



# “虚实交融、点面结合”的非电专业电路 实验教学研究

郑 重<sup>1</sup>, 顾 理<sup>2</sup>, 陆 伟<sup>2</sup>, 朱俊株<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 微电子学院, 合肥 230027; 2. 中国科学技术大学 信息与计算机实验教学中心, 合肥 230027)

**摘要:** 电子线路课程内容多、系统性强, 对于非电专业学生难度较大。与理论课相配套的电路实验, 由于客观条件的限制, 在时间上与理论课进度难以同步, 且实验内容侧重于单个知识点的验证, 综合性相对缺乏, 难以充分发挥其对理论课程的支撑作用。基于 Multisim 设计了系列仿真实验, 作为实体实验的补充, 构建了“虚实交融、点面结合”的实验教学模式。实体实验立足章节纵向联系, 聚焦“点上强化”, 旨在加深学生对理论知识点的理解, 训练学生的动手能力; 仿真实验突出章节横向联系, 强调“面上拓展”, 着力挖掘实验内容的深度和广度, 培养学生分析问题和解决问题的能力。通过实验教学改革与创新, 有效激发学生学习的主动性和积极性, 提升非电专业电路课程教学的质量和效果。

**关键词:** 实验教学; 电子线路; 非电专业; Multisim 仿真

中图分类号: TN710

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230480

## Research on the Experimental Teaching of Electronic Circuit for Non-electrical Disciplines in a Combination Mode of “Virtualization-reality” and “Point-surface”

ZHENG Zhong<sup>1</sup>, GU Li<sup>2</sup>, LU Wei<sup>2</sup>, ZHU Junzhu<sup>1</sup>

(1. School of Microelectronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Experimental Teaching Center of Information and Computer, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** The undergraduates majoring in non-electrical disciplines always feel difficult in studying electronic circuit course for its extensive content and high systematicity. For inadequate instruments, the corresponding experimental course sometimes fall out of step with the theoretical course. Moreover, most experiments aim at verification of some specific theoretical concepts with lacking integration. As a result, the experiments could not effectively leverage its strength to play a supporting role for the theoretical course. Aiming at the present problems, a series of visual reality experiments based on Multisim software are designed as supplements. A teaching mode is built by combining “virtualization-reality” and “point-surface”. The physical experiments are designed independently according to each chapter, which focus on helping the undergraduates comprehend the theoretical points and develop hands-on skills in practice. While the VR experiments emphasize connections among the key points from different chapters, which extend the width and depth of experimental contents to cultivate the ability of the students in analyzing and solving concrete problems. Innovations in the experimental teaching mode could effectively motivate the enthusiasm of the students from non-electrical disciplines in studying electronic circuit courses and thus improve the teaching performance of electronic circuit experiments.

**Key words:** experimental teaching; electronic circuit; non-electrical disciplines; Multisim simulation

现代社会电子信息技术迅速发展, 应用领域不断拓宽。在学科融合、多学科交叉等新工科背景下, 我校为非电类专业的本科生在大二开设了电子线路理论及实验课程<sup>[1-2]</sup>。理论课程主要讲授电路基本原理、模拟电子线路及系统, 使学生掌

握电子线路的基本原理、基本概念、主要电路类型及分析方法, 为电子技术在其专业领域中的应用打下必备的基础。电路实验与理论课程相配套, 主要是通过具体的实验操作, 对相关理论知识点进行验证, 让学生加深对理论概念的理解,

收稿日期: 2023-10-10; 修回日期: 2023-11-23

基金项目: 中国科学技术大学教学研究项目(2022xjyxm003, 2023xjyxm062); 安徽省教学质量工程项目(2020jyxm2263)。

作者简介: 郑重(1973-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事微纳器件方面的研究。E-mail: zozheng@ustc.edu.cn

培养他们的动手实践能力<sup>[3]</sup>。

电子线路课程内容繁多抽象,课时较少且电学基础相对薄弱的非电专业学生普遍反映难度很大,学习的积极性和主动性不高。与理论课相配套的电路实验课程,由于客观条件的限制,难以充分发挥其对理论课程的支撑作用。一方面,实验与理论课程进度不匹配:由于选课人数多,而仪器数量相对不足,实验室容量有限,电路实验通常实行分组轮转制,导致部分学生理论课程还没学,相关实验却已经开展,由于缺乏理论基础,实验只能是照葫芦画瓢,效果不佳;部分学生所学的理论知识,要间隔 1~2 个月才能进行对应的实验,所做的实验起不到及时巩固新知的作用。另一方面,实验内容较为单一:传统的非电类电子线路实验,通常按照理论课程逐章设计,每章对应一个独立的实验<sup>[4-5]</sup>,实验内容以验证单个理论知识为主,将各章节内容相联系的综合性实验较少,学生只是按照实验步骤去操作,自主拓展的空间有限。

针对现有非电专业电路课程教学中存在的问题,基于 Multisim 电路仿真软件设计了系列虚拟实验,作为实体实验的补充,构建了“虚实交融、点面结合”的实验教学模式;通过课前预习,课堂演练和课后探索等多种形式将仿真实验与实体实验合理搭配,有效克服了传统电路实验教学的不足,调动了学生学习的积极性,提升了非电专业电路实验的教学效果。

## 1 “虚实交融、点面结合”的教学设计思路

Multisim 是基于 Windows 操作系统的仿真工具,采用图形化操作界面,用软件的方法虚拟真实的实验环境,可以方便地开展各类电子线路实验,广泛应用于电路的分析、设计和仿真<sup>[6-7]</sup>。针对现有电路实验教学中存在的问题,将 Multisim 仿真软件引入电路课程的实验教学。根据理论课程的要点和难点,对原有实体实验项目进行梳理,适当增加部分虚拟实验,构建了如表 1 所示的“虚实交融、点面结合”的电路实验教学内容。

这些实验项目围绕课程教学大纲编排,包含基础性的实体实验和综合性的仿真实验,两者相辅相成,共同为理论课程提供重要支撑,为学生

提供理论联系实际的应用体验。实体实验项目立足理论课程内容的纵向联系,按照章节次序设计对应的实体实验,实验内容聚焦“点上强化”,旨在通过具体的实验操作,加深学生对单个理论知识的理解,训练学生的基本实验技能。虚拟仿真实验则注重强化章节之间的横向联系,将多个理论相关内容有机融合在一起,着力拓展扩充教学内容的广度和深度,培养学生分析问题和解决问题的能力。通过虚实交融的实验教学模式,开展点面结合的巩固和拓展训练,引导学生构建纵横交织的完整知识体系,掌握电路的基本分析方法,打下电路理论与应用的基础。

表 1 非电类电子线路实验内容设计

实验类型	实验项目	实验形式	预期效果
实体实验 (纵向关联)	电路基本定理	单点验证	巩固基础 训练技能
	RC电路的频率特性		
	二极管的基本应用		
	晶体管共射极单管放大器		
	差动放大器		
	模拟运算电路		
	负反馈放大器		
虚拟实验 (横向关联)	波形发生器	面上拓展	拓展内容 培养能力
	分压偏置共发射极放大电路		
	集成运算放大器		
	集成运算放大器应用电路		
	负反馈放大器		
	正弦波振荡电路		

基于 Multisim 所设计的虚拟仿真实验,在电路实验教学中主要应用于以下 3 个方面。

1) 开展仿真预习,提升实体实验的效率。传统的书面预习方式缺乏直观体验,不少学生即使进行了预习,对实验内容与实验原理之间的关系了解得仍不够清楚,实验调试中遇到问题就会手忙脚乱、无从下手,课堂效率较低。借助 Multisim 的强大功能,让学生在每次实验课之前将实验内容预先仿真,理顺实验和理论之间的关系,发现问题并探索如何解决这些问题。因为是有备而来,学生调试电路由过去的盲目低效变得胸有成竹、目标明确,显著提高了实验效率。

2) 延伸实验教学的时间和空间,弥补客观条件的不足。分组轮转制下的实体实验与理论课程进度很难同步。引入虚拟实验后,实验不同步的学生可以将当前理论课程所对应的实验内容通过 Multisim 及时仿真;在实验课堂上没有当堂解决的问题,课后可以在 Multisim 虚拟环境下继续研

究，突破实验时间、仪器数量等客观条件的限制，充分满足不同学生的学习需求。

3) 拓展实验教学内容的深度和广度，培养学生的创新能力。融合学生的专业背景，精心设置研究性实验课题，让学有余力的学生通过 Multisim 仿真软件进行电路分析与设计，让他们体会如何利用电子技术解决实际问题，激发学生自主开展实验探究的兴趣<sup>[8-9]</sup>。

## 2 基于 Multisim 的仿真实验教学设计实例

分压式偏置共发射极放大电路是模拟电子线路中一种重要的单管放大电路，结构简单、易于拓展。熟悉该电路工作特点，认识电路中各元器件的作用，学生可以在电路基本定理、差动放大电路、电流源电路、负反馈放大电路、放大电路的频率响应等知识点之间建立联系，从而深刻理解相关电路基本理论。本文以分压式偏置共发射极放大电路仿真实验为例，具体说明基于面上拓展的虚拟实验教学设计。

如表 2 所示，列出了分压式偏置共发射极放大电路仿真实验的具体内容和要求，主要包括：了解该电路的组成和基本工作原理、掌握该电路静态工作点的设置方法、明确该电路稳定静态工作点的基本原理、分析引入交流负反馈后对电路

交流性能的影响等。这些实验内容分层次呈现，联结了理论课程的不同章节，涵盖了多个知识点，可以让学生在分析问题和解决问题的过程中实现能力的提升。

表 2 分压式偏置共发射极放大电路仿真实验设计

虚拟实验	实验内容	联系章节
静态分析	求静态工作点、自动稳定静态工作点	基本放大电路、差动放大电路、电流源电路
交流分析	求放大电路的交流参数	基本放大电路
引入交流负反馈的影响	减小非线性失真 交流参数的变化 展宽频带	负反馈放大电路、放大电路频率响应

### 2.1 静态分析

#### 2.1.1 求静态工作点

如图 1 所示的分压式偏置共发射极放大电路，在求解静态工作点时，一般以  $V_{BQ}$  为出发点，依次为  $V_{BQ} \rightarrow V_{EQ} \rightarrow I_{EQ} \rightarrow V_{CEQ}$ 。教材中通常仅说明选取合适的电阻  $R_{b1}$  和  $R_{b2}$ ，使得流过  $R_{b1}$  的电流  $I_1$  约等于流过  $R_{b2}$  的电流  $I_2$ ，则有：

$$V_{BQ} \approx R_{b2}V_{CC}/(R_{b1} + R_{b2}) \quad (1)$$

什么是合适的  $R_{b1}$  和  $R_{b2}$ ？不少学生对此感到困惑，不解决这个困惑，就不能真正掌握该电路的静态分析方法。根据电路基本理论，从戴维南定理出发，推导出式(1)成立需满足如下条件<sup>[10]</sup>：

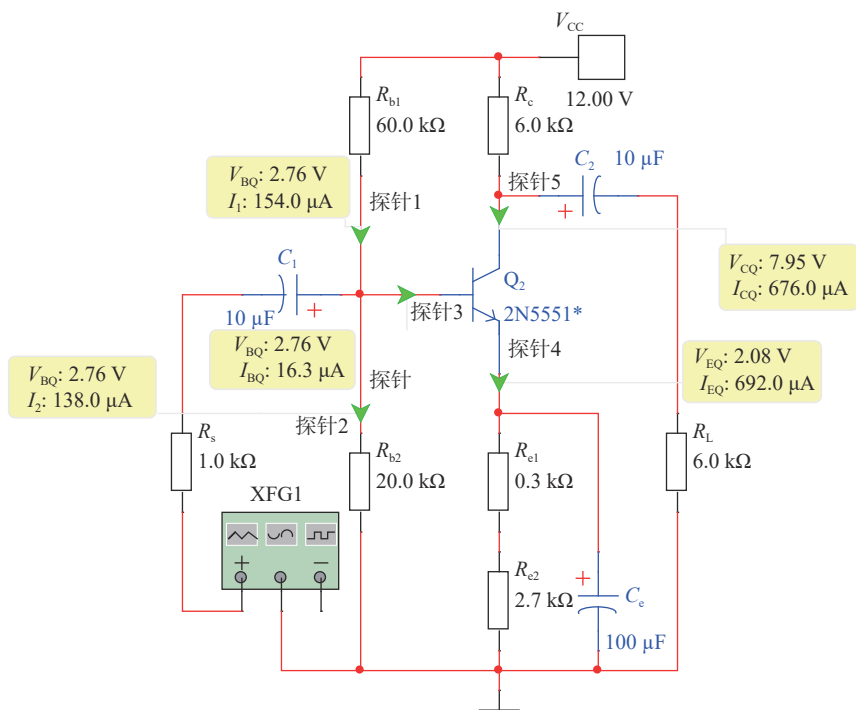


图 1 分压式偏置共射放大电路

$$R_{b1} // R_{b2} \ll (1 + \beta)R_e \quad (2)$$

Multisim 仿真软件可以通过自带的探针工具直接读出三极管各电极的直流电压和电流值, 进而求出静态工作点并验证式(1)成立的条件。如图 1 所示, 探针 1 测得  $I_1(154.0 \mu A)$ , 探针 2 测得  $I_2(138.0 \mu A)$ , 探针 3 测得  $I_{BQ}(16.3 \mu A)$ 、 $V_{BQ}(2.76 V)$ ; 同时, 由探针 4 测得  $I_{CQ}(676.0 \mu A)$ 、 $V_{CQ}(7.95 V)$  和探针 5 测得  $V_{EQ}(2.08 V)$ , 可以算出  $V_{BEQ} \approx 0.68 V$ 、 $V_{CEQ} \approx 5.86 V$ ,  $\beta \approx 41.5$ 。此时静态工作点已确定。为了验证式(1)成立的条件, 维持电阻  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$  阻值之比 3:1 不变, 即由式(1)估算  $V_{BQ}$  固定为 3.00 V, 改变  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$  阻值大小, 由 Multisim 仿真软件测得的  $V_{BQ}$  与由式(1)估算的  $V_{BQ}$  进行对比 (如表 3 所示), 可见  $R_{b1} // R_{b2} \ll (1 + \beta)R_e$  符合的程度越好, 由式(1)估算静态工作点造成的误差就越小。

表 3 由电阻  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$  的阻值与  $V_{BQ}$  估算的误差对比

$R_{b1}/k\Omega$	$R_{b2}/k\Omega$	$R_{b1} // R_{b2} / k\Omega$	$(1 + \beta)R_e / k\Omega$	仿真测得 $V_{BQ} / V$	由式(1)估算 $V_{BQ} / V$
15	5	3.75	125	2.93	3.00
30	10	7.50	125	2.87	3.00
60	20	15.00	125	2.76	3.00
120	40	30.00	125	2.56	3.00
300	100	75.00	125	2.14	3.00

这项内容在实体实验中由于课堂时间的限制很难开展。学生通过这个仿真实验, 可以验证式(1)成立的条件。  $R_{b1}$  和  $R_{b2}$  的阻值是否合适的问题不再难以捉摸, 并且可以直观地比较  $R_{b1}$  和  $R_{b2}$  取不同值时由式(1)估算  $V_{BQ}$  所产生的误差。由于 Multisim 仿真不需要占用实验室资源, 也没有时间限制, 可以随时随地进行, 从而弥补了实体实验的不足, 有利于学生快速掌握该电路的静态分析方法。

### 2.1.2 自动稳定静态工作点

固定偏置共射极放大电路的静态工作点会随着晶体管工作环境温度的变化而变化, 导致设置好的静态工作点发生漂移, 使得输出的交流信号失真。分压偏置共射放大电路通过  $R_e$  引入直流负反馈可以稳定静态工作点<sup>[1]</sup>, 但其稳定的过程对于部分初学者难以理解。厘清  $R_e$  的直流负反馈作用, 是掌握长尾式差动放大电路中  $R_e$  的共模负反馈作用等后续内容的必要前提。

设计了仿真实验, 利用 Multisim 的温度扫描功能研究温度变化对静态工作点的影响。调整好

固定偏置共射放大电路(如图 2 所示)和分压偏置共射放大电路(图 1)的静态工作点, 在温度扫描模式中将温度范围设置为 0~210 °C, 增量设为 30 °C, 共 8 个不同的温度点, 分别对两种电路进行直流工作点分析, 结果如图 3 所示。固定偏置共射放大电路的  $I_C$  随着温度的升高而升高, 尤其是温度达到 210 °C 左右时, 由于  $I_C$  接近 2 mA, 使得  $V_{CE}$  接近于 0 V, 此时静态工作点已经接近饱和区, 输出饱和失真。分压偏置共射放大电路的  $I_C$  随温度变化的幅度较小, 显示其具有稳定静态工作点的作用<sup>[12]</sup>。

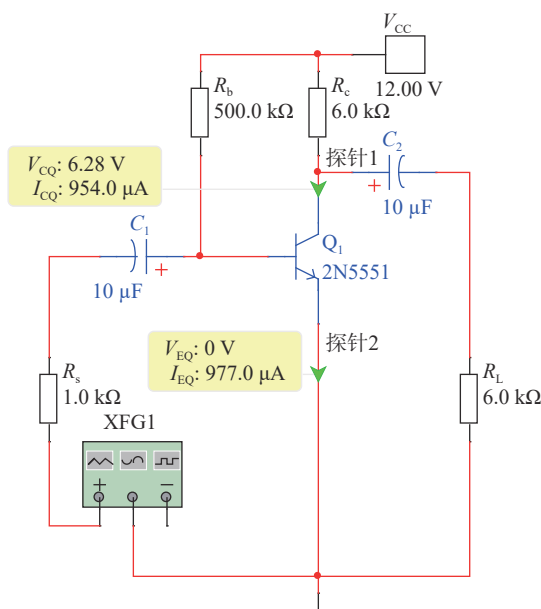


图 2 固定偏置共射放大电路

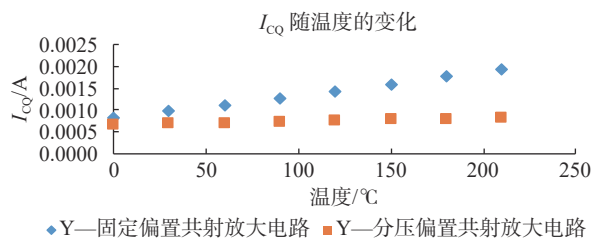


图 3 两种放大电路的温度扫描结果对比

由于温度改变这一条件在电路实验室中不易实现, 在通常的实体实验中很难验证温度变化对放大电路静态工作点的影响。采用 Multisim 软件可以很方便地将其仿真呈现, 使抽象的描述变得直观具体, 便于学生理解。

### 2.2 交流分析

微变等效电路法是分析放大电路的一个重要工具。在分压式偏置共射放大电路(图 1)中设置好

静态工作点，将 Multisim 自带的函数发生器输出设置为 1 kHz, 10 mV 的正弦波作为放大电路的输入，接上示波器，可以观察到放大电路的输入输出信号。如图 4 所示，将绿色输出信号的峰-峰值与红色输入信号的峰-峰值相除，得到电压放大倍数  $A_u = -896.908/11.872 \approx -75.55$ ；基于微变等效电路法  $A_u = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}}$ ，计算出  $A_u \approx -76.85$ ，两者非常接近，从而验证了微变等效电路法的合理性。通过示波器显示的输入输出波形，可以很直观地得到两者之间的相位关系，学生可以在生动的情境中产生切身的体会。及时地用仿真实验中直观的波形、简单的计算来验证课堂所学的微变等效电路法，可以使初学电路的非电专业学生加深对该方法的理解，帮助他们掌握这一重要的放大电路基本分析方法，为后续分析更复杂的电路打下基础。

### 2.3 引入交流负反馈对电路性能的影响

在图 1 所示电路中，设置旁路电容  $C_e$ ，仅旁

路掉电阻  $R_{e2}$ 。如图 5 所示，电阻  $R_{e1}$  出现在放大电路的交流通路中，并通过电阻  $R_{e1}$  引入了电流串联负反馈，这对放大电路的性能将会产生多方面的影响。如何让学生直观地观察到这些影响，并理解这些影响产生的原因，是课程学习中的一大难点。为此设计了以下基于 Multisim 的综合型实验，引导学生通过 Multisim 仿真进行自主探究。

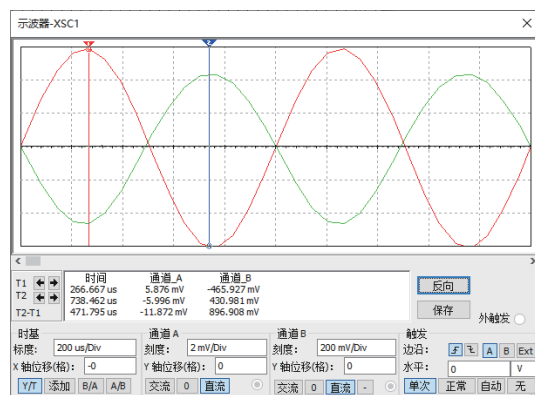


图 4 分压式偏置共射放大电路的输入(红)和输出(绿)波形

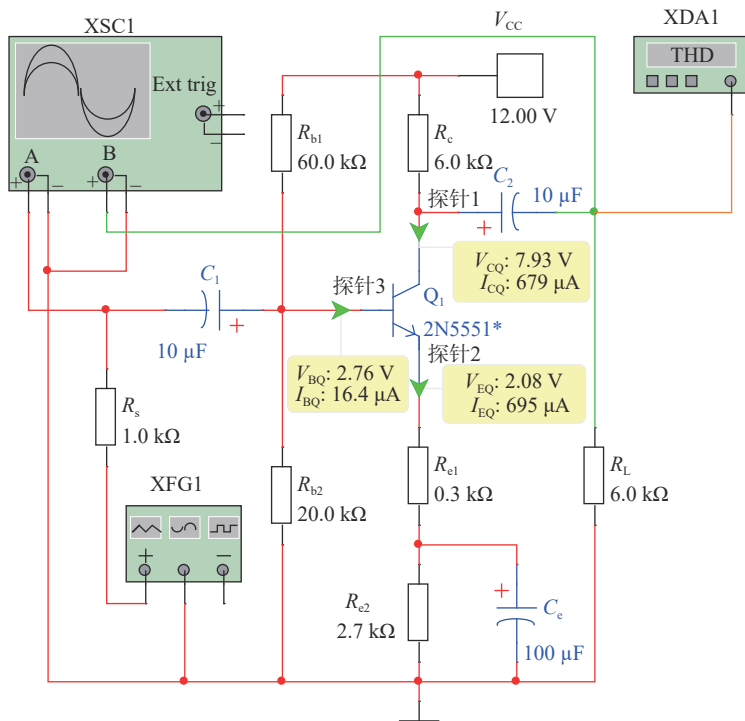


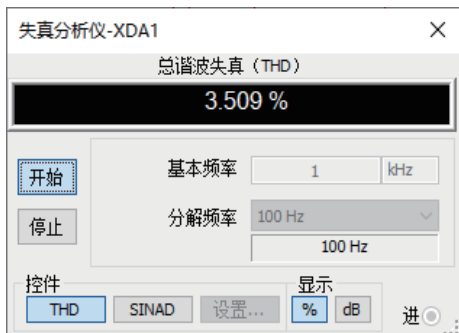
图 5 引入交流负反馈的分压式偏置共射放大电路

#### 2.3.1 减小非线性失真

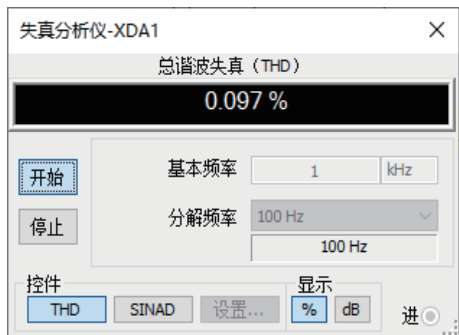
在图 1 所示的电路中，可以通过微变等效电路法计算  $A_u$ ，但如何判断电路的输出是否失真？如图 4 所示，示波器显示输出波形的负半轴峰值

稍大于正半轴峰值，用 Multisim 自带的失真分析仪测量，电路输出信号的总谐波失真为 3.509%，如图 6(a)所示，可见该电路出现了一定程度的非线性失真<sup>[13]</sup>。在理论课的负反馈放大电路章节中

指出, 这种非线性失真是由于晶体管输入特性曲线的非线性而产生的, 引入交流负反馈可以减小这种非线性失真。学生对此描述并无直接的体会, 因而难以理解。用 Multisim 失真分析仪测量图 5 所示电路, 其输出信号总谐波失真减小到 0.097%, 如图 6(b) 所示, 直观地说明了引入交流负反馈对非线性失真的影响, 从而帮助学生化解了理论知识难点。



(a) 引入负反馈前



(b) 引入负反馈后

图 6 引入负反馈前后输出信号的非线性失真对比

### 2.3.2 改变交流参数

引入交流负反馈会影响放大电路的交流参数。首先, 电压放大倍数会减小。对图 5 所示的电路, 引入交流负反馈以后, 可以根据示波器显示的输入输出波形的峰-峰值计算出电压放大倍数  $A_{uf} = -152.502/17.620 \approx -8.66$ ,  $A_u$  相比引入负反馈之前的 -75.55 明显减小。此外, 输入和输出电阻 ( $R_i$  和  $R_o$ ) 也会发生变化。如图 4 所示, 由示波器可读出引入交流负反馈前  $U_i \approx 11.872$  mV; 根据  $U_i = U_s \frac{R_i}{R_i + R_s}$ , 求得  $R_i \approx 1.46$  k $\Omega$ 。用同样的方法可算出引入交流负反馈后放大电路的输入电阻  $R_{if} = 7.41$  k $\Omega$ 。对比可见, 引入交流负反馈可增大输入电阻。用 Multisim 测出放大电路输出空载时的输出电压约为其接上  $R_L = 6.00$  k $\Omega$  时输出电压的两倍; 由  $R_o \approx R_{of} \approx 6.00$  k $\Omega$ , 可知该电路引入交流负

反馈对于输出电阻影响不大。通过以上虚拟实验, 学生可以验证电路引入交流负反馈之后对其交流性能所产生的影响, 结果如表 4 所示。

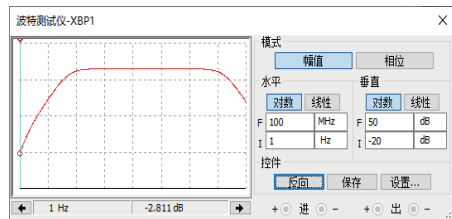
表 4 引入交流负反馈对放大电路交流参数的影响

引入交流负反馈前后的交流参数	未引入交流负反馈 Multisim 估算	未引入交流负反馈模型估算	引入交流负反馈后 Multisim 估算	引入串联负反馈后模型估算
$A_u (A_{uf})$	-75.55	-76.85	-8.66	-8.65
$R_i (R_{if})/k\Omega$	1.46	1.48	7.41	7.35
$R_o (R_{of})/k\Omega$	6.00	6.00	6.00	6.00

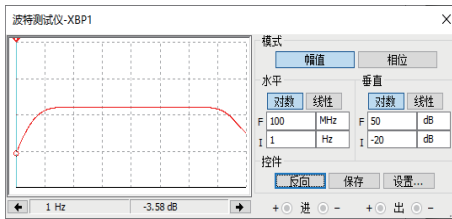
在目前的实验课程中, 由于课时的限制, 并不会对分压式偏置共射放大电路引入的交流负反馈进行深入研究。单管放大电路结构简单, 更容易突出交流负反馈的作用。借助 Multisim 仿真实验, 可以促进初学者深刻领会放大和反馈这两个重要概念。

### 2.3.3 引入负反馈展宽频带

Multisim 自带的波特测试仪可以测量放大电路的频率特性。设计仿真实验, 让学生使用波特测试仪比较分压式偏置共射放大电路引入交流负反馈前后增益和通频带的变化<sup>[14]</sup>。如图 7 所示, 引入交流负反馈前, 下限截止频率约为 53.6 Hz, 上限截止频率约为 16.2 MHz; 引入交流负反馈后, 上、下限截止频率分别变为 6.6 Hz 和 19.8 MHz, 通频带明显展宽; 同时, 放大电路的电压增益由 37.65 dB 下降到 18.75 dB。虚拟实验直观地显示了放大电路引入负反馈后通频带的展宽和电压增益的下降。在实体实验中, 一般采用示波器分析电路频率响应。学生可以在虚拟实验与实体实验的对比中, 体会两种方法的差别。



(a) 引入交流反馈前



(b) 引入交流反馈后

图 7 引入交流负反馈前后的通频带变化

设计基于 Multisim 的仿真实验, 对结构简单的分压式偏置共射放大电路进行交流分析, 初学者更易于理解放大、反馈、频率响应等重要且有一定难度的基本概念<sup>[15]</sup>, 认识到电路的各种参数并非孤立存在, 相互之间具有深入的内在联系。如引入交流负反馈可以改善放大电路的某些交流性能, 但却是通过牺牲电路的放大倍数实现的。深刻理解这种辩证关系可以培养学生的辩证思维, 为他们后续课程的学习奠定基础。当然, 虚拟实验着重解决当前电子线路课程中部分实体实验条件不具备时的问题; 未来在条件具备时, 以上这些复杂仿真实验都需要学生通过真实实验来验证。

### 3 考核方式和教学效果

通过实验预习、课堂演练、课后作业和课外探索等多种方式, 将 Multisim 仿真实验融入电子线路实验教学的各个环节, 作为实体实验教学的重要补充, 可以满足学生多样化的学习需求。基于面上拓展的仿真实验作为实验课程作业, 学生需提交包括仿真实验内容、实验截图、结果分析等项目的实验报告, 并根据自身情况增加个性化研究内容。教师对实验报告进行评判并按一定比例计入平时成绩, 最终体现在课程总成绩中。前期的教学探索和实践表明, 这种“虚实交融、点面结合”的实验教学模式, 显著调动了非电专业学生学习电路课程的积极性和主动性, 学期中的到课率由过去不足 60% 提高到现在的 90% 以上; 学习效果明显提升, 期末考试的优秀率由不足 20% 提升到近 40%; 全校各专业选修电子线路课程的学生数量不断增加, 课程组在春、秋两个学期各增加了一个教学班以满足学生的选课需求。

### 4 结束语

立足非电专业电路课程教学目标, 针对实际教学中存在的问题, 合理引入 Multisim 仿真实验, 与实体实验有机融合, 构建“虚实交融、点面结合”的实验教学模式, 同步开展基础性验证训练与综合性拓展探究, 可以将抽象、复杂的理论知识转变为立体、直观的模式, 帮助非电专业

学生高效地学习和消化理论知识, 更好地掌握本课程的教学内容, 培养他们的动手实践能力和创新精神, 又不过多地增加他们的负担, 有效地提升了非电专业电路实验课程的教学效果, 促进了新工科背景下复合型创新人才的培养。

### 参考文献

- [1] 杨基海, 戴蓓倩, 刘同怀, 等. 理科非电类专业《电子电路基础》教材的改革探索[J]. 高等理科教育, 2000, 6(34): 41-43.
- [2] 徐骏, 王自强, 施毅. 引领未来产业变革的新兴工科建设和人才培养: 微电子人才培养的探索与实践[J]. 高等工程教育研究, 2017(2): 13-18.
- [3] 吕念玲, 卢开聪, 殷瑞祥. 电子电气基础实验课建设目标、内容与实施[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(10): 368-371.
- [4] 冯志江, 张利, 王巧玲. 电子技术实验教学的思考[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(7): 330-332.
- [5] 卢结成, 高世忻, 陈力生, 等. 电子电路实验及应用课题设计[M]. 2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.
- [6] 付扬. 基于Multisim技术的电子电路综合设计改革[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(4): 112-114.
- [7] 周细凤, 曾荣周, 林愿, 等. 基于NI Multisim和LabVIEW的通信电子线路课程开放式虚拟实验平台[J]. 实验科学与技术, 2020, 18(5): 135-139.
- [8] 周润景, 崔婧. Multisim 电路系统设计与仿真教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [9] 潘学文, 赵全友. Multisim在数字电路课程教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(11): 130-132.
- [10] 刘君, 杨晓苹, 吕联荣, 等. Multisim 11在模拟电子技术实验中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(2): 95-98.
- [11] 童诗白, 华成英, 清华大学电子学教研组. 模拟电子技术基础[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] 康华光, 华中科技大学电子技术课程组. 电子技术基础模拟部分[M]. 6版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [13] 王建平. 基于Multisim与Excel的二极管限幅器仿真实验[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(1): 143-145.
- [14] 冷文, 刘国华. Multisim在单管放大电路失真分析中的验证和辅助作用[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(3): 106-111.
- [15] 侯卫周. 静态工作点稳定电路频率特性的虚拟测试研究[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(1): 125-129.

编辑 葛晋