



# Multisim 在单管放大电路失真分析中的 验证和辅助作用

冷文, 刘高华

(天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 单管放大电路的分析是低频电子线路课程的重要部分, 在对应的验证实验中关于信号失真的分析主要采用示波器观测和电位器及信号源调整的方法。这种方法对失真现象的分析和解释不够细致和全面, 导致最大不失真输出的测量误差较大。通过 Multisim 软件的深度开发, 结合具体电路案例的仿真结果, 对信号失真进行量化描述, 对实验结果进行全面验证和延展说明; 同时结合 Multisim 的综合仿真功能, 提出仿真软件的辅助设计方法测量最大不失真输出, 以达到降低测量误差的效果。结果表明, 仿真设计思路和结果对实验方法的优化具有一定的指导作用。

**关键词:** 计算机辅助分析; 单管放大电路; Multisim; 失真分析

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20200456

## Verification and Auxiliary Roles of Multisim in Distortion Analysis of Single Transistor Amplifier Circuit

LENG Wen, LIU Gaohua

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The analysis of single transistor amplifier circuit is an important part of low-frequency electronic circuit course. In the corresponding verification experiment, the analysis of signal distortion mainly adopts the method of oscilloscope observation and adjustment of potentiometer and signal source. The analysis and explanation of distortion phenomenon is not carried out in a detailed and comprehensive manner, therefore the measurement error of maximum undistorted output is large. Through the deep exploitation of Multisim software, combined with the simulation results of specific circuit cases, the signal distortions are described quantitatively and the experimental results are fully verified and extended. At the same time, combined with the comprehensive simulation function of Multisim, the auxiliary design method of the software is proposed for the measurement of the maximum undistorted output, so as to reduce the measurement error. The results show that simulation design ideas and results are instructive to the optimization of the experimental method.

**Key words:** computer aided analyse; single transistor amplifier circuit; Multisim; distortion analysis

《低频电子线路》教材中由三极管组成单管放大电路的相关内容课程的基础教学单元, 其对应的验证实验是学习各种复杂放大电路的基础<sup>[1]</sup>。针对实验, 理解原理、掌握方法以获取正确结论也是学生需要掌握的一种技能。

在单管放大电路的验证实验中, 针对失真现象的分析理解主要通过示波器观测、万用表测量以及偏置电阻和信号源调整等方法来实现。受到

观测/测量精度低、参数调整方法粗放以及实验仪器不足等影响, 这些方法存在以下问题:

- 1) 研究偏置电阻对失真的影响时, 在输入信号源幅度较小条件下, 仅利用万用表测量和示波器观测等方法, 容易造成对失真现象理解的不充分;
- 2) 利用偏置电阻和信号源联合调整来测量最大不失真输出时, 如果仅采用示波器观测的方法, 无法保证较高的测量精度。

收稿日期: 2020-09-27; 修回日期: 2020-10-23

基金项目: 天津市自然科学基金项目(17JCYBJC18600); 教育部第二批新工科研究与实践项目(E-ZDH20201603); 教育部产学合作协同育人项目(教学内容和课程体系改革)(201901066021)。

作者简介: 冷文(1967-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事无线通信、室内定位等方面的研究。

单管放大电路的失真是非线性失真,将产生新的频率分量。以音频信号为例,新的频率分量可能引起声音畸变,例如 Hi-Fi 功放就对失真指标有着严格的要求<sup>[2]</sup>,因此失真分析也是重要的教学内容。

Multisim 是目前国内教学中使用较多的电子线路仿真软件<sup>[3-4]</sup>。它主要分析低频模拟电路、数字电路和数模混合电路,提供的虚拟设备可以让学生方便地开展基于实验平台的电路仿真、测试和分析<sup>[5-6]</sup>。

本文在验证实验中引入 Multisim 软件,通过软件的深度开发,利用实验条件下无法完成的虚拟器件指标对比以及实验室相对缺乏的测试设备的虚拟应用,有助于更加全面深入地了解实验中

的失真结果。对最大不失真输出的测量,通过引入虚拟电路中参数扫描技术和量化验证手段,可大幅度提高测量精度。该仿真测试思路和结果对实验测量具有指导意义。

### 1 单管放大电路的失真分析理论基础

以 NPN 晶体管(2N2222)为核心的单管放大电路如图 1 所示,其中,可调节参数包括构成偏置电阻的电位器  $R_7$  和输入信号源  $V_1$  的幅度。对于失真的分析包括以下实验内容:

- 1) 小信号源幅度条件下,调整偏置电阻以改变静态工作点,了解静态工作点对失真的影响;
- 2) 联合调整信号源幅度和电位器,测量最大不失真输出的幅度。

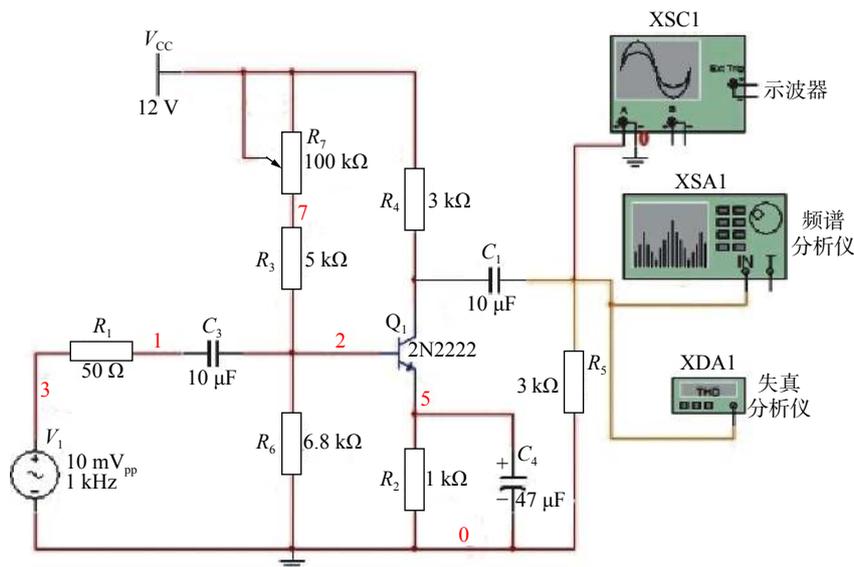


图 1 单管放大电路

静态工作点对失真影响的分析通常采用图解法<sup>[7]</sup>,该方法如图 2 所示,不同静态工作点的位置将造成不同程度的失真。

对于失真的量化描述为总谐波失真(THD)<sup>[4]</sup>:

$$THD = \frac{\sqrt{f_1 f_1 + f_2 f_2 + f_3 f_3 + \dots}}{|f_0|} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $f_0$  为基波,  $f_1, f_2, \dots$  为高次谐波。

由于器件的非线性,即使在信号源幅度很小和静态工作点合理的条件下,输出信号中的高次谐波分量依然存在。最大不失真输出波形是一种近似的不失真,是较低 THD 指标和较高基波幅度的优化组合。

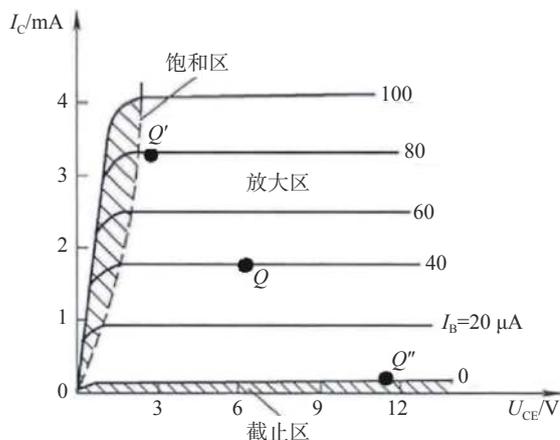


图 2 失真分析的图解法

## 2 实验过程描述和仿真软件的应用

### 2.1 静态工作点调整和失真结果测量

通常的静态工作点调整过程如下<sup>[8]</sup>：根据图 2 所示，最佳静态工作点应该在  $U_{CE}=V_{CC}/2$  的位置， $I_C=1\sim 2\text{ mA}$ 。先设置信号源幅度为  $10\text{ mV}_{pp}$ ，

调整图 1 中的电位器，用万用表测量  $U_{CE}$  满足要求即可(见图 2 中的  $Q$  点)，而失真严重的情况可以调整到图 2 中的  $Q'$  和  $Q''$  点处。根据示波器观测结果可以查看失真较小和较大情况下的输出幅度的变化情况，如图 3 所示。实验结果对失真的描述仅限于观测到的波形以及测量的静态工作点，缺乏全面的了解。

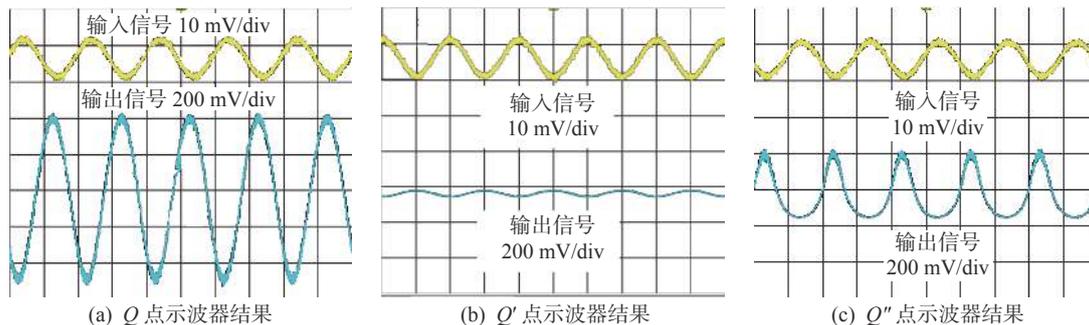


图 3 针对图 2 不同静态工作点的示波器观测输出

### 2.2 NPN 器件不同静态工作点对失真的影响

本文将仿真中的虚拟设备加入到对失真影响的分析中。根据文献的描述<sup>[9-11]</sup>，通过仿真调整图 1 中的  $R_7$  得到不同静态工作点，把图 1 中的失真分析仪加入到分析中，测量得到这些静态工作点下的  $THD$ ，其结果如图 4 中的红线所示。

的。采用如图 6 所示电路(通过替换其中的  $Q_2$  实现器件更换)以及如图 7 所示的直流嵌套扫描方法(输出变量为  $I(V_3)$ )可以获得器件的输出特性曲线，结果如图 8 所示。

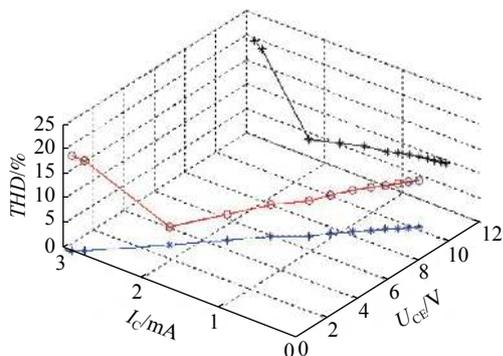


图 4 图 1 电路不同静态工作点的 THD

图 4 中蓝线为红线在  $(I_C, U_{CE})$  平面的投影(近似对应交流负载线<sup>[7]</sup>)，而红线在  $(I_C, THD)$  平面的投影(黑线)可以更清晰地描述  $THD$ ，从中可以发现一个有趣现象： $THD$  的最低值并不在图 2 所示的  $Q$  点，而靠近饱和区。为作比较，将图 1 中的 NPN 器件更换为虚拟 NPN 器件 BJT\_NPN\_VIRTUAL<sup>[4]</sup>，重做这个测试，结果如图 5 所示。

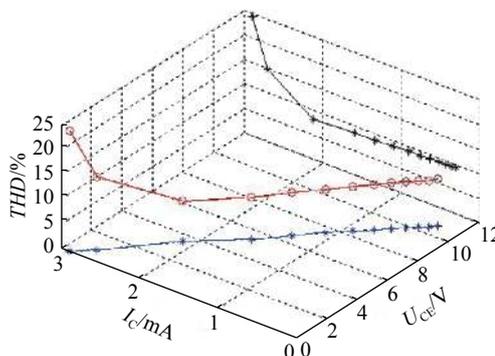


图 5 图 1 电路更换为虚拟器件后不同静态工作点的 THD

图 5 所示结果中对应图 2 的  $Q$  点位置能够实现接近最低  $THD$  值。图 4 和图 5 所表现的静态工作点对失真影响的差异是由器件特性的差异造成

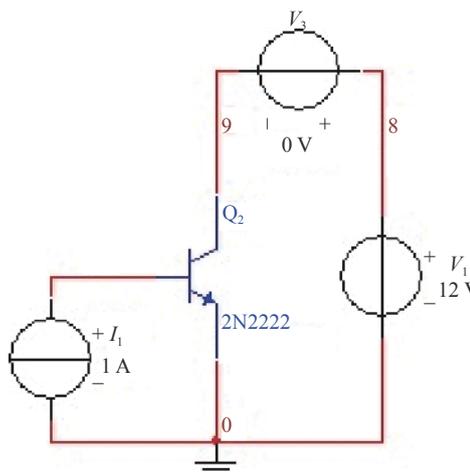


图 6 输出特性曲线测量电路

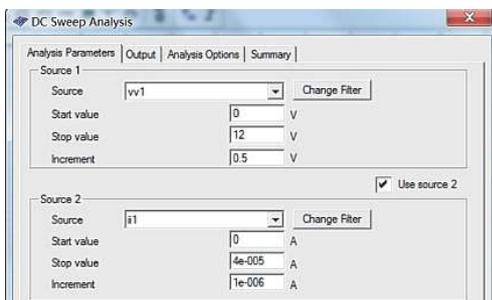
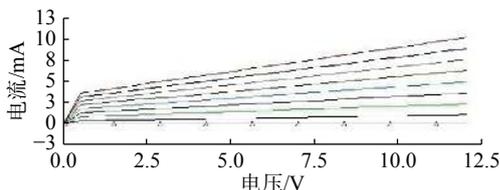
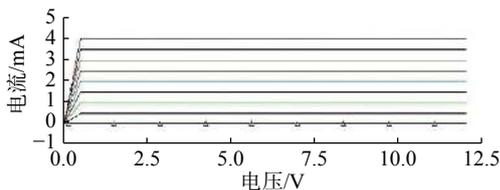


图7 直流嵌套扫描设置界面



(a) 器件为 2N2222



(b) 器件为虚拟 NPN 器件

图8 直流嵌套扫描方法得到的输出特性曲线

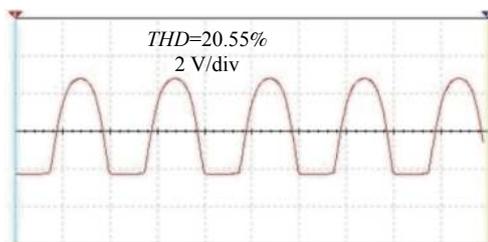
从图8可以看出,虚拟 NPN 器件的结果更接近教材中的理论曲线(图2),而真实器件的结果与理论的差异导致了静态工作点对失真影响的差异。

### 2.3 输出失真波形的深入分析

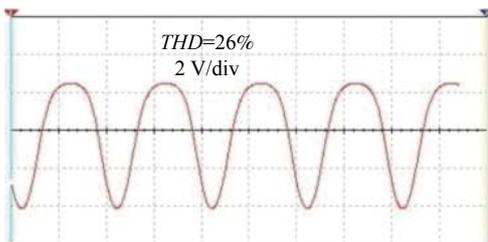
以音频信号为例,由于人耳对低/高次谐波的灵敏度各不同,且对声压相同但频率不同的感知也不同<sup>[12]</sup>,因此对信号频谱分析也是失真分析的重要组成部分。而频谱分析常用到的频谱分析仪在现有实验室条件下较为短缺,仿真软件的应用能起到弥补作用。

如图9所示的两个波形如果仅从效果看,似乎图9(a)失真更严重,但图9(b)的THD值却更高,因此需要进行更深入地研究,将图1中的频谱分析仪加入到仿真中,分析结果如图10所示。

从图10可以看出每个谐波分量的细节(大于4 kHz的谐波分量因为太小被忽略),根据各个谐波更详细的展示和THD的定义,可以解释图9(a)貌似失真严重而THD值偏小的原因。Multisim软件的傅里叶分析也能达到图10的分析效果并提供量化结果<sup>[13]</sup>。

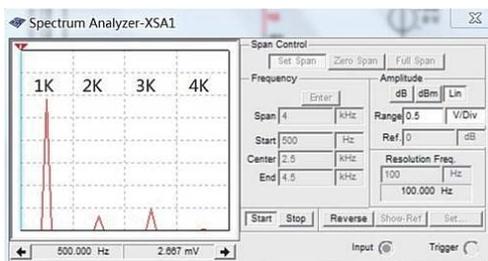


(a) 小 THD 的输出波形

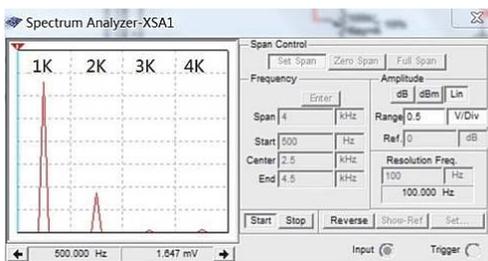


(b) 大 THD 的输出波形

图9 两个不同 THD 的仿真输出波形



(a) 图9(a) 分析结果



(b) 图9(b) 分析结果

图10 图9波形的频谱分析仪仿真结果

### 2.4 最大不失真输出幅度的测量

在实验中最大不失真输出的测量主要依靠图1中电位器  $R_7$  和输入信号源  $V_1$  幅度的联合调整并通过示波器观测来实现的。首先是通过电位器和输入信号源的联合调整实现在输出信号中既有截止失真又有饱和失真,并且两类失真在输出波形中的体现呈现对称特点;然后逐步减小信号源幅度,同时辅助以电位器微调,实现两类失真接近同步地消失,此时的输出即为最大不失真输出<sup>[7,14]</sup>。

这种实验方法的局限性在于它比较适合如

图 8(b)所示的理想输出特性曲线，而对于如图 8(a)所示具体器件的输出特性曲线，实现两类失真接近同步地消失的困难比较大；同时由于调试手段基本靠示波器观测以及两个参数的联合调整，也为实验实施带来操作困难和测量精度不高的问题。

### 2.5 仿真软件对最大不失真输出测量的辅助

本文采用 Multisim 软件中的参数扫描方法开展最大不失真输出的测量。由图 1 所示电路优化后得到如图 11 所示的电路图：简化偏置电阻为  $R_3$ ；为实现对于信号源幅度的参数扫描，增加一个线性受控源  $V_3$ ，在  $V_1=10\text{ mV}_{pp}$  不变的前提下，通过扫描  $V_3$  的增益实现信号源幅度扫描。

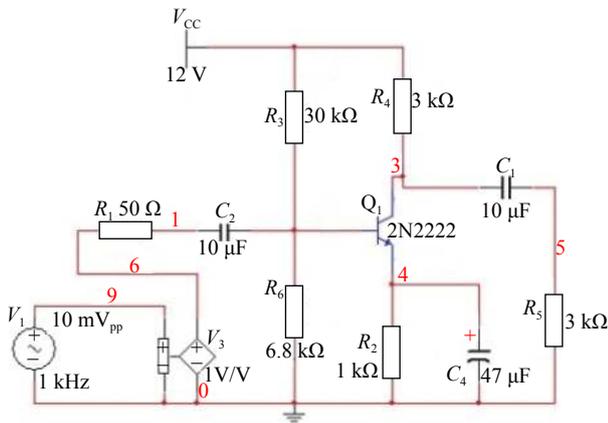


图 11 最大不失真输出测量电路

仿真的过程描述如下：

- 1) 设置  $R_3=10\sim 50\text{ k}\Omega$ ，设置原因是根据之前分析，偏置电阻等于  $30\text{ k}\Omega$  时静态工作点比较接近理论分析的最优解；
- 2) 在每个选定的  $R_3$  基础上，对  $V_3$  开展扫描，使得输入信号源幅度从  $10\text{ mV}$  变化到  $150\text{ mV}$ ，其扫描界面如图 12 所示。

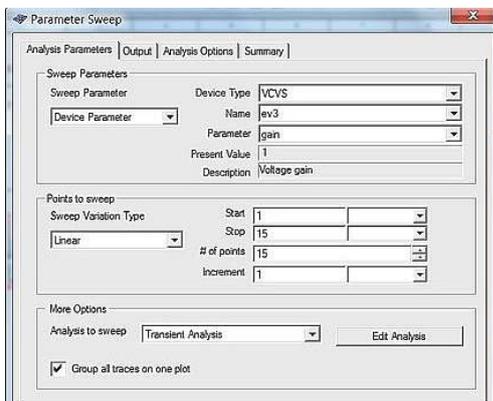


图 12 信号源幅度参数扫描设置界面

根据设置开展扫描，输出波形如图 13 所示，不同曲线对应不同信号源幅度。当  $R_3$  为  $40\text{ k}\Omega$  和  $50\text{ k}\Omega$  时失真严重，在此忽略。

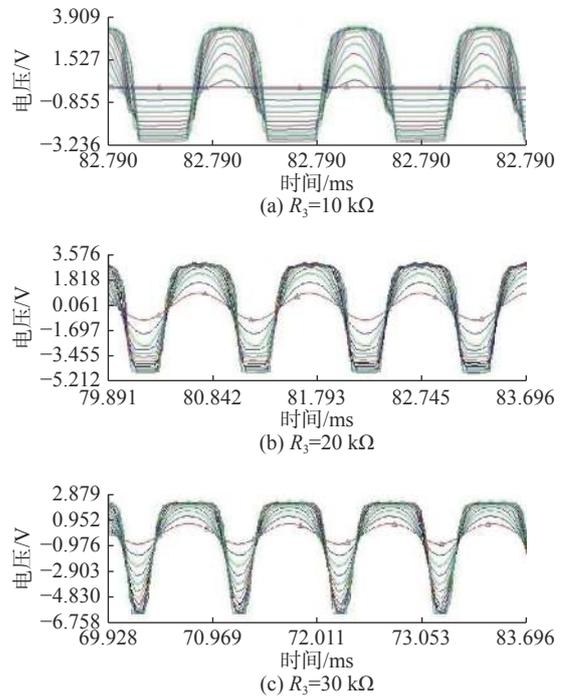


图 13 信号源幅度参数扫描结果

由图 13 可知， $R_3=20\text{ k}\Omega$  时截止失真和饱和失真呈现较明显对称，因此在  $R_3=15\sim 25\text{ k}\Omega$  范围内再进行细调，最后结果如图 14 所示 ( $R_3=21\text{ k}\Omega$ ， $V_3$  增益为 1~6)，从中选出失真较小、幅度较大的结果为最优解，这个选择过程也可以依靠 THD 和频谱分析仪/傅里叶分析辅助进行。最终选择  $V_3$  的增益为 4，最大不失真输出幅度为  $2.8\text{ V}$  (峰值)。

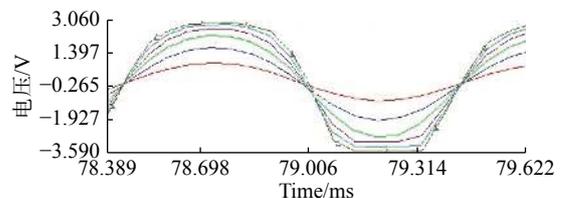


图 14 参数扫描细调最优解

在以上仿真结果的指导下，在图 1 电路基础上测量的最大不失真输出结果如图 15 的示波器测量结果所示。

这个辅助方法的优势在于能够将多种情况下的波形曲线进行对比处理，同时基于仿真软件的量化分析功能，可大幅度提高最终的测量精度。

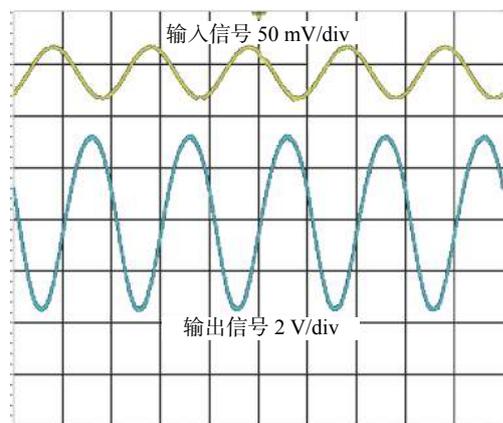


图15 最大不失真输出示波器测量结果

### 3 结束语

从上述实验过程可以看出,对于失真的深入了解方面,实验室所不能提供的虚拟器件(理想器件)与真实器件性能分析的仿真分析对比,以及实验室相对缺乏的频谱分析仪器的仿真分析结果,都能够达到强化学习的效果;对于最大不失真幅度的测量方面,在实验中实施困难和实施精度较低的多参数多次数的测量以及结果对比,可以在仿真软件中精确地执行,而仿真结果也为高精度测量的实验实施提供参考。

根据本文案例介绍可以看出, Multisim 软件的算法分析功能、时/频域虚拟设备以及综合仿真方法在实验题目的验证分析和辅助设计过程中得到充分的应用。通过仿真软件的深度开发<sup>[15]</sup>,可以实现对于题目实验实施的辅助,弥补实验实施过程中测试手段和实验仪器的不足,扩展题目的测试分析范围。

### 参考文献

- [1] 傅丰林. 低频电子线路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [2] 陈金坤. 高保真音响效果的技术评价[J]. 音响技术, 2004, 11: 69-70.
- [3] 王冠华. Multisim 10电路设计及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [4] 蒋卓勤. Multisim及其在电子设计中的应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
- [5] 张承畅, 龚昱文, 余洒, 罗元. Multisim在模电和数电混合实验案例中的应用[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(6): 50-62.
- [6] 吴伟雄, 褚莲娣. 基于Multisim的电子技术课程设计研究[J]. 实验室研究与探索, 2005, 24(1): 68-71.
- [7] 丘嵘, 陈艳峰, 谭斌冠. 放大电路失真分析方法的局限性探讨[J]. 电气电子教学学报, 2019, 41(3): 108-112.
- [8] 吴戈, 汪雨冰, 卫克. 单级交流放大电路实验教学方法探索[J]. 教育教学论坛, 2016, 18: 260-261.
- [9] 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.
- [10] 孙一萍, 叶建芳, 刘婉茹. 基于Multisim 13.0调谐放大器静态工作点研究[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(9): 151-153.
- [11] 张志强, 叶建芳. 静态工作点对振荡器起振特性影响的研究[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(7): 114-117.
- [12] 杜晓文. 从等响曲线说起谈谈那些与声音强弱有关的概念[J]. 家庭影院技术, 2019, 6: 92-95.
- [13] 吴贞焕, 钟庆宾, 张新莲. 负反馈放大电路稳定性动态仿真研究[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(7): 34-36.
- [14] 韩峰, 刘媛媛, 韩冰. 放大电路最大不失真幅度的估算与静态工作点设置[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2013, 29(3): 4-6.
- [15] 马学条, 陈龙. 基于虚拟仿真技术的数字电路实验教学探索[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(10): 127-129.

编辑 何雨莲