

学子专区— ADALM2000活动： 电感自谐振

Antoniu Miclaus, 系统应用工程师
Doug Mercer, 顾问研究员

目标

本实验室活动的目标是测量电感的自谐振频率(SRF)，并根据测量数据确定寄生电容。

背景知识

与所有非理想电气元器件一样，部件套件中提供的电感并不完美。图1为常见的实际电感简化模型电路图。除了所需的电感L之外，实际元件还会有损耗（建模为串联电阻，在图中以R表示）和并联寄生电容（以C表示）。电阻越小（接近0Ω），电容越小（接近0F），电感就越理想。



图1. 3元件LRC电感模型。

绕组间电容与自谐振频率

C通常表示电感的匝间分布电容（以及匝间与磁芯之间的电容等）。在特定频率(SRF)下，该匝间电容将与电感L形成并联谐振，使电感变为调谐电路。

3元件LRC模型阻抗与频率

在低于SRF的频率下，模型呈电感性。在高于SRF的频率下，模型呈电容性，在SRF频率下，模型呈电阻性，因为感抗和容抗的大小相等，相位相反，因此相互抵消。

在电感的SRF下，满足以下所有条件：

- ▶ 输入阻抗处于峰值。

- ▶ 输入阻抗的相位角为零，从正值（感性）转变为负值（容性）。
- ▶ 由于相位角为零，因此 θ 也为零。
- ▶ 有效电感为零，因为负容抗($X_c = 1/j\omega C$)刚好抵消了正感抗($X_L = j\omega L$)。
- ▶ 2端口插入损耗(S21 dB)达到最大值，对应于频率与S21 dB图中的最小值。
- ▶ 2端口相位（S21角）为零，从较低频率下的负值转变为较高频率下的正值。

公式1表示电感模型电路中SRF与电感和电容的关系。

$$F_{SR} = \frac{1}{(2\pi\sqrt{LC_p})_{in\ Hz}} \quad (1)$$

其中：

L为电感，单位为H

C_p 为寄生电容，单位为F

公式1清楚地表明，提高电感或电容会降低测量的SRF值，而降低电感或电容则会提高SRF值。

3元件LRC电感模型的实验室前仿真

图2为3元件LRC电感模型的仿真测试电路。L、R和 C_p 用于对电感进行建模。V1是理想的交流测试电压源，电阻RS表示V1的源电阻。CL和RL是负载元件，其中CL设置为ADALM2000示波器输入通道的典型输入电容。RL可以设置为RS，也可以设置为更高的值，

例如示波器通道的1MΩ输入电阻。

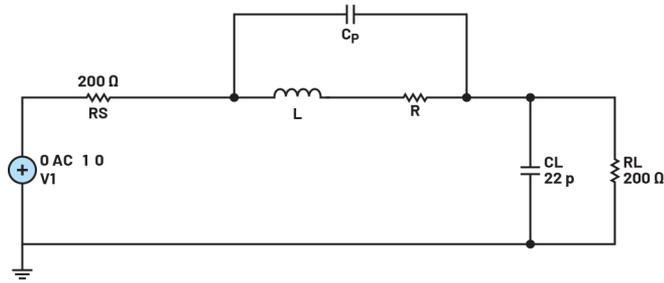


图2. 仿真原理图。

在实际构建电感测试电路之前，您应使用图2所示电路进行仿真。

如图3所示，以1mH电感L为例，我们进行了两次频率扫描仿真，频率范围为10 kHz至10 MHz，其中 C_p 设置为15 pF，R设置为100 mΩ。红色曲线表示 R_L 设置为与 R_S 相同的200 Ω。当电感阻抗达到最大值时， R_L 处测得的幅度在SRF时急剧下降。蓝色曲线表示 R_L 设置为示波器输入的1MΩ。同样，当阻抗达到最大值时，我们观察到急剧下降的零点。我们还看到 R_L 的幅度出现明显的尖峰，大约在陷波下方一个倍频程处。当源电阻和负载电阻不匹配时，就会出现这种峰值。

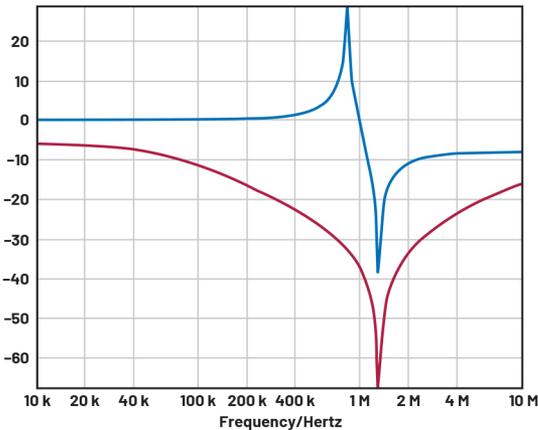


图3. 仿真结果：红色曲线 $R_L = 200 \Omega$ ，蓝色曲线 $R_L = 1 M\Omega$ 。

材料

- ▶ ADALM2000主动学习模块
- ▶ 无焊试验板和跳线套件
- ▶ 一个1mH电感
- ▶ 其他不同数值的电感
- ▶ 两个200 Ω电阻（可由两个100 Ω电阻串联而成）

说明

在无焊试验板上构建如图4所示的电感测试电路。蓝色方块表示连接ADALM2000 AWG和示波器通道的位置。

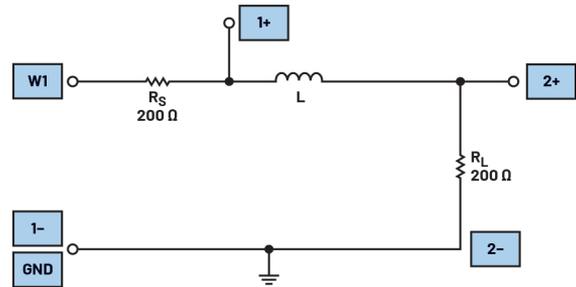


图4. 电感测试电路。

硬件设置

ADALM2000 AWG输出和示波器通道输入的连接方式如图4蓝色框所示。部件套件中应包含多个不同数值的电感。将电感逐个插入测试电路。

程序步骤

在Scopy窗口打开网络分析仪软件工具。配置扫描范围，起始频率为100 kHz，停止频率为30 MHz。将幅度设置为1V，偏移设置为0V，将伯德图的幅度范围设置为-60 dB至+40 dB。将最大相位设置为+180°，最小相位设置为-180°。在通道选项中，点击通道1，将其设为参考通道。将步骤数设为100。

对部件套件中的每个电感运行单次扫描。您应该会看到，幅度和相位与频率的关系曲线和仿真结果非常相似。将数据导出到.csv文件，以便采用Excel或MATLAB®进行深入分析。

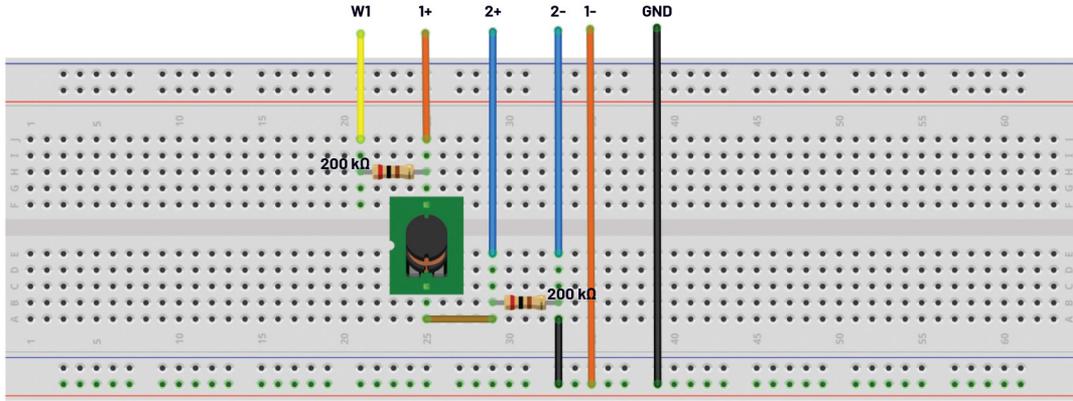


图5. 电感测试电路试验板连接。

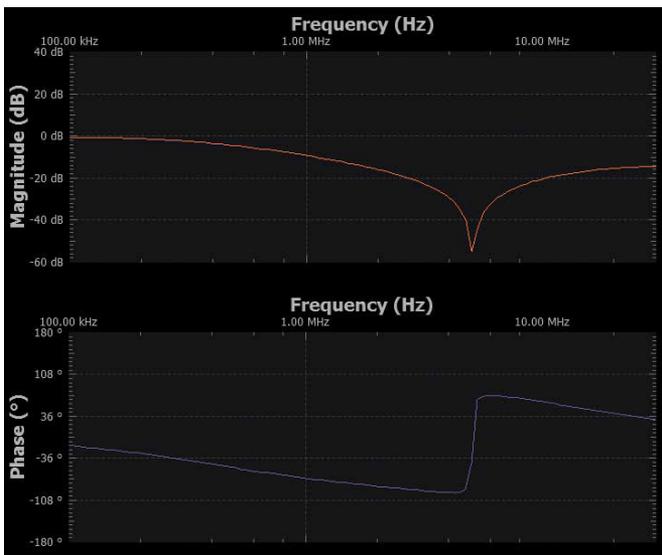


图6. Scopy截图, $L = 100 \mu\text{H}$, $R_L = 200 \Omega$ 。

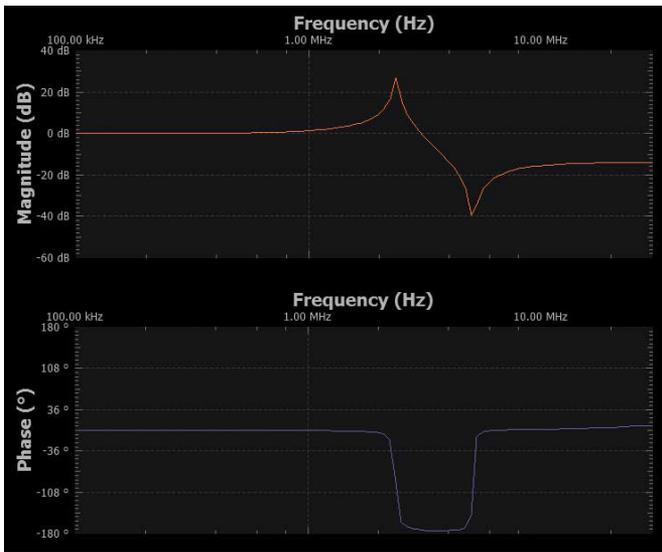


图7. Scopy截图, $L = 100 \mu\text{H}$, $R_L = 1 \text{M}\Omega$ 。

问题:

使用SRF公式计算实验装置中使用的电感的匝间寄生电容值。

您可以在[学子专区论坛](#)上找到问题答案。

附加实验

若要进一步探索这种谐振现象，请将外部39 pF和/或100 pF电容与电感并联，然后重新测量频率响应。这样就能获得更多的谐振频率数据，同样可以使用谐振公式来计算和确认简化模型中的电感L和 C_p 。



作者简介

Antoni Miclaus现为ADI公司的系统应用工程师，从事ADI教学项目工作，同时为Circuits from the Lab®、QA自动化和流程管理开发嵌入式软件。他于2017年2月在罗马尼亚克卢日-纳波卡加盟ADI公司。他目前拥有贝碧思鲍耶大学软件工程硕士学位，并拥有克卢日-纳波卡科技大学电子与电信工程学士学位。



作者简介

Doug Mercer于1977年毕业于伦斯勒理工学院(RPI)，获电子工程学士学位。自1977年加入ADI公司以来，他直接或间接贡献了30多款数据转换器产品，并拥有13项专利。他于1995年被任命为ADI研究员。2009年，他从全职工作转型，并继续以名誉研究员身份担任ADI顾问，为“主动学习计划”撰稿。2016年，他被任命为RPI ECSE系的驻校工程师。

