



欧姆表测量原理和倍率的探讨

马仕彪

(安徽省濉溪中学 安徽 淮北 235100)

(收稿日期:2022-10-17)

摘要:欧姆表的应用属于高考必考热点实验之一,但关于欧姆表的诸多问题,如刻度线特点的理解、测量系统误差分析等,无论是一线物理教师还是高考考生只知其然而不知其所以然,关于欧姆表的测量原理和换挡原理更是欧姆表的难点,而教材和各种教辅资料对该类问题都没有系统地解释说明.本文结合闭合电路欧姆定律等知识,将欧姆表的问题进行深入研究.

关键词:欧姆表;刻度线的特点;测量原理;换挡原理;闭合电路欧姆定律

如图 1 所示,首先熟悉一下多用电表外表结构,作为欧姆表使用测量电阻时,应将选择开关旋到对应的欧姆挡位,但选择不同的倍率,指针偏转的角度不同.下面先从测量原理角度展开,从而逐步引出欧姆表的核心问题.

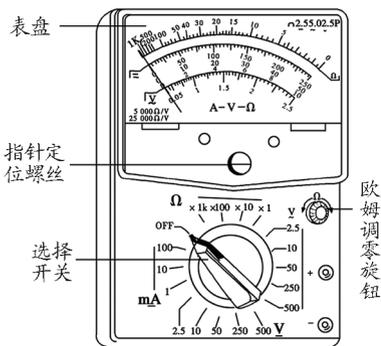


图 1 多用电表外表结构

1 欧姆表测量原理及结论^[1]

为了方便研究,先讨论最简单的如图 2 所示的欧姆表模型.当红、黑表笔间接入被测电阻 R_x 时,欧姆表测量电阻的原理为 $R_x = \frac{E}{I} - R_{内}$,改变被测电阻的阻值 R_x ,电流 I 随之改变,每个 R_x 值都对应一个电流值 I ,在刻度盘上直接标出与 I 值对应的 R_x 值,就可以从刻度盘上直接读出被测电阻的阻值了,

如图 3 所示.

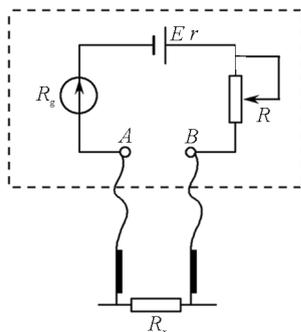


图 2 欧姆表模型

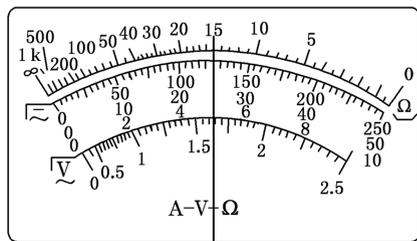


图 3 欧姆表读数刻度盘

1.1 刻度线特点及应用

(1) 特点

通过对欧姆表刻度线的观察,可以看出电阻刻度线特点是“左大右小、左密右疏、中央刻度附近较均匀”.那如何理解这个结论呢?下面分 2 种方法对刻度线的特点进行解释.

方法一:图像法

如图4所示,按照 $R_x = \frac{E}{I} - R_{内}$ 定性画出对应的 $R_x - I$ 图像.通过图像可看出 R_x 随着电流 I 的增加而减小、减小而增加,因此电阻的“0”刻度线对应满偏电流 I_g ,在刻度线最右侧;电阻的无穷大值对应电流“0”刻度线,在刻度线最左端.另外,图像的斜率逐渐减小,电阻越小斜率越小,随电流变化越慢,因此右边电阻刻度线较稀疏;电阻越大斜率越大,随电流变化越快,因此左边电阻刻度线较密集;在 $I = \frac{I_g}{2}$ 附近,图像接近一条倾斜的直线,刻度线较均匀.

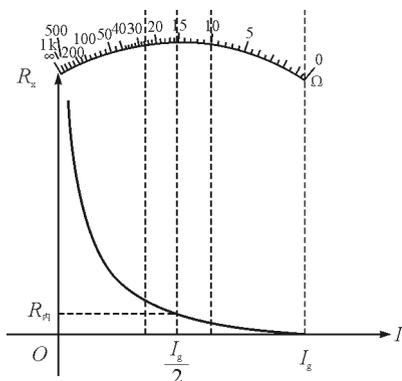


图4 图像法解释刻度线特点

方法二:函数分析法

将 R_x 对 I 进行求导

$$R'_x(I) = \frac{\Delta R_x}{\Delta I} = -\frac{E}{I^2}$$

结合

$$I = \frac{E}{R_{内} + R_x}$$

可得

$$R'_x(I) = -\frac{(R_{内} + R_x)^2}{E}$$

随着 R_x 的增大而增大,变化越快,刻度线越密,因此左边刻度线较密集,同理越往右越稀疏;解得

$$\Delta R_x = \frac{(R_{内} + R_x)^2}{E} \Delta I$$

表示电阻的绝对误差,说明 R_x 越大 ΔR_x 也就越大,但绝对误差对问题的研究没有实际的意义,我们需要讨论其相对误差

$$\eta = \frac{\Delta R_x}{R_x}$$

$$\eta = \frac{(R_{内} + R_x)^2}{E} \frac{\Delta I}{R_x}$$

结合 $E = I_g R_{内}$ 得

$$\eta = \frac{(R_{内} + R_x)^2}{R_x R_{内}} \frac{\Delta I}{I_g}$$

变形得

$$\eta = \left[\frac{(R_{内} - R_x)^2}{R_x R_{内}} + 4 \right] \frac{\Delta I}{I_g}$$

当 $R_x = R_{内}$ 时,相对误差 $\eta_{\min} = 4 \frac{\Delta I}{I_g}$,说明中央刻度相对误差最小,但仍不是零,也就是说中央刻度附近接近线性,但仍不是严格意义的线性函数.

相对误差相等对应的阻值为 R_1 、 R_2 时,将 R_1 、 R_2 带入

$$\eta = \frac{(R_{内} + R_x)^2}{R_x R_{内}} \frac{\Delta I}{I_g}$$

可得

$$R_1 R_2 = R_{内}^2$$

(2) 应用

鉴于刻度线特点,为了提高电阻读数的精确度,应尽量使指针指在刻度线的中央刻度附近.当 $I = \frac{I_g}{2}$ 时, $\frac{I_g}{2} = \frac{E}{R_{内} + R_x}$,结合 $I_g = \frac{E}{R_{内}}$,得到 $R_x = R_{内}$,此时电阻值 R_x 等于欧姆表的内阻值 $R_{内}$,也叫欧姆表的中值电阻.很多情况下,电阻刻度盘正中央的刻度标为“15”,这个数值恰好为 $\times 1$ 挡时欧姆表的内阻,当选择开关选择 $\times k$ 挡时,即相当于此时欧姆表的内阻为 $R_{内k} = 15k \Omega$.

1.2 常见测量系统误差

电池用旧了,电源电动势 E 减小(仍能欧姆调零)对测量结果的影响.

方法一:定性讨论

因为“仍能欧姆调零”,所以满偏电流 I_g 不变,由 $R_{内} = \frac{E}{I_g}$ 知 $R_{内}$ 要通过欧姆调零旋钮调小.由闭合电路欧姆定律

$$I = \frac{E}{R_{内} + R_x} = \frac{I_g R_{内}}{R_{内} + R_x} = \frac{I_g}{1 + \frac{R_x}{R_{内}}}$$

电流 I 随着 $R_{内}$ 的减小而减小,指针向左偏移,使电阻的测量读数偏大.

定性讨论虽然简单,但只能解释测量值相对真实值偏大,但无法判断具体的偏差值,下面进行定量

分析.

方法二:定量分析

设新电池的电动势为 E , 欧姆表的内阻为 $R_{内}$,

$R_{内} = \frac{E}{I_g}$; 旧电池的电动势为 E' , 欧姆表内阻为 $R'_{内}$,

$R'_{内} = \frac{E'}{I_g}$, 由测量原理

$$I = \frac{E}{R_{内} + R_{x测}} = \frac{E'}{R'_{内} + R_x}$$

可得

$$R_{x测} = \frac{E}{E'} R_x > R_x$$

通过定量计算, 可以更加具体地判断出测量值和真实值之间的差距.

【例1】某欧姆表的原理图如图5(a)所示. G 是电流表表头, 其满偏电流 $I_g = 500 \mu\text{A}$, 内阻 $R_g = 950 \Omega$. 电源电动势 $E = 1.5 \text{ V}$, 内阻 $r = 1 \Omega$. 电阻箱 R_1 和 R_2 的阻值调节范围均为 $0 \sim 9999.9 \Omega$.

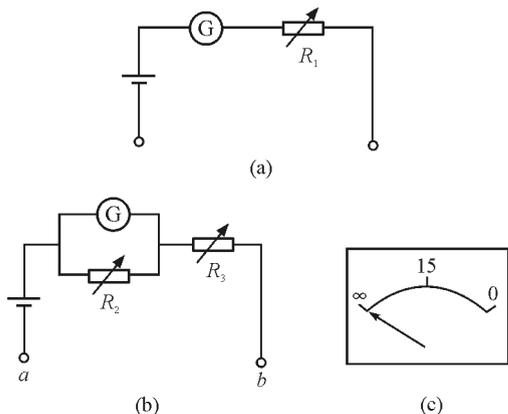


图5 例1题图

(1) 如图5(b)所示, 该学生利用该电路图组装一个“ $\times 100$ ”倍率的欧姆表, 要求欧姆表的表盘刻度示意图如图5(c)所示, 其中中央刻度标为“15”, 则该同学应调节 $R_2 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$. 用此欧姆表测量一个阻值约为 2000Ω 的电阻, 测量前应调节 $R_3 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$;

(2) 在(1)的条件下, 欧姆表的刻度值是按电源电动势 1.5 V 进行刻度的, 若表内电池用旧, 电源电动势下降到 1.2 V 时, 在正确的测量程序下测得某电阻读数为 2000Ω , 这个电阻阻值的真实值为 $\underline{\hspace{2cm}} \Omega$.

解析: (1) 中央刻度标“15”为“ $\times 1$ ”挡时欧姆表

的内阻, 因此“ $\times 100$ ”倍率的欧姆表内阻为 1500Ω ,

电流表的满偏电流 $I_{g(b)} = \frac{E}{R_{内(b)}} = 1000 \mu\text{A} = 2I_g$, 由

并联电路特点可知 $R_2 = R_g = 950 \Omega$, 在进行欧姆调

零时满足 $R_3 = \frac{E}{I_{g(b)}} - \frac{R_g R_2}{R_g + R_2} - r = 1024 \Omega$;

(2) 用以上分析得到的结论 $R_{x测} = \frac{E}{E'} R_x$, 解得

$R_x = 1600 \Omega$.

2 欧姆表的换挡原理及结论

2.1 换挡原理

如图6所示, 3和4为多用电表的欧姆挡, 欧姆表“ $\times k$ ”挡倍率为原来“ $\times 1$ ”挡的 k 倍, 即指针指在同一“刻度”位置时, 所测得的电阻 R_{xk} 为原来“ $\times 1$ ”挡所测得的电阻 R_{x1} 的 k 倍, 即

$$k = \frac{R_{xk}}{R_{x1}}$$

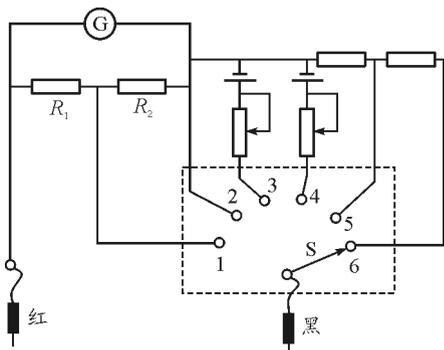


图6 欧姆挡换挡示意图

选择“ $\times 1$ ”挡时

$$R_{x1} = \frac{E_1}{I_1} - R_{内1} = \frac{I_{g1} R_{内1}}{I_1} - R_{内1} = \left(\frac{I_{g1}}{I_1} - 1 \right) R_{内1}$$

选择“ $\times k$ ”挡时

$$R_{xk} = \frac{E_k}{I_k} - R_{内k} = \frac{I_{gk} R_{内k}}{I_k} - R_{内k} = \left(\frac{I_{gk}}{I_k} - 1 \right) R_{内k}$$

如图7所示为电流表刻度盘, 设电流表总格子数为 N , 在同一“刻度”位置时的格子数为 n , 因为电流表的刻度是均匀的, 同一位置电流表的电流占总量程的比例相等, 即 $\frac{I_1}{I_{g1}} = \frac{I_k}{I_{gk}} = \frac{n}{N}$.

结合上述各式可得

$$k = \frac{R_{xk}}{R_{x1}} = \frac{R_{内k}}{R_{内1}}$$

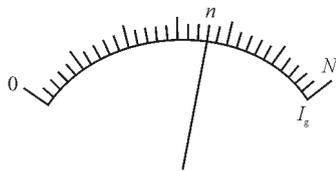


图7 电流表刻度盘

2.2 结论

结论:从数值上看,欧姆表的倍率 k 与其内阻 $R_{\text{内}k}$ 成正比。

如果仅仅从内阻的角度去理解倍率问题,处理起来难度较大,甚至无法得到正确的结果,下面试图将内阻进行转化,以便使研究更具体. 因为 $R_{\text{内}} = \frac{E}{I_g}$,

$$\text{所以 } k = \frac{R_{\text{内}k}}{R_{\text{内}1}} = \frac{I_{gk1}}{I_{gk}} = \frac{E_k}{E_1} \frac{I_{g1}}{I_{gk}}, \text{ 通过结果说明,实际上所}$$

谓的换挡归根结底无外乎就是换电源电动势 E 和电流表的量程 I_g .

(1) 由 $k = \frac{E_k}{E_1} \frac{I_{g1}}{I_{gk}}$ 说明欧姆表的倍率 k 与其电源电动势 E 成正比、与“满偏电流 I_g ”成反比;

(2) 电源电动势 E 一定的情况下: $k = \frac{I_{g1}}{I_{gk}}$, 说明欧姆表的倍率 k 与其“满偏电流” I_g 成反比;

(3) “满偏电流” I_g 一定的情况下: $k = \frac{E_k}{E_1}$, 说明欧姆表的倍率 k 与其电源电动势 E 成正比。

【例2】某物理兴趣小组要组装一个简易的欧姆表,他们设计了如图8(a)所示的电路,通过控制单刀多掷开关,可使欧姆表具有“ $\times 1$ ”“ $\times 10$ ”和“ $\times 100$ ”3个倍率的挡位,并使改装后的刻度盘正中央的刻度为“15”,如图8(b)所示. 所提供的器材及规格如下:

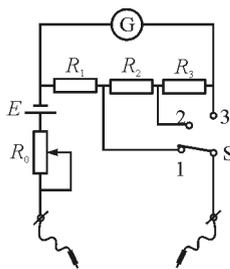
- A. 干电池(电动势 $E = 1.5 \text{ V}$, 内阻不计)
- B. 电流表表头 G (量程 $500 \mu\text{A}$, 内阻 180Ω)
- C. 定值电阻 R_1 (阻值为 1.8Ω)
- D. 定值电阻 R_2 、 R_3
- E. 滑动变阻器 R_0 (阻值范围 $0 \sim 1500 \Omega$, 额定电流 0.5 A)
- F. 单刀多掷开关一个,红、黑表笔各一支,导线若干

(1) 开关 S 接_____时,为欧姆表“ $\times 1$ ”倍率的挡位;

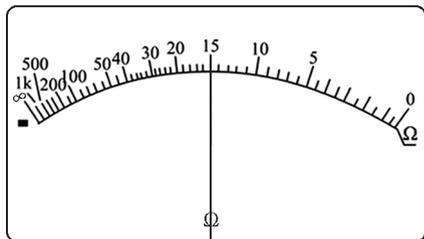
(2) 定值电阻 $R_2 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$, $R_3 = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$;

(3) 现利用该欧姆表测定一未知电阻 R_x 的阻值,将开关 S 接2,经正确操作后,欧姆表的指针位置如图8(c)所示,为较准确地测定被测电阻的阻值,以下正确且必要的操作是_____;

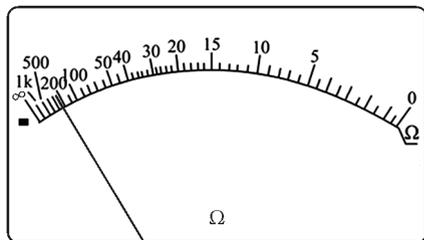
- A. 开关 S 接1
- B. 开关 S 接3
- C. 将红、黑表笔短接,调节滑动变阻器 R_0 使指针指在电阻的“0”刻线
- D. 将红、黑表笔短接,调节滑动变阻器 R_0 使指针指向电阻的“ ∞ ”刻线



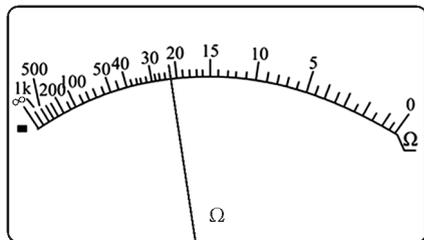
(a)



(b)



(c)



(d)

图8 例2题图

(4) 按正确方法测量电阻 R_x 的阻值, 欧姆表示数如图 8(d) 所示, 则 $R_x = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$.

解析: (1) 开关 S 接 1、2、3 时的等效电路分别如图 9(a)、(b)、(c) 所示.

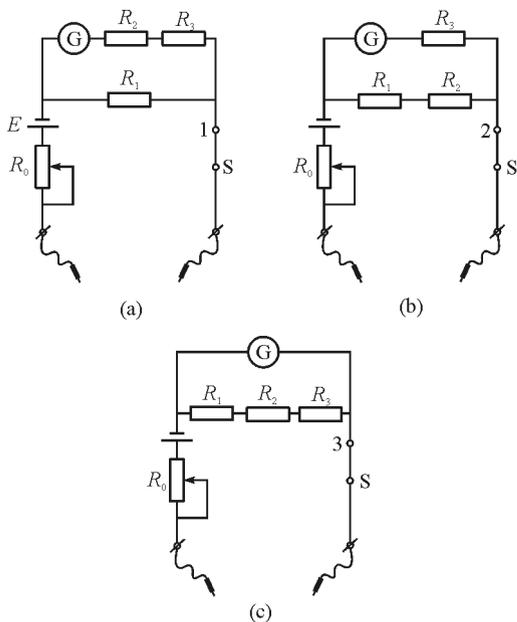


图 9 等效电路图

电流表满偏电流的大小分别为

$$I_{g1} = I_g + \frac{I_g(R_g + R_2 + R_3)}{R_1} = \frac{I_g(R_1 + R_2 + R_3 + R_g)}{R_1}$$

$$I_{g2} = I_g + \frac{I_g(R_g + R_3)}{R_1 + R_2} = \frac{I_g(R_1 + R_2 + R_3 + R_g)}{R_1 + R_2}$$

$$I_{g3} = I_g + \frac{I_g R_g}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{I_g(R_1 + R_2 + R_3 + R_g)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$I_{g1} > I_{g2} > I_{g3}$$

电源电动势 E 恒定, 欧姆表的倍率与其“满偏电流”成反比, 因此 1、2、3 分别对应“ $\times 1$ ”“ $\times 10$ ”和“ $\times 100$ ”3 个倍率挡;

(2) 开关 S 接 1 时, 欧姆表内阻 $R_{内1} = 15 \Omega$, 满偏电流

$$I_{g1} = \frac{E}{R_{内1}} = 100 \text{ mA}$$

同理分别接 2、3 时

$$I_{g2} = \frac{I_g(R_1 + R_2 + R_3 + R_g)}{R_1 + R_2} = 10 \text{ mA}$$

$$I_{g3} = \frac{I_g(R_1 + R_2 + R_3 + R_g)}{R_1 + R_2 + R_3} = 1 \text{ mA}$$

联立可得

$$R_2 = 16.2 \Omega \quad R_3 = 162 \Omega$$

(3) 选择开关 S 接 2 时, 对应的倍率为“ $\times 10$ ”挡, 欧姆表指针偏角较小, 说明被测电阻的阻值较大, 为较准确测量, 应换用大倍率“ $\times 100$ ”挡, 选择开关 S 应接 3, 并重新进行欧姆调零, 因此选项 B、C 正确;

(4) 欧姆表示数为 $R_x = 22 \times 100 \Omega = 2.2 \times 10^3 \Omega$.

3 欧姆表的综合考查

对于欧姆表, 很多情况下都不是对单一问题的考查, 而是以综合问题的形式呈现, 特别是当表头的连接方式改变和含有多个电源的情况, 高度和难度并存才能高屋建瓴, 触类旁通.

【例 3】疫情居家抗疫期间, 小马同学根据家中的实验器材设计了如图 10 所示的简易欧姆表, 他希望通过调节选择开关 S 使欧姆表具有“ $\times 1$ ”和“ $\times 10$ ”的两种倍率.

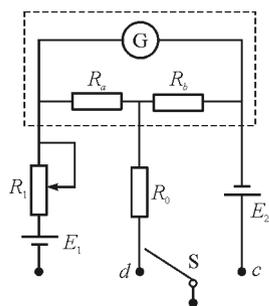


图 10 简易欧姆表

可供选择实验器材如下:

- A. 干电池两节(电动势 $E_1 = E_2 = 1.5 \text{ V}$, 内阻均不计)
- B. 电流表表头 G(满偏电流 $I_g = 1 \text{ mA}$, 内阻 $R_g = 190 \Omega$)
- C. 定值电阻 R_0 (阻值 $R_0 = 5.0 \Omega$)
- D. 滑动变阻器 R_1 (最大阻值为 150Ω)
- E. 定值电阻 R_a 、 R_b
- G. 单刀多掷选择开关一个, 红、黑表笔各一支, 导线若干

(1) 当选择开关 S 合向 时欧姆表的倍率为“ $\times 10$ ”挡;

(2) 已知欧姆表为“ $\times 1$ ”倍率时的中值电阻为 $15\ \Omega$, 则定值电阻 $R_a = \underline{\hspace{2cm}}\ \Omega, R_b = \underline{\hspace{2cm}}\ \Omega$;

(3) 将开关 S 合向 d , 第一步: 将红、黑表笔短接, 调节滑动变阻器 R_1 , 电流表电流达到满偏电流; 第二步: 在红、黑表笔间接入待测电阻 R_x , 发现电流表指针指向 $\frac{I_g}{3}$ 的位置, 则 $R_x = \underline{\hspace{2cm}}\ \Omega$.

解析: (1) 选择开关接 c 时, 相当于电流表满偏电流

$$I_{gc} = I_g + \frac{I_g R_g}{R_a + R_b} = \frac{I_g (R_a + R_b + R_g)}{R_a + R_b}$$

总电动势 $E_c = E_1 + E_2$

选择开关接 d 时, 相当于电流表满偏电流

$$I_{gd} = I_g + \frac{I_g (R_b + R_g)}{R_a} = \frac{I_g (R_a + R_b + R_g)}{R_a}$$

总电动势 $E_d = E_1$

因此 c, d 的倍率之比

$$\frac{k_c}{k_d} = \frac{E_c}{E_d} \times \frac{I_{gd}}{I_{gc}} = \frac{E_1 + E_2}{E_1} \times \frac{R_a + R_b}{R_a} > 1$$

因此选择开关接 c 时为高倍率, 即为“ $\times 10$ ”挡倍率, d 是低倍率, 即为“ $\times 1$ ”倍率;

(2) 当开关 S 合向 d 端时, 则中值电阻为 $R_{中d} = 15\ \Omega$, 则

$$I_{gd} = \frac{E_1}{R_{中d}} = 100\ \text{mA}$$

当开关 S 合向 c 端时, 则中值电阻为 $R_{中c} = 150$

Ω , 则

$$I_{gc} = \frac{E_1 + E_2}{R_{中c}} = 20\ \text{mA}$$

结合

$$I_{gd} = \frac{I_g (R_a + R_b + R_g)}{R_a}$$

$$I_{gc} = \frac{I_g (R_a + R_b + R_g)}{R_a + R_b}$$

可解得电阻

$$R_a = 2\ \Omega \quad R_b = 8\ \Omega$$

(3) 根据闭合电路的欧姆定律得 $I_{gd} = \frac{E_1}{R_{中d}}$, 在红、黑表笔间接入待测电阻 R_x , 发现电流表指针指向 $\frac{I_g}{3}$ 的位置, 干路电流 $I = \frac{I_{gd}}{3}$, 则 $\frac{I_{gd}}{3} = \frac{E_1}{R_{中d} + R_x}$, 解得 $R_x = 30\ \Omega$.

通过以上理论分析和例题可以看出, 从欧姆表内阻 $R_{内}$ 、电流表的满偏电流 I_g 、电源电动势 E 这 3 个角度理解的测量原理和欧姆表的倍率问题, 问题便可迎刃而解。

参考文献

- [1] 江秀梅, 刘大明. 欧姆表内部电路结构和换挡原理的分析[J]. 物理教学探讨, 2013, 31(8): 62-63.
- [2] 熊忠. 活用“中值电阻”分析欧姆表的相关问题[J]. 中学物理教学参考, 2020, 50(1): 7-8.

Discussion on Measuring Principle and Magnification of Ohmmeter

MA Shibiao

(Anhui Suixi Middle School, HuaiBei, Anhui 235100)

Abstract: The application of an ohmmeter is one of the compulsory experiments for the college entrance examination. However, whether frontline physics teachers or college entrance examination candidates, they only know the characteristics of ohmmeters, such as the characteristics of scale lines, measurement system error analysis, and so on, but don't know why. The measurement principle and shifting principle of an ohmmeter are even more challenging, and there is no systematic explanation of these issues in textbooks and various teaching aids. In this paper, combined with the knowledge of closed circuit Ohm's law, the problem of ohmmeter is deeply studied.

Key words: Ohmmeter; the characteristics of the scale lines; the measurement principle; shifting principle; closed circuit Ohm's law