

## 最佳噪声性能：低噪声放大器选择指南

作者：Paul Lee

### 简介

当针对低噪声应用评估放大器的性能时，考虑因素之一是噪声，包括内部噪声和外部噪声。本应用笔记将简要探讨有关内部和外部噪声的基本原理，并指出在为低噪声设计选择最佳放大器时涉及到的权衡问题。

### 外部噪声

内部和外部噪声源之间存在一定区别。外部噪声可以包括任何外部影响，比如外部器件和电气/电磁干扰等。干扰是指以电压或电流形式存在的任何无用信号，既可能存在于放大器引脚处，也可能存在于相关的电路中。干扰可能表现为尖峰、阶跃、正弦波和随机噪声等。干扰可以来自任何地方：机械、临近电力线、射频发射器或接收器、计算机甚至同一设备中的电路(即数字电路或开关型电源)。即使假设可以通过周密的设计和/或电路板布局布线来消除所有干扰，放大器及其相关电路中的器件仍然会产生随机噪声。

周围电路器件产生的噪声也必须考虑。当温度高于绝对零度时，所有电阻都是噪声源，这是由于载荷子产生热运动而造成的结果，称为约翰逊噪声或热噪声。这种噪声随电阻、温度和带宽的增加而升高。电压和电流噪声的计算公式如下所示：

$$V_n = \sqrt{4kTBR} \quad (1)$$

其中：

$V_n$ 是电压噪声。

$k$ 表示玻尔兹曼常数( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)。

$T$ 表示绝对温度(单位：Kelvin)。

$B$ 表示带宽(单位：Hz)。

$R$ 表示电阻(单位： $\Omega$ )。

$$I_n = \sqrt{\frac{4kTB}{R}} \quad (2)$$

其中：

$I_n$ 是电压噪声。

$k$ 表示玻尔兹曼常数( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)。

$T$ 表示绝对温度(单位：Kelvin)。

$B$ 表示带宽(单位：Hz)。

$R$ 表示电阻(单位： $\Omega$ )。

一般而言，在室温下，一个1 k $\Omega$ 电阻的噪声约为4 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。在进行深入分析时，还需考虑电阻的其他噪声源，如触点噪声、散粒噪声以及与特定电阻型号相关的寄生噪声。在本应用笔记中，我们只讨论约翰逊噪声，因为这种噪声与电阻值的平方根是成比例的。

电抗不会产生噪声，但通过电抗的噪声电流却会产生噪声电压和相关寄生噪声。

要降低电路输出的噪声，可通过降低电路中的器件总电阻或限制电路带宽。然而，降低温度一般用处不大，除非能使电阻温度降至极低的水平，因为噪声功率是与绝对温度成比例的，

$$T(x) \text{ (单位：Kelvin)} = x^\circ\text{C} + 273.15^\circ \quad (3)$$

电路中的所有电阻均会产生噪声，必须始终考虑它们的影响。实际上，只有输入和反馈通道中的电阻(通常在高增益配置中)有可能对电路总噪声产生较大的影响。噪声既可认为来自电流源，也可认为来自电压源(在既定电路中，往往采用一种便于处理的形式)。

## 目录

简介.....	1	“爆米花”噪声.....	5
外部噪声.....	1	叠加噪声源.....	5
内部噪声.....	3	噪声增益.....	6
四类内部噪声.....	4	选择低噪声运算放大器.....	7
折合到输入端的电压噪声.....	4	结论.....	9
折合到输入端的电流噪声.....	4	参考资料.....	12
闪烁噪声.....	5		

## 内部噪声

在放大器输出端，噪声通常以电压的形式表现出来，然而，这种噪声却是电压源和电流源共同产生的。一般来讲，所有内部噪声源都被折算到输入端，也就是说，内部噪声源都被当作与理想的无噪声放大器的输入相串联或并联的不相关或独立的随机噪声发生器(见图1)。由于这些噪声源被视为随机噪声，并/或表现为遵循高斯分布，因此，在叠加噪声源时，需要特别注意，详细内容如“叠加噪声源”一节所述。

如果同一个噪声在电路中出现在2个或以上的点(比如，输入偏置电流补偿电路)，那么这两个噪声源为相关噪声源，在分析噪声的时候，应该考虑到相关噪声叠加因子的因素。这篇应用笔记并没有更多的讨论相关噪声，因为一般情况下相关噪声源的影响一般都小于10%或者15%，并且往往可以被省略掉。

放大器的内部噪声可分以下几类：

- 折合到输入端的电压噪声
- 折合到输入端的电流噪声
- 散粒噪声
- “爆米花”噪声

折合到输入端的电压噪声和折合到输入端的电流噪声是放大器噪声分析中最常见的指标。通常定义为折合到输入端的谱密度函数或 $\Delta f$ 带宽中所包含的均方根(RMS)噪声值，一般以 $nV/\sqrt{Hz}$ (电压噪声)或 $pA/\sqrt{Hz}$ (电流噪声)为单位。使用 $1/\sqrt{Hz}$ 的原因在于，噪声功率随带宽(Hz)而增加，或者，电压和电流噪声密度随带宽的平方根值( $\sqrt{Hz}$ )而增加(见公式1和公式2)。

## 四类内部噪声

本节将介绍折合到输入端的电压噪声、折合到输入端的电流噪声、闪烁噪声和“爆米花”噪声。

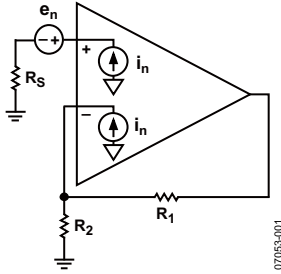


图1 运算放大器噪声模型

### 折合到输入端的电压噪声

折合到输入端的电压噪声( $e_n$ )通常被视为一种噪声电压源

电压噪声是经常被强调的噪声指标；然而，如果输入阻抗较高，电流噪声往往会成为系统噪声性能的制约因素。这与失调电压极为类似，输入失调电压通常成为输出失调的替罪羊，而实际上，当输入阻抗较高时，造成输出失调的罪魁祸首是偏置电流。

对于折合到输入端的电压噪声，需注意以下几点：

- 对于最高性能的运算放大器，电压噪声可能低于 $1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。
- 双极型运算放大器的电压噪声会低于FET运算放大器，但是其电流噪声会明显较大。
- 双极型放大器的噪声特性取决于静态电流。
- 现在的FET运算放大器能够在获得低电流噪声的同时，获得与双极型放大器性能相近的低电压噪声，当然与最好的双极型输入放大器还有一些差距。

### 折合到输入端的电流噪声

折合到输入端的电流噪声( $i_n$ )通常表现为通过两个差分输入端输出电流的两个噪声电流源。

散粒噪声(有时称为肖特基噪声)是由于流过某个势垒(如一个PN结)的电流中的载荷子随机分布而产生的电流噪声。散粒噪声电流( $i_n$ )通过以下公式计算得出：

$$i_n = \sqrt{2I_B q B} \quad (4)$$

其中：

$I_B$ 表示偏置电流(单位：A)。

$q$ 表示电子电荷(单位： $1.6 \times 10^{-19}$  C)。

$B$ 表示带宽(单位：Hz)。

简单双极型和JFET运算放大器的电流噪声通常在输入偏置电流的散粒噪声的1 dB或2 dB之内。该指标并不经常列于数据手册之中。

对于折合到输入端的噪声，需注意以下几点：

- 典型的双极型晶体管运算放大器，如OP27，电流噪声为 $400\text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ， $I_B = 10\text{ nA}$ 。除偏置电流补偿放大器外，不会随温度而发生大幅变化。
- JFET输入运算放大器(如AD8610： $5\text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，其中， $I_B = 10\text{ pA}$ )的电流噪声尽管稍低，但芯片温度每增加 $20^\circ\text{C}$ ，其电流噪声就会增加一倍，因为温度每增加 $10^\circ\text{C}$ ，JFET运算放大器的偏置电流会增加一倍。
- 传统的带平衡输入的电压反馈运算放大器通常在其反相和同相输入端具有相等的(相关或不相关的)电流噪声。
- 许多放大器，尤其是那些带输入偏置电流消除电路的放大器，其相关噪声成分比不相关噪声成分大得多。总体而言，可通过添加阻抗平衡电阻(使正负输入引脚上的阻抗相匹配)来改善噪声性能。

## 闪烁噪声

运算放大器的噪声具有高斯特性，其谱密度(白噪声)在较宽频率范围内为一个常数。随着频率的下降，受制造工艺、IC器件布局和器件类型的影响，谱密度将开始按以下速率升高：3 dB/倍频程(CMOS放大器)；3.5 dB至4.5 dB/倍频程(双极型放大器)；或最高5 dB/倍频程(JFET放大器)。

这种低频噪声特性被称为闪烁噪声或 $1/f$ 噪声，因为噪声功率谱密度与频率呈反比关系( $1/f$ )。在对数坐标图中斜率为-1。-3 dB/倍频程(CMOS类放大器)的外推谱密度线与宽带常数谱密度值相交的频率被称为 $1/f$ 拐角频率，而且是放大器的一个品质因数(见图2)。双极型和JFET放大器的 $1/f$ 拐角频率通常低于CMOS放大器。

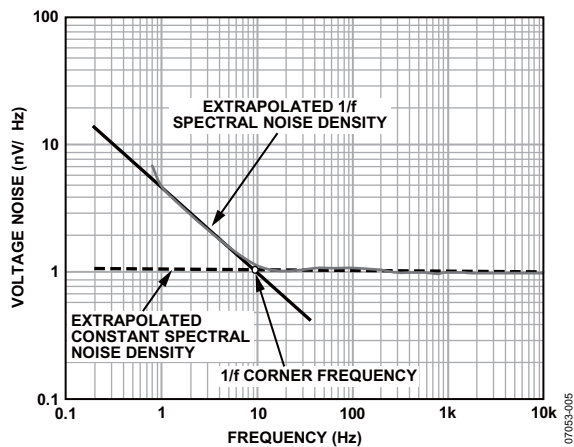


图2 噪声谱密度

## “爆米花”噪声

“爆米花”噪声亦称为随机噪声，是失调电压或电流的突然变化，持续时间为数微秒，振幅从几 $\mu$ V到几百 $\mu$ V不等。这种爆裂或“爆米花”噪声是随机的。通常，低温和高源阻抗条件下最易于产生“爆米花”噪声。尽管导致“爆米花噪声”的根本原因并不是绝对的，但晶格中存在的金属污染以及内部或表面缺陷都可能使IC产生“爆米花”或爆裂噪声。虽然在现代晶圆制造中，人们花了大量精力来减少“爆米花”噪声的根源，但完全根除是不可能的。更深入的对爆米花噪声的分析已经超出了我们这篇文章需要探讨的范围。

## 叠加噪声源

如果噪声源不相关(即一种噪声信号无法转换为另一种噪声信号)，相加的结果并不等于其算术和，而是等于其平方和的平方根。

$$V_{ni,TOTAL} = \sqrt{(e_n)^2 + (R_S \times i_n)^2 + V_n(R_{EX})^2} \quad (5)$$

其中：

$V_{ni,TOTAL}$ 表示折合到输入端(RTI)的总噪声。

$e_n$ 表示折合到输入端的电压噪声。

$i_n$ 表示折合到输入端的电流噪声。

$R_S$ 表示放大器的等效源电阻或输入电阻。

$V_n(R_{EX})$ 表示来自外部电路的电压噪声。

请注意以下事项：

- 同相输入中的任何电阻都具有约翰逊噪声，并将电流噪声转换为电压噪声。
- 在高阻抗电路中，反馈电阻中的约翰逊噪声有可能产生较大影响。

图3以勾股定理直观展示了公式5中的向量求和法。

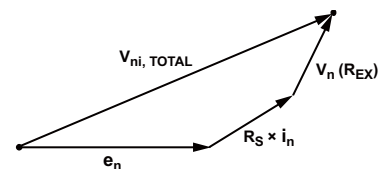


图3 噪声源向量求和

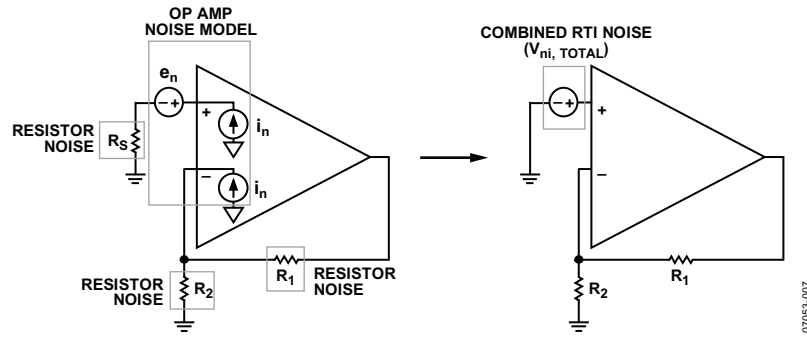


图4 简化放大器噪声电路

## 噪声增益

以上讨论的各种放大器电路噪声可归为折合到输入端(RTI)的噪声。要计算放大器电路的总输出噪声,必须用放大器电路的噪声增益乘以输入中的总合成噪声。噪声增益是放大器电路折合到输入端的噪声的增益,通常用来判断放大器电路的稳定性。

为了简化噪声增益计算,可以将图1所示放大器电路简图中的噪声源简化为一个RTI总噪声源( $V_{ni, TOTAL}$ ),如图4所示。一种常见做法是将总合成RTI噪声一次性折合到放大器的同相输入端。

$$V_{no, TOTAL} = G_N \times V_{ni, TOTAL}$$

其中:

$V_{no, TOTAL}$ 表示折合到输出端(RTO)的总噪声。

$V_{ni, TOTAL}$ 表示折合到输入端(RTI)的总噪声。

$$G_N = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

其中:

$G_N$ 表示噪声增益。

$R_1$ 表示反馈等效阻抗。

$R_2$ 表示输入等效阻抗

在某些情况下,噪声增益和信号增益并不相等(见图5)。需注意的是,闭环带宽通过用增益带宽积(或单位增益频率)除以放大器电路的噪声增益来计算。

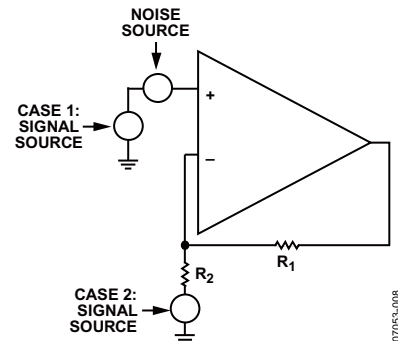


图5. 信号增益与噪声增益

情形1: 在同相配置中,信号增益和噪声增益都等于 $1 + R_1/R_2$ 。

情形2: 在反相配置中,信号增益等于 $-(R_1/R_2)$ ,而噪声增益仍等于 $1 + R_1/R_2$ 。

## 选择低噪声运算放大器

如果驱动一个带有一定源电阻的运算放大器，等效噪声输入则等于以下各项平方和的平方根：放大器的电压噪声；源电阻产生的电压；以及流过源阻抗的放大器电流噪声所产生的电压。

如果源电阻很小，则源电阻产生的噪声和放大器的电流噪声对总噪声的影响不大。这种情况下，输入端的噪声实际上只是运算放大器的电压噪声。

如果源电阻较大，源电阻的约翰逊噪声可能远高于运算放大器的电压噪声和由电流噪声产生的电压。但需要注意，由于约翰逊噪声仅随电阻的平方根而增长，而受电流噪声影响的噪声电压与输入阻抗成正比关系，因而对于输入阻抗值足够高的情况，放大器的电流噪声将成为主导。当放大器的电压和电流噪声足够高时，在任何输入电阻值情况下，约翰逊噪声都不会是主导。

如果某个放大器的噪声贡献相对于源电阻可以忽略不计，则可通过运算放大器的品质因数 $R_{S,OP}$ 来进行选择。这可以通过放大器的噪声指标来计算：

$$R_{S,OP} = \frac{e_n}{i_n} \quad (7)$$

其中：

$e_n$ 表示折合到输入端的电压噪声。

$i_n$ 表示折合到输入端的电流噪声。

图6给出的是1 KHz下，多种ADI高压(最高44 V)运算放大器的电压噪声密度对与 $R_{S,OP}$ 关系的比较，1 kHz。斜线显示了与电阻相关的约翰逊噪声。

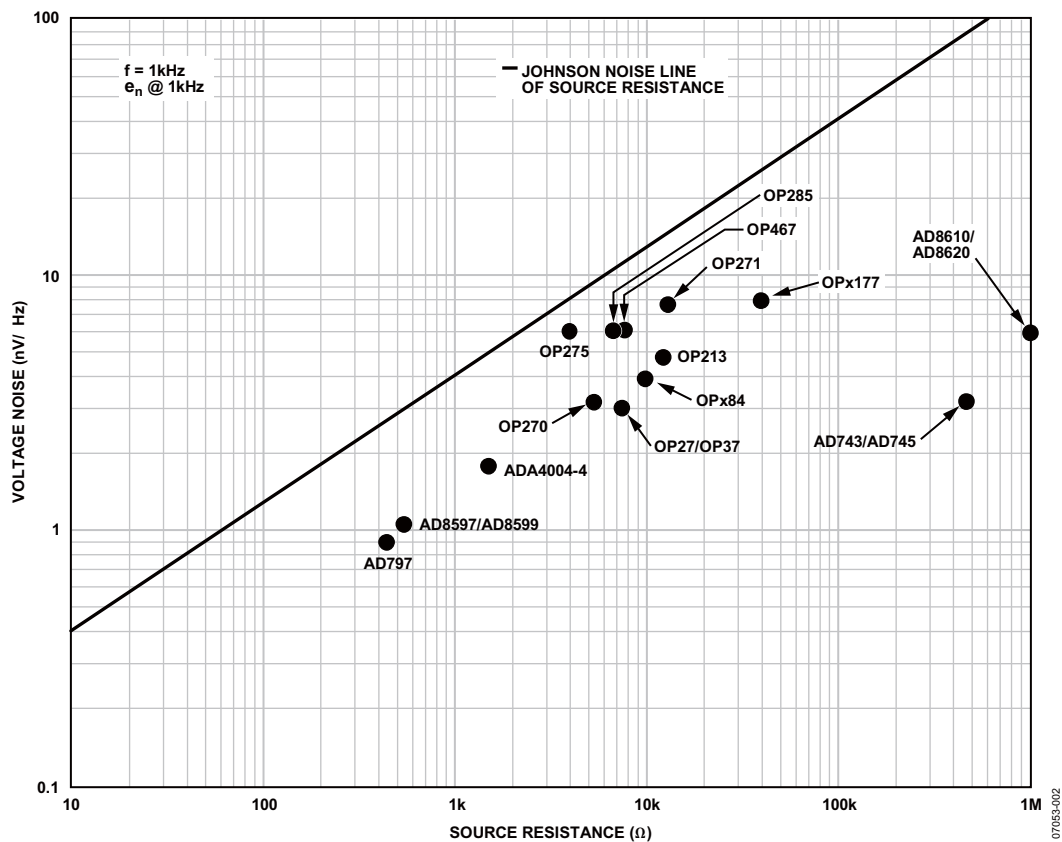


图 6 ADI公司的放大器噪声坐标图

根据运算放大器数据手册中的数据(见图8),可以为某个选定频率制作类似的曲线图。例如,AD8599的折合到输入端的电压噪声约为 $1.07 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,折合到输入端的电流噪声为 $2.3 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1 kHz)。其 $R_{s,OP}$ 值约为 $465 \Omega$ (1 kHz)。另外,需要注意以下几点:

- 与该器件相关的约翰逊噪声等效于约为 $69.6 \Omega$ 的源电阻(见图6)。
- 对于超过 $465 \Omega$ 的源电阻,放大器电流噪声产生的噪声电压会超过源电阻产生的噪声电压;放大器的电流噪声成为主要噪声源。

若欲使用该图(见图7),请执行第1至第4步。

1. 通常情况下,源电阻是已知的(如传感器阻抗)。如果不知道电阻值,则根据周围的或前端的电路器件进行计算。

2. 在约翰逊噪声线上确定给定源电阻的位置,如 $1 \text{ k}\Omega$ 。
3. 从第2步确定的点向坐标图右侧画一条水平线。
4. 从第2步确定的点向左下方画一条直线线。斜率为,每下降10倍电压噪声则下降10倍电阻。

位于线条右下方的放大器均为适用于目标设计的优质低噪声运算放大器,如图3阴影部分所示。

在图7所示例子中,适用于目标设计的优质产品有:AD8597、AD8599、AD797、ADA4004-4、OP270、OP27/OP37、AD743/AD745和OP184。

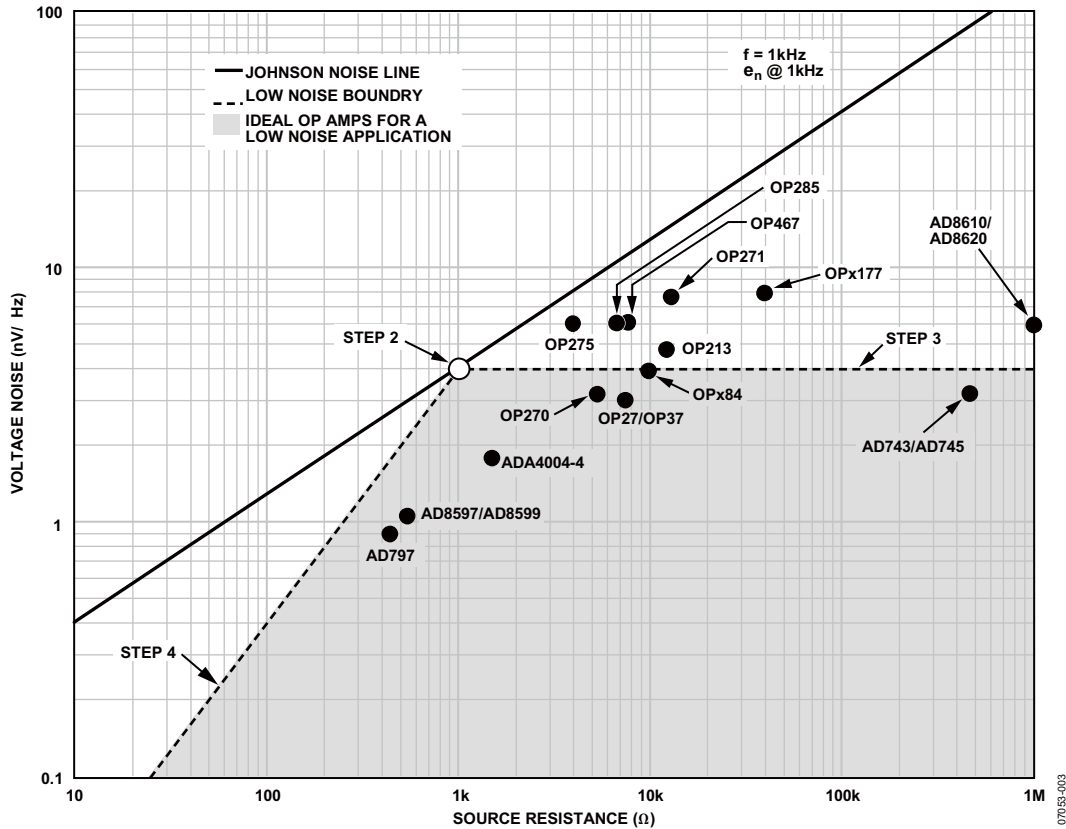


图7 为低噪声设计选择运算放大器



## 结论

在针对低噪声设计评估放大器噪声性能时，应考虑所有潜在噪声源。

运算放大器的主要噪声贡献取决于源电阻，具体如下：

- $R_S \gg R_{S,OP}$ ；折合到输入端的电流噪声占优势。
- $R_S = R_{S,OP}$ ；放大器噪声可忽略；电阻噪声占优势。
- $R_S \ll R_{S,OP}$ ；折合到输入端的电压噪声占优势。

概括而言，可通过以下方式减少或消除干扰信号：

- 良好的布线技术，以减少寄生效应。
- 良好的接地技术，如数字接地和模拟接地的隔离。
- 良好的屏蔽。

对于电阻性噪声源，请遵循以下规则：

- 根据应用的需要来限制带宽。
- 尽可能降低电阻值。
- 使用低噪声电阻，如采用大金属薄片、线绕式和金属薄膜技术的电阻。
- 尽可能减少电阻性噪声源的数量。
- 在选择ADI低噪声放大器时，可借助图8和图9，并以本应用笔记讨论的标准为依据。

有关噪声的更多信息，请参阅《传感器信号调理电路中的噪声优化》(Noise Optimization in Sensor Signal Conditioning Circuit)一文，网址：<http://www.analog.com/noiseoptimization>

产品 型号	V <sub>SY</sub> (V)	最大 V <sub>OS</sub> ( $\mu$ V)	TCV <sub>OS</sub> ( $\mu$ V/ $^{\circ}$ C)	GBP (MHz)	压摆率 (V/ $\mu$ s)	最大 I <sub>SY</sub> /AMP (mA)	e <sub>n</sub> @ 1 kHz (nV $\sqrt$ Hz)	i <sub>n</sub> @ 1 kHz (nV $\sqrt$ Hz)	R <sub>S</sub> , OP@ 1kHz ( $\Omega$ )	1/f 拐角 (Hz)	最大 I <sub>B</sub> (nA)	I <sub>S</sub> C (mA)	最小 CMRR (dB)	最小 PSRR (dB)	放大器 数量
AD797	10 TO 36	40	0.2	8	20	10.5	0.9	2	450	60	900	80	120	120	1
AD8597/ AD8599	9 TO 36	120	0.8	10	15	5.7	1.07	2.3	465	9	200	52	120	120	1/ 2
ADA4004-1/ ADA4004-2/ ADA4004-4	10 TO 36	125	0.7	12	2.7	2.2	1.8	1.2	1500	5	90	25	110	110	1/ 2/ 4
AD8676	10 TO 36	50	0.2	10	2.5	3.4	2.8	0.3*	—	10	2	40	111	106	2
AD8675	10 TO 36	75	0.2	10	2.5	2.9	2.8	0.3*	—	10	2	40	114	120	1
AD8671/ AD8672/ AD8674	10 TO 36	75	0.3	10	4	3.5	2.8	0.3*	—	10	12	30	100	110	1/ 2/ 4
ADA4075-2	$\pm$ 4.5 TO $\pm$ 18	1000	0.3	6.5	12	2.25	2.8	1.2	2333	5	100	40	110	106	2
OP27	8 TO 44	100	0.3	8	2.8	5.7	3.2	0.4	8000	2.7	80	30	100	140	1
OP37	8 TO 44	100	0.3	40	17	4.7	3.2	0.4	8000	2.7	75	30	100	140	1
OP270 OP470	9 TO 36	75	0.2	5	2.4	3.25	3.2	0.6	5333	5	20	15	106	110	2/ 4
AD743	9.6 TO 36	1000	2	4.5	2.8	10	3.2	0.0069	463,768	50	0.4	40	80	90	1
AD745	9.6 TO 36	500	2	20	12.5	10	3.2	0.0069	463,768	50	0.25	40	90	100	1
OP184/ OP284/ OP484	3 TO 36	100	0.2	4.25	4	2	3.9	0.4	9750	10	450	10	86	90	1/ 2/ 4
AD8655/ AD8656	2.7 TO 5.5	250	0.4	28	11	4.5	4	—	—	3000	0.01	220	85	88	1/ 2
OP113 / OP213/ OP413	4 TO 36	150	0.2	3.4	1.2	3	4.7	0.4	11,750	10	600	40	96	100	1/ 2/ 4
SSM2135	4 TO 36	2000	—	3.5	0.9	3	5.2	0.5	10,400	3	750	30	87	90	2
OP285	9 TO 36	250	1	9	22	2.5	6	0.9	6667	125	350	30	80	85	2
AD8610/ AD8620	10 TO 27	100	0.5	25	60	3.5	6	0.005	1,200,000	1000	0.01	65	90	100	1/ 2
OP275	9 TO 44	1000	2	9	22	2.5	6	1.5	4000	2.24	350	14	80	85	2
OP467	9 TO 36	500	3.5	28	170	2.5	6	0.8	7500	8	600	40	80	96	4
OP471	9 TO 36	1800	4	6.5	8	2.75	6.5	0.4	16,250	5	60	10	95	95	4
OP1177/ OP2177/ OP4177	5 TO 36	60	0.2	1.3	0.7	0.5	7.9	0.2	39,500	10	2	25	120	120	1/ 2/ 4
AD8510/ AD8512/ AD8513	9 TO 36	400	1	8	20	2.5	8	—	—	100	0.08	70	86	86	1/ 2/ 4
AD8651/ AD8652	2.7 TO 5.5	350	4	50	41	14	8	0.025	320,000	10000	0.01	80	80	76	1/ 2
AD8646/ AD8647/ AD8648	2.7 TO 5.5	2500	1.8	24	11	1.5	8	—	—	1000	0.001	120	67	63	1/ 2(SD)/ 4
AD8605/ AD8512/ AD8513	2.7 TO 5.5	300	1	10	5	1.2	8	0.01	800,000	500	0.001	80	85	80	1/ 2/ 4
AD8691/ AD8692/ AD8694	2.7 TO 6	2000	1.3	10	5	1.05	8	0.05	160,000	3000	0.001	80	70	80	1(SD)/ 2(SD)/ 4(SD)
OP162/ OP262/ OP462	2.7 TO 12	325	1	15	13	0.8	9.5	0.4	23,750	10	600	30	70	60	1/ 2/ 4
OP07	6 TO 36	75	0.3	0.6	0.3	4	9.6	0.12	80,000	100	4	30	106	94	1
OP07D	8 TO 36	150	0.5	0.6	0.2	1.3	10	0.074	135,135	8	1	30	120	115	1
AD8677	8 TO 36	130	0.5	0.6	0.2	1.3	10	0.074	135,135	8	1	30	120	115	1
AD8615/ AD8616/ AD8618	2.7 TO 5.5	500	1.5	24	12	2	10	0.05	200,000	1000	0.001	150	80	70	1/ 2/ 4
AD8519/ AD8529	2.7 TO 12	1100	2	8	2.9	1.2	10	0.4	25,000	80	300	70	63	60	1/ 2
AD8665/ AD8666/ AD8668	5 TO 16	2500	3	4	3.5	1.55	10	0.1	100,000	1000	0.001	140	90	98	1/ 2/ 4
AD8661/ AD8662/ AD8664	5 TO 16	160	4	4	3.5	1.55	12	0.1	120,000	1000	0.001	140	90	95	1/ 2/ 4
OP97 OP297 OP497	4 TO 40	75	0.3	0.9	0.2	0.38	14	0.02*	1,166,667	200	0.15	10	110	110	1/ 2/ 4
OP777/ OP727/ OP747	3 TO 36	100	0.3	0.7	0.2	0.35	15	0.13	115,384	20	11	30	110	120	1/ 2/ 4
AD8517/ AD8527	1.8 TO 6	3500	2	7	8	1.2	15	1.2	12,500	200	450	10	60	90	1/ 2/

\*请参考产品数据手册获得更详细的条件。

图8 ADI低输入电压噪声放大器选型表

产品 型号	V <sub>SY</sub> (V)	最大 V <sub>OS</sub> (μV)	TCV <sub>OS</sub> (μV/°C)	GBP (MHz)	压摆率 (V/μs)	最大 I <sub>SY</sub> /AMP (mA)	e <sub>n</sub> @ 1 kHz (nV√Hz)	i <sub>n</sub> @ 1 kHz (nV√Hz)	R <sub>S</sub> OP @ 1kHz (Ω)	1/f 拐角 (Hz)	最大 I <sub>B</sub> (nA)	I <sub>S</sub> C (mA)	最小 CMRR (dB)	最小 PSRR (dB)	放大器 数量
AD549	10 TO 36	500	10	5	3	0.7	35	0.22	159,090,909	100	0.06	20	90	90	1
AD548K/B	9 TO 36	500	5	1	1.8	0.2	30	1.8	16,666,666	700	10	15	82	86	1
AD743	9.6 TO 36	1000	2	4.5	2.8	10	3.2	6.9	463,768	50	0.4	40	80	90	1
AD745	9.6 TO 36	500	2	20	12.5	10	3.2	6.9	463,768	50	0.25	40	90	100	1
AD711C	9 TO 36	250	5	4	20	2.8	18	10	1,800,000	200	25	25	86	86	1
AD8605/ AD8606/ AD8608	2.7 TO 6	300	1	10	5	1.2	8	10	800,000	500	1	80	85	80	1/ 2/ 4
AD8651/ AD8652	2.7 TO 5.5	350	4	50	41	14	8	25	320,000	10,000	10	80	80	76	1/ 2
AD8615/ AD8616/ AD8618	2.7 TO 6	500	1.5	24	12	1.3	10	50	200,000	1000	1	150	80	70	1/ 2/ 4
AD8691/ AD8692/ AD8694	2.7 TO 6	2000	1.3	10	5	1.05	8	0.05	160,000	3000	1	80	70	80	1(SD)/ 2(SD)/ 4(SD)
AD8661/ AD8662/ AD8664	5 TO 6	160	4	4	3.5	1.55	12	0.1	120,000	1000	1	140	90	95	1/ 2/ 4
OP07	6 TO 36	75	0.3	0.6	0.3	4	9.6	0.12	80,000	100	4000	30	106	94	1

图9 ADI低输入电流噪声放大器选型表

07053-104

## 注释

- Analog Devices, Inc., AN-280 Application Note *Mixed Signal Circuit Techniques*.
- Barrow, J., and Paul Brokaw. 1989. "Grounding for Low- and High-Frequency Circuits." Analog Dialogue. Analog Devices, Inc. (23-3).
- Bennett, W. R. 1960. *Electrical Noise*. New York: McGraw-Hill.
- Bowers, Derek F. 1989. "Minimizing Noise in Analog Bipolar Circuit Design." IEEE Press.
- Brockman, Don and Arnold Williams. AN-214 Application Note *Ground Rules for High-Speed Circuits*. Analog Devices, Inc.
- Brokaw, Paul. 2000. AN-202 Application Note *An IC Amplifier User's Guide to Decoupling, Grounding, and Making Things Go Right for a Change*. Analog Devices, Inc. (February).
- Brokaw, Paul and Jeff Barrow. AN-345 Application Note *Grounding for Low- and High-Frequency Circuits*. Analog Devices, Inc.
- Bryant, James Bryant and Lew Counts. 1990. "Op Amp Issues—Noise" Analog Dialogue. Analog Devices Inc. (24–2).
- Freeman, J. J. 1958. *Principles of Noise*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Gupta, Madhu S., ed., 1977. *Electrical Noise: Fundamentals & Sources*. New York: IEEE Press. Collection of classical reprints.
- Johnson, J. B. 1928. "Thermal Agitation of Electricity in Conductors" (Physical Review 32): 97–109.
- Motchenbacher, C. D., and J. A. Connelly. 1993. *Low-Noise Electronic Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Nyquist, H. 1928. "Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors" (Physical Review 32): 110–113.
- Rice, S.O. 1944. "Math Analysis for Random Noise" *Bell System Technical Journal* (July): 282–332.
- Rich, Alan. 1982. "Understanding Interference-Type Noise." Analog Dialogue. Analog Devices Inc., (16–3).
- Rich, Alan. 1983. "Shielding and Guarding." Analog Dialogue. Analog Devices Inc. (17–1).
- Ryan, Al and Tim Scranton. 1984. "DC Amplifier Noise Revisited." Analog Dialogue. Analog Devices, Inc., (18–1).
- Schottky, W. 1926. "Small-Shot Effect and Flicker Effect." (Phys. Rev. 28): 74–103.
- Van Der Ziel, A. 1954. *Noise*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.