

D 类音频功放 LC 滤波器电感电容的计算原理

引言

D 类音频功率放大器凭借其高效率(通常超过 90%)、低热耗散和小型化优势,已成为现代音频设备的主流选择。然而,其脉冲宽度调制(PWM)输出本质上是一个包含音频信息的高频方波信号,必须通过低通滤波器重建为平滑的模拟音频信号,才能驱动扬声器。输出滤波器通常采用 LC 二阶低通滤波器的设计(直接关系到系统的音质、效率和稳定性)。

本文将深入解析 D 类功放 LC 滤波器的计算原理、频率响应特性及关键元器件的选型要点,提供完整的设计指南。

D 类功放基本原理与滤波需求

D 类功放的工作机制

D 类功放通过将模拟音频信号与高频三角波(或锯齿波)进行比较,生成占空比与音频瞬时幅度成正比的 PWM 方波。此方波的频谱包含:

低频成分:原始的音频信号,通常位于 20 Hz – 20 kHz。

高频成分:开关频率及其谐波,通常在数百 kHz 至数 MHz。

若直接将此 PWM 方波加至扬声器,高频能量会以热的形式耗散,降低效率,并可能损坏扬声器音圈,同时产生严重的电磁干扰(EMI)。

输出滤波器的核心作用

LC 低通滤波器(又称重建滤波器)的核心任务,是无损地通过低频音频信号,同时最大限度地抑制高频开关成分。其设计目标是在音频带内获得平坦的频率响应和低相位失真,并对开关频率处提供足够的衰减(通常要求 >40 dB),以实现高保真音频重现和良好的 EMI 性能。

LC 滤波器拓扑结构与等效模型

扬声器连接方式与对应滤波器结构

D 类功放的输出配置主要有 2 种,对应不同的滤波器需求:

1.单端(SE)输出:如图 1 所示,最简单的结构,滤波器连接在单个输出端与地之间。

2.桥接负载(BTL)输出:使用两个相位相反的半桥驱动扬声器两端,输出电压摆幅加倍,在相同电源电压下可获得四倍输出功率。

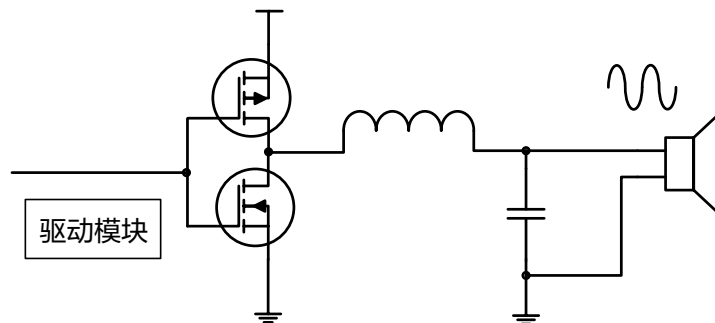
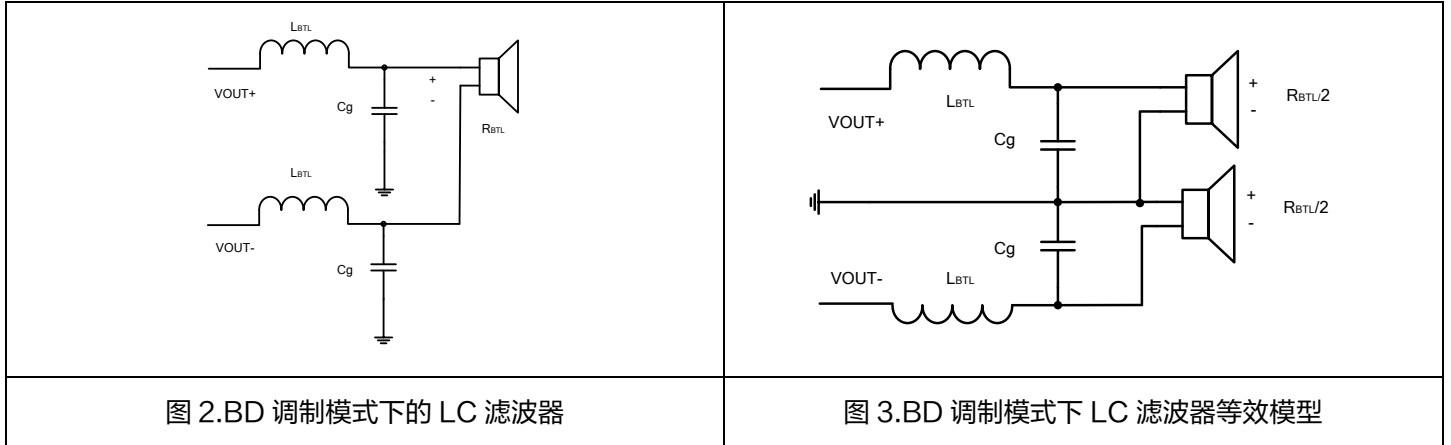


图 1.单端(SE)

本文重点阐述最通用和复杂的 BD 调制模式下的设计,其原理可简化应用于其他模式。

BTL 模式下的滤波器等效模型

在 BTL 模式下,输出滤波器结构对称,如图 2 所示。得益于电路的对称性,可以将其等效为两个完全相同的单端 LC 滤波器模型进行分析,如图 3 所示,这一简化是后续所有计算的基础。



每个单端模型的负载电阻 R_L 是 BTL 结构的扬声器标称阻抗 R_{spk} 的一半；例如，若驱动一个 4Ω 扬声器，在单端等效模型中， $R_L=R_{spk}/2=2\Omega$ 。图 4 为图 3 的进一步等效模型。

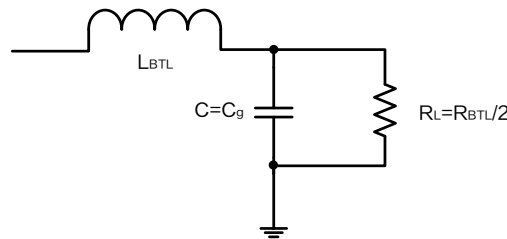


图 4. 单端 LC 滤波器

LC 滤波器参数的计算原理

核心设计方程：谐振频率与品质因数

二阶 LC 低通滤波器的传递函数由其谐振频率 (F_0) 和品质因数 (Q) 共同决定。

1. 谐振频率 (F_0)

滤波器通带边缘的关键参数。为确保音频带 ($20\text{Hz}-20\text{kHz}$) 的平坦响应，同时为高频衰减留有足够过渡带，通常 F_0 可选在 30kHz 至 40kHz 之间。

谐振频率计算公式为：

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

此式忽略了电阻成分，是理想的谐振条件。

2. 品质因数 (Q)

决定了滤波器在谐振频率 F_0 附近的响应特性。 Q 值过高会在 F_0 处产生尖峰，导致频率响应不平坦和瞬态振铃； Q 值过低则会导致过渡带过于平缓，高频衰减不足。

临界阻尼 (最平坦响应)：对应巴特沃斯 (Butterworth) 滤波器特性，此时 $Q=0.707$ 。这是音频应用中最常见的选择，能够在通带平坦性和开关频率衰减之间取得良好平衡。

品质因数 Q 的表达式为：

$$Q = R_L \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

电感 L 与电容 C 的求解

联立谐振频率 F_0 和品质因数 Q 两个方程，可以解出 L 和 C 的值：

$$L = \frac{R_L}{2\pi F_0 Q} \quad (3)$$

$$C = \frac{Q}{2\pi F_0 R_L} \quad (4)$$

LC 滤波器设计的三大关键指标

1. 音频带内平坦响应: 20Hz-20kHz 范围内, 幅频响应波动应控制在 $\pm 0.5\text{dB}$ 以内, 相位失真小, 以确保高保真音质。
2. 合理的谐振点品质因数: 推荐采用巴特沃斯型 ($Q=0.707$) 响应, 避免通带尖峰和振铃现象。
3. 足够的高频衰减: 在开关频率 F_{pwm} 及其主要谐波处, 衰减应至少达到 40dB , 以有效抑制可闻噪声和 EMI。

关键元器件选型指南

电感选型: 性能的核心

1. 电感值: 根据前述计算确定, 并考虑公差 (通常 $\pm 20\%$)。
2. 线性度与饱和电流: 这是最重要的参数。

线性度: 要求在整个预期工作电流范围内, 电感值变化小。铁氧体磁芯电感通常优于铁粉芯。

饱和电流 (I_{sat}): 必须大于流经电感的最大峰值电流。该电流由三部分组成:

负载功率电流 $I_{\text{load_pk}}$, 纹波电流 I_{PP} , 滤波器充电电流 (上电瞬间, 给滤波电容充电的浪涌电流)。

$$I_{\text{loadpk}} = \sqrt{\frac{2 * P_{\text{out_max}}}{R_L}} \quad (5)$$

$$I_{\text{PP}} = \frac{VPVDD}{8l * f_{\text{pwm}}} \quad (6)$$

备注: $P_{\text{out_max}}$ 为扬声器所需最大功率; $VPVDD$ 为供电电压。该电流是叠加在功率电流上的三角波。

选型准则: 电感的额定饱和电流应大于 $I_{\text{loadpk}} + I_{\text{PP}}/2$, 并留有充足余量 (建议 30% 以上)。同时, 在最大负载电流时, 电感值下降不应超过标称值的 25%。

3. 直流电阻 (DCR): 应尽可能小, 以减小导通损耗和发热。

电容选型: 稳定性与音质的保障

1. 电容值: 根据计算确定, 优先选用温度稳定性和电压稳定性好的类型。
2. 材质:

① C0G/NP0 陶瓷电容: 为首选, 因其极低的等效串联电阻 (ESR) 和等效串联电感 (ESL), 以及近乎零的压电效应 (可避免“啸叫”)。

② 薄膜电容: 性能优异, 但体积和成本较高。

③ 应避免使用高介电常数 (如 X7R, Y5V) 的陶瓷电容作为主滤波电容, 因其 ESR 较高, 且容量随直流偏置和温度变化大, 会劣化 THD 性能。

3. 额定电压: 必须高于功放电源电压 $VPVDD$, 并考虑可能的电压尖峰。

实际设计中的权衡与优化

1. 电感与电容的折衷: 在固定的 F_0 和 Q 下, L 和 C 成反比关系。增大 L 、减小 C 可以降低纹波电流和磁芯损耗, 但可能增加成本和体积, 反之亦然。

2. 开关频率的影响: 提高 F_{pwm} 可以允许使用更小的 L 和 C , 缩小滤波器体积, 并可能提升音频带内性能 (因为 F_0 可以设置得更远离音频带)。但代价是开关损耗增加, 可能降低整体效率, 并对功放芯片和布局提出更高要求。

3. PCB 布局的重要性: LC 滤波器的布局必须紧凑, 环路面积最小化, 以降低寄生电感和辐射 EMI。功率地回路应与敏感的小信号地分离。

结论

D 类音频功放输出 LC 滤波器的设计是一个融合了理论计算与工程实践的系统性工作。通过精确计算谐振频率和品质因数, 并基于严格的性能指标 (通带平坦度、高频衰减、THD) 进行验证, 可以确定 L 和 C 的初始值。然而, 设计的成功最终依赖于对电感饱和电流、线性度以及电容材质等关键参数的深入理解和谨慎选型。一个优秀的滤波器设计, 能够在高效率、高保真音质、小尺寸和低成本之间取得最佳平衡, 从而充分释放 D 类放大器的潜力, 为终端用户带来纯净、有力的音频体验。