

### Circuits from the Lab™ Reference Circuits

Circuits from the Lab™ reference circuits are engineered and tested for quick and easy system integration to help solve today's analog, mixed-signal, and RF design challenges. For more information and/or support visit [www.analog.com/CN0281](http://www.analog.com/CN0281).

#### 连接/参考器件

<a href="#">ADuC7060/ADuC7061</a>	基于ARM7的微控制器，内置双通道24位Σ-Δ型ADC
<a href="#">ADT7311</a>	±0.5℃精度、16位数字SPI温度传感器
<a href="#">AD8628</a>	精密、低功耗、零漂移运算放大器
<a href="#">ADP7102</a>	低压差线性稳压器

## 利用ADuC7060/ADuC7061精密模拟微控制器构建基于汽车SENT接口且带冷结补偿的热电偶温度传感器

### 评估和设计支持

#### 设计和集成文件

[原理图](#)、[布局文件](#)、[源代码](#)

### 电路功能与优势

本电路显示如何在精密热电偶温度监控应用中使用ADuC7060或ADuC7061精密模拟微控制器。ADuC7060/ADuC7061集成双通道24位Σ-Δ型模数转换器(ADC)、双通道可编程电流源、14位数模转换器(DAC)、1.2 V内置基准电压源以及ARM7内核、32 kB闪存、4 kB SRAM和各种数字外设，例如UART、定时器、串行外设接口(SPI)和I<sup>2</sup>C接口。

在该电路中，ADuC7060/ADuC7061连接到一个热电偶和一个100 Ω铂电阻温度检测器(RTD)。RTD用于冷结补偿。作为额外选项，ADT7311数字温度传感器可用于代替RTD来测量冷结温度。

在源代码中，ADC采样速率选择4 Hz。当ADC输入可编程增益放大器(PGA)的增益配置为32时，ADuC7060/ADuC7061的无噪声分辨率大于18位。

与主机的单边半字节传输(SENT)接口通过使用定时器控制数字输出引脚来实现。然后，使用外部NPN晶体管将此数字输出引脚通过外部方式电平转换为5 V。按照SENT协议(SAE J2716标准)第6.3.1节的建议在SENT输出电路中提供了EMC滤波器。数据按下降沿到下降沿测量，每个脉冲的持续时间与系统时钟周期数相关。可通过测量SYNC脉冲来

确定系统时钟速率。SYNC脉冲在每个数据包开始时发送。要了解更多详情，请参见“SENT接口”部分。

### 电路描述

本应用中用到ADuC7060/ADuC7061的下列特性：

- 内置PGA的24位Σ-Δ型主ADC。PGA的增益在本应用的软件中设置为32。主ADC在热电偶信号采样与RTD电压信号采样之间连续切换。
- 如果用RTD测量冷结温度，可编程激励电流源会驱动受控电流流过RTD。双通道电流源可在0 μA至2 mA范围内以200 μA阶跃配置。本例使用200 μA设置，以便将RTD自热效应引起的误差降至最小。
- 如果用ADT7311测量冷结温度，将在主机模式下使用SPI接口来连接ADT7311从机。
- ADuC7060/ADuC7061中ADC的内置1.2 V基准电压源。内部基准电压源精度高，适合测量热电偶电压。
- ADuC7060/ADuC7061中ADC的外部基准电压源。为了测量RTD电阻，我们采用比率式设置，将一个外部基准电阻( $R_{REF}$ )连接在外部VREF+和VREF-引脚上。
- AD8628单电源运算放大器用于缓冲 $R_{REF}$ 至ADC的高阻抗基准电压。
- OP193是用于替代AD8628的另一种选项。
- 用于将热电偶共模电压设为地以上850 mV的DAC。

#### 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)

- ARM7TDMI®内核。功能强大的16/32位ARM7内核集成了32 kB闪存和SRAM存储器，用来运行用户代码，可配置并控制ADC、通过RTD处理ADC转换，以及控制SPI接口的通信。
- 定时器1和数字输出引脚用于产生SENT输出信号。
- 用于抑制ESD、电快速瞬变(EFT)和电涌瞬变(最高23 kV)的可选PESDLIN保护二极管。
- 按照SAE J2716标准(SENT协议)第6.3.1节的建议在SENT输出端提供了EMC滤波器。
- 两个外部开关用来强制该器件进入闪存引导模式。使S1处于低电平，同时切换S2，ADuC7060/ADuC7061将进入引导模式，而不是正常的用户模式。在引导模式下，通过UART接口可以对内部闪存重新编程。

ADuC7060/ADuC7061的辅助ADC不含PGA，因此二者均连接到主ADC，二者之间的切换通过软件完成。热电偶和RTD产生的信号均非常小，因此需要使用PGA来放大这些信号。

本应用使用的热电偶为T型(copperconstantan)，其温度范围为-200°C至+350°C。其灵敏度约为40 μV/°C，这意味着ADC在双极性模式和32倍PGA增益设置下可以覆盖热电偶的完整温度范围。

RTD用于冷结补偿。本电路使用的是100 Ω铂RTD，型号为Enercorp PCS 1.1503.1。它采用0805表贴封装，温度变化率为0.385 Ω/°C。

注意，基准电阻 $R_{REF}$ 应为精密5.6 kΩ (±0.1%)电阻。

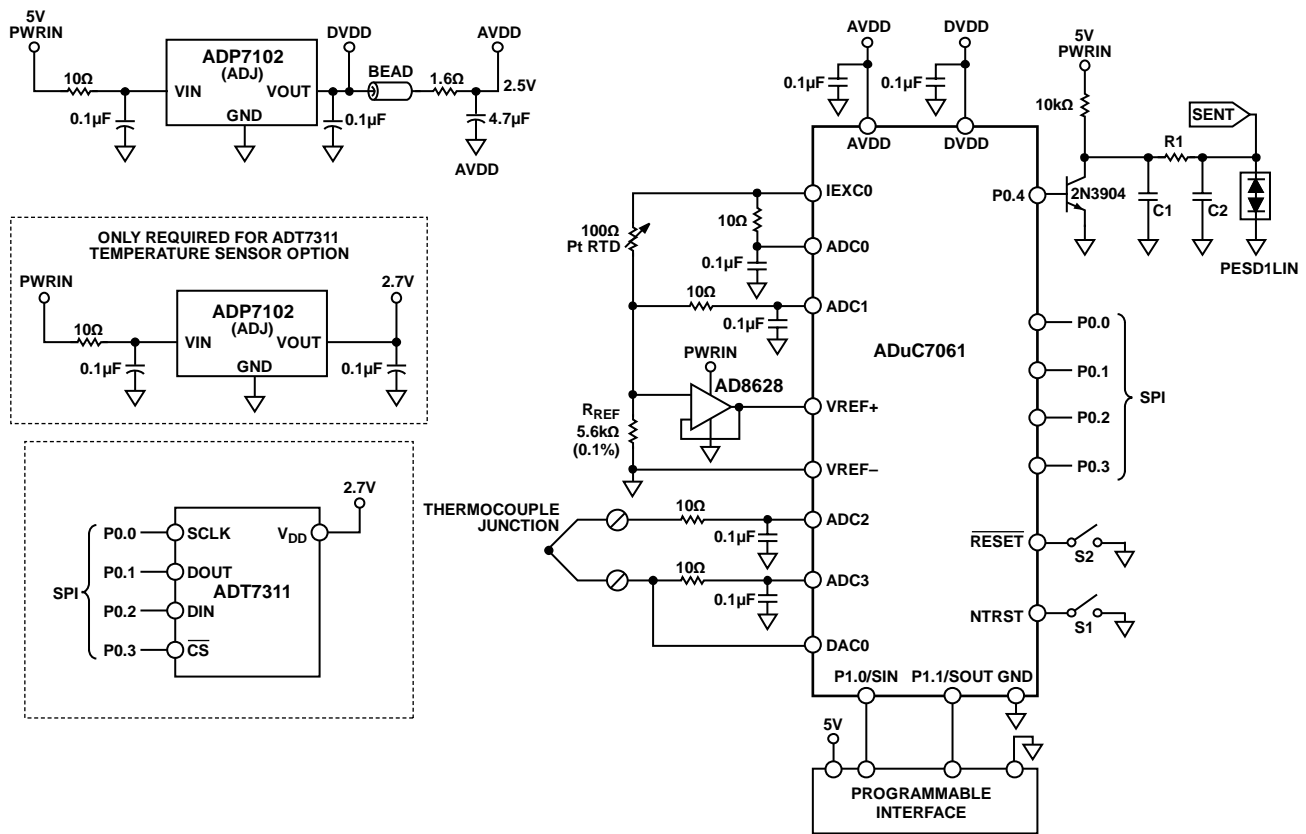


图1. 具有热电偶接口、用作温度监控器控制器的ADuC7060/ADuC7061(原理示意图，未显示所有连接)

10889-001

## SENT接口

SENT接口是一种单引脚单向(传感器至主机)时间调制信号,主要用于在汽车系统中使分布式传感器与主机CPU接口。

SENT的主要要求包括以下几点:

- 必须有0 V至5 V的信号摆幅,且带有EMC滤波。
- 用于SENT信号的时钟必须具备 $\pm 20\%$ 的精度。
- SENT输出电路必须足够稳定,以耐受对地短路和电源电压短路。

关联的源代码使用ADuC7061的P0.4数字引脚作为SENT输出引脚。所用数据包格式为单传感器数据包格式,详见SAE J2716标准(SENT协议)文档的第A.4节。可修改源代码(尤其是SENT.h和Sent.c文件),来支持其它数据包格式。整体温度结果以 $^{\circ}\text{C}$ 格式通过数据半字节1至数据半字节3返回。总而言之,返回的输出数据包为

- 同步脉冲的56个时钟周期
- 状态脉冲(7个周期至15个周期)
- 数据半字节1(温度结果的Bit 11至Bit 8)
- 数据半字节2(温度结果的Bit 7至Bit 4)
- 数据半字节3(温度结果的Bit 3至Bit 0)
- 数据半字节4(计数器的Bit 7至Bit 4)
- 数据半字节5(计数器的Bit 3至Bit 0)
- 数据半字节6(与半字节1相反)

图2为数据包示例。

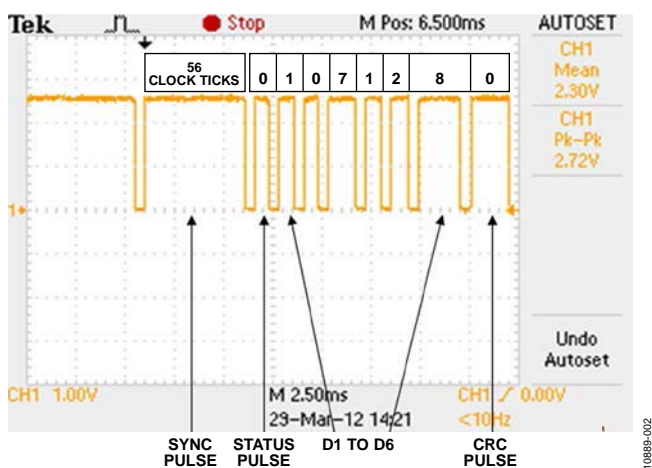


图2. 在P0.4引脚处测得的示例SENT数据包

该电路必须构建在具有较大面积接地层的多层印刷电路板(PCB)上。为实现最佳性能,必须采用适当的布局、接地和去耦技术(请参见指南MT-031“实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团”、指南MT-101“去耦技术”以及ADuC7060/ADuC7061评估板布局)。

## 代码说明

定时器1用于控制SENT输出引脚P0.4。根据热电偶的ADC结果和冷结温度计算出温度结果后,SENT数据包结构SENT\_PACKET将更新,并且定时器1会启动。该结构的域会在P0.4引脚上逐个输出,如图2所示。数据包的第一级是同步序列。主机根据此脉冲确定时钟周期,并据此确定后续半字节值。

要获得温度读数,应测量热电偶和RTD的温度。RTD温度通过一个查找表转换为其等效热电偶电压。将这两个电压相加,便可得到热电偶电压的绝对值。

首先,测量热电偶两条线之间的电压(V1)。然后,测量RTD电压并通过查找表将其转换为温度。接着,将此温度转换为其等效热电偶电压(V2)。然后,将V1和V2相加,以得出整体热电偶电压,接着将此值转换为最终的温度测量结果。

最后,采用分段线性方案来计算最终的温度值。固定数量的电压各自对应的温度存储在一个数组中,其间的值则利用相邻点的线性插值法计算。图3给出了使用理想热电偶电压时的算法误差。图4显示了使用ADuC7060/ADuC7061上的ADC0引脚测量整个热电偶工作范围内的52个热电偶电压时获得的误差。最差情况的总误差小于 $1^{\circ}\text{C}$ 。

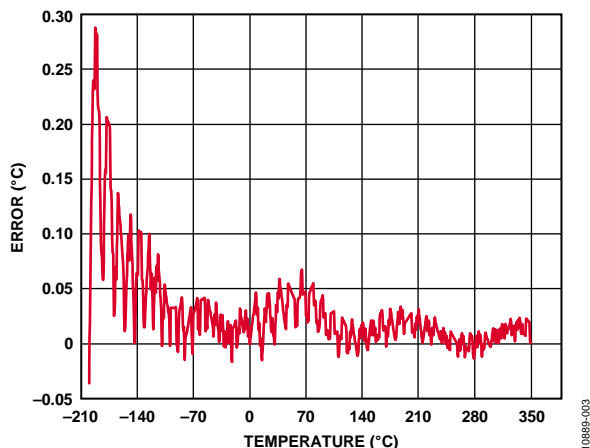


图3. 通过分段线性逼近法利用52个校准点和理想测量值计算时的误差

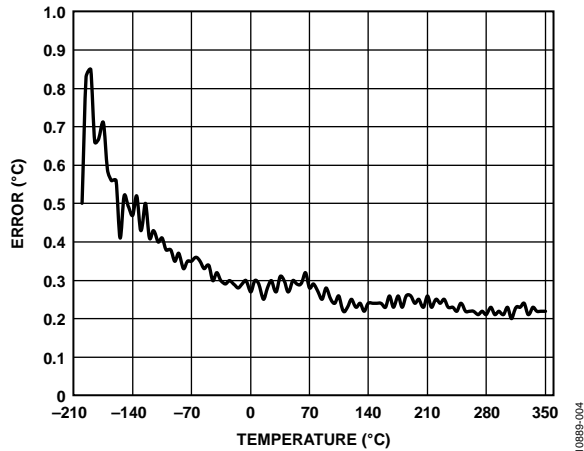


图4. 通过分段线性逼近法利用在ADuC7060/ADuC7061的ADC0引脚处测量的52个校准点计算时的误差

RTD温度是运用查找表计算出来的，并且对RTD的运用方式与对热电偶一样。注意，描述RTD温度与电阻关系的多项式与描述热电偶的多项式不同。

设计支持包中的源代码是利用KEIL  $\mu$ Vision V3.90生成的。

有关线性化和实现RTD最佳性能的详细信息，请参考应用笔记AN-0970“利用ADuC706x微控制器实现RTD接口和线性化”。

## 常见变化

可不使用外部RTD而改用ADT7311温度传感器来测量冷结温度。

使用ADT7311的源代码随附于设计支持包中的软件包：[www.analog.com/CN0281-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0281-DesignSupport)。

需要一个额外的外部稳压器来为ADT7311供电。

如果微控制器上需要更多GPIO引脚，则可选择采用48引脚LFCSP或48引脚LQFP封装的ADuC7060。请注意，ADuC7060/ADuC7061可通过标准JTAG接口进行编程或调试。

使用外部基准电阻作为RTD测量的基准源时，建议以单位增益模式使用运算放大器来对VREF+引脚的输入进行缓冲。这是为了确保进入VREF+引脚的输入泄漏电流不会有损于测量精度。图9中的OP193就是针对此目的。图1显示了额定工作温度范围为-40°C至+150°C的AD8628。

对于更宽的温度范围，可以使用不同的热电偶，例如型热电偶。为使冷结补偿误差最小，可以让一个热敏电阻与实际的冷结接触，而不是将其放在PCB上。

针对冷结温度测量，可以用一个外部数字温度传感器来代替RTD和外部基准电阻。例如，ADT7311可以通过I<sup>2</sup>C接口连接到ADuC7060/ADuC7061。

有关冷结补偿的更多信息，请参阅ADI公司的《传感器信号调理》第7章“温度传感器”。

## 电路评估与测试

### SENT接口测试

评估SENT接口输出时，利用数字示波器和逻辑分析仪。测试时间仅为一个SENT时钟周期(100  $\mu$ s)，这是SENT标准允许的最大值。这项实施方案的限制因素包括以下几点：

- 定时器FIQ中断延迟的变化。ARM7的中断延迟最高可达45个CPU时钟。CPU时钟频率为10.24 MHz时，此延迟最高可达4.4  $\mu$ s。最小值为5个CPU时钟(0.5  $\mu$ s)。当ARM7内核正在执行LDMIA或STMIA(从存储器加载或向其中存储多个值)时，延迟状况最差。选择“**Split Load and Store Multiple**(独立加载和存储多项)”编译器选项即可最大限度地避免此问题，具体方法见图5。
- ADuC7060/ADuC7061上的10.24 MHz振荡器在最差情况下的精度为 $\pm 3\%$ ，工作温度范围为-40°C至+125°C。

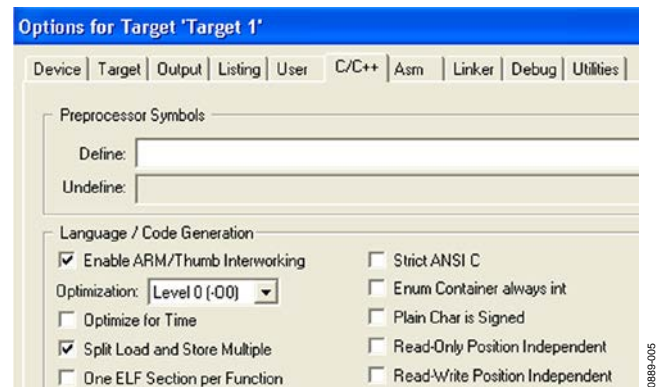


图5. 选择“Split Load and Store Multiple(独立加载和存储多项)”选项  
尽管存在这些限制，但选择一个SENT时钟周期(100  $\mu$ s)时，这种实施方案仍完全符合SENT规范的 $\pm 20\%$ 时序精度要求。

图1中的SENT输出上考虑到了EMC滤波器。为此滤波器选择值(R1、C1、C2)，以满足目标发射器输出波形，如图6所示，从而降低因SENT输出而造成的EMC辐射。

这里只对此滤波器做了有限测试；因此，忽略了该输出滤波器的电阻和电容值，如图1所示(R1、C1和C2)。

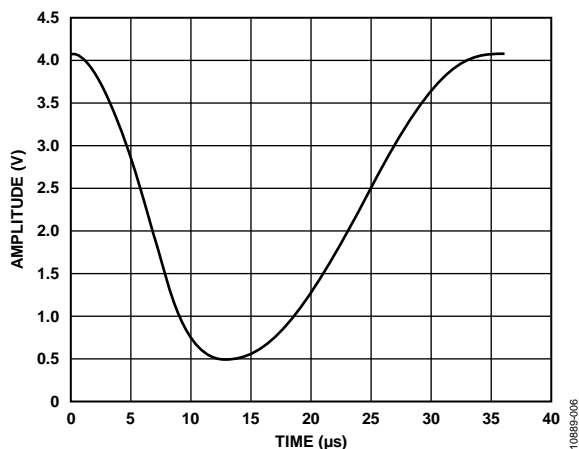


图6. SENT整形波形发射器输出示例

为了进一步测试和评估该电路，这里单独评估了热电偶测量和RTD测量。

### 热电偶测量测试

基本测试设置如图7所示。使用了两种方法来评估该电路的性能。首先使用连接到电路板的热电偶来测量冰桶的温度，然后测量沸水的温度。

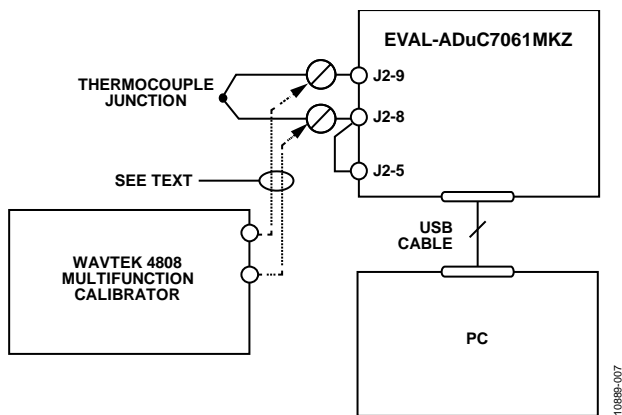


图7. 用于在整个热电偶输出电压范围内校准和测试电路的设置

使用Wavetek 4808多功能校准仪来充分评估误差，如图3和图4所示。这种模式下，校准仪代替热电偶作为电压源，如图7所示。为了评估T型热电偶的整个范围，利用校准仪设置T型热电偶 $-200^{\circ}\text{C}$ 至 $+350^{\circ}\text{C}$ 的正负温度范围之间52个点的等效热电偶电压(T型热电偶请参见ITS-90表)。

为了评估查找算法的精度，将 $-200^{\circ}\text{C}$ 至 $+350^{\circ}\text{C}$ 温度范围内每隔 $+1^{\circ}\text{C}$ 的温度所对应的551个电压读数传递到温度计算函数中。针对线性方法和分段线性逼近法计算得到误差，如图3和图4所示。

### RTD测量测试

为了评估RTD电路和线性化源代码，以精确的可调电阻源代替了电路板上的RTD。所用的仪器是1433-Z十进制电阻。测试的RTD值范围是 $90\ \Omega$ 到 $140\ \Omega$ ，代表 $-25^{\circ}\text{C}$ 到 $+114^{\circ}\text{C}$ 的RTD温度范围。

图8显示了RTD测试的误差结果，图9则显示了设置电路。

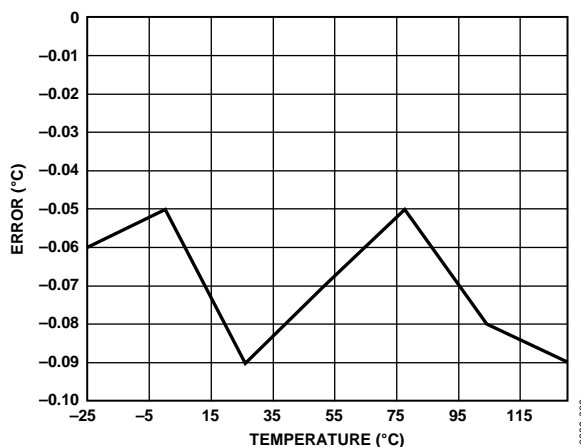


图8. 使用分段线性代码和ADC0测量结果进行RTD测量时的 $^{\circ}\text{C}$ 误差

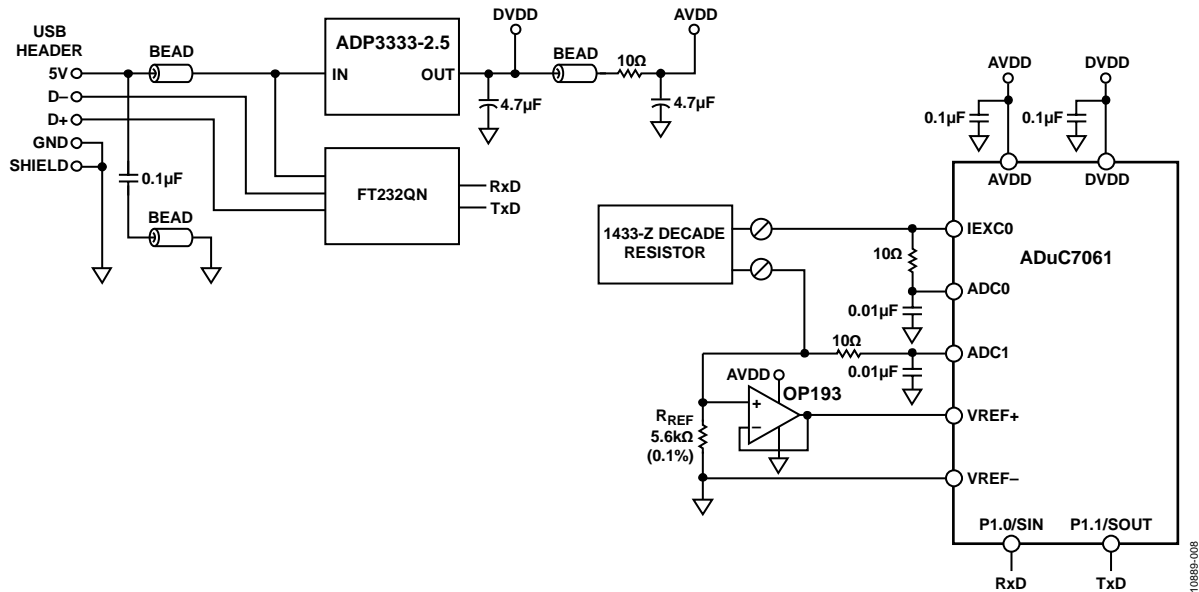


图9. 用于校准和测试-25°C至+114°C范围内RTD输出电压的测试设置

## 了解详情

CN0281 Design Support Package:

<http://www.analog.com/CN0281-DesignSupport>.

ADIsimPower Design Tool.

Kester, Walt. 1999. *Sensor Signal Conditioning*. Analog Devices. Chapter 7, "Temperature Sensors."

Kester, Walt. 1999. *Sensor Signal Conditioning*. Analog Devices. Chapter 8, "ADCs for Signal Conditioning."

Looney, Mike. *RTD Interfacing and Linearization Using an ADuC706x Microcontroller*. AN-0970 Application Note. Analog Devices.

MT-022 Tutorial, *ADC Architectures III: Sigma-Delta ADC Basics*. Analog Devices.

MT-023 Tutorial, *ADC Architectures IV: Sigma-Delta ADC Advanced Concepts and Applications*. Analog Devices.

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

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

ITS-90 Table for Type T Thermocouple.

SAE J2716 Standard (SENT Protocol).

## 数据手册和评估板

[ADuC7060/ADuC7061 Data Sheet](#)

[ADuC7060/ADuC7061 Evaluation Kit](#)

[ADM3202 Data Sheet](#)

[ADT7311 Data Sheet](#)

[AD8628 Data Sheet](#)

[ADP7102 Data Sheet](#)

## 修订历史

**2013年7月—修订版0至修订版A**

更改图1 ..... 2

更改“常见变化”部分 ..... 4

**2012年7月—修订版0：初始版**

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