

Class D 功放高次谐波过流保护分析和解决方法

Ryan Wang (SZ) 王凡

South China and Shenzhen OEM Team

摘要

高次谐波过流保护是一种特殊的过流、过功率现象。通常用户的电路设计完全正确，常规功率测试未超过额定功率。该种保护的定位及解决较为困难。本文结合理论分析和实际经验分析了高次谐波过流保护的原因，并提供了解决方案。

1	Class D 高次谐波过流保护现象	2
2	LC 滤波器频率响应	2
3	动圈式喇叭阻抗分析	3
	3.1 动圈式喇叭阻抗模型	4
	3.2 ZOBLE 补偿网络	5
4	现象分析及解决方案	6
	4.1 解决方案	8
5	总结	8
6	参考文献	8

图例

图 1:	Class D 输出的 LC 滤波器 (BTL 模式)	2
图 2:	LC 滤波器频率响应曲线 (包括负载 R)	3
图 3:	喇叭实测阻抗 VS 频率曲线	4
图 4:	动圈式喇叭的等效模型	4
图 5:	Mathcad 拟合出的喇叭频响曲线	5
图 7:	ZOBEL 网络和 SPEAKER 模型	5
图 8:	带有 ZOBEL 网络的喇叭阻抗曲线	6
图 6:	LC 滤波网络频率响应曲线 (喇叭 vs 电阻)	7

1 Class D 高次谐波过流保护现象

通常 Class D 功放芯片都会设计有过流保护功能，在输出电流超过限流阈值后芯片自动关闭驱动信号停止输出。一般的过流保护是由于输出功率超过额定或者输出短路而引起。还有一种特殊的过流保护现象是由于高次谐波能量过大引起。高次谐波过流保护是一种特殊的过功率现象。通常用户的电路设计完全正确，常规功率测试未超过额定功率。这种保护具有以下几个特征：

- 问题机器在 1KHz 标准音频信号测试时输出功率并未超过最大输出功率。
- 播放高频成分较多的歌曲较容易出现保护。
- 使用水泥电阻代替喇叭作为负载，保护现象消失。
- 减小，或者去掉输出 LC 滤波器的电容，保护现象消失。

若上述现象发生则可以怀疑是由于高次谐波能量引起的过流、过功率保护。高次谐波过流保护的原因较为复杂，首先分析一下 LC 滤波网络及喇叭阻抗的频率响应特性。

2 LC 滤波器的频率响应

图 1 是一个典型的 Class D 输出滤波网络（BTL 输出模式）。LC 滤波器由 L，C 和负载 R 组成。

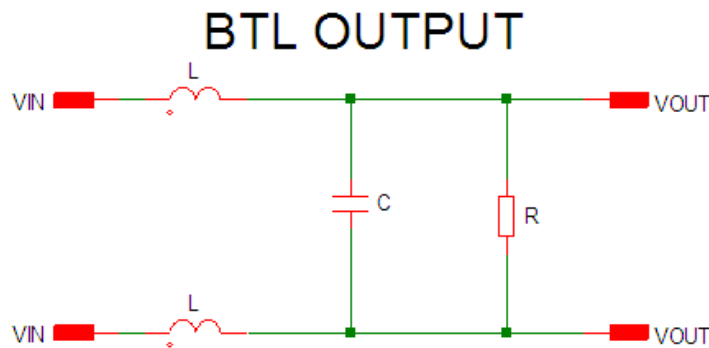


图 1: Class D 输出的 LC 滤波器（BTL 模式）

LC 滤波器的截止频率和 Q 值计算公式为：

$$F_c = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{2L \cdot C}} \quad Q = R \times \sqrt{\frac{C}{2L}}$$

一般 Class D 的输出 LC 滤波器截止频率 F_c 设置在 30kHz --- 50kHz 范围内，为的是提供足够大的高频衰减的同时不影响音频频带内的增益平坦性。LC 滤波器 Q 值随着负载阻抗的增大而增大，即输出增益在截止频率处有一定的提升。下图是一个滤波器频率响应曲线：

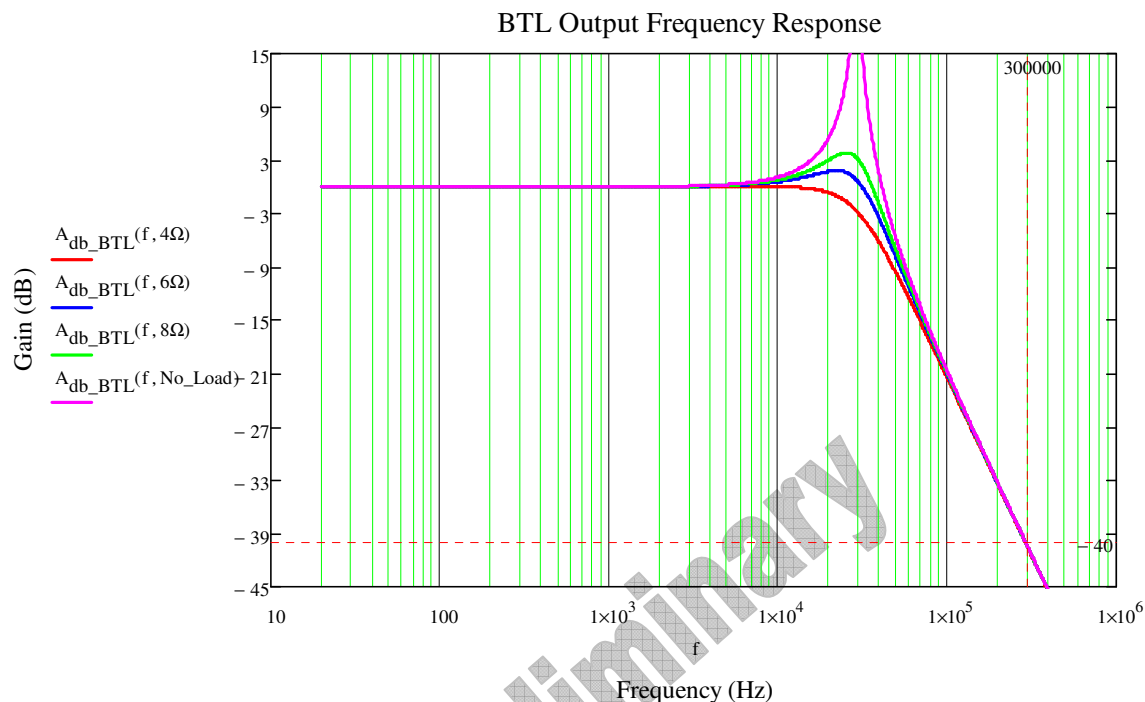


图 2: LC 滤波器频率响应曲线 (包括负载 R)

该例子中 $L=15\mu\text{H}$, $C=1\mu\text{F}$, 截止频率 F_c 约为 29kHz, 在 Class D 的开关频率 (约 300kHz) 位置提供 -40dB 的衰减。在截止频率处, 不同的负载阻抗呈现出不同的增益。理论上空载极端情况下增益为无限大, LC 进入谐振状态。

一般来说, 由于 F_c 设计高于 20kHz, 截止频率处的增益改变不会影响到音频频带内的幅频响应。但音频带外的信号会受到该部分的影响并输出到负载产生功率。若输出信号内正好存在位于 F_c 处的高次谐波, 同时 LC 滤波器 Q 值又很高的时候, 高次谐波的功率就会被放大。有可能超过电流限制阈值而导致过流保护。

由于 LC 滤波器的 Q 值和负载 R 有关, 只有当 R 非常大的时候才会出现高次谐波被放大的现象。在实际中负载 R 是动圈式喇叭。关于喇叭阻抗 R 和频率的关系在下节中给出。

3 动圈式喇叭阻抗分析

一个普通的动圈式喇叭是由纸盘 (Paper Cone)、线圈 (Voice Coil) 和永磁体 (permanent magnet) 组成。喇叭标称的阻抗为直流阻抗, 一般为 4Ω、6Ω 或者 8Ω。但由于线圈的电感特性以及其他寄生参数, 喇叭实际体现出的阻抗曲线 (vs 频率) 如图所示:

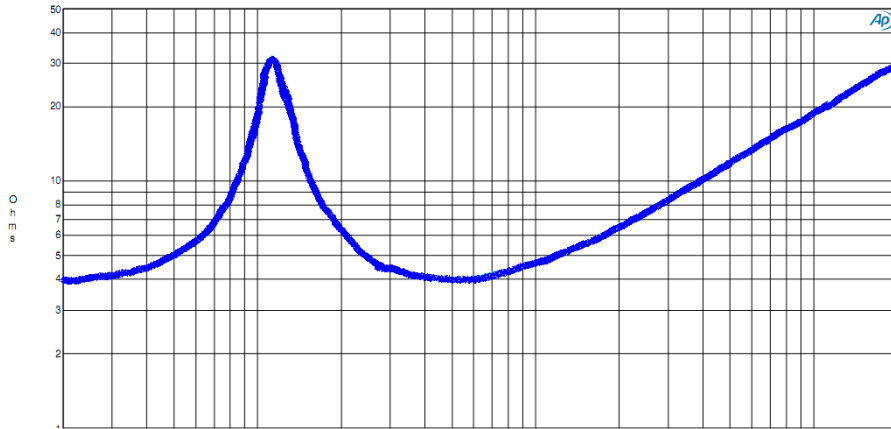


图 3：喇叭实测阻抗 VS 频率曲线

从曲线可看出，该喇叭是一个 4Ω 的喇叭。有一个位于 110Hz 左右的谐振点。从 500Hz 开始喇叭即呈现明显的电感特性，阻抗随着频率的增加而持续增加。

可见喇叭阻抗的标称值是其直流特性，随着频率喇叭阻抗会大幅度变化。在 LC 的截止频率约 30kHz 左右喇叭阻抗已经远远大于其标称的直流阻抗。图 3 的例子中，其 30kHz 的阻抗大约在 40Ω 附近。

3.1 动圈式喇叭阻抗模型

动圈式喇叭的阻抗特性可以使用图 4 中的等效电路模型来模拟（等效电路模型的详细分析请参见引用 2）。其中：

L_e ：喇叭等效串联电感

R_e ：喇叭直流等效阻抗

L_{es} , R_{es} , C_{es} ：喇叭寄生参数

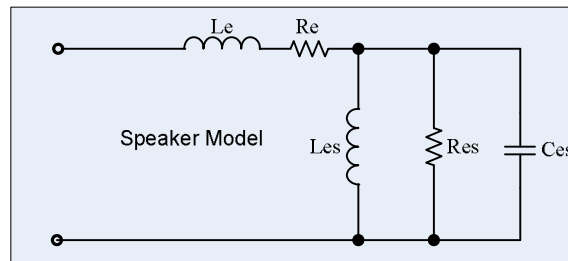


图 4：动圈式喇叭的等效模型

根据图 3 给出的电感频率响应曲线，可以拟合出等效电路模型的参数如下：

$$L_e = 280\mu H, R_e = 4\Omega, L_{es} = 8.2mH, R_{es} = 28\Omega, C_{es} = 200\mu F$$

使用 Mathcad 绘制等效模型的频率响应曲线如下所示，结果和实际测试曲线吻合。

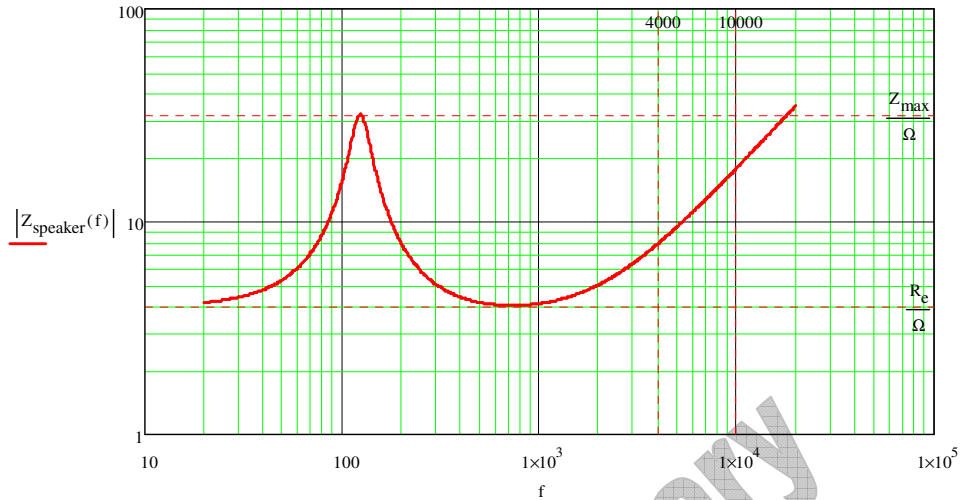


图 5: Mathcad 拟合出的喇叭频响曲线

3.2 ZOBEL 补偿网络

实际喇叭的高频阻抗因为线圈电感而呈现随频率增高而上升的趋势，由此导致了 LC 滤波网络的高 Q 值。ZOBEL 是和喇叭并联的阻容网络，它可以用来补偿喇叭的感性而抑制喇叭阻抗的抬升。如图 7 所示，ZOBEL 网络有电阻 R_z 和电容 C_z 组成。计算公式为（参见引用 3）：

$$R_z = 1.25 \times R_e$$

$$C_z = \frac{L_e}{R_z^2}$$

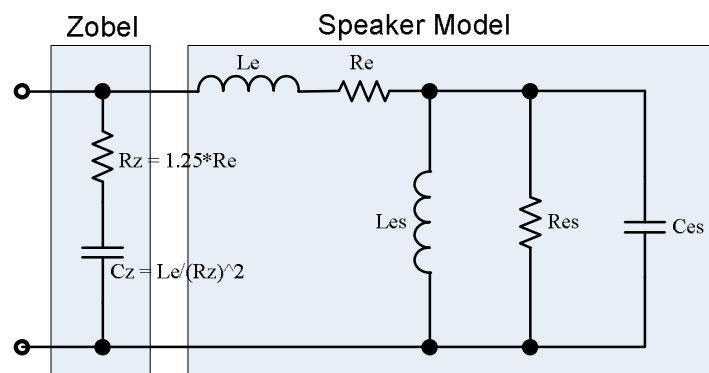


图 7: ZOBEL 网络和 SPEAKER 模型

以第 3 节的喇叭参数为例计算得出 $R_z = 5\Omega$ 和 $C_z = 11\mu F$ 。图 8 是加入 ZOBEL 网络前后的喇叭阻抗曲线对比。可见 ZOBEL 网络的作用很明显，将高频部分的阻抗提升压制下来，保持在 R_z 附近。这样就能限制 LC 滤波网络的截止频率附近的 Q 值。从而不会产生高次谐波的过流保护问题。

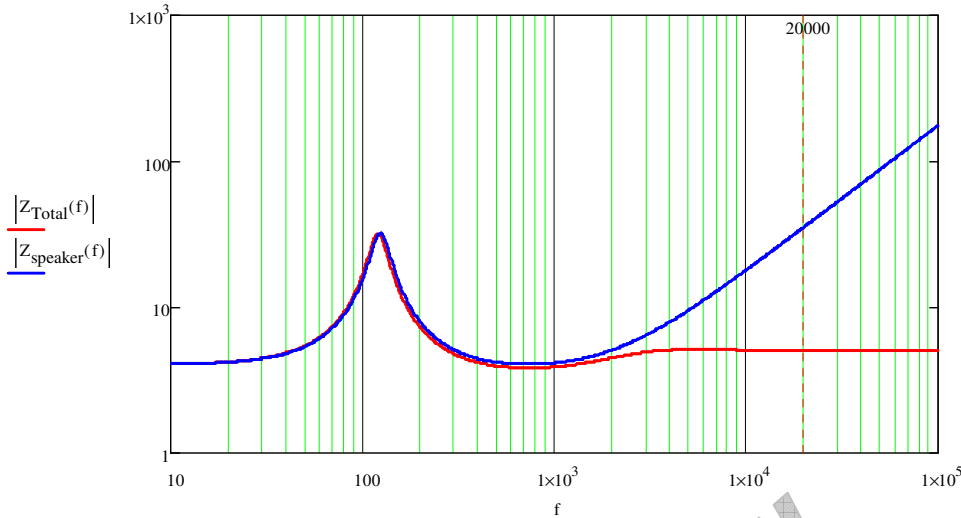


图 8：带有 ZOBEL 网络的喇叭阻抗曲线

4 现象分析及解决方案

综合上述理论分析，对于高次谐波过流保护的现象分析及解决方案如下：

通常在 Class D 功放路设计时会考虑到 20Hz-20KHz 音频带宽内的电信号的频率响应。保证在 20Hz-20KHz 内每个频率点的输出功率均不会超过额定值。一般老化测试时采用的是 1KHz 的标准正弦波，此时喇叭工作在额定阻抗附近（本文例子中，约为 4.2ohm）。

但是若输出信号的频率超过 20kHz 即输出含有大量谐波时。就会有位于 LC 滤波器截止频率（谐振频率）附近的高频信号。若 LC 滤波器的 Q 值又非常高，则会产生高频谐波被放大并导致过流保护的问题。

LC 滤波网络的 Q 值与负载阻抗有关系，从第三节已知喇叭在截止频率附近的阻抗通常很高，则滤波器的 Q 值很大。图 6 是将实际的喇叭阻抗曲线和 LC 滤波器的频率响应曲线合并后的结果。

可见当负载为纯电阻 4Ω 时，LC 滤波网络在截止频率处 Q 值较低，没有任何放大作用。而接入喇叭后，LC 滤波网络在截止频率处产生大于 20dB 的增益。这就是导致高次谐波过流保护的根源原因。

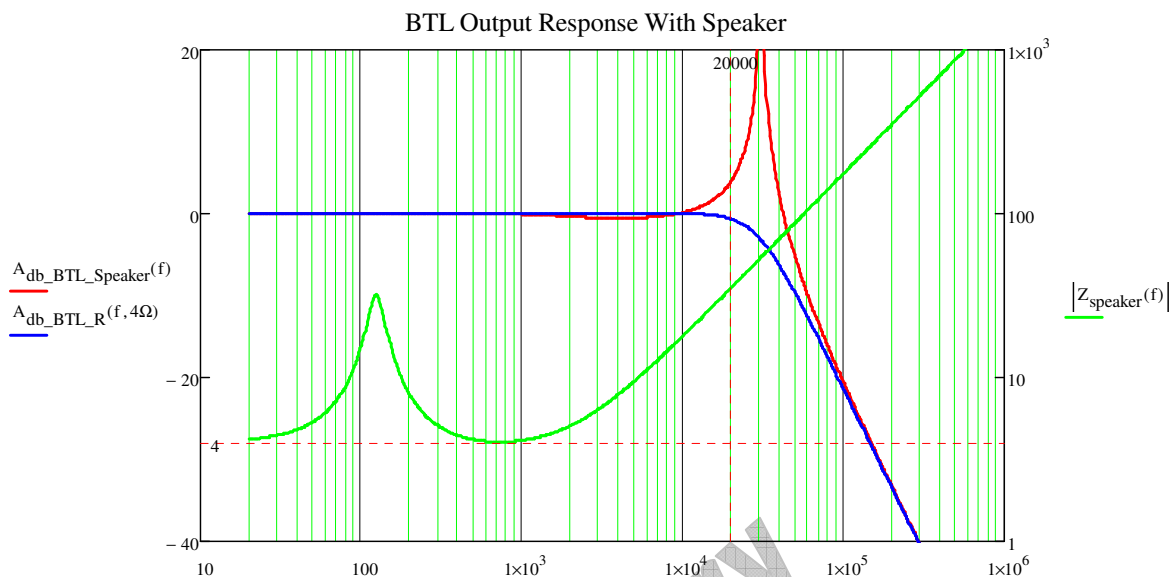


图 6: LC 滤波网络频率响应曲线 (喇叭 vs 电阻)

综上所述，对于第一节给出的高次谐波过流保护的现象补充分析如下：

- **问题机器在 1KHz 标准音频信号输出功率并未超过最大输出功率。**

分析：因为该保护现象发生在 LC 滤波网络截止频率附近，在 20Hz~20kHz 范围内的功率输出正常，并不会出发过流保护。

- **播放高频成分较多的歌曲较容易出现保护。**

分析：高频成分较多的歌曲内容容易产生位于 20kHz~40kHz 范围内的谐波能量，正好触发 LC 滤波网络截止频率处的高次谐波过流保护。

- **使用水泥电阻代替喇叭作为负载，保护现象消失。**

分析：该类高次谐波过流保护和喇叭高频呈现的高阻抗有关系，若使用纯电阻替代喇叭则不会出现该类保护。

- **减小，或者去掉输出 LC 滤波器的电容，保护现象消失。**

分析：LC 滤波器的截止频率位置被改变，减小电容将截止频率推到 40kHz 以上，一般该位置的谐波分量非常小，不足以引起过流保护现象。去掉电容 LC 滤波器不存在，也不会产生保护问题。

4.1 解决方案

1. 减小 LC 滤波器网络的电容 C 值:

减小 LC 滤波器网络的电容 C 的值可以增大 LC 滤波器的截止频率。使得截止频率远大于高次谐波可能达到的频率。通常将电容值减小 5 倍以上即可有效抑制高次谐波过流保护的问题。

优点: 无需修改电路, 只需要修改参数值。

缺点: LC 网络滤波效果变差, 开关纹波增加, EMI 有可能恶化。

注意: 不建议直接去掉滤波电容。否则会导致 Class D 开关纹波输入到喇叭, 增加损耗和恶化 EMI。

2. 添加 ZOBEL 网络:

优点: 有效抑制喇叭的高频阻抗抬升, 解决高次谐波过流问题。同时可以均一化中高频响应, 对高频听感有改善。

缺点: 需要添加外围元器件, 电容数值较大, 推荐使用无极性薄膜电容。

注意: 若只是为了解决高次谐波过流问题, ZOBEL 网络的电容可小于计算值, 一般只要达到阻抗抑制的作用即可。

5 总结

高次谐波过流保护是一种特殊的过功率现象, 在电路设计完全正确, 常规功率测试未超过额定功率的前提下, 该种保护问题较为隐蔽。本文结合 LC 滤波电路的频率响应和动圈式喇叭的阻抗频率特性, 分析了 Class D 谐波过流保护的原因并给出了解决方法。

6 参考文献

1. Leach, W. M., Jr., *Impedance Compensation Networks for the Lossy Voice-Coil Inductance of Loudspeaker Drivers*, Georgia Institute of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, J. Audio Eng. Soc., Vol. 52, No. 4, April 2004.
2. Speaker Impedance, http://www.epanorama.net/documents/audio/speaker_impedance.html
3. Speaker Zobel Impedance Equalization Circuit Calculator, <http://diyaudioprojects.com/Technical/Speaker-Zobel/>