

Application Brief

航天级 50krad 2 线制分立式 4 - 20mA 电流变送器电路



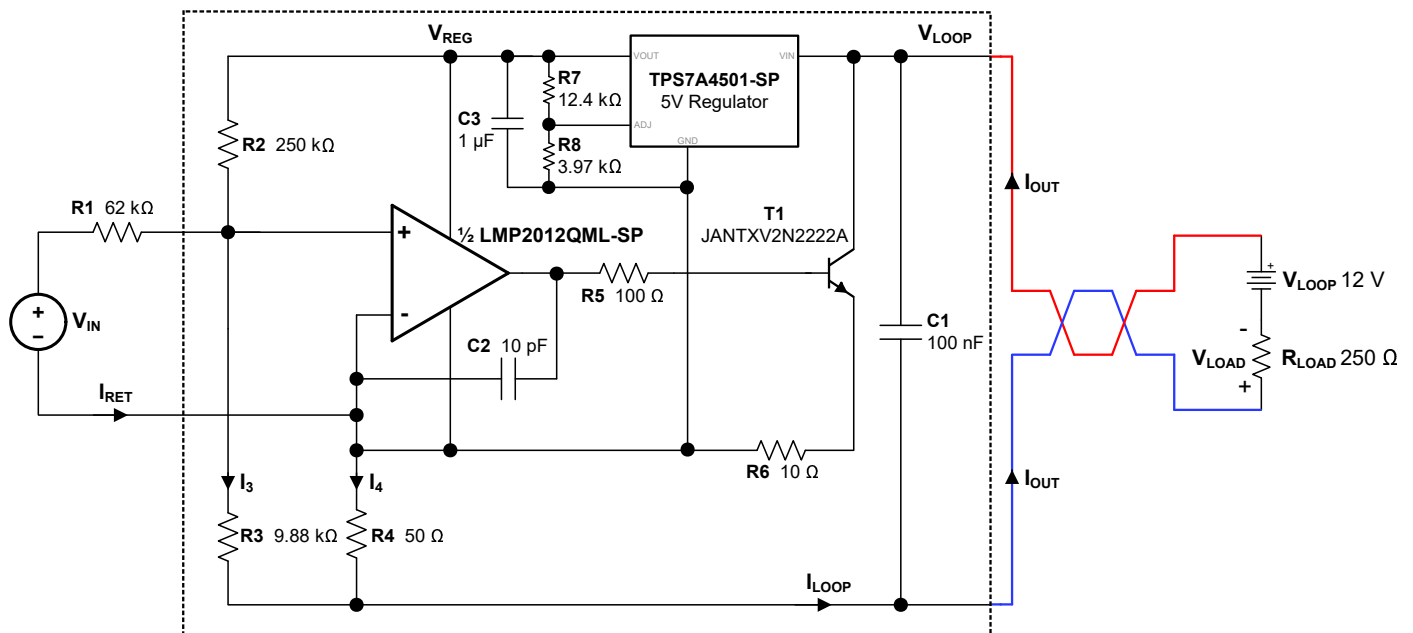
Nicholas Butts

设计目标

输入		输出		电源	负载	电离总剂量	SEL 抗扰度
V_{in_min}	V_{in_max}	I_{out_min}	I_{out_max}	V_{loop}	R_{load}		
0V	5V	4mA	20mA	12V	250 Ω	$\geq 50\text{krad(Si)}$	$\geq 77.5\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$

设计说明

本设计使用分立式组件来实现 4mA 至 20mA V-I 电流变送器，该变送器采用了适用于航天应用的航天级 (SP) 组件。该电路将差分电压转换为可通过长电缆传输的电流。该电流变送器的线性操作取决于运算放大器输入共模范围、晶体管和 LDO 的可用裕量以及输入电压范围内流经 R_3 和 R_4 的电流的线性匹配情况。由于运算放大器的反相输入连接到其负电源，因此运算放大器必须支持共模电压至负轨中。重要的是，因为环路返回电流流经输出路径，2 线环路供电式电流变送器加上同一电源回路上的任何外设所消耗的静态电流小于最小输出电流，因为环路返回电流会流经输出路径。



设计注意事项

1. 使用低容差电阻器实现高电流增益匹配精度。
2. 本设计所有的电阻器和电容器都必须经过航天级验证。
3. 在本设计中， I_{ret} 是本地接地，与电源接地区分开，必须允许其悬空。
4. 流经 R_3 的电流可视为静态电流。也就是说，该电流应尽可能最小以便不耗尽电流预算。然而，随着 I_3 变小，匹配率 R_3 / R_4 会变大，因此现实中， I_3 不能任意变小。
5. 在线性运行的情况下，当 $V_{in} = V_{in_max}$ 和 $V_{in} = V_{in_min}$ 时，流经 R_3 的电流之比 I_{3_max} / I_{3_min} 必须等于最大输出电流与最小输出电流之比 $I_{out_max} / I_{out_min}$ 。
6. 这种分立式 2 线电流变送器解决方案允许灵活地将输出电流设置为不同于标准 4 - 20mA 或 4 - 24mA。由于航天级组件的选择相对有限，这点变得有必要。例如，如果同一电源环路上的电流变送器与周围外设的总静态电流不能满足其总和小于 I_{out_min} (本设计中 = 4mA) 的要求，则输出电流范围可能会移至 8 - 24mA 或类似的范围。
7. C_1 是旁路补偿电容器，是确保电路稳定所必需的。推荐 100nF 或更大的电容器。
8. R_5 和 C_2 是用于补偿电路的附加元件。它们不是确保稳定性所必需的，但如果需要额外的补偿，则会添加它们以提高灵活性。
9. C_3 是 TPS7A4501-SP 所需的输出电容器。为确保稳定性，推荐 1 μ F 至 10 μ F 的电容器。
10. R_6 使运算放大器输出与流经晶体管的电流之间呈线性关系，并限制流经晶体管的电流。
11. 本设计可以通过单个 LMP2012QML-SP 或类似器件来实现。了解备选器件，请参阅[设计备用运算放大器](#)。

工作原理

4 - 20mA V-I 电流变送器以差分电压作为输入，并输出从输入到输出具有线性关系的电流。这种线性关系取决于运算放大器的共模范围以及晶体管和 LDO 的可用裕量。此外，采用 2 线环路设计的电流变送器要求环路路径上所有组件输出的静态电流消耗值小于本设计中的最小输出电流 $I_{out_min} = 4\text{mA}$ 。这包括运算放大器、LDO、流过 R_3 和 R_5 支路的电流，以及同一电源环路上的任何其他外设。只要满足这一要求，运算放大器和晶体管就会进行补偿，将剩余的电流提供给环路，从而向负载电阻输出正确的电流。

输出电流 I_{out} 是分别流过 R_3 和 R_4 的电流 I_3 和 I_4 之和：

$$I_{out} = I_3 + I_4$$

I_3 由 R_1 和 R_2 以及输入电压 V_{in} 和稳压电源 V_{reg} 进行设置。在理想运行条件下，运算放大器的同相端子与本地接地端 I_{ret} 之间存在虚拟短路。另请注意， V_{reg} 和 V_{in} 以 I_{ret} 为基准。因此， I_3 如下：

$$I_3 = \frac{V_{in}}{R_1} + \frac{V_{reg}}{R_2}$$

I_4 是本地接地端返回电流 I_{ret} 与流经晶体管 T_1 的补偿电流之和。

为了使运算放大器正确运行， R_3 和 R_4 上的电压必须相等，所以得出 $V_3 = V_4$ 然后由此得出：

$$I_3 R_3 = I_4 R_4$$

上述公式改写为：

$$I_4 = I_3 \frac{R_3}{R_4}$$

结合第一公式、第二公式和前述公式，推导出电路的传递函数为：

$$I_{out} = \left(\frac{V_{reg}}{R_2} + \frac{V_{in}}{R_1} \right) \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) = I_3 \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right)$$

很明显，流经 R_3 且由 R_1 、 R_2 、 V_{in} 和 V_{reg} 设定，并被因子 $1 + R_3 / R_4$ 放大。

设计步骤

想了解对所需规格的电阻值进行计算的 Excel 计算器，请参阅[设计参考资料](#)。

1. 定义电路的输入电压范围。本设计中，选择 $V_{in_min} = 0V$ ， $V_{in_max} = 5V$ 。
2. 定义电路的输出电流范围。本设计中，选择 $I_{out_min} = 4mA$ ， $I_{out_max} = 20mA$ 。
3. 计算 R_7 和 R_8 以设置 TPS7A4501-SP LDO 的输出电压。可调 LDO 的输出电压的设置公式如下：

$$V_{reg} = V_{ref} * \left(1 + \frac{R_7}{R_8}\right)$$

在这个公式中， V_{ref} 是 LDO 的内部带隙基准电压。TPS7A4501-SP 的标称基准电压 $V_{ref} = 1.21V$ ，而本设计的目标是 $V_{reg} = 5V$ ，适用如下：

$$5V = 1.21V * \left(1 + \frac{R_7}{R_8}\right)$$

$$\frac{R_7}{R_8} = 3.13$$

在选择值时，遵循以下指导原则：从 LDO 输出端到接地端的反馈电阻器中的电流必须至少是进入 ADJ 引脚的漏电流的 100 倍，以避免出现输出精度问题。对于 TPS7A4501-SP，ADJ 引脚的漏电流为 $3 \mu A$ (典型值)。由此产生以下不等式：

$$\frac{V_{reg}}{R_7 + R_8} \geq 100 * 3\mu A$$

$$\frac{5V}{R_7 + R_8} \geq 300\mu A$$

$$16.67k\Omega \geq R_7 + R_8$$

with $R_8 = 3.97k\Omega$ (标准值)，下述等式成立：

$$R_7 = 3.97k\Omega * 3.13 = 12,426\Omega \approx 12.4k\Omega \text{ (标准值)}$$

有了 R_7 和 R_8 的这些值，下述等式有效：

$$R_7 + R_8 = 3.97k\Omega + 12.4k\Omega = 16.37k\Omega \leq 16.67k\Omega$$

NOTE

由于本设计具有电流预算限制，因此最好将 R_7 和 R_8 的大小设置为接近该限制，以最小化此静态电流贡献。

4. 定义流经 R_3 的最小和最大电流。在定义这些电流之前，请参阅[设计注意事项 5](#)。本设计中，选择 $I_{3_min} = 20 \mu A$ ， $I_{3_max} = 100 \mu A$ 。

5. 如设计步骤 4 所定义的, 计算 R_1 和 R_2 的值以设置 I_{3_min} 和 I_{3_max} 。为此, 请使用第一个公式以及 V_{reg} 、 V_{in_min} 、 V_{in_max} 、 I_{3_min} 和 I_{3_max} 的技术参数。当 $V_{in} = V_{in_min}$ 时, 得到以下等式:

$$I_{3_min} = \frac{V_{in_min}}{R_1} + \frac{V_{reg}}{R_2}$$

$$20\mu A = \frac{0V}{R_1} + \frac{5V}{R_2} = \frac{5V}{R_2}$$

$$R_2 = 250k\Omega \text{ (标准值)}$$

当 $V_{in} = V_{in_max}$ 时, 以下等式成立:

$$I_{3_max} = \frac{V_{in_max}}{R_1} + \frac{V_{reg}}{R_2}$$

$$100\mu A = \frac{5V}{R_1} + \frac{5V}{250k\Omega}$$

$$R_1 = 62.5k\Omega \approx 62k\Omega \text{ (标准值)}$$

6. 计算 R_3 / R_4 以设置所需的电流增益。为此, 请使用该公式以及 I_{out_min} 和 I_{3_min} 。

$$4mA = 20\mu A * \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)$$

$$\frac{R_3}{R_4} = 199$$

NOTE

只需要使用 I_{out} 和 I_3 的最小值来计算 R_3 / R_4 , 因为假设已遵循设计注意事项 5。

7. 选择 R_3 和 R_4 的值。对 R_3 大小的调整远没有对 R_4 大小的调整重要得多, 因为在对 R_3 进行大小调整时容易粗心导致裕量问题。要了解原因, 请分析最大负载条件 ($I_{out} = I_{out_max} = 20mA$) 下的节点电压。负载电压如下:

$$V_{load} = I_{out_max} * R_{load} = 20mA * 250\Omega = 5V$$

大部分输出电流会通过 R_4 , 因此当 $R_4 = 100\Omega$ 时, I_{ret} 处的电压约为:

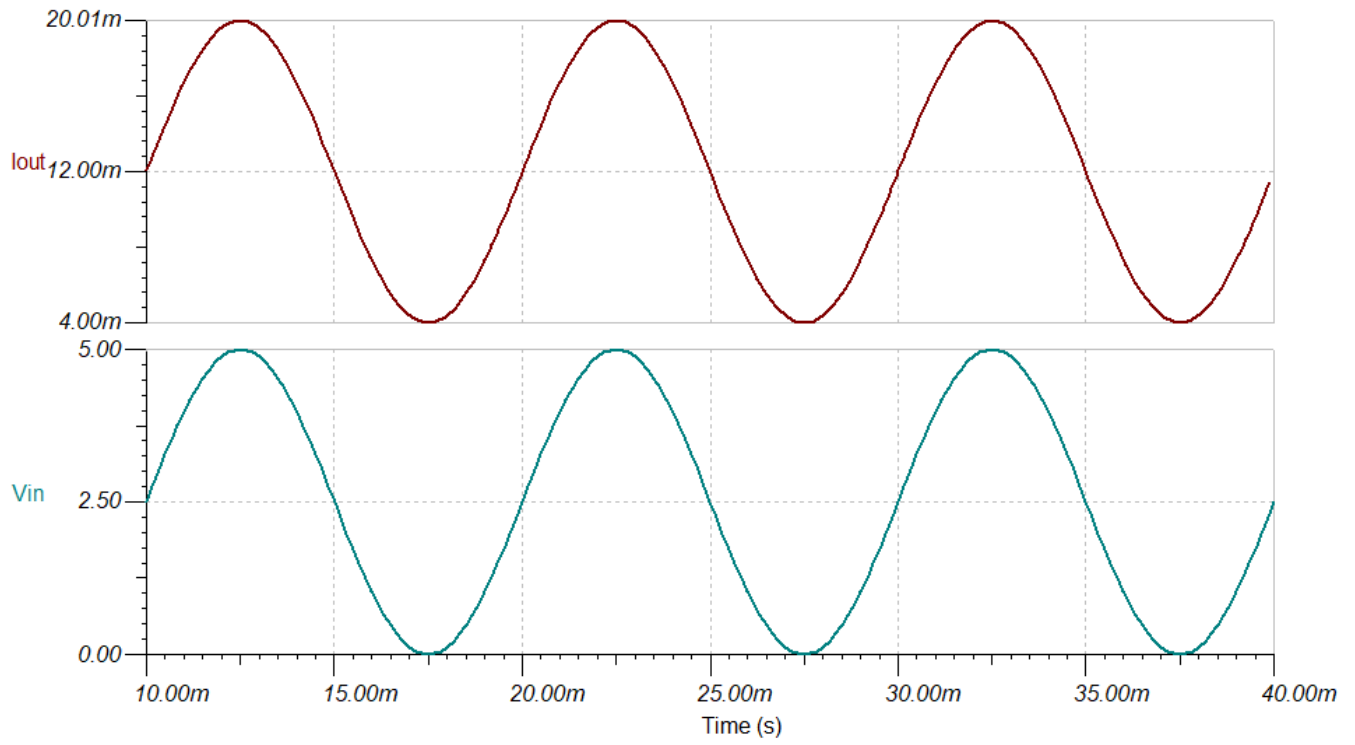
$$5V + 100\Omega * 20mA = 7V$$

V_{reg} 以 I_{ret} 为基准, 因此相对于电源接地, $V_{reg} = 7V + 5V = 12V$, 在这种情况下, LDO 进入压降。如果 LDO 进入压降, LDO 将失去其电源抑制 (PSR) 特性, 并且运算放大器的正电源电压降低, 因此其驱动晶体管基极以提供额外输出电流的能力也会降低。此外, 如果 V_{reg} 下降, 则流经 R_3 的电流将减小, 电路开始表现出非线性行为。另外, 如果 R_6 太大, 则 R_6 上的额外电压降会进一步降低晶体管的可用裕量。

考虑到这些因素, 选择 $R_4 = 50\Omega$ 以避免裕量问题。因此:

$$R_3 = 199 * 50\Omega = 9.95k\Omega \approx 9.88k\Omega \text{ (标准值)}$$

瞬态仿真结果



设计参考资料

1. 德州仪器 (TI), [Excel 计算器工具](#)
2. 德州仪器 (TI), [TI 精密实验室 - 电流环路变送器](#)
3. 德州仪器 (TI), [《低成本环路供电式 4-20mA 变送器 EMC/EMI 测试参考设计》](#)

设计精选运算放大器

LMP2012QML-SP	
V_{supply}	
V_{inCM}	- 0.3V 至 (V_+) + 0.3V
V_{out}	(V_-) + 40mV 至 (V_+) - 22mV
V_{os}	±120nV
I_{q}	每通道 930 μ A
I_{b}	-3pA
UGBW	3MHz
SR	4V/ μ s
通道数	2
电离总剂量	50krad(Si)
针对 LET 的 SEL 抗扰度	77.5MeV·cm ² /mg
https://www.ti.com.cn/product/cn/LMP2012QML-SP	

设计备用运算放大器

LMP7704-SP	
V_{supply}	±1.35V 至 ±6V
V_{inCM}	(V_-) - 0.2V 至 (V_+) + 0.2V
V_{out}	(V_-) - 120mV 至 (V_+) + 120mV
V_{os}	±32 μ V
I_{q}	每通道 725 μ A
I_{b}	±200fA
UGBW	2.5MHz
SR	0.9V/ μ s
通道数	4
电离总剂量	100krad(Si)
针对 LET 的 SEL 抗扰度	85MeV·cm ² /mg
http://www.ti.com.cn/product/cn/LMP7704-SP	

设计精选 LDO

TPS7A4501-SP	
V_{in}	2.3V 至 20V
V_{out}	1.21V 至 20V (可调节输出)
I_{out}	750mA
V_{do} (压差)	20mV
I_q	1.1mA
通道数	1
电离总剂量	150krad(Si)
针对 LET 的 SEL 抗扰度	91.9MeV·cm ² /mg
https://www.ti.com.cn/product/cn/TPS7A4501-SP	

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

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

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司