

TI 参考设计

适用于安全应用的 4 至 20mA 模拟输入模块 参考设计



概述

TIDA-00548 设计是一种隔离式双通道 4 到 20mA 模拟输入参考设计，可以将其用作功能安全可编程逻辑控制器 (PLC) 的子部件。此参考设计使用 32 位高性能模数转换器 (ADC) 来提供数字化输入值。基于 RM4x 双核 ARM® Cortex®-R4 的 CPU 具备锁步技术和内置自检 (BIST) 功能，可对多达九条可选择模拟输入信号链路径的转换值进行比较。具有两个单独负载电阻器的双输入方法可实现对单个 4 到 20mA 环路或两个独立环路进行冗余测量。基于 Hercules™ RM ARM Cortex-R MCUs 适用于功能安全的应用 (SafeTI 设计包的一部分) 有助于开发符合 IEC 61508 SIL 3 标准的系统。

资源

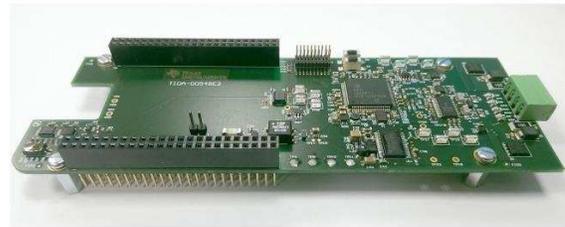
TIDA-00548	设计文件夹
RM41L232	产品文件夹
ADS1263	产品文件夹
TPS65381	产品文件夹
REF5030	产品文件夹
SN6501	产品文件夹
TPS62170	产品文件夹
TPS27082L	产品文件夹
CSD18534Q5A	产品文件夹
ISO7141CC	产品文件夹
INA826	产品文件夹
TLV333	产品文件夹
BeagleBone Black Wiki	BeagleBone 资源文件夹

特性

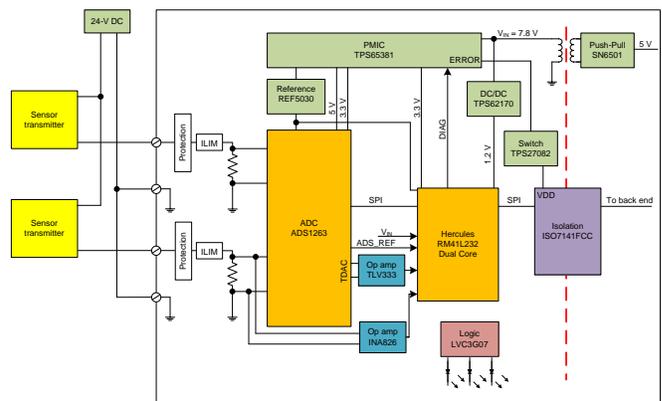
- 用于提供冗余支持的双通道 4 至 20mA 电流测量
- 两种 ADC 参考电压 (外部和内部)
- 小负载电阻器 (24.9Ω)
- 内置 ADC 特性，例如测试 DAC、辅助 ADC、模拟信号电平报警
- 发生故障时隔离器将会关闭，因此可向后端提供可靠的通知。
- 所有集成电路：MTBF 大于 4×10^8
- 采用 BeagleBone Cape 外形

应用

- 可编程逻辑控制器 (PLC)



咨询我们的 E2E 专家



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

1 系统概述

1.1 系统说明

TIDA-00548 4 至 20mA 模拟输入模块参考设计可帮助开发适用于 PLC 的安全模拟输入应用。它是模拟输入模块的一个子系统，涵盖通信控制器侧信号链直至隔离层之间的部分。以下项目是本 TI 设计的主要组件：

- SafeTI™ 产品 Hercules 双核 look-step 微控制器 (MCU)
- 高性能 32 位模数转换器 (ADC)
- MCU 配套电源管理 IC (PMIC)

双通道 4 至 20mA 模拟输入支持连接一个或两个传感器变送器。电流限制器有助于模拟输入并可耐受因连接错误导致的 $\pm 33V$ 电压。可以处理输入端子上的 EN61000-4-5 2 类 ($\pm 1 kV$, 24 A) 浪涌。模拟输入可占用多达九条不同的信号路径，以帮助确保转换后的信号正确无误。此模块使用隔离式推挽技术的 5V 背板电源 (BeagleBone Black) 供电。所需的大部分电压均由 PMIC 生成。Hercules MCU 的内核电压由单独的直流/直流转换器产生。使用外部高性能电压基准来驱动外部 ADC 和 Hercules MCU 中内置的 ADC。ADC 的内部基准用作备份，以便与外部基准进行对比。端子输入处有四个 LED，可以快速指示板的状态。本设计中所有 TI 组件的平均故障间隔时间 (MTBF) 数均大于 4×10^8 ，在组件级别确保了可靠性。BeagleBone cape 外形便于轻松插入到 BeagleBone (Black) 板的顶部以便快速评估。相比而言，它的模拟性能优于目前市场上可用的高性能和高分辨率模拟输入模块。在 $25^{\circ}C$ 下，这些模块的全量程误差介于 $\pm 0.1\%$ 范围内。在实验室测试期间，此 TI 设计在室温下的全量程误差达到了小于 $\pm 0.01\%$ 的水平。

图 1 显示了物理板，并简要说明了所有连接器、按钮、跨线和 LED。

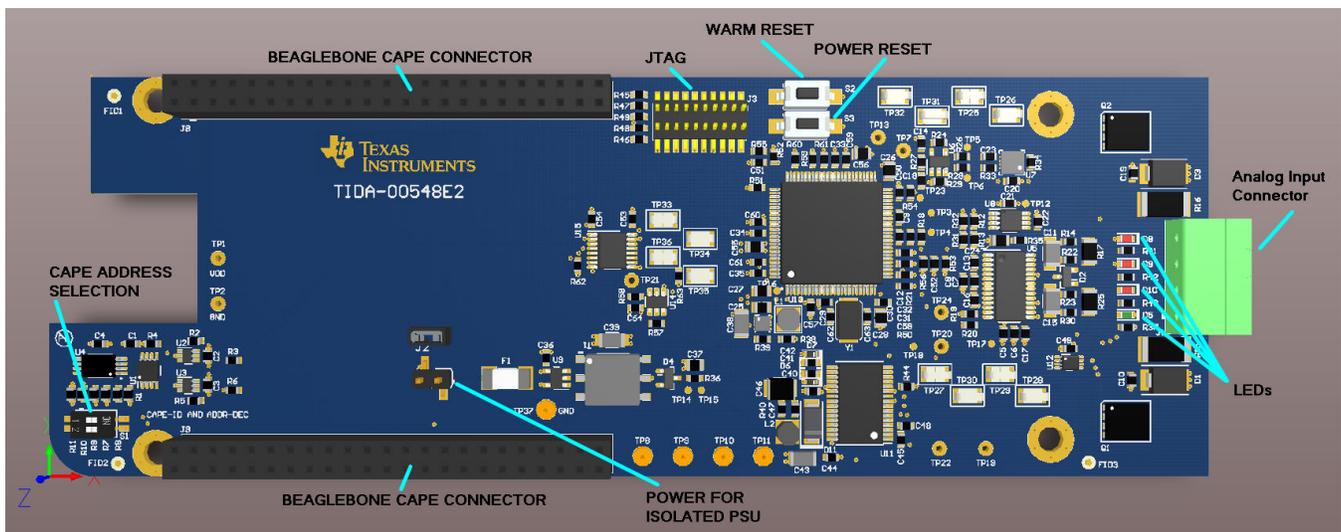
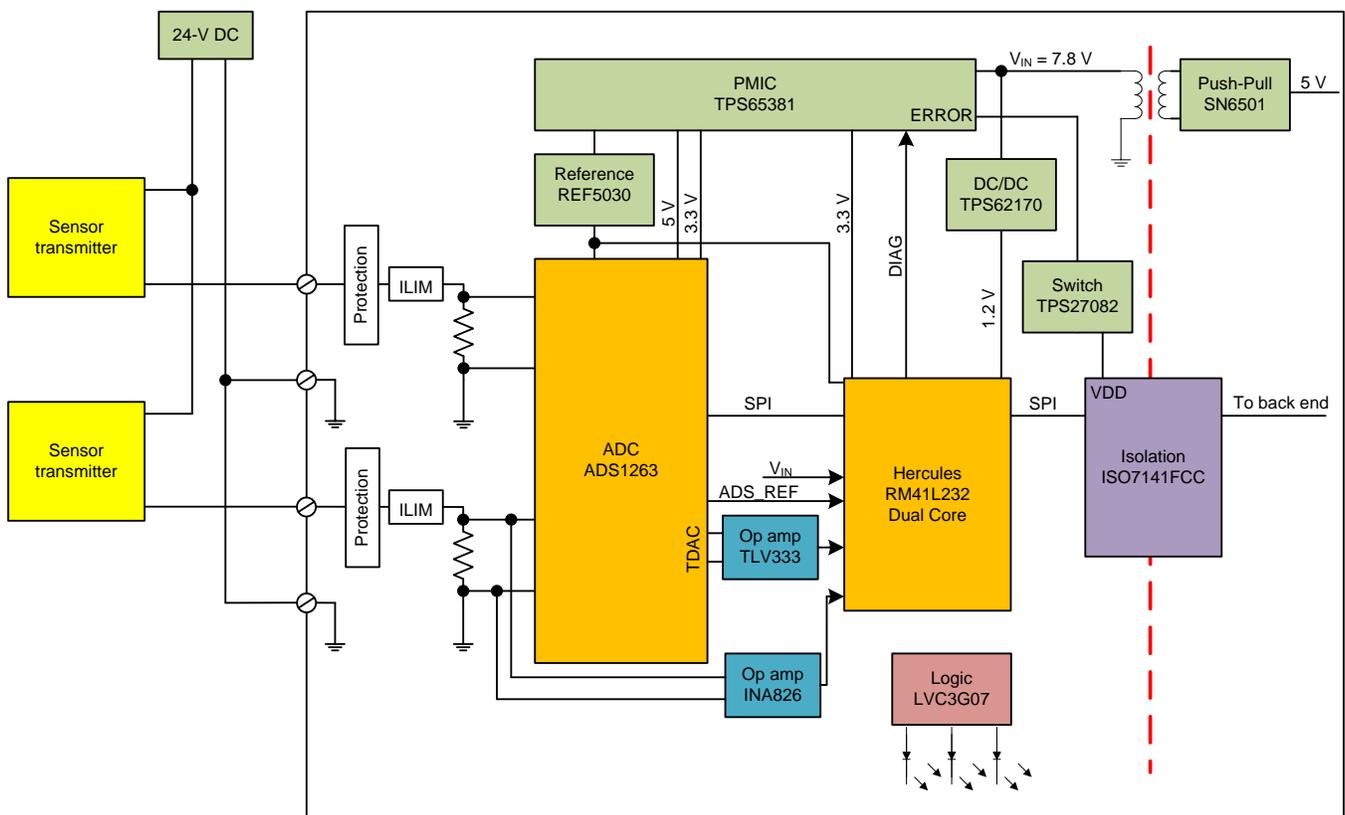


图 1. 物理板

1.2 主要系统规格

参数	技术规格	详细信息
AI 通道数	2	3.2 节
工作电压	4.3V 至 5.25V	3.4 节
功耗	800mW	3.4 节
模拟输入类型	4 至 20mA 回路	—
模拟信号路径数	9	3.3 节
输入阻抗	≈ 35Ω	3.2 节
电流限制	100mA	3.2 节
全程误差 (25°C 偏移校准)	±0.009%	4.2 节
有效位数	20	4.1 节
回路电源	外部	—
信号	端子输入处的四个 LED	3.8 节
浪涌瞬态等级	EN 61000-4-5 2 类 (±1kV, 24A)	3.2 节
工作温度	-40°C 至 85°C	—
外形	159 × 55mm (6.26 × 2.17 英寸)	—

1.3 方框图



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 2. 系统方框图

1.4 重点产品

1.4.1 ADS1263

ADS1263 是具有集成 PGA、电压基准和内部故障监视器的低噪声、低漂移、38.4kSPS、 Δ - Σ ADC。该器件集成有一个 24 位辅助 Δ Σ ADC，专用于后台测量。这些支持传感器的 ADC 提供了一套完备的高精度、单芯片测量解决方案，可满足大多数传感器应用的需求，其中包括称重天平、应力计传感器、热电偶和电阻式温度器件 (RTD)。ADC 由低噪声 CMOS PGA（增益范围为 1 至 32）、 Δ Σ 调制器以及可编程数字滤波器组成。模拟前端 (AFE) 非常灵活，其包含两个传感器激励电流源，非常适合直接 RTD 测量。单周期稳定数字滤波器可最大限度提高多输入转换吞吐量，同时能够为 50Hz 和 60Hz 的线路周期干扰提供 130dB 抑制。ADS1263 采用 28 引脚 TSSOP 封装，额定温度范围为 -40°C 至 125°C 。

1.4.2 Hercules RM41L232

RM41L232 器件是一款适用于安全系统的高性能微控制器。该安全架构包括锁步中的双 CPU，CPU 和内存 BIST 逻辑，闪存和数据 SRAM 上的 ECC，外设存储器上的奇偶校验以及外设 I/O 上的回路功能。RM41L232 器件集成了 ARM Cortex-R4 CPU。该 CPU 提供 1.66 DMIPS/MHz 的有效频率，并具有以高达 80MHz 的频率运行的配置，从而提供高达 132 DMIPS。此器件在 little-endian (LE) 模式下运行。

1.4.3 TPS65381-Q1

TPS65381-Q1 多轨电源管理 IC (PMIC) 支持德州仪器 (TI) 的 TMS570LS 系列闪存 MCU 和采用双核锁步 (LS) 或松耦合 (LC) 架构的其他 MCU。

TPS65381-Q1 器件集成了多个为 MCU 和外部传感器供电的电源轨。并且配有一个具有内部 FET 的异步降压开关模式电源转换器，可将输入电池电压转换为 6V 的前置稳压器输出。此 6V 前置稳压器能够为其它稳压器供电。此外，此器件还支持快速唤醒。

此器件可监控所有稳压器输出、电池电压和内部电源轨上的欠压和过压情况。将独立于主带隙基准之外的第二带隙基准用于欠压和过压监控，以便最大限度地减少主带隙基准内的任何漂移没有被检测到。此外，还可执行稳压器电流限制和过热保护。

TPS65381-Q1 具有监控和保护功能，包括：具有触发器和多种模式的看门狗、MCU 错误信号监控、针对内部振荡器的时钟监控、针对时钟监控器的自检、针对非易失性存储器的 CRC、支持 MCU 监测器件内部的模拟和数字信号的诊断输出引脚、针对 MCU 的复位电路以及可在检测到故障时禁用保存路径或外部功率级的使能驱动输出。内置自检 (BIST) 可在启动时监控器件功能。专用的诊断状态支持 MCU 检查 TPS65381-Q1 监控和保护功能。

1.4.4 REF5030

REF5030 是一种低噪声、低漂移、极高精度的电压基准。此基准能够灌电流和拉电流，并具有出色的线路和负载稳压功能。

1.4.5 SN6501

SN6501 是一款单片振荡器和电源驱动器，专门设计用于隔离接口应用中的小外形尺寸、隔离电源。该器件可驱动来自 3.3V 或者 5V 直流 (DC) 电源的薄型中间抽头的变压器初级。根据变压器的匝数比，变压器的次级可以提供任意隔离电压。

1.4.6 TPS62170

TPS62170 是一款简单易用的同步降压直流/直流转换器，针对高功率密度的应用进行了优化。2.25MHz 的典型高开关频率允许使用小电感器，并可利用 DCS-Control™ 技术提供快速瞬态响应以及高输出电压精度。它在 0.9 到 6V 的输出电压下（100% 占空比模式），在 3 到 17V 的宽运行输入电压范围内支持高达 0.5A 的连续输出电流。

1.4.7 TPS27082L

TPS27082L IC 是一款高侧负载开关，此器件在微小的 TSOT-23 封装内集成了一个功率 PFET 和一个控制电路。TPS27082L 需要极低的导通状态静态电流并提供极低的关闭状态泄露电流，从而优化了系统功效。

1.4.8 CSD18534Q5A

这款 7.8mΩ 60V SON 5x6mm NexFET™ 功率 MOSFET 设计可用于最大限度地降低电源转换应用中的损耗。

1.4.9 ISO7141CC

ISO7141CC 可提供符合 UL 1577 标准的高达 2500V_{RMS} 并持续 1 分钟的电隔离和符合 DIN V VDE V 0884-10 (VDE V 0884-10):2006-12 标准的 4242V_{PK}、566V_{PK} 工作电压。ISO7141CC 是一款四通道隔离器，具有三个正向通道和一个反向通道。此器件能够以 5V 电源提供 50Mbps 的最大数据速率，以 2.7 或 3.3V 电源提供 40Mbps 的最大数据速率，并且针对易受噪声影响的应用在输入端集成了滤波器。后缀 CC 表示默认输出状态为高电平。

1.4.10 INA826

INA826 为低成本仪表放大器，功耗极低且能够在极宽的单电源或双电源范围内工作。可通过单个外部电阻在 1 到 1000 范围内设置增益。它在一定的温度范围内具有很好的稳定性，即使在 $G > 1$ 时，也可实现仅有 35 ppm/°C（最大值）的低增益漂移。

1.4.11 TLV333

TLVx333 系列 CMOS 运算放大器不但具备精密的性能，而且价格极具竞争力。这些器件属于采用专有自动校准技术的零漂移系列放大器，在整个时间和温度范围内的偏移电压非常低（最大 15μV），漂移接近零，并且静态电流只有 28μA（最大值）。TLVx333 系列具有轨至轨输入和输出以及几乎不变的 1/f 噪声特性，因此是许多应用的理想选择，更容易设计到系统中。此类器件经过优化，适合在 1.8V (±0.9V) 至 5.5V (±2.75V) 的低电压状态下工作。

1.4.12 SN74LVC3G07

该三通道缓冲器和驱动器适用于 1.65 至 5.5V V_{CC} 操作。SN74LVC3G07 的输出是漏极开路。

1.4.13 SN74LVC2G86

这款双路双输入异或门适用于 1.65 至 5.5V V_{CC} 操作。

1.4.14 SN74LVC1G332

SN74LVC1G332 在正逻辑中具有三个输入，执行或函数。

2 SafeTI™ 设计包

此 TI 设计使用 SafeTI RM41L232 Hercules MCU。SafeTI 组件可以让客户开发其自己的功能安全相关产品。RM41L232 属于 SafeTI 产品中的一员，是 SafeTI 设计包的一部分。

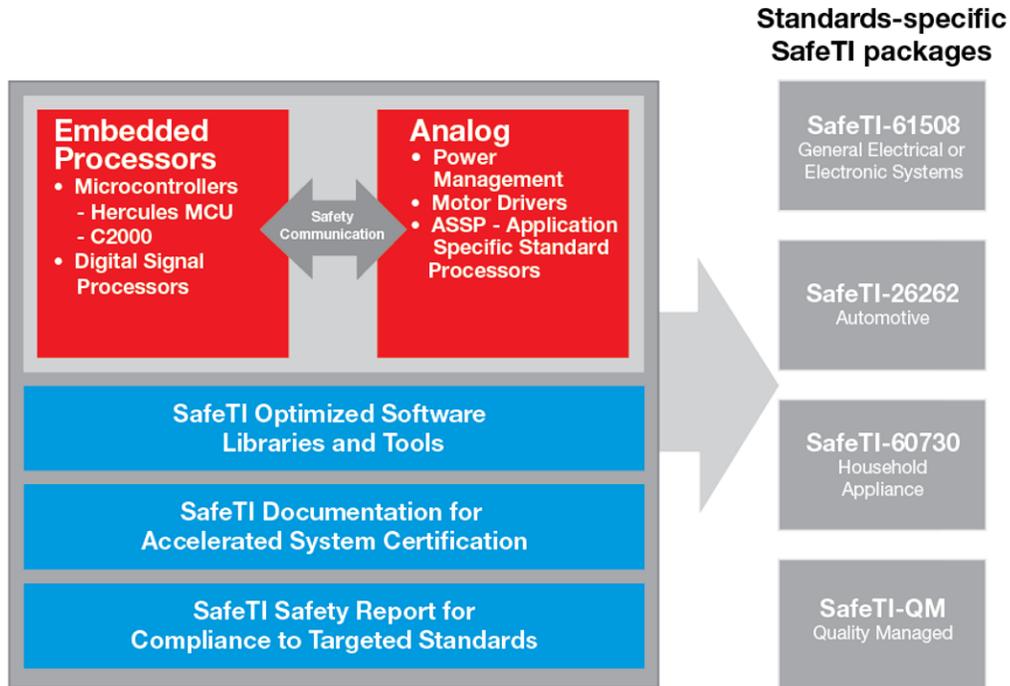


图 3. SafeTI 设计包

适用于功能安全应用的 SafeTI 设计包可用于各种安全相关应用，包括工业机械、工业流程、医疗、汽车、铁路和航天。SafeTI 产品可帮助 TI 客户将旨在符合 ISO 26262、IEC 61508 和 IEC 60730 等安全标准的安全关键型系统迅速推向市场。SafeTI 设计包有助于设计人员满足行业标准功能安全要求，同时帮助管理系统和随机故障。使用 SafeTI 组件可帮助客户实现适用的终端产品安全认证。

3 系统设计原理

3.1 传感器变送器

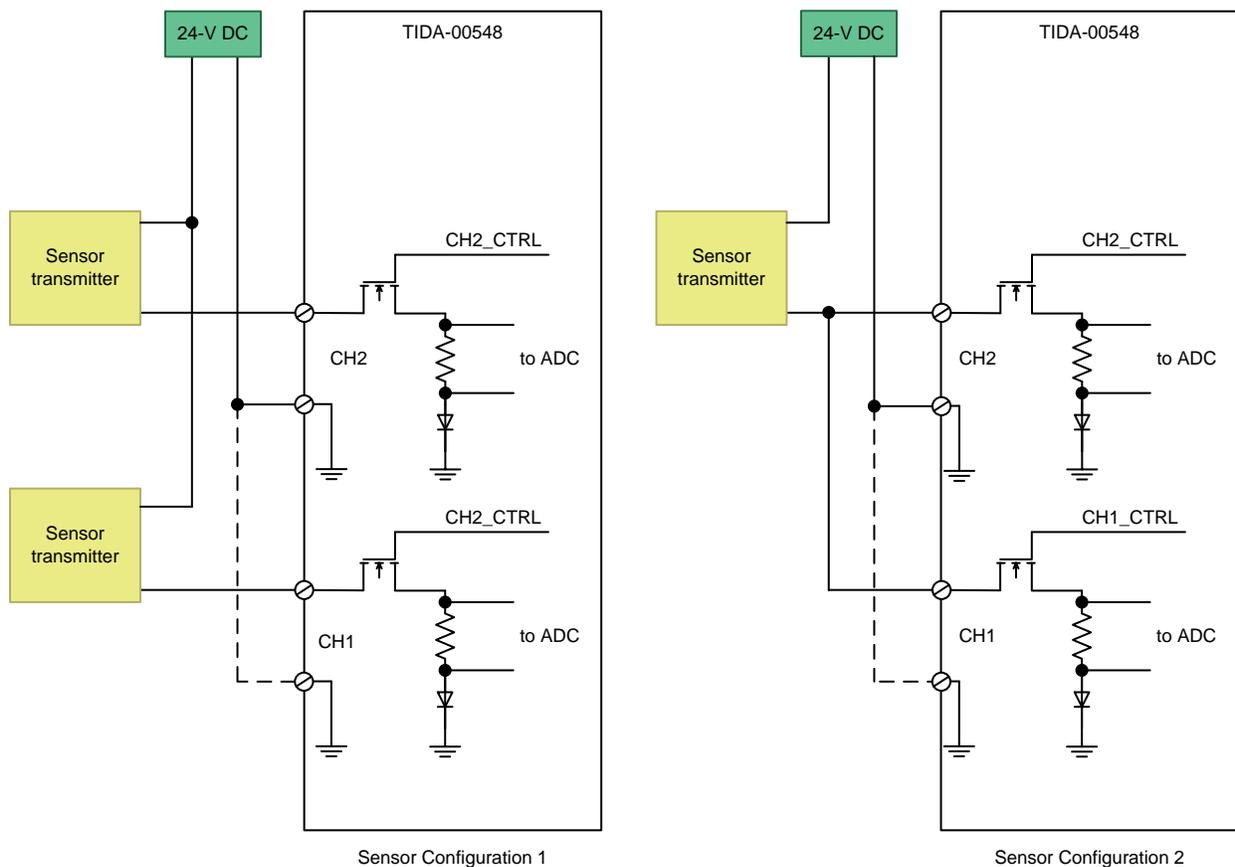
传感器变送器可将模拟值从传感器输出转换为等效的 4 至 20mA 电流。传感器变送器的回路电流和功率在同一对电缆上传输，以便于现场安装。在严苛环境下，随电流一起传输测量值具有可靠性方面的优势，在工厂自动化和控制空间领域通常可以看到这种优势。

顾名思义，此设计的标称电流范围为 4 至 20mA，但按照 NAMUR NE43 建议，将该范围扩展到了 3.6 至 21mA。超出此限制电流将被视为故障。

3.2 AFE

此模块具有一个双通道 4 至 20mA 模拟输入，可与具有 4 至 20mA 电流回路接口的传感器变送器配合使用。对同一个测量变量（例如温度、压力等）使用一个或两个（冗余）传感器变送器。在非安全环境下，两个输入通道可测量两个独立的测量变量。三种操作模式如下（另请参见 图 4）：

- 传感器配置 1
两个 4 至 20mA 环路冗余并排测量同一个模拟变量，或者两个单独的 4 至 20mA 环路测量两个不同的模拟变量
- 传感器配置 2
一个 4 至 20mA 环路由输入通道 1 或 2 以乒乓方式进行测量



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 4. 传感器连接

在传感器配置 1 中，每个传感器变送器始终保持连接到专用输入，同时，模数转换器 (ADC) ADS1263 中的内部多路复用器选择一个通道，以进行采样。如果一个信号链出现故障，则转换后的电压将不同于另一个通道，偏差超过自定义容许偏差，并进行报告。两个输入通道始终保持工作，这意味着信号 *CH1_CTRL* 和 *CH2_CTRL* 将一直保持启用状态。

在传感器配置 2 中，只使用一个传感器。两个模拟输入并行连接。一次仅启用一个通道（有小段时间重叠），两个通道将会以乒乓方式打开和关闭。必须采用先接后断方案来切换 *CH1_CTRL* 和 *CH2_CTRL* 信号，因为两个通道同时关闭将会使环路中断。当两个通道都打开时，由于两个负载电阻器为并联连接，因此负载电阻器上的压降等于标称值的一半。

为了获得最佳性能，ADC 通道的输入阻抗 (R_{ADCIN}) 被设置为最大值以降低输入端之前串联的保护电阻器的压降。 R_{ADCIN} 将取决于是否使用集成式可编程增益放大器 (PGA)。如果禁用 PGA，则 $R_{\text{ADCIN}} = 40\text{M}\Omega$ ；如果启用 PGA，则 $R_{\text{ADCIN}} = 1\text{G}\Omega$ 。在本设计中，PGA 将始终以 1 V/V 的固定增益进行启用。较高的 PGA 增益会使 PGA 的模拟输入范围向着中间范围收缩，而该 AFE 不支持此范围。ADS1263 单极电源 ($A_{\text{VDD}} = 5\text{V}$, $A_{\text{VSS}} = 0\text{V}$) 和启用的 PGA 将限制 $V_{\text{AINP/N,MIN}} = A_{\text{VSS}} + 0.3\text{V} = 0.3\text{V}$ 和 $V_{\text{AINP/N,MAX}} = A_{\text{VDD}} - 0.3\text{V} = 4.7$ 这一模拟输入范围。二极管 D2 可在 3.6mA 的最小环路电流下将 AINN 提升到大于 $V_{\text{AINP/N,MIN}}$ 的电压。利用 D2 和负载电阻器值 24.9Ω 可以直接得出表 1 中给出的模拟输入电压。

表 1. ADC 模拟输入电压

I_{LOOP}	V_{DIODE}	V_{BURDEN}	AINN 处的电压	AINP 处的电压
3.6mA	350mV	90mV	350mV	440mV
21mA	600mV	523mV	600mV	1123mV

模拟输入的电流必须加以限制以避免负载电阻器消耗过多功率。电流限制组件是 N 通道 MOSFET。MOSFET 的栅极-源极电压 (V_{GS}) 控制 MOSFET 的导通状态。MOSFET 的栅极电压 (V_{G}) 保持在 5V，而源极电压 (V_{S}) 随着负载电阻器和二极管上的压降而变化。根据关系 $V_{\text{GS}} = V_{\text{G}} - V_{\text{S}}$ 可知， V_{S} 增加将会降低 V_{GS} ，因而降低 MOSFET 的电导率，并限制电流。 V_{G} 连接到设置为通用输出 (GPO) 功能的 AINx 引脚，因为在设置为高电平时，它传输 5V (A_{VDD}) 的电压。MOSFET 栅极前面的电阻分压器用于优化电流限制器。

允许的最大连续输入电流 (I_{MAX}) 由负载电阻器的最大功率来确定。对于采用 1206 封装的电阻器，最大功率为 0.25W。根据负载电阻器值及其功耗，可通过公式 1 计算出 I_{MAX} ：

$$I_{\text{MAX}} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.25\text{ W}}{24.9\ \Omega}} = 100\text{ mA} \quad (1)$$

MOSFET CSD18534Q5A 可消耗高达 3.1W 的功率。如果是在最恶劣情况下，输入端连接了高达 36V 的现场电源，则在启用该通道的情况下，MOSFET 可消耗大约 $36\text{V} \times 70\text{mA} = 2.53\text{W}$ 的功率。在过流情况下，模块会禁用输入通道，禁用时间可能会持续几毫秒。另请参见 4.3 节。

如果没有电流流过负载电阻器（没有压降），则将会检测到 4 至 20mA 环路中存在开路线。在正常应用中，环路电流将被一直测量，这意味着我们能够立即检测到此类故障。二极管 D2 可在反极性连接期间防止不受控制的电流流过器件。输入具有防浪涌事件保护。直接安装于输入端和 TVS 二极管上的可承受高电压脉冲的电阻器可将 IEC 61000-4-5 中规定的 8/20μs 浪涌 ±1kV (42Ω) 脉冲的功率限制为对于 ADS1263 输入来说不重要的水平。

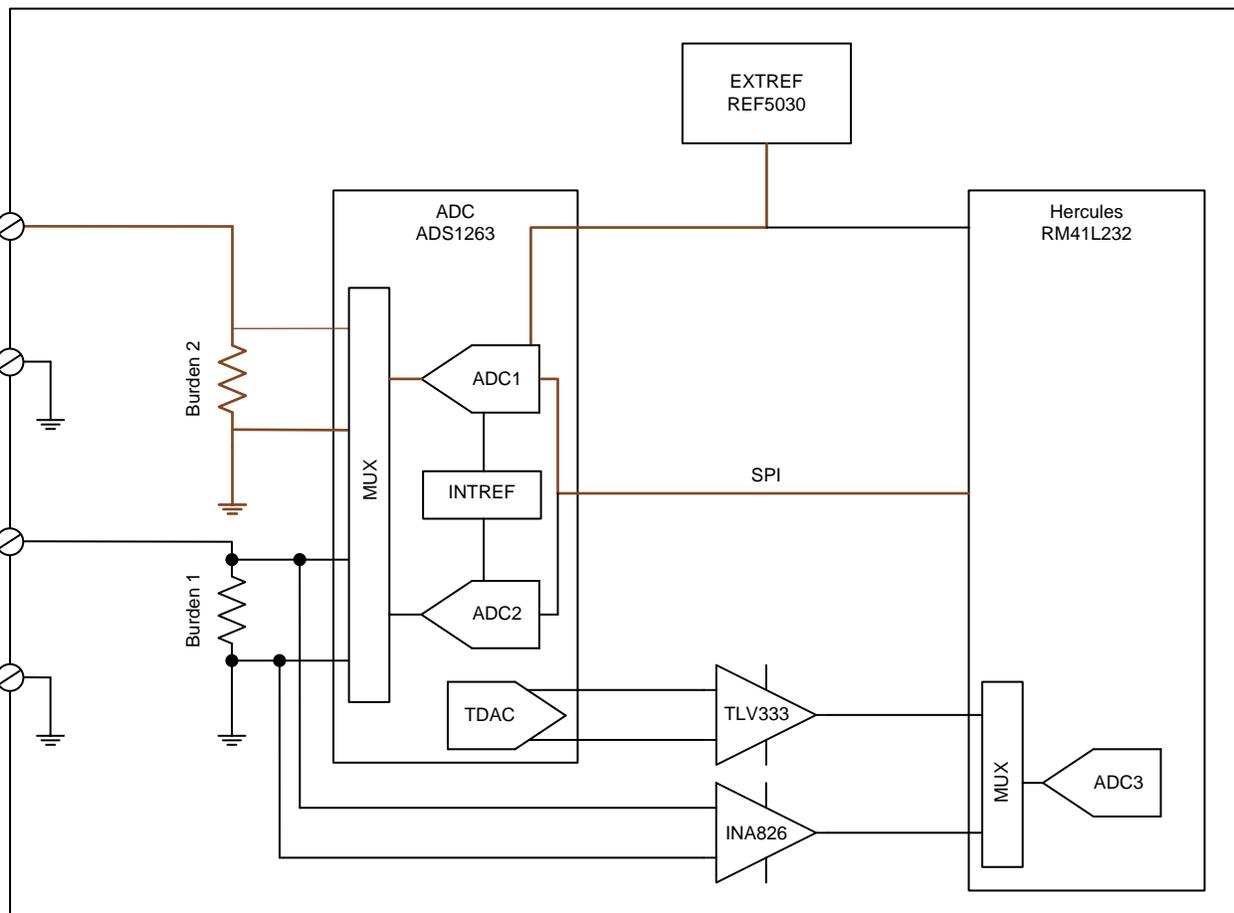
3.3 模拟信号转换

此设计的主要目的是可靠地传输与 4 至 20mA 环路电流相当的数据样本。系统中有七个涉及数模转换的主要块。所有块都是冗余的。表 2 列出了这些块的缩写及其说明。

表 2. 组件名称约定

名称	说明
CH1	输入通道 1 (负载为 R17)
CH2	输入通道 2 (负载为 R25)
ADC1	32 位 $\Delta\Sigma$ ADC 内核 (ADS1263)
ADC2	24 位 $\Delta\Sigma$ ADC 内核 (ADS1263)
ADC3	12 位嵌入式 SAR ADC 内核 (Hercules)
INTREF	内部 2.5V 基准 (ADS1263)
EXTREF	外部 3.0V 基准 (REF5030)

使用这些组件，可以利用多达九条不同路径转换模拟信号。为了获得最佳性能，建议使用 CHx-ADC1-EXTREF 组合。图 5 和表 3 显示了路径 6 (CH2-ADC1-EXTREF)，该路径将用作整个本文档中的默认路径。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 5. 默认模拟路径

在表 3 中，“可能故障”一列显示了路径 6 的结果与其他路径的值相差超过设定限制时可能损坏的组件。“性能”一列显示了特定路径的预期模拟性能（A 表示最佳）。虽然性能等级 (PG) A 至 D 非常接近，但并不表示路径 5 提供高质量数据样本；它用于粗略评估其他路径的输出是否仍在范围内。路径 5 是唯一独立于 ADS1263 的路径。

表 3. 信号路径

信号路径	输入	ADC	基准	可能故障	性能等级
1	Ch1	ADC1	外部	Ch	A
2	Ch1	ADC1	内部	通道、基准	C
3	Ch1	ADC2	外部	通道、ADC	B
4	Ch1	ADC2	内部	通道、ADC、基准	D
5	Ch1	ADC3	外部	通道、ADC	Z
6	Ch2	ADC1	外部	—	A
7	Ch2	ADC1	内部	基准	C
8	Ch2	ADC2	外部	ADC	B
9	Ch2	ADC2	内部	ADC、基准	D

为每个 PG 定义了一个误差带，其中 PG A 为基准误差带。误差带 PG B、C 和 D 相同，例如指定为 $\pm 0.1\%$ 。对于路径 5，需要放宽误差带。

3.4 电源

电源从 PLC 后端提供。此处我们将不对各种浪涌保护进行介绍，因为这不在本 TI 设计的范围内。缺点是需要使用隔离式电源。推挽式技术使用简单，组件数量少，因而我们使用了这一技术。输入电压为 5V 时，电源电压的效率为 75%。非稳压输出的缺点将由 PMIC TPS65381Q1 (V_{IN} 高达 36V) 和直流/直流转换器 TPS62170 (V_{IN} 高达 17 V) 进行补偿。变压器 T1 具有 1:1.7 的变压比率。在 5V 标称输入电压下，可生成 7.6V 的输出电压范围。TPS65381Q1 可生成 6V 的中间电压。内部 LDO 使用这个 6V 电压生成 3.3V 的数字 I/O 电压 V_{DIO} 和 5V 的模拟电压 A_{VDD} 。作为 LDO 运行并具有外部 MOSFET 的 PMIC 也可以生成 1.2V 的 Hercules 内核电压 V_{CORE} 。最大内核电流为 145mA。MOSFET 将需要消耗的功耗为 $(6V - 1.2V) \times 145mA = 696mW$ 。更有效的方法是使用外部直流/直流转换器。在相同条件下，TPS62170 将消耗 40mW 的功耗。

TPS27082L 是用于故障安全隔离器 ISO7141FCC 的场侧电源开关，通过 TPS65381Q1 的 ENDRV 信号进行控制。如果发生故障，TPS27082L 将会关闭隔离器的场侧电源。这会将隔离器主机侧的 SPI_MISO 线置于低电平状态。在这种意外情况下，会通知主机无法进行通信，直到在通过重新启动模块等方法将 SPI_MISO 信号重新设置为高电平。

3.5 Hercules 和 PMIC

Hercules RM41L232 MCU 是 SafeTI 设计包中的一个组件，用于帮助客户开发其自己的功能安全设计，旨在帮助我们的客户满足 ISO 26262、IEC 61508 和 IEC 60730 等功能安全标准。该双核锁步处理器通过 SPI 充当 ADS1263 的主器件，并通过第二个 SPI 充当后端的从属器件。此外，它通过第三个 SPI 与 TPS65381Q1 持续通信。使用具有集成式 16 通道多路复用器的集成式 12 位 SAR ADC 作为独立于 ADS1263 的替代模拟路径。它使用 REF5030 作为基准。模拟输入范围为 0 至 3V。通过此转换器监控负载电阻器 R17 的电压和各种系统电压：

- 通道 1 的负载电阻器上的电压（信号 *BURDEN1_SE*）
INA826 将差分信号转换为单端信号。5.61V/V 增益使用 0 至 3V 的整个模拟输入范围，最大负载压降为 523mV（另请参见表 1）。Hercules 将数据样本与从 ADS1263 传输的样本进行比较（精度有限）。有关测试结果，另请参见 4 节。
- 测试 DAC (TDAC) 电压（信号 *TDAC_SE*）
ADS1263 内集成的 TDAC 为 ADS1263 的多路复用器输入以及 AIN6 (V+) 和 AIN7 (V-) 引脚提供可编程的差分电压。Hercules ADC 转换该电压，以验证 TDAC 的运行是否正常。TLV333 将差分信号（最大 4V）转换为单端信号并将其增益 -3.5 dB。
- ADS1263 内部电压基准（信号 *ADS_REF*）
ADS1263 的内部基准可通过此输入进行观测。无论使用哪种 ADS1263 基准输入源（内部或外部），当开启了内部基准时，电压始终反映 2.5V 的内部基准。
- 电源电压监控（信号 *SUPPLY_MON*）
模块的主电源电压可通过此输入进行观测。1:3 电阻分压器将 7.6V 的标称电压衰减到 2.53V。
- 偏移测量 (GND)
从 *ADS_REF* 和 *SUPPLY_MON* 转换模拟信号中减除此输入的转换值以进行偏移补偿。信号 *BURDEN1_SE* 和 *TDAC_SE* 包括有源分量，必须通过将感应信号设置为零，将这些有源分量包含在偏移补偿中。

RM41L232 的 ERROR 引脚向 TPS64381Q1 指示 Hercules 上发生错误。故障条件可以用软件进行编程。TPS64381Q1 的 ENDRV 引脚指示 RM41L232 或 TPS64381Q1 本身出现故障。ENDRV 引脚控制负载开关 TPS27082L。

3.6 自检功能

对系统内关键组件进行定期自检的能力是安全设计的一种重要特性。可以测试的组件越多，诊断覆盖率 (DC) 就越高。Hercules RM41L232 已经内置了全面自检特性。系统中其它关键组件的测试由最终产品的系统设计人员负责。通过模拟具有已知输入的组件或通过比较冗余组件的结果来执行自检。

示例模拟方法在 ADS1263 中使用集成测试 DAC。对 ADC1 和 ADC2 应用可编程差分输出电压。为了验证测试 DAC 输出，还通过 TLV333 向 ADC3 馈送正确电压。

示例比较方法通过至少两个信号路径来转换输入信号（另请参见 3.3 节）。如果输出代码不同，则表明发现至少一个组件出现故障。在测试（不同路径的）特定组合时，可发现故障组件（另请参见表 3）。电源故障和内部自检失败将会立即导致转换到安全状态。如果信号链识别出异常，则用户应负责采取措施。表 4 显示了如何测试关键组件。

表 4. 硬件自检

要测试的组件	器件型号	验证方法	故障结果	安全状态
Hercules	RM41L232	自身	隔离器关闭	是
PMIC	TPS65381	自身	隔离器关闭	是
ADC1	ADS1263	ADC2、ADC3、TDAC	输出错误	自定义
ADC2	ADS1263	ADC1、ADC3、TDAC	输出错误	自定义
ADC3	RM41L232	ADC1、ADC2、TDAC	输出错误	自定义
内部基准	ADS1263	外部基准	输出错误	自定义
外部基准	REF5030	内部基准	输出错误	自定义
CH1	负载 1	CH2	输出错误	自定义
CH2	负载 2	CH1	输出错误	自定义
TDAC 运算放大器	TLV333	ADC1、ADC2、ADC3	输出错误	自定义
CH1 运算放大器	INA826	ADC1、ADC2、ADC3	输出错误	自定义
负载开关	TPS27082L	Hercules	否或始终通信	是
隔离器	ISO7141FCC	负载开关	无通信	是
V_{CORE} 生成	TPS62170	—	无通信	是
主电压	SN6501	—	无通信	是

3.7 监控和诊断

监控是被动确保所测量变量介于其限制范围内的一种方法。观测系统内的所有供电电压就是一个很好的示例。如果任何电压超出其限制，则无法再确保整个系统正常运行。PMIC TPS65381Q1 监控所有供电电压并采取适当措施。

PMIC 利用智能看门狗方案通过 SPI 监控 Hercules 处理器。PMIC 发送一个问题，Hercules 必须在限定的时间帧内发回四个答案。

3.8 信号

TIDA-00548 提供四个 LED，用于指示状态。这些 LED 可以在使用光纤通道的端子处看到。表 5 说明了每个 LED 的用途。

表 5. LED 分配

LED	颜色	LED 点亮	LED 熄灭
1	绿色	存在主电压	不存在主电压
2	红色	隔离器关闭（安全状态）	隔离器开启
3	红色	Hercules 报告故障	Hercules 正常运行
4	红色	用户自定义	用户自定义

图 6 中的 LED 指示应用了主电源，并且启用了用户 LED（从左到右依次为 LED1 到 LED4）。

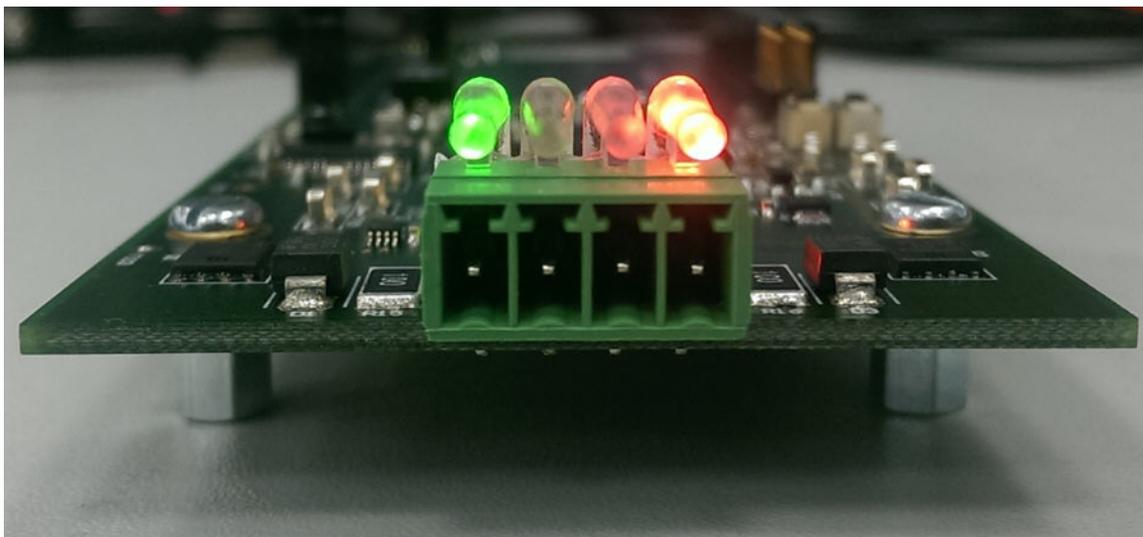


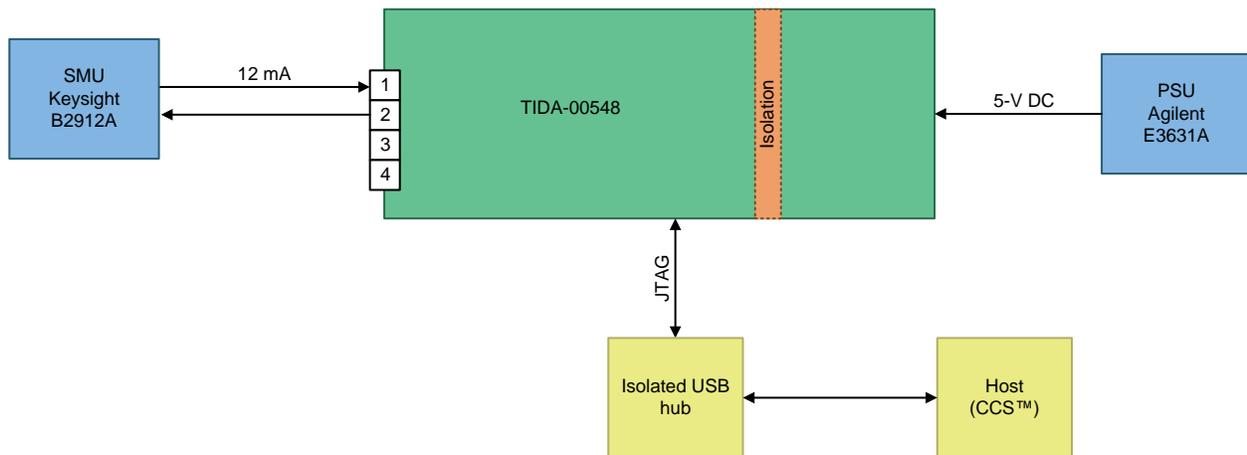
图 6. LED 指示

4 测试和结果

本节讨论 TIDA-00548 硬件的设置、测试和结果。用于 Hercules 处理器的测试软件（未提供）测试模拟信号链的所有功能并运行性能测量。软件的集成开发环境是 Code Composer Studio™ (CCS) 版本 6.0.1。在运行测试期间，所有测试的数据样本均存储在 RM41L232 内部存储器中。然后使用 CCS 的保存存储器功能将结果保存到硬盘驱动器，以便使用 Microsoft® Excel® 进行进一步处理。

4.1 有效和无噪声位

为了获得有效和无噪声位，利用从外部施加的 12mA 恒定电流采集的 200 个样本计算了标准偏差。由于环路电流的绝对值并不重要，因此未由外部 DMM 测量环路电流。重要的是，在数据采集期间，该电流不会漂移。图 7 显示了硬件设置。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 7. 有效和无噪声位测量的测试设置

使用公式 2 和公式 3 计算有效位数和无噪声位：

$$\text{Effective bits} = \log_2 \left(\frac{2^N}{\text{stddev}[\text{samples}]} \right) \quad (2)$$

其中 N = 转换器的数据宽度

$$\text{Noise-free bits} = \log_2 \left(\frac{2^N}{\text{stddev}[\text{samples}] \times 6.6} \right) = \text{Effective bits} - 2.72 \text{ bits} \quad (3)$$

测试了三个不同信号路径（见表 3）以显示其性能和限制。

4.1.1 路径 6: CH2-ADC1-EXTREF 的性能

路径 6 是默认模拟路径，具有最佳模拟性能。使用了 ADS1263 的 32 位转换器 (ADC1)、高性能外部基准 REF5030 和输入通道 2。此路径的代码-电流计算方法为：

$$I_{\text{PATH6}} = \frac{\left(\frac{\text{code}}{2^{N-1}} \times V_{\text{EXTREF}} \right)}{R_{\text{BURDEN}}} = \frac{\left(\frac{\text{code}}{2^{31}} \times 3 \text{ V} \right)}{24.9 \ \Omega} \quad (4)$$

图 8 显示了直方图。峰值间变化约为 600nA，未校准的系统偏移约为 17μA。

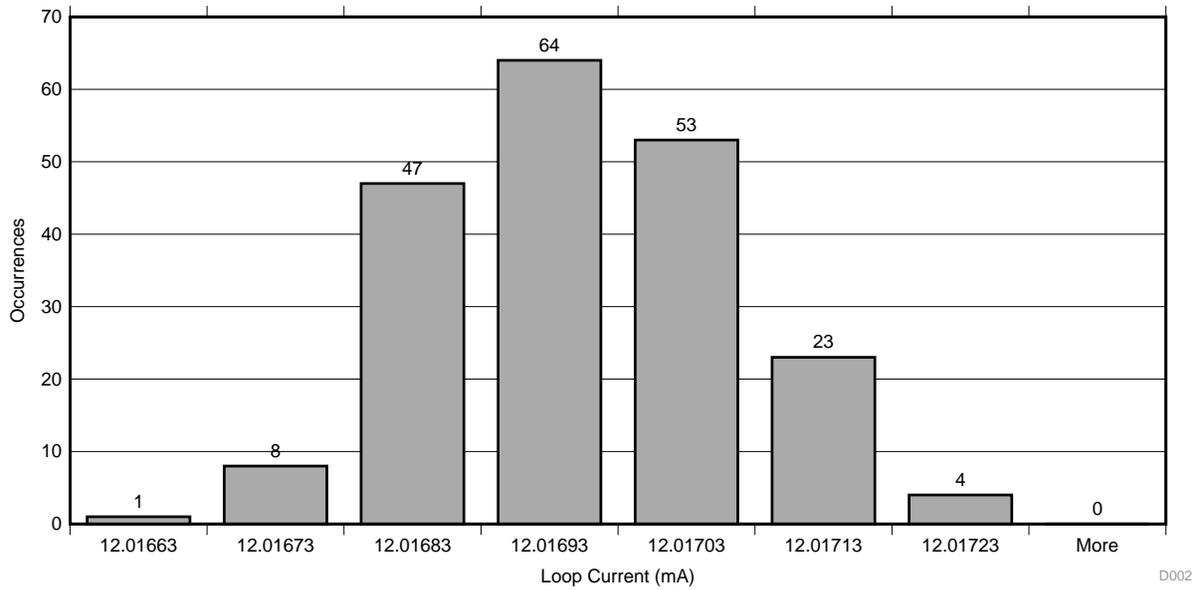


图 8. 使用外部基准的 32 位 ADC 直方图

根据直方图显示，我们可得到 20.03 个有效位数（根据标准偏差推导得出）和 17.31 个无噪声位。无噪声位得自于 6.6x 标准偏差。这等于 99.9% 的样本。

4.1.2 路径 7: CH2-ADC1-INTREF 的性能

此模拟信号路径使用相同的 ADC 内核和输入通道，但使用不同的内置基准。如果图 9 中所示的内部基准结果满足系统要求，则可以改用成本较低的基准。该内部基准最终的性能将会更好，因此我们将使用路径 7 作为默认路径。此路径的代码-电流计算方法为：

$$I_{\text{PATH7}} = \frac{\left(\frac{\text{code}}{2^{N-1}} \times V_{\text{INTREF}} \right)}{R_{\text{BURDEN}}} = \frac{\left(\frac{\text{code}}{2^{31}} \times 2.5 \text{ V} \right)}{24.9 \Omega} \quad (5)$$

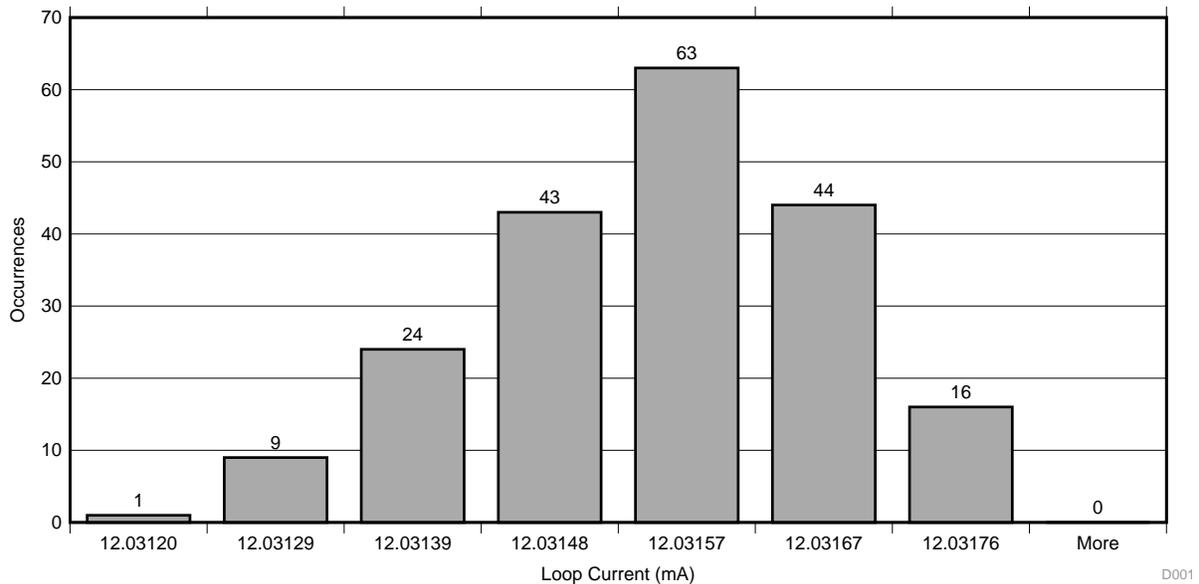


图 9. 使用内部基准的 32 位 ADC 直方图

内部基准与外部基准相比性能较低，因此此路径的性能预期略低。得到的 19.68 个有效位数和 16.96 个无噪声位仍然接近于路径 6 的性能。

4.1.3 路径 5: CH2-ADC3-EXTREF 的性能

RM41L232 Hercules 微控制器内置的嵌入式 12 位 SAR ADC 附带独立于 ADS1263 的模拟信号路径。RM41L232 需要一个外部基准。由于位数受限，因此性能较低，但足够用于验证来自 ADS1263 的数据样本，并大致正确。此路径的代码-电流计算考虑到了 INA826 的增益：

$$I_{\text{PATH5}} = \frac{\frac{\text{code}}{2^N} \times V_{\text{EXTREF}}}{\text{Gain}[\text{INA826}] \times R_{\text{BURDEN}}} = \frac{\frac{\text{code}}{2^{12}} \times 3 \text{ V}}{\left(1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{10.7 \text{ k}\Omega}\right) \times 24.9 \Omega} \quad (6)$$

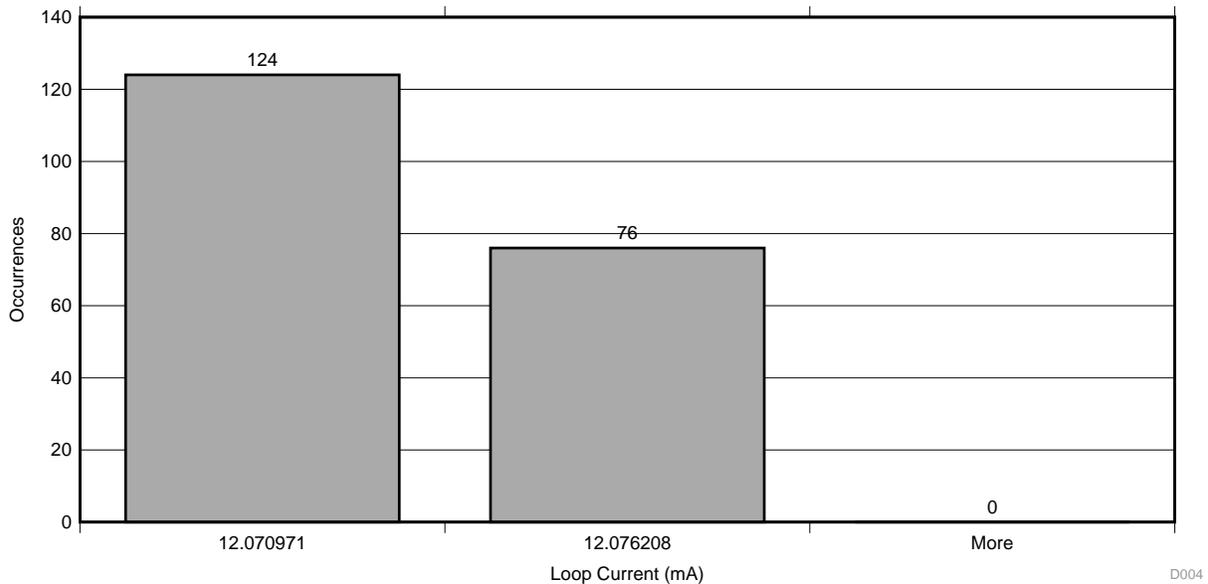
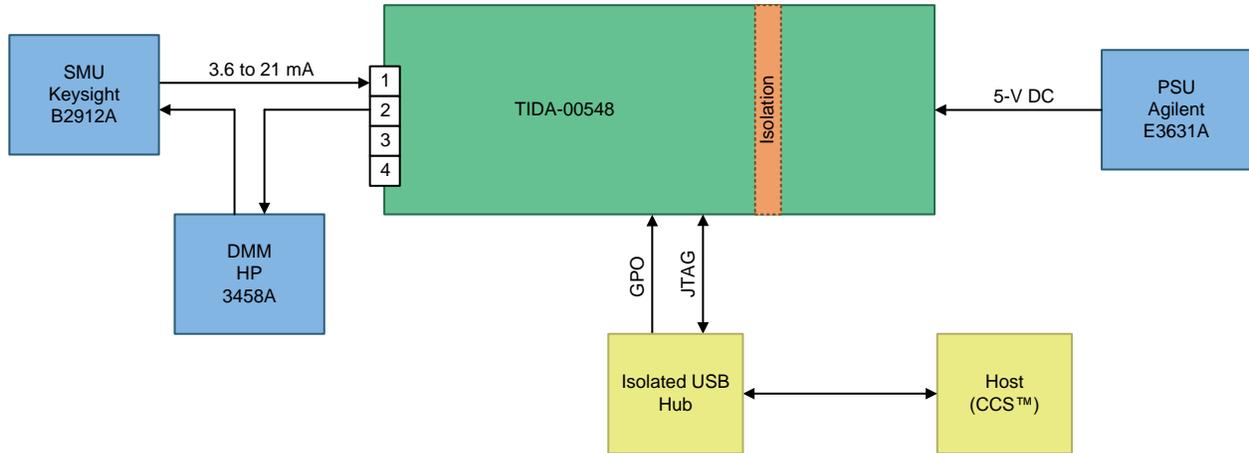


图 10. Hercules 中嵌入的 12 位 ADC 直方图

由于相对较低的 12 位分辨率，该直方图仅包含两个数据单元。得到的 13.04 个有效位数和 10.32 个无噪声位处于预期范围内。与高性能路径类似，建议补偿转换器的偏移误差。为了得到偏移，使用开路连接（无电流）测量了路径 5。在测试期间，观测到了 0x000F 值。用公式 6 计算虚拟电流可得到 78.5μA（代码 = 0x000F），约等于图 10 中给出的 12mA 的偏移。

4.2 整个模拟输入范围内的误差

PLC 模块的规范中，如今通常使用全量程误差来显示测量的数据样本相对于实际电流的误差。使用高性能路径 6 进行此测量（参见表 3）。图 11 显示了测试设置。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 11. 全量程误差测量的测试设置

8.5 位 DMM HP3458A 测量流过环路的电流，并用作基准。ADC 数据样本用于反算模块实际检测到的电流。在实际测量之前，在未将导线连接到端子的情况下，通过对 16 个样本求平均来获得偏移校正代码（参见公式 7）。可以在功能测试期间执行这种冷偏移校准，而无需在制造过程中采取额外措施。

$$I_{\text{MODULE}} = \frac{\left(\frac{\text{code} - \text{offset}}{2^{N-1}} \times V_{\text{EXTREF}} \right)}{R_{\text{BURDEN}}} = \frac{\left(\frac{\text{code} - \text{offset}}{2^{31}} \times 3 \text{ V} \right)}{24.9 \Omega} \quad (7)$$

全量程误差为：

$$E_{\text{FS}}[\%] = \frac{\text{abs}(I_{\text{DMM}} - I_{\text{MODULE}})}{0.021 \text{ A}} \times 100 \quad (8)$$

在此设计中，25°C 时的 $E_{FS[\%]}$ 不超过 $\pm 0.009\%$ ，如 图 12 所示。测量电流范围为 3 至 21mA，步幅为 25 μ A。

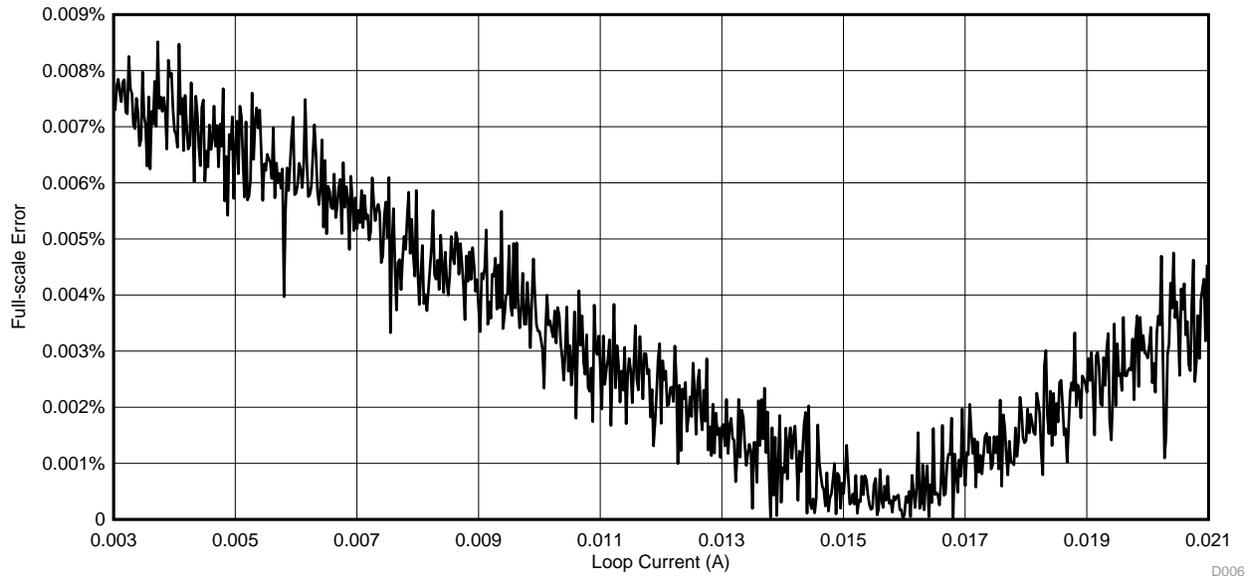


图 12. 路径 6 的全量程误差

4.3 模拟输入电流限制器性能

输入电流限制器是保护模块避免过大电流进入模块的一种重要方式。它设计为可在端子处承受 33V 的连续电压。3.2 节介绍了电流限制器功能。在最大允许输入电压 33V 连续连接到输入（同时启用了该输入）这种最恶劣的故障情况下，将会测量到 100mA 的输入电流。在正常工作条件下，最大输入电流 21mA 可在输入端子处导致 1.3V 的压降。

5 设计文件

5.1 电路原理图

要下载原理图，请参见 [TIDA-00548](#) 设计文件。

5.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参见 [TIDA-00548](#) 的设计文件。

5.3 PCB 布局建议

5.3.1 板层图

要下载布局图，请参见 [TIDA-00548](#) 的设计文件。

5.4 Altium 项目

要下载 Altium 项目文件，请参见 [TIDA-00548](#) 的设计文件。

5.5 光绘文件

要下载光绘文件，请参见 [TIDA-00548](#) 的设计文件。

5.6 装配图

要下载装配图，请参见 [TIDA-00548](#) 的设计文件。

6 关于作者

LARS LOTZENBURGER 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责开发面向工业领域的参考设计解决方案。

Lars 在工作中充分发挥了他在模拟/数字电路开发、PCB 设计和嵌入式编程方面的经验。Lars 拥有德国萨克森州米特韦达应用科技大学电气工程学位证书。

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。您就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等产权包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默示的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无屡发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2017 德州仪器半导体技术（上海）有限公司