

Application Note

适用于汽车应用、基于 INA1650-Q1 的高输出功率 Hi-Fi 耳机放大器设计注意事项



Mason Chen

摘要

本应用手册介绍了一款基于 INA1650-Q1 的耳机放大器设计，该设计专为汽车音频系统打造。该解决方案满足车载耳机功能的实际要求，适用于包括乘客专属音频和无噪声车内音频体验在内的场景。为了有效驱动低灵敏度耳机并确保充足音量，放大器必须在宽泛的耳机负载阻抗范围内提供足够的输出功率。一个关键设计难点在于功率输出要求的相互冲突：驱动高阻抗耳机需要更高的放大器输出电压（进而需要更高的电源电压），而对低阻抗耳机输出同等功率则需要显著更高的输出电流。通过将单颗 INA1650-Q1 的两个通道并联以增强输出功率，这一难题得以有效解决，从而实现符合汽车音频系统严格规范的高性能稳定音频放大。

内容

1 简介.....	2
2 汽车 Hi-Fi 耳机音频系统概述.....	3
2.1 汽车 Hi-Fi 音频系统的主要技术规格.....	4
2.2 汽车 Hi-Fi 耳机音频系统的设计要求.....	5
3 汽车 Hi-Fi 耳机音频系统的工作原理与电路设计.....	6
3.1 DAC 电路设计.....	6
3.2 差分转单端电路设计.....	7
4 仿真.....	9
4.1 瞬态响应仿真.....	9
4.2 噪声分析.....	10
4.3 功耗仿真和热计算.....	11
5 实验测试.....	12
6 总结.....	17
7 参考资料.....	18

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

随着汽车信息娱乐系统的不断升级，车载耳机功能已从一种小众功能发展为现代车辆中实用且高需求的功能。乘客往往追求个性化的音频体验（无论是欣赏音乐、观看影片还是参与语音通话），同时又不希望干扰驾驶员或其他乘客，这使得车载耳机连接成为以用户为中心的汽车设计中的关键组成部分。

然而，在驱动低灵敏度耳机时，一个关键问题随之显现：此类耳机需要一定的输出功率才能达到令人满意的音量水平。这给车载耳机放大器带来了独特的技术挑战：既需要适应不同耳机负载阻抗，又需要保持一致的输出功率。对于高阻抗耳机，放大器必须产生更高的输出电压才能提供所需功率，这对电源电压范围提出了更高的要求。反之，低阻抗耳机需要放大器输出更高的电流才能达到相同的功率水平，这考验着器件的电流驱动能力。传统放大器设计往往难以同时平衡这两项需求，导致音频性能受损或与不同类型耳机的兼容性受限。

INA1650-Q1 作为一款高性能车规级放大器，正是为应对这些挑战而设计。本报告详细阐述了基于 INA1650-Q1 的耳机放大器设计的设计原理、电路实现及性能验证，展示了其在多种负载条件下提供稳定、高质量音频输出的能力，以及满足汽车应用的严格可靠性与性能标准的能力。



图 1-1. 汽车 3.5mm 耳机插孔

2 汽车 Hi-Fi 耳机音频系统概述

Hi-Fi (高保真) 是指以高质量再现或以最大保真度播放原始音频源的声音。理想情况下, Hi-Fi 音频器件可以实现人耳无法察觉的超低噪声和失真。如图 2-1 (典型 Hi-Fi 音频系统的方框图) 所示, Hi-Fi 器件将数模转换器 (DAC) 的差分输出电压转换为能够驱动低阻抗耳机的单端电压。该器件采用差分转单端转换器将差分信号转换为单端信号, 以用于驱动耳机。

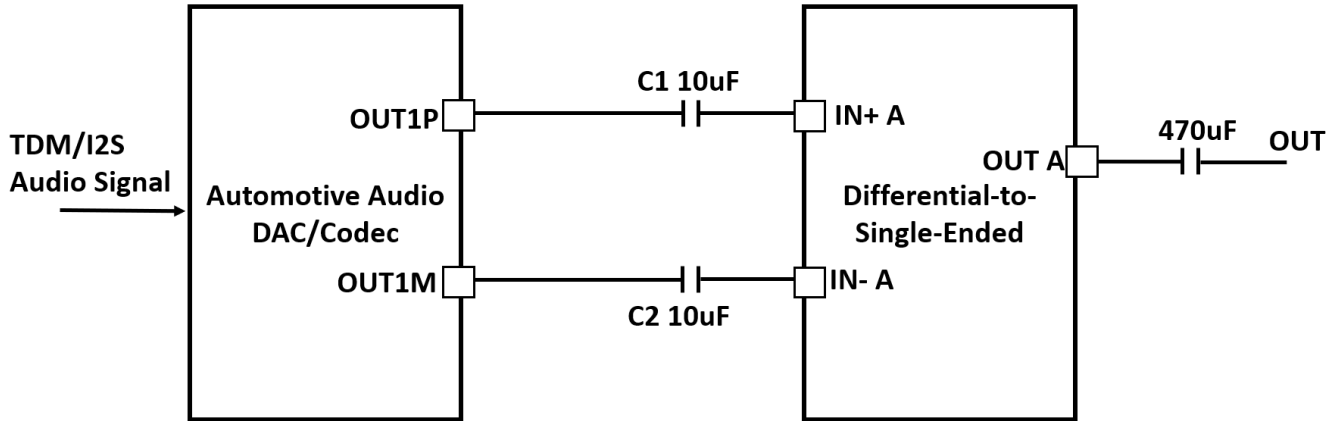


图 2-1. 汽车 Hi-Fi 音频系统的方框图

大多数消费级耳机都采用单端设计 (3.5mm/6.35mm 接口, 只需要一条信号路径加接地线)。对于单端模式, 有交流耦合和直流耦合模式。但单端直流耦合模式将包含直流共模电压。这会导致高功耗, 因此不建议使用直流耦合单端模式。单端交流耦合模式更适合耳机应用。在单端交流耦合模式下工作时, 需要小心选择交流耦合电容器。该电容器与负载形成高通滤波器, 其容值对音频频率响应有着显著影响。容值较小的电容器将衰减较低的音频频率, 进而导致低音响应损失。因此, 需要一个较大的交流耦合电容器来阻断 DAC 输出的直流偏置, 同时保持所需的音频频率范围。

$$F_C = \frac{1}{2 \times 3.14 \times C \times Z_{load}} \quad (1)$$

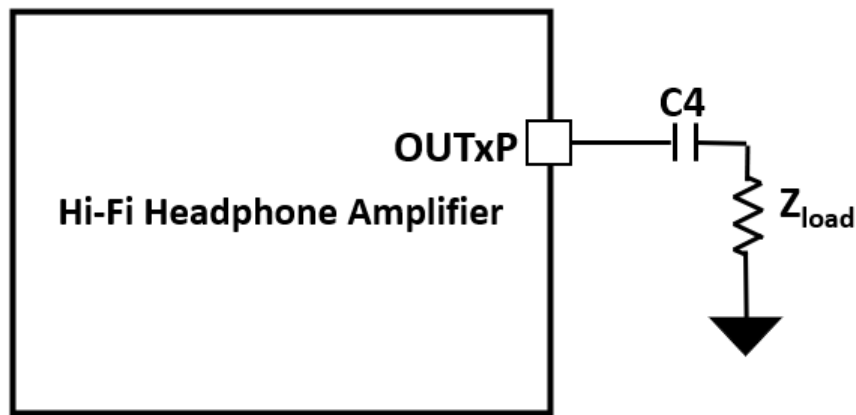


图 2-2. 直流耦合差分麦克风输入硬件设计

对于耳机 (32 Ω) 应用: 使用 ≥ 470 μF 可保持 $f_c = 10\text{Hz}$ 。

2.1 汽车 Hi-Fi 音频系统的主要技术规格

汽车 Hi-Fi 音频系统的核心技术规格包括信噪比 (SNR) 和总谐波失真加噪声 (THD+N)。

信噪比 (SNR) 定义为同一参考点处音频器件的输出信号功率与输出噪声功率之比，通常以分贝 (dB) 表示，如公式 (2) 所示。在该公式中， P_{signal} 表示输出信号功率， P_{noise} 表示输出噪声功率。SNR 值越高，表示叠加在音频信号上的噪声水平越低，对应的声音再现质量越高，反之亦然。对于汽车 Hi-Fi 音频系统，SNR 规格通常需要高于 105dB。

$$NR(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) \quad (2)$$

总谐波失真加噪声 (THD+N) 是表征音频再现质量的关键性能参数，其预测值可根据方程式 3 计算得出，其中 V_n 表示总输出噪声电压的 RMS 值， V_f 表示基频输出电压的 RMS 值。音频系统的 THD+N 性能由多个设计因素决定，包括高质量音频信号源、具有超低噪声和失真的 DAC 和运算放大器、超低噪声电源，以及优化的 PCB 布局和布线。对于汽车 Hi-Fi 音频系统，典型规格要求 $\text{THD+N} < 0.001\%$ 。方程式 3 通过数学方法展示了 $\text{THD} + \text{N}$ 定义为谐波功率测量值总和与基频功率之比。

$$\text{THD} + \text{N}(\%) = 100\% \times \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} 2(V_i^2 + V_n^2)}{V_f^2}} \quad (3)$$

其中：

V_i 基频第 i 次谐波的 RMS 电压 ($i=2, 3, 4, \dots$)

V_n 电路的 RMS 噪声电压

V_f 基频的 RMS 电压

此外，汽车应用对芯片的电磁干扰 (EMI) 性能提出了严格且详尽的要求。核心要求是符合国际和行业标准，以及适应车辆复杂的电磁环境。汽车芯片通常需要在 85°C 的环境温度下运行。因此，在设计中必须考虑 Hi-Fi 系统中采用的器件的 EMI 性能和热特性。汽车通常由 12V 电池供电，因此 TI 建议 Hi-Fi 系统采用单极电源配置且电源电压低于 12V。

2.2 汽车 Hi-Fi 耳机音频系统的设计要求

对于汽车应用，Hi-Fi 耳机音频系统的设计要求如下：

表 2-1. 设计目标

电源电压	<12v
THD+N (1kHz/32 Ω)	<0.001%
最大输出功率	100mW

为了确保低灵敏度耳机具有足够音量，耳机放大器需要在全负载范围内提供高输出功率。这带来了一个设计挑战：要向高阻抗耳机负载提供特定功率，需要放大器具有更高的输出电压（进而需要更高的电源电压），而要向低阻抗耳机输出相同功率，需要放大器具有更高的输出电流。

输出功率限制

运算放大器的输出功率受多种因素限制。对于高阻抗负载，运算放大器的转换率和全功率带宽是主要的限制因素。全功率带宽是指运算放大器能够在不产生明显失真的前提下输出最大功率的频率范围。对于低阻抗负载，运算放大器的输出电流限制则成为主要限制因素。此外，电流限制还受热效应影响：运算放大器内部的高功耗会导致其结温升高，进而降低电流限制，最终增大音频失真。

在以相对较高的电源电压驱动低阻抗负载时，这一问题尤其明显，因为低阻抗负载所需的高输出电流会迅速导致过高的功耗，从而显著限制可用的输出功率。

输出功率增强

使用较低的电源电压可以增加输送到低阻抗耳机的功率，能够降低运算放大器的功耗。然而，在某些应用中这可能并非可行的设计，因为降低电源电压会显著降低高阻抗耳机的功率输出。选用额定功率更高的车规级运算放大器可以减轻功率耗散带来的影响，但 INA1650-Q1 这类低功耗运算放大器的卓越性能却能让许多应用显著受益。在这种情况下，通过将运算放大器的两个通道并联，可提供所需的输出功率。

大多数普通消费级耳机的功率需求在 10mW 至 100mW 之间，该范围可满足大多数用户的日常聆听需求。该设计针对 100mW 的最大功率需求进行了优化，这一数值足以驱动众多的耳机型号。设计中选用了 32 Ω 的耳机阻抗 RHP，因为这是便携式音频耳机的标准阻抗值。因此，32 Ω 耳机所需的输出电压可计算如下：

$$V_o = \sqrt{P_{IN} \times R_{HP}} = \sqrt{100mW \times 32} = 1.789V_{RMS} \quad (4)$$

3 汽车 Hi-Fi 耳机音频系统的工作原理与电路设计

考虑到汽车高保真耳机放大器设计具有严格的性能要求，我们选择了具有差分输出功能的 DAC。INA1650-Q1 是一款专用音频放大器，可将 DAC 的差分电压输出转换为单端电压，生成的单端信号驱动耳机负载以产生音频输出。

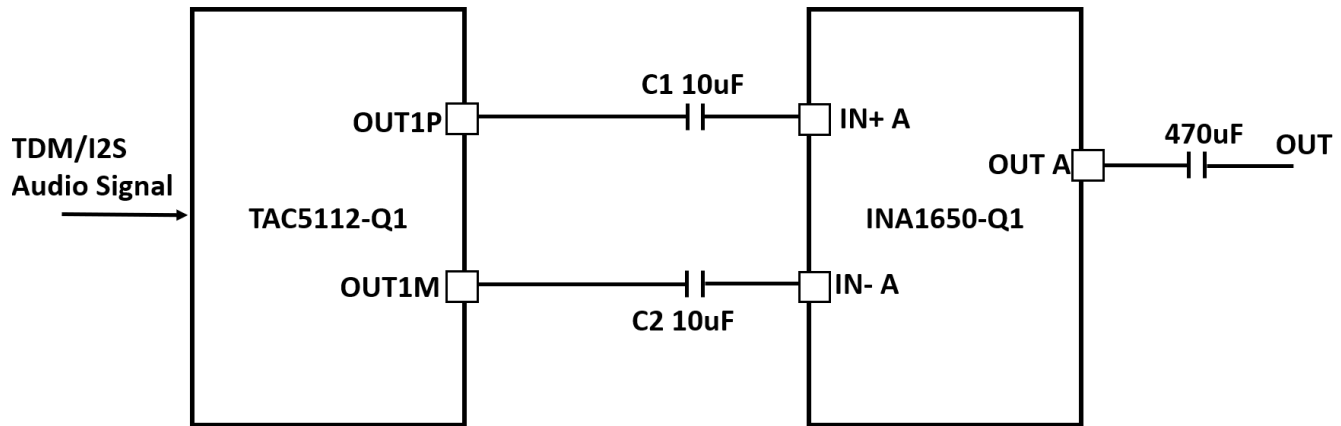


图 3-1. 汽车 Hi-Fi 耳机放大器的简化版原理图

3.1 DAC 电路设计

TI 面向汽车应用推出了 TAx5x1x-Q1 系列，这是一个车规级高性能音频 ADC/DAC/CODEC 器件系列，其中包含三个主要的子系列：TAC、TAA 和 TAD，涵盖单声道和立体声音频配置。这些器件集成了丰富的功能，包括多个模拟输入/输出通道、高信噪比 (SNR)、低总谐波失真加噪声 (THD+N)，并支持多种音频格式，使它们非常适合车载信息娱乐系统、ANC/RNC、eCall 等汽车音频应用。

在该系列中，TAC5212-Q1 是一款车规级高性能音频 DAC，其立体声通道支持 2Vrms 差分输出和 114dB 动态范围；四通道支持 1Vrms 单端输出和 107dB 动态范围。该器件同时支持差分 and 单端输入输出配置，能够灵活集成到汽车音频系统中。

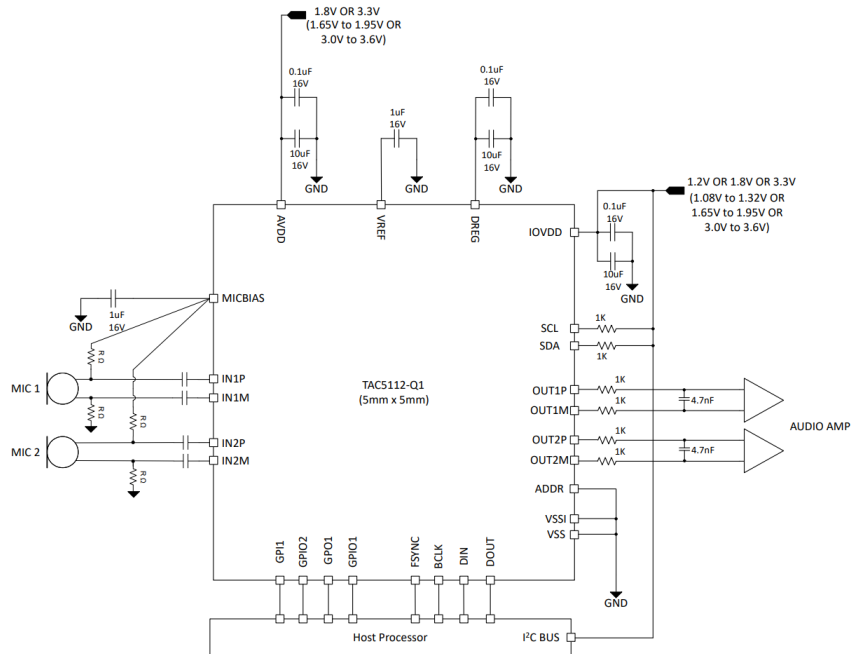


图 3-2. 音频编解码器 TAC5112-Q1 应用电路原理图

3.2 差分转单端电路设计

绝大多数消费级耳机采用单端设计 (3.5mm/6.35mm 接口, 只需要一个信号通道加一条接地线), 而专业音频链路 (例如 DAC 输出, 预放大) 通常使用差分信号来保证信号传输质量。为了利用差分信号的优势实现高保真耳机音频设计, 我们针对此特定应用开发了差分转单端电路。

该差分转单端电路不仅利用了差分信号的传输性能, 还通过信号转换来适配耳机的单端输入要求, 结合差分信号的强度来满足单端负载的应用需求。该电路凭借差分信号的抗干扰与低失真特性优化了信号质量, 然后通过信号转换来适配耳机的单端工作模式, 最终满足 Hi-Fi 耳机放大器的高保真追求。该设计在高端耳机放大器中尤为常见, 是提升音频质量的关键技术之一。

音频放大器通常用于实现音频差分转单端电路。TI 针对最挑剔的音频发烧友开发了一系列高性能音频放大器, 其中部分性能优异的车规级型号列举如下: OPA1642-Q1、OPA1612-Q1、OPA1662-Q1 和 INA1650-Q1。

表 3-1. 车规级音频放大器的主要性能参数

放大器 PN	THD+N (G = +1, f = 1kHz, VO = 3VRMS) (dB)	最大输出电流	支持单极电源?
OPA1642-Q1	-126	+ 36/-30mA/CH	是
OPA1612-Q1	-136	+ 55/-62mA/CH	是
OPA1662-Q1	-124	+50 mA/CH	是
INA1650-Q1	-108.1	±75mA/CH	是

在差分转单端电路中选择运算放大器时, 最重要的考量是在满足输出功率要求的同时保持低失真和低噪声。如前所述, 设计的输出功率为 100mW, 该数值足以驱动各种耳机型号, 对应于 1.789Vrms (2.529V 峰值)。对于典型的 32Ω 耳机, 所需的最大输出电流为 79mA。INA1650-Q1 的两个通道完全对称, 可并联来提高输出功率。根据对输出功率和 THD+N 性能的全面考量, 该设计选择了 INA1650-Q1。

实际上, 就性能而言, INA1620 是最优设计, 其 THD+N 达到 -132dB, 最大输出电流为 145mA, 并配备大尺寸散热焊盘。若该器件已获得车规级认证, 将是首要选择。然而, 在目前可用的车规级设计中, INA1650-Q1 凭借其 THD+N 性能、高输出电流以及单电源供电兼容性, 脱颖而出成为最佳选择。

INA1650-Q1 还具备另外三项关键优势:

1. 该器件集成了片上输入缓冲器, 可防止外部电阻 (例如来自 PCB、连接器或线缆的电阻) 破坏内部 10kΩ 电阻器的精密匹配 — 这种失配会降低差分放大器的高共模抑制比 (CMRR)。
2. 该器件集成了四对高精度匹配薄膜电阻器, 可直接用作差分放大器的外部电阻器, 无需额外的片外电阻器。薄膜电阻器通常价格昂贵且占用的 PCB 空间相当大, INA1650-Q1 的片上集成电阻器有效解决了这些问题。
3. 该器件内置片上 EMI 滤波器, 可显著缓解 EMI 问题, 这一特性对于具有严格 EMI 要求的汽车应用来说至关重要。

INA1650-Q1 支持单极电源, 这是汽车应用的首选供电方式, 因为双极电源通常需要更高的实现成本。TI 建议使用低压降稳压器 (LDO) 为 INA1650-Q1 供电, 这种稳压器可提供 Hi-Fi 音频系统所需的具有超低噪声和高电源抑制比 (PSRR) 的电源。

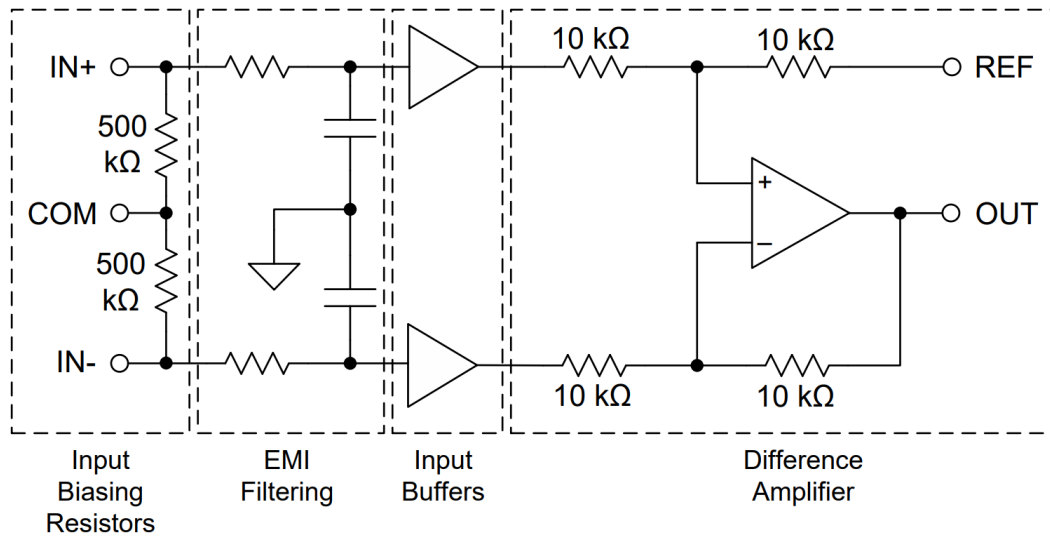


图 3-3. INA1650-Q1 音频信号路径 (所示为单通道)

4 仿真

图 4-1 展示了汽车 Hi-Fi 音频系统的仿真原理图。左侧红框包含音频 DAC，中间红框包含基于 INA1650-Q1 双通道并联运行的差分转单端电路，右侧红框包含耳机阻抗的等效模型。两个并联通道通过 $1\ \Omega$ 平衡电阻器将其通道 A 和通道 B 的输出进行组合，从而确保在两个输出通道之间平等共享负载电流。采用了 TINA-TI™ 作为该设计的仿真软件。

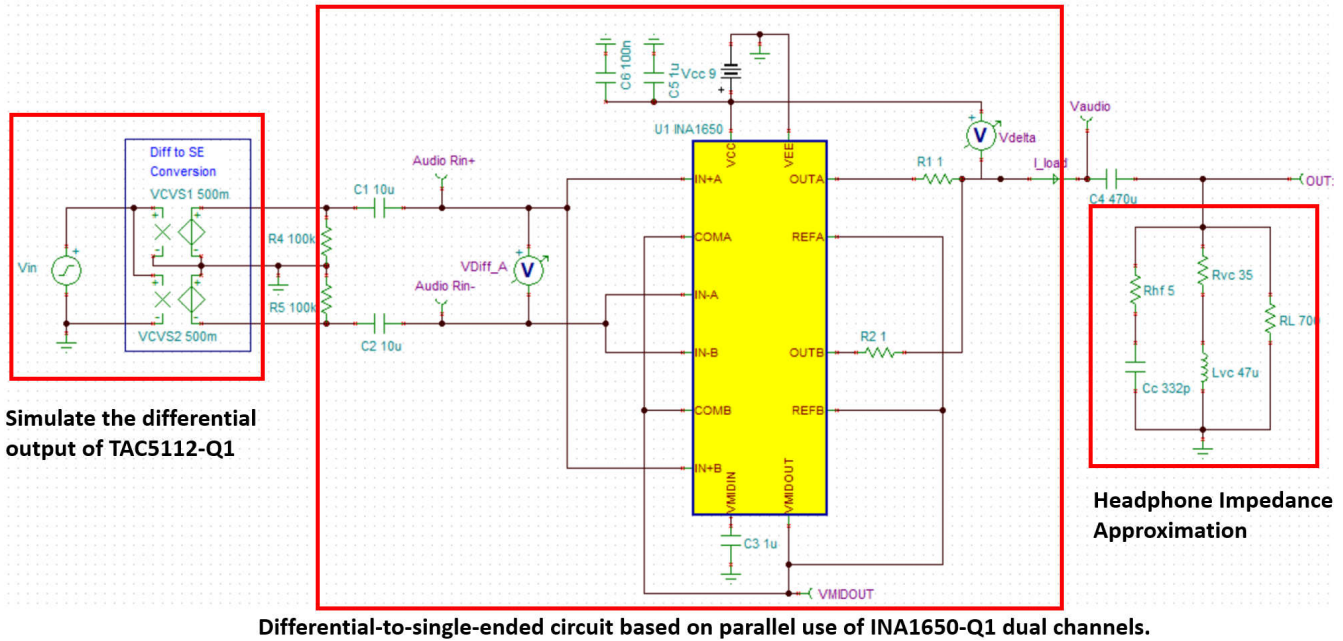


图 4-1. 汽车 Hi-Fi 音频系统仿真原理图

4.1 瞬态响应仿真

音频编解码器 TAC5112-Q1 在 TINA-TI™ 中建模为音频放大器的输入，在 $1.789V_{rms}$ (2.53V 峰值) 下具有 10kHz 正弦波输入波形。仿真结果表明，差分放大器可以在输出端子上输出所需的电压， $V_{out} = 2.53V = 1.789VRMS$ 。

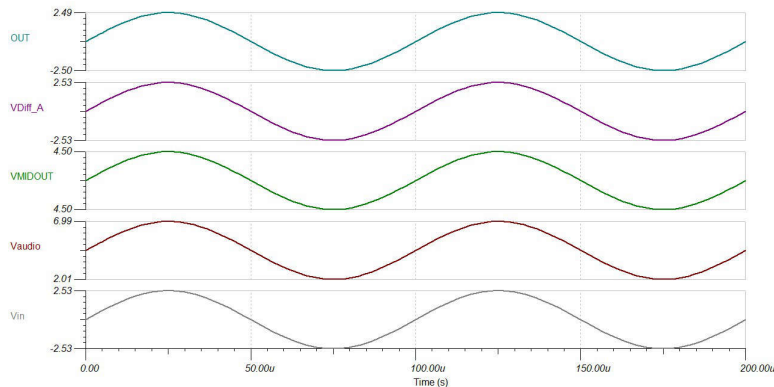


图 4-2. 瞬态响应曲线

4.2 噪声分析

在带宽设置为 1Hz - 100kHz 的情况下，使用了 TINA-TI™ 的噪声分析功能。仿真结果表明，在 20kHz 时，信噪比 (SNR) 达到 109.52dB，总输出噪声电压为 3.34uVRMS。

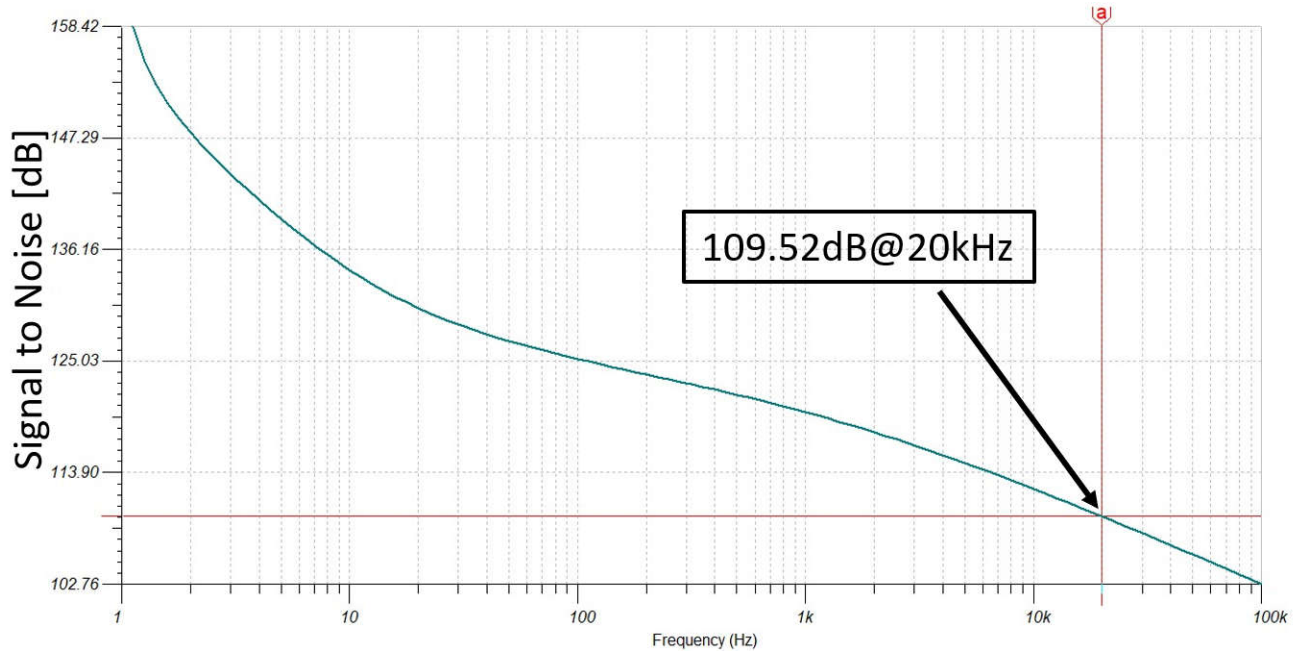


图 4-3. 信噪比仿真结果曲线

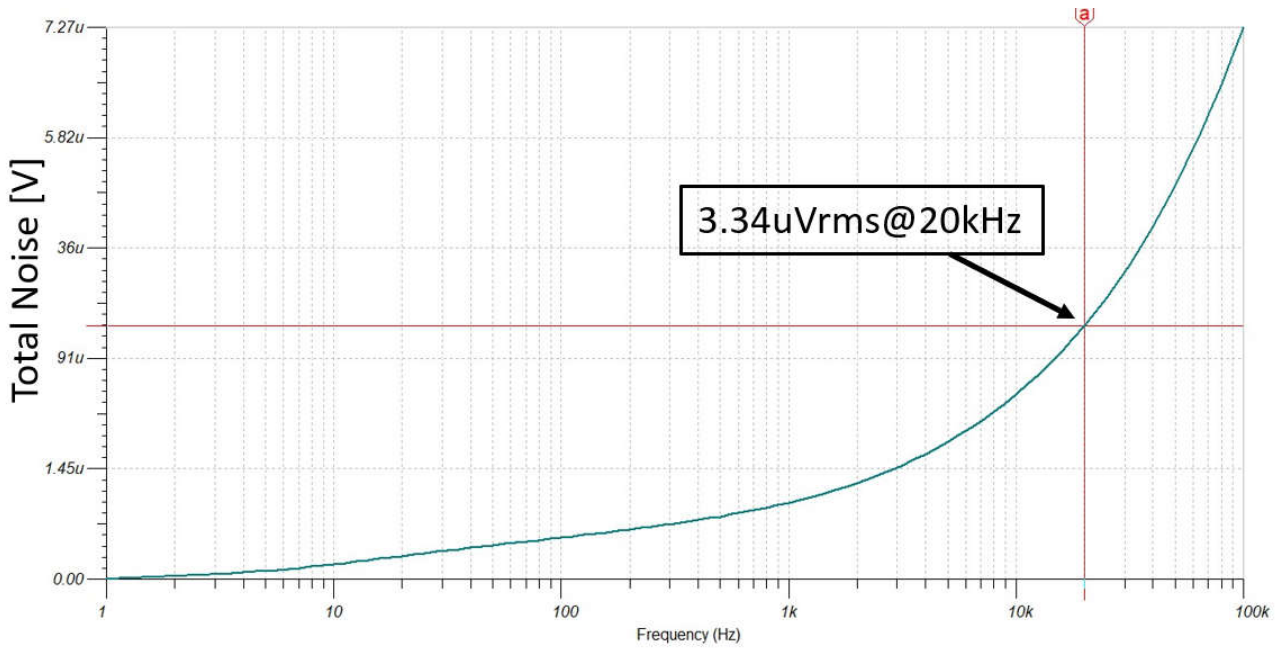


图 4-4. 总输出噪声仿真结果曲线

4.3 功耗仿真和热计算

为了简化功率计算，可以通过仿真功率代替执行复杂计算，以简化功率计算。方法如下：

使用测得的值 V_{Δ} （施加到 INA1650-Q1 的电压）和 I_{Load} ，使用 Tina 的后处理公式将它们相乘即可得到功率。通过点击功率曲线并转到 Process > Averages，即可计算出 RMS 功率，即 258.02mWrms。

要根据 97°C/W 的 INA1650-Q1 热参数 θ_{JA} 来估算温升，得到生的温升为： $258.02mW \times 97^{\circ}C/W = 25.03^{\circ}C$ 。将此温升与 85°C 环境温度相加，我们就得到了芯片温度为 110.03°C。不过，还应考虑器件本身的功耗。当 I_q 为 10mA 且电源电压为 9V 时，该器件会额外消耗 90mW ($10mA \times 9V$) 的功率。这会使芯片温度增加 8.73°C ($90mW \times 97^{\circ}C/W$)，从而使芯片总温度达到 118.76°C。

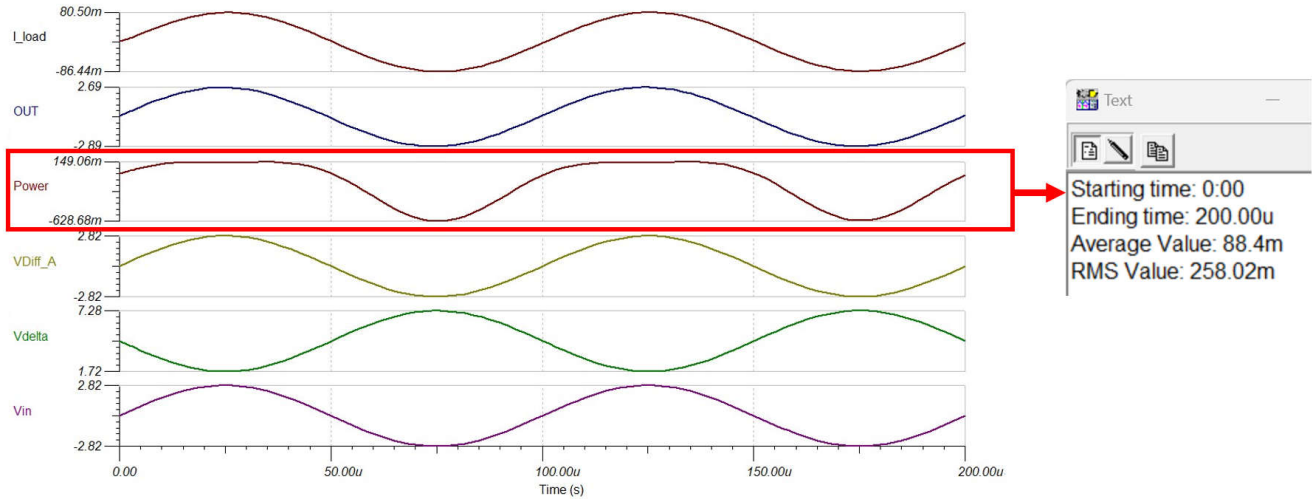


图 4-5. 电源仿真结果

根据 INA1650-Q1 数据表，在芯片温度为 125°C 时，器件可提供的最大电流约为 53mA。通过使用并联放大器，虽然无法实现电流的完美倍增，但用户仍能获得比单个放大器更大的电流。对于该设计所需的 100mW 最大输出功率，需要 80mA 的峰值驱动电流，这可通过 INA1650-Q1 的双通道并联配置来实现。

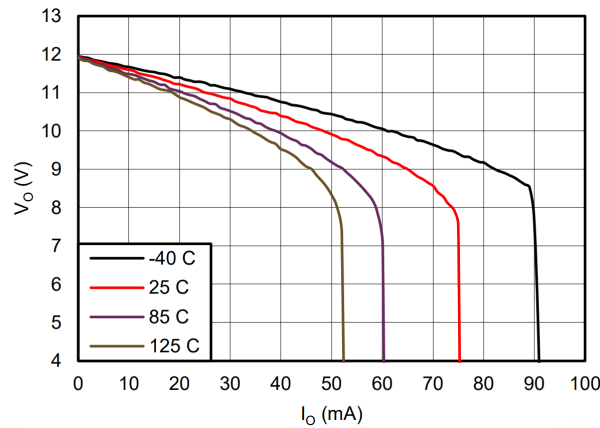


图 4-6. INA1650-Q1 正输出电压与输出电流间的关系

5 实验测试

可以利用 TAC5112-Q1 EVM 和 INA1650-Q1 EVM 构建实验电路。TAC5112-Q1 的 DAC 输出模式配置为差分输出，INA1650-Q1 的双通道输入采用并联方式连接。然后将 TAC5112-Q1 的差分输出连接到 INA1650-Q1 的并联输入。将直流电源电压设置为 9V。采用 $32\ \Omega$ 金属膜电阻器来对测试中的耳机负载进行仿真，实际的测试场景如图 5-1 所示。

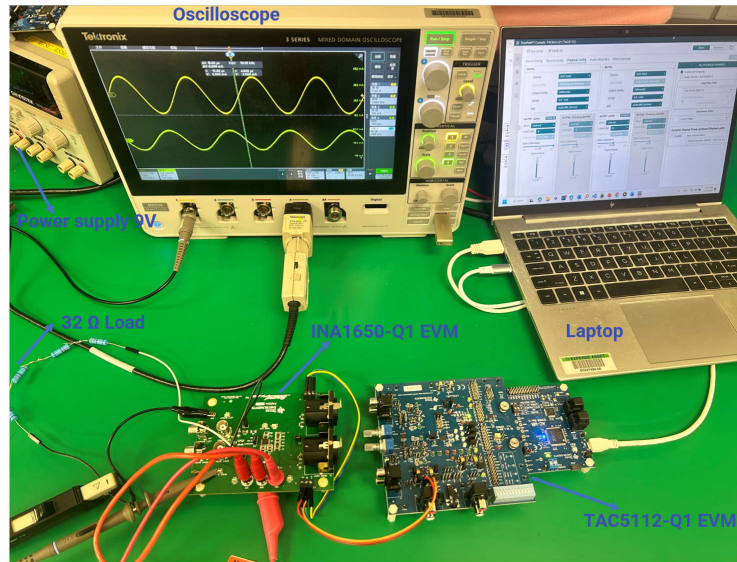


图 5-1. 实验测试原型

图 5-2 展示了 TAC5112-Q1 的差分输出波形、INA1650-Q1 执行差分至单端转换后的输出波形，以及驱动功率为 100mW 的 $32\ \Omega$ 负载时的负载电流波形。其中， V_{out} 的峰值间电压为 5.20V (1.84VRMS)， I_{out} 的峰值间电流为 172mA。请注意，所设计的高输出功率 Hi-Fi 耳机放大器的输出波形没有失真和衰减。

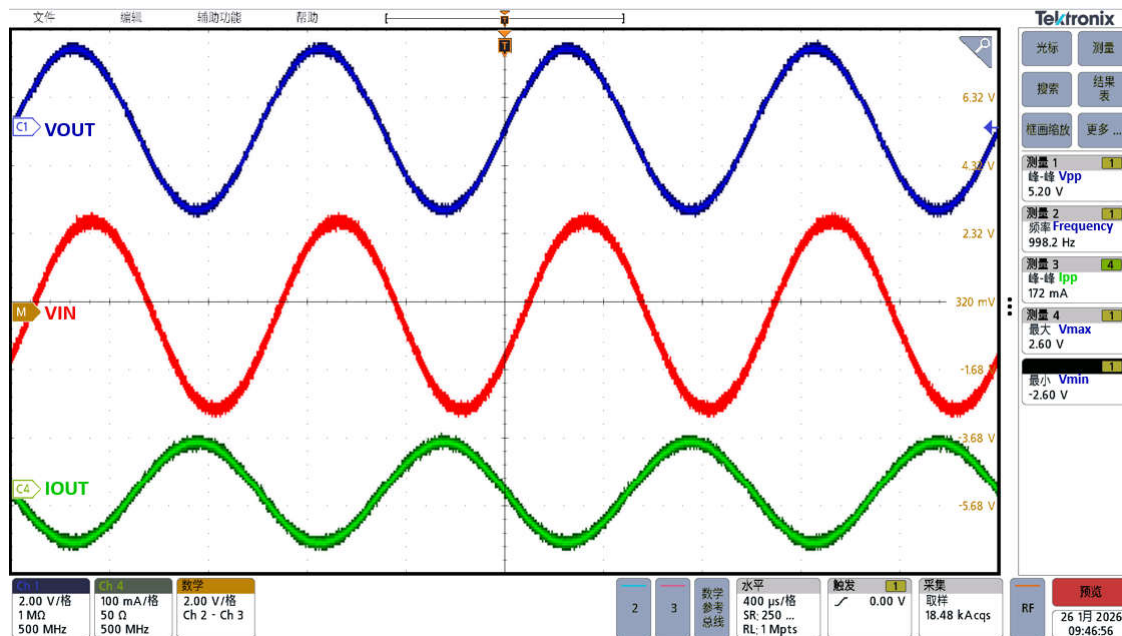


图 5-2. 动态波形测试

为了表征所设计的高输出功率 Hi-Fi 耳机放大器的音频性能，我们通过音频分析仪 (AP) 将振幅为 1.789Vrms 的 1kHz 正弦差分信号直接馈送到 INA1650-Q1。测试使用 $32\ \Omega$ 电阻负载进行，实验电路的构造如图 5-3 所示。

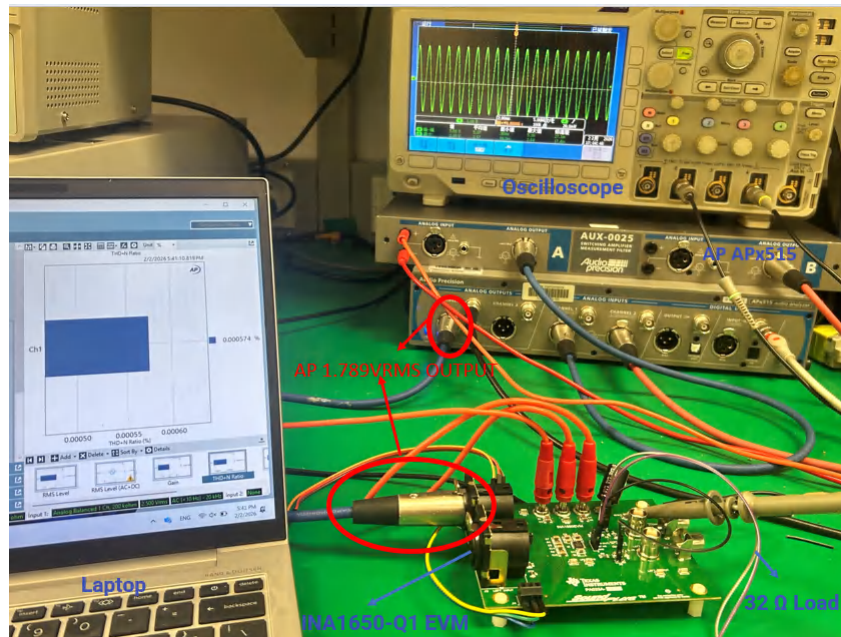


图 5-3. INA1650-Q1 THD+N 实验测试台

在输出功率为 100mW (对应于 32Ω 两端的 1.789VRMS) 时，基于 INA1650-Q1 的高输出功率 Hi-Fi 耳机放大器的测得总谐波失真加噪声 (THD+N) 为 0.000613%，如图 5-4 所示。实验结果与仿真结果高度吻合，完全符合 $THD+N < 0.001\%$ 的规范，适用于汽车 Hi-Fi 音频系统。

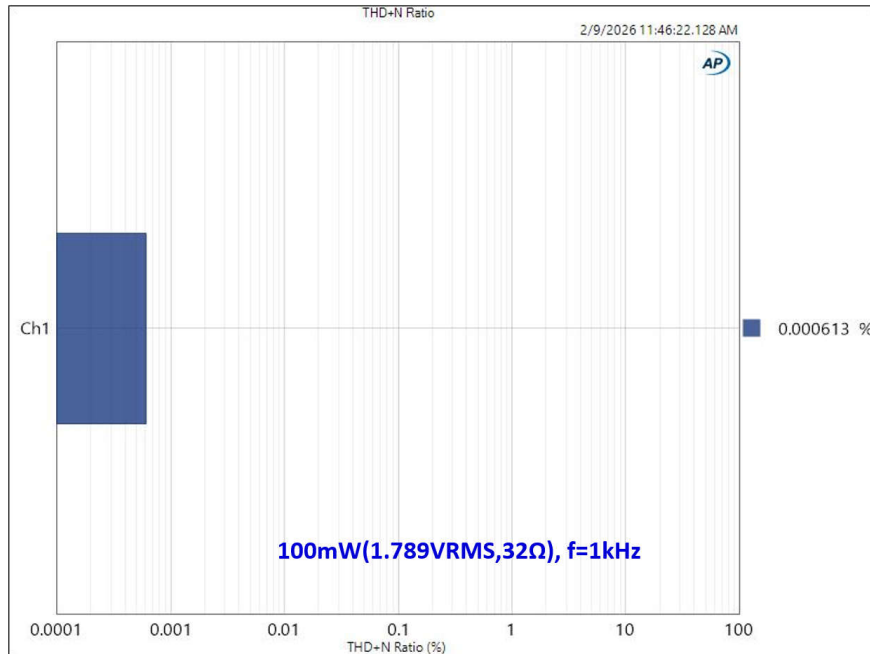


图 5-4. INA1650-Q1 100mW 输出 THD+N 测试结果

图 5-5 展示了不同输出 VRMS 值下的 THD+N 测试数据。当输出振幅超过 0.7VRMS 时，THD+N 结果均低于 0.001%。当输出振幅为 100mVRMS 或 500mVRMS 时，FFT 显示基频为 1kHz，而谐波位于运算放大器的本底噪声范围内且无法明显观察到，详见图 5-6。这表示曲线的噪声主导区域。随着输出振幅增加，谐波会增加并上升到高于运算放大器的本底噪声。1VRMS 和 1.789VRMS 的输出振幅 FFT 图清楚地显示了这些谐波，如图 5-7 所示。

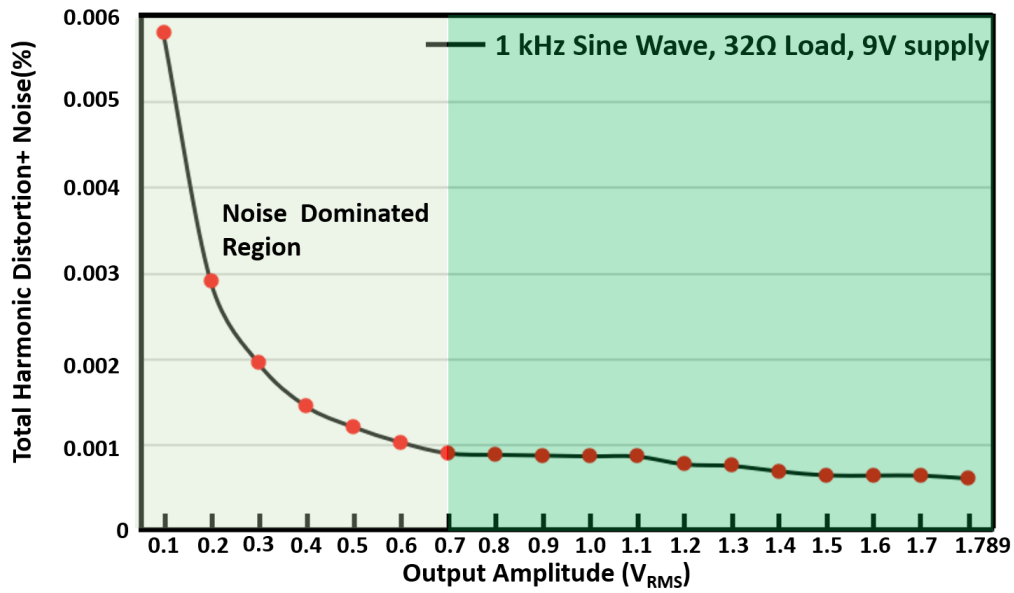


图 5-5. 不同输出 VRMS 值下的 THD+N 测试数据

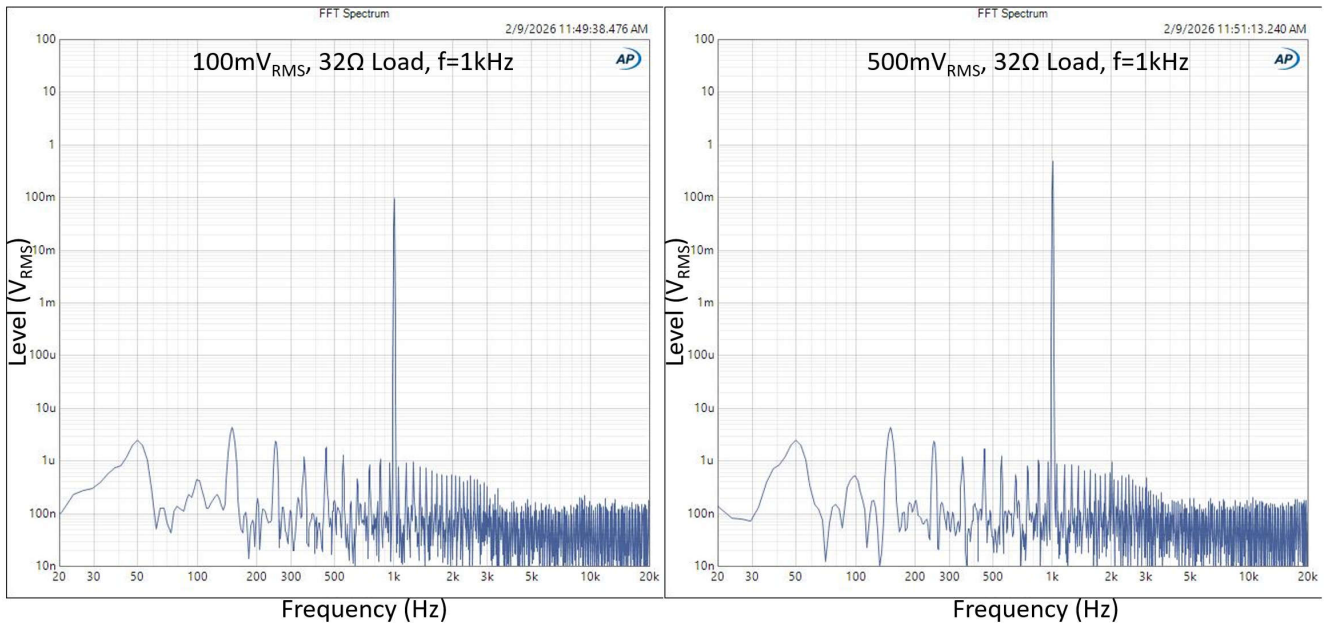


图 5-6. 噪声主导区域 FFT 测试波形

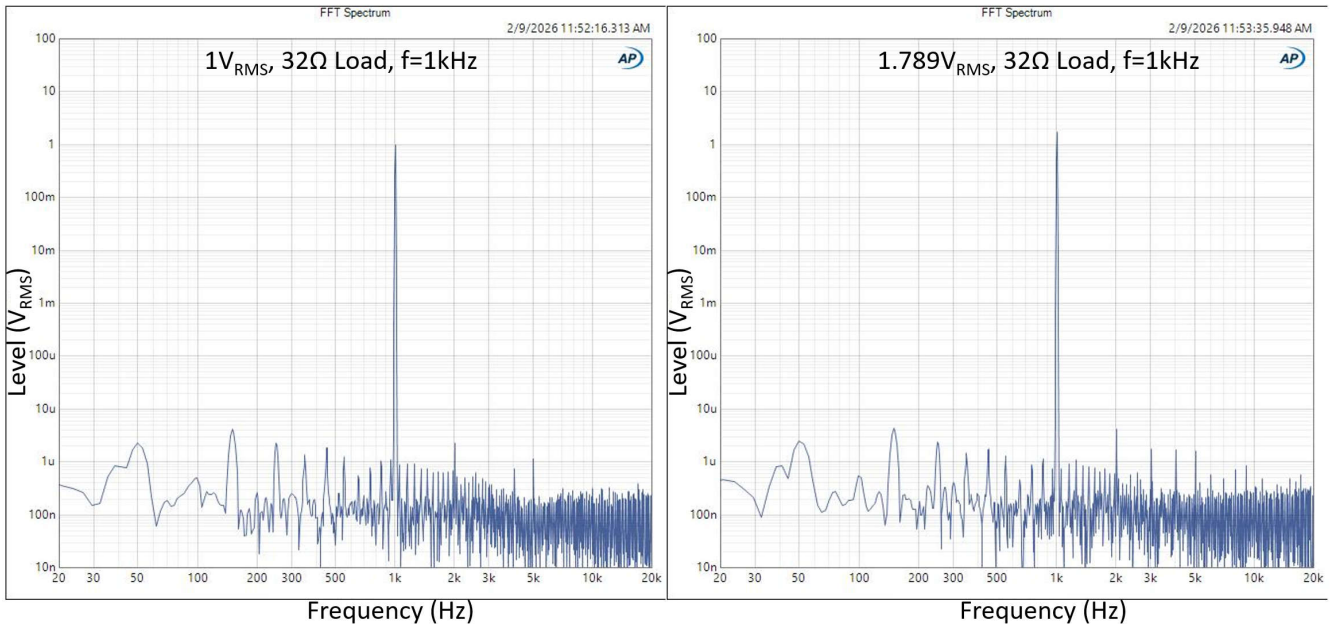


图 5-7. VRMS 输出和 1.789V VRMS 输出的 FFT 测试结果

为了实现更大的输出电压振幅，同时避免 INA1650-Q1 出现失真主导区域，必须首先提供足够的电源电压。电源电压不足会导致输出削波，进而导致谐波快速增加。可使用图 5-8 中所示的输出特性验证 INA1650-Q1 是否在线性区域内运行。本应用手册使用 9V 单电源配置。

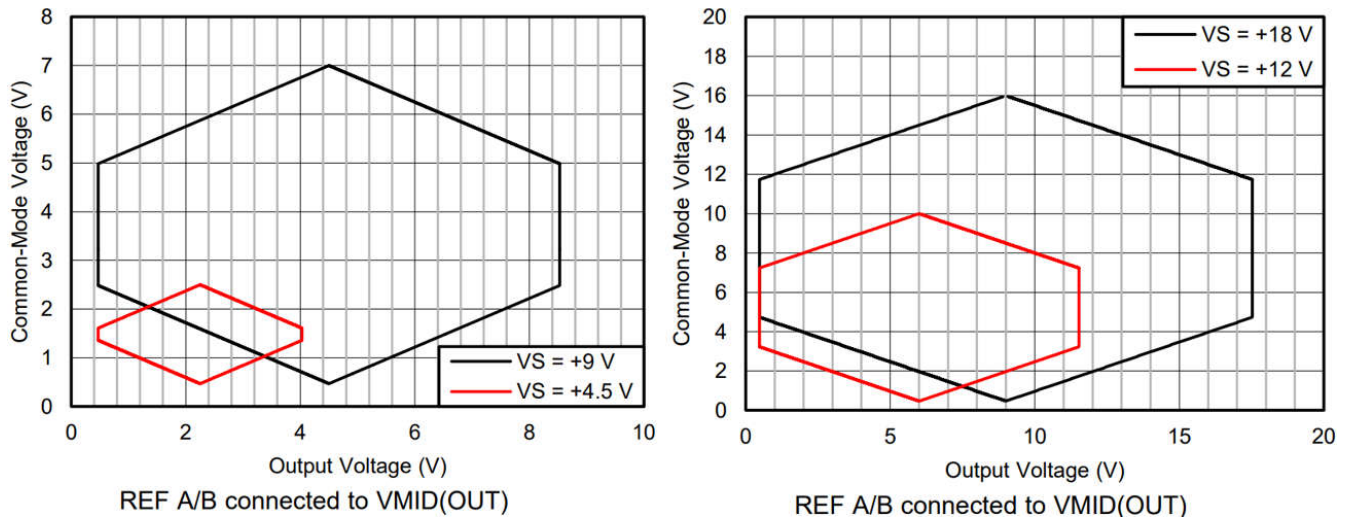


图 5-8. INA1650-Q1 输入共模电压与输出电压特性间的关系

热性能测试显示了 INA1650-Q1 在驱动 100mW 负载时的热性能，温升仅为 14.4°C (36.1°C - 21.7°C)。实验测试得出的结论是，即使在 85°C 的环境温度下，INA1650-Q1 仍然可以正常驱动 100mW 负载，而不会对音频性能产生重大影响。



图 5-9. 热性能测试

6 总结

本应用手册介绍了一款采用 **INA1650-Q1** 的汽车高输出功率 **Hi-Fi** 耳机放大器设计。该设计符合严格的汽车要求： $< 12\text{V}$ 单电源， $\text{THD+N} < 0.001\%$ ，输出功率为 100mW 。双通道并联结构可增大输出电流，以驱动 $32\ \Omega$ 耳机。借助集成缓冲器、精密电阻器和 **EMI** 滤波器，该设计可实现出色的音频性能。测量结果表明 **THD+N** 为 0.000613% ($32\ \Omega$ 、 100mW)，证明具有低失真和高输出能力。仿真和测试结果均证实具备稳健的高功率运行能力，为汽车信息娱乐音频设计提供了实用参考。

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [TAC5112-Q1 具有 105dB 动态范围 ADC 和 114dB 动态范围 DAC 的汽车低功耗立体声音频编解码器数据表 \(版本 A\)](#), 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [INA165x-Q1 SoundPlus™ 高共模抑制线路接收器数据表 \(版本 C\)](#), 数据表。
3. 德州仪器 (TI), [适用于电流输出音频 DAC 的高功率、高保真耳机放大器参考设计 \(修订版 C\)](#), 参考设计。
4. 德州仪器 (TI), [如何测量运算放大器的总谐波失真及 THD+N 基本原理](#), 应用手册。

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月