

# TI 高精度设计：经验证的设计 1% 误差，0-5V 输入电压，0-500mA 输出电流，低侧电压至电 流 (V-I) 转换器



## TI 高精度设计

TI 精度设计是 TI 的模拟产品专家创建的模拟解决方案。验证过的设计提供了理论、元件选型、仿真、完整的印刷电路板 (PCB) 电路原理图 & 布局布线、物料清单和可用电路的测试性能。还讨论了有助于达到替代设计目标要求的电路修改。

## 设计资源

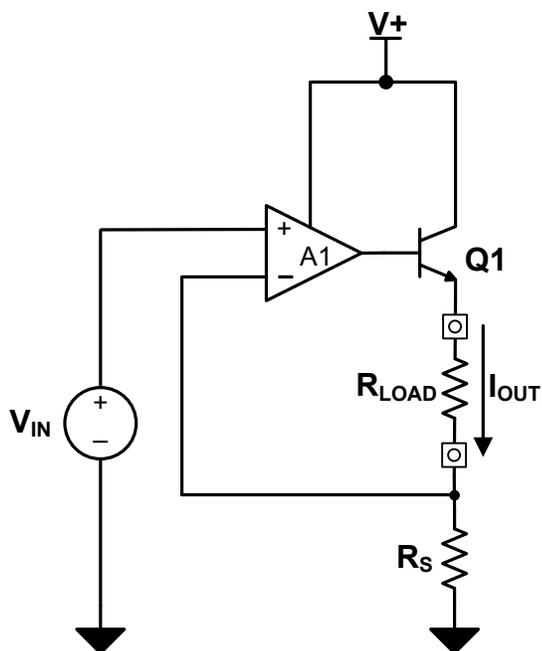
[设计存档](#) 全部设计文件  
[TINA-TI™](#) SPICE 模拟器  
[OPA735](#) 产品文件夹

## 电路描述

该低边侧电压至电流 (V-I) 转换器为一个悬浮负载发送一个很好稳定的电流。此设计使用一个小信号运算放大器来控制为负载提供电流的 NPN 发射极跟随器。通过一个低边侧电流检测电阻器上将压降反馈至运算放大器来准确调节此电流。



[请询问模拟产品专家](#)  
[WEBENCH® 设计中心](#)  
[TI 高精度设计库](#)



该 TI 参考设计末尾的一个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。

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

此设计需求如下：

- 电源电压：12V 直流
- 输入：0–5V 直流
- 输出：0–500mA 直流

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

表 1. 设计目标、仿真以及实际测试的性能对比

	目标值	模拟值	测得的值
偏移 (% 满量程范围 (FSR))	0.1	<0.001	<0.001
增益误差 (% FSR)	1	0.579	0.846
负载柔量 (V)	10	10.27	11.07

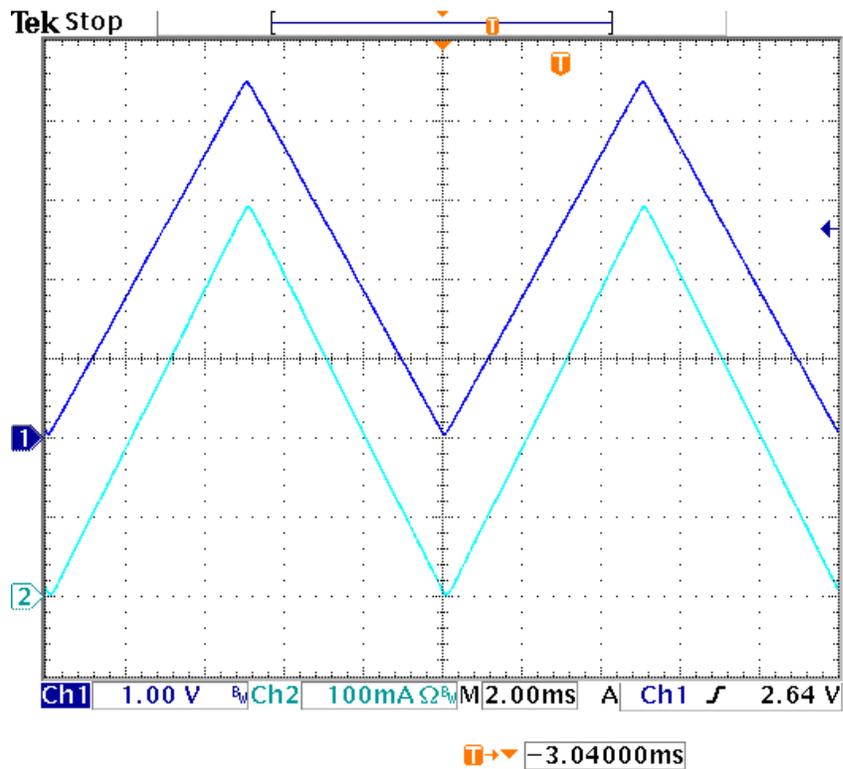


图 1: 测量到的传递函数

## 2 工作原理

Figure 2 中给出了该设计的更加确切的电路原理图。此电路的 V-I 转换功能基于输入电压， $V_{IN}$ ，输入电阻分压器网络和电流感测电阻器， $R_S$  之间的关系。

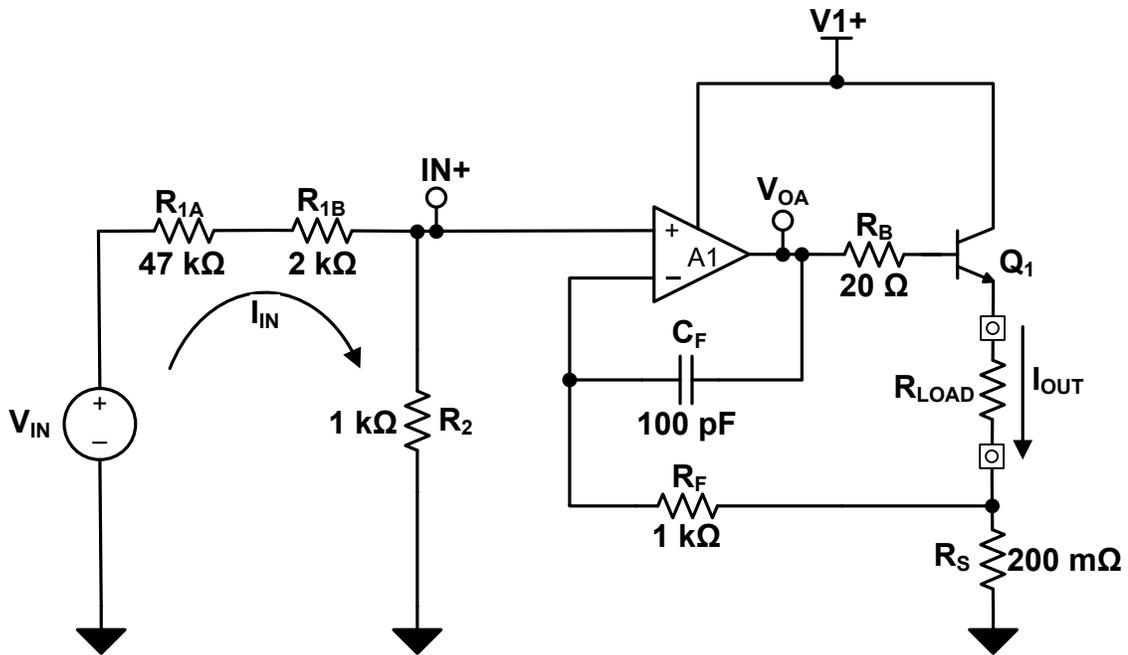


图 2: 完整电路原理图

在等式 1 中定义了针对这个设计的转换功能。

$$\text{Gain} = \frac{I_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_2}{R_S(R_1 + R_2)} \quad (1)$$

### 2.1 $R_S$

检测电阻， $R_S$ ，位于与负载串联的位置上，并且将产生与流经负载的电流成比例的压降。这个感测电压被反馈进入运算放大器的反相输入。通过负反馈，此运算放大器将控制流经双极结型晶体管 (BJT) 的电流，这样，它将把反相节点 (IN-) 上的电压设定为与施加到非反相节点 (IN+) 上的电压相等，从而实现 V-I 转换功能。

从负载依从电压中减去  $R_S$  上的压降，此压降在满量程时被限制在 100mV，以大大增加负载电压柔量。将压降限制为 100mV 也同样将满量程输出时的感测电阻器内的功率耗散限制在 50mW 的水平上，从而减少了自发热效应。

$$R_S = \frac{100\text{mV}}{500\text{mA}} = 200\text{m}\Omega \quad (2)$$

### 2.2 $R_1$ 和 $R_2$

通过将反相端子上的最大电压限制为 100mV，非反相端子上的电压也被限制为 100mV。为了用一个 0-5V 直流电压范围内的标准输入电压，在输入电压和非反相输入之间使用了一个电阻分压器。计算出了电阻值可以确保在满量程时，从输入源中汲取的电流只有 100μA。标准电阻器电阻值的使用也许要求使用多个串联的电阻器（也就是  $R_{1A}$  和  $R_{1B}$ ），以计算出下面的比率。

$R_2$  的值基于所需输入电流和  $I_{N+}$  上输入电压:

$$I_{N+} = 100 \text{ mV} = 100 \text{ uA} \times R_2 \quad (3)$$

$$R_2 = 1 \text{ k}\Omega \quad (4)$$

计算出了  $R_1$  值, 这样, 电阻分压器在 5V 的满量程输入时产生 100mV 电压:

$$I_{N+} = V_{IN} \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (5)$$

$$100 \text{ mV} = 5 \text{ V} \left( \frac{1 \text{ k}\Omega}{R_1 + 1 \text{ k}\Omega} \right) \quad (6)$$

$$R_1 = 49 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

通过设定检测电阻上的电压,  $V_{RS}$ , 使其与施加到  $I_{N+}$  上的电压相等, 用户可以获得如下面等式中所示的针对电流源线性操作的转换公式。

$$I_{OUT} = \left( \frac{V_{RS}}{R_S} \right) \quad (8)$$

$$\text{Gain} = \frac{I_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_2}{R_S(R_1 + R_2)} \quad (9)$$

### 2.3 $R_B$

基极电阻上的压降, 将从本设计的最大电压柔量中减去  $R_B$ 。因此,  $R_B$  的大小被设定, 这样, 满量程时, 它只从输出级上减去 100mV。对于增益  $\beta$  为 100 的晶体管, TIP33 在  $I_{输出}$  接近 500mA 的满量程电流时, 将汲取大约 5mA 的基极电流。

$$R_B = \frac{100 \text{ mV}}{5 \text{ mA}} = 20 \Omega \quad (10)$$

### 2.4 $R_F$ 和 $C_F$

反馈元件  $R_F$  和  $C_F$  为这个电路提供补偿, 以确保输入或负载瞬态期间的稳定性。补偿的工作方式为, 通过  $C_F$  而不是经由  $R_F$  在 BJT 发射器上来直接从放大器输出上提供到反相输入的反馈, 在较高频率时从控制环路内移除了 BJT 增益。这个情况下产生的频率大体上是基于  $R_F$  和  $C_F$  上而形成的 RC 时间常数。选择了这个电路中的值, 这样, 频率在放大器的可用带宽范围内, 但是高于 100kHz, 所以响应不会过阻尼。 $R_F$  的值应该远远大于负载电阻, 但是也不应太大, 这样会使流经它的运算放大器输入偏置电流产生一个较大的偏移电压。

在部分 6.4 中试验了这个电路的瞬态响应。基于放大器和负载输出的小信号响应, 很明显, 为  $R_F$  和  $C_F$  选择的值为一个纯粹的阻性负载提供了足够的稳定性。

为了适应具有电感负载的应用, 可增加  $R_F$  和/或  $C_F$  来提供额外的补偿。由于 RC 时间常量在增加, 有必要评估此系统的阶跃响应, 这是因为电路稳定时间也将增加。

$R_B$  也为电路提供补偿。用户应该控制  $R_B$  的大小, 不要使其过大, 这是因为它将限制输出级上的电压净空。因此, 在达到电压柔量前, 这减少了电路能够驱动的最大满量程负载 (请见与依从电压相关的部分 6.5)。对运算放大器稳定性更详细的研究, 请参考 1。

## 2.5 概要

这个电路的运行取决于  $R_s$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  和  $R_b$  的适当大小。流经  $R_s$  的输出电流生成了馈入 OPA735 反相输入端的电压电位。为了大大减少  $R_s$  上的功率耗散, 此感测电压在满量程时被限制在 100mV。这通过使用一个合适的电阻分压器来将直流输入电压拆分, 从电源汲取的电流不多于 100 $\mu$ A, 从而将非反相端子上的电压限制在 100mV 来实现。为了减少输出级上的电压净空损失,  $R_b$  被保持在较小的值。

## 3 元件选择

### 3.1 运算放大器

要实现一个成功的设计, 用户必须注意要选择运算放大器的直流特性。为了符合性能目标, 这个应用将得益于具有**低偏移电压、低温度漂移和轨到轨输出**的运算放大器。

OPA735 CMOS 运算放大器是一款具有 5 $\mu$ V 偏移和 0.05 $\mu$ V/C 漂移的高精度器件, 此器件输出摆幅在正电源轨的 50mV 电压以内的单电源运行进行了优化。

使用自动归零技术, OPA735 在温度范围内提供低初始偏移电压和近零漂移。低偏移电压和低漂移将减少系统内的偏移误差, 这使得这些器件适合于精密直流控制应用。OPA735 的轨到轨输出级将在负载上实现满净空。

针对这个应用的其它放大器选项是将在部分 7 中进行讨论的斩波稳定 OPA188 或 OPA333。

### 3.2 NPN 晶体管

为这个设计选中的 TIP333 NPN 晶体管额定电流为 10A 的连续集电极电流, 以及 40V 的集电极-发射极最大电压。选择一个超过此电路需求的晶体管将会更有效地散热, 并且可在无需外部散热片的情况下运行。TIP333 在 3A 时具有 1.6V 的额定基极发射极电压, 以及 100 的小信号增益 ( $\beta$ )。

### 3.3 被动元件的选择

这个设计的关键无源组件是转换功能的电阻器部件:  $R_{1A}$  和  $R_{1B}$ ,  $R_2$  和  $R_s$ 。

为了满足 1% FSR 增益误差的设计需求, 必须适当地选择这些电阻器的耐受值。选择的  $R_{1A}$ ,  $R_{1B}$  和  $R_2$  的耐受值为 0.1%, 这是因为在保持设计成本有效性的同时, 获得这些部件更加容易。 $R_s$  被选中为 1%, 这是因为低耐受 200m $\Omega$  电阻器的价格要高很多。虽然使用可获得的最精密组件能够提高设计性能, 成本是每个设计人员必须单独评估的权衡因素。

这个设计中的其它无源组件可选择为 1% 或更大, 这是因为它们将不会直接影响这个设计的转换功能。

## 4 模拟

Figure 3 中显示的 TINA-TI™ 电路原理图包括设计过程中获得的电路值。

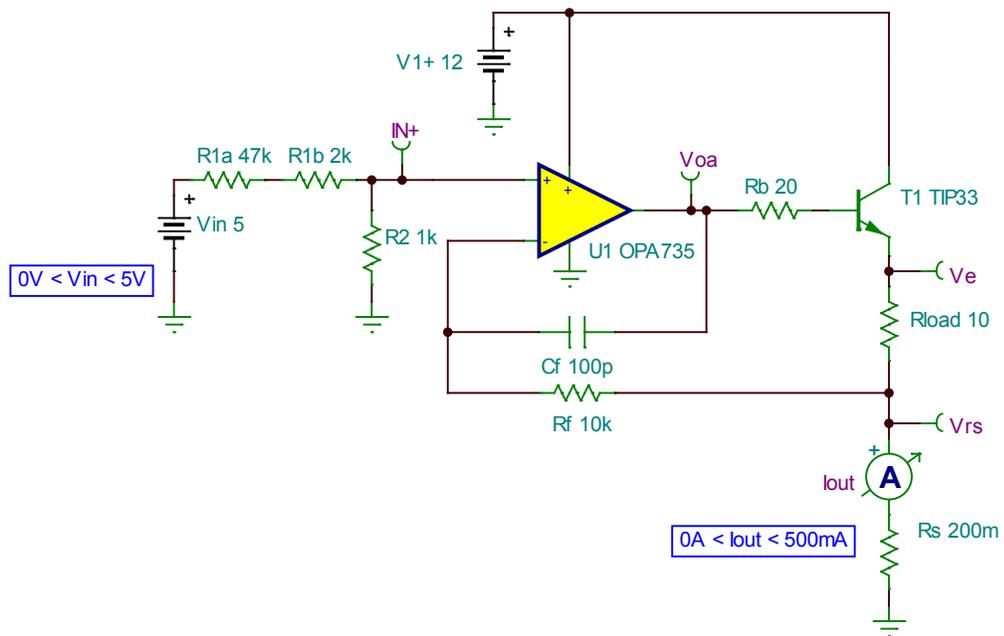


图 3: TINA-TI™ 仿真电路原理图

### 4.1 直流转换功能

Figure 4 中显示了此仿真的直流转换功能结果。 此仿真结果显示了一个 -14.78 的偏移电流和一个 499.94mA 的满量程电流。 这些结果不包括此无源组件的耐受值，并且有助于分析放大器和有源器件精度。

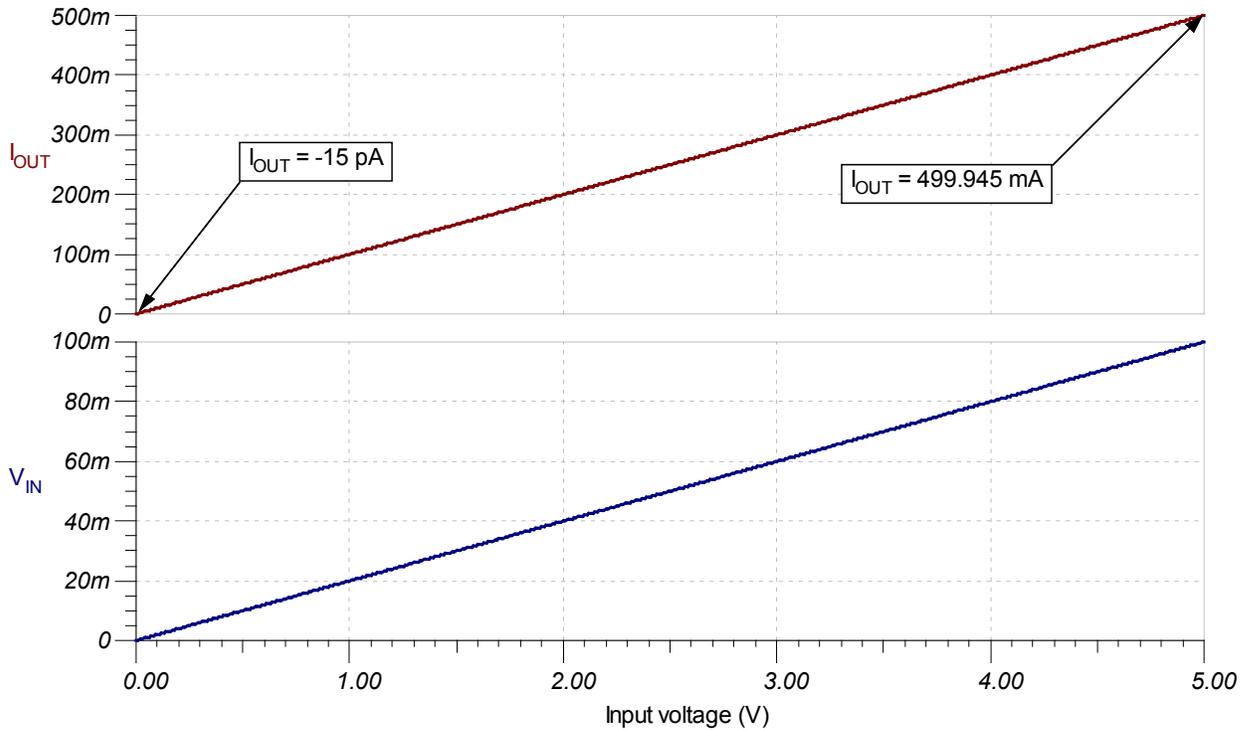


图 4: 模拟仿真的传递函数

20 扫描蒙特卡洛仿真采用了实际元件偏差来产生更真实的结果。 Table 2 和 Figure 5 中显示了此结果。

表 2: 平均蒙特卡洛直流转换结果

	最小值	最大值	平均	标准. 偏差 ( $\sigma$ )
I<382>输出</382>偏移 (pA)	-14.778	-14.762	-14.778	0.006
满量程 $I_{输出}$ (mA)	498.205	501.641	499.904	0.9654
满量程 $I_{输出}$   误差   (mA)	0.0573	1.795	0.193	不可用

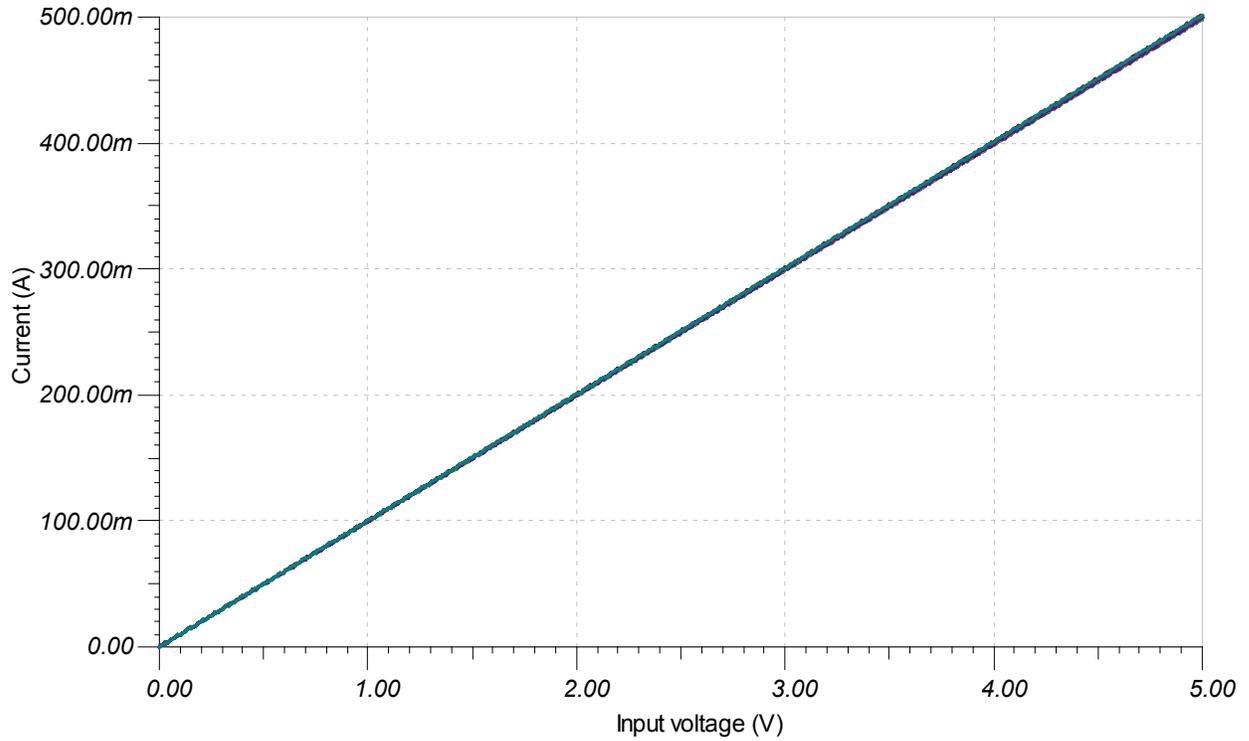


图 5: 模拟蒙特卡洛满量程转换功能

使用满量程负载电流的三个标准偏差计算出满量程增益误差，应该包括大约 99.7% 的设计 ( $3-\sigma$ )。

$$\text{Gain Error(\%)} = \frac{3 \times \sigma}{\Delta I_{\text{OUT}}(\text{Ideal})} \times 100 = \left( \frac{2.896}{500} \right) \times 100 = 0.579\% \quad (11)$$

## 4.2 阶跃响应

通过将一个阶跃响应施加到运算放大器的输入上，验证了此系统的小信号稳定性，此运算放大器的输入使输出大约变化 100mV。 Figure 6 中显示了此结果。

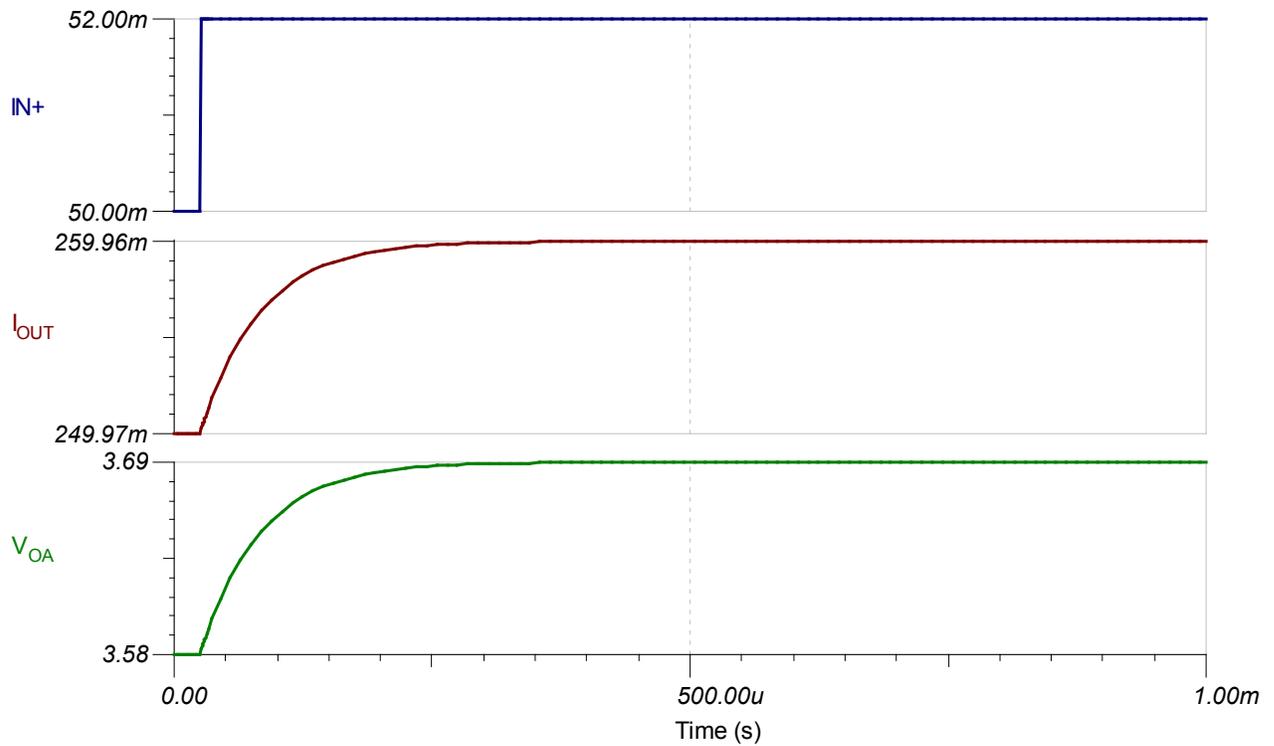


图 6: 小信号阶跃响应仿真

### 4.3 依从电压

为了测试最大负载依从电压和负载电阻，输出被设定为满量程（500mA），而负载电阻器， $R_{\text{负载}}$ ，在  $0\Omega - 25\Omega$  内扫描。发现输出电压柔量为 10.27V，而最大输出电阻为 20.55  $\Omega$ 。

仿真还验证了放大器的  $V_{\text{OA}}$  是电压柔量的限制因素，6.5 中对其进行了进一步讨论。

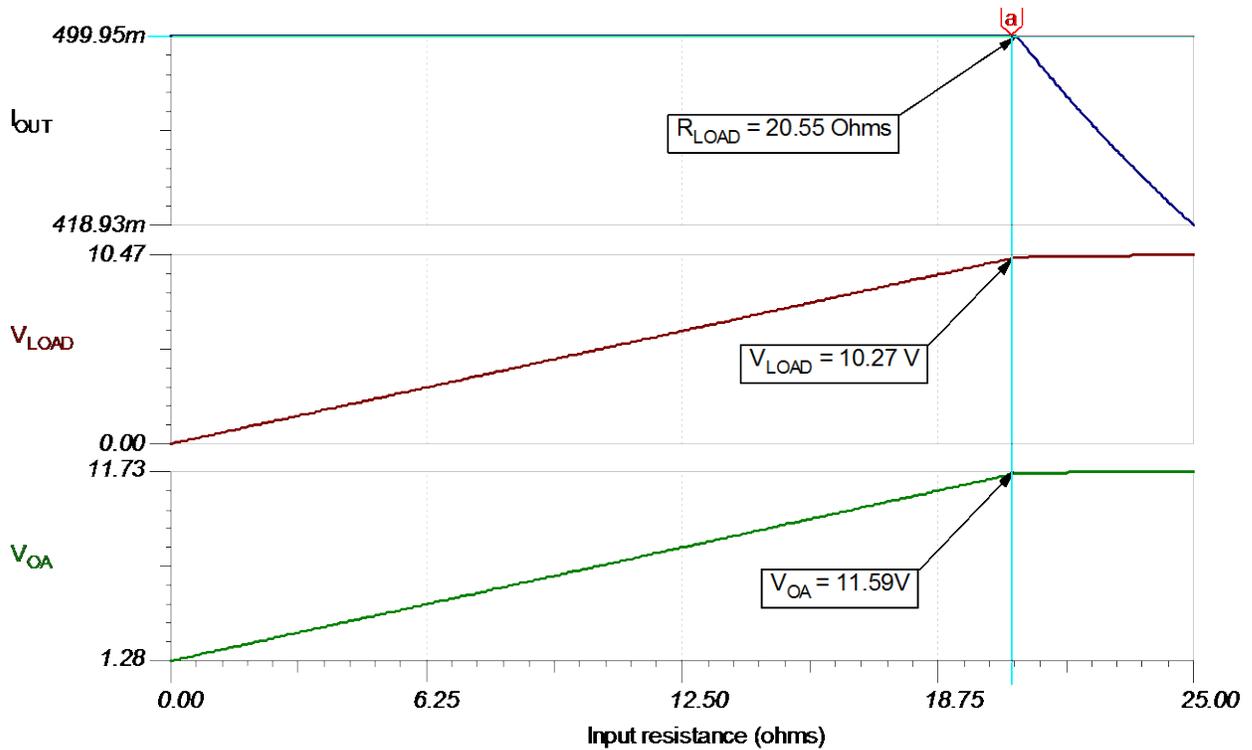


图 7： 最大负载阻抗和电压柔量仿真

### 4.4 仿真结果汇总

此仿真结果与 Table 3 中的设计目标相比较。

表 3： 模拟结果汇总

	目标值	模拟值
$I_{\text{输出}}$ 偏移 (% FSR)	0.1	<0.0001
$I_{\text{输出}}$ 增益误差 (% FSR)	1	0.386
负载依从 (V)	10	10.27

## 5 印刷电路板 (PCB) 设计

可在附录 A.1 和 A.2 中找到 PCB 电路原理图和物料清单。

### 5.1 PCB 布局布线

为了实现这个设计的最优性能，应更多地关注了从  $V_{1+}$  经由晶体管、负载和感测电阻器到接地的高电流路径。

由于这个设计中的满量程输出电流为 500mA，并且满量程感测电压只有 100mV，即使只有很少量的 PCB 电阻与感测电阻器串联，这也会产生误差电压，此误差电压将导致电路转换功能中的增益误差。为了避免这个情况，一个 4 线制开尔文连接被用来将流经  $R_s$  的高电流路径与用来感测其上压降的路径隔离开来。

为了减少 PCB 引线电阻，并且使电流流动更加顺畅，使用宽印制线来作为 BJT 和负载的高电流路径。NPN 晶体管附近较宽的大电流印制线将利于集成电路 IC 散热量，同时降低了器件温度。Figure 8 中显示了针对此设计的布局布线。

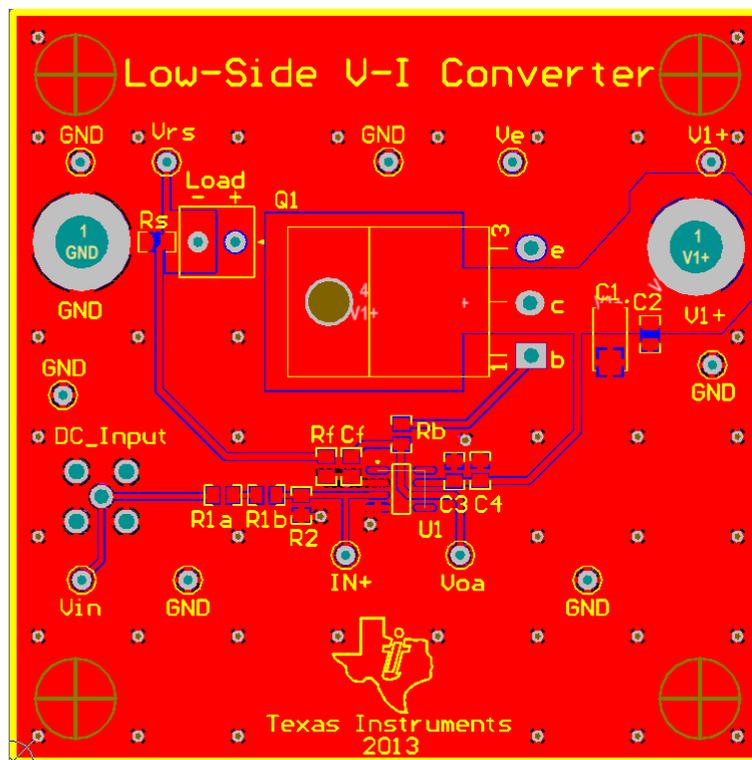


图 8: Altium PCB 布局布线

除了这些规则之外，请参考并遵守普通 PCB 布局布线原则。

## 6 验证和测量的性能

### 6.1 传递函数

在测量输出电流  $I_{\text{输出}}$  的同时，通过在 0-5V 直流电压之间扫描  $V_{\text{输入}}$  来采集数据。Figure 9 显示了  $I_{\text{输出}}$  与  $V_{\text{输入}}$  间关系的曲线图。

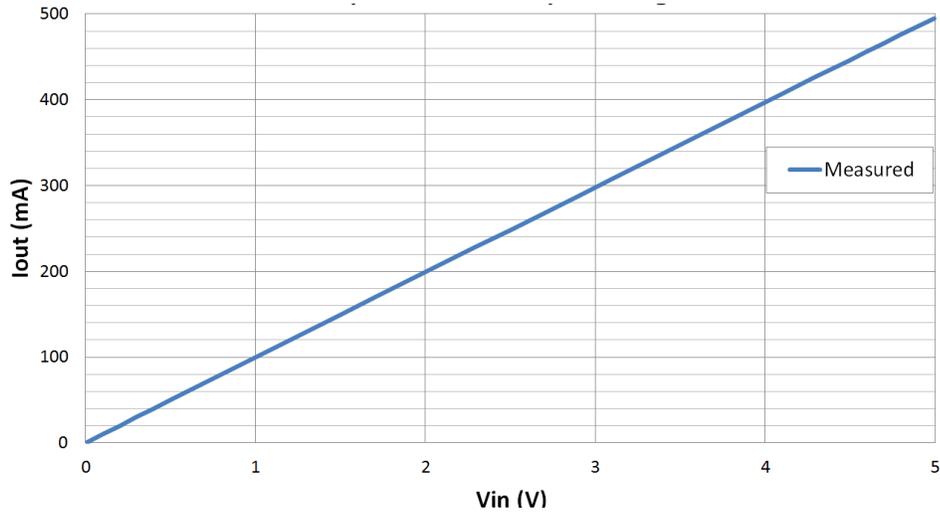


图 9: 实测得的  $I_{\text{输出}}$  与  $V_{\text{输入}}$  间的关系

### 6.2 偏移误差

由于 OPA735 的输入低偏移电压和轨到轨输出，这个电路的偏移误差是可以忽略不计的。由于  $V_{\text{输入}}$  为 0V 的零刻度输入，只观察到 12pA 的偏移误差。

### 6.3 增益误差

为了更清楚地观察转换功能中的误差，Figure 10 显示了  $I_{\text{输出}}$  中的满量程百分比误差，绘制为  $V_{\text{输入}}$  的函数曲线图。当满量程电流附近的感测电阻器开始加热时，可以看到一个轻微的二阶响应。可通过使用一个较低温度系数 (TC) 感测电阻器来大大减少这个值。

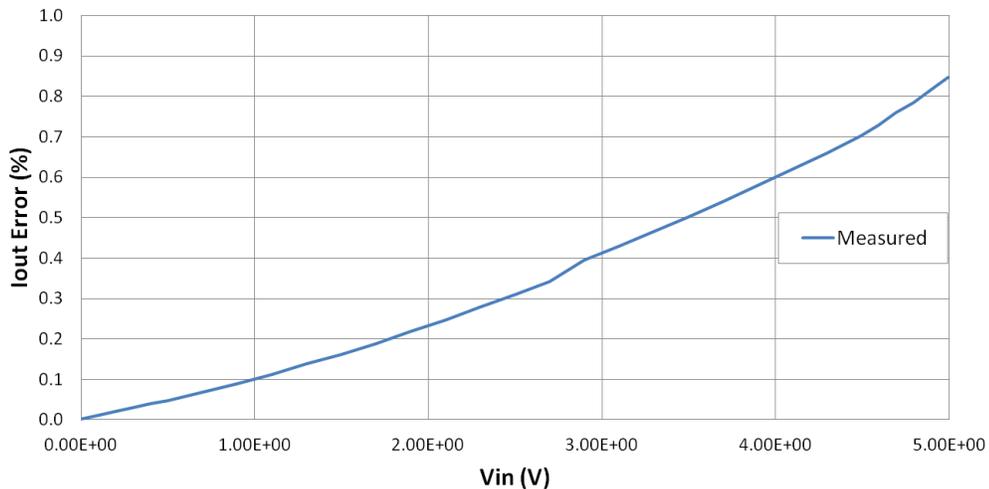


图 10: 已测得的  $I_{\text{输出}}$  误差 (%FSR) 与  $V_{\text{输入}}$  间的关系

虽然所需的输出范围为 0–500mA，这个电路的增益误差将输出限制为一个 495.1mA 的最大值。如等值 12 中显示的那样，计算出电路的运行范围内的增益误差。

$$\text{Gain Error(\%)} = \frac{\Delta I_{\text{OUT}}(\text{Ideal}) - \Delta I_{\text{OUT}}(\text{Measured})}{\Delta I_{\text{OUT}}(\text{Ideal})} = -0.846\% \quad (12)$$

输入电阻分压器、输出感测电阻器和寄生 PCB 电阻中的电阻器耐受值产生了电路中的增益误差。这个设计的精度在很大程度上受到检测电阻器， $R_s$ ，偏差的影响。在这个情况下，设计中使用的  $R_s$  具有 1% 的耐受值。寄生 PCB 电阻有可能是测得的增益误差高于经仿真增益误差的原因。

#### 6.4 瞬态响应

在满量程输入范围内验证了此设计的运行。100Hz 时，一个 0–5V 三角波形输入被馈入系统，同时用一个交流/直流电流探测器来测量输出电流。Figure 11 中显示了这些结果。

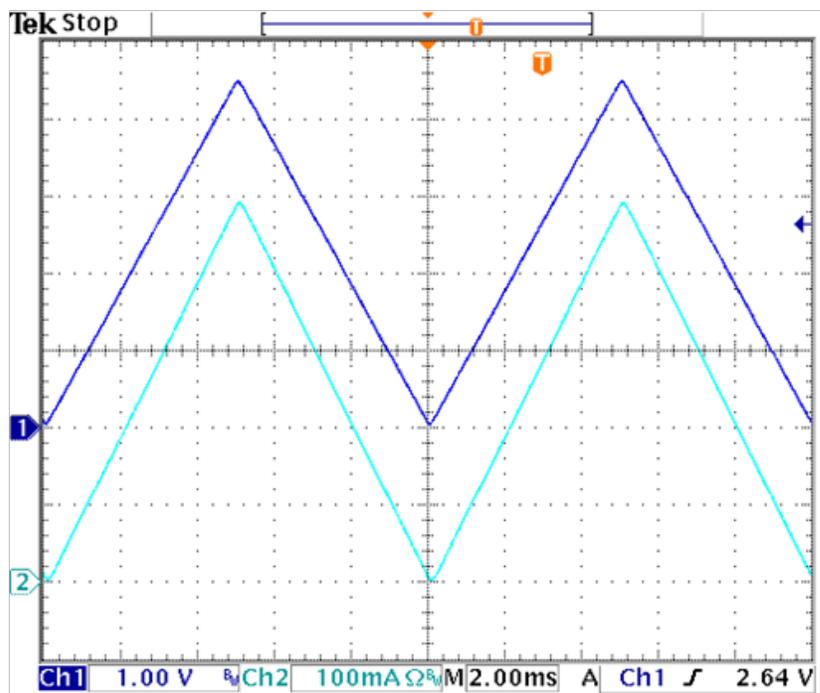


图 11: 测得的  $I_{\text{输出}}$  与满量程  $V_{\text{输入}}$  间的关系

还测试了系统的大信号稳定时间，以便确定输出从一个满量程输入瞬态中稳定的时间。 Figure 12 显示了一个 1kHz, 0-5V 方波输入，它产生一个流经负载的输出电流，它的稳定时间是 200 $\mu$ s 多一点。

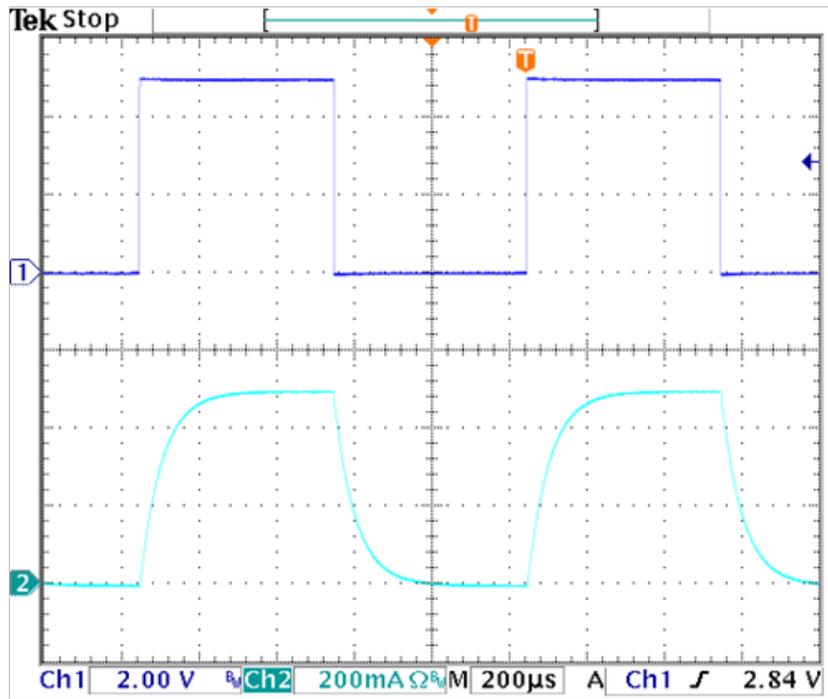


图 12:  $I_{\text{输出}}$  满量程阶跃响应

此小信号响应表明了电源源的稳定性。 一个不稳定设计将出现有害过冲、振铃和较长的稳定时间。 这会要求通过调节  $R_B$ ,  $R_F$  和  $C_F$  来在反馈网络中提供更佳的补偿。

在 Figure 13 中，一个 1kHz, 200mVpp 方波输入以中刻度为中心上下浮动。 这在运算放大器的输出内产生大约 200mVpp 的变化，并使流经负载的输出电流变化 20mApp。 由于具有最小的过冲和振铃，这个电路被认为是过阻尼且稳定的。

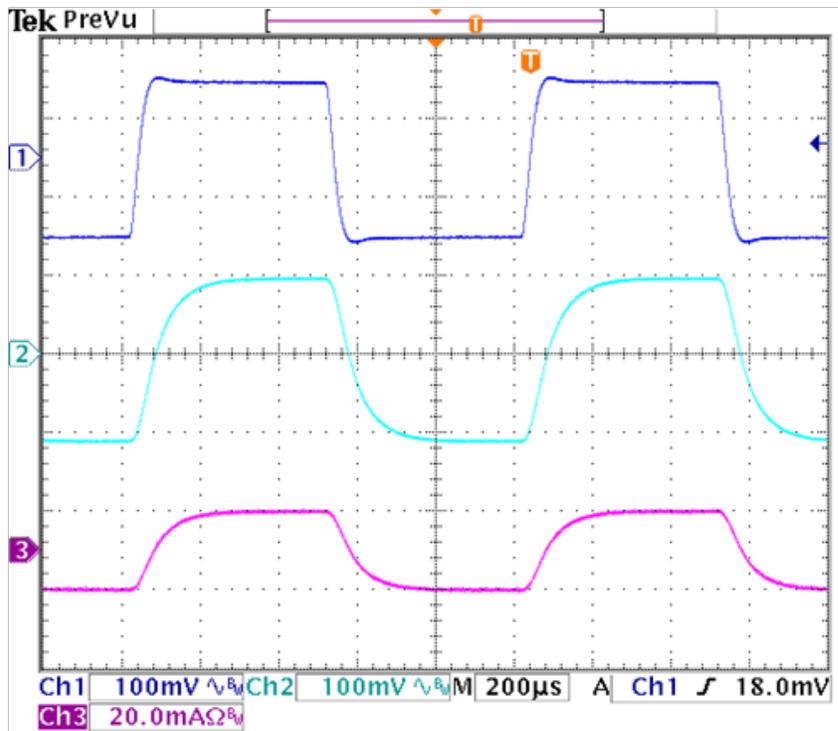


图 13: 小信号阶跃响应

### 6.5 电压柔量

这个电流源将在负载电阻上的电压不超过此设计的依从电压时正确运转。通过分析运算放大器输出到 BJT 发射极的路径，其中包括放大器的最大输出，检测电阻器上的压降，满量程输出上晶体管的基极发射极电压， $V_{BE}$ ，可以确定这个设计能够成功驱动的最大负载阻抗。

数据表规定了运算放大器的输出， $V_{OA}$ ，在轻负载时，具有一个正电源轨 50mV 以内的输出摆幅。因此，此电路的设计前提是假定  $V_{OA}$  不能超过 11.95V。 $R_B$  电阻器上的压降被设计为 100mV，而 BJT 的  $V_{BE}$  为 1.6V。可用下面显示的等式来计算满量程输出电流时，BJT 发射极上应该获得的最大电压。

$$V_E(\text{max}) = V_{OA} - (V_B + V_{BE}) \quad (13)$$

$$V_E(\text{max}) = 11.95 \text{ V} - (100 \text{ mV} + 1.6 \text{ V}) = 10.25 \text{ V} \quad (14)$$

发射极电压  $V_E$  必须保持在少于 10.25V 的水平，以使运算放大器能够在满量程时输出适当的电压。这意味着，可使用如下显示的等式来计算所允许的最大负载阻抗。

$$V_E = V_{LOAD} + V_{RS} = I_{OUT} \times (R_{LOAD} + R_S) \quad (15)$$

$$10.25 \text{ V} = 500 \text{ mA} \times (R_{LOAD} + 200 \text{ m}\Omega) \quad (16)$$

$$R_{LOAD} = 21.94 \Omega \quad (17)$$

相对于计算得出的值，测得的依从电压的增加是由于 OPA735 更佳的摆至轨性能，以及 0.75V 的更小 BJT  $V_{BE}$  电压。

虽然这不是这个设计的所涉及的情况，但是在某些情况下，BJT 的饱和电压也许会是负载依从电压的限制因素。

## 6.6 实测结果汇总

实测结果与 Table 4 中的设计目标相比较。

表 4: 实测的结果汇总

	目标值	测得的值
$I_{\text{输出}} \text{ 偏移 (\%FSR)}$	0.1	<0.0001
$I_{\text{输出}} \text{ 增益误差 (\%FSR)}$	1	0.846
负载依从性 (V)	10	11.07

## 7 修改

针对这个应用的其它放大器选项为斩波稳定 OPA188 或 OPA333。OPA188 针对有可能需要更大电流输出或依从电压的应用提供 36V 的更宽电源电压范围。对于电源电压少于 +5.5V 的设计，OPA333 提供不匹配的偏移、漂移和静态电流性能。其它放大器提供更低的静态电流或更高的带宽。Table 5 为这个设计提供几个具有关键技术规范的选项。

如果这个设计在宽温度范围内使用，除了针对关键组件的低耐受值外，还是建议选择低（温度系数）TC 器件。这个设计将在满量程输出电流附件运行时产生可观的热量。具有低 TC 的器件往往在温度变化时波动较少，并且提供更加一致的结果。

对于要求高精度的较高电流设计，请考虑使用一个 4 引线开尔文连接感测电阻器  $R_s$ ，这将有助于进一步减少由 PCB 寄生电阻导致的误差。必须小心，以确保设计中的 BJT 和其它组件在针对更高电压或更大输出电流进行修改时不会过应力。

表 5: 替代运算放大器

放大器	最大电源电压 (V)	最大偏移电压 ( $\mu\text{V}$ )	最大偏移漂移 ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )	带宽 (MHz)	静态电流 ( $\mu\text{A}$ )
OPA333	5.5	5	0.05	0.35	25
OPA335	5.5	5	0.05	2	350
OPA320	5.5	150	5	20	1750
OPA188	36	25	0.085	2	475
OPA277	36	20	0.15	1	825

## 8 可能的应用

在低侧 V-I 转换器配置中使用 OPA735 将使用户受益，用最小的转换误差提供一个精确控制、线性电流源。一个针对这个拓扑结构的示例应用是如 Figure 14 中显示的精密发光二极管 (LED) 电流控制。

根据可用的电源盒输出级上的净空数量，用户可以很轻松地在晶体管 and 感测电阻器， $R_s$  直接串联多个 LED。调节流经 LED 的电流将直接控制它们的亮度。此电路的输入和输出级可在 OPA735 的限制内的重新配置，以便适应其它输入电压和输出电流范围，来满足您的特定设计需求。

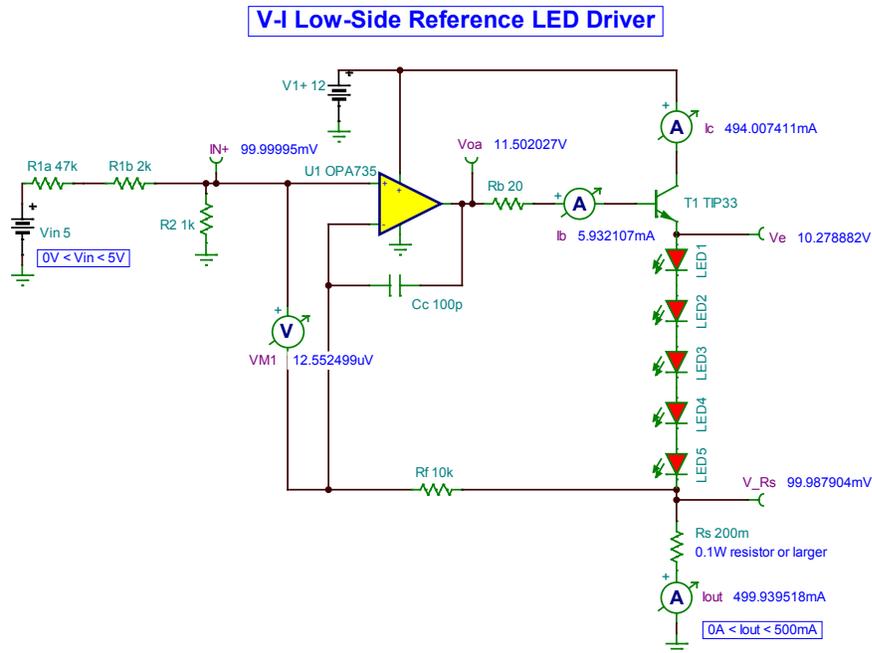


图 14: LED 驱动器应用电路

## 9 关于作者

Ryan Andrews 2011 年 8 月从罗德岛大学毕业，获得生物医学学士学位和西班牙语学士学位。他在 2012 年 2 月通过申请交流项目加入德州仪器 (TI)，与集中模拟应用和精密模拟产品-线性产品团队一同工作。2013 年 3 月，Ryan 加入了达拉斯的精密模拟-三角积分产品团队。

Collin Wells 是一名德州仪器 (TI) 精密线性产品组的应用工程师，在这里，他支持工业用产品和应用。Collin 在达拉斯的德克萨斯大学获得电子工程学士学位。

## 10 致谢 & 参考文献

1. Green, Tim, 运算放大器稳定性 1-11 部分, 2008 年 11 月, 提供如下: [http://www.genius.net/site/zones/acquisitionZONE/technical\\_notes/acqt\\_050712](http://www.genius.net/site/zones/acquisitionZONE/technical_notes/acqt_050712)
2. R. Mark Stitt, 电流源和电流接收器的执行和应用, 提供如下: [www.ti.com/lit/an/sboa046/sboa046.pdf](http://www.ti.com/lit/an/sboa046/sboa046.pdf)

## Appendix A.

### A.1 电气原理图

Figure 15 中可找到针对这个设计的 Altium 电气原理图。

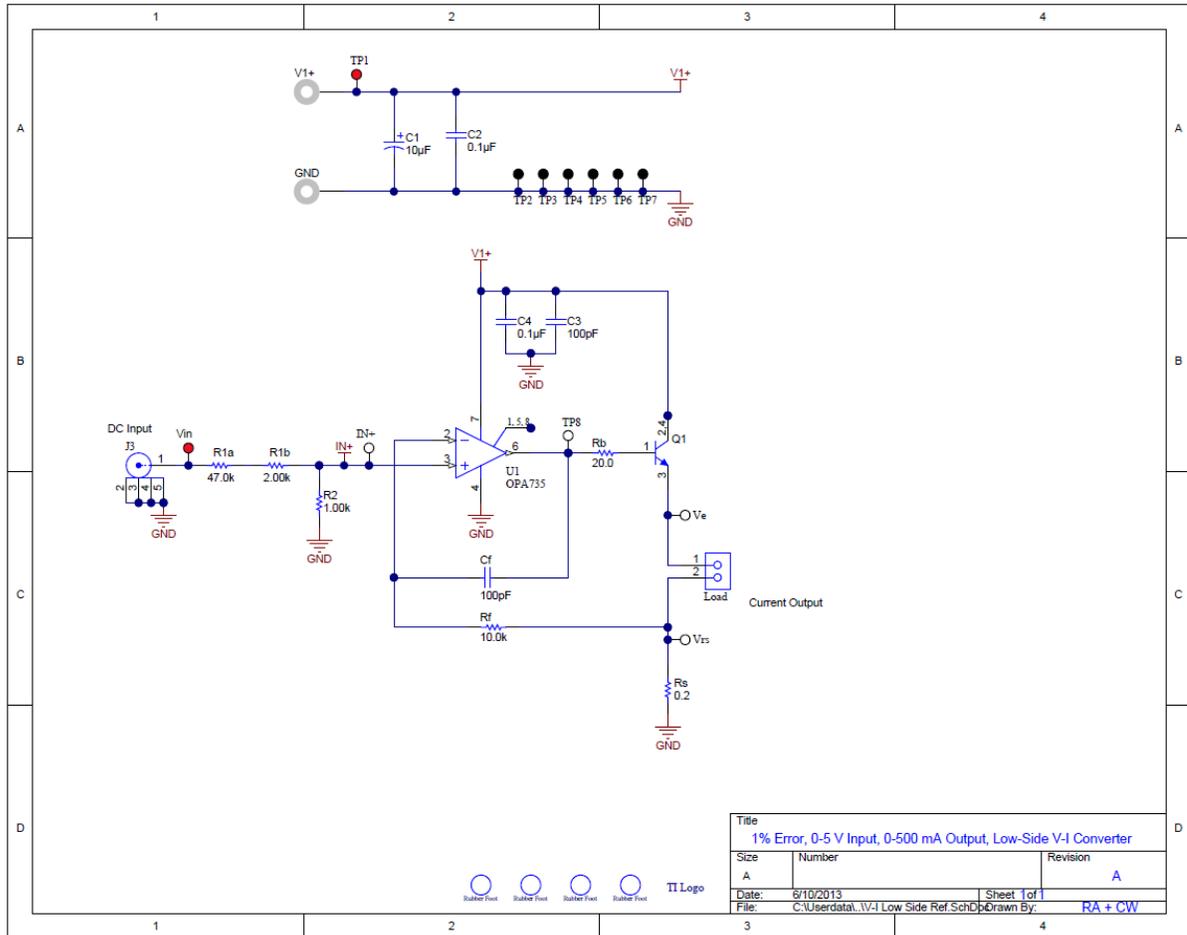


图 15: Altium 电路原理图

## A.2 物料清单

Figure 16 中可找到这个电路的物料清单。

Line #	Quantity	Value	Designator	Description	Manufacturer	PartNumber	Supplier Part Number 1
1	1	10uF	C1	CAP, TANT, 10uF, 25V, +/-10%, 0.3 ohm, 6032-28 SMD	AVX	TPSC106K025R0300	478-3360-1-ND
2	1	0.1uF	C2	CAP, CERM, 0.1uF, 25V, +/-10%, X7R, 0805	MuRata	GRM21BR71E104KA01L	490-1673-1-ND
3	2	100pF	C3, C5	CAP, CERM, 100pF, 50V, +/-5%, COG/NPO, 0805	Kemet	C0805C101J5GACTU	399-1122-1-ND
4	1	0.1uF	C4	CAP, CERM, 0.1uF, 50V, +/-5%, X7R, 0805	AVX	08055C104JAT2A	478-3352-1-ND
5	1		J1	Standard Banana Jack, Uninsulated, 5.5mm	Keystone	575-4	575-4K-ND
6	1		J2	Standard Banana Jack, Uninsulated, 5.5mm	Keystone	575-4	575-4K-ND
7	1		J3	Connector, TH, SMA	Emerson Network Power	142-0701-201	J500-ND
8	1		J4	Conn Term Block, 2POS, 3.81mm PCB	Phoenix Contact	1727010	277-1947-ND
9	1		Q1	TRANS NPN 10A 100V HI PWR TO218	ON Semiconductor	TIP33CGOS-ND	TIP33CG
10	1	20R	R1	RES, 20.0 ohm, 0.5%, 0.1W, 0805	Susumu Co Ltd	RR1220Q-200-D	RR12Q20DCT-ND
11	1	47.0k	R2	RES, 47.0k ohm, 0.1%, 0.125W, 0805	Susumu Co Ltd	RG2012P-473-B-T5	RG20P47KBCT-ND
12	1	2.00k	R3	RES, 2.00k ohm, 0.1%, 0.125W, 0805	Susumu Co Ltd	RG2012P-202-B-T5	RG20P2.0KBCT-ND
13	1	1.00k	R4	RES, 1.00k ohm, 0.1%, 0.125W, 0805	Susumu Co Ltd	RG2012P-102-B-T5	RG20P1.0KBCT-ND
14	1	10.0k	R5	RES, 10.0k ohm, 1%, 0.125W, 0805	Vishay-Dale	CRCW080510K0FKEA	541-10.0KCCT-ND
15	1	0.2	R6	RES 0.2 OHM 1/4W 1% 0805 SMD	Stackpole	CSR0805FKR200	CSR0805FKR200CT-ND
16	2	Red	TP1, TP9	Test Point, TH, Miniature, Red	Keystone	5000	5000K-ND
17	6	Black	TP2, TP3, TP4, TP5, TP6, TP7	Test Point, TH, Miniature, Black	Keystone	5001	5001K-ND
18	4	White	TP8, TP10, TP11, TP12	Test Point, TH, Miniature, White	Keystone	5002	5002K-ND
19	1		U1	IC OPAMP CHOP R-R 1.6MHZ 8SOIC	Texas Instruments	OPA735AID	296-17995-ND

图 16: 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 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	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">www.ti.com.cn/audio</a> 通信与电信 <a href="http://www.ti.com.cn/telecom">www.ti.com.cn/telecom</a>
放大器和线性器件	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">www.ti.com.cn/amplifiers</a> 计算机及周边 <a href="http://www.ti.com.cn/computer">www.ti.com.cn/computer</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">www.ti.com.cn/dataconverters</a> 消费电子 <a href="http://www.ti.com.cn/consumer-apps">www.ti.com.cn/consumer-apps</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a> 能源 <a href="http://www.ti.com.cn/energy">www.ti.com.cn/energy</a>
DSP - 数字信号处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">www.ti.com.cn/dsp</a> 工业应用 <a href="http://www.ti.com.cn/industrial">www.ti.com.cn/industrial</a>
时钟和计时器	<a href="http://www.ti.com.cn/clockandtimers">www.ti.com.cn/clockandtimers</a> 医疗电子 <a href="http://www.ti.com.cn/medical">www.ti.com.cn/medical</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">www.ti.com.cn/interface</a> 安防应用 <a href="http://www.ti.com.cn/security">www.ti.com.cn/security</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">www.ti.com.cn/logic</a> 汽车电子 <a href="http://www.ti.com.cn/automotive">www.ti.com.cn/automotive</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">www.ti.com.cn/power</a> 视频和影像 <a href="http://www.ti.com.cn/video">www.ti.com.cn/video</a>
微控制器 (MCU)	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">www.ti.com.cn/microcontrollers</a>
RFID 系统	<a href="http://www.ti.com.cn/rfidsys">www.ti.com.cn/rfidsys</a>
OMAP应用处理器	<a href="http://www.ti.com/omap">www.ti.com/omap</a>
无线连通性	<a href="http://www.ti.com.cn/wirelessconnectivity">www.ti.com.cn/wirelessconnectivity</a> 德州仪器在线技术支持社区 <a href="http://www.deyisupport.com">www.deyisupport.com</a>

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