



Alen Barisic, Ahmed Noeman

引言

可编程逻辑控制器 (PLC) 是一种强大的过程控制单元，广泛用于工厂自动化，例如生产线和自动机械。与 PLC 共享许多要求和功能的类似集中式控制单元用于楼宇自动化应用，例如智能家居或楼宇安全系统。

模拟输入模块 (AIN) 作为 PLC 的子系统，是实际物理参数 (即温度、距离、湿度) 与全数字控制单元之间的前端。AIN 可在主 PLC 单元中实现，但也广泛用于可扩展模块化系统和远程系统。AIN 命令输入和典型的传感输出是单极或双极电压 (即 0V 至 10V) 或电流 (即 0mA 至 20mA) 信号。

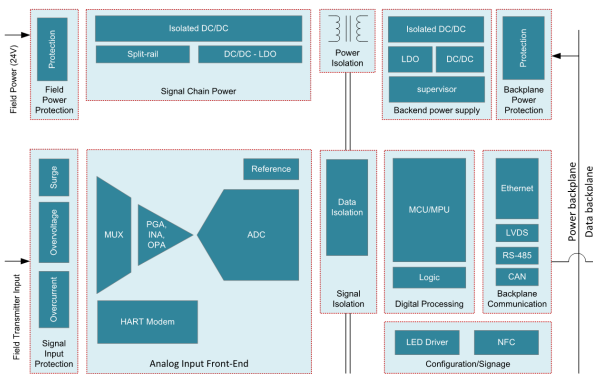


图 1. AIN AFE EE 图

加速的工业 4.0 革命会继续增加对可扩展 AIN 模块的需求，同时缩短开发时间、减小电路板尺寸和降低成本。引入了成本优化型 AIN 架构的一种可能实现方案，这种架构基于具有集成模拟功能 MSP430FR2355 MCU。

具有集成模拟的 MSP430FR2355

MSP430FR2355 是一款具有集成模拟功能的低功耗、低成本 MCU。它集成了 12 位 SAR ADC 和四个称之为智能模拟组合 (SAC) 的可配置信号链模块，每个组合均可用作 12 位 DAC 或可配置可编程增益运算放大器，以满足系统的特定需求，同时降低成本并减小 PCB 尺寸。

表 1. MSP430FR2355 内部 ADC

通道	多达 12 个多路复用通道
分辨率	10 或 12 位模式
采样频率	高达约 200kHz
电压基准	内部 1.5V、2.0V 和 2.5V 电源轨或外部电源轨

对于成本敏感型入门级或中等性能 AIN 架构，具有低输入电压范围的 MCU 集成 ADC 与外部前端相结合是一个不错的选择。使用分立式元件设计输入前端可在满足目标要求和降低成本方面带来更高的灵活性。

电压和电流输入前端

输入前端将工业典型信号输入范围 (即 0V 至 10V、0mA 至 20mA) 转换为 ADC 输入电压范围，并设置输入阻抗及提供所需的过压和过流保护。图 2 和图 3 显示了针对 ADC 2.5V 电源轨的分立式单极架构，重点是实现低于 1% 的系统精度并优化成本。

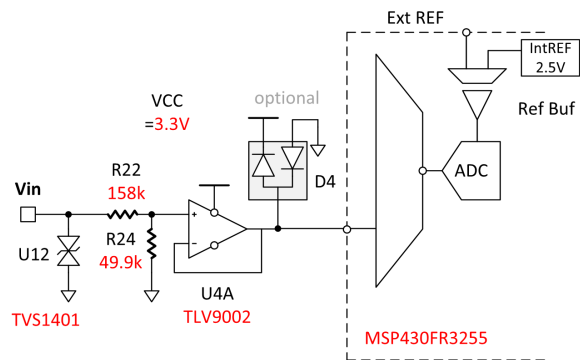


图 2. VIN 前端

表 2. VIN 器件选择

要求	规格
R1、R2 分压器	在精度和成本之间进行权衡，以实现目标系统精度
运算放大器	TLV9002
保护	双向浪涌保护、运算放大器输入保护
	TVS1401，双钳位二极管

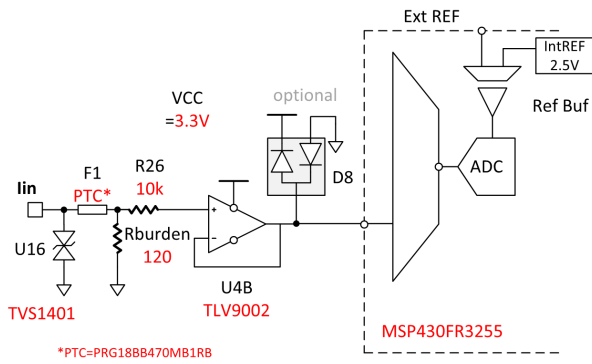


图 3. IIN 前端

表 3. IIN 器件选择

	要求	规格
分流电阻器	在精度和成本之间进行权衡，以实现目标系统精度	1%、50ppm/°C、1W
运算放大器		TLV9002
保护	双向浪涌保护、分流保护、可选运算放大器输入保护	TVS1401、PTC、双钳位二极管

选择输入级的增益系数时，10V 或 20mA 输入信号会导致 ADC 的输入电压略低于 2.5V 的满量程，从而避免因失调电压、增益和其他误差而饱和。对于电压输入级，使用 0.24V/V 的增益，即 2.4V 对应于 10V 输入。对于电流输入级，120 Ω 分流电阻器上的 20mA 输入电流会在 ADC 输入端产生 2.4V 电压。

系统精度

可实现的系统精度源自总体系统误差。通过降低动态范围的成本，可以在实现校准时消除失调电压、增益和其他静态误差。MSP430FR2355 支持 ADC 的校准寄存器和内部基准，以实现工厂校准。

在选择前端元件（即电阻器、运算放大器和外部基准的规格）时，可以灵活地满足各个精度规格。

表 4 列出了源自系统元件数据表的各种误差规格

表 4. 误差规格

	电阻器	运算放大器	内部基准	REF 缓冲器	ADC	单位
	1%、50ppm	TLV9002	MSP430FR2355			
偏移量误差		1.5		16	1.5	mV
温漂		0.004				mV/°C
增益误差	1.25 (VIN) 1.00 (IIN)		1.5	0.64	0.0732	%FS
增益漂移			50			ppm/°C

表 4. 误差规格 (continued)

	电阻器	运算放大器	内部基准	REF 缓冲器	ADC	单位
噪声			130			μV

这些误差值是指信号链中的特定点。在计算输入端子上的总体偏移和增益误差时，应考虑信号链增益。例如，ADC 输入端的 1mV 偏移量会在输入端子上产生 $1/2.4\text{mV} = 4.167\text{mV}$ 的偏移量。

布局尺寸

为了演示所提议电路的尺寸，电压和电流输入前端（包括保护器件）都放置在单面 PCB 上。两个通道只需要 $10\text{mm} \times 10\text{mm}^2$ ，如图 4 所示。每个通道的有效前端面积约为 $5 \times 10\text{mm}^2$ 。可以使用四路运算放大器封装代替双路运算放大器，并且可以移除可选钳位二极管以进一步减小电路面积。

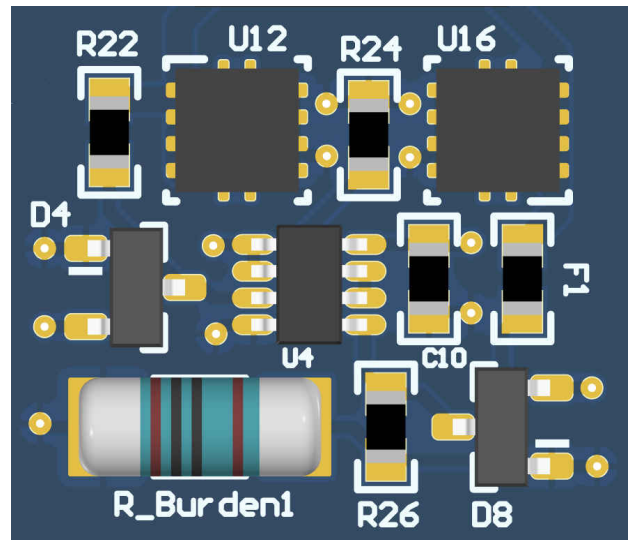


图 4. VIN 和 IIN 布局

测量步骤

对于失调电压测量，输入端短接至地，而 FR2355 集成 ADC 采集 1024 个样本，其中平均值表示偏移值。如果失调电压为负值，并且无法直接从零输入测量，则会添加几个 LSB 的略正输入以确定负失调电压。

为了测量增益误差，输入信号被设定为满量程值。ADC 捕获 1024 个样本，平均值表示满量程误差。增益误差的计算方法是从满量程误差中减去失调电压误差。

为了测量信号链噪声，从电池电芯施加了 1.6V 和 8.3V 的直流电压电平，以尽可能降低输入源产生的任何额外噪声。内部 ADC 采集 1024 个样本，据此计算 RMS 噪声。SNR 和 ENOB 可通过方程式 1 和方程式 2 计算得出。

$$\text{SNR} = 20 \times \log(\text{input FS} / \text{RMS noise}) \quad (1) \quad \text{ENOB} = (\text{SNR} - 1.76\text{dB}) / 6.02 \quad (2)$$

测量结果

表 5 详细介绍了电压输入。

表 5. 电压输入

参数	条件 ⁽¹⁾	20°C 时	- 25°C 时	55°C 时	单位
直流失调电压		2.71 (6.89)	不适用 ⁽²⁾	30.1 (76.5)	LSB (mV)
增益误差		7.27 (18.47)		21.4 (- 54.5)	LSB (mV)
FS 误差		9.97 (25.37)	23 (58.5)	8.6 (22)	LSB (mV)
RMS 噪声	1.6V 直流输入	1.03 (2.61)	2.3 (5.8)	0.76 (1.9)	LSB (mV)
	8.3V 直流输入	1.68 (4.27)		1.9 (4.9)	LSB (mV)
SNR	1.6V 直流输入	71.7	64.7	74.2	
	8.3V 直流输入	67.4		66.1	
ENOB	1.6V 直流输入	11.6	10.5	12.0	位
	8.3V 直流输入	10.9		10.7	

(1) ADC 配置：采样率约为 83kSPS、12 位模式、2.5V 内部 ADC 基准、基于 10V FS 输入的 LSB 单元

(2) 负失调电压：测量需要以稍正输入电平（约 10mV）进行测量。

表 6 列出了当前输入参数。

表 6. 电流输入

参数	条件 ⁽¹⁾	20°C 时	- 25°C 时	55°C 时	单位
FS 误差		3.26 (16.57)	28.4 (144)	18.3 (93)	LSB (μA)
RMS 噪声	19.652mA 直流输入	1.7 (8.5)	2 (10.4)	1.4 (7.2)	LSB (μA) LSB (μA)
SNR	19.652mA 直流输入	67.5	65.7	69.0	
ENOB	19.652mA 直流输入	10.9	10.6	11.1	位

(1) ADC 配置：采样率约为 83kSPS、12 位模式、2.5V 内部 ADC 基准、基于 10V FS 输入的 LSB 单元

电流输入级的结果与电压输入级的结果几乎相同，考虑了负载电阻器误差，而不是电阻分压器。

测量结果确认了失调电压误差、增益误差和噪声的初步估算。该电路在整个温度范围内保持 10 b ENOB 的最低电平，可通过对多个样本进行平均值计算来进一步改进该电平。失调电压和增益误差可通过校准来减少或消除。除了基于 MCU 所测量近似温度进行校正外，还可以进行单点校准。

参考文献

1. 德州仪器 (TI), [MSP430FR4xx 和 MSP430FR2xx 系列用户指南](#)
2. 德州仪器 (TI), [MSP430FR235x、MSP430FR215x 混合信号微控制器 数据表](#)
3. 德州仪器 (TI), [使用 MSP430FR4xx 和 MSP430FR2xx ADC 进行设计 应用报告](#)
4. 德州仪器 (TI), [MSP430 ADC 校准 - E2E™ 论坛](#)

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司