

物理实验



交流电桥灵敏特性设计性实验探究*

段正荣 王利娅 祝 昆 孙第勇

(六盘水师范学院物理与电气工程学院 贵州 六盘水 553000)

(收稿日期:2020-03-18)

摘要:通过控制变量法研究了串联电容交流电桥的灵敏特性.实验表明改变电桥臂阻抗可以提升交流电桥灵敏度,实验结果与理论分析相吻合.该方法物理意义清楚,操作简便可行,为交流电桥灵敏度实验研究提供了一条参考路线,适合作为低年级大学物理综合设计性实验项目开发.

关键词:大学物理实验 交流电桥 灵敏度 串联电容交流电桥

1 引言

交流电桥由于具有测量准确度高、使用方便灵活的特点成为当代测量技术中不可或缺的基本测量电路,通常将非物理量转化为电量进行测量,具有灵敏度高,测量精度好,测量电路可靠等特点^[1].交流电桥实验是大学物理实验中测量阻抗、电容、电感的容量和感量以及其他相关物理量的典型实验项目.它的主要原理是利用交流电桥平衡条件来进行测量,电桥的灵敏度受平衡指示器精度、电路特性、交流电源的幅值和频率等因素影响.文献[2,3]介绍了选择不同电路以提高交流电桥灵敏度;文献[4,5]研究了电压和线路配置对于灵敏度的影响;文献[6,7]从交流电桥灵敏度公式出发,对影响灵敏度的有关因素进行了分析和实验验证.上述研究共同存在测量公式复杂、变量多、数据分析要求高的问题,导致物理意义不容易被低年级学生掌握,不利于作为低年级学生实验项目进行开展.这里我们通过简化灵敏度测量公式,通过控制变量的方法利用串联电容交流电桥实验对交流电桥相对灵敏度进行了研究,结果表明与理论结果相符.

该方法具有物理意义清楚,测量简单可行,适合作为综合设计性实验开设,容易被低年级学生所接受的特点.对提升学生设计能力和综合处理数据能力以及工程设计等工作都具有参考意义,值得在教学和工程设计中推广.

2 实验原理和方法

2.1 实验原理

交流电桥一般是由4个电桥臂和平衡指示器组成.如图1所示,G为平衡指示器(通常为数字毫伏表), Z_1, Z_2, Z_3 和 Z_4 为复阻抗, U_s 为一定频率的交流电桥电源.理想状态下,当电桥达到平衡时,cd两端电压为零,流过平衡指示器的电流 I_0 为零.满足平衡条件 $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$.用复指数形式表示平衡条件为

$$\frac{|Z_1| \exp j\varphi_1}{|Z_2| \exp j\varphi_2} = \frac{|Z_3| \exp j\varphi_3}{|Z_4| \exp j\varphi_4}$$

为了实验的方便我们将交流电桥平衡条件分别用两式表示

$$\frac{|Z_1|}{|Z_2|} = \frac{|Z_3|}{|Z_4|}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4$$

* 六盘水师范学院物理学重点学科建设项目,项目编号:LPSSYZDXK201801;六盘水市科技局联合基金项目,项目编号:5202020180413

作者简介:段正荣(1998-),女,在读本科生,主要从事大学物理实验研究.

通讯作者:祝昆(1976-),男,硕士,教授,主要从事光电技术和物理实验教学研究.

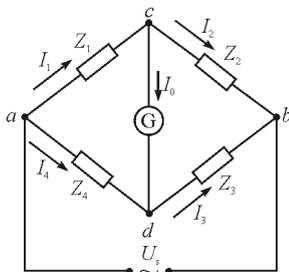


图1 交流电桥

交流电桥的灵敏特性通常用灵敏度来表示,交流电桥灵敏度的定义为,电桥平衡时,因测量的桥臂阻抗最小单位微小变化而带来的平衡指示器两端电压有效值示值产生变化的物理量.它是衡量设计电桥灵敏特性重要性能的物理量.表示为

$$S_u = \lim_{|\Delta Z| \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta Z} \quad (1)$$

其中 ΔU 表示平衡指示器两端 cd 的电压有效值, ΔZ 表示电桥臂阻抗最小单位微小变化.通常设计电桥时要考虑电桥臂的阻抗比例来提高灵敏特性,但是,对于设计好的交流电桥的灵敏度主要与电桥电源的大小、频率和平衡指示器的精度有关.由于实验中选用的仪器设备装置的电源和平衡指示器是一定的,即电桥臂阻抗变化引起平衡指示器变化一定.所以,在忽略理想情况下即电桥臂阻抗趋近于零时的灵敏度.我们将式(1)写成

$$S_u = \frac{\Delta U}{\Delta Z} \quad (2)$$

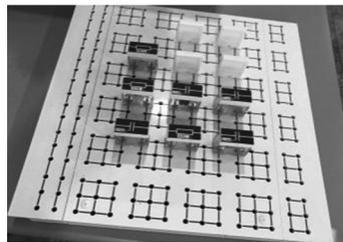
以式(2)作为测量利用两位半数字毫伏表作为平衡指示器,通过改变电桥臂阻抗来研究交流电桥的灵敏度.

2.2 实验方法及仪器

实验选用串联电容电桥研究交流电桥灵敏度特性,实物如图2所示.



(a)



(b)

图2 实验仪器实物图

实验装置是某仪器制造有限公司生产的型号为DH-ADB-A型交流电桥综合实验仪.选择数字电路板1块、电容器2个、变阻箱3个和定值电阻1个进行实验.

按照图3所示进行电路连接,电源频率取1000 Hz;输出电压5 V,并保持不变. R_a 取100 Ω ,定值 R_x 取99.94 Ω , C_n 取1.122 μF , C_x 取4.247 μF .调节可变电阻 R_b 和 R_n 使电桥达到平衡.然后,改变变阻箱 R_n 的值,使平衡指示器有最小改变量,记录 R_n 改变量 ΔR 和平衡指示器示值 ΔU ,再在等臂率上增加 R_n 值,测量15组 ΔR 和 ΔU 的值.

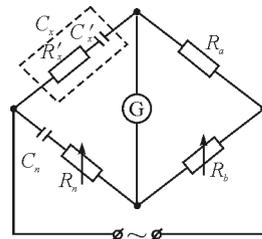


图3 串联电容电桥实验电路图

依次分别取 R_a 的值为200 Ω , 300 Ω , 400 Ω , 500 Ω , 重复上述实验步骤.注意,在调节电桥平衡时,可先固定 R_n 的值不变,调节 R_b 的值,当平衡指示器的值不再变小时微调 R_n 的值,可以使电桥较快达到平衡.

利用实验得到的 R_n 改变量 ΔR 和平衡指示器示值 ΔU 绘制 $\Delta U - \Delta R$ 曲线,斜率为电桥相对灵敏度,即 $S_u = \frac{\Delta U}{\Delta R}$.

3 实验结果和分析

当 $R_a = 100 \Omega$ 时,调节电桥平衡,其中 $R_b = 444 \Omega$, $R_n = 406 \Omega$, R_n 阻抗变化量 ΔR 与毫伏表变化量

ΔU 实验数据如表 1 所示.

表 1 当 $R_b = 444 \Omega, R_n = 406 \Omega$ 时的实验数据

$\Delta R/\Omega$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta U/\text{mV}$	0.03	0.06	0.09	0.13	0.17	0.21	0.25	0.28
$\Delta R/\Omega$	9	10	11	12	13	14	15	
$\Delta U/\text{mV}$	0.31	0.35	0.39	0.43	0.46	0.50	0.54	

根据表 3 数据利用 Excel 软件拟合可得到图 4.

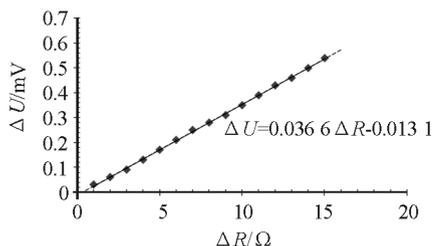


图 4 R_a 为 100Ω 时, $\Delta U - \Delta R$ 曲线

图中方形点代表 R_n 每增加 1Ω 所对应的 ΔU 的值, 虚线代表电桥的灵敏度(以下图 5 ~ 8 如是). 图 4 表明交流电桥灵敏度与其阻抗变化呈线性关系. 将曲线进行线性拟合得到数学表达式 $\Delta U = 0.0366\Delta R - 0.0131$, 斜率表示电桥相对灵敏度大小为 0.0366 , 当 ΔR 为零时, ΔU 的值为 -0.0131 说明电桥电路存在一定的系统误差, 但是在实验要求的系统误差允许范围之内, 可以忽略.

同理, 当 $R_a = 200 \Omega$ 时, 调节电桥平衡. 其中 $R_b = 863 \Omega, R_n = 433 \Omega, R_n$ 阻抗变化量 ΔR 与毫伏表变化量 ΔU 实验数据如表 2 所示.

表 2 当 $R_b = 863 \Omega, R_n = 433 \Omega$ 时的实验数据

$\Delta R/\Omega$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta U/\text{mV}$	0.02	0.04	0.06	0.09	0.11	0.14	0.16	0.19
$\Delta R/\Omega$	9	10	11	12	13	14	15	
$\Delta U/\text{mV}$	0.21	0.24	0.27	0.29	0.32	0.35	0.38	

根据表 2 得图 5.

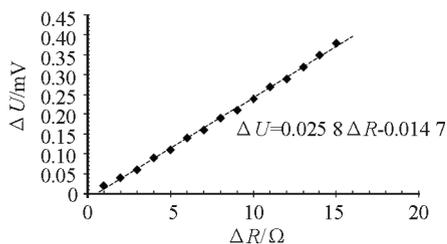


图 5 R_a 为 200Ω 时, $\Delta U - \Delta R$ 曲线

由图 5 可以看出, $\Delta U - \Delta R$ 呈线性关系, 表达式为 $\Delta U = 0.0258\Delta R - 0.0147$, 其中电桥相对灵敏度大小为 0.0258 .

当 $R_a = 300 \Omega$ 时, 调节电桥平衡, 其中 $R_b = 1268 \Omega, R_n = 404 \Omega; R_n$ 阻抗变化量 ΔR 与毫伏表变化量 ΔU 实验数据如表 3 所示.

表 3 当 $R_b = 1268 \Omega, R_n = 404 \Omega$ 时的实验数据

$\Delta R/\Omega$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta U/\text{mV}$	0.02	0.05	0.07	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20
$\Delta R/\Omega$	9	10	11	12	13	14	15	
$\Delta U/\text{mV}$	0.23	0.25	0.28	0.31	0.33	0.36	0.39	

根据表 3 得图 6.

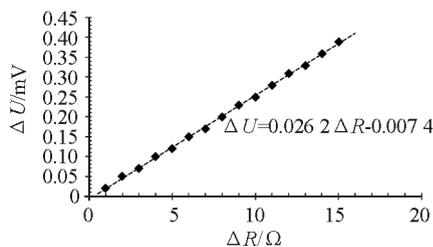


图 6 R_a 为 300Ω 时, $\Delta U - \Delta R$ 曲线图

由图 6 可以看出, $\Delta U - \Delta R$ 呈线性关系, 将曲线图进行拟合得出曲线表达式 $\Delta U = 0.0262\Delta R - 0.0074$, 斜率大小 0.0262 为电桥相对灵敏度.

当 $R_a = 400 \Omega$ 时, 调节电桥平衡, 其中 $R_b = 1629 \Omega, R_n = 402 \Omega, R_n$ 阻抗变化量 ΔR 与毫伏表变化量 ΔU 实验数据如表 4 所示.

表 4 当 $R_b = 1629 \Omega, R_n = 402 \Omega$ 时的实验数据

$\Delta R/\Omega$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta U/\text{mV}$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18
$\Delta R/\Omega$	9	10	11	12	13	14	15	
$\Delta U/\text{mV}$	0.20	0.22	0.25	0.28	0.30	0.32	0.35	

根据表 4 得图 7.

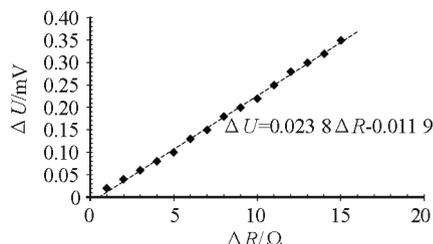


图 7 R_a 为 400Ω 时, $\Delta U - \Delta R$ 曲线图

由图7可以看出, $\Delta U - \Delta R$ 呈线性关系, 交流电桥灵敏度对曲线进行拟合得到数学表达式 $\Delta U = 0.0238\Delta R - 0.0119$, 表明电桥相对灵敏度大小为 0.0238. 图4~7中, 均出现拟合数据点与拟合直线有小范围的波动, 说明受到 R_a 桥臂的变化的影响.

当 $R_a = 500 \Omega$ 时, 调节电桥平衡, 其中 $R_b = 2395 \Omega$, $R_n = 442 \Omega$, R_n 阻抗变化量 ΔR 与毫伏表变化量 ΔU 实验数据如表5所示.

表5 当 $R_b = 2395 \Omega$, $R_n = 442 \Omega$ 时的实验数据

$\Delta R/\Omega$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta U/\text{mV}$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16
$\Delta R/\Omega$	9	10	11	12	13	14	15	
$\Delta U/\text{mV}$	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	

根据表5得出图8.

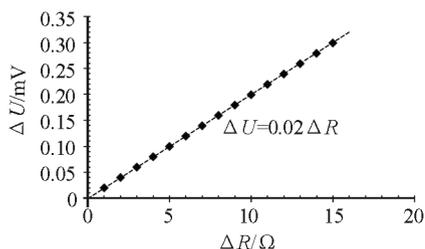


图8 R_a 为 500Ω 时, $\Delta U - \Delta R$ 曲线图

由图8可以看出, $\Delta U - \Delta R$ 呈良好的线性关系, 将曲线拟合的数学表达式为 $\Delta U = 0.02\Delta R$, 表明电桥相对灵敏度大小为 0.02. 数据点与曲线完全吻合说明系统误差在 R_a 取 500Ω 时为最佳匹配值.

以 R_a 作为自变量, 相对灵敏度 S_u 为变量绘制灵敏度变化趋势图如图9所示.

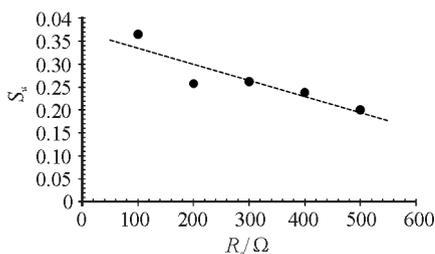


图9 交流电桥相对灵敏度变化趋势图

图9中黑点表示每一个 R_a 对应的相对灵敏度, 虚线是其趋势线. 由图9可以看出, 随着 R_a 阻值的增大, 电桥灵敏度呈下降趋势; 但是, 灵敏度高时受到

电桥系统误差影响较大出现测量的数据波动, 主要原因是平衡指示器两端电压相位变化影响了灵敏度的测量.

4 结论

交流电桥灵敏度是衡量电桥整体性能的物理量, 主要受平衡指示器(检流计)精度和电桥臂阻抗限制. 本实验简化灵敏度测量公式, 利用串联电容交流电桥研究了电桥臂阻抗对提升电桥灵敏度的作用. 得出如下结论:

(1) 当平衡指示器精度一定时, 电桥臂阻抗是影响交流电桥灵敏度的主要因素. 通过改变电桥臂阻抗可以有效地提高电桥灵敏度. 在学生实验中经常出现由于电桥臂阻抗设置不合理, 导致平衡指示器响应程度下降, 实验结果不理想的情况.

(2) 在电桥电路确定的情况下, 调节电桥平衡后, 通过改变待测电桥臂阻抗 ΔR , 测量平衡指示器示数 ΔU , 绘制 $\Delta U - \Delta R$ 图线, 通过斜率能够得出灵敏度相对值. 相对灵敏度与实验理论相吻合. 该方法实验原理清楚, 操作方便, 是研究交流电桥灵敏度一种可行方法. 可以作为综合设计性实验培养学生分析问题, 数据处理的能力.

(3) 随着侧臂 R_a 阻值的增大, 待测电桥臂 R_n 的相对改变量与毫伏表示数变化量的曲线的斜率在减小. 说明在电桥平衡条件下通过减小侧臂 R_a 阻抗可以提高相对灵敏度, 为交流电桥的调节和灵敏度研究提供实验经验.

(4) 本实验通过控制变量的方法研究了交流电桥灵敏度特征. 适合作为低年级大学物理实验综合设计性实验项目进行开展, 可以培养学生综合设计能力和数值分析能力.

总之, 作为大学物理实验的交流电桥涉及物理量多, 理论较为复杂, 对学生实验操作和技能要求高. 是培养创新拔尖人才的高阶性实验项目, 因此, 被广泛关注.

参考文献

- 祝昆,杨文韬,郑志荣,等.大学物理实验[M].北京:机械工业出版社,2017.8
- 王新礼.交流电桥灵敏度问题的探讨[J].吉林化工学院学报,2005(02):68~70
- 李尧,张学毕,张利云.交流电桥的灵敏度和抗干扰问题的探讨[J].大学物理实验,2004(01):26~27,8
- 杨振萍,潘学军.交流电桥臂的配置与灵敏度[J].四川师范大学学报(自然科学版),1999(02):92~96
- 朱奕丹.电压灵敏度不同的两种交流电桥电路[J].电工教学,1997(02):50~52
- 赵欢,董巧燕,闫海涛,等.交流电桥测量精度和灵敏度的分析研究[J].大学物理实验,2018,31(06):51~55
- 刘昶丁,柳纪虎,舒方平.交流电桥灵敏度的推论与实验验证[J].大学物理,1990(08):28~31

Experimental Study of Designability on the Sensitivity Characteristics of AC Bridge

Duan Zhengrong Wang Liya Zhu Kun Sun Diyong

(School of physics and electrical engineering, Liupanshui normal university, Guizhou, Liupanshui 553000)

Abstract: The sensitivity of series capacitor AC Bridge is studied by control variable method. The experimental results show that the sensitivity of AC Bridge can be improved by changing the impedance of bridge arm. This method has clear physical significance, simple and feasible operation, and provides a reference route for the sensitivity experiment of AC Bridge.

Key words: physics experiments; AC bridge; sensitivity; series capacitor AC bridge

(上接第79页)

(4) 科学思维素养的单元备课

科学思维是从物理学视角对客观事物的本质属性、内在规律及相互关系的认识方式;是基于经验事实构建物理模型的抽象概括过程。

本单元的科学探究得到了光的3种传播规律,而3种传播规律在各种应用中都能成像,所以,对各种像的分析就很有价值。

如果学生能区分生活中的各种像的种类并能解释清楚,这就说明学生具备了物理观念,对于生活中的现象在头脑中完成物理建模,将现象转化为物理模型,进而用所学的知识去分析成因,科学思维能力就得到了训练和提升,完成过程与方法目标。

(5) 评价反馈(形式多样)

- 1) 常规:课堂反馈,课后作业。
- 2) 自制学具:针孔相机、潜望镜、万花筒等。

3) 研究性学习:镜子发展史、望远镜史。

3 反思和感悟

学生能力具有内隐性和渐进性,教师在课时教学中不易察觉学生能力的变化。而单元教学具有一定的时间跨度,可整体架构学生能力培养体系,从而在科学内容的学习和科学探究的组织中体现其能力发展的螺旋式上升轨迹。即

核心素养 — 课程标准 — 单元设计 — 学习评价

在此基本链环中,单元设计发挥着让课标要求和学科核心素养“落地”的关键作用。

参考文献

- 1 宋晓萌.单元学习设计的实践反思.江苏教育,2019(30):20~22
- 2 付荣兴.第三章“透镜及其应用”教材介绍.中学物理教学参考,2003,32(6):34~36