

选择电阻以最大程度减少接地负载电流源误差

作者: David Guo

运算放大器通常用于在工业流程控制、科学仪器和医疗设备等各种应用中产生高性能电流源。《模拟对话》1967年第1卷第1期上发表的“单放大器电流源”介绍了几种电流源电路,它们可以提供通过浮动负载或接地负载的恒流。在压力变送器和气体探测器等工业应用中,这些电路广泛应用于提供4-mA至20-mA或0-mA至20-mA的电流。

图1所示的改进型Howland电流源非常受欢迎,因为它可以驱动接地负载。允许相对较高电流的晶体管可以用MOSFET取代,以便达到更高的电流。对于低成本、低电流应用,可以去除晶体管,如《模拟对话》2009年第43卷第3期“精密电流源的肝脏:差动放大器”所述。

这种电流源的精度取决于放大器和电阻。本文介绍如何选择外部电阻以最大程度减少误差。

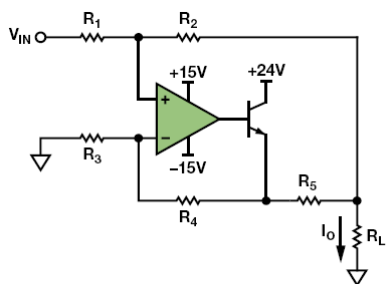


图1. 改进型 Howland 电流源驱动接地负载。

通过对改进型 Howland 电流源进行分析, 可以得出传递函数:

$$I_O = V_{IN} \times \frac{R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_5 R_3}{R_3 (R_2 + R_5) R_L - R_1 R_4 R_L + R_1 R_3 R_5 + R_2 R_3 R_5} \quad (1)$$

提示 1: 设置 \$R_2 + R_5 = R_4\$

在公式 1 中, 负载电阻影响输出电流, 但如果我们设置 \$R_1 = R_3\$ 和 \$R_2 + R_5 = R_4\$, 则方程简化为:

$$I_O = V_{IN} \times \frac{R_4}{R_3 R_5} \quad (2)$$

此处的输出电流只是 \$R_3\$、\$R_4\$ 和 \$R_5\$ 的函数。如果有理想放大器, 电阻容差将决定输出电流的精度。

提示 2: 设置 \$R_L = n \times R_5\$

为减少器件库中的总电阻数, 请设置 \$R_1 = R_2 = R_3 = R_4\$。现在, 公式 1 简化为:

$$I_O = V_{IN} \times \frac{R_5 + 2R_2}{R_5 (R_L + 2R_2)} \quad (3)$$

如果 \$R_5 = R_L\$, 则公式进一步简化为:

$$I_O = V_{IN} \times \frac{1}{R_5} \quad (4)$$

此处的输出电流仅取决于电阻 \$R_5\$。

某些情况下, 输入信号可能需要衰减。例如, 在处理 10 V 输入信号且 \$R_5 = 100 \Omega\$ 的情况下, 输出电流为 100 mA。要获得 20 mA 的输出电流, 请设置 \$R_1 = R_3 = 5R_2 = 5R_4\$。现在, 公式 1 简化为:

$$I_O = V_{IN} \times \frac{5R_5 + 6R_2}{5R_5 (R_L + 6R_2)}$$

如果 \$R_L = 5R_5 = 500 \Omega\$, 则:

$$I_O = V_{IN} \times \frac{1}{5R_5} \quad (5)$$

提示 3: \$R_1/R_2/R_3/R_4\$ 的值较大, 可以改进电流精度

大多数情况下, \$R_1 = R_2 = R_3 = R_4\$, 但 \$R_L \neq R_5\$, 因此输出电流如公式 3 所示。例如, 在 \$R_5 = 100 \Omega\$ 且 \$R_L = 500 \Omega\$ 的情况下, 图 2 显示电阻 \$R_1\$ 与电流精度之间的关系。要达到 0.5% 的电流精度, \$R_1\$ 必须至少为 40 k\$\Omega\$。

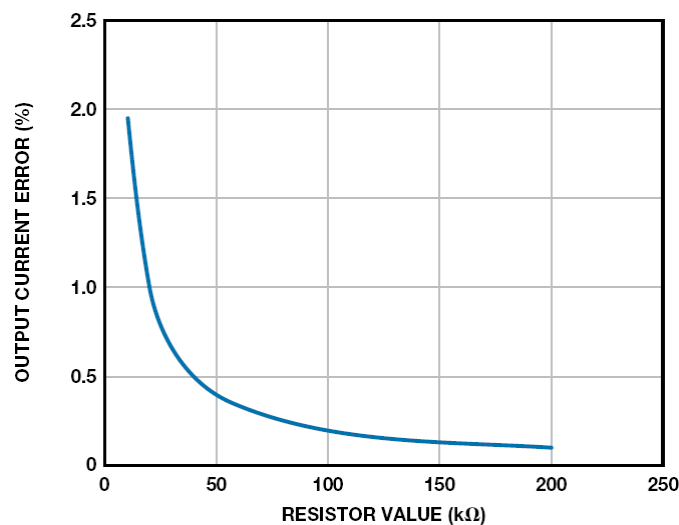


图 2. \$R_1\$ 与输出电流精度之间的关系。

提示 4: 电阻容差影响电流精度

实际电阻从来都不是理想的, 每个电阻都具有指定的容差。图 3 显示了示例电路, 其中 \$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 100 \text{ k}\Omega\$, \$R_5 = 100 \Omega\$, 而且 \$R_L = 500 \Omega\$。在输入电压设置为 0.1 V 的情况下, 输出电流应该为 1 mA。表 1 显示由于不同电阻容差而导致的输出电流误差。为达到 0.5% 的电流精度, 请为 \$R_1/R_2/R_3/R_4\$ 选择 0.01% 的容差, 为 \$R_5\$ 选择 0.1% 的容差, 为 \$R_L\$ 选择 5% 的容差。0.01% 容差的电阻成本昂贵, 因此更好的选择是使用集成差动放大器 (例如 AD8276), 它具有更好的电阻匹配, 而且更加经济高效。

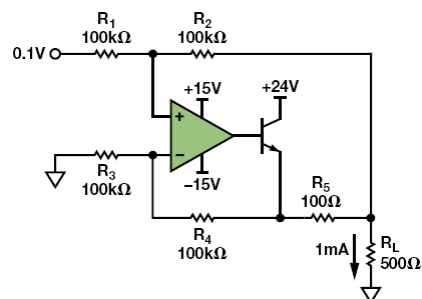


图 3. \$I_{OUT} = 1 \text{ mA}\$ 的示例电路。

表 1. 最差情况输出电流误差(%)与电阻容差(%)

电阻容差/ 电阻变化	5	1	0.5	0.1	0.05	0.01	0
$R_1/R_2/R_3/R_4$	110.11	10.98	5.07	1.18	0.69	0.30	0.20
R_5	5.05	1.19	0.70	0.30	0.25	0.21	0.20
R_L	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

结论

在设计改进型 Howland 电流源时，需要选择外部电阻，使得输出电流不受负载电阻的影响。电阻容差会影响精度，必须在精度和成本之间权衡考虑。放大器的失调电压和失调电流也会影响精度。请查阅数据手册，确定放大器是否满足电路要求。可以使用 Multisim 进行仿真，了解这些规格对精度产生的影响。集成差动放大器具有较低的失调电压、失调电压漂移、增益误差和增益漂移，可以经济高效地实现精确稳定的电流源。

参考文献

Guo, David. [Low-Power, Unity-Gain Difference Amplifier Implements Low-Cost Current Source](#), *Analog Dialogue*, Volume 45, Number 2, 2011.

Loe, James M. [Grounded-load current source uses one operational amplifier](#), *Analog Dialogue*, Volume 1, Number 3, 1967.

Miller, Bill. [Single Amplifier Current Sources](#), *Analog Dialogue*, Volume 1, Number 1, 1967.

Moghimi, Reza. [Ways to Optimize the Performance of a Difference Amplifier](#), AN-589.

Zhao, Neil, Reem Malik, and Wenshuai Liao. [Difference Amplifier Forms Heart of Precision Current Source](#), *Analog Dialogue*, Volume 43, Number 3, 2009.

作者简介

David Guo [david.guo@analog.com]是 ADI 公司位于北京的中国应用支持部门的一名现场应用工程师。获得北京理工大学机电工程硕士学位后，他在长峰集团工作过两年，担任导航终端硬件工程师。他于 2007 年加入 ADI 公司。

