

# 基于 CMOS 的 CLASSD 类功放线性度的提升

姚怡, 孙秀丽, 程晗, 秦慧平, 郭佳丽, 尹超, 张倩, 李旖旎

武汉纺织大学外经贸学院, 湖北 武汉 430200

DOI: 10.61369/RTED.2026040022

**摘 要 :** Class D 类功放是一种开关型功率放大器, 由于具有高效率、低功耗, 以及易于数字化集成的特点, 在便携式电子设备、汽车音响、智能终端等各个领域都具有深远影响。CMOS 工艺集成度高、成本低、功耗可调, 与 Class D 类功放应用需求一致, 是目前功放电路设计的主要工艺。本文以 CMOS 的 Class D 类功放为研究对象, 从功放的工作原理和线性度影响机制入手, 对线性度提高技术方法、CMOS 开关元件的优化设计以及电路设计和仿真进行系统分析, 提出相应路径。

**关 键 词 :** CMOS 工艺; Class D 类功放; 线性度; 开关元件; 失真补偿

## Improvement of Linearity of Class D Power Amplifier Based on CMOS Technology

Yao Yi, Sun Xiuli, Cheng Han, Qin Huiping, Guo Jiali, Yin Chao, Zhang Qian, Li Yini

Foreign Economic and Trade College, Wuhan Textile University, Wuhan, Hubei 430200

**Abstract :** Class D power amplifier is a type of switching power amplifier. Due to its characteristics of high efficiency, low power consumption, and ease of digital integration, it has far-reaching impacts in various fields such as portable electronic devices, car audio systems, and intelligent terminals. CMOS technology, featuring high integration, low cost, and adjustable power consumption, is consistent with the application requirements of Class D power amplifiers and has become the main process for current power amplifier circuit design. Taking the CMOS-based Class D power amplifier as the research object, this paper starts with the working principle of the power amplifier and the influencing mechanism of linearity, conducts a systematic analysis of linearity improvement technical methods, optimal design of CMOS switching elements, as well as circuit design and simulation, and proposes corresponding paths.

**Keywords :** CMOS technology; Class D power amplifier; linearity; switching elements; distortion compensation

### 一、基于 CMOS 的 Class D 类功放线性度影响机制分析

#### (一) CMOS 开关元件的非线性特性对线性度的影响

从导通电阻的角度看, CMOS 晶体管导通电阻会随着漏源电压的变化而变化, 当输入信号幅值发生变化的时候, 漏源电压也随之变化, 导通电阻也会随之改变, 造成开关桥路输出电压和占空比的线性关系被破坏, 出现非线性失真<sup>[1]</sup>。从开关速度上来说, CMOS 晶体管的开关过程不是瞬间完成的, 有导通延迟和关断延

迟。高频开关工作模式下, 由于延迟时间的存在, PWM 信号的占空比会出现偏差, 尤其是在输入信号频率较高的时候, 延迟时间所占的信号周期比例变大, 偏差也越大, 从而造成输出信号和输入信号之间的线性关系遭到破坏。另外, CMOS 晶体管的阈值电压离散性以及温度敏感性, 都会对线性度造成影响。

#### (二) 信号调制与驱动过程的非线性影响

Class D 类功放的调制模块主要使用 PWM 调制方式, 把输入的模拟信号转换成高频脉冲信号, 调制过程中产生的非线性会对 PWM 信号的占空比和输入信号幅值的线性关系造成破坏, 最终影

作者简介:

姚怡, 女, 汉族, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向: 电气工程及其自动化专业。

孙秀丽, 女, 汉族, 湖北武汉人, 学历硕士研究生, 研究方向: 电子信息。

程晗, 男, 汉族, 湖北天门人, 硕士研究生, 研究方向: 智能制造。

秦慧平, 女, 汉族, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向: 电子信息。

郭佳丽, 女, 回族, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向: 社会实践能力培养、心理健康教育。

尹超, 男, 汉族, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向: 中国画艺术研究。

张倩, 女, 汉族, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向: 工业产品设计—智能交互。

李旖旎, 女, 汉族, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向: 思想政治教育。

响到输出信号的线性度。PWM 调制时,将输入的模拟信号和高频载波信号相比较,得到 PWM 脉冲信号。调制模块存在比较器延迟、载波信号失真等问题,会造成线性关系出现偏差。比较器响应延迟会造成 PWM 信号上升沿、下降沿偏移,造成占空比和输入信号幅值的对应关系不是线性的;载波信号波形失真会造成调制时出现误判,从而产生非线性失真<sup>[2-3]</sup>。并且,如果驱动模块的增益是非线性的,就会使驱动信号的幅值和输入 PWM 信号的幅值不成线性关系,从而影响到开关元件的导通和关断状态,造成输出信号失真。

### (三) 电路拓扑与反馈机制的不完善影响

基于 CMOS 的 Class D 类功放常用的拓扑结构有半桥拓扑和全桥拓扑,两种拓扑结构各有优缺点,都会对线性度造成影响。半桥拓扑结构简单、成本低,但是输出电压幅值小,存在母线电压波动问题。当功放输出低频信号的时候,负载电流会产生能量回流,造成母线电压波动,进而影响到开关桥路的输出电压,产生非线性失真;全桥拓扑结构可以有效地抑制母线电压波动,输出电压幅值更高,但是结构比较复杂,需要更多的 CMOS 开关元件,元件参数的离散性会加剧非线性失真,全桥拓扑的驱动电路也更复杂,驱动过程的非线性也会对线性度产生影响<sup>[4]</sup>。反馈机制是提高功放线性度的手段,利用反馈回路对输出信号进行采样,然后与输入信号比较,调节功放的工作状态,减小失真。但是如果缺乏完善的反馈机制,就无法有效地补偿非线性失真,还会产生新的失真。

## 二、基于 CMOS 的 Class D 类功放线性度提升技术

### (一) 线性度补偿技术:主动抵消非线性失真

#### 1. 预失真技术

预失真技术的基本原理就是反向补偿,即预先对输入信号进行非线性处理,产生与功放本身的非线性失真相反的失真信号,经过功放放大后,两种失真信号相互抵消,得到线性的输出信号。基于 CMOS 的 Class D 类功放,预失真技术主要是对输入信号进行调制前的预失真处理,采用 CMOS 工艺来完成预失真电路的集成,与功放主体电路一起构成一体化设计。预失真电路的核心就是模拟功放的非线性特性,产生反向失真的信号,例如,如果功放的非线性会造成输出信号出现幅值衰减、谐波失真,那么预失真电路就会对输入信号做适当的幅值增强和反谐波处理,使经过功放放大后的输出信号可以恢复到理想的线性状态<sup>[5-6]</sup>。预失真技术具有结构简单、成本低、可以补偿功放静态非线性失真的优点,不需要对功放主体电路做大的改动,适合与 CMOS 工艺集成。但是该技术的缺点是,补偿效果取决于对功放非线性特性的准确建模,如果功放的非线性特性随着温度、负载等发生变化,那么预失真的补偿效果就会降低,因此一般采用自适应技术,不断调整预失真的参数来保证补偿效果的稳定。

#### 2. 数字校正技术

随着数字信号处理技术的发展,数字校正技术成为提高 Class D 类功放线性度的主要方法,用数字信号处理技术对功放的输出

信号进行实时监测和分析,提取出失真成分,再用数字算法生成校正信号,反馈到输入端或者调制模块,对输入信号或者 PWM 信号进行校正,从而减小非线性失真。基于 CMOS 的 Class D 类功放,数字校正技术可以和 CMOS 数字电路集成在一起,实现小型化、低成本的设计。具体可以分为三个步骤,首先是采用采样模块对功放的输出信号进行实时采样,把模拟输出信号转化为数字信号;其次用数字信号处理模块对采样信号进行分析,提取出非线性失真的部分,建立失真模型;最后根据失真模型产生校正信号,经数模转换模块转换成模拟信号,反馈到输入端或者调制模块,对输入信号或者 PWM 信号进行校正,消除功放造成的非线性失真<sup>[7]</sup>。数字校正技术的优势在于校正精度高,可以即时响应功放非线性失真的变化,也能随着温度、负载等环境的变化而调节,补偿效果比较稳定。数字校正技术可以利用软件算法进行各种失真的补偿,应用范围广。但是它需要额外的数字信号处理电路和采样电路,从而加大了电路的复杂度以及功耗,对 CMOS 工艺的集成度要求很高。

### 3. 负反馈技术

负反馈技术是电子电路中常用的线性度提高方法,将功放的输出信号采样后,以和输入信号相反的相位反馈到输入端,与输入信号比较得到误差信号,用误差信号调节功放的工作状态,减小输出信号和输入信号之间的偏差,提高线性度。对于基于 CMOS 的 Class D 类功放,负反馈技术主要用在开关桥路的输出端和调制模块的输入端之间,构成闭环反馈系统。反馈回路的主要部分是采样模块、比较模块,采样模块对开关桥路的输出信号进行采样,得到输出信号的幅值和相位信息,比较模块将采样信号与输入信号进行比较,产生误差信号,误差信号送到调制模块,调节 PWM 信号的占空比,改变开关桥路的输出电压,减小非线性失真。负反馈技术优点是结构简单、响应快,可以补偿功放动态非线性失真,提高功放稳定性及线性度,并且容易和 CMOS 工艺集成。但是反馈深度的设计十分重要,反馈深度太浅不能补偿失真,反馈深度太深会造成系统不稳定或者产生振荡。因此在设计负反馈回路的时候,要合理地设计反馈系数,平衡线性度提高和系统稳定的两者之间的关系。

### (二) CMOS 开关元件优化:从源头减少非线性失真

首先要对 CMOS 开关元件的导通电阻进行优化。导通电阻的非线性是造成输出信号失真的主要因素,通过改善晶体管的结构设计,增大沟道宽度、减小沟道长度可以减小导通电阻的数值,减小导通电阻随漏源电压、栅源电压变化的幅度,改善导通电阻的线性特性。另外,用互补对称的 CMOS 晶体管结构可以抵消导通电阻的非线性影响,提高开关桥路的输出线性度。其次,提高 CMOS 开关元件的开关速度<sup>[8]</sup>。开关速度不够会造成 PWM 信号的占空比误差增大,从而加重非线性失真的情况,改善晶体管的栅极结构,减小栅极电容和栅极电阻,能加快开关速度,缩减导通延迟和关断延迟。采用高速驱动电路给栅极提供足够的驱动电流,保证开关元件可以迅速、可靠地导通和关断,减小开关过程中波形失真,提高线性度。最后就是减小 CMOS 开关元件的阈值电压离散性。阈值电压的离散性会造成开关时序误差,产生死区

时间失真,通过改善 CMOS 工艺参数,比如离子注入剂量、退火温度等,可以减小阈值电压的离散性,使同一批次的晶体管阈值电压一致。另外,在电路设计时加入阈值电压补偿电路,可以实时调节晶体管的栅源电压来补偿阈值电压的误差,减小死区时间失真,提高线性度。

（三）电路设计与仿真优化：完善系统性能

在电路拓扑结构上,根据应用要求选择合适的拓扑结构,对结构进行改进。半桥拓扑中可以引入母线电压补偿电路来抑制母线电压波动,减少非线性失真,全桥拓扑中可以优化开关元件的布局和驱动时序,减小元件参数离散性造成的不良影响,采用对称的驱动电路使互补晶体管的导通和关断时序一致,减少死区时间失真。除此之外,对低通滤波模块进行改进设计,选择合适滤波参数、拓扑结构来滤除高频载波和噪声,提高输出信号的质量,间接改善线性度。就反馈机制改进而言,采用预失真技术、数字校正技术以及负反馈技术等手段来创建复合反馈系统,从而达成对各种失真的全面补偿。将负反馈技术和数字校正技术结合起来,用负反馈技术快速补偿动态失真,用数字校正技术准确补偿静态失真和环境因素造成的失真,提高补偿效果;将预失真技

术和反馈技术结合起来,先用预失真技术进行初步补偿,再用反馈技术进行实时调整,保证线性度的稳定性。电路仿真验证属于优化设计的重要部分,利用电路仿真软件对功放电路的工作状态加以模拟,剖析输出信号的失真状况,找出线性度存在的不足之处,从而为设计改进给予支撑<sup>[9-10]</sup>。仿真验证主要是对线性度指标进行验证,模拟不同的输入信号、不同的负载、不同的温度条件下功放的工作状态,分析非线性失真产生的原因及影响程度,根据仿真结果调整电路参数、优化元件设计、完善反馈机制,经过多轮仿真迭代,使线性度得到逐步提高。

三、结论

随着 CMOS 工艺以及数字信号处理技术的发展,基于 CMOS 的 Class D 类功放的线性度会越来越高,相应应用范围也会越来越广。未来还将出现对功放的非线性研究,改进补偿算法及电路设计,使线性度和效率、功耗之间达到最佳平衡,促进 Class D 类功放技术全面发展。

参考文献

[1] 张明文,王亚东,吴宇鹏,等. 低压低功耗大带宽高增益 CMOS 运算放大器设计研究 [J]. 科技资讯, 2025,23(03):111-113.

[2] 徐石雄,员振寰,曹秋挺,等. 基于 MCU 的 CMOS 单线激光测距系统设计与实现 [J]. 现代信息科技, 2024, 8(21):1-5+10.

[3] 赵宝平,陈林山,焦红兰,等. 电控单元及执行器电路分析与检测教学模式的研究(中)——基于高职院校《电控汽油发动机维修》课程理实一体化 [J]. 汽车维修与保养, 2024,(11):108-110.

[4] 李强,杨媛,邢文彬,等. 具有宽电源电压的 CMOS 电压基准设计 [J]. 固体电子学研究与进展, 2024, 44(05):455-460.

[5] 李良钰,蔡教武,乔瑞杰,等. 应用于 D 类功放的新型三角波发生器设计 [J]. 电子技术, 2024, 53(10):410-413.

[6] 常书惠. 基于 Multisim 的集成运算放大电路仿真实验研究 [J]. 电子质量, 2024,(10):60-65.

[7] 张超然,杨以俊,孙晓红. 一种改善 IMD3 的高线性射频功率放大器 [J]. 电子元件与材料, 2024, 43(07):872-877.

[8] 刘洁怡,周佳社,王新怀,等. 面向模拟电子技术的远程在线实验教学模式探索 [J]. 实验室科学, 2024, 27(02):98-102+107.

[9] 曹斌芳,蒋云龙,李思,等. 融合 MOOC 的信号与系统实验课教学模式改革探索 [J]. 当代教育实践与教学研究, 2019,(20):16-17.

[10] 张文俊. 大带宽线性调频信号侦收系统的设计方法和处理流程 [J]. 电子技术与软件工程, 2019,(17):56-60.