



基于 ADS 软件的串联谐振电路实验优化设计

沈光照, 王芳芳, 谌 静

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 南京 210023)

摘要: 虚拟仿真软件是进行高校工科实验课程的必备工具, 针对研究性强、涉及实验设备及元器件较多的复杂实验, 虚拟仿真软件对实验设计有很好的支撑作用。该文针对电工电子基础实验中的串联谐振电路实验, 开展了基于 ADS 电磁仿真软件的射频串联谐振电路实验的优化设计, 通过提出基于 ADS 软件的电路优化设计方法, 可以有效验证 RLC 串联谐振的品质因素、谐振频率与谐振带宽的计算公式, 并实现射频串联谐振电路的参数扫描及优化设计。该虚拟仿真方法的提出, 有助于更直观、更便捷地讲授 RLC 串联谐振电路的工作原理和实验流程, 提高电路优化设计效果。

关键词: 虚拟仿真软件; 电路优化方法; 串联谐振电路实验; 电工电子基础实验课程

中图分类号: TP31

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230450

Optimization Design of the Series Resonant Circuit Experiment Based on the Advanced Design System

SHEN Guangxu, WANG Fangfang, CHEN Jing

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Virtual simulation software is a necessary tool for teaching experiments of engineering subjects in universities. For complex experiments with strong research and involving many experimental equipment, virtual simulation software is a good support for experimental courses. Aiming at the series resonant circuit in the course of electrical and electronic basic experiments, this paper develops a new circuit design method using advanced design system (ADS) electromagnetic simulation software. Based on ADS, the calculation formulas of quality factor, resonance frequency and resonance bandwidth of radio-frequency RLC series resonance circuit can be demonstrated. The parameter analysis and an optimization of RLC series resonance circuit can be easily carried out. In conclusion, the proposed virtual simulation method is helpful to teach the working principle and experimental flow of RLC series resonant circuit, which can further improve the optimized design of RF circuits.

Key words: virtual simulation software; optimized circuit design method; series resonant circuit experiment; course of electrical and electronic basic experiments

“电工电子基础实验”是电子信息专业的必修专业基础课^[1], 是一门理论性、工程性、技术性、实践性和实用性很强的课程。射频串联谐振电路是电工电子课程中的一项基础实验, 在大学课堂中, 该类实验通常配备箱式实验设备, 在开展理论计算的基础上, 通过实际电路搭建实现理论验证。然而, 这种实验方法的可拓展性较低, 学生很难通过改变元件参数来研究电路特性的优化设计, 为此虚实结合的电路实验教学被广泛研

究^[2], 而其中至关重要的就是面向电路实验的虚拟仿真软件。

基于 LabVIEW 虚拟仪器平台^[3]或者 Multisim 软件^[4]可以快速实现串联谐振电路的仿真与调试。基于 Proteus 软件, 通过仿真幅频特性曲线也可以直观展示电容、电感、电阻上电压随频率的变化趋势^[5]。MATLAB 软件的优势主要体现在其强大的数据处理能力, 通过集成数学运算工具, 可以快速得到系统电流响应^[6]。这种方法可以有效

收稿日期: 2023-09-22

基金项目: 2020 年度教育部高等学校光电信息科学与工程专业教学指导委员会研究课题(2020XGK29); 南京邮电大学 2021 年教学改革研究项目(JG10620JX09)。

作者简介: 沈光照, 博士, 副教授, 主要从事电磁场与射频电路等教学和科研工作。E-mail: shenguangxu@njupt.edu.cn

用于分析 RLC 串联谐振的滤波特性, 在 DSP 应用系统的硬件和软件开发中, 可以提高软件的设计效率和算法的有效性^[7]。

以上虚拟仿真软件可以为串联谐振电路的幅频特性^[8]、串联谐振电路总损耗估算^[9]、谐振电路品质因数^[10]等研究提供技术支持。但是对于工作在微波频段的 RLC 谐振电路, 无法起到准确的模拟作用。同时, 因上述虚拟软件在电路定性和定量优化方面欠缺足够控件, 造成授课过程中学生很难通过参数扫描、定向分析等方式进一步加深对电路特性的理解。

本文在上述研究的基础上, 研究了基于 ADS 软件的虚拟仿真设计方法, 并开展面向 RLC 串联谐振的一端口、二端口电路特性研究。结合理论计算公式, 通过改变元器件的参数值, 研究品质因素、谐振频率与谐振带宽随电路参数的变化规律, 实现实验数据的可视化。通过与 Multisim、MATLAB 等软件对比, 该方法可以提高射频谐振电路仿真效率, 且可直观验证串联谐振电路理论, 更快实现最优化设计。

1 基于 ADS 软件的电路优化设计方法

1.1 ADS 软件

先进设计系统 ADS 是一种快速、精确、简单易用的电路和电磁仿真器, 可进行时域、频域、数字电路和模拟电路的仿真。通过使用 ADS 软件, 学生可以仿真 RLC 串联谐振的幅频、相频特性和散射参数; 通过学习 ADS 软件工作界面、系统参数的设置, 掌握元件、仿真工具的使用和设置; 学习参数扫描控件、公式编辑和曲线编辑功能, 进一步验证实验的原理部分。

1.2 优化设计系统架构

优化设计系统设计可以极大提高仿真效率^[11-12]。面向 RLC 串联谐振电路的虚拟仿真系统框图如图 1 所示, 主要包括 ADS 电磁仿真软件、谐振原理与电路拓扑和电路工作原理与计算 3 个部分。其中 ADS 电磁仿真软件主要包括以下 3 个模块:

1) 电路原理图模块, 可以实现串联谐振电路的搭建, 该模块还继承了变量设置、变量连续可控、优化算法模块;

2) 公式计算模块, 可以将电路的特性参数进行有效计算, 如计算谐振电路品质因素、谐振带

宽等;

3) 曲线仿真模块, 可以仿真电路的幅频曲线、相频曲线。

谐振原理与电路拓扑模块可以为电路原理图的搭建提供指导, 除了本文研究的 RLC 串联谐振电路, 还可以搭建一系列其他谐振电路。

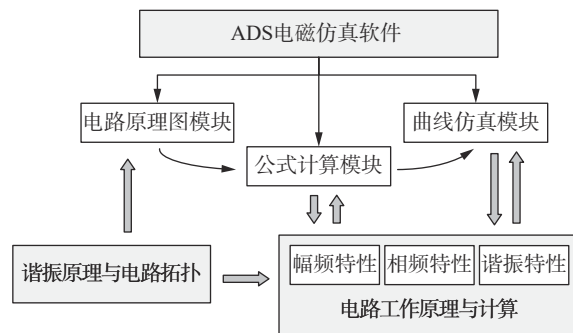


图 1 基于 ADS 虚拟仿真软件的优化设计系统架构图

电路工作原理与计算主要包含幅频特性、相频特性和谐振特性。基于电工电子基础, 可以得到以上各个特性的计算公式, 并进一步预测谐振电路的特性。通过与曲线仿真模块的结果对比, 可以实践理论与实验的验证, 进而完成实验的闭环。

2 实验原理与设计

2.1 串联谐振电路的谐振特性

串联谐振的一端口电路如图 2 所示, 端口电压为 U , 端口电流为 I , 输入阻抗^[13]为:

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (1)$$

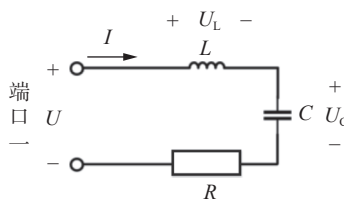


图 2 一端口串联谐振电路示意图

当输入阻抗 Z 的虚部为 0 时, RLC 串联电路发生谐振, 则有:

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \\ f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： ω_0 和 f_0 分别为谐振时的角频率和频率。此时电压 U 和电流 I 同相，串联谐振时等效阻抗最小，阻抗为纯电阻，即 $Z=R$ 。电流 I_0 达到最大值，即 $I_0=U/R$ 。电阻上的电压达到最大值，而电感上的电压 U_L 和电容上的电压 U_C 大小相等但相位相反。所以两个元件上的串联总电压为 0，相当于 LC 短路。

品质因素 Q 是反映谐振电路性能的重要指标。 Q 越大，谐振曲线越尖。电路对非谐振频率下的电流具有较强的抑制能力，通带选择性好。根据式(2)，可以进一步计算出该串联谐振电路的品质因素，其中，电阻 R 消耗的功率为：

$$P_1 = 0.5|I|^2 R \quad (4)$$

存储在电感和电容上的平均磁能 W_m 和平均电能 W_e 分别为：

$$W_m = 0.25|I|^2 L \quad (5)$$

$$W_e = 0.25|U_C|^2 C = 0.25|I|^2 \frac{1}{\omega_0^2 C} \quad (6)$$

因此，串联谐振电路的品质因素为：

$$Q = \omega \frac{W_m + W_e}{P_1} = \omega_0 \frac{2W_m}{P_1} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \quad (7)$$

由式(5)和式(6)可见，串联电阻 R 的大小不影响串联谐振电路的谐振频率，但对品质因素有决定性影响，电阻 R 越大，品质因素 Q 越低。根据品质因素 Q ，可以进一步计算出半功率频率点和谐振带宽 B 。这里半功率点是指功率值为谐振时最大功率的一半，对应的电流 $I = 0.707I_0$ 。半功率频率点分别为 f_1 和 f_2 ，谐振带宽 $B = |f_2 - f_1|$ 。半功率点的电压与电流相位差为 $\pm 45^\circ$ 。根据半功率点的定义，可得当频率为 f_1 和 f_2 时， $|Z_{in}|^2 = 2R^2$ 。

$$\left| R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right|^2 = 2R^2 \quad (8)$$

$$BW = \frac{B}{f_0} = \frac{1}{Q} \quad (9)$$

2.2 仿真模型与扫参设置

为了测量散射参数，二端口串联谐振电路的原理图如图 3(a)所示；基于 ADS 软件的仿真模型如图 3(b)所示；仿真的理论计算结果如图 3(c)所示。然而，当实际网络较为复杂时，无法准确确

定串联谐振电路的元件参数值，可以通过仿真软件对电路输入阻抗 Z_{in} 进行提取，利用这种方法有助于进一步分析基于复杂网络的谐振电路。

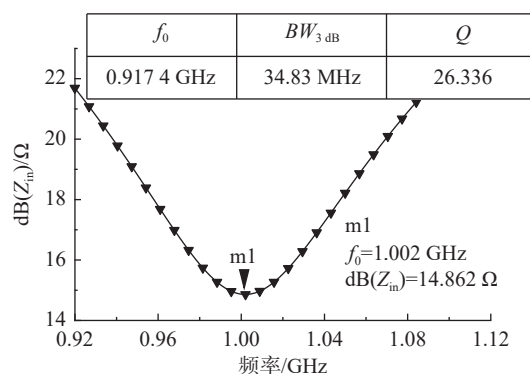
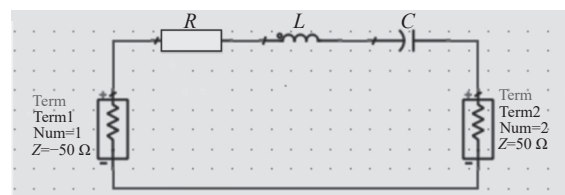
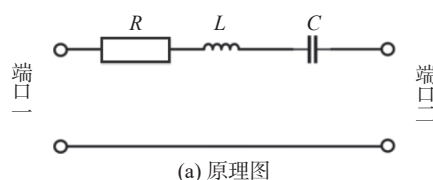
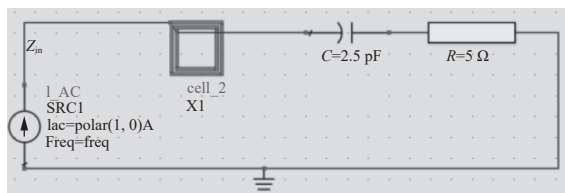


图 3 二端口串联谐振电路仿真模型

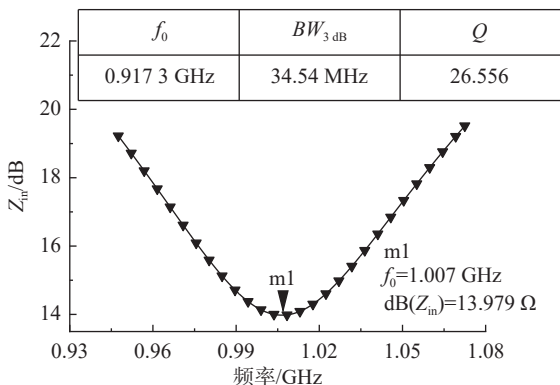
$$\begin{cases} f_0 = \text{center_freq}(\text{dB}(Z_{in}), 3) \\ BW_{3dB} = \text{bandwidth_func}(\text{dB}(Z_{in}), 3, 0) \\ Q = f_0 / BW_{3dB} \end{cases} \quad (10)$$

在 ADS 中利用式(10)进行计算，对比结果可以发现，通过仿真所求的 f_0 与理论计算基本吻合。另外加入实际电感后，电路的 Q 值明显降低，这与电感自带的损耗效应有关。

基于 ADS 软件，可以快速实现幅频、相频特性曲线的仿真，同时基于软件自带的参数扫描控件实现对电阻值 R 、电感值 L 和电容值 C 的参数仿真。通过软件仿真，可以进一步处理仿真数据，并得到谐振带宽、品质因素、半功率点幅度和相位的仿真数据，通过与式(4)~式(9)对比，可以进一步验证 RLC 串联谐振电路的谐振特性，帮助学生深刻理解 RLC 串联谐振的原理，掌握 RLC 串联谐振时的电路特性及有关参数计算公式和仿真方法。串联谐振电路相关电路特性参数提取如图 4 所示。



(a) ADS 中添加了实际电感的电路图



(b) ADS 中的对应仿真结果

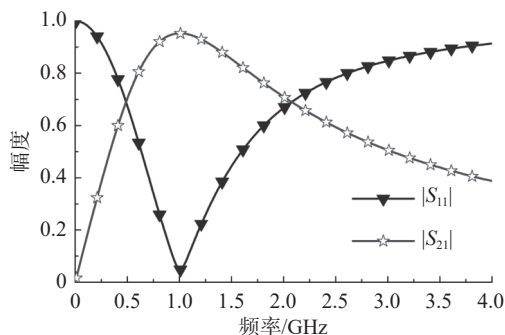
图 4 串联谐振电路相关电路特性参数提取

3 基于 ADS 的参数分析与优化

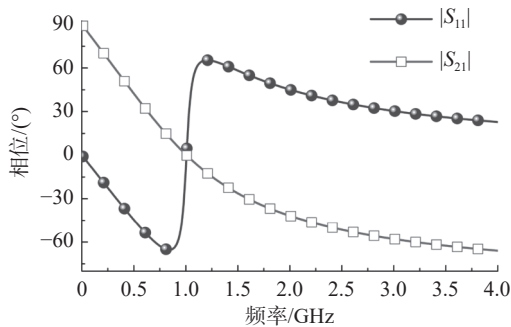
3.1 幅频、相频仿真曲线

二端口串联谐振电路的幅频和相频特性曲线如图 5(a)和 5(b)所示。该串联谐振电路的元件取值为 $R=5 \Omega$, $L=10 \text{ nH}$, $C=2.5 \text{ pF}$ 。谐振电路特性参数如表 1 所示, 可见该串联谐振电路的谐振频率 f_0 为 1.01 GHz。根据式(5)计算的谐振频率为 1.0066 GHz, 和 ADS 软件仿真的谐振频率保持一

致。在 1.01 GHz 处, 传输参数 S_{21} 的幅度为 0.952, 相位为 -0.234° ; 反射参数 S_{11} 的幅度为 0.048, 相位为 4.665° 。因此, RLC 串联谐振电路谐振时 S_{21} 的幅度最大, S_{11} 的幅度最小, 且 S_{21} 的相位约等于 0° 。



(a) 幅频曲线



(b) 相频曲线

图 5 二端口串联谐振电路仿真结果 ($R=5 \Omega$, $L=10 \text{ nH}$, $C=2.5 \text{ pF}$)

表 1 RLC 串联谐振电路的谐振特性参数

参数	谐振点 f_0 (1.01 GHz)	第一半功率点 f_1 (0.47 GHz)	第二半功率点 f_2 (2.15 GHz)	谐振带宽		谐振品质因素 Q
				绝对 B	相对 BW	
S_{21}	0.952	0.670	0.672	1.68 GHz	166%	0.602
$S_{21}/(^\circ)$	-0.234	45.250	-45.130			
S_{11}	0.048	0.711	0.710			
$S_{11}/(^\circ)$	4.665	-42.047	42.156			

由于 S_{21} 的最大幅度为 0.952, 半功率时幅度为 $0.952 \times 0.707 = 0.673$, 根据图 5(a) 可得半功率点频率 f_1 和 f_2 分别为 0.47 GHz 和 2.15 GHz, S_{21} 的相位约等于 $\pm 45^\circ$ 。由此可得该串联谐振电路的绝对带宽 B 为 1.68 GHz, 相对带宽 BW 为 166%。

3.2 电路参数分析及优化设计

串联谐振电路的幅频和相频特性随电阻 R 的变化曲线如图 6(a)和 6(b)所示。当电阻从 1Ω 增大到 16Ω 时, 谐振频率不变, 谐振频率处的

S_{21} 幅度最大值从 0.99 下降到 0.86, 对应的相对带宽 BW 从 158% 增加到 182%, 根据式(9)可得, 品质因素 Q 从 0.63 下降到 0.55。

为了进一步分析数据, 图 7 给出了谐振频率 f_0 、品质因素 Q 与电容 C 、电感 L 的关系。电容 C 和电感 L 越大, 谐振频率 f_0 越小, 与式(3)一致; 由图 7(b)可得, 要实现高品质因素, 需要减小电容 C 并增大电感 L , 与式(7)一致。通过 ADS 的优化控件能够调整电路元件及相关参数的数

值，以达到设定的优化目标。具体的步骤如下：

1) 设定指标(Goals)，通过仿真控件(SP1)对目标(Expression)在指定频段设定一个或多个指标(Limit)；

2) 设置控件(Controller)，设置优化类型与迭代次数，确保结果收敛有效；

3) 定义元件变量值(Variables)，对优化的具体变量进行设置，变化范围要在合理区间内；

4) 优化(Optimize)，优化过程持续进行到达到设定目标或达到最大迭代次数。

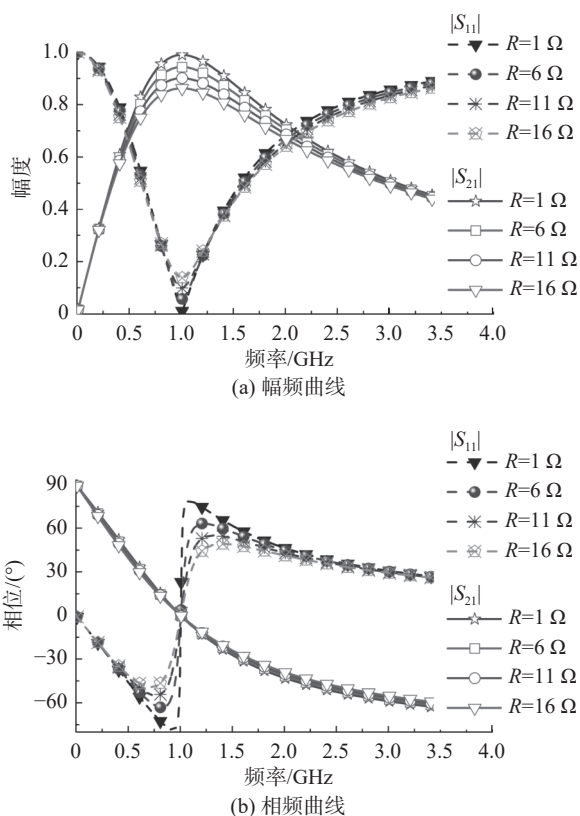


图 6 RLC 串联谐振电路幅频/相频曲线与电阻 R 的关系 (L=10 nH, C=2.5 pF)

当进行版图仿真时，需要注意网格剖分的相关条件，默认网格将为许多电路应用提供充分且准确的答案。对于大多数其他电路应用，只需使用全局网格参数即可提供更高的精度。对于高精度不连续性建模，默认网格在特定区域可能不够密集，无法提供足够的精度，需要对边缘网格进行额外的剖分。Momentum 选择要在仿真中使用的迭代稠密矩阵求解，计算机时间与矩阵大小 N 呈二次方关系，与直接密集矩阵求解器相比，对于复杂结构来说，仿真时间更快，但是迭代求解

不能保证快速收敛，其结果也不具备精确度。

此外，当仿真非线性器件或者有源器件时，仅靠 S 参数仿真分析并不够准确，此时需要用到谐波平衡分析和参数扫描分析非线性电路中的噪声、增益压缩、谐波失真、振荡器寄生、相噪和互调产物等参数。

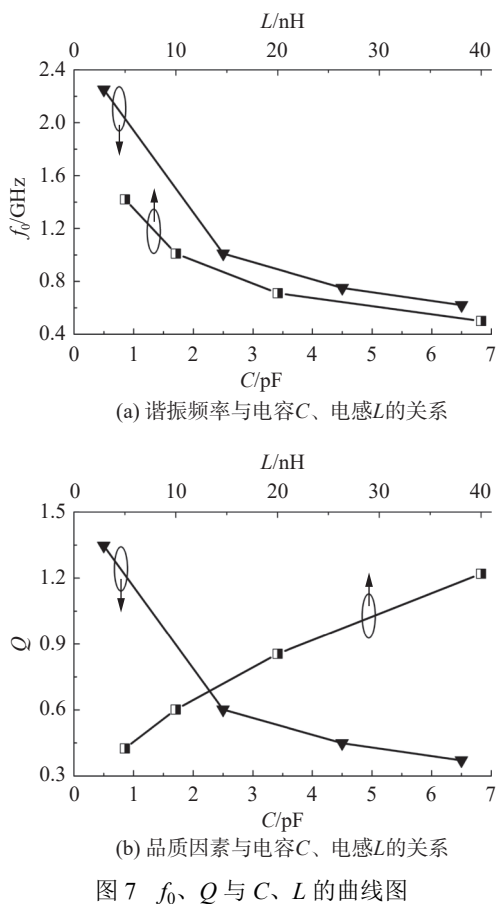


图 7 f_0 、 Q 与 C 、 L 的曲线图

4 结束语

ADS 电磁仿真软件对于实现 RLC 串联谐振电路的高效仿真与快速优化具有重要意义。基于所提出的电路优化设计方法，可以快速、精确得到幅频、相频特性，进而帮助学生掌握谐振频率、半功率点频率、品质因素的推导与仿真验证方法。基于 ADS 软件，可以实现电路参数扫描及结果分析，帮助学生快速设计出具有高品质因素的串联谐振电路。

此外，对于先进电磁仿真软件的国产化替代，尽管行业内均有了不同层面的技术突破，但是国产先进电磁仿真软件的开发依旧任重而道远。

(下转第 155 页)