

用交流电桥测电感电容*

XXX xxxxxxxx[†]

(1 中山大学物理学院, 广东广州 510275)

摘要: 本次实验以电桥的平衡条件为基本, 测量了电容器的电容量, 损耗电阻以及电感器的电感量和品质因数。用 NI VirtualBench-8012 一体化仪器及成品数字电桥测量相同参数并与其进行对比, 最后测量未知四端网络的连线方式及元件参数。根据实验搭建的电路测得电容 $C_x = 46.7nF$, 损耗电阻 $r_c = 51.5\Omega$, 损耗因数 $D = 0.0024$, 电感 $L_x = 14.8mH$, 电阻 $r_L = 61.7\Omega$, 品质因数 $Q = 0.24$ 。用数字电桥测得电容 $C_x = 47.1nF$, 损耗电阻 $r_c = 51.5\Omega$, 损耗因数 $D = 0.0024$, 电感 $L_x = 20.2mH$, 电阻 $r_L = 135\Omega$, 品质因数 $Q = 0.15$ 。另外, 利用实验室的仪器, 测得了 12 号黑盒中不同接口的电路情况, 推测出了黑盒内部的电路。最后利用 Multisim 电路仿真软件以 RLC 串联电路实验为例进行仿真模拟。RLC 电路测出的谐振频率为 1584.9Hz, 由实验 B5 测得谐振点频率为 1342.54Hz, 仿真结果与其相对误差为 18.05%。非平衡直流电桥实验与理论值几乎吻合, 交流电桥测电容和电感的实验中, 交换元件前后结果没有改变。

关键词: 交流电桥; 电感; 电容; 数字电桥; Multisim 电路仿真软件; RLC 串联电路; 非平衡直流电桥; 交流电桥测电容和电感

1 引言

交流电桥可较精确地测量电容器的电容量、自感系数、互感系数及线圈的品质因数等, 用途广泛。本实验将介绍用交流电桥测量电容和电感的基本原理及测量方法, 测量电容器的电容、损耗电阻和损耗因数, 测量电感器的电感、电阻和品质因数。在电路仿真软件中, NI Multisim 软件是一个专门用于电子电路仿真与设计的 EDA 工具软件。作为 Windows 下运行的个人桌面电子设计工具, NI Multisim 是一个完整的集成化设计环境, 利用计算机仿真与虚拟仪器技术可以很好地解决理论教学与实际动手实验相脱节的这一问题。Multisim 具有直观的图形界面、丰富的元器件、强大的仿真能力和丰富的测试仪器, 是电子学教学的首选软件工具。

2 介绍

2.1 RLC 串联电路

RLC 串联电路如图 1(a) 所示, 有

$$U = U_R + U_L + U_C = I[R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}] \quad (1)$$

可得总阻抗的模 $|Z|$ 、电流有效值 I 、电路电流与总电压之间的相位差 $\Delta\varphi$ 分别为

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

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (3)$$

$$U_R = IR = \frac{UR}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (4)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{U_R} - \varphi_U = -\arctan\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right) \quad (5)$$

*由中山大学物理学院陆佑堂提供器材和指导。

[†]通信作者, xxxx@mail2.sysu.edu.cn

若总电压有效值 保持不变, 根据式 (3)、(5) 可画出 $I - f$ 幅频特性曲线和 $\Delta\varphi - f$ 相频特性曲线,

分别如图 1(b) 和 (c) 所示。定义参数

$$Q = \frac{U_0}{U} = \frac{1}{R\omega_0 C} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (6)$$

该参数称为谐振电路的品质因数, 简称 Q 值, 是表征谐振电路性能优劣的重要物理量之一。谐振时, $U_C = U_L = QU$, 所以 Q 值越大, 电感、电容上的电压与总电压的比值也越大, 电路储能效率越高。

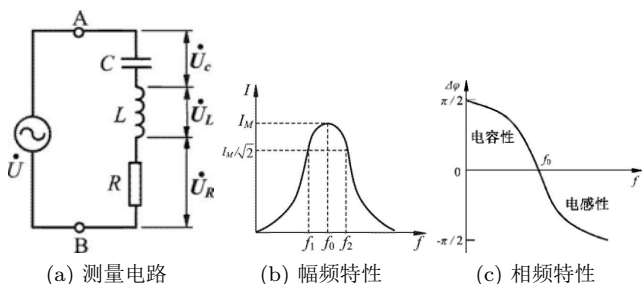


图 1: RLC 串联电路的稳态特性

2.2 交流电桥及其平衡条件

交流电桥的原理如图 2(a) 所示, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 分别为四个桥臂的复阻抗。调节各臂的阻抗, 使电桥达到平衡, 即 A 和 B 两点间的电位差为零, 则有 $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$, 即交流电桥相对两臂交流阻抗的乘积相等, 此即为交流电桥的平衡条件。用复数形式表示为 $\frac{|Z_1|e^{i\varphi_1}}{|Z_2|e^{i\varphi_2}} = \frac{|Z_3|e^{i\varphi_3}}{|Z_4|e^{i\varphi_4}}$, 相当于 $\frac{|Z_1|}{|Z_2|} = \frac{|Z_3|}{|Z_4|}$ 和 $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4$ 同时成立。可见, 交流电桥平衡时, 除相对两臂交流阻抗的模的乘积相等外, 阻抗相对两臂相位角的和值相等, 这是它和直流电桥的主要差别。为使电桥平衡, 要依照上式配置各桥臂的阻抗。在电桥平衡过程中要反复调节这些参数。

2.3 测量电容器的电容 C 及其损耗因素 D

实际电容不是理想的电容器, 在电路中会损耗能量, 故其等效电路可看成是一个纯电容 C_x 和一个损耗电阻 r_c 的串联或并联电路, 本实验将采用串联等效电路来处理。由于存在损耗, 当正弦信号通过它时, 电容器两端的电压与通过电容器的电流之间的相位差 φ 不是 90° , 而是 $\varphi = 90^\circ - \delta$ 其中 δ 称为电容器的损耗角, 它的正切值称为电容器的损耗因数, 表示为 D。它随损耗电阻 r_c 的增加而变大, 是衡量电容器质量优劣的一个重要参数, 可写为 $D = \tan\delta = r_c\omega C_x$ 。电容电桥适合测量损耗较小的电容, 测量电路如图 2(b) 所示, R_2 和 R_4 耗为纯电阻, C_0 为标准电容, 它的

损耗电阻 R_C 在低频时近似为零。为了相平衡, C_0 串联了一个电阻 R_0 。根据电桥各臂配置的情况可得 $C_x = \frac{C_0 R_2}{R_4}$, $r_c = \frac{R_0 R_2}{R_4}$, $D = \omega R_0 C_0$ 为了调节方便, 实验过程中常固定 R_0 和 R_2 的数值, 直到交流电桥 AB 点间的电压 AB 最小。

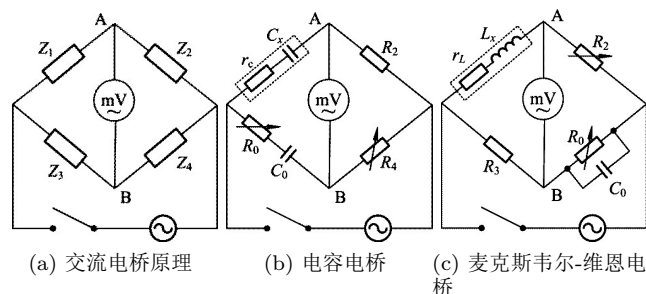


图 2: 不同类型的电桥

2.4 测量电容器的电感量 L 及其品质因素 Q

由于任何电感线圈都具有损耗电阻, 故其等效电路可看作是一个纯电感 L 和损耗电阻 r_L 的串联。实际使用过程中常希望 r_L 尽可能小, 以减小能量的损耗。 r_L 越小, 电感的品质因数 $Q = \frac{\omega L_x}{r_L} = \omega R_0 C_0$ 越大。品质因数是衡量电感线圈质量好坏的一个重要参数。如图 2(c) 麦克斯威尔-维恩电桥是一种最常用的测量电感的电桥。参照电容电桥的分析方法, 可得电感电桥平衡时有 $L_x = C_0 R_2 R_3 = \frac{R_2 R_3}{R_0} = \frac{\omega L_x}{r_L} = \omega R_0 C_0$, 其中 R_0 和 R_2 为独立变量, 反复交替调节可使电桥趋于平衡。

3 实验步骤

3.1 基于 Multisim 电路仿真软件的 RLC 串联电路特性

步骤一 基于 Multisim 电路仿真软件的 RLC 串联电路如图 3 所示。电路中电阻、电感和电容参数分别为 1000Ω , 20mH , $0.47\mu\text{F}$ 。

步骤二 参照实验 B5, 自拟数据记录表格, 测量 RLC 电路的幅频和相频特性, 并将模拟结果与上学期完成的实验结果进行对比。

3.2 测量电容器的电容量及其损耗因素 D

步骤一 按图 2(b) 连接线路, 要求桥臂接线尽可能短且接触良好。 R_0 和 R_4 采用电阻箱作为可调节参

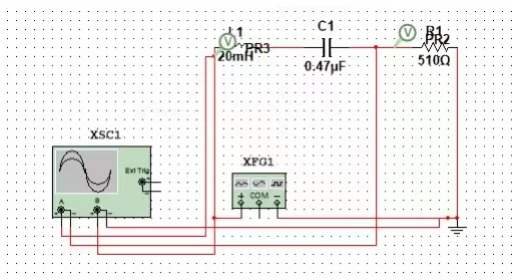


图 3: RLC 串联电路

数, 固定 C_0 和 R_2 的数值不变。

步骤二 调节 R_0 使 U_{AB} 为极小值, 再调节 R_4 使 U_{AB} 更小, 交替调节若干次, 直至 U_{AB} 值最小为止, 此时不论调节 R_0 还是 R_4 都会使 U_{AB} 值增大。由于判断 U_{AB} 最小值时人为误差较大, 需进行多次测量。

步骤三 将 R_4 和 R_0 被测电容互换位置, 用相同方法调节电桥平衡并记录多组 R_0 和 R_4 的数值。

步骤四 计算待测电容的 C_x 、 r_c 和 D 的数值及实验标准差。

3.3 测量电感器的电感量及品质因数

步骤一 采用如图 2(c) 所示的电路, 固定 R_3 和 C_0 的数值, R_0 和 R_2 采用电阻箱, 反复调节 R_0 和 R_2 的数值直至 U_{AB} 数值最小, 电桥平衡。

步骤二 记录相关数据并计算待测电感的 L_x 、 r_L 和 Q 的数值及实验标准差。测量过程中需类似实验内容 2 的方法进行“换臂”测量, 以减小系统误差。

3.4 用成品数字电桥测电容和电感

步骤一 采用数字电桥测量上述待测电容和电感的相关参数, 并与实验内容 2 和 3 的结果进行比较。

3.5 测量未知四端网络的连线方式及元件参数

步骤一 由教师指定一个测试盒, 盒内为 13 个基本元器件 (R、L、C) 的串联或并联电路, 每种元件最多只有一个, 或者没有。测试盒不透明, 实验者看不见内部电路。

步骤二 每个测试盒表面有编号, 盒外有四个接线柱, 要求实验者综合利用已学交直流电路知识和设备, 自行选择合适的仪器, 自行设计测量方法, 确定盒内电路的形式及各元件的参数。要求画出盒内的电路, 并标出元件参数。

3.6 利用 Multisim 软件仿真直流电桥和交流电桥实验

仿真交流电桥测电容实验 电路如图 4) 所示。其中电阻 $R_1 = 51\Omega$, $R_2 = 510\Omega$, 可调电阻 $R_3 = 100\Omega$, 可调电阻 $R_4 = 1k\Omega$, 电容 $C_1 = 0.1\mu F$, $C_2 = 0.47\mu F$, 信号为正弦信号, 频率为 $10kHz$, 电压幅峰值 $V_{PP} = 5V$ 。测完后“换臂”(图右)再测。

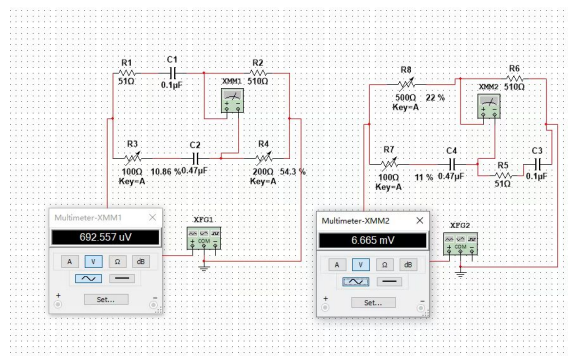


图 4: 仿真交流电桥测电容实验

仿真交流电桥测电感实验 电路如图 5(a)、5(b) 所示。其中电阻 $R_1 = 100\Omega$, $R_3 = 510\Omega$, 可调电阻 $R_2 = 1k\Omega$, 可调电阻 $R_4 = 1k\Omega$, 电容 $L_1 = 20mH$, $C_1 = 0.47\mu F$, 信号为正弦信号, 频率为 $10kHz$, 电压峰峰值 $V_{PP} = 5V$ 。测完后“换臂”再测。

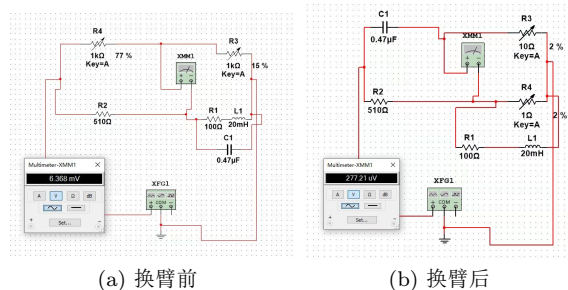


图 5: 仿真交流电桥测电感实验

3.7 实验结果分析

将自组交流电桥测量结果、Multisim 仿真结果和成品数字电桥测量结果三者进行比较。

4 实验数据分析

4.1 基于 Multisim 电路仿真软件的 RLC 串联电路特性

电路中电阻、电感和电容参数分别为 1000Ω , 20mH , $0.47\mu\text{F}$ 。

作 RLC 串联电路的幅频和相频特性曲线, 如图 6,7:

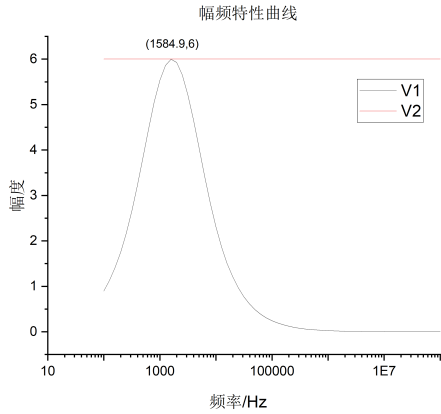


图 6: 幅频特性曲线

图中谐振点频率为 1584.9Hz , 由实验 B5 测得谐振点频率为 1342.54Hz , 仿真结果与其相对误差为 18.05% 。实验误差主要在于实验 B5 取样点太少, 拟合后相频曲线不光滑, 不能很好反映电路的相频特性,

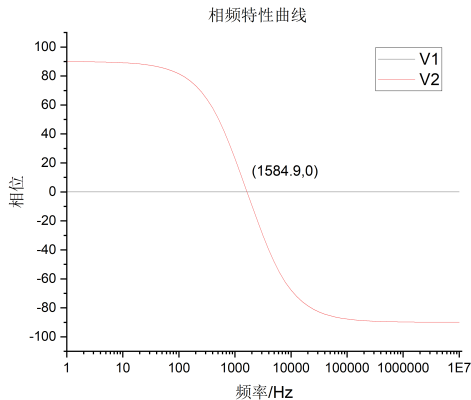


图 7: 相频特性曲线

故谐振点的读数会有所偏差。

4.2 测量电容器的电容量及其损耗因素

电路中 $C_0 = 0.47\mu\text{F}$, $R_0 = 510\Omega$, 交流电频率 $f = 1\text{kHz}$, $U = 10\text{V}$ 。

	实验次数	R_2/Ω	R_4/Ω	U_{AB}/mV
换臂前	1	10.6	108.4	0.101
	2	10.8	108.6	0.118
	3	10.8	108.7	0.108
	4	10.8	108.5	0.116
	5	10.8	108.3	0.108
平均值:		10.8	108.5	
标准差:		0.0	0.1	
换臂后	1	11.2	113.0	8.134
	2	11.2	113.1	7.939
	3	11.2	113.4	5.981
	4	11.2	113.7	8.192
	5	11.2	113.5	7.989
平均值:		11.2	113.4	
标准差:		0.0	0.3	

表 1: 交流电桥测电容数据

换臂前数据计算

$$\begin{cases} C_x = \frac{C_0 R_2}{R_4} = 46.9\text{nF} \\ r_c = \frac{R_0 R_2}{R_4} = 52.5\Omega \\ D = \omega r_c C_x = 0.0025 \end{cases}$$

换臂后数据计算

$$\begin{cases} C_x = \frac{C_0 R_2}{R_4} = 46.4\mu\text{F} \\ r_c = \frac{R_0 R_2}{R_4} = 50.4\Omega \\ D = \omega r_c C_x = 0.0023 \end{cases}$$

对换臂前后的数据取均值后计算, 如表 2 所示:

	实验测量	成品电桥测量	相对误差/%
C_x/nF	46.7	94.8	103.0
r_c/Ω	51.5	52.5	1.9
D	0.0024	0.0050	116.6

表 2: 实验测量值与成品电桥测量值对比表

仿真结果见表 3: 电路中 $C_0 = 0.47\mu\text{F}$, $R_0 = 510\Omega$, 交流电频率 $f = 1\text{kHz}$, $U = 10\text{V}$ 。

	换臂前	换臂后	平均值
R_2/Ω	10.9	11	
R_4/Ω	108.8	110	
C_x/nF	47.1	47	47.1
r_c/Ω	51.1	51	51.1

表 3: 仿真交流电桥测电容实验数据

由公式得仿真电路得电感品质因素 D:

$$D = \omega r_c C_x = 0.0024$$

将实验测量值与仿真结果比较, 结果见表 4:

	实验测量	仿真测量	相对误差/%
C_x/nF	46.7	47.1	0.9
r_c/Ω	51.5	51.1	0.8
D	0.0024	0.0024	0

表 4: 实验测量值与仿真值对比表

换臂前数据计算

$$\begin{cases} L_x = C_0 R_2 R_3 = 15.2mH \\ r_L = \frac{R_2 R_3}{R_0} = 63.5\Omega \\ Q = \frac{\omega L_x}{r_L} = 0.24 \end{cases}$$

换臂后数据计算

$$\begin{cases} L_x = C_0 R_2 R_3 = 14.4mH \\ r_L = \frac{R_2 R_3}{R_0} = 59.9\Omega \\ Q = \frac{\omega L_x}{r_L} = 0.24 \end{cases}$$

对换臂前后的数据取均值后计算, 如表 6 所示:

	实验测量	成品电桥测量	相对误差/%
L_x/mH	14.8	20.2	36.5
r_L/Ω	61.7	135.0	118.8
Q	0.24	0.15	37.5

表 6: 实验测量值与成品电桥测量值对比表

仿真实验中, $L_x = 20mH$, $r_L = 100\Omega$, 由公式得仿真电路得电感品质因素 D:

$$Q = \frac{\omega L_x}{r_L} = 0.2$$

将实验测量值与仿真结果比较, 结果见表 7:

	实验测量	仿真测量	相对误差/%
L_x/mH	14.8	20.0	35.1
r_L/Ω	61.7	100.0	62.1
Q	0.24	0.2	16.7

表 7: 实验测量值与仿真测量值对比表

由上述数据可知, 不论与成品数字电桥的测量结果还是与 Multisim 仿真结果相比, 实验结果的相对误差都较大。但相比于使用成品数字电桥测得的结果, 实验测得的结果与 Multisim 仿真结果的误差更小。原因可能有以下几点:

1. 调试电桥时, 受仪器、外界环境等条件影响, 电桥只能近似平衡, 无法完全平衡, 因而成品数字电桥和实验都存在无法消除的系统误差, 此误差可能导致成品数字电桥与实验结果误差偏大。

4.3 测量电感器的电感量及品质因数

电路中 $C_0 = 0.47\mu F$, $R_0 = 510\Omega$, 交流电频率 $f = 1kHz$, $U = 10V$ 。

	实验次数	R_2/Ω	R_3/Ω	U_{AB}/mV
换臂前	1	81.9	358.3	4.411
	2	92.0	361.1	2.580
	3	92.0	361.2	2.580
	4	91.0	361.2	2.613
	5	92.0	361.0	2.579
换臂后	平均值:	89.8	360.5	
	标准差:	3.9	1.1	
	1	87.6	349.1	4.958
	2	87.5	349.1	4.832
	3	87.5	349.0	4.807
换臂后	4	87.5	348.9	4.782
	5	87.5	348.8	4.760
	平均值:	87.5	349.0	
	标准差:	0.0	0.1	

表 5: 交流电桥测电感数据

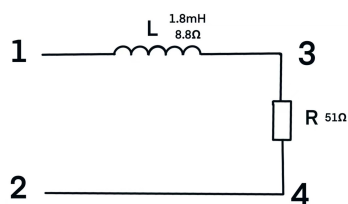


图 8: 内部电路图

6 参考文献

- [1] 沈韩. 基础物理实验 [M]. 科学出版社, 2015.
- [2] 项飞羽. 交流电桥换臂法测量电容的研究 [J]. 贵州教育学院学报 (自然科学), 2004(04): 29-30.

2. 实验过程中数据显示不够稳定, 读数产生一定误差。
3. 由于使用了真实仪器, 导线及插线板各处存在一定电容和电感, 导致了误差的存在。
4. 仪器接线处与元件的接触可能不够稳定, 导致产生一定误差。
5. 元件内部可能存在老化等问题, 导致标注参数与实际参数不相符, 产生误差。

4.4 测量未知四端网络的连线方式及元件参数

由成品电桥测得端口间数据见表 9:

端口编号	R/Ω	L/mH	C/mF
1-2	59.4	0.1	0
1-3	8.7	0.1	0
1-4	59.6	0.1	0
2-3	50.8	0	0
2-4	0	0	0
3-4	50.8	0	0

表 8: 未知四端网络参数

推断得箱内电路如图 8 所示:

5 结 论

通过实验, 实践了交流电路测未知电容和电感的方法, 测得了电容为 46.7nF , 损耗电阻 51.5Ω , 损耗因数 0.0024 ; 电感 14.8mH , 电阻 61.7Ω , 品质因数 0.24 。将其与用成品数字电桥及 Multisim 测出的数据相比, 与成品电桥测量误差较大, 与仿真结果较接近。手动测量误差较大, 利用成品电桥, 可以对电阻、电容和电感进行较为精确的测量, 从而推断出位置电路的元件参数和连接方式。

Measuring Inductance and Capacitance with AC bridge*

XXX¹ †

¹ School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: This experiment is based on the balance condition of the bridge. The capacitance of the capacitor, the loss resistance and the inductance and quality factor of the inductor were measured. The same parameters were measured and compared with data from NI VirtualBench-8012 integrated instrument and finished digital bridge. Finally, the connection mode and component parameters of the unknown four-terminal network were measured. According to the data measured by test circuit: capacitance $C_x = 46.7nF$, loss resistance $R_C = 51.5\Omega$, loss factor $D = 0.0024$, inductance $L_x = 14.8mH$, resistance $r_L = 61.7\Omega$, quality factor $Q = 0.24$. Data measured by digital bridge: capacitance $C_x = 47.1nF$, loss resistance $R_C = 51.5\Omega$, loss factor $D = 0.0024$, inductance $L_x = 20.2mH$, resistance $r_L = 135\Omega$, quality factor $Q = 0.15$. In addition, the circuit of different interfaces in no.5 black box was measured by laboratory instruments, and the circuit inside the black box was speculated. Finally, using Multisim circuit simulation software to simulate RLC series circuit experiment. The resonant frequency measured by RLC circuit is 1584.9Hz, and the resonant point frequency measured by experiment B5 is 1342.54Hz. The relative error between the simulation result and the resonant point frequency is 18.05%. The experimental results of non-equilibrium DC bridge are almost consistent with the theoretical values, and the results of capacitance and inductance measurement of AC bridge do not change before and after switching elements.

Key words: Temperature sensor, LM35

【思考题】

1. 交流电桥和直流电桥有何区别？

答：直流电桥中通的是直流电，是一种利用比较法精确测量电阻的方法，但直流电桥中不能有电容，电感相当于电阻。交流电桥则可以测量多种电路元件的数据。直流电桥只需要电桥各臂阻抗的实部满足平衡条件即可达到平衡；交流电桥必须按照一定方式配置桥臂阻抗，流电桥平衡必须反复调节两个桥臂的参数调节电桥平衡时有两个自由度，需要调节两个变阻器。交流电桥平衡时，除相对两臂交流阻抗的模的乘积相等外，阻抗相对两臂相位角的和值相等，这是它和直流电桥的主要差别。

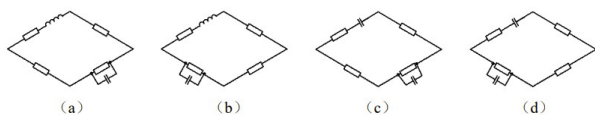
2. 麦克斯威尔—维恩电桥中， R_0 和 C_0 的桥臂若改成串联形式，电桥是否还能达到平衡？比较这两种形式的电桥，那一种电桥适合测量高 Q 值的电感，那一种适合测量低 Q 值？

答：达到平衡，由平衡条件，得到：

$$\begin{aligned}\frac{r_L + j\omega L_x}{R_2} &= \frac{R_3}{R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}} \\ r_L &= \frac{\omega^2 C_0^2 R_2 R_3}{1 + \omega^2 C_0^2 R_0^2} \\ L_x &= \frac{C_0 R_2 R_3}{1 + \omega^2 C_0^2 R_0^2} \\ \varphi_1 &= \arctan\left(\frac{\omega L_x}{r_L}\right), \varphi_2 = 0, \\ \varphi_3 &= \arctan 0, \varphi_4 = -\arctan\left(\frac{\omega C_0}{R_0}\right)\end{aligned}$$

因此可以满足 $\phi_1 - \phi_2 = \phi_3 - \phi_4$ ，并且进一步求得品质因数 $Q = \frac{1}{\omega C_0 R_0}$ 。低频信号下，并联形式适合低 Q 值，串联形式适合高 Q 值，高频信号下则相反。因而此种电桥量 Q 值较低的电感，克斯威尔-维恩电桥适合测量 Q 值较高的电感。

3. 分析下列四种电桥线路是否能实现平衡，为什么？



答：(a) 和 (d) 能平衡，(b) 和 (c) 不能。

根据交流电桥的平衡条件可知，电桥四个桥臂的阻抗中必须至少要有两个能够调节，并且 $\frac{|Z_1|}{|Z_2|} = \frac{|Z_3|}{|Z_4|}$

和 $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4$ 同时成立才能使电桥达到平衡状态。如果相邻两臂为纯电阻，则其余两臂必须同时为电感或者电容，因此 (b) (d) 中 (d) 可以，(b) 不行；如果相对两臂为纯电阻，则其余两臂必须分别为电感和电容，因此 (a) 和 (c) 中，(a) 可以，(c) 不行。

【附录】

实验器材

元件名称	型号
NI VirtualBench 一体化仪器	
函数信号发生器	DG1022
双通道交流毫伏表	TH1912A
数字电桥 (LCR 表)	
电阻箱	TH2811D
标准电容箱	0.47 μ F
待测电容	
待测电感	
导线	
12 号黑盒	

*Supported and taught by Luyoutang, School of Physics,
Sun Yat-sen University

[†]Corresponding author. E-mail:xxxx@mail2.sysu.edu.cn