

应用工程师问答—22

作者: Erik Barnes

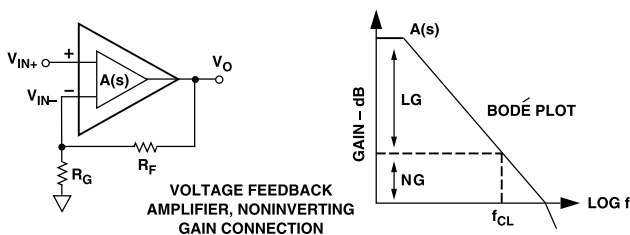
电流反馈型放大器 - I

问: 我不太清楚电流反馈型放大器的工作原理与普通运算放大器有何不同。听说电流反馈型放大器的带宽恒定, 与增益无关, 这是怎么做到的? 电流反馈型放大器与跨导放大器是一回事吗?

答: 查看电路之前, 让我们先了解电压反馈、电流反馈和跨导放大器的定义。顾名思义, “电压反馈”是指误差信号表现为电压形式的闭环配置。传统运算放大器使用电压反馈, 即其输入端会对电压变化做出响应, 产生对应的输出电压。“电流反馈”是指用于反馈的误差信号表现为电流形式的闭环配置。电流反馈型运算放大器在其输入端对误差电流而不是误差电压做出响应, 产生相应的输出电压。请注意, 两种开环结构均能实现同样的闭环效果: 零差分输入电压和零输入电流。

理想电压反馈型放大器的输入端为高阻抗, 因而输入电流为零, 并通过电压反馈保持零输入电压。相反, 理想电流反馈型运算放大器的输入端则为低阻抗, 因而输入电压为零, 并通过电流反馈保持零输入电流。跨导放大器的传递函数表示为输出电压与输入电流的比。这意味着, 开环“增益” v_o/i_{IN} 用欧姆表示。因此, 可以将电流反馈型运算放大器称为“跨导放大器”。有趣的是, 也可以用电流(例如来自光电二极管)驱动其动态低阻抗求和节点, 这样就能产生一个输出电压, 它等于输入电流乘以反馈电阻, 从而将电压反馈型运算放大器电路的闭环关系配置为跨导。更有趣的是, 由于任何运算放大器应用都可以采用电压反馈或电流反馈来实现, 因此可以用电流反馈型运算放大器实现同样的I-V转换器。使用“跨导放大器”这一术语时, 应当明白特定电流反馈型运算放大器架构与表现得像跨导一样的闭环I-V转换器电路之间的区别。

让我们看一下电压反馈型放大器的简化模型。同相增益配置以开环增益 $A(s)$ 为倍数放大电压差 $(V_{IN+} - V_{IN-})$, 并通过由 R_F 和 R_G 组成的分压器将部分输出反馈至反相输入端。为了导出此电路的闭环传递函数 V_o/V_{IN+} , 假设流入运算放大器的电流为零(无限输入阻抗); 两个输入端的电位将基本相等(负反馈和高开环增益)。



将

$$V_o = (V_{IN+} - V_{IN-})A(s)$$

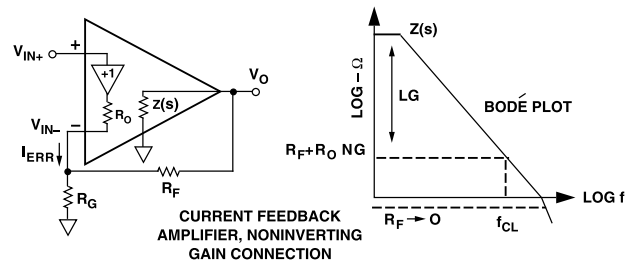
和

$$V_{IN-} = \frac{R_G}{R_G + R_F} V_o$$

代入并化简, 可得到:

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right) \frac{1}{1 + \frac{1}{LG}} \text{ where } LG = \frac{A(s)}{1 + \frac{R_F}{R_G}}$$

闭环带宽是指环路增益(LG)幅值降至1 (0dB)时的频率。 $(1 + R_F/R_G)$ 项称为电路的“噪声增益”; 对于同相配置, 它也是信号增益。在Bode图上, 闭环带宽位于开环增益 $A(s)$ 与噪声增益NG的交点。高噪声增益将会降低环路增益, 从而降低闭环带宽。如果 $A(s)$ 以20 dB/10倍频程滚降, 放大器的增益带宽积将保持恒定。这样, 如果闭环增益提高20dB, 闭环带宽将降低10倍。



现在考虑电流反馈型放大器的简化模型。同相输入端为单位增益缓冲器的高阻抗输入端, 反相输入端为其低阻抗输出端。缓冲器允许误差电流流入或流出反相输入端, 单位增益则迫使反相输入端跟随同相输入端而变化。误差电流镜像至一个高阻抗节点, 在该节点转换为电压, 经过缓冲后输出。该高阻抗节点是一个频率相关阻抗 $Z(s)$, 与电压反馈型放大器的开环增益相似; 它具有高直流值, 以20 dB/10倍频程滚降。

对 V_{IN-} 节点上的电流求和可得出闭环传递函数, 而缓冲器则保持 $V_{IN+} = V_{IN-}$ 。如果我们暂时假设缓冲器的输出电阻为零, 则 $R_o = 0\Omega$ 。

$$\frac{V_o - V_{IN-}}{R_F} + \frac{-V_{IN-}}{R_G} + I_{err} = 0 \text{ and } I_{err} = V_o/Z(s)$$

代入并求解 V_o/V_{IN+}

$$\frac{V_o - V_{IN-}}{R_F} + \frac{-V_{IN-}}{R_G} + I_{err} = 0 \text{ and } I_{err} = V_o/Z(s)$$

电流反馈型放大器的闭环传递函数与电压反馈型放大器相同，只是现在环路增益(1/LG)表达式仅取决于反馈跨阻 R_F ，而不是 $(1 + R_F/R_G)$ 。因此，电流反馈型放大器的闭环带宽随 R_F 值而变化，而不是噪声增益 $(1 + R_F/R_G)$ 。 R_F 与 $Z(s)$ 的交点决定环路增益，从而也决定了电路的闭环带宽(参见Bode图)。显然，增益带宽积不是一个常量，这是电流反馈的优势。

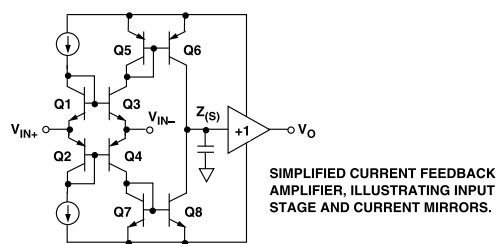
实际电路中，输入缓冲器的非理想输出电阻一般约为20至40 Ω ，这将改变反馈跨阻。两个输入电压将不会完全相等。将 $V_{IN-} = V_{IN+} - I_{err}R_O$ 代入上述方程式，并求解 V_O/V_{IN+} 可得到：

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right) \frac{1}{1 + \frac{1}{LG}} \text{ where } LG = \frac{Z(S)}{R_F + R_O \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)}$$

反馈跨阻中的附加项表明，环路增益实际上与电路的闭环增益有一定的关系。在低增益时， R_F 占主导地位，但在高增益时，第二项会增加，并降低环路增益，导致闭环带宽降低。

应当明白，让输出端短路接回反相输入端并让 R_G 开路(像在电压跟随器中一样)，将迫使环路增益变得非常大。对于电压反馈型放大器，最大反馈发生在反馈全部输出电压时，但电流反馈的限值却是短路电流。电阻越小，则电流越大。如果用图形表示， $R_F = 0$ 将使 $Z(s)$ 与反馈跨阻相交在高阶极点区中的较高频率点。与电压反馈型放大器一样， $Z(s)$ 的高阶极点将导致高频时发生较大相移；如果相移大于180度，放大器将变得不稳定。 R_F 的最佳值随着闭环增益而改变，因此Bode图对于确定各种增益所对应的带宽和相位余量非常有用。可以用低相位余量换得高闭环带宽，不过这将在频域中引起峰值，并在时域中引起过冲和响铃振荡。电流反馈器件的数据手册中会列出各种增益设置所对应的 R_F 最佳值。

电流反馈型放大器具有出色的压摆能力。虽然可以设计高压摆率电压反馈型放大器，但电流反馈结构天生更快。驱动小负载时，传统电压反馈型放大器的压摆率受限于用来对内部补偿电容进行充电和放电的电流。当输入端发生较大瞬变时，输入级将饱和，只能提供尾电流对补偿节点进行充电或放电。电流反馈型放大器则不然，需要时，其低阻抗输入端允许高瞬态电流流入放大器。内部电流镜将此输入电流传递到补偿节点，从而快速完成充电和放电；理论上，充放电速度与输入步进大小成比例。压摆率越快，则上升时间越短，压摆引起的失真和非线性越低，大信号频率响应越宽。实际压摆率将受限于电流镜的饱和(可能发生在10至15 mA)，以及输入和输出缓冲器的压摆率限制。



问：直流精度怎么样？

答：像电压反馈型放大器一样，电流反馈型放大器的直流增益精度可以根据其传递函数计算，它基本上等于内部跨阻与反馈跨阻的比值。若典型跨阻为1 M Ω ，反馈电阻为1 k Ω ， R_O 为40 Ω ，则单位增益时的增益误差约为0.1%。随着增益提高，增益误差显著增大。电流反馈型放大器很少在高增益下使用，特别是要求绝对增益精度时。

不过，对于许多应用，建立特性比增益精度更重要。虽然电流反馈型放大器的建立时间非常快，但由于存在建立时间热拖尾现象(导致建立精度差的主要原因之一)，许多数据手册仅显示0.1%建立时间。考虑上文的互补输入缓冲器，其中 V_{IN-} 端在 V_{IN+} 端的基础上发生偏置，偏置量为Q1与Q3的 V_{BE} 差。当输入为零时，两个 V_{BE} 应当匹配，从 V_{IN+} 到 V_{IN-} 的偏置将很小。对 V_{IN+} 施加一个正步进输入将导致Q3的 V_{CE} 降低，其功耗减小，进而其 V_{BE} 增大。连接二极管的Q1的 V_{CE} 不发生变化，因此其 V_{BE} 不会改变。这样，两路输入之间便存在偏置差，精度将因此而降低。电流镜中也会发生同样的效应：高阻抗节点的阶跃变化将改变 V_{CE} ，从而改变Q6的 V_{BE} ，但不会改变Q5的 V_{BE} 。 V_{BE} 变化导致一个电流误差反馈到 V_{IN-} ，它(乘以 R_F)将引起输出偏置误差。各晶体管的功耗发生在一个极小的区域内，无法在器件之间实现热耦合。采用反相配置放大器可以降低输入级的热误差，从而无需共模输入电压。

问：热拖尾在何种条件下会成为问题？

答：这取决于相关的频率和波形。热拖尾并非瞬间发生，晶体管的温度系数(与工艺有关)决定温度发生变化、更改参数及最后恢复所需的时间。例如，采用ADI公司高速互补双极性(CB)工艺制造的放大器，对于数kHz以上的输入频率，因为输入信号变化太快，所以热拖尾现象并不明显。通信系统一般更关注频谱性能，热拖尾可能引起的额外增益误差并不重要。在成像等应用中，当直流电平改变时，热拖尾可能对步进波形产生不利影响。对于这些应用，电流反馈型放大器可能无法提供合适的建立精度。

第二部分将探讨使用电流反馈型放大器的常见应用电路，并细致考察其工作原理。 A