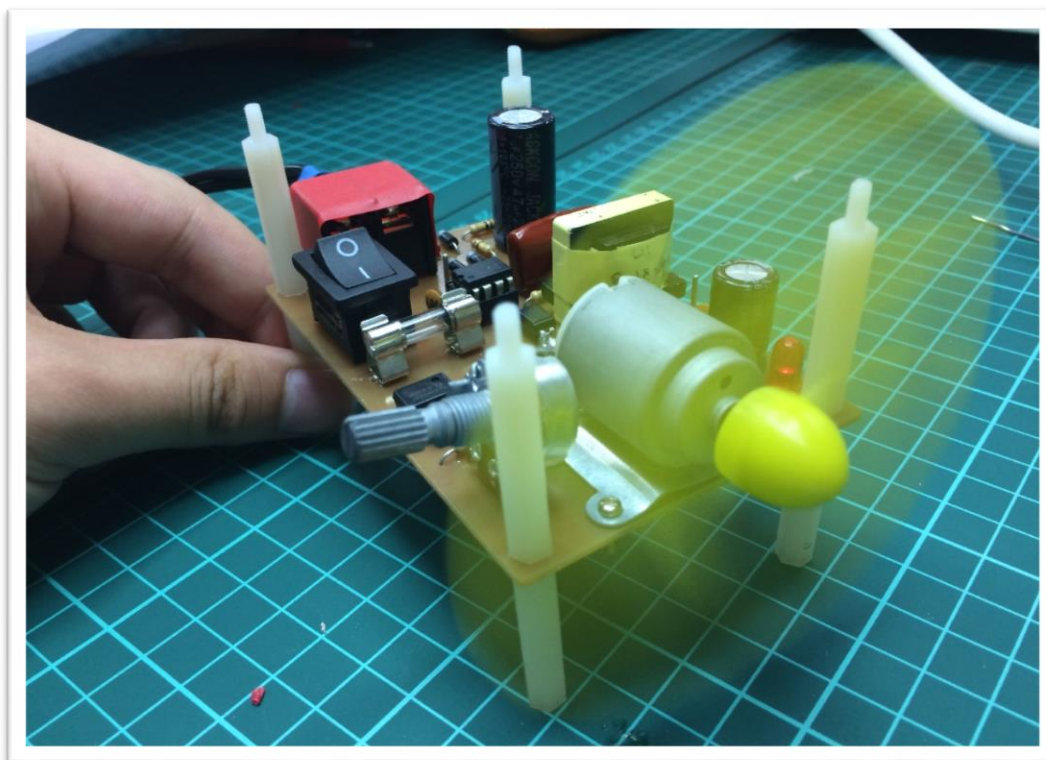


# 110V 交流輸入/直流輸出變壓器搭配可調速風扇

## FINAL REPORT

2017/06/13 電機二 C11\_B04505025 陳在賢



### 壹、 實驗目的

1. 學習 Buck-Boost converter、Flyback converter 的工作原理
2. 了解電路板設計的過程並增進自己設計電路的能力
3. 熟悉電路板上各元件的選用、IC 的運作原理，及其在電路上的功能
4. 學會利用 Protel 軟體設計 PCB 板
5. 認識雕刻機的使用方法、變壓器元件的製作及焊接技巧
6. 加強使用示波器量測各電壓波形的能力

### 貳、 使用儀器

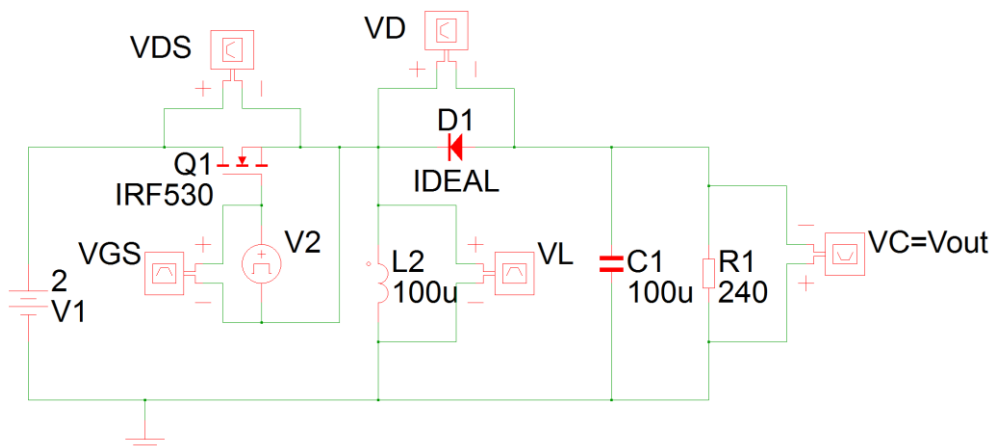
1. 雕刻機 PCB Prototype Machine EP2006、手動鑽孔機
2. 變壓器繞線機、電烙鐵、熱風槍、錫煙過濾機
3. 三用電表、LCR meter、直流電源供應器
4. 示波器 DSO7034B Oscilloscope、差動電壓探棒 Differential Probe
5. 手動工具：尖嘴鉗、斜口鉗、剝線鉗、鑷子、吸錫槍等
6. 軟體搭配：Protel DXP

## 參、 實驗原理

### 1. Buck-Boost 基本電路

變壓器可根據其降壓、升壓的特性分為 Buck、Boost、Buck-Boost converter，而本次實驗所用的 Flyback 反馳式電路是以 Buck-Boost 為基礎所發展出的電路。

Buck-Boost converter 的優點在於可進行升壓亦可降壓，但缺點是電路元件需承受較大的電壓，同時會伴隨較多的雜訊。以下是 Buck-Boost converter 的基本電路：



電路上最關鍵的元件之一是功率晶體 Q1，可藉由對其 VGS 施予不同頻率及 Duty Cycle 的電位，可以控制其導通的特性，扮演類似開關的角色。而在每個周期，電路會分為兩或三階段運作，其工作程序如下：

- (1) 第一階段：VGS 為高壓，使得 Q1 導通（相當於短路），此時電感 L2 會直接承受輸入端電壓，電流呈穩定增加，同時開始充電。而半導體 D1 因為逆向跨壓，故不導通（斷路）。
- (2) 第二階段：VGS 為低壓，使得 Q1 不導通（相當於斷路），而電感 L2 為了維護電流連續性故會開始放電，電流呈穩定減小，故跨壓瞬間降低，也使得承受正向跨壓的 D1 導通（短路）。此時電流迴圈改為流經輸出端，同時對 C1 充電，注意到雖然只有此階段有對輸出端供應能量，但在整個週期，負載皆能使用儲能電容 C1 的能量產生穩定的輸出電壓及電流（也很容易推得當 C1 為大電容時，輸出電壓及電流會更加穩定）。
- (3) 第三階段：VGS 仍為低壓，Q1 不導通，在此階段電感 L2 已放電完畢，跨壓為零，故 D1 亦不導通。（但若在電感放完電前，VGS 又改為高壓，便會提前進入下一循環的第一階段，那麼第三階段就不會發生）。

通常當 VGS 頻率較高或 L2 電感值較大時，每一週期只會有兩階段的運作，此模式稱為 continuous conduction mode，簡寫為 CCM 模式；反之，頻率較低、電感值較小、Duty 較小時則為 DCM 模式。

進一步得討論其數學模型，在第一、二階段，電感接受來自輸入端的跨壓充電，再對輸出端輸入電流產生輸出電壓。此二階段根據能量守恆，必須符合「伏秒平衡」，即充放電時間各別乘以輸入輸出電壓必須是定值，由此可知 CCM 模式下：

$$V_{in} \cdot DT = V_{out} \cdot (1 - D)T \rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D}$$

即可藉由欲得的輸入輸出端電壓比，求出所需設的 Duty。

至於 DCM 模式，同樣也能根據上述原理列：

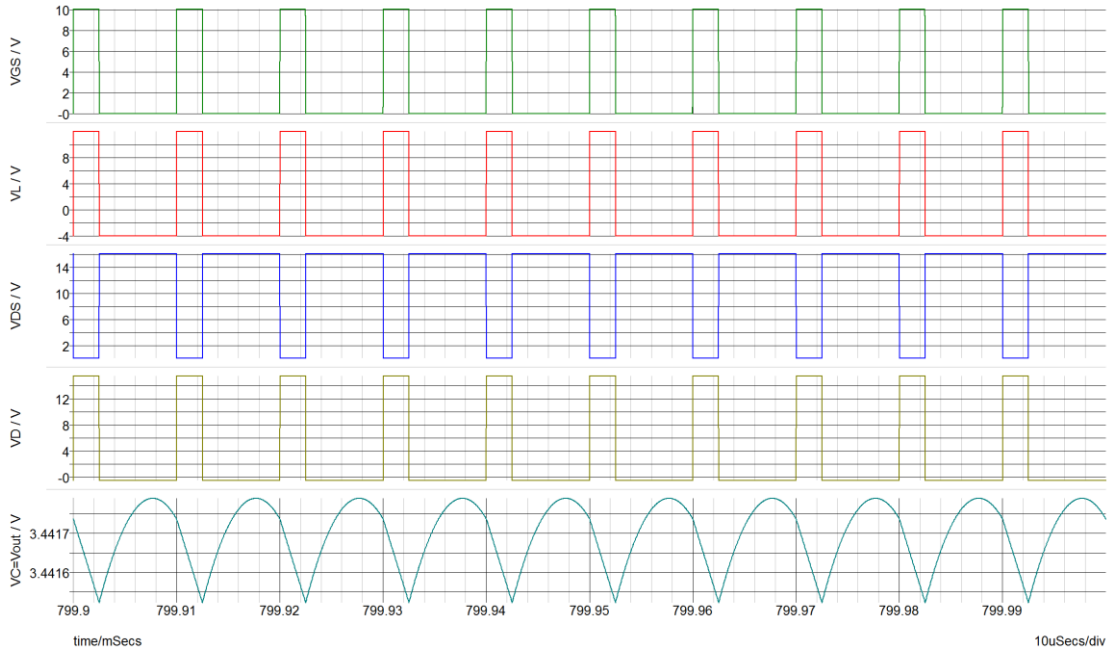
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D_1}{D_2}$$

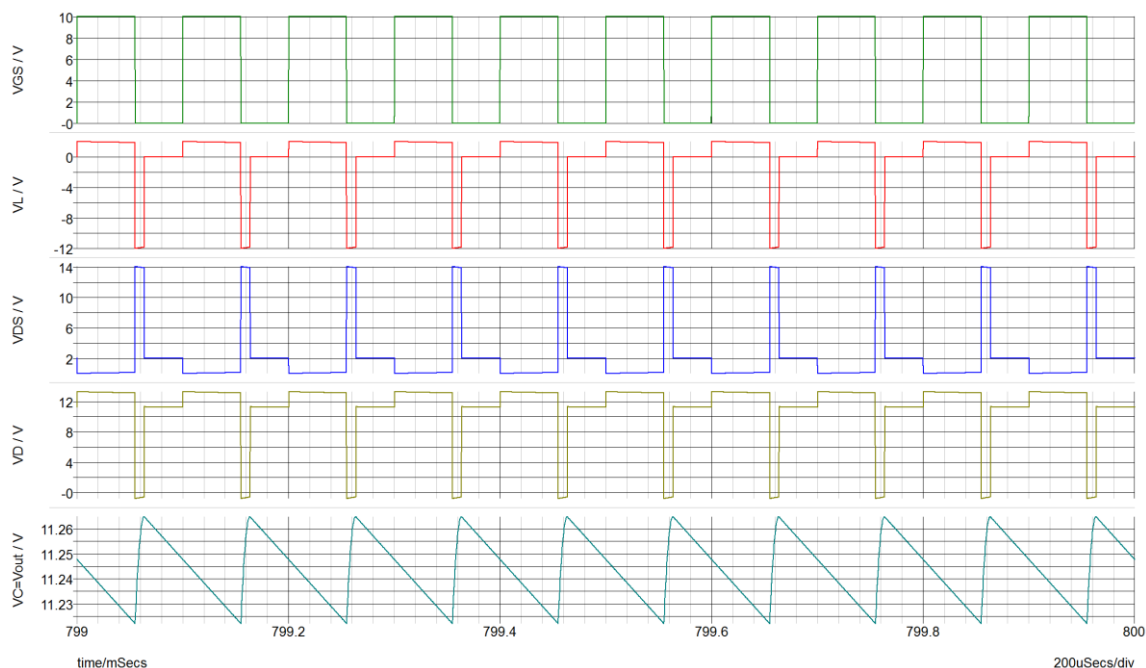
但因為還有第三階段的時間比，故還需根據輸出端的電荷量守恆定律（第二階段流入輸出端的電荷量等於整個週期從輸出端流出的電荷量）列出一關係式：

$$\frac{1}{2} \cdot \Delta I_L \cdot D_2 T = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{V_{in}}{L} \cdot D_1 T \right) \cdot D_2 T = I_{out} \cdot T \rightarrow D_1 \cdot D_2 = \frac{2L \cdot I_{out}}{V_{in} \cdot T}$$

根據上二式，可算出  $D_1$ 、 $D_2$  的確切值，再用  $D_3 = 1 - (D_1 + D_2)$  得第三階段的時間比。

以下兩張圖，分別為 CCM 模式（上圖）及 DCM 模式（下圖）的波形圖：

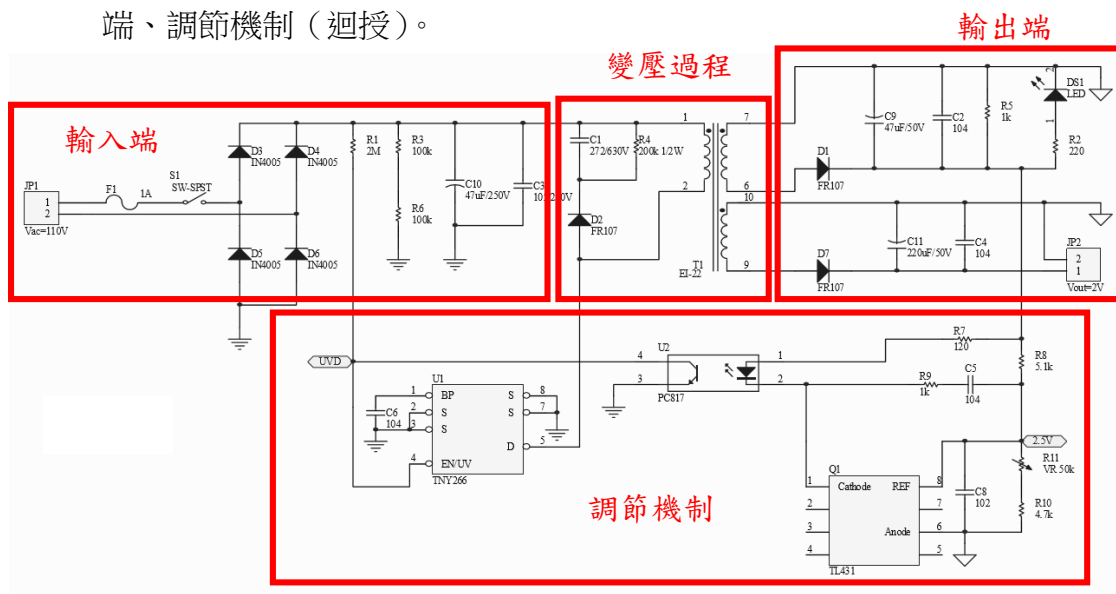




確實符合根據上述原理所建構出的模型。

## 2. FLYBACK 反馳式電路

底下將依此電路的功能分為四區討論：輸入端、變壓過程、輸出端、調節機制（迴授）。



### (1) 輸入端

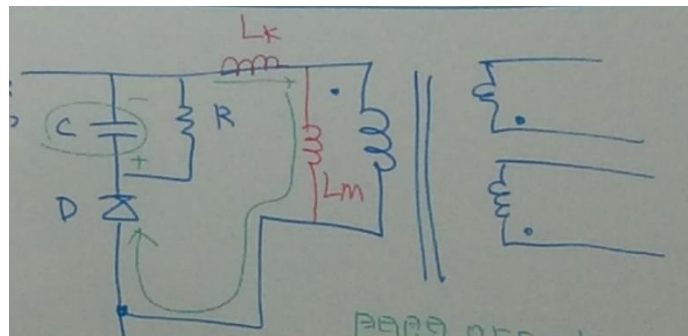
當 AC: 110V/60Hz 的市電輸入後，會先經過 D3、D4、D5、D6 所組成的橋式整流，再由電容 C3、C10 分別濾高頻、低頻，使得輸入電位大致呈直流訊號。至於 R3、R6 的功能在於，當開關開路即電路關閉後，能將電容的能量釋放，由於需承受較大的功率，因此選用兩顆 100kΩ 的電阻，減低單顆電阻所需負擔的功率。

### (2) 變壓過程

從 Buck-Boost 變壓器為基礎發展至 Flyback 電路後，有一個重要的

特點：以變壓器取代原有的儲能電感，使得輸入、輸出端被隔離於兩側，分別稱作一、二次側，如此設計最大的優點在於，即便當輸入端或任一輸出端有不理想的訊號時，都不會直接影響到其他線路，有保護元件的作用。

在進一步討論變壓器在電路上的作用前，必須先引入磁化電感、漏電感的概念。變壓器元件在一次側的部分為單一纏繞線圈，可視為電感，但除此之外還有並聯一磁化電感  $L_M$  及串聯一漏電感  $L_k$ ，可如下示意圖。前者是刻意在鐵粉芯中製造氣隙 (air gap) 而產生，後者則是不理想狀態下產生的寄生元件。



變壓的進行與否深深受著調節機制影響，更精確來說，是受 TNY266 元件決定（詳細資訊可參考後頁的各 IC 工作原理及電路應用），該元件會以約 130kHz 的頻率，藉由偵測輸出端電壓決定每個週期是否要由一次側傳送功率至二次側。

假若在某一週期內決定要傳送，該週期就大致可分為三個階段。第一階段，TNY266 的 D pin 腳會接地，此時初級線圈及磁化電感都因另一端接於剛濾完波的市電，故都跨接於大電位差上，渴望產生穩定電流的增加。但實際上只有磁化電感能夠實現，原因在於此時根據變壓器的工作特性，三端的打點皆為高電位，因此 D1、D2 是逆偏而不導通的，在二次側不允許電流流過的前提下，顯然初級線圈也無電流流經。所以在第一階段，只有磁化電感有電流流經，同時也將能量儲存於電感中。

在進入第二階段時，TNY266 的 D pin 腳會改為輸出高電位，使得初級線圈及磁化電感的跨壓皆反向，同樣根據變壓器的特性，在二次側的電位大小亦反向，也讓 D1、D7 轉為順偏而導通，當然也就允許初級線圈有電流流經。而同時磁化電感為了遵守電流連續性，會與初級線圈自呈迴路，開始釋放電流。此時電流為由非打點流進初級線圈，故在二次側為非打點出。

最後當磁化電感放電完畢，初級線圈也不再有電流流過，此時會有電位震盪且衰減的現象（此現象對電路沒有太大的影響，在此就不多做討論），此時便進入到第三階段。

而若在某一週期內決定不要傳送功率，則變壓器會繼續維持由最近一個導通週期的第三階段所留下的震盪電路狀態。



最後討論 D2、C1、R4 的功能，此三元件主要是用來卸除在漏電感的能量。假若某一循環功率晶體有導通，則在第一階段 D2 會因承受逆偏電壓而呈斷路，當進入第二、三階段，TNY266 的 D pin 腳會改為輸出高電位使得 D2 呈短路，此時漏電感會與磁化電感、電阻並聯電容串聯，便能依此迴圈將能量釋放完畢。

### (3) 輸出端

先就馬達部分說明，該元件與 C11、C4 兩電容串聯，前者是儲能電容，後者則用以穩定電路。當儲能元件提供能量給風扇時，電位會穩定下降，此時就須依靠從一次側感應而得的不連續電流對電容充電，一得一失，到達穩態時會趨近於某一定值，並持續上下震盪。而在重載時，功率晶體導通的頻率變高，電容有較多機會充電使得電壓升高，卻也因此使得風扇跨壓增加、轉速更快，亦即功率消耗更快，而在最後達穩態時，會在更高的電位重新取得平衡。

LED 燈端的機制與馬達類似，但多了提供迴授訊息的任務。當調整可變電阻 R11 時，由於 VREF 端恆為定壓，根據分壓定律使得 C2、C9 的跨壓也會變動（詳細調節機制請參考後面）。當 C2、C9 為低壓時，R5、R2 及 LED 燈的功率都較小；反之為高壓時，元件功率也就較大（其實功率的變化主要來自於 R5、R2，兩電阻的跨壓會因在輕、重載下有蠻大的差別，但 LED 的跨壓變化則明顯較小，這與元件特性有關，詳細討論可參考之後的波形分析）。當有大功率消耗時，C2、C9 的跨壓會下降得較快，進一步得讓 R8 的跨壓變小，而此一訊息在經過由 R7、R9、C5 所組的補償器及 PC817 元件，最終會傳回調節功率傳送頻率的 IC 元件 TNY266 進行調整。

### (4) 調節機制

電路的調節功能主要來自於三顆 IC 元件，在往後會有更進一步的介紹，目前就先不贅述。

## 肆、 相關知識

（備註：每個電路區塊功能及雕刻機使用分別寫在參、實驗原理/伍、實驗過程）

### 1. PCB 板的簡介及製作方式

印刷電路板 (Printed circuit board) 是電子裝配中的關鍵零件，能放置其他電子元件，提供安穩的電路環境工作，因此絕大多要用到電路板的裝置都會用到 PCB 板。而較為傳統的製作方式是採用印刷蝕刻阻劑，做出電路的線路及圖面，但由於電子元件不斷微小化跟精細化，製作方法已有大幅改變。在線路設計方面可搭配各種設計軟體，包含 OrCAD、Protel（本次實驗所採用的）、AutoCAD 等各式軟體。

進一步可依其導電特性分為單面板、雙面板、多層板，所適用的電路對象也依序從簡單至複雜且精密，其中多層板是將電路佈置成多層的結構並壓合在一起，並在層間佈建通孔電路連通各層電路。

另外，也可依基本製作方式分為減去法、加成法、積層法：

減去法是利用化學品或機械將原鋪有完整銅箔的電路板上不需要的地方除去，留下的地方是所需要的電路，製成方式包含絲網印刷（製作絲網遮罩並貼附於線路板，再將線路板浸入腐蝕劑中，把沒被遮住的地區腐蝕掉，最後將電路板放入保護劑清洗）、感光板（與前法類似，但是用部分透光的膠片遮罩於電路，再對塗有感光顏料的電路板照強光）、刻印（為本次實驗所使用的方法）。

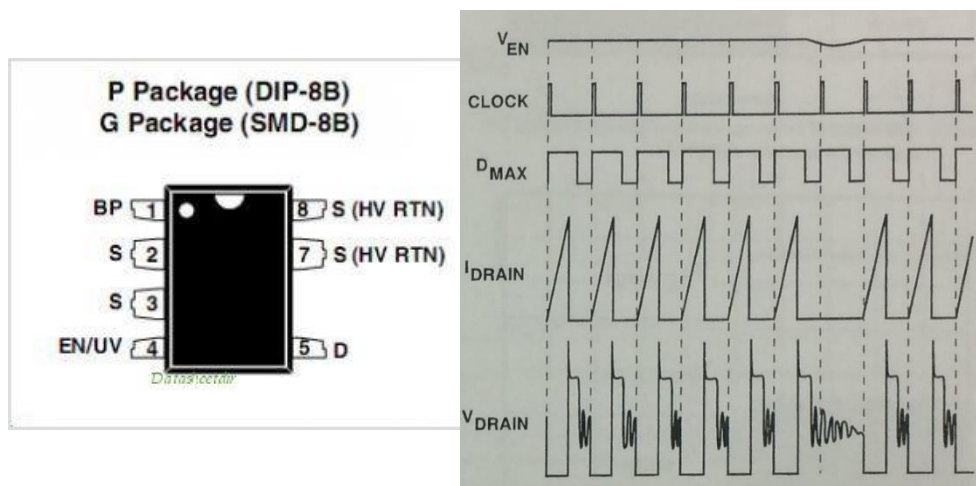
加成法是在一塊預先鍍上薄銅的基板上覆蓋光阻劑（該溶劑會在照到光後，溶於光阻顯影液），經紫外光曝光再顯影，把需要的地方露出。然後利用電鍍把線路板上的導線部分的銅箔增厚到所需要的規格，再鍍上一層抗蝕刻阻劑，最後除去光阻劑（此步又稱為去膜），再把光阻劑下的銅箔層蝕刻掉。

積層法是製作多層板的方法之一，其中順序基層法是在製作內層後才包上外層，再進一步得用上二作法處理外層。不斷重複積層法的動作，即可做出以原電路板為基底，而有更多層的電路板。

## 2. 各 IC 元件的工作原理及電路應用

### (1) TNY266

此元件的主要功能在於可作為開關用，相關波形及腳位圖如下：



元件的基本作用程序如下：首先，元件內部有一頻率約為 132kHz 的震盪器，在每次循環的開始會有一突波，作為 CLK 訊號。當 CLK 訊號為高電位時，元件會偵測 EN/UV pin 的電位訊號，若  $V_{EN}$  處於高電位（高於 1V），則在該循環內功率晶體會關閉 (ON, short, disabled)；反之則會開啟 (enabled)，而一旦決定了，該循環內就不會再變。

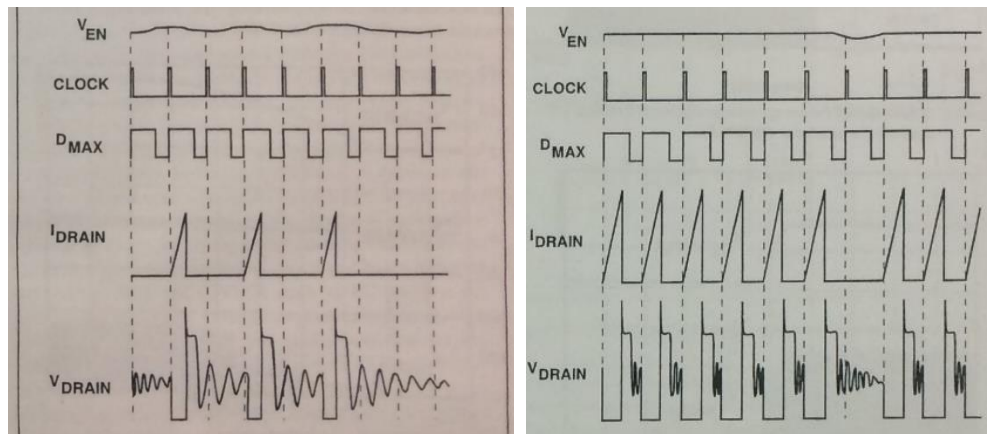
此元件在電路扮演著重要的角色：接受來自二次側的迴授資訊，並據此調整變壓器傳遞功率的頻率。原理如下：

首先觀察 TNY266 的所連接的元件，主要包含 EN/UV pin 連接 R1 及 PC817 的 pin 4，DRAIN pin 則連接變壓器在一次側的部分。另外，也可先留意到前述的 R1 與變壓器元件的另一側，皆連接至市電經整流及濾波後得的高壓直流電。

而其迴授路徑為：當 PC817 有電流傳入時（即輸出電壓較大，詳細討論可參考 PC817 部分），該電流會通過 R1，使得 R1 有較大的跨壓，進一步讓 EN/UV pin 的電位訊號為低。則在該循環內，MOSFET 保持開啟 (ON, open)，而  $V_{DRAIN}$  的電位會延續前一個導通循環，持續震盪，不傳送能量至二次側。

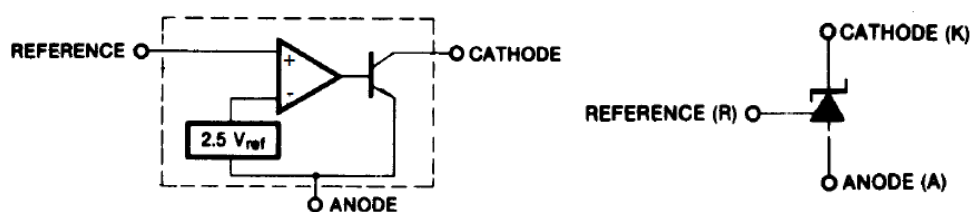
反之，當 PC817 的 pin 4 無電流流經時（即輸出電壓較小），EN/UV pin 會處於高電位時，則在該循環的起初 MOSFET 會被關掉 (OFF, short)。此時 DRAIN pin 會處於低電位（更精確而言是接地），使得與其串聯的磁化電感跨接於大電位差上，此即該循環的第一階段：電感充電，同時流進 DRAIN pin 的電流與流經磁化電感的電流相同，而呈穩定成長（可參照波形圖中的  $I_{DRAIN}$ ）。當 MOSFET 變回開啟，此時  $V_{DRAIN}$  會先個有突波，之後提升到高電位，便進入到第二階段：電感放電。最終當電感放電完畢，完成將能量傳至二次側的任務後，進入第三階段，此時  $V_{DRAIN}$  的電位會下降並且開始震盪。

在調整完一循環後，TNY266 會再次接受 PC817 所傳送的資訊，決定下一循環功率晶體的開關與否。因此也很容易推得，當為大功率輸出時，在一循環內輸出電位會下降較多，當較常偵測到輸出電壓較參考電壓小，功率晶體開放的頻率也就較高了。如下二圖，由左、右兩圖分別為負載為輕、重載時，TNY266 的波形圖



(2) TL431 穩壓元件

此元件的內部構造示意圖如下：





其特性在於，當元件處於正常工作的前提下，皆能將 REF 端的輸出電壓保持於  $V_{REF} = 2.5V$ ，此元件通常也可以使用齊納半導體來取代，但穩定度就較 TL431 元件低了。而在電路中，便是利用其為穩壓的特性，搭配跨接於 REF、Anode (GND) pins 腳的可變電阻元件，調整輸出電壓。原理如下：根據分壓定理，若將可變電阻調小，R8 上方的節點電壓會變得較高，因此輸出電壓及功率皆較大。反之亦然。

### (3) PC817 光電耦合器

此元件的特性，在於能傳輸數字信號（開關信號），基本工作原理大致如下：在輸入連續變化的模擬電壓或電流信號後，能根據輸入信號的強弱變化產生相應的光信號，從而使光敏晶體管的導通程度也不同，輸出的電壓或電流也隨之不同。更精確來說，PC817 會先偵測其 pin 1, 2 的壓差，若為正且大於一定值，則會產生一由 pin 1 流至 pin 2 的電流，再根據上述原理，於另一側感應出一由 pin 4 流至 pin 3 的電流，反之亦然。

而此元件在電路上的功能，等效於將輸出電壓與參考電壓 (reference voltage) 的大小關係迴授至一次側，作為功率晶體關閉的頻率評估。原理如下：當輸出電壓較小時 R8 的跨壓也較小時，元件四個腳皆不會有電流訊號流經，進一步使得 EN/UV pin 為高電位訊號，使得該循環內功率晶體導通。反之當 R8 的跨壓較大，則會有電流從 pin 1 流入，使得 pin 4 也感應出流入電流，使得 EN/UV pin 為低電位，該循環內功率晶體不導通。

另外，也因元件是用光信號傳播，故會有隔離的作用，我們便用此特性來隔離電路的一、二側。

## 伍、 實驗過程

本次 Flyback 電路製作大致分為幾個內容：電路及 PCB 板設計、PCB 板製作、部分元件製作及插板焊接、短路/通電測試、除錯及量測波形。以下將各別詳細敘述：

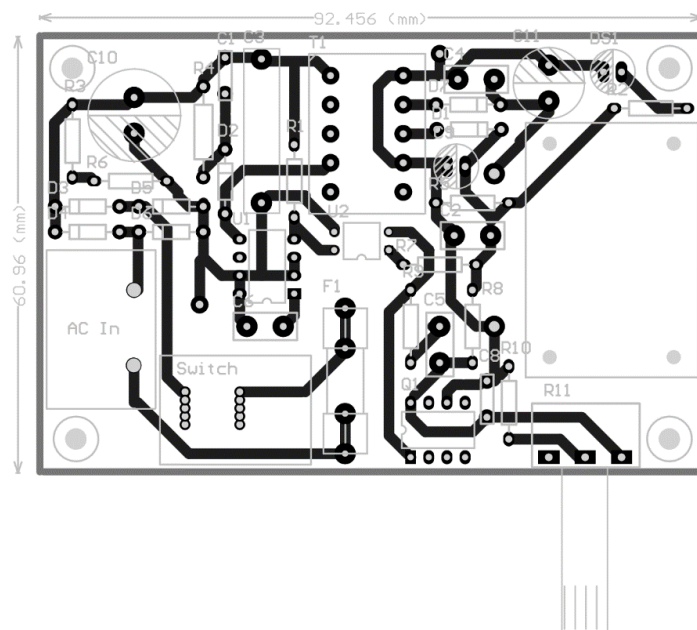
### 1. 電路及 PCB 板設計

首先，由於已經有現成的電路圖，因此先將電路以 Protel DXP 畫成 Schematic 檔。接著我們要根據電路上實際使用的元件規格，對應至正確的 Footprint，其中部分常用元件如電阻、電容、半導體、變壓器、IC 等元件已建置好，可以直接從 Library 中找尋並使用，其他元件如馬達、開關、隔離柱等尚須自行量測規格並繪製，內容包元件形狀的平面圖及腳位位置。

之後，就能將 Schematic 轉至 PCB 檔，亦即模擬實際電路板的檔案，開始安排元件的擺放位置。在此有幾點須注意，因為最終將會以單層 PCB 板實現電路，因此在擺放元件時，可先根據灰色的電器線（程式

根據電路圖先概略性畫的導線圖)，留意導線有無交叉穿越的問題。再來，由於 **Flyback** 有隔離的特性，我們亦希望在之後所實現的電路板也能明顯看出一、二次側的分隔，因此要將兩側的元件分開擺放。其他包括保險絲不應放至兩高元件中間、風扇不能距離可變電阻太近等機構問題也需特別注意。

元件擺放完成後就開始佈線，首先建議先在 **Keep-out layer** 將電路板的輪廓畫出，並且在 **Top layer** 上以連線的方式佈線，同時最好能先將導線寬設為 **1.5mm**，如此以來才不會在鋪銅時才發現走線過於緊密。在此仍有幾點要注意，包含 **PCB** 板規格必須少於 **75cm<sup>2</sup>** 且單邊不超過 **15cm**、導線必須是鉛直、水平或呈 **45°** 等事項，且一、二次側必須能以一條直線隔離（當然兩側的接地也沒有導通）。



而最終送進雕刻機中，會將不導通區塊的銅箔刻掉去除，又為了能減少雕刻刀的工作量，故要盡量增加導通區面積，此即鋪銅。在 **Bottom layer** 上鋪銅時，能根據上一步在 **Top layer** 已佈好的線，藉由增加導線寬度，增加鋪銅面積。此步有個重要的守則，在於減少兩個角位間的導通區有直角出現，因為當電路板開始運作，直角區域並不利於電荷流過，反而容易使得電荷累積。其他部分包含導線至少寬於 **1.5mm**，且兩導通區域也至少要隔離 **1.5mm**，導通區域必須完整包含腳位的 **pad** 等也需多留意。

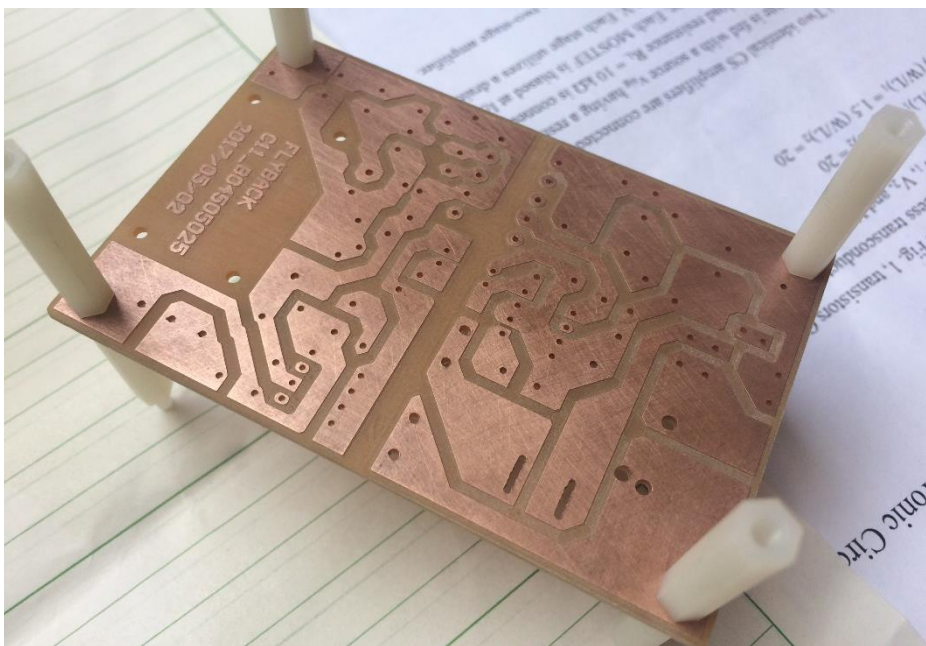
## 2. PCB 板製作

完成 **PCB** 板設計後就要以雕刻機實現電路板了，在此以條列式的方式敘述過程：

- (1) 通盤確認 **PCB** 板的設計及轉檔皆沒問題後，就將 **PCB** 檔複製到連接於雕刻機，且含有雕刻機控制程式的電腦中進行轉檔。

- (2) 打開雕刻機控制程式，點選「開啟檔案」並選取欲雕刻的檔案，含焊錫面、鑽孔檔等四個資料。
- (3) 點選「選擇成型資料」選取電路的邊界，再點選「成型資料偏移計算」選取外圈的邊框作為電路外框。
- (4) 點選「加工排版及設計環境」，此時按下 Home 鍵雕刻機應該會開始運作，若無的話可檢測機器上的 pause 紅燈是否被按下去了。正常運作的話，就可先用絕緣膠帶固定銅板，黏貼時務必確認四邊及四腳都黏緊，但避免過度拉扯膠帶使得膠帶回縮時動到銅板。另外，在黏貼左下角時，需要將雕刻機與銅板接觸的導線一同黏上，必須確認外露的導線確實碰觸到銅板。
- (5) 調整電路邊框的四角在銅板上的絕對位置，在不碰觸周圍膠帶的前提下，儘可能得節省空間。確定無誤後，點選「計算雕刻路徑」，之後就等程式自動計算路徑，此步驟會花較多時間。
- (6) 點選「設定機台運動參數」，將下刀深度改為 0mm。
- (7) 點選「電路板平面檢測」，設定寬度為 15mm，再次確認導線有連通後即可開始檢測，此時機台會先靠近使用者至移出底板，以供換刀，使用者則需搭配螺絲起子及尖嘴鉗的使用換上廢刀。換刀時有幾點需要注意：由於此時只是要檢測而無雕刻，故先不用把雕刻刀插至最深（但之後務必都要！避免雕刻時斷刀）；在鎖螺絲不要轉到更上方的校準孔，並且一定要將螺絲鎖至最緊；另外，因為雕刻刀很細，相當容易摔壞，故在持刀時先以手指抓緊，換刀時在使用尖嘴鉗將刀塞入。之後程式會要使用者將連接導線碰觸金屬台的腰度，確認迴路連通，一切無誤後機器便會開始偵測，此時我們只需注意路徑是否都在方框內即可。待其偵測完成後，點選「檔案」，進到我的文件將 temp.prj 替代掉為重新偵測出的結果檔。
- (8) 一切就緒後，點選「線路雕刻」，之後只要依序據機台的顯示更換雕刻刀，並且在每次換完刀後確認下刀深度即可。若發現下刀深度不夠，則先按下 pause 紅燈，再選「設定機台運動參數」，改下刀深度（依實際情狀決定調整幅度，但儘量一次僅調 0.03mm，避免使得下刀過深），再次按下 pause 取消暫停，反覆執行此步直到調為適當的下刀深度。而若要補該刀調整前尚未雕刻完全的部分，則到整個銅箔皆雕刻完後，點選「顯示圖層設定」，勾選要補刻的部分，當補刻完後即可將機台暫停。
- (9) 確認銅箔部分都雕刻完後，點選「電路板鑽孔」，此時要先更換雕刻刀，相較於上步是以顏色辨別刀種，在此是以雕刻刀的直徑辨別（標籤顏色皆為銀色）。之後仍依照顯示換刀，但注意到若要刻 3mm 以上的孔，要選用白色標籤的雕刻刀。

- (10) 鑽孔完畢後，點選「板框成型」並換上白刀，此時雕刻機會將電路板刻下來。確認電路板整個雕刻完畢後先做機台清潔，到主軸馬達中點選卸刀，可取下雕刻刀，再點選開啟，此時空氣清淨機會開始運作，取下空氣管並吸附機台附近的銅削。
- (11) 針對電路板的部分，要先以菜瓜布將銅箔面磨亮後，取下電路板，以銼刀將邊角磨滑，再噴些許酒精，以紙巾擦拭，最終在表面噴少量的保護漆並等待其完全乾燥，即完成 PCB 板的製作。



### 3. 部分元件製作及插板焊接

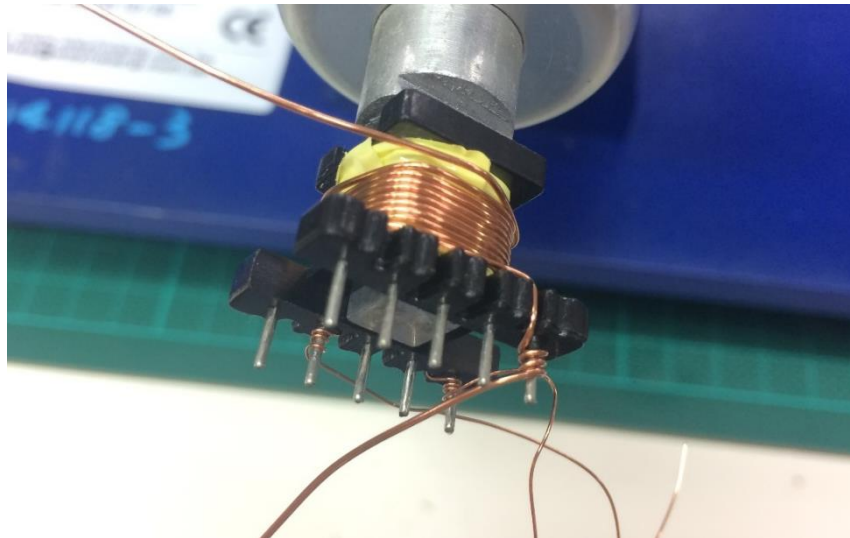
本電路板除了現成元件外，部分元件包含馬達、插座、變壓器等都還需要檢測及加工。馬達需依 PCB 板設計所供給正負跨壓的方向，檢測是否能使風扇吹出風而非吸風，若為吸風，就將馬達背部螺絲鬆開，並且將馬達主體轉半圈，鎖於對角的螺絲孔。另外，最後將馬達放於電路板上時，是以多芯線連接板子上的銅箔，並將四個洞皆以螺絲旋緊，固定於板子上，以免運轉時產生抖動或噪音。

插座的部分則是將電源線先套入共三個熱縮套管，並將線頭剪掉適當長度，再去除適當長度的線皮，套入 Y 型金屬片使得金屬片底部貼齊線皮。但在套入金屬片前，建議先在多芯線線頭滴少許焊錫，避免套入金屬片時折損，然而在使用焊錫前，還需先確認與熱縮套管保持一定的距離。之後在 Y 形金屬片底片灌焊錫，去除多餘的多芯線。

變壓器的製作則較為複雜，首先在講義上畫好變壓器的電路圖，並確認實際元件在電路板上的腳位資訊（AaBbCc 的絕對位置）後，就可以搭配繞線機的使用開始繞線。本次在 Aa 是使用較細的#33 漆包線纏繞 80 匝，Bb、Cc 則是用較粗的#24 漆包線各別纏繞 16、12 匝。在繞線前先將線頭在金屬腳繞約三圈固定，但得注意要讓線頭朝向金屬

腳位端向外繞行，以免被之後繞的線卡死，而將漆包線由金屬腳放進纏繞的地方時要從深溝進。

之後就可以開始使用繞線機把手繞行，繞行方向統一以計圈器增加的方向繞行，繞行的時候有幾點注意：首先得確定漆包線捆上的線不會在纏繞過程懸浮，進一步造成打結，建議可用抹布將其貼附於線網上；在繞行時儘量讓每一匝彼此貼緊但又不壓在其他匝的上方；繞完一層後應使用麥拉膠將該層表面覆蓋，以免線在摩擦掉漆後會與相鄰層短路。



繞完後亦要朝金屬角方向繞行三圈固定，並剪斷漆包線（要預留一定長度），漆包線線捆使用完畢後，要將線頭拉緊使得線接貼附於線捆上，並用膠帶將線頭固定，以免鬆開之後造成打結。以相同的方法將三個線圈都繞完。

繞完線圈後以電烙鐵將六隻腳的漆包線線頭的漆皆融掉，可藉由線頭是否由原本的亮銅色變為銀色確定判別有無融掉，同時要小心過程中勿讓線頭彈跳擺盪，以免上面的高溫焊錫噴飛傷人。之後搭配三用電表、LCR meter 的使用，初步檢測各對腳位是否短路，彼此是否斷路，且每對的電感值是否跟匝數呈正相關。確認無誤後，就將固定於金屬角所繞行的三圈漆包線鬆開，融掉該段線的外漆，再重新繞上金屬角並進行焊接，最後減掉多餘的線。但在焊接時，應先讓線圈彼此貼緊，必注意焊錫是否完全包覆線圈，但高度又不能超過線圈太多，不然當插件時，會發現變壓器無法差得太深，進一步容易使得焊元件時焊錫碰不到金屬角而造成斷路。

之後，將 EI-22 鐵粉芯取出，插入變壓器元件，並以手指壓緊兩塊鐵粉芯，此時要搭配 LCR meter 的使用，量測 100kHz 下  $A_a$  的電感值，目標是將其調整為 1mH。一開始電感值應會較大，此時可在兩鐵粉芯間貼麥拉膠帶製造氣隙，當再次量測電感值時，可觀察到電感值明顯下降，依此不斷重複上步使得  $L_{Aa}$  最終達到目標的  $\pm 5\%$  內。之後



再以麥拉膠帶緊密得將兩塊鐵粉芯黏貼於一起，並再次測量電感值是否在目標範圍，若否則鬆開麥拉膠帶再次調整，但注意到不能因調整數值步將麥拉膠帶完全貼牢，因為變壓器在運作時容易有較大的震動，若沒綁緊容易產生異音或抖動，嚴重時可能減少裝置壽命。最終再將鐵粉芯與變壓器黏牢，標記打點位置及  $L_{Aa}$  電感值。

變壓器元件完成後，即能在 PCB 板上插件焊接，需要注意的地方包含，由較矮的元件開始焊、確定元件貼齊於電路板、IC 元件應特別控制加熱時間以免元件損壞。另外，由於銅箔上已噴上保護漆，在焊元件時要確定焊錫有確實融掉漆而貼附於銅箔上，判斷依據在於焊錫底部應散開成較大面積，而不應該擁有弧形表面。

#### 4. 短路/通電測試、除錯及量測波形

電路板完成後，先進行短路測試，測試內容包含電路板所有的節點，及單一節點上的所有元件的腳都應進行確認。其中有幾點較為特別：插座的兩隻腳應與插頭的兩片一對一呈短路，而與另一腳呈斷路；另外，風扇的兩輸入端呈短路是正常的，因為內部電路本來就是電感、寄生電阻等元件組成的通路；而變壓器的 B、C 腳也因為同樣都是接地，故會呈短路。

短路測試完畢後就要進行通電測試，測試過程需搭配內建開關的延長線，而在測試前應先將電源輸入插座以絕緣膠帶覆蓋，避免誤觸。測試前，先確認電路及延長線的開關為 OFF，同樣得往後在調整電路開關時，都切忌將手攙扶於電路板底下的銅箔面，避免誤觸。之後將插頭插上並將延長線開關調為 ON。確定無異狀後，拔下插頭開啟電路開關，關閉延長線開關並插上插頭，再次開啟延長線開關。仍無異常的話，即可插入 TNY266 元件，並重複上步，若電路正常的話，應在做完最後一步後，電路開始正常運作。若無則進行電路除錯。

最終，電路除錯完畢後就要進行波形量測，至於量測內容及結果可參考後頁。

### 陸、發生的問題與解決方式

本次實驗所遇到的問題幾乎都來自於硬體實作的過程，以下將闡述遇到的四個問題及各別解決方法：

#### 1. PCB 板雕刻多雕一個洞

在雕刻電路板進行到最後一步：鑽孔且已經換上 2.5mm 刀時，雕刻機竟然在插座元件的洞的附近多鑽了一個洞，不過到目前仍未找出原因，檢查了 PCB 檔也沒有異常。但其實多打了一個孔並沒有對附近電路的導通及非導通關係造成影響，所以只是造成美觀上的問題，電路仍能正常運作。

## 2. 保護漆噴太厚

在刻完電路板要上漆時，我不小心壓得太深，導致保護漆被噴得過厚。一來是美觀問題，因為等到保護漆乾掉後，表面變得不是很平滑，而且在漆較厚的地方會偏深綠色，讓原本蠻漂亮的銅箔金屬光澤，彷彿沾上了污垢或上繡。另外，也使得焊接所需加熱的時間較長，這方面在後面會說明。

## 3. 成品除錯 I：變壓器繞錯腳

在完成電路板的插件焊接及其他測試，最終擺上 TNY266 元件並通電後，發現風扇呈現週期性的微弱旋轉，即時而慢慢轉時而不轉，LED 也呈一閃一滅。後來在近兩個小時的 debug 後，發現是變壓器繞錯腳，我將 b、c 輸出端的正壓角繞反了，因此也只好認命重繞。

## 4. 成品除錯 II：焊點不確定

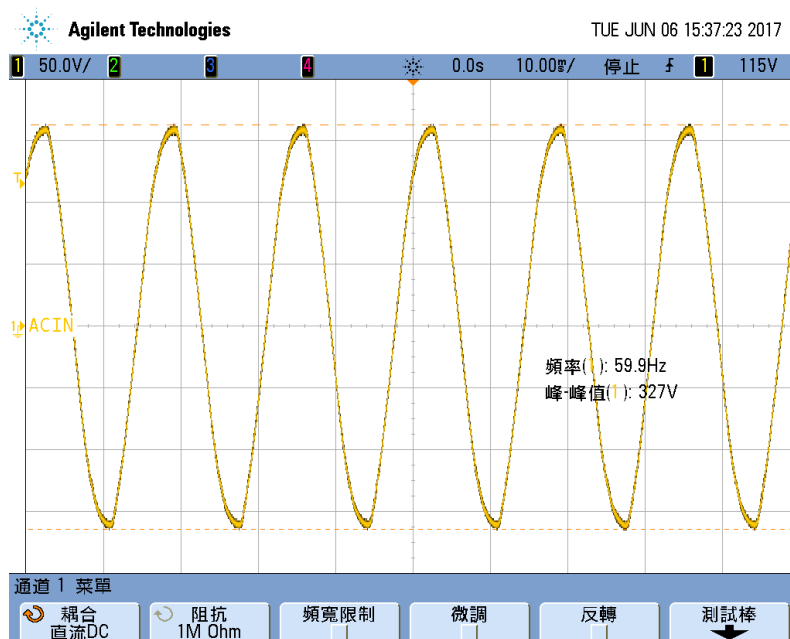
在修正完變壓器元件後，發現電路竟仍無法正常運作，風扇呈現時而轉時而不轉（此時甚至不呈週期性變化了）且 LED 維持閃爍狀態，但調整至較大的風速後情況似乎能有些許改善。後來有發現問題出在我的焊點並沒有完全貼附於銅箔上，而再經所有焊點都重新處理過後，電路總算能正確運作了。

另外，我認為這個錯誤也算是保護漆噴太厚所造成的間接問題，因為在焊元件時，我其實在每個焊點都加熱蠻長的時間，甚至某些地方都已經加熱至保護漆燒焦，焊錫仍沒有完全貼在銅箔上，最後往往會因為害怕加熱過度而誤判焊點的確定性。

## 柒、量測位置、參數及波形內容

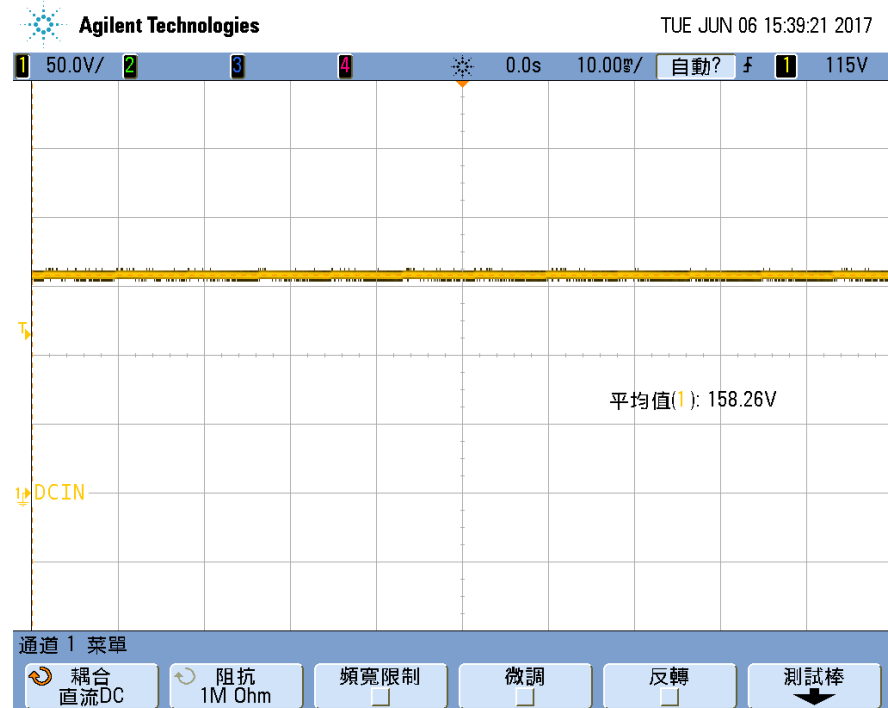
### 1. 市電及濾波後波形

#### (1) 市電（CH1: 插座兩端）

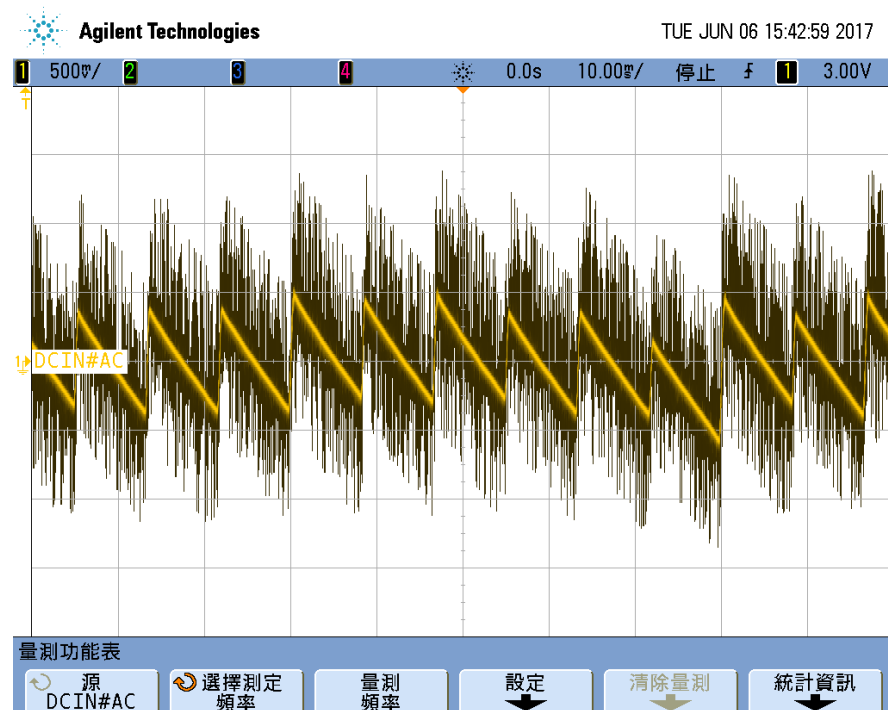


台灣一般插座所使用的都是由台電配給的 110V/60Hz 交流電，不過 110V 並非其振幅，而是方均根值，因此理論峰對峰值為其  $2^{1.5}$  倍，即 311V，得其誤差為 -5.1%。另外，其波形也不是完美的弦波，在到達電壓極值後，電壓變化的速度明顯變快，斜率大小較大。

(2) 濾波後波形 (CH1: 橋式整流 D3/D4 負端 - 一次側地)



濾波後是期望能得到直流電，且其大小為濾波前的交流電的振幅，即 156V。而從波形可看出，確實能得到大致穩定的直流電，大小誤差為 -1.7%。



但若用交流耦合模式去分析此一電位，可看到其實還是有一大致呈週期波動的漣波 (ripple)，振幅不到 0.5V，約為直流電的  $\pm 0.32\%$ ，影響相當小。而其頻率約為 120Hz，確實為原交流電頻率的兩倍。

## 2. TNY266/TL431 相關波形

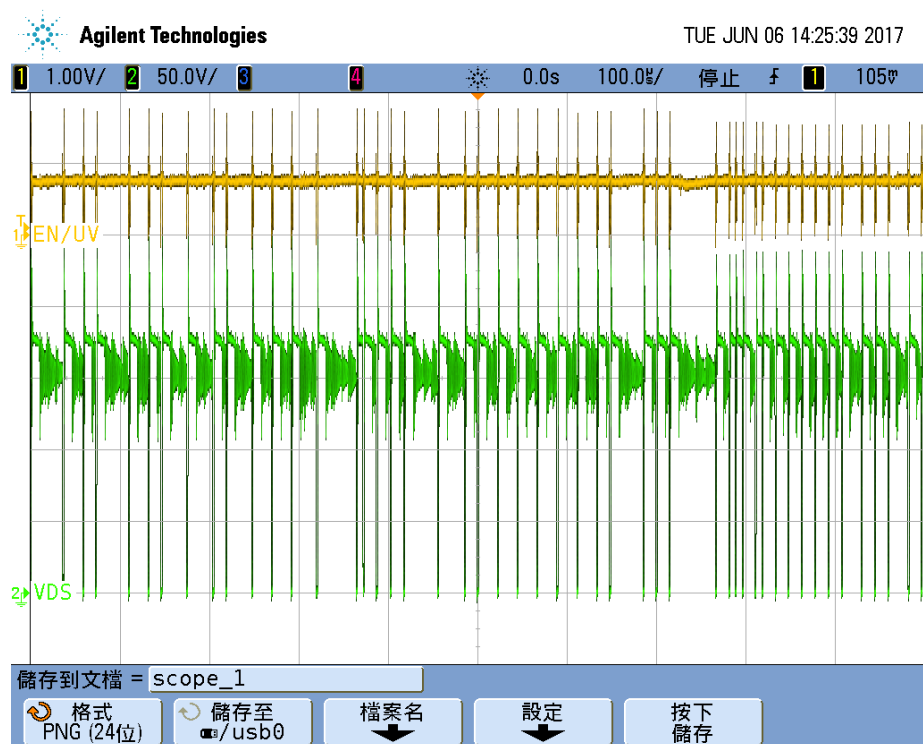
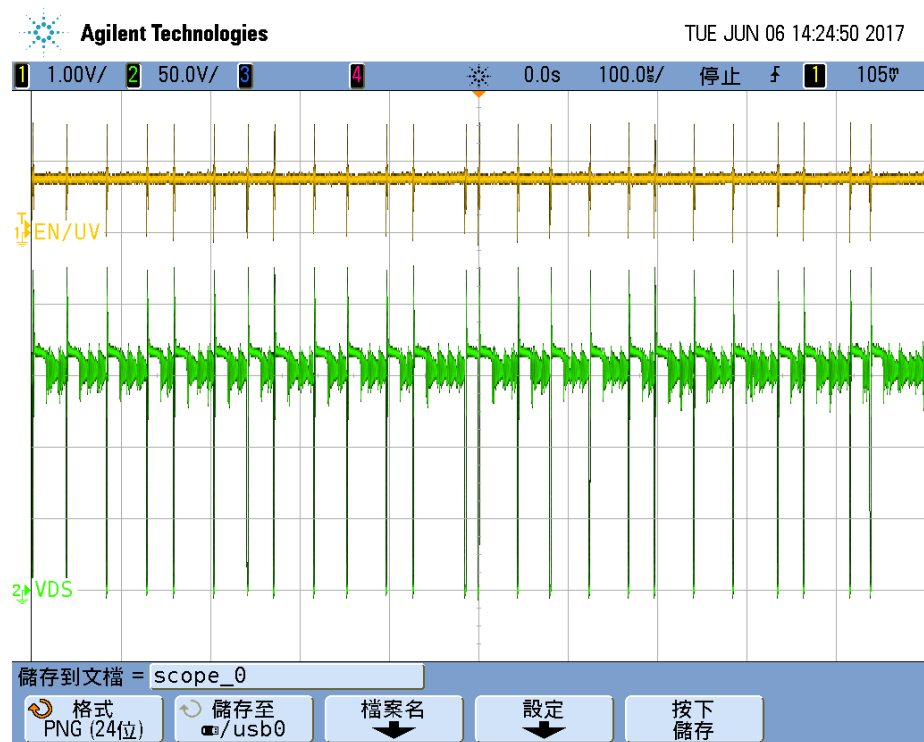
### (1) EN/UV pin 腳電位及 VDS pin 腳電位

(CH1: TNY266 EN/UV pin – 一次側地；CH2: TNY266 VDS pin)



先就單一循環波形討論，根據原理中所說明，TNY266 元件會以 132kHz 的頻率調節電路，在每個循環皆會判斷是否要傳送能量，同時實現判段結果。上圖顯示了約兩個多循環的波形，最左邊的循環為沒傳送能量的週期，右邊的兩個循環則有，進一步得對中間的完整循環量測時距，換算頻率得 133kHz，誤差為 0.76%。

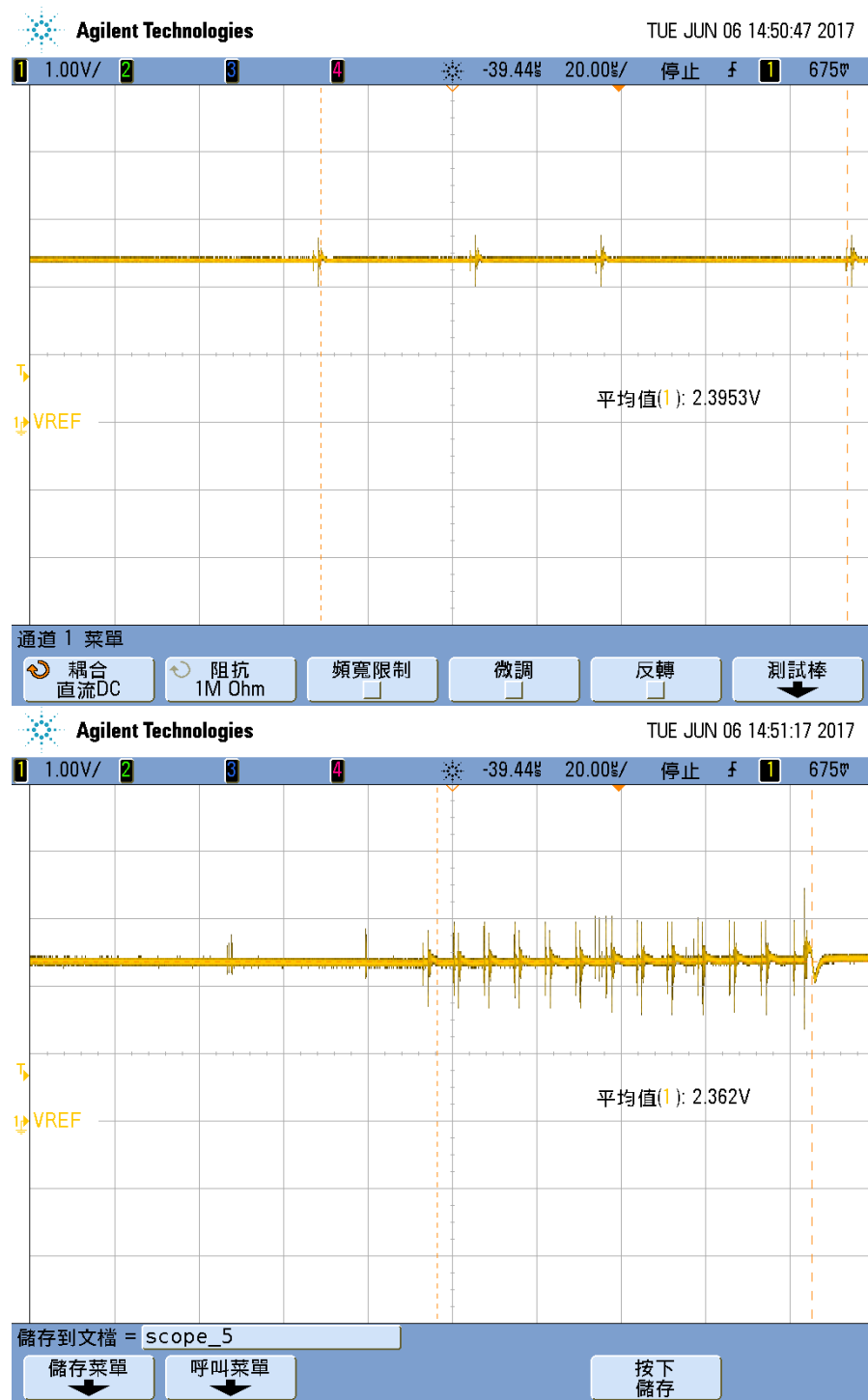
而此圖的兩波形也都符合預期，在該循環決定要傳送功率的起初，EN/UV pin 腳會有個擾動以做觸發，此時 VDS pin 腳電位馬上升至零電位，進入第一階段：磁化電感開始充電；之後 VDS 又會轉為高電位，使得電路進入第二階段：磁化電感放電；最終電感放電完畢後，進入到第三階段，電位開始有震盪現象。



上、下二圖分別是將時間軸單位長增長後，再各別觀察輕、重載時的調節狀況，可明顯看出當輕載（上圖）時，有傳送能量的循環變得更少，在相同時距內功率晶體導通次數較重載（下圖）時少了近兩倍。



(2) VREF pin 腳電位 (CH1: TL431 REF pin – 二次側地)

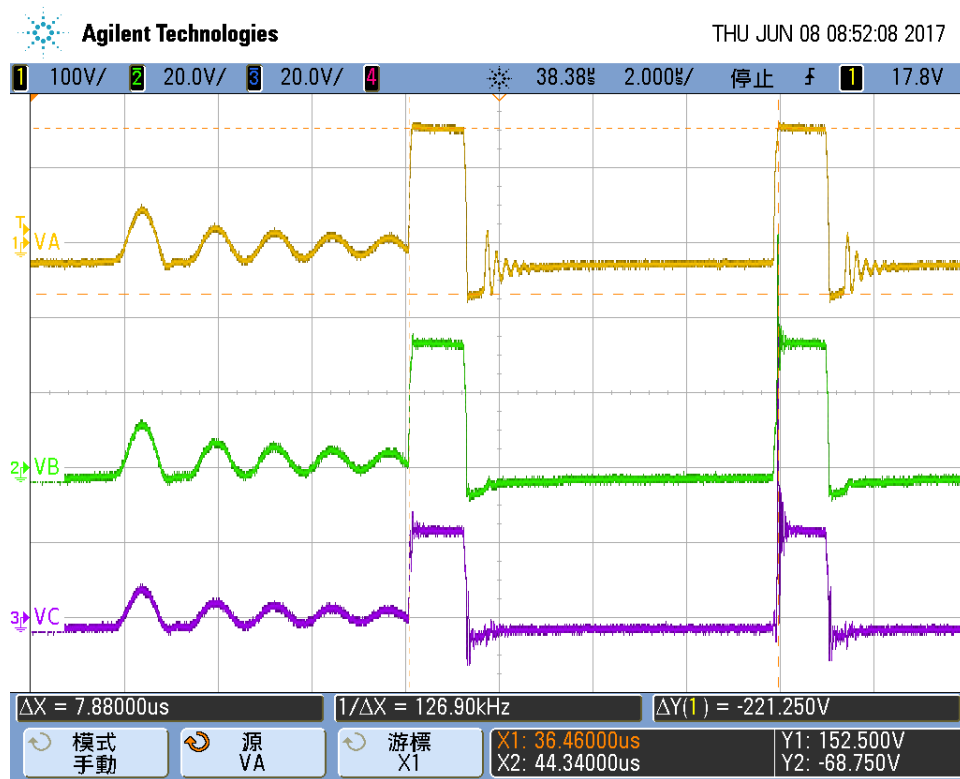


上、下二圖分別為輕、重載下的 VREF pin 腳電位，與理論大致相符，為一穩定的電位值且不隨負載有較大的改變。不過仍可看出兩者約有 -1.26%的差距（以輕載為理想值），且在重載時（下圖）有震幅較大且較常出現的雜訊。另外，理論上 VREF 應保持在 2.5V，實際測得的值有 4%的誤差，不過比起大小，我們更在意該電位的穩定度，而實際上也已經符合要求了。

### 3. 變壓器波形

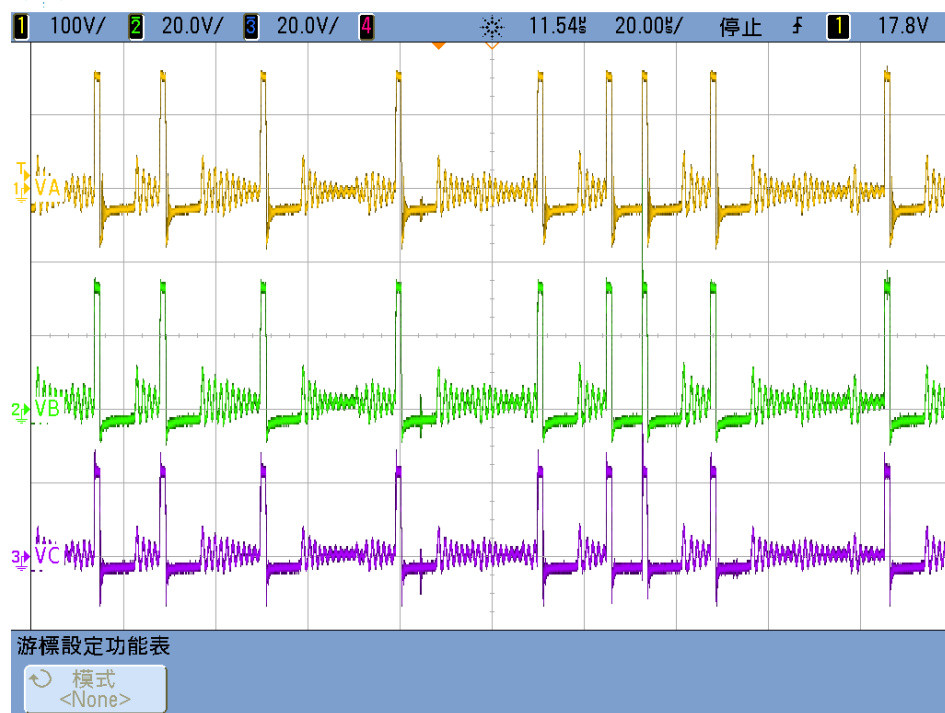
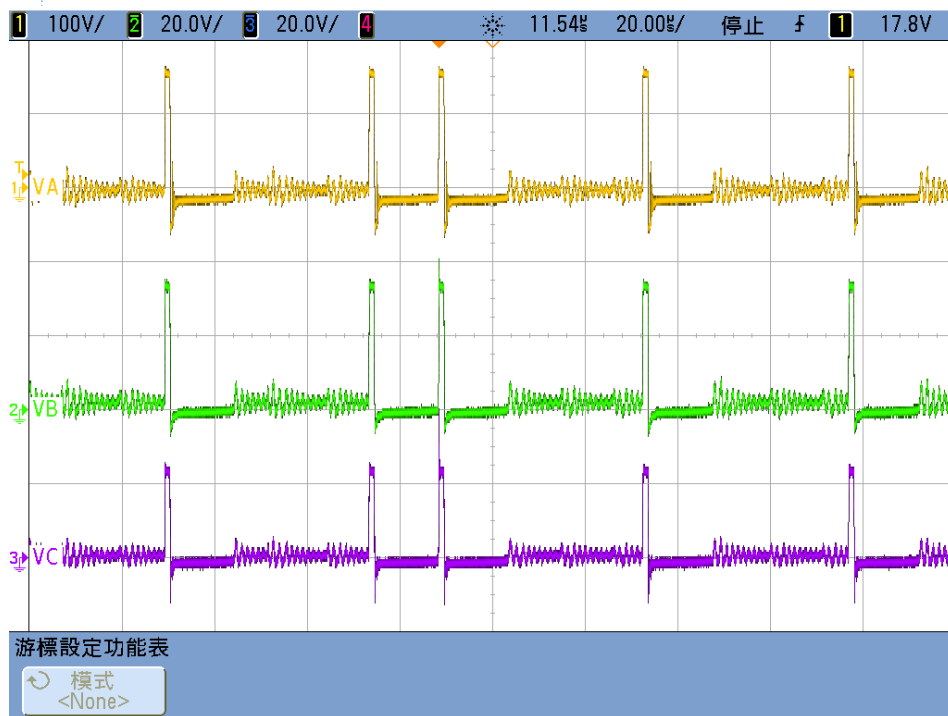
(CH1: 變壓器 Aa pins (使用浮動探棒);

CH2: 變壓器 b pin – 二次側地 (反向); CH3: 變壓器 c pin (反向))



同樣先就單一波形來看，此波形圖亦有一個無導通及兩個導通循環。先對 VA 波形進行討論，與上面提到的 VDS 波形相當類似，只是做了一個反轉及平移，實際上也應當如此，因為兩者相加後應為經濾波後市電的電位，即 156V 直流電。而對磁化電感充放電的意義為，第一階段跨接於大的跨壓上充電，第二階段則跨接於較小且為負的電位上開始放電，最終進到第三階段時電位震盪。

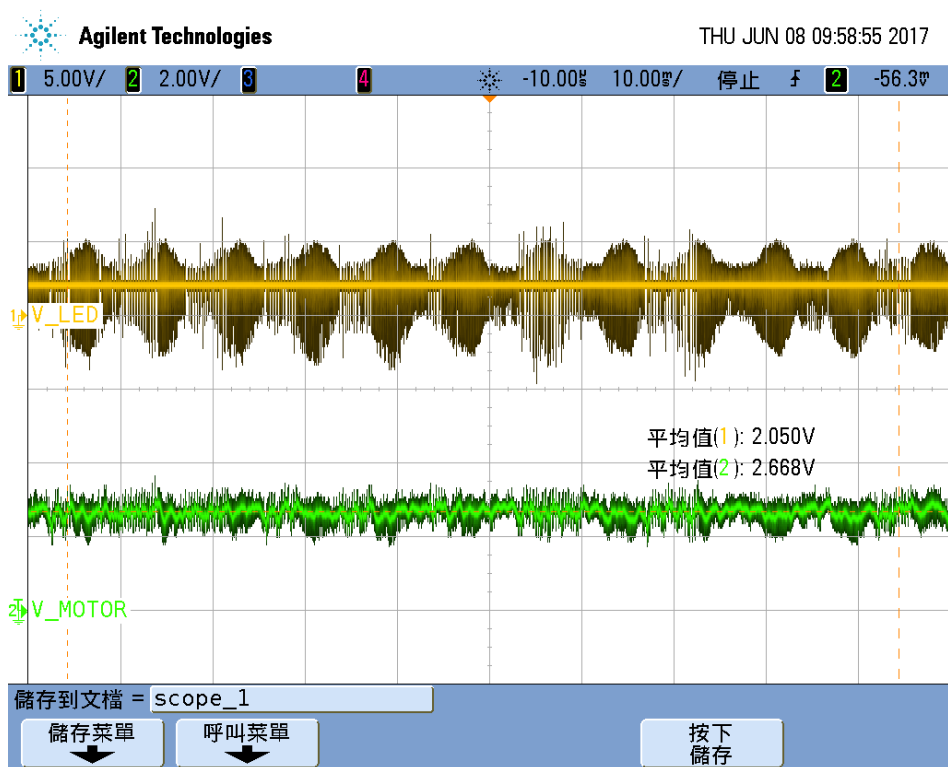
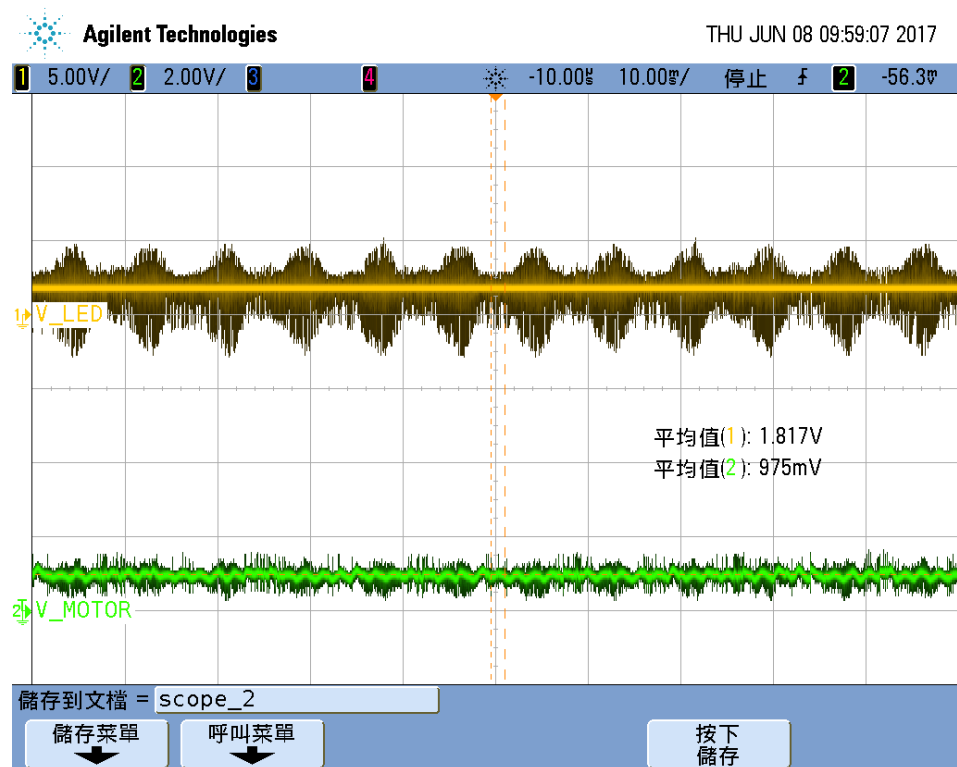
而經反向後的 VB、VC 電位，與 VA 的波形幾乎相同而呈倍數關係，三者在第一階段的電壓大致為 150V、34V、24V，比值為 6.25:1.42:1 與匝數比 80:16:12 相當，各比值的誤差約在 10% 上下。



上、下二圖同樣得增加了時軸單位長，並分別在輕、重載下所測得的波形圖，可看出與 VDS pin 腳電位有類似的結果，在相同時間內，重載下（下圖）導通的次數較多。

#### 4. 輸出波形

(1) LED 及馬達電壓 (CH1: DS1 正端 - 二次測地；CH2: 馬達正端)



上圖為輕載下的波形，下圖則為重載。

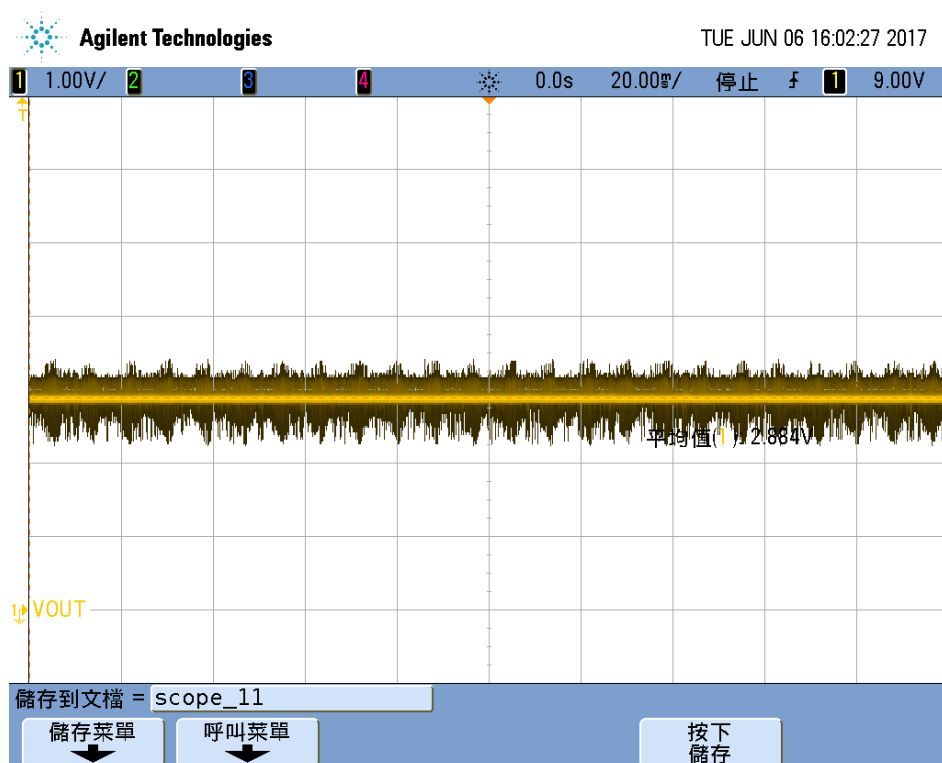
首先討論 LED 的跨壓，在兩情形下都有著相當穩定的壓差，而大小部分則有著不可忽略但相較於馬達不算很大的差異，我認為

原因要歸咎於元件本身。LED 為發光二極體 (Light-emitting diode)，根據二極體的性質，當有一定的跨壓足以使其導通時，在理想狀態下，此跨壓就為定值，這也是為何跨壓相較於馬達穩定許多。而實際情形下，跨壓仍會跟流經電流呈正相關（呈指數關係），在電路原理中有說明，重載（下圖）時流過 LED 的電流較大，此也就能解釋為何重載時跨壓較大了。

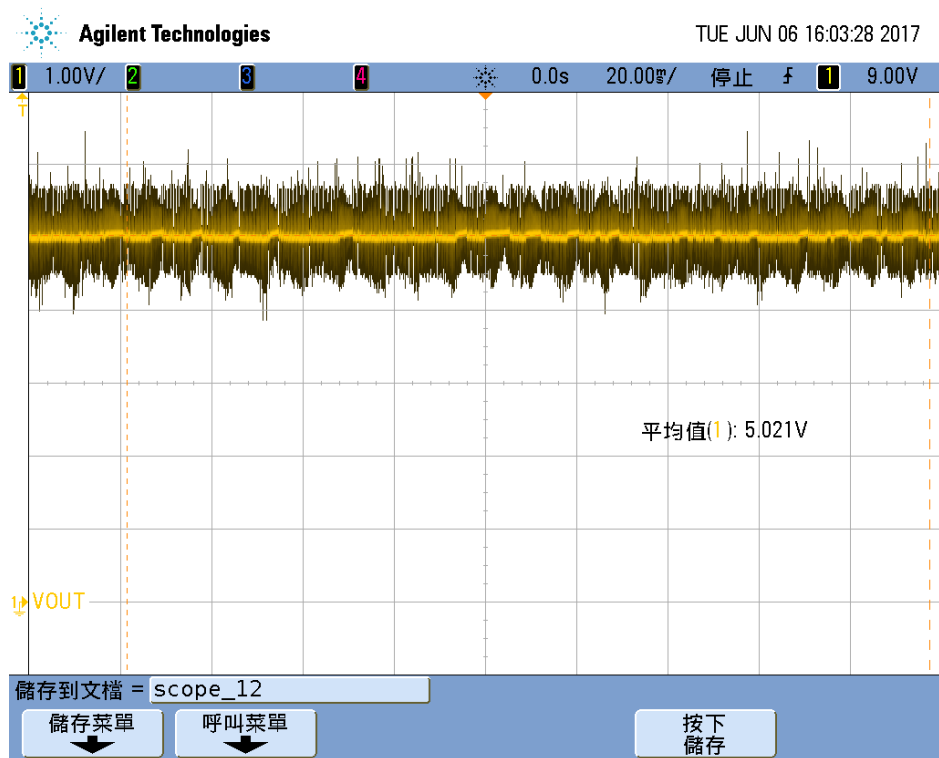
再來討論馬達的部分，與 LED 燈最大的差別有二，一來在輕、重載兩情形下，跨壓差很多；二來馬達跨壓雖然也趨近於一定值，但有明顯得有鉅齒狀震盪，以下將對此一現象討論。首先，馬達的轉速在此電路是以同整對其施予的跨壓控制，亦即跨壓大時轉速快。反之亦然，故明顯的電壓差異也容易想像。

再者，馬達的電位完全是依賴外在供給，在運轉時會不斷地消耗除能電容 C11 的能量，又其壓差與該電容相同，因此會造成電位下降。而當變壓器的二次側感應到輸入電流時，此電流會對電容充電，使得電位又變為上升。但根據電路的調節機制，輸入電流並不具連續性，因此讓跨壓波形變為鋸齒狀，在一穩定值上下擺動。同時在重載時，因為輸入電流頻率增加且消耗功率也增加，使得鋸齒波形的擺動頻率變得更高。

## (2) 輸出電壓（C2、C9 跨壓）（CH1: C2/C9 正端 - 二次側地）



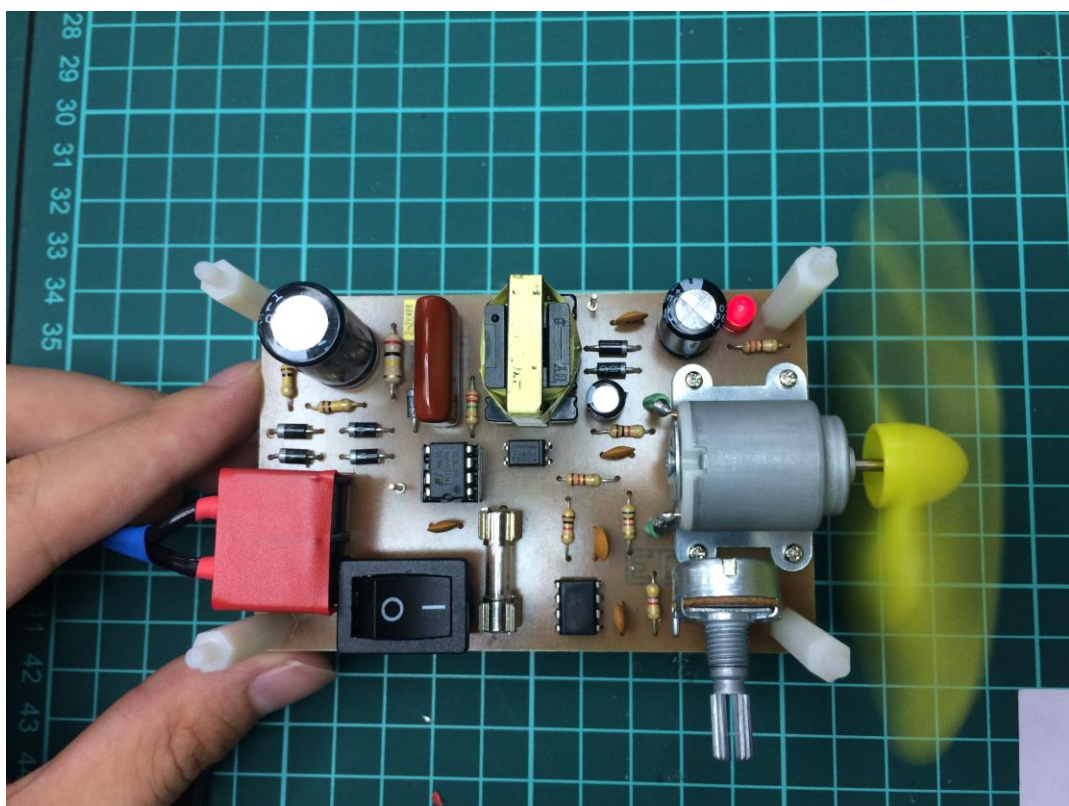
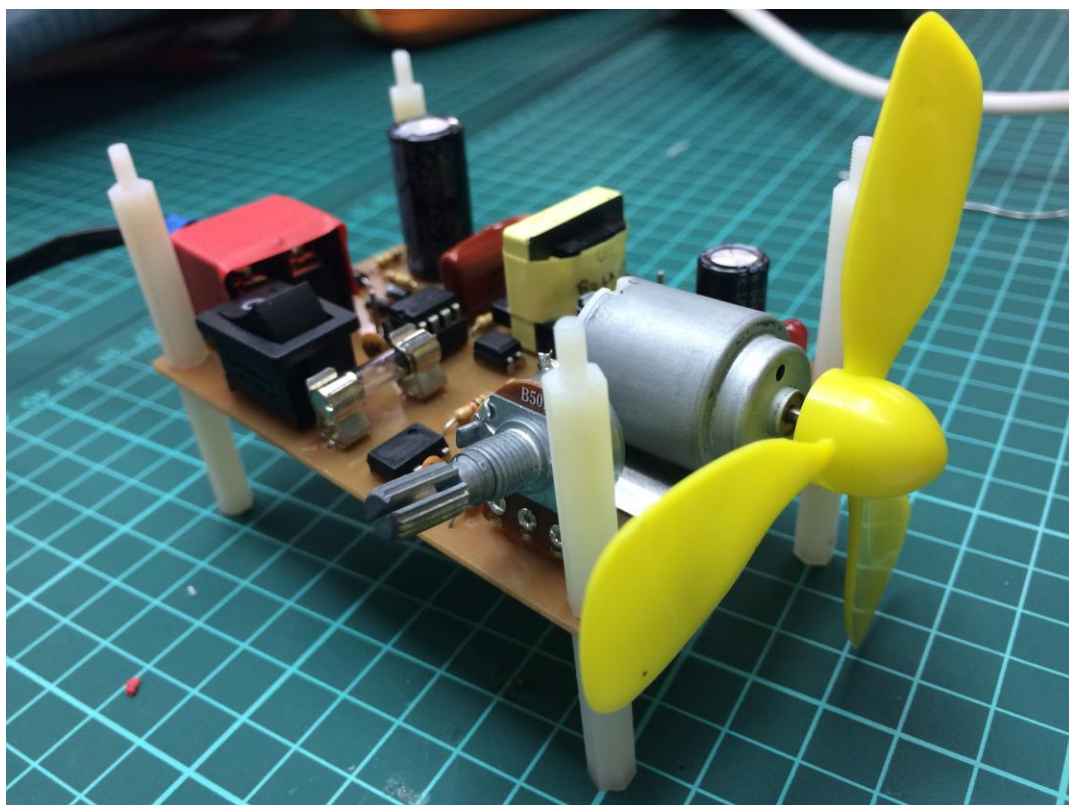




上圖為輕載下的波形，下圖則為重載。

此波形與馬達的跨壓相當類似，因為兩者同樣是變壓器二次側，通過二極體後的波形。不過相較馬達在輕、重載下電位為幾乎都沒有波動，我認為可能原因有二：一來是這裡的功率消耗沒有馬達這麼大，故在一循環內電位下降幅度較小，當有感應輸入電流流入時，不會有劇烈變化；二來，調節機制是直接根據此電位調整得，也就使得波形更為平順。

捌、 電路設計圖



## 玖、心得及建議

本實驗的後半學期都在做這次實驗的硬體成品「110V 交流輸入/直流輸出變壓器搭配可調速風扇」，雖然在學期初就已經知道會作出此一成品，但並不知道會從最一開始的電路圖設計到最終的插件焊接都由我們親手完成，花了這麼多時間，並有這麼高比例的參與及完成度，到現在還是難以置信自己竟然完成了這項創舉！

而如此高的參與度，讓我對電路製作的過程有完整的基本認知，同時在深入探討電路各區塊的功能及原理後，也讓我對各電子元件的應用，及 IC 元件的選用及使用時機有相當的理解。

也許是因為目前還是大二，接觸較多的還是系定必修，較為理論的課程。而經過這學期後，看到了好多以前曾經在課本出現或教授說過的現象，都確確實實得在電路上起了作用，各司其職，讓整個電路最終能如我們所預期的結果運作，這種學以致用的過程也令人相當興奮。

最終，很感謝助教及老師規畫了如此完整的課程，讓我在經過了一學期後，看到了好多從未接觸到的事情，將我的經驗及視野又提升了一級。

## 拾、參考資料

1. Datasheetbank，<http://www.datasheetbank.com/search-pdf/TNY266>，2017
2. 自動化在線，<http://www.autooo.net/utf8-classid164-id69705-1.html>，《TNY264 開關電源的應用電路設計》，2011/04/28
3. Wikipedia，<https://zh.wikipedia.org/wiki/>，印刷電路板，2017/05/30