

TI 高精度设计：经验证的设计 低电平 ($5\mu\text{A}$) V-I 转换器



TI 高精度设计

TI 高精度设计是 TI 的模拟产品专家创建的模拟解决方案。经验证的设计提供理论、组件选择、仿真、完整的印刷电路板 (PCB) 电路原理图 & 布局布线、物料清单和基于此参考设计的测试数据。还讨论了有助于符合替代设计目标要求的电路修改。

设计资源

[设计存档](#) 全部设计文件

[TINA-TI™](#)

SPICE 模拟器

[INA326](#) 产品文件夹

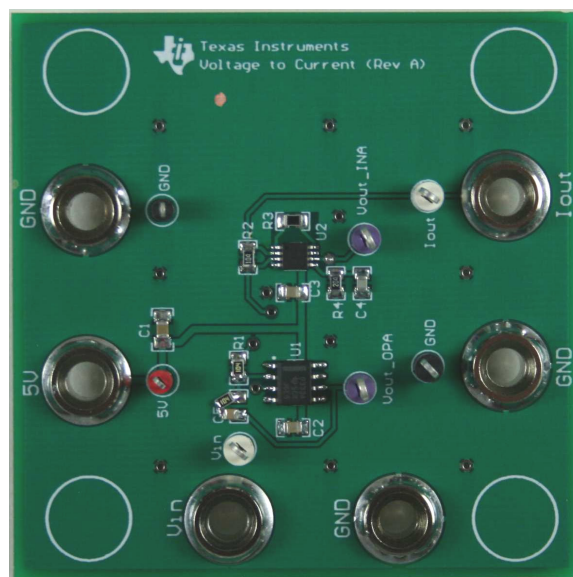
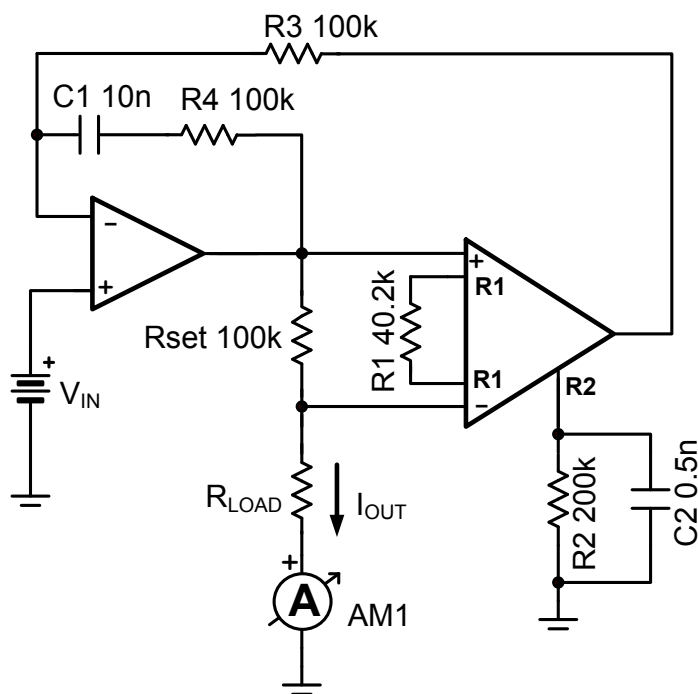
[OPA333](#) 产品文件夹

电路描述

这个微型放大器电压-电流 (V-I) 转换器为一个负载传送一个高精度低电平电流。这个设计由单个 5V 电源供电运行，并且使用一个高精度低漂移运算放大器和仪表放大器。简单修改能够改变 V-I 转换器的范围和精度。



[请咨询模拟产品专家](#)
[WEBENCH® 设计中心](#)
[TI 高精度设计库](#)



此 TI 参考设计末尾的一份重要声明解决了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

TINA-TI 是德州仪器 (TI) 的商标

WEBENCH 是德州仪器 (TI) 的注册商标

1 设计汇总

此设计要求如下：

- 电源电压： 5V 直流
- 输入： 0V - 5V 直流
- 输出： 0 μ A - 5 μ A 直流

Table 1 中总结了此设计目标和性能。 Figure 1 显示了此设计经测试的转换功能。

表 1. 设计目标、仿真和测量性能的比较

	目标值	仿真值	测量值
未校准的精度 (% FSR)	0.2%	0.3%	0.18%
经校准的精度 (% FSR)	0.01%	不适用	0.001%
负载依从度 $0 < R < 500k$ 最大线性输出 (μ A)	4.0 μ A	4.9 μ A	4.9 μ A
负载依从度 $0 < R < 500k$ 最小线性输出 (μ A)	1.0 μ A	0 μ A	0.6 μ A

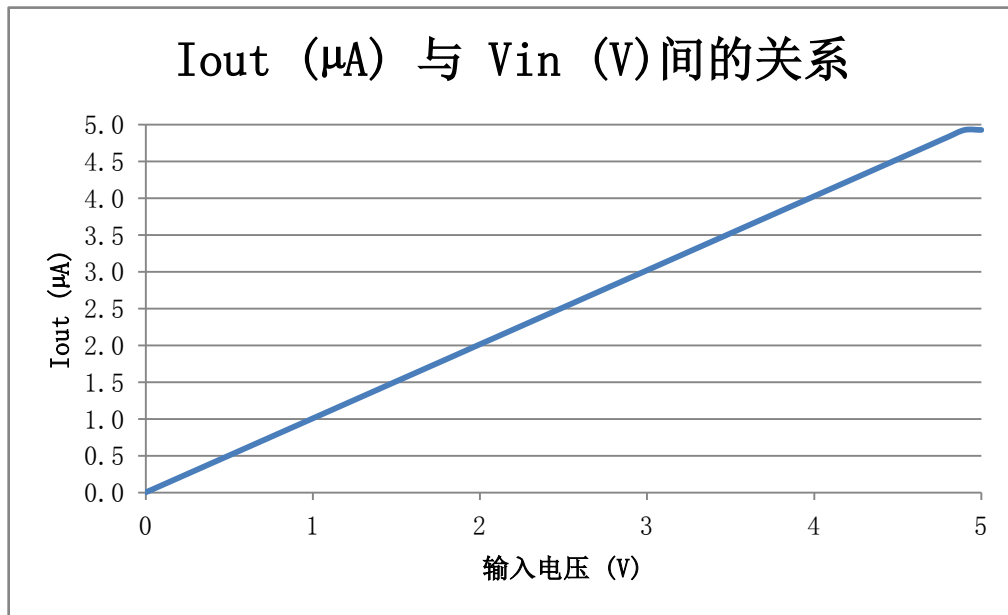


图 1: 经测量的转换曲线

2 工作原理

Figure 2 中显示了针对这个设计的更加完整的电路原理图。这个电路的 V-I 转换功能基于输入电压， $V_{\text{输入}}$ ， $R_{\text{设定}}$ 之间的关系，以及仪表放大器 (INA) 增益。运行期间，被 INA 增益拆分的输入电压降出现在置位电阻器上 ($V_{\text{设定}} = V_{\text{输入}} / G_{\text{INA}}$)。流经 $R_{\text{设定}}$ 的电流必须流过负载，所以 $I_{\text{输出}}$ 为 $V_{\text{设定}} / R_{\text{设定}}$ 。 $I_{\text{输出}}$ 将保持一个良好调节的电流，只要 $R_{\text{设定}}$ 和 $R_{\text{负载}}$ 上的总电压不违反运算放大器的输出限值，或者 INA 的输入共模限值。

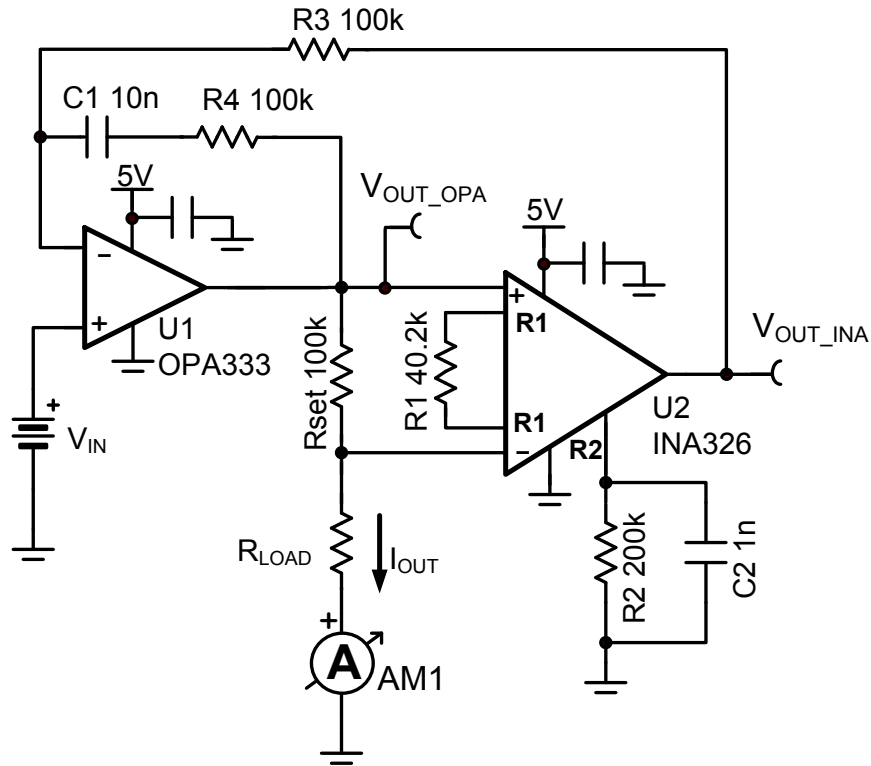


图 2: 完整电路原理图

这个设计的转换功能被定义为:

$$I_{\text{OUT}} = \frac{V_{\text{IN}}}{G_{\text{INA}} \times R_{\text{SET}}} \quad (1)$$

$$G_{\text{INA}} = \frac{2 \times R_2}{R_1} \quad (2)$$

2.1 经简化的复合放大器

将电流源视为一个复合放大器将有助于解释其运行。INA, U2, 是一个运算放大器 U1 的反馈内部的固定增益块。运算放大器被配置为一个单位增益电压随耦器, 所以施加到输入 ($V_{\text{输入}}$) 上的电压将被 1 增益放大, 并且出现在复合放大器的输出上 ($V_{\text{OUT_INA}} = V_{\text{输入}} \times 1$)。INA 的输入需要它的输出被增益拆分 ($V_{\text{INA_IN}} = V_{\text{OUT_INA}} / G_{\text{INA}}$ 或者代入 $V_{\text{INA_IN}} = V_{\text{IN}} / G_{\text{INA}}$)。Figure 4 中显示的示例演示了这个具有 1V 输入信号的概念。

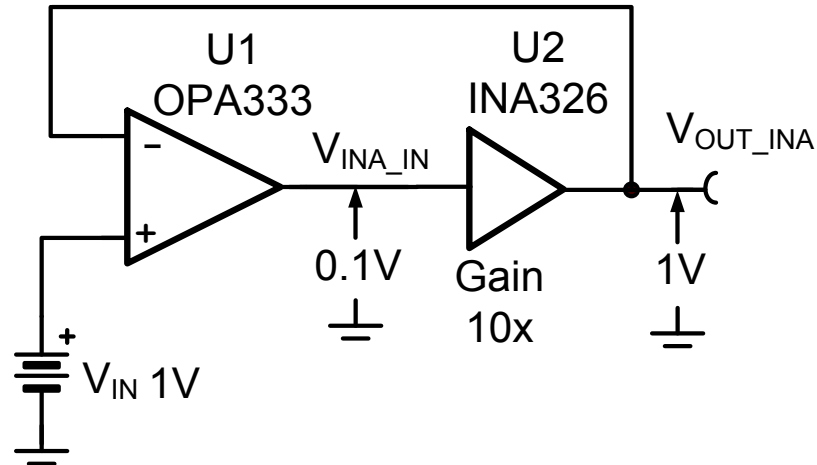


图 3: 经简化的复合放大器

2.2 电流输出功能

Figure 4 显示了 I 至 V 转换器的基本框图。置位电阻器上的电压 ($V_{\text{设定}}$) 是由 INA 增益拆分的输入电压 (例如 $V_{\text{设定}} = 1V / 10 = 0.1V$)。此电流由 $V_{\text{设定}}$ 和 $R_{\text{设定}}$ ($I_{\text{输出}} = V_{\text{设定}} / R_{\text{设定}} = 0.1V / 100k\Omega = 1\mu A$)。

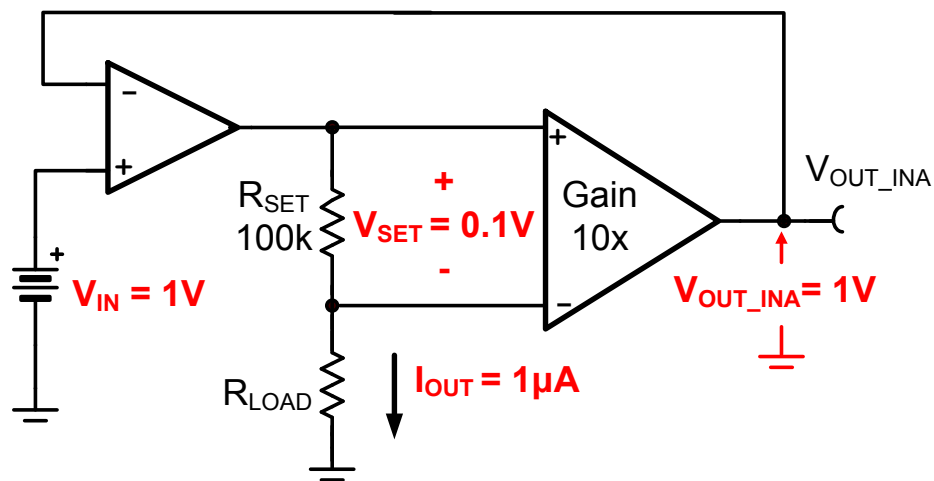


图 4: 经简化的 I 至 V 转换

2.3 设定 INA 增益

外部组件 (R1, R2 和 C2) 被用来设定 INA 增益。INA 增益将确定电流设置电阻器 ($R_{\text{设定}}$) 上的最大电压。例如, 如果增益为 10V/V, $R_{\text{设定}}$ 上的最大电压为 0.5 V ($V_{\text{SET_MAX}} = V_s / G_{\text{INA}} = 5\text{V} / 10 = 0.5\text{V}$)。大大减少 $R_{\text{设定}}$ 上的电压可在负载上实现更宽的电压范围。在这个示例中, 负载电压可以高达 4.5V (最大负载电压 = $V_s - V_{\text{设定}} = 5\text{V} - 0.5\text{V} = 4.5\text{V}$)。使用一个较大的增益有可能进一步减少 $R_{\text{设定}}$ 上的压降, 但是会引入其它问题。部分 6.5 详细介绍了依从性问题。部分 7.2 也包括了选择不同 INA 增益设置时的权衡考虑。在这个示例中, 增益被设定为 10V/V。Table 2 显示了摘自 INA326 数据表中的内容, 此内容被用来选择增益设定组件 ($G_{\text{INA}} = 10\text{V/V}$, $R1 = 40.2\text{k}\Omega$, $R2 = 200\text{k}\Omega$, $C2 = 0.5\text{nF}$)。请注意, $40.2\text{k}\Omega$ 是最接近 $40\text{k}\Omega$ 的标准值, 所以实际上, 增益被设定为 9.95V/V。由于这个电路针对最高精度进行了校准, 所以这实际上不是个问题。

表 2: 单电源配置中针对 INA326 的增益

所需增益 (V/V)	R1 (Ω)	R2 C2 (Ω nF)
1	400k	200k 0.5
10	40k	200k 0.5
20	20k	200k 0.5

2.4 设定输出电流范围

输出电流范围由最大设定电压 ($V_{\text{SET_MAX}}$) 和设定电阻 $R_{\text{设定}}$ 确定。如部分 2.3 中指出的那样, $V_{\text{SET_MAX}}$ 取决于电源电压和增益。 $R_{\text{设定}}$ 被选择用来设定输出电流范围 ($R_{\text{设定}} = V_{\text{SET_MAX}} / I_{\text{OUT_RANGE}} = 0.5\text{V} / 5\ \mu\text{A} = 100\text{k}\Omega$)。

$$R_{\text{SET}} = \frac{V_{\text{SET_MAX}}}{I_{\text{OUT_RANGE}}} = \frac{0.5\text{V}}{1\ \mu\text{A}} = 100\text{k}\Omega \quad (3)$$

2.5 补偿器件

外部器件 (C1, C3 和 C4) 被要求使 V 至 I 转换电路稳定。这些器件的值将针对不同的运算放大器和仪表放大器而变化。这些器件形成一个针对运算放大器的交流反馈路径, 此路径防止闭环响应中的峰值。由于 INA326 和 OPA333 的稳定性补偿器件和固有的带宽限制, 系统的闭环频率响应很低。选择稳定性网络的过程超出了这个设计说明的范围; 稳定性的详细解释请见参考 [1]。

3 组件选择

3.1 运算放大器选择

这个设计是一个高直流精密低电平（微放大器）电流源。为获得一个稳定直流输出电流，运算放大器（U1）关键特性是输入偏移电压（ V_{os} ）和偏移漂移（ $\Delta V_{os}/\Delta T$ ）。由于所需的输入范围介于 0V 至 5V 之间，需要一个轨至轨输入的放大器。此外，为了避免在输入共模范围内共模电压带来的误差，需要良好的共模抑制比（CMRR）（110db 或更佳）。

3.2 INA 选择

低失调电压、低失调电压漂移和低偏置电流是仪表放大器选择的关键特性。低增益误差和低增益误差漂移是第二位需考虑的特性。由于这个电路在 25 °C 时校准，漂移特性比绝对精度更加重要。INA 的另外一个重要特性是其共模输入范围和输出摆动范围。INA326 放大器具有高于电源轨的共模范围（即， $-0.02V < V_{cm} < 5.1V$ ）。此外，与很多仪表放大器一样，共模范围与增益或基准电压无关。输出能够在负载为 25 μ A 时摆动至非常接近于电源轨（5mV）。这个出色的共模和输出摆幅可实现很好地负载依从性（例如，负载电压的范围接近 0V 至 5V）。

3.3 无源组件选择

这个设计的关键无源组件是三个电阻，R1，R2 和 R_{设定}，它们是转换功能的一部分。为了减少增益误差，使用了 0.1%，20 ppm/°C 电阻。电阻的低温度漂移（20 ppm/°C）对于获得稳定结果十分重要，即使在电路运行在室温环境中时也是如此。请牢记，即使在良好控制的环境中，室温会在几分钟内变化 $\pm 2^\circ$ 。为了获得最优性能，应该将电路校准。

这个设计中的其它无源组件的选择可以为 1% 或更大，这是因为它们将不直接影响这个设计的转换功能。

4 仿真

Figure 5 中显示的 TINA-TI™ 电路原理图包括设计过程中获得的电路值。

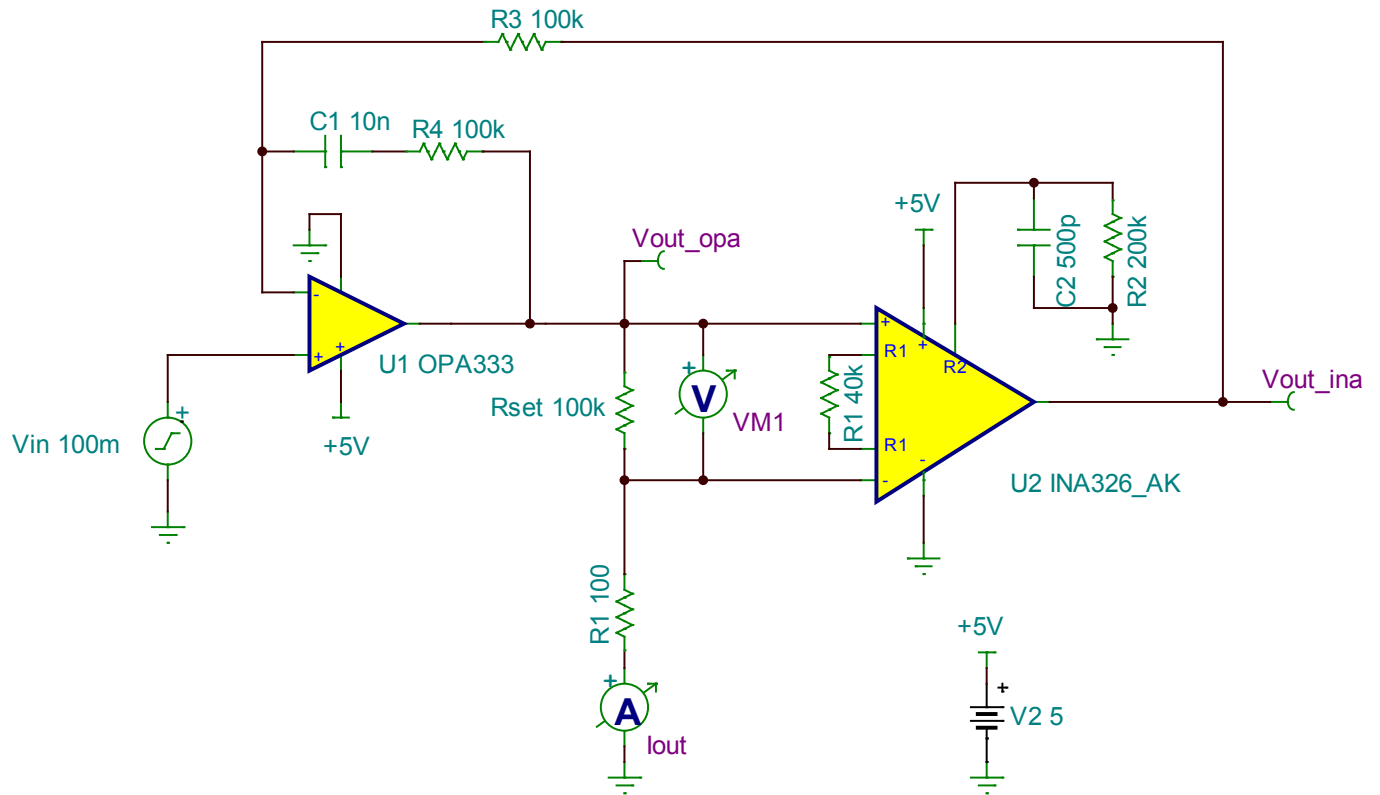


图 5: TINA-TI™ Spice 电路原理图

4.1 直流转换功能

Figure 6 中显示了电路的直流转换功能仿真结果。此结果可被用来在指定节点上将电压或电流参照为输入电压的函数。

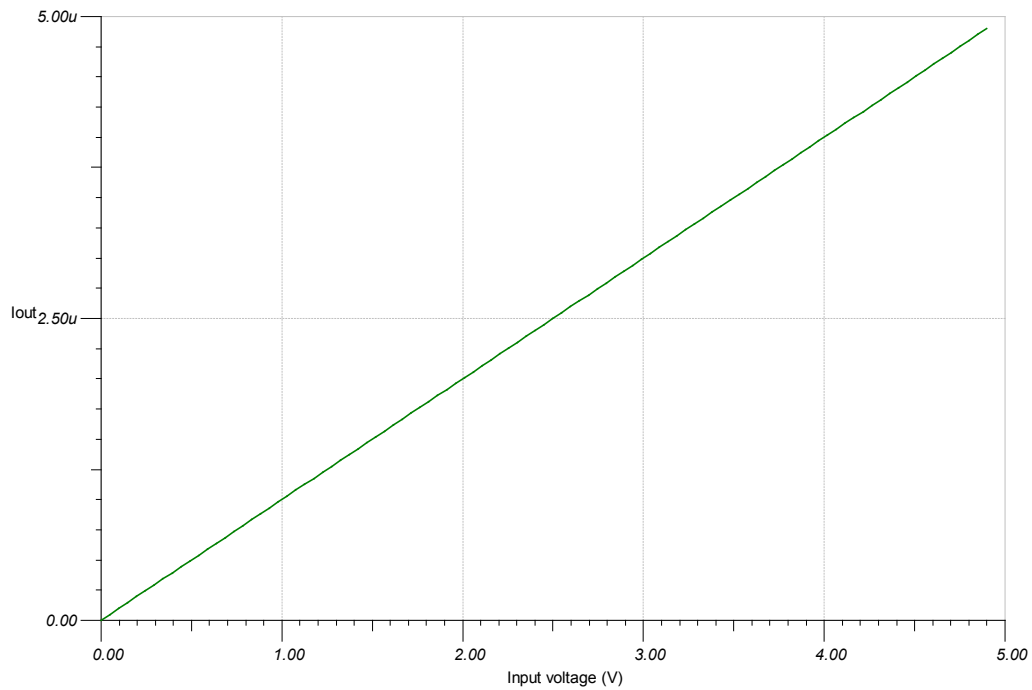


图 6: 仿真直流转换结果 (RL = 500k Ω)

Figure 7 显示了设计中其它节点的细节。例如，仪表放大器输出和运算放大器输出可在 Figure 7 中进行观测。

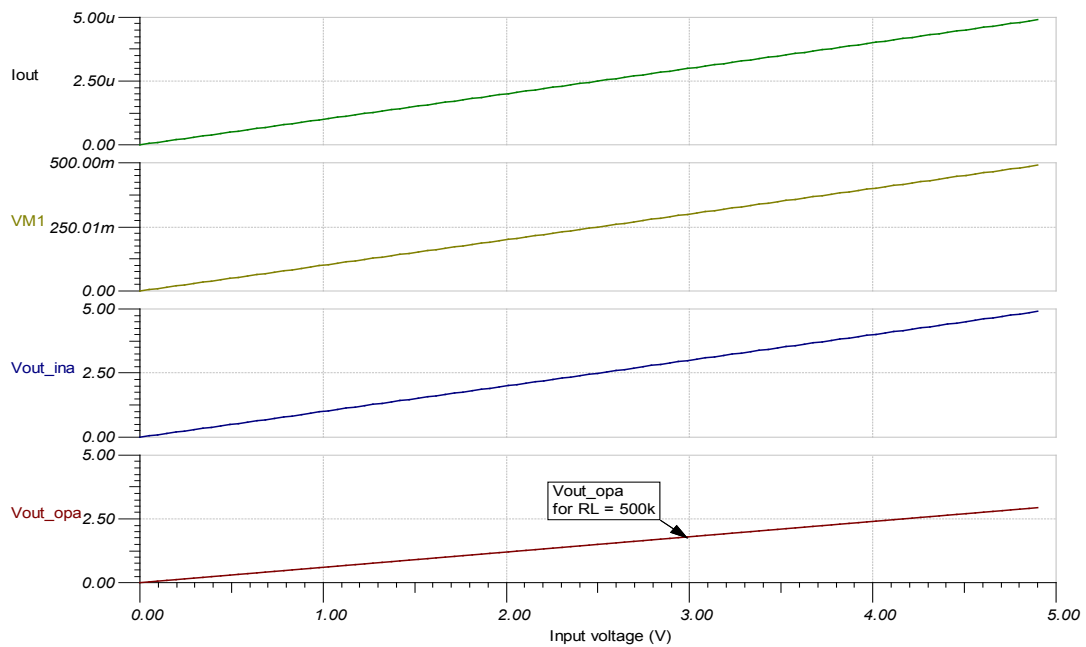


图 7: 仿真直流转换结果 (RL = 500k Ω)

4.2 阶跃响应

Figure 8 中可以看到此设计的阶跃响应。结果显示运算放大器的输出，INA 和电流输出用很少的过冲和振荡稳定至适当的值。这表明此设计是稳定的。

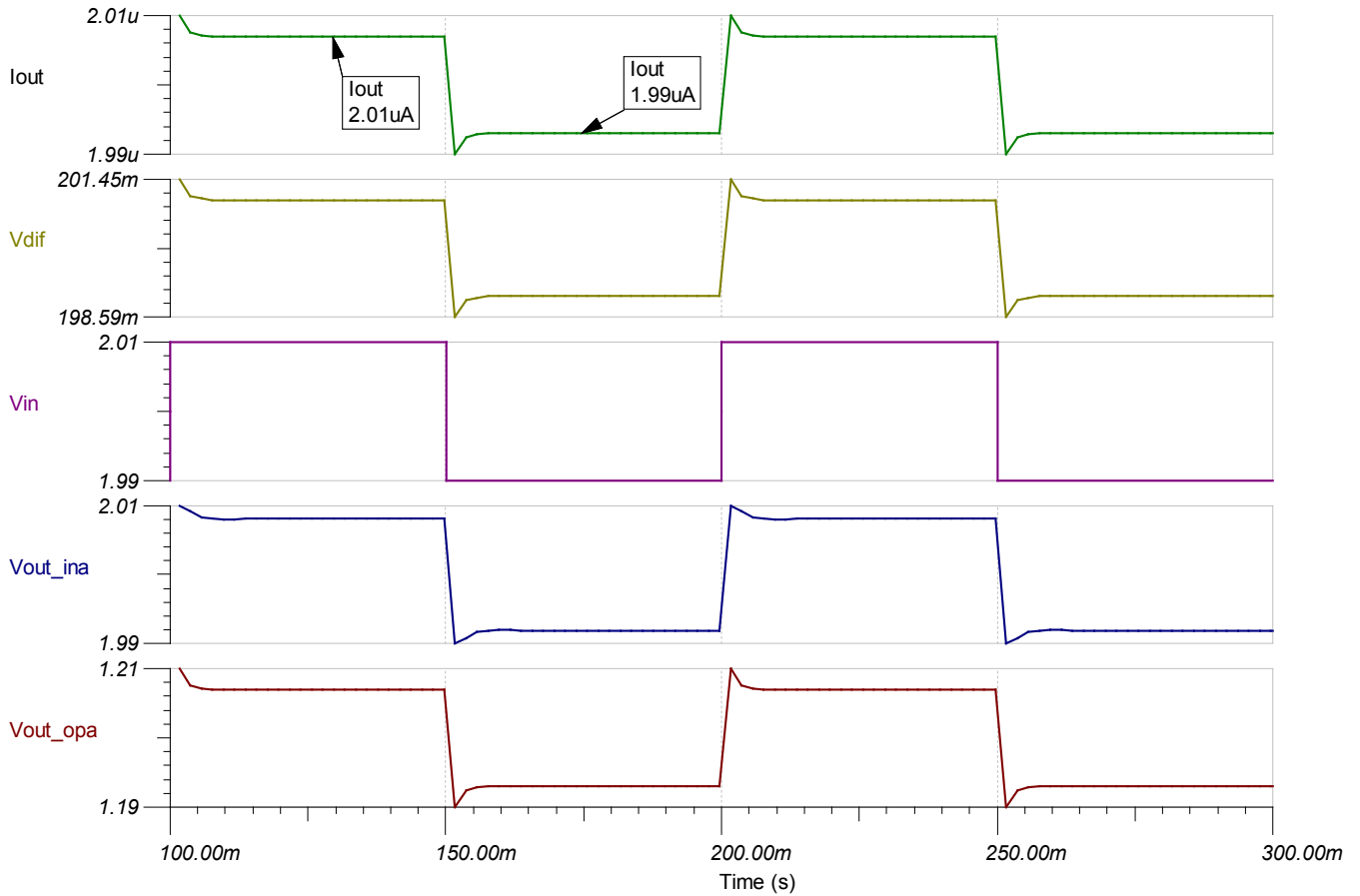


图 8：阶跃响应仿真

4.3 线性 (V-I) 转换的输入电压

为了测试最大和最小的线性 V-I 转换电压，输入电压针对不同的负载电阻器扫过整个范围 (0V 至 5V)。仿真显示最大线性电压受到电源电压的限制 (也就是说, $V_{OUT_OPA_MAX} = V_{电源} / (R_{负载} + R_{设定})$)。部分 6.5 中给出了线性转换电压范围的更多细节

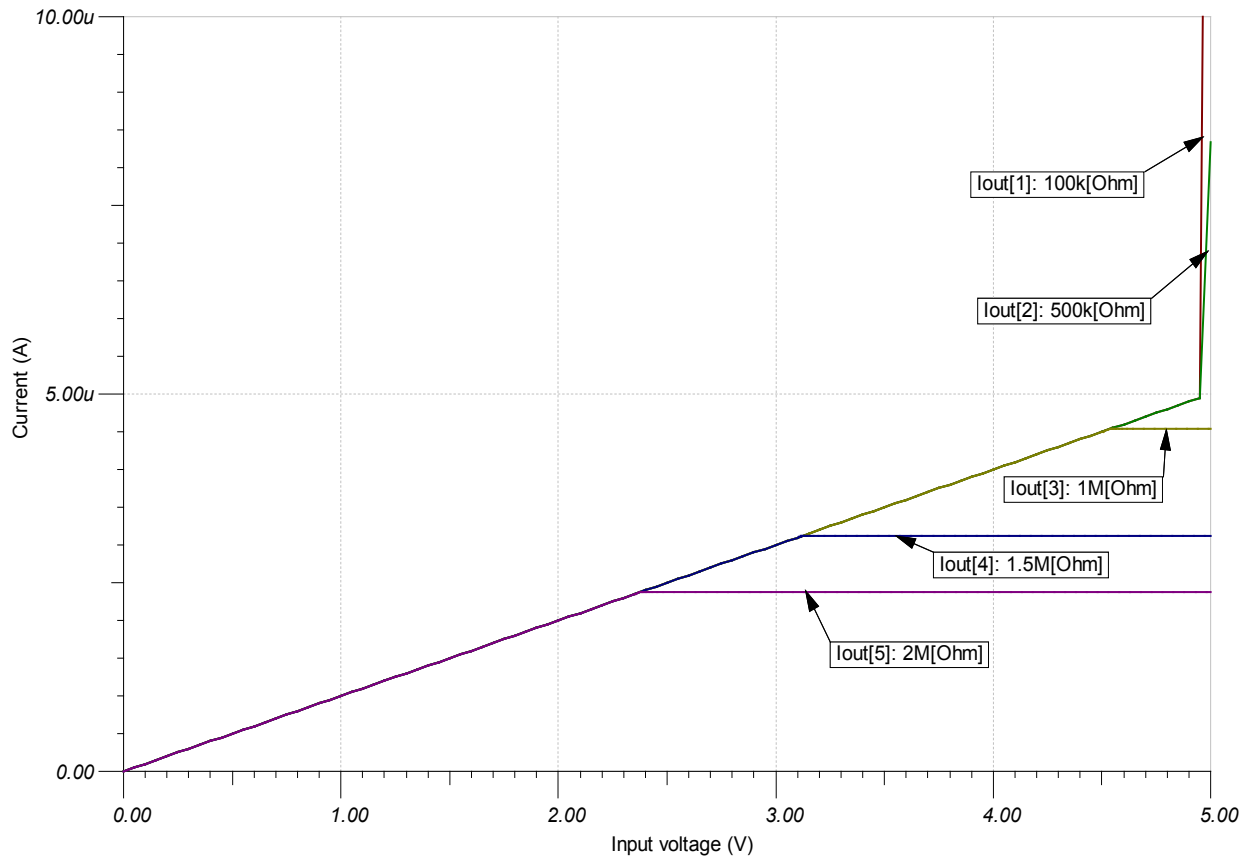


图 9: 线性转换电压与负载电阻仿真间的关系

Figure 10 显示了针对这个设计的未校准输出误差的蒙特卡洛分析。 这个误差由电阻耐受值控制。 在这个分析中，使用了 0.1% 电阻。 Figure 10 中显示的不同电流误差曲线是蒙特卡洛分析期间电阻器变化的结果。 等式 4 被用来将蒙特卡洛结果转换为一个百分比。 请注意，R1, R2 和 R_{设定} 都会影响误差。

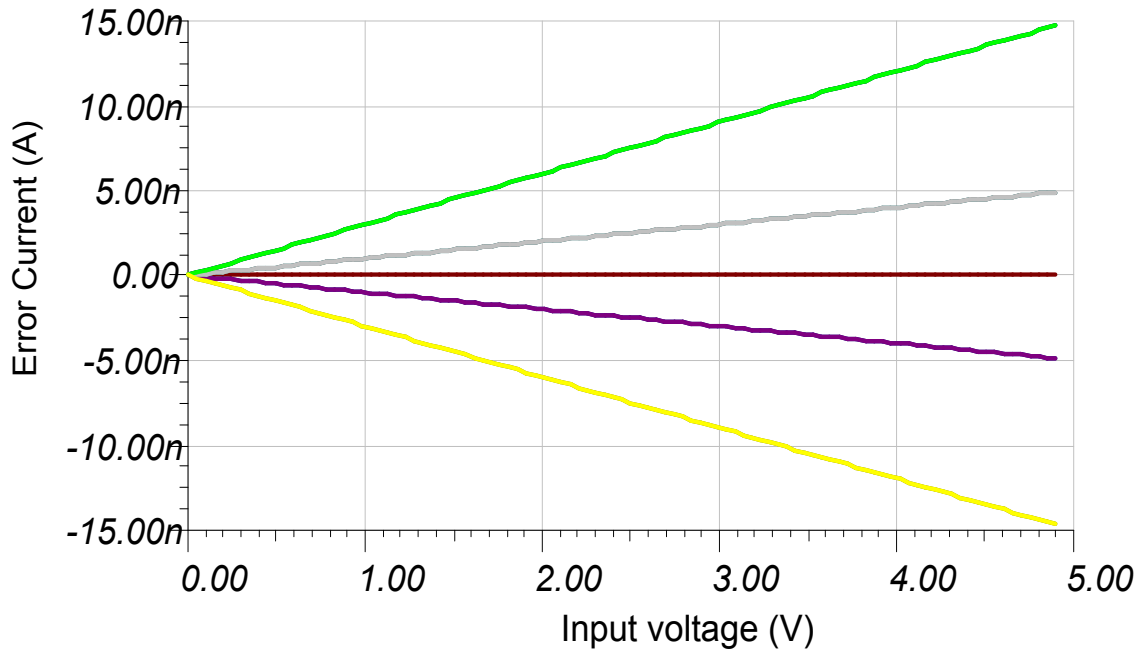


图 10: 针对电阻耐受值的蒙特卡洛分析

$$\text{Uncalibrated_Accuracy} = \frac{I_{\text{ERROR_MAX}}}{I_{\text{OUT_RANGE}}} \times 100\% = \frac{15\text{nA}}{5\mu\text{A}} \times 100\% = 0.3\% \quad (4)$$

5 PCB 设计

Appendix A 中可以找到 PCB 电路原理图和物料清单。

5.1 PCB 布局布线

在这个设计中使用了针对精密 PCB 布局布线的总原则。例如，迹线长度被保持尽量短，特别是针对去耦合以及反向放大器输入。这大大减少了电磁干扰 (EMI) 拾取并减少了寄生电容。INA326 上的增益设定放大器, R1, 对寄生电容特别敏感, 所以移除了这个电阻器下方附近的接地层。

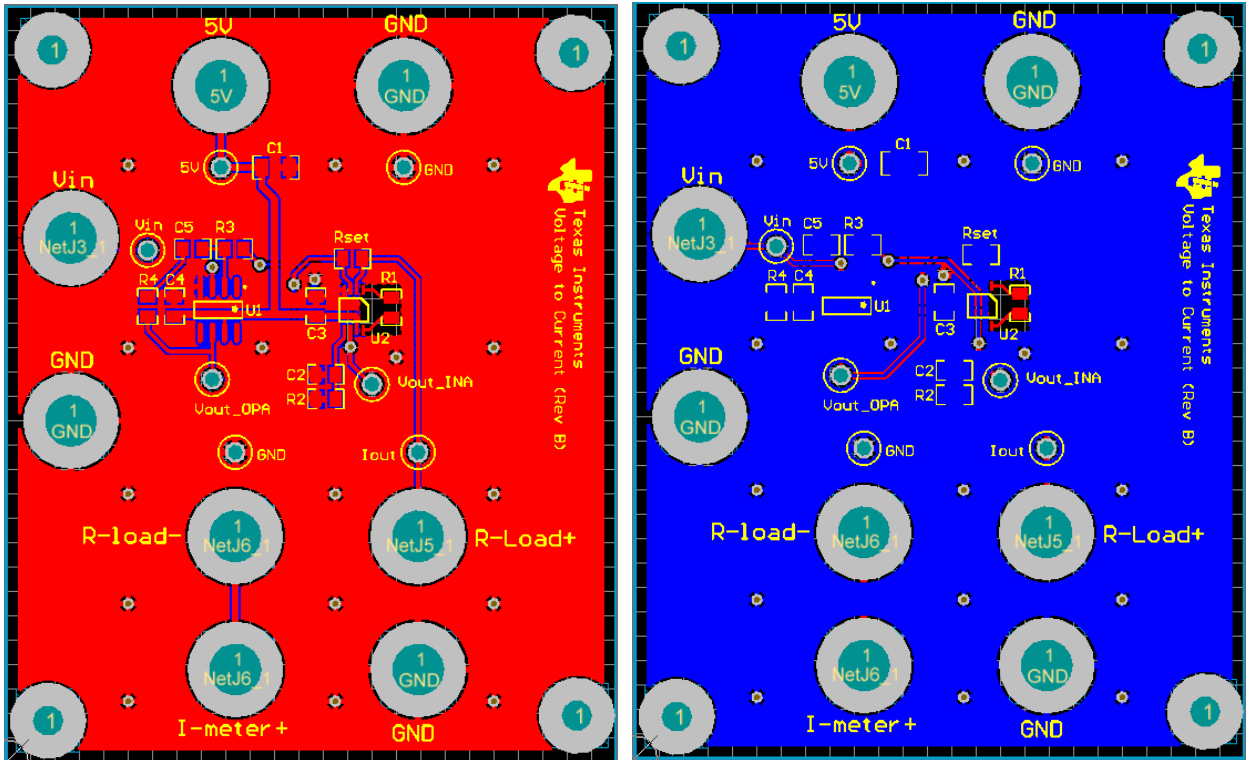


图 11: PCB 布局布线 (左上角, 右下角)

5.2 清理 PCB

由于这个 V 至 I 转换电路传送极低的电流, 正确清理 PCB 十分重要, 以避免残留焊剂所导致的寄生泄露路径; 使用一个专业的超声波清洁剂来进行最初清理, 之后使用异丙醇进行二次清理。避免触摸电路板和对着电路板呼气。请确保将电路板储存在清洁干燥的环境中。[2] 中给出了与此主题相关的更多细节。

6 验证 & 测量性能

6.1 测量低电平 V 至 I 转换电路中使用的常用预防措施

这个电路的目的是为了生成具有精度和稳定性的微安培级别的电流进入毫微放大器。必须使用一个高精度电压源和电流表来生成输入电压并且测量这个电路的输出电流。此外，V 至 I 电路板应该被放置在屏蔽的环境中以大大减少噪声拾取。应该使用屏蔽电缆（例如，同轴电缆或屏蔽双绞线）来将测试设备连接至 V 至 I 电路板。Figure 12 显示了用来测量低电流输出的测试设备设置。

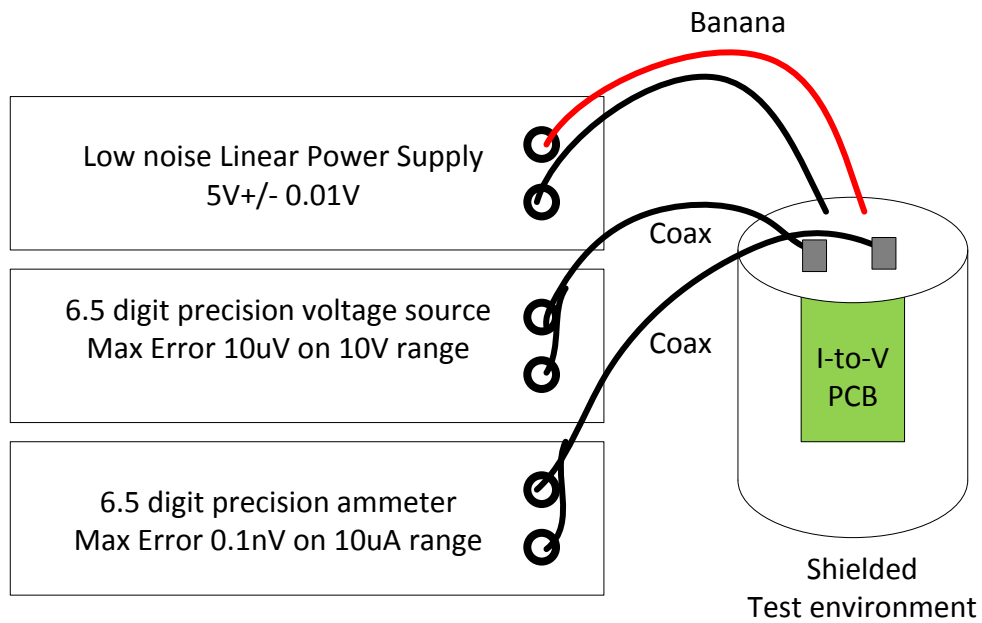


图 12: 针对 V 至 I 转换电路板的测试设置

6.2 转换功能

通过扫描 0V 至 5V, 0.1V 递增的直流输入, $V_{\text{输入}}$, 来采集数据, 同时测量负载电, $I_{\text{输入}}$ 。 Figure 13 显示了一个 $I_{\text{输入}}$ 与 $V_{\text{输入}}$ 之间关系的曲线图。 Figure 14 中给出了满量程百分比为单位的测量误差。 请注意, 由于放大器在这个范围内是非线性的, 误差在输出范围的末尾变大。 部分 6.5 中介绍了输出范围限制的细节。

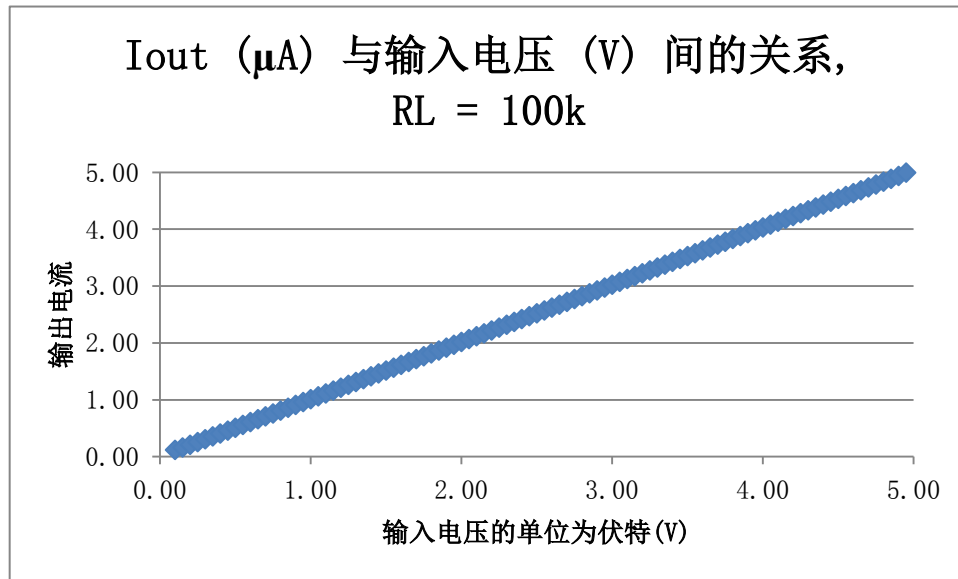


图 13: 针对 100kΩ 负载的 $I_{\text{输出}}$ 与 $V_{\text{输入}}$ 间的关系

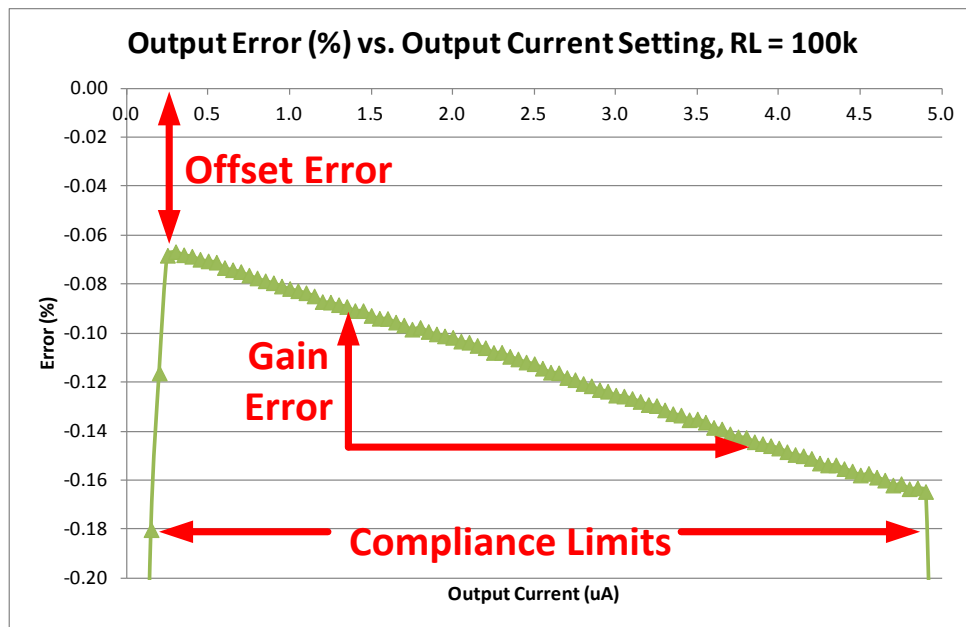


图 14: 满量程的百分比表示的未经校准输出误差

6.3 校准

这个设计的目的是为了获得非常精确、稳定且可重复的输出电流与输入电压特性间的关系。这个设计的精度受到电阻器耐受值，INA 增益精度，偏移电压和漂移的限制。一个两点线性校准可被用来获得一个高精度 V 至 I 转换器。一个两点线性校准测量转换函数的斜率和偏移误差。使用针对一条直线的等式，我们使用转换函数线性部分上的两个点来计算斜率 (m) 和偏移 (b)。由于在这些区域中线性变得不佳，请避免使用此函数的端点。

$$y = m \times x + b \tag{5}$$

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \tag{6}$$

$$b = y_2 - m \times x_2 \tag{7}$$

$$x = \frac{y - b}{m} \tag{8}$$

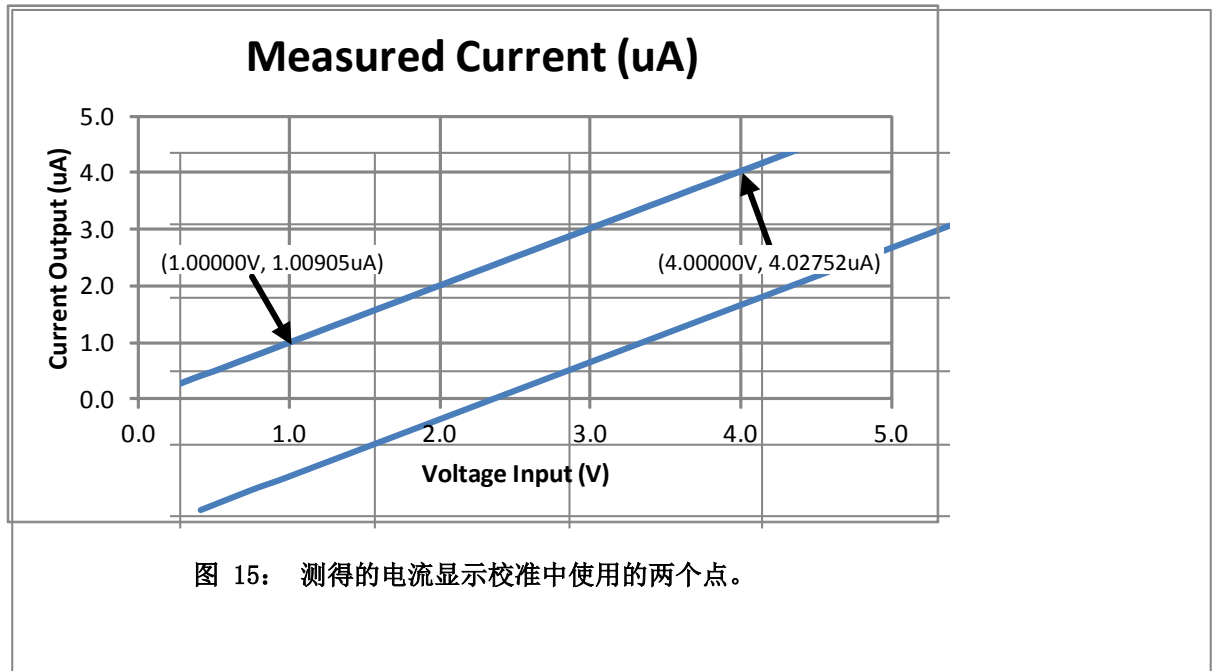


图 15: 测得的电流显示校准中使用的两个点。

下面的等式时一个用来找到测量转换函数的斜率和偏移的示例校准。

$$m = \frac{(4.02752\mu\text{A} - 1.00905\mu\text{A})}{(4.00000\text{V} - 1.00000\text{V})} = 1.00616\mu\text{A} / \text{V} \quad (9)$$

$$b = 4.02752 - (1.00616\mu\text{A} / \text{V}) * 4.00000\text{V} = 2.89467\text{nA} \quad (10)$$

通过使用上面的经校准的斜率和偏移，有可能计算出将输出设定为一个电路线性转换范围内精准电流值所需要的输出电压。下面的示例显示了如何计算输入电压，此电压被要求用来获得一个精确的 3.0000μA 输出。在这个情况下，获得一个精确 3.0000μA 输出所需要的输入电压被计算为 2.97877V。在这个校准后，测量实际的输出将产生非常准确的结果。典型最大后校准误差为 +/-50 pA 或更少（满量程的 0.001%）。这个电路中使用的组件非常稳定，所以，校准系数（*m* 和 *b*）可被测量一次，并且可被重新用于全部已校准电流设置。

$$x = \frac{y - b}{m} \quad (11)$$

$$V_{\text{in_required}} = \frac{I_{\text{out_desired}} - b}{m} = \frac{3.0000\mu\text{A} - 2.89467\text{nA}}{1.00616\mu\text{A}} = 2.97877\text{V} \quad (12)$$

后校准误差的计算方法如下。如 Figure 16 中所示，后校准误差是整个输出电流范围内（0μA 至 5μA）的误差。

$$\text{Error} = \frac{(I_{\text{out_measured}} - I_{\text{out_ideal}})}{I_{\text{out_range}}} \times 100 = \frac{3.000033\mu\text{A} - 3.0\mu\text{A}}{5\mu\text{A} - 0\mu\text{A}} \times 100 = 0.00066\% \quad (13)$$

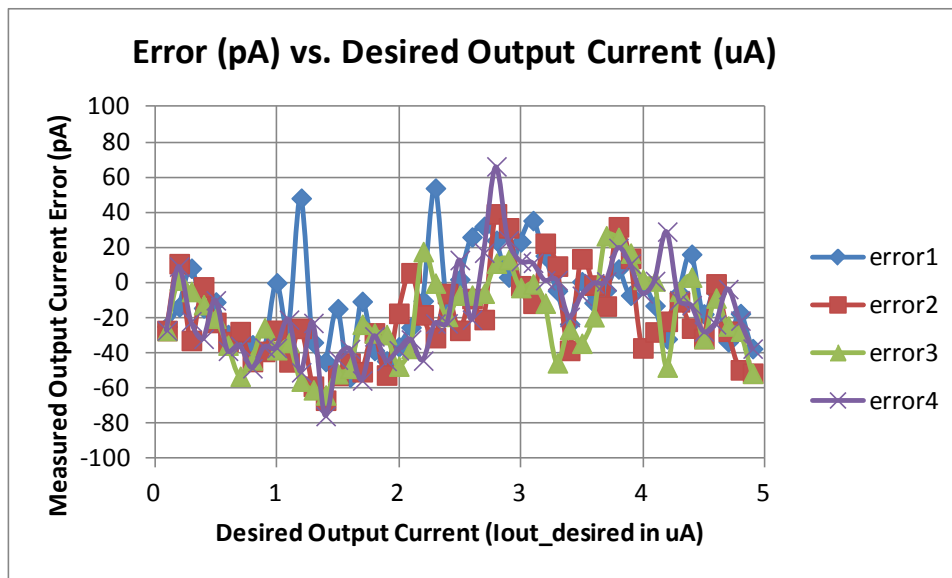


图 16: 针对 0.1μA < I_{输出} < 4.9μA 测得的输出误差后校准。

6.4 瞬态响应

Figure 17 显示了对一个 $1\text{M}\Omega$ 负载的 2V_{pp} , 5Hz 输入信号的大量程阶跃响应。显示了对于一个 $1\text{M}\Omega$ 负载的 2V_{pp} , 5Hz 输入信号的大量程阶跃响应。

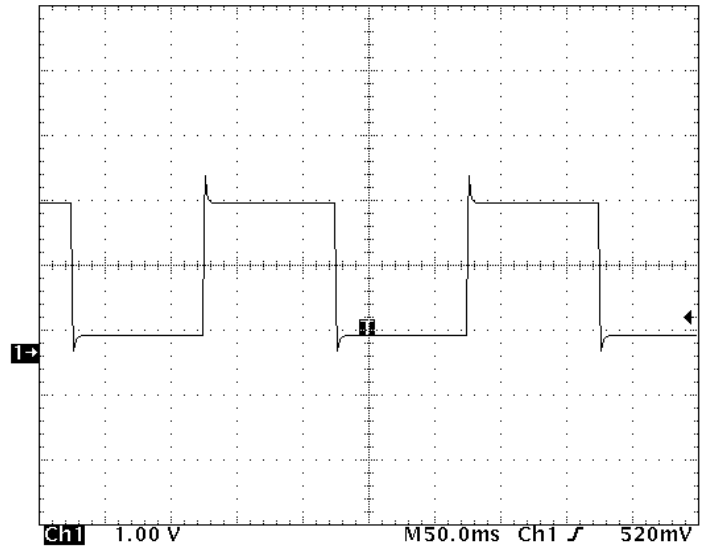


图 17: 大信号阶跃响应

Figure 18 是与 Figure 17 中一样的电路布置, 除了频率被增加至 100Hz 。这是这个 V 至 I 转换器带宽的极限值。这个电路的用途不是作为一个交流电流源。这个工具的目的是产生一个可编程直流源。基于下面的图, 至少需要 10ms 的稳定时间 (最高准确度需要 100ms)。

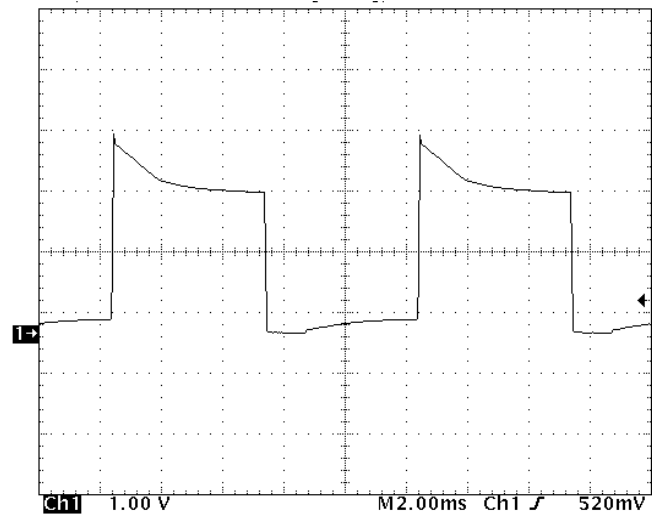


图 18: 带宽限值上的大信号 (100Hz)

Figure 19 中的布置与 Figure 17 和 Figure 18 中使用的布置一样，除了一个具有 500mV 直流偏移的小 (100mV_{p-p}) 信号被施加到输入上。这个测试的目的是为了确认此设计的稳定性。此设计在不产生过冲或振铃的情况下，用一个适当的衰减响应来快速稳定至最终值。这是电路稳定性的良好标志。

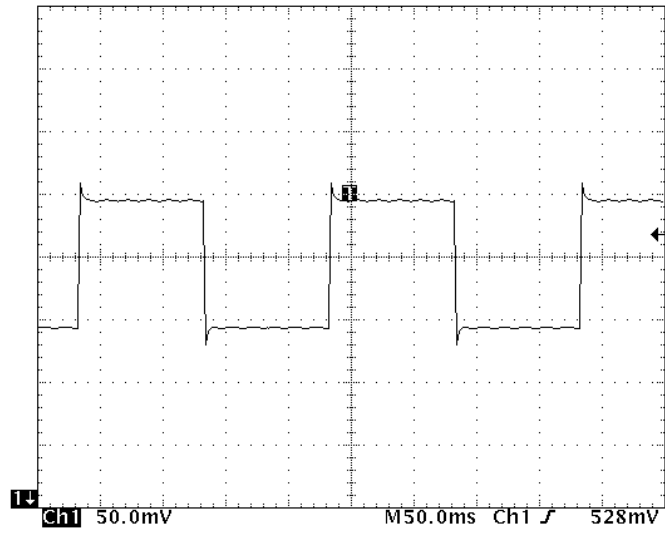


图 19: 小信号稳定性

6.5 线性输出范围

理想情况下，这个电路将能针对任一负载电阻输出 0μA 至 5μA。然而，由于当运算放大器输出接近任何一个电源轨时，电流受到限制，只在一定的电阻范围内可实现线性输出电流范围。此线性定义了输出电阻或电流限制并且基于 1) 电源电压，2) 负载电容，3) 当其输出接近电源轨时，运算放大器线性。因此，有可能看见针对满量程（例如，5μA）和最小量程（例如，0μA）输出电流的限制。最大输出电流限制由等式 14 和 15 给出。这个限制在运算放大器输出接近正电源轨时出现。Figure 20 图示了这个关系。能够使用 TINA-TI™ SPICE 来确认这个关系。对于 $I_{OUT_MAX} < I_{OUT_FULL_SCALE}$ ，等式 14 可被用来计算 I_{OUT_MAX} ，否则，使用等式 15 计算。

$$I_{OUT_MAX} = \frac{V_s}{R_{SET} + R_{LOAD}} \quad (14)$$

$$I_{OUT_MAX} = I_{OUT_MAX_RANGE} \quad (15)$$

其中， I_{OUT_MAX} 是线性限制之前可以传送的最大电流，而 $I_{OUT_FULL_SCALE}$ 是此设计的满量程范围（在这个情况下为 5μA）。

例如，假定 $R_{负载} = 1\text{ M}$ 。

$$I_{OUT_MAX} = \frac{V_s}{R_{SET} + R_{LOAD}} = \frac{5V}{100k\Omega + 1M\Omega} = 4.54\mu A \quad (14)$$

由于 $I_{OUT_MAX} < 5\mu A$ ，最大输出为 4.54μA。

现在假定 $R_{负载} = 100\text{ k}$ 。

$$I_{OUT_MAX} = \frac{V_s}{R_{SET} + R_{LOAD}} = \frac{5V}{100k\Omega + 100k\Omega} = 25\mu A \quad (14)$$

由于 I_{OUT_MAX} 为 5μA，最大输出为 5.0μA。

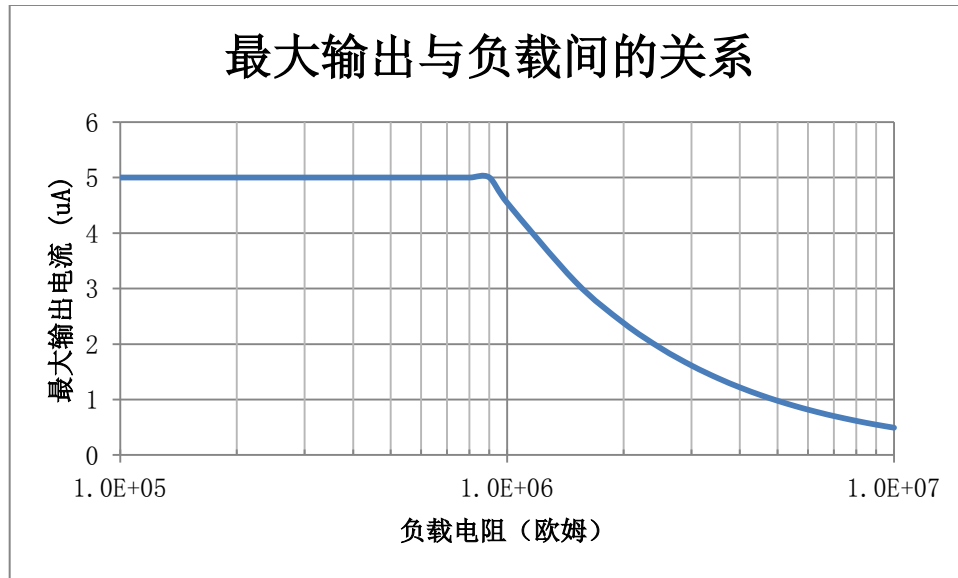


图 20: 最大输出与负载电阻间的关系

由于运算放大器输出接近负电源轨，最小输出电流限制出现。 请注意，运算放大器输出是负载电压和设定电压的总和 ($V_{OPA_OUT} = V_{负载} + V_{设定}$)。 对于低电流和低输出电阻，运算放大器输出电压接近 0V 并且变得非线性。 通常情况下，从电源轨技术规格的电压摆幅被用来确定放大器输出能够多接近负电源轨，如 Table 3 中所示。 然而，在这个情况下，相对于技术规格表中的测试条件，运算放大器输出电流很低，所以运算放大器能够摆动至比表中显示的更接近于接地的位置。 这个情况下一个更好的技术规格是如 Table 4 中显示的开环增益 AOL 技术规格。 AOL 技术规格中的测试条件表示，AOL 并不是针对比电源轨少 100mV 的输出而指定。 对于比电源轨少 100mV 的输出，AOL 将被降级。 降级的 AOL 将导致针对比电源轨少 100mV 的输出的非线性误差。 这个运行方式不能使用 TINA-TI™ SPICE 进行确认。

表 3: 从 OPA333 数据表中摘录的内容显示从电源轨的电压摆幅。

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值
从电源轨的电压摆幅	$R_L = 10k, I_L = 250\mu A$		30mV	50mV

表 4: 从 OPA333 数据表中摘录的内容显示从电源轨非线性 100mV 摆幅。

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值
开环增益 AOL	$(V^-) + 100mV < V_{out} < (V^+) - 100mV, R_L=10k$	106dB	130dB	

根据 Table 4，我们知道对于少于 100mV 的输出，OPA333 的输出将变成非线性。 运算放大器输出电压在串联电路 $R_{设定}$ 和 $R_{负载}$ 上。 可使用等式 16 等式 17 来轻松计算出避免 100mV 非线性区域所要求的最小输出电流，等式 18 给出了针对 100Ω 和 100kΩ 负载显示最小输出的示例计算。 Figure 21 图示了宽范围电阻上的等式 16。

$$I_{OUT_MIN} = \frac{100mV}{R_{SET} + R_{LOAD}} \tag{16}$$

例如，假定 $R_{负载} = 100$

$$I_{OUT_MIN} = \frac{100mV}{R_{SET} + R_{LOAD}} = \frac{100mV}{100k\Omega + 100\Omega} = 0.999\mu A \tag{17}$$

例如，假定 $R_{负载} = 100k$

$$I_{OUT_MAX} = \frac{100mV}{R_{SET} + R_{LOAD}} = \frac{100mV}{100k\Omega + 100k\Omega} = 0.5\mu A \quad (18)$$

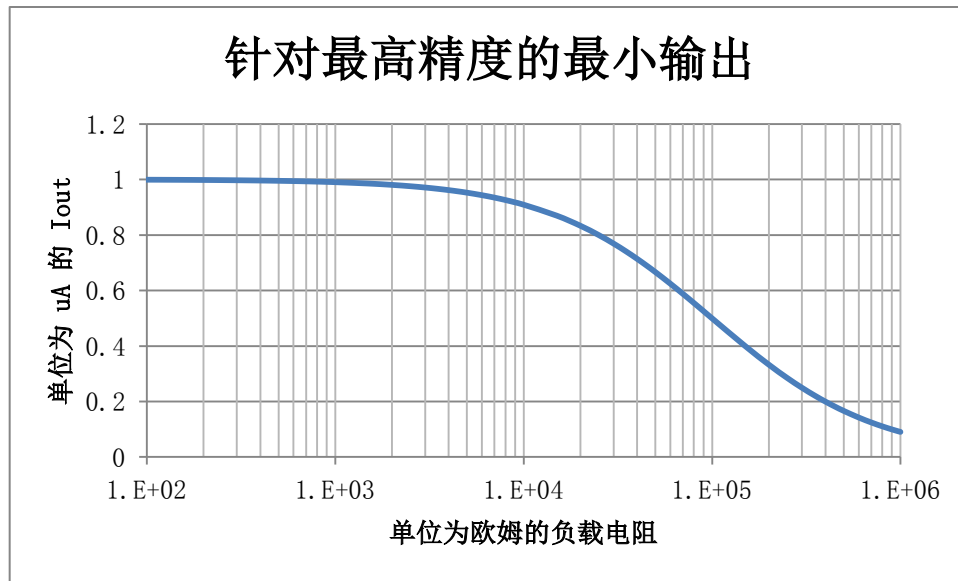


图 21: 针对最高精度的最小输出

100mV 限制是针对最高精度的指导原则。 实际放大器性能将大体上好于预期的限制。 Figure 22 显示了针对四个不同的测量运行时，对于一个 50kΩ 负载所测得的输出误差。 相对于范围其余部分上的误差，针对低输出电流（即，0μA 至 50μA）的误差较高。 这是因为 100mV 的最小输出限制。 Figure 22 中给出了与理论结果很好符合的测量结果。

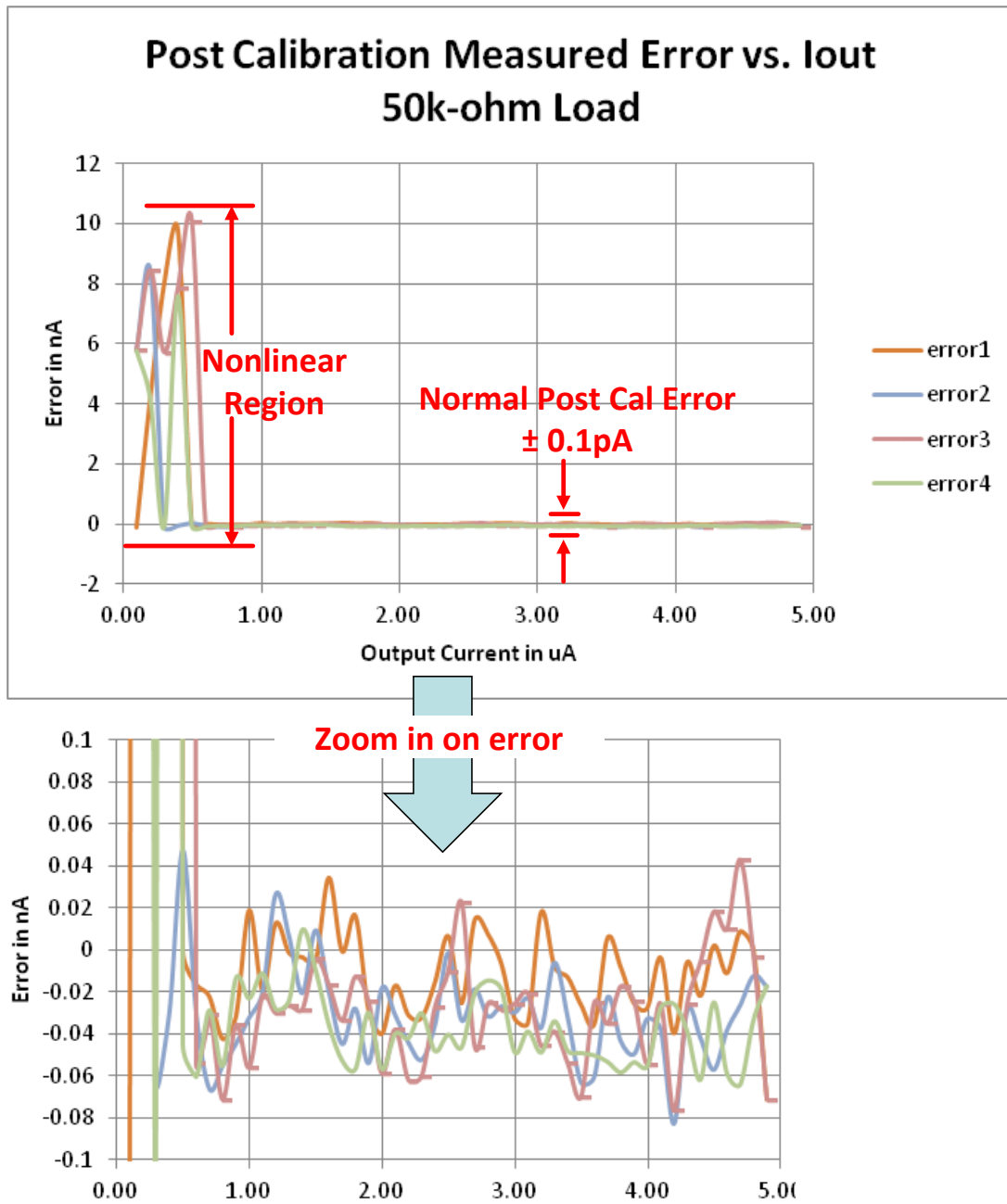
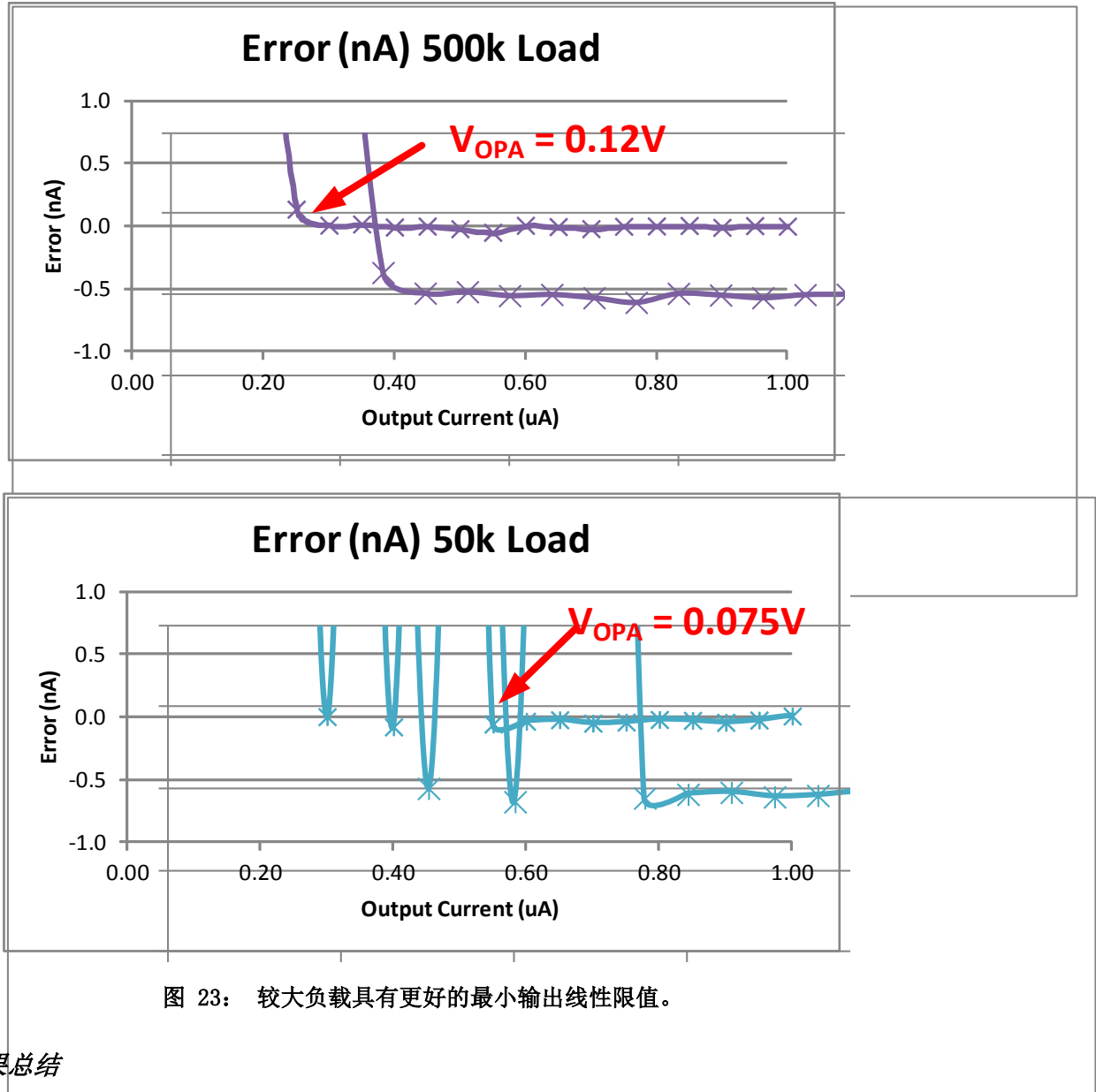


图 22: 显示针对低运算放大器输出的非线性的后校准误差

Figure 23 显示了测得的结果，此结果确认了对地输出依从性随重负载而有所改进。 Figure 22 中显示的限值与 Figure 21 中给出的最小输出限值相关联。



6.6 测量结果总结

Table 5 中给出了与目标值相比较的测量和模拟结果的最终汇总。

表 5: 设计目标、模拟和测量性能的比较

	目标值	仿真值	测量值
未经校准的精度 (%FSR)	0.2%	0.3%	0.18%
经校准的精度 (%FSR)	0.01%	不适用	0.001%
负载范围 0<R<500k 最大线性输出 (μA)	4.0μA	4.9μA	4.9μA
负载范围 0<R<500k 最小线性输出 (μA)	1.0μA	0μA	0.6μA

7 修改

7.1 选择不同的放大器

为这个设计所选择的器件基于设计过程开头列出的设计目标。选择诸如 OPA333 的斩波稳定放大器移除了大多数通常由这个设计中的放大器所导致的直流误差和漂移。校准可被用来获得最高精度。

表 6：放大器的简单比较

放大器	最大电源电压 (V)	最大偏移电压 (μV)	最大偏移漂移 ($\mu\text{V}/\text{C}$)	带宽 (MHz)	静态电流 (μA)
OPA333	5.5	10	0.05	0.35	34
OPA335	5.5	5	0.05	2	700
OPA320	5.5	150	5	20	1600
OPA735	12	5	0.05	1.6	1500
OPA188	36	25	0.085	1	950

7.2 选择不同的增益

仪表放大器的增益被设定为 10V/V 的增益，以改进依从性。对于 5V 的满量程输入，设定电阻器上的电压为 0.5V，此电压值可以使负载电压达到 4.5V。令人遗憾的是，使用一个 10V/V 的增益将在低电阻负载由低电流电平驱动时（例如， $100 \times 0.1 \mu\text{A}$ ，降低性能。在这个情况下，运算放大器的总输出电压接近接地电平，并且变为非线性（例如， $V_{\text{OPA}} = V_{\text{设定}} + V_{\text{负载}} = 0.01\text{V} + 10\mu\text{V} = 0.01\text{V}$ ）。

在低值电阻负载由低电流电平驱动的情况下，可以使用一个较低增益（例如， $G_{\text{INA}} = 1\text{V}/\text{V}$ ）。例如，如果一个 $100\mu\text{A}$ 负载被一个 $0.1\mu\text{A}$ 电流驱动时，运算放大器输出电压将大约为 0.1V。然而，进行这个改变将降低针对较大负载的依从性。

7.3 选择不同的电流输出范围

在这个设计中实现高精度的，很大程度与低电流设计有关。例如，需要仔细和彻底地清理电路板，这是因为我们尝试获得一个稳定在毫微安培的微安培信号。如果此电路的输出电流比较大（例如， $100\mu\text{A}$ ），那么对于微弱电流设计的注意事项（例如，清理）将不是那么关键。另一方面，如果输出针对更低的电流（例如， 100nA ），那么为了实现最高精度，也许需要其它专门的微弱电流技术。例如，一个超低电流基准也许要求保护、低摩擦静电效应电缆、特殊材料、特别精密电阻和很多其它防护措施。

7.4 双电源版本

可轻松地修改这个电路用于双电源运行。双电源配置的优势在于它可以拉电流和灌电流的输出。

8 关于作者

Arthur Kay 是一名 TI 的应用工程经理，他专门从事对放大器、基准和混合信号器件的技术支持。Arthur 专注于诸如桥式传感器信号调节的工业应用。Arthur 已经出版了一本关于放大器噪声的书，并且出版了与之有关的系列文章。Arthur 在佐治亚理工学院获得电子工程硕士学位，在克利夫兰州立大学获得电子工程学士学位。

9 致谢 & 参考文献

1. Green, T., 运算放大器稳定性, 2008 年 11 月 部分 1-11, http://www.engenius.net/site/zones/acquisitionZONE/technical_notes/acqt_050712
2. Grohe, P., 设计低泄露毫微微安培电路, 2011 年 11 月, 部分 1-3, <http://www.edn.com/design/analog/4368681/Design-femtoampere-circuits-with-low-leakage-part-one?page=3>
3. 低电平测量手册, 第 6 版, Keithley Instruments, 2004 年

Appendix A.

A.1 电气原理图

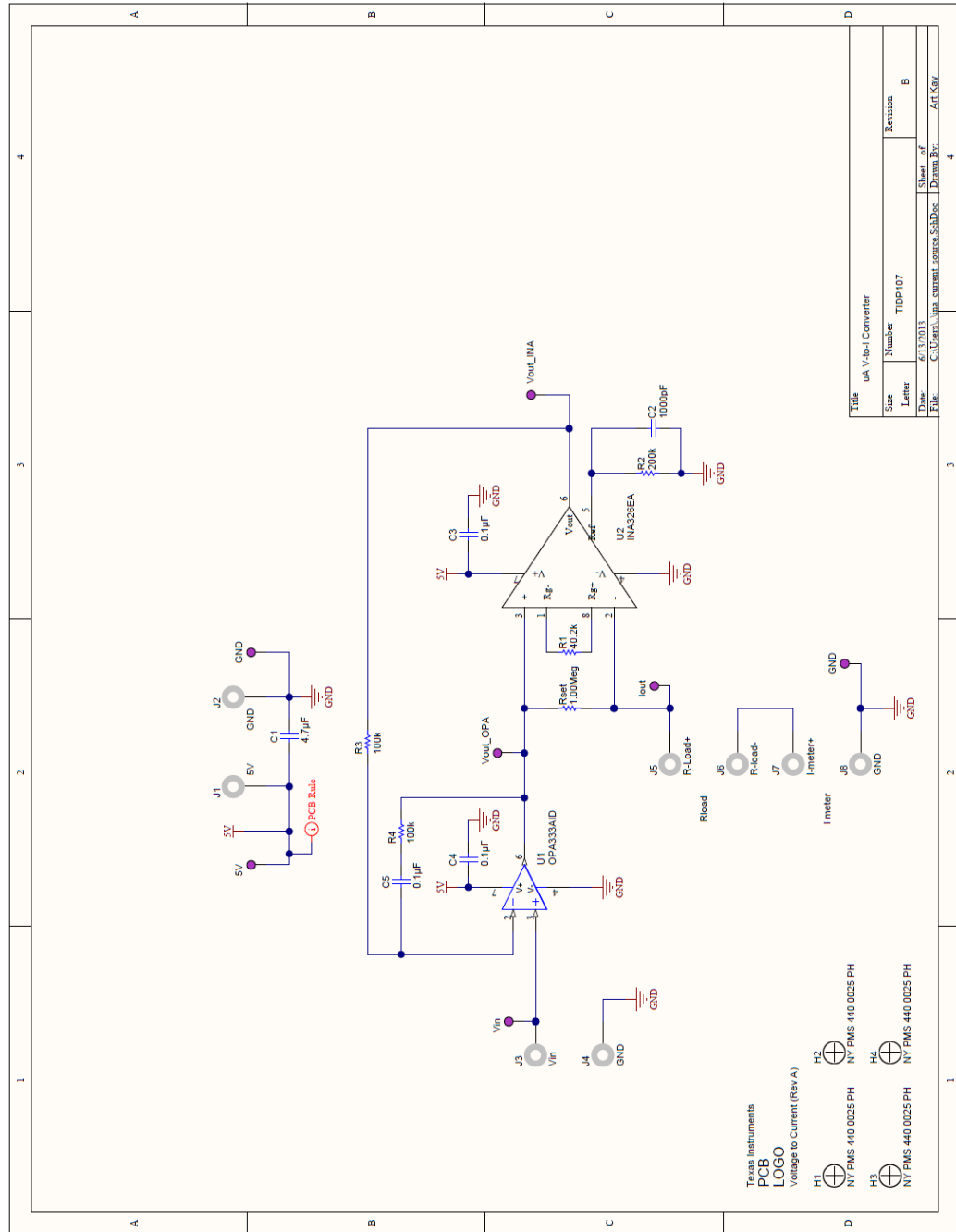


图 A-1: 电气原理图

A.2 物料清单

项目	数量	值	指示符	描述	制造商	制造商产品型号	DigiKey 产品型号
1	1	4.7uF	C1	CAP, CERM, 4.7uF, 16V, +/-20%, X7R, 1206	TDK	C3216X5R1H475K160AB	445-5994-1-ND
2	1	1000pF	C2	CAP, CERM, 1000pF, 50V, +/-1%, COG/NPO, 0805	AVX	08055A102FAT2A	478-3759-1-ND
3	3	0.1uF	C3, C4, C5	CAP, CERM, 0.1uF, 50V, +/-5%, X7R, 0805	AVX	08055C104JAT2A	478-3352-1-ND
4	4			机械螺丝 PAN PHILLIPS 4-40	B&F 紧固件	PMS 440 0038 PH	H782-ND
5	4		H1, H2, H3, H4	STANDOFF HEX 4-40THR ALUM .500"L	泰科公司	2203	2203K-ND
6	8		J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8	标准香蕉头插孔, 为绝缘, 5.5mm	泰科公司	575-4	5-4K-ND
7	1	40.2k	R1	电阻, 40.2k 欧姆, 0.1%, 0.125W, 0805	TE 互联	676335-2	A102342CT-ND
8	1	200k	R2	电阻, 200k 欧姆, 0.1%, 0.125W, 0805	TE 互联	4-1676971-2	A102090CT-ND
9	2	100k	R3, R4	电阻, 100k 欧姆, 1%, 0.125W, 0805	威世达勒	CRCW0805100KFKEA	541-100KCCT-ND
10	1	1.00Meg	Rset	电阻器, 1.00Meg 欧姆, 1%, 0.125W, 0805	威世达勒	CRCW08051M00FKEA	541-1.00MCCT-ND
11	2		TP1, TP7	测试点, TH, 紧凑, 黑色	泰科公司	5124	5001K-ND
12	1		TP2	测试点, TH, 紧凑, 红色	泰科公司	5005	5005K-ND
13	1		TP3, TP4, TP5, TP6	测试点, TH, 紧凑, 紫色	泰科公司	5124	5124K-ND
14	1		U1	单 JFET 输入运算放大器	德州仪器 (TI)	OPA333AID	296-19545-5-ND
15	1		U2	IC 运算放大器 INSTR R-R 1KHZ 8VSSOP	德州仪器 (TI)	INA326EA/2K5	INA326EA/2K5CT-ND

图 A-2: 物料清单

针对 TI 参考设计的重要声明

德州仪器公司 ("TI") 参考设计只用于帮助设计人员 ("客户") 开发包含 TI 半导体产品的系统 (在这里也指"组件")。客户理解并同意他们对设计客户系统和产品中的独立分析、评估和判断负责。

TI 参考设计已经使用标准实验室条件和工程实践创建。TI 未采取任何测试, 除非那些在已发布文档中针对一个特定参考设计所专门描述的测试。TI 也许会对它的参考设计进行修正、提高、改进和其它改变。

客户被授权使用具有每个特定参考设计中确认的 TI 组件的 TI 参考设计, 并且在他们的终端产品开发中修改参考设计。然而, 在这里不授予任何其它 TI 知识产权的直接或隐含, 默许或其它方式的许可, 和任何第三方技术或知识产权的许可, 其中包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权、或者与采用了 TI 产品或服务的任何集成、机器或工艺相关的知识产权。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

TI 参考设计"按原样"提供。对于参考设计或者包括精度和完整性在内的直接、隐含或者法律规定的参考设计的使用, TI 不作出任何保证或声明。TI 不对任何隐含的适销性、针对特定用途的适用性、平静受益权、无干扰享有权, 以及与 TI 参考设计或其使用相关的任何第三方知识产权的非侵权作出任何保证。TI 不对任何与 TI 参考设计中提供的产品组合相关的或基于这些产品组合的第三方侵权声明负责, 并且不应为客户提供辩护或赔偿。不论是何原因造成任何实际的、特殊的、意外的、相应发生的或间接的损坏, 并且不论 TI 是否已经告知了 TI 参考设计的任何使用或 TI 参考设计的客户使用所造成的此类损坏的可能性, TI 都不应对此负责。

TI 保留根据 JESD46 最新标准, 对所提供的半导体产品和服务进行更正、增强、改进或其它更改的权限, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的 TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

对于 TI 数据手册、数据表或参考设计中的 TI 信息, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。第三方信息可能受到其它限制条件的制约。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独立负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在客户的安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。借助于这样的组件, TI 的目标是帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或"增强型塑料"的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的组件。客户认可并同意, 对还未指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独立负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 将不承担任何责任。

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 © 2014, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

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 © 2014, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司