

Zach Olson

摘要

本应用手册介绍了如何使用放大器的开环输出阻抗来计算驱动较大容性负载的理想隔离电阻。应用示例计算来选择电阻器值，以稳定因输出端较大电容而振荡的放大器。探讨了开环输出阻抗与容性负载驱动之间的关系，并推导出了一个公式来快速确定最佳隔离电阻。

内容

1 引言：开环输出阻抗 (R_O).....	2
2 概述：闭环放大器稳定性.....	3
3 计算驱动较大负载电容的最佳隔离电阻示例.....	4
4 R_O 、 R_{ISO} 和容性负载驱动.....	6
5 推导计算最佳隔离电阻的公式.....	9
6 总结.....	12
7 参考文献.....	13

插图清单

图 1-1. OPA392 开环输出阻抗与频率间的关系.....	2
图 3-1. 10 μ F 负载的不稳定缓冲器配置.....	4
图 3-2. 具有最佳 R_{ISO} 的稳定缓冲器配置.....	5
图 4-1. 运算放大器输出电阻内部模型.....	6
图 4-2. 容性负载对放大器开环增益的影响.....	6
图 4-3. 带 R_{ISO} 和容性负载的运算放大器输出电阻.....	7
图 4-4. R_{ISO} 对具有容性负载的放大器开环增益的影响.....	7
图 4-5. 带电阻-容性负载的 R_{ISO} 分压器.....	8
图 5-1. 小信号阶跃响应和相位裕度.....	9
图 5-2. 具有容性负载的放大器开环增益.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言：开环输出阻抗 (R_O)

理想的运算放大器具有无限输入阻抗和零输出阻抗。在实践中，每个实际放大器都有一个非零输出阻抗，通常在 Ω 到 $k\Omega$ 范围内。德州仪器 (TI) 运算放大器数据表中包含开环输出阻抗 (R_O) 随频率变化的曲线图。请勿将 R_O 与闭环输出阻抗 (R_{OUT}) 混淆，尽管两者都与环路增益密切相关。

图 1-1 显示了 OPA392 随频率变化的开环输出阻抗，该阻抗在整个频率范围内在约 $120\ \Omega$ 时是平坦的。曲线的平坦部分意味着开环输出阻抗在放大器的有效带宽内充当电阻器 (R_O)。一些放大器的输出阻抗随频率变化，这意味着存在复阻抗 (Z_O)。本文档中的分析适用于在放大器有效带宽上具有平坦电阻输出阻抗的放大器。

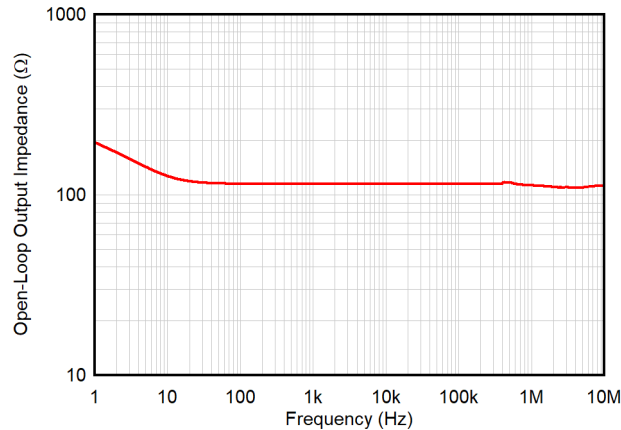


图 1-1. OPA392 开环输出阻抗与频率间的关系

数据表的电气特性部分还指定了 R_O ，确认电阻为 $120\ \Omega$ 。此 R_O 数据表规格用于确定驱动较大容性负载时 R_{ISO} 的最佳值，请参阅节 3。

R_O	开环输出阻抗	$f = 1\text{MHz}$	120	Ω
-------	--------	-------------------	-----	----------

2 概述：闭环放大器稳定性

放大器稳定性是设计人员最关心的问题，因为放大器电路需要在各种输出负载条件下工作。直接位于放大器输出端的电容会导致输入引脚和输出引脚之间的延时时间。这些延时时间通常表示为输出节点和反馈节点之间的相移，这些相移可能导致放大器输出端出现振荡。

方程式 1 定义了放大器在整个频率范围内的闭环增益 (A_{cl})。可在 [电压反馈运算放大器的稳定性分析](#) 应用手册中找到此公式的推导过程。

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

其中，

- A_{OL} 是放大器的开环增益
- β 是反馈因子

当 $A_{OL}\beta$ 的幅度为 1，并且相移为 180° 时， $A_{OL}\beta$ 可以用相量表示法表示为 $1 \angle 180^\circ$ ，等于 -1。分母中的这个 -1 项导致除以零，并且公式未定义。在单位增益下， $A_{OL}\beta$ 接近 180° 相移的系统开始以输出端振荡或振铃的形式表现出不稳定的迹象。术语相位裕度用于解释这一点，定义为当 $A_{OL}\beta$ 的幅度为 0dB 时，系统与 180° 总相位反转的接近程度。 45° 的相位裕度是评估系统稳定性的常见基准。设计人员通常将最小相位裕度设定为 45° ，以避免不稳定。

一种分析放大器稳定性的常用技术是仿真放大器电路在整个频率范围内的开环增益 (A_{OL}) 和反馈因子 (β)。稳定的电路将显示 A_{OL} 和 $1/\beta$ 曲线之间 20dB 的接近速率以及 45-90 度的相位裕度。[德州仪器 \(TI\) 精密实验室 \(TIPL\) 有关稳定性的视频系列](#) 详细解释了接近速率、相位裕度，以及与稳定性分析相关的其他细节。

3 计算驱动较大负载电容的最佳隔离电阻示例

放大器表现出不稳定的常见情况是配置为直接驱动较大容性负载。图 3-1 显示了配置为缓冲器的 OPA392，放大器输出和接地之间连接了一个 $10\mu\text{F}$ 电容器。 $10\mu\text{F}$ 负载会导致电路出现不希望的振铃行为。此振铃行为表示电路不稳定。TIPL 有关稳定性的视频系列中描述的分析技术确认此电路不稳定，相位裕度小于 1° 。

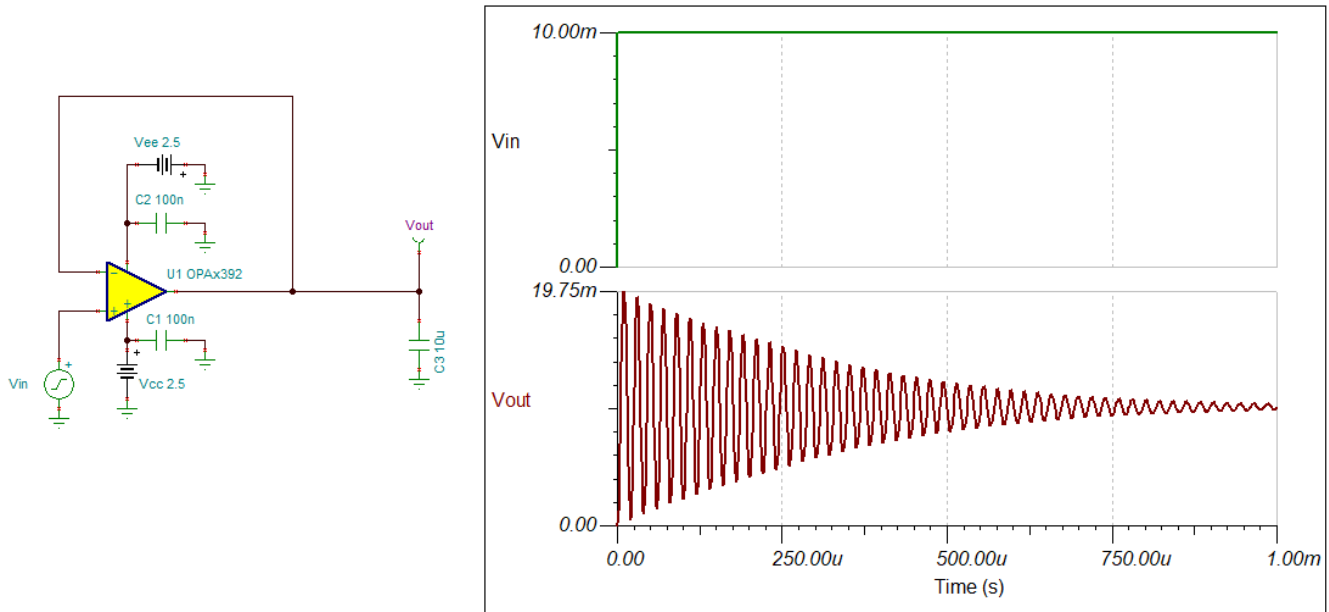


图 3-1. $10\mu\text{F}$ 负载的不稳定缓冲器配置

不建议直接加载具有较大电容器的放大器输出。然而，在某些情况下，例如 ADC 基准驱动器，该负载电容器对于电路正常工作至关重要，并且无法去除或减小该电容。稳定驱动容性负载的放大器的常用技术是在放大器的输出端和负载电容之间串联一个电阻器。此电阻器称为隔离电阻器或 R_{ISO} ，因为它的作用是隔离放大器的输出和反馈与容性负载。

在 OPA392 缓冲器电路中实现 380mΩ 的小型隔离电阻器可将相位裕度提高至 60°，并且电路稳定。图 3-2 显示了较小信号阶跃响应，其中输出稳定而没有振荡或振铃。

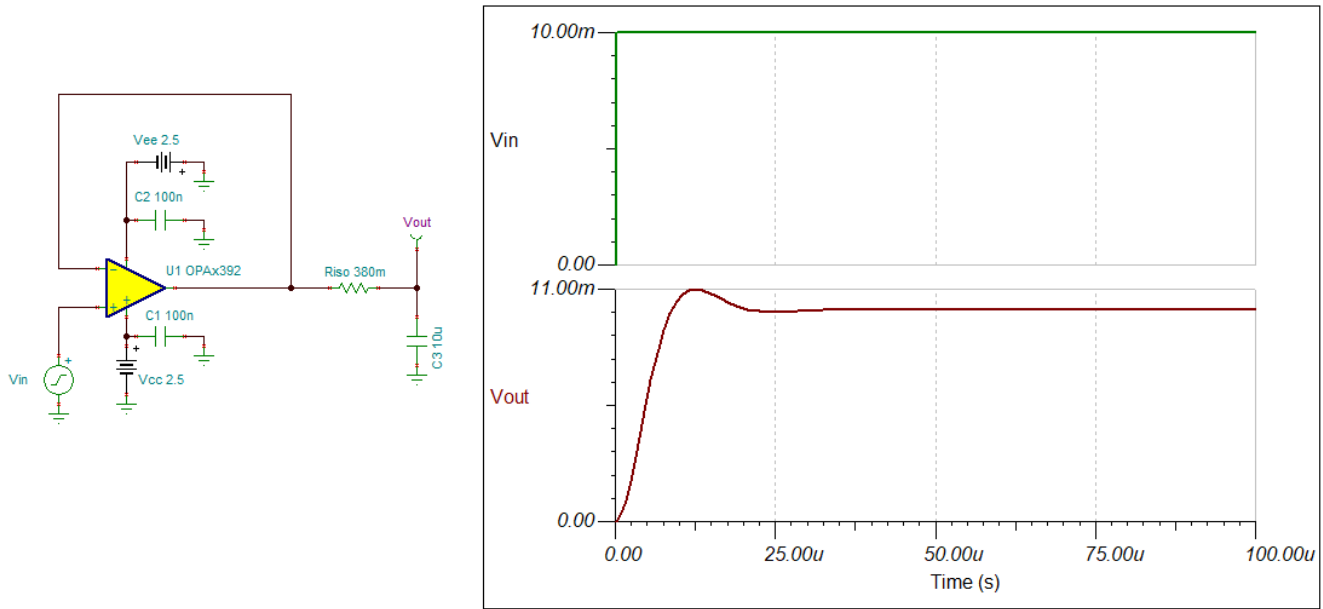


图 3-2. 具有最佳 R_{ISO} 的稳定缓冲器配置

方程式 2 确定了隔离电阻的幅度。

$$R_{ISO} = \frac{1 + \sqrt{1 + (8\pi \cdot R_O \cdot C_{LOAD} \cdot f_{gbW})}}{4\pi \cdot C_{LOAD} \cdot f_{gbW}} \quad (2)$$

其中，

- 根据数据表中的定义， f_{gbW} 是放大器的增益带宽（以 Hz 为单位）
- 根据数据表中的定义， R_O 是放大器的开环输出阻抗（以 Ω 为单位）
- C_{LOAD} 是负载电容（以法拉为单位）

根据增益带宽和开环输出阻抗的数据表规格，方程式 2 可用于快速确定稳定驱动较大容性负载的电路的最佳隔离电阻。始终使用 Spice 仿真工具（例如 TINA-TI）来验证电路是否稳定，并以所选的 R_{ISO} 值运行。

节 4 中详细探讨了开环输出阻抗、容性负载和闭环稳定性之间的关系。然后，可使用这一关系推导出方程式 2，以计算驱动容性负载时的最佳 R_{ISO} 。

4 R_O 、 R_{ISO} 和容性负载驱动

输出阻抗也称为输出电阻，可以建模为放大器输出端的串联电阻器。

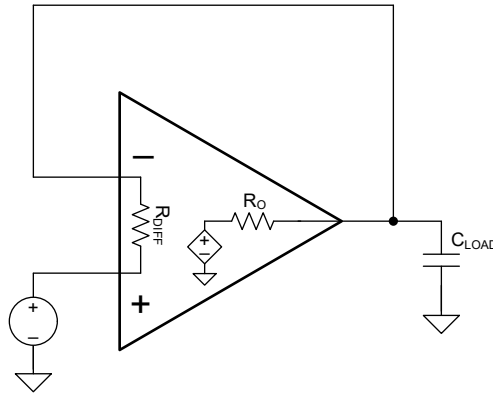


图 4-1. 运算放大器输出电阻内部模型

负载电容 (C_{LOAD}) 与放大器的输出阻抗 (R_O) 相互作用，在放大器的 A_{OL} 曲线中产生一个额外的极点，如图 4-2 所示。此额外极点 (f_{p2}) 会使 A_{OL} 再降低 20dB/十倍频程，从而达到在 $1/\beta$ 下总共 40dB/十倍频程的接近速率。接近速率 (ROC) 由 A_{OL} 和 $1/\beta$ 曲线在两条曲线相交频率处的斜率差定义。稳定电路的接近速率大约为 20dB/十倍频程。

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi \cdot R_O \cdot C_{LOAD}} \quad (3)$$

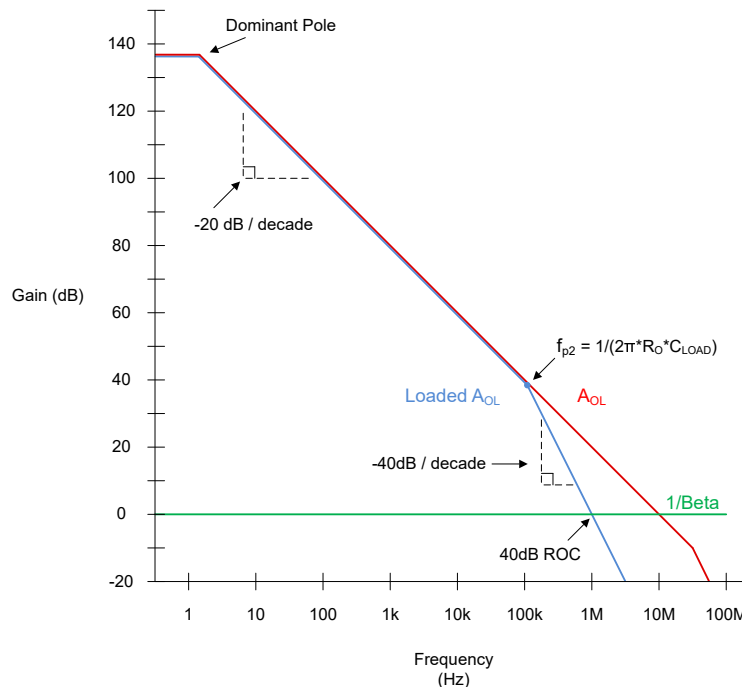
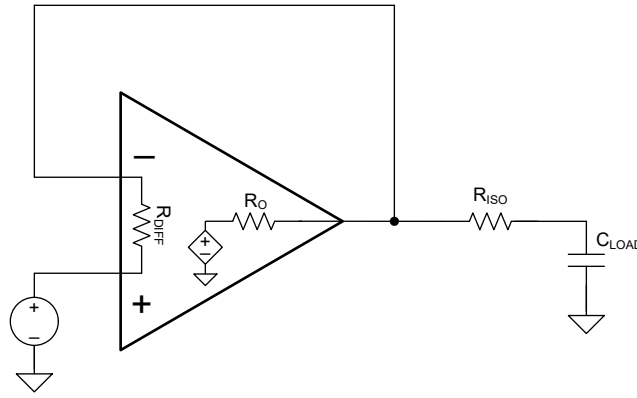


图 4-2. 容性负载对放大器开环增益的影响

考虑到 A_{OL} 和 $1/\beta$ 之间的接近速率，当 f_{p2} 的频率低于放大器带宽时，就会出现稳定性问题。对于具有相当带宽的放大器，具有较低开环输出阻抗的放大器能够驱动更大的容性负载，同时保持稳定性。

当电路中实现 R_{ISO} 时，隔离电阻与负载电容相互作用，在 A_{OL} 曲线中产生零点。此零点 (f_{z1}) 会导致 A_{OL} 曲线增加 20dB/十倍频程，从而抵消了 f_{p2} 的影响，并将接近速率恢复到 20dB/十倍频程。



$$f_{z1} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{ISO} \cdot C_{LOAD}} \quad (4)$$

图 4-3. 带 R_{ISO} 和容性负载的运算放大器输出电阻

按照方程式 5 中的定义， R_{ISO} 还会导致极点频率从 f_{p2} 偏移到 f_{p2}^* 。

$$f_{p2}^* = \frac{1}{2\pi[R_O + R_{ISO}]C_{LOAD}} \quad (5)$$

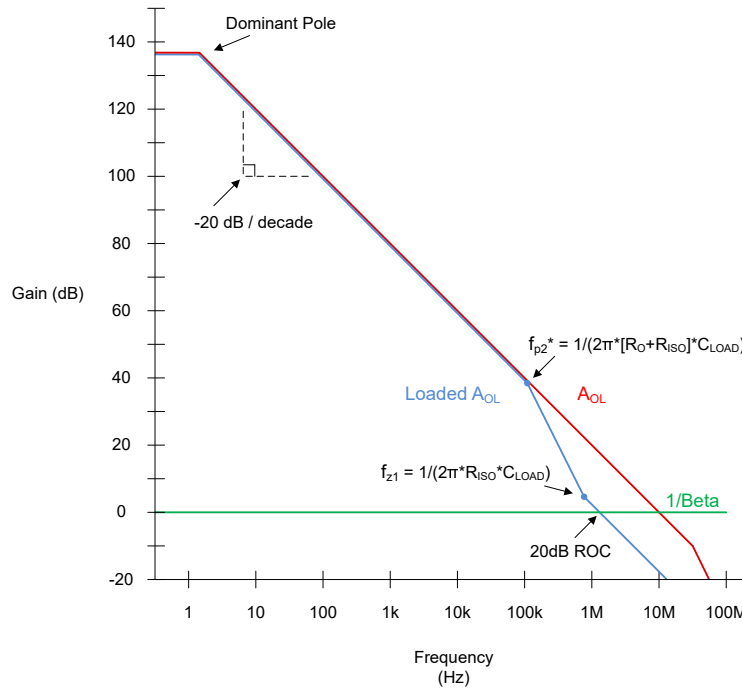


图 4-4. R_{ISO} 对具有容性负载的放大器开环增益的影响

R_{ISO} 设计为尽可能小，同时保持闭环稳定性。较大的隔离电阻会增加相位裕度，但会产生电压误差和增加稳定时间。如果负载具有电阻元件， R_{ISO} 会在放大器的输出和负载电阻之间创建一个电阻分压器，从而导致电压误差。如果负载电阻远大于 R_{ISO} ，此电压误差可以忽略不计。图 4-5 显示了两个驱动阻性元件为 $10k\Omega$ ，电容为 $5nF$ 的复杂负载的放大器。由 20Ω 隔离电阻器引起的电压误差对于应用来说是可以容忍的，而由 200Ω 隔离电阻器产生的电压误差是不可接受的。对于直流应用，如果稳定放大器所需的 R_{ISO} 过大，可以使用双反馈方法。对于交流应用，请选择具有低输出阻抗的运算放大器，以更大限度地降低实现稳定所需的隔离电阻。

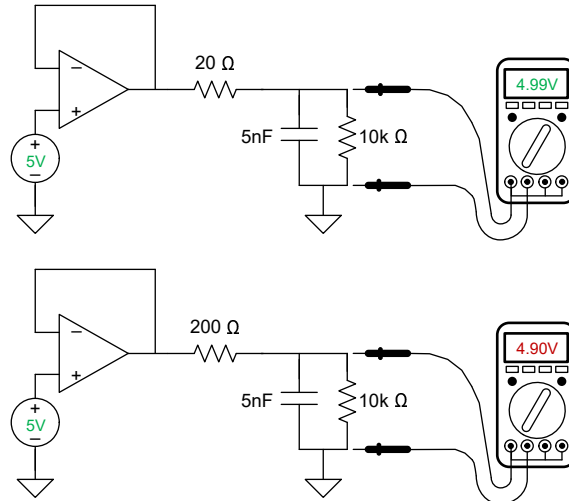


图 4-5. 带电阻-容性负载的 R_{ISO} 分压器

5 推导计算最佳隔离电阻的公式

为了在保持闭环稳定性的同时减少误差，必须确定最佳 R_{ISO} 电阻。最佳隔离电阻是在驱动容性负载时产生可接受的瞬态响应的最小串联电阻。虽然 45° 的相位裕度通常被认为是稳定的，但这对于需要较低过冲的应用来说可能还不够。在某些情况下， 60° 的相位裕度通常被视为最佳阻尼。如果电压误差是主要问题，可以将相位裕度设定为 45° ，因为这样允许使用最小的隔离电阻。

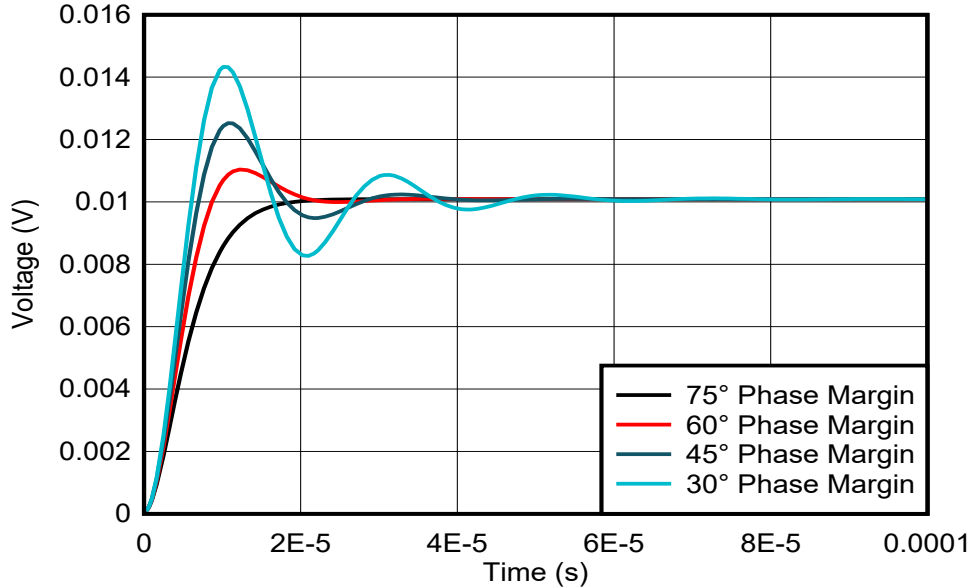


图 5-1. 小信号阶跃响应和相位裕度

接近频率 (f_{cl}) 是 A_{OL} 和 $1/\beta$ 曲线相交的频率。选择一个可将 f_{z1} 恰好置于接近频率的 R_{ISO} 电阻，目标相位裕度在 50° 至 60° 之间，是电压误差和瞬态性能之间的好权衡。在这种情况下，最佳 R_{ISO} 会产生 f_{z1} ，可使：

$$f_{z1} = f_{cl} \quad (6)$$

对于缓冲器配置中的典型放大器，接近频率就是运算放大器的增益带宽 (f_{gbw})。但是，在加载的 A_{OL} 曲线中， f_{p2} 导致 A_{OL} 每十倍频程额外降低 20dB，接近频率始终小于增益带宽。必须确定准确的接近频率，才能准确地选择最佳 f_{z1} 频率。

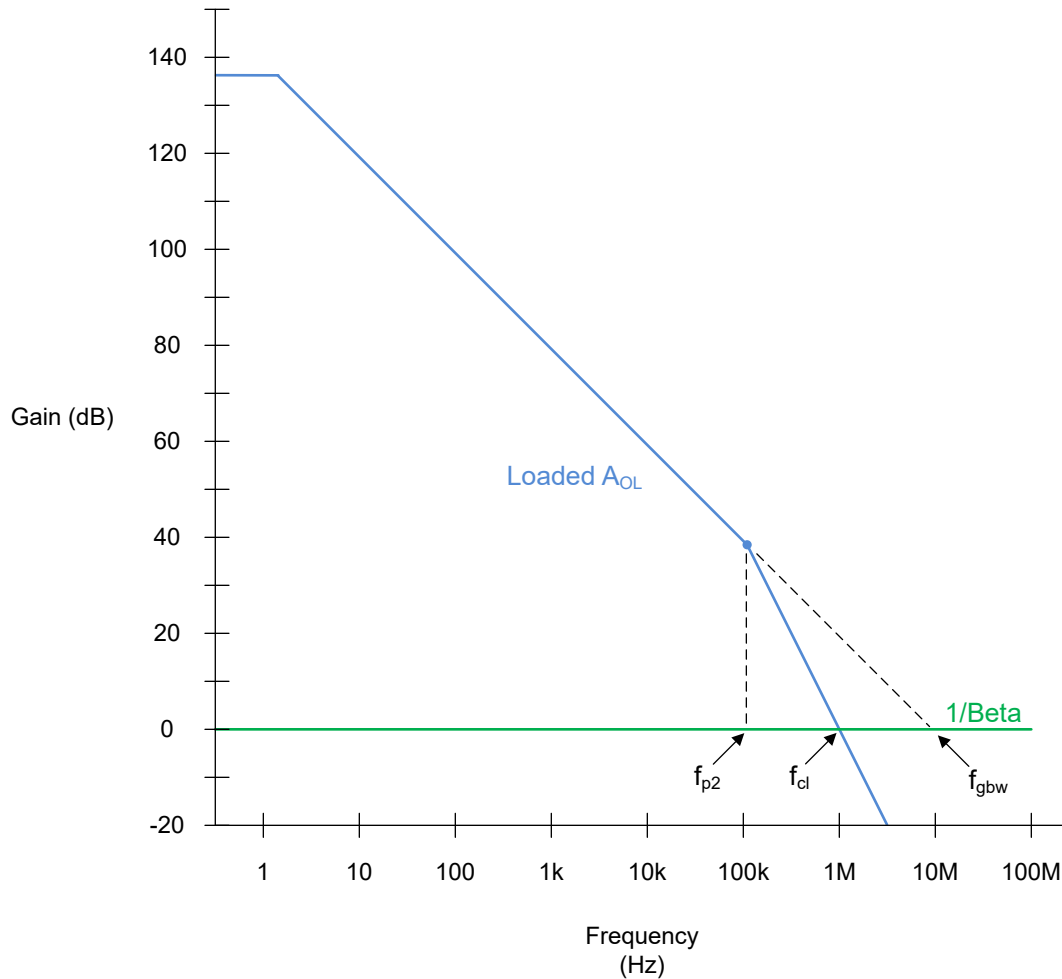

图 5-2. 具有容性负载的放大器开环增益

图 5-2 绘制了放大器的负载 A_{OL} 曲线与频率 f_{p2} 和 f_{gbw} 的关系。从几何角度观察该波特图，可以发现两个具有已知斜率和顶点的三角形，它们在 f_{cl} 处相交。假设二阶系统具有 $-20\text{dB}/十倍频程$ 和 $-40\text{dB}/十倍频程$ 的一致斜率， f_{cl} 始终位于对数轴上 f_{p2} 和 f_{gbw} 之间的中点。在已知负载电容和从数据表提取的 R_O 和 f_{gbw} 的值的的情况下，可以使用以下公式来求解 f_{cl} 。

$$\log_{10}(f_{cl}) = \frac{\log_{10}(f_{p2}) + \log_{10}(f_{gbw})}{2} \quad (7)$$

$$f_{cl} = 10^{\frac{\log_{10}(f_{p2} \cdot f_{gbw})}{2}} \quad (8)$$

$$f_{cl} = \sqrt{f_{p2} \cdot f_{gbw}} \quad (9)$$

将 f_{z1} 设置为等于 f_{cl} ，并考虑由于 R_{ISO} 而在 f_{p2} 中产生的相移，即可推导出方程式 10。

$$f_{z1} = \sqrt{f_{p2}^* \cdot f_{gbw}} \quad (10)$$

将方程式 10 与方程式 5 相结合即可产生方程式 11。

$$\frac{1}{2\pi \cdot R_{ISO} \cdot C_{LOAD}} = \sqrt{\frac{f_{gbw}}{2\pi[R_O + R_{ISO}]C_{LOAD}}} \quad (11)$$

简化后得到以下标准形式的 R_{ISO} 二次公式。

$$(2\pi \cdot C_{LOAD} \cdot f_{gbw})R_{ISO}^2 - R_{ISO} + R_O = 0 \quad (12)$$

使用此二次公式求解 R_{ISO} ，假设 R_{ISO} 必须是用于确定节 3 中最佳 R_{ISO} 的公式中的正结果。

$$R_{ISO} = \frac{1 + \sqrt{1 + (8\pi \cdot R_O \cdot C_{LOAD} \cdot f_{gbw})}}{4\pi \cdot C_{LOAD} \cdot f_{gbw}} \quad (13)$$

其中，

- 根据数据表中的定义， f_{gbw} 是放大器的增益带宽（以 Hz 为单位）
- 根据数据表中的定义， R_O 是放大器的开环输出阻抗（以 Ω 为单位）
- C_{LOAD} 是负载电容（以法拉为单位）

对于驱动较大容性负载的放大器，[方程式 13](#) 可用于快速得出实现 50° 至 60° 相位裕度所需的隔离电阻。必须使用 TINA-TI 等 Spice 仿真工具来验证生成的相位裕度，因为此相位裕度可能会根据初始相位裕度和其他电路条件而发生显著变化。TI 精密实验室在线培训视频介绍了如何在各种条件下对放大器电路进行稳定性分析。

[方程式 13](#) 是针对缓冲器配置中的放大器而推导出的，但是该公式也可以通过调整频率项以考虑增益带宽来用于增益级，如[方程式 14](#) 中所示。

$$R_{ISO} = \frac{1 + \sqrt{1 + \left(8\pi \cdot R_O \cdot C_{LOAD} \cdot \frac{f_{gbw}}{A_V}\right)}}{4\pi \cdot C_{LOAD} \cdot \frac{f_{gbw}}{A_V}} \quad (14)$$

其中 A_V 等于放大器级的同相增益，单位为 V/V。

增益配置中的反馈网络可以在放大器的 $1/\text{Beta}$ 和加载的 A_{OL} 曲线中产生额外的极点和零点，从而导致不稳定。在这些情况下，需要进一步分析，并且可以实施额外的稳定技术，例如反馈补偿。始终使用 SPICE 仿真工具（例如 TINA-TI）来验证电路是否稳定且运行正常。

6 总结

由于开环输出阻抗和负载电容之间的相互作用，驱动较大容性负载的放大器电路变得不稳定。驱动较大的容性负载时，必须采用更优的隔离电阻器以保持闭环稳定性和最小电压误差。对于具有电阻式开环输出阻抗的放大器，推导出一个公式来快速确定最佳 R_{ISO} 值。 R_{ISO} 的幅度取决于负载电容的幅度、放大器的增益带宽和开环输出阻抗。具有较低开环输出阻抗的放大器最适合驱动容性负载。

本文档中的分析考虑了具有电阻输出阻抗的放大器随频率变化的情况。某些放大器架构在放大器的整个带宽上表现出复输出阻抗 Z_O 。具有复输出阻抗的放大器需要进一步分析和额外技术来优化容性负载驱动稳定性。本文的范围仅限于表现出与图 1-1 所示的 OPA392 输出阻抗相似的电阻输出阻抗的放大器。

7 参考文献

- 德州仪器 (TI), [OPAx392 低失调电压、低噪声、低输入偏置电流、轨到轨 I/O、e-trim™ 精密运算放大器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI), [电压反馈运算放大器的稳定性分析](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [使用 \$Z_{OUT}\$ 对负载感应放大器稳定性问题进行闭环分析](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [TI 精密实验室 - 稳定性](#)。
- 德州仪器 (TI), [TINA-TI](#)。

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