

## 精密运算放大器

### 精密运算放大器的特性

本指南将详细考察精密信号调理应用中适用放大器的一些相关问题。尽管这些讨论把 [OP177](#) 运算放大器当作了精密双极性放大器的“金标准”，但一些新产品(比如轨到轨输出 [OP777](#)、[OP727](#) 以及 [OP747](#)、[OP1177](#)、[OP2177](#) 和 [OP4177](#)) 都以更小的封装提供不相上下的性能。

市场上有开环增益大于100万的精密运算放大器，共模和电源抑制比也达到这一数量级。还有失调电压低于25  $\mu\text{V}$ 、失调漂移低于0.1  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  的双电源运算放大器(如 [OP177](#))，然而，单电源精密双极性运算放大器有时还达不到这一性能水平。这是低功耗、低电压应用有时必须面对的权衡考量。但另一方面，现代斩波稳定(自稳零)运算放大器的失调和失调电压漂移无法与噪声区分开来，而且这些器件以单电源供电，同时提供轨到轨输入和输出。它们也有自己的问题，本节稍后部分将专门进行讨论。

必须了解的是，直流开环增益、失调电压、电源抑制(PSR)和共模抑制(CMR)并非选择精密放大器时的唯一考虑因素。放大器的交流性能也很重要，即使在“低”频下也是如此。开环增益、PSR和CMR都具有相对较低的转折频率，因此，可能视为“低”频的频率实际上可能超过这些转折频率，从而使误差超出仅仅依靠直流参数预测的值。例如，如果一个放大器的直流开环增益为1000万，单位增益交越频率为1 MHz，则其对应的转折频率为0.1 Hz！因此，我们必须在实际信号频率下考虑开环增益。单极点单位增益交越频率 $f_u$ 、信号频率 $f_{\text{sig}}$ 以及开环增益 $A_{\text{VOL}(f_{\text{sig}})}$ (在信号频率下测得)之间的关系可表示为：

$$A_{\text{VOL}(f_{\text{sig}})} = \frac{f_u}{f_{\text{sig}}} \quad \text{等式1}$$

在上例中，100 kHz下的开环增益为10，10 kHz下则为100000。请注意，恒定增益-带宽积概念只适用于VFB运算放大器。并不适用于CFB运算放大器，但很少用在精密应用中。目标频率下开环增益的损失可能带来失真，尤其是在音频频率下。因此，线路频率或谐波下的CMR或PSR损失也可能导致误差。

针对特定信号调理应用选择正确的放大器时，使问题变得更加复杂的是市场上存在大量采用不同工艺(双极性、互补双极性、BiFET、CMOS、BiCMOS)和架构(传统运算放大器、仪表放大器、轨波放大器、隔离放大器等)制成的多种多样的放大器。

另外，目前市场上有大量精密放大器可供选择，这些放大器采用单电源电压，由于其信号摆幅、电压输入和输出限制有所下降，结果使设计过程变得更加复杂。目前，失调电压和噪声在输入信号中的意义更加重大。图1总结了精密运算放大器的部分一般属性。

◆ Input Offset Voltage	<100 $\mu$ V
◆ Input Offset Voltage Drift	<1 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C
◆ Input Bias Current	<2nA
◆ Input Offset Current	<2nA
◆ DC Open Loop Gain	>1,000,000
◆ Unity Gain Bandwidth Product, $f_u$	500kHz - 5MHz
◆ Always Check Open Loop Gain at Signal Frequency!	
◆ 1/f (0.1Hz to 10Hz) Noise	<1 $\mu$ V p-p
◆ Wideband Noise	<10nV/ $\sqrt$ Hz
◆ CMR, PSR	>100dB
◆ Tradeoffs:	
● Single supply operation	
● Low supply currents	

**图1：精密运算放大器的特性**

### 精密运算放大器直流误差预算分析

为了对高精度运算放大器电路中的各种误差的大小形成一种概念，图2对OP177F进行了一种简单的室温分析。放大器以反相输入模式连接，其信号增益为100。示意图中同时还展示了数据手册中的关键规格。我们假定输入信号为100 mV满量程，相当于10 V的输出信号。各种误差源均经标准化处理为满量程，均以百万分率(ppm)为单位。注意：百万分(ppm)误差=小数误差 $\times 10^6$  = %误差 $\times 10^4$ 。

注意， $V_{OS}$ 和 $I_{OS}$ 导致的失调误差以及有限 $A_{VOL}$ 导致的增益误差可通过系统校准予以消除。然而，因开环增益非线性度引起的误差无法通过校准消除，结果会产生一个相对精度误差，通常称为分辨率误差。分辨率误差的另一个贡献因素是1/f噪声。

该噪声始终都是存在的，会增加测量结果的不确定性。电路在室温下的总体相对精度为9 ppm，相当于~17位分辨率。

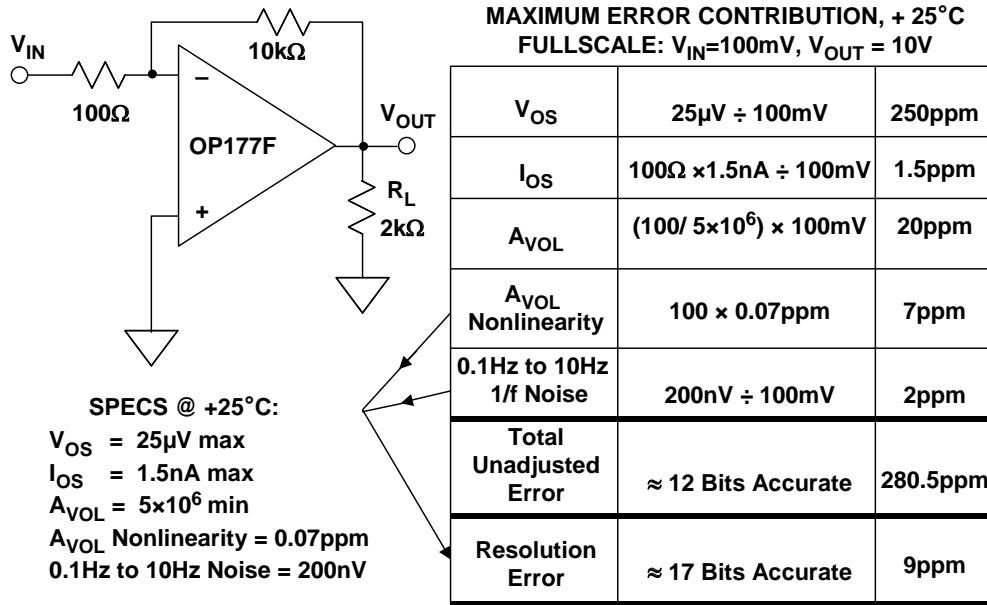


图2：精密运算放大器(OP177F)直流误差预算分析

也可以将若干个单电源运算放大器的性能与“金标准”[OP177](#)进行比较，下面的图3展示了一些代表性器件的比较结果。

LISTED IN ORDER OF INCREASING SUPPLY CURRENT

PART NO.	$V_{OS}$ max	$V_{OS}$ TC	$A_{VOL}$ min	NOISE (1kHz)	INPUT	OUTPUT	$I_{SY}/\text{AMP}$ MAX
OP293	250 $\mu\text{V}$	2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	200k	5nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0, 4V	5mV, 4V	20 $\mu\text{A}$
OP196/296/496	300 $\mu\text{V}$	2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	150k	26nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	R/R	"R/R"	60 $\mu\text{A}$
OP777	100 $\mu\text{V}$	1.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	300k	15nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0, 4V	"R/R"	270 $\mu\text{A}$
OP191/291/491	700 $\mu\text{V}$	5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	25k	35nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	R/R	"R/R"	350 $\mu\text{A}$
*AD820/822/824	1000 $\mu\text{V}$	20 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	500k	16nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0, 4V	"R/R"	800 $\mu\text{A}$
**AD8601/2/4	600 $\mu\text{V}$	2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	20k	33nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	R/R	"R/R"	1000 $\mu\text{A}$
OP184/284/484	150 $\mu\text{V}$	2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	50k	3.9nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	R/R	"R/R"	1350 $\mu\text{A}$
OP113/213/413	175 $\mu\text{V}$	4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	2M	4.7nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0, 4V	5mV, 4V	3000 $\mu\text{A}$
OP177F ( $\pm 15\text{V}$ )	25 $\mu\text{V}$	0.1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	5M	10nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	N/A	N/A	2000 $\mu\text{A}$

\*JFET INPUT \*\*CMOS      NOTE: Unless Otherwise Stated  
 Specifications are Typical @ +25°C  
 $V_S = +5\text{V}$

图3：精密单电源运算放大器的性能特性

注意，图3放大器列表并不包括斩波运算放大器，该类放大器在诸多类别中均有卓越表现。有关讨论另见[指南MT-055](#)。

### 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.

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.