

第 1 章 6：BJT 雙極性接面電晶體

電晶體是 20 世紀最重要的發明之一，是所有現代電子的基石。本章介紹歷史較早、概念較直觀的 BJT。

一、電晶體的革命

1947 年，Bell 實驗室的 Shockley、Bardeen、Brattain 發明了電晶體，取代了真空管，開啟了「半導體時代」。

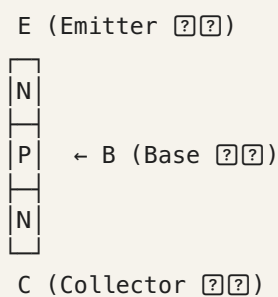
電晶體的核心能力：用小電流/小電壓控制大電流，即「放大」。

兩大主流家族：- BJT (Bipolar Junction Transistor)：本章 - FET (Field Effect Transistor)：下一章 (MOSFET 是現代主流)

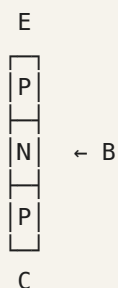
二、BJT 的結構

BJT 由「三層摻雜半導體」組成，有兩種類型：

NPN 型



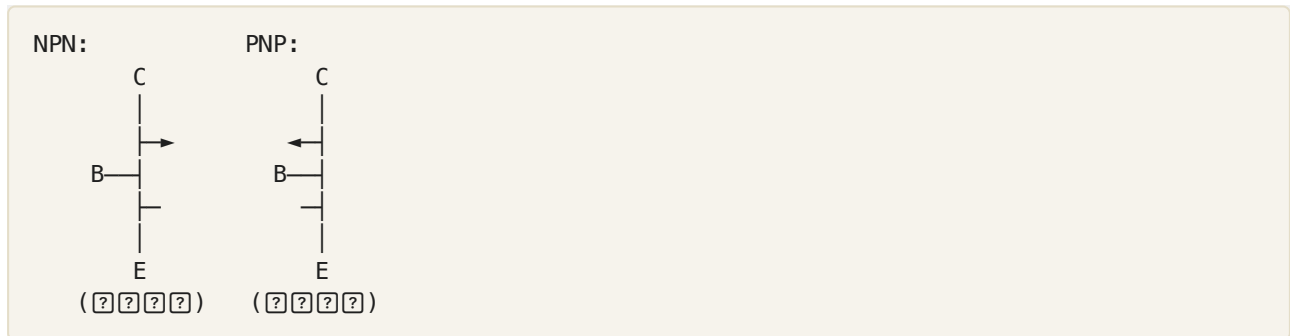
PNP 型



三個端點功能

- Emitter (E 射極)：發射載子 (NPN 發射電子；PNP 發射電洞)
- Base (B 基極)：控制端，極薄、低濃度摻雜
- Collector (C 集極)：收集載子，高濃度摻雜、面積大

電路符號



記憶口訣：- NPN: Not Pointing iN (箭頭向外) - PNP: Pointing iN Proudly (箭頭向內)

三、BJT 的工作原理

兩個 PN 接面

BJT 內部有兩個 PN 接面：- BE 接面 (Base-Emitter) - BC 接面 (Base-Collector)

三種工作區

區域	BE 接面	BC 接面	用途
截止 (Cutoff)	反向	反向	開關「OFF」
主動 (Active)	順向	反向	線性放大
飽和 (Saturation)	順向	順向	開關「ON」
反向主動	反向	順向	很少用

主動區的關鍵公式

1. 集極電流由基極電流控制

$$I_C = \beta \times I_B$$

或：

$$I_C = h_{FE} \times I_B$$

- β 或 h_{FE} ：直流共射放大率 (current gain)
- 一般小信號 BJT： $\beta = 100\text{--}400$
- 功率 BJT： $\beta = 30\text{--}100$

2. 射極電流

$$I_E = I_C + I_B = (\beta + 1)I_B$$

當 β 很大， $I_E \approx I_C$ 。

3. BE 壓降

$$V_{BE} \approx 0.7V$$

(近似定值，實際隨電流變化)

更精確：

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$

其中 $V_T = 25.85 \text{ mV} @ 300K$ 。

重要： V_{BE} 變化 60 mV ， I_C 變化 10 倍 ($V_T \times \ln(10)$)。

4. 早期效應 (Early Effect)

實際 I_C 不完全只取決於 I_B ，也微微受 V_{CE} 影響：

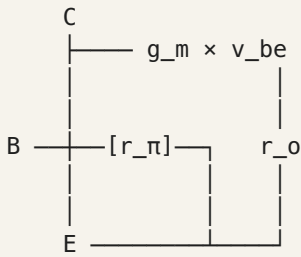
$$I_C = \beta I_B \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$

V_A 是 Early 電壓 (典型 $50\text{--}100 \text{ V}$)。

四、BJT 的小信號模型

設計線性放大器時，將 BJT 看成「小信號等效電路」。

混合 π 模型



關鍵參數：

1. 跨導 g_m

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

- 在 1 mA 工作點： $g_m \approx 38.5 \text{ mS}$

2. 輸入阻抗 r_{π}

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{V_T}{I_B}$$

- $\beta=200$, 1 mA： $r_{\pi} \approx 5.2 \text{ k}\Omega$

3. 輸出阻抗 r_o

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

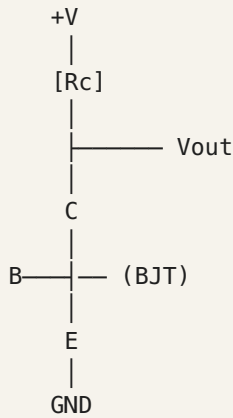
- $V_A=100\text{V}$, $I_C=1\text{mA}$ ： $r_o = 100 \text{ k}\Omega$

五、BJT 的三種放大組態

依「輸入接哪、輸出接哪、共用接哪」分類：

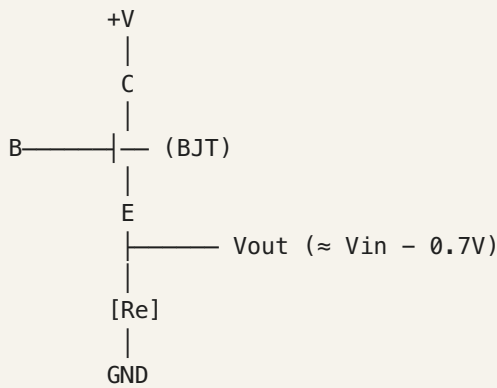
1. 共射放大器 (CE, Common Emitter)

最常見的放大器組態。



特性： - 電壓增益： $A_v \approx -g_m \times R_C$ （負號表示倒相） - 電流增益： β - 輸入阻抗：中等（ $k\Omega$ 級） - 輸出阻抗：中等（ $k\Omega$ 級） - 倒相

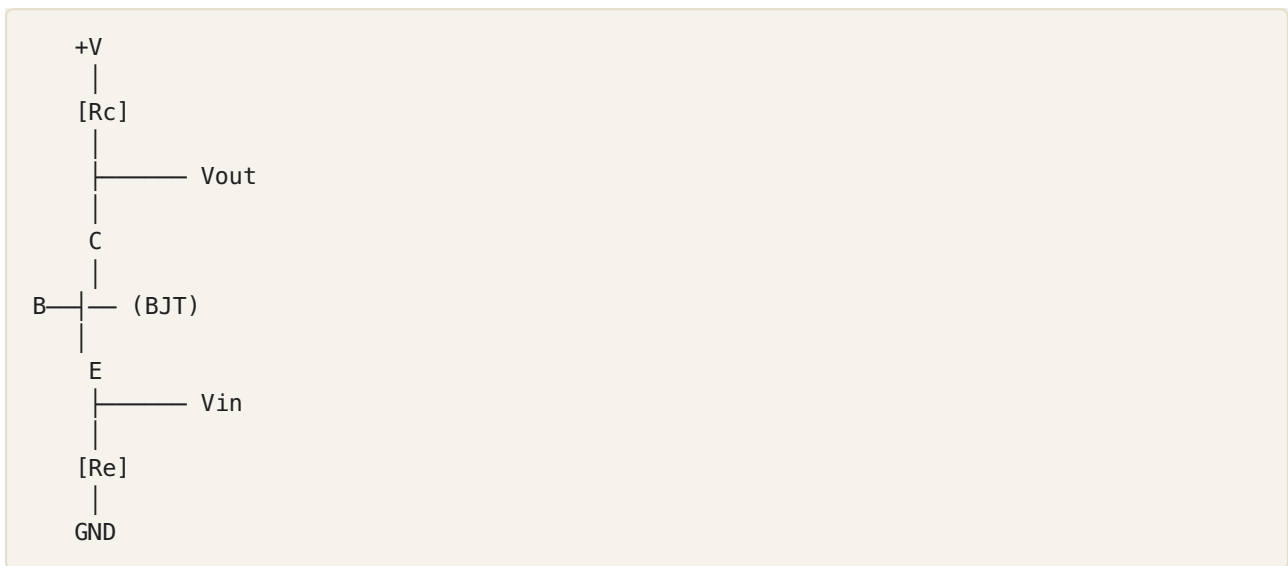
2. 共集（射極隨耦器）（CC / Emitter Follower）



特性： - 電壓增益： ≈ 1 （不放大電壓） - 電流增益： $\beta + 1$ - 輸入阻抗高 - 輸出阻抗低 - 不倒相

用途：阻抗匹配（高阻抗 $\rightarrow$ 低阻抗），驅動下游低阻負載。

3. 共基 (CB, Common Base)



特性：- 電壓增益： $\approx +g_m \times R_C$ （高增益、不倒相）- 電流增益： ≈ 1 - 輸入阻抗極低 - 輸出阻抗高 - 頻率響應好

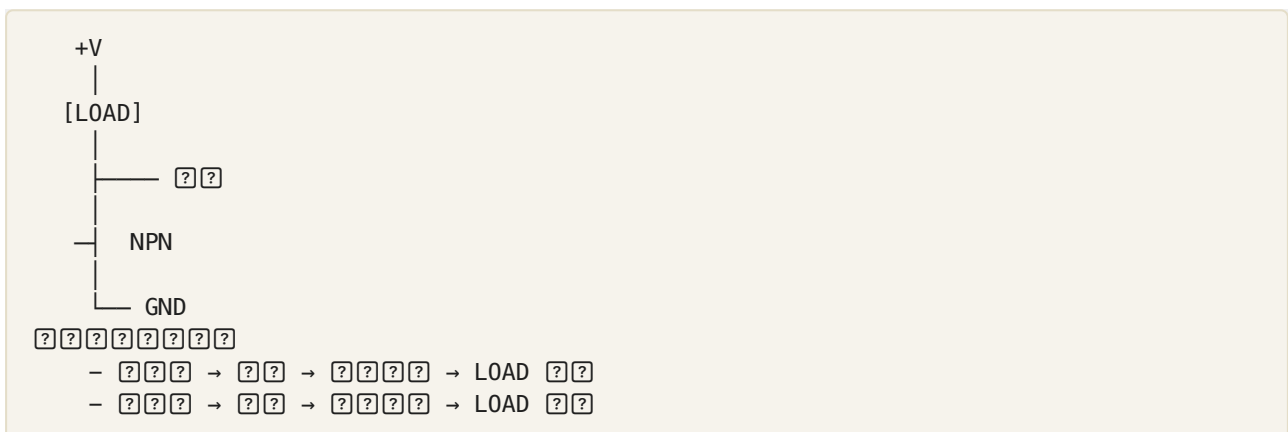
用途：射頻、共射-共基組合（cascode）。

六、BJT 的兩大用途

A. 開關 (Switch)

讓 BJT 在「截止 $\leftrightarrow$ 飽和」之間切換，實現電子開關。

NPN 開關（負載接 +V，BJT 拉低）



設計步驟：1. 計算負載電流 I_C 2. 確保 I_B 足夠大，使 BJT 進入飽和： $I_B > I_C / \beta_{min}$ 3. 通常給 $I_B = 5-10$ 倍的最小值（過驅動）以確保飽和 4. 計算基極電阻： $R_B = (V_{in} - V_{BE}) / I_B$

範例：MCU 3.3V 控制 12V/100mA 繼電器：

- $I_C = 100 \text{ mA}$ ，假設 $\beta_{\min} = 50$
- $I_B(\min) = 100/50 = 2 \text{ mA}$
- 過驅動： $I_B = 10 \text{ mA}$
- $R_B = (3.3 - 0.7) / 0.01 = 260 \Omega \rightarrow$ 選 220Ω

別忘了加飛輪二極體並聯在繼電器線圈兩端！

B. 放大器 (Amplifier)

(詳見 03-中級篇/01-放大器設計.md)

關鍵：1. 需要設計「偏壓電路」讓 BJT 在主動區工作 2. 訊號用電容耦合（隔離 DC 偏壓） 3. 加射極電阻提供「負回授」穩定工作點

七、常見 BJT 型號

小信號 NPN

- 2N3904：通用 NPN，60V/200mA，TO-92
- BC547：歐系常見，45V/100mA
- 2N2222 / PN2222：經典快速 NPN，60V/600mA
- MMBT3904 (SOT-23)：2N3904 的 SMD 版

小信號 PNP

- 2N3906：通用 PNP（2N3904 對應）
- BC557：歐系常見
- 2N2907：與 2N2222 對應

中功率/功率

- 2N2222（高一點）：600 mA
- TIP31/32：中功率（NPN/PNP），TO-220，3A
- 2N3055：經典功率管，15A

高頻 / 射頻

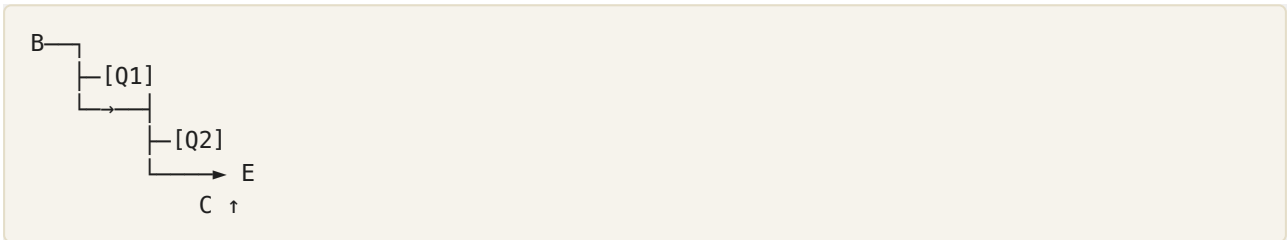
- BFR91：1.5 GHz 射頻
- 2N5179：UHF 用

八、達靈頓電晶體 (Darlington)

兩個 BJT 串聯，提升整體 β ：

$$\beta_{total} \approx \beta_1 \times \beta_2$$

可達 1000–10000。



優缺點： - ☒ 高 β ，小電流就能控制大負載 - ☒ $V_{BE(total)} \approx 1.4V$ （兩個壓降） - ☒ 飽和壓降 $V_{CE(sat)}$ 較大（ $\approx 0.9V$ ） - ☒ 切換速度較慢

經典型號：TIP120（NPN）、TIP125（PNP）、ULN2003（內含 7 個達靈頓陣列）。

九、BJT 的關鍵規格

datasheet 必看：

1. $V_{CEO} / V_{CBO} / V_{EBO}$

集-射、集-基、射-基的最大耐壓。

2. $I_C(max)$

最大集極電流（連續 / 脈衝）。

3. $P_D(max)$

最大功率耗散（依溫度降額）。

4. h_{FE} / β

直流電流增益（注意是「在某 I_C 下」的值）。

5. f_T (轉變頻率)

電流增益 β 降到 1 的頻率。代表元件的高速能力。 - 一般小信號：50–200 MHz - 高頻 BJT： > 1 GHz - 微波 BJT：可達數十 GHz

6. $V_{CE(sat)}$

飽和時的 C-E 壓降，影響開關時的損耗。

7. C_{OB} / C_{IB}

寄生電容（影響高頻響應）。

8. 工作溫度範圍

通常 -55°C 到 $+150^{\circ}\text{C}$ （接面溫度）。

十、BJT vs MOSFET（簡單對比）

屬性	BJT	MOSFET
控制方式	電流控制電流	電壓控制電流
輸入阻抗	中 ($k\Omega$)	極高 ($M\Omega$ – $T\Omega$)
切換速度	中速	高速
飽和壓降	$V_{CE(sat)} \approx 0.2\text{V}$	$R_{DS(on)} \times I$
雜訊	較低	較高 ($1/f$)
功率密度	中	高
並聯使用	困難（熱失控）	容易
製程相容	雙極性製程	CMOS（積體電路主流）
適合	線性放大、低雜訊	開關電源、數位、高功率

現代趨勢：MOSFET 為主流，BJT 用於特定應用（音響、感測器前級、射頻、ESD 保護）。

十一、實務應用範例

例 1：MCU 控制 LED 燈條

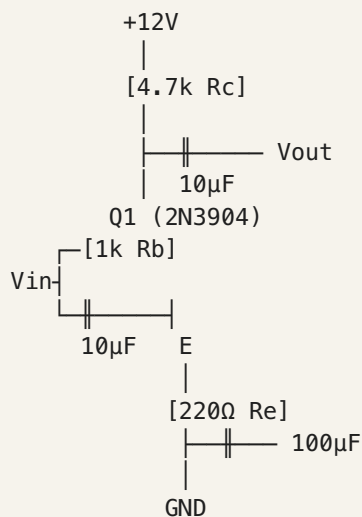
12V LED 燈條，電流 500 mA。MCU GPIO 3.3V/最多 20 mA。

直接接 GPIO 燒毀，用 NPN BJT 當開關：

選 2N2222 (600 mA)：- $I_C = 500 \text{ mA}$, $\beta_{\min} = 30 \rightarrow I_B(\min) = 17 \text{ mA}$ - 過驅動 $I_B = 25 \text{ mA}$ -
 $R_B = (3.3 - 0.7) / 0.025 = 104 \Omega \rightarrow$ 選 100Ω

但 25 mA 對 MCU 太大（一般限制 20 mA），建議改用 MOSFET（如 2N7002）或減小過驅動程度。

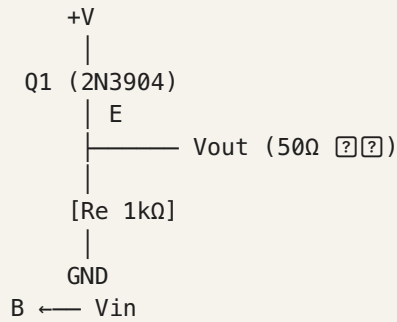
例 2：簡易電壓放大器



設計要點：- $I_C \approx 1 \text{ mA}$ （透過 R_C 上 4.7V 壓降）- $V_E = I_E \times R_E \approx 0.22\text{V}$ - $V_B = V_E + 0.7 \approx 0.92\text{V}$ - 增益 $\approx -R_C / R_E \approx -21$ （因射極旁路電容存在，AC 增益更高）

例 3：射極隨耦器

阻抗匹配， $10\text{k}\Omega$ 訊號源驅動 50Ω 負載：



訊號 V_{in} 直接到 B（透過耦合電容）。 V_{out} 跟隨 V_{in} （差 0.7V），且能輕鬆驅動 50Ω 負載。

十二、常見錯誤

1. NPN/PNP 接反

電路結構不對，根本不工作。

2. 沒加基極電阻

直接 MCU 接 BJT 基極 → 大電流燒毀 GPIO 或 BJT。

3. 飽和過驅動不足

β 隨電流變化，最壞情況 I_B 不夠 → BJT 沒完全飽和 → $V_{CE(sat)}$ 變大 → 發熱燒毀。

4. 達靈頓的 V_{BE} 誤解

達靈頓 V_{BE} 約 1.4V，計算 R_B 時不要用 0.7V。

5. 沒加飛輪二極體

驅動電感負載（繼電器、電磁閥）必須加。

6. 高溫熱失控

BJT 有「正回授熱失控」傾向： $-I_C$ 增加 → P 增加 → 溫度上升 → V_{BE} 下降 → I_C 更大 … - 解方：加射極電阻（負回授）、降額使用、散熱

7. 早期效應忽略

V_{CE} 變化會微微改變 I_C ，量測時需考慮。

十三、本章總結

✔ 您應該掌握：

- [x] BJT 的結構：NPN/PNP，三層摻雜
- [x] 工作原理：BE 順偏 $\rightarrow I_C = \beta \times I_B$
- [x] 三種工作區：截止、主動、飽和
- [x] 三種組態：CE（電壓放大）、CC（阻抗匹配）、CB（射頻）
- [x] BJT 開關設計：算 I_B 與 R_B
- [x] BJT 放大器原理（線性偏壓）
- [x] 達靈頓組合
- [x] 常見型號：2N3904, 2N3906, 2N2222, TIP31

自我檢測

1. NPN 飽和狀態下， V_{BE} 、 V_{CE} 大約多少？
2. $\beta = 200$ 的 BJT，要 100 mA I_C ，至少多少 I_B ？
3. 共射放大器為什麼會「倒相」？
4. 為什麼射極隨耦器能做阻抗匹配？
5. 達靈頓的優缺點？

解答

1. $V_{BE} \approx 0.7V$ ， $V_{CE(sat)} \approx 0.2V$
2. $I_B(\min) = 100/200 = 0.5 \text{ mA}$ ，但通常過驅動到 2–5 mA
3. 訊號在 B 增加 $\rightarrow I_C$ 增加 $\rightarrow R_C$ 上壓降增加 $\rightarrow V_{OUT} (= V_{CC} - I_C \times R_C)$ 下降
4. 高輸入阻抗（不影響源），低輸出阻抗（驅動負載），增益 ≈ 1 （不失真）
5. 優：高 β （千倍以上）；缺： V_{BE} 高（1.4V）、 $V_{CE(sat)}$ 較大、開關慢

下一章

07-???-FET-MOSFET.md 一場效電晶體與現代主流的 MOSFET。