

【教案名稱】CC 放大器電路模擬

【設計者】張敏娟¹

¹ 輔仁大學物理系

【教學對象】大二

【教學時間】4 堂課

【課程目的】以電路模擬軟體 LTspice 做 CC 放大器的電路設計與模擬。

【課程單元】

1. 安裝電路模擬軟體 LTspice
2. 設計 CC 放大器偏壓電路
3. 模擬 CC 放大器的交流輸出
4. 模擬 CC 放大器的頻率響應
5. 模擬 CC 放大器的輸入、輸出阻抗

【課程器材】

- 1 LTspice 軟體 (免費, 須自行安裝於電腦中) [1]
- 2 電腦 × 1 (Windows 與 MacOS 作業系統皆可)

【問題探究】

藉由電路模擬，理解電子學課本提到的 CC 放大器。

【課程實作內容】

以下示範為作者的 Mac OS 畫面，使用 Windows 也能執行的很好，但畫面略有不同。

第一堂課 (50 分鐘) 安裝電路模擬軟體 LTspice，做 CC 放大器偏壓電路設計

- 1.預備工具：安裝電路模擬軟體 LTspice 到電腦裡，如官網介紹 [1]。
- 2.電路設計：安裝 LTspice 後，開啟新檔案，做出 CC 放大器直流偏壓電路，如圖 1。

以下教案使用的參考書[2]。

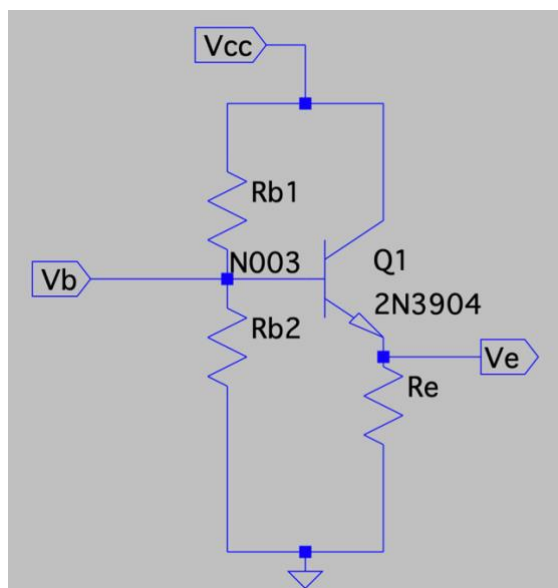


圖 1 CC 放大器的直流偏壓電路

3. CC 放大器直流偏壓設計

電子學課本中，設計一個 CC 放大器直流偏壓時，跟 CE 放大器相比，交流電源輸入端相同，都是 Base 極，但是輸出端不同，CE 放大器的輸出端是 C 極，而 CC 放大器的輸出端是 E 極，既然輸出端在 E 極，因此不需要將 C 極的電流轉換成電壓輸出，省略了 C 極的電阻。這個 CC 放大器不具備電壓放大的功能，但是具備電流與電功率放大的功能。若 NPN 型電晶體的 β 值 = 300， $V_{cc} = 10V$ ， $I_e = 10\text{mA}$ ， $R_{b2} = 6.8k\Omega$ ，則根據直流輸出電壓在交流擺盪中心的理論，得出以下式子：

$$V_b = V_{be} + \frac{V_{cc} - V_{be}}{2}$$

$$R_{b1} = \left(\frac{V_{cc} - V_b}{V_b} \right) * R_{b2}$$

$$V_e = \left(\frac{V_{cc} - V_{be}}{2} \right)$$

$$R_e = V_e / I_e$$

使用 $V_{be} = 0.65V$ ，算出來的 $V_b = 5.325V$ ， $R_{b1} = 5.970k\Omega$ ， $V_e = 4.675V$ ， $R_e = 467.5\Omega$ 。CC 放大器直流偏壓的三個電阻， R_{b1} 、 R_{b2} 、 R_e 就依上述設計完成。

第二堂課 (50 分鐘) 模擬 CC 放大器的交流輸出

1. 三個電阻的電阻值，取 $R_{b1} = 6k\Omega$ ， $R_{b2} = 6.8k\Omega$ ， $R_e = 470\Omega$ 輸入圖 1。再加入 2 個電容 C_b 、 C_e 。根據電子學課本內容， C_b 、 C_e 是為了避免外部電路與電晶體的輸入與輸出端連結時，影響了電晶體的直流電壓值，加入電容可以讓電晶體 Base/Emitter 兩極

的直流電壓不受外部電路影響，這樣的電容稱為耦合電容。將此 2 個電容的電容值設為 $10 \mu F$ 。

2. 假設輸入交流電壓為 $V_{in} = 0.01V \sin 1000t$ ，設定方式如圖 2。

3. 從資料庫挑選 2N3904 這個電晶體，它的 β 值約 300。挑選方式如圖 3，按下 Pick new transistor，獲得想要的電晶體。圖 4 是挑選電晶體時出現的資料庫。

4. 設定完畢後，設定直流模式：`.op`，如圖 5。完成直流分析電路圖，如圖 6。

Time Domain Function

style: SINE(Voff Vamp Freq Td θ ϕ <Ncycles>)

DC offset[V]: 0

Amplitude[V]: 0.01

Freq[Hz]: 1000

Tdelay[s]:

θ [1/s]:

ϕ [°]:

Ncycles:

Make this information visible on the schematic

Small Signal Parameters (.AC)

AC Amplitude: 1

AC Phase[°]: 0

Make this information visible on the schematic

Parasitic Impedances

Series Resistance[Ω]:

Parallel Capacitance[F]:

Make this information visible on the schematic

Cancel OK

圖 2 設定 $V_{in} = 0.01V \sin 1000t$

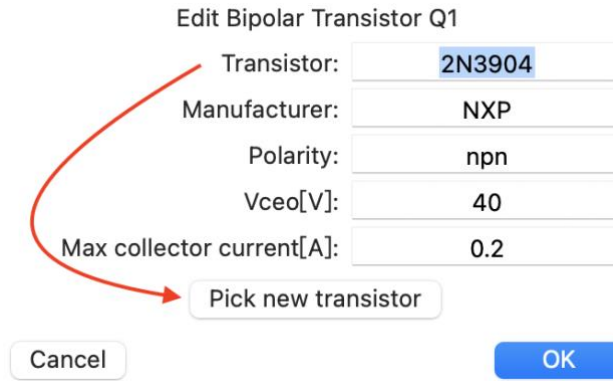


圖 3 從資料庫挑選 2N3904 電晶體。

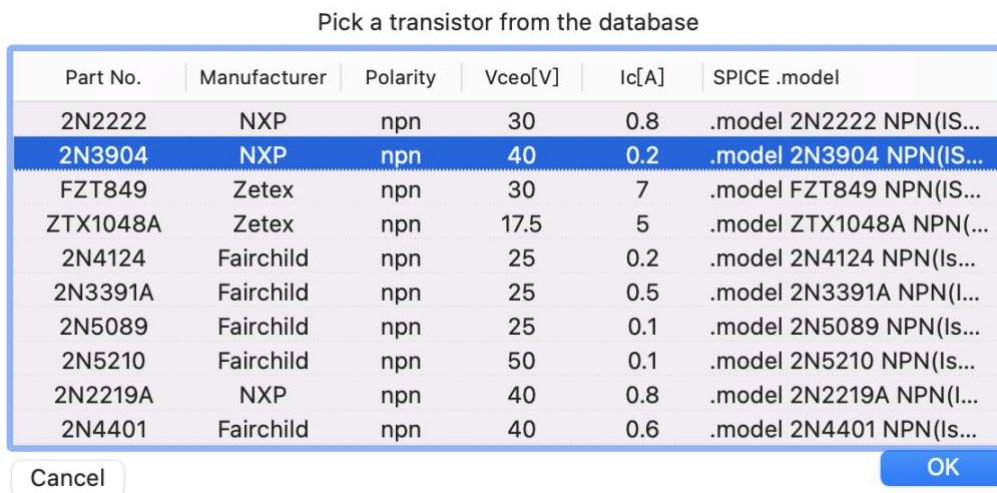


圖 4 電晶體資料庫

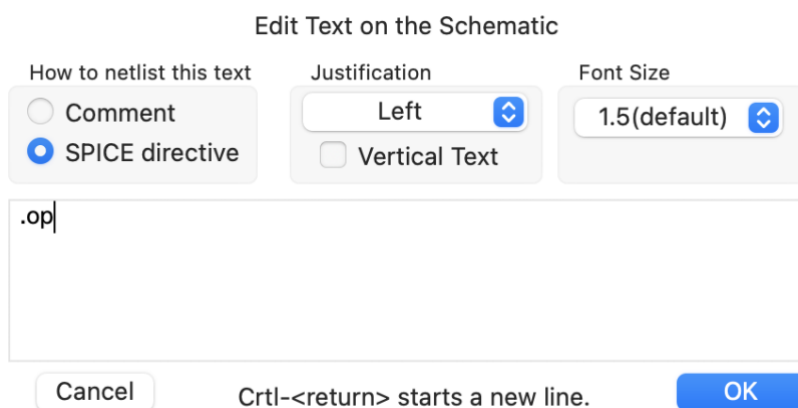


圖 5 設定直流工作命令 .op

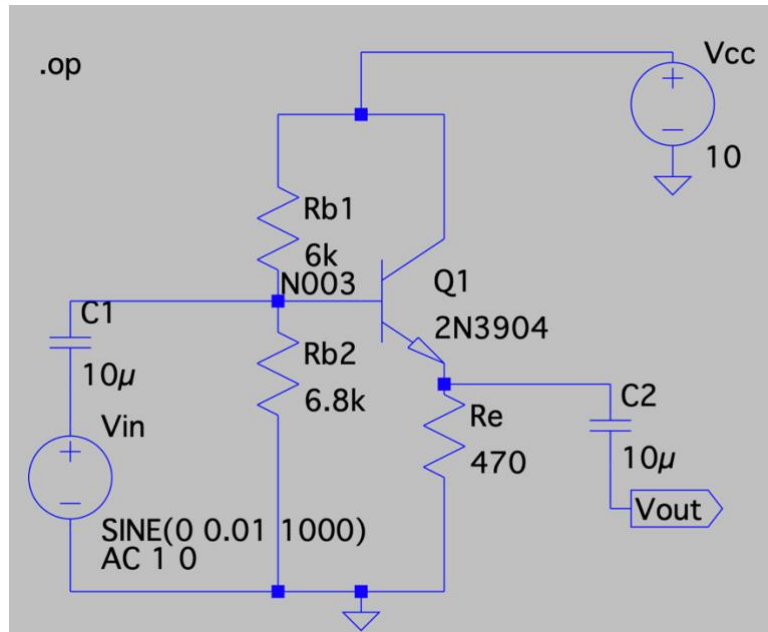


圖 6 CC 放大器電路圖，設定直流模式

5. 按下模擬執行(Run)後，點選 Add Traces，如圖 7。想知道電路節點上的電壓、電流值，按下列表名稱即可。跟直流計算結果互相比對，會跟理論值差不多。

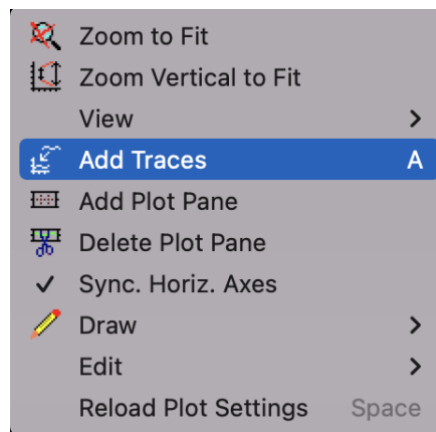


圖 7 添加訊號到作圖區 Add Traces

6. 電子學課本提到，CC 放大器非電壓放大器，電壓增益 $A_V \leq 1$ ，透過觀察輸入跟輸出的交流信號，可以看到『不反相』與『不放大』的特性。CC 放大器是電流放大器與

功率放大器。而電流增益 $A_I = \text{電壓增益} \times \frac{\text{等效輸入阻抗}}{\text{射極電阻}} = A_V \times \frac{Z_{in}}{R_E} \cong \frac{Z_{in}}{R_E}$ ，所以電流增益在等效輸入阻抗值獲得後，再做計算。功率增益是電壓增益 A_V 與電流增益 A_I 相乘，既然電壓增益近似於 1，所以**功率增益近似於電流增益**。

7.透過 LTspice 的瞬態分析功能，可以先獲得電壓增益。設定瞬態分析時，需要做時間設定，如圖 8，例如設定測試時間 10m (s)，因為頻率是 1kHz，所以週期是 $1/1\text{kHz}=1\text{ms}$ ，因此 10ms 這個設定可觀測 10 個正弦波形， $10\text{ms}/1\text{ms}=10$ 。設定後，電路圖上會出現.tran 10m，如圖 9。

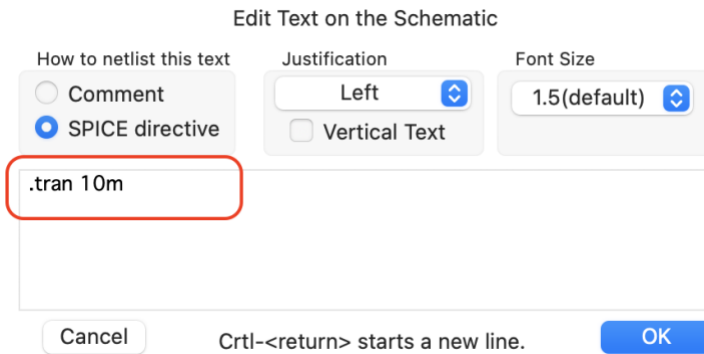


圖 8 瞬態設定，測試時間 10m (s)。

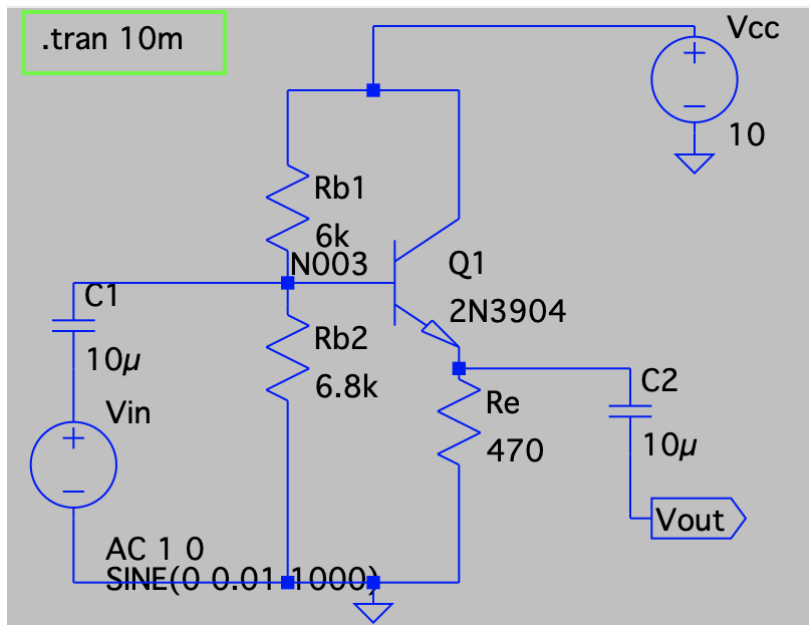


圖 9 瞬態設定後的電路圖，圖上有.tran 10m

8. 按下模擬執行(Run)後，先將模擬畫面分成上下兩格 Add Plot Pane，再依次點選 Add Traces，如圖 10，先選擇輸出電壓 V_{out} 、再選擇輸入電壓 $V_{in}(V(n004))$ ，如圖 11 呈現兩個波的相位不反向；輸出電壓 V_{out} 峰對峰值跟輸入電壓 V_{in} 的相同，電壓增益 $\cong 1$ 。

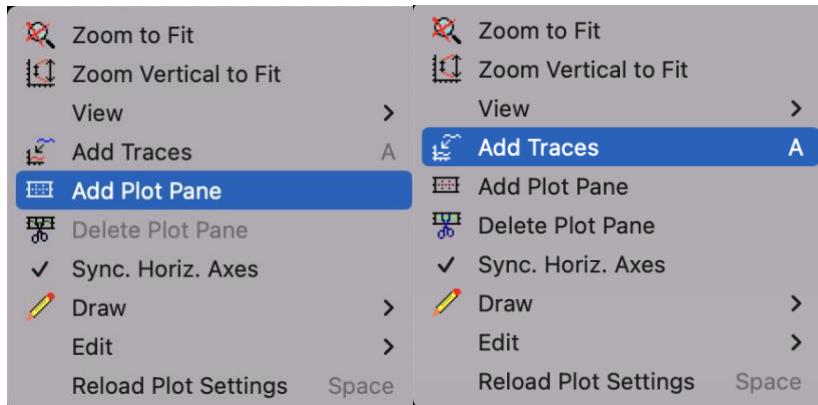


圖 10 先將模擬畫面 Add Plot Pane，分成上下兩格（左）、再 Add Traces 依次放入訊號（右）。

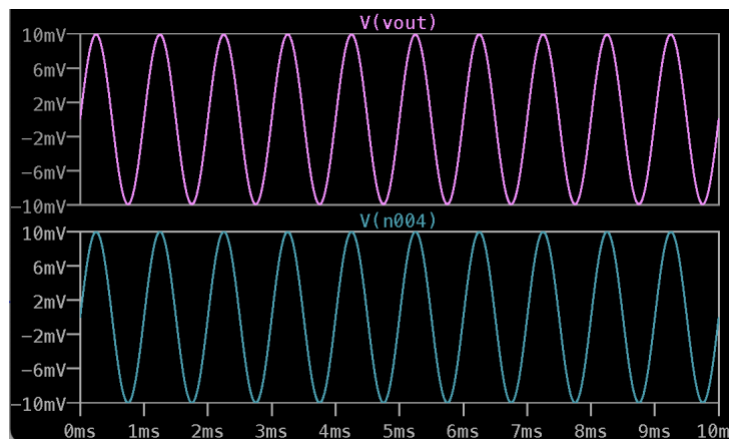


圖 11 輸出電壓 V_{out} 與輸入電壓 $V_{in}(V(n004))$ ，兩波的相位不反相以及峰對峰值相同，電壓增益 $\cong 1$ 。

9.以快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform ; FFT) , 觀察輸出波形。對著 V_{out} 波形任一點按下右鍵, 選擇 View 選單中的 FFT, 可看到 V_{out} 的 FFT 分析, 如圖 12。因為 V_{in} 為 1kHz 的交流信號, 那麼 V_{out} 的交流輸出, 主波是 1kHz, 其他頻率的波為副波。主波可以理解為 V_{in} 被放大輸出的部分; 副波可以理解為 V_{in} 波形失真的部分。

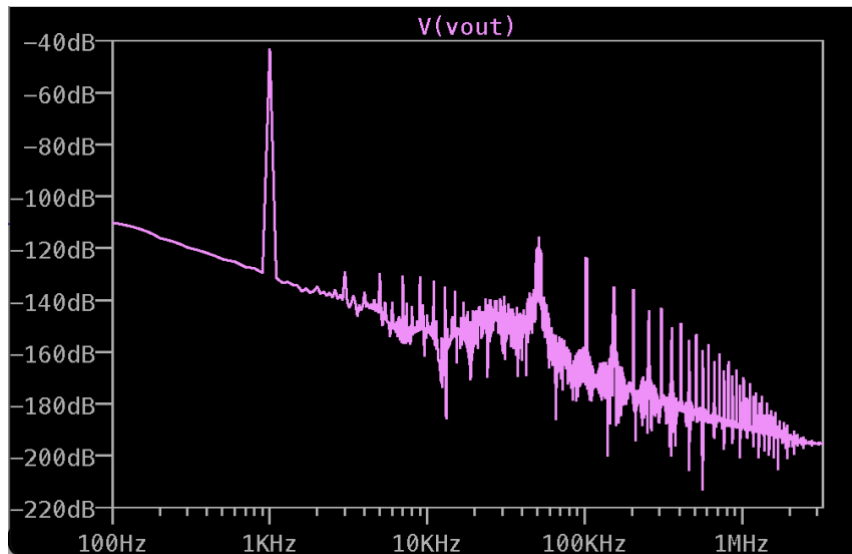


圖 12 V_{out} 的 FFT 分析, 主波 1kHz 很明顯, 其餘為副波。副波可以理解為波形失真。

第三堂課 (50 分鐘) 模擬 CC 放大器的頻率響應

電子學課本提到 CC 放大器時, 會先說明小信號交流理論, 將電容當作短路, 因為電容的阻抗為 $Z_C = 1/j\omega C$, 當頻率夠高的時候, 電容的阻抗趨近於零, 可以視為短路。但是當頻率很低時, 電容的阻抗不能忽略, 增益會隨頻率而改變。

1. 討論低頻響應時，把 CC 放大器分成兩個部分，輸入端 C_1 與輸出端 C_2 ，依照頻率響應理論計算出的 3dB 頻率值， $f_1 = \frac{1}{2\pi R_{eq1} C_1}$ ， $f_2 = \frac{1}{2\pi R_{eq2} C_2}$ ，由於通常輸入端阻抗 R_{eq1} 較高，所以 f_1 的值通常為低頻響應時的主宰頻率。
2. 透過數據模擬，觀察 CC 放大器低頻響應，測試電容值的改變對 3dB 頻率的影響。
 測試 1，設定交流頻率範圍為 1Hz 到 10MHz(.ac dec 100 1 10e6)。將 C_1 改為變數 C，且依序從 $10\mu F$ 到 $100\mu F$ ，改變間隔為 $50\mu F$ (.step param C 10u 100u 50u)，如圖 13。
3. 模擬執行(Run)後，得到頻率響應波德圖，圖 14。圖中實線為振幅，單位在左邊軸上；虛線為相位，單位在右邊軸上。圖中顯示當 C_1 值為 10μ 時，-3dB 低通頻率約 10Hz；而當 C_1 值為 100μ 時，-3dB 低通頻率則 $<1\text{Hz}$ 。 f_1 的值為低頻響應時的主宰頻率， C_1 為搭配此頻率的電容，此數值模擬可看出 C_1 值的確改變 -3dB 低通頻率的位置。

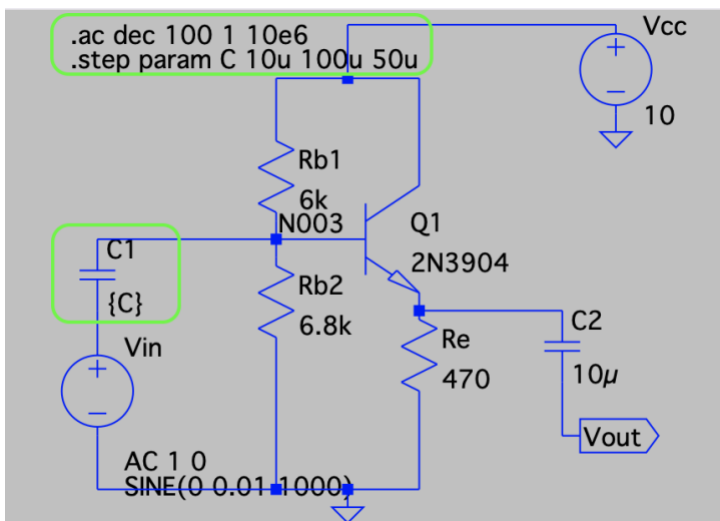


圖 13 CC 放大器低頻響應測試，設定交流頻率範圍 (.ac dec 100 1 10e6)。將 C_1 改為變數 C，且 C_1 依序從 $10\mu F$ 到 $100\mu F$ ，改變 step 為 $50\mu F$ (.step param C 10u 100u 50u)。

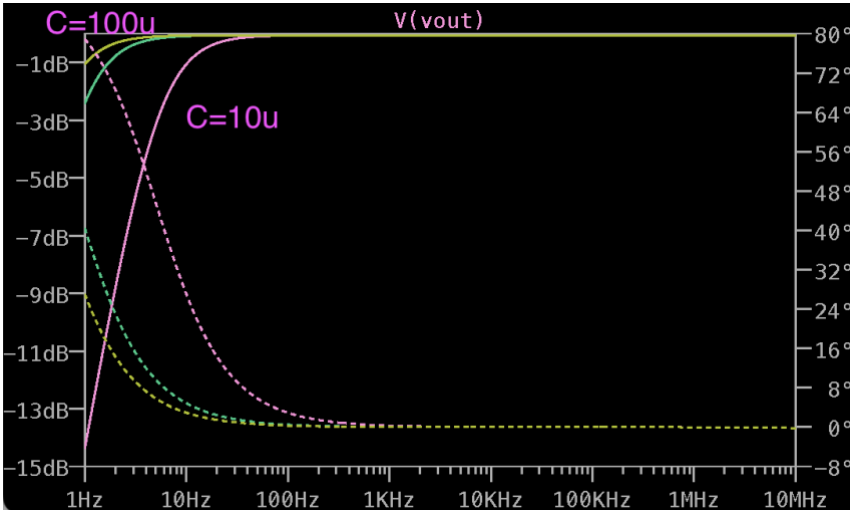


圖 14 CC 放大器低頻響應測試波德圖。實線為振幅，單位在左邊軸上；虛線為相位，單位在右邊軸上。圖中顯示當 C_1 值為 $10\mu F$ 時，-3dB 低通頻率約 10Hz；而當 C_1 值為 $100\mu F$ 時，-3dB 低通頻率則 $<1\text{Hz}$ 。低頻衰弱的情況，以 $10\mu F$ 較明顯。

4. 測試 2，交流頻率範圍不變，將 C_1 改回 $10\mu F$ ，而 C_2 改為變數 C，且 C_2 依序從 $10\mu F$ 到 $100\mu F$ ，改變間隔為 $50\mu F$ (.step param C 10u 100u 50u)，如圖 15。
5. 模擬執行(Run)後，得到頻率響應波德圖，圖 16。當 C_b 值為 $10\mu F$ - $100\mu F$ 時，-3dB 低通頻率仍為 10Hz，且三線重疊。 C_2 為搭配頻率 f_2 的電容，此數值模擬可看出 C_2 值的確不會改變-3dB 低通頻率的位置。

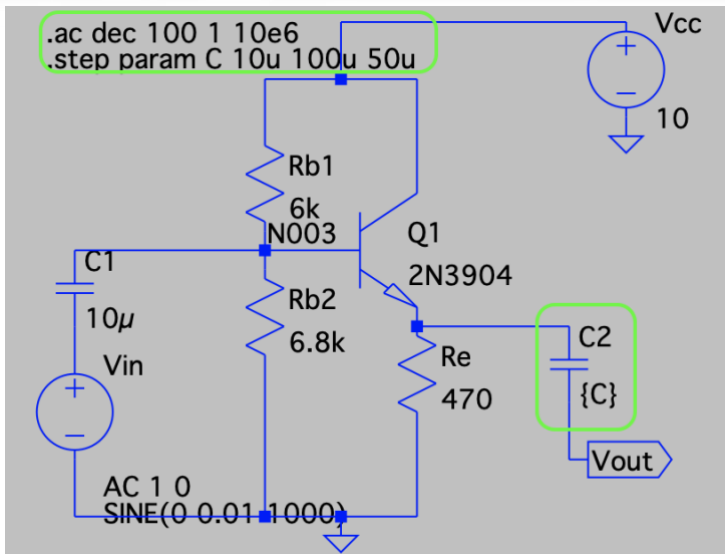


圖 15 CC 放大器低頻響應測試 2，交流頻率範圍不變，將 C_1 改為 $10\mu F$ ，而 C_2 改為變數 C ，且依序從 $10\mu F$ 到 $100\mu F$ ，改變間隔為 $50\mu F$ (.step param C 10u 100u 50u)。

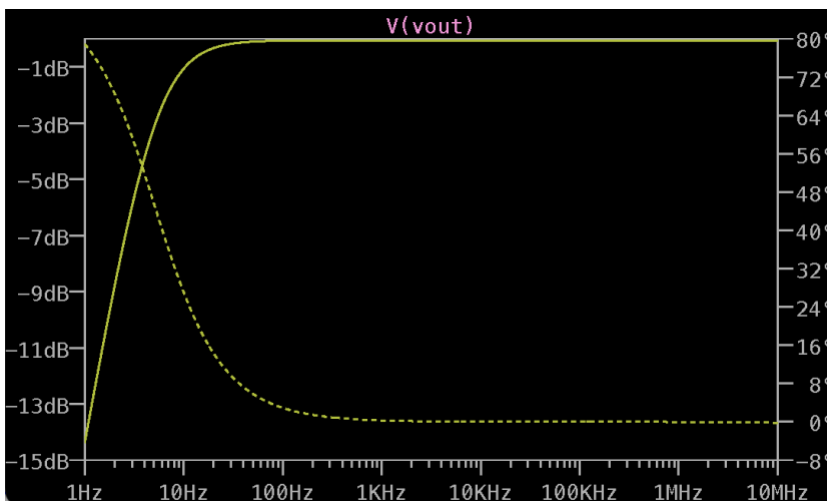


圖 16 CC 放大器低頻響應測試 2，當 C_2 值為 $10\mu F$ - $100\mu F$ 時，-3dB 低通頻率仍為 10Hz，且三線重疊。

第四堂課 (50 分鐘) 模擬 CC 放大器的輸入輸出阻抗

電子學課本提到 CC 放大器，解釋了等效電路理論，其中等效輸入阻抗與等效輸出阻抗的測量，測試電路不同。不同之處在於當做**等效輸入阻抗 Z_{in}** 測量時，輸入端有個理想的測試交流電源，輸出端為開路；而做**等效輸出阻抗 Z_{out}** 測量時，輸出端有個理想測試交流電源，輸入端為短路。

1. 等效輸入阻抗。將圖 15 修改，輸入端的理想交流電源 V_{in} 改名為 z-test，上方的節點也改名為 z-test，節點名稱修改，選擇 Label Net (圖 16 左)，跳出對話框後填入 z-test (圖 16 右)。名稱的修改，是為了做圖時方便找到電壓 $V(z\text{-test})$ 與電流 $I(z\text{-test})$ 。去掉.step 的設定，將電容改為 $C_1 = C_2 = 10\mu\text{F}$ 。測量等效輸入阻抗的電路設計如圖 17。



圖 16 節點名稱修改設定為對節點按下右鍵，選擇 Label Net (左)，跳出對話框後填入 z-test (右)。

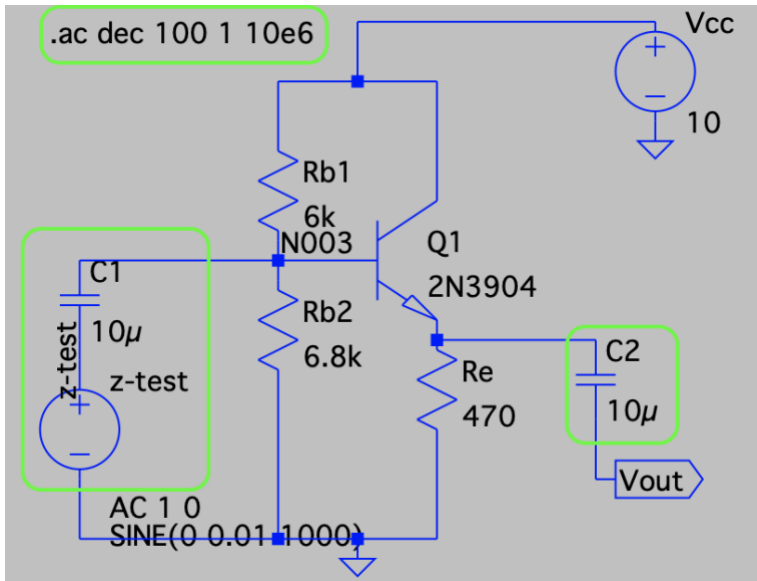


圖 17 測量等效輸入阻抗的電路設計圖。電壓與節點名稱的修改，是為了模擬做圖時方便找到電壓 V(z-test)與電流 I(z-test)。

2. 模擬執行(Run)後，選擇 V(z-test)/I(z-test)，如圖 18。等效輸入阻抗的波德圖如圖 19，不過，此時圖中縱軸阻抗單位是分貝 dB，需要修改為歐姆，所以在左邊分貝單位按下右鍵，把分貝 Decibel 改為線性 Linear (歐姆)，範圍選 Auto，如圖 20。改完後，等效輸入阻抗的波德圖如圖 21。在低頻響應模擬時， $-3dB$ 低通頻率約為 10Hz，此時對應的等效輸入阻抗值 Z_{in} 約 $3.5k\Omega$ 。前面提到，CC 放大器的電流增益

$$A_I = \text{電壓增益} \times \frac{\text{等效輸入阻抗}}{\text{射極電阻}} = A_V \times \frac{Z_{in}}{R_E} \cong \frac{Z_{in}}{R_E} = \frac{3.5k}{470} = 7.4。$$

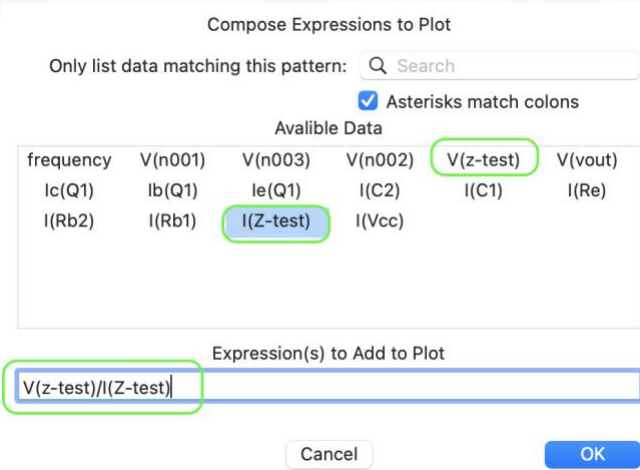


圖 18 $V(z-test)/I(z-test)$ 的設定圖。

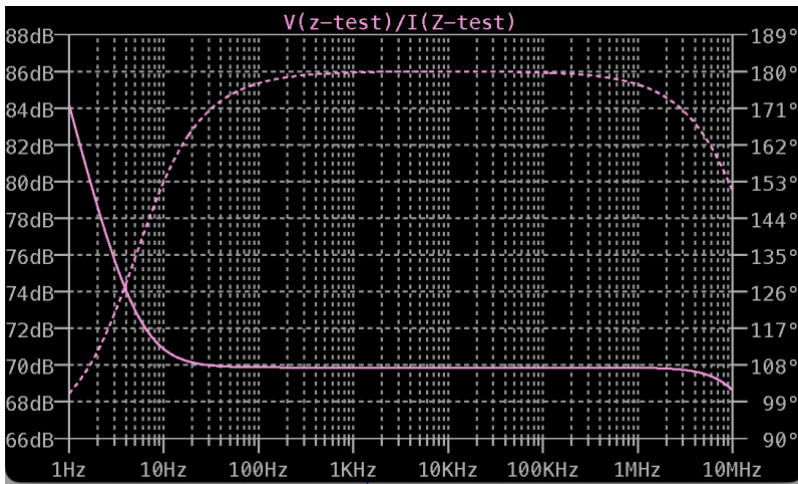


圖 19 輸入阻抗的波德圖，左邊縱軸單位是分貝 dB。

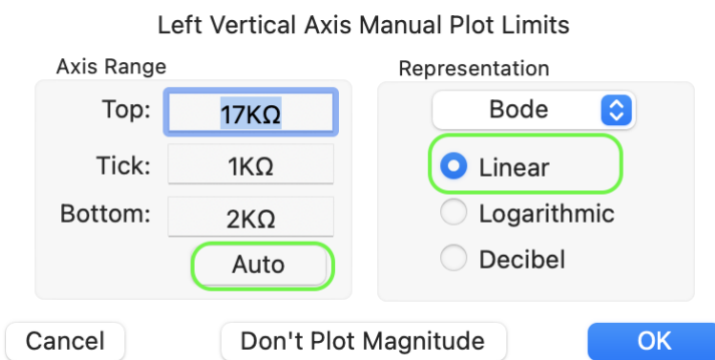


圖 20 將縱軸座標由分貝 Decibel 改為線性 Linear (歐姆)。

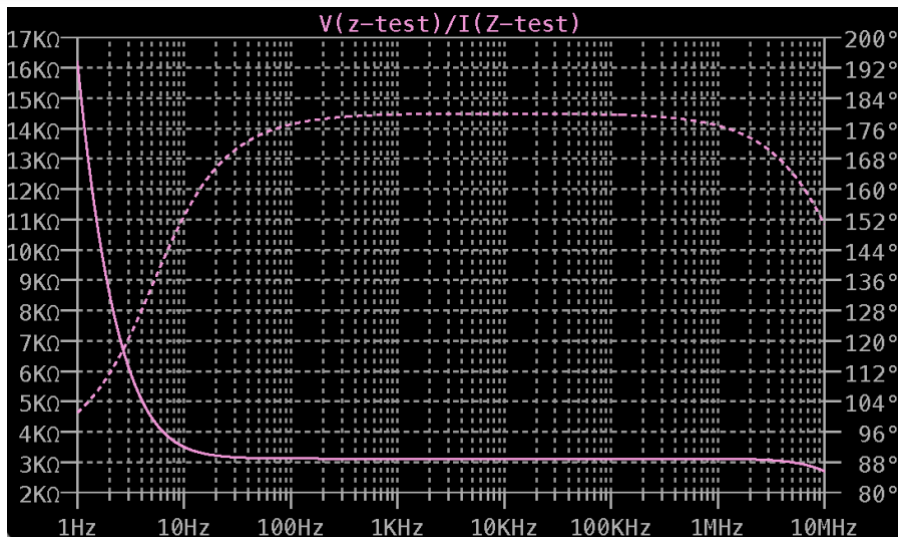


圖 21 等效輸入阻抗的波德圖，縱軸單位是歐姆。 $-3dB$ 低通頻率約為 $10Hz$ ，對應的輸入阻抗值 Z_{in} 約 $3.5k\Omega$ 。

3. 等效輸出阻抗。將圖 17 修改，把輸入端的理想交流電源 V_{in} 刪除，改為短路接地。把輸出端的 V_{out} 刪除，新增交流電源放在輸出端的位置。電壓與上方的節點皆改名為 z-test，方便做圖時找到電壓 $V(z-test)$ 與電流 $I(z-test)$ 。測量等效輸出電阻的電路設計如圖 22。

4. 執行模擬(Run)，選擇 $V(z-test)/I(z-test)$ ，輸出阻抗的波德圖，由分貝 Decibel 改為線性 Linear (歐姆)，跟等效輸入阻抗做法相同。低頻響應模擬時， $-3dB$ 低通頻率約為 $10Hz$ ，對應的輸出阻抗值 Z_{out} 約 $1.9k\Omega$ ，如圖 23。

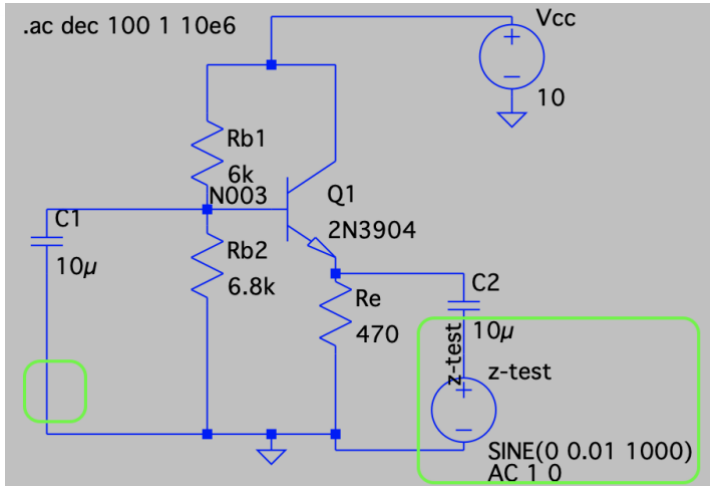


圖 22 測量等效輸出電阻 Z_{out} 的電路設計。電壓與節點名稱的修改，是為了模擬畫圖時方便找到電壓 $V(z-test)$ 與電流 $I(z-test)$ 。

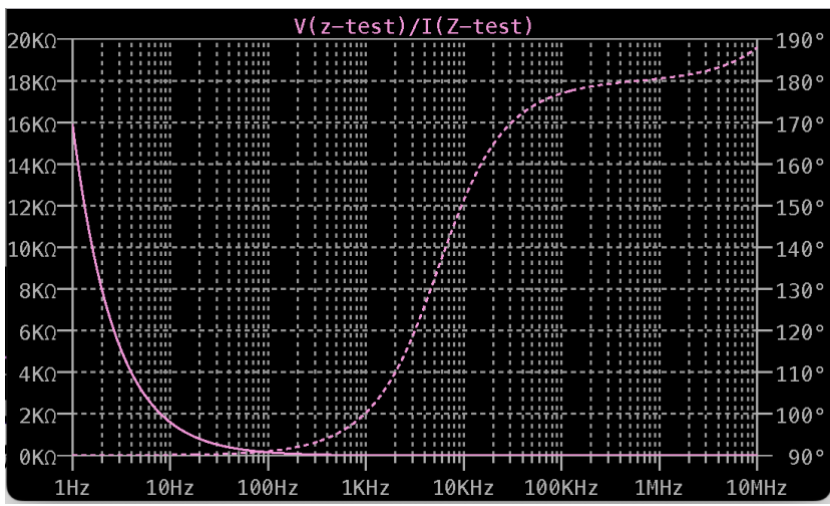


圖 23 輸出阻抗的波德圖，縱軸單位是歐姆。 $-3dB$ 低通頻率約為 10Hz，對應的輸出阻抗值 Z_{out} 約 $1.9k\Omega$ 。

【補充資料】

[1] 電路模擬軟體 LTspice 官網：<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>



[2] M2K SCOPY：電路設計、模擬測試、硬體裝置與除錯，作者：陳雲潮，出版社：
東華書局，出版日期：2022年1月1日。