



AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

精密模拟设计中的噪声分析

SCOTT HUNT

系统应用工程师

精密仪器

2016年6月1日



议题

- ▶ 器件噪声概述
 - 定义、类型以及对常见电路的影响
- ▶ 系统噪声概述
 - 最终设备的要求
- ▶ 针对噪声性能的系统设计建议



AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

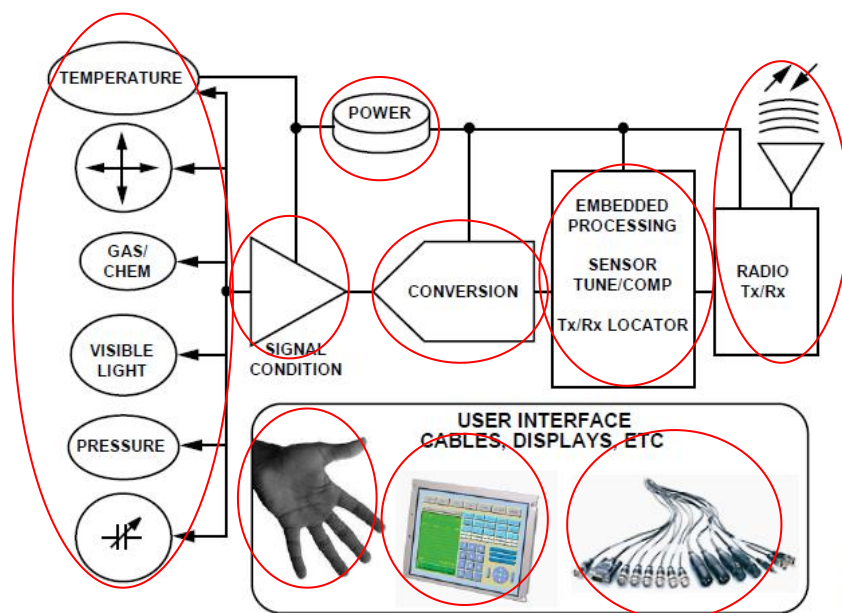
器件噪声概述

定义

► 什么是噪声？

- 任何干扰目标信号测量值的不良信号
 - 可以是直流或交流噪声、内部或外部噪声、随机或重复噪声、可削减或不可削减噪声
 - **随机**噪声会干扰测量的可重复性
 - 限制了能够测量的最小信号（灵敏度）

噪声源：



外部世界

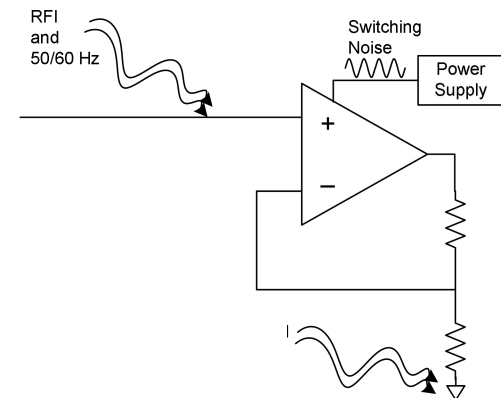
外部噪声与内部噪声

▶ 外部噪声：从外部进入电路中

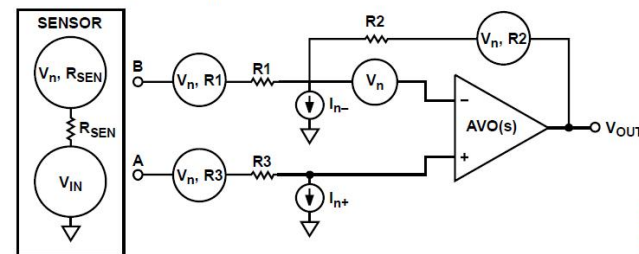
- 需要3个要素：来源、耦合路径、接收器。
- 能量通常处在离散频率上，可以是间歇性的。
- **可削减** - 尽量缩短噪声的耦合路径
 - 适当的接地、去耦、屏蔽、布局、特别技巧

▶ 内部噪声：电路中产生的噪声

- **不可削减** - 对于给定频率，可滤除
 - 扩散到全部频率
 - 限制了能够测量的最小信号
 - 前提是您已尽力降低外部噪声
 - 噪声电压的瞬时值是随机的
- 噪声功率是可预测的



$$\text{NOISE GAIN} = 1 + \frac{R2}{R1}$$
$$\text{BANDWIDTH} = 1.57 f_{\text{CLOSED-LOOP BANDWIDTH}}$$
$$\text{NOISE AT } V_{\text{OUT}} = \text{NOISE}_{\text{RTI}} \times \text{NOISE GAIN}$$



单位探究：NSD、RMS、峰峰值

◆ 峰峰值噪声($\mu\text{V}_{\text{p-p}}$)

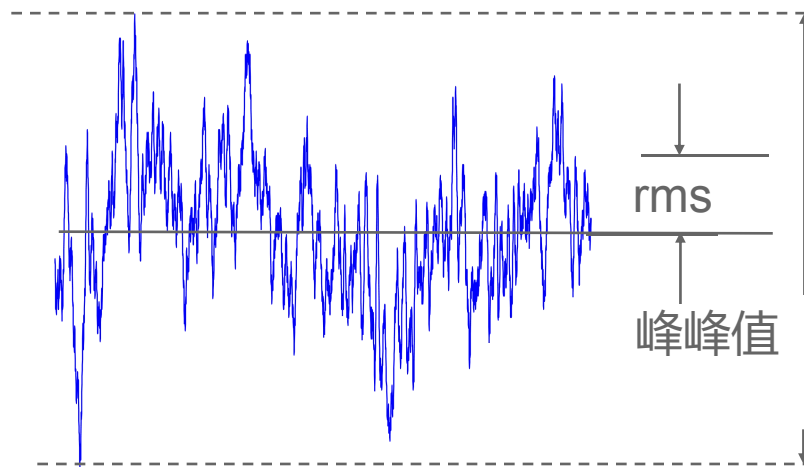
- 取决于两点（波形边界的两点）
- 与带宽相关
- 不可重复，可预测

◆ RMS噪声(μV_{rms})

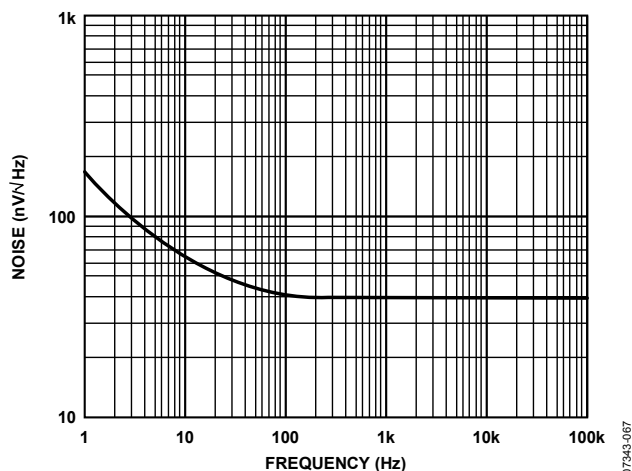
- 取决于波形中的全部点
- 与带宽相关
- 与噪声功率有关
 - 真实、可预测

◆ 噪声频谱密度(NSD) ($\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)

- 取决于波形中的全部点
- 按照频段将信息归类
 - 最灵活
- 测量时间长且复杂



噪声波形示例



噪声频谱示例

NSD转换为RMS：噪声等效带宽

- ◆ Mathematically, to get RMS noise: $\sqrt{\int_0^{\infty} (NSD * |A_V(f)|)^2 df}$
- ◆ 噪声等效带宽(NEB)处理滤波器截止频率以外的噪声能量
filter cutoff
 - ◆ NEB是将增益对频率积分而获得的一种带宽调整

$$NEB = \frac{1}{A^2_{v_max}} \int_0^{\infty} |A_V(f)|^2 df$$

- ◆ 对于LPF：RMS噪声 = NSD_{宽带} * \sqrt{NEB}
 - 对于带通滤波器：RMS噪声 = 峰值NSD * \sqrt{NEB}

巴特沃兹低通滤波器的NEB：

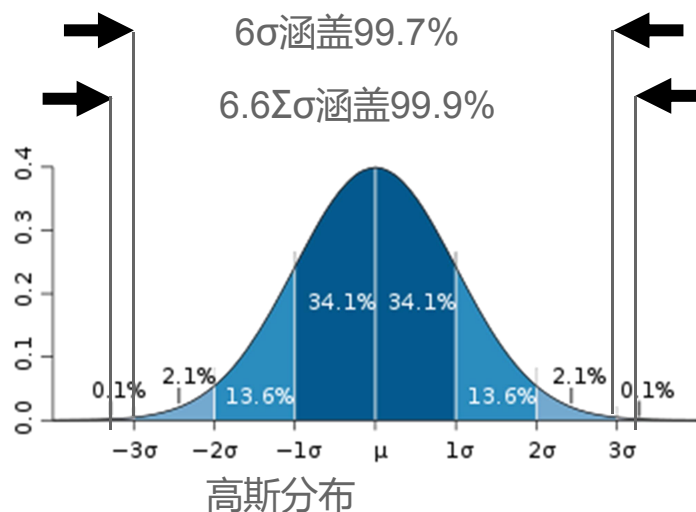
NUMBER OF POLES	NOISE BW / 3dB BW
1	1.57
2	1.11
3	1.05
4	1.03
5	1.02

示例：

- 求RMS噪声，条件如下：
 - ◆ $NSD = 40 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
 - ◆ 1 kHz、1极点滤波
- 答：
 - ◆ $40 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} * \sqrt{1000 \text{ Hz}} * 1.57$
 $\approx 1600 \text{ nVrms} = 1.6 \text{ } \mu\text{Vrms}$

RMS转换为峰峰值

- ◆ 噪声电压是随机的（高斯式），那么如何计算峰峰值？
 - ◆ 用概率
 - 理论上：峰峰值噪声可以是无限大
 - 实际上：rms乘以6.6是一个很好的估计值
 - ◆ 乘数6.6涵盖了波形中99.9%的点
 - ◆ 心算时，6即足够（涵盖波形中99.7%的点）



曲线来自Wikipedia : Jeremy Kemp原创

合并电路中的多个噪声源

使用2步避免非常常见的问题

1. 单位一致

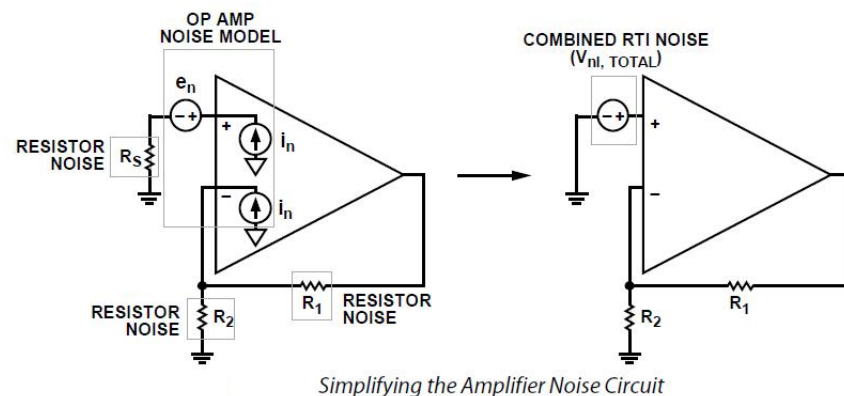
- 明确是RMS (首选) 还是NSD

2. 所有噪声源参考同一点

- 通常折合到输入端(RTI)或输出端(RTO)
- 对于这些点, 不同噪声源可能具有不同增益

最后, 噪声功率直接相加, 故而噪声电压以RSS (和方根) 相加

$$E_{N_total} = \sqrt{E_{N1}^2 + E_{N2}^2}$$



内部噪声类型

▶ 您需要知道的类型

- 电压噪声
- 电流噪声
- 1/f噪声与白噪声
- 电阻（热/约翰逊）噪声
- 量化噪声（知道更好）

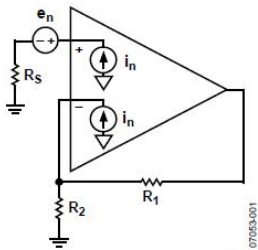


Figure 1. Op Amp Noise Model

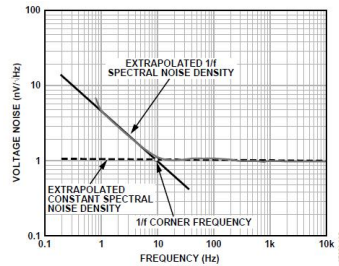
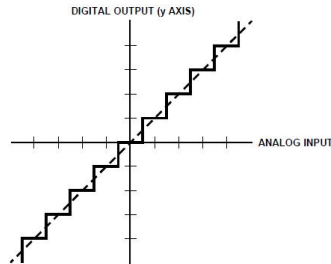


Figure 2. Spectral Noise Density



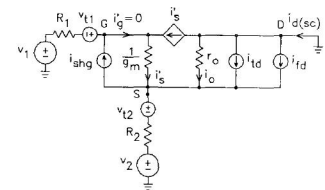
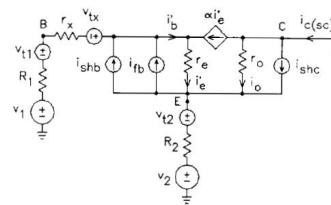
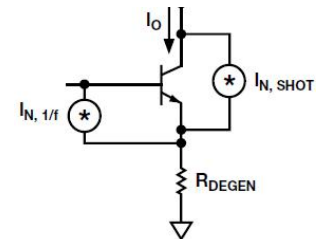
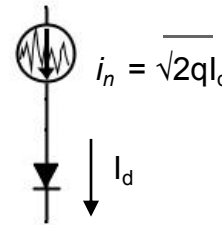
◆ ALL resistors have a voltage noise of $V_{NR} = \sqrt{4kTBR}$



AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

▶ 您可能不需要知道的类型

- 散粒噪声
- KT/C噪声
- 爆裂（爆米花）噪声
- 生成/复合噪声
- 雪崩噪声



理想电阻的热噪声

$$e_R = \sqrt{4kTRB}$$

带宽 (Hz)

rms电压噪声 :

玻尔兹曼常数
 $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

温度
(K)

电阻(Ω)

- 对于频谱密度, $B = 1\text{Hz}$
- $T_A = 25^\circ\text{C}$ 时: $4kT = 1.646 \times 10^{-20}$
 $\rightarrow e_n (\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}) = 1.283 \times 10^{-10} * \sqrt{R}$
 - 或使用近似计算: $1\text{k}\Omega \approx 4\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

噪声：数据手册中有什么？

▶ 放大器

Data Sheet ADA4084-1/ADA4084-2/ADA4084-4

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
NOISE PERFORMANCE						
Voltage Noise	e_n p-p	0.1 Hz to 10 Hz		0.14		$\mu\text{V p-p}$
Voltage Noise Density	e_n	$f = 1 \text{ kHz}$		3.9		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Current Noise Density	i_n	$f = 1 \text{ kHz}$		0.55		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$

■ 电压噪声

- 噪声频谱密度(NSD) – 单位为 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($f = 1\text{kHz}$ 、 10kHz 或多个频率时)
- $1/f$ 噪声通常指定峰峰值 (0.1Hz 至 10Hz 频段)
- 某些数据手册会给出噪声转折频率 ($1/f$ 噪声与宽带噪声的交点)

■ 电流噪声

- NSD – $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($f = 1\text{kHz}$ 或 10kHz 时)
- 某些数据手册会给出峰峰值 (0.1Hz 至 10Hz 频段)

Data Sheet AD7960

▶ ADC

- SNR (接近FS的信号)
- 码分布 (直方图, 输入短路)
- 某些时候会给出动态范围或RMS噪声

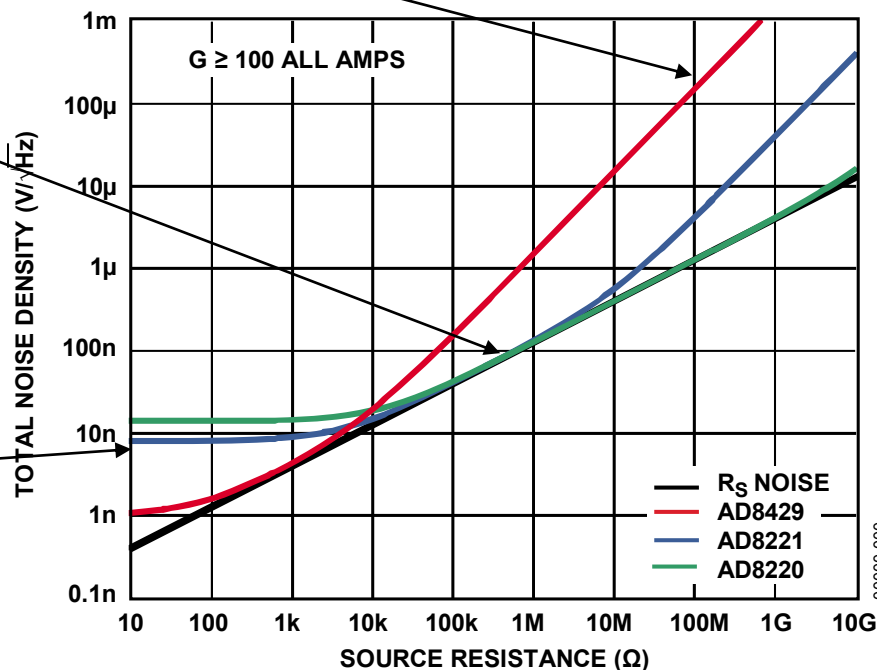
Parameter	Min	Typ	Max	Unit
AC ACCURACY				
$f_{\text{IN}} = 1 \text{ kHz}, -0.5 \text{ dBFS}, V_{\text{REF}} = 5 \text{ V}$				
Dynamic Range	98	100		dB
Signal-to-Noise Ratio	97	99		dB



如何处理电压和电流噪声

- ▶ 源阻抗是关键
- ▶ 高 R_S ：电流噪声占主导地位
 - 一般可以找到**电流噪声更低的放大器**，代价不会很大。目标： $I_n * R_S = n_{R_S}/3$
- ▶ 中等 R_S ：源阻抗噪声占主导地位
 - 您挑选了一款优秀的放大器，其噪声贡献很小或为0。若电路中有电阻，**应设法降低电阻值**。
- ▶ 低 R_S ：电压噪声占主导地位
 - 您可能会找到噪声更低的放大器。一般而言，更低电压噪声的代价是更高功率，因此应**知道您的功率预算和散热要求**。

假设纯阻性源：



不同仪表放大器的总噪声与源阻抗的关系

1/f区域中的噪声

ADA4084精密运算放大器

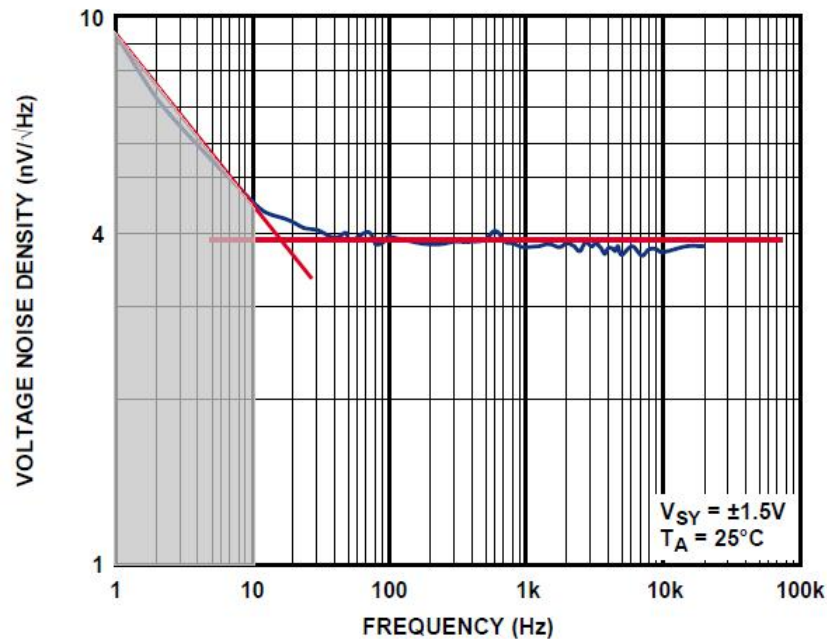


Figure 25. Voltage Noise Density vs. Frequency

- ▶ 低频工作的电路须关注1/f噪声
- ▶ 在1/f区域，NSD降低约10dB/十倍频程（噪声**功率**与1/f成比例）
 - RMS噪声 = $e_{n,wb} * \sqrt{f_c * \ln(f_H/f_L)}$
 - $e_{n,wb}$ → 宽带NSD
 - f_c → 噪声转折频率
 - 读取 $e_n = 1.41 * e_{n,wb}$ 时的噪声转折频率或使用：
 - RMS噪声 = 噪声 @ 1Hz * $\sqrt{\ln(f_H/f_L)}$
= $e_{n,1Hz} * \sqrt{(2.3 * \log_{10}(f_H/f_L))}$
 - 如果您擅长dB转换，那么您已经知道 \log_{10} 更易于估算。
 - 如果转折频率接近1Hz，请以RSS方式消除宽带NSD

ADC的SNR转换为RMS噪声

▶ ADC RMS噪声不过是电路中的又一个噪声源

Signal-to-Noise Ratio, SNR	$f_{IN} = 20 \text{ kHz}, V_{REF} = 4.096 \text{ V}, \text{ internal reference}$	87.0	88.5	dB ³
	$f_{IN} = 20 \text{ kHz}, V_{REF} = 5.0 \text{ V}, \text{ external reference}$	89.0	90.0	dB ³

$$\text{▶ } RMS \text{ Noise} = \frac{RMS \text{ input range}}{SNR \text{ in } V/V} = \frac{AIN \text{ Range} / 2\sqrt{2}}{10^{SNR(dB)/20}}$$

- 本例中： $\frac{5 / 2\sqrt{2}}{10^{90/20}} = 55.9 \mu V_{rms}$

▶ 您可以计算有效分辨率（不完全是ENOB，因为我们不考虑失真）

- 有效分辨率（位） = $\frac{SNR(dB) - 1.76}{6.02}$

放大器电路总噪声计算

来自MT-049：

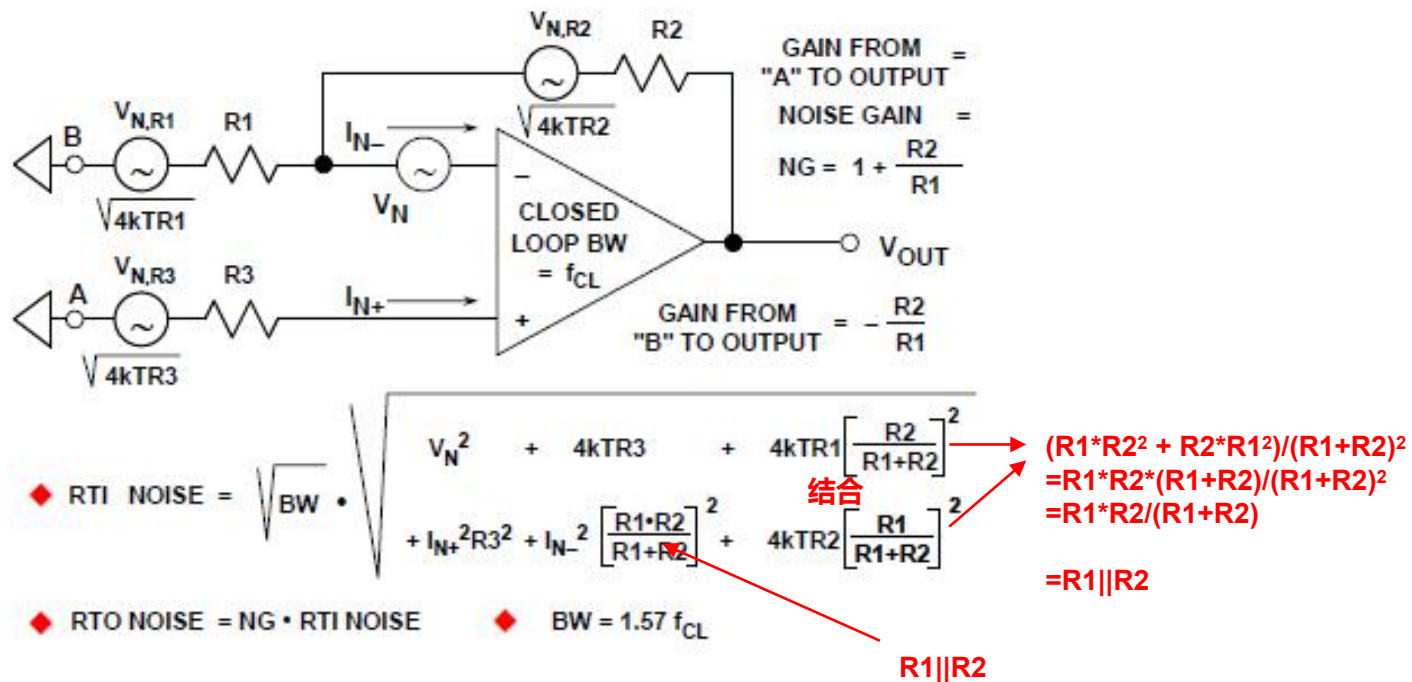
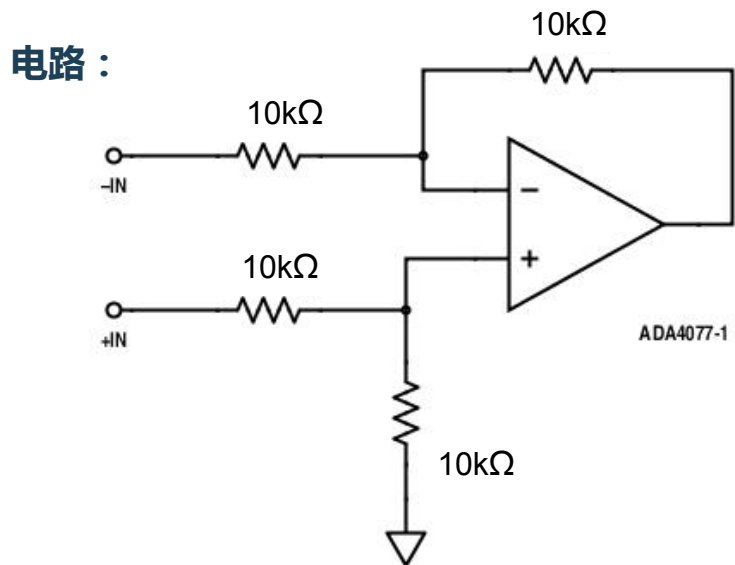


Figure 1: Op Amp Noise Model for Single Pole System

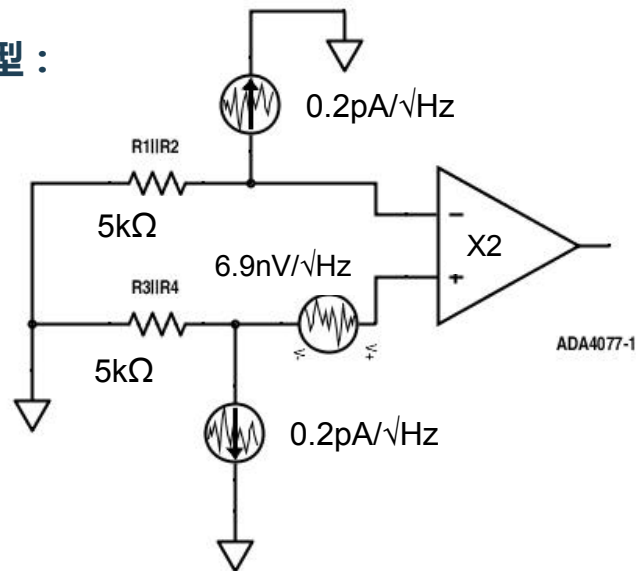
如等式所示，可以用一个简化模型来代替

- 1) 用增益=NG的增益模块代替运算放大器
- 2) 用并联组合代替各输入端的电阻
 - 这种情况下，反相引脚的阻抗为 $R1 || R2$

示例：放大器电路总噪声计算



噪声模型：



	计算RTI	频谱密度RTI	频谱密度RTO
电阻	$\sqrt{4kT} \cdot 10k$	12.8nV/√Hz	25.7nV/√Hz
Vn	Vn	6.9nV/√Hz	13.8nV/√Hz
In+	In+*5k	1nV/√Hz	2nV/√Hz
In-	In-*5k	1nV/√Hz	2nV/√Hz
总计		14.6nV/√Hz。	29.2nV/√Hz。

快速提示

- ▶ 不要担心比主要噪声源的1/5还低的噪声源(rms)
- ▶ 为什么？
 - 因为噪声电压是以和方根(RSS)相加。

主要噪声源	次要噪声源	总噪声	增幅%
e_n	e_n	$1.41 * e_n$	41%
e_n	$1/2 e_n$	$1.12 * e_n$	12%
e_n	$1/3 e_n$	$1.05 * e_n$	5%
e_n	$1/5 e_n$	$1.02 * e_n$	2%
e_n	$1/10 e_n$	$1.005 * e_n$	0.5%



AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

系统噪声概述

重要定义

▶ 分辨率

▶ 动态范围

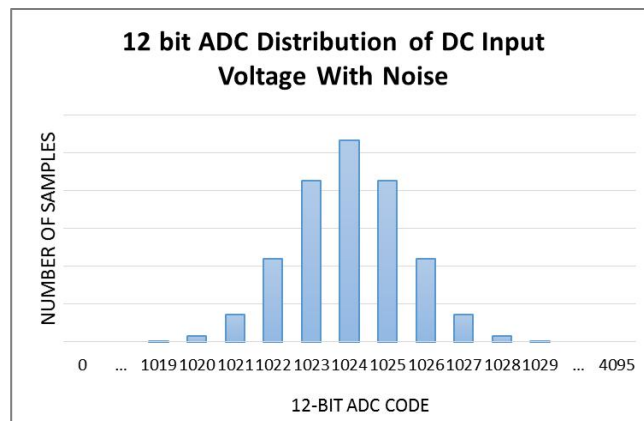
▶ 灵敏度

▶ 为什么需要了解这些？

- 不同类型的系统需要优化不同特性

▶ 涉及到噪声时，您要求噪声低到什么程度？

- 答案不止一个：
 - 情形1：低到满足最终客户要求即可
 - 情形2：在满足其他性能/功率/成本要求的同时尽可能低
 - 情形3：低于传感器



分辨率和有效分辨率

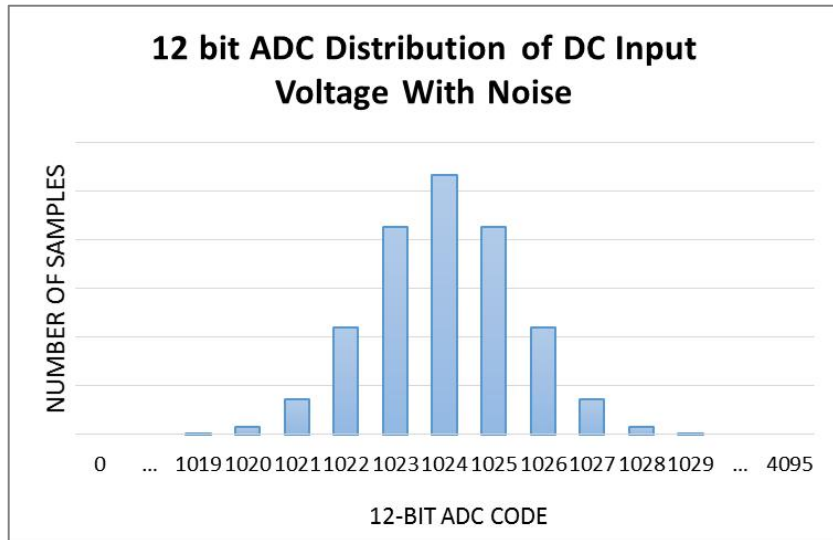
▶ 分辨率 – 仪器可以检测的总离散级数（位数、次数、数位）

- “分辨率是实际可观测的信号最小部分。它由测量设备中的模数转换器决定。” -Keithley, “测量基本原理”

▶ 有效分辨率 –

- “仪器能够可靠检测到的输入信号变化的最小部分”

-NI



分辨率：12位
有效分辨率：约11.4位
无噪声分辨率：约8.7位

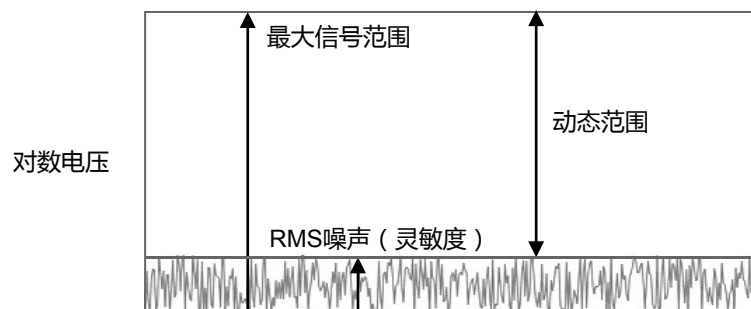
灵敏度和动态范围

► 灵敏度

- “灵敏度指测量中可以检测到的最小变化，以测量值的单位为单位，如伏特、欧姆、安培、度等。”
-Keithley
- “分辨率衡量输出（指示）的可能的最小变化，而灵敏度衡量能引起输出可观测变化的输入（激励）最小变化。”
-Keysight
- 针对最高增益、最小最敏感的范围而测定

► 动态范围：参数的额定最大水平与其最小可检测值的比值

- 注意：这与有效分辨率非常相似，常常可以换用



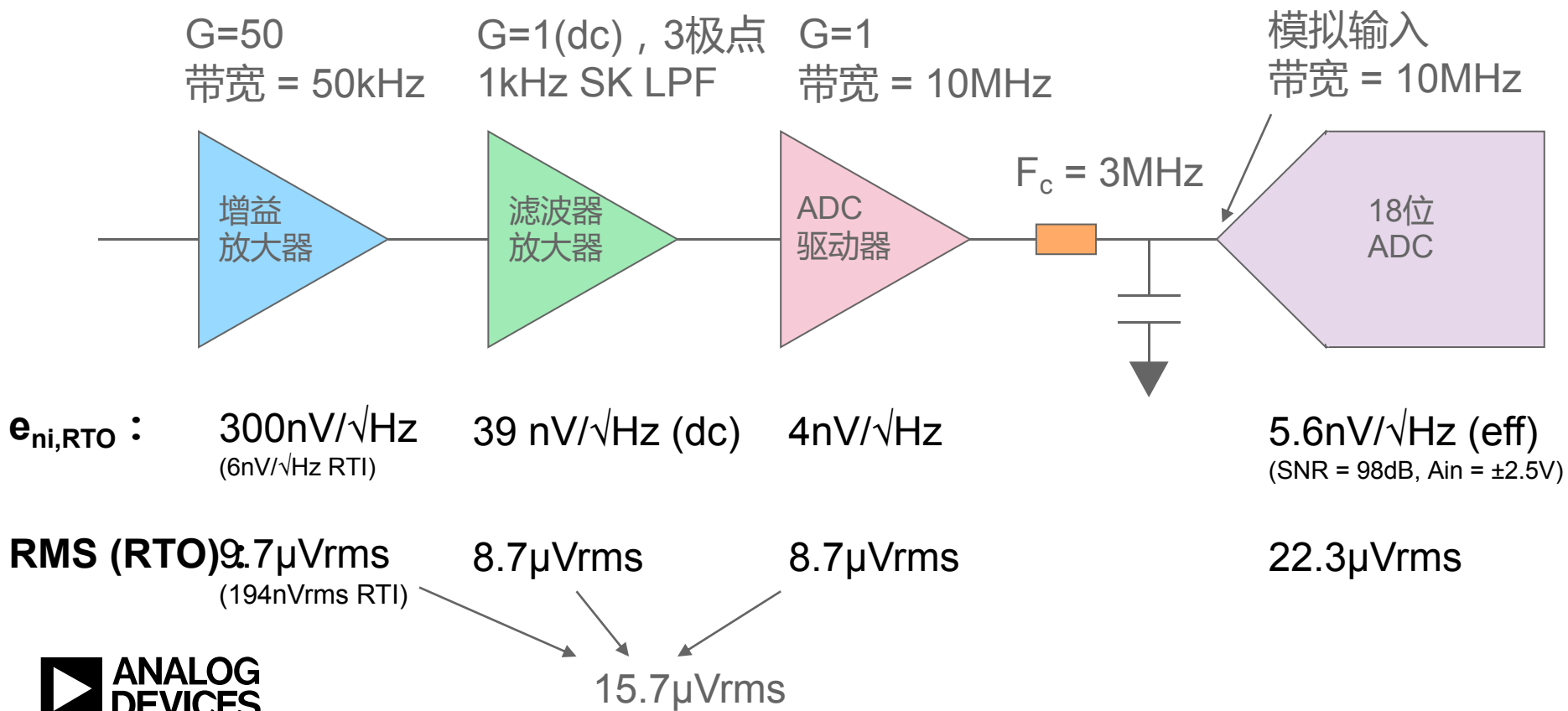


AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

针对噪声性能的系统设计建议

仅考虑NSD的危险

- ▶ 信号链中不同的部分/噪声源有不同的NEB
- ▶ 代之以考虑各部分的rms噪声贡献
 - 使用噪声源之后的最小NEB



含增益的系统

▶ 使用增益有何效果？

- 它使输入范围更小（输入信号范围 = 输出信号范围/增益）
- 它降低输出噪声源的贡献（使输入噪声源占主导地位）

▶ 这对噪声性能意味着什么？

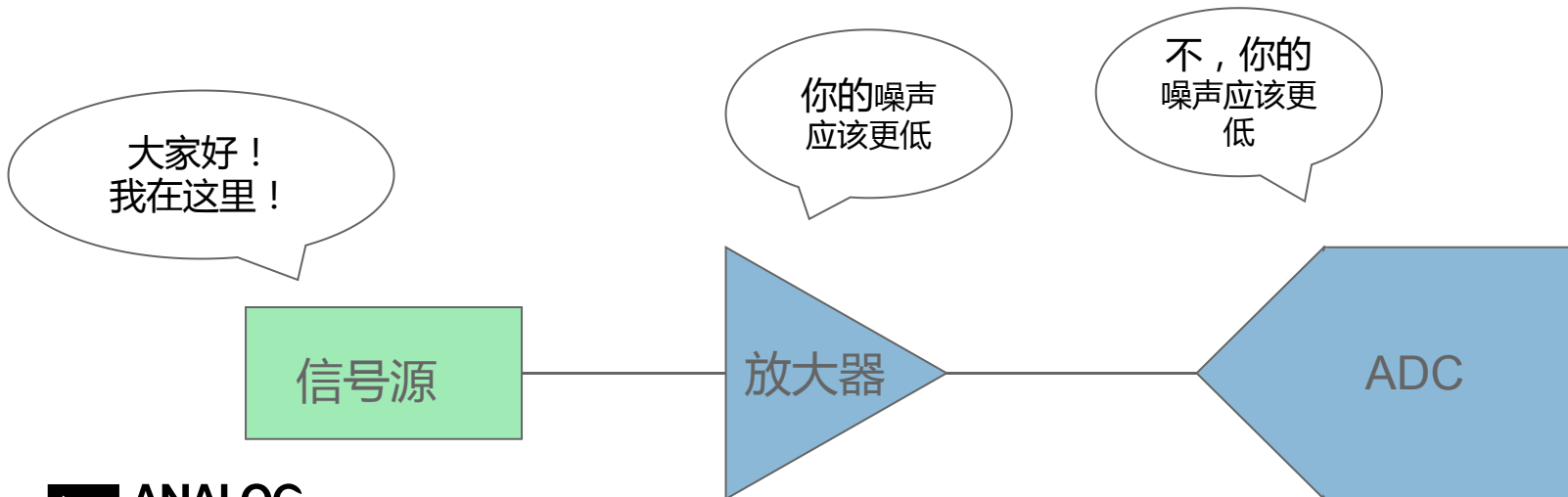
增益	动态范围	灵敏度
$G < e_{no}/e_{ni}$	基本上不随增益而变化	与增益成正比提高
$G > e_{no}/e_{ni}$	与增益成反比降低	基本上不随增益而变化

▶ 如何确定最佳增益？

- 增益受最大信号限制。使用较小增益要求更好的输出噪声和ADC分辨率，故而通常优先使用可能的最高增益。

平衡措施： 如何选择信号链

- ▶ 您是否需要噪声仅为ADC噪声1/10的放大器来使SNR损失最小？您是否需要ENOB比放大器多1.5位的ADC？
 - 请勿忘记您真正想要优化的特性！
 - 您测量的是信号，而不是放大器或ADC。
 - 如果信号调理电路和ADC各自的噪声仅为传感器噪声的1/3或更低，便可称之为理想噪声性能
 - 如果无法做到，请优化信号链以在设计条件内实现最佳性能



原则

▶ 从系统设计目标出发

- 系统优化始于您知道的情况
- 示例1：设计传感器接口系统时，从输入（传感器）侧开始，沿着信号链逐步向下设计，同时优化各电路模块
 - 重要的是输入信号，设计电路的目的是获得输入信号的尽可能好的表达
- 示例2：设计通用数据采集系统时，从输出（转换器）侧开始，沿着信号链逐步向上设计到模拟接口
 - 所选的模拟输入器件、放大器等应能实现与转换器相当的噪声和吞吐量性能

输入优化的低噪声设计建议流程

1. 了解信号

确定输入信号范围要求、频率、噪声、源阻抗

2. 设置所需的滤波器频率

在不影响信号的前提下，通带应设置得尽可能小

3. 根据设计条件选择输入放大器并确定总 e_{ni}

功能/配置、rms噪声、功率和误差（尤其是RTI误差、失调、CMRR、PSRR等）

4. 选择增益并计算输出电路要求

增益 < 输出范围/输入范围（为误差、饱和、故障检测等留有余量？）

5. 选择实际输出电路，根据需要重新调整增益

考虑ADC的影响。如果增益 $\gg e_{no}/e_{ni}$ ，考虑减小增益的影响

低增益：较高分辨率ADC，可能需要过采样/数字滤波器，较大的输入范围

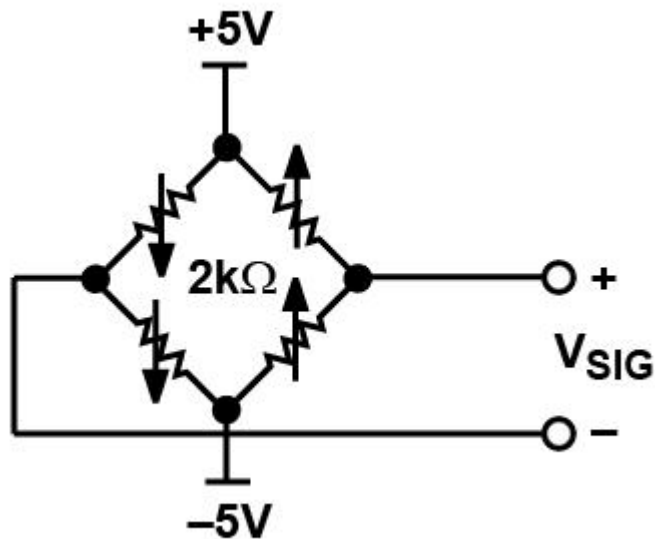
高增益：较低分辨率ADC，模拟滤波器更合理，较小的输入范围

示例

第1、2步：信号特性和滤波器频率

► 考虑一个 $2\text{k}\Omega$ 桥式传感器，其灵敏度为 $\pm 2\text{mV/V}$ ，采用 $\pm 5\text{V}$ 电源。

- 信号范围为DC至 1kHz
- 选择 5V 输入范围的转换器



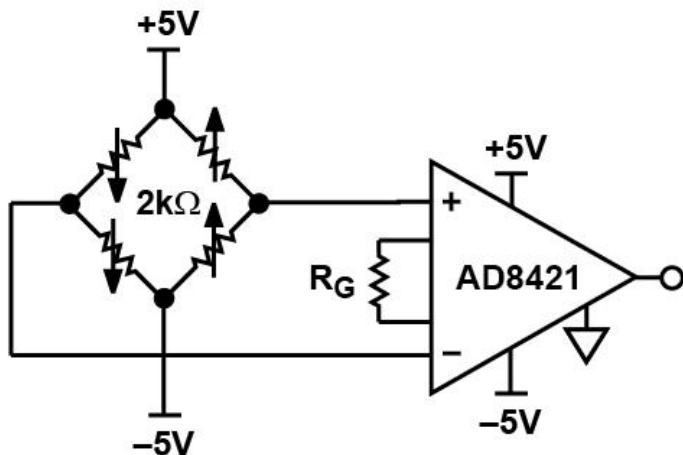
频率：DC至 10kHz
最大信号： $\pm 20\text{mV}$
NSD： $5.74\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
RMS噪声：约 $574\text{nV}_{\text{rms}}$
最大增益 = $5/40\text{m} = 125$

示例

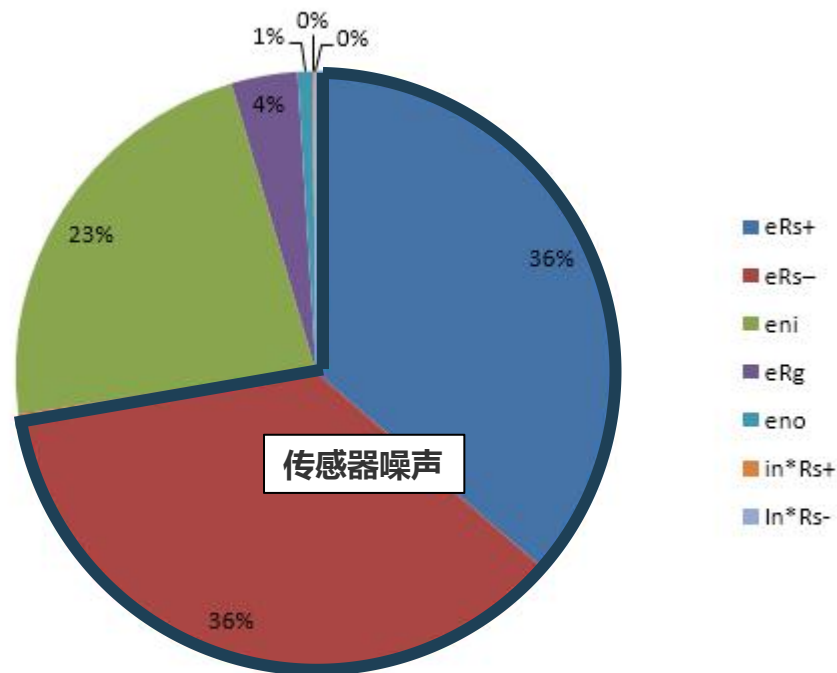
第3步：选择输入放大器

► 需求：高输入阻抗、差分输入、高增益

- 仪表放大器
- AD8421是不错的选择
 - $\text{RMS输入噪声} \approx 3.2n\sqrt{10k} + 5n\sqrt{2.3 \cdot \log(10k/0.001)}$
 - =320nVrms
 - RTI噪声从574nVrms提高到约657nVrms
- 全部计算：673nVrms (G=100)



AD8421 Noise Sources RTI



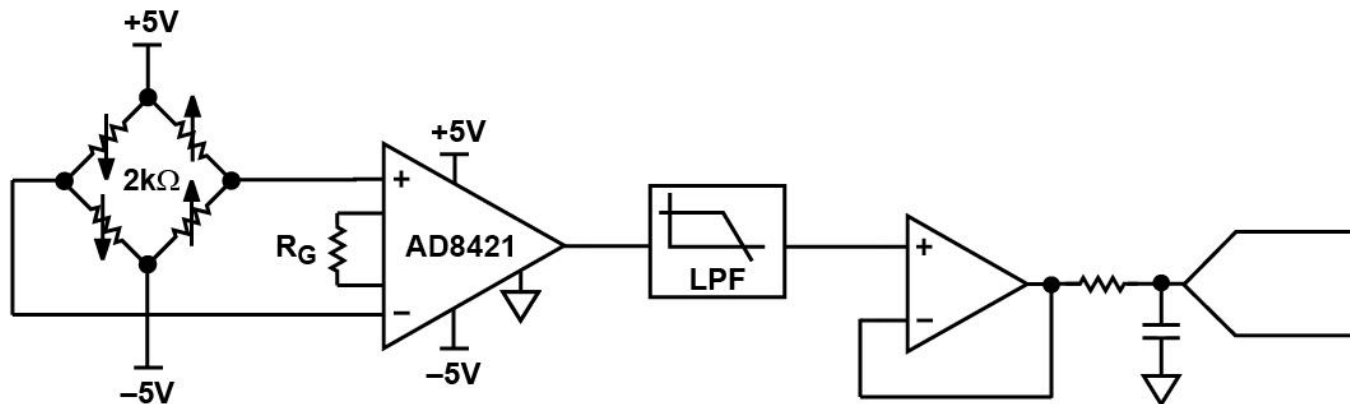
Noise RMS (Vrms)

来自：仪表放大器噪声计算电子表格

示例

第4步：选择增益并计算输出要求

- ▶ $G=115$ 为每侧的线性度/误差留下200mV余量
 - 来自传感器和仪表放大器的RTO噪声 = $77.1\mu\text{Vrms}$
 - 到目前为止的系统SNR = $20 \cdot \log_{10}(5/(2\sqrt{2})/77.1\mu) = 87.2\text{dB} = 14.2$ 有效位
 - 选择SNR为90 dB左右的16位ADC
 - 滤波器噪声应远小于 $77.1\mu\text{Vrms}$
 - ADC驱动器应为低噪声型，其对信号进行电平转换以与ADC输入范围相匹配

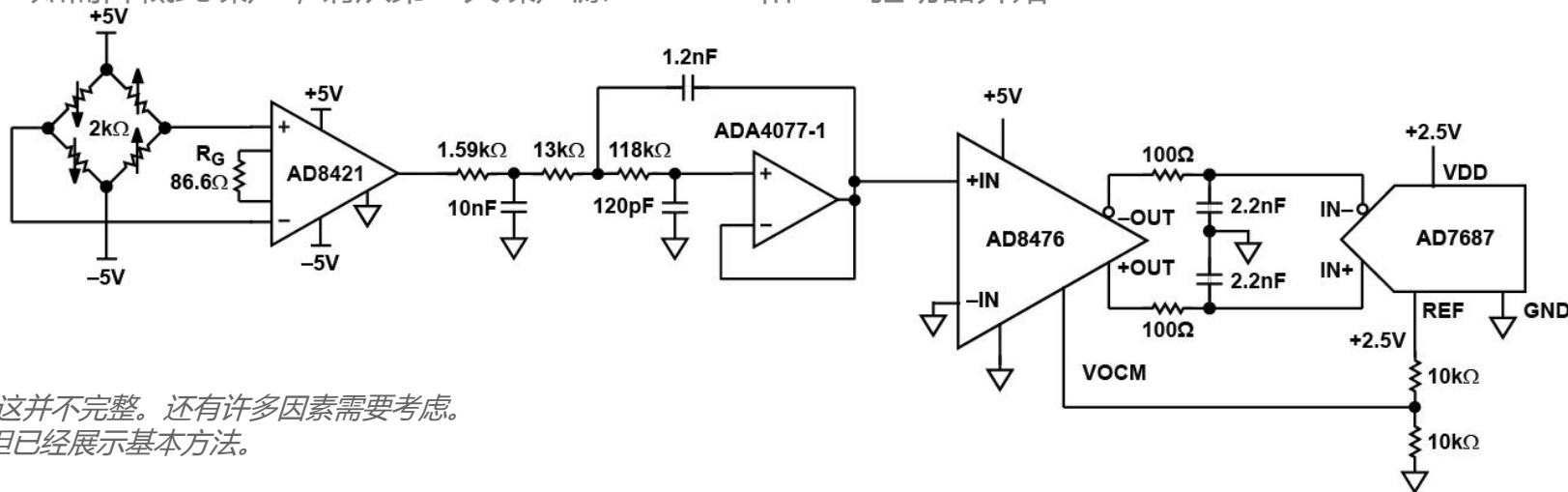


示例

第5步：选择输出器件

▶ 在直流系统中进行电平转换时，我喜欢使用差分电压，这样电平转换不会影响精度

- 在AD8476数据手册中，AD8476 G=1单端转差分ADC驱动器驱动AD7687
- AD7687:Vref = 2.5V，rms噪声 = 41.9 μ Vrms
- AD8476采用数据手册所示滤波器：rms噪声 = 42.6 μ Vrms
- 滤波器向导输出为3极点10kHz巴特沃兹滤波器：rms噪声 = 12.6 μ Vrms
- 总计：98.3 μ Vrms（传感器的66 μ Vrms RTO加上约50%的信号链噪声）
 - 如需降低此噪声，请从第二大噪声源——ADC和ADC驱动器开始



*这并不完整。还有许多因素需要考虑。
但已经展示基本方法。

总结

- ▶ 介绍了噪声的基本概念
- ▶ 探究了系统噪声特性
- ▶ 提出了低噪声设计方法

参考资料/资源

- ▶ analog.com上的免费在线研讨会
 - 信号调理电路中的噪声
- ▶ 文章
 - MS-2066
 - AN-940
- ▶ 书籍
 - Ott：电子系统的降噪技术
 - Motchenbacher：低噪声电子系统设计
 - Horowitz和Hill：电子的艺术
- ▶ 仿真
 - SPICE (ADIsimPE)

谢谢观看！

- ▶ ADI中国地区技术支持热线：4006 100 006
- ▶ ADI中国地区技术支持信箱：
china.support@analog.com
- ▶ ADI样片申请网址：
<http://www.analog.com/zh/sample>