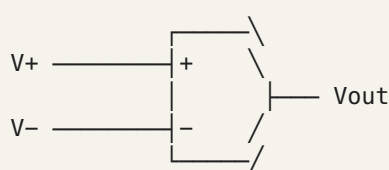


第 3 章 2：運算放大器 (Operational Amplifier)

OPAMP 是類比電路的「樂高積木」。掌握 OPAMP，就能設計絕大多數類比訊號處理電路。

一、OPAMP 的基本概念

符號



兩個輸入：- V_+ （非反相, Non-Inverting）- V_- （反相, Inverting）

一個輸出 V_{out} 。

理想 OPAMP 的特性

1. 無限大增益 ($A \rightarrow \infty$)
2. 無限大輸入阻抗 ($R_{in} \rightarrow \infty$ ，輸入電流為零)
3. 零輸出阻抗 ($R_{out} \rightarrow 0$)
4. 無限大頻寬
5. 零雜訊、零偏移

實際 OPAMP 接近這些理想，但有限制（後述）。

開回路與閉回路

OPAMP 開回路（Open Loop）增益 $\approx 100 \text{ dB}$ (10^5 – 10^6)。極小的輸入差異就會讓輸出飽和。

→ 必須加「回授（Feedback）」變成「閉回路」（Closed Loop）。

二、兩條黃金法則

實務分析（負回授下）的兩條法則：

Rule 1：兩輸入電壓相等

$$V_+ = V_-$$

(虛擬短路，virtual short)

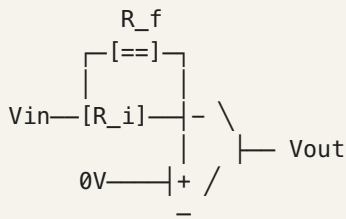
Rule 2：輸入電流為零

$$I_+ = I_- = 0$$

用這兩條規則，可秒解 90% 的 OPAMP 電路。

三、OPAMP 的基本應用電路

1. 反相放大器 (Inverting Amplifier)



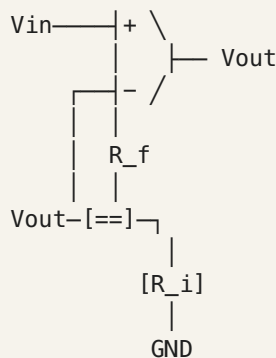
$V_- = V_+ = 0$ (virtual ground)

KCL @ V_- :

$$\frac{V_{in}}{R_i} = -\frac{V_{out}}{R_f}$$

$$\boxed{A_v = -\frac{R_f}{R_i}}$$

2. 非反相放大器 (Non-Inverting)



$V_- = V_+ = V_{in}$ (virtual short)

分壓：

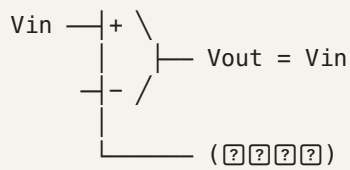
$$V_- = V_{out} \frac{R_i}{R_i + R_f}$$

$$\boxed{A_v = 1 + \frac{R_f}{R_i}}$$

非反相，最小增益是 1。

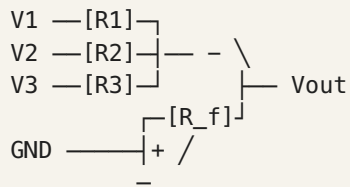
3. 電壓追隨器 (Buffer / Follower)

非反相 + $R_f = 0$, $R_i = \infty$:



$A_v = 1$ 。用於阻抗緩衝（高 R_{in} 、低 R_{out} ）。

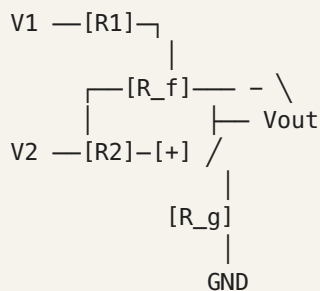
4. 加法器 (Summing Amplifier)



$$V_{out} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

當 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ 時： $V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_3)$ 。

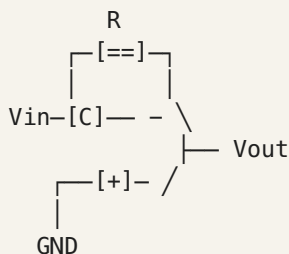
5. 減法器 (Difference Amplifier)



當 $R_1 = R_2$, $R_f = R_g$:

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_1}(V_2 - V_1)$$

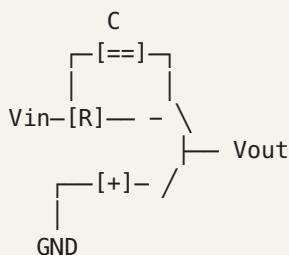
6. 微分器 (Differentiator)



$$V_{out} = -RC \frac{dV_{in}}{dt}$$

實際少用（雜訊放大）。

7. 積分器 (Integrator)



$$V_{out} = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt$$

用於：類比運算、波形產生、PID 控制。

8. 比較器 (Comparator)

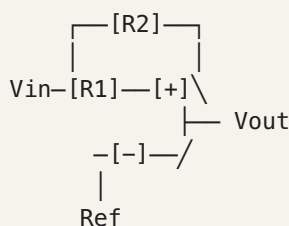
無回授（開迴路）：

$$V_{out} = \begin{cases} +V_{sat} & \text{if } V_+ > V_- \\ -V_{sat} & \text{if } V_+ < V_- \end{cases}$$

注意：一般 OPAMP 不適合做比較器（速度慢，可能進入線性區震盪），應用專用比較器 IC (LM393、LM339)。

9. 施密特觸發器 (Schmitt Trigger)

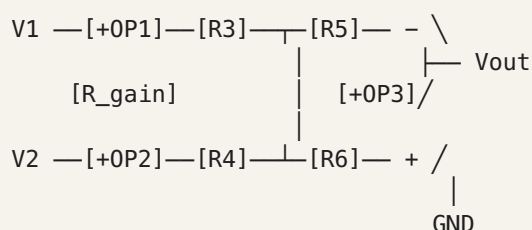
比較器加正回授，有「遲滯」（hysteresis）：



兩個閾值 V_{TH+} 與 V_{TH-} ，輸出在兩者之間切換。用於：消抖、雜訊環境的閾值偵測、波形整形。

10. 儀表放大器 (Instrumentation Amplifier)

3 顆 OPAMP 組成：



特性：- 高 CMRR (> 100 dB) - 高輸入阻抗（兩個 EF 緩衝）- 增益用一個 R_{gain} 控制

用於：感測器（熱電偶、應變計）、生醫量測（ECG、EEG）。

經典 IC：AD620、INA128、INA333。

11. 低通 / 高通濾波器

(詳見 03-中級篇/03-濾波器設計.md)

12. 振盪器

(詳見 03-中級篇/04-振盪器.md)

四、OPAMP 的實際非理想性

1. 有限的增益 (A_{OL})

實際 $A_{OL} = 10^5 - 10^6$ (100–120 dB)。但只在低頻有效。

2. 增益頻寬乘積 (GBW)

$$GBW = A_{CL} \times f_{-3dB}$$

對固定 OPAMP 來說 GBW 是常數。 - LM358 : GBW $\approx$ 1 MHz - LF356 : GBW $\approx$ 5 MHz - AD8051 : GBW $\approx$ 110 MHz - LMH6629 : GBW $\approx$ 900 MHz

範例：用 GBW = 10 MHz 的 OPAMP 做 Gain = 100 $\rightarrow$ 頻寬只有 100 kHz。

3. 迴轉率 (Slew Rate, SR)

輸出能多快變化 (V/ μ s)：

$$\text{SR} = \left| \frac{dV_{out}}{dt} \right|_{max}$$

範例： - LM358 : SR $\approx$ 0.5 V/ μ s - LF411 : SR $\approx$ 15 V/ μ s - AD797 : SR $\approx$ 20 V/ μ s - 高速：1000 V/ μ s+

對正弦波，最大頻率：

$$f_{max} = \frac{SR}{2\pi V_p}$$

4. 輸入偏移電壓 (Input Offset Voltage, V_{OS})

理想 $V_+ = V_- \rightarrow V_{out} = 0$ 。實際 $V_+ \neq V_-$ (差幾 μ V-mV)，需要在 V_- 補償一個 V_{OS} 。

範例： - LM358 : V_{OS} 典型 2 mV，最大 7 mV - OP07 : V_{OS} 典型 30 μ V - 精密： $< 5 \mu$ V (chopper-stabilized)

5. 輸入偏置電流 (I_B) 與偏移電流 (I_{OS})

實際輸入有微小電流流入： - 雙極性輸入： μ A 級 - FET 輸入：pA-nA 級 - 高阻抗應用必須用 FET 輸入 OPAMP

6. 共模拒絕比 (CMRR)

實際 80–120 dB。高 CMRR 才能在差模信號中消除共模雜訊。

7. 電源拒絕比 (PSRR)

電源變化不應影響輸出，實際 80–100 dB。

8. 雜訊

- 電壓雜訊 e_n (nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)
- 電流雜訊 i_n (fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$)

低雜訊 OPAMP： - AD797 : 0.9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ - LT6202 : 0.95 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

9. 輸出擺幅 (Output Swing)

- 一般 OPAMP：輸出無法到達電源軌（差 1-2V）
- Rail-to-Rail Output (R-R-O)：可接近電源軌
- Rail-to-Rail Input (R-R-I)：輸入也可
- R-R-I/O：兩者皆可（精密電路常用）

10. 輸入電壓範圍

不可超過電源軌（一般），R-R-I 才能。

五、回授原理

負回授

$$A_{CL} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

當 $A \rightarrow \infty$ ： $A_{CL} = 1/\beta$ （與 A 無關）

優點：- 增益穩定（不依賴元件變動）- 線性化（降低失真）- 改變輸入/輸出阻抗 - 拓寬頻寬

代價：增益降低。

正回授

$$A_{CL} = \frac{A}{1 - A\beta}$$

$A \cdot \beta = 1 \rightarrow$ 振盪 $A \cdot \beta > 1 \rightarrow$ 飽和（用於比較器、施密特觸發器）

穩定性

OPAMP 在高頻時相位偏移，可能讓「負回授變正回授」造成振盪。

相位裕度 (Phase Margin)

GBW 處的相位偏差距離 -180° 的差值：

- 60° ：穩定，無過衝
- 45° ：可接受
- $< 30^\circ$ ：嚴重過衝、可能振盪

設計時保留至少 45° 相位裕度。

六、OPAMP 的選擇

通用型

- LM358 / LM324：超便宜，學習用，GBW=1MHz
- TL071 / TL081：JFET 輸入，便宜常用
- LM4562：音響用低失真

精密型

- OP07：低 V_{OS} ($30\ \mu V$)
- OPA227：高精度
- AD797：超低雜訊
- MAX44267： $\pm 15V$ ，零漂移

高速型

- AD8021 / AD8065：300 MHz GBW
- LMH6629：900 MHz GBW
- OPA855：8 GHz GBW (極高速)

低功耗 / 軌對軌

- MCP6001： μA 級電流，3V 工作
- LMV358：低功耗 LM358

儀表放大器

- AD620：經典
- INA126 / INA128：精密
- INA333： $\mu Power$ 精密

跨阻放大器 (TIA)

光電二極體前端：- OPA381：高速 TIA - AD8015：光纖通訊

七、設計範例

例 1：麥克風前級放大器

- 駐極體麥克風輸出 $\sim \text{mV}_{\text{pp}}$
- 需要放大 100 倍 $\rightarrow 1 \text{ V}_{\text{pp}}$
- 頻寬 20 Hz – 20 kHz

選 NE5532 (低雜訊, $\text{GBW}=10 \text{ MHz}$) :

非反相: $A = 100$, $R_f = 99 \text{ k}\Omega$, $R_i = 1 \text{ k}\Omega$

頻寬: $\text{GBW}/A = 10\text{M}/100 = 100 \text{ kHz} \gg 20 \text{ kHz} \checkmark$

例 2：感測器訊號調理

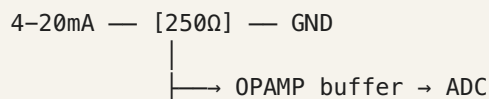
熱電偶 $\rightarrow$ AD620 (儀表放大器) $\rightarrow$ ADC

設 V 範圍 0–10 mV (TC 偵測 25–250° C) ADC 範圍 0–3.3V 增益 = 330

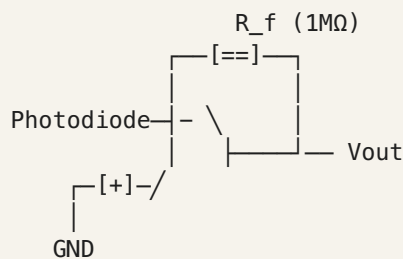
$R_{\text{gain}} = 49.4\text{k} / (G-1) = 49.4\text{k} / 329 \approx 150 \Omega$

例 3：4–20 mA 電流環接收

工業常用 4–20 mA 電流環，用 250Ω 串聯轉成 1–5 V。



例 4：光電二極體 TIA



光電流 I_{ph} 流過 R_f 產生電壓: $V_{\text{out}} = -I_{\text{ph}} \times R_f$

需要：低偏置電流 OPAMP (FET 輸入)、補償電容 (穩定性)。

八、實務注意事項

1. 電源去耦

每個 OPAMP 電源腳要加：- 0.1 μF X7R MLCC (緊靠) - 10 μF 鉭電解或 MLCC (區域性)

2. 輸入保護

可能超過電源軌的場合：- 串聯限流電阻 - 並聯箝位二極體

3. PCB 走線

精密電路：- 反相節點要短 (避免雜訊耦合) - 隔離數位訊號 - Guard Ring 包圍高阻抗節點

4. 補償未使用的 OPAMP

雙運放 / 四運放，未用的 OPAMP 要：- 接成 follower - V^+ 接到 $V_{CC}/2$

避免亂飛震盪、雜訊耦合。

5. 振盪 / 不穩定

常見原因：- 電源去耦不足 - 負載電容大 (驅動電纜) - 走線寄生電感 - 相位裕度不足

解方：- 加電源旁路電容 - 輸出串聯小電阻 (10–100 Ω) - 加 RC 補償網路

九、本章總結

✔ 您應該掌握：

- [x] OPAMP 的理想特性
- [x] 兩條黃金法則： $V^+ = V^-$, $I^+ = I^- = 0$
- [x] 反相、非反相、follower、加法器、減法器
- [x] 微分、積分、比較器、施密特觸發
- [x] 儀表放大器
- [x] 實際 OPAMP 的非理想性 (GBW、SR、 V_{OS} 、雜訊)
- [x] OPAMP 選用流程
- [x] 設計實例

自我檢測

1. 反相放大器 $R_f = 100\text{ k}\Omega$, $R_i = 10\text{ k}\Omega$ ，增益多少？

2. $GBW = 10 \text{ MHz}$ 的 OPAMP 做增益 100，頻寬多少？
3. $SR = 1 \text{ V}/\mu\text{s}$ 的 OPAMP 輸出 5V peak 正弦波，最高頻率？
4. 為什麼 OPAMP 不適合做比較器？
5. 儀表放大器為何優於差分 OPAMP？

解答

1. $-R_f / R_i = -10$
2. $f = GBW/A = 100 \text{ kHz}$
3. $f = SR/(2\pi \cdot V_p) = 1 \times 10^6 / (2\pi \cdot 5) \approx 31.8 \text{ kHz}$
4. 速度慢 (SR 限制)、可能進入線性區震盪、輸出可能不到電源軌
5. 兩個 follower 提供超高輸入阻抗，CMRR 由匹配的 R_g 與精密內部電阻決定，遠優於普通差分 OPAMP

下一章

03-[???.md](#) — 各種濾波器設計。