

带 Arduino 兼容模拟接口的灵活、低功耗、4 通道热电偶系统

评估和设计支持

电路评估板

[CN-0394 电路评估板\(EVAL-CN0394-ARDZ\) ADICUP360 评估板\(EVAL-ADICUP360\)](#)

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 所示电路是一种灵活的集成式 4 通道热电偶测量系统，基于 Arduino 兼容 [EVAL-ADICUP360](#) 平台，包含 [ADuCM360](#) 低功耗精密模拟微控制器。[ADuCM360](#) 具有 ARM Cortex™-M3 处理器内核、多种外设和精密模拟功能，包括双通道 24 位 Σ - Δ 型模数转换器(ADC)、多路复用器、可编程增益放大器(PGA)以及基准电压源。

该电路最多可支持 4 个独立的热电偶通道，软件线性化算法支持 8 种不同类型的热电偶 (B、E、J、K、N、R、S 和 T)。4 个热电偶可以按任意组合进行连接，各热电偶通道上的电阻温度检测器(RTD)提供冷端补偿(CJC)。无需额外的补偿。采用此系统的热电偶测量可覆盖各种类型热电偶的全部工作范围。

该电路与 [EVAL-ADICUP360](#) Arduino 兼容平台对接，支持快速开发原型。利用 USB 转 UART 接口和开源固件，[EVAL-CN0394-ARDZ](#) 和 [EVAL-ADICUP360](#) 组合可以轻松支持不同热电偶应用。

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)

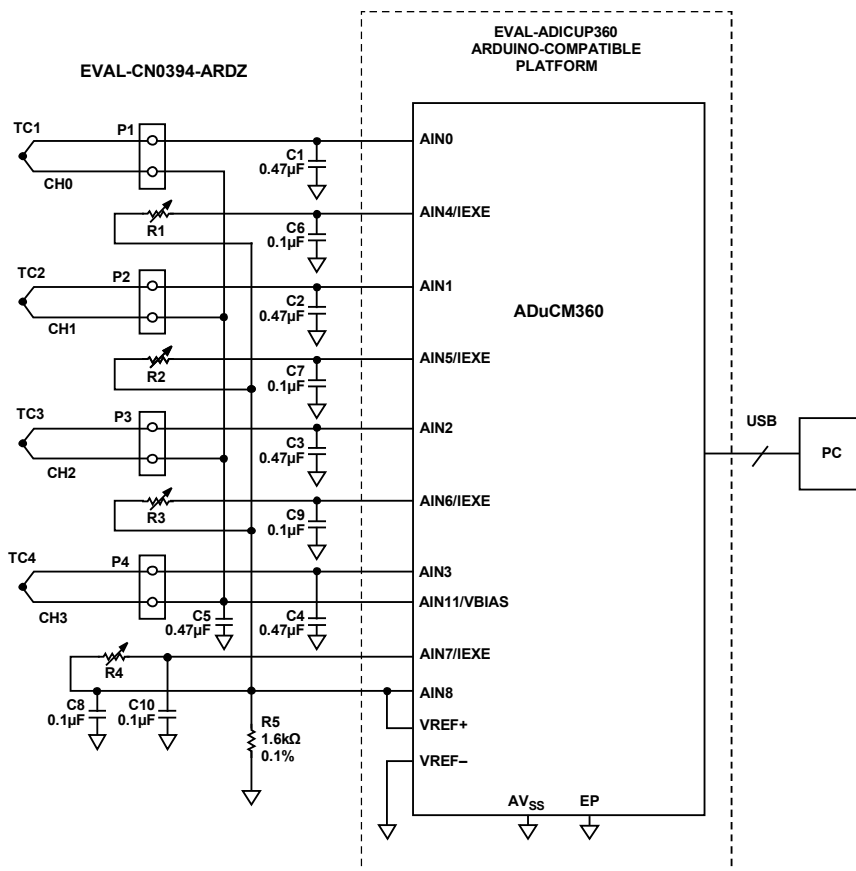


图 1. 热电偶测量系统 (原理示意图: 未显示所有连接和去耦)

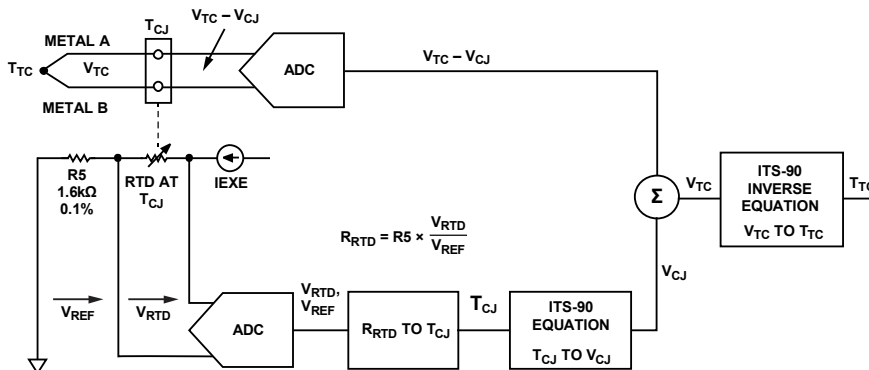


图 2. 包括测量端和参考端的热电偶连接 (一个通道)

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。

一端放置在需要进行温度测量的地方，称为测量端(T_{TC})。热电偶的另一端连接精密电压测量系统，该连接称为参考端，或者称为冷端(C)。测量端 T_{TC} 和冷端 T_{CJ} 之间的温差产生一个电压 $V_{TC} - V_{CJ}$ ，它是由两个端点之间的温差引起的。产生的电压通常为数微伏至数十毫伏不等，具体取决于温度差值和热电偶类型。

冷端补偿(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端温度。

热电偶的总输出电压是由热电偶与冷端的温差引起的。图 2 显示，冷端温度使用另一种温度敏感器件来测量，其通常是热敏电阻、二极管、RTD 或半导体温度传感器。用于此电路的温度检测器件为 Pt1000 RTD，每个通道都有一个 RTD 以保证精确测量。

图 2 中，总热电偶电压 $V_{TC} - V_{CJ}$ 利用 ADuCM360 中的精密 ADC 测量，并通过下式转换为数字格式：

$$V_{TC} - V_{CJ} = V_{REF} \times \frac{CODE}{2^{28}}$$

其中：

$V_{TC} - V_{CJ}$ 为实测热电偶电压。

V_{REF} 为测量所用基准电压。对于本电路，内部 1.2 V 基准电压用于热电偶测量。

CODE 为 ADuCM360 ADC 数据寄存器(ADCxDAT)中的 28 位字，增益为 8。

一个恒流源 IEXE(从 ADuCM360 获得)驱动 RTD 和 1.6 kΩ 精密基准电阻 R5 的串联组合。CN-0394 电路的 IEXE 设置为 620 μA，其产生的标称 V_{REF} 为 $1.6 \text{ k}\Omega \times 620 \mu\text{A} = 0.992 \text{ V}$ ，RTD 上有 $1 \text{ k}\Omega \times 620 \mu\text{A} = 0.62 \text{ V}$ 的压降。R5 两端的电压用作 ADC 的基准电压。RTD 电阻 R_{RTD} 利用下式计算：

$$R_{RTD} = R5 \times \frac{CODE}{2^{28}}$$

其中：

R5 为基准电阻， $R5 = 1.6 \text{ k}\Omega$ 。

CODE 为 ADuCM360 ADC 数据寄存器(ADCxDAT)中的 28 位字，增益为 1。

在 CN-0394 电路中，热电偶电压和 RTD 电压均通过 ADuCM360 24 位 ADC 转换。注意测量为比率式，不取决于基准电压的精度或 IEXE 激励电流的值。

RTD 电阻 R_{RTD} 通过查找表或多项式公式转换为冷端温度 T_{CJ} 。RTD 传递函数即所谓 CallenderVanDusen 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，CN-0394 软件即使用该公式。有关这些 RTD 公式的详细说明，参见电路笔记 CN-0381。

冷端温度 T_{CJ} 通过 ITS-90 热电偶数据库中的公式转换为相应的热电偶电压 V_{CJ} 。CN-0394 软件使用 ITS-90 多项式公式而非查找表来执行此转换。

软件将总热电偶电压($V_{TC} - V_{CJ}$)与冷端 V_{CJ} 相加以获得热电偶 EMF V_{TC} 。

然后利用 ITS-90 逆公式将热电偶 EMF V_{TC} 转换为等效热电偶温度 T_{TC} 。

关于热电偶原理、线性化表、公式和冷端补偿，请参阅 NIST ITS-90 热电偶数据库和 NIST 标准参考数据库 60 2.0 版(位于 NIST 网站)。关于热电偶和温度测量的一般理论，请参阅《传感器信号调理》第 7 章。

模数转换

CN-0394 电路利用 ADuCM360 集成的双通道 24 位 Σ - Δ 型 ADC 执行转换。ADuCM360 内置一个输入多路复用器，并集成一个增益选项为 1 至 128 的 PGA。ADuCM360 可配置为 6 路差分输入或 12 路单端输入。

ADuCM360 还提供多个滤波器选项和多种输出数据速率，确保为用户带来最大的灵活性。

PGA 可将很小的热电偶电压放大到最适合内部 Σ - Δ ADC 的水平。合理的增益设置由热电偶信号幅度和基准电压值决定。

CN-0394 软件支持 8 类热电偶：B、E、J、K、N、R、S 和 T 型。

不同热电偶具有不同的范围和灵敏度，如图 3 所示。例如，J 型热电偶由铁和康铜连接而成，测量范围约为 -210°C 至 +1200°C，灵敏度为 $55 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

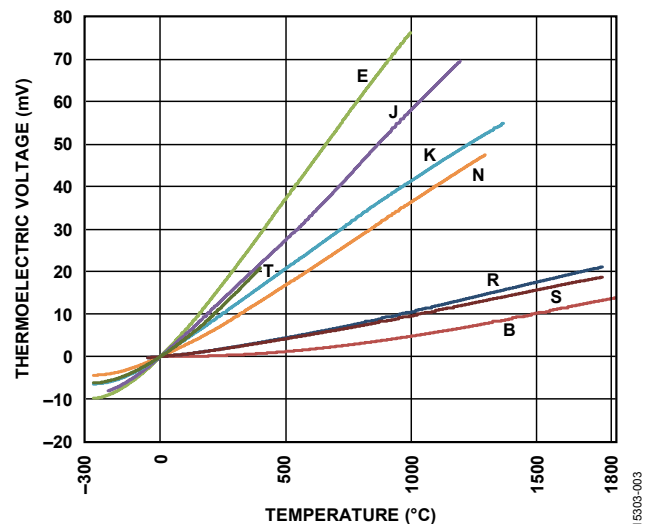


图 3. 热电偶输出电压与温度的关系

因此，利用 ADuCM360 的集成 PGA，可以检测热电偶的小电压并将其精确转换为数字信号。

冷端温度范围是 0°C 至 50°C；为确定最大和最小输出电压范围，须考虑各类热电偶的电压摆幅，并且不要忘记从热电偶电压减去的冷端电压分量。E 型热电偶需要的范围最宽，如表 1 所示。

表 1. 热电偶最大电压摆幅 (E 型)

输出	热端	冷端	电压
最大值	1000°C	0°C	76.4 mV
最小值	-270°C	50°C	-12.88 mV

采用内部 1.2 V 基准电压且将 PGA 增益设置为 $G = 8$ 时，ADuCM360 ADC 双极性差分输入范围为 ± 125 mV。此范围涵盖了所有 8 类热电偶的输出电压范围，故无需外部信号调理电路；对所有类型热电偶，PGA 都可以使用固定增益 8。24 位分辨率支持测量信号范围很小的热电偶（例如 B 型），无需进行增益调整。热电偶以差分模式连接到 ADC，负输入连接到 ADuCM360 提供的 900 mV 共模偏置电压。

EVAL-CN0394-ARDZ 板有 4 个迷你 U 型插口热电偶连接器 (Omega PCC-SMP-U-100)，用于连接热电偶连接器。冷端形成于连接器触头处，冷端补偿 RTD 靠近连接器。

CN-0394 电路使用简单的 2 线 RTD 连接，但 ADuCM360 包含可编程激励电流，可用于 2 线、3 线和 4 线 RTD。关于 3 线和 4 线应用的详细信息，请分别参阅电路笔记 CN-0381 和电路笔记 CN-0383。

系统噪声测量和结果

系统噪声必须很低才能精确测量热电偶输出的微小电压。图 4 所示为热电偶连接器在一个短路的通道上采集的 512 个样本的直方图。ADuCM360 sinc3 滤波器开启，斩波模式使能，数据速率为 50 Hz。

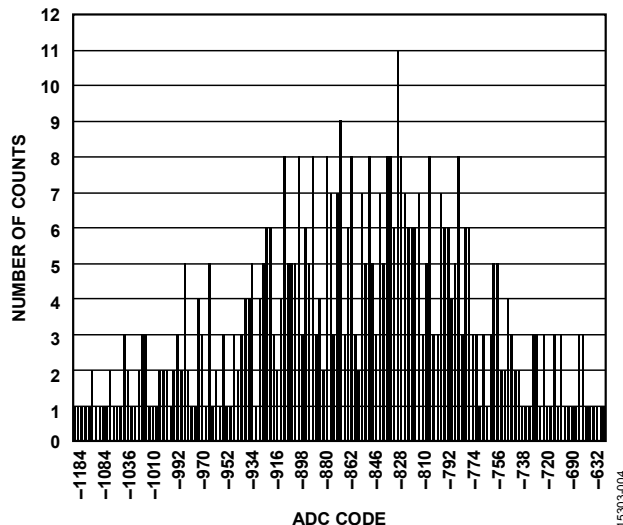


图 4. 单通道的短路输入直方图，512 样本，ADC Sinc3 滤波器开启，斩波使能，50 Hz 数据速率

从直方图可知，折合到输入端的峰峰值噪声为 2.51 μ V。对于 125 mV 的满量程输入，无噪声码分辨率可计算如下：

$$\text{无噪声码分辨率} = \log_2 \frac{125 \text{ mV}}{2.51 \mu\text{V}} = 15.6 \text{ 位}$$

系统热电偶测量和结果

为了进行热电偶系统测量试验，需要知道宽温度范围内热电偶温度的准确数据。油浴法很准确，但其温度范围有限，而且稳定过程很慢。

精确的热电偶仿真器可以代替油浴法，比如 Time Electronics 1090 温度校准器就是很有吸引力的选择。图 5 所示为说明仿真器测试原理的框图。

该仿真器允许用户输入热电偶类型和温度以及冷端温度。然后，仿真器利用 ITS-90 表和公式将热电偶温度 T_{TC} 和冷端温度 T_{CI} 转换为相应的电压 V_{TC} 和 V_{CI} 。再将 V_{CI} 从 V_{TC} 中扣除，以便得到仿真器输出电压 $V_{TC} - V_{CI}$ 。

仿真器的整体精度取决于热电偶类型和温度，典型值介于 0.5°C 和 2°C 之间。

注意，仿真器并不测试系统冷端补偿电路的精度，后者必须通过额外连接的热电偶单独测试。

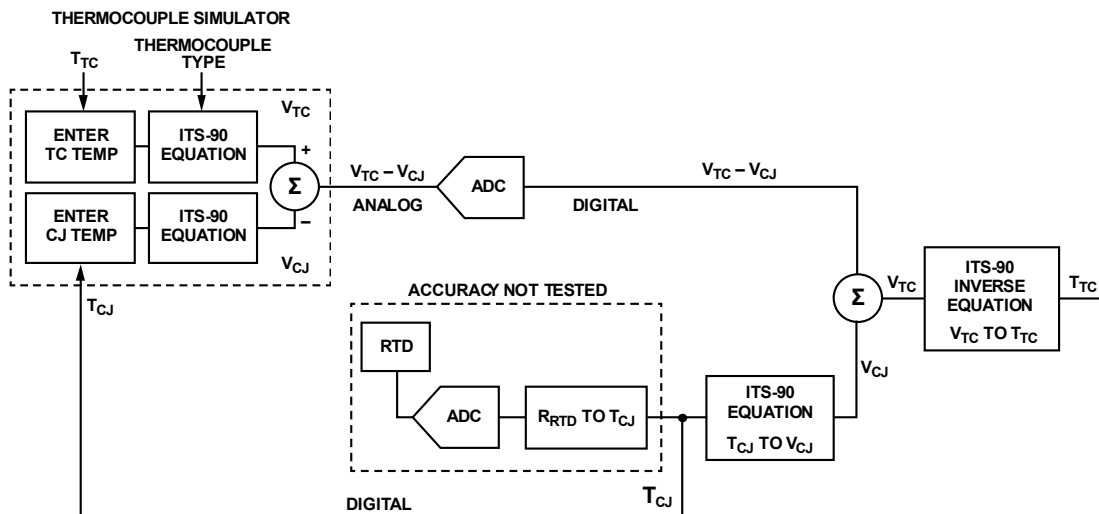


图5. 利用热电偶仿真器测试热电偶测量系统

图6显示了E、J、K、N和T型热电偶的仿真温度与测量温度之间的误差，图7显示了B、R、S型热电偶的误差。测量之前对ADuCM360 ADC进行了零电平和满量程校准。

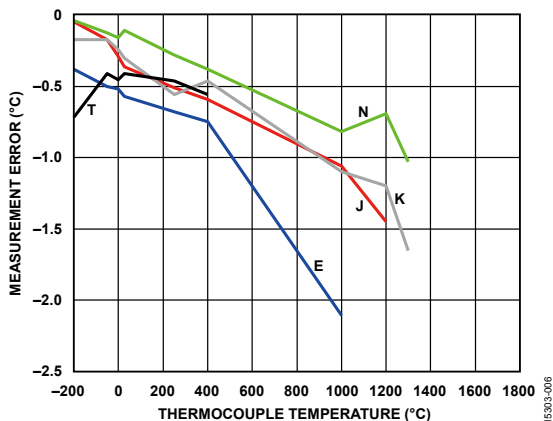


图6. EVAL-CN0394-ARDZ 温度测量误差 (E、J、K、N、T型热电偶, 使用热电偶仿真器)

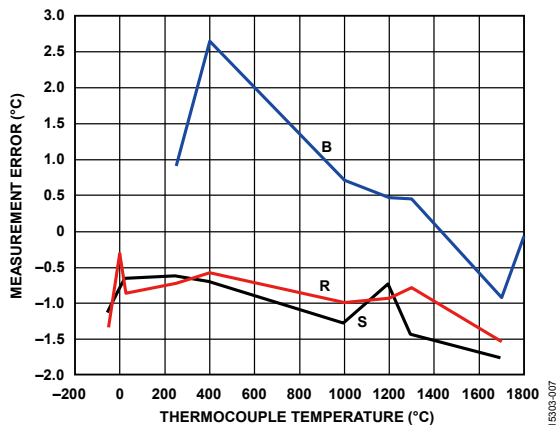


图7. EVAL-CN0394-ARDZ 温度测量误差 (B、R、S型热电偶, 使用热电偶仿真器)

图6和图7所示误差是以下误差源之和：

- 仿真器误差 (0.15°C 至 3°C, 取决于类型和范围)
- ADC 基准电压精度(0.2%)
- ADC 内部校准之后剩余的系统失调和增益误差 (小于 10 μV)
- ADC 非线性误差 (15 ppm FSR; FSR = 125 mV 时, 其为 1.9 μV)
- ITS-90 公式误差 (0.001°C 至 0.06°C 不等, 取决于类型和范围)

基准电压误差 (ADuCM360 内部基准电压为 0.1%) 引起系统增益误差, 在高温时可能贡献数摄氏度的误差。

B、R、S 型热电偶具有较小的赛贝克系数, 对失调误差更为敏感。

ADuCM360 非线性误差和 ITS-90 公式误差相对于其他误差源均可忽略不计。

对于所有 8 种标准热电偶的各自范围, 图6和图7所示的测量数据在其精度规格以内。

为实现最高精度, 尤其是 B、R、S 型热电偶, 必须利用精密外部电压源执行系统级零电平和满量程校准。

也可以使用 ADR4525 (初始精度为 0.02%) 等精度更高的外部基准电压源来使增益误差最小。

冷端补偿按如下方法进行测试: 将 J 型热电偶连接到一个通道, 热电偶维持在环境温度, 在 ThermoStream 或 Thermonics 温度控制器的控制下循环改变 CN-0394 板的温度。选择 J 型热电偶的原因是其对温度变化的灵敏度较高。

测量在 0°C、25°C 和 105°C 的冷端温度下进行结果如图 8 所示。

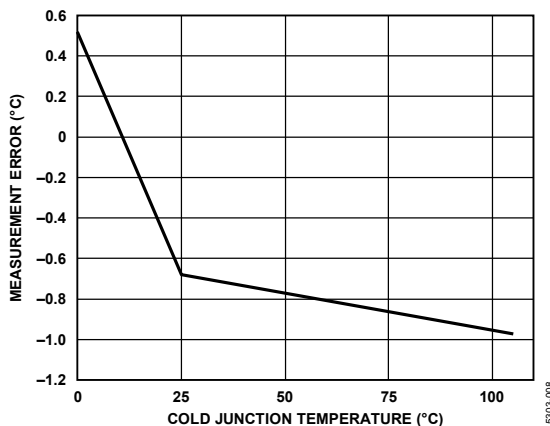


图 8. EVAL-CN0394-ARDZ 温度测量误差, J 型热电偶在室温下, 冷端温度为 0°C、25°C 和 105°C

EVAL-CN0394-ARDZ 硬件的完整文档, 包括原理图、布局文件、Gerber 文件和物料清单, 位于 [CN-0394 设计支持包](#) 中。

系统设计权衡

EVAL-CN0394-ARDZ 板设计具有非常大的灵活性, 支持四个独立热电偶输入通道的任意组合, 电路设计使用最少的额外元件。

如果在测量之前执行系统级零电平和满量程校准, 则 ADuCM360 中的 ADC 可提供更高的精度。

如果 ADuCM360 输入配置为差分工作模式, 并且为各通道增加输入抗混叠滤波器, 则还能改善噪声性能。典型滤波器配置如图 9 所示, 其中 R1 + R2 和 C3 形成一个差分模式滤波器 (带宽约为 800 Hz), R1/C1 和 R2/C2 形成共模滤波器 (带宽约为 16 kHz)。

利用 RTD 和热电偶电路实现最优性能的更多设计技巧, 参见 [电路笔记 CN-0381](#)、[电路笔记 CN-0383](#) 和 [电路笔记 CN-0384](#)。

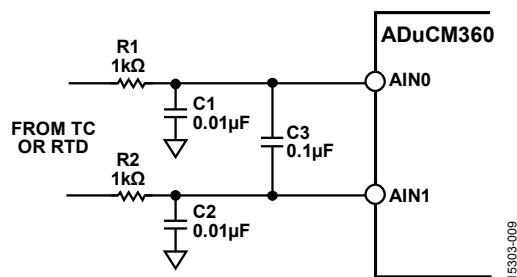


图 9. 适用于 ADuCM360 的可选差分 and 共模输入滤波器

ADuCM360 通过直接编程控制可配置为许多低功耗工作模式, 包括休眠模式 (内部唤醒定时器有效), 此时能耗仅为 4 μ A。在休眠模式下, 诸如外部中断或内部唤醒定时器外设可以唤醒该器件。该模式可让器件在功耗极低的情况下运行, 同时仍然响应外部异步或周期事件。

常见变化

ADuCM360 内部 1.2 V 基准电压源的初始精度为 $\pm 0.1\%$ 。如需更高精度和更低的满量程增益误差, 可使用 ADR4525 2.5 V $\pm 0.02\%$ 基准电压源。

电路评估与测试

本电路使用 EVAL-CN0394-ARDZ Arduino 扩展板和 EVAL-ADICUP360 Arduino 平台板。这两片板很容易插接起来, EVAL-CN0394-ARDZ 在上方, EVAL-ADICUP360 在下方。热电偶插入 EVAL-CN0394-ARDZ 板的 P1 至 P4 插口。

系统通过 EVAL-ADICUP360 板的 USB 接口连接到 PC。两片板均由 USB 5 V 电源供电。RTD 传感器已安装到 EVAL-CN0394-ARDZ 印刷电路板(PCB)上。

设备要求

需要以下设备:

- 带 USB 2.0 端口和 Windows® 7 (64 位) 或更高版本的 PC
- EVAL-CN0394-ARDZ Arduino 兼容电路评估板
- EVAL-ADICUP360 开发板或 Arduino 兼容平台板
- B、E、J、K、N、R、S 和 T 型热电偶的任意组合 (总共 4 个), 或 Time Electronics 1090 温度校准器或同类产品
- ADuCM360 软件 (IDE), 参见 [CN-0394 用户指南](#)
- 串行终端软件, 例如 PuTTY 或 Tera Term
- USB A 转 USB 微型电缆
- EVAL-CN0394-ARDZ 演示代码 (参见 [CN-0394 用户指南](#))

开始使用

选择 EVAL-ADICUP360 板上的正确跳线设置。跳线设置详见 [CN-0394 用户指南](#)。

将 EVAL-CN0394-ARDZ Arduino 扩展板插入 EVAL-ADICUP360 Arduino 兼容平台板。将热电偶传感器连接到 EVAL-CN0394-ARDZ 板。将用户 USB 端口连接到 PC。各通道使用 OMEGA 公司兼容式连接器连接热电偶, 这样可以简化不同类型热电偶的插拔。选择 U 补偿类型连接器, 使得板上的所有通道 (P1 至 P4) 都能相互通用。

将项目演示代码载入 ADuCM360 IDE，请按照[工具链设置用户指南](#)中的说明操作。

务必按照 [CN-0394 用户指南](#) 中的说明，针对 P1、P2、P3 和 P4 上的热电偶类型配置软件。

程序运行时，系统会计算输出数据并在终端窗口上显示。

关于 Arduino 尺寸兼容 ARM Cortex-M3 开发平台 ([EVAL-ADICUP360](#)) 的信息，请参阅 [EVAL-ADICUP360 用户指南](#)。

功能框图

测试设置的框图如图 10 所示。

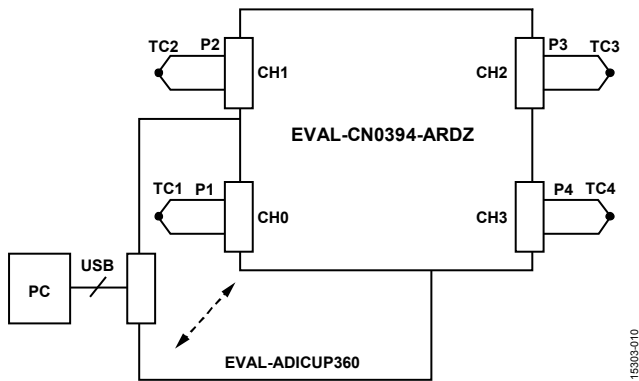


图 10. 测试设置功能框图 (两片板均由 PC USB 5 V 电源供电)

测试

示例代码经编译并加载到 [EVAL-ADICUP360](#) 上且将 [EVAL-CN0394-ARDZ](#) 插接在上面之后，器件与 PC 通信，连续更新并显示各通道的下列信息：

- 通道数和热电偶类型
- RTD 电阻
- 线性化 RTD 温度 (冷端温度)
- 线性化热电偶温度

如果所选热电偶的最终线性化温度超出 ITS-90 公式定义的范围，则会显示警告消息。其他编程选项详见 [CN-0394 用户指南](#)。

图 11 显示 [EVAL-CN0394-ARDZ](#) 板的实物照片。



图 11. EVAL-CN0394-ARDZ 板照片

更多资料

CN-0394 设计支持包:

www.analog.com/CN0394-DesignSupport

EVAL-ADICUP360 用户指南。

Kester, Walt。“温度传感器”，*传感器信号调理*第7章。

ADI 公司，1999 年。

McCarthy, Mary。应用笔记AN-615，*峰峰值分辨率与有效分辨率*。ADI公司。

McNamara, Donal。应用笔记AN-892，*温度测量原理及实用技术*。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。

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）*。ADI公司。

电路笔记CN-0381，*采用低功耗、精密、24位 Σ - Δ 型ADC的全集成式4线RTD测量系统*，ADI公司。

电路笔记CN-0383，*采用低功耗、精密、24位 Σ - Δ 型ADC的全集成式3线RTD测量系统*，ADI公司。

电路笔记CN-0384，*采用低功耗、精密、24位 Σ - Δ 型ADC的全集成式热电偶测量系统*，ADI公司。

Duff, Matthew和Joseph Towey，*两种简单、精确、灵活的热电偶温度测量方法*。《模拟对话》44-10，2010年10月，ADI公司。

NIST ITS-90热电偶数据库，NIST标准参考数据库60，2.0版。

Time Electronics 1090温度校准器。

数据手册和评估板

EVAL-ADICUP360评估板

EVAL-ADuCM360开发平台

ADuCM360数据手册

修订历史

2016年11月—修订版0：初始版

(Continued from first page) Circuits from the Lab reference designs 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 reference designs 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 reference designs. Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, Circuits from the Lab reference designs 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 reference designs at any time without notice but is under no obligation to do so.