

Application Note

D 类放大器驱动扬声器和触觉线圈中的高电感负载



Aditya Sundar, Ivan Salazar

摘要

D 类音频放大器是高效开关转换器，广泛用于消费电子产品的音频应用。德州仪器 (TI) 提供全面的 D 类器件产品系列，包括具有集成升压转换器 (如 [TAS2120](#)、[TAS2572](#) 和 [TAS2563](#)) 的器件，以及由外部 PVDD 电源 (如 [TAS2320](#)、[TAS2780](#) 和 [TAS2781](#)) 驱动的器件。这些放大器支持各种执行器，包括微型扬声器、低音扬声器、低音炮、高音扬声器、骨传导执行器、LRA、ERM、触觉线圈以及压电/MEMS 扬声器，每种执行器都具有独特的电气特性。驱动高电感负载时，放大器可能会因反向电感反冲电流引起升压过压 (OV) 故障，或由于 Y 桥开关迟滞不足而导致过流关断。在 D 类输出端使用 Y 桥和较大的 LC (EMI) 滤波器时，也会发生过流情况。本应用手册确定了这些模式的根本原因，并提供了实用的定量设计解决方案来缓解这些模式。

内容

1 简介.....	2
2 详细说明.....	3
2.1 高电感扬声器的升压过压故障注意事项.....	3
2.2 防止过流关断所需的 D 类 Y 桥最小迟滞要求.....	7
2.3 在 D 类输出端使用 EMI 滤波器时的 D 类 Y 桥过流关断.....	8
3 总结.....	9
4 参考资料.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

D 类音频放大器属于开关转换器，由于具有较高的效率，因此广泛应用于音频领域。TI 的 D 类放大器器件可以是集成升压转换器，用于将低压电池电源升压生成 D 类开关电源导轨（例如 11V/13V）：（例如 2.5V-5.5V）也可以是直接由外部电源导轨驱动的 D 类放大器器件。

此外，一些 TI D 类放大器器件采用集成式 Y 桥，可根据音频信号动态切换 D 类放大器所使用的电源导轨。例如：TAS2572 和 TAS2780 集成了 Y 桥。在低功耗下，放大器分别切换至 1.8V 和 3.8V 电源导轨；在较高功率下，则分别切换至升压后的/外部 PVDD 电源导轨运行。

D 类放大器可用于驱动多种执行器，包括：微型扬声器（用于智能手机、可穿戴器件或 PC 等应用）、大型扬声器（低音扬声器、高音扬声器、中频/全频扬声器）、骨传导执行器、LRA/ERM、触觉线圈以及压电扬声器/MEMS 扬声器，以产生音频。每种执行器都具有不同的电感和阻抗特性。在电气方面，微型扬声器通常是电阻性较强的负载，提供相对较低的电感；而大型扬声器、低音扬声器/超低音扬声器和触觉线圈（LRA 和 ERM）则是中低电阻和高电感的组合。在电气方面，高音扬声器是电容耦合扬声器负载，而压电/MEMS 扬声器几乎是纯电容负载。

下表列出了不同类型执行器的扬声器电阻 (R)、电感 (L) 和电容 (C) 的近似范围以及执行器的电气特性。

表 1-1. 不同音频应用的执行器类型和范围

执行器类型	典型应用	串 (联) (DC 电阻)	执行器的电气特性	串联电感/电容
微型扬声器	移动和 PC 扬声器	4Ω-32Ω	R	≤ 200uH
低音扬声器和中音/全频扬声器	蓝牙扬声器、电视、回音壁、派对音箱	3Ω-8Ω	R+L (轻微电感性)	≤500uH (中音扬声器) ≤1.5mH (低音扬声器)
低音炮	蓝牙扬声器、回音壁、电视、派对音箱	2Ω-8Ω	R+L (高电感性)	≤ 50mH
高音扬声器	回音壁、派对音箱	4Ω-15Ω	R+L+C (电容耦合)	≤ 1.5mH 10uF-80uF (串联电容)
骨传导执行器	耳机、听力测试设备、助听器	4Ω-50Ω	R+L (轻微电感性)	≤ 3mH
LRA/ERM/触觉线圈	游戏控制器、触控板、智能可穿戴器件	LRA : 10Ω-30Ω ERM : 25Ω-60Ω 触觉线圈 : 4Ω-12Ω	R+L (轻微电感性)	≤ 1.5mH
压电扬声器/蜂鸣器	警报器、警笛、门铃、GPS 追踪器、家用电器 (蜂鸣器)	非常高 >1MΩ	电容 (C)	≤ 1.5uF
MEMS 扬声器	耳机、智能可穿戴器件 (AR/VR 头显, 眼镜)、助听器	非常高 >1MΩ	电容 (C)	≤ 150nF

由于电感负载（例如 LRA、ERM、触觉线圈、低音扬声器、低音炮以及某些中全频扬声器）具有高电感性，因此必须引入特定的设计考量，以确保放大器平稳运行，避免触发升压过压或 D 类过流故障。

2 详细说明

2.1 高电感扬声器的升压过压故障注意事项

对于高电感音频执行器而言，关键在于即使执行器两端的电压极性发生变化，它们也会阻止通过执行器的电流发生突然变化。因此，在驱动高电感扬声器/触觉执行器时，电压与电流之间存在较大的相位滞后。例如，如下图所示，D 类放大器输出 OUT_P 和 OUT_N 用于将满量程输入差分 PWM 驱动到扬声器线圈中，该线圈的 $R = 4\Omega$ 、 $L = 1\text{mH}$ ，PVDD 电源电压 = 13V，如以下公式所示：



图 2-1. D 类输出连接到电感式扬声器

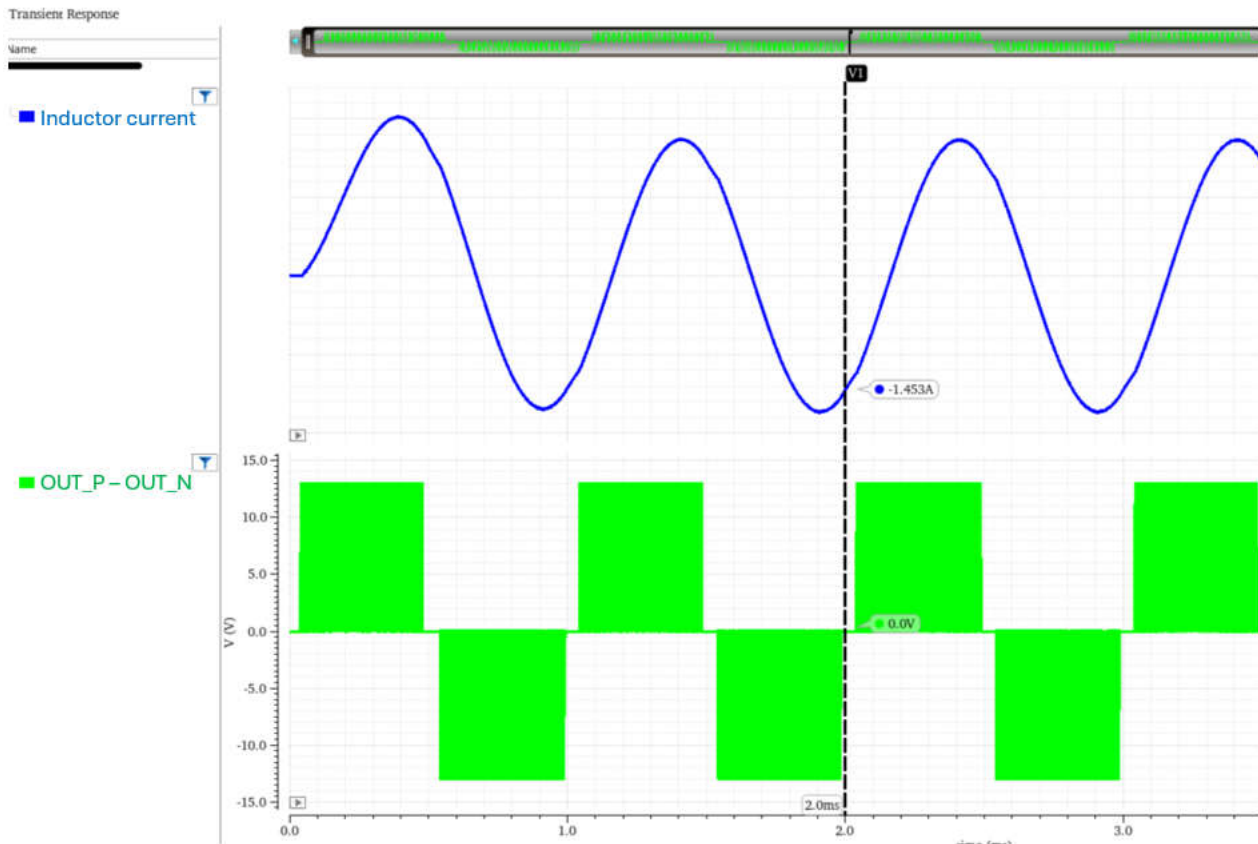
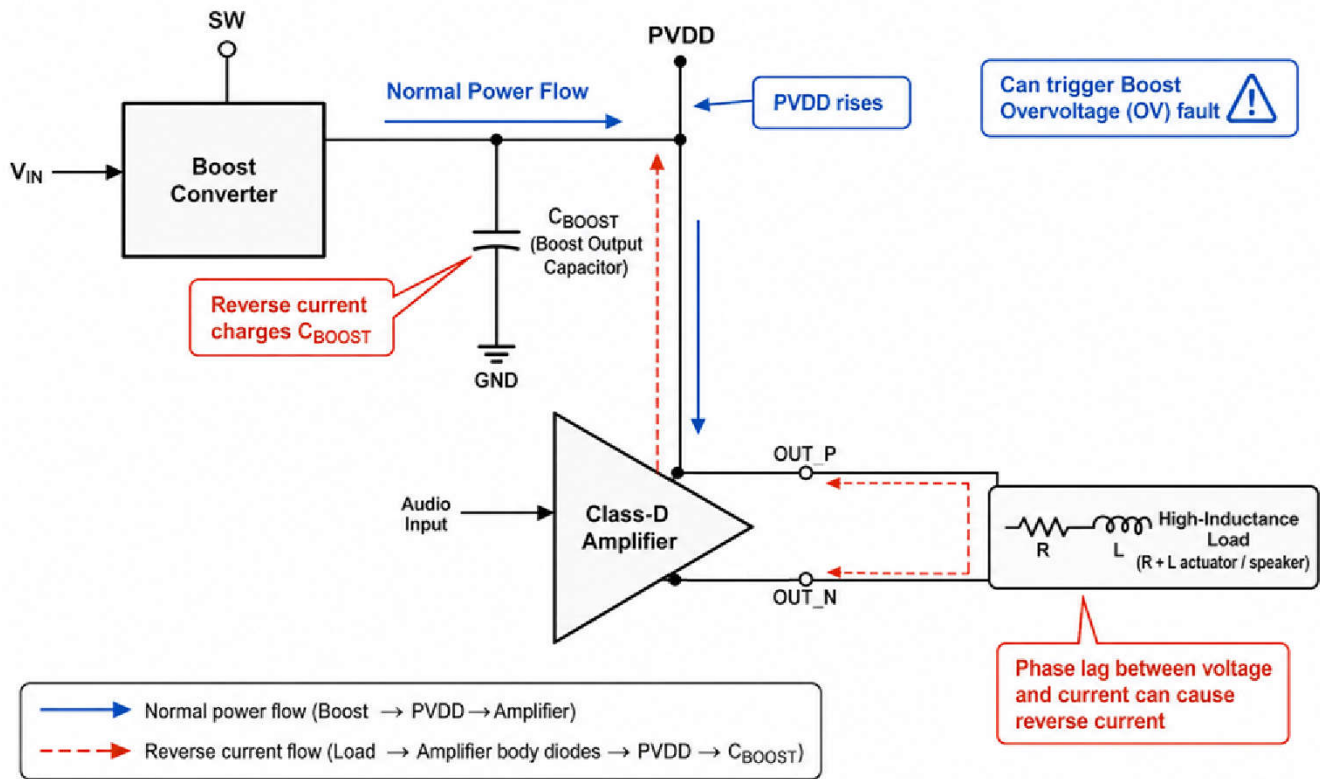


图 2-2. 驱动差分 PWM 时的执行器电流波形示例，展示了执行器两端电压与电流之间的相位滞后

从图中可以看出，在某些情况下，D 类输出 OUT_P-OUT_N 已过零，但由于电感较高，电流对电压变化的响应存在滞后，并产生了 -1.45A 的高负电流。

由于这种相位滞后，对于某些类型的输入音频文件，如果放大器在高峰值电流下工作且 D 类输出的相位突然发生变化，则来自执行器的反向电流会通过 D 类 FET 被推入升压输出端。图 2-3 展示了该现象情况。由于升压转换器通常仅设计用于提供输出电流，而非灌入电流，因此该反向电流最终会将升压输出电容器过充至更高的电压，从而导致升压过压故障最终被触发并关断器件。



Note: Reverse current occurs during high peak current and phase lag conditions in certain audio content.

图 2-3. 带有集成升压转换器的 D 类放大器，展示了反向电流路径

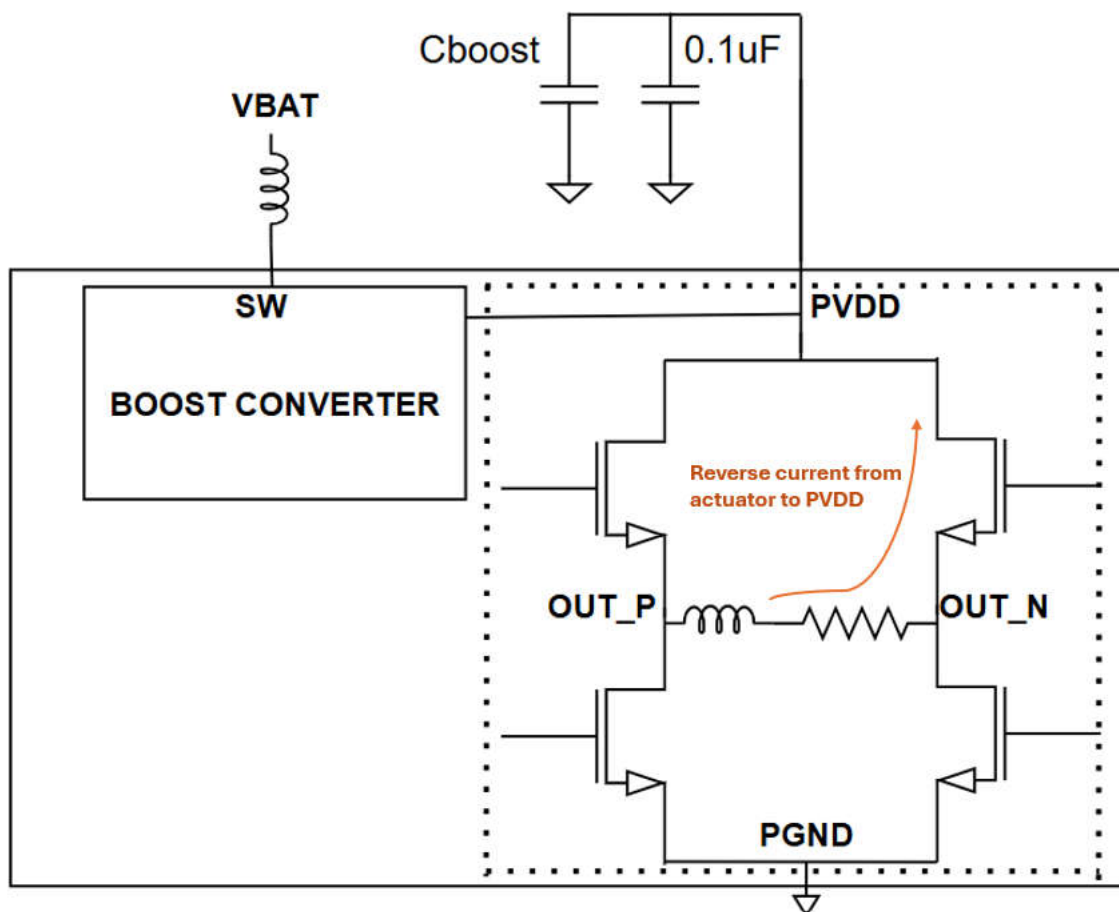


图 2-4. 带有集成升压转换器的 D 类放大器，显示内部 FET 电流路径

发生这种情况最坏的情形是，当大电流累积后，信号振幅突然减小到非常小的值，但较大的反向电流会导致升压转换器充电并触发过压故障。为了模拟这种情况，向放大器提供方波输入信号，并将其振幅从 -9dBfs 扫描至 -6dBfs，以触发负电流和 OV。图 2-5 显示了在向具有 $6\ \Omega + 500\ \mu\text{H}$ 电感器负载的器件输入此类音频而触发 OV 时，升压电压和扬声器电流的示波器屏幕截图。

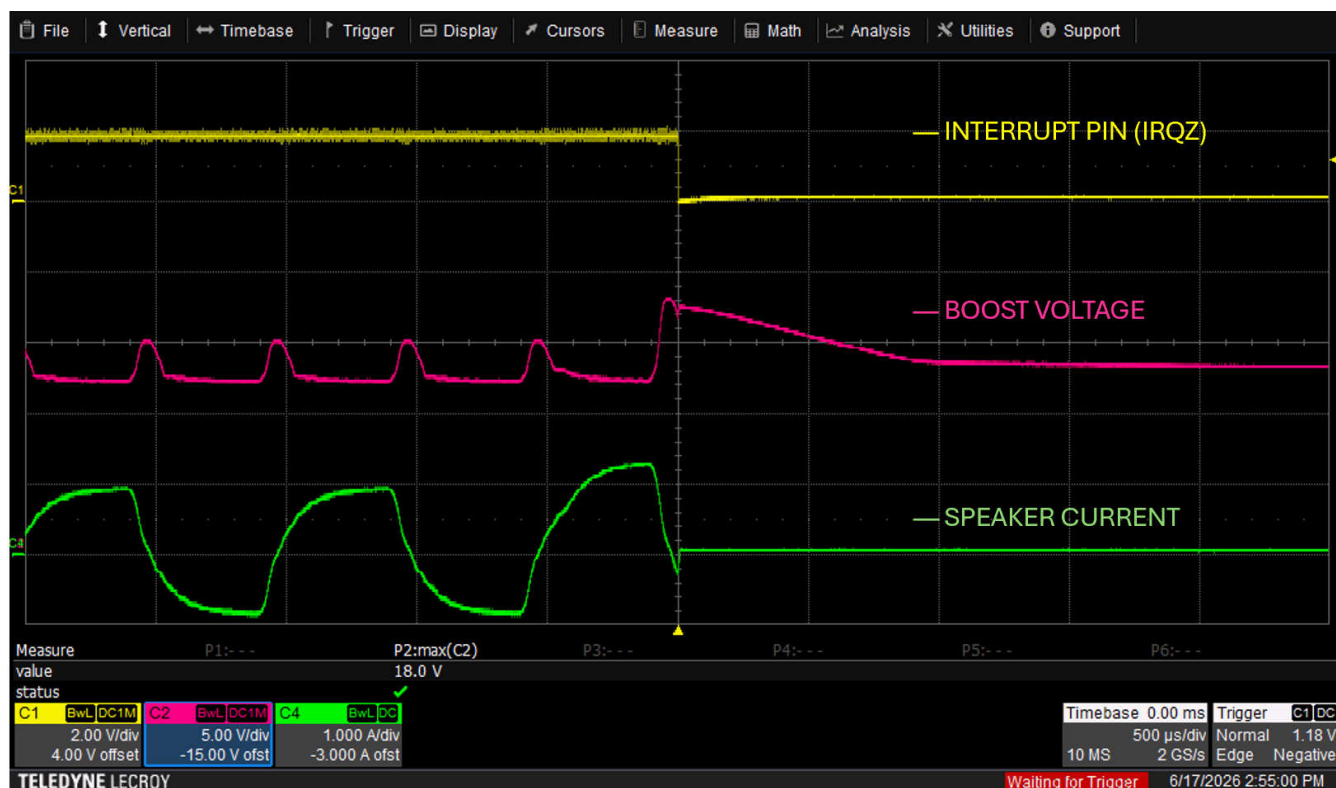


图 2-5. 在 TAS2572 EVM 上观察到升压过压故障，使用默认 20uF 电容和 6Ω + 500uH 负载

有 2 种解决方案可用于避免带有高电感负载的集成升压 D 类放大器器件上出现升压过压故障：

1. **解决方案 1：** 确保具有足够的升压电容，以防止升压电感器电流对升压电容器过度充电而超过 OV 阈值。要计算所需的升压电容量，必须确保在最坏情况的峰值负载电流下，储存在电感器中的能量不会导致升压电容器过度充电。

假设用户编程的通道增益为“CH” dBV，扬声器电阻为“Rspk”，电感为“Lspk”，升压电压为“Vbst”，最大升压 OV 阈值为“Vov”。假设放大器的 Rdson 为 rdson。要计算防止升压 OV 所需的最小升压电容 Cmin，可以应用以下公式：

- 负载两端的峰值电压 (Vpk) = $\text{Min}(V_{bst} \cdot R_{spk} / (R_{spk} + R_{dson}), 10^{((CH+3)/20)})$
- 流经扬声器的峰值电流 $I_{pk} = V_{pk} / R_{spk}$
- 存储在电感器中的能量 = $\frac{1}{2} \cdot L_{spk} \cdot I_{pk}^2$
- 为确保电感器中的能量能够通过电容器耗散而不会触发升压 OV 故障，应满足： $\frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_{ov}^2 - V_{bst}^2) > \frac{1}{2} \cdot L_{spk} \cdot I_{pk}^2$
- $C_{min} (\text{降额后}) \geq L_{spk} \cdot I_{pk}^2 / (V_{ov}^2 - V_{bst}^2)$

用户必须根据数据表检查电容器在“Vov” DC 偏置下的适当降额。

确保降额后的电容足以满足最低要求

为降低复杂性，用户还可使用本 [TI-E2E 帖子](#) 中包含的 Excel 工作表计算器。

Parameter	Value	Units	Comment
Load inductor	5.00E-04	H	For worst case scenario use highest load inductance value expected
Rload	8	ohm	Typical value
Channel Gain	21	dBV	As per PPC3 setting
Rload (min including variations)6.40		ohm	R-load minimum value including variations
Vpeak	12.45509	V	Audio peak voltage
Boost voltage (max)	13	V	As per PPC3 setting
Ipeak	1.95	A	
Boost OV threshold	16	V	For worst case scenario use minimum Boost OV threshold
Cmin required (post-derating)	2.18E-05	uF	

图 2-6. Excel 计算器快照

以黄色突出显示的 Cmin (降额后) 和 Ipeak 是这个基于 Excel 表格的计算器的输出, 该值通过用户提供的输入直接计算得出。所有未标记为黄色的项目都是用户必须输入到表格中的参数。

例如, 在图 6 所示的上述情况下, 假设负载电感最大为 500uH, 最小负载阻抗为 6.4 Ω , 用户已将通道增益编程为 21dBV。输出计算得到的 Ipeak 为 1.95A, 降额后为避免升压 OV 触发所需的最小电容为 $\geq 21.8\mu\text{F}$ 。

25V 陶瓷电容器在 16V DC 偏置下容量降额非常明显, 因此若要实现 $\geq 21.8\mu\text{F}$ 的有效电容, 则需要降额前 $\geq 181\mu\text{F}$ 的陶瓷电容, 这在成本和占板面积方面并非最佳选择。

为实现此电容, 从成本和占板面积角度考虑, 采用以下方法可能更明智:

- 47uF 铝电解电容器 (如果解决方案没有高度限制, 示例部件型号: UCM1V470MCL1GS) /50uF 的堆叠陶瓷电容器 (示例部件型号: ST125C506MAJ10)

或

- 5x10uF 电容器 50V 陶瓷电容器 (如果解决方案高度受限, 示例部件型号: GRM21BR61H106ME43L)

2. **解决方案 2:** 在升压电源上添加齐纳二极管电压钳位, 以吸收来自 D 类 FET 的回流电流, 并防止升压触发 OV。该齐纳二极管的电压容差必须相对较低, 才能确保其在正常升压工作条件下不会触发, 同时还需确保最大钳位电压小于最小升压 OV 阈值。对于 TAS2572, 升压 OV 阈值可通过 pvdd_ovlo_th_sel[1:0] 进行编程 (参见内部升压模式数据表), 默认设置为 16V。考虑 $\pm 2\%$ 的变化, 最小阈值为 15.68V。因此, 必须确保齐纳二极管仅在 $>13\text{V}$ 且 $<15.86\text{V}$ 时导通。因此, 可以使用容差为 $\pm 5\%$ 的 14V 或 15V 齐纳二极管。 (示例部件型号: 4878-SZ3C15)。确保齐纳二极管的额定功率足以承受短时间的高电流。

2.2 防止过流关断所需的 D 类 Y 桥最小迟滞要求

TAS2120、TAS2780、TAS2781 等器件集成了 Y 桥, 其中 D 类放大器在低功耗下使用 VBAT 电源 (3.8V), 并根据音频信号在高功耗下动态切换至 PVDD 电源 (18V)。同样, TAS2572 器件集成了 AVDD Y 桥, 在功率低于 100mW 时, 放大器切换至低压 (1.8V) 电源; 在更高功率下, 则切换至升压后的 PVDD 电源导轨 (2.5V-13V)。低压 AVDD Y 桥输出 FET 电路设计用于承受小于 0.95A 的峰值电流。例如, 在 TAS2572 中, 从 PVDD 电源导轨切换至 AVDD 电源导轨时会引入一定的迟滞 (例如 500us)。

因此, 如果某种音频配置下 D 类放大器以较大的峰值电流切换至 PVDD 电桥, 并且电感较大, 导致电流需要超过 500us 才能衰减至低于 0.7A, 则可能触发 AVDD 电桥过流保护, 并导致器件关断。为防止这种情况发生, 必须确保:

- Y 桥时间迟滞 $> 2 * L_{\text{spkr}} / R_{\text{spkr}}$

这是为了确保在电桥切换之前, 峰值电流衰减至足够低的水平, 以避免触发 AVDD 电桥过流错误。例如, 如果 $L_{\text{spkr}} = 10\text{mH}$ 且 $R = 4\Omega$, 建议将 Y 桥时间迟滞设置为 $> 5\text{ms}$ 。

同样, 在 TAS2764、TAS2780、TAS2781 中, VBAT Y 桥设计用于承受最大 2A 电流, 而 PVDD 电桥可承受 $> 4.9\text{A}$ 的电流。因此, 建议在使用高电感负载 (例如上述情况) 时, 对 LVS_HYS[3:0] 寄存器进行配置, 以满足最小迟滞要求, 从而避免因过流导致器件关断。或者, 也可以禁用 Y 桥功能, 但代价是效率会降低。不过, 所有器件均支持最高 50ms 的 Y 桥迟滞设置, 通常足以避免这些问题。

2.3 在 D 类输出端使用 EMI 滤波器时的 D 类 Y 桥过流关断

在 D 类输出端连接低频率 LC 滤波器（远低于 D 类放大器输出端的开关频率）时也可能发生这种情况，因为会产生流经 D 类 FET 的纹波电流。在这种情况下，可能还必须禁用 AVDD Y 桥，或者可能需要降低 AVDD Y 桥阈值（具体取决于流经 LC 滤波器的纹波电流大小），以避免触发 AVDD Y 桥过流错误。

为避免 OC 错误，必须确保：音频峰值电流 + 流经 LC 滤波器的纹波电流 < AVDD 桥过流阈值。假设放大器在 PVDD 桥上进行开关切换：

TAS2572 流经 LC 滤波器的纹波电流可通过以下公式计算：

- $\Delta I = PVDD / (4 * L * F_{sw})$ (在 PVDD 桥模式下运行)

其中 PVDD = PVDD 电源电压，L = 电感器值，F_{sw} = D 类放大器的开关频率。

例如，如果 L=1μH 且 C=0.68μF，F_{sw}=384kHz 且 PVDD=13V，当 D 类放大器从 PVDD 电源导轨切换到 AVDD 桥时，纹波电流为 ±0.84A，无论 AVDD Y 桥阈值如何，这都将触发过流错误。这将始终强制禁用 AVDD 桥。

但是，如果升压电压足够低 (<9V)，则可能仍可利用 AVDD Y 桥在低功耗水平下提高效率。或者，用户可以通过增大电感值并减小电容值，在依然实现相同 LC 滤波器截止频率的同时缓解高纹波电流（代价是会增加电感器的 BOM 尺寸和成本）。

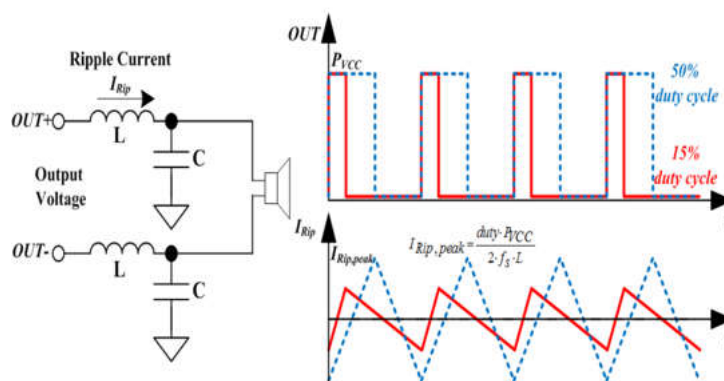


图 2-7. 此图显示使用 LC 滤波器时的 D 类输出纹波电流

3 总结

本应用手册介绍了在驱动低音炮、LRA、触觉线圈等高电感负载以及在放大器输出端使用 LC-EMI 滤波器时，D 类放大器的关键设计注意事项。高电感执行器的电压与电流之间存在显著的相位滞后，从而导致以下两种主要故障：由反向电感反冲电流引起的升压过压 (OV) 故障，以及由于 Y 桥开关迟滞不足导致的过流 (OC) 关断。

本应用手册涵盖具有集成升压转换器（如 [TAS2572](#)、[TAS2574](#)、[TAS2562](#)、[TAS2563](#) 或 [TAS2564](#)）的 TI D 类器件，以及具有外部 PVDD 电源（如 [TAS2764](#)、[TAS2770](#)、[TAS2780](#) 或 [TAS2781](#)）的器件。本手册对从微型扬声器 ($\leq 200\mu\text{H}$) 到高电感低音炮 ($\leq 50\text{mH}$) 和触觉线圈的各种执行器类型进行电气表征。

下面介绍了用于缓解升压 OV 的两种实用解决方案：(1) 使用提供的设计计算器工具，计算并配置足够的升压电容以吸收电感能量，且不超过 OV 阈值；(2) 添加齐纳二极管电压钳位以吸收反向电流。为了防止 Y 桥 OC，本手册确立了最低迟滞要求，以确保在电桥转换之前有足够的电流衰减。

本应用手册还解决了在 D 类输出端使用 LC-EMI 滤波器时的 OC 问题，提供了纹波电流计算方法，以及 Y 桥运行、滤波器元件值和系统效率之间的设计权衡。这些定量设计指南可在各种电感负载下实现放大器的稳健运行，而不会触发保护故障。

4 参考资料

1. [TAS2572](#) — 《具有集成 DSP 的 6.5W 升压 D 类音频放大器》数据表
2. [TAS2574](#) — 《具有 IV 感应功能的 10.5W 升压立体声 D 类音频放大器》数据表
3. [TAS2562](#) — 《5.7W 升压 D 类音频放大器》数据表
4. [TAS2563](#) — 《具有集成 DSP 的 5.7W 升压 D 类音频放大器》数据表
5. [TAS2564](#) — 《具有 IV 感应功能的 5.7W 升压 D 类音频放大器》数据表
6. [TAS2764](#) — 《4.5W 升压 D 类音频放大器》数据表
7. [TAS2770](#) — 《5.6W 单声道 D 类音频放大器》数据表
8. [TAS2780](#) — 《5W 升压 D 类音频放大器》数据表
9. [TAS2781](#) — 《具有集成 DSP 的 5W 升压 D 类音频放大器》数据表
10. 《通过 TAS2x20、TAS257x 中的 Y 桥提高效率》
11. 《TAS278x D 类放大器中用于提高效率的 Y 桥》

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