

D类音频功率放大器的关键技术

朱高峰, 吴黎明, 王桂棠, 张艳蕾

(广东工业大学信息工程学院, 广州 510643)

摘要: 随着移动音频设备的迅速发展, 传统的模拟线性放大器已不能满足大功率输出同时发热量少的要求, 而 D 类放大器能克服以上缺点, 但其引入的失真通常大于线性放大器, 研究适合的控制方法以改善 D 类放大器的保真度, 是近年来声学技术和音频功率放大领域研究的热点。本文除了介绍 D 类放大器的基本原理之外, 还着重分析了几种新型的关键控制技术以及元器件选择、电磁兼容、电路板布局方面需要重视的一些问题。

关键词: PWM(脉冲宽度调制); THD(谐波畸变率); 单周控制; 动态补偿; EMI(电磁干扰)

中图分类号: TN72

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2006)-05-0452-05

Key techniques of class D audio power amplifier

ZHU Gao-feng, WU Li-ming, WANG Gui-tang, ZHANG Yan-lei

(Information Engineering Institute of Guangdong University of Technology, Guangzhou 510643, China)

Abstract: With the rapid development of mobile audio equipment, conventional linear amplifiers can no longer meet the requirements of large power with low heat radiation. In this respect, class D amplifier has good performance as a switching power amplifier. However its distortion is greater than amplifiers. New control techniques to improve fidelity of class D amplifier have been studied in recent years. In this paper, the principle of D amplifiers is presented. Some control techniques including component selection, electromagnetic compatibility, and PCB layout are discussed. Using these techniques, efficiency of 90% can be achieved, and distortion can be made below 0.5%.

Key words: pulse width modulation; total harmonic distortion; one cycle control; dynamic compensation; electromagnetic interference

1 引言

最近几年, 电子产品正在向薄型化、便携式迅速发展, 由此人们对音频功率放大器提出了非常高的要求。因为移动设备受电池容量、散热、体积的限制, 对音频功率放大器要求高效节能、发热量少、体积小、便于集成。普通功放发热量大, 不易解决散热问题。而 D 类放大器由于工作在开关状态, 作为控

制元件的晶体管本身消耗功率较低, 功放的效率就高, 可达 90%以上, 因此能极大地降低能源损耗, 减小放大器体积。近几年, 工业控制上快速低电压控制大电流的 MOSFET 管也已用得很普遍, 该管开关特性、导通饱和压降和截止漏电流特性都大大改善, 应用到音频开关放大器上, 能大大提高其可靠性和保真度。故 D 类放大器在便携式设备上的应用具有很大的优势, 受到许多开发商的青睐。

D 类功放虽然也被称作数字化功放, 但在电路设计上绝不像纯粹的数字电路那么简单, 也不是直接采用一两块芯片就认为设计大功告成。以数字手段实现模拟功能, 仍然需要考虑许多模拟方面的因素, 其控制方式、元器件选择、电路板布局是直接影

收稿日期: 2005-09-28; 修回日期: 2005-12-29

基金项目: 广东省科技计划项目(2005B10201017)

作者简介: 朱高峰(1979-), 男, 湖南省双峰县人, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机测控技术、光机电一体化关键技术。

响其高保真度性能的关键因素。

2 工作原理

D类放大器一般采用脉冲编码调制即 PWM (Pulse Width Modulation) 控制技术, 由前后两级构成, 如图 1 所示。前级主要完成音频信号的 PWM, 将音频信号转换成 PWM 波输出; 后级为功率转换电路, 主要完成电平转换和功率输出。

模拟音频信号进入前置放大器放大后的信号 V_{in} , 与三角波发生器产生的三角波 V_m 进入比较器进行比较。当 $V_{in} > V_m$ 时, 比较器输出高电平, 反之, 输出低电平。这样把输入信号的大小转变为输出脉冲的宽窄, 相当于用输入信号 V_{in} 去调制载波 V_m , 从而形成占空比随输入信号幅度变化的输出调制波 V_o , 即 PWM 技术。从 CD 和 DVD 光盘到数字广播和 MP3, 大多数先进的媒体格式都是数字的。若是数字信号输入, 一开始的取样比较及调制过程都不再需要, 可以采用数字信号处理技术直接把不同格式的数字音频变换成 PWM 或 PDM 码, 后面的放大方式照旧。

后级低通滤波器选用单端两极点 LC 积分电路, 即一种最简单的数模转换器, 可将放大的 PWM 信号解调, 当脉冲宽度大时, 电容上的电压就积累得高, 反之电压就低。这样既可滤掉高频开关噪声, 又得到放大的音频信号, 驱动扬声器发声。同时由于功率管处于开关状态, 功耗很低, 因而可以获得很高的效率, 理论上可以获得 90% 以上的效率。

对调制波信号进行傅立叶分解, 其频谱可以用二维傅立叶级数表示。以单边调制为例, 设载波角频率为 ω_c , PWM 波形幅值为单位 1, 对信号 $M\cos\omega t$

的调制波形进行傅立叶分解, 表达式如下:

$$F(t) = k + \frac{M}{2} \cos \omega t + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m \omega t}{m \pi} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(m \pi M)}{m \pi} \cdot \sin(m \omega t - 2m \pi k) - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\infty} \frac{J_n(m \pi M)}{m \pi} \cdot \sin(m \omega t + n \omega t - 2m \pi k - \frac{n \pi}{2})$$

式中 k 为锯齿波的平均幅值, J_n 表示第一类贝塞耳函数。

由上面的表达式可知, 在其输出频谱中, 包含输入信号, 载波信号, 载波信号谐波, 以及输入信号与载波、输入信号谐波与载波谐波相互作用得到的边带信号, 这些边带信号有可能落入音频范围内, 造成音频信号失真。因此应尽可能提高载波频率即三角波的频率, 这样即可减少音频信号失真, 又可简化滤波器设计, 减小滤波器体积。当然, 开关频率越高, 后级放大器的功耗也越大(一般取开关频率为 200kHz)。以下是提高保真度的新的控制理论和方法。

3 反馈控制技术

一般的 D 类放大器为了提高放大倍数, 减少制作体积, 选择为开环系统, 但通过反馈控制技术可以减小 D 类放大器失真。假设放大器开环控制模型如图 2(a) 所示。

开环控制时, 输出 $V_{out} = H_{ff} V_{in} + V_n$ (1)

$THD_1 = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2} / (H_{ff} V_{in})$ (2)

式中 V_{in} 为放大器的输入信号, V_n 为谐波失真引入函数, H_{ff} 为传递函数, THD_1 为开环模型的总谐波失真。

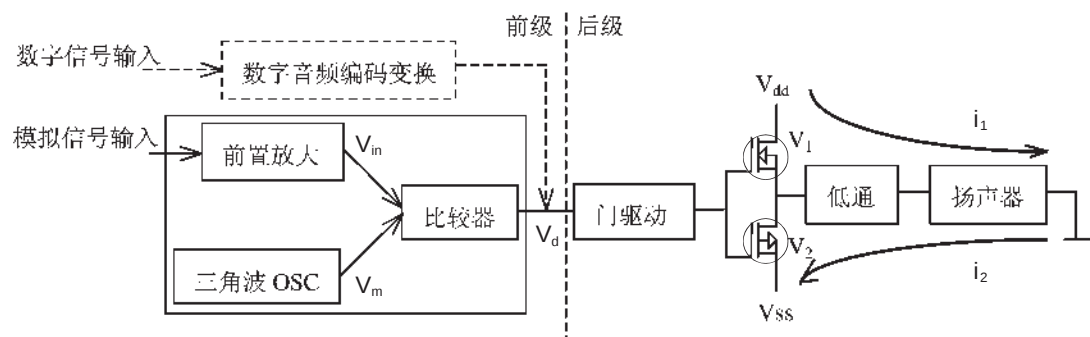
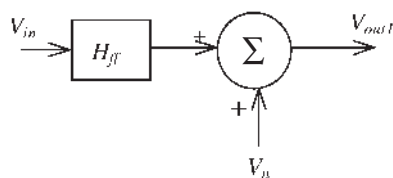
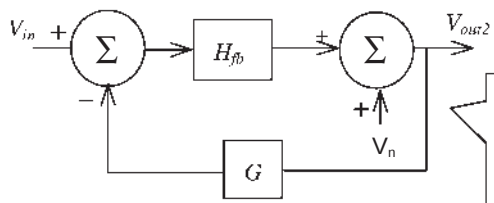


图 1 D 类放大器

Fig.1 The class D amplifier.



(a) 开环模型



(b) 闭环模型

图 2 D 类放大器模型

Fig.2 The model of class D amplifier

假设闭环控制时的反馈增益为 G , 建立 D 类放大器闭环控制模型如图 2(b) 所示, 则输出

$$V_{out2} = H_{fb} V_{in} / (1 + H_{fb} G) + V_n / (1 + H_{fb} G) \quad (3)$$

式中 H_{fb} 为闭环模型的传递函数。为了得到相当的放大倍数, 设计传递函数为: $H_{ff} = H_{fb} (1 + H_{fb} G)$, 则等式 (3) 调整为:

$$V_{out2} = H_{ff} V_{in} + V_n / (1 + H_{fb} G) \quad (4)$$

总谐波失真

$$THD_2 = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2 / (H_{ff} V_{in} (1 + H_{fb} G))} \quad (5)$$

比较等式 (2) 和 (5) 可以看出, 闭环控制时 THD (Total Harmonic Distortion) 为开环控制时 THD 的 $1/(1 + H_{fb} G)$, 即闭环控制改善了放大器的 THD^[1]。

在图 2(b) 的反馈设计中, 可采用求和积分器代替简单的加法器。由于积分器实质上是一个低通滤波器, 因此可衰减反馈信号中的高频载波成分, 增加低频反馈量, 特别是直流成分, 从而有效改善零输入时的占空比误差(是由输入信号直流电平与比较器门限电压的差异所形成)。另外, 还可采用电压、电流双环反馈的方案, 电流反馈环为内环, 电压反馈为外环, 电压反馈环为电流反馈环提供参考信号。这种双环反馈方式可改善放大器带宽, 增大放大器的放大倍数的恒定性, 提高放大器效率^[4]。

4 动态补偿控制

在 DC/AC 变换^[3]中, 为了降低输出交流电源的

THD, 减小纹波, 常采用串联补偿电压源或并联补偿电流源的方案。在 D 类放大器中, 由于变换器的非线性工作方式, 输出信号含有大量纹波。基于 DC/AC 中的补偿思路, 可考虑在 D 类放大器中引入补偿源, 但如果直接采用前面的方案, 由于直接串联电压源或并联电流源会产生很大的功率损耗, 降低了 D 类放大器的总体效率; 若用开关电源, 又可能增大整个放大器体积, 而高效率、小体积正是 D 类放大器的最大优点。为了克服直接串联电压源或并联电流源带来的功率损失, 采用辅助 D 类放大器作为动态补偿源, 产生补偿电压以消除输出纹波的方案, 该方案原理框图如图 3 所示。

图中主放大器为半桥配置, 主开关频率可设计仅为放大器输出带宽的 2 倍, 主放大器的输出纹波由辅助功率放大器通过变压器耦合进行补偿。由于辅助放大器只补偿纹波电压, 工作电压低, 因此开关频率可达到很高。虽然采用了两套 D 类放大器, 但由于主开关工作频率很低, 极大地降低了开关损耗; 辅助开关虽然工作频率高, 但工作电压低, 功率小, 因此整个放大器的总体效率得到提高。同时, 由于辅助放大器工作频率很高, 动态范围宽, 因此整个放大器的动态性能也得到改善^[6]。

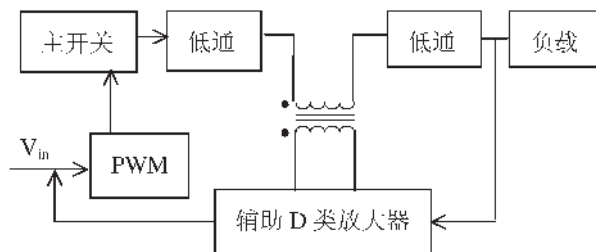


图 3 动态补偿方案

Fig.3 The scheme of dynamic compensation

5 单周控制技术

单周控制技术(one cycle control)是一种新型非线性大信号 PWM 控制理论^[2], 它的基本思想是通过控制开关的占空比, 使每个开关周期中开关变量的平均值严格等于或正比于控制参考量。图 4 所示为单周控制的 BUCK 型变换器, 控制器主要包括积分器、复位开关 S、比较器和 RS 触发器。开关 T 和 S 可以是电子开关, 当控制端为“1”时闭合, 为“0”时断开。当时钟脉冲到来时, RS 触发器置位(Q 端为“1”,

$\overline{Q}$ 为“0”),控制主开关 T 导通,复位开关 S 关断。在这个状态中,开关变量 V_D 等于电源电压 V_g ,积分器积分,直到积分输出 V_{int} 等于控制参考 V_{ref} ,比较器输出“0”,复位 RS 触发器(Q 端为“0”, $\overline{Q}$ 为“1”),控制主开关 T 关断,复位开关 S 导通。由于二极管导通,开关变量 V_D 为零,直到下一个时钟脉冲到来^[7]。

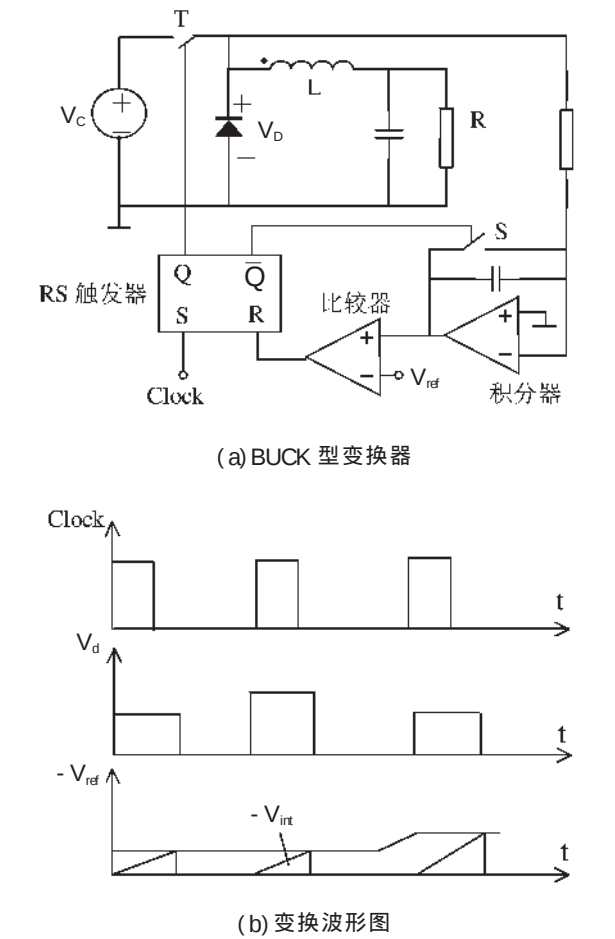


图 4 单周控制原理

Fig.4 Control principle with One-cycle Response

控制方程如下式:

$$\overline{V_D}=1/T_s \int_0^T V_D(t) dt=1/T_s \int_0^T V_D dt=kV_{ref} \tag{6}$$

式中 T_s 是开关周期, $\overline{V_d}$ 是 V_d 在一个开关周期中的平均值, $k=R_f C_{int} / T_s$ 是电压放大倍数。当参考信号 V_{ref} 发生变化时比较器输出为“0”时刻相应改变,使得主开关 T 关断时间跟随 V_{ref} 的变化,以保证在 V_d 两端产生的 PWM 信号严格正比于控制参考量 V_{int} ,这样在一个周期内自动消除了稳态、瞬态误差,使前一周期的误差不会带到下一周期。因此输出没有交越失真,能得到很高的线性度。

单周控制技术虽然硬件电路较复杂,但很适合应用于开关音频放大器:单周控制使开关变量在一个开关周期中精确地跟随控制参考,这就保证了获得高带宽;单周控制有效地消除电源纹波干扰且在同一级电路中处理信号和功率,因此不需要高精度的直流电源,控制方法简单。

6 电磁干扰和布局的考虑

开关电源由于快速变换大电流而引起的电磁干扰 EMI (Electro Magnetic Interference) 是 D 类放大器设计中应注意的又一个关键点^[5]。因为它不得不承载高功率 PWM 信号的导线发射 PWM 频率的电磁辐射及其进入射频带范围的谐波。长的非屏蔽扬声器接线就象天线一样能发射电磁波,因此,重建滤波器以防止幅射起到重要作用。低截止频率的滤波器可以抑制 EMI,但是也损耗音频频谱的高端,而高截止频率会保持平坦的频率响应,却要付出增加 EMI 的代价。高阶滤波器可以满足两种要求。在放大器内部,可以通过使输出级和滤波器之间的供电线和连接线尽可能短而降低 EMI。这些元件应该尽量与供电电源设计在同一块 PCB 上。由于降低了阻性损耗,短而宽的铜箔线也使得放大器的效率更高。在多声道系统中,很难将大量的功率 MOSFET 靠近电源放置,为了防止串扰,设计每端具有一个低 ESR 存储电容器的“星形”连接是非常理想的。

系统中可以方便地放置在离其它电路某段距离的地方的部件是 PWM 控制器。为了防止来自其它系统元件的干扰在 PWM 信号中引入抖动,将标准 CMOS 电压电平切换到低电压差分信号: (LVDS Low Voltage Difference Signal) 模式,每条线都用 100Ω 负载终结。LVDS 还能降低电磁辐射以及由长的信号线运行引起的 RC 延迟。

7 结 论

反馈控制和动态补偿控制都可在一定程度上改善放大器的保真度,提高整体效率,但反馈网络的延时特性设计较困难。单周控制技术具有控制方法简单,动态性能好,抗干扰能力强的优点,更容易适合于 D 类音频功率放大器。对家用音频功率放大器的三个关键指标总谐波失真 (THD)、信噪比 SNR (Signal

Noise Ratio) 和功率效率, D 类技术相对于模拟技术具有无可争议的优势。实验表明, 集成块 TDA8929, 其中 PWM 变换器采用 D 类放大器, 在传送 1W 音频功率时, 测量显示 THD 为 0.04%(-80dB), 在 30W 时则为 0.4%(-60dB)。还得到了高达 90% 的效率和超过 100dB(A-权重) 的 SNR。目前 D 类功放在便携式音响设备、笔记本电脑、迷你有源音箱、手机和声卡上已经得到广泛的运用。

参 考 文 献

- [1] CHANG J S, GWEE B H, LON Y S, et al. A Novel Low-Power Low-Voltage Class D Amplifier with Feedback for Improving THD Power Efficiency and Gain Linearity [A]. Proc-IEEE International Symposium On Circuits And System[C]. 2001, 1: 1-635-1-638.
- [2] SMITH KM, LAI Z R, SMEDLEY KM. A New PWM Controller with One-cycle Response[J]. IEEE Transaction On Power Electronics, 1999, 14(1): 142-150.
- [3] 马智龙, 丁玉薇. 程控功率超声发生器[J]. 声学技术, 1997, 16(1): 36-38.
- MA Zhilong, DING Yuwei. Stored Program Control Power

Ultrasonic Generator[J]. Technical Acoustics, 1997, 16(1): 36-38.

- [4] 鲍善惠. 一种采用集成驱动器的超声波发生器[J]. 声学技术, 1999, 18(2): 34-36.
- BAO Shanghui. an Ultrasonic Generator with Sntegrated Drivers[J]. Technical Acoustics, 1999, 18(2): 34-36.
- [5] 白同云, 吕晓德. 电磁兼容设计[M]. 北京: 北京邮电出版社, 2001, 63-168.
- BAI Tongyun, LU Xiaode. Design for Electromagnetic Com-patibility[M]. BEIJING: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2001, 63-168.
- [6] 康华光, 陈大钦. 电子技术基础(模拟部分)[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 1999, 277-314.
- KANG Huaguang, CHENG Daqin. Basis of Electronic Technologyc(Analog Circuit) the Fourth Edition[M]. BEIJING: Press of Higher education, 1999, 277-314.
- [7] 康华光, 邹寿彬. 电子技术基础(数字部分)[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2000, 179-201.
- KANG Huaguang, ZHOU Shoubin. Basis of Electronic Technologyc(Digital Circuit) [M]. the Fourth Edition. Beijing: Higher Education Press, 2000, 179-201.

简 讯

欢迎订阅《声学技术》双月刊

《声学技术》是中国科学院声学所东海研究站、同济大学声学研究所、上海市声学学会和中船重工集团 726 研究所合办的学术性刊物。1982 年创刊, 2006 年起由季刊改为双月刊, 国内外公开发刊, 已被《中国物理文献》数据库收录, 是《中国科技引文数据库》、《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊, 是中国科技论文统计源期刊, 被《中国核心期刊(遴选)数据库》收录, 在“万方数据-数字化期刊群”全文上网。并由《中国学术期刊(光盘版)》和《中国期刊网》全文收录, 被评为《CAJ-CD》执行优秀期刊。2004 年 3 月被评为《中国科技核心期刊》, 2004 年 4 月经专家评审, 被评为中文核心期刊, 并入编《中文核心期刊要目总览》(第四版)。

本刊专业范围包括: 超声学、生物医学超声学、电声学、水声学、海洋声学技术、建筑声学、噪声控制、生理和心理声学、声信号处理、换能器和声系统等。凡有关上述专业内容的科研论文、实验报告、综述评论、研制总结、使用经验等等, 均欢迎向本刊投稿。此外, 本刊还承接有关新产品的广告业务, 质量保证, 收费合理, 欢迎刊登。

本刊是中文核心期刊, 每双月末出版, 定价: 8.00 元/期, 48.00 元/年。国内统一刊号: CN31-1449/TB, 国际刊号: ISSN1000-3630, 国外发行代号: Q7276。读者可直接到编辑部订阅, 按以下地址将款邮寄至编辑部或通过银行汇款均可。

开户银行: 中国工商银行上海市建国西路支行
户 名: 中国科学院声学研究所东海研究站
帐 号: 1001220709026400618

编辑部地址: 上海市小木桥路 456 号《声学技术》编辑部
电 话: 021-64174105 64048159 转 119
邮 编: 200032
传 真: 021-64174105
E-mail: sxjs@21cn.com