动 60 kΩ 以下的负载，则需要输出缓冲。DAC 的输出阻抗恒定，且与数字码无关，但为了将增益误差降至最小，输出放大器的输入阻抗应尽可能高。输出放大器还应具有 1 MHz 或更高的 3 dB 带宽。输出放大器给系统增加了另一个时间常数，因此会延长最终输出的建立时间。

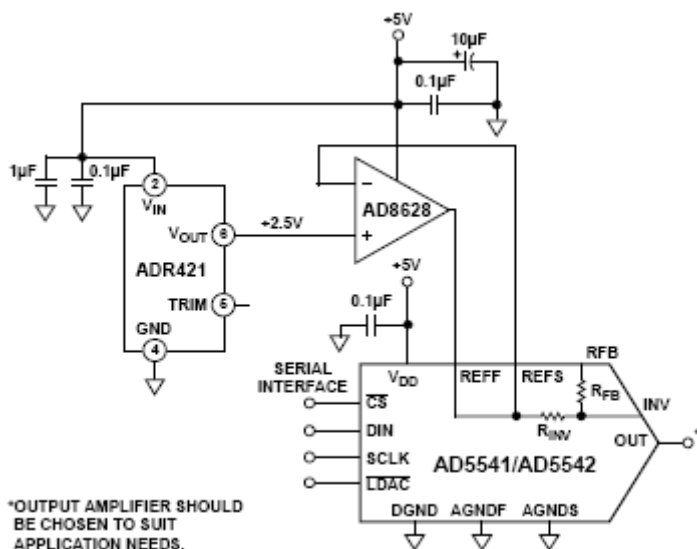


图 1. 精密 DAC 配置 (原理示意图)

Rev.0

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)

放大器的 3 dB 带宽越高, 则 DAC 与放大器组合的有效建立时间越快。电路中的所有器件均可采用+5 V 单电源供电。基准电压源 ADR421 的输入电压范围为 4.5 V 至 18 V。

### 电路描述

本电路采用电压输出 DAC AD5542, 提供 16 位、高精度性能。AD5541/AD5542 的 DAC 架构为分段 R-2R 电压模式 DAC。采用这种配置, 输出阻抗与数字码无关, 而基准电压源的输入阻抗则与数字码高度相关。因此, 基准电压缓冲的选择对于码相关基准电流的处理非常重要, 如果 DAC 基准电压缓冲不充分, 可能会导致线性误差。选择配合精密电压输出 DAC 使用的基准电压缓冲时, 运算放大器的失调电压、失调误差温度系数和噪声均是重要的选择标准。基准电压电路中的失调误差会引起 DAC 输出端产生增益误差。本电路采用零漂移、单电源、轨到轨输入/输出运算放大器 AD8628, 其失调电压为 1  $\mu\text{V}$ , 漂移低于 0.005  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , 噪声为 0.5  $\mu\text{V}$  峰峰值 (0.1 Hz 至 10 Hz), 因而适合需要尽可能减少误差源的应用。输出电压与基准电压相关, 如下式所示:

$$V_{OUT} = \frac{V_{REF} \times D}{2^N}$$

其中 D 为载入 DAC 寄存器的十进制数字字, N 为 DAC 的分辨率。对于 2.5 V 基准电压, 上述公式可简化为下式:

$$V_{OUT} = \frac{2.5 \times D}{65,536}$$

因此, 中间电平码对应的  $V_{OUT}$  为 1.25 V, 满量程码对应的  $V_{OUT}$  为 2.5 V。

LSB 大小为  $2.5 \text{ V}/65,536 = 38.1 \mu\text{V}$ 。

有一个普遍的误解认为自稳零放大器不可靠, 因为内部开关动作会导致交调项, 并使不需要的谐波未经滤除便进入到输出。以前的自稳零放大器采用自稳零或斩波稳定技术, 传统的自稳零技术使自稳零频率时的噪声能量较低, 但由于自稳零频带中混叠宽带噪声, 因此会造成低频噪声较高。斩波技术使低频噪声较低, 但斩波频率时的噪声能量较大。AD8628 系列采用已获专利的乒乓式配置, 同时使用自稳零和斩波技术, 可在斩波和自稳零频率获得较低的低频噪声以及较低的能量, 从而使大部分应用的信噪比达到最高, 且不需要额外滤波。内部斩波频率相对较高(15 kHz), 因此在仪器仪表和过程控制应用中, 可简化对滤波器的有效、无噪声、宽带宽要求。

测量结果显示: 在高精度、高性能系统中将 AD8628 用作基准电压缓冲, 可以实现高精度、低噪声以及最低高频交调失真(折合到输出端)性能。

积分非线性(INL)误差指实际 DAC 传递函数与理想传递函数的偏差, 用 LSB 表示。差分非线性(DNL)误差指实际步进大小与 1 LSB 的理想值之间的差异。图 1 所示电路在 16 位分辨率时的 INL 误差为  $\pm 1$  LSB, DNL 误差为  $\pm 1$  LSB。图 2 和图 3 显示了该电路的 INL 和 DNL 性能。

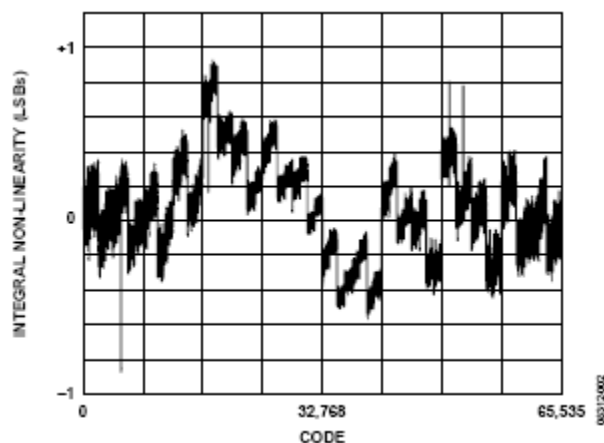


图 2. 积分非线性误差与输入码的关系

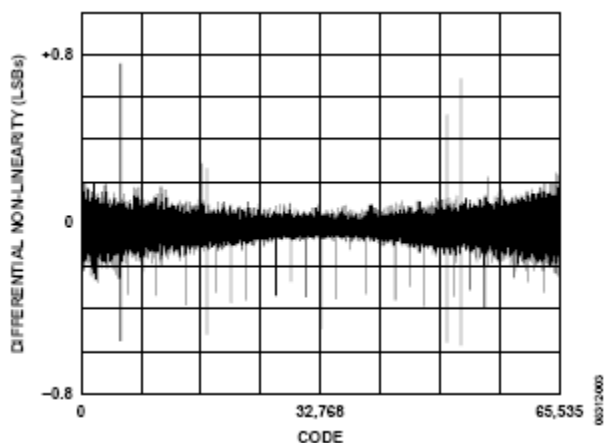


图 3. 差分非线性误差与输入码的关系

测得的失调误差和增益误差分别为  $10\ \mu\text{V}$  和  $170\ \mu\text{V}$ 。 $\pm 5$  LSB 的增益误差和  $\pm 1$  LSB 的零码误差均在  $38\ \mu\text{V}$  额定误差范围 ( $2.5\ \text{V}$  基准电压、环境温度) 内。

图 4 显示该电路的  $0.1\ \text{Hz}$  至  $10\ \text{Hz}$  噪声图。DAC 的输出  $V_{\text{OUT}}$  与  $0.1\ \text{Hz}$  至  $10\ \text{Hz}$  带宽滤波器的输入端相连, 滤波器之后接一个放大器, 其增益为  $10,000$ 。用一个示波器捕捉电压噪声, 观察到非常低的峰峰值电压  $57\ \text{mV}$  (相对于 DAC 输出为  $5.7\ \mu\text{V}$ )。

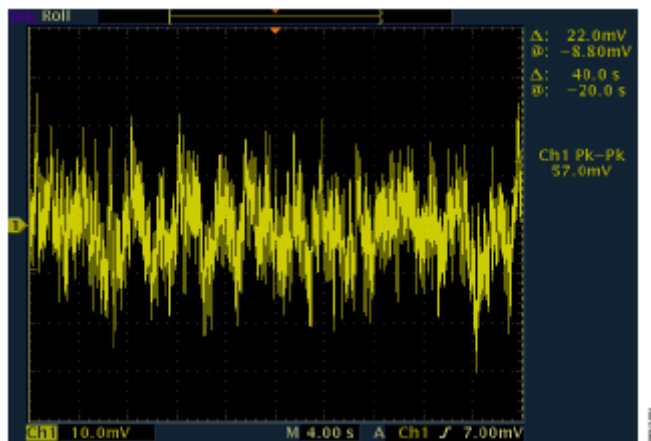


图 4.  $0.1\ \text{Hz}$  至  $10\ \text{Hz}$  输出噪声图; 满量程码载入 DAC  
( $1/f$  噪声 =  $57\ \text{mV}/10,000 = 5.7\ \mu\text{V}$ )

图 5 显示利用频谱分析仪得到的 DAC 输出, 扫频范围为  $100\ \text{Hz}$  至  $100\ \text{kHz}$ 。没有观察到明显的交调失真(IMD)项, 表明将 AD8628 等自稳零放大器用作基准电压缓冲是极佳选择。

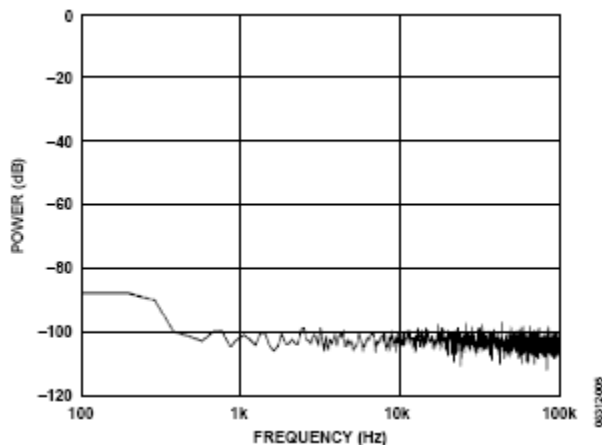


图 5. DAC 输出频谱密度图 (dB 折合到满量程)

在任何注重精度的电路中, 精心考虑电源和电路板上的接地回路布局有助于达成目标。包含该电路的印刷电路板 (PCB) 应具有单独的模拟和数字部分。如果该电路所在系统中有其它器件要求 AGND 至 DGND 连接, 则只能在一个点上连接。该接地点应尽可能靠近 AD5542。AD5542 的电源应使用  $10\ \mu\text{F}$  和  $0.1\ \mu\text{F}$  电容进行旁路。这些电容应尽可能靠近该器件,  $0.1\ \mu\text{F}$  电容最好正对着该器件。 $10\ \mu\text{F}$  电容为钽珠型电容。 $0.1\ \mu\text{F}$  电容必须具有低有效串联电阻 (ESR) 和低有效串联电感 (ESL), 普通陶瓷型电容通常具有这些特性。针对内部逻辑开关引起的瞬态电流所导致的高频, 该  $0.1\ \mu\text{F}$  电容可提供低阻抗接地路径。电源走线应尽可能宽, 以提供低阻抗路径, 并减小电源线路上的突波效应。时钟和其它快速开关数字信号应通过数字地屏蔽起来, 使之不受电路板的其它器件影响。

本电路必须构建在具有较大面积接地层的多层电路板上。为实现最佳性能, 必须采用适当的布局、接地和去耦技术 (请参考教程 MT-031 — “实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的迷团”, 以及教程 MT-101 — “去耦技术”)。

## 常见变化

AD8538 是另一款适合在该电路中缓冲基准电压的优秀自稳零运算放大器, 它具有低失调电压和超低偏置电流特性。 $2.5\ \text{V}$  输出 ADR421 可以用 ADR423 或 ADR434 代替, 二者均为低噪声基准电压源, 与 ADR421 同属一个基准电压源系列, 分别提供  $3\ \text{V}$  和  $4.096\ \text{V}$  输出。超低噪声基准电压源 ADR441 和 ADR431 也是合适的替代器件, 提供  $2.5\ \text{V}$  输出。请注意, 基准输入电压的大小受所选运算放大器的轨到轨输出电压能力限制。

本电路没有使用输出缓冲, 因为根据系统带宽和应用需要, 输出缓冲性能可以针对速度或直流精度进行优化。AD5661 将是出色的输出缓冲选择。这是一款单电源、 $5\ \text{V}$  至  $16\ \text{V}$  放大器, 采用 ADI 公司的 DigiTrim™ 专利技术实现低失调电压, 可提供低输入偏置电流和宽信号带宽。AD8605 或 AD8655 也是不错的选择。

**更多资料**

Kester, Walt。数据转换手册第3章和第7章。ADI公司，2005。

指南MT-015：DAC基本架构II：二进制DAC。ADI公司。

指南MT-016：DAC基本架构III：分段DAC，ADI公司。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-035：运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题。ADI公司。

指南MT-055：斩波稳定（自稳零）精密运算放大器。ADI公司。

指南MT-101：去耦技术。ADI公司。

基准电压源向导设计工具。

**数据手册和评估板**

AD5541数据手册。

AD5542数据手册。

AD8628数据手册。

ADR421 数据手册。

**修订历史**

09 年 8 月—修订版 0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0102](http://www.analog.com/cn/CN0102)。

## 连接/参考器件

AD7190	内置 PGA 的 4.8 kHz、超低噪声、24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC
ADP3303	5 V 低压差线性调节器
ADP3303	3.3 V 低压差线性调节器

## 利用内置 PGA 的 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7190 实现精密电子秤设计

### 电路功能与优势

本电路为电子秤系统，采用超低噪声、低漂移、内置 PGA 的 24 位  $\Sigma$ - $\Delta$  型 ADC AD7190。该器件将大多数系统构建模块置于芯片内，因此能够简化电子秤设计。

在 4.7 Hz 至 4.8 kHz 的完整输出数据速率范围内，AD7190 均能保持良好的性能，可用于以较低速度工作的电子秤系统，以及料斗秤等较高速电子秤系统。

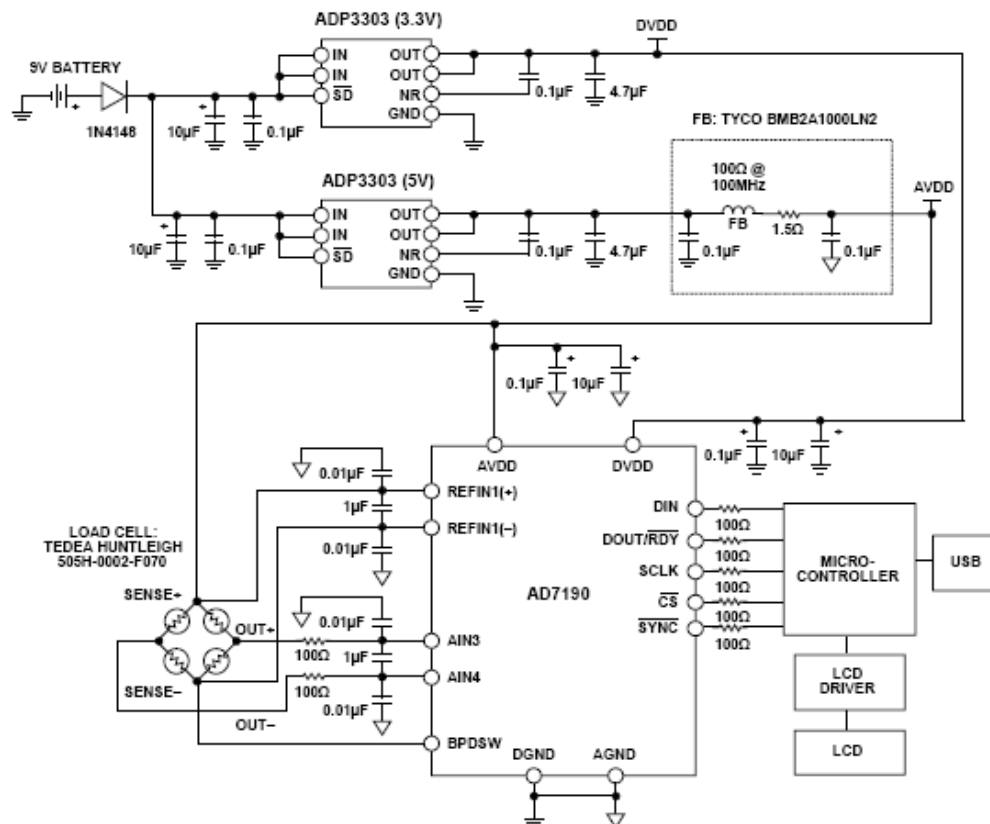


图 1. 软件校准的 RF 测量系统（原理示意图：未显示去耦和所有连接）

Rev.0

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700  
Fax: 781.461.3113  
[www.analog.com.cn](http://www.analog.com.cn)  
©2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



## 电路描述

AD7190 提供集成式电子秤解决方案,可以直接与称重传感器接口。只需在模拟输入端采用一些滤波器,在基准电压引脚上配置一些电容等外部元件,以满足电磁屏蔽(EMC)要求。来自称重传感器的低电平信号由 AD7190 的内置 PGA 放大。该 PGA 经过编程,以 128 的增益工作。AD7190 的转换结果送至微控制器,将数字信息转换为重量并显示在 LCD 上。

图 2 所示为实际的测试设置。为实现最佳系统性能,该测试设置使用一个 6 线式称重传感器。除激励、接地和 2 个输出连接外,6 线式称重传感器还有 2 个检测引脚。这些检测引脚分别与惠斯登电桥的高端和低端相连。因此,尽管线路电阻会引起压降,但仍能精确测量该电桥上产生的电压。此外,AD7190 具有差分模拟输入,接受差分基准电压。称重传感器差分 SENSE 线路与 AD7190 基准电压输入端相连,可构成一个比率式配置,既不受电源激励电压的低频变化影响,也无需精密基准电压源。如果采用 4 线式称重传感器,则不存在检测引脚,ADC 基准电压引脚将与激励电压和地相连。这种配置中,由于存在线路电阻,激励电压与 SENSE+ 之间将有压降,因此系统不是完全比率式。另外,低端上也会由线路电阻引起的压降。



图2.采用 AD7190 的电子秤系统设置

AD7190 具有单独的模拟电源引脚和数字电源引脚。模拟部分必须采用 5 V 电源供电。数字电源独立于模拟电源,可以为 2.7 V 至 5.25 V 范围内的任意电压。微控制器采用 3.3 V 电源。因此, DVDD 也采用 3.3 V 电源供电。这样就无需外部电平转换,从而可以简化 ADC 与微控制器之间的接口。

有多种方法可以为该电子秤系统供电,例如:利用主电源总线或利用电池(如图 1 所示)供电。一个 5 V 低噪声调节器用来确保 AD7190 和称重传感器获得低噪声电源。ADP3303 (5 V)是一款低噪声调节器,用来产生 5 V 电源。虚线框内显示的滤波器网络用来确保系统获得低噪声 AVDD。此外,按照 ADP3303 (5 V)数据手册的建议,在调节器输出端配有降噪电容。为优化电磁屏蔽性能,调节器输出先经过滤波,然后再给 AD7190 和称重传感器供电。3.3 V 数字电源可利用 ADP3303 (3.3 V)调节器产生。由于电源或接地层上的任何噪声都会给系统带来噪声,导致电路性能降低,因此必须用低噪声调节器产生供给 AD7190 和称重传感器的全部电源。

图 3 显示增益等于 128 时,AD7190 在不同输出数据速率下的均方根噪声。此图显示,均方根噪声随着输出数据速率增加而增加。不过,在整个输出数据速率范围内,该器件均能保持良好的噪声性能。

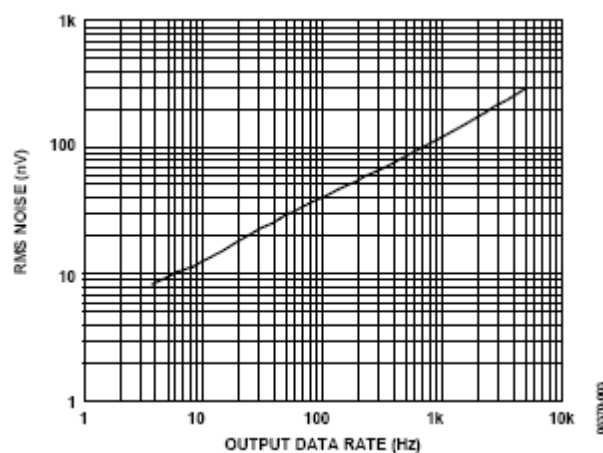


图3. 输入 = 900 MHz, ADC 使用 2.5 V 内部基准电压源

如果使用灵敏度为 2 mV/V 的 2 kg 称重传感器, 则激励电压为 5 V 时, 来自称重传感器的满量程信号为 10 mV。称重传感器具有相关失调电压或 TARE。此 TARE 的幅度最高可达称重传感器满量程输出信号的 50%。称重传感器还有最高可达满量程 $\pm 20\%$ 的增益误差。一些客户利用 DAC 来消除或抵消 TARE。如果 AD7190 采用 5 V 基准电压, 则增益设置为 128 且器件配置为双极性工作模式时, 其模拟输入范围等于 $\pm 40$  mV。相对于称重传感器的满量程信号(10 mV)而言, AD7190 的模拟输入范围较宽, 这有利于确保称重传感器的失调电压和增益误差不会使 ADC 前端过载。

当输出数据速率为 4.7 Hz 时, AD7190 的均方根噪声为 8.5 nV。无噪声采样数等于

$$\frac{10 \text{ mV}}{6.6 \times 8.5 \text{ nV}} = 178,250 \quad (1)$$

其中系数 6.6 用来将均方根电压转换为峰峰值电压。因此, 以克(g)为单位表示的分辨率等于

$$\frac{2 \text{ kg}}{178,250} = 0.01 \text{ g} \quad (2)$$

无噪声分辨率等于

$$\log_2(178,250) = \frac{\log_{10}(178,250)}{\log_{10}(2)} = 17.4 \text{ bits} \quad (3)$$

在实际操作中, 称重传感器本身会引入一定的噪声。AD7190 的漂移也会导致称重传感器发生一定的时间和温度漂移。为确定完整系统的精度, 可以将该电子秤通过 USB 连接器与 PC 相连, 然后利用 LabView 软件评估电子秤系统的性能。图 4 显示将 1 kg 重物置于称重传感器上并收集 500 次转换结果所测得的输出性能。软件计算出的系统噪声为 12 nV (均方根值) 和 88 nV (峰峰值), 相当于 113,600 无噪声采样数或 16.8 位无噪声码分辨率。

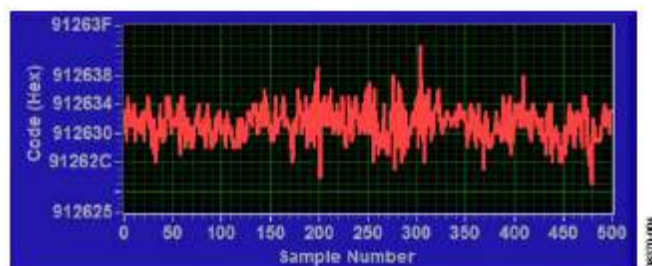


图 4. 500 次采样所测得的输出码, 显示出噪声的影响

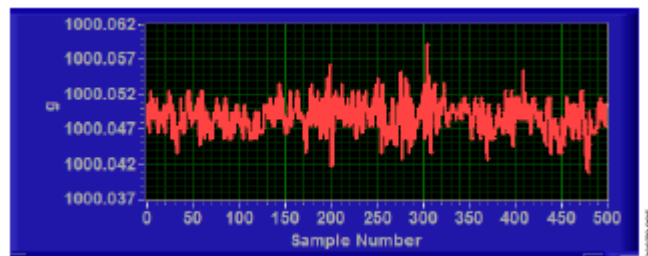


图 5. 500 次采样所测得的输出 (单位为克), 显示出噪声的影响

图 5 显示重量方面的性能。相对于 500 个码, 输出的峰峰值变化量为 0.02 克。因此, 该电子秤系统的精度达到 0.02 克。

上图所示为连接负荷传感器之后, 从 AD7190 回读得到的实际 (原始) 转换结果。在实际操作中, 电子秤系统会采用数字后置滤波器。在后置滤波器中另外执行均值计算会进一步提高无噪声采样数, 但数据速率会降低。

### 常见变化

注意: 本文的所有噪声规格均相对于 PGA 增益为 128 而言。

AD7190 是一款高精度 ADC, 适用于高端电子秤。其它合适的 ADC 有 [AD7192](#) 和 [AD7191](#)。AD7192 与 AD7190 引脚兼容, 但前者的均方根噪声略高。当输出数据速率均为 4.7 Hz 时, AD7192 的均方根噪声为 11 nV, AD7190 的均方根噪声为 8.5 nV。AD7191 是一款引脚可编程器件, 具有四种输出数据速率和四种增益设置。由于它具有引脚可编程能力, 并且功能较少, 因此易于使用。AD7191 的均方根噪声与 AD7192 相同。

[AD7799](#) 适用于中端电子秤。当输出数据速率为 4.17 Hz 时, 其均方根噪声为 27 nV。

[AD7798](#)、[AD7781](#) 和 [AD7780](#) 均适用于低端电子秤。AD7798 与 AD7799 的功能组合相同。在 4.17 Hz 时, 其均方根噪声为 40 nV。AD7780 和 AD7781 均有一路差分模拟输入, 并且引脚可编程, 输出数据速率可以为 10 Hz 和 17.6 Hz, 增益可设置为 1 或 128。当输出数据速率为 10 Hz 时, 均方根噪声为 44 nV。

与其它高精度电路一样, 必须采用适当的布局、接地和去耦技术。欲了解更多信息, 请参考教程 [MT-031](#)—“实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的迷团”, 以及教程 [MT-101](#)—“去耦技术”。

## 更多资料

Kester, Walt。数据转换手册第3章和第7章。ADI公司，2005。  
指南MT-015：DAC基本架构II：二进制DAC。ADI公司。  
指南MT-016：DAC基本架构III：分段DAC，ADI公司。  
指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。  
指南MT-035：运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题。ADI公司。  
指南MT-055：斩波稳定（自稳零）精密运算放大器。ADI公司。  
指南MT-101：去耦技术。ADI公司。  
基准电压源向导设计工具。

## 数据手册和评估板

AD7190数据手册  
AD7190评估板  
AD7191数据手册  
AD7192数据手册  
AD7780数据手册  
AD7781数据手册  
AD7798数据手册  
AD7799数据手册  
ADP3303 数据手册

## 修订历史

09 年 8 月—修订版 0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

Circuits from the Lab®参考设计是经过测试的参考设计, 有助于加速设计, 同时简化系统集成, 帮助并解决当今模拟、混合信号和RF设计挑战。如需更多信息和/或技术支持, 请访问 [www.analog.com/cn/CN0107](http://www.analog.com/cn/CN0107)。

## 连接/参考器件

AD7780	内置 PGA 的引脚可编程、低噪声、低功耗、24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC
ADP3303	3.3V 低压差线性调节器

## 利用内置 PGA 的 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7780 实现电子秤设计

### 电路功能与优势

本电路为采用 AD7780 构建的电子秤系统。AD7780 是一款 12 位可编程、低功耗、低漂移 24 位  $\Sigma$ - $\Delta$  型 ADC，内置 PGA，采用内部时钟。该器件将大多数系统构建模块置于芯片内，因此能够简化电子秤设计。该器件的典型功耗仅为 330  $\mu$ A，适合所有低功耗或电池供电应用。AD7780 还提供省电模式，不执行转换时，用户可以切断对桥式传感器的供电，并使该器件进入省电模式，从而延长电池使用时间。

### 电路描述

AD7780 提供一种集成式电子秤解决方案，可以直接与称重传感器接口。只需在模拟输入端用一些滤波器，在基准电压引脚上配置一些电容等外部元件，便可满足电磁屏蔽(EMC)要求。来自称重传感器的低电平信号由 AD7780 的内置 PGA 放大。该 PGA 经过编程，以 128 的增益工作。AD7780 的转换结果通过 USB 接口送至 PC，由 PC 将数字信息转换为重量。

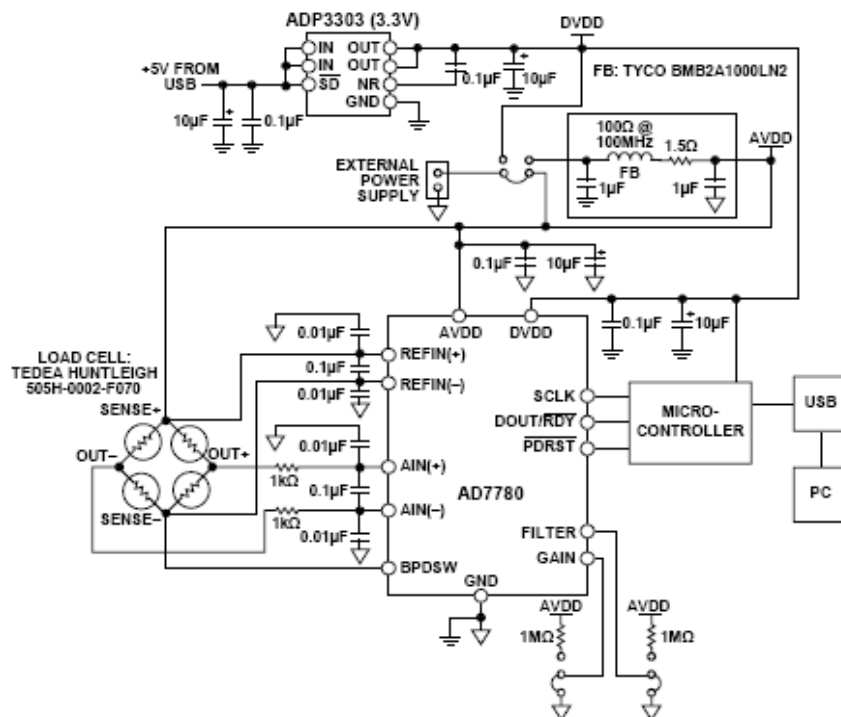


图1.采用AD7780的电子秤系统(原理示意图:未显示所有连接)

**Rev.0**

**"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.





图2.采用AD7780的电子秤系统设置

图2所示为实际的测试设置。为实现最佳系统性能，该测试设置使用一个6线式称重传感器。除激励、接地和2个输出连接外，6线式称重传感器还有2个检测引脚。这些检测引脚分别与惠斯登电桥的高端和低端相连。因此，尽管线路电阻会引起压降，但仍能精确测量该电桥上产生的电压。此外，AD7780具有一路差分模拟输入，接受差分基准电压。称重传感器差分 SENSE 线路与 AD7780 基准电压输入端相连，可构成一个比率式配置，不受电源激励电压的低频变化影响，如果采用4线式称重传感器，则不存在检测引脚，ADC基准电压引脚将与激励电压和地相连。这种配置中，由于存在线路电阻，激励电压与 SENSE+ 之间将有压降，因此系统不是完全比率式。另外，低端上也有线路电阻引起的压降。

AD7780 具有单独的模拟电源引脚和数字电源引脚。模拟电源和数字电源彼此独立，因此 AVDD 和 DVDD 可以处于不同的电位。微控制器采用 3.3 V 电源。因此，DVDD 也采用 3.3 V 电源供电。这样就无需外部电平转换，从而可以简化 ADC 与微控制器之间的接口。3.3 V 数字电源可利用 ADP3303 (3.3 V) 稳压器产生。

有多种方法可以为该电子秤系统供电，例如：利用主电源总线，或者利用 ADP3303 (3.3 V)。用 5 V 电压激励电子秤时，必须使用主电源总线。用 3.3 V 电压激励称重传感器时，可

以使用主电源总线或 ADP3303 (3.3 V)。ADP3303 (3.3 V) 是一款低噪声稳压器。此外，按照 ADP3303 (3.3 V) 数据手册的建议，在稳压器输出端配有降噪电容。为优化电磁屏蔽，稳压器输出先经过滤波，然后再给 AD7780 和称重传感器供电。由于电源或接地层上的任何噪声都会给系统带来噪声，导致电路性能降低，因此必须用低噪声稳压器产生供给 AD7780 和称重传感器的电源。

如果使用灵敏度为 2 mV/V 的 2 kg 称重传感器，则激励电压为 5 V 时，来自称重传感器的满量程信号为 10 mV。称重传感器具有相关失调电压或 TARE。此 TARE 的幅度最高可达称重传感器满量程输出信号的 50%。称重传感器还有最高可达满量程±20%的增益误差。一些客户利用 DAC 来消除或抵消 TARE。如果 AD7780 采用 5 V 基准电压，则增益设置为 128 时，其模拟输入范围等于±40 mV。相对于称重传感器的满量程信号(10 mV)而言，AD7780 的模拟输入范围较宽，这有利于确保称重传感器的失调电压和增益误差不会使 ADC 前端过载。

当输出数据速率为 10 Hz 时，AD7780 的均方根噪声为 49 nV。无噪声采样数等于

$$\frac{10 \text{ mV}}{6.6 \times 49 \text{ nV}} = 30,920 \quad (1)$$

其中系数 6.6 用来将均方根电压转换为峰峰值电压。

因此，以克(g)为单位表示的分辨率等于

$$\frac{2 \text{ kg}}{30,920} = 0.07 \text{ g} \quad (2)$$

无噪声分辨率等于

$$\log_2(30,920) = \frac{\log_{10}(30,920)}{\log_{10}(2)} = 14.9 \text{ bits} \quad (3)$$

在实际操作中，称重传感器本身会引入一定的噪声。AD7780 的漂移也会导致称重传感器发生一定的时间和温度漂移。为确定完整系统的精度，可以将该电子秤通过 USB 连接器与 PC 相连，然后利用 LabView 软件评估电子秤系统的性能。图3显示将 1 kg 重物置于称重传感器上，并收集 500 次转换结果所测得的输出性能（使用 5 V 激励电压）。软件计算的系统噪声为 50 nV（均方根值），相当于 30,300 无噪声采样数或 14.9 位无噪声码分辨率。

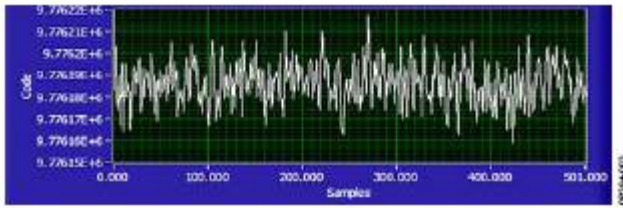


图 3. 500 次采样所测得的输出码，体现出噪声的影响

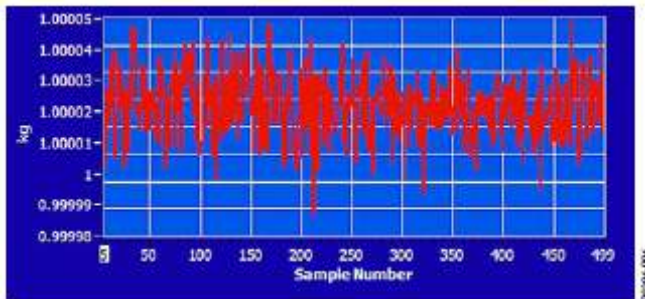


图 4. 500 次采样所测得的输出（单位为千克），体现出噪声的影响

图 4 显示重量方面的性能。相对于 500 个码，输出的峰峰值变化量为 0.075 克。因此，该电子秤系统的精度达到 0.075 克。上图所示为连接称重传感器之后，从 AD7780 回读得到的实际（原始）转换结果。在实际操作中，电子秤系统会采用数字后置滤波器。在后置滤波器中另外执行均值计算会进一步提高采样数，但数据速率会降低。

### 常见变化

注意：本文的噪声规格相对于 PGA 增益为 128 而言。

AD7780 是一款低噪声、低功耗 ADC，适合电子秤设计。其它合适的 ADC 有 [AD7798](#) 和 [AD7781](#)。AD7781 与 AD7780 的功能组合相同，但前者为 20 位 ADC。AD7798 的输出数据速率选择范围更宽。在 4.17 Hz 时，其均方根噪声为 40 nV。[AD7799](#) 适用于中端电子秤。当输出数据速率为 4.17 Hz 时，其均方根噪声为 27 nV。

[AD7190](#)、[AD7192](#) 和 [AD7191](#) 适用于精密电子秤设计。当输出数据速率设置为 4.7 Hz 时，AD7190 的均方根噪声为 8.5 nV。它也具有较宽的输出数据速率范围。它的工作速率最高可达 4.8 kHz，同时仍能保持良好的性能。AD7192 与 AD7190 引脚兼容，但前者的均方根噪声略高。当输出数据速率为 4.7 Hz 时，AD7192 的均方根噪声为 11 nV。AD7191 是一款引脚

可编程器件，具有四种输出数据速率和四种增益设置。由于它具有引脚可编程能力，并且功能较少，因此易于使用。AD7191 的均方根噪声与 AD7192 相同。

与其它高精度电路一样，必须采用适当的布局、接地和去耦技术。欲了解更多信息，请参考教程 [MT-031](#)—“实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的迷团”，以及教程 [MT-101](#)—“去耦技术”。

### 更多资料

Kester, Walt. 1999年。《传感器信号调理》。ADI公司。第2、3、4节。

指南MT-004: ADC输入噪声面面观——无噪声是利还是弊？  
ADI公司。

指南MT-022: ADC架构III:  $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC基础，ADI公司。

指南MT-023: ADC架构IV:  $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的高级概念和应用，  
ADI公司。

指南MT-031: 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND  
的迷团。ADI公司。

指南 MT-101: 去耦技术。ADI 公司。

### 数据手册和评估板

[AD7780数据手册](#)

[AD7780评估板](#)

[AD7781数据手册](#)

[AD7190数据手册](#)

[AD7191数据手册](#)

[AD7192数据手册](#)

[AD7780数据手册](#)

[AD7798数据手册](#)

[AD7799数据手册](#)

[ADP3303 数据手册](#)

### 修订历史

09 年 10 月—修订版 0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0108](http://www.analog.com/cn/CN0108)。

## 连接/参考器件

AD7781	内置 PGA 的引脚可编程、低噪声、低功耗、20 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC
ADP3303	3.3 V 低压差线性调节器

## 利用内置 PGA 的 20 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7781 实现电子秤设计

### 电路功能与优势

本电路为采用 AD7781 构建的电子秤系统。AD7781 是一款引脚可编程、低功耗、低漂移 20 位  $\Sigma$ - $\Delta$  转换器，内置 PGA，采用内部时钟。该器件将大多数系统构建模块置于芯片内，因此能够简化电子秤设计。该器件的典型功耗仅为 330  $\mu$ A，适合所有低功耗或电池供电应用。AD7781 还提供省电模式，不执行转换时，用户可以切断对桥式传感器的供电，并使该器件进入省电模式，从而延长电池使用时间。

### 电路描述

AD7781 提供一种集成式电子秤解决方案，可以直接与称重传感器接口。只需在模拟输入端用一些滤波器，在基准电压引脚上配置一些电容等外部元件，便可满足电磁屏蔽(EMC)要求。来自称重传感器的低电平信号由 AD7781 的内置 PGA 放大。该 PGA 经过编程，以 128 的增益工作。AD7781 的转换结果通过 USB 接口送至 PC，由 PC 将数字信息转换为重量。

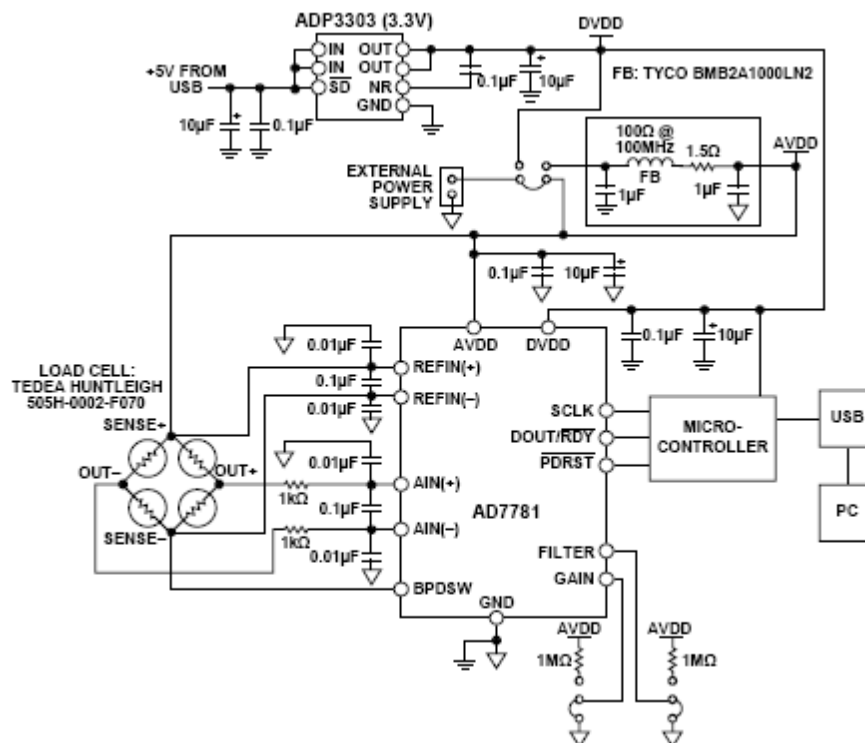


图 1. 采用 AD7781 的电子秤系统 (原理示意图: 未显示所有连接)

Rev.0

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700  
Fax: 781.461.3113  
[www.analog.com.cn](http://www.analog.com.cn)  
©2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



图2.采用 AD7781 的电子秤系统设置

图 2 所示为实际的测试设置。为实现最佳系统性能，该测试设置使用一个 6 线式称重传感器。除激励、接地和 2 个输出连接外，6 线式称重传感器还有 2 个检测引脚。这些检测引脚分别与惠斯登电桥的高端和低端相连。因此，尽管线路电阻会引起压降，但仍能精确测量该电桥上产生的电压。此外，AD7781 具有一路差分模拟输入，接受差分基准电压。称重传感器差分 SENSE 线路与 AD7781 基准电压输入端相连，可构成一个比率式配置，不受电源激励电压的低频变化影响。如果采用 4 线式称重传感器，则不存在检测引脚，ADC 基准电压引脚将与激励电压和地相连。这种配置中，由于存在线路电阻，激励电压与 SENSE+ 之间将有压降，因此系统不是完全比率式。另外，低端上也会有线路电阻引起的压降。

AD7781 具有单独的模拟电源引脚和数字电源引脚。模拟电源和数字电源彼此独立，因此 AVDD 和 DVDD 可以处于不同的电位。微控制器采用 3.3 V 电源。因此，DVDD 也采用 3.3 V 电源供电。这样就无需外部电平转换，从而可以简化 ADC 与微控制器之间的接口。3.3 V 数字电源可利用 ADP3303 (3.3 V) 稳压器产生。

有多种方法可以为该电子秤系统供电，例如：利用主电源总线，或者利用 ADP3303 (3.3 V)。用 5 V 电压激励电子秤时，

必须使用主电源总线。用 3.3 V 电压激励称重传感器时，可以使用主电源总线或 ADP3303 (3.3 V)。ADP3303 (3.3 V) 是一款低噪声稳压器。此外，按照 ADP3303 (3.3 V) 数据手册的建议，在稳压器输出端配有降噪电容。为优化电磁屏蔽，稳压器输出先经过滤波，然后再给 AD7781 和称重传感器供电。由于电源或接地层上的任何噪声都会给系统带来噪声，导致电路性能降低，因此必须用低噪声稳压器产生供给 AD7781 和称重传感器的电源。

如果使用灵敏度为 2 mV/V 的 2 kg 称重传感器，则激励电压为 5 V 时，来自称重传感器的满量程信号为 10 mV。称重传感器具有相关失调电压或 TARE。此 TARE 的幅度最高可达称重传感器满量程输出信号的 50%。称重传感器还有最高可达满量程±20%的增益误差。一些客户利用 DAC 来消除或抵消 TARE。如果 AD7781 采用 5 V 基准电压，则增益设置为 128 时，其模拟输入范围等于±40 mV。相对于称重传感器的满量程信号(10 mV)而言，AD7781 的模拟输入范围较宽，这有利于确保称重传感器的失调电压和增益误差不会使 ADC 前端过载。

当输出数据速率为 10 Hz 时，AD7781 (C 级) 的均方根噪声为 49 nV。采样数等于

$$\frac{10 \text{ mV}}{6.6 \times 49 \text{ nV}} = 30,920 \quad (1)$$

其中系数 6.6 用来将均方根电压转换为峰峰值电压。

以克(g)为单位表示的分辨率等于

$$\frac{2 \text{ kg}}{30,920} = 0.07 \text{ g} \quad (2)$$

无噪声分辨率等于

$$\log_2(30,920) = \frac{\log_{10}(30,920)}{\log_{10}(2)} = 14.9 \text{ bits} \quad (3)$$

在实际操作中，称重传感器本身会引入一定的噪声。AD7781 的漂移也会导致称重传感器发生一定的时间和温度漂移。为确定完整系统的精度，可以将该电子秤通过 USB 连接器与 PC 相连，然后利用 LabView 软件评估电子秤系统的性能。图 3 显示将 1 kg 重物置于称重传感器上，并收集 500 次转换结果所测得的输出性能（使用 5 V 激励电压）。软件计算的系统噪声为 50 nV（均方根值），相当于 30,300 无噪声采样数或 14.9 位无噪声码分辨率。

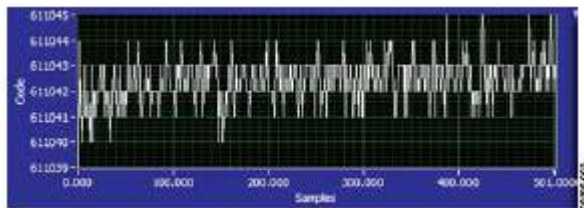


图 3. 500 次采样所测得的输出码，体现出噪声的影响

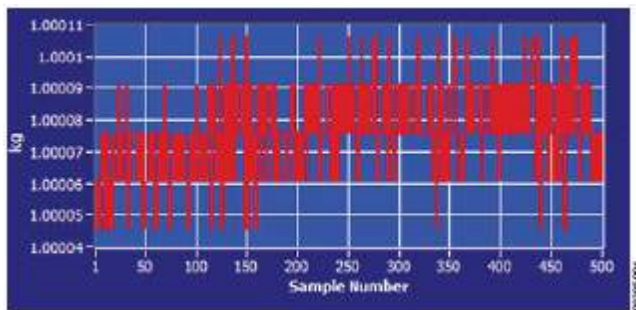


图 4. 500 次采样所测得的输出（单位为千克），体现出噪声的影响

图 4 显示重量方面的性能。相对于 500 个码，输出的峰峰值变化量为 0.075 克。因此，该电子秤系统的精度达到 0.075 克。上图所示为连接称重传感器之后，从 AD7781 回读得到的实际（原始）转换结果。在实际操作中，电子秤系统会采用数字后置滤波器。在后置滤波器中另外执行均值计算会进一步提高无噪声采样数，但数据速率会降低。

### 常见变化

注意：本文的噪声规格相对于 PGA 增益为 128 而言。

AD7781 是一款低噪声、低功耗 ADC，适合电子秤设计。其它合适的 ADC 有 [AD7798](#) 和 [AD7780](#)。AD7780 与 AD7781 的功能组合相同，但前者为 24 位 ADC。AD7798 的输出数据速率选择范围更宽。在 4.17 Hz 时，其均方根噪声为 40 nV。

[AD7799](#) 适用于中端电子秤。当输出数据速率为 4.17 Hz 时，其均方根噪声为 27 nV。

[AD7190](#)、[AD7192](#) 和 [AD7191](#) 适用于精密电子秤设计。当输出数据速率设置为 4.7 Hz 时，AD7190 的均方根噪声为 8.5 nV。它也具有较宽的输出数据速率范围。它的工作速率最高可达 4.8 kHz，同时仍能保持良好的性能。AD7192 与 AD7190 引脚兼容，但前者的均方根噪声略高。当输出数据速率为 4.7 Hz 时，AD7192 的均方根噪声为 11 nV。AD7191 是一款引脚

可编程器件，具有四种输出数据速率和四种增益设置。由于它具有引脚可编程能力，并且功能较少，因此易于使用。AD7191 的均方根噪声与 AD7192 相同。

与其它高精度电路一样，必须采用适当的布局、接地和去耦技术。欲了解更多信息，请参考教程 [MT-031—“实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的迷团”](#)，以及教程 [MT-101—“去耦技术”](#)。

### 更多资料

Kester, Walt. 1999年。《传感器信号调理》。ADI公司。第2、3、4节。

指南MT-004: ADC输入噪声面面观——无噪声是利还是弊？ADI公司。

指南MT-022: ADC架构III:  $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC基础，ADI公司。

指南MT-023: ADC架构IV:  $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的高级概念和应用，ADI公司。

指南MT-031: 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的迷团。ADI公司。

指南 MT-101: 去耦技术。ADI 公司。

### 数据手册和评估板

[AD7190数据手册](#)

[AD7191数据手册](#)

[AD7192数据手册](#)

[AD7780数据手册](#)。

[AD7781数据手册](#)

[AD7781评估板](#)

[AD7798数据手册](#)

[AD7799数据手册](#)

[ADP3303 数据手册](#)

### 修订历史

09 年 10 月—修订版 0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



### 连接/参考器件

AD9958/ AD9858	500 MSPS/1 GSPS 直接数字频率合成器(DDS)
AD9515	时钟分配 IC 和引脚可编程微型分频器
AD6645	14 位、80 MSPS/105 MSPS ADC

## 利用 500 MSPS/1GSPS DDS AD9958/AD9858 和时钟分配 IC AD9515 实现用于高性能 ADC 的低抖动采样时钟发生器

### 电路功能与优势

本电路采用一个具有 sub-Hz 调谐分辨率的直接数字频率合成器(DDS)，作为高性能 ADC 的低抖动采样时钟源。AD9515 时钟分配 IC 向 ADC 提供 PECL 逻辑电平。不过，利用 AD9515 的内部分频器特性，DDS 也可在 AD9515 前端以较高频率工作，有效提高输入压摆率。AD9515 输入方波电路中较高的压摆率有助于降低时钟路径中的宽带抖动。

ADC 采样时钟的抖动会降低总信噪比(SNR)，二者的关系如公式 1 所示：

$$SNR = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{2\pi f t_j} \right) \quad (1)$$

其中 f 为满量程模拟输入频率，t<sub>j</sub> 为均方根抖动。公式 1 中的“SNR”仅由时钟抖动决定，与 ADC 的分辨率无关。

以下数据证明 DDS 在时钟应用中可实现低抖动。有关公式 1 及如何用于评估 ADC 采样时钟抖动特性的更多信息，请参考应用笔记 AN-501。

### 电路描述

图 1 中的电路配置显示，基于 DDS 的时钟发生器由一个 DDS 及后置的重构滤波器和 AD9515 时钟分配 IC 组成，它用于为模数转换器(ADC)提供采样时钟。DDS 采样时钟由 Rohde & Schwarz SMA 信号发生器产生。测量抖动时，由 DDS 和 AD9515 产生的时钟作为高性能、14 位、80 MSPS/105 MSPS ADC AD6645 的采样时钟。ADC 的模拟输入信号是经过滤波

的 170.3 MHz 正弦波，由低抖动 Wenzel 晶体振荡器 ([www.wenzel.com](http://www.wenzel.com)) 产生。数据由两个不同 DDS 提供：AD9958 (500 MSPS)和 AD9858 (1 GSPS)。

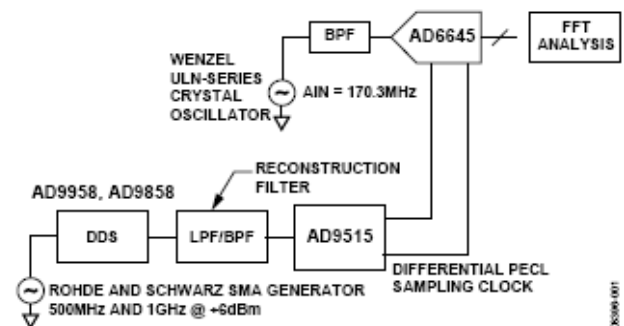


图 1.基于 DDS 的 ADC 采样时钟发生器 (原理示意图)

通过评估 ADC 的差分非线性和谐噪声贡献，然后应用基于 DDS 的时钟并测量 ADC SNR，便可获得基于 DDS 时钟所增加的抖动。有关测量设置和抖动计算的更多详细信息，请参考应用笔记 AN-823。另外，也可参考应用笔记 AN-837，其中说明如何设计具有最佳阻带性能的 DAC 重构滤波器。

表 1 列出了 AD9958 的测试结果数据。这些数据证实，提高 DDS 输出频率或压摆率以及减小 DDS 输出滤波器通带，可以实现更佳的抖动性能。表 2 列出了 AD9858 与 5%带通滤波器、225 MHz 低通滤波器在各种 DDS 输出功率水平时的测量结果。正如所预期的，提高功率和降低带宽可以实现低抖动。利用 5%带通滤波器，可衰减 DAC 的大部分杂散。这种情况下，抖动在更大程度上取决于 DAC 输出与限幅器输入之间的噪声耦合，抖动降低与压摆率提高之间的高度相关性证明了这一点。请注意，利用 AD9858 电路，就可以实现均方根抖动值始终低于 1 ps。

Rev.0

“Circuits from the Lab” 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 “Circuit from the Lab”. (Continued on last page)

为达到上述性能水平，这些电路必须构建在具有较大面积接地层的多层印刷电路板上，并采用适当的接地、布局和去耦技术（请参考[教程 MT-031—“实现数据转换器的接地并解开](#)

[AGND 和 DGND 的迷团](#)”，以及[教程 MT-101—“去耦技术”](#)）。有关更多指导信息，请参考 AD9958、AD9858、AD9515 和 AD6645 的评估板文档。

**表 1：AD9958 和 AD9515 的抖动响应与输出频率、功率、频率、滤波器带宽的关系**

产品	DDS 采样速率(MHz)	DDS 输出频率(MHz)	DDS 输出功率(dBm)	DDS 重构滤波器(MHz)	AD9515 分频器输出设置	AD9515 输出频率(MHz)	均方根抖动(ps)
AD9958/AD9515	500	38.88	-3.6	200 LPF	1	38.88	4.1
AD9958/AD9515	500	38.88	-3.6	200 LPF	2	19.44	4.1
AD9958/AD9515	500	38.88	-4.7	47 LPF	1	38.88	2.4
AD9958/AD9515	500	38.88	-4.7	47 LPF	2	19.44	2.4
AD9958/AD9515	500	38.88	-3.3	5% BPF	1	38.88	1.5
AD9958/AD9515	500	38.88	-3.3	5% BPF	2	19.44	1.5
AD9958/AD9515	500	77.76	-3.8	200 LPF	1	77.76	2.5
AD9958/AD9515	500	77.76	-3.8	200 LPF	2, 4	38.88, 19.44	2.5
AD9958/AD9515	500	77.76	-4.9	85 LPF	1	77.76	1.5
AD9958/AD9515	500	77.76	-4.9	85 LPF	2, 4	38.88, 19.44	1.5
AD9958/AD9515	500	77.76	-3.8	5% BPF	1	77.76	1.1
AD9958/AD9515	500	77.76	-3.8	5% BPF	2, 4	38.88, 19.44	1.1
AD9958/AD9515	500	155.52	-5.5	200 LPF	2	77.76	1.5
AD9958/AD9515	500	155.52	-5.5	200 LPF	4, 8	38.88, 19.44	1.5
AD9958/AD9515	500	155.52	-5.6	5% BPF	2	77.76	0.68
AD9958/AD9515	500	155.52	-5.6	5% BPF	4, 8	38.88, 19.44	0.68

**表 2：AD9858 和 AD9515 的抖动响应与输出频率、功率、频率、滤波器带宽的关系**

产品	DDS 采样速率(MHz)	DDS 输出频率(MHz)	DDS 输出功率(dBm)	DDS 重构滤波器(MHz)	AD9515 分频器输出设置	AD9515 输出频率(MHz)	均方根抖动(ps)
AD9858/AD9515	1000	155.52	+7.7	225 LPF	2	77.76	0.56
AD9858/AD9515	1000	155.52	+7.7	225 LPF	4, 8	38.88, 19.44	0.56
AD9858/AD9515	1000	155.52	+7.7	5% BPF	2	77.76	0.33
AD9858/AD9515	1000	155.52	+7.7	5% BPF	4, 8	38.88, 19.44	0.33
AD9858/AD9515	1000	155.52	+2.6	225 LPF	2	77.76	0.63
AD9858/AD9515	1000	155.52	+2.6	225 LPF	4, 8	38.88, 19.44	0.63
AD9858/AD9515	1000	155.52	+1.1	5% BPF	2	77.76	0.42
AD9858/AD9515	1000	155.52	+1.1	5% BPF	4, 8	38.88, 19.44	0.42
AD9858/AD9515	1000	155.52	-3.2	225 LPF	2	77.76	0.73
AD9858/AD9515	1000	155.52	-3.2	225 LPF	4, 8	38.88, 19.44	0.73
AD9858/AD9515	1000	155.52	-4.6	5% BPF	2	77.76	0.64
AD9858/AD9515	1000	155.52	-4.6	5% BPF	4, 8	38.88, 19.44	0.64

## 常见变化

ADI 公司提供各种直接数字频率合成器、时钟分配芯片和时钟缓冲器，用来构建基于 DDS 的时钟发生器。欲了解更多信息，请访问 [www.analog.com/dds](http://www.analog.com/dds) 和 [www.analog.com/clock](http://www.analog.com/clock)。

## 更多资料

应用笔记AN-501：*孔径不确定度与ADC系统性能*。ADI公司。

应用笔记AN-823：*时钟应用中的直接数字频率合成器*。ADI公司。

应用笔记AN-837：*基于DDS的时钟抖动性能与DAC重构滤波器性能的关系*。ADI公司。

Kester, Walt. 2005年。*数据转换手册*。ADI公司。第6章和第7章。

Kester, Walt. 2006年。*高速系统应用*。ADI公司。第2章，“优化数据转换器接口”。

Kester, Walt. 2006年。*高速系统应用*。ADI公司。第3章，“DAC、DDS、PLL和时钟分配。”

指南MT-031：*实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团*。ADI公司。

指南MT-101：*去耦技术*。ADI公司。

## 数据手册和评估板

[AD6645数据手册](#)。

[AD9515数据手册](#)。

[AD9858数据手册](#)。

[AD9958数据手册](#)。

[AD6645评估板](#)。

[AD9515评估板](#)。

[AD9858评估板](#)。

[AD9958 评估板](#)。

## 修订历史

09年7月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



AD5292	10 位、1%电阻容差数字电位计
OP184	轨到轨输入和输出、低噪声、高压摆率运算放大器

## 利用数字电位计 AD5292 和运算放大器 OP184 构建可变增益同相放大器

### 电路功能与优势

本电路采用 DigiPOT+ 系列数字电位计 AD5292 和运算放大器 OP184，提供一种低成本、高电压、可变增益同相放大器。该电路提供 1024 种不同增益，可通过 SPI 兼容型串行数字接口控制。AD5292 具有 ±1% 电阻容差性能，可在整个电阻范围内提供低增益误差，如图 2 所示。

本电路支持轨到轨输入和输出，既可采用 +30 V 单电源供电，也可采用 ±15 V 双电源供电，并且能够提供最高 ±6.5 mA 的输出电流。

此外，AD5292 内置一个 20 次可编程存储器，可以在上电时自定义增益设置。

本电路具有高精度、低噪声和低总谐波失真 (THD) 等特性，非常适合信号仪表调理应用。

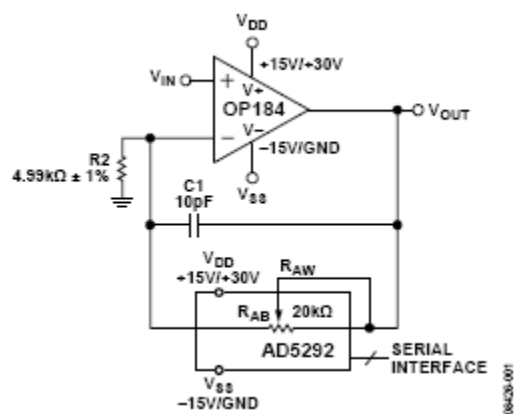


图 1. 可变增益同相放大器的原理示意图 (未显示去耦和所有连接)

### 电路描述

本电路采用数字电位计 AD5292 和运算放大器 OP184，提供一种低成本、可变增益同相放大器。

输入信号  $V_{IN}$  由 OP184 放大。该运算放大器具有低噪声、高压摆率以及轨到轨输入和输出特性。

最大电路增益由公式 1 确定。

$$G = 1 + \frac{R_{AB}}{R_2} \rightarrow R_2 = \frac{R_{AB}}{G - 1} \quad (1)$$

流过 AD5292 的最大电流为 ±3 mA，由此可根据电路增益限定最大输入电压  $V_{IN}$ ，如公式 2 所示。

$$|V_{IN}| \leq 0.003 \times R_2 \quad (2)$$

当与  $V_{IN}$  相连的输入信号高于公式 2 所确定的理论最大值时，应增大  $R_2$ ，并利用公式 1 重新计算新增益。

AD5292 的 ±1% 内部电阻容差可确保增益误差较低，如图 2 所示。

电路增益计算公式为：

$$G = 1 + \frac{(1024 - D) \times R_{AB} / 1024}{R_2} \quad (3)$$

其中 D 为载入该数字电位计的码。

Rev.B

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)

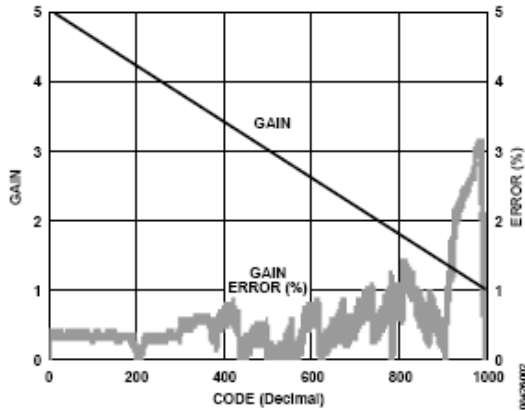


图2.增益和增益误差与十进制码的关系

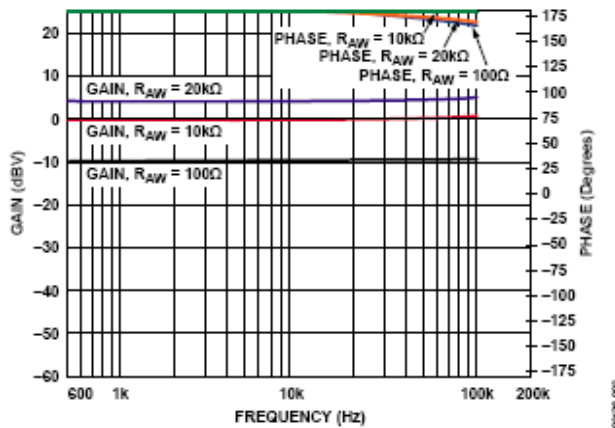


图3.输入为交流信号时增益和相位与频率的关系

当电路输入为交流信号时，数字电位计的寄生电容可能会导致输出发生不良振荡。不过，在反相器输入与其输出之间连接一个小电容  $C_1$  便可避免这种情况。对于图3所示的增益和相位图，所用电容值为 10 pF。

对本电路进行简单修改便可提供对数增益功能，如图4所示。这种情况下，该数字电位计配置为比率式。

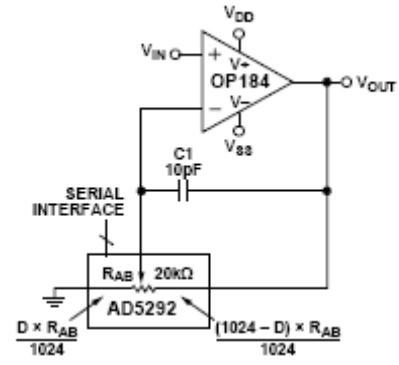


图4.对数增益电路

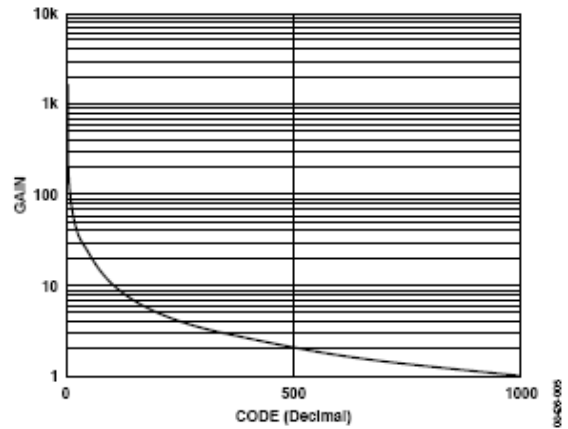


图5.对数增益函数

电路增益由公式4确定：

$$G = 1 + \frac{(1024 - D)}{D} = \frac{1024}{D} \quad (4)$$

其中  $D$  为载入该数字电位计的码。增益与码的关系如图5所示。

AD5292 具有一个 20 次可编程存储器，可以在上电时将输出电压预设为特定值。

为了使本文所讨论的电路达到理想的性能，必须采用出色的布局、接地和去耦技术（请参考教程 MT-031—“实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的迷团”，以及教程 MT-101—“去耦技术”）。至少应采用四层 PCB：一层为接地层，一层为电源层，另两层为信号层。

## 常见变化

AD5291 (8 位、内置 20 次可编程上电存储器) 和 AD5293 (10 位、无上电存储器) 均为 $\pm 1\%$ 容差数字电位计, 同样适合本应用。

## 更多资料

指南MT-031: *实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团*。ADI公司。

指南MT-032: *理想的电压反馈型(VFB)运算放大器*, ADI公司。

指南MT-087: *基准电压源*, ADI公司。

指南MT-091: *数字电位计*, ADI公司。

指南MT-101: *去耦技术*。ADI公司。

## 数据手册和评估板

AD5291数据手册。

AD5292数据手册。

AD5292评估板。

AD5293数据手册。

OP184 数据手册。

## 修订历史

### 10年3月—修订版A至修订版B

更改电路功能和优势部分 ..... 1

### 09年12月—修订版0至修订版A

校正商标 ..... 1

### 09 年 8 月—修订版 0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0114](http://www.analog.com/cn/CN0114)。

## 连接/参考器件

AD5292	10 位、1%电阻容差数字电位计
AD8221	精密仪表放大器

## 利用数字电位计 AD5292 和仪表放大器 AD8221 构建低成本、高电压、可编程增益仪表放大器

### 电路功能与优势

图 1 所示电路采用 digiPOT+ 系列数字电位计 AD5292 和仪表放大器 AD8221，提供一种低成本、高电压、可编程增益仪表放大器。

该电路提供 1,024 种不同增益设置，可通过 SPI 数字接口控制。AD5292 具有 ±1% 电阻容差性能，可在整个电阻范围内提供低增益误差，如图 2 所示。

本电路提供一种高性能仪表放大器，在业界同类产品中，具有相对于频率的最高共模抑制比 (CMRR) 和动态可编程增益，既可采用 +30 V 单电源供电，也可采用 ±15 V 双电源供电。此外，AD5292 内置一个 20 次可编程存储器，用户可以在上电时自定义仪表放大器增益。

本电路具有高精度、低噪声和高增益特性，非常适合信号仪表调理、精密数据采集、生物医学分析和航空航天仪表等应用。

### 电路描述

本电路采用数字电位计 AD5292 和仪表放大器 AD8221，提供一种总成本较低的高电压、可编程增益仪表放大器。

差分输入信号 +IN 和 -IN 由 AD8221 放大。该仪表放大器具有高精度、低噪声、高 CMRR 和高压摆率特性。

最大电路增益由公式 1 确定，其中  $R_{AW\_MIN}$  为 AD5292 在可变电阻器模式下的游标电阻，表示增益设置电阻的最小值 (100 Ω)。

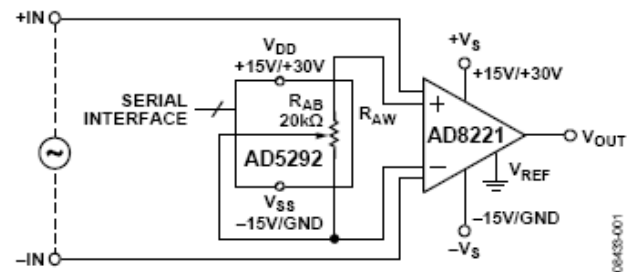


图 1. 可编程增益仪表放大器 (原理示意图；未显示去耦和所有连接)

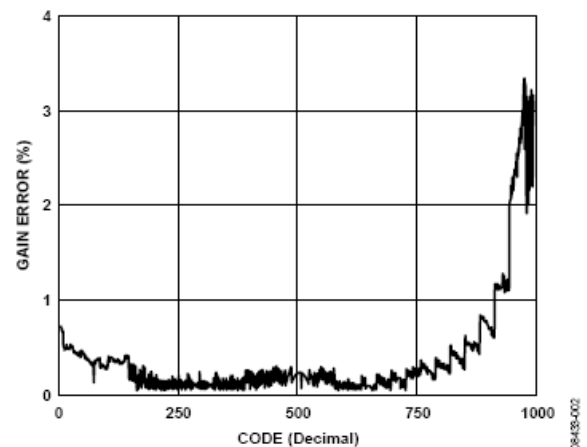


图 2. 增益误差与码的关系

$$G = 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_{AB}} \leq 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_{AW\_MIN}} \leq 500 \quad (1)$$

任意特定 AD5292 电阻的电路增益计算公式为：

$$G = 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{(1024 - D) \times R_{AB} / 1024} \quad (2)$$

Rev.A

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)

此公式与 D（十进制码）的函数关系图如图 3 所示。

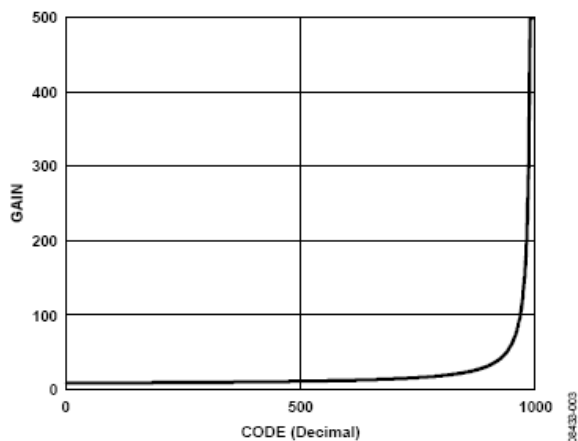


图 3.增益与十进制码的关系

流过 AD5292 的最大容许电流为  $\pm 3$  mA，由此限制与差分输入电压呈函数关系的容许电路增益。

公式 3 显示增益上限与差分输入电压  $V_{IN}$  呈函数关系。将  $R_{AB} = V_{IN} / 3$  mA 代入公式 1 便得到此公式，其函数关系图如图 5 所示。

$$G \leq 1 + \frac{148}{V_{IN}} \quad (3)$$

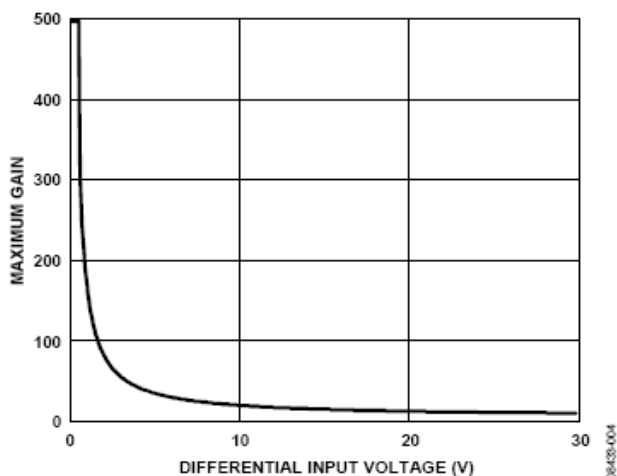


图 4.容许增益与差分输入电压的关系

公式 1 限定最大电路增益为 500。通过公式 2 求解 D 可得到公式 4，它计算在不超过电流限制的情况下 AD5292 的最小容许电阻（用数字码表示）。

$$D \geq 1024 - \left( \frac{49.4k\Omega \times 1024}{R_{AB} \times (G-1)} \right) \quad (4)$$

其中 D 为载入数字电位计的码, G 为公式 3 算出的最大增益。当电路输入为交流信号时, 数字电位计的寄生电容可能会导致 AD8221 的最大带宽降低。增益和相位图如图 5 所示。

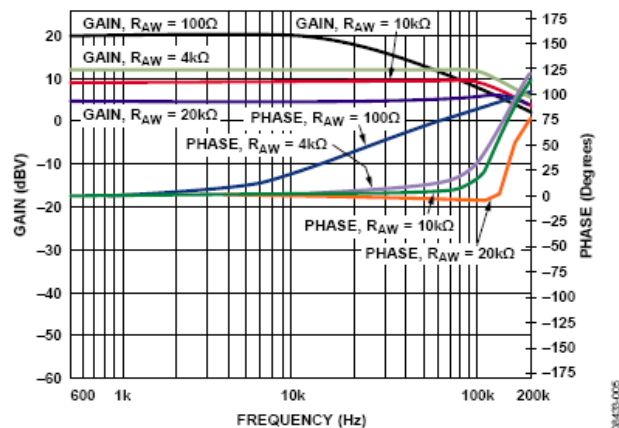


图 5.增益和相位与频率的关系（为显示完整增益曲线，垂直刻度经过压缩）

AD5292 具有一个 20 次可编程存储器, 可以在上电时将输出电压预设为特定值。

为了使本文所讨论的电路达到理想的性能, 必须采用出色的布局、接地和去耦技术（请参考教程 MT-031 和教程 MT-101）。至少应采用四层 PCB：一层为接地层，一层为电源层，另两层为信号层。

### 常见变化

AD5291（8 位、内置 20 次可编程上电存储器）和 AD5293（10 位、无上电存储器）均为  $\pm 1\%$  容差数字电位计, 同样适合本应用。

## 更多资料

指南MT-031: *实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团*。ADI公司。

指南MT-032: *理想的电压反馈型(VFB)运算放大器*, ADI公司。

指南MT-061: *仪表放大器基础*。ADI公司。

指南MT-087: *基准电压源*, ADI公司。

指南MT-091: *数字电位计*, ADI公司。

指南MT-095: *EMI、RFI和屏蔽概念*。ADI公司。

指南MT-101: *去耦技术*。ADI公司。

## 数据手册和评估板

AD5292数据手册。

AD5292评估板。

AD8221数据手册。

AD8221评估板。

AD5291数据手册。

AD5293 数据手册。

## 修订历史

10年3月—修订版0至修订版A

更改电路功能和优势部分 ..... 1

09 年 8 月—修订版 0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0118](http://www.analog.com/cn/CN0118)。

## 连接/参考器件

AD7191	内置 PGA 的 4.8 kHz、超低噪声、24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC
ADP3303	5 V 低压差线性调节器
ADP3303	3.3 V 低压差线性调节器

## 利用内置 PGA 的 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7191 实现精密电子秤设计

### 电路功能与优势

本电路为采用 AD7191 构建的电子秤系统。AD7191 是一款引脚可编程、低噪声、低漂移 24 位  $\Sigma$ - $\Delta$  转换器，内置 PGA，采用内部时钟。该器件将大多数系统构建模块置于芯片内，因此能够简化电子秤设计。它具有四种输出数据速率和四种增益设置，可利用专用引脚进行选择，这有助于简化与 ADC 的接口。

### 电路描述

AD7191 提供一种集成式电子秤解决方案，可以直接与称重传感器接口。只需在模拟输入端用一些滤波器，在基准电压引脚上配置一些电容等外部元件，便可满足电磁屏蔽(EMC)要求。来自称重传感器的低电平信号由 AD7191 的内置 PGA 放大。该 PGA 经过编程，以 128 的增益工作。AD7191 的转换结果送至微控制器，将数字信息转换为重量并显示在 LCD 上。

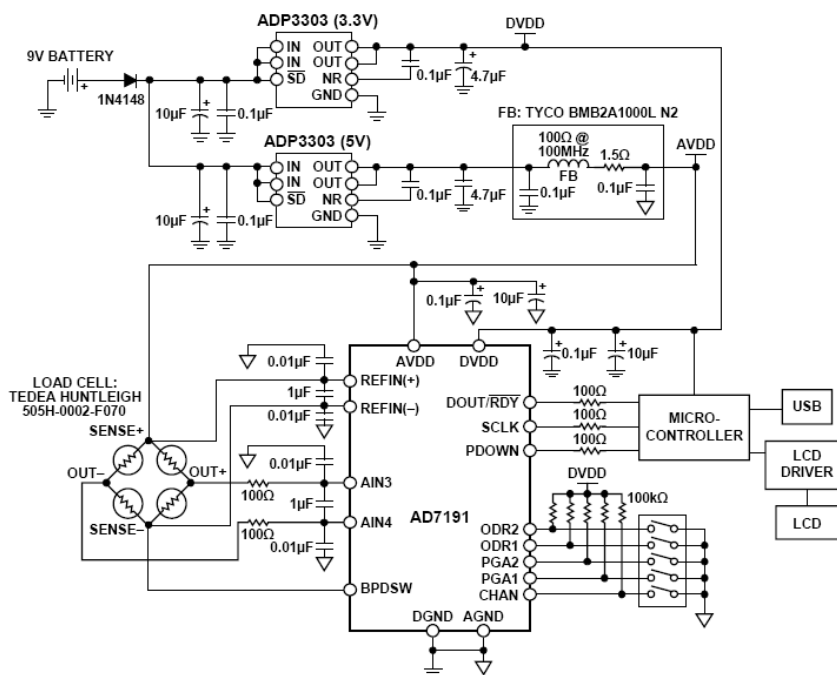


图 1. 采用 AD7191 的电子秤系统（原理示意图，未显示所有连接）

Rev.0

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



图2. 采用AD7191的电子秤系统

图2所示为实际的测试设置。为实现最佳系统性能，该测试设置使用一个6线式称重传感器。除激励、接地和2个输出连接外，6线式称重传感器还有2个检测引脚。这些检测引脚分别与惠斯登电桥的高端和低端相连，因此可以精确测量电桥上产生的电压。此外，AD7191具有差分模拟输入，接受差分基准电压。称重传感器差分SENSE线路与AD7191基准电压输入端相连，可构成一个比率式配置，不受电源激励电压的低频变化影响。如果采用4线式称重传感器，则不存在检测引脚，ADC基准电压引脚将与激励电压和地相连。这种配置中，由于存在线路电阻，激励电压与SENSE+之间将有压降，因此系统不是完全比率式。另外，低端上也会有线路电阻引起的压降。

AD7191具有单独的模拟电源和数字电源。模拟部分必须采用5V电源供电。数字电源独立于模拟电源，可以为2.7V至5.25V范围内的任意电压。微控制器采用3.3V电源。因此，DVDD也采用3.3V电源供电。这样就无需外部电平转换，从而可以简化ADC与微控制器之间的接口。

有多种方法可以为该电子秤系统供电，例如：利用主电源或利用电池（如图1所示）供电。一个5V低噪声稳压器用来确保AD7191和称重传感器获得低噪声电源。低噪声稳压器ADP3303(5V)用来产生5V电源。虚线框内显示的滤波器网络用来确保系统获得低噪声AVDD。此外，按照ADP3303(5V)数据手册的建议，在稳压器输出端配有降噪电容。为优化电磁屏蔽性能，稳压器输出先经过滤波，然后再给AD7191和称重传感器供电。3.3V数字电源可利用ADP3303(3.3V)稳压器产生。由于电源或接地层上的任何噪声都会给系统带来噪声，导致

电路性能降低，因此必须用低噪声稳压器产生供给AD7191和称重传感器的全部电源。

如果使用灵敏度为2mV/V的2kg称重传感器，则激励电压为5V时，来自称重传感器的满量程信号为10mV。称重传感器具有相关失调电压或TARE。此TARE的幅度最高可达称重传感器满量程输出信号的50%。称重传感器还有最高可达满量程±20%的增益误差。一些客户利用DAC来消除或抵消TARE。如果AD7191采用5V基准电压，则增益设置为128时，其模拟输入范围等于±40mV。相对于称重传感器的满量程信号(10mV)而言，AD7191的模拟输入范围较宽，这有利于确保称重传感器的失调电压和增益误差不会使ADC前端过载。

当输出数据速率为10Hz时，AD7191的均方根噪声为15nV。无噪声采样数等于

$$\frac{10\text{mV}}{66 \times 15\text{nV}} = 101,000 \quad (1)$$

其中系数6.6用来将均方根电压转换为峰峰值电压。

因此，以克(g)为单位表示的分辨率等于

$$\frac{2\text{kg}}{101,000} = 0.02\text{g} \quad (2)$$

无噪声码分辨率等于

$$\log_2(101,000) \frac{\log_{10}(101,000)}{\log_{10}(2)} = 16.6\text{bits} \quad (3)$$

在实际操作中，称重传感器本身会引入一定的噪声。AD7191的漂移也会导致称重传感器发生一定的时间和温度漂移。为确定完整系统的精度，可以将该电子秤通过USB连接器与PC相连，然后利用LabView软件评估电子秤系统的性能。图3显示将1kg重物置于称重传感器上，并收集500次转换结果所测得的输出性能。软件计算的系统噪声为17nV（均方根值）和98nV（峰峰值），相当于102,000无噪声采样数或16.6位无噪声码分辨率。

图4显示重量方面的性能。相对于500个码，输出的峰峰值变化量为0.02克。因此，该电子秤系统的精度达到0.02克。

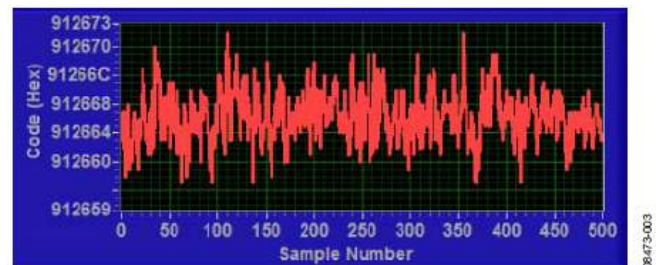


图3. 500次采样所测得的输出码，体现出噪声的影响

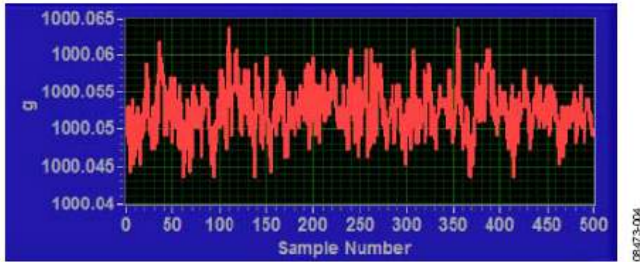


图 4. 500 次采样所测得的输出 (单位为克), 体现出噪声的影响

上图所示为连接称重传感器之后, 从 AD7191 回读得到的实际转换结果。在实际操作中, 电子秤系统会采用数字后置滤波器。在后置滤波器中另外执行均值计算会进一步提高无噪声采样数, 但数据速率会降低。

### 常见变化

注意: 本文的所有噪声规格均相对于 PGA 增益为 128 而言。

AD7191 是一款引脚可编程 ADC, 适用于高端电子秤。其它合适的 ADC 有 [AD7190](#) 和 [AD7192](#)。当输出数据速率设置为 4.7 Hz 时, AD7190 的均方根噪声为 8.5 nV。它也具有较宽的输出数据速率范围。它的工作速率最高可达 4.8 kHz, 同时仍能保持良好的性能。AD7192 与 AD7190 引脚兼容, 但前者的均方根噪声略高。当输出数据速率为 4.7 Hz 时, AD7192 的均方根噪声为 11 nV。

[AD7799](#) 适用于中端电子秤。当输出数据速率为 4.17 Hz 时, 其均方根噪声为 27 nV。

[AD7798](#)、[AD7781](#) 和 [AD7780](#) 均适用于低端电子秤。AD7798 与 AD7799 的功能组合相同。在 4.17 Hz 时, 其均方根噪声为 40 nV。AD7780 和 AD7781 均有一路差分模拟输入, 并且引脚可编程, 输出数据速率可以为 10 Hz 和 17.6 Hz, 增益可设置为 1 或 128。当输出数据速率为 10 Hz 时, 均方根噪声为 44 nV。

与其它高精度电路一样, 必须采用适当的布局、接地和去耦技术。欲了解更多信息, 请参考教程 [MT-031—“实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的谜团”](#), 以及教程 [MT-101—“去耦技术”](#)。

### 更多资料

Kester, Walt. 1999年。 [传感器信号调理](#)。第2、3、4节。ADI 公司。

指南MT-004: [ADC输入噪声面面观——无噪声是利还是弊?](#) ADI公司。

指南MT-022: [ADC架构III:  \$\Sigma\$ - \$\Delta\$ 型ADC基础](#), ADI公司。

指南MT-023: [ADC架构IV:  \$\Sigma\$ - \$\Delta\$ 型ADC的高级概念和应用](#), ADI公司。

指南MT-031: [实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团](#)。ADI公司。

指南MT-101: [去耦技术](#)。ADI公司。

### 数据手册和评估板

[AD7190数据手册](#)

[AD7191数据手册](#)

[AD7191评估板](#)

[AD7192数据手册](#)

[AD7780数据手册](#)

[AD7781数据手册](#)

[AD7798数据手册](#)

[AD7799数据手册](#)

[ADP3303 数据手册](#)

### 修订历史

09年10月—修订版0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0119](http://www.analog.com/cn/CN0119)。

## 连接/参考器件

AD7192	内置 PGA 的 4.8 kHz、超低噪声、24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC
ADP3303	5V 低压差线性调节器
ADP3303	3.3V 低压差线性调节器

## 利用内置 PGA 的 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7192 实现精密电子秤设计

### 电路功能与优势

本电路为采用 AD7192 构建的电子秤系统。AD7192 是一款超低噪声、低漂移 24 位  $\Sigma$ - $\Delta$  转换器，内置 PGA。该器件将大多数系统构建模块置于芯片内，因此能够简化电子秤设计。该器件可在 4.7 Hz 至 4.8 kHz 的完整输出数据速率范围内工作，并保持良好的性能，因此可用于以较低速度工作的电子秤系统，以及料斗秤等较高速度电子秤系统。

### 电路描述

AD7192 提供一种集成式电子秤解决方案，可以直接与称重传感器接口。只需在模拟输入端用一些滤波器，在基准电压引脚上配置一些电容等外部元件，便可满足电磁屏蔽(EMC)要求。来自称重传感器的低电平信号由 AD7192 的内置 PGA 放大。该 PGA 经过编程，以 128 的增益工作。AD7192 的转换结果送至微控制器，将数字信息转换为重量并显示在 LCD 上。

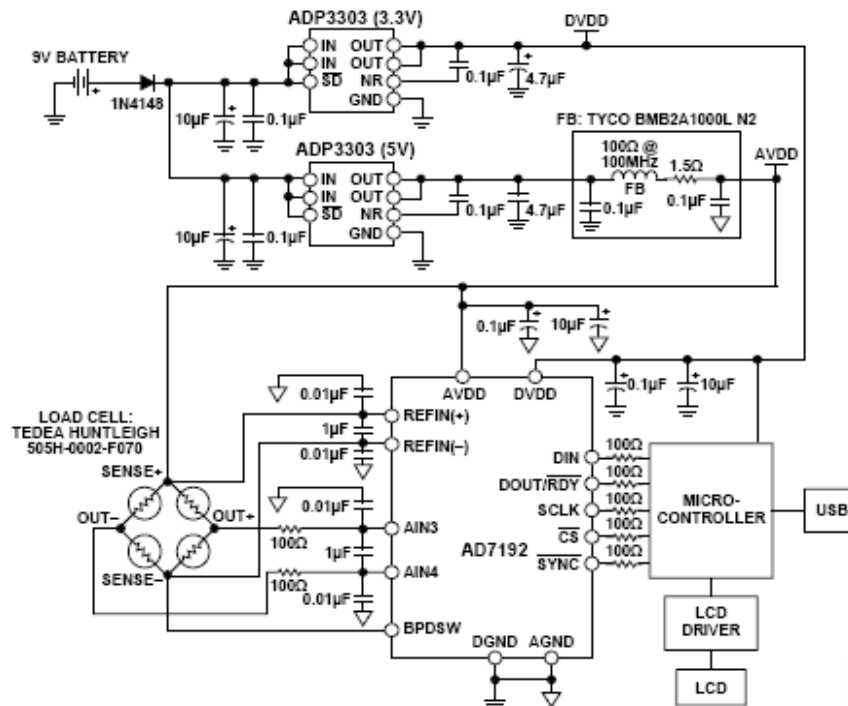


图 1. 采用 AD7192 的电子秤系统（原理示意图：未显示所有连接）

Rev.0

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (Continued on last page)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700  
Fax: 781.461.3113  
[www.analog.com.cn](http://www.analog.com.cn)  
©2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



图 2 所示为实际的测试设置。为实现最佳系统性能，该测试设置使用一个 6 线式称重传感器。除激励、接地和 2 个输出连接外，6 线式称重传感器还有 2 个检测引脚。这些检测引脚分别与惠斯登电桥的高端和低端相连，因此可以精确测量电桥上产生的电压。此外，AD7192 具有差分模拟输入，接受差分基准电压。称重传感器差分 SENSE 线路与 AD7192 基准电压输入端相连，可构成一个比率式配置，不受电源激励电压的低频变化影响。如果采用 4 线式称重传感器，则不存在检测引脚，ADC 基准电压引脚将与激励电压和地相连。这种配置中，由于存在线路电阻，激励电压与 SENSE+ 之间将有压降，因此系统不是完全比率式。另外，低端上也有线路电阻引起的压降。

AD7192 具有单独的模拟电源和数字电源。模拟部分必须采用 5 V 电源供电。数字电源独立于模拟电源，可以为 2.7 V 至 5.25 V 范围内的任意电压。微控制器采用 3.3 V 电源。因此，DVDD 也采用 3.3 V 电源供电。这样就无需外部电平转换，从而可以简化 ADC 与微控制器之间的接口。



图 2. 采用 AD7192 的电子秤系统

有多种方法可以为该电子秤系统供电，例如：利用主电源或利用电池（如图 1 所示）供电。一个 5 V 低噪声稳压器用来确保 AD7192 和称重传感器获得低噪声电源。低噪声稳压器 ADP3303 (5 V) 用来产生 5 V 电源。虚线框内显示的滤波器网络用来确保系统获得低噪声 AVDD。此外，按照 ADP3303 (5 V) 数据手册的建议，在稳压器输出端配有降噪电容。为优化电磁屏蔽性能，稳压器输出先经过滤波，然后再给 AD7192 和称重传感器供电。3.3 V 数字电源可利用 ADP3303 (3.3 V) 稳压器产生。由于电源或接地层上的任何噪声都会给系统带来噪声，导致电路性能降低，因此必须用低噪声稳压器产生供给 AD7192 和称重传感器的全部电源。

如果使用灵敏度为 2 mV/V 的 2 kg 称重传感器，则激励电压为 5 V 时，来自称重传感器的满量程信号为 10 mV。称重传感器具有相关失调电压或 TARE。此 TARE 的幅度最高可达称重传感器满量程输出信号的 50%。称重传感器还有最高可达满量程±20%的增益误差。一些客户利用 DAC 来消除或抵消 TARE。如果 AD7192 采用 5 V 基准电压，则增益设置为 128 且器件配置为双极性工作模式时，其模拟输入范围等于 ±40 mV。相对于称重传感器的满量程信号(10 mV)而言，AD7192 的模拟输入范围较宽，这有利于确保称重传感器的失调电压和增益误差不会使 ADC 前端过载。

当输出数据速率为 4.7 Hz 时，AD7192 的均方根噪声为 11 nV。无噪声采样数等于

$$\frac{10 \text{ mV}}{6.6 \times 11 \text{ nV}} = 137,740 \quad (1)$$

其中系数 6.6 用来将均方根电压转换为峰峰值电压。

以克(g)为单位表示的分辨率等于

$$\frac{2 \text{ kg}}{137,740} = 0.015 \text{ g} \quad (2)$$

无噪声码分辨率等于

$$\log_2(137,740) = \frac{\log_{10}(137,740)}{\log_{10}(2)} = 17 \text{ bits} \quad (3)$$

在实际操作中，称重传感器本身会引入一定的噪声。AD7192 的漂移也会导致称重传感器发生一定的时间和温度漂移。为确定完整系统的精度，可以将该电子秤通过 USB 连接器与 PC 相连，然后利用 LabView 软件评估电子秤系统的性能。图 4 显示将 1 kg 重物置于称重传感器上，并收集 500 次转换结果所测得的输出性能。软件计算的系统噪声为 14 nV 和 98 nV（峰峰值），相当于 102,000 无噪声采样数或 16.6 位无噪声码分辨率。

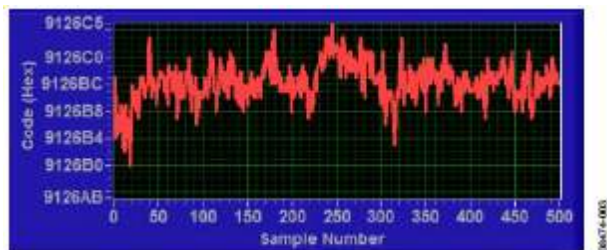


图 3. 500 次采样所测得的输出码，体现出噪声的影响

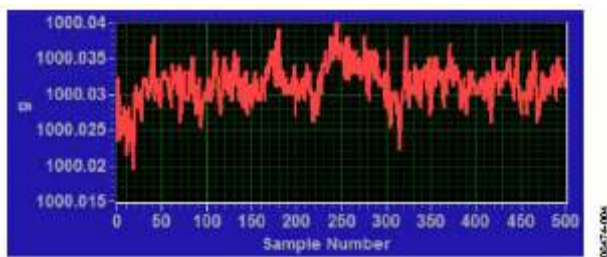


图 4. 500 次采样所测得的输出码，体现出噪声的影响

图 4 显示重量方面的性能。相对于 500 个码，输出的变化量为 0.02 克。因此，该电子秤系统的精度达到 0.02 克。

上图所示为连接称重传感器之后，从 AD7192 回读得到的实际转换结果。在实际操作中，电子秤系统会采用数字后置滤波器。在后置滤波器中另外执行均值计算会进一步提高无噪声采样数，但数据速率会降低。

## 常见变化

注意：本文的所有噪声规格均相对于 PGA 增益为 128 而言。

AD7192 是一款高精度 ADC，适用于高端电子秤。其它合适的 ADC 有 [AD7190](#) 和 [AD7191](#)。AD7190 与 AD7192 引脚兼容，但前者的均方根噪声略低。当输出数据速率均为 4.7 Hz 时，AD7190 的均方根噪声为 8.5 nV，AD7192 的均方根噪声为 11 nV。AD7191 是一款引脚可编程器件，具有四种输出数据速率和四种增益设置。由于它具有引脚可编程性能，并且功能较少，因此易于使用。AD7191 的均方根噪声与 AD7192 相同。

[AD7799](#) 适用于中端电子秤。当输出数据速率为 4.17 Hz 时，其均方根噪声为 27 nV。

[AD7798](#)、[AD7781](#) 和 [AD7780](#) 均适用于低端电子秤。AD7798 与 AD7799 的功能组合相同。在 4.17 Hz 时，其均方根噪声为 40 nV。AD7780 和 AD7781 均有一路差分模拟输入，并且引脚可编程，输出数据速率可以为 10 Hz 和 17.6 Hz，增益可设置为 1 或 128。当输出数据速率为 10 Hz 时，均方根噪声为 44 nV。

与其它高精度电路一样，必须采用适当的布局、接地和去耦技术。欲了解更多信息，请参考教程 [MT-031—“实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的迷团”](#)，以及教程 [MT-101—“去耦技术”](#)。



**更多资料**

Kester, Walt. 1999年。《传感器信号调理》。第2、3、4节。ADI公司。

指南MT-004: *ADC输入噪声面面观——无噪声是利还是弊?* ADI公司。

指南MT-022: *ADC架构III:  $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC基础*, ADI公司。

指南MT-023: *ADC架构IV:  $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的高级概念和应用*, ADI公司。

指南MT-031: *实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团*。ADI公司。

指南 MT-101: *去耦技术*。ADI 公司。

**数据手册和评估板**

AD7190数据手册

AD7191数据手册

AD7192数据手册

AD7192评估板

AD7780数据手册

AD7781数据手册

AD7798数据手册

AD7799数据手册

ADP3303 数据手册

**修订历史**

09年9月—修订版0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0123](http://www.analog.com/cn/CN0123)。

连接/参考器件	
AD5360	16 通道、16 位电压输出 DAC
AD790	高速精密比较器
AD8597	低噪声放大器
ADR435	5 V 超低噪声基准电压源

利用自动校准技术将 16 通道、16 位 DAC AD5360 的失调电压降至 1 mV 以下

电路功能与优势

本文所述电路如图 1 所示，可提供一种消除不确定失调误差的校准方法。在工业过程控制和仪器仪表应用中使用高精度、高分辨率 DAC 时，低失调通常是一个关键特性。该电路利用 AD5360 的内置特性，并配合外部比较器和运算放大器，确定 DAC 输出电压是高于还是低于接地参考信号。当失调量已知时，用户可以调整发送至 DAC 的代码来消除失调。

电路描述

AD5360 是一款 16 通道、16 位数模转换器。采用 5 V 基准电压源时，标称输出范围为±10 V。AD5360 内置两个偏移 DAC。各偏移 DAC 均与一组（8 个）DAC 相连，用来调整输出范围的中间电平点。例如，可通过设置偏移 DAC 将输出范围从±10 V 变为-8 V 至+12 V，或应用要求的其它值。

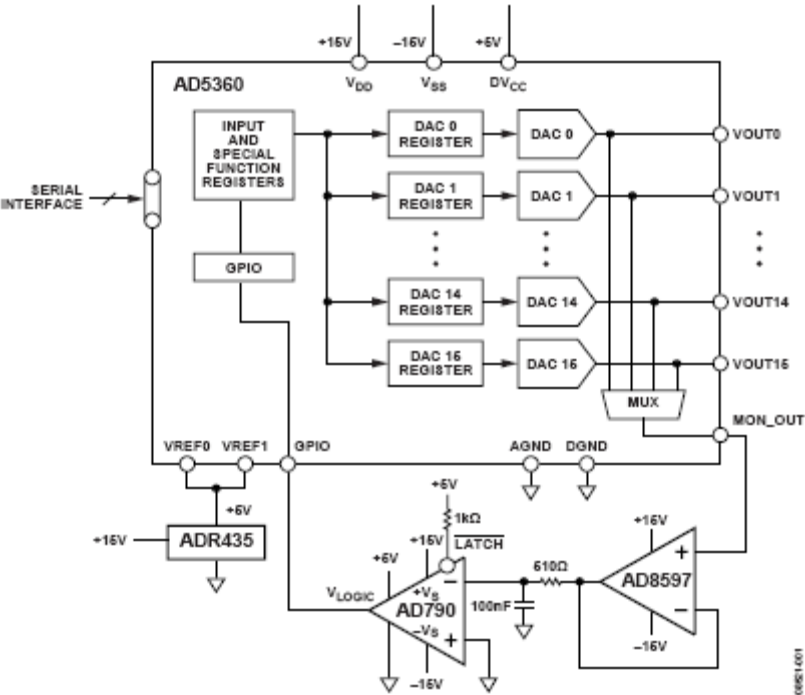


图 1. AD5360 DAC 的自校准电路可将失调电压降至 1 mV 以下（原理示意图，未显示去耦和所有连接）

Rev.0  
“Circuits from the Lab” 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 “Circuit from the Lab”. (Continued on last page)

AD5360 经过工厂调整, 具有极低失调。执行工厂调整时, 偏移 DAC 的值为默认值, 而且已经有效消除其所引起的失调误差。但是, 当偏移 DAC 的值变为非默认值时, 其失调误差会影响主 DAC 的失调误差。

本文所述电路可以测量并通过校准消除这些情况下主 DAC 的失调误差。该电路需用一个通用 I/O 引脚和一个片内监控多路复用器。GPIO (通用 I/O) 引脚设置为输入; 通过读取 GPIO 内部寄存器, 可以确定 GPIO 引脚的逻辑状态。模拟多路复用器是可编程的, 可将 16 路 DAC 输出中的任一输出与单一引脚(MON\_OUT)相连。多路复用器具有低而有限的导通电阻  $R_{ON}$ , 因此从 MON\_OUT 汲取的任何电流均会在  $R_{ON}$  上产生压降, 从而引起输出误差。为了避免这种现象, 需用一个低噪声放大器 AD8597 来缓冲 MON\_OUT。该放大器后接低通滤波器, 可降低高速精密比较器 AD790 所接受的噪声量, 以免发生误触发。

AD790 可以采用  $\pm 15\text{ V}$  电源供电, 从而与 AD5360 兼容。采用  $\pm 15\text{ V}$  电源供电时, AD790 还需要一个额外的  $+5\text{ V}_{\text{LOGIC}}$  电源。此外, AD790 的最大差分输入电压为  $15\text{ V}$ ; 因此, 它能够耐受 AD5360 的输出电压, 而无需衰减。图 1 中, 如果通道失调为正, 则比较器输出为低电平, 表示必须降低输出电压以消除失调。

如果通道失调为负, 则比较器输出为高电平, 表示必须提高输出电压以消除失调。为校准 DAC, DAC 通道需载入数字值, 该值应恰好提供与 SIGGND 相等的电压 (即  $0\text{ V}$ )。本例中, 假设 DAC 通道具有负失调。读取 GPIO 寄存器显示, 比较器输出为低电平, 表示输入必须递增, 直到输出反转为止。随着写入 DAC 输入寄存器的代码逐步增大, 读取 GPIO 寄存器, 直到比较器输出跳变为高电平。AD790 的最大迟滞带为  $0.65\text{ mV}$ ; 因此, 再次减小 DAC 码可以更精确地确定 DAC 失调。

当比较器输出重新跳变为低电平时, SIGGND 位于这两个码之间的某个位置。由于电路所用器件存在误差, 比较器跳变点之间通常有三四个码的跨度。用这种方法无法准确确定哪个码可提供最低失调输出, 但是, 如果选取的码为

两个跳变点码的平均值, 则相对于 SIGGND 的 DAC 通道失调一般小于  $1\text{ mV}$ 。

为了使本文所讨论的电路达到理想的性能, 必须采用出色的布局、接地和去耦技术 (请参考教程 MT-031 和教程 MT-101)。至少应采用四层 PCB: 一层为接地层, 一层为电源层, 另两层为信号层。

## 常见变化

AD5362 是 AD5360 的 8 通道版本。AD5361 和 AD5363 分别是 AD5360 和 AD5362 的 14 位版本。AD8599 是 AD8597 的双通道版本。

本文所述电路可以使用上述任一款 AD536x 器件。需要时, 也可以改用其它基准电压源以提供不同的输出范围。

## 更多资料

指南 MT-031: 实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的谜团。ADI 公司。

指南 MT-083: 比较器, ADI 公司。

指南 MT-101: 去耦技术。ADI 公司。

## 数据手册和评估板

[AD5360](#)

[AD5361](#)

[AD5362](#)

[AD5363](#)

[AD5360、AD5361、AD5362、AD5363 评估板](#)

[AD8597](#)

[AD790](#)

[ADR435](#)

## 修订历史

09 年 9 月—修订版 0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

AD5360	16 通道、16 位电压输出 DAC
ADR431/ADR421	2.5 V 超低噪声基准电压源
ADR435	5 V 超低噪声基准电压源

## 利用 16 位电压输出 DAC AD5360 提供具有可编程输出范围的 16 通道输出

### 电路功能与优势

本电路采用多通道 DAC 配置，各组通道具有不同的输出范围。它利用 AD5360 提供 16 个 DAC 通道，具有 16 位分辨率。AD5360 经过配置，8 个通道具有  $\pm 10$  V 的输出范围，另外 8 个通道具有  $\pm 5$  V 的输出范围。

### 电路描述

AD5360 是一款 16 通道、16 位 DAC，提供 56 引脚 LFCSP 和 52 引脚 LQFP 两种封装。它有两个基准电压输入引脚。VREF0 是 DAC 通道 VOUT0 至 VOUT7 的基准电压引脚，VREF1 是 DAC 通道 VOUT8 至 VOUT15 的基准电压引脚。

图 1 所示为 AD5360 的典型配置，它使用两个外部基准电压源。AD5360 的标称输出范围为基准电压的四倍，中间电平点为 0 V。ADR431 和 ADR421 均为 2.5 V 低噪声精密基准电压源。ADR435 为 5 V 低噪声精密基准电压源。按照图 1 所示方式连接时，AD5360 的 VOUT0 至 VOUT7 将具有  $\pm 5$  V 的输出范围，VOUT8 至 VOUT15 具有  $\pm 10$  V 的输出范围。AD5360 内置 2 个偏移 DAC 寄存器；利用这些寄存器，可以在器件功能与动态裕量的限制范围内更改输出范围的中间电平点。

本电路必须构建在具有较大面积接地层的多层电路板上。为实现最佳性能，必须采用适当的布局、接地和去耦技术（请参考教程 MT-031 和 MT-101）。

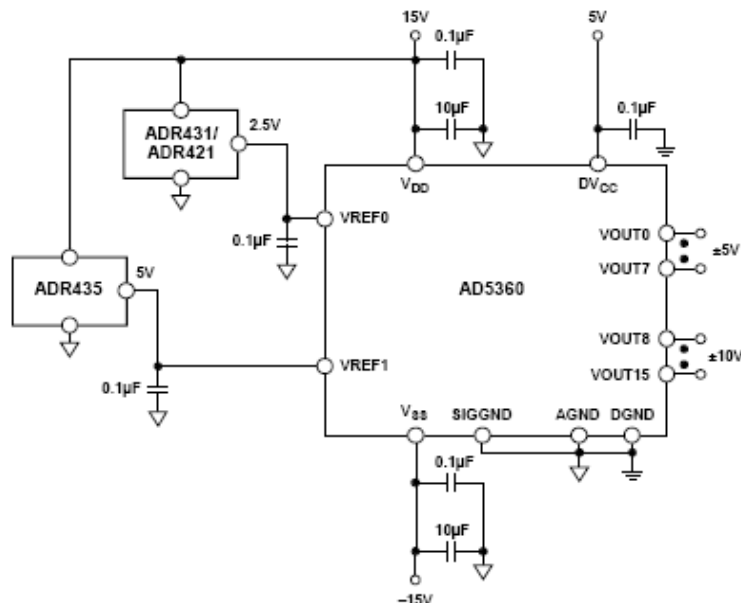


图 1. 利用 AD5360 DAC 提供具有可编程输出电压范围的 16 通道输出（原理示意图，未显示去耦和所有连接）

Rev.0

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## 常见变化

AD5362 是 AD5360 的 8 通道版本。AD5361 和 AD5363 分别是 AD5360 和 AD5362 的 14 位版本。

本文所述电路可以使用上述任一款 AD536x 器件。需要时，也可以改用其它基准电压源以提供不同的输出范围。

## 更多资料

Kester, Walt。数据转换手册第3章和第7章。ADI公司，2005。

指南MT-015：DAC基本架构II：二进制DAC。ADI公司。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-101：去耦技术。ADI公司。

基准电压源向导设计工具。ADI 公司。

## 数据手册和评估板

[AD5360数据手册](#)

[AD5360评估板](#)

[AD5361数据手册](#)

[AD5362数据手册](#)

[AD5363数据手册](#)

[ADR421数据手册](#)

[ADR431数据手册](#)

[ADR435 数据手册](#)

## 修订历史

09 年 10 月—修订版 0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



ADXL345	3 轴、 $\pm 2\text{ g}/\pm 4\text{ g}/\pm 8\text{ g}/\pm 16\text{ g}$ 数字加速度计
ADuC7024	精密模拟微控制器，12 位模拟 I/O，ARM7TDMI® MCU

## 利用精密模拟微控制器 ADuC7024 和 数字加速度计 ADXL345 检测低 g 加速度

### 电路功能与优势

ADXL345 是一款小巧纤薄的低功耗三轴加速度计，可以对高达  $\pm 16\text{ g}$  的加速度进行高分辨率（13 位）测量。数字输出数据为 16 位二进制补码格式，可通过 SPI（3 线或 4 线）或者 I<sup>2</sup>C 数字接口访问。

ADXL345 非常适合移动设备应用。它可以在倾斜检测应用中测量静态重力加速度，还可以测量运动或冲击导致的动态加速度。它具有高分辨率（4 mg/LSB），能够测量约 0.25° 的倾角变化。使用 ADXL345 等数字输出加速度计时，无需进行模数转换，从而可以节省系统成本和电路板面积。此外，

ADXL345 内置多种功能。活动/非活动检测、单击/双击检测以及自由落体检测均在内部完成，无需主机处理器执行任何计算。内置 32 级 FIFO 存储缓冲器可以减轻主机处理器的负担，起到简化算法和省电的作用。利用内置的活动/非活动检测功能，将 ADXL345 用作“运动开关”（无活动时关闭整个系统，检测到活动时才开启），系统可以实现进一步省电。

ADXL345 通过 I<sup>2</sup>C 或 SPI 接口进行通信。本文所述电路演示如何通过这些协议实现通信。

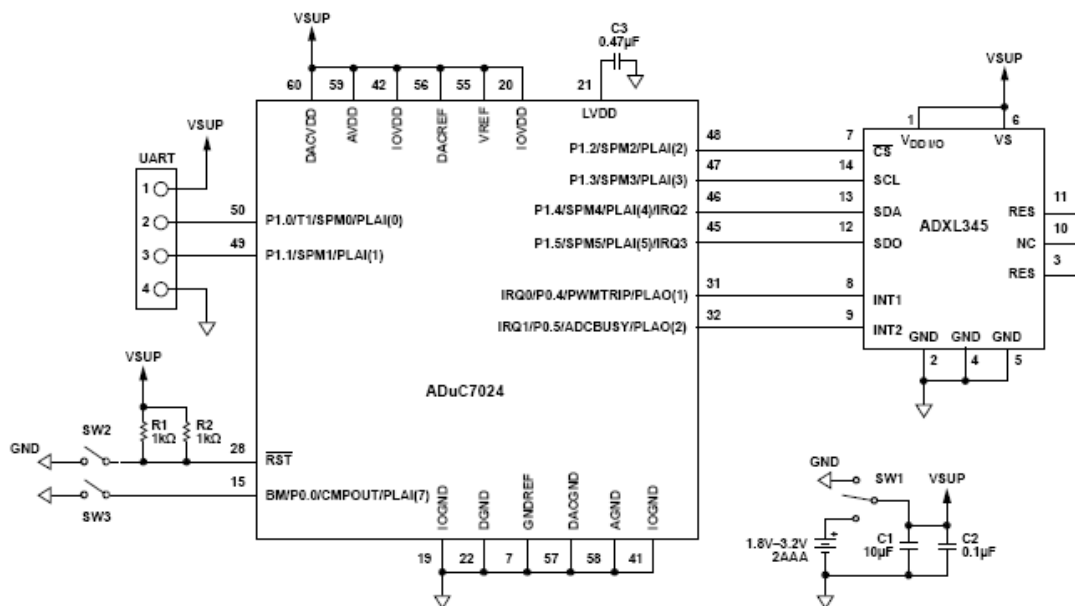


图 1. ADXL345 和 ADuC7024 的 4 线 SPI 配置（原理示意图，未显示去耦和所有连接）

Rev.0

“Circuits from the Lab” 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 “Circuit from the Lab”. (Continued on last page)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700  
Fax: 781.461.3113  
[www.analog.com.cn](http://www.analog.com.cn)  
©2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

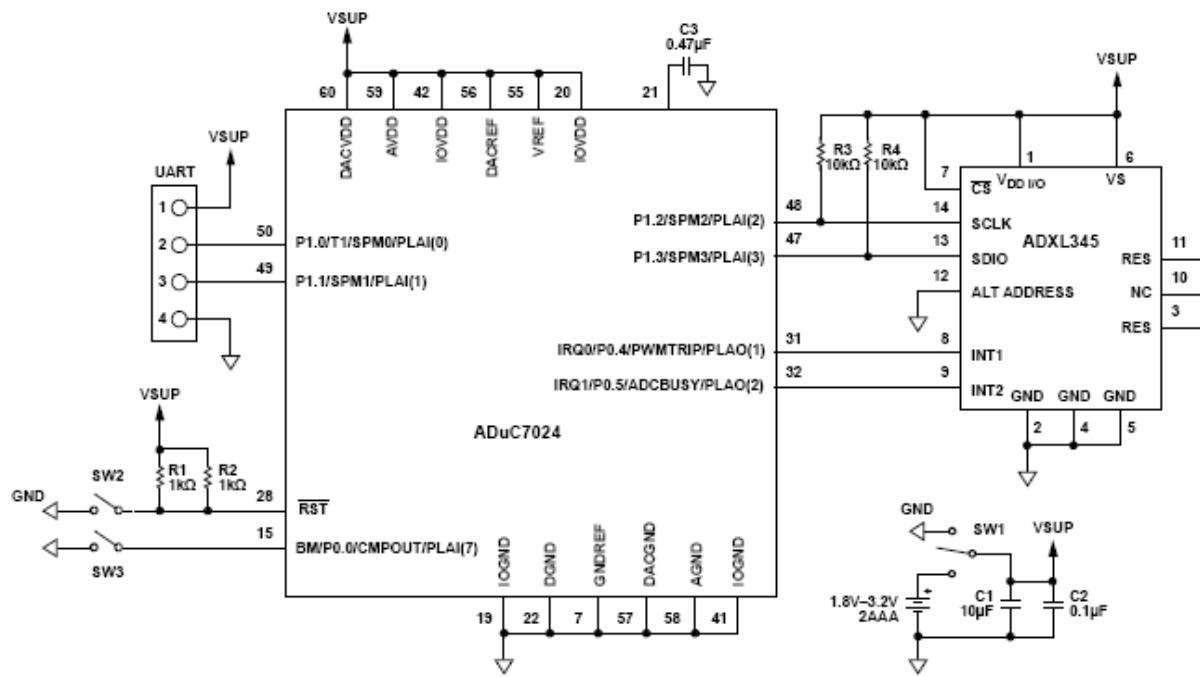


图 2. ADXL345 和 ADuC7024 的 I<sup>2</sup>C 配置（原理示意图，未显示去耦和所有连接）

电路描述

本电路将精密模拟微控制器 ADuC7024 和数字加速度计 ADXL345 配合使用。两款器件均支持 I<sup>2</sup>C 和 SPI 接口。图 1 显示 ADXL345 和 ADuC7024 的 SPI 配置，图 2 显示这些器件的 I<sup>2</sup>C 配置。 $\overline{CS}$  引脚（ADXL345 的引脚 7）用来选择所需的接口。如果  $\overline{CS}$  引脚连接高电平 ( $V_{DD I/O}$ )，则 I<sup>2</sup>C 模式使能。在 SPI 模式下，每次传输开始和结束时， $\overline{CS}$  电平都会切换。如果  $\overline{CS}$  被拉高，则表示没有 SPI 传输发生，或者 I<sup>2</sup>C 传输可能发生。

所示原理图均为示意图，但显示了必需的连接（电源、接地等）。在这些原理图中，ADuC7024 通过 UART 进行编程（连接到引脚 49 和引脚 50）。SW2 和 SW3 分别是复位和下载按钮，用于微控制器编程。SW1 是电源开关。

表 1. SPI 和 I<sup>2</sup>C 通信模式下 ADXL345 的引脚功能

引脚编号	引脚名称	功能	
		I <sup>2</sup> C	SPI
7	$\overline{CS}$	(连接到 $V_{DD}$ 以支持 I <sup>2</sup> C)	片选
12	SDO/ALT ADDRESS	备选地址选择	串行数据输出
13	SDA/SDI/SDIO	串行数据	串行数据输入 (4 线式 SPI) / 串行数据输入和输出 (2 线式 SPI)
14	SCL/SCLK	串行通信时钟	串行通信时钟

常见变化

图 1 显示了 ADXL345 的 4 线式 SPI 配置，但它也能通过 3 线式 SPI 进行通信。图 3 显示了这种配置。

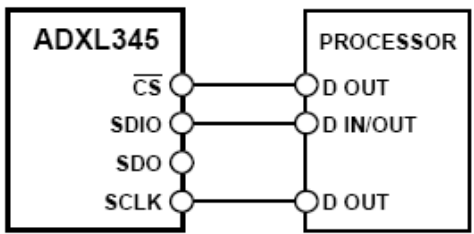
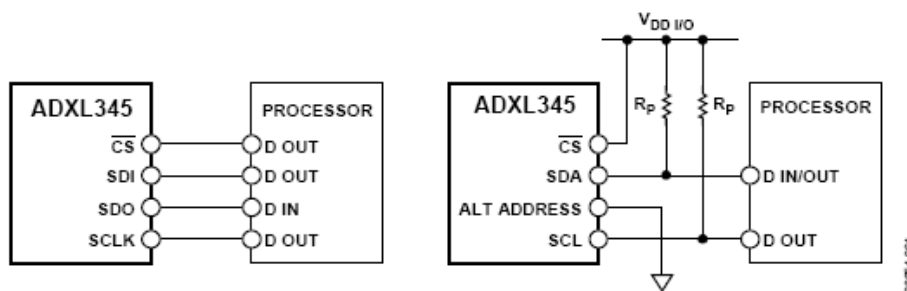


图 3. 3 线式 SPI 连接图

上述电路采用 ADuC7024 微控制器。同样的配置可以适用于任何支持 SPI 或 I<sup>2</sup>C 的微控制器，如图 4 所示，其中采用标准 I<sup>2</sup>C 和 SPI 连接。表 1 列出了两种协议的引脚功能。

图4. SPI (左) 和 I<sup>2</sup>C (右) 连接图

## 更多资料

该电路用于[ADXL345开发板](#)中(型号EVAL-ADXL345Z-DB)。

欲了解有关ADXL345操作和寄存器功能的信息, 请参考  
[ADXL345数据手册](#)。

欲了解有关ADuC7024编程的信息, 请参考[ADuC7024数据手册](#)。有关图2中所示的I<sup>2</sup>C配置示例代码, 请访问  
[http://www.analog.com/static/imported-files/circuit\\_notes/CN0133\\_Source\\_Code.zip](http://www.analog.com/static/imported-files/circuit_notes/CN0133_Source_Code.zip)。

## 数据手册和评估板

[ADXL345数据手册](#)

[ADXL345评估工具](#)

[ADuC7024数据手册](#)

[ADuC7024评估工具](#)

## 修订历史

09 年 10 月—修订版 0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

Circuits from the Lab®参考设计是经过测试的参考设计, 有助于加速设计, 同时简化系统集成, 帮助并解决当今模拟、混合信号和RF设计挑战。如需更多信息和/或技术支持, 请访问 [www.analog.com/cn/CN0140](http://www.analog.com/cn/CN0140)。

连接/参考器件	
ADL5356	1.2 GHz 至 2.5 GHz 双平衡混频器, 内置 LO 缓冲器、IF 放大器和 RF 巴伦
AD8376	超低失真、双通道、IF 可变增益放大器 (VGA)
AD9258	14 位、125 MSPS、1.8 V、双通道 ADC
AD9517-4	12 路输出时钟发生器, 集成 1.6 GHz VCO

## 高性能、双通道 IF 采样接收机

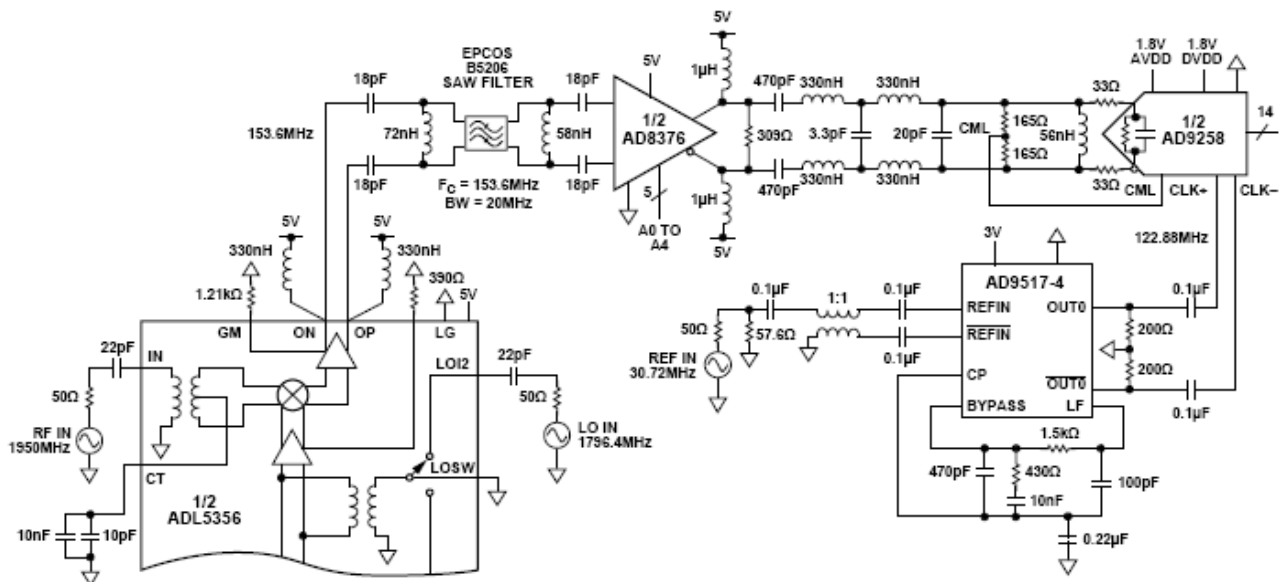
### 电路功能与优势

本电路提供一种高性能、双通道 IF 采样接收机；在基站术语中，它也称为主接收机和分集接收机。该下变频接收机使用 153.6 MHz 的单 IF 频率，内置一个双通道下变频混频器、数字控制双通道 VGA、双通道 ADC 和时钟频率合成器。该电路接受 RF 波形输入，输出两路 14 位分辨率数字数据流。它针对高频 IF 采样进行了优化，提供 79.61 dBc 的出色无杂散动态范围(SFDR)性能，高增益设置时采样速率为 122.88 MSPS。

### 电路描述

本电路包括 RF 前端和 IF 采样接收机, 由双通道平衡混频器、宽带 IF SAW 滤波器、数字控制双通道 VGA 和双通道 ADC 组成。本电路还内置频率合成器, 用来产生 ADC 采样时钟。

双通道平衡混频器 [ADL5356](#) 旨在将主要在 1200 MHz 至 2500 MHz 范围内的射频(RF),下变频为 30 MHz 至 450 MHz 范围内的低中频(IF)。



**NOTES**

1. ALL PINS AND CONNECTIONS TO ADL5356, AD8376, AD9258 AND AD9417 NOT SHOWN.  
CONSULT PRODUCT DATA SHEETS FOR DETAILED INFORMATION.

图1. 宽带双通道 IF 采样接收机 (原理示意图: 仅显示接收机的一半, 未显示所有连接和去耦)

Rev.0

"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

RF 和 LO 输入端口已进行交流耦合，用来预防非零直流电压损坏 RF 巴伦或 LO 输入电路（ADL5356 的一部分）。ADL5356 配置为单端 LO 工作模式，建议 LO 驱动为 0 dBm。混频器的 LOSW 引脚接地，本电路只使用两个 LO 通道中的一个(LOI2)。

混频器差分 IF 接口需要利用上拉扼流圈电感来偏置开集输出，并设置输出阻抗匹配。应适当选择用来将直流电流耦合至 IF 放大器的扼流圈电感的分流阻抗，以提供所需的输出回损。混频器输出阻抗的实部约为 200  $\Omega$ ，这与许多常用 SAW 滤波器匹配，而无需变压器。

接收机通道滤波主要由混频器后接的 153.6 MHz、20 MHz 带宽 Epcos B5206 型 SAW 滤波器完成。此滤波器的典型插入损耗(IL)约为 9 dB，匹配特性阻抗为 100  $\Omega$  差分。通过简单的 L-C 电抗性网络，使该 SAW 滤波器与混频器 200  $\Omega$  差分输出和 AD8376 VGA 150  $\Omega$  差分输入阻抗相匹配。

表 1 突出显示了双通道混频器加 SAW 滤波器的级联性能。请注意，IP3 为三阶交调截点，IP1dB 为折合到输入端的-1 dB 压缩点，NF 为噪声系数。

双通道、高输出线性 VGA [AD8376](#) 针对 ADC 接口进行了优化，提供 24 dB 的接收机增益控制。两个独立的 5 位二进制码以 1 dB 步进改变各衰减器的设置，使得各放大器的增益设置范围为+20 dB 至-4 dB。在可用的 24 dB 增益范围内，输出三阶交调截点(IP3)和本底噪声基本上保持不变。对于接收机增益改变时需保持恒定瞬时动态范围的可变增益接收机而言，这一特性很重要。采用 2 V 峰峰值复合信号时，AD8376 和随后的抗混叠滤波器的输出 IP3 超过 50 dBm。AD8376 提供 150  $\Omega$  输入阻抗，经过调整，用于驱动 150  $\Omega$  负载阻抗。开集输出结构要求通过外部偏置网络实现直流偏置。每个通道输出端均采用一组 1  $\mu$ H 扼流圈电感，用来向开集输出引脚提供偏置。模数转换之前的 DGA 输出端配有经过

优化的差分四阶带通抗混叠滤波器。请注意，抗混叠滤波器采用大约 300  $\Omega$  的分流输入和输出电阻端接。滤波器输入端的分流电阻为 309  $\Omega$ ，输出端的分流电阻为 330  $\Omega$ （由两个 165  $\Omega$  偏置设置电阻组成）；二者共同向 AD8376 提供 150  $\Omega$  标称负载阻抗。

带通抗混叠滤波器用来衰减奈奎斯特频率区域之外的 AD8376 输出噪声。一般而言，若使用一个阶数合适的抗混叠滤波器，SNR 性能会提高数个 dB。该抗混叠滤波器由一个四阶巴特沃兹滤波器和一个谐振回路组成。谐振回路通过谐振消除 ADC 负载的容性部分，有助于确保 ADC 输入在目标中心频率看起来像一个真正的电阻（参见应用笔记 [AN-742](#) 和 [AN-827](#)）。此外，交流耦合电容和偏置扼流圈会将更多零点引入传递函数。整体频率响应呈现出带通特性，有助于抑制目标奈奎斯特频率区域外的噪声。该滤波器提供 20 MHz 通带，中心频率为 153.6 MHz，平坦度为 0.3 dB，插入损耗约为 3 dB。

所用 ADC 为 14 位 [AD9258](#)，其采样速率最高可达 125 MSPS。AD9258 的模拟输入端由 AD8376 通过带通抗混叠滤波器驱动。ADC 采样速率设置为 122.88 MSPS，满量程输入范围为 2 V 峰峰值。AD9258 差分时钟信号由一个带片内 VCO 的时钟产生 IC AD9517-4 提供。为实现低抖动，使用 LVPECL 电平输出 OUT0。[AD9517-4](#) 利用其内部 VCO 频率 1474.56 MHz，产生用于 ADC 的 122.88 MHz 输出时钟。利用 [ADISimCLK](#)™ 仿真软件设计的环路滤波器提供 60 kHz 截止频率和 50°相位余量，使得时序抖动约为 160 fs 均方根值。假设输入频率为 153.6 MHz，利用公式  $SNR = 20 \log(1/2\pi \times f_{in} \times t_j)$  可知，此抖动相当于 76 dB 的理论 SNR。

利用此电路，在最大增益时可实现 79.61 dBc 的出色 SFDR 性能(153.6 MHz)，如图 2 所示。

**表 1. 双通道混频器加 SAW 滤波器的级联性能 (RF =1950 MHz, LO = 1796.4 MHz, IF = 153.6 MHz, RF 功率 = -10 dBm, LO 功率 = 0 dBm)**

	增益 (dB)	IP3 (dBm)	IP1dB (dBm)	NF (dB)
ADL5356	8.2	30.0	11.5	9.7
ADL5356 + SAW	-0.3	28.6	11.7	10.9



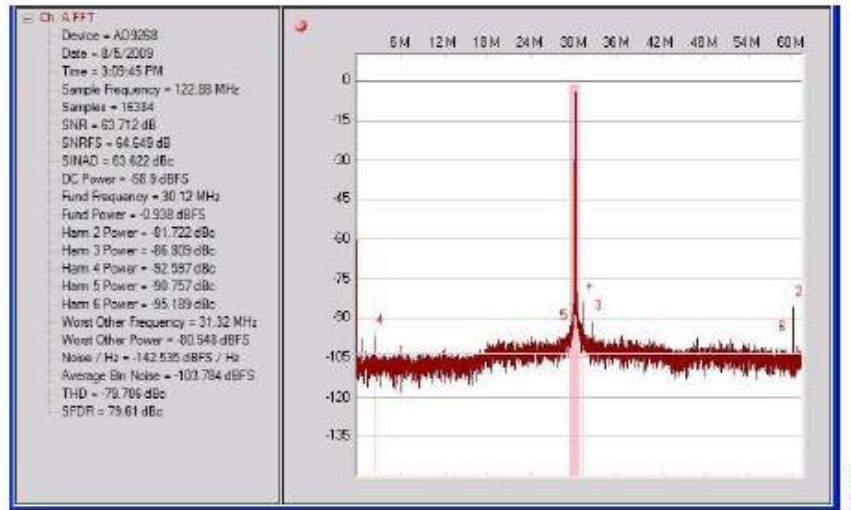


图2. 图1 电路的单音性能测量结果：1950 MHz RF 输入信号，采样频率 = 122.88 MSPS，IF 输入 = 153.6 MHz

### 常见变化

前端 LNA 和衰减器未包括在本电路中，但可以轻松地与混频器 ADL5356 的 50  $\Omega$  单端 RF 输入接口。完整的接收机设计可能需要纳入 [ADL5521/ADL5523](#) LNA。

标准配置使用 ADL5356，可以接收 1.2 GHz 至 2.4 GHz 范围内的 RF 信号，但也可以使用混频器 [ADL5358](#)，支持 500 MHz 至 1700 MHz 的 RF 输入频率。

Epcos ([www.epcos.com](http://www.epcos.com)) SAW 滤波器接在混频器之后，提供必要的通道选择功能，带宽范围为 20 MHz 至 40 MHz，具体取决于所选的滤波器。所示电路使用 20 MHz 带宽、153.6 MHz 中心频率 SAW 滤波器（产品型号：B5206），但也可以使用其它引脚兼容的滤波器。

在 SAW 滤波器匹配和抗混叠滤波器实施方案中，可能还需要考虑一些经验优化方法，帮助补偿实际的 PCB 寄生效应。关于级间滤波器设计的详细信息，请参考应用笔记 [AN-742](#) 和 [AN-827](#)。

为确保频带响应的可重复性，SAW 滤波器匹配元件和抗混叠滤波器建议使用 1% 电容。此外，推荐使用 Coilcraft 0603CS 或类似的电感。其它电阻、电容和电感的精度可以为 10%。

为了使本文所讨论的电路达到理想的性能，必须采用出色的布线、接地和去耦技术。至少应采用四层 PCB：一层为接地层，一层为电源层，另两层为信号层。

所有 IC 电源引脚都必须采用 0.01  $\mu$ F 至 0.1  $\mu$ F 的低电感多层陶瓷电容 (MLCC) 去耦至接地层（为简明起见，图中未显示），并应遵循各数据手册和教程 [MT-101](#) 的相关建议。有关布线方式和关键器件定位的建议，请参考产品评估板，可以通过器件的产品页面查询评估板。

即使 AD8376 和 AD9258（或其它 ADC）采用不同电源供电，因为 ADC 的输入信号为交流耦合信号，所以时序控制也不是问题。

关于 AVDD 和 DVDD 电源的正确时序（如果使用独立的电源），应参考相应的 ADC 数据手册。

## 更多资料

应用笔记AN-742：开关电容ADC的频率域响应。ADI公司。

应用笔记AN-827：实现放大器与开关电容ADC接口的匹配方  
谐振法。ADI公司。

电路笔记CN-0002——“利用AD8376 VGA驱动高中频交流耦  
合应用中的宽带宽ADC”，ADI公司。

电路笔记CN-0046——“用于高速ADC的超低失真差分RF/IF  
前端”，ADI公司。

Kester, Walt. 高速系统应用。第2章“优化数据转换器接口”，  
ADI公司，2006年。

指南MT-007：孔径时间、孔径抖动、孔径延迟时间——正本  
清源，ADI公司。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND  
的谜团。ADI公司。

指南MT-073：高速可变增益放大器(VGA)，ADI公司。

指南MT-075：高速ADC用差分驱动器概述。ADI公司。

指南 MT-101：去耦技术。ADI 公司。

## 数据手册和评估板

AD8376数据手册

AD9258数据手册

AD9258评估板

AD9517-4数据手册

AD9517-4评估板

ADL5356数据手册

ADL5356评估板

## 修订历史

10年1月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

Circuits from the Lab®参考设计是经过测试的参考设计, 有助于加速设计, 同时简化系统集成, 帮助并解决当今模拟、混合信号和RF设计挑战。如需更多信息和/或技术支持, 请访问 [www.analog.com/cn/CN0155](http://www.analog.com/cn/CN0155)。

## 连接/参考器件

AD7195	4.8 kHz、超低噪声、24 位、 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC、 内置 PGA 和交流激励
ADP3303	5 V 低压差线性调节器
ADP3303	3.3 V 低压差线性调节器

## 利用内置 PGA 和交流激励的 24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC AD7195 实现精密电子秤设计

### 电路功能与优势

该电路为采用 AD7195 构建的交流激励电子秤系统。

AD7195 是一款超低噪声、低漂移 24 位  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC，内置 PGA 和驱动器来实现称重传感器的交流激励。该器件将大多数系统构

建模块置于芯片内，因此能够简化电子秤设计。在 4.7 Hz 至 4.8 kHz 的完整输出数据速率范围内，AD7195 均能保持良好的性能，可用于以较低速度工作的电子秤系统，以及较高速电子秤系统。

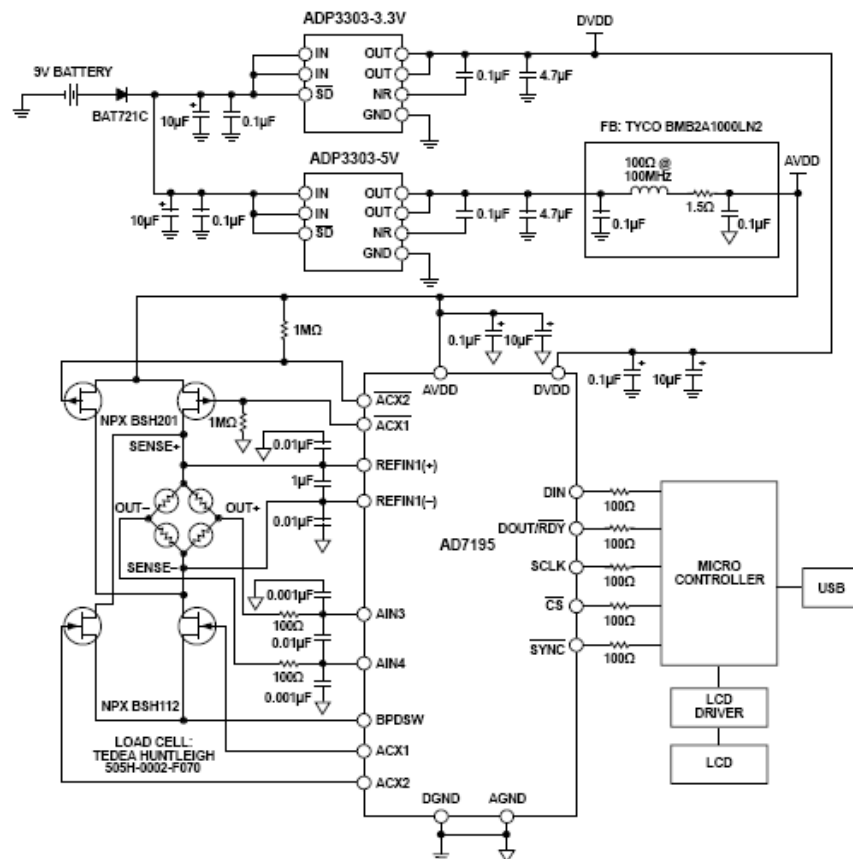


图1.采用内置交流激励的AD7195的电子秤系统(简化原理图,未显示所有连接)

**Rev.0**

**"Circuits from the Lab" 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 "Circuit from the Lab". (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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2010 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## 电路描述

利用交流激励,即可使用外部MOSFET来切换称重传感器的激励电压极性。然后对相邻值求平均值,以消除直流感应偏差。AD7195 包含内部逻辑来控制外部MOSFET的开关。来自AD7195 的驱动信号经过精确定时,非重叠,可确保在切换桥式驱动电压的极性时不会发生短路。上拉和下拉电阻  $1\text{ M}\Omega$  连接到ACX2和ACX2,防止上电时短路。

AD7195 提供一种集成式交流激励称重传感器解决方案。AD7195 可接受反向基准电压,当称重传感器的激励电压反向时,就需要这种特性。AD7195 将交流激励与转换保持同步,然后求平均值。只需用到很少的外部元件。除了MOSFET 晶体管外,只需在模拟输入端用一些滤波器,在基准电压引脚上配置一些电容等外部元件,便可满足电磁屏蔽(EMC)要求。

来自称重传感器的低电平信号由AD7195的内置PGA放大。该PGA 经过编程,以128的增益工作。AD7195 的转换结果通过USB 接口送至PC。使用Labview 软件可将转换结果转换为重量并显示。

图2 所示为实际的测试设置。为实现最佳系统性能,该测试设置使用一个6线式称重传感器。除激励、接地和2个输出连接外,6线式称重传感器还有2个检测引脚。这些检测引脚分别与惠斯登电桥的高端和低端相连。因此,尽管线路电阻会引起压降,但仍能精确测量该电桥上产生的电压。此外,AD7195 具有差分模拟输入,接受差分基准电压。称重传感器差分 SENSE 线路与AD7195 基准电压输入端相连,可构成一个比率式配置,不受电源激励电压的低频变化影响,也无需精密基准电压源。如果采用4线式称重传感器,则不存在检测引脚,ADC 基准电压引脚将与激励引脚EXC +和EXC -相连。这种配置中,由于存在线路电阻,EXC +/EXC -引脚与SENSE+/SENSE-之间将有压降,因此系统不是完全比率式。

AD7195 具有单独的模拟电源引脚和数字电源引脚。模拟部分必须采用5V 电源供电。数字电源独立于模拟电源,可以为2.7V 至5.25V 范围内的任意电压供电。

微控制器采用3.3V 电源。因此,DVDD 也采用3.3V 电源供电。这样就无需外部电平转换,从而可以简化ADC 与微控制器之间的接口。



图2.采用AD7195 的电子秤系统设置

有多种方法可以为该电子秤系统供电,例如:利用主电源或利用电池(如图1所示)供电。一个5V 低噪声稳压器用来确保AD7195 和称重传感器获得低噪声电源。ADP3303 (5V)是一款低噪声调节器,用来产生5V 电源。虚线框内显示的滤波器网络用来确保系统获得低噪声AVDD。此外,按照ADP3303 (5V)数据手册的建议,在调节器输出端配有降噪电容。为优化电磁屏蔽性能,调节器输出先经过滤波,然后再给AD7195 和称重传感器供电。3.3V 数字电源可利用ADP3303 (3.3V)调节器产生。由于电源或接地层上的任何噪声都会给系统带来噪声,导致电路性能降低,因此必须用低噪声调节器产生供给AD7195 和称重传感器的全部电源。

如果使用灵敏度为 $2\text{ mV/V}$ 的2kg 称重传感器,则激励电压为5V 时,来自称重传感器的满量程信号为10mV。称重传感器具有相关失调电压或TARE。此TARE 的幅度最高可达称重传感器满量程输出信号的50%。称重传感器还有最高可达满量程 $\pm 20\%$ 的增益误差。一些客户利用DAC 来消除或抵消TARE。如果AD7195 采用5V 基准电压,则增益设置为128 且器件配置为双极性工作模式时,其模拟输入范围等于 $\pm 40\text{ mV}$ 。相对于称重传感器的满量程信号(10mV)而言,AD7195 的模拟输入范围较宽,这有利于确保称重传感器的失调电压和增益误差不会使ADC 前端过载。



当一阶滤波器陷波设置值为 4.7Hz 时，AD7195 的均方根噪声为 6 nV，峰峰值噪声为 40 nV。当使用交流激励时（选中 Sinc4 滤波器），这相当于 1.17 Hz 的输出数据速率。无噪声采样数等于

$$\frac{10 \text{ mV}}{40 \text{ nV}} = 250,000 \quad (1)$$

The resolution in grams is, therefore, equal to

$$\frac{2 \text{ kg}}{250,000} = 0.008 \text{ g} \quad (2)$$

The noise free resolution is equal to

$$\log_2(250,000) = \frac{\log_{10}(250,000)}{\log_{10}(2)} = 17.9 \text{ bits} \quad (3)$$

在实际操作中，称重传感器本身会引入一定的噪声。图 3 显示将 1 kg 重物置于称重传感器上，并收集 500 次转换结果所测得的输出性能。软件计算的系统噪声为 10nV（均方根值）和 51nV（峰峰值），相当于 196,000 无噪声数或 17.5 位无噪声分辨率（根据测得的峰峰值噪声计算得出）。

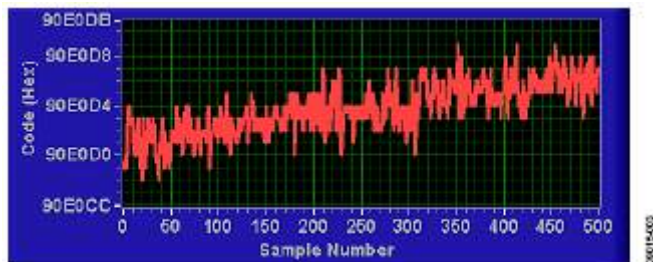


图 3. 500 次采样所测得的输出码，体现出噪声的影响

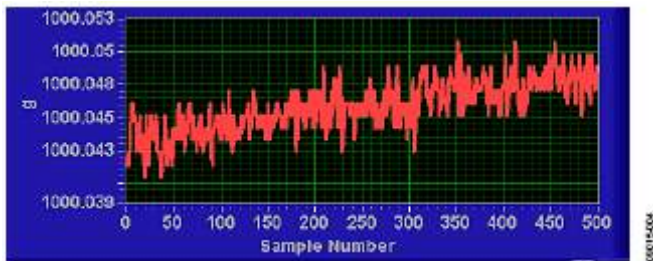


图 4. 500 次采样所测得的输出（单位为克），体现出噪声的影响

图 4 显示重量方面的性能。相对于 500 个码，输出的峰峰值变化量为 0.01 克。因此，该电子秤系统的精度达到 0.01 克。

上图所示为连接称重传感器之后，从 AD7195 回读得到的实际（原始）转换结果。在实际操作中，电子秤系统会采用数字后置滤波器。在后置滤波器中另外执行均值计算会进一步提高无噪声采样数，但数据速率会降低。

与其它高精度电路一样，必须采用适当的布局、接地和去耦技术。欲了解更多信息，请参考教程 MT-031—“实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的谜团”，以及教程 MT-101—“去耦技术”。

### 常见变化

有关其他无需交流激励的电子秤电路，请参考电路笔记 CN-0102、CN-0107、CN-0108、CN-0118 和 CN-0119。

### 更多资料

Kester, Walt. 1999年。《传感器信号调理》第2、3、4节。ADI 公司。

指南 MT-004: ADC 输入噪声面面观——无噪声是利还是弊？ADI 公司。

指南 MT-022: ADC 架构 III:  $\Sigma$ - $\Delta$  型 ADC 基础，ADI 公司。

指南 MT-023: ADC 架构 IV:  $\Sigma$ - $\Delta$  型 ADC 的高级概念和应用，ADI 公司。

指南 MT-031: 实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的谜团。ADI 公司。

指南 MT-101: 去耦技术。ADI 公司。

### 数据手册和评估板

AD7195 数据手册

AD7195 评估板

ADP3303 数据手册

### 修订历史

10年7月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



**Circuits  
from the Lab™**  
Reference Circuits

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0185](http://www.analog.com/cn/CN0185)。

### 连接/参考器件

AD7400A	隔离式 $\Sigma$ - $\Delta$ 型调制器
ADuM5000	隔离式 DC/DC 转换器
AD8646	双通道、24 MHz 轨到轨输入/输出运算放大器
ADP121	150 mA、低静态电流、CMOS 线性稳压器
ADP3301	高精度、100 mA、低压差线性稳压器

## 采用隔离式 $\Sigma$ - $\Delta$ 型调制器、隔离式 DC/DC 转换器和有源滤波器的新型模拟/模拟隔离器

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[CN-0185 电路评估板 \(EVAL-CN0185-EB1Z\)](#)

#### 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 所示电路是一种完整的低成本模拟/模拟隔离器解决方案，它提供 2500 V rms 的隔离值（1 分钟，符合 UL 1577 标准）。

该电路基于 AD7400A——一款二阶  $\Sigma$ - $\Delta$  型调制器，提供数字隔离的 1 比特数据流输出。隔离模拟信号利用一个基于双通道、低噪声、轨到轨运算放大器 AD8646 的四阶有源滤波器恢复。ADuM5000 用作隔离端的电源，两端完全隔离，系统仅使用一个电源。该电路具有 0.05% 的线性度，并能获益于调制器 AD7400A 和模拟滤波器提供的噪声整形。该电路的应用包括电机控制和电流监控，同时它还能有效替代基于光隔离器的隔离系统。

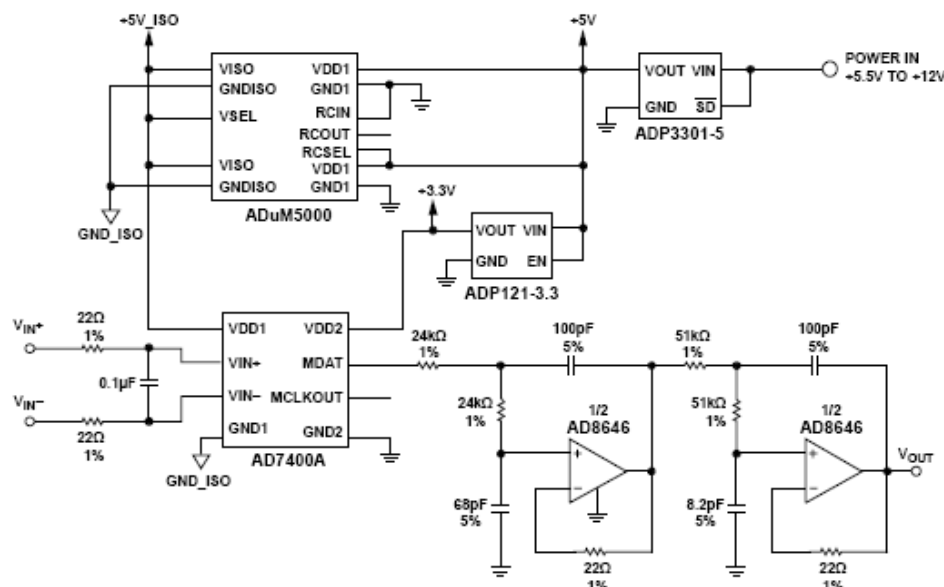


图 1. 采用 AD7400A 的模拟隔离器（原理示意图：未显示去耦和所有连接）

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)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 [www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## 电路描述

图 1 显示的是电路的框图。模拟输入由  $\Sigma$ - $\Delta$  型调制器 AD7400A 以 10 MSPS 进行采样。22  $\Omega$  电阻和 0.1  $\mu$ F 电容构成一个截止频率为 145 kHz 的差分输入降噪滤波器。AD7400A 的输出为隔离的 1 比特数据流。量化噪声由一个二阶  $\Sigma$ - $\Delta$  型调制器整形，将噪声移动到较高频率（参见教程 MT-022）。

为了重构模拟输入信号，数据流之后应连接一个阶数高于调制器阶数的滤波器。为了更好地衰减噪声，使用一个四阶切比雪夫滤波器。当滤波器阶数相同时，相比于其它滤波器响应（巴特沃兹、贝塞尔等），切比雪夫响应提供最为陡峭的滚降。该滤波器利用双通道、轨到轨输入和输出、低噪声、单电源运算放大器 AD8646 来实现。

ADuM5000 是一款基于 ADI 公司 iCoupler 技术的隔离式 DC/DC 转换器，用于为电路的隔离端（包含 AD7400A）提供电源。isoPower 技术利用高频开关元件，通过芯片级变压器传输功率。

本电路必须构建在具有较大面积接地层的多层电路板上。为实现最佳性能，必须采用适当的布局、接地和去耦技术（请参考教程 MT-031——“实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的谜团”、教程 MT-101——“去耦技术”和 ADuC7060/ADuC7061 评估板布局布线）。设计印刷电路板 (PCB) 布局布线时应特别小心，必须符合相关辐射标准以及两个隔离端之间的隔离要求。（参见应用笔记 AN-0971）

为了避免过驱 AD8646，输入信号应低于 AD8646 的电源电压 (5 V)。AD7400A 的输出为 1 和 0 的数据流，幅度等于 AD7400A VDD2 电源电压。因此，VDD2 数字电源为线性稳压器 ADP121 提供的 3.3 V 电压。或者，如果 VDD2 使用 5 V 电源，则数字输出信号应经过衰减后才能连接到有源滤波器。无论何种情况，电源都应进行适当调节，因为最终的模拟输出与 VDD2 直接成正比。

图 1 所示电路的 5 V 电源由 5 V 线性稳压器 ADP3301 提供，它接受 5.5 V 至 12 V 的输入电压。

## 模拟有源滤波器设计

低通滤波器的截止频率主要取决于电路所需的带宽。截止频率与噪声性能之间存在取舍关系，如果提高滤波器的截止频率，则噪声会增加。在本设计中尤其如此，因为  $\Sigma$ - $\Delta$  型调制器对噪声进行整形，将很大一部分移动到较高频率。本设计选择 100 kHz 的截止频率。

对于给定的截止频率，滤波器的过渡带越小，则滤波器通过的噪声越少。在所有滤波器响应中（巴特沃兹、切比雪夫、贝塞尔等），本设计之所以选择切比雪夫响应，是因为在给定滤波器阶数下，它的过渡带较小，但代价是瞬态响应性能略差。该滤波器是一个四阶滤波器，由两个采用 Sallen-Key 结构的二阶滤波器组成。该滤波器的设计使用了 Analog Filter Wizard 和 Multisim 工具。输入程序的参数如下：“滤波器类型：低通、切比雪夫 0.01 dB 纹波，阶数 = 4，Fc = 100 kHz，Sallen-Key”。除了反馈电阻降至 22  $\Omega$  外，全部使用程序生成的推荐值。

## 测量

AD7400A 的增益为 5.15，输出偏移电压为 1.65 V（采用 3.3 V 电源供电时）。0 V 的差分信号产生 1 和 0 的数字比特流，1 和 0 各占 50% 的时间。数字输出电源为 3.3 V，因此，滤波后会有 1.65 V 的直流偏移。在理想状态下，320 mV 的差分输入生成全 1 的数据流，滤波后产生 3.3 V 直流输出。因此，AD7400A 的有效增益为：

$$GAIN = (3.3 - 1.65) / 0.32 = 5.15625$$

通过测量，实测偏移为 1.641497 V，增益为 5.165。系统的直流传递函数如图 2 所示。实测线性度为 0.0465%。

无直流偏移电压下的输出电压与输入频率的关系如图 3 所示。输入信号电压为 40 mV p-p。因此，输出信号为  $40 \times 5.165 = 207$  mV p-p。注意，频率响应函数中约有 10 mV 的峰化，相当于大约 0.42 dB。

该系统具有良好的噪声性能，1 kHz 时的噪声密度为 2.50  $\mu$ V/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ，10 kHz 时为 1.52  $\mu$ V/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。

有关本电路笔记的完整设计支持包，请参阅

<http://www.analog.com/CN0185-DesignSupport>

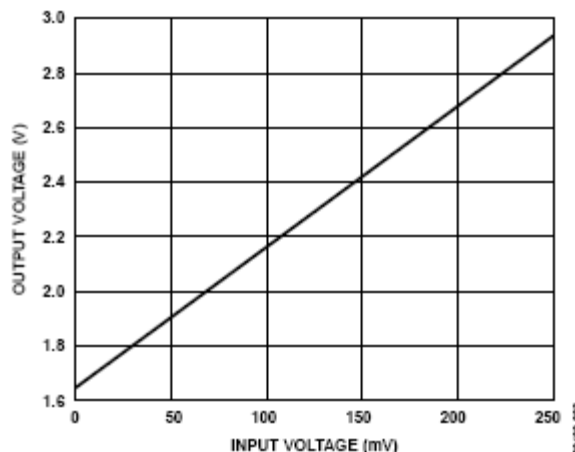


图 2. 系统直流传递函数

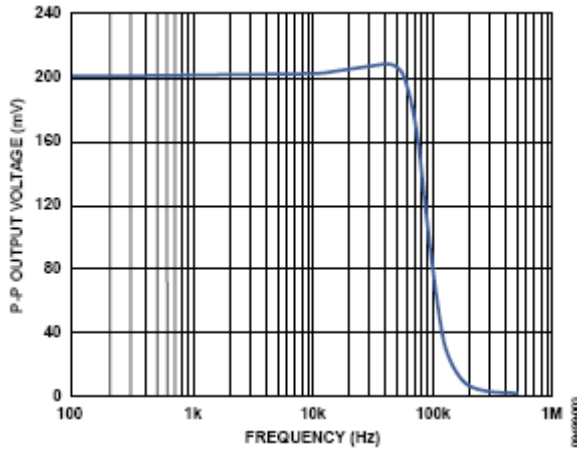


图 3. 40 mV  $p-p$  输入信号的电路频率响应

### 常见变化

该电路可以用于隔离电压监控，也可用于需要监控分流电阻两端电压的电流检测应用。系统输入信号的要求参见 AD7400A 数据手册。

如果用 ADuM6000 代替 ADuM5000，则整个电路的隔离额定值为 5 kV。

### 电路评估与测试

用 +6 V 电源使电路上电后，可以利用信号发生器和示波器轻松评估该电路。

#### 设备要求（可以用同等设备代替）

- 多功能校准仪（直流源）：Fluke 5700A
- 数字万用表：Agilent 3458A，8.5 位
- 频谱分析仪：Agilent 4396B
- 函数发生器：Agilent 33250A
- +6 V 电源

### 设置与测试

线性度测量设置的框图如图 4 所示。+6 V 电源连接到 EVAL-CN0185-EB1Z 电源引脚。

直流输入电压利用 Fluke 5700A 产生，使用 Agilent 3458A DVM 测量输出。Fluke 5700A 的直流输出以 1 mV 步进从 1 mV 提高到 250 mV，并记录数据。

为了测量频率响应，按照图 5 所示连接设备。首先将函数发生器 33250A 设置为 0 直流偏移的 40 mV 峰-峰值正弦波输出，然后利用频谱分析仪 4396B 扫描 100 Hz 至 500 kHz 的信号频率，并记录数据。

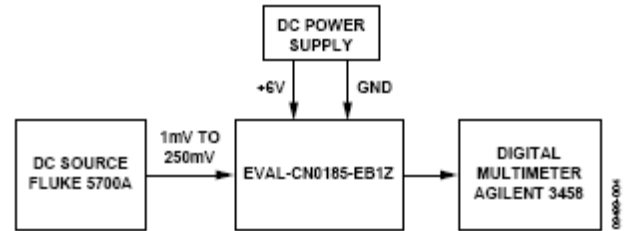


图 4. 用于测量线性度的 CN-0185 电路测试设置

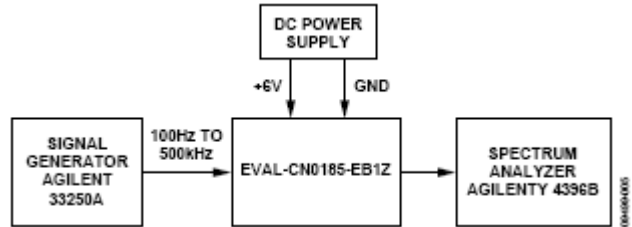


图 5. 用于测量频率响应的 CN-0185 电路测试设置

## 更多资料

CN0185设计支持包：

<http://www.analog.com/CN0185-DesignSupport>

ADIsimPower™设计工具，ADI公司。

模拟滤波器向导设计工具，ADI公司。

Cantrell, Mark. 应用笔记AN-0971: *isoPower*器件的辐射控制建议。ADI公司。

Chen, Baoxing、John Wynne和Ronn Kliger. 采用微型片内变压器的高速数字隔离器。ADI公司，2003年。

Chen, Baoxing. 采用*isoPower*™技术的*iCoupler*®产品：利用微变压器跨越隔离栅实现信号和电源传输。ADI公司，2006年。

Chen, Baoxing. “微变变压器隔离有利于数字控制。” *Power Electronics Technology*。2008年10月。

Ghiorse, Rich. 应用笔记AN-825: *iCoupler*®隔离产品的电源考虑因素。ADI公司。

Krakauer, David. “数字隔离提供紧凑的低成本解决方案，积极应对设计挑战。” *模拟对话*。第40卷，2006年12月。

指南MT-022: *ADC架构III:  $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC基础*，ADI公司。

指南MT-023: *ADC架构IV:  $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的高级概念和应用*，ADI公司。

指南MT-031: *实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团*。ADI公司。

指南MT-101: *去耦技术*。ADI公司。

USB 2.0技术规格，USB实施者论坛。

Wayne, Scott. “*iCoupler*数字隔离器保护工业、仪器仪表和计算机应用中的RS-232、RS-485和CAN总线。” *模拟对话*。第39卷，2005年10月。

Hank Zumbahlen. 应用笔记 AN-649 “ADI 有源滤波器设计工具的使用”，ADI 公司。

## 数据手册和评估板

AD7400A数据手册

AD7400A评估板

ADuM5000数据手册

ADuM5000评估板

AD8646数据手册

ADP121数据手册

ADP3301数据手册

ADG849数据手册

ADR443 数据手册

## 修订历史

11年4月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



**Circuits  
from the Lab™**  
Reference Circuits

Circuit from the Lab™ 是经过测试的电路设计，旨在解决常见的设计挑战，方便设计人员轻松快捷地实现系统集成。有关更多信息和/或技术支持，请访问：  
[www.analog.com/CN0187](http://www.analog.com/CN0187)。

## 连接/参考器件

ADL5502	450MHz 至 6 GHz 波峰因数检波器
AD7266	差分/单端输入、双通道、同步采样、2MSPS、12 位、3 通道 SAR ADC
ADA4891-4	低成本、四通道、CMOS、高速、轨到轨放大器
ADP121	150mA、低静态电流、CMOS 线性调节器，采用 5 引脚 TSOT 或 4 引脚 WLCSP 封装

## 针对高速、低功耗和 3.3 V 单电源而优化的波峰因数、峰值和均方根 RF 功率测量电路

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[CN-0187电路评估板\(EVAL-CN0187-SDPZ\)](#)

[系统演示平台\(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

#### 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 所示电路测量 450 MHz 至 6 GHz 的任意 RF 频率下的峰值和 rms 功率，动态范围约为 45 dB。测量结果转换为差分信号以便消除噪声，并通过串行接口和集成基准电压源在 12 位 SAR ADC 的输出端形成数字代码。在数字域中执行简单的两点校准。

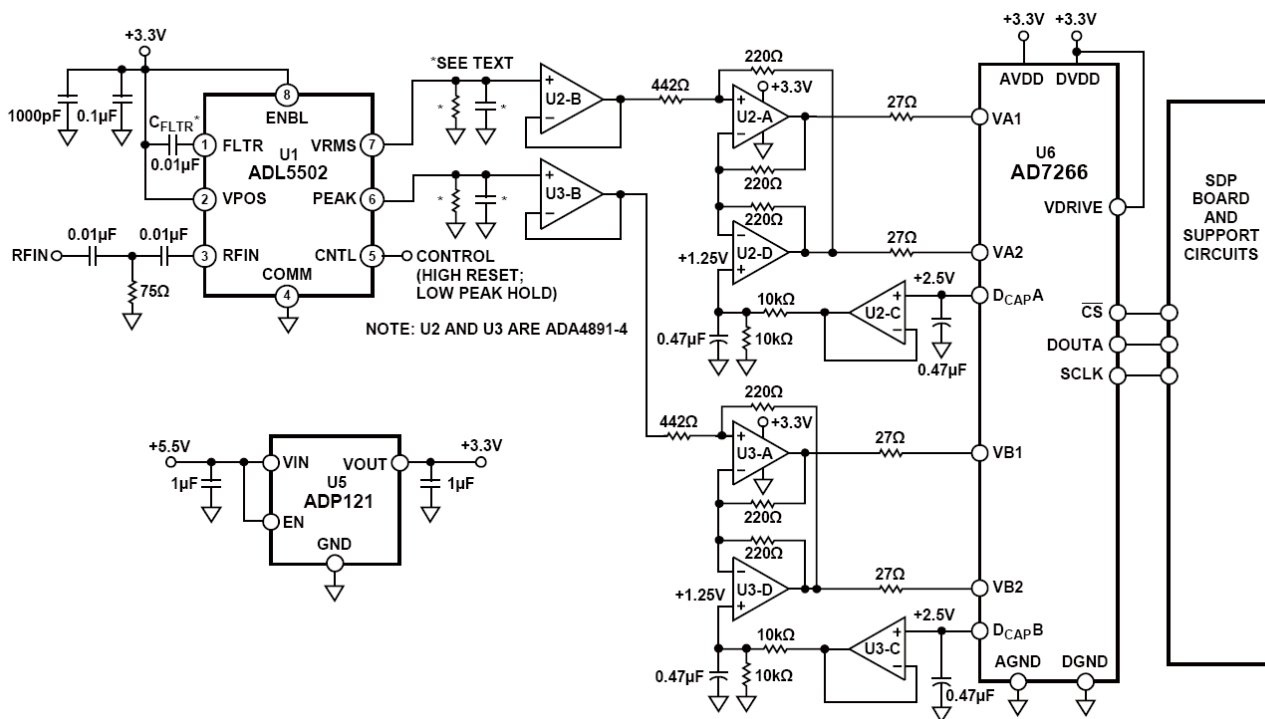


图 1. 高速、低功耗、波峰因数、峰值和 RMS 功率测量系统（简化示意图：未显示去耦和所有连接）

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)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 [www.analog.com.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



**ADL5502** 是一款均值响应 (true rms) 功率检波器, 内置包络检波器, 可以精确地测量调制信号的波峰因数(CF)。它可以用于 450 MHz 至 6 GHz 的高频接收机和发射机信号链, 包络带宽超过 10 MHz。峰值保持功能允许利用较低采样速率的ADC捕获包络中的短峰值。该器件的总功耗仅为 3 mA (3 V)。

**ADA4891-4** 是一款高速、四通道、CMOS放大器, 兼具高性能、低成本优势。每个放大器的功耗仅为 4.4 mA (3 V)。该放大器具有单电源供电能力, 输入电压范围可扩展至负供电轨以下 300 mV。轨到轨输出级使输出摆幅可以达到各供电轨 50 mV 以内, 以确保最大的动态范围。低失真和快速建立时间则使该器件成为此应用的理想选择。

**AD7266** 是一款双通道、12 位、高速、低功耗的逐次逼近型 ADC, 采用 2.7 V 至 5.25 V 单电源供电, 采样速率最高可达 2 MSPS。这款器件内置两个ADC, 两者之前均配有一个 3 通道多路复用器和一个能够处理 30 MHz 以上输入频率的低噪声、宽带宽采样保持放大器。功耗仅为 3 mA (3 V)。此外还内置一个 2.5 V 基准电压源。

电路采用**ADP121**的+3.3 V单电源供电, **ADP121**是一款低静态电流、低压差线性调节器, 采用 2.3 V 至 5.5 V 电源供电, 最大输出电流为 150 mA。驱动 150 mA 负载时压差仅为 135 mV, 这种低压差特性不仅可改善功效, 而且能使器件在很宽的输入电压范围内工作。满载时静态电流低至 30  $\mu$ A, 因此ADP121非常适合电池供电的便携式设备使用。

ADP121 可提供 1.2 V 至 3.3 V 范围内的输出电压, 其性能经过优化, 采用 1  $\mu$ F 小型陶瓷输出电容可实现稳定工作。ADP121 具有出色的瞬态响应性能, 所占电路板面积积极小。短路保护和热过载保护电路可以防止器件在不利条件下受损。ADP121 提供 5 引脚 TSOT 和 4 引脚、0.4 mm 间距无卤素 WLCSP 两种小型封装, 是适合各种便携式应用的业界最小尺寸解决方案。

## 电路描述

经测量的 RF 信号加在 ADL5502 上, RF 输入端的 75  $\Omega$  端接电阻与 ADL5502 的输入阻抗并联, 提供 50  $\Omega$  宽带匹配。更精确的电阻性或电抗性匹配可用于窄频带应用 (参见 ADL5502 数据手册的“RF 输入接口”部分)。

ADL5502 的内部滤波器电容提供平方域内的平均值, 但在输出端保留残余交流信号。高峰均比信号 (例如 W-CDMA 或 CDMA2000) 可在 ADL5502 VRMS 直流输出端产生交流残余电平。为减少这些低频成分对波形形成的影响, 需要一些额外的滤波处理。ADL5502 的内部平方域滤波器电容可通过在引脚 1 (FLTR) 与引脚 2 (VPOS) 之间连接  $C_{FLTR}$  电容来增强。交流残余电平则通过对 VRMS 输出增加电容来进一步减少。内部 100  $\Omega$  输出电阻与添加的输出电容共同形成低通滤波器, 从而减少 VRMS 输出端的输出纹波 (更多信息请参见 ADL5502 数据手册的“选择平方域滤波器”和“输出低通滤波器”部分)。

要测量波形峰值, 必须将控制线(CNTL)暂时设定为逻辑高电平 (复位模式 >1  $\mu$ s), 然后返回逻辑低电平 (峰值保持模式)。这样便可将 ADL5502 初始化至已知状态。将器件设定为测量峰值时, 应切换峰值保持模式, 且在此期间输入 rms 功率和波峰因数(CF)不会改变。

如果 ADL5502 处于峰值保持模式, 且 CF 从高变为低, 或者输入功率从高变为低, 则会报告错误峰值测量结果。ADL5502 仅报告峰值保持模式启动, 输入功率或 CF 较高时发生的最高峰值。除非 CNTL 复位, 否则 PEAK 输出不会反映信号内的最新峰值。

ADL5502 能够提供大约 3 mA 的 VRMS 输出电流。输出电流通过片内 100  $\Omega$  串联电阻提供; 因此, 任何负载电阻都会利用该片内电阻形成分压器。建议用 ADL5502 VRMS 输出驱动高阻性负载, 从而维持输出摆幅。如果应用需要驱动低电阻负载 (以及需要增加标称转换增益的情况), 则需要缓冲电路。

PEAK 输出专为驱动 2 pF 负载而设计。建议用 ADL5502 PEAK 输出驱动低容性负载, 从而实现完整输出响应时间。当在下降转换期间跟踪包络时, 较大容性负载的效应尤其明显。当包络处于下降转换中, 负载电容通过 1.9 k $\Omega$  的片内负载电阻放电。如果无法避免使用较大容性负载, 可通过将 PEAK 输出端的分流电阻接地抵消额外电容, 从而实现快速放电。该分流电阻可以使 ADL5502 流过更高的电流, 不应低于 500  $\Omega$ 。

图2至图5中显示了该电路的典型测量性能特征。

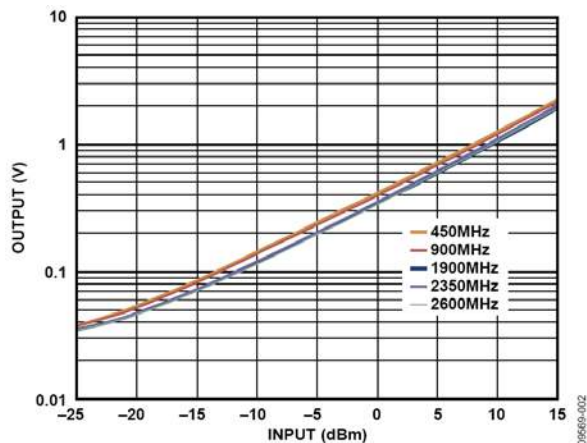


图2.测得的VRMS 输出与输入电平（对数比例）的关系，450 MHz、900 MHz、1900 MHz、2350 MHz、2600 MHz，+3.3 V 电源

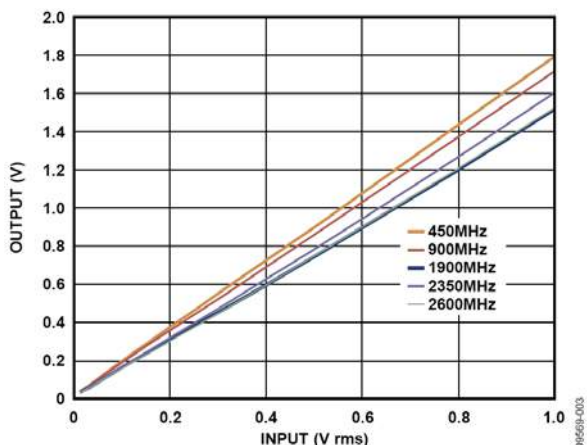


图3.测得的VRMS 输出与输入电平（线性比例）的关系，450 MHz、900 MHz、1900 MHz、2350 MHz、2600 MHz，+3.3 V 电源

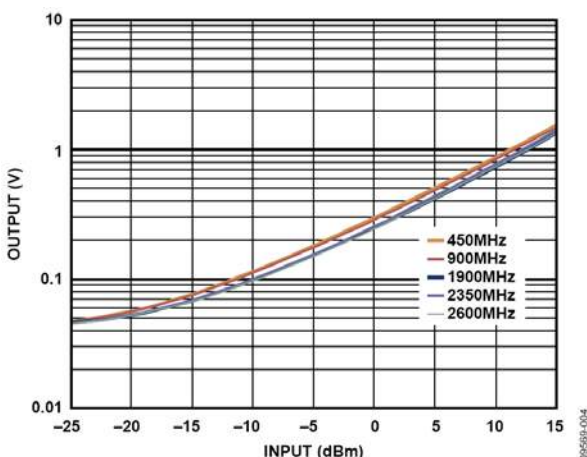


图4.测得的PEAK 输出与输入电平（对数比例）的关系，450 MHz、900 MHz、1900 MHz、2350 MHz、2600 MHz，+3.3 V 电源

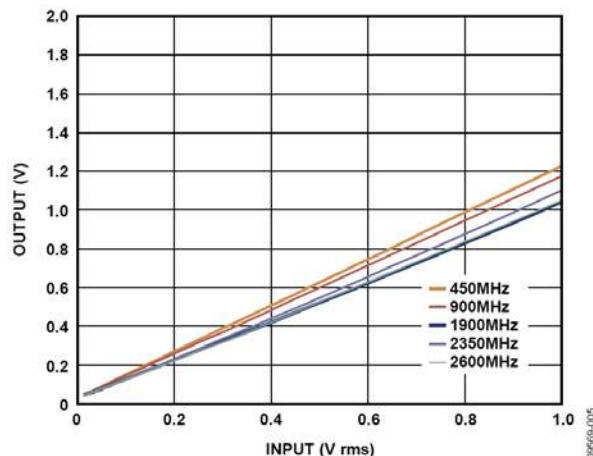


图5.测得的PEAK 输出与输入电平（线性比例）的关系，450 MHz、900 MHz、1900 MHz、2350 MHz、2600 MHz，+3.3 V 电源

开启时间和脉冲响应明显受平方域滤波器大小( $C_{FLTR}$ )和连接至VRMS输出的输出分流电容影响。图6（摘自ADL5502 数据手册）显示输出响应与RFIN引脚上RF脉冲之间的曲线图，带0.1  $\mu\text{F}$ 输出滤波器电容，无平方域滤波器电容( $C_{FLTR}$ )。下降沿明显与输出分流电容相关。

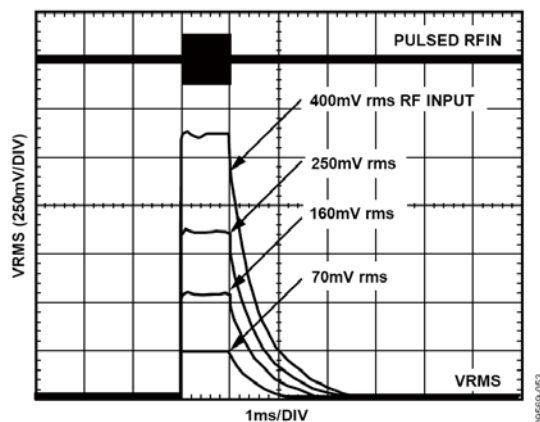


图6.输出响应与各种RF 输入脉冲电平的关系，3 V 电源，900 MHz 频率，平方域滤波器开启，0.1  $\mu\text{F}$  输出滤波器

要改善使能和脉冲响应的下降沿，可与输出分流电容并联放置电阻。添加的电阻有助于输出滤波器电容的放电。尽管该方法缩短了关断时间，但添加的负载电阻也会衰减输出（参见ADL5502 数据手册的“输出驱动能力”和“缓冲”部分）。图7（摘自ADL5502 数据手册）显示通过添加1 k $\Omega$  并联电阻实现的改良。

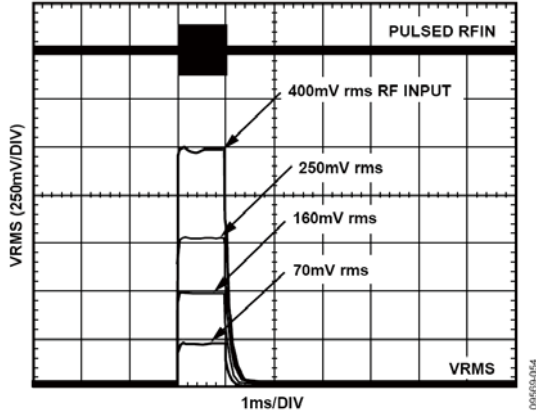


图7.输出响应与各种RF 输入脉冲电平的关系, 3V 电源, 900 MHz 频率, 平方域滤波器开启, 0.1  $\mu$ F 输出滤波器及 1 k $\Omega$  并联电阻

ADL5502 的RMS和PEAK输出经过单位增益缓冲器,后者驱动交叉耦合级,将单端输出转换为差分信号。AD7266 的+2.5 V 内部基准电压源(通过D<sub>CAP</sub>A和D<sub>CAP</sub>B引脚连接)则经过另一个单位增益缓冲器和分压器,这样,网络共模电压即设定为+1.25 V。

AD7266 可实现 RMS 和 PEAK 输出的同时采样,并在 1  $\mu$ s 响应时间内传输数据。数据通过单一串行数据线提供。由于斜率和截距随器件而改变,必须执行板级校准以实现高精度。一般而言,通过向 ADL5502 施加两个输入功率电平并测量相应的输出电压来执行校准。选择的校准点一般应在器件线性工作范围内,最佳拟合线通过下式计算转换增益(或斜率)和截距来表征:

$$Gain = (V_{VRMS2} - V_{VRMS1}) / (V_{IN2} - V_{IN1}) \quad (1)$$

$$Intercept = V_{VRMS1} - (Gain \times V_{IN1}) \quad (2)$$

其中:

$V_{IN}$  是 RFIN 的 rms 输入电压。

$V_{VRMS}$  是 VRMS 的电压输出。

计算增益和截距后,可得到一个公式,进而根据测量的输出电压计算(未知)输入功率。

$$V_{IN} = (V_{VRMS} - Intercept) / Gain \quad (3)$$

对于理想(已知)输入功率,测得的数据的法则一致性误差可计算如下:

$$ERROR (dB) = 20 \times \log \left( \frac{V_{VRMS, MEASURED} - Intercept}{Gain \times V_{IN, IDEAL}} \right) \quad (4)$$

图8和图9显示了 25°C 时 VRMS 与 PEAK 误差曲线图,这是校准 ADL5502 时的温度。注意,该误差不为零,这是因为即使 ADL5502 在其工作区域内,也无法完全符合理想线性公式。然而,通过适当的调整,可以使校准点处的误差等于零。

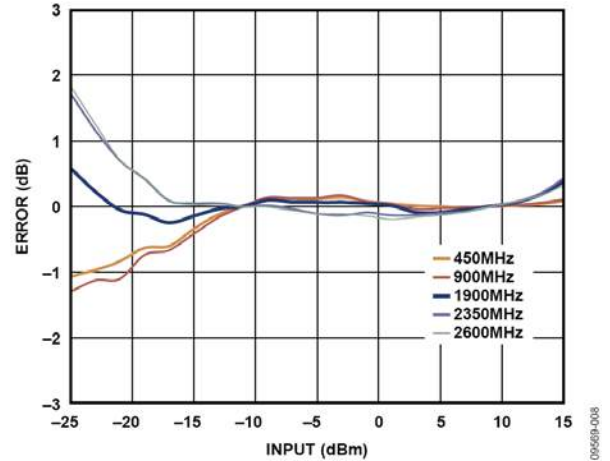


图8.测得的VRMS 线性度误差与输入电平的关系, 450 MHz、900 MHz、1900 MHz、2350 MHz、2600 MHz, +3.3 V 电源

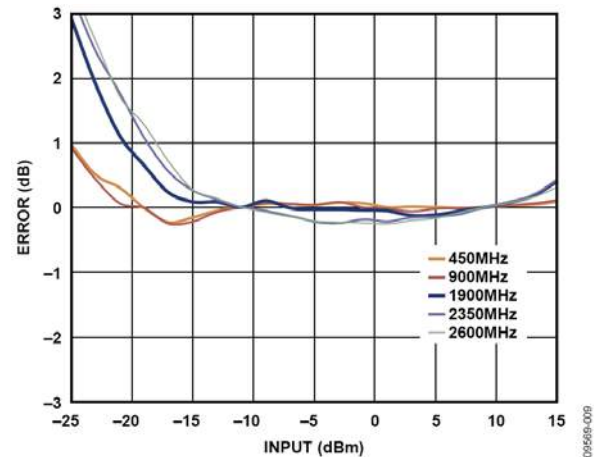


图9.测得的PEAK 线性度误差与输入电平的关系, 450 MHz、900 MHz、1900 MHz、2350 MHz、2600 MHz, +3.3 V 电源

已知VRMS和PEAK输出特征(斜率和截距)时,便可完成CF计算的校准。测量和计算任何波形的波峰因数必须采用三级过程。首先,必须将未知信号施加于RF输入,并测量相应的VRMS电平。该电平在图10中表示为 $V_{VRMS-UNKNOWN}$ 。RF输入 $V_{IN}$ 使用 $V_{VRMS-UNKNOWN}$ 和公式3计算。

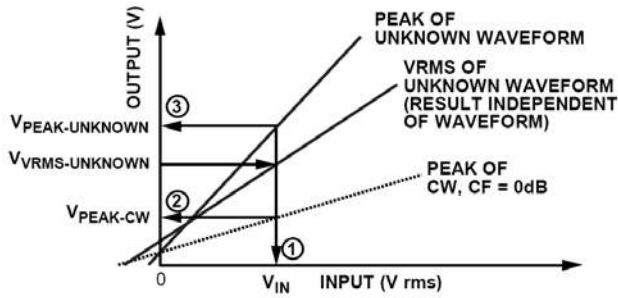


图 10. 波峰因数计算程序

接下来, 使用  $V_{IN}$  计算 PEAK、 $V_{PEAK-CW}$  的 CW 基准电平 (即输入波形是 CW 信号时看到的输出电压)。

$$V_{PEAK-CW} = (V_{IN} Gain_{PEAK}) + Intercept_{PEAK} \quad (5)$$

最后, 测量 PEAK、 $V_{PEAK-UNKNOWN}$  的实际电平, CF 可计算为:

$$CF = 20 \log_{10} (V_{PEAK-UNKNOWN} / V_{PEAK-CW}) \quad (6)$$

其中,  $V_{PEAK-CW}$  用作比较  $V_{PEAK-UNKNOWN}$  的基准点。如果两个  $V_{PEAK}$  值均相等, 则 CF 为 0 dB, 如图 11 中的 CW 信号所示 (摘自 ADL5502 数据手册)。在整个动态范围内, 计算出的 CF 在 0 dB 线附近波动。同样, 对于 3 dB、6 dB 和 9 dB CF 的复杂波形, 计算结果精确地在 CF 电平附近波动。

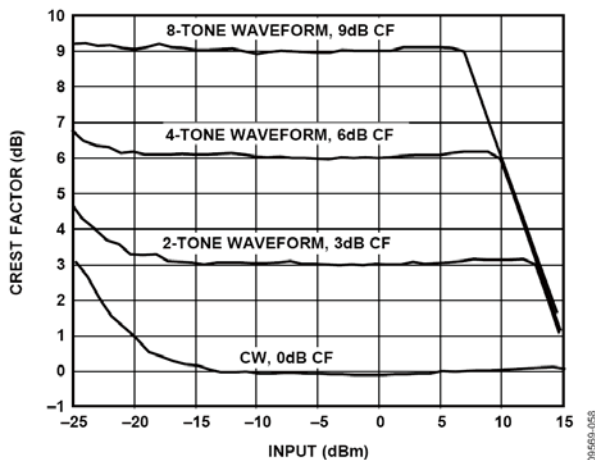


图 11. 报告的各种波形波峰因数

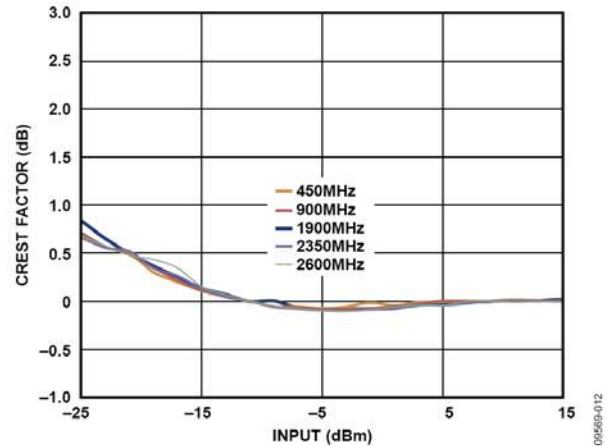


图 12. 测得的 CW 信号的波峰因数与输入电平的关系, 450 MHz、900 MHz、1900 MHz、2350 MHz、2600 MHz, +3.3 V 电源

该电路或任何高速电路的性能都高度依赖于适当的 PCB 布局, 包括但不限于电源旁路、受控阻抗线路 (如需要)、元件布局、信号布线以及电源层和接地层。(有关 PCB 布局的详情, 请参见 [MT-031 教程](#)、[MT-101 教程](#) 和 [高速印刷电路板布局实用指南一文](#)。) 有关本电路笔记的完整设计支持包, 请参阅 <http://www.analog.com/CN0187-DesignSupport>。

## 常见变化

对于需要较小 RF 检波范围的应用, 可以使用 [AD8363](#) 均方根检波器。AD8363 检波范围为 50 dB, 工作频率最高达 6 GHz。对于非均方根检波应用, 可使用 [AD8317/AD8318/AD8319](#) 或 [ADL5513](#)。这些器件提供不同的检波范围, 输入频率范围最高达 10 GHz (有关详情参见 [CN-0150](#))。

## 电路评估与测试

本电路使用 EVAL-CN0187-SDPZ 电路板和 EVAL-SDP-CB1Z 系统演示平台 (SDP) 评估板。这两片板提供 120 引脚的对接连接器, 可以快速完成设置并评估电路性能。EVAL-CN0187-SDPZ 板包含要评估的电路, 如本笔记所述。SDP 评估板与 CN0187 评估软件一起使用, 可从 EVAL-CN0187-SDPZ 电路板获取数据。



### 设备要求

- 带USB端口的Windows® XP、Windows Vista® (32 位) 或 Windows® 7 (32 位) PC
- EVAL-CN0187-SDPZ 电路评估板
- EVAL-SDP-CB1Z SDP 评估板
- CN0187 评估软件
- 电源电压: +6 V 或+6 V 壁式电源适配器
- RF 信号源
- 带 SMA 连接器的同轴 RF 电缆

### 开始使用

将 CN0187 评估软件光盘放入 PC 的光盘驱动器, 加载评估软件。打开“我的电脑”, 找到包含评估软件光盘的驱动器, 打开 Readme 文件。按照 Readme 文件中的说明安装和使用评估软件。

### 功能框图

电路框图参见本电路笔记的图 1, 电路原理图参见“EVAL-CN0187-SDPZ-SCH”pdf 文件。此文件位于[CN0187 设计支持包](#)中。

### 设置

EVAL-CN0187-SDPZ 电路板上的 120 引脚连接器连接到 EVAL-SDP-CB1Z (SDP) 评估板上标有“CON A”的连接器。应使用尼龙五金配件, 通过 120 引脚连接器两端的孔牢牢固定这两片板。使用适当的 RF 电缆, 通过 SMA RF 输入连接器将 RF 信号源连接至 EVAL-CN0187-SDPZ 板。在断电情况下, 将一个+6 V 电源连接到板上标有+6 V 和 GND 的引脚。如果有+6 V 壁式电源适配器, 可以将它连接到板上的管式插孔连接器, 代替+6 V 电源。SDP 板附带的 USB 电缆连接到 PC 上的 USB 端口。注意: 此时请勿将该 USB 电缆连接到 SDP 板上的微型 USB 连接器。

### 测试

为连接到 EVAL-CN0187-SDPZ 电路板的+6 V 电源(或壁式电源适配器)通电, 启动评估软件, 并通过 USB 电缆将 PC 连接到 SDP 板上的微型 USB 连接器, 如果“设备管理器”中列出了“ADI 系统开发平台”驱动程序, 则软件能够与 SDP 板通信。

一旦 USB 通信建立, 就可以使用 SDP 板来发送、接收、捕捉来自 EVAL-CN0187-SDPZ 板的串行数据。

本电路笔记中的数据通过 Rohde & Schwarz SMT-03 RF 信号源和 Agilent E3631A 电源产生。信号源设定为图表所示频率, 输入功率按 1 dB 步进, 数据按 1 dB 增量记录。

有关如何使用评估软件来捕捉数据的详细信息, 请参阅 CN0187 评估软件 Readme 文件。

有关SDP板的信息, 请参阅[SDP用户指南](#)。

### 更多资料

[CN0187设计支持包](#):

<http://www.analog.com/CN0187-DesignSupport>

[SDP用户指南](#)

[John Ardizzoni. 高速印刷电路板布局实用指南。《模拟对话》39-09, 2005年9月。](#)

[电路笔记CN-0150: 利用AD8318对数检波器实现经软件校准的1 MHz至8 GHz、70 dB RF功率测量系统, ADI公司。](#)

[指南MT-031: 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。](#)

[指南MT-073: 高速可变增益放大器\(VGA\), ADI公司。](#)

[指南MT-077: 对数放大器基础知识, ADI公司。](#)

[指南MT-078: 高速对数放大器, ADI公司。](#)

[指南MT-081: RMS-DC转换器, ADI公司。](#)

[指南MT-101: 去耦技术。ADI公司。](#)

[Whitlow, Dana. 现代通信系统中接收器用自动增益控制环路的设计和工作原理。第8章。ADI无线研讨会。2006年。](#)

### 数据手册和评估板

[CN-0187电路评估板 \(EVAL-CN0187-SDPZ\)](#)

[系统演示平台 \(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

[ADL5502数据手册](#)

[ADL5502评估板](#)

[AD7266数据手册](#)

[AD7266评估板](#)

[ADA4891数据手册](#)



## 修订历史

11年4月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

©2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN09569sc-0-4/11(0)

[www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)

Circuits from the Lab®参考设计是经过测试的参考设计, 有助于加速设计, 同时简化系统集成, 帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持, 请访问 [www.analog.com/cn/CN0216](http://www.analog.com/cn/CN0216)。

### 连接/参考器件

AD7791	低功耗、缓冲式、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC
ADA4528-1	精密、超低噪声、轨到轨输入/输出、零漂移运算放大器
ADP3301	高精度anyCAP® 100 mA低压差线性调节器

## 利用24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC AD7791和外部零漂移放大器ADA4528-1实现精密电子秤设计

## 评估和设计支持

## 电路评估板

**CN-0216电路评估板(EVAL-CN0216-SDPZ)**

### 系统演示平台(EVAL-SDP-CB1Z)

## 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所示电路是一个精密电子秤信号调理系统，它使用一个低功耗缓冲式24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC AD7791和两个外部零漂移放大器ADA4528-1。该解决方案支持单电源供电，可提供高直流增益。

前端使用超低噪声、低失调电压、低漂移放大器,以便放大来自称重传感器的低电平信号。对于满量程输出为10 mV的称重传感器,该电路提供15.3位的无噪声码分辨率。

利用本电路可以非常灵活地设计定制低电平信号调理前端，用户可以轻松优化传感器-放大器-转换器组合电路的整体传递函数。在9.5 Hz至120 Hz的完整输出数据速率范围内，**AD7791**均能保持良好的性能，可用于以各种较低速度工作的电子秤应用。

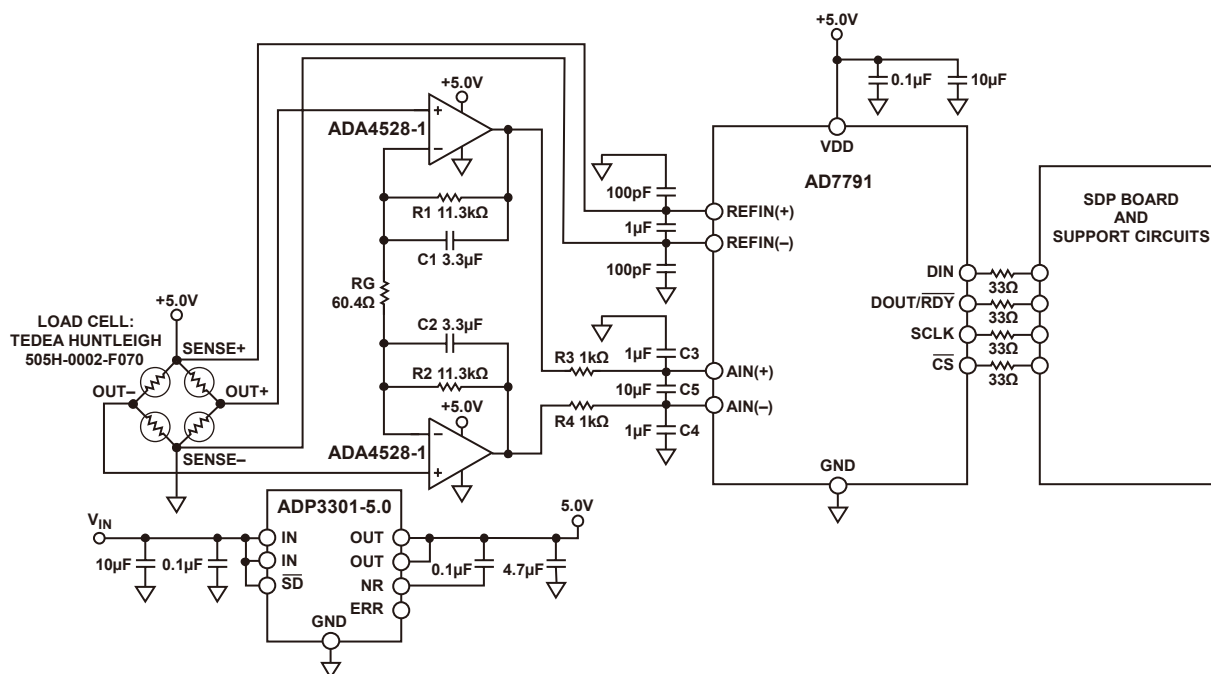


图1. 采用AD7791的电子秤系统（原理示意图；未显示去耦和所有连接）

## 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)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 [www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## 电路描述

图2所示为实际的测试设置。为进行测试，使用6线Tede-Huntleigh 505H-0002-F070称重传感器。

流经PCB走线的电流会产生IR压降，走线较长时，这种压降可能达到数毫伏或更大，引起相当大的误差。室温下，1英寸长、0.005英寸宽的1盎司铜走线的电阻约为100 mΩ。当负载电流为10 mA时，该走线可能引起1 mV的误差。

除激励、接地和两个输出连接外，6线式称重传感器还有两个检测引脚。这些检测引脚分别与惠斯登电桥的高端（激励引脚）和低端（地引脚）相连。尽管在线路电阻上存在一定的压降，但仍能精确测量该电桥上产生的电压。此外，AD7791接受差分模拟输入和差分基准电压。这两个检测引脚与AD7791基准电压输入端相连，构成一个比率式配置，不受电源激励电压的低频变化影响。因为是比率式连接，所以无需精密基准电压源。

与6线式称重传感器不同，4线式称重传感器不具有检测引脚，ADC差分基准电压引脚与激励电压和地直接相连。采用这种连接时，由于有线路电阻，ADC的激励引脚与基准电压引脚之间存在压差。另外，低端（地）上也有线路电阻引起的压差。这样，系统将不完全是比率式。

当激励电压为5 V时，Tede-Huntleigh 2 kg称重传感器的灵敏度为2 mV/V，满量程输出为10 mV。称重传感器也具有相关的失调电压或TARE。此外，称重传感器还具有增益误差。一些客户利用DAC来消除或抵消TARE。当AD7791采用5 V基准电压时，差分模拟输入范围等于±5 V或10 V p-p。图1所示电路将称重传感器输出放大375 ( $1 + 2R1/RG$ ) 倍，因此以称重传感器输出为基准的满量程输入范围为10 V/375 = 27 mV p-p。相对于称重传感器的10 mV p-p满量程信号，AD7791的模拟输入范围较宽，这有利于确保称重传感器的失调电压和增益误差不会使ADC前端过载。

来自称重传感器的低电平幅度信号由两个零漂移放大器ADA4528-1放大。顾名思义，零漂移放大器的失调电压漂移接近为0。放大器连续自行校正任何直流误差，尽可能保持精确。除了低失调电压和漂移外，零漂移放大器也没有1/f噪声，这一重要特性有助于电子秤在直流或低频时进行精确测量。

两个运算放大器ADA4528-1配置为三运放仪表放大器的第一级。第三个运算放大器连接为差动放大器，一般用于第二级，但在图1所示电路中，AD7791的差分输入端执行此功能。

增益等于  $1 + 2R1/RG$ 。电容C1和C2置于运算放大器的反馈环路中，与R1和R2一起形成4.3 Hz截止频率的低通滤波器，用于限制进入Σ-Δ型ADC的噪声量。C5与R3和R4一起形成一个截止频率为8 Hz的差分滤波器，用以进一步限制噪声。C3和C4与R3和R4一起形成截止频率为159 Hz的共模滤波器。

低噪声调节器ADP3301为AD7791、ADA4528-1和称重传感器供电。除了去耦电容外，按照ADP3301数据手册的建议，在调节器输出端配有降噪电容。调节器必须为低噪声型，因为电源或地层的任何噪声都会在系统中引起噪声，导致电路性能下降。

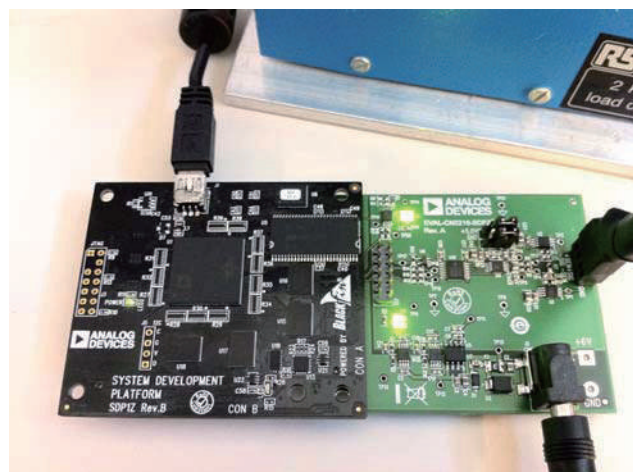


图2. 采用AD7791的电子秤系统设置

24位Σ-Δ型ADC AD7791转换来自称重传感器的经放大的信号。AD7791配置为缓冲工作模式，以适应模拟输入引脚上的R-C滤波器网络的阻抗。

图3显示AD7791在不同输出数据速率下的均方根噪声。此图显示，均方根噪声随着输出数据速率增加而增加。不过，在整个输出数据速率范围内，该器件均能保持良好的噪声性能。

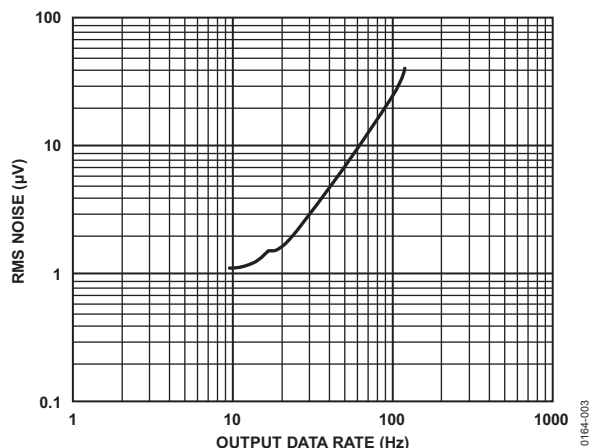


图3. AD7791在不同输出数据速率下的均方根噪声，采用2.5 V基准电压（5 V p-p输入范围），缓冲器开启

在9.5 Hz输出数据速率和2.5 V基准电压下，AD7791的均方根噪声为1.1 µV，因而无噪声码数为

$$\frac{V}{6.6 \times 1.1 \mu\text{V}} = 688,705$$

其中系数6.6用来将均方根电压转换为峰峰值电压。

因此，相应的无噪声码分辨率等于：

$$\log_2(688,705) = \frac{\log_{10}(688,705)}{\log_{10}(2)} = 19.5 \text{ bits}$$

注意，这是AD7791在不连接称重传感器或输入放大器情况下的性能。

ADA4528-1具有5.9 nV/√Hz的电压噪声密度，因此，输入放大器和电阻会增加系统的噪声。此外，称重传感器本身也会增加噪声。

图1所示电路使用5 V基准电压，峰峰值输入范围为10 V，因此LSB等于：

$$1\text{LSB} = \frac{10 \text{ V}}{2^{24}} = 0.596 \mu\text{V}$$

来自称重传感器的10 mV p-p满量程信号在ADC中产生3.75 V p-p信号，约为ADC量程的38%。

在连接称重传感器（无负载）的情况下，获取7个样本集，每个样本集包含500个样本。计算每个样本集的峰峰值代码分布，然后求平均值以产生159个采样点的代码分布。基于ADC的3.75 V p-p满量程输入，这相当于 $159 \times 0.596 \mu\text{V} = 94.8 \mu\text{V}$  p-p噪声。

因此，无噪声采样数等于：

$$\frac{3.75 \text{ V}}{94.8 \mu\text{V}} = 39,557$$

整体系统的相应无噪声码分辨率等于：

$$\log_2(39,557) = \frac{\log_{10}(39,557)}{\log_{10}(2)} = 15.3 \text{ bits}$$

图4显示了500个样本的ADC代码图（52.6秒、9.5 Hz数据速率）。注意，峰峰值分布约为160个代码。

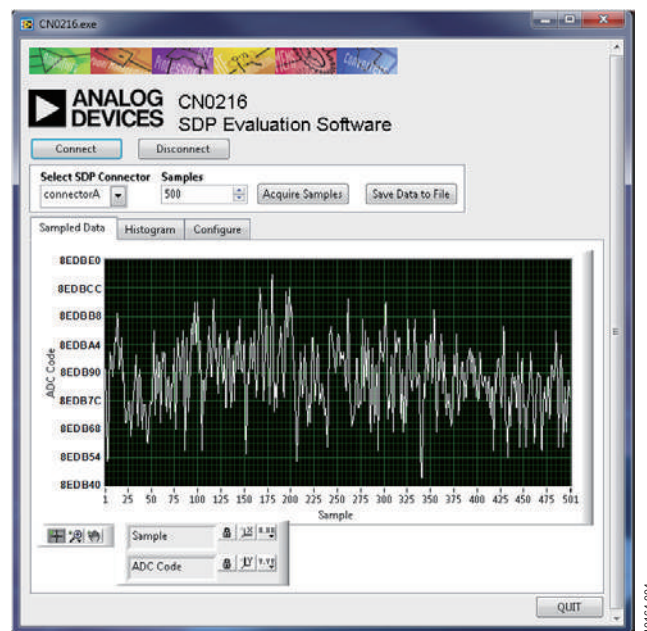


图4. 500次采样所测得的输出码，体现出噪声的影响

图5以直方图形式显示了同样的数据。图4和图5显示从AD7791回读的实际（原始）转换结果。在实际操作中，电子秤系统通常会采用数字后置滤波器。在后置滤波器中另外执行均值计算会进一步提高无噪声采样数，但数据速率会降低。

用克表示的系统分辨率计算如下：

$$\frac{2 \text{ kg}}{39,557} = 0.05 \text{ g}$$

与其它高精度电路一样，必须采用适当的布局、接地和去耦技术。欲了解更多信息，请参考指南MT-031—“实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团”，以及指南MT-101—“去耦技术”。有关本电路笔记的完整设计支持包，请参阅[www.analog.com/CN0216-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0216-DesignSupport)。



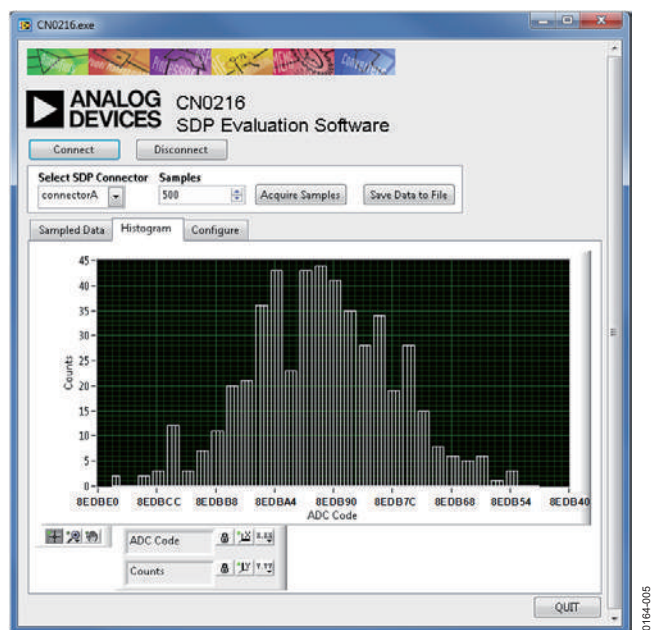


图5. 500次采样所测得的直方图，体现出噪声的影响

## 常见变化

下列应用笔记讨论了其它适合电子秤应用的ADC和电路：[CN-0102 \(AD7190\)](#)、[CN-0107 \(AD7780\)](#)、[CN-0108 \(AD7781\)](#)、[CN-0118 \(AD7191\)](#)、[CN-0119 \(AD7192\)](#)和[CN-0155 \(AD7195\)](#)。

[AD7171](#)是一款16位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC。

针对低功耗解决方案，请使用[ADA4051-2](#)。[ADA4051-2](#)是一款双通道、低功耗、零漂移放大器，每个放大器的电源电流仅为20  $\mu$ A。

## 电路评估与测试

本电路使用[EVAL-CN0216-SDPZ](#)电路板和[EVAL-SDP-CB1Z](#)系统演示平台(SDP)评估板。这两片板具有120引脚的对接连接器，可以快速完成设置并评估电路性能。[EVAL-CN0216-SDPZ](#)板包含要评估的电路，如本笔记所述。SDP评估板与[CN-0216](#)评估软件一起使用，可从[EVAL-CN0216-SDPZ](#)电路板获取数据。

## 设备要求

- 带USB端口和Windows XP、Windows Vista (32位) 或 Windows 7 (32位) 的PC
- [EVAL-CN0216-SDPZ](#)电路评估板
- [EVAL-SDP-CB1Z](#) SDP评估板
- CN0216评估软件
- Tedea-Huntleigh 505H-0002-F070称重传感器或等效器件
- 电源：+6 V或+6 V壁式电源适配器

## 开始使用

将CN0216评估软件光盘放进PC的光盘驱动器，加载评估软件。打开“我的电脑”，找到包含评估软件光盘的驱动器，打开Readme文件。按照Readme文件中的说明安装和使用评估软件。

## 功能框图

电路框图参见本电路笔记的图1，电路原理图参见PDF文件“EVAL-CN0216-SDPZ-SCH”。此文件位于[CN0216设计支持包](#)中。

## 设置

将[EVAL-CN0216-SDPZ](#)电路板上的120引脚连接器连接到[EVAL-SDP-CB1Z](#) (SDP)评估板上标有“CON A”的连接器。应使用尼龙五金配件，通过120引脚连接器两端的孔牢固固定这两片板。称重传感器连接到[EVAL-CN0216-SDPZ](#)板。

在断电情况下，将一个+6 V电源连接到板上标有+6 V和GND的引脚。如果有+6 V壁式电源适配器，可以将它连接到板上的管式插孔连接器，代替+6 V电源。SDP板附带的USB电缆连接到PC上的USB端口。注：此时请勿将该USB电缆连接到SDP板上的微型USB连接器。

## 测试

为连接到[EVAL-CN0216-SDPZ](#)电路板的+6 V电源（或壁式电源适配器）通电。启动评估软件，并通过USB电缆将PC连接到SDP板上的微型USB连接器。如果设备管理器中列出了Analog Devices System Development Platform驱动器，软件将能与SDP板通信。

一旦USB通信建立，就可以使用SDP板来发送、接收、捕捉来自[EVAL-CN0216-SDPZ](#)板的串行数据。

有关如何使用评估软件来捕捉数据的详细信息，请参阅CN0216评估软件Readme文件。

有关SDP板的信息，请参阅[SDP用户指南](#)。

## 分析数据

至少应采集ADC输出数据的500个样本。一旦将样本集导出到Excel等电子表格程序，就可以对样本进行分析。假设噪声为高斯分布，则样本的标准差约等于均方根噪声。峰峰值噪声约为均方根噪声的6.6倍。

峰峰值噪声也可以直接从样本集获得，只需将最大样本减去最小样本。实际上，利用这种方法获得的结果与将均方根值乘以6.6获得的值大致相同。



从样本获得的值的单位是LSB，因此必须将其转换为电压，对于5 V基准电压， $1 \text{ LSB} = 0.596 \mu\text{V}$ 。

需要时，可以对多个样本集的结果求平均值，以获得更精确的测量结果。

无噪声码分辨率根据峰峰值噪声计算，方法如上文所述。

## 更多资料

Kester, Walt. 1999年。传感器信号调理。第2部分。ADI公司。

Kester, Walt. 1999年。传感器信号调理。第3部分。ADI公司。

Kester, Walt. 1999年。传感器信号调理。第4部分。ADI公司。

指南MT-004: *ADC输入噪声面面观——无噪声是利还是弊?* ADI公司。

指南MT-022: *ADC架构III:  $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC基础*，ADI公司。

指南MT-023: *ADC架构IV:  $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的高级概念和应用*，ADI公司。

指南MT-031: *实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团*，ADI公司。

指南MT-063: *三运算放大器仪表放大器基本结构*。ADI公司。

指南MT-101: *去耦技术*。ADI公司。

Wong, Vicky. 应用笔记AN-1114: *最低噪声零漂移放大器具有 $5.6 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 电压噪声密度*。ADI公司。

电路笔记CN-0102: *利用内置PGA的24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC AD7190实现精密电子秤设计*。ADI公司。

电路笔记CN-0107: *利用内置PGA的24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC AD7780实现电子秤设计*。ADI公司。

电路笔记CN-0108: *利用内置PGA的20位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC AD7781实现电子秤设计*。ADI公司。

电路笔记CN-0118: *利用内置PGA的24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC AD7191实现精密电子秤设计*。ADI公司。

电路笔记CN-0119: *利用内置PGA的24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC AD7192实现精密电子秤设计*。ADI公司。

电路笔记CN-0155: *利用内置PGA和交流激励的24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC实现精密电子秤设计*。ADI公司。

## 数据手册和评估板

AD7791数据手册

ADA4528-1数据手册

ADP3301数据手册

CN-0216电路评估板 (EVAL-CN0216-SDPZ)

系统演示平台 (EVAL-SDP-CB1Z)

## 修订历史

11年9月—修订版0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

## Circuits from the Lab™ Reference Circuits

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0237](http://www.analog.com/cn/CN0237)。

### 连接/参考器件

<a href="#">ADA4940-1/</a> <a href="#">ADA4940-2</a>	单/双通道超低功耗、低失真差分 ADC 驱动器
<a href="#">AD7982</a>	18 位、1 MSPS PulSAR ADC
<a href="#">ADR395</a>	低功耗、低噪声、5 V 精密带隙基准电压源

## 超低功耗、18 位、差分 PulSAR ADC 驱动

### 评估和设计支持

#### 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所示电路使用超低功耗、18 位 1 MSPS ADC [AD7982](#)，由低功耗全差分放大器 [ADA4940-1](#) 来驱动。低噪声精密 5.0V 基准电压源 [ADR395](#) 用于提供该 ADC 所需的 5V 电源。图1所示的所有 IC 均采用 3 mm × 3 mm LFCSP 或 3 mm × 5 mm MSOP 小型封装，从而有助于降低电路板成本和空间。

电路中 [ADA4940-1](#) 的功耗不到 9 mW。18 位 1 MSPS [AD7982](#) ADC 的功耗仅 7 mW（1 MSPS 时），远低于市面上的同类 ADC。此功耗也随吞吐量而变化。[ADR395](#) 功耗仅为 0.7mW，使系统总功耗低于 17 mW。

### 电路描述

诸如 [AD7982](#) 18 位 1 MSPS PulSAR® ADC 等现代高分辨率 SAR ADC 需要差分驱动器来实现最优性能。在这类应用场合，ADC 驱动器接收差分或单端信号，并执行所需的电平转换以在适当的电平下驱动 ADC 输入端。

图1显示 [ADA4940-1](#) 差分放大器进行电平转换并驱动 18 位 [AD7982](#) 差分输入逐次逼近型 PulSAR ADC。利用四个电阻，[ADA4940-1](#) 既能以增益 1 来缓冲信号，也可放大信号获得更大动态范围。交流和直流性能兼容 18 位 1 MSPS PulSAR® ADC [AD7982](#) 和该系列的其它 16 及 18 位器件，采样率最高可达 2 MSPS。该电路也可接受单端输入信号以产生相同的全差分输出信号。

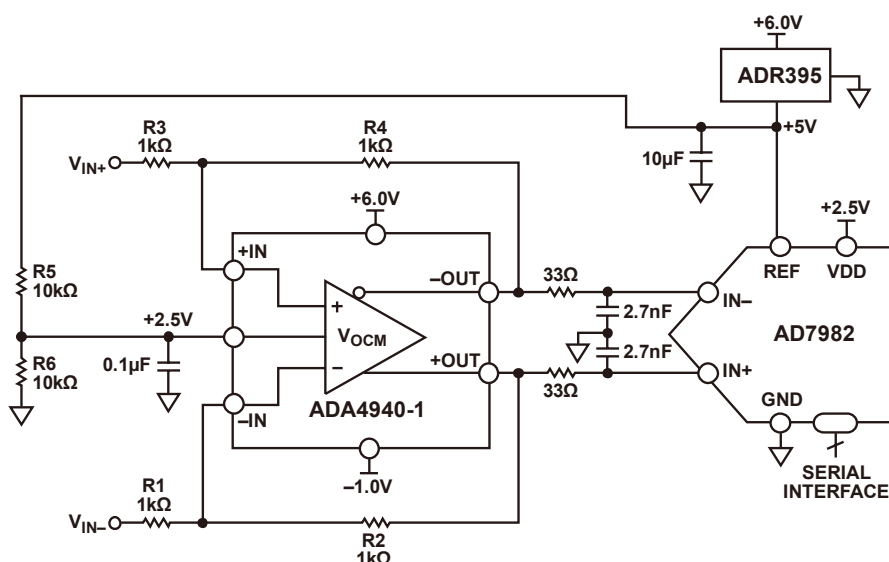


图1. 高性能18位差分ADC驱动器（简易原理图：未显示所有连接和去耦）

### 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)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700  
Fax: 781.461.3113  
[www.analog.com.cn](http://www.analog.com.cn)  
©2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

AD7982采用2.5 V的VDD单电源供电。它内置一个低功耗、高速、18位采样ADC和一个多功能串行接口端口。基准电压 (REF) 从ADR395精密低压差 (0.3 V) 带隙基准源由外部获得，并可独立于电源电压来设定。ADA4940-1具有直流耦合输入和输出，并视需要执行一次差分或单端转差分转换。它还可以缓冲驱动信号。一个单极1.8 MHz R-C (33  $\Omega$ , 2.7 nF) 噪声滤波器放在运算放大器输出和ADC输入之间。该滤波器还可以将运算放大器输出与内部采样保持功能在ADC输入端所引起的切换突波隔离开来。

ADA4940-1由7 V电源 (+6 V和-1 V) 供电，这样对于ADC满量程输入必须在0V至5V之间摆动时，输出能够提供足够的裕量。

增益由反馈电阻 ( $R2 = R4$ ) 和增益电阻 ( $R1 = R3$ ) 比率来设定。此外，该电路可用于进行单端或差分输入转差分输出转换。需要时，可在输入端并联一个端接电阻。无论输入为单端还是差分输入，均可如MT-076教程和DiffAmpCalc™ 差分放大器计算器 ([www.analog.com/zh/diffampcalc](http://www.analog.com/zh/diffampcalc)) 所示来计算放大器的输入阻抗。

如果 $R1 = R2 = R3 = R4 = 1 \text{ k}\Omega$ ，单端输入阻抗约为1.33 k $\Omega$ 。外部52.3  $\Omega$ 端接电阻提供一个50  $\Omega$ 源端接电阻。反相输入端的一个额外25.5  $\Omega$  (总共102.5  $\Omega$ ) 可平衡驱动同相输入的50  $\Omega$ 源端接电阻的并联阻抗 ( $52.3 \Omega \parallel 50 \Omega = 25.5 \Omega$ )。但是，如果使用差分源输入，则差分输入阻抗为2 k $\Omega$ 。此时，视需要使用两个52.3  $\Omega$ 端接电阻来端接每个输入。

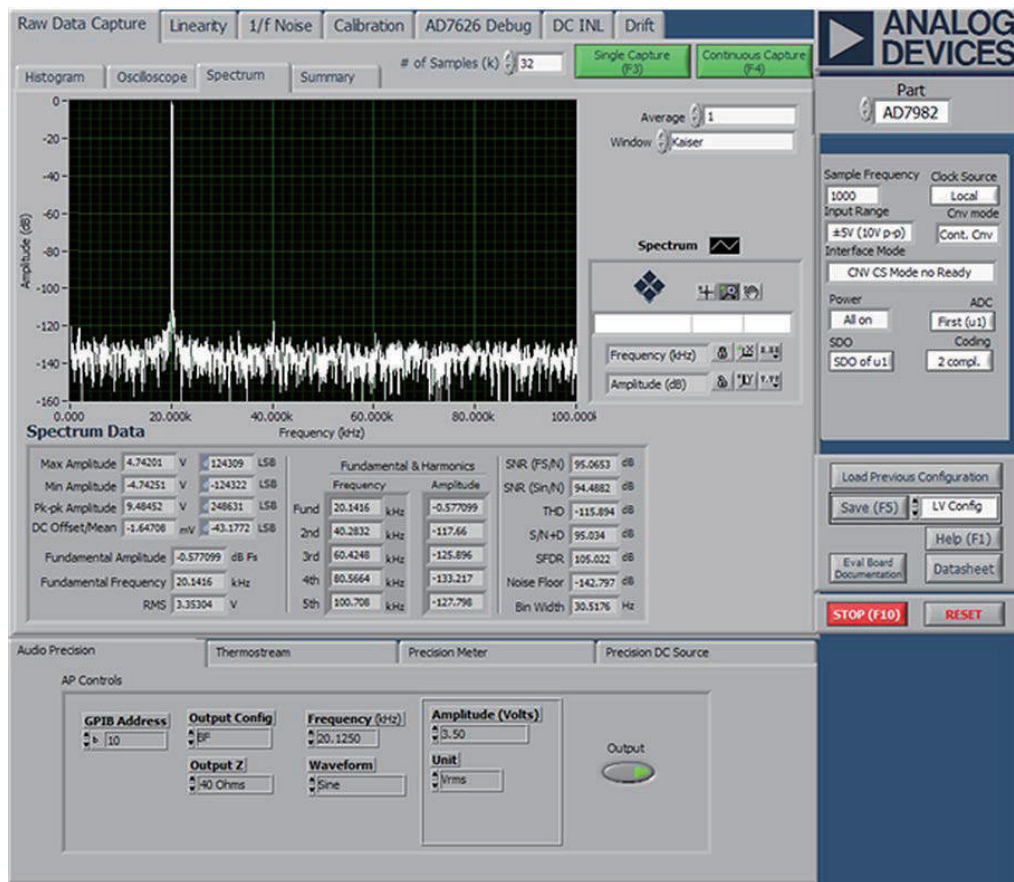


图2. 20 kHz信号、满量程以下0.5 dB、采样频率为1 MSPS的FFT曲线图 (32,000点)

针对此电路上的测试，信号发生器产生一个10 V p-p差分输出。为了降低噪声， $V_{OCM}$ 输入被旁路，并通过外部1%电阻来设置，以便在5V基准电源下获得最宽的输出动态范围。输出共模电压为2.5 V时，ADA4940-1各输出的摆幅在0 V至5 V之间，相位相反，向ADC输入端提供增益为1、10 V p-p的差分信号。

FFT性能如图2所示，归纳如下：

- SNR = 95.06 dBFS（不含谐波）
- SINAD = 95.03 dBFS
- SFDR = 105.02 dBFS
- THD = -115.89 dBFS

INL和DNL性能如图3所示。

### 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。其他模数转换器可以取代AD7982

来实现所需的最高性能。ADA4940-1/ADA4940-2针对驱动16位和18位ADC而优化，性能下降少。采样速度更快的18位ADC包括AD7984 (1.33 MSPS) 和AD7986 (2 MSPS)。差分16位ADC包括AD7688 (500 kSPS) 和AD7693 (500 kSPS)。

ADA4940-1/ADA4940-2轨到轨输出可驱动至每个供电轨的 $\pm 0.5$  V范围内，而交流性能不会明显下降。诸如AD8137和ADA4941-1等其他差分ADC驱动器也可用来在重视速度、输入阻抗等因素的其他应用中取代ADA4940-1。

### 电路评估与测试

此电路将修改后的EVAL-AD7982SDZ PulSAR AD7982评估板连接到转换器评估和开发板 (EVAL-CED1Z) 进行测试。修改后的AD7982评估板可用于ADA4940-1差分ADC驱动器和ADR395基准电压源。

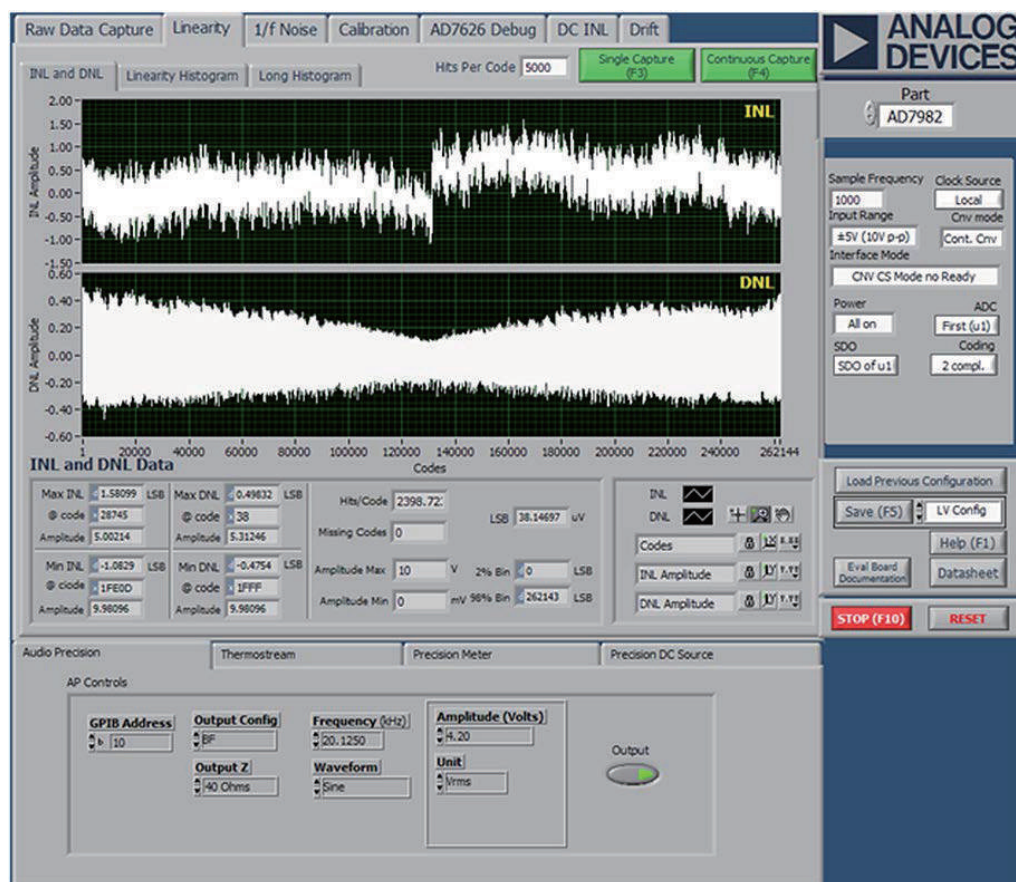


图3. 20 kHz信号、采样频率为1 MSPS的INL和DNL曲线图



**EVAL-AD7982SDZ**是一款用户评估板，用以简化18位AD7982 PulSAR ADC的独立性能和功能测试。

**EVAL-CED1Z**板是一种使用ADI精密转换器的系统评估、演示和开发平台。它提供转换器和PC之间所需的通信，编程或控制器件，通过USB线收发数据（如图4和图5所示）。

### 设备要求

除了上述两块评估板外，**ADA4940-1**还需要+6 V至-1 V的外部电源。**EVAL-CED1Z**采用壁式电源适配器提供+7.5 V直流电压。其他合适电压从**EVAL-CED1Z**供给**AD7982**评估板。

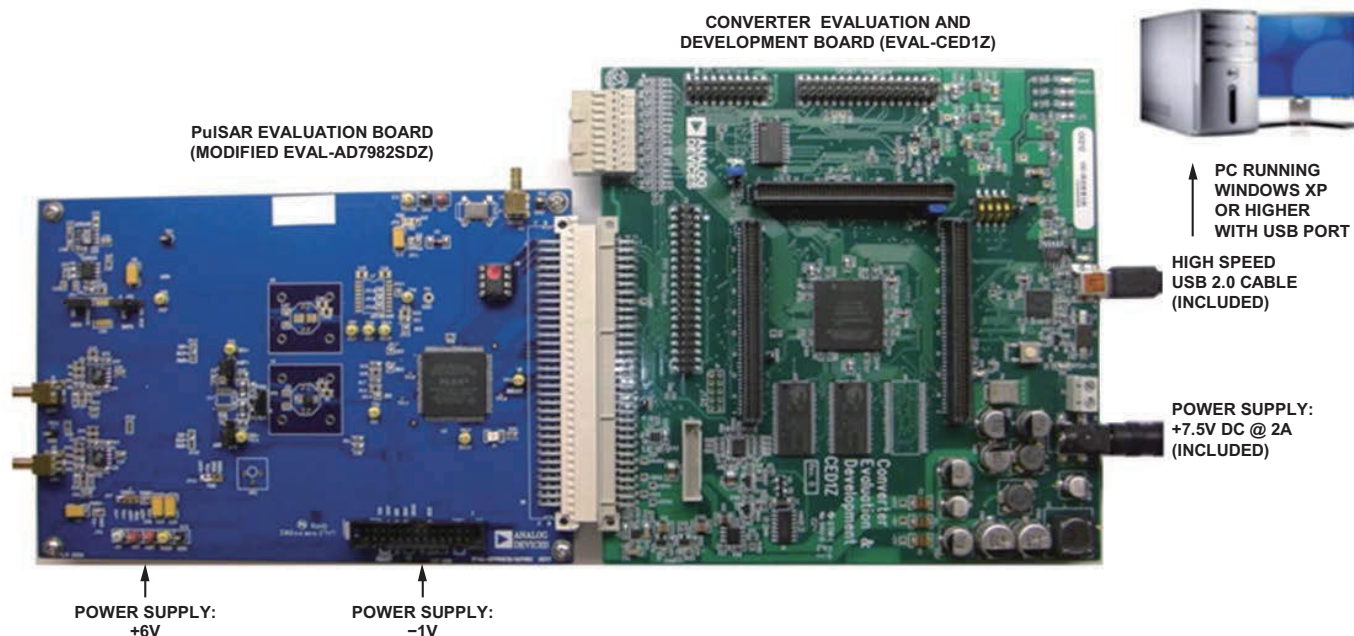


图4. PuISAR ADC评估平台

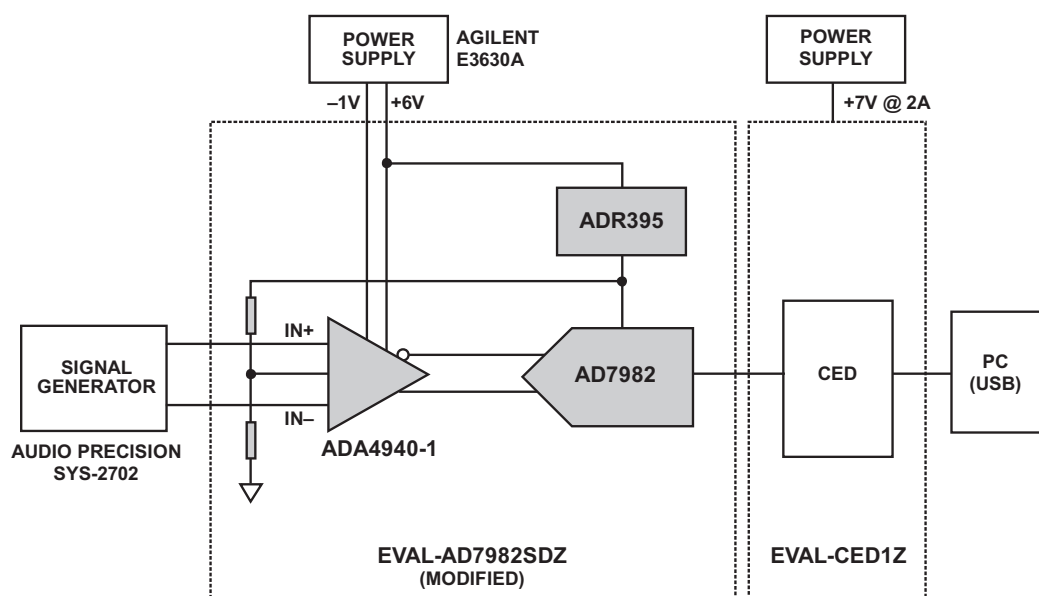


图5. 测试设置功能框图



低失真信号源Audio Precision® SYS-2702用来实现所需性能。运行PulSAR评估软件需采用配有Windows® XP或Windows 7系统及USB端口的PC。

### 开始使用

按[www.analog.com/zh/EVAL-CED1Z](http://www.analog.com/zh/EVAL-CED1Z)和[www.analog.com/zh/AD7982\\_adc\\_EVAL-CED1Z](http://www.analog.com/zh/AD7982_adc_EVAL-CED1Z)所述步骤安装软件。

将修改后的AD7982评估板接到EVAL-CED1Z。将+7.5 V壁式电源适配器接到EVAL-CED1Z。将+6 V至-1 V的外部电源接到AD7982评估板。

### 设置与测试

AD7982评估板使用Audio Precision SYS-2702信号源来提供输入信号。基于LabVIEW®的PulSAR评估软件用来控制Audio Precision输入信号，还能监控ADC输入和输出。

如图2、3和4所示，该软件可采集并处理INL、DNL和FFT数据。

### 更多资料

CN-0237设计支持包：

[www.analog.com/CN0237-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0237-DesignSupport)

DiffAmpCalc：差分放大器计算器：

[www.analog.com/zh/diffampcalc](http://www.analog.com/zh/diffampcalc)

John Ardizzoni。高速印刷电路板布局实用指南，《模拟对话》39-09，2005年9月。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-074：精密ADC用差分驱动器。ADI公司。

指南MT-075：高速ADC用差分驱动器概述。ADI公司。

指南MT-076：差分驱动器分析。ADI公司。

指南MT-101：去耦技术。ADI公司。

### 数据手册和评估板

[ADA4940-1数据手册](#)

[ADA4940-2数据手册](#)

[ADA4940评估板](#)

[AD7982数据手册](#)

[AD7982评估板](#)

[ADR395数据手册](#)

### 修订历史

10年10月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

## Circuits from the Lab™ Reference Circuits

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计, 有助于加速设计, 同时简化系统集成, 帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持, 请访问 [www.analog.com/cn/CN0241](http://www.analog.com/cn/CN0241)。

### 连接/参考器件

ADA4096-2	30 V、低功耗、过压保护、轨到轨输入/输出放大器
AD7920	12位、250 kSPS ADC, 采用6引脚SC70封装
ADP3336	高精度、超低-静态电流、500 mA anyCAP® 可调低压差线性稳压器

## 具有输入过压保护的高边电流检测

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[CN-0241 电路评估板 \(EVAL-CN0241-SDP\)](#)

[系统演示平台 \(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

#### 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

发生瞬变后, 或者连接、断开或关断监控电路时, 高端电流监控器可能遇到过压情况。图1所示电路使用具有过压保护功能、作为差动放大器连接的 ADA4096-2 运算放大器

来监控高端电流。ADA4096-2 具有输入过压保护功能, 对于高于或低于供电轨的电压 32 V 以内的范围, 不会发生反相或门锁。

该电路采用可调低压差 500 mA 线性稳压器 ADP3336 供电, 如果需要, 后者还可用于为系统其他器件供电。当设置为 5 V 输出时, 输入电压范围为 5.2 V 至 12 V。为了省电, 可通过移除 ADP3336 电源来关断电流检测电路, 而电源 (例如太阳能电池板) 仍可工作。

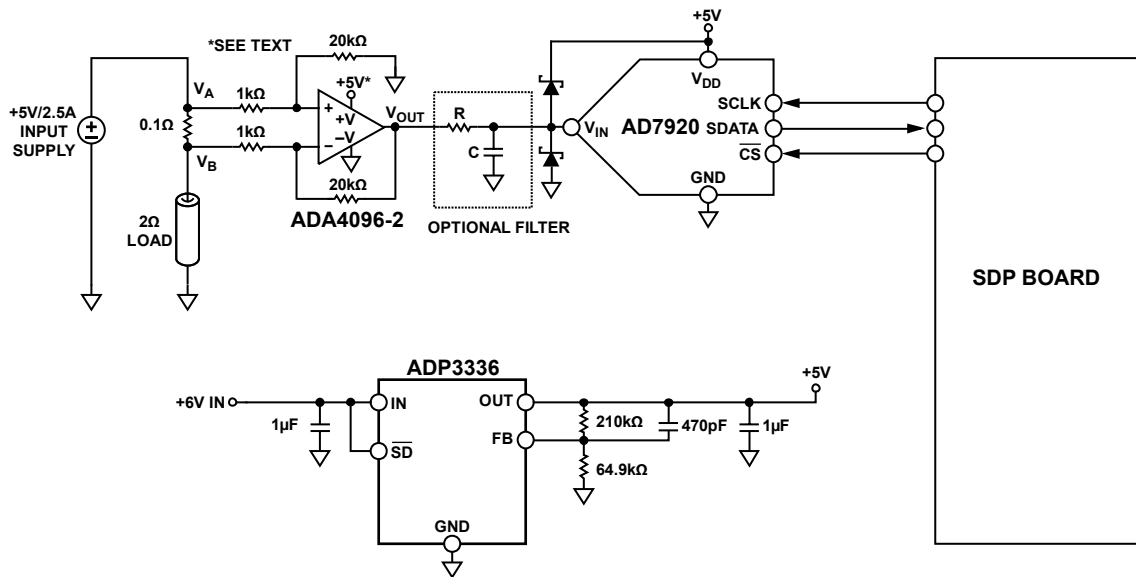


图1. 具有输入过压保护的高边电流检测(原理示意图: 未显示所有连接和去耦)

#### 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  
Fax: 781.461.3113  
[www.analog.com.cn](http://www.analog.com.cn)  
©2012 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

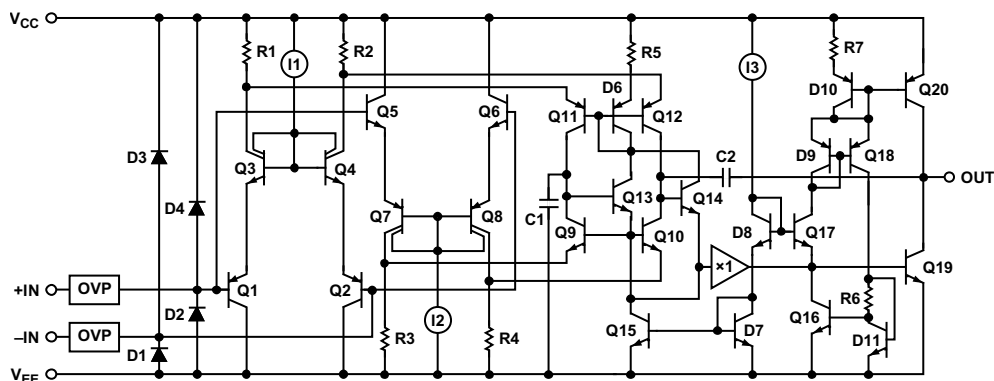


图2. ADA4096-2原理示意图

这样电压将施加于未上电的ADA4096-2输入端；但是，对于高出电源轨32 V以内的输入电压，不会发生锁存或损坏。如需较低的吞吐速率，AD7920也可在样本间休眠。AD7920在休眠时的最大功耗为5  $\mu$ W，上电时为15 mW。在工作条件下，ADA4096-2仅需120  $\mu$ A。工作电压为5 V时，功耗仅为0.6 mW。在关断模式下，ADP3336仅消耗1  $\mu$ A。

### 电路描述

该电路是经典的高端电流检测电路拓扑结构，采用单个检测电阻。其他四个电阻(双通道1 k $\Omega$ /20 k $\Omega$ 分压器)处于薄膜网络内(以实现比率匹配)，用于设置差分放大器增益。这将放大检测电阻上产生的两个电压间的差异，并抑制共模电压：

$$V_{OUT} = (V_A - V_B) (20 \text{ k}\Omega / 1 \text{ k}\Omega)$$

图2显示了ADA4096-2的原理示意图。输入级包含两个并行的差分对(Q1至Q4和Q5至Q8)。随着输入共模电压接近 $V_{CC} - 1.5 \text{ V}$ ，Q1至Q4在I1到达最低顺从电压时关断。相反，随着输入共模电压接近 $V_{EE} + 1.5 \text{ V}$ ，Q5至Q8在I2到达最低顺从电压时关断。此拓扑结构可实现最大输入动态范围，因为放大器在供电轨外的200 mV下(室温)仍可处理输入。

与任何轨到轨输入放大器一样，两个输入对之间的 $V_{OS}$ 失配决定放大器的CMRR。如果输入共模电压范围保持在各供电轨1.5 V以内，输入对之间的跃迁便可避免，从而将CMRR改进约10 dB。

ADA4096-2输入可保护器件不受最高超出各供电轨32 V的输入电压偏移的影响。此特性对存在电源时序控制问题的应用特别重要，该问题可导致信号源在施加放大器电源之前活动。

图3显示通过低 $R_{DS(ON)}$ 内部串联FET(绿色曲线)提供ADA4096-2的输入电流限制能力，并与使用5 k $\Omega$ 外部串联电阻和无保护的运算放大器(红色曲线)相比较。

图3是ADA4096-2采用单位增益缓冲器配置时的情况，其中将电源连接至GND(或 $\pm 15 \text{ V}$ )并对正输入扫描，直至输入超过电源达32 V。一般而言，输入电流在正过压条件期间限于1 mA，在负欠压条件期间限于200  $\mu$ A。例如，在20 V过压条件下，ADA4096-2输入电流限于1 mA，从而提供等效于串联20 k $\Omega$ 电阻的电流限制。

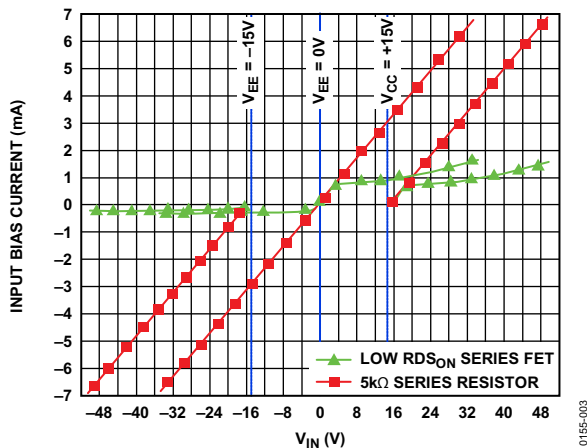


图3. 输入电流限制能力

图3还显示，无论是否为放大器供电，电流限制电路均有效。

请注意，图3仅代表异常条件下的输入保护。正确的放大器工作输入电压范围(IVR)见ADA4096-2数据手册的表2至表4。

AD7920是一款12位、高速、低功耗逐次逼近型ADC，采用2.35 V至5.25 V单电源供电，最高吞吐量可达250 kSPS。该器件内置一个低噪声、宽带宽采样保持放大器，可处理13 MHz以上的输入频率。

转换过程和数据采集过程通过 $\overline{CS}$ 和串行时钟SCLK进行控制，从而为器件与微处理器或DSP接口创造了条件。输入信号在 $\overline{CS}$ 的下降沿进行采样，而转换同时在此处启动。该器件无流水线延迟。

AD7920采用先进的设计技术，可在下述高吞吐速率的情况下实现极低的功耗。

若要进入关断模式，必须在SCLK的第2个下降沿之后、第10个下降沿之前的任意时间将 $\overline{CS}$ 变为高电平，以中断转换过程。一旦 $\overline{CS}$ 在SCLK的此窗口内变为高电平，器件即进入关断模式， $\overline{CS}$ 下降沿所启动的转换终止，SDATA返回三态。如果 $\overline{CS}$ 在第2个SCLK下降沿之前变为高电平，则器件仍将处于正常模式，不会关断。这可以避免 $\overline{CS}$ 线上的毛刺引起意外关断。

若要退出这种工作模式并使AD7920再次上电，需要执行一次伪转换。在 $\overline{CS}$ 的下降沿，器件开始上电，并且只要 $\overline{CS}$ 处于低电平便继续上电，直到第10个SCLK的下降沿之后。经过16个SCLK后，器件完全上电，下一次转换将产生有效数据。

如果 $\overline{CS}$ 在第10个SCLK下降沿之前变为高电平，则AD7920再次返回关断模式。这可以避免 $\overline{CS}$ 线上的毛刺引起意外上电，或者 $\overline{CS}$ 位于低电平时8个SCLK周期意外爆发。虽然器件可以在 $\overline{CS}$ 的下降沿开始上电，但只要不超过第10个SCLK下降沿，便会在 $\overline{CS}$ 的上升沿再次关断。

有关时序的详情请参见AD7920数据手册。

## 测试结果

衡量该电路性能的一个重要指标是最终输出电压测量结果中的噪声量。

图4显示了10,000个测量样本的直方图。该数据是利用连接到EVAL-SDP-CB1Z SDP-B评估板的CN-0241评估板获得的。有关设置详情，请参见“电路评估与测试”部分。

电源设置为3.0 V，不关闭LDO的输出，在250 kSPS的最大速率下采集10,000个数据样本。图4显示了采集结果。峰峰值噪声约为2 LSB，对应于大约0.3 LSB rms。

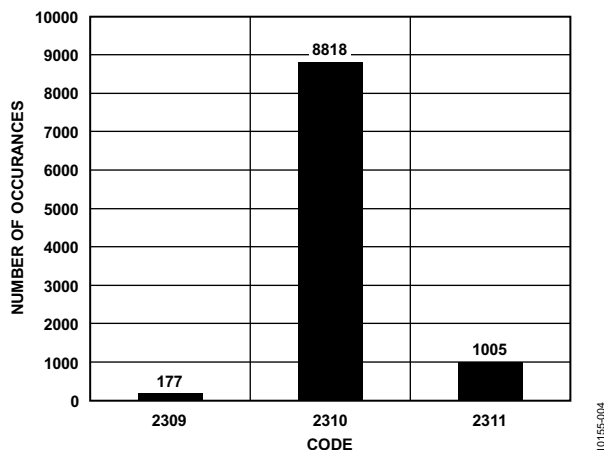


图4. 关断前10,000个样本的码字直方图

接着在软件中将连接至ADP3336的 $\overline{SD}$ 关断引脚置位低电平，从而关闭LDO输出。约1分钟后，再将ADP3336的关断引脚置位高电平，重新开启输出，并采集相同数量的数据样本。图5显示了采集结果。

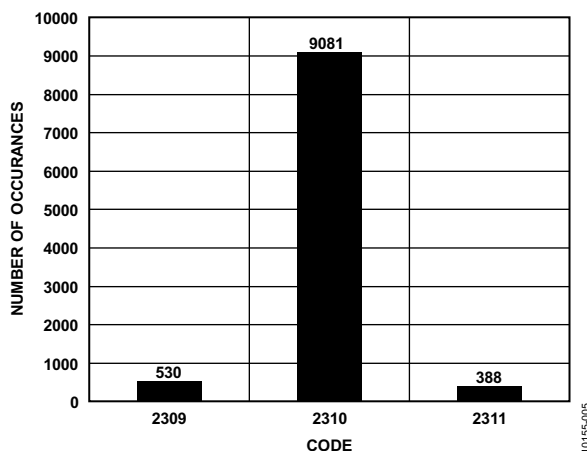


图5. 关断后10,000个样本的码字直方图

图5显示，输入处于高电平时，ADA4096-2的输出在关断期间并未闩锁。

有关本电路笔记的完整设计支持包，请参阅[www.analog.com/CN0241-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0241-DesignSupport)

## 常见变化

经验证，该电路能够稳定地工作，并具有良好的精度。该板同时兼容系统演示平台SDP-S控制板(EVAL-SDP-CS1Z)。

图1所示电路稍作更改，便可针对最高达30 V的输入电源电压监控电流。ADA4096-2的+V引脚并未连接到ADP3336的+5 V，而是直接连接到受监控的输入电源。在这种配置中，ADA4096-2直接采用输入电源供电。

## 电路评估与测试

本电路使用[EVAL-CN0241-SDPZ](#)电路板和[EVAL-SDP-CB1Z](#)系统演示平台SDP-B控制器板。这两片板具有120引脚的对接连接器，可以快速完成设置并评估电路性能。[EVAL-CN0241-SDPZ](#)板包含要评估的电路，如本笔记所述。SDP-B控制器板与CN0241评估软件一起使用，可从[EVAL-CN0241-SDPZ](#)电路板获取数据。

## 设备要求

需要以下设备：

- 带USB端口的Windows® XP、Windows Vista®或Windows® 7 (32位)PC
- [EVAL-CN0241-SDPZ](#)电路评估板
- EVAL-SDP-CB1Z SDP-B控制器板
- CN0241 SDP评估软件
- 能够驱动6 V/1 A的直流电源
- 能够驱动5 V/2.5 A的直流电源
- 2  $\Omega$ /12 W负载电阻

## 开始使用

将CN0241评估软件光盘放进PC的光盘驱动器，加载评估软件。打开“我的电脑”，找到包含评估软件的驱动器。

## 功能框图

电路框图参见本电路笔记的图1，电路原理图参见“[EVAL-CN0241-SDPZ-SCH-RevA.pdf](#)”文件。此文件位于[CN0241设计支持包](#)中。

## 设置

将[EVAL-CN0241-SDPZ](#)电路板上的120引脚连接器连接到[EVAL-SDP-CB1Z](#)控制器板(SDP-B)上的CON A连接器。使用尼龙五金配件，通过120引脚连接器两端的孔牢牢固定这两片板。在断电情况下，将一个6 V电源连接到电路板上的+6 V和GND引脚。如果有6 V壁式电源适配器，可将其连接到板上的管式连接器，代替6 V电源。SDP-B板附带的USB电缆连接到PC上的USB端口。此时请勿将该USB电缆连接到SDP-B板上的微型USB连接器。

将5 V/2.5 A直流电源连接到[EVAL-CN0241-SDPZ](#)板J1上的+VIN和GND。将2  $\Omega$ /12 W负载电阻连接到[EVAL-CN0241-SDPZ](#)板上的LOAD和GND。

## 测试

为连接到[EVAL-CN0241-SDPZ](#)电路板的6 V电源(或“壁式电源适配器”)通电。启动评估软件，并通过USB电缆将PC连接到SDP-B板上的微型USB连接器。

一旦USB通信建立，就可以使用SDP-B板来发送、接收、捕捉来自[EVAL-CN0241-SDPZ](#)板的串行数据。

当准备好采集数据时，开启5 V/2.5 A直流电源。对电压输出做出相应调节，以输出需要测量的电流量。

图6显示了CN0241 SDP评估软件界面的屏幕截图，图7显示了[EVAL-CN0241-SDPZ](#)评估板的屏幕截图。有关SDP-B板的信息，请参阅[SDP-B用户指南](#)。





图6. CN-0241 SDP评估软件界面

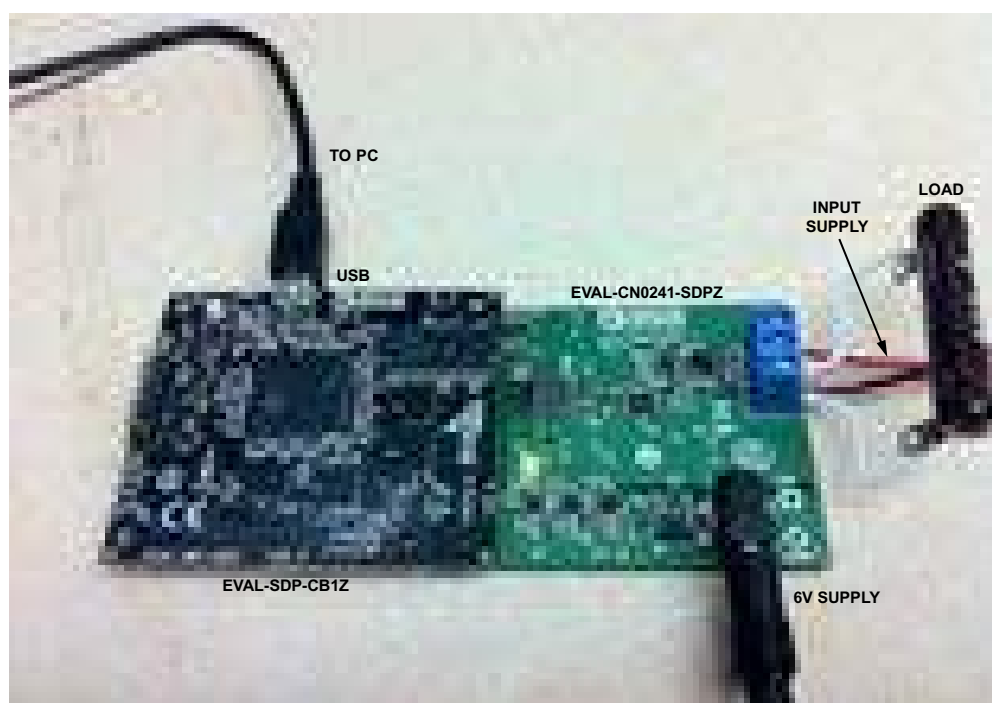


图7. 连接到SDP板的EVAL-CN0241-SDPZ评估板

更多资料

CN0241设计支持包：  
<http://www.analog.com/CN0241-DesignSupport>

SDP-B用户指南

John Ardizzoni. *高速印刷电路板布局实用指南*。《模拟对话》39-09，2005年9月。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-035：运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题。ADI公司。

指南MT-036：运算放大器输出反相和输入过压保护。ADI公司。

指南MT-068：差动和电流检测放大器，ADI公司。

指南MT-101：去耦技术。ADI公司。

数据手册和评估板

CN-0241电路评估板 (EVAL-CN0241-SDPZ)

系统演示平台 (EVAL-SDP-CB1Z)

ADA4096-2 数据手册。

AD7920 数据手册。

ADP3336 数据手册。

修订历史

2012年5月—修订版0至修订版A

更改电路功能与优势部分和图1 .....	1
更改图6 .....	5

2012年1月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0326](http://www.analog.com/cn/CN0326)。

### 连接/参考器件

AD7793	3通道、低噪声、低功耗24位Σ-Δ型ADC
ADuM5401	集成DC/DC转换器的四通道隔离器
AD8603	低功耗RRIO、低噪声、精密单通道CMOS运算放大器

## 具有温度补偿的隔离式低功耗PH值测试系统

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[CN0326评估板\(EVAL-CN0326-PMDZ\)](#)

[系统演示平台\(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

[SDP PMOD转接板\(SDP-PMD-IB1Z\)](#)

#### 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所示电路是一个完全隔离式低功耗pH传感器信号调理器和数字化仪，并且带有自动温度补偿以实现高精度。

该电路可为0至14范围内的pH值提供精度为0.5%的读数，无噪声代码分辨率大于14位，适用于多种工业应用，如化工、食品加工、水处理、污水分析等。

该电路支持众多内部电阻超高(范围从1 MΩ至数GΩ)的pH传感器，其数字信号和电源隔离设计使其免受恶劣工业环境中常见的噪声和瞬变电压的影响。

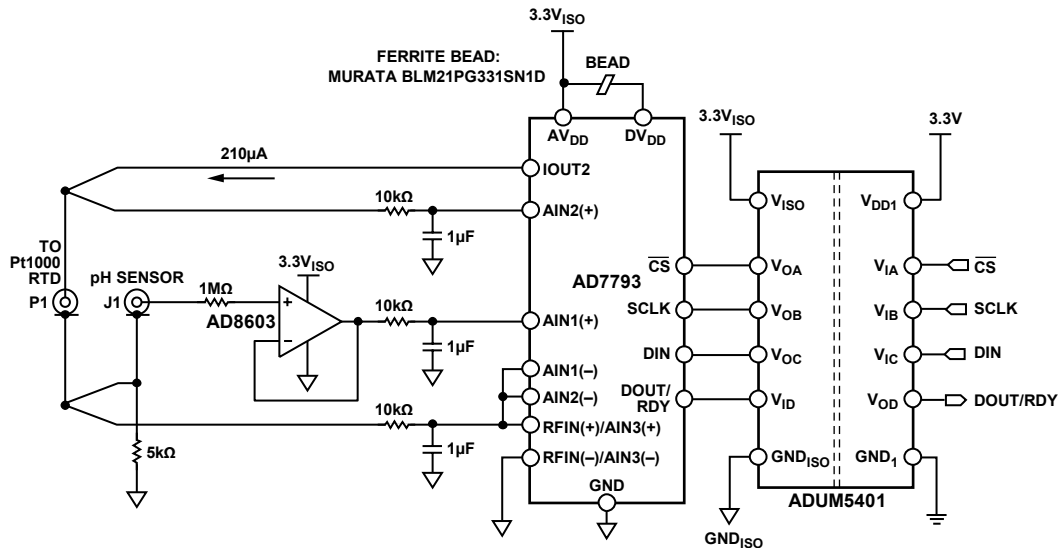


图1. pH传感器电路图(简化原理图: 未显示所有连接和去耦)

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)

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

## 电路描述

### pH测量的基本原理

pH值是衡量水溶液中氢离子和氢氧化物离子相对量的一项指标。就摩尔浓度来说，25°C的水含有 $1 \times 10^{-7}$ 摩尔/升氢离子，氢氧化物离子浓度与此相同。中性溶液指氢离子浓度正好等于氢氧化物离子浓度的溶液。pH值是表示氢离子浓度的另一种方式，定义如下：

$$pH = -\log(H^+)$$

因此，如果氢离子浓度为 $1.0 \times 10^{-2}$ 摩尔/升，则pH值为2.00。

pH电极是许多工业所使用的电化学传感器，但对水处理和污水工业具有特别重要的意义。pH探针由一个玻璃测量电极和一个参考电极构成，类似于一块电池。当把探针置于溶液中时，测量电极产生一个电压，具体取决于溶液中氢的活性，然后将该电压与参考电极的电位进行比较。随着溶液酸性的增强(pH值变低)，玻璃电极电位相对于参比电极阳性增强(+mV)；随着溶液碱性的增强(pH值变高)，玻璃电极电位相对于参比电极阴性增强(-mV)。这两个电极之差即为测得电位。在理想情况下，典型的pH探针在25°C下会产生59.154 mV/pH单位，用能斯特方程表示为：

$$E = a - \frac{2.303 R (T + 273.1)}{nF} \times (pH - pH_{ISO})$$

其中：

$E$  = 氢电极电压，活性未知

$\alpha = \pm 30$  mV，零点容差

$T$  = 环境温度(单位：°C)

$n = 1$  (25 °C)，价(离子上的电荷数)

$F = 96485$  库仑/摩尔，法拉第常数

$R = 8.314$  伏特·库仑/°K摩尔，阿伏加德罗氏数

$pH$  = 未知溶液的氢离子浓度

$pH_{ISO} = 7$ ，参比氢离子浓度

方程表明，产生的电压取决于溶液的酸度和碱度，并以已知方式随氢离子活性而变化。溶液温度的变化会改变其氢离子的活性。当溶液被加热时，氢离子运动速度加快，结果导致两个电极间电位差的增加。另外，当溶液冷却时，氢活性降低，导致电位差下降。根据设计，在理想情况下，当置于pH值为7的缓冲溶液中时，电极会产生零伏特电位。

关于pH理论的一本不错的参考书是《pH理论与实践》(出版社：Radiometer Analytical SAS；出版地点：Villeurbanne Cedex, 法国)。

## 电路细节

该设计为带温度补偿的pH传感器提供了一种整体解决方案。有三个重要的电路级：pH探针缓冲器、ADC和数字及电源隔离器，如图1所示。

**AD8603**，是一款精密低功耗(最大值50 μA)及低噪声(22 nV/√Hz) CMOS运算放大器，配置为连接**AD7793**通道之一输入的缓冲器。**AD8603**的典型输入偏置电流为200 fA，为高内部电阻pH探针提供了一种有效的解决方案。

pH检测和温度补偿系统基于**AD7793**，24位(Σ-Δ)ADC。它有三个差分模拟输入和一个片内低噪声、可编程增益放大器(PGA)，其范围为单位增益至128。**AD7793**的最大功耗仅为500 μA，适用于任何低功耗应用。有一个低噪声、低漂移内部带隙基准电压源，而且也可采用一个外部差分基准电压。输出数据速率可通过软件编程设置，可在4.17 Hz至470 Hz的范围内变化。

**ADuM5401**(四通道数字隔离器，集成DC-DC转换器)提供微控制器与**AD7793**数字线路之间的数字信号和电源隔离功能。利用iCoupler芯片级变压器技术，能够隔离逻辑信号和DC/DC转换器中的电源反馈路径。

### pH传感器接口缓冲器

典型的pH探针电极由玻璃制成，可形成极高的电阻，范围从1 MΩ到1 GΩ不等，充当与pH电压源串联的电阻，如图2所示。

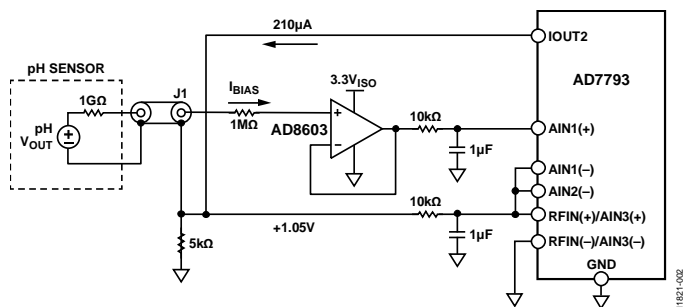


图2. 连接ADC的pH传感器和缓冲器接口  
(简化原理图：未显示所有连接、RTD和去耦。)

流过该串联电阻的缓冲放大器偏置电流会给系统带来失调误差。为使电路与该高源电阻隔离开来，在这种应用中，需要一个高输入阻抗、超低输入偏置电流的缓冲放大器。**AD8603**用作该应用的缓冲放大器，如图2所示。**AD8603**的低输入电流可以最大限度地减少流过电极电阻的偏置电流所产生的电压误差。

就25°C下串联电阻为1 GΩ的pH探针来说，对于200 fA典型输入偏置电流，失调误差为0.2 mV (0.0037 pH)。即使在1 pA的最大输入偏置电流下，误差也只有1 mV。

10 kΩ/1 μF低通噪声滤波器针对缓冲放大器输出的截止频率为 $f = 1/2\pi RC$ ，即16 Hz。

必须利用防护、屏蔽、高绝缘电阻支柱以及其他此类标准皮安方法，以最大限度地减少AD8603缓冲器高阻抗输入端的泄漏。

### ADC通道1配置，pH传感器

该级涉及测量pH电极产生的小电压。表1展示了一个典型pH探针的技术规格。基于能斯特方程，来自探针的满量程电压范围为±414 mV (±59.14 mV/pH) (25°C)至±490 mV (±70 mV/pH)(80°C)。

表1. 典型pH探针的技术规格

测量范围	pH 0至pH 14
零电压下的pH值精度	pH 7.00 ± 0.25 pH 0.05，温度范围：20°C至25°C
分辨率	pH 0.01 0.1 mV
工作温度	80°C(最大值)
反应时间	最终值的95% ≤ 1秒

在读取pH探针输出电压时，ADC采用外部1.05 V基准电压源，增益配置为1。满量程输入范围为 $\pm V_{REF}/G = \pm 1.05 V$ ，来自pH探针的最大信号为±490 mV (80°C)。

由于传感器的输出是双极性的，并且AD7793采用单电源供电，因此，pH探针产生的信号应偏置到地以上，以使其处于ADC的可接受共模范围之内。该偏置电压产生的方式是，将210 μA IOUT2电流注入5 kΩ 0.1%电阻，如图2所示。结果产生1.05 V共模偏置电压，这同时充当ADC基准电压。

### ADC通道2配置，RTD

ADC的第二通道监控在RTD上产生的电压，该RTD由AD7793的IOUT2电流输出引脚驱动。210 μA激励电流驱动由RTD和精密电阻(5 kΩ, 0.1%)构成的串联组合。(参见图1)。

纯铂的温度系数为0.003926 Ω/Ω/°C。根据DIN Std. 43760-1980和IEC 751-1983标准，工业RTD的正常系数为0.00385 Ω/Ω/°C。RTD的精度通常以0°C为基准。DIN 43760标准认可两个类，如表2所示，ASTM E-1137标准认可两个级，如表3所示。

表2. DIN-43760的标准RTD精度

类	容差
DIN 43760 A类	±0.06% @ 0°C
DIN 43760 B类	±0.12% @ 0°C

表3. ASTM E-1137的标准RTD精度

级	容差
ASTM E-1137 A级	±0.05% @ 0°C
ASTM E-1137 B级	±0.10% @ 0°C

RTD电阻值的计算公式为：

$$RTD \text{ 电阻} = RTD_0 (1 + T \alpha)$$

其中：

RTD电阻 = T下的电阻值

RTD<sub>0</sub> = 0°C下的电阻值

T = 环境温度

$\alpha = 0.00385 \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ ，DIN Std 43760-1980和IEC 751-1983定义的温度系数

RTD电阻在0°C (1000 Ω)至100°C (1385 Ω)范围内变化，产生的电压信号范围为210 mV至290 mV，激励电流为210 μA。

精密5 kΩ电阻产生作为外部基准电压源的1.05 V电压。当增益为1时，模拟输入范围为±1.05 V ( $\pm V_{REF}/G$ )。该架构形成一种比率式配置。激励电流值的变化不会影响系统精度。

尽管100 Ω Pt RTD十分常见，也可指定其他电阻(200 Ω、500 Ω、1000 Ω等)和材料(镍、铜、镍铁)。本应用使用一个1 kΩ DIN 43760 A类RTD，用于实现pH传感器的温度补偿功能。1000 Ω RTD对线路电阻误差不如100 Ω RTD敏感度。

采用一条2线连接，如图3所示。在RTD引脚上施加恒定电流，同时测量通过RTD本身的电压。测量器件是AD7793，该器件表现出高输入电阻和低输入偏置电流。该方案的误差源是引脚电阻、AD7793所产生恒定电流源的稳定性以及输入放大器中的输入阻抗和/或偏置电流及相应的漂移。



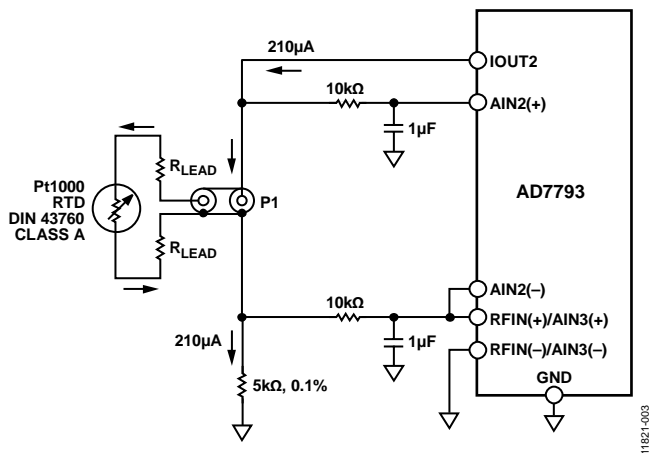


图3. 2线铂RTD连接(简化原理图:  
未显示所有连接和去耦)

消除线路电阻误差的另一种可能性是3线RTD配置, 详见  
[电流笔记CN-0287](#)。

### 输出编码

任一通道上输入电压的输出代码为:

$$Code = 2^{N-1} \left( \frac{AIN \times GAIN}{V_{REF}} + 1 \right)$$

其中:

$AIN$ 为模拟输入电压。

$GAIN$ 为仪表放大器设置。

$N = 24$

[EVAL-SDP-CB1Z](#)系统演示平台板和PC处理AD7793输出的数据。

### 数字和电源隔离

[ADuM5401](#)隔离ADC数字信号, 同时为电路提供经隔离稳压的3.3 V电源。[ADuM5401](#) ( $V_{DD1}$ )的输入应在3.0 V和3.6 V之间。要注意ADuM5401的布局, 以尽量减少EMI/RFI问题。有关更多详情, 请参考[AN-1109应用笔记: iCoupler器件的辐射控制建议](#)。

### 系统校准

AD7793的AIN3(+)输入用于测量精密5 kΩ 0.1%电阻上的电压降。为了精确测量RTD电阻, 必须考虑IOUT2电流的±5%变化范围。在此基础上, 将该电压除以5 kΩ, 从而求得IOUT2确切电流值。RTD电阻则通过用RTD中的电压除以IOUT2确切电流值来计算。

利用如图4所示两点校准程序来校准[EVAL-CN0326-PMDZ](#)评估软件中的pH计。

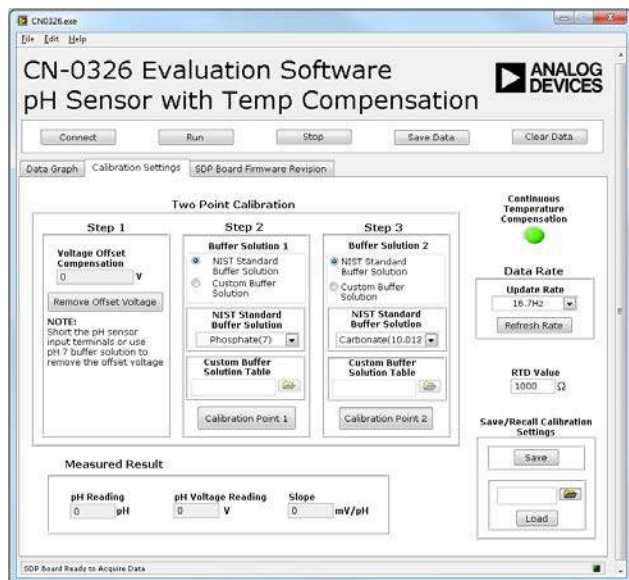


图4. 评估软件校准设置窗口

用户需要至少使用两种缓冲溶液, 其中, 用一种值为pH-7的中性pH缓冲溶液来消除pH探针和系统导致的失调。中性缓冲溶液可以用来设置第一个校准点。第一种缓冲溶液的pH值取决于需要测量的溶液的pH值。在测量碱性基液时, 可以使用pH-10缓冲溶液; 在测量酸性溶液时, 可使用pH-4缓冲溶液。为了提高测量的精度, 可以实施三点校准。其方法是在第2步和第3步使用两组不同的缓冲溶液, 如图4所示, 其中, pH-7溶液用来消除失调。

软件包括NIST推荐的缓冲溶液清单。清单中描述的每种缓冲溶液都有自己的温度系数, 范围在0°C至95°C之间, 可以在Radiometer Analytical出版的《pH理论与实践》一书中找到。软件利用该表将来自pH探针的mV输入关联至与读取自RTD传感器的温度读数相对应的正确pH值, 并利用线性插值法来填充表中空白。用户可以选择通过单击如图4所示绿色按钮, 使能/禁用连续温度补偿选项。

用于pH传感器校准的缓冲溶液在市场中很常见。也可使用NIST认证的其他pH参比溶液来校准。由于市场上有多种缓冲溶液可供选择, 因此, 软件同时为用户提供了选项, 可以使用所需要的NIST认证pH参比溶液进行校准, 如图4所示。

软件同时还为用户提供了使用其他RTD电阻值的选项, 但其默认值设为1000 Ω。

## 系统噪声考虑因素

如果输出数据速率为16.7 Hz且增益为1，则AD7793的rms噪声等于1.96  $\mu\text{V}$  (噪声折合到输入端，来自AD7793数据手册)。峰峰值噪声等于：

$$6.6 \times \text{RMS 噪声} = 6.6 \times 1.96 \mu\text{V} = 12.936 \mu\text{V}$$

如果pH计的灵敏度为59 mV/pH，则pH计能测量的无噪声分辨率pH水平为

$$12.936 \mu\text{V} / (59 \text{ mV/pH}) = 0.000219 \text{ pH}$$

其中只包括AD7793的噪声贡献。实际系统结果见下一节。

## 测试数据与结果

全部数据捕获操作都通过CN0326 LabVIEW评估软件实现。用一个Yokogawa GS200精密电压源来模拟pH传感器的输入。

通过以1 mV增量在-420 mV至+420 mV范围内扫描精密电压，EVAL-CN0326-PMDZ能根据用户自定义的校准选项捕获数据。

AD8603缓冲器和AD7793在实际系统中的峰峰值噪声的确定方法是，短接pH探针BNC连接器，并采集1000个采样。如图5中所直方图所示，代码分布约为500个代码，相当于峰峰值噪声为31.3  $\mu\text{V}$ ，等效pH读数分布为0.00053 pH峰峰值。

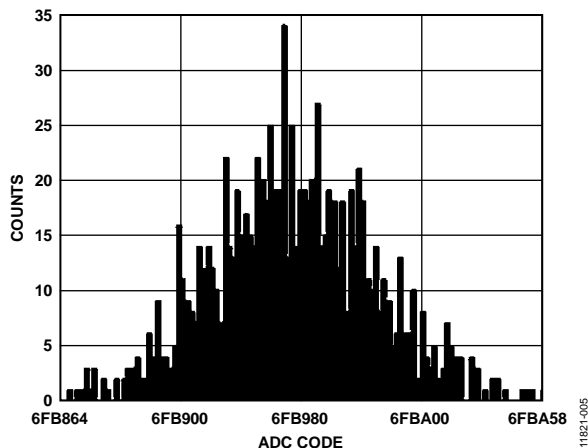


图5. 输出代码分布直方图  
(AD7793输入引脚短接在一起)

测试系统时将三个不同电阻与ADC输入串联，以仿真高阻抗玻璃电极的不同阻抗。同时对系统进行了校准，结果得到60 mV/pH。据图6，线性误差随仿真玻璃电极阻抗的增加而增加。图6同时显示，在整个仿真pH输出电压范围内，对于200 M $\Omega$ 的pH探针阻抗，线性误差小于0.5%。

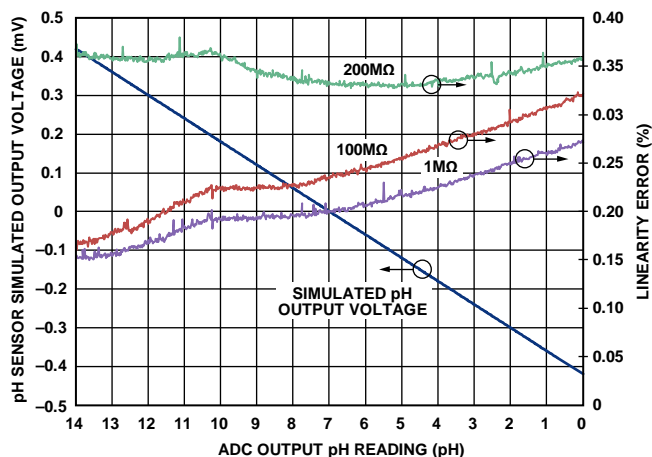


图6. pH传感器仿真输出电压(及关联线性误差图)与ADC输出pH读数的关系(所示探针电阻为1 M $\Omega$ 、100 M $\Omega$ 和200 M $\Omega$ )

测试数据以图7所示评估板采集。针对该系统的完整文档可以在CN-0326设计支持包中找到。



图7. EVAL-CN0326-PMDZ板的照片

## 常见变化

其他合适的ADC有AD7792和AD7785，这两款器件具有与AD7793相同的特性组合，但AD7792为16位ADC，AD7785为20位ADC。

AD8607缓冲放大器采用8引脚MSOP封装。这是一款双通道低功耗轨到轨输入/输出放大器，与AD8603属于同一系列。

ADuM5401的其他系列包括多种通道配置，如ADuM5402 / ADuM5403 / ADuM5404，同时提供4个独立隔离通道。

## 电路评估与测试

本电路采用EVAL-CN0326-PMDZ电路板、EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台(SDP)评估板和SDP-PMD-IB1Z(一款针对EVAL-SDP-CB1Z的PMOD转接板)。SDP和SDP-PMD-IB1Z板具有120引脚的对连接器，可以快速完成设置并评估电路性能。为了使用SDP-PMD-IB1Z和SDP评估EVAL-CN0326-PMDZ板，通过一个间距为100密尔、面积为25平方密尔的标准直角引脚-接头连接器把EVAL-CN0326-PMDZ连接至SDP-PMD-IB1Z。

## 设备要求

需要以下设备：

- 带USB端口的Windows® XP、Windows® Vista(32位)或Windows® 7(32位)PC
- EVAL-CN0326-PMDZ电路评估板
- EVAL-SDP-CB1Z电路评估板
- SDP-PMD-IB1Z SDP转接板
- CN-0326评估软件
- 电源：6 V壁式或同等电源适配器
- Yokogawa 2000精密直流电源或等效电源

## 开始使用

将CN-0326评估软件光盘放进PC的光盘驱动器，加载评估软件。打开“我的电脑”，找到包含评估软件光盘的驱动器，打开Readme文件。按照Readme文件中的说明安装和使用评估软件。

## 设置

CN0326评估套件包括一张光盘，其中含有自安装软件。该软件兼容Windows® XP (SP2)和Vista(32位和64位)。如果安装文件未自动运行，您可以运行光盘中的setup.exe文件。

请先安装评估软件，再将评估板和SDP板连接到PC的USB端口，确保PC能够正确识别评估系统。

1. 光盘文件安装完毕后，按照“电源配置”部分所述为SDP-PMD-IB1Z评估板接通电源。把SDP板(通过连接器A)接至SDP-PMD-IB1Z评估板，然后用随附电缆将其接至用于评估的PC的USB端口。
2. 将EVAL-CN0326-PMDZ的12引脚直角公引脚接头连接至SDP-PMD-IB1Z的12引脚直角母引脚接头。
3. 在运行图9所示程序之前，将pH探针的BNC端子和RTD传感器连接至EVAL-CN0326-PMDZ的端子插孔中。
4. 在接好并打开所有外设和电源之后，在图9所示图形用户界面上单击Connect(连接)。当PC成功检测到评估系统时，即可使用图9所示软件对EVAL-CN0326-PMDZ电路板进行评估。

## 功能框图

测试设置的功能框图如图8所示。该测试设置应按图中所示方式连接。主软件窗口的屏幕截图如图9所示。

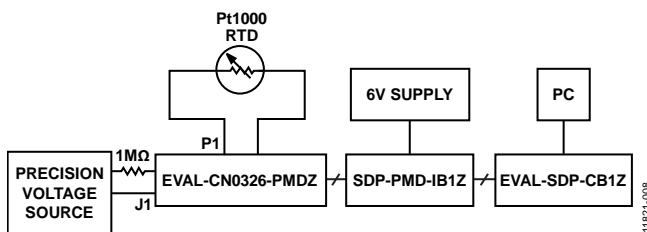


图8. pH传感器测试设置功能框图

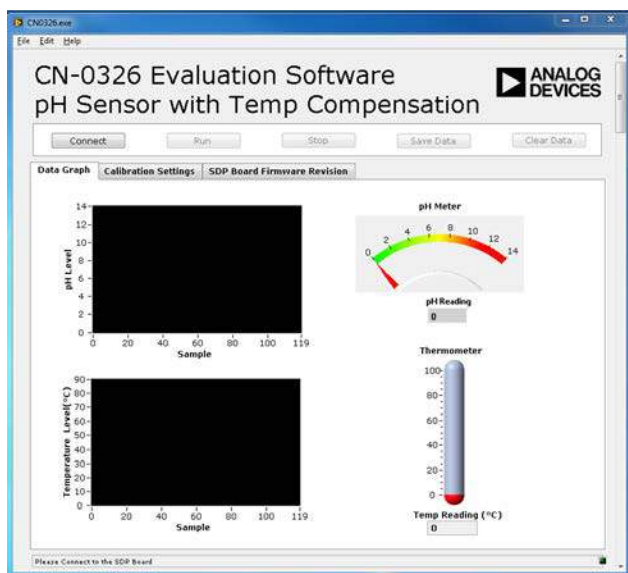


图9. 评估软件主窗口

## 电源配置

SDP-PMD-IB1Z必须采用6 V直流电源，其跳线JP1应设为3.3 V，用于驱动EVAL-CN0326-PMDZ。

## 测试

用Agilent E3631A和Yokogawa GS200精密电压来仿真传感器输出。Yokogawa的负端子连接至pH传感器所用ADC的负端子。正端子与电阻串联，接至ADC的正端子，如图8所示。Yokogawa产生 $\pm 420$  mV电压，然后仿真pH传感器输出，随后改变串联电阻值，以仿真pH探针的玻璃电极的阻抗，如图8所示。

用CN-0326评估软件来捕获来自EVAL-CN0326-PMDZ电路板的数据，所用设置如图8所示。

有关软件使用方法的详细信息可在CN-0326软件用户指南中找到。

## 更多资料

CN-0326设计支持包：

[www.analog.com/CN0326-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0326-DesignSupport)

指南MT-004：ADC输入噪声面面观——无噪声是利还是弊？  
ADI公司。

指南MT-022：ADC架构III： $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC基础，ADI公司。

指南MT-023：ADC架构IV： $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的高级概念和应用，ADI公司。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团。ADI公司。

指南MT-035：运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题。ADI公司。

指南MT-037：运算放大器输入失调电压。

指南MT-038：运算放大器输入偏置电流。

指南MT-040：运算放大器输入阻抗。

指南MT-095：EMI、RFI和屏蔽概念。

指南MT-101：“去耦技术”，ADI公司。

Kester, Walt. 1999年。高阻抗传感器。第5部分。ADI公司。

Kester, Walt. 1999年。温度传感器。第7部分。ADI公司。

Chen, Baoxing. 2006年。采用isoPower<sup>®</sup>技术的iCoupler<sup>®</sup>产品：利用微变压器跨越隔离栅实现信号和电源传输。ADI公司。

Wayne, Scott. 2005年。“iCoupler<sup>®</sup>数字隔离器保护工业、仪器仪表和计算机应用中的RS-232、RS-485和CAN总线。”模拟对话，第39卷。ADI公司（十月）。

Brian Kennedy和Mark Cantrell。iCoupler器件的辐射控制建议。应用笔记AN-1109。ADI公司。

pH理论与实践。Radiometer Analytical, SAS, Villeurbanne Cedex（法国）。

## 数据手册和评估板

AD7793数据手册

AD7793评估板

ADUM5401数据手册

ADuM5401评估板

AD8603数据手册

## 修订历史

2013年9月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



### Circuits from the Lab® Reference Designs

Circuits from the Lab®参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和RF设计挑战。如需更多信息或技术支持，请访问[www.analog.com/cn/CN0357](http://www.analog.com/cn/CN0357)。

#### 连接/参考器件

<a href="#">ADA4528-2</a>	5.0 V超低噪声、零漂移、RRIO双通道运算放大器
<a href="#">AD5270-20</a>	1024位、1%电阻容差误差、50-TP存储器数字变阻器
<a href="#">ADR3412</a>	低功耗、0.1%精度、1.2 V基准电压源
<a href="#">AD8500</a>	低功耗RRIO运算放大器
<a href="#">AD7790</a>	低功耗、16位Σ-Δ型ADC

## 使用电化学传感器的低噪声、单电源有毒气体探测器，集成可编程增益TIA，可用于快速原型制作

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[CN-0357电路评估板\(EVAL-CN0357-PMDZ\)](#)

[SDP到Pmod转接板\(PMD-SDP-IB1Z\)](#)

[系统演示平台\(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

#### 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所示电路是使用电化学传感器的单电源、低噪声、便携式气体探测器。本示例中使用Alphasense CO-AX一氧化碳传感器。

对于检测或测量多种有毒气体浓度的仪器，电化学传感器能够提供多项优势。大多数传感器都是针对特定气体而设计，可用分辨率小于气体浓度的百万分之一(1 ppm)。

图1中的电路采用[ADA4528-2](#)，它是一款双通道自稳零型放大器，室温下的最大失调电压为2.5 μV，具有业界领先的5.6 μV/√Hz电压噪声密度性能。此外，采用[AD5270-20](#)可编程变阻器而非固定跨阻电阻，允许针对不同的气体传感器系统进行快速原型制作，无需更改物料清单。

[ADR3412](#)精密、低噪声、低功耗基准电压源能以0.1%精度和8 ppm/°C漂移建立1.2 V共模、伪地基准电压。

对于必须测量气体浓度ppm比例的应用，使用[ADA4528-2](#)和[ADR3412](#)使得电路性能适合与16位ADC接口，例如[AD7790](#)。

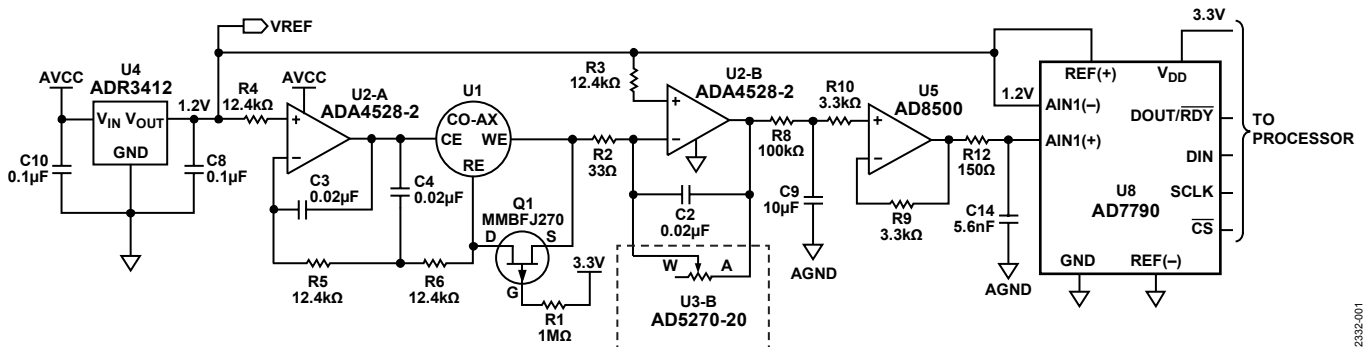


图1. 低噪声气体探测器电路(原理示意图：未显示所有连接和去耦)

#### Rev. 0

Circuits from the Lab® reference designs 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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2014 Analog Devices, Inc. All rights reserved.





ADA4528-2的0.1 Hz至10 Hz输入电压噪声为97  $\mu\text{V p-p}$ ；因此，输出端噪声为18  $\mu\text{V p-p}$ ，如公式5所示。跨阻放大器的输入噪声在输出端表现为由噪声增益放大。对于本电路，只需关注低频噪声，因为传感器工作频率极低。

$$V_{\text{OUTPUTNOISE}} = 97 \text{ nV} \times \text{NG} = 18 \text{ } \mu\text{V p-p} \quad (5)$$

由于这是极低频1/f噪声，所以很难滤除。然而，传感器响应也极低；因此可以使用截止频率为0.16 Hz的极低频率低通滤波器(R5和C6)。即使是这样的低频滤波器，与30秒的传感器响应时间相比，它对传感器响应时间的影响也可忽略。

系统无噪声码由峰峰值输出噪声确定。ADA4528-2的最大输出电压为2.4 V，因此无噪声数为：

$$\text{总无噪声数} = \frac{2.4 \text{ V}}{18 \text{ } \mu\text{V p-p}} = 64,865 \quad (6)$$

无噪声码分辨率等于：

$$\text{无噪声码分辨率} = \log_2(64,865) = 15.9 \text{ 位} \quad (7)$$

为了利用全部ADC范围( $\pm 1.2 \text{ V}$ )，选择AD8500低功耗、轨到轨输入/输出放大器来驱动AD7790的输入。如果不需要用到整个范围，那么可以移除AD8500，代之以AD7790内部缓冲器。

电化学传感器的一个重要特性是极长的时间常数。首次上电时，输出建立最终值可能需要几分钟。当暴露于目标气体中，浓度阶跃为量程的一半时，传感器输出达到最终值的90%所需的时间可在25秒至40秒之间。如果RE与WE引脚间的电压产生剧烈幅度变化，传感器输出电流建立最终值可能需要几分钟。这个较长的时间常数也同样适用于传感器周期供电的情况。为避免启动时间过长，当电源电压降至JFET的栅极-源极阈值电压(约2.0 V)以下时，P沟道JFET Q1将RE引脚与WE引脚短接。

## 常见变化

电化学传感器工作电流极小，非常适合便携式电池供电的仪器。如要求更低功耗，则ADA4505-2放大器的最大输入偏置电流为2 pA，每放大器功耗仅10  $\mu\text{A}$ 。但是，ADA4505-2的噪声大于ADA4528-2。

ADR291精密基准电压源功耗仅12  $\mu\text{A}$ ，要求更低功耗时可代替ADR3412。

更多信息，请参考电路笔记CN-0234。

## 电路评估与测试

图1中的电路采用EVAL-CN0357-PMDZ电路评估板、PMD-SDP-IB1Z转接板和EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台(SDP-B)控制器板。此外，EVAL-CN0357-PMDZ采用Pmod尺寸，因此能连接任意Pmod控制器板，从而实现快速原型制作。

CN-0357评估软件与SDP板通信，以便从EVAL-CN0357-PMDZ电路评估板捕捉数据。

## 设备要求

评估CN-0357电路需要下列设备：

- 带USB端口的Windows® XP、Windows Vista(32位)或Windows 7(32位)PC
- EVAL-CN0357-PMDZ评估板
- PMD-SDP-IB1Z转接板
- EVAL-SDP-CB1Z控制器板
- CN-0357评估软件
- 校准气体(低于250 ppm)
- EVAL-CFTL-6V-PWRZ或同等6 VDC电源

## 开始使用

将CN-0357评估软件光盘放进PC的光盘驱动器，加载评估软件。打开“My Computer(我的电脑)”，找到包含评估软件光盘的驱动器，运行setup.exe文件，按照屏幕说明安装和使用评估软件。

## 功能框图

图3显示测试设置的功能框图。CN-0357设计支持包内含有完整的评估板原理图，包括gerber文件以及物料清单。

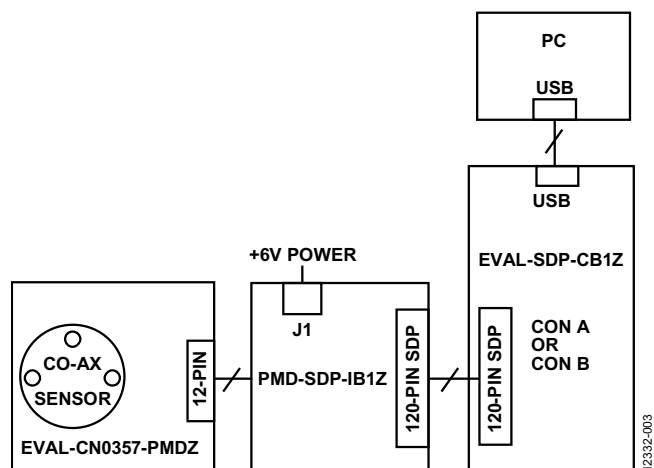


图3. 测试设置功能框图

## 设置

将电化学传感器连接到EVAL-CN0357-PMDZ电路评估板上的插口。

将EVAL-CN0357-PMDZ与转接板相连，并确保转接板上的跳线配置为+3.3 V。然后，将SDP-B板连接到转接板，并通过直流管式插孔为转接板上电。

将SDP-B板附带的USB电缆连接到PC上的USB端口和SDP-B板。

如果“Device Manager(设备管理器)”中出现“Analog Devices System Development Platform(ADI系统开发平台)”驱动器，软件便能与SDP板通信。一旦USB通信建立，就可以使用SDP板来发送、接收、采集来自EVAL-CN0357-PMDZ电路评估板的串行数据。

## 测试

浏览至CN-0357评估软件的安装目录，然后打开CN0357.exe文件。(文件应当位于操作系统开始菜单中名为Analog Devices的文件夹中)

应用程序启动后，软件将自动连接SDP-B板。如果连接了多个SDP-B控制器板，则所选电路板上的发光二极管(LED)将闪烁。

CN-0357评估软件用户指南包含有关如何使用评估软件采集数据的详细信息。

该电路板的输入信号是气体浓度；因此需要校准气体源。使用一氧化碳进行测试时，最大短间接接触限值为250 ppm。

该软件设计用于任意电化学传感器，因此输入所选传感器的正确规格很重要。

计算并设置AD5270-20数字变阻器的电阻时，需要用到最大传感器灵敏度和传感器范围。该值是一个带符号值。正值表示传感器吸取电流，负值表示传感器提供电流。

典型传感器灵敏度用来计算系统转换系数，单位为ppm/mV。

点击“Run(运行)”按钮即可开始收集浓度数据，间隔为1秒。

图4显示从175 ppm CO环境迅速移除传感器后的电路响应，它可以更好地衡量电路性能。

EVAL-CN0357-PMDZ板照片如图5所示。

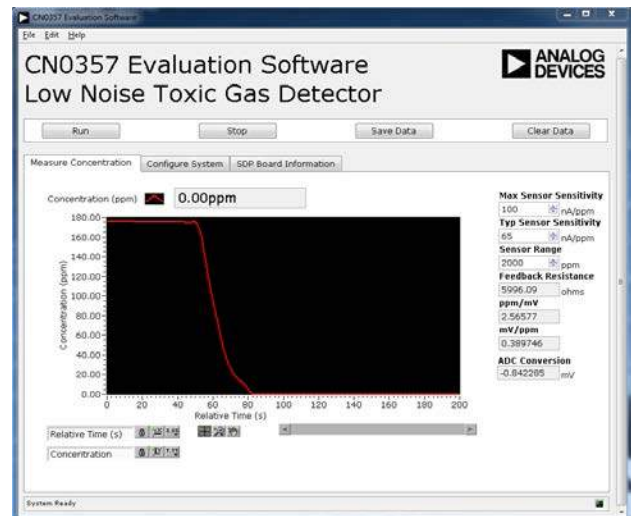


图4. 对175 ppm至0 ppm一氧化碳阶跃的响应



图5. EVAL-CN0357-PMDZ评估板

## 更多资料

CN-0357设计支持包:

<http://www.analog.com/CN0357-DesignSupport>

应用笔记AN-1114: 最低噪声零漂移放大器具有5.6 nV/√Hz电压噪声密度。ADI公司。

文章MS-2066—“传感器电路的低噪声信号调理”, DI公司。

指南MT-035: 运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题。ADI公司。

电路笔记CN-0234—“使用电化学传感器的单电源、低功耗有毒气体探测器”, ADI公司。

Alphasense应用笔记AAN-105-03—“设计恒电位电路”, Alphasense公司。

## 修订历史

2014年7月—修订版0: 初始版

## 数据手册和评估板

CN-0357电路评估板 (EVAL-CN0357-PMDZ)

系统演示平台 (EVAL-SDP-CB1Z)

ADA4528-2数据手册

AD5270-20数据手册

ADR3412数据手册

AD8500数据手册

AD7790数据手册

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

**Circuits  
from the Lab®**  
Reference Designs

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和RF设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0359](http://www.analog.com/cn/CN0359)。

**连接/参考器件**

<b>AD8253</b>	10 MHz、20 V/μs、G = 1、10、100、1000、iCMOS可编程增益仪表放大器	<b>ADuCM360</b>	集成双通道Σ-Δ型ADC和ARM Cortex-M3的低功耗精密模拟微控制器
<b>ADA4627-1</b>	30 V、高速、低噪声、低偏置电流JFET运算放大器	<b>AD8542</b>	CMOS轨到轨通用放大器
<b>ADA4000-1</b>	低成本、精密JFET输入运算放大器	<b>ADP2300</b>	1.2 A、20 V、700 kHz/1.4 MHz异步降压型稳压器
<b>ADA4638-1</b>	30 V、零漂移、轨到轨输出精密放大器	<b>ADP1613</b>	650 kHz/1.3 MHz升压PWM DC-DC开关转换器
<b>ADA4528-2</b>	精密、超低噪声、RRIO、双通道、零漂移运算放大器	<b>ADG1211</b>	低电容、低电荷注入、±15 V/+12 V iCMOS四通道单刀单掷开关
<b>ADA4077-2</b>	4 MHz、7 nV/√Hz、低失调和漂移、高精度放大器	<b>ADG1419</b>	2.1 Ω导通电阻、±15 V/+12 V/±5 V、iCMOS单刀双掷开关
<b>AD8592</b>	CMOS、单电源、轨到轨输入/输出运算放大器，具有关断功能	<b>ADM3483</b>	3.3 V限摆率、半双工、RS-485/RS-422收发器

## 全自动高性能电导率测量系统

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

**CN-0359电路评估板(EVAL-CN0359-EB1Z)**

#### 设计和集成文件

**原理图、源代码、布局文件、物料清单**

### 电路功能与优势

图1中的电路是一个完全独立自足、微处理器控制的高精度电导率测量系统，适用于测量液体的离子含量、水质分析、工业质量控制以及化学分析。

经过仔细选择的精密信号调理元件组合可在0.1 μS至10 S (10 MΩ至0.1 Ω)电导率范围内提供优于0.3%的精度，且无需校准。

针对100 Ω或1000 Ω铂(Pt)电阻温度检测器(RTD)提供自动检测功能，允许以室温为参考测量电导率。

系统支持双线式或四线式电导池以及双线式、三线式或四线式RTD，以提高精度和灵活性。

该电路能以极小的直流失调产生精确交流激励电压，从而避免电导率电极上的极化电压受损。交流激励的幅度和频率为用户可编程。

创新的同步采样技术可将激励电压和电流的峰峰值幅度转化为直流值，这样不仅提升了精度，同时简化了内置于精密模拟微控制器的双通道24位Σ-Δ型ADC对于信号的处理。

采用LCD显示器和编码器按钮实现直观的用户界面。该电路可以按需使用RS-485接口实现与PC的通信，并采用4 V至7 V单电源供电。

#### Rev. 0

Circuits from the Lab® reference designs 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 designs. (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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



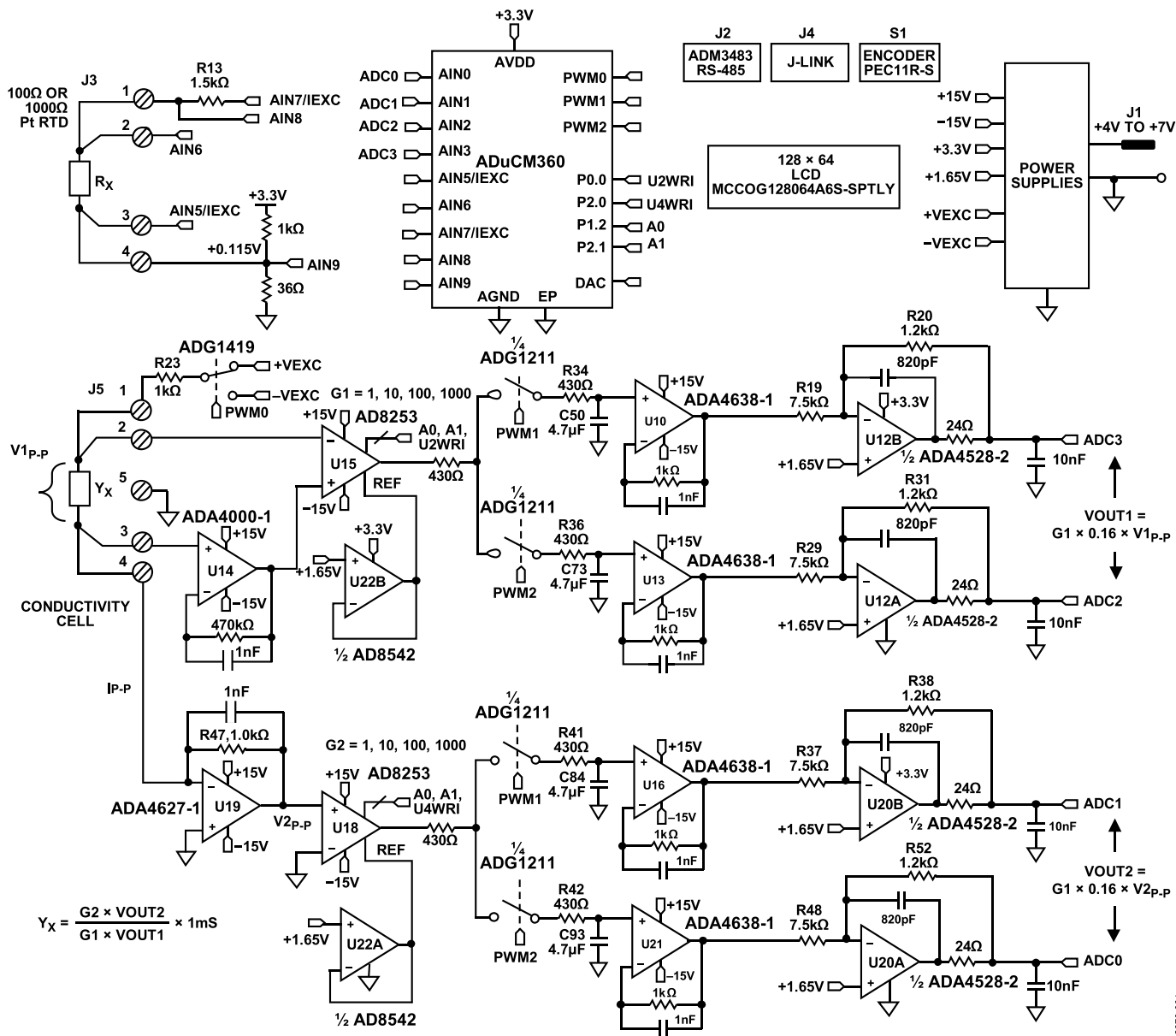


图1. 高性能电导率测量系统(原理示意图: 未显示所有连接和去耦)

## 电路描述

电导池的激励方波通过使用ADuCM360微控制器的PWM输出在+VEXC和-VEXC电压之间切换ADG1419产生。方波必须具有精确的50%占空比和极低直流失调。哪怕很小的直流失调都会在一时间之后损坏电导池。

+VEXC和-VEXC电压由ADA4077-2运算放大器(U9A和U9B)产生, 这两个电压的幅度由ADuCM360的DAC输出控制, 如图2所示。

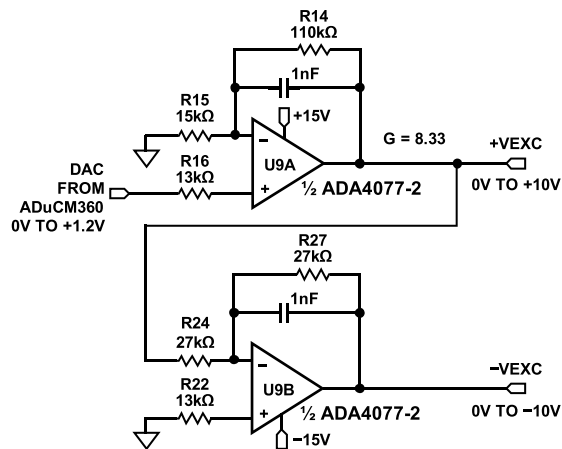


图2. 激励电压源

ADA4077-2失调电压典型值为 $15\mu\text{V}$ (A级), 偏置电流为 $0.4\text{nA}$ , 失调电流为 $0.1\text{nA}$ , 输出电流最高为 $\pm 10\text{mA}$ , 压差低于 $1.2\text{V}$ 。U9A运算放大器的闭环增益为8.33, 可将ADuCM360内部DAC输出( $0\text{V}$ 至 $1.2\text{V}$ )转换为 $0\text{V}$ 至 $10\text{V}$ 范围的+VEXC电压。U9B运算放大器反转+VEXC, 产生-VEXC电压。选择R22, 使得 $R22 = R24 \parallel R27$ , 以便消除一阶偏置电流。由U9A的 $15\mu\text{V}$ 失调电压产生的误差约为 $(2 \times 15\mu\text{V}) \div 10\text{V} = 3\text{ppm}$ 。因此, 反相级产生的主要误差是R24和R27之间的电阻匹配误差。

ADG1419是一个 $2.1\Omega$ 导通电阻单刀双掷模拟开关, 在 $\pm 10\text{V}$ 范围内的导通电阻平坦度为 $50\text{m}\Omega$ , 非常适合从 $\pm\text{VEXC}$ 电压产生对称方波信号。电阻R23将通过传感器的最大电流限制为 $10\text{V}/1\text{k}\Omega = 10\text{mA}$ 。ADG1419导致的对称误差通常为 $50\text{m}\Omega \div 1\text{k}\Omega = 50\text{ppm}$ 。

施加到电导池上的电压V1采用AD8253仪表放大器(U15)进行测量。U15正输入由ADA4000-1(U14)缓冲。选择ADA4000-1是因为它具有 $5\text{pA}$ 低偏置电流, 可最大程度减少低电导率相关的低电流测量误差。AD8253的负输入不需要缓冲。

同步采样级可以消除U14和U15的失调电压, 从而不影响测量精度。

U15和U18采用AD8253  $10\text{MHz}$ 、 $20\text{V}/\mu\text{s}$ 、可编程增益( $G=1$ 、 $10$ 、 $100$ 、 $1000$ )仪表放大器, 增益误差低于 $0.04\%$ 。AD8253压摆率为 $20\text{V}/\mu\text{s}$ ,  $0.001\%$ 建立时间为 $1.8\mu\text{s}$ ( $G=1000$ )。其共模抑制典型值为 $120\text{dB}$ 。

U19(ADA4627-1)级是一个精密电流-电压转换器, 可将流过传感器的电流转换为电压。这款器件的低偏置电流和低失调电压性能使其成为该级的理想选择。 $120\mu\text{V}$ 失调误差产生的对称误差仅为 $120\mu\text{V}/10\text{V} = 12\text{ppm}$ 。ADA4627-1失调电压为 $120\mu\text{V}$ (典型值, A级), 偏置电流为 $1\text{pA}$ (典型值), 压摆率为 $40\text{V}/\mu\text{s}$ ,  $0.01\%$ 建立时间为 $550\text{ns}$ 。

U22A和U22B(AD8542)缓冲器分别为U18和U15仪表放大器提供 $1.65\text{V}$ 基准电压。

下面介绍电压通道信号路径上的其余器件(U17A、U17B、U10、U13、U12A和U12B)。电流通道(U17C、U17D、U16、U21、U20A和U20B)的工作情况相同。

ADuCM360能产生PWM0方波开关信号以供ADG1419开关使用, 并且还能产生PWM1和PWM2同步信号供同步采样级使用。电导池的电压和三个时序波形如图3所示。

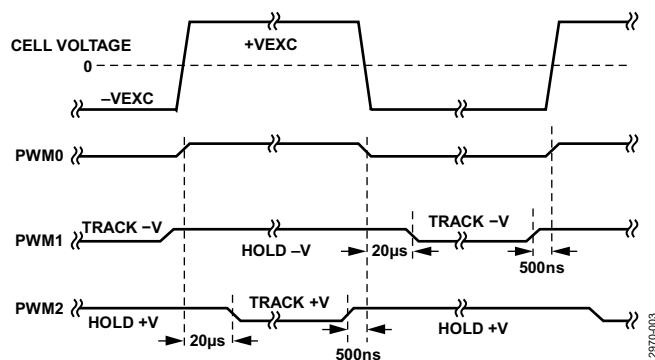


图3. 电导池电压和采样保持时序信号

AD8253仪表放大器(U15)输出驱动两个并行的采样保持电路; 这两个电路由ADG1211开关(U17A/U17B)、串联电阻(R34/R36)、保持电容(C50/C73)以及单位增益缓冲器(U10/U13)组成。

ADG1211是一个低电荷注入、四通道单刀单掷模拟开关, 工作电源电压为 $\pm 15\text{V}$ , 输入信号最高可达 $\pm 10\text{V}$ 。开关导致的最大电荷注入为 $4\text{pC}$ , 产生的电压误差仅为 $4\text{pC} \div 4.7\mu\text{F} = 0.9\mu\text{V}$ 。

PWM1信号使U10采样保持缓冲器可在传感器电压的负周期采样, 然后保持直至下一个采样周期。因此, U10采样保持缓冲器输出等于传感器电压方波负幅度对应的直流电平。

类似地, PWM2信号使U13采样保持缓冲器可在传感器电压的正周期采样, 然后保持直至下一个采样周期。因此, U13采样保持缓冲器输出等于传感器电压方波正幅度对应的直流电平。

采样保持缓冲器(ADA4638-1)的偏置电流典型值为 $45\text{pA}$ , 而ADG1211开关的漏电流典型值为 $20\text{pA}$ 。因此,  $4.7\mu\text{F}$ 保持电容的最差情况漏电流为 $65\text{pA}$ 。对于 $100\text{Hz}$ 激励频率而言, 周期为 $10\text{ms}$ 。由于 $65\text{pA}$ 漏电流而导致的半周期( $5\text{ms}$ )内压降为 $(65\text{pA} \times 5\text{ms}) \div 4.7\mu\text{F} = 0.07\mu\text{V}$ 。

ADA4638-1零漂放大器的失调电压典型值仅为 $0.5\mu\text{V}$ , 其误差贡献可以忽略不计。

信号链上位于ADC前面的最后一级是ADA4528-2反相衰减器(U12A和U12B), 其增益为 $-0.16$ , 共模输出电压为 $+1.65\text{V}$ 。ADA4528-2失调电压典型值为 $0.3\mu\text{V}$ , 因此误差贡献可以忽略不计。

衰减器级可将±10 V最大信号降低为±1.6 V，共模电压为+1.65 V。该范围为与ADuCM360 ADC输入范围相当，即采用3.3 V AVDD电源时为0 V至3.3 V (1.65 V ± 1.65 V)。

衰减器级同样提供噪声过滤功能，其-3 dB频率约为198 kHz。

电压通道VOUT1的差分输出施加到ADuCM360的AIN2和AIN3输入端。电流通道VOUT2的差分输出施加到ADuCM360的AIN0和AIN1输入端。

计算输出的两个等式如下所示：

$$VOUT1 = G1 \times 0.16 \times V1_{p-p} \quad (1)$$

$$VOUT2 = G2 \times 0.16 \times V2_{p-p} \quad (2)$$

电导池电流由下式确定：

$$I_{p-p} = V1_{p-p} \times Y_X \quad (3)$$

V2<sub>p-p</sub>电压由下式确定：

$$V2_{p-p} = I_{p-p} \times R47 \quad (4)$$

求解等式4的I<sub>p-p</sub>，然后代入等式3，求得Y<sub>X</sub>：

$$Y_X = \frac{V2_{p-p}}{V1_{p-p} \times R47} \quad (5)$$

求解等式1和等式2的V1<sub>p-p</sub>和V2<sub>p-p</sub>，然后代入等式5，求得：

$$Y_X = \frac{G2 \times VOUT2}{G1 \times VOUT1 \times R47} \quad (6)$$

$$Y_X = \frac{G2 \times VOUT2}{G1 \times VOUT1} \times 1 \text{ mS} \quad (7)$$

等式7显示电导率测量取决于G1、G2和R47，以及VOUT2和VOUT1的比值。因此，ADuCM360内置的ADC无需使用精密基准电压源。

AD8253增益误差(G1和G2)最大值为0.04%，并且R47选择0.1%容差的电阻。

从该点开始，VOUT1和VOUT2信号链的电阻便决定了总系统精度。

软件将每个AD8253的增益按如下所述进行设置：

- 如果ADC代码超过满量程的93.2%，则AD8253增益在下一个样本减少10倍。
- 如果ADC代码低于满量程的9.13%，则AD8253增益在下一个样本增加10倍。

## 系统精度测量

下列4个电阻影响VOUT1电压通道的精度：R19、R20、R29和R31。

下列5个电阻影响VOUT2电流通道的精度：R47、R37、R38、R48和R52。

假设所有9个电阻均为0.1%容差并包括AD8253的0.04%增益误差，则最差情况下的误差分析表明误差约为0.6%。分析内容在CN-0359设计支持包中。

在实际应用中，电阻更有可能采取RSS方式进行组合，且正或负信号链上的电阻容差导致的RSS误差为 $\sqrt{5} \times 0.1\% = 0.22\%$ 。

使用1 Ω至1 MΩ(1 S至1 μS)精密电阻进行精度测量，以仿真电导池。图4显示了结果，最大误差不到0.1%。

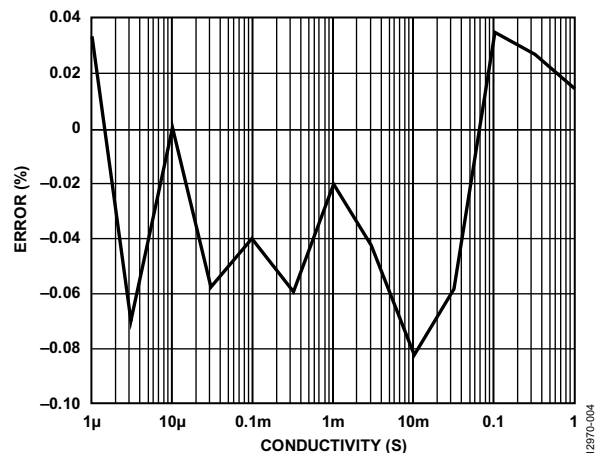


图4. 系统误差(%)与电导率(1 μS至1 S)的关系

## RTD测量

电导率测量系统精度只有经过温度补偿才能达到最佳。由于常见溶液温度系数在1%/°C至3%/°C或更高值之间变化，因此必须使用带有可调温度补偿的测量仪器。溶液温度系数在某种程度上是非线性的，通常还随着实际电导率变化。因此，在实际测量温度下进行校准可以达到最佳精度。

ADuCM360内置两个匹配的软件可配置激励电流源。它们可单独配置，提供10 μA至1 mA电流输出，匹配优于0.5%。电流源允许ADuCM360针对Pt100或Pt1000 RTD轻松执行双线式、三线式或四线式测量。在设置过程中，软件还能自动检测RTD是否为Pt100或Pt1000。

下文给出了不同RTD配置如何工作的简化原理图。所有模式切换均通过软件实现，无需改变外部跳线设置。

图5显示了四线式RTD配置。

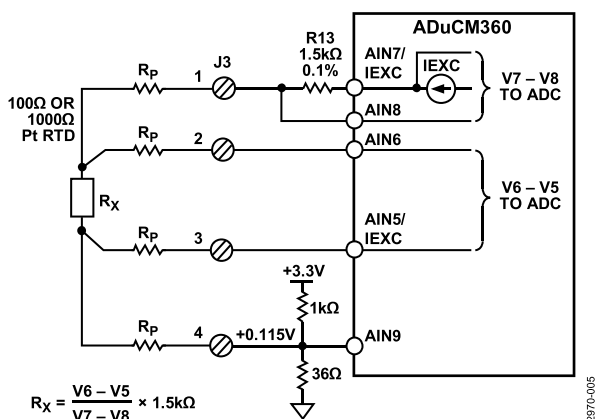


图5. 四线式RTD连接配置

每个连接远程RTD的引脚寄生电阻以 $R_p$ 表示。激励电流(IEXC)流过1.5kΩ精密电阻和RTD。片上ADC测量电阻(V7 - V8)两端的电压。

选择R13电阻和IEXC激励电流值,使得AIN7上的ADuCM360最大输入电压不超过 $AVDD - 1.1V$ 很重要;否则,IEXC电流源会工作异常。

RTD电压可以使用两个连接AIN6和AIN5的检测引脚进行精确测量。输入阻抗约为2MΩ(无缓冲模式,PGA增益=1),并且流过检测引脚电阻的电流引起的误差极小。然后,ADC测量RTD电压(V6 - V5)。

随后便可如下所示计算RTD电阻:

$$R_X = \frac{V6 - V5}{V7 - V8} \times 1.5k\Omega \quad (8)$$

测量值是一个比例值,且与精确的外部基准电压无关,而仅与1.5kΩ电阻容差有关。此外,四线式配置可消除引脚电阻相关的误差。

ADuCM360提供带缓冲与不带缓冲的输入选项。如果激活内部缓冲器,则输入电压必须大于100mV。1kΩ/36Ω电阻分压器能为RTD提供115mV偏置电压,允许以缓冲方式工作。在无缓冲模式下,J3端点4可以接地,并连接接地屏蔽,以减少噪声。

三线式连接是另一种使用广泛的RTD配置,可消除引脚电阻误差,如图6所示。

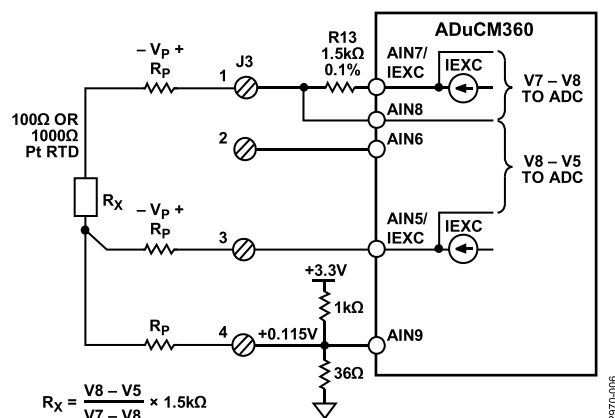


图6. 三线式RTD连接配置

第二个匹配的IEXC电流源(AIN5/IEXC)在引脚电阻上形成一个电压,并与端点3串联,消除与端点1串联的引脚电阻上的压降。因此,测得的V8 - V5电压不存在引脚电阻误差。

图7显示了双线式RTD配置,无引脚电阻补偿。

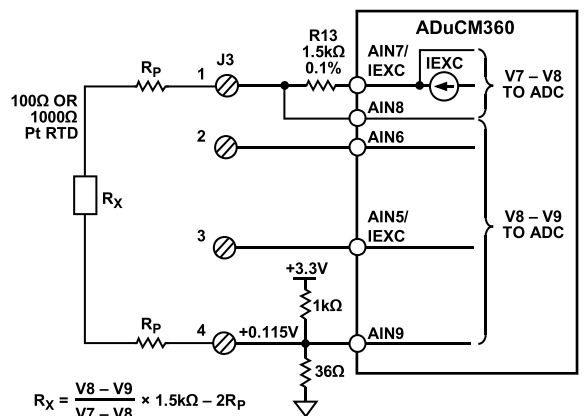


图7. 双线式RTD连接配置

双线式配置是成本最低的电路,适用于非关键型应用、短路RTD连接以及较高电阻RTD(比如Pt1000)等。

## 电导率理论

材料或液体的电阻率 $\rho$ 定义为：当立方体形状的材料反面完全导电接触时，该材料的电阻。其他形状材料的电阻 $R$ 可按以下方式计算：

$$R = \rho L / A \quad (9)$$

其中：

$L$ 是接触距离。

$A$ 是接触面积。

电阻率的测量单位为 $\Omega \text{ cm}$ 。当接触 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 立方体的反面时， $1 \Omega \text{ cm}$ 材料的电阻为 $1 \Omega$ 。

电导是电阻的倒数，电导率是电阻率的倒数。电导的测量单位为西门子(S)，电导率的测量单位为 $\text{S/cm}$ 、 $\text{mS/cm}$ 或 $\mu\text{S/cm}$ 。

所有水溶液都在一定程度上导电。向纯水中添加电解质，例如盐、酸或碱，可以提高电导率并降低电阻率。

在此电路笔记中， $Y$ 为电导率的通用符号，测量单位为 $\text{S/cm}$ 、 $\text{mS/cm}$ 或 $\mu\text{S/cm}$ 。但在很多情况下，为了方便起见，我们会省略距离项，电导率仅表示为 $\text{S}$ 、 $\text{mS}$ 或 $\mu\text{S}$ 。

电导率系统通过电子元件连接到沉浸在溶液中的传感器(称为电导池)来测量电导率，如图8所示。

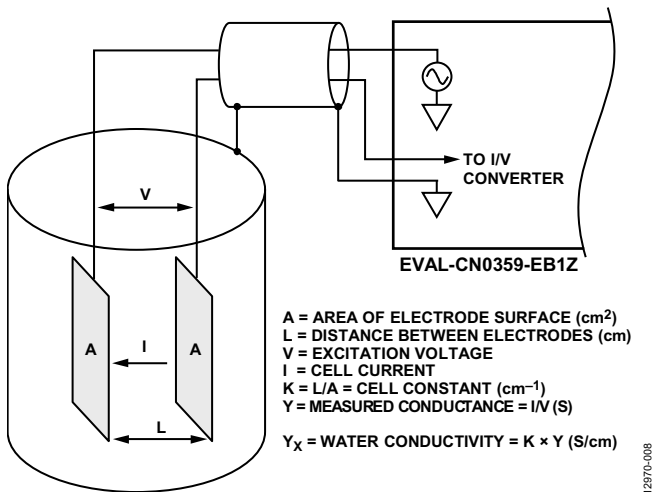


图8. 电导池与EVAL-CN0359-EB1Z实现对接

电子电路对传感器施加交流电压，并测量产生的电流大小，电流与电导率相关。由于电导率具有很大温度系数(最高达到 $4\%/^{\circ}\text{C}$ )，因此电路中集成了必需的温度传感器，用于将读数调整为标准温度，通常为 $25^{\circ}\text{C}$  ( $77^{\circ}\text{F}$ )。对溶液进行测量时，必须考虑水本身的电导率的温度系数。为了精确地补偿温度，必须使用第二个温度传感器和补偿网络。

接触型传感器通常包括相互绝缘的两个电极。电极通常为316型不锈钢、钛钼合金或石墨，具有特定的大小和间距，以提供已知的电导池常数。从理论上说， $1.0/\text{cm}$ 的电导池常数表示两个电极，每个电极面积为 $1 \text{ cm}^2$ ，间距为 $1 \text{ cm}$ 。对于特定的工作范围，电导池常数必须与测量系统相匹配。例如，如果在电导率为 $1 \mu\text{S/cm}$ 的纯水中使用电导池常数为 $1.0/\text{cm}$ 的传感器，则电导池的电阻为 $1 \text{ M}\Omega$ 。相反，相同电导池在海水中的电阻为 $30 \Omega$ ，由于电阻比过大，普通仪器很难在仅有一个电导池常数情况下精确测量此类极端情况。

对 $1 \mu\text{S/cm}$ 溶液进行测量时，电导池配置了大面积电极，相距很小的间距。例如，对于电导池常数为 $0.01/\text{cm}$ 的电导池，其电导池电阻测量值约为 $10,000 \Omega$ ，而非 $1 \text{ M}\Omega$ 。精确测量 $10,000 \Omega$ (而非 $1 \text{ M}\Omega$ )比较容易；因此，对于超纯水和高电导率海水，使用具有不同电导池常数的电导池，测量仪表可在相同的电导池电阻范围内工作。

电导池常数 $K$ 定义为电极之间距离 $L$ 与电极面积 $A$ 的比值：

$$K = L / A \quad (10)$$

然后，仪器测量电导池电导 $Y$ ：

$$Y = I / V \quad (11)$$

液体电导率 $Y_x$ 可计算如下：

$$Y_x = K \times Y \quad (12)$$

有两类电导池：一类采用两个电极，另一类采用四个电极，如图9所示。电极通常称为极点。

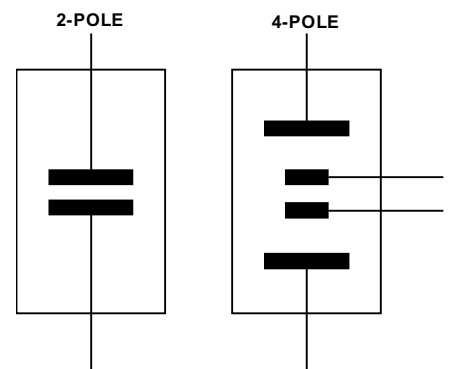


图9. 双极点和四极点电导池

双极点传感器比较适合低电导率测量时使用，比如纯净水和各种生物与医药液体。四极点传感器更适合高电导率测量，比如废水和海水分析。



双极点电导池的电导池常数范围大致是从0.1/cm到1/cm，而四极点电导池的电导池常数范围是从1/cm到10/cm。

四极点电导池可以消除电极极化和场效应引起的误差；这些误差可能会干扰测量。

电极的实际配置可以是平行环、同轴导体等，而不会是如图8所示的简单平行板。

无论电导池为何种类型，都不可在电极上施加直流电压，因为液体中的离子会在电极表面聚集，从而导致极化效应并产生测量误差，更有可能损坏电极。

若采用同轴传感器，则应当密切关注传感器屏蔽。屏蔽必须连接与盛放液体的金属容器相同的电位。如果容器接地，则屏蔽必须连接电路板的接地端(J5的引脚5)。

CN-0359电路允许的可编程激励电压范围为100 mV至10 V，并且R23 (1 k $\Omega$ )串联电阻将最大电导池电流限制为10 mA。最根本的预防措施是不要超过电导池激励电压或激励电流的额定值。

## 电源电路

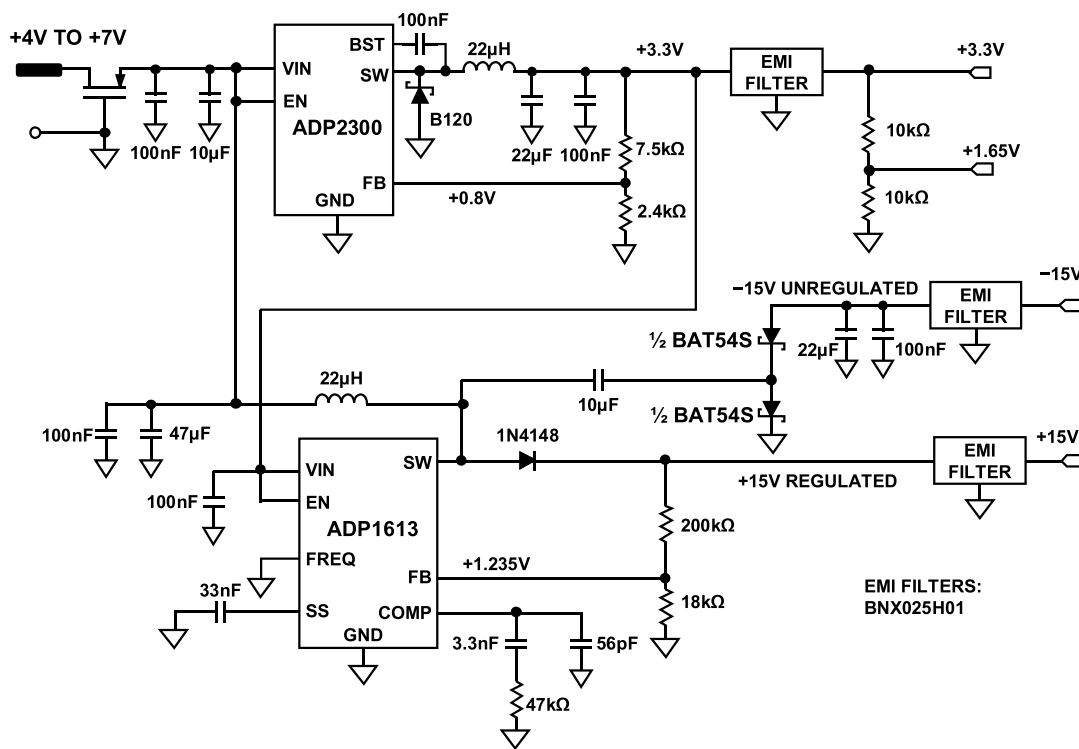
为了简化系统要求，所有必需的电压( $\pm 15$  V和+3.3 V)均由4 V至7 V单电源产生，如图10所示。

ADP2300降压调节器产生电路板所需的3.3 V电源电压。该设计基于可供下载的[ADP230x降压调节器设计工具](#)。

ADP1613升压调节器产生+15 V调节电源电压以及-15 V未调节电源电压。-15 V电源电压采用电荷泵产生。该设计基于[ADP161x升压调节器设计工具](#)。

有关电源的选择与设计详情请参阅[www.analog.com/ADIsimPower](http://www.analog.com/ADIsimPower)。

采用正确的布局和接地技术以避免开关调节器噪声耦合至模拟电路。更多详情，请参考[线性电路设计手册](#)、[数据转换手册](#)、[指南MT-031](#)和[指南MT-101](#)。



12970-010

图11显示LCD背光驱动器电路。

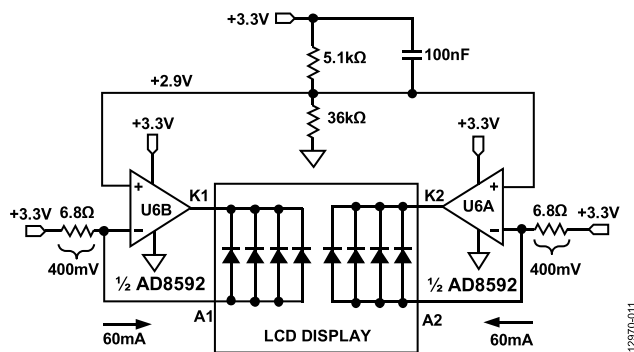


图11. LCD背光驱动器

每半个AD8592运算放大器均用作60 mA电流源，为LCD背光电流供电。AD8592的源电流和吸电流最大值为250 mA，内置100 nF电容以确保软启动。

### 软件操作和用户界面

EVAL-CN0359-EB1Z预加载了进行电导率测量所需的代码。代码在CN-0359设计支持包的CN0359-SourceCode.zip文件中。

CN-0359具有直观且易于使用的用户界面。所有用户输入均来自双功能按钮/旋转编码器旋钮。编码器旋钮可顺时针旋转或逆时针旋转(无机械停止)，也可用作按钮。

图12是EVAL-CN0359-EB1Z板的照片，显示了LCD显示器和编码器旋钮位置。



图12. EVAL-CN0359-EB1Z板照片，显示测量模式下的主画面

连线后，板上的电导池和RTD上电。LCD屏幕如图12所示。

按下编码器旋钮可进入设置菜单，然后输入EXC Voltage (EXC电压)、EXC Frequency (EXC频率)、TEMP Coefficient (温度系数)以及Cell Constant (电导池常数)，如图13所示。

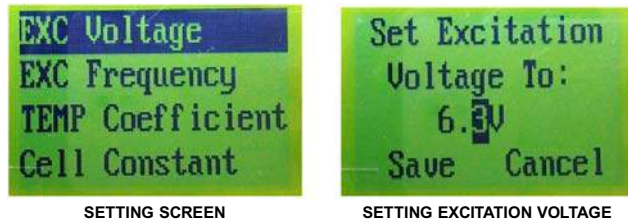


图13. LCD显示屏

旋转旋钮可上下移动光标，选定各种参数。

将光标定位在EXC Voltage (EXC电压)，然后按下旋钮，直至点击打开菜单。旋转旋钮，将光标定位到待设置数字的第一位数。按下按钮，光标闪烁。旋转旋钮改变数字，待出现所需数字时按下旋钮。完成所有数字位数的设置后，将光标定位到Save (保存)，然后按下按钮保存设置。

继续执行这些操作步骤，设置EXC Frequency (EXC频率)、TEMP Coefficient (温度系数)和Cell Constant (电导池常数)。

完成全部常数的设置后，选择RETURN TO HOME (返回主屏幕)，然后按下旋钮。至此，系统准备就绪，可进行测量。

如果输入允许范围外的数字，则蜂鸣器鸣响。

如果未正确连接电导池，则屏幕显示Sensor Incorrect (传感器不正确)。

如果未正确连接RTD，则屏幕显示RTD Incorrect use 25°C (RTD不正确，使用25°C)；此时系统依然可以在不连接RTD的情况下执行测量，但使用25°C作为补偿温度。

确保在施加电源之前RTD处于连接状态，以便系统可以检测RTD电阻(Pt100或Pt1000)和配置(双线式、三线式、四线式)。

### 常见变化

CN-0359中的系统采用ADuCM360精密模拟微控制器，实现高度集成的电导率测量。

如果用户希望采用分立式ADC，则AD7794 24位Σ-Δ型ADC是一个不错的选择。

## 电路评估与测试

本电路采用EVAL-CN0359-EB1Z评估板、外部电源、电导池和RTD。

## 设备要求

需要以下设备：

- EVAL-CN0359-EB1Z电路板
- 6 V电源或壁式电源适配器(EVAL-CFTL-6V-PWRZ)
- 电导池
- Pt100或Pt1000双线式、三线式或四线式RTD(如果未连接RTD，则电导率测量以25°C为基准)

## 设置

执行下列步骤，设置待评估电路：

- 按下列要求连接电导池：
  - 四线式电导池：将外部电流电极连接至J5引脚1；将最近的内部电压电极连接至J5引脚2。将第二个外部电流电极连接至J5引脚4；将最近的内部电压电极连接至引脚2。
  - 双线式电导池：将一个电极连接至J5引脚1和引脚2；将第二个电极连接至J5引脚3和引脚4。
  - 如果电导池具有屏蔽，则将其连接至J5引脚5。
- 按下列要求连接RTD(若使用)：
  - 四线式RTD(参见图5)：将正电流激励导线连接至J3引脚1；将正电压检测导线连接至J3引脚2。将负电流激励导线连接至J3引脚4；将负电压检测导线连接至J3引脚3。
  - 三线式RTD(参见图6)：将正电流激励导线连接至J3引脚1；将负电流激励导线连接至J3引脚4。将负电压检测导线连接至J3引脚3。
  - 双线式RTD(参见图7)：将RTD导线连接至J3引脚1；将其他导线连接至J3引脚4。
  - 如果RTD导线具有屏蔽，则将屏蔽连接至J5引脚5。

- 将6 V电源(EVAL-CFTL-6V-PWRZ)连接至EVAL-CN0359-EB1Z电路板的J1。
- 连接EVAL-CFTL-6V-PWRZ，然后按下EVAL-CN0359-EB1Z电路板上的按钮，以便上电。
- 遵循前文“软件操作和用户界面”部分的操作步骤，输入下列参数：EXC Voltage(EXC电压)、EXC Frequency(EXC频率)、TEMP Coefficient(温度系数)和Cell Constant(电导池常数)。
- 返回主屏幕，等待ADuCM360刷新缓冲器并显示电导率和温度。如果屏幕显示错误信息且蜂鸣器鸣响20次以上，则检查传感器连接。

## 针对原型开发的连接

根据设计，EVAL-CN0359-EB1Z需采用EVAL-CFTL-6V-PWRZ 6 V电源供电。EVAL-CN0359-EB1Z仅需电源、外部电导池和RTD即可工作。

EVAL-CN0359-EB1Z还提供RS-485连接器J2，允许外部PC与此板实现接口。连接器J4是一个JTAG接口，可用来编程和调试ADuCM360。

图14为典型PC连接示意图，显示RS-485至RS-232适配器。

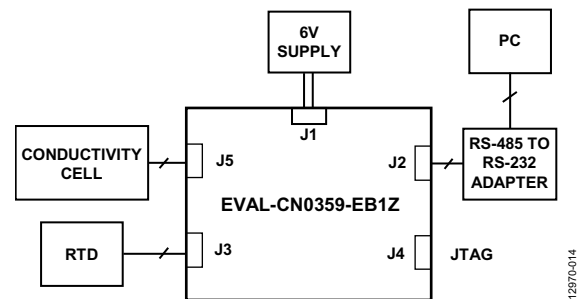


图14. 测试设置功能框图

12870-014

**更多资料**

CN-0359设计支持包：

[www.analog.com/CN0359-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0359-DesignSupport)

ADIsimPower设计工具，ADI公司。

线性电路设计手册，ADI/Elsevier公司。

运算放大器应用手册，ADI/Elsevier公司。

数据转换手册，ADI/Elsevier公司。

仪表放大器应用工程师指南(第三版)，ADI公司。

指南MT-031：实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团，ADI公司。

指南MT-101：去耦技术，ADI公司。

传感器信号调理 - 第7部分：温度传感器，ADI公司。

**数据手册和评估板**

AD8253数据手册

ADA4627-1数据手册

ADA4000-1数据手册

ADA4638-1数据手册

ADA4528-2数据手册

ADA4077-2数据手册

AD8592数据手册

AD8542数据手册

ADuCM360数据手册

ADP2300数据手册

ADP1613数据手册

ADG1211数据手册

ADG1419数据手册

ADM3483数据手册

**修订历史**

2015年1月—修订版0：初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN12970sc-0-1/15(0)



[www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)

**Circuits  
from the Lab®**  
Reference Designs

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0363](http://www.analog.com/cn/CN0363)。

**连接/参考器件**

AD7175-2	24位、250 kSPS $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC，具有20 $\mu$ s 建立时间，集成真轨到轨缓冲器
ADA4528-1	精密、超低噪声、轨到轨输入输出(RRIO)、零漂移运算放大器
AD8615	精密、20 MHz、CMOS、轨到轨输入/输出运算放大器
AD5201	33位数字电位计
ADA4805-1	0.2 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C失调漂移、105 MHz低功耗、低噪声、轨到轨运算放大器
ADG633	CMOS、 $\pm 5$ V/ $\pm 5$ V/ $\pm 3$ V、三通道单刀双掷开关
ADG733	CMOS、2.5 $\Omega$ 低电压、三通道单刀双掷开关
ADG704	CMOS、低压、4 $\Omega$ 、4通道多路复用器
ADG819	0.5 $\Omega$ 、CMOS、1.8 V至5.5 V、2:1多路复用器/单刀双掷开关

## 带可编程增益跨阻放大器和数字同步检波功能的双通道色度计

**评估和设计支持**
**电路评估板**

[CN-0363电路评估板\(EVAL-CN0363-PMDZ\)](#)

**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所示电路是一款双通道色度计，其具有一个调制光源发射器，各通道上有可编程增益跨阻放大器，后接一个噪声非常低的24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型模数转换器(ADC)。ADC的输出连接到一个标准FPGA夹层卡。FPGA从ADC获得采样数据，实现一个同步检波算法。

通过使用调制光和数字同步检波而非恒流(直流)源，系统可有力地抑制非调制频率的噪声源，提供出色的精度。

该双通道电路以三种不同的波长测量样本与参考容器中的液体的吸收光线之比。这种测量方法构成许多通过吸收光谱测量浓度和表征材料的化学分析和环境监控仪器仪表的基础。

**Rev. 0**

Circuits from the Lab® reference designs 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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



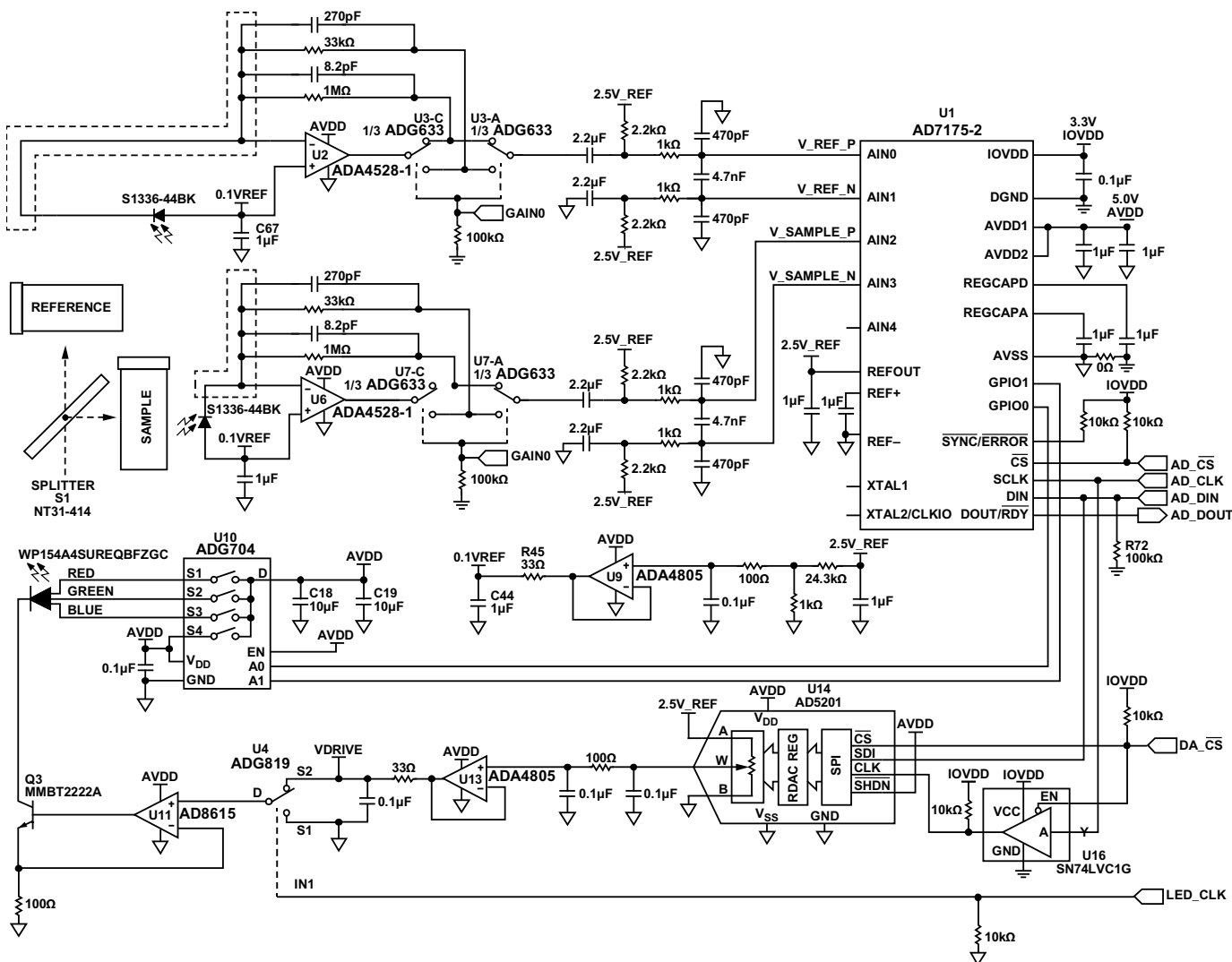


图1. 带可编程增益跨阻放大器和锁定放大器的双通道色度计  
(原理示意图：未显示所有连接和去耦)

## 电路描述

一个设置为用户可编程频率的时钟利用一个恒流驱动器调制三种LED颜色中的一种，该恒流驱动器由运算放大器AD8615、开关ADG819和数字电位计AD5201构成。分光镜将一半光线通过样本容器发送，另一半通过参考容器发送。配置为跨阻放大器的ADA4528-1随后将光电二极管电流转换为输出电压方波，其幅度与从样本或参考容器透射出来的光线成正比。跨阻放大器利用单刀双掷(SPDT)开关ADG633选择两个跨阻增益中的一个。AD7175-2  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC对电压进行采样，并将数字数据发送到FPGA进行数字解调。

FPGA首先将一个以数字方式生成的正弦波与LED时钟同步，然后将此正弦波与ADC采样数据相乘，从而实现同步解调。此外，该正弦波的90°相移版本也与ADC数据相乘

以获得调制信号的正交分量。这些操作的结果是产生两个低频解调信号，分别代表各通道接收光线的同相和正交分量。一个窄带FIR低通滤波器滤除所有其他频率成分，这样便很容易计算光电二极管测得的信号的幅度和相移，而与LED时钟不同的频率的光线或电气噪声则被抑制。多路复用器ADG704将供电轨连接至三种颜色LED中的一个，用户可以通过2位地址选择测试波长。AD8615和NPN晶体管构成一个简单的电流源，LED电流由下式给出：

$$I_{LED} = V_{NON-INVERTING} / R_{EMITTER}$$

其中：

$V_{NON-INVERTING}$  为AD8615同相输入端电压。

$R_{EMITTER}$  为连接到晶体管Q3发射极的电阻值。

ADG819 SPDT开关连接到设定电压和地，其控制引脚连接到参考时钟。当时钟在高低之间振荡时，电流源的设定点从0 mA变为所需的输出电流，从而产生一个方波信号。

数字电位计AD5201充当2.5 V基准电压源的可编程电阻分压器，使得LED电流共有33种不同的电流输出设置。

样本和参考容器各接收LED光能的一半，吸收的光量取决于每个容器中介质的类型和浓度。每个容器另一侧的光电二极管产生少量电流，数量与接收到的光量成比例。

每个接收器通道的第一级包含ADA4528-1运算放大器，该运算放大器配置为跨阻放大器，可将光电二极管输出电流转换为电压。ADA4528-1是一款自稳零放大器，其所导致的失调可忽略不计，无1/f噪声，宽带噪声则非常低(5.9 nV/√Hz)。像所有自稳零放大器一样，在自稳零频率处会出现一个噪声尖峰。对于ADA4528-1，该频率约为200 kHz，但电路信号带宽早在此之前即发生滚降。

运算放大器输入偏置电流乘以输出端的反馈电阻值，作为失调电压。运算放大器的输入失调电压出现在输出端会被放大，其增益取决于反馈电阻和光电二极管分流电阻。此外，运算放大器的任何输入电压失调都会出现在光电二极管上，导致光电二极管暗电流增加。ADA4528-1的失调电压很低(2.5 μV)，非常适合这种应用。

图2显示了一个带单反馈电阻的典型跨阻放大器及其理想传递函数。

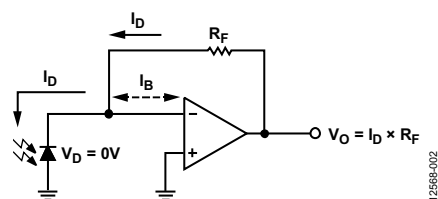


图2. 跨阻放大器传递函数

由于某些受测溶液可能具有非常强的吸收特性，因此有时需要使用大反馈电阻来测量光电二极管产生的极小电流，同时要能够测量与高度稀释溶液相对应的大电流。为了解决这一难题，图1中的光电二极管放大器含有两个不同的可选增益。其中一个增益设为33 kΩ，另一个设为1 MΩ。当单SPDT开关连接运算放大器的输出端以便开关反馈电阻时，ADG633的导通电阻会导致跨阻增益误差。为了避免这个问题，图3显示了一种较好的配置，在该配置中，反

馈环路内部的ADG633选择所需电阻，同时第二个开关将系统下一级与所选反馈环路相连。放大器输出端的电压为：

$$V_{TIA\ OUTPUT} = I_{PHOTODIODE} \times R_{FEEDBACK}$$

而不是

$$V_{TIA\ OUTPUT} = I_{PHOTODIODE} \times (R_{FEEDBACK} + R_{ON\ ADG633})$$

它表示增益误差。但是，由于其中一个ADG633位于反馈环路之外，该级的输出阻抗即为ADG633的导通电阻(通常52 Ω)，而非闭环工作时与运算放大器输出有关的极低输出阻抗。ADG633漏电流(典型值5 pA)引起的误差可忽略不计。

哪怕诸如ADA4528-1这类最好的轨到轨输出放大器，其输出都无法完全摆动至供电轨。此外，ADA4528-1上的输入失调电压可以为负，虽然其数值非常小。运算放大器ADA4805-1不是通过一个负电源来保证放大器绝不削波，并且保证它能驱动至0.0 V，而是提供一个100 mV缓冲电压来偏置光电二极管阳极和ADA4528-1。ADA4805-1非常适合用作基准电压缓冲器，因为当驱动去耦用大容量负载时，它能保持单位增益稳定性。另外还使用第二个ADA4805-1来缓冲用以设置LED电流的数字电位计AD5201输出。

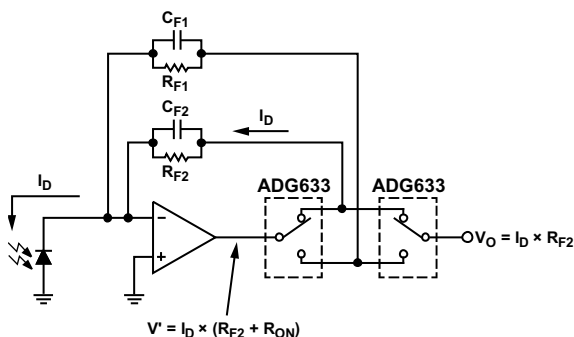


图3. 可编程增益跨阻放大器

光电二极管放大器输出电压可在0.1 V至5.0 V范围内摆动。对于33 kΩ范围而言，4.9 V输出范围对应148.5 μA的满量程光电二极管电流。对于1 MΩ范围，其对应4.9 μA的满量程光电二极管电流。使用1 MΩ的增益设置工作时，务必保护光电二极管不受外界光线影响，以防放大器饱和。虽然下文所述的同步检波方案能够有力地衰减任何不与LED时钟同步的频率，但若ADC返回饱和数据，检波方案将无法正常工作。

各通道的增益设置可通过FPGA板独立选择。

### ADC采样速率和调制频率选择

AD7175-2 ADC配置有sinc5+sinc1滤波器，输出数据速率为250 kSPS，可采样单周期建立对两个通道采样。这种配置使得各通道的有效采样速率为25 kSPS(各通道每隔40 μs输出数据)。任何高于12.5 kHz的频率(例如方波调制的奇数谐波)都会混叠回到ADC通带中，只要其不是刚好位于调制频率之上，同步解调级就会抑制这些频率。为了防止调制波形的混叠频率折回到基频，应根据以下关系选择调制频率：

$$F_{MODULATION} = \frac{F_{SAMPLE}}{2 \times n + 0.5}$$

其中：

$F_{MODULATION}$  为调制频率。

$F_{SAMPLE}$  为ADC有效输出数据速率。

$n$  为整数(对应于调制频率的谐波)。

例如在本系统中，有效输出数据速率为25 kSPS，因此，如果需要1 kHz左右的调制频率，该频率必须是1020 Hz ( $n = 12$ ) 或943 Hz ( $n = 13$ ) 以避免混叠问题。采样这种方法选择调制频率，前端即无需使用陡峭的抗混叠滤波器。

### 数字同步检波

本电路不是在硬件中实现同步检波(参见 [电路笔记 CN-0312](#))，而是获得时间采样数据并利用FPGA实现数字同步检波。图4是FPGA中实现的数字同步检波模块的示意图。FPGA产生交流激励信号驱动LED，以数字方式产生的正弦波在数字锁相环中锁定该信号。输入信号与数字正弦波和90°相移版本相乘，产生两个低频解调信号，其分别与输入信号在调制频率的同相和正交分量成正比。如图4所示，幅度为这两个分量的平方和之根。有关该解调技术的更多信息，请参阅“了解详情”部分。

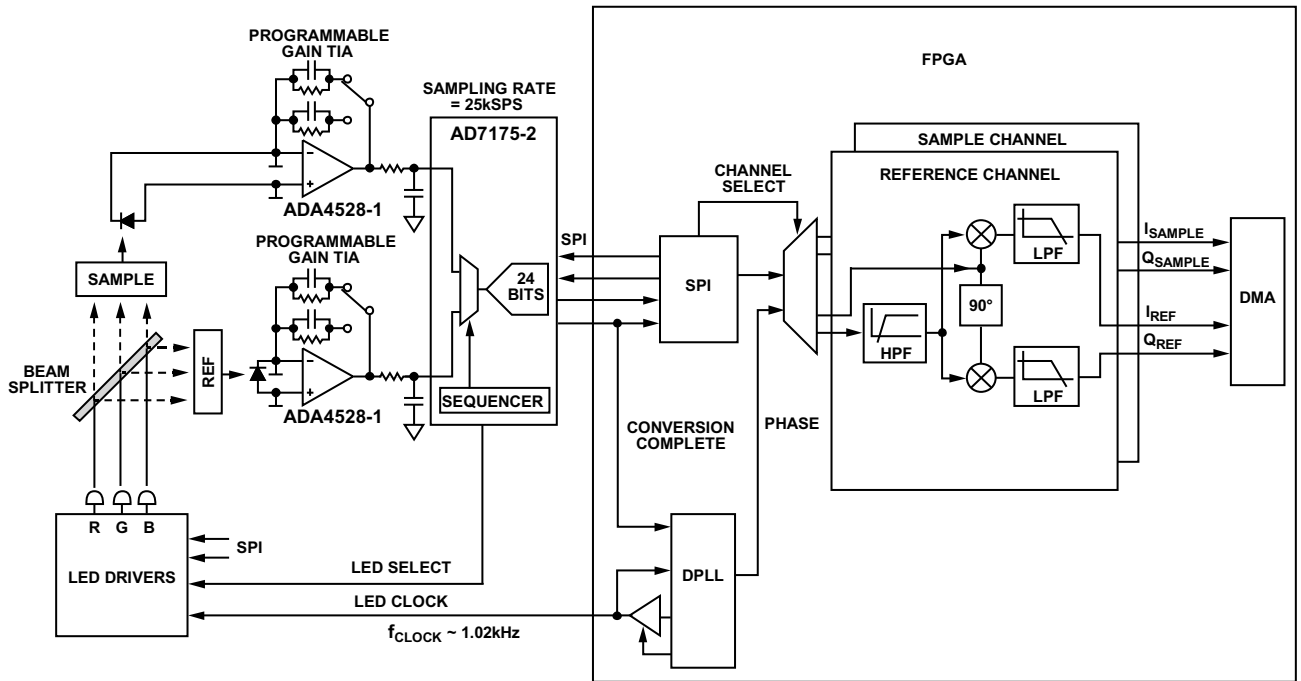


图4. 包括FPGA同步检波器的系统框图

## 电源

EVAL-CN0363-PMDZ板由外部6 V至12 V直流电源供电。电路的模拟部分由来自低压差稳压器ADP7102的AVDD = 5 V供电。电路的数字部分由低压差稳压器ADP1720产生的IOVDD = 3.3 V供电。或者，IOVDD也可以通过链路选项由PMOD连接器VCC提供。

2.5 V基准电压由AD7175-2 ADC的内部2.5 V基准源提供。

## 电路性能测量

为了验证系统的噪声性能，应在禁用所有LED的情况下获取数据。同步检波器依然工作在LED时钟频率，但不会检测到任何与该时钟同步的光信号，因此，它会消除所有直流和交流信号。表1所示为无噪声位性能。

表1. 无噪声位性能<sup>1</sup>

增益	ADC输出		最终滤波输出	
	参考通道ADC	样本通道ADC	参考通道输出	样本通道输出
1 MΩ	12.46	12.85	15.91	15.50
33 kΩ	15.58	15.59	18.77	18.85

<sup>1</sup> 采样速率 = 25 KSPS，激励频率 = 1020 Hz，输出滤波器带宽 = 100 Hz。

## 常见变化

改变光电二极管放大器上反馈电阻的值即可改变放大器增益，这是一种自定义电路的简单方法，可用于不同光照水平的特定应用。然而，补偿电容也必须改变，以保持带宽不变，并保证放大器的稳定性。

对于极低水平光照测量系统而言，同步检波器的输出低通滤波器的截止频率可设为低得多的频率值，以便具有最佳性能，但代价是测量周期较长。

由于LED的光输出随温度变化而改变，系统以样本和参考通道的比例进行测量。光电二极管的增益容差最大值为±11%；因此，由于LED输出随时间和温度的变化而改变，比例的变动在一定程度上存在漂移。增加光反馈网络来控制LED光输出可降低其随温度的变化，使精确的单端测量成为可能。

可以不使用方波来调制LED，而用FPGA中的DDS或PWM来产生正弦波调制。正弦波调制可减少信号的谐波成分，使滤波更简单，并降低噪声。

## 电路评估与测试

EVAL-CN0363-PMDZ板的完整文档，包括原理图、布局图、Gerber文件和物料清单，可在CN-0363设计支持包中找到，网址：[www.analog.com/CN0363-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0363-DesignSupport)。

CN-0363评估软件与FPGA开发板通信，以从EVAL-CN0363-PMDZ电路板捕捉数据并进行分析。

## 设备要求

- EVAL-CN0363-PMDZ电路评估板
- 6 V至12 V、500 mA直流电源或壁式电源适配器
- FPGA开发板(如ZedBoard)和12 V电源
- 8 GB SD卡，随同EVAL-CN0363-PMDZ提供
- USB键盘和鼠标组合
- HDMI监视器(仅HD)
- CN-0363评估软件(参见CN-0363用户指南)
- 蒸馏水和测试液体样本

## 开始使用

有关评估硬件和软件的操作详情，请参阅CN-0363用户指南。

HDL软件和驱动在软件链接中提供，支持各种FPGA开发板，例如Avnet ZedBoard。

开发平台需要一个SD开，其已随同CN-0363硬件提供。SD卡已经过适当分区，但必须用最新镜像予以更新。程序参见CN-0363用户指南。

## 功能框图

图5所示为测试设置的功能框图。

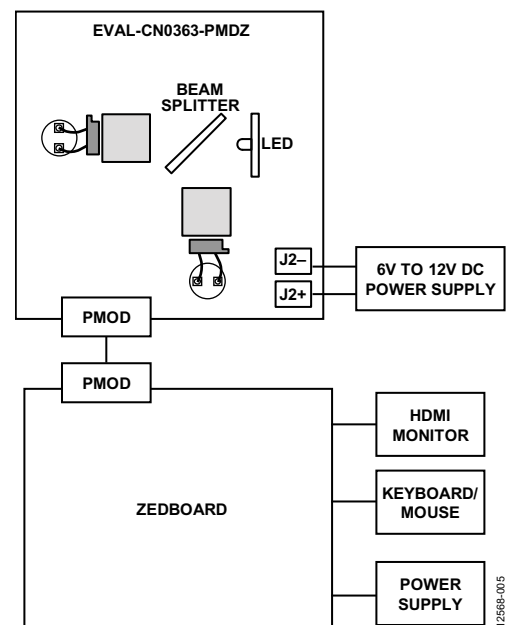


图5. 评估系统功能框图



## 设置

按照如下方式设置系统：

1. 用PMOD电缆连接EVAL-CN0363-PMDZ和ZedBoard，并将一个6 V至12 V直流电源连接到J2电源连接器。此时不要接通电源。
2. 将USB键盘/鼠标、HDMI监视器和电源连接到ZedBoard。此时不要接通电源。

## 测试

按照如下方式初始化系统：

1. 接通EVAL-CN0363-PMDZ板的电源。
2. 接通ZedBoard的电源。
3. 让系统开始引导。
4. 若需要，输入CN-0363用户指南所述的适当键盘命令。

## 校准

系统需进行一次初始校准，以便补偿波束分离器与光电二极管之间的对齐误差，以及补偿光电二极管的所有响应失配。若要校准系统，以蒸馏水填充两个容器，然后插入PCB的方孔中。在校准过程中，建议将光电二极管屏蔽起来，防止环境光线照射。

在软件中启动自动校准程序：从Menu(菜单)栏打开Calibration(校准)对话框，然后单击Calibrate(校准)。完成全部校准程序需要几秒钟时间，进度条会指示当前步骤。校准完成时，校准值会更新。校准会消除零点失调，并设置各通道的正确增益。校准数据还包括一个乘法系数K，其表示满量程激励下参考通道值和样本通道值的相对关系。

针对每种LED颜色，软件都会计算系数K，因此有：

$$\frac{V_{REFERENCE\_CHANNEL}}{V_{SAMPLE\_CHANNEL}} K = 1$$

其中，K表示经计算得出的校准常数。

完成校准后，软件在后续测量中均使用这些校准常数。

在光谱技术上，吸光度定义为到达被测介质的光与通过介质传递的光的对数之比。根据比尔-朗伯特定律，通过介质传递的光量随通道长度和浓度的增加而以指数规律递减。通过将吸光度定义为对数，可使得它与介质的浓度直接成比例(假设通道长度不变)。

$$Absorbance = \log_{10} \left( \frac{V_{REFERENCE}}{V_{SAMPLE}} K \right)$$

无需使用有害化学物质即可验证该理论的简单方法，是测量食用色素的染料浓度。图6显示采用EVAL-CN0363-PMDZ进行测量时，黄色5号染料不同浓度的实验结果。

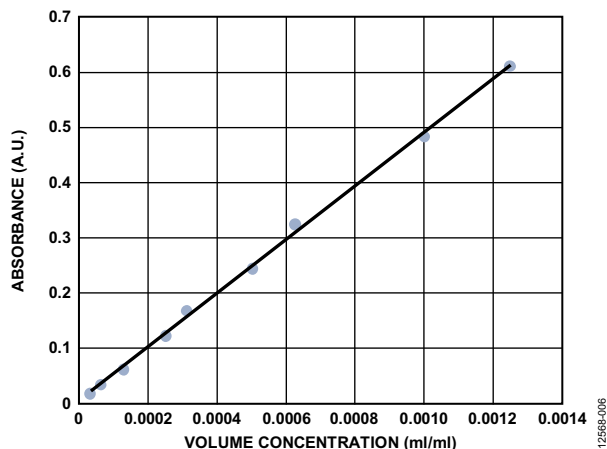


图6. 465 nm(主波长)光下黄色5号染料的吸光度直线

黄色溶液可强烈吸收蓝光；因此，测量采用蓝光(465 nm主波长)LED作为光源。x轴表示体积浓度(每毫升水中染料的毫升数，因此x轴没有单位)，y轴表示吸光度。根据比尔朗伯特定律的预测，吸光度随浓度呈线性变化。

## 分析样本

单击Automated Data Collection(自动收集数据)选项卡中的Analyze Sample(分析样本)按钮(参见图7)以自动分析样本，循环处理所有三种颜色，并计算每种颜色的吸光度。完成分析需要几秒钟时间，进度条会更新以指示当前步骤。分析完成时会显示吸光度值。然后便可将该样本与样本库中的现有样本进行比对，或将其保存到样本库中供将来使用。

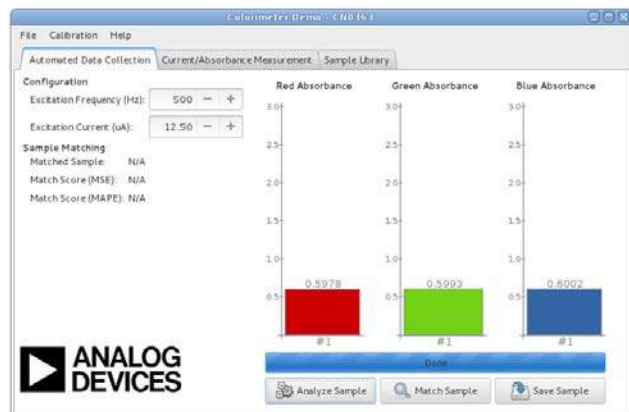


图7. Automated Data Collection(自动收集数据)选项卡视图



### 电流/吸光度测量和手动设置

通过Current/Absorbance Measurement(电流/吸光度测量)选项卡, 用户可以直接手动控制LED和增益, 以及查看原始数据(参见图8)。下列参数可供设置: Excitation Frequency(激励频率)、Excitation Current(激励电流)、LED(红光、绿光或蓝光)、Reference Channel Gain(参考通道增益)和Sample Channel Gain(样本通道增益)。

更改这些值后, 运行自动校准程序可以恢复初始默认值。



图8. Current/Absorbance Measurement(电流/吸光度测量)选项卡视图

### 样本库

利用Sample Library(样本库)选项卡(参见图9), 用户可以管理和比较以前保存的样本数据。左侧是所有样本的列表。右侧是当前所选样本的吸光度值。

按住CTRL键可以选择多个样本。利用此功能可以直接比较

多个样本的吸光度。选择样本, 然后单击Remove(删除), 可以将样本从库中删除。从库中删除的样本无法恢复。

EVAL-CN0363-PMDZ板的照片如图10所示。

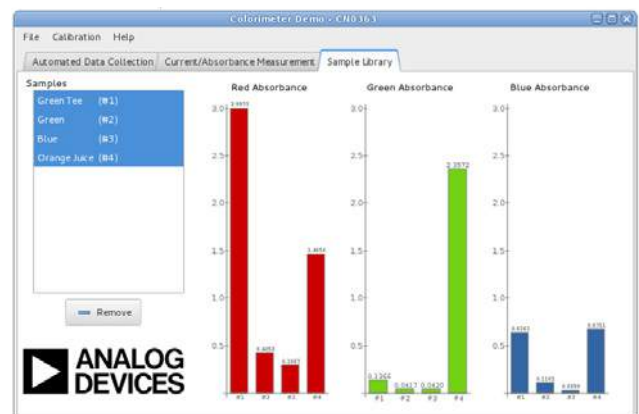


图9. Sample Library(样本库)选项卡视图



图 10. EVAL-CN0363-PMDZ照片

**更多资料**

CN-0363设计支持包:

[www.analog.com/CN0363-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0363-DesignSupport)

Luis Orozco。“同步检波器助力精密低电平测量”。Analog Dialogue 48-11, 2014年11月。

Luis Orozco。“可编程增益跨阻放大器使光谱系统的动态范围达到最大”。Analog Dialogue 47-05, 2013年5月。

Walt Kester、Scott Wurcer和Chuck Kitchin。高阻抗传感器，传感器信号调理实用设计技术，第5部分。1999年。

Douglas A. Skoog、Holler F. James和Stanley R. Crouch。“光谱测定方法入门”。Instrumental Analysis. 美国: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2007年。

**数据手册和评估板**

[AD7175-2数据手册](#)

[ADA4528-1数据手册](#)

[AD8615数据手册](#)

[AD5201数据手册](#)

[ADA4805-1数据手册](#)

[ADG633数据手册](#)

[ADG733数据手册](#)

[ADG704数据手册](#)

[ADG819数据手册](#)

**修订历史**

**2015年5月—修订版0: 初始版**

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN12568sc-0-5/15(0)



[www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)

## 连接/参考器件

AD7981	耐高温、16位、600 kSPS PulSAR ADC
AD8634	耐高温、低功耗、双通道运算放大器
ADR225	耐高温、低功耗基准电压源

## 适合高温环境的16位、600 kSPS低功耗数据采集系统

### 评估和设计支持

#### 评估板

[CN-0365电路评估板\(EVAL-CN0365-PMDZ\)](#)

[系统演示平台\(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

[PMOD/SDP转接板\(SDP-PMD-IB1Z\)](#)

#### 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

越来越多的应用要求数据采集系统必须在极高环境温度下可靠地工作，例如井下油气钻探、航空和汽车应用等。图1所示电路是一个16位、600 kSPS逐次逼近型模数转换器(ADC)系统，其所用器件的额定温度、特性测试温度和性能保证温度为175°C。很多此类恶劣环境应用都采用电池供电，因此该信号链针对低功耗而设计，同时仍然保持高性能。

本电路使用低功耗(600 kSPS时为4.65  $\mu$ A)、耐高温PulSAR® ADC [AD7981](#)，它直接从耐高温、低功耗运算放大器[AD8634](#)驱动。[AD7981](#) ADC需要2.4 V至5.1 V的外部基准电压源，本应用选择的基准电压源为低功耗2.5 V精密基准源[ADR225](#)，后者也通过了高温工作认证，并具有非常低的静态电流(210°C时最大值为60  $\mu$ A)。

本设计中的所有IC封装都是专门针对高温环境而设计，包括单金属线焊。此外，本设计说明了无源元件、印刷电路板(PCB)材料和建构技术的选择，以使其能在极端温度下工作，并且提供了完整的设计支持包，包括物料清单、原理图、装配和布局文件。

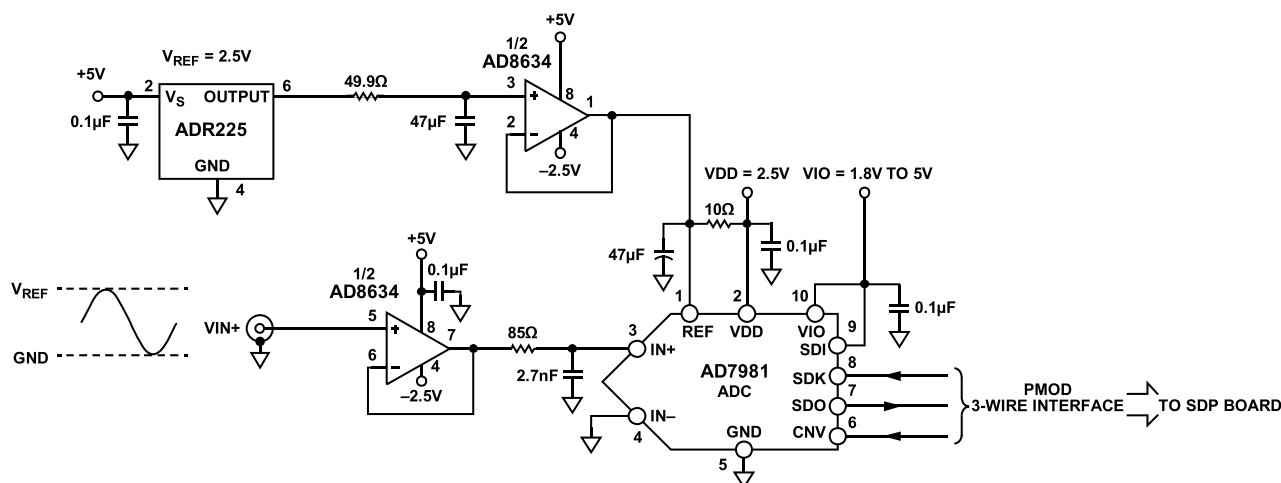


图1. 耐高温数据采集系统(原理示意图: 未显示去耦和所有连接)

#### Rev. 0

Circuits from the Lab reference designs 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

## 模数转换器

本电路的核心是16位、低功耗、单电源ADC [AD7981](#)，它采用逐次逼近架构，最高支持600 kSPS的采样速率。如图1所示，[AD7981](#)使用两个电源引脚：内核电源(VDD)和数字输入/输出接口电源(VIO)。VIO引脚可以与1.8 V至5.0 V的任何逻辑直接接口。VDD和VIO引脚也可以连在一起以节省系统所需的电源数量，并且它们与电源时序无关。

在两次转换之间，AD7981自动关断以节省功耗。因此，功耗与采样速率成线性比例关系，使得该ADC对高低采样速率(甚至低至数Hz)均适合，并且可实现非常低的功耗，支持电池供电系统。此外，可以使用过采样技术来提高低速信号的有效分辨率。

**AD7981**有一个伪差分模拟输入结构，可对IN+与IN-输入之间的真差分信号进行采样，并抑制这两个输入共有的信号。IN+输入支持0 V至 $V_{REF}$ 的单极性、单端输入信号，IN-输入的范围受限，为GND至100 mV。**AD7981**的伪差分输入简化了ADC驱动器要求并降低了功耗。**AD7981**采用10引脚MSOP封装，额定温度为175°C。图2给出了连接示意图。

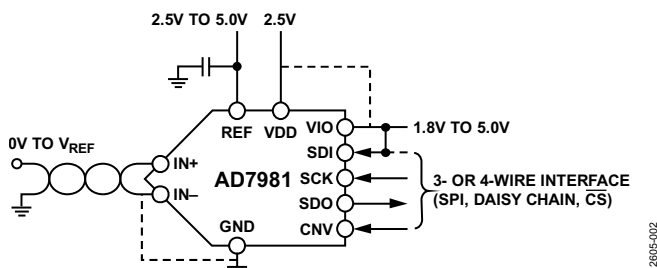


图2. AD7981连接图

## ADC驱动器

AD7981的输入可直接从低阻抗信号源驱动；然而，高源阻抗会显著降低性能，尤其是总谐波失真(THD)。因此，推荐使用ADC驱动器或运算放大器(如AD8634)来驱动AD7981输入，如图3所示。在采集时间开始时，开关闭合，容性DAC在ADC输入端注入一个电压毛刺(反冲)。ADC驱动器帮助此反冲稳定下来，并将其与信号源相隔离。

低功耗(1.3 mA/放大器)双通道精密运算放大器**AD8634**适合此任务, 因为其出色的直流和交流特性对传感器信号调理和信号链的其他部分非常有利。虽然**AD8634**具有轨到轨输出, 但输入要求从正供电轨到负供电轨具有300 mV裕量。

此裕量要求使得负电源成为必要, 所选负电源为 $-2.5\text{ V}$ 。

AD8634提供额定温度为175°C的8引脚SOIC封装和额定温度为210°C的8引脚FLATPACK封装。

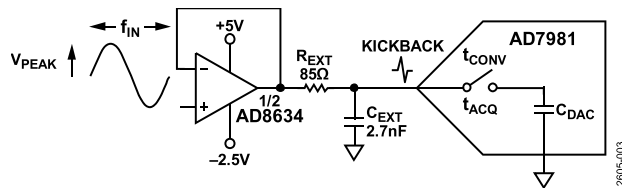


图3. SAR ADC前端放大器和RC滤波器

ADC驱动器与AD7981之间的RC滤波器衰减AD7981输入端注入的反冲，并限制进入此输入端的噪声带宽。不过，过大的限带可能会增加建立时间和失真。最佳RC值的计算主要基于输入频率和吞吐速率。对于所示实例， $R = 85\ \Omega$ 且 $C = 2.7\ \text{nF}$ 是最佳值，产生693 kHz的截止频率。详细计算参见Analog Dialogue文章：[精密SAR型模数转换器的前端放大器和RC滤波器设计](#)。

本电路中，ADC驱动器为单位增益缓冲配置。增加ADC驱动器增益会降低驱动器带宽，延长建立时间。这种情况下可能需要降低ADC吞吐速率，或者在增益级之后再使用一个缓冲器作为驱动器。

## 基准电压源

**ADR225** 2.5 V基准电压源在时210°C仅消耗最大60  $\mu$ A的静态电流，并具有典型值40 ppm/°C的超低漂移特性，因而非常适合用于该低功耗数据采集电路。**ADR225**的初始精度为 $\pm 0.4\%$ ，可在3.3 V至16 V的宽电源范围内工作。

像其他SAR ADC一样，AD7981的基准电压输入具有动态输入阻抗，因此必须利用低阻抗源驱动，REF引脚与GND之间应有效去耦，如图4所示。除了ADC驱动器应用，AD8634同样适合用作基准电压缓冲器。

使用基准电压缓冲器的另一个好处是，基准电压输出端噪声可通过增加一个低通RC滤波器来进一步降低。在该电路中， $49.9\ \Omega$ 电阻和 $47\ \mu\text{F}$ 电容提供大约 $67\ \text{Hz}$ 的截止频率。

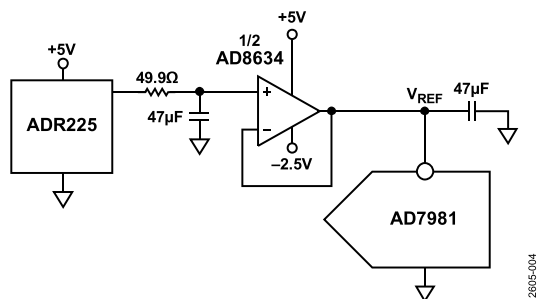


图4. SAR ADC基准电压缓冲器和RC滤波器



转换期间，AD7981基准电压输入端可能出现高达2.5 mA的电流尖峰。在尽可能靠近基准电压输入端的地方放置一个大容值储能电容，以便提供该电流并使基准电压输入端噪声保持较低水平。通常使用低ESR、10  $\mu$ F或更大的陶瓷电容，但对于高温应用，没有陶瓷电容可用。因此，选择一个低ESR、47  $\mu$ F钽电容，其对电路性能的影响极小。

## 数字接口

AD7981提供一个兼容SPI、QSPI和其他数字主机的灵活串行数字接口。该接口既可配置为简单的3线模式以实现最少的输入/输出数，也可配置为4线模式以提供菊花链回读和繁忙指示选项。4线模式还支持CNV(转换输入)的独立回读时序，使得多个转换器可实现同步采样。

本参考设计使用的PMOD接口实现了简单的3线模式，SDI接高电平VIO。VIO电压是由SDP-PMOD转接板从外部提供。

## 电源

本参考设计的+5 V和-2.5 V供电轨需要外部低噪声电源。AD7981是低功耗器件，可由基准电压缓冲器直接供电，如图5所示，因而无需额外的供电轨，节省功耗和板空间。

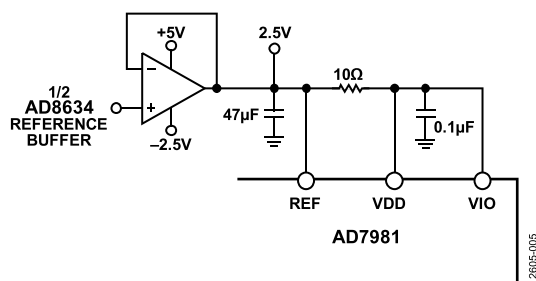


图5. 从基准电压缓冲器为ADC基准电压源供电

## IC封装和可靠性

ADI公司高温系列中的器件要经历特殊的工艺流程，包括设计、特性测试、可靠性认证和生产测试。专门针对极端温度设计特殊封装是该流程的一部分。本电路中的175°C塑料封装采用一种特殊材料。

耐高温封装的一个主要失效机制是焊线与焊垫界面失效，尤其是金(Au)和铝(Al)混合时(塑料封装通常如此)。高温会加速AuAl金属间化合物的生长。正是这些金属间化合物引起焊接失效，如脆性焊接和空洞等，这些故障可能在几百小时之后就会发生，如图6所示。

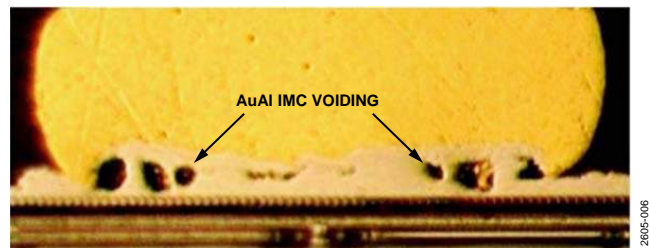


图6. 195°C时500小时后铝垫上的金球焊

为了避免失效，ADI公司利用焊盘金属化(OPM)工艺产生一个金焊垫表面以供金焊线连接。这种单金属系统不会形成金属间化合物，经过195°C、6000小时的浸泡式认证测试，已被证明非常可靠，如图7所示。

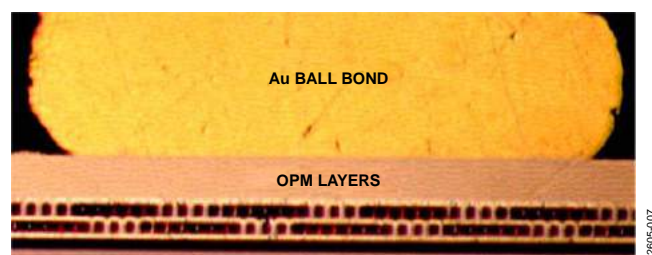


图7. 195°C时6000小时后OPM垫上的金球焊

虽然ADI公司已证明焊接在195°C时仍然可靠，但受限于塑料材料的玻璃转化温度，塑料封装的额定最高工作温度仅为175°C。

除了本电路所用的额定175°C产品，还有采用陶瓷FLATPACK封装的额定210°C型号可用。同时有已知良品裸片(KGD)可供需要定制封装的系统使用。

对于高温产品，ADI公司有一套全面的可靠性认证计划，包括器件在最高工作温度下偏置的高温工作寿命(HTOL)。数据手册规定，高温产品在最高额定温度下最少可工作1000小时。全面生产测试是保证每个器件性能的最后一步。ADI高温系列中的每个器件都在高温下进行生产测试，确保达到性能要求。



## 无源元件

必须选择耐高温的无源元件。本设计使用175°C以上的薄膜型低TCR电阻。COG/NPO电容用于低值滤波器和去耦应用，其温度系数非常平坦。耐高温钽电容有比陶瓷电容更大的容值，常用于电源滤波。本电路板所用SMA连接器的额定温度为165°C，因此，在高温下进行长时间测试时，必须将其移除。同样，0.1" 接头连接器(J2和P3)上的绝缘材料在高温时只能持续较短时间，因而在长时间高温测试中也必须予以移除。

## PCB布局和装配

在本电路的PCB设计中，模拟信号和数字接口位于ADC的相对两侧，IC之下或模拟信号路径附近无开关信号。这种设计可以最大程度地降低耦合到ADC芯片和辅助模拟信号链中的噪声。AD7981的所有模拟信号位于左侧，所有数字信号位于右侧，这种引脚排列可以简化设计。基准电压输入REF具有动态输入阻抗，必须用极小的寄生电感去耦，为此须将基准电压去耦电容放在尽量靠近REF和GND引脚的地方，并用低阻抗的宽走线连接该引脚。本电路板的元器件故意全都放在正面，以方便从背面加热进行温度测试。关于其他布局布线建议，参见AD7981数据手册。

针对高温电路，必须采用特殊电路材料和装配技术来确保可靠性。FR4是PCB叠层常用的材料，但商用FR4的典型玻璃转化温度约为140°C。超过140°C时，PCB便开始破裂、分层，并对元器件造成压力。高温装配广泛使用的替代材料是聚酰亚胺，其典型玻璃转化温度大于240°C。本设计使用4层聚酰亚胺PCB。

PCB表面也需要注意，特别是配合含锡的焊料使用时，因为这种焊料易于与铜走线形成金属间化合物。常常采用镀金表面处理，其中镍提供一个壁垒，金则为接头焊接提供一个良好的表面。此外，必须使用高熔点焊料，熔点与系统最高工作温度之间应有合适的裕量。本装配选择SAC305无铅焊料，其熔点为217°C，相对于175°C的最高工作温度有42°C的裕量。

## 性能预期

采用1 kHz输入信号音和5 V基准电压时，AD7981的额定SNR典型值为91 dB。然而，当使用较低基准电压时(低功耗/低电压系统常常如此)，SNR性能会有所下降。根据AD7981数据手册中的性能曲线，在室温和2.5 V基准电压时，预期SNR约为86 dB。该SNR值与室温时测试本电路所实现的性能(约86 dB SNR)符合得很好，如图8所示。

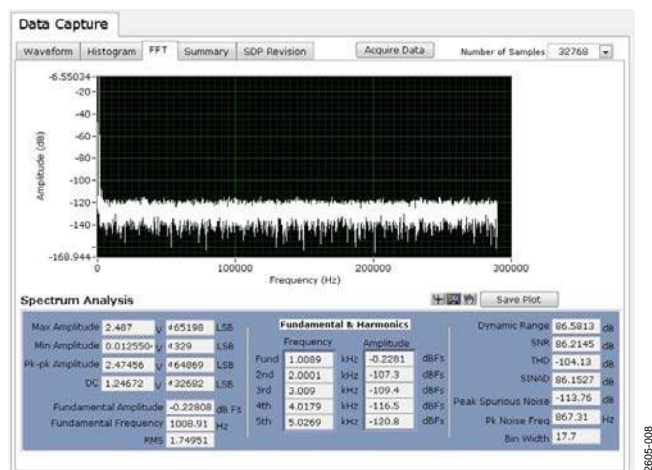


图8. 1 kHz输入信号音、580 kSPS、25°C时的交流性能

当温度升高至175°C时，SNR性能仅降低至约84 dB，如图9所示。THD仍然优于-100 dB，如图10所示。本电路在175°C时的FFT摘要如图11所示。

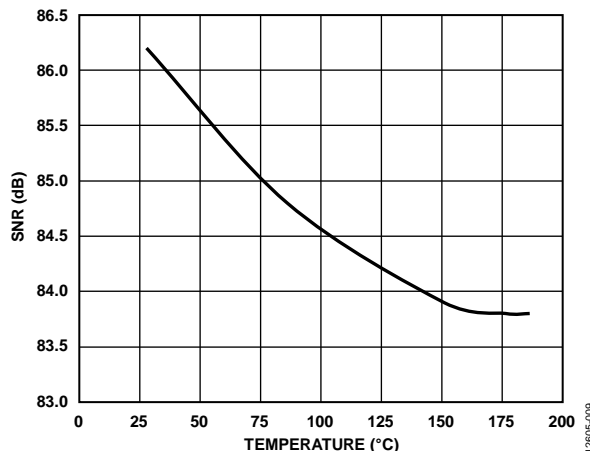


图9. SNR随温度的变化(1 kHz输入信号音、580 kSPS)

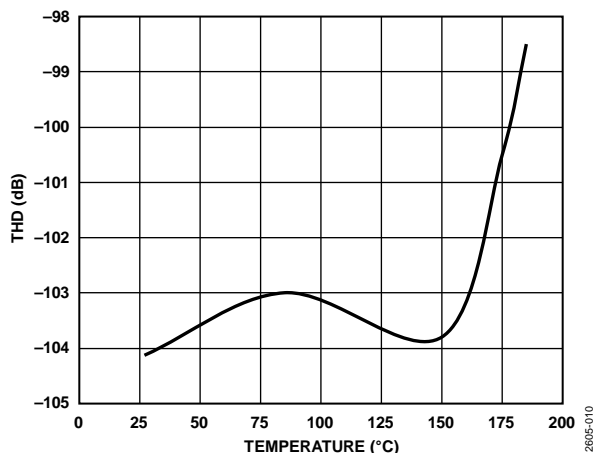


图10. THD随温度的变化(1 kHz输入信号音、580 kSPS)

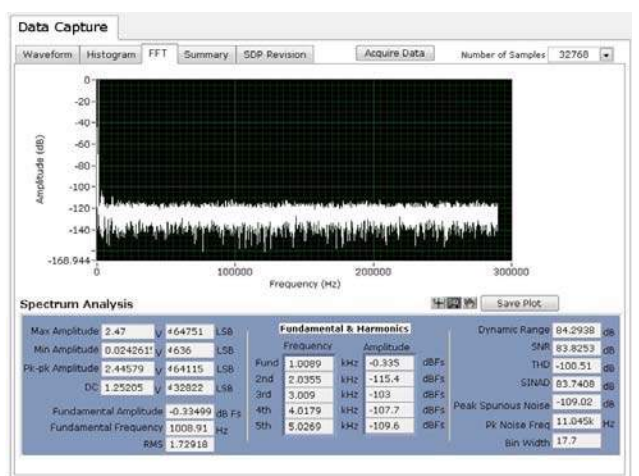


图11. 1 kHz输入信号音、580 kSPS、175°C时的交流性能

## 电路评估与测试

本电路采用EVAL-CN0365-PMDZ电路板、SDP-PMD-IB1Z转接板和EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台(SDP)板。转接板和SDP板采用120引脚对接连接器。转接板和EVAL-CN0365-PMDZ板采用12引脚PMOD对接连接器,可快速进行设置和评估电路性能。EVAL-CN0365-PMDZ板包含要评估的电路(如CN-0365所述),SDP评估板与CN-0365评估软件配合使用。

## 设备要求

需要以下设备:

- EVAL-CN0365-PMDZ板
- 系统演示平台(EVAL-SDP-CB1Z)
- PMOD/SDP转接板(SDP-PMD-IB1Z)
- CN-0365评估软件
- 函数发生器/信号源,例如这些测试中使用的Audio Precision SYS-2522
- 电源: +5 V和-2.5 V
- 电源: +6 V壁式电源适配器(EVAL-CFTL-6V-PWRZ)
- 带USB端口和USB线缆的PC,运行Windows® XP (SP2)、Windows Vista或Windows 7 Business/Enterprise/Ultimate版(32位或64位)

## 开始使用

要开始使用,请执行以下步骤:

1. 从<ftp://ftp.analog.com/pub/cftl/CN0365>下载CN-0365评估软件到PC。
2. 先安装该软件,再将SDP板连接到PC的USB端口,确保PC正确识别SDP板。
3. 解压缩下载的文件。
4. 运行setup.exe文件。
5. 按照屏幕提示操作,完成安装。建议将所有软件安装在默认位置。

## 功能框图

图12所示为测试设置的功能框图。

## 设置

设置电路的步骤如下：

1. 通过直流管式插孔将EVAL-CFTL-6V-PWRZ(+6 V直流电源)连接到SDP-PMD-IB1Z转接板。
2. 通过120引脚CON A连接器将SDP-PMD-IB1Z转接板连接到EVAL-SDP-CB1Z SDP板。
3. 通过USB电缆将EVAL-SDP-CB1Z SDP板连接到PC。
4. 通过12引脚接头PMD连接器将EVAL-CN0365-PMDZ评估板连接到SDP-PMD-IB1Z转接板。
5. 将+5 V ( $V_{S+}$ )和-2.5 V ( $V_{S-}$ )电源连接到EVAL-CN0365-PMDZ P3接头。默认配置中，VDD电压(2.5 V)不需要外部连接，因为它是在板上产生。
6. 通过SMA连接器将信号源连接到EVAL-CN0365-PMDZ。
7. 将Audio Precision SYS-2522(或同等信号发生器)设置为1 kHz频率和2.5 V p-p正弦波，并具有1.25 V直流偏移。

## 测试

启动评估软件。如果Windows设备管理器中出现“Analog Devices System Development Platform(ADI系统开发平台)”驱动器，软件便能与SDP板通信。USB通信建立之后，便可使用评估软件测试、查看、保存电路性能指标。

关于软件操作的详细信息，请参阅UG-340和评估8/10引脚PulSAR®系列14/16/18位ADC wiki页面。

在环境室中进行温度测试时，可使用延长线(未提供)连接模拟输入、电源和PMD。这些延长线必须尽可能短，并且必须采用最佳做法以避免噪声。本电路板所用SMA连接器的额定温度为165°C，因此，在高温下进行长时间测试时，必须将其移除。同样，0.1”接头连接器(J2和P3)上的绝缘材料在高温时只能持续较短时间，因而在长时间高温测试中也必须予以移除。

EVAL-CN0365-PMDZ板照片如图13所示。

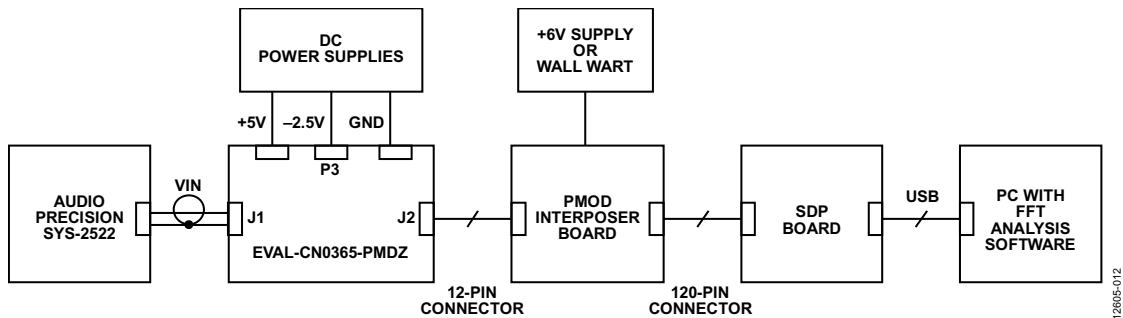


图12. 用于测量交流性能的电测试设置

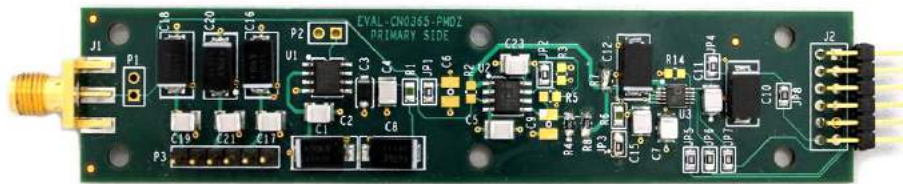


图13. EVAL-CN0365-PMDZ电路板的照片

**更多资料**

CN-0365设计支持包:

[www.analog.com/CN0365-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0365-DesignSupport)

系统演示平台(SDP)

UG-340用户指南

评估8/10引脚PulSAR®系列14/16/18位ADC - Wiki页面

ADI公司耐高温产品

Jeff Watson和Gustavo Castro, “高温电子器件的设计和可靠性挑战”, 模拟对话, 第46卷, 2012年4月。

Jeff Watson和Maithil Pachchigar, “征服恶劣环境——适合极端温度应用的低功耗、精密、耐高温器件”, MS-2707, ADI公司。

Alan Walsh, “精密SAR模数转换器的前端放大器和RC滤波器设计”, Analog Dialogue, 第46卷, 2012年12月。

Alan Walsh, “精密逐次逼近型ADC的基准电压源设计”, Analog Dialogue, 第47卷, 2013年6月。

指南MT-021, 逐次逼近型ADC, ADI公司

指南MT-031, 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团, ADI公司。

**数据手册和评估板**

CN-0365电路评估板(EVAL-CN0365-PMDZ)

系统演示平台(EVAL-SDP-CB1Z)

SDP-PMOD转接板(SDP-PMD-IB1Z)

AD7981数据手册

AD8634数据手册

ADR225数据手册

**修订历史**

2015年6月—修订版0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN12605sc-0-6/15(0)



[www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)

**Circuits  
from the Lab®**  
Reference Designs

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0370](http://www.analog.com/cn/CN0370)。

## 连接/参考器件

AD5542A	串行输入、电压输出、无缓冲型 16 位 DAC
ADA4500-2	轨到轨输入/输出、零输入交越失真放大器
ADR4525	超低噪声、高精度 2.5 V 基准电压源

## 16 位单电源 LED 电流驱动器，积分和差分非线性误差小于 $\pm 1$ LSB

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[CN-0370 电路评估板 \(EVAL-CN0370-PMDZ\)](#)

[系统演示平台 \(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

[PMD0 至 SDP 转接板 \(SDP-PMD-IB1Z\)](#)

#### 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 所示电路是一个完整的单电源、低噪声 LED 电流源驱动器，由一个 16 位数模转换器 (DAC) 控制。该系统的积分和差

分非线性误差为  $\pm 1$  LSB，0.1 Hz 至 10 Hz 噪声小于 45 nA p-p，满量程输出电流为 20 mA。

大多数轨到轨输入运算放大器都有交越非线性误差，其在 16 位系统中可能高达 4 到 5 个 LSB，而这个创新的输出驱动器消除了这一误差。

该业界领先的解决方案非常适合于脉搏血氧仪应用，其中叠加于 LED 亮度水平上的 1/f 噪声会影响整体测量的精度。

采用 5 V 单电源供电时，三个有源器件的总功耗典型值小于 20 mW。

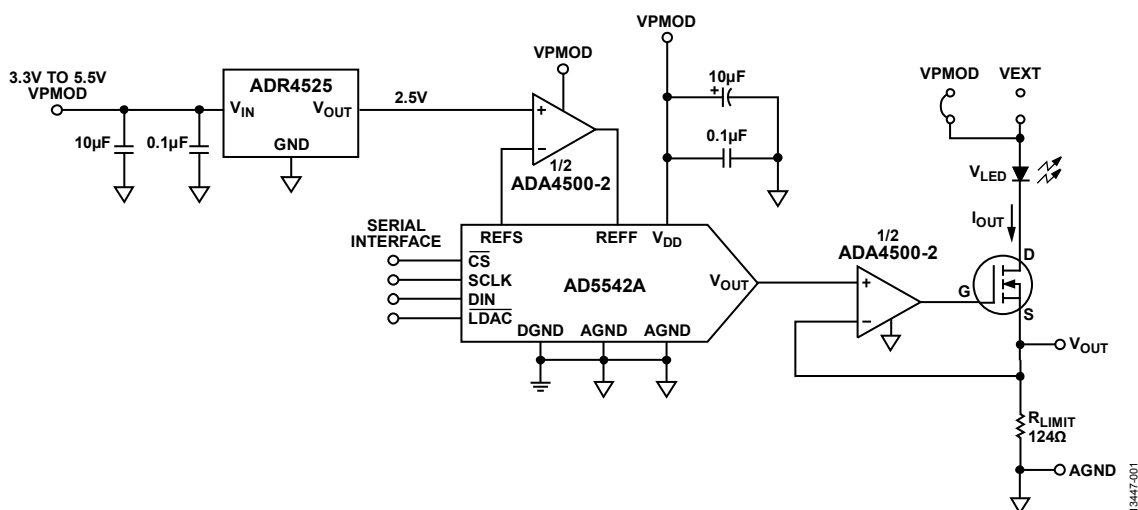


图 1.  $\pm 1$  LSB 线性 16 位 LED 电流源驱动器 (原理示意图，未显示去耦和所有连接)

Rev. 0

Circuits from the Lab reference designs 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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



## 电路描述

在典型的脉搏血氧仪应用中，LED接收到脉冲信号后，从高电流电平(如3/4量程)变为低电流电平(如1/4量程)。这些脉冲的导通时间通常只有数百微秒。导通期间叠加于LED亮度水平上的峰峰值1/f噪声会影响整体测量的精度，必须予以最小化。

图1显示该单电源信号链由基准电压源、DAC、DAC输出缓冲器和电流源组成。

DAC为AD5542A，它是一款16位、串行输入、电压输出、分段式R-2R CMOS DAC。DAC的输出电压与基准电压相关，如下式所示：

$$V_{OUT} = \frac{V_{REF} \times D}{2^N}$$

其中：

$D$ 为载入DAC寄存器的十进制数据字。

$N$ 为位数。

对于2.5 V基准电压且 $N = 16$ ，上述公式可简化为下式：

$$V_{OUT} = \frac{2.5 \times D}{2^{16}} = \frac{2.5 \times D}{65,536}$$

这样，在中间电平时 $V_{OUT}$ 为1.25 V，在满量程时 $V_{OUT}$ 为2.5 V。

LSB大小为 $2.5 \text{ V} / 65,536 = 38.1 \mu\text{V}$ 。

16位时，1 LSB也相当于满量程的0.0015%或15 ppm。

DAC基准引脚由2.5 V基准电压源ADR4525驱动，后者利用ADA4500-2进行缓冲。基准电压源ADR4525为DAC提供高精度、低噪声(1.25  $\mu\text{V}$  p-p, 0.1 Hz至10 Hz)且稳定的基准电压。ADR4525使用创新的内核拓扑结构来实现高精度，同时提供业界领先的温度稳定性和噪声性能。低输出电压温度系数(最大值2 ppm/°C)和低长期输出电压漂移也提高了系统在寿命和温度范围内的精度。ADR4525B的室温初始误差为±0.02%(最大值)，相当于16位时的约13 LSB。

选择双通道ADA4500-2作为DAC输出缓冲器和基准电压缓冲器。ADA4500-2是一款高精度放大器，最大失调电压为120  $\mu\text{V}$ ，失调漂移小于5.5  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，0.1 Hz至10 Hz噪声为2  $\mu\text{V}$  p-p，最大输入偏置电流为2 pA。其创新的轨到轨输入结构消除了交越失真，因而成为DAC缓冲器的出色选择。

典型的轨到轨输入放大器采用两个差分对(PNP和NPN或PMOS和NMOS)来实现轨到轨输入摆幅(参见指南MT-035)。一个差分对在输入共模电压范围的下部活跃，另一个差分对在该范围的上部活跃。这种经典互补双差分对拓扑结构在一个差分对转换到另一个差分对时会产生交越失真。将该放大器用作DAC缓冲器时，失调电压的变化会引起非线性误差。

ADA4500-2利用其输入结构中的集成电荷泵来实现轨到轨输入摆幅，无需第二差分对。因此，它不存在交越失真。在这种单电源系统中使用零交越失真放大器，不仅可在整个输入共模范围内保持高线性度，而且可提供宽动态输出范围。ADA4500-2的详细工作原理请参见ADA4500-2数据手册。

DAC的输出阻抗是恒定的(典型值6.25 k $\Omega$ )，与输出码无关。因此，输出缓冲器必须具有高输入阻抗和低输入偏置电流，以使误差最小。ADA4500-2是一款合适的器件，具有高输入阻抗，室温下的输入偏置电流最大值为2 pA，全温度范围内的输入偏置电流最大值为190 pA。最差情况下，输入偏置电流流过6.25 k $\Omega$  DAC阻抗所引起的误差为1.2  $\mu\text{V}$ ，远小于1 LSB。

DAC输出经过缓冲后，用于驱动功率MOSFET(IRLMS2002TRPBF)。MOSFET将DAC输出电压转换为电流来驱动LED。本电路中的MOSFET能够处理最高6.5 A的电流，但EVAL-CN0370-SDPZ板提供的LED的额定最大电流限值为20 mA。该板提供了轻松改变LED满量程电流的措施，那就是更改 $R_{LIMIT}$ 电阻。最大电流可通过下式计算：

$$I_{MAX} = 2.5 \text{ V} / R_{LIMIT}$$

利用跳线选项可将LED连接到PMOD电压(VPMOD)或外部电压(VEXT)。

在VPMOD=3.3 V下工作时，需要利用VEXT选项来为MOSFET提供充足的裕量。例如，若 $V_{OUT} = 2.5 \text{ V}$ 、 $V_{DS} = 0.7 \text{ V}$ 且 $V_{LED} = 0.7 \text{ V}$ ，则VEXT必须大于 $2.5 \text{ V} + 0.7 \text{ V} + 0.7 \text{ V} = 3.9 \text{ V}$ 。

还有一种方案可支持3.3 V电源供电，那就是将满量程输出电压限制在约1.9 V，仅使用76%的DAC输出范围。在1.9 V输出时，为了维持20 mA满量程输出电流， $R_{LIMIT}$ 电阻必须变为约95  $\Omega$ 。

AD5542A提供10引脚MSOP或10引脚LFCSP封装。ADR4525提供8引脚SOIC封装，ADA4500-2提供8引脚MSOP或8引脚LFCSP封装。

## 积分非线性(INL)和差分非线性(DNL)测量

积分非线性(INL)指实际DAC传递函数与理想传递函数的偏差,用LSB表示。差分非线性(DNL)指实际步进大小与1 LSB的理想值之间的差异。该系统解决方案提供16位分辨率,DNL和INL均为 $\pm 1$  LSB。图2和图3显示了该电路的DNL和INL性能。

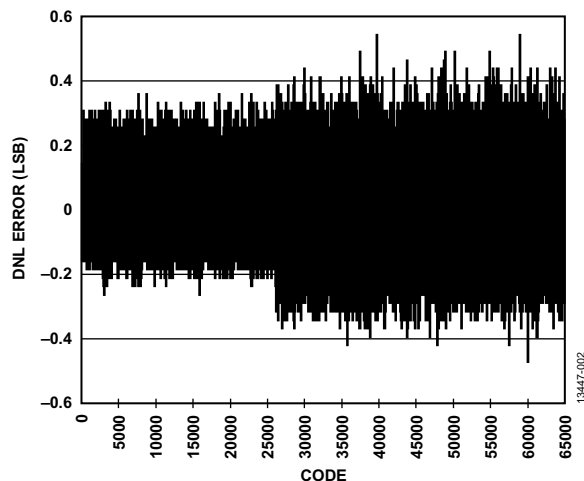


图2. 差分非线性(DNL)

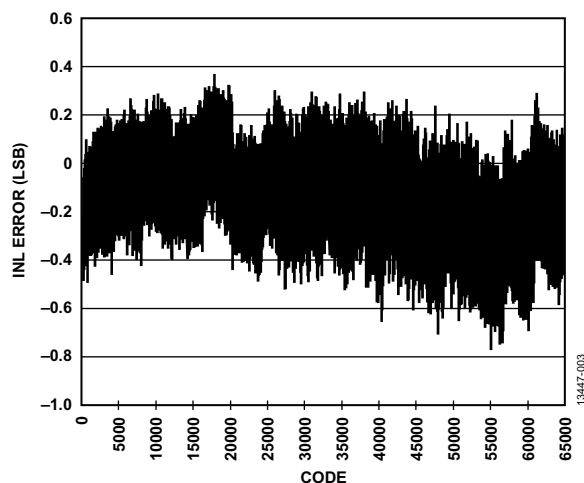


图3. 积分非线性(INL)

注意,DNL和INL测量排除了从范围下限开始的100个代码(约4 mV)。这是因为,MOSFET漏电流导致输出电压在此区间是非线性的。

图4显示了采用具有传统轨到轨输入级的运算放大器所引起的非线性误差。该曲线显示了有源差分对从PNP对变为NPN对时的交越失真。此区间内的误差摆幅为+4 LSB至-15 LSB。

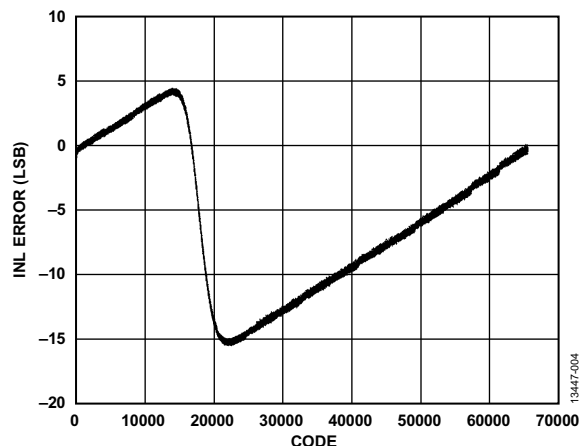


图4. 采用具有传统轨到轨输入级的运算放大器缓冲器时的DAC非线性误差

## 噪声测量

完整系统的目标0.1 Hz至10 Hz噪声小于 $14 \mu\text{V p-p}$ (在 $V_{\text{OUT}}$ 测量)。三个器件的噪声可采用和方根(RSS)方式加总以估算系统总噪声。0.1 Hz至10 Hz噪声值分别为:

- AD5542A:  $0.134 \mu\text{V p-p}$
- ADR4525:  $1.25 \mu\text{V p-p}$
- ADA4500-2(基准电压缓冲器):  $2 \mu\text{V p-p}$
- ADA4500-2(DAC缓冲器):  $2 \mu\text{V p-p}$

以上噪声源的RSS值为 $3.1 \mu\text{V p-p}$ 。

本电路的实际噪声是利用一个增益为10,000的噪声测量盒并结合一个0.1 Hz至10 Hz滤波器来测量。图5所示为噪声测试设置。

设置中移除了EVAL-SDP-CB1Z系统开发平台(SDP)和SDP-PMD-IB1Z转接板,电源从4.5 V电池获得。

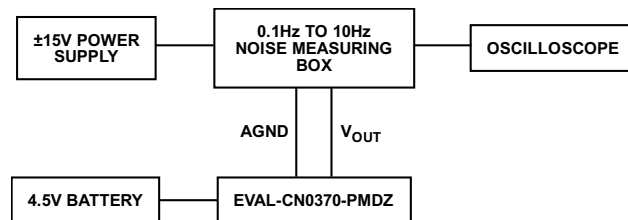


图5. 利用10,000增益测量0.1 Hz至10 Hz噪声的测试设置

在输入短路和连接本电路两种情况下,该盒的噪声输出测量值分别为 $7.81 \mu\text{V p-p}$ 和 $9.6 \mu\text{V p-p}$ ,如图6和图7所示。两个系统的噪声无关,因而可用RSS方式加总,系统噪声计算如下:

$$\text{系统噪声} = \sqrt{(9.6)^2 - (7.81)^2} = 5.58 \mu\text{V p-p}$$

对于20 mA的满量程电流,对应的驱动LED的噪声电流为 $5.58 \mu\text{V} \div 124 \Omega = 45 \text{ nA}$ 。

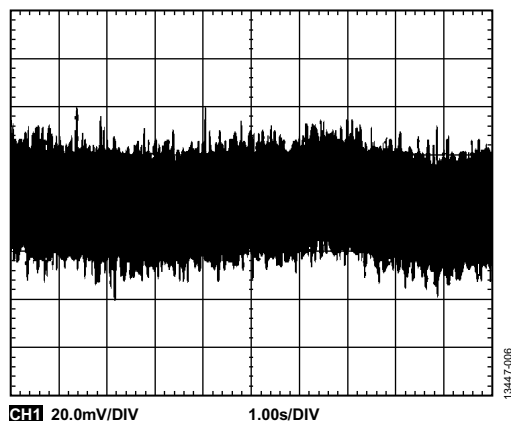


图6. 输入与噪声测量盒短路情况下测得的输出噪声为 78.1 mV p-p (折合到输入端为 7.81  $\mu$ V p-p)

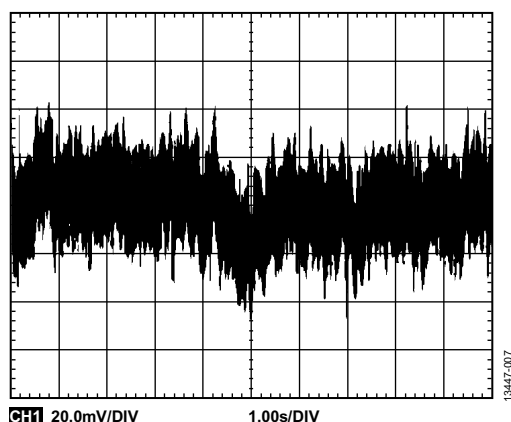


图7. 连接 EVAL-CN0370-PMDZ 的情况下测得的输出噪声为 96 mV p-p (折合到输入端为 9.6  $\mu$ V p-p)

## 电路板布局考量

应当精心考虑电路板上的电源和接地回路布局。印刷电路板必须将模拟部分与数字部分分离。如果该电路所在系统有多个器件要求模拟地至数字地连接，则只能在一个点进行连接。所有器件的电源必须通过至少 0.1  $\mu$ F 的电容旁路。这些旁路电容必须尽可能靠近器件，电容最好正对着器件。所选 0.1  $\mu$ F 电容应当具有低有效串联电阻 (ESR) 和低有效串联电感 (ESL)，例如陶瓷型电容。0.1  $\mu$ F 电容为瞬变电流提供低阻抗接地路径。电源走线必须尽可能宽，以提供低阻抗供电路径。采用适当的布局、接地和去耦技术以实现最佳性能 (参见指南 MT-031——实现数据转换器的接地并解开 AGND 和 DGND 的谜团以及指南 MT-101——去耦技术)。

如需包括布局文件、原理图和物料清单在内的完整设计支持包，请访问：[www.analog.com/CN0370-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0370-DesignSupport)。

## 常见变化

如要求功耗更低的解决方案 (速度较低)，请使用 ADA4505-1/ADA4505-2/ADA4505-4 作为输出缓冲器。ADA4505-1/ADA4505-2/ADA4505-4 是微功耗、零交越失真、低输入偏置电流放大器。ADR441 和 ADR421 是提供 2.5 V 基准电压的合适器件。它们具有高精度和低噪声特性，支持最高 18 V 的输入电压。

AD5063 是一款 16 位、无缓冲电压输出 DAC，支持双电源应用中的双极性供电模式。

## 电路评估与测试

本电路采用EVAL-CN0370-PMDZ电路板、EVAL-SDP-CB1Z SDP板和SDP-PMD-IB1Z转接板。SDP板和转接板具有120引脚对接连接器，可以快速完成设置并评估电路性能。EVAL-CN0370-PMDZ板通过PMOD连接器J3连接。EVAL-CN0370-PMDZ包含待评估电路，如本电路笔记所述。SDP板和转接板与CN-0370评估软件一同使用，收集EVAL-CN0370-PMDZ电路板的数据。关于软件使用指南，请访问[www.analog.com/wiki-CN0370](http://www.analog.com/wiki-CN0370)。

## 设备要求

需要以下设备：

- 带USB端口的Windows® XP、Windows Vista(32位)或Windows 7(32位)PC
- EVAL-CN0370-PMDZ电路评估板
- EVAL-SDP-CB1Z SDP板
- SDP-PMD-IB1Z转接板
- CN-0370评估软件(从[ftp://ftp.analog.com/pub/cftl/CN0370/](http://ftp://ftp.analog.com/pub/cftl/CN0370/)下载)
- 电源：6 V壁式电源适配器或EVAL-CFTL-6V-PWRZ
- Agilent 34401A万用表(或等效设备)
- GPIO转USB电缆(仅当在电路上进行线性度测量时需要)

## 开始使用

下载CN-0370评估软件并将其安装到PC上。

## 功能框图

图8所示为测试设置的功能框图。

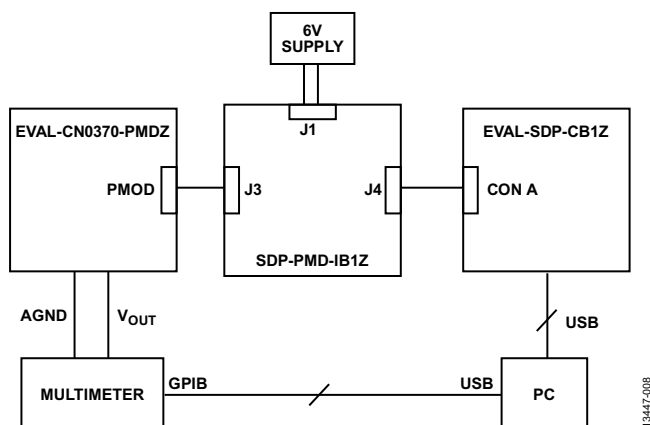


图8. 测试设置功能框图

## 设置

SDP-PMD-IB1Z转接板上的120引脚连接器连接到EVAL-SDP-CB1Z SDP板上标有CON A的连接器。使用尼龙五金配件，通过120引脚连接器两端的孔牢牢固定这两片板。EVAL-CN0370-PMDZ连接到J3 PMOD连接器。

在断电情况下，将6 V壁式电源连接到J1连接器。SDP板附带的USB电缆连接到PC上的USB端口。此时请勿将该USB电缆连接到SDP板上的微型USB连接器。

## 测试

给转接板通电，然后通过USB电缆将PC连接到SDP板上的微型USB连接器，并启动评估软件。如果Windows设备管理器中出现“EVAL-SDP-CB1Z系统开发平台”，软件便能与EVAL-CN0370-PMDZ通信。

一旦USB通信建立，就可以使用SDP板将数据写入EVAL-CN0370-PMDZ电路评估板。

图9是EVAL-CN0370-PMDZ电路评估板的实物照片。

有关测试设置以及如何使用评估软件来捕捉数据的详细信息，请参阅CN-0370软件用户指南。

有关SDP板的信息，请参阅SDP用户指南(UG-277)。



图9. EVAL-CN0370-PMDZ电路评估板

**更多资料**

CN-0370设计支持包:

[www.analog.com/CN0370-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0370-DesignSupport)

Walt Kester, 数据转换手册, 第3章和第7章, ADI公司, 2005年。

AN-1212应用笔记, 在反向模式下利用电流输出DAC构建单电源、低噪声LED电流源驱动器, ADI公司。

电路笔记CN-0348, 16位单电源缓冲电压输出数模转换, 积分和差分非线性误差小于 $\pm 1$  LSB, ADI公司。

MT-015指南, DAC基本架构II: 二进制DAC, ADI公司。

MT-016指南, DAC基本架构III: 分段DAC, ADI公司。

MT-031指南, 实现数据转换器接地并解开AGND和DGND的谜团, ADI公司。

MT-035教程, 运算放大器输入、输出、单电源和轨到轨问题, ADI公司。

MT-101指南, 去耦技术, ADI公司。

**数据手册和评估板**

[AD5542A数据手册](#)

[ADA4500-2数据手册](#)

[ADR4525数据手册](#)

**修订历史**

**2015年9月—修订版0: 初始版**

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN13447sc-0-9/15(0)



[www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)



**Circuits  
from the Lab®**  
Reference Designs

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0373](http://www.analog.com/cn/CN0373)。

连接/参考器件	
<a href="#">ADM3252E</a>	2.5 kV信号和电源隔离式双通道 RS-232线路驱动器/接收机
<a href="#">ADM2587E</a>	2.5 kV信号和电源隔离、±15 kV ESD保护、全/半双工 RS-485收发机
<a href="#">ADuM3160</a>	全速/低速 2.5 kV USB 数字隔离器
<a href="#">ADuM3070</a>	2.5 kV 集成反馈功能的隔离式开关调节器
<a href="#">ADP190</a>	逻辑控制的高端电源开关
<a href="#">ADP7102</a>	20 V、300 mA 低噪声 CMOS LDO

## 隔离式USB转隔离式RS-485/隔离式RS-232接口

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[CN-0373电路评估板\(EVAL-CN0373-EB1Z\)](#)

#### 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所示电路提供使用广泛的USB总线与RS-485或RS-232总线之间的完全隔离连接。信号和电源隔离确保USB设备与工业总线或调试端口之间实现安全接口，允许监控 TIA/EIA-485/232 总线流量，并且便于向未配备 RS-485 或 RS-232 端口的 PC 发送命令或从该 PC 接收命令。

本电路中的隔离能提供电气线路浪涌保护并断开总线和数

字引脚之间的接地连接，增加系统安全性和鲁棒性，进而消除系统中可能存在的接地环路。

在工业和仪器仪表应用中，TIA/EIA RS-485 总线标准是使用最广泛的物理层总线设计标准之一。RS-485 提供多个系统之间的差分数据传输，这些系统通常相距很远。相比 RS-232 标准，RS-485 通信可通过差分通信方式提供额外的鲁棒性。

TIA/EIA RS-232 器件广泛用于工业机器、网络设备和科研仪器中。在现代个人电脑中(个人电脑经常用来调试网络问题)，大部分外设接口已经采用 USB 代替 RS-232，并且很多电脑不再配备 RS-232 端口。图1中的电路为 RS-232 和 RS-485 接口提供鲁棒而紧凑的解决方案。

#### Rev. 0

Circuits from the Lab® reference designs 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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

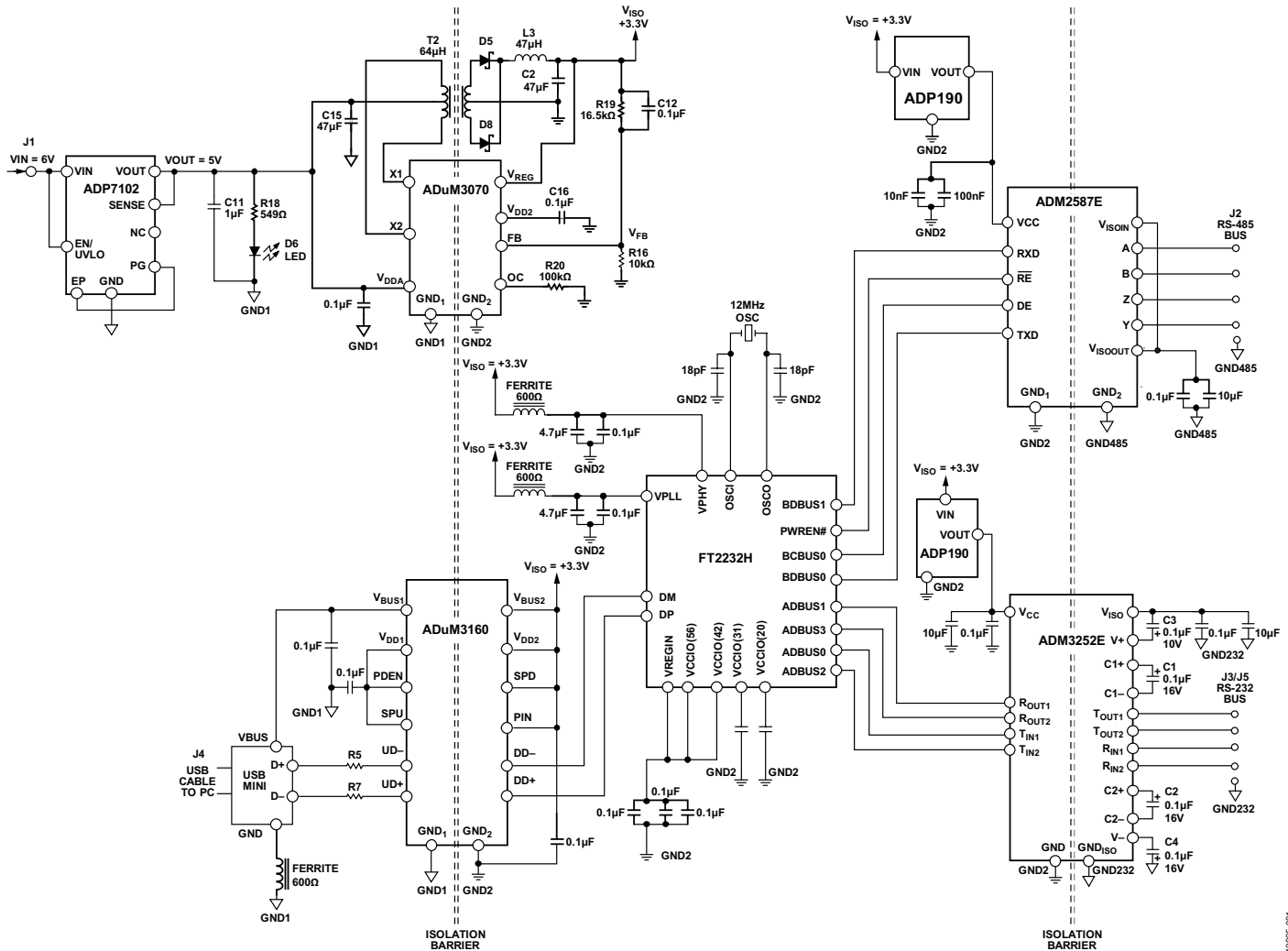


图1. 隔离式USB转FTDI隔离式RS-232/隔离式RS-485电路(原理示意图, 未显示所有连接)

## 电路描述

图1中的电路提供完全符合TIA/EIA-485/232标准、高度集成且鲁棒隔离性能的收发机。ADM3252E 2.5 kV rms隔离式RS-232和ADM2587E 2.5 kV rms隔离式RS-485解决方案是业界尺寸最小的解决方案。ADuM3160提供市场领先的USB端口2.5 kV rms隔离, 可轻松实现与低速和全速USB兼容外设的集成。FTDI FT232H(USB至UART转换器)能为通过UART转RS-485或RS-232总线端口进行传输提供方便。

TIA/EIA RS-232器件广泛用于工业机器、网络设备和科研仪器中。RS-485的应用包括: 过程控制网络、工业自动化、远程终端、楼宇自动化(例如, 暖通空调(HVAC)、保安系统)、电机控制和运动控制。

在这些实际的系统中, 雷击和电源波动会通过产生较大瞬变电压对通信端口造成损害。图1电路的隔离可针对这些电气线路浪涌提供保护, 增加系统安全性。

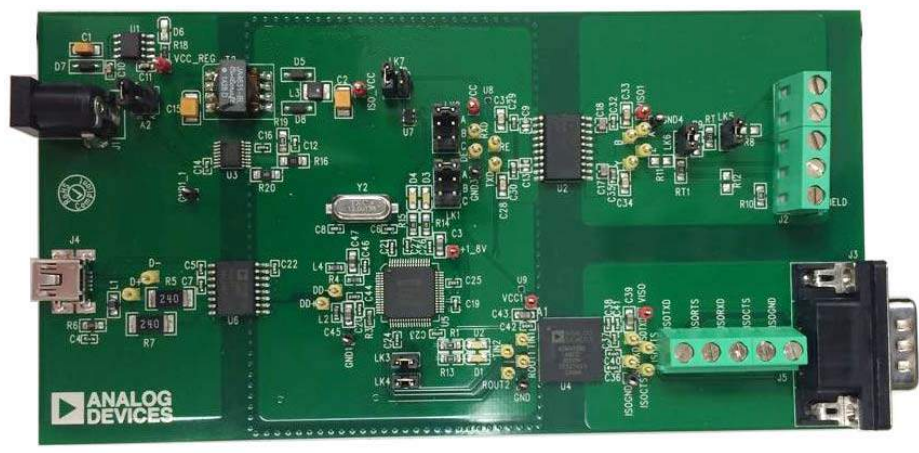


图2. EVAL-CN0373-EB1Z板

图2显示隔离式USB转FTDI隔离式RS-232/隔离式RS-485电路的照片。如有需要，该电路可实现USB端口至RS-485和RS-232端口的同步发送，也可仅发送一个端口。

**ADuM3160**提供USB总线D+和D-输入端数据信号到FTDI FT2232H(USB至UART转换器)的2.5 kV rms数字隔离。隔离式USB输出DD-和DD+信号分别连接FTDI的DM和DP引脚。FTDI FT2232H可通过UART转RS-232/RS-485接口发送数据，具体取决于所选PC虚拟COM端口(VCP)。**ADuM3160**通过USB电缆连接提供 $V_{BUS1}$ 电源。**ADuM3070**提供稳压隔离电源。**ADuM3070**的电源(+6 V)和接地通过J1管式插口连接器相连。**ADuM3160**  $V_{BUS2}$ 引脚采用**ADuM3070**的3.3 V隔离电源供电。**ADuM3070** 3.3V输出还为**ADM3252E** 2.5 kV rms隔离式RS-232和**ADM2587E** 2.5 kV rms隔离式RS-485收发机提供主电源。

**ADM2587E** 2.5 kV rms隔离式RS-485收发机是业界领先的信号和电源隔离解决方案。该收发机可在3.3 V或5 V下工作。数据通过TxD引脚发送，通过RxD引脚接收。驱动器和接收器的输出都可使能或禁用，即通过改变DE和 $\overline{RE}$ 引脚上的相应逻辑电平，进入高阻抗状态。

FTDI输出引脚BDBUS0连接**ADM2587E**的TxD数据输入引脚。FTDI输出引脚BCBUS0、PWREN#和BDBUS1分别连接**ADM2587E**的DE、 $\overline{RE}$ 和RxD输入引脚。DE和 $\overline{RE}$ 引脚状态还可通过LK1和LK2跳线配置。对每条链路而言，位置A连接逻辑引脚至3.3 V，位置B连接逻辑引脚至GND，位置C连接逻辑引脚至FTDI输出引脚。

**ADM2587E**可通过A、B、Y和Z RS-485输入/输出发送和接收总线数据。RS-485总线电缆可通过J2五路连接器连接。断开LK5和LK6跳线连接可将**ADM2587E**置于全双工配置

下，在该配置下数据可通过Y和Z引脚发送，并通过A和B引脚接收。连接LK5和LK6跳线可将**ADM2587E**输入/输出置于半双工配置下，在该配置下仅能发送或接收总线数据，不能同时收发。

**ADM3252E**是一款高速、2.5 kV、完全隔离、双通道RS-232/V.28收发机，采用3.3 V或5 V单电源供电。RS-232接口支持全双工通信，通过J5五路连接器或J3连接器为CTS和RTS提供硬件握手。J3提供RS-232电缆连接器，用来连接工业设备。

**ADM3252E**发射机输入( $T_{INX}$ )支持从FTDI的ADBUS0和ADBUS2引脚输出的FTDITTL/CMOS输入电平。 $T_{INX}$ 输入反转并跨越隔离栅耦合，然后作为EIA/TIA-232E总线信号通过J3或J5连接器发送。**ADM3252E**接收机输入( $R_{INX}$ )支持来自J3或J5连接器的EIA/TIA-232E信号电平。 $R_{INX}$ 输入反转并跨越隔离栅耦合至 $R_{OUTX}$ 引脚。 $R_{OUTX}$ 引脚连接FTDI的ADBUS1和ADBUS3输入。

使用两个独立的**ADP190**电路作为软启动电路，并在FTDI FT2232H完全上电后为**ADM2587E**和**ADM3252E**供电。跳线LK7通过74AHC1G14W5-7逆变器将FTDI FT2232H PWREN#引脚连接至**ADP190**电路的EN引脚。**ADP190** EN引脚必须为高电平才能开启电源开关；驱动EN至低电平可关闭电源开关。连接位置A的LK7(位置B断开连接)表示**ADP190** EN引脚始终为高电平/使能。连接位置B的LK7(位置A断开连接)表示**ADP190** EN引脚通过PWREN#反转信号触发。

FTDI FT2232H数据手册提供RS-232通信的引脚功能完整列表。LK3和LK4跳线支持RS-232握手选项。LK3连接时，ADBUS4 (DTR#)连接到ADBUS5 (DSR#)。LK4连接时，ADBUS4 (DTR#)连接到ADBUS6 (DCD#)。

## 电路评估与测试

在J1管式插口连接器上施加6 V电压，为EVAL-CN0373-EB1Z板供电。可在ADP7102稳压器输出端的VCC\_REG测试点上检查该电压。ADP7102输出电压测量值应当为5 V。5 V电压路由至ADuM3070和T2变压器，然后为RS-485、RS-232和FTDI电路提供3.3 V电源输出。检查ISO\_VCC测试点，该点处的测量电压应当为3.3V。

通过将RS-232和RS-485输出连接至ADI ezLINX™ iCoupler®隔离接口开发环境板，可测试完整的发送和接收路径。此外，还可通过Tera Term开源终端仿真程序执行USB转RS-232/RS-485发送测试。如有需要，该电路可实现USB端口至RS-485和RS-232端口的同步发送，也可仅发送一个端口。

使用USB电缆连接笔记本电脑/PC与J4连接器。将示波器探针与ADM3252E收发机旁边的ISOTxD测试点相接，如图3所示。打开PC应用软件，选择COM5，然后单击OK(确定)，如图4所示。

单击File(文件)菜单下的Send(发送)按钮，载入待发送的RS-232数据。选择用于连续测试传输的大数据尺寸文件并单击Send(发送)，如图5所示。

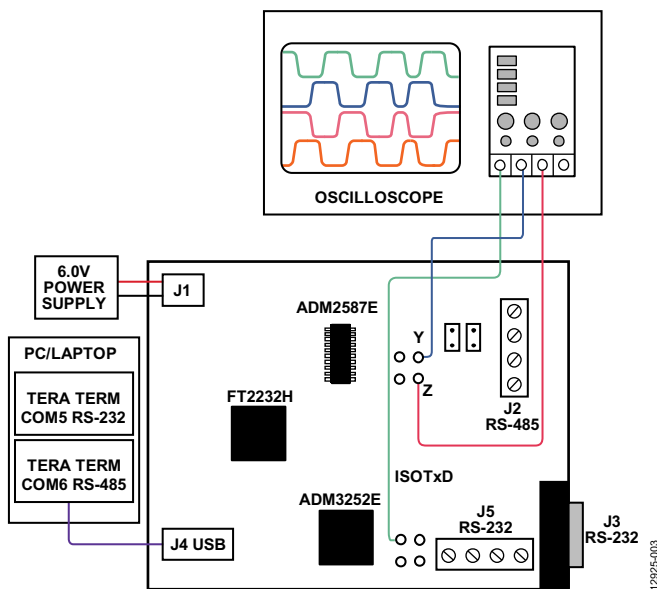


图3. EVAL-CN0373-EB1Z板测试设置

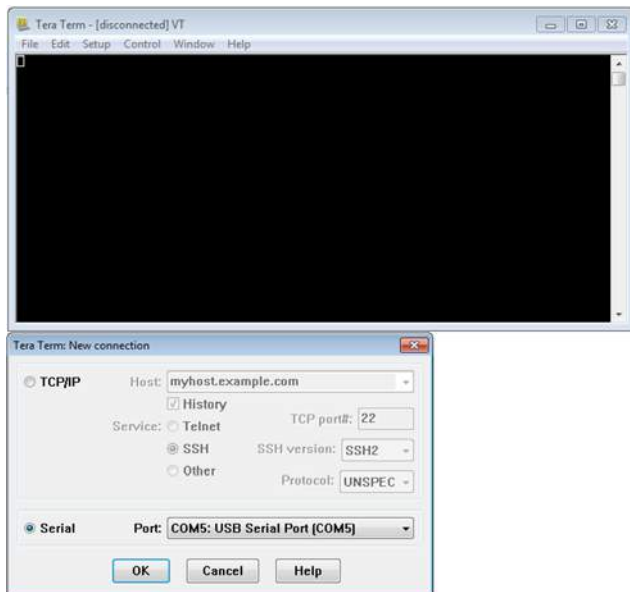


图4. 用于向EVAL-CN0373-EB1Z板上的RS-232端口进行USB传输的Tera Term COM5



图5. 用于向EVAL-CN0373-EB1Z板上的RS-232端口进行USB传输的Tera Term COM5数据

用探针探测EVAL-CN0373-EB1Z板上的ISOTxD测试点，通过示波器观察隔离式RS-232信号(见图6)。



图6. EVAL-CN0373-EB1Z板上RS-232端口的ISOTxD信号



可针对ADM2587E收发机执行类似的测试。使用USB电缆连接笔记本电脑/PC与J4连接器。将示波器探针与ADM2587E收发机旁边的Y和Z测试点相接，如图3所示。打开第二个Tera Term仿真器窗口，选择COM6用于RS-485传输，如图7所示。

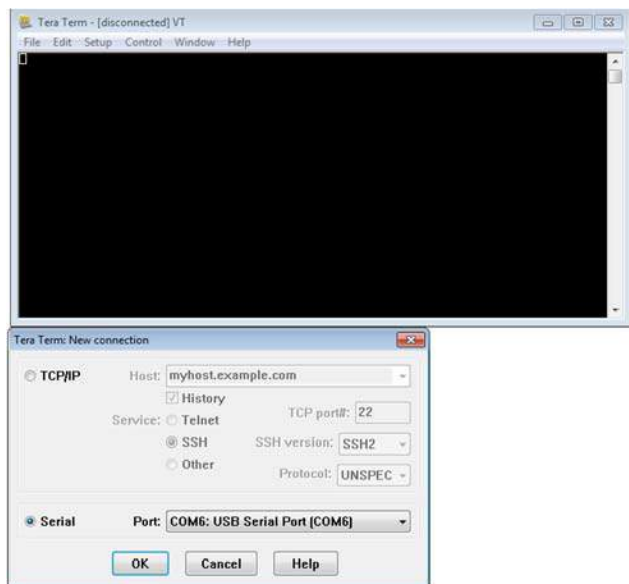


图7. 用于向EVAL-CN0373-EB1Z板上的RS-485端口进行USB传输的Tera Term COM6

单击File(文件)菜单下的Send(发送)按钮，载入待发送的RS-485数据。选择用于连续测试传输的大数据尺寸文件并单击Send(发送)，如图8所示。



图8. 用于向EVAL-CN0373-EB1Z板上的RS-485端口进行USB传输的Tera Term COM6数据

用探针探测Y和Z测试点，通过示波器观察隔离式RS-485信号；或者使用示波器的Y-Z数学函数观察差分总线信号，如图9所示。



图9. EVAL-CN0373-EB1Z板上RS-485端口的Y-Z数学波形



**更多资料**

CN-0373设计支持包:

[www.analog.com/CN0373-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0373-DesignSupport)

ezLINX™ iCoupler®隔离接口开发环境、ezLINX板快速入门指南。

Marais, Hein。AN-960应用笔记: RS-485/RS-422电路实施指南。ADI公司。

Clark, Sean和Ronn Kliger。AN-740应用笔记: RS-232应用中的iCoupler®隔离。ADI公司。

UG-400用户指南: ezLINX™ iCoupler®隔离接口开发环境。ADI公司。

**数据手册和评估板**

[ADM2587E数据手册](#)

[ADM3252E数据手册](#)

[ADuM3160数据手册](#)

[ADuM3070数据手册](#)

[ADP190数据手册](#)

[ADP7102数据手册](#)

[ezLINX™ iCoupler®隔离接口开发环境\(EZLINX-IIIDE-EBZ\)](#)

**修订历史**

**2015年4月—修订版0: 初始版**

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN12925sc-0-4/15(0)

**ANALOG  
DEVICES**

[www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)

**Circuits  
from the Lab®**  
Reference Designs

Circuits from the Lab®参考设计是经过测试的参考设计, 有助于加速设计, 同时简化系统集成, 帮助并解决当今模拟、混合信号和RF设计挑战。如需更多信息和/或技术支持, 请访问[www.analog.com/cn/CN0376](http://www.analog.com/cn/CN0376)。

## 连接/参考器件

AD7124-4	集成PGA和基准电压源的8通道、低噪声、低功耗24位Σ-Δ型ADC
ADuM5010	2.5 kV rms、隔离式DC/DC转换器
ADuM1441	低功耗四通道数字隔离器
ADP2441	36 V、1 A同步降压DC-DC稳压器

## 适合PLC/DCS应用的通道间隔离温度输入(热电偶/RTD)

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[CN-0376电路评估板\(EVAL-CN0376-SDPZ\)](#)

[系统演示平台\(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

#### 设计和集成文件

[原理图、布局文件和物料清单](#)

### 电路功能与优势

图1所示电路提供一个双通道、通道间隔离的热电偶或RTD输入, 适用于可编程逻辑控制器(PLC)和分布式控制系统(DCS)。该高集成度设计采用低功耗、24位、Σ-Δ型模数转换器(ADC), 带有丰富的模拟和数字特性, 无需额外的信号调理IC。

每个通道可接受热电偶或RTD输入。整个电路采用标准24 V总线电源供电。各通道的大小仅有27 mm × 50 mm。

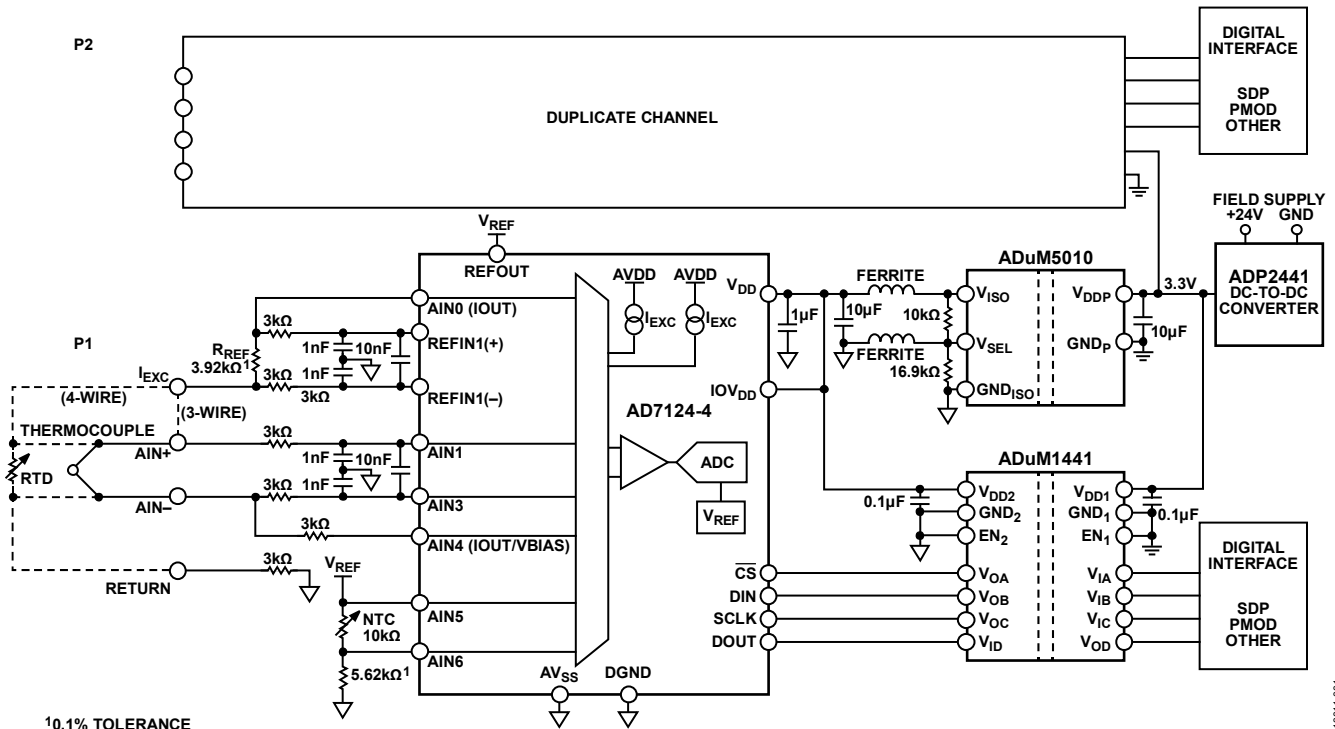


图1. PLC/DCS通道间隔离温度输入(原理示意图: 未显示去耦和所有连接)

### Rev. 0

Circuits from the Lab reference designs 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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## 电路描述

**AD7124-4** 24位 $\Sigma$ - $\Delta$ ADC集成可编程增益阵列(PGA)和基准电压源,为灵活地连接热电偶或RTD传感器提供完整的特性组合。其特性包括片内基准电压源、可编程增益阵列、激励电流、偏置电压发生器以及提供增强50 Hz和60 Hz抑制选项的灵活滤波。**AD7124-4**采用5 mm×5 mm小型LFCSP封装,因而非常适合空间为重要考虑因素的通道间隔离设计。它还包括多个可供用户使用的诊断功能。

**ADuM5010**隔离式DC/DC转换器通过集成的isoPower®技术提供3.3 V隔离电源。**ADuM1441**用于隔离**AD7124-4**的串行外设接口(SPI)。**AD7124-4**低功耗隔离器空闲时每通道的功耗仅4.8  $\mu$ A,能效非常高。

**ADP2441**是36 V降压DC-DC稳压器,采用工业标准24 V电源,具有宽输入电压容差。**ADP2441**用于将输入电压降至3.3 V,从而为所有控制器侧电路供电。

## 系统概述

通道间隔离在自动化系统中极具优势,因为特定输入通道的故障不会影响系统中的其它通道。然而,通道间隔离输入模块给设计提出了重大挑战,具体表现在复杂度、空间限制和系统成本这些方面。

热电偶或RTD输入是工业自动化系统的常用输入,因此,设计一个能够处理两者的温度输入模块很有用。这种灵活性最大程度地减少了两种输入模块的设计工作,而且为模块用户提供了灵活性。

**AD7124-4**显著降低了设计复杂度,提供一个片上系统,能够执行热电偶和RTD传感器所需的全部测量功能。

图1所示电路的每个通道大小仅有27 mm×50 mm,若在印刷电路板(PCB)两面贴放器件,则上述面积可进一步缩小。之所以能够实现如此小的尺寸,是因为**AD7124-4**采用5 mm×5 mm小型LFCSP封装,并且集成了几乎所有必需的功能,除了隔离以及附加前端滤波和保护之外。用于数据和电源隔离的隔离电路仅占用87 mm<sup>2</sup>,最小合并宽度为12.5 mm。

## 端子连接

图2显示了两个输入通道各自的端子连接。这些引脚对应于硬件中的P1和P2(见图1)。热电偶以及2/3/4线RTD连接如图所示。

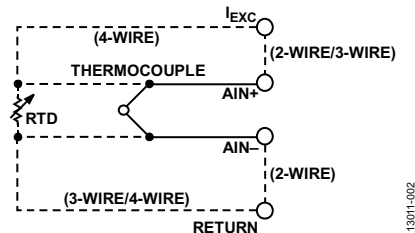


图2. 前端滤波和电路(简化图)

## 输入滤波

如图3所示,输入共模噪声滤波由R1、C1和R2、C2实现,截止频率约为50 kHz。差分噪声滤波由R1、R2和C3实现,截止频率约为2.5 kHz。务必以 $\Sigma$ - $\Delta$ 调制器频率(全功率模式下为307 kHz)滤除任何干扰,这点特别重要。建议调整这些滤波器的截止频率以满足系统带宽要求,共模滤波器的截止频率约为差分滤波器截止频率的10倍。

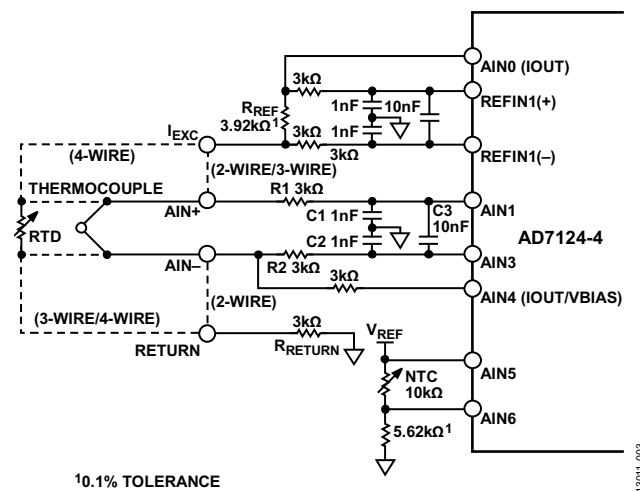


图3. 前端滤波和电路(简化图)

## 输入保护

为保护输入不过压状况影响, **AD7124-4**的每个输入路径上都放置了3 k $\Omega$ 电阻。此电阻值将30 V DC过压产生的电流限制在10 mA以下。

考虑30 V电压连接在AIN+和AIN-之间的情况。从AIN+朝里看, 30 V电压看到R1 (3 k $\Omega$ ), 之后是内部ESD保护二极管, 再后面是从AIN3朝外看到的3 k $\Omega$ 电阻与从AIN4朝外看到的3 k $\Omega$ 电阻并联。忽略内部ESD保护二极管, AIN+与AIN-之间的总电阻为3 k $\Omega$  + 3 k $\Omega$  || 3 k $\Omega$  = 4.5 k $\Omega$ 。因此, 流经**AD7124-4**的电流限值为30 V  $\div$  4.5 k $\Omega$  = 6.7 mA。

## RTD输入

图1所示电路可连接到2线、3线或4线RTD。最大可测量3.92 kΩ电阻，因此它适用于Pt100和Pt1000 RTD。使用电流激励，电阻测量为RTD与3.92 kΩ精密基准电阻( $R_{REF}$ )之间的比率式测量结果。如图3所示，RTD测量在AIN1和AIN3之间进行，REFIN1+和REFIN1-用作测量的基准输入。激励电流设置如下：

- 2线模式：仅AIN0上的激励有效，设置为250 μA。
- 3线模式：AIN0和AIN4上的激励电流均有效，各设置为100 μA。
- 4线模式：仅AIN0上的激励有效，设置为250 μA。

使用高端电流检测技术。对于较低的RTD引线电阻值，此技术可降低3线模式下电流失配的影响。有关3线RTD配置的更多信息，参见[电路笔记CN-0383](#)。

基准电阻( $R_{REF}$ )选择为3.92 kΩ，最高支持850°C的Pt1000 RTD测量(850°C时RTD电阻为3.9048 kΩ)。 $R_{REF}$ 的值必须根据RTD的最大预期电阻来选择。 $R_{REF}$ 电阻的精度直接影响测量精度，因此，必须使用精密、低漂移电阻。

4线模式下，激励电流必须设置为250 μA，3线模式下设置为100 μA。对于4线模式，假设RTD值为3.92 kΩ。来自AIN0的激励电流流经 $R_{REF} + R_{RTD} + R_{RETURN} = 3.92 \text{ k}\Omega + 3.92 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega = 10.84 \text{ k}\Omega$ 。因此，AIN0处的电压等于 $250 \mu\text{A} \times 10.84 \text{ k}\Omega = 2.71 \text{ V}$ 。[AD7124-4](#)指定激励电流输出端的输出顺从电压为 $AV_{DD} - 0.35 \text{ V}$ ，即 $3.3 \text{ V} - 0.35 \text{ V} = 2.95 \text{ V}$ 。因为 $2.95 \text{ V} > 2.71 \text{ V}$ ，所以即使对于最大RTD电阻，250 μA激励电流也能正常工作。

有关4线RTD配置的更多信息，参见[电路笔记CN-0381](#)。

在3线模式下，来自AIN4的引脚补偿激励电流也会流经3 kΩ返回电阻，在AIN0处产生一个附加电压： $250 \mu\text{A} \times 3 \text{ k}\Omega = 0.75 \text{ V}$ 。因此，AIN0处的总电压等于 $2.71 \text{ V} + 0.75 \text{ V} = 3.46 \text{ V}$ ，这违反了裕量要求。所以，在3线模式下，各激励电流必须降至100 μA以提供足够的裕量。

PGA增益可用来提高测量分辨率。对于Pt100 RTD，建议使用8倍增益(因为Pt100值比Pt1000值小10倍)。

为实现所需精度，RTD本身必须由主机控制器通过软件进行线性化，参见[电路笔记CN-0383](#)。

## 热电偶测量

如图3所示，热电偶连接在AIN+和AIN-端子之间。AIN4引脚为热电偶提供 $3.3 \text{ V} \div 2 = 1.65 \text{ V}$ 的偏置电压。热电偶电压在AIN1和AIN3之间测量，因为热电偶信号非常小，通常推荐使用32倍或64倍的PGA增益。

冷结补偿使用10 kΩ NTC热敏电阻。基准电压激励 $V_{REF}$ 从REFOUT获得，并且串联一个精密低漂移5.62 kΩ电阻接地。

NTC电阻值可以通过下式计算：

$$R_{NTC} = \frac{V_{NTC}}{V_{REF} - V_{NTC}} \times 5.62 \text{ k}\Omega$$

其中：

$V_{NTC}$ 为AIN1和AIN3之间测得的电压。

$V_{REF}$ 为[AD7124-4](#) REFOUT提供的基准电压。

端子板与NTC温度传感器之间的温度差会直接影响热电偶输入的温度读数。因此，NTC热敏电阻必须尽可能靠近端子板放置，使热耦合最大。

为实现所需精度，热电偶和NTC必须由主机控制器通过软件进行线性化，参见[电路笔记CN-0384](#)。

## 诊断

[AD7124-4](#)提供多种系统级诊断功能，包括：

- 基准电压检测
- 输入过压/欠压检测
- SPI通信的CRC
- 存储器映射的CRC
- SPI读/写检查

这些诊断功能对输入通道中可能发生的故障实现了高水平覆盖。

## 隔离

数据通道利用四通道微功耗隔离器[ADuM1441](#)隔离，能效很高。[ADuM1441](#)采用5 mm × 6.2 mm、16引脚小型QSOP封装(30 mm²)。

[ADuM5010](#)是一款完整的隔离开发转换器，利用isoPower技术为电路提供电源隔离。[ADuM5010](#)采用7.4 mm × 7.5 mm、20引脚小型SSOP封装(56.25 mm²)。

图4所示为ADuM5010电路详情。电源副边使用铁氧体磁珠来抑制潜在的电磁干扰(EMI)辐射。铁氧体磁珠(Murata BLM18HK102SN1)专门针对100 MHz至1 GHz的高阻抗而选择。还使用了10  $\mu$ F和0.1  $\mu$ F去耦电容。铁氧体磁珠和电容均通过短走线连接到ADuM5010引脚,以使寄生电感和电阻最小。

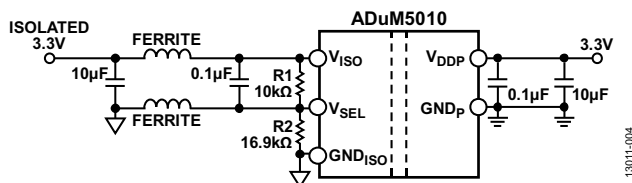


图4. 带铁氧体磁珠和去耦电容的isoPower电路

拼接电容已维持最小面积,因为铁氧体磁珠已大幅降低辐射。ADuM5010电源、GND引脚和铁氧体磁珠之间的PCB区域应消除任何接地层或走线,以尽量减少高频噪声容性耦合到接地层。有关控制isoPower器件辐射的更多信息,参见AN-0971应用笔记。

根据ADuM5010数据手册选择R1和R2反馈电阻以选用3.3 V输出。

### 每通道功耗

ADuM5010由控制器侧电源供电,典型功耗为3.3 mA。ADuM5010满载时的效率仅为27%,因此,尽量减少现场侧的电流消耗会对通道的能效产生重大影响。

AD7124-4功耗约为994  $\mu$ A(全功率模式、增益 = 32、TC偏置、诊断和内部基准电压源使能)。利用中功率或低功耗模式可以显著降低AD7124-4的功耗。

对于ADuM1441,空闲时现场侧总功耗约为7.2  $\mu$ A,以2 Mbps

工作时为552  $\mu$ A。如果接口在1/8的时间里有效,则ADuM1441的总功耗为 $(552 \mu\text{A} \times 0.125) + (7.2 \mu\text{A} \times 0.875) = 75.3 \mu\text{A}$ 。

当以全功率模式工作、增益为32、内部基准电压源和TC偏置使能时,一个输入通道的实测功耗为7.9 mA(来自控制器侧3.3 V电源)。

### 电源电路

评估板由4.5 V至36 V直流电源供电,利用板上开关稳压器向系统提供3.3 V电源,如图5所示。EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台(SDP)板为数字接口提供经调节的3.3 V电压。

ADP2441包括可编程软启动、调节输出电压、开关频率和电源良好指示等特性。这些特性通过外部小型电阻和电容编程。ADP2441还包括多种保护特性,如带迟滞的欠压闭锁(UVLO)、输出短路保护和热关断等。

300 kHz开关频率可使ADP2441的效率最高。由于ADP2441的开关频率非常高,建议使用低磁芯损耗、低EMI的屏蔽铁氧体磁芯电感。

在图5所示电路中,开关频率通过294 k $\Omega$ 外部电阻设置为约300 kHz。22  $\mu$ H电感值(Coilcraft LPS6235-223MLC)是利用可下载的ADP2441降压调节器设计工具选择的。此工具可根据所需的工作条件(4.5 V至36 V输入、3.3 V输出、1 A输出电流)选择最佳的元件值。选择1 A电流是为了给主机控制器侧的其它电路供电(若需要)。

有关EVAL-CN0376-SDPZ电路评估板的完整文档,包括原理图、装配图、布局文件、Gerber文件和物料清单,请参阅[www.analog.com/CN0376-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0376-DesignSupport)。

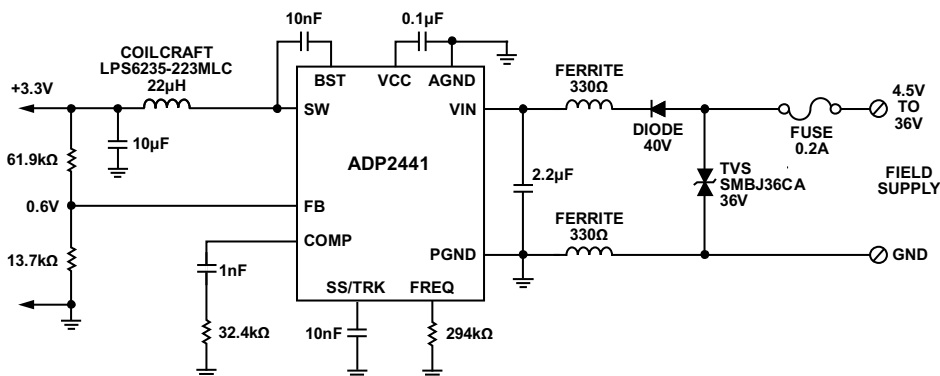


图5. 电源电路(原理示意图, 未显示所有连接)



## 测试结果

关于热电偶、3线和4线RTD电路的详细性能分析，参见[电路笔记CN-0381](#)、[电路笔记CN-0383](#)和[电路笔记CN-0384](#)，其中给出了深入分析和测量结果。

图6给出了EVAL-CN0376-SDPZ的直方图，采用25 SPS后置滤波器，AIN+短接AIN-，增益为32，TC偏置使能。数据对应于17.85位无噪声分辨率。

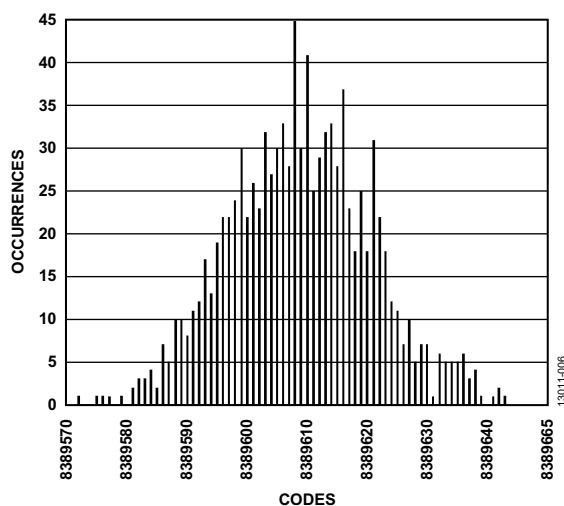


图6. AIN+和AIN-输入短接时的代码直方图  
(选择25 SPS后置滤波器、增益 = 32、TC偏置使能)

## 常见变化

如果需要更多通道，可以使用[AD7124-8](#)。[AD7124-8](#)有8个差分输入或16个单端输入。[AD7792](#)也可作为低成本选项加以考虑，不过其特性较少，性能较低。

[ADuM3151](#)等SPI Isolator™可作为数据隔离选项，其最高支持17 MHz SPI传输，并且内置三个通用低速隔离通道。

图1所示电路使用NTC热敏电阻进行冷结补偿。另一个选项是使用[ADT7320](#)数字温度传感器，其精度为0.25°C。(参见[电路笔记CN-0172](#))。

## 电路评估与测试

图1所示电路采用EVAL-CN0376-SDPZ评估板和EVAL-SDP-CB1Z SDP控制板。

EVAL-CN0376-SDPZ评估板具有PMOD兼容接头，支持与外部控制板集成。

CN-0376评估软件与SDP板通信，以便配置EVAL-CN0376-SDPZ评估板并从中捕捉数据。

## 设备要求

需要以下设备：

- 带USB端口的Windows® Vista(32位)或Windows 7(32位)PC
- EVAL-CN0376-SDPZ电路评估板
- EVAL-SDP-CB1Z SDP控制板
- CN-0376评估软件
- 精密电压和电阻源，或热电偶、RTD仿真器
- 电源：4.5 V至36 V dc(100 mA)

## 开始使用

从<ftp://ftp.analog.com/pub/cftl/CN0376/>下载CN-0376评估软件，然后安装。按照屏幕提示安装并使用该软件。更多信息参见CN-0376软件用户指南。

## 测试设置功能框图

图7所示为测试设置的功能框图。

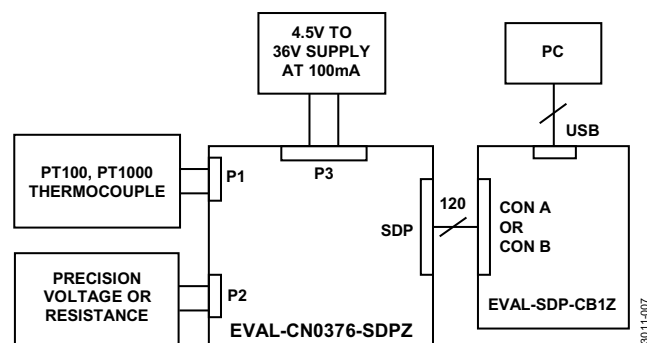


图7. 测试设置功能框图

## 设置

EVAL-CN0376-SDPZ评估板通过120引脚对接连接器连接EVAL-SDP-CB1Z SDP板，两个板上均有这种连接器。CN-0376评估软件和SDP板支持用PC分析数据。

对P3连接器施加一个4.5 V到36 V(标称值24 V)范围内的电压。务必将P8跳线设为EXT(默认)，以便通过P3电源为电路板供电。

外部控制器也可用来与评估板通信(通过PMOD接头进行SPI通信)，以及为评估板供电。若需要，可将P8跳线设为VCC\_PMOD，以便通过PMOD连接器为评估板提供3.3 V电源。

精密电压和电阻源可用作模拟前端的输入，从而评估系统性能。也可使用热电偶或RTD仿真器。

图8显示了EVAL-CN0376-SDPZ电路评估板的实物照片。

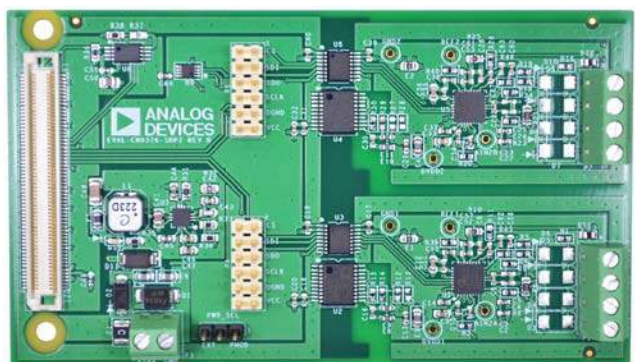


图8. EVAL-CN0376-SDPZ电路评估板照片

## 更多资料

CN-0376设计支持包:

[www.analog.com/CN0376-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0376-DesignSupport)

SDP-B用户指南

CN-0376软件用户指南

Matthew Duff和Joseph Towey, 两种简单、精确、灵活的热电偶温度检测方法, Analog Dialogue 44-10, Analog Devices

Mark Cantrell, 应用笔记AN-0971, isoPower器件辐射控制建议, Analog Devices

Walt Kester, 《传感器信号调理》第7章“温度传感器”, Analog Devices, 1999年

Mary McCarthy, 应用笔记AN-615, 峰峰值分辨率与有效分辨率, Analog Devices

Donal McNamara, 应用笔记AN-892, 温度测量原理及实用技术, Analog Devices

Mike Looney, 应用笔记AN-0970, 使用ADuC706x微控制器实现RTD接口和线性化, Analog Devices

Mark Cantrell, 技术文章MS-2644, 超低功耗开启高速隔离应用之门, Analog Devices.

MT-031指南, 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团, Analog Devices

MT-101指南, 去耦技术, Analog Devices

电路笔记CN-0172, 精度为0.25°C的3通道热电偶温度测量系统, Analog Devices

电路笔记CN-0206, 耗用电流小于500  $\mu$ A的热电偶温度测量系统, Analog Devices

电路笔记CN-0209, 适合过程控制应用的完全可编程通用模拟前端, Analog Devices

电路笔记CN-0325, 使用4引脚或6引脚端子板的PLC/DCS通用模拟输入, Analog Devices

电路笔记CN-0381, 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的全集成式4线RTD测量系统, Analog Devices

电路笔记CN-0382, 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的隔离式4 mA至20 mA/HART温度和压力工业变送器, Analog Devices

电路笔记CN-0383, 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的全集成式3线RTD测量系统, Analog Devices

电路笔记CN-0384, 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的全集成式热电偶测量系统, Analog Devices

## 数据手册和评估板

CN-0376电路评估板(EVAL-CN0376-SDPZ)

系统演示平台(EVAL-SDP-CB1Z)

AD7124-4数据手册

ADuM1441数据手册

ADuM5010数据手册

ADP2441数据手册

## 修订历史

2015年7月—修订版0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

**Circuits  
from the Lab®**  
Reference Designs

Circuits from the Lab®参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和RF设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问[www.analog.com/cn/CN0381](http://www.analog.com/cn/CN0381)。

**连接/参考器件**
**AD7124-4/  
AD7124-8**

集成PGA和基准电压源的4通道/  
8通道、低噪声、低功耗24位  
 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC

**ADP1720**

50 mA、高压、微功耗线性稳压器

## 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的全集成式4线RTD测量系统

**评估和设计支持**
**电路评估板**
**AD7124-4评估板(EVAL-AD7124-4SDZ)或AD7124-8评估板  
(EVAL-AD7124-8SDZ)**
**系统演示平台(EVAL-SDP-CB1Z)**
**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所示电路是一个集成的4线式电阻温度检测器(RTD)系统，基于AD7124-4/AD7124-8低功耗、低噪声、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC，针对高精度测量应用而优化。采用两点校准和线性化，在-50°C至+200°C的温度范围内，4线系统的整体精度优于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。在全功率模式、选择sinc<sup>4</sup>滤波器、输出数据速率为50 SPS的条件下，系统的典型无噪声码分辨率为17.9位；在低功耗模式、选择后置滤波器、输出数据速率为25 SPS的条件下，系统的典型无噪声码分辨率为17.3位。

AD7124-4可配置为4个差分或7个伪差分输入通道，而AD7124-8可配置为8个差分或15个伪差分输入通道。片内可编程增益阵列(PGA)确保ADC中可直接输入小信号。

AD7124-4/AD7124-8提供最高的信号链集成度，其中包括可编程低漂移激励电流源。片内集成了RTD测量系统需要的大部分构建模块，因而能够大大简化RTD系统设计。

AD7124-4/AD7124-8允许用户灵活地使用三种集成功耗模式中的一种，电流消耗、输出数据速率范围和均方根噪声与所选的功耗模式相对应。低功耗模式下，AD7124-4/AD7124-8的功耗仅255  $\mu\text{A}$ ，全功率模式下为930  $\mu\text{A}$ 。这些功耗选项使得该器件既适合功耗不重要的应用，如输入/输出模块，也适合低功耗应用，如环路供电智能变送器(整个变送器的功耗必须低于4 mA)。

该器件还具有关断选项。在关断模式下，整个ADC及其辅助功能均关断，器件的典型功耗降至1  $\mu\text{A}$ 。AD7124-4/AD7124-8还集成了丰富的诊断功能，作为全面特性组合的一部分。

**Rev. 0**

Circuits from the Lab reference designs 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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

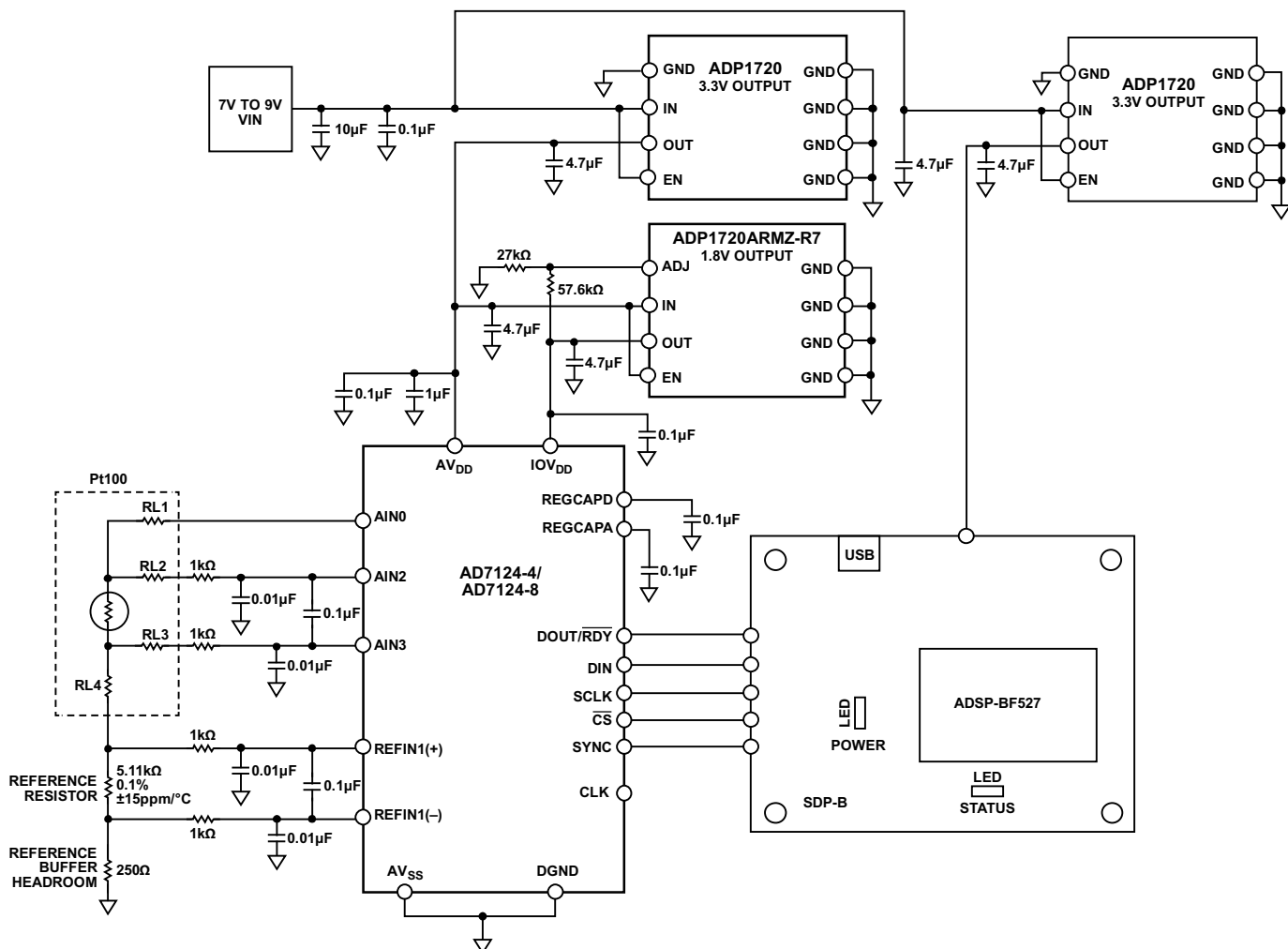


图1. 4线RTD测量配置

## 电路描述

### RTD温度测量简介

RTD是工业应用中温度测量常用的传感器。RTD由纯金属(如铂、镍或铜)制成,其电阻随温度的变化是可预测的。最常用的RTD是铂Pt100和Pt1000。与其它类型的温度传感器相比,RTD具有高精度和良好的稳定性。长导线的电阻所引起的误差可利用4线连接来消除。

为了精确测定电阻,须利用一个恒定电流源在RTD上产生一个电压。AD7124-4/AD7124-8提供两个这样的激励电流源,可通过寄存器编程将其设置为50  $\mu$ A到1 mA的值。将测量值折合为精密参考电阻两端的电压(由同一个电流驱动),即可轻易消除电流源中的误差,实现比例测量。

图1所示电路使用Pt100 RTD B类传感器。Pt100 RTD的温度测量范围是 $-200^{\circ}\text{C}$ 至 $+600^{\circ}\text{C}$ 。B类RTD在 $0^{\circ}\text{C}$ 时的电阻典型值为100  $\Omega$ ,典型温度系数约为 $0.385 \Omega/^{\circ}\text{C}$ (参见图2)。利用此信息,根据所选的电流源很容易计算出Pt100 RTD两端产生的电压。

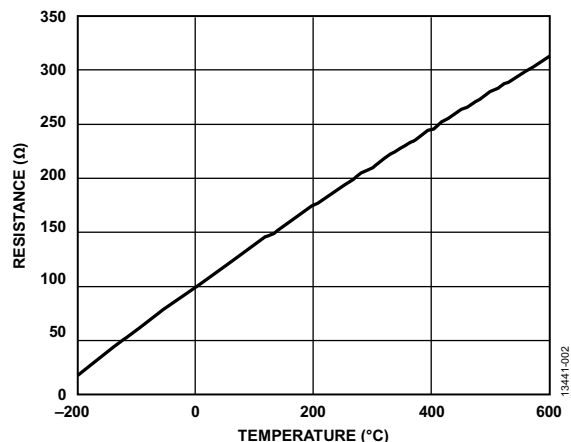


图2. Pt100 RTD电阻与温度的关系



## 电路工作原理

AD7124-4/AD7124-8提供集成式RTD测量解决方案，可实现高分辨率、低非线性度误差和低噪声性能，以及极高的50 Hz/60 Hz抑制能力。AD7124-4/AD7124-8片内集成低噪声PGA，可放大RTD的小信号，增益编程范围为1到128，因而可以直接与传感器接口。增益级具有高输入阻抗，输入漏电流在全功率模式下不超过3.3 nA，在低功耗模式下为1 nA（典型值）。下面说明构成4线RTD温度测量系统的不同元件。

## 电源

AD7124-4/AD7124-8具有单独的模拟电源和数字电源。数字电源IOV<sub>DD</sub>独立于模拟电源，可以为1.65 V至3.6 V范围内的值（以DGND为基准）。模拟电源AV<sub>DD</sub>以AV<sub>SS</sub>为基准，范围是2.7 V到3.6 V（中低功率模式）或2.9 V至3.6 V（全功率模式）。图1所示电路采用单电源供电，因此AV<sub>SS</sub>与DGND相连，仅使用一个接地层。AV<sub>DD</sub>和IOV<sub>DD</sub>电压利用低压差稳压器ADP1720分别产生。AV<sub>DD</sub>电压设置为3.3 V，IOV<sub>DD</sub>电压设置为1.8 V，采用ADP1720稳压器。使用单独的稳压器可确保噪声最低。

## 串行外设接口(SPI)

与AD7124-4/AD7124-8的SPI通信由EVAL-SDP-CB1Z板上的Blackfin® ADSP-BF527处理，如图1所示。为了访问AD7124-4/AD7124-8的寄存器，使用AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件。图3显示了该软件的主窗口。单击4-WIRE RTD(4线RTD)按钮以配置软件用于4线RTD测量。

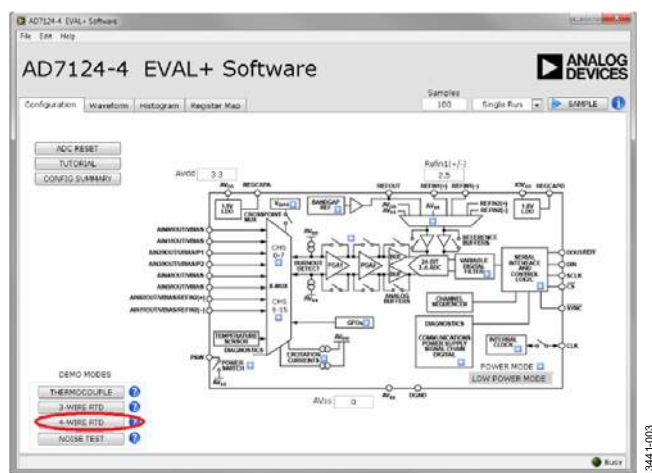


图3. AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件配置窗口

AD7124-4/AD7124-8的片内诊断功能可用来检测SPI通信故障。这些诊断包括检查SPI读写操作，确保仅访问有效寄存器。SCLK计数器确保使用正确数量的SCLK脉冲，而CRC功能检查传输期间位值有无变化。当任一SPI通信诊断功能使能且发生相关的错误时，错误寄存器中的对应标志就会置1。所有使能的标志进行或运算，以控制状态寄存器的ERR标志位。该功能在将状态位附加到ADC转换结果时特别有用。

## 模拟输入和基准电压源

AD7124-4可配置为4个差分或7个伪差分输入通道，而AD7124-8可配置为8个差分或15个伪差分输入通道。

AD7124-4/AD7124-8的片内诊断功能可用来检查模拟引脚上的电平是否在额定工作范围以内。正(AINP)和负(AINM)模拟输入可以单独检查是否发生过压和欠压，以及ADC是否饱和。当模拟输入上的电压超过AV<sub>DD</sub>时，过压标志就会置1；当模拟输入上的电压低于AV<sub>SS</sub>时，欠压标志就会置1。

图1所示电路利用3个模拟引脚实现4线测量：AIN0、AIN2和AIN3。AIN2和AIN3配置为全差分输入通道，用于检测RTD上的电压。用于激励RTD的激励电流源由AV<sub>DD</sub>产生，并流向AIN0。图4详细显示了模拟引脚及其配置。

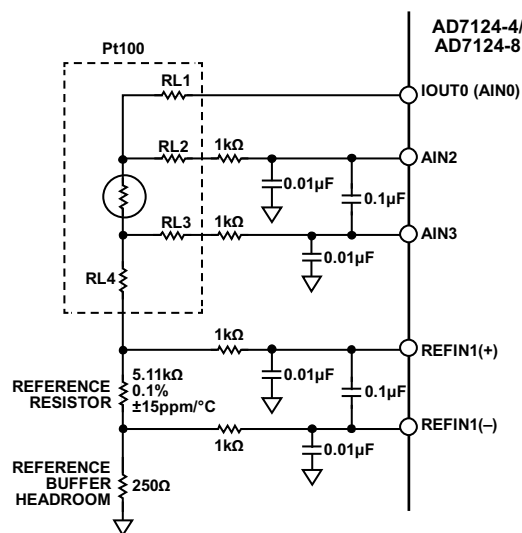


图4. 4线RTD测量的模拟输入配置

## 数字和模拟滤波

对于图1所示电路，所用的基准输入为REFIN1(±)。流经RTD的电流也会流过精密基准电阻，产生基准电压。此精密基准电阻上产生的电压与RTD上的电压成比例，因此，激励电流的波动会被消除。由于缓冲器已使能，务必满足正常工作所需的裕量( $AV_{DD} - 0.1\text{ V}$ 和 $AV_{SS} + 0.1\text{ V}$ )。0.125 V ( $500\text{ }\mu\text{A} \times 250\text{ }\Omega$ )的裕量由250  $\Omega$ 接地电阻提供，如图4所示。

差分滤波器(截止频率约为800 Hz)和共模滤波器(截止频率约为16 kHz)在模拟输入端和基准输入端实现。为了抑制调制器频率及其倍数处的干扰，必须使用这种滤波。

AD7124-4/AD7124-8在片内数字滤波方面拥有很大的灵活性。有多种滤波器选项可用，所选的滤波器会影响输出数据速率、建立时间和50 Hz/60 Hz抑制性能。对于此电路笔记，电路实现了sinc<sup>4</sup>滤波器和后置滤波器。之所以使用sinc<sup>4</sup>滤波器，是因为它在整个输出数据速率范围内具有出色的噪声性能，另外还有出色的50 Hz/60 Hz抑制性能。后置滤波器提供50 Hz和60 Hz同时抑制，建立时间为40 ms。

## 校准

AD7124-4/AD7124-8提供不同的校准模式，通过校准可消除失调和增益误差。对于本电路笔记，电路使用了内部零电平校准和内部满量程校准。

## 4线RTD配置

图1所示电路使用AD7124-4/AD7124-8进行精密4线RTD测量。4线RTD测量需要一个激励电流源。AD7124-4/AD7124-8提供两个匹配电流源，可使用其中任何一个来激励RTD。RTD产生低电平电压信号，AD7124-4/AD7124-8的片内PGA将其放大。放大后的电压通过24位Σ-Δ型ADC转换为精密数字信号。

本4线RTD电路采用B类RTD。如果片内激励电流设置为500  $\mu\text{A}$ ，在最高温度600°C时，RTD上产生的电压约为156.85 mV。为确保使用AD7124-4/AD7124-8的最大范围，PGA增益设置为16。PGA将RTD传感器最大输出电压放大至2.5096 V。

选择适当的外部精密电阻值，使RTD上产生的最大电压等于基准电压除以PGA增益。

$$R_{REF} = V_{RTD\text{ MAX}}/I_{EXC} = 2.5096\text{ V}/500\text{ }\mu\text{A} = 5020\text{ }\Omega$$

因此使用5.11 k $\Omega$ 电阻，其给出的基准电压为

$$5.11\text{ k}\Omega \times \text{激励电流} = 5.11\text{ k}\Omega \times 500\text{ }\mu\text{A} = 2.555\text{ V}$$

利用AD7124-4/AD7124-8进行4线RTD测量时，还必须考虑激励电流源的输出顺从电压。输出顺从电压取决于所选的激励电流。本电路选择500  $\mu\text{A}$ ，其输出顺从电压为 $AV_{DD} - 0.37\text{ V}$ 。本电路的 $AV_{DD}$ 电源电压为3.3 V，因此，激励电流源的输出顺从电压必须低于2.93 V。从上述计算可知，电路满足这一要求，因为AIN0引脚的最大电压等于精密基准电阻上的电压加上RTD上的电压和裕量电阻上的电压。

$$V_{REF} + V_{RTD} + V_{HEADROOM} = 2.555\text{ V} + 156.85\text{ mV} + 125\text{ mV} = 2.83685\text{ V}$$

针对4线RTD测量的AD7124-4/AD7124-8配置如下：

- 差分输入：AINP = AIN2，AINM = AIN3
- 激励电流：IOUT0 = AIN0 = 500  $\mu\text{A}$
- 增益 = 16
- 精密基准电阻：5.11 k $\Omega$
- 数字滤波：
  - Sinc<sup>4</sup>滤波器(全功率模式)
  - 后置滤波器(低功耗模式)

当ADC工作在双极性差分模式时，计算RTD电阻 $R_{RTD}$ 的通用表达式如下所示：

$$R_{RTD} = \frac{(CODE - 2^{N-1}) \times R_{REF}}{G \times 2^{N-1}} \quad (1)$$

其中：

CODE为ADC输出码。

N为ADC的分辨率(本电路为24)。

$R_{REF}$ 为基准电阻。

G为所选增益。

根据B类RTD的规格，电阻变化约为0.385  $\Omega/^{\circ}\text{C}$ 。可利用此关系快速获得RTD的近似温度。由于RTD的温度系数在整个温度范围内略有变化，因此上述方法不够精确，但可以利用它来快速检查温度。

要计算近似温度，请使用公式2。

$$\text{Temperature } (^{\circ}\text{C}) = \frac{R_{RTD} - 100}{0.385} \quad (2)$$

RTD传递函数即所谓Callender-Van Dusen公式，它由两个不同的多项式公式组成，可提供更精确的结果。公式3用于0°C以上的温度，公式4用于0°C以下的温度。

温度 $t \leq 0^\circ\text{C}$ 时，公式为：

$$R_{RTD}(t) = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100^\circ\text{C})t^3] \quad (3)$$

温度 $t \geq 0^\circ\text{C}$ 时，公式为：

$$R_{RTD}(t) = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (4)$$

其中：

$t$ 为RTD温度(°C)。

$R_{RTD}(t)$ 为RTD电阻(Ω)。

$R_0$ 为0°C时的RTD电阻(本例中 $R_0 = 100 \Omega$ )。

$A = 3.9083 \times 10^{-3}$ 。

$B = -5.775 \times 10^{-7}$ 。

$C = -4.23225 \times 10^{-12}$ 。

结合公式3和公式4给出的传递函数，有多种方法可以确定作为RTD电阻函数的温度值。这里选择直接数学方法，因为其精度高。根据公式3可得出以下温度计算公式：

$$T_{RTD} (^\circ\text{C}) = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B\left(1 - \frac{r}{R_0}\right)}}{2B} \quad (5)$$

其中 $r$ 为RTD电阻，其它变量的定义如上所述。

此方法能够很好地处理大于或等于0°C的温度。要计算0°C以下的RTD温度，需要一个最佳拟合多项式表达式，本电路笔记使用的多项式为公式6所示的五阶多项式。

$$T_{RTD} (^\circ\text{C}) = -242.02 + 2.2228 \times r + (2.5859 \times 10^{-3})r^2 - (48260 \times 10^{-6})r^3 - (2.8183 \times 10^{-3})r^4 + (1.5243 \times 10^{-10})r^5 \quad (6)$$

举例来说，温度设置为25°C时，若从AD7124-4/AD7124-8读出的代码为11270065，则利用公式1将其转换为电阻值：

$$R_{RTD} = \frac{(11270065 - 2^{23}) \times R_{REF}}{G \times 2^{23}} = 109.704 \Omega$$

利用公式5进行线性化，得出温度为24.921°C。

再举一例，温度设置为-25°C时，若从AD7124-4/AD7124-8读出的代码为10757779，则将其转换为电阻值：

$$R_{RTD} = \frac{(10757779 - 2^{23}) \times R_{REF}}{G \times 2^{23}} = 90.200 \Omega$$

利用公式6进行线性化，得出温度为-24.982°C。

## 4线RTD测量和结果

对于图1所示电路，我们采集了AD7124-4/AD7124-8在不同数字滤波器和功耗模式配置下获得的数据，sinc<sup>4</sup>滤波器用于全功率模式，后置滤波器用于低功耗模式。

若选择sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式和50 SPS的配置，则AD7124-4/AD7124-8可以最佳的速度和噪声性能工作。图5显示了室温下4线RTD按图1所示连接时的噪声分布。对应的均方根噪声典型值为199.37 nV，相当于约17.9位无噪声分辨率。使用相同的滤波器、增益、功耗模式和输出数据速率，但输入短路时，AD7124-4/AD7124-8的噪声性能为100 nV rms，相当于18.7位无噪声分辨率。噪声的增加直接来自输入通道(AIN2、AIN3)上的RTD连接。

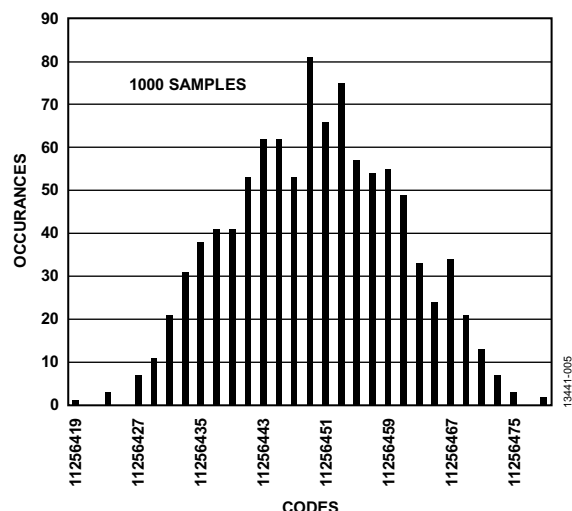


图5. 室温、Sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式、50 SPS时的RTD码直方图

对于选择sinc<sup>4</sup>滤波器和全功率模式的4线RTD配置，将RTD温度从-50°C扫描至+200°C。对于每个温度，按照上述方法利用AD7124-4/AD7124-8测量RTD上的相应电压。然后将此电压转换为电阻，按照“4线RTD配置”部分所述进行线性化并转换为温度。图6显示了设定温度与线性化后RTD实测温度之间的误差。对于每个RTD温度设置，AD7124-4/AD7124-8保持25°C。如图6所示，线性化后RTD实测温度的误差在Pt100 B类RTD的误差窗口内。图6还显示了RTD误差在不同AD7124-4/AD7124-8温度设置下的偏差。对于AD7124-4/AD7124-8的每个温度设置，执行内部零电平校准和满量程校准。如图6所示，对于AD7124-4/AD7124-8的所有温度设置，RTD误差在B类RTD的预期误差范围内。

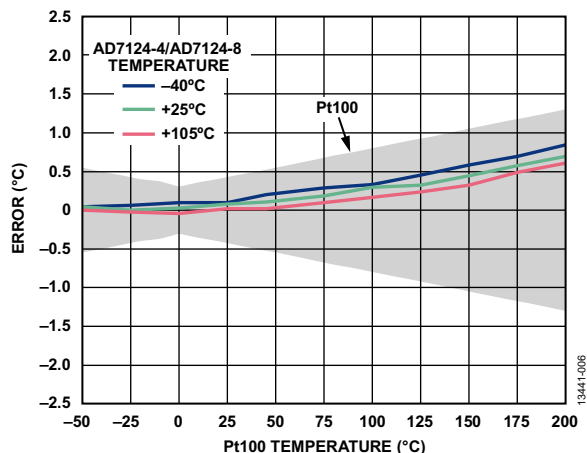


图6. 温度精度测量(Sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式、50 SPS)

图7显示了在25°C执行一次性内部零电平和满量程校准后的RTD实测温度误差。从图中可看出，在25°C执行一次性校准与在各温度设置执行校准，AD7124-4/AD7124-8表现出相同的性能。

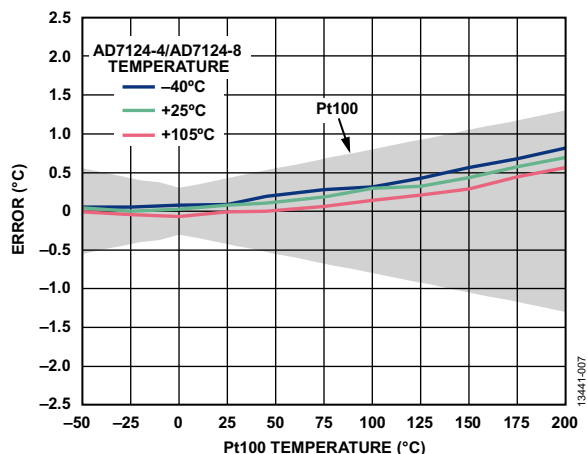


图7. 温度精度测量(Sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式、50 SPS, 仅执行25°C一次性校准)

测试的第二种AD7124-4/AD7124-8配置是低功耗模式，选择后置滤波器和25 SPS输出数据速率。25 SPS滤波器提供50 Hz和60 Hz同时抑制，并且允许用户用建立时间换取电源抑制性能。图8显示了室温下4线RTD按图1所示连接时的噪声分布。对应的均方根噪声典型值为774 nV，相当于约16.8位无噪声分辨率。使用相同的滤波器、增益、功耗模式和输出数据速率，但输入短路时，AD7124-4/AD7124-8的噪声性能典型值为360 nV rms，相当于17.3位无噪声分辨率。两次测量的噪声增加直接来自输入通道(AIN2、AIN3)上的RTD连接。

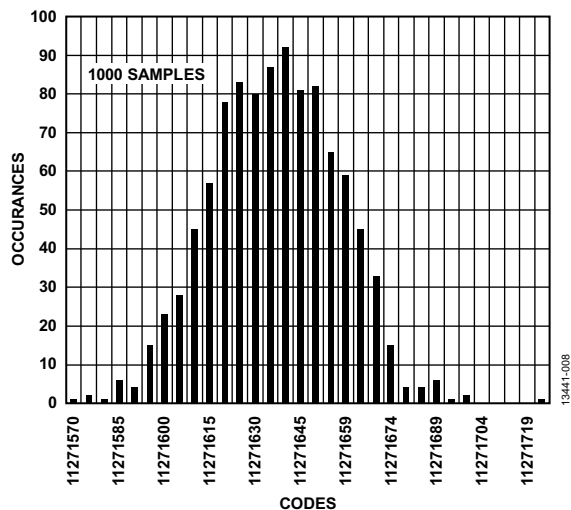


图8. 室温、后置滤波器、低功耗模式、25 SPS时的RTD码直方图

RTD的温度从-50°C扫描到+200°C。对于每个设定的RTD温度，按照上述方法利用AD7124-4/AD7124-8测量RTD上的相应电压。然后将此电压转换为电阻，按照“4线RTD配置”部分所述进行线性化并转换为温度。图9显示了设定温度与线性化后RTD实测温度之间的误差。对于每个RTD温度设置，AD7124-4/AD7124-8保持25°C。如图9所示，RTD实测温度的误差在Pt100 B类RTD的误差窗口内。图9还显示了RTD误差在不同AD7124-4/AD7124-8温度设置下的偏差。对于AD7124-4/AD7124-8的每个温度设置，执行内部零电平校准和满量程校准。如图9所示，对于AD7124-4/AD7124-8的所有温度设置，RTD误差在B类RTD的预期误差范围内。

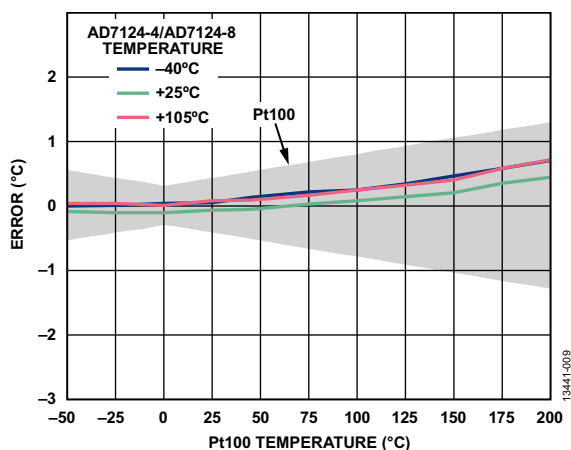


图9. 温度精度测量(后置滤波器、低功耗模式、25 SPS)

图10显示了在25°C执行一次性内部零电平和满量程校准后的RTD实测温度误差。从图中可看出，在25°C执行一次性校准与在各温度设置执行校准，AD7124-4/AD7124-8表现出相似的性能。

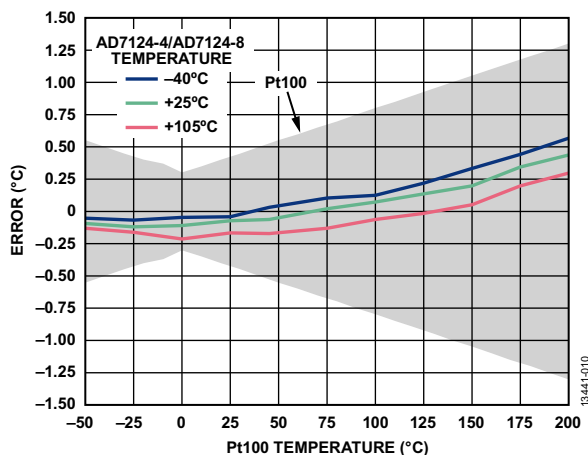


图10. 温度精度测量(后置滤波器、低功耗模式、25 SPS, 仅执行25°C一次性校准)

## 常见变化

### 多个4线RTD

AD7124-4/AD7124-8可用作多个4线RTD的测量系统。AD7124-4可连接2个4线RTD，AD7124-8最多可连接5个4线RTD。所有RTD可使用同一基准输入，一个电流源可激励所有RTD。当需要进行RTD温度测量时，电流依次流向各RTD的顶端。利用AD7124-4/AD7124-8上的交叉多路复用器可单独配置多个通道，各通道可配置为不同的设置。

测量RTD电压需要进行如下设置：

1. 将外部基准电压设置为REFIN1±。
2. 使能要测量的RTD的IOUT0电流。
3. 使能输入端连接有RTD的模拟输入通道。

图11显示了一个例子，2个4线RTD连接到AD7124-4。一个4线RTD连接在AIN2和AIN3模拟输入引脚上(通道0配置)，激励电流来自AIN0；另一个4线RTD连接在AIN6和AIN7模拟输入引脚上(通道1配置)，AIN1用于提供激励电流。然后按照下述步骤依次对每个RTD执行温度测量：

1. IOUT0流向AIN0。测量通道0(AIN2、AIN3)上的电压；因此，必须使能通道0。对于此测量，禁用所有其它通道。
2. 禁用通道0，使能通道1，将IOUT0电流导向AIN1。然后测量通道1(AIN6、AIN7)上的电压。

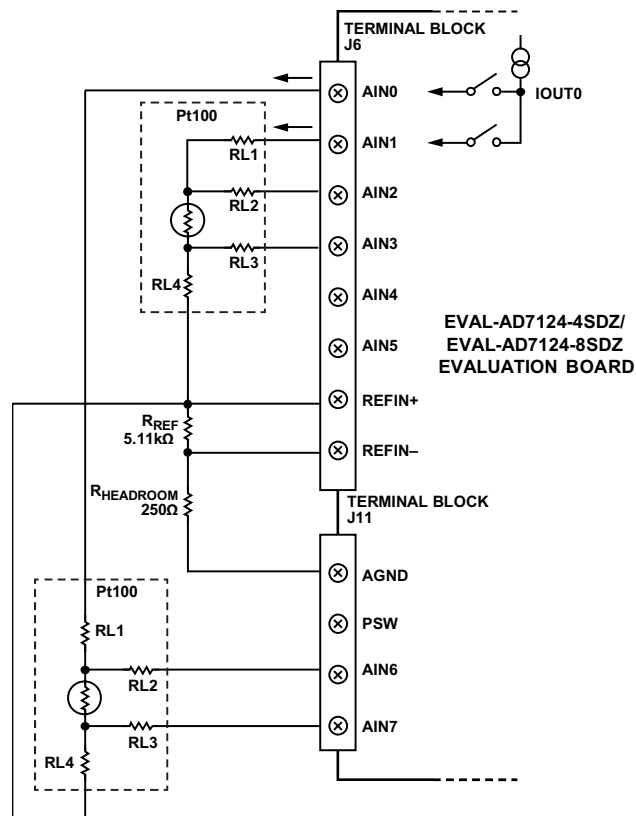


图11. 使用2个4线RTD的AD7124-4 4线RTD配置

对图11所示4线RTD配置的性能进行了评估，确保连接多个RTD时实现了预期性能。对于此测量，两个4线RTD的温度均从-50°C扫描到+200°C。对于每个温度设置，记录各RTD上的电压。图12显示了各RTD的误差。如结果所示，将同一电流从通道0切换到通道1对建立性能无影响，两个RTD均在B类RTD的预期误差窗口内。

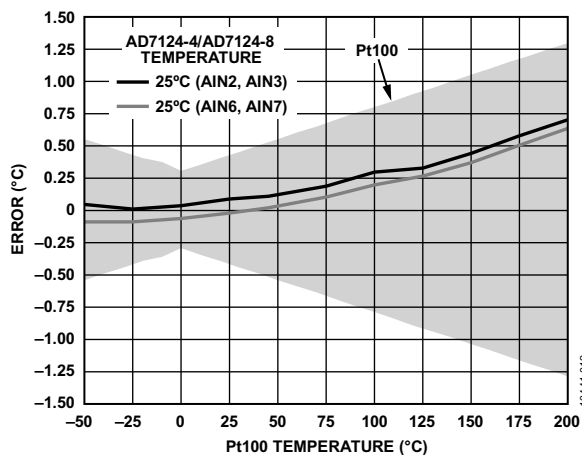


图12. 两种不同RTD测量配置下记录的RTD温度误差



## 电路评估与测试

### 设备要求

4线RTD测量系统需要如下设备：

- EVAL-AD7124-4SDZ或EVAL-AD7124-8SDZ评估板
- EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台(SDP)
- AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件
- 电源：7 V或9 V壁式电源适配器
- B类Pt100 4线RTD
- 运行Windows® XP (SP2)、Windows Vista或Windows 7(32位或64位)的PC

### 软件安装

AD7124-4/AD7124-8和SDP板的完整软件用户指南参见EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ用户指南和SDP用户指南。

软件需要与硬件接口。此软件可从<ftp://ftp.analog.com/pub/evalcd/AD7124>下载。如果安装文件未自动运行，请双击setup.exe文件。请先安装评估软件，再将评估板和SDP板连接到PC的USB端口，确保PC能够正确识别评估系统。

完成评估软件安装后，将EVAL-SDP-CB1Z(通过连接器B)连接到EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ，然后利用附送的电缆将EVAL-SDP-CB1Z连接到PC的USB端口。检测到评估系统后，确认出现的所有对话框，完成安装。

### 设置与测试

图13所示为测试设置的功能框图。

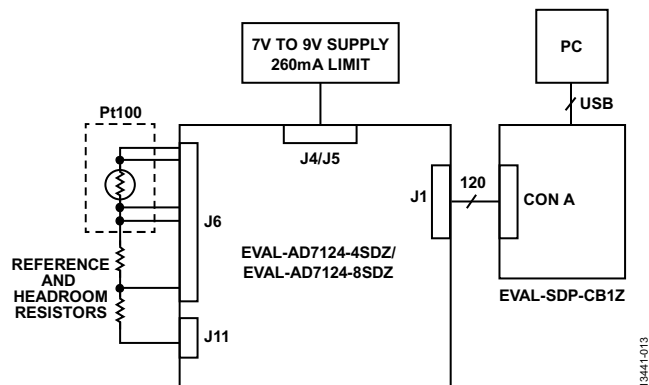


图13. 测试设置功能框图

测试该电路需要EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ评估板。此外还需要下列传感器和电阻以确保电路正常工作：

- B类4线Pt100 RTD
- 5.11 k $\Omega$ 精密电阻
- 缓冲器裕量所需的250  $\Omega$ 电阻

### 配置硬件

按照下述步骤配置硬件：

1. 将EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ评估板上的所有链接设为默认位置，如EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ用户指南所述。
2. 利用连接到J5的7 V或9 V电源为评估板上电。
3. 连接RTD、精密基准电阻和裕量电阻，如图14所示。

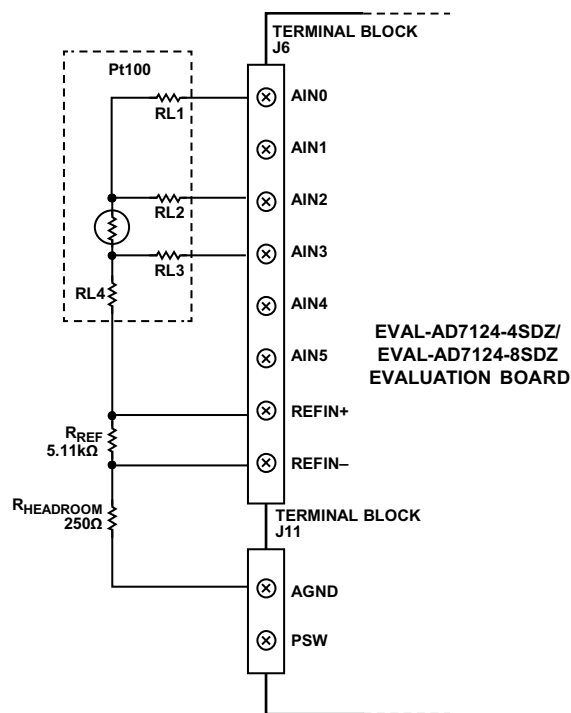


图14. 用于四线式RTD测量的EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ评估板连接器

运行AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件，随即出现图15所示的窗口。

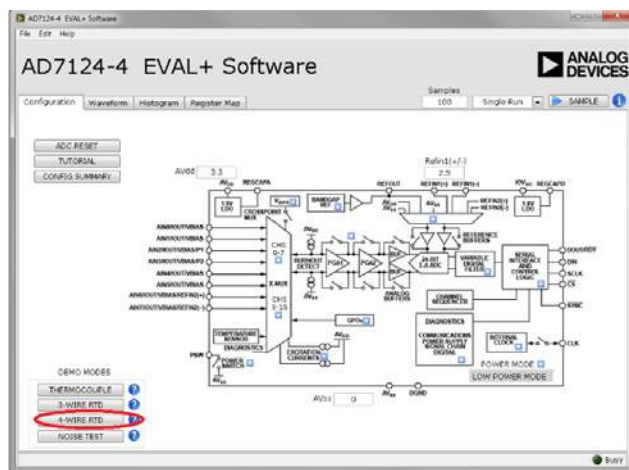


图15. AD7124-4 EVAL+软件窗口

为了配置AD7124-4/AD7124-8进行4线RTD测量，单击4-WIRE RTD(4线RTD)演示模式按钮(参见图15)。单击4-WIRE RTD(4线RTD)按钮以配置ADC软件，如下所示：

- Channel\_0
  - AINP\_0 = AIN2
  - AINM\_0 = AIN3
  - Setup0
  - Enabled = TRUE
- Setup\_0
  - PGA\_0 = 16
  - AIN\_BUFP、AIN\_BUFM均为ENABLED
  - BIPOLAR = ENABLED
  - FS\_0 = 384
  - FILTER\_MODE\_0 = SINC4
- ADC\_Control
  - MODE = Continuous Conversion
  - POWER\_MODE = FULL
- IO\_CONTROL\_1
  - IOUT0 Channel Enable = AIN1
  - IOUT0 Select = 500  $\mu$ A

AD7124-4/AD7124-8的内部满量程和零电平校准。将AD7124-4/AD7124-8配置为4线RTD测量之前，还需要一项额外的设置：此校准可通过Register Map(寄存器映射)选项卡执行，如图16所示。

1. 单击ADC\_Control寄存器。
2. 选择Low Power(低功耗)模式。
3. 执行内部满量程校准。
  - a. 单击ADC控制寄存器的Mode(模式)位域。
  - b. 在Mode位域中，选择内部满量程校准选项。
  - c. 单击寄存器树中的Gain0寄存器，检查校准是否已执行，并且系数是否改变。
4. 执行内部零电平校准。
  - a. 单击ADC控制寄存器的Mode(模式)位域。
  - b. 在Mode位域中，选择内部零电平校准选项。
  - c. 单击寄存器树中的Offset0寄存器，检查校准是否已执行，并且系数是否改变。
5. 校准完成后，将功耗模式改变为所需的工作模式，并从ADC\_Control寄存器的Mode位域下拉框选择Continuous(连续)，以确保将ADC设置为连续转换模式。

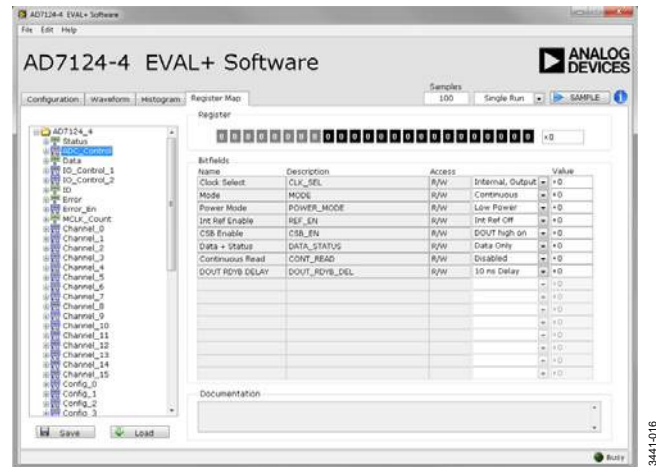


图16. 寄存器映射内部满量程和零电平校准

现在，评估板和器件已完成4线RTD测量配置。单击SAMPLE(采样)以启动AD7124-4/AD7124-8采样。Waveform(波形)和Histogram(直方图)选项卡显示从AD7124-4/AD7124-8采集到的数据。

**更多资料**

CN-0381设计支持包:

[www.analog.com/CN0381-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0381-DesignSupport)

EVAL-AD7124-4用户指南(UG-855)

EVAL-AD7124-8用户指南(UG-856)

SDP用户指南

Walt Kester, 《传感器信号调理》第7章“温度传感器”,  
Analog Devices, 1999年

Mary McCarthy, 应用笔记AN-615, 峰峰值分辨率与有效分辨率,  
Analog Devices

Donal McNamara, 应用笔记AN-892, 温度测量原理及实用技术,  
Analog Devices

MT-031指南, 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团,  
Analog Devices

MT-101指南, 去耦技术, Analog Devices

电路笔记CN-0376, 适合PLC/DCS应用的通道间隔离温度输入(热电偶/RTD),  
Analog Devices

电路笔记CN-0382, 超低功耗工业温度和压力、4 mA至20 mA/HART变送器,  
Analog Devices

电路笔记CN-0383, 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的全集成式3线RTD测量系统,  
Analog Devices

电路笔记CN-0384, 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的全集成式热电偶测量系统,  
Analog Devices

**数据手册和评估板**

[EVAL-AD7124-4SDZ](#)

[EVAL-AD7124-8SDZ](#)

[系统演示平台\(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

[AD7124-4数据手册](#)

[AD7124-8数据手册](#)

[ADP1720数据手册](#)

**修订历史**

**2015年7月—修订版0: 初始版**

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN13341sc-0-7/15(0)

**ANALOG  
DEVICES**

[www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)

**Circuits  
from the Lab®**  
Reference Designs

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0383](http://www.analog.com/cn/CN0383)。

**连接/参考器件**
**AD7124-4/  
AD7124-8**

集成 PGA 和基准电压源的 4 通道/  
8 通道、低噪声、低功耗 24 位  
 $\Sigma$ - $\Delta$  型 ADC

**ADP1720**

50 mA、高压、微功耗线性稳压器

## 采用低功耗、精密、24 位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型 ADC 的全集成式 3 线 RTD 测量系统

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

**AD7124-4 评估板 (EVAL-AD7124-4SDZ) 或 AD7124-8 评估板 (EVAL-AD7124-8SDZ)**

**系统演示平台 (EVAL-SDP-CB1Z)**

#### 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 所示电路是一个集成的 3 线式电阻温度检测器 (RTD) 系统，基于 AD7124-4/AD7124-8 低功耗、低噪声、24 位  $\Sigma$ - $\Delta$  型模数转换器 (ADC)，针对高精度测量应用而优化。采用两点校准和线性化，在  $-50^{\circ}\text{C}$  至  $+200^{\circ}\text{C}$  的温度范围内，3 线系统的整体精度优于  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。在全功率模式、选择  $\text{sinc}^4$  滤波器、输出数据速率为 50 SPS 的条件下，系统的典型无噪声码分辨率为 17.9 位；在低功耗模式、选择后置滤波器、输出数据速率为 25 SPS 的条件下，系统的典型无噪声码分辨率为 16.8 位。

AD7124-4 可配置为 4 个差分或 7 个伪差分输入通道，而 AD7124-8 可配置为 8 个差分或 15 个伪差分输入通道。片内可编程增益阵列 (PGA) 确保 ADC 中可直接输入小信号。

AD7124-4/AD7124-8 提供最高的信号链集成度，其中包括可编程低漂移激励电流源。片内集成了 RTD 测量系统需要的大部分构建模块，因而能够大大简化 RTD 系统设计。

AD7124-4/AD7124-8 允许用户灵活地使用三种集成功耗模式中的一种，电流消耗、输出数据速率范围和均方根噪声与所选的功耗模式相对应。低功耗模式下，AD7124-4/AD7124-8 的功耗仅  $255\ \mu\text{A}$ ，全功率模式下为  $930\ \mu\text{A}$ 。这些功耗选项使得该器件既适合功耗不重要的应用，如输入/输出模块，也适合低功耗应用，如环路供电智能变送器 (整个变送器的功耗必须低于  $4\ \text{mA}$ )。

该器件还具有关断选项。在关断模式下，整个 ADC 及其辅助功能均关断，器件的典型功耗降至  $1\ \mu\text{A}$ 。AD7124-4/AD7124-8 还集成了丰富的诊断功能，作为全面特性组合的一部分。

**Rev. 0**

Circuits from the Lab reference designs 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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

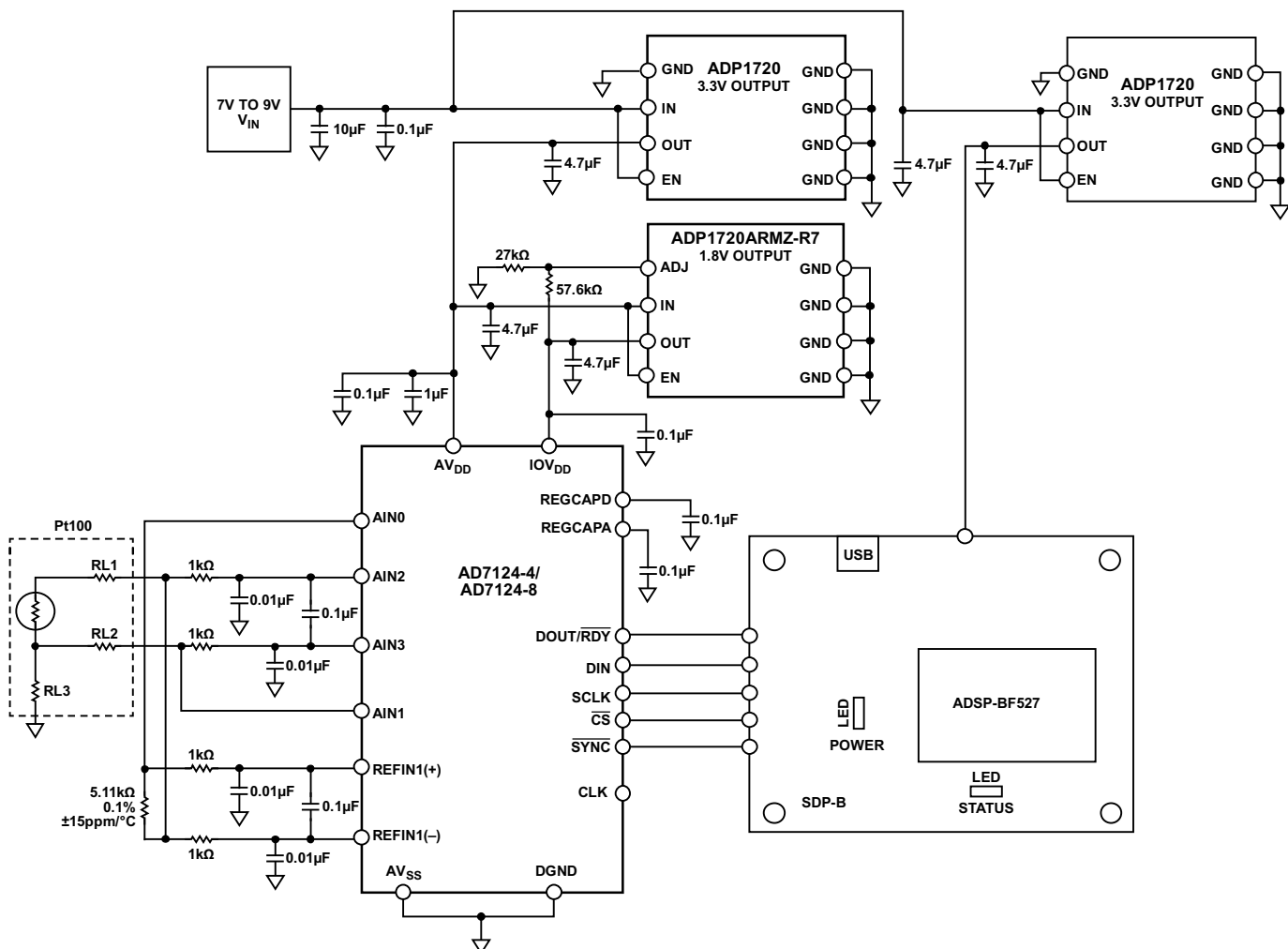


图1. 3线RTD测量配置

## 电路描述

### RTD温度测量简介

RTD是工业应用中温度测量常用的传感器。RTD由纯金属（如铂、镍或铜）制成，其电阻随温度的变化是可预测的。最常用的RTD是铂Pt100和Pt1000。与其它类型的温度传感器相比，RTD具有高精度和良好的稳定性。长导线的电阻可利用3线连接来补偿。

为了精确测定电阻，须利用一个恒定电流源在RTD上产生一个电压。AD7124-4/AD7124-8提供两个这样的激励电流源，可通过寄存器编程将其设置为50  $\mu$ A到1 mA的值。将测量值折合为精密参考电阻两端的电压（由同一个电流驱动），即可轻易消除电流源中的误差，从而产生比例测量结果。

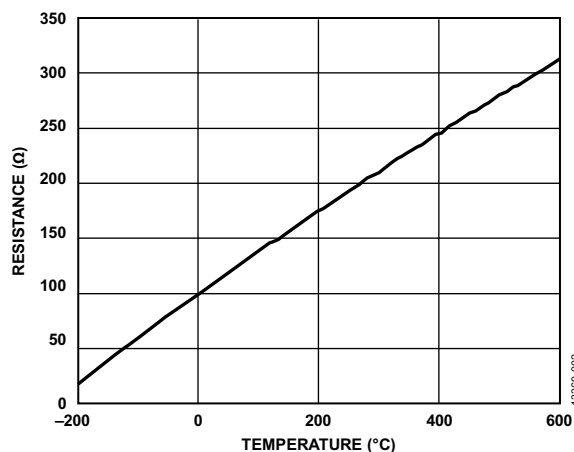


图2. RTD电阻与温度的关系

图1所示电路使用B类Pt100 RTD传感器。Pt100 RTD的温度测量范围是-200°C至+600°C。B类RTD在0°C时的电阻典型值为100  $\Omega$ ，典型温度系数约为0.385  $\Omega/^\circ\text{C}$ （参见图2）。利用此信息，根据所选的电流源很容易计算出Pt100 RTD两端产生的电压。



## 电路工作原理

AD7124-4/AD7124-8提供集成式RTD测量解决方案,可实现高分辨率、低非线性度误差和低噪声性能,以及极高的50 Hz/60 Hz抑制能力。AD7124-4/AD7124-8片内集成低噪声PGA,可放大RTD的小信号,增益编程范围为1到128,因而可以直接与传感器接口。增益级具有高输入阻抗,输入漏电流在全功率模式下不超过3.3 nA,在低功耗模式下为1 nA(典型值)。下面说明构成3线RTD温度测量系统的不同元件。

## 电源

AD7124-4/AD7124-8具有单独的模拟电源和数字电源。数字电源IOV<sub>DD</sub>独立于模拟电源,可以为1.65 V至3.6 V范围内的值(以DGND为基准)。模拟电源AV<sub>DD</sub>以AV<sub>SS</sub>为基准,范围是2.7 V到3.6 V(中低功率模式)或2.9 V至3.6 V(全功率模式)。图1所示电路采用单电源供电,因此AV<sub>SS</sub>与DGND相连,仅使用一个接地层。AV<sub>DD</sub>和IOV<sub>DD</sub>电压利用稳压器ADP1720分别产生。AV<sub>DD</sub>电压设置为3.3 V,IOV<sub>DD</sub>电压设置为1.8 V,采用ADP1720稳压器。使用单独的稳压器可确保噪声最低。

## 串行外设接口(SPI)

与AD7124-4/AD7124-8的SPI通信由EVAL-SDP-CB1Z板上的Blackfin® ADSP-BF527处理,如图1所示。为了访问AD7124-4/AD7124-8的寄存器,使用AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件。图3显示了该软件的主窗口。单击3-WIRE RTD(3线RTD)按钮以配置软件用于3线RTD测量。

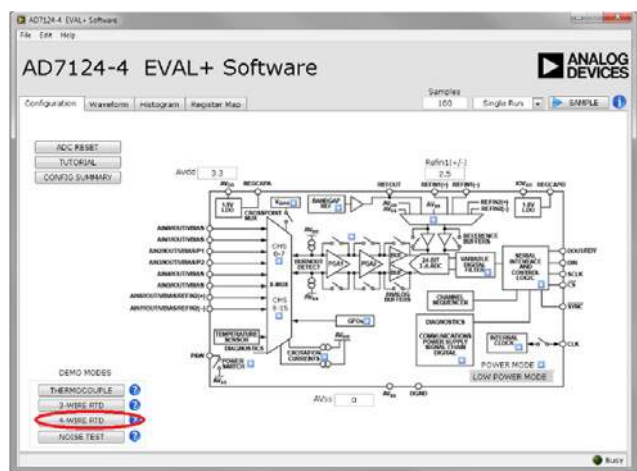


图3. AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件配置窗口

AD7124-4/AD7124-8的片内诊断功能可用来检测SPI通信故障。这些诊断包括检查SPI读写操作,确保仅访问有效寄存器。SCLK计数器确保使用正确数量的SCLK脉冲,而CRC功能检查传输期间位值有无变化。当任一SPI通信诊断功能

使能且发生相关的错误时,错误寄存器中的对应标志就会置1。所有使能的标志进行或运算,以控制状态寄存器的ERR标志位。该功能在将状态位附加到ADC转换结果时特别有用。

## 模拟输入和基准电压源

AD7124-4可配置为4个差分或7个伪差分通道,而AD7124-8可配置为8个差分或15个伪差分通道。

AD7124-4/AD7124-8的片内诊断功能可用来检查模拟引脚上的电平是否在额定工作范围以内。正(AINP)和负(AINM)模拟输入可以单独检查是否发生过压和欠压,以及ADC是否饱和。当模拟输入上的电压超过AV<sub>DD</sub>时,过压标志就会置1;当模拟输入上的电压低于AV<sub>SS</sub>时,欠压标志就会置1。

图1所示电路利用4个模拟引脚实现3线测量: AIN0、AIN1、AIN2和AIN3。AIN2和AIN3配置为全差分输入通道,用于检测Pt100上的电压。用于激励RTD的激励电流源由AV<sub>DD</sub>产生,并流向AIN0。一个相同的电流流向AIN1,并流经RL2引线电阻,从而产生一个电压,其抵消RL1引线电阻上的压降。图4详细显示了模拟引脚及其配置。

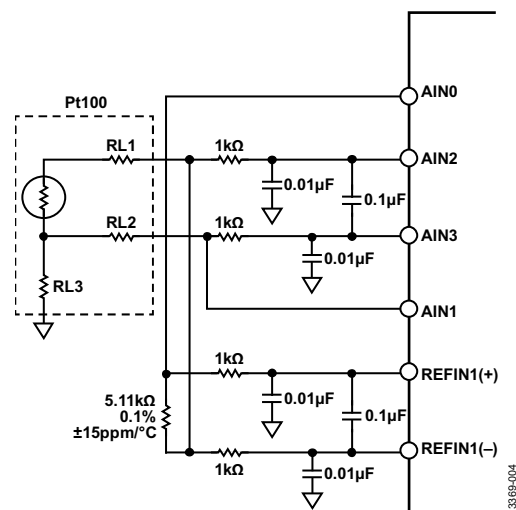


图4. 3线RTD测量的模拟输入

PGA使能时,模拟输入缓冲器自动使能。PGA允许输入引脚上的电压低至AV<sub>SS</sub>,因此,模拟输入引脚不需要裕量电阻。基准电压缓冲器也使能。这些缓冲器需要裕量。基准电阻位于高端,其裕量要求得到满足,因而不需要其它裕量电阻。

对于图1所示电路，所用的基准输入为REFIN1(±)。流经Pt100的电流也会流过精密基准电阻，产生基准电压。此精密基准电阻上产生的电压与Pt100上的电压成比例，因此，激励电流波动所引起的误差会被消除。

### 数字和模拟滤波

差分滤波器(截止频率约为800 Hz)和共模滤波器(截止频率约为16 kHz)在模拟输入端和基准输入端实现。为了抑制调制器频率及其倍数处的干扰，必须使用这种滤波。

AD7124-4/AD7124-8在片内数字滤波方面拥有很大的灵活性。有多种滤波器选项可用，所选的滤波器会影响输出数据速率、建立时间和50 Hz/60 Hz抑制性能。对于此电路笔记，电路实现了sinc<sup>4</sup>滤波器和后置滤波器。之所以使用sinc<sup>4</sup>滤波器，是因为它在整个输出数据速率范围内具有出色的噪声性能，另外还有出色的50 Hz/60 Hz抑制性能。后置滤波器用于提供50 Hz和60 Hz同时抑制，建立时间为40 ms。

### 校准

AD7124-4/AD7124-8提供不同的校准模式，通过校准可消除失调和增益误差。对于本电路笔记，电路使用了内部零电平校准和内部满量程校准。注意，这些校准只能消除ADC增益和失调误差，而不能消除外部电路引起的增益和失调误差。

### 3线RTD配置

图1所示电路使用AD7124-4/AD7124-8进行精密3线RTD测量。3线RTD测量需要两个精密激励电流源，以便轻松消除RL1和RL2产生的引线电阻误差。注意，RL3引线电阻不会影响测量精度。对于图1所示3线RTD配置，基准电阻放在RTD的高端。对于此设置，一个激励电流流经基准电阻和RTD；另一个电流流经引线电阻RL2，其产生的电压抵消RL1上的压降。由于仅利用一个激励电流来产生基准电压REFIN1±和RTD上的电压，因此，该电流源的精度、失配和失配漂移对ADC传递函数的影响极小。

激励电流在Pt100 RTD上产生一个低电平电压。此低电平电压由AD7124-4/AD7124-8的片上PGA放大，然后通过24位Σ-Δ ADC转换为精密数字信号。对于此3线RTD配置，两个激励电流均设置为500 μA。对于最高600°C的RTD温度，采用500 μA激励电流时，RTD上产生的电压约为156.85 mV。

为确保使用AD7124-4/AD7124-8的最大范围，PGA增益设置为16，其将RTD传感器最大输出电压放大到2.5096 V。为确保此3线电路实现真正的比率式配置，ADC的基准电压利用外部精密电阻产生，所用的激励电流与Pt100情况相同。使用这种配置意味着，激励电流值的任何波动都会反映在Pt100和基准电阻上，因而不会改变系统的精度。

使用500 μA激励电流和ADC的放大电压，基准电阻值为：

$$V_{RTD\ MAX}/I_{EXC} = 2.51\ V/500\ \mu A = 5020\ \Omega$$

因此，选择5.11 kΩ电阻，其产生的基准电压为：

$$V_{REF} = R_{REF} \times I_{EXC} = 5.11\ k\Omega \times 500\ \mu A = 2.555\ V$$

利用AD7124-4/AD7124-8进行3线RTD测量时，还必须考虑激励电流源的输出顺从电压。输出顺从电压取决于所选的激励电流。本电路选择500 μA，其输出顺从电压为AV<sub>DD</sub> - 0.37 V。本电路的AV<sub>DD</sub>电源电压为3.3 V，因此，激励电流源的输出顺从电压必须低于2.93 V。从上述计算可知，电路满足这一要求，因为AIN0引脚的最大电压等于精密基准电阻上的电压加上RTD上的电压：

$$V_{REF} + V_{RTD} = 2.555\ V + 156.85\ mV = 2.71185\ V$$

针对3线RTD测量的AD7124-4/AD7124-8配置如下：

- 差分输入：AINP = AIN2，AINM = AIN3
- 激励电流：IOUT0 = AIN0 = 500 μA
- 激励电流：IOUT1 = AIN1 = 500 μA
- 增益 = 16
- 5.11 kΩ精密基准电阻
- 数字滤波(sinc<sup>4</sup>和后置滤波器)

当ADC工作在双极性模式时，计算RTD电阻(R)的通用表达式如下所示：

$$R_{RTD} = \frac{(CODE - 2^{N-1}) \times R_{REF}}{G \times 2^{N-1}} \quad (1)$$

其中：

CODE为ADC码。

N为ADC的分辨率(本电路为24)。

R<sub>REF</sub>为基准电阻。

G为所选增益。

根据B类RTD的规格，电阻变化约为0.385 Ω/°C。可利用此关系快速获得RTD的近似温度。由于RTD的温度系数在整

个温度范围内略有变化，因此上述方法不够精确，但可以利用它来快速检查温度。

使用公式2计算近似温度，RTD电阻在0°C时为100 Ω。

$$\text{Temperature } (^{\circ}\text{C}) = \frac{R_{RTD} - 100}{0.385} \quad (2)$$

RTD传递函数即所谓Callender-Van Dusen公式，它由两个不同的多项式公式组成。公式3用于0°C以上的温度，公式4用于0°C以下的温度。

温度 $t \leq 0^{\circ}\text{C}$ 时，公式为：

$$R_{RTD}(t) = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100^{\circ}\text{C})t^3] \quad (3)$$

温度 $t \geq 0^{\circ}\text{C}$ 时，公式为：

$$R_{RTD}(t) = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (4)$$

其中：

$t$ 为RTD温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

$R_{RTD}(t)$ 为RTD在温度( $t$ )时的电阻( $\Omega$ )。

$R_0$ 为0°C时的RTD电阻(本例中 $R_0 = 100 \Omega$ )。

$A = 3.9083 \times 10^{-3}$ 。

$B = -5.775 \times 10^{-7}$ 。

$C = -4.23225 \times 10^{-12}$ 。

结合公式3和公式4给出的传递函数，有多种方法可以确定作为RTD电阻函数的温度值。本电路笔记选择直接数学方法，因为其精度高。根据公式3可得出以下温度计算公式：

$$T_{RTD} (^{\circ}\text{C}) = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B\left(1 - \frac{r}{R_0}\right)}}{2B} \quad (5)$$

其中 $r$ 为RTD电阻，其它变量的定义如上所述。

此方法能够很好地处理大于或等于0°C的温度。计算0°C以下的RTD温度需要使用最佳拟合多项式表达式。本电路笔记使用的多项式为五阶多项式，如公式6所示。

$$T_{RTD} (^{\circ}\text{C}) = -242.02 + 2.2228 \times r + (2.5859 \times 10^{-3})r^2 - (48260 \times 10^{-6})r^3 - (2.8183 \times 10^{-3})r^4 + (1.5243 \times 10^{-10})r^5 \quad (6)$$

举例来说，温度设置为25°C时，若从AD7124-4/AD7124-8读出的代码为11270065，则利用公式1将其转换为电阻值：

$$R_{RTD} = \frac{(11270065 - 2^{23}) \times R_{REF}}{G \times 2^{23}} = 109.704 \Omega$$

利用公式5进行线性化，得出温度为24.921°C。

再举一例，温度设置为-25°C时，若从AD7124-4/AD7124-8

读出的代码为10757779，则将其转换为电阻值：

$$R_{RTD} = \frac{(10757779 - 2^{23}) \times R_{REF}}{G \times 2^{23}} = 90.200 \Omega$$

利用公式6进行线性化，得出温度为-24.982°C。

### 3线RTD测量和结果

对于图1所示电路，我们采集了AD7124-4/AD7124-8在不同数字滤波器和功耗模式配置下获得的数据，sinc<sup>4</sup>滤波器用于全功率模式，后置滤波器用于低功耗模式。

若选择sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式和50 SPS输出数据速率的配置，则AD7124-4/AD7124-8可以最佳的速度和噪声性能工作。图5显示了室温下3线RTD按图1所示连接时的噪声分布。对应的均方根噪声典型值为199.37 nV rms，相当于约17.9位无噪声分辨率。选择相同的滤波器、增益和输出数据速率，但输入短路时，AD7124-4/AD7124-8的噪声性能典型值为100 nV rms，相当于18.7位无噪声分辨率。噪声的增加直接来自输入通道(AIN2、AIN3)上连接的RTD。

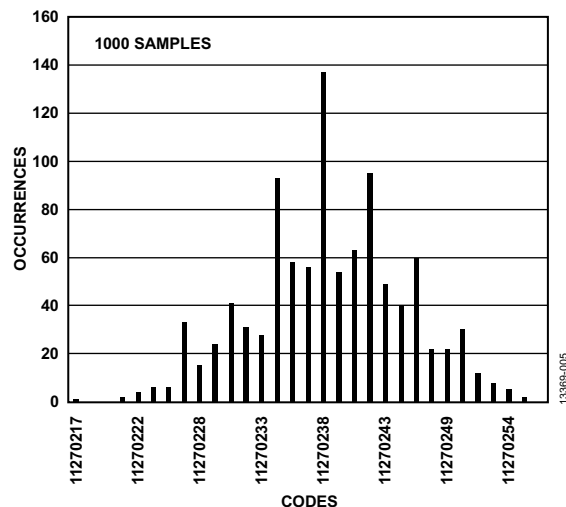


图5. 室温、Sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式、50 SPS时的RTD码直方图

对于选择sinc<sup>4</sup>滤波器和全功率模式的3线RTD配置，将RTD温度从-50°C扫描至+200°C。对于每个温度，按照上述方法利用AD7124-4/AD7124-8测量RTD上的相应电压。然后将此电压转换为电阻，按照“3线RTD配置”部分所述进行线性化并转换为温度。图6显示了设定温度与线性化后RTD实测系统温度之间的误差。对于每个RTD温度设置，AD7124-4/AD7124-8保持25°C。如图6所示，RTD实测温度的误差在Pt100 B类RTD的误差窗口内。图6还显示了RTD误

差在不同AD7124-4/AD7124-8温度设置下的偏差。对于AD7124-4/AD7124-8的每个温度设置，执行内部零电平校准和满量程校准。如图6所示，对于AD7124-4/AD7124-8的所有温度设置，RTD误差在B类RTD的预期误差范围内。

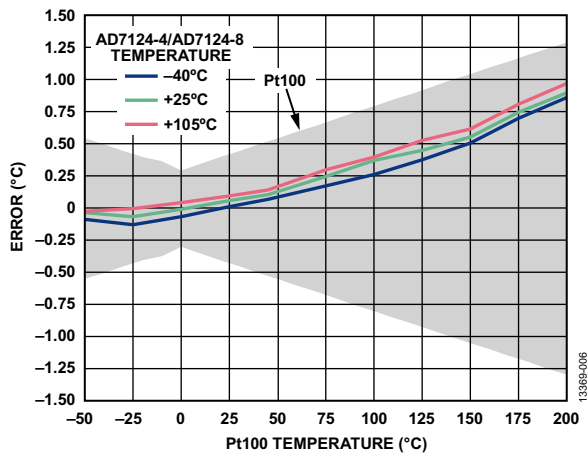


图6. 温度精度测量(Sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式、50 SPS)

图7显示了在25°C执行一次性内部零电平和满量程校准后的RTD实测温度误差。该图显示，在25°C执行一次性校准与在各温度设置执行校准，AD7124-4/AD7124-8表现出相似的性能。

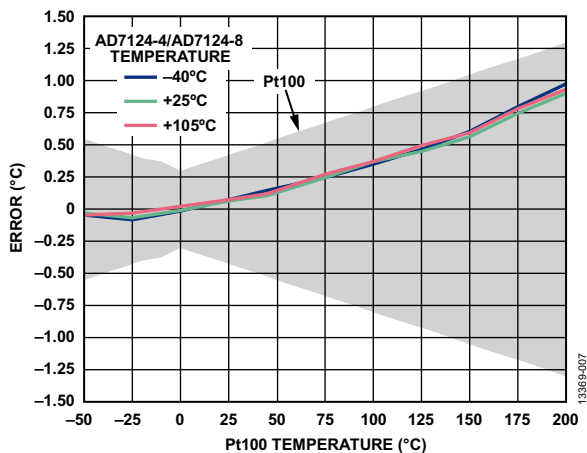


图7. 温度精度测量(Sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式、50 SPS, 仅执行25°C一次性校准)

测试的第二种AD7124-4/AD7124-8配置是低功耗模式，选择后置滤波器和25 SPS输出数据速率。25 SPS滤波器提供50 Hz和60 Hz同时抑制，并且允许用户用建立时间换取电源抑制性能。图8显示了室温下3线RTD按图1所示连接时的噪声分布。对应的均方根噪声典型值为774 nV rms，相当于约16.8位无噪声分辨率。使用相同的滤波器、增益、功耗模式和输出数据速率，但输入短路时，AD7124-4/AD7124-8的噪声性能典型值为360 nV rms，相当于17.3位无噪声分辨

率。两次测量的噪声增加直接来自输入通道(AIN2、AIN3)上的RTD连接。

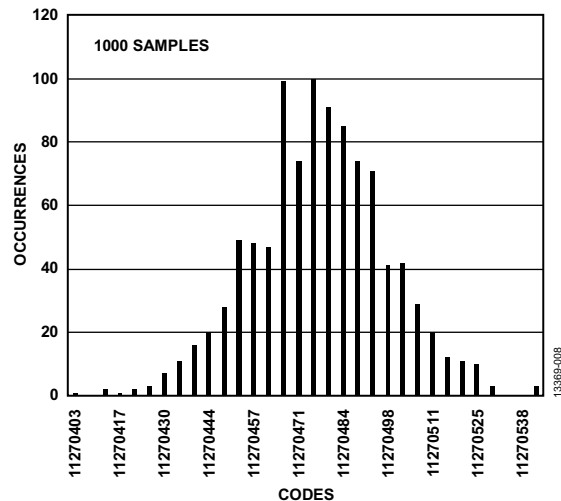


图8. 室温、后置滤波器、低功耗模式、25 SPS时的RTD码直方图

对于选择后置滤波器和低功耗模式的AD7124-4/AD7124-8配置，将RTD温度从-50°C扫描至+200°C。对于每个设定的RTD温度，按照上述方法利用AD7124-4/AD7124-8测量RTD上的相应电压。然后将此电压转换为电阻，按照“3线RTD配置”部分所述进行线性化并转换为温度。图9显示了设定温度与线性化后RTD实测温度之间的误差。对于每个RTD温度设置，AD7124-4/AD7124-8保持25°C。如图9所示，RTD实测温度的误差在Pt100 B类RTD的误差窗口内。图9还显示了RTD误差在不同AD7124-4/AD7124-8温度设置下的偏差。对于AD7124-4/AD7124-8的每个温度设置，执行内部零电平校准和满量程校准。图9显示，对于AD7124-4/AD7124-8的所有温度设置，RTD误差在B类RTD的预期误差范围内。

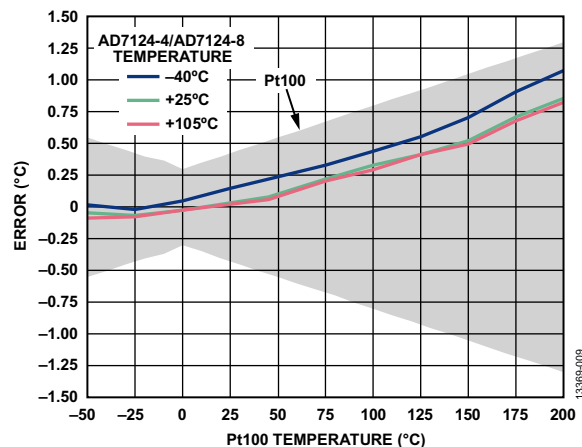


图9. 温度精度测量(后置滤波器、低功耗模式、25 SPS)



图10显示了在25°C执行一次性内部零电平和满量程校准后的RTD实测温度误差。该图显示，在25°C执行一次性校准与在各温度设置执行校准，AD7124-4/AD7124-8表现出相似的性能。

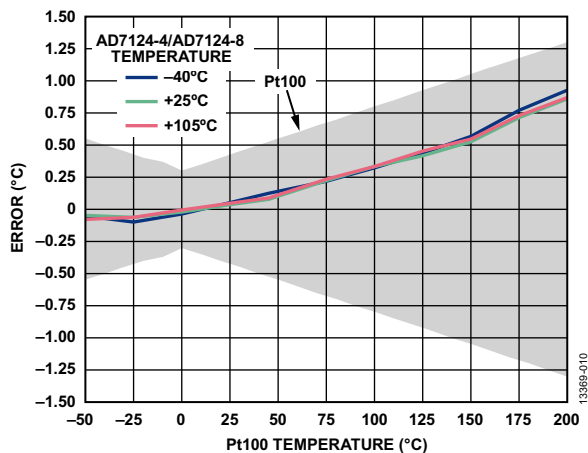


图10. 温度精度测量(后置滤波器、低功耗模式、25 SPS, 仅执行25°C一次性校准)

## 常见变化

### 电流源失配和失配漂移

在图1所示电路中，精密基准电阻放置于高端。高端配置非常适合采用单个RTD的系统。使用多个RTD时，将精密电阻放在低端更好，因为仅需要一个基准电阻。基准电阻放在低端时，需要更高的激励电流匹配度。有两种技术可以用来降低电流失配引起的误差：

- 激励电流斩波
- 通过测量激励电流来校准

### 激励电流斩波

利用AD7124-4/AD7124-8的交叉点多路复用器，很容易实现斩波配置。图11显示3线RTD配置的5.11 kΩ精密基准电阻连接到Pt100 RTD的低端。对于这种配置，必须考虑所用的电流源和增益。IOUT0和IOUT1均设置为250 μA。选择此电流可确保电路符合电流源的输出顺从要求，以及精密电阻上产生的基准电压要求。为确保利用ADC的全部范围，PGA增益设置为32。基准电阻低端需要一个电阻，因为基准电压缓冲器已使用且需要裕量(100 mV)。

为了对电流进行斩波，当IOUT0连接到AIN0且IOUT1连接到AIN1时，对RTD电压进行测量，如图11所示。交换电流后，即IOUT1连接到AIN0，IOUT0连接到AIN1时，再次测量RTD上的电压。然后利用这两次测量的平均值计算RTD

电阻，再利用公式1到公式6计算温度。斩波方法可大大降低激励电流失配和失配漂移的影响。然而，由于需要两次测量，对吞吐速率会有影响。

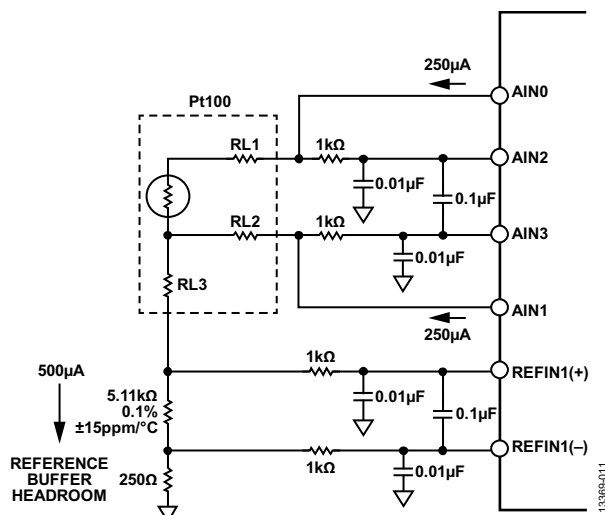


图11. AD7124-4/AD7124-8的3线RTD测量配置，采用电流斩波测量技术

收集采用激励电流斩波方法测得的数据，并记录对应的Pt100温度误差，如图12所示。在AD7124-4/AD7124-8的不同环境温度下，对于所有测量的RTD温度，温度误差都在Pt100 RTD的误差带内。这些结果表明，激励电流斩波所得到的结果可与高端精密基准电阻配置所获得的数据相比拟。

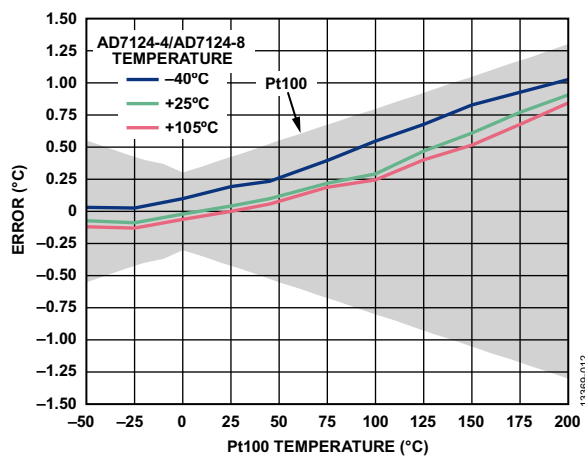


图12. 斩波配置温度精度测量(Sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式、各温度下校准)

### 通过测量激励电流来校准

通过测量激励电流来校准3线系统的配置如图13所示。对于此配置，精密基准电阻连接到RTD的低端。该配置与电流斩波所用的配置相似，两个电流均设为250 μA，PGA增



益设为32，但主要区别在于需要一个附加差分输入通道。该附加输入通道用于测量两个激励电流。测量方法如下：分别使能各激励电流，相对于内部基准电压测量精密基准电阻上的压降。然后根据精密基准电阻值，将测得的电压转换为电流，并计算电流之比，用以校准失配。

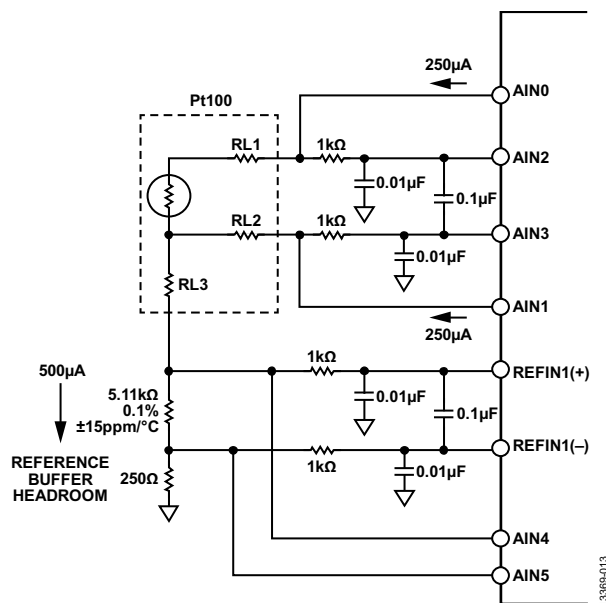


图13. AD7124-4/AD7124-8的3线RTD测量配置，通过测量激励电流来校准

图14显示了RTD测量的校准温度误差。结果表明，RTD误差在RTD的预期误差带内，测量误差接近RTD本身的误差曲线。为确保结果精确，必须定期校准电流。

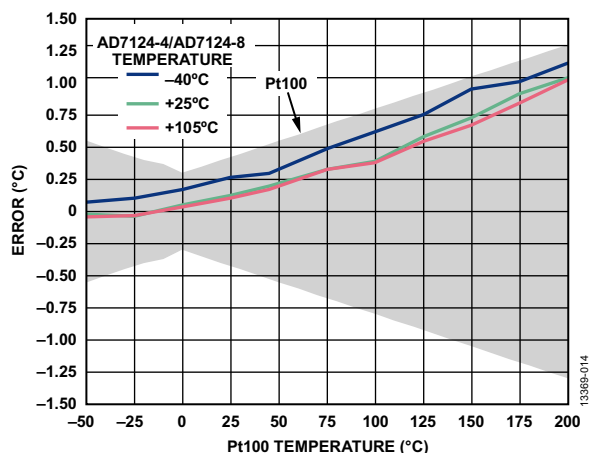


图14. 用于激励电流校准的温度精度测量 (Sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式、各温度下校准)

## 引线电阻补偿

对于3线RTD测量，引线电阻补偿的精度取决于各引线的电阻是否相等(即 $RL1 = RL2$ )。RL3上的压降不影响RTD元件上测得的电压，因此，RL3不会给本电路笔记所述电路的测量带来误差。

24 AWG铜线的标称电阻为每英尺0.026 Ω。50英尺长具有1.3 Ω引线电阻。假设补偿和激励电流完全匹配，10%的引线电阻匹配误差将在RTD测量中产生0.13 Ω误差。RTD温度系数约为0.385 Ω/°C，因此，0.13 Ω引线电阻失配测量误差相当于约 $(0.13 \Omega) \div (0.385 \Omega/^{\circ}\text{C}) = 0.337^{\circ}\text{C}$ 误差。故而，对于精密3线测量，必须精确知道连接电缆的匹配特性。

假设引线电阻完全匹配，激励电流(IOUT0和IOUT1)失配产生的误差与总引线电阻成比例。例如，0.5%的激励电流失配(AD7124-4/AD7124-8的典型规格)将在RTD电阻测量中产生0.5%误差。Pt100 RTD电阻标称温度系数为0.385 Ω/°C，相当于2.6°C/Ω的温度变化。0.5%的电阻测量误差产生的RTD测量误差为 $0.005 \times 2.6^{\circ}\text{C}/\Omega = 0.013^{\circ}\text{C}/\Omega$ 。对于10 Ω的引线电阻(约400英尺24 AWG铜线)，电流失配引起的误差仅为0.13°C。

上面的讨论说明，在大多数实际应用中，引线电阻失配引起的误差远大于0.5%的激励电流失配所致误差。如上所述，激励电流的失配误差可通过斩波模式或测量各激励电流来降至最小。

## 电路评估与测试

### 设备要求

3线RTD测量系统需要如下设备：

- EVAL-AD7124-4SDZ或EVAL-AD7124-8SDZ评估板
- EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台(SDP)
- AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件
- 电源：7 V或9 V壁式电源适配器
- B类Pt100 3线RTD
- 运行Windows® XP (SP2)、Windows Vista或Windows 7(32位或64位)的PC

### 软件安装

AD7124-4/AD7124-8和SDP板的完整软件用户指南参见EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ用户指南和SDP用户指南。

软件需要与硬件接口。此软件可从<ftp://ftp.analog.com/pub/evalcd/AD7124>下载。如果安装文件未自动运行，请双击setup.exe文件。请先安装评估软件，再将评估板和SDP板连接到PC的USB端口，确保PC能够正确识别评估系统。

完成评估软件安装后，将SDP板(通过连接器A)连接到EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ，然后利用附送的电缆将SDP板连接到PC的USB端口。检测到评估系统后，确认出现的所有对话框，完成安装。

### 设置与测试

图15所示为3线RTD配置的测试设置功能框图。

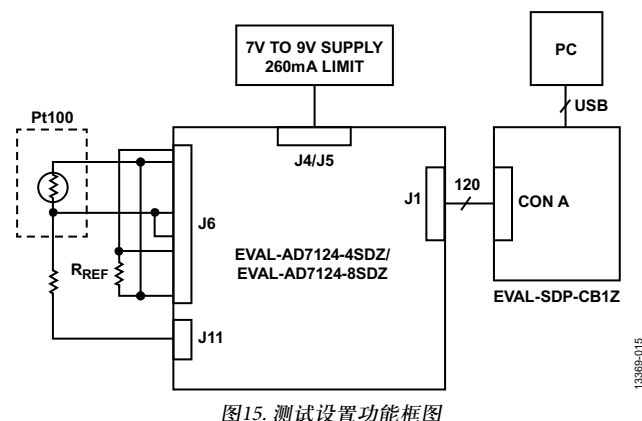


图15. 测试设置功能框图

测试该电路需要EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ评估板。此外还需要下列传感器和电阻以确保电路正常工作：

- B类3线Pt100 RTD
- 5.11 kΩ精密电阻
- 用于缓冲器裕量的250 Ω电阻(本配置不需要，但若在增益为1时使用Pt1000 RTD，则可能需要)

配置硬件，请执行如下步骤：

- 将EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ评估板上的所有链接设为默认位置，如EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ用户指南所述。
- 利用连接到J5的7 V或9 V电源为评估板上电。
- 连接RTD、精密基准电阻和裕量电阻，如图16所示。

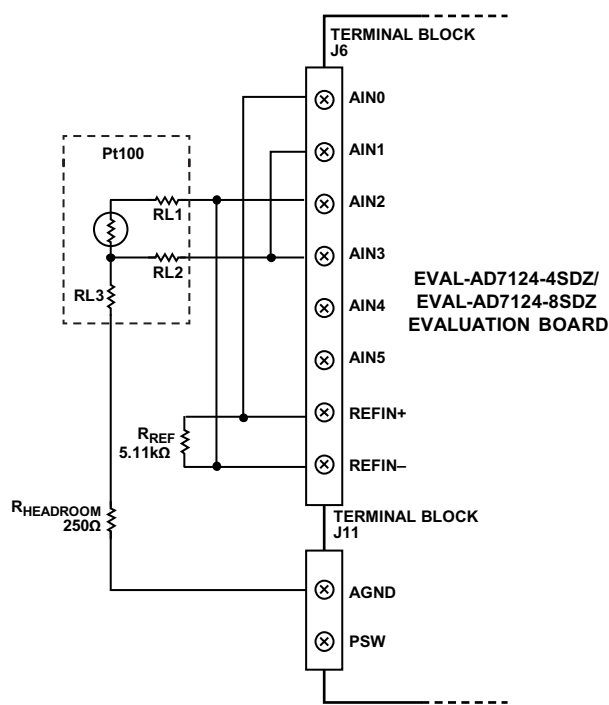


图16. 用于3线RTD测量的EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ评估板

运行AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件。图17所示为软件主窗口的截图。

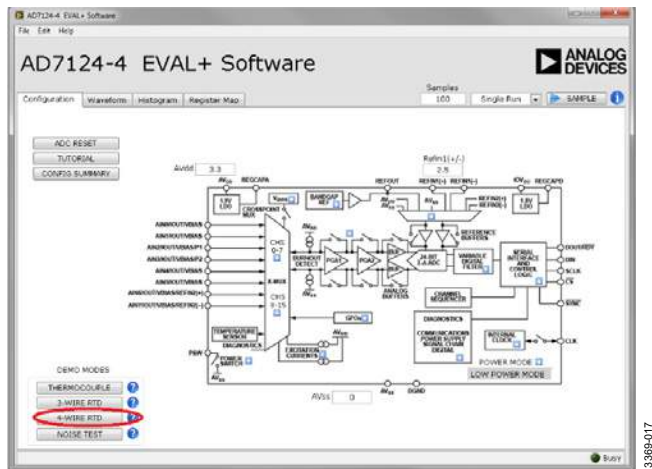


图17. AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件主窗口

为了配置AD7124-4/AD7124-8进行3线RTD测量，单击3-WIRE RTD(3线RTD)演示模式按钮(参见图17)。单击此按钮配置ADC软件以获得最佳性能。一些寄存器设置如下：

1. Channel\_0
  - a. AINP\_0 = AIN2
  - b. AINM\_0 = AIN3
  - c. Setup0
  - d. Enabled = TRUE
2. Setup\_0
  - a. PGA\_0 = 16
  - b. AIN\_BUFPM、AIN\_BUFM均为ENABLED
  - c. BIPOLAR = ENABLED
  - d. FS\_0 = 384
  - e. FILTER\_MODE\_0 = SINC4
3. ADC\_Control
  - a. MODE = Continuous Conversion
  - b. POWER\_MODE = FULL
4. IO\_CONTROL\_1
  - a. IOUT0 Channel Enable = AIN0
  - b. IOUT0 Select = 500  $\mu$ A
  - c. IOUT1 Channel Enable = AIN1
  - d. IOUT1 Select = 500  $\mu$ A

AD7124-4/AD7124-8的内部满量程和零电平校准。将AD7124-4/AD7124-8配置为3线RTD测量之前，还需要一项额外的设置：此校准可通过Register Map(寄存器映射)选项卡执行，如图18所示。

1. 从寄存器树中选择ADC\_Control寄存器。
2. 选择Low Power(低功耗)模式。
3. 执行内部满量程校准。
  - a. 单击ADC控制寄存器的Mode(模式)位域。
  - b. 在Mode位域中，选择内部满量程校准选项。
  - c. 选择寄存器树中的Gain0寄存器，检查校准是否已执行，并且系数是否改变。
4. 执行内部零电平校准。
  - a. 单击ADC控制寄存器的Mode(模式)位域。
  - b. 在Mode位域中，选择内部零电平校准选项。
  - c. 选择寄存器树中的Offset0寄存器，检查校准是否已执行，并且系数是否改变。
5. 校准完成后，将功耗模式改变为所需的工作模式，并从ADC\_Control寄存器的Mode位域下拉框选择Continuous(连续)，以确保将ADC设置为连续转换模式。

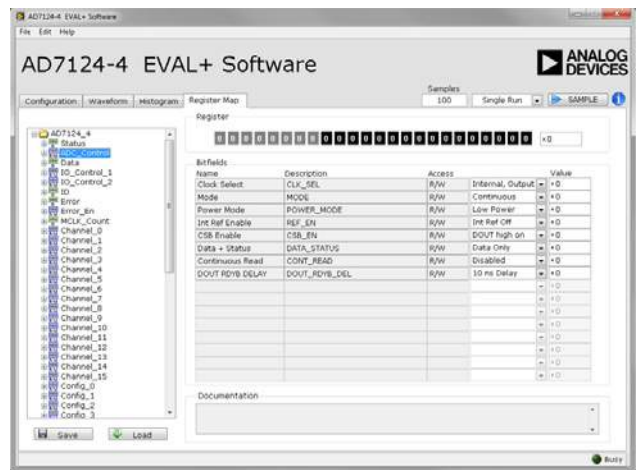


图18. 寄存器映射内部满量程和零电平校准

现在，评估板和器件已完成3线RTD测量配置。单击SAMPLE(采样)以启动AD7124-4/AD7124-8采样。Waveform(波形)和Histogram(直方图)选项卡显示从AD7124-4/AD7124-8采集到的数据。

**更多资料**

CN-0383设计支持包:

[www.analog.com/CN0383-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0383-DesignSupport)

SDP用户指南

EVAL-AD7124-4用户指南(UG-855)

EVAL-AD7124-8用户指南(UG-856)

AN-892应用笔记, 温度测量原理及实用技术, Analog Devices

Walt Kester, 《传感器信号调理》第7章“温度传感器”,  
Analog Devices, 1999年

Mary McCarthy, 应用笔记AN-615, 峰峰值分辨率与有效分  
辨率, Analog Devices

MT-031指南, 实现数据转换器的接地并解开AGND和  
DGND的谜团, Analog Devices

MT-101指南, 去耦技术, Analog Devices

电路笔记CN-0376, 适合PLC/DCS应用的通道间隔离温度  
输入(热电偶/RTD), Analog Devices

电路笔记CN-0381, 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的  
全集成式4线RTD测量系统, Analog Devices

电路笔记CN-0382, 超低功耗工业温度和压力、4 mA至  
20mA/HART变送器, Analog Devices

电路笔记CN-0384, 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的  
全集成式热电偶测量系统, Analog Devices

**数据手册和评估板**

EVAL-AD7124-4SDZ

EVAL-AD7124-8SDZ

系统演示平台(EVAL-SDP-CB1Z)

AD7124-4数据手册

AD7124-8数据手册

ADP1720数据手册

**修订历史**

2015年7月—修订版0: 初始版

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN13369sc-0-7/15(0)



[www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)

**Circuits  
from the Lab<sup>®</sup>**  
Reference Designs

Circuits from the Lab<sup>®</sup> 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0384](http://www.analog.com/cn/CN0384)。

**连接/参考器件**
**AD7124-4/  
AD7124-8**

集成PGA和基准电压源的4通道/  
8通道、低噪声、低功耗24位  
 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC

**ADP1720**

50 mA、高压、微功耗线性稳压器

## 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的全集成式热电偶测量系统

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

**AD7124-4评估板(EVAL-AD7124-4SDZ)或AD7124-8评估板  
(EVAL-AD7124-8SDZ)**

**系统演示平台(EVAL-SDP-CB1Z)**

#### 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所示电路是一个集成的热电偶测量系统，基于AD7124-4/AD7124-8低功耗、低噪声、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型模数转换器(ADC)，针对高精度测量应用而优化。使用该系统的热电偶测量在-50°C至+200°C的测量温度范围内具有 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的整体系统精度。系统的典型无噪声码分辨率约为15位。

AD7124-4可配置为4个差分或7个伪差分输入通道，而AD7124-8可配置为8个差分或15个伪差分输入通道。片内低噪声可编程增益阵列(PGA)确保ADC中可直接输入小信号。

AD7124-4/AD7124-8提供最高的信号链集成度，其中包括可编程低漂移激励电流源、偏置电压发生器和内部基准电压源。片内集成了系统需要的大部分构建模块，因而能够简化热电偶系统设计。

AD7124-4/AD7124-8允许用户灵活地使用三种集成功耗模式中的一种，电流消耗、输出数据速率范围和均方根噪声与所选的功耗模式相对应。低功耗模式下，AD7124-4/AD7124-8的功耗仅255  $\mu\text{A}$ ，全功率模式下为930  $\mu\text{A}$ 。这些功耗选项使得该器件既适合功耗不重要的应用，如输入/输出模块，也适合低功耗应用，如环路供电智能变送器(整个变送器的功耗必须低于4 mA)。

该器件还具有关断选项。在关断模式下，整个ADC及其辅助功能均关断，器件的典型功耗降至1  $\mu\text{A}$ 。AD7124-4/AD7124-8还集成了丰富的诊断功能，作为全面特性组合的一部分。

**Rev. 0**

Circuits from the Lab reference designs 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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



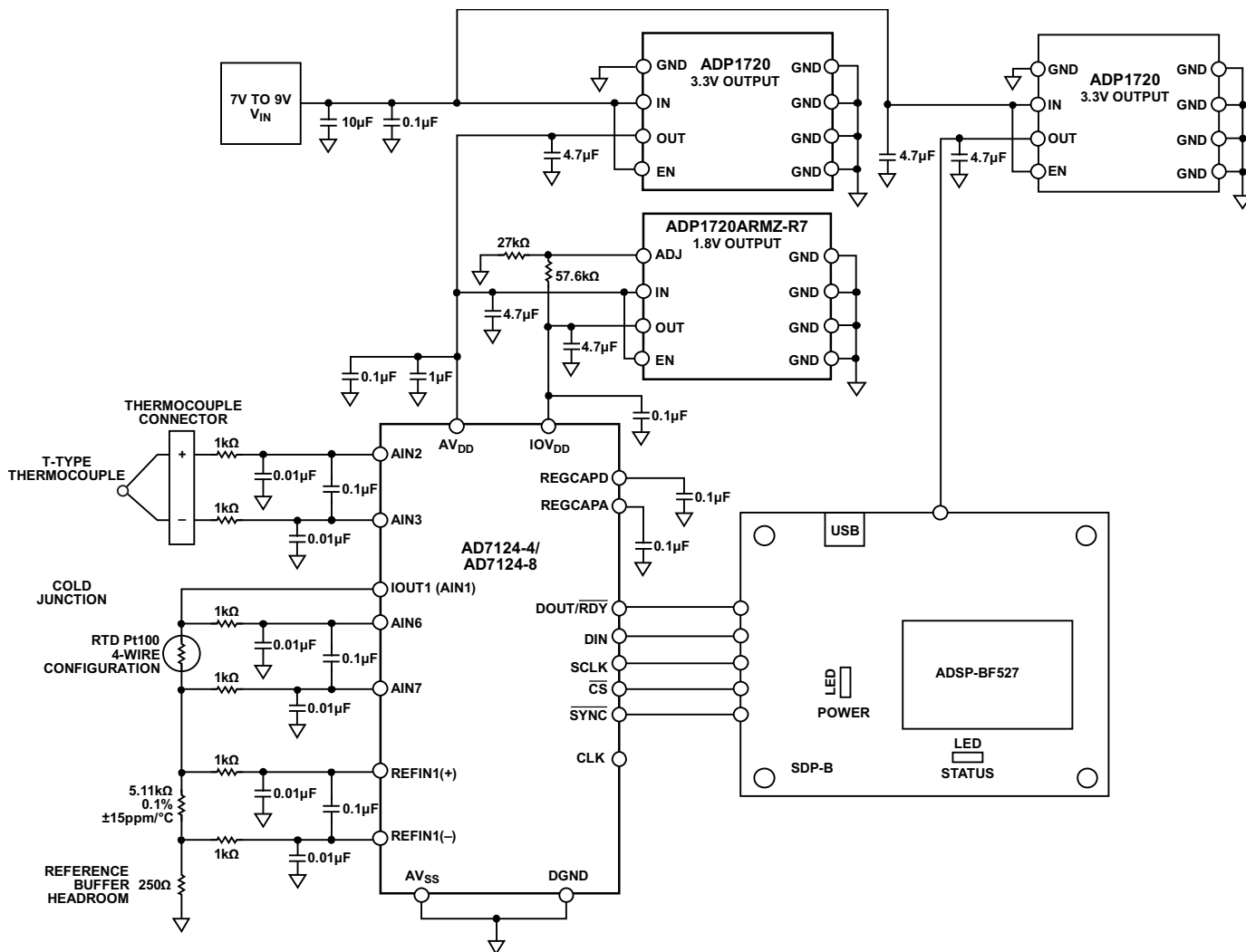


图1. AD7124-4/AD7124-8热电偶测量配置，包括RTD冷结补偿

## 电路描述

### 温度测量简介

热电偶是工业应用中最常用的温度测量传感器之一，其成本低，坚固耐用，可重复性好，并具有很宽的工作温度范围和快速响应时间。热电偶特别适合高温测量(C型热电偶最高可测量2300°C的温度)。

热电偶由两条不同金属线连接而成，如图2所示。

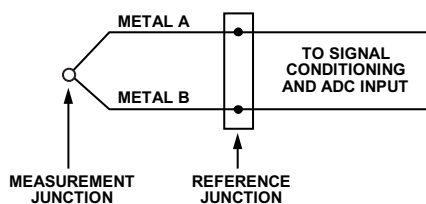


图2. 包括测量结和参考结的热电偶连接

一端放置在需要进行温度测量的地方，称为测量结。热电偶的另一端连接精密电压测量单元，该连接称为参考结，或者称为冷结。测量结和冷结之间的温差产生一个电压，其值与两个结点之间的温差成比例。该温差产生的信号通常为数微伏至数十毫伏不等，具体取决于温度差值。图1所示电路采用T型热电偶。T型热电偶可测量-200°C至+400°C的温度，输出范围约-8.6 mV至+17.2 mV。对于信号链而言，重要的是对热电偶保持较高的阻抗和较低的漏电流，以便实现最高精度。

T型热电偶的灵敏度约为40  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。因此，利用AD7124-4/AD7124-8的集成PGA，可以轻松检测热电偶的小电压并将

其精确转换为数字信号。在一个较小范围(0°C至60°C)内,热电偶响应接近线性,如图3所示。为了在宽温度范围内实现精确测量,必须对实测值应用线性化处理,确保获得准确的温度值。

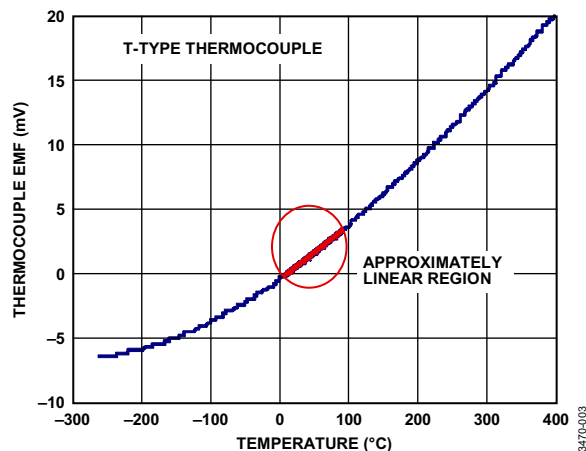


图3. T型热电偶输出电压与温度的关系

T型热电偶由铜和康铜连接而成。其它金属组合形成范围和灵敏度不同的其它类型热电偶。例如, J型热电偶由铁和康铜连接而成,测量范围为0°C至760°C,灵敏度为55  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。K型热电偶由铬镍和铝镍连接而成,测量范围为-200°C至+1260°C,灵敏度为39  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

### 冷结补偿(CJC)

必须将热电偶产生的电压转换为温度。将测得的电压转换为精确的温度是很困难的,因为热电偶电压很小,温度与电压不是线性关系,而且还必须准确测量冷结温度。

热电偶输出电压代表热电偶与冷结的温差。为确保从热电偶获得精确的绝对温度读数,必须知道冷结温度。冷结温度使用另一种温度敏感器件来测量,一般为热敏电阻、二极管、RTD(电阻温度检测器)或半导体温度传感器。本电路使用的温度检测器件为一个4线RTD。冷结温度误差直接产生绝对温度误差,因此需要对冷结温度进行高精度测量。测量并补偿冷结温度的技术称为冷结补偿或CJC。

### 电路工作原理

AD7124-4/AD7124-8提供集成式热电偶测量解决方案,可实现高分辨率、低非线性度误差和低噪声性能,以及极高的50 Hz/60 Hz抑制能力。该器件片内集成低噪声PGA,可放大热电偶的小信号,增益编程范围为1到128,因而可以直接与传感器接口。增益级具有高输入阻抗,输入漏电流在全功率模式下不超过3.3 nA,在低功耗模式下为1 nA(典型值)。下面说明基于AD7124-4/AD7124-8开发热电偶温度测量系统所用的不同元件。

### 电源

AD7124-4/AD7124-8具有单独的模拟电源和数字电源。数字电源 $\text{IOV}_{\text{DD}}$ 独立于模拟电源,可以为1.65 V至3.6 V范围内的值(以DGND为基准)。模拟电源 $\text{AV}_{\text{DD}}$ 以 $\text{AV}_{\text{SS}}$ 为基准,范围是2.7 V到3.6 V(低功耗模式和中功率模式)或2.9 V至3.6 V(全功率模式)。图1所示电路采用单电源供电,因此 $\text{AV}_{\text{SS}}$ 与DGND相连,仅使用一个接地层。 $\text{AV}_{\text{DD}}$ 和 $\text{IOV}_{\text{DD}}$ 电压利用低压差稳压器ADP1720分别产生。 $\text{AV}_{\text{DD}}$ 电压设置为3.3 V, $\text{IOV}_{\text{DD}}$ 电压设置为1.8 V,采用ADP1720稳压器。使用单独的稳压器可确保噪声最低。

### 串行外设接口(SPI)

与AD7124-4/AD7124-8的SPI通信由EVAL-SDP-CB1Z板上的Blackfin® ADSP-BF527处理,如图1所示。为了访问AD7124-4/AD7124-8的寄存器,使用AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件。图4显示了该软件的主窗口。单击THERMOCOUPLE(热电偶)以配置软件用于T型热电偶测量。

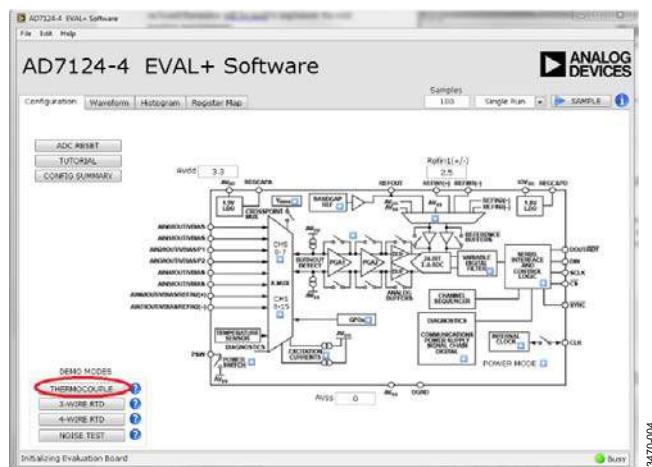


图4. AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件配置窗口

AD7124-4/AD7124-8的片内诊断功能可用来检测SPI通信故障。这些诊断包括检查SPI读写操作，确保仅访问有效寄存器。SCLK计数器确保使用正确数量的SCLK脉冲，而CRC功能检查传输期间位值有无变化。当任一SPI通信诊断功能使能且发生相关的错误时，错误寄存器中的对应标志就会置1。所有使能的标志进行“或”运算，以控制状态寄存器的ERR标志位。该功能在将状态位附加到ADC转换结果时特别有用。

### 模拟输入

AD7124-4可配置为4个差分或7个伪差分输入通道，而AD7124-8可配置为8个差分或15个伪差分输入通道。

AD7124-4/AD7124-8的片内诊断功能可用来检查模拟引脚上的电平是否在额定工作范围以内。正(AINP)和负(AINM)模拟输入可以单独检查是否发生过压和欠压，以及ADC是否饱和。当模拟输入上的电压超过 $AV_{DD}$ 时，过压标志就会置1；当模拟输入上的电压低于 $AV_{SS}$ 时，欠压标志就会置1。

对于图1所示电路，使用两个模拟输入引脚来连接热电偶(AIN2、AIN3)，需要三个模拟引脚来进行冷结补偿(AIN1、AIN6、AIN7)。AIN2和AIN3配置为全差分输入通道，用于测量热电偶产生的电压。对于本电路，如图1所示，热电偶是浮空的。要将热电偶偏置到已知电平，AIN2上使能 $V_{BIAS}$ 电压发生器，使热电偶偏置到以下值：

$$V_{BIAS} = AV_{SS} + \left( \frac{AV_{DD} - AV_{SS}}{2} \right)$$

热电偶测量是绝对测量，因而需要一个基准电压源，使用AD7124-4/AD7124-8内置2.5 V基准电压源。

针对冷结补偿，一个激励电流源用于激励RTD。此电流从 $AV_{DD}$ 产生，流向AIN1。图5详细显示了模拟引脚及其配置。

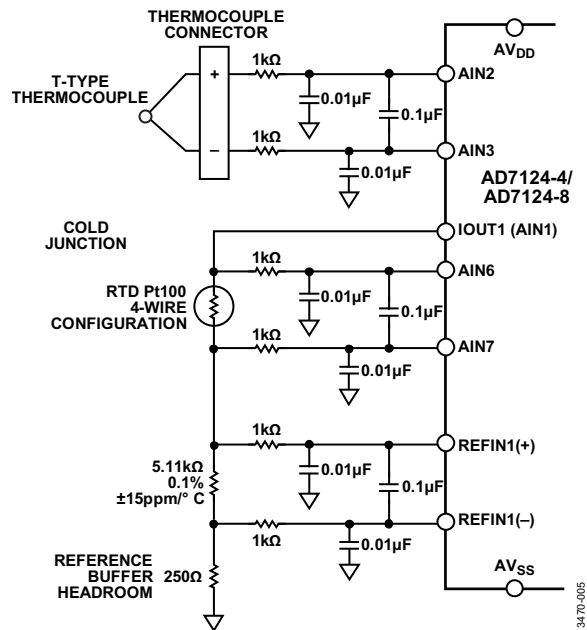


图5. 热电偶测量的模拟输入配置，采用4线RTD进行冷结补偿

对于本电路，冷结电路采用基准输入REFIN1(±)。流经4线RTD(用于冷结测量)的电流也会流过精密基准电阻，产生基准电压。此精密基准电阻上产生的电压与RTD上的电压成比例，因此，激励电流的波动会被消除。由于基准电压缓冲器已使能，务必满足正常工作所需的裕量( $AV_{DD} - 0.1 V$ 和 $AV_{SS} + 0.1 V$ )。0.125 V ( $500 \mu A \times 250 \Omega$ )的裕量由250 Ω接地电阻提供，如图5所示。

### 数字和模拟滤波

差分滤波器(截止频率约为800 Hz)和共模滤波器(截止频率约为16 kHz)在模拟输入端和基准输入端实现。为了抑制调制器频率及其倍数处的干扰，必须使用这种滤波。

AD7124-4/AD7124-8在片内数字滤波方面拥有很大的灵活性。有多种滤波器选项可用，所选的滤波器会影响输出数据速率、建立时间和50 Hz/60 Hz抑制性能。对于此电路笔记，电路实现了sinc<sup>4</sup>滤波器和后置滤波器。之所以使用sinc<sup>4</sup>滤波器，是因为它在整个输出数据速率范围内具有出色的噪声性能，另外还有出色的50 Hz/60 Hz抑制性能。后置滤波器用于提供50 Hz和60 Hz同时抑制，建立时间为40 ms。

## 校准

AD7124-4/AD7124-8提供不同的校准模式，通过校准可消除失调和增益误差。对于本电路笔记，电路使用了内部零电平校准和内部满量程校准。

## 热电偶配置

图1所示电路使用AD7124-4/AD7124-8进行精密T型热电偶测量。热电偶测量要求冷结补偿。如图1所示，一个4线Pt100 RTD用于此目的。采用图1所示配置，作为冷结补偿测量的一部分，需要一个精密激励电流源来激励RTD。该RTD连接到模拟输入AIN6、AIN7。RTD的底端连接到一个精密基准电阻，后置将一个外部基准电压施加于器件。该精密基准电阻连接在基准输入引脚REFIN1(±)之间。此配置代表一个比率式配置，激励电流的任何偏差都会同时作用于RTD和基准电阻，因而不会出现在测量结果中。

热电偶本身连接到模拟输入AIN2、AIN3。其中一个输入利用ADC的内部偏置电压发生器偏置。热电偶电压在-8 mV到+17.2 mV范围内，代表的温度范围为-200°C至+400°C。此低电平电压由AD7124-4/AD7124-8的片上PGA放大，然后通过24位Σ-Δ ADC转换为精密数字信号。为确保利用ADC的全部范围，PGA增益设置为128。此热电偶测量相对于内部低漂移2.5 V基准电压源执行。

一个4线Pt100 B类RTD用于冷结测量。Pt100 RTD的激励电流设置为500 μA。

选择适当的外部精密电阻值，使RTD上产生的最大电压等于基准电压除以所选增益。电路笔记CN-0381详细讨论了下列必需步骤：

- 选择精密基准电阻
- 为RTD测量选择适当的PGA增益
- 裕量电阻选择
- 激励电流输出顺从电压

针对热电偶测量的AD7124-4/AD7124-8全系统配置如下：

- 热电偶测量(T型)
  - 差分输入(AINP = AIN2, AINM = AIN3)
  - 增益 = 128
  - 2.5 V内部基准电压源
  - 数字滤波(sinc<sup>4</sup>和后置滤波器)
- 冷结补偿测量(4线RTD)
  - 差分输入(AINP = AIN6, AINM = AIN7)
  - 激励电流: IOUT1 = AIN1 = 500 μA
  - 增益 = 16
  - 5.11 kΩ精密基准电阻
  - 数字滤波(sinc<sup>4</sup>和后置滤波器)

## 热电偶温度计算

实现上述程序之后，下一步便是解决热电偶和冷结计算。线性化和补偿可使用不同的方法，包括：

- 查找表：需要存储器来存储，但也提供快速、准确的计算。
- 软件线性近似法：只需存储转换多项式系数，不需要其它存储器。需要处理时间来求解多阶多项式。但是，它也能产生非常精确的结果。这是本电路采用的方法。

软件线性近似法需要两个输入：热电偶上测得的电压和冷结温度。

模拟输入通道(AIN2、AIN3)用于测量热电偶上的电压。公式1用于将代码转换为电压，它假设ADC为双极性配置。AD7124-4/AD7124-8软件根据所实现的配置自动将代码转换为电压。

$$V_{TC} = \frac{(CODE_{TC} - 2^{N-1}) \times V_{REF}}{2^{N-1} \times Gain} \quad (1)$$

其中：

$V_{TC}$ 为热电偶(TC)电压。

$CODE_{TC}$ 为热电偶(TC)代码。

$N$ 为ADC的分辨率(24位)。

$V_{REF}$ 为测量所用的基准电压。对于本电路，内部基准电压用于热电偶测量。

$Gain$ 为针对TC模式选择的增益(128)。

用于冷结的4线RTD需要自行线性化。当ADC工作在双极性模式时，计算RTD电阻(R)的通用表达式如下所示：

$$R_{RTD} = \frac{(CODE - 2^{N-1}) \times R_{REF}}{G \times 2^{N-1}} \quad (2)$$

其中：

$R_{RTD}$ 为RTD的电阻。

$CODE$ 为ADC码。

$N$ 为ADC的分辨率(24位)。

$R_{REF}$ 为基准电阻。

$G$ 为所选增益(16)。

将RTD电压转换为温度以及线性化所涉及到的步骤参见[电路笔记CN-0381](#)。

计算热电偶温度需要下列步骤：

- 将冷结温度转换为电压
- 计算热电电压
- 将热电电压转换为温度表示。冷结温度必须转换为电压。

冷结温度利用国家标准技术研究院(NIST)提供的多项式进行转换，如公式3所示。

$$V_{CJ} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n \quad (3)$$

其中：

$V_{CJ}$ 为热电电压。

$a_x$ 为与热电偶类型相关的多项式系数。

$T$ 为冷结温度(°C)。

$n$ 为多项式阶数。

增加多项式的阶数可提高冷结温度转电压的转换精度。然而，阶数越高，所需的处理越多。因此，执行此转换时需要权衡。本电路的计算采用八阶多项式。

冷结温度电压必须加到热电偶上测得的差分电压上。最终电压是热电偶温度检测结点产生的热电电压近似值。

然后便可利用该热电电压计算热电偶整体温度。这一步涉及到公式4给出的幂级数多项式。本电路采用六阶多项式，T型热电偶的多项式系数从NIST网站获得。

$$T = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 + \dots + a_n V^n \quad (4)$$

其中：

$V$ 为热电电压(μV)。

$a_x$ 为与热电偶类型相关的多项式系数。

$T$ 为温度(°C)。

$n$ 为多项式阶数。

## 热电偶测量和结果

对于图1所示电路，我们收集了AD7124-4/AD7124-8在不同数字滤波器和功耗模式配置下的数据。

第一种配置是采用sinc<sup>4</sup>滤波器、全功耗模式和50 SPS的输出数据速率。在这些条件下，AD7124-4/AD7124-8具有最佳的速度和噪声性能。图6显示了室温下热电偶按图1所示连接在AIN2、AIN3输入通道之间时的噪声分布。对应的均方根噪声典型值为70 nV，相当于约16.4位无噪声分辨率。在相同条件下，输入短路时AD7124-4/AD7124-8的噪声性能典型值为48 nV rms，相当于17位无噪声分辨率。噪声的增加直接来自输入通道(AIN2、AIN3)上连接的热电偶。

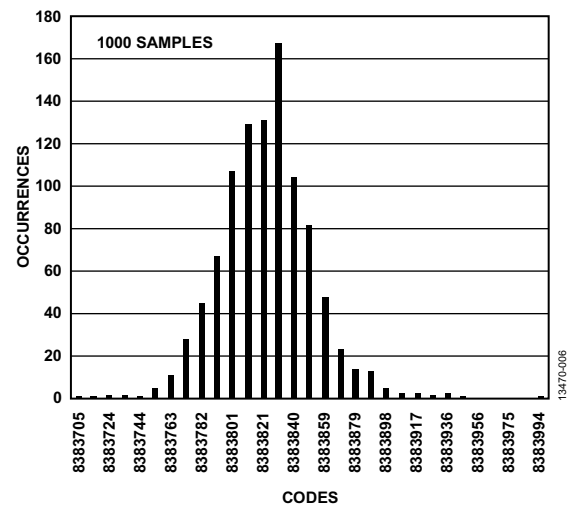


图6. 室温、Sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式、50 SPS时的热电偶码直方图



对于选择sinc<sup>4</sup>滤波器和全功率模式的热电偶配置，将热电偶温度从-50°C扫描至+200°C，而冷结保持在-40°C、+25°C和+105°C。对于每个设定的热电偶温度，按照上述方法利用AD7124-4/AD7124-8测量热电偶上的相应电压。另外还记录了使用4线RTD测得的冷结温度。利用热电偶电压和冷结温度的电压表示来计算热电偶的温度。图7显示了冷结温度为-40°C、+25°C和+105°C时，设定温度值与线性化后热电偶实测温度之间的误差。在每个冷结温度执行内部零电平和满量程校准。如图7所示，计算得到的温度与热电偶设定温度之间的误差在T型热电偶和Pt100 RTD的均方根合并误差窗口内。T型热电偶的最大误差为1°C或0.75%；根据IEC751标准，Pt100误差为 $\pm(0.3 + 0.005 \times |T|)$ 。

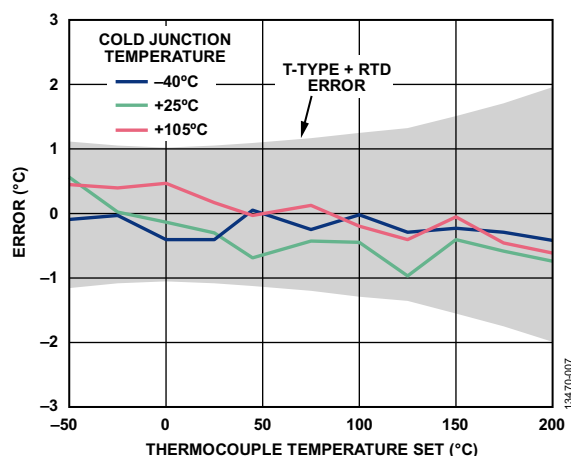


图7. 热电偶温度精度测量(Sinc<sup>4</sup>滤波器、全功率模式、50 SPS)

测试的第二种配置采用后置滤波器、低功耗模式和25 SPS输出数据速率，其提供50 Hz和60 Hz同时抑制，并且允许用户用建立时间换取抑制性能。图8显示了室温下热电偶按图1所示连接在AIN2、AIN3输入通道之间时的噪声分布。对应的均方根噪声典型值为220 nV rms，相当于约14.7位无噪声分辨率。选择相同的滤波器、增益和输出数据速率，但输入短路时，AD7124-4/AD7124-8的噪声性能典型值为170 nV rms，相当于15.1位无噪声分辨率。噪声的增加直接来自输入通道(AIN2、AIN3)上连接的热电偶。

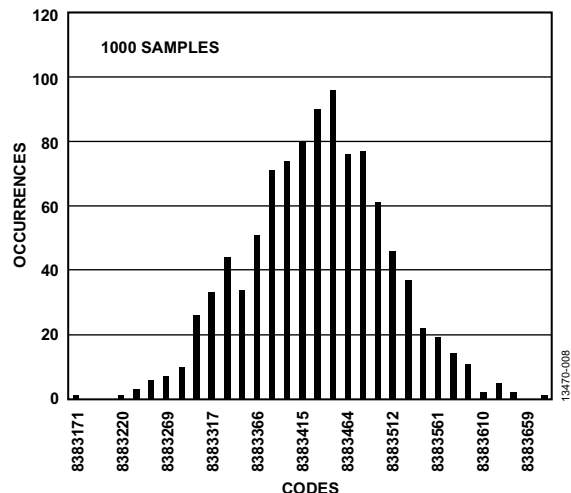


图8. 室温、后置滤波器、低功耗模式、25 SPS时的热电偶和冷结温度的码直方图

对于选择后置滤波器和低功耗模式的AD7124-4/AD7124-8配置，将RTD温度从-50°C扫描至+200°C。对于每个设定的热电偶温度，按照上述方法利用AD7124-4/AD7124-8测量热电偶上的相应电压。另外还记录了使用4线RTD测得的冷结温度。利用热电偶电压和冷结温度的电压表示来计算热电偶的温度。

图9显示了冷结温度为-40°C、+25°C和+105°C时，设定温度与线性化后热电偶实测温度之间的误差。如图9所示，计算得到的温度与热电偶设定温度之间的误差在T型热电偶和Pt100 RTD的均方根合并误差窗口内。T型热电偶的最大误差为1°C或0.75%；根据IEC751标准，Pt100误差为 $\pm(0.3 + 0.005 \times |T|)$ 。

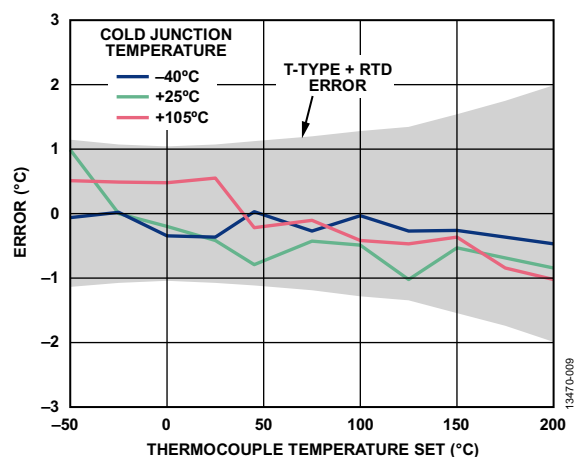


图9. 热电偶温度精度测量(后置滤波器、低功耗模式、25 SPS)

## 常见变化

### 冷结测量替代方法

EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ评估板上有一个热敏电阻，其是评估板整体设计的一部分。该热敏电阻为KTY81/110型，+25°C时典型电阻值为1 kΩ，-40°C时为500 Ω，+105°C时为1.7 kΩ。该热敏电阻可用于测量冷结温度。热敏电阻比4线RTD便宜，但精度不如后者。采用热敏电阻测量冷结温度时，务必确保冷结测量符合预期。下列步骤列出了需要考虑的一些决策：

1. 选择精密基准电阻值。
2. 选择适当的增益。
3. 选择激励电流。
4. 检查激励电流的输出电压顺从范围。
5. 检查不同冷结温度下的热敏电阻值。

考虑所有这些步骤，当利用此热敏电阻测量冷结温度时，整个温度测量系统要求进行如下寄存器配置：

- 热电偶测量设置如上所示(T型)
  - 差分输入(AINP = AIN2, AINM = AIN3)
  - 增益 = 128
  - 2.5 V内部基准电压源
  - 数字滤波(sinc<sup>4</sup>和后置滤波器)
- 冷结补偿测量(热敏电阻)
  - 差分输入(AINP = AIN4, AINM = AIN5)
  - 激励电流：
  - 增益 = 1
  - 2 kΩ精密基准电阻(热敏电阻值在500 Ω(-40°C)到1.7 kΩ(+105°C)之间变化；还需要利用此电阻评估裕量)

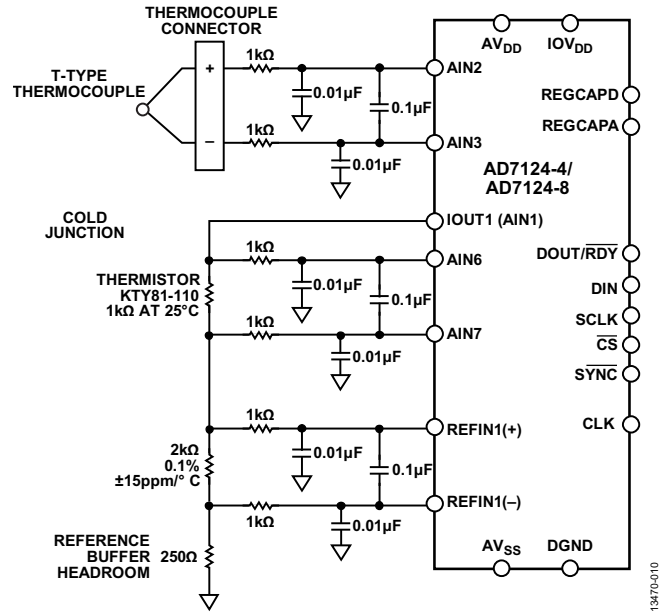


图10. 热电偶测量的热敏电阻冷结配置

使用图10所示的配置，AD7124-4/AD7124-8的基准电压始终在1 V左右(基于500 μA电流和2 kΩ精密基准电阻)。热敏电阻用于冷结补偿时，记录系统的性能，冷结保持在25°C，热电偶温度从-50°C扫描到+200°C。使用全功率模式的sinc<sup>4</sup>滤波器和低功耗模式的后置滤波器。图11显示了记录到的热电偶设定温度与计算温度(利用线性化技术，两类滤波器和两种功耗模式下)之间的最大误差。记录到的最大误差为±1°C。

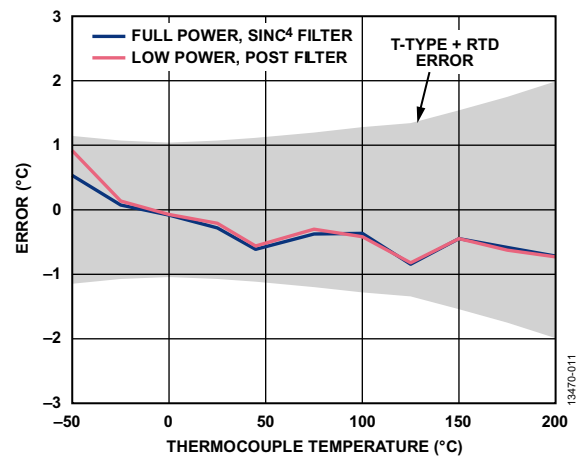


图11. 热电偶温度精度测量，利用热敏电阻进行冷结补偿(25°C)

## 偏置电压

图1中，内部 $V_{BIAS}$ 电压通过AINP或AINM引脚提供给热电偶。当利用图1所示元件值实现抗混叠滤波器时，这种 $V_{BIAS}$ 电压配置能够很好地工作。如果滤波器使用非常大的R值和C值(例如用于EMC滤波器)， $V_{BIAS}$ 必须从单独的专用引脚获得，然后从外部施加于热电偶。这样可以消除潜在共模噪声(可转换为差模噪声)引起的测量误差。

## 多热电偶测量系统

AD7124-4和AD7124-8可用于多热电偶测量。热电偶测量要求

- 两个模拟引脚配置为差分形式以测量热电偶上的电压
- 两个模拟引脚配置为差分形式以测量冷结端子上的电压
- 一个模拟引脚将激励电流导向冷结补偿电路

利用此信息，AD7124-4允许连接两个热电偶并相对于同一冷结进行测量，如图12所示。AD7124-8允许六个热电偶相对于同一冷结进行测量，如图13所示。

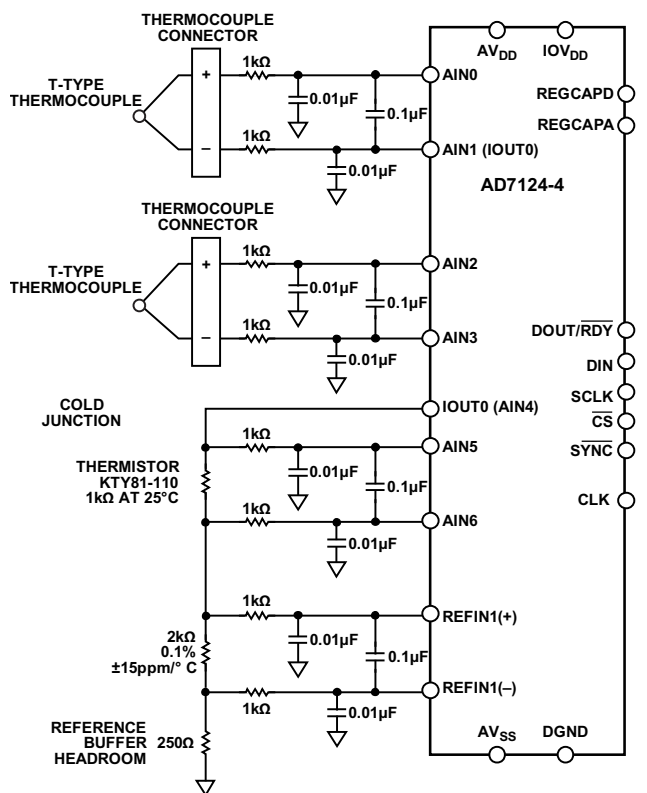


图12. AD7124-4—二热电偶测量系统，包括冷结补偿

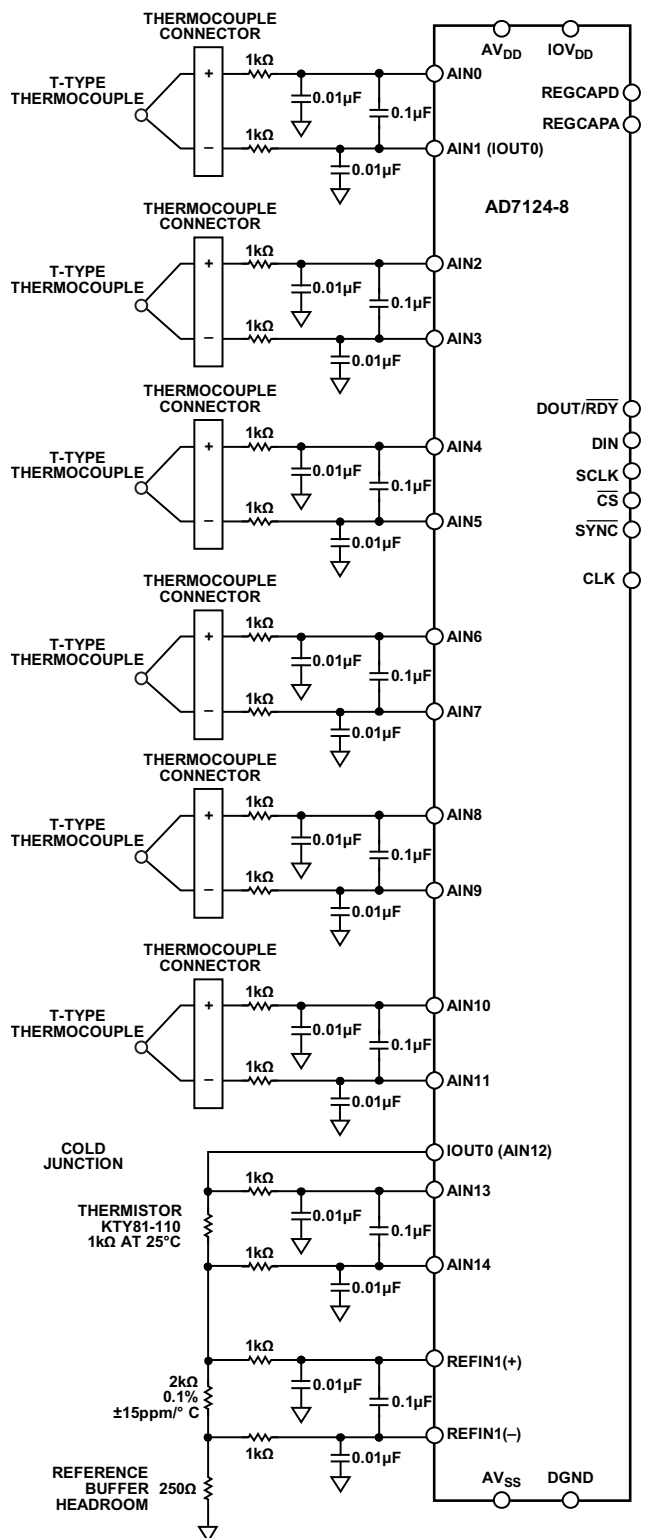


图13. AD7124-8—六热电偶测量系统，包括冷结补偿

## 电路评估与测试

### 设备要求

热电偶测量系统需要如下设备：

- EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ评估板
- EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台(SDP)
- AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件
- 电源：7 V或9V壁式电源适配器
- T型热电偶
- 运行Windows® XP (SP2)、Windows Vista或Windows 7(32位或64位)的PC

### 软件安装

EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ和SDP板的完整软件用户指南分别参见EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ用户指南和SDP用户指南。

需要软件来与硬件接口，此软件可从<ftp://ftp.analog.com/pub/evalcd/AD7124>下载。如果安装文件未自动运行，请双击setup.exe文件。请先安装评估软件，再将评估板和SDP板连接到PC的USB端口，确保PC能够正确识别评估系统。

完成评估软件安装后，将SDP板(通过连接器A)连接到评估板，然后利用附送的电缆将评估板连接到PC的USB端口。检测到评估系统后，确认出现的所有对话框，完成安装。

### 设置与测试

图14所示为测试设置的功能框图。为了快速设置热电偶测量，使用板上热敏电阻来实现冷结测量。

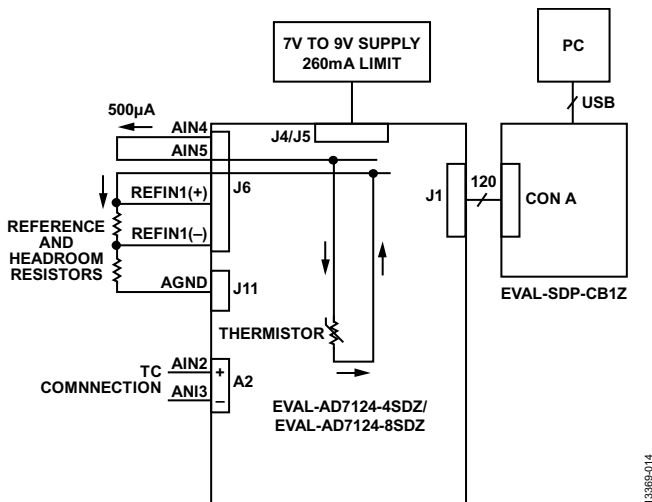


图14. 测试设置功能框图

测试该电路需要EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ评估板。此外还需要下列传感器和电阻以确保电路正常工作：

- T型热电偶
- 2 kΩ精密电阻
- 缓冲器裕量所需的250 Ω电阻

### 配置硬件

按照下述步骤配置硬件：

- 将EVAL-AD7124-4SDZ/EVAL-AD7124-8SDZ评估板上的所有链接设为默认位置，如评估板用户指南所述。
- 利用连接到J5的7 V或9 V电源为评估板上电。
- 连接热电偶、精密基准电阻和裕量电阻，如图15所示。

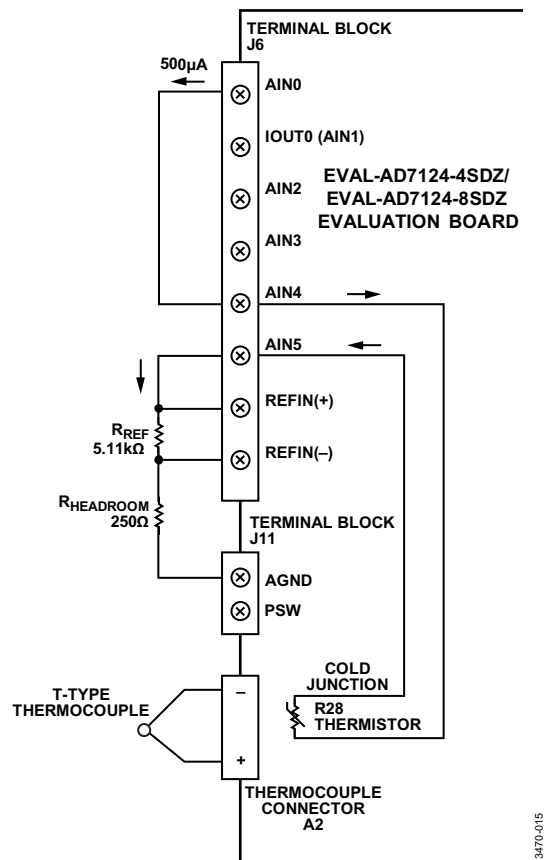


图15. 用于热电偶测量的评估板连接器

## 配置软件

运行AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件。图16显示了该软件的主窗口截图。

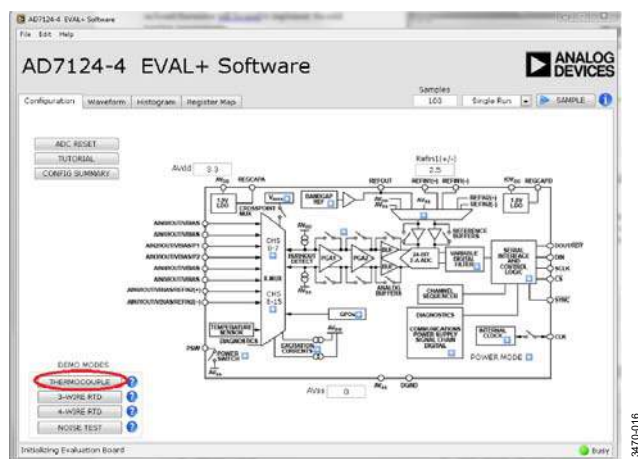


图16. AD7124-4/AD7124-8 EVAL+软件主窗口

为了配置AD7124-4/AD7124-8进行热电偶测量，单击主窗口中的THERMOCOUPLE(热电偶)演示模式按钮(参见图16)。单击此按钮配置ADC软件以获得最佳性能。一些寄存器设置如下：

- Channel\_0(热电偶)
  - AINP\_0 = AIN2
  - AINM\_0 = AIN3
  - Setup = Setup0
  - Enabled = TRUE
- Channel\_1(热敏电阻冷结测量)
  - AINP\_1 = AIN4
  - AINM\_0 = AIN5
  - Setup = Setup1
  - Enabled = TRUE
- CONFIG\_0(热电偶)
  - PGA\_0 = 128
  - AIN\_BUFP、AIN\_BUFM均为ENABLED
  - BIPOLAR = ENABLED
  - REF\_SEL = Internal Reference
- CONFIG\_1(热敏电阻冷结测量)
  - PGA\_0 = 1
  - AIN\_BUFP、AIN\_BUFM均为ENABLED
  - BIPOLAR = ENABLED
  - REF\_SEL = External Reference
- FILTER\_0(热电偶)
  - Filter = Sinc4
  - FS\_0 = 384
- FILTER\_1(热敏电阻冷结)
  - Filter = Sinc4
  - FS\_0 = 384
- ADC\_Control
  - MODE = Continuous Conversion

- POWER\_MODE = FULL POWER
- REF\_EN = Enabled
- IO\_CONTROL\_1 (excitation for RTD)
  - IOUT1 Channel Enable = AIN1
  - IOUT1 Select = 500  $\mu$ A
- IO\_CONTROL\_2(偏置热电偶)
  - VBIAS2 = True

将AD7124-4/AD7124-8配置为热电偶测量之前，还需要一项额外的设置：热电偶通道需要执行AD7124-4/AD7124-8的内部满量程和零电平校准。此校准可通过Register Map(寄存器映射)选项卡执行，如图17所示。

1. 从寄存器树中选择ADC\_Control寄存器。
2. 仅使能通道0。
3. 选择Low Power(低功耗)模式。
4. 执行内部满量程校准。
  - a. 单击ADC控制寄存器的Mode(模式)位域。
  - b. 选择内部满量程校准。
  - c. 选择寄存器树中的Gain0寄存器，检查校准是否已执行，并且系数是否改变。
5. 执行内部零电平校准。
  - a. 单击ADC控制寄存器的Mode(模式)位域。
  - b. 选择内部零电平校准。
  - c. 选择寄存器树中的Offset0寄存器，检查校准是否已执行，并且系数是否改变。

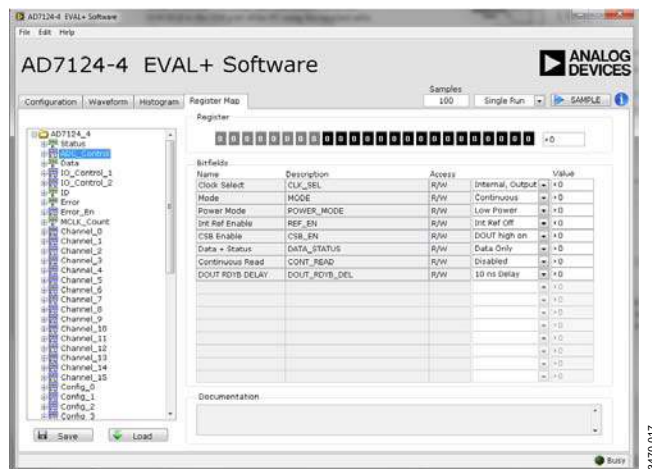


图17. 寄存器映射内部满量程和零电平校准

热敏电阻通道不需要校准，因为增益为1时的增益误差经过工厂校准。

现在，评估板和器件已完成热电偶测量配置，包括使用评估板上的热敏电阻进行冷结测量。单击SAMPLE(采样)以启动AD7124-4/AD7124-8采样。Waveform(波形)和Histogram(直方图)选项卡显示从AD7124-4/AD7124-8采集到的数据。

要实现更精确的冷结测量，可连接一个4线RTD，如上文所述。使用4线RTD时，来自AIN1的电流必须与热敏电阻断开，而连接到4线RTD，如图1所示。



**更多资料**

CN-0384设计支持包:

[www.analog.com/CN0384-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0384-DesignSupport)

SDP用户指南

EVAL-AD7124-4用户指南(UG-855)

EVAL-AD7124-8用户指南(UG-856)

AN-892应用笔记, 温度测量原理及实用技术, Analog Devices

Walt Kester, 《传感器信号调理》第7章“温度传感器”,  
Analog Devices, 1999年

Mary McCarthy, 应用笔记AN-615, 峰峰值分辨率与有效  
分辨率, Analog Devices

MT-031指南, 实现数据转换器的接地并解开AGND和  
DGND的谜团, Analog Devices

MT-101指南, 去耦技术, Analog Devices

CN-0376电路笔记, 适合PLC/DCS应用的通道间隔离温度  
输入(热电偶/RTD), Analog Devices

CN-0381电路笔记, 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的  
全集成式4线RTD测量系统, Analog Devices

CN-0382电路笔记, 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的  
隔离式4 mA至20 mA/HART温度和压力工业变送器,  
Analog Devices

CN-0383电路笔记, 采用低功耗、精密、24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC的  
全集成式3线RTD测量系统, Analog Devices

**数据手册和评估板**

[EVAL-AD7124-4SDZ](#)

[EVAL-AD7124-8SDZ](#)

[系统演示平台\(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

[AD7124-4数据手册](#)

[AD7124-8数据手册](#)

[ADP1720数据手册](#)

**修订历史**

**2015年7月—修订版0: 初始版**

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN13470sc-0-7/15(0)

**ANALOG  
DEVICES**

[www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)

## Circuits from the Lab® Reference Designs

Circuits from the Lab® 参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息/或技术支持，请访问 [www.analog.com/cn/CN0387](http://www.analog.com/cn/CN0387)。

### 连接/参考器件

ADL6010	快速响应、45 dB范围、0.5 GHz至43.5 GHz包络检波器
AD7091R	1 MSPS、超低功耗、12位ADC，采用10引脚LFCSP和MSOP封装
HMC547	GaAs MMIC、SPDT、非反射式开关，DC至28 GHz

## 免校准回损测量系统

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[CN-0387回损测量评估板\(EV-VSWR-SDZ\)](#)

[系统演示平台\(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

#### 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所示电路可以准确测量无线发射器中的回损，测量范围为1 GHz至28 GHz，无需系统校准。

设计在单电路板上实现，采用一个非反射式RF开关、一个微波RF检波器和一个12位精密模数转换器(ADC)。为了在尽可能宽的频率范围内评估电路，采用了一个带SMA连接器的双端口定向耦合器，而非窄带表贴式定向耦合器。

电路可测量最高达20 dB的回损，输入功率范围为25 dB(在较小的输入功率范围内，可以测量超过20 dB的回损)。

电路的一个独有特点是可以利用来自RF检波器的数字化电压的一个简单比值来计算回损，因而无需系统校准。

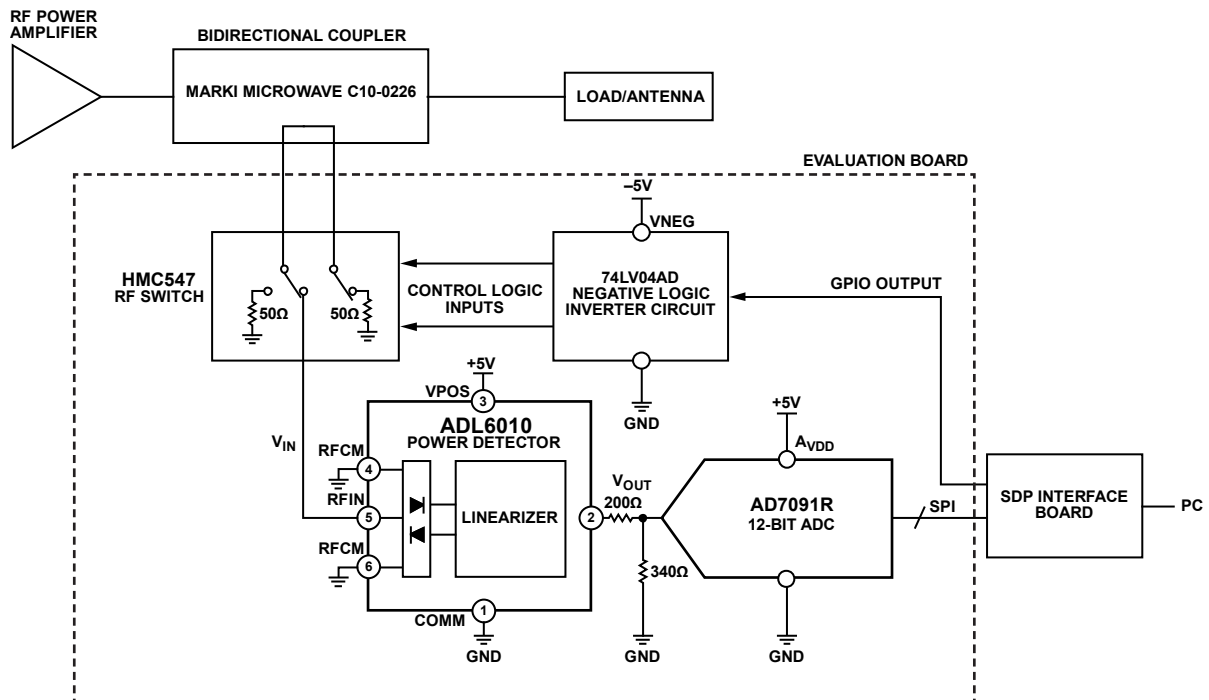


图1. 电压驻波比(VSWR)评估板测量设置(未显示全部连接和去耦)

### Rev. A

Circuits from the Lab® reference designs 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.cn](http://www.analog.com.cn)  
Fax: 781.461.3113 ©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## 电路描述

使一个在1 GHz至28 GHz范围内的RF信号通过一个RF耦合器(Marki Microwave C10-0226)，馈送至一个匹配的50 Ω负载或天线，如图1所示。正向和反向耦合端口连接至HMC547，后者为一款单刀双掷(SPDT)非反射式开关。开关输入在正向与反向耦合端口之间切换，同时在50 Ω时端接相反端口，如此，两个耦合端口总会看到一个50 Ω的负载。

RF开关的输出端口驱动ADL6010，这是一款微波RF检波器，工作频率范围为500 MHz至43.5 GHz。检波器的输出电压与输入信号的幅度成正比。ADL6010是一款线性V/V检波器，其标称斜率为2.1 V/V。

AD7091R 12位ADC以1 MSPS的速率对功率检波器输出电压采样。(也可使用较低的采样速率，结果会降低ADC中的功耗)。

AD7091R把模拟电压转换为一个数字代码。然后，EVAL-SDP-CB1Z (SDP-B)接口板用串行外设接口(SPI)通信来控制ADC，并把结果发送到电脑上，以便进行系统评估和回损计算。然后，用ADC采样的正向耦合电压与反向耦合电压之比计算VSWR、回损和反射系数。

## 回损计算

下列推导式展示了正向与反向电压之比与系统回损之间的关系。这种关系对系统的免校准特性起着关键作用。

检波器在其线性工作区的系统传递函数可以用众所周知的直线等式来表示：

$$y = mx + c$$

其中：

$m$ 为斜率。

$c$ 为截距。

用真实电路参数，

$$V_{OUT} = m \times V_{IN} + c \quad (1)$$

如前所述， $m$ 标称值为2.1，但可能因频率和器件而异。 $c$ 的值通常接近零。

用 $V_{IN}$ 改写等式1，

$$\Rightarrow V_{IN} = \frac{V_{OUT} - c}{m} \quad (2)$$

把等式转换为功率，

$$\Rightarrow P_{IN} = \frac{\left(\frac{V - c}{m}\right)^2}{R} \quad (3)$$

然后转换为dBm，

$$P_{IN_{dBm}} = 10 \times \log \left( 1000 \times \frac{\left(\frac{V_{OUT} - c}{m}\right)^2}{R} \right) \quad (4)$$

如果包括ADC，则等式变为

$$P_{IN_{dBm}} = 10 \times \log \left( 1000 \times \frac{\left(\frac{CODE - c'}{m'}\right)^2}{R} \right) \quad (5)$$

其中：

$m'$ 为检波器和ADC组合信号链的斜率。

$c'$ 为检波器和ADC组合信号链的截距。

回损为正向与反向功率之差，单位为dBm：

$$P_{F_{dBm}} - P_{R_{dBm}} = 10 \times \log \left( \frac{1000 \times \frac{\left(\frac{CODE_F - c'}{m'}\right)^2}{R}}{1000 \times \frac{\left(\frac{CODE_R - c'}{m'}\right)^2}{R}} \right) \quad (6)$$

$$\Rightarrow P_{F_{dBm}} - P_{R_{dBm}} = 10 \times \log \left( \frac{(CODE_F - c')^2}{(CODE_R - c')^2} \right) \quad (7)$$

由于 $c'$ 接近零且 $CODE_F$ 和 $CODE_R$ 一般远远大于 $c'$ ，所以，公式可简化为

$$P_{F_{dBm}} - P_{R_{dBm}} = 10 \times \log \left( \frac{CODE_F^2}{CODE_R^2} \right) \quad (8)$$

本节的推导表明，无需校准即可计算回损，因为公式不包括信号链的斜率( $m'$ )或截距( $c'$ )。

## RF开关

HMC547是一款非反射式SPDT RF开关，频率范围为DC至28 GHz。如图2框图中所示，开关会在50 Ω时在内部端接任一输入，同时，另一个输入则馈入RFC输出。开关的快速开关时间一般为6 ns。开关的A和B逻辑输入由-5 V高电平和0 V低电平负电压逻辑控制。HMC547数据手册中包括一种推荐的控制电路。该电路由一个驱动74LV04AD逆变器的5.1 V齐纳二极管电平转换器构成。逆变器的供电电压范围为-5 V至0 V，而非0 V至+5 V。完整的电源电路见CN-0387设计支持包中的详细原理图，网址：[www.analog.com/CN0387-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0387-DesignSupport)。

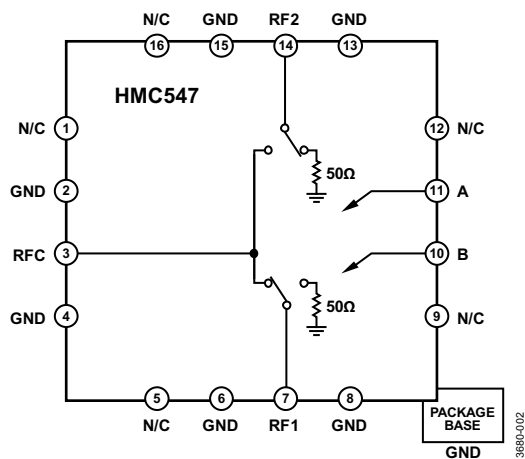


图2. HMC547俯视图

## 功率检波器

**ADL6010**功率检波器具有线性V/V特性，这是本应用的关键。为驱动该器件，向VPOS引脚施加一个+5 V的DC电压，并舍入至COMM引脚，如图3所示。

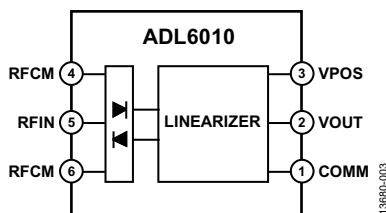


图3. ADL6010 RF/微波检波器功能框图

如图4所示,输出电压随频率而变化。传递函数随频率的这种变化并不会对电路性能造成任何不利影响,因为回损计算依赖于特定频率下的比率式计算。

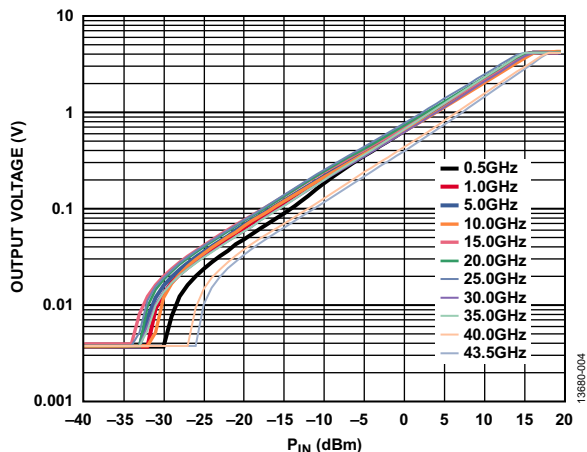
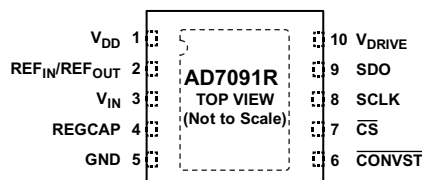


图4. 500 MHz到43.5 GHz频率范围内的传递函数

## 模数转换器



## NOTES

**1. THE EXPOSED PAD IS NOT CONNECTED INTERNALLY.  
FOR INCREASED RELIABILITY OF THE SOLDER JOINTS AND  
FOR MAXIMUM THERMAL CAPABILITY, SOLDER THE EXPOSED  
PAD TO THE SUBSTRATE, GND.**

图5. AD7091R模数转换器

**AD7091R**是一款12位逐次逼近型寄存器(SAR) ADC，吞吐速率最高达1 MSPS。尽管可以使用一个精度超高的外部基准电压，但本应用并不要求这样做。在本电路中，使用了2.5 V的内部基准电压，结果产生的LSB大小为

$$LSB = (2.5 \text{ V})/2^{12} = 610 \mu\text{V}$$

由于ADL6010的输出电压的最大值可以达到约3 V, 因此, 必须在检波器与ADC之间用一个200  $\Omega$ /340  $\Omega$ 电阻分压器来衰减该电压, 如图1所示。该电阻分压器的标称衰减比为1.6。

## 定向耦合器

定向耦合器把正向或反向信号的一部分耦合至功率检波器以便进行测量。一般而言，耦合器有4个端口，如图6所示。

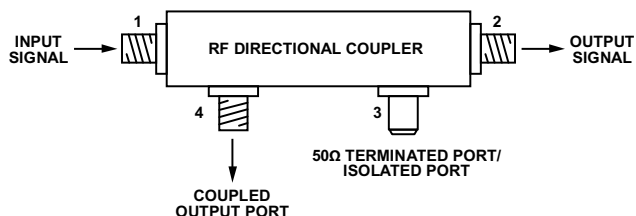


图6. 定向耦合器

在图6的配置中,输入信号被耦合至端口4,端口3在50  $\Omega$  时端接,以实现信号的无反射式耦合。如果在50  $\Omega$  时端接端口4而非端口3,则反射信号会被耦合到端口3。

在该电路中，并未使用前面展示的直接连接端口的50  $\Omega$ 端接，相反，两个端口都馈入RF开关输入端。因此，可以认为耦合器是双向的，因为50  $\Omega$ 端接电阻由HMC547从内部施加到端口3或端口4，具体取决于开关的状态。

本电路选用的RF耦合器是Marki Microwave C10-0226带状线耦合器。该耦合器具有10 dB耦合能力，意味着耦合信号比输入信号少10 dB。本电路用带SMA连接器的定向耦合器是为了展示其在尽可能宽的频率范围内的工作情况。也可使用表贴式耦合器；但这种器件一般具有较窄的频率范围。

## 数据分析

EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台(SDP)板与评估软件一起使用,以捕捉ADC采样的数据。

软件用前面推导出来的等式8计算回损。反射系数和VSWR都由该等式推导而来。

$$P_{F_{dBm}} - P_{R_{dBm}} = 10 \times \log \left( \frac{CODE_F^2}{CODE_R^2} \right) \quad (8)$$

图7显示了软件GUI的结果显示窗格。

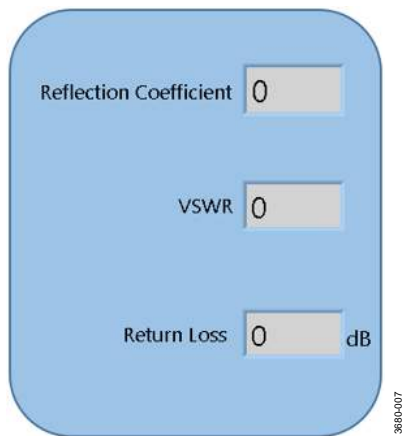


图7. CN-0387评估软件显示

## 检波器采样策略

为了准确测量系统的回损,在测量正向和反向电压时,正向与反向测量之间的时间延迟必须短。图8所示为连续采样时执行的采样序列。

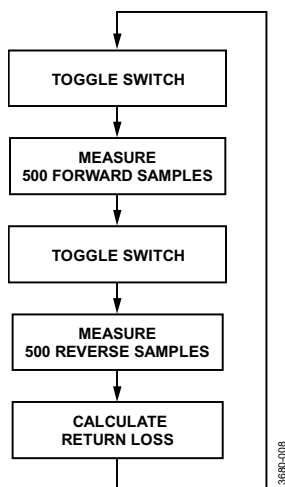


图8. 采样序列

当RF开关收到信号切换开关时,开关位会发生变化,正向或反向耦合端口信号被馈入功率检波器。在回损计算步骤中,会求500个正向样本和500个反向样本的均值,并根据平均正向和反向电压的比值计算回损。

ADC的采样速率为1 MSPS。因此,测量500个样本需要耗时500 μs。在正向与反向周期之间,用SDP-B接口的通用输入/输出(GPIO)切换开关位大约耗时400 μs。时序图见图9。

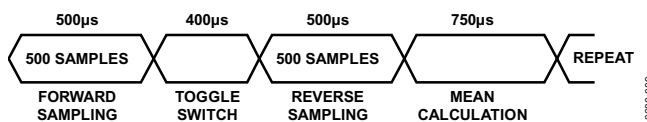


图9. 时序图表示

利用正向和反向电压测量结果的均值计算回损、反射系数和VSWR。为了在更新前清楚读取结果,先求出50个样本的均值,然后再在GUI结果窗格上显示结果。

关于EVAL-VSWR-SDZ板的完整文档(包括原理图、布局、Gerber文件和物料清单)可从CN-0387设计支持包中下载,网址: [www.analog.com/CN0387-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0387-DesignSupport)。

## 常见变化

如前所述,本电路使用带连接器的宽带定向耦合器是为了展示其在尽可能宽的频率范围内的工作情况。也可使用表贴式定向耦合器或印刷电路定向耦合器;但这些器件一般具有较窄的频率范围。

也可使用耦合因子较高的定向耦合器,这类耦合器的插入损耗一般较低。但我们建议要注意电路的尺寸,以实现测量范围的最大化。例如,如果最大系统功率为+35 dBm,则使用一个20 dB的定向耦合器会使检波器的最大功率设为约+15 dBm,这已是输入范围的上限。





## 测试结果

通过调节RF输入功率水平手动收集测量结果。不同输出配置中的回损是在ADL6010的功率范围内测量的。

同时还用Keysight高级设计系统(ADS)运行RF仿真。该软件是一款面向RF和微波应用的电子设计仿真工具。仿真是为了验证RF输入走线插入损耗和反射是否处于特定限值范围以内，同时模拟定向耦合器的性能。

Marki Microwave C10-0226定向耦合器提供了一个仿真模型文件，即.s4p文件。该文件中的信息描述了耦合器的S参数，在ADS中可以方便地用于仿真目的。在DC至耦合器26.5 GHz的频率上限范围内进行仿真，每次仿真时，输入功率均设为0 dBm。

## 回损测量

在测试EV-VSWR-SDZ评估板时，将一个9 dB的衰减器端接连接到耦合器输出端，以验证与仿真结果相比，是否能在选定频率下测得预期衰减水平。

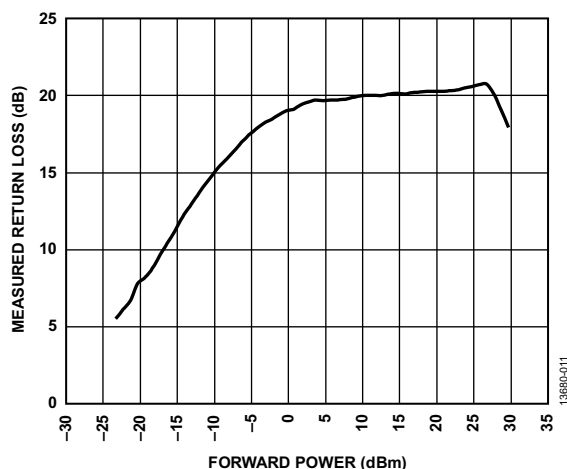


图11. 回损测量

如图11所示，在0 dBm至25 dBm的输入功率范围内，测得的回损保持在20 dB，几乎不变。该值为前述正向和反向衰减（9 dB + 9 dB）与耦合器在2 GHz下用Marki Microwave C10-0226时的正向插入损耗之和。在正向耦合端口的输入功率达到约27 dBm之后，回损会显著减小。之所以会减小是因为正向耦合端口的耦合功率接近+15 dBm（10 dB耦合），此为ADL6010的功率上限。随着输入功率减小，测得回损会开始减小，因为反向耦合端口的反射功率降至-30 dBm的下限以下。图11所示为ADL6010可以测量20 dB回损的功率范围。

## 功率检波器测得功率

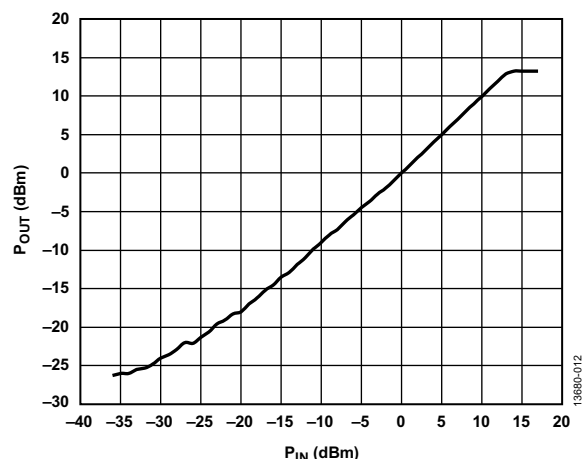


图12. 输入功率与测得耦合输出功率

图12展示了测得功率随输入功率而变化的情况。在每个功率水平下，在2 GHz条件下执行一个校准例程，以取得正向耦合端口的准确功率测量值。随着输入功率的增加，测得功率将达到检波器的限值，即15 dBm。类似地，随着输入功率的减小，会达到检波器的下限，测量精度会随之下降。

## 开路配置

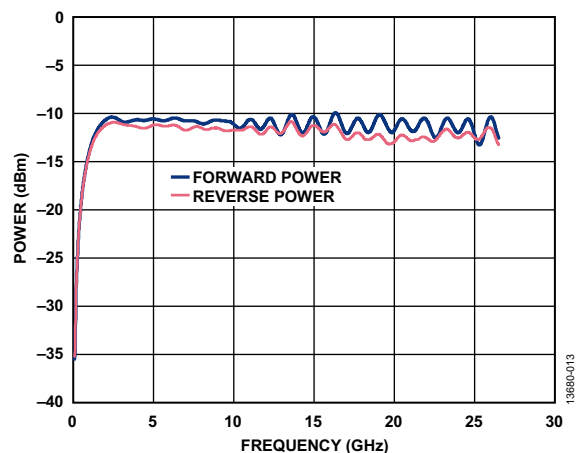


图13. 耦合器正向和反向功率与频率的关系——开路

图13表明，当正向和反向功率水平的值接近时，回损接近0 dB，与前面提到的50  $\Omega$ 端接情况不同。

该开路仿真展示了信号主体是如何通过相反方向的耦合器反射回正向波的。正向波与反射波之差由耦合器在频率范围内的插入损耗导致。此图表明，确切的回损与VSWR测量值会随所用耦合器而变化，原因是耦合器阻抗在频率范围内的匹配不理想。

另外，可以设置一个阈值回损，以指示系统中是否发生了失配且失配远远大于耦合器回损。

### 50 $\Omega$ 输出端接电路配置

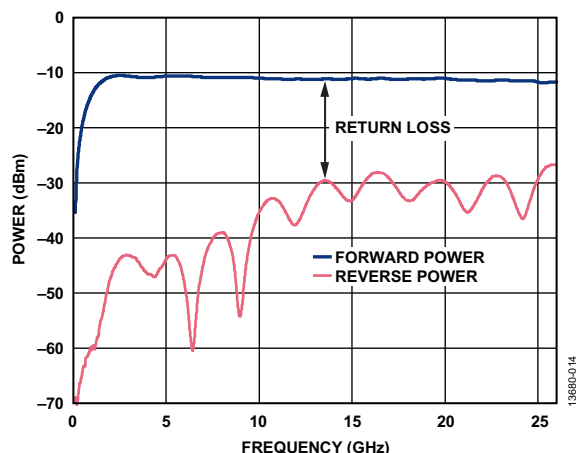


图14. 耦合器正向和反向功率与频率的关系——50  $\Omega$  端接

图14展示了Marki Microwave C10-0226 RF耦合器在50  $\Omega$  端接输出条件下的正向插入损耗和反射信号，其中，0 dBm的功率水平被施加于耦合器正向端口。耦合器的额定工作频率范围为2 GHz至26.5 GHz。因此，在图14中，不出所料，当频率超过2 GHz时，耦合器开始工作。仿真中，在耦合器上使用了一条匹配完善的传输线路，其输出阻抗为50  $\Omega$ 。任意频率下的回损为正向与反向功率之差。此图表明，回损随频率变化。然而，在该频率范围内，回损接近20 dB，这是可以接受的，因为回损值大于20 dB时，可以忽略不计。

### 3 dB 输出衰减器电路配置

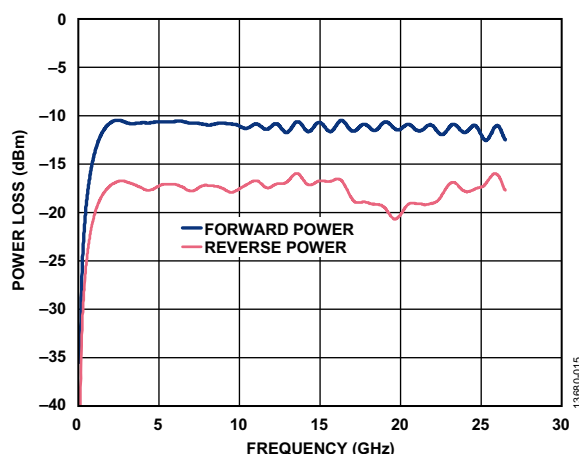


图15. 耦合器正向和反向功率与频率的关系——3 dB 衰减器

在图15中，回损在6 dB至约15 GHz的范围内相对稳定，在此之后，耦合器损耗增加，衰减提高。

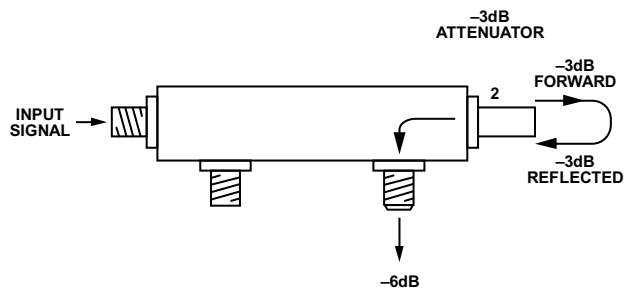


图16. 带6 dB衰减的耦合器

6 dB衰减的原因在于，3 dB耦合器会使入射信号和反射信号同时衰减3 dB。如图16所示，信号先在正向衰减3 dB，然后反射并再次衰减3 dB。测得的反射信号为正向和反射衰减累计结果。

### 校准结构走线插入损耗

RF走线插入损耗是用EV-VSWR-SDZ评估板的布局文件仿真的。将该布局文件导入ADS工具以运行仿真，以确定板上RF走线的损耗。

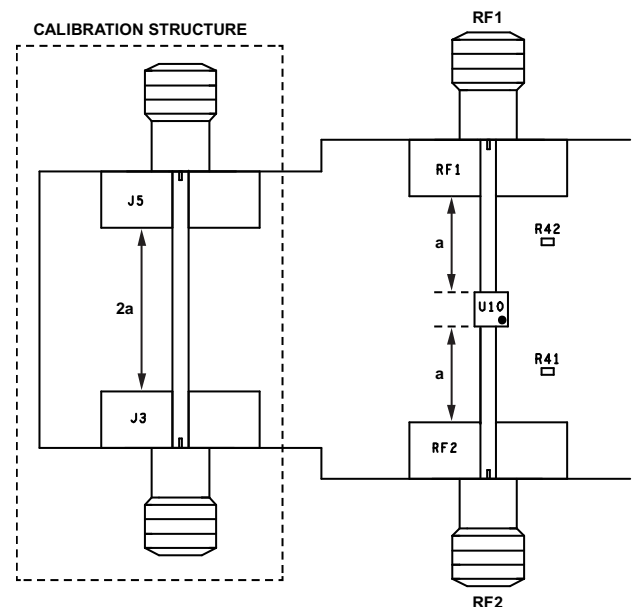


图17. 校准结构

仿真中使用了图17在评估板部分显示的校准结构。在评估板设计中纳入该结构是为了测量从SMA连接器到开关的损耗（距离A）。如图所示，校准结构的长度刚好为从RF1/RF2到HMC547开关（U10）的距离的两倍。为了在特定频率下测量这些RF走线损耗，把信号施加到一个校准结构连接器上，然后再在相反方向的连接器上测量。

在从DC至26.5 GHz的范围内，在该结构上运行ADS仿真工具，以模拟RF直线的插入损耗。

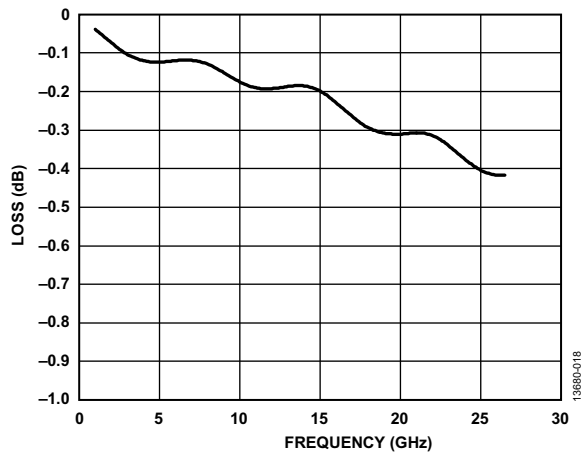


图18. 校准结构损耗——频率与功率

如图18所示，校准结构的插入损耗在26.5 GHz频率下会达到最大衰减值，即约-0.4 dB。

一般认为该插入损耗处于评估板可接受的限值范围以内。如果该插入损耗较大，结果会限制测量结果。

图19为与EVAL-SDP-CB1Z板相连的EV-VSWR-SDZ的照片。

面向HMC547LC3的一款电气等效更换器件将于2016年6月上市。

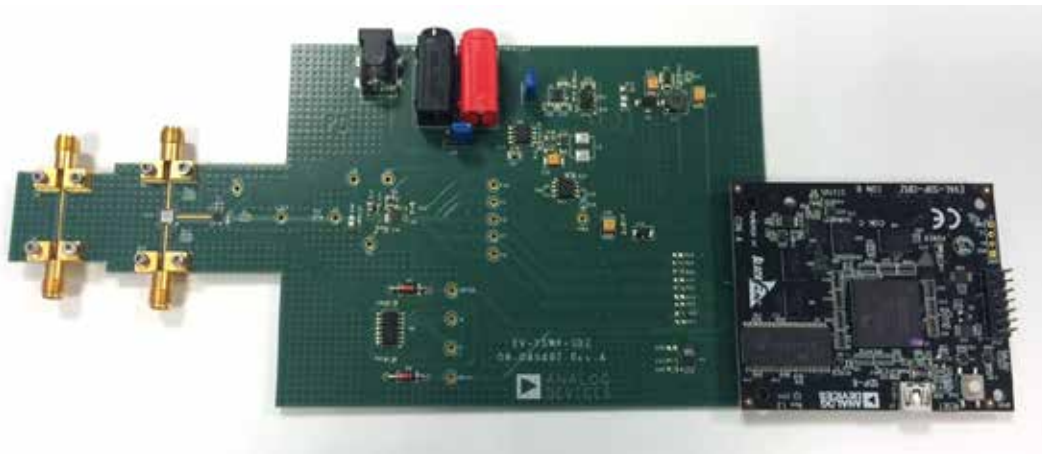


图19. EV-VSWR-SDZ板连接至EVAL-SDP-CB1Z板

## 更多资料

CN-0387设计支持包:

[www.analog.com/CN0387-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0387-DesignSupport)

EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台用户指南(UG-277)

EVAL-AD7091RSDZ评估板用户指南(UG-409)

ADIsimRF设计工具

Ardizzoni, John, 高速印刷电路板布局实用指南,《模拟对话》39-09, 2005年9月。

电路笔记CN-0366, 一款范围为-30 dBm至+15 dBm的40 GHz微波功率计, ADI公司。

电路笔记CN-0178, 软件校准型50 MHz至9 GHz RF功率测量系统, ADI公司。

MT-031教程,《实现数据转换器的接地并解开“AGND”和“DGND”的谜团》, ADI公司。

MT-073教程,《高速可变增益放大器(VGA)》, ADI公司。

MT-101教程,《去耦技术》, ADI公司。

## 数据手册和评估板

[HMC547LC3数据手册和评估板](#)

[ADL6010数据手册和评估板](#)

[AD7091R数据手册和评估板](#)

## 修订历史

**2015年10月—修订版0至修订版A**

更改“设置与测试”部分 .....5

**2015年10月—修订版0: 初始版**

(Continued from first page) "Circuits from the Lab" 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" 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". Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, "Circuits from the Lab" 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" at any time without notice, but is under no obligation to do so. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN13680sc-0-10/15(A)



[www.analog.com/cn](http://www.analog.com/cn)