

分立式与集成式差分放大器对比

Esteban Garcia

Product marketing engineer

Jacob Nogaj

Applications engineer

利用运算放大器（运放）和电阻器网络，可以构建多种实用电路，差分放大器 (DA) 便是其中之一。借助 DA，可以测量两个信号之间的差值，这对于太阳能电池板、移动电源和其他 DC/DC 模块等系统中的电流和电压检测非常有用。此外，许多 DA 可以施加增益，向信号添加基准电压，以及抑制输入信号产生的共模噪声。

DA 主要有两种类型：分立式（使用外部电阻器）和集成式（使用单片或片上电阻器）。本文将通过实测数据（包括偏移电压、共模抑制比 [CMRR]、增益误差及增益误差温漂）对这两种 DA 实施方案进行对比分析。

增益误差

如图 1 所示，典型的 DA 由一个运算放大器和四个电阻器组成。R1/R2 电阻梯的中点连接到运放的反相端子，而 R3/R4 的中点连接到同相端子。GND

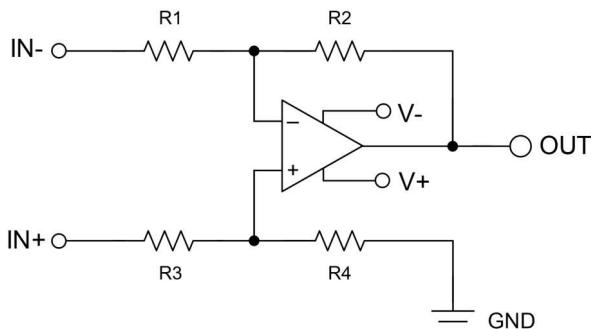


图 1. 一种典型 DA

公式 1 描述了一种典型 DA 的传递函数。请注意，R2 和 R1 的比率（假设 $R1 = R3$ 、 $R2 = R4$ ）决定了增益。如果要尝试实现低增益误差，则需要匹配电阻器。容差为 $\pm 1\%$ 的电阻器可能会产生高达 2% 的增益误差。分立式电阻器的性能表现可能存在较大差异，而集成式 DA 中的单片电阻器通常经过修整，可实现低至 0.01% 的增益误差。

$$V_{\text{OUT}} = (V_{\text{IN+}} - V_{\text{IN-}}) \times \left(\frac{R2}{R1} \right) + V_{\text{REF}} \quad (1)$$

增益误差漂移

增益漂移是另一个重要参数，尤其是在一天中或整个运行过程中温度可能会波动的系统中，例如太阳能电池板、电机驱动器和电池组等。由于 TI INA600 DA 的薄膜电阻器都集成与同一封装内并相互交错，所有四个电阻器都会感知到温度波动，进而会在保持相同增益比的同时产生漂移。在采用外部电阻器的分立式实施方案中，DA 的增益漂移性能可能存在很大差异，因为温度产生的应力会在电路板表面形成梯度分布，进而导致输入信号上施加的增益发生变化。

失调电压

对输入信号施加增益时，偏移电压的大小会显著影响输出信号上引入的误差量。因此，我们建议在电压或电流检测应用中优先选择具有出色偏移电压的运放。在构建分立式 DA 时，您可以灵活选用任何可用的运放作为设计核心；而集成式 DA 的偏置电压则是固定的，且取决于内部运放。不过，借助诸如 e-Trim™ 运算放大器技术等电阻器修整方法，可以降低集成式 DA 的偏置电压。

CMRR

对于电压和电流检测应用，在考虑 DA 时，抑制共模信号的能力是一个主要考虑因素。与增益误差类似，CMRR 将取决于所使用元件（例如电阻器）的匹配情况。虽然典型运放的 CMRR 可能高达 100dB，但引入失配电阻器可能使 CMRR 骤降至 60dB，因此它们不太适合嘈杂环境中的工业系统。典型集成式 DA 的 CMRR 通常保持在 90dB 以上，最高可达 130dB。

支持超电源轨电压监测的增益配置

DA 通常采用单位增益配置（意味着增益 = 1），但增益可以在 0.5 至 2 之间变化。通过更改 DA 中电阻器网络的值，可以针对需要更大衰减来将电压降至 ADC 输入范围（3.3V 或 5V）的不同应用实现宽范围的增益比。如图 2 所示，更改电阻器网络值可实现更大的衰减。

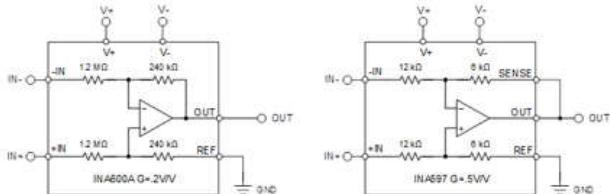


图 2. INA600A DA 与 INA597 DA 的比较

DA 的一个被忽略的优势是能够让输入超出电源轨范围。电阻梯会对 DA 的输入电压进行分压，因此集成放大器收到的输入仅是衰减后的电压。使用标准运放时，电源电压会限制共模电压范围。DA 的这种灵活性使其适用于在可用电源轨数量有限时监测更高的电压。如图 3 所示，输入电压范围扩展到了 DA 的建议电源电压范围以外。

6.3 Recommended Operating Conditions over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)			
	MIN	MAX	
Supply voltage $V_S = (V_+) - (V_-)$	Single-supply	2.7	40
	Dual-supply	± 1.35	± 20
Input voltage range	Single-supply / Dual-supply	$(V_-) - 40$	$(V_-) + 85$
C_{BYP}	Bypass capacitor on the power supply pins (1)	0.1	μF
Specified temperature	Specified temperature	-40	125

图 3. INA600 DA 的建议运行条件

在功率密度较高的系统中，开关频率提升和印刷电路板布线引起的寄生电感增加可能会导致额外的电压扰动，进而影响电压监测精度，因为共模噪声无法完全消除。虽然采用高 CMRR 的集成式 DA 将消除在输入端观察到的任何共模噪声，但考虑到电阻器的轻微失配（尤其是在增益比较高时），很难通过分立式 DA 中的外部电阻器实现高 CMRR。

公式 2 表示寄生电感和开关频率对信号的电压扰动量的影响：

$$V = L \times \frac{di}{dt} \quad (2)$$

图 4 展示了集成式 DA 的 CMRR 随频率变化的性能。

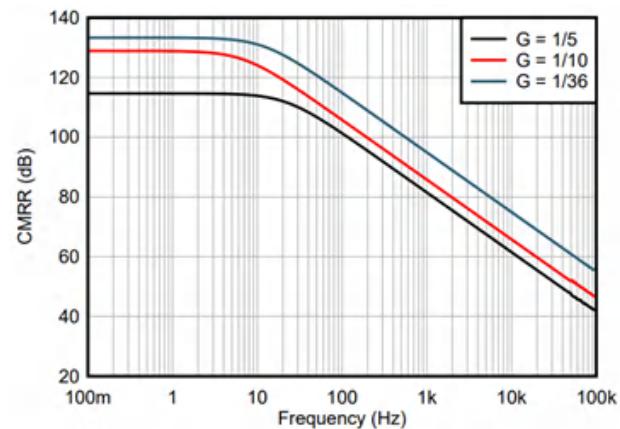


图 4. INA600 DA 的输出参考 CMRR 与频率间的关系

测试设置与对比

我们使用了 CMRR 和偏移电压误差作为衡量各电路在不同温度下的性能表现的指标。对于每个器件，我们将一个精密源测量单元连接到 DA 的两个输入引脚，并使用经过校准的 8.5 位数字万用表测量偏移电压变化。所有测试均经过五次扫描并取平均值，以精确反映器件性能。测试配置为：共模电压扫描范围 -35V 至 35V，采用 $\pm 18\text{V}$ 双电源配置。我们使用烘箱进行了过热测试，并留出足够的浸泡时间，以确保整个测试板的温度一致。

通过在器件输入端施加差分电压，并将共模电压保持在中点值，可同步测试增益误差与增益误差漂移。使用相应的输入范围扫描每个器件，强制其输出介于 -10V 至 +10V 之间，这样就可以比较实际斜率与理想斜率，从而评估增益误差的百分比。

表 1 比较了在不同工作温度下分立式 DA 和两个 TI 集成式 DA 的 CMRR 性能和偏移。

温度 (°C)	分立式 DA		INA600		INA597	
	CMRR (dB)	偏移电压 (μV)	CMRR (dB)	偏移电压 (μV)	CMRR (dB)	偏移电压 (μV)
125	73.06	-237.88	98.33	801.82	102.66	-26.12
85	71.89	-285.95	100.12	661.56	103.70	-10.22
25	70.35	-221.42	101.63	582.19	100.33	-3.24
-40	73.26	-206.95	106.82	500.60	105.97	13.4

表 1. CMRR 和偏移电压比较

表 2 比较了相同的分立式 DA 和集成式 DA 在不同工作温度下的增益误差和漂移性能。

	分立式 DA		INA600		INA597	
温度 (°C)	增益误差 (%)	增益误差漂移	增益误差 (%)	增益误差漂移	增益误差 (%)	增益误差漂移
125	0.14806	-237.88	98.33	801.82	102.66	-26.12
85	71.89	-285.95	100.12	661.56	103.70	-10.22
25	70.35	-221.42	101.63	582.19	100.33	-3.24
-40	73.26	-206.95	106.82	500.60	105.97	13.4

表2. 增益误差和漂移比较

正如预期的那样，与分立式 DA 相比，集成式 DA 在实现高 CMRR、低增益误差和低增益误差漂移方面表现尤为出色。虽然分立式 DA 的偏移电压性能优于其中一个集成式 DA，但可以通过软件校准对此进行补偿。

图 5 显示了三种 DA 型号各自的简化布局，并比较了每种解决方案的尺寸。出于比较目的，我们使用了最小的器件封装，以及采用 0402 封装的电阻器和电容器。

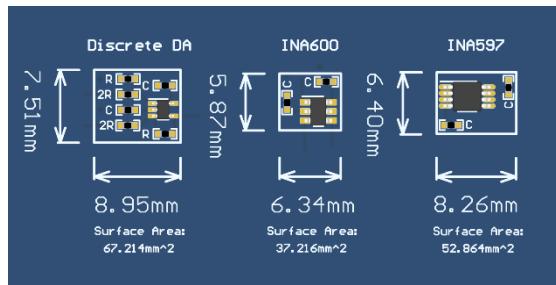


图5. 尺寸比较

结语

虽然有很多方法可以实现电压检测，但集成式 DA 提供了分立式实施方案难以企及的卓越性能优势。对于 TI **INA600** 等集成式差分放大器，运放电源电压导致的输入电压限制不再构成设计障碍，同时高衰减比特性使其在监测超过电源轨的电压时具有更高的灵活性。

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要通知和免责声明

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出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途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、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月