

**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/CN0300](http://www.analog.com/CN0300).

### 连接/参考器件

|             |                                  |
|-------------|----------------------------------|
| ADuCM360    | 基于Cortex-M3的微控制器，内置双通道24位Σ-Δ型ADC |
| ADP1720-3.3 | 低压差线性稳压器                         |

## 提供4 mA至20 mA输出的完整闭环精密模拟微控制器热电偶测量系统

### 评估和设计支持 电路评估板

[CN-0300评估板\(EVAL-CN0300-EB1Z\)](#)包含USB-SWD/UART和SEGGER J-Link Lite电路板

### 设计和集成文件

[原理图](#)、[布局文件](#)、[物料清单](#)、[ADuCM360源代码](#)

### 电路功能与优势

本电路在精密热电偶温度监控应用中使用ADuCM360精密模拟微控制器，并相应地控制4 mA至20 mA的输出电流。ADuCM360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、12位数模转换器(DAC)、1.2 V内置基准

电压源以及ARM Cortex-M3内核、126 KB闪存、8 KB SRAM和各种数字外设，例如UART、定时器、SPI和I<sup>2</sup>C接口。

在该电路中，ADuCM360连接到一个T型热电偶和一个100 Ω铂电阻温度检测器(RTD)。RTD用于冷结补偿。低功耗Cortex-M3内核将ADC读数转换为实际温度值。支持的T型温度范围是-200°C至+350°C，而此温度范围所对应的输出电流范围是4 mA至20 mA。

该电路为热电偶测量提供了完整的解决方案，所需外部元件极少，并且可针对高达28 V的环路电压采用环路供电。

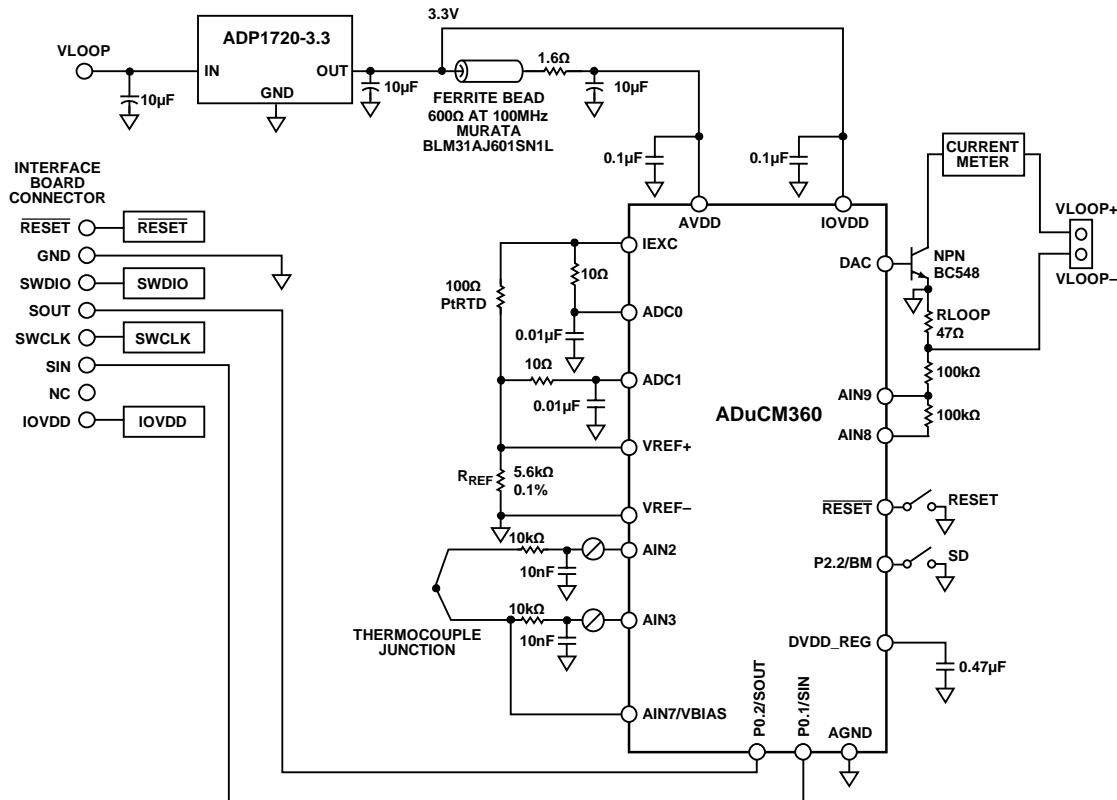


图1. 具有热电偶接口、用作温度监控控制器的ADuCM360(原理示意图，未显示所有连接)

### 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](http://www.analog.com)  
Fax: 781.461.3113 ©2012 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## 电路描述

本应用中用到ADuCM360的下列特性：

- 12位DAC输出及其灵活的片内输出缓冲器用于控制外部NPN晶体管BC548。通过控制此晶体管的 $V_{BE}$ 电压，可将经过 $47\ \Omega$ 负载电阻的电流设置为所需的值。
- DAC为12位单调式，但其输出精度通常在3 LSB左右。此外，双极性晶体管引入了线性误差。为提高DAC输出的精度并消除失调和增益端点误差，ADC0会测量反馈电压，从而反映负载电阻( $R_{LOAD}$ )两端的电压。根据此ADC0读数，DAC输出将通过源代码纠正。这样就针对4 mA至20 mA的输出提供了 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的精度。
- 24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC内置PGA，在软件中为热电偶和RTD设置32的增益。ADC1在热电偶与RTD电压采样之间连续切换。
- 可编程激励电流源驱动受控电流流过RTD。双通道电流源可在 $0\ \mu\text{A}$ 至2 mA范围内以一定的阶跃进行配置。本例使用 $200\ \mu\text{A}$ 设置，以便将RTD自热效应引起的误差降至最小。
- ADuCM360中的ADC内置了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。
- ADuCM360中ADC的外部基准电压源。测量RTD电阻时，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。由于该电路中的基准电压源为高阻抗，因此需要使能片内基准电压输入缓冲器。片内基准电压缓冲器意味着无需外部缓冲器即可将输入泄漏影响降至最低。
- 偏置电压发生器(VBIAS)。VBIAS功能用于将热电偶共模电压设置为 $AVDD/2$  (900 mV)。同样，这样便无需外部电阻，便可以设置热电偶共模电压。
- ARM Cortex-M3内核。功能强大的32位ARM内核集成了126 KB闪存和8 KB SRAM存储器，用来运行用户代码，可配置和控制ADC，并利用ADC将热电偶和RTD输入转换为最终的温度值。它还可以利用来自AIN9电压水平的闭环反馈控制并持续监控DAC输出。出于额外调试目的，它还可以控制UART/USB接口上的通信。

- UART用作与PC主机的通信接口。这用于对片内闪存进行编程。它还可作为调试端口，用于校准DAC和ADC。
- 两个外部开关用来强制该器件进入闪存引导模式。使SD处于低电平，同时切换RESET按钮，ADuCM360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。
- J1连接器是一个8引脚双列直插式连接器，与CN0300支持硬件随附的USB-SWD/UART板相连。配合J-Link-Lite板可对此应用电路板进行编程和调试。参见图3。

热电偶和RTD产生的信号均非常小，因此需要使用可编程增益放大器(PGA)来放大这些信号。

本应用使用的热电偶为T型(铜-康铜)，其温度范围为 $-200^\circ\text{C}$ 至 $+350^\circ\text{C}$ ，灵敏度约为 $40\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，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整个温度范围。

RTD用于冷结补偿。本电路使用的RTD为 $100\ \Omega$ 铂RTD，型号为Enercorp PCS 1.1503.1。它采用0805表贴封装，温度变化率为 $0.385\ \Omega/^\circ\text{C}$ 。

注意，基准电阻 $R_{REF}$ 必须为精密 $5.6\ \text{k}\Omega$  ( $\pm 0.1\%$ )电阻。

本电路必须构建在具有较大面积接地层的多层电路板(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(请参考指南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ADuCM360TCZ评估板布局)。

评估本电路所用的PCB如图2所示。

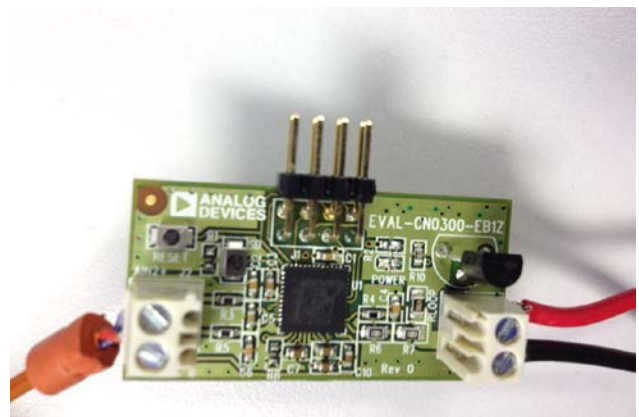


图2. 本电路所用的EVAL-CN0300-EB1Z板



图3. 连接至USB-SWD/UART板和SEGGER J-Link-Lite板的 EVAL-CN0300-EB1Z板

图3显示了USB-SWD/UART板。此板用作PC USB端口的接口板。该USB端口可用于通过基于UART的下载器对器件进行编程。它也可用于连接PC上的COM端口(虚拟串行端口)。这是运行校准程序所需要的条件。

J-Link-Lite插入USB-SWD/UART板的20引脚连接器中。J-Link-Lite提供代码调试和编程支持。它通过另一个USB连接器连接至PC。

### 代码说明

用于测试本电路的源代码可从ADuCM360产品页面下载(zip压缩文件)。源代码使用示例代码随附的函数库。图4显示了利用Keil  $\mu$ Vision4工具查看时项目中所用的源文件列表。



图4.  $\mu$ Vision4中查看的源文件

### 代码的校准部分

可调整编译器#define值(calibrateADC1和calibrateDAC), 以使能或禁用ADC和DAC的校准程序。

要校准ADC或DAC, 接口板(USB-SWD/UART)必须连接至J1和PC上的USB端口。可使用“超级终端”等COM端口查看程序来查看校准菜单并逐步执行校准程序。

校准ADC时, 源代码会提示用户将零电平和满量程电压连接至AIN2和AIN3。注意, AIN2是正输入端。完成校准程序后, ADC1INTGN和ADC1OF寄存器的新校准值就会存储到内部闪存中。

校准DAC时, 应通过精确的电流表连接VLOOP+输出端。DAC校准程序的第一部分校准DAC以设置4 mA输出, 第二部分则校准DAC以设置20 mA输出。用于设置4 mA和20 mA输出的DAC代码会存储到闪存中。针对最终的4 mA和20 mA设置在AIN9处测得的电压也会记录下来并存储到闪存中。由于在AIN9处的电压与流经RLOOP的电流线性相关, 因此这些值会用于计算DAC的调整因子。这种闭环方案意味着, 可以使用片内24位 $\Sigma$ - $\Delta$ 型ADC进行微调而消除DAC和基于晶体管的电路上的所有线性误差。

UART配置为波特率9600、8数据位、无极性、无流量控制。如果本电路直接与PC相连, 则可使用“超级终端”等通信端口查看程序来查看该程序发送给UART的结果, 如图5所示。

要输入校准程序所需的字符, 请在查看终端中键入所需字符, 然后ADuCM360 UART端口就会收到该字符。

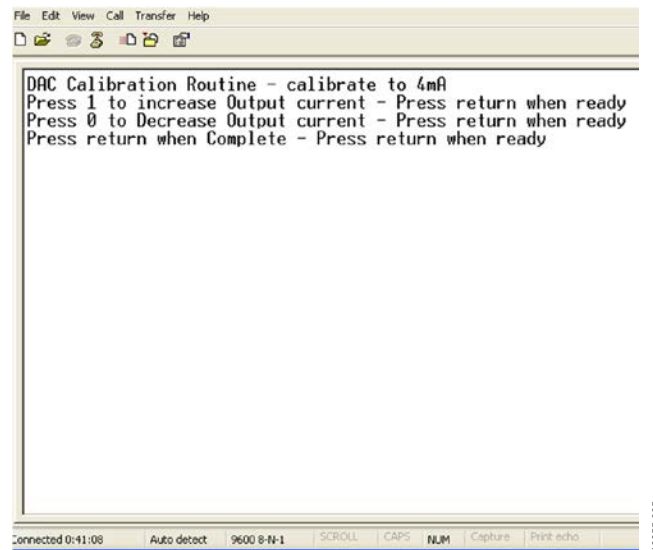


图5. 校准DAC时的“超级终端”输出

## 代码的温度测量部分

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(T型热电偶请参见ISE, Inc.的ITS-90表)。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)。测量RTD电压并通过查找表转换为温度，然后再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。

对热电偶而言，固定数量的电压所对应的温度会存储在一个数组中。其间的温度值利用相邻点的线性插值法计算。

图6显示了使用ADuCM360上的ADC1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°C。

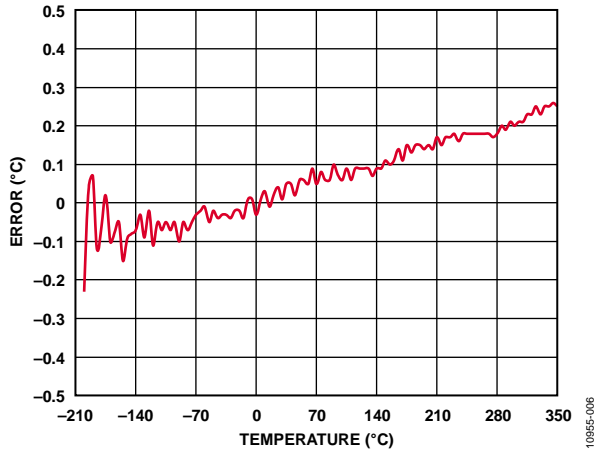


图6. 通过分段线性逼近法利用ADuCM360/ADuCM361所测52个校准点时的误差

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。

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”。

## 代码的温度至电流输出部分

测得最终温度后，将DAC输出电压设置为适当的值，以便在RLOOP上产生所需的电流。输入温度范围应该是-200°C至+350°C。代码针对-200°C和+350°C设置的输出电流分别是4 mA和20 mA。代码实施的是闭环方案，如图7所示，其中AIN9上的反馈电压通过ADC0测量，然后此值用于补偿DAC输出设置。FineTuneDAC(void)函数执行此项校正。

为获得最佳结果，应在开始该电路的性能测试前校准DAC。

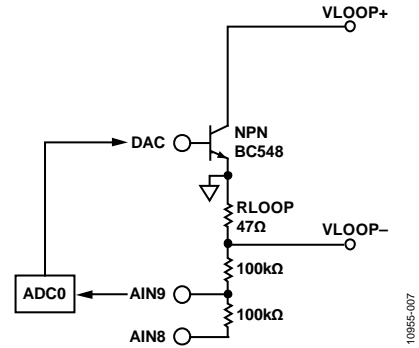


图7. 闭环控制4 mA至20 mA的DAC输出

出于调试目的，以下字符串会在正常工作期间发送至UART(见图8)。

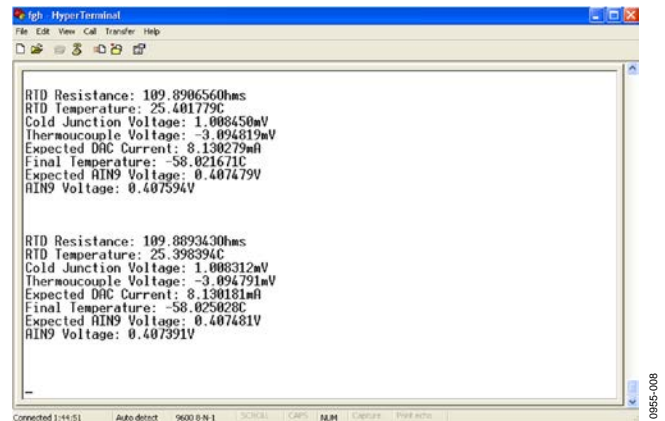


图8. 用于调试的UART字符串

## 常见变化

对于标准UART至RS-232接口，可以用ADM3202等器件代替FT232R收发器，前者需采用3 V电源供电。对于更宽的温度范围，可以使用不同的热电偶，例如J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，ADT7410可以通过I<sup>2</sup>C接口连接到ADuCM360。

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

如果USB连接器与本电路之间需要隔离，则必须增加ADuM3160/ADuM4160隔离器件。

## 电路评估与测试

### 电流输出测量

DAC和外部电压电流转换器电路性能测试全都一起完成。

一个电流表与VLOOP+连接串联，如图1所示。所用的电流表为HP 34401A。执行初始校准和使用VDAC输出的闭环控制时的电路性能导致DAC输出电路报告的温度值为0.5°C。借助24位ADC，DAC和外部晶体管电路的非线性误差可以调零。因为温度是一个变化较慢的输入参数，所以此闭环方案非常适合这种应用。图9显示了未采用闭环控制(ADC0没有用于补偿DAC输出)时的理想DAC输出(蓝色)和实际DAC输出。未采用闭环控制时的误差可能会大于10°C。

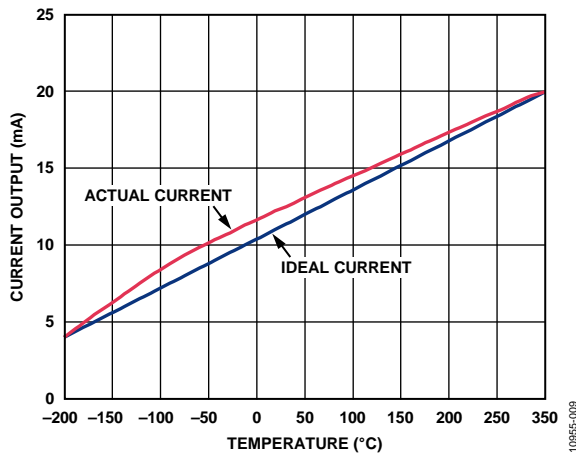


图9. 温度(°C)与输出电流(mA)的关系  
(蓝色 = 理想值, 开环操作: 未补偿DAC输出)

图10显示了按推荐方式采用闭环控制时的相同信息。误差非常微小，与理想值相差不到0.5°C。

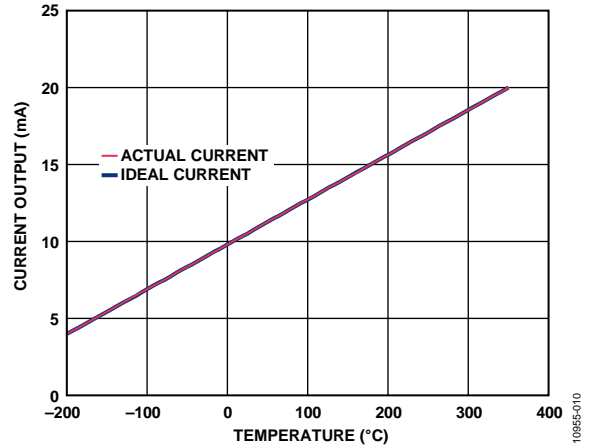


图10. 温度(°C)与输出电流(mA)的关系  
(蓝色 = 理想值, 闭环操作: 通过ADC0测量补偿DAC输出)

### 热电偶测量测试

基本测试设置如图11所示。热电偶连接至J2。

使用两种方法来评估本电路的性能。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。

使用Wavetek 4808多功能校准仪来充分评估误差，如图11所示。这种模式下，校准仪代替热电偶作为电压源。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°C至+350°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ISE, Inc.的ITS-90表)。图6显示了测试结果。

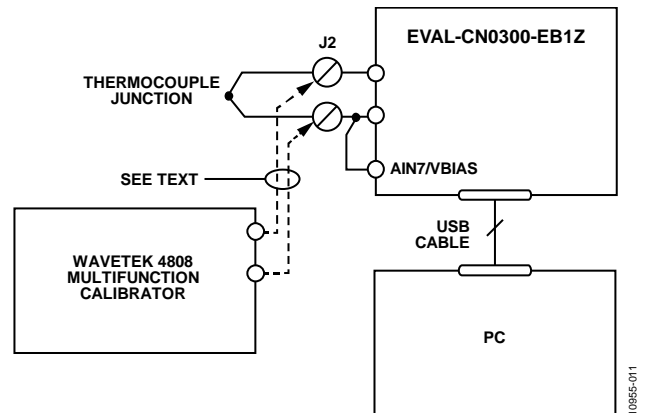


图11. 用于在整个热电偶输出电压范围内校准和测试电路的设置

# CN-0300

## 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。RTD值的范围是90 Ω至140 Ω，代表-25°C至+114°C的RTD温度范围。

图12显示了RTD测量的测试设置电路，图13则显示了RTD测量的误差结果。

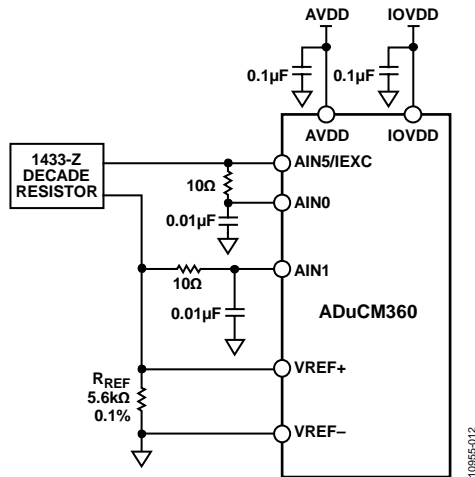


图12. RTD误差测量的测试设置

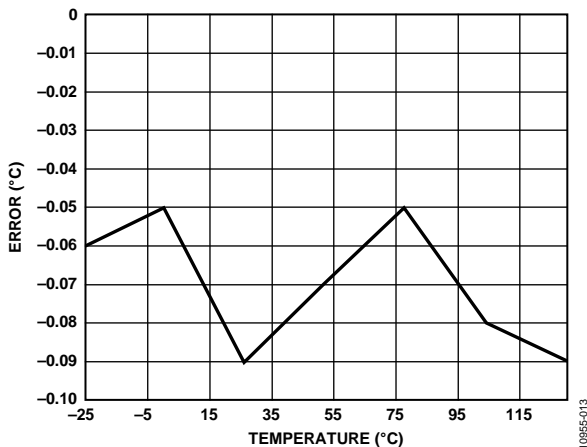


图13. 使用分段线性代码和ADC0测量结果进行RTD测量时的°C误差

## 电流测量测试

正常工作时，整个电路的功耗通常为2.25 mA。保持在复位状态时，整个电路的功耗不到600 µA。

有关ADuCM360功耗数据的更多详情，请参考应用笔记AN-1111。

## 了解详情

CN0300 Design Support Package:

<http://www.analog.com/CN0300-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 ADuCM360 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.

## 数据手册和评估板

[ADuCM360/ADuCM361 Data Sheet](#)

[ADuCM360/ADuCM361 Evaluation Kit](#)

[ADM3202 UART to RS232 Transceiver Data Sheet](#)

[ADP120 Data Sheet](#)

[ADP1720 Data Sheet](#)

## 修订历史

2012年10月—修订版0：初始版

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

©2012 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN10955sc-0-10/12(0)

