

LC 串联电路测量液体电容率

窦如强^a, 刘 鑫^a, 何 钰^b, 杜进祥^c, 吴 平^a, 陈 森^d

(北京科技大学 a. 数理学院; b. 化学与生物工程学院; c. 材料科学与工程学院;
d. 自然科学基础实验中心, 北京 100083)

摘 要: 基于 LC 串联电路存在“零电阻”状态的电路特性, 利用标准电感线圈和自制液体电容器, 设计了可以精确测量液体电容率的实验方法. 利用该方法测量了蒸馏水以及不同体积分数乙醇溶液的电容率, 测量结果与文献参考值的相对偏差在 1% 以内.

关键词: 电容率; LC 串联电路; 液体

中图分类号: O441.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2017)02-0046-03

电容率是反映材料极化性能的一个重要参数, 它也是溶剂的重要参量, 表征溶剂对溶质分子溶剂化以及隔开离子的能力^[1]. 目前, 对于电容率的测量主要有终端短路法^[2]、波导微扰法^[3-6]等, 这些方法主要用于固体材料复电容率的测量, 由于液体的电容率与温度、浓度、频率等多个物理量相关^[7], 应用到液体材料的测量时, 对实验设备和条件将会有更高的要求, 在实验室内完成精确测量具有一定的难度. 本文基于串联电路存在“零电阻”状态的电路特性, 利用标准电感线圈和自制的液体电容器, 提出了可以便捷、精确测量液体电容率的实验方法.

1 实验原理与计算方法

材料的电容率是频率的函数, 且是复数, 实部反映材料容纳电荷的能力, 虚部反映传导中的耗散能力. 对于液体材料而言, 在大部分生化制剂及化学溶液的性质研究中, 为了保证生物活性, 主要关注其零频电容率的实部, 而电容率随频率变化的跳变点通常出现在 GHz 量值下^[8]. 因此, 在 kHz, MHz 甚至数十 MHz 下, 对液体电容率的影响都可以看作是微扰, 与零频电容率相比几乎不变. 基于上述特性, 用液体材料作为电容器的填充介质, 在低频 (≤ 1 MHz) 条件下测得的电容率

近似为零频电容率. 因此本文在低频下利用 LC 串联电路的零电阻特性, 设计了间接测量零频电容率的方法. 原理如图 1 所示, AC 为交流信号源, R_0 为保护电阻, L 标准电感线圈, C 为自制圆柱形电容器, U 为 LC 两端电压, U_0 为电路输出电压.

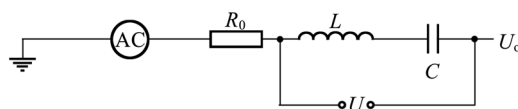


图 1 实验原理图

电路中输入阻抗为

$$R_r = R_0 + j \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right], \quad (1)$$

其中 ω 为输入信号的圆频率.

当 $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ 时, $\omega < \sqrt{\frac{1}{LC}}$, 电路呈现电容性;

$\omega L > \frac{1}{\omega C}$ 时, $\omega > \sqrt{\frac{1}{LC}}$, 电路呈现电感性; $\omega L = \frac{1}{\omega C}$

时, $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$, 此时电路的输入阻抗最小, 处于“零电阻”状态, LC 两端电压存在极小值, 对应的输入信号频率记为 f_0 , 如果测量出 U 随输入信号频率 f 的变化曲线, 则在点 f_0 处能观测到 LC 两端

“第 9 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期: 2016-05-29

资助项目: 北京科技大学研究型教学示范课建设项目 (No. KC2014YJX30)

作者简介: 窦如强 (1993-), 男, 河北承德人, 北京科技大学数理学院黄昆班 2013 级本科生.

指导教师: 陈 森 (1978-), 男, 河南濮阳人, 北京科技大学物理实验中心高级工程师, 硕士, 主要从事物理实验教学工作的.



电压极小值 U_{\min} :

$$U_{\min} = F(f_0). \quad (2)$$

此时电路满足零电阻状态的频率方程为

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (3)$$

$$\omega = 2\pi f_0. \quad (4)$$

实验中选用圆柱形电容器, 其电容值为

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln(r_2/r_1)}, \quad (5)$$

式中: ϵ_r 为极间填充介质的相对电容率(零频电容率), ϵ_0 为真空电容率, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, h 为圆柱形电容器的高度, r_1 为圆柱形电容器的内径, r_2 为圆柱形电容器的外径.

由式(3)~(5)可得待测电容率 ϵ_r 表达式为

$$\epsilon_r = \frac{\ln(r_2/r_1)}{8\pi^3 f_0^2 \epsilon_0 h L}, \quad (6)$$

式中 f_0 可以通过 $U-f$ 曲线得到, 其他量都是已知值.

2 实验结果与讨论

2.1 蒸馏水的电容率测量

实验中所用标准电感 $L = 1.15 \times 10^{-3} \text{ mH}$ 是, 分别从几个方向测量圆柱型电容器的内外径和高度, 求得平均值 $r_1 = 1.2 \text{ cm}$, $r_2 = 4.6 \text{ cm}$, $h = 7.5 \text{ cm}$, 利用上述方法测得的数据如表 1 所示.

表 1 LC 两端电压 U 与频率 f 对应关系

f/kHz	U/V	f/kHz	U/V
310	2.329	355	2.283
320	2.309	360	2.286
330	2.292	363	2.289
340	2.284	366	2.291
350	2.283	370	2.307

由表 1 画出 LC 两端电压 U 随输入信号频率 f 的变化关系曲线如图 2 所示.

由图 2 可以看出, LC 两端电压 U 随输入信号频率 f 变化先减小后增大, 极小值对应的信号输入频率 f_0 为 352 kHz, 利用式(6)可求得蒸馏水的相对电容率为 78.21, 与文献参考值 78.0^[9] 相比, 相对偏差为 0.27%.

2.2 不同体积分数的乙醇溶液的电容率测量

为了进一步验证测量方法的有效性, 采用同样方法测量了不同体积分数的乙醇溶液的电容

率, 数据如表 2 所示.

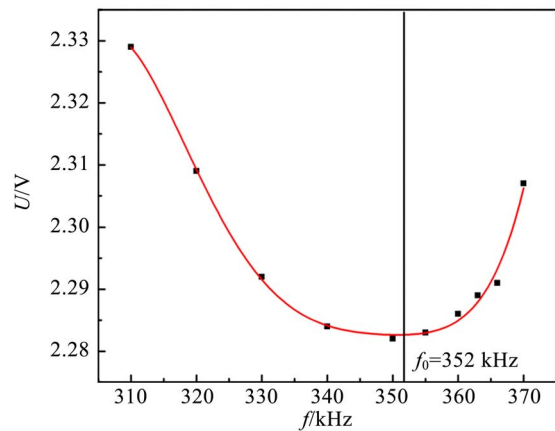


图 2 LC 两端电压 U 与频率 f 关系曲线

表 2 不同体积分数的乙醇溶液电容率测量值与文献参考值对比

体积分数	ϵ_r		E_r
	测量值	参考值	
10%	73.90	73.844 29	0.081%
25%	67.05	66.966 29	0.12%
50%	54.56	54.564 9	0
75%	40.51	40.886 63	0.92%
100%	25.80	25.7	0.39%

由表 2 可看出, 测得的不同体积分数的乙醇溶液的电容率值与文献参考值的相对偏差均在 1% 以内, 利用 LC 串联电路存在“零电阻”状态的电路特性, 电容值与液体电容率存在一一对应的函数关系, 通过直接测量电容值可以精确、间接测量出液体的电容率, 方法简单可行.

3 结束语

通过上述实验测量结果可以看出, 基于 LC 串联电路存在“零电阻”状态的电路特性, 利用标准电感线圈和自制的电容器, 设计的方法不仅可以测量液体的电容率, 也可以测量各种电容器的电容值, 操作简单、方便. 此外, 通过测量零电阻状态时的输入信号频率, 可以间接计算求得电容器填充介质的电容率, 减少了对直接测量数据 LC 两端电压 U 的使用, 提高了测量精度.

参考文献:

[1] 李云峰, 李建锡, 李兵兵. 微波加热过程中材料的复介电常数性质的研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41

- (12):4-6.
- [2] 倪尔瑚. 用谐振腔—截止波导技术测量介质谐振器的复介电常数[J]. 微波学报, 2000, 19(5):554-600.
- [3] 唐宗熙, 张其助. 改进矩形腔微扰法测试微波电介质复介电常数[J]. 通信学报, 1996, 17(5):56-61.
- [4] Yu K B. Accurate microwave resonant method for complex permittivity measurement of liquid [J]. IEEE Trans on MTT, 2000, 48(11):2159-2164.
- [5] 金浩, 董树荣. 微扰法测量介质陶瓷薄膜的介电特性[J]. 微波学报, 2003, 19(3):67-71.
- [6] Krasezwski A W. Observations on resonant cavity Perturbation by dielectric object [J]. IEEE Trans on MTT, 1992, 40(1):151-155.
- [7] 金钦汉, 戴树珊, 黄卡玛. 微波化学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [8] 钟淑荣. 一种基于矩形波导的液体介电常数测量方法的研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [9] 王福安, 刘大壮. 二元非电介质溶液介电常数随浓度变化的关系[J]. 郑州工学院学报, 1981(1):104-119.

Measuring the capacity of liquid materials using series LC circuit

DOU Ru-qiang^a, LIU Xin^a, HE Yu^b, DU Jin-xiang^c, WU Ping^a, CHEN Sen^d

(a. School of Mathematics and Physics; b. School of Chemistry and Biological Engineering;
c. School of Material Science and Engineering; d. Basic Experimental Center for Natural Science,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the unique characteristic of series LC circuit, a method was designed to measure the capacity of liquid materials, using a standard inductor and a cylinder capacitor. Using the above method, the capacity of distilled water and alcohol solution was measured. The relative error between the measured result and the reference value was less than 1%.

Key words: capacity; series LC circuit; liquid materials

[责任编辑:郭 伟]

(上接第 45 页)

Measurement of transmittance of umbrella cloth

HU Xiao, WANG Chun-mei, SHEN Guo-tu

(School of Physics and Materials Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: A method of measuring the ultraviolet protection factor of the umbrella was suggested. In the experiment, the WG-8A grating spectrometer, bromine tungsten lamp, dimmer glass and other equipment were used, and the transmittance of the sample umbrella cloth was calculated indirectly by measuring the transmittance of the dimmer glass which was called the intermediate measured value. That helped us to expand the measurement range of the transmittance. By analyzing the transmittance, the ultraviolet protection factor of the sample was obtained. This experiment, by combining the modern physical experiment with real life, could enhance the students' interest.

Key words: grating spectrometer; ultraviolet protection factor; transmittance; dimmer glass; intermediate value

[责任编辑:郭 伟]