

在电压反馈(VFB)和电流反馈(CFB)运算放大器之间选择

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。当今的许多高速CFB和VFB放大器在性能上不相上下，但各有其优缺点。本指南将考察与这两种拓扑结构相关的重要考虑因素。

VFB和CFB运算放大器的直流及运行考虑因素

VFB运算放大器

- 对于要求高开环增益、低失调电压和低偏置电流的精密低频应用，VFB运算放大器是正确的选择。高速双极性输入VFB运算放大器的输入失调电压很少进行微调，因为输入级的失调电压匹配十分出色，一般为1至3 mV，失调温度系数为5至15 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。在微调后，可实现低于20 μV 的输入失调电压。采用自稳零架构的运算放大器可提供低于5 μV 的失调电压，但我们在此不予考虑。有关自稳零运算放大器的详情，请参阅[指南MT-055](#)。
- VFB运算放大器上的输入偏置电流（无输入偏置电流补偿电路）在(+)输入端和(-)输入端大致相等，范围为1至5 μA 。有的FET输入运算放大器的输入偏置电流不到200 fA，适用于静电计等应用。（如[AD549](#)）。
- 因输入偏置电流引起的输出失调电压可以归零，其方法是反相和同相输入端中的有效源电阻相等。这种方法对于偏置电流补偿VFB运算放大器无效，因为这类放大器的输入端有额外的电流误差源。在这种情况下，净输入偏置电流不一定相等，也不一定具有相同的极性。
- VFB运算放大器在反馈网络控制着整体响应的应用中十分有用，比如有源滤波器应用。然而，有些VFB运算放大器是经过非完全补偿处理的，使用时必须超过其额定的最低闭环增益。
- VFB运算放大器的简化模型是大家耳熟能详的，所有模拟电子教材中都有论述。
- VFB架构适用于那些需要轨到轨输入和输出的低电源电压应用。

CFB运算放大器

- 另一方面，我们对电流反馈(CFB)运算放大器的了解较少，相关文献也不多。许多设计师选择VFB运算放大器，只是因为他们更了解这种放大器。
- CFB运算放大器的开环增益和精度一般低于精密VFB运算放大器。
- CFB运算放大器的反相和同相输入阻抗不相等，而且CFB运算放大器的输入偏置电流一般也是不相等且不相关的，因为(+)输入端和(-)输入端具有完全不同的架构。为此，外部偏置电流取消机制也不起作用。CFB输入偏置电流的范围为5至15 μA ，在反相输入端一般都较高。
- 由于CFB运算放大器一般是针对一个固定的反馈电阻值而优化的，因此，除设置闭环增益以外，其反馈网络的灵活性显得不足。这使得CFB运算放大器不适合多数有源滤波器，Sallen-Key滤波器除外，因为这种滤波器可以采用合适的固定反馈电阻进行设计。图1总结了VFB和CFB运算放大器的直流及运行考虑因素。
- CFB架构确实适用于轨到轨输入和输出。

◆ VFB运算放大器

- 高开环增益和直流精度
- 提供低失调电压($<20 \mu\text{V}$)
- 提供低偏置电流(JFET、CMOS或偏置电流补偿) ($<200 \text{ fA}$)
- 平衡输入阻抗
- 灵活的反馈网络
- 提供轨到轨输入和输出

◆ CFB运算放大器

- 较低的开环增益和直流精度
- 较高的失调电压
- 反相输入阻抗低，同相输入阻抗高
- 输入偏置电流不如VFB低，并且匹配程度不如VFB
- 实现最佳性能需使用固定反馈电阻

图1：VFB和CFB运算放大器的直流及运行考虑因素

VFB和CFB运算放大器的交流考虑因素

VFB运算放大器

- VFB运算放大器的一个显著特点是，它们可在较宽的频率范围内提供恒定的增益带宽积。
- 另外，市场上有高带宽、高压摆率、低失真VFB运算放大器，其针对低静态电流采用了“H桥”架构 ([指南MT-056](#)) 。
- VFB运算放大器适用于各类有源滤波器架构，因为其反馈网络非常灵活。

CFB运算放大器

- CFB拓扑结构主要用于对高带宽、高压摆率和低失真有极高要求的场合。有关CFB运算放大器交流特性的详细讨论，请参阅[指南MT-057](#)。
- 对于给定的互补性双极性IC工艺，CFB一般可在相同量的静态电流下产生比VFB高的FPBW（因而具有较低的失真）。这是因为CFB几乎不存在压摆率限制。为此，其全功率带宽和小信号带宽大约相同。然而，高速VFB运算放大器中使用的“H桥”架构在性能上几乎与CFB运算放大器相当 ([指南MT-056](#)) 。
- 不同于VFB运算放大器，CFB运算放大器的反相输入阻抗极低。在反相模式下将运算放大器作为I/V转换器使用时，这是一种优势，因为其对反相输入电容的敏感度低于VFB。
- CFB运算放大器的闭环带宽由内置电容以及外置反馈电阻的值决定，相对而言，是独立于增益设置电阻的（即从反相输入端到地的电阻）。这使得CFB运算放大器成为要求增益独立带宽的可编程增益应用的理想选择。
- 由于CFB运算放大器必须配合一个固定反馈电阻使用，才能实现最佳稳定性，因此，在除Sallen-Key滤波器以外，它们作为有源滤波器的应用是十分有限的。
- 在CFB运算放大器中，其反馈电阻上较小的杂散电容值可能导致不稳定。

- ◆ VFB运算放大器
 - 恒定的增益带宽积
 - 提供高压摆率和高带宽
 - 提供低失真版本
 - 灵活的反馈网络
 - 适合有源滤波器
- ◆ CFB运算放大器
 - 各种闭环增益下的带宽相对恒定
 - 增益带宽积不恒定
 - 针对特定工艺和功耗提供略高的压摆率和带宽（相比VFB而言）
 - 提供低失真版本
 - 实现最佳性能需使用固定反馈电阻
 - 杂散反馈电容导致不稳定
 - 难以用于非Sallen-Key型有源滤波器
 - 低反相输入阻抗降低I/V转换器应用中的输入电容影响

图2：VFB和CFB运算放大器的交流考虑因素

VFB和CFB运算放大器的噪声考虑因素

VFB运算放大器

- 市场上有些精密VFB运算放大器的输入电压噪声不到 $1\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。多数JFET或CMOS输入VFB运算放大器的输入电流噪声低于 $100\text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，有些则低于 $1\text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。然而，总输出噪声不但取决于这些值，同时也取决于闭环增益和反馈电阻的实际值（[指南MT-049](#)）。
- 对于VFB运算放大器，反相和同相输入电流噪声一般相等，而且几乎总是不相关。宽带双极性VFB运算放大器的典型值范围为 $0.5\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 至 $5\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。当增加输入偏置电流补偿电路时，双极性输入级的输入电流噪声会提高，因为它们的电流噪声不相关，因而会（以RRS方式）增加双极性级的内生电流噪声。然而，偏置电流补偿很少用在高速运算放大器中。

CFB运算放大器

- CFB运算放大器中的输入电压噪声一般低于带宽与之近似的VFB运算放大器。其原因在于，CFB运算放大器中的输入级一般在较高的电流下工作，从而使发射极电阻下降，结果导致电压噪声降低。CFB运算放大器的典型值范围为 1 至 $5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

- 然而，CFB运算放大器的输入电流噪声一般大于VFB运算放大器，因为其偏置电流普遍较高。CFB运算放大器的反相电流噪声和同相电流噪声通常不同，因为它们采用的是独特的输入架构，二者表示为独立的规格参数。多数情况下，反相输入电流噪声是二者中较大者。CFB运算放大器的典型输入电流范围为5至40 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。这往往可能占据主导地位，但在电压噪声占主导地位的超高闭环增益下除外。

计算噪声的最佳方法是写一个简单的电子表格计算程序，以自动进行计算，其中要包括所有噪声源。在[指南MT-049](#)中讨论的等式可用于该目的。

- ◆ **VFB运算放大器**
 - 提供低电压噪声 (< 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)
 - 提供低电流噪声 (JFET和CMOS输入)
 - 反相和同相输入电流噪声相等且不相关
 - 计算总噪声时必须考虑反馈网络和外部电阻值
- ◆ **CFB运算放大器**
 - 低电压噪声 (1至5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)
 - 较高的电流噪声 (5至40 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$) 通常是主要因素
 - 计算总噪声时必须考虑反馈网络和外部电阻值

图3：VFB和CFB运算放大器的噪声考虑因素

总结

对于多数通用或高精度低频、低噪声应用，VFB运算放大器通常是最佳选择。VFB运算放大器也非常适合单电源应用，因为许多此类放大器提供轨到轨输入和输出。

VFB运算放大器具有极为灵活的反馈网络，因而适用于有源滤波器设计。

CFB运算放大器具有最佳带宽、压摆率和失真性能，但牺牲的是直流性能、噪声以及使用固定值反馈电阻的要求。CFB运算放大器在有源滤波器中的应用仅限于Sallen-Key等同相配置。

- ◆ 选择VFB运算放大器可获得下列优点
 - 高精度、低噪声、低带宽
 - 轨到轨输入和输出
 - 反馈网络灵活性
 - 有源滤波器

- ◆ 选择CFB运算放大器可获得下列优点
 - 超高带宽、压摆率和极低失真
 - 不同增益下的带宽相对恒定
 - Sallen-Key有源滤波器

图4：总结——VFB与CFB运算放大器

参考文献

1. Hank Zumbahlen, *Basic Linear Design*, Analog Devices, 2006, ISBN: 0-915550-28-1. 另见[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, 另见[Op Amp Applications Handbook](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7844-5. Chapter 1.

© 2009 Analog Devices, Inc 保留所有权利。对于客户产品设计、客户产品的使用或应用，以及因ADI公司协助而可能导致的任何侵权，ADI公司概不负责。所有商标和标志均属各自所有人所有。ADI公司应用与开发工具工程师提供的信息准确可靠，但ADI公司对其技术指南所提供内容的技术准确性和时效性不承担责任。