

第 3 章 1：放大器設計

放大器是類比電路的核心。從 μV 級的感測器訊號到 W 級的喇叭驅動，都離不開放大器。

一、放大器的基本概念

增益 (Gain)

$$\text{Gain} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}}$$

- 電壓增益 $A_v = V_{\text{out}} / V_{\text{in}}$
- 電流增益 $A_i = I_{\text{out}} / I_{\text{in}}$
- 功率增益 $A_p = P_{\text{out}} / P_{\text{in}}$

dB 表示：

$$A_{dB} = 20 \log_{10} |A_v| \quad (\text{電壓})$$

$$A_{dB} = 10 \log_{10} |A_p| \quad (\text{功率})$$

dB 加法 = 線性乘法。串聯放大器的 dB 直接相加。

線性 vs 非線性

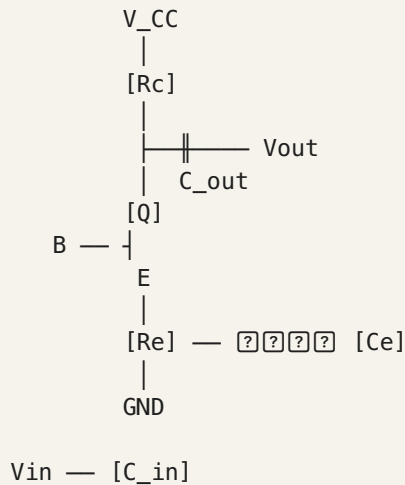
理想放大器： $V_{\text{out}} = A \times V_{\text{in}}$ （線性）。實際放大器在大信號或極限工作點會失真（非線性）。

失真 (Distortion)

- 諧波失真 (THD)：輸出含有 fundamental 之外的諧波
- 互調失真 (IMD)：兩個頻率混合產生新頻率
- 雜訊 (Noise)：隨機訊號

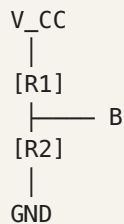
二、BJT 共射放大器 (CE)

電路結構 (含偏壓)



DC 偏壓設計

1. 分壓偏壓 (最常見)



設計步驟：

1. 選 I_C (典型 0.5–10 mA)
2. V_{CE} 設為 $V_{CC}/2$ (讓擺幅最大)
3. $V_E = 0.1 \times V_{CC}$ (提供穩定)
4. $R_E = V_E / I_E (\approx V_E / I_C)$
5. $R_C = (V_{CC} - V_{CE} - V_E) / I_C$
6. $V_B = V_E + 0.7$
7. R_1, R_2 分壓得到 V_B ，分壓電流 $\sim 10 \times I_B$

範例：12V 供電的 CE 放大器

設 $I_C = 1 \text{ mA}$, $V_{CE} = 6\text{V}$, $V_E = 1.2\text{V}$

- $I_E \approx 1 \text{ mA} \rightarrow R_E = 1.2 / 0.001 = 1.2 \text{ k}\Omega$

- $R_C = (12 - 6 - 1.2) / 0.001 = 4.8 \text{ k}\Omega \rightarrow \text{選 } 4.7 \text{ k}\Omega$
- $V_B = 1.2 + 0.7 = 1.9 \text{ V}$
- 假設 $\beta = 200 \rightarrow I_B = 5 \mu\text{A}$
- 分壓電流 $\sim 50 \mu\text{A}$:
- $R_1 = (12 - 1.9) / 0.05 = 202 \text{ k}\Omega \rightarrow \text{選 } 200 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 1.9 / 0.05 = 38 \text{ k}\Omega \rightarrow \text{選 } 39 \text{ k}\Omega$

AC 增益 (小信號)

帶射極旁路電容：

$$A_v = -g_m R_C = -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{R_C}{V_T / I_E}$$

代入： $A_v = -4700 \times 0.001 / 0.0259 \approx -181$

倒相 + 高增益。

不帶旁路電容 (部分負回授)：

$$A_v = -\frac{R_C}{r_e + R_E}$$

$A_v = -4700 / (26 + 1200) \approx -3.84$

低得多，但增益穩定 (不依賴 r_e 變動)。

輸入阻抗

$$R_{in} = R_1 || R_2 || (\beta(r_e + R_E))$$

帶 R_E ： $\beta \cdot R_E$ 主導，可達數十 $\text{k}\Omega$ 。

輸出阻抗

$$R_{out} \approx R_C$$

三、共集 (射極隨耦器)

用途

阻抗匹配 / 緩衝 (buffer)。

增益

$$A_v = \frac{R_E}{r_e + R_E} \approx 1 \quad (\text{當 } R_E \gg r_e)$$

輸入阻抗

$$R_{in} = \beta(r_e + R_E)$$

輸出阻抗

$$R_{out} = \frac{r_e + R_S/\beta}{1}$$

通常很低 (< 100 Ω)。

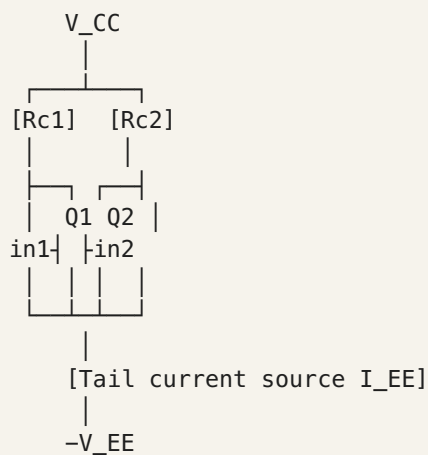
應用範例

10 k Ω 訊號源 $\rightarrow$ 50 Ω 負載： - 直接接：訊號被分壓到極小 - 加 EF：高 R_{in} 不影響源，低 R_{out} 驅動負載

四、差動放大器 (Differential Amplifier)

結構

兩個對稱的 BJT，共用一個 R_E 或電流源 (tail current)：



兩種模式

共模 (Common Mode)：兩輸入相同

$$V_{out, cm} = -A_{cm} V_{in, cm}$$

理想為零。

差模 (Differential Mode)：兩輸入相差

$$V_{out, diff} = A_d(V_{in1} - V_{in2})$$

差動增益：

$$A_d = g_m R_C = \frac{I_{tail}/2}{V_T} R_C$$

共模拒絕比 (CMRR)

$$CMRR = 20\log_{10} \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right|$$

理想 ∞ ，實際 80–120 dB。高 CMRR 是運算放大器的關鍵指標。

為什麼這麼重要？

差動放大器是：- 運算放大器 (OPAMP) 的輸入級 - 儀表放大器的核心 - 高速比較器的基礎 - 差動傳輸線的接收端 (USB、LVDS)

五、MOSFET 放大器

共源 (CS, Common Source)

對應 BJT 的 CE：

$$A_v = -g_m(R_D || r_o) \approx -g_m R_D$$

共汲 (CD, Source Follower)

對應 EF：

$$A_v = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s} \approx 1$$

共閘 (CG)

對應 CB，射頻常用。

MOSFET vs BJT 線性放大

- MOSFET 優勢：高輸入阻抗 ($G\Omega$)

- MOSFET 劣勢： g_m 較低（ $\sqrt{I_D}$ 關係），增益較小
- BJT 優勢： g_m 大，增益高，雜訊低
- BJT 劣勢：輸入阻抗中等（ $k\Omega$ ），輸入電流影響源

六、多級放大器

串聯時的增益

$$A_{total} = A_1 \times A_2 \times A_3 \times \dots$$

dB：直接相加。

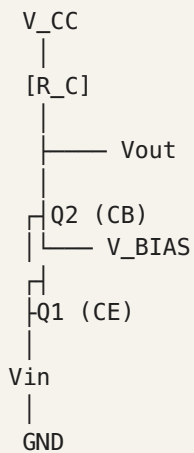
阻抗考慮

第二級的輸入阻抗會「加載」第一級的輸出，實際增益降低：

$$A_{1, actual} = -g_m(R_C || R_{in, 2})$$

→ 加緩衝級（EF）解決此問題。

Cascode（共射-共基組合）



優點： - 高輸出阻抗（ $\approx g_m \times r_o^2$ ） - 高增益 - Miller 效應減少 → 高頻響應好 - 用於 OPAMP、高頻放大器

七、頻率響應

低頻截止

由耦合電容 C_{in} 、 C_{out} 、旁路電容 C_E 決定：

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC}$$

通常選最大的 RC 為主導極點。

高頻截止

由 BJT/MOSFET 寄生電容決定：

Miller 效應

CE 中 C_μ 等效輸入電容：

$$C_{Miller} = C_\mu(1 - A_V) \approx C_\mu \times |A_V|$$

→ 大增益時 Miller 電容很大，限制高頻響應。

高頻極點

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_S(C_\pi + C_{Miller})}$$

頻寬：Gain-Bandwidth Product (GBW)

$$GBW = A_{DC} \times f_H \approx f_T$$

接近電晶體本身的 f_T 。

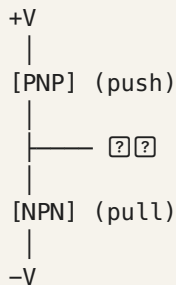
八、輸出級設計

A 類 (Class A)

- 全週期都導通
- 線性度極佳
- 效率最差 (< 25%)
- 用於：高 fidelity 音響前級

B 類 (Class B)

- 兩個電晶體推挽 (push-pull) ，各導通半週期
- 效率 78%
- 但有「交越失真」 (Crossover Distortion)



AB 類 (Class AB)

最常見的線性功率放大器：- 給輸出晶體小偏壓，避開交越失真 - 效率 ~ 50–70% - 失真小

D 類 (Class D)

開關式：- 輸出 PWM 後低通濾波 - 效率 > 90% - 用於現代 D 類音響、開關式 LED 驅動

九、放大器的實務

1. 選 BJT 還是 MOSFET ?

場景	推薦
低雜訊 (音響、感測器前級)	BJT
高輸入阻抗 (量測、生醫)	MOSFET / JFET
射頻 (GHz 級)	BJT (SiGe HBT) 或 GaAs HEMT
大功率音響	BJT 或 MOSFET (兩者都常見)
IC 內	MOSFET (CMOS 主流)

2. 偏壓穩定性

- 用分壓偏壓 (不用單一基極電阻)
- 加射極電阻 (負回授)
- 大功率時用「電流鏡」 (current mirror) 穩定

3. 旁路電容的選擇

C_E 旁路電容要在最低工作頻率時阻抗 < r_e/10：

$$C_E > \frac{10}{2\pi f_{low} r_e}$$

4. 失真控制

- 不要超過線性區
- 用負回授降低失真
- 注意輸出擺幅

十、放大器分析工具

LTspice 模擬

```
.dc V1 0 12 0.01 ; DC [?] [?] [?] [?]
.ac dec 100 1 1Meg ; AC [?] [?] [?] [?]
.tran 10ms ; [?] [?] [?] [?]
.tf V(out) V(in) ; [?] [?] [?] [?]
```

量測工具

- 函數發生器 (Function Generator)
- 示波器 (Oscilloscope)
- 頻譜儀 (看諧波)
- 失真儀 (測 THD)

十一、本章總結

✅ 您應該掌握：

- [x] 增益、dB、線性度的概念
- [x] BJT 共射放大器設計流程
- [x] 共集（射極隨耦器）的阻抗匹配作用
- [x] 差動放大器與 CMRR
- [x] MOSFET 放大器 (CS、CD、CG)
- [x] 多級放大器與 Cascode
- [x] 頻率響應、Miller 效應、GBW

- [x] 輸出級分類（A、B、AB、D 類）

自我檢測

1. CE 放大器為什麼倒相？增益由哪些元件決定？
2. EF 增益約 1，那它「放大」了什麼？
3. 差動放大器的 CMRR 為什麼重要？
4. Cascode 結構為何能改善高頻響應？
5. AB 類放大器為什麼比 B 類好？

解答

1. 訊號 $\rightarrow I_C$ 增加 $\rightarrow V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C$ 下降。增益由 g_m 與 R_C 決定 ($A_v \approx -g_m \cdot R_C$)
2. 不放大電壓但放大電流 ($\beta+1$ 倍)，因此提供阻抗變換（高 R_{in} 、低 R_{out} ）
3. 共模訊號通常是雜訊（如電源耦合），高 CMRR 才能消除而保留差模真實訊號
4. 共基級的低輸入阻抗使 CE 級的輸出端 V_C 不再大幅變動，Miller 效應大幅降低
5. AB 類給輸出小偏壓避開交越失真，效率比 A 類高、失真比 B 類小

下一章

02-??????.md — OPAMP 的應用聖經。