

摘要

许多工程师面临的挑战是，如何在低噪声电路中放大具有高源阻抗的传感器产生的小信号。适用于水听器、吉他拾音器、高源阻抗麦克风和唱盘等传感器应用的放大器电路设计可受益于分立式元件和运算放大器的组合。本应用手册讨论了如何在复合放大器配置中使用 JFET 和运算放大器来克服这一设计挑战。

内容

1 引言.....	2
2 工作原理.....	3
3 稳定性.....	7
4 总结.....	9

插图清单

图 1-1. 闭环电路中带有 JFE2140 前端的前置放大器.....	2
图 2-1. 具有 JFE2140 前端小信号 T 模型的前置放大器.....	3
图 2-2. 跨导与漏源电流间的关系.....	3
图 2-3. 环路参数 (dB) 与频率 (Hz) 间的关系.....	4
图 2-4. A_{cl} (dB) 与频率 (Hz) 间的关系.....	5
图 2-5. 增益带宽比较.....	6
图 3-1. 使用小信号 T 模型对具有 JFE2140 前端的前置放大器进行环路分析.....	7
图 3-2. 稳定性分析.....	8

表格清单

表 2-1. 电路拓扑比较.....	6
--------------------	---

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

放大低噪声电路中传感器产生的小信号是一个非常常见但很难解决的问题。[JFE150 超低噪声前置放大器](#) 应用手册对此进行了概述。麦克风等高源阻抗传感器产生的信号大约为千分之一伏，由低噪声和低输入阻抗双极结型晶体管 (BJT) 级加载。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。分立式 JFET (如 TI 的 [JFE2140](#)) 后跟双极运算放大器 (如 [OPA202](#))，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，请参阅图 1-1。

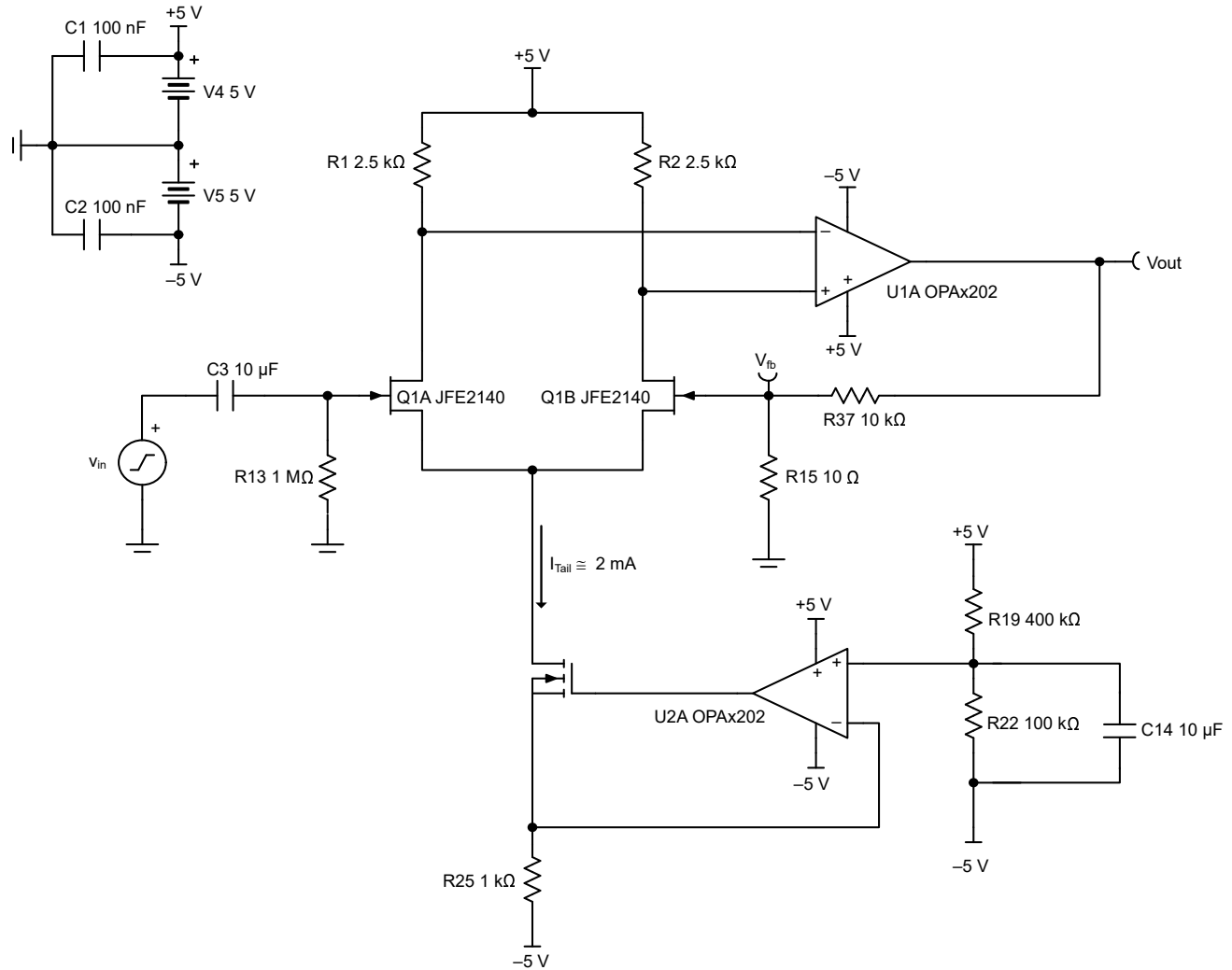


图 1-1. 闭环电路中带有 JFE2140 前端的前置放大器

2 工作原理

JFET 前置放大器电路很容易使用小信号 T 模型进行分析，如图 2-1 所示。为了解此电路的运行情况，首先检查输入端的前置放大器。传感器生成小信号输入电压 (v_{in} ，用于调制 JFET 的栅源电压 (v_{gs})。JFE2140 是前置放大器电路中的第一个增益级，它会传导小信号漏源电流 $i_{ds1} = g_{m1} \times v_{gs1}$ ，该电流随 v_{in} 波动。跨导增益参数 (g_m) 用 Siemens 表示， v_{gs} 用伏特表示。

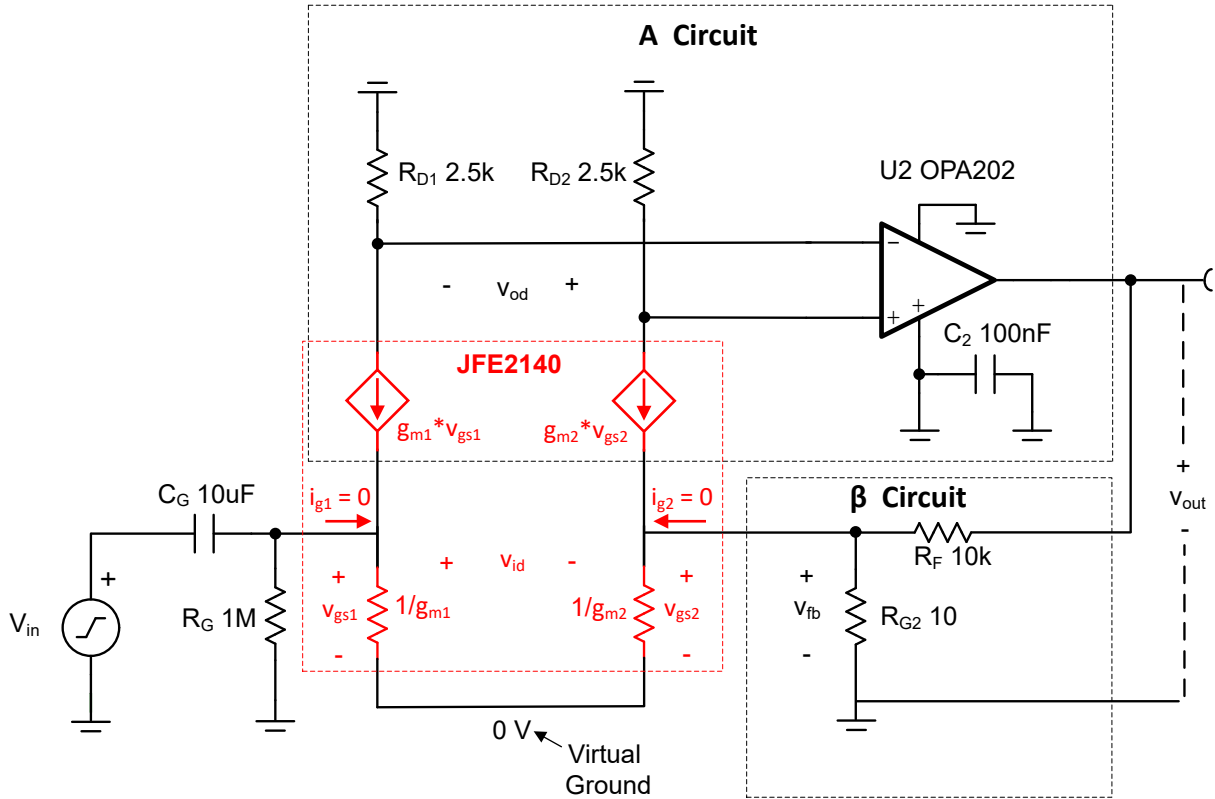


图 2-1. 具有 JFE2140 前端小信号 T 模型的前置放大器

小信号电流 i_{ds1} 流经电阻器 R_{D1} 和 R_{D2} ，从而在 JFE2140 的漏极之间形成差分电压 v_{od} 。OPA202 会监控 v_{od} 并使用电压 v_{out} 驱动环路，从而使 OPA202 的输入端大致相等。JFE2140 与 OPA202 组合形成前馈增益级 A，如图 2-1 所示。假设对称和 $i_{ds1} = i_{ds2}$ ，JFE2140 的增益为 $g_m \times R_D$ 。跨导参数 g_m 可通过图 2-2 进行近似计算。当漏源电流为 1mA 时，测得的 g_m 约为 7.5mS。

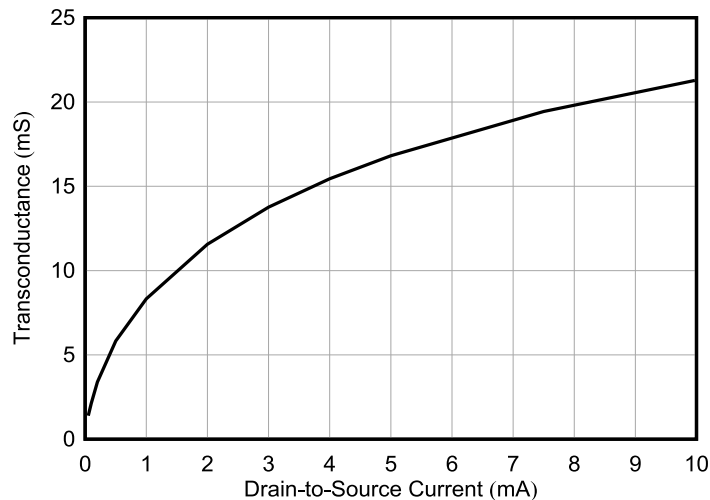


图 2-2. 跨导与漏源电流间的关系

OPA202 的 DC A_{ol} 为 150dB。结合 JFET 增益，可计算出前馈增益 A，如方程式 1 所示。仿真前馈增益如图 2-3 所示， $A = 175\text{dB}$ 。这与计算结果非常吻合。

$$A_{dB} = 20 \times \log(7.5 \text{ mS} \times 2.5 \text{ k}\Omega) + 150 \text{ dB} = 175.46 \text{ dB} \quad (1)$$

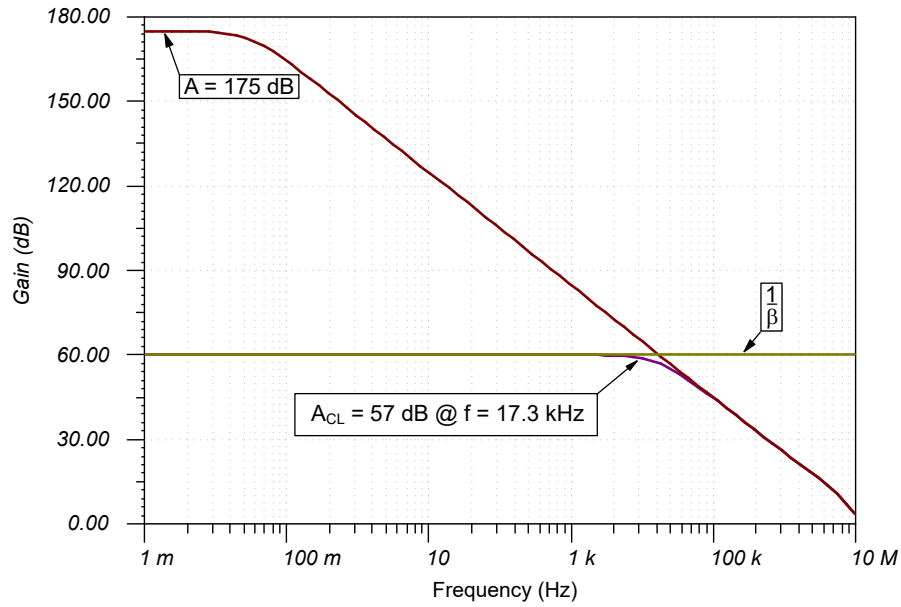


图 2-3. 环路参数 (dB) 与频率 (Hz) 间的关系

由于晶圆工艺变化可使 g_m 发生高达 30% 的变化，因此添加反馈网络 (β) 可保持可预测的闭环增益。 β 反馈网络由电阻 R_F 和 R_{G2} 组成，是一个串联分流反馈网络。 β 网络通过分流 OPA202 的输出对 v_{out} 进行采样，然后反馈成比例的电压 v_{fb} 。电压 $v_{fb} = v_{gs2}$ 。栅极是电路的反馈求和节点。在此配置中，环路是闭合的。输入差分电压 v_{id} 的增加会导致 v_{od} 上升，从而导致 v_{out} 上升。如果 v_{out} 上升， v_{gs2} 也会上升。 v_{gs2} 的增加会降低 v_{id} 。观察到 JFET 漏极之间的差分电压降低。最终结果是 v_{out} 降低，从而使前置放大器的负反馈环路完整。

标准闭环增益 (A_{cl}) 方程式 2 适用。

$$A_{cl} = \frac{A}{1 + A\beta} \quad (2)$$

假设前馈增益 A 远高于 β ，则 A_{cl} 大致由中波段频率中的电阻器 R_F 和 R_{G2} 决定。 A_{cl} 可使用方程式 3 近似计算得出。

$$A_{cl} \approx \frac{1}{\beta} \approx \frac{R_F}{R_{G2}} + 1 \quad (3)$$

$$A_{cl} \approx 1001 \frac{V}{V} \text{ 或 } 60 \text{ dB} \quad (4)$$

图 2-4 展示了 JFET 前置放大器电路的闭环增益与频率响应间的关系。

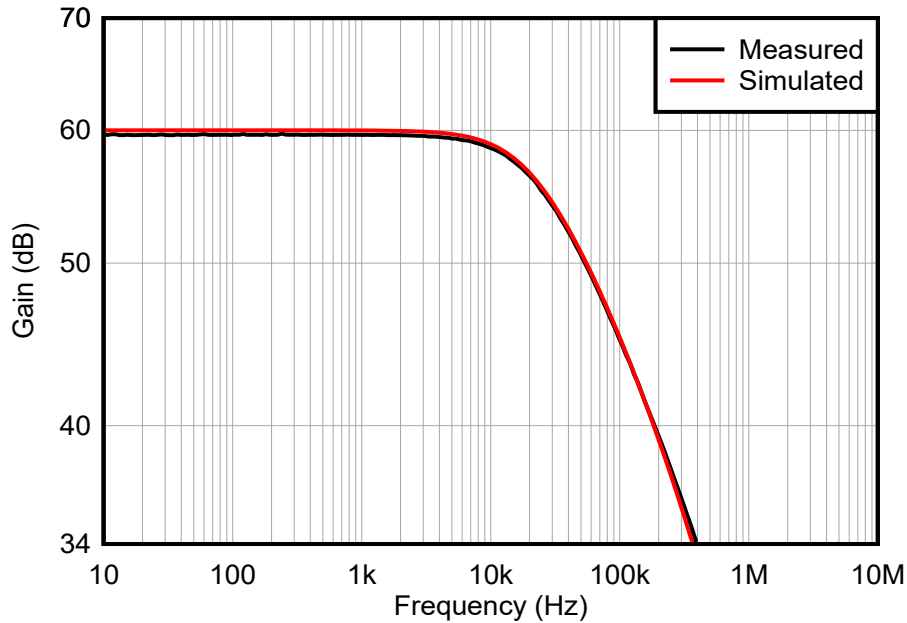


图 2-4. A_{cl} (dB) 与频率 (Hz) 间的关系

图 2-5 比较了 JFE2140 复合前置放大器电路与 OPA202 和 OPA145 的增益带宽。每种配置的增益均为 60dB。表 2-1 展示了 JFE2140 复合前置放大器电路可实现 3 个电路中的最高带宽。这是由于分立式 JFET 前端产生的额外前馈增益实现的。表 2-1 还展示了 JFE2140 复合电路实现的超低噪声性能。

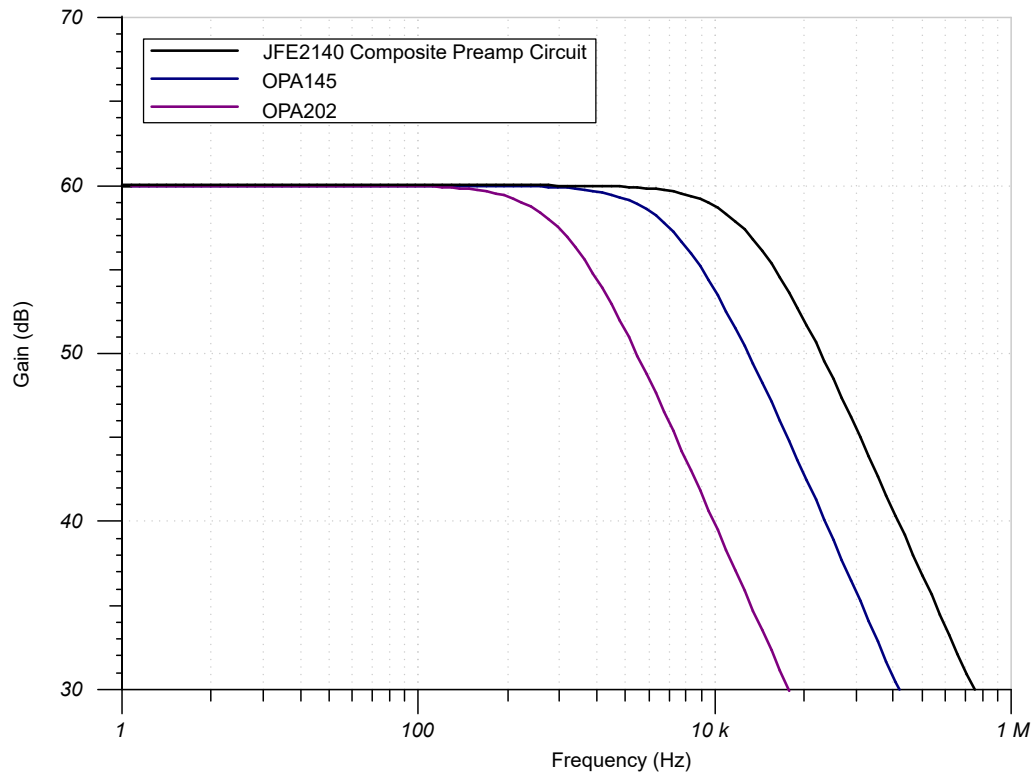


图 2-5. 增益带宽比较

表 2-1. 电路拓扑比较

放大器	- 3dB 点	电压噪声 以输入为基准 f = 1kHz	总 Iq
JFE2140 复合前置放大器电路	17.3 kHz	$1.96 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$	3.6mA
OPA145	5.56 kHz	$7.1 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$	449μA
OPA202	988 Hz	$8.9 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$	582μA

3 稳定性

环路参数 A 和 $1/\beta$ 可以通过断开环路在仿真中确定。这是通过使用 V_{Loop} 驱动环路在 SPICE 仿真器中完成的，如图 3-1 所示。

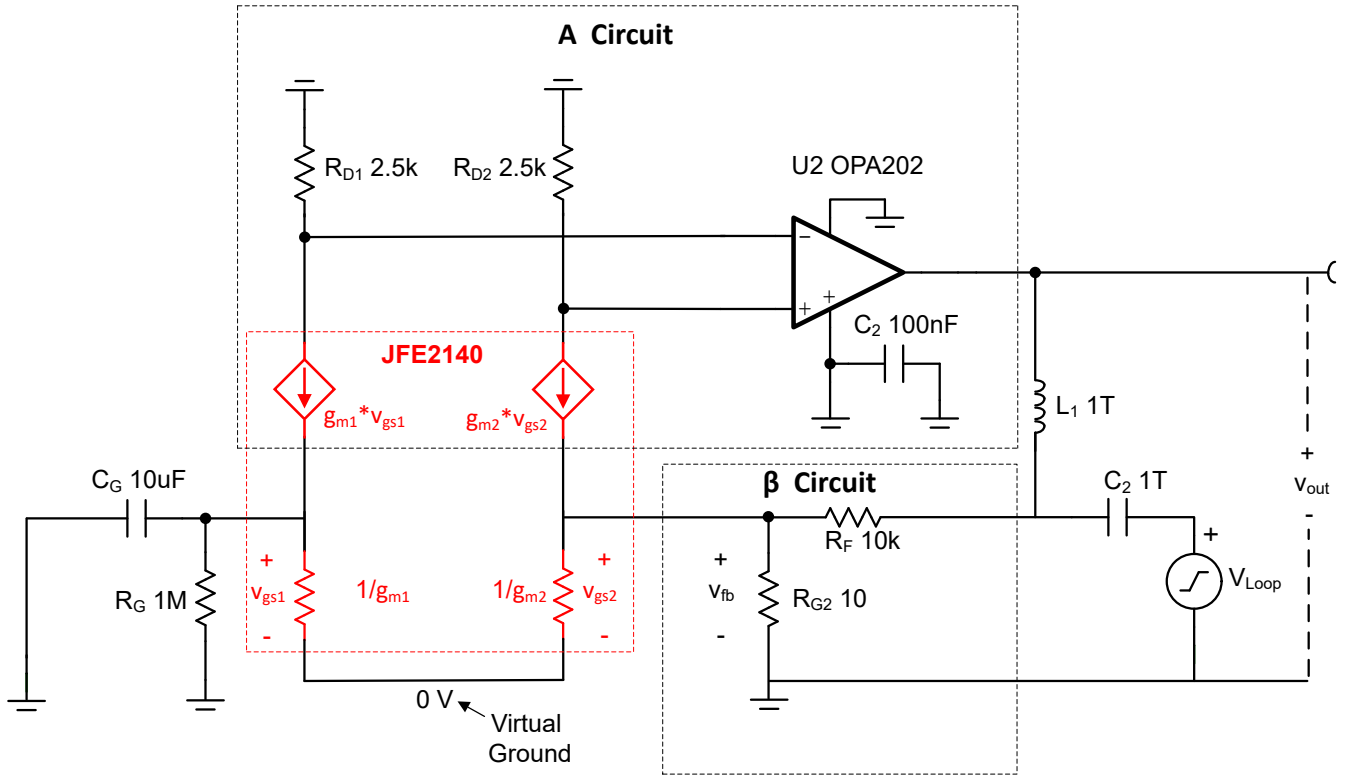


图 3-1. 使用小信号 T 模型对具有 JFE2140 前端的前置放大器进行环路分析

在高频时，电感器 L_1 为开路，电容器 C_2 为短路。该方法可隔离电路 A 和 β ，绘制每个电路的频率响应，如图 3-2 所示。

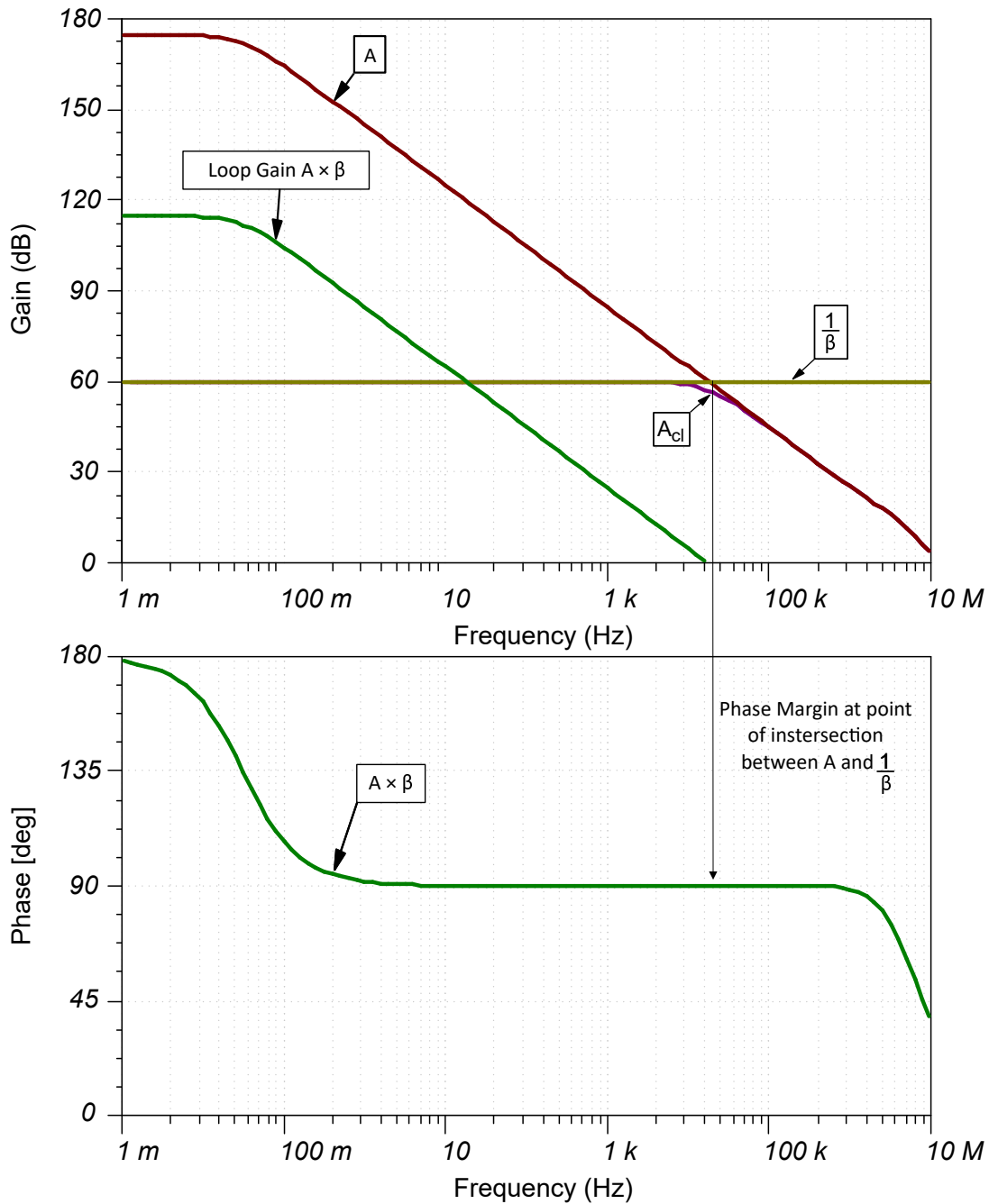


图 3-2. 稳定性分析

当 A 和 $1/\beta$ 相交时， A_{cl} 的上 -3dB 点会出现。断开环路还允许设计人员检查电路稳定性，如图 3-2 中的环路增益 ($A \times \beta$) 相位图所示。在 A 和 $1/\beta$ 的交点处，相位裕度 = $180^\circ - 90^\circ = 90^\circ$ 。 β 电路中置于电阻器 R_F 两端的电容器可以提高易受不稳定影响的应用的稳定性。驱动大容量负载的应用可从放置在 v_{out} 环路外部的隔离电阻器中获益。

4 总结

在专业麦克风、音频接口、混频器、唱盘和吉他放大器等应用中，放大小信号非常具有挑战性。这些类型的应用受益于分立式 JFET 提供的偏置灵活性、高输入阻抗和低噪声。

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