

物理实验中单臂电桥灵敏度分析与测量

肖淙文¹,赵冠湘²,贺水燕²

(1. 长郡中学,湖南 长沙 410002; 2. 湖南科技大学,湖南 湘潭 411201)

摘 要:用单臂电桥测量电阻是普通物理实验中常用的一种电阻测量方法。依据单臂电桥的工作原理,通过理论分析和数学推导,分析了影响单臂电桥灵敏度的各种因素,给出了获得最大灵敏度时电桥应具备的条件。最后通过实验进一步验证了推导出的结论。

关键词:单臂电桥;灵敏度;比例系数

中图分类号:TM938.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-5884(2014)08-0177-02

单臂电桥在精密电磁测量、工业自动化检测等领域中有着广泛的应用,它不仅可以用来测量电阻,还可以用来测量电容、电感、频率、温度等许多物理量。用单臂电桥测量各种物理量时,电桥灵敏度是一个必须考虑的问题,因为它能决定测量值的准确性^[1]。

1 单臂电桥工作原理

单臂电桥原理电路图如图 1 所示。 R_1, R_2 为已知电阻,称为比例臂。 R_4 为可调电阻,用来调节电桥以达到平衡状态,称为比较臂。 R_x 为待测电阻。检流计用来检测“桥”上是否有电流通过。

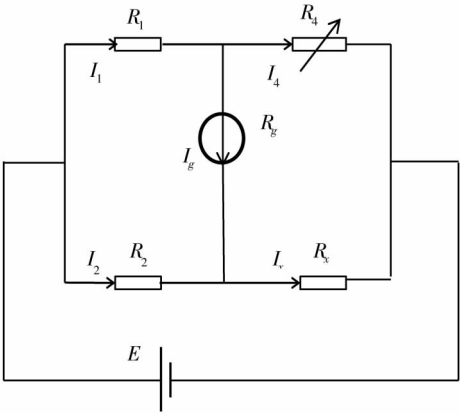


图 1 单臂电桥原理电路图

设回路中每条支路电流如图 1 中标示,由基尔霍夫定律可列出回路方程为:

$$I_1 = I_g + I_4$$
$$I_2 = I_x - I_g$$

$$I_1 R_1 + I_4 R_4 = E$$
$$I_2 R_2 + I_x R_x = E$$
$$R_1 I_1 + R_g I_g - R_2 I_2 = 0$$

联立方程组求解,可得:

$$I_g = \frac{E(R_2 R_4 - R_1 R_x)}{R_g(R_1 + R_4)(R_2 + R_x) + R_1 R_4(R_2 + R_x) + R_2 R_x(R_1 + R_4)}$$

要使电桥平衡,必须使 $I_g = 0$, 即应设置 $R_2 R_4 - R_1 R_x = 0$ 。

即 $R_x = \frac{R_2}{R_1} R_4$ (1)

通常定义 $C = \frac{R_2}{R_1}$, 称为电桥的比例系数^[2]。实验时,通过调节 R_4 可使电桥平衡,从而可由式(1)求出待测电阻 R_x

2 单臂电桥灵敏度分析

当电桥平衡时,给 R_4 加一个微小的调节量 dR_4 , 检流计上就会有微电流 dI_g 通过,通过微分可求出:

$$\frac{dI_g}{dR_4} = \frac{R_2 E}{R_g(R_1 + R_4)(R_2 + R_x) + R_1 R_4(R_2 + R_x) + R_2 R_x(R_1 + R_4)}$$
 (2)

设此时检流计上对应的读数表格偏转为 $dn, dn = S_{检} dI_g$, 则电桥相对灵敏度的定义^[3]为:

$$S = \frac{dn}{dR_4/R_4} = \frac{S_{检} dI_g}{dR_4/R_4}$$

其中, $S_{检}$ 为检流计的灵敏度。

代入式(2)并简化,可得到:

$$S = \frac{S_{检} E}{R_g(1 + \frac{R_1}{R_4})(1 + \frac{R_x}{R_2}) + R_{总}}$$

其中, $R_{总} = R_1 + R_2 + R_x + R_4$

由式(3)可看出,电桥的相对灵敏度 S 与检流计的灵敏度 $S_{\text{检}}$ 和电源电压 E 成正比,即随着 $S_{\text{检}}$ 、 E 的增大,电桥的相对灵敏度增加。但由于各桥臂电阻允许功率的限制,电源电压的最大取值也受到了限制。

下面我们假定 $S_{\text{检}}$ 、 E 固定,来讨论已知电阻 R_1 、 R_2 、 R_g 的变化对相对灵敏度 S 的影响。

由于 $S_{\text{检}}$ 、 E 固定,可令 $Q = R_g(1 + \frac{R_1}{R_4})(1 + \frac{R_x}{R_2}) + R_{\text{总}}$, 分别求 Q 对 R_1 、 R_2 、 R_g 的导数,可得: $\frac{\partial Q}{\partial R_1} = \frac{R_g}{R_4}(1 + \frac{R_x}{R_2}) + 1$

$$\frac{\partial Q}{\partial R_2} = -\frac{R_g R_x}{R_2^2}(1 + \frac{R_1}{R_4}) + 1 \tag{4}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial R_g} = (1 + \frac{R_1}{R_4})(1 + \frac{R_x}{R_2})$$

由式(4)可见, $\frac{\partial Q}{\partial R_1} > 0$, $\frac{\partial Q}{\partial R_g} > 0$, 说明随着 R_1 (或 R_g) 的递增, Q 递增,而 S 递减,电桥相对灵敏度下降。

由 $\frac{\partial Q}{\partial R_2} = 0$,可求出当 $R_2 = \sqrt{R_g R_x(1 + \frac{R_1}{R_4})}$ 时,电桥相对灵敏度 S 具有最大值。

若令 $L = \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_x}$, 式(3)也可表达为

$$S = \frac{S_{\text{检}} E / R_g}{(1 + L)(1 + \frac{1}{L}) + R_{\text{总}} / R_g}$$

当 $R_{\text{总}}$ 、 R_g 一定时, $S \sim L$ 的变化曲线如图 2 所示。可看出,当 $L = 1$ 时,相对灵敏度 S 具有最大值。即当 $R_1 = R_4$, $R_2 = R_x$ 时,电桥灵敏度最高。

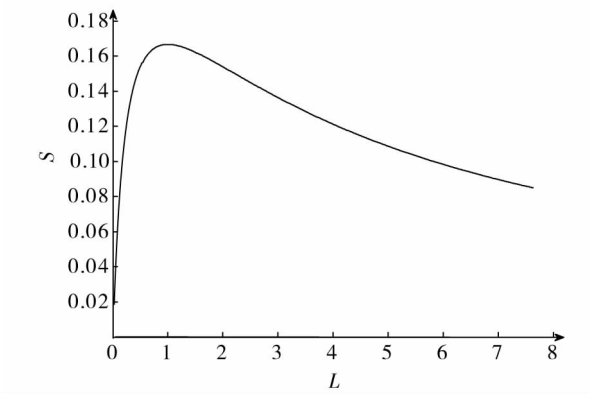


图 2 相对灵敏度 S 与 L 的变化曲线

3 实验结果及分析

前面分析了各种因素在不同条件下对电桥相对灵敏度 S 的影响,下面将通过实验来验证我们所推导出的结论。表 1 给出了各桥臂电阻变化对相对灵敏度 S 的影响。其中,第 1(3 行桥臂电阻中只有 R_g 变化,其它臂电阻值不变,可看出随着 R_g 的增大, S 值减小。第 1、4、5 行中则只有 R_1 变化,其它各固定臂电阻值不变,可看出随着 R_1 增大, S 值减小。而第 1、6、7 行则给出了 S 随 R_2 变化的情况,可看出,当 $R_2 = \sqrt{R_g R_x(1 + \frac{R_1}{R_4})}$ 时, S 可取得此条件下的最大值。

表 1 相对灵敏度 S 随各桥臂电阻变化表						
R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	R_g (Ω)	R_4 (Ω)	R_x (Ω)	dn(格)	S
400	400	200	100.5	100.5	6.8	2 536
400	400	400	100.4	100.4	5.2	1 631
400	400	600	100.4	100.4	4.1	1 202
200	400	200	100.6	201.2	8.1	3 116
600	400	200	100.6	67.1	5.8	2 040
400	200	200	100.5	50.25	6.3	2 415
400	316	200	100.5	79.5	7.7	2 854

4 结 语

本文讨论了单臂电桥中各因素对电桥相对灵敏度的影响。电桥的相对灵敏度与检流计的灵敏度和电源电压成正比,与臂电阻 R_1 和 R_g 成反比,在其它条件相同的情况下,当 $R_2 = \sqrt{R_g R_x(1 + \frac{R_1}{R_4})}$ 时,可获得最大相对灵敏度值。最后通过实验进行了验证。

参考文献:

[1] 吴培莉. 直流单臂电桥的准确度与灵敏度[J]. 云南电力技术,2001,29(2):35-36.
[2] 丁慎训,张连芳. 物理实验教程[M]. 北京:清华大学出版社(第二版),2003.
[3] 杨述武. 普通物理实验[M]. 北京:高等教育出版社,2000.

(责任校对 罗 渊)