

# 高中电学实验滑动变阻器选择释疑

刘 旭

(淄博第一中学 山东 淄博 255200)

(收稿日期:2023-03-13)

**摘 要:**根据安全、准确、科学方便的实验原则,结合笔者在长期实验教学中的实践经验,利用数学工具,用定量的方式,分别阐述了在高中物理伏安法测电阻、测定电源的电动势和内阻、半偏法测电阻实验中,不同规格滑动变阻器的选择原则。

**关键词:**滑动变阻器;伏安法测电阻;测定电源的电动势和内阻;半偏法测电阻

滑动变阻器是高中电学实验中重要的调节电流、电压的电学仪器.在高中电学实验中涉及滑动变阻器的实验主要有伏安法测电阻、测定电源的电动势和内阻、半偏法测电阻.高考中经常出现关于滑动变阻器接法的考查,也时而出现在确定接入方法的情况下滑动变阻器规格的选择问题.笔者发现有关滑动变阻器的定量选择原则讨论较少,且由于在不同电路中滑动变阻器的接法多样,误差计算繁琐,选择原则在不同实验中也不能一概而论.在日常教学中多数师生往往根据经验来选择器材,并无严格的理论依据.同时该问题的探讨能有效培养学生“能用多种方法分析数据,发现规律,形成合理的结论,用已有物理知识做出科学解释<sup>[1]</sup>”的物理素养.现对滑动变阻器的选择谈一些自己的认识.

## 1 电学实验的基本原则

### 1.1 安全原则

安全原则是高中电学实验的首要原则.在电学实验中要保证所有电学原件和测量器材的安全.这体现在滑动变阻器规格选择上要使实验电流不能超过滑动变阻器的额定电流.

### 1.2 准确性原则

通过选择合适的器材、设计更好的实验步骤,尽可能减小系统误差和偶然误差.滑动变阻器的引入很多情况下是为了多次测量减小偶然误差.

### 1.3 科学、方便原则

高中物理实验要求实验原理科学,实验步骤能

够相对比较方便地进行操作.

从滑动变阻器使用的角度讨论科学方便原则,主要体现在所选的滑动变阻器规格首先要能够满足题中要求的调节范围,其次也能够相对比较方便地调节所需要的电压、电流.方便性,即指易操作,无法提供确切的定义.笔者通过多年的实验操作认为滑动变阻器的调节方便指在手动调节滑动变阻器时,如果能使得调节对象电压的大小随着滑动变阻器的阻值变化接近线性变化,且有足够的调节范围,就是滑动变阻器使用过程中较为理想的状态.

## 2 伏安法测电阻实验中 滑动变阻器的规格选择

### 2.1 限流接法滑动变阻器的选择

**【例 1】**如图 1 所示的图形中,电路总供电电压为  $U$ ,待测电阻两端电压为  $U_x$ ,滑动变阻器滑动头在  $A$  端时  $U_x$  为最小值,向右滑动时逐渐增大,现在设  $AP$  距离为  $x$ ,  $AB$  距离为  $L$ ,当向右调节  $x$  距离时,计算  $U_x$  的值.

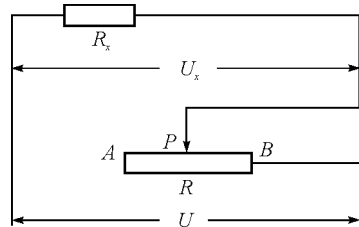


图 1 限流接法

**解析:**

由图 1 可得

$$U_x = \frac{U}{R \frac{L-x}{L} + R_x} R_x \quad (1)$$

由式(1)得

$$\frac{U_x}{U} = \frac{1}{\frac{R}{R_x} - \frac{R}{R_x} \frac{x}{L} + 1} \quad (2)$$

现讨论调节滑动变阻器过程中电压变化得快慢,从上式中可以看到,  $\frac{U_x}{U}$  和  $\frac{x}{L}$  并不是线性关系,其函数关系与  $\frac{R}{R_x}$  的取值有关. 从函数中无法直接观察.

为进一步讨论此问题,以  $\frac{U_x}{U}$  为 Y 轴,以  $\frac{x}{L}$  为 X 轴,取  $k = \frac{R}{R_x}$ , 现通过 desmos 函数绘图软件,绘制在 k 取不同数值时两者的关系.

$$Y = \frac{1}{\frac{R}{R_x} - \frac{R}{R_x} X + 1} \quad \left( \frac{x}{L} \in [0, 1] \right)$$

分别取  $k=1, 2, 5, 10$  时,绘制的函数图像,如图 2 所示.

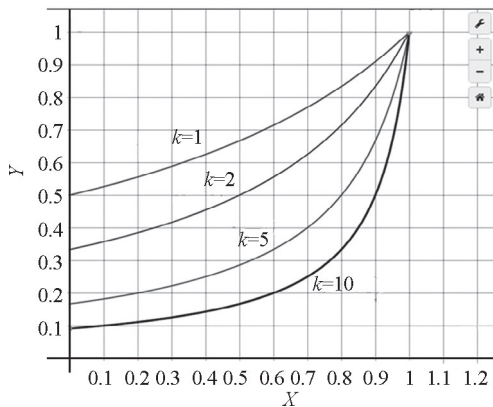


图 2 限流法 Y-X 图像

图 2 中图像由上到下,分别为  $k = \frac{R}{R_x} = 1, 2, 5, 10$ . 观察图形可得, k 取值越小,  $U_x$  最小值将越大,其调节范围越小,函数图像越接近线性关系;当 k 取值越大时,  $U_x$  的最小值将越小,调节范围越大,函数图像将越偏离线性关系,调节将不太方便.

综合以上分析,限流接法时 R 的取值既不能太大也不能太小,在高中电学实验中 R 常取  $2R_x \sim 10R_x$  之间.

## 2.2 分压接法滑动变阻器的选择

**【例 2】**如图 3 所示的图形中,电路总供电电压

为 U,待测电阻两端电压为  $U_x$ ,滑动变阻器滑动头在 A 端时  $U_x$  为最小值,向右滑动时  $U_x$  逐渐增大,现在设 AP 距离为 x, AB 距离为 L,当向右调节 x 距离时,计算  $U_x$  的值.

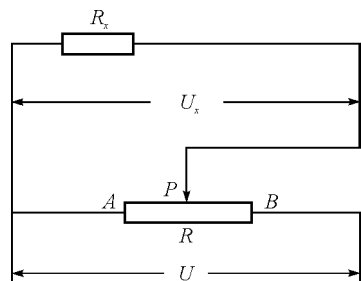


图 3 分压接法

解析:

由图 3 可得

$$U_x = \frac{U}{\frac{R_0 \frac{x}{L} R_x}{R_0 \frac{x}{L} + R_x} + R_0 \frac{L-x}{L}} \cdot \frac{R_0 \frac{x}{L} R_x}{R_0 \frac{x}{L} + R_x} \quad (3)$$

由式(3)化简得

$$\frac{U_x}{U} = \frac{\frac{x}{L}}{-\frac{R_0}{R_x} \left( \frac{x^2}{L^2} - \frac{x}{L} \right) + 1} \quad \left( \frac{x}{L} \in [0, 1] \right) \quad (4)$$

直接从公式中观察,  $\frac{U_x}{U}$  与  $\frac{x}{L}$  的关系比较复杂,其函数关系与  $\frac{R_0}{R_x}$  的取值大小有关. 为了进一步探究两者关系,以  $\frac{U_x}{U}$  为 Y 轴,以  $\frac{x}{L}$  为 X 轴,令  $k = \frac{R_0}{R_x}$  取不同的数值,画出函数的图像,如图 4 所示.

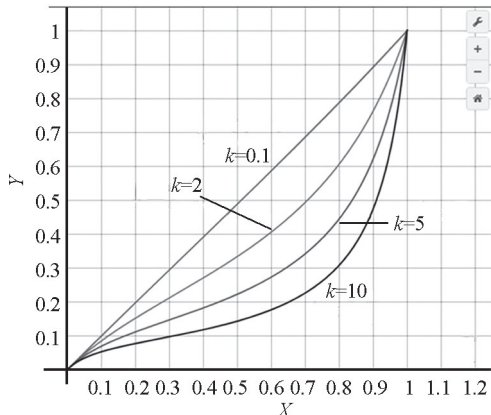


图 4 分压法 Y-X 图像

图4中图像由上到下,分别为 $k=0, 1, 2, 5, 10$ . 观察图形可得, $k$ 取值越小, $\frac{U_x}{U}$ 与 $\frac{x}{L}$ 越接近线性关系,调节起来也就越方便,从图中可以看出,当 $\frac{R}{R_x}$ 取值为0.1时,图像非常接近线性关系;随着 $k$ 取值增大, $\frac{U_x}{U}$ 与 $\frac{x}{L}$ 的变化将逐步偏离线性关系,在滑动头靠近A端时, $U_x$ 变化缓慢,逐渐靠近B端时, $U_x$ 快速变化,这样在使用滑动变阻器调节电压变化时就不方便了.

综上所述,在能保证电路安全的情况下,分压接法最好选择总电阻比较小的滑动变阻器,这样在使用中调节比较方便.

### 3 伏安法测量电源电动势和内阻实验中滑动变阻器的选择

在伏安法测量电源电动势和内阻的实验中,测量对象发生了转变. 电路中滑动变阻器的作用主要是用来调节路端电压和干路电流.

**【例3】**如图5所示的电路中,实验测量电源电动势 $E$ ,内阻为 $r$ ,调节滑动变阻器改变电路的路端电压. 为保证电路安全,开始时,滑动变阻器应在最左端,然后逐渐右划记录数据. 设滑动头距离滑动变阻器右端距离为 $x$ ,计算路端电压 $U_x$ .

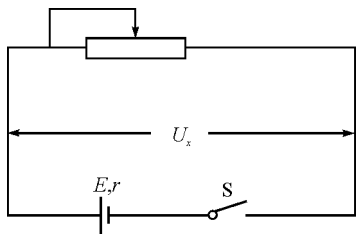


图5 伏安法电路图

解析:

由图5电路得

$$U_x = \frac{E}{R \frac{x}{L} + r} R \frac{x}{L} \quad (5)$$

化简得

$$\frac{U_x}{E} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R} \frac{L}{x}} \quad (6)$$

取 $\frac{U_x}{E}$ 为Y轴, $\frac{x}{L}$ 为X轴,令 $k = \frac{R}{r}$ ,取 $k=10, 5, 2, 1, 0.5$ 绘制式(6)的函数图像,如图6所示.

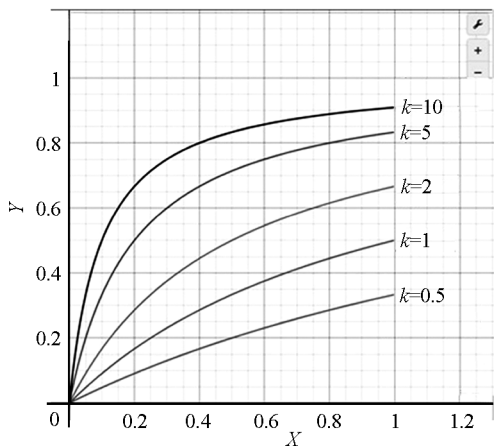


图6 伏安法Y-X图像

考察图6中图像,自上而下为 $R=10r, 5r, 2r, r, 0.5r$ . 从图像可以看到,当 $R=0.5r$ 时,调节滑动变阻器获得的路端电压比较接近线性,但是路端电压的最大值只能达到电动势的 $\frac{1}{3}$ ,且电流较大,容易导致电池发热,内阻增大,有较大误差. 所以在实际操作中不推荐使用太小的滑动变阻器. 当 $R=10r$ 时,调节滑动变阻器,路端电压变化范围较大,路端电压大小变化范围为 $0 \sim \frac{10}{11}E$ . 为保证电路安全,滑动变阻器从最大值开始调节,逐渐减小.

从图5中可以看到,滑动变阻器在左半段调节时,对应图6中的右半部分图像,调节过程中的X与Y非常接近线性的变化,在滑动变阻器右半段调节时,对应图6中的左半部分图像,图像斜率变化很快,调节较小距离,路端电压变化很大. 所以在使用较大的滑动变阻器进行调节时,仅使用滑动变阻器的左半部分调节,调节相对方便,此时电路中的电流较小,也避免了升温 and 极化现象. 但这样调节带来的问题是路端电压一直较大,为了减小实验误差,在使用较大的滑动变阻器进行电路调节时 $U-I$ 图像的绘制,电压的纵坐标初始值往往不从零开始,而是从电动势数值的 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{2}{3}$ 开始绘制,这样做可使得滑动变阻器调节时,路端电压与滑动值接近线性变化,调

节方便.但是在测量电动势和内阻的实验中,经常使用旧电池,滑动变阻器阻值过大会使得电流较小和接近线性调节的范围过窄,造成测量上的困难.

综上所述,笔者认为伏安法测量电源电动势和内阻时  $R$  的选择一般控制在  $2r \sim 10r$  之间会比较合适.

#### 4 半偏法测电阻实验中滑动变阻器的选择

半偏法与伏安法在滑动变阻器的使用上有很大不同之处,在伏安法中滑动变阻器主要用来调节电路电压、电流实现多次测量减小实验偶然误差.而在半偏法测量电阻的实验中,滑动变阻器仅调节一次,用来控制电路中的电压或者电流.所以其选择的依据主要不在需要方便多次调节,而是一次调节后尽可能地减小测量的系统误差.

##### 4.1 半偏法测电流表的内阻

**【例 4】**半偏法测电流表的内阻的操作步骤:

(1)如图 7 连接电路闭合  $S_1$ ,断开  $S_2$ ,调节滑动变阻器,使得电流表满偏;

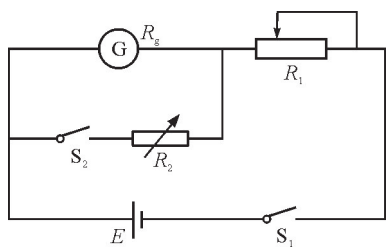


图 7 半偏法测量电流表的内阻

(2)保持  $S_1$  闭合,闭合  $S_2$ ,调节电阻箱  $R_2$ ,使得电流表半偏;

(3)记录  $R_2$  示数,即为  $G$  的电阻.

**解析:**设电源电动势为  $E$ ,电流表  $G$  的满偏电流为  $I_g$ ,电流表内阻为  $R_g$ ,滑动变阻器接入电路部分电阻为  $R_1$ ,由闭合电路欧姆定律可得:

步骤(1)满足方程

$$E = I_g(R_1 + R_g) \quad (7)$$

步骤(2)满足方程

$$E = \frac{I_g}{2} R_g \frac{1}{\frac{R_g R_2}{R_g + R_2} + R_1} \quad (8)$$

式(7)、(8)化简得

$$R_g R_1 - R_g R_2 = R_1 R_2 \quad (9)$$

化简式(9)可得

$$R_2 = \frac{R_g R_1}{R_g + R_1} = \frac{R_g}{1 + \frac{R_g}{R_1}} \quad (10)$$

通过式(10)可以得出  $R_2 < R_g$ ,说明通过上述实验测得的电流表的内阻偏小.只有当  $R_1 \gg R_g$  时,才可以得到  $R_2 \approx R_g$ ,所以此实验要求滑动变阻器接入电路中的电阻值  $R_1$  应当越大越好.但再观察式(7)不难发现,滑动变阻器接入电阻  $R_1 = \frac{E}{I_g} - R_g$ ,接入电路的阻值实际上是由  $E$ 、 $I_g$ 、 $R_g$  三者共同决定,而  $I_g$ 、 $R_g$  为待测电流表的参数无法改变.在实验中如果需要减小误差,就需要选择电动势较大的电源,根据电源来确定接入的滑动变阻器阻值.

综上所述,本实验中在选择器材时应当选择电动势大的电源,然后选择滑动变阻器,其最大电阻满足  $R_{1\max} > \frac{E}{I_g} - R_g$  即可.无需用太大的滑动变阻器,滑动变阻器总阻值过大,反而因为接入电阻部分占比较小,造成电路的调节不便.

上述分析中没有考虑电源的内阻影响,若考虑这部分影响,只需用电源的内阻  $r$  与滑动变阻器的阻值之和替代上述分析中的滑动变阻器的阻值部分进行计算即可,式(10)将成为

$$R_2 = \frac{R_g}{1 + \frac{R_g}{R_1 + r}} \quad (11)$$

由式(11)可知,不影响上述分析的结论.

##### 4.2 半偏法测电压表的内阻

**【例 5】**半偏法测量电压表内阻步骤:

(1)如图 8 连接电路,调节电阻箱  $R_2$  示数为零,闭合  $S$ ,调节滑动变阻器  $R_1$ ,使得电压表满偏;

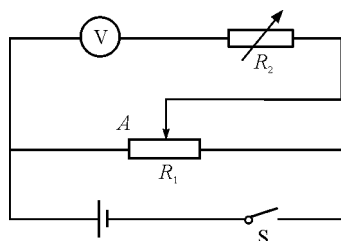


图 8 半偏法测电压表的内阻

(2) 保持 S 闭合,  $R_1$  不变, 调节电阻箱  $R_2$ , 使得电压表半偏;

(3) 记录  $R_2$  示数, 即为电压表的电阻.

**解析:** 设电源电动势为  $E$ , 电压表 V 的满偏电压为  $U_V$ , 滑动变阻器总电阻为  $R_1$ , 滑动头左半部分为  $R_A$ , 按照实验步骤得到各相应的实验数据, 结合闭合电路欧姆定律, 可得

步骤(1) 满足

$$\frac{E}{\frac{R_A R_V}{R_A + R_V} + R_1 - R_A} \frac{R_A R_V}{R_A + R_V} = U_V \quad (12)$$

步骤(2) 中满足

$$\frac{E}{\frac{R_A (R_V + R_2)}{R_A + R_V + R_2} + R_1 - R_A} \cdot \frac{R_A (R_V + R_2)}{R_A + R_V + R_2} \frac{R_V}{R_2 + R_V} = U_V \quad (13)$$

式(12)、(13), 消去  $E$  和  $U_V$  整理得

$$R_1 R_2 = R_1 R_A + R_1 R_V - R_A^2 \quad (14)$$

从上式可得

$$R_2 = \frac{R_A (R_1 - R_A)}{R_1} + R_V \quad (15)$$

若要满足  $R_2 \approx R_V$  只需要

$$\frac{R_A (R_1 - R_A)}{R_1} \ll R_V \quad (16)$$

要满足此条件, 下面分 2 种情况进行讨论.

**讨论一:**  $R_1 \ll R_V$  即实验中所用滑动变阻器的总阻值与待测电压表的阻值相比很小, 那么

$$\frac{R_A (R_1 - R_A)}{R_1} < \frac{R_A R_1}{R_1} < R_A < R_1 \ll R_V$$

此时对电源只要求电动势足够大, 使得电压表能够满偏即可.

**讨论二:** 在实验中不满足  $R_1 \ll R_V$  的情况下, 欲使

$$\frac{R_A (R_1 - R_A)}{R_1} \rightarrow 0, \text{ 可有两种方法实现:}$$

(1) 当  $R_A \ll R_1$  时, 滑动头在非常接近图 8 中 A 端时, 电压表实现满偏, 此时要求电动势满足  $E \gg U_V$ , 此方法也可以使得系统误差较小, 此种情况对滑动变阻器的最大阻值没有要求, 只需要保证安全

即可. 但这种方法需要滑动头非常接近 A 端不易调节, 实验中尤其注意.

(2)  $(R_1 - R_A) \ll R_1$ , 滑动头在非常接近图 8 中右端的地方, 电压表实现满偏, 此时要求电动势  $E$  略大于  $U_V$ , 且两者大小十分相近, 也可以使得系统误差较小, 此种情况对滑动变阻器的最大阻值也没有要求, 只需要保证安全即可. 但这种方法需要滑动头非常接近右端不易调节.

在讨论二的两种情况下, 虽然可以实现较小的系统误差, 但是对电源有特殊要求, 且实验操作中滑动变阻器不易调节. 讨论一的情况是比较理想的实验选择.

综上所述, 在半偏法测电压表的内阻实验中, 为了更加准确方便地完成实验只需在保证安全的条件下, 选择总阻值较小的滑动变阻器.

在考虑电源内阻  $r$  的情况下, 式(15) 需要将  $R_1$  替换为  $R_1 + r$ , 即

$$R_2 = \frac{R_A (R_1 + r - R_A)}{R_1 + r} + R_V \quad (17)$$

此式对讨论一和讨论二(1) 都没有影响, 在讨论二(2) 中, 由于  $r$  的存在, 若不满足  $r \ll R_1$ , 则无法准确测量电压表电阻.

## 5 结束语

本文对高中电学实验中, 滑动变阻器的选择原则进行了讨论. 结合实验操作经验和理论推导, 运用公式法进行了定量的分析, 然后借助函数绘图软件, 展示了不同实验中滑动变阻器调节时电压的变化规律, 得出在各类高中电学实验中滑动变阻器选择的原则. 该问题作为高中电学实验误差分析的一部分具有很强的代表性, 可以培养学生在物理实验中严密的思维习惯, 训练学生物理学科思维能力, 提升学生的物理学科素养.

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版2020年修订)[S]. 北京: 人民教育出版社, 2020: 48.