

电压反馈型运算放大器的增益和带宽

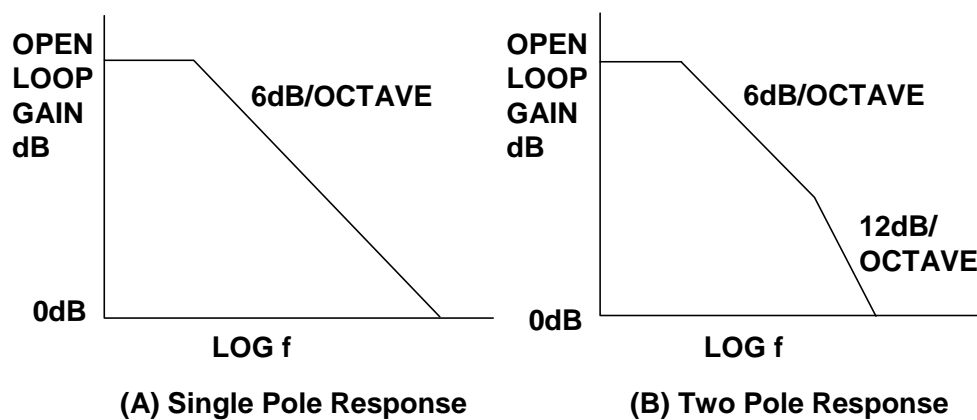
简介

本教程旨在考察标定运算放大器的增益和带宽的常用方法。需要指出的是，本讨论适用于电压反馈(VFB)型运算放大器——电流反馈(CFB)型运算放大器将在以后的教程(MT-034)中讨论。

开环增益

与理想的运算放大器不同，实际的运算放大器增益是有限的。开环直流增益(通常表示为 A_{VOL})指放大器在反馈环路未闭合时的增益，因而有了“开环”之称。对于精密运算放大器，该增益可能非常高，为160 dB(1亿)或以上。从直流到主导极点转折频率，该增益表现平坦。此后，增益以6 dB/8倍频程(20 dB/10倍频程)下降。(8倍频程指频率增加一倍，10倍频程指频率增加十倍。)如果运算放大器有一个单极点，则开环增益继续以该速率下降，如图1A所示。实际的运算放大器一般有一个以上的极点，如图1B所示。第二个极点会使开环增益下降至12 dB/8倍频程(40 dB/10倍频程)的速率增加一倍。如果开环增益在达到第二个极点的频率之前降至0 dB(单位增益)以下，则运算放大器在任何增益下均会无条件地保持稳定。数据手册上一般将这种情况称为单位增益稳定。如果达到第二个极点的频率且闭环增益大于1(0 dB)，则放大器可能不稳定。有些运算放大器设计为只有在较高闭环增益下才保持稳定，这就是所谓的非完全补偿运算放大器。

然而，运算放大器可能在较高频率下拥有更多额外的寄生极点，前两个极点一般都是最重要的。



1: 开环增益(波特图)
(A) 单极点响应、(B)双极点响应

有必要了解开环增益、闭环增益、环路增益、信号增益和噪声增益之间的区别。它们性质类似、相互关联，但也存在差异。下面我们将详细讨论。

开环增益并不是一项精确控制的参数。其范围相对较大，在规格参数中，多数情况下均表示为典型值而非最小/最大值。有些情况下，一般指高精度运算放大器，该参数会有一个最小值。

另外，开环增益可能因输出电压电平和负载而变化。这就是所谓的开环增益非线性度。该参数与温度也有一定的相关性。一般来说，这些影响很小，多数情况下都可以忽略不计。事实上，一些运算放大器的数据手册中未必包含开环增益非线性度。

闭环增益

闭环增益指放大器在反馈环路闭合时的增益，与其相反，开环增益则是放大器在反馈环路断开时的增益。闭环增益有两种形式：信号增益和噪声增益。下面对两者进行说明并加以区分。

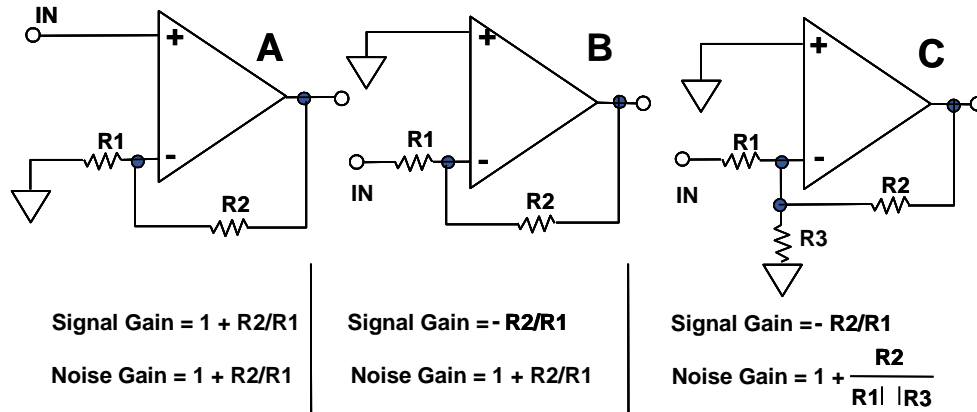
闭环放大器增益的经典表达式涉及开环增益。设 G 为实际闭环增益， N_G 为噪声增益(见下文)， A_{VOL} 为放大器的开环增益，则：

$$G = \frac{N_G}{1 + \frac{N_G}{A_{VOL}}} \quad \text{等式 1}$$

显然，如果开环增益很高，一般情况下都是如此，则电路的闭环增益就是噪声增益。

信号增益与噪声增益

信号增益指连接反馈环路时施加于输入信号的增益。在[教程MT-032](#)中，我们讨论了反相和同相电路的增益，更确切地说，实际上就是闭环信号增益。信号增益可为正(同相模式)，也可为负(反相模式)，反相模式下，可能低于单位增益。信号增益是在设计信号路径元件时最重要的增益。图2详细展示了各种增益的情况。



- Voltage Noise and Offset Voltage of the op amp are reflected to the output by the Noise Gain.
- Noise Gain, not Signal Gain, is relevant in assessing stability.
- Circuit C has unchanged Signal Gain, but higher Noise Gain, thus better stability, worse noise, and higher output offset voltage.

图2: 信号增益与噪声增益

反相放大器级的信号增益为:

$$\text{信号增益} = -\frac{R2}{R1}, \quad \text{等式 2}$$

同相放大器则为:

$$\text{信号增益} = 1 + \frac{R2}{R1}. \quad \text{等式 3}$$

噪声增益指出现在与运算放大器输入端串联的噪声源(输入电压噪声)或电压源(输入失调电压)上的增益。噪声增益等于

$$\text{噪声增益} = 1 + \frac{R2}{R1}. \quad \text{等式 4}$$

噪声增益等于同相放大器的信号增益。同时,反相级或同相级的噪声增益是相同的。

用于确定运算放大器稳定性的是噪声增益。噪声增益等于波特图中用到的闭环增益。上面的噪声增益表达式中用到电阻值,但是,在实际应用中,它们实际上是带有实部和虚部的阻抗。

环路增益

开环增益与闭环增益之差称为环路增益，如图3所示。环路增益给出了可以在给定频率下施加于放大器的负反馈量。

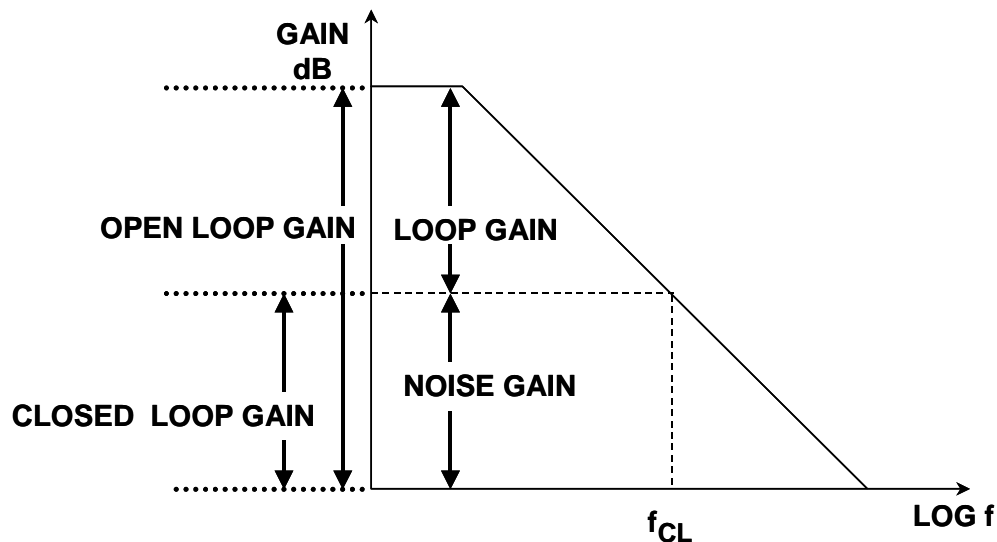


图3：增益定义

波特图：渐近和实际响应

基于对数-对数比例的开环增益与频率的关系坐标图称为波特图。这是评估某个运算放大器是否适合特定应用的主要工具之一。

如果在波特图上先画上开环增益，然后绘出噪声增益(如图4所示)，则其交点将决定放大器系统的最大闭环带宽。该交点通常被称为闭环频率(F_{CL})。请记住，交点处的实际响应值比该值低3 dB。在比 F_{CL} 高和低一个8倍频程的频率下，渐近响应与实际响应之差将小于1 dB。

波特图也可用于确定稳定性。如上所述，如果闭环增益(噪声增益)在大于6 dB/8倍频程(20 dB/10倍频程)的斜率下与开环增益相交，则放大器可能不稳定(取决于相位余量)。

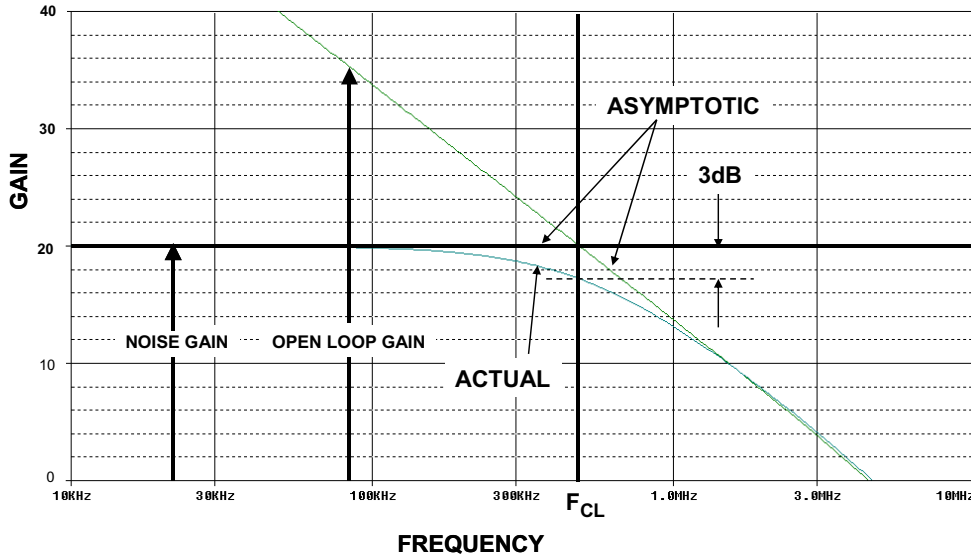


图4：波特图——渐近响应与实际响应

增益带宽积

对于单极点响应，开环增益以6 dB/8倍频程下降。这就是说，如果我们将频率增加一倍，增益会下降两倍。相反，如果使频率减半，则开环增益会增加一倍，如图5所示。结果产生所谓的增益带宽积。如果用频率乘以开环增益，其积始终为一个常数。需要注意的是，必须处于整条曲线中以6 dB/8倍频程下降的部分。这样，我们就得到了一个品质因素，可以据此决定某个运算放大器是否适合特定的应用。请注意，增益带宽积仅对电压反馈(VFB)运算放大器有意义。有关电流反馈(CFB)运算放大器带宽的讨论见[教程MT-034](#)。

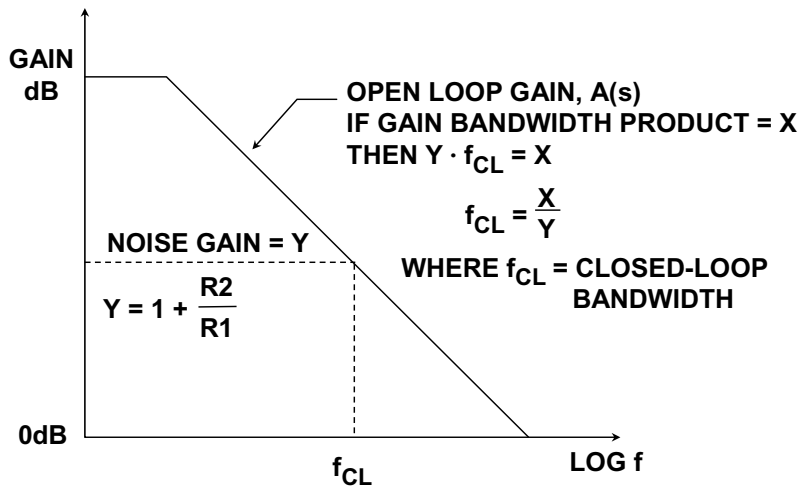


图5：增益带宽积

例如，如果有这样一个应用，要求闭环增益为10，带宽为100 kHz，则需要一个最低增益带宽积为1 MHz的运算放大器。但这有点把问题过度简单化了，因为增益带宽积变化极大，而且在闭环增益与开环增益相交的位置，响应实际上要低3 dB。另外，还应该允许一定的额外余量。

在上述应用中，增益带宽积为1 MHz的运算放大器是最低要求。保险起见，为了实现要求的性能，因数至少应该是5。因此选择了增益带宽积为5 MHz的运算放大器。

稳定性标准

反馈稳定性理论认为，闭环增益必须在不大于6 dB/8倍频程(单极点响应)的斜率下与开环增益相交，才能使系统实现无条件稳定。如果响应为12 dB/8倍频程(双极点响应)，则运算放大器会发生振荡。简单起见，不妨这样设想，每个极点增加90°相移。两个极点则会产生180°的相移，而180°的相移会使负反馈变成正反馈，即振荡。

那么问题是：为什么要用单位增益下不稳定的放大器呢？答案是，对于给定的放大器，如果该放大器设计时未考虑单位增益稳定性，则可在较高增益下提高带宽。这类运算放大器有时被称为非完全补偿运算放大器。然而，仍需满足稳定性标准，即闭环增益必须在6 dB/8倍频程(单极点响应)的斜率下与开环增益相交。否则，放大器将会振荡。因此，非完全补偿运算放大器仅在数据手册中规定的较高增益下保持稳定。

举例来说，不妨比较图6中的开环增益图。图中的三种器件，AD847、AD848 和 AD849基本上采用相同的设计，只是内部补偿机制不同。AD847为单位增益稳定型，规定增益带宽为50 MHz。AD848在增益为5或以上时保持稳定，其增益带宽为175 MHz。AD849在增益为25或以上时保持稳定，其增益带宽为725 MHz。由此可见，在基本设计相同的情况下，可以通过修改运算放大器的内部补偿机制来产生不同的增益带宽积，其为最低稳定增益的函数。

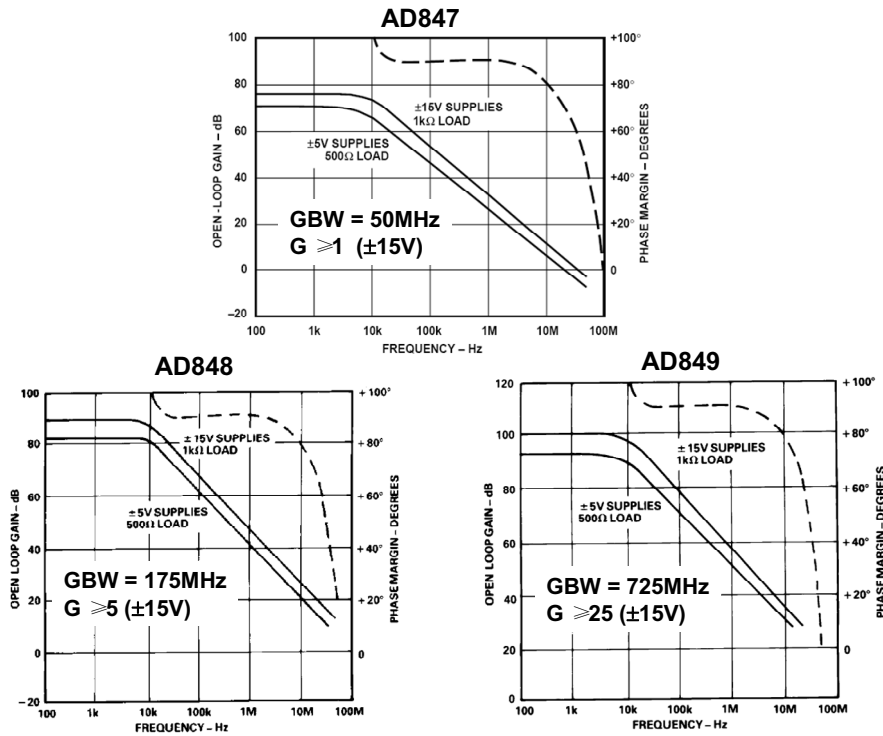


图6: AD847、AD848、AD849的开环增益特性、增益带宽积和最低稳定闭环增益

相位余量

衡量稳定性的一项指标是相位余量。正如幅度响应不会一直保持平坦却突然变化一样，相位响应也会从转折频率前的大约十倍频程开始逐渐变化。相位余量指在达到 180° 之前剩余的相移量，在闭环增益与开环增益相交的频率下进行测量。

低相位余量造成的结果是，增益峰值会刚好在闭环增益与开环增益的相交频率之前增加。图7显示了AD8051运算放大器的增益和相位响应。这种情况下，相位余量与单位增益频率成 45° 。

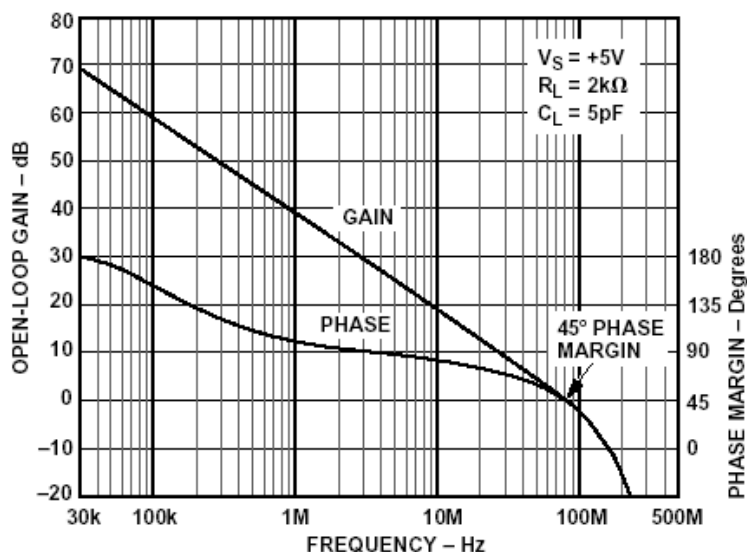


图7: AD8051相位余量

参考文献:

1. 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 1
2. 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 1.

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.