



电表示零法及其应用

张伟娟

(石家庄市第一中学 河北 石家庄 050011)

(收稿日期:2021-08-24)

摘要:在电学实验中,电表对电路结构会产生影响,从而导致系统误差.而电表示零法则是消除测量过程中系统误差的一种好方法.电桥电路、电位差计等都是用这种方法来消除系统误差.

关键词:误差 示零法 巧妙 补偿

物理实验中对某些物理量的测量,由于实验仪器、实验设计方案以及实验条件等因素的局限,测量结果与真实值相比会存在系统误差.为了消除系统误差,在测量过程中通过调节待测量与已知的标准量对指示仪表的作用,使系统处于平衡(或补偿)状态,当指示仪表示零时,待测量与标准量具有确定的关系,这就是示零法.在力学中,天平就是利用示零法来测量物体的质量.而在电学中,电桥电路、电位差计等都是用这种方法来消除系统误差.

1 惠斯通电桥的原理

如图1所示为惠斯通电桥的原理图,定值电阻 R_1 和 R_2 、可变电阻 R_0 、待测电阻 R_x 这4个电阻构成电桥的4个“臂”,其中 R_1 和 R_2 称为比例臂, R_x 为待测臂, R_0 为比较臂.检流计 G 连通的 CD 称为“桥”.

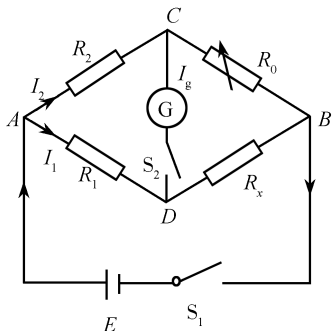


图1 惠斯通电桥原理图

当 AB 端加上直流电源时,桥上的检流计用来检测其间有无电流以及比较“桥”两端(即 C, D 端)的电势高低.将电源接通后,当 C 和 D 两点之间的电势不相等时,桥路中的电流 $I_g \neq 0$,此时检流计的指针

发生偏转,调整 R_0 ,当 C 和 D 两点之间的电势相等时,检流计指针指零,我们称电桥处于平衡状态.

电桥平衡时, $U_{AC} = U_{AD}, U_{BC} = U_{BD}$,即 $I_1 R_1 = I_2 R_2, I_x R_x = I_0 R_0$.因为 G 中无电流,所以, $I_1 = I_x, I_2 = I_0$,上列两式相除,得

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

式(1)即为惠斯通电桥的平衡方程.根据电桥的平衡方程, R_x 的计算式为

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 = K R_0 \quad (2)$$

式(2)为平衡电桥测量电阻的原理,其中 $K = \frac{R_1}{R_2}$ 称为比率值,这也是 R_1 和 R_2 称为比例臂的原因.

由于电桥平衡需由检流计示零表示,故电桥测量方法又称为示零法.利用惠斯通电桥测电阻,从根本上消除了采用伏安法测电阻时由于电表内阻的原因带来的系统误差,只要检流计有足够的灵敏度来反映桥路电流的变化,利用电桥的平衡原理测电阻的准确度可以很高.由于测量准确度高且结构简单,随着科学技术的发展,惠斯通电桥也被广泛地应用于实际生活中——在精确度更高的称重传感器、医学诊断和检测等仪器中发挥着重要作用.

2 电位差计的原理

如图2所示为线性电位差计的工作原理图,其中电源 E ,限流电阻 R ,粗细均匀电阻丝 AB 串联成的闭合回路为辅助工作回路,待测电源 E_x 、标准电

源 E_x 和检流计 G 组成补偿电路. 接通 S_1 后, 有电流 I 通过电阻丝 AB , 并在电阻丝上产生电势降落 IR . 如果再将 S_2 接到接触点 1, 可能出现 3 种情况:

(1) 当 $E_x > U_{CD}$ 时, G 中有自右向左流动的电流(指针偏向一侧).

(2) 当 $E_x < U_{CD}$ 时, G 中有自左向右流动的电流(指针偏向另一侧).

(3) 当 $E_x = U_{CD}$ 时, G 中无电流, 指针不偏转. 我们将这种情况称为电位差计处于补偿状态, 或者说待测电路得到了补偿.

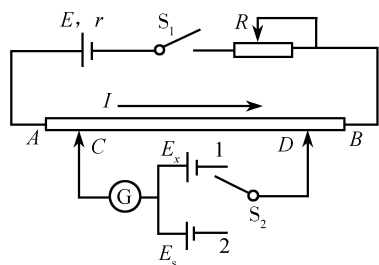


图2 线性电位差计原理图

在补偿状态时, $E_x = IR_{CD}$. 设每单位长度电阻丝的电阻为 r_0 , CD 段电阻丝的长度为 L_x , 于是

$$E_x = Ir_0L_x \quad (3)$$

将限流电阻 R 的滑动端固定, 即保持工作电流 I 不变, 再将 S_2 接到接触点 2, 相当于一个电动势为 E_s 的标准电池替换了图中的 E_x , 适当地将 C 和 D 的位置调至 C' 和 D' , 同样可使检流计 G 的指针不偏转, 达到补偿状态. 设这时 $C'D'$ 段电阻丝的长度为 L_s , 则

$$E_s = Ir_0L_s \quad (4)$$

将式(3)和式(4)相比得到

$$E_x = \frac{L_x}{L_s}E_s \quad (5)$$

式(5)表明, 待测电源的电动势 E_x 可用标准电池的电动势 E_s 和在同一工作电流下电位差计处于补偿状态时测得的 L_x 和 L_s 来确定.

用电位差计测量时, 补偿回路中电流为零, 可测出电路被测两端的开路电压, 也就是电源电动势. 同理, 如果要测任一电路两点间电位差, 只需将待测两点接入补偿回路代替 E_x , 即可测出电位差.

电位差计是电磁学测量中用来直接精密测量电动势或电位差的主要仪器之一. 它不像电压表那样需要从待测电路中分流, 因而不干扰待测电路, 测量结果仅仅依赖准确度极高的标准电池、标准电阻和高灵敏度的检流计. 它的准确度可以达到 0.01% 或更高, 是精密测量中应用最广泛的仪器之一.

早在 19 世纪 40 年代初, 一些科学家开始尝试用补偿法来测量电源的电动势. 大约在 1874 年, 法国科学家 J. S. HcariPellat 设计出原理同图 2 的电位差计^[1]. 时至今日, 其巧妙的构思、深邃的思想, 仍在熠熠生辉!

3 电表示零法在物理实验中的应用

实验在高考中是以笔试的形式出现, 但是高考题却力图通过创新设计的实验来鉴别考生物理核心素养的水平. 这类试题要求考生能深刻理解物理概念和规律, 并能灵活地将学过的实验原理迁移到新的背景中. 下面这道实验题就是把电表的示零法应用到了测量电源的电动势和内阻的实验中, 以考查考生的科学探究、科学思维等核心素养.

【例题】 采用伏安法测量电源电动势 E 和内阻 r 时, 由于电表的内阻因素带来了实验的系统误差, 为消除电表内阻的影响, 某研究性学习小组对此进行了探究实验, 设计出如图 3 所示的测量电源电动势 E 和内电阻 r 的电路, E' 是辅助电源, A, B 两点间有一灵敏电流计 G .

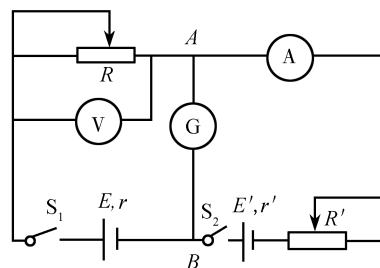


图3 研究小组设计的电路图

请你补充实验步骤:

(1) 闭合开关 S_1 和 S_2 , 调节 R 和 R' 使得灵敏电流计 G 的示数为零, 这时 A, B 两点的电势 φ_A, φ_B 的关系是 φ_A _____ φ_B (选填“大于”“小于”或“等于”), 读出电流表 A 和电压表 V 的示数 I_1 和 U_1 , 其中 I_1 _____ (选填“大于”“小于”或“等于”) 通过电源 E 的电流, U_1 _____ (选填“大于”“小于”或“等于”) 电源 E 两端的电压.

(2) 改变滑动变阻器 R 和 R' 的阻值, 重新使得灵敏电流计 G 的示数为零, 读出电流表 A 和电压表 V 的示数 I_2 和 U_2 .

(3) 由上述步骤中测出的物理量, 可以得出电动势 E 表达式为 _____, 内阻 r 的表达式 _____.

(4) 该实验中 $E_{\text{测}}$ _____ $E_{\text{真}}$ (选填“大于”“小于”或“等于”), $r_{\text{测}}$ _____ $r_{\text{真}}$ (选填“大于”“小

于”或“等于”).

解析:

(1) 闭合开关 S_1 和 S_2 , 调节 R 和 R' 使得灵敏电流计 G 的示数为零, 则说明 A 和 B 两点的电势 φ_A 和 φ_B 的关系是 φ_A 等于 φ_B , 读出电流表和电压表的示数 I_1 和 U_1 , 电流表测量的是干路上的电流, 故 I_1 等于通过电源 E 的电流. U_1 为电源 E 两端的电压.

(3) 由闭合电路欧姆定律可知.

$$E = U_1 + I_1 r$$

$$E = U_2 + I_2 r$$

联立解得

$$E = \frac{I_1 U_2 - U_1 I_2}{I_1 - I_2}$$

$$r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}$$

(4) 因本实验中所用的电流和电压均是我们需要干路电流及路端电压, 故测得的电动势和内阻都是准确的.

答案: (1) 等于, 等于, 等于; (3) $\frac{I_1 U_2 - U_1 I_2}{I_1 - I_2}$,

$$\frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}; (3) \text{ 等于, 等于.}$$

本题是常规实验基础上改进的创新实验. 用伏安法测量电源电动势和内阻时, 由于电压表的分流或电流表的分压, 测量结果存在系统误差. 而在此题的实验方案中, 应用电表示零法消除了系统误差, 由闭合电路欧姆定律列式求解出电源电动势和内阻的真实值.

一般情况下, 在电学实验中, 我们通过电流表的示数来得到被测支路电流的大小. 而电表示零法的巧妙之处就是要让电表示零, 使电表对电路没有影响, 再通过和标准值进行比较进而得出被测量的大小, 这样操作没有系统误差, 实验设计构思巧妙, 方法简洁、结果准确, 让人叹为观止! 在以实验为主的物理教学中, 我们应该多挖掘这样有价值、有生命力而又极富学科特色的素材, 不断拓宽探究性实验设置的思路, 有意识培养学生的科学探究精神, 提升学生的科学素养.

参考文献

- 曹福军. 电位差计的早期发展史[J]. 唐山师范学院学报, 2006, 28(2): 59~61

(上接第 113 页)

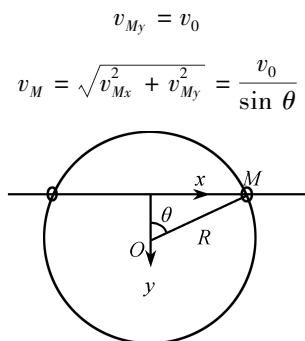


图8 直角坐标系的建立

x 方向的分加速度

$$a_{Mx} = \frac{dv_{Mx}}{dt} = \frac{dv_{Mx}}{dy} \frac{dy}{dt} =$$

$$-v_0 \frac{dv_{Mx}}{dy} = -\frac{R^2 v_0^2}{(R^2 - y^2)^{\frac{3}{2}}} = -\frac{v_0^2}{R \sin^3 \theta}$$

负号表示方向. y 方向的分加速度

$$a_{My} = \frac{dv_{My}}{dt} = 0$$

$$a_M = \sqrt{a_{Mx}^2 + a_{My}^2} = \frac{v_0^2}{R \sin^3 \theta}$$

方向沿杆由 B 指向 A .

3 结束语

求解速度和加速度都是物理力学中常见的一类问题. 本文以两个经典物理问题为例, 依次采用物理竞赛的思想和方法以及采用大学先修物理力学的方法求解, 得到相同的结果. 通过对比分析, 高中物理竞赛的能力要求主要是在利用高中物理的知识来建模求解, 而大学先修物理力学课程对高等数学的要求较高. 对于运动学和力学中的常见问题, 通常都是建立恰当的直角坐标系后, 坐标的变化与位移的变化相对应, 利用对位移(坐标)的一阶导数求出速度, 对速度求导得加速度, 即位移的二阶导数求得加速度. 也就是说对高等数学的能力提出了更高的要求, 特别是导数、数列极限、微积分、微分方程的求解等, 高中教师在指导物理资优生学生提高学科素养时要注意到两者的区别.

参考文献

- 张汉壮. 物理力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016. 35~36
- 张留碗, 李岩松, 俞家新. 物理力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016. 9~10
- 江四喜. 物理竞赛专题精编[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2013. 5