

摘要

在差分输入 V_{sense} 接近零的情况下操作电流检测放大器 (CSA) 时，我们必须确保放大器输出保持在线性范围内。避免摆幅限制的一种方法是输出偏置或电平转换。因此，零 V_{sense} 包含在线性输入范围内。双向 CSA 为输出偏置提供了一个方便的选项。此外，在接近零的 V_{sense} 下，放大器的失调电压开始占主导地位，导致高百分比输出误差。失调电压校准可有效提高接近零的 V_{sense} 下的系统精度。一些传统产品在低 V_{sense} 电平下表现出较大的输出误差。该限制是为适应宽输入共模范围而进行的权衡。最新开发的产品解决了这一问题，新发布的器件中消除了低 V_{sense} 限制。

内容

1 引言	2
2 接近零的 V_{sense} 下的 CSA 总输出误差	4
3 支持校准的接近零的 V_{sense} 测量	5
4 某些传统 CSA 中接近零的 V_{sense} 工作模式	6
5 高压 CSA 的最新发展	7
6 总结	8

插图清单

图 1-1. 单向响应	2
图 1-2. 单向 CSA 传递函数	2
图 1-3. 双向响应	3
图 1-4. 双向 CSA 传递函数	3
图 2-1. CSA 的总输出误差	4
图 3-1. 偏移校准	5
图 3-2. 双向 CSA 的失调电压校准	5
图 3-3. 增益校准	5
图 4-1. INA193-INA198 方框图	6
图 5-1. INA293 方框图	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

电流检测放大器通常由单电源供电，设计用于在远超过电源电压的输入共模范围内工作。同时，差分输入电压 V_{sense} 需要精确放大而不失真。理想情况下， V_{sense} 的范围仅受电源电压限制，并一直向下扩展至接地（包括接地）。

单向 CSA 仅线性响应沿一个方向流动的电流，输出沿一个方向以与输入差分信号成正比的方式移动。反向流动的电流会导致输出崩塌至电源轨之一，通常是接地。

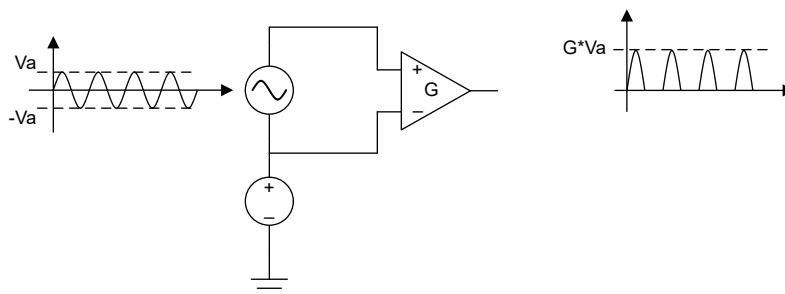


图 1-1. 单向响应

图 1-1 说明了具有双极差分电压输入的单向 CSA 的最佳输出响应。当 V_{sense} 为正时，CSA 可以精确放大输入信号，没有任何失真或延迟。当 V_{sense} 为负时，输出会崩塌至接地或 0V。

图 1-2 展示了单向 CSA 的直流输入/输出传递函数。假设电源电压为 V_s ，最佳传递函数由黑色分段线性曲线（实线）表示。当 V_{sense} 处于接地至 V_s/Gain 范围内时，输入/输出传递曲线是一条穿过 (0, 0) 和 $(V_s/\text{Gain}, V_s)$ 的直线，其中 Gain 表示 CSA 增益。当 V_{sense} 低于 0V 时，输出始终保持为接地；当 V_{sense} 大于 V_s/Gain 时，输出始终保持为 V_s 。

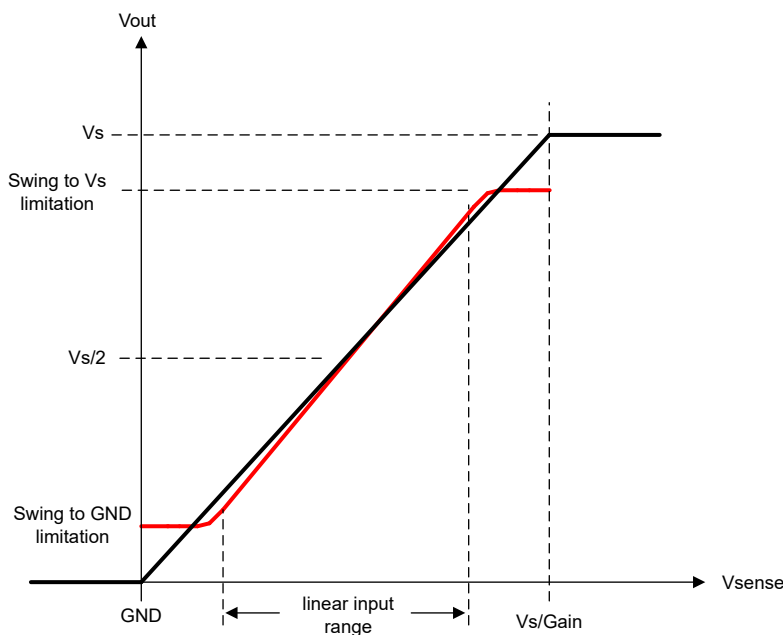


图 1-2. 单向 CSA 传递函数

除非涉及特殊电路（例如电荷泵），否则在实际部署时，可能的最小 V_{sense} 通常会受到限制，该值不包含 0V。当低于最小 V_{sense} 的限值时，放大器输出不能再被视为输入的可靠表示。

典型的 CSA 输出无法进行轨至轨摆动。红色曲线展示了更真实的输入/输出传递函数，该曲线被夸大了，目的是展示相对于理想曲线的偏差。

当 V_{sense} 接近零时，输出会出现摆动至接地限制。 V_{sense} 的持续下降无法再使输出电压按比例下降，最终在高于接地的电平处停止。输出摆动至接地特性限制了 V_{sense} 可以有多低。同样，在高侧，摆动到电源电压对 V_{sense} 施加了上限。

对于双向 CSA，允许电流沿任一方向流动。器件的输出偏离静态输出电平，与输入差分信号成正比。双向 CSA 输出能够向上移动至电源电压或向下移动至接地这一事实意味着静态输出电平对应于零电流。在这些器件中，通常有一个或两个输出基准引脚。会通过使用合适的源驱动基准引脚来对输出进行电平转换。图 1-3 展示了相同的双向输入被准确再现。通过将静态输出设置为等于或接近任一电源轨，可以将双向 CSA 配置为单向。

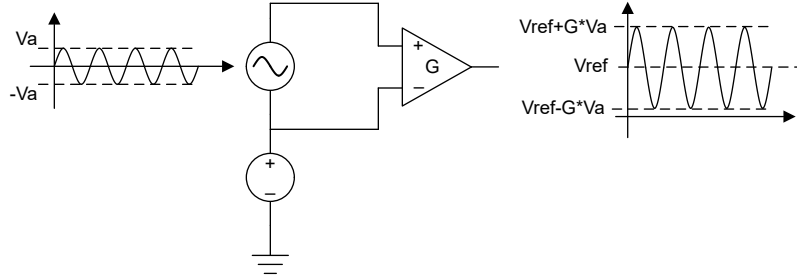


图 1-3. 双向响应

通常将双向 CSA 静态输出电平配置为接地和 V_s 之间的中间值。 $1/2 V_s$ 的 V_{ref} 允许相对于接地的对称双向输入。将图 1-2 的 CSA 配置为双向，同时保持所有其他特性不变，可获得如图 1-4 所示的传递函数。线性输入范围现在包括 0V。

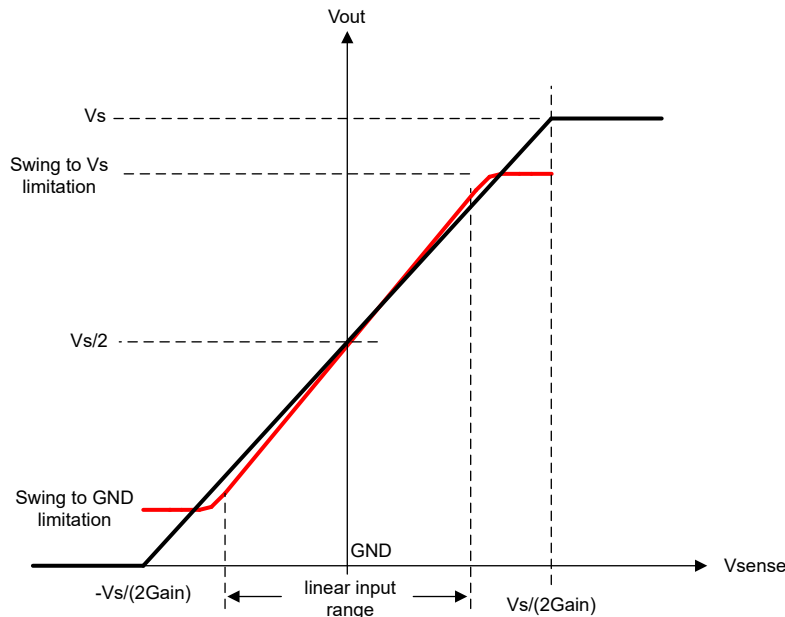


图 1-4. 双向 CSA 传递函数

2 接近零的 V_{sense} 下的 CSA 总输出误差

要将零 V_{sense} 包含在线性输入范围内，请使用双向 CSA。双向 CSA 配备了一个或两个基准引脚。可以对此类 CSA 的输出进行偏置，从而使输出不再被摆动到电源轨限制所掩盖。因此，只要差分输入发生少量变化，输出就会发生相同的变化，然后乘以器件增益。

如图 1-4 所示，由于失调电压、增益误差和非线性等器件误差，实际传递曲线相对于理论值存在偏差。通常用于评估系统精度的一个品质因数是总输出误差百分比，它被定义为实际输出相对于理论输出的偏差量。

$$\text{Total Output Error (\%)} = \frac{\text{Actual Output} - \text{Ideal Output}}{\text{Ideal Output}} \times 100 \quad (1)$$

图 2-1 显示了 CSA 的典型误差与电流之间的关系图。由于 V_{sense} 等于电流和分流电阻的乘积，因此可以将 x 轴更改为 V_{sense} ，此时曲线的形状保持不变。

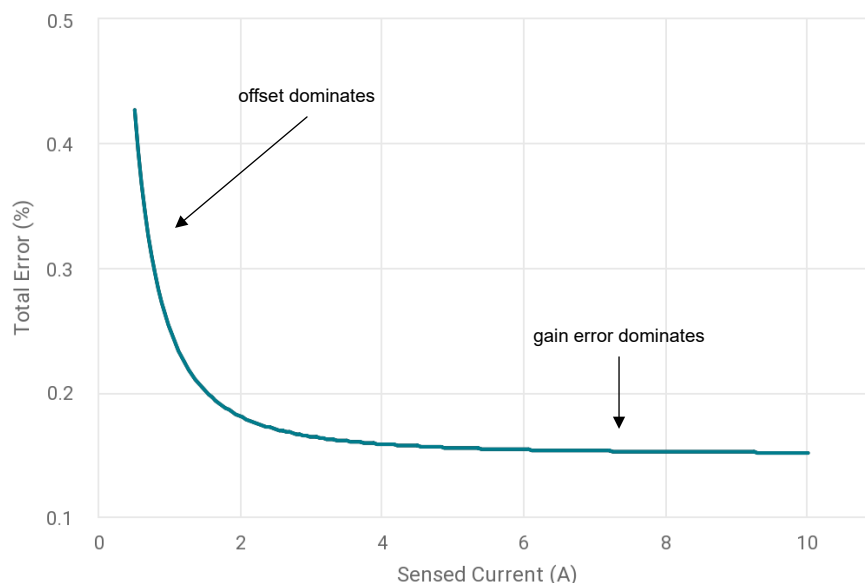


图 2-1. CSA 的总输出误差

在该特定示例的较高电流范围（例如大于 2A）内，百分比误差接近平坦并且主要由增益误差决定；在较低的电流范围内，随着电流逐渐减小并趋向于零，而失调电压本身保持不变，失调电压会产生巨大的影响。在零电流下，百分比误差接近于无穷大，器件缺陷的影响变得更加明显。

总误差图仅反映 CSA 规格，并未考虑其他系统级元件。例如，分流电阻容差对总误差的影响类似于增益误差。该图还采用了最坏情况下的器件规格。由于器件参数通常遵循正态分布，因此单个器件的性能可能会好得多。遇到所有参数性能都最差的样片的可能性很低。

3 支持校准的接近零的 V_{sense} 测量

在某些应用中，依赖于其他方面非常合适的 CSA 的数据表规格不足以满足精度要求。如果是这种情况，校准可以通过提高系统精度提供一条前进的道路。

可以采用失调电压校准来提高电流检测系统在接近零的 V_{sense} 下的精度。在失调电压校准期间，单个系统的失调电压被测量和存储，然后从未来的测量中减去。图 3-1 显示了 CSA 失调电压校准的方框图。电压源 V_{os} 表示器件输入为基准的失调电压。

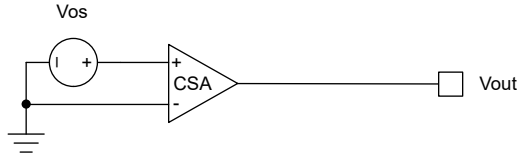


图 3-1. 偏移校准

失调电压校准的关键注意事项之一是尽可能保持校准路径和正常信号路径重叠。通过在校准路径中包括完整的信号测量路径，所有误差因素都被考虑在内。可以通过一次校准操作减去所有误差因素的累积效应。当引入额外的元件以支持校准时，必须考虑这些元件的容差；还必须考虑对正常信号测量的影响，以便将任何不利影响降至最低。

另一个注意事项是使系统保持在线性工作范围内。例如，如果 CSA 输出被限制在任一电源轨上，则校准结果无效。

在图 3-1 中，输入短接在一起以执行失调电压校准。然而，CSA 的摆幅限制很可能导致 CSA 的输出始终保持为接地，从而掩盖了 V_{os} 的影响。正确的设置是配置 CSA，使输出可以在零输入的情况下自由变化。

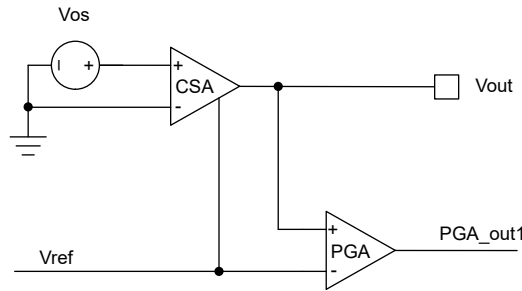


图 3-2. 双向 CSA 的失调电压校准

将输出偏置到高于接地可以摆脱摆幅限制。在图 3-2 所示的设置中，双向 CSA 配置有等于电源电压一半的基准电压。输入短路时，PGA 将 CSA 输出与基准电压进行比较。差值等于输出失调电压。要计算以输入为基准的失调电压，请使用方程式 2。

$$V_{os} = \frac{PGA_{out1}}{PGA_{Gain} \times CSA_{Gain}} \quad (2)$$

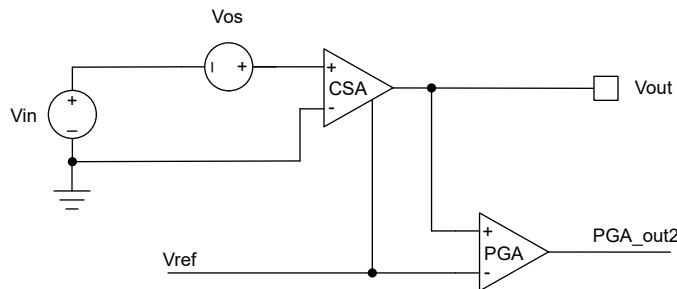


图 3-3. 增益校准

为了在失调电压校准的基础上进行构建，可以使用至少一个额外的数据点来校准增益误差。图 3-3 显示了使用非零输入 V_{in} 驱动的 CSA。相应的输出为 PGA_Out2，可按照方程式 3 来计算 CSA 增益。

$$Gain = \frac{PGA_{out2} - PGA_{out1}}{PGA_{Gain} \times V_{in}} \quad (3)$$

假定非零输入是已知的精确值。实际上，输入要么通过精密仪表进行测量，要么由精密源提供。在任何一种情况下，输入的真实幅度都必须已知，否则输入值的不确定性会对准确性产生负面影响并使计算目的无法实现。

这些是一些基本的校准方案。可以通过更详细的校准方案来实现更高的精度水平。

4 某些传统 CSA 中接近零的 V_{sense} 工作模式

INA193-INA198 器件使用独特的电路拓扑，可提供 $-16V$ 至 $80V$ 的共模范围，同时采用单电源供电。如图 4-1 所示，当共模电压为正时，放大器 A_2 处于活动状态。施加在 R_S 两端的差分输入电压 $(V_{IN+}) - (V_{IN-})$ 通过一个电阻器转换为电流。该电流通过 R_L 转换回至电压，然后由输出缓冲放大器放大。当共模电压为负时，放大器 A_1 处于活动状态。施加在 R_S 两端的差分输入电压 $(V_{IN+}) - (V_{IN-})$ 通过一个电阻器转换为电流。该电流来自精密电流镜，其输出被引导至 R_L ，将信号转换回至电压并由输出缓冲放大器放大。

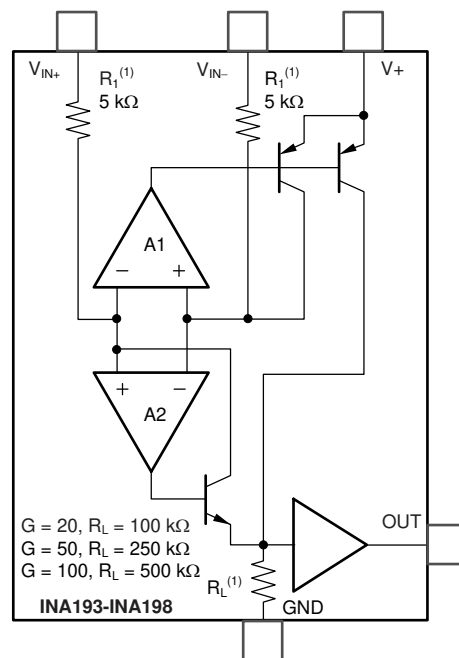


图 4-1. INA193-INA198 方框图

在 V_{sense} 接近零时，输出电流非常低，输出晶体管的集电极-基极（或发射极-基极）泄漏变得很明显，可以有效地关断驱动输出晶体管的晶体管。因此，输出无法继续与输入电压的降低成正比地向接地摆动。最低输出电平显示为高于预期输出电压的下限。因此 $20mV$ 及以下被认为是该系列器件的低 V_{sense} 的原因，此时输出偏差变得很明显。

影响输出精度的另一个因素是共模电压 V_{cm} 。通常情况下，两个放大器之一 A_1 或 A_2 处于活动状态并占主导地位。然而，当共模输入电压介于接地和电源电压之间时， A_1 和 A_2 都可以处于活动状态，但两者都不占主导地位。 V_{sense} 越接近零，相对于线性运行的偏差就越大，从而使该区域最不准确。

INA200 至 INA208 九款器件是基于 INA193-INA198 的器件系列。这些器件包含比较器和基准，从而使过流保护 (OCP) 变得很方便。由于模拟内核保持不变，因此在 V_{sense} 接近零的情况下操作这些器件时要小心。与 INA193-INA198 类似，最不准确的工作区域是 V_{cm} 介于接地和电源电压之间时。

5 高压 CSA 的最新发展

INA193-INA198 系列高压电流传感器非常成功，十多年来一直为客户提供高压电流检测和 OCP。如节 4 所述，由于采用两级设置，这些器件在精度和瞬态性能方面存在限制，在接近零的 V_{sense} 下和两个运算放大器均处于活动状态的共模输入电压转换范围内尤其如此。

INA293 系列器件专为解决该问题而设计，并且可提高所有关键电气参数的性能。INA293 是全新的超精密高压电流检测放大器，其共模范围为 $-4V$ 至 $110V$ (可承受 $-20V$ 至 $+120V$)。

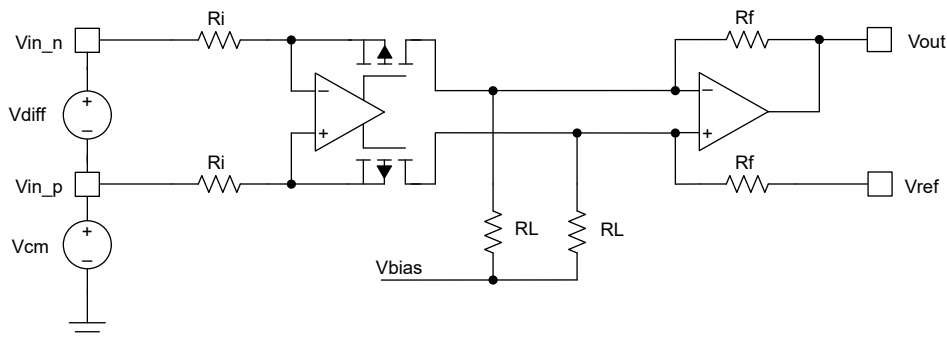


图 5-1. INA293 方框图

INA293 使用两级拓扑，如图 5-1 所示。前面是一个电流反馈放大器，通过从连接到输入端的共模源汲取固定量的电流来供电。这有效地为第一级放大器创建了一个独立于器件电源的浮动电源。

INA293 输出级是一个电压反馈放大器，用于完成差分至单端的转换。该两级结构可实现高带宽。 V_{bias} 用作前级以及输出级的输入的接地基准，在 R_L 上提供共模输出。负电荷泵用于生成 V_{bias} 以适应低于接地的输入共模电压。

INA310 基于 INA293，集成了一个带内部基准电压的开漏比较器。与 INA200-INA208 类似，INA310 比较器可以配置为透明模式或锁存模式。可以通过外部电阻分压器来设置跳闸点。INA310 相对于 INA200-INA208 的一项重大改进是不再存在接近零的 V_{sense} 限制。

6 总结

电流检测放大器通常由单个电源供电。摆动至接地限制可以掩盖零 V_{sense} 下的输出。双向 CSA 提供了一种将零 V_{sense} 包含在线性输入范围内的便捷方式。百分比输出误差通常随着 V_{sense} 的降低而增加，并在零 V_{sense} 下变为无穷大。提高电流测量系统精度的一种方法是校准。TI 最新开发的产品推出了一系列高压超精密 CSA，解决了某些传统产品的输出限制问题。

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