

## 實驗十 BJT 電路(二) 功率放大器

### 10-1 前言：

功率放大器(power amplifier)指的是大訊號(large-signal)放大器，通常其操作範圍涵蓋負載曲線(load-line)較大範圍。值得注意的是，功率放大器通常用於訊號最後階段的放大，並將此功率較大的訊號傳至喇叭或天線等元件。

本章實驗主要介紹以 BJT 實現三種功率放大器 A 級(class A)功率放大器、B 級(class B)功率放大器、C 級(class C)功率放大器。如圖 10-1 所示，三種功率放大器的分類主要依照放大器工作的時間長短來區分。以週期  $360^\circ$  的輸入訊號  $V_{in}$  為例，若每個週期放大器工作時間為  $360^\circ$  則為 A 級放大器； $180^\circ$  則為 B 級放大器；小於  $180^\circ$  則為 C 級放大器。

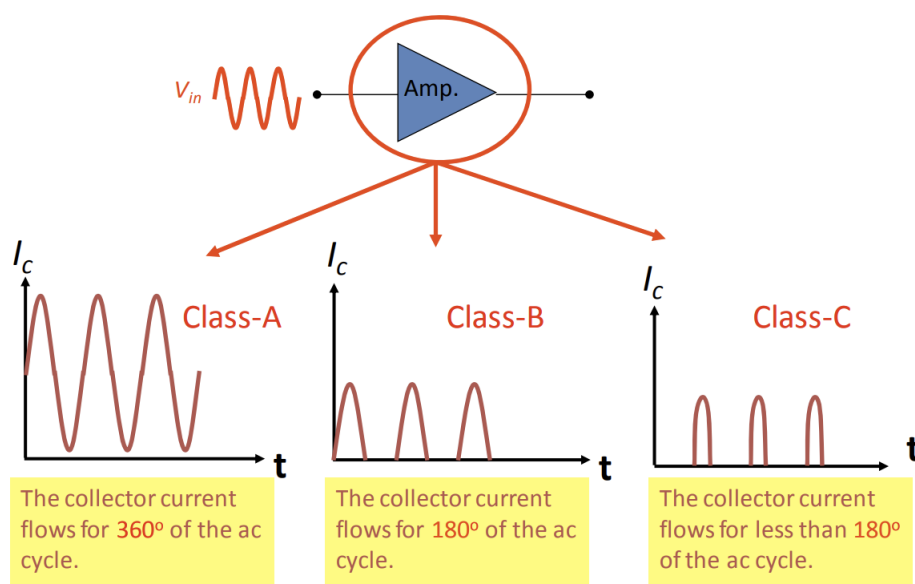


圖 10-1 功率放大器分類圖

### 10-2 基本原理：

(本文件如無特別說明，以小寫下標表示與 AC-相關的量；以大寫下標表示與 DC-相關的量)

注意：BJT 必須工作在主動模式，才能確實放大信號。由於  $I_B$  在主動模式極小可忽略，因此此處不須化為戴維寧電路。

#### 10-2-1 A 級放大器

分析圖 10-2 之 A 級放大器可分下列步驟：

Step 1：DC-分析

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} ; I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

$$I_C \cong I_E$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

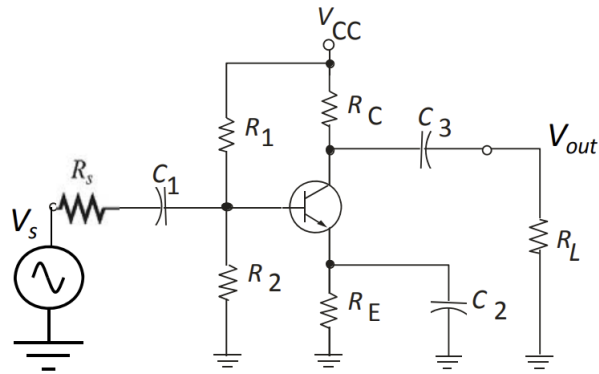


圖 10-2 A 級功率放大器

由上面  $I_C$  與  $V_{CE}$  可得到 Q 點。

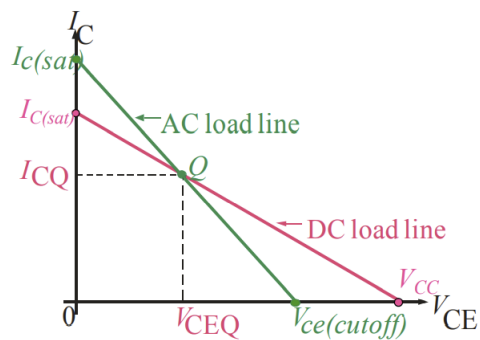


圖 10-3 A 級功率放大器之附載曲線

Step 2 : AC-分析

利用  $\pi$  模型將圖 10-2 之放大器轉換成圖 10-3 之等效 AC 電路。

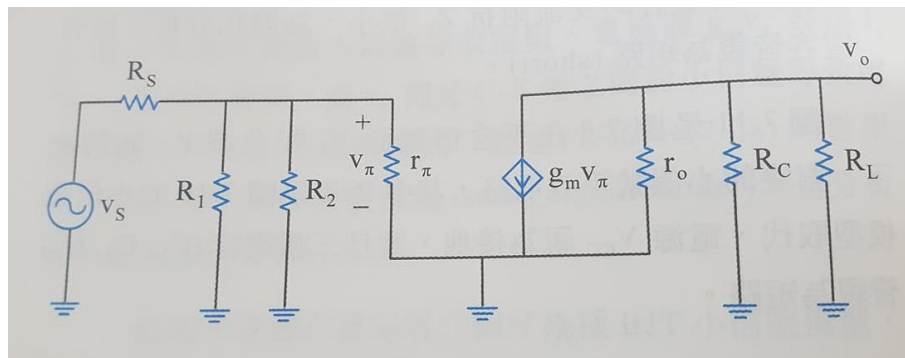


圖 10-4 A 級功率放大器之等效電路

重要公式：

1.  $g_m = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{\partial}{\partial V_{BE}} I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = \frac{1}{V_T} I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = \frac{I_C}{V_T}$
2.  $r_\pi = \left( \frac{\partial I_B}{\partial V_{BE}} \right)^{-1} = \left( \frac{\partial}{\partial V_{BE}} \frac{1}{\beta} I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{V_T} \frac{1}{\beta} I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \right)^{-1} = \frac{V_T}{I_B} = \frac{\beta}{g_m}$
3.  $r_e = \left( \frac{\partial I_E}{\partial V_{BE}} \right)^{-1} = \left( \frac{\partial}{\partial V_{BE}} \frac{1}{\alpha} I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{V_T} \frac{1}{\alpha} I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \right)^{-1} = \frac{V_T}{I_E} = \frac{\alpha}{g_m}$

$$\text{其中 } \alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$$

$$4. r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

在主動模式中，通常假定  $I_C$  僅與  $V_{BE}$  有關，而事實上， $I_C$  仍會受  $V_{CE}$  影響，只是其影響遠比  $V_{BE}$  小所以忽略。兩者間的關係稱為爾力效應 (Early effect)，關係式為：

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \cdot \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right)$$

$V_A$  稱為 Early voltage，通常是很大的數值，因為  $V_A$  很大而  $V_T$  很小，故  $I_C$  受  $V_{CE}$  的影響遠小於  $V_{BE}$ 。

若考慮 Early effect，則  $I_C$  對  $V_{CE}$  的偏微分為

$$\frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} = \frac{I_S}{V_A} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \cong \frac{I_C}{V_A}$$

故  $\Delta I_C$  與  $\Delta V_{CE}$  的關係為

$$\Delta I_C = \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \cdot \Delta V_{CE} = \frac{I_C}{V_A} \cdot \Delta V_{CE} = \frac{1}{r_o} \cdot \Delta V_{CE}$$

其中  $r_o$  表示為

$$r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

代表  $\Delta I_C$  對應  $\Delta V_{CE}$  的變動關係。

假設

$$R_{eq1} = R_1 // R_2 // r_\pi$$

$$R_{eq2} = r_o // R_C // R_L$$

從圖 10-3，利用分壓定理可得

$$v_\pi = v_s \cdot \frac{R_{eq1}}{R_s + R_{eq1}}$$

於是，輸出信號  $v_o$  可表示為

$$\begin{aligned} v_o &= -g_m v_\pi \cdot R_{eq2} \\ &= -g_m v_s \cdot \frac{R_{eq1}}{R_s + R_{eq1}} \cdot R_{eq2} \end{aligned}$$

則

5. 電壓增益：

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = -g_m R_{eq2} \cdot \frac{R_{eq1}}{R_s + R_{eq1}}$$

6. 功率增益：

$$A_p = \frac{P_L}{P_{in}} = \frac{v_o^2 / R_L}{v_s^2 / R_{eq1}} = A_v^2 \left( \frac{R_{eq1}}{R_L} \right)$$

7. DC 靜功率 (DC Quiescent Power,  $P_{DQ}$ )：

$$P_{DQ} = I_{CQ} V_{CEQ}$$

即為沒有小訊號時的直流功率。

8. 最大輸出功率 (Max. Output Power)：

$$\begin{aligned} P_{out(max)} &= \left( \frac{1}{\sqrt{2}} I_{C(max)} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{2}} V_{C(max)} \right) \\ &= \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{V_{CEQ}}{R_C} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{2}} I_{CQ} R_C \right) \\ &= 0.5 V_{CEQ} I_{CQ} \end{aligned}$$

9. 最大效率 (Max. Efficiency)：

$$\eta_{max} \triangleq \frac{P_{out(max)}}{P_{DC}} = \frac{0.5 V_{CEQ} I_{CQ}}{V_{CC} I_{CQ}} = \frac{0.5 V_{CEQ} I_{CQ}}{2 V_{CEQ} I_{CQ}} = 0.25$$

### 10-2-2 B 級放大器

由於 B 級放大器在一週期內只有工作一半的時間(亦即  $180^\circ$ )，為了讓整個週期的輸入訊號均能獲得放大，一般使用互補對稱電晶體 (complementary symmetric transistors) 來產生 B 級推-拉(class B push-pull) 放大器(如圖 10-5 所示)。其主要操作原理是利用一個 npn-BJT 與一個 pnp-BJT 分別負責半個週期的訊號放大，其結果便等同整個週期訊號皆可被放大。然而，由於 Base 與 Emitter 間存在位能障礙(barrier potential)，單純使用圖 10-5 的電路將造成訊號失真的情形(如圖 10-6 所示)。

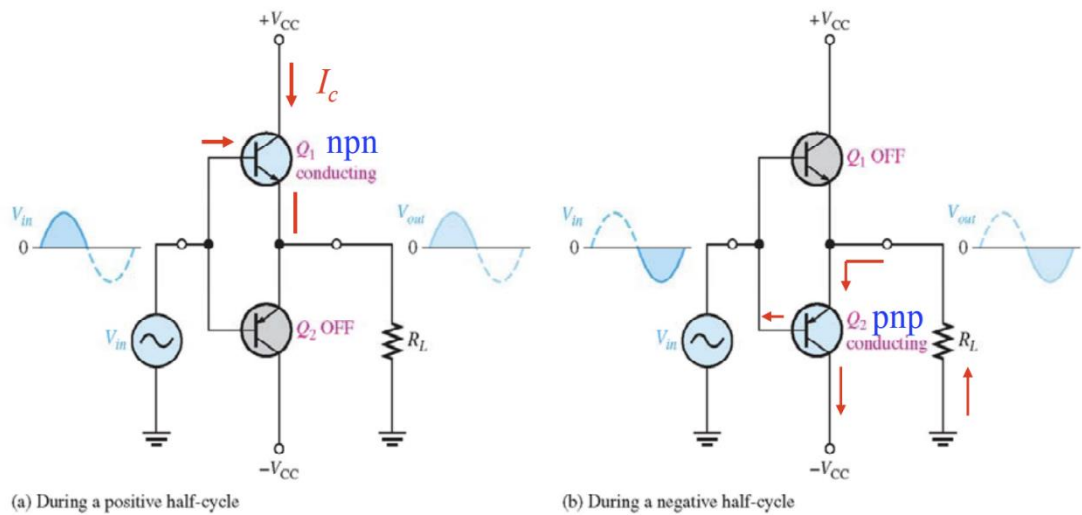


圖 10-5 基本的 B 級推-拉放大器

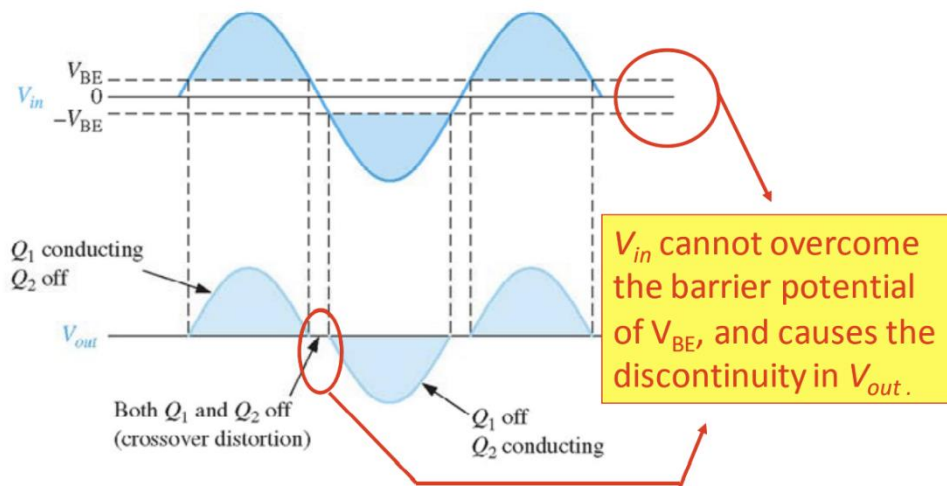


圖 10-6 因 Base 與 Emitter 間的位能障礙，造成輸出訊號失真的示意圖。

為了解決此問題，可利用電流印射(current mirror)的概念解決(如圖 10-7 所示)。

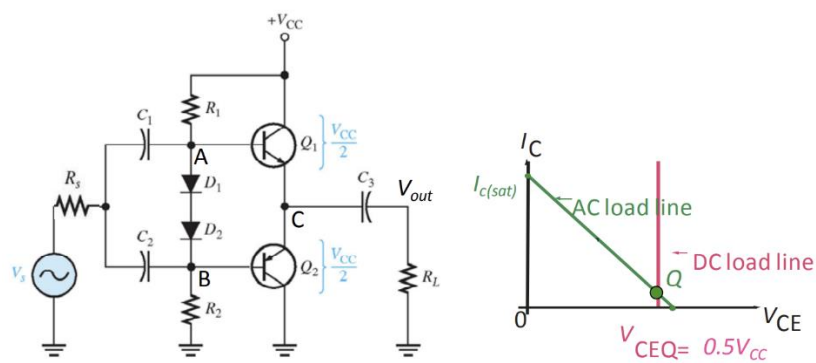


圖 10-7 以電流印射概念所設計之 B 級推-拉放大器。

重要公式：

1. 電壓增益(由 base 至  $V_{out}$ )

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{base}} \approx 1$$

(因為此電路為 emitter follower)

2. 電壓增益(由  $V_{in}$  至  $V_{out}$ )

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_s} = \left(\frac{V_{base}}{V_s}\right) \left(\frac{V_{out}}{V_{base}}\right)$$

其中

$$\frac{V_{base}}{V_s} = \frac{R_{eq1}}{R_s + R_{eq1}}$$

$$R_{eq1} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_\pi$$

3. 輸出功率與最大輸出功率(Output Power and Max. Output Power)

$$P_{out} \triangleq I_{out} V_{out}$$

$$P_{out(max)} \triangleq I_{out(max)} V_{out(max)}$$

其中

$$I_{out(max)} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} I_{c(sat)}$$

$$V_{out(max)} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} V_{CEQ}$$

$$P_{out(max)} = 0.5 I_{c(sat)} V_{CEQ} = 0.25 I_{c(sat)} V_{CC}$$

4. 直流輸入功率與最大直流輸入功率(DC input Power and max. DC input Power)

$$P_{DC} \triangleq I_{CC} V_{CC} \text{ where } I_{CC} = \frac{I_c}{\pi} \rightarrow P_{DC} = \frac{I_c}{\pi} V_{CC}$$

$$P_{DC(max)} \triangleq I_{CC} V_{CC} \text{ where } I_{CC} = \frac{I_{c(sat)}}{\pi} \rightarrow P_{DC(max)} = \frac{I_{c(sat)}}{\pi} V_{CC}$$

5. 最大效率(Max. Efficiency)

$$\eta_{max} \triangleq \frac{P_{out(max)}}{P_{DC(max)}} = 0.25\pi \approx 0.79$$

### 10-2-3 C 級放大器

C 級放大器一般用於 RF 震盪器或調變器(如圖 10-8 所示)。若要使電晶體導通產生  $I_c$ ，輸入訊號  $V_{in}$  須滿足  $V_{in} > |V_{BB}| + V_{BE}$ ；換言之，當  $|V_{BB}|$  增加時導通時間變短，放大器的效率提高。此外，若欲放大的頻率成分  $f_r$ ，可藉由調整電容與電感達成，其中， $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC_2})$ 。

重要公式：

1. 最大輸出功率(Max. Output Power)

$$P_{out} \triangleq \frac{V_{out}^2}{R_c} = \frac{V_{out}^2}{R_{tank} \parallel R_L}$$

$$\rightarrow P_{out(max)} \cong \frac{(\frac{1}{\sqrt{2}}V_{CC})^2}{R_c} = \frac{0.5V_{CC}^2}{R_c}$$

2. BJT 導通時之功率消耗(Power Dissipation during the BJT is on)

$$P_{D(on)} = I_c V_{ce}$$

3. 平均功率消耗(Averaged Power Dissipation)

$$P_{D(avg)} \triangleq (\frac{t_{on}}{T})P_{D(on)}$$

(如圖 12-7 所示， $\frac{t_{on}}{T}$  很小，所以  $P_{D(avg)}$  很小)

4. 效率(Efficiency)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{total}} = \frac{P_{out}}{P_{D(avg)} + P_{out}} \cong 1$$

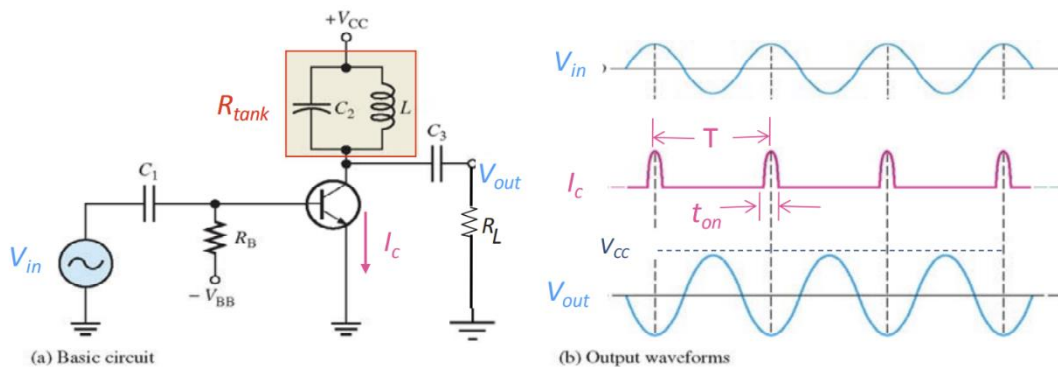


圖 10-8 用於頻率調變之 C 級放大器。

12-3 實驗步驟：

實驗一：A 級放大器

1. 將一個射極跟隨器(emitter follower)連接於 10-2 之 A 級放大器，則成為一個具有驅動揚聲器能力的 A 級放大器(如圖 10-9)；各元件表 10-3-1 所示。

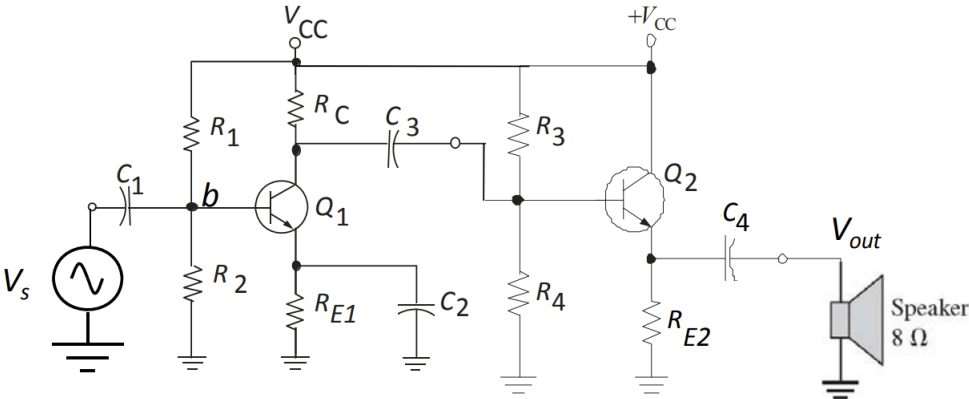


圖 10-9 實驗一電路圖

表 10-3-1 實驗一電路元件

| 元件 or 符號       | 規格                        | 型號      |
|----------------|---------------------------|---------|
| $Q1$           |                           | 2SC1815 |
| $Q2$           |                           | 2SC1815 |
| $V_s$          | 50mV <sub>pp</sub> ; 1KHz |         |
| $V_{CC}$       | 2V                        |         |
| $C_1$          | 1 $\mu$ F                 |         |
| $C_2$          | 100 $\mu$ F               |         |
| $C_3$          | 0.22 $\mu$ F              |         |
| $C_4$          | 100 $\mu$ F               |         |
| $R_1$          | 1K $\Omega$               |         |
| $R_2$          | 10K $\Omega$              |         |
| $R_3$          | 1K $\Omega$               |         |
| $R_4$          | 22K $\Omega$              |         |
| $R_{E1}$       | 4.7K $\Omega$             |         |
| $R_{E2}$       | 33 $\Omega$ , 0.5w        |         |
| $R_C$          | 1K $\Omega$               |         |
| $R_L(speaker)$ | 8 $\Omega$ , 0.5w         |         |

2. 以理論分析圖 10-9 並完成下表。

表 10-3-2

|                                          |                                              |                                                |                                                |                                                                                                                                    |
|------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 電壓增益<br>$A_v \triangleq \frac{V_c}{V_b}$ | 功率增益<br>$A_p \triangleq \frac{P_{out}}{P_s}$ | DC 靜功率<br>$P_{DQ1} \triangleq I_{CQ1}V_{CEQ1}$ | DC 靜功率<br>$P_{DQ2} \triangleq I_{CQ2}V_{CEQ2}$ | 最大效率<br>$\eta_{max} \triangleq \frac{P_{out(max)}}{P_{DC1} + P_{DC2}}$<br>$= \frac{0.5V_{CEQ2}I_{CQ2}}{V_{CC}(I_{CQ1} + I_{CQ2})}$ |
|                                          |                                              |                                                |                                                |                                                                                                                                    |

Hint：須先算出 Emitter follower 的  $R_{eq1}$  與  $R_{eq2}$ 。

- 利用產波器產生  $V_s = 50mV_{pp}$ ；1KHz 的 sine 訊號，並用示波器量測並記錄  $V_b$  與  $V_{out}$  的波形。同時計算實驗之  $A_v$  與  $A_p$  看看與理論值差多少。
- 當  $V_s = 0$  時，量測流經  $Q_1$  與  $Q_2$  的電流  $I_C$  與  $V_{CE}$ ，求出 DC 靜功率看看與理論值差多少。
- 調整  $V_s$  從 0 逐漸增加，直到示波器上的  $V_{out}$  發生被裁切到的現象為止。記錄此時的  $V_b$  與  $V_{out}$  同時計算此時的效率  $\eta \triangleq \frac{P_{out}}{P_{DC1} + P_{DC2}}$  (hint:  $V_{out}$  變化時  $I_C$  也會等比例變化，可利用此概念推導而得)。(註：此則為電路 10-10 的極限)。

## 實驗二：B 級放大器

- 連接一個如圖 10-7 之 B 級放大器，各元件表 10-3-3 所示。

表 10-3-3 實驗二電路元件

| 元件 or 符號       | 規格                        | 型號      |
|----------------|---------------------------|---------|
| $Q1$           |                           | 2SC1815 |
| $Q2$           |                           | 2SA1015 |
| $V_s$          | 0.2V <sub>pp</sub> ; 1KHz |         |
| $V_{CC}$       | 2V                        |         |
| $C_1$          | 22 $\mu$ F                |         |
| $C_2$          | 22 $\mu$ F                |         |
| $C_3$          | 470 $\mu$ F               |         |
| $D_1$          |                           | 1N4001  |
| $D_2$          |                           | 1N4001  |
| $R_1$          | 470 $\Omega$              |         |
| $R_2$          | 470 $\Omega$              |         |
| $R_L(speaker)$ | 8 $\Omega$ , 0.5w         |         |

2. 以理論分析此 B 級放大器並完成下表。

表 10-3-4

|               |                                                                      |                                                       |                                                                 |
|---------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 電壓增益<br>$A_V$ | 最大輸出功率<br>$P_{out,max} \triangleq I_{out(rms),max} V_{out(rms),max}$ | 最大直流輸入<br>功率<br>$P_{DC,max} \triangleq I_{CC} V_{CC}$ | 最大效率<br>$\eta_{max} \triangleq \frac{P_{out(max)}}{P_{DC,max}}$ |
|               |                                                                      |                                                       |                                                                 |

3. 利用產波器產生  $V_s = 0.2V_{pp}$ ；1KHz 的 sine 訊號，並用示波器量測並記錄  $V_A$  與  $V_{out}$  的波形。同時計算實驗之  $A_v$  看看與理論值差多少。
4. 當  $V_s = 0$  時，量測流經  $Q_1$  與  $Q_2$  的電流  $I_C$  與  $V_{CE}$ ，看看與理論值差多少。
5. 調整  $V_s$  從 0 逐漸增加，直到示波器上的  $V_{out}$  發生被裁切到的現象為止。記錄此時的  $V_A$  與  $V_{out}$  同時計算此時的效率  $\eta \triangleq \frac{P_{out}}{P_{DC}}$  (hint:  $V_{out}$  變化時  $I_C$  也會等比例變化，可利用此概念推導而得)。

### 實驗三：C 級放大器

1. 連接一個如圖 10-8 之 C 級放大器，各元件表 10-3-5 所示。

表 10-3-5 實驗三電路元件

| 元件 or 符號 | 規格                      | 型號 |
|----------|-------------------------|----|
| $V_s$    | 2V <sub>pp</sub> ; 5KHz |    |
| $V_{CC}$ | 4V                      |    |
| $V_{BB}$ | ground                  |    |
| $L$      | 220 $\mu$ H             |    |
| $C_1$    | 10nF                    |    |
| $C_2$    | 1 $\mu$ F               |    |
| $C_3$    | 10nF                    |    |
| $R_B$    | 470 $\Omega$            |    |
| $R_L$    | 10K $\Omega$            |    |

2. 以理論分析此 C 級放大器並完成下表。

表 10-3-6

|                                             |                                          |                                                                                                 |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 可讓<br>BJT 導<br>通的最<br>小輸入<br>訊號<br>$V_{in}$ | 電路的共振頻率<br>$f_r = 1 / (2\pi\sqrt{LC_2})$ | 最大輸出功率<br>$P_{out,max} \cong \frac{(0.707V_{cc})^2}{Re(R_c)} \cong \frac{0.5V_{cc}^2}{Re(R_c)}$ |
|                                             |                                          |                                                                                                 |

3. 利用產波器產生  $V_s = 2V_{pp}$  的 sine 訊號，調整其頻率由 5KHz~15KHz 並用示波器量測並記錄  $V_{base}$  與  $V_{out}$  的波形。記錄發生共振時的圖形並與計算之  $f_r$  比較看看與理論值差多少
4. 當調整  $V_s$  的頻率等於步驟 3 所得的共振頻率並從 0V 逐漸增加，記錄何時才可使 BJT 導通並與步驟 2 所計算的理論值比較。
5. 依照步驟 3 產生共振時的輸入訊號  $V_s$ ，以產波器輸入數個週期後關閉，用示波器觀察並記錄  $V_s$  與  $V_{out}$  如何變化。

#### 10-4 預習問題：

依基本原理計算理論值並完成表 10-3-2，表 10-3-4，表 10-3-6。

#### 10-5 問題與討論：

1. 實驗一中若不使用射極跟隨器而直接將揚聲器接於 C3 將有何問題？
2. 實驗一中  $R_{E2}$  可以用 0.25 歐姆的電阻代替嗎？為什麼？
3. 實驗二中的輸出訊號是理想的 sine 波嗎?? 為什麼？
4. 實驗三中當  $V_s$  關閉後，為何  $V_{out}$  的共振波逐漸削弱？