

# 数字功放中的低通滤波器

## 1. 概述

采用开关放大技术的数字功放工作原理与模拟功放完全不同，其开关功率级输出的高频 PWM 信号中包含有音频信号。PWM 频率为几百 kHz，比音频信号带宽 20~20kHz 大得多，为了从 PWM 开关信号中恢复出音频信号，通常采用低通滤波器 (LPF)，低通滤波器频率特性如图 1 所示。

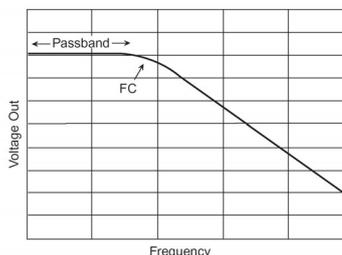


图 1 低通滤波器频率特性

图 2 与图 3 为 PWM 滤波前后的时域与频域分析。从图中可以看出，PWM 经过低通滤波器后高频分量大大减小，音频信号得到恢复，但总会残留部分高频开关成分。

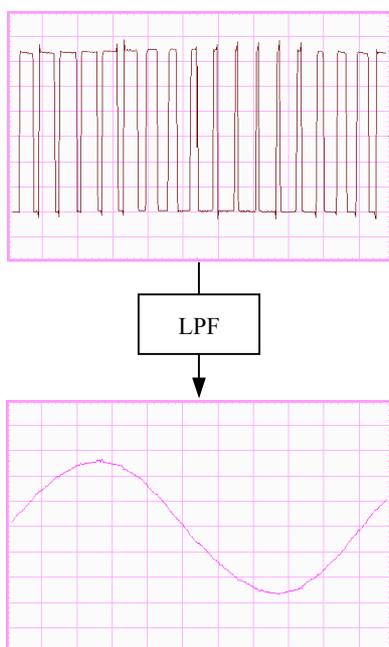


图 2 PWM 滤波前后的时域波形

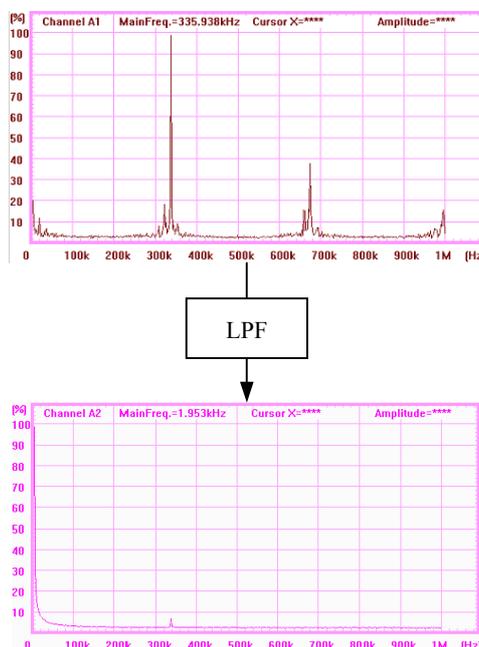


图 3 PWM 滤波前后的频谱分布

根据组成低通滤波器的元件与结构不同，低通滤波效果与应用方面不尽相同。图 4 所示为数字功放中低通滤波器可能出现的位置及作用。低通滤波器按照组成元件通常可分为 LC、RC 型，RC 又可分为无源与有源型，低通滤波器的比较如表 1 所示

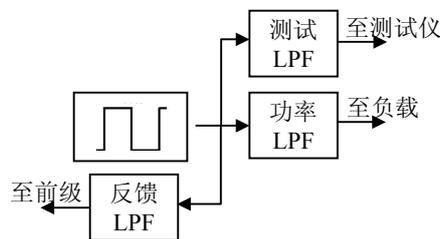


图 4 数字功放中低通滤波器位置及作用

表 1

类型	等效内阻	输出功率	使用场合
LC	小	大	功率输出
无源 RC	大	微小	反馈、测试
有源 RC	输入大、输出小	小	反馈、测试

## 2. LC 低通滤波器

LC 低通滤波器用在功率输出，组成元件为电感 L 与电容 C，数字功放功率输出常采用的 LC 低通滤波器可分为二阶（一级）、四阶（二级）低通滤波器，结构如图 5、图 6 所示，四阶低通滤波器由两个二阶低通滤波器串联组成。二阶与四阶 LC 低通滤波器性能比较如表 2 所示。

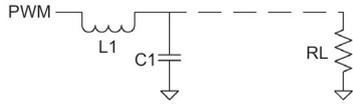


图 5 二阶（一级）低通滤波器

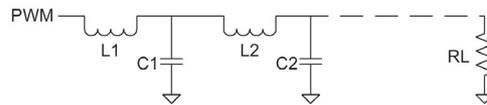


图 6 四阶（二级）低通滤波器

表 2

	二阶 LC 低通滤波器	四阶 LC 低通滤波器
功率损耗	低	高
频响 vs 阻抗变化(2~8 Ω)	+/-3dB	+/-6dB
成本	低	高
THD+N	差别很小	
EMI	大	小

以二阶 LC 低通滤波器为例，其拉普拉斯变换为：

$$H(S) = \frac{QS}{QCS^2 + C\omega S + QC\omega^2}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$Q = R_L C \omega$$

在 LC 低通滤波器中，负载电阻  $R_L$  是影响  $Q$  值的一个变量，负载电阻的变化将影响频率响应曲线，图 7 所示为负载电阻为 4 欧姆所设计的 LC 参数，频响曲线平坦，对于 8 欧姆与 2 欧姆负载，在 20kHz 处的幅度分别有 2db 的抬升与-4dB 的下降。

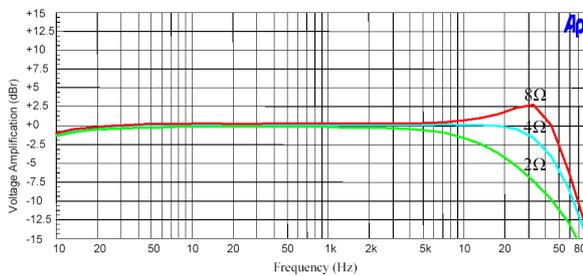


图 7 不同负载时 LC 低通滤波器频率响应

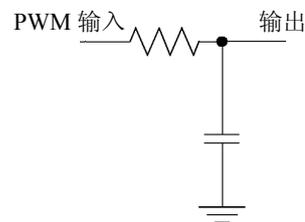


图 8 无源 RC 低通滤波器

## 2. RC 低通滤波器

### 2. 1 无源 RC 低通滤波器

无源 RC 低通滤波器的组成元件为电阻 R 与电容 C，结构如图 8 所示，为一阶系统。由

于电阻 R 与频率变化无关, RC 低通滤波器比 LC 低通滤波器在设计与器件选材方面要简单, 但不适合于大功率输出, 仅可作为弱信号处理与微小功率应用。与 LC 低通滤波器一样, RC 低通滤波也可以进行级联, 组成多阶(级)系统。

对于无源 RC 滤波器, 其滤波效果受前、后级阻抗的影响很大, 与 RC 低通滤波器自身阻抗相比, 前级的输出阻抗要足够小, 后级的输入阻抗要足够大才能满足滤波要求。为了得到良好的滤波效果, 可以采用有源 RC 低通滤波器。

**2.2 有源 RC 低通滤波器**

有源 RC 低通滤波器组成元件为电阻 R、电容 C 与放大器, 二阶有源 RC 低通滤波器典型结构如图 9 所示, 由于采用放大器, 具有高输入阻抗与低阻抗输出特性。有源 RC 低通滤波器也可以进行级联, 组成多阶系统。

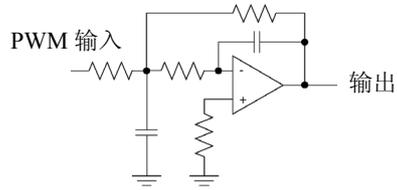


图 9 有源 RC 低通滤波器

**2.3 测试用低通滤波器**

根据“音频工程师协会 (AES)”发布的 AES17-1998 中关于数字音频设备测试的描述:

4.2.1.1 For the upper band-edge frequency of 20 kHz, the standard low-pass filter shall have the following characteristics:

- a) passband response deviation:  $\leq \pm 0.1$  dB,  $10$  Hz  $\leq f \leq 20$  kHz;
- b) stop-band attenuation:  $> 60$  dB,  $f > 24$  kHz.

功率输出的 LC 低通滤波器与模拟音频测试设备的滤波器指标不能满足上述要求, 模拟功放的测试方法与设备不能完全适合数字功率放大器的测量, 特别是谐波失真与信噪等性能指标的测量, 为了满足数字功放的测量, 必须在数字功放与音频分析仪之间插入专用的低通滤波器, 如 Audio Precision 公司的 AUX-0025 滤波适配器。满足 AES17-1998 要求的低通滤波器原理与结构见图 10, 衰减网络的作用是将数字功放输出的高电压降低为较低电压, 三个二阶低通滤波器串联组成满足数字音频测试所需要的低通滤波器。测试用低通滤波器的输入端可以接数字功放的 LC 滤波器输出, 也可以直接接数字功放开关功率级输出的 PWM 信号, 后一种测试连接可以消除 LC 滤波器产生的失真, 能得到更好的测试指标, 测试用低通滤波器的输出接传统的模拟音频测试仪。

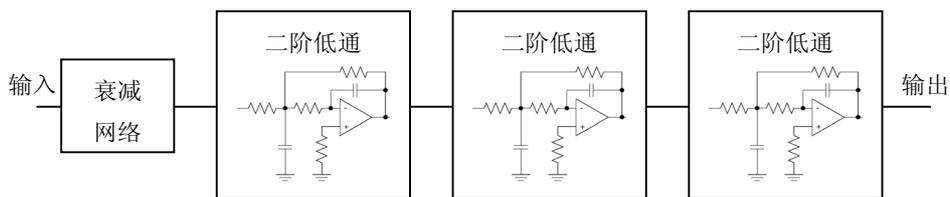


图 10 满足 AES17-1998 要求的低通滤波器