

實驗九 達靈頓放大器與輸出級電路

一、 實驗目的：

- (1) 達靈頓 (Darlington Pair) 放大器電路原理與量測分析。
- (2) AB 類功率放大器輸出級電路原理與量測分析。
- (3) 利用達靈頓放大器電路與 AB 類輸出級電路建構一個使用 3.5mm 音源輸出與 8 歐姆(或 4 歐姆) 喇叭之擴音機。

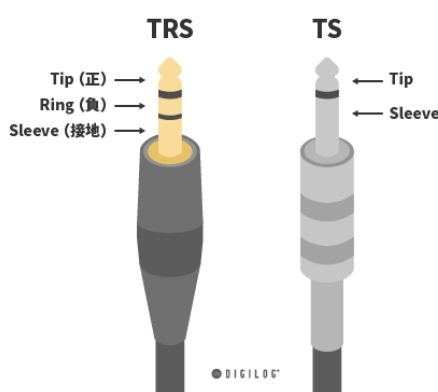
二、 原理說明：

(1) 音源接頭

以下內容有關音源接頭之說明，可以參考 DigiLog 聲響實驗室網頁介紹 (<https://digilog.tw/>)。

目前市面上最常見的音源連接線其接頭直徑為 6.3mm 和 3.5mm，6.3mm 接頭也可稱為"大頭"或"1/4 接頭"，一般用於樂器間連接，ex. 吉他、電子琴、麥克風等，而 3.5mm 接頭 (1/8 接頭) 則俗稱"耳機頭"，抗干擾性強且傳輸信號效果佳，多適用於手機、耳機、電腦等音源信號的傳輸。

常見的 6.3 接頭分為 TRS (Tip-Ring-Sleeve) 及 TS (Tip-Sleeve) 兩種，前者為平衡線後者為非平衡線；在外型分辨上，TRS 在接頭上有三環而 TS 則是兩環。



(Tip、Ring、Sleeve 分別為正、負及接地，左為 TRS 右為 TS)

■ TRS (Tip-Ring-Sleeve)：線內和其他平衡線相同，有正、負以及地線，可以是平衡輸出也可以做非平衡輸出；一次用兩條各為左右單聲道在平衡輸出、輸入的裝置間，左右聲道的訊號將會把雜訊互相抵消，因此可以做為平衡輸出；當你使用單條 TRS 線作為雙聲道時(左右聲道使用同一條線傳輸)，線內的兩條線都

會被用來傳輸訊號，一條左聲道、一條右聲道，沒有另外的線可作為噪音的抵消，因此為非平衡，通常在耳機的輸出、輸入上常見。

■ TS (Tip-Sleeve)：而 TS 線內只有兩條線，一條做為導體另一條為地線，TS 都是單聲道的。多用在單聲道輸出的設備上，像是吉他、單聲道效果踏板、部分的合成器或鼓機，在各種樂器設備上非常常見。和所有非平衡線一樣，線長越短越好。

3.5mm 接頭上面圈圈為絕緣體，用來分段接頭，依圈數不同可分為 TS(一極二環)、TRS(二環三極)、TRRS(三環四極)：

■ TS：傳輸單聲道，和 6.3 接頭相同構造與功能。

■ TRS：傳輸左、右聲道，常常在一些裝置上的 AUX 輸出及輸入上看到。

■ TRRS：除了分別傳輸左、右聲道以外還有麥克風的訊號，兩者都常在連接手機、電腦周邊產品以及領夾式麥克風上看到，像是筆電與手機的耳機接頭常常就是使用 TRRS 接頭。在 TRRS 接孔上可使用 TRS 接頭的左、右聲道與接地訊號。

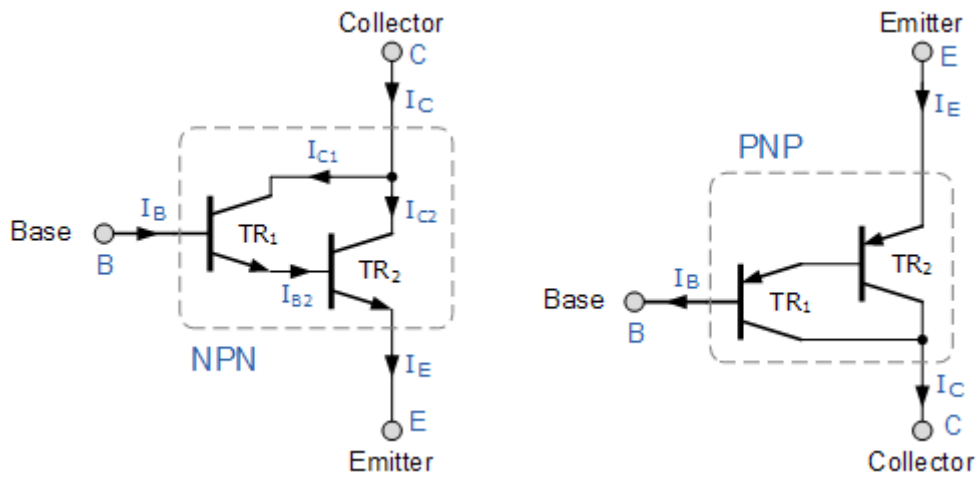


(2) 達靈頓放大器

說明參考來源：

<https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/darlington-transistor.html>

達靈頓對由連接在一起的兩個 NPN 或 PNP 電晶體組成，第一個電晶體 TR1 的發射極電流成為第二個電晶體 TR2 的基極電流，電晶體 TR1 作為射極跟隨器連接 TR2，TR2 作為共射極放大器連接，在此達靈頓對配置中，從電晶體或控制電晶體 TR1 的集極電流與主開關電晶體 TR2 的集極電流「同相」，如下圖所示。



以 NPN 達靈頓對為例，兩個電晶體的集極連接在一起，TR1 的射極驅動 TR2 的基極。此配置實現了 β 倍增益，因為對於基極電流 I_B ，集極電流為 βI_B ，其中電流增益大於一。因此，

$$I_C = I_{C1} + I_{C2}$$

$$I_C = \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 \cdot I_{B2}$$

但基極電流 I_{B2} 等於電晶體 TR1 射極電流 I_{E1} ，所以：

$$I_{B2} = I_{E1} = I_{C1} + I_B = \beta_1 \cdot I_B + I_B = (\beta_1 + 1) \cdot I_B$$

再代入第一個方程式：

$$I_C = \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 \cdot (\beta_1 + 1) \cdot I_B$$

$$I_C = \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 \cdot I_B$$

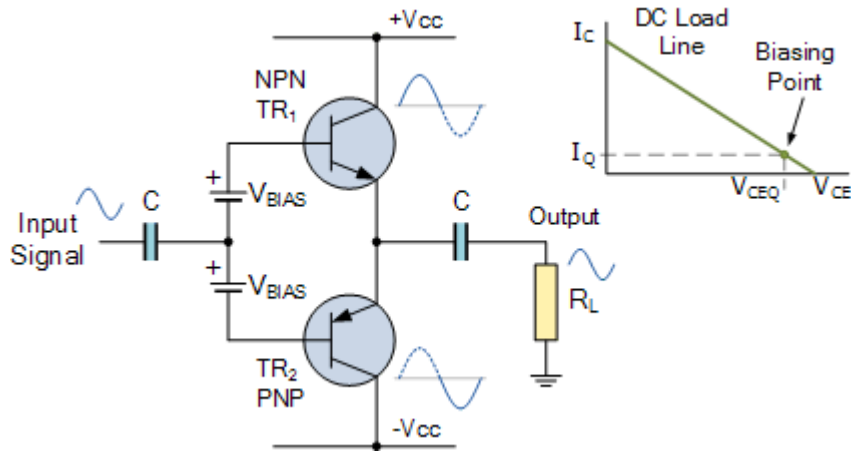
$$I_C = (\beta_1 + (\beta_2 \cdot \beta_1) + \beta_2) \cdot I_B$$

其中 β_1 和 β_2 是各個電晶體的增益。

這意味著總電流增益 β 由第一個電晶體的增益乘以第二電晶體的增益（當兩個電晶體的電流增益相乘時）給出。換句話說，一對雙極電晶體組合在一起形成單一達靈頓電晶體對，可以被視為具有非常高的 β 值並因此具有高輸入電阻的單一電晶體。

(3) AB 類輸出級電路

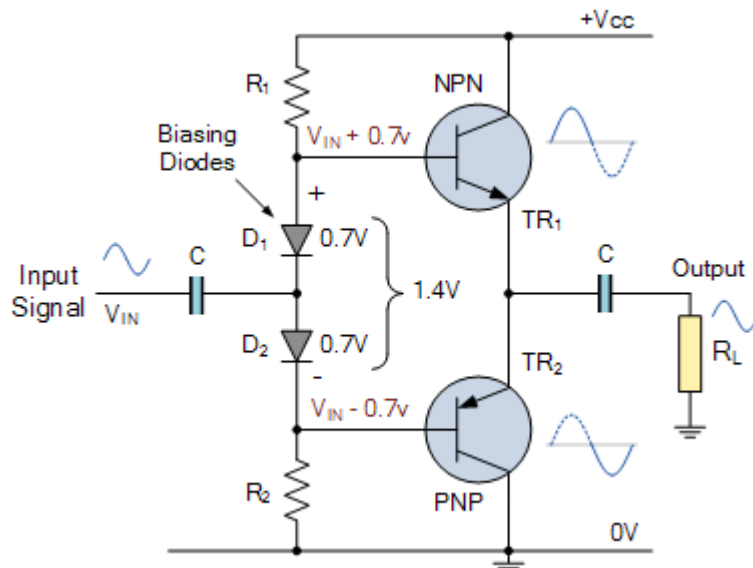
參考說明來源：<https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/class-ab-amplifier.html>



如上圖，在教科書中提到 AB 類放大器電晶體的偏壓是透過使用施加在 TR₁ 和 TR₂ 的基極上的合適固定偏壓來實現。在某一個電壓操作區域，兩個電晶體都導通，流經 TR₁ 的小靜態集電極電流與流經 TR₂ 的小靜態集電極電流構成放大器的靜態操作點電流 I_Q 。

當輸入訊號變成正值時，TR₁ 基極的電壓增加，產生類似量的正輸出，這增加了流經 TR₁ 的集電極電流，提供電流給負載 R_L 。然而，由於兩個基極之間的電壓是固定不變的，TR₁ 導通的任何增加都會導致 TR₂ 導通在正半週期內相等且相反的減少。

由於兩個電晶體之間的切換幾乎是瞬間發生的並且是平滑的，因此影響 B 類配置的交越失真大大減少。然而，當兩個晶體管切換時，不正確的偏壓可能會導致尖銳的交叉失真尖峰。使用固定偏壓允許每個電晶體導通超過一半的輸入週期（AB 類操作）。然而，在擴大機輸出級設計中若使用額外的電池作為偏壓不太實用。為解決此一問題的方法是在放大器偏壓裝置內使用一對正常的正向偏壓二極體，如下圖所示。



小的恆定電流流過 R1-D1-D2-R2 的串聯電路，產生輸入兩側對稱的壓力降。在沒有施加輸入訊號電壓的情況下，兩個二極體之間的點為 $V_{cc}/2$ 。當電流流過此鏈時，二極體兩端會產生約 0.7V 的正向偏壓降，電壓降施加到開關電晶體的基極-射極接面。

因此，二極體兩端的電壓降將電晶體 TR1 的基極偏壓至約 0.7 伏特，將電晶體 TR2 的基極偏壓至約 -0.7 伏特。因此，兩個矽二極體在兩個基極之間提供約 1.4 伏特的恆定壓降，將它們偏壓到截止電壓以上。另外考慮溫度效應，隨著電路溫度升高，位於電晶體旁的二極體的溫度也會升高。因此，二極體 PN 接面兩端的電壓降低，轉移一些電晶體基極電流，從而可穩定電晶體集極電流。

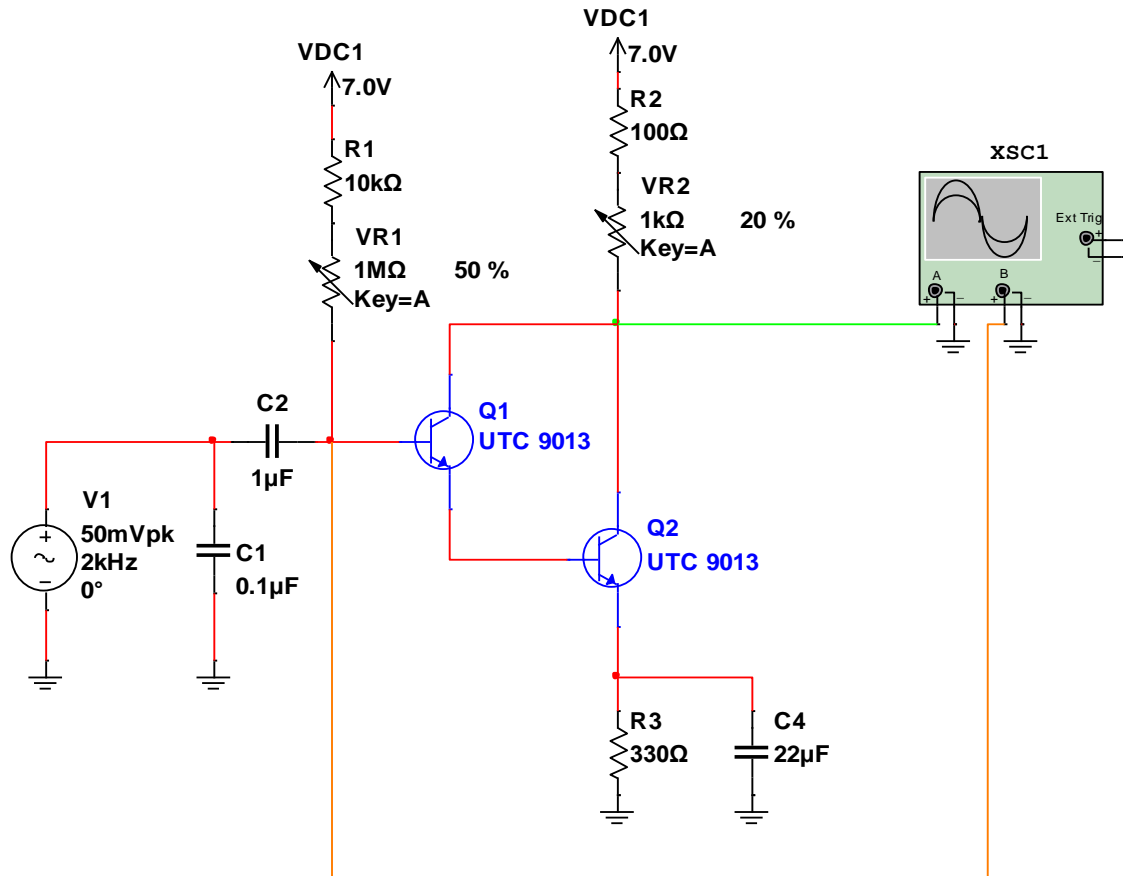
三、實驗器材：

電容	1 μ F	x2	
	22 μ F	x2	
	0.1 μ F, 47 μ F	x1	
電晶體	CS9013	x2	
	MJE3055	x1	
	MJE2955	x1	
二極體	1N4001	x2	
可變電阻	1 k Ω	x1	
	1 M Ω	x1	
電阻	1k Ω	x2	
	100 Ω , 330 Ω , 10k Ω		x1
音源線 (TRS 接頭)			x1
鱈魚夾連接線			x2
小喇叭單體 (SPK 8 Ω , 0.5W)			x1
具有 3.5mm 音源輸出接頭之筆電/PC/手機			x1

四、實驗步驟：

注意：輸出級電晶體通電運作期間溫度可高達攝氏 60 度以上，切勿直接觸摸以免燙傷。若需拔插電晶體，待關閉電源靜置 1 分鐘後檢視降溫狀況再做接觸。

1. 工作一：達靈頓放大電路



- (1)按工作一圖連接電路，調信號產生器為 2kHz 的正弦波，震幅 V_{pk} 為 50 mV (100mV, peak to peak voltage)，作為測試輸入信號。
- (2) VR1 調為 500K 歐姆，VR2 調為 200 歐姆，先不輸出 V1 波形，紀錄包括精準之 VDC1, Q1-Base, Q1-Collector, Q2-Emitter 等各節點之靜態操作點電壓值至小數以下第二位。
- (3) 利用 (2) 的結果，將 Q1-Q2 所構成的達靈頓電晶體對電路視為一個等效 NPN 電晶體，計算於靜態操作點下等效之電晶體 β 以及 g_m 參數。
- (4)改變 VR1 數值，由最小 (大約 0 歐姆) 至最大 (大約 1M 歐姆)，觀察示波器 A 端電壓變化，並將有明顯差異結果繪出(或拍照黏貼)於報告上。
- (5)設定 VR1 為 500K 歐姆，改變 VR2 由最小至最大，觀察並紀錄(如表 1)兩端電壓放大增益。

VR2 (歐姆)	100	300	500	700	1000
A_v					

表 1

- (6) 固定 VR1 為 500K 歐姆以及 VR2 為 200 歐姆，調整 V1 輸入電壓自最小 (例如 5mV) 至 100mV，觀察並以示波器波形估算電壓放大增益紀錄於表 2。

V1 (mV)	5	10	30	60	100
Av					

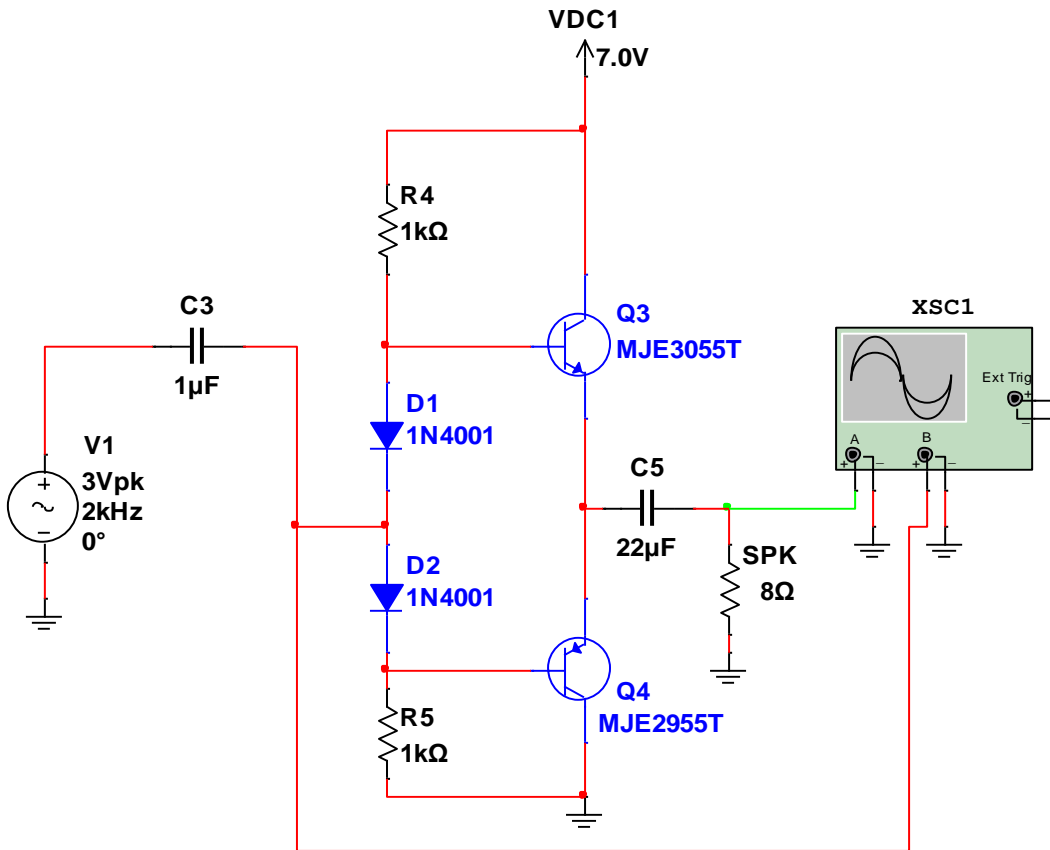
表 2

(7) 固定 VR1 為 500K 歐姆以、VR2 為 200 歐姆、以及 V1 電壓為 50mV，
改變輸入訊號頻率範圍 500Hz 至 8KHz 以示波器波形估算電壓放大增益紀錄於表 3。

V1 (Hz)	500	1K	3K	5K	8K
Av					

表 3

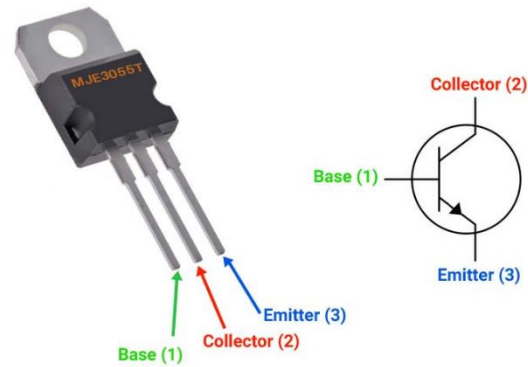
2. 工作二：AB 類輸出級電路



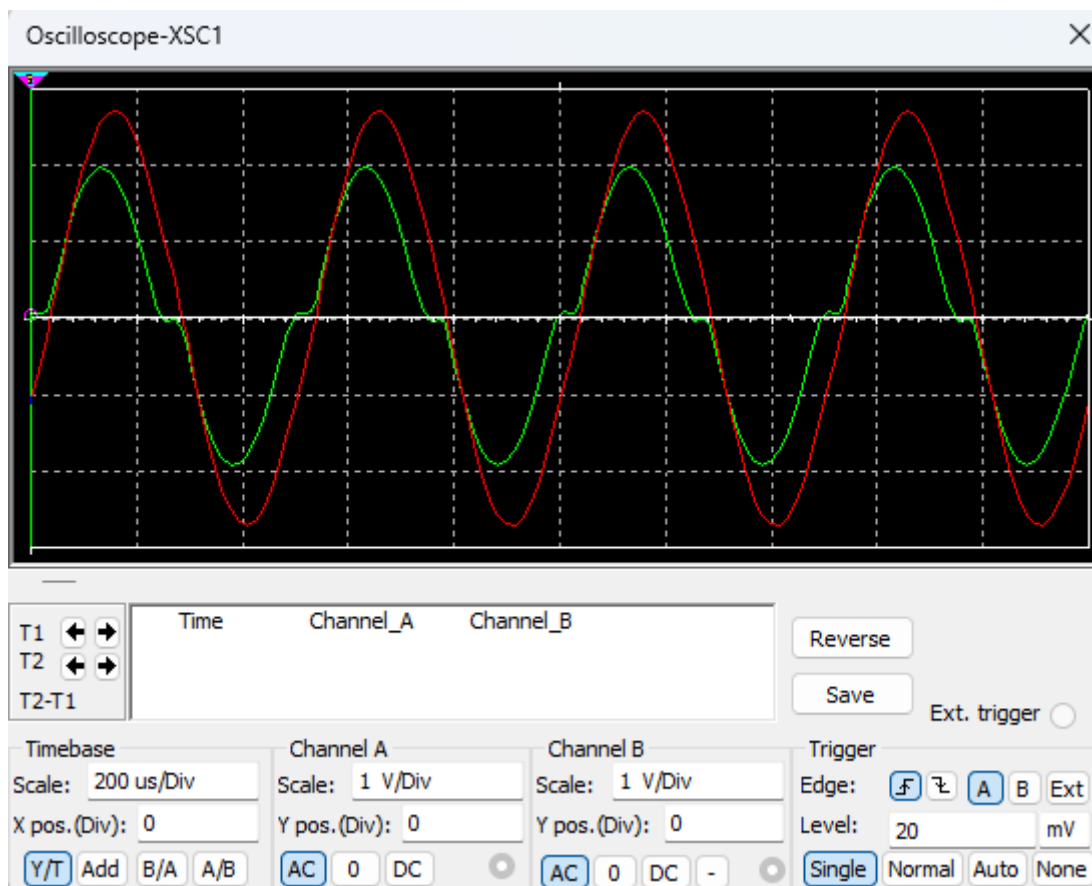
(1) 按工作二電路圖連接線路，調整信號產生器輸出為 3Vpk 以及 2kHz 的正弦波。將 1K 歐姆可變電阻調為 10 歐姆左右(勿過小形成 0 阻抗)，用以替代 8

歐姆的喇叭 (SPK) 當作負載阻抗，以免測試過程產生噪音。

注意: MJE3055T 與 MJE2955T 的接腳均相同，如下圖:



(2) 先將 D1 及 D2 兩二極體短路或移除後短路形成 B 類放大器，觀察示波器輸出波形，是否有 crossover 現象？



(3) 調整信號產生器輸出電壓為 1Vpk，恢復兩二極體連結，波形是否消除 crossover？

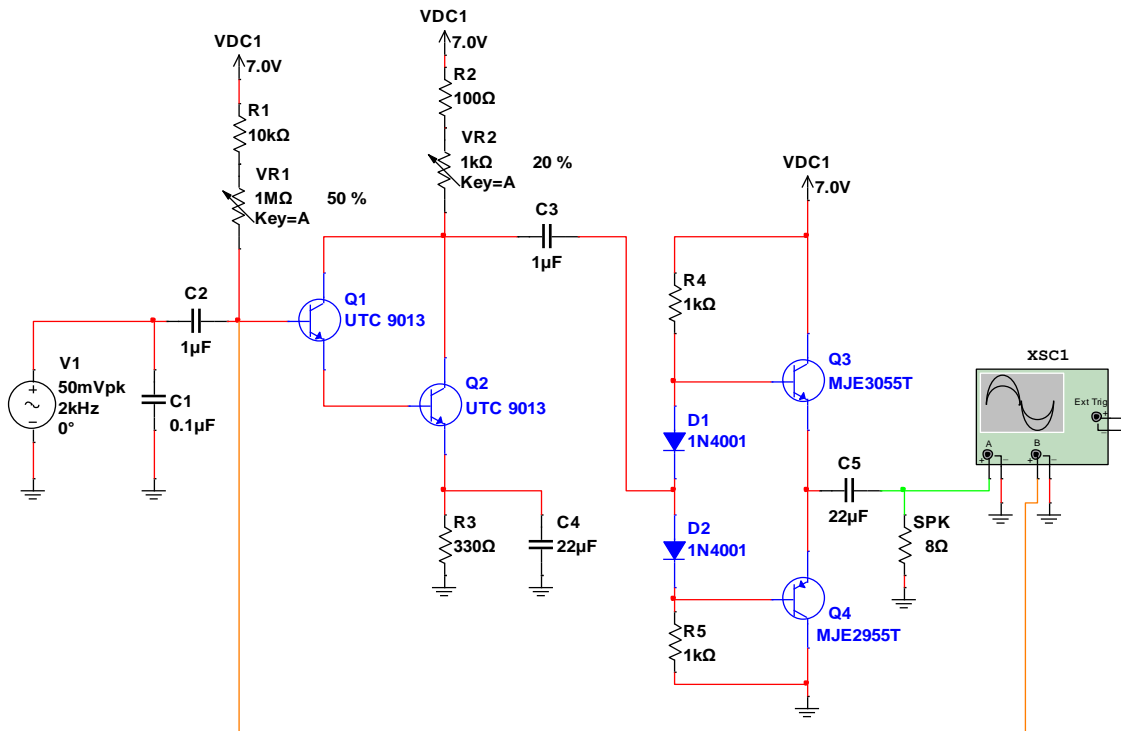
(4) 調整信號產生器輸出電壓為 3Vpk，波形變成如何？繪出結果或拍照附於報告

上。

- (5) 調整訊號產生器輸出電壓，觀察調低到多少 Volt 將可使輸出波形恢復為正常正弦波？
- (6) 將信號產生器輸出電壓固定為 3Vpk，若將電源供應器電壓調高，觀察調高到多少 Volt 將可使輸出波形恢復為正常正弦波？完成本項後請記得將電源供應器電壓恢復為 7 福特。
- (7) 計算此附載阻抗在無失真情況下輸出理想正弦波的瞬時操作功率限制。

3. 工作三：聲音播放測試

- (1) 參考下圖，連結工作一與工作二線路，完成完整的音源放大器電路。利用鱷魚夾連接線將音源線之左聲道 (或右聲道) 以及接地訊號連接至本線路上之 V1 訊號源及接地端。音源線可接自 PC/筆電/手機等具有 3.5mm TRS 插孔之音樂撥放裝置。注意設定理想電壓與電阻值。



- (2) 觀察電源供應器的輸出電壓與電流變化，**注意勿使電壓超過 10 福特，建議實驗過程經常性保持在 7 福特以下**，以防造成電晶體產生過大功率消耗與產生高熱。
- (3) 下載測試音檔或撥放自己準備的音樂檔。注意控制音量，建議勿使喇叭輸出電壓過大，以避免喇叭失真破音。
- (4) 固定 VR2 約為 200 歐姆，測試改變 VR1 電阻值由小至大，對於聲音輸出的影響。
- (5) 固定 VR1 約為 500k 歐姆，測試改變 VR2 電阻值由小至大，對於聲音輸出的影響。注意當 VR2 電阻調為多少可以得到你認為的最佳聲音輸出？過大的

VR1 電阻會產生甚麼樣音質變化?

(6) 當調高撥放器音量時，改變電源供應器電壓由 5 福特至 9 福特，觀察對音質的影響。

(7) 如果拿掉 C5 的 22uF 電容，換成 47uF 電容，或是輸出直接接 SPK，比較對音質與音量的影響。三者相比較，你較喜歡何者的音質?

(8) 比對本課程參考測試音檔，在時間 1:04 分鐘附近按下示波器之 Run/Stop 鍵，節錄示波器輸出結果如下圖，黃色為音源輸入波形，綠色為喇叭端訊號波形，可比較輸入音源波形與喇叭端之訊號放大後波形差異。



五、 問題討論：

1. 利用工作一項目 (2) 的量測結果，分析工作一線路的靜態操作點電壓放大增益值。
2. 根據工作一的項目 (4)-(6) 的紀錄，討論實驗觀察到的電壓放大增益值與討論 1 獲的靜態操作點電壓放大增益相同？ 如果不同請分析原因，是否當輸入訊號越小的時候，與靜態操作點所計算的結果越接近？
3. 基於工作二 (4)-(7) 項結果，討論電源電壓對 SPK 負載失真的影響。
4. 分析工作二線路當使用 7 Volt 電源電壓，SPK 負載的無失真電壓為何在 2 Volt 左右？

5. 分析工作二線路中，Q3 與 Q4 電晶體的最大電流與 V_{ce} , V_{ec} 的最大承受電壓為何？請上網查閱電晶體規格參數，討論是否此線路合適採用 S9013 NPN 與 S9012 PNP 電晶體？
6. 在共基極組態放大器實習中， R_L 值得大小對各點波形有何影響？為什麼？
7. 在工作三項目 (5) 中，討論為何不斷調高 VR2 電阻，會對輸出音質產生破音？
8. 參考工作三項目 (7)，討論 C5 電容的用處。