

## 高保真系统的单级放大器设计考虑

作者: Roy He

### 简介

随着手机和有源耳机等便携式设备对内置高保真系统的需求越来越大,高保真系统广泛采用较大驱动功率的放大器来实现。

作为高保真系统的一部分,输出放大器为负载(即耳机)提供充足的输出功率;它对整个音频的客观和主观性能而言,是至关重要的元件。ADI公司为此类应用提供多种多样的低噪声、高性能放大器,例如:ADA4841-2、ADA4896-2、ADA4075-2、AD8599、AD8610、AD8397和ADA4807-2。这些放大器广泛用于高保真相关的系统电路设计。

高保真音频系统设计有许多方法,本应用笔记无法覆盖所有设计架构。本应用笔记仅讨论单级放大器结构,其成本低,易于设计,被手机公司广泛使用。

### 单级简易放大器高保真设计

为了更好地从整体上了解高保真系统结构,本部分讨论放大器设计。

图2中的放大器模块显示,基于通用音频放大器有许多不同类型的电路设计,如对信号进行放大、滤波、缓冲和调理。与双级或三级放大器设计相比,单级设计方法使用的元件更少,成本更低,印刷电路板(PCB)布局更为简单,同时仍能提供出色的音频性能。

因此,单级设计方法更适合需要高性价比产品的场合,例如手机。

图2为高保真系统的典型连接图。

高保真设计是一种系统级设计,其中的每个器件都有自己的功能,同时作为一个整体发挥作用。便携式设备中的编解码器或数模转换器(DAC)要求的典型规格通常为如下所示:

- 电压摆幅达2 V rms。
- $R_{OUT}$ 足够低以实现最佳性能,并且可予以忽略,这有助于获得更好的阻尼系数和输出幅度水平。
- 差分电压模式输出。

简易且低成本的典型电路如图1所示。

图1中, $V_{AC}$ 为音频信号, $V_{DC}$ 为来自音频DAC的内部偏置电压。

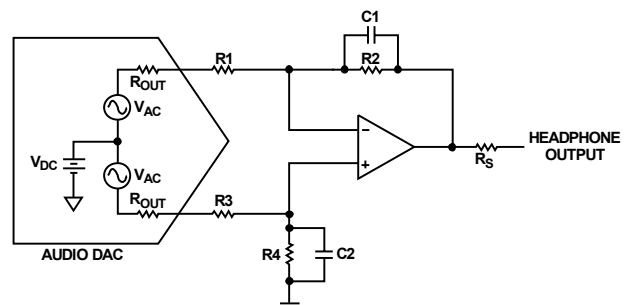


图1. 典型单级简易放大器结构图

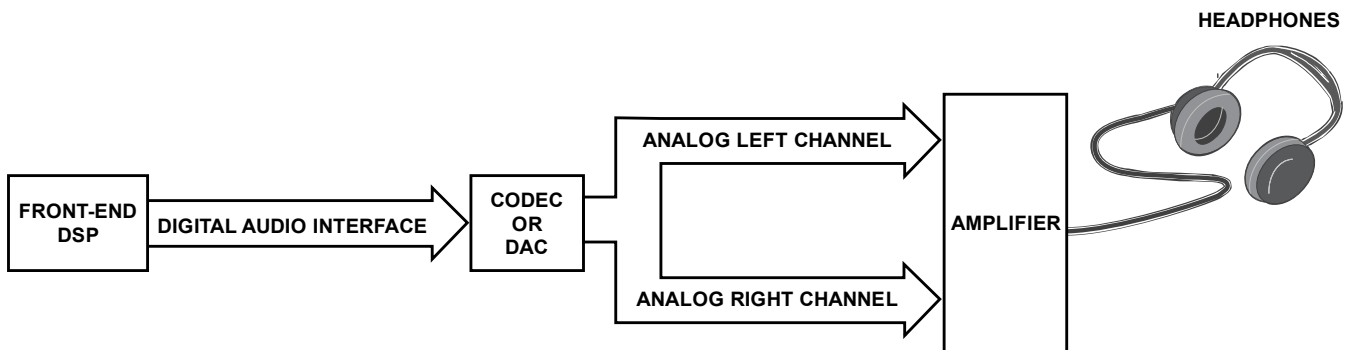


图2. 高保真系统典型连接图

## 目录

简介.....	1	串联输出电阻.....	5
单级简易放大器高保真设计.....	1	带宽设置.....	5
修订历史.....	2	噪声性能.....	5
计算指导和设计参数.....	3	增益配置.....	5
计算.....	3	串扰.....	5
设计考虑.....	4	动态范围 (DNR).....	5
调试方法和分析.....	5	滤波器设计.....	6
屏蔽.....	5		

## 修订历史

2016年12月—修订版0：初始版

## 计算指导和设计参数

### 计算

高保真音频系统性能的标准测试方法包括主观和客观测试。

在主观聆听测试中，其性能与人对所播放音乐的感受相关，每个人的听音标准与喜好风格有所不同，因而不太容易计算和量化。

音频DAC设置和电路设计元件值可根据不同的预期听音风格进行调校。本应用笔记仅关注如何通过调整硬件层面的电路设计来改善客观性能。

在诸多测试项目中，总谐波失真加噪声 (THD+N) 是客观性能测试的重要影响因素。

通常，对于小信号电平，N为主导因素。对于图2所示电路，N可通过下面的计算得出。电容对计算公式的影响很小，因此忽略电容效应。

假设条件如下：

- $E_N$  和  $I_N$  为图1所示单级放大器的电压和电流噪声谱密度。
- 截止频率 ( $f_c$ ) 为系统带宽。

为使电路更为对称，选择电阻值如下：

$$R_1 = R_3, R_2 = R_4$$

$$R_{P1} = R_1 \parallel R_2$$

$$R_{P2} = R_3 \parallel R_4$$

那么：

$$RTI_{NOISE}(f) \approx \sqrt{4KTR_{P1} + 4KTR_{P2} + E_N^2 + I_N^2 \times (R_{P1}^2 + R_{P2}^2)} \quad (1)$$

其中：

$RTI_{NOISE}$  为折合到输入端噪声，单位为  $V/\sqrt{Hz}$ 。

$K$  为玻尔兹曼常数，等于  $1.3806505(24) \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

$T$  为温度。

$R_{P1}$  和  $R_{P2}$  为并联电阻值。

$E_N$  为电压噪声谱密度。

$I_N$  为电流噪声谱密度。

$$RTO_{NOISE}(f) = RTI_{NOISE} \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \quad (2)$$

其中：

$RTO_{NOISE}$  为折合到输出端噪声，单位为  $V/\sqrt{Hz}$ 。

$R2$  为反馈电阻，如图1所示。

$R1$  为串联输入电阻，如图1所示。

$RTO_{RMS} =$

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{f_c} RTO_{NOISE}(f) \approx RTO_{NOISE} \times \sqrt{1.57 \times f_c} \quad (3)$$

其中：

$RTO_{RMS}$  为折合到输出端噪声的均方根值。

$f$  为频率。

$$THD + N = 20 \log \frac{RTO_{NOISE} + THD}{V_{IN} \times \left(\frac{R2}{R1}\right)} \quad (4)$$

其中， $V_{IN}$  为输入电压。

计算  $THD + N$  请参见等式5。

$$THD + N \text{ (dB)} \approx 20 \log \frac{\sqrt{4KTR_{P1} + 4KTR_{P2} + E_N^2 + I_N^2 \times (R2_{P1} + R2_{P2})} \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \times \sqrt{1.57 \times f_c} + THD}{V_{IN} \times \left(\frac{R2}{R1}\right)} \quad (5)$$

## 设计考虑

对于小信号电平情形，THD非常小，几乎等于0，故可予以忽略。由于集成电路（IC）设计的电气特性，它对系统没有影响。因此，在小信号电平情形中，噪声是影响THD + N结果的主导因素。

以ADA4807-2为例，如果 $R1 = R3 = 1 \text{ k}\Omega$ 且 $R2 = R4 = 1 \text{ k}\Omega$ ，则可计算22 kHz带宽内的近似噪声性能。图3显示了利用数学工具wxMaxima计算得到的结果。

利用SYS-2712或APx555等测试设备以dBA分析音频时，由于测试设备会增加一个A计权滤波器来降低噪声，故噪声结果会有所改善，这也是模拟了人耳对声音的响应。

为了提高性能，设计还必须考虑功率、噪声和电磁干扰

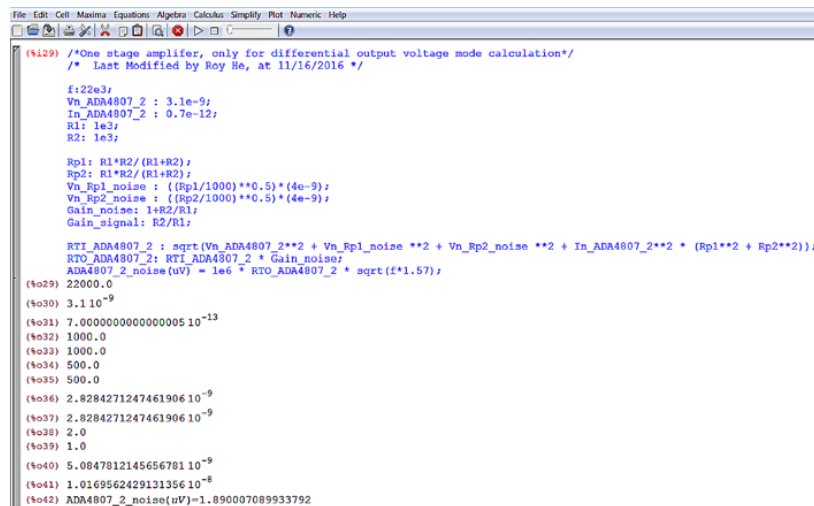
(EMI)。音频性能很敏感，易受WiFi或射频（RF）环境影响，因此必须采用适当的屏蔽和布局。

通常，如果所需负载功率超过任何放大器的输出限值，那么THD会严重得多。这意味着，不像小负载条件，必须仔细考虑THD，尤其是在大负载情况下。

因此，电压和电流噪声、带宽、电阻、输出能力及增益设置会影响硬件层面的客观测试结果。

这样一来，用户便可选择和评判相关参数，如图1和图3所示。

此外，压摆率、共模抑制比（CMRR）、电源抑制比（PSRR）、电压摆幅等其他参数是音频系统设计过程中必须考虑的系统因素。



```

File Edit Cell Maxima Equations Algebra Calculus Simplify Plot Numeric Help
(129) /*One stage amplifier, only for differential output voltage mode calculation*/
/* Last Modified by Roy He, at 11/16/2016 */

E:22e3;
Vn_ADA4807_2 : 3.1e-9;
In_ADA4807_2 : 0.7e-12;
R1: 1e3;
R2: 1e3;

Rp1: R1*R2/(R1+R2);
Rp2: R1*R2/(R1+R2);
Vn_Rp1_noise : ((Rp1/1000)**0.5)*(4e-9);
Vn_Rp2_noise : ((Rp2/1000)**0.5)*(4e-9);
Gain_noise: 1+R2/R1;
Gain_signal: R2/R1;

RTI_ADA4807_2 : sqrt(Vn_ADA4807_2**2 + Vn_Rp1_noise **2 + Vn_Rp2_noise **2 + In_ADA4807_2**2 * (Rp1**2 + Rp2**2));
RTO_ADA4807_2: RTI_ADA4807_2 * Gain_noise;
ADA4807_2_noise(uV) = 1e6 * RTO_ADA4807_2 * sqrt(*1.57);
(129) 22000.0
(130) 3.1 10^-9
(131) 7.0000000000000005 10^-13
(132) 1000.0
(133) 1000.0
(134) 500.0
(135) 500.0
(136) 2.8284271247461906 10^-9
(137) 2.8284271247461906 10^-9
(138) 2.0
(139) 1.0
(140) 5.0847812145656781 10^-9
(141) 1.0169562429131356 10^-8
(142) ADA4807_2_noise(uV)=1.890007089933792
  
```

图3. 利用wxMaxima计算得到的ADA4807-2结果

15Z21-003

## 调试方法和分析

### 屏蔽

强烈建议利用屏蔽壳来保护高保真音频电路。必须认真对待布局布线，避免整个电路系统的其他部分造成干扰。因为音频性能与信号完整度和电气环境相关，故布局布线至关重要。例如：强干扰会出现在DC-DC器件或RF功率放大器周围。妥善的布局布线，包括走线和PCB堆叠，有助于避免噪声和失真。

### 串联输出电阻

建议使用图2所示的输出串联电阻 $R_S$ ，原因如下：

- 保证放大器的稳定性，适应不同的耳机负载。
- 防止输出功率超出放大器限值。
- 针对输出信号幅度和主观聆听体验进行调谐。

### 带宽设置

理论上，带宽越窄则噪声越低，但频率响应的平坦度也会受限，因此需要取得一个平衡点。通常，最佳截止频率范围是60 kHz到200 kHz。

### 噪声性能

从模拟设计角度看，增益越大则噪声越大。因此，对于单级放大器，必须设置满足输出要求的最小增益。不好的电源或EMI设计均可能导致在某些区域出现噪声杂散，如图4所示。

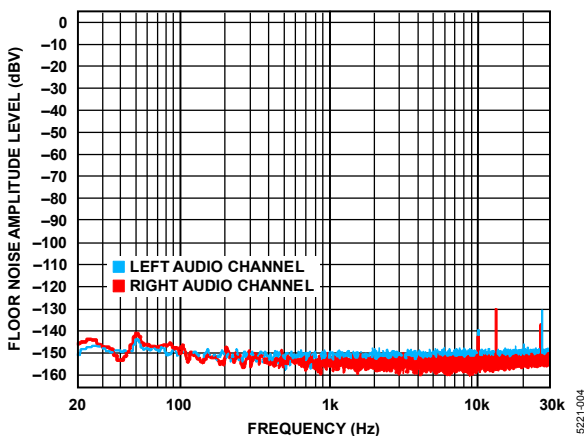


图4. 噪底幅度水平与频率的关系

### 增益配置

为降低放大器产生的噪声，应利用电阻值计算正确的增益设置。以图1所示电路为例，假设负载为 $R_L$ ， $V_L$ 为电压负载， $I_L$ （图1中未显示）为电流负载，因此

$$V_L = \frac{V_{DAC} \times \text{增益} \times R_L}{R_S + R_L} \quad (6)$$

其中：

$V_{DAC}$ 为DAC的输出电压。

$R_S$ 为输出串联电阻，如图1所示。

$R_L$ 为负载电阻。

$$I_L = \frac{V_{DAC} \times \text{增益}}{R_S + R_L} \quad (7)$$

对于给定 $R_L$ 和 $V_{DAC}$ 值以及所需的 $V_L$ 和 $I_L$ 值，根据设计要求，利用适当的电容值计算并设置最佳增益和所需的 $f_c$ 。

### 串扰

串扰指示音频通道之间的隔离度。大部分串扰是由各通道的不同接地网之间的阻抗引起的。遵守布局原则可实现接地网络之间的低阻抗连接。值得注意的是，不同种类的耳机插口会产生不同的GND连接阻抗，这会影响到串扰性能，尽量使用低阻抗的耳机插口有助于实现更好的性能。

### 动态范围 (DNR)

如“计算指导和设计参数”部分所述，对于小信号，噪声 (N) 是影响THD + N结果的主导因素。DNR在几乎没有THD的情况下测试，仅有噪声。图5中几乎没有THD，因此N是影响DNR结果的主要因素。噪底结果越低，DNR越好。

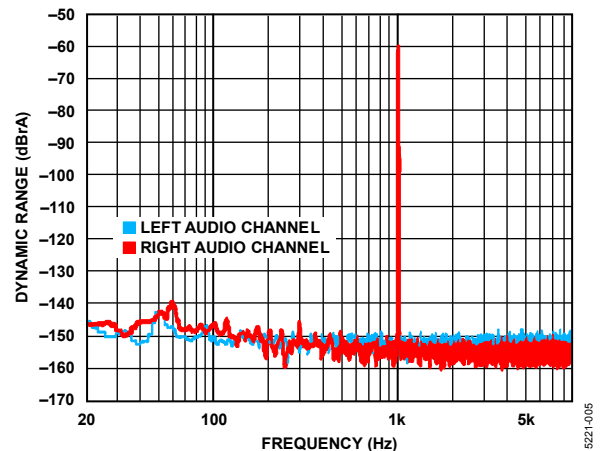


图5. 动态范围与频率的关系

## 滤波器设计

图1显示了一个典型单级音频放大器电路设计，其采用简单的一阶有源滤波器，因此实现的滤波效果有限。

要优化滤波器设计，可以使用二阶有源滤波器，例如巴特沃兹、切比雪夫、椭圆或贝塞尔滤波器。不同类型的滤波器有不同的特性，用户必须根据整个系统的具体要求选择特定类型的滤波器。本部分讨论贝塞尔线性相位滤波器。

放大器很容易引起相位漂移，这意味着不同信号频率在通过放大器之后会有不同的时间延迟，这种现象也称为群延迟。贝塞尔滤波器可保证线性相位性能，让不同信号频率实现相同的群延迟。

图6显示了贝塞尔有源滤波器原理图的一个例子。DAC\_OUT+和DAC\_OUT-是DAC的输出信号，同时也是贝塞尔滤波器的正负输入。

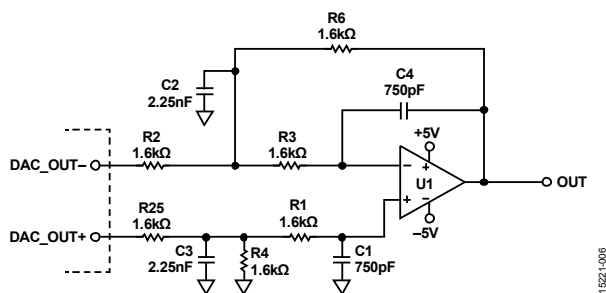


图6. 贝塞尔有源滤波器原理图

图7显示，在人耳可听到的20 Hz到20 kHz频率范围内，相位漂移具有出色的线性度。幅度和相位与频率的关系仿真如图7所示。

表1给出了不同频率的不同相位漂移和线性度。线性度曲线如图8所示。

如果图1所示滤波器设计变为二阶滤波器，噪声计算也必须改变。

单级放大器高保真模型要求系统层面的设计考虑，包括耳机负载、DAC兼容接口、音频功率设计、布局考虑和系统级调谐。

表1. 滤波器线性度的仿真结果

参数	频率 (Hz)							单位
	100	1000	5000	10,000	20,000	30,000	50,000	
相位	0.130	1.298	6.492	12.984	25.947	38.794	63.245	度
线性度	1.299	1.298	1.298	1.298	1.297	1.293	1.265	m°/Hz

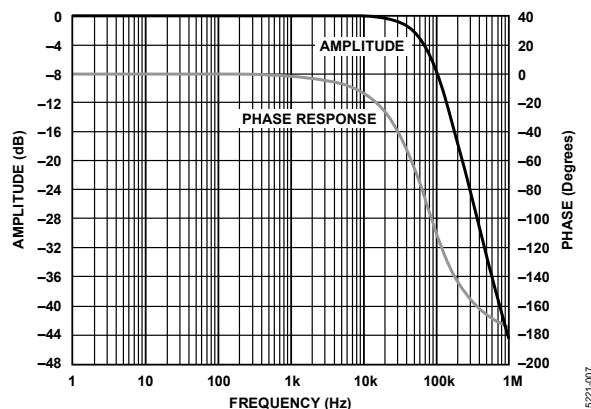


图7. 幅度和相位与频率的关系

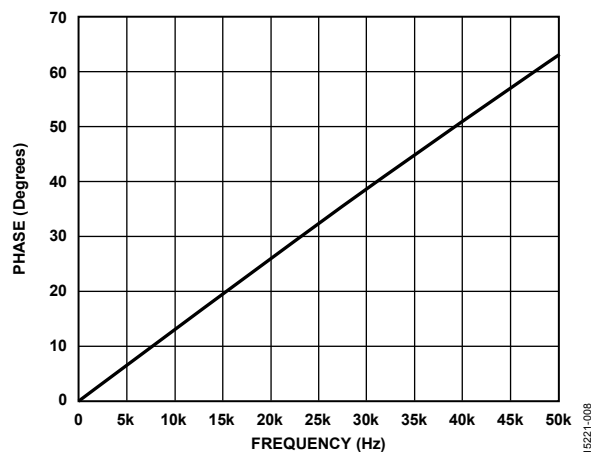


图8. 相位与频率的关系

对于更具体的设计情形，频率、阻抗、灵敏度、累积频谱衰减（CSD）等耳机参数的兼容性对整个音频系统设计也很重要。音频设计师可以调整模拟器件（比如放大器、电阻和电容）及数字参数设置（比如数字滤波器和过采样配置）以实现最终的优化性能。

要计算表1所列的线性度和图8所示的斜率，请使用下式：

$$\text{线性度} = \text{相位} \times 1000 \div \text{频率}$$