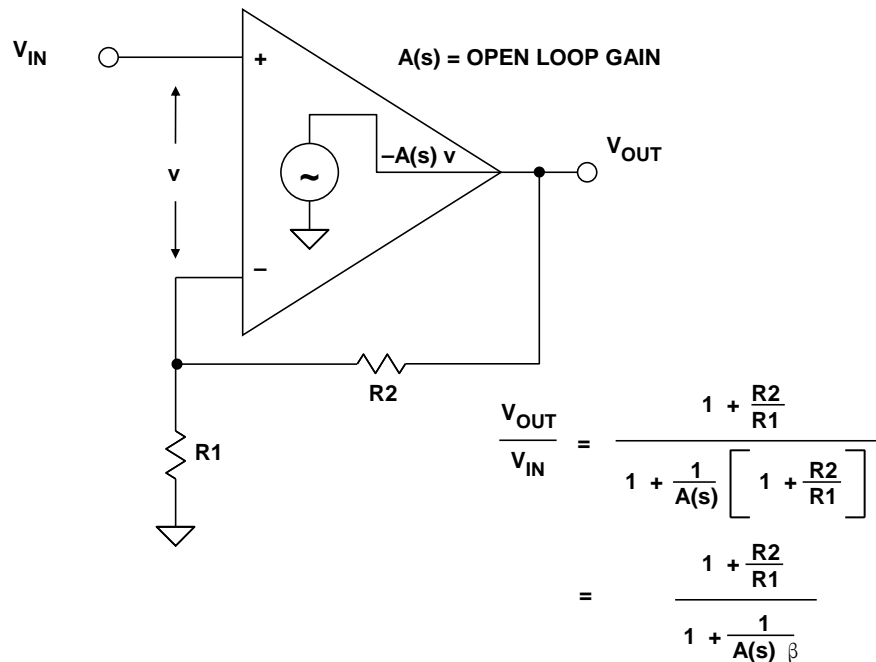


**电流反馈(CFB)运算放大器**

**简介**

本教程将详细介绍两种基本运算放大器的拓扑结构(电压反馈(VFB)与电流反馈(CFB))，并说明其差异。图1中再次列出了基本电压反馈运算放大器和增益公式。



**图1：已连接反馈网络的电压反馈运算放大器**

必须注意，由于反馈网络和有限的开环增益A(s)而产生的误差信号实际上是小电压v。

**电流反馈放大器基本原理**

图2所示为基本电流反馈放大器拓扑结构。注意，该模型采用一个单位增益缓冲器将同相输入连接至反相输入。理想状态下，该缓冲器的输出阻抗为零( $R_o = 0$ )，误差信号为流入反相输入的小电流i。误差电流i镜像到高阻抗T(s)，T(s)上产生的电压等于T(s)·i。(T(s)的大小通常称为开环跨导增益。)

接着，该电压经过缓冲，连接至运算放大器输出。如果假设 $R_O$ 为零，就很容易得出以 $R_1$ - $R_2$ 反馈网络和开环跨导增益 $T(s)$ 表示闭环增益 $V_{OUT}/V_{IN}$ 的相关表达式。 $R_O$ 为有限值时，也可以得出该公式，图3给出了两种表达式。

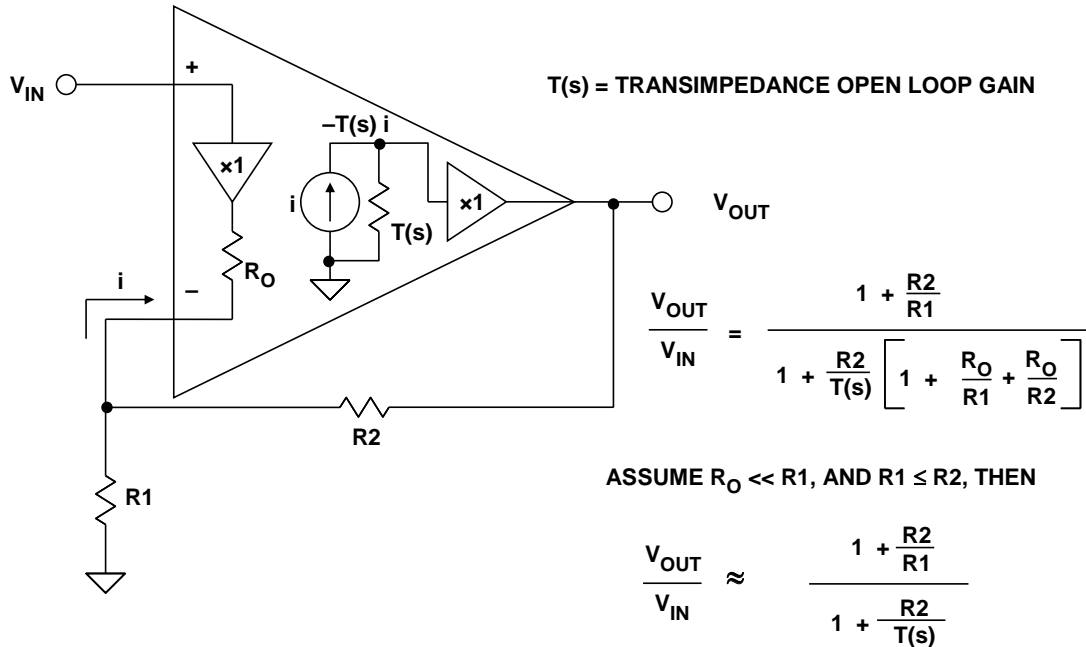


图2：电流反馈(CFB)运算放大器拓扑结构

此时应当注意，电流反馈运算放大器通常称为跨导运算放大器，因为开环传递函数实际上是一个阻抗，如上文所述。但是，很多常见的电路往往也使用跨导放大器这一术语，比如电流-电压(I/V)转换器，而CFB或VFB运算放大器都可用于I/V转换器。因此，在特定应用中遇到术语跨导时应加以注意。而术语电流反馈运算放大器则很少会混淆，因此，提到运算放大器拓扑结构时，最好选用这个术语。

这个简单模型中可以得出CFB运算放大器的几个重要特性。

- 与VFB运算放大器不同，CFB运算放大器没有平衡输入。相反，其同相输入端为高阻抗，反相输入端为低阻抗。
- CFB运算放大器的开环增益用 $\Omega$ 为单位来衡量(跨导增益)，而不是VFB运算放大器所用的 $V/V$ 。
- 反馈电阻 $R_2$ 为固定值时，CFB的闭环增益可通过改变 $R_1$ 而发生变化，不会对闭环带宽产生重大影响。通过检查图3中的简化公式就可以发现这一点。分母决定整体频率响应，如果 $R_2$ 不变，则可以改变分子中的 $R_1$ (从而改变增益)，不影响分母，这样带宽就会保持相对稳定。

CFB拓扑结构主要用于对高速和低失真有极高要求的场合。其基本原理基于这样一个事实：在双极型晶体管电路中，在所有其它条件相同的情况下，电流的切换速度快于电压。

图3所示为早期IC CFB运算放大器AD846的简化原理图，这是ADI公司1988年推出的一款放大器。注意，该器件充分利用了互补双极型(CB)工艺可以提供匹配良好的高 $f_t$  PNP和NPN晶体管的优点。

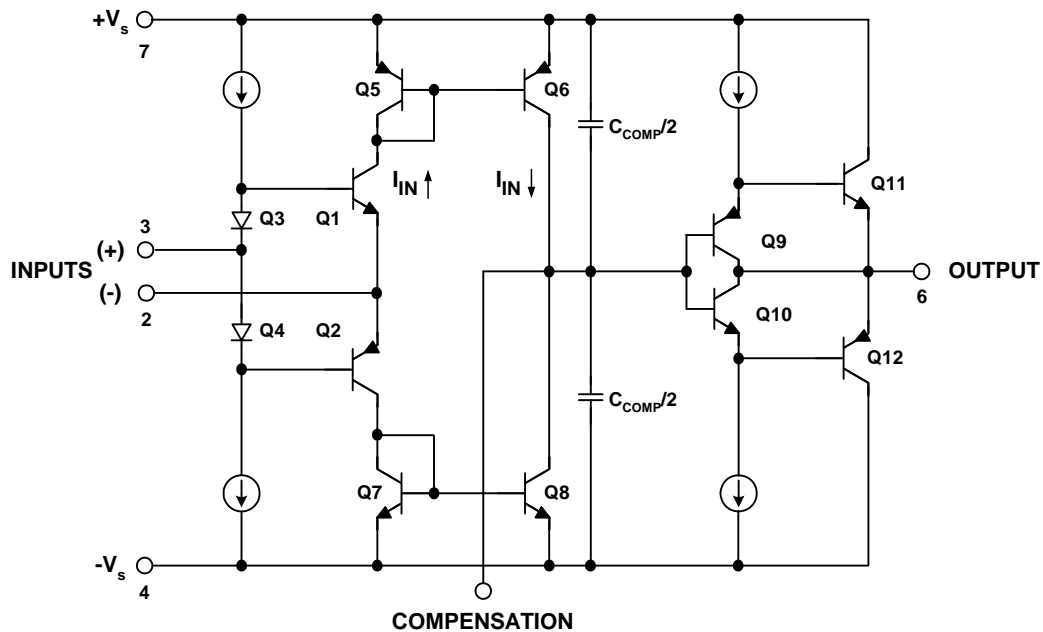


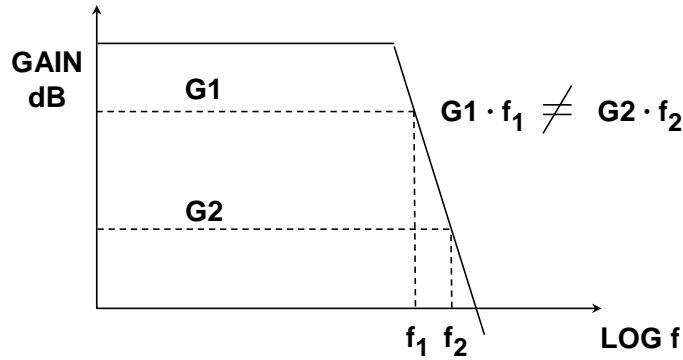
图3: AD846电流反馈运算放大器(1988)

晶体管Q1-Q2缓冲同相输入(引脚3)，并驱动反相输入(引脚2)。Q5-Q6和Q7-Q8用作电流镜，驱动高阻抗节点。C<sub>COMP</sub>电容提供主极点补偿，Q9、Q10、Q11和Q12构成输出缓冲。为了充分利用CFB架构的优势，需要采用高速互补双极型(CB) IC工艺。凭借现代IC工艺，这一目标很容易实现，这样就可以在放大器信号路径中实现直接耦合。

### CFB和VFB运算放大器的差异

CFB和VFB放大器的一个主要差异就是CFB放大器没有恒定的增益带宽产品。CFB运算放大器的带宽随增益变化很小，远小于在VFB运算放大器中看到的6 dB/倍频程，如图4所示。如前所述，CFB运算放大器的带宽与反馈电阻成比例。每个CFB运算放大器都有最大带宽时的推荐反馈电阻值。如果电阻值增加后超过该推荐值，就要减小带宽。

如果采用阻值低于推荐值的电阻，相位裕量就会减小，放大器可能会变得不稳定。



- ◆ 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: 电流反馈放大器频率响应

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。

最佳反馈电阻在不同的工作条件下可能是不同的。例如，由于寄生效应的变化，对于不同的封装类型，最佳反馈电阻值会有所变化。图5所示为AD8001运算放大器在采用PDIP、SOIC和SOT-23封装以及不同增益时的最佳反馈电阻。

| Component                    | AD8001AN (PDIP)<br>Gain |      |      |      |      | AD8001AR (SOIC)<br>Gain |      |      |      |      | AD8001ART (SOT-23-5)<br>Gain |      |      |      |      |
|------------------------------|-------------------------|------|------|------|------|-------------------------|------|------|------|------|------------------------------|------|------|------|------|
|                              | -1                      | +1   | +2   | +10  | +100 | -1                      | +1   | +2   | +10  | +100 | -1                           | +1   | +2   | +10  | +100 |
| R <sub>F</sub> (Ω)           | 649                     | 1050 | 750  | 470  | 1000 | 604                     | 953  | 681  | 470  | 1000 | 845                          | 1000 | 768  | 470  | 1000 |
| R <sub>G</sub> (Ω)           | 649                     |      | 750  | 51   | 10   | 604                     |      | 681  | 51   | 10   | 845                          |      | 768  | 51   | 10   |
| R <sub>O</sub> (Nominal) (Ω) | 49.9                    | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 49.9                    | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 49.9                         | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 49.9 |
| R <sub>S</sub> (Ω)           | 0                       |      |      |      |      | 0                       |      |      |      |      | 0                            |      |      |      |      |
| R <sub>T</sub> (Nominal) (Ω) | 54.9                    | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 54.9                    | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 54.9                         | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 49.9 |
| Small Signal BW (MHz)        | 340                     | 880  | 460  | 260  | 20   | 370                     | 710  | 440  | 260  | 20   | 240                          | 795  | 380  | 260  | 20   |
| 0.1 dB Flatness (MHz)        | 105                     | 70   | 105  |      |      | 130                     | 100  | 120  |      |      | 110                          | 300  | 145  |      |      |

图5: AD8001采用不同封装时的最佳反馈电阻

CFB放大器的反馈环路中也不应该有电容。如果反馈环路中采用电容，就会减小高频净反馈阻抗，导致运算放大器发生振荡。反相输入上的杂散电容会产生类似的效应，应去除反相端四周的接地层，尽量减小杂散电容。

使用电流反馈运算放大器时常见的错误是把反相输入直接连接到输出，试图构建单位增益电压跟随器(缓冲)。该电路会产生振荡，因为等效反馈电阻值为零。只要采用推荐的反馈电阻值,将反相输入连接至输出，就可以稳定跟随器电路。

VFB和CFB放大器的另一个差异,就是CFB放大器的反相输入阻抗较低(通常为50  $\Omega$ 至100  $\Omega$ )，而同相输入阻抗则较高(通常为几百k $\Omega$ )。因此，CFB放大器的输入不平衡，而VFB放大器的输入平衡。

CFB拓扑结构还增强了压摆率性能。对内部补偿电容进行充电和放电的电流可以根据需要提供。不用像通常VFB拓扑结构中一样必须限制在固定值。对于阶跃输入，电流会不断增加(“按需电流”)，直至反馈环路稳定。基本电流反馈放大器没有理论压摆率限制。只有对内部寄生电容的相关限制，而且已经通过多种方式来减少寄生电容的影响。

CFB器件结合了高带宽和高压摆率，具有良好的失真性能，且功耗较低。

放大器的失真受放大器开环失真和闭环电路环路增益的影响。因为内部拓扑结构具有基本对称性，所以受CFB放大器影响产生的开环失真量较小。高带宽是造成低失真的另一个主要原因。在大多数配置中，CFB放大器的带宽都比对应的VFB更大。因此，在给定的信号频率下，具有更大的环路增益，因而失真就越低。但是，有些电压反馈结构(通常称为“四核”或“H电桥”)也采用类似工艺设计，其性能水平接近CFB，并且也可以提供“按需电流”(参考文献2，第1章，第1-6节)。

### **总结：电流反馈(CFB)与电压反馈(VFB)**

电流反馈和电压反馈具有不同的应用优势。在很多应用中，CFB和VFB的差异并不明显。如今的CFB和VFB放大器性能相当，但两种拓扑结构还是各有其独特优势。电压反馈可以自由选择反馈电阻(或网络)，但会因为增益而牺牲带宽。电流反馈可以在较大的增益范围内保持高带宽，但会限制反馈阻抗的选择。

总之，VFB放大器具有以下特点：

- 噪声较低
- 直流性能较好
- 反馈元件选择自由

CFB放大器具有以下特点：

- 压摆率较快
- 失真较低
- 反馈元件选择受限

#### 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.