

Tyler Noyes, Tamara Alani

摘要

构建高保真音频电路时，重大设计挑战之一是如何降低系统总噪声。该噪声通常与系统信号进行比较，表示为信噪比 (SNR)。噪声可以定义为干扰所需信号而导致出错的不必要信号。音频电路的总体噪声可能有多个来源，一些是固有的，一些是非固有的。

放大器电路中固有噪声的三大影响因素是热噪声、电压噪声和电流噪声。在这篇文章中，我们将介绍在为音频应用选择放大器之前计算总噪声的重要性。我们将使用两种不同的放大器架构 (CMOS 和双极) 来演示不同噪声源对音频电路的影响。

内容

1 热噪声.....	2
2 运算放大器电压噪声.....	3
2.1 闪烁噪声.....	3
2.2 宽带噪声.....	3
3 运算放大器电流噪声.....	4
3.1 深入了解噪声源.....	4
4 计算输出端的电压噪声.....	5
5 总结.....	8

插图清单

图 1-1. 电压噪声密度曲线.....	2
图 2-1. 电压噪声.....	3
图 2-2. 电压噪声密度曲线.....	3
图 3-1. Req 等效电路.....	4
图 3-2. OPA1656 噪声曲线.....	4
图 3-3. OPA1612 噪声曲线.....	4
图 3-4. OPA1656 与 OPA1612 的总噪声对比.....	5
图 4-1. 电路配置.....	5
图 4-2. 仿真电路.....	6

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 热噪声

电阻器可能是音频电路总体噪声的主要来源。电阻器产生的噪声也称为热噪声，是电阻器内电荷随机运动产生的噪声。我们可以使用[方程式 1](#) 计算理想电阻器产生的噪声。

$$e_{n(R)} = \sqrt{4 \times k \times T_k \times R} \quad (1)$$

其中

- $e_{n(R)}$ = 电阻产生的噪声频谱密度，单位为 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- k = 玻尔兹曼常数 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$
- T_k = 温度，单位为开尔文
- R = 以放大器的同相端子为基准的输入电阻

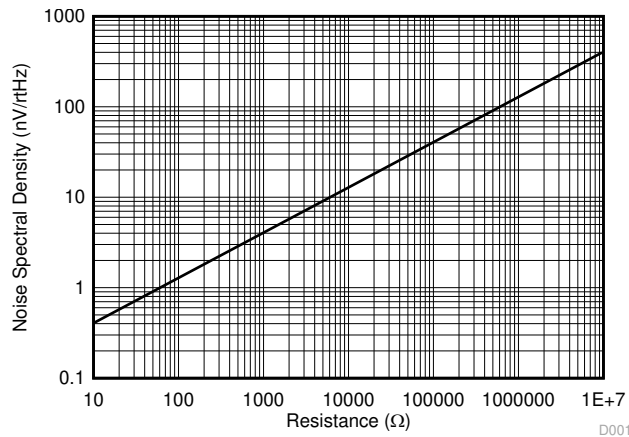


图 1-1. 电压噪声密度曲线

[图 1-1](#) 显示了在 $T = 25^\circ\text{C}$ (298K) 条件下随源电阻值变化绘制的噪声频谱密度 (单位为 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) 和电阻 (单位为欧姆) 之间的关系。当源电阻只有 1k 欧姆时，电压噪声便已达到 $4\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

需要注意的是，理想电阻器将表现出可预测的噪声密度，该噪声密度在整个频谱范围内保持不变。将[方程式 1](#) 乘以噪声带宽可得到 RMS。噪声带宽是电路的带宽。可通过运算放大器内部电路或使用滤波器来设置该带宽。该 RMS 噪声计算如[方程式 2](#) 所示。

$$E_{n(R)} = \sqrt{4 \times k \times T_k \times R \times BW_n} \quad (2)$$

2 运算放大器电压噪声

运算放大器具有电压噪声和电流噪声源。放大器数据表中给出了放大器内部噪声源的幅度。考虑放大器的电压噪声时，必须了解放大器的架构。通常，对于相同的静态电流，双极输入放大器的电压噪声将比 CMOS 输入放大器低得多。更多有关放大器架构之间差异的信息，请参阅此技术文章：[CMOS、JFET 和双极输入级技术之间的权衡](#)。讨论不同类型的电压噪声之前，务必了解这种噪声在放大器电路中的样子。可通过在放大器正极端子上将放大器噪声建模为外部电压噪声 $e_{n(v)}$ 来简化放大器噪声，如图 2-1 所示。

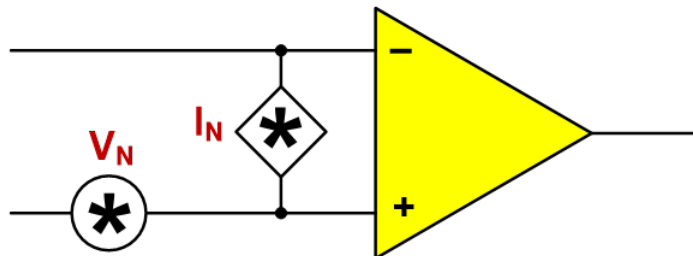


图 2-1. 电压噪声

放大器电压噪声可分为两个主要部分：闪烁噪声和宽带噪声。图 1-1 显示了这些噪声区域。

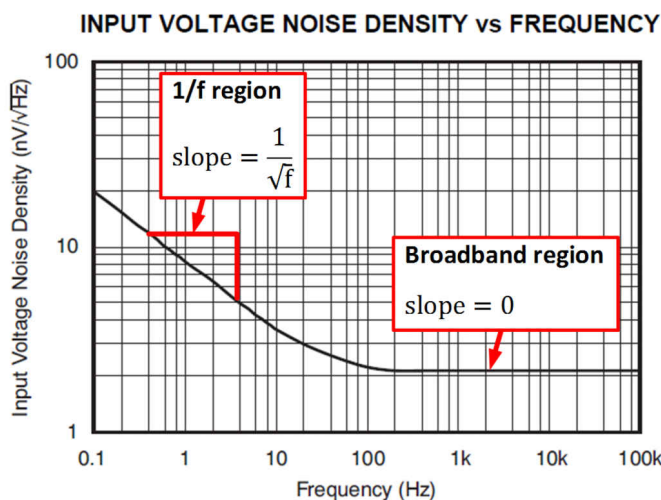


图 2-2. 电压噪声密度曲线

2.1 闪烁噪声

我们认为闪烁噪声（ $1/f$ 噪声）处于低频范围内，即频率低于 1kHz。 $1/f$ 噪声的斜率等于 1 除以频率的平方根。对于低频聚焦电路（如低音扬声器或低音控制级）， $1/f$ 噪声可能至关重要。然而，对于一个涵盖全音频带宽的电路， $1/f$ 噪声将不是主要的噪声源。

2.2 宽带噪声

宽带噪声被认为处于中高频范围内；例如，频率大于 1kHz。在大多数放大器数据表中，该噪声频谱密度规格以 1kHz 和 10kHz 的频率示出。

3 运算放大器电流噪声

如前所述，放大器的电流噪声影响如图 2-2 中的 I_N 所示。电流噪声表示为反相和同相输入之间的噪声源。输入电流噪声密度 (i_n) 是放大器数据表中很常见的单位。对于电流噪声计算，通常有必要计算 R_{eq} ，即输入端的等效电阻，如图 3-1 所示。

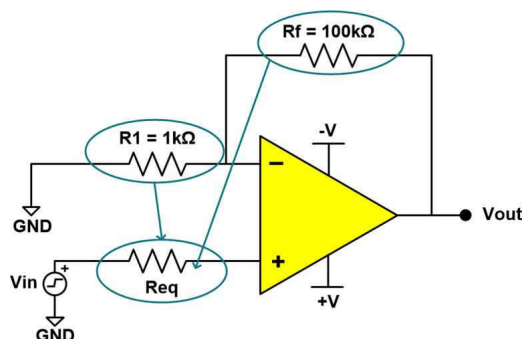


图 3-1. R_{eq} 等效电路

R_f 和 R_1 的并联组合相当于放大器同相输入端的电阻，因此本示例中的 R_{eq} 值约为 $1k\Omega$ 。

该 R_{eq} 值可以乘以放大器数据表中的输入电流噪声密度规格，以产生电流噪声引起的噪声，单位为 $V/\sqrt{Hz}$ 。该计算如方程式 3 所示。

$$e_{n(l)} = i_n \times R_{eq} \quad (3)$$

将频谱密度乘以噪声带宽的平方根，即可得到 RMS 电压噪声。方程式 4 展示了这种情况。

$$e_{n(l)} = i_n \times R_{eq} \times \sqrt{BW_n} \quad (4)$$

3.1 深入了解噪声源

使用 OPA1656 和 OPA1612，我们可以看到不同的噪声源如何影响总体噪声。使用 Excel，我们可以绘制出电压噪声、电流噪声和电阻噪声与电阻值的关系图。在本示例中，频率设置为 $1kHz$ 。

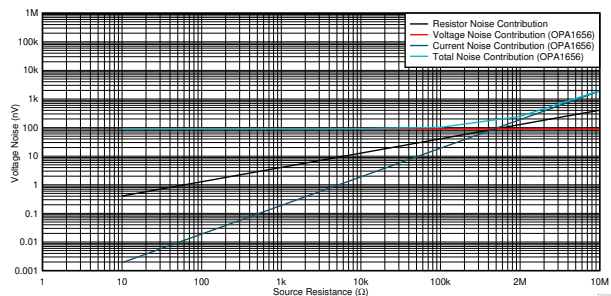


图 3-2. OPA1656 噪声曲线

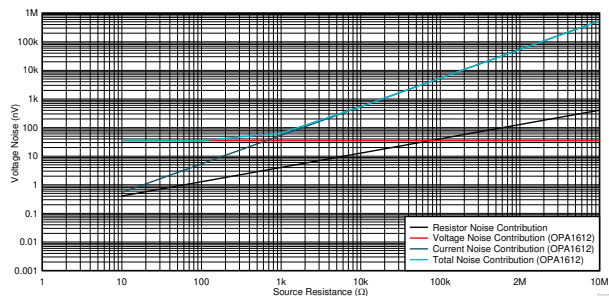


图 3-3. OPA1612 噪声曲线

随着源电阻的增加，由于存在电流噪声，OPA1612 的总体噪声最终将在 OPA1656 的总体噪声中占据主导地位。因此，选择放大器之前，务必要了解系统及其产生的所有噪声。

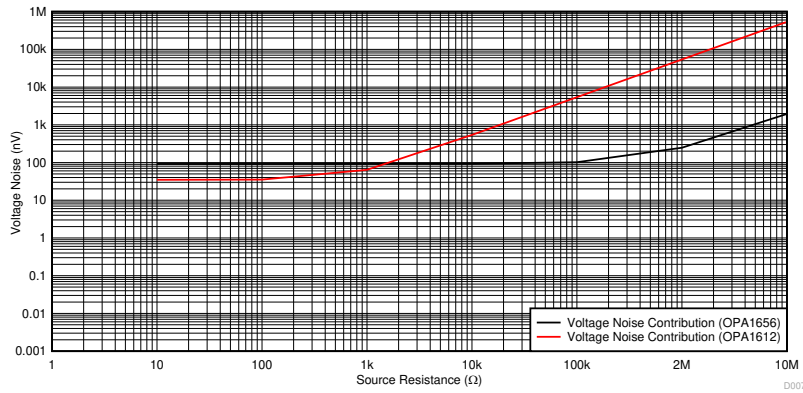


图 3-4. OPA1656 与 OPA1612 的总噪声对比

4 计算输出端的电压噪声

现在，我们通过手工计算来得出简化音频系统的总噪声。在本示例中，我们在同相配置中使用 OPA1656，增益为 40dB 或 100V/V。我们还使用节 1 中所述的滤波来限制 BW。图 4-1 是我们在该示例中使用的电路配置。

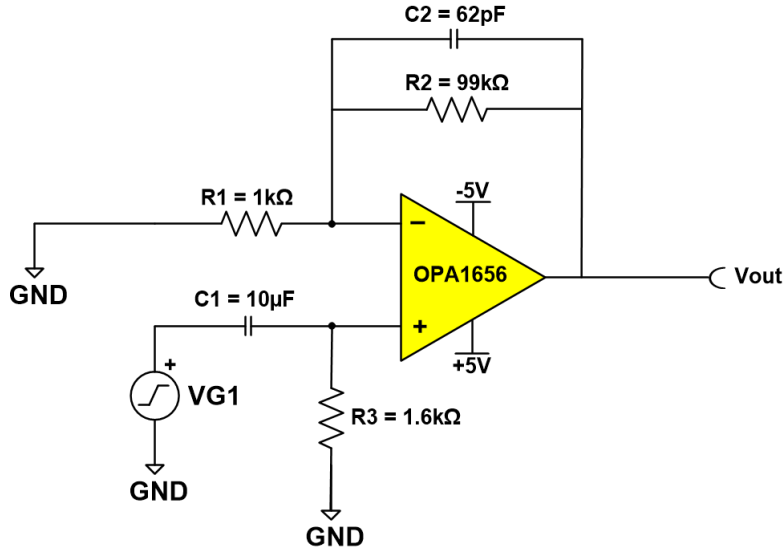


图 4-1. 电路配置

第一步是计算电路的噪声 BW。本例电路的截止频率设置为 25.9K。可以使用方程式 5 来计算电路的带宽噪声。

$$BW_n = k_n \times f_c \quad (5)$$

其中：

- BW_n = 噪声 BW
- K_n - 砖墙因数 (对于第一阶滤波器为 1.57)
- F_c = 截止频率

方程式 6 是图 4-1 中所示电路的噪声带宽。

$$BW_n = 1.57 \times 25.9 \text{ k} = 40.7 \text{ kHz} \quad (6)$$

我们首先看一下电路的热噪声。热噪声是可通过首先计算增益网络的 R_{eq} 来进行计算的电路。这是通过将 R1 和 R2 并联来完成的。对于电路 1 中所示的电路，使用以下方法完成此操作：

$$R_{eq} = R_1 \parallel R_2 = 1\text{ k} \parallel 99\text{ k} = 990\ \Omega \quad (7)$$

在更高速度下，直流阻断电容器的作用将类似于短路。因此，考虑将 **R4** 电阻器与源电阻并联。该值非常低，因此不包括在 **Req** 计算中。使用 [方程式 1](#)，可以计算电阻器产生的 **2RMS** 电压噪声。

$$E_v = 6 \times 990 \times \sqrt{40.7\text{ k}} = 1.2\text{ nV} \quad (8)$$

接下来，我们看一下电路的电压噪声。评估运算放大器产生的电压噪声时，第一步是获取数据表中显示的输入电压噪声，并将其乘以频率的平方根。如果我们看一下 [OPA1656 SoundPlus 超低噪声和失真](#)、[Burr-Brown 音频运算放大器](#) 数据表中的电压噪声，会发现 10kHz 时的值为 2.9nV/rtHz。如 [图 1-1](#) 所示，宽带噪声在整个频率范围内保持不变，因此我们可以将此数字用于任何超过 10kHz 的频率。将放大器的电压噪声乘以截止频率将得出放大器的 RMS 电压噪声。

$$E_I = 2.9 * \sqrt{40.7\text{ k}} = 585\text{ nV} \quad (9)$$

下一步是计算放大器产生的电流噪声。使用 [方程式 4](#) 可以计算放大器产生的 RMS 电流噪声。对于该示例，OPA1656 的电流噪声为 6fA/rtHz。

$$E_v = 6 \times 990 \times \sqrt{40.7\text{ k}} = 1.2\text{ nV} \quad (10)$$

接下来是计算放大器输入端的总噪声。

$$\text{Total Noise} = \sqrt{(\text{Thermal Noise})^2 + (\text{Current Noise})^2 + (\text{Voltage Noise})^2} \quad (11)$$

$$\text{Total Noise} = \sqrt{813\text{ n}^2 + 585\text{ n}^2 + 1.2\text{ n}^2} = 1.00\text{ uV} \quad (12)$$

这将得出所谓的总输入基准电压噪声。接下来，将输入基准电压噪声乘以电压噪声增益，对于我们的电路，增益为 100V/V。请记住，这是放大器同相端子处的增益。

$$V_{os,N} = \text{Total Noise} \times \text{Noise Gain} = 1.00\text{ uV} \times 100 = 100\text{ uV} \quad (13)$$

根据计算，得到的值为 100uVpp。该值非常接近 [图 4-2](#) 中所示电路的仿真值。请注意，为了更准确地计算，可以单独计算 1/f 噪声。更多有关电压噪声以及如何计算该误差的信息，请观看培训视频：[TI 精密实验室 - 运算放大器：噪声](#)。

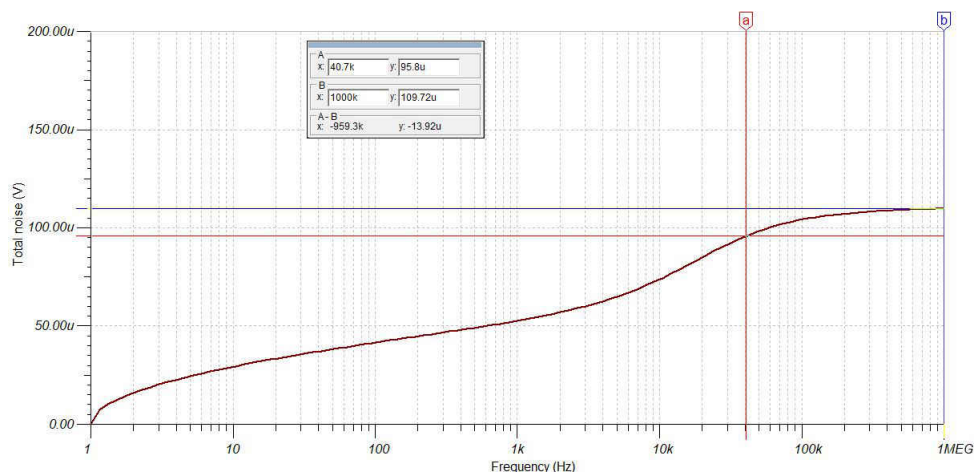


图 4-2. 仿真电路

手动计算的一个关键原因是它允许您评估各个噪声源。在我们的示例中，实际上可以看到电阻器噪声是主要噪声源。

5 总结

尝试从音频运算放大器获得更低总体噪声性能时，需要考虑许多因素。构建高保真电路时，始终要考虑所有三种噪声源（即热噪声、电压噪声和电流噪声），这一点非常重要。表 5-1 显示了我们最新的低噪声音频放大器列表，供您参考。

表 5-1. 低噪声音频放大器

器件	电压噪声	电流噪声
OPA1656 - 超低噪声 CMOS	4.3nV/rtHz	6fA/rtHz
OPA1637 - 低功耗 FDA	3.7nV/rtHz	300fA/rtHz
INA1620 - 超低噪声 THD+N	2.8nV/rtHz	800fA/rtHz
OPA1612 - 超低噪声双极	1.1 nV/rtHz	1700fA/rtHz

重要声明和免责声明

TI 提供技术和可靠性数据 (包括数据表) 、设计资源 (包括参考设计) 、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源, 不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保, 包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任: (1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品, (2) 设计、验证并测试您的应用, (3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。这些资源如有变更, 恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务, TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.ti.com) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司