

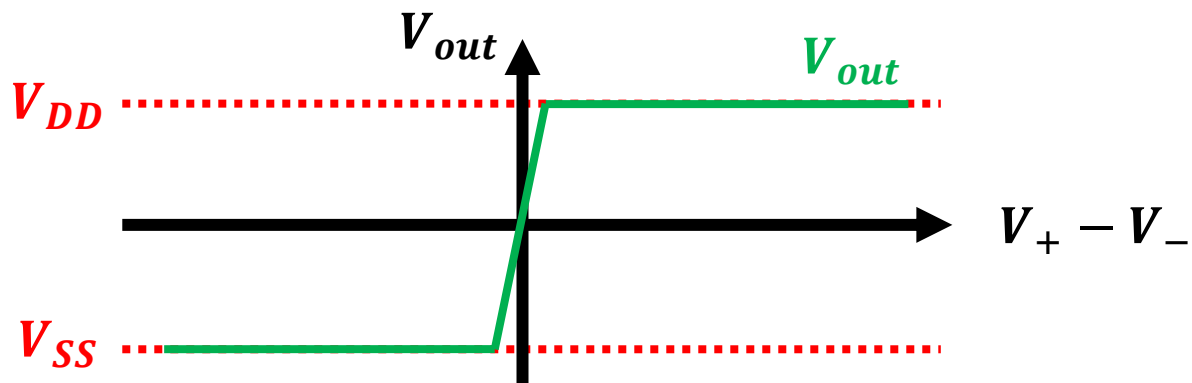
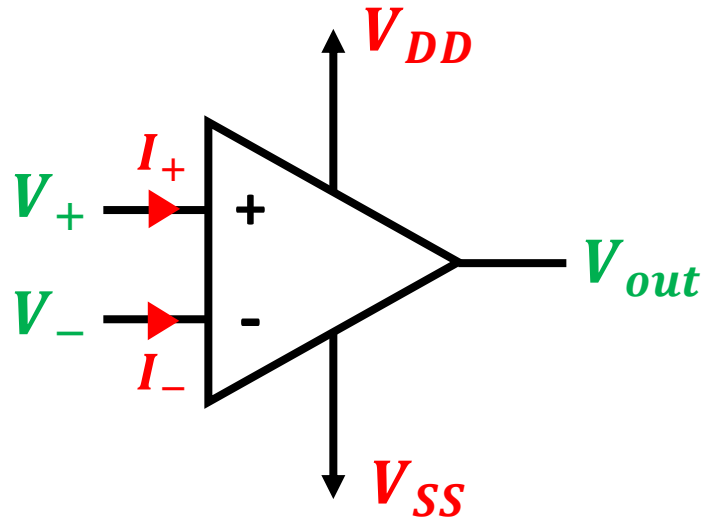
Operational Amplifiers

電機 26 級 陳亮宇

Outline

- **Opamp basics**
 - Open-loop comparator
 - Negative feedback amplifiers
 - Common circuits
- **Opamp non-idealities**
 - Bandwidth
 - Slew rate
 - Output swing
 - Input offset voltage
 - Input swing
- **Common ICs**

運算放大器 Operational Amplifier (opamp)



I/O 電壓不超過供電電壓

$$V_{SS} \leq V_+, V_-, V_{out} \leq V_{DD}$$

輸入電流非常小

$$I_+, I_- \approx 0$$

Input 電壓差被放大(很多倍)

$$V_{out} = A \cdot (V_+ - V_-)$$
$$A \gg 1$$

A 稱作 open-loop gain

分貝 Decibel (dB)

$$A_{dB} = 20\log_{10}A_{V/V}$$

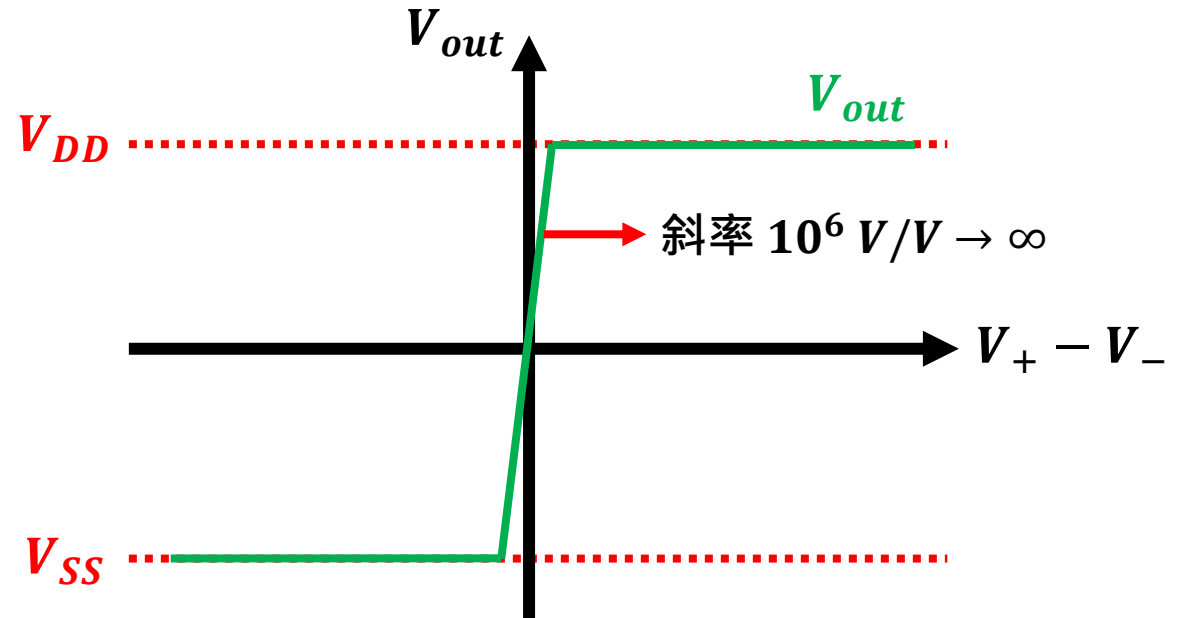
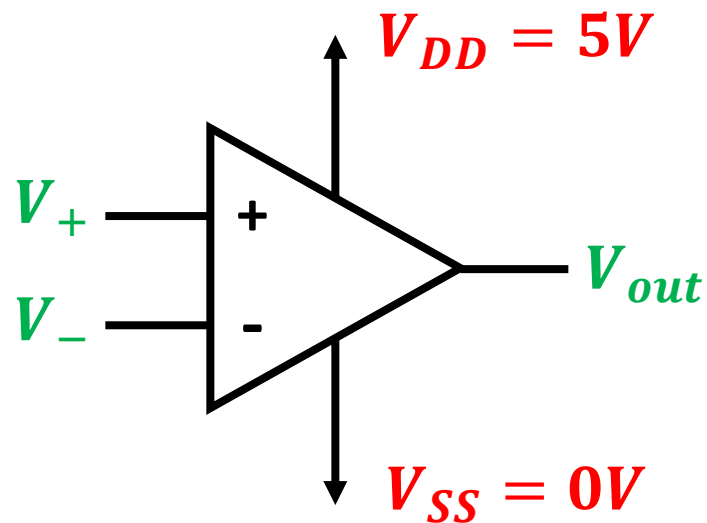
Opamp open-loop gain
通常都是 > 100,000
我們常用分貝(dB)表示

電壓放大倍率：
20 dB -> 十倍
40 dB -> 一百倍
3 dB -> 兩倍

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
OPEN-LOOP GAIN							
A _{OL}	Open-loop voltage gain	V _S = 16 V, V _{CM} = V _− (V _−) + 0.1 V < V _O < (V ₊) − 0.1 V		120	145	dB	
			T _A = −40°C to 125°C		142		
		V _S = 4 V, V _{CM} = V _− (V _−) + 0.1 V < V _O < (V ₊) − 0.1 V		104	130		
			T _A = −40°C to 125°C		125		
		V _S = 2.7 V, V _{CM} = V _− (V _−) + 0.1 V < V _O < (V ₊) − 0.1 V ⁽²⁾		101	120		
			T _A = −40°C to 125°C		118		

10⁶ V/V

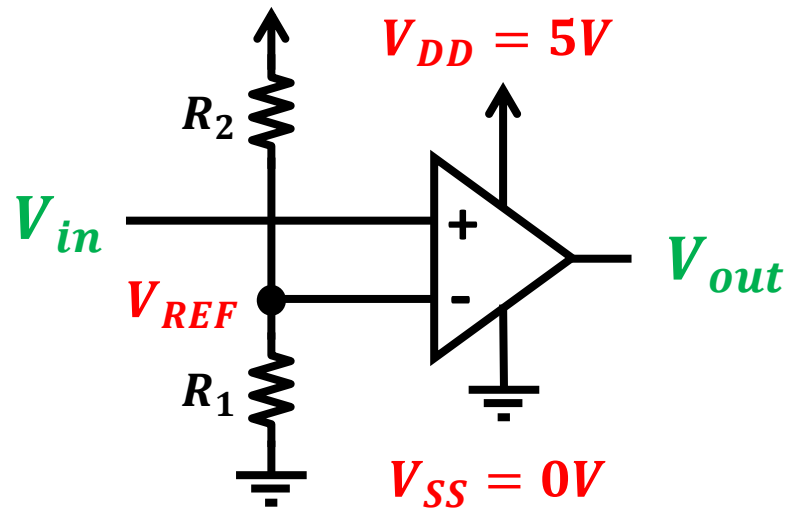
比較器 Comparator



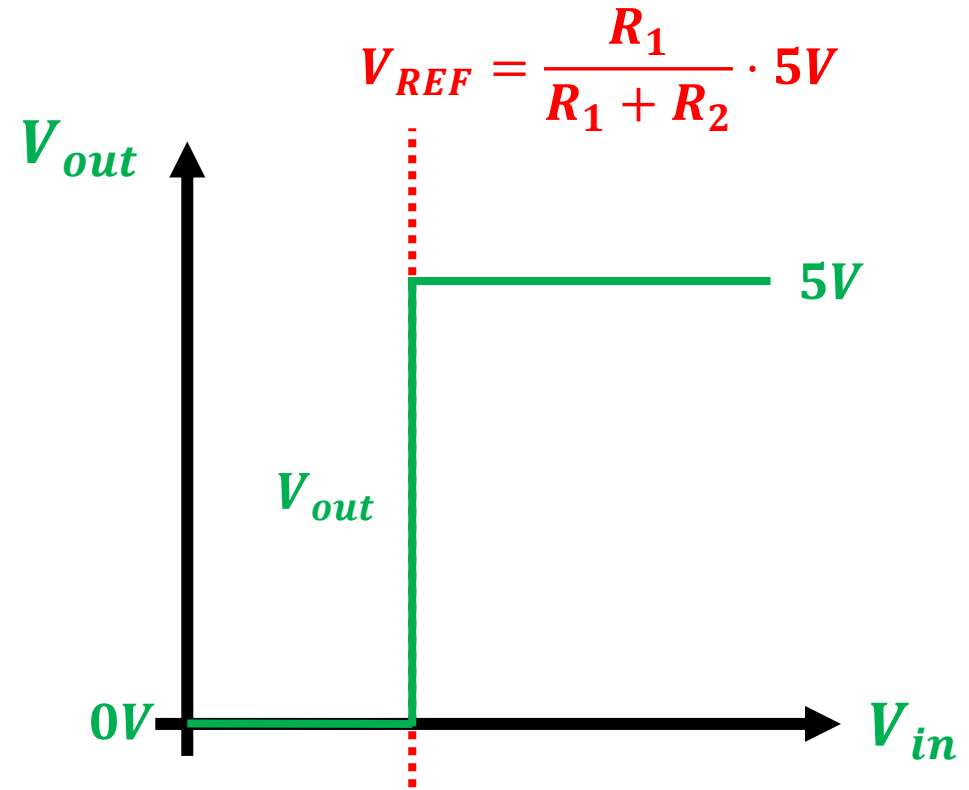
沒接 feedback 的時候，
行為可以簡化為比較器

$$V_{out} = \begin{cases} V_{DD}, & \text{if } V_+ > V_- \\ V_{SS}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

比較器範例電路



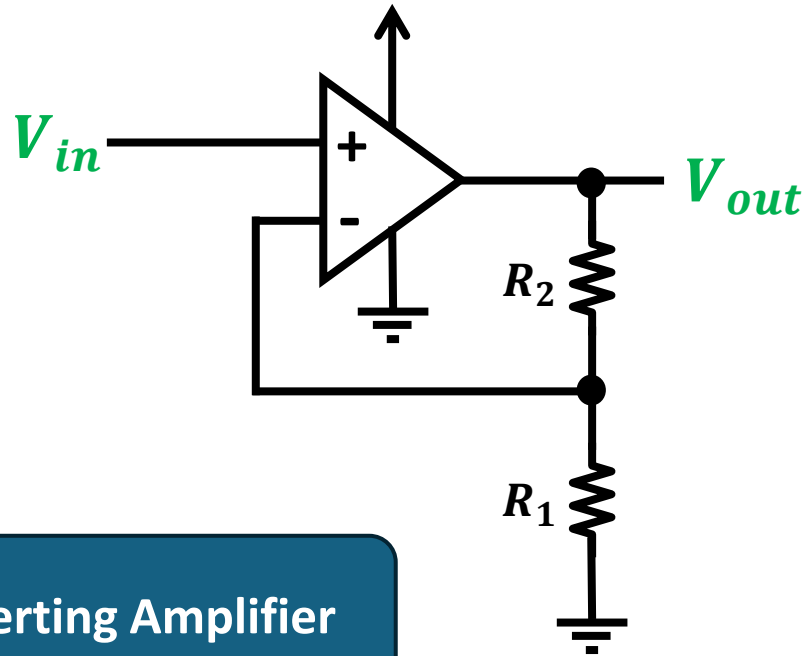
Voltage Threshold Detector



DC Transfer Curve

Negative Feedback 負迴授

從輸出拉回來的訊號一定是接到負的輸入



Non-Inverting Amplifier

Error amplification

$$V_{out} = A \cdot (V_+ - V_-)$$

因為 $I_+, I_- \approx 0$ ，所以迴授部分只是單純的電阻分壓

$$V_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{out}$$

$$V_{out} = A \cdot (V_{in} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{out})$$
$$\left(1 + A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) V_{out} = A \cdot V_{in}$$

因為 $A \rightarrow \infty$ ，所以分母的 1 相對而言可以忽略

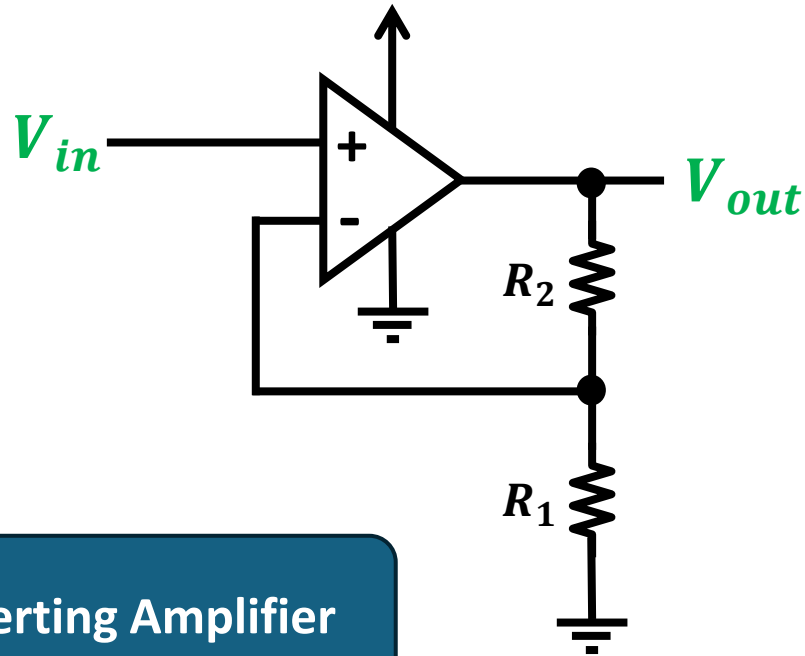
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A}{1 + A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Closed-loop gain

Negative Feedback 負迴授

從輸出拉回來的訊號一定是接到負的輸入

在負迴授的情況下，
 V_+ , V_- 最後會達到同一個電壓



Non-Inverting Amplifier

$$V_+ = V_{in}$$
$$V_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_{in}$$

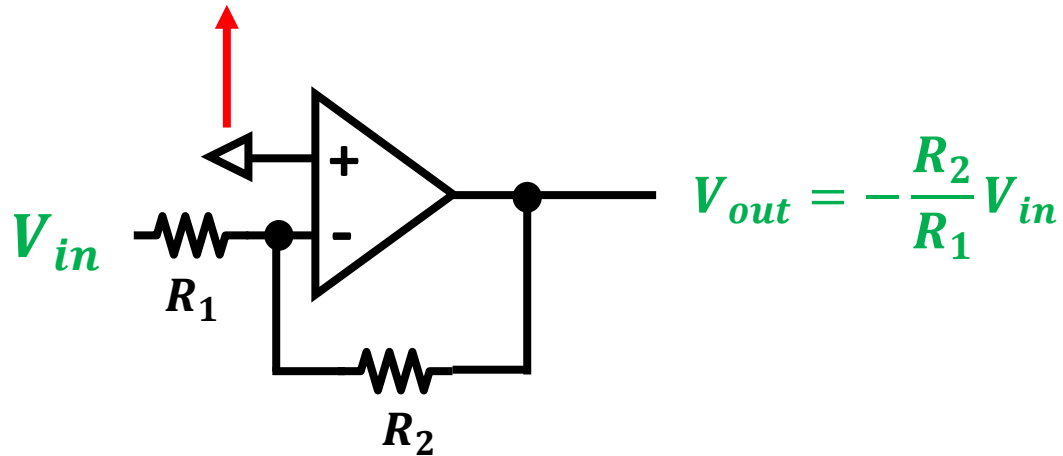
可以用 V_+ , V_- 電壓相同，
當作計算時的條件

$$V_+ = V_-$$
$$\Rightarrow V_{in} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{out}$$
$$\Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

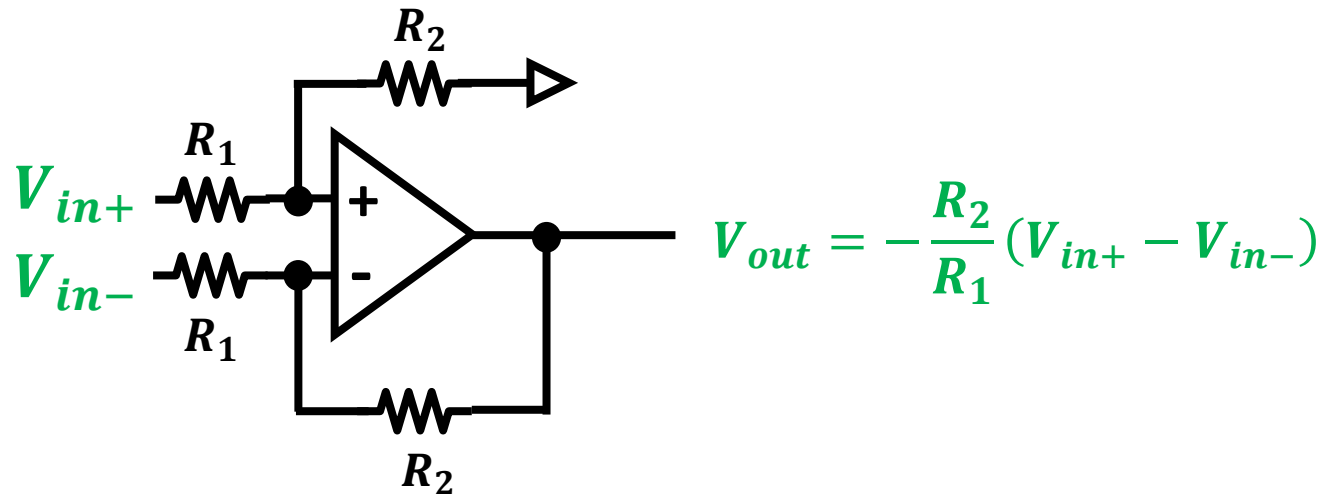
負迴授 opamp 範例電路

訊號參考電位(不一定是 0V，可以是其他穩定的電壓，例如 0.5VDD)

Inverting Amplifier

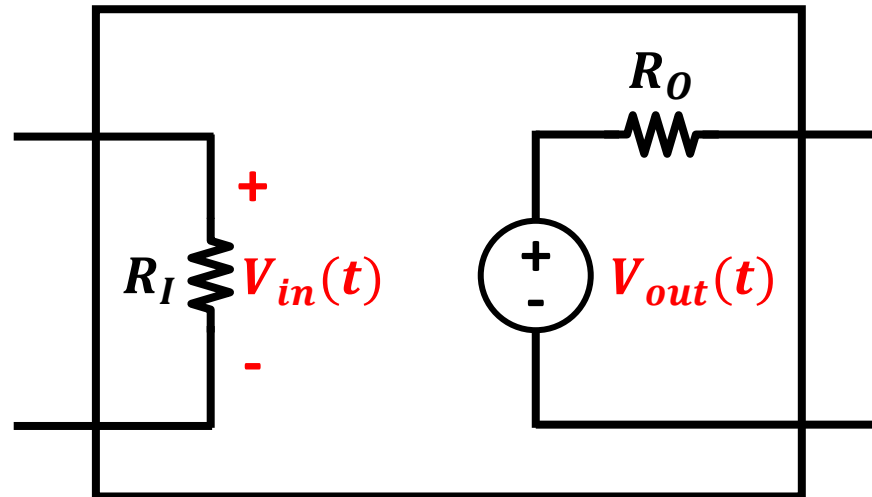


Differential Amplifier



Input / Output Impedance

我們會把一個電路當作一個有輸入輸出的黑盒子



$$V_{out}(t) = f(V_{in}(t))$$

Input Impedance 表示要把電壓訊號送進黑盒子的難度

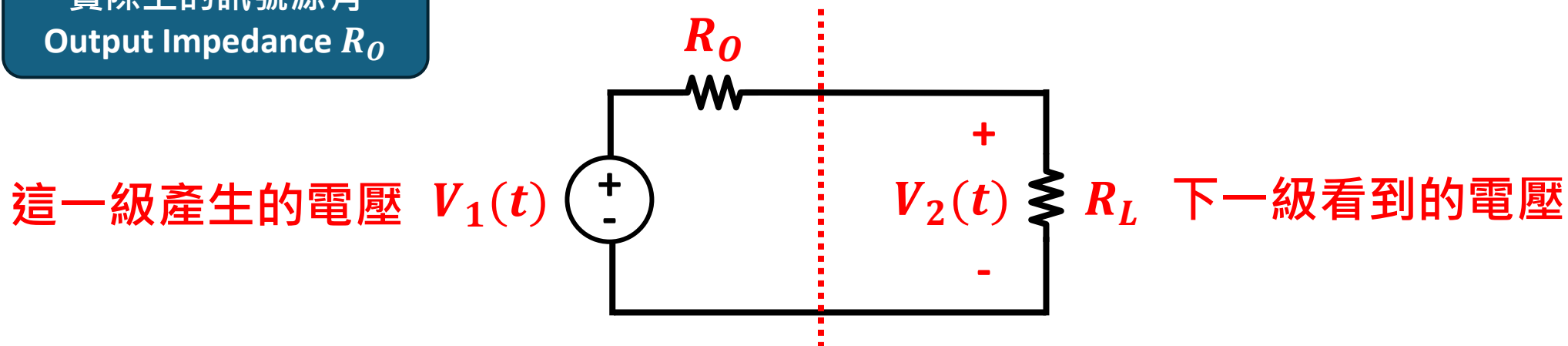
R_I 越大，電壓越容易被送進黑盒子成為電路看到的 V_{in}

Output Impedance 表示黑盒子能夠把電壓訊號送出去的強度

R_O 越小，電壓越容易被送出去外面看到的電壓會越接近想像中的 V_{out}

Input / Output Impedance

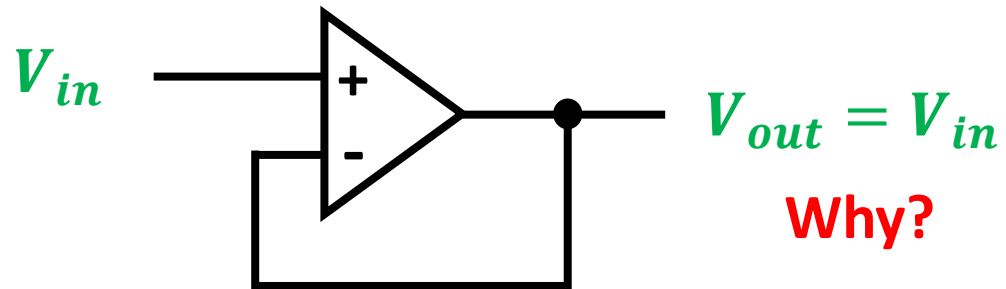
實際上的訊號源有
Output Impedance R_O



想像中，訊號源產生了 $V_1(t)$ 的訊號

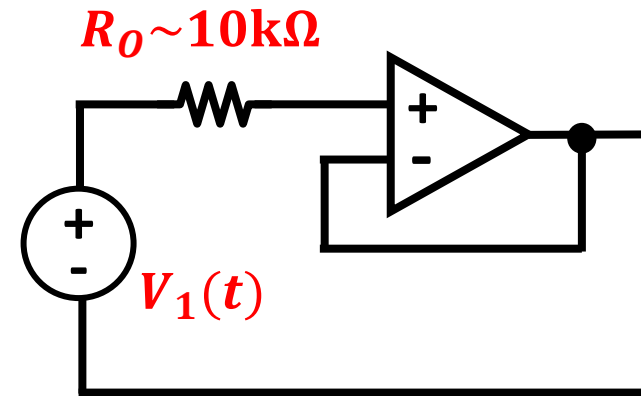
實際上，我們只看到 $V_2(t) = \frac{R_L}{R_O + R_L} V_1(t)$

Voltage Buffer

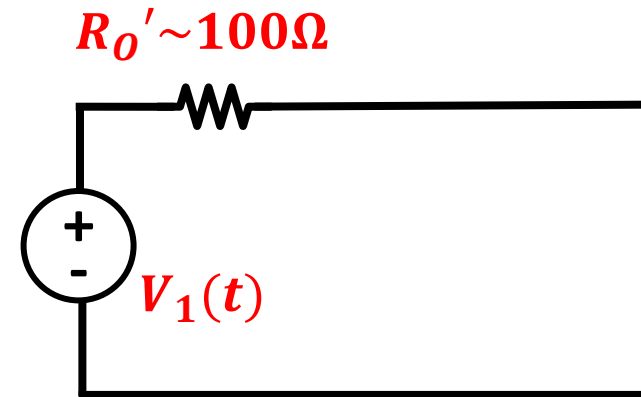


Why?

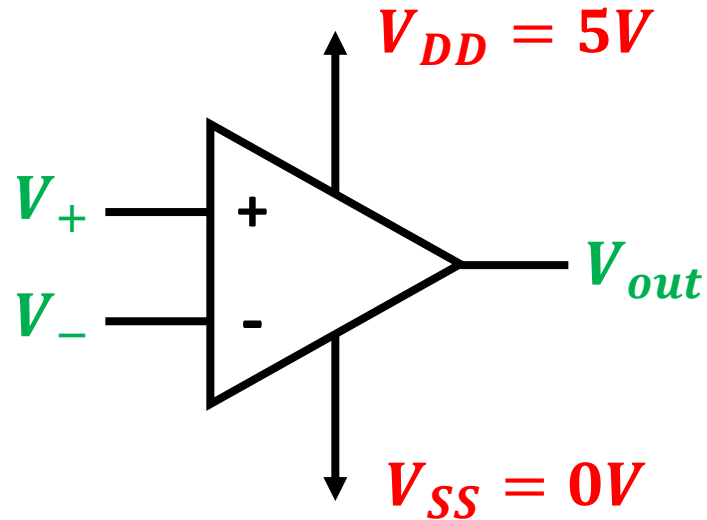
Opamp 的兩個輸入 $R_I \rightarrow \infty$ ，輸出 $R_O \rightarrow 0$
Voltage Buffer 可以調整 I/O Impedance



加 buffer 之後 R_O 下降，
驅動能力提升



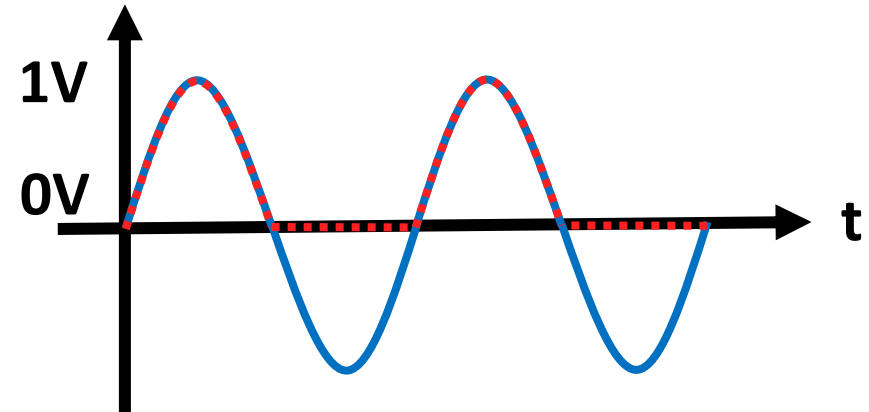
Virtual Ground



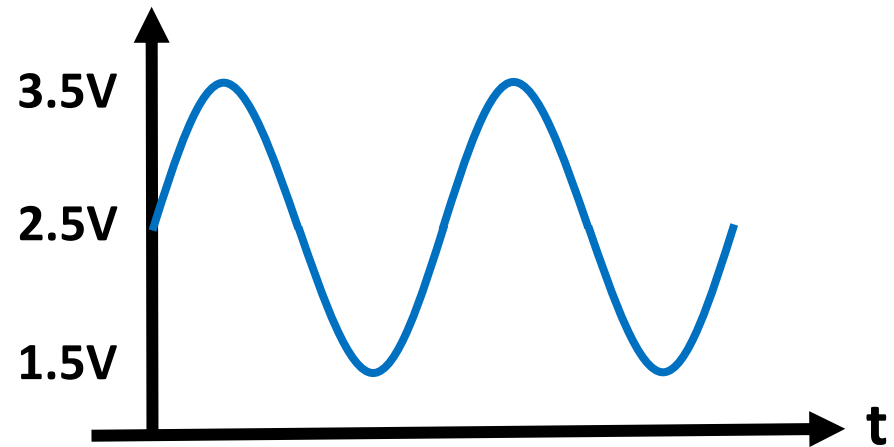
I/O 電壓不超過供電電壓

$$0V \leq V_+, V_-, V_{out} \leq 5V$$

訊號的參考電位也是 $0V$ 的話
訊號的一半會被砍掉

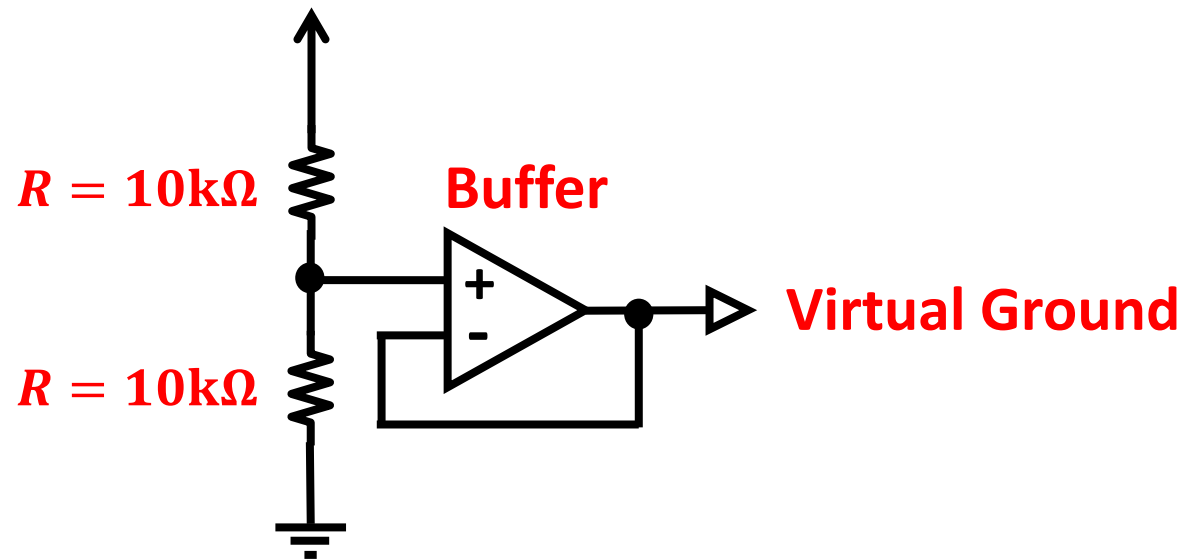


通常會把訊號擺在供電範圍
的正中間，讓振幅可以最大



Virtual Ground

簡單的 virtual ground 電路



先用電阻分壓製造 $0.5V_{DD}$ 的參考電位

再用 Voltage Buffer 增加驅動能力(變得像獨立電壓源)

Opamp Non-Idealities

參考影片：[This chip will RUIN your circuit](#) (有點偏激)

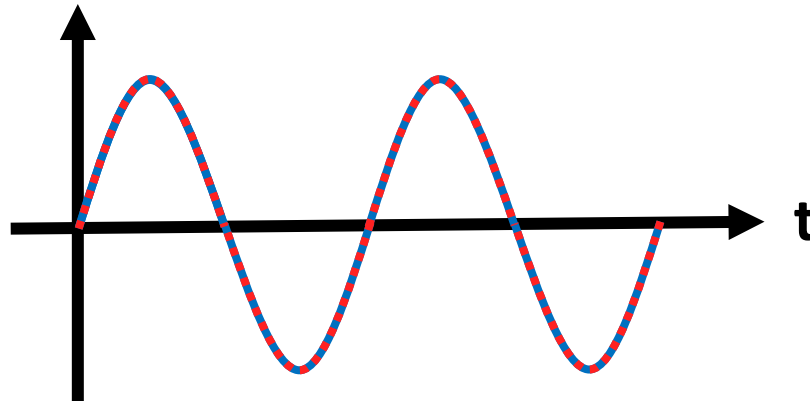
頻寬 Bandwidth

Input 頻率越來越高的時候
Opamp 什麼時候會跟不上 input

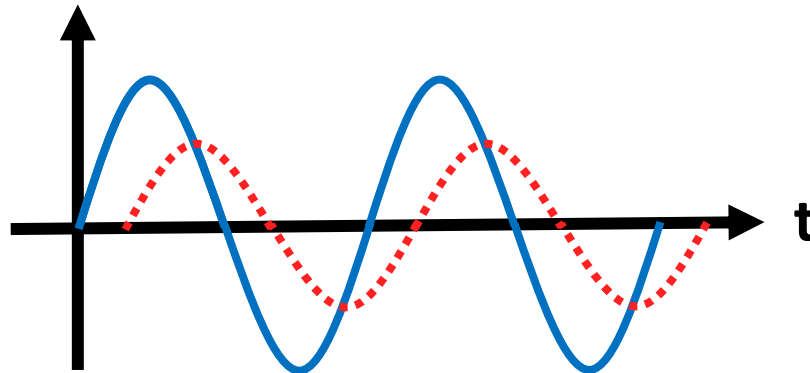
規格上會表示為
Gain bandwidth product (GBW)

舉例：Voltage Buffer

輸入頻率小於頻寬



輸入頻率大於頻寬

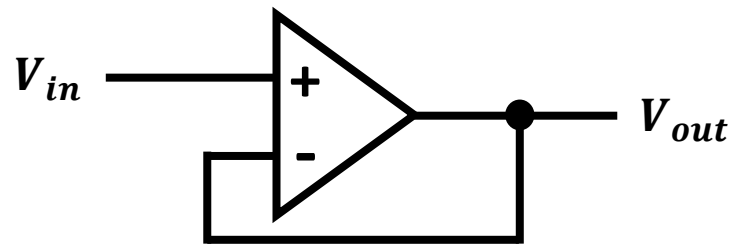


輸出訊號：
振幅比預期小
時間比預期晚

Gain Bandwidth Product

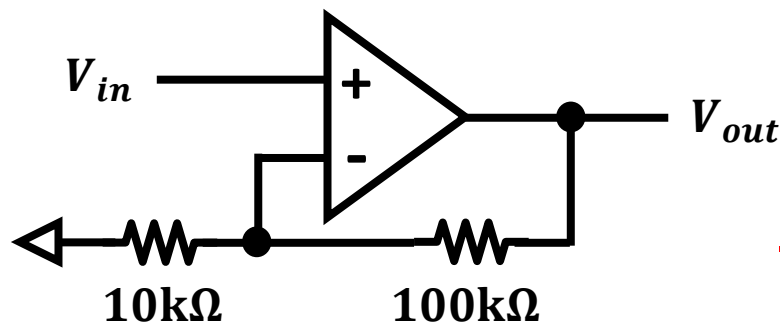
FREQUENCY RESPONSE				
GBW	Gain-bandwidth product		4.5	MHz
SR	Slew rate	$V_S = 16\text{ V}$, $G = +1$, $C_L = 20\text{ pF}$	21	$\text{V}/\mu\text{s}$

Closed-loop gain x bandwidth = constant (GBW)



舉例：GBWP = 4.5MHz

Gain = 1 -> BW = 4.5 MHz

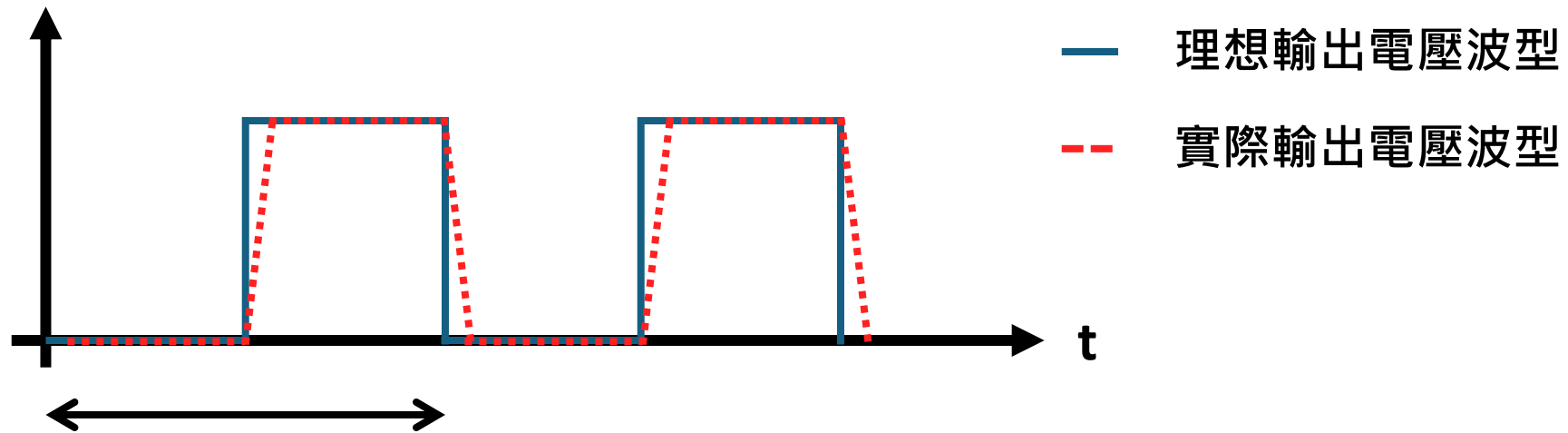


Gain = 11 -> BW = 409 kHz

一般便宜的 opamp 頻寬大概 100kHz ~ 10MHz

Slew Rate

輸出電壓訊號對時間的最大斜率



就算頻率遠小於頻寬，slew rate 的限制還是存在

Slew Rate

FREQUENCY RESPONSE				
GBW	Gain-bandwidth product		4.5	MHz
SR	Slew rate	$V_S = 16\text{ V}$, $G = +1$, $C_L = 20\text{ pF}$	21	V/ μs

一般便宜的 opamp ，
Slew rate 大概 0.1~20 V/ μs

Output Swing 輸出電壓範圍

OUTPUT							
V _O	Voltage output swing from rail	Positive rail (V+)		I _{OUT} = 50 μA	1.35	1.42	V
				I _{OUT} = 1 mA	1.4	1.48	V
				I _{OUT} = 5 mA ⁽¹⁾	1.5	1.61	V
		Negative rail (V–)		I _{OUT} = 50 μA	100	150	mV
				I _{OUT} = 1 mA	0.75	1	V
				V _S = 5 V, R _L ≤ 10 kΩ connected to (V–)	T _A = –40°C to +85°C	5	20

吃掉的電壓可能跟輸出電流有關

理想上：

I/O 電壓不超過供電電壓

$$V_{SS} \leq V_+, V_-, V_{out} \leq V_{DD}$$

實際上：

Opamp 還會從 V_{SS} 和 V_{DD} 吃一點電壓

以供電 $V_{SS}=0V$, $V_{DD}=5V$ 為例，在輸出電流 1mA 情況下，實際輸出電壓範圍是最低 $0+1=1V$ 最高 $5-1.48=3.52V$

Input Swing 輸入電壓範圍

INPUT VOLTAGE RANGE					
V_{CM}	Common-mode voltage range	$V_S = 3\text{ V to }36\text{ V}$	$T_A = -40^\circ\text{C to }+85^\circ\text{C}$	(V-)	(V+) - 1.5
		$V_S = 5\text{ V to }36\text{ V}$		(V-)	(V+) - 2



Common-mode voltage 是指
接成負迴授之後，
兩個輸入被壓到一樣的那個電壓

Input 也會從 V_{SS} 和 V_{DD}
吃一點電壓

如果超出這個範圍的話，
無法正常以負迴授運作

現在新的 opamp 大多會設計 RRIO (rail-to-rail input/output)
這樣 input/output 基本上可以達到整個 $V_{SS} \sim V_{DD}$ 的範圍

(但零售比較難買)

Input Offset Voltage

OFFSET VOLTAGE					
V_{OS}	Input offset voltage	LM358B		± 0.3	± 3.0 mV
			$T_A = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$		± 4 mV
		LM358BA			± 2.0 mV
			$T_A = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$		± 2.5 mV

兩個 input 之間的誤差 V_{OS}

$$V_{out} = A \cdot (V_+ - V_- - V_{OS})$$

Input offset 會讓 opamp 的零點
飄掉一個小電壓

opamp 的 closed-loop gain 很大的
時候，會造成輸出嚴重的誤差

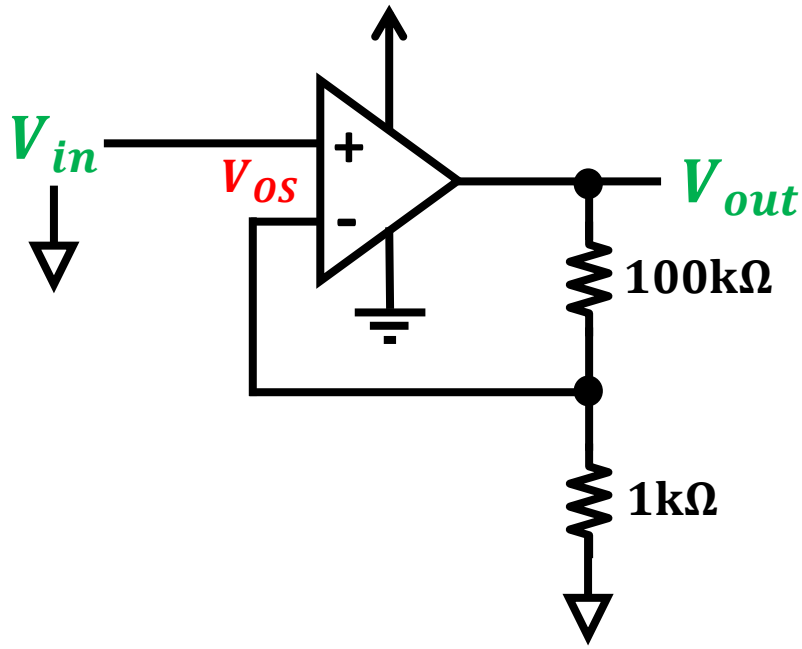
注意： V_{OS} 可以是正的也可以是負的

	General Purpose Opamp	Precision Opamp
Input Offset	0.5~5 mV	0.01~0.5mV
Bandwidth	一般	偏低

(或是買更貴的 opamp，兩個規格都好看)

Input Offset Voltage

接成負迴授時，
兩個 input 最後會卡一個 V_{os}



假設 $V_{os} = +1\text{mV}$
假如現在輸入為 0V

$$V_+ = 0 \\ \Rightarrow V_- = V_+ - V_{os} = -1\text{mV}$$

$$V_- = \frac{1\text{k}\Omega}{1 + 100\text{k}\Omega} \cdot V_{out} \\ \Rightarrow V_{out} = 101 \cdot V_- = 101\text{mV}$$

理想上應該要是 0 才對