

D 类功率放大器电路设计与调试

D 类放大器（数字音频功率）是一种将输入模拟音频信号或 PCM 数字信息转换成 PWM（脉冲宽度调制）或 PDM（脉冲密度调制）的脉冲信号，然后用 PWM 的脉冲信号去控制大功率开关器件通/断音频功率放大器。D 类放大或数字式放大器，是利用极高频率的转换开关电路来放大音频信号的，经常被用于高效率的音频放大器中。在高保真音响设备和更高档的家庭影院设备中，往往需要几十瓦甚至几百瓦的音频功率，这时，低失真、高效率的音频放大器就显得颇为重要，本文从实用角度出发，设计了一款低失真、高效率的音频放大器，与传统放大器相比，本放大器在效率、体积以及功率消耗方面具有明显的优势，它产生的热量小且为传统放大器的一半，其效率在 78%以上，而传统的放大器效率仅在 50%左右。

1 系统设计

1.1 总体设计分析

本系统由高效率功率放大器（D 类音频功率放大器）、信号变换电路、外接测试仪表组成，系统框图如图 1 所示。

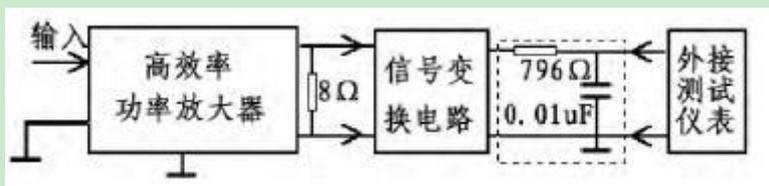


图 1 系统方框图

1.2 D 类功放的设计

D 类放大器的架构有对称与非对称两大类，在此讨论的 D 类功放针对的是对功率、体积都非常敏感的便携式应用，因此采用全电桥的对称型放大器，以充分利用其单一电源、系统小型化的特点。D 类功率放大器由 PWM 电路、开关功放电路及输出滤波器组成，原理框图如图 2 所示。

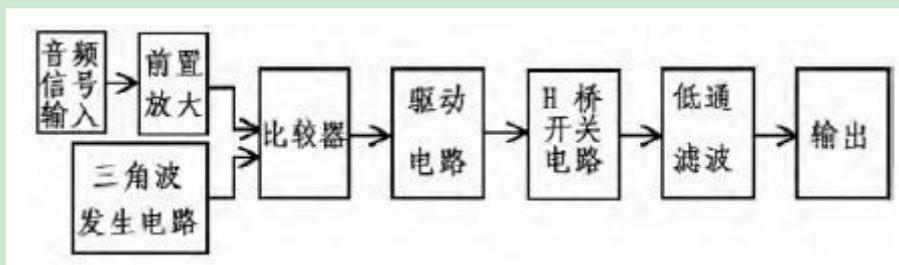


图 2 D 类音频功率放大器组成框图

采用了由比较器和三角波发生器组成的固定频率的 PWM 电路，用输入的音频信号幅度对三角波进行调制，得到占空比随音频输入信号幅度变化的方波，并以相反的相位驱动上下桥臂的功率管，使功率管一个导通时另一个截止，再经输出滤波器将方波转变为音频信号，推动扬声器发声。采用全桥的 D 类放大器可以实现平衡输出，易于改善放大器的输出滤波特性，并可减少干扰。全桥电路负载上的电压峰峰值接近电源电压的 2 倍，可采用单电源供电。实现时，通常采取 2 路输出脉冲相位相反的方法。

2 硬件电路设计

2.1 原理分析

D类功率放大器的工作过程是：当输入模拟音频信号时，模拟音频信号经过 PWM 调制器变成与其幅度相对应脉宽的高频率 PWM 脉冲信号，控制开关单元的开/关，经脉冲推动器驱动脉冲功率放大器工作，然后经过功率低通滤波器带动扬声器工作。

2.2 比较器

比较器电路采用低功耗、单电源工作的双路比较器芯片 LM311 构成。此处为提高系统效率，减少后级 H 桥中 CMOS 管不必要的开合，用两路偏置不同的三角波分别与音频信号的上半部和下半部进行比较，当正端上的电位高于负端的电位时，比较器输出为高电平，反之则输出低电平。这样产生两路相互对应的 PWM 波信号给后级驱动电路进行处理，双路比较电路如图 3 所示。

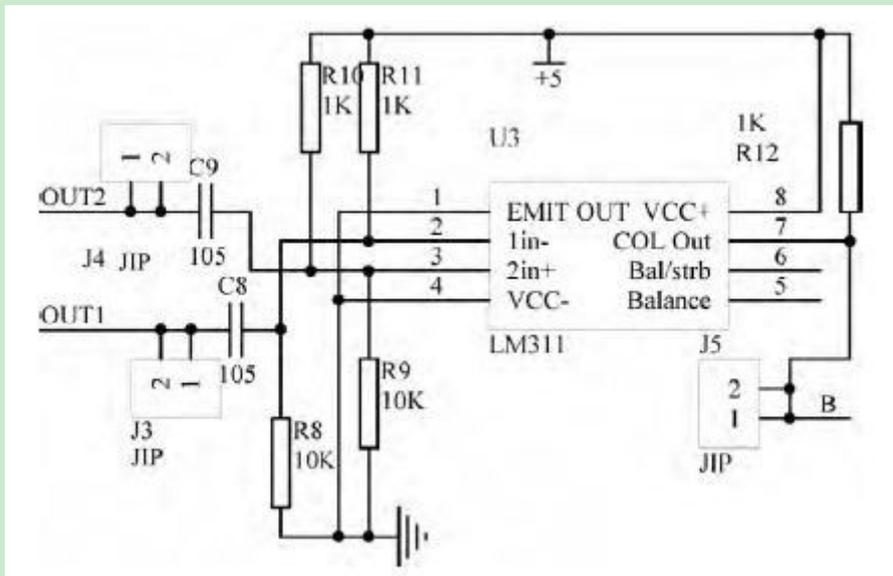


图 3 比较器电路

此处值得注意的是将上半部比较处理为音频信号接比较器的负向端、三角波信号接正向端；下半部比较则相反，这样形成相互对应，在音频信号的半部形成相应 PWM 波时，另半部为低电平，可保证后级 H 桥中的 CMOS 管没有不必要的开合，以减少系统功率损耗。电路以音频信号为调制波，频率为 70kHz 的三角波为载波，两路信号均加上 2.5V 的直流偏置电压，通过比较器进行比较，得到幅值相同，占空比随音频幅度变化的脉冲信号。

LM311 芯片的供电电压为 5V 单电源，为给 $V^+ = V^-$ 提供 2.5V 的静态电位，取 $R_{10} = R_{11}$ ， $R_8 = R_9$ ，4 个电阻均取 $10k\Omega$ 。由于三角波 $V_{p-p} = 2V$ ，所以要求音频信号的 V_{p-p} 不能大于 2V，否则会使功放产生失真。由于比较器芯片 LM311 的输出级是集电极开路结构，输出端须加上拉电阻，上拉电阻的阻值采用 $1k\Omega$ 的电阻。

2.3 驱动电路以及互补对称输出和低通滤波电路

如图 4 所示。将 PWM 信号整形变换成互补对称的输出驱动信号，用 CD40106 施密特触发器并联运用以获得较大的电流输出，送给由晶体三极管组成的互补对称式射极跟随器驱动的输出管，保证了快速驱动。驱动电路晶体三极管选用 9012 和 9014 对管。

H 桥互补对称输出电路对 VMOSFET 的要求是导通电阻小，开关速度快，开启电压小。因输出功率稍大于 1W，属小功率输出，可选用功率相对较小、输入电容较小、容易快速驱动

的对管，IRF9630 和 IRFZ48NMOS 对管的参数能够满足上述要求，故采用之。实际电路如图 4 所示。本设计采用 4 阶 Butterworth 低通滤波器。

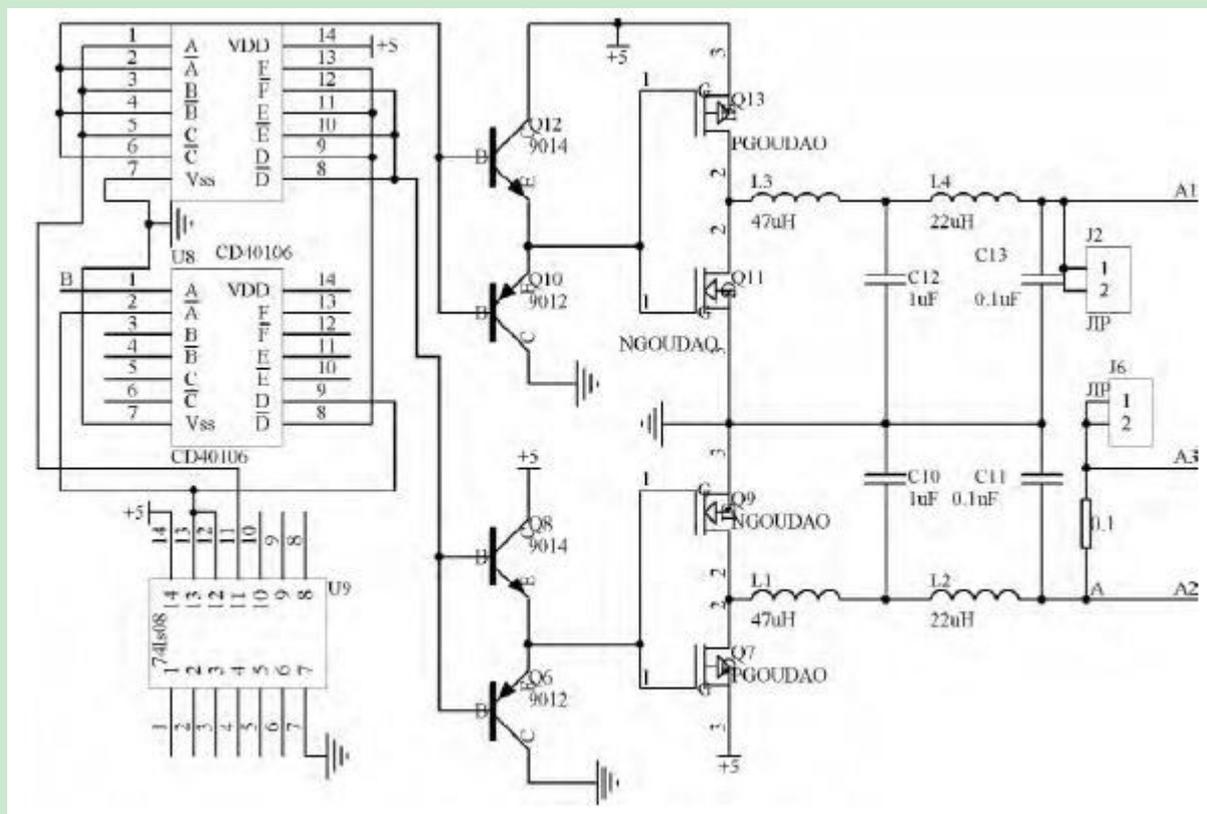


图 4 H 桥互补对称输出及低通滤波电路

对滤波器的要求是上限频率 $\geq 20\text{kHz}$ ，在通频带内特性基本平坦。互补 PWM 开关驱动信号交替开启 Q6 和 Q8 或 Q12 和 Q10，分别经两个 4 阶巴特沃兹滤波器滤波后推动喇叭工作。

3 电路测试

3.1 调试步骤

1) 通频带的测量：在放大器电压放大倍数为 10，实测 3dB 通带的上、下边界频率值。通频带测试时应去掉测试用的 RC 滤波器。

2) 最大不失真输出功率：放大倍数为 10，输入 1kHz 正弦信号，用毫伏表测量放大器输出电压有效值，计算最大输出功率 $P_{o-\max}$ 。3) 输入阻抗：在输入回路中串入 $10\text{k}\Omega$ 电阻，放大器输入端电压下降应小于 50%。

4) 效率测量：输入 1kHz 正弦波，放大倍数为 10 时，使输出功率达到 500mW，测量功率放大器的电源电流 I （不包括测试用变换电路和显示部分的电流）。要求电源电压 V 的范围为 $5 \times (1+1\%) V$ 。效率为： $500\text{mW} \% V \times I$ 。

3.2 数据分析

根据以上的调试步骤测量，测得数据如表 1、表 2、表 3、图 5、图 6 所示。

表 1 误差放大(静态)

测试点	电源端	接地端	同相端	反向端	输出端
测试值	4.98V	0V	2.484V	2.494V	2.494V
理论值	5V	0V	2.5V	2.5V	2.5V

表 2 脉宽调制(动态)

测试点	输入频率	输出波形	输出频率	输出幅度
测试值	100HZ	不规则的矩形方波	65.36KHZ	5.04V

表 3 效率测试

测试点	U_i	i_i	P_i	U_o	I_o	P_o	η
测试值	5V	0.5A	2.5W	3.79V	0.39A	1.368W	59.1%

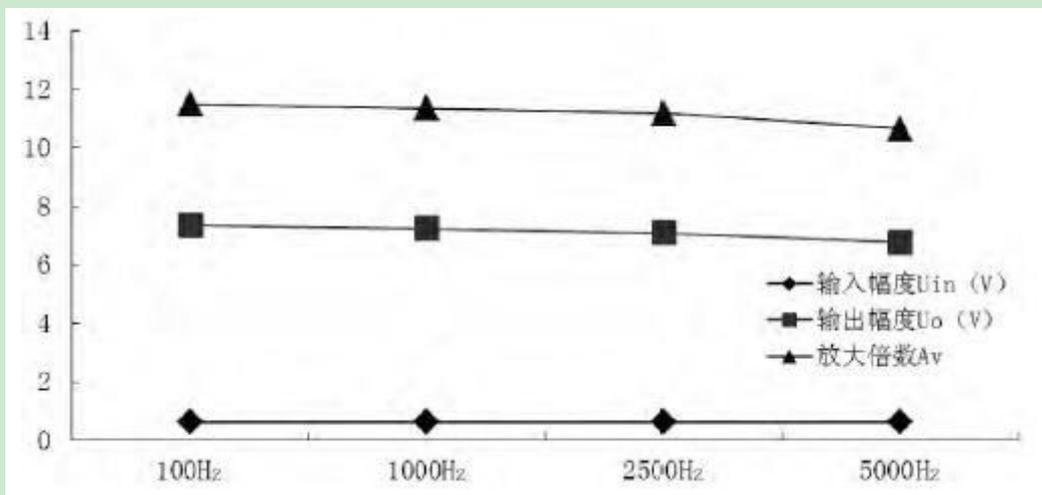


图 5 误差放大(动态)

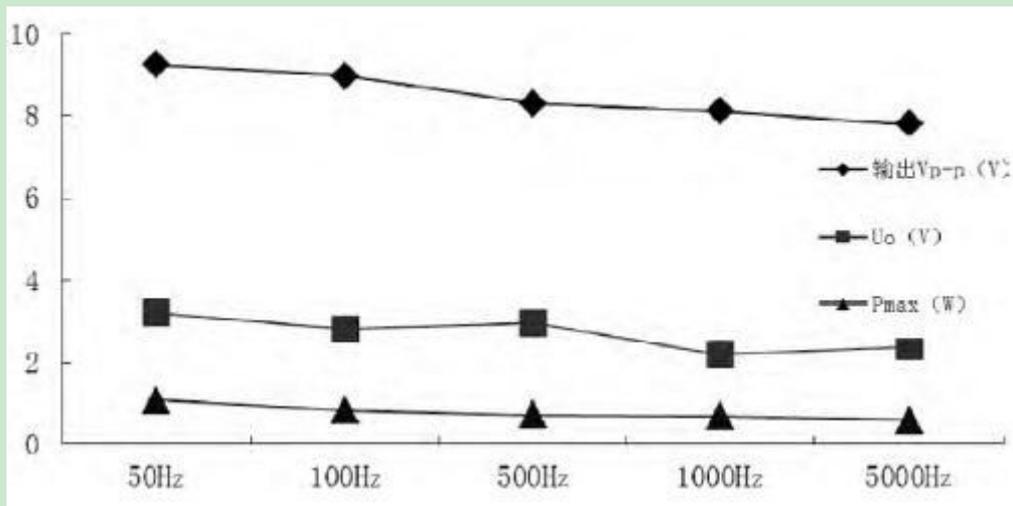


图6 最大不失真功率测试数据

图5展示了当输入信号的幅值不变，仅改变其频率，动态放大误差效果图。由图可知，对于频带以外的信号，系统的放大倍数与输出幅值有明显降低。对于当信号频率的升高导致EMI（电磁干扰）增强，可以利用低通滤波器降低干扰。

功率放大器采用5V电源，前置放大器的放大倍数调到最大，适当的调节输入信号的幅值，改变其频率，测量其最大不失真输出功率及效率见图6。对于频带以外的信号，功率放大器的最大不失真功率有明显的降低。若要提高效率，可以降低载波频率，但输出电压的谐波成分及失真增加；若要使输出电压非线性失真减少，则需提高PWM调制信号的频率。尽管高频干扰是D类功率放大器现今存在的主要问题，但其高效节能的优点，以越来越多的受到了人们的重视。

从上面的数据可知，功放的效率和最大不失真输出功率与理论值还有一些差距，其原因有以下几方面：

1) 在功放电路存在静态损耗。电路在静态下是具有一定的功耗，测试其5V电源的静态总电流约为28mA，静态功耗为： $P_{损耗} = 5 \times 28 = 140\text{mW}$ ，则这部分的损耗对总的效率影响很大，且对小功率输出时影响更大。

2) 功放输出电路的损耗，这部分的损耗对效率和最大不失真输出功率均有影响。H桥的互补激励脉冲达不到理想同步，也会产生功率损耗。

3) 滤波器的功率损耗，这部分损耗主要是由电感的直流电阻引起的，功率测量电路的误差。此外，还有测量仪器本身带来的测量误差。