

## 运算放大器开环增益与开环增益非线性

### 开环增益

大多数电压反馈(VFB)型运算放大器的开环电压增益(通常称为 $A_{VOL}$ ,有时简称 $A_V$ )都很高。常见值从100000到1000000,高精度器件则为该数值的10至100倍。有些快速运算放大器的开环增益要低得多,但是几千以下的增益不适合高精度应用。此外还要注意,开环增益对温度变化并不高度稳定,同一类型的不同器件也会存在极大差异,因此,增益值必须很高。

电压反馈运算放大器采用电压输入/电压输出方式工作,其开环增益为无量纲比,所以不需要单位。但是,数值较小时,为方便起见,数据手册会以V/mV或V/ $\mu$ V代替V/V表示增益,电压增益也可以dB形式表示,换算关系为 $\text{dB} = 20 \times \log A_{VOL}$ 。因此,1V/ $\mu$ V的开环增益相当于120 dB,以此类推。

电流反馈(CFB)型运算放大器采用电流输入和电压输出,因此,其开环跨导增益以V/A或 $\Omega$ (或k $\Omega$ 、M $\Omega$ )表示。增益值通常介于几百k $\Omega$ 与几十M $\Omega$ 之间。

根据基本反馈原理,为了保持精度,精密放大器的直流开环增益 $A_{VOL}$ 必须很高。通过检查闭环增益公式就能发现这点,该公式包含由有限增益引起的误差。包含有限增益误差的闭环增益公式如下:

$$G_{CL} = \frac{1}{\beta} \cdot \left[ \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{VOL}\beta}} \right] \quad \text{公式 1}$$

其中, $\beta$ 是反馈环路衰减,也称反馈因子(反馈网络的电压衰减)。噪声增益等于 $1/\beta$ ,因此,该公式还可以其它形式表示。将公式右端两项合并,把NG(噪声增益)代入,可得到如下公式:

$$G_{CL} = \frac{NG}{1 + \frac{NG}{A_{VOL}}} \quad \text{公式 2}$$

公式1和2是等效的,两者均可使用。如前所述,噪声增益(NG)只是从与运算放大器输入串联的小电压源获得的增益,是同相模式下的理想放大器信号增益。如果公式1和2中的 $A_{VOL}$ 无限大,闭环增益就和噪声增益 $1/\beta$ 完全相等。

但是，由于 $NG \ll A_{VOL}$ 且 $A_{VOL}$ 为有限值，因此存在闭环增益误差，估算公式如下：

$$\text{Closed loop error(\%)} = \frac{NG}{A_{VOL}} \cdot 100 \approx \text{公式 3}$$

注意，公式3中的百分比形式增益误差直接与噪声增益成比例，因此，有限 $A_{VOL}$ 对低增益的影响较小。一些示例可以说明上述增益关系的要点。

### 开环增益不确定性

下图1中，第一个示例中噪声增益为1000，可以看出，开环增益为200万时，闭环增益误差约为0.05%。注意，若温度、输出负载和电压变化时开环增益保持不变，0.05%的增益误差很容易通过校准从测量结果中去除，这样就不存在整体系统增益误差。但是，若开环增益改变，由此产生的闭环增益也会改变。这就导致了增益不确定性。在第二个示例中， $A_{VOL}$ 减少至30万，产生的增益误差为0.33%。这种情况会使闭环增益中产生0.28%的增益不确定性。大多数应用中，使用良好的放大器时，电路的增益电阻是绝对增益误差的最大来源，但是应注意，增益不确定性不能通过校准去除。

- ◆ "IDEAL" CLOSED LOOP GAIN =  $1/\beta$  = NOISE GAIN (NG)
- ◆ ACTUAL CLOSED LOOP GAIN =  $\frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{VOL}\beta}} = \frac{NG}{1 + \frac{NG}{A_{VOL}}}$
- ◆ CLOSED LOOP GAIN ERROR (%)  $\approx \frac{NG}{A_{VOL}} \times 100$  ( $NG \ll A_{VOL}$ )
- ◆ Ex. 1: Assume  $A_{VOL} = 2,000,000$ ,  $NG = 1,000$   
% GAIN ERROR  $\approx 0.05\%$
- ◆ Ex. 2: Assume  $A_{VOL}$  Drops to 300,000  
% GAIN ERROR  $\approx 0.33\%$
- ◆ CLOSED LOOP GAIN UNCERTAINTY  
=  $0.33\% - 0.05\% = 0.28\%$

**图1：开环增益变化导致闭环增益不确定性**

输出电平和输出负载的变化是导致运算放大器开环增益变化的最常见原因。开环增益中信号电平的变化会导致闭环增益传递函数的非线性，也无法在系统校准过程中去除。大多数运算放大器都有固定负载，因此负载的 $A_{VOL}$ 变化一般不重要。但是， $A_{VOL}$ 对输出信号电平的灵敏度在负载电流较高时可能会上升。

非线性的严重程度在不同类型的器件中变化很大，数据手册中一般不会明确规定。但是通常会规定最小 $A_{VOL}$ ，选择高 $A_{VOL}$ 的运算放大器可以将增益非线性误差的发生概率降至最低。增益非线性的来源有很多，具体取决于运算放大器的设计。其中一个常见来源是热反馈(例如从热输出级反馈至输入级)。如果温度变化是非线性误差的唯一原因，减小输出负载可能会有所帮助。为了验证这一点，需要在空载条件下测量非线性，然后与负载条件下进行比较。

### 测量开环增益非线性

下图2所示为测量直流开环增益非线性的示波器X-Y显示测试电路。前文讨论的与失调电压测试电路相关的防范措施在该电路中也应注意。放大器的信号增益设置为-1。开环增益定义为输出电压的变化除以输入失调电压的变化。但是， $A_{VOL}$ 值较大时，实际失调电压在整个输出电压摆幅内可能只改变几微伏。因此，采用 $10\ \Omega$ 电阻和 $R_G$  ( $1\ M\Omega$ )组成的除法器时，节点电压 $V_Y$ 按以下公式计算：

$$V_Y = \left[ 1 + \frac{R_G}{10\ \Omega} \right] V_{OS} = 100,001 \cdot V_{OS}. \tag{公式 4}$$

选择 $R_G$ 值是为了使 $V_Y$ 获得可测量的电压，具体取决于 $V_{OS}$ 的预期值。

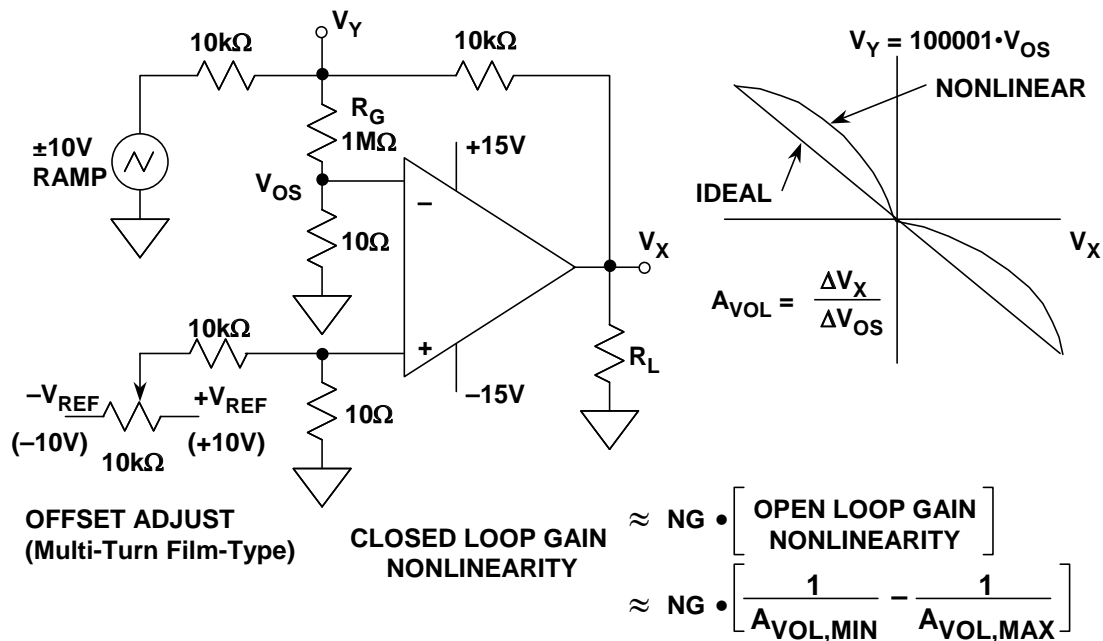


图2：测量开环增益非线性的电路

$\pm 10\text{ V}$ 斜波发生器输出乘以 $-1$ 的信号增益后，会使得运算放大器输出电压 $V_x$ 在 $+10\text{ V}$ 到 $-10\text{ V}$ 之间摆动。因为失调电压添加了增益系数，所以需要增加失调调整电位计，将初始输出失调设置为零。选择的电阻值可以抵消高达 $\pm 10\text{ mV}$ 的输入失调电压。电位计的每一端都应采用稳定的 $10\text{ V}$ 基准电压源(如AD688)，以防止输出漂移。还应注意，由于开环增益的转折频率较低，斜坡发生器频率必须很低，可能不超过 $1\text{ Hz}$ 的几分之一(例如，OP177为 $0.1\text{ Hz}$ )。

图2右侧的坐标图所示为 $V_y$ 与 $V_x$ 的关系图。如果不存在增益非线性，则图中所示应为斜率不变的直线， $A_{VOL}$ 按以下公式计算：

$$A_{VOL} = \frac{\Delta V_X}{\Delta V_{OS}} = \left[ 1 + \frac{R_G}{10\Omega} \right] \left[ \frac{\Delta V_X}{\Delta V_Y} \right] = 100,001 \cdot \left[ \frac{\Delta V_X}{\Delta V_Y} \right]. \quad \text{公式 5}$$

如果存在非线性， $A_{VOL}$ 会随着输出信号变化而动态变化。开环增益非线性的近似值根据输出电压范围内的 $A_{VOL}$ 最大值和最小值计算，公式如下：

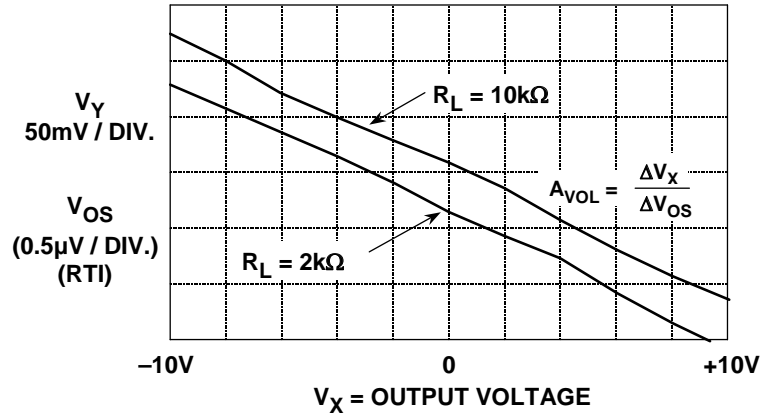
$$\text{Open Loop Gain Nonlinearity} = \frac{1}{A_{VOL,MIN}} - \frac{1}{A_{VOL,MAX}}. \quad \text{公式 6}$$

闭环增益非线性用开环增益非线性乘以噪声增益NG计算得出，公式如下：

$$\text{Closed Loop Gain Nonlinearity} \approx \text{NG} \cdot \left[ \frac{1}{A_{VOL,MIN}} - \frac{1}{A_{VOL,MAX}} \right]. \quad \text{公式 7}$$

理想状态下， $V_{OS}$ 和 $V_x$ 的关系图是一条斜率不变的直线，斜率的倒数为开环增益 $A_{VOL}$ 。斜率为零的水平线表示开环增益无限大。实际运算放大器中，由于存在非线性和热反馈等因素，斜率会在输出范围内发生变化。实际上，斜率甚至可以改变符号。

图3所示为OP177精密运算放大器中 $V_y$ (以及 $V_{OS}$ )与 $V_x$ 的关系图。图中所示为 $2\text{ k}\Omega$ 和 $10\text{ k}\Omega$ 两种负载下的关系图。斜率的倒数根据端点计算， $A_{VOL}$ 平均值约为800万。经测量， $A_{VOL}$ 在输出电压范围内的最大值和最小值分别约为910万和570万。对应的开环增益非线性约为 $0.07\text{ ppm}$ 。因此，噪声增益为100时，对应的闭环增益非线性约为 $7\text{ ppm}$ 。



$A_{VOL}$  (AVERAGE)  $\approx$  8 million

$A_{VOL,MAX}$   $\approx$  9.1 million,  $A_{VOL,MIN}$   $\approx$  5.7million

OPEN LOOP GAIN NONLINEARITY  $\approx$  0.07ppm

CLOSED LOOP GAIN NONLINEARITY  $\approx$  NG $\times$ 0.07ppm

**图3: OP177增益非线性**

当然，这些非线性测量方法在高精度直流电路中最为适用。但是也适合音频之类带宽较宽的应用。例如，图2中的X-Y显示技术可以轻松显示设计不当的运算放大器输出级的交越失真

#### 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.