

基于非平衡电桥的电子秤设计实验*

姚璐 相国涛 唐笑

(重庆邮电大学 理学院 重庆 400065)

摘要: 基于非平衡电桥设计电子秤, 以电阻应变片为可变电阻, 利用了电阻应变片的应变效应, 电桥电路的输出电压随可变电阻阻值变化, 通过建立标准砝码质量和电桥电路输出电压的关系, 即可实现对待测物体质量进行准确称量的目标。此外, 通过对比单臂电桥、双臂半桥和四臂全桥三种非平衡电桥电子秤的测量结果, 讨论了非平衡电桥工作模式对称量结果准确性的影响。本实验能够帮助学生建立采用非平衡电桥测量非电量的设计思路, 引导学生运用基础物理知识解决实际问题, 对培养学生的创新应用能力具有重要意义。

关键词: 非平衡电桥 应变效应 质量 机械应力

中图分类号: G642.3 **文献标识码:** A

DOI: 10.12218/j.issn.2095-4743.2022.30.118

质量是物体的基本物理属性之一。在测量领域中, 质量测量历史悠久。早在新石器时代, 古埃及人就掌握了悬挂式的双盘秤称量方法。从古至今, 称作为一种重要的衡器, 在人类的日常生活、工农业生产及科学研究中, 一直发挥着不可替代的作用。人类历史上也先后出现了杆秤、天平、案秤等不同的称重器具。随着商业和工业技术的发展, 人们对称量的范围和精度逐渐有了更高的要求, 电子秤应运而生。电子秤以其反应速度快、测量范围宽、操作简便等特点, 被广泛应用于农、工、商等各个领域^[1]。

本文基于非平衡电桥电路, 设计采用电阻应变片制作电子秤。应变片在外力作用下发生机械形变, 导致其电阻值变化。电阻应变传感器能将物体的机械应力变化转换为电阻变化, 通常与相应的测量电路组成测力、测压、称重、测温等测试系统^[2-4]。非平衡电桥电路作为大学物理实验中的一项基本教学内容, 在力、热、光、电等领域均有涉及。但在实际教学实践中, 学生仍存在对非平衡电桥原理认识不透彻, 无法掌握非平衡电桥在测量非电量的过程中的优势和特点, 缺乏“举一反三”的能力^[5-6]。因此, 本文以生产生活中常见的电子秤为例, 基于非平衡电桥原理进行设计, 通过直观简洁的物体质量称量过程, 由浅入深地使学生掌握综合运用基础理论解决实际应用问题的能力。

一、基本原理

1. 应变效应

电阻应变片是一种常见的电气测量元件, 能够在静态区域反应力、负载、扭矩等变化, 通常分为半导体应变片和金

属应变片两种。半导体应变片的灵敏度系数高于金属应变片, 而稳定性较后者更低, 本实验设计选用金属应变片。金属应变片基于应变效应实现其功能: 当金属材料在外力作用下产生机械变形时, 其电阻值相应地发生变化, 如式(1):

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (1)$$

其中, $\frac{\Delta R}{R}$ 为电阻丝电阻相对变化, K 为应变灵敏系数, $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ 为电阻丝长度相对变化。

2. 电桥电路

电桥一般由四个电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 构成四边形电路, 各支路称为电桥的“臂”, a, c 结点之间接入电源 U_i , 另一对结点 b, d 间电压差作为输出电压 U_o 端, 如图1所示。作为比较法测量电路, 电桥将待测电阻、电容、电感等物理量与相应的标准量比较以获得测量结果, 具有测量精度高, 易操作的特点。当输出电压 $U_o=0$ 时, 电桥达到“平衡”, 反之为电桥“不平衡”状态。电桥在相对桥臂电阻乘积相等时平衡, 即 $R_1R_3=R_2R_4$ 。

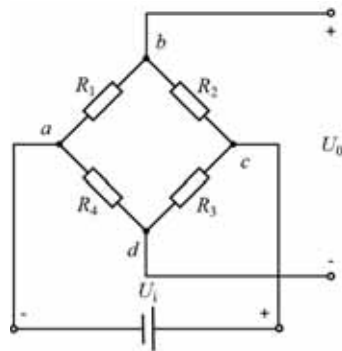


图1 电桥电路

*基金项目: 1.基于基础物理实验的课程思政建设与协同育人实践研究, 重庆邮电大学2022年校级教改项目(XJG22231)。2.基础物理实验, 重庆邮电大学2022年校级课程思政示范建设项目(XKCSZ2226)。

3. 非平衡电桥

非平衡电桥是指电桥状态初次从平衡变为不平衡时,通过输出电压可间接获得电桥中电阻阻值的变化,从而反映出所测连续变化的物理量。对于非平衡电桥的输出电压,可用式(2)描述:

$$U_o = U_b - U_d = U_i \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = U_i \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2)$$

对于等臂电桥 ($R_1=R_2=R_3=R_4=R$) 若电桥相邻电阻值变化趋势相同,则输出电压为0;若相邻电阻的阻值变化趋势相反,则产生输出电压:

$$U_o = U_i \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (3)$$

其中, ΔR_i 为电桥中电阻阻值的变化量。当 $\Delta R_i < R$ 时,式(3)中的高阶项可以忽略,得到线性输出电压:

$$U_o = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (4)$$

此时,非线性误差为:

$$Y = \left| \frac{U_o - U'_o}{U_o} \right| \times 100\% = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) \times 100\% \quad (5)$$

二、电子秤设计实验基本思路

非平衡电桥在科学研究和工程实践中使用广泛,却是学生在电学电路学习中的一个难点。为帮助学生深入理解非平衡电桥的工作原理,本实验以生活学习常涉及的称重问题为例,旨在设计一个基于非平衡电桥的电子秤,培养学生的综合物理实验素养,设计思路如图2所示。金属应变片电阻变化范围很小,使用万用表测量电阻应变片的阻值变化,会造成很大误差,因此需要使用非平衡电桥测量电阻的微小变化,将 $\frac{\Delta R}{R}$ 转换为输出电压 U_o 。电桥的作用是完成电阻到电压的比例变化,电桥的输出电压反映了相应的受力状况。

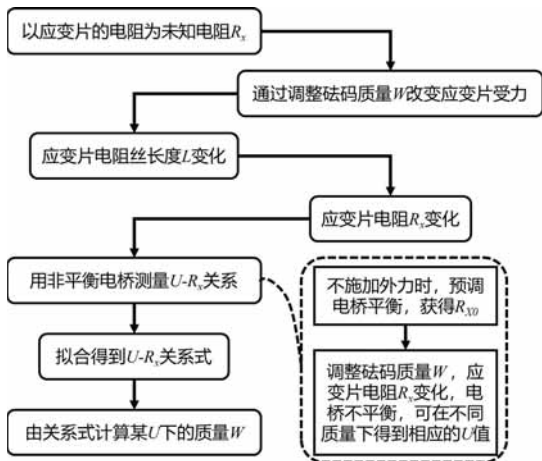


图2 电子秤设计实验基本思路

非平衡电桥根据工作方式可分为单臂电桥、双臂半桥和四臂全桥,其稳定性和灵敏度均有所不同。本实验侧重基础理论知识与实际应用的结合,要求学生在充分掌握基础电学知识的前提下,灵活处理实际应用问题,根据测量对象的变化范围,恰当选择非平衡电桥的工作方式。同时,在实际应用设计中,学生往往在选择非平衡电桥工作方式时存在误区。而在实验过程中,不同工作方式的非平衡电桥所反映的电压和电阻关系是可以直接观察的,这将有利于学生对非平衡电桥工作方式选择的认识,因此有必要针对电子秤设计实验,对不同工作方式的非平衡电桥进行分析。

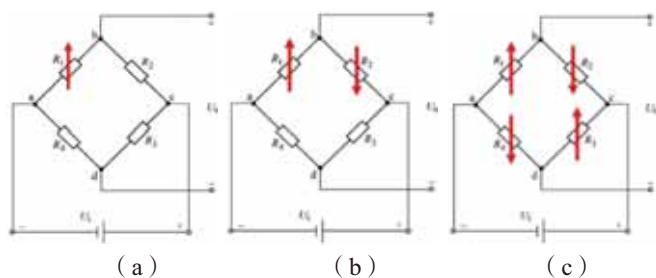


图3 非平衡电桥的三种工作方式 (a) 单臂电桥 (b) 双臂半桥

(c) 四臂全桥

(1) 单臂电桥:四个桥臂中,仅有一个可变电阻。 R_1 为电阻应变片, R_2 、 R_3 、 R_4 为固定电阻,如图3(a)所示。

单臂电桥的输出电压为:

$$U_o = \frac{U_i \Delta R_1}{4 R_1} = \frac{U_i}{4} K \varepsilon_1 \quad (6)$$

非线性误差:

$$Y = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R} \times 100\% \quad (7)$$

(2) 双臂半桥:相邻电阻 R_1 、 R_2 为电阻应变片, R_3 、 R_4 为固定电阻,如图3(b)所示。应变片 R_1 、 R_2 感受到的应变 ε_1 、 ε_2 相反,产生的电阻增量正负号相反($\Delta R_1 = -\Delta R_2$)。双臂半桥电路的输出电压 U_o 会成倍增大:

$$U_o = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) = \frac{U_i \Delta R}{2 R} = \frac{U_i}{4} K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (8)$$

非线性误差:

$$Y = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} \right) \times 100\% = 0 \quad (9)$$

(3) 四臂全桥:全桥的四个电阻均为电阻应变片,如图3(c)所示。相邻桥臂接入极性相反的电阻应变片,则 R_1 - R_4

产生的电阻增量正负号相间。

四臂全桥电路的输出电压 U_0 进一步增大:

$$U_o = U_i \frac{\Delta R}{R} \quad (10)$$

非线性误差

$$Y = O \quad (11)$$

由此可见,非平衡电桥的三种工作方式中,单臂电桥的工作输出信号最小,双臂半桥输出信号是单臂电桥的两倍,四臂全桥输出信号是单臂电桥的四倍。此外,四臂全桥灵敏度最高、性能最好,其次是双臂半桥,灵敏度最低的是单臂电桥,线性性和稳定性也是三者中最差的。

对于非平衡等臂电桥中所使用的应变片,其受力方向的不同会影响其形变量的符号,从式(4)中可以看出,如果相邻应变片受力后变化趋势相同,则电阻变化量就会相互抵消,导致输出电压为零,不能得到准确的测量数据。由于电阻应变片受力发生形变而影响电阻变化的过程无法直接观察,因此,学生在进行实验时往往不能深刻认识电阻应变片在电桥电路中作为可变电阻的作用,从而在实验操作中出现错误操作。因此,实验中不能够忽略电阻应变片的方向性,应保证相邻应变片的变化趋势相反。

此外,由于非平衡电桥中实际所使用的四个电阻的比例通常是不可能完全相同的,在电桥中设置“调零电位器(RP)”,如图4所示,从而保证电桥电路中四个电阻的比例可达到完全相同是非常有必要的。调零电位器在电桥中相当于一个可变电阻,通过调节调零电位器,可将RP电阻视为由 R' 和 R'' 两部分组成,当 R' 和 R'' 分别与 R_1 和 R_2 并联后构成 R_1' 和 R_2' 两个等效电阻时,可通过调节其大小,最终实现 $R_1'/R_2' = R_4/R_3$ 。电桥趋于平衡, U_0 被预调到零位,这一过程称为调零。 R_5 的作用是减小调节范围,也称为限流电阻。

三、实验结果及讨论

采用非平衡电桥的三种工作方式设计电子秤,并记录电压随质量变化的数据。表1为采用三种不同工作模式非平衡电桥电子秤的称量结果。其中,单臂电桥电路中, $R_2=R_3=R_4=35\ \Omega$;双臂半桥电路中, $R_3=R_4=35\ \Omega$ 。在室温条件下预调电桥平衡后,所有实验数据均为测量电阻应变片在受力增加和减少过程中非平衡电桥输出电压的平均值。

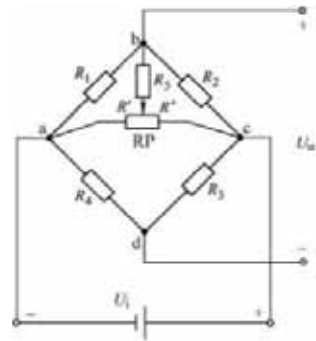


图4 非平衡电桥的调零电路

表1 单臂电桥电子秤输出电压

W (g)	0	20	40	60	80	100	120
U_1 (mV)	0.05	9.20	18.20	27.10	36.20	45.10	54.15
U_2 (mV)	-0.05	17.40	35.15	52.90	70.75	88.35	106.2
U_4 (mV)	-0.05	34.80	70.15	105.70	140.80	176.30	211.55

采用最小二乘法对实验数据进行线性拟合,可以得到基于三种不同工作模式的非平衡电桥电子秤的质量与输出电压(W-U')的关系,图5为三种工作模式下非平衡电桥电子秤的实验数据和线性拟合曲线。其中:(1)单臂电桥: $U_1' = 0.4502W + 0.1321$; (2)双臂半桥: $U_2' = 0.8862W - 0.2125$; (3)四臂全桥: $U_4' = 1.7651W - 0.2982$ 。

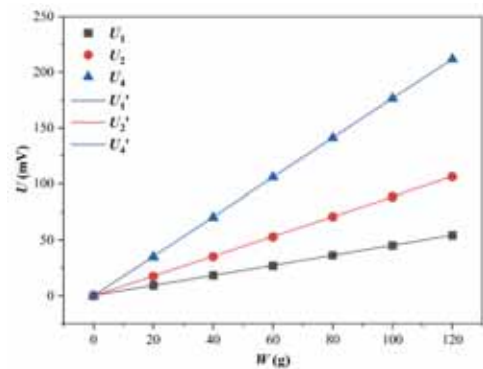


图5 三种工作模式下非平衡电桥电子秤的实验数据和线性拟合结果

(其中 U_1 、 U_2 、 U_4 分别代表实验测量数据, U_1' 、 U_2' 、 U_4' 分别代表线性拟合结果)

对三种工作模式的实验数据和线性拟合结果进行数据处理,依次计算不同质量点对应电压的相对误差,可以发现,无论是单臂电桥、双臂半桥、四臂全桥电子秤在施加砝码质量发生改变后,其输出电压的相对误差均在1%以内,且相对误差随着施加砝码质量的增加逐渐减小。说明非平衡电桥电子秤在称量过程中,对于大质量的物体,测量结果与其真实值更为接近,称量结果更为准确。而对于质量较小的物体,

则称量结果与真实值存在一定差距。但考虑到测量误差均在1%以内,且在实验教学中,旨在帮助学生认清不同工作模式非平衡电桥输出电压的变化规律,并不追求在整个称量范围内的最高精确度,因此可以采用任一种工作模式的非平衡电桥进行电子秤设计。

表4 三种工作模式下非平衡电桥电子秤

W (g)	0	20	40	60	80	100	120
U_1' (mV)	0.13	9.14	18.14	27.14	36.15	45.15	54.17
U_2' (mV)	-0.21	17.51	35.23	52.96	70.68	88.40	106.22
U_4' (mV)	-0.30	35.00	70.31	105.61	140.91	176.21	211.51
$\Delta 1$ (%)	62.16	0.70	0.33	0.16	0.15	0.11	0.03
$\Delta 2$ (%)	76.47	0.63	0.24	0.11	0.10	0.06	0.02
$\Delta 4$ (%)	83.23	0.58	0.22	0.09	0.08	0.05	0.02

此外,对比三种工作模式非平衡电桥电子秤测量结果的相对误差可以发现,当开始称量物体质量时,三种电子秤在称量相同质量的物体时,测量的相对误差按单臂电桥、双臂半桥和四臂全桥三种工作模式依次降低。并且双臂半桥电子秤的测量误差较单臂电桥有显著下降,四臂全桥较双臂半桥虽有进一步降低,但降低幅度较小。由此可见,采用四臂全桥非平衡电桥设计电子秤不仅具有最高的灵敏度,在由低至高的称量范围内,测量的准确性也是最好的。

四、总结

非平衡电桥作为一种基本电路,是大学物理电学实验教学的常例,在考查学生对相关电学基础理论的掌握和实际操作方面具有重要作用。本文从生活中数见不鲜的物体质量称量问题出发,在对非平衡电桥电路特点进行介绍的基础上,详细阐述了基于非平衡电桥进行电子秤设计的思路,重点分析了单臂电桥、双臂半桥和四臂全桥三种典型工作模式下非平衡电桥输出电压的特征。同时,通过在实验电子秤上施加

不同质量的砝码,获得了施加砝码质量与非平衡电桥输出电压(W-U)在三种不同工作模式下的对应关系。并通过测量获得实验数据进行处理,讨论了不同工作模式非平衡电桥对所设计的电子秤称量准确性的影响。从实验的设计思路因势利导,加深学生对实验原理的内在联系的认识,帮助学生在掌握基本物理知识的同时,学会运用知识解决实际问题,并能够结合实际应用场景优化设计,实现从理论到实验,从实验到实践,从实践到创新的学习目标。

参考文献

- [1]梁小洁,张薇,罗重阳,等.基于单片机的电子秤设计[J].电子设计工程,2018,26(4):4.
- [2]魏萌,毛佳琪,王晋莹,等.基于非平衡电桥原理的太阳能双轴跟踪系统的设计[J].大学物理实验,2021,34(3):68.
- [3]冯秋菊,石博,李昀铮,等.单根Sb掺杂ZnO微米线非平衡电桥式气敏传感器的制作与性能[J].物理学报,2020,69(3):288.
- [4]鲁侣峰.非平衡电桥原理的简易水质检测仪[J].物理通报,2022(6):5.
- [5]王立英,程丽艳,冯列峰,等.基础实验试题D:电桥及其应用[J].物理实验,2021,41(11):25.
- [6]姚春贤.物理竞赛中含有非平衡电桥的复杂电路问题研究[J].物理教师,2019,40(1):94.

作者简介

姚璐(1990—),女,重庆邮电大学理学院讲师,博士,主要从事大学物理实验、基础物理实验教学和催化功能材料研究工作。