

# Multisim 平台下三极管放大电路动态范围扩展与失真控制研究

王兆博<sup>1</sup>, 白文裕<sup>1</sup>, 王俊尧<sup>1</sup>, 边廷玥<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院;

2. 辽宁省葫芦岛市兴城市龙湾南大街 188 号辽宁工程技术大学)

**摘要:** 三极管作为模拟电路中最基础且核心的半导体器件之一, 其放大特性构成了模拟电路设计的基石。本文将深入探讨三极管放大电路的设计原理和方法, 并结合模拟仿真技术, 对典型的三极管放大电路进行详细分析与优化。从三极管的基本特性出发, 详细分析其电流放大机制以及在不同工作状态下的性能表现。以及三极管放大电路的常见类型, 包括共发射极放大电路、共基极放大电路和共集电极放大电路, 分析各自的特点及应用场景。在此基础上, 使用 Multisim 模拟仿真软件, 对这些放大电路进行建模与仿真, 通过对比仿真结果与理论分析, 验证仿真技术在三极管放大电路设计中的有效性和可靠性。并针对实际应用中的问题, 提出优化设计方案, 并通过仿真验证其性能提升效果。

**关键词:** 电子技术; 模拟电子电路; Multisim 仿真; 三极管; 放大电路;

**中图分类号:** TN722

## Research on dynamic range extension and distortion control of triode amplifier circuit on Multisim platform

Wang Zhaobo, Bai Wenyu, Wang Junyao, Bian Tingyue

(College of Electronics and Information Engineering, Liaoning Technical University)

**Abstract:** The transistor, as one of the most fundamental and core semiconductor devices in analog circuits, its amplification characteristics constitute the cornerstone of analog circuit design. This paper will deeply explore the design principles and methods of transistor amplification circuits, and combine with analog simulation technology to conduct detailed analysis and optimization of typical transistor amplification circuits. Starting from the basic characteristics of the transistor, it will analyze its current amplification mechanism and performance in different working states. As well as the common types of transistor amplification circuits, including common emitter amplification circuits, common base amplification circuits, and common collector amplification circuits, it will analyze their respective characteristics and application scenarios. On this basis, using the Multisim simulation software, these amplification circuits will be modeled and simulated. By comparing the simulation results with theoretical analysis, the effectiveness and reliability of simulation technology in the design of transistor amplification circuits will be verified. And for problems in practical applications, optimization design schemes will be proposed and verified through simulation for their performance improvement effects.

**Key words:** Circuit and System; Analog Electronic Circuit; Multisim Simulation; Transistor; Amplifier Circuit

## 0 引言

在现代电子技术的迅猛发展中, 模拟电路作为电子系统的重要组成部分, 一直占据着不可或缺的地位。从日常生活中的音频设备和通信系统, 到工业应用中的传感器信号处理和电源管理, 模拟电路都发挥着关键作用。在模拟电路的设计中, 作为最基本的半导体器件之一

**作者简介:** 王兆博(男), 2004, 学生, 嵌入式开发

**通信联系人:** 边廷玥, 女, 讲师, 软件无线电 运筹学. E-mail: 764567925@qq.com

的晶体管一直是电路设计的核心和基础。晶体管的电流放大机制使它们能够在各种复杂的应用场景中精确放大和处理信号<sup>[1]</sup>。

然而，晶体管放大器的设计并非易事。这不仅需要对晶体管的基本特性有深刻的理解，还需要考虑诸如电路参数计算、器件匹配和噪声控制等各种因素。传统的设计方法通常依赖大量的实验验证，这不仅耗时费力，而且难以快速优化电路性能。随着计算机仿真技术的进步，利用仿真软件对电路进行建模和分析已成为提高设计效率和优化电路性能的重要手段<sup>[2]</sup>。

本文将深入探讨晶体管放大器的设计原理和方法，结合模拟仿真技术，对典型晶体管放大器进行详细的分析和优化。从晶体管的基本特性出发，分析其不同工作状态下的电流放大机制和性能。使用专业的模拟仿真软件对电路进行建模和仿真，将仿真结果与理论分析进行比较，以验证仿真技术的有效性和可靠性。

## 1 共射极放大电路

### 1.1 工作原理和特点

共射放大电路是属于三极管放大电路，三极管的发射极作为输入和输出信号的公共端接地。该电路结构为模拟电子学提供良好的电压增益、电流增益和功率增益<sup>[3]</sup>。

#### 1)基本组成

表 1-1 共射极放大电路基本元器件表  
Tab. 1-1 Basic Components List of Common Emitter Amplifier Circuit

元器件组成	功能
三极管	放大元件，三极管基极接收输入信号，集电极输出放大后的信号，发射极接地。
偏置电阻	用于为三极管提供合适的直流工作点，确保三极管在放大区域工作。
耦合电容	用于隔离直流分量，只允许交流信号通过。输入耦合电容将输入信号耦合到三极管的基极，输出耦合电容则将放大后的信号从集电极耦合到负载。
负载电容	连接在集电极和电源之间，将放大的电流信号转换为电压信号。

#### 2)工作原理

表 1-2 共射极放大电路工作步骤  
Tab. 1-2 Working steps of the common emitter amplifier circuit

步骤	步骤名称	具体操作名称
Step 1	输入信号	输入信号通过输入耦合电容加到三极管的基极，引起基极电流的微小变化
Step 2	电流放大	基极电流的微小变化通过三极管的放大作用，导致集电极电流 发生较大的变化，变化量是基极电流变化量的 $\beta$ 倍
Step 3	电压放大	集电极电流的变化通过负载电阻转换为电压变化，从而在集电极和发射极之间产生放大的输出电压
Step 4	输出信号	输出耦合电容将放大后的交流信号耦合到负载，同时隔离直流分量。

### 1.2 基于三极管的正常放大

下图一种基础的共射极放大电路。在该电路中，输入和输出电路都以三极管的发射极为公共端。输入信号通过电容施加到三极管的基极，引起基极电流的变化。基极电流的这种变化会导致集电极电流发生相应的变化，且集电极电流的变化量是基极电流变化量的 $\beta$ 倍（ $\beta$ 为三极管的电流放大系数）。集电极电流的变化会通过耦合电容传递到输出端，从而产生输

出电压。当电路中的参数被正确选择时，得到一个比输入信号大得多的输出电压，实现信号的放大。相应原理图如下所示。

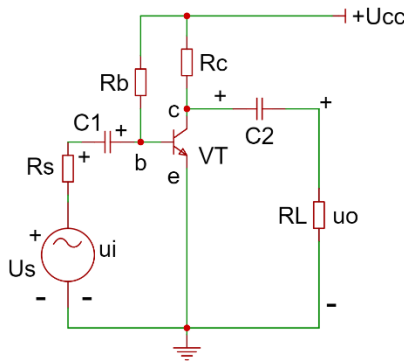


图 1-1 共射极放大电路原理图

Fig. 1-1 The schematic diagram of common emitter amplifier circuit

70 具体仿真电路图如下:

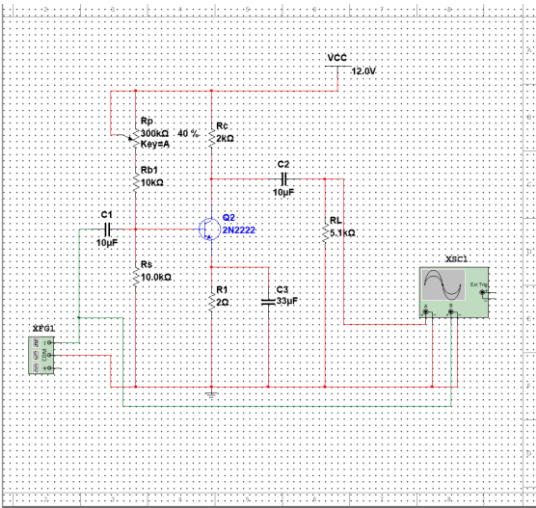


图 1-2 正常放大电路图

Fig. 1-2 Normal amplifier circuit diagram

最终仿真结果如下波形图:

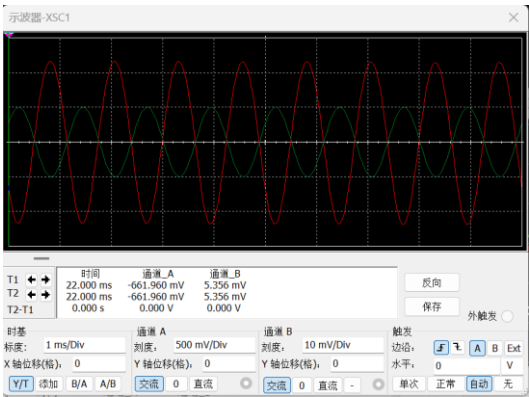


图 1-3 示波器监测情况(正常放大)

Fig. 1-3 The oscilloscope monitoring condition (normal amplification)

图 1-3 中显示了两个波形，红色波形为输出信号，绿色波形为输入信号。从横轴（时间轴）来看，每个波形在一个周期内大约占据了 20 毫秒的时间，两个波形都没有明显的直流偏置，波形中心都位于零电压轴上，是纯粹的交流信号。两个波形都表现出良好的对称性，

75 正半周和负半周的波形形状基本一致，没有明显的失真或不规则现象。从波形的光滑程度来看，波形没有明显的噪声或干扰，表现为平滑的正弦曲线，信号质量较高。

## 2 失真状态仿真

80 在模拟电路设计中，失真是指输出信号与输入信号相比发生了波形变化，导致信号质量下降。失真模拟仿真设计是分析和优化电路性能的重要手段，在三极管放大电路中失真现象尤为常见。

### 2.1 顶部失真(截止失真)

顶部失真，也称为截止失真，是放大电路中常见的一种失真现象，主要发生在 BJT（双极型晶体管）放大电路中。当静态工作点设置过低时，BJT 在交流信号的负半周（底部）进入截止区，导致输出信号的顶部被削平或变钝，从而产生失真。

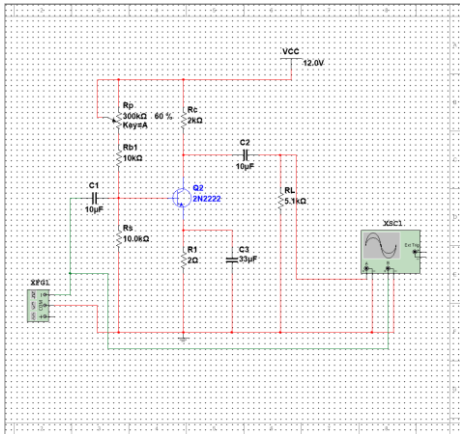


图 2-1 顶部失真电路图

Fig. 2-1 Top distortion circuit diagram

#### 1.静态工作点设置过低:

85 当静态工作点  $Q$  设置过低时，即基极-发射极电压 ( $V_{BEQ}$ ) 和基极电流 ( $I_{BQ}$ ) 过低，BJT 在交流信号的负半周会进入截止区。此时，三极管的集电极电流几乎为零，导致输出电压的负半周无法正常跟随输入信号的变化。

#### 2.交流信号的影响:

90 在交流信号的负半周，BJT 的基极-发射极电压不足以维持三极管的导通状态，导致集电极电流急剧下降，甚至降为零。这使得输出信号的顶部被削平或出现明显的失真。

#### 2.波形表现

95 如图 2-2，顶部失真的输出波形表现为在负半周（底部）出现明显的削平或失真。输出信号的顶部被削平，导致信号的整体形状发生改变，无法准确反映输入信号的变化。输出信号的最大不失真幅值 ( $V_{OM}$ ) 会受到限制，无法达到预期的放大效果。

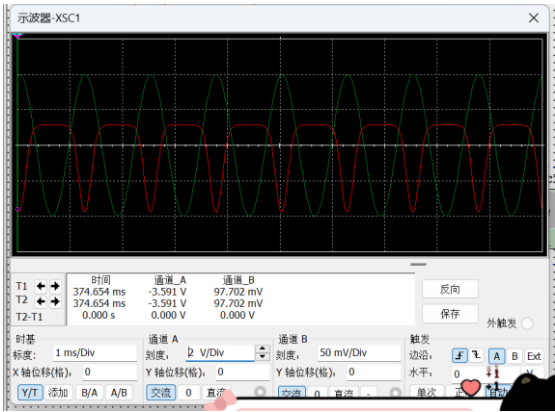


图 2-2 示波器监测情况(顶部失真)

Fig. 2-2 The oscilloscope monitoring situation (top distortion)

2.2 底部失真(饱和失真)

底部失真，也称为饱和失真，是 BJT（双极型晶体管）放大电路中常见的一种失真现象。当静态工作点设置过高时，BJT 在交流信号的正半周（顶部）进入饱和区，导致输出信号的底部被削平或变钝，从而产生失真。

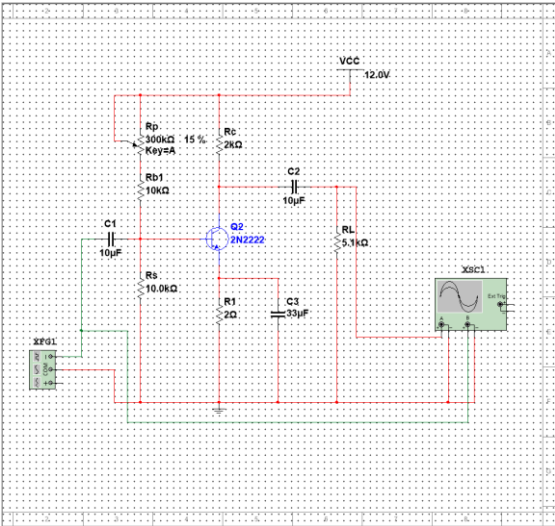


图 2-3 底部失真电路图

Fig. 2-3 Top distortion circuit diagram

如图 2-3 可知:

- 1.静态工作点设置过高: 当静态工作点  $Q$  设置过高时，即基极-发射极电压 ( $V_{BEQ}$ ) 和基极电流 ( $I_{BQ}$ ) 过高，BJT 在交流信号的正半周会进入饱和区。此时，三极管的集电极-发射极电压 ( $V_{CE}$ ) 几乎降为零，导致集电极电流  $i_C$  无法继续增加，输出电压  $V_{ce}$  的正半周无法正常跟随输入信号的变化。
- 2.交流信号的影响: 交流信号的正半周，BJT 的基极-发射极电压过高，使得三极管进入深度饱和状态，集电极电流达到最大值，无法进一步变化。这使得输出信号的底部被削平或出现明显的失真。

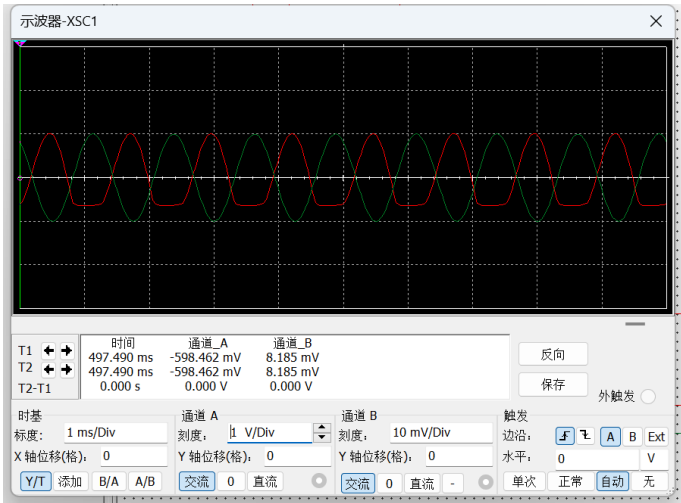


图 2-4 示波器监测情况(底部失真)

Fig. 2-4 The oscilloscope monitoring situation (top distortion)

如图 2-4，底部失真的输出波形表现为在正半周（顶部）出现明显的削平或失真。输出信号的底部被削平，导致信号的整体形状发生改变，无法准确反映输入信号的变化。针对于电压变化，集电极-发射极电压在正半周无法正常上升，导致输出电压的正半周被限制在一个较低的水平。

2.3 交越失真

交越失真是推挽放大电路中常见的一种失真现象，尤其在 BJT（双极型晶体管）推挽放大器中较为显著。这种失真发生在输入信号通过零（即从正半周过渡到负半周或反之）时，由于三极管的非线性特性，导致输出信号在过零附近出现不连续或失真。

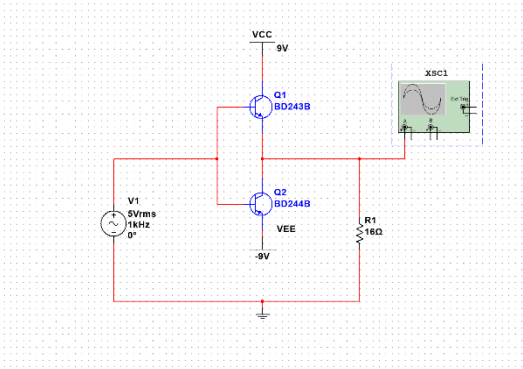


图 2-5 交越失真电路图

Fig. 2-5 Crosstalk distortion circuit diagram

通常情况下，出现交越失真情况如上图：

1.三极管的导通特性：

BJT 三极管在导通时，基极-发射极电压（ $V_{BE}$ ）需要达到一定的阈值电压（通常为 0.6V 到 0.7V）才能导通。在推挽放大电路中，当输入信号过零时，两个三极管（一个负责正半周，另一个负责负半周）都需要在极短的时间内完成导通和截止的切换[4]。

2.静态工作点设置不当：

如果静态工作点设置不当，导致在输入信号过零时，两个三极管的基极-发射极电压不足以使其导通，那么在信号过零的瞬间，三极管会处于截止状态，无法立即响应输入信号的变化。



3.信号过零时的切换延迟:

由于三极管的导通延迟,输入信号在过零时,三极管无法立即导通,导致输出信号在过零附近出现短暂的截止时间,从而产生失真。

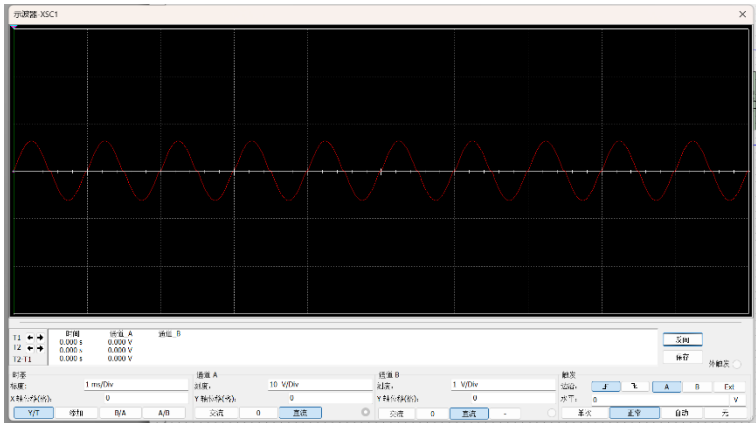


图 2-6 示波器监测情况(交越失真)

Fig. 2-6 The monitoring situation of the oscilloscope (cross-over distortion)

交越失真的输出波形表现为在过零附近出现明显的“台阶”或“不连续”。具体来说,输出信号在过零时无法平滑过渡,而是出现一个短暂的平坦区域,导致波形出现“断裂”或“失真”。而针对这个电压变化,在信号过零时,输出电压无法及时跟随输入信号的变化,导致电压变化出现延迟或不连续。

2.4 双向失真

双向失真(Bidirectional Distortion)是指在放大电路中,输入信号的整个周期内,正半周和负半周均出现失真现象。这种失真通常是由于信号幅度过大,导致放大器件(如三极管)在正半周和负半周都进入了非线性工作区(如截止区或饱和区),从而导致输出信号在正负半周都发生失真<sup>[5]</sup>。以下是对双向失真的详细介绍:

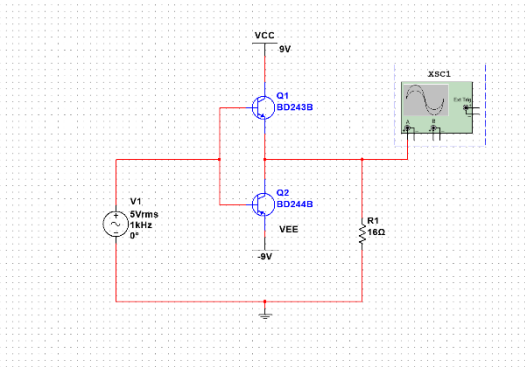


图 2-5 交越失真电路图

Fig. 2-7 Crosstalk distortion circuit diagram

1.信号幅度过大:

当输入信号的幅度超过放大电路的线性工作范围时,放大器件(如三极管)在正半周和负半周都会进入非线性工作区。例如,在BJT放大电路中,如果输入信号的幅度过大,三极管会在正半周进入饱和区,在负半周进入截止区<sup>[6]</sup>。

2.静态工作点设置不当:

静态工作点设置不当也会导致双向失真。如果静态工作点设置过高或过低,三极管在交

流信号的整个周期内都无法保持在放大区，从而导致正负半周都出现失真。

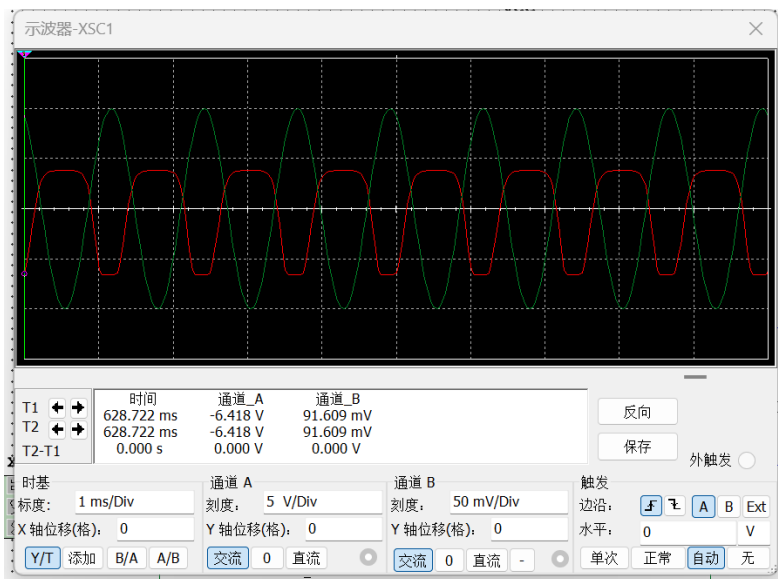


图 2-6 示波器监测情况(交越失真)

Fig. 2-8 The monitoring situation of the oscilloscope (cross-over distortion)

145 如图 2-8，双向失真的输出波形表现为在正半周和负半周都出现失真。具体来说，输出信号的顶部和底部都可能同时被削平或出现不规则的变化，导致波形整体形状发生改变。在正半周和负半周，输出电压都无法正常跟随输入信号的变化，导致电压变化出现失真。

### 3 理论分析

#### 3.1 三极管工作状态的分区判据

150 基于 Ebers-MoII 模型，三极管的放大区需满足：

$$\begin{cases} V_{BE} > V_{\gamma} \text{ (发射结正偏)} \\ V_{BC} < 0 \text{ (集电结反偏)} \end{cases} \quad (4-1)$$

1)截止区:  $V_{BE} < V_{\gamma}$ , 此时  $I \approx 0$ ,  $I_C \approx I_{CEO}$

2)饱和区:  $V_{CE} < V_{BE} - V_{\gamma}$ , 集电结正偏,  $I_C$  受外电路限制。

#### 3.2 静态工作点的数学表征

155 共射电路 Q 点由基极偏置电阻决定：

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b + (\beta + 1)R_e} \quad (\text{考虑发射极电阻 } R_e) \quad (4-2)$$

当  $R_e = 0$  时简化为：

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \quad (4-3)$$

#### 3.3 交越失真非线性动力模型

$$v_{out} = \begin{cases} 0 & |v_{in}| < V_{\gamma} \\ g_m(v_{in} - V_{\gamma}) & v_{in} > V_{\gamma} \\ g_m(v_{in} + V_{\gamma}) & v_{in} < -V_{\gamma} \end{cases} \quad (4-4)$$

$g_m$  为跨导。死区效应引入高次谐波，THD 可近似为：



$$\text{THD} \approx \frac{2V_{\gamma}}{\pi V_{in(peak)}}$$

(4-5)

3.4 失真类型参数敏感性分析

表 4-1 失真参数敏感性分析

Tab. 4-1 Sensitivity analysis of distortion parameters

失真类型	控制变量	临界阈值	THD 变化趋势
截止失真	$R_b$	$R_b > 220k\Omega$	THD 随 $R_b$ 线性增加
饱和失真	$R_b$	$R_b < 50k\Omega$	THD 随 $R_b < 50k\Omega$ 线性增加
双向失真	$V_{in}$	$V_{in} > 30mV_{pp}$	THD 呈指数增长
交越失真	未加偏置电压	$V_{in(pesk)} < 0.6V$	THD 恒定约 15%~20%

4 结论

本文围绕 BJT（双极型晶体管）放大电路中的几种常见失真现象——饱和失真、截止失真（顶部失真）、交越失真以及双向失真进行分析：

1.饱和失真和截止失真主要是由于静态工作点设置不当引起的。饱和失真发生在静态工作点过高时，导致三极管在正半周进入饱和区，输出信号的底部被削平；而截止失真则发生在静态工作点过低时，导致三极管在负半周进入截止区，输出信号的顶部被削平。这两种失真都会严重影响信号的线性放大，限制最大不失真输出电压的幅值[7]。

2.交越失真是推挽放大电路中特有的失真现象，主要由于三极管在信号过零时的导通延迟引起，导致输出信号在过零附近出现不连续或失真[8]。这种失真会显著降低音质，尤其在音频放大器中表现明显。

3.双向失真则是由于输入信号幅度过大或静态工作点设置不当，导致三极管在正负半周都进入非线性工作区，从而引起输出信号在正负半周都出现失真[9]。这种失真会全面影响信号的保真度，导致信号完整性受损。

[参考文献] (References)

[1] 杨海杰,李昊然.高增益运算放大器放大电路的低噪声处理[J].电子技术与软件工程,2013(11):68  
[2] 李伟业,李文昌,鉴海防,等.一种高精度低噪声运算放大器设计[J].微电子学,2023,53(5):800-806.  
[3] 张事成.基于电流驱动模块的高速型运算放大器设计与研究[D].兰州:兰州大学,2023.  
[4] ]尤其伟.低噪声视频运算放大器芯片设计[D].贵阳:贵州大学,2022.  
[5] Gray P R, Meyer R G. Analysis and Design of Analog Integrated Circuits[]]. Wiley, 1984  
[6] Sedra A S, Smith K C. Microelectronic Circuits[M]. Oxford University Press, 2015.  
[7] Multisim 仿真中的三极管模型精度分析[J].电子测量技术,2020,43(5):12-18.  
[8] 李新.共集电极放大电路分析[J].科技信息, 2014(13):314.  
[9] 钟俊,刘辉,刘恒.基于 Multisim 的三极管共射极放大电路分析[J].普洱学院学报,2020, 36(06):34-36.