

Application Note

TAS6x84-Q1 LC 滤波器选型指南



Derek Gong, Ronan Liu

摘要

TI 的数字输入汽车 D 类音频放大器 TAS6x84-Q1 支持 384kHz、480kHz 和高达 2MHz 的开关频率。放大器的输出端需要使用一个 LC 滤波器来消除基本开关频率噪声。正确选择 LC 滤波器的元件对于满足终端应用所需的音频性能、效率、EMC 要求和成本来说至关重要。本应用报告作为指南，可帮助选择适用于 TAS6x84-Q1 的 LC 滤波器，从而实现终端系统的设计目标。

内容

1 简介.....	3
2 LC 滤波器配置.....	5
3 音频性能.....	9
3.1 电感器性能指南.....	9
3.2 电容器选型.....	15
4 总结.....	16
5 参考资料.....	16
A 增益补偿双二阶滤波器.....	17

插图清单

图 1-1. BD 和 1SPW 模式的 LC 滤波器 (显示了一半的电路).....	3
图 1-2. PVDD/2 共模电压.....	3
图 1-3. PWM 电压波形.....	3
图 1-4. 电感器电压和电流.....	4
图 1-5. TAS6x84-Q1 典型 LC 滤波器电路 (显示了一半的电路).....	4
图 2-1. LC 滤波器的频率响应 - 4 Ω 负载.....	5
图 2-2. 使用 10 μ H/1 μ F + 1 μ H/0.22 μ F 电感器时的 LC 滤波器响应.....	6
图 2-3. 使用 10 μ H/1 μ F + 1 μ H/0.22 μ F - 2 Ω , 24V PVDD 时的 LC 滤波器响应.....	7
图 2-4. 使用 10 μ H + 0.22 μ F - 8 Ω , 45V PVDD 时的 LC 滤波器响应.....	7
图 2-5. 效率与输出功率间的关系 - 8 Ω , PVDD.....	8
图 2-6. 效率与输出功率间的关系 - 4 Ω , PVDD.....	8
图 3-1. THD 与频率间的关系 - 2 Ω , 24V PVDD.....	10
图 3-2. THD 与频率间的关系 - 4 Ω , 35V PVDD.....	10
图 3-3. THD 与频率间的关系 - 4 Ω , 45V PVDD.....	11
图 3-4. THD 与频率间的关系 - 8 Ω , 35V PVDD.....	11
图 3-5. THD 与频率间的关系 - 8 Ω , 45V PVDD.....	12
图 3-6. THD 与功率间的关系 - 2 Ω , 24V PVDD.....	12
图 3-7. THD 与功率间的关系 - 4 Ω , 24V PVDD.....	13
图 3-8. THD 与功率间的关系 - 4 Ω , 35V PVDD.....	13
图 3-9. THD 与功率间的关系 - 4 Ω , 45V PVDD.....	14
图 3-10. THD 与功率间的关系 - 8 Ω , 35V PVDD.....	14
图 3-11. THD 与功率间的关系 - 8 Ω , 45V PVDD.....	15
图 A-1. TAS6584-Q1 GUI 音频处理窗口.....	17
图 A-2. TAS6584-Q1 GUI 增益补偿双二阶滤波器页面 - 2 Ω	18
图 A-3. TAS6584-Q1 GUI I2C 监控器 - 2 Ω	18
图 A-4. TAS6584-Q1 GUI 增益补偿双二阶滤波器页面 - 8 Ω	19
图 A-5. TAS6584-Q1 GUI I2C 监控器 - 8 Ω	19

表格清单

表 2-1. LC 滤波器配置.....	5
表 3-1. 电感器规格.....	9
表 3-2. 电容器规格.....	15

1 简介

有关如何为 D 类放大器确定合适的 LC 滤波器，当前有几份应用手册（例如 [LC 滤波器设计](#) 和 [2.1MHz D 类放大器的电感器选型指南](#)）讨论了在确定输出 LC 滤波器配置、电感器值和电容器值时的注意事项。

TAS6x84-Q1 是一款高功率 D 类音频放大器，支持高达 45V 的电压和每通道至少 10A 的电流，并使用 BD 或 1SPW 模式调制。图 1-1 展示了 LC 滤波器单端等效电路。BD 和 1SPW 模式调制使用相同的 LC 滤波器配置。

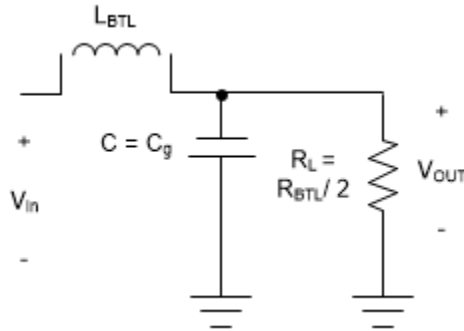


图 1-1. BD 和 1SPW 模式的 LC 滤波器 (显示了一半的电路)

电感器上的纹波电流定义为流经 D 类放大器输出电感器的交流电流。使用 LC 滤波器时，特别是当 LC 滤波器的截止频率相对于放大器的 PWM 开关频率降低时，纹波电流会减小，从而在 LC 滤波器之后仅存在很小的残余纹波电压。在 LC 滤波器设计中，通常希望降低纹波电流，以便降低输出 FET 的 $R_{DS(on)}$ 和输出电感器的 DCR 上的功率损耗，以及减少 EMC 辐射干扰。

纹波电流在总待机电流中的占比最大。图 1-2 显示，在 BD 调制模式下，D 类放大器在 LC 滤波器处于空闲状态时产生 $PVDD/2$ 的共模电压，这是 50% 占空比 PWM 开关波形的平均值（请参阅图 1-3）。

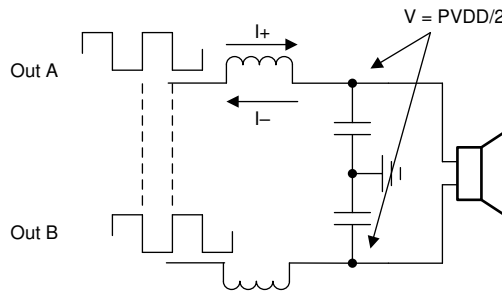


图 1-2. PVDD/2 共模电压

因此，当 PWM 电压达到 $PVDD/2$ 时，输出电感器两端的电压会改变极性。电感器两端的最大电压为 $PVDD/2$ ，最小电压为 $-PVDD/2$ 。

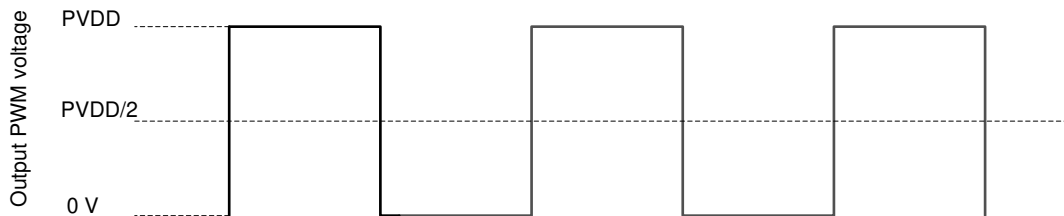


图 1-3. PWM 电压波形

图 1-4 展示了使用这些参数绘制的电感器电压和电流波形。

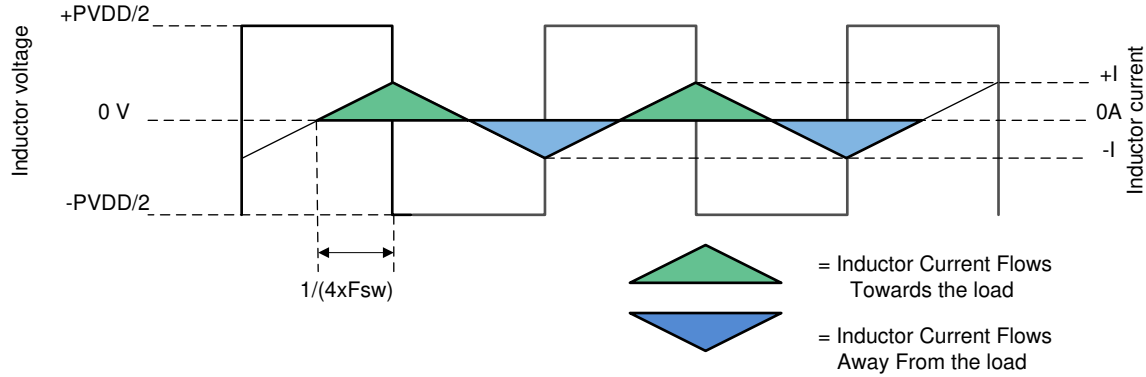


图 1-4. 电感器电压和电流

空闲时，流经电感器的正负电流必须对称，因此以零为中心。否则，扬声器会产生直流偏置，并且会有恒定的平均电流流过负载。图 1-4 中的阴影区域表示电流的方向。

使用图 1-4 可以计算空闲时的峰值纹波电流。

$$I_{\text{Ripple, Peak}} = \frac{PVDD/2}{L} \delta t$$

$$I_{\text{Ripple, Peak}} = \frac{PVDD}{2 \times L} \times \frac{1}{4 \times f_{\text{PWM}}}$$

$$I_{\text{Ripple, Peak}} = \frac{PVDD}{8 \times L \times f_{\text{PWM}}} \tag{1}$$

其中

- L = 电感器值
- f_{PWM} = PWM 开关频率

随着电源电压增大，峰值纹波电流也会增大。考虑增加电感来减小输出纹波电流。在高电压应用中，请使用四阶滤波器配置以提高 EMC 性能。图 1-5 是典型的 TAS6x84 LC 滤波器配置，可覆盖所有电压应用。

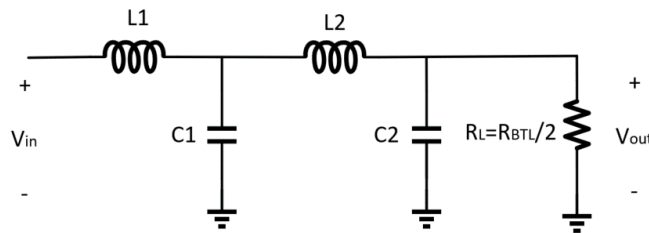


图 1-5. TAS6x84-Q1 典型 LC 滤波器电路 (显示了一半的电路)

2 LC 滤波器配置

根据临界阻尼、平坦通带和相位响应来选择 LC 滤波器值。为 LC 滤波器选择元件时，截止频率和 Q 因子或阻尼比是需要考虑的两个因素。LC 滤波器的截止频率和电感器值取决于放大器开关频率，所以要降低纹波电流，使 LC 滤波器之后只有很小的残余纹波电压。TAS6x84-Q1 支持 384kHz、480kHz 和高达 2MHz 的高开关频率。根据 [LC 滤波器设计](#) 应用手册中的计算结果找到典型的电感器和电容器值。384kHz 或 480kHz 开关频率通常使用 10 μ H 电感器，而 2MHz 开关频率设计可以使用 3.3 μ H 范围内小得多且重量更轻的电感器。但是，LC 滤波器配置也会根据电源电压和终端系统 EMC 规格进行调整。对于高压电源应用和特殊 EMC 条件，使用四阶滤波器配置和更高的电感。表 2-1 提供了 LC 滤波器的快速选择指南。

表 2-1. LC 滤波器配置

EMC 条件	开关频率	LC 滤波器配置				截止频率, 4 Ω 负载
		L1	C1	L2	C2	
支持 H 类, 或 $\leq 24V$ 电源应用	384kHz、480kHz	10 μ H	2.2 μ F	无	无	41.82kHz
在基频下具有高限制		15 μ H	2.2 μ F	无	无	29.79kHz
标准配置		10 μ H	1 μ F	1 μ H	0.22 μ F	43.85kHz
在全频带具有高限制		10 μ H	1 μ F	3.3 μ H	1 μ F	38.93kHz
仅适用于 $\leq 24V$ 电源应用	2MHz	5.6 μ H	1 μ F	0.68 μ H	0.22 μ F	76.34kHz
仅适用于 14.4V 电池电源应用		3.3 μ H	1 μ F	0.68 μ H	0.22 μ F	113.19kHz

为电感器和电容器选择元件值时，LC 滤波器的频率响应至关重要。图 2-1 是具有 4 Ω 负载的 LC 滤波器配置的频率响应 (假设电感呈线性且直流电阻 (DCR) 为零)。表 2-1 给出了不同 LC 滤波器的截止频率。为 384kHz 或 480kHz 开关频率选择的电感值和电容值对 4 Ω 负载进行了优化，使用 10 μ H/1 μ F + 1 μ H/0.22 μ F LC 滤波器时会略微过阻尼，使用 10 μ H + 2.2 μ F LC 滤波器时会略微欠阻尼。而在 2MHz 开关频率下，使用 3.3 μ H/1 μ F + 0.68 μ H/0.22 μ F LC 滤波器时，响应略显过高，处于欠阻尼状态。

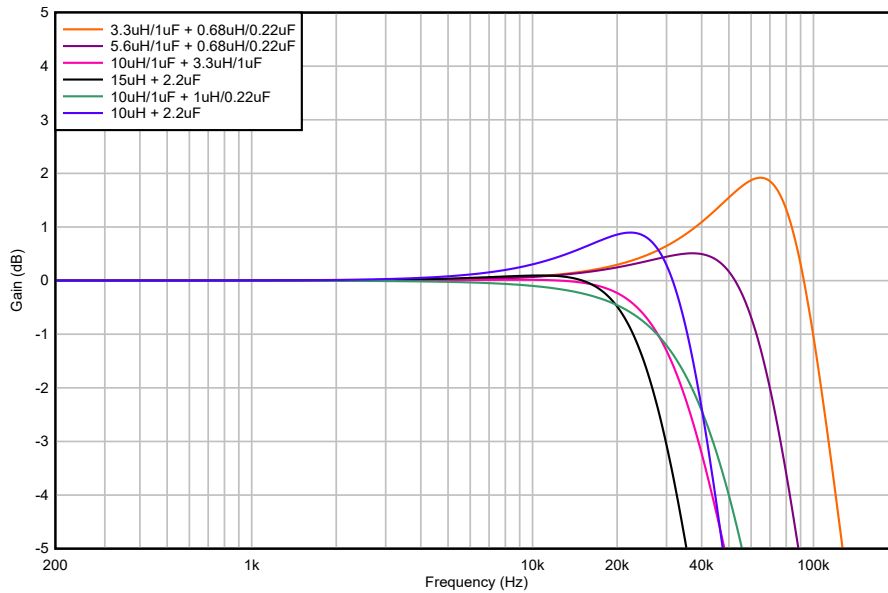


图 2-1. LC 滤波器的频率响应 - 4 Ω 负载

LC 滤波器响应也随着扬声器负载阻抗的变化而变化。负载阻抗决定了输出 LC 滤波器的阻尼比，分为过阻尼、临界阻尼或欠阻尼。图 1-1 显示了单端 LC 滤波器的公式：

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C}} \text{ Cutoff frequency of single-ended LC filter} \quad (2)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \text{ Conversion between radians and frequency in hertz} \quad (3)$$

$$Q = R_L \sqrt{\frac{C}{L}} \text{ Quality Factor } Q \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{1}{2Q} = \frac{1}{2 \times R_L \sqrt{\frac{C}{L}}} \text{ Damping Ratio} \quad (5)$$

根据上述计算结果，负载阻抗决定了输出 LC 滤波器的阻尼比。图 2-2 是所选 LC 滤波器 $10 \mu\text{H}/1 \mu\text{F} + 1 \mu\text{H}/0.22 \mu\text{F}$ 在不同扬声器负载下的频率响应。频率响应在 2Ω 负载下严重过阻尼，在 8Ω 负载下严重欠阻尼。在高频下，峰值通常对人耳来说非常刺耳，并且还会触发某些放大器的保护电路，例如过电流保护。但是，过阻尼滤波器会导致音频频带内的高频音频内容衰减。

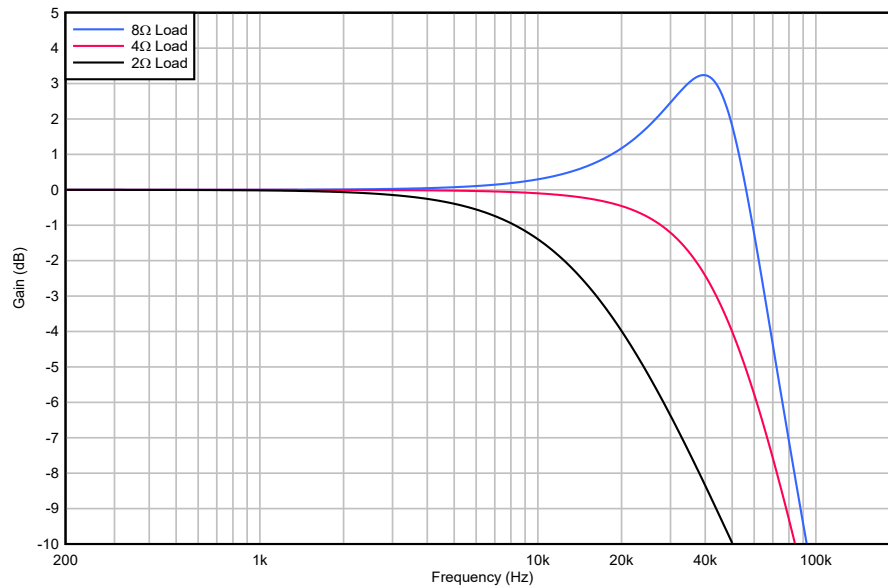


图 2-2. 使用 $10 \mu\text{H}/1 \mu\text{F} + 1 \mu\text{H}/0.22 \mu\text{F}$ 电感器时的 LC 滤波器响应

为了帮助补偿这种影响并实现平坦的响应，TAS6x84-Q1 提供了基于通道的集成增益补偿双二阶滤波器，这些双二阶滤波器可按通道进行配置，并默认处于禁用状态。为了实现所需的调节，需要将相应的系数写入 DSP 存储器。图 2-3 和图 2-4 展示了在相同负载下启用和未启用调优增益补偿双二阶滤波器时的频率响应差异。通过适当的均衡器设置启用集成补偿后，可获得平坦的响应。有关增益补偿双二阶滤波器调优指南，请参阅附录 A。

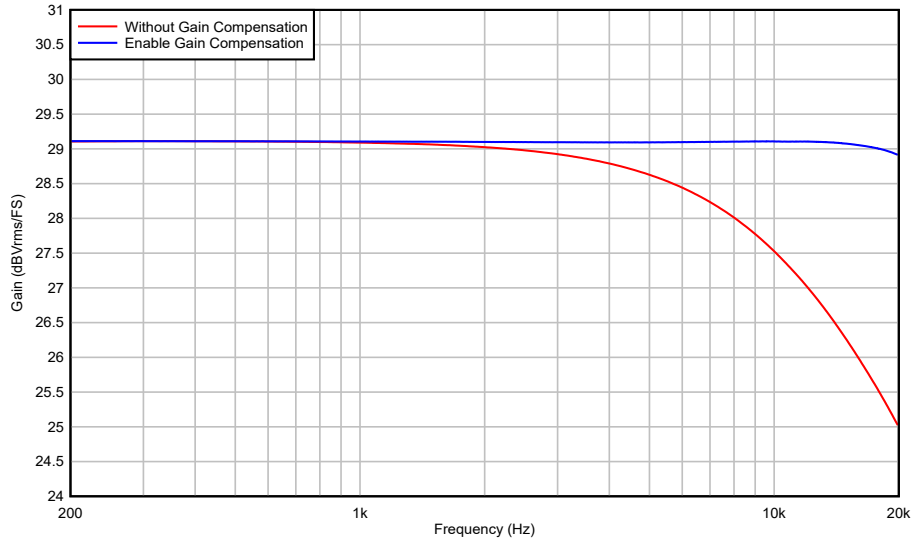


图 2-3. 使用 $10\ \mu\text{H}/1\ \mu\text{F} + 1\ \mu\text{H}/0.22\ \mu\text{F} - 2\ \Omega$ ，24V PVDD 时的 LC 滤波器响应

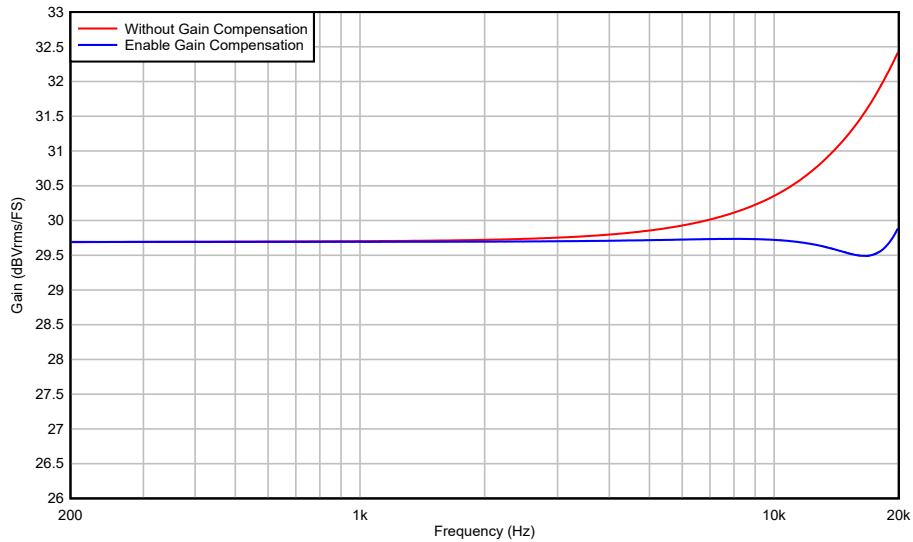


图 2-4. 使用 $10\ \mu\text{H} + 0.22\ \mu\text{F} - 8\ \Omega$ ，45V PVDD 时的 LC 滤波器响应

图 2-5 和图 2-6 展示了 TAS6584-Q1 在几种电源下的 2MHz 开关频率电源效率。高电源电压下的电源效率会带来较高的热要求，因此不建议在高电源电压应用中使用 2MHz 开关频率。在 2MHz 开关频率下，仅建议在 14.4V 电源应用中使用 3.3 μ H 电感器。由于电源电压增加，因此将电感增大至 5.6 μ H 可减小纹波电流。另外，为了满足终端系统 EMC 规格，建议在 2MHz 开关频率下采用四阶滤波器配置。当电源电压高于 24V 时，384kHz 或 480kHz 开关频率是更好的设计。本文档重点介绍 480kHz 开关频率应用中的 LC 滤波器性能，因为在相同电感下，480kHz 开关频率的纹波电流低于 384kHz 开关频率的纹波电流。

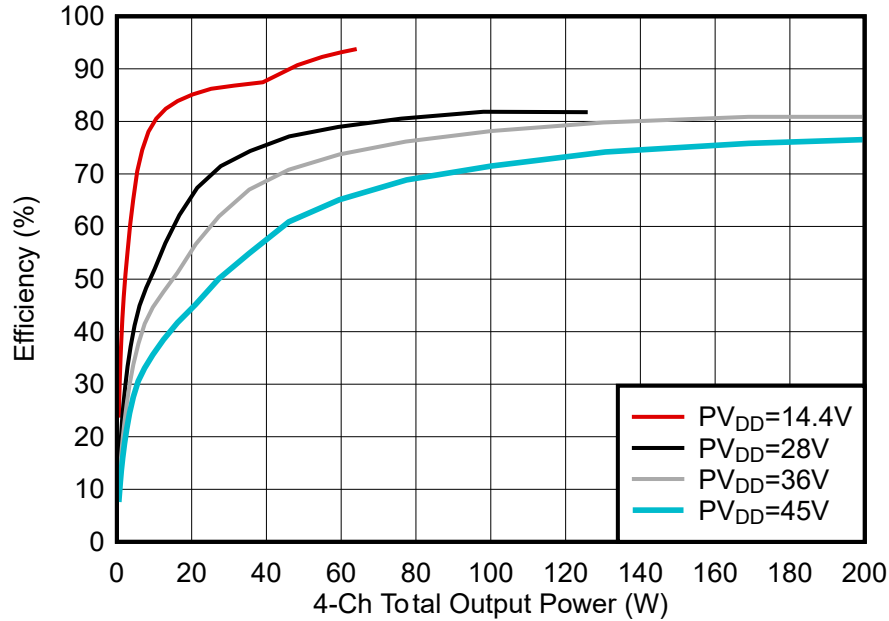


图 2-5. 效率与输出功率间的关系 - 8 Ω , PVDD

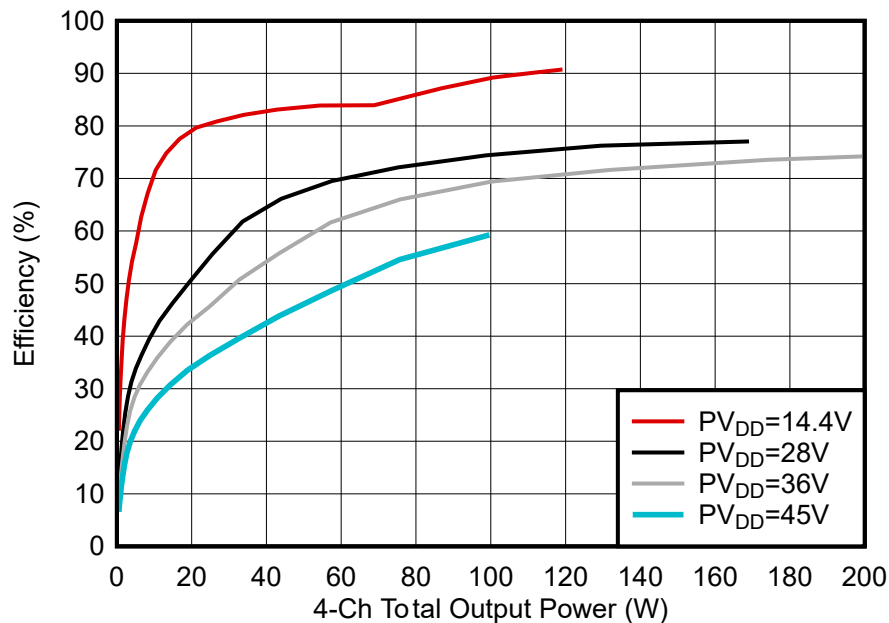


图 2-6. 效率与输出功率间的关系 - 4 Ω , PVDD

3 音频性能

LC 滤波器配置和元件选择会显著影响音频性能 THD + N、频率响应等。本节提供了从数据表中找到的数据以及测量的音频性能，从而说明各种 LC 滤波器元件的性能。

3.1 电感器性能指南

电感值、DCR、线性度和磁芯损耗对于音频性能至关重要。有关每个因素的详细影响，请参阅 [LC 滤波器设计](#) 和 [2.1MHz D 类放大器的电感器选型指南](#) 应用手册。通过参考数据表和测量电感器的 THD+N 来编制选择电感器指南，以便展示电感器性能。排名由设计目标决定。目标分为负载的输出功率、THD 和物理尺寸。

使用 TAS6584-Q1 器件典型应用执行了以下测试：采用 4 × BTL 输出配置，负载为 2 Ω、4 Ω 和 8 Ω。PWM 开关频率设置为 480kHz，PVDD 电源为 24V、35V 和 45V。表 3-1 列出了测试的电感器。创建了图表，根据总体电流处理能力以及在不同阻抗负载下的所有可配置 LC 滤波器配置，对接受测试的电感器进行了比较。

表 3-1. 电感器规格

器件型号	电感 (μH)	尺寸 长 × 宽 × 高 (mm)	L _{SAT} (A)	L _{TEMP} (A)	DCR (mΩ)
Chilisin AMDCDY1010J0100MA2	10	10 × 9.5 × 10.85	12	5.8	22
Chilisin AMDCDY1010J0150MA2	15	10 × 9.5 × 10.85	10	3.6	40
Cyntec VAMV1009AA-100MM2	10	10.2 × 9.2 × 10.85	12	5.8	18
Cyntec VAMV1009AA-150MM2	15	10.2 × 9.2 × 10.85	9	4.5	34
Cyntec VAMV08089A-100MM2	10	8.15 × 8.0 × 8.9	8	4	33
Coilmaster CMI-CMMPP8055H1-100M	10	8.6 × 8.1 × 5	10.5	7	45
Coilmaster CMI-TMMPB11120HL-150M	15	11 × 11 × 12.5	11	8.5	40
Coilmaster CMI-TMMPB09120HL-150M	15	9 × 11 × 12.5	10.5	8	45
Sagami DBE1316HH-100M	10	15 × 10 × 16	11.1	6.2	9
Sagami DLM1623M-100M	10	15 × 15.9 × 23	15	6.4	9
Sagami DLM1623M-150M	15	15 × 15.9 × 23	11	5.2	17.6
Sagami 7W14A-150M	15	15.5 × 14 × 16	8.4	5.2	14
Sunlord AMPR1009H-100MT	10	10.2 × 9.2 × 10.8	12	9	18
Murata DFE322520FD-1R0M=P2	1	3.2 × 2.5 × 2	7.5	4.1	22

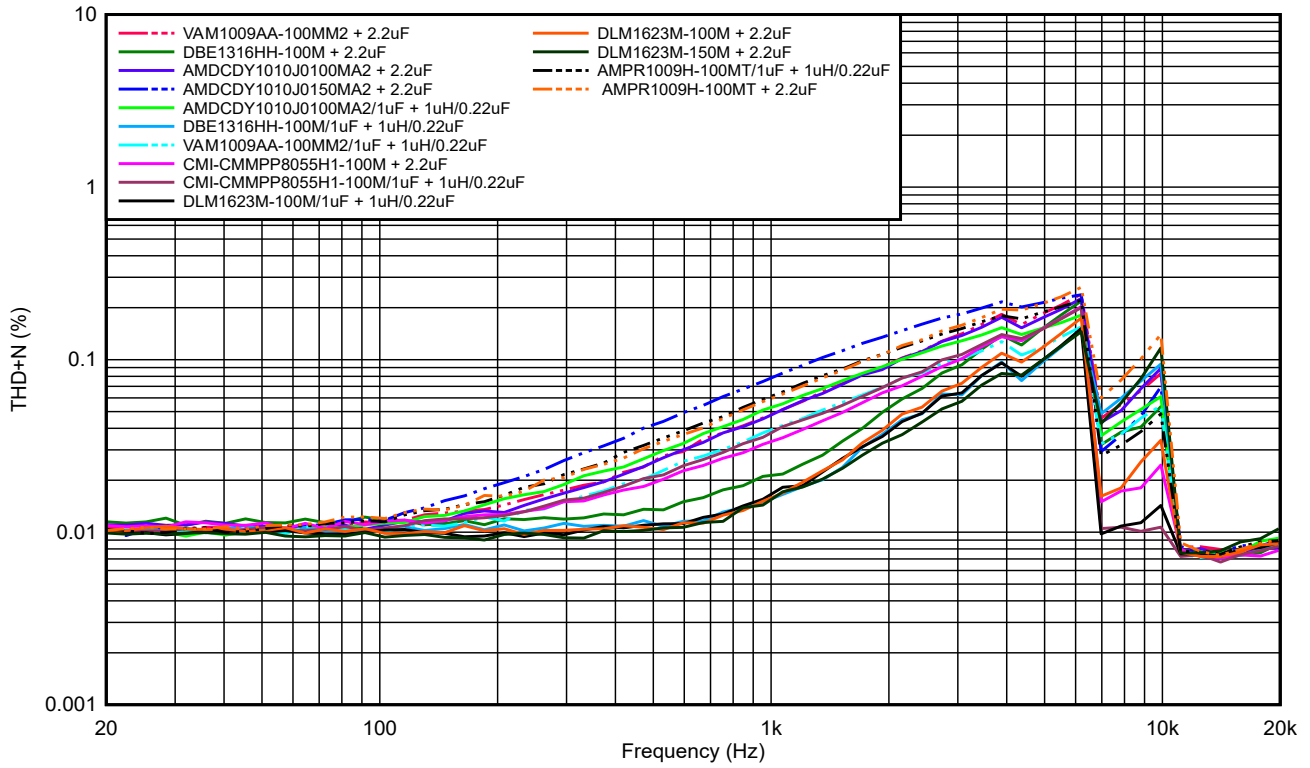


图 3-1. THD 与频率间的关系 - 2 Ω , 24V PVDD

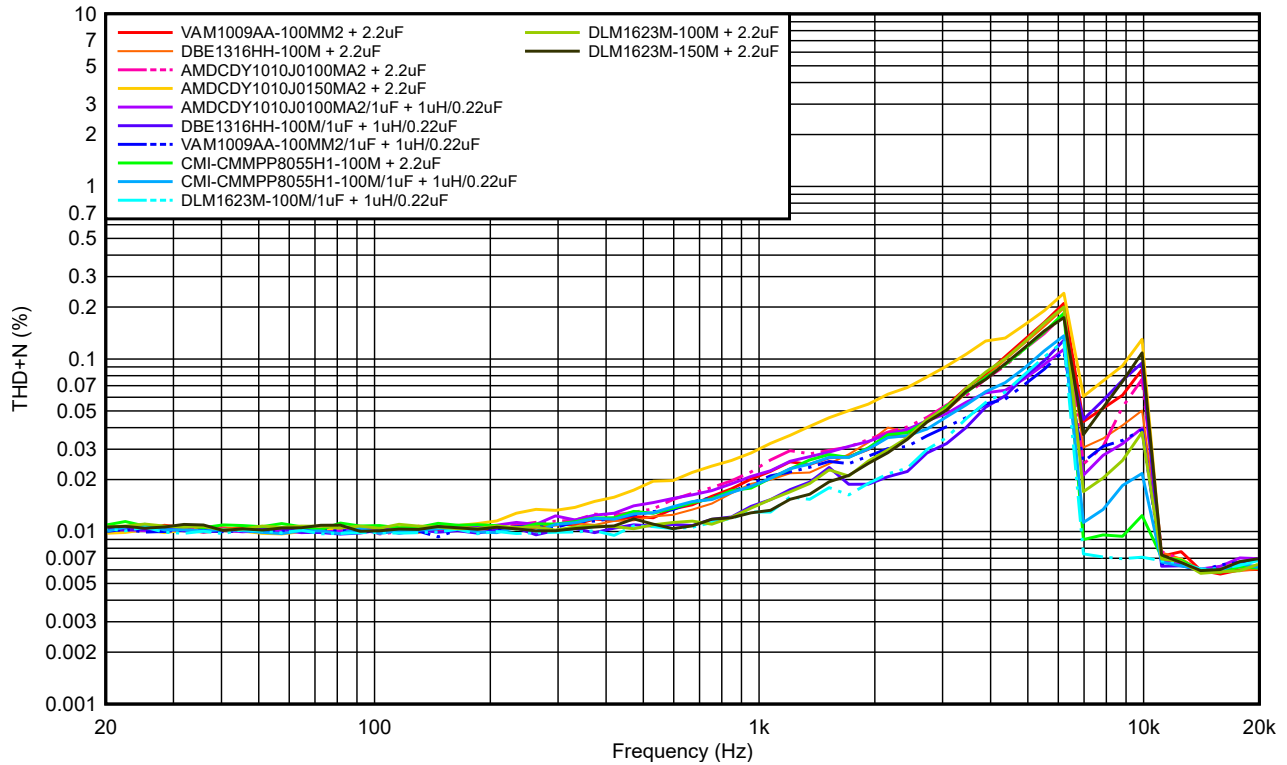


图 3-2. THD 与频率间的关系 - 4 Ω , 35V PVDD

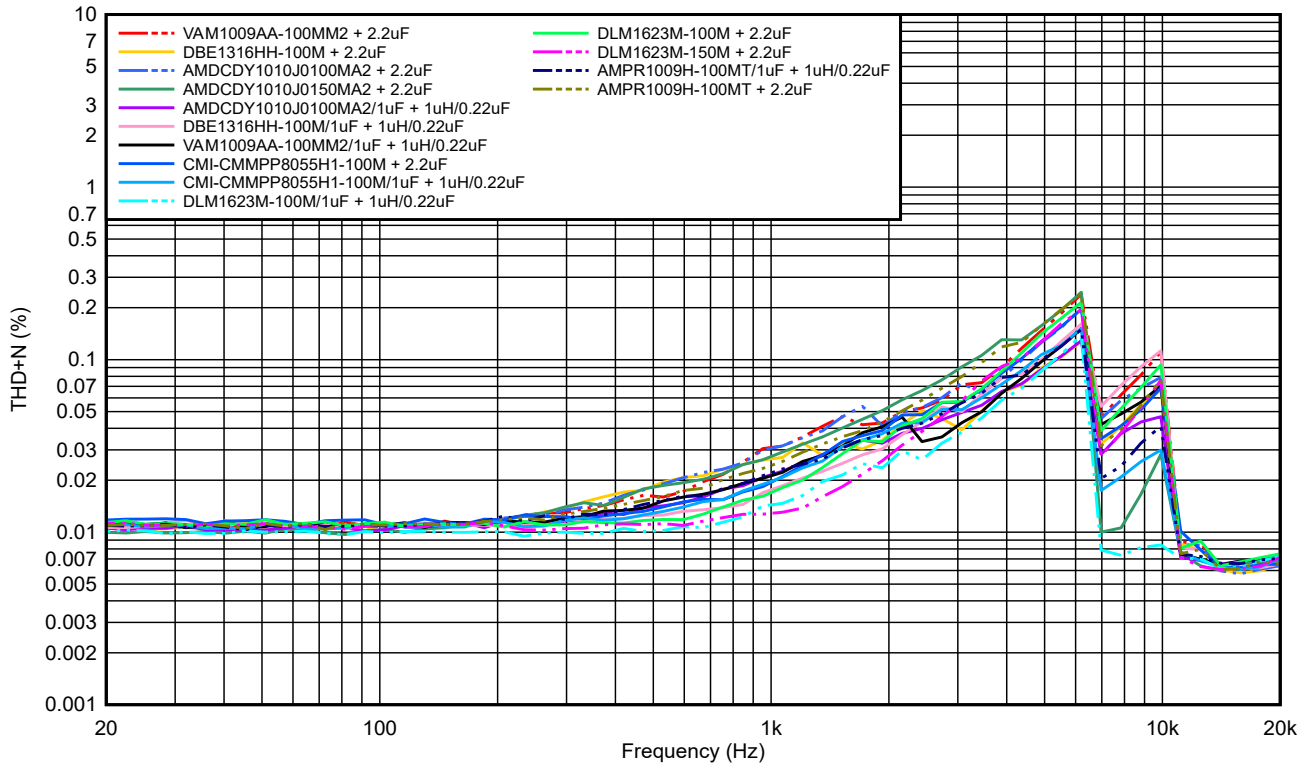


图 3-3. THD 与频率间的关系 - 4 Ω , 45V PVDD

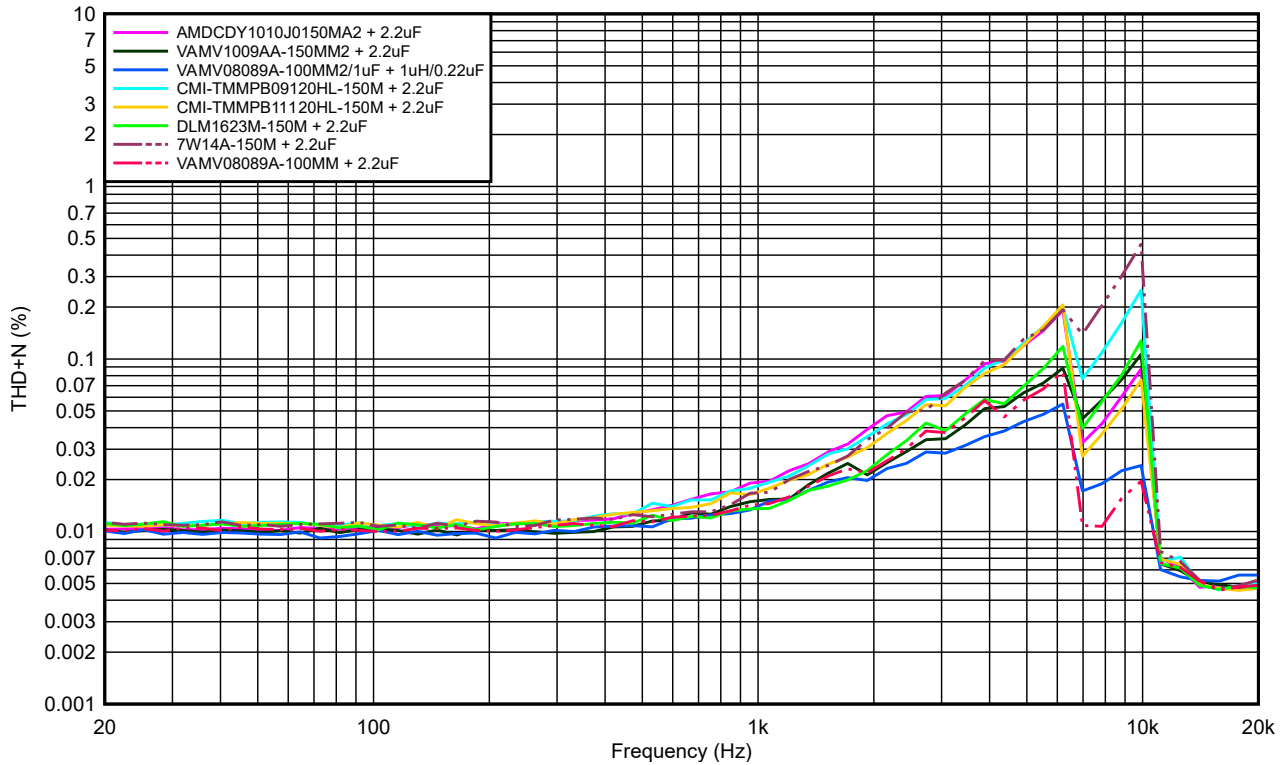


图 3-4. THD 与频率间的关系 - 8 Ω , 35V PVDD

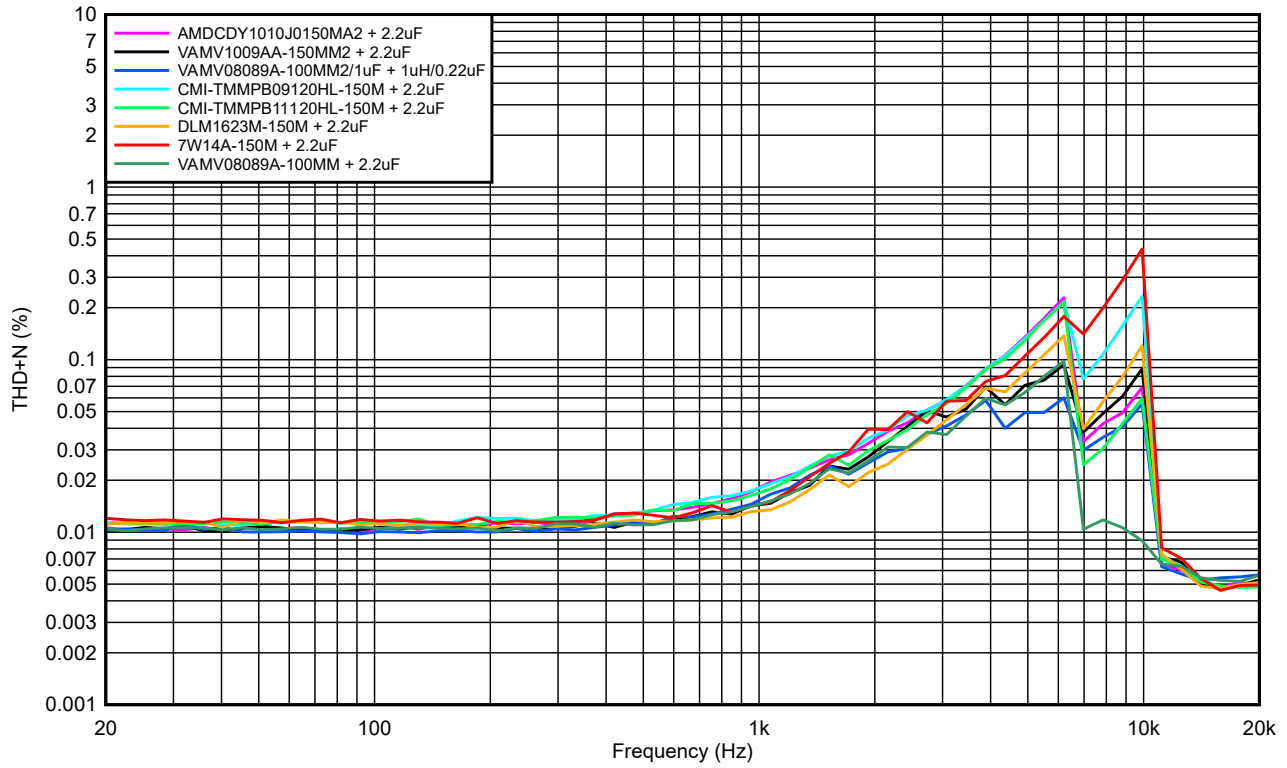


图 3-5. THD 与频率间的关系 - 8Ω , 45V PVDD

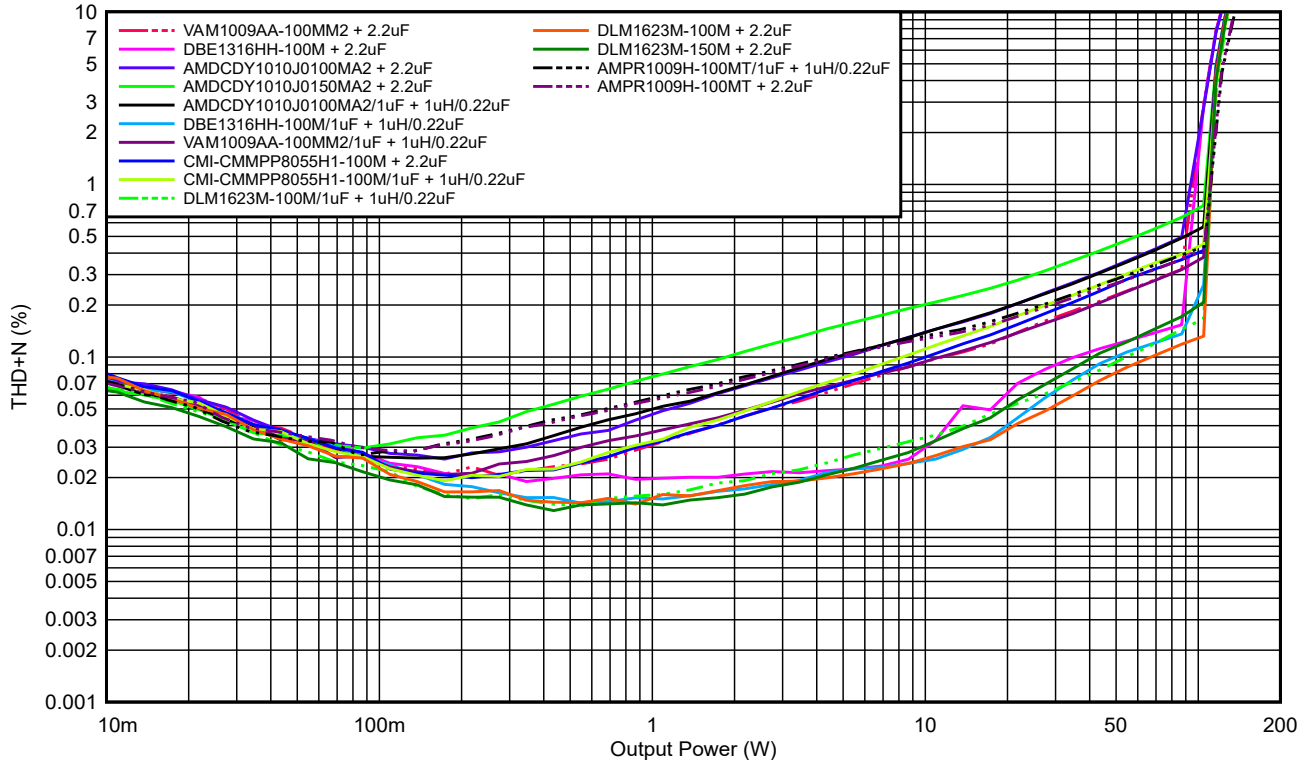


图 3-6. THD 与功率间的关系 - 2Ω , 24V PVDD

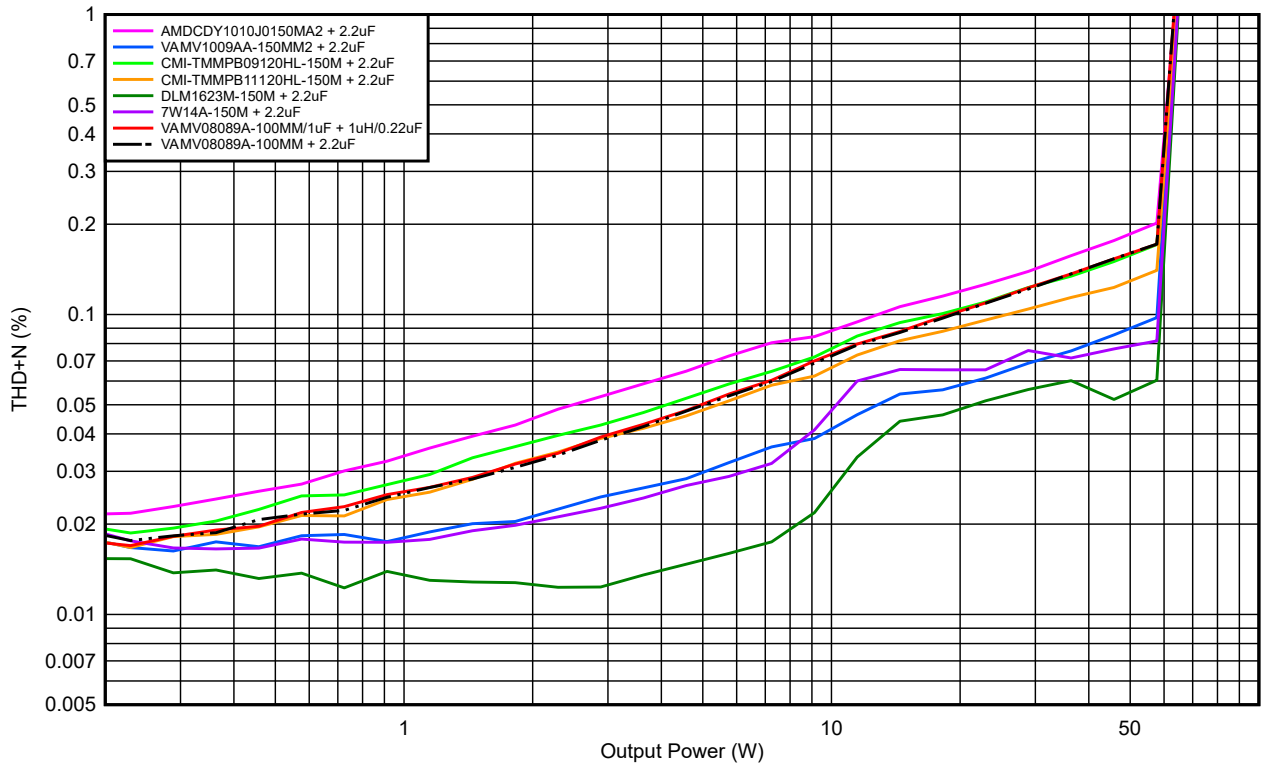


图 3-7. THD 与功率间的关系 - 4 Ω , 24V PVDD

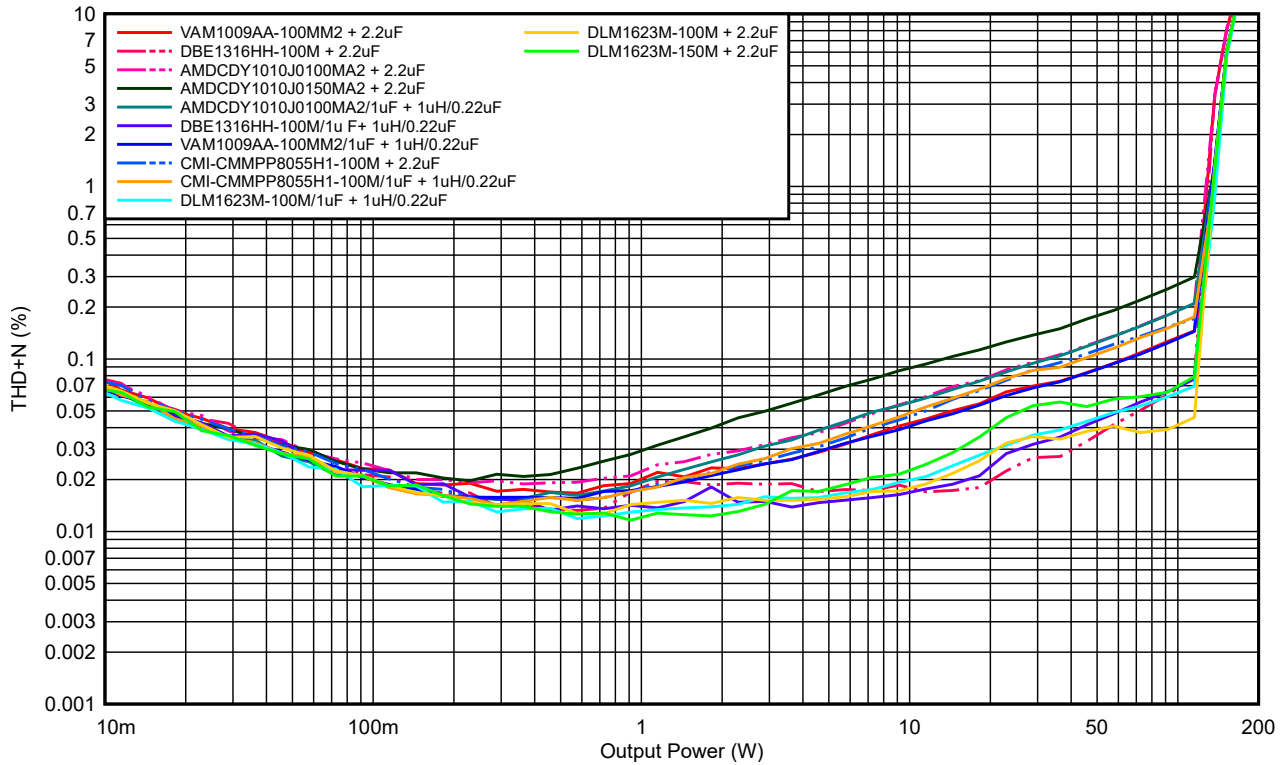


图 3-8. THD 与功率间的关系 - 4 Ω , 35V PVDD

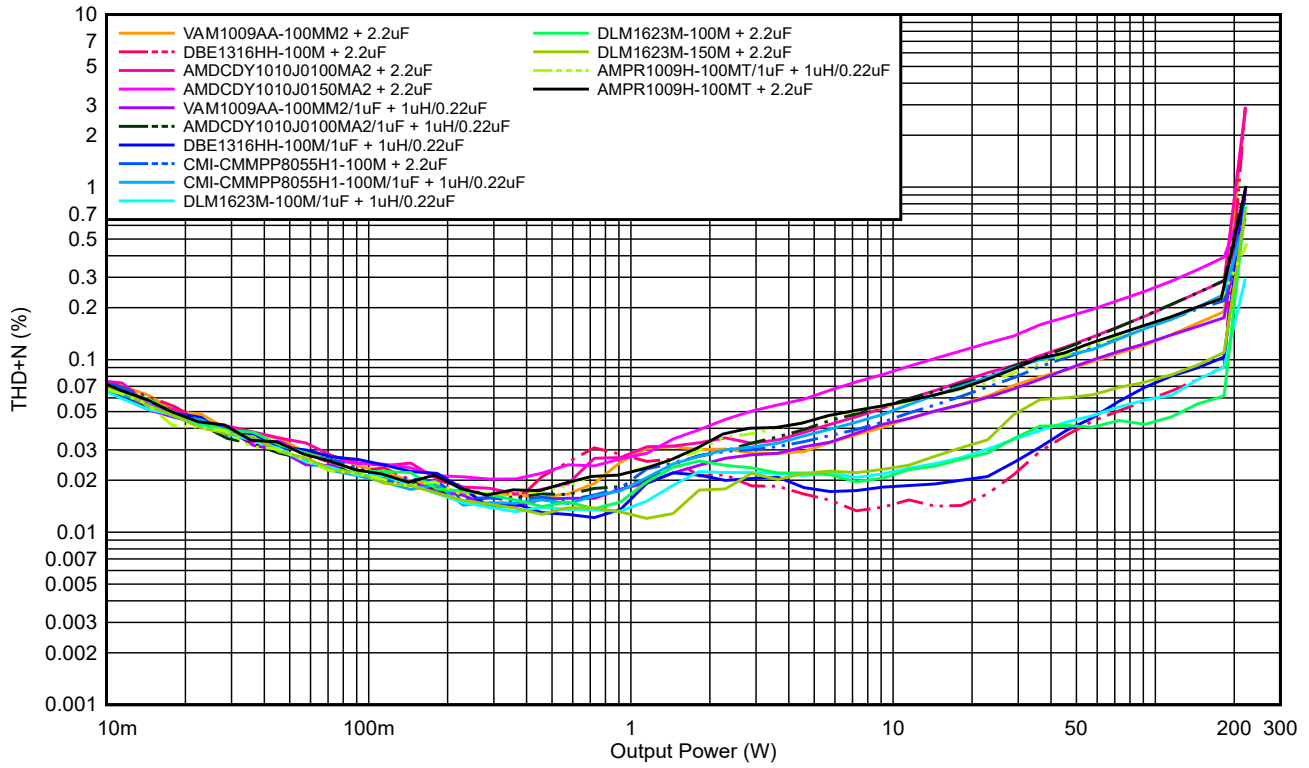


图 3-9. THD 与功率间的关系 - 4 Ω , 45V PVDD

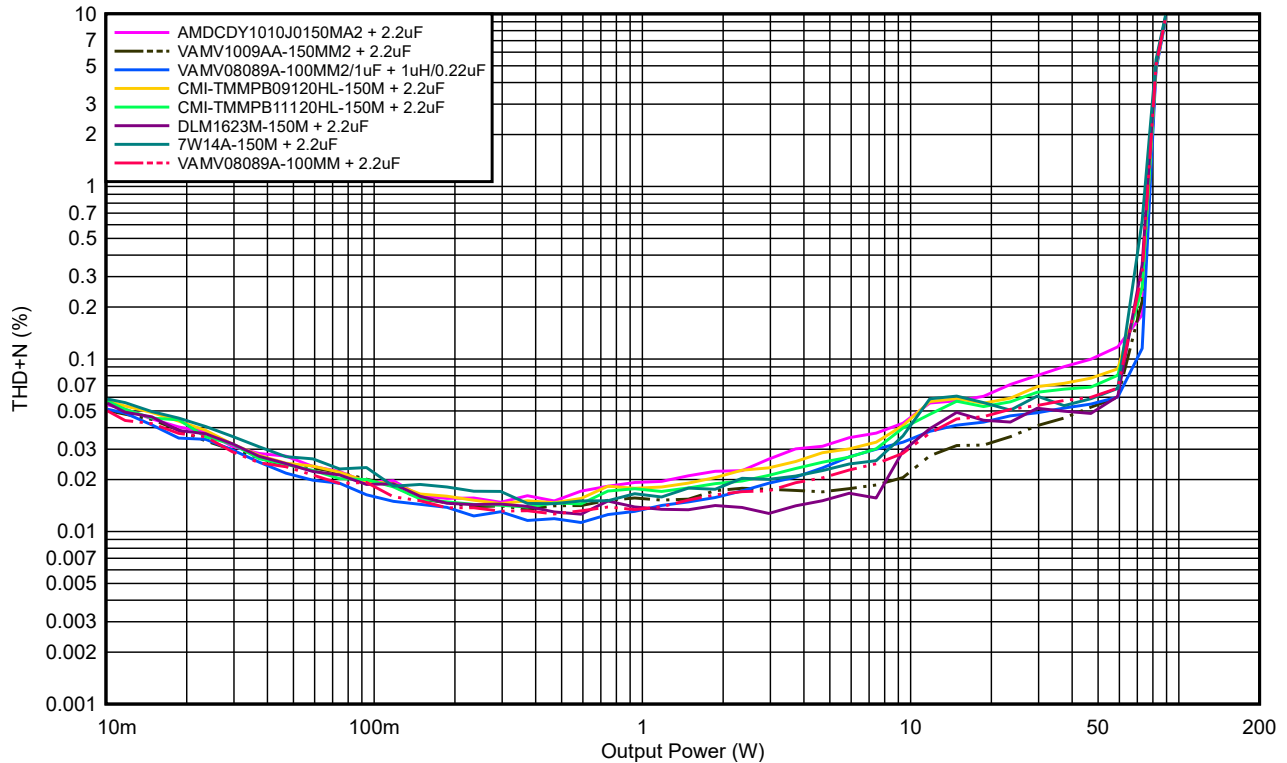


图 3-10. THD 与功率间的关系 - 8 Ω , 35V PVDD

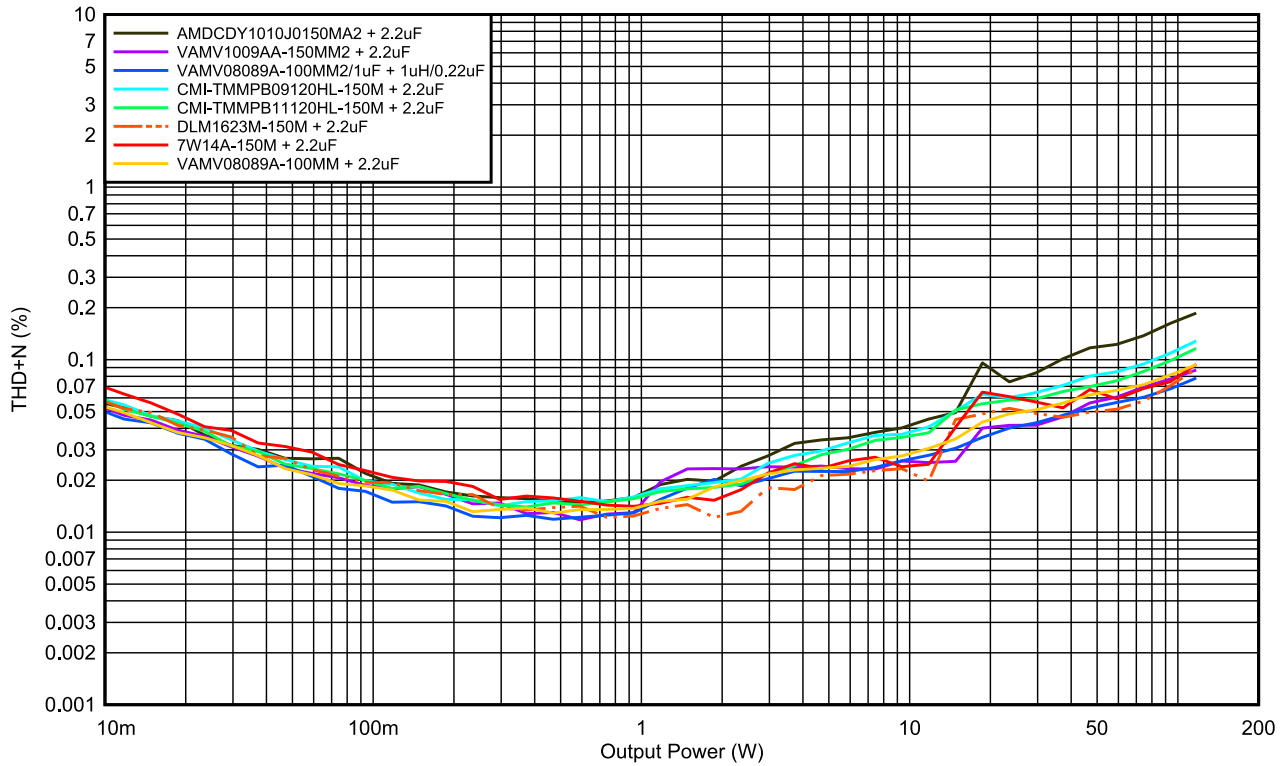


图 3-11. THD 与功率间的关系 - 8Ω, 45V PVDD

3.2 电容器选型

为了获得出色的音频性能，元件选择对于保持平坦的 LC 滤波器频率响应并更大幅度地减少失真至关重要。LC 滤波器设计应用手册的 [电容器注意事项](#) 部分详细说明了为高功率 D 类音频放大器应用选择电容器的关键参数和权衡因素。

由于多层陶瓷片式电容器 (MLCC) 尺寸小且成本低，因此已成为当今电子产品中使用的一些标准化元件。本指南测试数据选择了汽车用陶瓷电容器，这些电容器具有优化的主要参数，可更大幅度地降低对音频和 EMC 性能的影响。所选电容器具有足够的额定电压 (45V)、低 ESR 和合适的尺寸，可以更大幅度地减小直流偏置电压的影响。[表 3-2](#) 列出了在 LC 滤波器中使用并经过音频性能测试的电容器。为了在系统中安全地使用电容器，可向电容器制造商获取详细的额定值和规格。

表 3-2. 电容器规格

器件型号	电容	尺寸代码	额定电压	温度特性
GCJ31CC72A225KE01	2.2 μF	1206 (3216M)	100V	X7S (EIA)
GCJ31CR72A105KA01L	1 μF	1206 (3216M)	100V	X7S (EIA)
GCM21BR71H105KA03L	0.22 μF	0805 (2012M)	50V	X7R (EIA)

4 总结

LC 滤波器设计对于汽车 D 类音频放大器至关重要。根据开关频率、电源系统、散热、音频性能和终端系统 EMC 规格选择 LC 滤波器配置。根据使用不同电感器的 LC 滤波器配置研究的结果，可以明显看出电感器在音频性能中起着重要作用。电感值、DCR 和线性因素对整个系统的性能有影响，必须根据特定应用的设计目标进行考虑。

对于 TAS6x84-Q1 系列器件，四阶滤波器配置 $10\ \mu\text{H}/1\ \mu\text{F} + 1\ \mu\text{H}/0.22\ \mu\text{F}$ 是标准配置，由于具备较低的纹波电流和较高的电感而可以实现更好的音频性能。根据 TAS6584-Q1 器件测试数据，使用相同的 $10\ \mu\text{H}$ 器件型号电感器时， $10\ \mu\text{H}/1\ \mu\text{F} + 1\ \mu\text{H}/0.22\ \mu\text{F}$ LC 滤波器的音频性能优于 $10\ \mu\text{H} + 2.2\ \mu\text{F}$ 配置。

在高输出功率应用中还必须考虑 DCR。尽管 $10\ \mu\text{H}/1\ \mu\text{F} + 1\ \mu\text{H}/0.22\ \mu\text{F}$ 配置由于纹波电流较小而可以改善低输出功率情况下的功率耗散，但如果应用具有高 DCR，则高电流下的损耗会大于具有较高纹波电流的 $10\ \mu\text{H} + 2.2\ \mu\text{F}$ 配置。从 TAS6584-Q1 器件的测试数据可以看出，在相同的 LC 滤波器配置下，具有较低 DCR 的电感器的输出功率容量高于具有较高 DCR 的电感器。具有较低 DCR 的电感器在高输出功率下也具有更好的 THD + N 性能。

在不同的阻抗负载下，一些 LC 滤波器配置在高频时会使频率响应严重过阻尼或严重欠阻尼。除了 LC 滤波器调整外，调整 TAS6x84-Q1 系列内部增益补偿双二阶滤波器也有助于实现平坦的频率响应。附录 A 介绍了详细的调优指南。

可以通过电感器制造商获得电感值、处理电流和线性度的详细额定值和规格。实际电感值随电流增大而显著影响音频性能。电感值越高，音频性能就越好。在进行最终选择之前，请评估电感器的尺寸和价格。虽然电感器的价格不是这项研究的重点，但通常电感器越小，成本就越低。

5 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[“LC 滤波器设计”应用手册](#)
- 德州仪器 (TI)，[“2.1MHz D 类放大器的电感器选型指南”应用手册](#)

A 增益补偿双二阶滤波器

TAS6584-Q1 PPC3 GUI 软件提供了一种简单的方法来启用增益补偿双二阶滤波器 (BQ)，并可调整设置来优化平坦的 LC 滤波器频率响应。

点击 *Home* 窗口中的 *Audio Processing Options* 框，将 *Gain Compensation BQs* 切换为 *On* (请参阅图 A-1)。

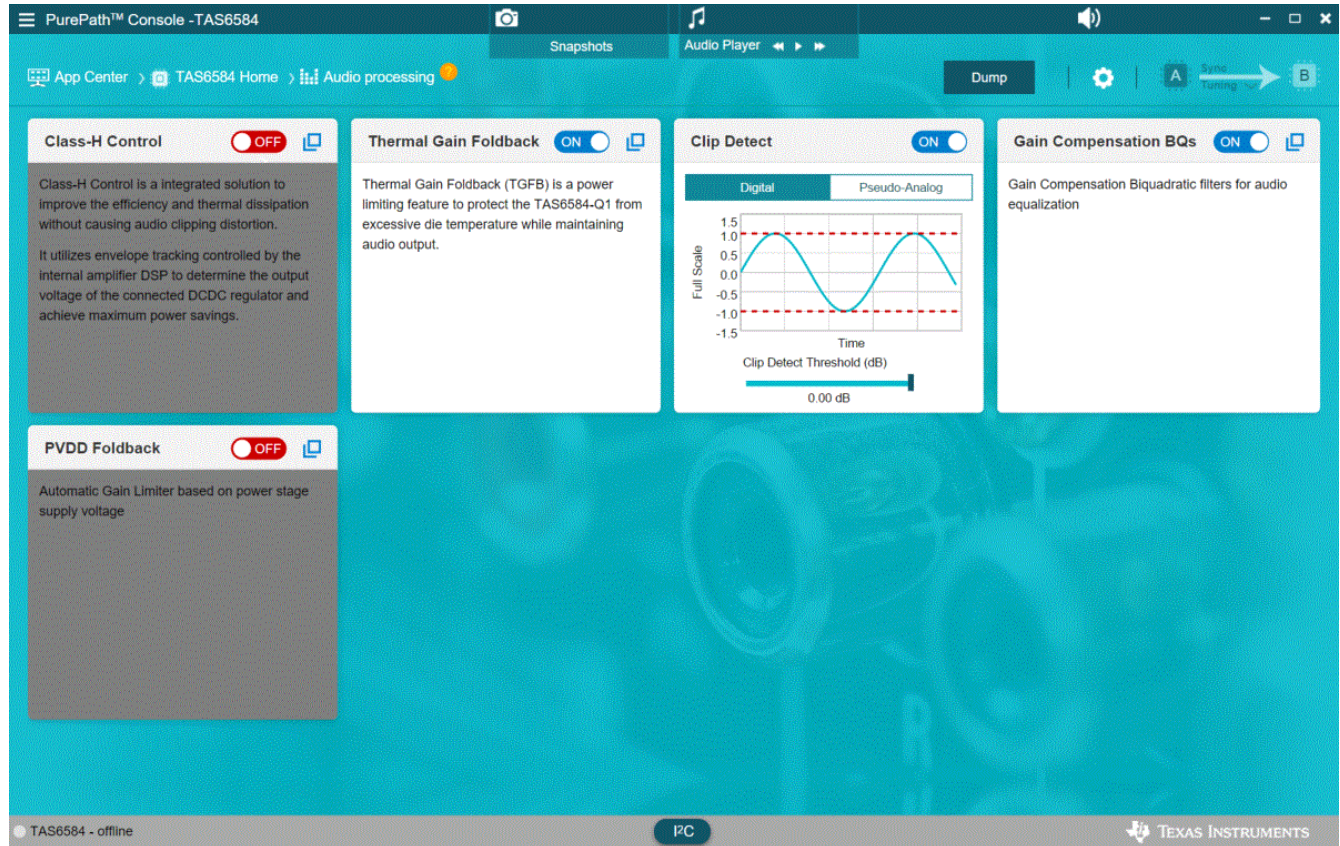


图 A-1. TAS6584-Q1 GUI 音频处理窗口

在 *Gain Compensation Biquads* 页面上，选择 *Combined* 选项时，所有通道均由相同的设置来控制。每个通道还可以通过 *Individual* 选项进行单独配置。点击通道的开关滑块上的 *ON* 可以打开均衡器进程 (Q 因子)。可以使用 *I2C Monitor* 窗口 (点击图 A-2 中下部的 I2C 按钮) 来记录均衡器的集成 DSP 寄存器设置。图 A-2 和图 A-3 是图 2-3 (2Ω 负载，使用 LC 滤波器 VAM1009AA-100MM/1 μ F + 1 μ H/0.22 μ F) 调优均衡器设置的示例。图 A-4 和图 A-5 是图 2-4 (8Ω 负载，使用 LC 滤波器 VAM1009AA-100MM + 2.2 μ F) 调优均衡器设置的示例。



图 A-2. TAS6584-Q1 GUI 增益补偿双二阶滤波器页面 - 2 Ω

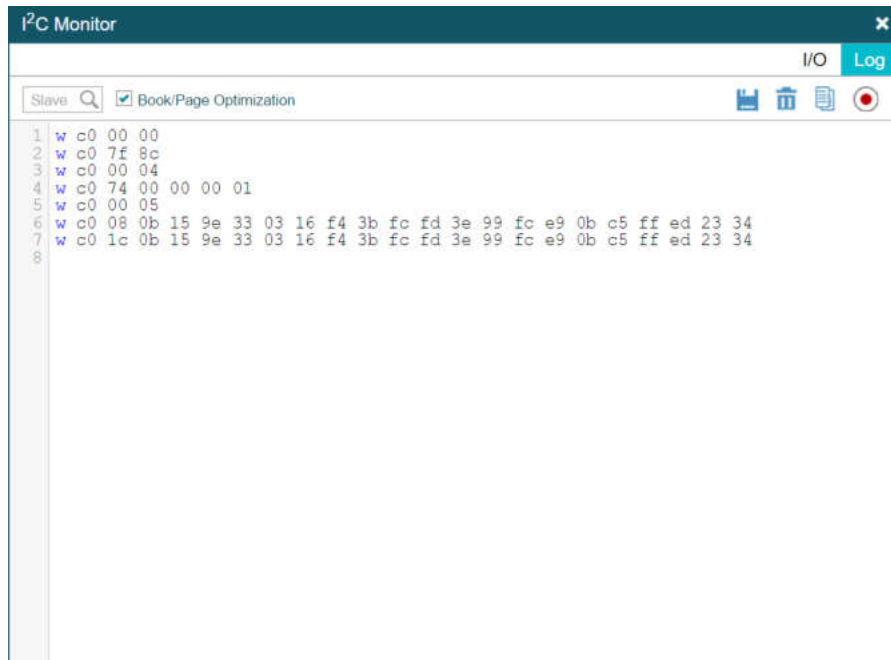


图 A-3. TAS6584-Q1 GUI I2C 监控器 - 2 Ω

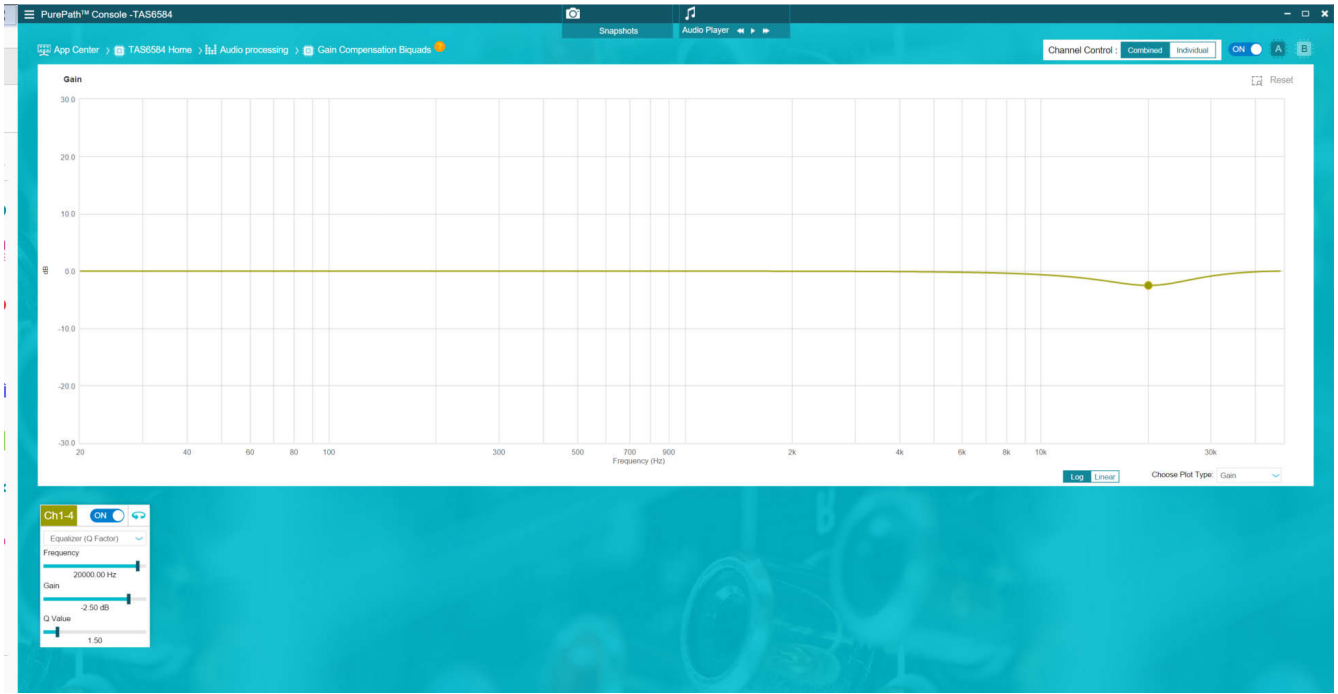


图 A-4. TAS6584-Q1 GUI 增益补偿双二阶滤波器页面 - 8 Ω

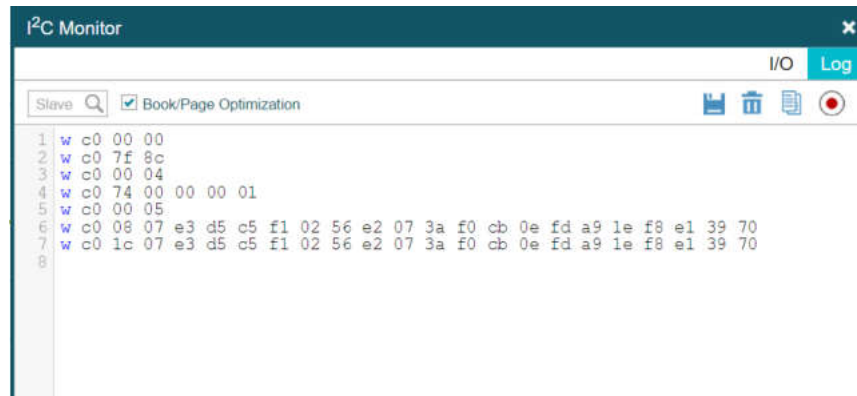


图 A-5. TAS6584-Q1 GUI I2C 监控器 - 8 Ω

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司