

高中物理精确测量电阻的方法归类及辨析运用研究

肖小江¹ 姚华鑫²

(1. 湖北省十堰市车城高级中学, 湖北 十堰 442000; 2. 北京师范大学未来教育学院, 广东 珠海 519085)

摘要: 精确测量电阻是高中电学的重点和难点, 同时是高考常考点. 高中阶段对电阻的精确测量主要包含测量定值电阻、电表内阻、电源内阻等. 梳理了电阻精确测量分析的4种方法, 分别是伏安法、等效替代法、半偏法、电桥法. 分析阐述了4种测量方法的基本原理, 通过深入理解欧姆定律从而加强对基本电路的认识, 掌握对实验方法和实验器材的选择, 并结合器材分析系统误差产生的原因及减小误差的方法, 对4种方法辨析论述, 使学生能快速找到精确测量电阻的方向和办法.

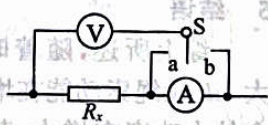
关键词: 伏安法; 等效替代法; 半偏法; 电桥法; 误差分析

高中物理电学中对电阻的测量始终是教学的重点, 也是难点. 对电阻的测量主要包含测量定值电阻、电表内阻、电源内阻等. 多用电表只是粗测电阻的阻值, 对电阻的精确测量主要有4种方法, 分别是伏安法、等效替代法、半偏法、电桥法, 其中等效替代法、半偏法、电桥法都有“特定”的特征, 都提供“特定”的器材, 但本质上都离不开欧姆定律. 当我们遇到精确测量电阻的问题时, 只要先看是否有等效替代法、半偏法、电桥法所需要的“特定”器材, 如果没有, 那一定是用伏安法的思想去解决这类问题. 下面分别对4种测量方法基本原理的理解、基本电路的认识、器材方法的选择、系统误差产生的原因及减小误差的办法进行阐述.

1 伏安法

(1) 伏安法定值电阻 $R = \frac{U_V}{I}$.

图1为测量电路, S接a, 电流表外接, S接b, 电流表内接.



基本原理: 运用口诀

“大内大、小外小”及其含义

(即待测电阻阻值相比电流表内阻大得较多时采用电流表内接, 测量值偏大; 待测电阻阻值相比电流表内阻大得较小时采用电流表外接, 测量值偏小).

发散性思维: 一表三用原理(电表内阻已知时, 既可充当电阻, 也可以充当电压表或电流表)等; 一阻五用原理(阻值已知时, 既可充当已知电阻、限流电阻、分压电阻, 也可以充当“等效”电压表或电流表).

(2) 伏安法测电表的内阻.

① 如图2所示测量电压表内阻 $R_V = \frac{U_V}{I_A}$.

发散性思维: 电压表并联元件(分流作用).

② 如图3所示测量电流表内阻 $R_A = \frac{U_V}{I_A}$.

发散性思维: 电流表串联元件(分压作用).

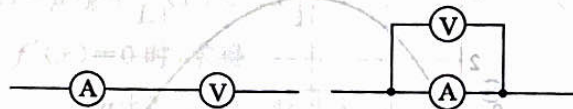


图2

图3

(3) 伏安法测电源的内阻.

基本原理 $U = E - Ir$.

如图4所示, S_2 接b, 适用于方程组法或图像法, 此时图像的斜率即认为是电源内阻; S_2 接a, 适用于电流表内阻很小或已知的情形, 因为此时测量出的电源内阻包括电流表的内阻.

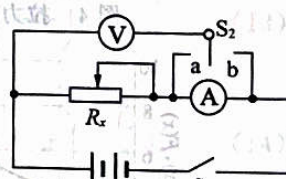


图4

发散性思维: 安阻法或伏阻法测量电源的内阻(安培表或伏特表加电阻箱, 运用欧姆定律列方程即可).

例1. 现尽可能精确地测定一个待测电阻 R_x 的阻值(约为 $100\ \Omega$), 提供如下器材:

电池组 E , 电动势 3 V , 内阻不计;

电流表 A_1 , 量程 $0\sim 15\text{ mA}$, 内阻约为 $100\ \Omega$;

电流表 A_2 , 量程 $0\sim 300\ \mu\text{A}$, 内阻为 $1000\ \Omega$;

滑动变阻器 R_1 , 阻值范围 $0\sim 20\ \Omega$, 额定电流

2 A;

电阻箱 R_2 , 阻值范围 $0 \sim 9\,999\ \Omega$, 额定电流 1 A ; 开关 S 、导线若干。

(1) 为了测量待测电阻两端的电压, 可以将电流表 A_2 (填写器材代号) 与电阻箱串联, 并将电阻箱阻值调到 $9000\ \Omega$, 这样可以改装成一个量程为 3.0 V 的电压表;

(2) 画出完整测量 R_x 阻值的电路图, 并在图中标明器材代号;

(3) 调节滑动变阻器 R_1 , 两表的示数如图 5 所示, 可读出电流表 A_1 的示数是 8.0 mA , 电流表 A_2 的示数是 $150\ \mu\text{A}$, 测得待测电阻 R_x 的阻值是 $187.5\ \Omega$ 。

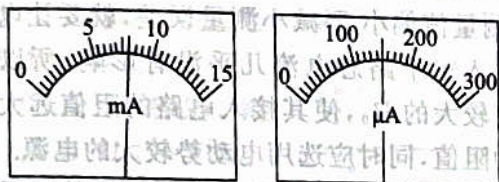


图 5

解析: 要改装成 3.0 V 的电压表, 则需电流表的内阻已知, 所以必须使用 A_2 串联 $9000\ \Omega$ 的电阻, 由于改装成的电压表内阻已知, 应将电流表 A_1 外接, 运用欧姆定律即可得出待测电阻的阻值。因为滑动变阻器的总阻值比负载的阻值小得多, 不宜采用限流式接法, 而应采用分压式接法来控制电路。电路图如图 6 所示。

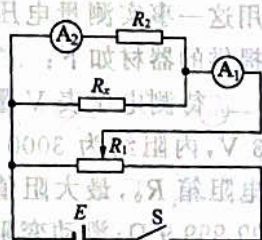


图 6

(4) 伏安法测电阻的特征及选用。

伏安法测电阻实际上就是运用欧姆定律的计算来测量待测电阻。此时电路中不一定是伏特表加安培表, 因为只要电表的内阻已知, 电压表也可以当作电流表使用, 电流表也可以当作电压表使用, 所以也可以是“安安法”“伏伏法”“安阻法”“伏阻法”等。高中阶段精确测量电阻绝大多数情况下会选择“伏安法”的思想去解决问题。

2 等效替代法

(1) 基本原理: 把待测电阻换成电阻箱, 调整电阻箱的阻值, 使电路中电表的读数与原来一样, 读出电阻箱的值便是待测电阻的阻值。

(2) 基本电路: 分为两种, 图 7 是电流等效替

代法; 图 8 是电压等效替代法。

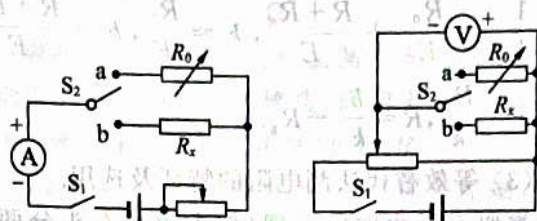


图 7 图 8

例 2. 为测量一未知电阻 R 的阻值 (阻值约 $10\text{ k}\Omega$), 现在实验桌上有下列器材:

- (A) 滑动变阻器 R_1 ($0 \sim 100\ \Omega$);
- (B) 电阻箱 R_0 ($99\,999.9\ \Omega$);
- (C) 灵敏电流计 G ($300\ \mu\text{A}$, 内阻不可忽略);
- (D) 直流电源 E (3 V , 内阻不计);
- (E) 开关、导线若干。

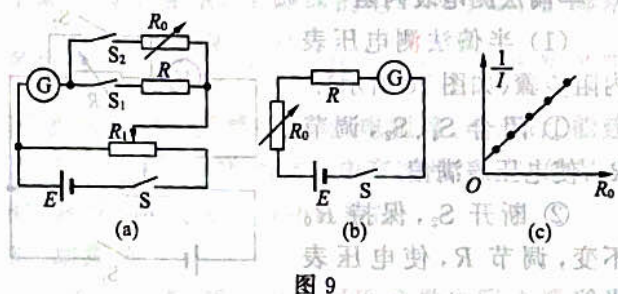


图 9

(1) 甲同学用图 9(a) 所示的电路进行实验。

① 先将滑动变阻器的滑动头移到 左 端, 再接通 S ; 保持 S_2 断开, 闭合 S_1 , 调节 R_1 使电流计指针偏转至某一位置, 并记下电流 I_1 。

② 断开 S_1 , 保持 R_1 不变, 闭合 S_2 , 调节 R_0 使得电流计读数为 I_1 时, R_0 的读数即为待测电阻的阻值。

(2) 乙同学查得电流计内阻为 R_g , 采用图 9(b) 进行实验, 改变电阻箱的电阻, 读出电流计相应的示数 I , 由测得数据作出 $\frac{1}{I} - R_0$ 图像如图 9(c) 所示, 图线纵轴截距为 b , 斜率为 k , 则待测电阻 R 的阻值为 $\frac{b}{k} - R_g$ 。

解析: 滑动变阻器 R_1 的滑片位置不变时, 我们认为负载的电压保持不变, 若两次电流计指针指在同一电流值 I_1 , 说明待测电阻 R 的电阻值等于 R_0 。

乙同学测量电路中, 根据欧姆定律有

$$I = \frac{E}{R_0 + R + R_g}$$

变形整理得

$$\frac{1}{I} = \frac{R_0}{E} + \frac{R+R_g}{E}, k = \frac{R_0}{E}, b = \frac{R+R_g}{E}.$$

$$\text{解得 } E = \frac{R_0}{k}, R = \frac{b}{k} - R_g.$$

(3) 等效替代法测电阻的特征及选用.

类似于曹冲称象原理(把大象和石头分两次放到同一条船上,当水面所达到船的位置相同时,就可以用石头的重量等效替代大象的重量),我们也将待测电阻和电阻箱分两次连接到同一条电路上,当电表的读数相同时,就可以用电阻箱的阻值等效替换为待测电阻的阻值.所以提供的器材应有“特定”的器材如:电阻箱、电流表(或电压表)、单刀双掷开关(或两个开关).当题目中有这些“特定”的器材时,就可以优先考虑采用等效替代法.

3 半偏法测电表内阻

(1) 半偏法测电压表内阻步骤(如图10所示).

① 闭合 S_1 、 S_2 , 调节 R_0 , 使电压表满偏.

② 断开 S_2 , 保持 R_0 不变, 调节 R , 使电压表半偏.

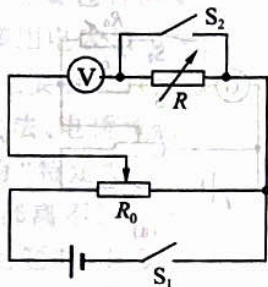


图10

③ 由上得 $R_V = R$.

误差分析及器材选择: 断开 S_2 , 保持 R_0 不变时, 我们是认为负载电压保持不变, 而实际上由于电阻箱 R 的串入使得负载电阻值变大, 负载分得的电压变大. 调节 R , 使电压表半偏时, 电阻箱 R 的电阻值是大于电压表的电阻值的, 所以电压表 R_V 的测量值偏大. 要减小测量误差, 就要让电阻箱 R 的串入对负载分得的电压几乎不变, 所以应选用的 R_0 的电阻值远小于电压表的电阻值.

发散思维: 半偏法测电压表内阻的简易.

如图11所示, 测电压表 V 内阻步骤如下.

① 闭合 S , 调节电阻箱阻值为 R_1 时, 测得电压表示数为 U_1 .

② 改变电阻箱阻值为 R_2 时, 测得电压表示数为 $U_1/2$.

③ 由上得 $R_V = R_2 - 2R_1$.

(2) 半偏法测电流表内阻.

如图12所示, 测量电流表的内阻, 步骤如下.

① 断开 S_2 、闭合 S_1 , 调节 R_0 , 使电流表满偏为 I_0 .

② 保持 R_0 不变, 闭合 S_2 , 调节 R , 使电流表读数为 $I_0/2$.

③ 由上得 $R_A = R$.

器材选择及误差分析: 闭合 S_2 , 保持 R_0 不变时, 我们是认为电路的总电流保持不变为 I_0 , 而实际上由于电阻箱 R 的并入使得总电阻阻值变小, 干路总电流变大 ($I_{总} > I_0$). 调节 R , 使电流表半偏时, 通过电阻箱 R 的电流大于 $I_0/2$, 所以电阻箱 R 的电阻值是小于电流表的电阻值的, 所以电流表 R_A 的测量值偏小. 要减小测量误差, 就要让电阻箱 R 的并入对干路总电流几乎没有影响, 所以应选用阻值较大的 R_0 , 使其接入电路的阻值远大于电流表的阻值, 同时应选用电动势较大的电源.

例3.(2015年全国卷二)电压表满偏时通过该表的电流是半偏时通过该表电流的两倍. 某同学利用这一事实测量电压表的内阻(半偏法), 实验室提供的器材如下:

待测电压表 V 量程 3 V, 内阻约为 3000 Ω ; 电阻箱 R_0 , 最大阻值为 99 999.9 Ω ; 滑动变阻器 R_1 , 最大阻值 100 Ω , 额定电流 2 A; 电源 E , 电动势 6 V, 内阻不计; 开关两个, 导线若干.

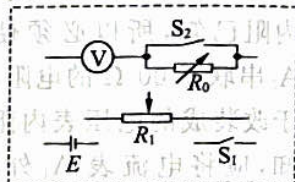


图13

(1) 图13为该同学设计的测量电压表内阻的电路图的一部分, 将电路图补充完整;

(2) 根据设计的电路, 写出实验步骤_____;

(3) 这种方法测出的电压表内阻记为 R_V' , 与电压表内阻的真实值 R_V 相比, R_V' _____ R_V (填“>”“=”或“<”), 主要理由是_____.

解析: 本题显然是半偏法测电压表内阻, 电路补充完整如图14所示.

实验步骤: ① 闭合 S_1 、 S_2 , 调节 R_1 , 使电压表满偏; ② 断开 S_2 , 保持 R_1 不变, 调节 R_0 , 使电压表半偏; ③ 由上得 $R_V' = R_0$.

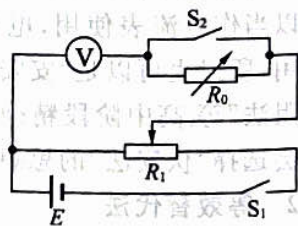


图14

测量值偏大, $R_V' = R_0 > R_V$, 主要理由: 电阻箱 R_0 的串入使得负载电阻值变大, 负载分得的电压变大. 调节 R_1 , 使电压表半偏时, 电阻箱 R 的电阻值是大于电压表的电阻值, 所以电压表的测量值偏大.

(3) 半偏法测电阻的特征及选用.

半偏法测电阻实际上也是运用欧姆定律进行计算, 通过比较得出电表的电阻值. 提供的“特定”器材: 电阻箱、电流表或电压表、总阻值较大的变阻器、两个开关. 当题目中有这些“特定”的器材时, 就可以优先考虑采用半偏法.

4 电桥法测电阻

(1) 基本原理.

如图 15 所示, 灵敏电流计读数为零时 $U_{ab} = 0$, 相当于 ab 间断路, 则 $\varphi_a = \varphi_b$, 有 $IR_1 = I'R_3$, $IR_2 = I'R_4$. 整理即得 $R_1R_4 = R_2R_3$, 从而得出其中待测电阻的阻值.

此即电桥平衡满足的条件.

例 4. 某同学利用如图 16 所示的电路测量一微安电流表(量程为 $100 \mu\text{A}$, 内阻大约为 2500Ω)的内阻. 可使用的器材: 两个滑动变阻器 R_1 、 R_2 (其中一个阻值为 20Ω , 另一个阻值为 2000Ω); 电阻箱 R_x (最大阻值为 $99\,999.9 \Omega$); 电源 E (电动势约为 1.5 V); 单刀开关 S_1 和 S_2 . C 、 D 分别为两个滑动变阻器的滑片. 完成下列填空:

(1) R_1 的阻值为 20 Ω (填“20”或“2000”).

(2) 为了保护微安电流表, 开始时将 R_1 的滑片 C 滑到接近图中滑动变阻器 左 端(填“左”或“右”)对应的位置; 将 R_2 的滑片 D 置于中间位置附近.

(3) 将电阻箱 R_x 的阻值置于 2500.0Ω , 接通 S_1 , 将 R_1 的滑片置于适当位置, 再反复调节 R_2 的滑片 D 的位置. 最终使得接通 S_2 前后, 微安表的示数保持不变, 这说明 S_2 接通前 B 与 D 所在位置的电势 相等 (填“相等”或“不相等”).

(4) 将电阻箱 R_x 和微安电流表位置对调, 其他条件保持不变, 发现将 R_x 的阻值置于 2601.0Ω

时, 在接通 S_2 前后, 微安表的示数也不变. 待测微安表的内阻为 2550 Ω .

解析: 本题显然是电桥法测微安电流表内阻, 滑动变阻器用的分压式接法, 应使 R_1 的阻值远小于 R_2 , 所以 R_1 应选阻值为 20Ω , R_2 应选阻值为 2000Ω . 开始时将 R_1 的滑片 C 滑到最左端, 将电阻箱 R_x 和微安表位置对调前后, 微安表的示数不变, 说明 S_2 接通前 B 与 D 所在位置的电势相等(即“电桥平衡”), 同时负载电压几乎不变, 所以有

$$\frac{2500}{R_{\mu\text{A}}} = \frac{R_{\mu\text{A}}}{2601}, \text{ 所以 } R_{\mu\text{A}} = 2550 \Omega.$$

(2) 电桥法测电阻的特征及选用.

电桥法测电阻际上还是运用欧姆定律进行计算, 当电桥“平衡”时, 电流计的示数为 0, 电桥两端点上的电势差为 0, 即有 R_1 上降落的电压等于 R_3 上降落的电压, R_2 上降落的电压等于 R_4 上降落的电压, 所以有 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$, 从而得出待测电阻的阻值.

提供的“特定”器材应有: 电阻箱、电流计、能建立“桥”的电路器材. 当题目中有这些“特定”的器材时, 就可以优先考虑采用电桥法.

5 结束语

综上所述, 高中阶段精确测量电阻主要就是以上 4 种方法, 其他方法(例如补偿法、双电源法等)也是以上 4 种方法的变形, 其基本原理是欧姆定律计算、比较法、伏安法等方法的变形. 其中等效替代法、半偏法、电桥法都有不一样的特征, 都提供有“特定”的器材, 但都离不开欧姆定律的计算运用. 所以, 当我们遇到精确测量电阻的问题时, 先看看有没有等效替代法、半偏法、电桥法需要的“特定”器材, 如果没有, 那一定是用“伏安法”的思想去解决问题, 只要选好合适的电表量程, 同时选好控制电路中滑动变阻器的限流式或分压式接法, 就能达到精确测量电阻的目的了.

参考文献:

- 陈泓宇, 田博扬, 李春密. 基于义务教育物理课程标准(2022 年版)的实验教学改革探讨[J]. 物理教师, 2022, 43(8): 27-32, 36.
- 王丽, 张军朋. 例析高考全国卷“电阻测量”实验试题创新变式[J]. 物理教学, 2019, 41(6): 63-67.
- 孙硕研. 创设真实问题情境促进学生深度学习——以“电阻的测量”教学为例[J]. 中学物理教学参考, 2023, 52(23): 10-12.

(收稿日期: 2023-10-18)