

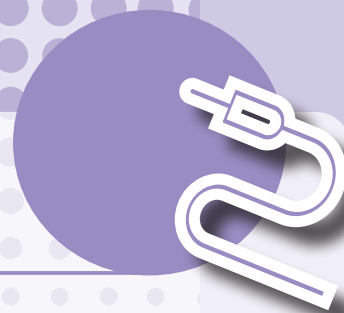
十二年國民基本教育

技術型高級中等學校電機與電子群

基本電學實習

(全一冊)

編輯大意



- 一、本書係依據民國 107 年 8 月教育部發布之技術型高級中等學校電機與電子群「基本電學實習」課程綱要編輯而成。
- 二、本書全一冊，供技術型高級中等學校電機與電子群所屬類科等，第一學年第二學期三學分教學之用。
- 三、本書的目的是當作基本電學的啓蒙實作教材，所以實驗前都會講述基本電學相關知識，且可與基本電學同步教學。
- 四、高一學生僅有國中數學基礎，所以基本電學所需數學基礎，本書都會先介紹。但是，一下子要介紹指數函數、三角函數、複數、極座標，也要一面學基本電學，學生老師其實都很吃力，所幸 Python 程式設計已經是國中必修課程，所有學生都有程式設計基礎，所以本書大量使用 Python 程式繪出以上數學函數圖形，這樣才能快速理解數學公式所代表的物理意義。以上使用電腦輔助學習，完全呼應 108 課綱的跨領域統整教學。
- 五、本書有充分的自我練習，這樣學生才能充分練習，達到舉一反三的效果。
- 六、我們希望學生不斷重複做實驗，記錄與繪出實驗結果，能由這些圖像，瞭解基本電學原理與公式，並深深烙印腦海，此即為圖像記憶法。
- 七、本書主要目的是，以實驗驗證基本電學的理論，希望藉由本書的學習，可以強化基本電學理論的學習。
- 八、本書雖力求嚴謹，但疏漏之處在所難免，尚祈先進惠予指正。

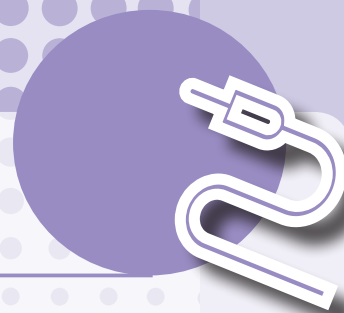
🔧 本書學習表現

1. 使用基本電子儀表量測電阻值與交直流電壓及電流值，具備符號辨識的能力。
2. 具備組裝各種交直流電路之能力，並驗證其電路原理及功能，能以系統思考方式，進行電學之問題解決。
3. 使用各種基本電子儀表量測電路信號，並具備檢修基本家電中之照明、電熱及旋轉器具之能力，應用科技資訊進行問題解決。
4. 認識基本電學工場設施，並了解工業安全及衛生與消防安全相關知識，具備對工作職業安全及衛生知識的理解與實踐，展現良好的工作態度與情操。
5. 能思辨勞動法令規章與相關議題，省思自我的社會責任。

🔧 教學注意事項

1. 本科目為群共同實習科目，得依據相關規定實施分組教學。
2. 本課程教學內容及實施，須與「基本電學」課程密切配合，由學習內容之主題進行觀察或驗證教學內容，以提高學生學習成效。

目錄



第1章 工場安全及衛生

1-1 實習工場設施環境及機具設備的認識	1-2
1-2 工業安全及衛生、消防安全的認識	1-6
1-3 電源與電線過載實作	1-15
1-4 課後習題	1-19

第2章 常用家電量測

2-1 低功率電烙鐵、量測電表、電源供應器之使用	2-2
2-2 電阻的識別與測量	2-9
2-3 交直流電壓及電流之量測	2-17
2-4 常用家電的認識與量測	2-27
2-5 本章內容摘要	2-31
2-6 課後習題	2-32

第3章 直流電路實作

3-1 電阻串並聯電路	3-2
3-2 惠斯登電橋	3-16
3-3 重疊定理	3-18
3-4 戴維寧及諾頓定理	3-20
3-5 最大功率轉移定理	3-25
3-6 本章內容摘要	3-29
3-7 課後習題	3-32

第4章 電子儀表之使用

4-1 電感電容電阻表之使用	4-2
4-2 電容器、電感器之識別及量測	4-3
4-3 示波器、信號產生器之使用、並計算信號之頻率與周期	4-15

4-4	交流電壓與電流的測量	4-37
4-5	量測誤差實作	4-43
4-6	本章內容摘要	4-47
4-7	課後習題	4-48

第5章 直流暫態

5-1	電阻 - 電容暫態電路	5-2
5-2	電阻 - 電感暫態電路	5-14
5-3	本章內容摘要	5-22
5-4	課後習題	5-26

第6章 交流電路

6-1	交流純電阻、電容、電感電路	6-2
6-2	交流電阻、電感、電容串聯電路實作	6-12
6-3	交流電阻、電感、電容並聯電路實作	6-27
6-4	諧振電路實作	6-42
6-5	本章內容摘要	6-56
6-6	課後習題	6-60

第7章 常用家用電器之檢修

7-1	照明類器具之認識、安裝及檢修	7-2
7-2	電熱類之認識及檢修	7-12
7-3	旋轉類器具之認識及檢修	7-19
7-4	本章內容摘要	7-24
7-5	課後習題	7-26

附錄A 本書關鍵字中英文對照與索引表

附錄B 本書使用儀器

附錄C 本書相關知識

附錄D 本書編排體例與數位學習資源



工場安全及衛生

學習大綱

- 1-1 實習工場設施環境及機具設備的認識
- 1-2 滅火器與消防栓的使用
- 1-3 電源與電線過載實作
- 1-4 課後習題

學習目標

- 1. 瞭解實習工場的各種設施並且安全的使用及發揮各種設施的最大效能。
- 2. 瞭解工業安全及衛生的相關法規及注意事項以確保生命及財產安全。
- 3. 瞭解消防安全的重要性並培養意外發生時的緊急應變能力。
- 4. 培養學生良好的工作習慣並瞭解程式應用如何帶給人們便利的日常生活。

1-1 實習工場設施環境及機具設備的認識

工場安全教育是要讓從事工業相關之從業人員，透過教育訓練而具有工業安全之知識與技能，讓所有從業人員在安全的工作環境中工作，加上適當的安全防護措施，用科學與安全的方法從事工作，以防止工場意外事故之發生，減少損失。另外，實習課程的教學必須分門別類在各種不同的專門實習工場實施，在一般職業類科學校的實習工場中，主要的設施有：

1. 實習儀器、
2. 實習工具、
3. 場地照明及通風設備、
4. 人員機具安全防護設備、
5. 各類標示牌等等，分別說明如下：

實習儀器

基本電學實習工場，如圖 1-1，常用儀器如表 1-1。



★ 圖 1-1 基本電學實習工場（摘自彰化高工電子科網站）

► 表 1-1 基本電學實習工場常用儀器表

1. 電源供應器。	2. 信號產生器。
3. 示波器。	4. LCR表。

5. 三用電表。	6. 電流勾表。
7. 數位三用電表。	8. 常用家電電器維修教學板。

實習工具

基本電學實習工場常用實習工具，如表 1-2。

► 表 1-2 基本電學實習常用實習工具

1. 尖嘴鉗。	2. 斜口鉗。
3. 一字起子。	4. 十字起子。
5. 電烙鐵。	6. 烙鐵架。

ㄟ 場地照明及通風設備

基本電學實習工場常見照明及通風設備，如表 1-3。

► 表 1-3 基本電學實習工場地常見照明及通風設備表

1. 日光燈 	2. 緊急照明燈 
3. 通風扇 	4. 空調 

ㄟ 人員機具安全防護設備

基本電學實習場地常見人員機具防護設備，如表 1-4。

► 表 1-4 基本電學實習場地常見人員機具防護設備

1. 滅火器。 	2. 漏電斷路保護器。 
3. 煙霧偵測器。 	4. 急救箱。 
5. 緊急求救鈴。 	6. 緊急廣播系統。 
7. 消防栓。 	8. 緩降機。 

9. 緊急斷電開關。		10. 緊急停止按鈕。	
11. 無熔絲開關。		12. 過載斷路保護器。	
13. 接地型電源插座。			

§ 各類標示牌

以上基本電學實習工場常見設備與標示牌，如圖 1-2 ～ 1-3。



★ 圖 1-2 滅火器與操作說明



圖 1-3 緩降機操作說明

1-2 工業安全及衛生、消防安全的認識

工業安全與工業衛生以及消防安全的基本目標是一樣的，皆是致力於維護工作人員的安全與健康，避免意外事故的發生，以及災害發生時的緊急應變措施，所以工業安全與工業衛生以及消防安全是先進國家非常重視的課題。工業安全是指「透過各種安全防護措施，以避免工業災害的發生。」工業安全課程包括：意外事故與職業傷害、機具安全與維護、電器安全與維護等。工業衛生是指「分析工業環境對工作人員健康影響的一切因素，進而利用科學方法去預防和減少工作人員產生疾病和傷害。」工業衛生課程包括：危害物的管理與回收處理、急救、工作環境清潔等。我國憲法第 153 條規定：「國家為改良勞工及農民之生活，增進其生產技能，應制定保護勞工及農民之法律，實施保護勞工及農民政策。」並且明文規定「勞動基準法」為國家實現此一基本國策所制定之法律。

工業安全與衛生。

工業安全及衛生之標示顏色相關規定

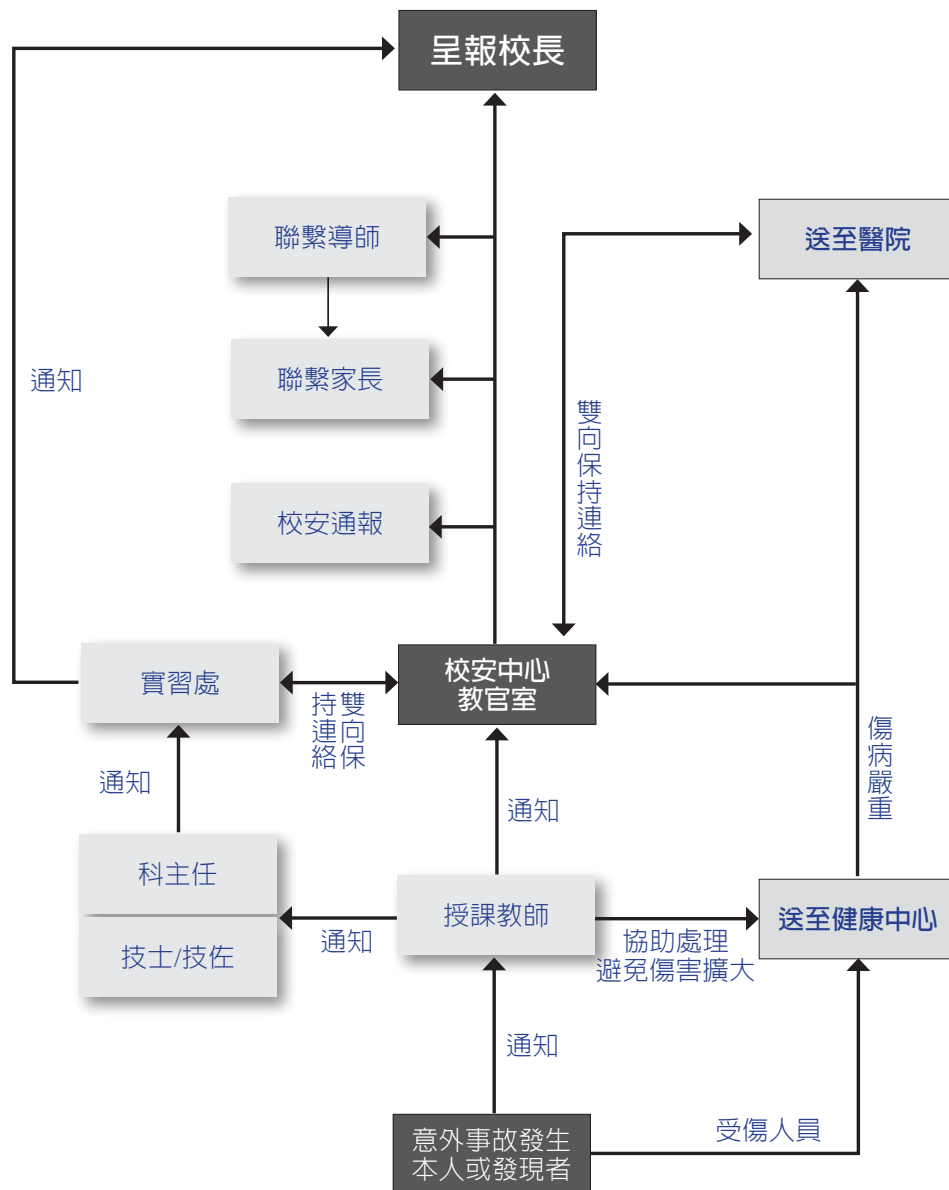
1. 紅色表示：危險或禁止標示。(例如：緊急停止鈕、禁煙標示等。)
2. 橙色表示：可能發生立即災害或傷害的地方所用之標示。(例如：爆裂物、電擊傷害等。)
3. 黃色表示：注意或警告標示。(例如：易燃物、墜落、跌倒等。)
4. 綠色表示：無危險或衛生有關標示。(例如：逃生門、急救箱。)
5. 藍色表示：提醒注意標示。(例如：控制按鈕、指示燈。)
6. 白色表示：一般標示。(例如：方向指示。)
7. 紫色表示：放射性危險警告或污染標示。(例如：放射性物質現場警告標示。)
8. 黑色表示：輔助或提醒用標示。(例如：文字標語。)

工業安全及衛生之意外發生與急救處理

一般事故的發生，大多數是人為因素所造成的，只要透過教育訓練，確定每個工作人員具備安全觀念和知識，並且消除不安全之機具設備的因素與環境因素，便可以使意外事故發生減少到最低。為了防止事故的發生，

必先探究事故發生的原因，一般意外事故發生的主要原因有三：

1. **人員的因素**：意外事故發生中大部分是肇因於工作人員的粗心大意、不熟悉作業流程或是精神狀態不佳所造成的。
2. **機具設備的因素**：機具設備若缺乏安全防護，或是未落實定期保養也是意外事故發生的主要因素之一。
3. **環境因素**：工場照明不良、通風不良、噪音太大、粉塵、有毒氣體、不適當的建築結構與隔間或是不整潔的廠房也是意外事故發生的主要因素之一。



★ 圖 1-4 學校實習場所意外通報流程圖

另一方面，對於意外事故的發生我們除了須盡力防範之外，也必須了解事故的發生仍然無法絕對避免，因此，急救處理便是給予意外事故發生時受傷者的緊急照料，以維持傷患之生命現象，除去傷害因素，阻止傷勢惡化並給予傷患心理上之鼓舞及信心，直到受傷者獲得醫護人員的救治為止。簡單來說，急救處理的目的就是救命，當意外事故發生時，請依圖 1-4 學校場所意外通報流程快速通報學校，若有人員受傷，通常會依傷患受傷的類別來進行急救。各受傷類別之急救方法分述如下：

1. 外傷急救

- (1) 使患者平躺，並將出血部位設法抬高。
- (2) 以清潔的紗布止血，綁緊繃帶，控制出血，但不可過緊以免影響血液循環，使肌肉組織壞死。
- (3) 盡快送外科醫院診治。

2. 骨折急救

- (1) 閉鎖性骨折：斷骨端未刺穿皮膚。
 - a. 使患者平躺，盡可能將傷肢置於自然的位置。
 - b. 使用木板固定患部，並用繃帶或布條固定之。
- (2) 開放性骨折：斷骨端刺穿皮膚。
 - a. 用壓力繃帶止血。
 - b. 使患者平躺，盡可能將傷肢置於自然的位置。
 - c. 使用木板固定患部，並用繃帶或布條固定之。

3. 灼傷急救

人體的皮膚因受到熱、冷、火、化學藥品等傷害，稱之為灼傷，灼傷的急救方法應以「沖」、「脫」、「泡」、「蓋」、「送」五大步驟 施行。

- (1) 沖：以流動的冷水沖洗灼傷部位 15 ～ 30 分鐘。
- (2) 脫：於冷水中小心脫除灼傷部位的衣物。
- (3) 泡：於冷水中浸泡 15 ～ 30 分鐘，以降低傷口疼痛。
- (4) 蓋：以乾淨的毛巾蓋住傷口，防止細菌感染。
- (5) 送：快速送醫治療。

4. 大量出血急救（需注意血液循環的問題）

- (1) 直接壓迫傷口止血法。
- (2) 壓迫止血點止血法。
- (3) 止血帶止血法

5. 昏迷無心跳無呼吸急救

當傷患呼吸停止無心跳時，如沒有即時急救必定死亡，因此必須立即施行心肺復甦術 (Cardio Pulmonary Resuscitation, CPR)(注意：沒有經過完整訓練並取得合格證書者，不可隨意對傷患進行 CPR 急救)，依據 2011 年我國衛生署函文說明的新版 CPR 急救法，分為六個程序，簡稱「**叫叫 CABD**」，如圖 1-5 所示：



★ 圖 1-5 心肺復甦術程序 (摘自苗栗縣政府消防局一救護 e 點靈叫叫 CABD 之急救程序)

消防安全。

火災為工業安全之意外災害中最嚴重的災害之一，它所造成的災害損失都很大，尤其是人員的傷亡。因此防火、滅火及火災的應變，為所有人員都必須學習的科目。

► 火災的種類與滅火方法

火災的種類依據火災燃燒物之性質可將火災分為下列四類，如表 1-5。

► 表 1-5 火災分類表

火災類別	火災名稱	燃燒物	適當滅火方法
A 類 (甲類)	一般火災	由一般可燃性固體所引起的火災。如木材、紙張、衣服、塑膠、橡膠等。	使用水或含有大量水分的溶劑滅火最有效。
B 類 (乙類)	油類火災	由可燃性液體或可燃性氣體與油脂類物質所引起的火災，如汽油、機油、燃料油、溶劑、酒精等。	此類火災禁止使用大量的水來灌注滅火，因為油浮於水面上，水的流動會助長火焰的蔓延。正確的滅火方式常用乾化學劑或二氧化碳、泡沫等方式來滅火。
C 類 (丙類)	電器火災	由電力設施、電氣設備所引起的火災，如馬達、開關設備、接線盒、變壓器等。	此類火災滅火必須使用非導電性滅火劑如乾化學劑、二氧化碳等。泡沫及水均不宜使用，因水具有導電性，可能使救火人員觸電，但是如果確定總電源切斷後，可視為甲 (A)、乙 (B) 類火災。
D 類 (丁類)	金屬火災	由易氧化之金屬所引起的火災，如鉀、鈉、鈦、鋁、鎂等。	此類火災滅火需要特種技術並使用特殊金屬化學乾粉的滅火器才能撲滅。
輔助記憶法： 憶猶未盡 (一油電金) (一般火災、油類火災、電器火災燒焦味、金屬火災)			

各類火災因燃燒物不同，可選用的滅火器對照表，如表 1-6。

► 表 1-6 各類火災滅火器對照表

適用滅火劑 火災類別	水	泡沫	二氧 化碳	鹵化烷 (乾化學劑)	乾粉		
					ABC 類乾粉	BC 類乾粉	D類乾粉(特殊 金屬化學乾粉)
甲 (A) 類火災	○	○			○		
乙 (B) 類火災		○	○	○	○	○	
丙 (C) 類火災			○	○	○	○	
丁 (D) 類火災							○

► 滅火器的裝設規定

根據我國「各類場所消防安全設備設置標準」第 31 條，滅火器應依下列規定設置：

- (1) 設有滅火器之樓層，自樓面居室任一點至滅火器之步行距離在二十公尺以下。
- (2) 固定放置於取用方便之明顯處所，並設有以紅底白字標明滅火器字樣之標識，其每字應在二十平方公分以上。但與室內消防栓箱等設備併設於箱體內並於箱面標明滅火器字樣者，其標識顏色不在此限。
- (3) 懸掛於牆上或放置滅火器箱中之滅火器，其上端與樓地板面之距離，十八公斤以上者在一公尺以下，未滿十八公斤者在一點五公尺以下。

► 火災的預防

1. 去除可燃物質。
2. 防止高溫及無法散熱的問題。
3. 嚴禁工作人員吸煙。
4. 養成良好工作方法及習慣，慎選慎用高溫設備。
5. 做好電力線路及設備之檢查及維護。
6. 做好防災教育訓練。

► 火災的應變

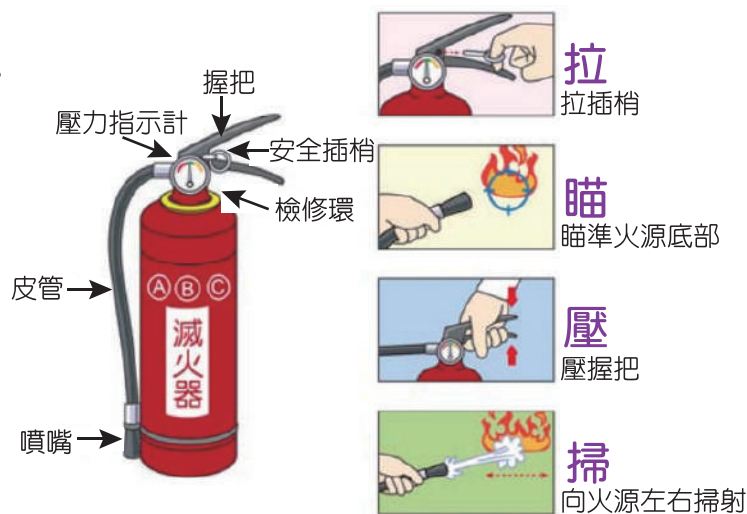
火災應變能力絕不是與生俱來的，它是經過教育訓練與不斷的演習才能夠具備的一種能力。當火災發生時才能藉由正確的使用滅火裝置於第一時間滅火，並能適時的疏散逃生。另外，工場應設置消防組織，對所有從業人員實施消防訓練，其訓練內容應包括：

1. 消防常識。
2. 各種消防裝置之使用。
3. 逃生與疏散。
4. 依消防任務編組實施演習。
5. 檢討消防裝置是否足夠與汰舊換新。

✚ 滅火器與消防栓的使用

► 滅火器的使用步驟

- (1) 拉開安全插梢。
- (2) 拉皮管，朝向火源根部。
- (3) 用力壓下手壓柄。
- (4) 站在上風處左右移動掃射火源，如圖 1-6。



✚ 圖 1-6 滅火器的使用步驟

► 消防栓的使用

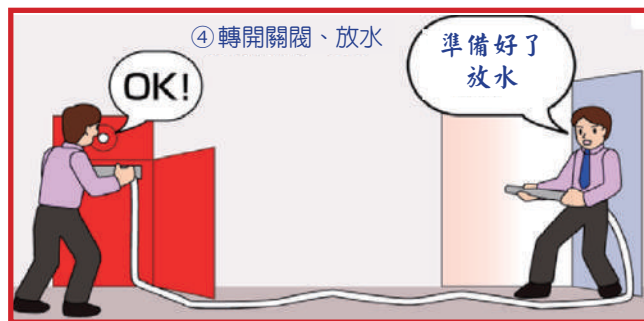
常見的消防栓分為兩種，分別說明如下：

第 1 種消防栓（水帶型消防栓），如圖 1-7，口徑 38mm，瞄子出水壓力達 1.7 kg/cm² 以上，放水量 130 l/min 以上，具有很大反作用力，最好由二人操作，但情況緊急在不得已時，亦得由一人操作。



★ 圖 1-7 第 1 種消防栓使用步驟（摘自消防署）

- (1) 按下火警發信機。
- (2) 打開消防栓箱門。
- (3) 拿出瞄子，拉水帶。
- (4) 轉開關閥。
- (5) 放水。



★ 續圖 1-7 第 1 種消防栓使用步驟（摘自消防署）

第2種消防栓（皮管型消防栓），如圖1-8，口徑25mm，瞄子出水壓力2.5kg/cm²以上，放水量60 l/min以上，皮管長20公尺，瞄子設有容易開關之裝置並具有直線與水霧射水功能，反作用力小，可由一人即可操作。

- (1) 按下火警發信機
- (2) 打開消防栓箱門
- (3) 拿出瞄子，拉出皮管、轉開關閥
- (4) 打開瞄子開關裝置，放水



★ 圖 1-8 第2種消防栓操作步驟(皮管型消防栓)(摘自消防署)

1-3 電源與電線過載實作

電源線若沒有過載保護，當電流過大時，電源線持續增溫，電源線絕緣皮會慢慢融化，然後裸露的中性線與火線會直接碰觸，當然產生火花，您會看到整條電線有如爆竹一樣，持續往線頭竄進，直到有人關掉電源，或產生更大的火災。

無熔絲開關

無熔絲開關 (no fuse breaker，簡稱 NFB)，如圖 1-8，無熔絲開關是利用雙金屬片 (bimetal) 受熱彎曲，兩種不同金屬彎曲的角度不同，推動跳脫機構，致使接點被頂開，供電迴路因此被切斷，以達到保護之目的。當無熔絲開關跳開時，應先檢查用電狀況，排除部分用電，並休息三分鐘以上，讓雙金屬片降低溫度，跳脫時會卡在中間位置，故障排除後須往下扳再往上扳。但每次保護裝置斷開電源後，開關也會損耗，也會降低此開關的使用年限。



★ 圖 1-8 無熔絲開關

延長線與過載保護(overload protect)

現代 3C 產品都需要充電，所以延長線插座（如圖 1-9）的需求越來越多，台灣市售延長線通常額定電流為 15A、最大功率 1650W、且最高可承受 125V 的電壓。安檢合格的延長線也都有「**過載保護裝置**」，當延長線插入太多的電器，導致電流超過負載時，保護裝置會瞬間跳脫斷電，在保護電器用品的同時也避免延長線過熱、電線走火。不過需要注意的是，雖然配有過載保護裝置的延長線能夠避免電流超過負載，但每次保護裝置斷開電源後，開關也會損耗，也會降低使用年限。



（當過載跳電後，可按一下過載重置開關，即可繼續通電）

過載保護開關

★ 圖 1-9 具有過載保護的延長線

⚡ 電源使用安全須知

一、裝置電器時應注意事項：

1. 燈泡或其他電熱裝置，切勿靠近易燃物品，尤其不可在衣櫃內裝設電燈，以免因為高溫引起火災。
2. 用電不可超過電線許可負荷能力。
3. 增設大型電器時，應先重新裝設屋內配線。
4. 切勿利用分叉或多口插座，同時使用多項電器。
5. 電線延長線，不可經由地毯、衣物等易燃物。

二、延長線及電線使用安全須知：

1. 拔下延長線插頭時，應手握插頭取下，不可僅拉電線，而造成電線內部銅線斷裂。
2. 電線內部銅線部分斷裂稱為半斷線，當電流流過半斷線時，因電路突然變窄，造成過負荷而產生高熱。
3. 延長線不可壓在家具或重物下方，以避免發生損壞產生危險。
4. 使用延長線時，應注意不可將其纏綁，由於電線經纏綁後 熱量很難流通，因此溫度升高而將塑膠融解，造成銅線短路著火。
5. 延長線避免放置爐具上方，因爐火高溫將塑膠融解，造成銅線短路著火。
6. 延長線應在容許負載容量下使用，且延長線上有連接多孔插座應使用具過負荷保護裝置之產品。
7. 老舊、破損之延長線會造成短路、漏電或感電等危險，應即立更新。
8. 使用中之延長線若有發燙或異味產生，此為過負荷象，應立即更換線徑較大的延長線。

三、故障排除時應注意事項：

1. 電器發生故障，有異狀首先應切斷電源開關，即時修理，以免發生短路，引起電線著火。
2. 屋內配線陳舊、外部絕緣體破損或插座損壞，都必須立即更換修理。
3. 保險絲熔斷、或無熔絲開關跳開，通常是用電過量的警告，應立即停止部分用電，切勿誤以為保險絲太細而換用較粗或以銅絲、鐵絲替代。
4. 切勿用潮濕的手碰電器設備，以防觸電。
5. 電線走火時，應立即切斷電源，電源未切斷前，切勿用水潑覆其上，以防導電。

範例 1-3a

電源與電線過載實作一，測試無熔絲開關是否動作。

操作步驟

1. 請準備 3 個電子鍋，找出其額定功率貼紙，如圖 1-10，表示額定功率是 760W。
2. 我們電壓是 110V，表示此電子鍋使用電流 $I=P/V=760/110=6.9A$ 。
3. 我們家用無熔絲開關大都是 20A，且廚房用電量較大，都是專用一個無熔絲開關，表示廚房僅至多可以使用 2 個電子鍋，3 個電子鍋的電流是 $6.9 \times 3 = 20.7A$ ，已經超過安全容量，因為超過一點點，所以通常煮到一半就會跳電。
4. 請在廚房的插座，同時使用 3 個電子鍋煮飯（電鍋、烤箱、吹風機、電熱水瓶也可以，請自行累加總電流），請觀察無熔絲開關是否跳開。
5. 跳開後，請將電鍋插頭拔掉一個，降低廚房的使用電流，等待 3 分鐘，讓無熔絲開關降溫，然後將無熔絲開關先往下扳，再往上扳。



★ 圖 1-10

範例 1-3b

電源與電線過載實作二，測試延長線的過載保護開關。

操作步驟

1. 請準備 3 個電子鍋，找出其額定功率貼紙，如圖 1-10，表示額定功率是 760W。
2. 請準備 1 條具有過載保護的延長線，如圖 1-9，表示額定電流是 15A 或 1650W。
3. 請於此延長線的插座，同時使用 3 個電子鍋煮飯（電鍋、烤箱、吹風機、電熱水瓶也可以，請自行累加總功率），請觀察具有過載保護的延長線是否跳開。

範例 1-3c

電源與電線過載實作三，實際感受電線的溫度變化。(特別聲明：本項實驗有危險性，可請老師示範或看我們書籍的影片即可)

操作步驟

1. 室內配線的導線線徑至少要 1.6mm，才能承受 20A 額定電流，請將範例 2-4b 的紅色導線換成 1mm 細導線。
2. 請於插座插入家用電熱水瓶。
3. 請用溫度感測器，量測導線溫度的變化。
4. 當導線溫度上升時，就拔掉電源線，此即為電線過載，電線產生高溫。若不理會，電器繼續運轉，溫度當然越來越高，接著絕緣皮就會融化，然後兩條電線裸露。但本實習有將兩條線分開，若不分開當然兩條導線碰在一起而產生火花，而繼續往線頭竄燒，產生更大火花，此即為電線走火。

自我練習

1. 電鍋與吹風機都是高功率電器，當電鍋與吹風機工作時，請摸著電線感受電線的溫度是否稍微上升，若感覺有點溫度，那就不行了，表示導線太細，絕緣線容易老化，導致電線走火。
2. 請問同一延長線，其功率標注 1650W，若同時插入與使用烤箱(800W)、電鍋(800W)、電子鍋(700W)，這樣總功率是多少？是否安全？
3. 廚房是用電量最大的房間，在配電箱通常有一專用無熔絲開關，此開關的額定電流是 20A，請問其額定功率是多少？

1-4 課後習題

- () 1. 工場安全教育其主要且直接的目的是在 (A) 提高生產力 (B) 避免人員與設備受損 (C) 安定勞工生活 (D) 減少投資成本。
- () 2. 有關電腦教室的安全注意事項，下列敘述何者正確？統測 112
(A) 電腦教室内發生火災，應立即離開教室但不用通報學校環安室或老師
(B) 教室内發現同學因觸電倒地，應立即對他進行 CPR 急救
(C) AED 裝置是急救的電擊設備，用於 CPR (叫叫 CABD) 中的 D 步驟
(D) 同學在教室内打翻可燃性塗料引起火災，應立即潑水灌救。
- () 3. 下列敘述中何者是正確的？(A) 在工場中實習可以穿著寬鬆的衣服比較舒服 (B) 工場應保持通風良好，光線充足 (C) 在工場中無需保持整齊、清潔 (D) 學生在工場實習中可不必配戴個人防護器具。
- () 4. 下列對工業用標示顏色所代表之意義，何者為錯誤？(A) 紅色表示防火設備、禁止 (B) 黃色表示注意、警告 (C) 綠色表示安全、救護設備 (D) 藍色表示放射性危險。
- () 5. 下列因素中何者不是由不安全的個人因素所造成的意外事件？(A) 粗心 (B) 精神狀態不佳 (C) 不使用防護器具 (D) 噪音。
- () 6. 燙傷時的處理程序為 (A) 叫叫 CABD (B) 沖脫泡蓋送 (C) 牙膏與醬油塗抹 (D) 立即刺破水泡
- () 7. 下列哪一類火災是電氣火災？(A) 甲 (A) 類 (B) 乙 (B) 類 (C) 丙 (C) 類 (D) 丁 (D) 類。
- () 8. 使用滅火器應站在何處？(A) 上風 (B) 下風 (C) 側風 (D) 逆風。
- () 9. 下列何種滅火器不適用於撲滅丙 (C) 類電氣火災？(A) ABC 乾粉滅火器 (B) 泡沫滅火器 (C) 二氧化碳滅火器 (D) 鹵化烷滅火器（俗稱海龍，Halon）。
- () 10. 一般 18 公斤以下滅火器，放置的高度不得超過多少公尺？（滅火器上端與樓地板之距離）(A) 1 公尺 (B) 1.5 公尺 (C) 2 公尺 (D) 2.5 公尺。

MEMO



常用家電量測

學習大綱

- 2-1 低功率電烙鐵、量測電表、電源供應器之使用
- 2-2 電阻的識別與測量
- 2-3 交直流電壓及電流之量測
- 2-4 常用家電的認識與量測
- 2-5 本章內容摘要
- 2-6 課後習題

學習目標

- 1. 能夠使用低功率電烙鐵焊接電路。
- 2. 能夠由電阻色碼識別電阻值與使用三用電表量測其電阻值。
- 3. 能夠量測交直流電壓與交直流電流。
- 4. 能夠量測家用電器所使用電流與功率。
- 5. 能夠實作電線過載。

前面第 1 章已經介紹實習工場設施、環境及機具也探討工業安全及衛生、消防安全的認識，本章就要進入主題，學習量測電阻、電壓、電流，然後也介紹認識家用電器的基本量測，進入主題之前，也要先認識基本電學最常用基本工具與儀器—尖嘴鉗、斜口鉗、電烙鐵、電源供應器、三用電表。

2-1 低功率電烙鐵、量測電表、電源供應器之使用

► 表 2-1 本節零件表（以下各章都需要這些材料與工具）

編號	零件名稱	數量	備註
1	尖嘴鉗	1 把	
2	斜口鉗	1 把	
3	電線	1 捲	
4	焊錫	1 捲	
5	含海綿烙鐵架	1 組	
6	低功率電烙鐵	1 把	
7	吸錫器	1 把	

低功率電烙鐵

電烙鐵是電路銲接必備的工具，它是利用電熱絲產生熱量，使烙鐵頭的溫度上升至約 250°C 至 400°C ，此溫度即可融化焊錫，使零件的引線固定在電路板，而能導通電流。電烙鐵的規格主要以電熱絲的消耗功率區分，一般電子電路銲接以使用 $20\text{W} \sim 30\text{W}$ 的電烙鐵為宜，此稱為低功率電烙鐵如圖 2-1，若所銲的零件較大，則採 60W 、 100W 或更大的瓦特數。



★ 圖 2-1 低功率電烙鐵

量測電表

量測電表主要是用來測量電阻、電壓、電流，故被稱為三用電表，或簡稱 VOM 表，V 表示電壓單位「伏特 Volt」，O 表示電阻單位「歐姆 Ohm」，M 表示電流單位「毫安培 milliampere」。但是目前的電表，附屬功能可說越來越多，故有時又稱為萬用表（multi-tester），為電機電子從業人員裝配修護必備的基本儀表。電表輸出型式可分為指針型及數位型等兩種，如圖 2-2。第一：不論是指針型或數位型，都有很多檔位，可以選擇量測電壓、電流或電阻。第二：指針型每一個檔位，還要依照量測值的大小，選擇合適的檔位，所以檔位看起來比較多。第三：數位型電表則先合併檔位，然後使用「Select」按鈕由使用者選擇交流與直流；再使用「Range」按鈕，選擇量測範圍，所以看起來檔位比較少。第四：面板都有三個孔，黑色「-com」孔都是共用孔，用來接黑棒，都是所有量測的接地端的共用孔；紅色孔都有兩個，有一個是量測大電流專用孔，上面都有標示最大「10A」，當電流超過 25mA 時，插入此孔；除了大電流外，所有電壓、電阻、與小電流的量測，都是使用紅色通用孔，上面有標示「VmA +」。第五：指針型需要零位調整與歐姆歸零調整，數位型則不用。第六，兩者都有電源開關，當不用時，要放在「OFF」位置，才可以避免電池損耗。



✦圖 2-2a 傳統指針電表

✦圖 2-2b 傳統指針電表

✦圖 2-2c 新型數位電表

電源供應器

基本電學實驗，常常需要不同的直流電壓來進行實驗，所以就有直流電源供應器的發明。而且電源供應器都有限流保護功能，什麼是限流保護呢？因為電學實驗階段，使用者很可能接線錯誤造成短路，此時電流很大，有可能燒毀電源供應器或使用者電路，所以電源供應器都有限流保護，限制在一個安全電流內可以正常運作，超出範圍燈就亮，且有三種保護模式，分別是定值（超出時，也是以設定值當作輸出）、折返型（超出時，提供比設定值略小的電流輸出）、與截流保護（超出時，電源直接斷電切掉）。為了實驗需求，有些廠商會將 2 組以上電源放在同一台機器，然後提供按鈕選擇此兩電源是獨立、串聯或並聯運作。電源供應器依照輸出電壓設定方式，分為傳統型與數位型，分別說明如下：

🔧 傳統型電源供應器

傳統型電源供應器如圖 2-3。第一：本例共有 3 組電壓輸出，兩組可獨立調整電壓與電流（如 COM2 與 COM1），1 組固定輸出 5V（如 COM3）。第二：兩組可調電壓的電壓與電流設定採用旋鈕（如兩組 CURRENT、VOLTAGE）。第三：電流與電壓輸出採用七段顯示器（如兩組 A、V）。第四：兩組獨立電源可獨立使用、串聯使用、或並聯使用，本例選擇方式如照片指示的兩個按鈕，兩個按鈕都沒按，表示「INDEP」；左邊按下，右邊沒按，表示「SERIES」；左邊沒按，右邊按下，表示「PARALLEL」。第五，不論是傳統與數位型，都有電源開關，如圖片的「POWER」。第六，不論是傳統與數位型，都有輸出開關，如圖片的「OUTPUT」，也就是以上電壓與電源都設定好了，要按「OUTPUT」按鈕，電壓才能輸出。



✦ 圖 2-3 傳統型電源供應器

ㄟ 數位型電源供應器

數位型電源供應器如圖 2-4。第一：本機型僅提供 1 組可調電壓輸出，1 組固定電壓 5V 輸出。第二：數位型電源供應器採用液晶螢幕輸出電壓與電流等設定；第三：本機型本機型的 V（電壓設定）、I（電流設定）、OVP（過壓設定）、OVC（過流設定）的設定，都是採用逐位數輸入。例如，當按一下「V」時，螢幕繪出現四個位數「00.00」，且會有一個數字顏色不一樣，繼續按一下「V」按鈕，可改變顏色不一樣的數字，此時調整旋鈕，即可改變該數字的大小，所以可以進行很精確的電壓設定。第四：本機型也是有「On/Off」按鈕，用於輸出設定，當所有設定完成，才按此鈕，電源供應器才輸出電壓。



✦ 圖 2-4 數位型電源供應器

ㄟ 電源供應器使用步驟

電源供應器的機型很多，各校機型都不同，但是其使用步驟如下：

1. 若有多組電源，先選擇這些電源運作模式是獨立、串聯或並聯供電。
2. 連接測試棒。
3. 調整最大供應電流（以免燒毀電路）。
4. 調整輸出電壓。
5. 按下「OUTPUT」輸出電壓。以上電源供應器的使用，請看 2-3 節範例說明。

範例 2-1a

電線剝線練習。

準備工作

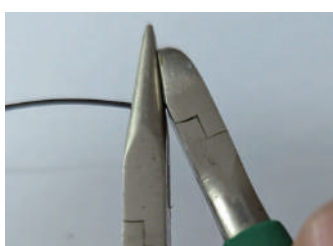
1. 準備尖嘴鉗、斜口鉗、電線如圖 2-5a。

操作步驟

1. 使用左手拿尖嘴鉗，用尖嘴鉗後端平的地方夾住電線。(尖嘴鉗前端有齒紋，若用此齒紋夾電線，很容易把電線絕緣皮咬破，容易造成不必要的短路)
2. 使用右手拿斜口鉗平貼尖嘴鉗，如圖 2-5b。
3. 使用尖嘴鉗的尖端當支點，右手向外輕輕推開施力，即可剝開絕緣皮，如圖 2-5c。



★ 圖 2-5a 剝線工具



★ 圖 2-5b 剝線動作一



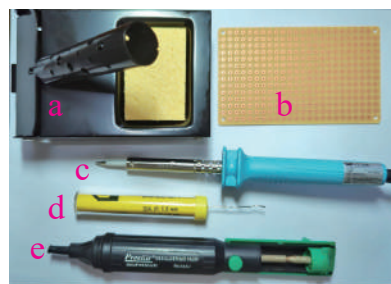
★ 圖 2-5c 剝線動作二

範例 2-1b

焊接示範。

準備工作

1. 準備含有海綿的安全烙鐵架，如圖 2-6a，電烙鐵加熱後為避免燙傷人員與物品，所以要放在安全烙鐵架內，才不會燙傷皮膚或燒毀桌子。焊接前請在海綿加點水，每次烙鐵使用前都要先將烙鐵頭在濕海綿擦拭，將上次焊接的餘錫抹掉（因為上次餘錫已經沒有黏著力）。
2. 準備電路板，如圖 2-6b。
3. 準備低功率電烙鐵，如圖 2-6c，電烙鐵的規格是加熱功率，30W 以內稱為低功率電烙鐵，因為初學者熟練度不足，若功率太高，很容易將電子零件燒壞、或燒破電線絕緣皮。
4. 準備焊錫，如圖 2-6d。
5. 準備吸錫器，如圖 2-6e。



★ 圖 2-6 焊接工具

操作步驟

1. 焊接頭先在海綿擦拭，將上次餘錫擦拭掉。
2. 焊接頭要點在零件腳的地方，且焊接頭保持不晃動，將焊接面與零件加熱。
3. 下焊錫。
4. 待焊錫足夠，抽離焊錫。
5. 待焊接面光滑時，抽離電烙鐵。
6. 在焊接點未完全冷卻前，不可搖晃零件腳，只要還沒完全冷卻前，零件腳有搖晃，此焊接就不牢靠，焊點的光滑性也消失，請務必重焊。牢靠的焊接，才能經得起使用者不斷地摔，還能堅如磐石。
7. 如圖 2-7，焊點 a 表面光滑，焊錫量也剛好。
8. 如圖 2-7，焊點 b 焊錫量太少。
9. 如圖 2-7，焊點 c 焊錫量太多，浪費焊錫。
10. 如圖 2-7，焊點 d,e 表面沒光澤，焊點不牢靠。



✦ 圖 2-7 練習用電路板



✦ 圖 2-8 正立方體

相關知識

1. 假焊，是指表面上好像焊住了，但實際上並沒有焊上。有時用手一拔，引線就可以從焊點中拔出。
2. 虛焊，是焊點處只有少量的錫焊住，造成接觸不良，時通時斷。虛焊與假焊都是指焊件表面沒有充分鍍上錫層，焊件之間沒有被錫固定住，是由於焊件表面沒有清除乾淨或焊錫用得太多所引起的。
3. 空焊，是焊點應焊而未焊。焊錫太少、焊點或引線沾油污、氧化生鏽、受潮…等會造成空焊。

4. 冷焊，是在零件的吃錫介面沒有形成吃錫帶，(即焊錫不良)。流焊溫度太低、流焊時間太短、吃錫性問題…等會造成冷焊。
5. 如何檢查焊接是否確實？
 - (1) 直觀檢查法：可用放大鏡檢查焊點是否有細小的裂縫群。
 - (2) 電流檢測法：可用三用電表檢查引線和焊點是否相通。
 - (3) 晃動法：用手或攝子對元件逐個地進行晃動，以感覺元件有無鬆動現象。
 - (4) 補焊法：當仔細檢查後仍舊不能發現故障時進行的一種維修方法，就是對故障範圍內的元件逐個進行焊接。

自我練習

1. 剪 12 根，每根 5 公分，兩端各剝線 0.5 公分，然後焊接成一個正立方體，如圖 2-8。

範例 2-1c

示範吸錫器的使用。

若要更換零件，則應使用吸錫器將焊錫吸走，再拔零件。

操作步驟

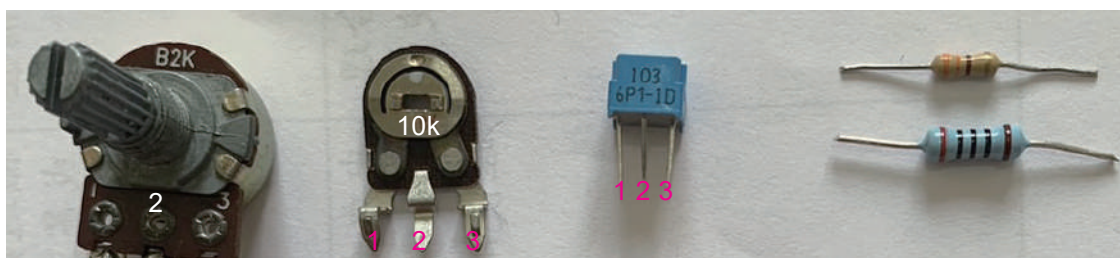
1. 準備吸錫器，如範例 2-1b 的圖 2-6e，先按壓吸錫器彈簧使其卡住。
2. 使用電烙鐵先加熱焊點，待焊點融化，將吸錫器的吸頭靠近融化的焊點，並按下彈簧吸取開關，即可吸走焊錫。

2-2 電阻的識別與測量

► 表 2-2 本節零件表

編號	零件名稱	數量	備註
1	4 碼電阻	5~10 個	
2	5 碼電阻	5~10 個	
3	可變電阻	1 個	
4	半可變電阻	1 個	

電阻器 (resistor) 是電氣設備中最常見的元件，單位為**歐姆** (Ω)，依其用途可分為可變電阻器、半可變電阻器及固定電阻器等三種，其外觀及電路符號圖如圖 2-9a ~ 2-9d 所示。可變電阻器，如圖 2-9a，通常放在電器的面板讓使用者調整電阻值，例如，音響設備的音量調整；半可變電阻如圖 2-9b 與 2-9c，半可變電阻通常焊在電路板，給工程師進行出廠前調整。以上可變與半可變電阻都有三隻腳，其 1,3 接腳兩端電阻值是固定的，如電阻上的標示，分別是 2K、10K、10K(103)，調整旋扭即可改變 (1,2) 或 (2,3) 腳之間的電阻值，因為腳位 2 的電阻位置是在腳位 1,3 之間移動，所以 (1,2) + (2,3) 的總電阻也是固定值。固定電阻如圖 2-9d。



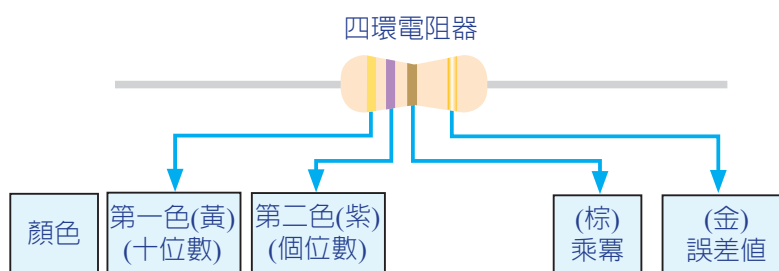
✦ 圖 2-9a 可變電阻 ✦ 圖 2-9b 半可變電阻 ✦ 圖 2-9c 半可變精密電阻 ✦ 圖 2-9d 固定值電阻器

電阻值的標示

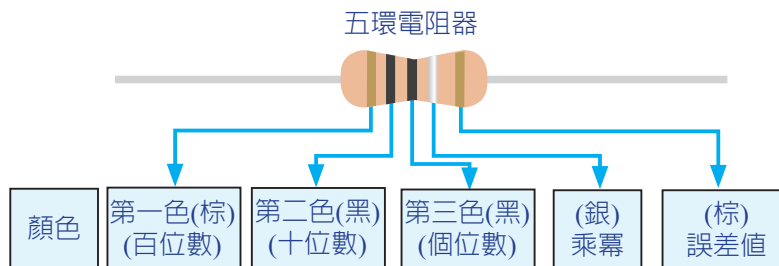
常見的電阻值的標示有**色碼**標示與**數字**標示，分別說明如下：

色碼標示

色碼標示又分為**四環標示**，如圖2-10與**五環標示**，如圖2-11。第一，兩者使用相同色環，如圖2-12，只是五環標示多一個有效值，所以其精密度比較高。第二，不管是四環或五環，環與環的間隙，都有一個間隙比較寬，請將此間隙放在最右邊，此間隙右邊的環代表誤差值；第三，四環的前兩碼，分別代表十位數與個位數，第四，五環電阻前三碼，分別代表百位數、十位數與個位數；間隙較大左邊一環則代表10的乘冪（也就是後面加零的個數）。



★ 圖 2-10 四環電阻器



★ 圖 2-11 五環電阻器

黑	0	0	0	10^0	
棕	1	1	1	10^1	±1%
紅	2	2	2	10^2	±2%
橙	3	3	3	10^3	
黃	4	4	4	10^4	
綠	5	5	5	10^5	±0.5%
藍	6	6	6	10^6	±0.25%
紫	7	7	7	10^7	±0.10%
灰	8	8	8		±0.05%
白	9	9	9		
金				10^{-1}	±5%
銀				10^{-2}	±10%
無					±20%

★ 圖 2-12 色碼與數字對照表

範例 2-2a

如圖 2-11 所示，請寫出電阻的電阻值與可能範圍。

操作步驟

1. 將電阻橫放。
2. 此為四環電阻，顏色分別是黃、紫、棕、金。
3. 將間隙較寬的放在右邊。
4. 第 1 環是黃色，其值是 4；第 2 環是紫色，其值是 7；第 3 環是棕，表示 10^1 ，所以電阻值是 $47 \times 10^1 = 470\Omega$ 。
5. 第 4 環是金，表示誤差值是 $\pm 5\%$ 。所以表示此電阻值可能落在 $470 \pm (470 \times 0.05) = 470 \pm 23.5 = 446.5\Omega \sim 493.5\Omega$ 之間。

自我練習

1. 請寫出表 2-3 色碼的電阻值與誤差。

► 表 2-3 四環色碼練習表

題號	色碼	電阻值	誤差
1	棕黑紅金		
2	黃紫藍銀		
3	橙白黑棕		
4	棕黑金無		

2. 請任意拿出 5 個四環電阻，寫出其顏色、電阻值、誤差百分比與電阻可能範圍。

範例 2-2b

如圖 2-12 所示，請寫出電阻的電阻值與可能範圍。

操作步驟

1. 將電阻橫放。
2. 此為五環電阻，顏色分別是棕、黑、黑、銀、棕。
3. 將間隙較寬的放在右邊。

- 第 1 環是棕色，其值是 1；第 2 環是黑色，其值是 0；第 3 環是黑色，其值是 0；第四環是銀色表示乘以 0.01，所以電阻值是 $100 \times 0.01 = 1\Omega$ 。
- 第 5 環是棕色，表示誤差值是 $\pm 1\%$ 。所以表示此電阻值可能落在 $1 \pm 0.05 = 0.95\Omega \sim 1.05\Omega$ 之間。

自我練習

- 請寫出表 2-4 色碼的電阻值與誤差。

► 表 2-4 五環色碼練習表

題號	色碼	電阻值	誤差
1	棕黑白紅金		
2	黃紫灰藍銀		
3	橙白綠黑棕		
4	棕黑黃金金		
5	紅黑黑銀無		

- 請任意拿出 5 個五環電阻，寫出其顏色、電阻值、誤差百分比與電阻可能範圍。

數字標示

數字的標示也有兩種，分別是直接標示與數字標示，如圖 2-9a 的「2K」與圖 2-9b 的「10K」則為直接標示。圖 2-9c 則為數字標示，103 的第一個數字所代表的是電阻值的十位數，第二個數字代表電阻值的個位數，最後一個數字所代表的是十的乘幂，也就是數字後面加零的個數，所以 103 的數值代表其電阻值為 $10000\Omega = 10k\Omega$ 。

自我練習

- 某一可變電阻標示 202，請問其電阻值。

乘幂表示法

基本電學的數值資料有時會太大或太小，例如 47000 或 0.001，爲了好讀好寫與好溝通，通常會加上一些**乘幂符號**輔助，例如，k 表示乘以 1000，m 表示乘以 0.001，所以 47000 會以 47k 表示，0.001 會以 1m 表示，表 2-5 是常見的**乘幂符號**。

► 表 2-5 常見的乘幂符號

乘幂符號	代表大小	中文	英文
T	$10^{12}=1,000,000,000,000$	兆	tera
G	$10^9=1,000,000,000$	十億	giga
M	$10^6=1,000,000$	百萬	mega
k	$10^3=1,000$	仟	kilo
m	$10^{-3}=0.001$	毫	milli
μ	$10^{-6}=0.000001$	微	micro
n	$10^{-9}=0.000000001$	毫微，奈	nano
p	$10^{-12}=0.000000000001$	微微，披	pico

自我練習

1. 請將表 2-6 數字以乘幂符號表示：

► 表 2-6 數字轉乘幂符號練習表

題號	題目	答案	題號	題目	答案
1	10000		6	$10\text{m} \times 1\text{k}$	
2	3000000		7	$10\text{M} \times 3\mu$	
3	4000000000000000		8	$20\text{T} \times 4\text{n}$	
4	0.022		9	$10\text{m}/4\text{p}$	
5	0.0000033		10	$15\text{n}/3\text{k}$	

範例 2-2c

指針式三用電表的電阻量測。

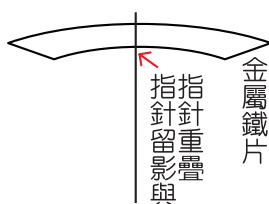
操作步驟

1. **零位調整**：所有的量測前應先確認指針是否在左邊「0」的刻度上（金屬鏡片下方的刻度），如果不在「0」的刻度上，請先利用一字型起子調整。
2. **金屬鏡片**：金屬鏡片可讓指針在鏡片上留下指針影像位置，判讀時，請移動眼睛觀測位置，使指針與指針影像重疊，如圖 2-13b，若能同時看到指針與指針影像，如圖 2-13c 或 2-13d，表示眼睛觀測角度不對，指

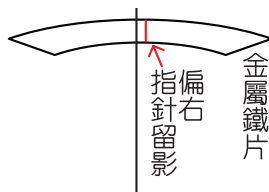
針留影在右邊，表示觀測點偏右，如圖 2-13c，指針留影在左邊，表示觀測點偏左，如圖 2-13d。



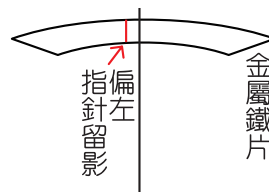
✦ 圖 2-13a 選 $\times 1$ 檔位



✦ 圖 2-13b 正確



✦ 圖 2-13c 偏右



✦ 圖 2-13d 偏左

3. **電阻檔位：**圖2-14a的三用電表電阻檔共有 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1K$ 、 $\times 10K$ 等5個檔位。例如待測電阻是 330Ω ，則檔位選用「 $\times 1$ 」的結果如圖2-13a，檔位選用「 $\times 10$ 」的結果如圖2-14a，檔位選為「 $\times 100$ 」的結果如圖2-14b，都有執行結果，但是檔位應盡量選在讓指針停留在 $5\Omega \sim 50\Omega$ 之間為原則，因為，此範圍內刻度的變化量比較線性，數值判讀較準確，所以本例以選用「 $\times 10$ 」，則指針停留在 30Ω 附近較佳。



✦ 圖 2-14a 選 $\times 10$ 檔位



✦ 圖 2-14b 選 $\times 100$ 檔位

4. **歸零調整**：每選一個檔位，都要進行歸零調整，再進行量測。歸零的調整是將兩根測試棒短路，調整「0Ω ADJ」旋鈕，若 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1K$ 無法歸零，表示 1.5V 電池電力不足，若 $\times 10K$ 無法歸零，表示 9V 電池電力不足，請更換電池。

自我練習

1. 請寫出圖 2-15a、2-15b 電阻量測值。(請留意，我們拍攝時，也有考慮金屬鏡片的留影位置)

1. 使用 $\times 100$ 檔位，電阻值=_____。



★ 圖 2-15a 電阻讀數練習

2. 使用 $\times 1k$ 檔位，電阻值=_____。



★ 圖 2-15b 電阻讀數練習

範例 2-2d

使用數位型三用電表量測電阻值。

操作步驟

1. 選擇檔位：本例請將檔位撥在「Ω」檔位。
2. 範圍選擇：請連續按一下「Range」按鈕，觀察此電表所提供的檔位。例如，本三用電表提供「.0」「.000k」、「.00k」、「.0k」「.000M」、「.00M」共6個檔位。
3. 圖 2-16a 是量測 $2k\Omega$ 電阻，小數點選 3 位的執行結果，圖 2-16b 是小數點選 2 位，圖 2-16c 是小數點選 1 位的執行結果。



✦ 圖 2-16a 小數點選 3 位



✦ 圖 2-16b 小數點選 2 位



✦ 圖 2-16c 小數點選 1 位

相關知識

1. 圖 2-17a、圖 2-17b 是兩種常用數位電表的對照照片，其特徵是都有功能接近的轉盤，可以轉換量測模式，也都有「SELECT」或「SEL」選 AC/DC，有「RANGE」選有效數字範圍。
2. 圖 2-17a 有大電流專用孔「10A」，圖 2-17b 則分大電流「A mA」與小電流「uA」專用孔，其餘都是使用一般通用孔。



✦ 圖 2-17a



✦ 圖 2-17b

2-3 交直流電壓及電流之量測

► 表 2-7 本節零件表

編號	零件名稱	數量	備註
1	9V 電池	1 顆	
2	3 號或 4 號 1.5V 電池	3 顆	

直流電壓的量測

ㄟ 電動勢與電壓

在力學裡，水之於會流動而做功，是因為有水位的高低落差或利用水泵浦讓水流動；在電學裡，要讓電荷移動而有做功的能力，就要有電動勢（electromotive force），此電動勢提供一個電壓差（voltage difference），來推動電荷做功，其功能就如同水流裡的水泵浦；電動勢與電壓之單位為伏特（Volt），簡稱伏（V），其 SI 國際單位制之符號為 V。電動勢在基本電學實習的常見來源有電池、發電機（電源插座）與電源供應器，以下將分別介紹如何使用三用電表量測以上設備的電壓。

範例 2-3a

9V 電池電壓的量測。（請準備 1 顆 9V 電池）

操作步驟

1. 三用電表零位調整。（請複習範例 2-2c）
2. 三用電表，撥 DCV10，黑棒接負極（電極開口較大的一端為負極），紅棒接正極（電池有凸點的為正極），畫面如圖 2-18a，代表電壓是 9.24，每一小格代表 0.2V，所以 9.2 是測量值，0.04 是估計值。
3. 三用電表，撥 DCV50，畫面如圖 2-18b，代表電壓是 9.0V。（請留意 9 與 9.0 是不同的，9.0 強調 9 是正確值，0 是估計值。）

2-18 基本電學實習



✦ 圖 2-18a



✦ 圖 2-18b

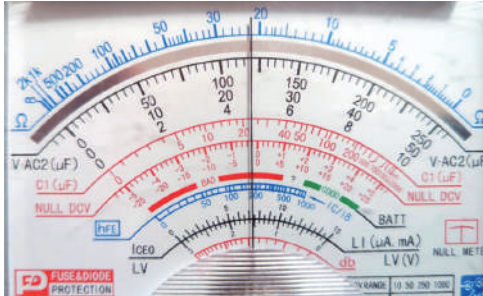
4. 以上兩個檔位都可以量測 9V 電池，但是電壓檔位選用標準是選讓指針能盡量伸展為原則，所以本例應該選用 DCV10V 檔位。
5. 請找出一顆新電池，量測新的電池電壓_____。
6. 請找出一顆舊電池，量測舊電池的電壓_____。

補充說明

1. 三用電表滿刻度 250 時，每小格是 5。
2. 三用電表滿刻度 50 時，每小格是 1。
3. 三用電表滿刻度 10 時，每小格是 0.2。

自我練習

1. 請寫出圖 2-19a、2-19b 電壓的量測值。

1. 使用 30V 檔位，電壓值=_____。  ✦ 圖 2-19a	2. 使用 12V 檔位，電壓值=_____。  ✦ 圖 2-19b
---	--

範例 2-3b

1.5V 電池直流電壓的量測。

操作步驟

1. 3 號與 4 號 1.5V 電池平的一端為負極，電池有凸點的為正極。3 號電池較大，長度是 5cm；4 號電池較小，長度只有 4.3cm，普遍用在遙控器。
2. 將三用電表測試棒黑棒接電池負極，測試棒紅棒接電池正極。
3. 圖 2-20 為使用 DCV2.5 檔位的輸出結果，請留意指針和金屬鏡片反射的位置要一致。
4. 但三用電表的刻度只有 250、50、10，並沒有滿刻度是 2.5 的刻度，變通的辦法是使用滿刻度是 250 的刻度，由圖可知，準確值是 160（每小格是 5），估計值是 3，量測值是 163，然後因為是使用 2.5 檔位，要除以 100，所以電壓是 1.63V。



★圖 2-20 量測結果

自我練習

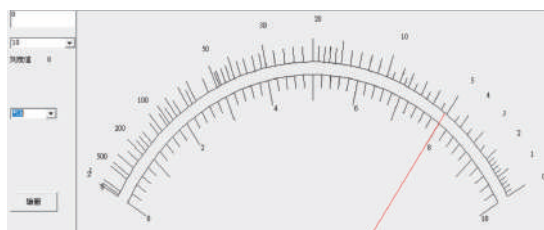
1. 請找一個新的 3 號電池，量測新電池電壓_____。
2. 請找一個舊的 3 號電池，量測舊電池電壓_____。

範例 2-3c

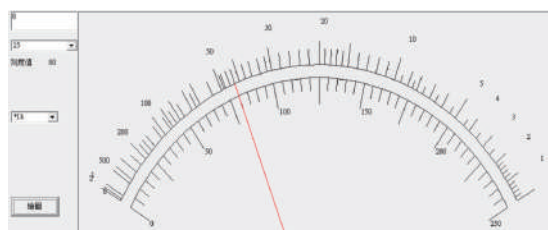
三用電表模擬軟體的操作。三用電表滿刻度只有 250、50、10，但檔位除了 250、50、10 以外，還有 1000、2.5、0.5、0.1 等檔位，此時 1000、2.5、0.5、0.1 等檔位，就需要選用對應檔位，然後再乘除，本書撰寫一個三用電表模擬軟體如下，讓大家熟悉檔位的選用與心算的練習。

操作步驟

1. 開啓「www.goodbooks.com.tw/elect/meter.exe」。
2. 圖 2-21a 是輸入 8V，使用滿刻度 10V 檔位的畫面。
3. 圖 2-21b 是輸入 8V，使用滿刻度 25V 檔位的畫面，但三用電表沒有滿刻度 25V 的刻度，所以先用 250V 的刻度，每格 5V 共 16 格， $5V \times 16 = 80V$ ，但還要除以 10，所以是 8V。



★ 圖 2-21a 8V 使用滿刻度 10V 的畫面



★ 圖 2-21b 8V 使用滿刻度 25V 的畫面

自我練習

1. 請自行開啓以上軟體，自行操作讀取。
2. 以上軟體，因為可藉由電腦畫面放大顯示，亦可做為老師電阻量測、電阻值判讀教學。

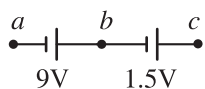
範例 2-3d

電池串聯電壓的量測。

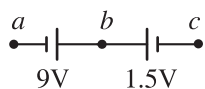
操作步驟

1. 請準備 1 個 9V 與 2 個 1.5V 電池。
2. 請先量測每個電池電壓實際值。

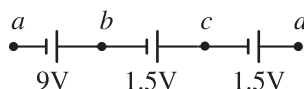
3. 9V 與 1.5V 電池串聯方式與極性如圖 2-22a，三用電表負極接 a 點，正極接 c 點，寫出理論電壓_____，量測實際電壓_____。
4. 9V 與 1.5V 電池串聯方式與極性如圖 2-22b，三用電表負極接 a 點，正極接 c 點，寫出理論電壓_____，量測實際電壓_____。
5. 9V 與 1.5V 電池串聯方式與極性如圖 2-22c，三用電表負極接 a 點，正極接 d 點，寫出理論電壓_____，量測實際電壓_____。
6. 9V 與 1.5V 電池串聯方式與極性如圖 2-22d，三用電表負極接 a 點，正極接 d 點，寫出理論電壓_____，量測實際電壓_____。



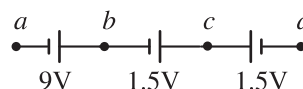
★ 圖 2-22a



★ 圖 2-22b



★ 圖 2-22c



★ 圖 2-22d

交流電壓

範例 2-3e

台電交流電壓的量測。

操作步驟

1. 家裡常用插座有兩孔、與三孔插座，如圖 2-23a、2-23b、2-23c。



★ 圖 2-23a 110V 兩孔插座



★ 圖 2-23b 110V 三孔插座



★ 圖 2-23c 220V 冷氣插座

2. 指針式三用電表請撥 AC250V，將兩根測試棒，不用分極性，任意插入中性線 (neutral wire) 與火線 (live wire)，量測結果如圖 2-24a，指針放大如圖 2-24b，每 1 小格 5V，所以是 115V。
3. 數位式三用電表，的交流電壓與直流電壓通常放在同一檔位，例如本書使用的「OW16A」，請用「Select」選「AC」，然後使用「Range」選「000.0」的檔位，也是不分極性插入中性線與火線，量測結果如圖 2-24a 右邊，顯示 118.3V。以上量測結果不一致，此為儀器誤差。



✦ 圖 2-24a



✦ 圖 2-24b

自我練習

1. 請將測試棒插入接地線 (earth wire) 與中性線，請問電壓為_____。
2. 如圖 2-23c，請將測試棒插入兩個火線，請問電壓為_____。
3. 如圖 2-23c，請將測試棒插入任一火線與接地線，請問電壓為_____。

範例 2-3f

電源供應器的基本操作。

操作步驟

1. 圖 2-25a 是目前常見的電源供應器。
2. 圖 2-25a 有三組電源，其中 CH1、CH2 可單獨使用、也可串聯、並聯使用，CH3 則獨立提供 5V，且至多 3A 的電源。
3. CH1、CH2 的工作模式由兩個按壓開關控制，兩個都不按，為獨立供電；左邊按，右邊不按，為串聯供電；兩個按鈕都按下去，則為並聯模式。本例為獨立供電。
4. 請先調電壓：圖 2-25a 右邊為 CH1，調整為 18V。調整電流上限：本例調為 0.1A。
5. 輸出電壓：請按一下「OUTPUT」按鈕，如圖 2-25b，電源供應器顯示實際輸出電流與電壓，請用直流電壓檔量測輸出電壓=_____；若電流超過預設值「0.1」，則「CC」燈會轉為紅燈，電壓會切斷或下降。



★ 圖 2-25a 電源供應器電流設定



★ 圖 2-25b 電源供應器實際輸出

自我練習

1. 請問您的電源供應器輸出最大電壓是多少？_____可輸出最大電流是多少？_____
2. 請問若使用『SERIES』模式，可輸出最大電壓是多少？_____，請實際使用電表量測，量測值是多少？_____，可輸出最大電流是多少？_____（串聯模式可提高電壓的供應）
3. 請問若使用『PARALLEL』模式，可輸出最大電壓是多少？_____請實際使用電表量測，量測值是多少？_____，可輸出最大電流是多少？_____（並聯模式可提高電流的供應）
4. 請使用『INDEP』模式，將 CH1 設定 8V，將 CH2 設定 2V。
 - (1) 請練習接線，使得電源供應器輸出 10V，且用三用電表量測。
 - (2) 請練習接線，使得電源供應器輸出 6V，且用三用電表量測。

範例 2-3g

液晶顯示電源供應器基本操作。由於液晶顯示的普及與單晶片技術的精進，現在電源供應器已經慢慢進入液晶顯示介面，所能設定與顯示的資訊也較多，圖 2-26 是目前常見液晶顯示電源供應器，而且價錢也逐漸降低中，很適合學生買一套放在家裡做實驗。

操作步驟

1. 因為有液晶顯示器，所以操作方式與手機接近。如圖 2-26 所示，此儀器有 5 個常用按鈕與 1 個旋鈕，其功能分別是電壓設定 (V)、電流設定 (I)、過壓設定 (OVP)、過流設定 (OCP)、數值調整旋鈕（調整以上數值）、輸出設定（按下去才輸出）（Display 與 Memory 初學者先略）。
2. 電壓、電流設定顯示在液晶螢幕的「Set」位置，過壓與過流設定顯示在「Limit」位置，都是按一下指定按鈕（V、I、OVP 或 OCP），請留意游標所在位置，繼續按指定按鈕（V、I、OVP 或 OCP）可以改變游標位置，然後旋轉「數值調整」旋鈕，即可調整指定游標位置的數值。
3. 以電壓設定為例，按一下「V」按鈕，請留意游標位置，再按一下「V」按鈕，即可改變游標位置（數值「12.00」，表示游標共有 4 個位置，然後旋轉「數值調整」旋鈕，即可調整指定游標位置的數值）
4. 請逐一電壓設定「V」、電流設定「I」、過壓設定「OVP」、過流設定「OCP」，最後按一下「On/Off」按鈕，即可輸出電壓。



► 圖 2-26 液晶顯示電源供應器

電流(electric current)

在力學裡，水的流動稱為水流，在電學裡，電子的流動，我們就稱為**電流**。我們定義單位時間通過某一截面的電量為電流。以數學式表示如下：

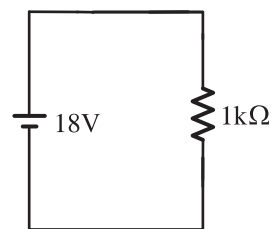
$I = Q/t$ （ Q 是帶電量，單位是 C（庫倫）， t 是時間，單位是秒， I 是電流，單位是 A（安培））

電流的量測

前面電阻與電壓的量測都是直接量測，但是電流的量測，則要切斷原來的電路，讓電流流進電表。請看以下範例說明。

範例 2-3h

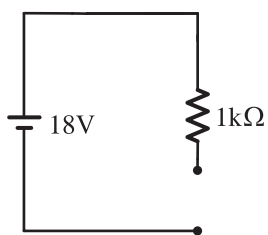
電流的量測。假設有電路如圖 2-27，請問如何量測電流。



★ 圖 2-27 電路圖

操作步驟

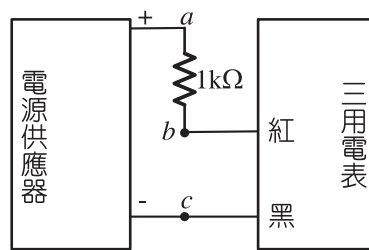
1. 要量測其電流，都要將電路切斷，如圖 2-28a。
2. 電路焊接如圖 2-28b，於 a, c 兩點輸入電壓，於 b, c 兩點量測電流，請留意 b, c 兩點下面沒有導線連接，而畫黑線的地方表示焊接面有導線連接。
3. 三用電表連結如圖 2-28c。



★ 圖 2-28a 電路切開

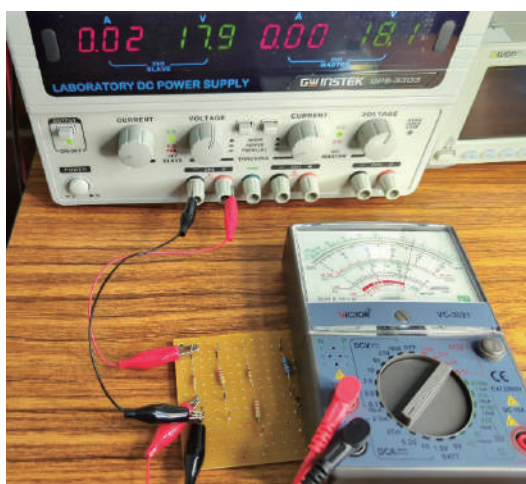


★ 圖 2-28b 電路板

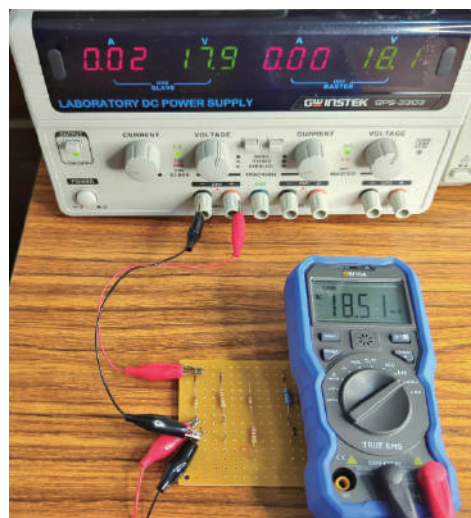


★ 圖 2-28c 電表連接圖

4. 若是指針型三用電表，則先選擇最大直流電流檔。例如，先選擇 250mA 檔位，再逐一下降檔位，讓指針盡量張開，如圖 2-29a。
5. 若是數位顯示型三用電表，則先用轉盤選擇電流檔，然後用「Select」選擇「DC」直流，再用「Range」選擇「000.0mA」或「00.00mA」，如圖 2-29b。



✦ 圖 2-29a



✦ 圖 2-29b

2-4 常用家電的認識與量測

一般家庭常用家電有電鍋、電風扇、冰箱、電視機，配電盤則是室內所有配線的中心，本單元將介紹這些電器的量測。

家用電器電流的量測

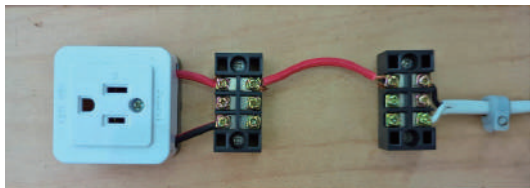
家用電器交流電流的量測有兩種方式，分別是**交流電流表**與**交流勾表**，分別說明如下。

範例 2-4a

示範使用交流電流表量測交流電流。

操作步驟

1. 交流電流表與前面範例 2-3h 已經介紹直流電流的量測相同，都必須先將電路切斷，然後讓電流流進電表，爲了不破壞原來電源線的完整性，所以我們製作電路如圖 2-30a。
2. 電流表接線如圖 2-30b，請留意家用電器的電流大多超過 25mA（量測電流請一定從大電流檔位往下修正，找到適合的檔位），所以要先將紅色插銷改插在「10A」的位置，下圖電表電流插銷還分小電流的「 μA 」與大電流的「A mA」，且請用「DEL」選擇「AC/DC」與用「RANGE」選擇顯示範圍「mA/A」。



★ 圖 2-30a



★ 圖 2-30b

延伸思考

1. 前面電壓的量測，我們可以同時使用兩支電壓表同時量測電壓，請問是否可以同時使用兩個電流表量測電流，請同學發揮實驗精神，自己也量測看看。

電流勾表

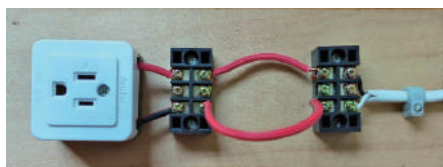
前面交流電流表，必須先將電路切斷，這樣真的很不方便，所以就有電流勾表的發明，電流勾表是利用載流導線產生磁場的原理 $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ ，所以可以用儀器圈住單一導線，由其產生的磁場大小，推測其電流大小，請看以下範例說明。

範例 2-4b

示範使用交流電流勾表量測交流電流。

操作步驟

1. 圖 2-31b 是使用電流勾表量測的結果，我們同時用 2 支，但同學實驗時，用 1 支勾表就可以。請留意電流的大小有不同的檔位，所以轉盤還分「200A」「2A」與「mA」檔位，且留意通常「AC/DC」都共用檔位，還要用「SEL」按鈕選擇「AC/DC」。



✦ 圖 2-31a 準備電路



✦ 圖 2-31b 量測結果

延伸思考

1. 前面範例 2-4a，我們發現不能同時使用兩支電流表量測電流，此一勾表竟然可以，請說明其差異。

功率

功率（英語：power）定義為能量轉換或使用的速率，以單位時間的能量大小來表示，即是作功的率。功率的符號是 P ，功率的國際標準制單位是**瓦特**（W），名稱是得名於十八世紀的蒸汽引擎設計者詹姆斯·瓦特。燈泡在單位時間內，電能轉換為熱能及光能的量就可以用功率表示，瓦特數越高表示單位時間用的能力（或電力）越高。

功率的計算

功率的計算為該電器的端電壓與通過電流的乘積。

$$P = V \cdot I$$

但因為 $V = IR$ 或 $I = V/R$ ，所以功率 P 也可以寫成

$$P = V \cdot I = I^2 \cdot R = V^2 / R$$

額定功率(rated power)

額定功率是指用電器正常工作時的功率，它的值為用電器的額定電壓乘以額定電流。所有的電器都有貼一張貼紙，標示使用電壓、使用頻率與額定功率的標籤，例如圖 2-32 代表此電子鍋使用電壓為 110V，使用頻率為 60Hz，額定功率為 760W，額定功率代表此電器可以接受或輸出的最大的功率，當超過此功率時，導線或發熱元件容易燒毀。由功率 = VI ，可推測此電器工作時流進的電流為 $760/110 = 6.9A$ ，所以以下自我練習，請自己量測其電流。但通常會比較低，因為實際消耗功率當然比額定功率低，因為額定功率代表此電器可以接受的最大的功率。



★ 圖 2-32

自我練習

1. 表 2-8 是家裡常用電器，請由其貼紙一一檢視其額定功率，然後量測電壓、量測電流、計算消耗功率，填入表 2-8。

► 表 2-8 家庭常用電器表

編號	電器名稱	額定功率	端電壓	通過電流	消耗功率	編號	電器名稱	額定功率	端電壓	通過電流	消耗功率
1	電視機					5	檯燈				
2	手機充電器					6	筆電或電腦				
3	電子鍋					7	電風扇				
4	電鍋					8	洗衣機				

2-5 本章內容摘要

1. **電阻色碼**的黑、棕、紅、橙、黃、綠、藍、紫、灰、白，分別代表 0～9。四環電阻前兩環代表數值，第 3 環代表後面加 0 的個數，第四環代表誤差。例如，黃、紫、棕、金代表 $470\Omega \pm 5\%$
2. **五環**電阻的前 3 環代表數值，第 4 環代表後加 0 的個數，第 5 環代表誤差。例如，棕、黑、黑、金、銀代表 $10\Omega \pm 10\%$
3. 三用電表所有的量測前應先確認指針是否在左邊「0」的刻度上，此稱為「**零位調整**」。
4. 三用電表量測電阻前，每變換一個檔位，都要先將測試棒短路，將電阻歸零，此稱為**歸零調整**。
5. 三用電表備有**金屬鏡片**，觀測時，應該讓指針與鏡面指針一致。
6. 電池串聯應該留意極性，極性正確電壓相加，極性錯誤則相減。
7. 三用電表測得的交流電是**有效值**。
8. **電源供應器**可提供任意電壓的直流電，且有**過載保護**。
9. **電子**是一顆顆的質點，其重量為 $9.1 \times 10^{-31}\text{kg}$ ，帶電量是 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ (庫倫)。
10. 使用**直流電流表**必須將原電路切斷，然後將測試棒夾在切斷點兩測。
11. 使用**交流電流勾表**，僅能圈住一條導線，然後讀取量測值。
12. 電器能量轉換或使用的速率稱為**功率** (Power，符號為 P)，單位是 W。
以下三個公式都可以計算功率
$$P = V \cdot I = I^2 \cdot R = V^2 / R$$
13. 電力公司使用 3 條電線送來電力，分別是**火線 1**、**火線 2** 與**中性線**，任一火線與中性線為 110V，可供應家裡所有電器與燈具（冷氣除外）；兩條火線可供應 220V，可供給冷氣機使用。
14. **無熔絲開關**為**過載保護器**，當線路過載時，可跳電保護線路過熱、燒毀與走火。
15. **漏電斷電器**為**漏電保護**裝置，當線路漏電時，可快速跳電，保護使用者。
16. 延長線一定要有**過載保護**，延長線才不會過熱與電線走火。

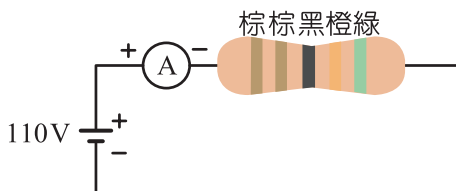
2-6 課後習題

一、選擇題

1. 如圖 (1) 所示電路，五色碼電阻色環依序讀取為「棕棕黑橙綠」，安培計(A)的讀值約為何？

統測 111

- (A) 1A (B) 100mA
(C) 1mA (D) 0.01mA



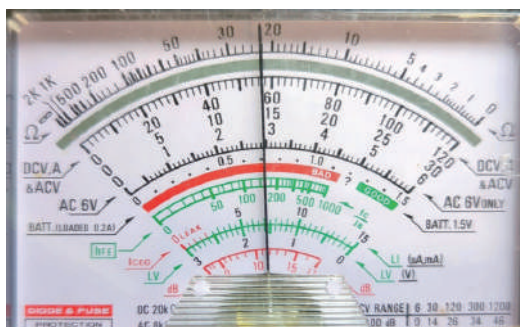
★ 圖 (1)

2. 將一個五環色碼電阻串接直流安培計，再串接於 12.4V 之直流電壓源，安培計讀值為 20mA，此色碼電阻的色環依序（第一環至第五環）可能為何？統測 112
- (A) 藍紅黑棕棕 (B) 藍灰黑金棕 (C) 藍紅黑黑棕 (D) 藍紫黑銀棕
3. 低功率電烙鐵功率範圍：
- (A) 20W~30W (B) 40W~50W (C) 60W~70W (D) 80W~100W
4. 低功率電烙鐵溫度範圍：
- (A) 100°C 至 200°C (B) 250°C 至 400°C
(C) 500°C 至 600°C (D) 700°C 至 800°C
5. 三用電表的測試棒輸入孔，通常量測什麼時，有專用輸入孔：
- (A) 大電阻 (B) 大電流 (C) 大電壓 (D) 小電壓
6. 直流電源供應器可提供：
- (A) 正弦波 (B) 三角波 (C) 直流電壓 (D) 交流電壓
7. 電源供應器輸出短路時，直接停止供電，稱為：
- (A) 定值保護 (B) 折返保護 (C) 截流保護
8. 三號電池的長度比四號電池的長度：
- (A) 長 (B) 短 (C) 一樣
9. 使用三用電表量測家用插座的中性線與地線，其電壓大約多少？
- (A) 110V (B) 220V (C) 0
10. 使用三用電表量測冷氣插座的兩個火線，其電壓大約多少？
- (A) 110V (B) 220V (C) 0

二、填充題

1. 若有四環電阻色碼分別為紅、綠、藍、金，請寫出電阻值=_____，誤差=_____。
2. 若有五碼環阻色碼分別為紫、灰、棕、金、銀，請寫出電阻值=_____，誤差=_____。
3. 請寫出以下圖 (2) 電阻測量值。
4. 請寫出以下圖 (3) 電壓測量值。

使用×100檔位



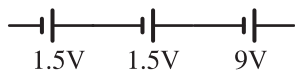
★ 圖 (2)

使用3V檔位

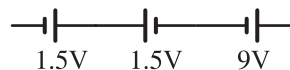


★ 圖 (3)

5. 請將以下數值以乘幂表示。 $2000000 = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $0.0001 = \underline{\hspace{2cm}}$
6. 請完成以下乘幂運算，且以乘幂表示。 $3p \times 4T = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $4M/2u = \underline{\hspace{2cm}}$
7. 有一電阻標示 104，請問其電阻值。_____
8. 電池串聯如圖 (4)，請問其端電壓。
9. 電池串聯如圖 (5)，請問其端電壓。



★ 圖 (4)



★ 圖 (5)

10. 家用插座如圖 (6)，三用電表撥交流電壓檔，且測試棒插入中性線與地線，則電壓理論值=_____V；插入中性線與火線，電壓理論值_____，插入接地線與火線，電壓理論值_____。
11. 冷氣插座如圖 (7)，三用電表撥交流電壓檔，且測試棒插入兩條火線，則電壓理論值=_____V



✦ 圖 (6)



✦ 圖 (7)

12. 請問額定電壓是 110V，額定功率是 770W 的家電，其額定電流是多少？
13. 電力公司的用電 1 度是千瓦・小時，也就是 1 千瓦的家電連續使用 1 小時，其用電稱為 1 度，請問 20W 的燈泡，連續使用 300 小時，其用電度數是多少？

直流電路實作



學習大綱

- 3-1 電阻串並聯電路
- 3-2 惠斯登電橋
- 3-3 重疊定理
- 3-4 戴維寧及諾頓定理
- 3-5 最大功率轉移定理
- 3-6 本章內容摘要
- 3-7 課後習題

學習目標

1. 能計算串並聯電路的電壓、電流與總電阻。
2. 能理解惠斯登電橋原理，與由惠斯登電橋計算未知電阻。
3. 能理解重疊定理原理，並由重疊定理計算負載電流。
4. 能理解戴維寧及諾頓定理，並由解戴維寧及諾頓定理計算負載電流。
5. 能理解最大功率轉移定理，並由最大功率轉移定理設計負載的大小，可得到最大功率轉移。

► 表 3-1 本章零件表

編號	零件名稱	數量	備註
1	1kΩ(1/2W)	10	
2	2kΩ(1/2W)	10	
3	3kΩ(1/2W)	10	
4	10kΩ(1/2W)	3	
5	1k 半可變電阻	5	
6	10k 半可變電阻	5	

前面第 2 章已經介紹電阻、電壓、電流、電源供應器，本章則要進入直流電主題，電阻的串並聯電路、惠斯登電橋、重疊定理、戴維寧及諾頓定理、最大功率轉移等定理。

3-1 電阻串並聯電路

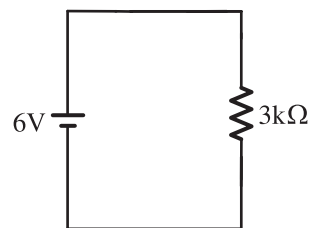
歐姆定律

科學家歐姆經由不斷實驗，發現任一元件可流過的**電流 (I)** 大小與其端**電壓 (V)** 成正比，與其**電阻 (R)** 成反比，以數學式表示如下，我們稱此為歐姆定律 (Ohm's law)。

$$I = \frac{V}{R} \quad (\text{電壓 } V \text{ 單位伏特 (V)，電阻 } R \text{ 單位 } \Omega, \text{ 電流 } I \text{ 單位安培 (A)})$$

範例 3-1a

電路如圖 3-1，請計算與量測電流。



★ 圖 3-1 電路圖

實習目的

1. 驗證歐姆定律。

操作步驟

1. 計算電流理論值。依據歐姆定律 $I = V/R = 6/3k = 2mA$ 。
2. 量測電流。同範例 2-3h，焊接電路，量測電流，寫出此電流_____。
請問此量測值，是否與第 1 點的理論值接近？_____

自我練習

1. 同範例 3-1a，電壓分別調整 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10V，如表 3-2，請計算電流理論值，量測電流實際值，取 x 軸為 V ， y 軸為 I ，繪出 $V-I$ 曲線圖。

► 表 3-2 電流理論驗證

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I理論值										
I測量值										

2. 同範例 3-1a，電壓為 10V，電阻改為 10k 可變電阻，電阻分別調整 1k,2k,3k,4k,5k,6k,7k,8k,9k,10k，如表 3-3，請計算電流理論值，量測電流實際值，取 x 軸為電阻 R ， y 軸為電流 I ，繪出 $R-I$ 曲線圖。

► 表 3-3 電流理論驗證

R	1k	2k	3k	4k	5k	6k	7k	8k	9k	10k
I理論值										
I測量值										

3. 若有一實驗，實驗結果如表 3-4，請繪出其曲線圖，並以數學式推測其關係。

► 表 3-4 實驗數據表

A	10	20	30	40	50	60	70
B	0.11	0.19	0.33	0.4	0.51	0.6	0.69

4. 若有一實驗，實驗結果如表 3-5，請繪出其曲線圖，並以數學式推測其關係。

► 表 3-5 實驗數據表

A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B	60	30	20	15	12	10	8.5	7.5	6.7	6

✚ 克希荷夫電壓定律(Kirchhoff's voltage law)

德國物理學家克希荷夫 (Gustav Robert Kirchhoff, 1824-1887) 研究電路學提出兩個有名的定律，分別為電壓定律及電流定律。首先介紹克希荷夫電壓定律 (Kirchhoff's voltage law, 簡稱 KVL), KVL 用於說明迴路上各元件電壓的關係, KVL 說：在任一封閉迴路中，按一特定方向作完整的“繞行”時，會有下列現象：

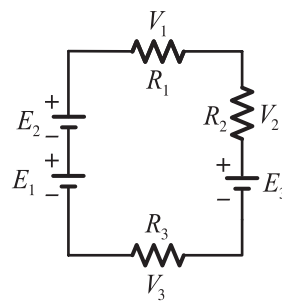
總電壓升 = 總電壓降

封閉迴路繞行時的電源，電源內部由正極出發者，稱為**電壓升**，電源內部由負極出發者稱為**電壓降**，而所有電阻消耗的電壓則是**電壓降**。例如，圖 3-2，我們採用順時針繞行封閉迴路，則：

$$E_1 + E_2 = V_1 + V_2 + E_3 + V_3$$

若採用逆時針繞行，則：

$$E_3 = V_2 + V_1 + E_2 + E_1 + V_3$$



✚ 圖 3-2

✚ 克希荷夫電流定律(Kirchhoff's current law)

對於任意節點，流進的電流和等於流出的電流和。例如，範例 3-1c 圖 (1)，對於 a 節點，電源電流 I_T 是流進 a 節點， I_1 與 I_2 都是流出 a 節點，所以 $I_T = I_1 + I_2$ 。範例 3-1c 將驗證克希荷夫電流定律。

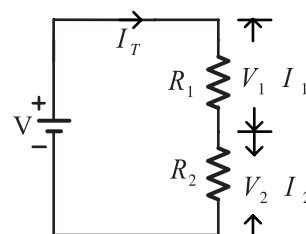
電阻串聯電路

電阻串聯電路 (serial circuit) 如圖 3-3，所有電阻沿單一路徑頭尾相接。串聯電路的特性如下：

- (1) 串聯電路各元件的電壓降之和，等於電流源的電壓升。
- (2) 串聯總電阻等於所有串聯電阻之和： $R_T = R_1 + R_2 + R_3 \cdots + R_N$ 。
- (3) 串聯的所有元件電流都相同。
- (4) 電阻值越大，其端電壓越大，此即為電壓分配定則。

- (5) 元件位置互換，以上所有性質不變。
- (6) 任一元件斷路，則所有元件都沒有電流。
- (7) 電壓分配定則：

由克希荷夫電壓定律，串聯電路的電流都相同，所以各元件所分配的分壓也是與自己的電阻成正比。例如，兩個電阻 R_1, R_2 串聯，接在電源電壓 V ，如圖 3-3 則 R_1 的分壓 V_1 是：



★ 圖 3-3

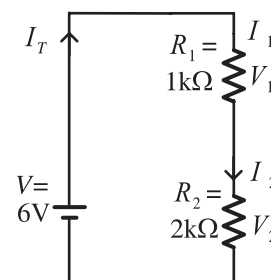
$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V$$

R_2 的分壓 V_2 是：

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

範例 3-1b

電路如圖 3-4，請計算與量測 R_T 、 I_T 、 V_1 、 V_2 。



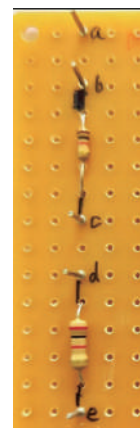
★ 圖 3-4

實習目的

1. 驗證串聯電路總電阻等於所有元件電阻的總和。
2. 驗證串聯電路所有元件的電流都相等，且等於總電流。
3. 驗證克希荷夫電壓定律—封閉迴路的電壓升等於電壓降。

操作步驟

1. 電路板製作如圖 3-5，(a,b)、(c,d) 接線柱下面是斷路，用於量測電流，電路板黑線條表示電路焊接面有銅線連接。



★ 圖 3-5

2. 若使用麵包板，則接線如圖 3-6。電源從點 2 與點 22 輸入，點 2 與點 6 之間，用於量測電流，若無量測電流，則應強制短路。
3. 計算總電阻 R_T 理論值：

(1) 依據克希荷夫電壓定律——任意封閉迴路電壓升等於電壓降 $V = V_1 + V_2$

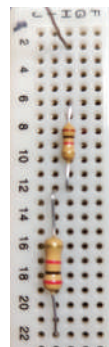
(2) 依據歐姆定律 $I = \frac{V}{R}$

$$I_T R_T = I_1 R_1 + I_2 R_2 \quad (2)$$

(3) 依據克希荷夫電流定律——對於任意節點，流進的電流和等於流出的電流和，所以串聯電路 $I_T = I_1 = I_2$ ，既然電流都相同，所以 (2) 式可以簡化如下：

$$R_T = R_1 + R_2 = 1k + 2k = 3k\Omega$$

4. 測量總電阻_____ (請於 b, e 兩點量測總電阻，且 (c, d) 要用鱷魚夾線短路)，以上測量值是否與理論值相同呢？_____
5. 計算電路總電流 I 理論值， $I = V/R_T =$ _____
6. 電源供應器調 6V，且電源正極接上頁圖 2 的 a 點，負極接 e 點。
7. 量測 $I_1 =$ _____：三用電表測試紅棒夾 a 點，測試黑棒夾 b 點， (c, d) 接線柱要用鱷魚夾線短路。
8. 量測 $I_2 =$ _____：三用電表測試紅棒夾 c 點，測試黑棒夾 d 點， (a, b) 接線柱要用鱷魚夾線短路。
9. 計算 V_1 理論值： $V_1 = I * R_1 =$ _____，量測 V_1 _____。((a, b) 、 (c, d) 接線柱要用鱷魚夾線短路)
10. 計算 V_2 理論值： $V_2 = I * R_2 =$ _____，量測 V_2 _____。((a, b) 、 (c, d) 接線柱要用鱷魚夾線短路)
11. 以上 V_1 、 V_2 量測值相加等於_____，是否等於電源 6V 呢？_____



★ 圖 3-6 麵包板接線圖

自我練習

1. 同範例 3-1b，電源改為 12V，並重新計算 R_T 、 I 、 V_1 、 V_2 與驗證。
2. 同範例 3-1b，但再串聯一個電阻 $R_3 = 3k\Omega$ ，電源改為 12V，並重新計算 R_T 、 I 、 V_1 、 V_2 、 V_3 與驗證。

電阻並聯電路

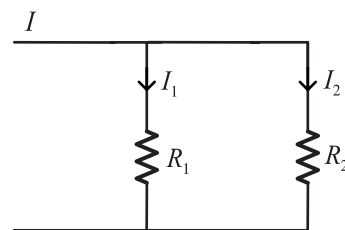
電阻並聯 (parall) 電路如圖 3-7，所有電阻共用輸入點，同時流入電流；共用輸出點，同時流出電流。並聯電路的特性如下：

- (1) 並聯電路各元件的電壓降都相同。
- (2) 並聯總電阻等於所有並聯電阻倒數之和再倒數： $R_T = 1 / (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \cdots + 1/R_N)$ 。
- (3) 並聯的所有元件流入的電流等於流出的電流之和 $I_T = I_1 + I_2 + I_3 \cdots + I_N$ 。
- (4) 電阻值越大，流過的電流越小，此為電流分配定則。
- (5) 任一元件斷路，其它元件都可正常運作，家用電器都是並聯連接，所以任意電器故障，其它電器都是正常運作。
- (6) 並聯電路電流分配定則：

並聯電路因為電壓都相同，而電流與電阻成反比，所以若有電流 I 進入 R_1 與 R_2 並聯的節點，如圖 3-7，則

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

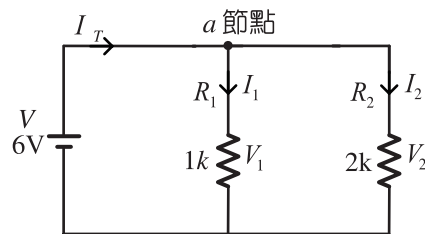


★ 圖 3-7

以上稱為電流分配定則。這些電壓、電流分配定則都要記起來，後面章節計算才能省事。

範例 3-1c

電阻並聯電路如圖 3-8，請計算總電阻 R_T 、總電流 I_T 、各分支電流 I_1 、 I_2 。



★ 圖 3-8 電路圖

實習目的

1. 驗證克希荷夫電流定律—對於任意節點，流進的電流和等於流出的電流和。
2. 驗證串聯電路總電阻的倒數 $1/R_T$ 等於所有元件電阻倒數的總和 $1/R_1 + 1/R_2$ 。
3. 驗證串聯電路所有元件的電壓 V 都等於總電壓 V 。

操作步驟

1. 計算總電阻 R_T 理論值：

(1) 於圖 (1)，對於節點 a ，依據克希荷夫電流定律：

$$I_T = I_1 + I_2$$

(2) 依據歐姆定律：

$$\frac{V}{R_T} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \quad (2)$$

(3) 依據克荷夫電壓定律，所以 $V_1 = V_2 = V$ ，既然電壓都相等所以 (2) 式可以化簡如下：

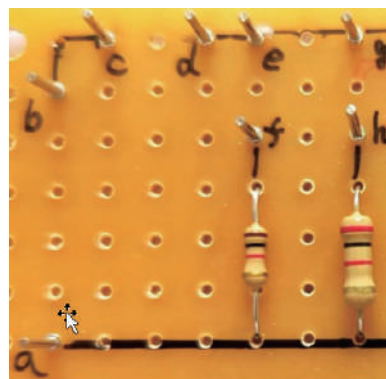
$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{1k} + \frac{1}{2k} = \frac{2}{2k} + \frac{1}{2k} = \frac{3}{2k}$$

$$R_T = \frac{2k}{3} = 0.67k\Omega$$

(4) 以上兩個電阻並聯的計算較耗時，我們通常簡化如下：兩個電阻相乘除以相加的結果。

$$R_T = \frac{1k \times 2k}{(1k + 2k)} = \frac{2k^2}{3k} = 0.67k\Omega$$

2. 電路板製作如圖 3-9， (c,d) 、 (e,f) 、 (g,h) 接線柱下面是斷路，用於量測電流，黑色線條表示電路板焊接面有銅線連接。
3. 測量總電阻_____（請於 d,a 兩點量測總電阻，且 (e,f) 、 (g,h) 要用鱷魚夾線短路），是否與第 1 點理論值相同呢？_____

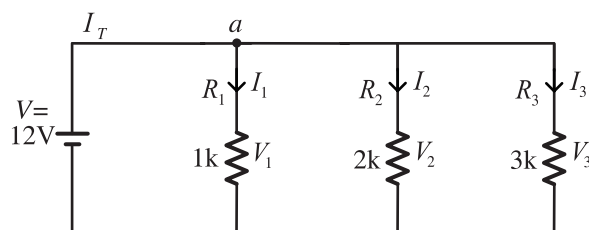


✦ 圖 3-9 焊接電路板

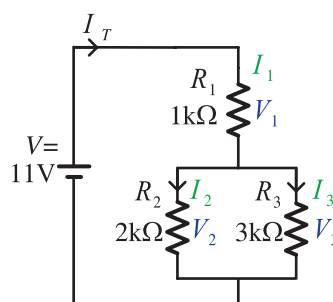
4. 電源供應器調 6V，且電源正極接 b 點，負極接 a 點。
5. 計算電路總電流 I 理論值， $I = V/R_T = \underline{\hspace{2cm}}$
6. 量測 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ ：三用電表測試紅棒夾 c 點，測試黑棒夾 d 點， (e,f) 、 (g,h) 接線柱要用鱷魚夾短路。
7. 量測 $I_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ：三用電表測試紅棒夾 e 點，測試黑棒夾 f 點， (c,d) 、 (g,h) 接線柱要用鱷魚夾短路。
8. 量測 $I_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ：三用電表測試紅棒夾 g 點，測試黑棒夾 h 點， (c,d) 、 (e,f) 接線柱要用鱷魚夾短路。
9. 以上量測值 $I_1 + I_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ，是否與 I 相同呢？ $\underline{\hspace{2cm}}$
10. 計算 V_1 理論值： $V_1 = I_1 * R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ，量測 $V_1 \underline{\hspace{2cm}}$ ((c,d) 、 (e,f) 、 (g,h) 接線柱要用鱷魚夾短路)， V_1 是否等於 V ? $\underline{\hspace{2cm}}$
11. 計算 V_2 理論值： $V_2 = I_2 * R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ，量測 $V_2 \underline{\hspace{2cm}}$ 。 ((c,d) 、 (e,f) 、 (g,h) 接線柱要用鱷魚夾短路)， V_2 是否等於 V ? $\underline{\hspace{2cm}}$

自我練習

1. 同以上範例 3-1c，但是電源改為 12V，並重新計算與驗證。
2. 同以上範例 3-1c，但是新增並聯 $R_3 = 3k\Omega$ ，電源改為 12V，如圖 3-10a，並重新計算與驗證。
3. 假設有電路如圖 3-10b，請計算 R_T 、 I_T 、 I_1 、 I_2 、 V_1 、 V_2 、 V_3 理論值，並焊接此電路、量測以上實際值。



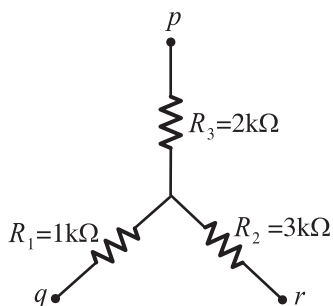
★ 圖 3-10a



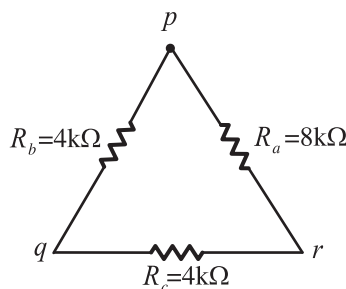
★ 圖 3-10b

Y型(y branch)電路轉△電路(delta branch)

以下圖 3-11a，稱為 **Y 型電路**，圖 3-11b 稱為 **△型電路**。



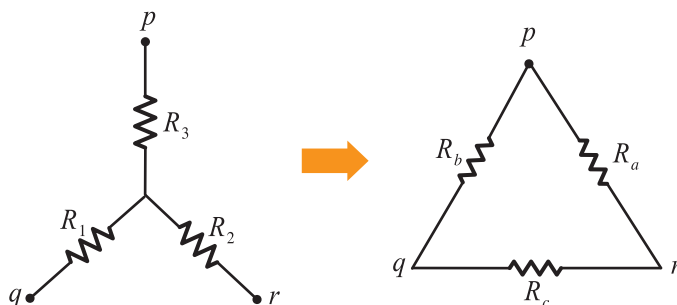
★ 圖 3-11a Y 型電路



★ 圖 3-11b △型電路

經由串並聯計算，我們發現兩個電路的 R_{pq} 、 R_{qr} 、 R_{pr} 都相等，所以我們稱此兩個電路等效，既然等效，表示可以替換，而不影響原電路特性，以上 Y 型轉△型或△型轉 Y 型是一個解電路的技巧，因為有些電路經由此種方式轉換後，會變得比較簡單。

Y 轉△的公式如下：



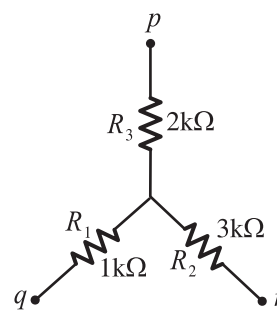
$$R_a = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1} = R_b = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2}, R_c = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3}$$

以上公式可以用電路形狀來幫助記憶，簡單的說，Y 轉△，先有 Y，請留意 Y 下面有一直線，所以分母選對面的電阻，分子是三個電阻兩兩相乘之總和。而且此轉換公式，分子一定是兩個相乘，單位是 Ω^2 ，分母則是一個 Ω ，兩個相除，單位才會是 Ω ，而且分母只有一個電阻，樣式很簡單，分子就會比較複雜。（此公式「分母較簡單」這句話，請看以下△電路轉 Y 型電路，就會明白）

$$R_a = \frac{\text{電阻兩兩相乘之總和}}{R_a \text{對面的電阻}} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1}$$

範例 3-1d

Y 型電路如圖 3-12，請焊接此電路，轉換此電路為 Δ 電路，焊接此 Δ 電路，如圖 3-13b，分別計算與量測 Y 型電路與 Δ 電路中的 R_{pq} 、 R_{qr} 、 R_{rq} 是否相等。



★ 圖 3-12

實習目的

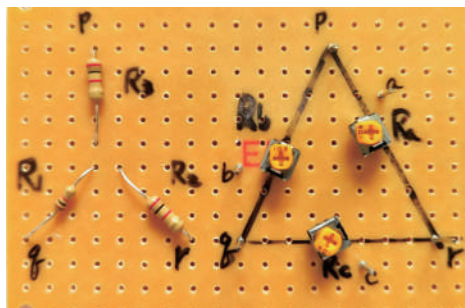
1. 驗證 Y 型電路轉為 Δ 電路的公式。

操作步驟

1. 將 Y 型電路轉為 Δ 電路的公式以 Python 程式完成，求出 R_a 、 R_b 、 R_c 分別為 $8k\Omega$ 、 $4k\Omega$ 、 $4k\Omega$ 。

```
k=1000
R1=1*k
R2=2*k
R3=2*k
RR=R1*R2+R2*R3+R3*R1
Ra=RR/R1
Rb=RR/R2
Rc=RR/R3
print(Ra,Rb,Rc) #8000,4000,4000
```

2. 焊接圖 3-12 的 Y 型電路，如圖 3-13a。
3. 分別以 3 個 $10k$ 半可變電阻焊接圖 3-11b Δ 電路，如圖 3-13b，調整 R_a 、 R_b 、 R_c 分別為 $8k\Omega$ 、 $4k\Omega$ 、 $4k\Omega$ 。
(本例，使用接線柱 a, b, c 接出電



★ 圖 3-13a

★ 圖 3-13b

阻，也就是使用 a, r 兩點調整 R_a ，使用 p, b 兩點調整 R_b ，使用 q, c 兩點調整 R_c ，調整完，請將 (a, p) ， (b, q) ， (c, r) 使用鱷魚夾線短路

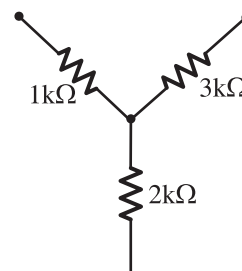
4. 分別計算、量測 Y 型電路與 $\triangle$ 電路兩邊 R_{pq} 、 R_{qr} 、 R_{rp} 的值，填入表 3-6：

► 表 3-6 Y 轉 $\triangle$ 練習

	Y型電路		△型電路		Y型與△型比較
	理論值	測量值	理論值	測量值	是否相符？
R_{pq}	$R_1+R_3=$		$R_b/(R_a+R_c)=$		
R_{qr}	$R_1+R_2=$		$R_c/(R_a+R_b)=$		
R_{rp}	$R_2+R_3=$		$R_a/(R_b+R_c)=$		

自我練習

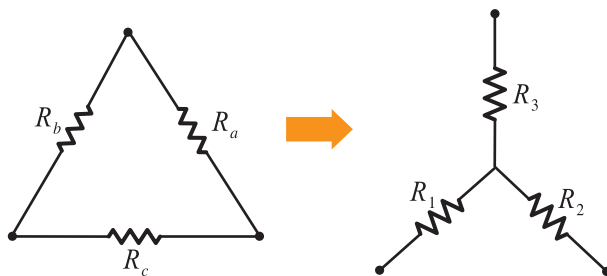
- 假設有 Y 型電路如圖 3-14，請繪出其等效 $\triangle$ 電路，且使用範例 3-1d 的可變電阻調整出此 $\triangle$ 電路。



★ 圖 3-14

$\triangle$ 電路轉 Y 型電路

$\triangle$ 轉 Y 的公式如下：



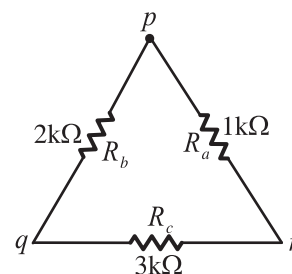
$$R_1 = \frac{R_b R_c}{R_a + R_b + R_c}, \quad R_2 = \frac{R_a R_c}{R_a + R_b + R_c}, \quad R_3 = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b + R_c}$$

以上公式可以用電路形狀來幫助記憶，簡單的說， $\triangle$ 轉 Y，先有 $\triangle$ ，所以分母選三個電阻相加，分子是對應電阻兩旁的電阻乘積。而且分子一定是兩個相乘，單位是 Ω^2 ，分母則是一個 Ω ，那兩個相除，單位才會是 Ω ，而且分母複雜（分母簡單這句話，請對照 Y 轉 $\triangle$ ），分子就簡單，所以選 R_1 旁邊電阻相乘就可以。

$$R_1 = \frac{\text{原本三角型中，相同位置兩邊電阻相乘}}{\text{三個電阻總和}} = \frac{R_a R_c}{R_a + R_b + R_c}$$

範例 3-1e

電路如圖 3-15，請焊接此 $\triangle$ 電路，轉換此電路為 Y 型電路，焊接此 Y 型電路，分別計算與量測 Y 型電路與 $\triangle$ 電路中的 R_{pq} 、 R_{qr} 、 R_{rp} 是否相等。



★ 圖 3-15

實習目的

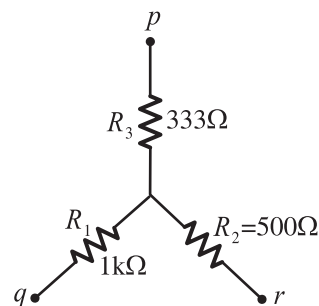
1. 驗證 $\triangle$ 電路轉為 Y 型電路的公式。

操作步驟

1. 焊接此 $\triangle$ 電路。
2. 將 $\triangle$ 電路轉為 Y 型電路的公式以 Python 程式完成，求出 R_1 、 R_2 、 R_3 分別為 $1\text{k}\Omega$ 、 500Ω 、 333Ω 。

```
k=1000
Ra=1*k
Rb=2*k
Rc=3*k
RR=Ra+Rb+Rc
R1=(Rb*Rc)/RR
R2=(Ra*Rc)/RR
R3=(Ra*Rb)/RR
print(R1,R2,R3)#1000 500 333
```

3. 使用三個 1k 半可變電阻，焊接如圖 3-16 的 Y 型電路，並分別將 R_1 、 R_2 、 R_3 調整為 1000Ω 、 500Ω 、 333Ω 。



★ 圖 3-16

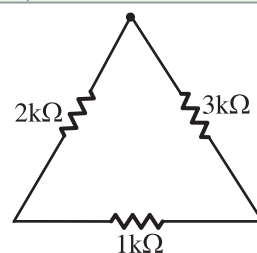
4. 分別計算、量測△電路與 Y 型電路兩邊 R_{pq} 、 R_{qr} 、 R_{rq} 的值，填入表 3-7：

► 表 3-7 △轉 Y 練習

	△型電路		Y型電路		Y型與△型比較
	理論值	測量值	理論值	測量值	是否相符？
R_{pq}	$R_b/(R_a+R_c)=$		$R_1+R_3=$		
R_{qr}					
R_{rq}					

自我練習

1. 假設有△型電路如圖 3-17，請繪出其等效 Y 型電路，且使用範例 3-1e 的可變電阻調整出此電路。



★ 圖 3-17

補充說明

以上 Y 型與△型電路互轉公式的推導如下：

$$1. R_{pq} = R_b/(R_a+R_c) = R_1+R_3 \Rightarrow \frac{R_a R_b + R_b R_c}{R_a + R_b + R_c} = R_1 + R_3 \quad (1)$$

$$2. R_{qr} = R_c/(R_a+R_b) = R_1+R_2 \Rightarrow \frac{R_a R_c + R_b R_c}{R_a + R_b + R_c} = R_1 + R_2 \quad (2)$$

$$3. R_{pr} = R_a/(R_b+R_c) = R_3+R_2 \Rightarrow \frac{R_a R_b + R_a R_c}{R_a + R_b + R_c} = R_3 + R_2 \quad (3)$$

4. 將以上①②③三式，等號兩邊全部相加得到

$$\frac{2(R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a)}{R_a + R_b + R_c} = 2(R_1 + R_2 + R_3) \Rightarrow \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_a + R_b + R_c} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (4)$$

$$5. \text{ 將④ - ③得到 } R_1 = \frac{R_b R_c}{R_a + R_b + R_c} \quad (5) \text{ (此爲△型轉 Y 型公式)}$$

$$6. \text{ 將④ - ①得到 } R_2 = \frac{R_a R_c}{R_a + R_b + R_c} \quad (6) \text{ (此爲△型轉 Y 型公式)}$$

$$7. \text{ 將④ - ②得到 } R_3 = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b + R_c} \quad (7) \text{ (此爲△型轉 Y 型公式)}$$

8. 將⑤⑥⑦兩邊兩兩相乘再相加，也就是⑤⑥ + ⑥⑦ + ⑤⑦得到

$$\begin{aligned}
 R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1 &= \frac{R_c(R_a R_b R_c) + R_a(R_a R_b R_c) + R_b(R_a R_b R_c)}{(R_a + R_b + R_c)^2} \\
 &= \frac{R_a R_b R_c (R_a + R_b + R_c)}{(R_a + R_b + R_c)^2} = \frac{R_a R_b R_c}{R_a + R_b + R_c} \quad (8)
 \end{aligned}$$

9. 將⑧ / ⑤得到 $R_a = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1}$ (此為 Y 型轉△型公式)

10. 將⑧ / ⑥得到 $R_b = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2}$ (此為 Y 型轉△型公式)

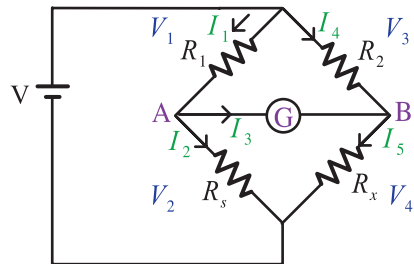
11. 將⑧ / ⑦得到 $R_c = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_3}$ (此為 Y 型轉△型公式)

3-2 惠斯登電橋

惠斯登電橋 (wheatstone bridge) 電路如圖 3-18， R_1 和 R_2 稱為電橋的比例臂， R_s 為調整臂，待測電阻為 R_x ，其功用可用來量測未知電阻 R_x 的值。依據歐姆定律得到：

$$V_2 = I_2 R_s \quad V_4 = I_5 R_x$$

$$V_1 = I_1 R_1 \quad V_3 = I_4 R_2$$



★ 圖 3-18 惠斯登電橋

調整 R_s 的電阻值，使流過檢流計的電流 $I_3 = 0$ ，代表電橋平衡，流過檢流計的電流為零，即電橋 A、B 兩點的電位相同，此時

$$V_A = V_B, \quad I_2 = I_1, \quad I_5 = I_4, \quad V_2 = V_4, \quad V_1 = V_3$$

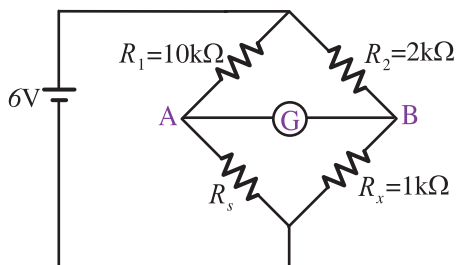
$$\text{由 } V_2 = V_4 \text{ 得到 } I_2 \cdot R_s = I_5 R_x \quad (1)$$

$$\text{由 } V_1 = V_3 \text{ 得到 } I_1 \cdot R_1 = I_4 R_2 \quad (2)$$

$$\text{將以上 (1)/(2) 得到 } \frac{R_s}{R_1} = \frac{R_x}{R_2} \Rightarrow R_x = \frac{R_2}{R_1} R_s$$

範例 3-2a

電路如圖 3-19，假設 R_x 為未知電阻，本例使用 $1\text{k}\Omega$ 電阻， R_s 為 $10\text{k}\Omega$ 精密可變電阻，調整 R_s 電阻值，使得檢流計電流為 0，請量測 R_s 電阻值，並由 R_s 電阻值計算 R_x 電阻值。



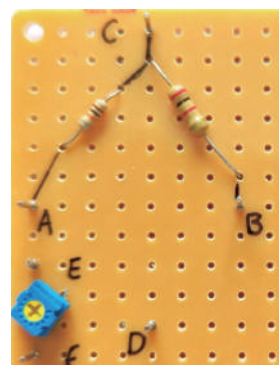
★ 圖 3-19

實習目的

1. 驗證惠斯登電橋。

操作步驟

1. 焊接以上電路，如圖 3-20。本例實驗時（A,E）與（F,D）兩點，請使用鱷魚夾線使其短路（等一下實驗完成，可將短路線移除，才能量測半可變電阻的電阻值）。D,B 兩點，用來夾未知電阻。
2. 三用電表撥「NULL DCV 5」，調整可變電阻 R_s ，使得 A,B 兩點電壓為 0。
3. 三用電表請撥電流檔，量測 A,B 兩點電流=_____。
4. 移除電源，移除（A,E）與（F,D）的短路線，使用三用電表量測 R_s 電阻，即（E,F）兩點的電阻=_____。
5. 此時待測電阻 $R_x = R_2 * R_s / R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ，請問是否與本例 $1k\Omega$ 相近。



★ 圖 3-20

自我練習

1. 同範例 3-2a，請更換未知電阻為 $1.5k\Omega$ ，並重新進行實驗。

3-3 重疊定理

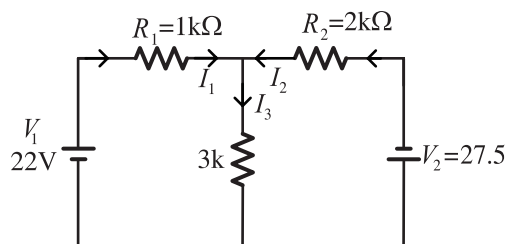
重疊定理

在含有數個獨立電源同時存在的電路中，各元件上的電流或電壓，為各電源單獨作用時，所產生的電流或電壓的代數和，此稱為**重疊定理** (superposition theorem)。大意是說，當電源有很多個時，可以分開一個一個獨立計算，最後再加起來，這樣可以簡化問題。但因為電源有可能是電壓源或電流源，若是被忽略的是電壓源，則將其短路，被忽略的是電流源則將其開路。其解題步驟如下：

1. 考慮第 1 個電源對負載的貢獻，且忽略其它電源，被忽略的若是電壓源，則將其短路，被忽略的若是電流源，則將其開路。
2. 重複步驟 1，直到所有電源都被計算。
3. 加總所有電源對此負載的貢獻，但要考慮電流方向。

範例 3-3a

電路如圖 3-21，請計算 I_3 理論值與量測值。



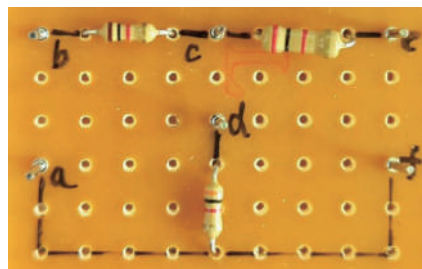
✦ 圖 3-21

實習目的

1. 驗證重疊定理。

操作步驟

1. 電路焊接如圖 3-22。
2. 計算 I_3 理論值。



✦ 圖 3-22

(1) 先計算 V_1 對 I_3 的貢獻：

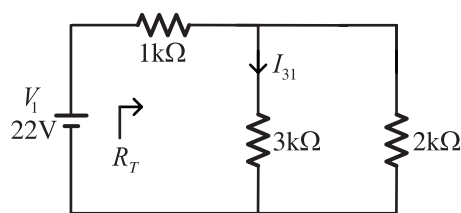
a. 將 V_2 短路，如圖 3-23。

b. 計算總電阻

$$R_T = 1k + (3k // 2k) = 2.2k\Omega。$$

c. 計算總電流 $I_T = \frac{22}{2.2k} = 10mA。$

d. 使用分流定則計算 $I_{31} = 10m \cdot \frac{2}{3+2} = 4mA。$ (向下)



★ 圖 3-23

(2) 計算 V_2 對 I_3 的貢獻：

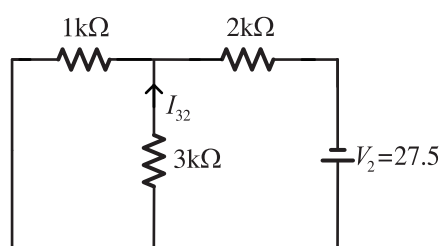
a. 將 V_1 短路，如圖 3-24。

b. 計算總電阻

$$R_T = 2k + (1k // 3k) = 2.75k\Omega。$$

c. 計算總電流 $I = \frac{27.5}{2.75} = 10mA。$

d. 使用分流定則計算 $I_{32} = 10m \cdot \frac{1}{3+1} = 2.5mA。$ (向上)



★ 圖 3-24

(3) 累加以上電源對 I_3 的貢獻：

$$I_3 = I_{31} + I_{32} = 4m \text{ (向下)} + 2.5m \text{ (向上)} = 1.5mA \text{ 向下}$$

3. 僅 V_1 供電 (V_2 不能供電，且要短路)，量測 $I_3 =$ _____。
(請寫出方向)
4. 僅 V_2 供電 (V_1 不能供電，且要短路)，量測 $I_3 =$ _____。
(請寫出方向)
5. 累加以上兩個 $I_3 =$ _____。(請留意以上兩個電流的方向，同向相加，異向相減)
6. V_1 、 V_2 同時供電，量測 $I_3 =$ _____，是否與第 5 點的電流和相同呢？
_____。

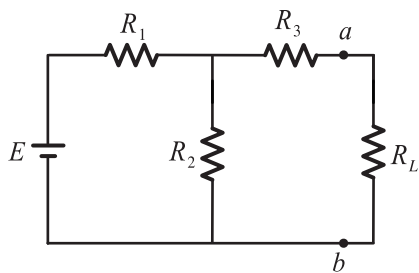
自我練習

1. 電路同範例 3-3a，但是 V_2 反向，也就是正極在上面。
2. 電路同範例 3-3a，但是負載換為 R_1 ，求流經 R_1 的電流。

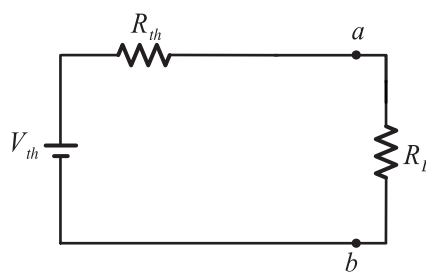
3-4 戴維寧及諾頓定理

戴維寧定理

戴維寧定理 (Thevenin's theorem) 是一個電路簡化技巧，用來求任一複雜的線性網路（如圖 3-25a）中某一負載（如圖 3-25a 中的 R_L ）的電流與電壓，因為抽離此負載後，剩下的電路（圖 3-25a，a,b 兩點左邊）可以化簡為一電壓源 (V_{th}) 與一電阻 (R_{th}) 串聯的等效電路；其中電壓源 V_{th} 稱為此一複雜線性網路的「**戴維寧等效電壓**」，電阻 R_{th} 則稱為「**戴維寧等效電阻**」，如圖 3-25b。**戴維寧定理**的解題步驟如下：



★ 圖 3-25a 任一複雜的線性網路

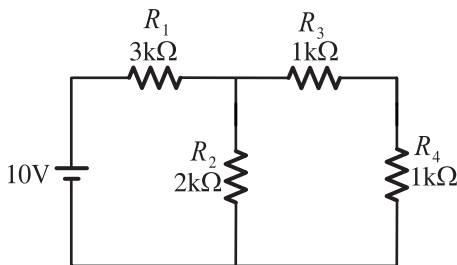


★ 圖 3-25b 任一複雜的線性網路

1. **抽離負載**（要求解電流或電壓的元件稱為負載）
2. **求 V_{th} ：**
抽離負載後，從負載端量測的電壓即為 V_{th} 。
3. **求 R_{th} ：**
 - (1) 若有電壓源，將電壓源短路。
 - (2) 若有電流源，將電流源開路。
 - (3) 從負載端量測的電阻即為 R_{th} 。以下我們以範例實作以上戴維寧定理。

範例 3-4a

電路如圖 3-26，請計算 R_4 電流理論值與量測值。



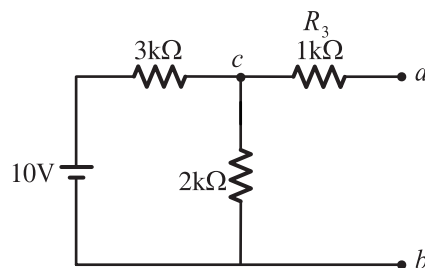
★ 圖 3-26

實習目的

1. 驗證戴維寧定理。

操作步驟

1. 要求 R_4 電流， R_4 就是負載，**抽離負載 R_4** ，並在抽離處標示 a, b 兩點，電路如圖 3-27。



★ 圖 3-27

2. 求 V_{th} ：

如圖 (2)， a, b 兩點的電壓即為 V_{th} ，現在開路了， R_3 沒電流，所以 a, c 兩點等電位，此時 c 點電壓，即為 V_{th}

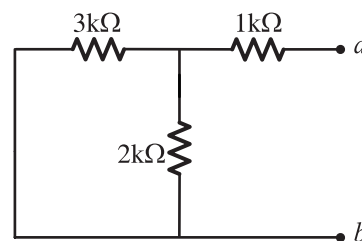
$$V_{th} = (10 / (3k + 2k)) * 2k = 4V$$

3. 求 R_{th} ：

(1) 將電壓源短路，如圖 3-28。

(2) 從負載端 a, b 兩點量測的電阻，即為 R_{th} 。

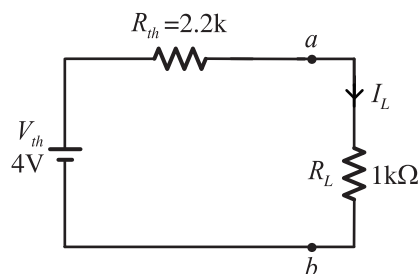
$$R_{th} = (3k // 2k) + 1k = 1.2k + 1k = 2.2k$$



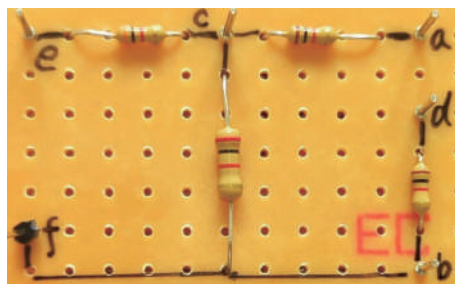
★ 圖 3-28

4. **畫出等效電路**：如圖 3-29，計算 I_L 理論值。

$$I_L = 4 / (2.2k + 1k) = 1.25mA$$



★ 圖 3-29



★ 圖 3-30 電路板照片

6. **量測 R_{th}** ：電壓源短路（請將 e, f 兩點短路），量測 a, b 兩點的電阻值____（表示負載移除），此即為 R_{th} ，請問此值是否與前面第 3 點理論值相同？_____
7. 電源由 e, f 兩點供應 10V。

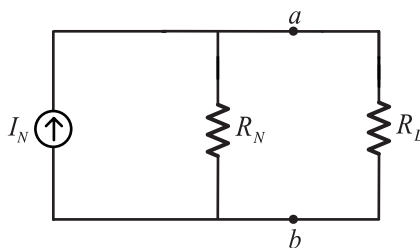
8. 量測 V_{th} ：如圖 3-30，量測 ab 兩點電壓_____，此即為 V_{th} ，請問與前面第 2 點的理論值是否相同？_____也請量測 c, b 兩點電壓，請問 c 點電壓與 a 點是否相同？_____
9. 量測 a, d 兩點的電流_____，此即為負載的電流，請問是否與第 4 點的 I_L 理論值相同？_____。

自我練習

1. 同範例 3-4a，但將負載改為 R_1 ，請先計算流經此電阻的電流，並量測 V_{th} 、 R_{th} 、 I_L 。
2. 同範例 3-4a，但將負載改為 R_2 ，請先計算流經此電阻的電流，並量測 V_{th} 、 R_{th} 、 I_L 。

諾頓定理

諾頓定理 (Norton's theorem) 也是一個類似戴維寧定理的電路簡化技巧，用來求任一複雜的線性網路（如圖 3-25a）中某一負載（如圖 3-25a 中的 R_L ）的電流與電壓，因為抽離此負載後，剩下的電路（如圖 3-25a a,b 點左邊）



★ 圖 3-31 諾頓等效電路

可以化簡為一電流源 (I_N) 與一電阻 (R_N) 並聯的等效電路，如圖 3-31；其中電流源 I_N 稱為此一複雜線性網路的「**諾頓等效電流**」，電阻 R_N 則與 R_{th} 計算方式相同，但改稱為「**諾頓等效電阻**」，如圖 3-31。

諾頓定理的解題步驟如下：

1. **抽離負載**（要求解電流或電壓的元件稱為負載）。
2. **求 I_N** ：
將負載短路，流經此短路線的電流即為 I_N 。
3. **求 R_N** ：求法同戴維寧定理的 R_{th} ，但在此稱為 R_N 。
 - (1) 若有電壓源，將電壓源短路。
 - (2) 若有電流源，將電流源開路。
 - (3) 從負載端量測的電阻即為 R_N 。以下我們以範例實作以上諾頓定理。

範例 3-4b

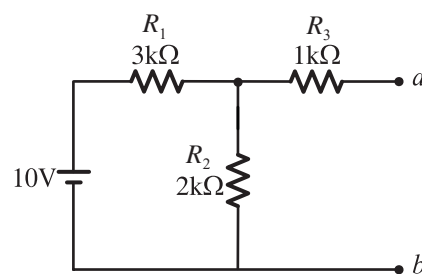
電路同範例 3-4a，但請以諾頓定理求解 R_4 電流 I_L 。

實習目的

1. 驗證諾頓定理。

操作步驟

1. 要求 R_4 電流， R_4 就是負載，抽離此負載，並標示 a, b 兩點，電路如圖 3-32。



★ 圖 3-32

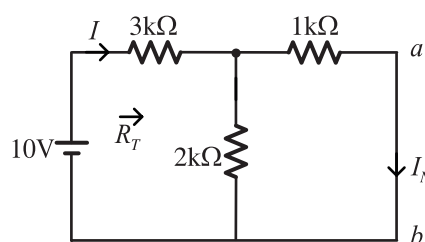
2. 求 I_N ：

如圖 3-33， a, b 兩點的短路線電流即為 I_N 。

$$R_T = 3k + (1k // 2k) = 3.7k\Omega$$

$$I = \frac{10}{3.7k} = 2.7mA$$

$$I_N = \frac{2}{2+1} \cdot I = \frac{2}{3} \cdot 2.7m = 1.8m \quad (\text{分流定則，電流與電阻成反比})$$



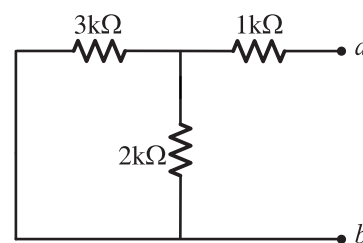
★ 圖 3-33

3. 求 R_N ：（此與戴維寧定理相同）

(1) 將電壓源短路，如圖 3-34。

(2) 從負載端 a, b 兩點量測的電阻，即為 R_N 。

$$R_N = (3k // 2k) + 1k = 1.2k + 1k = 2.2k$$

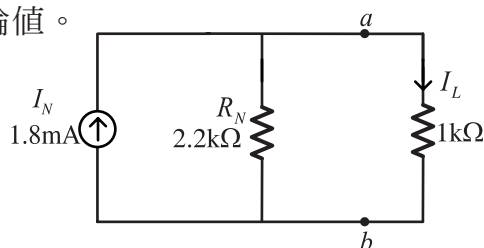


★ 圖 3-34

4. 畫出等效電路：如圖 3-35，計算 I_L 理論值。

$$I_L = 1.8m \cdot 2.2k / (2.2k + 1k) = 1.23mA$$

（分流定則，電流與電阻成反比）



★ 圖 3-35

5. 焊接電路如範例 3-4a 圖 3-30。
6. 量測 R_{th} ：電壓源短路（請將 e,f 兩點短路），量測 a,b 兩點的電阻值_____，此即為 R_{th} ，請問此值是否與前面第 3 點相同。
7. 電源由 e,f 兩點供應 10V。
8. 量測 I_N ：如範例 3-4a 圖 3-30，量測 ab 兩點電流_____，此即為 I_N 。
9. 量測 a,d 兩點的電流_____，此即為負載的電流，請問是否與第 4 點的 I_L 理論值相同。

自我練習

1. 同範例 3-4b，但將負載改為 R_1 ，請先計算流經此電阻的電流，並計算與量測 I_N 、 R_N 、 I_L 。
2. 同範例 3-4b，但將負載改為 R_2 ，請先計算流經此電阻的電流，並計算與量測 I_N 、 R_N 、 I_L 。

3-5 最大功率轉移定理

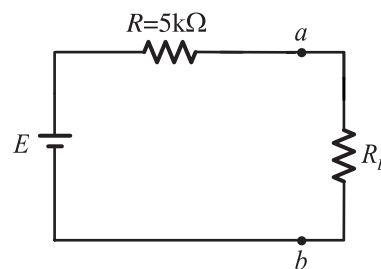
功率

電路元件作功的效率稱為功率，符號是 P ，單位是 W ，讀音瓦特或瓦。一個元件電阻 R ，端電壓 V ，通過的電流為 I ，則其功率 P

$$\begin{aligned} P &= VI \quad (V \text{ 的單位是 } V, I \text{ 的單位是 } A, P \text{ 的單位是 } W, \text{ 讀音瓦特或瓦}) \\ &= I^2 R \quad (\text{因為上式 } V = I * R, \text{ 所以功率還可寫成 } I^2 R) \\ &= V^2 / R \quad (\text{因為第 1 式 } I = V / R, \text{ 所以功率還可寫成 } V^2 / R) \end{aligned}$$

最大功率轉移

圖 3-36 的電路是電學中常見的電路，因為若是實際電壓源， R 就是電壓源內組，於複雜電路中，此複雜電路必可用戴維寧定理化簡，得到一個戴維寧電壓與戴維寧電阻，此 R 就是戴維寧電阻，本節要探討 R_L 電阻值如何設計？可以得到最大功率，此稱為**最大功率轉移定理** (maximum power transfer theorem)。也就是我們要探討，我們負載的電阻值要取多少？負載功率才能最大。也就是電源的功率要盡量給負載 R_L ，而不要讓功率浪費在無關緊要的電阻 R 。由圖 3-5a 可知流過負載 R_L 的電流 $I = E / (R + R_L)$ ，所以負載的功率是



★ 圖 3-36

$$P_L = I^2 R_L = \left(\frac{E}{R + R_L} \right)^2 R_L \quad (1)$$

現在我們假設 $E = 10V$ ， $R = 5\Omega$ ，我們 R_L 分別取 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 代入公式 (1)，將可得到 10 個功率，且以負載電阻 R_L 為 x 軸，負載功率 P_L 為 y 軸，在二維座標系統畫出以上 (R_L, P_L) 的點，以上工作的 Python 程式如下：

```
import matplotlib.pyplot as plt #載入繪圖 matplotlib.pyplot
                                模組，才能繪圖
import numpy as np #載入numpy 模組，繪圖用數值模組
E=10
R=5
```

```

RL = np.arange(1, 10+1, 1) #產生 1到10數列
print(RL) # 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 代入
# RL 分別以 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 代入PL
# 逐一計算每一個RL的PL值
PL=(E/(R+RL))**2*RL
#分別輸出每一個RL的P值
for i in range(0,10):
    print(RL[i],end=" , ")
    print(PL[i])
plt.plot(RL,PL) #繪出每一個RL所對應PL值
plt.axhline(RL=0) #繪出x軸
plt.axvline(PL=0) #繪出y軸
plt.show() #於螢幕輸出圖形

```

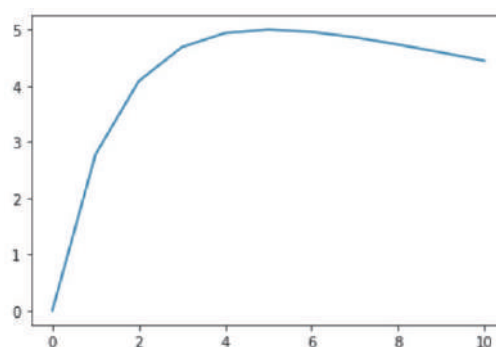
以上程式每一個 R_L 與 P_L 的大小如圖 3-37a，圖形輸出如 3-37b。

```

[ 1  2  3  4  5  6  7  8  9 10]
1 , 2.777777777777778
2 , 4.081632653061225
3 , 4.6875
4 , 4.938271604938272
5 , 5.0
6 , 4.958677685950413
7 , 4.861111111111112
8 , 4.733727810650888
9 , 4.591836734693878
10 , 4.444444444444445

```

✦ 圖 3-37a



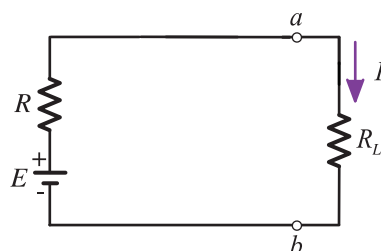
✦ 圖 3-37b

由上圖可知，當 $R_L = R$ 時（實際電壓源就是負載等於電壓源內阻，複雜電路就是負載等於戴維寧電阻時），負載的功率可得到最大值，即：

1. 對於實際電壓源（如圖 3-38 所示）

而言，當負載電阻等於電源裝置的內電阻時，負載自電源獲得的功率最大，即當 $R_L = R$ 時， R_L 可獲得最大功率為：

$$P_{L\max} = \left(\frac{E}{R + R_L}\right)^2 R_L = \frac{E^2}{4R} = \frac{E^2}{4R_L}$$

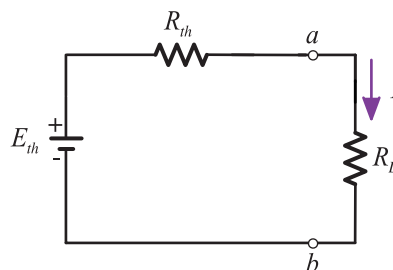


✦ 圖 3-38 實際電壓源的最大功率轉換

2. **對於複雜的網路**——所有複雜網路都可簡化戴維寧等效電路（如圖 3-39 所示）而言，當負載電阻等於網路的戴維寧等效電阻時，負載自網路獲得的功率最大，即當 $R_L = R_{th}$ 時， R_L 可獲得最大功率為：

$$P_{L\max} = \left(\frac{E_{th}}{R_{Th} + R_L} \right)^2 R_L = \frac{E_{Th}^2}{4R_{Th}} = \frac{E_{Th}^2}{4R_L}$$

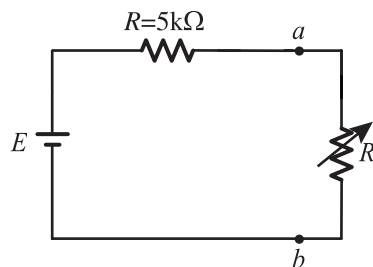
以上即為最大功率轉移定理。



★ 圖 3-39 複雜網路的最大功率轉換

範例 3-5a

電路如圖 3-40，請調整可變電阻 $10\text{k}\Omega$ ，使得負載分別是 $1\text{k}\Omega, 2\text{k}\Omega, 3\text{k}\Omega, 4\text{k}\Omega, 5\text{k}\Omega, 6\text{k}\Omega, 7\text{k}\Omega, 8\text{k}\Omega, 9\text{k}\Omega, 10\text{k}\Omega$ 時，量測負載電流，計算負載功率 P ，在二維座標點出 (R_L, P_L) 位置，求出負載是多少時，此負載可得到最大功率，此功率為何？



★ 圖 3-40

實習目的

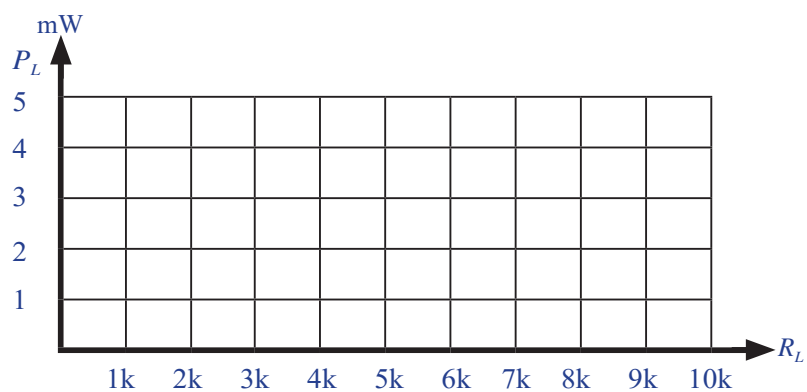
1. 驗證最大功率轉移定理。

操作步驟

1. 負載分別是 $1\text{k}\Omega, 2\text{k}\Omega, 3\text{k}\Omega, 4\text{k}\Omega, 5\text{k}\Omega, 6\text{k}\Omega, 7\text{k}\Omega, 8\text{k}\Omega, 9\text{k}\Omega, 10\text{k}\Omega$ 時，計算負載電流 $I = V/(R + R_L)$ ，計算負載功率 $P_L = I^2 * R_L$ ，填入表 3-8。
2. 焊接此電路。
3. 調整可變電阻使得負載分別是 $1\text{k}\Omega, 2\text{k}\Omega, 3\text{k}\Omega, 4\text{k}\Omega, 5\text{k}\Omega, 6\text{k}\Omega, 7\text{k}\Omega, 8\text{k}\Omega, 9\text{k}\Omega, 10\text{k}\Omega$ 時，量測負載電流，計算負載功率 P_L ，填入表 3-8。（每次調整電阻時，請先將電源供應線移除）
4. 將 R_L 當作 x 軸， P_L 當作 y 軸，請在圖 3-41 二維座標系統畫出 (R_L, P_L) 的位置（ x 軸是 R_L ， y 軸是 P_L ）。
5. 觀察 R_L 等於何值_____，功率可得到最大值，此最大值為何？

► 表 3-8 最大功率轉移定理

R_L	I (理論值)	$P = I^2 R$	I (測量值)	$P = I^2 R$
1 k Ω				
2 k Ω				
3 k Ω				
4 k Ω				
5 k Ω				
6 k Ω				
7 k Ω				
8 k Ω				
9 k Ω				
10 k Ω				



★ 圖 3-41 最大功率轉移定理

3-6 本章內容摘要

1. 歐姆定律：

$$I = \frac{V}{R} \quad (V \text{ 單位 V, } R \text{ 單位 } \Omega, I \text{ 單位 A})$$

2. 串聯電路特性：

- (1) 串聯電路各元件的電壓降之和，等於電壓源的電壓升。
- (2) 串聯總電阻等於所有串聯電阻之和 $R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_N$ 。
- (3) 串聯的所有元件電流都相同。
- (4) 電阻值越大，其端電壓越大，此即為電壓分配定則。
- (5) 元件位置互換，以上所有性質不變。
- (6) 任一元件斷路，則所有元件都沒有電流。

3. 並聯電路特性：

- (1) 並聯電路各元件的電壓降都相同。
- (2) 並聯總電阻的倒數等於所有並聯電阻倒數之和 $R_T = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \cdots + 1/R_N)$ 。
- (3) 並聯的所有元件流入的電流等於流出的電流之和 $I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_4$ 。
- (4) 電阻值越大，流過的電流越小，此為電流分配定則。
- (5) 任一元件斷路，其它元件都可正常運作，家用電器都是並聯連接，所以任意電器故障，其它電器都是正常運作。

4. 惠斯登電橋

電路如圖 3-2a，其功用可用來測量未知電阻 R_x 的值，在圖 3-2a 中， R_1 和 R_2 稱為電橋的比例臂， R_s 為調整臂，待測電阻為 R_x 。

5. 重疊定理：

在含有數個獨立電源同時存在的線性電路中，各元件上的電流或電壓，為各電源單獨作用時，所產生的電流或電壓的代數和，此稱為重疊定理。

6. 戴維寧定理：

戴維寧定理是一個電路簡化技巧，任一複雜的線性網路（如圖 3-25a）中某一負載（如圖 3-25a 中的 R_L ）的電流與電壓，都可以化簡為一戴維寧等效電壓源（ V_{th} ）與一戴維寧等效電阻（ R_{th} ）串聯的等效電路，如圖 3-25b。戴維寧定理的解題步驟如下：

- (1) 抽離負載。
 - (2) 求 V_{th} ：抽離負載後，從負載端量測的電壓即為 V_{th} 。
 - (3) 求 R_{th} ：
 - a. 若有電壓源，將電壓源短路。
 - b. 若有電流源，將電流源開路。
 - c. 從負載端量測的電阻即為 R_{th} 。
 - (4) 畫出戴維寧等效電路。
 - (5) 求負載電流。
7. 諾頓定理：
- 諾頓定理也是一個類似戴維寧定理的電路簡化技巧，用來求任一複雜的線性網路（如圖 3-4a）中某一負載（如圖 3-4a 中的 R_L ）的電流與電壓，因為抽離此元件後，剩下的電路（如圖 3-4a a,b 兩點左邊）可以化簡為一電流源（ I_N ）與一電阻（ R_N ）並聯的等效電路，如圖 3-4c；其中電流源 I_N 稱為此一複雜線性網路的「諾頓等效電流」，電阻 R_N 則與 R_{th} 計算方式相同，但改稱為「諾頓等效電阻」，如圖 3-4c。諾頓定理理解題步驟如下：
- (1) 抽離此負載。
 - (2) 求 I_N ：

將負載短路的電流即為 I_N 。
 - (3) 求 R_N ：（此步驟與 R_{th} 相同）。
 - (4) 畫出諾頓等效電路。
 - (5) 求負載電流。
8. 定律 (law)：在自然界中，通過大量具體的實驗與驗證，所累積歸納而成的結論。例如，牛頓萬有引力定律、克希荷夫電壓定律、克希荷夫電流定律。
9. 定理 (theorem)：物理、電學、數學上的公式或規則，已證明為真實，稱為「定理」，例如，畢氏定理、戴維寧、諾頓定理。定理比定律適用範圍較窄，通常先要有一些前提，例如，畢氏定理的條件是要有一個直角。戴維寧、諾頓定理也是，僅適用特定的電路，不像克希荷夫電壓、電流定律，是所有電路都適用。

10. **定則 (rule)**：定則是一種特定的方法用於解決或計算問題的數學方法，有時也稱作**法則**，例如，依據克希荷夫電壓定律可以導出電壓分配分配定則，依據克希荷夫電流定律，可導出電流分配定則，將此公式與定則記起來，可以減少計算時間。
11. **公式 (formula)**：公式是由定律、定理或定則整理出來的數學式，這樣以後遇到類似的問題，直接計算比較快。例如，串聯電路總電阻為所有電阻的和；並聯電路總電阻為所有電阻倒數和相加再倒數。
12. **性質 (property) 與特性 (attribute)**：性質與特性通常用來描述某一定律的現象。例如，依據克希荷夫電壓定律，可以得到以下串聯電路性質：
 - (1) 串聯電路的所有元件的電流一定相同。
 - (2) 任一元件燒毀，電流就中斷。
 - (3) 任意元件都可互換位置，不影響總電流。

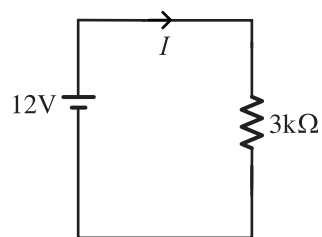
3-7 課後習題

一、選擇題

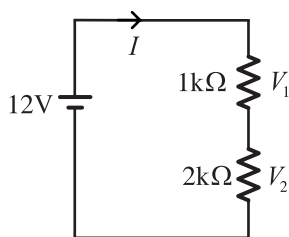
1. 於新買三號電池，量測其端電壓為 1.7V，現外接 1Ω 電阻，然後量測其電流，請問電流會不會 1.7A？
(A) 會 (B) 不會
2. 小明要將 10Ω 電阻接在 10V 的電源，進行電流實驗，則此電阻的額定功率至少要多少，才不會燒毀？
(A) 1W (B) 1/2W (C) 12W (D) 100W
3. 小明要將 10Ω 電阻接在 10V 的電源，進行電流實驗，則電源供應器的電流旋鈕應該至少調為多少？
(A) 0.1A (B) 10mA (C) 1.2A (D) 2A
4. 10W/110 燈泡與 30W/110 燈泡串聯，外接 110 電源，請問何者較亮？
(A) 10W (B) 30W (C) 一樣亮
5. 10W/110 燈泡與 30W/110 燈泡串聯，外接 220 電源，請問結果如何？
(A) 沒事 (B) 10W 先燒掉 (C) 30W 先燒掉
6. 請問 $1k\Omega$ 與 $2k\Omega$ 電阻串聯，外接 10V 電源，哪一電阻的分壓較大？
(A) $1k\Omega$ (B) $2k\Omega$ (C) 一樣大
7. 請問 $1k\Omega$ 與 $2k\Omega$ 電阻並聯，外接 10V 電源，哪一電阻的電流較大？
(A) $1k\Omega$ (B) $2k\Omega$ (C) 一樣大
8. 假設某一電路有兩個電壓源，現進行重疊定理實驗，被忽略的電壓源應該：
(A) 短路 (B) 斷路 (C) 不變
9. 某一電路要量測其戴維寧等效電阻，遇到電壓源時，應該：
(A) 短路 (B) 斷路 (C) 不變
10. 某一電路要量測其諾頓等效電流，應將負載：
(A) 短路 (B) 斷路 (C) 不變

二、填充題

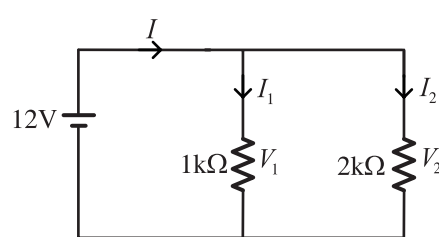
1. 電路如圖 (1)，試求電流 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
2. 電路如圖 (2)，試求電流 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
3. 電路如圖 (3)，試求電流 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $I_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $I_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ 。



✦ 圖 (1)

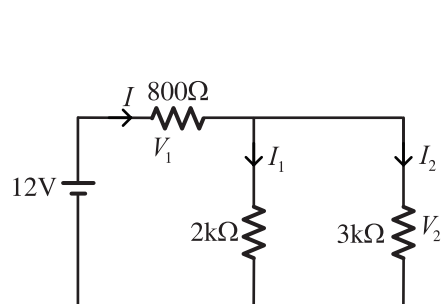


✦ 圖 (2)

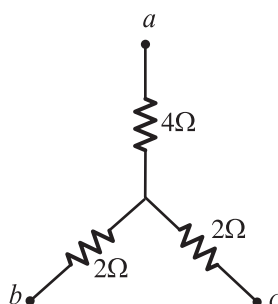


✦ 圖 (3)

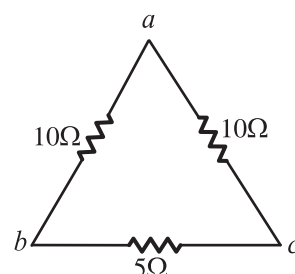
4. 電路如圖 (4)，試求電流 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $I_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $I_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
5. 電路如圖 (5)，求 $R_{ab} = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $R_{ac} = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $R_{bc} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
6. 電路如圖 (6)，求 $R_{ab} = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $R_{ac} = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $R_{bc} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。請問圖 (5) 與圖 (6) 的電路是否等效？



✦ 圖 (4)

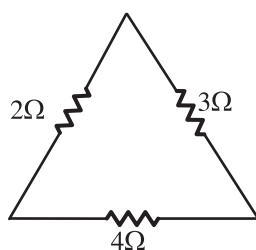


✦ 圖 (5)

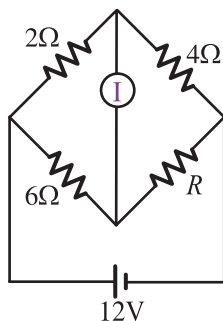


✦ 圖 (6)

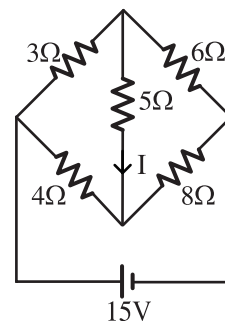
7. 電路如圖 (7)，請求其 Y 型等效電路。_____。
8. 電路如圖 (8)，若檢流計電流為 0，試求 $R = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
9. 電路如圖 (9)，求電流 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 。



✦ 圖 (7)



✦ 圖 (8)

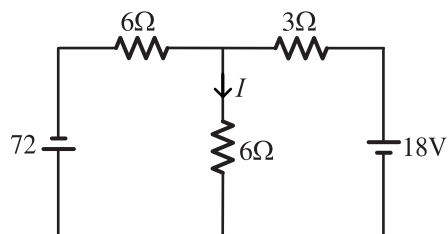


✦ 圖 (9)

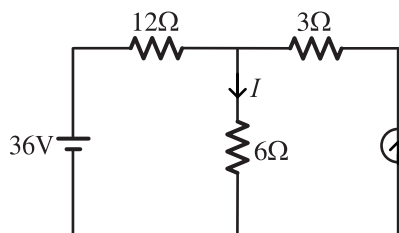
10. 電路如圖 (10)，求電流 $I =$ _____。

11. 電路如圖 (11)，求電流 $I =$ _____。

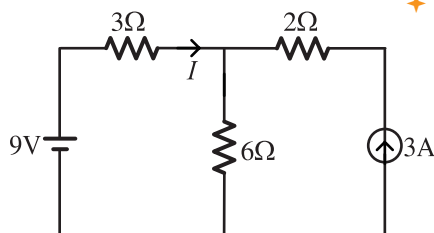
12. 電路如圖 (12)，求電流 $I =$ _____。



★ 圖 (10)

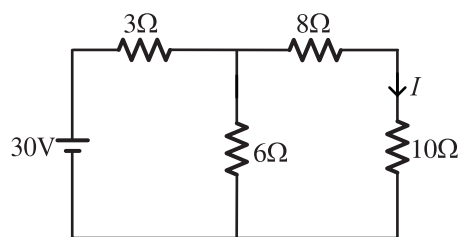


★ 圖 (11)



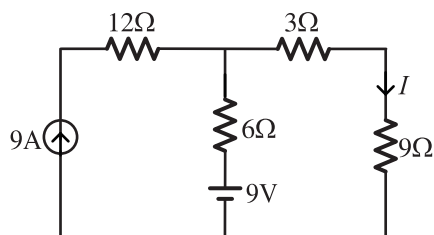
★ 圖 (12)

13. 電路如圖 (13)，請以戴維寧定理求 10Ω 電阻的電流， $V_{th} =$ _____, $R_{th} =$ _____, 畫出戴維寧等效電路，求出 10Ω 電阻的電流 = _____。

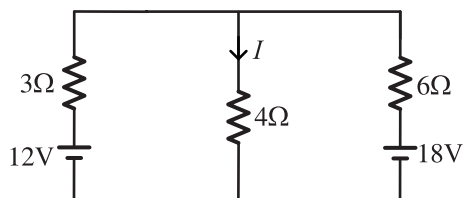


★ 圖 (13)

14. 電路如圖 (14)，請以戴維寧定理求 9Ω 電阻的電流， $V_{th} =$ _____, $R_{th} =$ _____, 畫出戴維寧等效電路，求出 10Ω 電阻的電流 = _____。(本例 V_{th} 還要使用重疊定理)

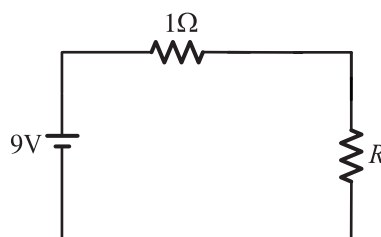


★ 圖 (14)



★ 圖 (15)

16. 電路如圖 (16)，求 R 為多少，可得最大功率 _____，最大功率是多少 _____。



★ 圖 (16)



電子儀表之使用

學習大綱

- 4-1 電感電容電阻表之使用
- 4-2 電容器、電感器之識別及量測
- 4-3 示波器、信號產生器之使用
- 4-4 交流電壓與電流的量測
- 4-5 量測誤差實作
- 4-6 本章內容摘要
- 4-7 課後習題

學習目標

- 1. 能使用 RLC 表量測電阻、電感、與電容
- 2. 能識別電感、電容的值
- 3. 能使用三角函數的運算
- 4. 能量測台電電力波形
- 5. 能使用示波器與信號產生器。
- 6. 能使用示波器觀測交流電波形
- 7. 能實作量測誤差

► 表 4-1 本章零件表

編號	零件名稱	數量	備註
1	1k Ω (1/2W)	2	
2	1 Ω (1/2W)	2	
3	電線		纏繞電感用
4	鐵盤		量測電容用
3	電感	若干	LCR 表量測用
4	電容	若干	LCR 表量測用

前面已經介紹電阻、電流、電壓及直流電路的電路分析，本章則要導入電感、電容，且逐漸導入交流信號、並介紹示波器、信號產生器、及交流電壓與電流的量測。

4-1 電感電容電阻表之使用

電感電容電阻表稱為 LCR 表，顧名思義是用來測量**電感** (L)、**電容** (C) 和**電阻** (R) 等被動電子元件的儀器，如圖 4-1a。傳統的 LCR 表，檔位很多，使用者要依照量測來源選擇電感、電容、或電阻，還要依照元件的大小選擇檔位，現代的 LCR 表，大多單鍵處理，例如圖 4-1a 的 LCR 表，只要先將電感、電容、或電阻夾好，然後連續使用「L/C/R/DCR」按鍵，LCR 表就會顯示該元件的電感、電容、電阻、電感直流電阻，圖 4-1a 是電感量測，圖 4-1b 是電容量測，圖 4-1c 是電阻量測。



★ 圖 4-1a 電感量測



★ 圖 4-1b 電容量測



★ 圖 4-1c 電阻量測

4-2 電容器、電感器之識別及量測

電容器(capacitor)

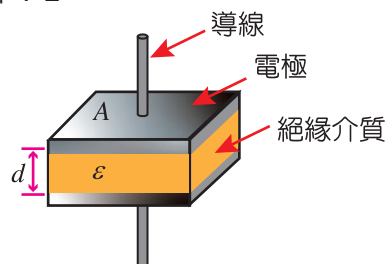
將兩片導電板（金、銀、銅導電金屬板都可以）平行放置如圖 4-2，都可儲存電荷，都可當作電容器，其電容量與板面積成正比，與兩板距離成反比，如以下公式：

$$C(\text{電容量}) = \varepsilon(\text{介電係數}) \times \frac{A(\text{截面積})}{d(\text{距離})} (\text{法拉, F})$$

A：極板面積，單位為 m^2 （平方公尺），如圖 4-2。

d：極板間距離，單位為 m（公尺）。

ε ：絕緣介質的介電係數（dielectric constant），為一希臘字母，讀作 epsilon，單位為 F/m（法拉 / 公尺），絕緣介質可為空氣、蠟紙、絕緣油等。



★ 圖 4-2 電容器示意圖

範例 4-2a

驗證量平行電板就是容器，與電容量公式。

操作步驟

1. 請將家裡端菜鐵盤子拿出來實驗，如圖 4-3。



★ 圖 4-3 電容實驗器材

2. 請將兩個小鐵板平行放置，量測其電容量=_____。
3. 量測大鐵盤電容量=_____，是否面積較大鐵盤的電容量較大_____。
4. 將盤子距離拉大，量測其電容量=_____。
5. 使用陶瓷盤子，量測其電容量=_____。

電容的標示

1. 直接標示法 — 將電容器的主要參數（容量、額定電壓）直接標示在電容器上，例如，如圖 4-4 是 $1000\mu\text{F}/50\text{V}$ ，其中 $1000\mu\text{F}$ 是電容量， 50V 是耐壓。



★ 圖 4-4 直接標示法

2. 文字符號法 — 採用數字與字母混合的方法來標注電容器的主要參數。一般是用 3 個阿拉伯數字標示電容器的容量。其中前兩位是十位數與個位數，第三位為乘冪（10 的幾次方，即表示有效值後有多少個 0），基本單位為 pF (pico Farad)。例如圖 4-5，分別是 105、104、103、102，其電容量分別是 $1000000\text{pF} = 1\mu\text{F}$ 、 $0.1\mu\text{F}$ 、 $0.01\mu\text{F}$ 、 $0.001\mu\text{F}$ ，K 則代表誤差，誤差的符號如表 4-2。



★ 圖 4-5 文字標示法

► 表 4-2 電容量誤差符號表

誤差標注	C	D	F	G	J	K	M
%	± 0.25	± 0.5	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20

自我練習

1. 有一平行電板，介電係數是 $2 \times 10^{-12}\text{F/m}$ ，板面積是 20m^2 ，兩板距離是 $1 \times 10^{-4}\text{m}$ ，請問電容量=_____，若將板面積變為 3 倍，電容量=_____，若板面積不變，距離縮短為一半，電容量=_____。
2. 有一電容標示 224F，請問其電容量=_____，誤差=_____。

範例 4-2b

電容儲存電荷實習。

實驗目的

1. 驗證電容可儲存電荷。
2. 驗證電容儲存電量 $Q = CV$ ，儲存電量 Q 的多寡與外接電壓、電容量成正比。

操作步驟

1. 將耐壓 50V、電容量 10 μF 電容使用 6V 電壓充電，將電源移開，然後使用三用電表量測電容器電壓，寫出電壓值_____，取 1 個 12V 鎢絲燈泡，接在電容器兩端，觀察燈泡亮度。本範例使用燈泡亮度衡量電量 Q ，請留意燈泡亮度。
2. 同步驟 1，但外加電壓改為 12V。請問燈泡亮度是否提升。
3. 同步驟 1，但電容器改為 100 μF ，外加電壓為 12V。請問燈泡亮度是否再提升。

電容並聯特性

電容並聯電路如圖 4-6，以下介紹電容並聯電路特性：

1. 並聯的所有電容器的端電壓都相同：

$$V_1 = V_2 = V_T$$

2. 並聯的總電量為所有電容電量之和：

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

- ① 由 KCL：

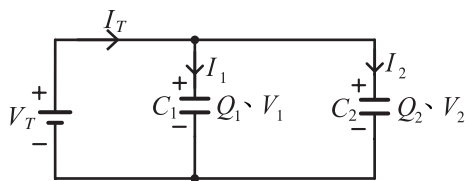
$$I_T = I_1 + I_2$$

- ② 將①兩邊都乘以 t ，得到

$$I_T t = I_1 t + I_2 t$$

- ③ 由 $Q = I \cdot t$ 得到

$$Q_T = Q_1 + Q_2 \quad (\text{可看成板面積增加，電容量加大，幫助記憶})$$



★ 圖 4-6

3. 並聯的總電容量為所有電容量之和：

$$C_T = C_1 + C_2$$

① 由 $Q = CV$ ，將 $Q_T = Q_1 + Q_2$ 轉換如下：

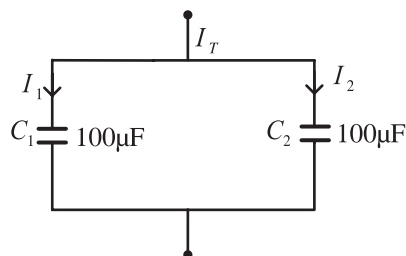
$$C_T V_T = C_1 V_1 + C_2 V_2$$

② 並聯時，電壓都相同，得到：

$$C_T = C_1 + C_2 \quad (\text{可看成板面積增加，電容量加大，幫助記憶})$$

範例 4-2c

請完成圖 4-7 電路，驗證電容並聯，電容量為所有電容之和 $C_T = C_1 + C_2$ ，計算總電容量理論值，使用 LCR 表量測總電容量。



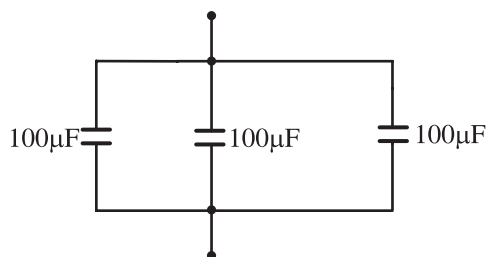
★ 圖 4-7

操作步驟

1. 並聯電路 $I_T = I_1 + I_2$ 。
2. 將步驟 1 兩邊都乘以時間 t 。
3. $I_T t = I_1 t + I_2 t$ 。
4. 因為 $It = Q$ ，所以 $Q_T = Q_1 + Q_2$ 。
5. 因為 $Q = C \cdot V$ ，所以 $C_T \cdot V = C_1 \cdot V + C_2 \cdot V$ 。
6. 因為並聯，電壓都相同，所以電壓都消去，得到 $C_T = C_1 + C_2 = 100\mu + 100\mu = 200\mu\text{F}$ 。（可以想像成，板面積增加，電容增加）
7. 使用 LCR 表量測總電容量_____。

自我練習

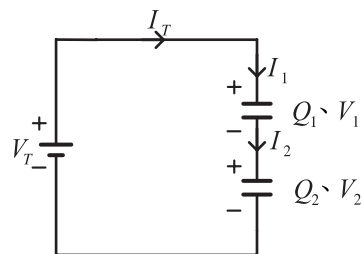
1. 請完成圖 4-8 電路，計算總電容量，使用 LCR 表量測電容量。



★ 圖 4-8

電容的串聯特性

圖 4-9 則是兩個電容的串聯，以下介紹電容串聯特性：



★ 圖 4-9

1. 串聯總電容為所有電容倒數和的倒數：

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{or} \quad C_T = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

- ① 由 KVL：

$$V_T = V_1 + V_2$$

- ② 由 $V = \frac{Q}{C}$ 得到：

$$\frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2}$$

- ③ 由 $Q = I \cdot t$ 得到：

$$\frac{I_T \cdot t}{C_T} = \frac{I_1 t}{C_1} + \frac{I_2 t}{C_2}$$

- ④ 串聯時電流都相同： $I_T = I_1 = I_2$ ，充電時間也相同，得到：

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (\text{與電阻並聯相似})$$

2. 串聯總等效帶電量與所有電容所帶電量相同：

- ① 串聯時電流都相同：

$$I_T = I_1 = I_2$$

- ② 充電時，時間都相同，所以

$$I_T \cdot t = I_1 \cdot t + I_2 \cdot t$$

- ③ 由 $Q = I \cdot t$ 得到

$$Q_T = Q_1 = Q_2$$

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = C_T \cdot V_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \cdot V_T$$

3. 串聯的分壓與自己的電容成反比：（此與電阻並聯的分流相似）

$$V_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} V_T$$

$$V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_T$$

① 因為 $Q_1 = C_1 V_1$ ，由 $Q_1 = Q_T$ 得到：

$$Q_T = C_1 V_1$$

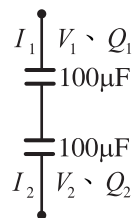
② 由 $Q_T = C_T V_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} V_T$ 得到：

$$\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} V_T = C_1 V_1$$

③ 整理，得到 $V_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} V_T$ ，同理 $V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_T$ 。

範例 4-2d

請完成圖 4-10 電路，驗證電容串聯，總電容量為所有電容倒數之和再倒數 $1/C_T = 1/C_1 + 1/C_2$ ，計算理論值，使用 LCR 表量測總電容量。



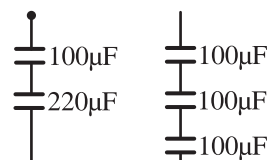
★ 圖 4-10

操作步驟

1. 串聯電路，所有元件電流都相等 $I_T = I_1 = I_2$ ，且 $Q = It$ ，所以 $Q_T = Q_1 = Q_2$ 。
2. 串聯電路，總電壓等於所有元件的電壓和，所以 $V_T = V_1 + V_2$ 。
3. 因為 $V = Q/C$ ，所以 $Q_T/C_T = Q_1/C_1 + Q_2/C_2$ 。
4. 上式，串聯電路，電量 Q 都相等，可以消掉，所以 $1/C_T = 1/C_1 + 1/C_2$ 。
（可以想像成，板距離增加，所以電容量減少）
5. 計算串聯總電容_____，使用 LCR 表量測總電容_____。

自我練習

1. 請完成圖 4-11 電路，計算總電容量，使用 LCR 表量測電容量。
2. 請完成圖 4-12 電路，計算總電容量，使用 LCR 表量測電容量。

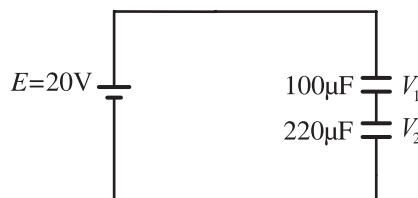


★ 圖 4-11

★ 圖 4-12

範例 4-2e

請完成圖 4-13 電路，請留意電容耐壓至少 25V 以上，計算 V_1 、 V_2 理論值，使用三用電表量測其電壓。驗證電容串聯，每一電容的分壓與自己電容量成反比。



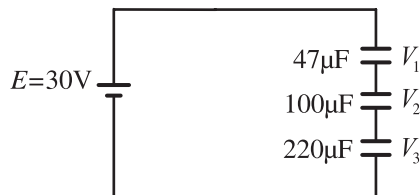
★ 圖 4-13

操作步驟

1. 每一電容電壓為 $V_1 = Q_1/C_1$ ， $V_2 = Q_2/C_2$ ，
2. 串聯因為電流相同，電量也會相同 $Q_T = Q_1 = Q_2$ ，所以步驟 1 方程式 $V_1 = Q_1/C_1 = Q_T/C_1$ ， $V_2 = Q_2/C_2 = Q_T/C_2$ 。
3. 因為 $Q_T = V_T * C_T$ ，所以 $V_1 = Q_T/C_1 = V_T * C_T/C_1$ ， $V_2 = Q_T/C_2 = V_T * C_T/C_2$ 。
4. 因為 $C_T = (C_1 * C_2)/(C_1 + C_2)$ ，所以 $V_1 = V_T * (C_1 * C_2)/(C_1 * (C_1 + C_2)) = (V_T * C_2)/(C_1 + C_2)$ ，同理 $V_2 = (V_T * C_1)/(C_1 + C_2)$ 。(因為，串聯電量都相同，且 $Q = CV$ ，所以每一電容分壓與 C 成反比)
5. 依照以上公式計算 V_1 理論值_____， V_2 理論值_____。
6. 使用三用電表直流電壓檔量測 V_1 電壓_____， V_2 電壓_____。

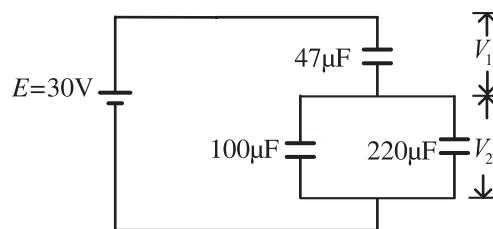
自我練習

1. 完成圖 4-14 電路，計算 V_1 、 V_2 、 V_3 理論值，量測 V_1 、 V_2 、 V_3 電壓。



★ 圖 4-14

2. 完成圖 4-15 電路，計算 V_1 、 V_2 理論值，量測 V_1 、 V_2 電壓。

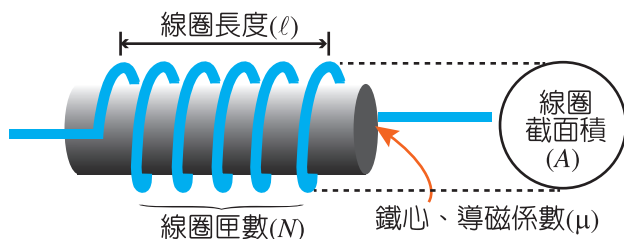


✦ 圖 4-15

電感器(inductor)

將電線以螺旋方式纏繞，如圖 4-16 就是簡單電感器，且其電感量與截面積、匝數的平方成正比，與長度成反比，如以下公式。以下範例 4-2f 即可驗證此現象。

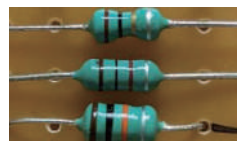
$$L(\text{自感電感量}) = \frac{\mu(\text{導磁係數}) \times (\text{截面積}) \times N^2(\text{匝數平方})}{\ell(\text{長度})} (\text{亨利, H})$$



✦ 圖 4-16 電感器示意圖

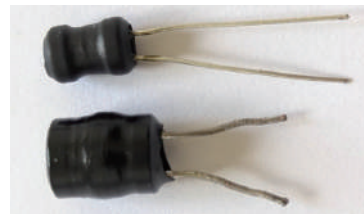
電感的標示

- 色碼標示：電感色碼與電阻相同，但是其單位是 μH ，例如圖 4-17 第 1 個色環分別是『棕黑金銀』，代表其值是 $10 \times 10^{-1} \mu\text{H} \pm 10\% = 1 \mu\text{H} \pm 10\%$ ；第 2 個色環分別是『棕黑紅銀』，代表其值是 $10 \times 10^2 \mu\text{H} \pm 10\% = 1 \text{mH} \pm 10\%$ ；第 3 個色環分別是『棕黑橙銀』，代表其值是 $10 \times 10^3 \mu\text{H} \pm 10\% = 10 \text{mH} \pm 10\%$ 。



✦ 圖 4-17

- 數碼標示法：將數碼印製在電感器上，通常是用 3 個阿拉伯數字標示電感器的容量。其中前兩位是有效值數字，第三位為乘冪（10 的幾次方，即表示有效值後有多少個 0），基本單位為 μH ，Farad) 例如 122J，即表示 $12 \times 10^2 \pm 5\% \mu\text{H} = 1.2 \text{mH} \pm 5\%$ （最後一碼：K 表示誤差 10%，J 表示誤差 5%，M 表示誤差 20%）。



✦ 圖 4-18 立式電感

3. 沒有標示:立式電感，如圖 4-18，通常沒標示，僅能使用 LCR 表量測。

自我練習

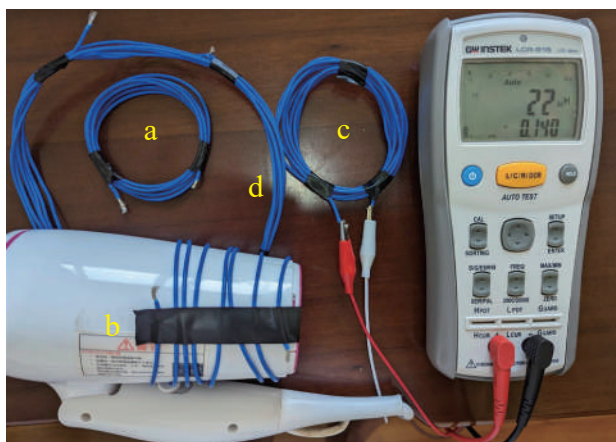
1. 有一電感，顏色為「橙黑金銀」，其值=_____，誤差=_____。
2. 有一電感，標示 303K，其值=_____，誤差=_____。

範例 4-2f

驗證將電線以螺旋方式纏繞，就是簡單電感器，且驗證電感量與截面積、匝數的平方成正比，與長度成反比。

操作步驟

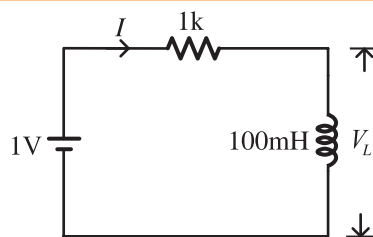
1. 準備 4 條電線。
2. 將第 1 條電線繞 7 圈。如圖 4-19 線圈 a。
3. 將第 2 條電線繞 7 圈（半徑同線圈 a），但長度拉長，本例刻意用吹風機噴頭固定其長度。如圖 4-19 線圈 b。
4. 將第 3 條電線繞 14 圈（半徑同線圈 a）。如圖 4-19 線圈 c。
5. 將第 4 條電線，以線圈 a 的兩倍直徑繞七圈。如圖 4-19 線圈 d。
6. 請以 LCR 表，分別量測以上 4 個線圈的電感，請問其值是否與截面積、匝數的平方成正比，與長度成反比。



✦ 圖 4-19

範例 4-2g

完成圖 4-20 電路，驗證電感端電壓為零。



✦ 圖 4-20

操作步驟

1. 本例電感穩定時，請用三用電表量其電壓_____，用直流電流量表量電流_____。
2. 步驟 1 是穩態，可用三用電表觀察，電感充電、放電現象，時間很短，僅能使用示波器觀察，請看第五章。

電感串聯

圖 4-21 為電感串聯電路，電感串聯特性如下：

- (1) 串聯無互感總電感為 $L_T = L_1 + L_2$ 。
- (2) 電感串聯，當兩線圈同相纏繞，會有串聯互助電感 M ，總電感為 $L_T = L_1 + L_2 + 2M$ ， M 為電感互感值。
- (3) 電感串聯，當兩線圈線圈異相纏繞，會有串聯互消電感 M ，總電感為 $L_T = L_1 + L_2 - 2M$ ， M 為電感互消值。



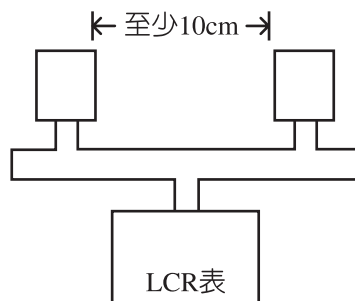
✦ 圖 4-21 電感串聯

範例 4-2h

驗證以上電感串聯特性。

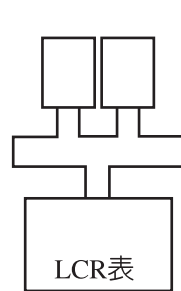
操作步驟

1. 取兩個立式 100mH 電感串聯，將兩電感拉開最少 10 公分，如圖 4-22，量測其電感值。（距離遠，則兩個線圈無互感）

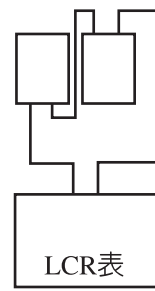


✦ 圖 4-22

2. 同步步驟 1，但將兩個電感移近貼在一起，如圖 4-23，量測其電感值_____，移動的過程，也要看觀察其電感的變化。（距離拉近，兩個線圈就有互感）
3. 同步步驟 1，但將任一個電感反向，使得線圈方向與步驟 1 相反，且貼在一起，如圖 4-24，量測其電感值_____。



★ 圖 4-23



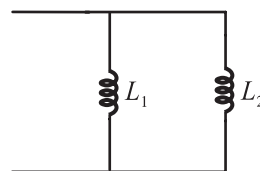
★ 圖 4-24

4. 觀察步驟 2 與步驟 3，若是線圈方向相同，則互感值是相加，線圈方向相反，則互感值相減。（立式線圈沒有標示電感值，也沒有標示線圈方向，就要靠自己做記號）

電感並聯

圖 4-25 為電感並聯電路，電感並聯特性如下：

- (1) 並聯無互感總電感為 $L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$ 。



★ 圖 4-25 電感並聯

- (2) 電感並聯，當兩線圈同相纏繞，電感會有互感 M ，串聯互助總電感為

$$L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}, \text{ M 為電感互感值。}$$

- (3) 電感並聯，當兩線圈線圈異相纏繞，電感會有互消電感 M ，總電感為

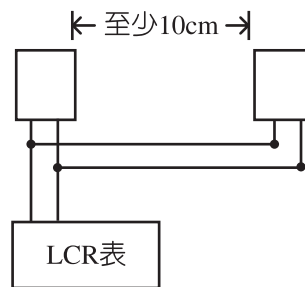
$$L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}, \text{ M 為電感互消值。}$$

範例 4-2i

驗證以上電感並聯特性。

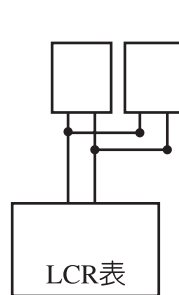
操作步驟

1. 取兩個立式 100mH 電感並聯，將兩電感拉開最少 10 公分，如圖 4-26，量測其電感值。

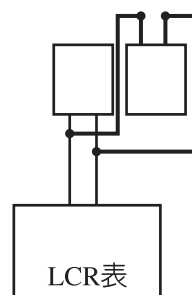


★ 圖 4-26

2. 同步驟 1，但將兩個電感移近貼在一起，如圖 4-27，量測其電感值_____，移動的過程，也要看觀察其電感的變化。
3. 同步驟 1，但將任一個電感反向，使得線圈方向與步驟 1 相反，且貼在一起，如圖 4-28，量測其電感值_____。
4. 觀察步驟 2 與步驟 3，若是線圈方向相同，則互感值是相加，線圈方向相反，則互感值相減。



★ 圖 4-27



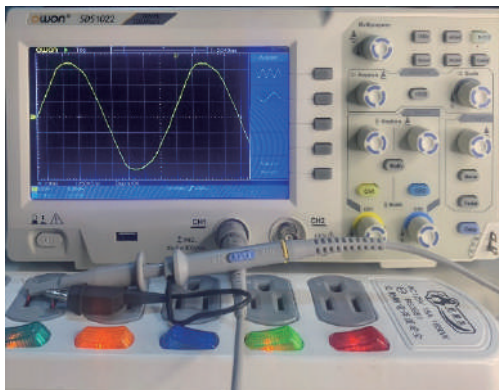
★ 圖 4-28

4-3 示波器、信號產生器之使用 、並計算信號之頻率與周期

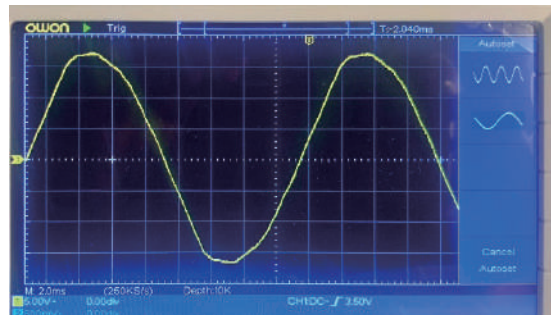
備註：本節所需要的相關知識——三角函數、波形的認識、有效值的計算，請自行參考附錄 C)

示波器(oscilloscope)

電學的波形週期都非常短，例如電力公司供應的正弦波交流電其頻率是 60Hz，也就是一個週期是 0.016 秒，人類眼睛根本無法觀察此波形，所以就有示波器的發明。圖 4-29 是以示波器量測電力公司的正弦波。圖 4-30 是波形放大圖。此即為本節所要介紹的示波器。



★ 圖 4-29 示波器量測觀察電力波形圖



★ 圖 4-30 波形放大圖

Volts/Div

示波器螢幕的水平線代表電壓，所以 Volts/Div 就是每一格的電壓大小。圖 4-30 的 Volts/Div=5V， $V_m=3.4$ 格，且用 10 倍的衰減棒，所以 $V_m=5 \times 3.4 \times 10=170V$ 。Volts/Div 是可調整的，舊型機器就以 Volts/Div 為旋鈕名稱，但新型機器則大都以 Scale 為旋鈕名稱，且因為一台示波器都至少可以同時觀察兩個波形，所以就有兩個 Volts/Div 或 Scale 旋鈕。請自行觀察自己實驗室示波器的面板，找出 Volts/Div 旋鈕。

Time/Div

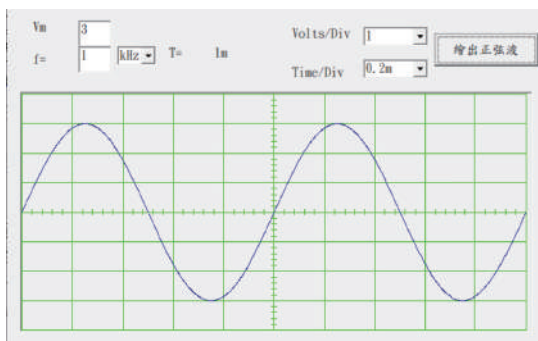
示波器螢幕的垂直線代表時間，Time/Div 就是每一垂直線所代表的時間間隔，圖 4-30 的 Time/Div=2m，表示一格是 2ms，本例一個週期共 $(0.6+7+0.7) = 8.3$ 格，所以週期 T 是 $2\text{m} \times 8.3 = 16.6\text{m}$ ，頻率 $f = 1/T = 60\text{Hz}$ 。Time/Div 是可調整的，舊型機器就以 Time/Div 為旋鈕名稱，但新型機器大都以 Scale 為旋鈕名稱，且不管一台示波器可以同時觀察多少個波形，因為這些波形的時間點相同，才能同時量測，所以都只有一個 Time/Div 或 Scale 旋鈕。請自行觀察自己實驗室示波器的面板，找出 Time/Div 旋鈕。關於以上 Volts/Div 與 Time/Div 旋鈕的調整與波形變化，請看以下範例說明。

範例 4-3a

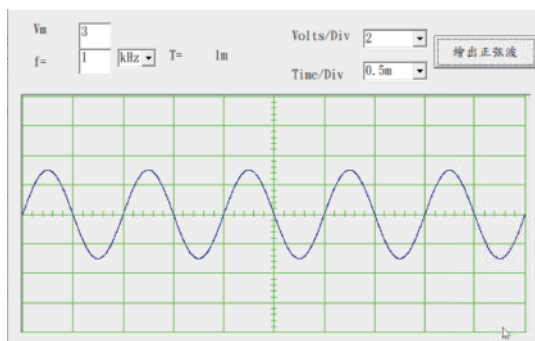
示波器模擬軟體。

操作步驟

1. 開啓示波器模擬程式 (<http://www.goodbooks.com.tw/elect/osc.exe>) 如圖 4-31，它可以幫助學生認識與學習示波器檔位與模擬執行結果。
2. Volts/Div 與 Time/Div 的認識與操作。
 - (1) 示波器最常用的旋鈕是 Volts/Div 與 Time/Div。
 - (2) 示波器螢幕的水平線代表電壓，所以 Volts/Div 就是每一格的電壓大小。
 - (3) 示波器螢幕的垂直線代表時間，Time/Div 就是每一垂直線所代表的時間。
 - (4) 圖 4-31 是表示信號產生器輸入是 3V, 1kHz，示波器有 Volts/Div 與 Time/Div 供使用者選擇，圖 4-31 是 Volts/Div 選「1」，Time/Div 選「0.2m」的輸出結果，首先，由圖可知， V_m 共佔 3 格（縱向），每格 1V，所以是 3V；其次，此 $\sin()$ 函數一個週期共佔 5 格（橫向 5 格），每格代表 0.2ms，所以一個週期是 $0.2\text{m} \times 5 = 1\text{ms}$ ， $f = 1/T$ ， $f = 1\text{kHz}$ ；
 - (5) 圖 4-32 是輸入不變，但 Volts/Div 選「2」，Time/Div 選「0.5m」的輸出結果，此時 V_m 共佔 1.5 格，週期共佔 2 格，請自行計算 V_m 與 f 是否與步驟 2 的 (4) 相符。



✦ 圖 4-31 Volts/Div=1, Time/Div=0.2m



✦ 圖 4-32 Volts/Div=2, Time/Div=0.5m

- (6) 由以上操作可知，改變 Volts/Div 與 Time/Div 旋鈕都可以改變圖形的顯示方式，就如同照相機的變焦鏡頭，是用來改變拍攝的顯示的尺寸，而不是改變輸入電壓與波形。那到底要調整至哪一檔位，依據「工業電子丙級檢定」的規定是，週期以顯示 2~3 週，振幅上下以佔六大格為原則。

示波器的操作

示波器品牌非很多，各校的示波器當然都不一樣，有些是數位液晶螢幕顯示的新型數位示波器，如範例 4-3b、4-3c，有些是映像管顯示的傳統類比示波器，如範例 4-3d。因為類比示波器反應速度快，反而好使用，在沒壞之前各校當然都還保存繼續使用。首先，類比示波器版面旋鈕比較多，數位式示波器的旋鈕與電腦選單接近，有些旋鈕會被放在某些選單裡面，所以旋鈕看起來比較少。但不論廠牌如何，其旋鈕功能都相同、操作方式大都接近，只是擺放位置不同。其次，不管類比或數位，其旋鈕都非常多，但大部分都是進階功能，所以針對高一入門學生，本書不一一介紹其所有功能，而是透過簡單範例操作認識常用旋鈕與常用入門功能。第三，不管示波器品牌為何，其操作步驟都是相同，只要先熟悉一種儀器操作，當面對不同品牌示波器時都可迎刃而解。

上下 POSITION 旋鈕

大部分機型都至少可同時觀察 2 組波形，所以通常有兩個上下 POSITION 旋鈕，用於個別調整每個波形的上下位置。請自行觀察自己實驗室示波器的面板，找出上下 POSITION 旋鈕。

左右 POSITION 旋鈕

左右 POSITION 旋鈕，用於調整波形的左右位置，但因為所有輸入波形的時間點都相同，所以不管可以同時量測幾個波形，都只有一個左右 POSITION 旋鈕。請自行觀察自己實驗室示波器的面板，找出左右 POSITION 旋鈕。

DC/AC

所有示波器都是使用 DC 檔量測實際波形，但有時候我們希望專注於量測交流的變化，此時可以選用 AC 檔位，去除直流成分，僅觀察交流的部分。請自行觀察自己實驗室示波器的面板，找出 DC/AC 旋鈕。(有的新型的示波器，將此旋鈕放在螢幕選單內)

CH1/CH2/DUAL/ADD

所有示波器都至少可同時輸入兩個波形，所以有 CH1、CH2 等按鈕，用於選擇量測任一波形；也有 DUAL 按鈕，用於同時量測兩個波形；ADD 按鈕，用於輸出兩個波形相加結果。

BNC 連接器(Bayonet Neill-Concelman)

前面的電源供應器，輸出電壓時，是正負極使用兩條電線分開輸出，這樣可以避免短路，但是示波器通常用於量測微小信號，此時的正極就需要用



✦ 圖 4-33a BNC 連接器

使用地線包圍保護，才不會受到雜訊干擾，所以使用 BNC 連接器，如圖 4-33a，此種連接線，正極是被地線包裹在裡面。一台示波器通常至少可以同時量測 2 個波形，所以機殼至少有 2 個 BNC 連接器。

Autoset (自動設置)

傳統的示波器，都要由使用者自己調整 Volds/Div 與 Time/Div 旋鈕，當 Volds/Div 與 Time/Div 正確時，才能得到波形，請看範例 4-3d。但目前新的數位機型，都有 Autoset(自動設置)，只要輸入波形，然後按此按鈕，示波器就自動調整 Volds/Div 與 Time/Div 至適當的檔位，並得到波形，請看範例 4-3b 與 4-3c。

自我測試

所有示波器在示波器面板都有金屬突出接點，上面標示一個電壓與頻率，如圖 4-33b 自我測試接點，此即自我測試接點，此接點輸出一個指定頻率與電壓的波形，用來測試與校正此示波器，以下我們以三種機器分別操作此自我測試。



★ 圖 4-33b 自我測試接點

範例 4-3b

數位機型自我測試一。本例以固緯 GDS-1072B 為例。

操作步驟

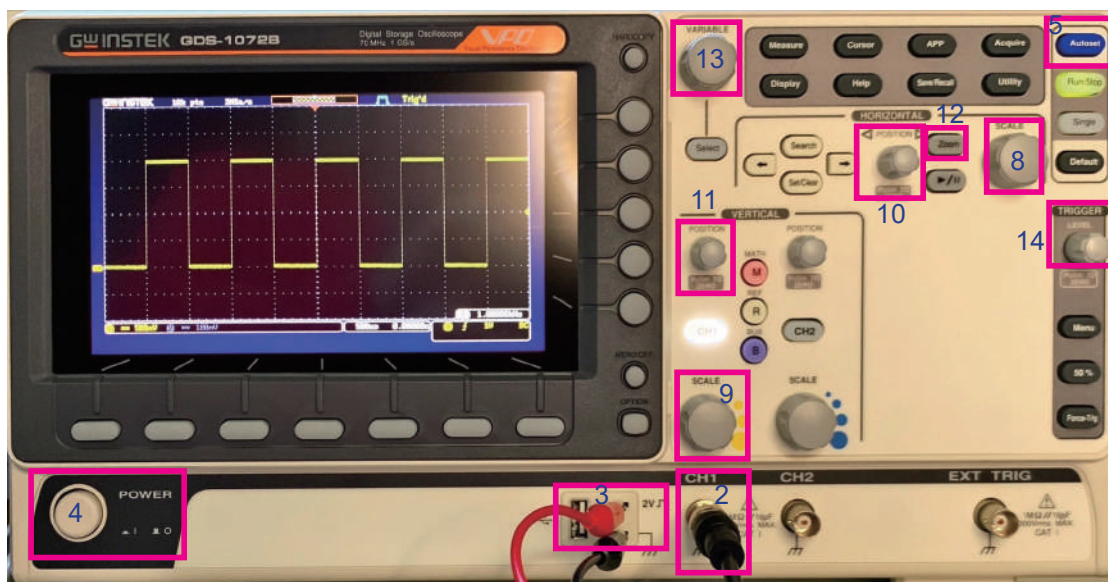
1. 示波器探棒（或稱測試棒）有兩種，圖 4-35 是標準探棒，整條線的正極都由負極包住，這樣當信號很微弱時（低於 50mV）才不會有雜訊，而且有衰減選擇扭，可選擇原信號輸入(*1)或衰減 10 倍(*10)輸入，但因為考量成本，學校通常使用低成本的測試棒，如圖 4-34，此一測試棒也是信號產生器的輸出測試棒，本書大部分實驗也是使用圖 4-34 簡易測試棒就可以。但當信號低於 50mV 時，雜訊就很大（示波器訊號圖形會很粗，看到很多雜訊），此時可拿出標準探棒，才能解決雜訊問題。不論是標準探棒或簡易測試棒，都是使用 BNC 連接頭（Bayonet Neill Concelman），插入示波器面板輸入插銷或信號產生器輸出插銷。每次拿到新的測試棒，都要檢查是否正常，以免沒有結果，也不知錯在哪裡。檢查方式是，使用三用電表的歐姆檔，檢查 BNC 接頭的中心點與探頭或紅色鱷魚夾是否相通，其次檢查 BNC 接頭的外殼是否與黑色鱷魚夾相通。



★ 圖 4-34

★ 圖 4-35

- 將示波器探棒母 BNC 連接器插入示波器面板標示「CH1」的公 BNC 連接器並向右旋轉直到卡住，如圖 4-36 的編號 2。



★ 圖 4-36 示波器自我測試（上圖按鈕編號亦為操作步驟的編號）

- 測試棒探頭（簡易型是紅色鱷魚夾），夾在自我測試輸出銅片接點。
- 打開電源。
- 按一下「AutoSet」自動設置按鈕，即可得波形。
- 由圖 4-36 顯示「Volds/Div」= 500mV，且上下 4 格，所以電壓 = $500\text{mv} \times 4 = 2\text{V}$
- 由圖 4-36 顯示「Time/Div」= 500us，且每個波形左右佔 2 格，所以週期 $T = 500\text{us} \times 2 = 1\text{ms}$ ，頻率 $f = 1/T = 1\text{kHz}$
- 請調整 Time/Div 的「Scale」每格時間旋鈕，波形將會重新顯示，請計算週期是否相同。
- 請調整 CH1 Volds/Div 的「Scale」每格電壓旋鈕，波形將會重新顯示，請計算電壓是否相同。（所有示波器都一樣，都只有一個 Time/Div 旋鈕，但每一頻道都會有一個 Volds/Div 的「Scale」旋鈕。）
- 請練習調整左右的「POSITION」位置旋鈕，並觀察波形是否左右移動。
- 請練習調整 CH1 的上下「POSITION」位置旋鈕，並觀察波形是否上下移動。

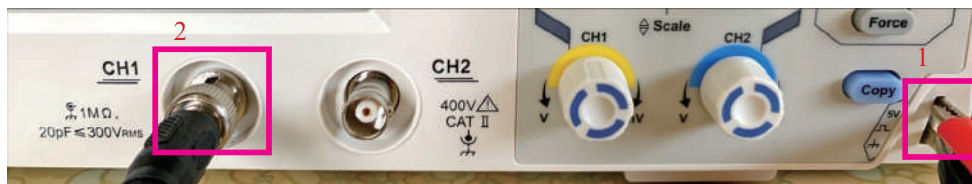
12. 請旋轉「TRIGGER LEVEL」旋鈕，觀察 TRIGGER LEVEL 電壓。（為什麼要有觸發電壓？請想像一下，有六個人，編號分別是 1～6，每 2 秒跑出來輪流重複亮相一次，若你每 1 秒就按一下快門，您會看到「0,0,1,1,2,2,3,3…」；若你每 2 秒按一下快門，才是看到「0,1,2,3,4,5」，若你每 3 秒按一次快門，你會看到「0,3,0,3」，所以必須指派一個觸發信號（也就是指派從誰開始當起點）與每幾秒按一下快門，此即為「TRIGGER LEVEL」觸發位準旋鈕的原理。「TRIGGER LEVEL」系統預設 0V，當下次又 0V 時，就是一個週期，就知道取樣的頻率，也能計算每次取樣的間隔。請自行調整「LEVEL」，觀察 TRIGGER LEVEL 電壓，本例電壓最大是 2V，當 TRIGGER LEVEL 電壓大於 2V 時，是不是波形就亂掉了。
13. 請由大到小寫出您的示波器 Time/Div 檔位（請旋轉圖 4-36 編號 8 水平的 Scale 旋鈕）。_____
14. 請由大到小寫出您的示波器 Volds/Div 檔位（請旋轉圖 4-36 編號 9 CH1 的 Scale 旋鈕）。_____

範例 4-3c

數位機型自我測試二。本例以 OWON1022 為例。

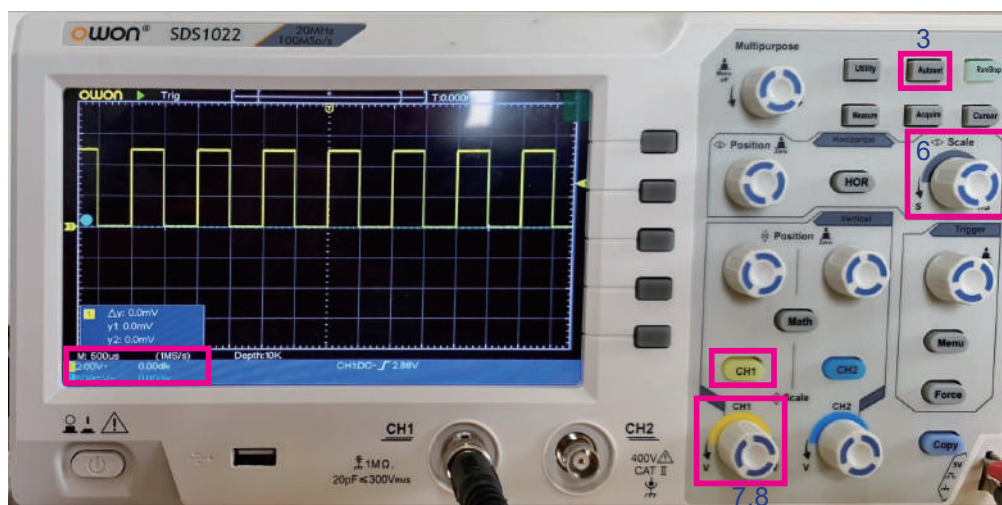
操作步驟

1. 同範例 4-3b，使用三用電表檢查測試棒是否正常。
2. 將示波器探棒 BNC 連接器插入示波器面板標示「CH1」的公 BNC 連接器，如圖 4-37 的編號 2，並向右旋轉直到卡住，測試棒的探頭（簡易型為紅色鱷魚夾）夾在示波器自我測試的銅片，如圖 4-37 的編號 1。



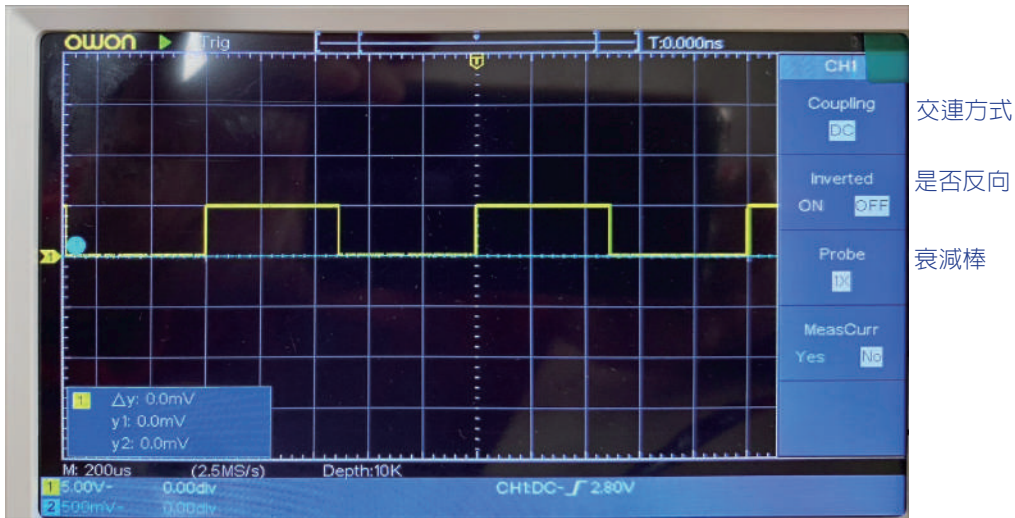
★ 圖 4-37 BNC 連接線與示波器自我測試點

3. 按壓「**Autoset**」自動設置按鈕（如圖 4-38 編號 3），示波器輸出如圖 4-38， $\text{Time/Div} = 500\mu\text{s}$ 、 $\text{Volts/Div} = 2\text{V}$ 。



✦ 圖 4-38 示波器自我測試圖 ($\text{Time/Div} = 500\mu\text{s}$ 、 $\text{Volts/Div} = 2\text{V}$)

4. 圖 4-38 共出現 8 個方波， $\text{Time/Div} = 500\mu\text{s}$ ，每個方波佔 2 格，所以 $T = 500\mu\text{s} \times 2 = 1\text{ms}$ ， $f = 1/T = 1\text{kHz}$
5. 圖 4-38 $\text{Volts/Div} = 2\text{V}$ ，上下共佔 2.5 格，所以 $V_{p-p} = 2 \times 2.5 = 5\text{V}$ 。
6. 請自行調整「**Scale**」每格時間旋鈕，觀察 Time/Div 數值與波形的變化，並計算頻率 f 是否相同。
7. 請自行調整「**CH1**」每格電壓旋鈕，觀察 Volts/Div 數值與波形的變化，並計算電壓值是否相同。
8. 按一下「**CH1**」按鈕，畫面出現一些選單，如圖 4-39，可在此選擇交連方式是「**AC/DC**」（DC 交連是全部電壓都接收，AC 交連是去掉直流成分，只讓交流成分進入示波器）、是否反向、是否使用衰減棒。圖 4-39 Time/Div 改為 $200\mu\text{s}$ ，所以一個波形左右佔 5 格， Volts/Div 改為 5V ，所以一個波形上下佔 1 格。



✦ 圖 4-39 示波器運算

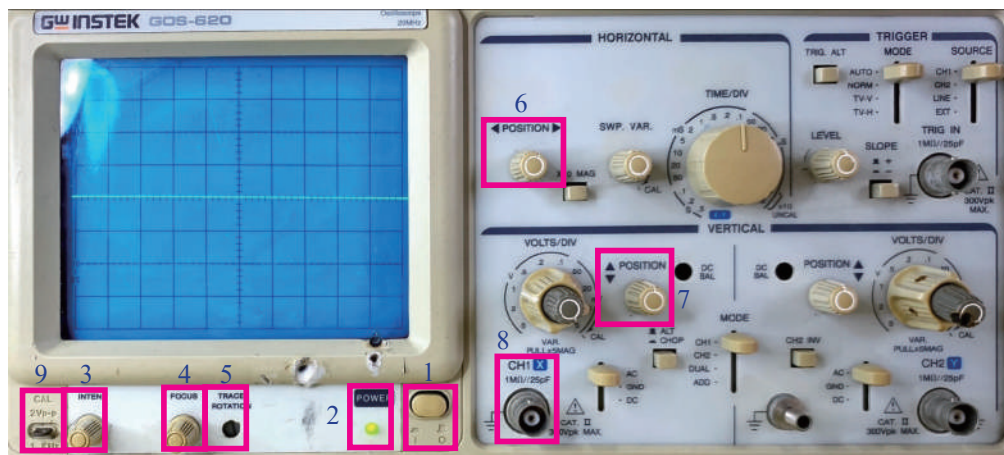
9. 請由大到小寫出您的示波器 Time/Div 檔位（請旋轉圖 4-38 編號 6 的 Scale 旋鈕）。_____
10. 請由大到小寫出您的示波器 Volds/Div 檔位（請旋轉圖 4-38 編號 7 的 Scale 旋鈕）。_____

範例 4-3d

類比機型自我測試。本例以固緯 GOS-620 為例。

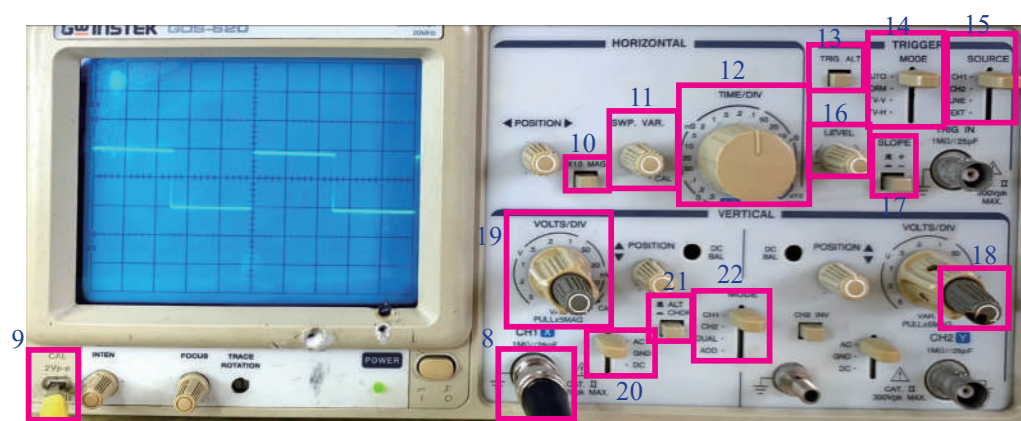
操作步驟

1. 同範例 4-3b，使用三用電表檢查測試棒是否正常。
2. 打開示波器電源，理論上至少應該看到螢幕中間一條水平線，如圖 4-40。



✦ 圖 4-40 傳統映像管示波器開機畫面

3. 若未出現圖 4-40 一條直線，請左右旋轉調整「INTEN」亮度旋鈕，使之出現一直線。
4. 若直線線條太模糊，請調整「FOCUS」聚焦旋鈕，使之能聚焦。
5. 若直線斜了，請用一字起子調整「TRACE ROTATION」水平軌跡調整旋鈕，使之水平。
6. 若直線偏左或偏右，沒有填滿螢幕左右 10 格，請調整水平「POSITION」位置旋鈕，使之填滿 10 格。
7. 若直線沒有在上下的中間，請調整垂直「POSITION」位置旋鈕使之在中間。
8. 將示波器探棒 BNC 連接器插入示波器面板標示「CH1」的公 BNC 連接器並向右旋轉直到卡住，測試棒的探頭（簡易型為紅色鱷魚夾）夾在示波器自我測試的銅片，如圖 4-41。
9. 測試棒另一端正極（紅色）鱷魚夾接頭夾在自我測試接點，如圖 4-41 所示。



TIME/DIV=0.2ms, $T=0.2\text{ms} \times 5=1\text{ms}$, $f=1\text{kHz}$
 CH1 VOLDS/DIV=1V, $V_{p,p}=1 \times 2=2\text{V}$

★ 圖 4-41 示波器自我測示波形

10. 將「*10 MAG」影像放大按鈕置於不用按下狀態。（本按鈕若按下，可將波形放大十倍）
11. 將 SWP.VAR 週期調校鈕往右旋到底（至 CAL 位置）。
12. 將 TIME/DIV 每格時間旋轉，對齊在「.2ms」。（表示水平每格 0.2ms）

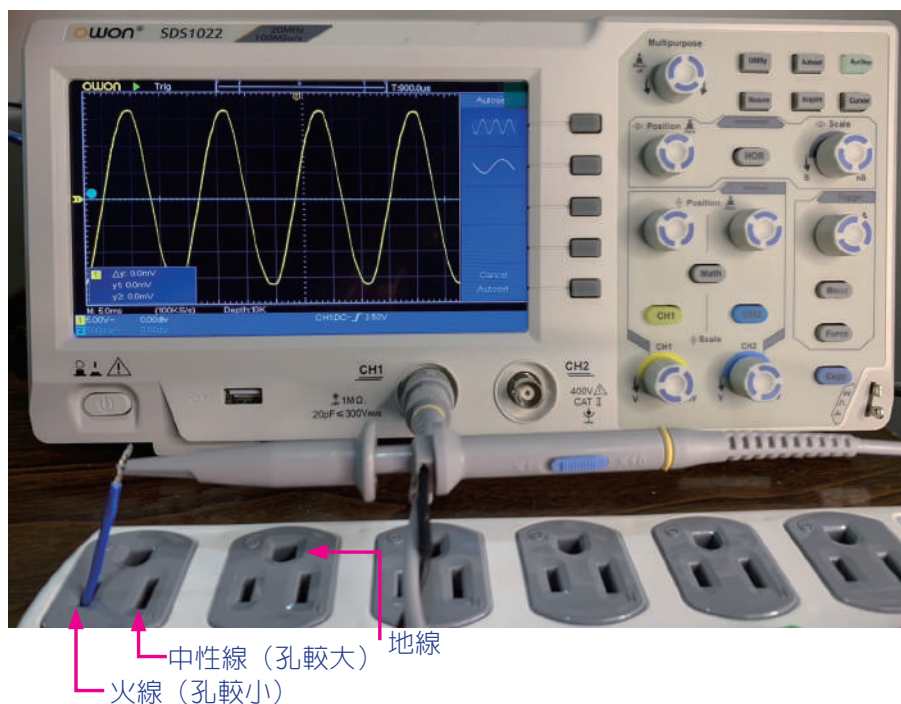
13. 「TRIG. ALT」 交替觸發按鈕置於不用按下狀態。(此按鈕若按下，可用來顯示兩個不同頻率的輪流掃描輸出)
14. 將 TRIGGER MODE 觸發模式選擇按鈕置於 AUTO。(另一位置 NORMAL 是手動觸發，一般用於低於 25Hz 的輸入訊號)
15. 將 TRIGGER SOURCE 觸發來源置於「CH1」。(表示使用 CH1 當作觸發來源)
16. 將 LEVEL 觸發準位的旋鈕置於中間位置。(LEVEL 用於調整觸發電位)
17. 將 TRIGGER SLOPE 置於不用按下狀態。(此按鈕沒按是選擇正緣觸發，按下是選擇負緣觸發)
18. 將 CH1 與 CH2 之垂直衰減器 VOLTS/DIV 的深灰色小旋鈕往右旋到底(至 CAL 位置)。
19. 將 CH1 的 VOLTS/DIV 調至 1 V/DIV。(表示垂直每格 1V)
20. 將 CH1 的「AC-GND-DC」置於「AC」。(AC 表示將信號的直流成分去掉，僅顯示交流信號；DC 表示保留原來信號模式，交直流都進入示波器；GND 則表示將輸入接地，通常用來調整 0V 時的顯示位置)
21. 將 CH1 的「ALT/CHOP」置於不用按下狀態。(此按鈕沒按，表示 CH1,CH2 輪流掃描輸出，按下去表示 CH1,CH2 分段輸出，通常用於小於 25Hz 的低頻訊號)
22. 將 CH1 與 CH2 中間的「CH1 與 CH2 顯示 MODE」置於「CH1」。(表示選擇僅輸出 CH1，位置 CH2 表示僅顯示 CH2，至於 DUAL 表示同時輸出 CH1 與 CH2，ADD 表示輸出 CH1 與 CH2 相加的波形)
23. 傳統類比示波器面板旋鈕比數位示波器還多，所以麻煩看著照片，重複檢查以上步驟，等圖 4-41 波形出現後，然後自己也拍照，下次也是比對照片，將旋鈕調至這些預設位置。
24. 請由大到小寫出您的示波器 Time/Div 檔位。_____
25. 請由大到小寫出您的示波器 Volds/Div 檔位。_____

範例 4-3e

台電 110V 插座電壓瞬時值量測。

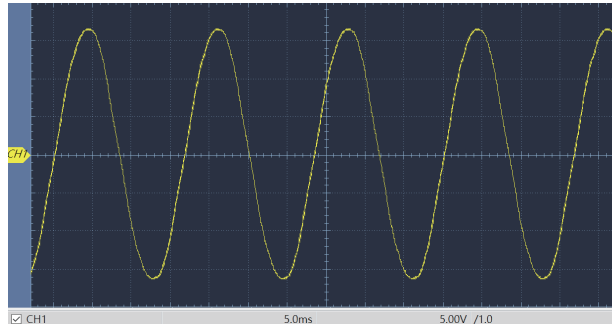
操作步驟

1. 本實習請務必先確認電源插座的火線、中性線、地線，如圖 4-42，不然量測結果也是錯的。
2. 請務必使用三孔插插座如圖 4-42，也確認其插頭的地線沒被剪斷，則火線、中性線、地線如圖所示，請留意中性線的孔比較大，且沒有電，所以小偷偷電線都是偷中性線，若是沒有三兩三，剪到火線就是死在現場。（請留意三線電源插頭，地線一定較長，這樣比較安全，因為電路先接地，萬一有漏電，也能先讓電荷接地，才不會觸電；兩線電源插頭則是中性線比較粗，當使用者插入時，也會先接觸，這樣也會較安全）
3. 請務必使用有衰減棒，且將衰減倍數調為「*10」，如圖 4-42，表示將電壓先除以 10，再送入示波器。
4. 將衰減棒的正端勾住火線，如圖 4-42。
5. 若是數位型示波器，只要按一下「Autoset」，就可得到測量結果，如圖 4-42。



✦ 圖 4-42 電力公司瞬時波形量測

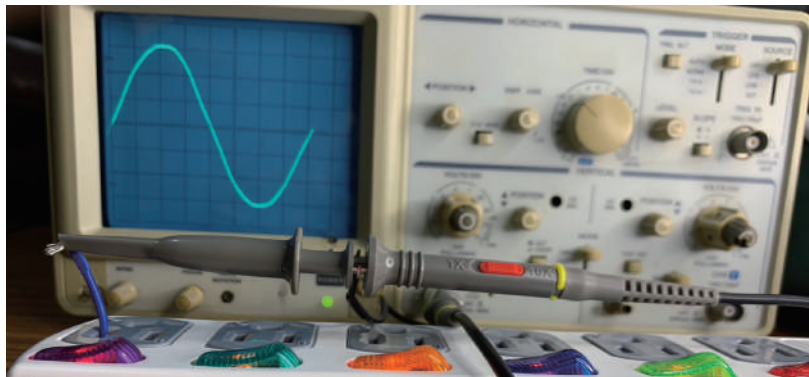
6. 將螢幕放大如圖 4-43。



Time/Div=5m, $T=5\text{m} \times 3.4=17\text{ms}$ ，頻率 $f=1/T=58.8\text{Hz}$
CH1 Volds/Div=5, $V_m=5\text{V} \times 3.4 \times 10=170\text{V}$

✦ 圖 4-43 電力公司供電瞬時值波形

7. 由圖 4-43 可知，電力公司供電是交流正弦波，最大值是 $5\text{V} \times 3.4 \times 10 = 170\text{V}$ ，表示有效值是 $170 / \sqrt{2} = 120\text{V}$ ，有效值量測請看附錄 C。
8. 由圖 4-43 可知，電力公司供電是交流正弦波，週期 T 是 $5\text{m} \times 3.4 = 17\text{ms}$ ，頻率 $f = 1/T = 58.8\text{Hz}$ ，已接近 60Hz （備註：實驗會有誤差，此結果已經合理）。
9. 示波器電源線若使用兩線電源線，也就是地線沒接，則測試棒正極負都要接，不然只量到一半電壓。
10. 請自行使用三用電表 ACV 檔，測量有效值電壓_____。
11. 若使用傳統數位示波器，結果如圖 4-44，請自己將 TIME/DIV 調為 2m ，VOLTS/DIV 調為 5V ，由圖 4-44 可知 $T = 2\text{m} \times 8 = 16\text{m}$ ，電壓為 $5 \times 3.1 \times 10 = 155\text{V}$ ，結果也合理，因為我們教學實驗室的儀器都不會刻意每年校正，當然都有誤差。



TIME/DIV=2m, $T=2\text{m} \times 8=16\text{m}$, $f=1/T=62.5\text{Hz}$;
VOLTS/DIV=5V, 電壓 V_m 為 $5 \times 3.1 \times 10=155\text{V}$

✦ 圖 4-44 傳統示波器量測電源瞬時值

信號產生器(signal generator)

前面的直流電源供應器是提供任意直流電壓，交流**信號產生器**，則可提供任意頻率與任意振幅的交流電信號。信號產生器也是包含很多開關與旋鈕。各家廠商的面盤按鍵排列也都不同，但是其操作步驟大致都相同，操作步驟如下：

1. 選擇輸出波形。一般所有的信號產生器都有提供正弦波、三角波、方波，有些機型使用三個按鍵選擇，有些機型僅提供一個「WAVE」按鈕供連續按壓選擇合適的波形。
2. 調整輸出頻率：傳統機型的頻率調整是使用按鍵先點選頻率範圍，然後使用旋鈕微調所要的頻率，目前新的數位機型都可以使用數位輸入的方式，先點選頻率或週期，然後直接數入數字。例如，可以直接輸入 $f=1250\text{Hz}$ ，或直接輸入 $T=1\text{mS}$ 。
3. 調整輸出電壓：傳統機器是使用旋鈕調整輸出電壓，數位式機型則可選擇輸入最大值或有效值，然後再直接輸入數字。
4. 輸出波形：傳統的信號產生器，以上操作過程就有輸出結果，但新型數位信號產生器，同電源供應器的操作，調整機器的過程，都沒有輸出，都要等使用者按「OUTPUT」，才有輸出結果。有了以上概念，以下以範例說明信號產生器的使用。

範例 4-3f

示範信號產生器一。本例練習操作輸出 $f=1\text{kHz}$ ， V_{p-p} 值為 6V 正弦波。

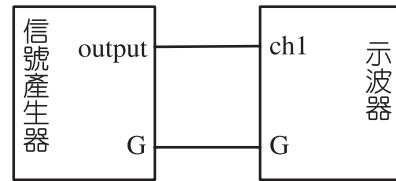
實習儀器

1. 信號產生器：OWON AG1022。
2. 示波器：OWON SDS1022

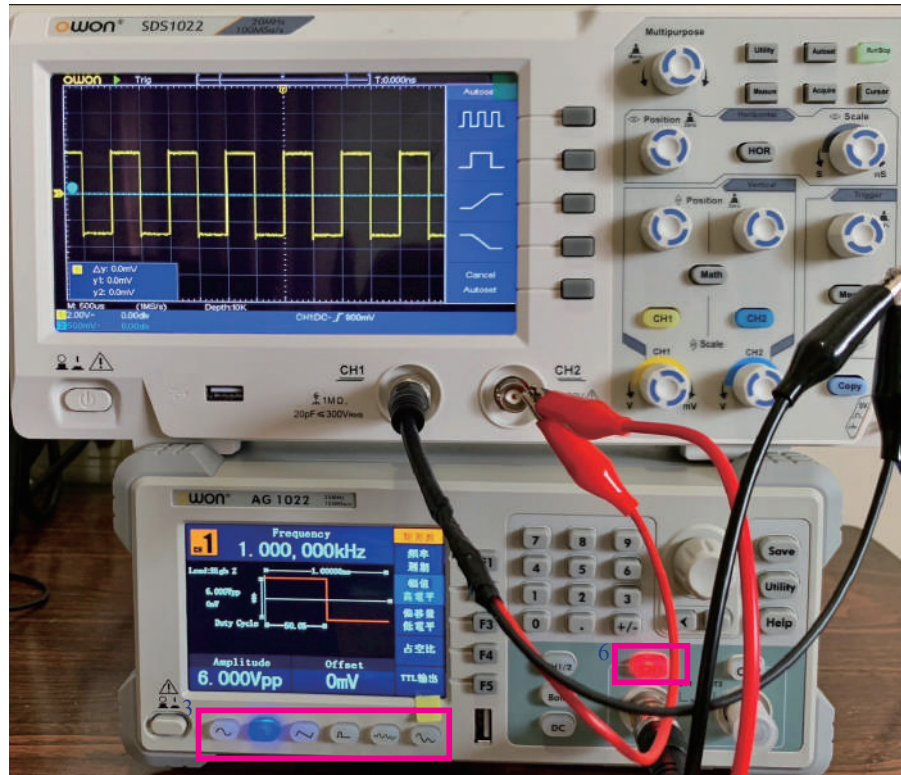
操作步驟

1. 打開電源開關。

2. 將信號產生器使用測試棒，將「output 50Ω」輸出接頭連結到示波器 CH1 輸入端，如圖 4-45，實體連接，如圖 4-46。



✦ 圖 4-45



Time/Div=500us, T=500us*2=1ms, 頻率 $f=1/T=1\text{kHz}$
 CH1 Vols/Div=2, $V_m=2\text{V} \times 1.5=3\text{V}$

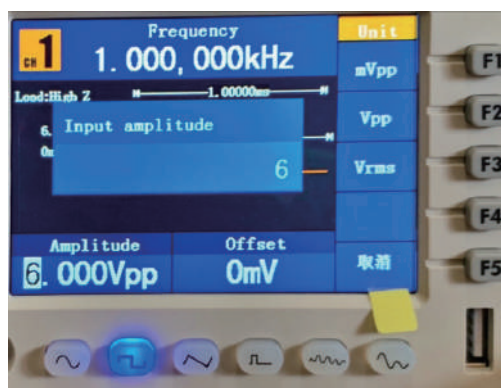
✦ 圖 4-46 信號產生器與示波器的連接

- 輸出波形選擇：**一般所有的信號產生器都有提供正弦波、三角波、方波，請按一下「正弦波」按鍵選擇「正弦波」
- 輸入頻率：**於圖 4-47 先按一下「F1」鍵，選擇「頻率」或「週期」，本例選「頻率」。接著，按數字鍵輸入「1」，畫面如圖 4-47，再按一下「F2」選「kHz」。
- 輸入電壓：**於圖 4-47 先按一下「F2」選擇「振幅」或「高電平」，本例選「振幅」。接著，按一下數字鍵，輸出「6」，畫面如圖 4-48，可選擇「mVpp」、「Vpp」、「Vrms」，本例按一下「F2」鍵，選擇

「Vpp」。(mVpp 表示電壓單位是 mV;Vrms 表示輸入有效值電壓，例如輸入 1，表示 $V_m = 1.4$ ， $V_{pp} = 2.8$)



✦ 圖 4-47 頻率的輸入



✦ 圖 4-48 電壓的輸入

6. **輸出電壓**：所有的數位示波器，都是多一道手續，都要選擇「輸出」按鈕，信號才有輸出。本例按一下「CH1」按鈕，使此按鈕亮起，信號才輸出，畫面如圖 4-45。
7. 請寫出您的信號產生器可輸出的最大有效電壓_____。（使用三用電表量測）
8. 請寫出您的信號產生器可輸出最大的正弦波頻率_____，最小正弦波頻率_____。

範例 4-3g

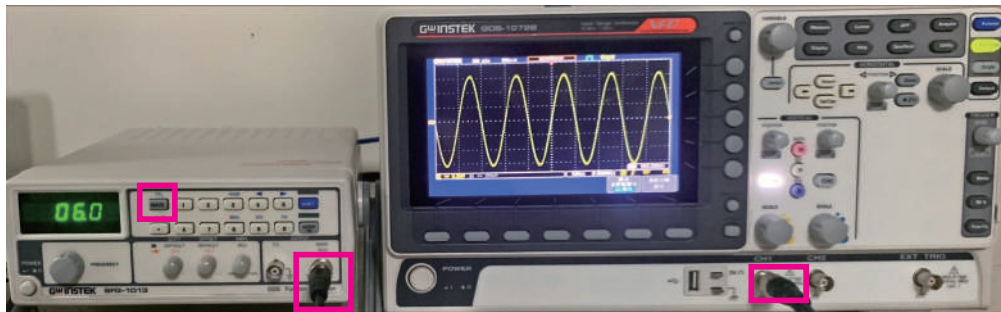
示範信號產生器二。本例練習操作輸出 V_m 值為 6V， $f = 1\text{kHz}$ 的正弦波。

實習儀器

1. 信號產生器：固緯 SFG-1013。
2. 示波器：固緯 GDS-1072B。

操作步驟

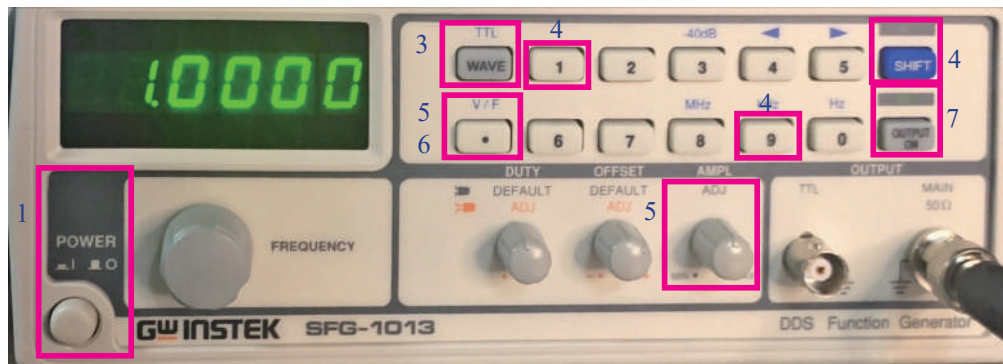
1. 打開電源開關。
2. 將信號產生器使用測試棒，將「output 50Ω」輸出接頭連結到示波器 CH1 輸入端，如圖 4-49。



Time/Div=500us, $T=500\mu s \times 2=1\text{ms}$ ，頻率 $f=1/T=1\text{kHz}$
 CH1 Volds/Div=2, $V_m=2\text{V} \times 3=6\text{V}$

★ 圖 4-49 信號產生器與示波器的連接

3. **輸出波形選擇**：一般所有的示波器都有提供正弦波、三角波、方波，如圖 4-50 請連續按一下「WAVE」按鍵選擇「正弦波」，請留意螢幕上方會出現「波形符號」、「k」、「Hz」等影像，但因為螢幕都是掃描輸出，所以無法同時捕捉此文字影像。



★ 圖 4-50 信號產生器面板

4. **輸入頻率**：於圖 4-50 先按一下數字區的「1」鍵，輸入數字「1」。再按一下「SHIFT」鍵，讓「SHIFT」燈亮起，接著，按一下「kHz/9」，即可輸入指定頻率。請留意螢幕是否出現正確波形符號與頻率數字。（因為 kHz 與 9 共用一個按鍵，所以用 SHIFT 鍵選擇 kHz。）
5. **輸入電壓**：於圖 4-50 先按一下「SHIFT」與「V/F」鍵，讓螢幕輸出電壓，本例選輸出「V」，請留意螢幕下方顯示「V」，如圖 (1)。接著，旋轉「AMPL」旋鈕，使得輸出電壓接近「6」V，畫面如圖 (1)，此為電壓最大值 V_m 。

- 請留意，螢幕若是出現頻率，如圖4-50的「1.000」，則「AMPL」就是調整頻率，若出現電壓值，如圖4-49的「06.0」，「AMPL」就是調整電壓，以上螢幕輸出的變化，則是使用「V/A」按鈕交換。
- 輸出電壓**：所有的數位信號產生器，都是多一道手續，都要選擇「輸出」按鈕，信號才有輸出。本例按一下「OUTPUT ON」按鈕，使此按鈕亮起，信號才輸出。
- 示波器按一下「Autoset」，即可得波形，如圖 4-49。
- 請寫出您的信號產生器可輸出的最大有效電壓_____。（使用三用電表量測）
- 請寫出您的信號產生器可輸出最大的正弦波頻率_____，最小正弦波頻率_____。

範例 4-3h

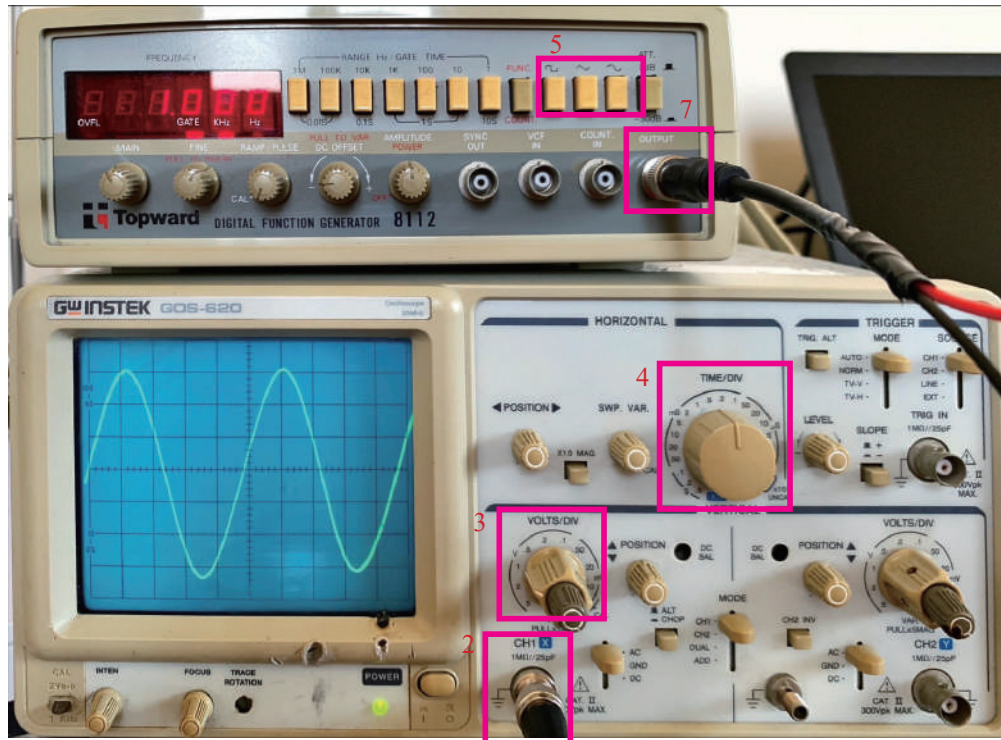
示範傳統按鍵式信號產生器。本例練習操作輸出 V_{p-p} 值為 6V， $f=1\text{kHz}$ 的正弦波。

實習儀器

- 信號產生器：Topword 8112。
- 示波器：固緯 GOS-620。

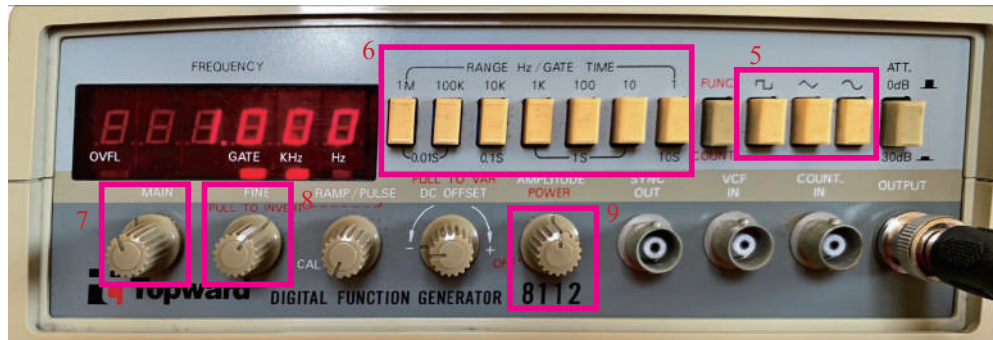
操作步驟

- 打開電源開關。
- 將信號產生器使用測試棒，將 output 50Ω 輸出接頭連結到示波器 CH1 輸入端，如圖 4-51。
- 將示波器 **VOLDS/DIV** 調為「1V」，表示垂直每格 1V 如圖 4-51。
- 將示波器 **TIME/DIV** 調為「.2m」，表示水平每格 0.2ms 如圖 4-51。
- 輸出波形選擇**：所有的信號器都提供正弦波、三角波、方波，請於圖 4-52 按一下「正弦波」按鍵選擇「正弦波」
- 輸入頻率範圍**：於圖 4-52 先選擇頻率範圍，本例點選「1k」。
- 粗調頻率**：於圖 4-52 使用「MAIN」旋鈕調整頻率，使得頻率視窗顯示接近 1k。



Time/Div=0.2ms, $T=0.2\text{ms} \times 5=1\text{ms}$ ，頻率 $f=1/T=1\text{kHz}$
 CH1 Volds/Div=1, $V_m=1\text{V} \times 3=3\text{V}$

★ 圖 4-51 信號產生器與示波器的連接



★ 圖 4-52 信號產生器面板

8. **微調頻率**：於圖 4-52 使用「FINE」旋鈕微調頻率，使得頻率視窗顯示接近 1.003kHz ~ 999Hz。(頻率視窗 kHz 的 LED 若亮起，表示頻率單位是 kHz；反之，頻率視窗 Hz 的 LED 若亮起，表示頻率單位是 Hz)
9. **設定電壓**：於圖 4-52 將「Power」旋鈕右旋，將電壓慢慢調大使得示波器 $V_{p-p}=6\text{V}$ ，如圖 4-51。

10. 請寫出您的信號產生器可輸出的最大有效電壓_____。(使用三用電表量測)
11. 請寫出您的信號產生器可輸出最大的正弦波頻率_____, 最小正弦波頻率_____。

範例 4-3i

直流偏移量的調整。於第五章直流暫態中需要使用直流偏移量，本例示範如何調出頻率10kHz，0V與2V各佔百分之五十的直流方波，如圖4-53所示。

使用儀器

1. 信號產生器：OWON AG1022
2. 示波器：OWON SDS1022

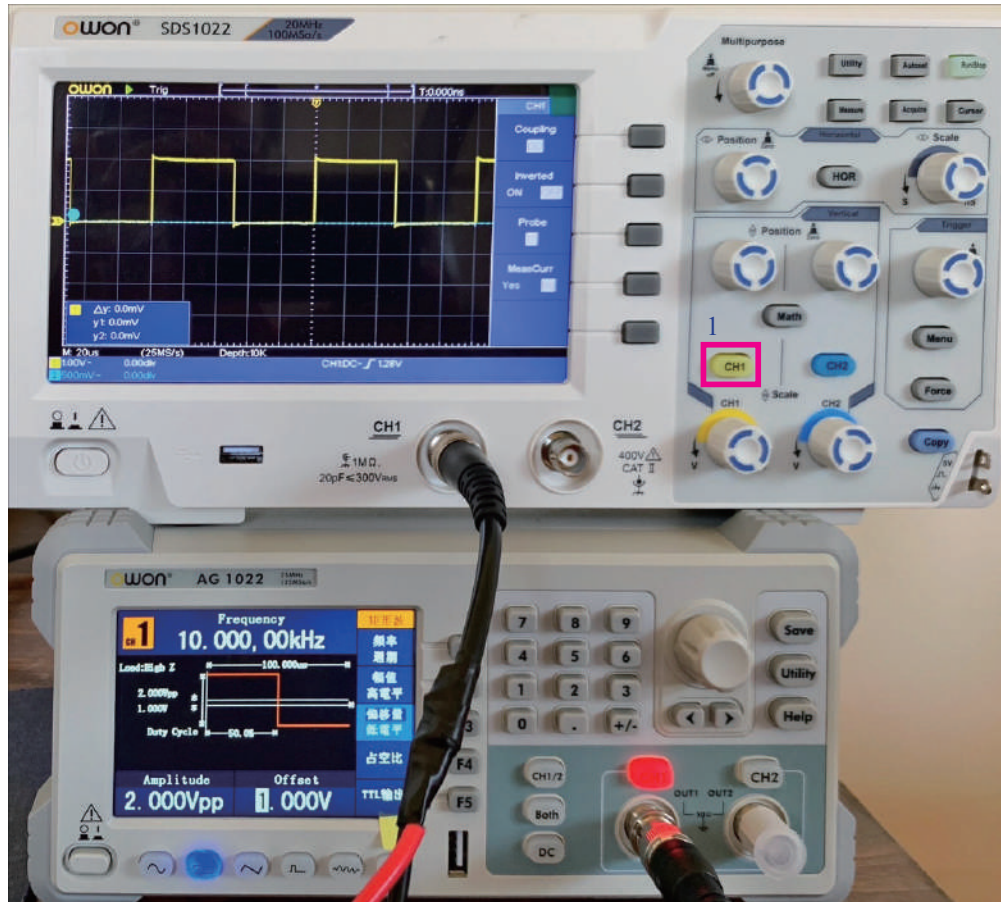
實習目的

1. 使學生瞭解「直流 / 交流」耦合的操作與目的。
2. 後面第 5 章直流暫態會使用此波形。

操作步驟

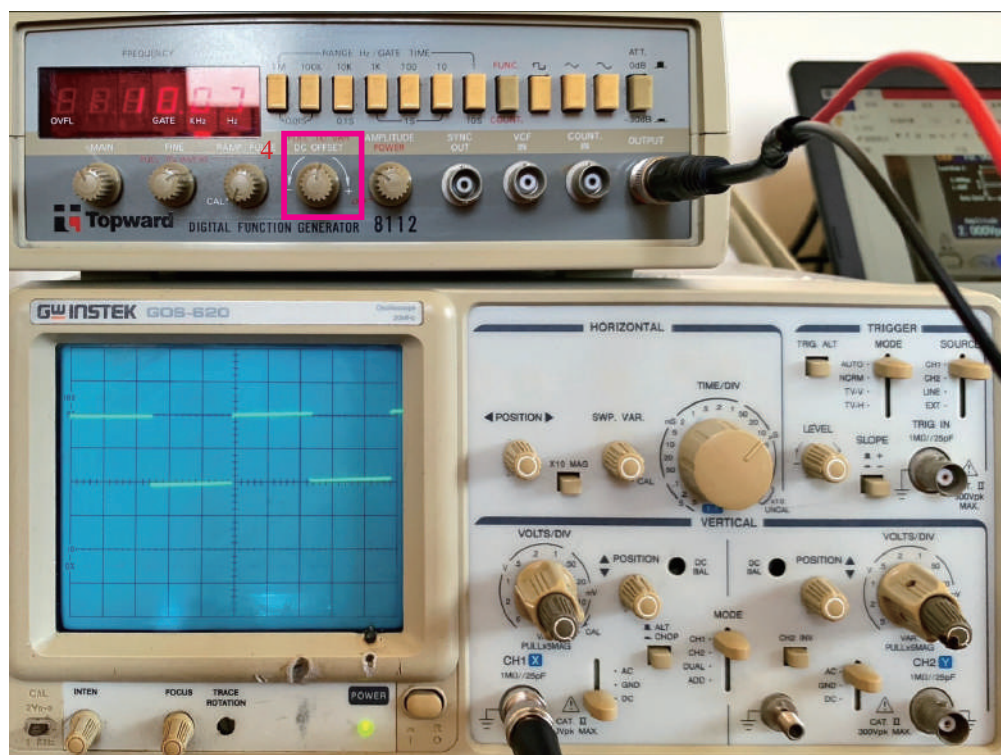
1. 示波器先調整「DC」模式，如圖 4-53。(按一下「CH1」，使用按鈕點選「Coupling DC」)
2. 讓信號產生器輸出 10kHz， V_{p-p} 2V 的方波，請留意此時信號是 -1 與 1 之間。
3. 信號產生器設定偏移量「1V」。點選圖 4-53 的「偏移量 Offset」，然後依照指示輸入「1」。
4. 圖 4-54 是傳統信號產生器的設定，請將「DC OFFSET」向外抽出、右旋，看著示波器螢幕，直到顯示正確波形。
5. 固緯 SFG-1013 信號產生器，也是拉起「OFFSET」旋鈕，然後右旋，即可調整直流補償。
6. 本例因為信號產生器有直流成份，所以示波器都要選擇「Coupling DC」。

7. 請特別留意，有些同學會直接調整示波器的零準位，讓信號看起來在 0~2V 之間，但這是錯的。所謂直流補償是從信號產生器下手，提供直流補償 1V，讓信號從原本 -1~1V，提升為 0~2V。而且示波器要調為 DC 耦合，因為另一 AC 耦合是去掉直流成分，只讓交流信號進入。



Time/Div=20us, T=20us*5=100us, 頻率 $f=1/T=10\text{kHz}$
 CH1 Vols/Div=1, $V_m=1\text{V}*2=2\text{V}$

✦ 圖 4-53 直流偏移量的調整



✦ 圖 4-54 傳統信號產生器與示波器的「DC OFFSET」

4-4 交流電壓與電流的測量

前面 4-3 節已經介紹示波器、信號產生器的使用，本節則要開始介紹交流電路電流有效值，瞬時值的量測，與如何同時量測兩個串聯分壓。(備註：關於有效值的相關知識，請看附錄 C)

範例 4-4a

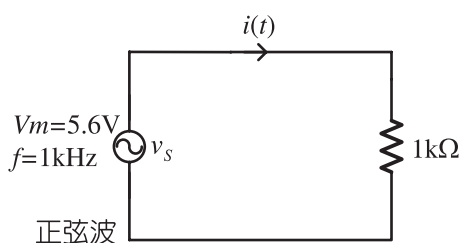
交流電流有效值的量測。設有交流電路如圖 4-55a，請量測交流電流有效值。

使用儀器

1. 任一信號產生器。
2. 交流電流表，本例使用 OWON OW16A，但大部分數位三用電表的檔位與用法都相近。

操作步驟

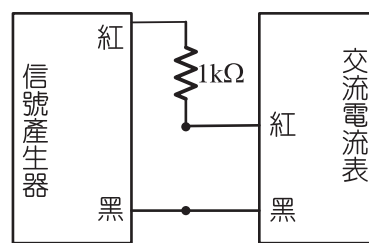
1. 前面直流電流需要開路量測，交流電流也是，都要將電路切斷，讓電流流進三用電表。
2. 焊接電路如圖 4-55b。



★ 圖 4-55a 電路圖



★ 圖 4-55b 電路板實體圖



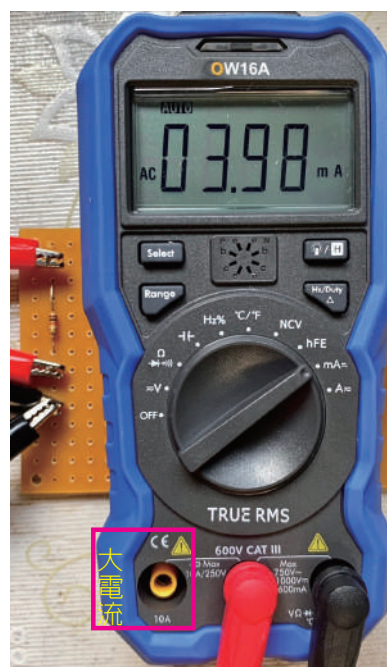
★ 圖 4-55c 交流電流表連接圖

3. 信號產生器調整輸出 $V_m = 5.6V$ ， $f = 1kHz$ 正弦波。計算 V_{rms} 理論值 = $5.6/1.4 = 4V$ 。計算 I 有效值 = $4/1k = 4mA$ ，
4. 使用交流電壓表測量交流電壓有效值 (rms)。_____，請問與理論值接近否？_____
 - (1) 三用電表撥到「V」檔位，請留意此為交直流電壓共用檔位，如圖 4-56a，其按鈕有「直線」與「正弦波」線條，表示此檔位是交直流共用。

- (2) 連續點選「Select」按鈕，使得螢幕顯示「AC」。(選擇量測交流電壓)
 - (3) 連續點選「Range」按鈕，使得螢幕出現「000.0V」檔位。請連續按壓「Range」按鈕，觀察其可量測範圍，例如，OW16A 會出現「000.0mV,0.000V,00.00V,000.0V,0000V」等數字範圍，供使用者點選，此數字範圍即代表此檔位可量測範圍，例如，000.0mV 表示可量測範圍為 $999.9 \sim 0.1\text{mV}$ ；0000V 表示可量測 $1000 \sim 0\text{V}$ ，其餘類推。
 - (4) 請將三用電表測試棒連接信號產生器輸出，如圖 4-56a，本例得到交流電壓有效值是 4.12V 。此與理論值接近，因為實驗室的儀器都沒有每年校正，所以有誤差。
5. 交流電流有效值測量。交流電流表接線如圖 4-55c。
- (1) 檔位選擇。三用電表撥到「mA」檔位，請留意此為交直流電流共用檔位。
 - (2) 連續點選「Select」按鈕，使得螢幕顯示「AC」。
 - (3) 連續點選「Range」按鈕，使得螢幕出現「000.0mA」檔位。OW16A 可量測範圍有 00.00mA , 000.0mA 兩個檔位。另一「A」檔位則是大電流檔位，其量測範圍是 00.00A ，但此檔位的正極棒要使用大電流「10A」插孔，如圖 4-56b。
 - (4) 交流電流是 3.98mA ，如圖 4-56b，此與理論值相近，滿足歐姆定律。



★ 圖 4-56a 交流電壓的量測



★ 圖 4-56b 交流電流的量測

範例 4-4b

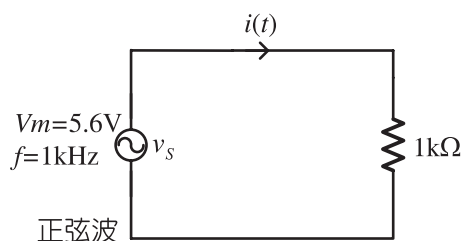
交流瞬時電流的量測。交流電壓既然一直變化，那交流電流呢？設有交流電路如圖 4-57a，請量測交流瞬時電流波形。

實習目的

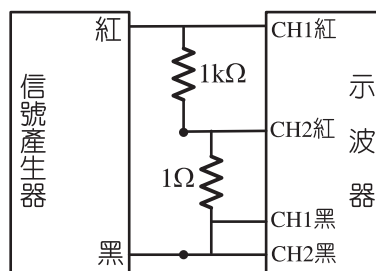
1. 練習交流電流的量測。

操作步驟

1. 示波器是用來觀測電壓波形，但因為歐姆定律 $i = v/R$ ，當 $R = 1\Omega$ 時， $i = v$ ，所以可以將原電路串聯一個 1Ω 電阻，此時的電壓波形，即為電流波形。
2. 所以電路連接如圖 4-57b，實體圖如圖 4-57c（ 1Ω 電阻採用活動式鱷魚夾），左邊鱷魚夾是信號產生器的輸出，右邊是示波器 CH1 的輸入。

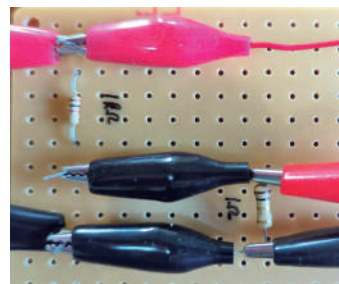


★ 圖 4-57a 電路圖



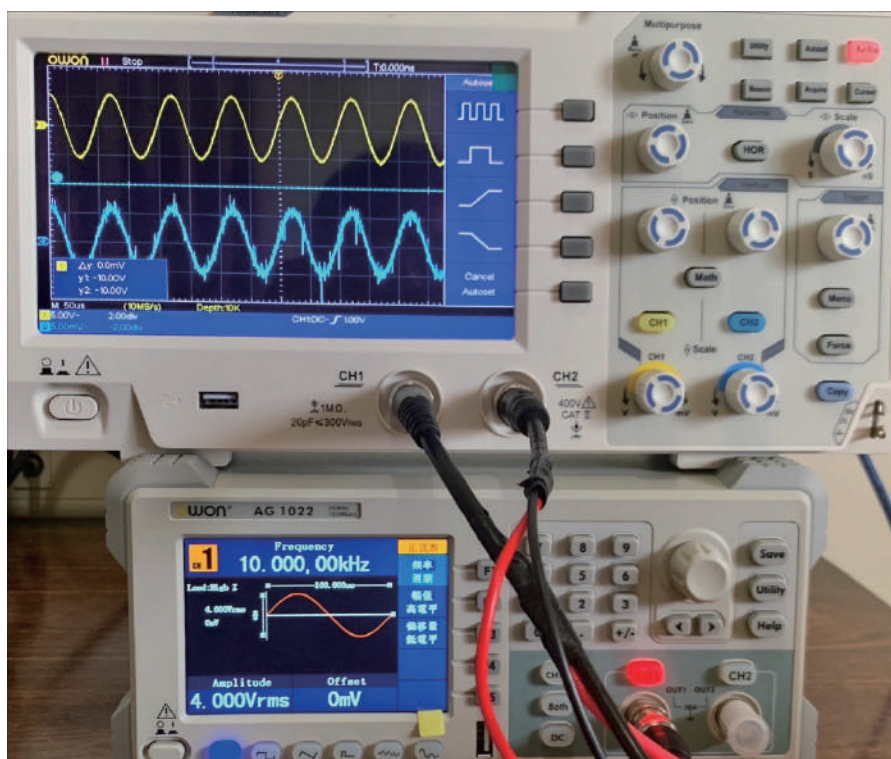
★ 圖 4-57b 連接圖

3. 信號產生器請調整 $V_m = 5.6$ ， $f = 10\text{kHz}$ 。
4. 示波器請按一下「AutoSet」自動設置調整，示波器波形如圖 4-58，由圖形可知 $i_m = V_m = 5.6\text{mA}$ ， $T = 50\mu\text{s} \times 2 = 100\mu\text{s}$ ， $f = 1/T = 10\text{kHz}$ ，與理論值相符，交流電流亦遵守歐姆定律。
5. 一般小信號較容易受雜訊影響，測試棒若使用簡易型的鱷魚夾線，會出現很多雜訊，如



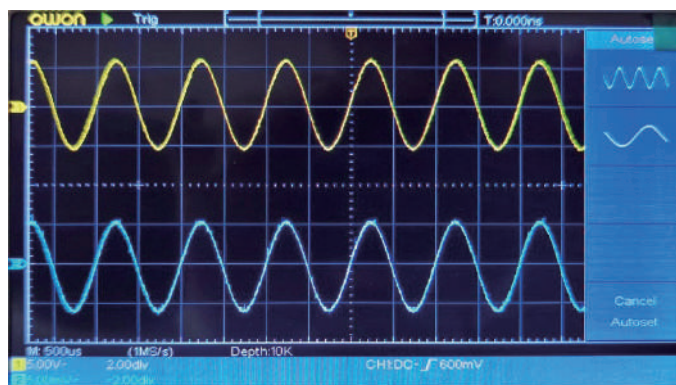
★ 圖 4-57c 電路板實體圖

圖 4-58，線條很粗，此時可以按一下「Run/Stop」，停止取樣，將畫面靜止。或換成示波器測專用夾式測試棒，因為夾式測試探棒整個正極都有被負極包住，就可以減少雜訊干擾，如圖 4-59。



Time/Div=20us, $T=20\mu s \times 5=100\mu s$ ，頻率 $f=1/T=10\text{kHz}$
 CH1 Volds/Div=1, $V_m=1\text{V} \times 2=2\text{V}$
 CH2 Volds/Div=5mV, $V_m=5\text{mV} \times 1.2=6\text{mV}$

✦ 圖 4-58 示波器波形



✦ 圖 4-59 小信號使用示波器測試探棒的波形

6. 由圖 4-59 可知， $i_m = v_m = 5\text{mV} \times 1.2 = 6\text{mA}$ ， $i_{rms} = i_m / 1.4 = 4.2\text{mA}$ 交流電也滿足歐姆定律。
7. 由範例 4-4a、4-4b 可知，三用電表是量測有效值，示波器則是量測瞬時值。

範例 4-4c

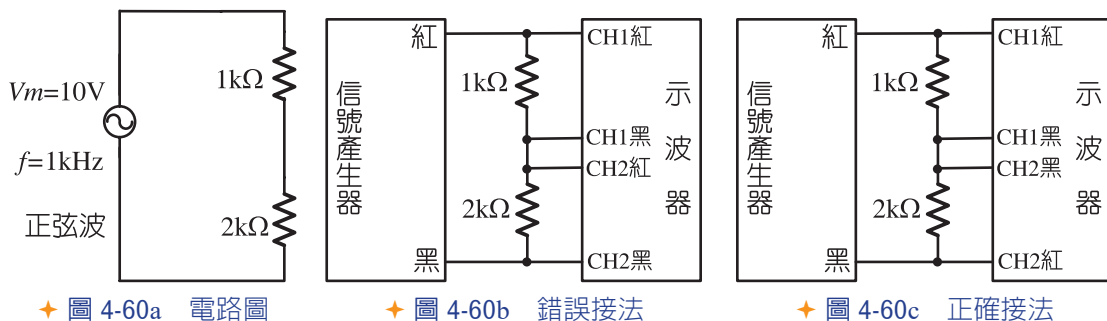
串聯分壓的量測。假設有電路如圖 4-60a，請問如何同時使用 CH1、CH2 測量其分壓。

實習目的

1. 瞭解如何使用示波器 CH2 反向 (INVERSE) 的功能。
2. 後續第六章，電壓與電流同時量測會用到此技巧。

操作步驟

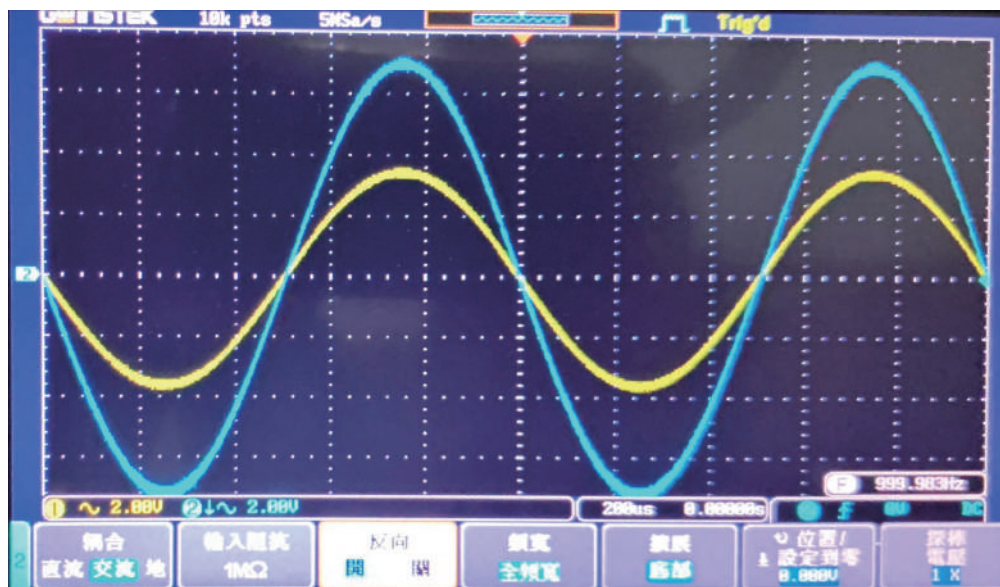
1. 初學者的想法大都如圖 4-60b，但是因為示波器內部 CH1、CH2 地線是同一點，彼此互相連通，以上接法將導致 CH2 所量測的電阻被短路，而沒有電壓。
2. 變通的辦法是將 CH2 反向連接，如圖 4-60c，讓兩個地線連在一起。



3. 然後於示波器設定 CH2 電壓反相，如圖 4-61。數位顯示型示波器，都是按一下「CH2」，會出現選單，然後點選 CH2 反相，如圖 4-61。（傳統映像管顯示示波器，CH2 有「INV」按鈕，讓使用者選擇是否反向）
4. 電源線地線問題。因為大部分的信號產生器、示波器等儀器都將儀器地線與電源的地線互相連接，所以以上 CH2 所量測的電阻還是被短路，所以應該檢查信號產生器的電源線，將此電源線的地線移除。（儀器地線連接電源地線才安全，但此一實驗不能讓信號產生器地線與示波器地線互相連接，變通的辦法就是隔離信號產生器或示波器的電源地線，隔離地線的方法很多，最實用而安全的方法是，使用電源地線隔離轉接插座（此一電源轉接頭，輸入僅兩個接點，所以原地線就空接了，輸出有

三孔，可以插入三線電源線，所以地線就被隔離了)，暫時將任一儀器的電源地線隔離。

5. 排除地線後，示波器執行結果如圖 4-61，請由實驗結果計算電壓有效值，然後也由電路計算理論值，觀察兩者是否相符。



Time/Div=200us, $T=200\mu s \times 5=1\text{ms}$ ，頻率 $f=1/T=1\text{kHz}$

CH1 Volds/Div=2, $V_m=2V \times 1.8=3.6V$

CH2 Volds/Div=2V, $V_m=2V \times 3.5=7V$

✦ 圖 4-61 示波器圖形

4-5 量測誤差實作

基本電學實習量測誤差 (error of measurement) 的來源分別有儀器的誤差、材料的誤差、人員操作誤差，分別說明如下：

儀器的誤差

所有儀器都有誤差，所以所有儀器都要定期校正，但是我們學校的儀器因為屬於非買賣交易的教育實習儀器，所以幾乎沒有在校正，當然一定有誤差。

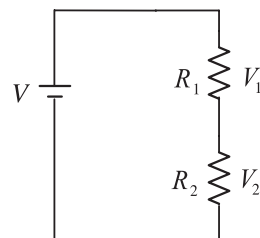
範例 4-5a

請放一個 $1\text{k}\Omega$ 電阻，輪流由每個同學用自己的三用電表量測其電阻。

自我練習

1. 請老師使用電源供應器調好 5V 輸出電壓，然後輪流由每位同學使用自己的三用電表量測其電壓。

由以上結果可發現，不同的儀器都有不同的結果，爲了避免不同儀器有不同的結果，所以在同一次實驗，請用同一個儀器量測。例如，圖 4-62 是使用電源供應器進行兩個電阻的分壓實驗，本例電壓的量測有 V 、 V_1 、 V_2 ，通常電源供應器有顯示電壓，但既然 V_1 、 V_2 要由三用電表量測，所以電源供應器的 V 也要以三用電表爲準，這樣才有統一的量測基準。



★ 圖 4-62

負載效應 (loading effect)

電源供應器與信號產生器都會因負載改變而改變輸出電壓（交流電路會因頻率改變而改變阻抗，也會影響輸出電壓，所以都要用三用電表或示波器不斷檢驗輸出電壓是否改變，若有改變都要隨時調整，這樣輸出結果才能正確。

範例 4-5b

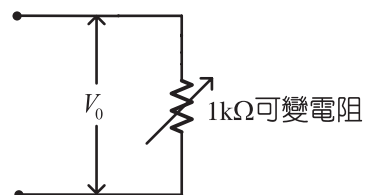
實作負載效應。

操作步驟

1. 電源供應器使用三用電表測量並確認 1V 輸出，電路如圖 4-63。
2. 可變電阻請調為 $1\text{k}\Omega$ ，量測輸出電壓。

3. 可變電阻請調為 100Ω ，量測輸出電壓。

4. 可變電阻請調為 50Ω ，量測輸出電壓。_____
5. 可變電阻請調為 40Ω ，量測輸出電壓。_____
6. 可變電阻請調為 30Ω ，量測輸出電壓。_____（電流有點大，請不要量太久，以免電阻過熱燒毀）
7. 可變電阻請調為 20Ω ，量測輸出電壓。_____（電流有點大，請不要量太久，以免電阻過熱燒毀）
8. 可變電阻請調為 10Ω ，量測輸出電壓。_____（電流有點大，請不要量太久，以免電阻過熱燒毀）
9. 由以上實驗，我們發現，當阻抗低於 50Ω 時，電流變大時，由於電壓源還是有內組，此內阻會消耗電壓，所以輸出電壓會降低，此即為負載效應，此時只好調高電源供應器的輸出電壓。
10. 交流電路也會有此現象，因為交流電路裡的電感與電容的阻抗會因為頻率的改變而改變，當阻抗低於 50Ω 時，輸出電流變大，信號產生器的內阻會消耗電壓，信號產生器的輸出電壓也會降低，此時就要適當的調高輸出電壓，以彌補內阻消耗的功率。



★ 圖 4-63

材料的誤差

所有的電子材料也都有誤差，但大部分都有記載其誤差範圍。

自我練習

1. 請拿出 5 個 $1k\Omega$ 電阻，使用三用電表輪流量測其電阻值。
2. 請拿出 5 個 $10mH$ 電感，使用 RLC 表量測其電感量。
3. 請拿出 5 個相同電容，使用 RLC 表量測其電容量。

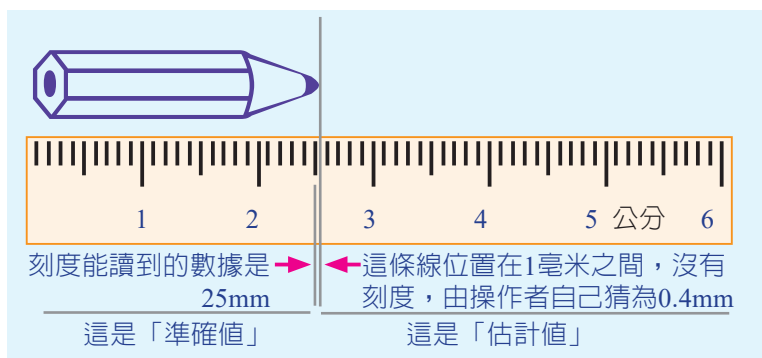
人員操作的誤差

「準確值」與「估計值」

「準確值」與「估計值」是在量測時，讀取數據的方法，所謂「準確值」就是量具上有刻度的數據；「估計值」則是無刻度的區域，由操作者依照比例「寫」出一位數字，它是在「準確值」的下一位數（即使是「0」也必須寫下來，不能省略），而且切記，只能「寫」一位數字。

範例 4-5c

圖 4-64 為量測某物體的長度，請讀出被測物的長度數據。



★ 圖 4-64 物體長度的量測

操作步驟

1. 這是一支直尺大刻度的單位是「公分 (cm)」，小刻度的單位是「毫米 (mm)」，所以這把直尺的最小刻度是「毫米 (mm)」。
2. 把「準確值」與「估計值」合起來的數據： $25mm + 0.4mm = 25.4mm$ 。
3. 如果單位改成「公分」，則 $25.4mm = 2.54cm$ 。換句話說，不管以何種單位所讀出來的數據，最後一位一定是「估計值」，倒數第二位則是「最小刻度」的位置。

4. 三用電表、示波器也是這樣，每次量測，指針都不可能剛好落在刻度上，所以一樣有準確值與估計值。

自我練習

1. 請用三用電表夾住 1 個 $1\text{k}\Omega$ 電阻，放在桌子上不動，輪流由每個同學讀取量測值。

4-6 本章內容摘要

1. 電容的電容器與**板面積**成正比，與**兩板距離**成反比，如以下公式：

$$C(\text{電容量}) = \varepsilon(\text{介電係數}) \times \frac{A(\text{截面積})}{d(\text{距離})} (\text{法拉, F})$$

2. 電容量的標示使用 3 個阿拉伯數字表示電容器的容量。其中前兩位數為有效值數字，第三位數為乘幂數（10 的幾次方，即表示有效值後有多少個 0），基本單位為 pF。例如 105 其電容量是 1000000pF = 1μF
3. 基本電學實習誤差的來源分別有儀器的誤差、材料的誤差、人員操作誤差。
4. 理想的電源內阻為 0，但實際的電源供應器與信號產生器內阻不可能為 0，都會因負載改變，當電流變大時，內阻也會消耗電壓，而使得實際輸出電壓變小，此稱為負載效應。
5. 電感電容電阻表稱為 LCR 表，用來量測**電感** (L)、**電容** (C) 和**電阻** (R) 等元件的值。
6. 電感器的電感量與**截面積**、**匝數**的平方成正比，與**長度**成反比，如以下公式：

$$L(\text{自感電感量}) = \frac{\mu(\text{導磁係數}) \times (\text{截面積}) \times N^2(\text{匝數平方})}{\ell(\text{長度})} (\text{亨利, H})$$

7. 電感的色碼標示與與電阻相同，但是其單位是 μH，例如色環分別是『棕黑金銀』，代表其值是 $10 \times 10^{-1} \mu\text{H} \pm 10\% = 1\mu\text{H} \pm 10\%$ ；
8. 電感的數碼標示法單位為 μH，例如 122J，即表示 $12 \times 10^2 \pm 5\% \mu\text{H} = 1.2\text{mH} \pm 5\%$

4-7 課後習題

一、選擇題

1. 某生在實驗課時用 LCR 表量測一標示為 203K 之待測陶瓷電容，該生所量測的電容值可能為何？ 統測 111

(A) 20.8nF (B) 20.8 μ F (C) 203nF (D) 203 μ F

2. 示波器操作面板上 LEVEL 鈕之功能為何？ 統測 111

(A) 調整亮度 (B) 調整觸發準位 (C) 調整水平位置 (D) 調整垂直位置

3. 若將平板電容器極板面積減少為原來的一半，並將極板間的距離改變為原來的 2 倍，且介電係數不變，則改變後的電容器之電容值為原來的幾倍？ 統測 111

(A) 4 倍 (B) 2 倍 (C) 0.5 倍 (D) 0.25 倍

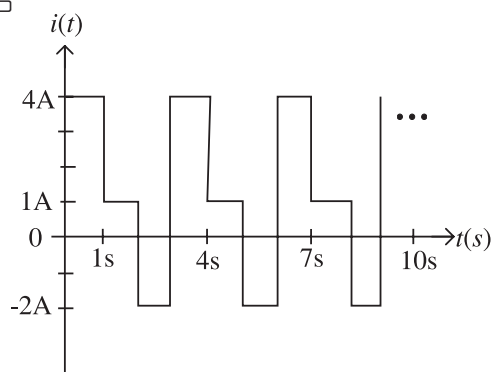
4. 如圖 (1) 所示週期性電流信號 $i(t)$ ，該信號之平均值 I_{av} 及有效值 I_{rms} 分別為何？ 統測 111

(A) $I_{av} = 1\text{ A}$ ， $I_{rms} = \sqrt{7}\text{ A}$

(B) $I_{av} = \sqrt{7}\text{ A}$ ， $I_{rms} = 1\text{ A}$

(C) $I_{av} = 2\text{ A}$ ， $I_{rms} = 2\sqrt{7}\text{ A}$

(D) $I_{av} = 2\sqrt{7}\text{ A}$ ， $I_{rms} = 2\text{ A}$



★ 圖 (1)

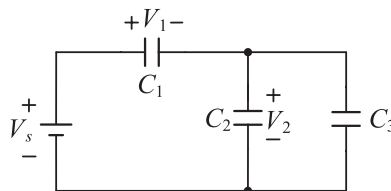
5. 如圖 (2) 所示電路，若直流電壓源 $V_s = 120\text{V}$ ， $C_1 = 10\mu\text{F}$ 、 $C_2 = 20\mu\text{F}$ 、 $C_3 = 30\mu\text{F}$ ，則電壓 V_1 與 V_2 分別為何？ 統測 112

(A) $V_1 = 20\text{V}$ 、 $V_2 = 100\text{V}$

(B) $V_1 = 60\text{V}$ 、 $V_2 = 60\text{V}$

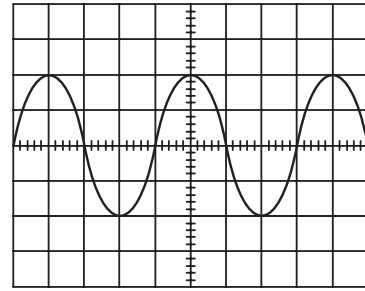
(C) $V_1 = 80\text{V}$ 、 $V_2 = 40\text{V}$

(D) $V_1 = 100\text{V}$ 、 $V_2 = 20\text{V}$



★ 圖 (2)

6. 用示波器量測弦波電壓信號，其測試棒及示波器端之衰減比設定皆為 1 : 1，電壓信號波形如圖 (3) 所示，若電壓信號的峰值對峰值為 20V，頻率為 500Hz，則示波器設定垂直刻度 (VOLTS / DIV) 與水平刻度 (TIME / DIV) 分別為何？



★ 圖 (3)

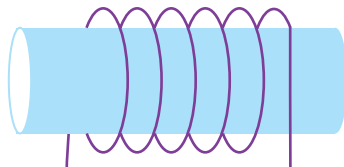
統測 112

- (A) 垂直刻度為 10V / DIV、水平刻度為 0.5ms / DIV
 (B) 垂直刻度為 10V / DIV、水平刻度為 5ms / DIV
 (C) 垂直刻度為 5V / DIV、水平刻度為 10ms / DIV
 (D) 垂直刻度為 5V / DIV、水平刻度為 0.5ms / DIV
12. 電壓 $v(t) = 6 + 8\sqrt{2}\sin(10t)$ V，則其有效值 V_{rms} 與平均值 V_{av} 之比值 (V_{rms} / V_{av}) 約為何？
- (A) 1.67 (B) 1.41 (C) 1.34 (D) 1.11

統測 112

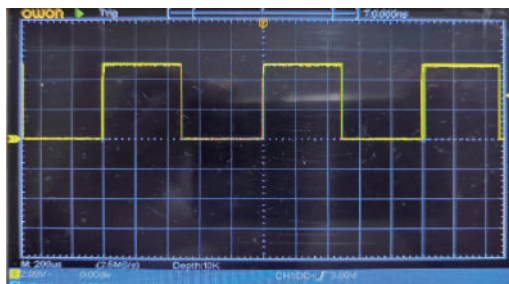
二、填充題

- 有一電感，顏色為「橙黑金銀」，其值=_____，誤差=_____。
- 有一電感，標示 303K，其值=_____，誤差=_____。
- 有一平行電板，介電係數是 1×10^{-12} F/m，板面積是 10m^2 ，兩板距離是 2×10^{-4} ，請問電容量=_____，若將板面積變為 2 倍，電容量 = _____，若板面積不變，距離縮短為一半，電容量 = _____。
- 有一電容器標示為 401N，請問電容量 = _____，誤差 = _____。
- 如圖 (4) 所示，已知鐵心截面積 $A = 10^{-2}\text{m}^2$ ，鐵長度 = 10^{-1}m ，鐵心導磁係數 $\mu = 10^{-4}\text{H/m}$ ，線圈匝數 $N=100$ 匝。求 (1) 自感 $L = ?$ (2) 若線圈匝數減半，則 $L = ?$

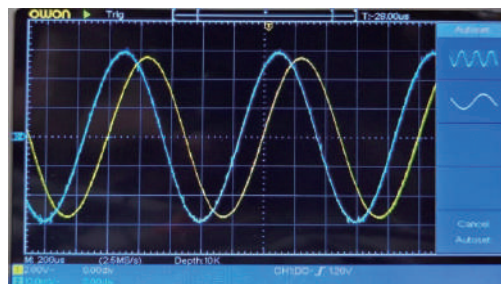


★ 圖 (4)

6. 若有示波器畫面如圖 (5)，Voids/Div=2V，Time/Div=200us，請問此波形 $V_m = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $T = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $f = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
7. 若有示波器畫面如圖 (6)，黃色波形是 CH1，Voids/Div=2V，藍色波形是 CH2，Voids/Div=10mV Time/Div=200us，請問藍色波形 $V_m = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_{rms} = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $T = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $f = \underline{\hspace{2cm}}$ ，與黃色波形的相位差 = $\underline{\hspace{2cm}}$



✦ 圖 (5)



✦ 圖 (6)

直流暫態



學習大綱

- 5-1 電阻電容暫態電路
- 5-2 電阻電感暫態電路
- 5-3 本章內容摘要
- 5-4 課後習題

學習目標

1. 能瞭解 e 的緣由與 $f(x)=e^{-x}$ 圖形。
2. 能夠瞭解與計算電阻、電容暫態電路。
3. 能夠瞭解與計算電阻、電感暫態電路。



► 表 5-1 本章零件表

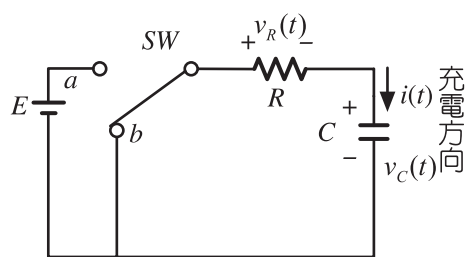
編號	零件名稱	數量	備註
1	100k Ω 電阻	1	
2	1k Ω 電阻	1	
3	100 μ F 電容	1	
4	0.1 μ F 電容	1	
5	10mH 電感	1	

前面我們已經介紹電阻接直流電壓的實驗，我們發現其電壓與電流瞬間就達穩定狀態。但是，電容與電感就不同了，其電壓與電流要達穩定狀態需要一個時間，且此時間與**電感**、**電容**、**電阻**有關。在電壓還沒穩定之前這段期間的電壓與電流變化狀況，我們稱為**暫態** (transient state)，等電壓與電流穩定了，我們稱此為**穩態** (steady state)。接著，我們定義電壓變化到電源電壓的 **63.2%** (配合 e 的次方) 所需的時間，稱為一個時間**常數時間**，符號為 τ (讀音 tau)，以上即為本章內容概要。本節所需要的相關知識——關於 e 的由來與指數函數等相關知識，請參考附錄 C。

5-1 電阻-電容暫態電路

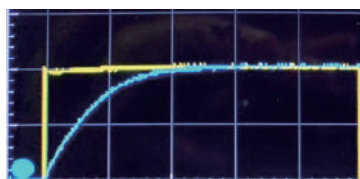
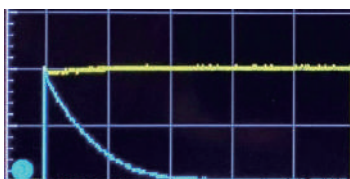
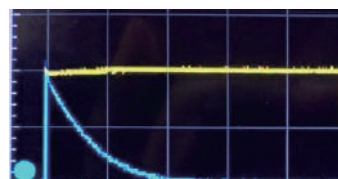
電阻電容充電暫態

圖 5-1 稱為電阻電容充電電路 (簡稱 RC 充電電路)。開關 SW 初始狀態位於位置 b ，此時電容器放電完畢，未儲存任何電荷。當 $t = 0$ 時，開關 SW 連接 a 點，電源 E 流出的電流 $i(t)$ 經 R 向電容器 C 充電 (電流是順時針)，



★ 圖 5-1

電容器兩端電壓 $v_C(t)$ 從 0 隨著時間 t 的增加逐漸增加，這段時間電壓一直在上升，一直在變化，我們稱為**暫態**。經過一段時間後，電容器兩端的電壓 $v_C(t)$ 會因電荷被充滿而等於電源電壓 E ，電流也為 0，此時電壓與電流都穩定下來，不再變化，我們稱為**穩態**。以上充電過程中， $v_C(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 的示波器函數圖形如圖 5-2a、5-2b、5-2c。

★ 圖 5-2a $v_C(t)$ 黃色是電源，藍色是 $v_C(t)$ ★ 圖 5-2b $v_R(t)$ 黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$ ★ 圖 5-2c $i(t)$ 黃色是電源，藍色是 $i(t)$

以上結果，經過科學家不斷實驗，我們發現都與時間 t 、 E 、 R 、 C 有關，且為時間 t 函數，隨著時間 t 的改變而改變，且其值可以由以下方程式表示：

$$v_C(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (\text{單位：V})$$

(公式5-1a)

$$v_R(t) = Ee^{-\frac{t}{RC}} \quad (\text{單位：V})$$

(公式5-1b)

$$i(t) = \frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \quad (\text{單位：A})$$

(公式5-1c)

時間常數

RC 充電電路中，電容器在充電過程電壓是由小變大，電路處在暫態期間的時間長短是取決於電阻值與電容值的大小，因此，我們定義一個**時間常數** (time constant)，此時間為電容端電壓由初始狀態 0V，增加到電源電壓的 63.2% (配合 e 的次方) 所需的時間，稱為一個時間常數時間。時間常數符號為 τ (讀音 tau)，其公式為：

$$\tau = RC$$

(公式5-1d)

τ ：時間常數，單位為秒(s)。

R ：電阻值，單位為歐姆(Ω)。

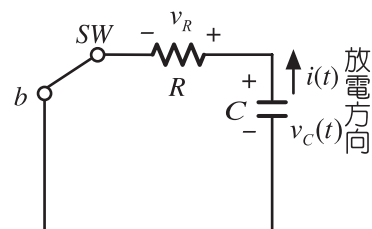
C ：電容值，單位為法拉(F)。

電阻電容暫態時間為 5τ ，經過 5τ 時間，電壓與電流都穩定下來，此時稱為穩態。

RC放電

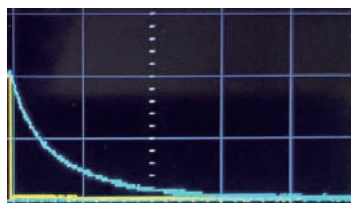
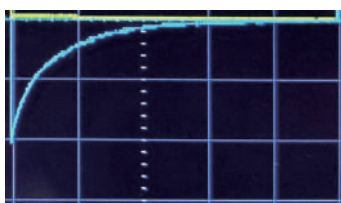
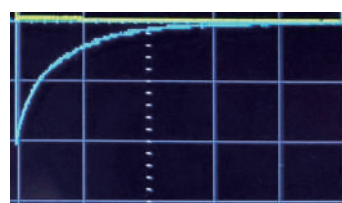
圖 5-1 當電容器充滿以後， $v_C(t) = E$ ， $v_R(t) = 0$ ， $i(t) = 0$ ，電路呈現穩定狀態。若此時開關 SW 切換至 b 的位置，如圖 5-3，電容器開始逆時針放電，電容器兩端的電壓 $v_C(t)$ 隨時間逐漸降低，科學家經過不斷的實驗，發現也是經過同樣 5 倍的時間常數 ($\tau = RC$)

後， $v_C(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 逐漸降為 0。以上放電過程中， $v_C(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 的示波器函數圖形如圖 5-4a、5-4b、5-4c，請留意 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 都是由負到 0，這代表放電的方向與充電時相反。



★ 圖 5-3

(本項放電實驗，因為暫態時間很短，無法使用人工的開關操作，所以使用信號產生器輸出 0 伏特，用來表示開關的接地，如以下圖形的黃色線條)

★ 圖 5-4a $v_C(t)$ 黃色是電源，藍色是 $v_C(t)$ ★ 圖 5-4b $v_R(t)$ 黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$ ★ 圖 5-4c $i(t)$ 黃色是電源，藍色是 $i(t)$

以上結果，經過科學家不斷實驗，發現都與時間 t 、 E 、 R 、 C 有關，且為時間 t 函數，隨著時間 t 的改變而改變，其值如下：

$$v_C(t) = Ee^{-\frac{t}{RC}} \text{ V (單位: V)}$$

(公式5-1e)

$$v_R(t) = -Ee^{-\frac{t}{RC}} \text{ V (單位: V)}$$

(負號表示與原充電電壓極性相反)

(公式5-1f)

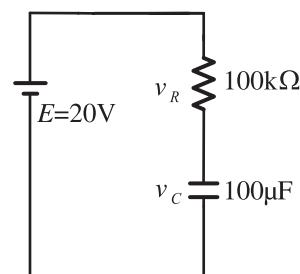
$$i(t) = -\frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \text{ A (單位: A)}$$

(負號表示與原充電電流方向相反)

(公式5-1g)

範例 5-1a

若有 RC 充放電暫態電路如圖 5-5，請完成充放電暫態實習。



★ 圖 5-5

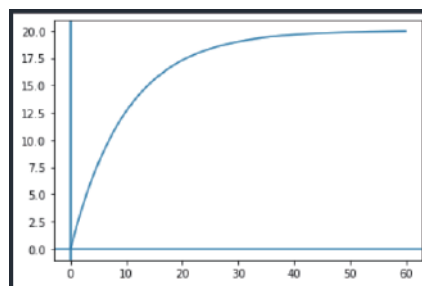
實習目的

1. 我們要驗證電容充電過程 $v_C(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 的變化為時間函數，其值與公式 5-1a、5-1b、5-1c 相同。
2. 我們要驗證電容放電過程 $v_C(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 的變化為時間函數，其值與公式 5-1e、5-1f、5-1g 相同。
3. 我們要驗證充電時間與放電時間均為 5 個時間常數 τ ($\tau = R \cdot C$)。

操作步驟

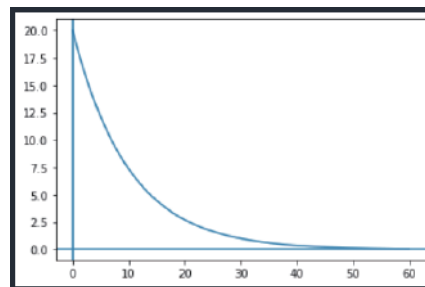
1. 本例 $\tau = RC = 100k \cdot 100\mu = 10s$ ， $E = 20V$
2. 撰寫程式，繪出 $v_C(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ 的函數圖形，執行結果如圖 5-6，由圖可知，要準備可以量測 20V~0V 的直流電壓表。

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
k=1000
u=0.000001
E=20
R=100*k
C=100*u
tau=R*C
t = np.arange(0, 6*tau, 0.1)
# t為串列，其值從0到6，dt=0.1
y=E*(1-(np.e)**(-t/tau)) #計算每一個x對應的y值，y也是串列
plt.plot(x,y) #繪出函數圖形
plt.axhline(y=0) #繪出x軸
plt.axvline(x=0) #繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```

★ 圖 5-6 $v_C(t)$ 的函數圖形

3. 撰寫程式，繪出 $v_R(t) = Ee^{-\frac{t}{RC}}$ 的函數圖形，結果如圖 5-7，由圖可知，要準備可以量測 20V~0V 的直流電壓表。

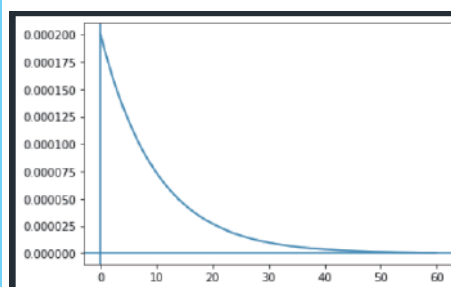
```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
k=1000
u=0.000001
E=20
R=100*k
C=100*u
tau=R*C
t = np.arange(0, 6*tau, 0.1)
# t為串列，其值從0到6，dt=0.1
y=E*(np.e)**(-t/tau)#計算每一個x對應的y
值，y也是串列
plt.plot(t,y)#繪出函數圖形
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```



★ 圖 5-7 $v_R(t)$ 的函數圖形

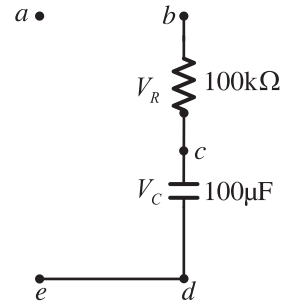
4. 撰寫程式，繪出 $i(t) = \frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}}$ 的函數圖形，結果如圖 5-8，由圖可知，要準備可以量測 0.20mA~0.00mA 的直流電流表。

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
k=1000
u=0.000001
E=20
R=100*k
C=100*u
tau=R*C
t = np.arange(0, 6*tau, 0.1)
# t為串列，其值從0到8，dt=0.1
y=(E/R)*(np.e)**(-t/tau)#計算每一個x對應
的y值，y也是串列
plt.plot(t,y)#繪出函數圖形
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```



★ 圖 5-8 $i(t)$ 的函數圖形

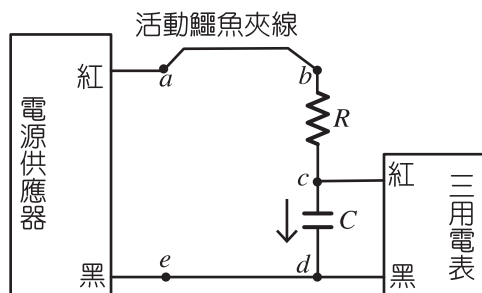
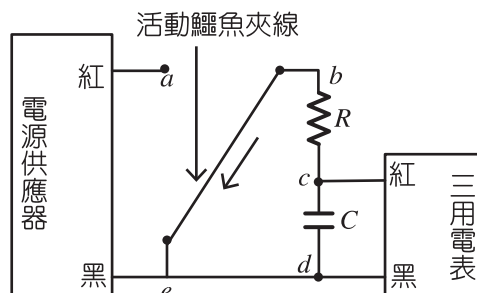
5. 完成焊接此電路，如圖 5-9，於 a, e 兩點供應 20V 直流電壓。
6. 計算時間常數 $\tau = R * C = 100k * 100\mu = 10s$ ，因為時間常數為 10 秒，我們使用眼睛就可觀察電壓與電流的變化。
7. 撰寫以下程式，此程式每 10 秒發出「嗶」一聲，當聽到此聲音，請用筆記錄當時電壓或電流之值。若實驗室沒有電腦，也可以兩個人一組，請同學幫忙看者手錶，每十秒敲一下桌子。



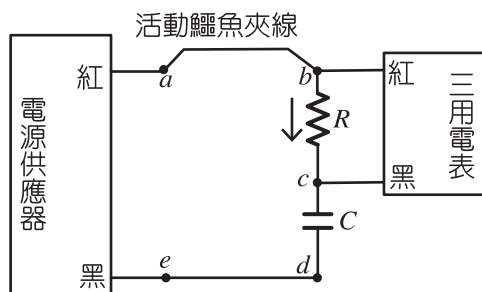
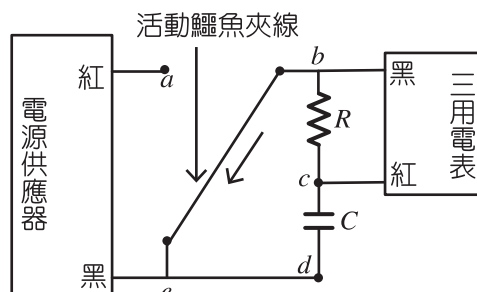
★ 圖 5-9 電路圖

```
import time
t=0
while True:
    t=t+1
    print(t)
    time.sleep(1)
    if t%10==0:
        print('\a')#發出Beep一聲
        t=0
```

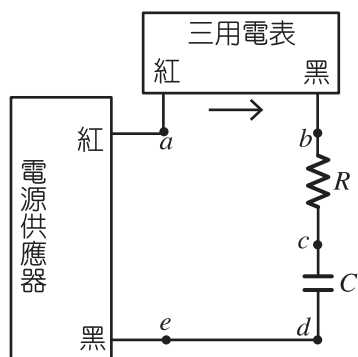
8. 本實驗可使用一個電表，分三次進行實驗，觀察與紀錄電壓或電流，也可以同時使用三個電表，由三位同學同時觀察與記錄。
9. 記錄 v_C 充電電壓：請先將電容放電（用尖嘴鉗夾一下電容器兩端，即可完成電容放電）。如圖 5-10，三用電表撥直流 V 檔位，正極接 c ，負極接 d 。當 b 點使用鱷魚夾夾線，夾在電源供應器 a 點瞬間，計時就開始，此時電容處於充電狀態，電壓逐漸上升，然後每 10 秒記錄 v_C 電壓，填入表 5-2 v_C 電壓欄位。請問您的 v_C 至多可以充電到多少？_____V。
10. 紀錄 v_C 放電電壓：如圖 5-11，三用電表撥直流 V 檔位，正極接 c ，負極接 d ，請留意與充電方向相同。請先完成步驟 9 的充電實習，此時電容已經充滿電量，將 b 點鱷魚夾線，夾在 e 點瞬間，計時就開始，然後每 10 秒記錄 v_C 電壓，填入表 5-3 v_C 電壓欄位。

★ 圖 5-10 $v_C(t)$ 充電★ 圖 5-11 $v_C(t)$ 放電

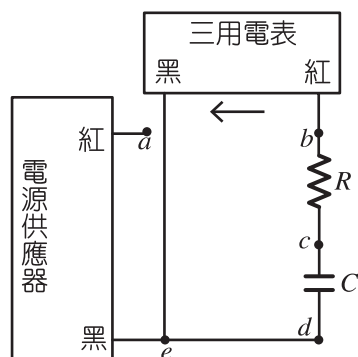
11. 記錄 v_R 充電電壓：請先將電容放電（用尖嘴鉗夾一下電容器兩端，即可完成電容放電）。接著，如圖 5-12，三用電表撥直流 V 檔位，正極接 b ，負極接 c 。當 b 點使用鱷魚夾線，夾在電源供應器 a 點瞬間，計時就開始，然後每 10 秒記錄 v_R 電壓，填入表 5-2 v_R 電壓欄位。
12. 紀錄 v_R 放電電壓：如圖 5-13，三用電表撥直流 V 檔位，正極接 c ，負極接 b ，請留意與充電方向相反。當完成步驟 11 充電實習，此時電容已經充滿電量，將 b 點鱷魚夾線，夾在 e 點瞬間，計時就開始，然後每 10 秒記錄 v_R 電壓，填入表 5-3 v_R 電壓欄位。

★ 圖 5-12 $v_R(t)$ 充電★ 圖 5-13 $v_R(t)$ 放電

13. 記錄充電電流 i ：請先將電容放電（用尖嘴鉗夾一下電容器兩端，即可完成電容放電）。如圖 5-14，三用電表撥直流 μA 檔位，正極接 a ，負極接 b 。當三用電表夾在電源供應器 a 點瞬間，計時就開始，然後每 10 秒記錄 i ，填入表 5-2 i 欄位。
14. 紀錄放電電流 i ：當完成步驟 13 充電實習，此時電容已經充滿電量，如圖 5-15，將三用電表，正極接 b ，負極接 e 點瞬間（請留意方向與充電方向相反），計時就開始，然後每 10 秒記錄 i ，填入表 5-3 i 欄位。



★ 圖 5-14 $i(t)$ 充電



★ 圖 5-15 $i(t)$ 放電

► 表 5-2 RC 充電

時間 t (秒)	$v_C(t)$ 單位V	$v_R(t)$ 單位V	$i(t)$ 單位mA
0			
10			
20			
30			
40			
50			
60			

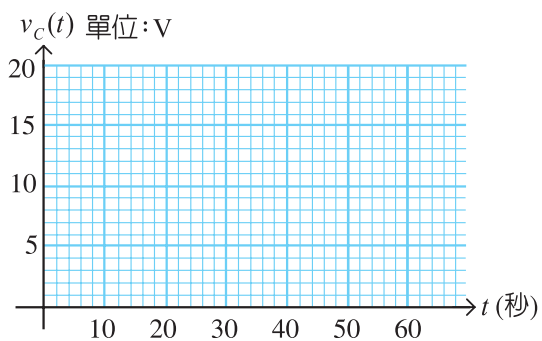
► 表 5-3 放電 (填寫 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 時，因為量測方向相反，請用負號表示)

時間 t (秒)	$v_C(t)$ 單位V	$v_R(t)$ 單位V	$i(t)$ 單位mA
0			
10			
20			
30			
40			
50			
60			

15. 請將表 5-2 的結果，於圖 5-16a,5-16b,5-16c 繪出 $v_C(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 時間函數圖。

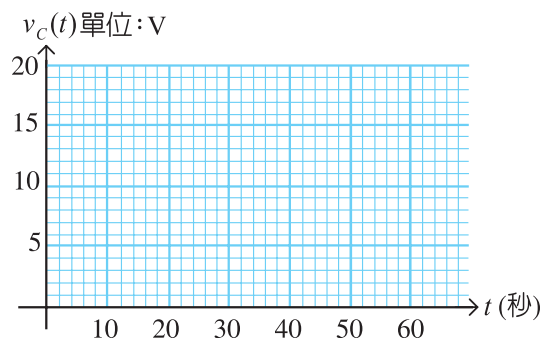
16. 請將表 5-3 的結果，於圖 5-17a,5-17b,5-17c 繪出 $v_C(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 時間函數圖。繪製 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 時，因為您的量測方向與充電方向相反，所以要畫在第 4 象限，此負號表示與充電方向相反。

充電

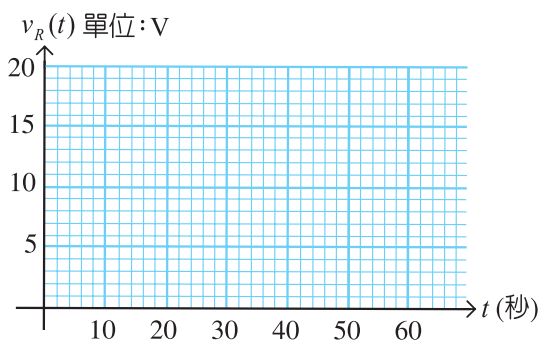


★ 圖 5-16a

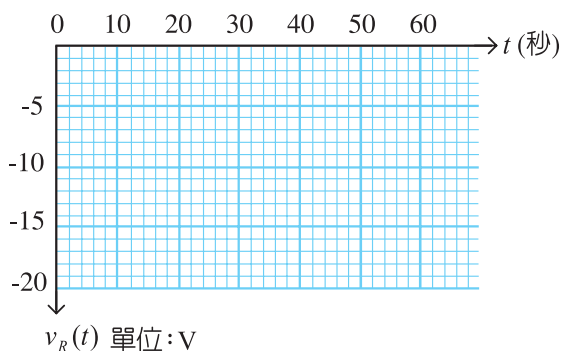
放電



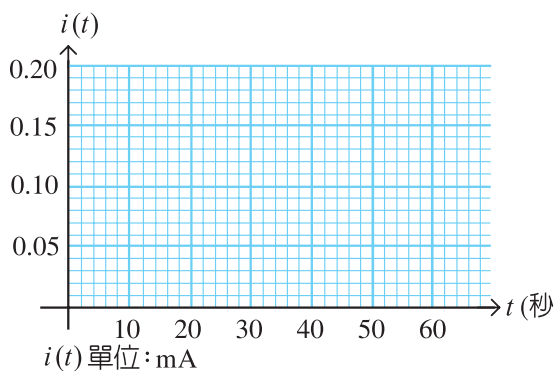
★ 圖 5-17a



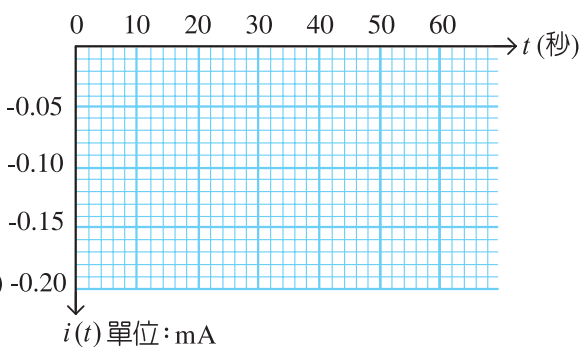
★ 圖 5-16b



★ 圖 5-17b



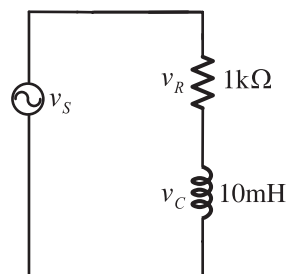
★ 圖 5-16c



★ 圖 5-17c

範例 5-1b

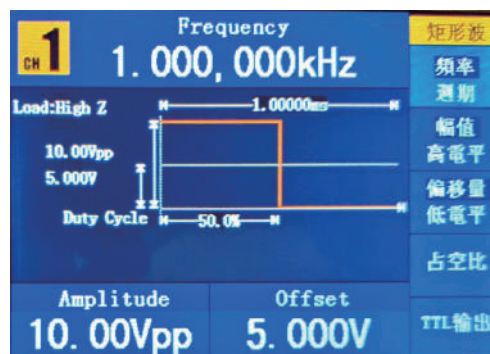
若有 RC 充放電如圖 5-18，請進行充放電實驗。



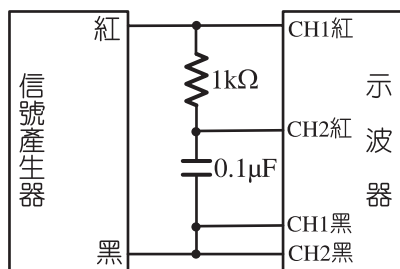
★ 圖 5-18 RC 暫態電路圖

操作步驟

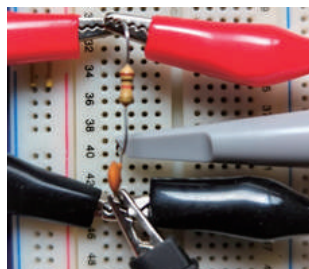
1. 前面範例 5-1a，因為 RC 時間常數有 10 秒，我們有充分的時間，可以使用三用電表量測電壓與電流，本例時間常數 $\tau = 1k * 0.1\mu = 0.1ms$ ，此時就要使用示波器了。
2. 本例使用信號產生器供應 10V 方波持續 0.5ms 當作充電電壓，然後供應 0V 方波持續 0.5ms 當作放電電壓（供應 0V 時，表示此點接地，電容就能放電）。0.5ms 供电，0.5ms 停電，所以週期為 1ms，頻率 $f = 1kHz$ 。以上直流方波，可以使用頻率 $f = 1kHz$ ， $V_{p-p} = 10V$ 的交流方波加上 5V 直流偏壓而得，如圖 5-19。
3. 同時量測 $v_s(t)$ 與 $v_c(t)$ 波形。信號產生器、示波器 CH1, CH2 接線如圖 5-20a，本例因為步驟 7，電容、電阻要交換位置，所以適合使用麵包板接線，如圖 5-20b。



★ 圖 5-19

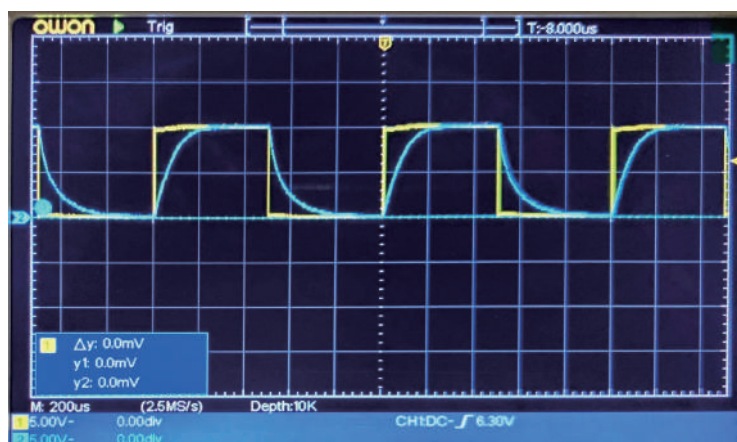


★ 圖 5-20a 信號產生器與示波器接線圖



★ 圖 5-20b 麵包板接線圖

4. 示波器執行結果如圖 5-21，CH1,CH2 都是直流耦合，Volds/Div 都是 5V，Time/Div = 200 μ s。



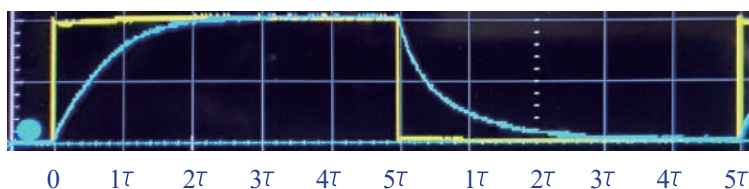
Time/Div=200 μ s, $T=200\mu\text{s} \times 5=1\text{ms}$ ，頻率 $f=1/T=1\text{kHz}$

CH1 Volds/Div=5, $V_m=5\text{V} \times 2=10\text{V}$

CH2 Volds/Div=5V, $V_m=5\text{V} \times 2=10\text{V}$

✦ 圖 5-21 示波器執行結果

5. 將 Time/Div 調為 100 μ s，波形放大如圖 5-22，垂直線每格剛好 1 個時間常數可以很清楚看到時間常數等於 1,2,3,4,5 時的充電電壓。



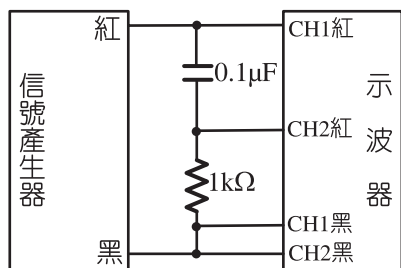
Time/Div=100 μ s, $T=100\mu\text{s} \times 10=1\text{ms}$ ，頻率 $f=1/T=1\text{kHz}$

CH1 Volds/Div=5, $V_m=5\text{V} \times 2=10\text{V}$

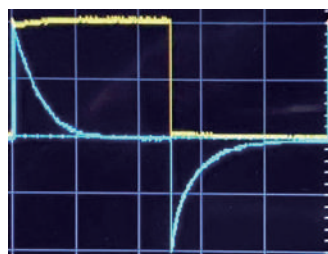
CH2 Volds/Div=5V, $V_m=5\text{V} \times 2=10\text{V}$

✦ 圖 5-22 示波器執行結果

6. 由圖 5-22 可知，信號產生器供電 10V 時，電容開始充電，經過 5 個時間常數 (500 μ s)，電容充滿電。信號產生器供電 0V 代表信號產生器接地，此時電容器開始反向放電，也是經過 5 個時間常數放電完畢，電壓歸零。
7. 同時量測 $v_s(t)$ 與 $v_R(t)$ 波形。信號產生器、示波器 CH1,CH2 接線如圖 5-23a，信號產生器輸入信號同上不變，此時示波器波形如圖 5-23b。



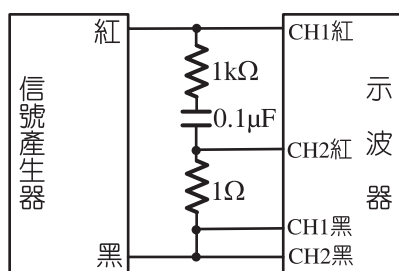
★ 圖 5-23a 信號產生器與示波器接線圖



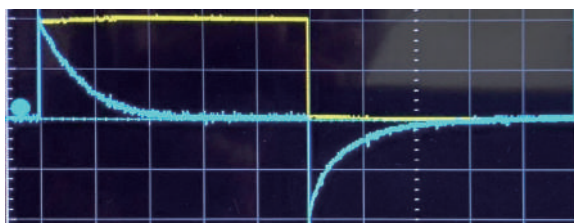
200μs, $T=200\mu s \times 5=1ms$
 CH1 Volds/Div=5, $V_m=5V \times 2=10V$
 CH2 Volds/Div=5V, $V_m=5V \times 2=10V$

★ 圖 5-23b 示波器執行結果

8. 由圖 5-23b 可知，信號產生器供電 10V， v_R 電壓逐漸降低，經過 5 個時間常數 (500us) 電壓完全為零。信號產生器供電 0V，代表信號產生器接地，此時由電容器供電，電流反向由電阻流回信號產生器的地線，時間也是 5 個時間常數 (500μs)。請留意放電 v_R 為負，表示電流反向。
9. 同時量測 $v_s(t)$ 與 $i(t)$ 波形。信號產生器、示波器 CH1, CH2 接線如圖 5-24a，信號產生器輸出信號同上不變，此時示波器波形如圖 5-24b。一般小信號就有此雜訊，所以要改用夾式探頭，畫面才不會跳動，也可以按一下「Run/Stop」，停止取樣，且將畫面靜止。



★ 圖 5-24a 信號產生器與示波器接線圖



Time/Div=100μs, $T=100\mu s \times 10=1ms$ ，頻率 $f=1/T=1kHz$
 CH1 Volds/Div=5, $V_m=5V \times 2=10V$
 CH2 Volds/Div=5mV, $V_m=5mV \times 2=10mV$

★ 圖 5-24b 示波器執行結果

10. 由圖 5-24b 可知，信號產生器供電 10V， i 電流逐漸降低，經過 5 個時間常數 (500μs) 電流完全為零。信號產生器供電 0V，代表信號產生器接地，此時由電容器供電，電流反向由電阻流回信號產生器的地線，時間也是 5 個時間常數 (500μs)，請留意電流方向的改變。

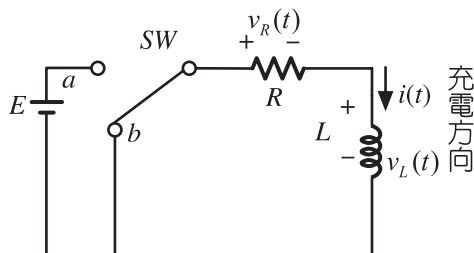
自我練習

1. 同範例 5-1b，但電阻改為 2kΩ，重新自己做一次，請問時間常數是多少？信號產生器頻率應該調為多少？

5-2 電阻-電感暫態電路

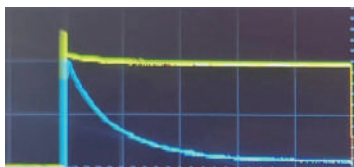
電阻電感充電暫態

圖 5-25a 稱為電阻電感充電電路（簡稱 RL 充電電路）。開關 SW 初始狀態位於位置 b ，此時電感器放電完畢，未儲存任何電荷。當 $t=0$ 時，開關 SW 連接 a 點，電源 E 流出的電流，先經過電阻 R ，再向電感器



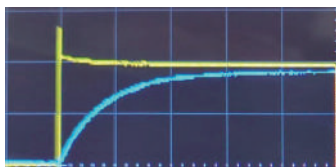
★ 圖 5-25a

L 充電，電感器兩端瞬間感應一個電動勢 E ，來抵抗電流的增加，但此電壓 E ，隨著時間的增加逐漸降低，這段時間電壓一直在下降，一直在變化，我們稱為**暫態**。經過一段時間後，電感器兩端的電壓逐漸降為 0，電壓穩定下來，不再變化，我們稱為**穩態**，此時電流為 E / R ，順時針。以上充電過程中， $v_L(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 的示波器函數圖形如圖 5-26b、5-26c、5-26d。（下圖電流的藍色線變粗，是因為電流信號較微弱，所以雜訊很明顯，線條變粗）



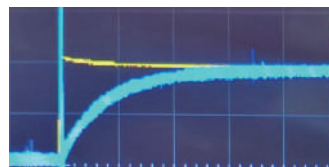
★ 圖 5-25b $v_L(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_L(t)$



★ 圖 5-25c $v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$



★ 圖 5-25d $i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

以上結果，經過科學家不斷實驗，我們發現都與時間 t 、 E 、 R 、 L 有關，且為時間 t 函數，隨著時間的改變而改變，且其值可由以下方程式表示：

$$v_L(t) = Ee^{-\frac{t}{L/R}} \quad (\text{單位：V})$$

(公式5-2a)

$$v_R(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{L/R}}) \quad (\text{單位：V})$$

(公式5-2b)

$$i(t) = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{t}{L/R}}) \quad (\text{單位：A})$$

(公式5-2c)

時間常數

RL 充電電路中，開關接觸接點 a ，電感器瞬間感應一個反電動勢，以抵抗電流的增加，然後此電壓逐漸降低，電路處在暫態期，暫態時間長短是取決於電阻值與電感值的大小，因此，我們定義一個**時間常數** (time constant)，此時間為電感端電壓由初始狀態電源電壓 E ，降到到電源電壓 E 的 **36.8%** (配合 e 的次方) 所需的時間，稱為一個時間**常數時間**。時間常數符號為 τ (讀音 tau)，其公式為：

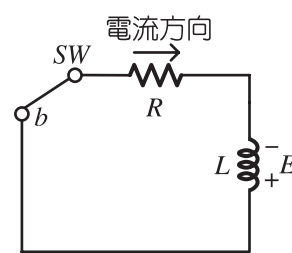
$$\tau = \frac{L}{R}$$

τ ：時間常數，單位為秒(s)。

R ：電阻值，單位為歐姆(Ω)。

L ：電感值，單位為亨利(H)。

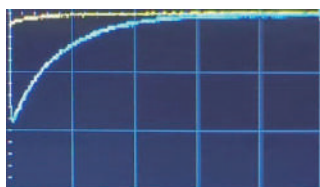
(公式5-2d)



★ 圖 5-26 RL 放電

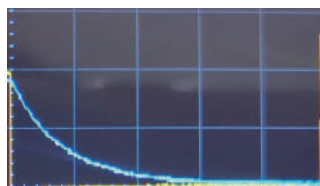
RL放電

圖 5-25a 當電感器充滿以後，電感電壓為 0，電路呈現穩定狀態，此時電流為 E / R ，方向為順時針。若此時開關 SW 切換至 b 的位置，如圖 5-26，電感器瞬間感應一個反向電壓 E (下面正，上面負)，以能讓電流持續再順時針流動一下 (電感就是電流來了，反抗一下，電流沒了，彌補一下，此即為冷次定律)，但是此電動勢會隨時間的改變而逐漸降低，科學家經過不斷的實驗，發現也是經過同樣 5 個時間常數 (τ) 後，逐漸降為 0。以上放電過程中， $v_L(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 的示波器函數圖形如圖 5-27a、5-27b、5-27c。(下圖電流的藍色線變粗，是因為電流信號較微弱，所以雜訊很明顯，線條變粗)



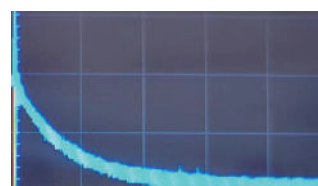
★ 圖 5-27a $v_L(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_L(t)$



★ 圖 5-27b $v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$



★ 圖 5-27c $i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

以上結果，經過科學家不斷實驗，發現都與時間 t 、 E 、 R 、 L 有關，且為時間 t 函數，隨著時間 t 的改變而改變，其值可由方程式表示如下：

$$v_L(t) = -Ee^{-\frac{t}{L/R}} \quad (\text{單位：V})$$

(負號表示與原充電電壓極性相反)

(公式5-2e)

$$v_R(t) = Ee^{-\frac{t}{L/R}} \quad (\text{單位：V})$$

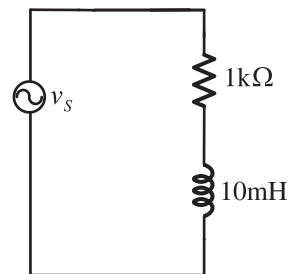
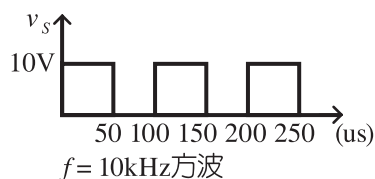
(公式5-2f)

$$i(t) = \frac{E}{R}e^{-\frac{t}{L/R}} \quad (\text{單位：A})$$

(公式5-2g)

範例 5-2a

若有 RL 充放電如圖 5-28，請進行充放電實驗。



★ 圖 5-28 RL 暫態電路圖

實習目的

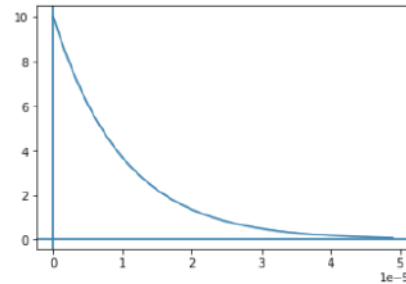
1. 我們要驗證電感充電過程 $v_L(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 的變化為時間函數，其值與公式 5-2a、5-2b、5-2c 相同。
2. 我們要驗證電感放電過程 $v_L(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 的變化為時間函數，其值與公式 5-2e、5-2f、5-2g 相同。
3. 我們要驗證充電時間與放電時間均為 5 個時間常數 ($\tau = L/R$)。

操作步驟

1. 前面範例 5-1a，因為 RC 時間常數有 10 秒，我們有充分的時間，可以使用三用電表量測電壓與電流，本例時間常數 $\tau = \frac{L}{R} = \frac{10\text{m}}{1\text{k}} = 100\mu\text{s}$ ，此時就要使用示波器了。

2. 撰寫程式，繪出 $v_L(t) = Ee^{-\frac{t}{L/R}}$ 的函數圖形，執行結果如圖 5-29，由圖可知，要準備可以量測 20V~0V 的直流電壓表。

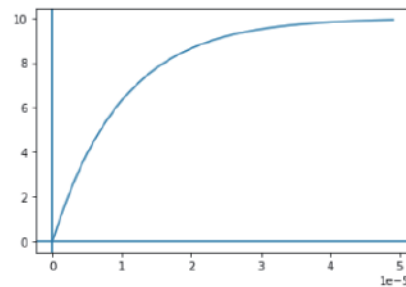
```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
k=1000
m=0.001
E=10
R=1*k
L=10*m
tau=L/R
t = np.arange(0, 5*tau, tau/10)
# t為串列，其值從0到5*tau，dt=0.1tau
y=E*(np.e)**(-t/tau)#計算每一個x對應的y
值，y也是串列
plt.plot(t,y)#繪出函數圖形
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```



★ 圖 5-29 $v_L(t)$ 的函數圖形

3. 撰寫程式，繪出 $v_R(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{L/R}})$ 的函數圖形，結果如圖 5-30。

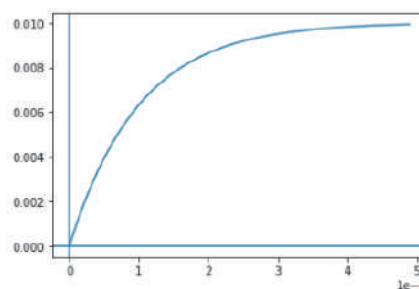
```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
k=1000
m=0.001
E=10
R=1*k
L=10*m
tau=L/R
t = np.arange(0, 5*tau, tau/10)
# t為串列，其值從0到5*tau，dt=0.1tau
y=E*(1-(np.e)**(-t/tau))#計算每一個x對應
的y值，y也是串列
plt.plot(t,y)#繪出函數圖形
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```



★ 圖 5-30 $v_R(t)$ 的函數圖形

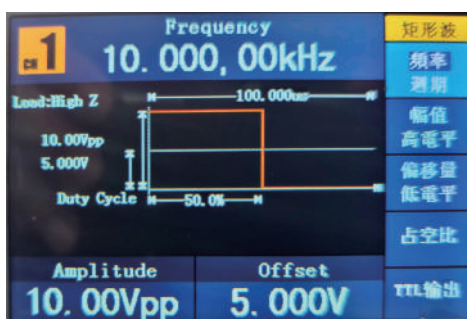
4. 撰寫程式，繪出 $i(t) = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{t}{L/R}})$ 的函數圖形，結果如圖 5-31。

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
k=1000
m=0.001
E=10
R=1*k
L=10*m
tau=L/R
t = np.arange(0, 5*tau, tau/10)
# t為串列，其值從0到5*tau，dt=0.1tau
y=(E/R)*(1-(np.e)**(-t/tau)) #計算每一個x
對應的y值，y也是串列
plt.plot(t,y) #繪出函數圖形
plt.axhline(y=0) #繪出x軸
plt.axvline(x=0) #繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```



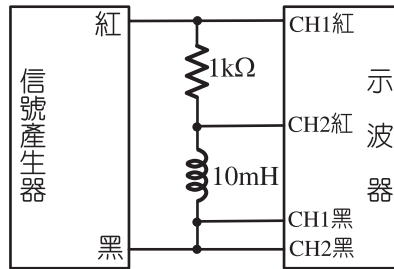
✦ 圖 5-31 $i(t)$ 的函數圖形

5. 本例使用信號產生器供應 10V 方波持續 50 μ s 當作充電電壓，然後供應 0V 方波持續 50 μ s 當作放電電壓（供應 0V 時，表示此點接地，電感就能放電）。50 μ s 供電，50 μ s 停電，所以週期為 100 μ s，頻率 $f = 10\text{kHz}$ 。以上直流方波，可以使用頻率 $f = 10\text{kHz}$ ， $V_{p-p} = 10\text{V}$ 的交流方波加上 5V 直流偏壓而得，如圖 5-32。



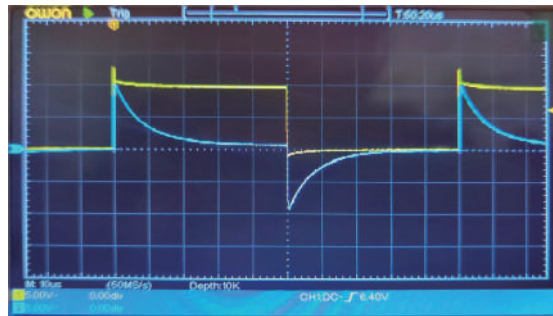
✦ 圖 5-32

6. 同時量測 $v_s(t)$ 與 $v_L(t)$ 波形。信號產生器、示波器 CH1,CH2 接線如圖 5-33。



★ 圖 5-33 信號產生器與示波器接線圖

7. 示波器執行結果如圖 5-34，CH1,CH2 都是直流耦合，Volds/Div 都是 5V，Time/Div = 10 μ s，每一格就是一個時間常數。

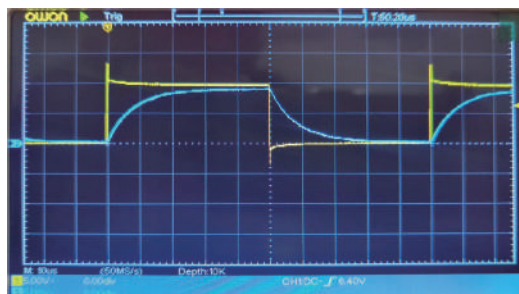
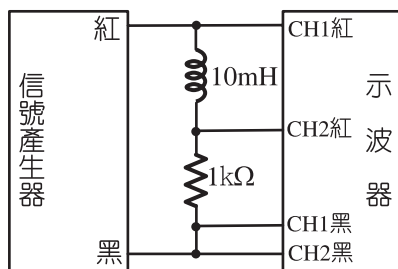


Time/Div=10 μ s, $T=10\mu\text{s} \times 10=100\mu\text{s}$ ，頻率 $f=1/T=10\text{kHz}$
 CH1 Volds/Div=5V, $V_m=5\text{V} \times 2=10\text{V}$
 CH2 Volds/Div=5V, $V_m=5\text{V} \times 2=10\text{V}$

★ 圖 5-34 示波器執行結果

8. 由圖 5-34 可知，信號產生器供電 10V 時，電感瞬間感應 10V，然後電感開始放電，經過 5 個時間常數 (50 μ s)，電感器電壓降為 0，此時電流是 E / R (順時針)。信號產生器供電 0V，代表信號產生器接地，此時電感器瞬間感應一個反向電壓 E (下面正，上面負)，以能讓電流持續再順時針流動一下 (電感就是電流來了，反抗一下，電流沒了，彌補一下，此即為冷次定律)，也是經過 5 個時間常數放電完畢，電感電壓歸零。請特別留意，電感充電，電感瞬間感應一個電壓來反抗，電流是順時針，電壓是逐漸回到 0V；電感放電，是瞬間感應一個電壓來補充，電流方向也是順時鐘，電感電壓也是逐漸回到 0。

9. 同時量測 $v_s(t)$ 與 $v_R(t)$ 波形。信號產生器、示波器 CH1,CH2 接線如圖 5-35a，信號產生器輸入信號同上，此時示波器波形如圖 5-35b。

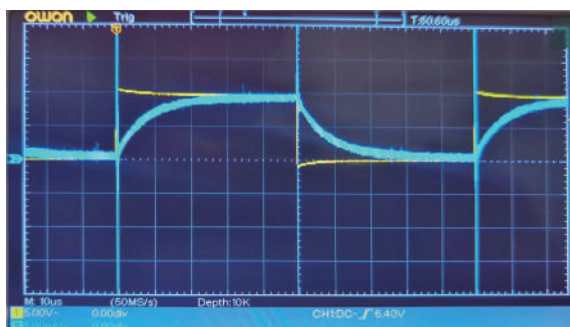
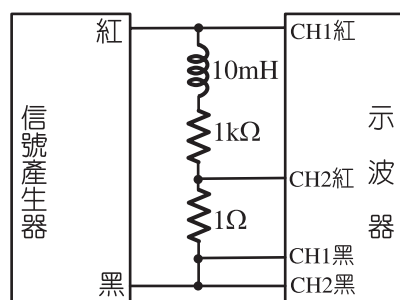


Time/Div=10 μ s, T=10 μ s*10=100 μ s，頻率f=1/T=10kHz
CH1 Vols/Div=5V, Vm=5V*2=10V
CH2 Vols/Div=5V, Vm=5V*2=10V

★ 圖 5-35a 信號產生器與示波器接線圖

★ 圖 5-35b 示波器執行結果

10. 由圖 5-35b 可知，信號產生器供電 10V， v_R 電壓逐漸上升，經過 5 個時間常數 (50 μ s) 電壓為 E 。信號產生器供電 0V，代表信號產生器正負極連接，此時由電感器繼續供電，電流繼續順向由電感流向電阻，時間也是 5 個時間常數 (50 μ s)，請特別留意，電阻的極性沒有改變，表示充放電的電流方向都相同。
11. 同時量測 $v_s(t)$ 與 $i(t)$ 波形。信號產生器、示波器 CH1,CH2 接線如圖 5-36a，信號產生器輸出信號同上不變，此時示波器波形如圖 5-36b。一般小信號就有此雜訊，所以要改用示波器專用接棒，畫面才不會跳動。(下圖電流的藍色線變粗，是因為電流信號較微弱，所以雜訊很明顯，線條變粗)



Time/Div=10 μ s, T=10 μ s*10=100 μ s，頻率f=1/T=10kHz
CH1 Vols/Div=5V, Vm=5V*2=10V
CH2 Vols/Div=5V, Vm=5V*2=10V

★ 圖 5-36a 信號產生器與示波器接線圖

★ 圖 5-36b 示波器執行結果

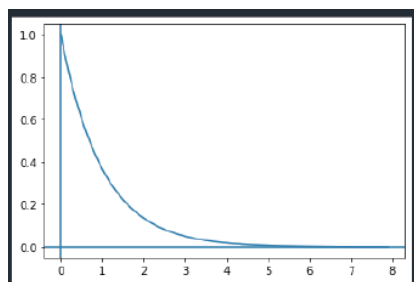
12. 由圖 5-36b 可知，信號產生器供電 10V， i 電流逐漸上升，經過 5 個時間常數 ($50\mu\text{s}$) 電流為 E / R ，電感等於短路。信號產生器供電 0V，代表信號產生器接地，此時由電感器供電，電流繼續順向由電感流向電阻，時間也是 5 個時間常數 ($50\mu\text{s}$) 請特別留意，電流的方向沒有改變，表示充放電的電流方向都相同。

自我練習

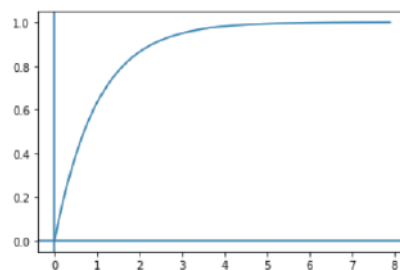
1. 同範例 5-2a，但電感請改為 1mH。

5-3 本章內容摘要

1. $e=2.718$, $e^0=1$, $e^{-1}=0.368$, $e^{-2}=0.135$, $e^{-3}=0.05$, $e^{-4}=0.02$, $e^{-5}=0$ 。
2. $1-e^{-1}=0.632$, $1-e^{-2}=0.865$, $1-e^{-3}=0.95$, $1-e^{-4}=0.98$, $1-e^{-5}=1$ 。
3. $f(x)=e^{-x}$ 圖形如圖 (1)(趨近於 0) , $f(x)=1-e^{-x}$ 圖形如圖 (2)(趨近於 1) 。

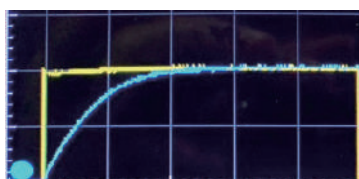


★ 圖 (1) $f(x)=e^{-x}$ 圖形



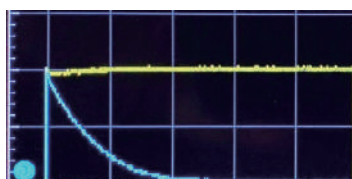
★ 圖 (2) $f(x)=1-e^{-x}$ 圖形

4. 電容是由平行電板組成，可以儲存電荷。
5. **電容充電**， $v_C(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 波形，如圖 (3)、(4)、(5)：



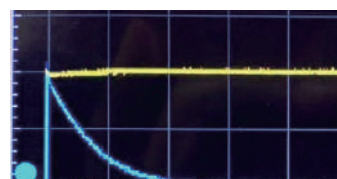
★ 圖 (3) $v_C(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_C(t)$



★ 圖 (4) $v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$



★ 圖 (5) $i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

方程式分別是：

$$v_C(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (\text{單位：V}) \quad (\text{電容充電趨近於E})$$

(公式5-1a)

$$v_R(t) = Ee^{-\frac{t}{RC}} \quad (\text{單位：V}) \quad (\text{趨近於0})$$

(公式5-1b)

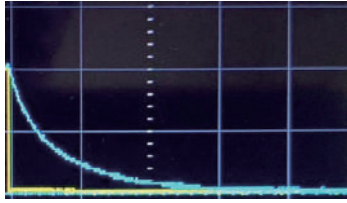
$$i(t) = \frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \quad (\text{單位：A}) \quad (\text{電流} = v_R/R)$$

(公式5-1c)

$$\text{時間常數 } \tau = RC \quad (\text{單位：s})$$

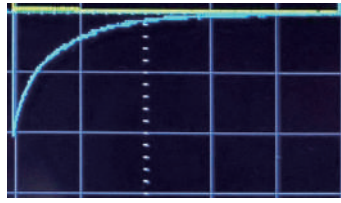
(公式5-1d)

6. 電容放電， $v_C(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 波形，如圖 (6)、(7)、(8)：



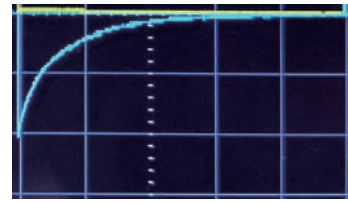
★ 圖 (6) $v_C(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_C(t)$



★ 圖 (7) $v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$



★ 圖 (8) $i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

方程式分別是：

$$v_C(t) = Ee^{-\frac{t}{RC}} \quad (\text{單位：V}) \quad (\text{放電都是放到0})$$

(公式5-1e)

$$v_R(t) = -Ee^{-\frac{t}{RC}} \quad (\text{單位：V}) \quad (\text{放電都是放到0，請留意放電方向改變了})$$

(負號表示與原充電電壓極性相反)

(公式5-1f)

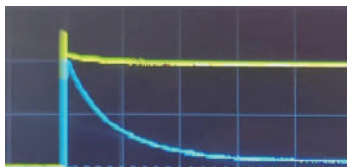
$$i(t) = -\frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \quad (\text{單位：A}) \quad (\text{電流} = v_R/R)$$

(負號表示與原充電電流方向相反)

(公式5-1g)

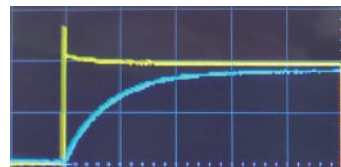
7. 電感是由線圈纏繞而成，當電流來時，會瞬間產生反電動勢抵抗，然後此反電動勢會慢慢消失；當電流消失時，會瞬間產生電動勢彌補電流的消失，且此反電動勢也會慢慢消失。

8. 電感充電， $v_L(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 波形，如圖 (9)、(10)、(11)：(下圖電流的藍色線變粗，是因為電流信號較微弱，所以雜訊很明顯，線條變粗)



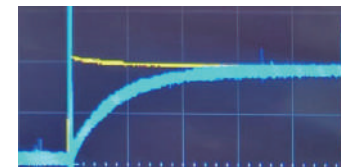
★ 圖 (9) $v_L(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_L(t)$



★ 圖 (10) $v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$



★ 圖 (11) $i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

方程式分別是：

$$v_L(t) = Ee^{-\frac{t}{L/R}} \quad (\text{單位：V}) \quad (\text{電感充電是感應}E, \text{反抗一下，然後趨近}0)$$

(公式5-2a)

$$v_R(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{L/R}}) \quad (\text{單位：V}) \quad (\text{充電是『電阻+電感=E』，所以趨近}E)$$

(公式5-2b)

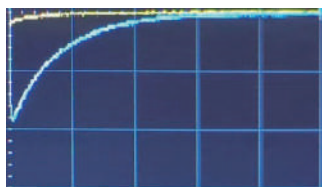
$$i(t) = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{t}{L/R}}) \quad (\text{單位：A}) \quad (i \text{ 都是 } v_R/R)$$

(公式5-2c)

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (\text{單位：s})$$

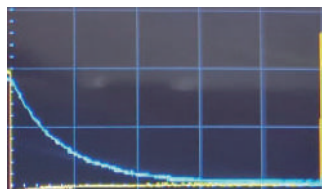
(公式5-2d)

9. **電感放電**， $v_L(t)$ 、 $v_R(t)$ 、 $i(t)$ 波形，如圖 (12)、(13)、(14)：(下圖電流的藍色線變粗，是因為電流信號較微弱，所以雜訊很明顯，線條變粗)



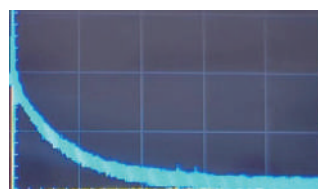
✦ 圖 (12) $v_L(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_L(t)$



✦ 圖 (13) $v_R(t)$

黃色是電源，藍色是 $v_R(t)$



✦ 圖 (14) $i(t)$

黃色是電源，藍色是 $i(t)$

方程式分別是：

$$v_L(t) = -Ee^{-\frac{t}{L/R}} \quad (\text{單位：V}) \quad (\text{電感放電是補充一下}E, \text{然後趨近}0)$$

(負號表示與原充電電壓極性相反)

(公式5-2e)

$$v_R(t) = Ee^{-\frac{t}{L/R}} \quad (\text{單位：V}) \quad (\text{放電放到}0, \text{且同充電方向})$$

(公式5-2f)

$$i(t) = \frac{E}{R}e^{-\frac{t}{L/R}} \quad (\text{單位：A}) \quad (i \text{ 都是 } v_R/R)$$

(公式5-2g)

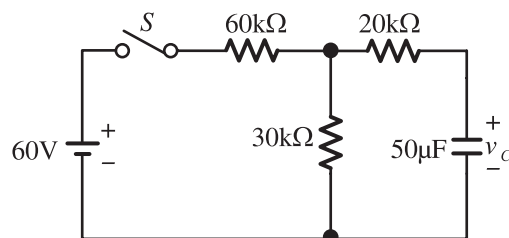
10. 以上電容與電感充放電的電壓與電流整理如下表：（放電的負號代表與充電方向相反）

RC充放電	電容電壓	電阻電壓	電流	電流方向
電容充電	$0 \rightarrow E$	$E \rightarrow 0$	$E/R \rightarrow 0$	順時針
電容放電	$E \rightarrow 0$	$-E \rightarrow 0$	$-E/R \rightarrow 0$	逆時針
RL 充放電	電感電壓	電阻電壓	電流	電流方向
電感充電	$E \rightarrow 0$	$0 \rightarrow E$	$0 \rightarrow E/R$	順時針
電感放電	$-E \rightarrow 0$	$E \rightarrow 0$	$E/R \rightarrow 0$	順時針

5-4 課後習題

一、選擇題

- 進行 RC 充放電實習，電阻的充電與放電的電流方向是否相同？
(A) 相同 (B) 相反
- 進行 RC 充放電實習，電阻的充電與放電的電壓方向是否相同？
(A) 相同 (B) 相反
- 進行 RC 充放電實習，電容充滿電時，電阻電流是否為 0？
(A) 是 (B) 不是
- 進行 RC 充放電實習，電容充滿電時，電阻電壓是否為 0？
(A) 是 (B) 不是
- 進行 RC 充放電實習，電容充滿電時，電容電壓是否為 0？
(A) 是 (B) 不是
- 進行 RL 充放電實習，電感充電瞬間，電感電壓是否為 0？
(A) 是 (B) 不是
- 進行 RL 充放電實習，電感充滿電時，電感電壓是否為 0？
(A) 是 (B) 不是
- 進行 RL 充放電實習，電感充滿電時，電阻電流是否為 0？
(A) 是 (B) 不是
- 進行 RL 充放電實習，充電與放電的電流方向是否相同？
(A) 是 (B) 不是
- 進行 RL 充放電實習，電感放電結束時，電感電壓是否為 0？
(A) 是 (B) 不是
- 如圖 (1) 所示電路， $t = 0$ 秒前電容器電壓為零，若 $t = 0$ 秒時將開關 S 閉合，則電容器兩端電壓 $v_C(t)$ 為何？
統測 111
(A) $60(1 - e^{-0.5t})$ V (B) $20(1 - e^{-0.5t})$ V
(C) $60(1 - e^{-0.05t})$ V (D) $20(1 - e^{-0.05t})$ V



★ 圖 (1)

12. 如圖 (2) 所示電路， $t = 0$ 秒前電感器儲存能量為零，若 $t = 0$ 秒時將開關 S 由位置 1 切至位置 2，則下列敘述何者正確？

統測 111

(A) 流經電感器的初始電流值為 1A 且
電路時間常數為 80ms

(B) 流經電感器的初始電流值為 0A 且電路時間常數為 80ms

(C) 流經電感器的初始電流值為 1A 且電路時間常數為 0.2ms

(D) 流經電感器的初始電流值為 0A 且電路時間常數為 0.2ms

13. 電阻與電容串聯電路，電阻為 $2\text{k}\Omega$ ，電容為 $25\mu\text{F}$ ，此電路的时间常數為何？

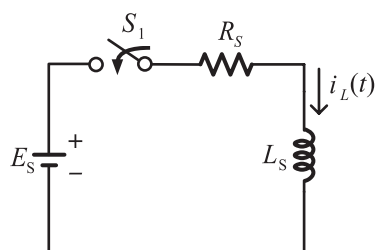
統測 112

(A) 12.5ms (B) 25ms

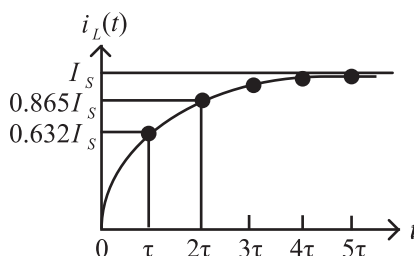
(C) 50ms (D) 100ms

14. 如圖 (3) 所示之暫態電路及電流 $i_L(t)$ 時間響應圖，電流 $I_S = 10\text{A}$ ，時間常數 τ 為 0.02 秒。已知電阻 $R_S = 2\Omega$ ，且電感在開關 S_1 閉合前無儲存能量，當時間為零時 ($t = 0$ 秒) 開關 S_1 閉合 (導通)，則此電路的直流電壓源 E_S 與電感 L_S 分別為何？

統測 112



★ 圖 (3)



(A) $E_S = 20\text{V}$ 、 $L_S = 40\text{mH}$

(B) $E_S = 10\text{V}$ 、 $L_S = 30\text{mH}$

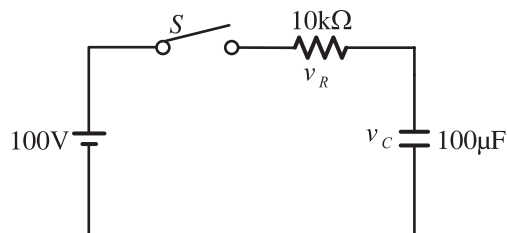
(C) $E_S = 20\text{V}$ 、 $L_S = 20\text{mH}$

(D) $E_S = 10\text{V}$ 、 $L_S = 10\text{mH}$

二、填充題

1. 電路如圖 (4) 所示， S 閉合瞬間 $t=0$ 時， $v_C=0$ 。求：

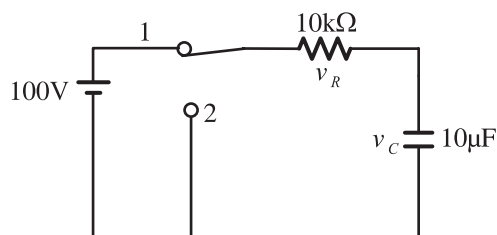
- (1) 充電 τ 時間常數之值？
- (2) $t=1$ 秒時， v_C 、 v_R 及 i 之值？
- (3) $t=2$ 秒時， v_C 、 v_R 及 i 之值？
- (4) $t=3$ 秒時， v_C 、 v_R 及 i 之值？
- (5) $t=4$ 秒時， v_C 、 v_R 及 i 之值？
- (6) $t=5$ 秒時， v_C 、 v_R 及 i 之值？
- (7) 充電電流是順或逆時針？



★ 圖 (4)

2. 電路如圖 (5) 所示，當 $t=0$ 時， $v_C=100V$ ， S 由 1 切入 2。求：

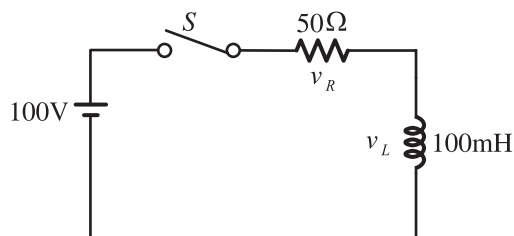
- (1) 放電 τ 時間常數之值？
- (2) 當 $t=-1$ 秒時， v_C 、 v_R 及 i 之值？
- (3) $t=0.1$ 秒時， v_C 、 v_R 及 i 之值？
- (4) $t=0.1$ 秒時， v_C 、 v_R 及 i 之值？
- (5) $t=0.1$ 秒時， v_C 、 v_R 及 i 之值？
- (6) $t=0.1$ 秒時， v_C 、 v_R 及 i 之值？
- (7) $t=0.1$ 秒時， v_C 、 v_R 及 i 之值？
- (8) 放電電流是順或逆時針？



★ 圖 (5)

3. 電路如圖 (6) 所示，當 $t=0$ 時， S 閉合。求：

- (1) 求 τ 時間常數之值？
- (2) $t=0$ 秒時， v_L 、 v_R 及 i 之值？（請標示 v_L 及 v_R 的正端及 i 的方向）
- (3) $t=2ms$ 時， v_L 、 v_R 及 i 之值？
- (4) $t=4ms$ 時， v_L 、 v_R 及 i 之值？
- (5) $t=6ms$ 時， v_L 、 v_R 及 i 之值？
- (6) $t=8ms$ 時， v_L 、 v_R 及 i 之值？
- (7) $t=10ms$ 時， v_L 、 v_R 及 i 之值？



★ 圖 (6)

4. 電路如圖 (7) 所示， S 在 1 的位置。求：

(1) v_L 、 v_R 及 i 之值？（請標示方向）

(2) 當 $t=0$ 時， S 由 1 切入 2，求 τ 時間常數之值？ v_L 、 v_R 及 i 之值？

（請標示 v_L 及 v_R 的正端及 i 的方向）

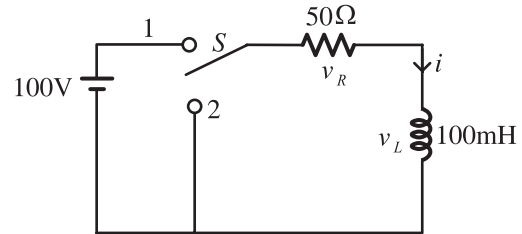
(3) $t=2\text{ms}$ 時， v_L 、 v_R 及 i 之值？

(4) $t=4\text{ms}$ 時， v_L 、 v_R 及 i 之值？

(5) $t=6\text{ms}$ 時， v_L 、 v_R 及 i 之值？

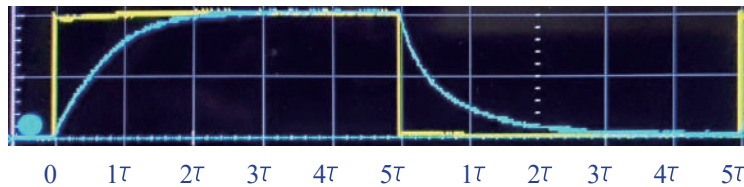
(6) $t=8\text{ms}$ 時， v_L 、 v_R 及 i 之值？

(7) $t=10\text{ms}$ 時， v_L 、 v_R 及 i 之值？



★ 圖 (7)

5. 若有示波器波形如圖 (8)，藍色波形的 Volds/Div=5V，Time/Div=100 μs ，請問藍色波形的 V_m = _____, f = _____, 時間常數 = _____。



Time/Div=100 μs , $T=100\mu\text{s} \times 10=1\text{ms}$ ，頻率 $f=1/T=1\text{kHz}$

CH1 Volds/Div=5, $V_m=5V \times 2=10V$

CH2 Volds/Div=5V, $V_m=5V \times 2=10V$

★ 圖 (8)

MEMO

交流電路



學習綱要

- 6-1 交流純電阻、電容、電感電路
- 6-2 交流電阻、電感、電容串聯電路實作
- 6-3 交流電阻、電感、電容並聯電路實作
- 6-4 諧振電路實作
- 6-5 本章內容摘要
- 6-6 課後習題

學習目標

1. 能使用直角坐標與極座標表示相量，且能進行座標轉換與進行加減乘除等運算。
2. 能實作與計算純電阻、純電容、純電感的交流電路。
3. 能實作與計算電阻、電容、電感串聯交流電路。
4. 能實作與計算電阻、電容、電感並聯交流電路。
5. 能實作與計算電阻、電容、電感串並聯交流諧振電路。

► 表 6-1 本章零件表

編號	零件名稱	數量	備註
1	1k Ω 電阻	3	
2	1 Ω 電阻	3	
3	100 Ω 電阻	3	
4	300 Ω 電阻	3	
5	0.01 μ F 電容	3	
6	0.1 μ F 電容	3	
7	1 μ F 電容	3	
8	10mH 電感	3	
9	100mH 電感	3	

前面的電阻、電感、電容都是接到直流電，本章開始我們要探討電阻、電容、電感接到交流電的反應。首先，交流電的計算需要使用向量。我們將會一步步探討純電阻、純電容、純電感、電阻 - 電容串連、電阻 - 電感串連、電阻 - 電容 - 電感串併聯等電路。最後則是介紹交流諧振電路。(備註：本章所需要的相關知識——向量運算，請自行參考附錄 C)

6-1 交流純電阻、電容、電感電路

本節我們要探討單一電子元件電阻、電容、電感的交流電路。

阻抗(impedance)

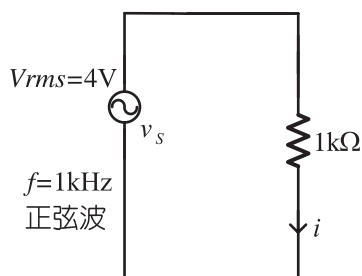
前面直流電路裡，電源電壓 V 與電源電流 I 的比值，依照歐姆定律，我們定義為 R 。但在交流電路裡，因為加入電容與電感等元件，所以有**電容抗** (capacitive reactance，簡稱 X_c ，容抗)、有**電感抗** (inductive reactance，簡稱 X_L ，感抗)，所以電源電壓 V 與電源電流 I 的比值改稱為**阻抗 Z** ，也就是阻抗 Z 包含**電阻抗**、**電容抗**、**電感抗**。

範例 6-1a

探討交流純電阻電路。假設交流純電阻電路如圖 6-1a，請驗證其電流與電壓相位相同，電路阻抗 Z 為其電阻值 R 且與電源頻率 f 無關。

操作步驟

1. 電路板焊接如圖 6-1b，量測電流都要將電路打開。

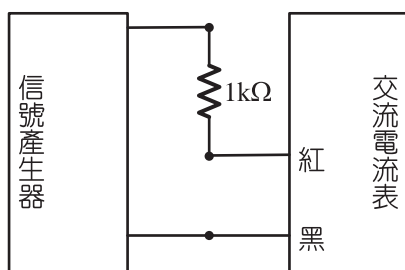


✦ 圖 6-1a

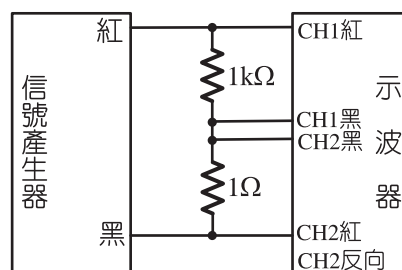


✦ 圖 6-1b

2. 信號產生器輸出 $V_{rms} = 4V$ ， $f = 1kHz$ 正弦波。
3. 交流電流表與信號產生器連接如圖 6-2a。
4. 使用交流電流表量測 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
5. 信號產生器與示波器接線如圖 6-2b，請留意 CH2 反向，且信號產生器的電源地線要隔離。

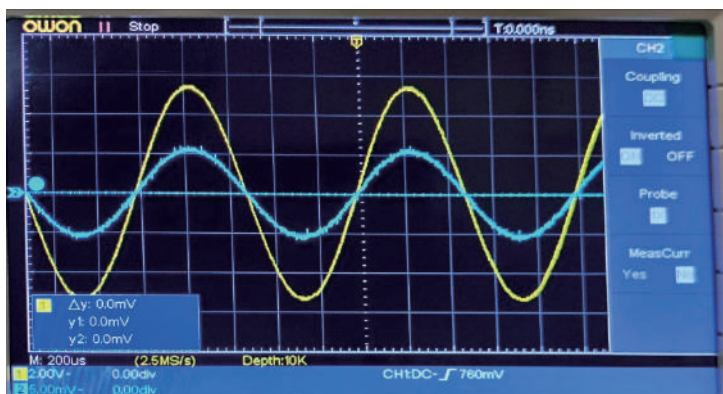


✦ 圖 6-2a



✦ 圖 6-2b

6. 輸出波形如圖 6-3，CH1（黃色）是 v_R ，CH2（藍色）是 i 。



✦ 圖 6-3 v_R 與 i 的波形

信號產生器：
 $V_m = 5.6V$ ， $f = 1kHz$ ，正弦波。
 示波器：
 $T = 200\mu s \times 5 = 1ms$ 。
 CH1(黃色 $v_R(t)$)：
 $V_1 = 2V \times 2.8 = 5.6$ 。
 CH2(藍色 $i(t)$)：
 $V_2 = 5mV \times 1.1 = 5.5$ ，與CH1同相。

7. 由圖 6-3 可知， $v_R(t) = 5.6 \sin(2 * 3.14 * 1000 * t) \text{V}$ ， $\bar{V} = 4 \angle 0^\circ \text{V}$ 。
8. 由圖 6-3 可知， $i(t) = 5.5 \text{mA} \sin(2 * 3.14 * 1000 * t) \text{A}$ ， $\bar{I} = 4 \text{mA} \angle 0^\circ \text{A}$ ，請留意是否與第 4 點接近？_____。
9. 依照歐姆定律，電路阻抗 $Z = V / I = (4) / (4 \text{mA}) = 1 \text{k}\Omega$ ，此即為電路的阻抗值。

相關知識

1. 經過科學家不斷的實驗，純電阻交流電路，電流大小與輸入電壓成正比，與 R 成反比，與頻率無關，依據歐姆定律， $\bar{Z} = \bar{V} / \bar{I}$ ，可求得純電阻電路的阻抗 Z 僅與其電阻本身電阻值 R 有關，與電源頻率無關，如公式 6-1a。

阻抗 $Z = R$

(公式6-1a)

2. $v_R(t)$ 稱為正弦式表示法，正弦式 = $V_m \sin(2 \pi f t + \theta)$ ， θ 為相位差，本例為 0。
3. $V = V_{rms} \angle 0^\circ$ 稱為相量式。
4. 正弦式因為含有最大值、頻率與相位角，所以是完整波形表示法。
5. 相量式則僅含 V_{rms} 與相位角，僅用來計算電壓與電流的關係，計算完，還要再轉回正弦式。
6. V_m 與 V_{rms} 關係是 $V_{rms} = V_m / \sqrt{2}$ 。
7. 在同一交流電路裡，每一元件的頻率都不會改變，所以在計算每一元件的電壓與電流時，頻率就可以省略。
8. 因為相量計算的過程，頻率 f 不會改變，所以正弦式改為相量式時，頻率 f 省略，但計算完畢改回正弦式時，也要將頻率 f 放回去。
9. 不同頻率的正弦式，不會出現在同一電路，當然也不能一起使用相量式計算。

自我練習

1. 請調整輸入電壓 $V_m = 8.4 \text{V}$ ， $f = 10 \text{kHz}$ ， $R = 1 \text{k}\Omega$ ，(1) 使用三用電表量測 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(2) 繪出波形，CH1 是 v_r ，使用藍色筆，CH2 是 i ，使用紅色筆，如圖 6-4，請計算電路電阻。

2. 請調整輸入電壓 $V_m = 8.4V$ ， $f = 5kHz$ ， $R = 300\Omega$ ，(1) 使用三用電表量測 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(2) 繪出波形，CH1 是 v_r ，使用藍色筆，CH2 是 i ，使用紅色筆，如圖 6-5。

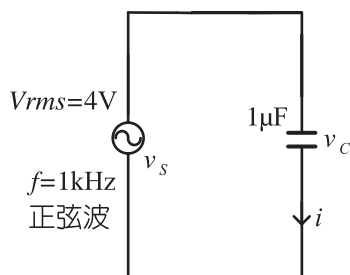
$T = \underline{\hspace{2cm}} \text{ s/div} * \underline{\hspace{2cm}} \text{ div} = \underline{\hspace{2cm}}$ $f = \underline{\hspace{2cm}}$ CH1 : $V_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{ v/div} * \underline{\hspace{2cm}} \text{ div} = \underline{\hspace{2cm}}$ $V = V_m / 1.4 = \underline{\hspace{2cm}}$ CH2 : $I_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{ v/div} * \underline{\hspace{2cm}} \text{ div} = \underline{\hspace{2cm}}$ $I = I_m / 1.4 = \underline{\hspace{2cm}}$ $R = V/I = \underline{\hspace{2cm}}$, 是否與電阻值相同 相位差 = $\underline{\hspace{2cm}}$ ★ 圖 6-4	$T = \underline{\hspace{2cm}} \text{ s/div} * \underline{\hspace{2cm}} \text{ div} = \underline{\hspace{2cm}}$ $f = \underline{\hspace{2cm}}$ CH1 : $V_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{ v/div} * \underline{\hspace{2cm}} \text{ div} = \underline{\hspace{2cm}}$ $V = V_m / 1.4 = \underline{\hspace{2cm}}$ CH2 : $I_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{ v/div} * \underline{\hspace{2cm}} \text{ div} = \underline{\hspace{2cm}}$ $I = I_m / 1.4 = \underline{\hspace{2cm}}$ $R = V/I = \underline{\hspace{2cm}}$, 是否與電阻值相同 相位差 = $\underline{\hspace{2cm}}$ ★ 圖 6-5
---	---

範例 6-1b

探討交流純電容電路。假設交流純電容電路如圖 6-6a，請驗證其電流超前電壓 90° ，且容抗 X_C 與電路頻率 f 與 C 乘積成反比，其值為 $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ 。

操作步驟

1. 準備電路如圖 6-6b。



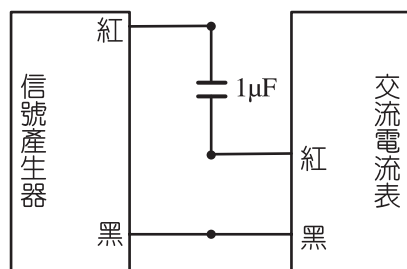
★ 圖 6-6a



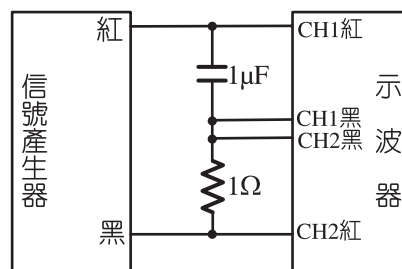
★ 圖 6-6b

6-6 基本電學實習

2. 信號產生器調好 $V_{rms} = 4V$ ， $f = 1kHz$ ，正弦波。
3. 交流電流表連接如圖 6-7a，使用交流電流表量測 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
4. 信號產生器與示波器接線如圖 6-7b，請留意 CH2 反向，且信號產生器的電源地線要隔離。

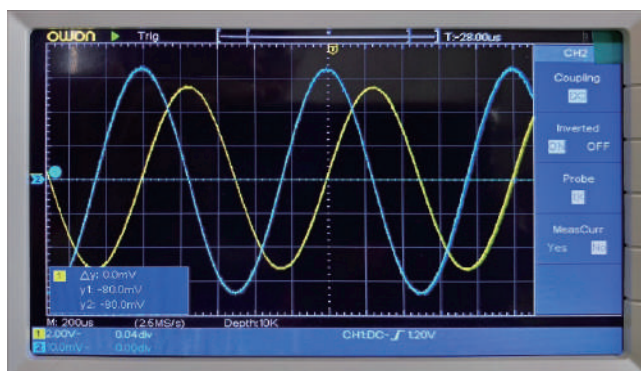


★ 圖 6-7a



★ 圖 6-7b

5. 輸出波形如圖 6-8，CH1（黃色）是 $v_c(t)$ ，CH2（藍色）是 $i(t)$ 。



★ 圖 6-8 v_c 與 i 的波形圖

信號產生器：
 $V_m = 5.6V$ ， $f = 1kHz$ ，正弦波。
 示波器： $T = 200\mu s \times 5 = 1ms$ 。
 CH1(黃色 $v_c(t)$):
 $V_1 = 2V \times 2.8 = 5.6V$ 。
 CH2(藍色 $i(t)$):
 $V_2 = 10mV \times 3.2 = 32mV$
 電流相位超前電壓 $1.3/5 \times 360 \div 90^\circ$ 。

6. 由圖 6-8 可知， $v_c(t) = 5.6 \sin(2 \times 3.14 \times 1000 \times t)V$ ， $\bar{V}_C = 4 \angle 0^\circ V$ 。
7. 由圖 6-8 可知， $i(t) = 32m \sin(2 \times 3.14 \times 1000 \times t - 90^\circ)A$ ， $\bar{I} = 22m \angle -90^\circ A$ ，請留意電流超前電壓 90° 。
8. 感抗 X_C 理論值 $= 1/(2 \times \pi \times f \times C) = 1/(2 \times 3.14 \times 1k \times 1\mu) = 159\Omega$ 。
9. 感抗 $\bar{X}_C$ 實驗值 $= V/I = (4 \angle 0^\circ)/(22m \angle -90^\circ) = 181 \angle 90^\circ \Omega$ ，此與理論值接近。

相關知識

1. 經過科學家不斷的實驗，我們得到兩個現象。

第1：交流純電容電路的電流與電壓成正比，與 $f \cdot C$ 乘積成正比，且歸納得到其關係為

$$I = V \cdot 2\pi f C = \frac{V}{\frac{1}{2\pi f C}} (\omega = 2\pi f)$$

$$= \frac{V}{\omega C} = \frac{\bar{V}}{X_C}$$

第2：電流相位超前電壓 90° ，此相位超前角度與電壓、頻率、電感無關。依據歐姆定律

$$\bar{X}_C = \frac{\bar{V}}{\bar{I}}$$

我們得到純電容電容抗與頻率 f 、電容量 C 的乘積成反比，其數學式如下：

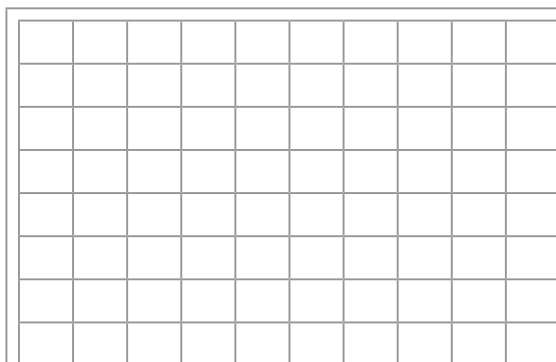
$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \Omega \quad (\text{單位是 } \Omega) \quad (\text{公式6-1b})$$

電流 $\bar{I}$ 超前電壓 V 90° ，表示 $\bar{X}_C$ 相位落後 90° ，以上 $\bar{X}_C$ 包含大小與角度，所以以相量表示如下：

$$\bar{X}_C = \frac{1}{\omega C} \angle -90^\circ = -\frac{1}{\omega C} j = -X_C j \Omega \quad (\text{單位是 } \Omega) \quad (\text{公式6-1c})$$

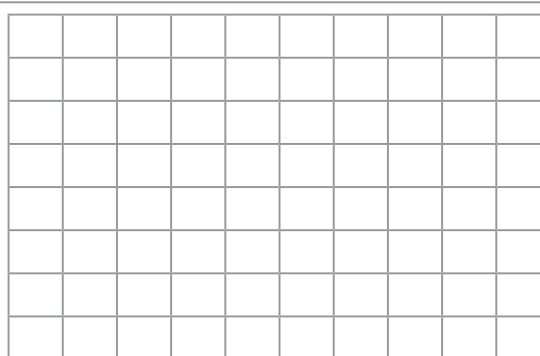
自我練習

- 請調整輸入電壓 $V_m = 8.4\text{V}$ ， $f = 10\text{kHz}$ ， $C = 0.1\ \mu\text{F}$ ，(1) 使用三用電表量測 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(2) 繪出波形，CH1 是 v_C ，使用藍色筆，CH2 是 i ，使用紅色筆，如圖 6-9。
- 請調整輸入電壓 $V_m = 8.4\text{V}$ ， $f = 500\text{Hz}$ ， $C = 10\ \mu\text{F}$ ，(1) 使用三用電表量測 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(2) 繪出波形，CH1 是 v_C ，使用藍色筆，CH2 是 i ，使用紅色筆，如圖 6-10。



$T = \text{_____} \text{ s/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$
 $f = \text{_____}$
 $\text{CH1 : } V_m = \text{_____} \text{ v/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$
 $V = V_m / 1.4 = \text{_____}$
 $\text{CH2 : } I_m = \text{_____} \text{ v/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$
 $I = I_m / 1.4 = \text{_____}$
 相位差 = _____
 $X_c(\text{測量值}) = V/I = \text{_____}$
 $X_c(\text{理論值}) = \text{_____}$

★ 圖 6-9



$T = \text{_____} \text{ s/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$
 $f = \text{_____}$
 $\text{CH1 : } V_m = \text{_____} \text{ v/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$
 $V = V_m / 1.4 = \text{_____}$
 $\text{CH2 : } I_m = \text{_____} \text{ v/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$
 $I = I_m / 1.4 = \text{_____}$
 相位差 = _____
 $X_c(\text{測量值}) = V/I = \text{_____}$
 $X_c(\text{理論值}) = \text{_____}$

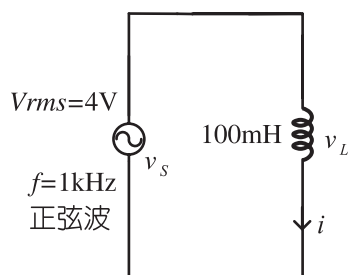
★ 圖 6-10

範例 6-1c

探討交流純電感電路。假設交流純電感電路如圖 6-11a，請驗證其電流落後電壓 90° ，且感抗 X_L 與電路頻率 f 與 L 乘積成正比，其值為 $X_L = 2\pi fL$ 。

操作步驟

1. 準備電路如圖 6-11b。

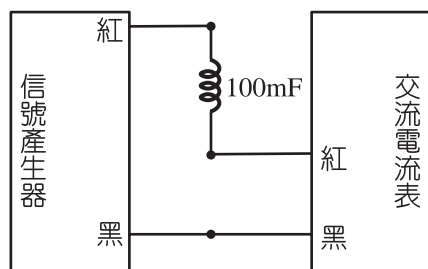


★ 圖 6-11a

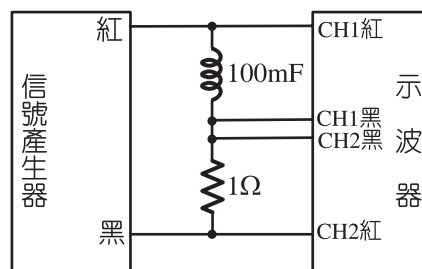


★ 圖 6-11b

2. 信號產生器調好 $V_{rms} = 4V$ ， $f = 1kHz$ ，正弦波。
3. 交流電流表連接如圖 6-12a，使用交流電流表量測： $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
4. 信號產生器與示波器接線如圖 6-12b，請留意 CH2 反向，且信號產生器的電源地線要隔離。

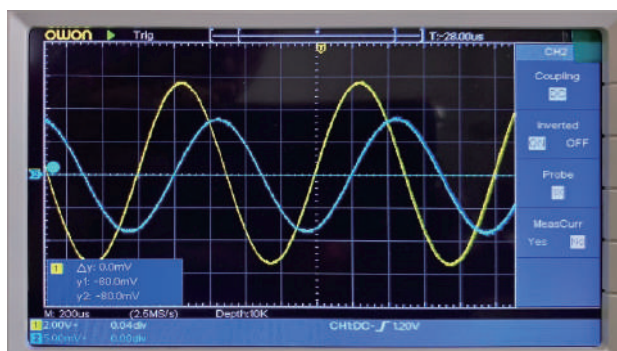


★ 圖 6-12a



★ 圖 6-12b

5. 輸出波形如圖 6-13，CH1（黃色）是 $v_L(t)$ ，CH2（藍色）是 $i(t)$ 。



★ 圖 6-13 $v_L(t)$ 與 $i(t)$ 的波形

信號產生器：
 $V_m = 5.6V$ ， $f = 1kHz$ ，正弦波。
 示波器： $T = 200\mu s \times 5 = 1ms$ 。
 CH1(黃色 $v_L(t)$):
 $V_1 = 2V \times 2.8 = 5.6$ 。
 CH2(藍色 $i(t)$):
 $V_2 = 5mV \times 1.7 = 8.5mV$ ，電流相位落後電壓
 $1/5 \times 360 = 72^\circ$ (因為電感有內阻，無法達
 90°)。

6. 由圖 6-13 可知， $v_L(t) = 5.6 \sin(2 \times 3.14 \times 1000 \times t) V$ ， $\bar{V} = 4 \angle 0^\circ$ 。
7. $i(t) = 8.5m \sin(2 \times 3.14 \times 1000 \times t - 72^\circ) A$ ， $\bar{I} = 6m \angle -72^\circ A$ ，請留意電流落後電壓 72° 。
8. 感抗 X_L 理論值 $= 2 \times \pi \times f \times L = 2 \times 3.14 \times 1k \times 100m = 628\Omega$ 。
9. 感抗實驗值 $\bar{X}_L = V / I = (4 \angle 0) / (6m \angle -72) = 666 \angle 72^\circ \Omega$ ，與理論值接近。

相關知識

1. 經過科學家不斷的實驗，我們得到兩個現象。

第 1：交流純電感電路的電流與電壓成正比，與 $f * L$ 乘積成反比，且歸納得到其關係為：

$$I = \frac{V}{2\pi fL} = \frac{V}{\omega L} = \frac{V}{X_L}。$$

第 2：電流相位落後電壓 90° ，此相位落後角度與電壓、頻率、電感無關。依據歐姆定律：

$$\bar{X}_L = \bar{V} / \bar{I}$$

我們得到純電感電感抗

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \text{ } \Omega \text{ 單位是 } \Omega$$

(公式6-1d)

電流相位落後電壓相位 90° ，表示 $\bar{X}_L$ 相位超前 90°

$$\bar{X}_L = \omega L \angle 90^\circ = \omega Lj = X_Lj \text{ } \Omega \text{ 單位是 } \Omega$$

(公式6-1e)

請留意，我們使用一個數學式，同時表示其大小與相位角，此即為複數。

自我練習

- 請調整輸入電壓 $V_m = 8.4V$ ， $f = 10kHz$ ， $L = 10mH$ ，(1) 使用三用電表量測 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(2) 繪出波形，CH1 是 V_L ，使用藍色筆，CH2 是 i ，使用紅色筆，如圖 6-14。
- 請調整輸入電壓 $V_m = 8.4V$ ， $f = 500Hz$ ， $L = 100mH$ ，(1) 使用三用電表量測 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(2) 繪出波形，CH1 是 V_L ，使用藍色筆，CH2 是 i ，使用紅色筆，如圖 6-15。

$T = \text{_____} \text{ s/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$ $f = \text{_____}$ $\text{CH1 : } V_m = \text{_____} \text{ v/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$ $V = v_m / 1.4 = \text{_____}$ $\text{CH2 : } I_m = \text{_____} \text{ v/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$ $I = I_m / 1.4 = \text{_____}$ 相位差 = _____ $X_L(\text{測量值}) = V/I = \text{_____}$ $X_L(\text{理論值}) = \text{_____}$ ★ 圖 6-14	$T = \text{_____} \text{ s/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$ $f = \text{_____}$ $\text{CH1 : } V_m = \text{_____} \text{ v/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$ $V = V_m / 1.4 = \text{_____}$ $\text{CH2 : } I_m = \text{_____} \text{ v/div} * \text{_____} \text{ div} = \text{_____}$ $I = I_m / 1.4 = \text{_____}$ 相位差 = _____ $X_L(\text{測量值}) = V/I = \text{_____}$ $X_L(\text{理論值}) = \text{_____}$ ★ 圖 6-15
--	--

6-2 交流電阻、電感、電容串聯電路實作

前面 6-1 節已經介紹純電阻在交流電之下，其阻抗值：

$$\bar{Z} = R$$

與輸入電壓角速度 ω 無關。電容的容抗與輸入電壓的角速度 ω 有關，而且電容是落後 90° ，其表示式是：

$$\bar{X}_C = -j \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C} \angle -90^\circ \text{ (單位是 } \Omega \text{)}$$

電感的感抗也與輸入電壓角速度 ω 有關，而且電感是超前 90° ，其表示式是：

$$\bar{X}_L = j\omega L = \omega L \angle 90^\circ \text{ (單位是 } \Omega \text{)}$$

本節則要開始探討電阻電容串聯（以下簡稱 RC 串聯）電阻電感串聯（以下簡稱 RL 串聯）及電阻電容電感串聯（以下簡稱 RCL 串聯）等電路，以上串聯電路的計算步驟如下：

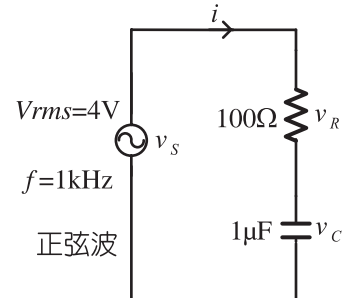
1. 計算電阻阻抗 ($\bar{Z}$)：電阻阻抗 $\bar{Z} = R$ ，僅與 R 值有關，不會隨著角速度 ω 更動。
2. 計算 $\bar{X}_C$ ： $\bar{X}_C = \frac{1}{\omega C} \angle -90^\circ \Omega$ 。
3. 計算 $\bar{X}_L$ ： $\bar{X}_L = \omega L \angle 90^\circ \Omega$ 。
4. 計算 $\bar{Z}$ ： $\bar{Z} = R + \bar{X}_C + \bar{X}_L$ 。
5. 計算 $\bar{I}$ ： $\bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}}$ 。
6. 計算 $\bar{V}_R$ ： $\bar{V}_R = \bar{I}R$ 。
7. 計算 $\bar{V}_C$ ： $\bar{V}_C = \bar{I}\bar{X}_C$ 。
8. 計算 $\bar{V}_L$ ： $\bar{V}_L = \bar{I}\bar{X}_L$ 。
9. 電路特性： $X_L = X_C$ 時，電路是電阻性； $X_L > X_C$ 時，電路是電感性，此時電流落後總電壓； $X_L < X_C$ 時，電路是電容性，此時電流超前總電壓。

以上交流串聯電路除了阻抗使用複數表示，計算使用複數運算，其餘都與直流電路相同，一樣遵守歐姆定律，一樣遵守 KVL 與 KCL 定律，總阻抗等於全部個別阻抗之和，請看以下範例說明。

範例 6-2a

實作 RC 串聯電路。電路如圖 6-16，信號產生器提供信號為 $V_{rms} = 4V$ ， $f = 1kHz$ 正弦波， $R = 100\Omega$ ， $C = 1\mu F$ 。

1. 計算 $\bar{Z}$ 、 $\bar{I}$ 、 $\bar{V}_C$ 、 $\bar{V}_R$ 理論值。
2. 使用交流電壓與交流電流表量測 I 、 V_C 、 V_R 之值。
3. 使用示波器 CH1, CH2 同時量測 $v_S(t) - v_C(t)$ 、 $v_S(t) - v_R(t)$ 、 $v_S(t) - i(t)$ 之波形。
4. 依照示波器輸出結果繪製 $\bar{V}$ 、 $\bar{V}_C$ 、 $\bar{V}_R$ 、 $\bar{I}$ 相量圖。



★ 圖 6-16

操作步驟

1. 計算理論值：

(1) 依據公式 6-2b，計算 $X_C = 1/(2 * \pi * f * C) = 1/(2 * 3.14 * 1k * 1u) = 159\Omega$

$$\bar{X}_C = -jX_C$$

$$\bar{Z} = R + \bar{X}_C = R - jX_C$$

- (2) 請留意相量加減法要用直角座標，乘除法要用極座標，等一下要使用歐姆定律計算電流 $\bar{I}$ ，所以要先轉極座標如下：

$$= \sqrt{R^2 + X_C^2} \angle \tan^{-1} \frac{-X_C}{R}$$

我們令以上方程式為 $Z \angle \theta$

$$\text{所以 } Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}, \theta = \tan^{-1} \frac{-X_C}{R}$$

- (3) 以上 X_C 、 Z 與 θ 的三角函數計算，我們使用 Python 程式計算如下，執行結果如圖 6-17。

```

import math as ma
pi=ma.pi
u=0.000001
k=1000
f=1*k
R=100
C=1*u
XC=1/(2*pi*f*C)
XCsi=-90
print("XC=%d" % XC) #輸出XC
Z=round((R*R+XC*XC)**(1/2))
print("Z=%d" % Z) #輸出Z
Zsi=ma.atan2(-XC,R) #XC是-j,傳回反正切徑度量
Zsi=round(Zsi*180/pi) #度度量
print("/Z=%d∠%d" % (Z,Zsi)) #輸出Z相量

```

```

XC=159
Z=188
/Z=188∠-58

```

★ 圖 6-17 程式執行結果

(4) 本例 $X_C = 159$ ， $R = 100$ ， $\bar{Z} = 100 - j159 = 188 \angle -58^\circ \Omega$ 。

$$(5) \bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} = \frac{4 \angle 0^\circ}{188 \angle -58^\circ} = 21m \angle 58^\circ A$$

$$\bar{V}_C = \bar{I} \cdot \bar{X}_C = 21m \angle 58^\circ \cdot 159 \angle -90^\circ = 3.4 \angle -32^\circ$$

$$\bar{V}_R = \bar{I} \cdot R = 21m \angle 58^\circ \cdot 100 = 2.1 \angle 58^\circ V$$

(6) 以上相量運算，撰寫 Python 程式如下，執行結果如圖 6-18。

```

V=4;Vsi=0
I=V/Z;Isi=Vsi-Zsi#大小相除，角度相減
print("/I=%10.6f∠%2d" % (I,Isi))
VC=I*XC;VLsi=Isi+XCsi; #大小相乘，角度相加
print("/VC=%6.2f∠%2d" % (VC,VLsi))
VR=I*R;VRsi=Isi
print("/VR=%6.2f∠%2d" % (VR,VRsi))

```

```

/I= 0.021277∠58
/VC= 3.38∠-32
/VR= 2.13∠58

```

★ 圖 6-18 程式執行結果

(7) 以上是基本電學的計算方式，因為 Python 資料型態有複數，所以本書直接請電腦計算如下，這樣才能聚焦基本電學的學習。

```

import math as ma
import cmath #載入cmath模組
pi=ma.pi
u=0.000001
k=1000
f=1*k
R=100
C=1*u
V=4
XC=1/(2*pi*f*C)
print("XC=",XC)
XC=complex(0,-XC)#轉為向量，電容是-j
Z=R+XC #串聯阻抗
r,si=cmath.polar(Z)#轉極座標
si=ma.degrees(si)#角度轉度度量
print("/Z=%d∠%d" %(r,si))
I=V/Z #電流
r,si=cmath.polar(I) #轉極座標
si=ma.degrees(si) #角度轉度度量
print("/I=%f∠%d" %(r,si))
VC=I*XC #電容電壓
r,si=cmath.polar(VC) #轉極座標
si=ma.degrees(si) #角度轉度度量
print("/VC=%f∠%d" %(r,si))
VR=I*R #電阻電壓
r,si=cmath.polar(VR) #轉極座標
si=ma.degrees(si) #角度轉度度量
print("/VR=%f∠%d" %(r,si))

```

```

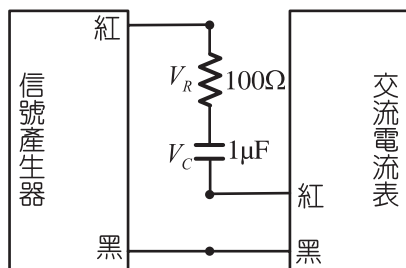
XC= 159.154943091
/Z=187 ∠ -57
/I=0.021281 ∠ 57
/VC=3.386932 ∠ -32
/VR=2.128072 ∠ 57

```

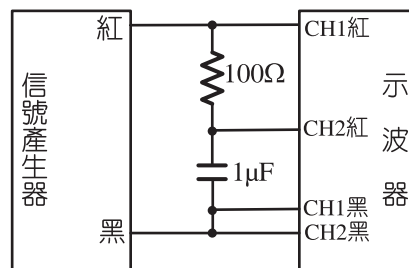
✦ 圖 6-19

2. 使用交流電壓表量測電壓 $V_S = \underline{\hspace{2cm}}$, $V_C = \underline{\hspace{2cm}}$, $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
3. 交流電流表接線如圖 6-20a , 量測電流 $I = \underline{\hspace{2cm}}$, 請問是否與理論值接近。

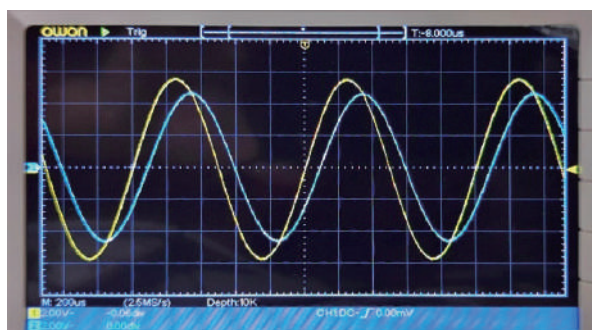
4. 信號產生器、示波器接線如圖 6-20b，使用示波器量測 $v_s(t) - v_c(t)$ ，輸出結果如圖 6-21。



★ 圖 6-20a 交流電流表接線圖



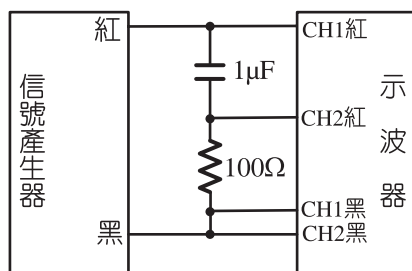
★ 圖 6-20b 示波器接線圖



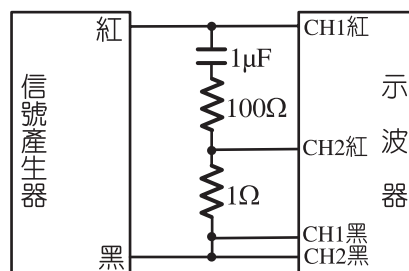
★ 圖 6-21 $v_s(t) - v_c(t)$ 的波形圖

信號產生器：
 $V_s = 4V$ ， $f = 1kHz$ ，正弦波
 示波器： $T = 200\mu s \times 5 = 1ms$
 CH1(黃色 $v_s(t)$):
 $V_1 = 2V \times 2.8 / 1.4 = 4V(rms)$
 CH2(藍色 $v_c(t)$):
 $V_2 = 2V \times 2.4 / 1.4 = 3.4V(rms)$
 相位：落後CH1 $0.5 \times 360 / 5 = 36^\circ$

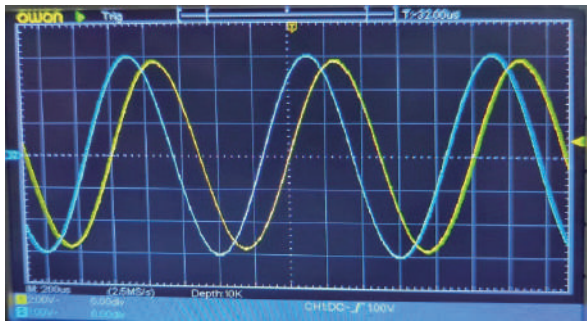
5. 信號產生器、示波器接線如圖 6-22a，此為考慮地線問題，所以待測元件要移到下面。使用示波器量測 $v_s(t) - v_R(t)$ ，輸出結果如圖 6-23。
6. 信號產生器、示波器接線如圖 6-22b，此亦為考慮地線問題，所以待測元件要移到下面。使用示波器量測 $v_s(t) - i(t)$ ，輸出結果如圖 6-24。



★ 圖 6-22a



★ 圖 6-22b



★ 圖 6-23 $v_s(t) - v_R(t)$ 的波形圖

信號產生器：

$V_s = 4V$ ， $f = 1kHz$ ，正弦波

示波器： $T = 200\mu s * 5 = 1ms$

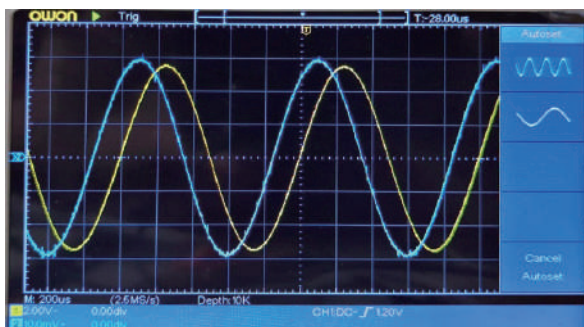
CH1(黃色 $v_s(t)$)：

$V_1 = 2V * 2.8 / 1.4 = 4V(rms)$

CH2(藍色 $v_R(t)$)：

$V_2 = 1V * 2.9 / 1.4 = 2V(rms)$

相位：超前CH1 $0.8 * 360 / 5 = 57^\circ$



★ 圖 6-24 $v_s(t) - i(t)$ 的波形圖

信號產生器：

$V_s = 4V$ ， $f = 1kHz$ ，正弦波。

示波器： $T = 200\mu s * 5 = 1ms$ 。

CH1(黃色 $v_s(t)$)：

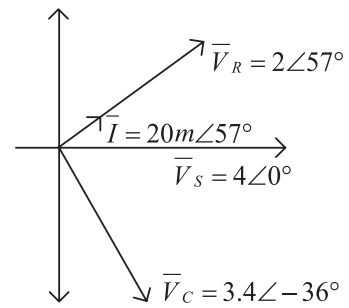
$V_1 = 2V * 2.8 / 1.4 = 4V(rms)$ 。

CH2(藍色 $i(t)$)：

$V_2 = 10mV * 2.9 / 1.4 = 20mV(rms)$

相位：超前CH1 $0.8 * 360 / 5 = 57^\circ$

7. 依照以上實驗結果， $\bar{V}_S = 4\angle 0^\circ V$ ，
 $\bar{V}_C = 3.4\angle -36^\circ$ ， $\bar{V}_R = 2\angle 57^\circ$ ，
 $\bar{I} = 20m\angle 57^\circ$ ，以上相量繪圖如圖 6-25。



★ 圖 6-25 實驗結果相量圖

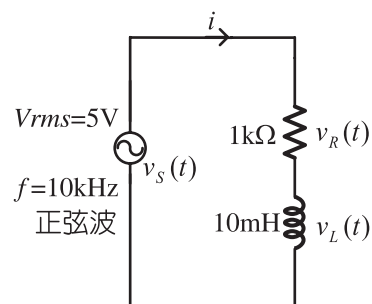
自我練習

- 同範例 6-2a，但頻率改為 500Hz， $V_s(rms) = 5V$ ，重新計算與重新實驗。

範例 6-2b

實作 RL 串聯電路。電路如圖 6-26，信號產生器提供信號為 $V_{rms} = 5V$ ， $f = 10kHz$ 正弦波， $R = 1k\Omega$ ， $L = 10mH$ 。

1. 計算 $\bar{Z}$ 、 $\bar{I}$ 、 $\bar{V}_C$ 、 $\bar{V}_L$ 理論值。
2. 使用交流電壓與交流電流量測 I 、 V_C 、 V_L 之值。
3. 使用示波器 CH1,CH2 同時量測 $v_S(t) - v_L(t)$ 、 $v_S(t) - v_R(t)$ 、 $v_S(t) - i(t)$ 之波形。



★ 圖 6-26

操作步驟

1. 計算理論值：

(1) 依據公式 6-2c，計算 $X_L = 2 * \pi * f * L = 2 * 3.14 * 10k * 10m = 628 \Omega$

$$\bar{X}_L = jX_L$$

$$\bar{Z} = R + jX_L = \sqrt{R^2 + X_L^2} \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$$

$$\text{令以上方程式爲 } \bar{Z} \angle \theta, \text{ 可得 } Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$$

- (2) 以上 X_L 、 Z 與 θ 的三角函數計算，我們使用電腦程式計算如下，執行結果如圖 6-27。

```
import math as ma
pi=ma.pi
u=0.000001
k=1000
m=0.001
f=10*k
R=1000
L=10*m
XL=2*pi*f*L
XLsi=90 #電感 j
print("XL=%d" % XL) #
print("R=%d" % R)
Z=(R*R+XL*XL)**(1/2)
Zsi=ma.atan2(XL,R) #徑度量
Zsi=round(Zsi*180/pi) #度度量
print("/Z=%6d∠%d" % (Z,Zsi))
```

```
XL=628
R=1000
/Z= 1181∠32
```

★ 圖 6-27 程式執行結果

(3) 本例 $R=1k$, $X_L = 628$, $\bar{Z} = R + jX_L = 1000 + j628 = 1.2k\angle 32^\circ \Omega$ 。

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} = \frac{5\angle 0^\circ}{12k\angle 32^\circ} = 4.2m\angle -32^\circ \text{ A}$$

$$\bar{V}_L = \bar{I} \bar{X}_L = 4.2m\angle -32^\circ \cdot 628\angle 90^\circ = 2.7\angle 58^\circ \text{ V}$$

$$\bar{V}_R = \bar{I} \cdot R = 4.2m\angle -32^\circ \cdot 1k = 4.2\angle -32^\circ \text{ V}$$

(4) 以上 I 、 V_L 、 V_R 的計算，我們撰寫 Python 程式如下，執行結果如圖 6-28。

```
V=5;Vsi=0
I=V/Z;Isi=Vsi-Zsi
print("/I=%6.4f∠%2d" %(I,Isi))
VL=I*XL;VLsi=Isi+XLsi;
print("/VL=%6.1f∠%2d" %(VL,VLsi))
VR=I*R;VRsi=Isi
print("/VR=%6.1f∠%2d" %(VR,VRsi))
```

```
/I=0.0042∠-32
/VL= 2.7∠58
/VR= 4.2∠-32
```

★ 圖 6-28 程式執行結果

(5) 以上是基本電學的計算方式，可以學習基本電學的計算方式，Python 有複數型態，所以本書直接請電腦計算如下，這樣才能聚焦基本電學的學習。

```
import math as ma
import cmath #載入cmath模組
#因為不斷輸出，所以將輸出寫成函式
def pr(a,Z):
    r,si=cmath.polar(Z)
    si=ma.degrees(si)
    print(a+"=%f∠%d" %(r,si))
pi=ma.pi
u=0.000001
k=1000
m=0.001
f=10*k
R=1000
L=10*m
V=5
XL=2*pi*f*L
print("XL=",XL)
```

```
XL= 628.3185307179587
/Z=1181.009812∠32
/I=0.004234∠-32
/Vl=2.660090∠57
/VR=4.233665∠-32
```

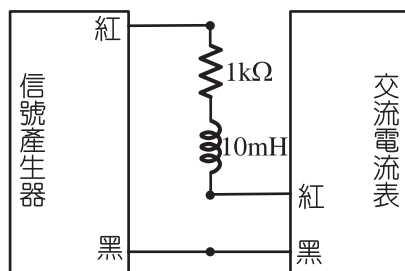
★ 圖 6-29 程式執行結果


```

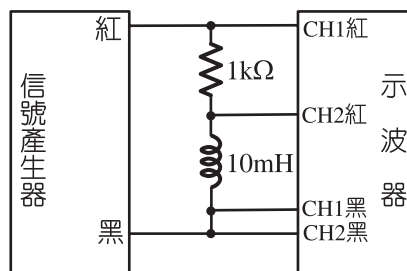
XL=complex(0,XL)#轉為向量，電感是j
Z=R+XL #串聯阻抗
pr("/Z",Z) #輸出阻抗
I=V/Z #電流
pr("/I",I)
VL=I*XL #電感電壓
pr("/Vl",VL)
VR=I*R #電阻電壓
pr("/VR",VR)

```

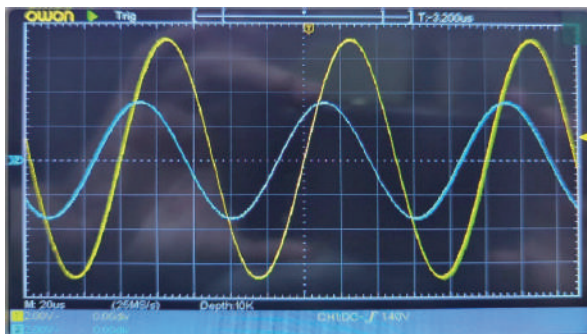
2. 使用交流電壓表量測電壓 $V_S = \underline{\hspace{1cm}}$ ， $V_L = \underline{\hspace{1cm}}$ ， $V_R = \underline{\hspace{1cm}}$ 。
3. 交流電流表接線如圖 6-30a，量測電流 $I = \underline{\hspace{1cm}}$ 。
4. 示波器接線接線如圖 6-30b，量測 $v_L(t)$ ，示波器輸出如圖 6-31。



★ 圖 6-30a

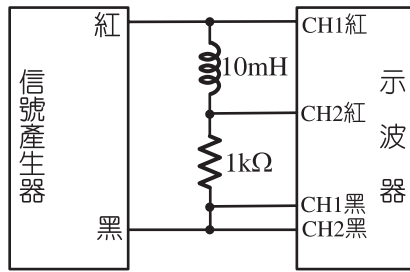


★ 圖 6-30b

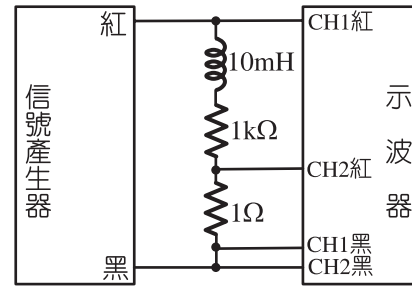
★ 圖 6-31 $v_s(t) - v_L(t)$ 的波形圖

信號產生器：
 $V_S = 5V(\text{rms})$ ， $f = 10\text{kHz}$ ，正弦波。
 示波器：
 $T = 20\mu\text{s} \times 5 = 0.1\text{ms}$
 CH1(黃色 $v_s(t)$):
 $V_1 = 2V \times 3.5 / 1.4 = 5V(\text{rms})$
 CH2(藍色 $v_L(t)$):
 $V_2 = 2V \times 1.7 / 1.4 = 2.4V$
 相位：超前CH1 $0.7 \times 360 / 5 = 50^\circ$

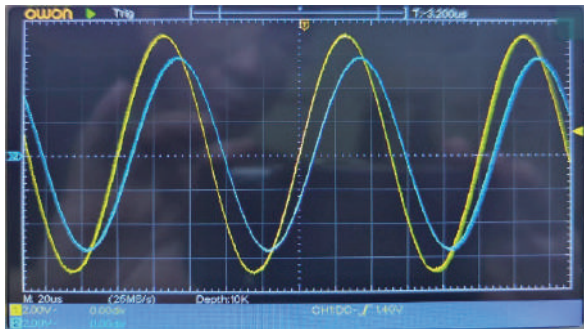
5. 示波器接線如圖 6-32a，量測 $v_R(t)$ ，此為考慮地線問題，所以待測元件要移到下面，輸出結果如圖 6-33。
6. 示波器接線如圖 6-32b，量測 $i(t)$ ，此亦為考慮地線問題，所以待測元件要移到下面，輸出結果如圖 6-34。



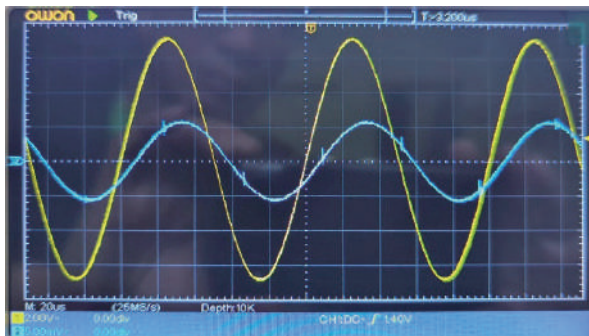
★ 圖 6-32a



★ 圖 6-32b

★ 圖 6-33 $v_s(t) - v_R(t)$ 的波形圖

信號產生器：
 $V_s = 5V$, $f = 10kHz$, 正弦波。
 示波器：
 $T = 20\mu s \times 5 = 0.1ms$
 CH1(黃色 $v_s(t)$):
 $V_1 = 2V \times 3.5 / 1.4 = 5V(rms)$
 CH2(藍色 $i(t)$):
 $V_2 = 5mV \times 1.2 / 1.4 = 4.2mV(rms)$
 相位：落後CH1 $0.4 \times 360 / 5 = 29^\circ$

★ 圖 6-34 $v_s(t) - i(t)$ 波形圖

信號產生器：
 $V_s = 5V$, $f = 10kHz$, 正弦波。
 示波器：
 $T = 20\mu s \times 5 = 0.1ms$
 CH1(黃色 $v_s(t)$):
 $V_1 = 2V \times 3.5 / 1.4 = 5V(rms)$
 CH2(藍色 $i(t)$):
 $V_2 = 5mV \times 1.2 / 1.4 = 4.2mV(rms)$
 相位：落後CH1 $0.4 \times 360 / 5 = 29^\circ$

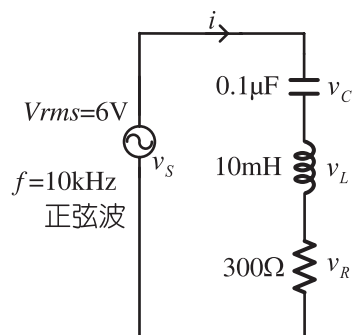
自我練習

1. 同範例 6-2b，請依照以上實驗結果，繪出 $\overline{V}_S$ 、 $\overline{V}_L$ 、 $\overline{V}_R$ 、 $\overline{I}$ 的相量圖。
2. 同範例 6-2b，請將輸入改為 $V_{rms} = 4V$ ，頻率改為 $8kHz$ ，重新計算且做實驗。

範例 6-2c

實作 RCL 串聯電路。電路如圖 6-35，信號產生器提供信號為 $V_{rms} = 6V$ ， $f = 10kHz$ 正弦波， $R = 300\Omega$ ， $C = 0.1\mu F$ ， $L = 10mH$ 。

1. 計算 $\bar{Z}$ 、 $\bar{I}$ 、 $\bar{V}_R$ 、 $\bar{V}_C$ 、 $\bar{V}_L$ 理論值。
2. 使用交流電壓與交流電流表量測 I 、 V_R 、 V_C 、 V_L 之值。
3. 使用示波器 CH1, CH2 同時量測 $v_s(t) - v_C(t)$ 、 $v_s(t) - v_L(t)$ 、 $v_s(t) - v_R(t)$ 之波形。
4. 依照示波器結果繪製 $\bar{V}$ 、 $\bar{V}_C$ 、 $\bar{V}_L$ 、 $\bar{V}_R$ 相量圖。



★ 圖 6-35

操作步驟

1. 計算理論值：

$$(1) X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 10k \cdot 0.1\mu} = 159\Omega$$

$$X_L = 2\pi f L = 2 \cdot 3.14 \cdot 10k \cdot 10m = 628\Omega$$

$$\begin{aligned} \bar{Z} &= R + j(X_L - X_C) \\ &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \angle \tan^{-1} \frac{(X_L - X_C)}{R} \end{aligned}$$

令上式為 $\bar{Z} \angle \theta$

$$\text{可得 } Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \theta = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R}$$

- (2) 以上 X_C 、 X_L 、 Z 與 θ 的三角函數計算，我們使用 Python 程式計算如下，執行結果如圖 6-36。

```
import math as ma
pi=ma.pi
u=0.000001
k=1000
f=10*k
R=300
m=0.001
C=0.1*u
L=10*m
```

```

XC=round(1/(2*pi*f*C))
print("XC=%d" % XC) #
XCsi=-90
XL=round(2*pi*f*L)
XLsi=90
print("XL=%d" % XL) #
print("XL-XC=%d" % (XL-XC)) #
print("R=%d" % R) #
Z=round((R*R+(XL-XC)*(XL-XC))**(1/2))
print("Z=%d" % Z) #400
Zsi=ma.atan2(XL-XC,R) #徑度量
Zsi=round(Zsi*180/pi) #度度量
print("Zsi=%d" % Zsi) #
print("/Z=%d∠%d" % (Z,Zsi)) #

```

```

XC=159
XL=628
XL-XC=469
R=300
Z=557
Zsi=57
/Z=557∠57

```

★ 圖 6-36 程式執行結果

$$(3) \bar{Z} = R + jX_L - jX_C = 300 + j628 - j159 = 300 + j469 = 557\angle 57^\circ \Omega$$

$$= 557\angle 57^\circ \Omega。$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} = \frac{6\angle 0^\circ}{557\angle 57^\circ} = 11m\angle -57^\circ A$$

$$\bar{V}_C = \bar{I} \cdot \bar{X}_C = 11m\angle -57^\circ \cdot 159\angle -90^\circ = 1.7\angle -147^\circ V$$

$$\bar{V}_L = \bar{I} \cdot \bar{X}_L = 11m\angle -57^\circ \cdot 628\angle 90^\circ = 6.8\angle 33^\circ V$$

$$\bar{V}_R = \bar{I} \cdot R = 11m\angle -57^\circ \cdot 300 = 3.2\angle -57^\circ V$$

(4) 以上相量運算，撰寫 Python 程式如下：

```

V=6;Vsi=0
I=V/Z;Isi=Vsi-Zsi
print("/I=%10.6f∠%2d" % (I,Isi))
VC=I*XC;VLsi=Isi+XCsi;
print("/VC=%6.1f∠%2d" % (VC,VLsi))
VL=I*XL;VLsi=Isi+XLsi;
print("/VL=%6.1f∠%2d" % (VL,VLsi))
VR=I*R;VRsi=Isi
print("/VR=%6.1f∠%2d" % (VR,VRsi))

```

```

/I= 0.010772∠-57
/VC= 1.7∠-147
/VL= 6.8∠33
/VR= 3.2∠-57

```

★ 圖 6-37 程式執行結果

(5) 以上是基本電學的計算方式，但是高一三角函數可能跟不上基本電學實習，所以本書直接請電腦計算如下，這樣才能聚焦基本電學的學習。

```

import math as ma
import cmath #載入cmath模組
def pr(a,Z):
    r,si=cmath.polar(Z)
    si=ma.degrees(si)
    print(a+"=%f∠%d" %(r,si))
pi=ma.pi
u=0.000001
m=0.001
k=1000
V=6
f=10*k
R=300
C=0.1*u
L=10*m
XC=1/(2*pi*f*C)
print("XC=%d" % XC) #159
XC=complex(0,-XC) #轉為向量，電容是-j
XL=2*pi*f*L
print("XL=%d" % XL) #628
XL=complex(0,XL) #轉為向量，電感是j
Z=R+XC+XL #串聯阻抗
pr("/Z",Z) #輸出阻抗

I=V/Z #電流
pr("/I",I)
VC=I*XC #電容電壓
pr("/VC",VC)
VL=I*XL #電感電壓
pr("/VL",VL)
VR=I*R #電阻電壓
pr("/VR",VR)

```

```

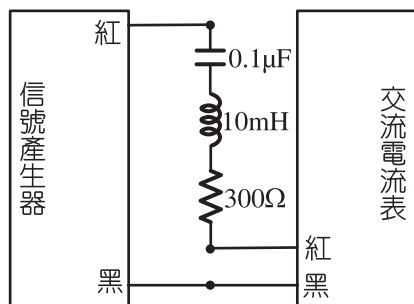
XC=159
XL=628
/Z=556.879226∠57
/I=0.010774∠-57
/VC=1.714788∠-147
/VL=6.769711∠32
/VR=3.232299∠-57

```

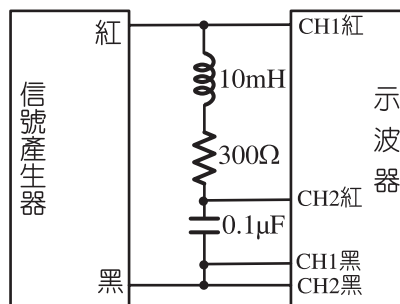
★ 圖 6-38 程式執行結果

2. 使用交流電壓表量測電壓 $V_S = \underline{\hspace{2cm}}$, $V_C = \underline{\hspace{2cm}}$, $V_L = \underline{\hspace{2cm}}$, $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
3. 交流電流表接線如圖 6-39a , 量測電流 $I = \underline{\hspace{2cm}}$, 請問是否與理論值接近。

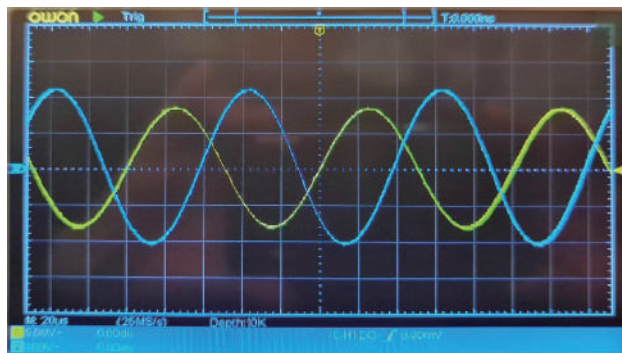
4. 信號產生器、示波器接線如圖 6-39b，使用示波器量測 $v_s(t) - v_c(t)$ ，輸出結果如圖 6-40。



★ 圖 6-39a



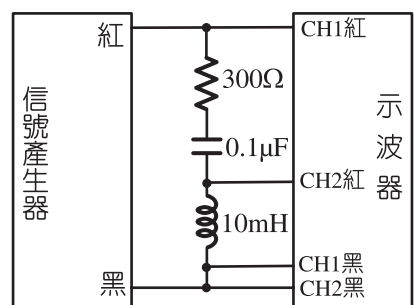
★ 圖 6-39b



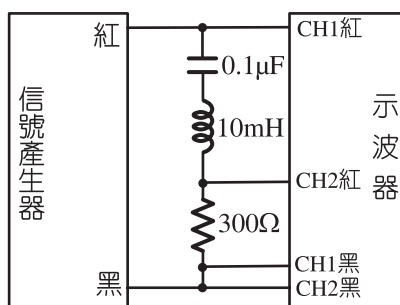
★ 圖 6-40 $v_s(t) - v_c(t)$ 的波形圖

信號產生器：
 $V_s = 6V$, $f = 10kHz$ ，正弦波。
 示波器： $T = 20\mu s \times 5 = 0.1m$ 。
 CH1(黃色 $v_s(t)$):
 $V_1 = 5V \times 1.7/1.4 = 6V(rms)$
 CH2(藍色 $v_c(t)$):
 $V_2 = 1V \times 2.2/1.4 = 1.6V(rms)$
 相位：落後CH1 $1.9 \times 360/5 = 137^\circ$

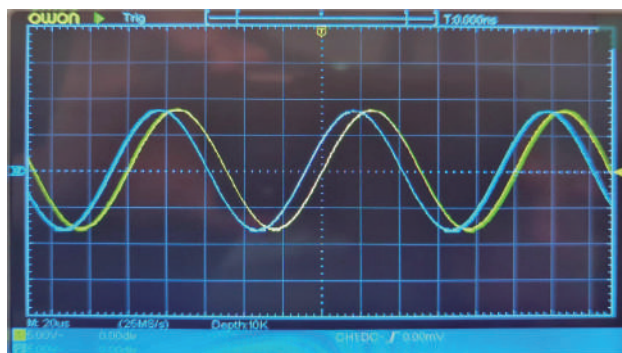
5. 信號產生器、示波器接線如圖 6-41a，此為考慮地線問題，所以待測元件要移到下面。使用示波器量測 $v_s(t) - v_L(t)$ ，輸出結果如圖 6-42。
6. 信號產生器、示波器接線如圖 6-41b，此亦為考慮地線問題，所以待測元件要移到下面。使用示波器量測 $v_s(t) - v_R(t)$ ，輸出結果如圖 6-43。



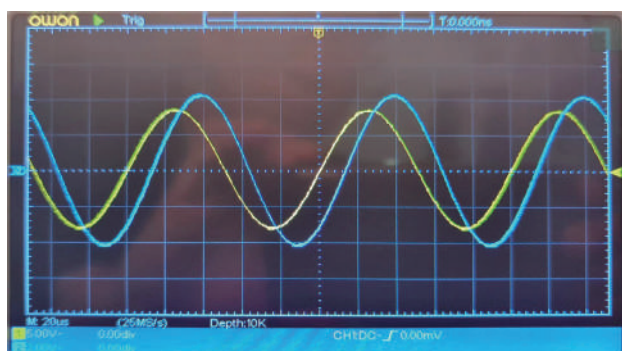
★ 圖 6-41a



★ 圖 6-41b

圖6-42 $v_s(t) - v_L(t)$ 的波形圖

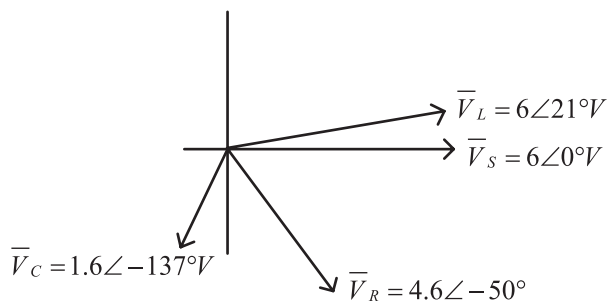
信號產生器：

 $V_s = 6V$ ， $f = 10kHz$ ，正弦波。示波器：Time/Div = $20\mu s \times 5 = 0.1m$ 。CH1(黃色 $v_s(t)$)： $V_1 = 5V \times 1.7/1.4 = 6V(rms)$ CH2(藍色 $v_L(t)$)： $V_2 = 5V \times 1.7/1.4 = 6V(rms)$ 相位：超前CH1 $0.3 \times 360/5 = 21^\circ$ ★ 圖 6-43 $v_s(t) - v_R(t)$ 的波形圖

信號產生器：

 $V_s = 6V$ ， $f = 10kHz$ ，正弦波。示波器：T = $20\mu s \times 5 = 0.1m$ 。CH1(黃色 $v_s(t)$)： $V_1 = 5V \times 1.7/1.4 = 6V(rms)$ CH2(藍色 $v_R(t)$)： $V_2 = 2V \times 3.2/1.4 = 4.6V(rms)$ 相位：落後CH1 $0.7 \times 360/5 = 50^\circ$

7. 依據以上實驗數據 $\bar{V}_S = 6\angle 0^\circ V$ ， $\bar{V}_C = 1.6\angle -137^\circ V$ ， $\bar{V}_L = 6\angle 21^\circ V$ ， $\bar{V}_R = 4.6\angle -50^\circ V$ ，以上相量繪圖如圖6-44。

★ 圖 6-44 $\bar{V}_S$ 、 $\bar{V}_C$ 、 $\bar{V}_L$ 、 $\bar{V}_R$ 相量圖

自我練習

1. 同範例 6-2c，但示波器輸入改爲 $V_{rms} = 4V$ ，頻率改爲 $12kHz$ 。

6-3 交流電阻、電感、電容並聯電路實作

前面 6-2 節已經介紹電阻、電容、電感的串聯交流電路，本節則要介紹交流電阻電容（以下簡稱 RC）、電阻電感（以下簡稱 RL）及電阻電容電感（以下簡稱 RCL）並聯電路。並聯定路求電壓與電流的步驟如下：

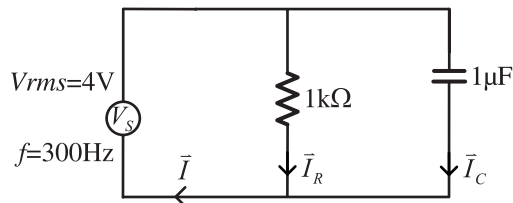
1. 計算電阻阻抗 $\bar{Z}$ ：電阻阻抗 $\bar{Z} = R$ ，僅與 R 值有關。
2. 計算 $\bar{X}_C$ ： $\bar{X}_C = \frac{1}{\omega C} \angle -90^\circ$ 。
3. 計算 $\bar{X}_L$ ： $\bar{X}_L = \frac{1}{\omega L} \angle 90^\circ$ 。
4. 計算 $\bar{I}_R$ ： $\bar{I}_R = \frac{\bar{V}}{R}$ 。（並聯因所有元件電壓都相同的電流，所以先計算所有元件的電流）
5. 計算 $\bar{I}_C$ ： $\bar{I}_C = \frac{\bar{V}}{\bar{X}_C}$ 。
6. 計算 $\bar{I}_L$ ： $\bar{I}_L = \frac{\bar{V}}{\bar{X}_L}$ 。
7. 計算 $\bar{I}$ ： $\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_C + \bar{I}_L$ 。
8. 計算 $\bar{Z}$ ： $\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}}$ 。
9. 電路特性： $I_C = I_L$ （或 $X_C = X_L$ ）時，電路呈現電阻性； $I_C > I_L$ （或 $X_L > X_C$ ）時，電路呈現電容性，此時總電流超前總電壓； $I_C < I_L$ （或 $X_L < X_C$ ）時，電路呈現電感性，此時總電流落後總電壓。

以上計算方式與前面直流電阻並聯電路相同，有相同的並聯總電阻與分流定則，維一不同的是阻抗的表示與計算方式改為複數，請看以下範例說明。

範例 6-3a

實作 RC 並聯電路。電路如圖 6-45，
信號產生器提供信號為 $V_{rms} = 4V$ ，
 $f = 300Hz$ 正弦波， $R = 1k\Omega$ ， $C = 1\mu F$ 。

1. 計算 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_C$ 、 $\bar{I}$ 、 $\bar{Z}$ 理論值。
2. 使用交流電壓與交流電流量測 $\bar{V}_S$ 、 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_C$ 、 $\bar{I}$ 之值。
3. 使用示波器 CH1, CH2 同時量測 $v_s(t) - i_R(t)$ 、 $v_s(t) - i_C(t)$ 、 $v_s(t) - i(t)$ 之波形。
4. 依照示波器輸出結果繪製 $\bar{V}_S$ 、 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_C$ 、 $\bar{I}$ 相量圖。



★ 圖 6-45

操作步驟

1. 計算理論值：

- (1) 計算 $\bar{I}_R$

$$I_R = \frac{V}{R} = \frac{4}{1k} = 4mA$$

$$\bar{I}_R = I_R \angle 0^\circ = 4mA$$

- (2) 計算 $\bar{X}_C$ ：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \times 300 \cdot 1\mu} = 531\Omega$$

$$\bar{X}_C = X_C \angle -90^\circ = 531 \angle -90^\circ \Omega$$

- (3) 計算 $\bar{I}_C$ ：

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{V}}{\bar{X}_C} = \frac{4 \angle 0^\circ}{531 \angle -90^\circ} = 7.5mA \angle 90^\circ = 7.5mj$$

- (4) 計算合電流 $\bar{I}$ ：

$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_C = 4m + j7.5m = 8.5m \angle 62^\circ A$$

- (5) 計算 $\bar{Z}$ ：

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} = \frac{4 \angle 0^\circ}{8.5m \angle 62^\circ} = 468 \angle 62^\circ \Omega$$

2. 以上 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_C$ 、 $\bar{I}$ 、 $\bar{Z}$ 理論值的計算，我們使用 Python 程式計算如下，執行結果如圖 6-46。

```
import math as ma
pi=ma.pi
u=0.000001
k=1000
f=300
R=1*k
C=1*u
V=4
Vsi=0
IR=V/R
IRsi=0
print("/IR=%f∠%d"%(IR,IRsi))
XC=round(1/(2*pi*f*C))
XCsi=-90
print("/XC=%d∠%d" % (XC,XCsi))
IC=V/XC
ICsi=90
print("/IC=%f∠%d" %(IC,ICsi))

I=(IC*IC+IR*IR)**(1/2)
Isi=ma.atan2(IC,IR) #徑度量
Isi=round(Isi*180/pi) #度度量
print("/I=%f∠%d" % (I,Isi))

Z=V/I
Zsi=Vsi-Isi
print("/Z=%6d∠%d" % (Z,Zsi)) #468∠-62
```

```
/IR=0.004000∠0
/XC=531∠-90
/IC=0.007533I∠90
/I=0.008529∠62
/Z= 468∠-62
```

★ 圖 6-46 程式執行結果

3. 以上理論值的計算，是基本電學的計算方式，可以幫助基本電學的學習，以下直接使用 Python 複數型態，程式如下，執行結果如圖 6-48。

```
import math as ma
pi=ma.pi
u=0.000001
import math as ma
import cmath
def pr(a,Z):
```

```

    r,si=cmath.polar(Z)
    si=ma.degrees(si)
    print(a+"=%f∠%d" %(r,si))
pi=ma.pi
u=0.000001
k=1000
V=4
f=300
R=1*k
C=1*u
R=complex(R,0)
IR=V/R
pr("/IR",IR)
XC=1/(2*pi*f*C)
XC=complex(0,-XC)#電容是-j
IC=V/XC
pr("/IC",IC)
I=IR+IC
pr("/I",I)
Z=V/I
pr("/Z",Z)
#直接求/Z
Z=1/((1/R)+(1/XC))
pr("/Z",Z)

```

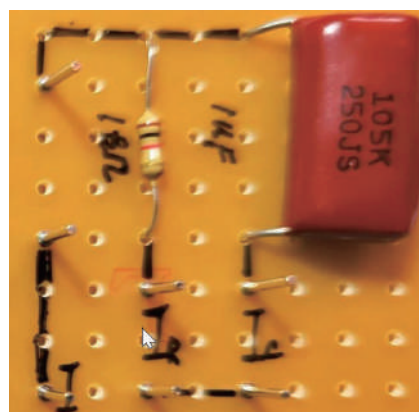
```

/IR=0.004000∠0
/IC=0.007540∠90
/I=0.008535∠62
/Z=468.649792∠-62
/Z=468.649792∠-62

```

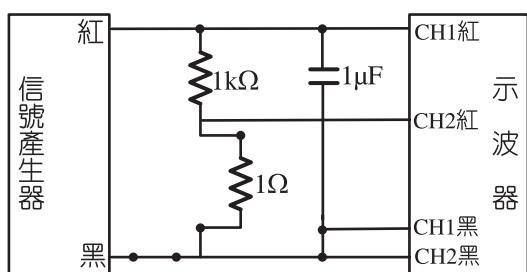
★ 圖 6-48 程式執行結果

4. 電路焊接如圖 6-49，接線柱用於量測電流。(交流電流表直接量測，信號產生器則是串聯 1Ω 電阻，量測此 1Ω 電阻電壓，未量測點請用導線連接，使其導通)。
5. 使用交流電壓表量測電壓 $V_S = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_C = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
6. 使用交流電流表，量測 $I_R = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $I_C = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $I = \underline{\hspace{2cm}}$ ，請問是否與理論值相近。

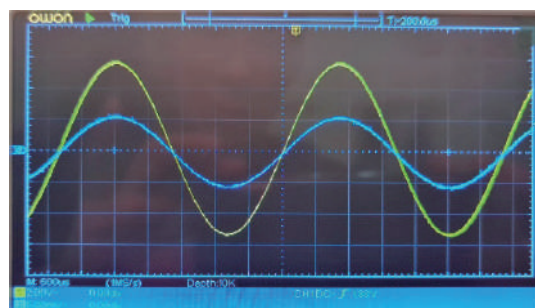


★ 圖 6-49 電路焊接板

7. 使用示波器量測 $v_s(t) - i_R(t)$ ，
信號產生器與示波器接線如圖
6-50，畫面如圖 6-51。



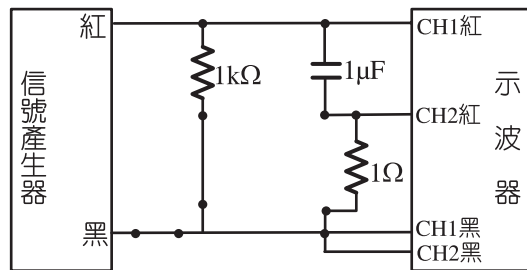
★ 圖 6-50 $v_s(t) - i_R(t)$ 接線圖



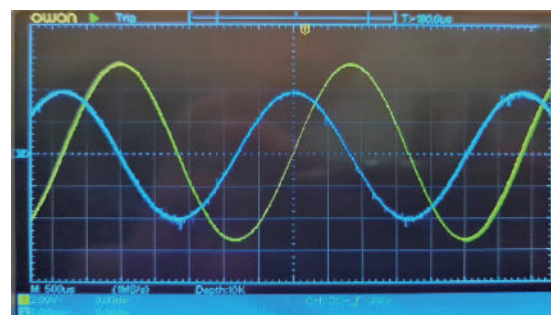
信號產生器： $V_{rms}=4V$ ， $f=300Hz$ ，正弦波。
示波器： $T=500\mu s \times 6.7=3.35ms$ 。 $f=1/3.35m=300Hz$
CH1(黃色 $v_s(t)$)： $V_1=2V \times 2.8/1.4=4V(rms)$
CH2(藍色 $i_R(t)$)： $V_2=5mV \times 1/1.4=3.5mV(rms)$
相位：與CH2同相

★ 圖 6-51 $v_s(t) - i_R(t)$ 的波形圖

8. 使用示波器量測 $v_s(t) - i_C(t)$ ，
信號產生器與示波器接線如圖
6-52a，畫面如圖 6-52b。



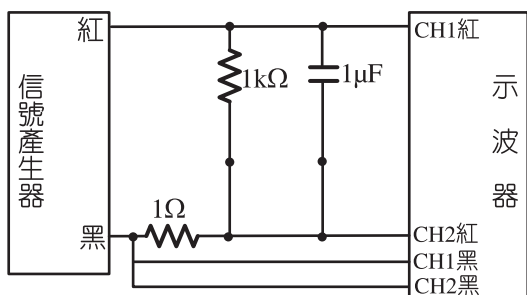
★ 圖 6-52a $v_s(t) - i_C(t)$ 接線圖



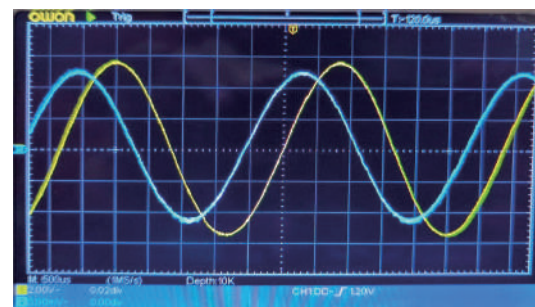
信號產生器： $V_{rms}=4V$ ， $f=300Hz$ ，正弦波。
示波器： $T=500\mu s \times 6.7=3.35ms$ 。 $f=1/3.35m=300Hz$
CH1(黃色 $v_s(t)$)： $V_1=2V \times 2.8/1.4=4V(rms)$
CH2(藍色 $i_C(t)$)： $V_2=5mV \times 2/1.4=7.1mV(rms)$
相位：超前CH1 $1.7/6.7 \times 360=91^\circ$

★ 圖 6-52b $v_s(t) - i_C(t)$ 的波形圖

9. 使用示波器量測 $v_s(t) - i(t)$ ，
信號產生器與示波器接線如圖
6-53，畫面如圖 6-54。



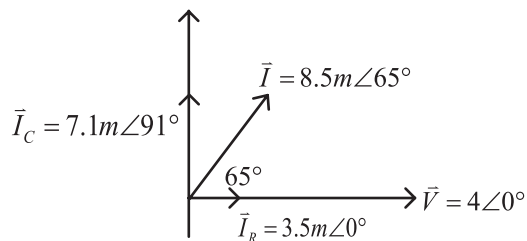
★ 圖 6-53 $v_s(t) - i(t)$ 接線圖



信號產生器： $V_{rms}=4V$ ， $f=300Hz$ ，正弦波。
示波器： $T=500\mu s \times 6.7=3.35ms$ 。 $f=1/3.35m=300Hz$
CH1(黃色 $v_s(t)$)： $V_1=2V \times 2.8/1.4=4V(rms)$
CH2(藍色 $i(t)$)： $V_2=5mV \times 2.4/1.4=8.5mV(rms)$
相位：超前CH1 $1.2/6.7 \times 360=65^\circ$

★ 圖 6-54 $v_s(t) - i(t)$ 的波形圖

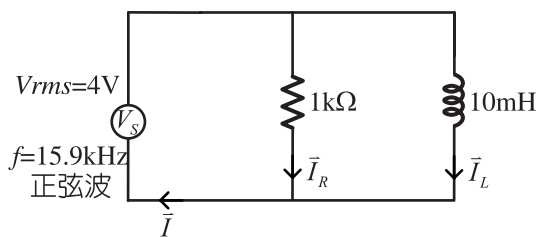
10. 依照以上實驗數據 $\bar{V}_S = 4\angle 0^\circ$,
 $\bar{I}_R = 3.5m\angle 0^\circ$, $\bar{I}_C = 7.1m\angle 91^\circ$,
 $\bar{I} = 8.5m\angle 65^\circ$, 繪製以上相量
 如圖 6-55 。



★ 圖 6-55

範例 6-3b

實作 RL 並聯電路。電路如圖 6-56 ,
 信號產生器提供信號為 $V_{rms} = 4V$,
 $f = 15.9kHz$ 正弦波 , $R = 1k\Omega$,
 $C = 10mH$ 。



★ 圖 6-56 電路圖

1. 計算 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{X}_L$ 、 $\bar{I}_L$ 、 $\bar{I}$ 、 $\bar{Z}$ 理論值。
2. 使用交流電壓與交流電流表量測 $\bar{V}_S$ 、 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_L$ 、 $\bar{I}$ 之值。
3. 使用示波器 CH1, CH2 同時量測 $v_S(t) - i_R(t)$ 、 $v_S(t) - i_L(t)$ 、 $v_S(t) - i(t)$ 之波形。
4. 依照示波器輸出結果繪製 $\bar{V}_S$ 、 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_L$ 、 $\bar{I}$ 相量圖。

操作步驟

1. 計算理論值：

(1) 計算 $\bar{I}_R$ ：

$$\bar{I}_R = \frac{4\angle 0^\circ}{1k\angle 0^\circ} = 4m\angle 0^\circ A$$

(2) 計算 $\bar{X}_L$ ：

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3.14 \times 159k \cdot 10m = 1k\Omega$$

$$\bar{X}_L = X_L \angle 90^\circ = 1k\angle 90^\circ \Omega$$

(3) 計算 $\bar{I}_L$ ：

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{V}}{\bar{X}_L} = \frac{4\angle 0^\circ}{1k\angle 90^\circ} = 4m\angle -90^\circ A$$

(4) 計算合電流 $\bar{I}$ ：

$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_L = 4m\angle 0 + 4m\angle -90^\circ = 5.6m\angle -45^\circ A \quad (\text{此為 } 1:1:\sqrt{2} \text{ 特別角})$$

(5) 計算 $\bar{Z}$:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} = \frac{4\angle 0^\circ}{5.6\text{mA}\angle -45^\circ} = 706\angle 45^\circ \Omega$$

2. 以上 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{X}_L$ 、 $\bar{I}_L$ 、 $\bar{I}$ 、 $\bar{Z}$ 理論值的計算，我們使用 Python 程式計算如下，執行結果如圖 6-57。

```
import math as ma
pi=ma.pi
u=0.000001
m=0.001
k=1000
f=15.9*k
R=1*k
L=10*m
V=4
Vsi=0
IR=V/R
IRsi=0
print((" /IR=%f∠%d" % (IR, IRsi)) #/
IR=0.004000∠0
XL=round(2*pi*f*L)
XLsi=90
print("/XL=%d∠%d" % (XL, XLsi)) #/
XL=999∠90
IL=V/XL
ILsi=Vsi-XLsi
print("/IL=%f∠%d" % (IL, ILsi)) #0.004
I=(IL*IL+IR*IR)**(1/2)
Isi=ma.atan2(-IL, IR) #徑度量
Isi=round(Isi*180/pi) #度度量
print("/I=%f∠%d" % (I, Isi)) #/
I=0.005660∠-45
Z=V/I
Zsi=Vsi-Isi
print("/Z=%d∠%d" % (Z, Zsi)) # /Z=
706∠45
```

```
/IR=0.004000∠0
/XL=999∠90
/IL=0.004004∠-90
/I=0.005660∠-45
/Z= 706∠45
```

★ 圖 6-57 程式執行結果

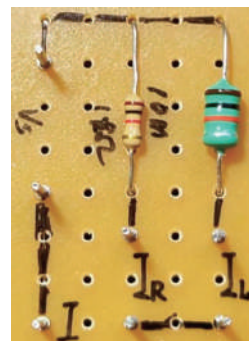
3. 以上理論值的計算，是基本電學的計算方式，可以幫助基本電學的學習，以下直接使用 Python 複數型態，程式如下，執行結果如圖 6-58。

```
import math as ma
import cmath
def pr(a,Z):
    r,si=cmath.polar(Z)
    si=ma.degrees(si)
    print(a+"=%f∠%d" %(r,si))
pi=ma.pi
u=0.000001
k=1000
m=0.001
V=4
f=15.9*k
R=1*k
L=10*m
R=complex(R,0)
IR=V/R
pr("/IR",IR)
XL=2*pi*f*L
XL=complex(0,XL)
IL=V/XL
pr("/IL",IL)
I=IR+IL
pr("/I",I)
Z=V/I
pr("/Z",Z)
#直接求/Z
Z=1/((1/R)+(1/XL))
pr("/Z",Z)
```

```
/IR=0.004000 ∠ 0
/IL=0.004004 ∠ -90
/I=0.005660 ∠ -45
/Z=706.762333 ∠ 45
/Z=706.762333 ∠ 45
```

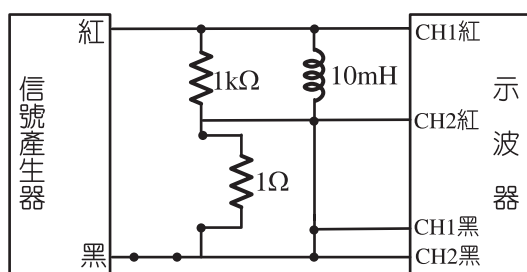
★ 圖 6-58 程式執行結果

4. 電路焊接如圖 6-59，接線柱用於量測電流（請留意，交流電流表是直接量測，信號產生器則是串聯 1Ω 電阻，再量測此 1Ω 電阻電壓）。
5. 使用交流電壓表量測電壓 $V_s = \underline{\hspace{2cm}}$ ，
 $V_L = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
6. 使用交流電流表，量測 $I_R = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $I_L = \underline{\hspace{2cm}}$ ，
 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ ，請問是否與理論值相近。

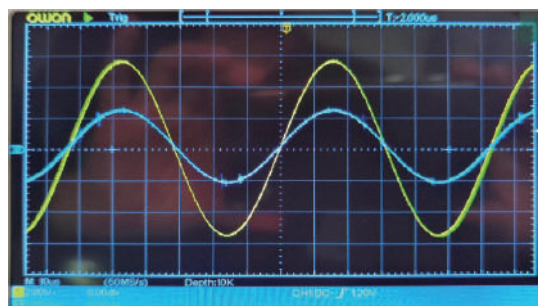


★ 圖 6-59 電路焊接圖

7. 使用示波器量測 $v_s(t) - i_R(t)$ ，
信號產生器與示波器接線如圖
6-60，畫面如圖 6-61。



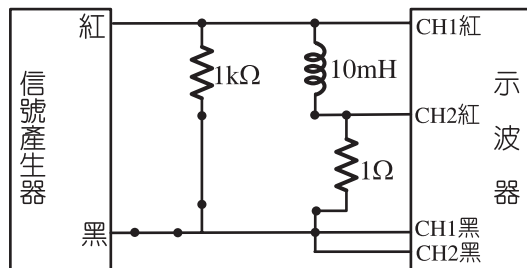
★ 圖 6-60 $v_s(t) - i_R(t)$ 接線圖



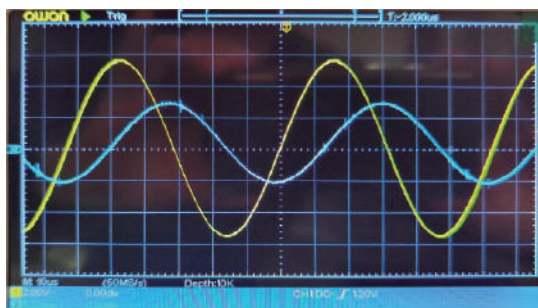
信號產生器： $V_{rms}=4V$ ， $f=15.9kHz$ ，正弦波。
示波器： $T=10\mu \times 6.3=63\mu$ 。 $f=1/63\mu=15.9kHz$
CH1(黃色 $v_s(t)$)： $V_1=2V \times 2.8/1.4=4V(rms)$
CH2(藍色 $i_R(t)$)： $V_2=5mV \times 1.2/1.4=4.2mV$
相位：與CH1同相

★ 圖 6-61 $v_s(t) - i_R(t)$ 的波形圖

8. 使用示波器量測 $v_s(t) - i_L(t)$ ，
信號產生器與示波器接線如圖
6-62，畫面如圖 6-63。



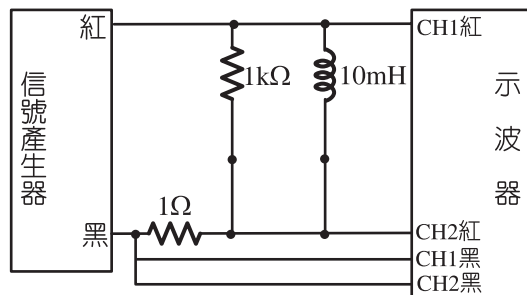
★ 圖 6-62 $v_s(t) - i_L(t)$ 接線圖



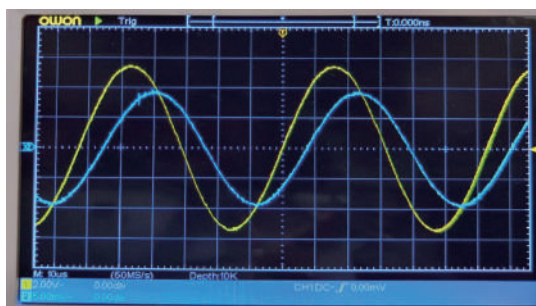
信號產生器： $V_{rms}=4V$ ， $f=15.9kHz$ ，正弦波。
示波器： $T=10\mu \times 6.3=63\mu$ 。 $f=1/63\mu=15.9kHz$
CH1(黃色 $v_s(t)$)： $V_1=2V \times 2.8/1.4=4V(rms)$
CH2(藍色 $i_L(t)$)： $V_2=5mV \times 1.5/1.4=5.3mV(rms)$
相位： $1.2/6.3 \times 360=68^\circ$ 落後CH1

★ 圖 6-63 $v_s(t) - i_L(t)$ 的波形圖

9. 使用示波器量測 $v_s(t) - i(t)$ ，
信號產生器與示波器接線如圖
6-64，畫面如圖 6-65。



★ 圖 6-64 $v_s(t) - i(t)$ 接線圖



信號產生器： $V_{rms}=4V$ ， $f=15.9kHz$ ，正弦波。
示波器： $T=10\mu \times 6.3=63\mu$ 。 $f=1/63\mu=15.9kHz$
CH1(黃色 $v_s(t)$)： $V_1=2V \times 2.8/1.4=4V(rms)$
CH2(藍色 $i(t)$)： $V_2=5mV \times 1.8/1.4=6.4mV(rms)$
相位： $0.7/6.3 \times 360=40^\circ$ 落後

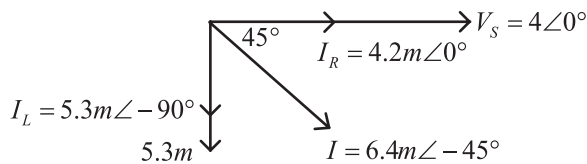
★ 圖 6-65 $v_s(t) - i(t)$ 的波形圖

10. 依照以上實驗數據，

$$\bar{V}_S = 4\angle 0^\circ \text{ V}, \quad \bar{I}_R = 4.2\text{m}\angle 0^\circ \text{ A},$$

$$\bar{I}_L = 5.3\text{m}\angle -90^\circ \text{ A},$$

$\bar{I} = 6.4\text{m}\angle -45^\circ \text{ A}$ ，以上相量繪圖如圖 6-66。



★ 圖 6-66 $\bar{V}_S$ 、 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_L$ 、 $\bar{I}$ 相量圖

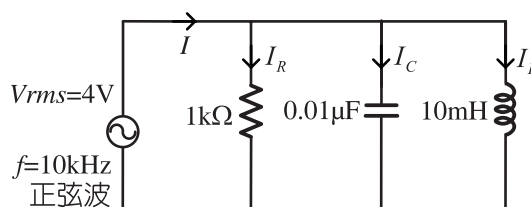
範例 6-3c

實作 RCL 並聯電路。電路如圖 6-67，

信號產生器提供信號為 $V_{rms} = 4$ ，

$f = 10\text{kHz}$ 正弦波， $R = 1\text{k}\Omega$ ，

$C = 0.01\ \mu\text{F}$ ， $L = 10\text{mH}$ 。



★ 圖 6-67 RCL 並聯電路

1. 計算 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_C$ 、 $\bar{I}_L$ 、 $\bar{I}$ 、 $\bar{Z}$ 理論值。
2. 使用交流電壓與交流電流表量測 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_C$ 、 $\bar{I}_L$ 、 $\bar{I}$ 之值。
3. 使用示波器 CH1, CH2 同時量測 $v_S(t) - i_R(t)$ 、 $v_S(t) - i_C(t)$ 、 $v_S(t) - i_L(t)$ 、 $v_S(t) - i(t)$ 之波形。
4. 依照示波器結果繪製 $\bar{V}_S$ 、 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_C$ 、 $\bar{I}_L$ 、 $\bar{I}$ 相量圖。

操作步驟

1. 計算理論值：

(1) 計算 $\bar{I}_R$ ：

$$\bar{I}_R = \frac{V}{R} = \frac{4\angle 0^\circ}{1k} = 4\text{m}\angle 0^\circ \text{ A}$$

(2) 計算 $\bar{X}_C$ ：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 10k \cdot 0.01\mu} = 1591\Omega$$

$$\bar{X}_C = X_C j = 1591j = 1591\angle -90^\circ \Omega$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{V}}{\bar{X}_C} = \frac{4\angle 0^\circ}{1591\angle -90^\circ} = 0.0025\angle 90^\circ = 2.5\text{m}\angle 90^\circ \text{ A} = j2.5\text{mA}$$

(3) 計算 $\bar{I}_L$ ：

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3.14 \cdot 10k \cdot 10\text{m} = 628\Omega$$

$$\bar{X}_L = X_L j = 628j = 628\angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{V}}{\bar{X}_L} = \frac{4\angle 0^\circ}{628\angle 90^\circ} = 6.3m\angle -90^\circ = -6.3mjA$$

(4) 計算合電流 $\bar{I}_j$ (j 軸電流) :

$$\bar{I}_j = \bar{I}_C + \bar{I}_L = 2.5mj - j6.3m = -3.8mjA$$

(5) 計算 $\bar{I}$:

$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_j = 4m - j3.8m = 5.5m\angle -44^\circ A$$

(6) 計算 $\bar{Z}$:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} = \frac{4\angle 0^\circ}{5.5m\angle -44^\circ} = 720\angle 44^\circ \Omega$$

2. 以上 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_C$ 、 $\bar{I}_L$ 、 $\bar{I}$ 、 $\bar{Z}$ 計算，我們使用 Python 程式計算如下，程式執行結果如圖 6-68。

```
import math as ma
pi=ma.pi
u=0.000001
m=0.001
k=1000
f=10*k
R=1*k
L=10*m
C=0.01*u
V=4
Vsi=0
IR=V/R
IRsi=0
print("/IR=%f∠%d"%(IR, IRsi))#/
IR=0.004000∠0
XC=1/(2*pi*f*C)
XCsi=-90
print("/XC=%d∠%d" % (XC, XCsi))
IC=V/XC
ICsi=90
print("/IC=%f∠%d" % (IC, ICsi))
```

```
/IR=0.004000∠0
/XC=1591∠-90
/IC=0.002513∠90
/XL=628∠90
/IL=0.006366∠-90
/I=0.005554∠-44
/Z= 720∠44
```

★ 圖 6-68 程式執行結果

```

XL=2*pi*f*L
XLsi=90
print("/XL=%d∠%d" % (XL,XLsi)) #
IL=V/XL
ILsi=Vsi-XLsi
print("/IL=%f∠%d" % (IL,ILsi))#
IV=IC-IL
I=(IV*IV+IR*IR)**(1/2)
Isi=ma.atan2(IV,IR) #徑度量
Isi=round(Isi*180/pi) #度度量
print("/I=%f∠%d" % ( I,Isi)) #
Z=V/I
Zsi=Vsi-Isi
print("/Z=%6d∠%d" % (Z,Zsi))#

```

3. 以上理論值的計算，是基本電學的計算方式，可以幫助基本電學的學習，以下直接使用 Python 複數型態，程式如下，執行結果如圖 6-69。

```

import math as ma
import cmath
def pr(a,Z):
    r,si=cmath.polar(Z)
    si=ma.degrees(si)
    print(a+"=%f∠%d" % (r,si))
pi=ma.pi
u=0.000001
k=1000
m=0.001
V=6
f=11*k
R=1*k
C=0.01*u
L=10*m
R=complex(R,0)
IR=V/R
pr("/IR",IR)

XC=1/(2*pi*f*C)
XC=complex(0,-XC)
IC=V/XC
pr("/IC",IC)

```

```

/IR=0.004000∠0
/IC=0.002513∠90
/IL=0.006366∠-90
/I=0.005554∠-43
/Z=720.223788∠43
/Z=720.223788∠43

```

★ 圖 6-69 程式執行結果

```

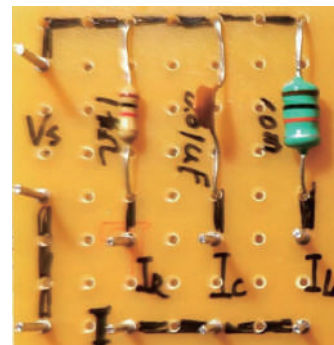
XL=2*pi*f*L
XL=complex(0,XL)
IL=V/XL
pr("/IL",IL)

I=IR+IC+IL
pr("/I",I)
Z=V/I
pr("/Z",Z)
#直接求/Z
Z=1/((1/R)+(1/XC)+(1/XL))
pr("/Z",Z)

```

4. 電路焊接如圖 6-70，接線柱用於量測電流（交流電流表請直接量測，若使用信號產生器則是先串聯 1Ω 電阻，再量測此 1Ω 電阻電壓，未測量點請用導線連接，使其導通。）

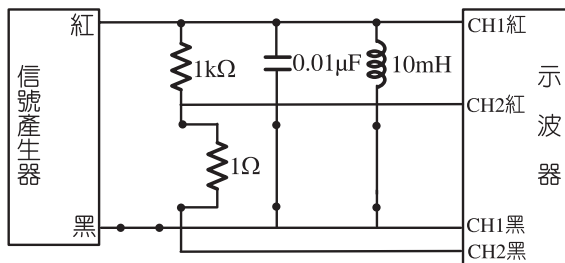
5. 信號產生器請輸出 $V_S = 4V(\text{rms})$ ， $f = 10\text{kHz}$ ，正弦波。



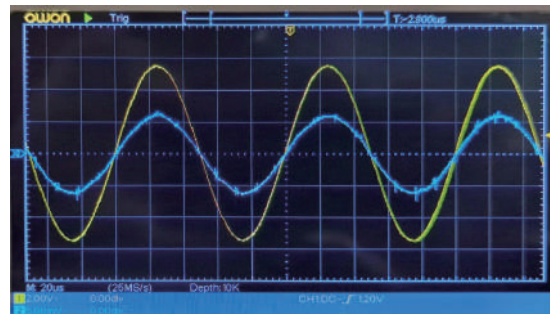
✦ 圖 6-70 電路焊接圖

6. 使用交流電流表量測電壓 $I_R = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $I_C = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $I_L = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $I = \underline{\hspace{2cm}}$ ，請問是否與理論值接近。（未測量點請用鱷魚夾線使之導通）

7. 使用示波器量測 $v_S(t) - i_R(t)$ ，信號產生器與示波器連接線如圖 6-71，輸出結果如圖 6-72。



✦ 圖 6-71 $v_S(t) - i_R(t)$ 接線圖



信號產生器：

$V_S = 4V(\text{rms})$ ， $f = 10\text{kHz}$ ，正弦波。

示波器： $T = 20\mu\text{s} \times 5 = 0.1\text{ms}$

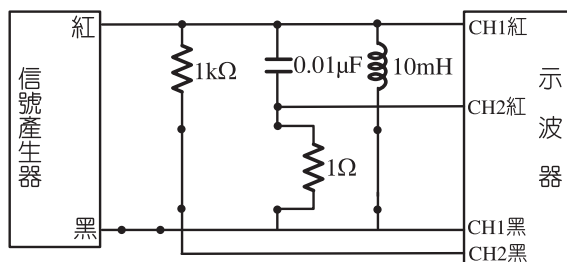
CH1(黃色 $v_S(t)$)： $V_1 = 2V \times 2.8 / 1.4 = 4V(\text{rms})$

CH2(藍色 $i_R(t)$)： $V_2 = 5\text{mV} \times 1.1 / 1.4 = 4\text{mV}$

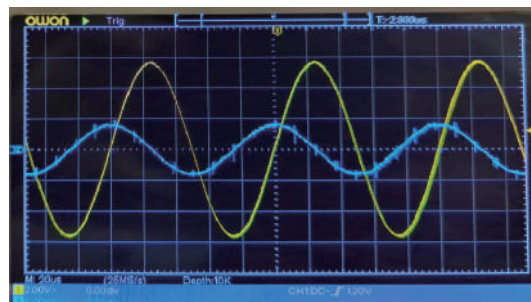
相位：與CH1同相

✦ 圖 6-72 $v_S(t) - i_R(t)$ 的波形圖

8. 使用示波器量測 $v_s(t) - i_c(t)$ ，信號產生器與示波器連接線如圖 6-73，輸出結果如圖 6-74。



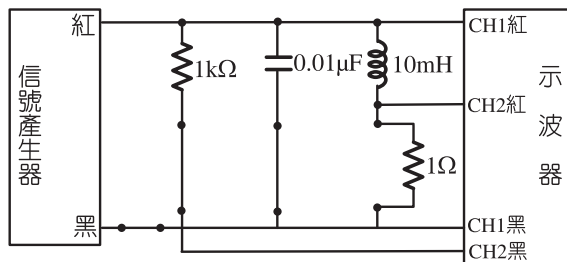
★ 圖 6-73 $v_s(t) - i_c(t)$ 接線圖



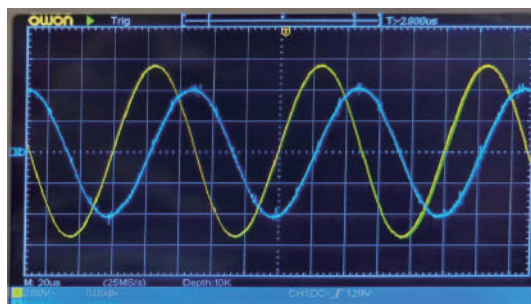
信號產生器： $V_s = 4V(\text{rms})$ ， $f = 10\text{kHz}$ ，正弦波。
 示波器： $T = 20\mu\text{s} \times 5 = 0.1\text{ms}$
 CH1(黃色 $v_s(t)$)： $V_1 = 2V \times 2.8/1.4 = 4V(\text{rms})$
 CH2(藍色 $i_c(t)$)： $V_2 = 5\text{mV} \times 0.8/1.4 = 2.8\text{mV}(\text{rms})$
 相位超前CH1 $1.2 \times 360/5 = 86^\circ$

★ 圖 6-74 $v_s(t) - i_c(t)$ 的波形圖

9. 使用示波器量測 $v_s(t) - i_L(t)$ ，信號產生器與示波器連接線如圖 6-75，輸出結果如圖 6-76。



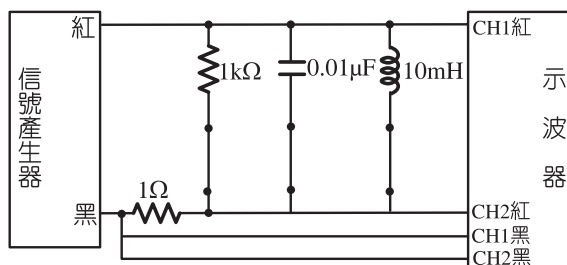
★ 圖 6-75 $v_s(t) - i_L(t)$ 接線圖



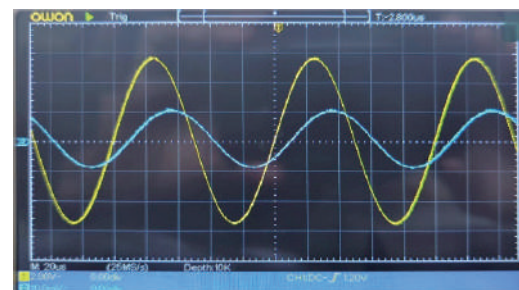
信號產生器： $V_s = 4V(\text{rms})$ ， $f = 10\text{kHz}$ ，正弦波。
 示波器： $T = 20\mu\text{s} \times 5 = 0.1\text{ms}$
 CH1(黃色 $v_s(t)$)： $V_1 = 2V \times 2.8/1.4 = 4V(\text{rms})$
 CH2(藍色 $i_L(t)$)： $V_2 = 5\text{mV} \times 2.0/1.4 = 7.1\text{mV}(\text{rms})$
 相位：落後CH1 $1 \times 360/5 = 72^\circ$

★ 圖 6-76 $v_s(t) - i_L(t)$ 的波形圖

10. 使用示波器量測 $v_s(t) - i(t)$ ，信號產生器與示波器連接線如圖 6-77，輸出結果如圖 6-78。



★ 圖 6-77 $v_s(t) - i(t)$ 的波形圖



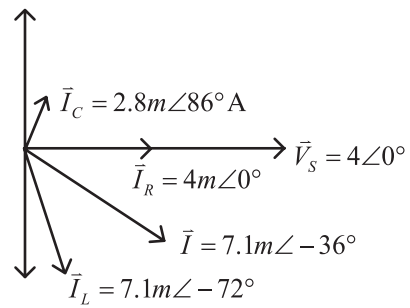
信號產生器： $V_s = 4V(\text{rms})$ ， $f = 10\text{kHz}$ ，正弦波。
 示波器： $T = 20\mu\text{s} \times 5 = 0.1\text{ms}$
 CH1(黃色 $v_s(t)$)： $V_1 = 2V \times 2.8/1.4 = 4V(\text{rms})$
 CH2(藍色 $i(t)$)： $V_2 = 10\text{mV} \times 1/1.4 = 7.1\text{mV}$ ，相位落後CH1 $0.5 \times 360/5 = 36^\circ$

★ 圖 6-78 $v_s(t) - i(t)$ 的波形圖

11. 依照示波器結果， $\bar{V}_S = 4\angle 0^\circ \text{ V}$ ， $\bar{I}_R = 4\text{mA}\angle 0^\circ$ ， $\bar{I}_C = 2.8\text{mA}\angle 86^\circ \text{ A}$ ， $\bar{I}_L = 7.1\text{mA}\angle -72^\circ \text{ A}$ ， $\bar{I} = 7.1\text{mA}\angle -36^\circ \text{ A}$ ，繪製 $\bar{V}_S$ 、 $\bar{I}_R$ 、 $\bar{I}_C$ 、 $\bar{I}_L$ 、 $\bar{I}$ 相量圖，如圖 6-79。

自我練習

1. 同範例 6-3c，但信號產生器輸入電壓改為 $V_{rms} = 5\text{V}$ ，頻率 $f = 11\text{kHz}$ 。

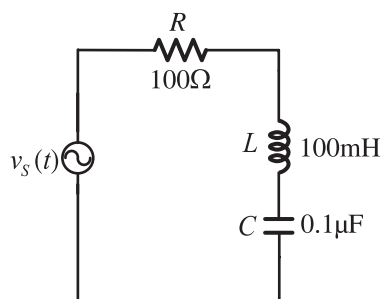


★ 圖 6-79 相量圖

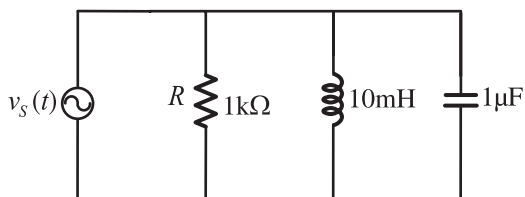
6-4 諧振電路實作

諧振(resonance)

在力學裡的盪鞦韆運動就是一種諧振運動，我們只要按照鞦韆轉動的頻率，給予很小的推力，就能讓鞦韆維持擺動，因為此推力先轉為動能，有了動能，鞦韆就上升，物體上升重力位能就上升，也就是動能轉為重力位能儲存，當物體達最高點時，此重力位能就轉為動能，當物體達最低點時，速度達最快，轉動動能達最大，重力位能達最小，接著此轉動動能繼續轉為重力位能，直到達最高點時，此重力位能又轉為轉動動能，若沒有摩擦力，此物體將持續進行此擺動，此一推一挽就能讓物體持續運動，但是因為鞦韆的轉盤有摩擦力，所以我們要依照其頻率，給一個小小的推力，此鞦韆就可持續運動，我們稱此運動為簡諧運動，此「諧」就代表此物體處於「諧振」狀態。在電學理，電容與電感若將其串聯，如圖 6-80a，或並聯如圖 6-80b，若調整頻率逐漸增加，電感阻抗將上升，電容阻抗將下降，將會有一個頻率，使得電容與電感的阻抗相同，因為其阻抗相位相反，電壓相位也會相反（串聯是電流相位相反），以上兩個電路，電容所放的電剛好將電感充電，電感放電時也剛好將讓電容充電，內部電子也是處於一推一挽的運動，所以也能產生諧振現象，我們稱此為諧振電路。以下分別說明串聯與並聯諧振電路。



★ 圖 6-80a 串聯諧振電路



★ 圖 6-80b 並聯諧振電路

串聯諧振(series resonance)

串聯諧振電路如圖 6-80a，此電路電感、電容阻抗分別如下：

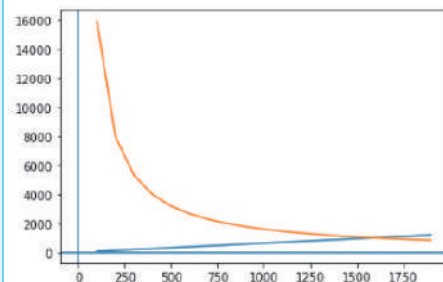
$$\bar{X}_L = 2\pi fL \angle 90^\circ$$

$$\bar{X}_C = \frac{1}{2\pi fC} \angle -90^\circ$$

頻率由 100Hz 逐漸增加時，電感阻抗將增加，電容阻抗將變小。我們撰寫 Python 程式如下，頻率 f 從 100Hz 到 2000Hz 繪出其電感與電容阻抗，藍色是電感阻抗，逐漸增加，橘紅色是電容阻抗，逐漸減少。(頻率不能 0Hz 開始，不然計算電容阻抗會當掉，本例由 100Hz 開始，是多次修正結果，圖形視覺效果較好)

```
import math as ma
pi=ma.pi
u=0.000001
m=0.001
k=1000
R=100
L=100*m
C=0.1*u
V=2
f=1/(2*ma.pi*(L*C)**(1/2))
print(f) #1591
import matplotlib.pyplot as plt #載入繪圖 matplotlib.pyplot 模組，才能繪圖
import numpy as np #載入numpy 模組，繪圖用數值模組
print(np.pi) #輸出pi值
x = np.arange(100, 2000, 100) #產生 0到 pi/2數列，不含pi/2
y1 =2*pi*x*L #逐一產生sin(x) 正弦波值
y2 =1/(2*pi*x*C)
plt.plot(x,y1)#繪出正弦波
plt.plot(x,y2)

plt.axhline(y=0)#x軸
plt.axvline(x=0)#y軸
plt.show()#於螢幕輸出圖形
```



藍色是電感阻抗，橘紅色是電容阻抗

★ 圖 6-81 電感、電容阻抗圖

我們發現 X_L 隨者頻率增加而越來越大， X_C 隨著頻率增加而越來越小，當兩者阻抗相同，

$$X_L = X_C \quad 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad \text{推得 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \sqrt{100m \cdot 0.1\mu}} = 1591\text{Hz}$$

f_0 稱為諧振頻率。此時：

$$\overline{Z_0} = R + jX_L - jX_C = R$$

串聯諧振時，電路總阻抗最小，電流將會最大，此諧振電流我們以 I_0 表示。

$$I_0 = \frac{V}{Z_0} = \frac{V}{R}$$

品質因數(quality factor)

前面盪鞦韆時，我們給一個小小的推力，可以得到很大的振幅，在此電容、電感諧振電路中，我們也發現，我們僅給予電壓 2V，但是電容與電感的端電壓竟然可以超過 2V，所以我們定義一個**品質因數**（符號為 Q ）為諧振的能量（或稱功率）與消耗的能量的比值。本例電感與電容都處於諧振，諧振能量取任一元件，也就是取電感、電容計算都相同。諧振能量取電感的計算如下：

$Q = \frac{I_0^2 X_L}{I_0^2 R} = \frac{X_L}{R}$ （電感諧振能量 $I_0^2 X_L$ ，電阻消耗能量 $I_0^2 R$ ，功率共有 3 種計算方式，分別是 $I_0^2 R$ 、 $I_0 V$ 與 $\frac{V^2}{R}$ ，因為串聯時，電流相同，所以本處功率使用 $I_0^2 X_L$ 與 $I_0^2 R$ ）

諧振能量取電容的計算如下：

$$Q = \frac{I_0^2 X_C}{I_0^2 R} = \frac{X_C}{R} \quad \text{（電容諧振能量 } I_0^2 X_C \text{，電阻消耗能量 } I_0^2 R \text{）諧振時}$$

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

$$\text{由於 } Q = \frac{X_L}{R}$$

$$\text{得到 } Q = \frac{2\pi f_0 L}{R} \quad (X_L \text{ 以 } 2\pi f_0 L \text{ 代入})$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2\pi \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} L}{R} \quad (f_0 \text{繼續以 } \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ 代入}) \\
 &= \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}
 \end{aligned}$$

由上式可，調整 R 、 L 、 C 可調整 Q 值。

電感、電容端電壓

$$\begin{aligned}
 \text{由 } Q &= \frac{X_L}{R} = \frac{I_0 X_L}{I_0 R} \quad (\text{分子分母同乘以 } I_0) \\
 &= \frac{V_L}{V_R}
 \end{aligned}$$

可得到 $V_L = QV_R = QV$ (諧振時 $V_R = V$)

也就是諧振時電感的端電壓會是電源時 Q 倍。同理，由於

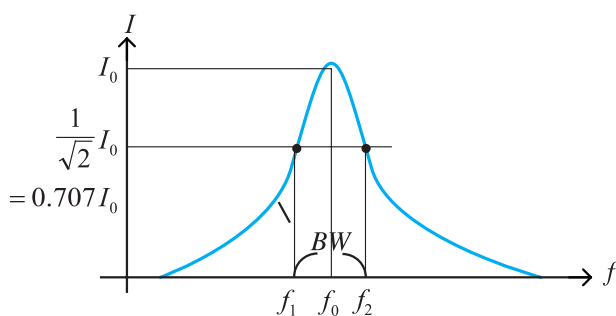
$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{I_0^2 X_C}{I_0^2 R} = \frac{X_C}{V_R}$$

可得到 $V_C = QV_R = QV$ ，也就是諧振時電容的端電壓會是電源的 Q 倍。

頻帶寬度(bandwidth)與選擇性(selectivity)

諧振電路可用來作為收音機的電台選擇，調整諧振頻率就可接收對應的電台。相信大家都有有一個經驗，當您用旋扭選台時，有些電台頻帶寬度很窄，選擇性很高，很快就可以就定位；有些電台頻帶較寬，總要花點時間調整旋鈕才能清

晰收聽。RLC 串聯電路的 $I-f$ 之變化曲線如圖 6-82，由圖可知，電源頻率在諧振頻率 f_0 時有最大的電路電流 I_0 ，頻率變大或變小，電流均下降，因此定義：由**電流最大值**下降至最大值 I_0 的 $1/\sqrt{2}$ 倍（0.707 倍）之間對應的頻率範圍稱為**頻帶寬度**（bandwidth，簡寫為 BW ，簡稱**頻寬**）。



★ 圖 6-82 RCL 串聯電路 $I-f$ 之頻率響應曲線

頻率往下調，當電流為 $0.7I_0$ 時，為下截止頻率，頻率往上調，電流為 $0.707I_0$ 時，為上截止頻率，依照定義，此兩個頻率對應的頻率範圍，稱為**頻帶寬度**。

$$BW = f_2 - f_1$$

而電路諧振時的平均功率為

$$P_0 = I_0^2 \times R$$

截止頻率時的平均功率為

$$P = I^2 \times R = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_0\right)^2 \times R = \frac{1}{2} I_0^2 \times R = \frac{1}{2} \times P_0$$

由上式可知截止頻率時的平均功率為諧振頻率時平均功率的一半，因此截止頻率又稱為**半功率頻率 (half-power frequency)**。

當 RLC 串聯諧振電路品質因數 $Q \geq 10$ 時，圖 6-5d 為一對稱於諧振頻率之曲線，可得截止頻率：

$$f_2 = f_0 + \frac{BW}{2}$$

$$f_1 = f_0 - \frac{BW}{2}$$

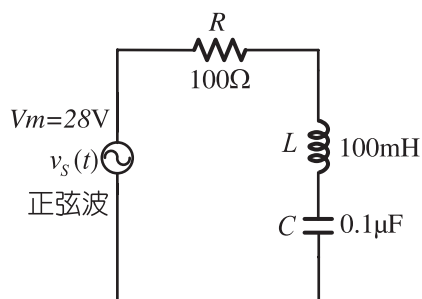
頻帶寬度 BW 經證明可與諧振頻率 f_0 及品質因數 Q 三者之間建立關係，但證明過程繁雜故省略。 BW 、 f_0 及 Q 之關係式為：

$$BW = \frac{f_0}{Q}$$

範例 6-4a

串聯諧振電路如圖 6-83。

- 當電路諧振時，請計算以下理論值 (1) 諧振頻率、(2) 諧振電流、(3) 品質因素、(4) 電感端電壓、(5) 電容端電壓 (6) 頻帶寬度、(7) 上下截止電流、(8) 下截止頻率、(9) 上截止頻率。
- 調整信號產生器的輸出電壓 $V_m = 2.8\text{V}$ ，正弦波，頻率由 1kHz 往上調整，找出諧振頻率 $f_0 = \underline{\hspace{2cm}}$ 。(請留意頻率改變時，因為負載效應，信號產生器的輸出電壓會改變，請隨時調整輸出電壓)
- 諧振時，用三用電表量測 V_R 、 V_L 與 V_C 。
- 諧振時，用示波器量測 $v_L(t)$ 與 $v_C(t)$ 。
- 往下調整頻率，當總電流變為 $0.7I_0$ ，此為下截止頻率 f_1 。往上調整頻率，當總電流變為 $0.7I_0$ ，此為上截止頻率 f_2 ， $f_2 - f_1$ 即為 BW ，計算此 BW 是否與理論值接近。



★ 圖 6-83 電路圖

操作步驟

- 計算理論值：

(1) 諧振頻率 f_0 ：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \sqrt{100\text{m} \cdot 0.1\mu}} = 1591\text{Hz}$$

以上計算對高一學生有點複雜，所以寫成 Python 程式如下：

```
import math;pi=math.pi;m=0.001;u=0.000001
L=100*m;C=0.1*u
print(1/(2*pi*(L*C)**(1/2)))#1591
```

(2) 諧振電流 I_0 ：諧振時 V_L 與 V_C 互消抵消， $V_{rms} = \frac{V_m}{1.4} = \frac{2.8}{1.4} = 2\text{V}$ ，所以：

$$I_0 = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{2}{100} = 20\text{mA}$$

(3) 品質因數 Q :

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{100} \sqrt{\frac{100m}{0.1\mu}} = 10$$

以上計算對高一學生有點複雜，所以寫成 Python 程式如下：

```
import math;pi=math.pi;m=0.001;u=0.000001
L=100*m;C=0.1*u;R=100
print((L/C)**(1/2)/R)#10
```

(4) 電感端電壓 V_L :

$$V_L = QV = 10 \cdot 2 = 20V$$

(5) 電容端電壓 V_C :

$$V_C = QV = 10 \cdot 2 = 20V$$

(6) 頻帶寬度 BW :

$$BW = \frac{f_0}{Q} = \frac{1591}{10} = 159$$

(7) 上下截止電流 :

$$I_1, I_2 = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{20m}{1.4} = 14mA$$

(8) 下截止頻率 f_1 :

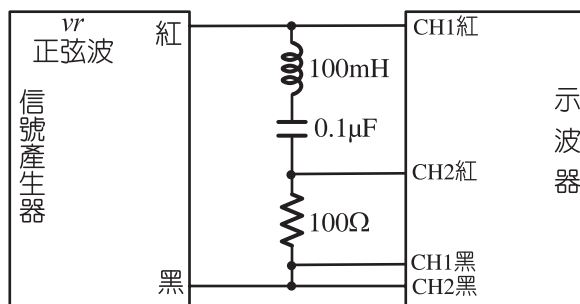
$$f_1 = f_0 - \frac{BW}{2} = 1591 - \frac{159}{2} = 1511Hz$$

(9) 上截止頻率 f_2 :

$$f_2 = f_0 + \frac{BW}{2} = 1591 + \frac{159}{2} = 1671Hz$$

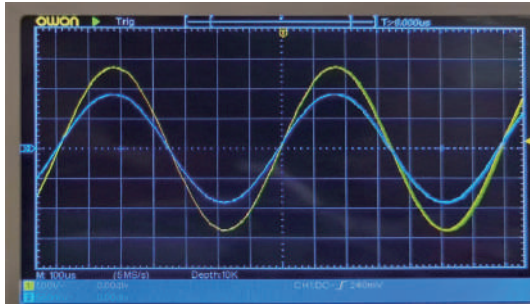
2. 用示波器找出諧振頻率 :

(1) 信號產生器與示波器接線
如圖 6-84，信號產生器的
電源輸出 $V_m = 2.8V$ 正弦
波。



★ 圖 6-84 $v_s(t) - i(t)$

- (2) 圖 6-85 是 $v_s(t)-i(t)$ 圖，調整信號產生器的頻率，從 1kHz 開始，慢慢增加，觀察總電流是否逐漸變大，當總電流相位與電源相位同相時，此時稱為諧振，此諧振頻率為 1460Hz。



★ 圖 6-85 示波器諧振波形

信號產生器：

$V_s=2V(\text{rms})$ ， $f=1460\text{Hz}$ ，正弦波。

示波器： $T=100\mu\text{s} \times 6.8=680\text{ms}$

CH1(黃色 $v_s(t)$)：

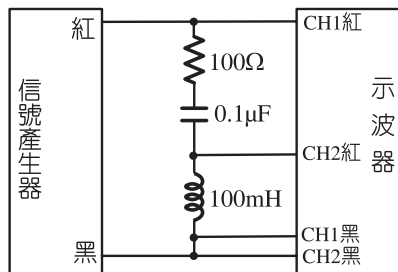
$V_1=1V \times 2.8/1.4=2V(\text{rms})$

CH2(藍色 $i(t)$)：

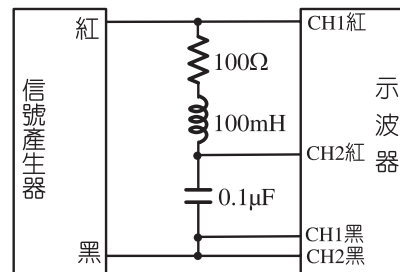
$V_2=500\text{mV} \times 1.8/1.4=0.64V$ (因為電容、電感都有內阻，所以 V_R 沒有 $2V$)

諧振電流 $I_0=0.64/100=6.4\text{mA}$

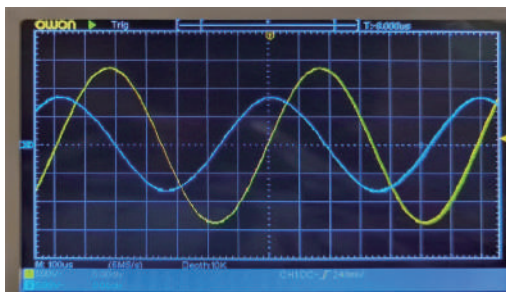
3. 諧振時，使用交流電壓表量測 $V_R=$ _____， $V_C=$ _____， $V_L=$ _____。
4. 諧振時，圖 6-88 是 $v_L(t)$ 波形（信號產生器與示波器接線如圖 6-86），相位超前；圖 6-89 是 $v_C(t)$ 波形（信號產生器與示波器接線如圖 6-87），相位落後，此兩電壓波形剛好大小相同，相位相反，互相一推一挽，形成諧振。



★ 圖 6-86 $v_s(t)-v_L(t)$ 接線圖



★ 圖 6-87 $v_s(t)-v_C(t)$ 接線圖

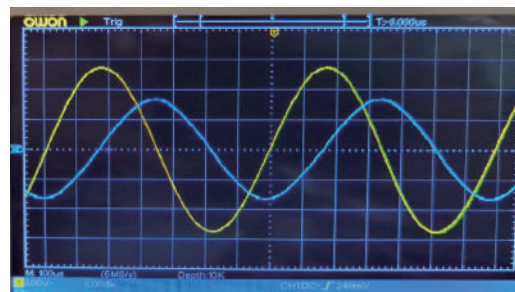


CH1(黃色, $v_s(t)$): $1V \times 2.8/1.4=2V(\text{rms})$

CH2(藍色, $v_L(t)$): $5V \times 1.7/1.4=6V$

相位：超前 $1.6/6.8 \times 360=85^\circ$ (理論值是 90°)

★ 圖 6-88 示波器諧振 $v_L(t)$ 波形



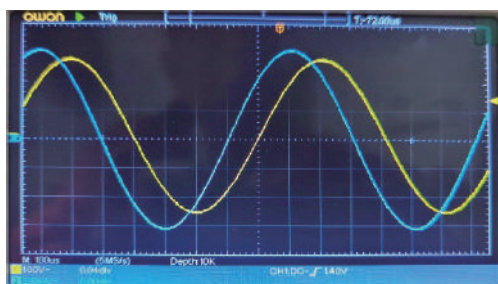
CH1(黃色, $v_s(t)$): $1V \times 2.8/1.4=2V(\text{rms})$

CH2(藍色, $v_C(t)$): $5V \times 1.7/1.4=6V$

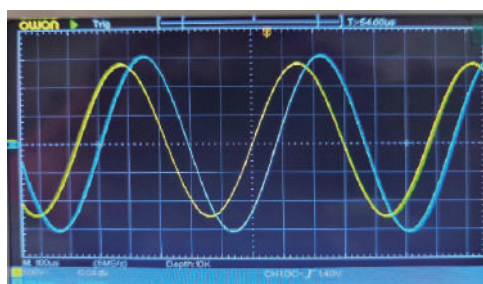
相位：落後 $1.6/6.8 \times 360=85^\circ$ (理論值是 90°)

★ 圖 6-89 示波器諧振 $v_C(t)$ 波形

5. 諧振電流為 6.4mA ，所以半功率點電流為 $6.4\text{mA}/1.4 = 4.5\text{mA}(\text{rms})$ ，表示 $V_R = 4.5\text{mA}(\text{rms}) * 100 * 1.4 = 630\text{mV}$ 。信號產生器與示波器接線如圖 6-84，往下調整信號產生器的頻率，使得 $V_R = 630\text{mV}$ ，如圖 6-90，此時信號產生器 $f = 1230\text{Hz}$ ，此即為下截止頻率 f_1 ；往上調整信號產生器，使得 $V_R = 630\text{mV}$ ，如圖 6-91，此時信號產生器 $f = 1750$ ，此即為上截止頻率 f_2 ，計算其頻寬 $f_2 - f_1 = 1750 - 1230 = 520\text{Hz}$ 。



✦ 圖 6-90 下截止頻率的波形



✦ 圖 6-91 上截止頻率的波形

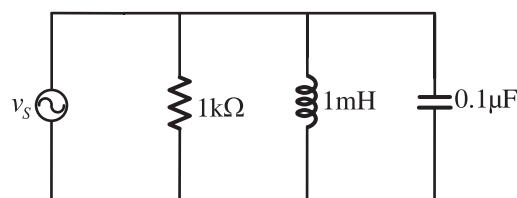
自我練習

- 範例 6-4a 的電源有效值是 2V ，請改為 3V ，並重新做一次。

範例 6-4b

並聯諧振電路如圖 6-92， $V_s = 2\text{V}(\text{rms})$ 。

- 請計算以下理論值 (1) 諧振頻率、(2) 諧振電流、(3) 品質因數、(4) 電感端電壓、(5) 電容端電壓 (6) 頻帶寬度、(7) 上下截止電流、(8) 下截止頻率、(9) 上截止頻率。
- 調整頻率，當總電流相位與電源相位同相時，即為諧振頻率，找出諧振頻率。
- 諧振時，用三用電表量測 I 、與 I_L 、 I_C 。
- 諧振時，用示波器量測 $i(t)$ 、與 $i_L(t)$ 、 $i_C(t)$ 。
- 往下調整頻率，當總電流變為 $1.4I_0$ ，此即為其下截止頻率。往上調整頻率，當總電流變為 $1.4I_0$ ，此即為上截止頻率 f_2 ，找出上下截止頻率，計算此 BW 是否與理論值接近。



✦ 圖 6-92 RLC 並聯諧振電路圖

操作步驟

1. 計算理論值：

(1) 諧振頻率 f_0 ：

並聯諧振與串聯諧振相同，都是 $X_L = X_C$ 時產生諧振。

$$X_L = 2\pi fC$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_L = X_C \text{ 推得 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \sqrt{1m \cdot 0.1\mu}} = 15.9\text{kHz}$$

(2) 諧振電流：

諧振時，電感電流與電容電流一推一挽，互相抵消，所以電感電容合電流為 0，且總電流 $\bar{I} = \bar{I}_0 = \bar{I}_R$ 達最小。（備註：前面串聯諧振是達最大）。

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{V}}{R} = \frac{2}{1k} = 2mA \text{ (達最小)}$$

(3) 品質因數 Q ：

並聯諧振與串聯諧振品質因數 Q 的定義相同，都是諧振能量與消耗能量的比，以下以電感來計算，功率的計算有 3 種方式，分別是 $\frac{V^2}{R}$ 、 IV 與 I^2R ，因為並聯時電壓相同，所以本處功率使用 $\frac{V^2}{X_L}$ 與 $\frac{V^2}{R}$

$$Q = \frac{\frac{V^2}{X_L}}{\frac{V^2}{R}} = \frac{R}{X_L}$$

$$\text{諧振時 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \text{ 代入 } Q$$

$$Q = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{2\pi f_0 L} = \frac{R}{2\pi \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} L} = R\sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$= 1k\sqrt{\frac{0.1\mu}{1m}} = 10$$

（請留意，並聯品質因數定義相同，但結果卻剛好是串聯品質因數的倒數）

以上計算的 Python 程式如下：

```
import math;pi=math.pi;m=0.001;u=0.000001;k=1000
L=1*m;C=0.1*u;R=1*k
print(R*(C/L)**(1/2))#10
```

$$(4) \text{ 由於 } Q = \frac{R}{X_L} = \frac{\frac{V}{I_R}}{\frac{V}{I_L}} = \frac{I_L}{I_R}$$

$$\text{得到 } I_L = QI_R = 10 \cdot 2\text{mA} = 20\text{mA}$$

$$(5) \text{ 同理 } Q = \frac{R}{X_C} = \frac{\frac{V}{I_R}}{\frac{V}{I_C}} = \frac{I_C}{I_R}$$

$$\text{得到 } I_C = QI_R = 10 \cdot 2\text{mA} = 20\text{mA}$$

(6) 頻帶寬度 BW ：

並聯諧振的頻帶寬度，經由科學家不斷實驗，也是與串聯諧振相同。（過程較複雜，本書不推導）

$$BW = \frac{f_0}{Q} = \frac{1591}{10} = 1.59\text{kHz}$$

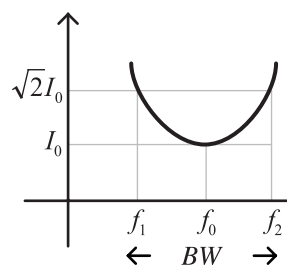
(7) 上下截止電流：

並聯諧振是諧振時電流最小，當電流達到 $\sqrt{2}$ 倍時，稱為半功率點，如圖 6-93。所以上下截止電流為 $I_1, I_2 = 1.4 \cdot 2\text{mA} = 2.8\text{mA}$ 。

(8) 下截止頻率 f_1 ，上截止頻率 f_2 ：

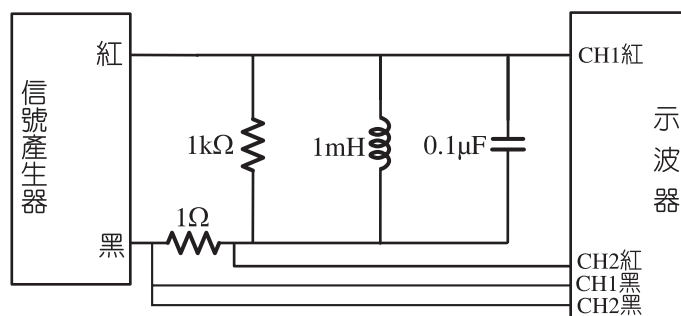
$$f_1 = f_0 - \frac{BW}{2} = 15.9\text{k} - \frac{1.59}{2} = 15.1\text{kHz}$$

$$f_2 = f_0 + \frac{BW}{2} = 15.9\text{k} + \frac{1.59}{2} = 16.7\text{kHz}$$



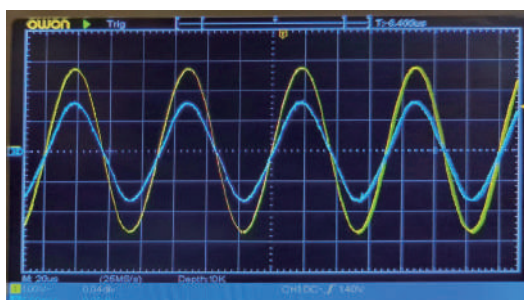
★ 圖 6-93

2. 信號產生器、示波器接線如圖 6-94（示波器量電流，都是先串聯 1Ω ，然後量測此 1Ω 電壓）。



★ 圖 6-94 $v_s(t)-i(t)$ 接線圖

3. 圖 6-95 是 $v_s(t)-i(t)$ 圖，調整信號產生器的頻率，使得 $v_s(t)-i(t)$ 同相，此時電路諧振，諧振頻率 $f = 14.3\text{kHz}$ 。



信號產生器：

$V_s = 2\text{V(rms)}$ ， $f = 14.3\text{kHz}$ ，正弦波。

示波器： $T = 20\mu\text{s} \times 3.5 = 70\mu\text{s}$

$f = 1/T = 14.3\text{kHz}$ (計算值)

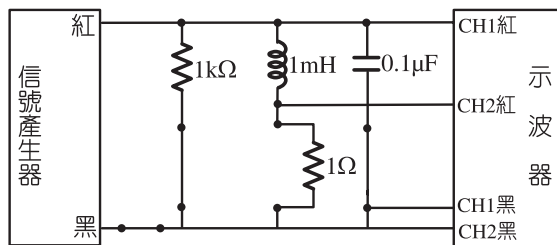
CH1($v_s(t)$, 黃色)： $V_1 = 1 \times 2.8 / 1.4 = 2\text{V}$

CH2($i(t)$, 藍色)：

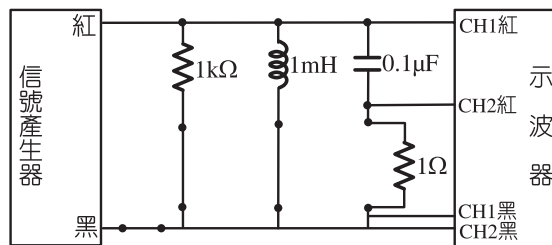
$V_2 = 5\text{m} \times 1.6 / 1.4 = 5.7\text{mA(rms)}$ ，理論值是 2mA ，但因為電容、電感都有內阻，所以有誤差)諧振電流 $I_0 = 5.7\text{mA}$

★ 圖 6-95 $v_s(t)-i(t)$ 圖

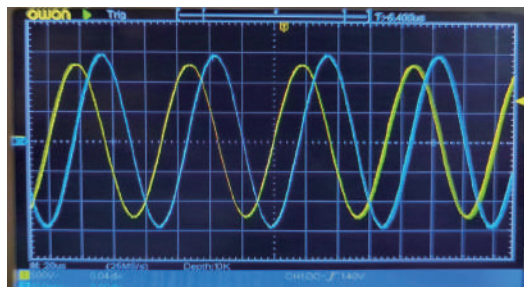
4. 諧振時，請用三用電表量測 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ 、與 $I_L = \underline{\hspace{2cm}}$ 、 $I_C = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
5. 諧振時，圖 6-98 是 $v_s(t)-i_L(t)$ 波形（信號產生器與示波器接線如圖 6-96）， $i_L(t)$ 藍色相位落後 82° ，圖 6-99 是 $v_s(t)-i_C(t)$ 波形（信號產生器與示波器接線如圖 6-97）， $i_C(t)$ 藍色相位超前 82° ，此兩電流波形剛好大小相同，相位相反，互相一推一挽，形成諧振。



★ 圖 6-96 $v_s(t)-i_L(t)$ 接線圖

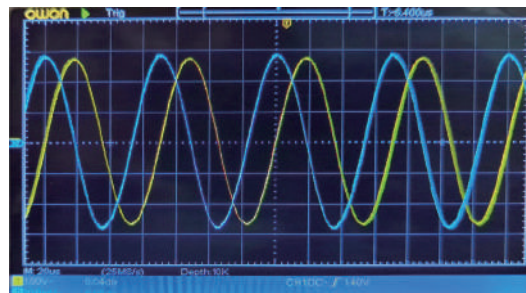


★ 圖 6-97 $v_s(t)-i_C(t)$ 接線圖



CH1($v_s(t)$,黃色): $1 \times 2.8 / 1.4 = 2\text{V}$
 CH2($i_L(t)$,藍色): $10\text{m} \times 2.9 / 1.4 = 21\text{mA}$
 相位: 落後 $0.8 / 3.5 \times 360 = 82^\circ$

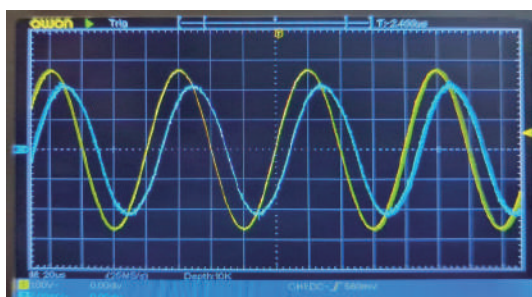
✦ 圖 6-98 $v_s(t) - i_L(t)$ 波形



CH1($v_s(t)$,黃色): $1 \times 2.8 / 1.4 = 2\text{V}$
 CH2($i_C(t)$,藍色): $10\text{m} \times 2.9 / 1.4 = 21\text{mA}$
 相位: 超前 $0.8 / 3.5 \times 360 = 82^\circ$

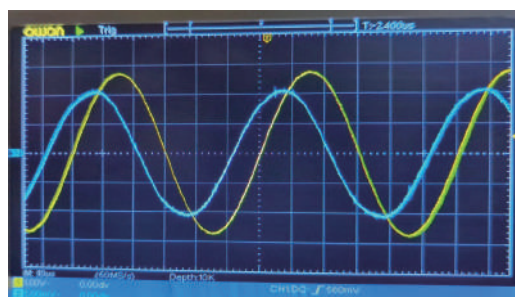
✦ 圖 6-99 $v_s(t) - i_C(t)$ 波形

6. 諧振電流為 $5.7\text{mA}(\text{rms})$ ，所以半功率點電流為 $5.7\text{m} \times 1.4 = 8\text{mA}(\text{rms})$ ， $I_m = 8\text{m} \times 1.4 = 11.2\text{m}$ (示波器 V_m)，電路圖 6-94，往下調整信號產生器的頻率，使得 $I_m = 11.2\text{mA}$ ，如圖 6-100，此時信號產生器 $f = 12.6\text{kHz}$ ，此即為下截止頻率 f_1 ；往上調整信號產生器，使得 $I_m = 11.2\text{mA}$ ，如圖 6-101，此時信號產生器 $f_2 = 16.6\text{kHz}$ ，此即為上截止頻率 f_2 ，計算其頻寬 $f_2 - f_1 = 16.6\text{k} - 12.6\text{k} = 4\text{kHz}$ 。



CH1($v_s(t)$,黃色): $1 \times 2.8 / 1.4 = 2\text{V}$, $f = 12.6\text{k}$
 CH2($i(t)$,藍色): $5\text{m} \times 2.2 = 11\text{mA}$

✦ 圖 6-100 下截止頻率



CH1($v_s(t)$,黃色): $1 \times 2.8 / 1.4 = 2\text{V}$, $f = 16.6\text{k}$
 CH2($i(t)$,藍色): $5\text{m} \times 2.2 = 11\text{mA}$

✦ 圖 6-101 上截止頻率

自我練習

1. 範例 6-4b 的電源是 $2\text{V}(\text{rms})$ ，請改為 $3\text{V}(\text{rms})$ ，並重新做一次。

§ 諧振的危機

在盪鞦韆裡，我們的推力要適中，不然鞦韆會越盪越高而翻覆，在吊橋裡，若以同頻率持續猛搖晃吊橋，則吊橋一定斷裂。同樣的道理，在串聯諧振電路裡，電容與電感端電壓會是電源 Q 倍；在並聯諧振電路裡，電容與電感端電流會是電阻電流 Q 倍，所以一定要考慮電容、電感的耐壓問題，不然很容易將電路燒毀。

6-5 本章內容摘要

1. 僅含大小的數字稱為**純量**。
2. 必須同時包含大小與方向的物理量稱為**向量**，**向量**本書在符號上加直線，例如， $\bar{A}$ 。
3. **複數**包含**實部**與**虛部**，可用來記錄向量 $\bar{A}$ 。
4. 複數在高職領域有兩種表示，分別是使用**直角坐標**的 $\bar{A} = a + jb$ 與**極座標**的 $\bar{A} = r \angle \theta$ 。
5. **直角坐標轉極座標**公式： $\bar{A} = a + jb = r \angle \theta$ 。

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$$

6. **極座標轉直角坐標**公式 $\bar{A} = r \angle \theta = a + jb$ 則 $a = r \cos \theta$ ， $b = r \sin \theta$ 。
7. 電學裡電壓與電流的大小與相位角運算剛好與向量運算規則相同，所以亦採用向量表示與運算，但為了表示此為相位角運算，所以改稱為**相量**運算。
8. 複數的**加減法**以直角坐標較方便，其運算方式為實部與虛部各自獨立運算，例如：

$$\bar{A} = a + jb, \bar{B} = c + jd$$

$$\bar{A} + \bar{B} = (a + c) + j(b + d)$$

$$\bar{A} - \bar{B} = (a - c) + j(b - d)$$

9. **複數乘除法**以極座標較方便，其運算方式為大小相乘除，角度相加減，例如：

$$\bar{A} = a \angle b, \bar{B} = c \angle d$$

$$\bar{A} \cdot \bar{B} = (ac) \angle (b + d)$$

$$\frac{\bar{A}}{\bar{B}} = \frac{a}{c} \angle (b - d)$$

10. 頻率的符號 f ，角速度的符號 ω ，兩者關係是 $\omega = 2\pi f$ 。

11. 頻率 f ，最大值電壓為 V_m 的正弦式表示法是 $v(t) = V_m \sin(2\pi ft + \theta)$ ， θ 是時間為零的相位角， $2\pi f$ 可用角速度 ω 代替 $v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta)$ 。

正弦式的數值代表最大值 V_m ，相量式的數值代表有效值 V_{rms} ，兩者的關係是 $V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$ 正弦式轉相量式，數值大小要先除以 $\sqrt{2}$ ，相量式轉正弦則是乘以 $\sqrt{2}$ ：例如：

$v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta)$ 轉為相量式

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \angle \theta$$

12. 直流電路只有電阻 R ，但交流電路有電阻、電容、電感，且包含大小與角度，所以以**阻抗** $\bar{Z}$ 表示。

13. **電容抗**公式如下：

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \Omega = \frac{1}{2\pi f C} \Omega$$

$$\bar{X}_C = X_C \angle -90^\circ \Omega = -jX_C \Omega \quad (\text{電容電流超前電壓 } 90^\circ, \text{ 所以阻抗落後 } 90^\circ)$$

14. **電感抗**公式如下：

$$X_L = \omega L \Omega = 2\pi f L \Omega$$

$$\bar{X}_L = X_L \angle 90^\circ \Omega = jX_L \Omega \quad (\text{電感電流落後電壓 } 90^\circ, \text{ 所以阻抗超前 } 90^\circ)$$

15. **交流 R、L、C 串聯電路解題步驟如下：**

$$(1) \text{ 計算 } \bar{X}_C : X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C}, \bar{X}_C = -jX_C = X_C \angle -90^\circ$$

$$(2) \text{ 計算 } \bar{X}_L : X_L = 2\pi f L = \omega L, \bar{X}_L = jX_L = X_L \angle 90^\circ$$

$$(3) \text{ 計算 } \bar{Z} : \bar{Z} = R + \bar{X}_C + \bar{X}_L = R + j(X_L - X_C)$$

$$(4) \text{ 轉極座標 } r = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right)$$

$$(5) \text{ 計算 } \bar{I} : \bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}}$$

(6) 計算 $\bar{V}_R$ 、 $\bar{V}_L$ 、 $\bar{V}_C$ ：

$$\bar{V}_R = \bar{I} \cdot R$$

$$\bar{V}_L = \bar{I} \cdot \bar{X}_L$$

$$\bar{V}_C = \bar{I} \cdot \bar{X}_C$$

16. 交流 R、L、C 並聯電路解題步驟如下：

(1) 計算 $\bar{I}_R$ ： $\bar{I}_R = \frac{\bar{V}}{R}$

(2) 計算 $\bar{X}_C$ ： $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ ， $\bar{X}_C = -X_C j = X_C \angle -90^\circ$

(3) 計算 $\bar{I}_C$ ： $\bar{I}_C = \frac{\bar{V}}{X_C} = \frac{V}{X_C \angle -90^\circ} = \frac{V}{X_C} \angle 90^\circ$

(4) 計算 $\bar{X}_L$ ： $\bar{X}_L = \omega L = 2\pi f L$ ， $\bar{X}_L = jX_L = X_L \angle 90^\circ$

(5) 計算 $\bar{I}_L$ ： $\bar{I}_L = \frac{\bar{V}}{X_L} = \frac{V}{X_L \angle 90^\circ} = \frac{V}{X_L} \angle -90^\circ$

(6) 計算 $\bar{I}$ ： $\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_C + \bar{I}_L$

(7) 計算 $\bar{Z}$ ： $\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}}$

(8) $\bar{Z}$ 亦可直接使用 $\bar{Z} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{\bar{X}_L} + \frac{1}{\bar{X}_C}}$

17. 串聯諧振的特性：

(1) 諧振頻率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

(2) 諧振時，電流達最大 $I_0 = \frac{V}{R}$

(3) 品質因數 $Q = \frac{I_0^2 X_L}{I_0^2 R} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ (串聯電流相同，所以功率取 $I_0^2 X_L$)

(4) 電感端電壓 $V_L = QV$ (V 為電源電壓)

(5) 電容端電壓 $V_C = QV$ (V 為電源電壓)

(6) 頻帶寬度 $BW = \frac{f_0}{Q}$

(7) 上下截止電流 $I_1, I_2 = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$

$$(8) \text{ 下截止頻率 } f_1 = f_0 - \frac{BW}{2}$$

$$(9) \text{ 上截止頻率 } f_2 = f_0 + \frac{BW}{2}$$

18. 並聯諧振的特性：

$$(1) \text{ 諧振頻率 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{。 (與串聯相同)}$$

$$(2) \text{ 諧振時，電流達最小 } I_0 = \frac{V}{R}$$

$$(3) \text{ 品質因數 } Q = \frac{\frac{X_L}{V^2}}{\frac{R}{V^2}} = \frac{L}{X_L} = \frac{L}{X_C} = R\sqrt{\frac{C}{L}}$$

(並聯電壓相同，所以功率取 $\frac{V^2}{X_L}$ ，品質因數為串聯的倒數)

$$(4) \text{ 電感電流 } I_L = QI_0$$

$$(5) \text{ 電容電流 } I_C = QI_0$$

$$(6) \text{ 頻帶寬度 } BW = \frac{f_0}{Q} \text{ (與串聯相同)}$$

$$(7) \text{ 上下截止電流 } I_1, I_2 = \sqrt{2}I$$

$$(8) \text{ 下截止頻率 } f_1 = f_0 - \frac{BW}{2} \text{ (與串聯相同)}$$

$$(9) \text{ 上截止頻率 } f_2 = f_0 + \frac{BW}{2} \text{ (與串聯相同)}$$

6-6 課後習題

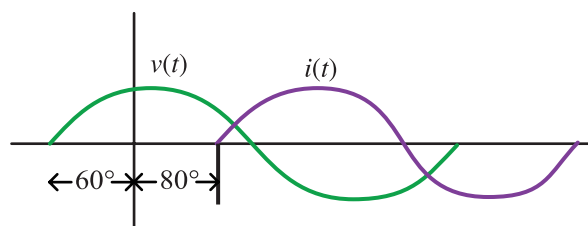
一、選擇題

- 純交流電阻電路，電阻電流的相量與電壓：
(A) 同相 (B) 超前 90° (C) 落後 90°
- 純交流電容電路，電容電流的相量與電壓：
(A) 同相 (B) 超前 90° (C) 落後 90°
- 純交流電感電路，電感電流的相量與電壓：
(A) 同相 (B) 超前 90° (C) 落後 90°
- 純交流電阻電路，電阻的阻抗大小與頻率 f 關係：
(A) 無關 (B) $2\pi fR$ (C) $1/(2\pi fR)$
- 純交流電容電路，電容的容抗大小與頻率 f 關係：
(A) 無關 (B) $2\pi fC$ (C) $1/(2\pi fC)$
- 純交流電感電路，電感的感抗大小與頻率 f 關係：
(A) 無關 (B) $2\pi fL$ (C) $1/(2\pi fL)$
- 交流電角速度 ω 與頻率 f 的關係：
(A) $\omega=2\pi f$ (B) $\omega=1/(2\pi f)$ (C) $\omega=1/f$ (4) $\omega=2\pi f + 90$
- 電阻性電路，電壓相位與電流相位：
(A) 同相 (B) 電壓超前 (C) 電壓落後
- 電容性電路，電壓相位與電流相位：
(A) 同相 (B) 電壓超前 (C) 電壓落後
- 電感性電路，電壓相位與電流相位：
(A) 同相 (B) 電壓超前 (C) 電壓落後

二、填充題

- $\bar{A}=3+j4$ ， $\bar{B}=1+j$ 求 $\bar{A}+\bar{B}=\underline{\hspace{2cm}}$ ， $\bar{A}-\bar{B}=\underline{\hspace{2cm}}$ ， $\bar{A}*\bar{B}=\underline{\hspace{2cm}}$ ， $\bar{A}/\bar{B}=\underline{\hspace{2cm}}$ 。
- $\bar{A}=\sqrt{3}+j4$ ，請將 $\bar{A}$ 以極座標表示， $\bar{A}=\underline{\hspace{2cm}}$ 。
- $\bar{A}=2\angle 60^\circ$ ，請將 $\bar{A}$ 以直角座標表示， $\bar{A}=\underline{\hspace{2cm}}$ 。

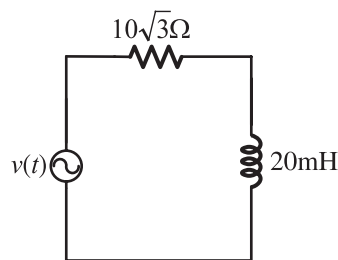
4. 已知 $v(t) = 100\sqrt{2} \sin(377t + 60^\circ)V$ ， $i(t) = 10\sqrt{2} \sin(377t - 30^\circ)A$ ，則 $v(t)$ 與 $i(t)$ 的大小關係_____，相位關係_____， $\bar{V} =$ _____， $\bar{I} =$ _____。
5. 如圖 (1) 所示，請比較 $v(t)$ 與 $i(t)$ 之相位關係_____。



★ 圖 (1)

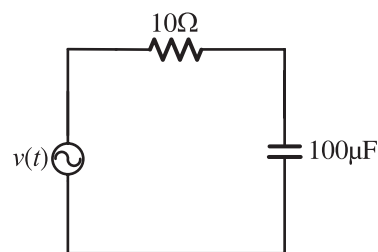
6. 有一純電阻電路，假設電源 $v(t) = 100\sqrt{2} \sin(377t + 30^\circ)V$ ， $R = 10 \Omega$ ，求 $\bar{I} =$ _____， $i(t) =$ _____。
7. 有一純電感電路，假設電源 $v(t) = 100\sqrt{2} \sin(500t + 60^\circ)V$ ， $L = 20mH$ ，求 $X_L =$ _____， $\bar{X}_L =$ _____， $\bar{I} =$ _____， $i(t) =$ _____。
8. 有一純電容電路，假設電源 $v(t) = 10\sqrt{2} \sin(500t - 30^\circ)V$ ， $C = 200\mu F$ ，求 $X_C =$ _____， $\bar{X}_C =$ _____， $\bar{I} =$ _____， $i(t) =$ _____， $v(t)$ 與 $i(t)$ 相位關係=_____。

9. 如圖 (2) 所示，已知 $v(t) = 100\sqrt{2} \sin(500t - 60^\circ)V$ ，則 $X_L =$ _____， $\bar{X}_L =$ _____， $\bar{Z} =$ _____， $\bar{I} =$ _____， $i(t) =$ _____， $v(t)$ 與 $i(t)$ 相位關係=_____， $\bar{V}_R =$ _____， $\bar{V}_L =$ _____。



★ 圖 (2)

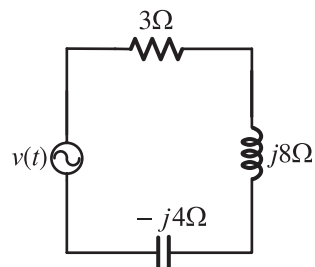
10. 如圖 (3) 所示，已知 $\bar{V} = 10\sqrt{2} \angle 45^\circ$ ， $f = 159Hz$ ，則 $\omega =$ _____， $X_C =$ _____， $\bar{X}_C =$ _____， $\bar{Z} =$ _____， $\bar{I} =$ _____， $i(t) =$ _____， $\bar{V}_R =$ _____， $\bar{V}_C =$ _____。



★ 圖 (3)

11. 如圖 (4) 所示，已知 $\bar{V} = 100\angle 0^\circ$ ，則

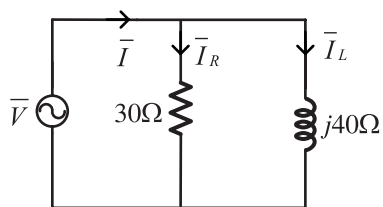
$$\begin{aligned}\bar{Z} &= \underline{\hspace{2cm}}, \quad \bar{I} = \underline{\hspace{2cm}}, \\ \bar{V}_R &= \underline{\hspace{2cm}}, \quad \bar{V}_L = \underline{\hspace{2cm}}, \\ \bar{V}_C &= \underline{\hspace{2cm}}^\circ.\end{aligned}$$



★ 圖 (4)

12. 如圖 (5) 所示，已知 $\bar{V} = 240\angle 0^\circ$ ，則

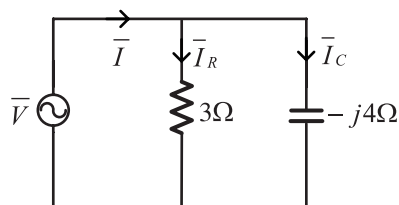
$$\begin{aligned}\bar{I}_R &= \underline{\hspace{2cm}}, \quad \bar{I}_L = \underline{\hspace{2cm}}, \\ \bar{I} &= \underline{\hspace{2cm}}, \quad \bar{Z} = \underline{\hspace{2cm}}^\circ.\end{aligned}$$



★ 圖 (5)

13. 電路如圖 (6) 所示， $\bar{V} = 60\angle 30^\circ$ ，則

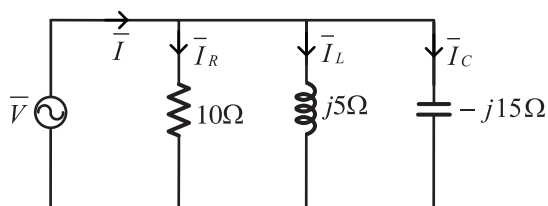
$$\begin{aligned}\bar{I}_R &= \underline{\hspace{2cm}}, \quad \bar{I}_C = \underline{\hspace{2cm}}, \\ \bar{I} &= \underline{\hspace{2cm}}, \quad \bar{Z} = \underline{\hspace{2cm}}^\circ.\end{aligned}$$



★ 圖 (6)

14. 電路如圖 (7) 所示， $\bar{V} = 60\angle 30^\circ$ ，則

$$\begin{aligned}\bar{I}_R &= \underline{\hspace{2cm}}, \quad \bar{I}_L = \underline{\hspace{2cm}}, \\ \bar{I}_C &= \underline{\hspace{2cm}}, \quad \bar{I} = \underline{\hspace{2cm}}, \\ \bar{Z} &= \underline{\hspace{2cm}}, \text{ 繪出 } \bar{V}、\bar{I}_R、\bar{I}_L \\ &\quad \bar{I}_C、\bar{I}^\circ.\end{aligned}$$

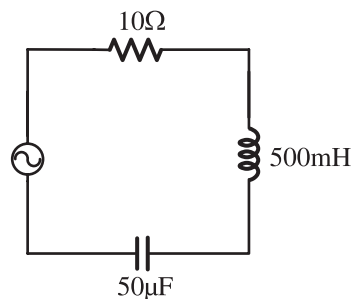


★ 圖 (7)

15. 如圖 (8) 之 RLC 串聯電路， $\bar{V} = 20\angle 0^\circ\text{V}$

，當此電路達諧振時，則諧振頻率

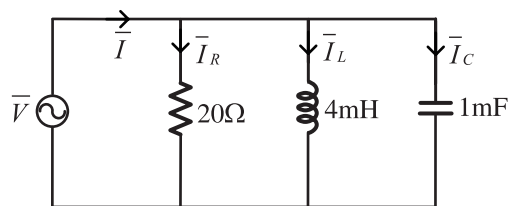
$$\begin{aligned}f_0 &= \underline{\hspace{2cm}} \quad X_L = \underline{\hspace{2cm}}, \\ X_C &= \underline{\hspace{2cm}} \quad Z_0 = \underline{\hspace{2cm}}, \\ I_0 &= \underline{\hspace{2cm}} \quad V_L = \underline{\hspace{2cm}}, \\ V_C &= \underline{\hspace{2cm}} \quad P_0 = \underline{\hspace{2cm}}, \\ Q &= \underline{\hspace{2cm}} \quad BW = \underline{\hspace{2cm}}, \\ f_1 &= \underline{\hspace{2cm}} \quad f_2 = \underline{\hspace{2cm}}^\circ.\end{aligned}$$



★ 圖 (8)

16. RLC 並聯電路如圖 (9)， $\bar{V} = 200\angle 0^\circ \text{ V}$ ，求諧振頻率

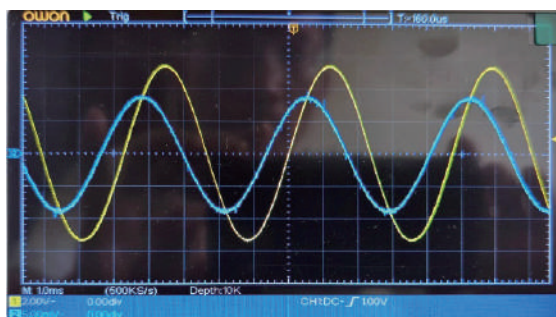
$$\begin{aligned} f_0 &= \underline{\hspace{2cm}} \quad I_R = \underline{\hspace{2cm}}, \\ I_C &= \underline{\hspace{2cm}} \quad I_L = \underline{\hspace{2cm}}, \\ I &= \underline{\hspace{2cm}} \quad P = \underline{\hspace{2cm}}, \\ Q &= \underline{\hspace{2cm}} \quad BW = \underline{\hspace{2cm}}, \\ f_1 &= \underline{\hspace{2cm}} \quad f_2 = \underline{\hspace{2cm}}. \end{aligned}$$



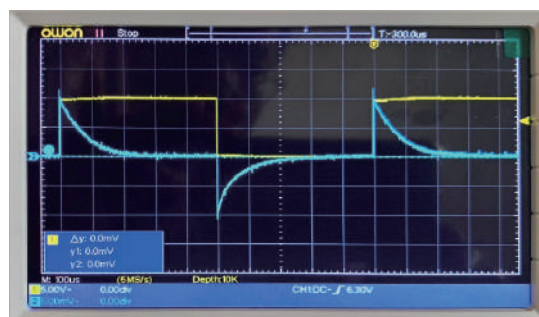
★ 圖 (9)

17. 如圖 (10)，請寫出藍色波形的最大值、有效值、相位角、週期、頻率、角速度 (Vold/Div = 5mV，Time/Div = 10ms)。

18. 如圖 (11)，請寫出藍色波形的時間常數。(Time/Div = 100μs)



★ 圖 (10)

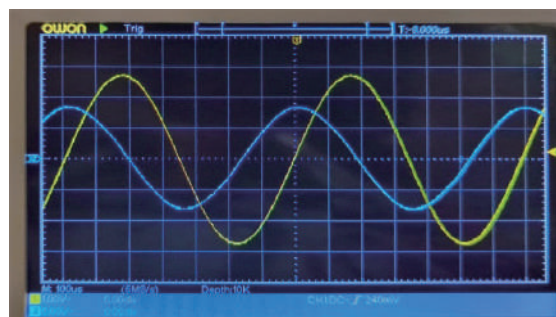


★ 圖 (11)

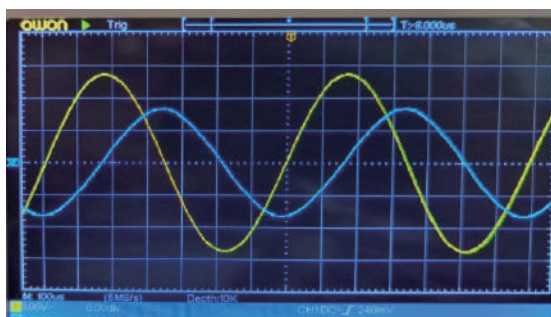
19. 如圖 (12)，Time/Div=100μs，藍色波形 Volds/Div=5V，求藍色波形的 $V_m = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_{rms} = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $f = \underline{\hspace{2cm}}$ ，與黃色波形的相位差 = $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

20. 如圖 (13)，Time/Div=100μs，藍色波形 Volds/Div=5V，求藍色波形的 $V_m = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $V_{rms} = \underline{\hspace{2cm}}$ ， $f = \underline{\hspace{2cm}}$ ，與黃色波形的相位差 = $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

21. 請問圖 (12) 與圖 (13) 的藍色波形相加的結果 $\underline{\hspace{2cm}}$ ，此二波形是否互相抵銷 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

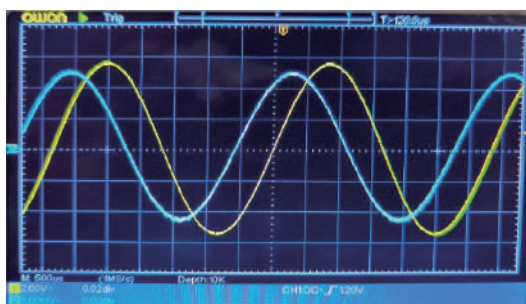


★ 圖 (12)

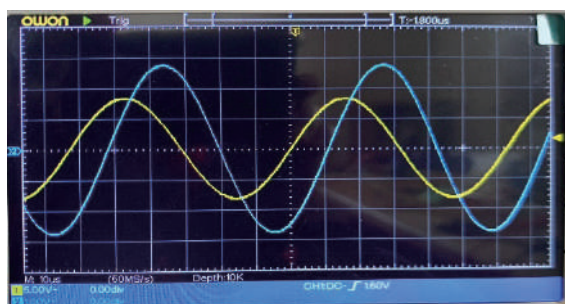


★ 圖 (13)

22. 如圖 (14)，Time/Div=500 μ s，黃色是 $v(t)$ ，Volds/Div=2V、藍色是 $i(t)$ 圖，Volds/Div=5mV，求週期 = _____， f = _____，阻抗 = _____。
23. 如圖 (15)，Time/Div=10 μ s，黃色是 $v(t)$ ，Volds/Div=5V、藍色是 $i(t)$ 圖，Volds/Div=1V，求週期 = _____， f = _____，阻抗 = _____。



★ 圖 (14)



★ 圖 (15)



常用家用電器之檢修

學習大綱

- 7-1 照明類器具之認識、安裝及檢修
- 7-2 電熱類之認識及檢修
- 7-3 旋轉類器具之認識及檢修
- 7-4 本章內容摘要
- 7-5 課後習題

實習目標

1. 融合基本電學實習課之實習技巧，排除電器基本故障。
2. 瞭解家用電燈、多段開關、樓梯電燈的原理、安裝與檢修。
3. 瞭解家用電鍋、吹風機、烤箱的基本原理、安裝與檢修。
4. 瞭解家用風扇、吸塵器的基本原理、安裝與檢修。

7-1 照明類器具之認識、安裝及檢修

家用常用照明設備有螺旋燈座、多段開關燈座、樓梯電燈開關、電源插座、露營燈、LED 檯燈，以下分別以範例說明以上照明設備的安裝與檢修。

範例 7-1a

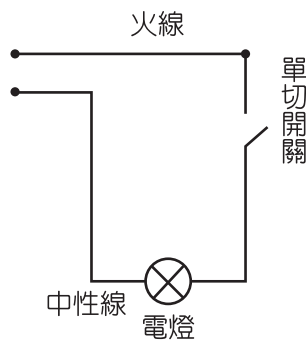
單一螺旋燈座的安裝與檢修。

相關知識

1. 單一螺旋燈座是家中最常見的照明設備，如圖 7-1a。
2. 單一螺旋燈座的電路圖，如圖 7-1b，當電燈不亮時，檢修步驟如下：



✦ 圖 7-1a

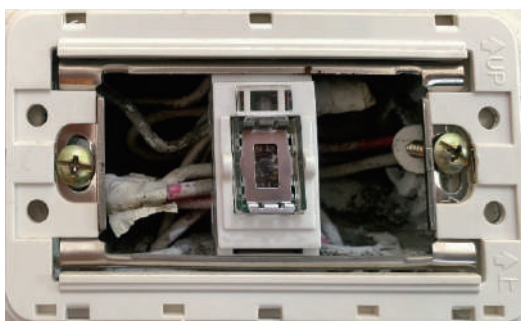


✦ 圖 7-1b

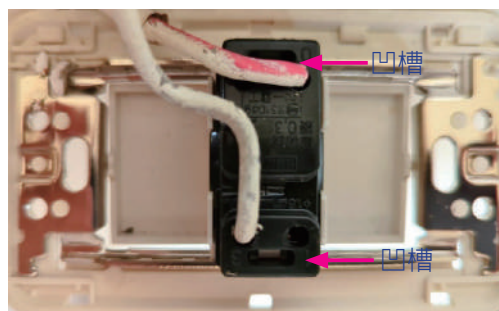
操作步驟

1. 檢查其它燈具是否也不亮，若不亮則檢查配電箱，若有亮則為此燈具故障。直接跳至步驟 4。
2. 檢查配電箱的燈具無熔絲開關是否跳電（配電箱請看附錄 C，找出電燈的無熔絲開關，電燈與開關通常分別有自己獨立的無熔絲開關），若跳電，則檢查是否同時開太多燈光，若無，則將此開關往上推。
3. 檢查漏電斷路器是否跳電，若是，則表示剛剛有漏電，請檢查廚房、浴室、陽台等地方，線路是否有被水冲刷痕跡，或處於淹水中，若有，則先排除，若無，則可重新啟動。

4. 檢查此電燈的開關，當按壓開關時，聲音與位置是否確實，若開關老化了，停靠位置會不確實而鬆垮垮，若開關有問題，請直接進入步驟 6。
5. 逆時針旋轉，拆下燈泡。檢查標準程序是，使用三用電表的電壓檔，按下開關，檢查燈座是否有電，但是因為天花板很高，有點不好操作。變通的辦法是直接購買適當瓦特數燈泡（以前燈泡有鎢絲燈泡、螺旋燈泡，現在僅剩 LED 燈泡了），並將新燈泡旋入置換燈泡，旋入時要將燈泡與燈座保持垂直慢慢旋入，以避免螺紋差一輪，而無法全部旋入，當轉不動時，請確認一下燈泡與燈具是否完全垂直，且推一下燈具也不會搖晃，沒經驗者，很容易螺紋剛好差一輪，而勉強旋入，所以燈泡與燈具沒有完全垂直，此時請將燈泡再拆起來，重新再旋入一次。
6. 開關用久了，當然會老化，檢修開關的步驟如下：
 - (1) 於開關蓋板兩邊的中間凹槽，使用一字起子撬開蓋板，拆下蓋板如圖 7-2a，繼續拆下兩顆螺絲翻轉，並翻轉 180 度，如圖 7-2b。

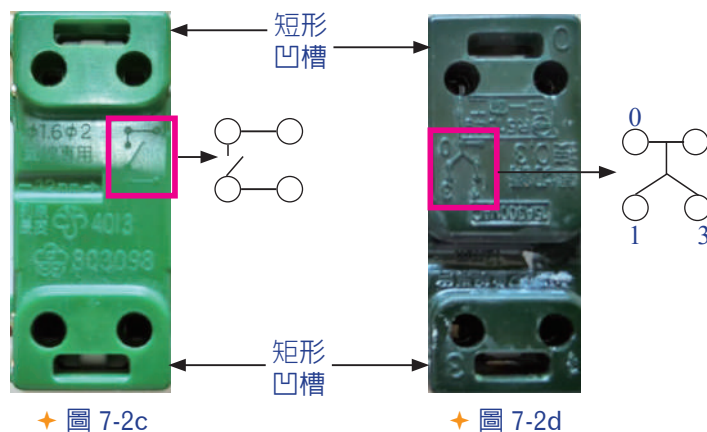


✦ 圖 7-2a



✦ 圖 7-2b

- (2) 本例應該使用單切開關就可以，單切開關如圖 7-2c，共有 4 個孔，上面兩個孔內部相通，下面兩個孔內部也相通，開關按下去上下兩條線導通，沒按則不通。但是因為三路開關的價錢相同，用途比較廣，可以取代單切開關，所以水電師傅通常一律使用三路開關，這樣準備材料比較省事。三路開關如圖 7-2d，請留意上面兩孔內部相通，編號是 0，下面左邊則是編號 3，下面右邊是編號 1，請留意紅色電線是插在編號 0 位置，白色電線插在編號 3 的位置，表示開關按下去 0-3 導通，開關沒按 0-1 導通，請拍照到水電行購買相容品。（請留意單切開關沒有數字編號，三路開關有數字編號）



★ 圖 7-2c

★ 圖 7-2d

- (3) 卸下電線的步驟。請用一字起子插入圖 7-2c 或圖 7-2d 圓孔電線旁的矩形凹槽，此凹槽內有讓電線鬆開的插銷，然後才能拔電線。
7. 於新的開關，將電線依照原來位置，插入導線，打開電源，體驗開關是否正常。
 8. 本例火線、中性線接錯，雖不影響功能，但卻影響安全性，因為都是拉火線來接開關的入口 0，然後從開關出口 1 或 3 接到電器設備，這樣大家順序都一樣，檢修才會一致。尤其若將火線直接接燈泡，中性線拉來當控制線，那結果雖然一樣，但卻是不安全，因為電燈不管有沒有運作，都是通電中，這樣比較容易讓人觸電。

範例 7-1b

多段開關照明之安裝與檢修。

相關知識

1. 多段開關照明如圖 7-3a，通常是按一下、按兩下、按三下同一開關時，可變換燈泡亮的個數。

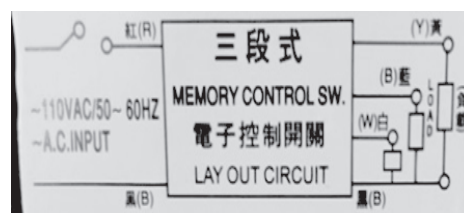
操作步驟

1. 先於配電箱，關掉電燈的無熔絲開關。
2. 同範例 7-1a，先檢修燈泡、電燈開關、配電箱的無熔絲開關是否正常。若都是正常，則是多段開關故障。

3. 拆下燈座，找出多段控制開關，如圖 7-3b，共有 5 條線，左邊紅線就是接到電源開關，黑線接到中性線。各品牌的通電方式不同，但都會標示在開關上面，請自己留意。本例標示如下：『第一段「黃 + 藍線通電」，第二段「黃線通電」，第三段「白線通電」，所以，若將黃線接到一個燈泡、藍色接到另兩個燈泡，白線接到小夜燈泡，則按一下是三個燈泡全亮、按兩下亮一個燈泡，按三下則亮小夜燈。本例也是先將接線拍照，然後到水電行購買相容多段開關。



★ 圖 7-3a



第一段：黃線+藍線通電
第二段：黃線通電
第三段：白線通電

★ 圖 7-3b

4. 依照圖 (2) 線路，於多段開關連接以上五條線，並用膠布進行絕緣包覆。

範例 7-1c

電源插座之更換。

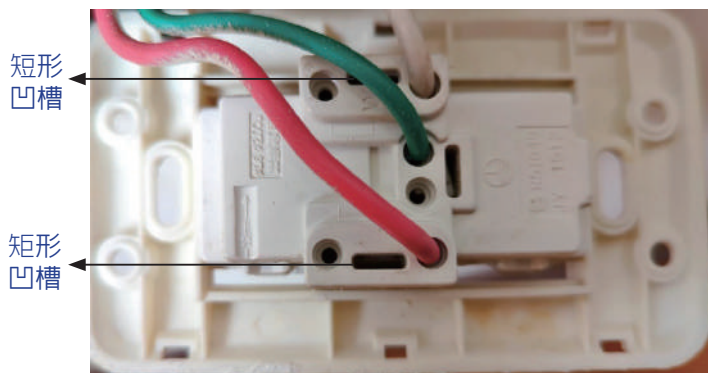
相關知識

1. 電源插座用久了，當然都會老化變黑、插座鐵片也變鬆不牢靠，此時即應進行更換。

操作步驟

1. 同電源開關，使用一字起子撬開插座面板。
2. 鬆開兩顆螺絲，並旋轉 180 度，畫面如圖 7-4，紅白綠分別代表火線、中性線、地線，請先拍照，然後到五金行購買相容款式插座。

3. 電線的拆卸，同範例 7-1b，都要先用一字起子插入電線旁的矩形凹槽，再拔電線。
4. 將電線依照拍照的原來位置，重新插入，完成電源插座的更換。



★ 圖 7-4

範例 7-1d

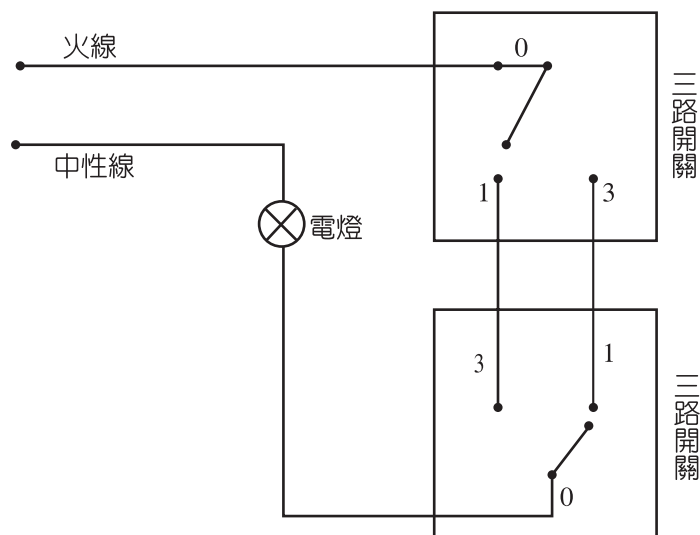
兩處控制一電燈的認識與檢修。

相關知識

1. 我們樓梯與臥室通常都可以在兩個地方同時控制一個燈具，任一地方按一下，電燈就亮，任一地方再按一下，電燈就滅。此控制線路圖如圖 7-5a，其中兩個開關都是三路開關，三路開關如範例 7-1b 圖 7-2d，開關向上按下去，則是 0-3 導通，開關沒按，則是 0-1 導通。
2. 圖 7-5a 的開關位置，電燈不亮，只要按任一開關一次，電燈就會亮，再按一下任一開關，電燈就不亮。

操作步驟

1. 打開開關面板，翻過來線路如圖 7-5b，請先拍照留存，上面紅線是火線，插在編號 0，左邊白線是編號 3，右邊白線是編號 1，等一下 3 條線的位置都不能插錯，然後購買相容品，自己更換開關。



✦ 圖 7-5a



✦ 圖 7-5b

自我練習

1. 請依照圖 7-5a 的電路圖，自己買 1.6mm 單心線、一個插頭、兩個三路開關與一個燈座，練習接線。但插電前，請先讓同學確認線路是否正確。

範例 7-1e

露營燈之認識、安裝及檢修

實習目標

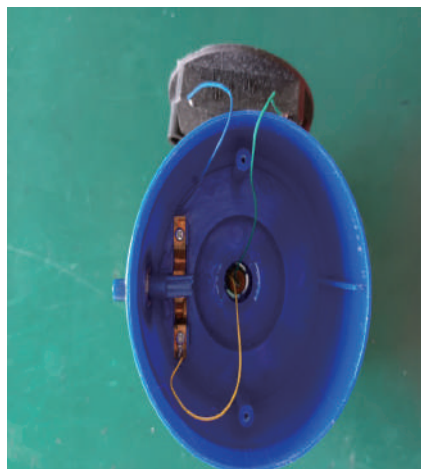
1. 了解露營燈與 LED 檯燈之動作原理。
2. 了解實際檢修過程會面臨到的問題與故障排除方式。
3. 了解電器檢修基本流程。

相關知識

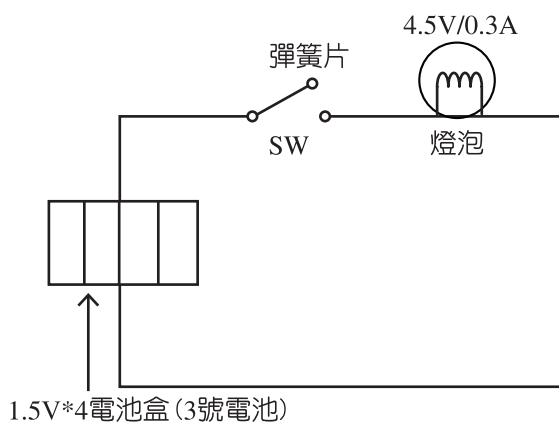
1. 如圖 7-6a 所示，是一種很普遍且隨處可見之露營燈。其內部構造如圖 7-6b 所示，當使用者將開關打開時，開關旋轉軸會擠壓彈簧，讓電源正端得以順利與燈泡正極的延伸線串接而形成通電狀態，燈泡也藉此電源導通得以產生亮光，其電路如圖 7-6c。



✦ 圖 7-6a



✦ 圖 7-6b



✦ 7-6c 露營燈



✦ 圖 7-6d



✦ 圖 7-6e

操作步驟

1. 露營燈開關打開後，燈泡不亮。一般故障點判定可能是：(1) 電池沒電或已損壞。(2) 也可能是燈泡燒掉或燈泡座焊接接觸點脫落。(3) 電源相關線路開路。
2. 以不拆機構為第一原則下，選擇先確認電池供電是否有問題。因此，打開電池盒蓋後，發現 4 顆 1.5V 的 3 號電池中，有 1 顆有液化的狀況，而接觸電池正、負極的彈簧片有生鏽的情形。此樣態，在當時判斷是造成電路無法正常導通的原因之一。一般而言，有生鏽處會相當於開路。因此，可以運用一字起子工具先將生鏽處作簡易的去鏽處理，再以長毛刷刷除鐵鏽。

3. 至此，不拆機構已無法確認燈泡與線路是否有問題。如圖 7-6b 所示，是拆除機構後的內裝。經檢視燈泡外觀，發現燈泡內有明顯的黑點。一般此種情況的初判是燈泡也燒壞了。而確認燈泡好壞，可以直接通電測試。通電測試前，若無適合的燈泡座安置燈泡時，可以於燈泡的底部與側邊焊接正、負極接線。其焊接接線方式可如圖 7-6d 所示。焊接正、負極接線後，再藉由電源供應器直接供電 2~5V 至燈泡的正、負極接線端，觀察燈泡在電壓 2~5V 區間的變化。燈泡確實不亮，也是造成露營燈供電後，無動作的主因之一。
4. 而機構已拆除，此時也就順勢測試所有接線端是否有誤。因此，基本電學實習學過的三用電表量測技巧就能派上用場了。分別針對與電池盒正、負極相關的連接點作短路測試，可以進一步確認接線端之間都沒有異狀。
5. 以上各階段的預設故障因素一一排除與確認後，就可以接電測試。因已確認燈泡壞掉，若手頭上無適當的燈泡可以替換時，可以採用一般 LED 或高亮度 LED 將之放在原燈泡座內與燈泡座之正、負極接觸妥當後，再以電源供應器直接通電做基礎測試。確認 LED 能正常發光後，將機構復歸，再以電池盒內的電池做最後測試，LED 仍然是正常發光。至此，可以確認故障點之一是燈泡壞掉而導致露營燈故障。
6. 最後，要完美結束檢修，就必需買顆新燈泡做替換。此時，可到電子材料行採買所需的替換品。一般 LED 只要 1.7V 以上就能發光，又因原燈泡老舊已無法辨識原燈泡之規格，故，只能以電子材料行所能買到的最低 2.4V 的電壓規格做燈泡替換。後續接回替換的新燈泡後，打開開關，燈泡依然不亮，此時是接電池的電做測試。最後，將 4 顆電池全換新的，再次打開開關，燈泡亮了，如圖 7-6e 所示。

🔧 實作問題與討論

1. 藉由上述實作過程，我們還可以發現有哪些電器用品是類似上述的檢修就能自己完成的？
2. 檢修方式並非唯一路徑，我們還可以有哪些作法或靈感去完成類似電器用品的檢修？

3. 檢修過程難免會有瓶頸，我們該以何種態度或思維或轉念去完成曾經自以為不可能的任務？
4. 如何以最低成本去完成或創造出檢修過程中，所衍生出來的額外問題？

範例 7-1f

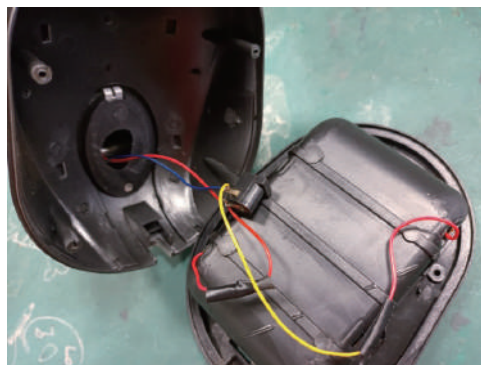
LED 檯燈之認識、安裝及檢修。

相關知識

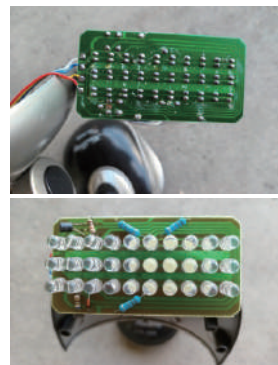
1. 如圖 7-7a 所示，是一種很普遍且隨處可見之 LED 檯燈。其內部構造如圖 7-7b、圖 7-7c 所示，當使用者將按鈕開關壓下時，正常情況下，電路導通會讓高亮度 LED 全部亮起。而此檯燈可接受的電源可採 3 顆 1.5V 的 1 號電池供電或經由變壓器將 110V 降壓至 5V，再透過電感將交流效應降至最低，並透過稽納二極體穩壓後，經電晶體放大電流以推動輸出之高亮度 LED 產生亮光，其電路如圖 7-7d 所示。



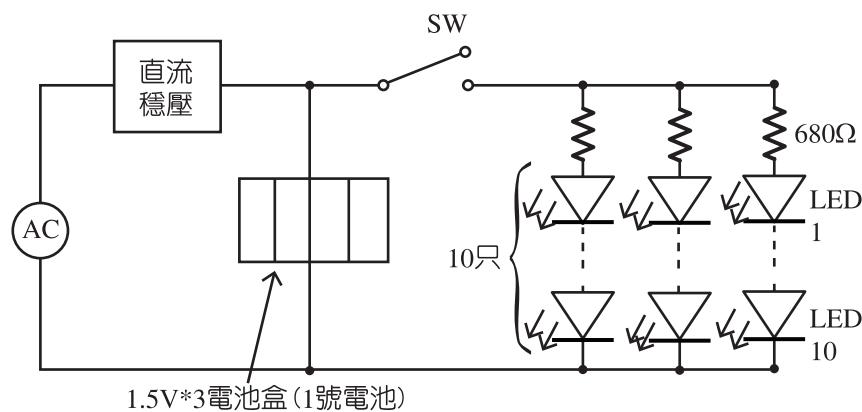
★ 圖 7-7a



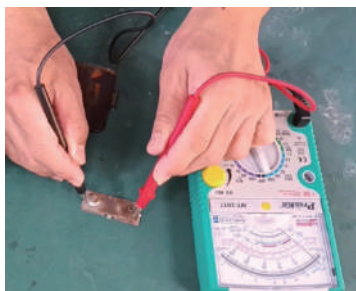
★ 圖 7-7b



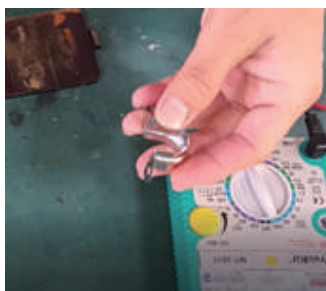
★ 圖 7-7c



★ 圖 7-7d LED 檯燈



★ 圖 7-7e



★ 圖 7-7f



★ 圖 7-7g

操作步驟

1. LED 檯燈按鈕開關壓下後，LED 燈都不亮。一般故障點判定可能是：
(1) 電池沒電或已損壞。(2) 也可能是 LED 燈燒掉或 LED 燈焊接接觸點脫落。(3) 電源相關線路開路。
2. 以不拆機構為第一原則下，選擇先確認電池供電是否有問題。因此，打開電池盒蓋後，發現 3 顆 1.5V 的 1 號電池都有液化與腐蝕的狀況，而接觸電池正、負極的彈簧片都有生鏽的情形。此樣態，在當時判斷是造成電路無法正常導通的原因之一。一般而言，有生鏽處會相當於開路，如圖 7-7e 左。而此機構的電池盒彈簧片幾乎都因電池液化腐蝕而生鏽，因此，可以考慮換掉整個彈簧片。換掉彈簧片之前，可以先確認電路機構是否能正常動作。也就是繞過電池盒供電方式，改採電源供應器直接供電 5V 給 LED 檯燈電源的正、負極，用以確認電路動作是否正常。經電源供應器開電測試後，LED 檯燈是正常發光的。據此，就可以判斷出故障點在於電池盒的電池供電端出問題。
3. 至此，就能確認只需換掉 3 顆 1.5V 的 1 號電池及電池盒內的彈簧片即可。又考慮到功能完整性、同規格的彈簧片不易取得與低維修成本，決定以水管壓環如圖 7-7f 右，再搭配迴紋針嘗試製作出適用此電池盒的電池串接端子。之後，再以電池盒內的新電池做再次測試，LED 檯燈是正常發光，將機構復歸後如圖 7-7g。至此，即完成 LED 檯燈檢修動作。

實作問題與討論

1. 藉由上述實作過程，我們可以發現檢修過程中，有哪些基礎工具是不可以缺少的？
2. 要達到低檢修成本又能復歸實用，所需之料件是否能從日常生活中取得或加工再利用？
3. 檢修過程之故障點確認是否能因經驗之累積而更加準確？

7-2 電熱類之認識及檢修

家裡常用電熱類家電有電鍋、吹風機、烤麵包機，以下範例分別介紹其檢修流程。

範例 7-2a

電鍋之認識與檢修。

相關知識

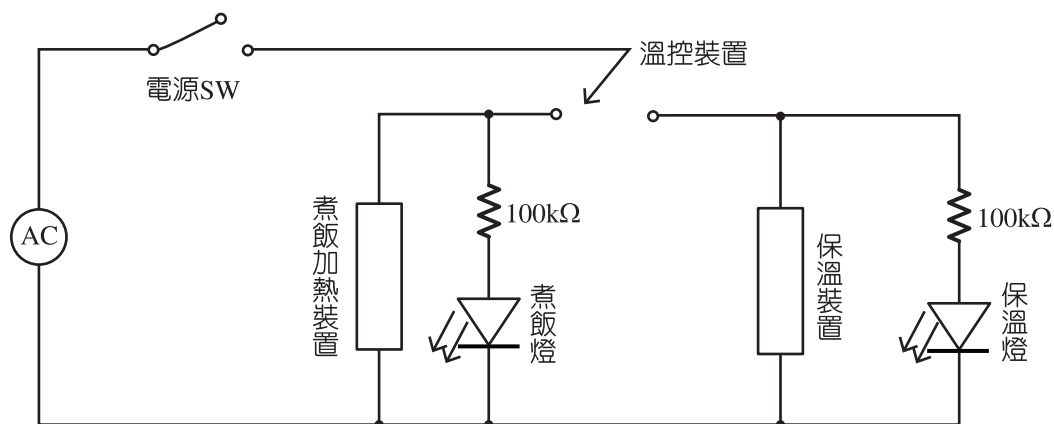
1. 如圖 7-8a 所示，是一種很普遍的機械控制式大同電鍋。其內部構造如圖 7-8b 所示。電鍋一般都有一個安裝在外鍋底部的溫度控制裝置。在內鍋的溫度達到攝氏 100 度之前，加熱裝置會一直加熱直到鍋內的水分被蒸發，因電鍋內部持續升溫悶熱，會讓內鍋溫度超過攝氏 100 度。此時，溫度控制裝置會把加熱裝置停止，並讓開關彈跳斷開而至保溫裝置，其電路如圖 7-8c 所示。



✦ 圖 7-8a



✦ 圖 7-8b



✦ 圖 7-8c 電鍋



✦ 圖 7-8d



✦ 圖 7-8e



✦ 圖 7-8f



✦ 圖 7-8g

操作步驟

1. 電鍋開關壓下後，開始煮飯流程。經過一段煮飯時間後，並未如正常煮飯截止後，開關跳開情況，而是開關並未跳開且能聞到一絲絲燒焦味。
2. 於是手動強迫跳開開關，並檢查燒焦味來源。發現電源線與電鍋電源接頭處有燒毀跡象。
3. 於是至市場購買同規格新電源線再測試一次，其結果相同。
4. 於是，拆開電鍋底座如圖 7-8b 並檢查內部機構狀況，發現電鍋電源接受端子中，其中一支有嚴重燒焦銹化的狀況。另外也將電源線接頭拆開如圖 7-8d，一樣發現與電鍋接觸的同一端子亦有燒焦狀況。一般故障點判定可能就是此電源接受端子受電異常所致。
5. 拆下電鍋受電端子與電源線接頭端子至材料行購買同規格新品，並如圖 7-8e、7-8f 替換回原位置。再送電測試電鍋煮飯流程如圖 7-8g 後，已能正常於煮飯時間截止後，開關正常跳開。
6. 據此，就可以判斷出故障點在於電鍋的受電端子其中 1 支可能因使用年久而失能。導致電鍋溫度保險絲亦無法判斷溫度已高於可容忍溫限而讓電鍋繼續加熱，最終導致電源線跟著燒焦。將機構復歸後如圖 7-8g。至此，即完成電鍋檢修動作。

實作問題與討論

1. 藉由上述實作過程，我們可以發現此種機械式的家用電器並非實習課常常看到或學到的電路結構。而是機械零組件層層串接而成。只要有一方斷點，功能可能就會產生異常。因此，我們於檢修過程中，有哪些機械零組件接點，可以運用基礎工具去確認電路能否正常動作的故障點？
2. 故障點有時不會很順利只是單一點，如何利用有效資源或知識或常識去突破瓶頸？
3. 當網路資源或所學或所問的經驗已無法突破瓶頸時，我們還可以如何換位思考或轉念去取得維修靈感並且完成故障排除任務？

範例 7-2b

吹風機之認識及檢修

實習目標

1. 了解吹風機之動作原理。
2. 了解實際檢修過程會面臨到的問題與故障排除方式。
3. 了解電器檢修基本流程。

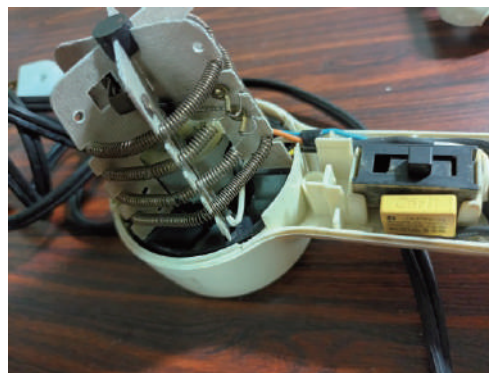
相關知識

1. 如圖 7-9a 所示，是一般型的吹風機。手握處設有 110V/220V 切換電壓開關，拆開機構檢查其電路時，發現此電壓切換扭並無任何電路或元件之設置，乍看之下似乎沒有功能，但仔細推敲其機構設計，卻發現，第 1，當此開關切換至 220V 時，內部的機構，可以限制「風速與溫度選擇」滑動開關，只能用「LO」檔運轉，以符合 110V/220V 都能工作的通用性。第 2，當放在高速檔「Hi」時，用力推切換開關到「220V」時，也會將「風速與溫度選擇」推回「LO」，如圖 7-9b。

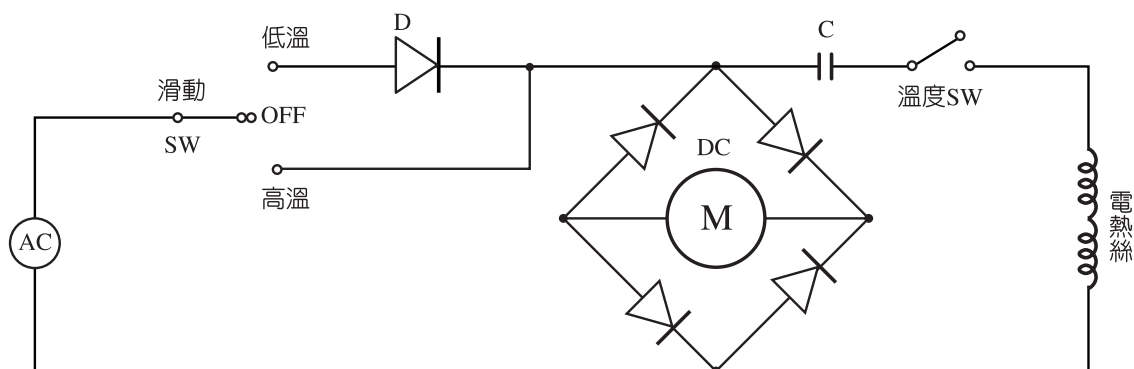


★ 圖 7-9a

2. 「風速與溫度選擇」滑動開關向上推至 LO 時，電源經二極體、濾波電容至電熱絲產生熱氣，使得風扇轉動將熱氣送出。
3. 「風速與溫度選擇」滑動開關向下推至 HI 時，電源經濾波電容至另一電熱絲產生熱氣，使得風扇轉速與溫度都提高。但是，當「110V/220V」切換電壓開關，選擇「220」時，能限制使用者無法推至此檔位。
4. 此款吹風機僅有慢風速微熱氣吹出與大風速熱氣吹出之變化。而當溫度過熱時，位於電熱絲之間的溫度開關會啟動斷路模式，對機構形成保護措施。另外，位於滑動開關旁的黃色大電容，可用於保護機構免於高壓或突波之影響，如圖 7-9c。



★ 圖 7-9b



★ 圖 7-9c

操作步驟

1. 吹風機滑動開關下推至 HI 或上推至 LO 時，僅有某些角度會啟動馬達送出對應的熱氣。
2. 因為馬達某些角度依然能有動作，故一般故障點判定可能是電源線某一段落有問題。
3. 經反覆確認電源線接頭後，判斷應是接頭內部多芯線因接頭使用前、後拔取或插入時，使用不當，而導致多芯線某些芯線斷掉而造成某些角度在使用時，無法正常通電所致。

4. 至五金行購買替換接頭，並將電線配置如圖 7-9d 所示後，接上電源測試，並任意轉動不同角度，皆能正常使用。即本次故障點確為電源線插頭內多芯線斷開所產生的問題。



✦ 圖 7-9d

✦ 實作問題與討論

1. 藉由上述實作過程，我們可以發現任一電器用品的電源線插、拔時，正確之作法應為何？
2. 當使用吹風機時，過於靠近頭髮而導致頭髮捲入吹風機後，讓馬達無法正常推動風扇送風且不時出現燒焦味時，該如何處理？
3. 吹風機使用過長時間後，通常機身與電線容易燙或熱，此時應該如何收藏，比較能夠保護機身或電線？

範例 7-2c

烤麵包機之認識及檢修

相關知識

1. 如圖 7-10a 所示，是一種很普遍的家用型烤麵包機。其內部構造如圖 7-10b、圖 7-10c 所示，當使用者將旋轉開關轉到烤物需求溫度時，正常情況下，電路導通會透過上、下石英加熱管進行烤箱內循環加熱至預設時間，機械式定時器就會響鈴並結束加熱動作。當然當溫度過高或異常時，也會經由斷路保護器進行斷路，以免發生因過熱而引起電線走火的風險，其電路圖 7-10d 所示。



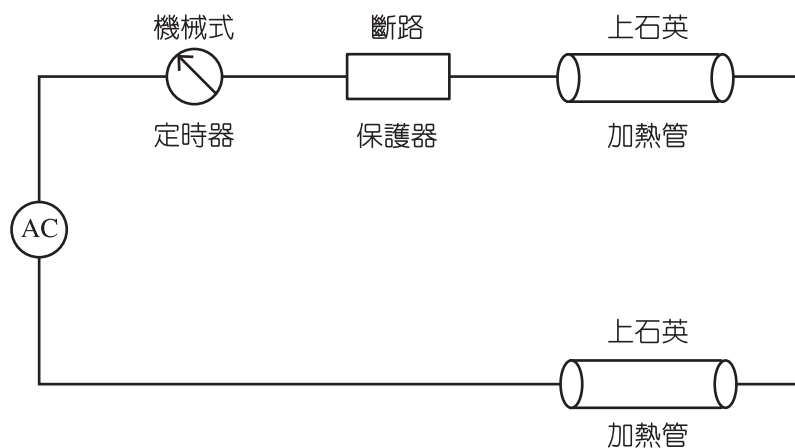
✦ 圖 7-10a



✦ 圖 7-10b



✦ 圖 7-10c



★ 圖 7-10d 烤麵包機



★ 圖 7-10e



★ 圖 7-10f



★ 圖 7-10g

操作步驟

1. 烤麵包機旋轉開關旋轉至烤物需求時間後，烤麵包機能正常烤物。但是，烤物程序並不會因設定時間到達後即停止動作。一般故障點判定可能是計時器故障了。
2. 因此，花了相當多的時間做機構拆解動作。解開機殼盒上蓋螺絲與如圖 7-10b、圖 7-10c 拆掉左、右側蓋後，發現其內裝其實也很簡單。
3. 找到機械式定時器如圖 7-10e 上，抄錄其規格並於網路 google 類似可用之替代品如圖 7-10e 下。
4. 收到替代品後，就是利用基本電學實習課實習過的焊接技巧將它焊回原處，如圖 7-10d。

5. 接著，就是插電供電做基本測試，確認電路動作能於設定烤物時間到達後，即響鈴並停止加熱動作，如圖 7-10f。
6. 最後，就是將烤箱外部機殼與螺絲復歸。據此，就可以確定出故障點在於機械式計時器。至此，即完成烤麵包機檢修動作。

實作問題與討論

1. 藉由上述實作過程，我們可以發現檢修過程中，有哪些動作需要運用到基本電學實習課程中學習到的技巧？
2. 若機械式定時器一時之間無法取得又急需使用此烤麵包機時，機械式定時器部分還可以用那些替代品更換？
3. 自己檢修完成之電器用品，該如何做？才能讓自己或家人安心地繼續使用。

7-3 旋轉類器具之認識及檢修

旋轉類器具之認識及檢修，我們介紹電扇與吸塵器。

範例 7-3a

電扇之認識及檢修

實習目地

1. 了解電扇之動作原理。
2. 了解實際檢修過程會面臨到的問題與故障排除方式。
3. 了解電器檢修基本流程。

相關知識

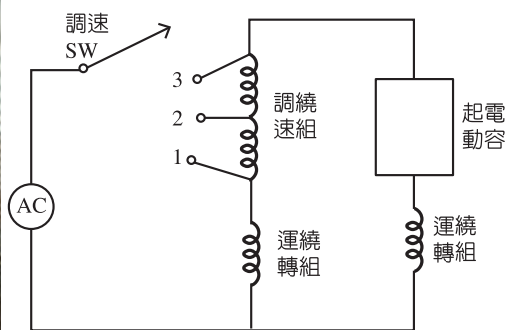
如圖 7-11a 所示，是 18 吋的電扇。當使用者將電扇電源插頭插上插座後，旋轉調速開關至位置 1 時，運轉繞組未與調速繞組串接，電壓不會被調速繞組分壓，此時風速最大；當調速開關轉至位置 2 時，運轉繞組會與「部分」調速繞組串接，此時電壓會被「部分」調速繞組分壓，讓風速變慢；當調速開關轉至位置 3 時，運轉繞組會與「全部」調速繞組串接，此時電壓會被「全部」調速繞組分壓，讓風速變更慢。因此，運轉線組圈數「多」與「少」才是影響轉速大小的關鍵，其電路如圖 7-11c 所示。



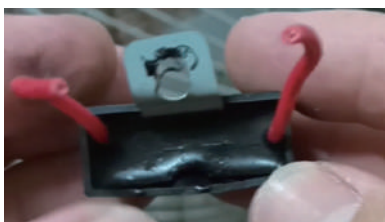
★ 圖 7-11a



★ 圖 7-11b



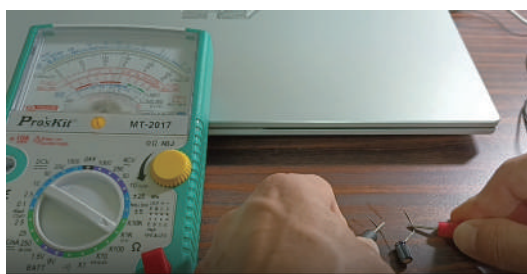
★ 圖 7-11c 工業電扇



✦ 圖 7-11d



✦ 圖 7-11e



✦ 圖 7-11f



✦ 圖 7-11g

操作步驟

1. 電扇開啓，經過一段很長時間後，忽然間覺得風扇聲音怎麼沒聽到了，且室內越來越熱，更有一絲絲東西融掉的怪味道。
2. 起身查看工業電扇，風扇慢慢停止運轉。
3. 當下隨即關掉工業電扇旋轉開關再開啓，工業電扇依舊無法啓動。
4. 一般此情況先檢查軸承是否會因太久沒上油而卡死。
5. 因此，拿了灌黃油予以潤滑軸承前、後相關位置，並再次將工業電扇旋轉開關開啓測試，其結果是失敗的，工業電扇依舊無法啓動。
6. 怕拆解過程中將線圈扯斷，因此以不拆馬達機構為原則下，再次判斷應是摸起來有點鼓鼓且接腳面板有裂痕的電容器如圖 7-11d 有問題。
7. 因手頭上沒有電容表可以測量其電容值，故改採基本電學實習課程中學過的三用電表量測技巧，將電容器兩隻腳先行接觸短路後，以 Ω 檔接觸電容器雙腳。若電容器正常時，則指針應該要由低 Ω 往高 Ω 處偏轉，也就是會有充電效應出現。
8. 然而，如圖 7-11e 所示，指針永遠停留在最低 Ω 值，一動也不動。接著以同樣的方式換另外一顆全新油浸式電容器測試如圖 7-11f 所示，指針能由低 Ω 往高 Ω 處偏轉且還會返回一點點才穩定不再繼續偏轉動作。

9. 至此，更加確信應該就是大電容掛了。於是於網路 google 找尋其類似之替代品如圖 7-11g 所示，並將其焊接回原處。
10. 接著將電扇電源插頭插上插座後，旋轉調速開關至需要風速的檔位時，電扇動了，再測試其他檔位的風速也都正常，皆能正常使用。即本次故障點確定為啓動電容斷開所產生的問題。至此，即完成工業電扇檢修動作。

✎ 實作問題與討論

1. 藉由上述實作過程，我們可以想到除了利用電容表或三用電表檢測外，還能有任何其他方式可以確認電容的好與壞？
2. 當確認啓動電容及溫度保險絲也無壞掉時，僅剩運轉線圈與啓動線圈斷路會造成影響，此時的你，會想要如何處理呢？
3. 如同實作過程中運用一般三用電表量測電容，用以初步確認其好或壞。類似此種方式，還能運用於甚麼物品檢修上呢？

範例 7-3b

吸塵器之認識與檢修

相關知識

1. 如圖 7-12a 所示，是一種很普遍的車用吸塵器。其內部構造如圖 7-12b 所示，當使用者將滑動開關上推時，正常情況下，電源導通會透過如圖 7-12c 之 RS385SA-3530 DC 12V 馬達，以每分鐘 17200~30000 轉的高速帶動渦輪扇葉，並製造真空吸力將灰塵及小垃圾吸入集塵袋中。而排出的空氣則會透過機構本身雙側邊的出風口排出，其電路如圖 7-12d。



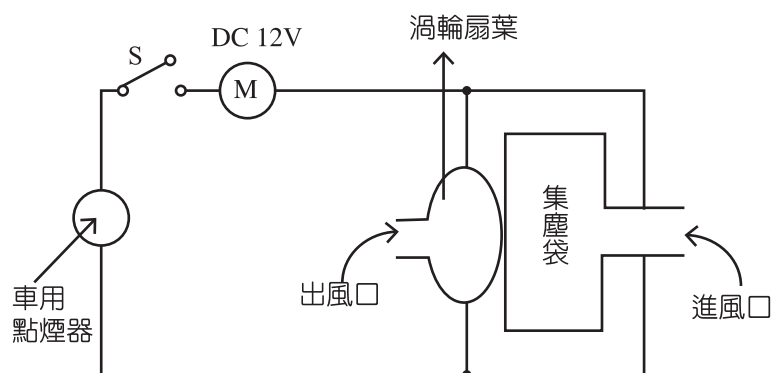
✦ 圖 7-12a



✦ 圖圖 7-12b



✦ 圖圖 7-12c



✦ 圖 7-12d 車用吸塵器



✦ 圖 7-12e



✦ 圖 7-12f



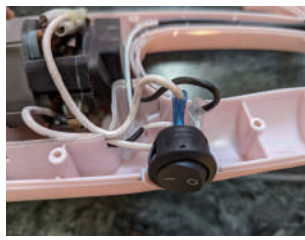
✦ 圖 7-12g

操作步驟

1. 車用吸塵器使用後，應如圖 7-12e~7-12g 將它們一一拆開來用長毛刷將灰塵與毛屑清除乾淨。
2. 而當使用中，一下子吸入過多物品或較大型物品時，容易造成渦輪扇葉速度瞬間遞減。若再繼續使用，則容易引起馬達燒毀。
3. 因此，使用此類電器產品過程中，仍應遵守聽到異樣聲響或遇阻力時，停止動作，查看吸入口或集塵袋為原則。
4. 若無法啟動，請檢查機身電源線，如圖 7-12h，因為使用吸塵器時，此電源線最容易拉扯斷裂，請用肉眼檢視是否斷裂。
5. 若無斷裂，請用三用電表檢查電源線到開關，如圖 7-12i，的接點是否連通，檢查方式的三用電表連接如圖 7-12j。
6. 請檢查開關，如圖 7-12i，開關的按壓是否鬆脫，若已鬆脫表示此開關已經燒毀，請更換新品。



✦ 圖 7-12h



✦ 圖 7-12i



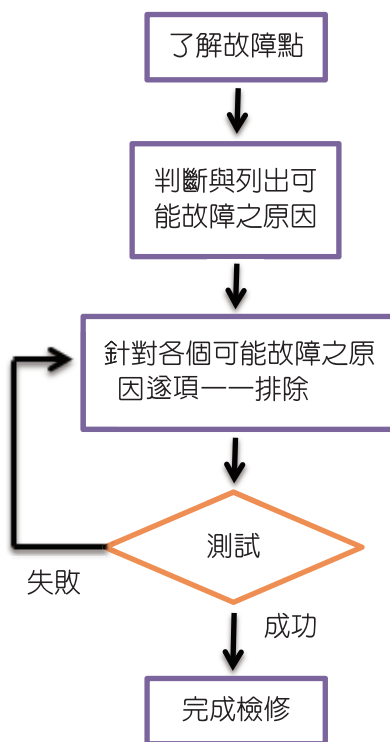
✦ 圖 7-12j

✧ 實作問題與討論

1. 藉由上述保養過程，我們可以發現實作過程中，有哪些地方清除污垢的動作需要越確實越好？
2. 若渦輪扇葉因硬物卡住而導致轉動不良或卡死時，是否有工具或方式能適當的排除？

7-4 本章內容摘要

1. 一般進行電器各類物品之檢修流程如下：



★ 圖 7-13 電器檢修流程圖

2. 任何電器勘誤或檢修前，務必先確認**電源**是否已關閉。
3. 使用三用電表 Ω 檔對電器或零組件做短路測試前，先轉檔至需求檔位置，再將紅、黑探棒接觸並檢查電阻值是否歸 0。
4. 使用三用電表 V 檔測試插座或電器前，務必確認檔位是否轉至正確位置。交流測試時，應轉至 ACV 檔；直流測試時，應轉至 DCV 檔。
5. 使用替代零組件做電路動作測試時，留意規格是否差異太大。
6. 電鍋一般是一種靠著加熱板上加水與內鍋水於啓動電源後，靠著水蒸氣內循環加熱就能做飯的電器用品。
7. 機械式電鍋內部機構本身未任意調整下，最常出現的故障點位於溫度保險絲或電源接受端子及電源線規格不符。

8. 吹風機機身使用時勿靠物體太近。使用後若不慎捲入異物而導致機構瞬減轉速，要即時停止使用並於機構冷卻後，再拆機清除異物並檢視零組件是否因異物接觸而造成短路現象。
9. 吹風機最常出現電源線接頭，因接觸不良而產生馬達運作不順之故障點。於使用吹風機前、後的電源線插、拔動作，要平進、平出。
10. 烤麵包機最易出現之故障點是計時器及溫度保護器裝置。於日常使用過程中，就應養成隨時留意烤物前、後之樣態及烤物完成後，時間之變化。以即早發現電器機構使用之控制料件，是否因老化而產生使用上的問題。
11. 電扇購入後，盡可能在使用前，先在風扇葉片的軸承上針車油或黃油潤滑，以利帶動風扇葉片的軸承於使用時能更順利旋轉。
12. 電扇除軸承容易因為潤滑不夠或失效而卡住外，最容易出現的故障點在於溫度保險絲與啟動電容器。
13. 使用三用電表 Ω 檔測試電容器時，若無任何 Ω 值，則電容器應是掛掉的情況居多。反之， Ω 值能由小變大再迴轉後， Ω 值能處於一穩定值時，則電容器應是正常的情況居多。
14. 吸塵器使用期間，需留意勿吸入過尖、大的物品，以避免渦輪扇葉卡死且進而讓馬達燒毀。
15. 應定期清理集塵袋內所吸入的任何物品，以利馬達運轉所產生的真空吸力能處於最大量。

7-5 課後習題

一、選擇題

1. 家中電燈的單切開關，應該接到：(A) 火線 (B) 中性線 (C) 地線
2. 家中電器的機殼，應該接到：(A) 火線 (B) 中性線 (C) 地線
3. 室內配線的火線通常使用顏色是：(A) 紅色 (B) 綠色 (C) 黑色
4. 家中所有電器都是：(A) 串聯 (B) 並聯
5. 樓梯燈大都兩處控制一個電燈，請問內部使用兩個：(A) 單切開關 (B) 三路開關
6. 電鍋有煮飯電熱絲與保溫電熱絲，請問用歐姆檔量測其阻抗，那一個電熱絲的阻抗高：(A) 煮飯 (B) 保溫
7. 吹風機的發熱材料通常是：(A) 鎳鉻絲 (B) 石英管
8. 烤箱的發熱材料通常是：(A) 鎳鉻絲 (B) 石英管

二、實作題

1. 請依照範例說明，練習自家燈泡拆解與更換。(請留意椅子的穩定性、與拆解逆時針旋轉方向、拆下先拍照、再裝回去)
2. 請依照範例說明，練習電燈開關更換。(請先將電線從開關抽出、拍照、抽開關、拍照、再裝回去)
3. 請依照範例說明練習自家電源插座的更換。(請先將電線從插座抽出、拍照、抽插座、拍照、再裝回去。)
4. 請依照範例說明將自家電鍋底蓋拆開、擦拭、拍照、裝回去。
5. 請依照範例說明將自家電風扇的葉片拆下、擦拭、軸心上油、拍照、裝回去，且感受啟動是否較流暢。
6. 請將自家冷氣出風口往上扳、拍照、拿刷子將灰塵、蜘蛛網等刷掉、拿下過濾網、拍照、清洗、再放回去。
6. 請依照範例說明，將自家吹風機步驟，拆解、擦拭、拍照、再裝回去。
7. 請將自家配電盤拍照，每次關掉一個無熔絲開關，檢查每個無熔絲開關所控制的開關與燈具。

附錄

A



本書關鍵字中英文對照與索引表

中文	英文	頁碼
心肺復甦數	cardio pulmonary resuscitation	1-6
三用電表	multimer	2-3
電阻	resister	2-9
電壓	voltage	2-17
電源供應器	power supply	2-4
電流	electric current	2-24
功率	power	2-29
額定功率	rated power	C-37
配電盤	distribution panel	C-38
漏電斷路器	earth leakage circuit	1-15
無熔絲開關	no fuse breaker	1-15
過載保護	overload protect	3-2
歐姆定律	Ohm's law	3-4
串聯電路	serial circuit	3-4
克希荷夫電壓定律	Kirch'hoff's voltage law	3-4
克希荷夫電流定律	Kirchhoff's current law	3-4
並聯電路	parall circuit	3-7
Y 型電路	y branch	3-10
△型電路	delta branch	3-12
惠斯登電橋	wheatstone bridge	3-16

中文	英文	頁碼
重疊定理	superposition theorem	3-18
戴維寧定理	Thevenin's theorem	3-20
諾頓定理	Norton's theorem	3-22
最大功率轉移定理	maximum power transfer theorem	3-25
LCR 表	LCR meter	4-2
電感器	inductor	4-10
電容器	capacitance	4-3
正弦波	sine wave	C-12
有效值	root-mean-square	C-14
相位角	phase angle	C-16
示波器	oscilloscope	4-15
信號產生器	signal generator	4-28
量測誤差	error of measurement	4-43
負載效應	loading effect	4-43
暫態	transient state	5-2
穩態	steady state	5-2
電阻電容暫態	RC transient state	5-2
時間常數	time constant	5-3
電阻電感暫態	RL transient state	5-14
純量	scale	C-25
向量	vector	C-25
複數	complex number	C-25
直角坐標	rectangular coordinates	C-25
極座標	polar coordinates	C-26
阻抗	impedance	6-2
容抗	capacitive reactance	6-5
感抗	inductive reactance	6-8
電阻 - 電容串聯	RC serial circuit	6-13
電阻 - 電感串聯	RL serial circuit	6-18
電阻 - 電容 - 電感串聯	RCL serial circuit	6-22

中文	英文	頁碼
電阻 - 電容並聯	RC parall circuit	6-28
電阻 - 電感並聯	RL parall circuit	6-32
電阻 - 電容 - 電感並聯	RCL parall l circuit	6-36
諧振	resonance	6-42
串聯諧振	series resonance	6-43
品質因數	quality factor	6-44
頻帶寬度	bandwidth	6-45
選擇性	selectivity	6-45
並聯諧振	parall resonance	6-50

MEMO

附錄 B



本書使用儀器

1. 指針式三用電表（量測電阻、交直流電壓、直流電流）



ProsKit MT-2017



VICTOR VC-3021

B-2 基本電學實習

2. 數位顯示三用電表（量測交流電流）



OWON OW16A

3. 交流勾表（量測電器交流電流）



GM GDM532



Victor 6019C



OWON CM240

4. LCR 表（量測 L、C、R）



GM LCR 916

5. 電源供應器



OWON SPE3051



GW GPS-3303

6. 信號產生器

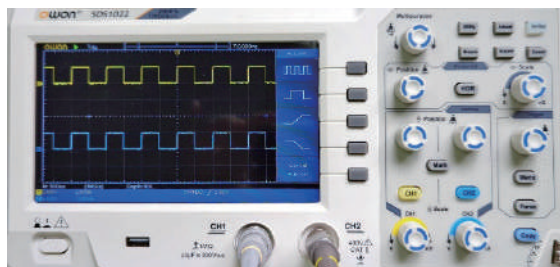


OWON AG1022



GW SFG-1013

7. 示波器



OWON SDS1022



GW GDS-1072B

MEMO

附錄 C



本書相關知識

C-1 三角函數演練

因為電力公司交流電的瞬時值，可使用三角函數的 $\sin(\theta)$ 正弦波表示，所以本節先介紹三角函數。

三角函數之正弦波

任意三角形有三個邊，三個角，科學家為了找出其邊與角的關係，就定義出三角函數。例如已知三角形任兩邊與其所夾角度，就可透過餘弦定理找出第 3 邊的長度。所以現代人蓋六角庭，蓋橋樑、蓋房子，都可以將所有木頭或鋼板長度通通事先裁切好，到了現場就是組裝而已。但是古代的工匠就窘了，他們沒有三角函數，所以是一面作，一面量下一根木頭長度，一面裁切，速度當然慢。

三角函數共有 6 個函數，分別是 $\sin(\theta)$ 、 $\cos(\theta)$ 、 $\tan(\theta)$ 、 $\cot(\theta)$ 、 $\sec(\theta)$ 、 $\csc(\theta)$ ，雖然有 6 個，但其實之間都有關係，電學裡常用為正弦波 $\sin(\theta)$ 、餘弦波 $\cos(\theta)$ 與正切 $\tan(\theta)$ 函數，最常用的則為 $\sin(\theta)$ 。在數學裡定義域 θ 我們習慣用角度，其範圍為 0~360 度，但電學裡我們用徑度量，其範圍則為 0~2 π ($\pi=3.14159$)。以下實習用來學習三角函數。

範例 C-1a

$\sin \theta$ 、 $\cos \theta$ $\tan \theta$ 函數圖形的繪製。

實習目的

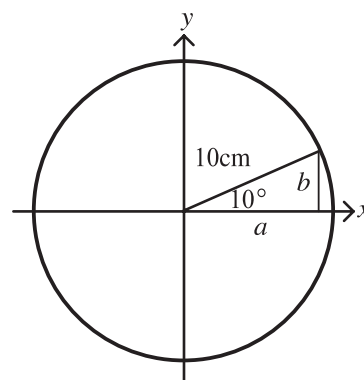
1. 認識 $\sin \theta$ 、 $\cos \theta$ $\tan \theta$ 函數的定義與圖形。

準備工具

1. 尺、圓規與量角器。

操作步驟

1. 畫出二維 x, y 座標軸。
2. 使用圓規在原點畫一個半徑為 10 公分的圓，如圖 C-1。
3. 以圓心為中心，正 x 軸為起點 0° ，使用量角器找出 10° 位置，由圓心往圓周畫線，如圖 C-1，量測 a 與 b 的值，並除以半徑 10，填入表 C-1。
4. 重複步驟 3，使用量角器依序在 $0^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 37^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 53^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ ，從圓心到圓畫直線，量測 a 與 b 的值，並除以半徑 10，填入表 C-1。



★ 圖 C-1

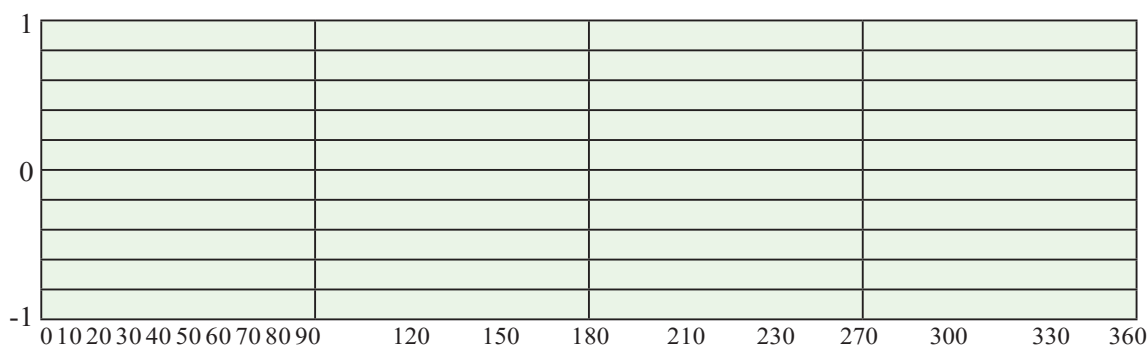
► 表 C-1 三角函數值計算一

角度 函數	0°	10°	20°	30°	37°	40°	45°	50°	53°	60°	70°	80°	90°
$\sin \theta = \frac{b}{r} = \frac{b}{10}$													
$\cos \theta = \frac{a}{r} = \frac{a}{10}$													
$\tan \theta = \frac{b}{a}$													

5. 重複步驟 3，使用量角器依序在 $100^\circ, 110^\circ, 120^\circ, 130^\circ, 140^\circ, 150^\circ, 160^\circ, 170^\circ, 180^\circ$ ，從圓心到圓畫直線，量測 a 與 b 的值，並除以半徑 10，填入表 C-2。

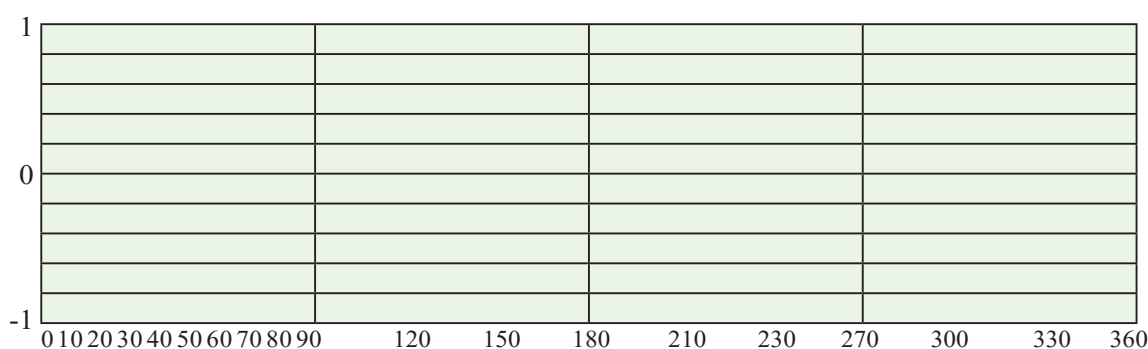
C-4 基本電學實習

8. $\sin \theta$ 函數的定義是 $\sin \theta = \text{對邊} / \text{斜邊} = b/r$ ，將表 1,2,3,4 的 $\sin \theta$ 函數值點在圖 C-2，並將這些點連接。



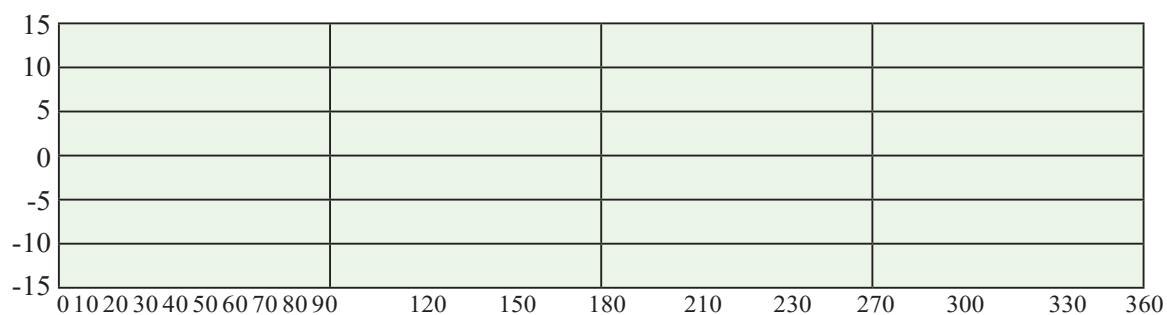
★ 圖 C-2 $\sin \theta$ 函數圖

9. $\cos \theta$ 函數的定義是 $\cos \theta = \text{臨邊} / \text{斜邊} = a/r$ ，將表 1,2,3,4 的 $\cos \theta$ 函數值點在圖 C-3，並將這些點連接。



★ 圖 C-3 $\cos \theta$ 函數圖

10. $\tan \theta$ 函數的定義是 $\tan \theta = \text{對邊} / \text{臨邊} = b/a$ ，將表 1,2,3,4 的 $\tan \theta$ 函數值點在圖 C-4，並將這些點連接。



★ 圖 C-4 $\tan \theta$ 函數圖

範例 C-1b

三角函數 $\sin \theta$ 正弦波觀察。範例 C-1a 是自己繪製 $\sin \theta$ 、 $\cos \theta$ 、 $\tan \theta$ 函數圖形，本範例則示範寫 Python 程式，請電腦繪製，後續就可以依此範例繪出以上圖形。

操作步驟

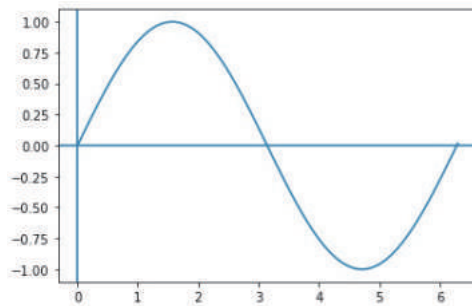
1. 以下是 $\sin(\theta)$ 函數的定義。

$$y = \sin(\theta) = \frac{\text{對邊}}{\text{斜邊}}$$

θ 定義域是 0 到 2π 。

2. 撰寫程式如下：

```
import matplotlib.pyplot as plt #載入繪圖 matplotlib.pyplot 模組，才能繪圖
import numpy as np #載入numpy 模組，繪圖用數值模組
print(np.pi) #輸出pi值
si = np.arange(0, 2*np.pi+0.1, 0.1)
#產生 0到2pi數列，以si串列儲存
y = np.sin(si) #逐一產生sin(si)正弦波值
print(si) #si為串列，輸出si串列內容
plt.plot(si,y)#繪出正弦波
plt.axhline(y=0)#繪出y軸
plt.axvline(x=0)#繪出x軸
plt.show()#於螢幕輸出圖形
```



✦ 圖 C-5 程式執行結果

3. 執行結果如圖 C-5，由圖可知其週期為 2π （大約為 6.28）。
4. 輸出 π 值，使用徑度量，如圖 4-6 的 3.14159...
5. 輸出 si 串列，如圖 C-6，中括號範圍內數值。 x 為從 0 到 2π ，遞增 0.1 的串列。

```
3.141592653589793
[ 0.  0.1  0.2  0.3  0.4  0.5  0.6  0.7  0.8  0.9  1.  1.1  1.2  1.3
 1.4  1.5  1.6  1.7  1.8  1.9  2.  2.1  2.2  2.3  2.4  2.5  2.6  2.7
 2.8  2.9  3.  3.1  3.2  3.3  3.4  3.5  3.6  3.7  3.8  3.9  4.  4.1
```

✦ 圖 C-6 輸出 π 值與 si 串列

6. 輸出 y 串列，如圖 C-7。不論 s_i 值如何變化，其值一律在 -1 與 1 之間。

```
0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.6 0.7 0.8 0.8 0.9 0.9 1.0 1.0 1.0 1.0
1.0 1.0 0.9 0.9 0.9 0.8 0.7 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1 0.0 -0.1 -0.2
-0.3 -0.4 -0.4 -0.5 -0.6 -0.7 -0.8 -0.8 -0.9 -0.9 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0
-1.0 -1.0 -1.0 -0.9 -0.9 -0.8 -0.8 -0.7 -0.6 -0.6 -0.5 -0.4 -0.3 -0.2
-0.1 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.7 0.8 0.9 0.9 0.9 1.0 1.0 1.0
```

★ 圖 C-7 輸出 y 串列

自我練習

1. 同範例 C-1b，請使用 Python 程式給出 $\cos(\theta)$ 餘弦波函數圖形。

範例 C-1c

使用 Python 程式繪出 $\tan(\theta)$ 正切函數圖形。

操作步驟

1. 以下是 $\tan(\theta)$ 函數的定義。

$$y = \tan(\theta) = \text{對邊} / \text{臨邊} = b/a$$

θ 定義域是 0 到 2π 。

2. 但由範例 C-1a 表 C-1 與表 C-3，我們發現， $x=90$ 與 270 時， a 得到 0 ，因為分母不能為 0 ，所以要扣掉這兩點，程式才不會當掉。所以定義域修正如下：

θ 定義域是 0 到 2π 。 $x \neq \pi/2, x \neq 3\pi/2$

3. 撰寫程式如下：程式撰寫時，也要扣掉這兩點，程式才不會當掉。

範例 C-1d

寫一程式，可以指派 θ ，而求的 $\sin(\theta)$ 函數值。

操作步驟

1. 數學課本的 $\sin(\theta)$ 函數都是使用度度量，但是電腦的計算都是使用徑度量，度度量繞圓一圈是 360 度，徑度量則是 2π 。

2. 度度量轉徑度量公式為

$$\text{徑度量} = \text{度度量} * 2\pi / 360 = \text{度度量} * \pi / 180$$

3. 徑度量轉度度量公式為

$$\text{度度量} = \text{徑度量} * 360 / 2\pi = \text{徑度量} * 180 / \pi$$

4. 以上轉換，程式如下，輸出結果如圖 C-8，請留意電腦實數計算會有誤差，不會剛好輸出 30，而是 29.999999999999996。

```
import math as ma #載入math 模組
print(ma.pi)
si=30
arad=si*ma.pi/180 #轉徑度量
print(arad)
a=arad*180/ma.pi #轉度度量
print(a)
```

```
3.141592653589793
0.5235987755982988
29.999999999999996
```

✦ 圖 C-8 程式輸出結果

5. 繪圖都需要 numpy 模組，所以以上程式，使用 numpy 模組的程式如下，執行結果如圖 C-9。

```
import numpy as np #載入numph 模組
print(np.pi)
si=30
arad=si*np.pi/180 #轉徑度量
print(arad)
a=arad*180/np.pi #轉度度量
print(a)
```

```
3.141592653589793
0.5235987755982988
29.999999999999996
```

✦ 圖 C-9

6. 以下程式可以計算任意角的三角函數值，我們同時使用 math 與 numpy 模組，因為後續程式會一再使用此二模組，執行結果如圖 C-10。

```
import math as ma #載入math 模組
import numpy as np #載入numph 模組
print(ma.pi) #使用 math 模組
print(np.pi) #使用 numpy 模組
si=30
si=si*np.pi/180 #轉徑度量
print(ma.sin(si))
print(np.sin(si))
```

```
3.141592653589793
3.141592653589793
0.49999999999999994
0.49999999999999994
```

✦ 圖 C-10

範例 C-1e

寫一程式，完成任意角的 $\sin(\theta)$ 反函數值計算。(前面輸入 $\sin(\theta)$ 得到一個 $-1\sim 1$ 的值，此稱為 $\sin(\theta)$ 函數值，現在輸入一個 $-1\sim 1$ 的值，要求 θ ，稱為反函數值。)

操作步驟

1. 撰寫程式如下：請留意 math 模組 $\sin()$ 反函數是 $\text{asin}()$ ，numpy 模組 $\sin()$ 反函數是 $\text{arcsin}()$ 程式如下：

```
import math as ma #載入math 模組
import numpy as np #載入numph 模組
a=0.5
print(ma.asin(a)*180/ma.pi) #使用 math 模組
print(np.arcsin(a)*180/np.pi) #使用 numpy 模組
```

```
30.000000000000004
30.000000000000004
```

★ 圖 C-11

2. 執行結果如圖 C-11，輸入 0.5 得到 30° ，此即為 $\sin()$ 反函數值。

範例 C-1f

寫一程式，完成任意角的 $\tan(\theta)$ 函數值計算。

操作步驟

1. $\tan(\theta)$ 的定義是 $\tan\theta = \frac{\text{對邊}}{\text{斜邊}}$ 。

例如 $\tan(45) = 1/1$; $\tan(60) = 1.732/1 = 1.732$ 。

撰寫程式如下：

```
import math as ma
pi=ma.pi
si=45
si=si*pi/180 #轉徑度量
a=ma.tan(si)
print(a)#0.9999
si=60*pi/180;print(ma.tan(si))#1.732 #si改為60求tan(si)值
```

2. 三角形三邊長比例若是 $3:4:5$ ，此為特別角，三個角分別是 $37, 53, 90$ ，程式如下：

```
si=37*pi/180;print(ma.tan(si)) #3/4=0.75
si=53*pi/180;print(ma.tan(si)) #4/3=1.32
```

範例 C-1g

寫一程式，完成任意角的 $\tan(\theta)$ 反函數值計算。(前面輸入 $\tan(\theta)$ 得到一個值，此稱 $\tan(\theta)$ 函數值，現在輸入兩個邊長的比值，要求 θ ，稱為反函數值。)

操作步驟

1. `math` 模組的 `atan(y/x)`，可以求 (對邊 y / 臨邊 x) 的三角形的 θ 。
2. 請鍵入以下程式，在直角坐標系繪點，然後觀察其角度，請留意都是大邊對大角，小邊對小角， y 若是負，表示在第四項限， θ 也會是負。

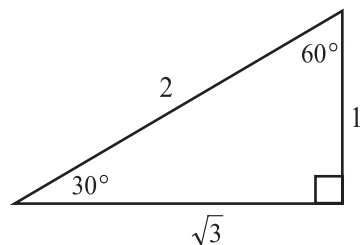
```
import math as ma
pi=ma.pi
print(ma.atan(1/1)*180/pi) #45
print(ma.atan(-1/1)*180/pi) #-45
print(ma.atan(1.732/1)*180/pi) #60
print(ma.atan(-1.732/1)*180/pi) #-60
print(ma.atan(3/4)*180/pi) #37
print(ma.atan(-3/4)*180/pi) #-37
```

範例 C-1h

特別角的三角函數值。

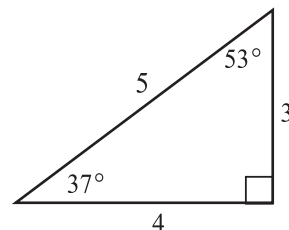
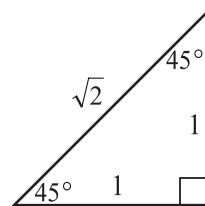
操作步驟

1. 當三角形的三個角度分別是 30-60-90，如圖 C-12，則其三個邊長的比值，將分別是 $1:\sqrt{3}:2$ ，所以 $\sin 30^\circ = \text{對邊}/\text{斜邊} = 1/2$ ， $\cos 30^\circ = \text{臨邊}/\text{斜邊} = \sqrt{3}/2$ ， $\sin 60^\circ = \sqrt{3}/2$ ， $\cos 60^\circ = 1/2$



★ 圖 C-12 30-60-90

2. 當三角形的三個角度分別是 37° - 53° - 90° ，如圖 C-13，則其三個邊長的比值，將分別是 $3:4:5$ ，所以 $\sin 37^\circ = 3/5$ ， $\cos 37^\circ = 4/5$ ， $\sin 53^\circ = 4/5$ ， $\cos 53^\circ = 3/5$
3. 當三角形的三個角度分別是 45° - 45° - 90° ，如圖 C-14，則其三個邊長的比值，將分別是 $1:1:\sqrt{2}$ ，所以 $\sin 45^\circ = \sqrt{2}/2$ ， $\cos 45^\circ = \sqrt{2}/2$
4. 以上角度都有固定的邊長比，所以稱為特別角，考試因為不能帶計算機，所以都會湊出這些特別角。

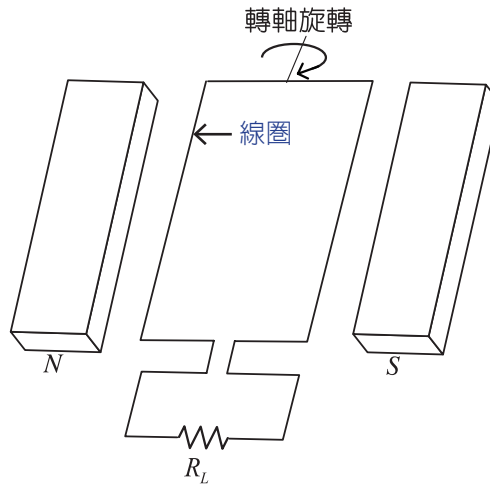
★ 圖 C-13 37° - 53° - 90° ★ 圖 C-14 45° - 45° - 90°

自我練習

1. 請寫出以上特別角的 $\tan \theta$ 。
2. 若 $\sin \theta = 1/2$ ，求第 1 象限 θ 值。
3. 若 $\cos \theta = 0.6$ ，求第 1 象限 θ 值。
4. 若 $\tan \theta = 1$ ，求第 1 象限 θ 值

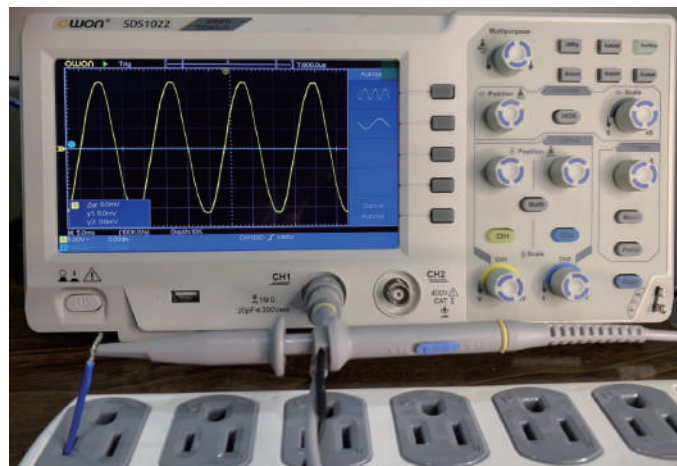
C-2 台電電力波形

電力公司的發電機原理示意圖如圖 C-15，使線圈在磁場內旋轉，就能發電。



★ 圖 C-15 電力公司發電機示意圖

圖 C-16 則是用示波器量測電力公司供電的電壓的瞬時值， x 軸是時間 t ，每一格是 5ms ，共 3.3 格，所以週期 $T = 5\text{ms} \times 3.3 = 16.5\text{ms}$ ， $f = 1/T = 60\text{Hz}$ ； y 軸是瞬時電壓，每一格是 5V ，但是我們使用 10 倍衰減棒，所以電壓最大值 V_m 是 $5 \times 3.2(\text{格}) \times 10 = 160\text{V}$ 。以上電壓瞬時值一直在變化，與前面的直流電的恆壓不同，且有正有負，此一有正有負的電壓，我們稱為交流電，但電學上的負值代表供電方向的改變。



★ 圖 C-16 電力公司電壓瞬時值

正弦波(sine wave)

以上電力公司供電瞬時值恰好與 $\sin(\theta)$ 函數正弦波相同，所以交流電瞬時值可以使用 $\sin(\theta)$ 函數表示如下

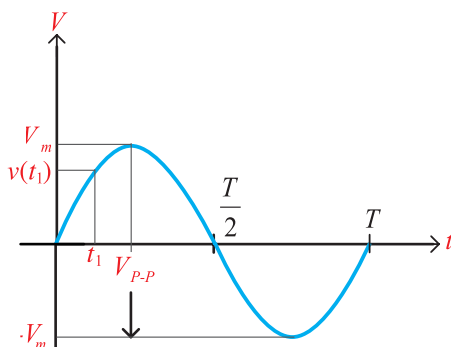
$$v(t) = V_m \sin(\theta + 2\pi ft) \text{ 表示}$$

θ ：是 $t=0$ 的相位角，本例為 0 ，範例 C-2a、C-2d 有進一步說明。

f ：是發電機轉動的頻率，單位是 Hz(次 / s)，台電是 60Hz。

V_m ：是發電機輸出最大值，波形變化一週中的最大波幅，如圖 C-17。

V_{p-p} ：峰對峰值，波形一週中，波峰與波谷之值，如圖 C-17。



★ 圖 C-17 交流電瞬時值與最大值 V_m 、 V_{p-p} 關係圖

範例 C-2a

已知台電公司瞬間輸出最大值為 160V 的正弦波，頻率是 60Hz，假設時間 $t=0$ 時電壓為 0V，請寫一程式，可以輸出台電任一瞬間的電壓值。

實習步驟

1. 因為電力公司發電機輸出恰好與 $\sin(\theta)$ 正弦波相同，所以台電公司瞬時值可以表示如下。

$$v = V_m * \sin(2\pi ft)$$

2. 撰寫程式如下：

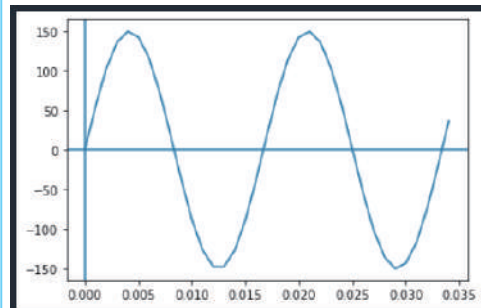

```
import math as ma #載入math模組，才能
求sin(x)含數值
t=0
Vm=160
f=60
pi=3.14
dt=0.001
while True:
    v=Vm*ma.sin(2*pi*f*t)
    print(v)
    t=t+dt
```

```
9.248041738130627
67.37233472198135
116.04386123517807
148.43369697460597
159.99734226514312
149.11234422695767
117.30593721980965
```

★ 圖 C-18

3. 以上輸出結果如圖 C-18，由圖可知其輸出電壓介於 -160～160V 之間。
4. 以下程式可繪出 $t = 0 \sim 0.033(2/60)$ 秒之間的順時電壓值，其結果如圖 C-19，因為 1 秒來 60 個正弦波，1 個正弦波需要 $1/60$ 秒，本例繪出兩個，所以時間取 $2.1/60$ ，這樣可得兩個正弦波再多一點點。

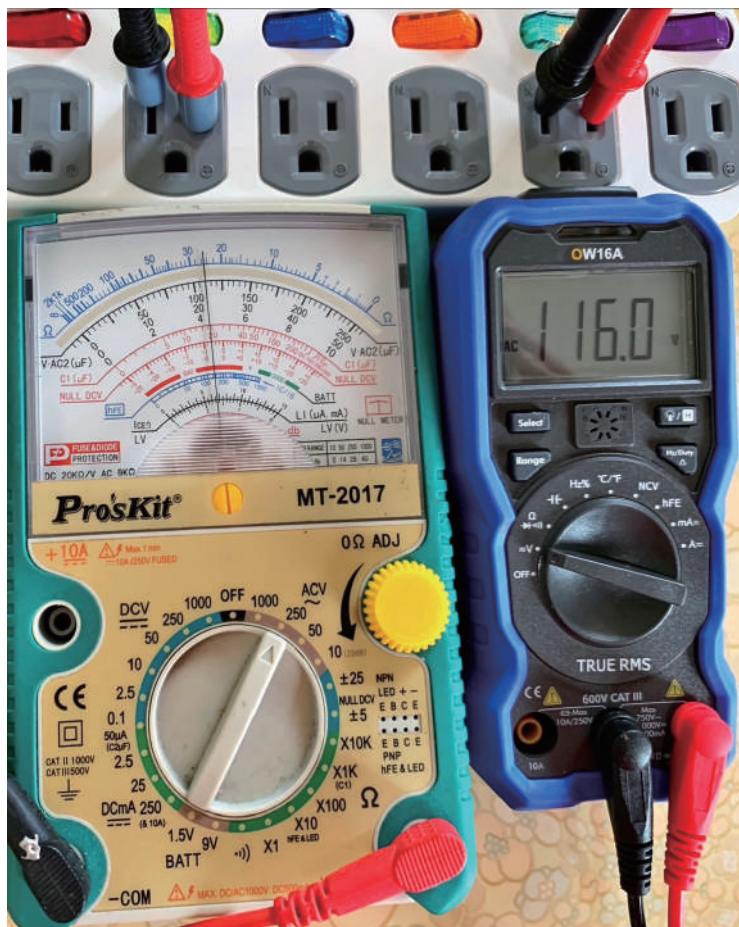
```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
Vm=160
f=60
pi=3.14
dt=0.001
#1秒來60個正弦波，1個正弦波需要1/60秒
#本例繪出兩個，所以時間取 2.1/60
t = np.arange(0, 2.1/60, 0.001)
# t為串列，其值從0到2/60，dx=0.001
y=Vm*np.sin(2*pi*f*t)#計算每一個x對應
的y值，y也是串列
plt.plot(t,y)#繪出函數圖形
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```



★ 圖 C-19

有效值的計算

圖 C-20 是用三用電表 ACV 檔位測量而得的電壓值（左邊是傳統指針式三用電表、右邊是數位顯示型電表），此稱為有效值。也就是示波器用來量測**瞬時值**，三用電表用來量測**有效值**。



★ 圖 C-20 有效值的測量，左邊是傳統指針電表、右邊是數位顯示型電表

由圖 C-16 輸出波形觀察，若直接計算這些瞬時值的平均，電壓有正有負，其平均將會是 0，所以我們不採用平均值來評估此波形的效益。因為電壓負值，僅是供電方向改變，一樣有輸出電壓，一樣有提供電能，一樣可以讓燈泡發光，所以我們另外定義**有效值**（root-mean-square，簡稱 rms），有效值的計算如下：

1. 將所有數值都先平方。（目的是去掉負號的影響）

2. 計算以上平方和。
3. 計算以上平方和的平均。
4. 計算以上平均值的開根號。(目的是抵銷平方的效果)

例如，若有資料 1,2,3,-3,-2,-1，因為資料有正有負，若單純計算其平均，則平均值為 0，但是電學的負號是方向的改變，同樣有供電，所以我們改計算其有效值。其有效值計算過程如下：

1. 將所有數值平方且相加

$$(1*1+2*2+3*3 + (-1)*(-1)+(-2)*(-2)+(-3)*(-3)) = 28$$

2. 求平均

$$28/6 = 4.6$$

3. 開根號

$$\sqrt{4.6} = 2.1$$

4. 資料 1,2,3,-3,-2,-1 的平均是 0，但其有效值是 2.1，因為有正有負的數值計算其平均值沒有意義，但有效值的計算，先將資料平方，可以去掉負號的影響，才能代表資料的有效意義，所以稱為有效值。
5. 也就是說供電是 1,2,3,-3,-2,-1V 的效果與持續供電 2.1V 的效果相同，此稱為有效值，但是直流電無法長距離傳送，長距離供電必須使用交流電。

範例 C-2b

計算 $\sin(\theta)$ 正弦波的有效值。

實習目的

所有教科書都是使用積分計算 $\sin(\theta)$ 正弦波的有效值，但是高一學生沒有學過微積分，而是國中都已是應學過 Python 程式設計，所以我們使用 Python 迴圈計算 $\sin(\theta)$ 正弦波的有效值，其值如執行結果為 $V_m / \sqrt{2}$

操作步驟

1. 鍵入以下程式。

```
import math ma #載入 math模組
PI=ma.pi #計算PI 值
print(PI) #3.14159
print(1/(2**(1/2))) #輸出1/√2=0.707106
di=0.01
s=0
i=0
while i<=2*PI:
    s=s+(ma.sin(i)**2)*di #累加每個平方值
    i=i+di
print((s/(2*PI))**(1/2)) #求平均、再開根號 0.707106
```

```
3.141592653589793
0.7071067811865475
0.7071067797088415
```

★ 圖 C-21 程式輸出結果

2. 輸出結果如圖 C-21。
3. 由輸出結果驗證 $\sin(x)$ 正弦波的 rms 值為 $V_m / \sqrt{2}$ 。

範例 C-2c

台電供電有效值的測量。

操作步驟

1. 前面圖 C-16 我們用示波器量測其 $V_m = 160$ 。
2. 使用公式計算有效值 $= 160/1.414 = 113V$
3. 請使用三用電表 ACV 電壓檔位，測試棒不用分極性，隨便插入插座，如圖 C-20，測量其 rms 值_____。

相位角(phase angle)

前面範例 C-2a，時間為 0 時，其電壓為 0，但有時候 $t=0$ 時，電壓不會為 0，如範例 C-2d 與 C-2e，其波形我們稱為超前或落後 θ 角度，其超前或落後的程度，我們通常以角度計算，其值在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 之間，我們稱此為**相位角**，請看以下範例說明。

範例 C-2d

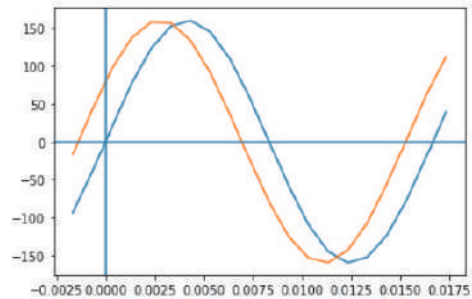
相位角的計算。

前面範例 C-2a 關於台電瞬時值的計算，我們假設時間 $t = 0$ 時電壓為 0V，所以其相位角我們取 0，但若 $t = 0$ 時電壓為 80V，請寫一程式，(1) 可以計算其相位角 (2) 可以繪出波形。

操作步驟

1. 因為 $t = 0$ 時電壓為 80V，最大值為 160，所以 $80 = 160\sin(\theta)$ ，此時 $\theta = \arcsin(80/160) = 30^\circ$
2. 以上 $\arcsin(x)$ 是 $\sin(x)$ 的反函數，請複習範例 C-1e，請鍵入以下程式。

```
import matplotlib.pyplot as plt #載入繪圖模組
import numpy as np #載入numph 模組
Vm=160
V=80
print(np.arcsin(V/Vm)*180/np.pi) #使用numpy 模組
f=60
pi=np.pi
dt=0.001
#1秒來60個正弦波，1個正弦波需要1/60秒
#本例繪出兩個，所以時間取 1.1/60
si=np.arcsin(V/Vm) #徑度量
print(si*180/pi) #度度量30
t = np.arange(-0.1/60, 1.1/60, 0.001)
# t為串列，其值從0到2/60，dx=0.001
y1=Vm*np.sin(2*pi*f*t) #計算每一個x對應的y1值，y1也是串列
y2=Vm*np.sin(si+2*pi*f*t) #計算每一個x對應的y2值，y2也是串列
plt.plot(t,y1) #繪出函數圖形，藍色
plt.plot(t,y2) #繪出函數圖形，橘色
plt.axhline(y=0) #繪出x軸
plt.axvline(x=0) #繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```



★ 圖 C-22 橘紅色 y_2 超前藍色 y_1 30°

3. 以上程式輸出結果如圖 C-22，請留意 $t=0$ 時，電壓為 $80V$ ，要 $t=0$ 時，電壓就有 $80V$ ，表示信號要提早出發，所以稱為「超前」。
4. 由圖 C-22 可知，因為 x 軸是時間軸，橘紅色的波形比藍色波形提早出發，此稱為波形超前，且超前 30° ，也就是 $t=0$ ，相位角是 30° 。

範例 C-2e

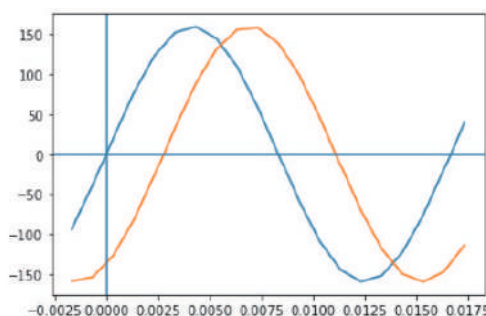
相位角的計算二。

前面範例 C-2a 關於台電瞬時值的計算，我們假設時間 $t=0$ 時電壓為 $0V$ ，所以其相位角我們取 0 ，但若 $t=0$ 時電壓為 $-80\sqrt{3}V$ ，請寫一程式，(1) 可以計算其相位角 (2) 可以繪出波形。

操作步驟

1. 因為 $t=0$ 時電壓為 $-80\sqrt{3}V$ ，最大值為 160 ，所以 $-80\sqrt{3} = 160\sin(\theta)$ ，此時 $\theta = \arcsin(-80\sqrt{3}/160) = -60^\circ$
2. 本例程式同範例 C-2d，但是修改 V_m 如下：

$$V = -80 * 1.732$$
3. 程式執行結果如圖 C-23，請留意 $t=0$ 時，電壓為 $-80\sqrt{3}V$ ， $t=0$ 時，電壓就 $-80\sqrt{3}$ ，表示信號要落後出發，所以稱為「落後」。



★ 圖 C-23 本例橘紅色 y_2 落後藍色 y_1 60°

4. 由圖 C-23 可知，因為 x 軸是時間軸，橘紅色的波形比藍色波形落後出發，此稱為波形落後，且落後 60° ，也就是說 $t=0$ 時的相位角是 -60° 。

```

import matplotlib.pyplot as plt #載入繪圖 matplotlib.pyplot 模組，才能繪圖
import numpy as np #載入numpy 模組，繪圖用數值模組
print(np.pi) #輸出pi值
si = np.arange(0, np.pi/2, 0.1) #產生 0到pi/2數列, 不含pi/2
y = np.tan(si) #逐一產生sin(x)正弦波值
print(si)
plt.plot(si,y)#繪出正弦波

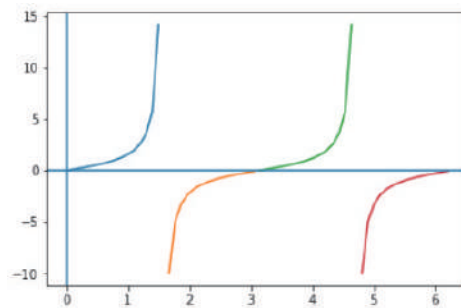
si = np.arange(np.pi/2+0.1, np.pi, 0.1) #產生 pi/2+0.1到pi數列
y = np.tan(si) #逐一產生sin(x)正弦波值
print(si)
plt.plot(si,y)#繪出正弦波

si = np.arange(np.pi, 3*np.pi/2, 0.1) #產生 pi到3*pi/2數列, 不含3*pi/2
y = np.tan(si) #逐一產生sin(x)正弦波值
print(si)
plt.plot(si,y)#繪出正弦波

si = np.arange(3*np.pi/2+0.1, 2*np.pi, 0.1) #產生 3*pi/2+0.1到2*pi數列
y = np.tan(si) #逐一產生sin(x)正弦波值
print(si)
plt.plot(si,y)#繪出正弦波

plt.axhline(y=0)#繪出y軸
plt.axvline(x=0)#繪出x軸
plt.show()#於螢幕輸出圖形

```



★ 圖 C-24 程式執行結果

4. 執行結果如圖 C-24，由圖可知其週期為 π （大約為 3.14）。

C-3 e與指數函數

因為第五章直流暫態的實驗結果與 e 與指數函數 $f(x) = e^x$ 有關，所以我們先介紹 e 與指數函數的圖形。

範例 C-3a

說明 $e = 2.718$ 的由來。

實習步驟

工程與科學的指數與對數函數，通常不是以 2 或 10 為底，而是以 e 為底，在此簡單闡述如下：

1. 假設借款金額為一元，年利率為 100%，每年複利一次，則一年後的本利和為 2 元。

$$1 \times (1+1)^1 = 2$$

2. 假設借款金額為一元，年利率為 100%，每月複利一次，則一年後的本利和為 2.613。

$$1 \times \left(1 + \frac{1}{12}\right)^{12} = 2.613$$

3. 假設借款金額為一元，年利率為 100%，每日複利一次，則一年後的本利和為 2.714。

$$1 \times \left(1 + \frac{1}{365}\right)^{365} = 2.714$$

4. 假設借款金額為一元，年利率為 100%，每秒複利一次，則一年後本利和為 2.718。

$$1 \times \left(1 + \frac{1}{365 \times 24 \times 60 \times 60}\right)^{365 \times 24 \times 60 \times 60} = 2.718$$

5. 以上計算，請鍵入以下程式，觀察執行結果。

```

for i in range(0,6+1):
    t1=10**i
    t2=1+1/t1
    e=t2**t1
    print("i=%d,t2=%lf,t1=%d,e=%f"%(i,t2,t1,e))
print(e)#2.7182804690957534

```

以上執行結果如下：

```

i=0,t2=2.000000,t1=1,e=2.000000
i=1,t2=1.100000,t1=10,e=2.593742
i=2,t2=1.010000,t1=100,e=2.704814
i=3,t2=1.001000,t1=1000,e=2.716924
i=4,t2=1.000100,t1=10000,e=2.718146
i=5,t2=1.000010,t1=100000,e=2.718268
i=6,t2=1.000001,t1=1000000,e=2.718280
2.7182804690957534

```

6. 細菌的繁殖、或電容、電感的充放電等，細菌與電子的數量都非常龐大，這些非常龐大物件的成長現象，都要用 e 來解釋才能理解。也就是數量非常龐大的物件，若其一年「平均」成長 2 倍，則一年後總數量會成長為 2.718 倍，而不是 2 倍。

範例 C-3b

繪製指數函數 $f(x) = e^x$ 圖形。

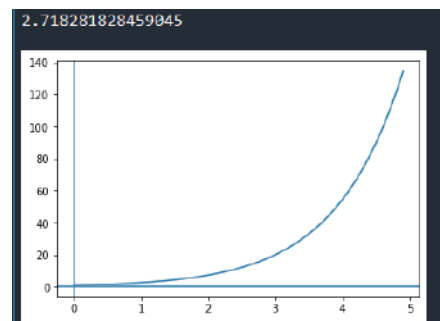
實習步驟

1. 請鍵入以下程式，觀察指數函數 $f(x) = e^x$ 圖形。

```

import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
print(np.e) #輸出e=2.718281828459045
x = np.arange(0, 5, 0.1)
# x為串列，其值從0到5，dx=0.1
y=(np.e)**(x) #計算每一個x對應的y值，y也是串列
plt.plot(x,y) #繪出函數圖形
plt.axhline(y=0) #繪出x軸
plt.axvline(x=0) #繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形

```



✦ 圖 C-25 $f(x) = e^x$ 圖

2. 以上程式執行結果，如圖 C-25。
3. 圖 C-25 是 $f(x)=e^x$ 的圖形，但這並非電學所要的，我們電學需要 $f(x)=e^{-x}$ ，指數為負表示整個函數倒數，所以此函數為 $f(x)=1/e^x$ ，以下我們寫程式觀察此函數圖形。

範例 C-3c

請寫一程式輸出 $x=0,1,2,3,4,5,6,7$ 的指數函數 $f(x)=e^{-x}$ 值。

實習步驟

1. 請鍵入以下程式，觀察指數函數 $f(x)=e^{-x}$ 的輸出結果。

```
import numpy as np #載入numpy 模組
print(np.e) #輸出e=2.718281828459045
x = np.arange(0, 8, 1)
# x為串列，其值從0到7，dx=1
y=(np.e)**(-x)#計算每一個x對應的y值，y也是串列
for i in range(8):
    print(x[i],end=" ")
    print("{:7.3f}".format(y[i]))#輸出佔七格，小數取3位
```

```
2.718281828459045
0    1.000
1    0.368
2    0.135
3    0.050
4    0.018
5    0.007
6    0.002
7    0.001
```

★ 圖 C-26 $f(x)=e^{-x}$ 的輸出結果

2. 以上程式執行如圖 C-26。
3. 由圖 C-26 的結果，我們發現 $e^{-1}=\frac{1}{e}=0.368$ ， $e^{-2}=\frac{1}{e^2}=0.135$ ， $e^{-3}=0.05$ ， $e^{-4}=0.018=0.02$ ， $x=5$ 之後， e^{-x} 就非常小，我們就說其值趨近於 0，這些值要記起來，這樣本章的計算才會快，以上運算將是本章重點。

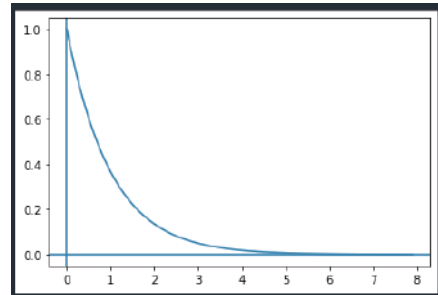
範例 C-3d

寫程式繪出 $x=0,1,2,3,4,5$ 的指數函數 $f(x)=e^{-x}$ 圖形。

操作步驟

1. 請鍵入以下程式，觀察指數函數 $f(x)=e^{-x}$ 圖形。

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
print(np.e) #輸出e=2.718281828459045
x = np.arange(0, 8, 0.1)
# x為串列，其值從0到8，dx=0.1
y=(np.e)**(-x)#計算每一個x對應的y值，y也是串列
plt.plot(x,y)#繪出函數圖形
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```



★ 圖 C-27

2. 以上程式執行結果如圖 C-27。由圖 C-27，我們發現指數函數 $f(x)=e^{-x}$ ， x 大於等於 5 以後就趨近 0，此即為本章關鍵重點。

範例 C-3e

寫程式輸出 $x = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ 的指數函數 $f(x)=1-e^{-x}$ 之值。

操作步驟

1. 請鍵入以下程式，觀察指數函數 $f(x)=1-e^{-x}$ 的輸出結果。

```
import numpy as np #載入numpy 模組
print(np.e) #輸出 2.718281828459045
e=np.e
x = np.arange(0, 8, 1)
# x為串列，其值從0到7，dx=1
y=1-e**(-x)#計算每一個x對應的y值，y也是串列
for i in range(8):
    print(x[i],end=" ")
    print("{:7.3f}".format(y[i]))#輸出佔七格，小數取3位
```

```
2.718281828459045
0  0.000
1  0.632
2  0.865
3  0.950
4  0.982
5  0.993
6  0.998
7  0.999
```

★ 圖 C-28 程式執行結果

2. 以上程式執行結果如圖 C-28，我們發現 $x \geq 5$ 以後，其值接近 1。
3. 以上 $x=1, f(x)=0.632; x=2, f(x)=0.86; x=3, f(x)=0.95; x=4, f(x)=0.98; x=5, f(x)=0.99$ ，這些值要記起來，這樣本章的計算才會快。

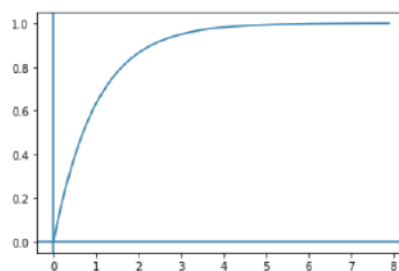
範例 C-3f

寫程式繪出 $x = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ 的指數函數 $f(x) = 1 - e^{-x}$ 圖形。

操作步驟

1. 請鍵入以下程式，觀察指數函數 $f(x) = 1 - e^{-x}$ 圖形。

```
import matplotlib.pyplot as plt
#載入繪圖模組
import numpy as np #載入numpy 模組
print(np.e) #輸出e=2.718281828459045
x = np.arange(0, 8, 0.1)
# x為串列，其值從0到8，dx=0.1
y=1-(np.e)**(-x)#計算每一個x對應的y值，y也是串列
plt.plot(x,y)#繪出函數圖形
plt.axhline(y=0)#繪出x軸
plt.axvline(x=0)#繪出y軸
plt.show() #於視窗輸出圖形
```



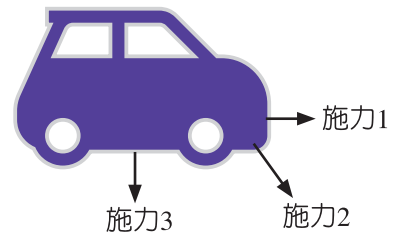
★ 圖 C-29 $f(x) = 1 - e^{-x}$ 圖形

2. 以上程式執行結果如圖 C-29。由圖 C-29，我們發現指數函數， x 大於等於 5 以後就趨近 1，此即為本章重點。

C-4 向量運算

純量(sealar)與向量(vector)

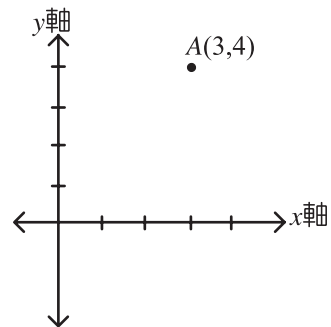
只需要數值的大小來描述的量，稱為**純量**，例如，溫度、體重、長度等物理量。有些則與方向有關，此稱為**向量**，例如，施力，重力、電力、磁力等物理量。以人類拉車的施力為例，就有很多方向，如圖 C-30。現在要讓車子移動，不只要施力，還要考慮方向、方向若錯誤，車子也不會移動，例如施力 1 與 2，車子都可移動，但施力 3，再大的施力，車子也不會移動，所以，與施力有關的物理量——施力、重力、電力、磁力等，都需要大小與方向，此稱為**向量**。以下我們將介紹向量的表示與向量的運算，後續介紹交流電，就能依此運算規則運算。



★ 圖 C-30

向量的表示

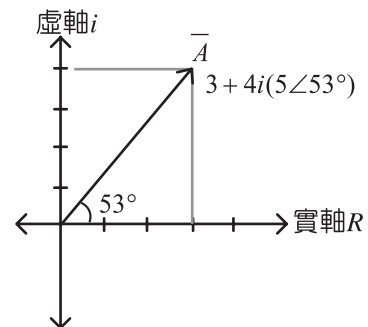
國中數學曾經定義平面的二維座標系統，水平線為 x 軸，垂直線為 y 軸，點的標示為 $A(x,y)$ ，所以座標以 $(3,4)$ 來標示，如圖 C-31。現在我們要強調往 x 軸右邊 3 單位、往 y 軸上面 4 單位的，施力方向為由座標原點 $(0,0)$ 往 $(3,4)$ 方向拉，我們稱此為**向量** $\vec{A}(3,4)$ ，但為了方便後續向量的運算，我們並不以此種方式表示，而是以 $\vec{A}=3+4i$ （直角坐標）或 $\vec{A}=5\angle 53^\circ$ （極座標）表示， $\vec{A}$ 的上面加上直線，強調此為**向量**，且用一個簡單符號加號 (+) 或角度符號 ($\angle$) 連結兩個數字，我們稱為**複數**（complex number，代表兩個數字的連結）。



★ 圖 C-31

複數平面

在複數的領域裡，我們將水平線改稱實軸，以 R 表示；垂直線改稱虛軸，以 i 表示，如圖 C-32。但為了能滿足複數的運算，我們定義， $i*i=-1$ ，因為 $i=\sqrt{-1}$ 是不存在的數，所以我們定義此 i 為**虛**



★ 圖 C-32

數 (imaginary number)，有別以 1,2,3,4 等實際存在的數字（因為任何實數的平方都是正數，例如， $2^2=4$ ， $(-2)^2=4$ ，都是正數， $\sqrt{4}=2$ 與 -2 ，所以 $i*i=-1$ 不存在，因為不存在，所以稱為**虛數**）。雖然 i 不存在，但卻可以協助向量的加、減、乘、除等運算，以下是 i 的定義與次方運算結果：

$$i = \sqrt{-1}$$

$$i^2 = -1$$

$$i^3 = i^2 \cdot i = -i$$

$$i^4 = i^2 \cdot i^2 = 1$$

$$i^5 = i^4 \cdot i = i$$

本節後面會介紹，每一次「 $*i$ 」代表向左旋轉 90° 。

複數的表示

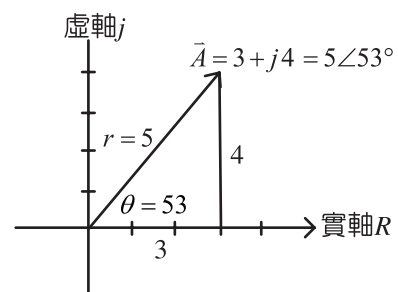
複數的表示有**直角坐標**的 $\bar{A} = 3 + 4i$ 與**極座標**的 $\bar{A} = 5 \angle 53^\circ$ ，分別說明如下：

直角坐標(rectangular coordinates)

直角坐標是將座標原點往座標 (x,y) 的施力以 $x + yi$ 表示。例如由座標 $(0,0)$ 往座標 $(3,4)$ 的向量表示為 $3 + 4i$ ，但是在電學領域裡，此 i 剛好與電流 i 相同，爲了不混淆，所以改以 j 表示，且將 j 寫在前面所以改寫為 $3 + j4$ （有些書把 j 寫在後面，採用 $3 + 4j$ ，例如 Python 程式語言使用 $3 + 4j$ ）。

極座標(polar coordinates)

極座標是以長度 r （與原點的長度）與角度 θ （與實軸 R 的角度）表示，中間以 $\angle$ 連結，符號是 $r \angle \theta$ ，例如 $3 + j4$ 如圖 C-33，其長度為 5，角度為 53° ，所以我們以 $5 \angle 53^\circ$ 表示（ 53° 是特別角，邊長比是 3 : 4 : 5）。由直角坐標轉極座標公式如下：



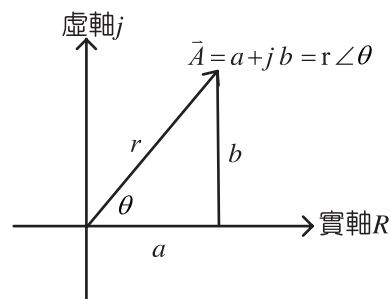
★ 圖 C-33

$\vec{A} = a + jb$ 令等於 $r\angle\theta$ ，則

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

以上 r, θ 如圖 C-34。



★ 圖 C-34

以上三角函數我們用 Python 程式輔助計算如下，執行結果如圖 C-35。

```
import math as ma
pi=ma.pi
print(pi) #3.14159
a=3
b=4
r=(a*a+b*b)**(1/2)
print(r) #5
si=ma.atan2(b,a)#徑度量，得到對應θ
print(si) #0.927
si=si*180/pi #轉為度度量
print(si) #53
print(" /A=%d∠%d" % (r,si)) #/A=5∠53
```

```
3.141592653589793
5.0
0.9272952180016122
53.13010235415598
/A=5∠53
```

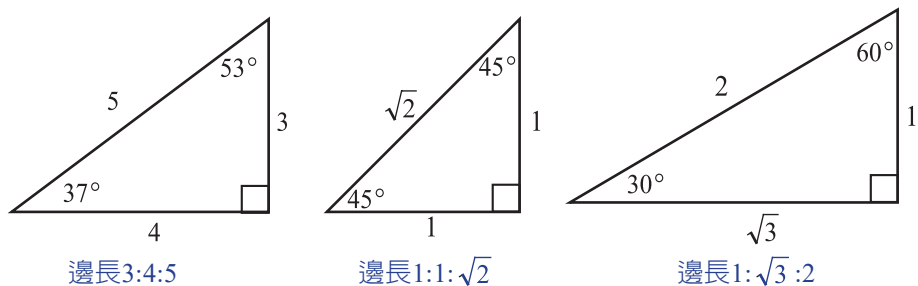
★ 圖 C-35

補充說明

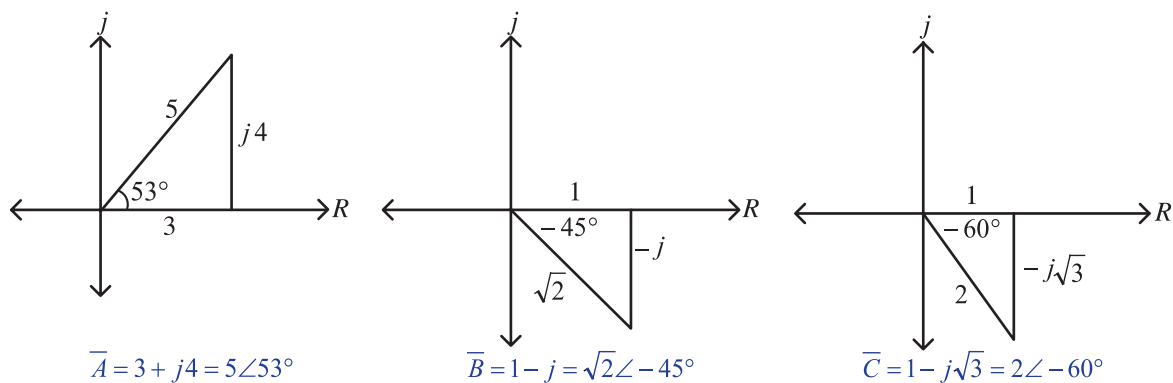
- 前面 4-1 節，我們使用 $\text{atan}(p)$ 反函數求角度，此 p 是 y/x 的值，且傳回值是 $-2\pi/2 \sim \pi/2$ ，但是極座標的轉換要使用 $\text{atan2}(y,x)$ ，因為此函式要求傳入一個直角坐標 (y,x) ，且傳回 $-\pi \sim \pi$ 的角度值，此一函數才是轉極座標的函式。

特別邊長比轉極座標

以上直角坐標轉極座標的運算，需要使用 $\text{atan2}()$ 反函數求角度，但考試不能用計算機，所以會選用特別角，因為在直角三角形裡，邊長比例若是 $3:4:5$ 、 $1:1:\sqrt{2}$ 、或是 $1:\sqrt{3}:2$ ，這些特殊邊長比的直角三角形，有特殊的角度對應，如圖 C-36，例如， $3 + j4 = 5\angle 53^\circ$ ， $1 - j1 = \sqrt{2}\angle -45^\circ$ ， $1 - j\sqrt{3} = 2\angle -60^\circ$ ，請留意向量繪圖時，可以先平移，如圖 C-37。



★ 圖 C-36



★ 圖 C-37

自我練習

- 請將以下表 C-5 以直角坐標表示的向量在複數平面上標示，且寫出其極座標。

► 表 C-5 座標轉換練習

題號	直角坐標	極座標	題號	直角坐標	極座標
1.	$-3 + j4$		6.	$j3$	
2.	$-3 - j4$		7.	$-j3$	
3.	$3 - j4$		8.	$2 + j2$	
4.	4		9.	$1 + j\sqrt{3}$	
5.	-4		10.	$2\sqrt{3} - j2$	

極座標轉直角坐標

極座標轉直角坐標公式如下：

$$A = r\angle\theta = a + jb$$

$$a = r\cos(\theta) \quad (\text{請留意 } a \text{ 是 } \theta \text{ 臨邊})$$

$$b = r\sin(\theta) \quad (\text{請留意 } b \text{ 是 } \theta \text{ 對邊，且善用特別角的邊長關係})$$

例如， $4\angle 60^\circ = a + jb$ 則

$$a = 4\cos 60^\circ = 4 \times \frac{1}{2} = 2$$

$$b = 4\sin 60^\circ = 4 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 2\sqrt{3}$$

以上三角函數，直接用 Python 程式計算如下：

```
import math as ma
pi=ma.pi
r=5
si=53 #度度量
#人類採用度度量，但電腦採用徑度量
si=si/180*pi#轉為徑度量
a=round(r*ma.cos(si))#四捨五入
b=round(r*ma.sin(si))#四捨五入
print(a,b)
print(" /A=%d+%dj" % (a,b))
```

$$\begin{matrix} 3 & 4 \\ /A=3+4j \end{matrix}$$

★ 圖 C-38

2. 請將以下表 C-6 以極座標表示的向量在複數平面上標示，且寫出其直角坐標，考試沒有計算機，以下都是特別角，請善用特別角的邊長關係。

► 表 C-6 座標轉換練習

題號	直角坐標	極座標	題號	直角坐標	極座標
1.	$5\angle 53^\circ$		5.	$6\angle 120^\circ$	
2.	$5\angle -53^\circ$		6.	$6\angle -60^\circ$	
3.	$5\angle 143^\circ$		7.	$8\angle 45^\circ$	
4.	$5\angle 127^\circ$		8.	$8\angle 135^\circ$	

複數的運算

以上我們已經介紹兩種複數的表示，分別是 $\bar{A}=3+j4$ （直角坐標）或 $\bar{A}=5\angle 53^\circ$ （極座標），現在則要分別介紹直角坐標與極座標兩個複數的加、減、乘、除等運算規則。

直角坐標

假設兩個複數分別是 $\bar{A}=a+jb$ ， $\bar{B}=c+jd$ 則以上兩個複數的加、減、乘、除運算規則分別如下：

- (1) $\bar{A} + \bar{B} = (a + jb) + (c + jd) = (a + c) + j(b + d)$
- (2) $\bar{A} - \bar{B} = (a + jb) - (c + jd) = (a - c) + j(b - d)$
- (3) $\bar{A}\bar{B} = (a + jb)(c + jd) = ac + jad + jbc - bd(j^2 = -1)$
- (4) $\bar{A}/\bar{B} = \frac{a + jb}{c + jd} = \frac{(a + jb)(c - jd)}{(c + jd)(c - jd)}$ （ $c - jd$ 稱為 $c + jd$ 的共軛複數，用來

消除分母的虛部，讓分母變為實數）

$$= \frac{ac + bd}{(c^2 + d^2)} + j \frac{bc - ad}{(c^2 + d^2)}$$

以上計算，有點耗時，所幸，現在電腦非常普及，以上公式以 Python 程式完成如下：

```
def add(A,B):
    return (A[0]+B[0],A[1]+B[1])
def sub(A,B):
    return (A[0]-B[0],A[1]-B[1])
def mul(A,B):
    a=A[0];b=A[1]
    c=B[0];d=B[1]
    return (a*c-b*d,a*d+b*c)
def div(A,B):
    a=A[0];b=A[1]
    c=B[0];d=B[1]
    e=c*c+d*d
    return ((a*c+b*d)/e, (b*c -a*d)/e)
A=[6,8] #list A[0]=6;A[1]=8,代表6+8j
```

```

B=[4,-3] #list B[0]=4;B[1]=-3,代表4-j3
C=add(A,B)
print(C)
print("%d+j%d"%(C[0],C[1])) #10+j5
C=sub(A,B)
print(C)
print("%d+j%d"%(C[0],C[1])) #2+j11
C=mul(A,B)
print(C)
print("%d+j%d"%(C[0],C[1]))#48+j14
C=div(A,B)
print(C)
print("%d+j%d"%(C[0],C[1])) #0+j2

```

```

(10, 5)
10+j5
(2, 11)
2+j11
(48, 14)
48+j14
(0.0, 2.0)
0+j2

```

✦ 圖 C-39

自我練習

1. 假設 $\bar{A}=3+j4$ ， $\bar{B}=2-j$ ，請在複數平面標示此複數，求此兩個複數加、減後的結果，且標示相加與相減結果，使用直線連接這四個點，觀察其關係。(提示：本題希望學生體會平行四邊形的向量相加或相減)
2. 假設 $\bar{A}=3+j4$ ， $\bar{B}=j$ ，請在複數平面標示此複數 $\bar{A}$ 、計算兩個複數相乘除結果，標示兩個複數乘、除的結果。(提示：本題 $\bar{B}=1\angle 90^\circ$ ，請觀察角度的變化)
3. 假設 $\bar{A}=3+j4$ ， $\bar{B}=1+j$ ，請在複數平面標示此複數 $\bar{A}$ 、計算兩個複數相乘除結果，標示兩個複數乘、除的結果。(提示：本題 $\bar{B}=\sqrt{2}\angle 45^\circ$ ，請觀察大小與角度的變化)

極座標

假設 $\bar{A}=a\angle b$ ， $\bar{B}=c\angle d$ 則以上兩個相量的加、減、乘、除運算規則分別如下：

- (1) $\bar{A}+\bar{B}$ 與 $\bar{A}-\bar{B}$ 極座標的加減法並沒有公式，只能先將極座標化為直角坐標，然後相加減，再轉為極座標，以上過程，請看以下 Python 程式。
- (2) $\bar{A}\bar{B}=(a\angle b)(c\angle d)=ac\angle(b+d)$ (長度相乘，角度相加)
- (3) $\frac{\bar{A}}{\bar{B}}=\frac{a\angle b}{c\angle d}=\frac{a}{c}\angle(b-d)$ (長度相除，角度相減)

以上加、減、乘、除的 Python 程式如下：

```
import math as ma
pi=ma.pi
def add(A,B):
    #從列表取資料
    m=A[0];n=A[1]*pi/180
    p=B[0];q=B[1]*pi/180
    #轉直角坐標
    a=m*ma.cos(n);b=m*ma.sin(n)
    c=p*ma.cos(q);d=p*ma.sin(q)
    #相加
    e=a+c;f=b+d
    #轉極座標
    r=(e*e+f*f)**(1/2)
    si=ma.atan2(f,e)#徑度量
    si=round(si*180/pi) #轉為度度量
    return(r,si)
def sub(A,B):
    m=A[0];n=A[1]*pi/180
    p=B[0];q=B[1]*pi/180
    #轉直角坐標
    a=m*ma.cos(n);b=m*ma.sin(n)
    c=p*ma.cos(q);d=p*ma.sin(q)
    #相減
    e=a-c;f=b-d
    #轉極座標
    r=(e*e+f*f)**(1/2)
    si=ma.atan2(f,e)#徑度量
    si=round(si*180/pi) #轉為度度量
    return(r,si)
def mul(A,B):
    a=A[0];b=A[1]
    c=B[0];d=B[1]
    #長度相乘
    e=a*c
    #角度相加
    f=b+d
    return(e,f)
def div(A,B):
    a=A[0];b=A[1]
    c=B[0];d=B[1]
```

```
(5.0, -37)
相加：/C=5∠-37
(5.0, 37)
相減：/C=5∠37
(12, -90)
相乘：/C=12∠-90
(1.3333333333333333, 90)
相除：/C=1∠90
```

★ 圖 C-40

```

#長度相除
e=a/c
#角度相減
f=b-d
return(e,f)
A=[4,0]#list A[0]=4;A[1]=0
B=[3,-90]
C=add(A,B)
print(C)
print("相加：/C=%d∠%d" % (C[0],C[1]))

C=sub(A,B)
print(C)
print("相減：/C=%d∠%d"%(C[0],C[1]))

C=mul(A,B)
print(C)
print("相乘：/C=%d∠%d"%(C[0],C[1]))

C=div(A,B)
print(C)
print("相除：/C=%d∠%d"%(C[0],C[1]))

```

由以上直角座標與極座標的加、減、乘、除運算，我們發現各有優缺點，直角坐標擅長進行加減法運算，極座標擅長乘除運算，也就是往後我們若要進行加減法，那就要以直角坐標表示，若要進行乘除法，那就以極座標表示，這樣才能事半功倍。

自我練習

請分別使用人工與電腦求解表 C-7 複數的運算練習。

► 表 C-7 複數的運算練習

題號	題目	求 $\bar{Z}$ (分母要實數)	求 $\bar{Z}$ 極座標
1	$\bar{Z} = (3+j)*(3-j)$		
2	$\bar{Z} = 1/j$		
3	$\bar{Z} = 1/(3-j4)$		
4	$\bar{Z} = 1 + 1/j + 1/-j$		
5	$\bar{Z} = 1 + 1/j2 + 1/-j$		
6	$\bar{Z} = (1+j4) + (2-j)$		
7	$\bar{Z} = (4+j3)/(3+j4)$		

特殊角極座標的加減法

向量若以極座標表示，若要進行加減法，原則上要先轉為直角坐標，然後相加減，再轉回極座標，但若是兩個向量相差 90° 或 180° ，則可使用作圖法求解，請看以下範例說明。

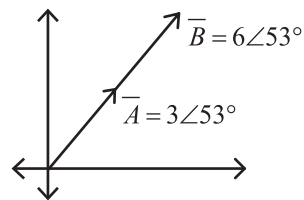
範例 C-4a

請計算以下極座標的運算：

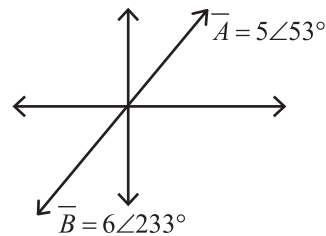
1. $\vec{A} = 3\angle 53^\circ$ ， $\vec{B} = 6\angle 53^\circ$ ，求 $\vec{A} + \vec{B}$ ？
2. $\vec{A} = 5\angle 53^\circ$ ， $\vec{B} = 6\angle 233^\circ$ ，求 $\vec{A} + \vec{B}$ ？
3. $\vec{A} = 3\angle 53^\circ$ ， $\vec{B} = 5\angle 53^\circ$ ，求 $\vec{A} - \vec{B}$ ？
4. $\vec{A} = 3\angle 0^\circ$ ， $\vec{B} = 4\angle 90^\circ$ ，求 $\vec{A} + \vec{B}$ ？

解

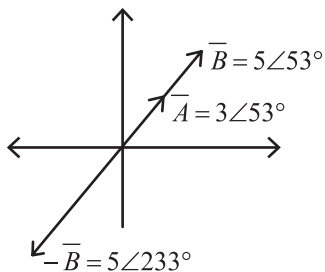
1. $A = 3\angle 53^\circ$ ， $B = 6\angle 53^\circ$ ，圖解如圖 C-41，兩個方向相同，可直接相加，所以是 $9\angle 53^\circ$ 。
2. $A = 5\angle 53^\circ$ ， $B = 6\angle 233^\circ$ ，圖解如圖 C-42，兩個方向相反，可直接相減（施力反向視為抵銷），所以是 $1\angle 233^\circ$ 。
3. $A - B$ 可視為 $A + (-B)$ ， $-B$ 可視為改變 180° ，圖解如圖 C-43，兩個方向相反，可直接相減，所以是 $2\angle 233^\circ$ 。
4. $A = 3\angle 0^\circ$ ， $B = 4\angle 90^\circ$ ，圖解如圖 C-44，因為向量可平移，所以將 B 向量平移，平移後為 $37^\circ - 53^\circ - 90^\circ$ 特別角，所以合向量是 $5\angle 53^\circ$ 。



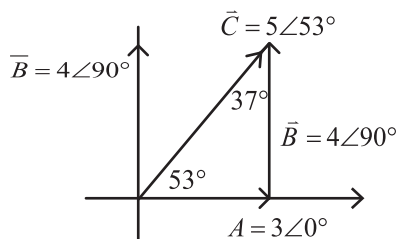
★ 圖 C-41



★ 圖 C-42



★ 圖 C-43



★ 圖 C-44

自我練習

1. 求解以下向量的運算。

(1) $A = 1\angle 0^\circ$ ， $B = 1\angle -90^\circ$ ，求 $A + B =$ _____。

(2) $A = 1\angle 0^\circ$ ， $B = 1\angle -90^\circ$ ，求 $A - B =$ _____。

(3) $A = 1\angle 0^\circ$ ， $B = 2\angle 180^\circ$ ，求 $A - B =$ _____。

(4) $A = 1\angle 90^\circ$ ， $B = 2\angle -90^\circ$ ，求 $A + B =$ _____。

(5) $A = 1\angle 0^\circ$ ， $B = \sqrt{3}\angle -90^\circ$ ，求 $A - B =$ _____。

Python與複數

以上是基本電學教材關於複數的運算，現代的 Python 語言的資料型態已經有複數，例如，可以直接使用變數表示複數

```
a=3+4j
b=2-1j #j 前的1不能省略
```

有了變數，就可以直接進行加、減、乘、除、轉為極座標等運算，請鍵入以下程式，寫出執行結果。

```
import math,cmath #載入math,cmath模組
a=3+4j
b=2-1j #j 前的1不能省略
c1=a+b
print("c1:",c1)#_____
c2=a-b
print("c2:",c2)#_____
c3=a*b
print("c3:",c3)#_____
c4=a/b
print("c4:",c4)#_____
```

§ 直角坐標轉極座標

Python 有直角坐標轉極座標模組 `cmath`，請鍵入以下程式，寫出執行結果。

```
import cmath ,math
pi=math.pi
print(pi) #3.14159
Z=3+4j
r,si=cmath.polar(Z)#轉極座標
si=math.degrees(si) #轉為度度量
print(" /Z=%d∠%d" % (r,si)) #/A=5∠53
```

§ 係數為變數的複數

Python 的複數的係數若要以變數表示，則要以 `complex()` 函數轉換，例如：

```
a=3;b=-4
Z=complex(a,b)
print(Z)
```

也就是寫成以下樣式，Python 無法辨識

```
a=3;b=-4
Z=a-bj #錯誤的表示法
```

以上複數的計算，對於往後串、並聯交流電路的阻抗計算非常方便。這樣才能聚焦基本電學的學習，而不是同時學數學也學基本電學。

§ 相量(phasor)與向量

直流電路的元件只有電阻，通過電阻的電流與輸入的電壓沒有任何相位差。但在交流電路裡，交流電路新增電容與電感，通過電容、電感的電流與輸入電壓將會有相位角的落差，此一相位角的落差剛好可以使用向量計算，因為是處理相位角的向量計算，所以在電學領域裡，我們將「向量」改稱為「相量」，強調此為相位角的計算，但也都遵守向量運算規則。

C-5 配電盤

範例 C-5a

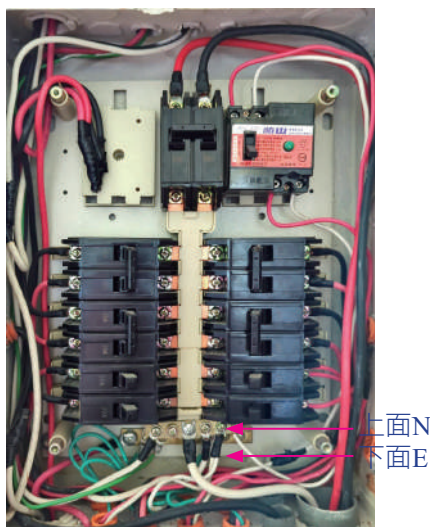
配電盤 (distribution panel) 的認識與量測。

操作步驟

1. $1\phi 3W$ 配電盤如圖 C-45a，拆開鐵片如圖 C-45b，內部電路示意圖，如圖 C-46。A、B 兩點的導線通常是紅色與黑色，稱為火線，N 點導線通常是白色，稱為中性線，E 點導線通常是綠色，直接埋到地底下，稱為地線。其中 A、B 兩條火線與中性線 N 連接到電力公司，E 點的地線，直接連接埋在牆面與地裡的鋼筋，直通大地。（圖 C-45b 綠色的地線 E 點，與白色的中性線 N 點，是立體上下排列，地線在下面如圖 C-45c）



★ 圖 C-45a 配電盤外觀圖



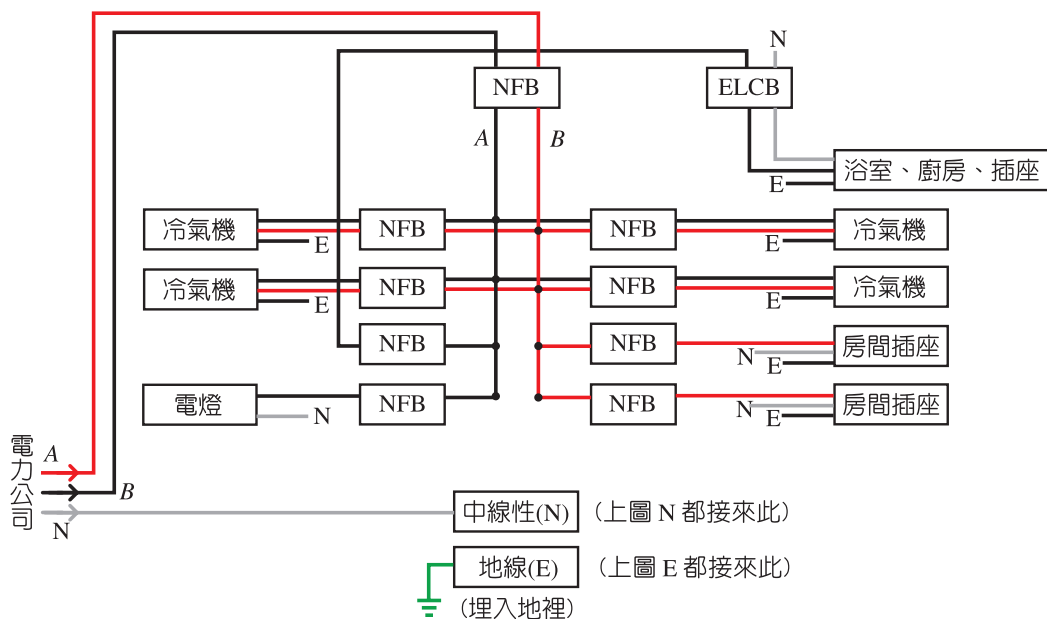
★ 圖 C-45b $1\phi 3W$ 配電盤實體圖



★ 圖 C-45c N 與 E 接點放大圖

2. 請用電壓檔，量測圖 C-45b 的 A、E 兩點電壓_____，B、E 兩點電壓_____，N、E 兩點電壓_____，量測 A、B 兩點電壓_____，理論值是 220V，所以直接經由無熔絲開關送到每一台冷氣。
3. 量測 A、N 與 B、N 的電壓_____，這兩條線理論值都是 110，配線時要平均分給家裡的電器，這樣電力系統才會穩定。
4. 無熔絲開關將於 2-5 節介紹，額定電流是 20A，所以每個迴路可以供應額定功率 $P = IV = 20 \times 110 = 2200W$ ，若超過，無熔絲開關就會跳開。

5. 廚房通常是用電量較大的房間，所以單獨使用一個無熔絲開關。每個無熔絲開關都標注 20A，表示額定電流是 20A，依據功率公式 $P = IV = 20 \times 110 = 2200\text{W}$ ，表示每一個回路僅能同時使用 2200W。



★ 圖 C-46 1φ3W 配電盤電路示意圖

6. 浴室、廚房、陽台插座都要加裝漏電斷路器 (earth leakage circuit breaker，簡稱 ELCB)，因為以上三個位置都有水，若電線供電途中，裸露的電線有浸泡到水，或人員觸到裸露的電線，都會產生漏電，漏電斷路器可以馬上切斷供電，這樣才能保障人員安全。漏電斷路器原理是此元件偵測去程與回程線路的電流是否一致，若不一致，表示有電流流失。電線或電器為什麼會漏電呢？例如，浴室、陽台、廚房都很容易漏水、若火線被水淹，就會有部分電流流進大地，人類碰到有電的水，電也會經由人類進入大地（例如，人類赤腳站著小便，用小便噴向火線，電也會經由人類流回大地；或人類碰到裸露的火線，電也會經由人類流進大地），只要部份電流有提早流進大地，就會造成流出去的與流回來的電流不相等，漏電斷路器就是時時刻刻監測流進與流出的電流是否相同，只要流回去的電，不等於流出的電，表示漏電，此時漏電斷電器就會發揮作用，立刻斷電，才不會造成人員傷亡。因為只要電線進水，部分電荷就會提早流進大地，這樣就造成流回去的

電流不等於流出去的電流，這也就是下雨後，陽台的插座容易跳電，或者浴室插座不小心噴到水，都很容易跳電。

7. 為什麼要有接地線？過去的洗衣機、冰箱、烤箱都附有一條綠色接電線，都有交代此地線要埋進地裡，現在的家電都改為有地線的三線式插頭，此電線有連通配電盤地線，也流進大地，此地線主要目的就是預防漏電時，可將這些漏電收集起來，直接流進大地。因為機殼可能因為碰撞、或老鼠咬破火線，導致機殼接觸裸露火線，此時機殼就帶電了，若機殼有使用接地線，則這些電可經由地線先接地，這樣使用者碰觸漏電的機殼才不會觸電。但是有些惡質水電工，有可能為了省事省錢，沒有連接此地線大地，請拆開您家的電源插座，仔細檢查此地線有沒有實際連接。

補充說明

1. 農夫抽水灌溉為什麼容易觸電？因為抽水機有水，這些水若流過破損的火線，那水就帶電了，農夫水裡耕作又沒穿鞋，所以很容易觸電，所以下次經過抽水站，請勿赤腳走在潮濕的地方，下雨天，也不要赤腳走在陽台，因為您的漏電斷電器若故障，也很容易觸電。

自我練習

1. 標示無熔絲開關的供電位置。除了總開關，請將所有無熔絲開關關掉，每次僅開一個無熔絲開關，然後拿三用電表去量測哪些插座或電燈有電，並將開關的控制範圍用油性筆寫在無熔絲開關旁邊。
2. 檢查漏電斷路器是否正常。請用水噴陽台或浴室插座，並檢查漏電斷路器有沒有斷電。（正常的漏電斷路器，只要噴一點水就斷電，但還是請特別注意，要有家人看著，且穿鞋子，且不要踩到水，不然小命也會不保。因為富蘭克林用風箏引雷電沒事，證明電的存在，沒死的才是科學家，後續的人做同樣實驗，卻有人被電死。）（特別聲明：本項實驗有危險性，可選擇看我們影片即可）

C-6 Python程式設計簡易說明

語法說明

程式設計雖然是國中課綱內容，資電群高一上學期也有程式設計實習課程，但不見得每個學生都學過 Python 程式設計，本書也僅用 Python 最基本的數值加、減、乘除等運算功能，所以使用 Python 計算電阻與電壓的簡單說明如下：

1. 程式設計與掌上型計算機的不同

掌上型計算機的所有計算都是直接輸入數值，例如計算長方形面積，就直接鍵入：

```
5*8=
```

螢幕就輸出 40。但若使用 Python 程式設計，則要將所有數值先以變數儲存。變數命名簡易規則是要以英文大小寫 26 個字母開頭。例如：

```
A1、x、b、V、SUM、Xc
```

等都是合法變數名稱。然後使用變數名稱儲存數值。例如：

```
a=5  
b=8
```

然後使用數學式，計算結果。例如：

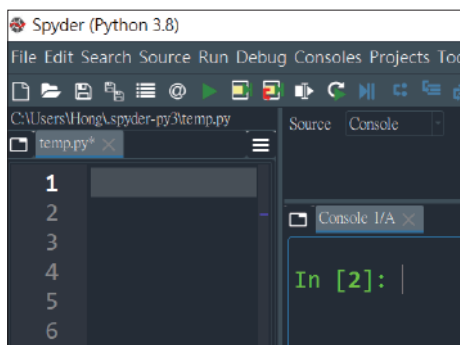
```
c=a*b
```

最後，再用 `print()` 函數輸出結果。所以全部程式如下：

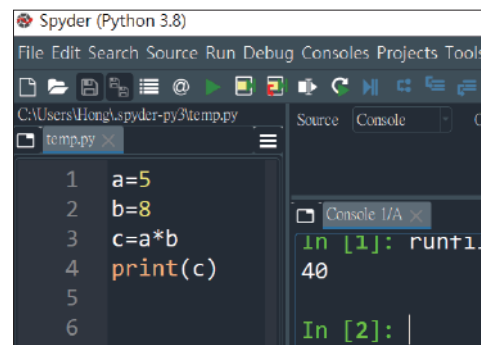
```
a=5  
b=8  
c=a*b  
print(c)
```


程式的編輯與執行

下載與安裝 Python 編譯器，畫面如圖 C-47，然後鍵入以上程式，並執行，結果如圖 C-48。若計算正確，還可按一下「File/Save As」輸入檔名並存檔，下次就可重複使用。使用程式設計的優點是，寫好一次程式，就可執行很多次，且計算結果有一致性，不用像計算機要重複按兩次，才能檢驗按鍵過程正確。因為本書很多計算，例如，串並聯計算、交流電容、電感阻抗等，每個題目都要進行相同計算，所以特別適合使用程式進行計算。



✦ 圖 C-47 Python 初始畫面



✦ 圖 C-48 鍵入程式且執行畫面

Python 複數的表示

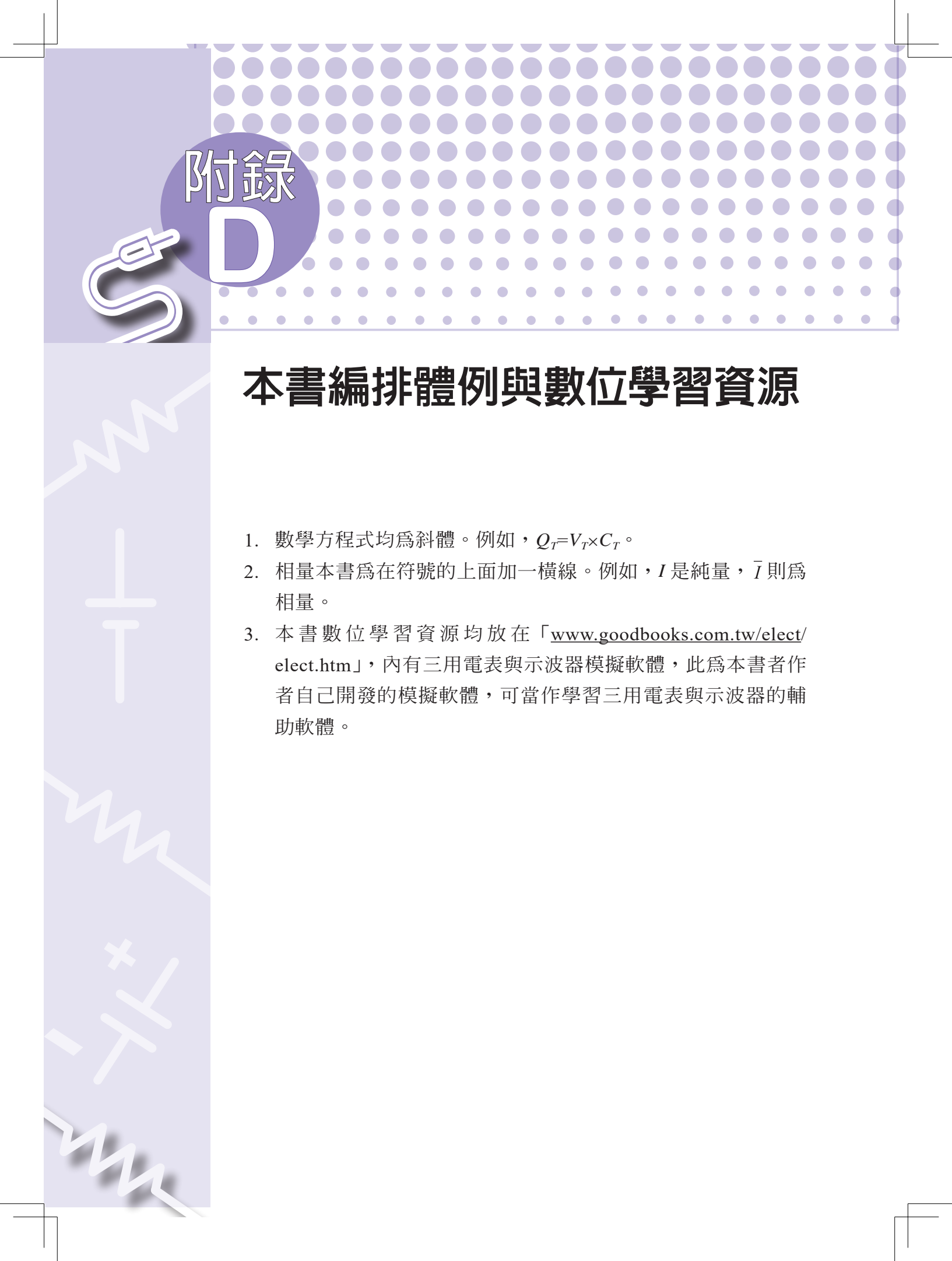
其次，Python 的資料型態有複數，只是書寫方式與基本電學習慣不同，基本電學是 j 在數值前，例如：

```
a=1+j4
```

Python 則為 j 在數值後面，例如：

```
a=1+4j
```

以上複數的計算，在附錄 C 有詳細介紹。



附錄 D

本書編排體例與數位學習資源

1. 數學方程式均為斜體。例如， $Q_T = V_T \times C_T$ 。
2. 相量本書為在符號的上面加一橫線。例如， I 是純量， $\bar{I}$ 則為相量。
3. 本書數位學習資源均放在「www.goodbooks.com.tw/elect/elect.htm」，內有三用電表與示波器模擬軟體，此為本書者作者自己開發的模擬軟體，可當作學習三用電表與示波器的輔助軟體。