

软硬件协同的射频振荡器 教学实践研究

——基于Multisim的LC振荡电路仿真与实验验证

闫淑卿, 王 花, 郭 恒, 朱安福, 刘高峰, 肖旭华, 李 健, 李军明

华北水利水电大学电子工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年10月6日; 录用日期: 2025年11月6日; 发布日期: 2025年11月13日

摘 要

针对射频电路课程中LC振荡器理论抽象、实践脱节及工程思维培养不足的问题, 本文提出“问题驱动 - 仿真探究 - 实验验证 - 优化拓展”的软硬件协同教学方案。以考毕兹、Clapp、Seiler振荡器为案例, 通过Multisim仿真与硬件实验联动, 系统解析电路演进逻辑: 考毕兹电路因寄生参数导致频率误差达64.8%, Clapp电路串联小电容($C_3 = 10 \text{ pF}$)将误差降至3.1%, Seiler电路并联电容($C_4 = 10 \text{ pF}$)使幅度波动降低42%。教学实践表明, 该方案显著提升学生对理论的理解深度、实践能力及创新设计能力。学生反馈与成效评估证实, 该方法有效破解了振荡器教学中的抽象性难题, 为射频电路“理论 - 实践 - 创新”融合教学提供了可复用范式。

关键词

软硬件协同教学, LC振荡器, Multisim仿真, 频率稳定性, 教学改革

Research on Teaching Practice of Software-Hardware Cooperative Radio Frequency Oscillator

—Simulation and Experimental Verification of LC Oscillating Circuit Based on Multisim

Shuqing Yan, Hua Wang, Heng Guo, Anfu Zhu, Gaofeng Liu, Xuhua Xiao, Jian Li,
Junming Li

School of Electronic Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou
Henan

文章引用: 闫淑卿, 王花, 郭恒, 朱安福, 刘高峰, 肖旭华, 李健, 李军明. 软硬件协同的射频振荡器教学实践研究[J]. 教育进展, 2025, 15(11): 877-883. DOI: 10.12677/ae.2025.15112112

Abstract

Aiming at the problems of abstract theory, disconnection between practice and insufficient cultivation of engineering thinking in the teaching of LC oscillators in radio frequency circuit courses, this paper proposes a software - hardware cooperative teaching scheme of “problem-driven - simulation exploration - experimental verification - optimization and expansion”. Taking Colpitts, Clapp and Seiler oscillators as cases, through the linkage of Multisim simulation and hardware experiments, the evolutionary logic of the circuits is systematically analyzed: the Colpitts circuit has a frequency error of 64.8% due to parasitic parameters, the Clapp circuit reduces the error to 3.1% by connecting a small capacitor ($C_3 = 10 \text{ pF}$) in series, and the Seiler circuit reduces the amplitude fluctuation by 42% by connecting an additional capacitor ($C_4 = 10 \text{ pF}$) in parallel. Teaching practice shows that this scheme significantly improves students’ depth of understanding of theory, practical ability and innovative design ability. Student feedback and effect evaluation confirm that this method effectively solves the problem of abstractness in oscillator teaching and provides a reusable paradigm for the integration of “theory-practice-innovation” in radio frequency circuit teaching.

Keywords

Software-Hardware Cooperative Teaching, LC Oscillator, Multisim Simulation, Frequency Stability, Teaching Reform

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“新工科”建设背景下，射频电路课程作为电子技术专业衔接基础理论与工程应用的核心课程，其教学质量直接影响学生对雷达探测、智能传感等领域核心技术的掌握能力。该课程要求学生不仅能理解“高频信号产生、放大、调制解调”的理论逻辑，更需具备“从电路设计到性能优化”的工程实践能力[1]。

通过对本校近年来教学反馈分析，本研究以振荡器教学为例，总结射频电路教学中主要存在的典型问题。

1.1. 理论抽象与数学壁垒致理解断层

振荡平衡准则(相位平衡 360° 、幅度平衡 $AF \geq 1$)需复数域传递函数推导验证，但传统教学中公式与物理意义割裂。调研显示，82%学生能背诵准则，仅 29%可结合电路解释相位平衡；67%计算频率时忽略寄生参数，致理论与实测偏差大且无法分析误差，呈现“知其然不知其所以然”问题[2]。

1.2. 实践环节“验证性”大于“探究性”，工程思维培养不足

传统实验以“按图接线、记录参数”为主导，76%学生仅知电路能振荡，难预判参数变化影响：考毕兹振荡器中改变 C_1 时，学生无法预判频率趋势；仅 31%能理解 Clapp 电路串联 C_3 是为“抑制寄生参数”，

其余误认是结构差异[3]。因缺乏参数优化与性能权衡探究，学生工程设计能力薄弱。

1.3. 仿真工具应用浅层化，未形成“仿真 - 实验”协同闭环

Multisim、ADS 等仿真工具虽引入教学，但应用较浅，多仅替代实物用波形验证振荡，未启用参数分析等核心功能辅助理解。如分析温度对振荡频率影响时，仅口头强调电容温漂致偏移，未设参数让学生观察漂移曲线，认知模糊[4]，最终导致仿真与实验协同闭环断裂[5]-[8]。

总之，现有射频教学研究多局限于单环节优化，或仿真未破解理论抽象，或硬件实验缺乏协同逻辑。为此本文提出“软硬件协同”方案，构建“问题驱动 - 仿真探究 - 实验验证 - 优化拓展”闭环教学链，通过参数化对比呈现电路演进逻辑，多维度量化评估成效，提供可复用教学范式。

2. 振荡器教学的深度解析

2.1. 考毕兹振荡器：寄生参数教学的典型载体

考毕兹振荡器是 LC 振荡器的基础拓扑，其电路结构如图 1 所示，由晶体管(放大核心)、LC 谐振回路(C₁、C₂、L，选频与反馈)构成。其谐振频率理论公式为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \tag{1}$$

在传统教学中，学生易陷入两个认知误区：

(1) 忽略寄生参数“隐性影响”：

设置 L = 10 μH、C₁ = 300 pF、C₂ = 700 pF 时，理论频率 f₀ = 9.2 MHz，但 Multisim 仿真仅 3.24 MHz，误差 64.8%，系晶体管结电容(C_e ≈ 5 pF)并联增大等效电容所致。学生却多将误差归咎于计算错误或仪器不准，难关联寄生参数物理意义。

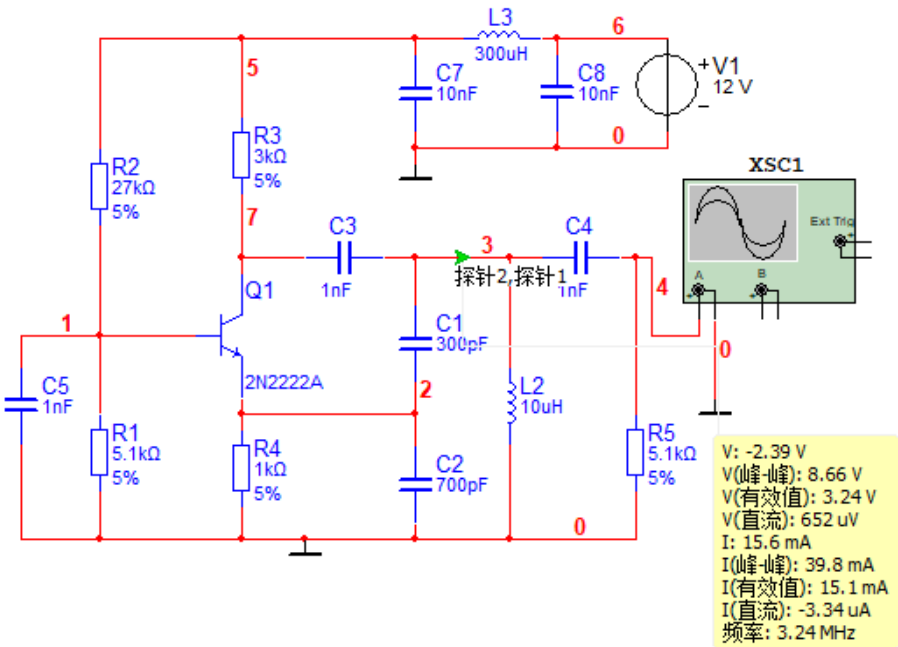


Figure 1. Colpitts oscillator
图 1. 考毕兹振荡器

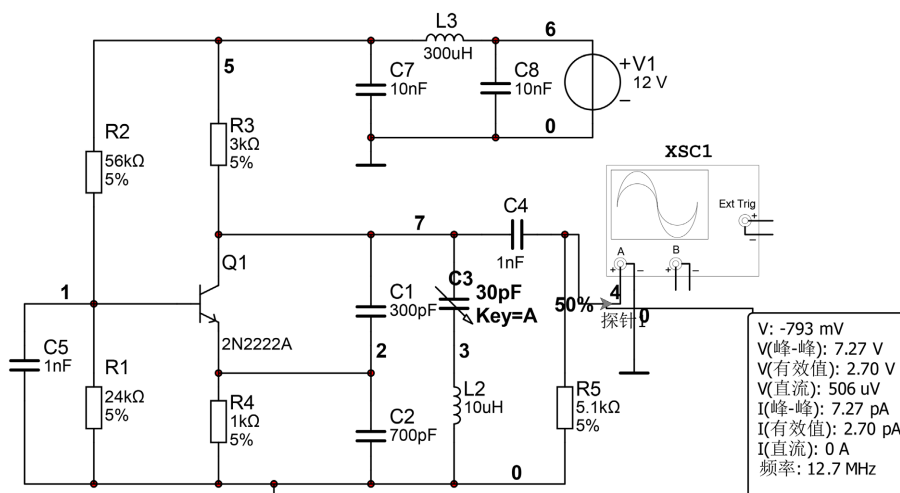


Figure 2. Clapp oscillator
图 2. Clapp 振荡器

(2) 混淆“起振条件”与“稳定振荡条件”：

学生虽知“起振 $AF > 1$ 、稳定 $AF = 1$ ”，却不解 AF 为何下降。Multisim 瞬态分析可见：0~10 μs 起振期， $AF > 1$ 使幅度增大；幅度达 3 V 时晶体管进入非线性区， β 从 100 降至 60，增益 A 下降致 $AF = 1$ ，动态可视化可破解“非线性稳幅”认知难点。

2.2. Clapp 振荡器：参数优化教学的关键案例

Clapp 振荡器在考毕兹电路基础上串联小电容 C_3 (图 2 所示)，其谐振频率公式为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)^{-1}}} \quad (2)$$

当 $C_3 \ll C_1, C_2$ 时(如 $C_3 = 10 \text{ pF}$, $C_1 = 300 \text{ pF}$, $C_2 = 700 \text{ pF}$)， $\frac{1}{C_3} \gg \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ ，此时 $C_{eq} \approx C_3$ ，寄生电容 (C_e) 的影响被“稀释”。

教学中需突破的核心难点是：

(1) 为何 C_3 需远小于 C_1, C_2 ？

Multisim 参数扫描($C_3 = 5 \text{ pF} \rightarrow 50 \text{ pF}$)显示： $C_3 = 10 \text{ pF}$ 时频率误差 3.1%；增至 50 pF (与 C_1, C_2 差距缩小)时误差升至 18%，印证 C_3 主导谐振是稳频关键。

(2) 高灵敏度的两面性：

Clapp 电路虽提升稳频性，但 C_3 微小变化易致频率大幅波动(C_3 从 5 pF 增至 50 pF 时幅度波动 28%)。故固定频率场景需严控 C_3 精度，可调频场景需配稳幅电路，体现“性能权衡”工程思维。

2.3. Seiler 振荡器：系统优化教学的进阶实例

Seiler 振荡器在 Clapp 电路基础上并联电容 C_4 (图 3 所示)，其改进逻辑是通过 C_4 降低回路对 C_3 的依赖性。仿真显示：当 $C_4 = 10 \text{ pF}$ 时， C_3 同等变化(5 pF $\rightarrow$ 50 pF)的幅度波动降至 16%，频率稳定性提升 1.8 倍。

教学中需重点解析：

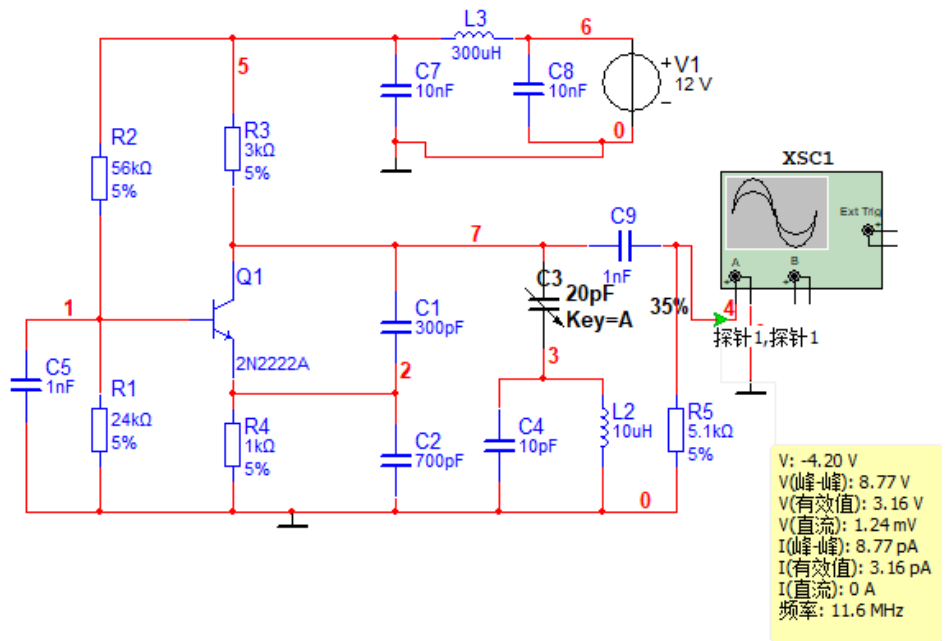


Figure 3. Seiler oscillator
图 3. Seiler 振荡器

(1) 并联 C_4 的作用机理:

C_4 与 LC 回路并联可降低回路 Q 值对 C_3 的敏感度。Multisim 对比显示, Seiler 电路曲线平缓, 且在 C_3 变化时峰值频率偏移更小, 直观呈现选择性与稳定性的权衡。

(2) 电路改进的迭代思维:

从考毕兹到 Clapp 再到 Seiler 的迭代, 均针对前序电路核心缺陷。贯穿“发现问题 - 设计方案 - 验证效果”逻辑的教学, 可培养学生工程创新意识。

3. 软硬件协同教学方案的设计与实施

本文研究核心目标是使学生既理解振荡器数学原理, 又掌握“参数优化 - 性能评估”工程方法, 形成“从问题到方案”的设计能力。整体框架通过“五步教学法”(图 4 所示)构建闭环, 具体实施细节如下:

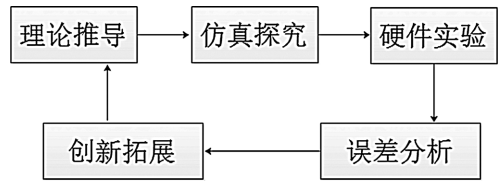


Figure 4. Five-step teaching method
图 4. 五步教学法

3.1. 理论推导: 从“公式记忆”到“问题溯源”

以“考毕兹电路为何频率误差大”为起点, 引导学生推导等效电容时纳入寄生参数, 定位“寄生参数占比过高”问题; 进而通过“降低寄生参数影响”引出 Clapp 电路串联小电容设计; 再围绕“降低参数敏感度”引出 Seiler 电路并联电容方案。互动设计通过“设计稳频振荡器应优先控哪些参数”的小组辩论, 教师总结出寄生参数抑制、回路 Q 值设计等关键要素。

3.2. 仿真探究：从“波形观察”到“机理可视化”

Multisim 建模中, 设结电容 $C_{j\text{c}} = 5 \text{ pF}$ 、 $C_{j\text{c}} = 2 \text{ pF}$ 将电路中易被忽略的寄生参数“显性化”, 为后续机理分析奠定贴近实际的模型基础; 借助瞬态分析功能, 记录 $0 \sim 50 \mu\text{s}$ 内电路的起振动态过程: 通过观察输出电压从无到有、从增幅振荡到等幅振荡的波形变化, 直观验证振荡电路的 AF 起振、平衡条件, 完成从“波形观察”到“起振机理验证”的第一步; 开展参数扫描分析, 固定 $L = 10 \mu\text{H}$, 调节关键电容 $C_3 = 5 \text{ pF}$ 至 50 pF , 通过对比不同扫描条件下 Clapp 电路与 Seiler 电路的振荡频率稳定性、起振灵敏度等波形特征, 清晰呈现两种电路拓扑的性能差异。

整个仿真过程以波形为切入点, 结合参数调控与结果分析, 揭示振荡电路的核心工作机理, 助力学生从“看懂波形”深入到“理解机理”, 实现“机理可视化”的探究目标。

3.3. 硬件实验：从“照图接线”到“主动调试与工程问题探究”

实验采用“模块化实验板 + 精密仪器”组合平台: 模块化实验板配备可调电容、 $10 \mu\text{H}$ 电感及兼容晶体管插座; 仪器含示波器、频率计等。实验任务涵盖基础验证和参数优化、同时重点强化工程实践。首先, 在 PCB 布局设计与高频干扰抑制上, 通过对比“不合理布局”与“优化布局”的实测波形, 引导学生理解“最小化回路面积”原则; 同时要求学生自主设计简易 PCB, 遵循关键走线宽度 $\geq 0.8 \text{ mm}$ 、间距 $\geq 1 \text{ mm}$ 及避免直角走线的规范, 通过观察噪声幅度, 结合走线寄生电感 $L_p \approx 0.1 \mu\text{H}/\text{mm}$ 的分析, 建立“物理结构 - 电气参数 - 性能指标”的关联认知。

其次, 在高频元器件选型与参数匹配环节, 系统讲解高频电容类型差异并选用屏蔽式高频电感与高频 NPN 管, 帮助学生掌握“器件工作频率需远高于振荡频率”的选型原则。在接地处理与电源滤波方面, 设计单点接地与多点接地方案, 通过观察波形噪声叠加理解高频电路接地准则; 在电源输入端添加 RC 滤波电路, 对比滤波前后的电源纹波与振荡幅度稳定性, 明确“电源噪声耦合至振荡回路导致幅度波动”的机理, 助力学生从被动接线转向主动探究工程问题。

3.4. 误差分析：从“数据记录”到“根源追溯”

引导学生系统分析误差: 理论与仿真值偏差源于仿真模型简化; 仿真与实测值差异涉及元件实际值与标称值偏差、仪器误差及环境干扰(如电源纹波)。三种电路误差对比直观体现改进效果: 考毕兹误差最大, 印证寄生参数影响; Clapp 与 Seiler 误差接近, 但 Seiler 幅度稳定性更优, 凸显电路改进的工程价值。

3.5. 创新拓展：从“被动接受”到“主动设计”

布置开放性设计任务: 设计胎压监测系统用振荡器, 需满足 433 MHz ISM 频段、 $-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 频率稳定度 $\leq \pm 2\%$ 、输出幅度 $\geq 2 \text{ V}$ 核心指标。要求: 一是从 Clapp 与 Seiler 拓扑中选型, 结合场景分析频率稳定性、功耗等; 二是通过 Multisim 仿真建模, 优化 L 、 C_3 、 C_4 参数以符合指标; 三是搭建硬件并测量工作频率等参数; 四是提出改进方案, 全面锻炼学生设计、仿真、实验及问题解决能力。

4. 教学成效评估与分析

选取本校电子技术专业 2022 级 86 名学生, 随机分为两组(各 43 人): 对照组采用“理论推导 + 固定参数实验”传统教学, 实验班采用本文“五步教学法”, 通过理论、实践、创新三维度评估对比效果。

4.1. 评估结果与分析

在理论理解层面, 实验班平均分 81.2 分超过对照组 62.5 分; “寄生参数分析”等主观题正确率 76%,

是对照组 28% 的 2.7 倍。对照组 65% 的人误认 Clapp 电路稳频因“电容更小”，实验班 89% 能准确关联“ C_3 主导谐振”核心原理。

在实践能力方面，实验班调试成功率 93% (对照 58%)，平均调试时间 42 分钟较对照 75 分钟缩短 44%；82% 能列举 3 个以上误差源，远高于对照 35%。尤其在工程实践环节，实验班 91% 能独立完成 PCB 布局优化，87% 可根据场景正确选型高频元件，79% 能通过接地与滤波设计降低噪声，而对照组对应比例仅为 32%、28%、21%，凸显方案对工程实践能力的提升作用。

在创新设计维度方面，实验班作品达标率 72%，为对照 19% 的 3.8 倍。12 份作品用“负温度系数电容”补偿电感温漂，8 份设计“二极管稳幅电路”优化性能。5 份通过“双层 PCB 屏蔽接地”进一步降低干扰，体现学生从“被动学习”到“主动创新”的转变。

4.2. 学生反馈与教学反思

学生反馈方面，96% 回收率的问卷显示，91% 认为仿真参数扫描更直观，87% 理解电路改进针对性，79% 希望推广至其他模块教学。85% 认为 PCB 布局、元件选型等工程实践内容“填补了理论与实际的间隙”。

教学反思中发现，不足在于部分学生不熟练 Multisim 分析工具；高频电路需补充“短引线、接地优化”等布线规范。此外，PCB 设计与制作环节耗时较长，需优化实验流程以平衡深度与效率。

5. 结语

针对射频振荡器教学中“理论抽象、实践脱节、工程思维薄弱”问题，本文提出“软硬件协同”方案，通过“问题驱动 - 仿真探究 - 实验验证 - 优化拓展”闭环，将抽象原理转化为可视化参数变化与可操作实践，并融入 PCB 布局、元件选型、接地设计等工程细节，引导学生解析实测与仿真差异的物理机理。实践表明其能显著提升学生的理论理解深度、工程实践能力及创新设计能力。

后续将从三方面深化研究：一是开发“仿真 - 实验”数据联动平台，实现实时数据对比与误差自动分析；二是引入项目式教学，将振荡器设计融入简易对讲机、无线传感器等综合项目，强化多模块协同能力；三是构建含仿真模型、PCB 模板、实验指导书的线上资源库，支持混合式教学。本方案可为电类课程“理论 - 实践 - 创新”融合教学提供参考，也为解决高频电路教学中的工程思维培养难题提供新思路。

基金项目

2024 年华北水利水电大学校级本科质量工程(2080503)。

参考文献

- [1] 侯文静, 王淑娇. 新工科背景下《高频电子线路》课程实验教学模式改革的研究[J]. 电子世界, 2020(6): 106.
- [2] 李健, 常红霞, 鲁业频. 高频电子线路仿真教学改革研究——以调幅及其解调为例[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(8): 153-154.
- [3] 裴瑞平, 韩超, 王洋, 等. Multisim 在高频电子线路教学中的应用[J]. 电子技术, 2023, 52(11): 9-11.
- [4] 王银花. Multisim 在应用型本科高校高频电子线路教学中的应用[J]. 河北水利电力学院学报, 2020, 30(1): 54-58.
- [5] 张建军, 李娜. 基于 PBL 的射频电路课程教学改革[J]. 电气电子教学学报, 2021, 43(4): 112-115.
- [6] 刘敏, 王强. 项目式学习在《无线通信原理》课程中的应用[J]. 高等工程教育研究, 2022(S1): 189-192.
- [7] 陈勇, 李红. 高频电路中寄生参数的教学方法研究[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(9): 215-218.
- [8] 王建国, 赵辉. 电子线路 PCB 设计与制作实践教学探索[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(7): 226-229.