



Tamara Alani

Precision Amplifiers

摘要

使用仪表放大器 (IA) 进行设计时，许多工程师面临的一个常见应用问题是忽略了交流和直流应用中的直流对地返回路径。如果没有直流对地路径或没有其他偏置电压来提供输入偏置电流 (I_b)，电路将无法正常工作。本应用报告论述了如何简单地解决这个问题。

内容

1 仪表放大器的典型运行原理.....	2
2 问题说明.....	3
3 常见错误.....	4
4 建议解决方案.....	5
5 元件选型和权衡.....	6
6 常见应用.....	8
7 结论.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 仪表放大器的典型运行原理

仪表放大器是两级电路，用于在存在共模电压的情况下提取和放大差分输入信号，如图 1-1 所示。第一级构成一个可放大差分信号的高输入阻抗电路，但会通过共模信号而不进行放大。该设计的第二级通常是一个差分放大器，在很大程度上去除共模信号，同时使输出参考特定的基准电压。

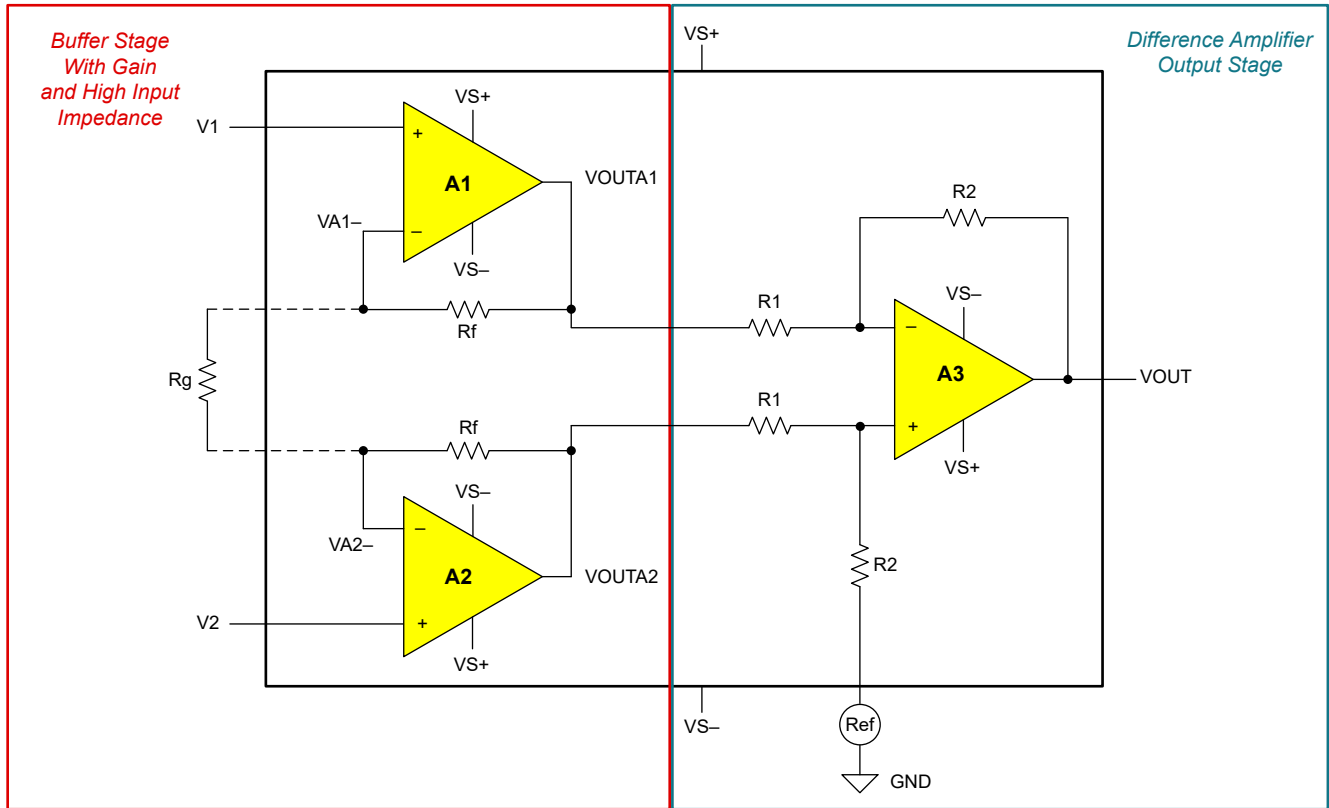


图 1-1. 典型的三放大器 IA

2 问题说明

许多 IA 应用都需要进行精确的低电平交流信号处理，同时在输出端抑制直流信号。实现这些功能最轻松的方法是对 IA 进行交流耦合。设计人员在进行交流耦合时，可以通过添加电容器与 IA 输入进行串联来阻断直流输入电压，这会有效形成高通滤波器。这种方法不再需要在 IA 增益级将直流输入信号驱动至饱和（一种非线性工作状态）之前适应直流输入信号。因此，这种只传递交流信号的方法可实现更高的增益和更宽的动态范围。

例如，假设 IA 具有 100 Hz 正弦波，在存在 5V 共模电压和 3V 直流电压的情况下，波幅为 100 mV。所需输出为 $\pm 1V$ 信号。在这些工作状态下时，仪表放大器必须配置 10V/V 的增益。以 TI 的一款高精度、低功耗、低噪声 IA INA818 为例，电路原理图和瞬态分析如图 2-1 所示。

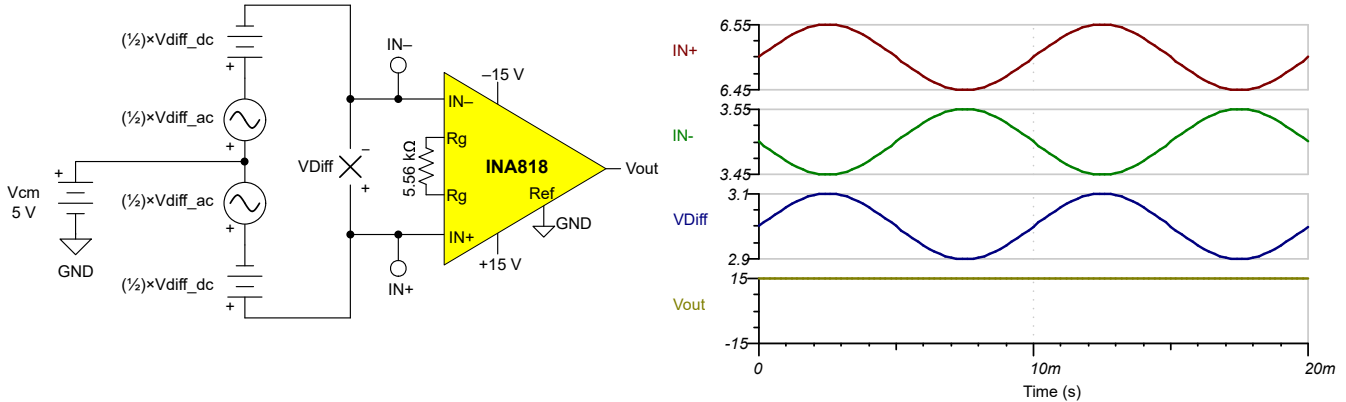


图 2-1. INA818 原理图和瞬态分析

虽然 IA 会抑制 5V 共模电压，但 3V 直流电压会与 VDiff 曲线所示的输入差分电压求和。增益为 10V/V 时，输出信号对正电源轨饱和。尽管要放大的所需信号是 100 mV/100 Hz 正弦波，但 3V 直流电压阻止仪表放大器输出仅表示放大的交流信号。

3 常见错误

在输出端消除直流输入电压导致的直流非线性度非常重要。工程师通常会错误地配置交流耦合 IA 电路，添加一个电容器与每个输入端子进行串联，而不提供输入偏置电流路径。图 3-1 中说明了这种错误。如果将电容器与仪表放大器输入串联而不提供实现电流流动的直流路径，那么随着时间的推移，IA 的 Ib 会为该电容器充电，直到将输出电平驱动为其中一个电源轨，如图 3-1 中的 IN+ 曲线所示。

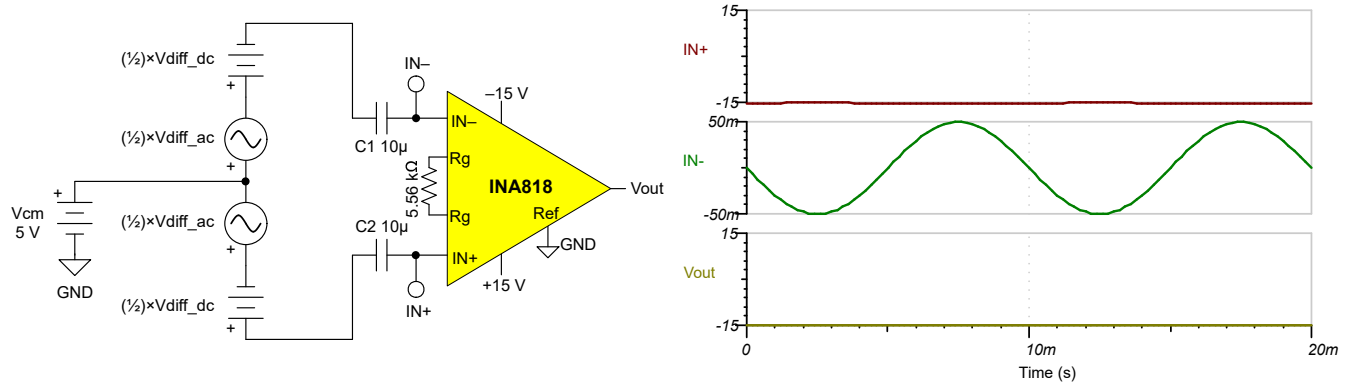


图 3-1. 不正确的交流耦合原理图和瞬态分析

4 建议解决方案

此问题的简单解决方案是将一个电阻器从每个 IA 输入连接到系统接地或其他偏置电压。此解决方案提供了一种让输入偏置电流正确偏置 IA 输入的方法。在双电源配置 (图 4-1A 显示了示例原理图) 中, 每个电阻器都接地。在单电源配置中, 为了最大限度地扩大输入电压范围, 输入偏置电阻器通常连接到 $1/2 V_s$ (V_{bias}), 如图 4-1B 所示。连接 $1/2 V_s$ 有一个辅助用途, 因为典型的 IA 输入摆幅通常无法一直达到电源轨。因此, 将电阻器连接到 $1/2 V_s$ 可最大限度地扩大 IA 输入动态范围。同样, 由于 IA 的输出摆幅无法达到电源轨, 将基准电压 (V_{ref}) 连接到 $1/2 V_s$ 可最大限度地提高输出电压动态摆幅。请注意, V_{ref} 和 V_{bias} 都必须能够灌入和拉出电流; 因此, 在此处使用低压降稳压器 (LDO) 可能是无法接受的, 因为 LDO 只能拉出电流。若要驱动 IA 上的基准引脚, 通常需要使用缓冲器或电压基准。

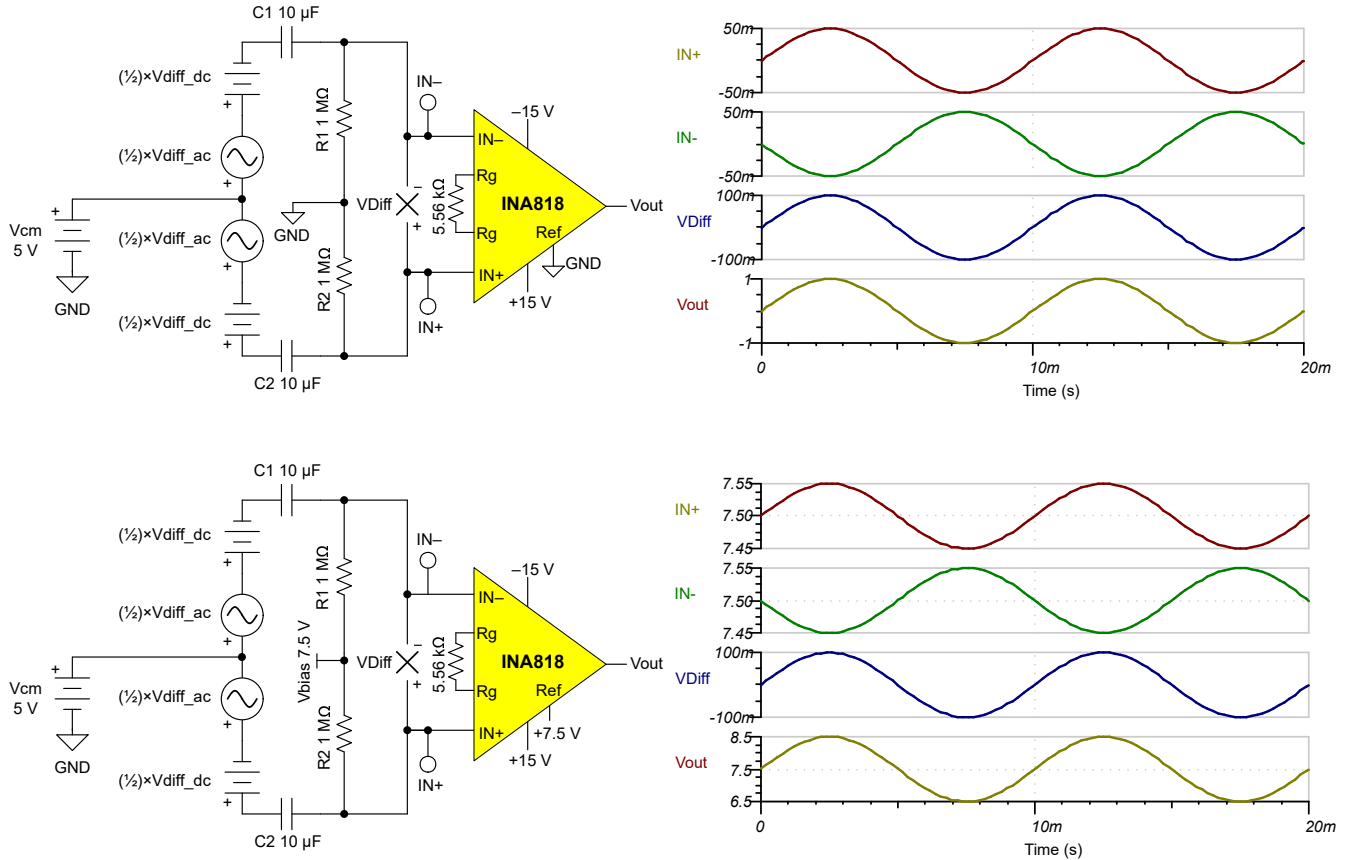


图 4-1. 单电源和双电源配置的正确交流耦合

5 元件选型和权衡

添加电阻器和电容器需要权衡多种因素，包括噪声增加和布板空间有限。为此，典型电阻值（如图 5-1 中的 R1 和 R2 所示）范围为 100 kΩ 至 1 MΩ。选择的阻值通常应大于差分源电阻。不过，仪表放大器输入偏置电流流过电阻器并在电阻器上产生压降，因此电阻器阻值高则会引入更高的热噪声，并产生直流失调电压。此外，输入偏置电流会流入输入阻抗并产生电压，从而增加系统总体误差，如图 5-1 和方程式 1 所示：

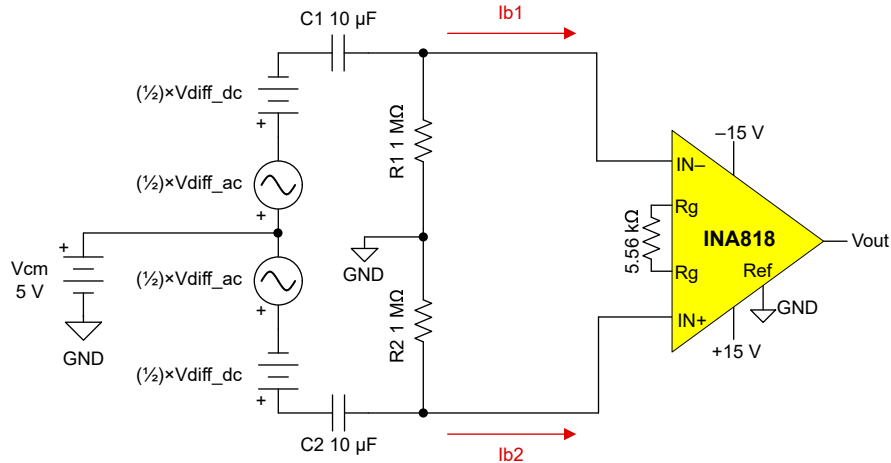


图 5-1. IA 输入偏置电流

$$V_{os_{in}}(I_b) = (I_{b1} \times R1) - (I_{b2} \times R2) \quad (1)$$

使用容值更高的电容器时可以使用更小的电阻器；不过，大电容器会占用更多的布板空间。在元件选型中，除了电容值外，电容器的类型也起着重要作用。根据应用，设计人员可能需要选择特定的电容器等级，因为等级可能影响线性度和失真性能。C0G 级电容器的电容在各种温度、电压和频率下是所有陶瓷电容器中最稳定的，因此可产生最低的失真。陶瓷 X7R 级和 X5R 级电容器在不同温度、电压和频率下并不那么稳定，在不同频率下的失真可能是不可接受的。

除了权衡噪声、失调电压误差和布板空间外，这些增加的元件还可能影响总体精度。添加到电路两个输入路径中的电阻器和电容器彼此之间必须精确匹配，即 R1 必须匹配 R2，C1 必须匹配 C2。这些元件之间的任何失配都会降低交流共模抑制比 (CMRR)，从而将此共模信号转变为差分信号，并在电路的输出端引入误差。保持 CMRR 的一种方式降低 RC 组合的截止频率。不过，这种方法需要更大的电阻值和电容值，因此会产生更大的噪声并占用更大的布板空间。提高精度的另一种方法是再添加一个电阻器，其阻值通常是另两个电阻器的十分之一。将这个第三个电阻器连接在仪表放大器输入之间。

图 5-2 展示了添加第三个电阻器后输出误差的改进情况。这些电路展示的是 INA849，其输入偏置电流为 50 nA（最大值）。如方程式 1 所示，输入偏置电流流入输入阻抗后产生电压，该电压随后在仪表放大器的输出中显示为误差。同样，如果 IA 配置了增益，则误差也会被放大，从而在输出端增加更多的误差。在 IA 的输入之间添加第三个电阻器（如下面的电路所示）可降低总体输入阻抗，从而在输出端得到更小的系统误差。在左侧的电路中，使用了两个精确匹配的 10 MΩ 电阻器。添加第三个 1MΩ 电阻器可显著降低输出误差。

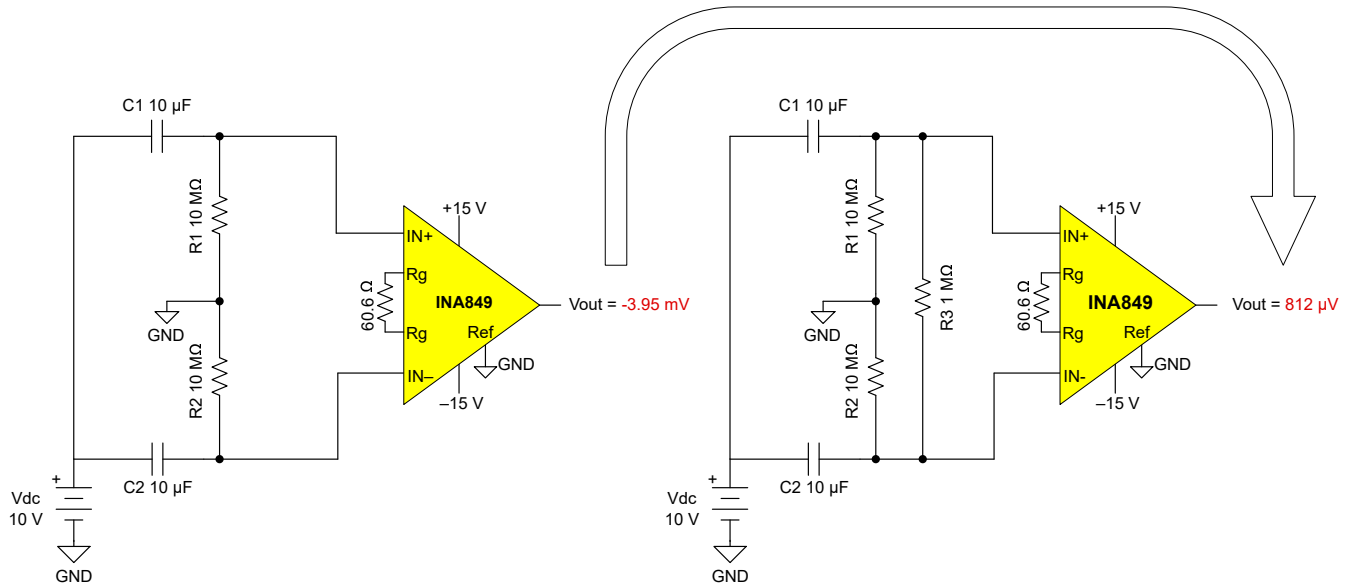


图 5-2. 在两个精确匹配的电容器基础上添加第三个输入电阻器来减小失调电压

遗憾的是，电阻器在生产中无法精确匹配，而是按照容差对电阻器进行标记。1% 的 $1\text{ M}\Omega$ 电阻器可以产生高达 1% 的偏差，而且仍然在容差范围内。图 5-3 显示了两个电路，其中 $R1$ 和 $R2$ 误差为 $\pm 1\%$ ；这可能是最坏的情形。但添加第三个电阻器可显著降低输出误差。根据系统要求，该第三个电阻器可以让设计人员使用容差更低的电阻器并仍能实现高精度输出。

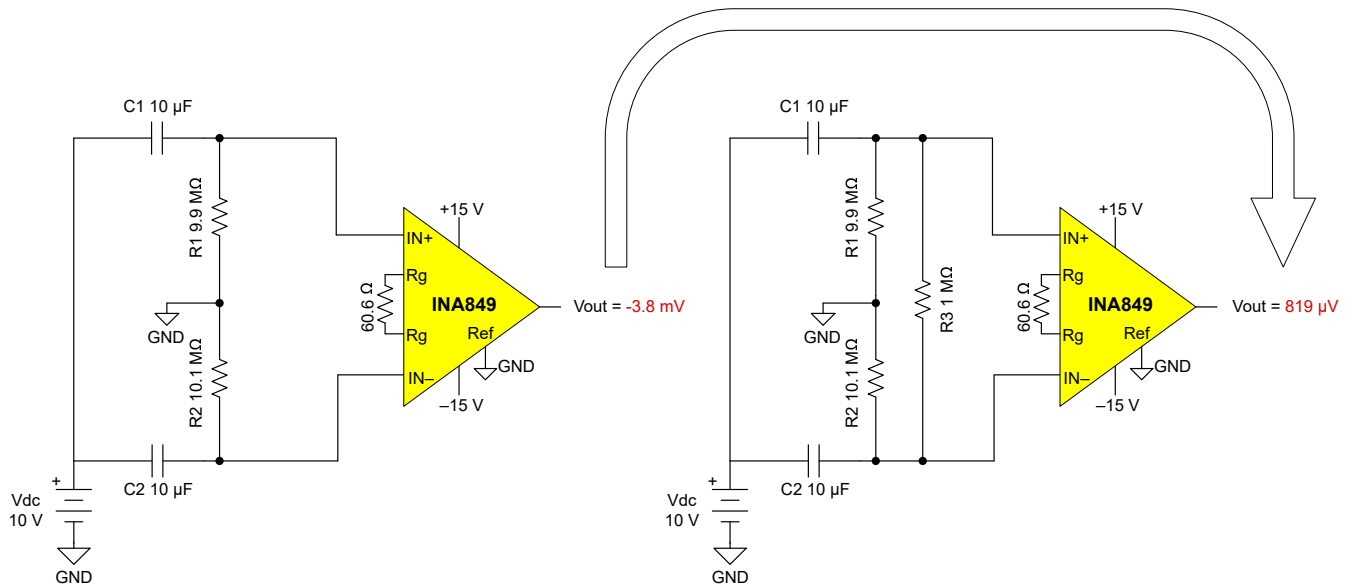


图 5-3. 通过第三个输入电阻器 (1% 电阻器) 改进失调电压

请注意，该第三个电阻器具有一组特有的缺点。虽然添加第三个电阻器可以让设计人员抵销 $R1$ 和 $R2$ 之间电阻器较大失配所带来的影响，但添加第三个电阻器确实可以降低总体阻抗。降低输入阻抗可能影响驱动 IA 的传感器电路。设计人员必须确保由 $R1$ 至 $R3$ 形成的阻抗与源输出阻抗相比仍然较大。降低输入阻抗还会更改直流阻断高通滤波器的转角频率。根据应用，可能需要通过提高耦合电容器的容值来调整该转角频率。

6 常见应用

仪表放大器常用于在存在共模噪声时放大差分电压。一些常见应用包括麦克风前置放大器和热电偶放大器。

对于通过直流元件偏置内部 JFET 的典型双端子驻极体麦克风，可以使用仪表放大器来放大差分电压，如图 6-1 所示。麦克风参数决定了需要何种偏置电阻器。对于输出阻抗为 2.2 k Ω 的麦克风，应确保所用偏置电阻的最小值不会加载麦克风并导致失真，而最大值不会产生过大的热噪声。这种权衡必须根据系统要求进行评估和确定。选择偏置电阻器后，可以基于需要通过的频段来计算耦合电容器。

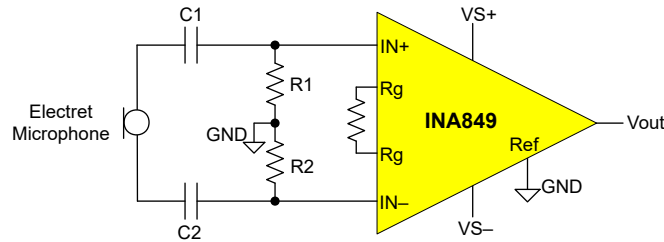


图 6-1. 交流耦合麦克风前置放大器电路

另一个常见应用是使用热电偶进行温度测量。热电偶实质上是低阻抗短路，可基于塞贝克效应产生小信号直流失调电压。此失调电压可使用 IA 进行测量，如图 6-2 所示。热电偶具有低输出阻抗；因此，不需要两个偏置电阻器。一个偏置电阻器便可提供必要的对地路径，不会因为 I_b 而产生大的失调电压误差。

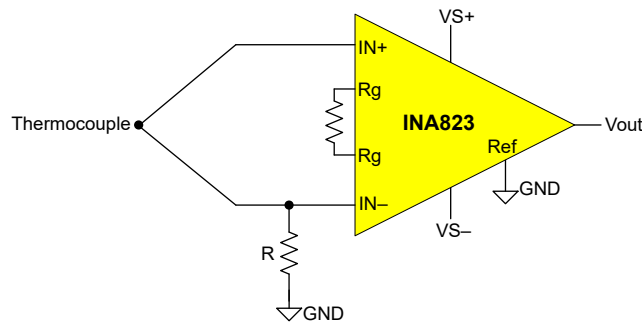


图 6-2. 热电偶偏置电路

7 结论

需要在大功率直流电位下进行低电平交流信号处理的许多应用都需要专门的附加电路。构建电路时出现简单的错误会导致大的误差和意外输出。在直流或交流应用中提供直流对地路径是电路设计中的必要步骤。若要妥善设计这些电路，需要了解传感器输出阻抗或仪表放大器驱动电路的输出阻抗，并对元件选型进行性能权衡。

有关 TI 的一些高精度低 I_b 仪表放大器的清单，请参阅表 7-1。

表 7-1. TI 推荐的高精度低 I_b 仪表放大器

器件型号	说明
INA849	具有低输入偏置电流 (20 nA, 最大值) 的超低噪声 ($1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) 宽带宽 (28 MHz) 高精度 (35 μV) 超级 β 36V IA
INA823	具有低输入偏置电流 (15 nA)、过压保护和负输入电压的低功耗 (250 μA) 宽电压范围 (2.7V 至 36V) 精密 (150 μV) 超级 β IA
INA821	具有低输入偏置电流 (0.5 nA, 最大值) 和过压保护的宽带宽 (4.7 MHz) 低噪声 ($7\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) 高精度 (35 μV) 超级 β 36V IA
INA819	具有低输入偏置电流 (0.5 nA, 最大值) 和过压保护的低功耗 (350 μA) 低噪声 ($8\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) 高精度 (35 μV) 超级 β 36V IA (提供替代引脚排列: INA818)
INA188	具有低输入偏置电流 (2.5 nA, 最大值) 的零漂移 (0.2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 55 μV) 低噪声 ($12\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) 36V CMOS IA
INA333	具有低输入偏置电流 (0.2 nA, 最大值) 的微功耗 (50 μA) 零漂移 (0.1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 25 μV) 5.5V CMOS IA
INA331	超低偏置电流 (10 pA, 最大值) 低功耗 (0.01 μA , 具有关断功能) 低电流噪声 ($0.5\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$) 5.5V CMOS IA
INA121	具有过压保护功能的超低偏置电流 (50 pA, 最大值) 低电流噪声 ($1\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$) 36V FET 输入 IA

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司