

Ignacio Vazquez Lam

**摘要**

改进型 Howland 电流泵是这样的一种电路：该电路使用差分放大器在并联电阻器上施加电压，从而产生能够驱动大范围负载电阻的压控电流源。很多应用要求电流源能够支持双极性（拉电流或灌电流）操作，在这些应用中，该设计的这种多功能性非常有用。这种多功能性体现在能够对设计进行小幅调整，从而改善电路的整体性能。本文将分析一些经过改进的 Howland 电流泵配置，并提供有关如何提高其性能的建议。

这些设计的一个共同目标是打造一个高输出阻抗电流源，该电流源既要能提供约 25mA 的拉电流或灌电流，又要采用改进型 Howland 电流泵拓扑。本文对四种不同的配置进行了分析，并讨论了每种配置的一些优缺点。根据设计要求，对于特定应用，某种配置可能更加适合，优于另一种。在改进型 Howland 电流泵电路中驱动无功负载时，请采取预防措施。另外，一些负载会导致电路因为相位裕度不足而变得不稳定。本文仅讨论电阻负载。

**内容**

1 分立式改进型 Howland 电流泵 - 设计 1.....	2
2 具有缓冲器的分立式改进型 Howland 电流泵 - 设计 2.....	4
3 集成式改进型 Howland 电流泵 - INA592 和缓冲器 - 设计 3.....	6
4 集成式改进型 Howland 电流泵 - INA592 和可设置增益 - 设计 4.....	7
5 设计需求和注意事项.....	8
6 运算放大器注意事项.....	9
7 参考文献.....	9
8 修订历史记录.....	9

**插图清单**

图 1-1. 分立式改进型 Howland 电流泵.....	2
图 1-2. 理想的 10mA 改进型 Howland 电流泵.....	2
图 2-1. 具有缓冲器的分立式改进型 Howland 电流泵.....	4
图 2-2. 具有缓冲器的理想 10mA 改进型 Howland 电流泵.....	5
图 3-1. 具有 INA592 和缓冲器的集成式改进型 Howland 电流泵.....	6
图 4-1. 具有 INA592 和可设置增益的集成式改进型 Howland 电流泵.....	7

**表格清单**

表 5-1. 设计 1-4 比较表.....	8
表 6-1. 运算放大器注意事项.....	9
表 6-2. 集成式差分放大器注意事项.....	9

**商标**

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 分立式改进型 Howland 电流泵 - 设计 1

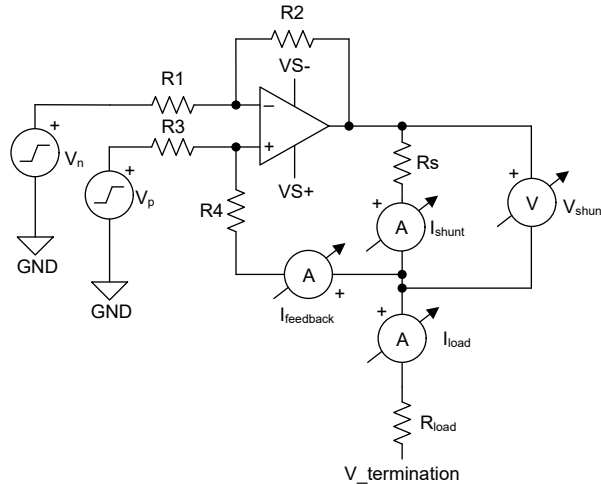


图 1-1. 分立式改进型 Howland 电流泵

图 1-1 展示了改进型 Howland 电流泵的基本配置，其中使用了一个运算放大器、五个分立式电阻器和一个电阻负载  $R_{load}$ 。流经负载的电流 ( $I_{load}$ ) 可以通过方程式 1 计算得出。

$$I_{load} (A) = \frac{G \times (V_p - V_n)}{R_s} \quad (1)$$

$$G(V/V) = \frac{R_2}{R_1}, \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4 + R_s}{R_3} \quad (2)$$

在理想的改进型 Howland 电流泵中，电阻器  $R_4$  有时设为等于  $R_2 - R_s$ ，这会稍稍改变正环路中的反馈，从而产生预期的电流值。考虑到可供选择的标准电阻器值及其容差，此设计的实用性有限。如需更加详细地了解改进型 Howland 电流泵理想设计的功能，可访问参考文献一节中提供的链接。图 1-2 展示了设计 1 的示例，以及使用经修改的  $R_4$  电阻器时对应的结果。该电流专为采用理想器件（通过 5V 输入电压差提供 10mA 输出电流）而设计。

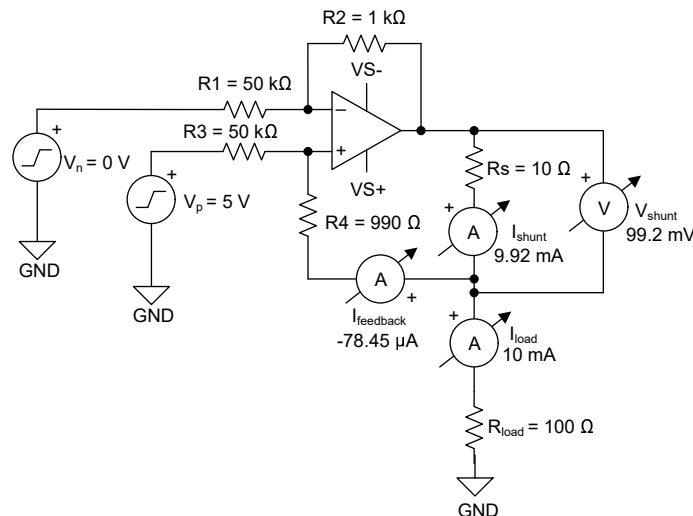


图 1-2. 理想的 10mA 改进型 Howland 电流泵

**优势：**该配置的一项优势是，能够自由地选择增益值 ( $G$ ) 并最终设计为通过改变  $V_{shunt}$  电压来提供输出裕量 (最大输出电压摆幅或依从范围)。这是因为该电路中的所有电阻器都是以分立形式选择的。另一项优势是能够根据应用的具体设计要求 (例如尺寸、功率和电源电压) 来选择适当的运算放大器。该设计的最后一项优势是只需一个运算放大器。

**劣势：**该配置的一个缺点是  $I_{feedback}$  电流会影响  $I_{load}$  电流而产生误差。理想的电流源具有无穷大的输出阻抗；不过，该配置输出阻抗有限，由两个串联的反馈电阻器 ( $R3+R4$ ) 确定。这会导致  $I_{load}$  中存在显著的误差，当设计中不使用经修改的  $R4$  电阻器时，该误差会更为明显。

为了更大限度地减少  $I_{feedback}$  导致的误差，应当为反馈路径选择值更大的电阻器，而这将导致电流源的输出阻抗增加。这样的代价是更大的电阻器值会导致更多的热噪声。大电阻和电路中的寄生电容可能导致的带宽限制和稳定性问题也会变得更为普遍。若要详细了解噪声和稳定性，可以访问[参考文献](#)一节中提供的 TI 高精度实验室系列视频链接。

该配置的另一个缺点来自于反馈网络中以分立形式选择的电阻器。使用具有 0.1% 容差的电阻器进行分立构建的情况最差，对应的  $CMRR$  值约为 60dB，这对于精密应用来说过低。有关匹配电阻器重要性的更多信息，可以访问[参考文献](#)一节中提供的链接。这种电阻器不匹配还会在设计中导致增益误差，进而增加总体误差。对于该配置的分立式版本，最后一个注意事项是考虑差分放大器使用外部电阻器时所需的 PC 板空间。

## 2 具有缓冲器的分立式改进型 Howland 电流泵 - 设计 2

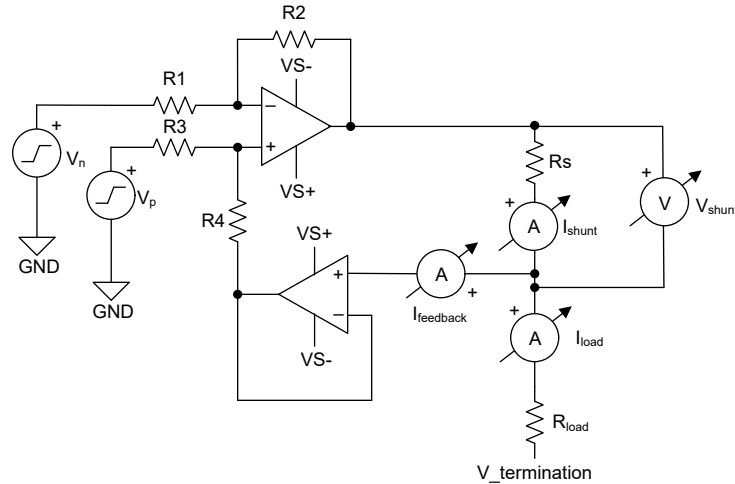


图 2-1. 具有缓冲器的分立式改进型 Howland 电流泵

图 2-1 显示了一种类似的配置——一种采用两个运算放大器的改进型 Howland 电流泵。缓冲器具有高输入阻抗，这会将高输出阻抗引入电流源。请注意，添加缓冲器后，电路设计人员不应再根据  $R_s$  的值修改  $R_4$ 。 $I_{load}$  现在可以通过下文提供的方程式 3 计算得出。

$$I_{load} (A) = \frac{G \times (V_p - V_n)}{R_s} \quad (3)$$

$$G(V/V) = \frac{R_2}{R_1}, \quad (R_1 = R_3, R_2 = R_4) \quad (4)$$

**优势：**该配置与分立式改进型 Howland 电流泵 - 设计 1 中所示的无缓冲配置具备同样的优势；不过，它还增添了一项优势，那就是添加缓冲器后实际上可以消除  $I_{feedback}$  电流，从而更大幅度地减少误差。因此，第二个运算放大器使得能够为反馈网络选择值更小的电阻器。这让电路设计人员可以更大幅度地减少高阻值电阻器造成的热噪声，同时还能更大幅度地减少电路中的任何稳定性和带宽问题。

图 2-2 展示了相同的 10mA 电流源；缓冲器实际上消除了  $I_{\text{feedback}}$  电流。

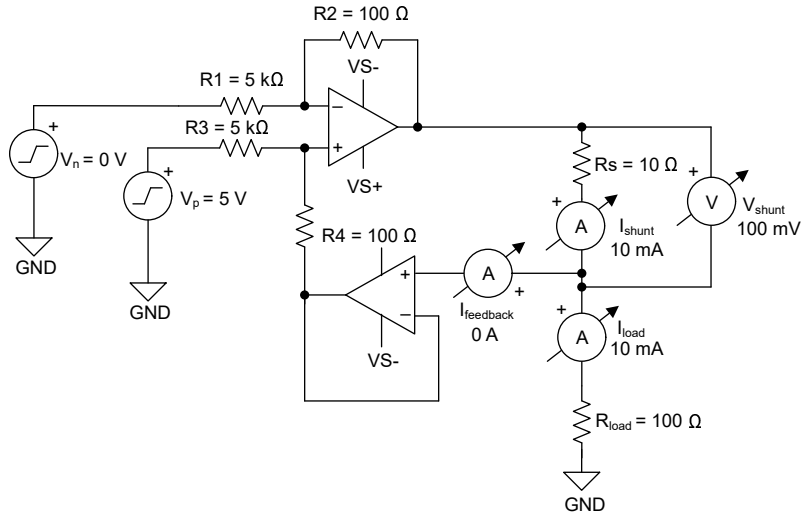


图 2-2. 具有缓冲器的理想 10mA 改进型 Howland 电流泵

**劣势：**与具有一个运算放大器的设计相似，该配置存在一个由不匹配的分立式电阻器带来的缺点。由于增加了一个运算放大器，电路的整体尺寸有所增加；对于空间受限的设计，这可能是一个缺点。幸运的是，很多精密运算放大器都提供双通道配置，这几乎不会导致电路尺寸或成本增加。

### 3 集成式改进型 Howland 电流泵 - INA592 和缓冲器 - 设计 3

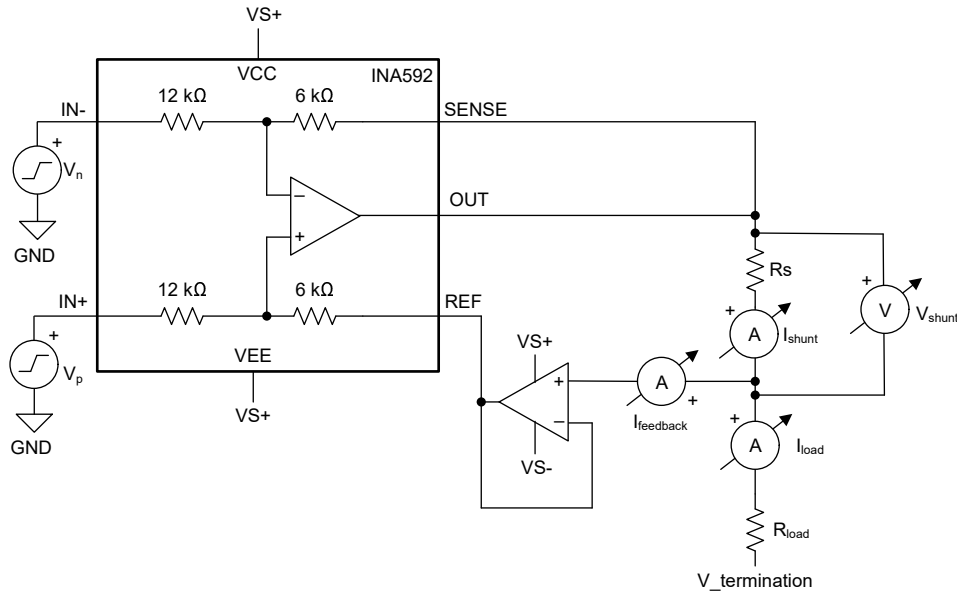


图 3-1. 具有 INA592 和缓冲器的集成式改进型 Howland 电流泵

图 3-1 展示了具有缓冲器的分立式改进型 Howland 电流泵 - 设计 2 的集成度更高的版本，在一个封装中集成了差分放大器配置。对于高达  $\pm 25$  mA 的设计对象，INA592 会是一个适合集成设计的不错选择。该器件的高性能可归因于核心 OPA192 精密运算放大器和精密匹配的薄膜电阻器全都集成到单个芯片上。负载电流可以通过方程式 3 准确地计算得出；不过，集成电阻器使得  $G$  固定为  $1/2V/V$  或  $2V/V$ 。改进型 Howland 电流泵电路通常采用不到  $1V/V$  的增益，因此更可能使用  $1/2(V/V)$  的增益。

**优势：**使用集成式改进型 Howland 电流泵 - INA592 和缓冲器 - 设计 3 的优势是它能够更大幅度地减少分立式设计中存在的很多误差源。缓冲器会产生高输出阻抗，而这实际上会消除  $I_{\text{feedback}}$  电流。集成式电阻器几乎消除了不匹配的电阻器在之前导致的误差。这使得该器件具有 100 dB 的典型 CMRR 值和 0.01% 的典型增益误差，足以用于高精度应用。如果购买该性能水平的分立式精密匹配电阻器，费用会非常昂贵。考虑到 INA592 的价格与其他不包含这四个高精度电阻器的高性能运算放大器相当，仅分立式电阻器就很容易使成本远超 INA592 本身。

12k $\Omega$  和 6k $\Omega$  集成式电阻器还使热噪声保持在相对较低的水平。这还能更大幅度地减少可能的带宽限制和稳定性问题。该集成式设计的另一项优势是电路的尺寸。INA592 提供 3mm  $\times$  3mm VSSOP 封装，远远小于搭配四个分立式电阻器使用的大多数分立式运算放大器。

对于精密应用，可以轻松看到采用 INA592 等集成式配置的优势。对于精度较低的应用或在充分执行校准的情况下，精度较低的运算放大器和容差更大的外部电阻器可能就能够满足所需的性能规格。

**劣势：**由于采用集成式电阻器，该集成式差分放大器的增益值是固定的。就 INA592 而言，增益值为  $1/2V/V$  或  $2V/V$ 。通过更改  $R_s$ ，可以改变流经负载的电流；不过，对于相同的输入电压差，固定的增益会限制  $V_{\text{shunt}}$  可能具有的值范围。由于设计中的输出裕量受限，这会导致在采用低电源电压或大负载电阻器的电路中产生限制。

## 4 集成式改进型 Howland 电流泵 - INA592 和可设置增益 - 设计 4

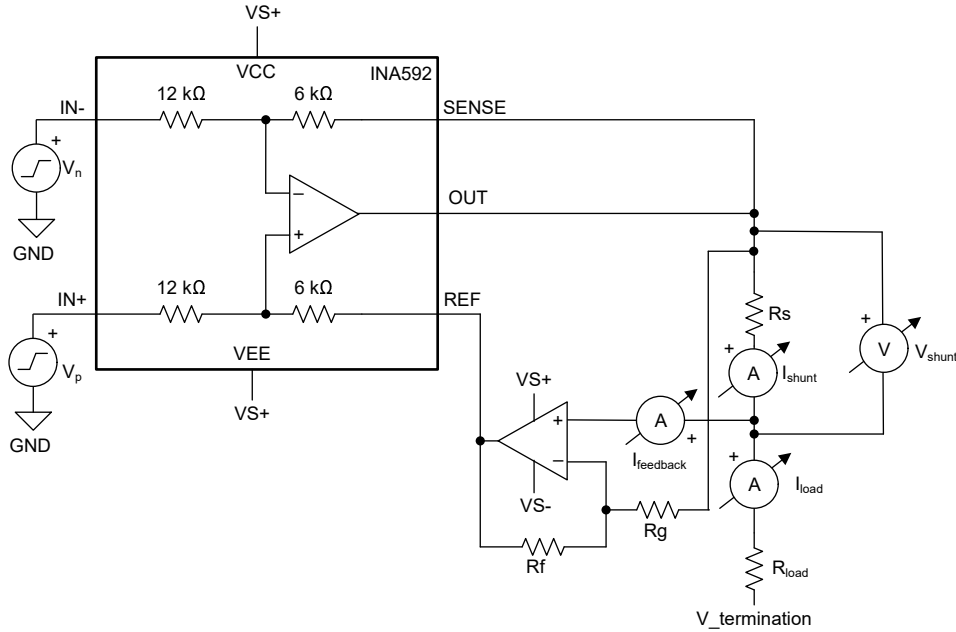


图 4-1. 具有 INA592 和可设置增益的集成式改进型 Howland 电流泵

图 4-1 显示了与集成式改进型 Howland 电流泵 - INA592 和缓冲器 - 设计 3 中相同的改进型 Howland 电流泵集成式设计；唯一的区别是，与缓冲器配置中的单位增益相比，反馈运算放大器具有可设置的增益。该增益配置使设计人员能够通过设计在相同的输入电压差条件下实现不同的  $V_{shunt}$  值，而这在集成式改进型 Howland 电流泵 - INA592 和缓冲器 - 设计 3 中会受到限制。 $I_{load}$  现在可以通过方程式 5 计算得出。

$$I_{load} (A) = \frac{G \times (V_p - V_n)}{R_s \times \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right)} \quad (5)$$

$$G(V/V) = \frac{1}{2} \text{ or } 2 \quad (6)$$

**优势：**该配置的优势与集成式改进型 Howland 电流泵 - INA592 和缓冲器 - 设计 3 中相同；另外，还有一项额外的优势是能够像上文讨论的那样改变  $V_{shunt}$  电压。由于能够调节分流电阻器上的电压，电路设计人员能够更加自由地设置电路的输出裕量，同时仍能从 INA592 的精密性和高性能中获益。

**劣势：**该配置的一个缺点可能在于电路的尺寸，因为设计中采用了两个运算放大器和两个外部电阻器。这还会导致设计的复杂程度要略高于前面的三种配置。外部电阻器 ( $R_f$ 、 $R_g$ ) 无法达到理想效果，因此预计会产生增益误差，而该误差会影响电路的电流精度。

## 5 设计需求和注意事项

通过实现改进型 Howland 电流泵拓扑，很容易满足简单压控电流源的需求，并且就像前文中讨论过的，由于其多功能性，有很多选项可供选择。在设计特定应用时，需要考虑很多参数。在全部四种配置中，任何运算放大器和电阻器的非理想特性都是设计中固有的误差源。关于运算放大器，应考虑的一个非理想特性是失调电压。这种非理想特性对改进型 Howland 电流泵电路的最终性能会产生巨大影响。采用具有超低失调电压 (<100 $\mu$ V) 的精密运算放大器，可以显著减少电路造成的误差。失调电压信息包含在运算放大器数据表的 *电气特性* 表中。

在运算放大器方面，应考虑另一个非理想特性是输出电流变化时的输出电压摆幅限制。在考虑输出裕量性能时，请参阅运算放大器数据表中 *输出电压摆幅与输出电流之间的关系* 图表中提供的典型值。这样就不会遗漏输出摆幅限制。还必须考虑类似的注意事项，确保不会超出运算放大器的共模输入电压范围。对于设计 2 至 4，请考虑两个运算放大器的输入和输出摆幅限制。这些输入和输出限制会影响电流源的整体电压依从性。

正如文中通篇所述，每种设计都有缺点，根据某种应用的具体设计目标，一种设计可能要优于另一种。如果要缩小所选设计的范围，应首先考虑放大器的电源电压、输出阻抗、电阻器导致的热噪声、运算放大器、设计输出裕量的自由度以及总体精度等参数。

在选择要实现的设计和运算放大器的精度水平时，可以使用表 5-1 作为着手点。在一些情况下，使用 OPA310、OPA2310、OPA990 或 OPA2990 等通用运算放大器便足以实现具体的设计目标，而不必使用 OPA192 或 OPA2192 等精度更高的运算放大器。

表 5-1. 设计 1-4 比较表

设计	放大器	器件电源电压	输出阻抗	热噪声	裕量设计	精度
1.A	OPA310 运算放大器	1.5V 至 5.5V	R3+R4	不确定	最好	好
1.B	OPA990 运算放大器	2.7 V 至 40 V	R3+R4	不确定	最好	好
1.C	OPA192 运算放大器	4.5V 至 36V	R3+R4	不确定	最好	较好
2.A	OPA2310 运算放大器	1.5V 至 5.5V	高	中等	最好	较好
2.B	OPA2990 运算放大器	2.7 V 至 40 V	高	中等	最好	较好
2.C	OPA2192 运算放大器	4.5V 至 36V	高	低	最好	较好
3.A	具有 OPA990 缓冲器的 INA592	4.5V 至 36V	高	中等	正常	最好
3.B	具有 OPA192 缓冲器的 INA592	4.5V 至 36V	高	低	正常	最好
4.A	具有 OPA990 反馈运算放大器的 INA592	4.5V 至 36V	高	中等	最好	较好
4.B	具有 OPA192 反馈运算放大器的 INA592	4.5V 至 36V	高	低	最好	最好

要选择所用的配置，应考虑系统的误差、成本和尺寸预算。另外，还应考虑各种设计规格，例如特定设计中要流经负载的电流、输出裕量以及电压限制。



## 6 运算放大器注意事项

表 6-1 列出了运算放大器的注意事项。表 6-2 详细介绍了集成差分放大器的注意事项。

**表 6-1. 运算放大器注意事项**

器件型号	规格
OPA310 高输出电流运算放大器 ( 1.5V 至 5.5V )	轨至轨输入和输出 (RRIO), 5.5V 时的输出短路电流为 $\pm 150\text{mA}$ , $\pm 250\mu\text{V}$ 失调电压 ( 最大值 $\pm 1.3\text{mV}$ ), 1kHz 时低噪声, $16\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
OPA192 精密运算放大器	RRIO, 低失调电压, $\pm 5\mu\text{V}$ ( 最大值 $\pm 25\mu\text{V}$ ), 1kHz 时低噪声, $5.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
OPA191 精密低功耗运算放大器	RRIO, 低失调电压, $\pm 5\mu\text{V}$ ( 最大值 $\pm 25\mu\text{V}$ ), 1kHz 时低噪声, $15\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
OPA197 精密运算放大器 ( 适用于成本优化设计 )	RRIO, 低失调电压, $\pm 25\mu\text{V}$ ( 最大值 $\pm 100\mu\text{V}$ ), 1kHz 时低噪声, $5.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
OPA196 精密低功耗运算放大器 ( 适用于成本优化设计 )	RRIO, 低失调电压, $\pm 25\mu\text{V}$ ( 最大值 $\pm 100\mu\text{V}$ ), 1kHz 时低噪声, $15\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
OPA990 通用运算放大器	RRIO, $\pm 300\mu\text{V}$ 失调电压 ( 最大值 $\pm 1.5\text{mV}$ ), 1kHz 时低噪声, $30\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

**表 6-2. 集成式差分放大器注意事项**

器件型号	规格
INA592 精密运算放大器	RRIO, 低失调电压, $\pm 14\mu\text{V}$ ( 最大值 $\pm 40\mu\text{V}$ ), 1kHz 时低噪声, $18\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ( $G = 1/2$ )
INA597 精密运算放大器 ( 适用于成本优化设计 )	RRIO, 低失调电压, $\pm 14\mu\text{V}$ ( 最大值 $\pm 200\mu\text{V}$ ), 1kHz 时低噪声, $18\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ( $G = 1/2$ )
INA1620 具有集成精密电阻器的运算放大器	$\pm 100\mu\text{V}$ 失调电压 ( 最大值 $\pm 1\text{mV}$ )、1kHz 时超低噪声, $2.8/\sqrt{\text{Hz}}$

## 7 参考文献

- 德州仪器 (TI), [AN-1515 Howland 电流泵的综合研究](#)
- 德州仪器 (TI), [使用并行放大器获得更高的输出功率：一种改进的 Howland 泵方法](#)
- 德州仪器 (TI), TI 高精度实验室噪声系列视频：[8-1 TI 高精度实验室 - 运算放大器：噪声 - 频谱密度](#)
- 德州仪器 (TI), TI 高精度实验室稳定性系列视频：[10.1 TI 高精度实验室 - 运算放大器：稳定性 - 引言](#)
- 德州仪器 (TI), 匹配差分放大器电阻器的重要性：[差分放大器 - 对匹配良好的电阻器的需求](#)

## 8 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 * (October 2020) to Revision A (February 2023)	Page
• 在第 5 节和第 6 节中添加了对 OPA310 和 OPA2310 的引用.....	9
• 添加了参考文献： <a href="#">使用并行放大器获得更高的输出功率：一种改进的 Howland 泵方法</a> .....	9

## 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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司