

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211416

# 结合多项式拟合的功率回退改进方法\*

张昕哲<sup>1,2</sup> 刘成成<sup>1,2</sup> 汪友华<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300130;

2. 河北工业大学河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300130)

**摘要:** 常用的功率回退法可以在一定程度上改善放大器的非线性问题,但由于该方法的效率较低,因此使用范围存在局限性。本文在功率回退的基础上,提出了一种结合多项式拟合的方法,提升了传统功率回退法 6~10 dB 的回退范围约束。为了验证组合方法的效果,本文搭建了基于 LabVIEW 的光电放大测试平台,对不同给定频率下的正弦波、方波以及三角波信号进行信号放大试验。在测试系统放大功能的同时对输出信号进行功率周期图谱分析,能够确定其谐波失真的状态。试验结果表明,改进后的方法降低各谐波分量的功率值相较于功率回退提高了 34.6%,证明了该方法对进一步改善放大器非线性问题的有效性。

**关键词:** 功率放大器; LabVIEW; 虚拟仪器; 非线性失真; 衰减输入; 多项式拟合

**中图分类号:** TH89 TM935 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

## Improved power back-off method combined with polynomial fitting

Zhang Xinzhe<sup>1,2</sup> Liu Chengcheng<sup>1,2</sup> Wang Youhua<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology,

Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei

Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** The commonly used Power Back-Off method can improve the nonlinear problem of the amplifier to some extent, but its application scope is limited due to its low efficiency. Based on the Power Back-Off, this paper proposes a method combining polynomial fitting to improve the 6~10 dB backoff range constraint of the traditional Power Back-Off method. In order to verify the effect of the combined method, the photoelectric amplification test platform based on LabVIEW was built in this paper to carry out signal amplification tests on sine wave, square wave and triangle wave signals at different given frequencies. When the amplifying function of the system is tested, the output signal is analyzed by power cycle map, and the harmonic distortion state can be determined. The experimental results show that the improved method can reduce the power value of each harmonic component by 34.6% compared with the Power Back-Off, which proves the effectiveness of the proposed method to further improve the nonlinear problem of the amplifier.

**Keywords:** power amplifier; LabVIEW; virtual instrument; nonlinear distortion; attenuated input; polynomial fitting

## 0 引言

随着互联网和通信技术的发展,信号放大系统在各种应用中所占比重越来越大。但是随着一些正交调制方式的出现,输出波形信号会产生很大的峰均比,导致信号经过放大器后产生严重的非线性失真<sup>[1]</sup>。正常情况下,工作在放大区的放大器会受到谐波或噪声等问题的干扰从而接近饱和点,导致失真情况的出现并加深放大器的非线性<sup>[2]</sup>。目

前针对改善放大器线性化的研究主要是前馈补偿、数字预失真(digital pre-distortion, DPD)以及功率回退(power back-off, PBO)等<sup>[3]</sup>。PBO可以使放大器远离饱和点以提升其线性度,但是效率比较低<sup>[4]</sup>。DPD对非线性失真的系统进行相反特性的补偿,并且在较大频谱范围内都可以进行<sup>[5]</sup>。前馈补偿技术用统一化增益信号与放大信号相减得到误差信号,并用其与正常放大信号的差值使放大器线性化<sup>[6]</sup>。

收稿日期:2022-09-16

\* 基金项目:国家自然科学基金(51877065)项目资助

相比于其他方法,PBO简单易操作,在不需要任何附加设备的情况下使放大器输入功率从1 dB压缩点向后回退6~10 dB,远离放大器饱和工作点。但是这种方法的效率差强人意,当输入功率回退到一定程度时放大器线性度将不再改变。赵康杰<sup>[7]</sup>设计了一种基于Doherty架构的28 GHz功率放大器,旨在提升1 dB压缩点以及6 dB功率回退处的工作效率。Lopera等<sup>[8]</sup>提出一种采用3.5 GHz动态输入功率分割的功率放大器设计模型,通过新兴的混合设计结构在6 dB回退值下提升增益。文献<sup>[9]</sup>通过减小载波功率放大器优化输出阻抗的变化范围从而提高放大器功率回退的性能,特别是在大功率回退应用的场合性能会得到更明显的提升。

放大器的输入和输出存在非线性函数关系时,传统的处理方法利用线性模型拟合非线性关系,但结果经常出现多重共线性问题。多项式拟合是一种可以通过增加自变量次数,将现有数据通过函数关系映射到多维度空间的拟合方法,它可以改变阶数从而达到逼近最优解的效果<sup>[10]</sup>。文献<sup>[11]</sup>以电压的均方根作为输入,THD系数作为输出值,基于双变量函数拟合测量THD系数。刘颖等<sup>[12]</sup>利用不同方式对热敏电阻曲线进行拟合,并对多项式自变量进行归一化处理,提高多项式拟合精度。

PBO作为放大器线性化技术存在一定局限性,因此本文在其基础上增加多项式拟合模型以进一步提高放大器线性化效果。利用PBO和多项式拟合进行组合,实现在6~10 dB的回退范围内继续增加回退值,同时用多项式对放大器输入进行拟合,在输出端进行校正,优化放大器因失真产生的非线性问题。试验和仿真结果表明该组合方法可以有效降低放大器输出中的谐波分量功率,提高PBO改善放大器线性化的效率。

## 1 放大器基本模型分析

放大器的结构主要包括输入匹配网络电路、栅漏偏置电路、输出匹配网络电路和功率放大器晶体管等,其基本结构如图1所示。

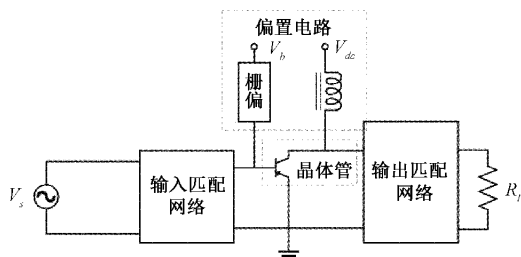


图1 放大器基本结构图

图中,输入和输出匹配网络主要是进行阻抗匹配,以提高在放大过程中的效率。由于放大器中某些元件的非线性特性,在输出信号中会存在除基波之外的高次谐波分量,匹配网络电路会对这些谐波分量产生抑制的作用。偏置电

路可以为晶体管输入更多能量,并且在给定输入的情况下在输出放大端信号。

在放大器的输入功率较小时,输出功率与输入功率的关系呈线性关系。但是当输入功率增加到一定范围,输出功率增长的加速度减小,逐渐表现出其非线性的特性,直至不再随输入功率变化,此时输出与输入的关系表示为:

$$y(t) = \lambda_1 x(t) + \lambda_2 x^2(t) + \lambda_3 x^3(t) \quad (1)$$

若输入信号为:

$$x(t) = V_{in}(t) = V \cos(\omega t) \quad (2)$$

则输出的信号频率由于系统的非线性会表示为:

$$y(t) = \lambda_1 V \cos(\omega t) + \lambda_2 V^2 \cos^2(\omega t) + \lambda_3 V^3 \cos^3(\omega t) = \frac{\lambda_2 V^2}{2} + \left( \lambda_1 V + \frac{3\lambda_3 V^3}{4} \right) \cos(\omega t) + \frac{\lambda_2 V^2}{2} \cos(2\omega t) + \frac{\lambda_3 V^3}{4} \cos(3\omega t) \quad (3)$$

由式(3)可以看出,输出信号中不仅包含直流分量,还包含基波分量、二次谐波和三次谐波分量。相比更高次数的谐波项,次数越大数值越小,所以通常情况只考虑到三次谐波分量。

此时最大输出功率能力称为1 dB压缩点( $P_{out,1dB}$ ),即实际输出功率增益比理想线性功率增益低1 dB,如图2所示,图中虚线A代表输出功率随输入功率变化的理想曲线,实线B表示实际情况下的输出变化曲线。由于系统非线性问题,实际情况下的系统增益会随着输入功率的增大而减小,即用1 dB压缩点表示该效应。

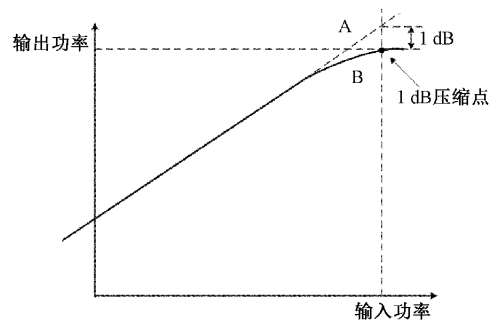


图2 1 dB压缩点

通过输入信号控制晶体管导通角的不同,传统放大器可以分为A、B、C、D类。这些类型的放大器具有较高的线性化,但是输出效率较低。还有其他D、E、F类型的放大器称为开关放大器,将晶体管作为控制开关,随输入功率的变化开启和关闭,这些放大器输出功率和输入功率不是线性关系,一般应用于恒包络方式装置中。

## 2 PBO及多项式拟合

### 2.1 PBO原理分析

PBO是将放大器输入功率在1 dB压缩点的位置向后回退6~10 dB,使其工作电压降低到远小于1 dB压缩点处的电压值,远离饱和点进入线性工作区。

传统的 RF 放大器经常采用 PBO 作为放大器线性化的手段,其结构通常包括固定或者温度补偿的栅极电压偏置。由于其栅极偏置电压不与输出端进行关联,所以只有当将输入功率回退幅度较大时才可以实现较好的线性化效果,但随着输出功率增大到饱和点时放大器的线性化指标也会快速下降。

在放大器工作过程中,增益中的立方项非线性分量是放大器产生失真的主要原因,不考虑其他非线性因素,放大器增益特性表示为:

$$V_o(t) = G_a \cdot V_i(t) + G_b \cdot V_i^3(t) \quad (4)$$

$V_i(t)$  和  $V_o(t)$  表示放大器的输入和输出信号,  $G_a$  和  $G_b$  分别表示线性增益和非线性增益。由于立方项  $V_i^3(t)$  主要导致放大器信号失真以及产生谐波分量,所以放大器通常将立方项  $V_i^3(t)$  的功率进行度量,得到 PBO 的理论计算值:

$$RCM = 20 \cdot \lg[\text{RMS} | V_{\text{norm}}^3(t) |] \quad (5)$$

$$V_{\text{norm}}(t) = \frac{|V_i(t)|}{\text{RMS}[V_i(t)]} \quad (6)$$

$V_{\text{norm}}(t)$  表示输入信号利用均方根归一化后的结果, RCM 为原始立方项的功率值,也是 PBO 的理论计算值,由  $V_{\text{norm}}(t)$  进行均方根归一化处理之后得到。可以看出其机制主要针对三次立方项的非线性分量,并在改善谐波非线性失真方面具有一定优势。

PBO 具有简单且容易实现的特点,且不需要其他复杂的系统或设备,在改善弱非线性系统时具有一定的效果。但是单纯使用这种方法效率较低,在回退到一定程度时,继续降低输入功率时放大器的线性度也不会再改善,所以对于线性化要求较高的设备或系统,单纯地使用 PBO 对于放大器线性化的效果是远远不够的。

### 2.2 多项式拟合模型及拟合分析

放大器的输出与输入信号存在特定函数关系,当其出现非线性问题时,输出信号将不再与输入信号呈规律变化的关系,对于放大器的非线性问题的分析会变得十分复杂。多项式拟合可以利用已有的数据对输入和输出的关系进行合理关联,最终得到其最优函数关系。

用带有正态分布噪声的正弦曲线  $\sin(2\pi x)$  生成一个包含  $N$  个点的样本,观测值记为  $y(x, \omega)$ 。利用训练集中的数据对输入的变量  $x$  预测输出变量  $y$ , 构建方程组:

$$y(x, \omega) = \sum_{m=0}^M \omega_m \cdot x^m = \omega_0 + \omega_1 \cdot x + \omega_2 \cdot x^2 + \dots + \omega_M \cdot x^M \quad (7)$$

其中,  $y(x, \omega)$  为拟合函数,多项式的系数以向量形式表达:  $\omega = (\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_M)^T$ 。该系数需要通过拟合函数  $y(x, \omega)$  和训练集样本  $y_N$  之间的误差计算得到,将误差函数定义为:

$$E(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N [y(x, \omega) - y_n]^2 \quad (8)$$

误差函数的性质决定了  $y(x, \omega)$  仅当可以完全与  $y_N$  重合时才可以得到  $E(\omega) = 0$ , 其图像描述如图 3 所示。

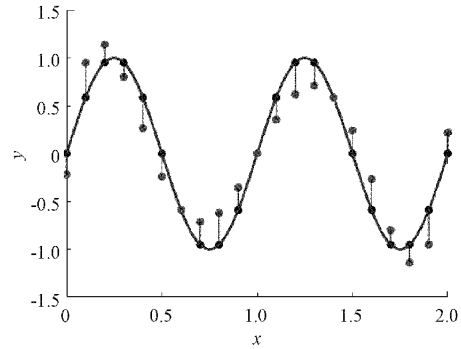


图 3 误差函数图

为求出一组最优的拟合系数,令  $y(x, \omega)$  尽量逼近  $y_N$ , 对误差函数  $E(\omega)$  求取  $N+1$  次偏导,并且令结果为 0, 即:

$$\begin{cases} \frac{\partial E(\omega)}{\partial \omega_0} = 0 \\ \frac{\partial E(\omega)}{\partial \omega_1} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial E(\omega)}{\partial \omega_N} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中,上述方程组中的某一项可以展开为:

$$\frac{\partial E(\omega)}{\partial \omega_i} = \sum_{i=1}^N 2x_i^{N-i} [(\omega_0 x_i^N + \omega_1 x_i^{N-1} + \dots + \omega_N) - y_i]^2 \quad (10)$$

将上述方程组的所有项均展开为包含有拟合系数  $\omega_0 \sim \omega_N$  的等式,可以得到一组令  $E(\omega)$  最小的系数,带回到式(1)计算就会得到构建完成的拟合多项式  $y(x, \omega)$ 。

针对上述构建的拟合多项式,需要通过确定其阶数实现拟合效果的判断。假设分别取阶数  $M$  为 0、1、3、5、7、9 来拟合  $x \in [0, 1]$  的正弦曲线  $\sin(2\pi x)$ , 拟合效果如图 4 所示,实线代表理想拟合曲线,虚线代表实际拟合曲线。

$M=0$  和 1 时,拟合曲线处于欠拟合状态;  $M=9$  时拟合曲线基本穿过了所有的样本点,明显处于过拟合状态,泛化能力较差。对比发现中间范围的阶数多项式拟合效果更好。

泛化能力对于多项式阶数  $M$  依赖程度较高,实际选择的  $M$  需要对其在训练集和测试集中的残差值  $E(\omega)$  进行评估。其残差值需要利用均方根误差进行度量,即:

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{2E(\omega)}{N}} \quad (11)$$

当阶数  $M$  取不同值的时候,训练集和测试集的  $E_{\text{RMS}}$  如图 5 所示。

$M$  的值处于中间范围时,训练集的均方根误差在  $[0, 1]$  区间范围内较小,但在此区间外拟合效果会变差;当  $M=9$  时,训练误差为 0,此时其 10 个自由度和系数相互对应,拟

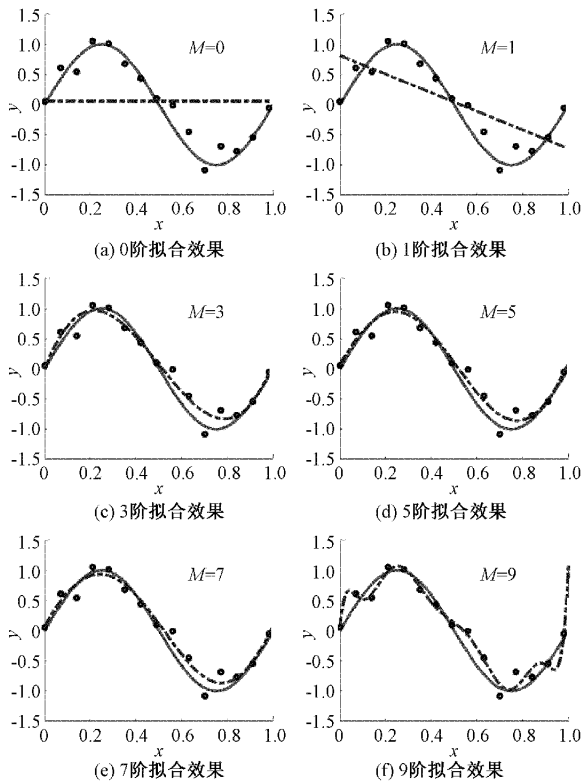


图4 不同阶数对拟合效果的影响

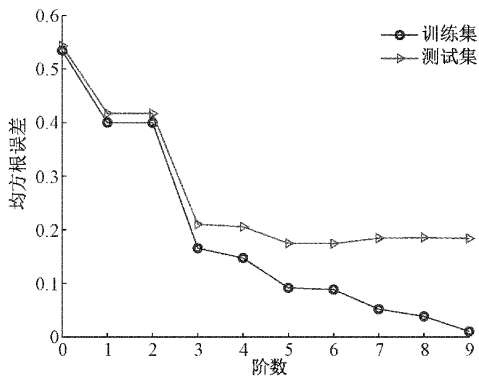


图5 阶数与均方根误差的对应关系

合效果也很好,但是测试误差较大,对应的  $y(x, \omega)$  曲线会表现出较大的震荡,产生过拟合的效果。

另外,不同样本大小的训练集对于模型拟合程度的表现也是不同的。以  $M=9$  时产生的过拟合现象为例,数据集样本对于模型拟合程度的表现如图6所示。

可以看出,对于给定复杂度的模型,当数据量增加时,曲线拟合的问题会适当减少。从另一种角度也可以说明数据集越大,就需要相对复杂的训练集和模型取拟合实际数据。

### 3 测试部分设计

#### 3.1 硬件框架设计

整体框架设计如图7所示,由 LabVIEW 控制的上位机界面发送激励信号,经过信号发生系统控制继电器选择

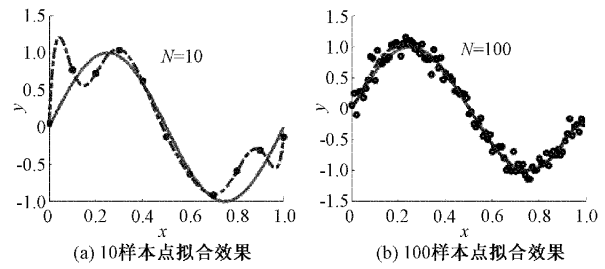


图6 不同样本数量对应  $M=9$  的拟合效果

开关通道,并将电流信号输出到待测模块转换为电压放大信号,经信号采集系统回到上位机界面并显示电压放大信号,通过比较输入输出波形的频率及不同频率下的输出波形效果判断测试结果,将测试结果保存在上位机中<sup>[13]</sup>。

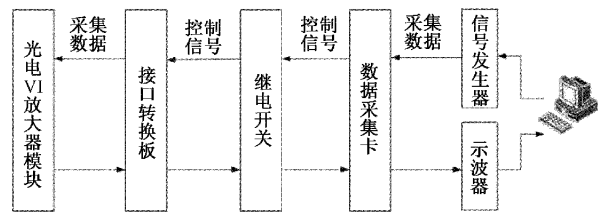


图7 整体硬件框架设计

图中,光电 IV 放大模块主要由雪崩光电二极管 (APD) 完成光电转换,并将转换完成的微弱电流信号由模块放大器输出。APD 是一种高灵敏度、高速度的光电二极管<sup>[14]</sup>。施加反向电压时,能启动其内部的增益机构,APD 的增益可以由反向偏置电压的幅度来节制,反向偏置电压越高增益就越高。

#### 3.2 软件总体设计

系统的软件设计采用 LabVIEW 对光电放大模块进行信号采集和处理,并实现人机交互界面的开发。信号采集由 NI-DAQmx 驱动完成,包括对物理通道参数配置、采样时钟设置以及信号幅值频率的控制<sup>[15-16]</sup>。

采用模块化和集成化的思想,将常用的程序模块设计为独立使用的子 VI,即采用分层结构设计,将整个程序分为:设备驱动层、测试语句驱动层、故障定位层以及功能测试子程序层。整个测试自上而下,上一层可以调用下一层程序,最后测试子程序再被主程序调用。分层结构如图8所示。

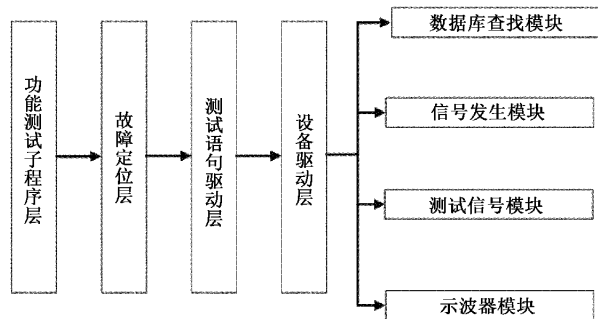


图8 系统分层结构

在图8中,设备驱动层总共有4个模块,分别控制不同

仪器的驱动程序。测试语句驱动层将底层模块进行集成封装,对单个或者多个通道施加激励信号。故障定位层根据测试过程中出现的问题进行故障定位并且将结果输出。功能测试子程序层可以实现信号采集或基本功能的测试。

界面设计主要使用 JKI 状态机实现各种事件结构的转换,利用条件结构和事件结构执行复杂状态并使得按钮按下,相应的事件得到响应,实现人机界面的交互及程序状态切换,程序前面板如图 9 所示。

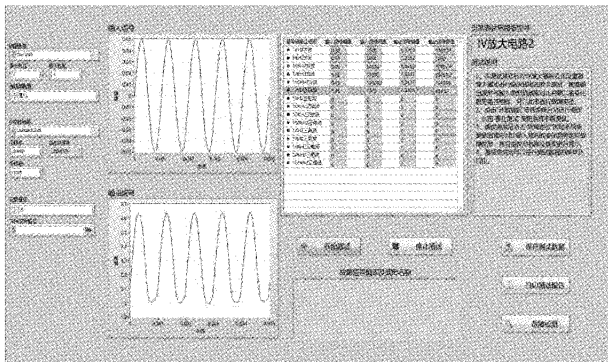


图 9 系统人机交互界面

基于 NI DAQmx 的模拟输入电压采集程序,对电压信号进行采集如图 10 所示。AI 电压通道创建后,利用 While 循环持续从指定的通道中读取采样,即可输出已采集波形。

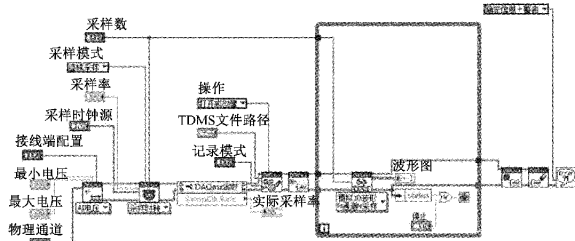


图 10 数据采集程序框图

在程序框图设计过程中,子 VI 放置在程序框图中随主 VI 的运行被直接调用的方式称为静态调用。静态调用时子 VI 会随着程序运行而被加载,浪费内存且效率较低。在复杂的程序框图需要运行时,一般会采用动态调用的方式,以电压采集为例,程序框图如图 11 所示。

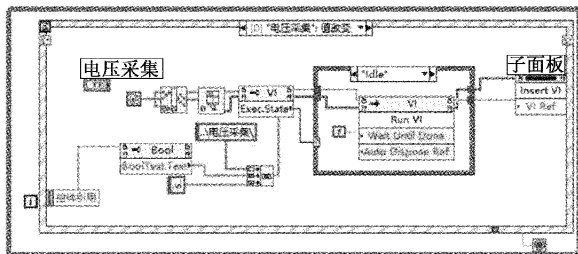


图 11 动态调用程序框图

相比于静态调用,动态调用只有在需要运行该 VI 时才会将其加载,并且在子 VI 运行结束时将其从内存中释放,

提升程序运行效率。

### 4 模块放大功能测试及非线性问题改善

#### 4.1 测试流程

如图 12 所示,开始测试之前进行系统的初始化,将某些参数设置为初始参数状态。选择板卡选项跳转到相应的测试界面进行各测试项,所有测试项的指示灯高亮之后测试自动停止。此时可以根据存储在数据库中测试的波形自动定位指定频率和波形下的故障项,然后生成测试报告。

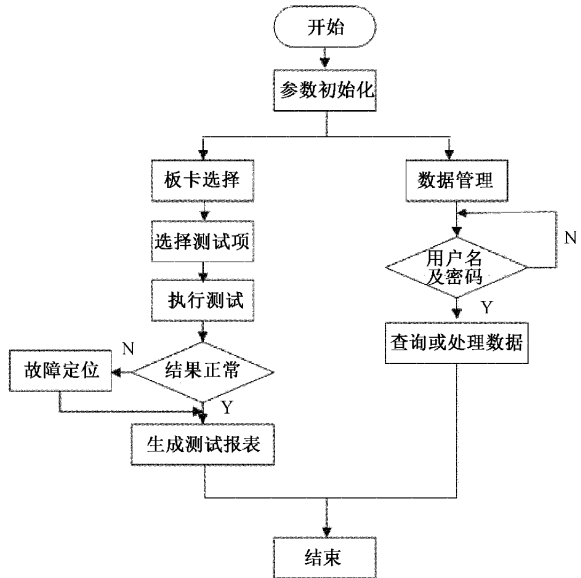


图 12 系统测试流程

用户还可以进行数据管理实现用户名和密码的改变,并且在数据库中查询到历史测量数据并且进行处理。

#### 4.2 光电放大测试

基于上述的硬件设备,搭建了如图 13 所示的测试系统平台,其中激光驱动模块输入频率范围是 1~150 kHz,IV 转换放大模块增益为 5,输入电流最小分辨率是 10 nA。信号输入为正弦波、三角波以及方波时,分别在不同频率下测试模块的光电转换及放大功能,并且在频率为 1 kHz 的情况下,分析输出波形的非线性失真情况。

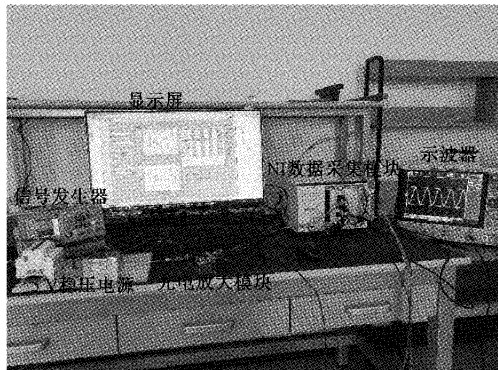
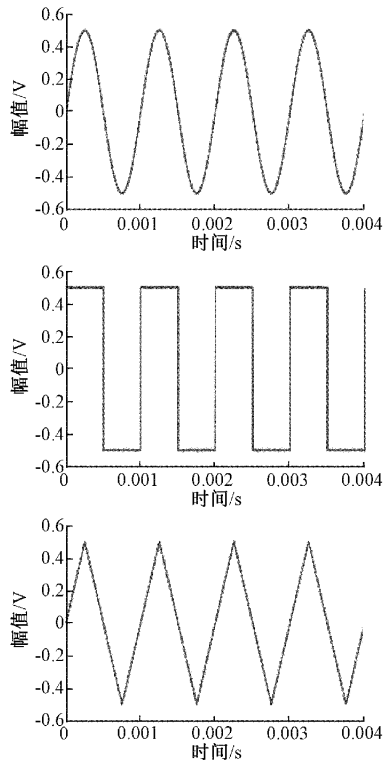
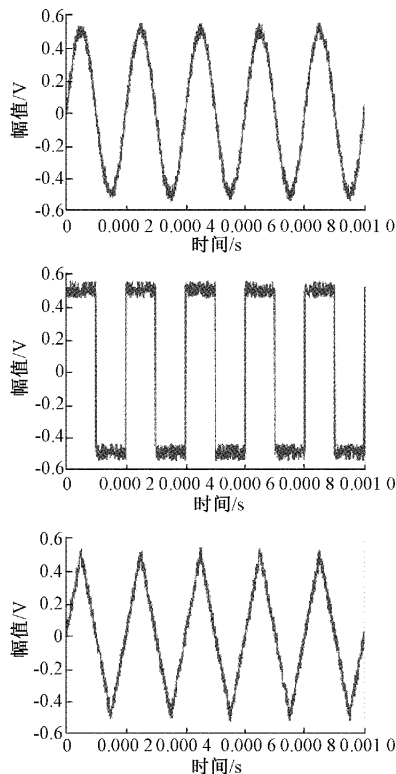


图 13 测试系统平台

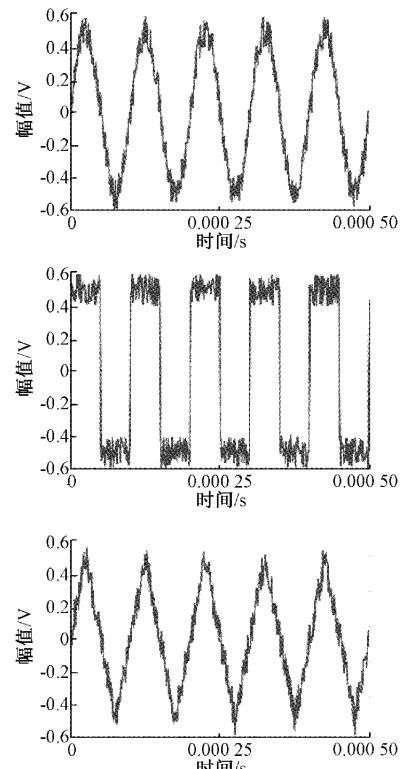
在信号发生器输入电压为 200 mV, 频率为 1, 5 以及 10 kHz 的信号时, 设置不同的采样率, 分别测试了正弦波、方波和三角波的输入信号转换及放大效果, 如图 14 所示。



(a) 1 kHz 下的不同输出波形测试结果



(b) 5 kHz 下的不同输出波形测试结果



(c) 10 kHz 下的不同输出波形测试结果

图 14 不同频率下的波形测试结果

将 3 种波形输出前后的频率和幅值进行对比如表 1 所示。

表 1 不同频率下波形的幅值和频率对比

波形名称	初始频率/kHz	输出频率/kHz	初始幅值/V	输出幅值/V	THD/dB
正弦波	1	1.00	0.1	0.49	79.41
正弦波	5	5.01	0.1	0.50	95.05
正弦波	10	9.98	0.1	0.50	150.15
三角波	1	1.00	0.1	0.49	121.07
三角波	5	5.00	0.1	0.51	121.20
三角波	10	10.01	0.1	0.50	121.60
方波	1	1.01	0.1	0.50	156.89
方波	5	5.00	0.1	0.50	157.66
方波	10	10.00	0.1	0.49	160.11

由图 14 及表 1 可看出测试平台可以很好地完成自动测试功能, 信号输出的频率和增益都在正常范围内且比较准确。但由于模块电路的芯片带宽不足以及噪声干扰的问题, 给定频率逐渐增加时三种输出波形失真程度也随之变大。

#### 4.3 基于组合法的非线性问题分析及改善

针对基于上述装置输出频率为 1 kHz, 幅值为 1 V<sub>pp</sub> 的正弦波进行傅里叶变换得到其周期功率谱如图 15(a) 所

示。图中显示除基波外还有其他高次谐波存在，其中 3 kHz 处的谐波功率为 -86.3 dB，峰值最高，代表输出中的大部分失真。

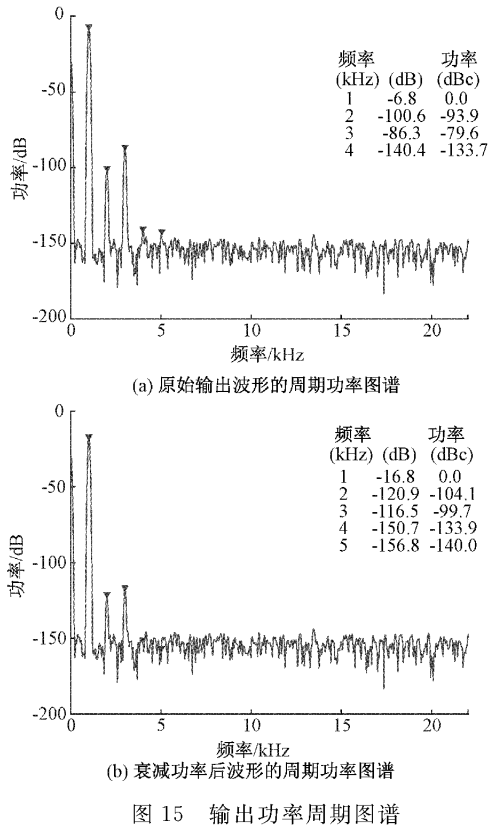


图 15 输出功率周期图谱

调用总谐波失真(THD)和信纳比(SINAD)函数，得到  $|THD| = SINAD = 79.41$  dB。由于 SINAD 计算的是信号功率中所有的其他谐波含量与噪声的比值，且 SINAD 与 THD 的幅值相等，判断大部分失真是由谐波失真造成。

根据式(5)和(6)由仿真计算得到此时输出波形的理论回退功率大约为 10 dB。将基波功率衰减 10 dB 后的结果如图 15(b)所示。3 kHz 处的谐波功率降至 -116.5 dB，放大器谐波失真的改善并不明显。

将线性斜坡输入作为激励信号，利用 3 阶多项式拟合输入并在输出端执行校正，与原始未进行校正的输出进行对比，如图 16 所示，第 2 和第 3 个谐波处的功率明显降低。

在输入衰减基础上增加多项式拟合，用基波与 3 kHz 处谐波功率的差值作为扫描值，以 THD, SNR, SINAD 作为衰减输入的函数，绘制信号指标的动态范围，以确定更精确的输入衰减值，如图 17 所示。

将对应于最大 SINAD 值的输入衰减 16 dB 作为确定衰减重复绘制信号的周期功率图谱如图 18 所示。

分别将原始输出，单纯衰减及组合方法的谐波功率以及 THD 含量数值进行对比，结果如表 2 和 3。

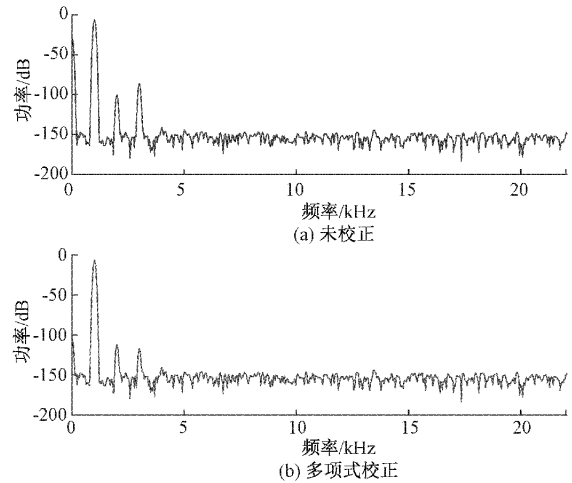


图 16 多项式校正前后谐波功率对比

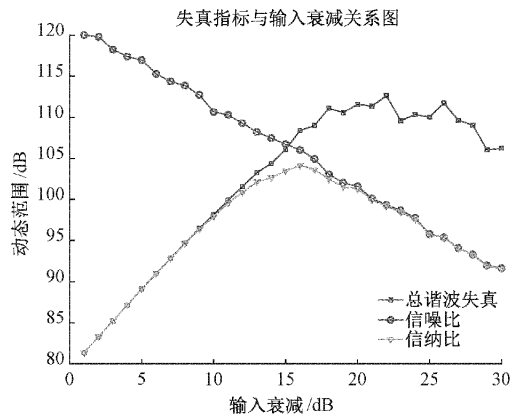


图 17 信号指标的动态范围

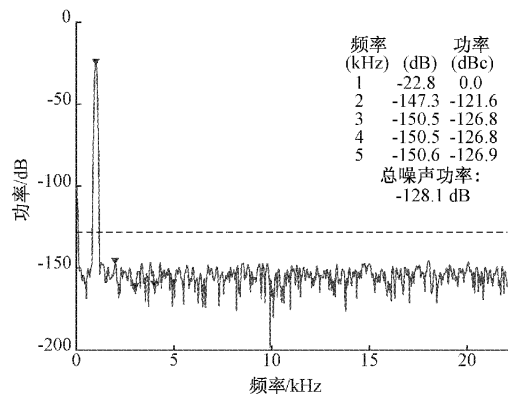


图 18 基于组合方法衰减 16 dB 的周期功率图谱

表 2 3 种情况下的谐波分量功率对比

分量名称	原始输出/dB	单纯衰减/dB	组合方法/dB
基波	-6.8	-16.8	-22.8
二次谐波	-100.6	-120.9	-147.3
三次谐波	-86.3	-116.5	-150.2
四次谐波	-140.4	-150.7	-150.5
五次谐波	-142.3	-156.8	-150.6

表3 3种情况下的THD数值对比

方法名称	THD/dB
原始输出	-79.41
单纯衰减	-91.03
组合方法	-118.51

可以看到在应用组合方法的衰减值设置下,利用多项式拟合的方法可以大幅衰减谐波分量的功率,使其远小于总噪声功率,也验证了组合方法对于改善放大器非线性问题的可行性。

## 5 结 论

本文对放大器模型以及其非线性输出分量做了基本分析,针对放大器工作过程中产生的谐波失真等非线性问题,提出在PBO的基础上增加多项式拟合模型来进一步改善放大器非线性的方法。根据搭建的测试平台输出的放大测试信号,由仿真得到其各谐波分量功率值。在利用组合方法实现增加PBO约束范围的同时,对放大器的输入进行多项式拟合并在输出端进行校正,改善其输出因谐波而导致的失真问题。经测试和仿真结果分析对比,该组合方法对改善放大器谐波失真的效果相较于PBO有明显的改善,并可大幅降低放大器的谐波分量功率值。

## 参考文献

- [1] 孙柏昶,李佳宣,张金波,等. 正交频分复用信号峰均比抑制技术研究[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(1): 126-131.
- [2] 逢晨,余志勇,孙亚民. 基于双频测试的功率放大器非线性特性研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(12): 18-21.
- [3] BOREL A, BARZDÉNAS V. A review of the basic power amplifier linearization methods[C]. 2020 IEEE Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences(eStream), IEEE, 2020: 1-4.
- [4] KELLY N, ALLEGUE-M M, ARAPOGLOU P D, et al. Bandwidth-constrained digital pre-compensation technique for multi-carrier satellite communications[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2016, 34(2): 171-194.
- [5] 王楠. 射频功率放大器线性化技术分析[J]. 科技创新与应用, 2020(26): 164-165.
- [6] 刘昕,陈文华,吴汇波,等. 功放数字预失真线性化技术发展趋势与挑战[J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52(4): 569-595.
- [7] 赵康杰. 基于Doherty架构的28 GHz功率放大器设

计[J]. 集成电路应用, 2022, 39(1): 1-3.

- [8] LOPERA J R, MAYOCK J, SUN Q, et al. A 3.5 GHz high power GaN hybrid Doherty power amplifier with dynamic input power splitting for enhanced power added efficiency at backoff[C]. 2021 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications(PAWR), IEEE, 2021: 1-4.
- [9] QI T, HE S B. Design of high efficiency Doherty power amplifier applying power controlling technology with 15dB output power back-off [C]. 2017 47th European Microwave Conference (EuMC), IEEE, 2017: 576-579.
- [10] 郭世杰,武建新,乔冠,等. 数控机床几何误差正弦低次多项式参数化建模与应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 136-146.
- [11] SIKORA R, MARKIEWICZ P, PABJAŃCZYK W. Surface polynomial fitting of controlled single-phase nonlinear load of input current total harmonic distortion[C]. 2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts, IEEE, 2017: 1-2.
- [12] 刘颖,刘义平,任婷婷,等. 不同曲线拟合方式对NTC热敏电阻测温精度的影响[J]. 中国测试, 2018, 44(S1): 200-204.
- [13] 张浩,许靖锋,吴彬. 基于LabVIEW串口通信的多通道风速风向测试系统[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(7): 137-140.
- [14] 白郭敏,梁焰,曾和平. 基于国产InGaAs/InP APD的高速单光子探测[J]. 电子测量技术, 2017, 40(6): 175-179, 196.
- [15] 独秀,魏亚楠,黄建成,等. 基于虚拟仪器的管道泄漏监测与定位系统设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(4): 129-134.
- [16] 李琳,杨永侠,陈显含. 基于LabVIEW的示波器采集存储系统[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(2): 132-137.

## 作者简介

张昕哲, 硕士, 主要研究方向为现代工程电磁技术及应用。

E-mail: 779367006@qq.com

刘成成(通信作者), 博士, 主要研究方向为电磁装置设计与优化。

E-mail: 2016020@hebut.edu.cn