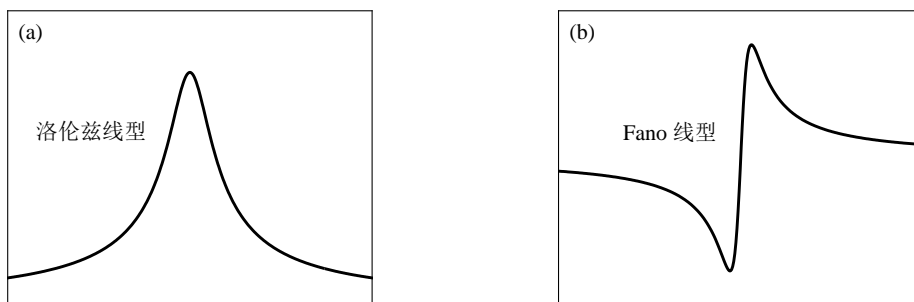


Fano 共振实验

本次实验要求课前认真阅读讲义，并自行设计实验方案（本实验重在自由探索，设计不成功没关系），课前不提交预习报告，只在课后提交实验报告，相应的预习分并入实验报告分。请携带 U 盘到实验室，以拷贝电子数据。

【背景】

共振是自然界普遍存在的基本现象之一，从力学系统中弹簧振子的共振、弦的共振，到电磁学系统中 RLC 电路的谐振，再到光学系统中各种不同类型的光学谐振腔，乃至量子系统中的原子能级跃迁，等等，都是典型的共振现象。通常最简单、最常见的共振是单共振现象，孤立的具有单一共振频率的阻尼振荡系统在不同频率的外界驱动下，系统表现为典型的单共振现象，其振幅随外界驱动频率变化表现为洛伦兹线型的响应谱，该线型在系统共振频率附近呈现近似对称的分布。与之不同的另一类共振是 Fano 共振，其响应谱在系统共振频率附近表现为明显的非对称分布。Fano 共振线型于 1935 年在惰性气体的吸收谱线中被观察到，并由 Fano 给出了理论解释。这种非对称的共振线型源于原子从初态到末态的跃迁过程中不同跃迁路径之间的干涉效应：当一条跃迁路径表现为窄谱共振（对应分立态到分立态的跃迁），另一条跃迁路径表现为宽谱共振或连续谱（对应分立态到连续态的跃迁），2 条跃迁路径之间的干涉会使得系统总的吸收谱线表现出非对称的 Fano 共振线型。后来，人们陆续在半导体量子阱、量子点等各类量子体系以及光子晶体、回音壁微腔等各类经典体系中观察到 Fano 共振。由于 Fano 共振线型的非对称特征，其响应谱相比通常的洛伦兹线型更为陡峭、更为尖锐，在非线性光学、光开关、传感等领域有着重要的应用前景，因此它也成为了近年来很多前沿领域如纳米光子学等的研究热点之一。

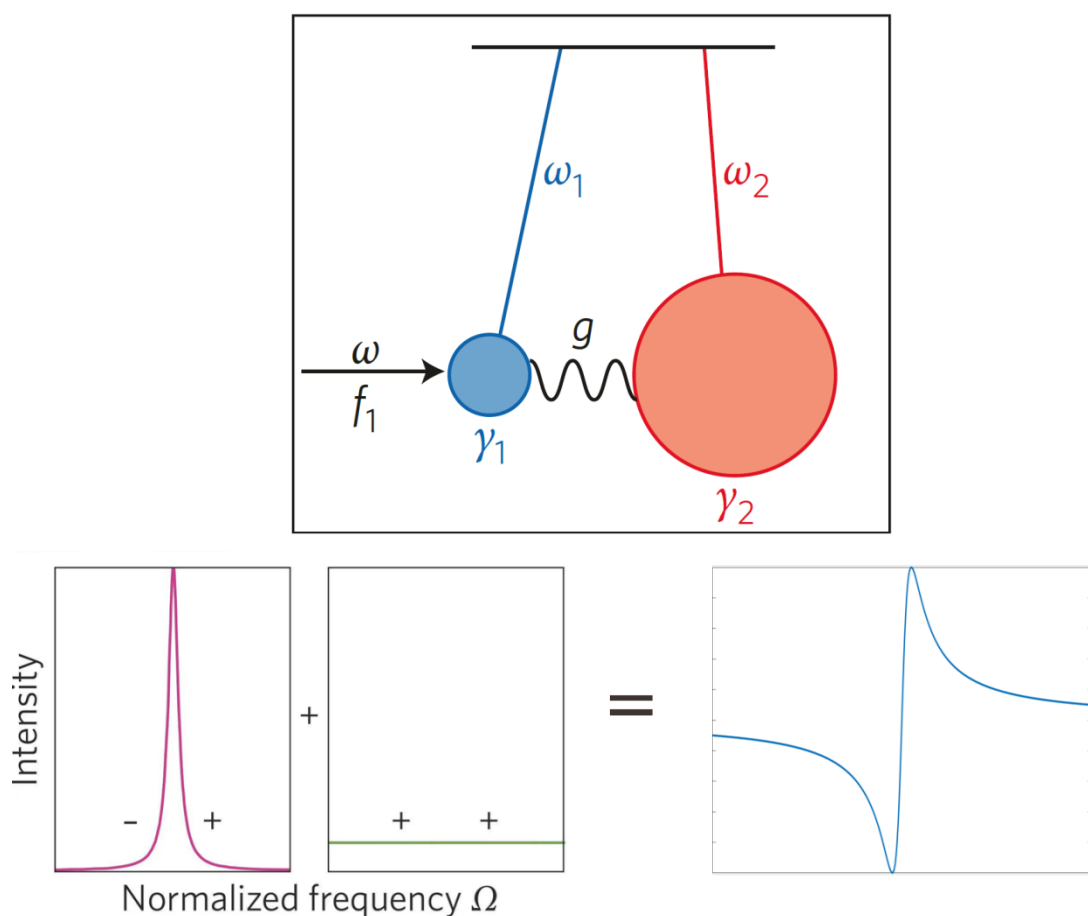


洛伦兹线型和 Fano 共振线型示意图

【原理】

Fano 共振是对传统共振现象的重要补充和拓展，该现象在很多物理体系中普遍存在，其中一个典型的例子是经典的耦合谐振子系统。如下图所示，两个谐振子分别具有共振角频率 ω_1 、 ω_2 ，以及阻尼系数 γ_1 、 γ_2 ，二者以耦合系数 g 相互耦合，周期性外力 f_1 以角频率 ω 作用于振子 1。当振子 1 的损耗较大，对应宽谱共振，振子 2 的损耗很小，对应窄谱共振，且耦合系数 g 具有合适的取值时，耦合体系可以发生显著的 Fano 共振现象：此时，振子 1 的响应谱在振子 2 的谐振频率 ω_2 附近会出现非对称的 Fano 共振线型。上述现象与振子 2 在谐振频率附近的相位变化密切相关，如下图所示，窄谱共振的振子 2 在自身谐振频率 ω_2 附近相位有接近 180 度的反相行为，而宽谱共振的振子 1 在 ω_2 附近相位近似保持不变，因

此振子 1 自身振动和振子 2 对振子 1 的反馈作用之间的干涉在 ω_2 附近形成了非对称的 Fano 共振线型。关于 Fano 共振的更多资料，感兴趣的同学可阅读参考文献 1、2 等，但不阅读文献也可完成本实验。



【仪器用具】

计算机（含操作系统）、LabVIEW 程序，数据采集卡，电阻箱一个（0.1-100k Ω ），电容箱两个（0.0001-1 μ F），标称 100 Ω 电阻一个，标称 18mH、16mH 电感各一个，标称 0.047 μ F 电容一个。

【实验内容】

本实验希望在普通物理实验层次展示并研究 Fano 共振现象，建立基础实验与前沿研究的联系。

1. 利用实验室提供的程序“电容电感元件表征程序”对标称 18mH、16mH 的电感和标称 0.047 μ F 的电容进行元件参量表征，测量范围 1-10kHz、测量频率间隔 1kHz。定性分析实验结果。

2. 根据背景资料和原理自行设计电路，并合理地设置参量，从实验上展示 Fano 共振现象。这部分测量使用实验室提供的程序“交流电路的稳态特性测量程序”。请在课前自行独立设计电路，不要参考其他同学的结果（本实验重在自由探索，设计不成功没关系），课上首先由同学自由探索一段时间，之后教师会统一公布参考电路，再由同学复现统一参考电路及相应的测量结果。

3. 在成功复现标准结果后，进一步自行设计研究方案，系统改变参量值，对相关现象开

展研究，总结并分析实验结果。

【注意事项】

本实验用程序控制 RIGOL 信号发生器对电路进行供电，此时数据采集卡的输出端口（AO 口）一定不能连接到电路中，否则可能影响电路工作。

【附录】

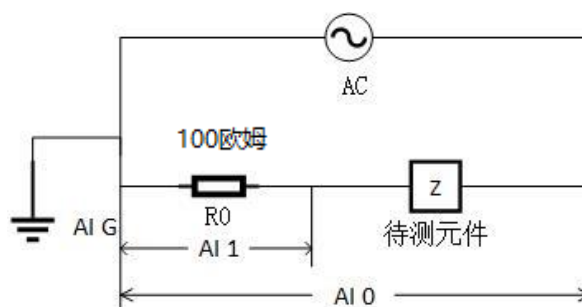
对实验室提供的两个程序的说明（课上会简单演示，且打开程序后使用说明在前面板可见）

1. 电容电感元件表征程序

本程序将待测元件与标准电阻串联，利用 RC 或 RL 串联电路的稳态特性测量待测元件复阻抗，通过待测元件两端电压与电流相位差判断元件是电容还是电感，并给出该频率下的电容值或电感值及损耗电阻值。

接线：

- 1) 计算机 USB 口与 RIGOL 信号发生器背面的 USB 口相连。
- 2) 如下图接电路。将待测元件与标准电阻 R_0 串联（100 欧姆精密电阻）。用信号源 CH1 通道给电路供电，接地端（AI GND）位于 R_0 侧。用采集卡 AI0 通道测全电路电压，AI1 通道测标准电阻 R_0 电压。



程序运行：

- 1) **先打开计算机，再打开信号源开关**，不然可能软件运行时报错：无法连接信号源。
- 2) 确保子程序 command string.vi, Rigol Sine.vi 和 Rigol Control.vi 与本程序在同一目录下，在 Rigol Sine.vi 和 Rigol Control.vi 两个程序中重新设置控制信号源的 USB 端口（如信号源已连好且接口未改变则无需重新设置）：分别打开两个程序，在框图窗口，用操作工具点击程序左上角 I/O 属性框，在下拉选项中重新选择 USB0::...::INSTR，关闭程序，此时会弹出对话框询问是否保存，选 Save。
- 3) 在前面板左侧参数设置区域设置各测量参数：正弦信号幅度、偏置；测量的频率起始值、步进值、终止值。
- 4) 打开采集卡开关。运行程序。根据前面板上的实时测量值和右侧图线，可以观察电容值或电感值和损耗电阻值随频率变化的情况。
- 5) 运行结束后需要自己输入数据文件名保存测量数据，建议文件名包含电路参数值，以.txt 作为后缀。
- 6) 记录的数据文件每行数据依次为（括号里是单位）：f(Hz), C(F)或 L(H), R_损耗(Ohm), 阻抗(Ohm), 相位 (degree)
- 7) 测量结束后关闭采集卡和信号源开关。

注意事项:

- 1) 注意信号发生器与采集卡共地。
- 2) 测量电容时若频率太小,则电容与标准电阻分压差距太大,给出的测量结果不准确。

测量原理概述:

- 1) 用程序控制信号源输出所需的正弦信号。

调用 Rigol Sine 子 VI 通过计算机 USB 口向 RIGOL 信号发生器发指令,使它输出一定频率(幅度、偏移)的正弦信号,给电路供电,等待 1 秒至电路达到稳态。

- 2) 测量电压波形,并分析出幅值和相位。

用 DAQ Assistant 控件通过采集卡 AI0 和 AI1 通道测量电路电压波形,用最高采样率(500k/s,每通道 250k/s)采集 1 秒,即每通道 250k 个点。

用 fft 分析 AI0 和 AI1 波形数据的频谱,找到 AI0 信号中幅度最大的频率成分,并找到其对应的 AI0 和 AI1 成分的幅值、相位值。

由于 AI1 通道数据测量时间比 AI0 滞后,但记录时间与 AI0 一样,所以其相位偏大,要修正掉滞后时间对应的相位差。当采样率足够大,采样周期小于 14us 时,通道间采样延时是等间隔的,即延时=1/(采样率*通道数)。

根据 AI0(测总电压)和 AI1(测标准电阻上电压)波形的幅值和相位值,可以计算待测元件上波形的幅值和相位值,进而计算出待测元件的阻抗绝对值和相位,以及其电容或电感值和损耗电阻值。

2.交流电路的稳态特性测量程序

本程序用于测量交流电路的幅频、相频特性。通过 USB 口向信号发生器发出指令,产生指定频率的正弦信号,测量给出两组波形的幅度之比与相位差随频率的变化,并通过幅度比随频率变化的快慢调节测量中的频率步长。使用中的接线、程序运行和注意事项与电容电感元件表征程序类似,这里仅对部分不同之处加以说明。

当需要变频率步长测量时,有两种选择,一种是测量过程中手动修改频率步长(不修改则频率按固定步长递增),一种是根据幅频特性变化趋势自动调节步长(在频率步长设置区设置频率步进值和相应的幅频特性斜率区间起止值,默认步长为 100Hz)。

程序记录的数据文件每行数据依次为(括号里是单位): f(Hz), 待测电路电压 UX(V_rms), 电流 I(A_rms), 电流和待测电路电压幅值比 I/UX(A/V), 电流和待测电路电压相位差 PhaiI-PhaiX (degree)

测量原理概述:

- 1) 用程序控制信号源输出所需的正弦信号。

调用 Rigol Sine 子 VI 通过计算机 usb 口向 RIGOL 信号发生器发指令,使它输出一定频率(幅度、偏移)的正弦信号,给电路供电,等待 1 秒至电路达到稳态。

- 2) 测量电压波形,并分析出幅值和相位。

用 DAQ Assistant 控件通过采集卡 AI0 和 AI1 通道测量电路电压波形,用最高采样率(500k/s,每通道 250k/s)采集 1 秒,即每通道 250k 个点。用 fft 分析 AI0 和 AI1 波形数据的频谱,找到 AI0 信号中幅度最大的频率成分,并找到其对应的 AI0 和 AI1 成分的幅值、相位值。由于 AI1 通道数据测量时间比 AI0 滞后,但记录时间与 AI0 一样,所以其相位偏大,要修正掉滞后时间对应的相位差。当采样率足够大,采样周期小于 14us 时,通道间采样延时是等间隔的,即延时=1/(采样率*通道数)。被测电路的幅值 UX 和相位 PhaiX 可以根据 AI0(测总电压)和 AI1(测标准电阻上电压)波形的复振幅计算得到,然后计算标准电阻和被测电路上电压的幅值比和

相位差，即可得到幅频特性和相频特性。

3) 根据幅频特性变化趋势自动调节频率间隔（步长）。

由于整个频率测量区间跨度较大，而有些电路的幅频特性在较小的频率范围内有非常急剧的变化，如果频率采取等间距变化方式，间距太小时，测量点过多，耗时太久，间距不够小时，又不能很好的刻画尖锐的峰和谷，因此考虑根据幅频特性斜率大小调节频率间隔，当幅频特性斜率大时，频率间隔适当调小。实际计算时，由于在峰值处计算出的斜率很小，如果仅根据当时的斜率设定频率步长，会导致此处频率步长取得很大，反而不能很好刻画峰值之后的曲线，因此考虑根据此前 20 个数据点中的最大斜率来设定频率步长，使频率步长不致骤然增大。