

電學基本量測

一、目的：

熟悉電學量測的一些基本觀念和一般實驗室常用儀器的操作。

二、原理：

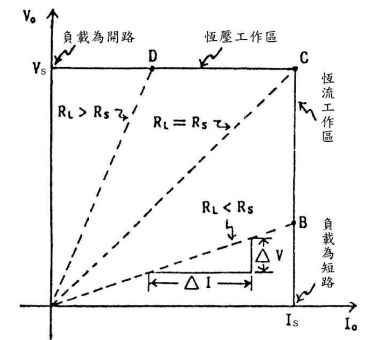
(一) 電源供應器(power supply)

不論負載如何改變，輸出電壓仍能維持不變的電源稱為恆壓源，一般以 CV 符號表示；不論負載如何改變，輸出電流仍能維持不變的電源稱為恆流源，以符號 CC 或 CCS 表示之

一般在實驗室中所使用的直流電源供應器為。恆壓/恆流(CV/CC)供應器。圖 1 為為 CV/CC 電源供應器的工作特性曲線。當電源供應器的輸出端短路($R_L=0$)時，輸出電壓 $V_o=0$ ，輸出電流 $I_o=I_s$ (I_s 為電源供應器面板上電流控制鈕所設定的電流值)。在輸出端接上可變電阻 R_L 後，把 R_L 從零慢慢調大，如果小於負載電阻之臨界值 R_s ($R_s=V_s/I_s$)，則輸出電壓 V_o 亦隨著 R_L 慢慢增加，輸出電流則一直保持於 I_s ，亦即電源供應器自動設定於恆流工作區，圖 1 中的 B 點即為 $R_L < R_s$ 時的工作點。在恆流工作區內輸出電壓 V_o 與 R_L 之關係為 $V_o=I_s R_L$ 。當 R_L 繼續調大至 $R_L=R_s$ ($R_s=V_s/I_s$) 時，輸出電壓 $V_o=I_s R_L=V_s$ ，這時電源供應器處於恆壓與恆流工作區的臨界點。只要 R_L 稍大於 R_s 時，電源供應器立刻自動跳接至恆壓工作區，此時輸出電壓 $V_o=V_s$ ，輸出電流隨 R_L 值而變，輸出電流與 R_L 之關係為 $I_o=V_s/R_L$ ，圖 1 中的 D 點即為 $R_L > R_s$ 時的工作點。若電源供應器輸出端不接負載(即 $R_L=\infty$)，輸出電流 $I_o=0$ ，輸出電壓 $V_o=V_s$ 。

在 CV/CC 電源供應器的設計中，沒有一種負載狀況能使供應器的輸出超出圖 1 的限制之外，因此使得負載元件能在電源供應器的電壓、電流雙重限制下，不會超過負載元件本身的額定值^{#1}，這樣不但使負載不致損毀，同時也使得電源供應器獲得適當的保護。

(二) 重疊原理



V_s = 電壓控制鈕設定之電壓

I_s = 電流控制鈕設定之電流

$$R_s = \frac{V_s}{I_s} = \text{負載電阻之臨界值與跨越值}$$

$$R_L = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

圖 1 CV/CC 電源供應器之工作軌跡。

#1 額定值表示原件所能承受的最大功率，例如有些電阻器上標有 "1W"，表示這類電阻器最大承受功率 "1W" (1W=1 J/S)

在說明重疊原理之前，我們必須先了解恆壓與恆流電源供應器的等效電路，圖 2 (a)所示為實際恆壓電源供應器的等效電路，為其內阻，由於我們希望電源供應器所有的能量都能用於推動負載 Z ，亦即 $V_Z = V$ ，所以，理想恆壓電源供應器的內阻值越小越好($r \rightarrow 0$)，圖 2(b)所示為一實際的恆流電源供應器， r 為其內阻，同樣地，為使所有的能量用於推動 Z ，恆流電源供應器的內阻值必須越大越好($r \rightarrow \infty$)，使得 $I_Z \approx I$ 。

所謂重疊原理就是一個線性網路如果同時包含幾個電源，其效應為各個電源單獨作用時的代數和。以圖 3 為例，圖 3(a)兩個電源在電路上所成的效應等於圖 3(b)和圖 3(c)兩個電源單獨所造成效應的和。因電流源的內阻非常大，所以可將圖 3(b)中電流源視為開路；而電壓源的內阻非常小，所以可將圖 3(c)中的電壓源部份視為短路；這兩個原則於下面討論戴維寧(Thevenin)定理和諾頓(Norton)定理時會再度用到。

(三) 戴維寧(Thevenin)定理與諾頓(Norton)定理

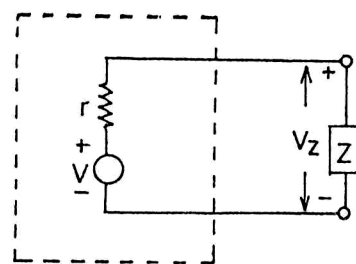
通常一個電路是由許多元件構成的，除了驅動電路所需的電壓源或電流源之外，這些元件包括電阻，電感和電容等被動元件和各種二極體，電晶體或真空管等主動元件兩大類。

如圖 4 所示的電路，方塊代表任意電路，裡面可能包括被動元件、主動元件、電源或是它們的組合， Z_L 為負載， Z_L 可能是由一個被動元件，或是由另一種電路所造成。為了瞭解 Z_L 的工作特性，時常需用一些複雜的代數運算，解出 Z_L 上的電壓值與電流值；為了解決這種困擾，以下我們介紹兩種解析電路的技巧，稱之為戴維寧定理及諾頓定理。為解說方便，我們以電阻電路來說明如何運用這兩個定理(文獻 1)

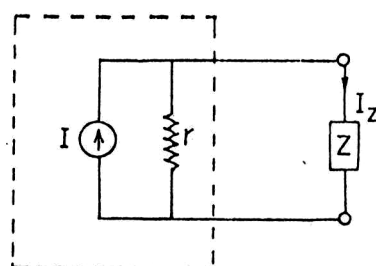
1. 戴維寧定理：

圖 5 的方塊代表任意電路， R_L 為負載電阻。戴維寧定理指出圖 5 的電路可以換成一個電壓源 V_T 串聯一個等效電阻 R_T 的組合，如圖 6 所示，其中圖 5 的輸出電流與圖 6 的輸出電流相等。戴維寧等效電路求法如下：

(a) V_T 的求法：將圖 5 電路的輸出端開路(亦即將 R_L 拿掉)，以電壓表量 a、b 兩端

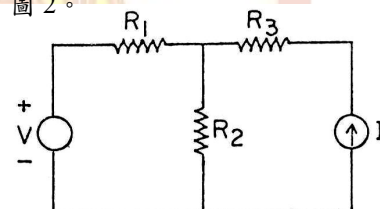


(a) 恆壓電源供應器。

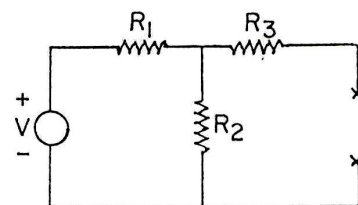


(b) 恆流電源供應器。

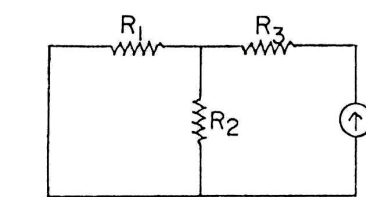
圖 2。



(a)



(b)



(c)

圖 3

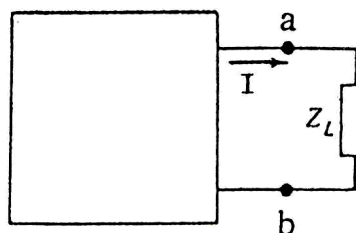


圖 4

的電壓，如圖 7(a)所示，電壓表上所示的電壓值即為 V_T 。

(b) R_T 的求法: 在前一單元。重疊原理。中曾提及電壓源內阻很小，電流源內阻非常大；因此可將圖 5 電路中的電壓源看成短路，電流源則看成斷路，如圖 7(b)所示，然後透過代數運算，可以得到由 a、b 端看進去的等效電阻，即為 R_T

解出如圖 6 的戴維寧等效電路後，就可利用這個等效電路解出任意的 R_L 電流值和電壓值。

$$I = \frac{V_T}{R_T + R_L}, \quad V_{ab} = \frac{V_T R_L}{R_T + R_L}$$

2. 諾頓定理：

與戴維寧定理相對應的另一定理是諾頓定理，這個定理是說如圖 8(a)的任意電路可以換成一個電流源 I_N 並聯一等效電阻 R_N ，如圖 8(b)所示。以下說明如何求諾頓等效電路。

(a) I_N 的求法: 將圖 8(a)電路的 R_L 拿開，接上電流表，測量輸出短路時的電流，如圖 8(c)所示，電流表上的讀值即為 I_N 。但是有些電路短路後電流會過大而損毀電路，所以不能用這種方法測量 I_N ； I_N 的另一種求法是直接從戴維寧等效電路所求得的 V_T 、 R_T 來算， I_N 與 V_T 、 R_T 的關係為

$$I_N = \frac{V_T}{R_T}$$

(b) R_N 的求法: 與戴維寧等效電路中的 R_T 求法相同。

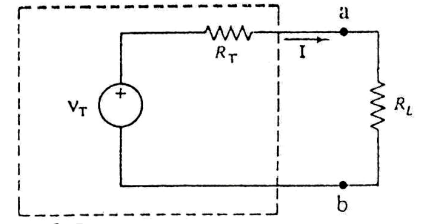


圖 5

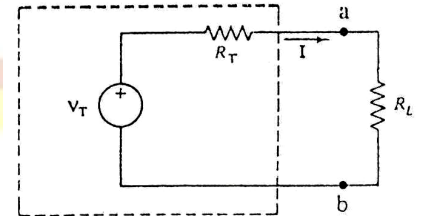
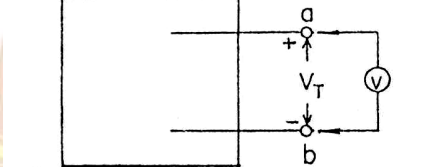
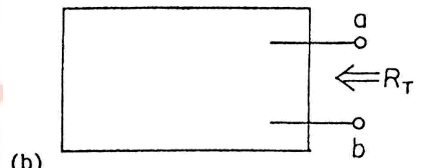


圖 6



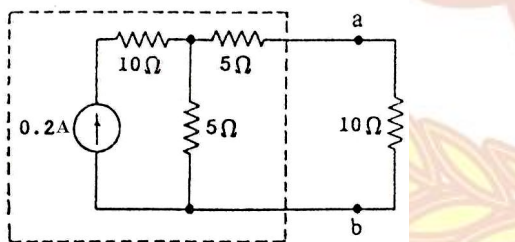
(a)



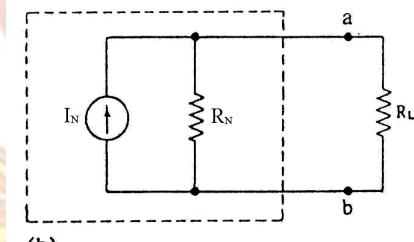
(b)

圖 7(a) V_T 的求法。

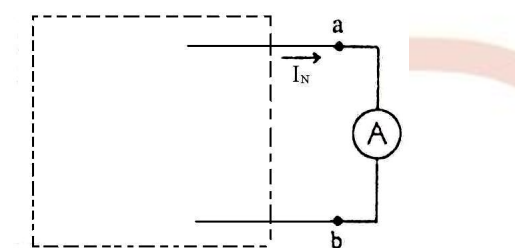
(b) R_T 的求法。



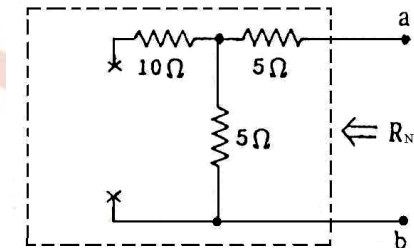
(a)



(b)



(c)

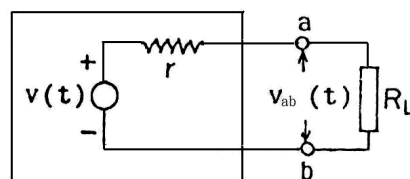


(d)

圖 8(a)任意的電阻 (b)諾頓等效電路 (c) I_N 的求法 (d)內阻的求法。

(四)輸出阻抗:

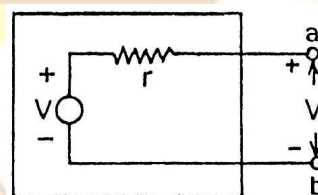
在實驗室中常常會利用信號產生器及波形產生器來驅動電路，圖 9 所示為這類儀器的戴維寧等效電路， r 為儀器的內阻， R_L 為負載，負載上的電壓 $v_{ab}(t)$ 為



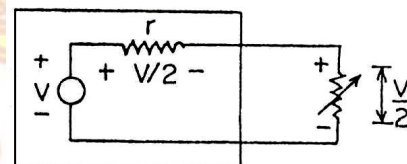
$$v_{ab}(t) = \frac{v(t)R_L}{R_L + r}$$

圖 9

如果 $R_L \gg r$ ，則 r 可以忽略不計， $v_{ab}(t) \approx v(t)$ ；如果 R_L 的數量級與 r 相近時，內阻 r 相對於 R_L 的效應便不能忽略。本單元以信號產生器及波形產生器為例，來說明如何測得儀器的輸出阻抗。信號產生器的輸出阻抗約為 600Ω ，測量的方法是如圖 10(a)，先量輸出開路時的電壓，再把一個可變電阻接到輸出端如圖 10(b)，將可變電阻器從最大電阻值開始慢慢調小，直到電阻上的電壓降為一半，這時可變電阻器的電阻值就等於儀器的輸出阻抗。這種方法通常用於輸出阻抗較大的儀器，有些儀器的輸出阻抗太小，可變電阻還沒調到內阻值便已把儀器燒毀，所以這種方法不能用於輸出阻抗較小的儀器上。波形產生器的內阻約為數十 Ω ，屬於輸出阻抗較低的儀器；測量這類儀器輸出阻抗最保險的方法，是先在儀器的輸出端串聯在一枚數十 Ω 的固定電阻 R ，如圖 11 所示，以避免電流過大而燒毀儀器；然後按照上面所敘述的步驟測量 AB 兩端的阻抗，再減去串聯的 R 值，即可得儀器的輸出阻抗。



(a) 輸出開路時電壓。



(b) 可變電阻值與輸出阻抗相等時之電壓

圖 10

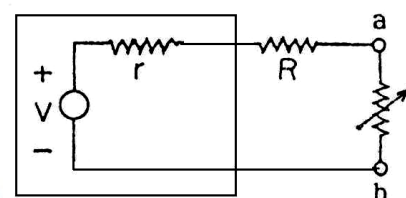


圖 11 儀器輸出時阻抗太小的時
測試方法。

(五)負載效應：

測量電路元件時，常需有少量電流流經測量的儀器，因此形成待測電路的負載。如果儀器的內阻遠大於待測元件的阻抗，則電路的負載效應可忽略。如果儀器的內阻與待測電路的阻抗的數量級相近時，一旦儀器接上待測元件後，會改變待測元件的電流值而造成測量上的誤差。

圖 12 表示一個簡單的電路，欲測量 R_2 上的電壓 V_2 ，在沒有負載效應時

$$V_2 = \frac{VR_2}{R_1 + R_2}$$

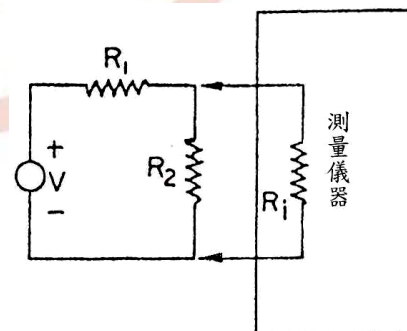


圖 12 儀器內電阻對待測電路造成的影響。

接上儀器(內阻為 R_i)後, V_2 變為

$$V_2' = \frac{V \cdot \frac{R_i}{R_2 + R_i}}{R_i + \frac{R_i R_2}{R_i + R_2}} \cdot R_2$$

如果 $R_i \gg R_2$, 則 $V_2' \approx V_2$, 這時, 儀器的內阻可以不必考慮(視為 $R_i = \infty$), 對於 R_2 兩端電壓的測量不會有影響。如果 R_i 的數量級與 R_2 接近, V_2' 與 V_2 會有很大的差距, R_i 對待測電路影響便不能忽略不計, 這就是負載效應。實驗室中所用的三用電表表面左下角標示 DC20k Ω /V, 表示使用 DC 50V 範圍時, 內阻為 1 M Ω (餘類推), 如果待測電阻 R_2 的數量級也是 M Ω , 則負載效應會很嚴重。

(六) 頻率響應:

一個電路或一部儀器的輸出功率和輸入信號的頻率有關, 在頻率高時, 輸出功率 P 通常會下降, 如圖 13 所示。 P 衰減至 $P/2$ 時(分貝數改變 $10 \log 1/2(\text{dB}) = -3\text{dB}^{#2}$) 的頻率稱為半功率點, 3dB 點或 3dB 頻率。

一部儀器的頻率響應與其本身的輸入阻抗有關。如圖 15 以一部儀器測量 R_2 的電壓(這部儀器可能是示波器, DMM 或三用電表)。頻率低時, 電容阻抗($= 1/\omega C_i$)很大, 所以 R_2 上的電壓不受儀器影響(不過仍要考慮負載效應)。但是頻率相當高時, 電容阻抗會降低, 如果降低至負載效應很明顯時, 在 R_i 、 C_i , 兩端獲得的電壓會降低。因此, 當我們以一部儀器測量電路時, 不但要考慮輸入阻抗對電路造成的。負載效應。 , 而且還要考慮電路上的信號頻率對測量的影響。

頻率高到多少時, 頻率響應會下降得很嚴重呢? 大概的估計是電容阻抗約等於前一級電路的待測阻抗或輸出阻抗時:

$$\frac{1}{\omega C_1} \approx R_2$$

$$f \approx \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$$

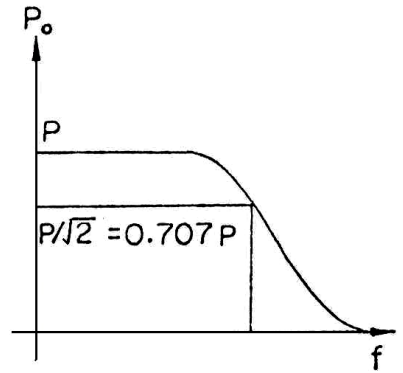


圖 13 頻率響應圖

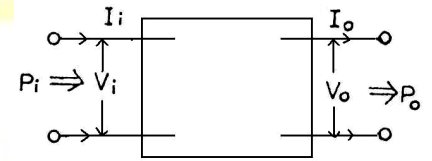


圖 14

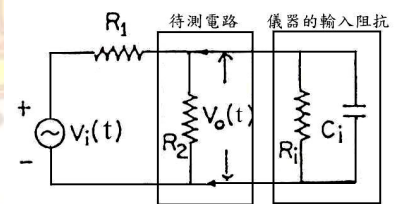
#2 功率的大小或放大率(參看圖 14)常以分貝(dB)為單位來表示, 其定義為

$$\text{分貝數} = 10 \log \frac{P_o}{P_i} \text{ (dB)}$$

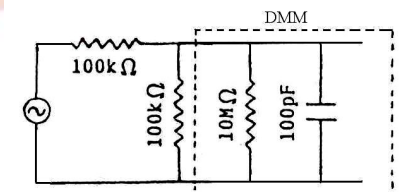
其中 P_i 為參考功率或輸入功率, P_o 為輸出功率。由於功率與電流、電壓均成平方關係, 因此功率比也可以寫成

$$\text{分貝數} = 20 \log \frac{I_o}{I_i} \text{ (dB)}$$

$$= 20 \log \frac{V_o}{V_i} \text{ (dB)}$$



(a) 輸入信號的頻率對測量儀器造成的頻率響應



(b) DMM 之頻率響應

圖 15

例如：用 DMM 測量在圖 15(b) 中 $100\text{k}\Omega$ 電阻器兩端的電壓，當頻率為

$$f \approx \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \approx 15\text{kHz}$$

時，頻率響應的效應會有嚴重的影響。

三、儀器與配件：

直流電源供應器、信號產生器、波形產生器、三用電表、數位式三用電表、示波器、電阻器。

四、步驟

(一) 恆壓源與恆流源：

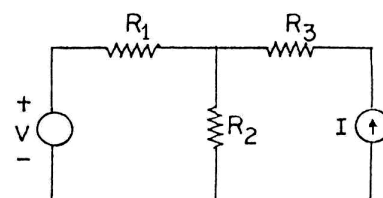
1. 直流電源供應器的輸出電流設定為 0.5A ：將電源輸出端短路，以電流控制鈕調到電流為 0.5A 。
2. 直流電源供應器的輸出電壓設定為 5V ：將電源輸出端開路，以電壓控制鈕調到電壓為 5V 。
3. 將 50Ω 可變電阻器接到直流電源供應器的輸出端，將電阻值從小調到大，記錄對應的電壓值和電流值。
4. 將電壓對電流作圖，從圖中看出那裡是定電壓操作，那裡是定電流操作。

(二) 重疊原理：

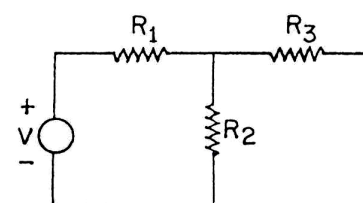
1. 接好如圖 16(a) 的電路，記錄 V 、 I 值及各電阻器之電阻值，並量取各電阻器上的電壓。
2. 接好如圖 16(b) 之電路，量取各電阻器上的電壓(注意正、負號)。
3. 接好如圖 16(c) 之電路，量取各電阻器上的電壓。
4. 將圖 16(b) 與 (c) 各電阻器的電壓相加，與圖 16(a) 作比較。

(三) 戴維寧定理和諾頓定理：

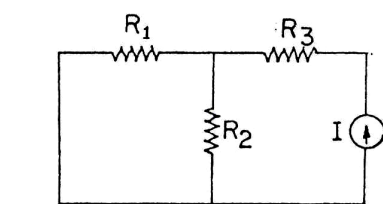
1. 接好如圖 17 的電路， V 、 I 及 R_L 值由同學們任意設定^{#3}。
2. 量 R_L 上的電壓 V_{AB1} 。
3. 取下 R_L ，如圖 18，量 AB 端電壓，得 V_T 值。



(a)



(b)



(c)

圖 16 重疊原理

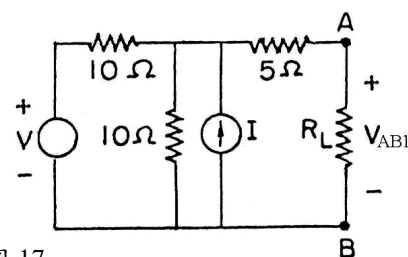


圖 17

#3 注意：由於 V 、 I 及各電阻值均為同學們自行設定，所以在接線前，同學們必須參考電阻器上的額定值，仔細算清 V 和 I 應設定在哪一個數值的範圍內，才不致使電源接上後，電阻器的實際消耗功率超過額定值。下一步驟的實驗亦要注意這一點。

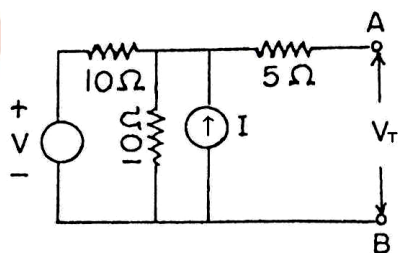


圖 18

4. 電流源開路，電壓源短路，如圖 19，量 AB 端的電阻，得 R_T 值。

5. 找一顆與 R_T 等值的電阻，接成如圖 20 的電路，其中 R_L 的值與圖 17 的 R_L 值相同，測 R_L 上的電壓 V_{AB2} 值。

6. 取下圖 17 的 R_L ，將 AB 端短路，如圖 21，測量流經 AB 端短路時的電流 $I_N^{#4}$ 。

7. $R_N = R_T$ ，將與 R_N 並聯，接成如圖 22 之電路，量 R_L 兩端的電壓 V_{AB3} 。

8. 將 V_{AB1} 、 V_{AB2} 、 V_{AB3} 作一比較，你的結論為何？

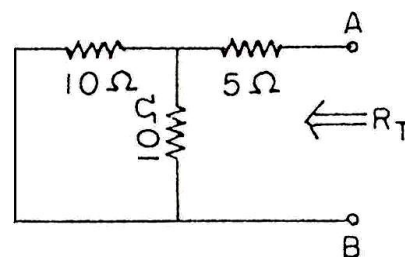


圖 19

#4 注意： I_N 電流可以直接量取 5Ω 上的電壓，可除以 5。若於 AB 端接電流表來量，則因整個線路電阻都不大，所以電流表的內阻會影響測試值。

(四) 輸出阻抗：

1. 信號產生器的輸出端開路，電壓調到 2V，(注意：是 Signal Generator，不是 Function Generator)。

2. 接上 1kΩ 可調電阻器，把電阻調低，注意電壓下降的情形，直到電壓降到 1V。如圖 23 所示。

3. 取下 1kΩ 可變電阻器，以三用電表量其電阻值。這個值就是信號產生器的內電阻。

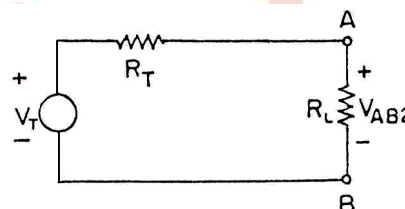


圖 20

(五) 負載效應：

1. 接好如圖 24 的電路，以三用電表、DMM#5、示波器#5(測試棒選擇×1和×10位置)分別測量 AB 間的電壓。

2. 100 kΩ 電阻改成 1MΩ 仍以三用電表、DMM、示波器(測試棒選擇×1和×10)分別測量 AB 間的電壓。

3. 比較各數據，說明差異的原因。

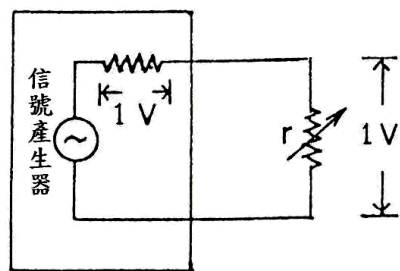


圖 23

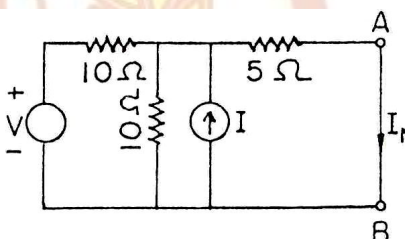


圖 21

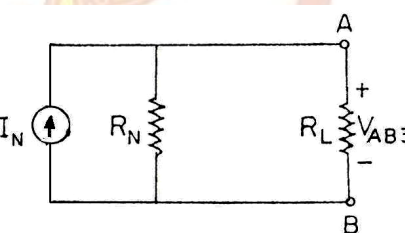


圖 22

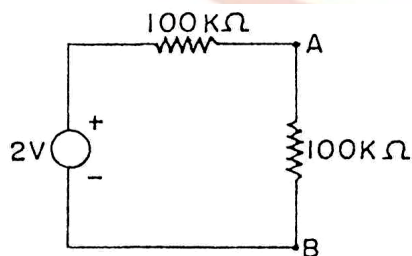


圖 24

(六) 頻率響應：

1. 接好如圖 25 的電路，以三用電表、DMM、示波器(測試棒選擇×1 和×10 位置)分別測量 AB 間的電壓。改變頻率，觀察讀數降低的情形，找出各儀器的 3dB 點。
2. 將兩個 100Ω 電阻器均改為 100 kΩ，重覆步驟 1。
3. 比較 1、2 之間的差異。

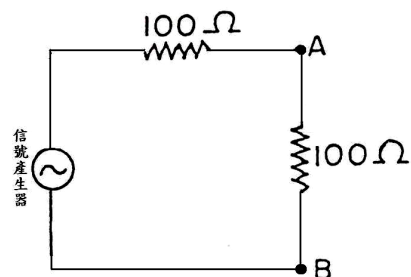


圖 25

五、問題：

1. 求圖 26 的電路中，流經 A、B 兩點間的 5Ω 電阻的電流。
(提示:用戴維寧或諾頓定理)。
2. 假設信號產生器的內阻可以忽略，試證：對 A、B 兩點而言，圖 27 可以簡化成圖 28。
3. 試求出圖 28 電路的頻率響應 3dB 點。
4. 在步驟(二)有兩個電源 V 及 I ，試問你如何確定這兩個電源分別工作於恆壓區及恆流區？

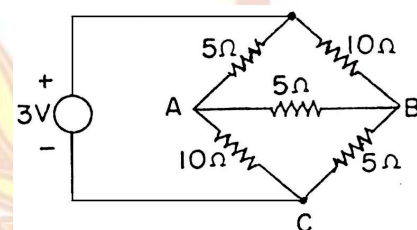


圖 26

5. 圖 24 的輸入訊號採用正弦波，圖 24 則採用直流電壓，是否有特殊原因。若把前者改為直流電壓，或者後者改為正弦波，對實驗結果有沒有影響?為什麼?

六、參考文獻：

1. 謝芳生：微電子學，上冊，東華書局，民國 75 年；附錄 C, p.460~ p.461。
2. S. Karni : Applied Circuit Analysis (John Wiley & Sons Inc., 1988), §5-1, p.101~ p.107, §5-3, p.114~ p.119, §5-4, p.119~ p.122。

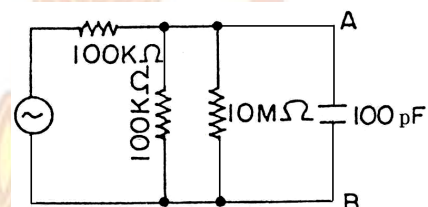


圖 27

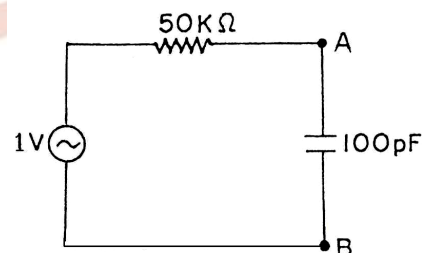


圖 28