

Application Brief

用于高阻抗传感器的超低噪声 JFET 前置放大器设计



Chris Featherstone

引言

具有高源阻抗的传感器可以是纯电阻式、电容式、电感式或这三者的组合。能够产生千分之一伏特量级小信号的高源阻抗传感器通常需要通过噪声低、输入阻抗高的前置放大器进行放大。具有双极结型晶体管 (BJT) 输入级的放大器通常用于实现低电压噪声特性。与互补金属氧化物半导体 (CMOS) 输入和结型场效应晶体管 (JFET) 输入器件相比, BJT 器件的电流噪声通常更高。与高源阻抗传感器配合使用时, 来自 BJT 输入级的电流噪声会转化为额外电压噪声增加。使用互补金属氧化物半导体 (CMOS) 器件是高输入阻抗的理想选择; 但是, 噪声性能比双极输入的噪声性能更差。分立式结型场效应晶体管 (JFET) 的 $1/f$ 噪声性能优于 CMOS 器件, 并且具有高输入阻抗。更多详细信息, 请参阅 [CMOS、JFET 和双极输入级技术之间的权衡](#) 应用报告。本应用简报讨论了如何使用分立式匹配的 JFET 将高源阻抗传感器与高电流噪声 BJT 仪表放大器连接起来。本应用简报比较了两种前置放大器拓扑, 并分析了各种权衡因素以及如何确定在特定情况下应使用哪种拓扑。

前置放大器拓扑

图 1 显示了使用 INA849 的前置放大器拓扑。INA849 使用 12V 单电源偏置。OPA145 输出 6V 的 $1/2 V_s$ 直流电压, 并驱动 INA849 的基准引脚 R_{ef} 和输入共模电压。INA849 具有一个电压噪声超低的 BJT 输入级。BJT 输入级通常用于实现低电压噪声特性。与高源阻抗传感器配合使用时, 来自 BJT 输入级的电流噪声会转化为额外的电压噪声。

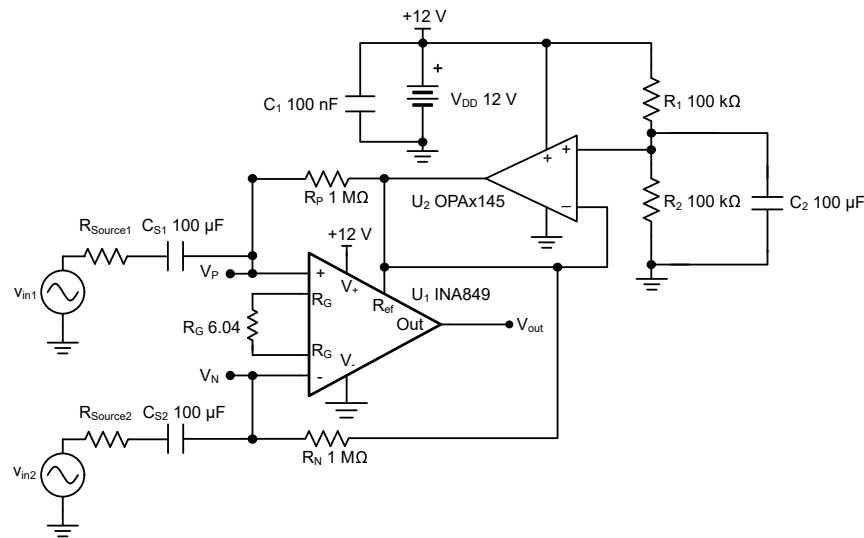


图 1. INA 前置放大器

分立式 JFET (如 TI 的 JFE2140) 后跟双极仪表放大器 (如 INA849), 提供了一种通过灵活偏置实现高输入阻抗和低噪声的方法, 请参见图 2。JFET Q_{1A} 和 Q_{1B} 均在源极跟随器配置中配置, 并取代 INA849 前端。INA849 以 60dB 增益配置。源阻抗 $R_{source1}$ 和 $R_{source2}$ 现在连接至输入阻抗高且电流噪声低的分立式 JFET 前端。分立式 JFET 和 INA 前置放大器电路提供 JFET 的低输入电流噪声和 INA 的低电压噪声。

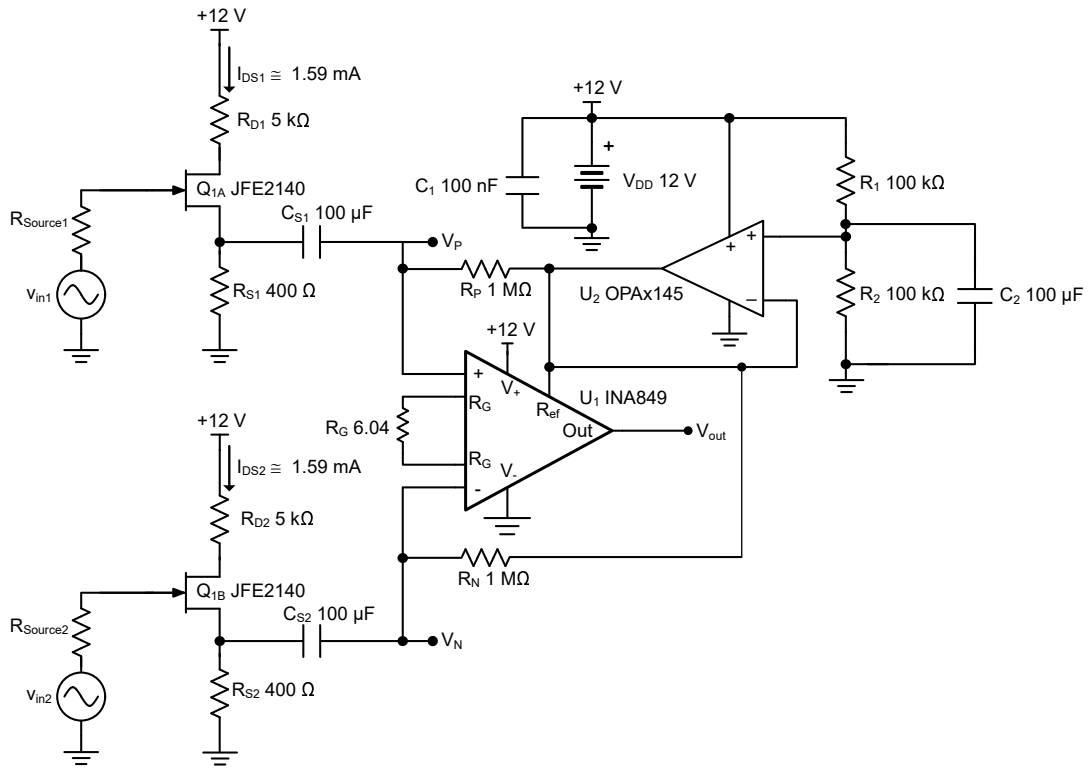


图 2. 分立式 JFET 和 INA 前置放大器

噪声

图 3 显示了图 1 和图 2 中所示的两种前置放大器拓扑与各种源阻抗 R_{source} 间的噪声性能比较。INA849 具有低源阻抗传感器，性能优于 JFET 设计。随着 R_{source} 增大，图 2 中显示的前置放大器优于 INA849。

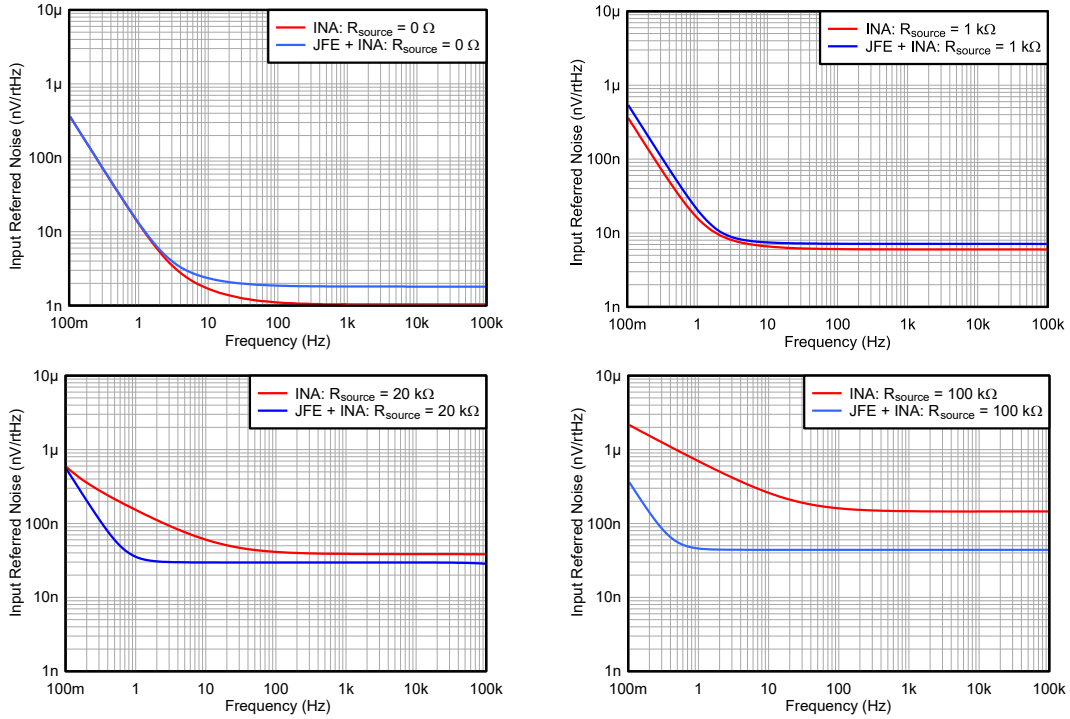


图 3. 具有不同源阻抗的前置放大器噪声比较

表 1 显示了两种前置放大器拓扑之间的总电路电流消耗和噪声权衡。图 1 中所示设计的总电流消耗为 6.71mA。图 2 中所示 JFET 前端设计的总电流消耗为 9.88mA。这意味着总电流消耗增加了 47.2%。使用 $R_{source} = 100k\ \Omega$ 的源阻抗时，添加分立式 JFET 可提高噪声性能（通过将输入参考宽带噪声降低 64.4%）。图 3 显示了将 JFET + INA849 拓扑与高源阻抗搭配使用时的 $\frac{1}{f}$ 噪声改善。

表 1. 前置放大器拓扑比较

| 前置放大器拓扑 | 总 I_q (mA) | I_q 增加百分比 | 总电压噪声 $\left(\frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)$ 输入参考 $f = 1kHz$ | 电压噪声 减少百分比 $R_{SOURCE} = 100k\ \Omega$ |
|---------------|--------------|-------------|--|--|
| INA849 | 6.71 | - | 162.07 | - |
| JFET + INA849 | 9.88 | 47.2% | 57.63 | -64.4% |

在决定使用图 1 和图 2 中所示的两种拓扑之一时，可以使用一个简单的计算方法。一般来说，如果 $R_{source} > \frac{4kT}{(i_n)^2}$ ，则使用 JFET 输入器件可降低噪声。有关更多详细信息，请参阅 CMOS 和 JFET 放大器中电流噪声的影响应用手册。INA849 的典型电流噪声规格为 $i_n = 1.1 \frac{pA}{\sqrt{Hz}}$ 。

$$R_{source} > \frac{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times (273.15 + 25)}{(1.1 \times 10^{-12})^2} \quad (1)$$

$$R_{source} > 13.6 \text{ k}\Omega \quad (2)$$

当 $R_{source} = 13.6 \text{ k}\Omega$ ，表 2 显示 $e_{nR} = e_{ni_INA} = 21.16 \text{ (nV/}\sqrt{\text{Hz}})$ 。按照这个指导原则，使用分立式 JFET 和 INA 前置放大器时，可实现 $\sqrt{2}$ 噪声改善（前置放大器见图 2）。

表 2. 源阻抗和计算得出的噪声比较

| $R_{source}(\Omega)$ | $e_{nR} \text{ (nV/}\sqrt{\text{Hz}})$ | $e_{ni_INA} \text{ (nV/}\sqrt{\text{Hz}})$ | INA 计算得出的总输入参考噪声 $e_{n_Total_INA} \text{ (nV/}\sqrt{\text{Hz}})$ | JFET + INA 计算得出的总输入参考噪声 $e_{n_Total_JFET_INA} \text{ (nV/}\sqrt{\text{Hz}})$ |
|----------------------|--|---|---|--|
| 100 | 1.81 | 0.16 | 2.08 | 2.56 |
| 500 | 4.06 | 0.78 | 4.25 | 4.44 |
| 1000 | 5.74 | 1.56 | 6.03 | 6.01 |
| 1,360 | 6.69 | 2.12 | 7.09 | 6.93 |
| 5,000 | 12.83 | 7.78 | 15.04 | 12.95 |
| 10,000 | 18.14 | 15.56 | 23.92 | 18.23 |
| 13,600 | 21.16 | 21.16 | 29.94 | 21.23 |
| 50,000 | 40.57 | 77.78 | 87.73 | 40.61 |

表 2 中的值是使用方程式 3 至方程式 6 计算得出的，计算时使用了表 3 中所示的值。

表 3. 值表

| 值 | 说明 |
|--|---|
| $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ | 玻尔兹曼常数 |
| $T = 298.15 \text{ K}$ | 温度（单位：开尔文） |
| $e_{n_JFET} = 1.5 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ | JFE2140 以 1.59mA 偏置、 $f = 1 \text{ kHz}$ 时的宽带电压噪声 |
| $e_{n_INA} = 1 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ | INA849 G = 60dB、 $f = 1 \text{ kHz}$ 时的宽带电压噪声 |
| $i_n = 1.1 \frac{pA}{\sqrt{Hz}}$ | INA849 G = 60dB、 $f = 1 \text{ kHz}$ 时的宽带电流噪声 |

前置放大器拓扑具有平衡的输入。因此， $\sqrt{2}$ 系数在方程式 3 和方程式 4 中均使用。

$$e_{nR} = \sqrt{2} \sqrt{4k_B T R_{source}} \quad (3)$$

$$e_{ni_INA} = \sqrt{2} R_{source} i_n \quad (4)$$

$$e_{n_Total_INA} = \sqrt{e_{nR}^2 + e_{ni_INA}^2 + e_{n_INA}^2} \quad (5)$$

$$e_{n_Total_JFET_INA} = \sqrt{e_{nR}^2 + e_{n_INA}^2 + e_{n_JFET}^2} \quad (6)$$

设计注意事项

分立式 JFET 通过调节漏源电压 V_{DS} 和栅源电压 V_{GS} 来提供偏置灵活性。在设计图 2 中所示的前置放大器拓扑时，可以考虑一些关键的 JFET 偏置注意事项。图 4 显示了漏源电流 I_{DS} 与 V_{DS} 间的关系。使用足够的 V_{DS} 对 JFET 进行偏置，以在饱和和区域中运行。

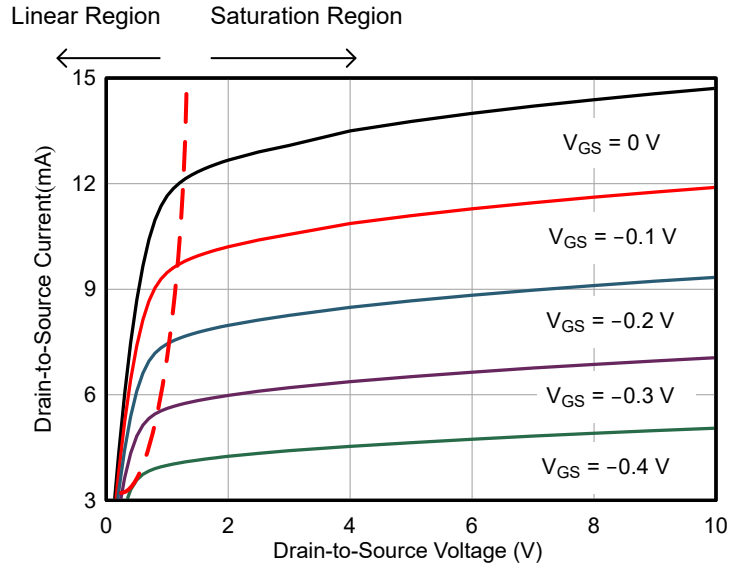


图 4. I_D 与 V_{DS} 间的关系

图 5 显示了 I_G 与 V_{DS} 间的关系。偏置 V_{DS} ，使栅极电流低于 INA849 偏置电流。

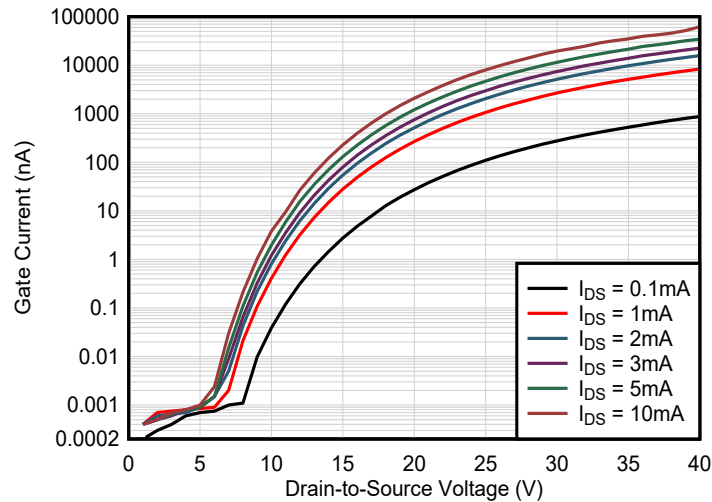


图 5. I_G 与 V_{DS} 间的关系

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司