

HIC 技术

D 类功放的设计与分析

陈新国, 程耕国

(武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要: D 类功放采用脉宽调制技术来提高功放的效率, 利用占空因数, 建立了分析功放效率的数学模型; 详细描述了 D 类功放的三角波发生器、比较器、H-桥的电路设计; 列出了在设计中的注意事项。不仅保证了功放的高效性, 而且具有良好的音质效果。

关键词: 功放; 脉宽调制; 高效; 音质

中图分类号: TN73

文献标识码: A

文章编号: 1001-2028 (2004) 02-0028-03

Design and Analysis of Class D Power Amplifier

CHEN Xin-guo, CHENG Geng-guo

(Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: In Class D Power Amplifier, pulse width modulation technology is used to enhance its efficiency. The advantage of duty cycle is used to build the mathematical model for analyzing efficiency. Three circuits of Class D Power Amplifier: triangle wave oscillator, comparator, H-bridge are presented. Some important methods are given. The technology improved the sound quality at the same time.

Key words: power amplification; pulse width modulation; high efficiency; sound quality

提到功放的设计, 人们立即会想到要解决两个问题: 一是保真度; 二是效率。模拟功放利用晶体管的线性关系, 保真度较高, 因此, 在目前的音响系统里, 模拟功放仍占有主导地位。模拟功放的不足是效率低, 能量消耗大, 散热要求高。一般地, A 类功放的效率在 50% 以下, 即使是改进的 B 类或 AB 类, 其效率也在 75% 以下。而 D 类功放效率高、体积小、重量轻、输出功率大的数字音频功放, 在 20 世纪 90 年代末, 逐渐被行家们所重视, 近几年发展迅速, 各种专用的集成芯片, 通用音响产品不断推陈出新, 不够理想的音质得到极大改善, 且数字音频功放的应用有利于实现音响系统的全数字化。

本文介绍 D 类功放在设计过程中的一些关键环节, 且加以理论分析, 在整个音频范围内, 信号很容易高保真、高效率的放大。

1 电路设计

1.1 整体框图

D 类功放采用脉冲宽度调制 (PWM) 系统和开关电源供电。音频信号全部信息被调制在 PWM 信号

的宽度变化中, 功率管工作在饱和、截止两种状态, 失真小, 效率高。其工作原理是将模拟音频信号经 PWM 设备调制成数字信号; 然后高效功率放大、低频滤波; 解调信号后, 驱动扬声器。为适应数字声源直接输出的脉冲编码调制 (PCM) 输入, 一般机内还设置一个 PCM/PWM 两种脉冲编程调制的转换装置。

本文介绍的 D 类功放其原理框图如图 1 所示, 包括两部分。第一部分是脉宽调制部分, 输入的模拟信号经电压放

大后, 与固定频率的三角波相比较, 比较器输出宽度被调制的高、低电平。第二部分是功率放大, PWM 信号控制 H-桥功率管的通/断, 使电能驱动扬声器, 产生声音。

图 1 中的电压放大电路可简单地通过运放来实

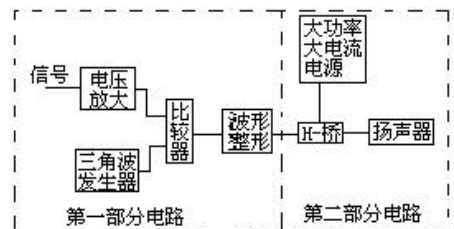


图 1 D 类功放的整体框图
Fig.1 Class D block diagram

收稿日期: 2003-08-31 修回日期: 2003-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60074032)

作者简介: 陈新国 (1971-), 男, 湖南益阳人, 讲师, 在读研究生, 研究方向为信号处理, Tel: (027)86302461; E-mail: xinguo666@sina.com ; 程耕国 (1947-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士, 研究方向为压电材料及信号检测。

现，本文不详细讨论，下面主要介绍三角波发生器、比较器、H-桥等电路。

1.2 三角波发生器的设计

三角波的作用是用来调制音频信号，对此有两方面的要求。其一，调制后的信号可以被完整地恢复。根据 Nyquist 采样定理，三角波的频率至少是音频信号最高频率的两倍，人类听到的声频范围是 20 Hz~20 kHz，说明三角波的频率应在 40 kHz 以上，为确保音频信号的采样，可取三角波的频率为 65 kHz；其二，三角波要有稳定的频率和幅度，否则，调制后的脉宽会产生变形，从而降低音频输出的信噪比，音质变差，噪声增大。在高频的情况下，产生频率、幅度

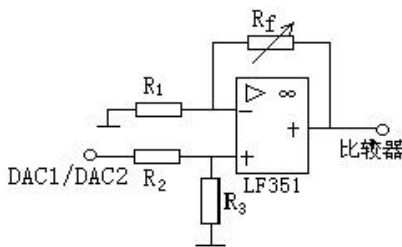


图 2 电压转换电路
Fig.2 Voltage transition circuit

稳定的三角波，对一般的波形发生器来说很难实现，本设计选用了台湾凌阳公司的 unsp061 单片机的片内有两路

DAC，可用其中的一路与图 2 所示的电路直接相连。产生稳定频率的三角波。

unsp061 单片机输出三角波的软件编程可通过循环语句 (或者采用查表法) 实现，但 DAC 输出的是电流信号，必须用图 2 所示的同相比例运算电路实现电压转换。其中 R_f 可调，以保证三角波的电压变化范围大于放大后信号的电压变化范围。

1.3 比较器的设计

比较器是带一个锁相环的脉宽调制电路，把三角波与音频信号比较，实现两者的调制，电路如图 3 所示。

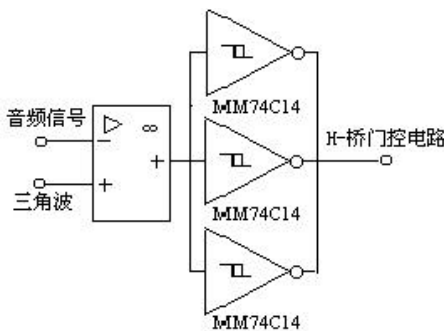


图 3 比较器、Schmitt 触发器
Fig.3 Comparator and schmitt trigger

调制后的电路与 H-桥的门控电路相连，地线被连接到公

共地端。

为了简单，音频信号以单一正弦信号 $u = \sqrt{2}U \sin \omega t$ 为例来说明 PWM 信号。如图 4 所示，当音频信号大于三角波信号时，比较器输出高电平，当音频信号小于三角波信号时，比较器输出低电平。值得注意的是：

音频信号的幅值不允许大于三角波信号的幅值，否则，结果是一个错误的 PWM 信号。

如图 4 所示，PWM 信号是一个数字脉冲信号，其脉宽的变化反映信号的全部信息，在正弦波的正半周时，正脉冲宽，负脉冲窄；反之，正脉冲窄，负脉冲宽；当正负脉冲等宽时，输入为 0。脉冲信号的高、低电平控制 H-桥两组功率管的通/断，高/低两值之间的转换快慢决定两组功率管之间通/断的转换时间，所以，要求 PWM 信号高/低电平之间的转换时间要短，否则，输出到扬声器的信号会出现明显的交越失真，降低音频信号的失真度。比较器的实际输出如图 5 所示，很显然不符合要求。为了缩短高/低电平的转换时间，在设计中，采用三个 MM74C14 Schmitt 触发器来调整比较器输出的波形。MM74C14 的特点是磁滞现象和快速的转换特性。磁滞现象可使电路抗干扰能力增强；快速转换特性可使输出波形得到明显的改善，改善后的波形如图 6 所示。如果只采用一片 MM74C14，片中的电流大，芯片温度容易升高，因此，采用三片 MM74C14，以减少每个触发器的电流，减少能量消耗，降低运行时的温度。

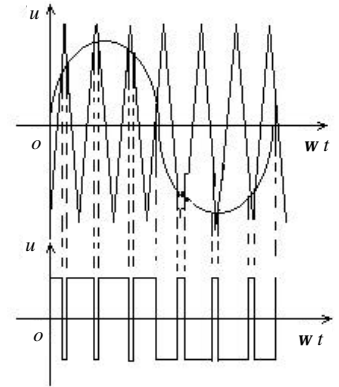


图 4 三角波、正弦波、PWM 信号
Fig.4 Trigggle weveform, audio signal and PWM signal

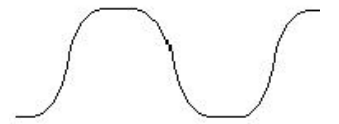


图 5 比较器输出的波形
Fig.5 Output waveform of comparator

改善后的波形如图 6 所示。如果只采用一片 MM74C14，片中的电流大，芯片温度容易升高，因此，采用三片 MM74C14，以减少每个触发器的电流，减少能量消耗，降低运行时的温度。



图 6 Schmitt 触发器的输出波形
Fig.6 Output waveform of schmitt trigger

1.4 H-桥与滤波电路

H-桥是由四个 MOSFET 功率管构成，功率管的通/断由 MM74C14 输出的 PWM 信号控制，从而控制通过扬声器电流的大小和方向，其原理图如图 7 所示。其中 A、B 是两组、共四个高频 MOSFET 功率管，R、L 是扬声器的等效电路，与电容 C 并联构成低通滤波。当 PWM 信号为高电平时，A1、

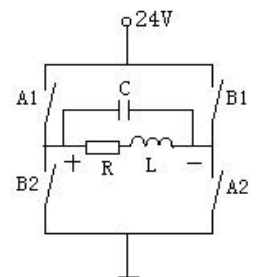


图 7 H-桥原理图
Fig.7 H- bridge overview

A2 导通, B1、B2 截止, 电流从扬声器的正极流向负极; 当 PWM 信号为低电平时, A1、A2 截止, B1、B2 导通, 电流从扬声器的负极流向正极。功率管开关的频率等于 PWM 信号的频率。整个 H-桥和滤波电路运行在大电压、大电流、大功率的环境下, 与第一部分电路的电源无关。在设计中选用 LMD18201 作为 H-桥, 如图 8 所示。这种芯片附有一个散热片, 即用来散热, 也充当功率地; 为了降低噪声, 信号地和功率地都通过短且粗的导线连到散热片。

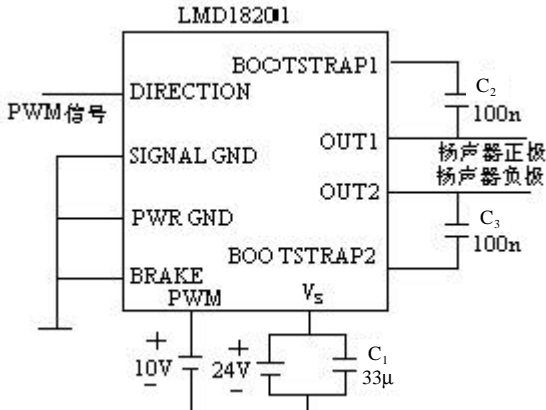


图 8 H-桥电路
Fig.8 H-bridge circuit

其中 C1 是 Ta 电容, 以确保开关时有足够的电流供给 H-桥; C2、C3 是解耦电容, 用来提高功率管的开关速度。H-桥输出给扬声器的方波是 PWM 信号的放大, 经扬声器的滤波电路消除声频以上的高频信号, 还原音频信号, 驱动扬声器。

1.5 电源电路

在整个电路中用到三种电压: unsp061 单片机的电压是 5 V; 音频信号的放大电路、比较器采用 ±10 V 的双电源; H-桥的电压是 24 V。若采用常规直流稳压电源的设计, 电路复杂、效率低, 体积、重量大。由此, 笔者采用开关电源, 先把 220 V 的交流电整流为高压直流电, 然后经开关电路的精确控制分割, 产生一种高压、高频的方波, 最后经小型变压器变压、整流、滤波后输出所需直流电。因变压器线圈的匝数与频率成反比, 频率越高, 匝数越少, 这样可以减少电源的重量和体积。在高频下, 用 Π 型滤波可把方波转换为直流电, 省略低效率的线性稳压电路, 提高电源的效率。具体电路不详细讨论。

2 效率分析的数学模型

第一部分电路运行在小功率的情况下, 效率的高低无关重要, 提高效率主要是第二

部分电路, H-桥的四个功率管总是工作在饱和/截止两种状态, 在截止状态时, 无电流, 无能量消耗; 在饱和状态时, 内阻很小, 等效电路如图 9 所示。其中 R_s 是功率管的等效电阻, C 是很小的滤波电容, R 、L 是扬声器的等效电路。为简便起见, 设音频信号是单一正弦波:

$$u = \sqrt{2}U \sin 2\pi ft$$

其频率是 f , 周期是 T , 设该信号被频率是 nf 的三角波所调制 ($n \geq 2$), 则 PWM 信号是频率为 nf 的方波, 设一个周期内高电平的占空因数为 $a_i (a_i < 1)$, 则低电平的占空因数是 $1 - a_i$, 负载中电流的波形可近似为 PWM 波形的放大 (L 、 C 很小), 其占空因数相同, 设其幅度为 $\pm I_o$, 则每一个周期 T/n 中负载的平均电流是:

$$\begin{aligned} \bar{I}_j &= \frac{1}{T/n} \int_0^{T/n} i(t) dt = \frac{n}{T} \left(\int_0^{a_i T/n} I_o dt - \int_{a_i T/n}^{T/n} I_o dt \right) \\ &= I_o (2a_i - 1) \end{aligned}$$

电源提供的功率是:

$$P_E = E_C \cdot |\bar{I}_j| = E_C I_o |2a_i - 1|$$

式中: E_C 为电源电压。

负载消耗的功率:

$$P = (E_C - 2U_{CES}) \cdot |\bar{I}_j| = (E_C - 2U_{CES}) I_o |2a_i - 1|$$

式中: U_{CES} 为功率管内阻上的压降。

电路的效率:

$$h = \frac{P}{P_E} = \frac{E_C - 2U_{CES}}{E_C}$$

由上式可知, 功率管的饱和压降越小, 效率越高; 提高电源电压, 可明显提高输出功率, 也可提高效率, 但处于安全考虑, 只能适度。另外, 由于开关信号和电磁干扰信号都要消耗一部分能量, 所以实际值会略小于理论值。

3 注意事项

D 类功放采用脉宽调制方式, 效率高, 但设计者一般认为其音质不够理想。笔者认为, 这并非理论上的问题, 原因是制作不精细, 对以下几方面考虑不周。

(1) 采用 LC 振荡器产生的三角波, 其幅度、频率都不稳定, 甚至扭曲、变形。用来调制信号, 使脉宽的变化不能真实反映信号的信息, 引起输出噪声, 甚至变声。

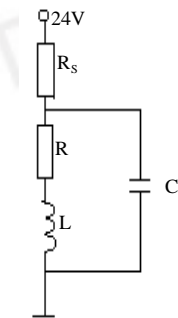


图 9 输出端阻抗等效电路
Fig.9 The impedance equivalent loop of the output stage

(2) 比较器输出的脉冲不理想，高低电平之间的转换时间太长，使 H-桥输出的波形产生较大的交越失真，导致音质生硬，不够圆润。

(3) 高频率 MOSFET 功率管的饱和/截止工作状态之间的转换要快，这样可避免两组功率管同时导通或截止。

(4) H-桥电路要进行有效的屏蔽，以免 MOSFET 功率管工作在大功率、高频率时，对外辐射电磁波，干扰音频信号。

(5) 可采用负反馈或局部负反馈来提高保真度。

4 结束语

随着电子技术的迅速发展，各种 D 类功放的设计方法也层出不穷，笔者设计的 D 类功放效率可达到 86.9% 以上，在负载是 4Ω 时，最大输出功率可达 71 W，且音质较好。基本可满足家庭音响的要求。

参考文献：

- [1] Jason Cookson, Janelle Tonti. Class D audio power amplifier [C]. The University of Maine, 2002. 5.
- [2] Duncan McDonald. Class D audio-power amplifiers: Interactive simulations assess device and filter performance [Z]. Transim Technology Corp, 2001. 4.

(编辑：尚木)