

# 共射极放大电路失真问题分析

杜晓玉<sup>a</sup>, 孔庆梅<sup>b</sup>, 李 辉<sup>b</sup>

(河南大学 a. 计算机与信息工程学院; b. 民生学院, 河南 开封 475002)

**摘要** 该文针对共射极放大电路实验过程中出现的输入信号  $u_i$  波形失真现象进行了阐述, 分析了失真问题产生的原因, 并通过 Multisim 进行了仿真。通过分析及仿真可知, 三极管工作在饱和区时, 由于发射结输入电流过大, 等效电阻  $r_{be}$  近似为 0, 发射结为一正向导通的 PN 结, 输入信号  $u_i$  出现截顶失真; 当三极管工作在截止区时, 发射结反向偏置, 基极虚断, 输入信号  $u_i$  不会产生明显的失真现象。

**关键词** 共射极放大器; 饱和失真; 截止失真; 输入电阻

中图分类号 G642—423

文献标志码 A

doi: 10.3969/j.issn.1672-4550.2017.04.004

## Analysis of Waveform Distortion Problem in Common-emitter Amplifier

DU Xiaoyu<sup>a</sup>, KONG Qingmei<sup>b</sup>, LI Hui<sup>b</sup>

(a. School of Computer and Information Engineering; b. Minsheng College, Henan University, Kaifeng 475002, China)

**Abstract** Waveform Distortion Problem of input signal  $u_i$  in the Common-emitter amplifier is analyzed in this paper. In actual cases, the input waveform will be top distortion if triode operates in the saturation region, because the input current is too large and the emitter junction is deemed as a positive onset PN junction. On the other hands, when the transistor work in the cut-off area, the emission junction reverse bias, base virtual, the input signal  $u_i$  will not produce significant distortion.

**Key words** common-emitter amplifier; saturation distortion; cutoff distortion; input resistance

共射极放大电路由三极管、电阻、电容组成, 是放大电路中应用最广泛的一种电路模型, 主要应用于低频电路的放大级<sup>[1]</sup>。共射极放大电路相关参数的测量是电路电子学相关课程的一个基本实验, 通常会采用分压偏置式共射电路, 其电路图如图 1 所示<sup>[2-4]</sup>。

共射极放大电路参数的测量有静态工作点、电压放大倍数、输入电阻、输出电阻和最大不失真电压范围 5 项。动态性能指标和静态参数测量实验加深了对共射极放大器交流放大电路性能的认识, 也对实验中遇到的现象和问题进行了思索。其中输入电阻  $R_i$  是衡量放大器对信号源影响的一个性能指标, 它定义为输入信号电压与输入信号电流之比, 即放大器的交流等效电阻, 等效电路图如图 2 所示。分压电阻  $R_s$  与输入电阻  $R_i$  组成串联电路, 电源电压  $U_s$  和输入电压  $U_i$  的关系:

$$U_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} U_s \quad (1)$$

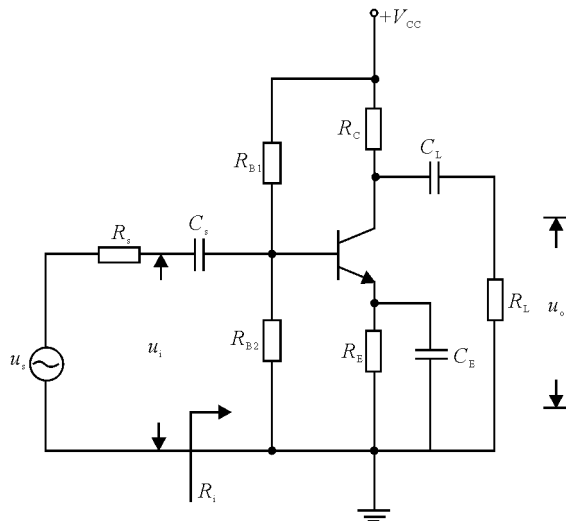


图 1 共射极放大电路

收稿日期: 2016-02-22; 修改日期: 2016-04-21

基金项目: 河南大学教学改革项目(HDXJJG2013-65, HDXJJG2013-64); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(14B510024, 17A120007); 河南省科技厅基础与前沿技术研究计划项目(142300410445); 河南大学科研基金资助项目(2013YBZR004); 河南大学民生学院教学改革项目(MSJG2014044, MSJG2015039)。

作者简介: 杜晓玉(1979-), 女, 博士, 副教授, 主要从事无线传感器网络相关研究、计算机方向相关教学及电子实验教学等工作。

通信作者: 孔庆梅, 讲师, 主要从事建筑自动化方面的研究, kqm@henu.edu.cn

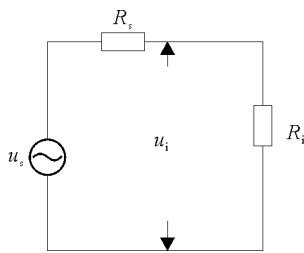


图2 等效电路

因此输入电阻  $R_i$  的计算公式如下:

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s \quad (2)$$

在实验的过程中发现了一个问题, 增加输入信号的电压值, 当输出波形出现饱和失真时, 电压信号  $u_i$  相应的出现顶部失真, 但是输出信号  $u_o$  的波形出现截止失真时,  $u_i$  并没有出现底部失真。为了说明该问题, 在 Multisim 中对图 1 所示电路进行了仿真, 仿真结果如图 3 所示。

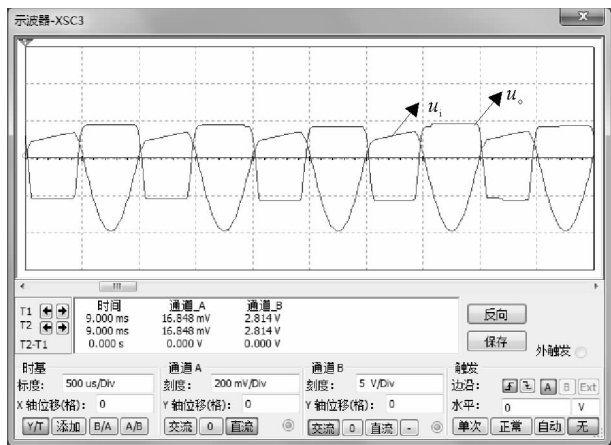


图3  $u_i$  和  $u_o$  的波形图

### 1 放大区电路分析

工作在放大区时, 集电结反偏, 发射结正偏, 三极管可以用线性元件等效, 图 1 可等效为图 4 所示的小信号等效电路图<sup>[5-6]</sup>。等效输入电阻表示如下:

$$R_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel R_{be} \quad (3)$$

图中,  $r_{be}$  为发射结的等效电阻, 当三极管工作在放大区时,  $r_{be}$  可表示为:

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{V_T}{26} \quad (4)$$

此时输入电阻为一个固定值的电阻,  $u_s$  和  $u_i$  之间关系满足式(1),  $u_i$  的波形为正弦波, 没有失真现象。

### 2 饱和失真电路分析

当共射极放大电路的输入信号增加时, 三极管

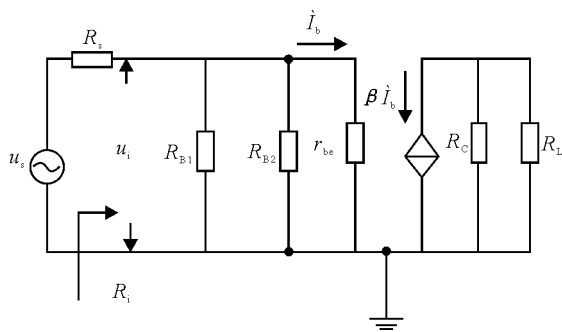


图4 小信号等效电路图

的工作点沿负载线移至饱和区, 如图 5 所示。由于三极管工作在饱和区使输出信号  $u_o$  产生的非线性失真被称为饱和失真, 此时的集电结电压为 0 或者集电结正向偏置, 集电结失去了收集电区电子的能力,  $i_c$  不再受  $i_b$  控制<sup>[7]</sup>。当三极管工作在饱和区时, 三极管不再等效为线性元件,  $r_{be}$  不满足式(4),  $u_i$  不能随着  $u_s$  等比例的变化, 此时  $u_i$  会产生失真现象。

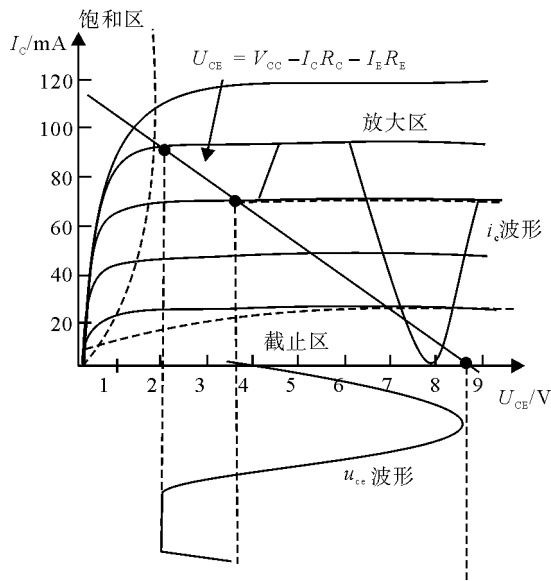


图5 三极管输出特性曲线

对于共射极放大电路, 当输出信号正电压过大, 三极管工作在饱和区时, 集电结正偏, 发射结正偏。如图 5 所示, 为三极管输出特性曲线, 由于工作在深度饱和区的三极管,  $U_{CE}$  值很小, 并且  $U_{CE}$  和  $I_C$  之间满足的负载线方程如下:

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E \quad (5)$$

这使得集电极和发射极形成很大的饱和电流  $I_C$  和  $I_E$ , 并且  $I_C$  不再受到  $I_B$  的控制<sup>[8]</sup>。而三极管的发射结所呈现的伏安特性与正向导通的二极管的伏安特性一致, 在深度饱和区, 发射结几乎导通, 输入回路的等效电路图如图 6 所示。

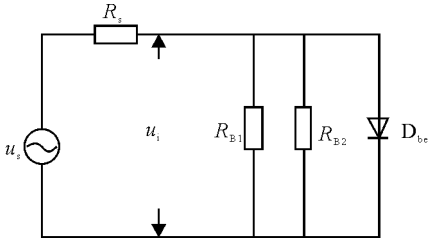


图6 饱和失真时输入回路的等效电路图

由等效电路图可看出, 三极管在饱和区工作时,  $u_i$  的电压近似等于二极管的导通电压  $V_T$ 。

### 3 截止失真电路分析

当共射极放大电路的输入信号减少时, 三极管的工作点沿负载线移至截止区, 三极管工作在截止区使输出信号  $u_o$  产生的非线性失真称为截止失真, 此时的发射结电压为 0 或者发射结反向偏置, 发射结电压过小, 无法使发射结导通, 此时三极管的基极仅有少量的漏电电流流入<sup>[9]</sup>。三极管工作在截止区时, 流入基极的电流几乎为 0, 基极电路虚断, 输入回路的等效电路图如图 7 所示, 由图 7 可以计算出  $u_i$  和  $u_s$  之间的关系如下:

$$u_i = \frac{R_{B1} \parallel R_{B2}}{R_s + R_{B1} \parallel R_{B2}} u_s \quad (6)$$

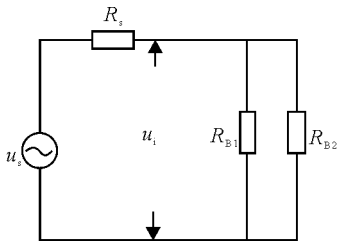


图7 截止失真时输入回路等效电路图

$R_{B1}$  和  $R_{B2}$  串联为三极管的基极提供偏置电压, 通常  $R_{B1}$  和  $R_{B2}$  选择阻值较大的电阻,  $R_{B1}$  和  $R_{B2}$  并联等效电阻远远大于电阻  $R_s$  的阻值, 即  $R_{B1} \parallel R_{B2} \gg R_s$ 。因此当三极管工作在截止区时,  $u_i \approx u_s$ 。

### 4 综合分析

通过以上分析, 可以推导出三极管工作在不同的区域时  $u_i$  的表达式如下:

$$u_i = \begin{cases} V_T & \text{饱和区} \\ \frac{R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel r_{be}}{R_s + R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel r_{be}} u_s & \text{放大区} \\ \frac{R_{B1} \parallel R_{B2}}{R_s + R_{B1} \parallel R_{B2}} u_s & \text{截止区} \end{cases} \quad (7)$$

当输入信号  $u_s$  正向过大时, 三极管工作在饱

和区,  $u_i$  的动态电压近似等于二极管的导通电压,  $u_i$  的电压波形出现截顶失真。三极管工作在放大区和截止区时,  $u_i$  与  $u_s$  之间均存在线性关系, 区别仅仅是  $R_s$  上分压比例不同。所以输出波形出现截止失真时, 输入信号  $u_i$  并未出现明显的失真现象。

为了更直观地说明三极管在不同区域的工作情况, 使用 Multisim 实现共射极放大电路的设计<sup>[10-12]</sup>, 如图 8 所示, 输入信号接入频率为 1 kHz, 有效电压为 300 mV 的正弦交流电压, 输出端接 4 通道示波器 (XSC1), 仿真图如图 9 所示。由波形图可以看出, 输入信号  $u_s$  为正弦波, 输出波形同时存在饱和失真和截止失真, 但信号  $u_i$  仅有与饱和失真对应的顶部失真, 底部几乎为正常的正弦波波形。

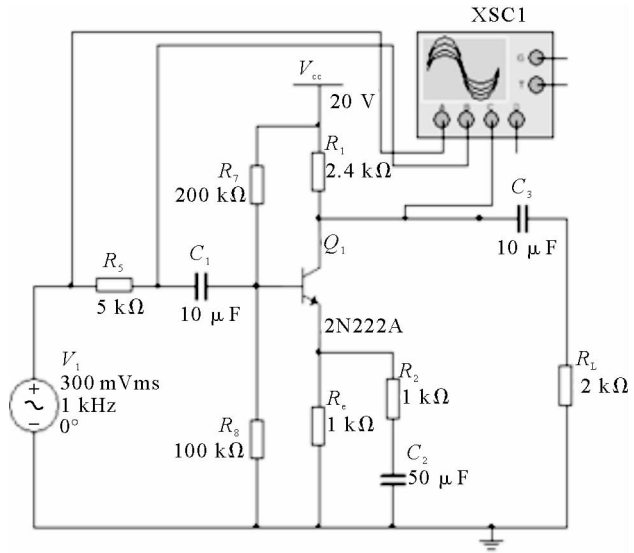


图8 共射极放大电路仿真图

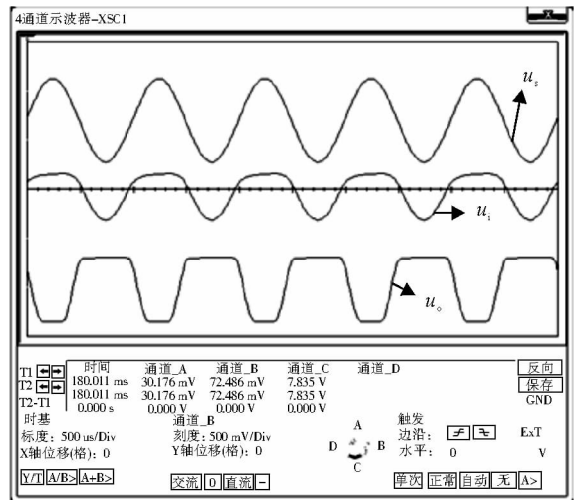


图9 波形对比图

品,亲自动手操作核磁仪进行谱图采集,对产物进行定性定量分析,大大丰富了实验教学内容,不仅训练了学生基本操作与技能,同时培养了学生多角度思考问题的能力,获得了较好的实验教学效果。

### 参考文献

[1] PAVEL J T, HYDE E C, BRUCH M D. Structure determination of unknown organic liquids using NMR and IR spectroscopy: A general chemistry laboratory [J]. Journal of Chemical Education, 2012, 89(11): 1450 - 1453.

[2] 林沛和. HNMR 在本科基础有机化学实验教学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2005, 24(6): 76 - 77.

[3] WONG K C. Review of NMR Spectroscopy: Basic principles, concepts and applications in chemistry [J]. Journal of Chemical Education, 2014, 91(8): 1103 - 1104.

[4] SIMPSON A J, MITCELL P J, MASOOM H, et al. An oil spill in a tube: An accessible approach for teaching environmental NMR spectroscopy [J]. Journal of chemical education, 2015, 92(4): 693 - 697.

[5] 毛秋平, 梁向晖, 钟伟强. 核磁共振仪用于教学实验的探索[J]. 广州化工, 2015, 43(7): 154 - 156.

[6] 王奎武. 核磁共振的实验教学与仪器管理的探索与实践[J]. 科技文汇, 2013(9): 75 - 76.

[7] 周中振, 陈金香, 习保名. 浅谈核磁共振教学[J]. 广东化工, 2011, 38(4): 258 - 258.

[8] MEDEN F I. Analysis of bromination of ethylbenzene using a 45 MHz NMR spectrometer: An undergraduate organic chemistry laboratory experiment [J]. Journal of Chemical Education, 2014, 91(8): 1264 - 1266.

[9] BONJOUR J L, PITZER J M, FROST J A. Introducing high school students to NMR spectroscopy through percent composition determination using Low - Field spectrometers [J]. Journal of Chemical Education, 2015, 92(3): 529 - 533.

[10] 强根荣, 孙莉, 杨振平, 等. 有机化学传统实验的改进[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(2): 102 - 104.

[11] 吴强, 唐晓琳, 田建焱. 核磁共振波谱实验教学探讨[J]. 广州化工, 2011, 39(13): 179 - 180.

[12] 祁慧雪. 核磁共振技术在化学定量分析中的应用[J]. 广东化工, 2012, 39(6): 121.

[13] 王召平, 朱姐, 王晓, 等. 核磁共振内标法测定乙基麦芽酚对照品的含量[J]. 山东科学, 2015, 28(4): 30 - 34.

[14] 徐伟亮. 基础化学实验[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

(上接第 13 页)

## 5 结束语

针对共射极放大电路实验过程中出现的输入信号波形失真问题进行了分析,即共射极放大器输入信号电压过大时,三极管的工作点进入饱和区和截止区,放大电路的输入电阻发生变化,使带有串联电阻的共射极放大器输入信号产生波形失真。同时,根据三极管的输入输出特性曲线及仿真,分析输入回路的等效电阻,通过分压公式计算出在不同的工作区  $u_i$  的表达式,进而分析  $u_i$  波形失真的原因。

### 参考文献

[1] 杨泰朋, 苏静, 黄友锐. 单管交流放大电路实验中的问题分析[J]. 实验室科学, 2010, 13(4): 97 - 98, 102.

[2] 康华光. 电子技术基础: 模拟部分[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[3] 胡剑琦, 王丽丹, 吴援明. 共射放大电路的设计[J]. 实验科学与技术, 2015, 13(1): 216 - 219.

[4] 董华, 童立君. 分压偏置式共射电路静态分析之中外教材对比研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2015, 29(2): 104 - 108.

[5] 张国礼, 张延曹. 静态工作点稳定的教学设计与实践[J]. 电气电子教学学报, 2016, 38(1): 102 - 104.

[6] 代素梅, 刘照红, 钟宁. 单管放大电路静态工作点仿真分析[J]. 测控技术, 2014, 33(12): 143 - 146.

[7] 吕长志. 半导体器件电子学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[8] 廖波, 伍学珍. 深度饱和和三极管等效电路模型分析[J]. 现代电子技术, 2005, 28(13): 98 - 100.

[9] 王红燕. 三极管内部载流子的分析[J]. 太原大学教育学院学报, 2015, 33(2): 102 - 106.

[10] 聂典. Multisim 12 仿真设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.

[11] 曹鸿霞, 冒晓莉, 张加宏, 等. Multisim 10 在单管共射放大电路中的应用[J]. 现代电子技术, 2011, 34(14): 169 - 172.

[12] 陈达军, 于肇贤. 计算机仿真在多级放大电路设计中的应用[J]. 电子设计工程, 2015, 23(18): 30 - 33.