

运算放大器带宽和带宽平坦度

电压反馈型运算放大器的带宽

下图1显示电压反馈型运算放大器的开环频率响应。有两种可能：图1A是最常见的情况，高直流增益以6 dB/倍频程从极低频率下降至单位增益，也就是典型的单极点响应。相比之下，图1B的放大器响应中具有两个极点，增益先以6 dB/倍频程下降，然后以12 dB/倍频程下降。图1A中的放大器称为无条件稳定或完全补偿型放大器，可配合单位噪声增益使用。该类型的放大器可在输出至反相输入的100%反馈(包括电容)下保持稳定。

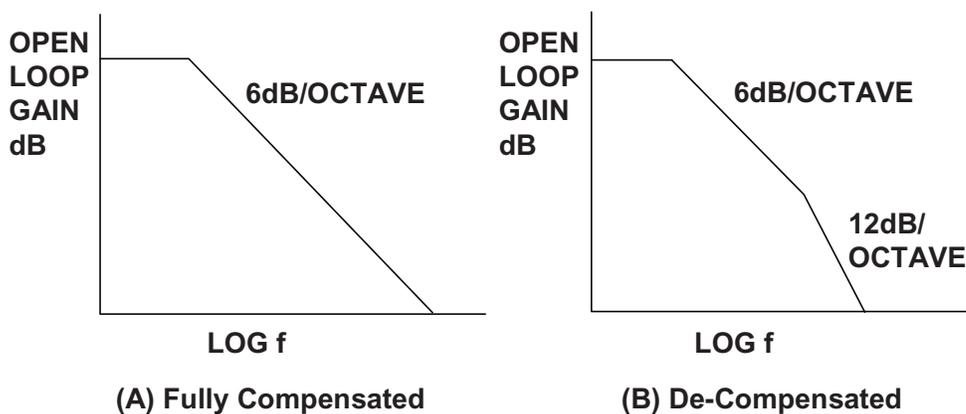


图1：电压反馈型运算放大器的频率响应

与图1B的放大器相互比较，如果该运算放大器配合特定噪声增益使用，且该噪声增益低于响应斜率从6 dB/倍频程增加至12 dB/倍频程的增益，则反馈中的相移将过大，放大器将会振荡。该类型的放大器表述为“在增益 $\geq X$ 时保持稳定”，其中 X 是发生6 dB/12 dB转换时的频率增益。当然应注意，这里参考的是噪声增益。稳定增益级可能在2至25之间，通常我们称之为“5倍增益稳定”等等。这些非完全补偿运算放大器具有比完全补偿型放大器更高的增益带宽积，所有其他特性完全相同。因此虽然设计器件时略为复杂，但非常有用。不过，与完全补偿型运算放大器不同，非完全补偿运算放大器无法用于输出至反相输入的直接容性反馈。

两种放大器的响应斜率均为6 dB/倍频程，也就是在发生此斜率的频率范围内，该增益下的闭环增益与3 dB闭环带宽之积恒定不变，这称为增益带宽积(GBW)，是放大器的一个品质因数。例如，如果运算放大器具有 X MHz的GBW积，则在1倍噪声增益下的闭环带宽为 X MHz，2倍噪声增益下为 $X/2$ MHz， Y 倍噪声增益下为 X/Y MHz(参见下图2)。请注意，闭环带宽是噪声增益与开环增益相交的频率。

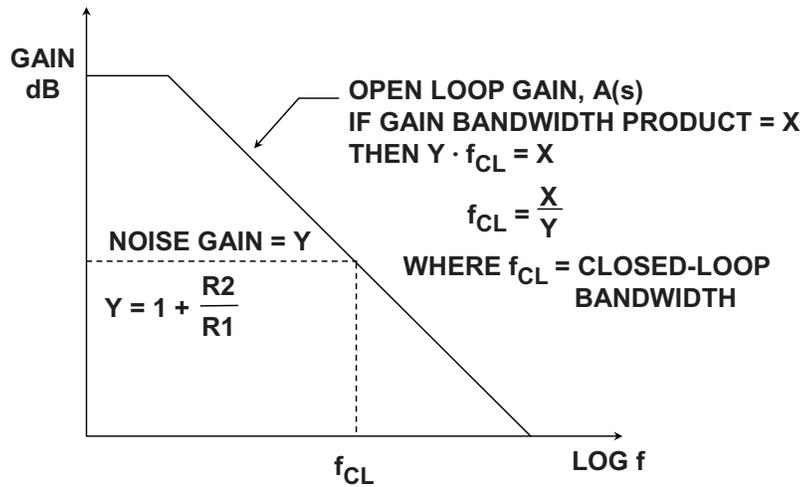


图2：电压反馈型运算放大器的增益带宽积

以上示例中，假定了反馈元件为电阻性。但实际情况通常需要反馈电容以提高稳定性。

下图3显示了典型示例，其中运算放大器的反相输入端具有电容C1。此电容是运算放大器内部电容与可能存在的任何外部电容之和，它始终存在，并在噪声增益传递函数中引入一个极点。

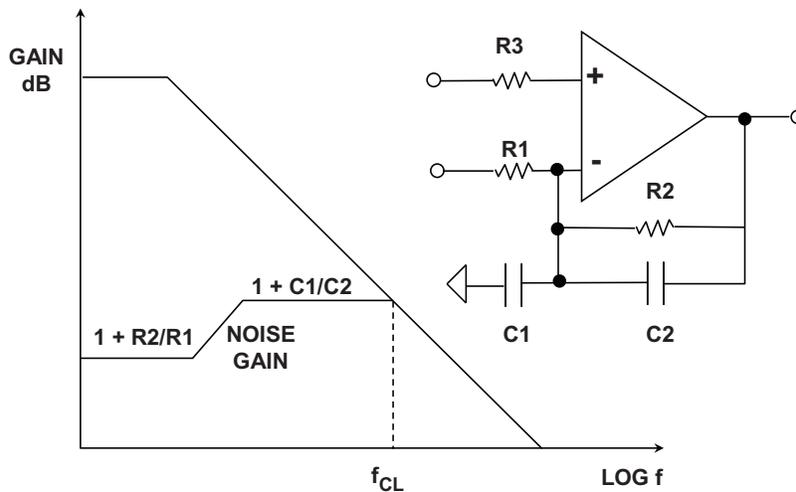


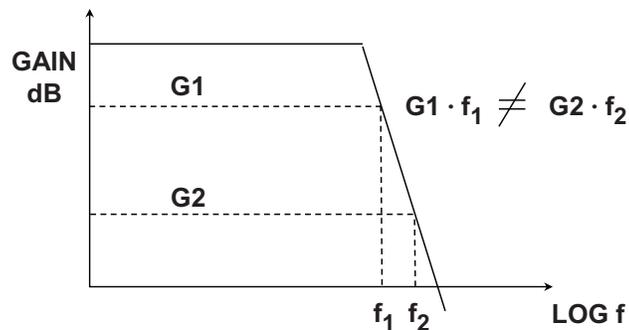
图3：使用电阻性和电抗性反馈元件的电压反馈型运算放大器的噪声增益波特图

噪声增益曲线和开环增益曲线交点处的净斜率决定系统稳定性。如需无条件稳定性，噪声增益必须以小于12 dB/倍频程(20 dB/10倍频程)的净斜率与开环增益相交。添加反馈电容C2可在噪声增益传递函数内引入一个零点，从而使电路趋于稳定。请注意，图3中的闭环带宽 f_{cl} 是噪声增益与开环增益相交的频率。

噪声增益波特图在分析运算放大器稳定性时是很有用的工具。制作波特图并不难。噪声增益和稳定性的进一步细节不在本节讨论范围内，有关波特图的制作和分析，请读者自行参阅参考文献1。

电流反馈型运算放大器的带宽

电流反馈型运算放大器与电压反馈型运算放大器不同。在容性反馈下不会保持稳定，也无法用于输出至反相输入的短路。对于CFB运算放大器，一般在最佳反馈电阻时可获得最大带宽。请注意，此电阻值可随电源电压而变化—请参考器件数据手册。如果反馈电阻增大，带宽会降低。相反，如果反馈电阻减小，带宽会升高，放大器则变得不稳定。



- ◆ Feedback resistor fixed for optimum performance. Larger values reduce bandwidth, smaller values may cause instability.
- ◆ For fixed feedback resistor, changing gain has little effect on bandwidth.
- ◆ Current feedback op amps do not have a fixed gain-bandwidth product.

图4：电流反馈型运算放大器的频率响应

在CFB运算放大器中，对于给定反馈电阻值(R2)，闭环带宽大多数情况下不受噪声增益影响，如上图4所示。因此CFB放大器不应参考增益带宽积，因为该值不恒定。控制CFB运算放大器应用中的增益时，需要为器件选择正确的反馈电阻(R2)，然后选择底部电阻(R1)，以产生所需的闭环增益。R2和R1的增益关系与VFB运算放大器中的关系是相同的。

通常，CFB运算放大器数据手册会提供建议电阻值表，规定了器件在增益和电源电压范围内的最大带宽。使用这些表可显著简化设计过程。

带宽平坦度

在要求严苛的专业视频之类应用中，需要在某一最大额定频率之下维持相对平坦的带宽和线性相位，仅仅指定3 dB带宽是不够的。具体而言，习惯做法是指定0.1 dB带宽或0.1 dB带宽平坦度。这意味着在额定的0.1 dB带宽频率之下，纹波不超过0.1 dB。

视频缓冲放大器一般同时指定3 dB和0.1 dB带宽。图5显示了AD8075三路视频缓冲器的频率响应。

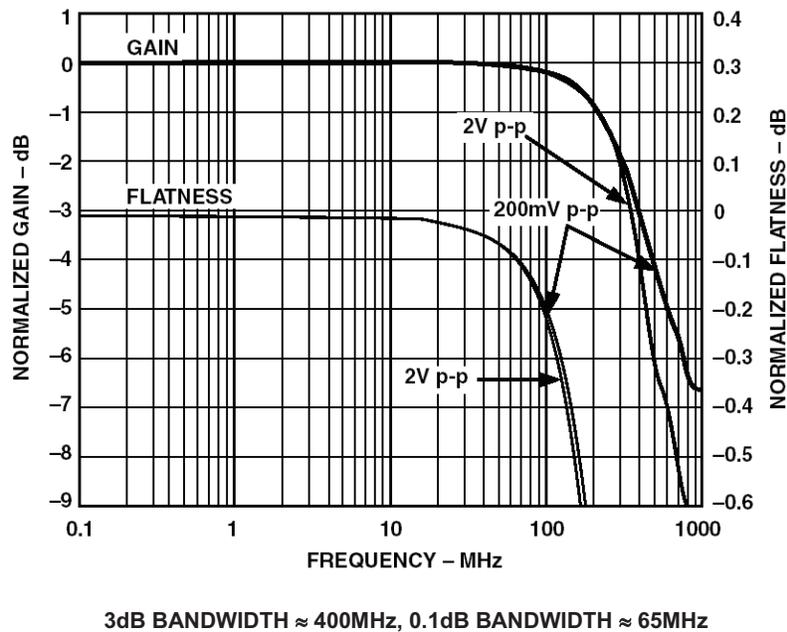


图5：AD8075三路视频缓冲器的3 dB和0.1 dB带宽， $G = 2$ ， $R_L = 150\Omega$

请注意，3 dB带宽约为400 MHz。这可以从图中标为“GAIN”的响应确定，左侧竖轴显示了对应的增益量程(刻度为1 dB/分频)。

右侧竖轴是“FLATNESS”的响应量程，本例中刻度为0.1 dB/分频。这样就能确定0.1 dB带宽，本例中约为65 MHz。此处应注意一点，即3 dB和0.1 dB标准适用带宽的差异。提供65 MHz 0.1 dB的平坦度额定值需要400 MHz带宽的放大器(以常规方式测定)。

应注意，驱动75 Ω源和负载端接电缆时，这些技术规格仍然适用，代表150 Ω的阻性负载。放大器输出端的任何容性负载将导致频率响应峰化，必须予以阻止。

压摆率和全功率带宽

放大器的压摆率(SR)是其输出端上的最大电压变化率，用V/s(或更常见的V/μs)表示。我们曾解释过运算放大器为何在趋正和趋负转换过程中具有不同压摆率，但此分析的假设前提是高速、优良运算放大器具有合理对称的压摆率。

如果考虑峰峰值幅度为 $2V_p$ 、频率为 f 的正弦波信号，输出电压表达式应为：

$$V(t) = V_p \sin 2\pi ft. \quad \text{公式1}$$

此正弦波信号在零交越处具有最大变化率(斜率)。该最大变化率为：

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{\max} = 2\pi f V_p. \quad \text{公式2}$$

要无失真地重现此信号，放大器必须能够以此速率(或更快地)响应输出电压。当放大器到达最大输出变化率或压摆率时，表示发生了压摆限制(有时也称为压摆率限制)。因此可以看出，不会发生压摆限制的最大信号频率与信号斜率成正比，与信号幅度成反比。这样，我们便可定义运算放大器的全功率带宽(FPBW)，即额定电压输出下不会发生压摆限制的最大频率。计算方式如下，让公式2中的 $2V_p$ 等于放大器最大峰峰值摆幅， dV/dt 等于放大器压摆率，求解 f ：

$$\text{FPBW} = \text{Slew Rate}/2\pi V_p \quad \text{公式3}$$

必须了解，压摆率和全功率带宽在某种程度上也取决于使用的电源电压以及放大器驱动的负载(特别是容性负载)。下图6总结了有关压摆率和全功率带宽的关键问题。作为参考，峰值输出摆幅为1 V的运算放大器要重现1 MHz正弦波，必须具有6.28 V/μs的最低SR。

◆ Slew Rate = Maximum rate at which the output voltage of an op amp can change

◆ Ranges: A few volts/μs to several thousand volts/μs

◆ For a sinewave, $V_{out} = V_p \sin 2\pi ft$

$$dV/dt = 2\pi f V_p \cos 2\pi ft$$

$$(dV/dt)_{max} = 2\pi f V_p$$

◆ If $2V_p =$ full output span of op amp, then

$$\text{Slew Rate} = (dV/dt)_{max} = 2\pi \cdot \text{FPBW} \cdot V_p$$

$$\text{FPBW} = \text{Slew Rate} / 2\pi V_p$$

图6：压摆率和全功率带宽

事实上，在实际电路中，设计人员会选择SR超过此数字的运算放大器，因为真正的运算放大器在到达压摆率限制点之前就会显示失真增加。

参考文献

1. James L. Melsa and Donald G. Schultz, *Linear Control Systems*, McGraw-Hill, 1969, pp. 196-220, ISBN: 0-07-041481-5
2. Hank Zumbahlen, *Basic Linear Design*, Analog Devices, 2006, ISBN: 0-915550-28-1. Also available as [Linear Circuit Design Handbook](#), Elsevier-Newnes, 2008, ISBN-10: 0750687037, ISBN-13: 978-0750687034. Chapter 12
3. Walter G. Jung, *Op Amp Applications*, Analog Devices, 2002, ISBN 0-916550-26-5, Also available as [Op Amp Applications Handbook](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7844-5. Chapter 2.

Copyright 2009, Analog Devices, Inc. All rights reserved. Analog Devices assumes no responsibility for customer product design or the use or application of customers' products or for any infringements of patents or rights of others which may result from Analog Devices assistance. All trademarks and logos are property of their respective holders. Information furnished by Analog Devices applications and development tools engineers is believed to be accurate and reliable, however no responsibility is assumed by Analog Devices regarding technical accuracy and topicality of the content provided in Analog Devices Tutorials.