

# 实验方法在系统误差消除中的应用

曹丽丹 倪敏 魏莹 戴维

(上海师范大学数理学院 上海 200234)

(收稿日期:2018-01-29)

**摘要:**实验方法是学习实验要掌握的重要内容,物理学不同实验中不同问题常常可以用相同的实验方法解决,所以对物理实验来说除原理、器材、内容等,方法也是重点.以系统误差消除方法作为实例讲解了实验方法的重要性.

**关键词:**实验方法 系统误差 物理实验

物理学是一门以实验为基础的学科,物理学中每个概念的建立,每个规律的发现都需要坚实的实验基础.物理学中有很多实验,虽然它们实验目的不相同,但是实验中要解决的问题是相同或者相似的,因此在实验中解决问题的方法也就相同或在原理上相似<sup>[1]</sup>.系统误差消除中有很多重要的实验方法.

本文将系统误差消除为例,让学生意识到学习和掌握物理实验方法的重要性.

## 1 相关概念界定

### 1.1 实验方法

物理学实验方法是根据一定的物理现象、物理规律和物理学原理,设置特定的条件,对相关的物理现象或物理量的变化进行显示或测量的方法、手段<sup>[2]</sup>.通过对物理实验方法的掌握,可以培养学生的创造性思维、科学思维,从而提高学生的核心素养.消除或者减弱系统误差可以确保实验的精确性;可以更好地选择实验方案,开阔思路,有利于实验设计和改进.

### 1.2 系统误差

系统误差是指在同一条件下,多次测量同一物理量时,误差的大小和符号均保持不变,或者当条件

改变时,按某一确定的已知规律而变化的误差<sup>[3]</sup>.研究系统误差在于使实验结果更加接近真值,而且可以在这个过程中对实验有新理解和新发现.

## 2 应用案例

系统误差消除有很多方法,现以系统误差消除方法中的补偿法、交换抵消法和对称法为例,阐明在不同实验中,不同问题常常可以用相同的实验方法解决.

### 2.1 补偿法

补偿法指在与原问题和物理规律不相违背的前提下,补偿一些物理条件,完善物理实验设计理论及方法,简化问题或者通过补偿法消除某些非对称影响,从而减少系统误差.

#### (1) 二极管伏安特性实验

在二极管伏安特性实验中,测量电路中电流和电压时,不管采用内接法还是外接法实际测量值都有一定误差,特别是在测量二极管伏安特性时.因为二极管的电阻是非线性的,而且变化范围很广,所以不管采取哪种方法进行测量,都将产生很大的误差.根据图1可以看出电流表读数是 $I_D$ , $I_V$ 和 $I_G$ 三者之和, $I_V$ 和 $I_G$ 会带来系统误差.这时候补偿法就可以

作者简介:曹丽丹(1993-),女,在读研究生.

通讯作者:倪敏(1960-),女,副教授,主要从事物理教育和物理实验研究.

消除电流表带来的系统误差. 为了消除这个误差可以增加补偿电流. 分压器  $R_2$  滑动端通过检流计  $G$  和待测二极管  $R_D$  的一端相接, 调节滑片位置, 选取适当的电压值, 改变电阻  $R_0$  和  $R_1$  的比例, 使检流计  $G$  中无电流流过, 这时电压表与电流表测的值完全等于二极管两端的电压和电流. 有了补偿电流就可以消除电压表或者电流表带来的系统误差, 得到精确的二极管伏安特性曲线图. 这是一个用补偿法消除系统误差的典型实验.

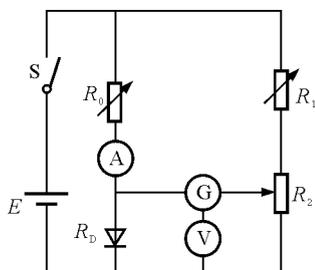


图1 二极管伏安特性实验原理图

## (2) 测量物质比热实验

同样在测混物质比热实验中, 把金属块作为高温物体, 把水作为低温物体, 将二者混合, 测出所需要的物理量, 根据平衡方程

$$Q_{\text{吸}} = Q_{\text{放}} \quad (1)$$

求出金属块比热容

$$c_{\text{金}} = \frac{c_{\text{水}} m_{\text{水}} \Delta t_{\text{水}}}{m_{\text{金}}} \quad (2)$$

这种直接测量的方式测得金属的比热容总比真实值大得多, 相对误差很大. 原因是水吸收的热量  $Q_{\text{吸}}$  总小于金属块放出热量  $Q_{\text{放}}$ . 因为在测量过程中有损失热量(散热损失、量热器小筒及搅动器所吸收的热量)  $Q_{\text{损}}$ , 这部分热量导致这个实验存在很大误差, 也可以采用和上面实验同样的方法(补偿法)去消除该实验误差<sup>[4]</sup>. 则热平衡公式

$$Q_{\text{放}} = Q_{\text{吸}} + \Delta Q_{\text{损}} \quad (3)$$

令金属块比热真实值为  $c'_{\text{金}}$ , 测量值为  $c_{\text{金}}$  则

$$c'_{\text{金}} m_{\text{金}} \Delta t_{\text{金}} = c_{\text{水}} m_{\text{水}} \Delta t_{\text{水}} + \Delta Q_{\text{损}} \quad (4)$$

$$c'_{\text{金}} = c_{\text{金}} + \frac{\Delta Q_{\text{损}}}{m_{\text{金}} t_{\text{金}}} \quad (5)$$

根据公式可以看见测量值小于真实值, 为了消

除这个实验的系统误差. 同样可以采用“补偿法”对实验进行散热修正. 根据上面公式(3)可以得出

$$\Delta Q_{\text{损}} = Q_{\text{放}} - Q_{\text{吸}} \quad (6)$$

用物体向环境散热与向环境吸热相互抵消原理, 使整个混合系统向环境热交换趋于零. 就是控制量热器初温高于室温, 末温低于室温并且中途交换温度相等, 这样就可以使吸热和放热相互补偿, 消除误差. 根据上面两个实例可以看出, 虽然两个实验的实验目的和实验现象都不相同, 但是都采用了补偿法消除误差. 还有很多类似的电学实验可采用补偿方法, 比如在测电源内阻时用电流补偿法消除误差. 学生掌握实验方法就可以自己设计相应实验, 确保物理实验精确性.

## 2.2 交换抵消法

这种方法要求两次测量, 使出现两次符号相反、大小相等的系统误差, 取其平均值作为测量结果, 就可以消除系统误差; 根据系统误差产生的原因, 将某些条件交换, 可消除固定系统误差.

### (1) 霍尔电压测量

霍尔效应原理图如图2所示, 将一个电板放在垂直于它的磁场中. 当有电流通过它在导体板上下两侧会产生一个电势差  $U$ , 这种现象叫霍尔效应. 电压  $U$  称为霍尔电压, 霍尔电压计算公式是

$$U = K \frac{IB}{d} \quad (7)$$

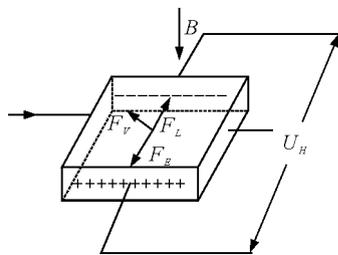


图2 霍尔效应实验原理图

式(7)中比例系数  $K$  叫做霍尔系数,  $I$  表示电流,  $B$  表示磁场的磁感应强度. 可以通过霍尔效应测量霍尔电压  $U$ . 在测量霍尔电压时, 实际上同时存在几种负效应, 不等位电势差  $U_0$ ; 温差电势差  $U_E$ ; 效应电势差  $U_N$  与  $U_{R_L}$ ; 接触电势差  $U_J$ ; 不对称因素电

势差  $U_D$ 、霍尔电压  $U$  和这些负效应  $U_E, U_N, U_{RL}$  都与工作电流  $I$  和磁场的磁感应强度方向有关, 而  $U_N, U_{RL}$  只与  $B$  有关, 所以我们采用“交换抵消法”测量霍尔电压  $U^{[5]}$ . 当保证  $I, B$  大小不变的情况下测出横向电压(这时的电压是上述几种电压的总和), 改变  $B, I$  方向再次进行同样测量, 可以消出这几种负效应带来的系统误差. 横向电压计算如下<sup>[5]</sup>

$$U_1 = U + U_0 + U_R + U_N + U_E (+B + I) \quad (8)$$

$$U_2 = -U - U_0 + U_R + U_N - U_E (+B - I) \quad (9)$$

$$U_3 = U - U_0 - U_R - U_N + U_E (-B - I) \quad (10)$$

$$U_4 = -U + U_0 - U_R - U_N + U_E (-B + I) \quad (11)$$

综合式(8)~(11)可得

$$U = \frac{1}{4} |U_1 - U_2 + U_3 - U_4| - U_E \quad (12)$$

因  $U_E$  一般远小于  $U$ , 可忽略, 所以得

$$U = \frac{1}{4} |U_1 - U_2 + U_3 - U_4| \quad (13)$$

可以看出来, 运用“交换抵消法”可以消除  $U_0, U_R, U_N, U_E$  带来的系统误差的.

### (2) 惠斯登电桥

惠斯登电桥测量电阻实验中可运用同样方法消除误差. 惠斯登电桥原理图如图3所示, 惠斯登电桥测量电阻  $R_x$ , 从原理上也是一种对称测量, 图中  $R_1, R_2, R_x, R_N$  称为电桥的4条桥臂, 接通开关后, 各支路均有电流, 检流计支路起到沟通桥臂的作用, 可以通过检流计直接比较  $a, b$  两点电势, 当调节  $R_1, R_2, R_N$  使得检流计的电流  $I_G = 0$  时, 这时电桥达到平衡, 由实验原理得

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N = K R_N \quad (14)$$

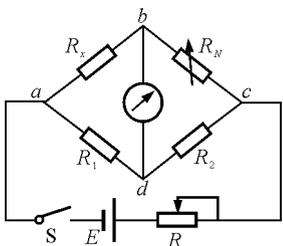


图3 惠斯登测电阻原理图

上式中  $K = \frac{R_1}{R_2}$ , 称为电桥的倍率值.  $R_1, R_2$  为电桥的比例臂,  $R_N$  为比较臂. 实际测量当中,  $R_1$  和  $R_2$  会引入系统误差, 消除误差采用交换抵消法, 交换  $R_x$  与  $R_N$  后如图4所示, 可得

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_N' \quad (15)$$

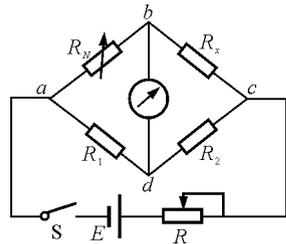


图4 惠斯登电桥测电阻变换原理图

式(14)与式(15)相乘计算得

$$R_x = \sqrt{R_N R_N'} \quad (16)$$

从上面两个实验可以看出在一些物理实验中, 可以根据误差产生原因, 改变测量方向, 进行两次对称测量, 消除同一实验中出现的误差. 如, 在实验中处理天平不等臂而造成的系统误差也可以采取同样的方法. 交换抵消法可以培养学生的发散性思维和逆向思维, 并且两次实验测量也可以让学生对实验有更深入的理解.

### 2.3 对称法

对称法是消除线性系统误差的有效方法, 如图5只要随着时间的变化, 被测量做线性增加, 若选定某时刻为 midpoint, 则对称该点的线性误差算数平均值解皆相等<sup>[6]</sup>. 即

$$\frac{\Delta l_1 + \Delta l_5}{2} = \frac{\Delta l_2 + \Delta l_4}{2} = \Delta l_3 \quad (17)$$

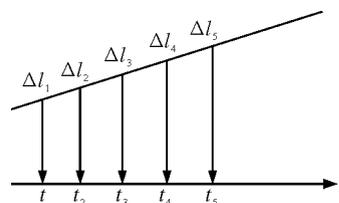


图5 按线性变化的系统误差

利用这个特点, 可将测量对称安排, 取各对称点两次读数的算数平均值作为测得值, 就可以消除线

性误差.

### (1) 用电位差计测电阻

用电位差计测电阻,用同一个电位差计分别测量  $R_x, R_0$  上的电压降. 设回路电流  $I$  随时间线性降低,为了消除系统误差,可采用如下对称法进行测量.

如图 6 所示,在  $t_1$  时刻测量的  $R_x$  上的电压,得

$$U_{x_1} = I_1 R_x \quad (18)$$

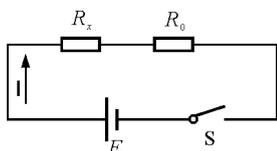


图 6 电位差计测电阻

在  $t_2$  时刻测量  $R_0$  上电压得

$$U_0 = I_2 R_0 \quad (19)$$

在  $t_3$  时刻再测量  $R_x$  上电压,得

$$U_{x_3} = I_3 R_x \quad (20)$$

由式(19)与式(20)相加再除以 2 得

$$\frac{1}{2}(U_{x_1} + U_{x_3}) = \frac{1}{2}(I_1 + I_3)R_x \quad (21)$$

取

$$t_3 - t_1 = t_2 - t_1$$

则

$$I_3 - I_2 = I_2 - I_1 \quad (22)$$

从而有

$$I_2 = \frac{1}{2}(I_1 + I_3) \quad (23)$$

由公式(21)和(23)得

$$\frac{1}{2}(U_{x_1} + U_{x_3}) = I_2 R_x \quad (24)$$

将式(19)代入式(24)得

$$R_x = \frac{(U_{x_1} + U_{x_3})R_0}{2U_0} \quad (25)$$

从上式就可以看出,最后的测量结果消除了电流  $I$  的线性变化影响.

在系统误差随时间发生改变并且成线性规律的实验中都可以采用对称法去减少或者消除系统误差. 如在使用到冲击电流计的实验中,冲击电流计的偏转值取相同实验情况下左右两次读数的平均值,然后把测量值代入相应计算公式,以此来消除系统误差. 在这个实验方法的学习中可以掌握系统误差改变的规律,根据规律应用相应的方法也是物理实验需要掌握的重点内容. 实验方法除了消除系统误差中所用到的,还有很多比如转换法、理想化方法、控制变量法、放大法、积累法、图像法等.

### 3 结语

相同的方法在不同实验中应用的案例很多,本文仅是对系统误差消除方法应用的一点探讨,对于实验方法中系统误差处理的学习,可以让学生体会到物理实验的严谨性、科学性、精确性. 进一步加深学生对物理学科特点的认识,提高学生的核心素养. 希望本文可以起到抛砖引玉的效果,激发更多的教育工作者能利用实验方法去研究和讨论有关实验的改进,为教育事业的发展作出应有的贡献.

### 参考文献

- 1 阎金铎. 物理实验论. 南宁:广西教育出版社,1996. 67 ~ 71
- 2 冯杰. 高中物理探究实验及案例教学设计. 北京:北京大学出版社,2011. 58 ~ 65
- 3 滕敏康. 实验误差与数据处理. 南京:南京大学出版社,1989. 127 ~ 165
- 4 冯克诚. 中学物理实验改进设计与规范操作实用全书. 北京:中国对外翻译出版社,1999. 555 ~ 557
- 5 罗浩,向泽英,谢英英,等. 霍尔效应法测磁场实验误差研究. 大学物理实验,2015,28(04):99 ~ 102
- 6 石林,张玘. 误差分析与数据处理. 北京:清华大学出版社,2010. 85,87