

对增益大于等于 10 时保持稳定的放大器进行补偿以在较低增益下工作

作者：Charly El-Khoury

本文说明如何补偿一个增益为 9 倍以上时通常保持稳定的放大器（如 [ADA4895-2](#)），以使其在增益低至 2 时工作，提供比等效内部补偿放大器更高的压摆率和更快的建立时间。本文将提出两种方法并突出每种电路的优缺点。

ADA4895-2 与 [ADA4896-2](#)、[ADA4897-1](#) 和 [ADA4897-2](#) 同属一个系列，是一款双通道、低噪声、高速、电压反馈、轨到轨输出型放大器。它在增益为 10 时可保持稳定，增益带宽积为 1.5GHz，压摆率为 940 V/ μ s，0.1%建立时间为 26 ns，10 Hz 时 1/ θ 噪声为 2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ，宽带噪声为 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ，2 MHz 时无杂散动态范围为 -72 dBc。这款器件采用 3 V 至 10 V 电源供电，每个放大器的静态功耗为 3 mA。

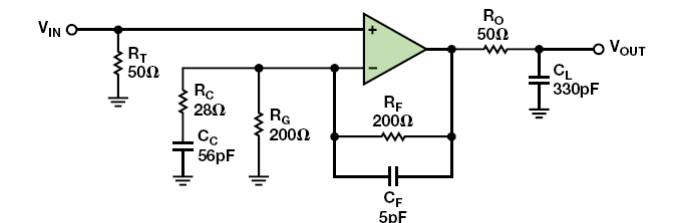


图 1. 方法 1：补偿 ADA4895-2 实现增益为+2 时保持稳定

方法 1 如图 1 所示，在反相输入端增加一个简单的 RC 电路（ $R_C = 28\ \Omega$ 且 $C_C = 56\ \text{pF}$ ），且反馈电阻并联一个反馈电容（ $C_F = 5\ \text{pF}$ ）。该电路在高频时的噪声增益为 +9，在谐振频率（ $1/2\pi R_C C_C = 100\ \text{MHz}$ ）以下的频率时噪声增益为 +2。虽然高频时的噪声增益接近 +9，但只要由 R_O 和 C_L 构成的低通滤波器能够阻隔高频成分，总输出噪声就能保持在低水平。这种情况下，放大器可以在增益为 +2 时工作，而总输出噪声则非常低（ $3.9\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ）。

可以扩展这种配置以支持 +2 到 +9 之间的任何增益。表 1 显示了各种增益设置的元件值和总宽带输出噪声。

表 1. 用于增益低于+10 的元件值， $R_T = R_O = 49.9\ \Omega$						
增益	$R_C\ (\Omega)$	$C_C\ (\text{pF})$	$R_G\ (\Omega)$	$R_F\ (\Omega)$	$C_L\ (\text{pF})$	总输出噪声 ¹ ($\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)
+2	28.6	56	200	200	330	3.88
+3	33.3	56	100	200	270	5.24
+4	40	56	66.7	200	200	6.60
+5	50	56	50	200	150	7.96
+6	66.7	40	40	200	150	9.32
+7	113	30	37.5	226	120	10.82
+8	225	20	32.1	226	120	12.18
+9	N/A	N/A	31.1	249	100	13.67

¹完整的总噪声公式见下文。

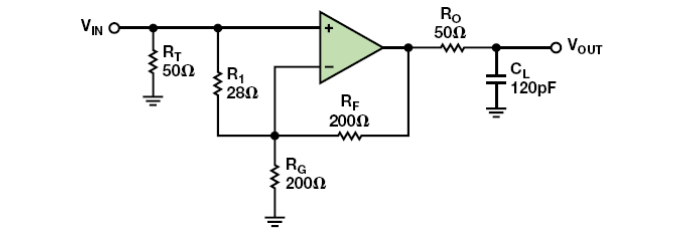


图 2. 方法 2：补偿 ADA4895-2 实现增益为+2 时保持稳定

方法 2 如图 2 所示，在反相输入端与同相输入端之间增加一个电阻（ $R_I = 28\ \Omega$ ），将放大器的噪声增益提高到 +9。 R_I 上无电压，因而无电流通过其中。因此， R_I 与同相输入端并联所得的输入阻抗仍然非常高。输入至输出信号增益等于 $1 + R_F/R_G$ ，本例中即为 +2。补偿电路未使用电容，因而不存在频率依赖性。这意味着，与第一种方法相比，低频时的宽带输出噪声始终较高。

可以扩展这种配置以支持 +2 到 +9 之间的任何增益。表 2 显示了各种增益设置的元件值和总宽带输出噪声。

表 2. 用于增益低于+10 的元件值， $R_T = R_O = 49.9\ \Omega$ ， $C_L = 120\ \text{pF}$				
增益	$R_I\ (\Omega)$	$R_G\ (\Omega)$	$R_F\ (\Omega)$	总输出噪声 ¹ ($\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)
+2	28.6	200	200	13.39
+3	33.3	100	200	13.39
+4	40	66.5	200	13.39
+5	49.9	49.9	200	13.39
+6	66.5	40	200	13.39
+7	113	37.4	226	13.53
+8	225	32.4	226	13.53
+9	N/A	30.9	249	13.67

¹完整的总噪声公式见下文。

图 3 显示了图 1 和图 2 所示电路的小信号和大信号频率响应，采用 50 Ω 分析仪， $G = +5\ \text{V/V}$ 或 14 dB。如图所示，两个电路均非常稳定，峰化略高于 1 dB。只要使用表 1 和表 2 中的值，增益范围在 +2 至 +9 时均可保持稳定。

为降低总输出噪声，可以调整输出端的低通 RC 滤波器以将此电路的带宽降至 50 MHz 或更低，具体取决于应用。

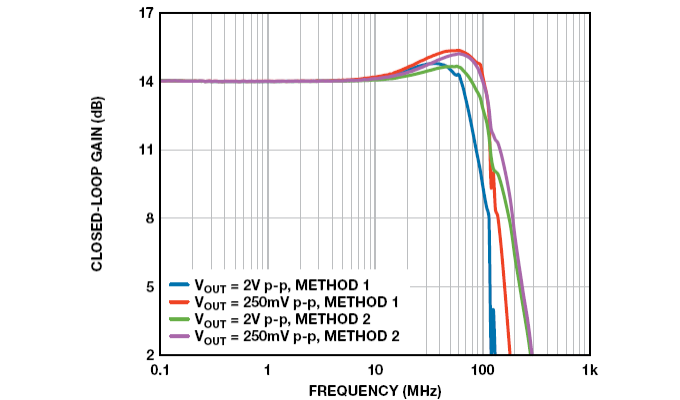


图 3. $G = +5$ 时的频率响应

方法 1 的公式：总输出噪声=

$$\sqrt{\left(\sqrt{4KTR_T} \times \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)\right)^2 + \left(e_n \times \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)\right)^2 + \left(i_n \times 10^{-3} \times R_T \times \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)\right)^2 + \left(\sqrt{4KTR_G} \times \left(\frac{R_F}{R_G}\right)\right)^2 + \left(i_n \times 10^{-3} \times R_F\right)^2 + \left(\sqrt{4KTR_F}\right)^2 + \left(\sqrt{4KTR_O}\right)^2}$$

方法 2 的公式：总输出噪声=

$$\sqrt{\left(\sqrt{4KTR_T} \times \left(1 + \frac{R_F}{R_E}\right)\right)^2 + \left(e_n \times \left(1 + \frac{R_F}{R_E}\right)\right)^2 + \left(i_n \times 10^{-3} \times R_T \times \left(1 + \frac{R_F}{R_E}\right)\right)^2 + \left(\sqrt{4KTR_E} \times \left(\frac{R_F}{R_E}\right)\right)^2 + \left(i_n \times 10^{-3} \times R_F\right)^2 + \left(\sqrt{4KTR_F}\right)^2 + \left(\sqrt{4KTR_O}\right)^2}$$

为什么方法 1 中的输出噪声优于方法 2 中的输出噪声？

方法 1 中的输出噪声远低于方法 2，尤其是在增益低于+7 时，这是因为方法 1 中的噪声增益仅在高频时较高。高频时，可以利用低通滤波器来消除高频噪声成分。但在方法 2 中，放大器始终在噪声增益为+9 时工作，即便在低频时亦如此。因此，总输出噪声不随增益而变化，如表 2 所示。下面是这两种方法对应的公式（注意： $R_E = R_G/R_1$ ）。

每种方法的优缺点

我们给出了两种不同的方法，说明如何利用若干外部元件来使高增益稳定型放大器能在低增益下稳定地工作。与方法 2 相比，方法 1 采用了更多的无源元件，因而可能会占用更多的电路板空间，成本更高。作为回报，第一种电路的总输出噪声低于第二种电路。因此，选择何种电路取决于具体应用及其要求的规格。

如图 4 所示，与增益大于等于+1 时保持稳定的内部补偿放大器 ADA4897-2 相比，去补偿的 ADA4895-2 提供更高的压摆率（300 V/μs 对 100 V/μs）和更快的建立时间。随着电路增益提高，这些优势还会扩大。

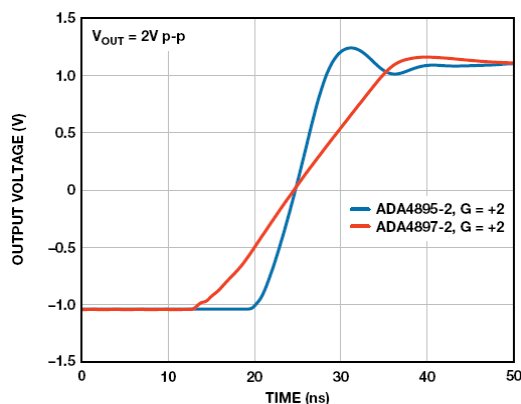


图 4. G = +2 时对比补偿与去补偿放大器

结论

ADA4895-2 去补偿放大器在增益大于 9 时保持稳定，可以通过补偿来实现低增益工作。本文提出的两种方法通过提高复杂度来降低总宽带噪声。与增益大于等于 +1 时保持稳定的内部补偿放大器 ADA4897-2 相比，两种方法均能提供更高的压摆率和更快的建立时间。

作者简介

Charly El-Khoury [charly.el-khoury@analog.com]
高速放大器部门的应用工程师。他于 2006 年毕业于伍斯特理工学院(WPI), 获得电气与计算机工程(ECE)硕士学位，之后加入 ADI 公司。

