

# 430-451 電阻之測定及誤差之討論

研究者： 鄭欣佩 蔡岑儀  
          王夢蓮

指導老師： 張仁昌

## 壹、研究動機

在偶然的機會下，在書上看到了測量電阻的方法有《伏安法》、《惠斯同電橋法》以及《雙電橋法》同時也看到電橋的裝置其形狀，十分特別。我們不禁被它吸引住了！在張老師的鼓勵下，我們嘗試著試驗這些測量電阻的方法。

在初步測量時，我們發現《伏安法》、《惠斯同電橋法》都能量出電阻的值，但是其值並不相同，這代表測量值和時際值有誤差的存在。那麼，誤差是什麼，又為什麼會有誤差？什麼方法可以減少誤差？

張老師熱心地告訴我們，在實驗的操作過程一定會有人為誤差存在，即使實驗者非常小心，仍不能避免，而實驗器材也會造成誤差。於是我們便著手探討不同的測量電阻方式所造成的結果之差異。

由於《雙電橋法》的實驗器材無法取得，故我們就《伏安法》和《惠斯同電橋法》作討論。

## 貳、實驗器材

- 1、電源供應器
- 2、電阻箱
- 3、電阻
- 4、可變電阻
- 5、長導線
- 6、一般導線
- 7、粗短導線
- 8、鱷魚夾導線
- 9、伏特計
- 10、安培計
- 11、檢流計

## 參、實驗目的

學習用伏安法、惠斯同電橋法來測量未知電阻，且以測量值與實際值之間的誤差，求得誤差值（以“百分比”表示）。

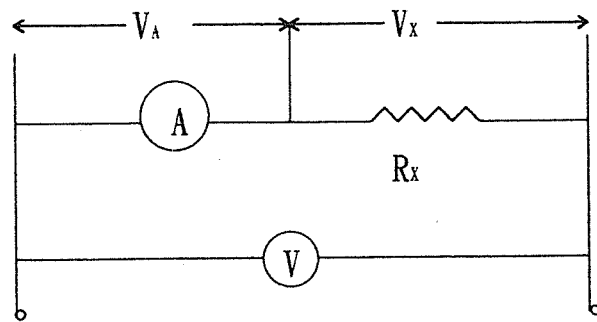
由實驗所得的誤差值比較伏安法、惠斯同電橋在測量電阻時所適用的範圍，並探討其原因，而歸納之。

## 肆、伏安法——實驗原理

伏安法測電阻時所通過的電流可以與該電阻工作時通過它的電流完全相同，這一點對於電阻值與工作電流有關的非線性元件（如鎢絲燈泡、半導體二極管）的測量是很重要的。但是由於伏特計、安培計有其內電阻，所以會影響測量結果的準確度。至於電表準確等級對測量結果的影響可以參考以下的方法而加以修正。

### （一）內接電路（如圖一所示）

安培計測量的是通過待測電阻  $R_x$  的電流  $I_x$ ，但伏特計測量的則是  $R_x$  上的電壓  $V_x$  與安培計上的電壓  $V_A$  之和。由安培計及伏特計讀數計算出電阻值。



（圖一）

$$R_x' = (V_x + V_A) / I_x = R_x + R_A \quad (1)$$

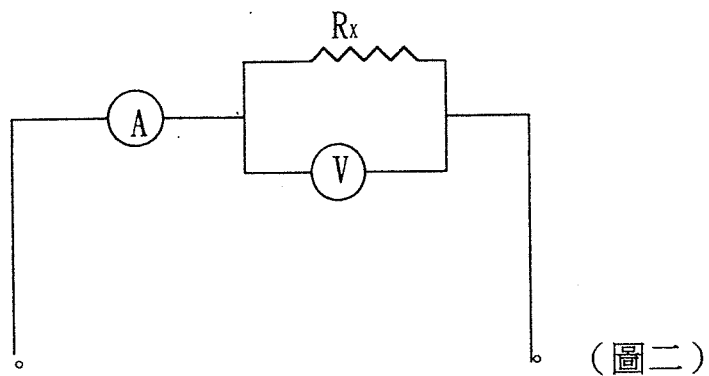
所引入的方法誤差用相對誤差表示為

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_x' - R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x} \quad (2)$$

由公式(2)看出，只有當  $R_x \gg R_v$ ，才能確保測量有足夠的準確度，所以測量較大電阻時宜採用安培計內接電路。

(二) 外接電路(如圖二所示)

伏特計測量的是  $R_x$  兩端電壓  $V_x$ ，但安培計測量的電流至是通過  $R_x$  的電流  $I_x$  之和。由安培計和伏特計讀數計算的結果實際是  $R_x$  與伏特計內電阻  $R_v$  的並聯電阻



$$\frac{R_x''}{1} = \frac{V_x}{I_x + I_v} = \frac{1}{\frac{I_x}{V_x} + \frac{I_v}{V_v}} = \frac{1}{\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_v}} = \frac{R_x R_v}{R_x + R_v}$$

(3)

所引入方法誤差用相對誤差表示：

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_x'' - R_x}{R_x} = \frac{-R_x^2}{R_x (R_x + R_v)} = \frac{-R_x}{(R_x + R_v)}$$

(4)

由公式看出，當待測電阻  $R_x$  較小時 ( $R_v \gg R_x$ ) 宜採用安培計外接電路。  
(式中負號表示安培計外接時電阻值測量結果偏小。)

當  $R_x$ ， $R_v$  和  $R_A$  滿足一定關係時，兩種電路將導致一樣大小的誤差

即

$$\frac{R_A}{R_x} = \frac{R_x}{R_x + R_v} \quad (5)$$

由於一般安培計內電阻  $R_A$  比伏特計內電阻  $R_v$  小的多，且  $R_x \ll R_v$ ，由 (5) 式可以得到

$$R_x = \sqrt{R_A \cdot R_v} \quad (6)$$

就是說，當  $R_x = \sqrt{R_A \cdot R_v}$  時，兩種電路的方法誤差相等，  
當  $R_x > \sqrt{R_A \cdot R_v}$  時，採用安培計內接電路方法誤差較小，  
當  $R_x < \sqrt{R_A \cdot R_v}$  時，採用安培計外接電路方法誤差較小。

方法誤差屬於系統誤差，如果要得到電阻的準確值，可以對測量值進行修正，公式 (2) 及 (4) 中的  $R_x$  是真實值，不是測量值，而我們希望將測量值直接代入公式後計算接入誤差，對測量值進行修正。因此，我們將 (2) 式及 (4) 式改寫為下列形式。

安培計內接電路：

$$\begin{aligned} \Delta R_x &= R_A \\ R_x &= R_x' - R_A \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $R_x'$  是測量值， $R_A$  是安培計內電阻

安培計內接電路：由(3)和(4)式，經化簡可得到

$$\frac{\Delta R_X}{R_X''} = - \frac{R_X''}{R_V - R_X''} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta R_X}{I} = - \frac{R_X''^2}{R_V - R_X''} \quad (9)$$

其中  $R_X''$  是測量值， $R_V$  是伏特計內電阻。因此有

$$\frac{R_X}{I} = \frac{R_X''}{I} + \frac{R_X''^2}{R_V - R_X''} \quad (10)$$

## 伍、伏安法——實驗步驟

- 1、如圖一、二所示將電路裝置好  $R \leq \sqrt{R_{伏}R_{安}}$  時採用外接《圖二》，  
 $R \geq \sqrt{R_{伏}R_{安}}$  時採用內接《圖一》，（ $R_{伏}$ ：伏特計內電阻， $R_{安}$ ：  
安培計內電阻。）
- 2、調整可變電阻（當電阻值較大時，可變電阻可調得小些；當電阻值較小時，  
可變電阻可調得大些。）
- 3、讀取伏特計的電壓值  $V$  及安培計的電流值  $I$ ，然後計算  $V/I$  的值，記錄下來。

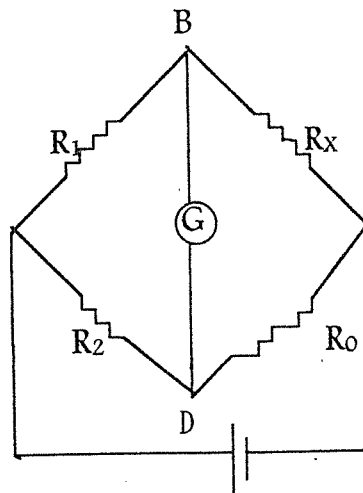
## 陸、惠斯同電橋——實驗原理

### 一、直流單電橋的電路及平衡條件

直流單電橋的基本電路圖如圖三所示。圖中的  $R_1$ 、 $R_2$  為比例臂； $R_0$  為可調標準電阻，常稱作比較臂； $R_x$  為待測電阻。在電路的對角連接點 B、D 之間接入檢流計，作為平衡指示器，用以比較這兩點的電位。調整  $R_0$  的大小，當檢流計指零時，B、D 點的電位相等，則電橋達到平衡，其平衡條件為：

$$R_x = R_1 R_0 / R_2 \quad (11)$$

根據上式，由比例臂  $R_1/R_2$  及比較臂  $R_0$  的大小，即可算出待測電阻  $R_x$  的電阻值。

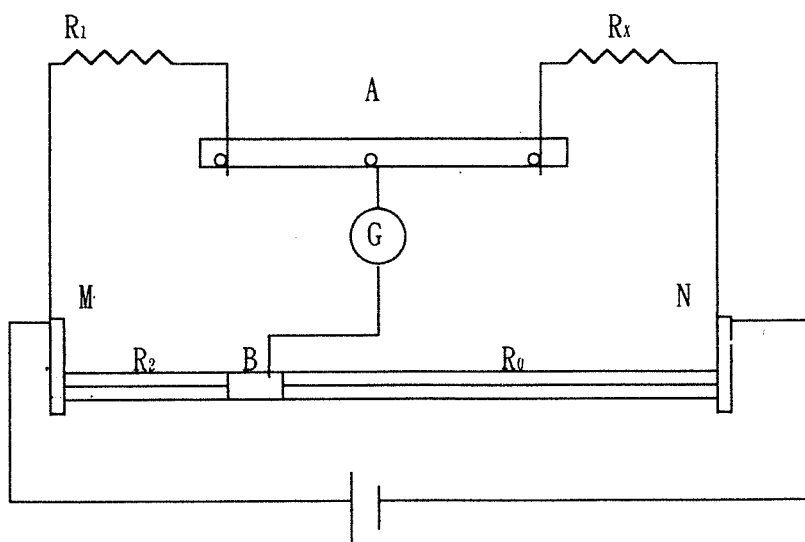


(圖三)

## 二、滑線惠斯同電橋的結構及平衡條件

滑線惠斯同電橋之線路圖，如圖四所示。M, B, N 為一均勻金屬線，通常置於一公制尺上。由電阻定義，得知電阻  $R_0$  和  $R_2$  之比即為金屬線長 BN 與 MB 之比。A 為固定點，電流計 G 之另一接觸點 B 可在 MN 金屬線上滑動，若找到一平衡點（也就是電流計之指針為零時），則公式 (11) 可寫成

$$R_x = R_1 \left( \frac{BN}{MB} \right) \quad (12)$$



(圖四)



## 柒、惠斯同電橋——實驗步驟

- 1、如圖四所示，將惠斯同電橋線路接好（ $R_1$  為電阻箱， $R_x$  為待測電阻。連接電阻箱與待測電阻之間所使用的連接線盡量用粗短者，每一接頭，須確實旋緊，以免造成重大誤差。）
- 2、先將檢流計之接線 B 置於滑線中央，按上電池開關。
- 3、調整電阻箱之電阻，使電流計之指針接近零。
- 4、移動檢流計之接頭 B，使檢流計正對零。
- 5、記錄 $R_1$  之值與滑線之長BN、MB，利用公式(12)計算待測未知的電阻。
- 6、重複上述實驗，並計算各電阻值。
- 7、由測試電阻上所提供之規格與上述實驗所得之電阻，計算各管線之電阻係數，再與標準值比較。

## 捌、實驗結果與分析

### (一) 數據

#### 實驗數據 伏安法 $1\Omega-10\Omega$

實際電阻值	測量值1	測量值2	測量值3	平均值	精確值	誤差值比例
1 $\Omega$	1.16	0.91	1.00	1.02	1.02	2.00%
2 $\Omega$	2.80	1.99	2.20	2.34	2.34	17.00%
3 $\Omega$	3.56	3.17	3.86	3.56	3.56	18.67%
4 $\Omega$	4.50	4.91	4.69	4.70	4.70	17.50%
5 $\Omega$	5.89	5.39	5.63	5.64	5.64	12.80%
6 $\Omega$	6.75	6.56	6.83	6.71	6.71	11.83%
7 $\Omega$	7.47	7.33	7.28	7.36	7.36	5.14%
8 $\Omega$	8.26	8.19	8.64	8.36	8.36	4.50%
9 $\Omega$	9.52	9.52	9.92	9.65	9.65	7.22%
10 $\Omega$	11.11	10.14	10.08	10.44	10.44	4.40%

#### 實驗數據 惠斯同電橋 $1\Omega-10\Omega$

實際電阻值	測量值1	測量值2	測量值3	平均值	誤差值比例
1 $\Omega$	0.58	0.99	0.79	0.79	21.00%
2 $\Omega$	1.67	2.04	1.77	1.83	7.50%
3 $\Omega$	2.86	3.15	2.75	2.92	2.67%
4 $\Omega$	4.56	4.16	3.87	4.20	5.00%
5 $\Omega$	3.90	5.16	4.99	5.08	1.60%
6 $\Omega$	5.17	6.35	5.93	5.82	3.00%
7 $\Omega$	6.67	7.36	6.62	6.88	1.71%
8 $\Omega$	9.78	8.38	7.21	8.46	5.75%
9 $\Omega$	8.95	9.49	8.31	8.92	0.80%
10 $\Omega$	10.06	10.53	9.42	10.00	0.00%

**實驗數據**伏安法  $10\Omega-100\Omega$ 

實際電阻值	測量值1	測量值2	測量值3	平均值	精確值	誤差值比例
10 $\Omega$	11.11	10.14	10.08	10.44	10.44	4.40%
20 $\Omega$	22.24	21.60	20.27	21.37	21.37	6.85%
30 $\Omega$	35.00	32.43	31.00	32.81	32.82	9.37%
40 $\Omega$	47.10	42.50	42.69	44.10	44.11	10.28%
50 $\Omega$	56.62	52.75	55.00	54.79	54.81	9.62%
60 $\Omega$	68.92	63.41	65.70	66.00	66.03	10.05%
70 $\Omega$	77.20	74.67	72.10	74.66	74.69	6.70%
80 $\Omega$	93.54	83.10	87.09	87.91	87.95	9.94%
90 $\Omega$	98.85	95.38	91.94	95.39	95.44	6.04%
100 $\Omega$	122.55	100.00	100.00	107.52	107.58	7.58%

**實驗數據**惠斯同電橋  $10\Omega-100\Omega$ 

實際電阻值	測量值1	測量值2	測量值3	平均值	誤差值比例
10 $\Omega$	10.06	10.53	9.42	10.00	0.00%
20 $\Omega$	20.30	20.93	19.92	20.38	1.90%
30 $\Omega$	30.70	31.30	30.00	30.67	2.23%
40 $\Omega$	41.35	41.91	40.73	41.33	3.33%
50 $\Omega$	51.43	52.12	50.81	51.45	2.90%
60 $\Omega$	62.59	62.60	61.46	62.22	3.70%
70 $\Omega$	72.68	73.10	71.99	72.59	3.80%
80 $\Omega$	83.33	83.15	82.60	83.03	3.79%
90 $\Omega$	94.93	94.93	93.67	94.51	5.01%
100 $\Omega$	107.60	104.72	101.41	104.58	4.58%

**實驗數據**伏安法  $100\Omega-1000\Omega$ 

實際電阻值	測量值1	測量值2	測量值3	平均值	精確值	誤差值比例
100 $\Omega$	122.55	100.00	100.00	107.52	107.58	7.58%
200 $\Omega$	200.59	204.85	204.26	209.90	210.12	5.06%
300 $\Omega$	337.50	304.83	293.75	312.03	312.52	4.17%
400 $\Omega$	447.37	410.38	387.80	415.18	416.05	4.01%
500 $\Omega$	546.88	502.82	495.00	514.90	513.70	2.74%
600 $\Omega$	635.71	568.75	585.80	596.75	595.55	0.74%
700 $\Omega$	750.00	681.48	668.92	700.13	698.93	0.02%
800 $\Omega$	834.86	781.51	763.32	793.24	792.04	0.10%
900 $\Omega$	968.42	885.51	825.00	893.24	891.84	0.09%
1000 $\Omega$	1027.78	940.00	1000.00	989.26	988.06	1.19%

**實驗數據**惠斯同電橋  $100\Omega-1000\Omega$ 

實際電阻值	測量值1	測量值2	測量值3	平均值	誤差值比例
100 $\Omega$	107.60	104.72	101.41	104.58	4.58%
200 $\Omega$	208.77	256.58	206.50	233.95	16.98%
300 $\Omega$	318.27	476.56	312.24	315.26	5.06%
400 $\Omega$	419.20	417.43	520.41	418.32	4.58%
500 $\Omega$	532.60	525.70	413.84	490.71	2.32%
600 $\Omega$	642.11	633.69	629.99	635.26	5.87%
700 $\Omega$	739.60	735.51	731.49	735.53	5.07%
800 $\Omega$	853.18	851.85	765.42	820.48	2.56%
900 $\Omega$	936.73	940.92	939.13	938.93	4.33%
1000 $\Omega$	1062.50	1062.71	1004.01	1043.07	4.31%

**實驗數據** 伏安法  $1K\Omega-10K\Omega$

實際電阻值	測量值1	測量值2	測量值3	平均值	精確值	誤差值比例
1K $\Omega$	1027.78	940.00	1000.00	989.26	988.06	1.19%
2K $\Omega$	1904.36	1855.47	1918.37	1821.78	1820.58	8.97%
3K $\Omega$	2790.92	2988.63	3062.50	2947.35	2946.15	1.79%
4K $\Omega$	3944.52	4213.85	3807.69	3988.69	3987.49	0.03%
5K $\Omega$	5044.38	4829.59	4714.29	4862.75	4861.55	2.77%
6K $\Omega$	5500.00	5980.42	5732.78	5737.74	5736.54	4.39%
7K $\Omega$	6436.78	6742.32	6600.00	6593.03	6591.83	5.83%
8K $\Omega$	8044.62	7524.29	7615.38	7728.10	7726.90	3.41%
9K $\Omega$	9144.32	9000.00	8402.68	8849.00	8847.80	1.68%
10K $\Omega$	9333.34	9142.86	9090.90	9189.03	1987.83	8.12%

**實驗數據** 惠斯同電橋  $1K\Omega-10K\Omega$

實際電阻值	測量值1	測量值2	測量值3	平均值	誤差值比例
1K $\Omega$	1062.50	1062.71	1004.01	1043.07	4.31%
2K $\Omega$	2125.00	2102.04	2095.68	2107.57	5.28%
3K $\Omega$	3102.04	3110.89	3124.80	3112.58	3.75%
4K $\Omega$	4220.84	4208.10	4211.18	4213.37	5.33%
5K $\Omega$	5326.01	5257.04	5219.18	5267.41	5.34%
6K $\Omega$	6298.76	6232.51	5000.00	5843.76	2.60%
7K $\Omega$	7331.44	7361.11	7285.71	7326.09	4.66%
8K $\Omega$	8333.33	8281.54	8345.68	8320.18	4.00%
9K $\Omega$	9377.93	9305.02	9333.33	9338.76	3.76%
10K $\Omega$	10527.95	10449.90	10366.60	10448.15	4.48%

**實驗數據**伏安法  $10K\Omega-100K\Omega$ 

實際電阻值	測量值1	測量值2	測量值3	平均值	精確值	誤差值比例
10K $\Omega$	9333.34	9142.86	9090.90	9189.03	9187.83	8.12%
20K $\Omega$	11000.00	10888.88	11111.11	10999.99	10998.79	45.01%
30K $\Omega$	15823.53	15210.53	14285.71	15106.59	10105.39	66.32%
40K $\Omega$	16600.00	17538.46	20000.00	18046.15	18044.95	54.89%
50K $\Omega$	18250.00	17615.38	16500.00	17455.13	17453.93	65.09%
60K $\Omega$	14625.99	17432.85	16500.00	16063.28	16062.08	73.23%
70K $\Omega$	18250.00	16533.33	20000.00	18261.11	18259.91	73.91%
80K $\Omega$	27623.55	28500.00	25000.00	27041.18	27039.98	66.20%
90K $\Omega$	28640.00	27000.00	25000.00	26880.00	26878.80	70.13%
100K $\Omega$	28083.33	28250.00	33333.33	29888.89	29887.69	70.11%

**實驗數據**惠斯同電橋  $10K\Omega-100K\Omega$ 

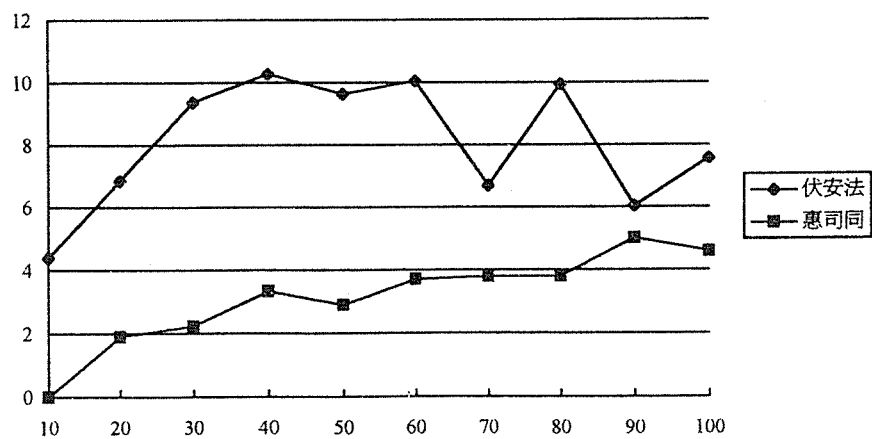
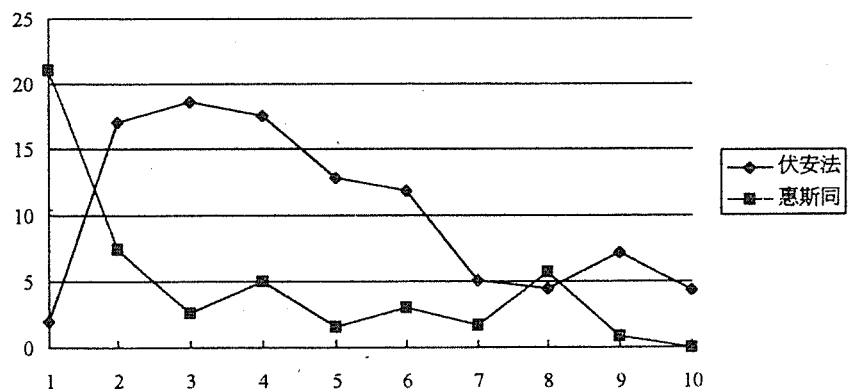
實際電阻值	測量值1	測量值2	測量值3	平均值	誤差值比例
10K $\Omega$	10527.95	10449.90	10366.60	10448.15	4.48%
20K $\Omega$	21545.74	21545.74	21650.79	21580.76	7.90%
30K $\Omega$	31580.04	31666.67	31666.67	31637.79	5.45%
40K $\Omega$	41546.39	43475.94	44200.54	43074.29	7.68%
50K $\Omega$	51728.40	55359.48	55265.06	54117.65	8.20%
60K $\Omega$	66923.08	65923.08	63444.44	65430.20	9.05%
70K $\Omega$	78430.89	78430.89	78430.89	78430.89	12.04%
80K $\Omega$	80000.00	79000.00	80851.85	79950.62	0.06%
90K $\Omega$	101111.11	101244.90	102402.06	101586.02	12.87%
100K $\Omega$	111222.22	115436.78	116906.97	115421.99	15.42%

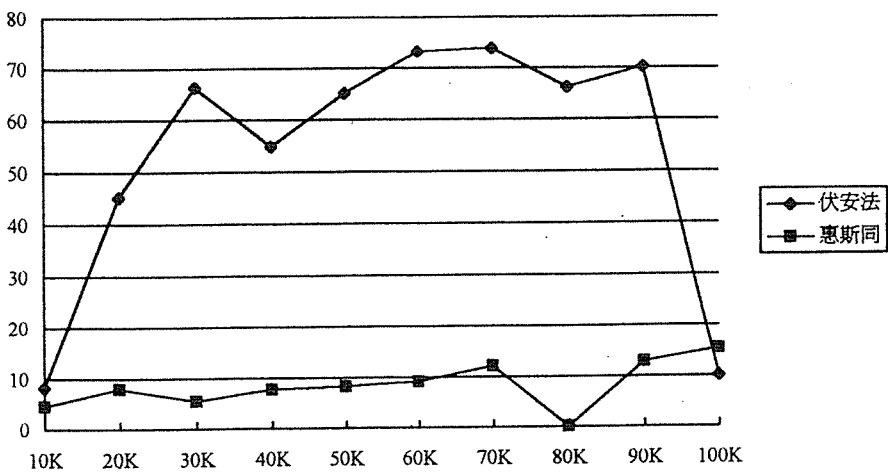
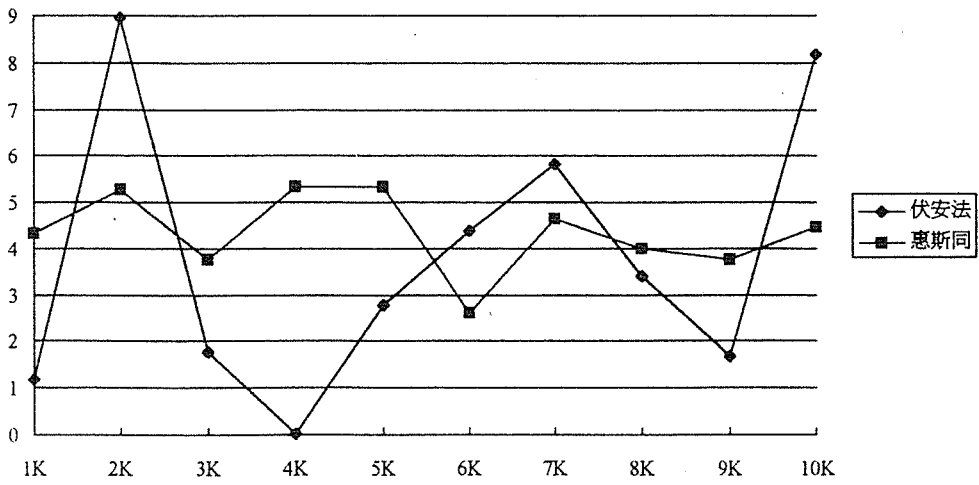
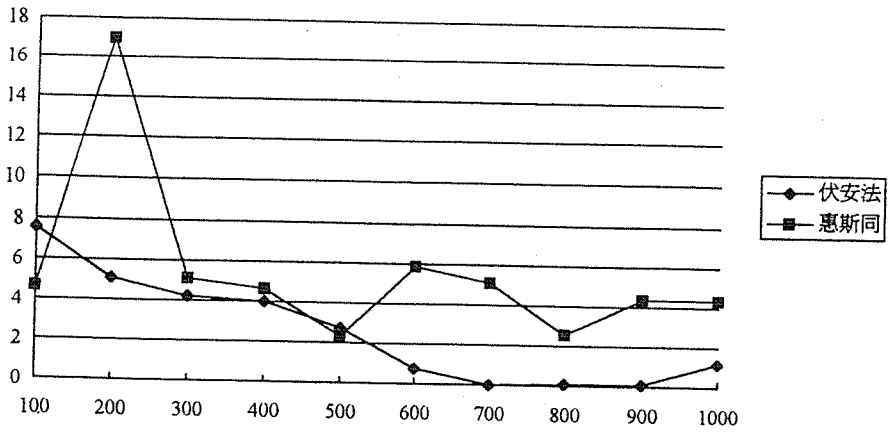
(二) 曲線圖

伏安法與惠斯同電橋誤差比例折線圖

縱坐標：誤差比例 (%)

橫坐標：電阻值 ( $\Omega$ )







(三) 比較

至於「伏安法」和「惠斯同電橋」對於電阻的準確度由表所示

伏安法和惠斯同電橋的比較										
電阻值 $\Omega$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
伏安法	✓							✓		
惠斯同		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
電阻值 $\Omega$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
伏安法										
惠斯同	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
電阻值 $\Omega$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
伏安法		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
惠斯同	✓				✓					
電阻值K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
伏安法	✓		✓	✓	✓			✓	✓	
惠斯同		✓				✓	✓			✓
電阻值K	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
伏安法										
惠斯同	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

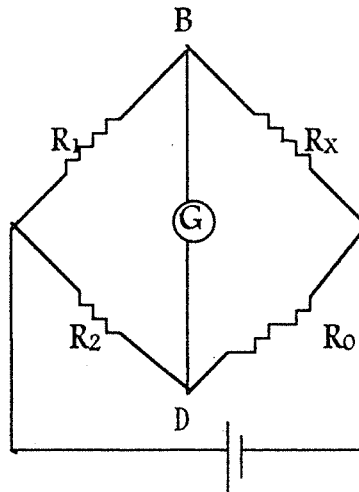
兩者比較, 較準確的打 ✓

由上表可明顯地看出, 伏安法和惠斯同電橋對於電阻的誤差並不一致, 在準確度方面有階段性, 例如在  $10 \sim 100 \Omega$ ,  $10K \sim 100K$  的範圍內, 利用惠斯同電橋法測出的電阻值比伏安法測出的值要準確許多了。而在  $100 \sim 1000 \Omega$  的範圍內, 伏安法卻略勝一籌了。

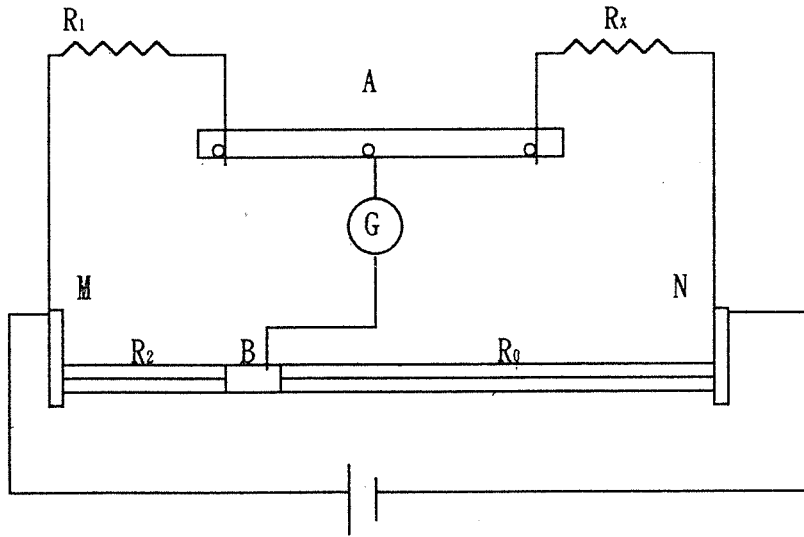
## 玖、討論

由「電阻—誤差值」的曲線圖中我們可以看出，電阻值和誤差值並無一定的關係，但在某些階段，誤差值的範圍很小，誤差比例也頗低。例如利用惠斯同電橋測量 10~100  $\Omega$  電阻的誤差比例皆小於等於 5.01 %，伏安法測量 100~1000  $\Omega$  電阻所得到的誤差比例皆小於 10.00 %。這是十分奇妙的！於是我們便去探討其原因。

惠斯同電橋法測未知電阻  $R_x$ ，當電橋平衡時，利用  $R_x = R_1 R_0 / R_2$  (1) 《參考圖一》而我們的實驗裝置如圖二。



(圖一)



(圖二)

M, B, N 為一均勻金屬線，制於一公制尺上。由電阻定義，得知電阻  $R_0$  和  $R_2$  之比即為金屬線長 BN 與 MB 之比，A 為固定點，檢流計 G 之另一接觸點可在 MN 金屬線上滑動，若找到一個平衡點（即檢流計之指針為零時）時，則公式 (1) 可寫成

$$R_2 = R_1 \frac{BN}{MB} \quad (2)$$

由公式 (2) 可知  $R_2$  和  $R_1$ , BN, MB 的關係十分密切。在 BN, MB 的測量部份，誤差很顯然地存在，但不能解釋上述的現象，於是我們由  $R_1$ （即電阻箱提供的電阻）開始著手。

利用三用電表我們發現電阻箱在提供電阻時，也有些誤差。在  $10\sim 100\ \Omega$  的範圍內，誤差比例皆小於  $0.01\%$ ，而範圍外的誤差比例便大了許多（約在  $0.2\%\sim 5\%$ ），而在我們測量過程中，由於取讀數據的方便，我們儘量不把 B 點取在靠近兩端的地方，即  $BN/MB$  之值不會過大或過小（約在  $1/2\sim 2$  倍間），故  $1/2 \times 10\sim 2 \times 100\ \Omega$  範圍內的電阻可測得較為準確。這也就是  $10\sim 100\ \Omega$  的誤差比例較小的緣故了。

至於伏安法測電阻時在  $100\sim 1000\ \Omega$  內較準的現象，我們發現在測量  $100\sim 1000\ \Omega$  的電阻時，伏特計和安培計的指針位於讀取的中央部分，讀數的讀取十分容易。同時在此範圍內指針的偏轉幅度不小，電壓和電流很適合這二電表的測量範圍，此二電表的靈敏度也較高。

在  $10K\ \Omega\sim 100K\ \Omega$  時，伏安法的誤差比例已高達  $73.91\%$ ，非常不精準，這是預料中的現象，因為在測  $10K\ \Omega\sim 100K\ \Omega$  的電阻時，讀取數據我們感到十分吃力，伏特計和安培計的指針偏轉幅度很小，刻度卻又不夠精密，因此我們只能目測其中微小的差距，所以誤差很大。在惠斯同電橋測高電阻時，誤差比例也略高了一些。這是因為電阻箱所提供的最大電阻為  $11K$ ，所以我們在滑線上取 B 點時《參考圖二》會十分靠近 M 點，所以也造成了較大的誤差值。

一般而言，惠斯同電橋測出的電阻值比伏安法準確，一方面是伏安法中電表的準確度不足使電流和電壓的測量有誤差，另一方面由於電表有一定的內電阻，在測量電流和電壓時又存在著人為誤差，故以伏安法測電阻較不穩定。

## 拾、心得

記得剛開始做專題研究時，內心著實惶恐，對專研有種期望，但不解、疑惑卻時時存在，還好張仁昌老師給了我們一些建議，讓我們一步步走下去。

決定這個題目時，有點感動，因為這幾個字，將伴著我們一年的專研課。從跑市圖、國家圖書館，去了解實驗，到熟練地裝置實驗、測量、探討原因，都是令人難忘的經驗。還記得第一次到光華商場購買電阻時，更是興奮地摸了又摸……原來電阻就是這麼可愛呀！

這一年的專研課讓我們學了很多，雖然結果沒有什麼偉大的發現、驚人的成果，但是從中我們知道如何蒐集資料，如何修正實驗，如何運用經費，如何虛心請教，如何分析、討論，對自己的實驗負責任。更重要的，我們真正體會到從挫折中爬起來再接再勵的精神。

一路走來，並不順利，也體會了靠自己力量的難能可貴。雖然沒有人帶著我們一步一步走，但是張老師適時的提醒，及自我的壓力讓我們也走了過來，而且走得很快樂。

## 拾壹、感謝

1. 北一女中張仁昌老師的指導。
2. 北一女中特教組長黃通鑑老師的行政配合及支援。
3. 北一女中實驗準備人員周同文先生的熱心幫助。

## 拾貳、參考資料

- ◎ 物理學 第三冊  
譯者：王唯農、王明建、蔡正治  
p.104 — 117  
東華書局
  
- ◎ 普通物理實驗  
孟爾熹 主編  
p.152 — 154 169 — 171  
山東大學出版社
  
- ◎ 大學物理實驗  
賈玉潤、王公治、凌佩玲 主編  
復旦大學出版社
  
- ◎ 普通物理實驗  
H.F.近斯納 W.埃彭斯泰 K.H.穆爾 著  
p.193 — 196  
科學出版社
  
- ◎ 普通物理學 第三冊 UNIVERSITY PHYSICS  
作者：HARRIS BENSO  
p.199 — 204  
歐亞書局
  
- ◎ 高等學校適用教材  
梁汕彬、秦光戎、梁竹健 著  
p.210 — 217  
高等教育出版社
  
- ◎ 普通物理實驗指導 電磁學  
謝慧媛、梁秀慧、朱世嘉、嚴雋鈺 主編  
p.25 — 36 65 — 89  
北京大學出版社
  
- ◎ 物理學 第三冊  
陳龍英 著  
p.873 — 875  
三民書局