

## Analog Engineer's Circuit

具有 **MSP430™** 智能模拟组合的单电源、低侧、单向电流检测电路

Matthew Calvo

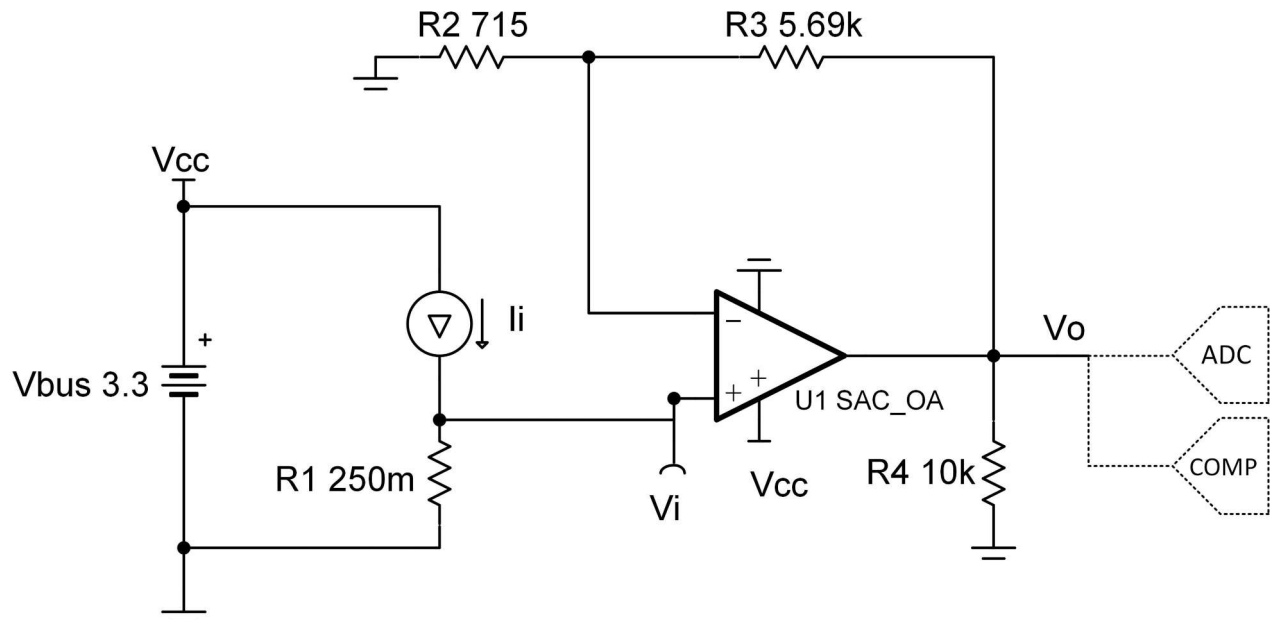
## 设计目标

输入		输出		电源		满量程范围误差
$I_{iMax}$	$V_{iMax}$	$V_{oMin}$	$V_{oMax}$	$V_{cc}$	$V_{ee}$	$FSR_{Error}$
1A	250mV	100mV	2.25V	3.3V	0V	2.09%

## 设计说明

某些 MSP430™ 微控制器 (MCU) 包含可配置的集成信号链元件，例如运算放大器、DAC 和可编程增益级。这些元件组成了一个称为智能模拟组合 (SAC) 的外设。有关 SAC 的不同类型以及如何利用其可配置模拟信号链功能的信息，请查看 [MSP430 MCU 智能模拟组合培训](#) 视频。要开始设计，请下载 [单电源、低侧、单向电流检测电路设计文件](#)。

此单电源、低侧电流检测解决方案可以准确地检测最大为 1A 的负载电流，并将其转换为 100mV 至 2.25V 的电压。该电路在同相放大器配置中使用 [MSP430FR2311](#) 运算放大器。通过使用 [MSP430FR2355](#) 外设中的可编程增益级块，可将反馈电阻梯 (R2 和 R3) 集成到 MCU 中，从而实现进一步集成。可以根据需要调节输入电流范围和输出电压范围，并且可以使用更大的电源来适应更大的摆幅。二级运算放大器的输出可以直接通过板载 ADC 采样或通过板载比较器进行监测，以在 MCU 内部进行进一步处理。



## 设计说明

- 运算放大器工作在线性输出范围内，这个参数通常在芯片手册的测试条件中给出。
- 共模电压等于输入电压。
- 分流电阻器和反馈电阻器的容差将决定电路的增益误差。
- 避免将容性负载直接放置在放大器的输出端，从而更大幅度地减少稳定性问题。
- 使用高值电阻器可能会减小电路的相位裕度并在电路中引入额外的噪声。
- 此电路的小信号带宽取决于电路的增益和放大器的增益带宽积 (GBP)。
- 可通过添加一个与  $R_3$  并联的电容器来完成滤波。如果使用了高阻值电阻器，那么添加一个与  $R_3$  并联的电容器还可提高电路的稳定性。
- 如果该解决方案是通过 MSP430FR2355 SAC\_L3 实现的，则运算放大器可以配置为同相可编程增益放大器模式或带有外部  $R_2$  和  $R_3$  无源器件的通用模式来测量电流感应电路。
- 如果该解决方案是通过 MSP430FR2311 实现的，则可以通过 SAC\_L1 运算放大器或跨阻放大器 (TIA) 来实现该运算放大器，以测量电流感应电路。
- MSP430FR2355 中的增强型参考模块可以通过调节参考电压至 2.5V 来调节 ADC 的测量范围，以更精确地测量电流感应 AFE 地输出。
- [单电源、低侧、单向电流检测电路设计文件](#) 包含展示如何正确初始化 SAC 外设的代码示例。

## 设计步骤

下面给出了该电路的传递函数。

$$V_o = I_i \times R_1 \times \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right)$$

1. 定义满量程分流电压并计算最大分流电阻。

$$V_{iMax} = 250 \text{ mV} \quad \text{at} \quad I_{iMax} = 1 \text{ A}$$

$$R_1 = \frac{V_{iMax}}{I_{iMax}} = \frac{250 \text{ mV}}{1 \text{ A}} = 250 \text{ m}\Omega$$

2. 计算最大线性输出电压所需的增益。

$$V_{iMax} = 250 \text{ mV} \quad \text{and} \quad V_{oMax} = 2.25 \text{ V}$$

$$\text{Gain} = \frac{V_{oMax}}{V_{iMax}} = \frac{2.25 \text{ V}}{250 \text{ mV}} = 9 \frac{\text{V}}{\text{V}}$$

3. 为  $R_2$  和  $R_3$  选择标准值。

假设  $R_2 = 715 \Omega$  (0.1% 标准值)

$$\text{Gain} = 9 \frac{\text{V}}{\text{V}} = 1 + \frac{R_3}{R_2}$$

$$R_3 = \left(9 \frac{\text{V}}{\text{V}} - 1\right) \times R_2 = 8 \times 715 \Omega = 5.72 \text{ k}\Omega$$

选择  $R_3 = 5.69 \text{ k}\Omega$  (0.1% 标准值)

### 备注

反馈电阻梯 ( $R_2$  和  $R_3$ ) 可使用 SAC\_L3 的集成可编程增益电阻梯实现，编程同相增益为  $9\times$ 。  
[MSP430FR2355 代码示例](#) 演示了此实现。如果 SAC 运算放大器在通用模式下使用，则外部电阻器将用于构建反馈电阻器梯。

4. 计算达到输出摆幅至轨限制前的最小输入电流。  $I_{iMin}$  表示可准确检测到的最小输入电流。

$$V_{oMin} = 100 \text{ mV}; R_1 = 250 \text{ m}\Omega$$

$$V_{iMin} = \frac{V_{oMin}}{\text{Gain}} = \frac{100 \text{ mV}}{9 \frac{\text{V}}{\text{V}}} = 11.1 \text{ mV}$$

$$I_{iMin} = \frac{V_{iMin}}{R_1} = \frac{11.1 \text{ mV}}{250 \text{ m}\Omega} = 44.4 \text{ mA}$$

5. 计算满量程范围误差和相对误差。  $V_{os}$  是数据表中的典型失调电压。

$$\text{FSRerror} = \left( \frac{V_{os}}{V_{iMax} - V_{iMin}} \right) \times 100 = \left( \frac{5 \text{ mV}}{238.9 \text{ mV}} \right) \times 100 = 2.09 \%$$

$$\text{Relative Error at } I_{iMax} = \left( \frac{V_{os}}{V_{iMax}} \right) \times 100 = \left( \frac{5 \text{ mV}}{250 \text{ mV}} \right) \times 100 = 2 \%$$

$$\text{Relative Error at } I_{iMin} = \left( \frac{V_{os}}{V_{iMin}} \right) \times 100 = \left( \frac{5 \text{ mV}}{11.1 \text{ mV}} \right) \times 100 = 45 \%$$

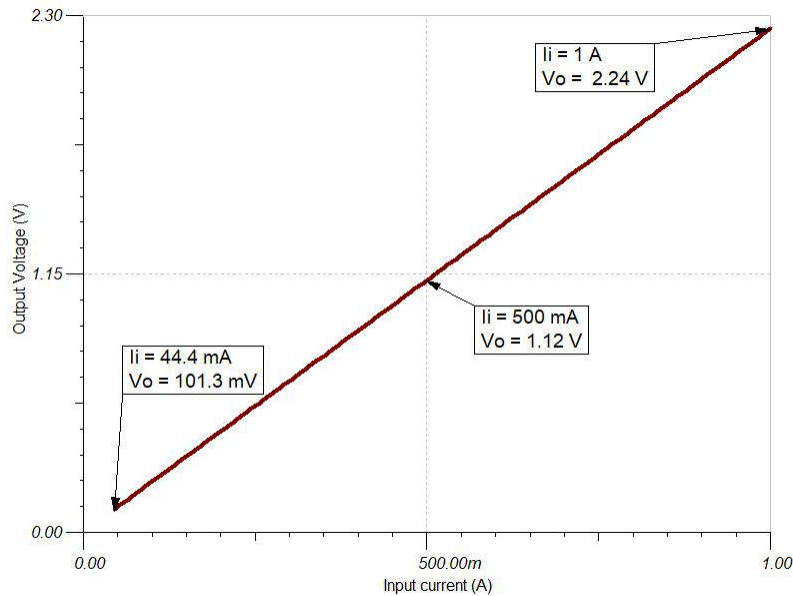
6. 为了保持足够的相位裕度，应确保器件的增益设置电阻器和输入电容生成的零点大于电路的带宽

$$\frac{1}{2 \times \pi \times (C_{cm} + C_{diff}) \times (R_2 || R_3)} > \frac{\text{GBP}}{G}$$

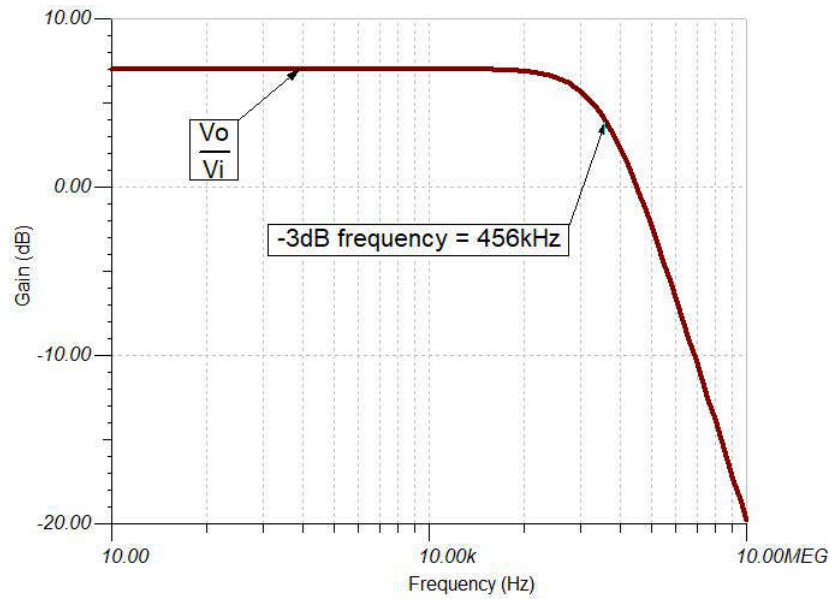
$$\frac{1}{2 \times \pi \times (3 \text{ pF} + 3 \text{ pF}) \times \left( \frac{715 \Omega \times 5.69 \text{ k}\Omega}{715 \Omega + 5.69 \text{ k}\Omega} \right)} > \frac{4 \text{ MHz}}{9 \frac{\text{V}}{\text{V}}} = 41.76 \text{ MHz} > 444.4 \text{ kHz}$$

## 设计仿真

### 直流仿真结果



## 交流仿真结果



### 目标应用

- [无线电动工具电池包](#)
- [混合动力汽车/电动汽车电池管理系统 \(BMS\)](#)
- [电机驱动器](#)
- [照明](#)
- [能源基础设施](#)

### 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [MSP430 单电源、低侧、单向电流检测电路](#), 代码示例和 SPICE 仿真文件
2. 德州仪器 (TI), [具有 3.75KB FRAM、运算放大器、TIA、具有 DAC 的比较器、10 位 ADC 的 16MHz 集成模拟微控制器](#), 产品页面
3. 德州仪器 (TI), [MSP430 MCU 智能模拟组合](#), 视频



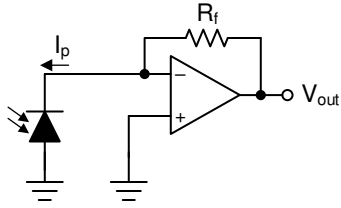
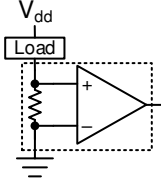
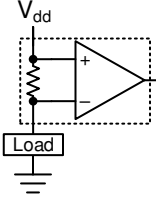
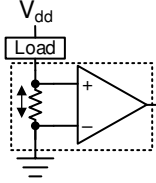

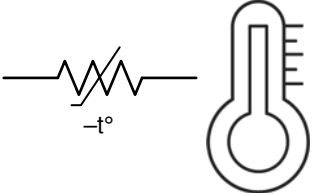
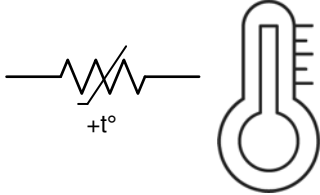
### 设计特色运算放大器

MSP430FRxx 智能模拟组合		
	MSP430FR2311 SAC_L1	MSP430FR2355 SAC_L3
$V_{CC}$	2.0V 至 3.6V	
$V_{CM}$	-0.1V 至 $V_{CC} + 0.1V$	
$V_{out}$	轨到轨	
$V_{os}$	$\pm 5mV$	
$A_{OL}$	100dB	
$I_q$	350 $\mu A$ (高速模式)	
	120 $\mu A$ (低功耗模式)	
$I_b$	50pA	
UGBW	4MHz (高速模式)	2.8MHz (高速模式)
	1.4MHz (低功耗模式)	1MHz (低功耗模式)
SR	3V/ $\mu s$ (高速模式)	
	1V/ $\mu s$ (低功耗模式)	
通道数量	1	4
<a href="#">MSP430FR2311</a>		
<a href="#">MSP430FR2355</a>		

### 设计备选运算放大器

MSP430FR2311 跨阻放大器	
$V_{CC}$	2.0V 至 3.6V
$V_{CM}$	-0.1V 至 $V_{CC}/2V$
$V_{out}$	轨到轨
$V_{os}$	$\pm 5mV$
$A_{OL}$	100dB
$I_q$	350 $\mu A$ (高速模式)
	120 $\mu A$ (低功耗模式)
$I_b$	5pA (TSSOP-16, 带 OA 专用引脚输入)
	50pA (TSSOP-20 和 VQFN-16)
UGBW	5MHz (高速模式)
	1.8MHz (低功耗模式)
SR	4V/ $\mu s$ (高速模式)
	1V/ $\mu s$ (低功耗模式)
通道数量	1
<a href="#">MSP430FR2311</a>	

### MSP430 相关电路

<p>低噪声、远距离 PIR 传感器调节器电路</p> 	<p>桥式放大器电路</p> 	<p>跨阻放大器电路</p> 
<p>单电源、低侧、单向电流检测电路</p> 	<p>带有分立式差分放大器的高侧电流检测电路</p> 	<p>低侧双向电流检测电路</p> 
<p>半波整流器电路</p> 	<p>通过 NTC 热敏电阻电路检测温度</p> 	<p>通过 PTC 热敏电阻电路检测温度</p> 

### 商标

MSP430™ is a trademark of Texas Instruments.  
所有商标均为其各自所有者的财产。

### 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision A (March 2020) to Revision B (October 2024)	Page
• 通篇更新了表格、图和交叉参考的格式.....	1

Changes from Revision * (December 2019) to Revision A (March 2020)	Page
• 添加了 MSP430 相关电路 部分.....	1

## 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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司