

低阻测量中消除线电阻和接触电阻的原理及实现

黄永平¹, 金玉善², 汤建华¹, 于前洋¹, 邢忠宝¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021;

2. 长春五五所, 吉林 长春 130012)

摘要: 论述了有源电桥在刻蚀低电阻时的测量原理及其方法, 提出在低阻测量时消除线电阻及其接触电阻的方法, 对测量精度进行了分析, 对低阻测量及其控制有一定的参考价值。

关键词: 电桥; 电阻; 测量

中图分类号: TM 93 文献标识码: A

1 引言

经典的电阻测量方法, 虽有优点, 但很难进行高速测量, 标准电阻过多, 不经济, 不方便。保留经典电桥的差值测量方法的优点, 用少量标准电阻作为比较的标准, 利用伏安法测电阻的灵活性, 配以高精度的运算放大器, 就构成了各种有源电桥测量电阻的方案。保留经典电桥的“比较测量”的基本优点的前提下, 达到高速高精度电阻测量的目的^[1]。

在中阻区(100Ω~1MΩ)及其高阻区(>1MΩ)进行测量时, 线电阻, 干簧继电器接触电阻, 测量点接触电阻都可以忽略, 但在低阻区范围<100Ω进行测量时, 线电阻, 干簧继电器接触电阻, 测量点接触电阻都不可以忽略, 它们会影响测量的精度, 必须考虑。

2 有源单臂电桥测量原理

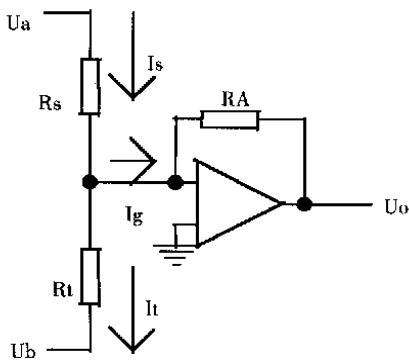


Fig. 1 Basic measurement theory of Wheatstone bridge

图1中, R_s 为标准电阻, R_t 为待测电阻, U_a , U_b 为两个独立电压源, 由 D/A 器件产生, 用运放构成电流检测器。

如图, 有:

$$\left. \begin{aligned} I_s &= \frac{U_a}{R_s} \\ I_t &= -\frac{U_b}{R_t} \\ U_o &= -I_g R_A \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$I_g = I_s - I_t = \frac{U_a}{R_s} + \frac{U_b}{R_t} \quad (2)$$

电桥平衡时: $I_g = 0, U_o = 0$, 由(2)式得到:

$$R_t = -\frac{U_b}{U_a} R_s \quad (3)$$

(3)式表明, 仅靠一个标准电阻 R_s 和 U_a, U_b 的调整, 即可以得到待测电阻 R_t 的精确值。

不平衡时: $I_g \neq 0, U_o \neq 0$, 由(1)(2)式得到:

$$R_t = -\frac{U_b}{U_a + \frac{R_s}{R_A} U_o} R_s \quad (4)$$

(4)式表明, 由 R_s, R_A, U_a, U_b, U_o 可以得到待测电阻 R_t 的精确值。

3 有源单臂电桥在低阻区测量原理

3.1 测量原理

三线制电阻测量方法只能消除等值线电阻的影响, 不能消除接触电阻的影响, 当考虑线电阻或接触电阻不相等时, 可以用四线制来设计电路消除线电阻及其接触电阻的影响^[1-2], 接触电阻包括干簧继电器的接触电阻及探针与毛坯电阻的接触电阻。

如图 2 采用四个探针进行测量, 其等效电路如图 3, 其中 R_{j1} 、 R_{j2} 、 R_{j5} 、 R_{j6} 是探针与毛坯电阻的接触电阻, 它们与相应的线电阻串联; R_{j3} 、 R_{j4} 、 R_{j7} 、 R_{j8} 是镀锡引脚之中相应的探针接触点到待测电阻点的等效电阻。

用探针 1、3 作为驱动端, 则 R_{j3} 、 R_{j4} 与探针 1、3 相应电路中的线电阻串联; 用探针 2、4 作为电压检测反馈端, 最终测得的电阻是 $R_t = R_t + R_{j4} + R_{j8}$, 对于镀锡引脚(或镀银引脚) 设 $R_{j4} = 0$; $R_{j8} = 0$ 则 $R_t = R_t$ 。此方法抵消了一切线电阻(包括不等值线电阻)、干簧继电器的接触电阻、探针与毛坯电阻的接触电阻对电路的影响, 只剩下 R_{j4} 、 R_{j8} 的影响。由于结构上的原因 R_{j4} 、 R_{j8} 是不能消除的, 只能通过采用导电好的材料制作引脚(如镀银引脚) 和减小探针 2、4 与待测电阻的距离来减小 R_{j4} 、 R_{j8} 的电阻值。

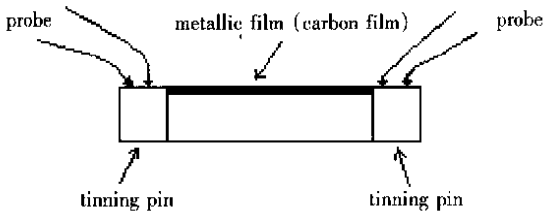


Fig. 2 Structure of resistor and probe

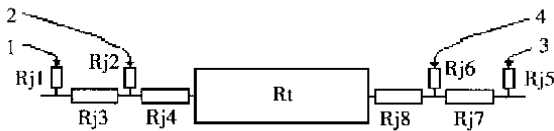


Fig. 3 Equivalent circuit of resistance with probe

如图 4, 考虑用电流驱动, 双电压检测的方法。 R_{s1} 、 R_{s2} 、 R_{s3} 、 R_{s4} 包括了相应的线电阻及其相应的接触电阻, 其中 $R_{s1} = R_{j1} + R_{j3} + R_{line1} + R_{dry1}$, $R_{s2} = R_{j2} + R_{line2} + R_{dry2}$, $R_{s3} = R_{j6} + R_{line3} + R_{dry3}$, $R_{s4} = R_{j5} + R_{j7} + R_{line4} + R_{dry4}$, $R_{line1} \sim R_{line4}$ 是相应回路的线电阻, $R_{dry1} \sim R_{dry4}$ 是相应回路干簧继电器的接触电阻。 R_s 是标准电阻。

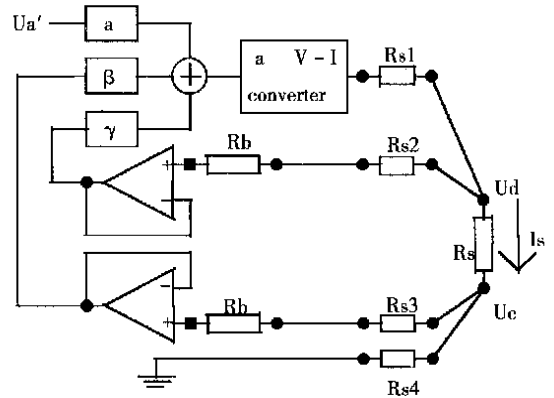


Fig. 4 Voltage source with feedback

条件①: 运算放大器失调电流= 0。由图 4 得到:

$$I_s = a(\alpha U_a + \beta U_c + \gamma U_d) \quad (5)$$

条件②: 令 $\beta = -\gamma$

得到:

$$I_s = a[\alpha U_a + \beta(U_c - U_d)] \quad (6)$$

而

$$U_d - U_c = R_s I_s \quad (7)$$

(7) 代入(6) 化简得到:

$$I_s = \frac{\alpha U_a}{\frac{1}{a} + \beta R_s} \quad (8)$$

(8) 式表明 I_s 与线电阻、接触电阻无关。

条件③: 若令 $\alpha = \beta = -\gamma = 1$

设 $R_0 = \frac{1}{a}$

得到 R_s 驱动部分的电流:

$$I_s = \frac{U_a}{R_0 + R_s} \quad (9)$$

同理得到 R_t 驱动部分的电流:

$$I_t = \frac{-U_b}{R_0 + R_t} \quad (10)$$

(10) 式表明 I_t 与线电阻、接触电阻无关。

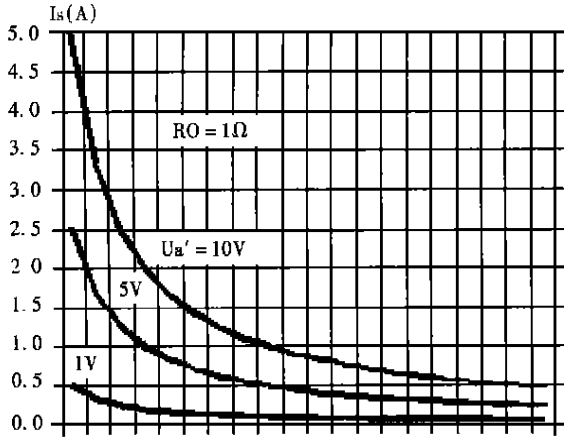


Fig. 5 Curves of $I_s = \frac{U_a}{R_s}$, R_s equal 1Ω per grid

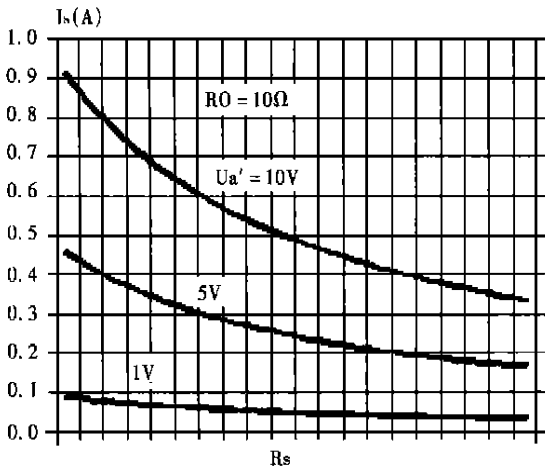


Fig. 6 Curves of $I_s = \frac{U_a}{R_s}$, R_s equal 1Ω per grid

I_s 的最大值:

$$I_{smax} = \frac{U_a}{R_0} \quad (11)$$

I_t 的最大值:

$$I_{tmax} = \frac{-U_b}{R_0} \quad (12)$$

在 $R_0 = 1\Omega$, $R_s = 1\Omega \sim 20\Omega$ 时 $I_s = \frac{U_a}{R_0 + R_s}$ 的曲线如图 5。

由公式(22)知 I_s 在 $R_s = -R_0 = -1\Omega$ 有极点。实际上 $I_s = \frac{U_a}{R_0 + R_s}$ 是把 $I_s = \frac{U_a}{R_s}$ 向左移动 R_0 单位得到的。

$I_t = \frac{-U_b}{R_0 + R_t}$ 的曲线 $I_t = f(R_t)$ 与 $I_s = f(R_s)$ 一样,只是用 I_t 代替 I_s ; R_t 代替 R_s ; $-U_b$ 代替 U_a 。

在 $R_0 = 10\Omega$, $R_s = 1\Omega \sim 20\Omega$ 时

$I_s = \frac{U_a}{R_0 + R_s}$ 的曲线如图 6。由公式知 I_s 在 $R_s = -R_0 = -10\Omega$ 有极点。

可以减小 R_0 来增加 I_s 的变化,这对测量精度有利,但 I_s 的最大值($\frac{U_a}{R_0}$)也在增加,注意 I_s 的最大值不要超过电路允许的最大值。

以上只是对 $I_s = \frac{U_a}{R_0 + R_s}$ 的不同情况进行分析,它同样适用于 $I_t = \frac{-U_b}{R_0 + R_t}$,实际进行刻电阻时, R_s 相对不变,而 R_t 随着光刻长度在增大,则 I_t 减小,平衡时, $I_s = I_t$ 。

3.2 V-I 变换电路的设计(采用 PA10A)

利用功率放大器 PA10A 设计电压/电流变换器^[3]。

由 PA10A 器件资料得到 PA10A 的最大电流为:

$$I_{max} = \frac{0.65}{R_{cl}}$$

其中 $R_{cl} = R_{cl1} = R_{cl2}$

取 $R_{cl} = 210/3.3$

得到:

$$I_{max} = 200.0649\text{mA}$$

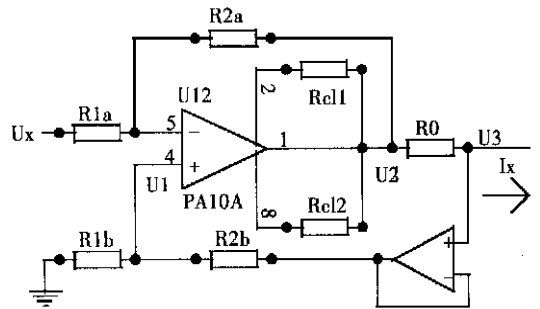


Fig. 7 Voltage-current conversion

由图 7 得到:

$$\frac{U_x - U_1}{R_{1a}} = \frac{U_1 - U_2}{R_{2a}} \quad (13)$$

$$U_1 = \frac{R_{1b}}{R_{1b} + R_{2b}} U_3 \quad (14)$$

$$I_x = \frac{U_2 - U_3}{R_0} \quad (15)$$

由(13)(14)(15)消去 U_2, U_3 得到:

$$I_x = -\frac{R_{2a}}{R_{1a}R_0}U_x + \left(\frac{R_{2a}}{R_{1a}} - \frac{R_{2b}}{R_{1b}}\right)U_1 \quad (16)$$

令 $\frac{R_{2a}}{R_{1a}} = \frac{R_{2b}}{R_{1b}}$ 得到

$$I_x = -\frac{R_{2a}}{R_{1a}R_0}U_x \quad (17)$$

条件④: 若令 $\frac{R_{2a}}{R_{1a}} = \frac{R_{2b}}{R_{1b}} = 1$ (取 $R_{1a} = R_{2a} = R_{1b} = R_{2b} = 10k$)

得到:

$$I_x = -\frac{U_x}{R_0} \quad (18)$$

3.3 电路的设计

由图 4、图 7 及条件①②③④设计电路, 得到图 8。

同理得到 R_t 的驱动电路, 两部分合成图如图 9。

电桥平衡时: $I_g = I_s - I_t = 0$

$$\text{即 } \frac{U_a}{R_o + R_s} + \frac{U_b}{R_o + R_t} = 0$$

化简得到:

$$R_t = \frac{-U_b}{U_a}(R_s + R_0) - R_0 \quad (19)$$

不平衡时:

$$R_t = \frac{-U_b}{U_a}(R_s + R_0) \frac{1}{1 - \frac{I_g(R_s + R_0)}{U_a}} - R_0 \quad (20)$$

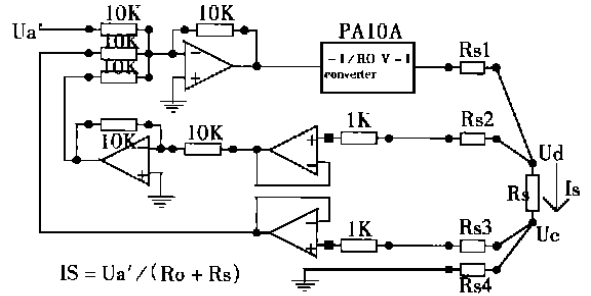


Fig. 8 Real voltage source with feedback

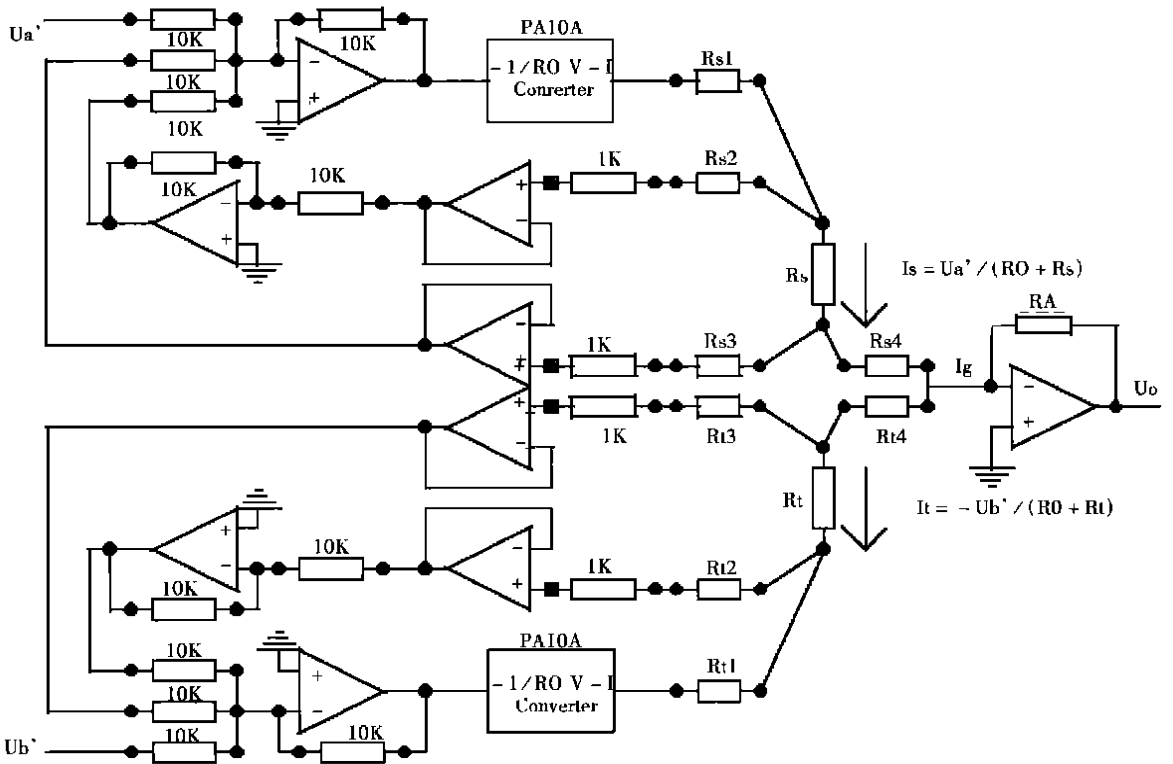


Fig. 9 Two real voltage sources with feedback

4 精度分析

$$dR_t = \frac{(R_t + R_0)^2}{U_b (R_s + R_0)} dU_a + \frac{R_t + R_0}{U_b} dU_b - \frac{(R_t + R_0)^2}{U_b} dI_g + \frac{R_t - R_s - \frac{I_g (R_t + R_0)^2}{U_b}}{R_s + R_0} dR_0 \quad (21)$$

$$\frac{dR_t}{R_t} = \frac{U_a (R_t + R_0)^2}{U_b (R_s + R_0) R_t} \frac{dU_a}{U_a} + \frac{R_t + R_0}{R_t} \frac{dU_b}{U_b} - \frac{(R_t + R_0)^2 I_g}{U_b R_t} \frac{dI_g}{I_g} + \frac{(R_t - R_s - \frac{I_g (R_t + R_0)^2}{U_b}) R_0}{(R_s + R_0) R_t} \frac{dR_0}{R_0} - \frac{U_b R_s}{(1 - \frac{I_g}{U_a (R_s + R_0)^2})^2} \frac{dR_s}{R_s} \quad (22)$$

相对误差:

$$\Delta R_t = \frac{U_a (R_t + R_0)^2}{U_b (R_s + R_0) R_t} \Delta U_a + \frac{R_t + R_0}{R_t} \Delta U_b - \frac{(R_t + R_0)^2 I_g}{U_b R_t} \Delta I_g + \frac{(R_t - R_s - \frac{I_g (R_t + R_0)^2}{U_b}) R_0}{(R_s + R_0) R_t} \Delta R_0 - \frac{U_b R_s}{U_a R_t (1 - \frac{I_g (R_s + R_0)^2}{U_a})^2} \Delta R_s \quad (23)$$

电桥平衡时,由(19)式得到: $\frac{(R_t + R_0) U_a}{(R_s + R_0) U_b} = -1$ 代入(23)式

$$\Delta R_t = - \frac{R_t + R_0}{R_t} \Delta U_a + \frac{R_t + R_0}{R_t} \Delta U_b - \frac{(R_t + R_0)^2 I_g}{U_b R_t} \Delta I_g + \frac{(R_t - R_s) R_0}{(R_s + R_0) R_t} \Delta R_0 - \frac{U_b R_s}{U_a R_t} \Delta R_s \quad (24)$$

(24)式说明,用这种有源电桥进行电阻测量,待测电阻的相对误差由五个分量构成,它们分别是:

① 电压源 a 的相对误差 ΔU_a ,使用高位的 D/A 器件,使 ΔU_a 减小;同时选择小的 R_0 值。

② 电压源 b 的相对误差 ΔU_b ,使用高位的 D/A 器件,使 ΔU_b 减小;同时选择小的 R_0 值。

③ 运放失衡电流的相对误差 ΔI_g ,使用失衡电流小的运放,同时,在满足 R_t 的功率要求的情况下,使 $I_t = \left| \frac{U_b}{R_t + R_0} \right|$ 尽量大,从而使 $\left| \frac{(R_t + R_0)^2 I_g}{U_b R_t} \right|$ 尽量小。

④ R_0 相对误差 ΔR_0 ,使用高精度的精密电阻;选择小的 R_0 值;选择 R_s 接近 R_t 的标准电阻。

⑤ 标准电阻的相对误差 ΔR_s ,使用高精度的精密电阻。

5 结束语

以上提出了有源电桥在低电阻刻蚀中的电阻测量原理及其电路设计,分析了提高精度的方法,提出了消除引线电阻及其接触点电阻的方法,对低阻测量有一定的参考价值。在中阻区及其高阻区测量时,引线电阻及其接触点电阻可以忽略,在高阻区测量时,主要考虑消除漏电阻的影响。

参考文献:

- [1] 李继凡, 罗远瑜. 精密电气测量[M]. 北京: 计量出版社, 1984.
- [2] 林德杰, 林均淳. 电气测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [3] 韦特 J V 著. 沈承杭, 等译. 运算放大器原理和应用导论[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1983

Theory and implementation method of removing line resistance and junction resistance in low resistance measurement

HUANG Yong-ping¹, JIN Yu-shan², TANG Jian-hua¹,
YU Qian-yang¹, XING Zhong-bao¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China;*
2. *Changchun 55 Research Inst., Changchun 130012, China*)

Abstract: The measurement theory and method of source Wheatstone bridge in low resistance trim were described. The method of removing line resistance and junction resistance in low resistance measurement was proposed, and the measurement precision was analyzed. The method is valuable to the low resistance measurement and control.

Key words: Wheatstone bridge; resistances; measurements

作者简介: 黄永平(1964-), 男(朝鲜族), 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要从事单片机、EDA 技术、计算机测控系统、计算机网络方面的研究工作。Email: huang@ccipt.edu.cn。