

物理教學實驗室

安全守則與生活公約

實驗前注意事項：

1. 實驗前請先核對實驗儀器清單，並檢查實驗桌上之儀器，若有短缺或破損請註明於器材清點單內，並請立即通知教師或助教。
2. 禁止閒談、嬉鬧，更嚴格禁止拿儀器作為嬉鬧工具。
3. 禁止穿夾腳拖、拖鞋或涼鞋進入實驗室，以防儀器掉落砸傷。
4. 實驗室內不得飲食（水除外）。

實驗中注意事項：

1. 儀器須按規定使用，實驗過程中若儀器損壞，應立即通知教師或助教進行檢修或更換。如因操作不當而損壞，操作者須負賠償之責。
2. 實驗室電腦僅供數據擷取、運算與資料傳輸。
3. 實驗完成後應立即檢查結果，誤差過大或不合理之處，應查出發生原因並立即重做。建議準備工程計算機與熟習 MS EXCEL，以利計算。
4. 如遇問題應先自行思考解決方式再與教師或助教討論，勿過度依賴。

實驗後注意事項：

1. 若實驗結果於合理誤差範圍內，不要急著收儀器，待數據經由教師或助教檢查核可後再行收拾儀器。
2. 實驗數據若無教師或助教簽名，該次實驗成績以零分計算。
3. 實驗數據簽名後，務必將實驗器材歸回原位並關掉儀器電源與刪除數據檔案，檢查器材是否短缺或毀損，並於實驗器材清點單上簽名。
4. 儀器收整齊後，請找教師或助教檢查簽名後，方可離開實驗室。

實驗儀器操作注意事項：

1. 正確地使用電源：

實驗桌之電壓插座包含 110 V 及 220 V 兩種，實驗前應先確定儀器所需電壓為何後，再插上正確插座，以避免損壞儀器。

實驗儀器中常常使用到電源開關及調節大小用的旋鈕，如電源供應器。操作這些儀器時須養成良好習慣，以延長儀器的使用壽命。例如，實驗上要求供應 3 V 直流電壓時，正確使用方法是先將所有旋鈕轉到最小，然後插上插頭，再打開開關，當電源燈亮後，再將電壓及電流的旋鈕慢慢適度地調整直到顯示 3 V 為止。若要關閉電源，則應將所有旋鈕轉到最小，再關閉開關，最後拔掉插頭。

2. 注意雷射安全：

雷射 (LASER，全名為 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) 是實驗室中常運用到的工具，具有高強度及同調特性。本實驗室所使用之雷射其功率皆不超過 5 mW，但其強度約為陽光強度數百倍以上，所以仍可能會對眼睛造成傷害，應小心使用。

3. 正確地連接訊號端子：

很多端子的連接雖有防呆設計，但不要讓自己成為設計者擔心的對象，況且錯誤的硬接，會損壞端子，有時造成兩端子的連接性不佳，無形中影響量測的準確性。請先看兩端子的接腳，找出正確連接方向，再連接兩端子。

4. 儀器不能運作，怎麼辦？

根據過去經驗，發生儀器不能運作的情形有超過一半原因為電源沒開，或者是插頭根本就沒接上。其次才是儀器的組裝或連接有問題。所以當發現儀器不能運作時，請先別急著找教師或助教，請試著培養「自行除錯」的能力。當再次詳細檢查確認非上述問題時，再考慮問題是否出在儀器上。

缺課：

1. 若因病假或公假而不能出席實驗課，**必須事前(上課前)於學校請假網頁系統附上文件正式請假(同學代為傳話者請假無效)**，同意後請與助教聯繫安排補作。
2. 若未能在事前請假，則必須於一周內向教師提出合理的證明，否則以曠課論，且不得補作實驗。若請假事由可被接受，才可補作實驗，但必須於規定時間內完成。

目次

導論	1
空氣的熱容比與熱機	15
載流導線受磁力的測量.....	25
光的干涉與繞射	31
麥克森干涉	41
基礎電路	49
RLC 串聯電路	63
附錄	I

導論

前言：

大學教育不僅傳授專業知識，也著重於培養良好的實驗態度與習慣。在實驗課所提供的學習機會裡，同學們不但可以親手獲得第一手知識，也學到如何正確地使用儀器，鍛鍊出一雙靈巧的手，體驗本身能力以及發揮器材效用，這是一種寶貴的經驗。

「求真」是科學的美德，在實驗室裡清楚地知道自己在做什麼、忠實地記錄下所有的原始數據與結果，這就是求真。我們固然重視實驗結果的合理與否，但更重要的是對問題的了解、對問題的透視以及分析能力上的訓練。實驗做完後要能知道什麼樣的原因會造成這樣的結果：如果結果對了，要能知道為什麼會對；如果錯了，要有能力判斷出問題的癥結，看出影響的嚴重性如何，分析出解決困難的途徑……等等，這些功力都將成為各位日後發展的本錢，也是實驗課的訓練目的。一位了解為什麼做出重力加速度量值 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 並知道如何改進的學生，比起另一位不知道為什麼做出 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 的學生要來得有收穫。

以眾所周知的庫倫定律(Coulomb's law)為例，根據 David K. Cheng 所著 *Field and Wave Electromagnetics (2/e)* 其原文嚴密敘述為：「The force between two charged bodies, q_1 and q_2 and, that are very small in comparison with the distance of separation, R_{12} , is proportional to the product of the charges and inversely proportional to the square of the distance, the direction of the force being along the line connecting the charges.」以數學式表示則為：

$$\vec{F}_{12} = \hat{R}_{12} k \frac{q_1 q_2}{R_{12}^2}$$

儘管庫倫定律最初是由實驗所得出來的結果，我們不禁有個疑問：帶電物體到底要小到什麼地步才算是「very small in comparison with the distance of separation」？首先，我們要知道點電荷僅是理想化的假設，就跟質點一樣，在現實世界裡是不存在的。當帶電體幾何尺寸給定時，將距離拉遠是可用近似來表示「very small in comparison with the distance of separation」，如此一來新的問題產生了。當距離拉得太遠可能導致庫倫力非常微弱，以至於很容易受到外界影響，使得實驗結果更不準確，更何況是在實驗室有限空間裡也不容許我們將距離拉得很遠，做實驗以及設計實驗的人總是在各個現實條件下找尋一個最佳化的狀態。因此，實驗的不準度是永遠無法完全避免的。

就因為不準確，實驗就一文不值了嗎？非也。實驗是檢驗真理的必要方式，即便理論說得再漂亮、再天衣無縫，要是禁不起實驗的考驗，它仍舊會被摒棄。當實驗有誤差時，該如何去克服呢？以「謹慎」的態度、多次「練習」藉以提昇實驗技巧，永遠是做好實驗的不二法門。

以下提供幾項做實驗「求真」的基本觀念：

1. 所有測量值都要毫不改變地記錄下來，且不要再有任何的更改或謄錄以降低筆誤甚至被懷疑捏造數據的機會。即使出現了筆誤，就在該數據上畫上橫槓，不可塗改或是修飾。記住，留下所有原始資料，即使它是錯的。
2. 養成將實驗數據以表格形式記錄下來。記住，所有物理量皆應附單位。

3. 單一次測量在實驗上價值不大，因為它可能包含了相當大的誤差而不自知，甚至根本就是錯的。準確起見，盡可能對可測量的物理量做五次以上的測量。

物理量單位：

以國際單位制(SI)為準，數字與單位間應加上一個空格：如 3 kg、4 V、5 m....等等。

採用人名的單位時若欲全寫則必須全為小寫字母，若為簡寫則其第一個字母須大寫，例如：

Newton (人名) → newton (單位) → N (單位)

Hertz (人名) → hertz (單位) → Hz (單位)

Ampere (人名) → ampere (單位) → A (單位)

非採用人名之單位則無論是全寫或簡寫均以小寫字母表示：

例如：

meter=m，hour=h，second=s；但 liter=L 是唯一的例外。

在任何的實驗觀測中，即使採用非常精密的測量儀器也不可能得到絕對精確的實驗結果。此時，便衍生出估計值、有效數字、誤差等觀念。

科學記號：

由阿基米德所提出，科學記號是一種記數的方式由阿基米德所提出。當實驗數據位數過多時，為方便記錄會將實驗數據簡化以科學記號表示。

科學記號是將一個數寫成 1 到 10 間的實數與 10 幕次方的乘積，以 $a \times 10^n$ 表示。在電腦或計算機中通常以「EXP」或「E」來表示 10 的幕次方。

[例 1] 1.632E-19 即 1.632×10^{-19}

[例 2] 3.00E8 即 3.00×10^8

有效數字：

有效數字定義為準確值再加上一位估計值，而估計值為準確值下一位數。

對於長度的表示法可用 2.376×10^{-4} km、0.000 237 6 km、0.237 6 m、23.76 cm、237.6 mm、237 600 m、.....等。上述所有表示法僅單位不同但有效位數都是四位，乍看來很唬人的「零」都只是用來表示小數點的位置而已，並不影響有效數字的位數。

假如有效數字中的「零」不是用來標明小數點的位置，則這些「零」跟所有「不是零」的數字一樣都是有效數字。例如：0.500 06，34.209 都是五位有效數字。

「零」的規則如下：

1. 第一位數之前的「零」一律不算有效數字。
2. 第一位與末位之間所有的「零」均為有效數字。
3. 末位數之後的「零」若為估計值則為有效數字。

A. 四則運算法

(a) 加減法則

有單位者應化成相同單位再進行運算。計算結果以計算前小數點後位數最少者為準，其餘捨去。

$$[\text{例 1}] \quad 49.57 + 2\,903.405\,0 + 9.679 + 5.08 = 2\,967.734\,0 \rightarrow 2\,967.73$$

$$[\text{例 2}] \quad 123.579 - 12.41 = 111.169 \rightarrow 111.17$$

(b) 乘除與開根號法則

有單位者應化成相同單位再進行運算。計算結果以計算前有效位數最少者為準，其餘捨去。

$$[\text{例 1}] \quad 9\,500\,635 \times 0.58 = 5\,510\,368.30 \rightarrow 5\,500\,000 = 5.5 \times 10^6$$

$$[\text{例 2}] \quad 36.94 \times 28.55 = 1\,054.637\,0 \rightarrow 1\,055$$

$$[\text{例 3}] \quad 9357.98 \div 508 = 18.421 \rightarrow 18.4$$

B. 四捨六入法

在進行大量數據運算時，因四捨五入法，逢五就進位，容易導至誤差均值偏高，因此會改採用四捨六入進行運算，使總體誤差均值較低且趨近於零。規則如下：

1. 估計值(底線)下一位數大於或等於 6 時，進位。

$$[\text{例}] \quad 30.29 \rightarrow 30.3$$

2. 估計值(底線)下一位數小於或等於 4 時，不進位。

$$[\text{例}] \quad 30.24 \rightarrow 30.2$$

3. 估計值(底線)下一位數為 5 時，再往下看一位數，再決定是否進位。

(a) 往下一位數為 1-9 時進位。

$$[\text{例}] \quad 30.256 \rightarrow 30.3$$

(b) 往下一位數為 0 時，應由估計值判斷是否進位，「遇偶便捨，逢奇則入」。

◇ 當估計值為奇數時，進位。

$$[\text{例}] \quad 30.350 \rightarrow 30.4$$

◇ 當估計值為偶數時，不進位。

$$[\text{例}] \quad 30.850 \rightarrow 30.8$$

誤差表示：

實驗中所有的測量值皆非絕對準確。即使是由同一個人以同一套系統操做重覆實驗也常會得出不完全相同的結果，可見每一次實驗都難免會產生誤差。為了將誤差降到最低，我們必須先分析出導致誤差的原因才能對症下藥。

誤差來源一般分成系統誤差、人為誤差及隨機誤差三大類：

A. 系統誤差

- (a) **設備上缺陷所造成：**例如儀器設計不良或機械零件精度不夠、刻度不準，甚至磨損與老化，都可能造成實驗結果不可靠。解決辦法有：針對特定的測量工作要特別選擇適用的器材，按照標準程序對儀器作校正。上述方法均無效後，可嘗試找出修正公式，用來將原測量值換算成正確的數據。
- (b) **環境所造成：**例如實驗室溫度突然改變將導致米尺的熱脹冷縮，解決的方法可在實驗室裝設恆溫的空調；又比方說，有些電磁輻射會對一些電子儀器造成干擾，所以在設計或採購儀器時可加上「防電磁輻射」的功能設計。
- (c) **理論誤差與實驗方法誤差：**因為理論不夠嚴密或實驗方法採取不當的近似所導致。

B. 隨機誤差

任何系統的物理狀態都具有統計上的不確定性，且此誤差是物理的本質之一，也是永遠存在而無法避免的。唯一應付之道便是增加實驗次數，再以統計學的理论來處理數據以獲得較佳的結果。

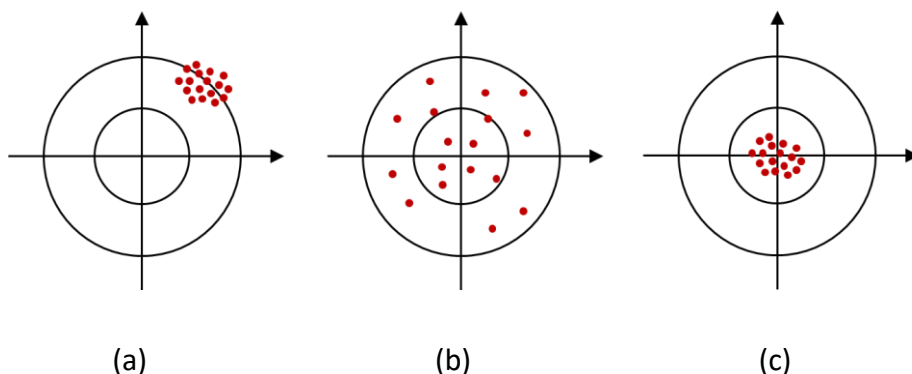
C. 人為誤差

多半為個人疏忽所造成。例如數據的判讀有誤、實驗前忘了校正、記錄數據時的筆誤，或是計算錯誤等。解決的辦法為多做幾次重覆的實驗，以便挑出離譜數據並捨棄之，以及平常便養成細心的習慣等等。

記住，當在整套實驗數據裡找到一個錯誤時，只有「劃去不用」或「實驗重做一遍」兩條路，千萬不可修飾它，也不可只單獨重取該數據，因為這個新取的數據已不屬於原來的那套數據的一部分。此外，人的感官或不良習慣也是造成此類誤差的原因。

測量，有本質上的極限。我們必須認知的是：數量、物理公式、甚至經驗方程式……等等並「不等於」其所描述的那件現象本身。我們只是「人為嘗試著去形容它」罷了。以下，我們將探討如何藉由統計上的方法來詮釋數據。

數據表示：



圖一 精確度示意圖

要完整而精確地表示出一個實驗所量測到的物理量，必須包含以下三者：數量、精確度以及單位。

- A. 數量與單位：**除物理上以定義的真值(例： $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ 、 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 等)或數學常數(如： R 、 N_A 等)外，皆應以有效數字及科學記號($a.bc \times 10^n$)與單位來表示。
- B. 精確度：**通常以加減型式表示。可再細分為精度，確度以及精確度三大類。
- (a) **精度** - 觀察實驗數據密集程度，用以反映隨機誤差。當實驗數據越集中，即表示隨機誤差較小，實驗精度越高。
- (b) **確度** - 觀察實驗數據於實際值偏差程度，用以反映系統誤差。當實驗數據與真值偏差越小，即表示系統誤差較小，實驗確度越高。
- (c) **精確度** - 系統與隨機誤差的綜合性指標。當實驗數據越集中且實驗數據與真值偏差越小，即表示實驗準確度越高。

統計分析：

統計分析常用於分析數據，是一種清晰明瞭且具有說服力的工具。即以相同儀器測量相同待測物 n 次時，應將實驗結果加以整理表示。

A. 算術平均數

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

平均數並非真正的值，亦不表示其最可能值，我們只能說它「具代表性」。

B. 偏差 (有正負之分)

$$d_i = x_i - \bar{x}$$

C. 平均偏差

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n}$$

D. 百分誤差

$$\frac{D}{\bar{x}} \times 100\%$$

E. 標準差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}}$$

當實驗數據量夠多(理想情況是 $n \rightarrow \infty$)時，數據將成常態分佈。根據某一數值距離平均值多少個標準差可得知：從「平均值到該值之間的數據個數」佔「總個數」的百分比。根據理論計算的結果，在平均值上下一個標準差範圍內的個數佔總個數的 68.3%；兩個標準差範圍內的個數佔 95.4%；三個標準差範圍內的個數佔 99.7%。因此，當我們看到一段描述「質量 127 公克，標準差 2 公克」時必須知道「約有將近七成的測量數據是在 125 到 129 公克間」。

F. 平均標準差

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n-1)}}$$

在有限次數測量下，所計算的平均值其實只是實際值的一個估計，平均標準差可以做為平均值與實際值差距的不準度參考，越小代表平均值越接近實際值的機率越高。測量次數的增加並不會影響每次測量的可能誤差，可是平均值卻可以抵消隨機誤差而使實驗結果越接近實際值。亦即，標準差並不會隨著測量次數減少，而平均標準差卻會隨著測量次數減少。

平均標準差嚴格定義為對一個測量對象取了 n 個數據 (n 是有限值)，用這 n 個數據可得出一個平均值 \bar{a}_1 。再以這 n 個數據為一組，重覆取無限多組，則每一組將各有其平均值 \bar{a}_i ，於是我們得到了無限多個 \bar{a}_i (它們也將成常態分佈)。而這無限多個 \bar{a}_i 的標準差就是我們所定義的平均標準差。從另一個角度來看，對一個實驗操作九次測量所獲得的平均值，其可靠性為單一測量時的三倍。這種工作冗繁無比，但我們無需這樣做，只要利用統計理論，就可以從一組 n 個量度的標準差 σ 算出平均標準差 σ_x 。

G. 相關係數

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

$\gamma = 0$	零相關
$0.0 < \gamma < 0.3$	低度相關
$0.3 < \gamma < 0.7$	中度相關
$0.7 < \gamma < 1.0$	高度相關
$\gamma = 1$	完全相關

H. 實驗結果

所有實驗結果應記錄為 $\bar{x} \pm \sigma_x$ ，並附上單位。

誤差傳遞：

兩組以上的實驗結果進行四則運算時，皆應考慮誤差傳遞。

令 $x = \bar{x} \pm \sigma_x$ 且 $y = \bar{y} \pm \sigma_y$

A. 加減法的誤差傳遞

$$\begin{aligned} \overline{x \pm y} &= \bar{x} \pm \bar{y} \quad \text{and} \quad \sigma_{x \pm y}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 \\ x \pm y &= (\bar{x} \pm \bar{y}) \pm \sigma_{x \pm y} \quad \text{and} \quad \sigma_{x \pm y} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \\ \text{一般式(通式)可表示為：} \quad \sigma_N^2 &= \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \end{aligned}$$

B. 乘除法的誤差傳遞

(a) 乘法

$$x \times y = \overline{(xy)} \pm \sigma_{xy}$$

$$\text{where } \overline{(xy)} = \bar{x} \times \bar{y} \quad \text{and} \quad \sigma_{xy} = \sqrt{\left[\left(\frac{\sigma_x}{\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\bar{y}}\right)^2\right]} \times (\bar{x} \times \bar{y})$$

(b) 除法

$$\frac{x}{y} = \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right) \pm \sigma_{\frac{x}{y}}$$

$$\text{where } \overline{\left(\frac{x}{y}\right)} = \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \quad \text{and} \quad \sigma_{\frac{x}{y}} = \sqrt{\left[\left(\frac{\sigma_x}{\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\bar{y}}\right)^2\right]} \times \frac{\bar{x}}{\bar{y}}$$

一般式(通式)可表示為：

$$\left(\frac{\sigma_N}{y}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_1}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{y_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\sigma_n}{y_n}\right)^2$$

其中 y 為導出量的平均值； y_1 、 y_2 、...、 y_n 為乘除計算中每一個物理量的平均值。

C. 冪次運算的誤差傳遞

$$x^l \times y^m = (\bar{x}^l \times \bar{y}^m) \pm \sigma_{x^l y^m}$$

$$\text{where } \overline{x^l \times y^m} = (\bar{x}^l \times \bar{y}^m) \quad \text{and} \quad \left(\frac{\sigma_{x^l y^m}}{\bar{x}^l \bar{y}^m}\right)^2 = l^2 \left(\frac{\sigma_x}{\bar{x}}\right)^2 + m^2 \left(\frac{\sigma_y}{\bar{y}}\right)^2$$

D. 一般情況下平均標準差的誤差傳遞

令 $N = f(x, y)$ ，則

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2}$$

最小平方迴歸分析：

這是一種常用的分析工具，經由計算求得一條最佳逼近曲線，使所有的數據到此線的鉛垂方向距離平方之總和為最小。

設 n 個實驗數據：

$$(x_i, y_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$$

簡而言之，線性迴歸分析即為利用數學或統計的方法取得最佳曲線用以解釋過去與預測未來。

A. 線性迴歸 (linear regression)

若其最佳曲線函數型式為 $y = f(x) = Ax + B$ ，其中 A 與 B 均為未知參數，則所有數據到此線的鉛垂方向距離平方和，表示如下

$$D(A, B) = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n [Ax_i + B - y_i]^2$$

所謂最佳化就是使 $D(A, B)$ 為最小，則

$$\frac{\partial D}{\partial A} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial D}{\partial B} = 0$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial D}{\partial A} &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial A} [Ax_i + B - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n 2[Ax_i + B - y_i]x_i \\ &= 2 \sum_{i=1}^n [Ax_i^2 + Bx_i - x_i y_i] = 2 \left[A \sum_{i=1}^n x_i^2 + B \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \right] = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial B} &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial B} [Ax_i + B - y_i]^2 = 2 \left[\sum_{i=1}^n Ax_i + \sum_{i=1}^n B - \sum_{i=1}^n y_i \right] \\ &= 2 \left[A \sum_{i=1}^n x_i + nB - \sum_{i=1}^n y_i \right] = 0\end{aligned}$$

解得

$$A = \frac{n[\sum_{i=1}^n x_i y_i] - [\sum_{i=1}^n x_i] \cdot [\sum_{i=1}^n y_i]}{n[\sum_{i=1}^n x_i^2] - [\sum_{i=1}^n x_i]^2} \quad ; \quad B = \frac{[\sum_{i=1}^n y_i] - A[\sum_{i=1}^n x_i]}{n}$$

在很多工程用計算機裡頭都有計算 A 與 B 的功能，我們只須輸入 (x_i, y_i) 便可輕易得出 A 與 B，不須如上作繁雜的計算。試算表軟體(如 MS-Excel)亦可求出迴歸(趨勢)線。

B. 指數迴歸 (exponential regression)

用來描述實驗數據的函數型式為 $y = A \times e^{Bx}$ 者，也可以用計算機或試算表軟體求得其迴歸曲線的參數。

C. 對數迴歸 (logarithmic regression)

用來描述實驗數據的函數型式為 $y = A \times \ln x + B$ 者，也可以用計算機或試算表軟體求得其迴歸曲線的參數。

D. 乘冪迴歸 (power regression)

用來描述實驗數據的函數型式為 $y = A \times x^B$ 者，也可以用計算機或試算表軟體求得其迴歸曲線的參數。

實驗報告的標準格式

封面(Cover)

自由設計

但一定要在封面寫上系、班級、學號、組別、姓名

前言(Introduction)

動機、目的

歷史小故事、前人的成果、有趣的資訊

原理(Theories)

實驗中物理現象的原理

扼要寫出現象、觀念與數學公式

方法(Methods)

說明實驗方法

畫出實驗裝置的示意圖，詳細說明實驗中使用的材料、儀器、設備

結果(Results)

畫數據圖呈現實驗的結果

說明數據的走勢

說明數據圖的特徵，有哪些符合你(妳)的期望，有哪些出乎意料之外

說明數據的精確度如何，誤差傳遞要計算清楚

討論(Discussion)

比對 Results 中**實際的結果**和**預測的結果**，兩者有那裡相符？有哪裡不符合？為什麼不符合？

實驗結果中呈現了哪些誤差？歸納**系統性誤差**和**隨機性誤差**。

你想要如何重新設計實驗，讓方法更簡潔或更嚴謹？

你想要採取那些改善措施，修正系統性誤差或減少隨機性誤差？

結論(Conclusion)

心得與展望

在這次實驗中你學習到哪些事情？

這個實驗還有哪些有趣的問題或方向可以一直發展下去？

這個實驗中的物理現象可以如何應用在日常生活中？

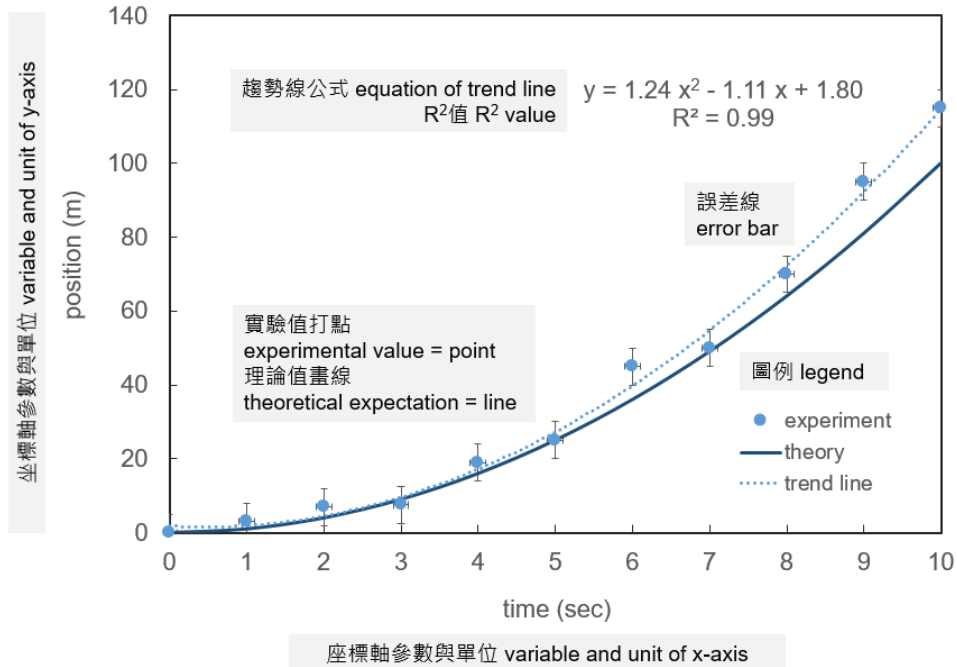
心情小語，或留言給助教

參考資料(References)

請列出參考資料的作者、文章標題、收錄這篇文章的書或期刊、出版商、年份。如果有網址也請註明。

數據圖的標準格式

下圖是一張完整的數據圖：



圖一 質點的位置隨時間變化圖。圖中圓點是實驗數據，粗實線是理論期望值，粗虛線是擬合得到的趨勢線。圖中有標示出趨勢線的公式與擬合的 R^2 值。圖說

以下元素，缺一不可：

- 坐標軸參數與單位
- 實驗值：打點(x_i, y_i)。請不要把點連起來。
- 實驗值的誤差線(error bar)
- 理論值：畫線。請不要打點。
- 趨勢線
- 圖例：圖中每一種符號和線條都要說明它是誰
- 趨勢線公式 $y(x)$ 與 R^2 值(量化數據與趨勢線的接近程度，完全吻合為 1)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - y(x_i))^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad \text{and} \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad n: \text{number of data points}$$

- 圖說：圖編號與圖名(一目了然圖表示的物理)

有效數字的處理原則

實驗中我們會用量尺或電子儀器測量物理量。紀錄數據的時候，要記得用「有效數字」表示出量尺(或儀器)的精密度，把「量尺(或儀器)的精密度」這筆資訊保留下來。例如：用尺測量一枝筆的長度，尺的最小測量單位是 1 mm，要讀取長度就是 150.51 mm。其中 150.5 是刻度上可準確讀到的數字，「5」右方的「1」是估計值，150.51 mm 為 5 位有效數字。再以電子天平量重量為例，同一搓藥品若用兩台天平稱量，得到 2.20 g 及 2.174 5 g 二組數據，從數據紀錄我們可以判斷這兩台天平的精密度分別為 ± 0.01 g 及 $\pm 0.000 1$ g。數據「2.20 g」中的 0 要保留，不可以省略，以正確地呈現出天平的精密度是 ± 0.01 g。記錄實驗測量數據時，記得要養成保留有效數字的習慣，每一筆數據都要記錄**精確讀到的數值再加一位估計值**。

有效數字彼此之間加減乘除的時候，先把數值轉換成科學記號，把數字和數量級 (order of magnitude, 10 的幾次方) 區分清楚，接下來會比較容易處理。例如：

$$0.345 6 = 3.45\mathbf{6} \times 10^{-1}$$

$$4 567.8 = 4.567\mathbf{8} \times 10^3$$

上面兩筆數字中，粗體是準確值，灰色有襯底線的是估計值，數量級不算有效數字。

以下列出幾個常見的狀況，有些比較棘手，甚至偶爾會產生疑義，請大家記得把數字轉換成科學記號，遵守「保留量尺精確度資訊」這個大原則，棘手狀況就能迎刃而解。

加減：

■ 最直觀沒有疑問的狀況

$$3.45\mathbf{6} \times 10^{-1} + 1.00\mathbf{1} \times 10^{-1} = 4.45\mathbf{7} \times 10^{-1}$$

有效數字的位數從頭到尾都相同，都是四位。

■ 一個值很精密，一個很粗糙，怎麼辦？

$$3.45\mathbf{6} \times 10^{-1} + 1.\mathbf{1} \times 10^{-1} = 4.\mathbf{5} \times 10^{-1}$$

前者很精密，後者很粗糙，這時只能使用跟粗糙的那個量測一樣的精準度。

■ 兩筆數字相加以後，進位了，有效數字位數變多，怎麼辦？

$$3.45\mathbf{6} \times 10^{-1} + 8.00\mathbf{1} \times 10^{-1} = 11.45\mathbf{7} \times 10^{-1}$$

這裡有人是算數字位數派的(只保留四位有效數字)，有人是保留量測精準度派的(保留有效數字到小數點後三位)，兩種都可以。理由說明清楚即可。

乘除：

- 最直觀沒有疑問的狀況

$$(3.45\bar{6} \times 10^{-1}) \times (1.00\bar{1} \times 10^{-1}) = 3.45\bar{9} \times 10^{-2}$$

有效數字的位數從頭到尾都相同，都是三位。

- 一個值超級大，一個很小，怎辦？

$$(1.00\bar{1} \times 10^7) \times (1.\bar{1} \times 10^{-1}) = 1.\bar{1} \times 10^6$$

值的數量級(order of magnitude)由 10 的指數吸收，數字只呈現出準確值跟估計值。

前者很精密，後者很粗糙，這時只能使用跟粗糙的那個量測一樣的精準度。

- 相乘以後，進位了，數字位數變多，怎辦？

$$(5.00\bar{1} \times 10^2) \times (5.00\bar{1} \times 10^7) = (25.01\bar{0} \times 10^9)$$

值的數量級(order of magnitude)由 10 的指數吸收，數字只呈現出準確值跟估計值。這裡有人是算數字位數派的(只保留四位有效數字)，有人是保留量測精準度派的(保留有效數字到小數點後三位)，兩種都可以。理由說明清楚即可。

空氣的熱容比與熱機

實驗目的：

A. 空氣的熱容比

以 Rüchardt 實驗法，測量空氣熱容比 γ 。

B. 熱機

1. 使用真實的熱機確定等溫和等壓熱力學過程。
2. 使用真實的熱機創建熱循環過程，並完成 $P-V$ 圖。

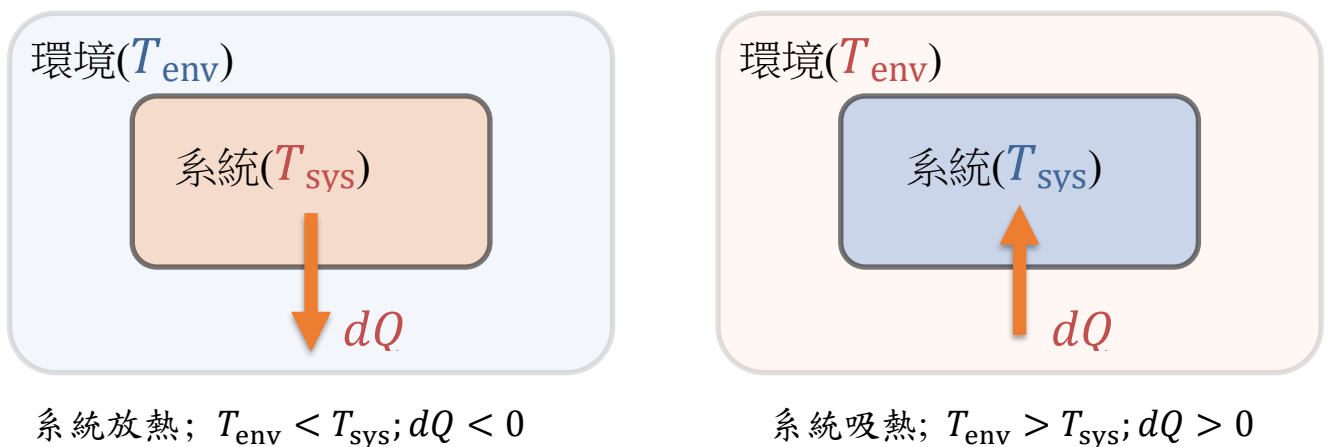
實驗儀器：

氣體定律儀(TD-8572)，雙頻壓力感測器(藍、PS-2181)，透明塑膠管，溫度計(Stainless Steel)，鋁罐，砝碼，絕對壓力/溫度感測器(藍、PS-2146)，藍牙訊號收發器(白、PS-3200)，電腦(含Capstone 程式軟體)。

實驗原理：

A. 系統吸熱與放熱

在本實驗中，系統指的就是氣體，當環境溫度 T_{env} 大於系統溫度 T_{sys} 時，系統會由外界吸熱，定義系統吸收的熱量 dQ 為正。反之，當環境溫度 T_{env} 小於系統溫度 T_{sys} 時，熱量由系統流向環境，視為放熱，故 dQ 為負值。如圖一所示。

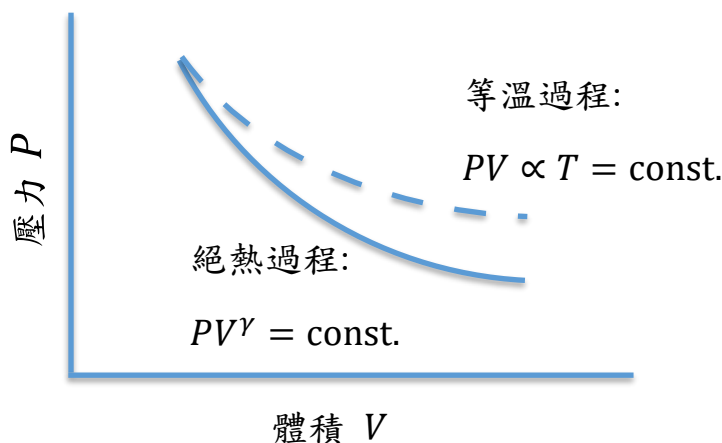


圖一 環境與系統吸放熱示意圖。

- 熱力學第一定律 $dE_{int} = dQ - dW = dQ - PdV$
 E_{int} 為系統內能， Q 為熱量， W 為系統對環境所作的功。對於理想氣體而言，氣體內能僅與溫度 T 有關，即氣體內能為溫度的函數， $dE_{int} = dE_{int}(T)$ 。
- 理想氣體的絕熱過程 (adiabatic process)
當氣體被壓縮時，系統對環境作負功(即外界對氣體作正功)。當環境作用在系統上的正功全部轉變為氣體的內能時，氣體溫度會升高；反之，當氣體膨脹時，氣體會對外界作功而消耗其內能，因此氣體的壓力和溫度將會同時降低。

● 理想氣體的等溫過程 (isothermal process)

等溫過程，即系統內能不變($dE_{\text{int}} = 0 \Rightarrow dQ = dW$)，由熱力學第一定律可知，當氣體被壓縮時，外界對氣體作正功，且氣體的溫度須維持不變的狀態下，系統必須要放熱($dQ < 0$)，用以維持系統內能恆定；反之，當氣體膨脹時，氣體對環境作功，為使系統內能維持不變，系統必須要吸熱($dQ > 0$)。



圖二 氣體壓力與氣體體積關係圖。

由熱力學第一定律可知，在絕熱過程中，氣體壓力 P 與氣體體積 V 關係圖的變化率較等溫過程為大(如圖二所示)，即絕熱過程的曲線較為陡峭。

理想氣體的熱量 dQ 與氣體內能變化 dE_{int} 以及氣體對外界所作的功 $dW = PdV$ 之間關係如下所示

$$dQ = dE_{\text{int}} + PdV \quad (1)$$

B. 莫耳比熱

氣體比熱定義為氣體溫度升高一度所需的熱量。當氣體體積不變時，一莫耳氣體溫度升高一度所需的熱量，稱為定容莫耳比熱，以 C_V 表示。由公式(1)可得

$$C_V = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_V = \left(\frac{\partial E_{\text{int}}}{\partial T}\right)_V = \frac{dE_{\text{int}}}{dT} \quad (2)$$

將公式(2)代回公式(1)整理後可得

$$dQ = C_V dT + PdV \quad (3)$$

又理想氣體方程式可表示為 $PV = nRT$ ；考慮一莫耳氣體，將兩邊同時作微分後可得

$$PdV + VdP = RdT \quad (4)$$

將公式(4)代回公式(3)可得，

$$\begin{aligned} dQ &= C_V dT + RdT - VdP \\ &= (C_V + R)dT - VdP \end{aligned} \quad (5)$$

考慮氣體壓力固定的條件($dP = 0$)時，系統對環境做功 $dW = PdV$ ，即為 RdT 。此條件下，一莫耳氣體溫度升高一度所需的熱量，稱為定壓莫耳比熱，以 C_p 表示。代入公式(5)整理後可得

$$dQ = (C_V + R)dT$$

$$C_p = \left. \frac{\partial Q}{\partial T} \right|_P = C_V + R \quad (6)$$

C. 熱容比 γ

熱容比 γ 定義為定壓莫耳比熱 C_p 和定容莫耳比熱 C_V 的比值，即

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{C_V + R}{C_V} \quad (7)$$

在古典統計力學中，能量儲存的方式稱為自由度，每一自由度相當於每莫耳分子儲存 $\frac{1}{2}RT$ 的能量。而空氣屬於雙原子分子，共有5個自由度(包含3個移動自由度與2個轉動自由度)，故每莫耳空氣分子所儲存的能量為 $\frac{5}{2}RT$ 。因此可推得空氣分子定容莫耳比熱 $C_V = \frac{5}{2}R$ ，代入公式(6)即可得定壓莫耳比熱 $C_p = C_V + R = \frac{7}{2}R$ 。空氣分子熱容比 γ 如下

$$\gamma \equiv \frac{C_p}{C_V} = \frac{C_V + R}{C_V} = \frac{(5/2)R + R}{(5/2)R} = 7/5 = 1.4 \quad (8)$$

D. 絕熱氣體方程式

空氣為熱的不良導體，當空氣被快速壓縮或膨脹時，各部分的氣體來不及進行熱交換，此時無熱量流進或流出系統，可視為絕熱過程。在絕熱過程中，可將熱量變化量視為零($dQ = 0$)，由熱力學第一定律可知

$$dE_{\text{int}} = dQ^{\text{=0}} - dW = -PdV \quad (9)$$

將公式(9)代回公式(2)整理後可得

$$C_V dT + PdV = 0 \quad (10)$$

考慮一莫耳氣體，又由理想氣體方程式可得

$$PV = RT \Rightarrow P = \frac{RT}{V} \quad (11)$$

將公式(11)代回公式(10)整理後可得

$$C_V dT + \frac{RT}{V} dV = 0$$

$$\Rightarrow \frac{dT}{T} + \frac{R}{C_V} \frac{dV}{V} = 0 \quad (12)$$

將公式(12)積分後可得

$$\begin{aligned} \ln T + \ln V^{R/C_V} &= \text{const.} \\ \Rightarrow TV^{R/C_V} &= \text{const.} \end{aligned} \quad (13)$$

再由理想氣體方程式可得

$$PV = RT \Rightarrow T = \frac{P}{R}V \quad (14)$$

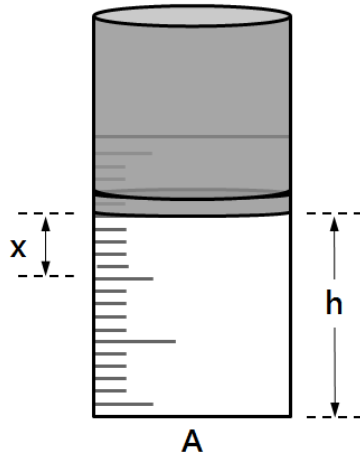
將公式(14)代回公式(13)可得

$$\begin{aligned} \frac{P}{R} \cdot V \cdot V^{R/C_V} &= \frac{P}{R} \cdot V^{(R/C_V)+1} = \text{const.} \\ \Rightarrow PV^{(R+C_V)/C_V} &= \text{const.} \end{aligned} \quad (15)$$

將上述各條件代入整理後可得

$$\begin{aligned} PV^{C_p/C_V} &= \text{const.} \\ PV^\gamma &= \text{const.} \end{aligned} \quad (16)$$

如圖三所示，施以適當力道迅速拍打活塞一下後，活塞將會向下移動一小段位移 x 。此時，空氣柱內的氣體會施於以反作用力推動活塞，而空氣柱內的氣體壓力將會隨時間振盪。在此過程中並無熱量自外界進入或流出，故可將整個過程視為絕熱過程，即滿足絕熱過程氣體方程式 $PV^\gamma = \text{const.}$



圖三 空氣柱示意圖。

本實驗是以 Rüchardt 實驗方法測得空氣熱容比 γ ，其推導過程如下所示。

將公式(16)作微分運算後可得

$$\begin{aligned} V^\gamma dP + \gamma PV^{\gamma-1} &= 0 \\ \Rightarrow dP &= -\frac{\gamma P}{V} dV \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $dV = xA$ ，代入公式(17)可得

$$dP = -\frac{\gamma P}{V} dV = -\frac{\gamma P}{V} xA \quad (18)$$

活塞所受到的淨力 F ，可以壓力 dP 與受力面積 A 表示為

$$\begin{aligned} F &= (dP)A \\ &= -\frac{\gamma PAx}{V} A = -\frac{\gamma PA^2}{V} x \end{aligned} \quad (19)$$

當活塞所受淨力 F 作用使其產生上下振盪，此上下振盪的過程滿足簡諧振盪，而簡諧振盪通式可表示為 $F = -kx$ ，則

$$\begin{aligned} F &= -\frac{\gamma PA^2}{V} x \\ \Rightarrow k &= \frac{\gamma PA^2}{V} \end{aligned} \quad (20)$$

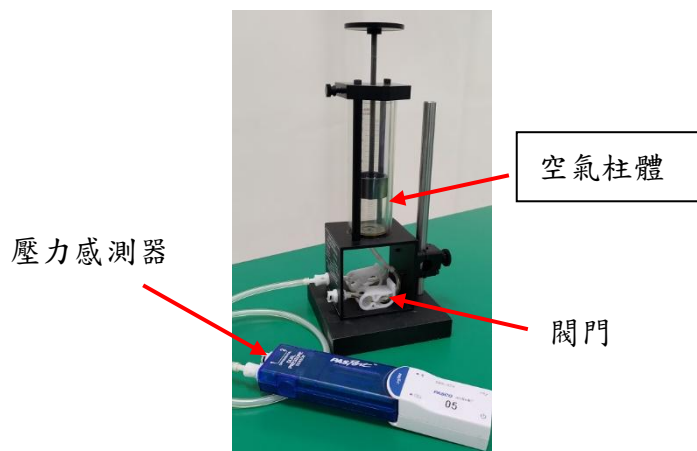
活塞振盪週期 T 可表示為（其中， m 為活塞質量）

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{mV}{\gamma PA^2}} \quad (21)$$

實驗項目：

A. 空氣的熱容比 γ

在本實驗中，所使用的氣體定律儀如圖四所示。其中，活塞截面積為 A 、活塞質量為 m （記載於底座前面板）與大氣壓力為 P_0 。



圖四 氣體定律儀。

1. 將活塞拉到適當高度 h (活塞下緣對應空氣柱刻度值) 後，關閉未與壓力感測器連接之閥門。
2. 內部氣體所受到的總壓力 P 包含大氣壓力 P_0 與活塞壓力，即 $P = P_0 + \frac{mg}{A}$ 。
3. 內部氣體總體積 V 包含空氣柱體積 Ah 與氣體定律儀下方塑膠管總體積 V' ，即 $V = V' + Ah$ 。
4. 由公式(21)可得，空氣柱高度 h 與振盪週期平方 T^2 的關係式，如下所示

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{mV}{\gamma p A^2}}$$

$$\Rightarrow V = \frac{\gamma P A^2}{4\pi^2 m} T^2 = V' + Ah$$

$$\Rightarrow \frac{\gamma P A}{4\pi^2 m} T^2 = h + \frac{V'}{A}$$

5. 因此作振盪週期平方 T^2 vs. 空氣柱高度 h 關係圖時，可由關係圖斜率 (*slope*) 與其它物理量求得空氣的熱容比 γ

$$\text{slope} = \frac{4\pi^2 m}{\gamma P A}$$

$$\gamma = \frac{4\pi^2 m}{P A (\text{slope})}$$

實驗步驟 A：

1. 先將氣體定律儀底部二個閥門皆打開，再將活塞拉至指定高度後，關閉未與低壓感測器連接閥門(下壓至底)。
2. 啟動軟體開始擷取數據，再以適當力道迅速拍打活塞一下。
3. 觀察『壓力 vs. 時間』關係圖，待活塞振盪週期變化關係圖趨於穩定後，再停止擷取數據。
4. 記錄活塞振盪 5 個週期總時間，再計算振盪週期 T 。
5. 改變空氣柱高度，重覆上述步驟。
6. 作『 T^2 vs. h 』關係圖，再由線性迴歸線取得關係圖斜率 (*slope*)。
7. 計算空氣的熱容比 γ ，再計算百分誤差。

B. 熱機

氣體可以通過作功與周圍環境進行能量交換。如果在氣體在定溫下發生體積變化，則將這種恆定溫度下的作功過程稱為等溫過程。另一方面，如果壓力不變，則稱為等壓過程。在本實驗中，本實驗嘗試利用真實熱機的運行，驗證物質位移(y)時的位能(mgy)與氣體在熱循環時的淨熱力學功(PV)間的關係。

熱機的設置由帶有石墨活塞的中空氣缸組成，該石墨活塞可以沿氣缸的軸線移動(摩擦很小時可忽略摩擦力影響)。活塞上有一個用於舉起質量的平台，並通過軟管將氣缸連接到氣室(由橡膠塞密封的鋁罐組成，該橡膠塞子可以交替放置在熱庫與低溫熱庫中)。我們可藉著將氣室(鋁罐內)置於不同溫度差的熱庫控制氣體的膨脹，並依此升高或下降汽缸上的物體，熱機的裝置示意圖如圖五所示。

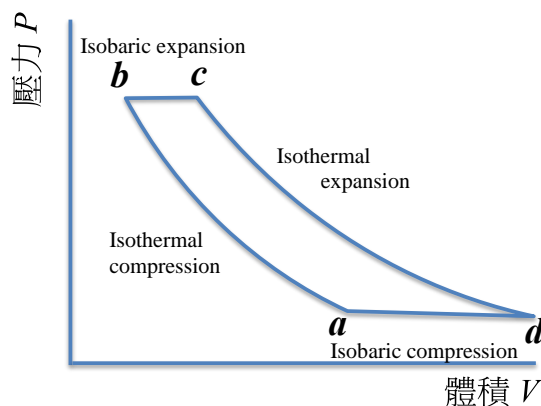


圖五 熱機示意圖。

實驗步驟 B：

1. 以真實熱機驗證熱循環曲線

以真實熱機驗證熱循環曲線(等溫，等壓，膨脹與壓縮)，熱循環過程如圖六所示。實際操作示意圖如圖七所示。以橡皮筋將溫度計綁在鋁罐邊，使溫度計平貼於鋁罐側邊。同步測量鋁罐內壓力與其環境溫度。



圖六 熱循環過程

1) 等溫壓縮(Isothermal compression): 過渡 $a \rightarrow b$

空氣罐置於冷水中，由平台上方外加質量(~ 200 g, 可隨氣體量調整)以壓縮活塞和鋁罐內的氣體。

2) 等壓膨脹(Isobaric expansion): 過渡 $b \rightarrow c$

從冷水浴中取出鋁罐，然後將其放入熱水(高溫熱庫)中。

3) 等溫膨脹(Isothermal expansion): 轉變 $c \rightarrow d$

使鋁罐仍在熱水(高溫熱庫)中，移除平台上的外加質量

4) 等壓壓縮(Isobaric compression): 轉換 $d \rightarrow a$

從熱水中取出鋁罐，然後將其放回冷水中。

2. 以實際的 PV 曲線計算功 (圖七為熱循環實驗配置。)

1) 以第 1 部分的步驟內容，測量熱循環中所有四個點處系統中的空氣壓力與膨脹(壓縮)體積。確保寫下圓柱的初始高度。以此來計算體積。

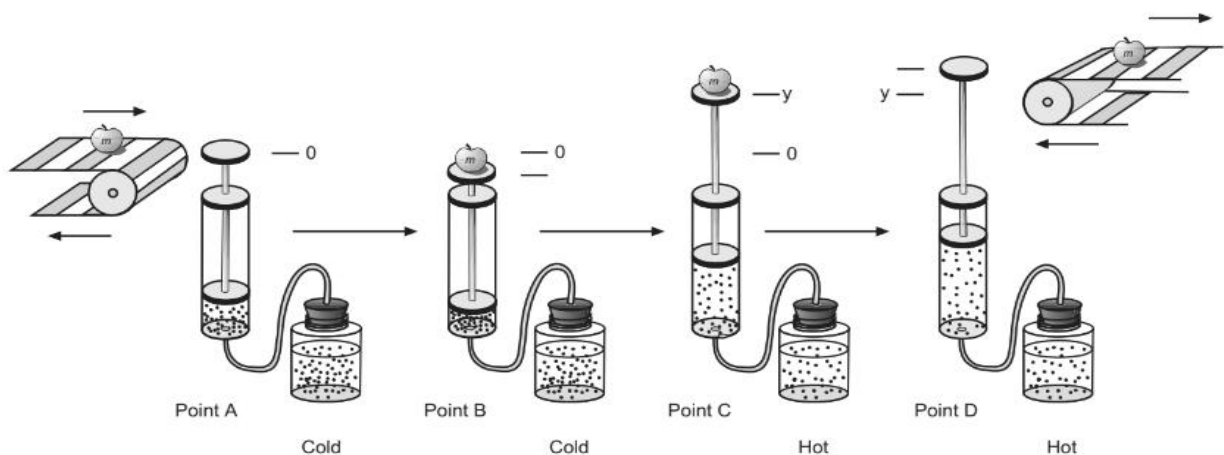
2) 使用測量值來計算點 A, B, C 和 D 的系統體積。(考慮管道和空氣罐中的空氣量!)

3) 利用理想氣體定律驗證從 $A \rightarrow B$ 和從 $C \rightarrow D$ 的過程(為近似等溫曲線)。

4) 畫出熱循環的 P vs. V 圖，並標記循環上的每個點。在 P vs. V 圖表上標記近似等溫線和等壓線。

5) 計算熱循環過程中由 $(B \rightarrow C \rightarrow D)$ 過程中氣體所做的功 W_1 。

6) 將熱循環 P vs. V 圖近似為四邊形，計算此四邊形的面積 W_2 。



圖七 熱循環實驗配置。

注意事項：

1. 為防止儀器損壞，實驗進行時，應以一手緊握氣體定律儀，另一手再以適當力道拍打活塞。
2. 關閉閥門後應注意活塞是否向下滑落，倘若活塞仍會向下滑落，其主要原因為未與低壓感測器連接之閥門未完全關閉。
3. 熱機實驗中，如果提起較大的物體，洩漏率會增加，請斟酌附加的物體重量。
4. 熱機實驗中，為了實驗安全，請避免使用溫度過高的熱水於高溫熱庫。

討論提示：

1. 為何蓋上蓋子煮開水時，水體的溫度增加得比未加蓋時快？試著由熱容比的值來探討此現象。
2. 若將實驗氣體改成氦氣，則 T^2 vs. h 關係圖中的斜率會如何變化？試說明。
3. 空氣主要的成分為何？在本實驗中，假設空氣為雙原子分子目的為何？試說明。
4. 在熱機實驗中，是否能在 P vs. V 圖上完成封閉的熱循環曲線？試就曲線行為說明。
5. 試說明 W_1 與 W_2 的意義。

載流導線受磁力的測量

實驗目的：

將載流的導線置於磁場中，分別觀察導線受力與電流、導線長度、磁場強度以及導線和磁場夾角間的關係，藉以驗證勞倫茲力。

實驗儀器：

載流導線受力測試裝置(含電流連接架、印刷電路板(PCB)、馬蹄形磁鐵、旋轉迴路裝置、長條形磁座、方形磁座)，電源供應器，高斯計(含探測棒)，電子秤。

實驗原理：

帶電粒子 q 以速度 \vec{v} 在電場 \vec{E} 與磁場 \vec{B} 中的受力被稱為勞倫茲力(Lorentz force)，可表示為

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

若只考慮單一載流的長直導線在磁場中受力，則

$$\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B} \quad (2)$$

導線受力的量值和方向，可由下述四個因素來決定

1. 電流值 i
2. 導線的長度 L
3. 磁場的強度 B
4. 導線方向與磁場方向夾角 θ

本實驗藉由改變各項參數，變化導線的受力，用以驗證勞倫茲力。

將一可產生近似均勻磁場的磁鐵座置於電子秤，秤得磁鐵組的總質量。再將印刷電路板(PCB)上的均勻導線段置於磁鐵內，當導線接通電流後，此電流迴路就會受到一向上或向下的勞倫茲力，根據牛頓第三定律(作用力與反作用力)，兩力量值相等、方向相反；因此電子秤上讀數改變，由所秤得的質量變化量可得知導線的受力。

高斯計使用說明

(a) 操作前準備

1. 將探測棒與高斯計連接(如圖一所示)，請先確認針腳方向是否正確後再連接。
2. 檢查是否接上 Model:PSU-5 變壓器。

3. 備好歸零磁室(Zero Flux Chamber)。
4. 按下 ON/OFF 鍵開機，開機後螢幕會出現 CAL6 - CAL0，此時高斯計正在執行自我校正檢測。



圖一 高斯計裝置。

(b) 單位選取

1. 按 SHIFT 鍵，待螢幕上出現 SHIFT 字樣，按 ← 鍵 (選擇 UNITS 切換功能)，此時螢幕右邊的磁場單位會開始跳動，由 ↑/↓ 鍵選擇單位。在本實驗中選用單位為 "mT"。
2. 單位選取完成後，按 SHIFT 鍵，待螢幕上出現 SHIFT 字樣，再按 ← 鍵，即可確認單位。

若螢幕上出現 AUTO RANGE 字樣，即表示高斯計設定在自動檔位切換。若無，請先按 SHIFT 鍵，待螢幕上出現 SHIFT 字樣，再按下 RANGE 鍵，當螢幕出現 AUTO RANGE 字樣時，即可自動進行檔位切換。

(c) 執行校正歸零 (※ 每次測量前執行)

1. 將探測棒前端放入歸零磁室(Zero Flux Chamber)內。
2. 按 ZERO 鍵，待螢幕出現 AUTO ZERO 字樣，當主機會發出"嗶! 嗶!"聲後再將探測棒取出，即使高斯計完成歸零。

(d) 磁場量值測量

1. 將探測棒前端伸入磁場內部。
2. 移動探測棒觀察磁力數值。
3. 探測面應與磁場方向垂直，切記勿與磁座碰觸。
4. 高斯計螢幕所呈現數值即為磁場強度。

(e) 如何用探測棒判斷磁鐵的極性

將探測棒伸入磁場內，若磁場為負值，則握把上的 F.W BELL 該面所面對的磁鐵面極性為 S 極，若磁場為正值，則握把上的 F.W BELL 該面所面對的磁鐵面極性為 N 極。藉此即可判斷磁鐵極性。

注意事項：

1. 高斯計所附探測棒脆弱易斷且價格昂貴，請小心使用。
2. 探測棒未使用(含暫時擱置)時，務必套上保護套，以防止損壞。
3. 探測棒與高斯計連接前，應先確認針腳方向是否正確後再連接，以防針腳折斷。
4. 使用高斯計前，應先將高斯計與探測棒連接後，再開啟電源。使用完畢後，應先關閉電源再移除探測棒。
5. 高斯計使用前應先將探測棒前端置於歸零磁室內，待歸零後再使用。
6. 電子秤最大可承受重量為 600.00 gw，切勿超過此重量。
7. PCB 上導線的最大承受電流為 2.00 A，旋轉迴路裝置的最大承受電流為 5.00 A。
8. 高斯計與電子秤之變壓器切勿混用。
9. 請注意實驗室冷氣的風壓是否強到影響電子秤讀數。

實驗步驟：

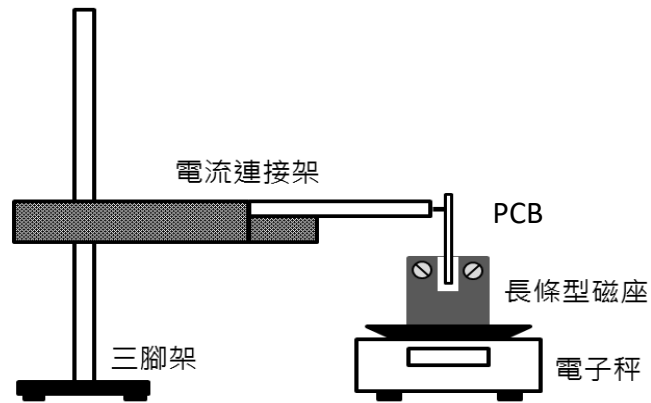
A. 觀察磁鐵排列與磁場量值關係

1. 隨意將 6 個馬蹄形磁鐵吸附於長條形磁座下方。
2. 將高斯計探測棒伸入長條形磁座溝渠間，觀察磁場強度 B 變化。
3. 試著移動探測棒，觀察探棒與磁鐵距離變化時的磁場變化。
4. 試著以不同極性組合排列磁鐵，觀察不同組合時磁場強度的差異變化。

B. 固定導線長度 L 與磁場量值 B ，改變導線電流 i ，觀察導線受力量值 F 與導線電流 i 兩者間的關係

1. 安排實驗裝置，如圖二所示。
2. 將 6 個馬蹄形磁鐵吸附於長條形磁座下方，切記磁極方向要一致。
3. 將高斯計探測棒伸入長條形磁座溝渠間，測量磁場強度 B 。
4. 將 6 號 PCB ($L = 8.40$ cm) 與電流連接架連接。
5. 將長條形磁座放置於電子秤上，再將 PCB 置於兩磁極間。此時，電子秤所測得長條形磁座質量為 m_1 。

6. 以電源供應器輸出電流 0.50 A，記錄長條形磁座質量為 m_2 。
7. 由通電流前後長條形磁座質量變化，計算導線受力量值 F 。
8. 改變導線電流 i (勿超過 2.00 A)，重複上述步驟。
9. 作 F vs. i 關係圖。



圖二 實驗裝置圖 I。

C. 固定導線電流 i 與磁場量值 B ，改變導線長度 L ，觀察導線受力量值 F 與導線長度 L 兩者間的關係

1. 安排實驗裝置，如圖二所示。
2. 將 6 個馬蹄形磁鐵吸附於長條形磁座下方，切記磁極方向要一致。
3. 將高斯計探測棒伸入長條形磁座溝渠間，測量磁場強度 B 。
4. 將 6 號 PCB ($L = 8.40$ cm) 與電流連接架連接。
5. 將長條形磁座放置於電子秤上，再將 PCB 置於兩磁極間。此時，電子秤所測得長條形磁座質量為 m_1 。
6. 以電源供應器輸出電流 1.50 A，記錄長條形磁座質量為 m_2 。
7. 由通電流前後長條形磁座質量變化，計算導線受力量值 F 。
8. 改變導線長度 L (如表一所示)，即更換 PCB，重複上述步驟。
9. 作 F vs. L 關係圖。

表一 PCB 編號與其導線長度對照表。

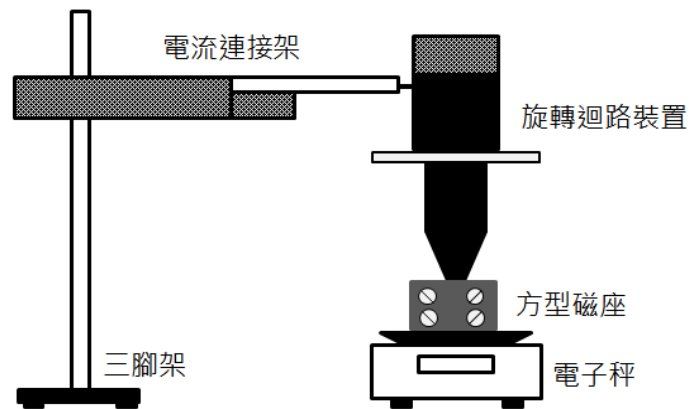
PCB 編號	1	2	3	4	5	6
導線長度 L (cm)	2.20	4.20	3.20	1.20	6.40	8.40

D. 固定導線電流 i 與導線長度 L ，改變磁場量值 B ，觀察導線受力量值 F 與磁場量值 B 兩者間的關係

1. 安排實驗裝置，如圖二所示。
2. 將 6 個馬蹄形磁鐵吸附於長條形磁座下方，切記磁極方向要一致。
3. 將高斯計探測棒伸入長條形磁座溝渠間，測量磁場量值 B 。
4. 將 4 號 PCB ($L = 1.20 \text{ cm}$) 與電流連接架連接。
5. 將長條形磁座放置於電子秤上，再將 PCB 置於兩磁極間。此時，電子秤所測得長條形磁座質量為 m_1 。
6. 以電源供應器輸出電流 1.50 A ，記錄長條形磁座質量為 m_2 。
7. 由通電前後長條形磁座質量變化，計算導線受力量值 F 。
8. 改變磁場強度，即改變磁座下方馬蹄形磁鐵數目，重複上述步驟。
9. 作 F vs. B 關係圖。

E. 觀察導線受力量值 F 與電流方向-磁場方向夾角 θ 兩者間的關係

1. 安排實驗裝置，如圖三所示。
2. 將高斯計探測棒伸入方型磁座溝渠間，測量磁場量值 B 。
3. 先將旋轉迴路裝置上方角度設為 0.0° ，再與電流連接架連接。
4. 將方形磁鐵座放置於電子秤上，再將旋轉迴路裝置伸入於方形磁座內。此時，電子秤所測得方形磁座質量為 m_1 。
5. 以電源供應器輸出電流 1.50 A ，再以手些微轉動方形磁座使電子秤讀值仍為 m_1 。此步驟即再確認電流方向與磁場方向是否平行。
[註] 當電流方向與磁場方向平行時，導線受力為零。
6. 承上，若無法使電子秤讀值顯示為 m_1 ，再微調旋轉迴路裝置上方角度(方形磁座不動)，使電子秤讀值為 m_1 ，記錄微調角度為 ϕ 。
7. 改變導線電流方向與磁場方向夾角，即轉動旋轉迴路裝置角度，記錄方形磁座質量為 m_2 。
8. 改變旋轉角度使磁座質量變化，計算導線受力量值 F 。
9. 作 F vs. $\sin \theta$ 關係圖。



圖三 實驗裝置圖 II。旋轉迴路的有效導線長度為迴路的開數乘以單開的長度(1.0 cm)

討論提示：

1. 在量測磁場前，高斯計使用前應先將探測棒前端置於歸零磁室內，試說明歸零磁室的原理。
2. 已知導線通電後會產生磁場，而在本實驗中是否會受此磁場影響？試說明。
3. 印刷電路板(PCB)在磁鐵組中的擺放位置差異是否也會影響磁場量測結果？試說明。
4. 在導線受力與外加磁場關係實驗中，為何要選用 4 號 ($L=1.20$ cm) PCB，其目的為何？試說明。

光的干涉與繞射

實驗目的：

藉由單(雙)狹縫、圓孔及光柵觀察光的干涉與繞射現象，進而由屏幕上所產生的干涉或繞射條紋計算雷射光波長。

實驗儀器：

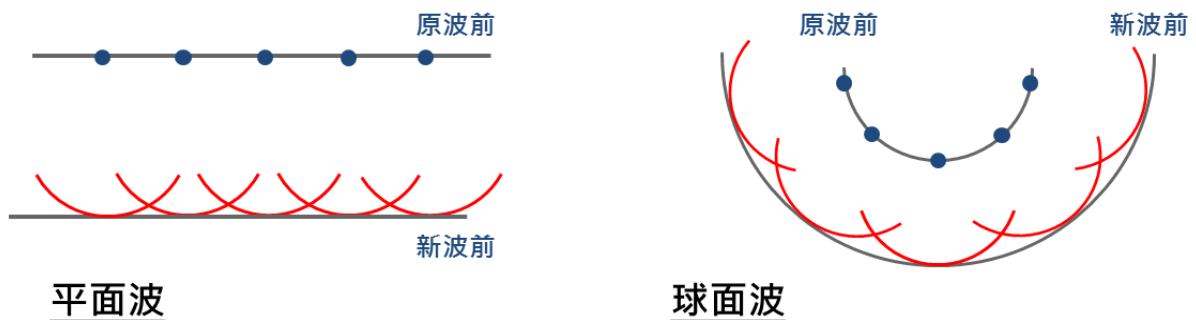
光學軌道，二極體雷射，光偵測器(含屏幕)，轉動感測器，單狹縫/雙狹縫/孔模組，光柵模組，方格紙，直尺，數位轉接頭(藍、PS-2159)，類比轉接頭(藍、PS-2158)，藍牙訊號收發器(白、PS-3200)x2，micro_USB cable，電腦(含Capstone 程式軟體)。

實驗原理：

A. 惠更斯原理

西元 1678 年荷蘭物理學家惠更斯(Christiaan Huygens)提出波在傳遞的過程中，波前上任何一點皆可視為一個新的點波源，而這些新的點波源將會往波前進的方向產生新的波，故於下一時刻所形成的波形即為這些點波源疊加合成的結果。

圖一即是利用惠更斯原理來說明平面波與球面波傳遞情形。

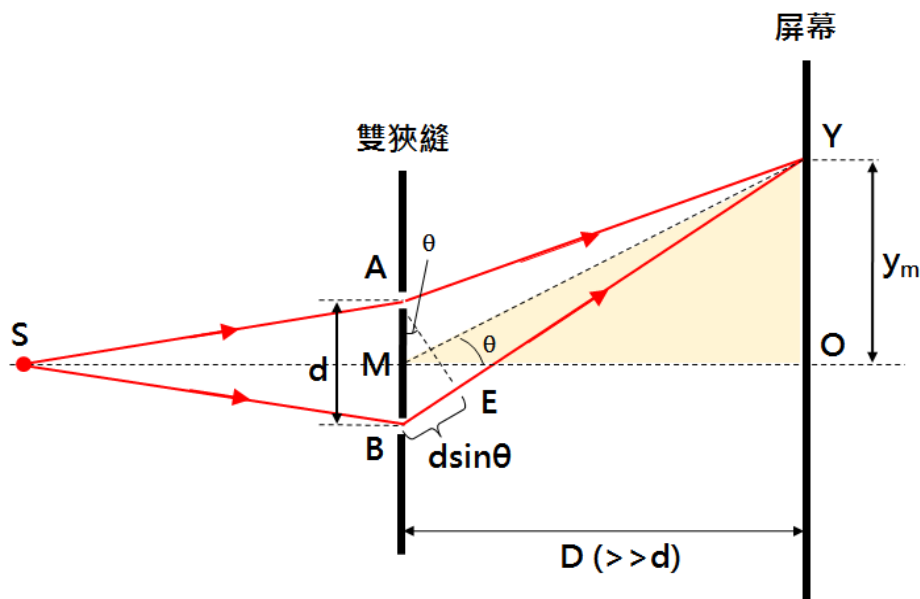


圖一 平面波與球面波傳遞示意圖。

B. 雙狹縫干涉

楊氏雙狹縫干涉(Young's double-slits experiment)為 19 世紀跨世紀的光學巨作，藉由光波通過兩個狹縫後，即可於遠端屏幕上觀察到波的干涉條紋的實驗，奠基了光為波動的「光波學說」，也給予後來「物質波」定性觀察之準則。

如圖二所示，於不透明平板上切割兩個狹縫 A 與 B，再將同調光源 S 置於兩狹縫之前，當光波分別穿過兩狹縫後，即可於遠處屏幕上產生明暗相間的條紋，此即光波干涉所造成的現象，由此可證明光具有波動性。楊氏於西元 1801 年首先進行光干涉實驗，從而證實惠更斯的波動理論，故又稱為楊氏實驗。



圖二 雙狹縫干涉示意圖。

如圖二所示，屏幕上任一點 Y 至兩狹縫距離分別為 \overline{AY} 與 \overline{BY} 。在 \overline{BY} 上取一線段 \overline{EY} 使 $\overline{EY} = \overline{AY}$ ，則 $\overline{BY} - \overline{AY} = \overline{BY} - \overline{EY} = \overline{BE}$ 。 \overline{BE} 為光分別由 A 與 B 兩狹縫到 Y 點之光程差(path difference)。

假設屏幕至狹縫距離 D 遠大於兩狹縫間距 d (即 $D \gg d$)，則三角形 AYE 頂角 $\angle AYE$ 極小，再由等腰三角形的性質可知 \overline{AY} 、 \overline{YM} 、 \overline{BY} 均與 \overline{AE} 近乎垂直，故 \overline{AY} 與 \overline{BY} 兩光波之光程差 \overline{BE} (path difference) 可表示為

$$\overline{BE} \sim d \sin \theta \sim d \tan \theta = d \frac{y_m}{D} \quad (\theta \ll 1 \approx 0) \quad (1)$$

1. 建設性干涉

當兩光波於屏幕上形成亮紋時，其光程差滿足下式：

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

其中， λ 為光波波長， $m=0$ 為中央亮紋， $m=1$ 為第一亮紋，以此類推。

承上，已知屏幕上第 m 條亮紋到中央亮紋 ($m=0$) 間距離為 y_m ，代入公式(2)即可求得光波波長 λ 。

$$m\lambda = d \sin \theta \sim d \tan \theta = d \frac{y_m}{D}$$

$$\Rightarrow \lambda \sim \frac{dy_m}{mD} \quad (3)$$

2. 破壞性干涉

當兩光波於屏幕上形成暗紋時，其光程差滿足下式：

$$d \sin \theta = \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda, \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

其中， λ 為光波波長， $m=1$ 為第一暗紋， $m=2$ 為第二暗紋，以此類推。

承上，已知屏幕上第 m 條暗紋到中央亮紋($m=0$)間距離為 y_m ，代入公式(4)即可求得光波波長 λ 。

$$\begin{aligned} \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda &= d \sin \theta \sim d \tan \theta = d \frac{y_m}{D} \\ \Rightarrow \lambda &\sim \frac{dy_m}{\left(m - \frac{1}{2}\right)D} \end{aligned} \quad (5)$$

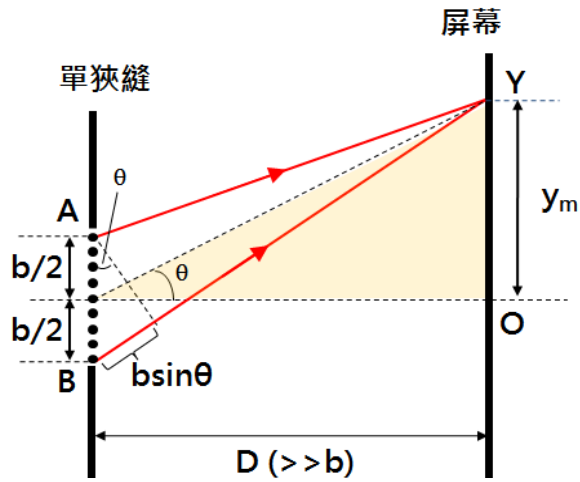
綜合上述，當光波通過雙狹縫後會於後端屏幕產生明暗相間的干涉條紋，且此干涉條紋會於屏幕上 O 點往兩側相互對稱。

C. 單狹縫繞射

由惠更斯原理可知(如圖一所示)，當平面波(Plane wave)進入狹縫時，狹縫上之各點可視為一系列彼此相同之新波源。由此新波源所發出之光波，必然依照波的重疊原理相互干涉，而於遠端屏幕上產生干涉條紋。來自點光源的波，若波前距離遠離點光源時，其波前可視為平面波。此時的繞射稱為遠場繞射(Far field)，亦稱夫朗和斐繞射(Fraunhofer Diffraction)。此外，若波前仍保有球面波的特性時，則會形成菲涅耳繞射(Fresnel diffraction)，亦所謂的近場繞射(Near field)。

同調光源 S 置於單狹縫之前，如圖三所示，光波由左入射至單狹縫(線開口 AB ， $\overline{AB} = b$)，可視為在此狹縫的同一平面波上有許多點波源(黑色小點)，假設屏幕至狹縫距離 D 遠大於單狹縫寬度 b (即 $D \gg b$)，則三角形 AYB 頂角 $\angle AYB$ 極小。已知單狹縫的寬度為 b ，屏幕上 Y 點與狹縫中心的連線對中心線夾角為 θ ，則 \overline{AY} 與 \overline{BY} 兩光波之光程差(path difference)可表示為

$$b \sin \theta \sim b \tan \theta = b \frac{y_m}{D}, \quad \theta \approx 0 \quad (6)$$



圖三 單狹縫繞射示意圖。

1. 破壞性干涉

當光波於屏幕上形成暗紋時，其光程差滿足下式：

$$b \sin \theta = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

其中， λ 為光波波長， $m=1$ 為第一暗紋， $m=2$ 為第二暗紋，以此類推。

承上，已知屏幕上第 m 條暗紋到中央亮紋 ($m=0$) 間距離為 y_m ，代入公式(7)即可求得光波波長 λ 。

$$\begin{aligned} m\lambda &= b \sin \theta \sim b \tan \theta = b \frac{y_m}{D} \\ \Rightarrow \lambda &\sim \frac{by_m}{mD} \end{aligned} \quad (8)$$

2. 建設性干涉

所有光波到達屏幕中點 O 的光程差為零，形成建設性干涉，為中央亮紋的中心點，是繞射影像的最亮處。當光波於屏幕上中央亮紋的兩側形成其它亮紋時，其光程差滿足下式：

$$b \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

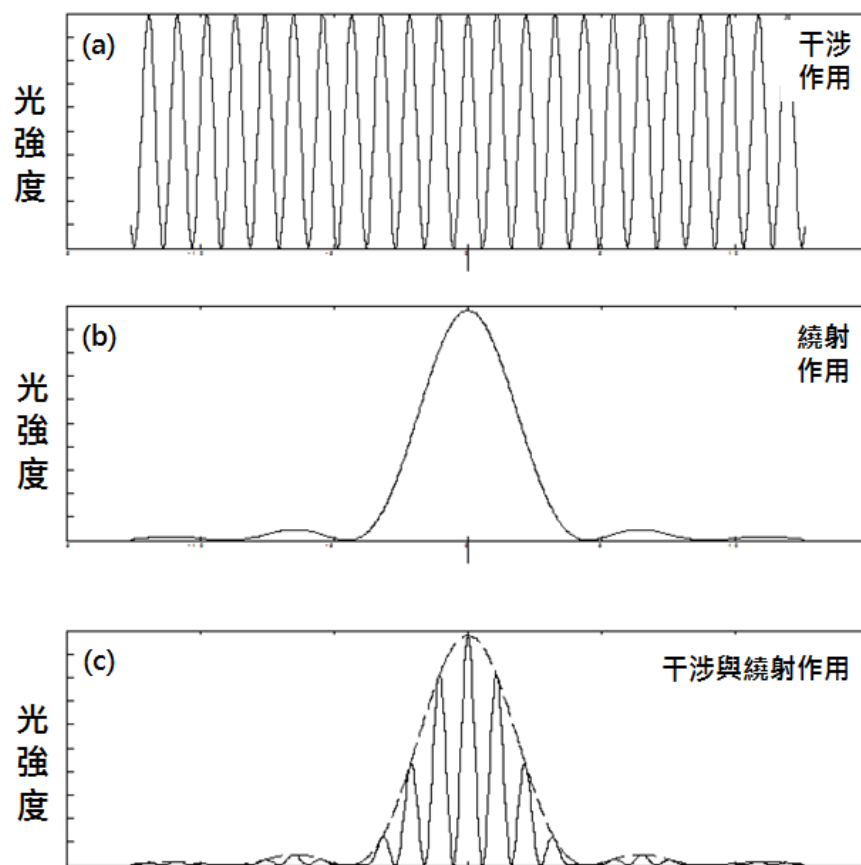
其中， λ 為光波波長， $m=1$ 為第一亮紋， $m=2$ 為第二亮紋，以此類推。

承上，已知屏幕上第 m 條亮紋到中央亮紋 ($m=0$) 間距離為 y_m ，代入公式(9)即可求得光波波長 λ 。

$$\begin{aligned} \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda &= b \sin \theta \sim b \tan \theta = b \frac{y_m}{D} \\ \Rightarrow \lambda &\sim \frac{by_m}{\left(m + \frac{1}{2}\right)D} \end{aligned} \quad (10)$$

D. 雙狹縫干涉及繞射

圖四為雙狹縫干涉實驗中，干涉與繞射作用光強度與位置關係圖。理想上我們是假設狹縫寬度趨近於零，但實際上狹縫都會有一定的寬度，故此除了兩狹縫因光程差所造成干涉外，仍會受狹縫繞射作用影響而使光強度產生變化。因此雙狹縫干涉實驗於屏幕上所產生的條紋綜合了干涉和繞射。



圖四 雙狹縫受干涉與繞射作用中光強度與位置關係圖。(a) 理想雙狹縫干涉圖形。(b) 理想單狹縫繞射圖形。(c) 實際雙狹縫實驗所得圖形(含干涉與繞射)。

E. 圓孔繞射

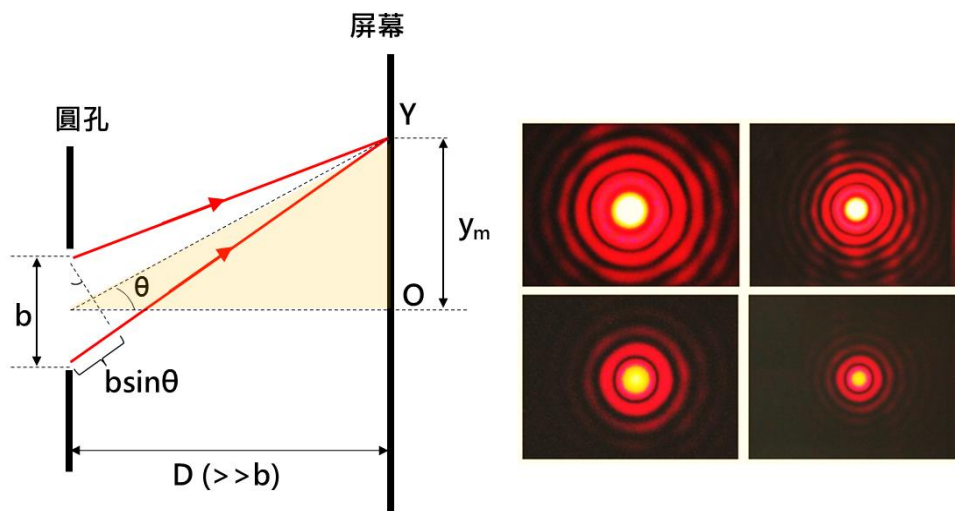
如圖五所示，光波通過圓孔時也會於屏幕產生環形且明暗相間的繞射條紋。假設圓孔直徑為 b 且圓孔至屏幕距離 D 遠大於圓孔直徑 b ，經由 Airy 於 1835 年以雙重積分法可推導出環形且明暗相間的繞射條紋應滿足下列關係式：

$$m\lambda = b \sin \theta \sim b \tan \theta = b \frac{y_m}{D}$$
$$\Rightarrow \lambda \sim \frac{by_m}{mD} \quad (11)$$

其中， λ 為光波的波長， y_m 為亮(或暗)環條紋至環心的距離。

$m=0$ 為中央亮盤； $m=1.220$ 為第一暗環； $m=1.635$ 為第一亮環

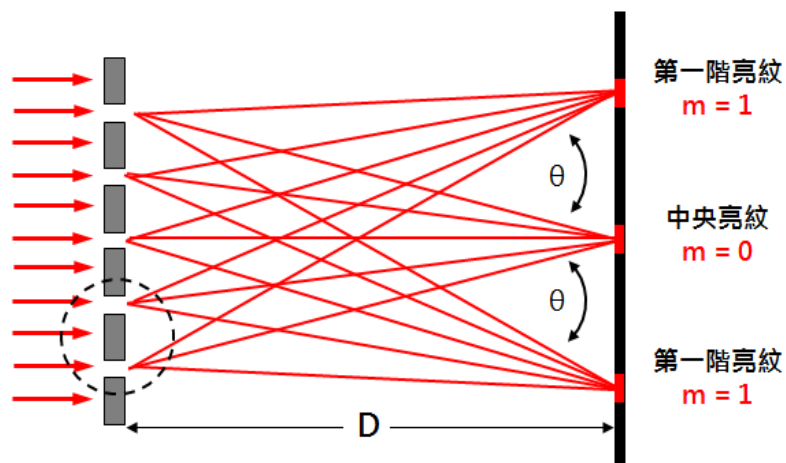
$m=2.233$ 為第二暗環； $m=2.679$ 為第二亮環； $m=3.238$ 為第三暗環



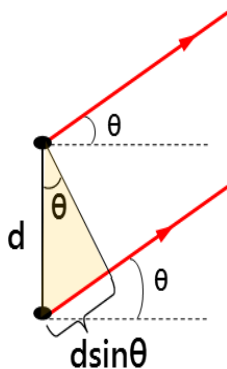
圖五 圓孔繞射示意圖。

F. 光柵繞射

如圖六所示，當平行光入射光柵時會受繞射作用影響而於屏幕上產生繞射條紋。假設屏幕至光柵距離 D 遠大狹縫寬度，則當光波通過相鄰兩狹縫至屏幕上某一點所產生的光程差如圖七所示。光程差可表示為 $d \sin \theta$ ，其中， d 為相鄰兩狹縫間距



圖六 光柵繞射示意圖。



圖七 相鄰兩狹縫光程差示意圖（圖六虛框放大）。

假設光波通過相鄰狹縫於屏幕上 P 點所造成的光程差為波長 λ 為的整數倍，則光波會於屏幕上 P 點產生亮紋，即為建設性干涉，表示如下：

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (12)$$

$m = 0$ 中央亮紋 (zero-order maximum)

$m = \pm 1$ 第一階亮紋 (first-order maximum)

$m = \pm 2$ 第二階亮紋 (second-order maximum)

承上，已知屏幕上第 m 階亮紋至中央亮紋的距離為 y_m ，代入公式(12)即可求得波長 λ 。

$$m\lambda = d \sin \theta \sim d \tan \theta = d \frac{y_m}{D}$$

$$\Rightarrow \lambda \sim \frac{dy_m}{mD} \quad (13)$$

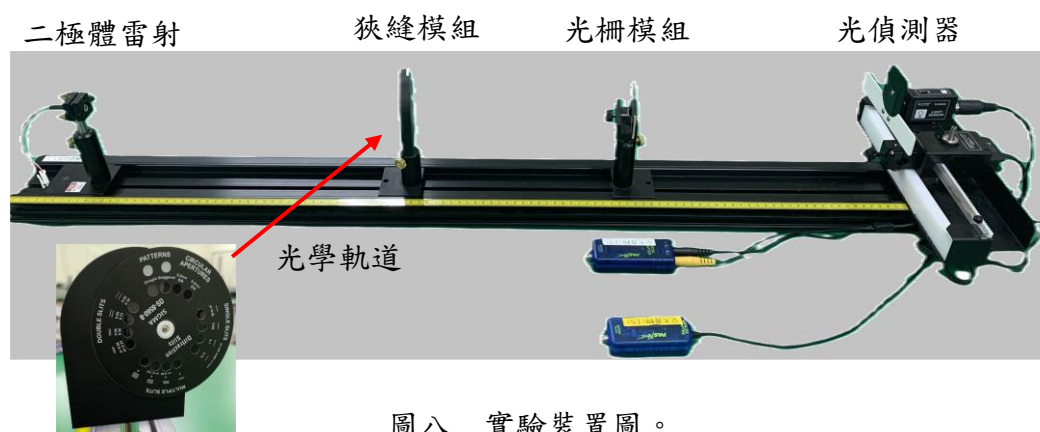
注意事項(違反下列任一事項者，並情節重大者，本學期總分直接以零分計算)：

1. 切勿用眼睛直視雷射光源，實驗時請留意周遭同學與助教，以防實驗過程中因雷射光掃射而傷害眼睛。
2. 實驗過程若需移動雷射，應先關閉雷射，或將雷射光遮蔽。
3. 應將雷射光適當遮蔽，切勿使雷射光不預期地射出實驗桌。
4. 切勿徒手觸摸光學元件鏡面或反覆開關雷射。

實驗步驟：

➤ 實驗前準備

實驗裝置如圖八所示。其中，轉動感測器(含光偵測器與屏幕)應與光學軌道垂直。



圖八 實驗裝置圖。

A. 雙狹縫干涉

1. 將二極體雷射與狹縫模組置於光學軌道中，於狹縫模組上選擇一雙狹縫，並調整模組位置使其與屏幕間距至少大於或等於 80.00 cm。
2. 啟動雷射，同時調整雷射光高度與傾角以及雙狹縫模組位置，使雷射光垂直入射雙狹縫並於屏幕清楚呈現水平干涉條紋。
[註 1] 干涉條紋應由中央向兩側對稱呈現。
[註 2] 在滑軌上慢慢地移動轉動感測器，確定干涉條紋均可通過屏幕上狹縫進入位於轉動感測器前方的光偵測器。
3. 依軟體操作說明書設定相關參數與關係圖。
4. 啟動軟體開始擷取數據，觀察『強度-位置』關係曲線，同時緩慢移動轉動感測器從滑軌的一側至另一側。
5. 分別測量各亮暗紋至中央亮紋間的距離 y_m ，再代入公式計算雷射光波長 λ 。
6. 選擇不同規格雙狹縫，重覆上述步驟。

B. 單狹縫繞射

1. 將二極體雷射與狹縫模組置於光學軌道中，於狹縫模組上選擇一單狹縫，並調整模組位置使其與屏幕間距至少大於或等於 80.00 cm。
2. 啟動雷射，同時調整雷射光高度與傾角以及單狹縫模組位置，使雷射光垂直入射單狹縫並於屏幕清楚呈現水平繞射條紋。
[註 1] 繞射條紋應由中央向兩側對稱呈現。
[註 2] 移動轉動感測器時，繞射條紋均可通過屏幕上方狹縫。
3. 依軟體操作說明書設定相關參數與關係圖。
4. 啟動軟體開始擷取數據，觀察『強度-位置』關係曲線，同時緩慢移動轉動感測器從滑軌的一側至另一側。
5. 測量各暗紋至中央亮紋間的距離 y_m ，再代入公式計算雷射光波長 λ 。
6. 測量中央亮帶與其他亮帶寬度。
7. 選擇不同規格單狹縫，重覆上述步驟。

C. 圓孔繞射

1. 將二極體雷射與狹縫模組置於光學軌道中，於狹縫模組上選擇一圓孔，並調整模組位置使其與屏幕間距至少大於或等於 80.00 cm。
2. 啟動雷射，同時調整雷射光高度與傾角以及單狹縫模組位置，使雷射光垂直入射圓孔並於屏幕清楚呈現環形繞射條紋。
[註] 移動轉動感測器時，繞射條紋均可通過屏幕上方狹縫。
3. 依軟體操作說明書設定相關參數與關係圖。

4. 啟動軟體開始擷取數據，觀察『強度-位置』關係曲線，同時緩慢移動轉動感測器從滑軌的一側至另一側。
5. 分別測量各亮暗環至環心的距離 y_m ，再代入公式計算雷射光波長 λ 。
6. 選擇不同規格圓孔，重覆上述步驟。

D. 光柵繞射

1. 將光柵片(含支撐架)置於光學軌道內，再將方格紙固定於屏幕前方。
2. 啟動雷射並調整光柵位置與雷射光高度，使雷射光垂直入射光柵。
3. 標示方格紙上繞射條紋位置。
4. 測量各亮紋到中央亮紋距離 y_m ，再代入公式計算雷射光波長 λ 。
5. 選擇不同規格光柵，重覆上述步驟。

討論提示：

1. 若雷射光非垂直入射狹縫，屏幕上呈現的干涉或繞射條紋是否會改變？試說明。
2. 在不改變實驗架構下(含狹縫規格，狹縫至屏幕距離)，僅改變雷射光波長，所測得的干涉或繞射條紋將如何改變？試說明。
3. 楊氏當初進行實驗時並無雷射光源，他是如何透過實驗驗證光具有波動性？試說明。

麥克森干涉

實驗目的：

了解麥克森干涉儀的構造與操作原理，觀察其所產生的干涉現象來測量雷射光波長，並利用干涉儀測量未知透明塊的折射率。

實驗儀器：

麥克森干涉儀(含擴束鏡，分光鏡與反射鏡)，氦氖(He-Ne)雷射，屏幕，透明塊、螺旋測微器，水平儀，內六角扳手。

實驗原理：

光的干涉現象，最早可追溯至 1801 年英國科學家楊氏為了證明光是粒子性還是波動性所進行的干涉實驗。當光穿過相鄰兩狹縫時會被分成兩部分，此時遠端屏幕上會產生明暗相間的干涉條紋，稱為波前分光(Division of Wavefront)。而楊氏為詳細解釋此實驗現象，建立了光的波動學說。

除前述波前分光方法外，另有一種分光方式稱為振幅分光(Division of Amplitude)，麥克森干涉即是利用此種分光方式於屏幕上產生干涉條紋。當入射光射入分光鏡後，入射光的強度會被分成兩部份，其中一道光會被分光鏡反射，另一道光則會穿透分光鏡。而後這兩道光再分別經由反射鏡反射至屏幕，當屏幕上兩光點重合時，屏幕上便會出現明暗相間的干涉條紋。

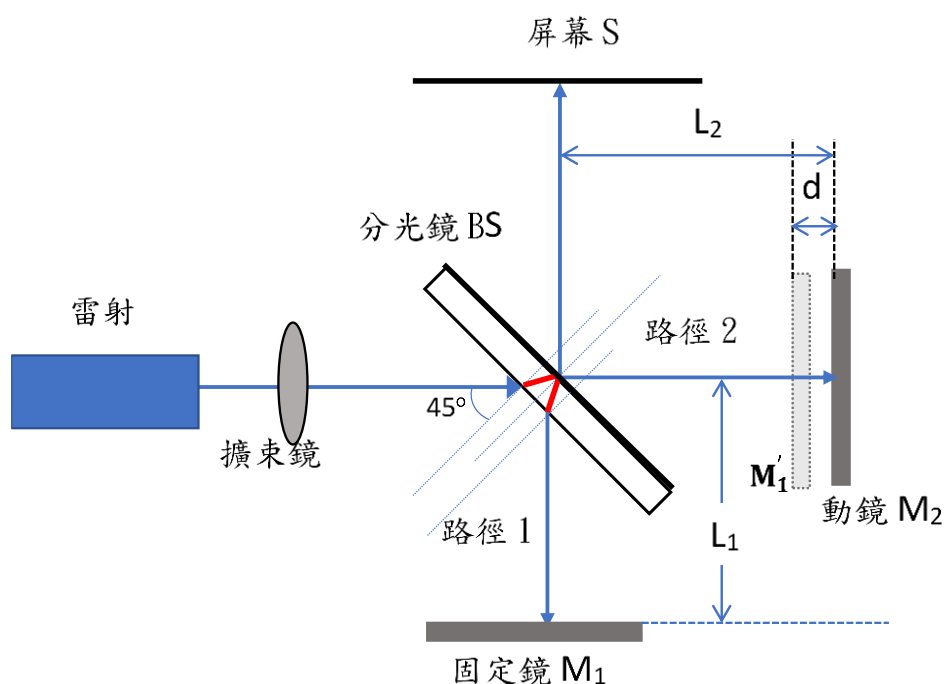
麥克森干涉儀

圖一為麥克森干涉儀實驗裝置示意圖。當雷射光入射至分光鏡 BS 後，光強度會被分為兩部分，其中一部分雷射光會經分光鏡反射後垂直入射至固定鏡 M_1 ，而後再經由固定鏡 M_1 反射並穿過分光鏡 BS 後至屏幕 S，此路徑定義為光路 1；另一部分雷射光穿過分光鏡 BS 後垂直入射至動鏡 M_2 ，而後再依序經由動鏡 M_2 與分光鏡 BS 反射至屏幕 S，此路徑定義為光路 2。當兩光束射入屏幕 S 的光點重疊且光路 1 與光路 2 光程不同 ($L_1 \neq L_2$) 時，屏幕即會產生干涉條紋。

[註] 分光鏡其中一面經鍍膜處理，可將雷射光強度分為兩部分。

[註] 固定鏡與動鏡均為反射鏡。

在本實驗中，因 He-Ne 雷射其光束發散角較小，較不易於屏幕上觀察到干涉條紋，故在 He-Ne 雷射與分光鏡 BS 間放置擴束鏡 L，使雷射光束經擴束鏡 L 後發散成球面波，此時即可於屏幕上明顯看出環形干涉條紋。



圖一 麥克森干涉儀實驗裝置示意圖。

假設雷射光以 45° 角入射至麥克森干涉儀內的分光鏡，雖然光路經過鏡面反射會有 180° 相位改變，因光路 1 會在分光鏡 BS 內部會產生一次反射，又在固定鏡 M_1 做一次反射，而光路經動鏡 M_2 作一次反射，又會在分光鏡 BS 表面產生一次反射，因此兩光路由雷射光源出發到達屏幕的光程差為 $2|L_1 - L_2|$ ，使其相位產生變化。因此，當屏幕上呈現亮環即建設性干涉時，光程差表示如下：

$$2|L_1 - L_2| = n\lambda \quad (1)$$

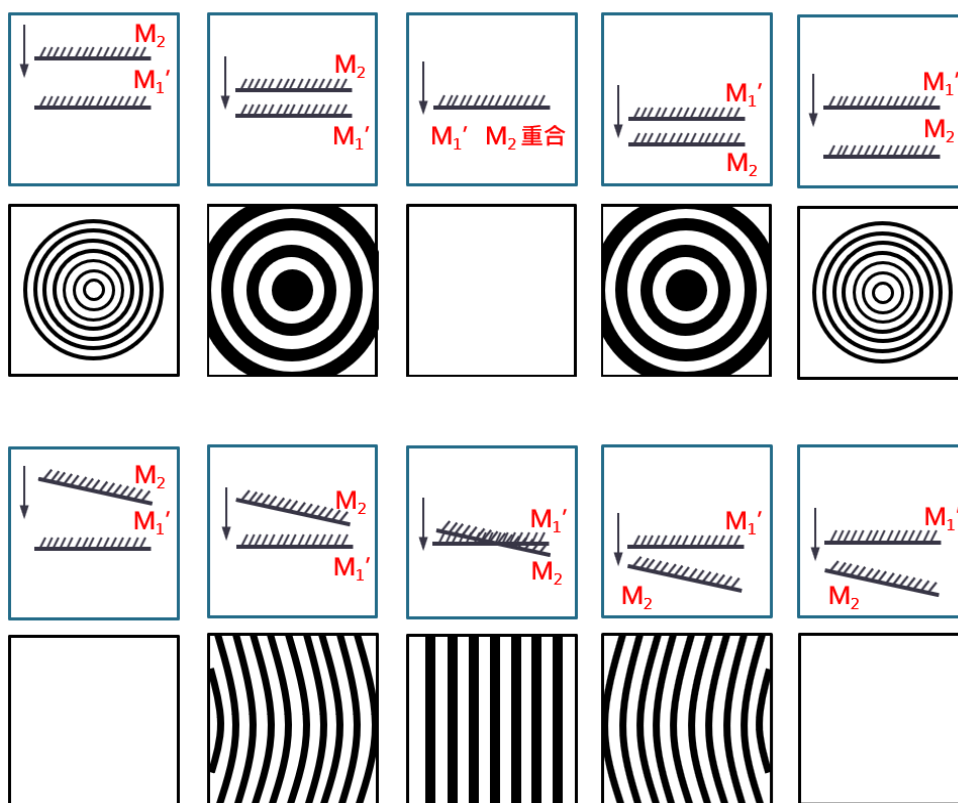
其中， λ 為雷射光波長， n 為第 n 條亮環數。

承上，屏幕上呈現暗紋即破壞性干涉時，光程差表示如下：

$$2|L_1 - L_2| = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (2)$$

其中， λ 為雷射光波長， n 為第 n 條暗環數。

圖二為干涉條紋示意圖，假設當 $L_1 = L_2$ 時，動鏡 M_2 恰在 M_1' ，屏幕上會形成一整片亮區，即無干涉條紋產生。若移動 M_2 使相對距離越大時，屏幕上所產生的干涉條紋數量會變多且變細；反之，若相對距離越小時，屏幕上所產生的干涉條紋數量會變少且變粗。另外，當光路 1 垂直入射固定鏡 M_1 ，但動鏡 M_2 相對光路 2 位置非垂直入射而有夾角時，屏幕上所產生的干涉條紋會變成弧形。



圖二 固定鏡 M_1 的虛像 M_1' 與動鏡 M_2 於不同相對位置下干涉條紋示意圖。

綜合上述，當光路 1 與光路 2 分別垂直入射固定鏡 M_1 和動鏡 M_2 時，可於屏幕上看見清晰的環形干涉條紋，但若有些許角度偏差時，仍可見干涉條紋，但不成環形；當兩路徑間相對距離縮小時，環形的干涉條紋會逐漸變寬，當兩者間相對距離縮小至等於 $\lambda/2$ 時，則會有一圓環縮小進而消失於環心。但若兩者間相對距離相差甚大，則無法於屏幕上看見干涉條紋。

A. 以麥克森干涉儀測量雷射光(單頻)波長 λ

以環形中心為觀測點，可由公式(1)得知，環形中心亮紋方程式為

$$2|L_1 - L_2| = n\lambda \quad (3)$$

將動鏡 M_2 移動使相對距離 $|L_1 - L_2|$ 變為 d_1 ，使環形中心再出現亮環，則此時環形中心亮環方程式為

$$2d_1 = n_1\lambda \quad (4)$$

若再將動鏡 M_2 移動使相對距離 $|L_1 - L_2|$ 變為改變為 d_2 ，使環形中心再出現亮環，則此時環形中心亮環方程式為

$$2d_2 = n_2\lambda \quad (5)$$

將公式(5)式減去公式(4)，用以計算干涉條紋於環形中心變化，即

$$2(d_2 - d_1) = (n_2 - n_1)\lambda \quad (6)$$

定義 $\Delta d = d_2 - d_1$ 且 $\Delta n = n_2 - n_1$ ，即可將公式(6)改寫為

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{\Delta n} \quad (7)$$

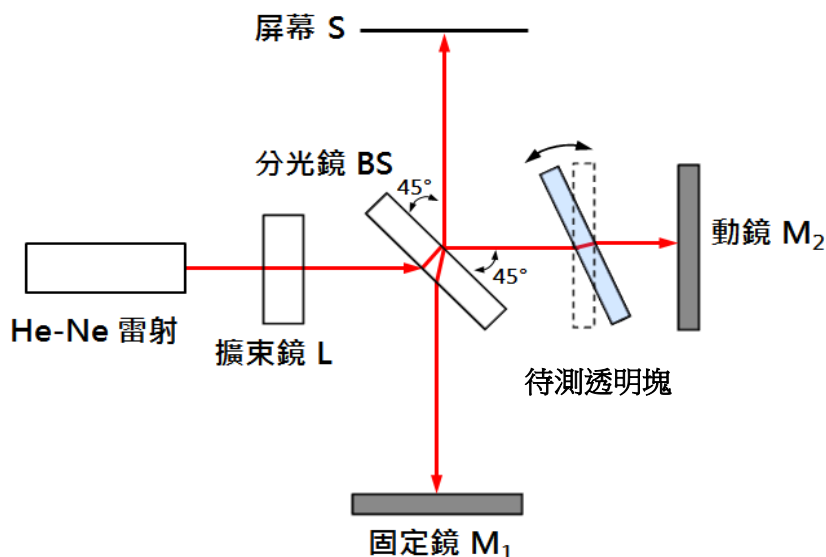
由公式(7)可知，當動鏡 M_2 於光路上平移距離改變量為 $\Delta d = d_2 - d_1$ 時，通過環形中心的干涉條紋數為 $\Delta n = n_2 - n_1$ ，由此便可計算雷射光之波長 λ 。

B. 以麥克森干涉儀測量未知透明塊的折射率 n

光在真空中傳遞的速度(光速) $c = f\lambda_0$ ，其值約為 3×10^8 m/s。當光於不同介質中行進時，其速度會有所變異，進而使光波長發生改變。倘若介質折射率為 n ，則光在此介質中的波長 λ 即可表示為 $\lambda = \lambda_0/n$ 。

[註] f 為頻率， λ_0 為光在真空中傳遞時的波長。

當屏幕上產生環形干涉條紋後，再將待測透明塊放置於分光鏡與可動鏡之間，即可藉由干涉條紋變化計算透明塊的折射率 n 。然而在實驗中，當透明塊置入干涉儀後會造成環形干涉條紋驟變，故不易求得其折射率 n 。因此，改由轉動透明塊，觀察其於轉動前後，因光程改變所引起的干涉條紋變化來求透明塊的折射率 n ，如圖三所示。



圖三 實驗裝置示意圖。

假設 Δl 為轉動待測透明塊後所產生的光程差，而 Δm 是干涉條紋變化量。則光程差 Δl 可表示為

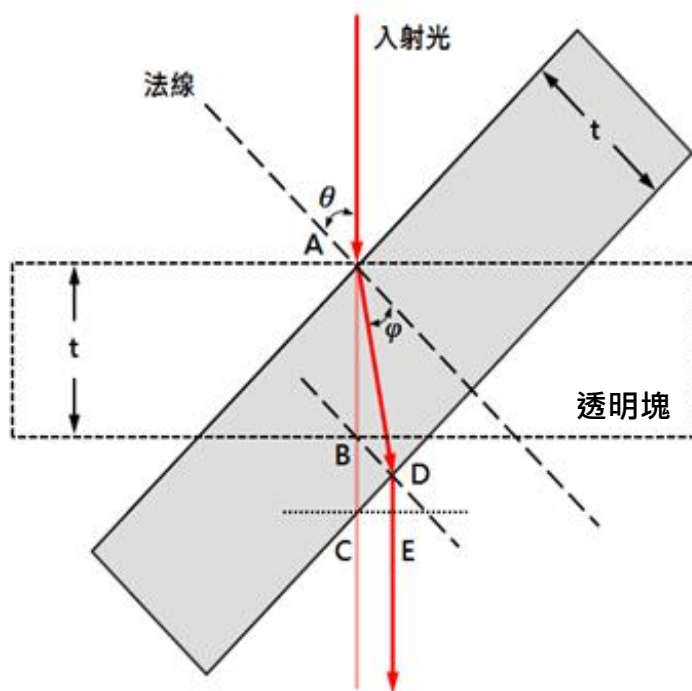
$$2\Delta l = \lambda\Delta m \quad (8)$$

根據斯乃耳定律(Snell's law)可知

$$n_0 \sin \theta = n \sin \varphi \quad (9)$$

其中， n 為待測透明塊的折射率， n_0 為空氣折射率($n_0 \sim 1$)，則待測透明塊的折射率 n 可表示

$$n = \frac{\sin \theta}{\sin \varphi} \quad (10)$$



圖四 光進入轉動後待測透明塊的光路示意圖。

如圖四所示，當光垂入射至待測透明塊時，光所行進的路程可表示為 $n\overline{AB} + \overline{BC}$ ；當光以 θ 角入射至待測透明塊時，光所行進的路程可表示為 $n\overline{AD} + \overline{DE}$ ；因此轉動待測透明塊前後所引起的光程差 Δl 可表示為

$$\Delta l = (n\overline{AD} + \overline{DE}) - (n\overline{AB} + \overline{BC}) \quad (10)$$

代入公式(8)可知

$$2(n\overline{AD} + \overline{DE} - n\overline{AB} - \overline{BC}) = \lambda \Delta m \quad (11)$$

其中

$$\overline{AB} = t, \quad \overline{AD} = \frac{t}{\cos \varphi}, \quad \overline{BC} = \frac{t}{\cos \theta} - t, \quad \overline{DE} = \overline{CE} \tan \theta = \frac{t \sin(\theta - \varphi) \sin \theta}{\cos \varphi \cos \theta}$$

經代換整理後，則透明塊折射率 n 可表示為

$$n = \frac{(1 - \cos \theta)(2t - \lambda \Delta m)}{2t(1 - \cos \theta) - \lambda \Delta m} \quad (12)$$

注意事項(違反下列任一事項者，並情節重大者，本學期總分直接以零分計算)：

1. 雷射光源會對人眼造成傷害，切勿用眼睛直視雷射光源，實驗時請留意周遭同學與助教，以防實驗過程中因雷射光掃射而傷害眼睛，過程中切勿使雷射光射出實驗桌。
2. 切勿徒手觸摸光學元件鏡面或反覆開關雷射。
3. 實驗過程若需移動雷射，應先關閉雷射，或遮蔽雷射光。
4. 實驗進行時，切勿來回走動，避免震動影響觀測。(冷氣、桌面震動亦會有影響)
5. 因鏡面之清潔程度會影響實驗品質，嚴禁手指或衛生紙直接接觸鏡面，若有油污灰塵等，必須用專門的清潔用具及方式處理，不可自行隨意清理。

實驗步驟：

A. 測量雷射光(單頻)波長 λ

1. 擺置實驗裝置，如圖五所示。(干涉儀前端先不置放擴束鏡)
2. 調整干涉儀下方螺絲使光學平台水平。
3. 調整固定鏡 M_1 後端微調螺絲，使固定鏡 M_1 與其支架相互平行。
4. 啟動 He-Ne 雷射，並適當調整雷射支架高度與位置，使雷射光穿透分光鏡 BS 後，可垂直入射動鏡 M_2 鏡心。
5. 轉動分光鏡 BS，使雷射光以 45° 入射分光鏡 BS。
6. 觀察分別經由固定鏡 M_1 與動鏡 M_2 反射至屏幕的兩光點是否重合。若否，請調整固定鏡 M_1 後端微調螺絲，使兩光點重合。
7. 以長尾夾將擴束鏡 L 夾於干涉儀前端，並微調其位置使環形干涉條紋出現於屏幕上。
8. 轉動螺旋測微器用以改變動鏡 M_2 前後位置，觀察環形干涉條文的變化。

[Note] 本實驗儀器中，動鏡 M_2 移動距離 Δd 為螺旋測微器移動距離的二十五分之一，故可由螺旋測微器移動距離 Δs ，計算可動鏡 M_2 移動距離 Δd 。

$$\Delta s = \text{螺旋測微器轉動格數} \times 0.01 \text{ (mm)}$$

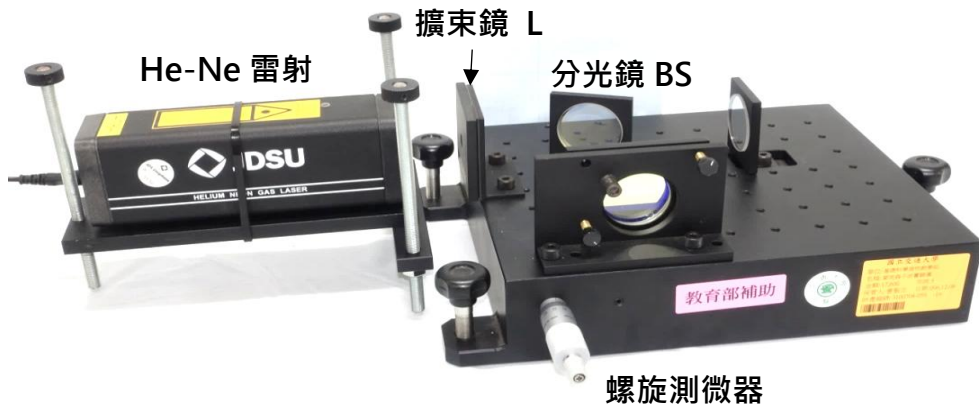
$$\Delta d = \Delta s \times \frac{1}{25} \text{ (mm)}$$

9. 轉動螺旋測微器用以改變動鏡 M_2 前後位置。同時，觀察屏幕相同位置(如環形中心)干涉條紋變化週期次數 Δn (10 次以上)，計算對應的 Δd 。
10. 計算雷射光波長 λ 。

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{\Delta n}$$

11. 改變不同的 Δs ，重覆上述步驟 9 & 10。

12. 作 Δd vs. Δn 關係圖，再由線性迴歸線求雷射光波長 λ 。



圖五 麥克森干涉儀裝置。

B. 測量未知透明塊的折射率 n

1. 依前述步驟，先使屏幕產生環形干涉條紋。
2. 將待測透明塊磁吸於轉動桿前端鏡架，如圖六所示，使光點接近其中心。
3. 將轉動桿尺標使接近麥克森干涉儀上三角刻度板的 0° 。
4. 緩慢轉動轉動桿，觀察屏幕上干涉條紋變化。
5. 記錄當干涉條紋明暗變化週期次數為 Δm 時，轉動桿對應的角度 θ' 。
6. 重複數組不同 Δm 與對應的轉動桿角度 θ' 。
7. 由數據找出垂直入射透明塊時的起始角度，並計算透明塊的折射率 n 。

[註] t 為透明塊厚度，以螺旋測微器測量。



圖六 麥克森干涉儀平台照片。

討論提示：

1. 分光鏡的原理為何？該如判斷分光鏡上的鍍膜面？試說明。
2. 麥克森干涉儀可應用在那些地方？試說明。
3. 實驗方式若改為不轉動透明塊，而是改變動鏡與透明塊的相對位置，是否仍可求得透明塊折射率？試說明。
4. 是否可利用麥克森干涉儀求得一大氣壓下空氣的折射率？試說明。

表一 折射率列表

介質	真空	標準大氣	水	石英	壓克力	窗玻璃	燧石玻璃	鑽石
折射率	1	1.000 29	1.33	1.46	1.49	1.52	1.69	2.42

基礎電路

實驗目的：

1. 簡述三用電表原理、構造與使用方式，藉以學習使用三用電表測量交流電 (Alternating Current, AC) 訊號與直流電 (Direct Current, DC) 訊號。
2. 熟悉訊號產生器與示波器構造、原理與操作方式。

實驗儀器：

三用電表，電源供應器，訊號產生器，免焊電路板(俗稱麵包板)，電阻，示波器，T型分接頭，轉接頭(BNC/雙香蕉插頭)，同軸電纜線(BNC/兩鱷魚夾、BNC/BNC)。

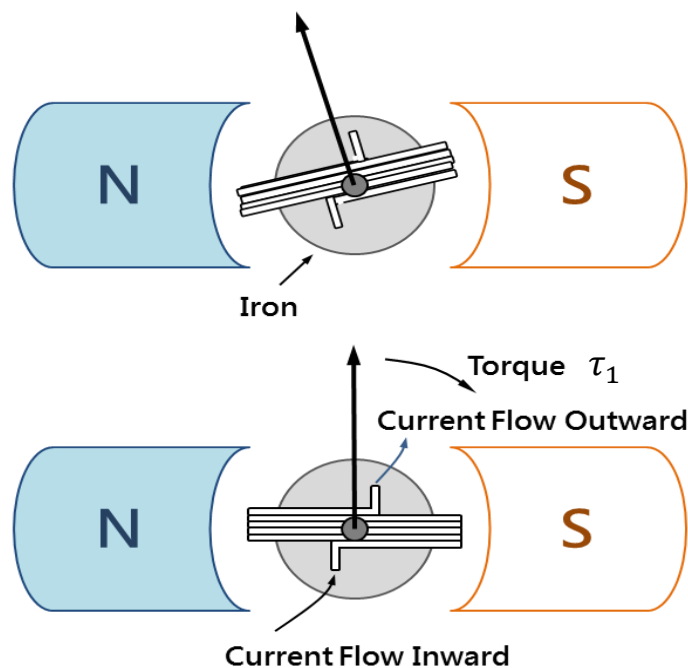
實驗原理：

A. 達松發爾檢流計

圖一為達松發爾檢流計簡圖，當直流電流 I 流入可動線圈時，會受磁鐵所產生之磁場作用，進而產生順時針轉動的入紙面方向力矩 τ_1 ，其量值與電流 I 成正比，而此關係式可表示為

$$\tau_1 = KI \quad (1)$$

其中 K 為比例係數。



圖一 達松發爾檢流計構造示意圖。

此力矩會使內部線圈轉動，同時受到上下兩控制彈簧的扭力影響而產生逆時針轉動的出紙面方向力矩 $\vec{\tau}_2$ ，其量值與線圈轉動角度 θ 成正比，而此關係式可表示為

$$\tau_2 = \kappa\theta \quad (2)$$

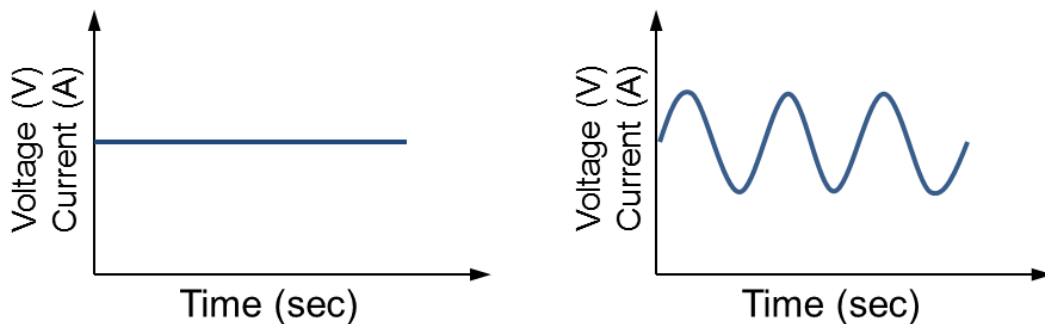
其中 κ 為比例係數。

當系統達平衡時，兩力矩 $\vec{\tau}_1$ 與 $\vec{\tau}_2$ 互相抵消，即表示

$$\begin{aligned} KI &= \kappa\theta \\ \Rightarrow I &= \frac{\kappa}{K}\theta \end{aligned} \quad (3)$$

因此，電流值可由線圈偏轉角度 θ 得知。

[註] 電訊號輸出模式主要可分為直流(DC)訊號與交流(AC)訊號兩種模式。直流訊號其電壓與電流值均為穩定常數，即不隨時間而變化；而交流訊號其電壓與電流值非為穩定常數，其值會隨時間呈現週期性變化，如圖二所示。



圖二 (左)直流與(右)交流訊號對時間關係圖。

因此，若將直流與交流訊號電訊號分別附加於電路上時，電路就會呈現不同的反應。在此，以電功率為例，來說明兩者間的差異。

(a) 直流訊號 (DC)

電阻 R 通過直流電流 I ，此時電阻消耗功率 P 可表示為

$$P = I^2R \quad (4)$$

(b) 交流訊號 (AC)

電阻 R 通過正弦交流電流 $I = I_{\max} \sin(2\pi t/T)$ ，此時電阻消耗功率 P 可表示為

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T R(I_{\max} \sin(2\pi t/T))^2 dt = \frac{RI_{\max}^2}{T} \int_0^T \left(\frac{1 - \cos(4\pi t/T)}{2} \right) dt \\ &= \frac{RI_{\max}^2}{T} \left(\frac{t}{2} - \frac{T \sin(4\pi t/T)}{8\pi} \right) \Big|_0^T = \frac{RI_{\max}^2}{T} \frac{T}{2} = \frac{RI_{\max}^2}{2} = RI_{\text{rms}}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中， I_{\max} 為峰值電流(即電流振幅)， T 為週期， I_{rms} 為方均根電流值，用以說明正弦交流電的淨效應。

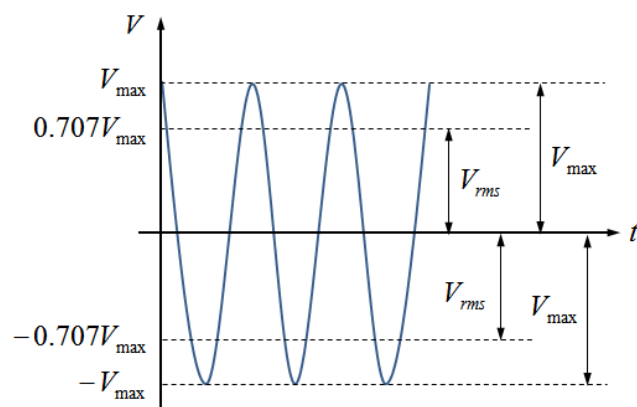
因此日常生活中所使用的電壓(或電流)並非交流訊號最大或最小值，而是有效值，又稱為方均根(root-mean-square, rms.)值。方均根值所代表的物理意義為『交流電源接在某電阻上所產生的熱量與某直流電源接在相同電阻上所產生的熱量相同』。

若以三用電表測量交流電壓或交流電流時，電表上所顯示的數值均為方均根電壓 V_{rms} 或方均根電流 I_{rms} 。

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = 0.707V_{\text{max}} \quad (6)$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = 0.707I_{\text{max}} \quad (7)$$

其中， V_{max} 代表最大電壓值(即電壓振幅)， V_{rms} 代表方均根電壓值，如圖三所示。



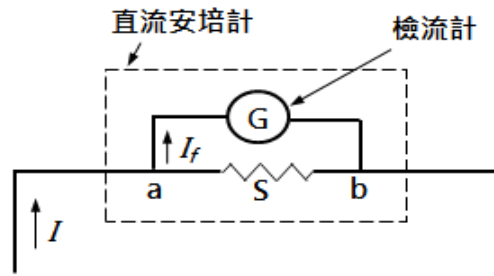
圖三 正弦交流電壓示意圖：方均根與極值電壓。

B. 安培計—電流的測量

在如圖四所示，直流安培計是由檢流計 G 與一低電阻 S 並聯所構成。 R_g 為檢流計內電阻， I 為通過直流安培計之電流值與 I_f 為通過檢流計最大電流值。由歐姆定律可知，分流電阻 S 應滿足下述關係

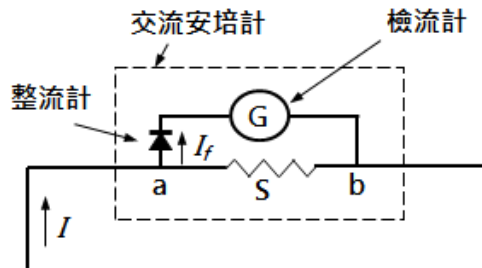
$$\begin{aligned} R_g I_f &= S(I - I_f) \\ \Rightarrow I &= \left(\frac{R_g}{S} + 1 \right) I_f \end{aligned} \quad (8)$$

因此，直流安培計測量範圍，可藉由調整分流的並聯電阻值 S 來決定。



圖四 直流安培計內部構造示意圖。

交流安培計則是由檢流計 G 、低分流電阻 S 及整流器所構成。因達松發爾檢流計只對直流電有效，故應於電路上加整流器使得交流電訊號成直流電訊號，如圖五所示。若於圖五中 a 點左側線路加上整流器即可當作交流安培計使用，應注意交流安培計的刻度是以 $0.707 (\sim 1/\sqrt{2})$ 倍之交流電峰值加以刻劃。



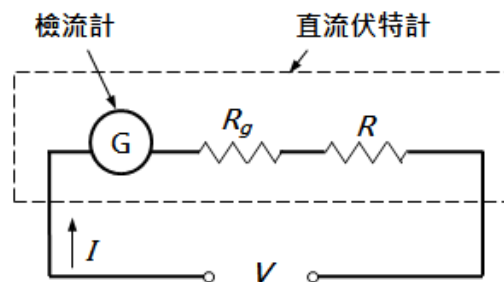
圖五 交流安培計內部構造示意圖。

C. 伏特計—電壓的測量

如圖六所示，直流伏特計是由檢流計 G 與一高電阻 R 串聯所構成。令檢流計可測量最高電壓值為 V_{\max} 、最高電流值為 I_{\max} 且檢流計內電阻為 R_g ，則 $V_{\max} = R_g I_{\max}$ 。假設欲測量電路內最高電壓為 V ，則所需串聯之高電阻為 R 應滿足下述關係

$$V = (R + R_g) I_{\max} = R I_{\max} + V_{\max} \quad (9)$$

因此，直流伏特計測量範圍，可藉由調整分壓的串聯電阻值 R 來決定。



圖六 直流伏特計內部構造示意圖。

交流伏特計，除需於電路內多加整流器外，其餘皆與直流伏特計相同。

D. 歐姆計－電阻的測量

已知電壓 V 與電流 I ，經由歐姆定律即可推算出電阻值 R 。

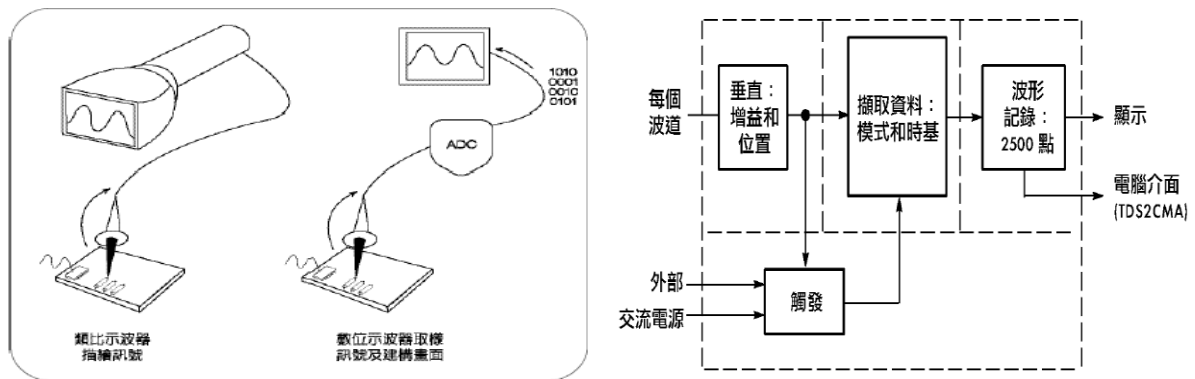
$$R = \frac{V}{I} \text{ (歐姆定律)} \quad (10)$$

E. 示波器

如圖七所示，示波器主要可分為類比式示波器與數位式示波器。類比式示波器主要由陰極射線管 (Cathode ray tube, CRT) 構成，電子束從陰極產生，經聚焦加速後，再以高速射向螢幕，此時電子束會於螢幕上產生一個亮點。若於電子束打到螢幕前，於垂直方向加上偏極板並施加電場，電子束即會於垂直方向產生偏折，又因電子束的偏折量和電壓值成正比關係，故只要將要測量的電壓接在偏極板兩端，即可藉由偏折量測出電壓值。

電壓值通常會在螢幕縱軸方向顯示，為觀測輸入訊號的波形，還得在水平方向增加一組偏極板，同時偏極板上加上與時間成正比關係的電場，此時螢幕上所產生的光點即會隨時間增加而向水平方向展開。

數位式示波器內部使用一個能將類比訊號轉換為數位訊號的轉換器(ADC)，此轉換器會將收集到的訊號進行一連串的取樣及數位轉換，再將資料儲存於記憶體中，直至累積足夠量的取樣點後，即可於螢幕上描繪出波形。



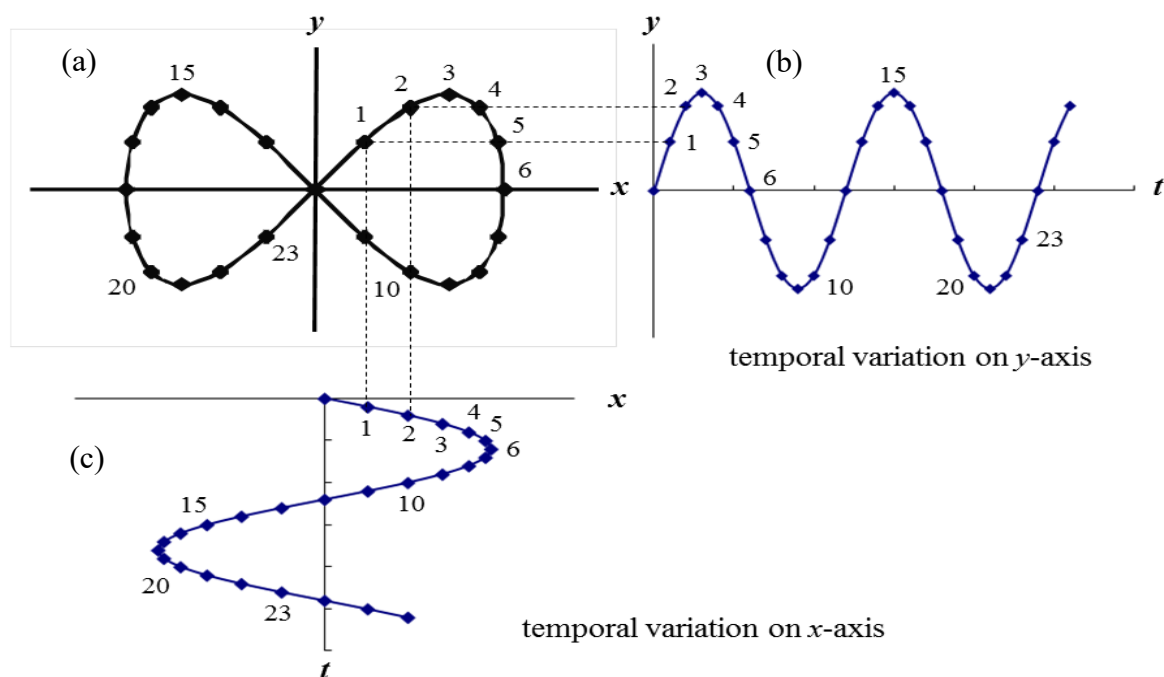
圖七 數位示波器原理。

F. 訊號產生器

訊號產生器的訊號係由振盪器所產生，依頻率範圍可分為低頻與高頻兩類，低頻訊號產生器又稱音頻訊號產生器，高頻訊號產生器又稱射頻訊號產生器。訊號產生器可用於測試或檢修各類電子儀器內的電路特性，如頻率響應、增益、失真、相移等等。故在電路檢修、調整、測試時通常與示波器搭配使用。

G. 利薩如曲線

當兩正弦波訊號分別輸入示波器垂直與水平輸入端時，螢光幕上會顯示連續的二維曲線，稱為『利薩如曲線』。當兩弦波的頻率比為有理數時，利薩如曲線會形成封閉曲線，螢幕上所顯示的利薩如圖形穩定且靜止；若兩弦波的頻率比非有理數時，螢幕上所顯示的利薩如曲線永不封閉且會不斷變動。圖八為頻率比值為 2 的利薩如曲線描繪示意圖，圖八(a)分別是由圖八(b)與圖八(c)兩正弦波自 0 點到 24 點對應 x 、 y 座標軸訊號所構成。



圖八 (a) 頻率比值為 2 之利薩如曲線、(b) Y 軸輸入正弦波、與 (c) X 軸輸入正弦波 5 之描繪示意圖。

利薩如曲線會因兩正弦波彼此之間頻率與相位差異而呈現出不同的封閉曲線，如圓形、橢圓形或直線…等。因此可藉由利薩如曲線判斷兩正弦波頻率比與相位差，表一為即為不同頻率比與相位差下所描繪出之利薩如曲線。

表一 不同頻率比與不同相位差所描繪出之利薩如曲線

相位差 $f_H:f_V$	0°	45°	90°	135°
1 : 1				
2 : 1				
3 : 1				
3 : 2				

以利薩如曲線判斷兩正弦波頻率比

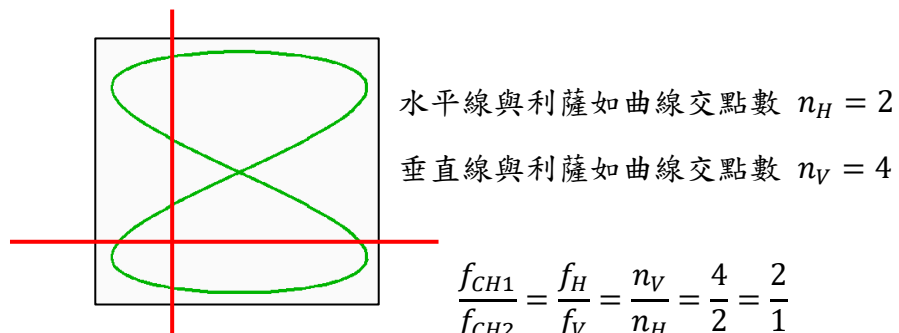
將示波器設定為 XY 模式，若此時輸入兩訊號均為正弦波，螢幕上則出現利薩如曲線；設定水平軸輸入端 (CH1) 正弦波頻率為 f_H ，再調整垂直軸輸入端 (CH2) 正弦波頻率 f_V ，可以觀察到表一所示的各式曲線。

於利薩如圖形上畫上十字線，水平線與垂直線交點應在曲線的封閉區域內且不在曲線交叉處。再分別計算水平線與垂直線與利薩如曲線相交次數，水平線與利薩如圖形相交次數為 n_H ，垂直線與利薩如曲線相交次數為 n_V ，即可由十字線與利薩如圖形相交次數計算兩弦波頻率比。

兩訊號頻率比如下所示：

$$f_{CH1}:f_{CH2} = f_H:f_V = n_V:n_H \quad (11)$$

例



注意事項：

1. 請先了解電源供應器(附錄四)、免焊電路板(麵包板,附錄八)、三用電表(附錄五)與訊號產生器(附錄三)使用方式。
2. 使用三用電表,正確連接待測元件後,按壓上下鍵選擇正確檔位且量程由大至小測量。避免因電路短路或電流/電壓超過負荷而造成儀器損壞。
3. 以三用電表作伏特計測量電壓時,三用電表應與電路並聯。
4. 以三用電表作安培計測量電流時,三用電表應與電路串聯。
5. 千萬不要以電流檔位來測量電壓,嚴重時恐造成電線走火而灼傷自身或同學,超過 2 A 的電流絕對不可接在小電流輸入端子上。
6. 為避免器材損壞,電源供應器所輸出電壓不可超過 10.0 V。
7. 操作示波器前,應先了解面板上各開關、旋鈕與接頭功用(附錄二)。
8. 當不知示波器顯示何種訊號時,請按『AUTO SET』鍵用以自動校正,但請勿過度依賴此按鍵。
9. 使用完畢請確實關閉所有儀器電源。

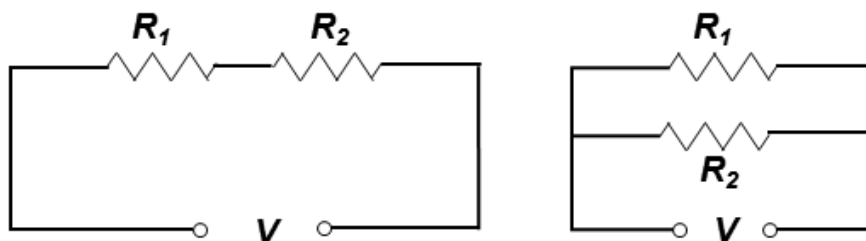
實驗步驟：

A. 直流電壓、電流與電阻測量

1. 任選兩電阻 R_1 與 R_2 ,再由色碼表(表二與附錄七)計算 R_1 與 R_2 電阻值。
2. 將三用電表選取電阻檔位,取轉接頭(BNC/雙香蕉插頭),雙香蕉接頭插在三用電表的 V/R-COM 輸入端子,訊號連接同軸電纜線(BNC/兩鱷魚夾),以另一端的兩鱷魚夾夾住電阻兩端,分別記錄兩電阻測量值。
3. 依序於免焊電路板上完成串聯與並聯電路,如圖九所示。
4. 分別以電源供應器提供直流電壓($< 10.0\text{ V}$)至串聯與並聯電路,執行步驟 5 與 6 時應先確定接線與三用電表檔位無誤後,才開啟電源供應器提供直流電壓。
5. 開啟三用電表,量測直流電壓時則選取直流電壓檔位,並確認使用電表的電壓接端(V/R and COM),量測各電阻的跨壓。量測完後,拆電壓端接線並關閉三用電表。
※ 注意此時電表須以並聯方式與待測電阻連接。
6. 量測直流電流時,則電路的端子需串接三用電表(I(20A) and COM),開啟三用電表前先確認正確的接線,並選取三用電表直流電流檔位,量測電路的總電流或分電流(量程由大到小測量,若確定待測電流小於 2A,可使用 I(2A)端子)。
※ 注意電表需與待測電路串聯,若與電路並聯會使電表保險絲燒毀,務必在通電之前再三確認。
7. 以歐姆定律計算電路總電壓、分電壓與總電流、分電流,並計算百分誤差。

表二 色碼表

黑	棕	紅	橙	黃	綠	藍	紫	灰	白	金	銀
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	±5%	±10%



圖九 (左)串聯與(右)並聯電路示意圖。

B. 交流電壓測量(ACV)

1. 開啟三用電表，再按交流電壓(ACV)模式。
2. 取轉接頭(BNC/雙香蕉插頭)，雙香蕉接頭插在三用電表的 V/R-COM 輸入端子，訊號連接同軸電纜線(BNC/BNC)，以線另一端 BNC 頭連接訊號產生器輸出端(16，附錄三)。
3. 開啟訊號產生器，再由訊號產生器輸出 60 Hz 的正弦波，調整輸出電壓值，觀察方均根電壓值是否隨輸出電壓值不同而改變。
4. 固定輸出電壓值，改變訊號產生器輸出頻率 60 Hz ~ 1 MHz，記錄不同頻率所對方均根電壓值。

➤ 示波器實驗前準備

1. 以同軸電纜線(BNC/BNC)連接訊號產生器與示波器 CH1。
2. 以訊號產生器輸出 1.00 kHz 正弦波。
3. 調整示波器上電壓「伏特/格 VOLTS/DIV」與時間「秒/格 TIME/DIV」兩旋鈕，使螢幕所顯示出現 1-2 個完整波形並佔螢幕 70%。

C. 電壓測試

(a) 直接觀察法

1. 計算波形峰對峰 (波峰至波谷) 垂直大格數。
2. 記錄波形每大格電壓比例尺「伏特/格 VOLTS/DIV」(螢幕左下角顯示)。
3. 峰對峰電壓值 $V_{pp} = (\text{峰對峰垂直所佔大格數}) \times (\text{伏特/格 VOLTS/DIV})$ 。
4. 計算波形電壓振幅 V_{max} 與方均根電壓 V_{rms} 。

(b) 游標夾擊法

型號 TDS 2022

1. 按 CURSOR 鍵，進入 CURSOR 功能表。
2. 按下螢幕右側類型所對應功能鍵選擇電壓；訊號源所對應功能鍵選擇 CH1。
[註] 操作面板上游標 1、游標 2 的燈會亮起。
3. 調整 CH1 與 CH2 的垂直位置旋鈕，使兩水平游標分別與波形波峰/波谷切齊。
4. 記錄螢幕右側 |相對值| 下方數值，此即峰對峰電壓值 V_{pp} 。
5. 計算波形電壓振幅相對值

型號 GDS 1152A-U

1. 按 CURSOR 鍵，進入 CURSOR 功能表。
2. 分別按下由螢幕右側訊號源所對應功能鍵選擇 CH1； $X \leftrightarrow Y$ 所對應功能鍵使螢幕所顯示游標為水平方向。
3. 按下螢幕右側 Y1 所對應功能鍵，調整 VARIABLE 旋鈕，用以移動實線游標並與波峰切齊。
4. 按下螢幕右側 Y2 所對應功能鍵，調整 VARIABLE 旋鈕，用以移動實線游標並與波谷切齊。
5. 記錄螢幕右側 Y1 Y2 下方數值，此即波形峰對峰電壓值 V_{pp} 。
6. 計算波形電壓振幅 V_{max} 與方均根電壓 V_{rms} 。

(c) 自動測量法

型號 TDS 2022

1. 按 MEASURE 鍵，進入 MEASURE 功能表。
2. 由螢幕右側各項測量值中直接記錄 CH1 峰對峰值下方數值，此即波形峰對峰電壓值 V_{pp} 。若螢幕右側測量值中未出現 CH1 峰對峰值，則由下述步驟取得。
3. 任意按下螢幕右側區塊所對應功能鍵，進入讀取選單。
4. 依序按下螢幕右側信號源所對應功能鍵選擇 CH1；自動量測所對應之功能鍵選擇峰對峰值。再次按下螢幕右側區塊所對應功能鍵，使回到 MEASURE 功能表。
5. 計算波形電壓振幅 V_{max} 與方均根電壓 V_{rms} 。

型號 GDS 1152A-U

1. 按 MEASURE 鍵，進入 MEASURE 功能表。
2. 由螢幕右側各項測量值中直接記錄峰對峰值下方數值，此即波形峰對峰電壓值 V_{pp} 。若螢幕右側測量值中未出現峰對峰值，則由下述步驟取得。
3. 任意按下螢幕右側區塊所對應功能鍵，進入讀取選單。再按螢幕右側第 3 個功能鍵，進入測量表選單。調整 VARIABLE 旋鈕，選擇電壓峰對峰 (V_{pp}) 後，再次按下此功能鍵。
4. 按下螢幕右側前一頁所對應之功能鍵，使螢幕回到 MEASURE 功能表。
5. 計算波形電壓振幅 V_{max} 與方均根電壓 V_{rms} 。

(d) 電表測量法

1. 以三用電表測量方均根電壓 V_{rms} 。
2. 計算波形電壓振幅 V_{max} 與峰對峰電壓 V_{pp} 。

D. 頻率測試

(a) 直接觀察法

1. 計算一完整波形所佔有之水平大格數。
2. 記錄完整波形每大格時間比例尺「秒/格 TIME/DIV」(螢幕正下方顯示)。
3. 週期 $T = (\text{一完整波形水平大格數}) \times (\text{秒/格 TIME/DIV})$ 。
4. 計算頻率 f 。

(b) 游標夾擊法

型號 TDS 2022

1. 按 CURSOR 鍵，進入 CURSOR 功能表。
2. 由螢幕右側類型所對應功能鍵選擇時間；信號源所對應功能鍵選擇 CH1。
[註] 操作面板上游標 1、游標 2 的燈會亮起。
3. 調整 CH1 與 CH2 的垂直位置旋鈕，使兩垂直游標分別位於波形相鄰兩波峰上。
4. 記錄螢幕右側 |相對值| 下方數值，即為波形週期 T 。
5. 計算頻率 f 。

型號 GDS 1152A-U

1. 按 CURSOR 鍵，進入 CURSOR 功能表。
2. 分別按下由螢幕右側訊號源所對應功能鍵選擇 CH1； $X \leftrightarrow Y$ 所對應功能鍵使螢幕所顯示游標為垂直方向。
3. 按下螢幕右側 X1 所對應功能鍵，調整 VARIABLE 旋鈕，用以移動實線游標使其落於某波峰上。
4. 按下螢幕右側 X2 所對應功能鍵，調整 VARIABLE 旋鈕，用以移動實線游標使其落於相鄰波峰上。
5. 記錄螢幕右側 |相對值| 下方數值，即為波形週期 T 。
6. 計算頻率 f 。

(c) 自動測量法

型號 TDS 2022

1. 按 MEASURE 鍵，進入 MEASURE 功能表。
2. 由螢幕右側各項測量值中直接記錄 CH1 週期與 CH1 頻率下方數值，即波形週期 T 與頻率 f 。若螢幕右側測量值中未出現 CH1 週期與 CH1 頻率，則由下述步驟取得。
3. 任意按下螢幕右側區塊所對應之功能鍵，進入讀取選單。
4. 依序按下螢幕右側信號源所對應功能鍵選擇 CH1；自動量測所對應之功能鍵選擇 CH1 週期或 CH1 頻率。再次按下螢幕右側區塊所對應功能鍵，使回到 MEASURE 功能表。
5. 記錄波形週期 T 與頻率 f 。

型號 GDS 1152A-U

1. 按 MEASURE 鍵，進入 MEASURE 功能表。
2. 觀察螢幕右側各項測量值中直接記錄週期與頻率下方數值，即波形週期 T 與頻率 f 。若螢幕右側測量值中未出現週期與頻率，則由下述步驟取得。
3. 任意按下螢幕右側區塊所對應功能鍵，進入讀取選單。再按螢幕右側第 3 個功能鍵，進入測量表選單。調整 VARIABLE 旋鈕，用以選擇週期(Period)與頻率(Frequency)後，再次按下此功能鍵。
4. 按下螢幕右側前一頁所對應之功能鍵，使螢幕回到 MEASURE 功能表。
5. 記錄波形週期 T 與頻率 f 。

E. 訊號傳輸速率

1. 選取兩條不同長度之同軸電纜線(BNC/BNC)，分別為 1 m 與 60 m。
2. 將 T 型分接頭接於訊號產生器輸出端，再將兩同軸電纜線之一 BNC 分別接於 T 型分接頭兩端，後再將另一端 BNC 分別連接示波器 CH1 與 CH2。
3. 開啟訊號產生器，設定輸出頻率為 1.0 MHz 弦波。
4. 以游標夾擊法夾擊兩波形相鄰波峰，所得數值即為兩波形時間差 Δt 。
5. 計算訊號傳輸速率 v 。(其中， Δd 為兩訊號線長度差)

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$$

6. 於 1.0 MHz~2.2 MHz 間每 0.3 MHz 取樣並重覆上述步驟，計算訊號傳輸速率 v 。

F. 利薩如圖形

1. 選取兩條相同長度同軸電纜線(BNC/BNC)。
2. 由兩台訊號產生器分別輸出振幅相同但頻率不同的正弦波至示波器 CH1 與 CH2。

型號 TDS 2022

3. 分別調整 CH1 與 CH2 「伏特/格」至 5V/格。(螢幕左下角顯示)
4. 按 DISPLAY 鍵，進入 DISPLAY 功能表。按下螢幕右側格式所對應之功能鍵選擇 XY 軸 (進入利薩如模式)。
5. 由利薩如圖形，計算兩弦波頻率比。

型號 GDS 1152A-U

3. 分別調整 CH1 與 CH2 「伏特/格」至 5V/格。(螢幕左下角顯示)
4. 按下示波器面板上 HORIZONTAL 中的 MENU 鍵，進入功能表。按下螢幕右側 XY 所對應之功能鍵進入利薩如模式。
5. 由利薩如圖形，計算兩弦波頻率比。

討論提示：

1. 直流電測量實驗中，計算值與測量值是否相同？試說明。
2. 交流電測量實驗中，固定訊號輸出電壓僅改變輸出頻率時，所得電壓測量值是否相同？試說明。
3. 在訊號傳輸速率的實驗中，不同的頻率對傳輸速率有何影響？在實驗中為何要選取高頻率？試說明。
4. 甲、乙分別於 A、B 兩地通電話，甲發現當他每講完一句話後 100 ms 會聽到自己的回聲，若電信系統是將聲音以 1.5 MHz 的載波頻率傳送，則是否可由實驗數據推算 A、B 兩地距離？試說明。

RLC 串聯電路

實驗目的：

以交流電訊號驅動 RLC 串聯電路，藉以了解阻尼振盪現象與特徵頻率的關係。

實驗儀器：

示波器，訊號產生器，電阻器，電容器，電感器，同軸電纜線。

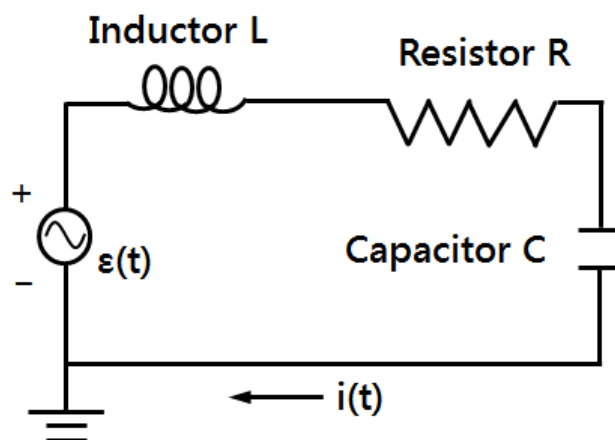
實驗原理：

電子元件中，電阻並無法儲存能量，屬於能量消耗元件；電容 C 與電感 L 皆不會消耗能量屬於能量儲存元件。在 LC 串聯電路中並無串接電阻 R，故能量消耗為零，為維持能量守恆，電路所儲存的能量會於電容 C 與電感 L 內進行交換，而此交換的頻率稱為特徵頻率。特徵頻率可藉由測量電容中電壓對時間的關係，或電感中磁場對時間的關係取得。若在 LC 串聯電路中再串接電阻 R 就成為 RLC 串聯電路，電阻 R 在電路中所扮演的角色就是阻尼，其作用即為消耗能量。

欲測量 LC 或 RLC 串聯電路中的特徵頻率，最簡單的方式就是於電路中再串接驅動源(例：訊號產生器)。訊號產生器的作用為驅動電路內的電子移動，其驅動方式可分為直流與交流驅動，而交流驅動頻率會與電路內的特徵頻率相互影響。

圖一為 RLC 串聯電路示意圖，完整的 RLC 串聯電路是由訊號產生器、電阻 R、電容 C 和電感 L 及電壓測量儀所組成，最常使用的電壓測量儀器即為示波器。

以電動勢 $\varepsilon(t)$ 來驅動 RLC 電路時，各元件其電壓與相位均會隨時間增加而改變。



圖一 RLC 串聯電路示意圖。

由克希荷夫定律(Kirchhoff law)可知『任一封閉迴路的總電壓降為零』，則

$$V_R(t) + V_L(t) + V_C(t) = \varepsilon(t) \quad (1)$$

其中， $\varepsilon(t)$ 為訊號產生器所提供的電動勢， $V_R(t)$ 、 $V_L(t)$ 、 $V_C(t)$ 分別為電阻 R、電感 L 與電容 C 三個元件的兩端電壓。

在 RLC 電路中，電阻 R、電感 L、電容 C 的特性皆可以電流 $i(t)$ 方式表示：

$$1. \text{ 電容 } C \text{ 特性：} C = \frac{Q(t)}{V_C(t)} \ \& \ i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \Rightarrow i(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt}$$

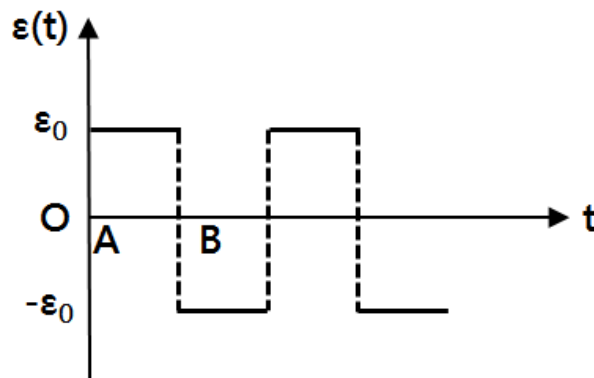
$$2. \text{ 電阻 } R \text{ 特性 (歐姆定律)：} R = \frac{V_R(t)}{i(t)} \Rightarrow V_R(t) = i(t)R = RC \frac{dV_C(t)}{dt}$$

$$3. \text{ 電感 } L \text{ 特性：} L = \frac{d\Phi(t)}{di(t)} \ \& \ V_L(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \Rightarrow V_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = LC \frac{d^2V_C(t)}{dt^2}$$

分別將電阻 R、電感 L、電容 C 的特性代入公式(1)，可得與電容電壓 $V_C(t)$ 有關的二次微分方程式，如下表示：

$$\frac{d^2V_C(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dV_C(t)}{dt} + \frac{1}{LC} V_C(t) = \frac{1}{LC} \varepsilon(t) \quad (2)$$

A. 以訊號產生器提供電動勢 $\varepsilon(t)$ 的直流(方波)訊號，其電動勢 $\varepsilon(t)$ 隨時間變化的關係圖，如圖二所示。



圖二 $\varepsilon(t)$ 對時間 t 變化關係圖 <方波>。

假設 $\varepsilon(t)$ 為低頻方波，則此電路會受到兩個過程所作用：

- i. 在 A 點電動勢由 $-\varepsilon_0$ 變成 ε_0 ：相當於電動勢對電容充電直到電容充滿電荷。
- ii. 在 B 點電動勢由 ε_0 變成 $-\varepsilon_0$ ：相當於電路短路，即電容放電後會再反向充電直到電容充滿電荷。

充電過程：

將電動勢 $\varepsilon(t) = \varepsilon_0$ 代入公式(2)，可得二次微分方程式如下所示：

$$\frac{d^2V_C(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dV_C(t)}{dt} + \frac{1}{LC} V_C(t) = \frac{1}{LC} \varepsilon_0 \quad (3)$$

如圖二所示，充電過程的起始電壓 $V_C(t=0) = -\varepsilon_0$ ，則此二次微分方程式所解得的電容電壓 $V_C(t)$ 如下所示：

$$V_C(t) = \varepsilon_0 \left(1 - 2 \sqrt{1 + \left(\frac{\beta}{\omega}\right)^2} e^{-\beta t} \cos(\omega t - \phi) \right)$$

$$\Rightarrow V_C(t) = \varepsilon_0 - 2\varepsilon_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\beta}{\omega}\right)^2} e^{-\beta t} \cos(\omega t - \phi) \quad (4)$$

其中衰變率 $\beta = \frac{R}{2L}$ ，角頻率 $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$ ，相位差 $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\beta}{\omega}\right)$

$$\text{振幅項 } |V_C(t)| = 2\varepsilon_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\beta}{\omega}\right)^2} e^{-\beta t}$$

$$\text{振盪項 } \cos(\omega t - \phi)$$

反向充電過程：

將電動勢 $\varepsilon(t) = -\varepsilon_0$ 代入公式(2)，可得二次微分方程式如下所示：

$$\frac{d^2V_C(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dV_C(t)}{dt} + \frac{1}{LC} V_C(t) = -\frac{1}{LC} \varepsilon_0 \quad (5)$$

如圖二所示，充電過程的起始電壓 $V_C(t=0) = \varepsilon_0$ ，則此二次微分方程式所解得的電容電壓 $V_C(t)$ 如下所示：

$$V_C(t) = 2\varepsilon_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\beta}{\omega}\right)^2} e^{-\beta t} \cos(\omega t - \phi) - \varepsilon_0 \quad (6)$$

其中衰變率 $\beta = \frac{R}{2L}$ ，角頻率 $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$ ，相位差 $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\beta}{\omega}\right)$

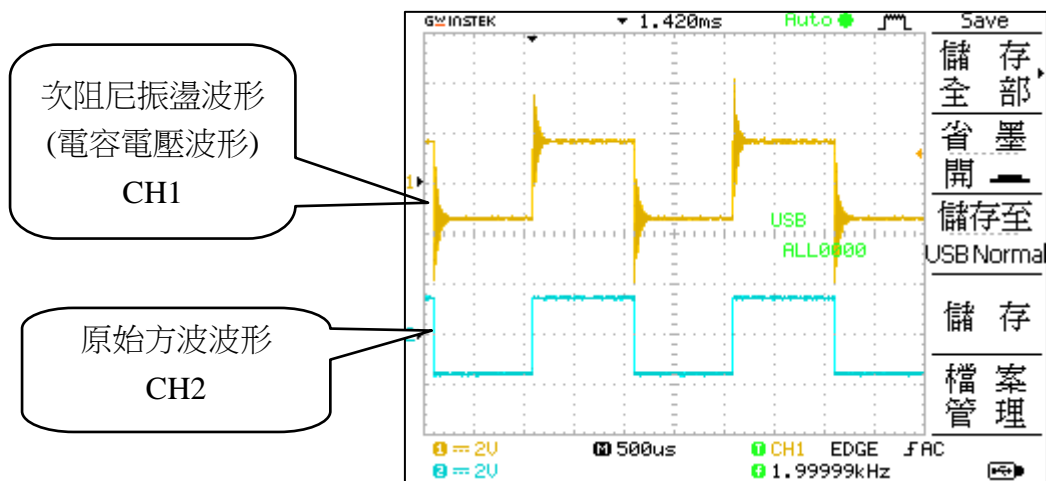
$$\text{振幅項 } |V_C(t)| = 2\varepsilon_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\beta}{\omega}\right)^2} e^{-\beta t}$$

$$\text{振盪項 } \cos(\omega t - \phi)$$

將公式(4)與公式(6)分別對時間作圖，即可得電容電壓振盪波形，稱為阻尼振盪。

圖三為示波器上所顯示原始方波(CH2)與次阻尼振盪波形(CH1)。

在公式(4)與公式(6)中，計算所得的振幅項均有 $e^{-\beta t}$ 指數函數(衰減因子)且振盪項均有 $\cos(\omega t)$ ，代表在振盪的過程中電容電壓振幅會受到指數函數影響而衰減，此與力學中彈簧阻尼振盪的行為類似。



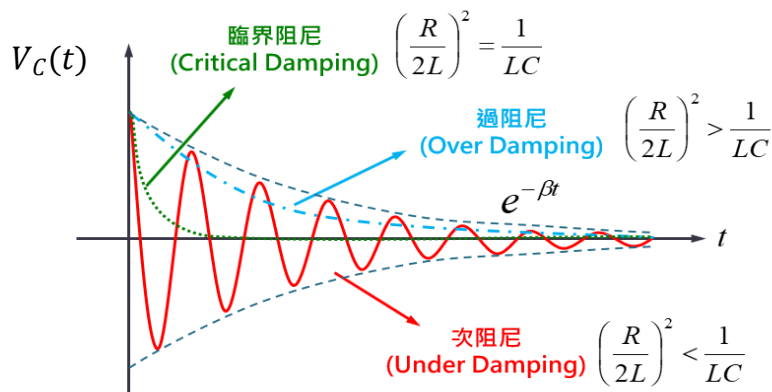
圖三 示波器顯示波形示意圖。

承上， β 值及角頻率 ω 均與RLC 電路中的電阻 R 、電感 L 、電容 C 有關，即當RLC 串聯電路中各元件數值不同時，其所產生的振盪形式亦會有所不同，如下所示：

1. 當 $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$ ，則 $\omega=0$ ，無振盪產生，電容電壓會隨時間增加而以指數函數變小，稱為「**臨界阻尼 (Critical Damping)**」。
2. 當 $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC}$ ，則 ω 為虛數，故 $\cos(\omega t) = \cosh(i\omega t)$ 可視為 Hyperbolic Cosine 函數，亦無振盪產生，稱為「**過阻尼 (Over Damping)**」。電容電壓將以兩疊加指數函數變小。
3. 當 $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC}$ ，則 ω 為實數，電容電壓將以阻尼方式振盪，其振幅隨時間增加而遞減，稱為「**次阻尼 (Under Damping)**」。

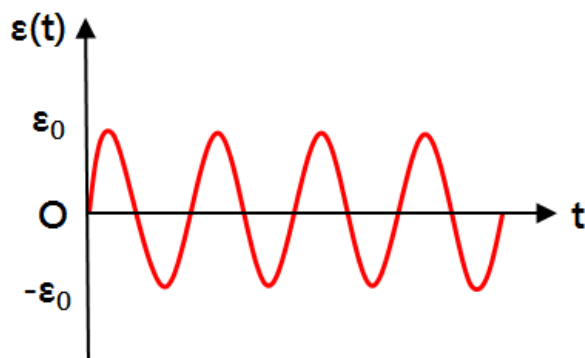
再者，若 $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 \ll \frac{1}{LC}$ ，電路振盪角頻率 $\omega \sim \sqrt{\frac{1}{LC}} = \omega_0$ ，稱為自然角頻率或固有角頻率(natural angular frequency)。

圖四為上述各條件下電容電壓對時間關係圖(阻尼振盪)。



圖四 電容電壓對時間關係圖。

B. 以訊號產生器提供電動勢 $\varepsilon(t)$ 的交流(弦波)訊號，其電動勢 $\varepsilon(t)$ 隨時間變化的關係圖如圖五所示。



圖五 $\varepsilon(t)$ 對時間 t 變化關係圖 <弦波>。

將電動勢 $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t)$ 代入公式(2)，可得二次微分方程式如下所示：

$$\frac{d^2V_C(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dV_C(t)}{dt} + \frac{1}{LC} V_C(t) = -\frac{\varepsilon_0}{LC} \cos(\omega t) \quad (7)$$

可解得電容電壓訊號 $V_C(t)$ ，又電阻電壓訊號 $V_R(t) = i(t)R = RC \frac{dV_C(t)}{dt}$ ，如下所示：

$$V_R(t) = \frac{\varepsilon_0 R}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \cos(\omega t - \phi) \quad (8)$$

其中相位差 $\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right)$

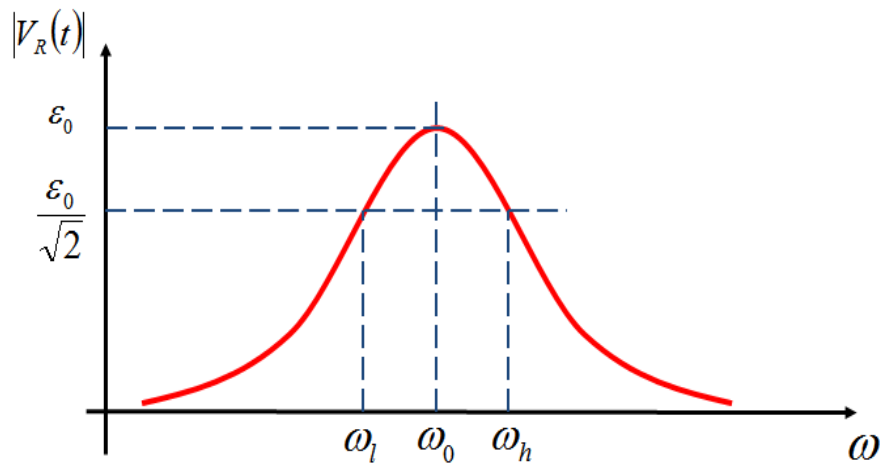
振幅項 $|V_R(t)| = \frac{\varepsilon_0 R}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$

共振與濾波

由公式(8)可知，當角頻率 $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ 時，電阻電壓振幅 $|V_R(t)|$ 會有最大值 ε_0 ，此頻率稱為共振角頻率 ω_0 ，同時將此現象稱為共振(Resonance)。

圖六為電阻電壓振幅 $|V_R(t)|$ 隨角頻率 ω 變化關係圖。當電阻電壓振幅 $|V_R(t)| = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}}$ 時，稱為半功率電壓，其所對應角頻率稱為截止角頻率 ω_l 與 ω_h ，半高角頻率寬為

$\Delta\omega = \omega_h - \omega_l$ 。在RLC電路中半高角頻率寬 $\Delta\omega = \frac{R}{L}$ ，其值與電容 C 無關。在電子電路應用上可藉由調整電阻 R 與電感 L 值，製成不同的濾波元件，進而達到不同的應用。



圖六 電阻電壓振幅 $|V_R(t)|$ 隨角頻率 ω 變化關係圖。

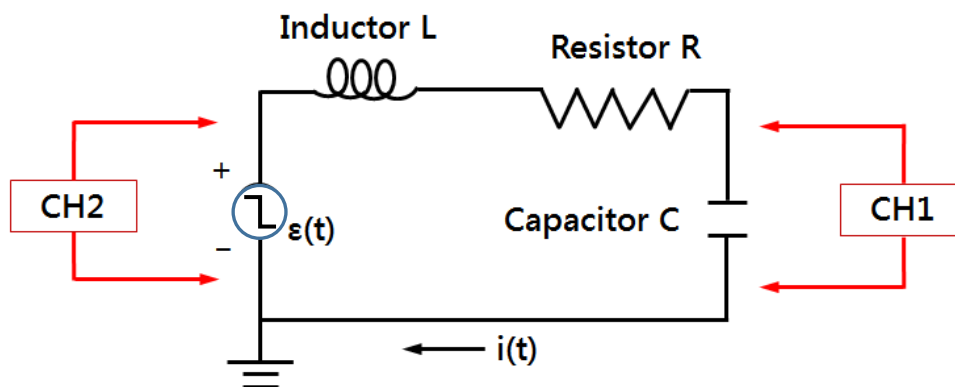
注意事項：

1. 打開儀器電源前，請先檢查電路是否正確或短路。
2. 確認電阻器、電容器與電感器開關皆在 OUT 位置。

實驗步驟：

A. 次阻尼振盪 I -- 電容電壓振幅與時間關係

(以示波器 CH1 讀取電容電壓訊號；以示波器 CH2 搭配 BNC T 轉接頭同步讀取來自訊號產生器的原始方波訊號)



圖七 RLC 串聯電路實驗架設圖(阻尼振盪)。

1. 實驗裝置如圖七所示。
2. 設定電阻 $R = 800 \Omega$ 、電感 $L = 10 \text{ mH}$ 與電容 $C = 100 \text{ pF}$ 。
3. 將上述條件代入公式計算衰變率 β 值。

4. 開啟訊號產生器，設定輸出波形為 500.0 Hz 且電壓振幅 $\epsilon_0 (=V_{\max})$ 為 1.00 V 方波。

[註] 即 CH2 峰對峰訊號 $V_{pp} = 2.00 \text{ V}$ 。(peak to peak: 波峰到波峰)

5. 調整示波器「電壓/格 VOLT/DIV」與「時間/格 TIME/DIV」旋鈕，使螢幕上大約可看到 2-3 個週期的方波(CH2)與次阻尼振盪波形(CH1)。

[註] 若無次阻尼振盪波形，請檢查線路或儀器各項設定是否有誤。

6. 再調整「電壓/格 VOLT/DIV」與「時間/格 TIME/DIV」旋鈕，使螢幕顯示一個完整次阻尼振盪波形，再利用游標夾擊法記錄各峰值電容電壓 $V_C(t)$ 與時間 t 。

7. 作 $|V_C(t)|$ vs. t 關係圖，再以指數迴歸分析，計算 β 測量值及其誤差。

B. 次阻尼振盪 II --角頻率與電容關係

1. 設定電阻 $R = 100 \Omega$ 與電感 $L = 10 \text{ mH}$ ，再於電容器 $0.002 \mu\text{F}$ 至 $0.04 \mu\text{F}$ 區間內選取 7 個不同電容 C 。

2. 承如步驟 A，再次觀察次阻尼振盪波形。

3. 計算不同電容 C 所產生的次阻尼振盪角頻率 ω 計算值。

4. 以游標夾擊法記錄不同電容 C 下所產生的次阻尼振盪週期 T 測量值，再由公式計算角頻率 ω 測量值。

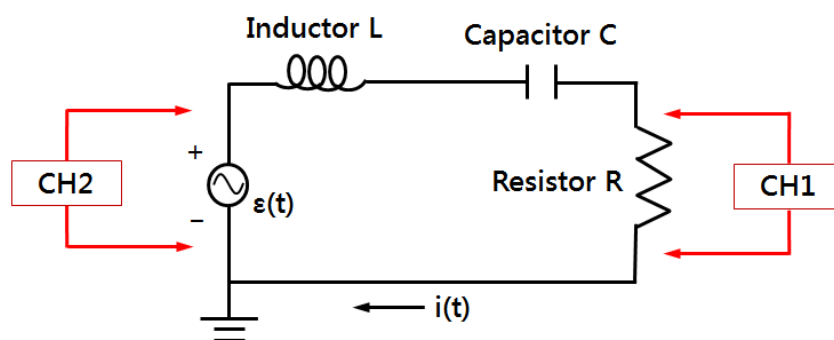
5. 作 ω^2 vs. $\frac{1}{C}$ 關係圖，再以線性迴歸分析，計算 $\frac{1}{L}$ 測量值及其誤差。

C. 阻尼振盪觀察

固定電感 L 與電容 C ，僅調整電阻 R ，觀察次阻尼、臨界阻尼與過阻尼振盪現象。

D. 共振觀察

(以示波器 CH1 讀取電阻電壓訊號；以示波器 CH2 讀取原始弦波訊號)



圖八 RLC 串聯電路實驗架設圖 (強迫振盪)。

1. 實驗裝置如圖八所示。
2. 設定電阻 $R = 1 \text{ k}\Omega$ 、電感 $L = 10 \text{ mH}$ 與電容 $C = 0.001 \text{ }\mu\text{F}$ 。
3. 將上述條件代入公式計算此 RLC 串聯電路共振角頻率 ω_0 與共振頻率 f_0 理論值。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad \& \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

4. 由原理公式判斷當 RLC 串聯電路達共振時，電阻電壓振幅 $|V_R(t)|$ 與相位差 ϕ 理論值。
5. 開啟訊號產生器，設定輸出電壓振幅 $\varepsilon_0 (=V_{\max})$ 為 1.00 V 的弦波。

[註] 即 CH2 峰對峰訊號 $V_{pp} = 2.00 \text{ V}$ 。

6. 先將訊號產生器輸出頻率設定為共振頻率理論值。
[註] 因共振頻率極大，故先計算共振角頻率理論值，而後再於共振角頻率理論值附近找共振角頻率實驗值。
7. 將示波器切換至利薩如(XY)模式。
8. 微調訊號產生器輸出頻率，同時觀察示波器上的利薩如圖形。當螢幕上顯示的圖形為頻率比 1:1 且相位差 ϕ 為 0 的利薩如圖形後，停止微調。
[註] 當 RLC 電路達共振時，電阻電壓 $V_R(t)$ 與原始訊號相位差 ϕ 為零。
9. 承上，記錄此時訊號產生器輸出頻率(即共振頻率實驗值)，再將示波器切換至一般模式，記錄電阻電壓振幅 $|V_R(t)|$ 值。
[註] 即 CH1 電阻的跨電壓訊號。
10. 以共振頻率實驗值為基準，分別記錄當訊號產生器輸出頻率增加或減小時，各頻率所對應電阻電壓振幅 $|V_R(t)|$ 。

[註] 頻率選取範圍應跨越截止角頻率 ω_l 與 ω_h 。

11. 作 $|V_R(t)|$ vs. ω 關係圖。

[註] 關係圖應包含共振頻率與截止角頻率。

12. 以內差法計算截止角頻率 ω_l 與 ω_h 實驗值。
13. 計算半高角頻率寬 $\Delta\omega$ 測量值及其誤差。
14. 將電阻 R 更換為 $2 \text{ k}\Omega$ ，其他條件不變，重覆上述步驟。

討論提示：

1. 在阻尼振盪實驗中，一旦當訊號產生器接上 RLC 串聯電路後，示波器所顯示的方波就不太完美，為何會有這種現象產生？試說明。
2. 在電感 $L = 10 \text{ mH}$ 、電容 $C = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$ 及電感 $L = 10 \text{ mH}$ 、電容 $C = 100 \text{ pF}$ 兩種條件下，若要於示波器看到阻尼振盪訊號，電阻 R 應如何設定？試說明。
3. 阻尼振盪在生活中有那些應用？試說明。
4. 試由公式證明 RLC 電路的半高角頻率寬為 $\Delta\omega = \frac{R}{L}$ 。
5. 在共振實驗中，當電阻 R 改變時，電阻電壓振幅 $|V_R(t)|$ 與角頻率 ω 關係圖有何不同？試說明。
6. 在共振實驗中，若此實驗設計為固定電阻 R 及電容 C ，僅改變電感 L ，共振頻率與半高頻寬會如何變化？試說明。

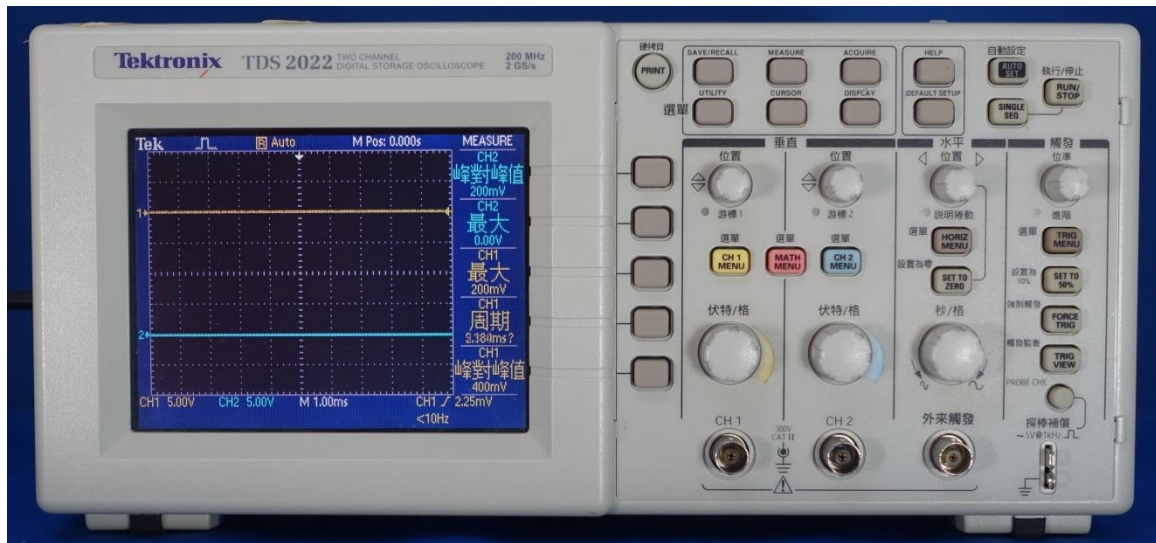
附錄一

常用物理係數表

名稱	符號	近似值	SI 單位
Avogadro's number	N_A	6.022×10^{23}	mol^{-1}
Boltzmann's constant	$k = R / N_A$	1.381×10^{-23}	J/K
Coulomb-law constant	$k (=1/4 \pi \epsilon_0)$	9.00×10^9	$\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$
Electron mass	m_e	9.109×10^{-31}	kg
Elementary charge	e	1.602×10^{-19}	C
Permeability constant	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
Permittivity constant	$\epsilon_0 (=1/\mu_0 c^2)$	8.854×10^{-12}	F/m
Planck's constant	h	6.626×10^{-34}	J·s
Speed of light in vacuum	c	3.00×10^8	m/s

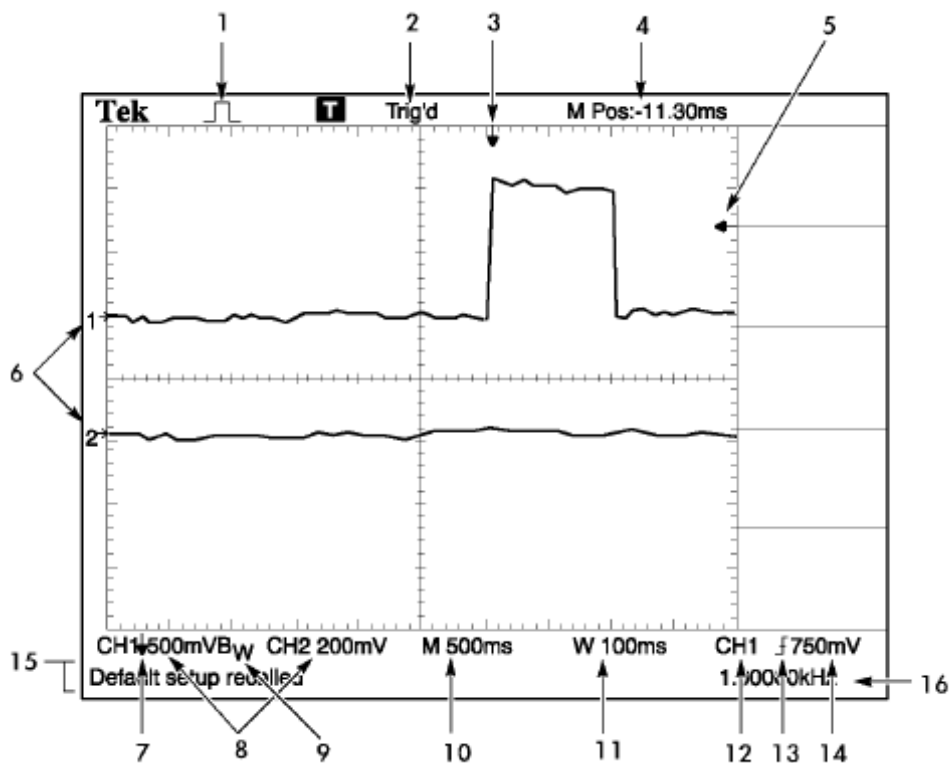
附錄二

TDS 2022 數位示波器面板：






數位示波器 TDS 2022 面板

A. 螢幕顯示說明









1. 擷取模式

-  取樣模式
-  峰值檢測模式
-  平均模式

2. 觸發狀況可指出下列訊息

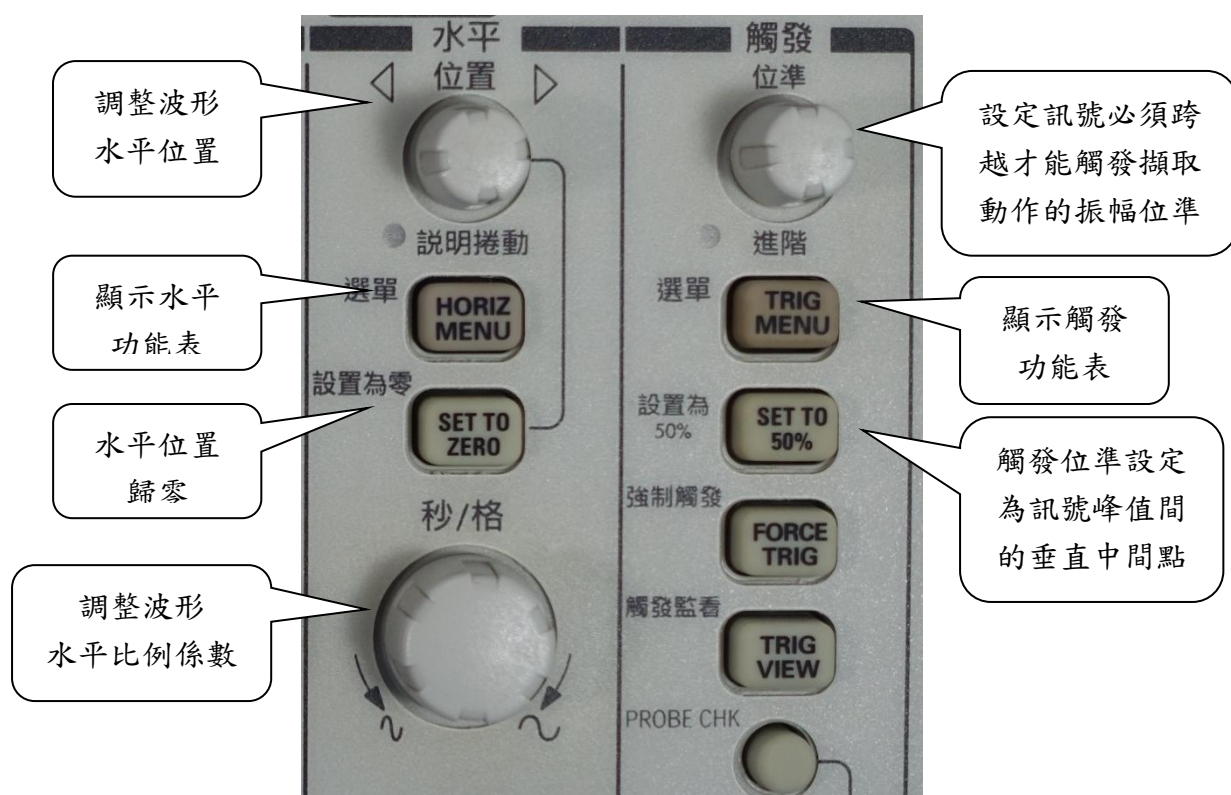
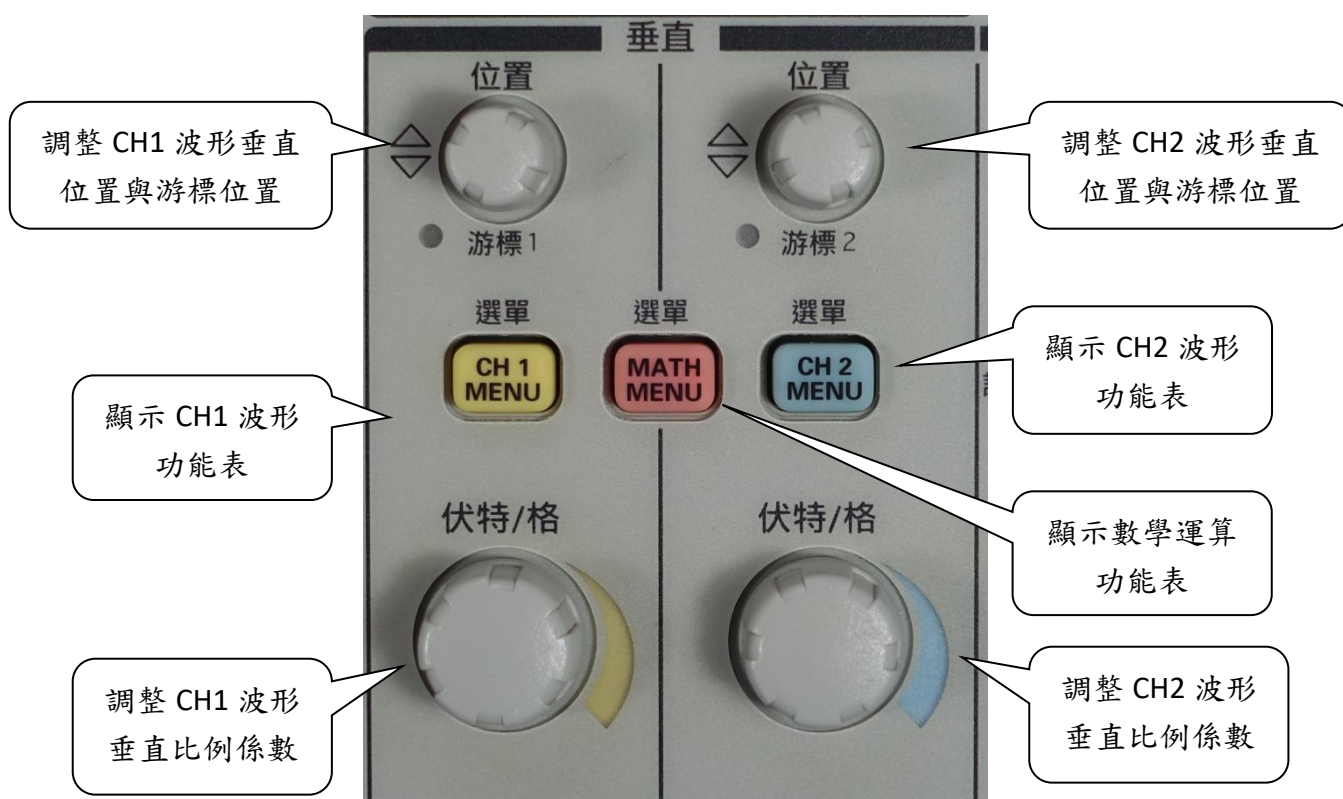
<input type="checkbox"/> 作用中	示波器正在擷取前置觸發資料
<input checked="" type="checkbox"/> 就緒	示波器已擷取到所有前置觸發資料並且已準備好接受觸發
<input checked="" type="checkbox"/> Trig'd	示波器已看到觸發，並且正在擷取後置觸發資料
<input checked="" type="checkbox"/> 停止	示波器已停止擷取波形訊號
<input checked="" type="checkbox"/> 擷取完成	示波器已完成一個「單擊」擷取
<input checked="" type="checkbox"/> 自動	示波器處於自動模式，且在沒有觸發的情況下擷取波形
<input type="checkbox"/> 掃描	示波器處於掃描模式，且連續擷取及顯示波形資料

- 標記為水平的觸發位置，旋轉「水平位置」旋鈕可調整標記位置
- 讀數會在中央方格圖顯示時間
- 標記所示為「邊緣」或「脈波寬度」觸發位準
- 螢幕上的標記為波形的接地參考點
- 箭頭顯示波形已經反向
- 讀數會顯示 CH1、CH2 伏特/格數值
- Bw 圖示表示波道頻寬受限制
- 讀數顯示主時基設定：秒/格
- 讀數顯示視窗時基設定
- 觸發來源
- 顯示觸發類型

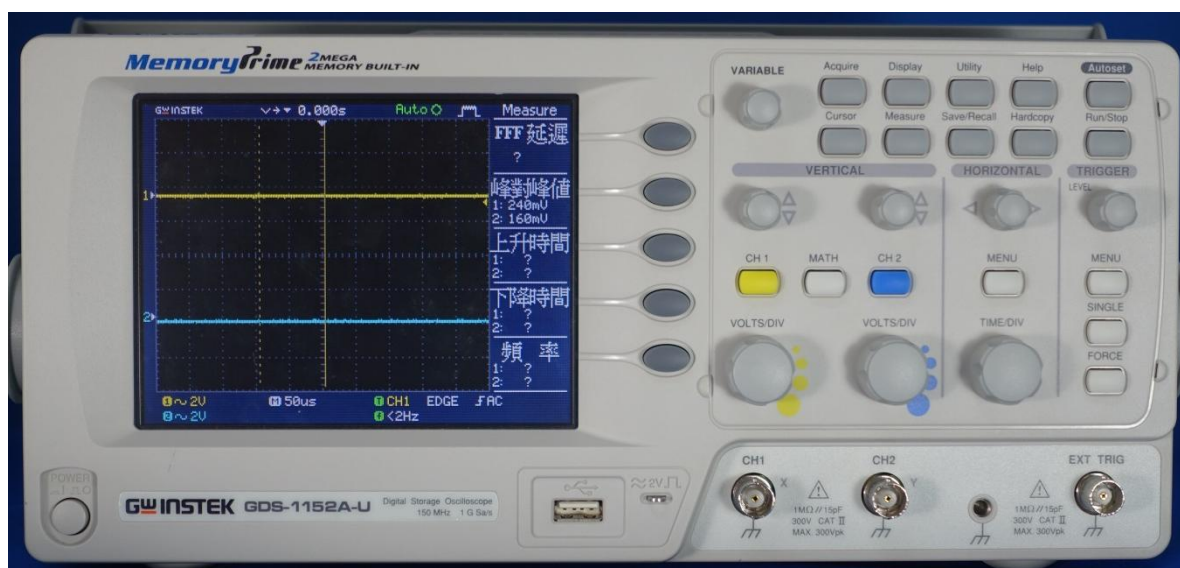
	上升緣的邊緣觸發
	下降緣的邊緣觸發
	與掃描線同步的視頻觸發
	與圖場同步的視頻觸發
	正極脈波寬度觸發
	負極脈波寬度觸發

- 讀數顯示“邊緣”或“脈波寬度”觸發位準之值
- 訊息顯示區域
- 讀數顯示觸發頻率

B. 面板說明

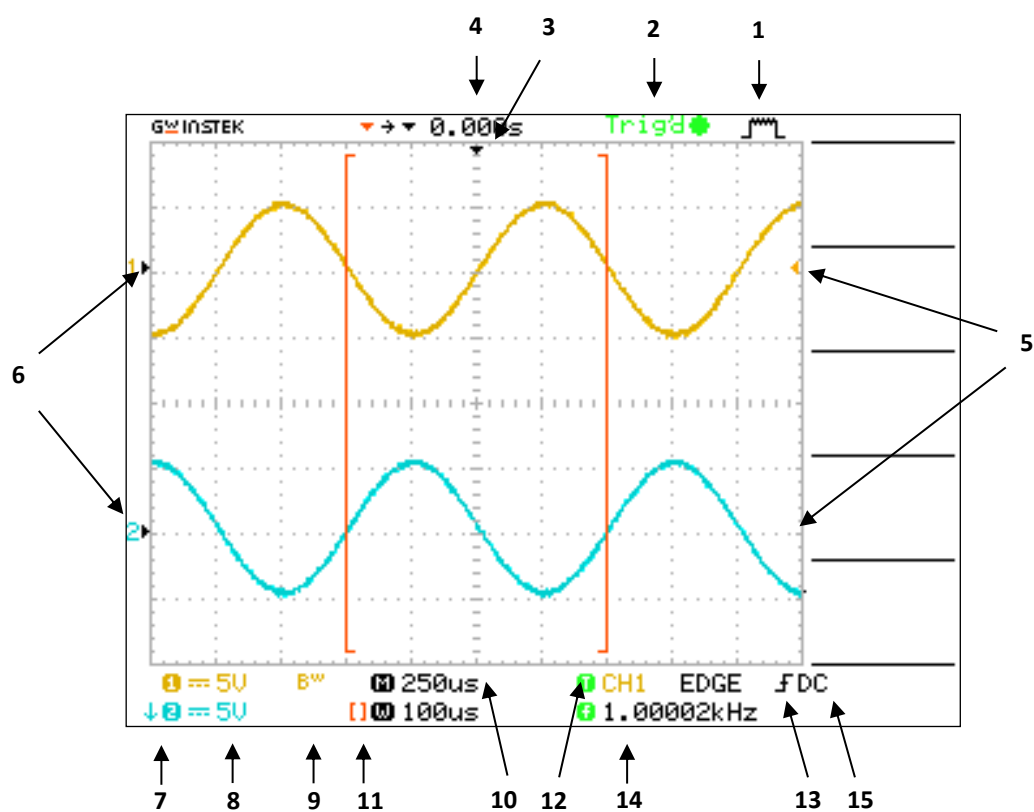


GDS 1152A 數位示波器面板：





數位示波器 GDS 1152A 面板


A. 螢幕顯示說明



1. 擷取模式

 取樣模式

 峰值檢測模式

 平均模式

2. 觸發狀況可指出下列訊息

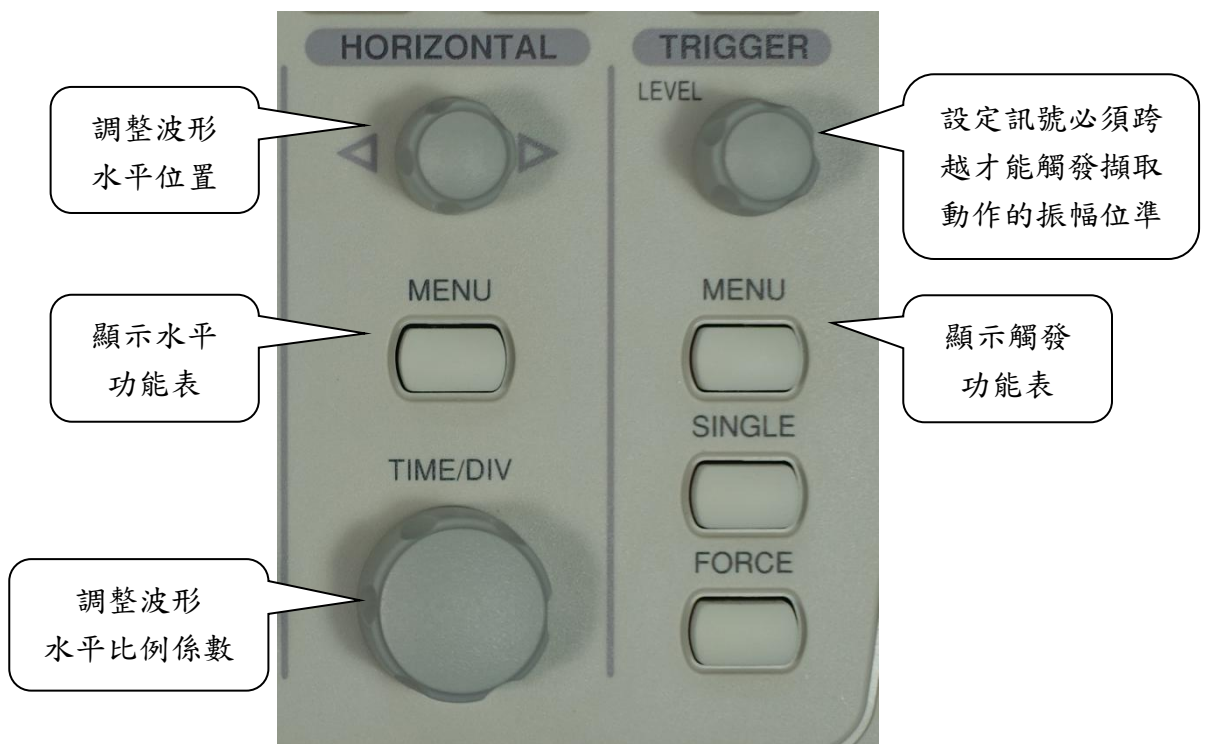
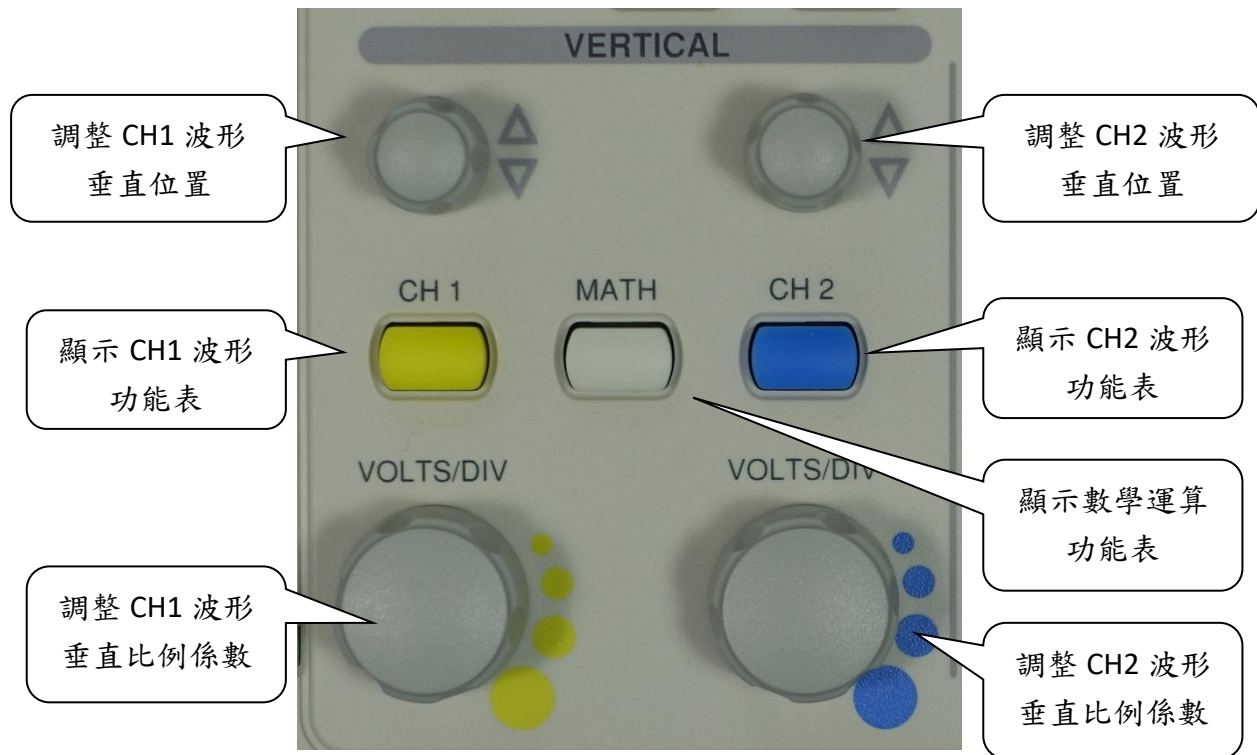
<input type="checkbox"/> 作用中	示波器正在擷取前置觸發資料
<input checked="" type="checkbox"/> 就緒	示波器已擷取到所有前置觸發資料並且已準備好接受觸發
<input checked="" type="checkbox"/> Trig'd	示波器已看到觸發，並且正在擷取後置觸發資料
<input checked="" type="checkbox"/> 停止	示波器已停止擷取波形訊號
<input checked="" type="checkbox"/> 擷取完成	示波器已完成一個「單擊」擷取
<input checked="" type="checkbox"/> 自動	示波器處於自動模式，且在沒有觸發的情況下擷取波形
<input type="checkbox"/> 掃描	示波器處於掃描模式，且連續擷取及顯示波形資料

3. 標記為水平的觸發位置
4. 讀數會在中央方格圖顯示時間
5. 標記所示為「邊緣」或「脈波寬度」觸發位準
6. 螢幕上的標記為波形的接地參考點
7. 箭頭顯示波形已經反向
8. 讀數會顯示 CH1、CH2 伏特/格數值
9. Bw 圖示表示波道頻寬受限制
10. 讀數顯示主時基設定：秒/格
11. 讀數顯示視窗時基設定
12. 觸發來源
13. 顯示觸發類型

	上升緣的邊緣觸發
	下降緣的邊緣觸發
	與掃描線同步的視頻觸發
	與圖場同步的視頻觸發
	正極脈波寬度觸發
	負極脈波寬度觸發

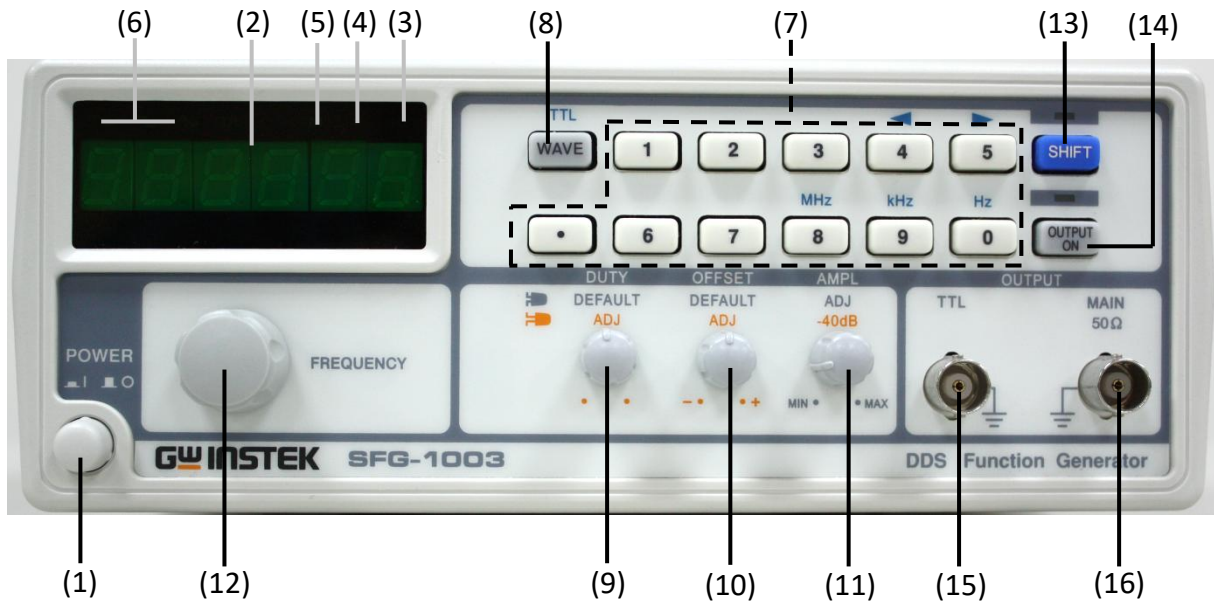
14. 讀數顯示“邊緣”或“脈波寬度”觸發位準之值
15. 訊息顯示區域

B. 面板說明



附錄三

訊號產生器面板：

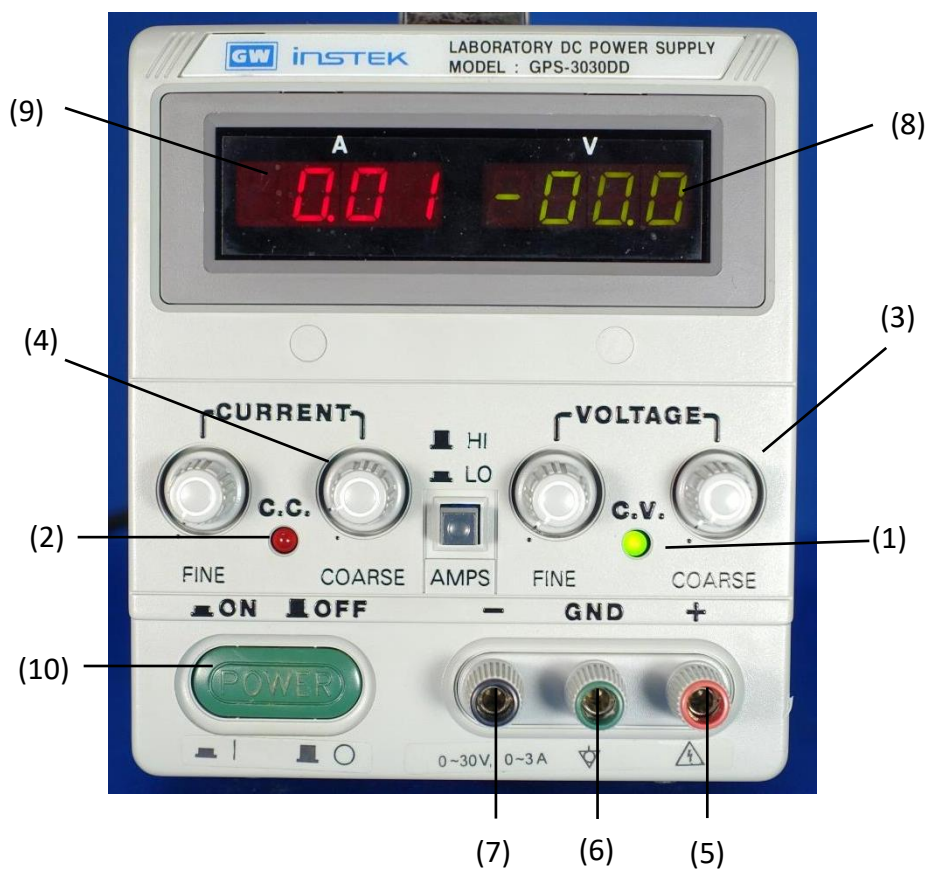


SFG-1003 訊號產生器

1. 電源開關
2. 數位顯示面板
3. Hz 指示器
4. kHz 指示器
5. MHz 指示器
6. 輸出波形指示器
7. 設定欲輸出的頻率 (數字鍵)
8. 輸出波形選擇鈕
9. 脈衝寬度調變之高 (低) 準位時間的百分比
10. 直流偏壓調整 (拉起旋鈕)
11. 輸出振幅調整
12. 輸出頻率調整
13. Shift 鍵 (設定數字鍵上面的藍色字功能)
14. 訊號輸出 on/off 鍵
15. TTL (Transistor-Transistor Logic) 輸出端
16. 主要輸出端

附錄四

直流電源供應器面板：



1. 定壓指示燈
2. 定流指示燈
3. 電壓粗調
4. 電流粗調
5. 輸出端 (正極)
6. 接地端
7. 輸出端 (負極)
8. 電壓計
9. 電流計
10. 電源開關

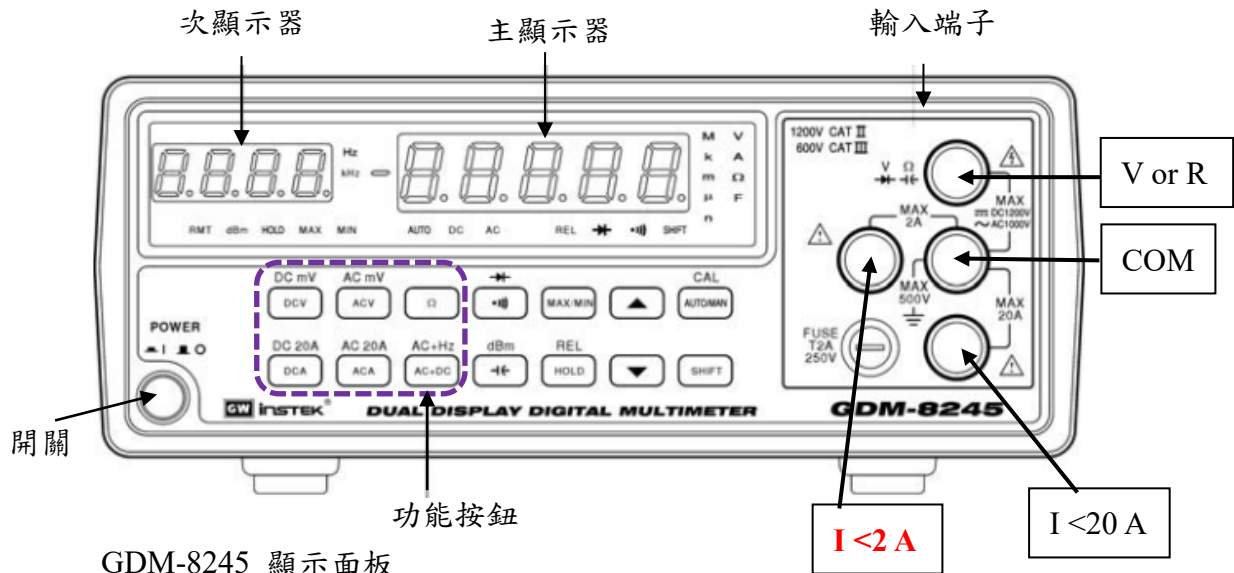
附錄五

數位式三用電表 GDM-8245 使用說明：

功能為量測電路的電流、電壓及電阻值，可視為為安培計、伏特計的結合。

1. 按壓開關鍵，開啟機台。
2. 按鈕選擇量測功能：可量測直流電壓(DCV)、交流電壓(ACV)、電阻(Ω)、直流電流(DCA)或交流電流(ACA)，依所需的測量，按面板左下方之一功能按鈕。
3. 輸入端子連結：依照所選擇的測量:電阻、電壓、或電流，將紅色引線接於 (+) 極插座 (選取適當孔洞)，黑色引線接於 (-) 極插座 (或 COM)。

右中間孔洞為 COM、右上孔洞為電壓或電阻(+)極輸入端；右下孔洞為電流 (+)極輸入端、若電流小於 2 A，為增加電流解析度可使用左中孔洞。



GDM-8245 顯示面板

接線無誤後，主顯示器顯示測量的值。

4. 按[AUTO/MAN]選擇自動或手動調整檔位，手動下可按壓「▲」或「▼」到所需的檔位。

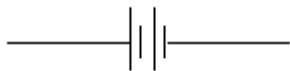
最大容許輸入值

功能	檔位	最大輸入
DCV	5 V ~ 1200 V	1200 V dc 或 $V_p=1200$ V ac
ACV (AC+DC)	5 V ~ 1000 V	1000 V rms
Ω		450 V dc 或 $V_p=450$ V ac
DCA, AC20A (AC+DC)	~20 A	無保險絲
DCA, ACA (AC+DC)	50 μ A ~ 2 A	fuse : 2 A/250 V

附錄六

常見電子元件符號：

1. 直流電源： (電池)



2. 交流電源： (訊號產生器)



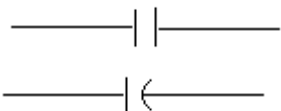
3. 電阻： (固定)



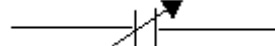
(可變)



4. 電容： (固定)



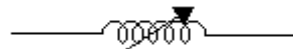
(可變)



5. 電感： (固定)



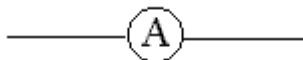
(可變)



6. 檢流計：



7. 安培計：



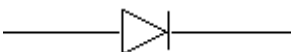
8. 伏特計：



9. 接地：



10. 二極體：

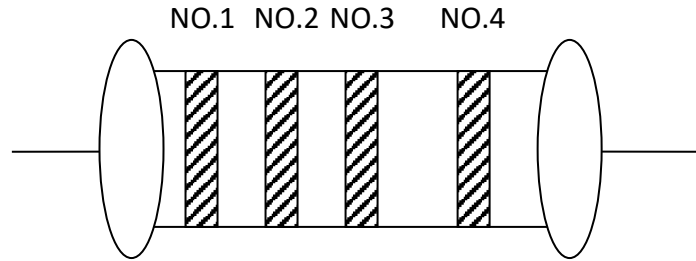


11. 電晶體：



附錄七

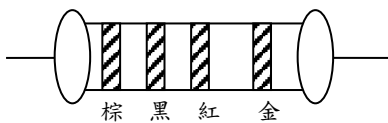
(電阻)色碼表：



顏色	No.1	No.2	No.3	No.4 (誤差值)
黑	0	0	10^0	
棕	1	1	10^1	$\pm 1\%$
紅	2	2	10^2	$\pm 2\%$
橙	3	3	10^3	
黃	4	4	10^4	
綠	5	5	10^5	$\pm 0.5\%$
藍	6	6	10^6	$\pm 0.25\%$
紫	7	7	10^7	$\pm 0.1\%$
灰	8	8	10^8	$\pm 0.05\%$
白	9	9	10^9	
金			10^{-1}	$\pm 5\%$
銀			10^{-2}	$\pm 10\%$

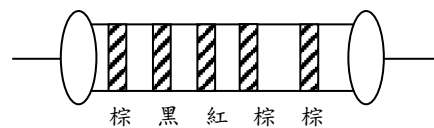
Ex :

(1) 一般電阻



$$\Rightarrow 10 \times 10^2 \Omega \pm 5\% \Rightarrow 1 \text{ k}\Omega \pm 5\%$$

(2) 精密電阻

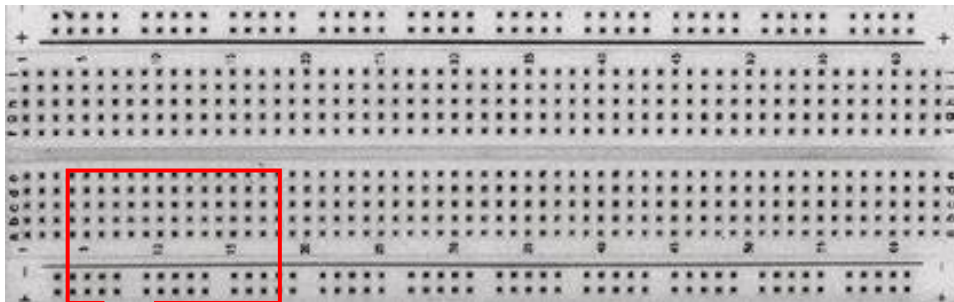


$$\Rightarrow 102 \times 10^1 \Omega \pm 1\% \Rightarrow 1020 \Omega \pm 1\%$$

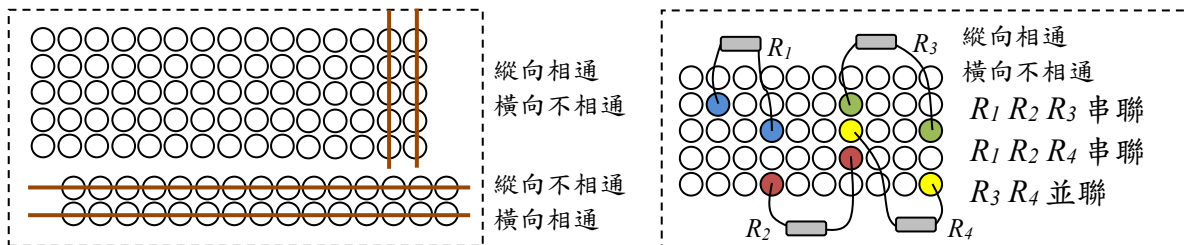
附錄八

免焊電路板(俗稱麵包板)：

此種裝備將可免除實驗中電子零件的连接，焊上或取下的困擾，縮短實驗之時間，增加其經濟性(且攜帶方便)。一般有分大小尺寸(視情況需要)，甚至有些尚附有電源供給裝置、電壓表和電流表等，是電子實驗中不可缺少之裝備，如圖一所示。插孔說明如圖二所示。



圖一 麵包板外觀



圖二 麵包板之等電位(相接通點)示意圖