

基于 INA1620 和 OPA1612 的 Hi-Fi 耳机放大器方案

Jianyong Qiu / Joy Chen

South China Team

摘要

这篇文档描述如何设计一个满足 Hi-Fi 性能的音频系统。Hi-Fi 音频系统要求输出高信噪比和低 THD+N 的信号。本文所述系统基于 TI 超低噪声的音频放大器 INA1620 和 OPA1612 设计，能够将音频数模转换器（DAC）的差分输出电流转换成能够驱动低阻抗耳机的单端电压，以达到高保真的声音回放。

这篇文档包括方案的系统介绍，并分析其硬件设计，以及性能优化建议。

Contents

1	Hi-Fi 音频系统简介	3
1.1	Hi-Fi 音频系统.....	3
1.2	Hi-Fi 音频系统的主要技术指标.....	3
2	设计要求	4
3	工作原理及参数设计	5
3.1	DAC 电路设计.....	5
3.2	跨阻放大器.....	6
3.3	输出级差分放大器.....	6
4	器件选型	9
4.1	电阻.....	9
4.2	电容.....	10
4.3	放大器.....	10
4.4	电源.....	11
5	仿真	11
5.1	暂态响应.....	12
5.2	噪声.....	12
5.3	幅频响应.....	13
6	性能优化建议	14
7	参考文献	14
8	附录	15
8.1	关于放大器的失真分析.....	15
8.2	电气原理图.....	17
8.3	样机模型.....	21

Figures

Figure 1.	Hi-Fi 音频系统框图	3
Figure 2.	SPL 与耳机输入功率的关系	4

Figure 3. 高保真耳机放大器简化电路原理图.....	5
Figure 4. 音频 DAC-PCM1794A 应用电路原理图	6
Figure 8. 输出级差分放大器	6
Figure 5. 耳机级联运放简化图.....	7
Figure 6. 音频 DAC+I/V 转换器简化框图	8
Figure 7. 电阻分压网络提供偏置电压	9
Figure 9. Hi-Fi 音频系统仿真原理图	11
Figure 10. 暂态响应曲线.....	12
Figure 11. 信噪比仿真结果曲线	13
Figure 12. 总输出噪声仿真结果曲线.....	13
Figure 13. 幅频特性仿真结果曲线	14
Figure 14. 包含失真源的放大器控制回路框图.....	15
Figure 15. INA1620 电气特性曲线.....	16
Figure 16. 输出阻抗与负载的关系	16
Figure 17. 电源原理图	18
Figure 18. DAC 原理图.....	19
Figure 19. 主电路原理图.....	20
Figure 20. 样机模型.....	21

Tables

Table 1. 设计目标	4
Table 2. OPA1612 数据手册节选.....	8
Table 3. 音频运算放大器的输入电压噪声	10
Table 4. 音频运算放大器的 THD+N	10

1 Hi-Fi 音频系统简介

1.1 Hi-Fi 音频系统

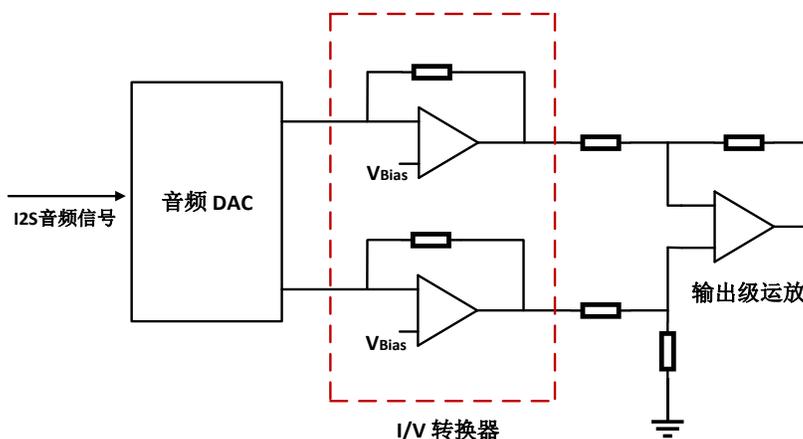


Figure 1. Hi-Fi 音频系统框图

Hi-Fi 是“高保真”的缩写，即高质量还原声音或最大化接近原声的回放。在理想情况下，高保真音频设备可以实现人耳无感知的超低的噪声和失真。

如图一所示典型的 Hi-Fi 音频系统框图，Hi-Fi 设备将音频数模转换器（DAC）的差分输出电流转换成能够驱动低阻抗耳机的单端电压。使用两个跨阻运算放大器作为电流/电压转换器，将 DAC 输出的差分电流转换成电压后，利用输出级差分运放将差分电压转换成单端电压。音频信号经过两级运放放大处理后，驱动耳机发声。

1.2 Hi-Fi 音频系统的主要技术指标

Hi-Fi 音频系统的主要技术指标有：信噪比（SNR）、失真+噪声（THD+N）、电源抑制比（PSRR）。

信噪比（SNR）：音响设备在同一参考点输出信号功率与输出噪声功率的比值，常常用分贝数表示，如式（1）所示，其中， P_{signal} 为输出信号功率， P_{noise} 为输出噪声功率。一般来说，SNR 越大，说明混在信号里的噪声越小，声音回放的质量越高，否则相反。Hi-Fi 系统一般达到 110dB 以上。

$$SNR(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) \quad (1)$$

失真+噪声（THD+N）：THD+N 是表征音频质量的重要参数，可通过式（2）进行预测值估算，其中， V_n 为总输出噪声电压有效值， V_f 为基频输出电压有效值。高质量的音频信号源、超低噪声和失真的 DAC 和运放、超低噪声的电源以及 PCB 布线都会影响音频系统的 THD+N 性能。Hi-Fi 系统一般要求 $THD+N < -110\text{dB}$ 。

$$THD + N(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{V_n^2}{V_f^2}} \quad (2)$$

电源抑制比（PSRR）：在音频放大器中，一个主要的噪声来源是电源本身，为了保证理想的信噪比，必须抑制电源在音频放大器输出端产生的噪声，式（3）为 PSRR 表达式。Hi-Fi 系统一般要求 PSRR > 80dB。

$$PSRR(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{\text{Ripple}_{IN}}{\text{Ripple}_{OUT}} \right) \quad (3)$$

除此之外，对于智能手机应用场合，受限于体积和电池容量，要考虑 Hi-Fi 系统所采用器件的封装尺寸和静态电流等参数。

2 设计要求

设计要求如下：

Table 1. 设计目标

供电电源	±5V
幅值变化 (20Hz-20kHz)	0.01dB
相角变化 (20Hz-20kHz)	5.0°
THD+N (1kHz/32Ω)	<0.001%
最大输出功率	125mW

当我们着手设计一个耳机放大器时，我们首先要考虑的问题之一是耳机需要多少功率？耳机所需的功率取决于耳机的阻抗和耳机的效率 η （也称灵敏度），它与耳机声压级(SPL)的计算有关。SPL 的计算公式如下：

$$SPL(\text{dB}) = \eta + 10 \log \left(\frac{P_{IN}}{1\text{mW}} \right) \quad (4)$$

*公式（4）出处：参考文献 6。



Figure 2. SPL 与耳机输入功率的关系（图源：参考文献 6）

在公式（4）中， P_{IN} 表示耳机的输入功率，效率 η （单位 dB/mW）表示在给定 1mW 输入功率时的效率。例如，耳机厂商可以指定其耳机的效率为 100dB / mW，应将其读为“1mW 时为 100dB”。耳机的阻抗、 η 和最大 SPL 等参数均由耳机厂商提供。如公式（4）所示 SPL 越大，表示音量越大，所以一般灵敏度越高、阻抗越小，耳机越容易驱动。

通常情况下，头戴式耳机的效率要比入耳式耳机的效率低，一般头戴式耳机效率的常见值是 95dB/mW，而入耳式耳机具有 115dB/mW 的高效率。因此入耳式耳机所需的功率更小。针对这个设计的输出功率目标值为 125mW，这是一个足够驱动广泛的耳机的功率值。耳机的阻抗 R_{HP} 选用 32 Ω ，因为这是一个常见值在便捷式应用耳机领域。因此，可以计算出 32 Ω 耳机所需的电压值：

$$V_O = \sqrt{P_{IN} \times R_{HP}} = \sqrt{125mW \times 32\Omega} = 2V_{RMS} \quad (5)$$

3 工作原理及参数设计

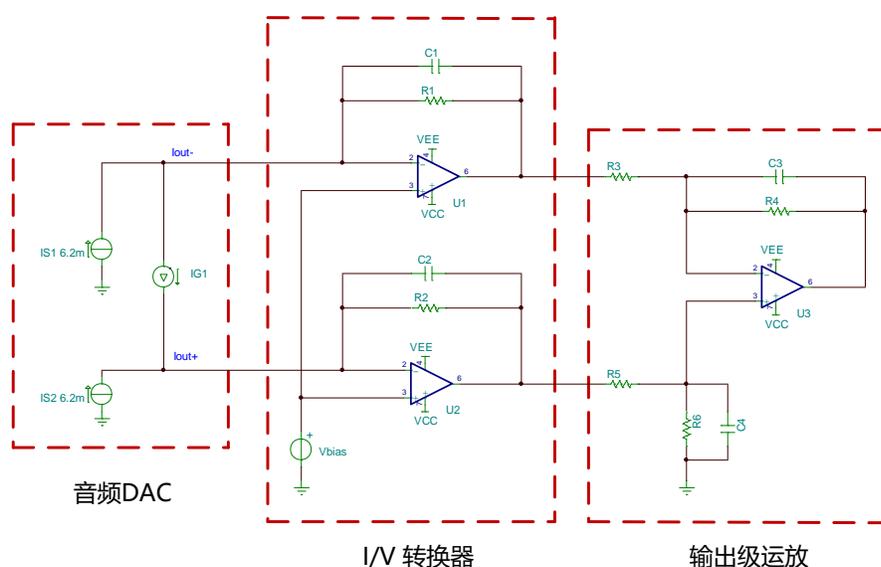


Figure 3. 高保真耳机放大器简化电路原理图

电流输出 DAC 具有比电压输出 DAC 更好的性能，但是电流输出 DAC 外围电路配置需要较多的元器件。在高保真耳机放大器设计中，对性能的要求苛刻，所以选择电流输出音频 DAC 配置。电流输出音频 DAC 的简化模型如图 3 中所示，交流电流源 I_{G1} 叠加一个直流中心电流后，分别输出两个差分电流。I/V 转换器将 DAC 输出的差分电流转换成差分电压，而后经过一个输出级差分运放输出单端信号驱动低阻抗耳机发声。

3.1 DAC 电路设计

DAC 内部同时包含模拟和数字功能模块，所以需要超低噪声的时钟、电源和注意 PCB 布局设计，以实现小于 -100dB 的 THD+N 的性能。TI 的 PCM1794A 音频 DAC，拥有出色的动态性能，SNR 可达 127dB（2V_{RMS}，立体声），THD+N < 0.0004%。PCM1794A 在 0dB 情况下，提供均衡 7.8mA_{P-P} 差分电流输出，最高可支持 200kHz 的采样速率。如图 4 所示 DAC 外围电路设计，详情参考 TI 官网 PCM1794A 的数据手册。

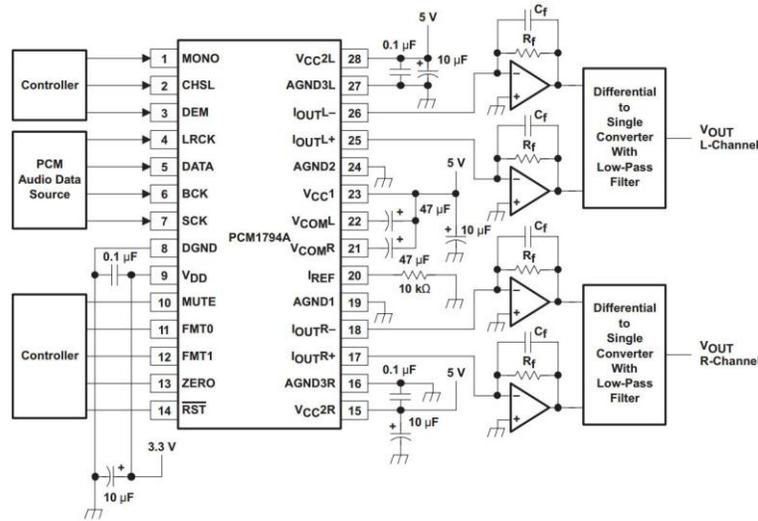


Figure 4. 音频 DAC-PCM1794A 应用电路原理图

3.2 输出级差分放大器

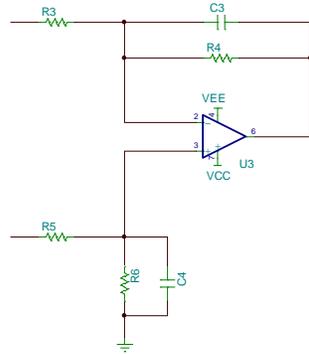


Figure 5. 输出级差分放大器

输出级差分放大器的作用在于将跨阻放大器输出的差分信号转换成单端信号，并且提供合适的增益和足够的电流驱动耳机。差分放大器的增益设置取决于耳机所需的最大电压，根据前文信息，针对本设计其输出电压值为 $2V_{RMS}$ 。又因为差分放大器的差分输入电压为：

$$V_{in} = \frac{2 \times 3.9mA \times R_1}{\sqrt{2}} = 1.986V_{RMS} \tag{12}$$

其中 R_1 为跨阻放大器的反馈电阻。接着可以计算出差分放大器的增益为：

$$A = \frac{V_O}{V_{in}} = \frac{2V_{RMS}}{1.986V_{RMS}} = 1.007 \rightarrow A = 1 \tag{13}$$

根据增益值 A ，差分放大器的电阻值关系如下：

$$A = \frac{R_4}{R_3} = \frac{R_6}{R_5} \quad (14)$$

TI 高保真音频运算放大器 INA1620 内置有 4 个 1 kΩ 的高精度匹配薄膜电阻，所以选取 $R_3=R_4=R_5=R_6=1k\Omega$ 。

为了在特定条件下达到电路稳定，且降低高频噪声干扰，必须在差分放大器两个电阻 R_4 和 R_6 上并联分别并联一个电容。如跨阻放大器部分所述，该电容值受限于各自在音频范围需满足一定的相移条件。将极点频率设置为跨阻放大器部分计算的值 f_p ，即可计算出满足相移要求的电容值：

$$C_{3,4} \leq \frac{1}{2\pi R_4 f_p} \leq \frac{1}{2\pi(1000\Omega)(458k)} \leq 347 pF \rightarrow 300 pF \quad (15)$$

所以选取 $C_3=C_4=300pF$ 。

3.3 跨阻放大器

因为高性能 DAC 通常是差分电流输出，所以需要两个跨阻放大器作为 I/V 转换器将其输出差分电流转换成差分电压。

跨阻放大器的设计原则：选用超低噪声和失真的跨阻运算放大器以实现出色的 SNR、THD+N 性能。

为什么要遵循这个关键的设计原则呢？因为从噪声角度分析，音频 DAC 之后的信号链由两级运放串联而成，即 I/V 转换器作为第一级运放 A_1 ，输出级差分放大器作为第二级运放 A_2 。信号链简化框图如图 5 所示，每级运放包含两个增益：输入信号增益 G_S 和放大器固有的噪声增益 G_N 。该信号链的信号总增益 $G_S=G_{S1} \times G_{S2}$ 。

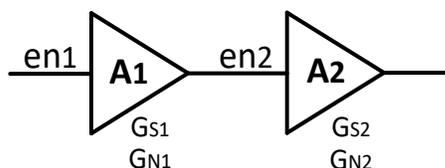


Figure 6. 耳机级联运放简化图

根据以下公式可以得到总输出噪声：

$$e_n = \sqrt{(e_{n1} G_{N1} G_{S2})^2 + (e_{n2} G_{N2})^2} \quad (6)$$

分析可知，放大器 A_1 的噪声被放大器 A_1 的噪声增益和放大器 A_2 的信号增益放大，这为降低信号链总输出噪声提供了一个设计思路：放大器 A_1 的噪声要尽量小，且可以设置第一级运放增益达到最大，设置第二级运放的增益远小于 1。

电流输出音频 DAC+I/V 转换器的简化框图如下：

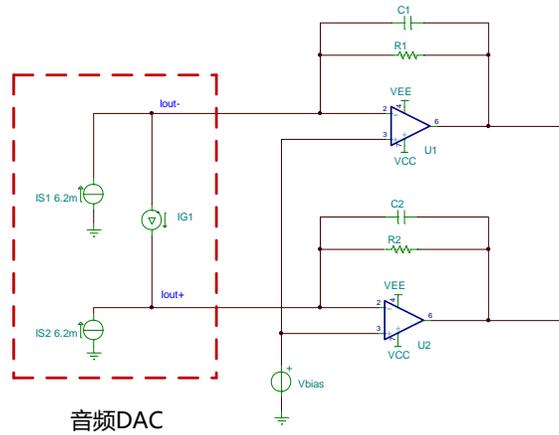


Figure 7. 音频 DAC+I/V 转换器简化框图

跨阻放大器的合适增益值设置取决于音频 DAC 的输出电流和所选运算放大器的输出电压摆幅。

Table 2. OPA1612 数据手册节选

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
Vout 电压输出	RL=2kΩ, AOL>=110dB	(V-) +0.6		(V+) -0.6	V
Vcm 共模电压范围		(V-) +2		(V+) -2	V

在计算跨阻放大器的反馈电阻值时，首先要知道 DAC 的最大输出电流。查询 PCM1794A 数据手册可知，其输出交流电流摆幅是 ±3.9mA，直流中心电流是 6.2mA，所以最大输出电流是 $i_{max}=3.9mA+6.2mA=10.1mA$ 。在运算放大器供电电压为 ±5V 条件下，根据数据手册信息，放大器的输出电压摆幅为[-4.4, 4.4]，共模电压输入范围[-3, 3]。考虑到一定的裕度，选取输出电压值为 3.9V，所以反馈电阻：

$$R_1 = R_2 = \frac{3.9V}{10.1mA} = 386\Omega \rightarrow 360\Omega \tag{7}$$

此时，放大器的偏置电压 $V_{bias}=6.2mA \times 360\Omega = 2.232V$ ，满足放大器的共模电压输入范围。此外，反馈电阻需要并联一个电容，一是为了补偿放大器反相输入端的寄生电容，二是限制放大器或者 DAC 的高频噪声干扰量。由于反相输入端的寄生电容未知，所以该电容值应在不引起音频信号显著相移条件下尽可能大。根据设计目标要求相移<-5.0°。假设 I/V 转换器和输出级差分运放形成相同的相移，设置 20kHz 条件下 I/V 转换器的跨阻放大器相移为-2.5°，所以可以得出极点频率：

$$f_p = \frac{f}{\tan(-\theta)} = \frac{20kHz}{\tan(2.5^\circ)} = 458kHz \tag{8}$$

根据反馈电阻和极点频率值，可以推出反馈电容值：

$$C_{1,2} \leq \frac{1}{2\pi R_{1,2} f_p} \leq \frac{1}{2\pi (360\Omega)(458k)} \leq 1.04nF \rightarrow 100pF \tag{9}$$

由于 DAC 存在直流中心电流漂移，在 DAC 输出电流为 0 时仍会存在输出电流。图 7 所示电阻分压网络提供偏置电压给到跨阻放大器的同相输入端，目的就是解决 DAC 漂移问题。

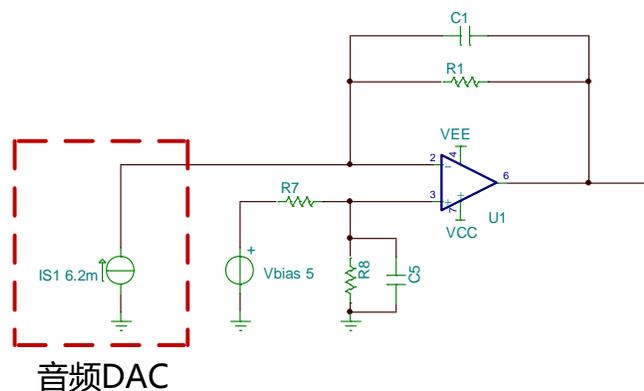


Figure 8. 电阻分压网络提供偏置电压

根据前文，运放所需的偏置电压 $V_{bias}=2.232V$ 。针对 5V 电源轨，可算出提供所需偏置电压对应的 R_7 和 R_8 分压电阻值：

$$V_{bias} = 2.232V = 5V \frac{R_8}{R_7 + R_8} \quad (10)$$

考虑到电路功耗且不影响电路启动时间，选取 $R_7=19.6k\Omega$ ， $R_8=15.8k\Omega$ ，生成 2.232V 偏置电压。为了减小 5V 电源轨带来的电源噪声影响音频信号输出质量， R_7 电阻两端需要并联一个电容。设置该电容产生的截止频率应低于 20Hz，才能有效减弱电源噪声。从而可以计算出该电容值：

$$C_5 \geq \frac{1}{2\pi(R_7 \parallel R_8)f_c} \geq \frac{1}{2\pi(8.74k\Omega)(20Hz)} \geq 0.91\mu F \rightarrow 2.2\mu F \quad (11)$$

所以选取 $C_5=2.2\mu F$ ，过大的电容值不仅占用较大的 PCB 空间，也延长充电至设定偏置电压的时间，即影响电路的正常工作的启动时间。

4 器件选型

在音频信号链中，有源器件和无源器件的选择直接决定了音频输出性能的优劣。

4.1 电阻

在跨阻放大器中的反馈电阻以及构成差分放大器的各个电阻都建议采用高精度匹配（0.1%）的薄膜电阻，以便实现最佳输出性能。薄膜电阻因其特殊的制造工艺，具有较低的噪声和温度系数，同时能够提高差分放大器的共模抑制特性，非常适用于 Hi-Fi 耳机放大器的设计。

4.2 电容

所有信号链上的电容建议选择 COG/NPO 类型陶瓷电容。COG/NPO 类型陶瓷电容具有较低的电容电压系数，这意味着组件的电容值受器件两端电压偏置的影响较小。

4.3 放大器

TI 专门为最挑剔的音乐爱好者设计了许多出色的音频放大器。其中性能相对最优的几个放大器如下：OPA1612、OPA1688、OPA1622、OPA1671 和 INA1620。

(1) 跨阻放大器

根据 3.2 节对跨阻放大器选型的分析，要求是低噪声。因为级联运放的总噪声输出主要取决于第一级运放，也就是跨阻运放。影响输出总噪声的主要因素是输入电压噪声，通过对比以上几颗音频运算放大器可知，OPA1612 输入电压噪声最低。所以选取 OPA1612 作为 I/V 转换器的跨阻运放。

Table 3. 音频运算放大器的输入电压噪声

放大器型号	输入电压噪声
OPA1612	1.1nV/√Hz
OPA1688	8.0nV/√Hz
OPA1622	2.8nV/√Hz
OPA1671	7.0nV/√Hz
INA1620	2.8nV/√Hz

(2) 输出级差分放大器

对于输出级差分放大器最为重要的点是在满足输出功率条件下保持低失真和噪声。对比以上几颗音频运算放大器的性能可知，OPA1622 和 INA1620 的 THD+N 最低，且具有相同的值。

进一步对照它们的数据手册可以发现，OPA1622 和 INA1620 其他性能基本一致。INA1620 相对于 OPA1622，优势有两点：其一是 INA1620 内部集成了四对高精度匹配（0.004%）的薄膜电阻，刚好可以作为差分放大器的外部电阻，而不需要额外挂电阻，因为通常薄膜电阻贵、会占据 PCB 较大的空间，这些问题 INA1620 均可有效解决；其二是它内部还集成了一个片上 EMI 滤波器，这给大大减小 EMI 问题，特别是在智能手机应用场合。

所以综上所述，选取 INA1620 作为输出级差分放大器，以便实现最佳性能。

Table 4. 音频运算放大器的 THD+N

放大器型号	THD+N (1kHz、10mW、32Ω)
OPA1612	-110dB
OPA1688	-109dB
OPA1622	-116dB
OPA1671	-109dB
INA1620	-116dB

4.4 电源

该 Hi-Fi 音频系统对供电的需求如下：

- 音频 DAC 需要双电源支持：+5V 模拟、+3.3V 数字
- 音频运算放大器：±5V 电源

Hi-Fi 音频系统需要超低噪声和高 PSRR 的电源。针对系统 5V 电源轨，推荐 TI 超低噪声的 LDO LP5907 提供 3.3V 电压来驱动音频 DAC。LP5907 具有超低噪声 ($<6.5\mu\text{VRMS}$)、高 PSRR (82dB @ 1kHz)、低静态电流 (12 μA) 和超小尺寸的封装，非常适合为应用于手机等便捷式电子产品的 Hi-Fi DAC 供电。

通常情况下，音频运算放大器需要正负双电源供电，以实现最佳的性能。针对本设计，推荐 TI 单电感-双输出电源 TPS65132 为音频运放提供 $\pm 5\text{V}$ 供电电压，同时也可以为音频 DAC 提供 +5V 模拟电源。TPS65132 内部集成同步升压转换器产生一个正电压，后续分别接一个集成的 LDO 输出正电源轨和一个电荷泵输出负电源轨。由于内部集成 LDO，正电源轨输出可以显著减小输出电压纹波，为运放或者 DAC 提供一个高质量电源。此外，如果对在具体应用中对负电源轨的纹波要求较高的情况下，可以在 TPS65132 的负压输出添加合适的电容或者负 LDO 来减少纹波，也可以根据具体运放供电需求选用其他电源方案，如 LM27762，其在正负压输出端均集成了 LDO。

5 仿真

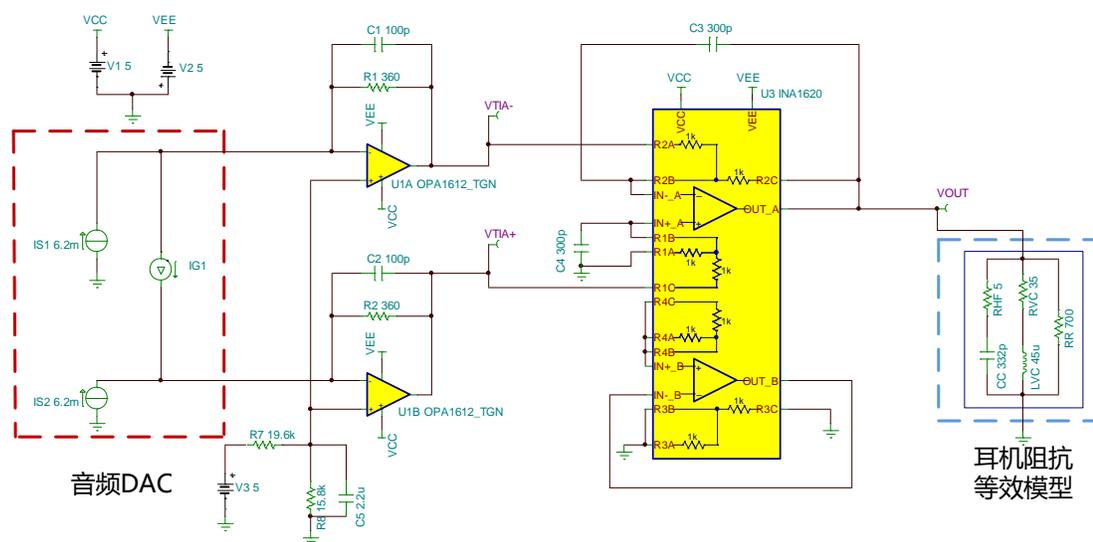


Figure 9. Hi-Fi 音频系统仿真原理图

图 9 所示 Hi-Fi 音频系统的仿真原理图。音频 DAC 位于左边红色虚线框内，耳机阻抗等效模型位于右边蓝色虚线框中。仿真软件采用 TINA-TI™。

5.1 暂态响应

TINA-TI™ 模拟音频 DAC PCM1794A 输出 3.9mA 互补正弦电流 IG1，作为音频放大器的输入。仿真结果显示，在差分放大器输出端可以输出期望的电压值 $V_{OUT}=2.8V=1.98V_{RMS}$ 。

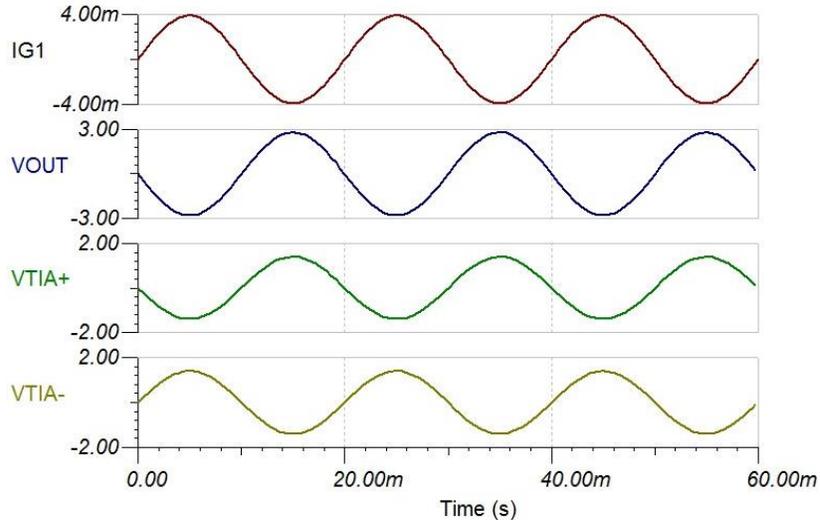


Figure 10. 暂态响应曲线

5.2 噪声

通过 TINA-TI™ 的噪声分析功能，设置带宽为 1Hz-100kHz。仿真结果显示，在 20kHz 条件下，信噪比可达到 116.5dB，总输出噪声电压为 $1.48\mu V_{RMS}$ 。利用输出噪声电压可以通过以下公式计算 THD+N 的预测值：

$$THD + N(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{V_n^2}{V_f^2}} \quad (16)$$

其中， V_n 为总输出噪声电压有效值， V_f 为基频输出电压有效值。这样可以计算出在负载为 $32\Omega/10mW$ 时噪声主导的 THD+N 预测值为 0.00026% 满足设计要求 ($<0.001\%$)。

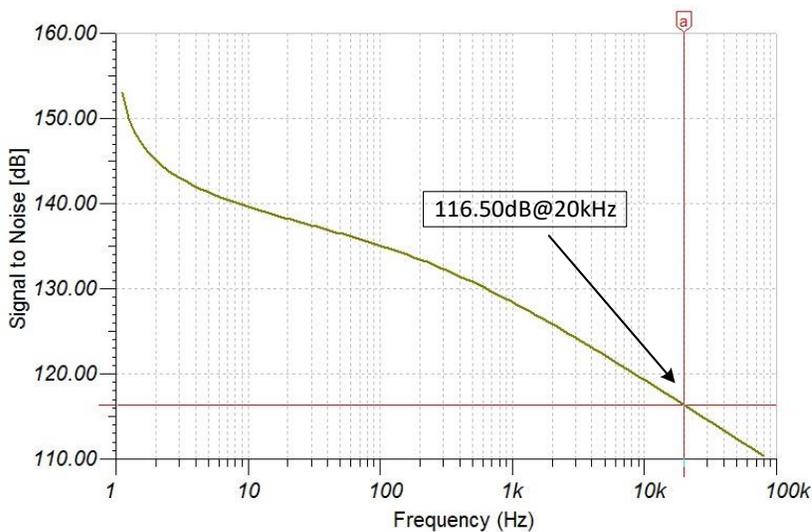


Figure 11. 信噪比仿真结果曲线

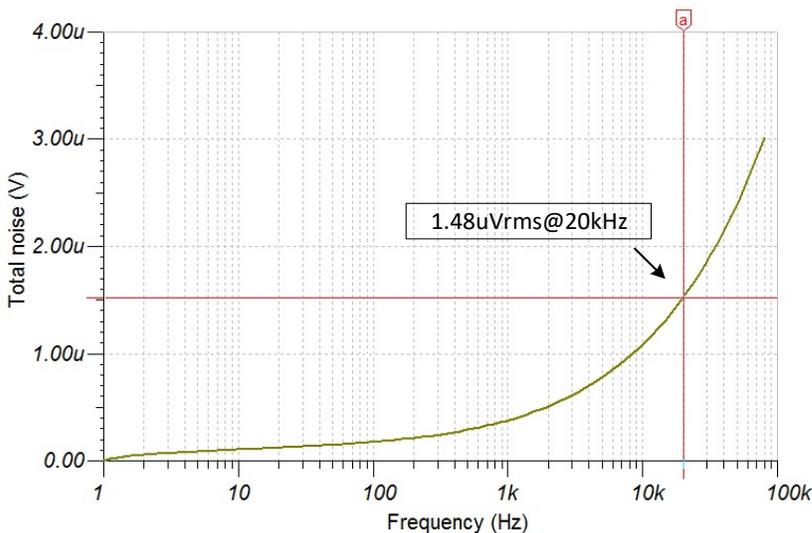


Figure 12. 总输出噪声仿真结果曲线

5.3 幅频响应

TINA-TI™的 AC 转换特性分析用于检测电路的幅频响应特性。本设计要求是在 20Hz-20kHz 条件下，幅值变化小于 0.01dB，相角变化小于 5°。仿真结果显示，幅值响应下降-0.0091dB，相角偏移-2.52°，均满足设计要求。

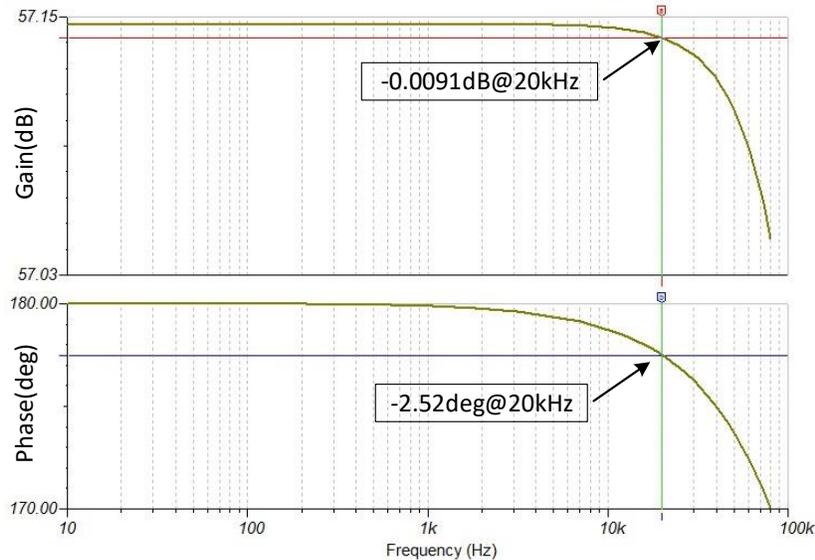


Figure 13. 幅频特性仿真结果曲线

6 性能优化建议

THD+N 是衡量 Hi-Fi 音频系统的重要指标。关于放大器的失真问题，在附录 8.1 节进行了详细的分析。如何设计低噪声低失真的耳机放大器，在这里给一些性能优化的建议：

- 建议采用高精度匹配（0.1%）的薄膜电阻。薄膜电阻因其特殊的制造工艺，具有较低的噪声和温度系数，同时能够提高差分放大器的共模抑制特性。所有信号链上的电容建议选择 COG/NPO 类型陶瓷电容；
- 超低噪声的 LDO 电源有利于噪声敏感型应用。开关电源不建议直接用于驱动音频 DAC 和放大器，因为开关电源有着明显的开关噪声和纹波；
- 接地设计对噪声敏感型应用而言至关重要。如果电路板上的所有信号和噪声通过公共地连接在一起，将导致信号与噪声相互干扰，在 Hi-Fi 音频设计中是不被允许的。良好的接地设计是尽量减小信号环路面积和环路阻抗，电源与 DAC 和主电路运放尽可能采用单点接地法，最大限度地减少干扰；
- 根据 3.2 节分析，为降低输出信号总噪声，在合理范围内提高跨阻放大器的增益，减小输出级放大器的增益。

7 参考文献

1. [INA1620 Datasheet \(SBOS859B\)](#)
2. [OPA1612 Datasheet \(SBOS450\)](#)
3. [PCM1794A Datasheet \(SLES117B\)](#)
4. [Hi-Fi Audio Circuit Design \(SBOA237\)](#)

5. [A High-Power High-Fidelity Headphone Amplifier for Current Output Audio DACs Reference Design \(TIDU672C\)](#)
6. [Amp up your cans: How much power do headphones need? \(Part 1\)](#)

8 附录

8.1 关于放大器的失真分析

针对 Hi-Fi 音频系统的设计，我们关注的是如何设计出低失真低噪声的耳机放大器。为了进一步优化 Hi-Fi 的性能，首先我们需要明白关于耳机放大器失真的一些影响因素。

图 14 为基本运算放大器的控制框图。输入信号 V_{in} 、运放开环增益 α 、反馈因子 β 以及失真源 V_D 。输出信号由经放大的输入信号和失真量组成：

$$V_{OUT} = \underbrace{\frac{\alpha V_{in}}{1 + \alpha\beta}}_{\text{Signal}} + \underbrace{\frac{V_D}{1 + \alpha\beta}}_{\text{Distortion}} \quad (17)$$

输出信号的失真量取决于：

- 控制环路的增益量（ α 和 β 的乘积）
- 由放大器产生的固有失真源 V_D 的幅度大小

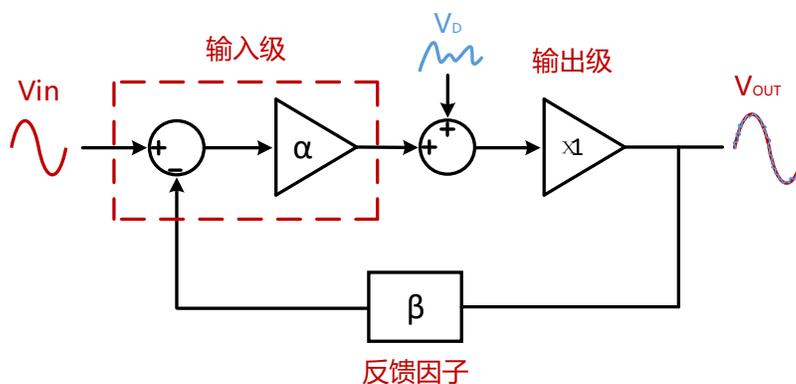
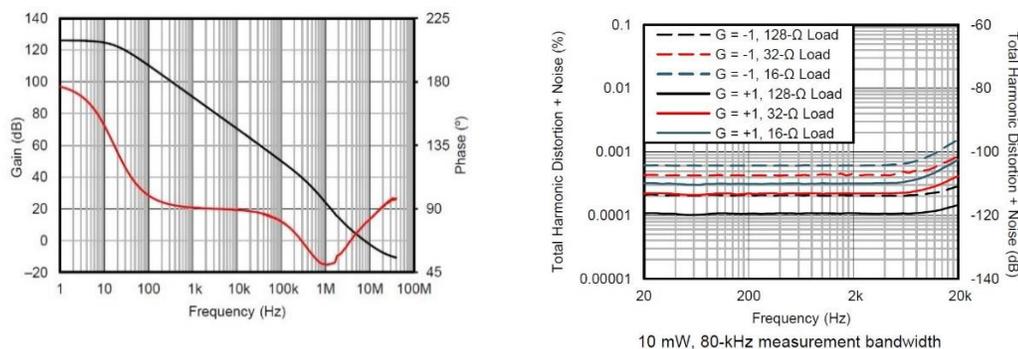


Figure 14. 包含失真源的放大器控制回路框图



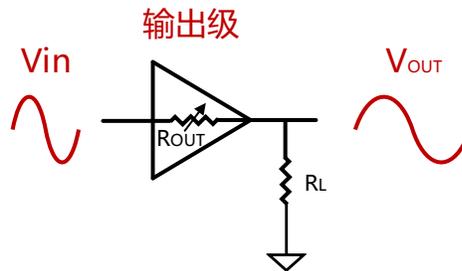
(a)开关增益与频率的关系

(b)THD+N 与频率的关系

Figure 15. INA1620 电气特性曲线

公式（17）解释了图 15 所示放大器的电气特性，放大器的环路增益在高频段会减小，从而输出信号中的失真量成分增加，导致 THD+N 性能变差。所以音频放大器开发者会选择最大程度地去提高音频放大器在音频频率段（20Hz-20kHz）的开环增益大小。

除了开环增益这个因素会影响放大器的失真外，还有另一个本质的影响因素-放大器的输出阻抗。由图 15(b)我们可以发现，负载越大，THD+N 越小。这是为什么呢？

**Figure 16. 输出阻抗与负载的关系**

如图 16 所示，输出级的实际增益（Aos）由输出阻抗（ROUT）和负载阻抗（RL）组成的电阻分压器决定。因此，输出级的增益不是固定的 1，而是取决于负载阻抗与输出阻抗的比值：

$$A_{os} = \frac{V_{OUT}}{V_{in}} = \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} = \frac{1}{\frac{R_{OUT}}{R_L} + 1} \quad (18)$$

所以我们发现，当减小负载阻抗时，将会引起输出级放大器增益的变化，导致更多失真量的产生。

总结：

- 放大器开环增益越小，输出的失真越严重；
- 负载阻抗越小，输出的失真越多。

8.2 电气原理图

(1) 电源原理图

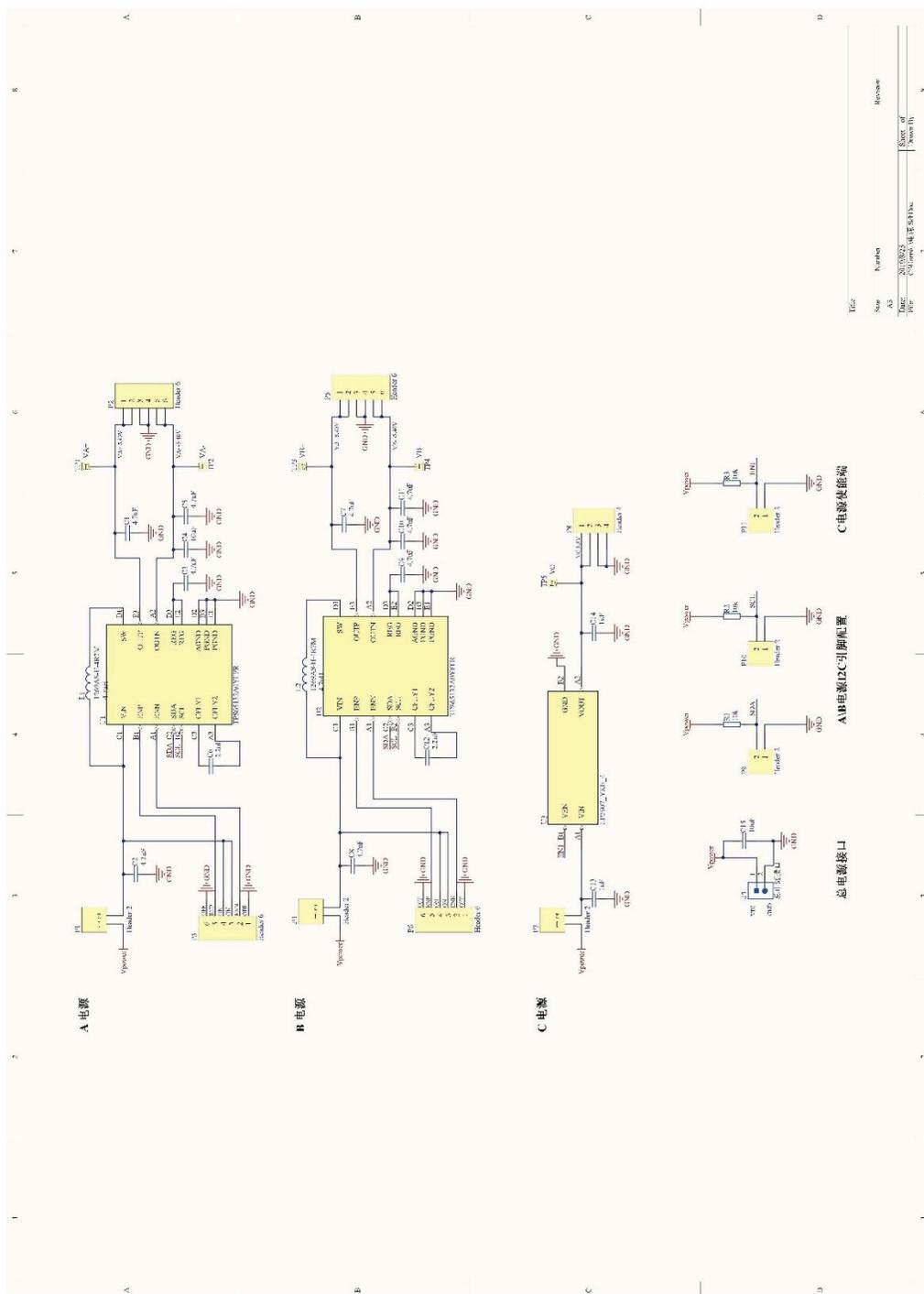


Figure 17. 电源原理图

(2) DAC 原理图

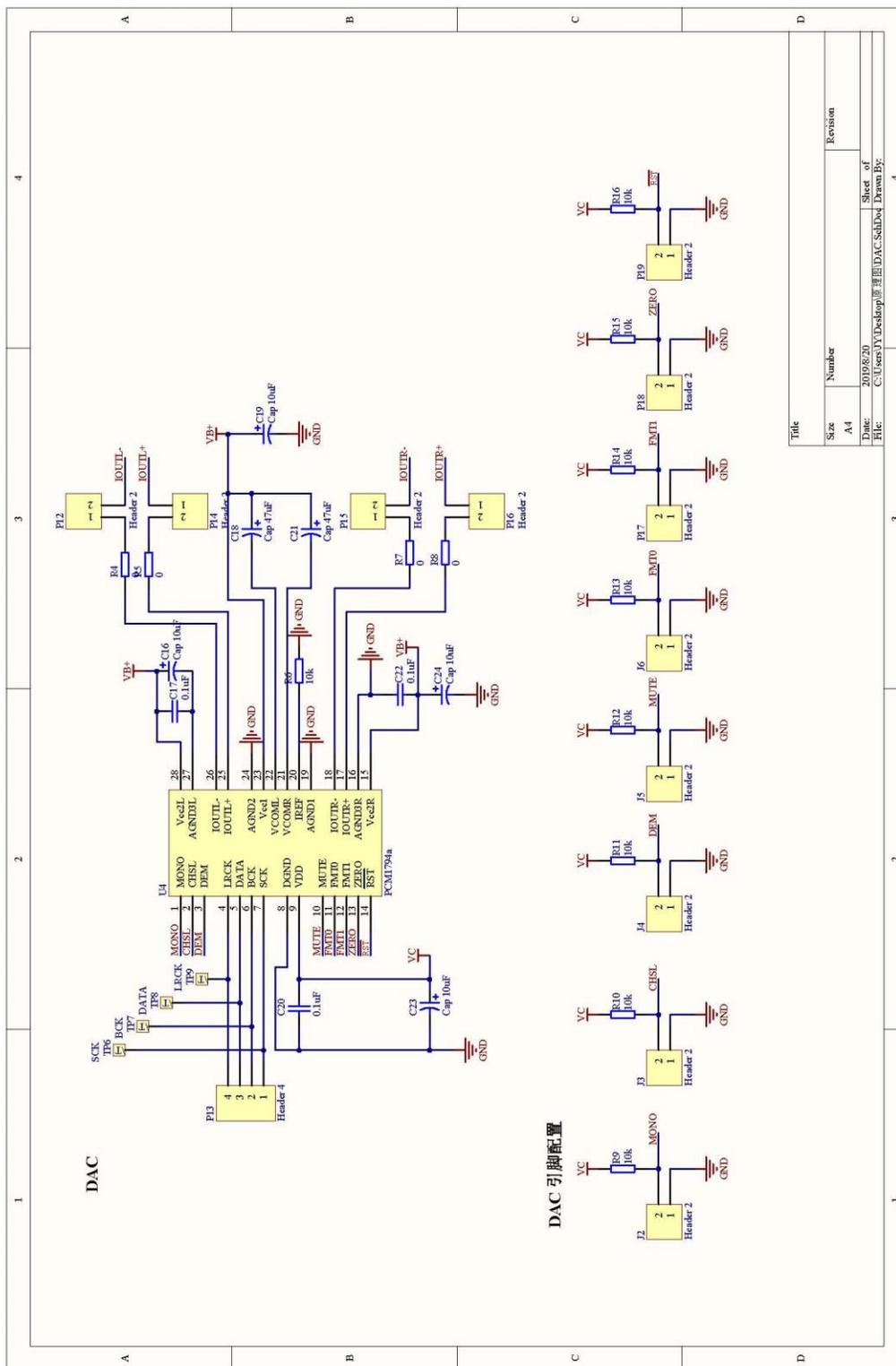


Figure 18. DAC 原理图

(3) 主电路原理图

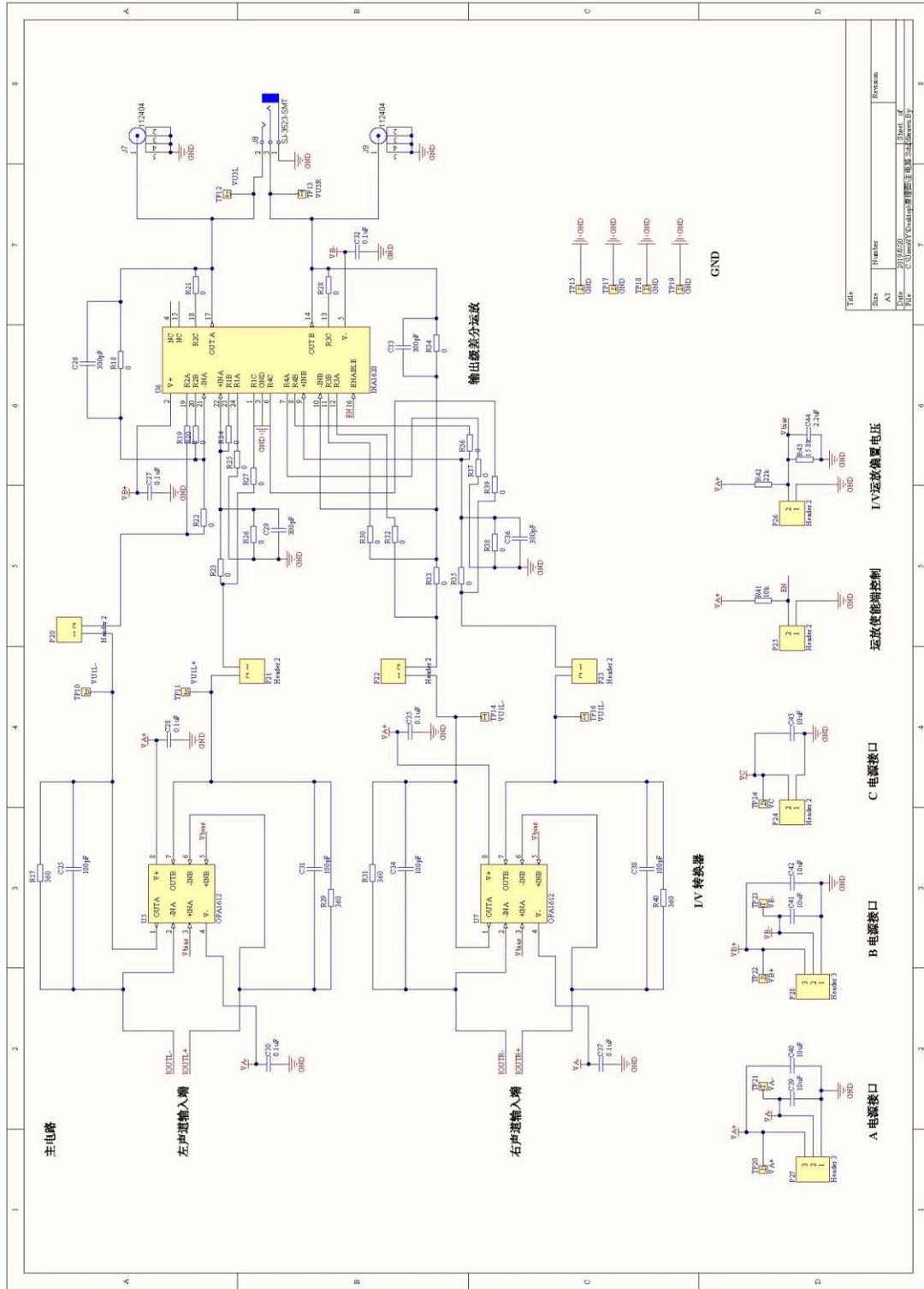


Figure 19. 主电路原理图

8.3 样机模型

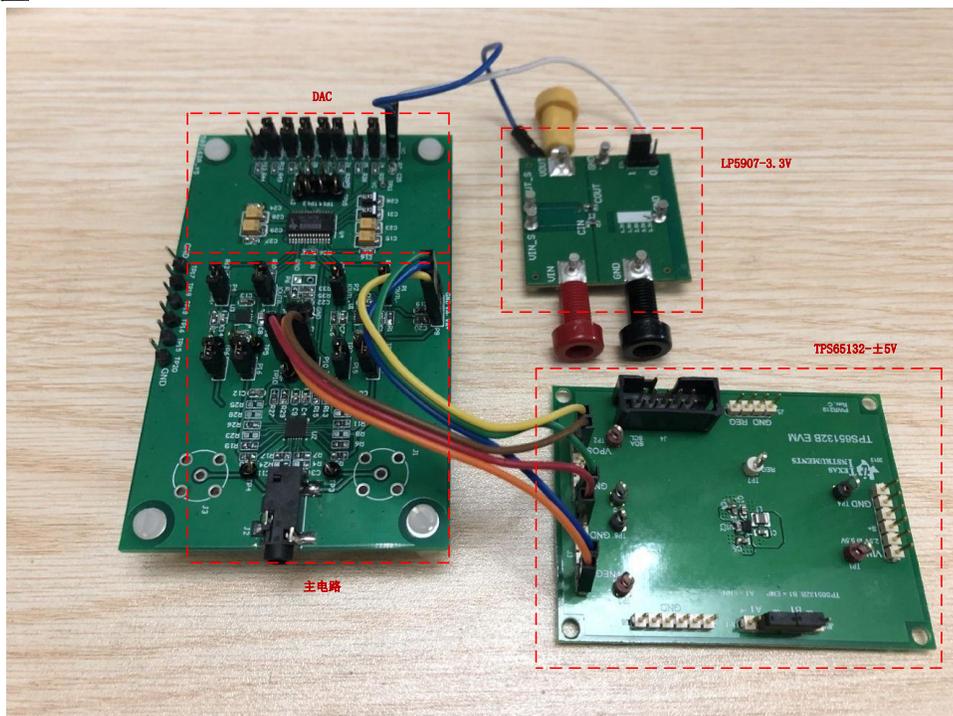


Figure 20. 样机模型

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.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com.cn](https://www.ti.com.cn) 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: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼, 邮政编码: 200122
Copyright © 2021 德州仪器半导体技术 (上海) 有限公司