

電子學

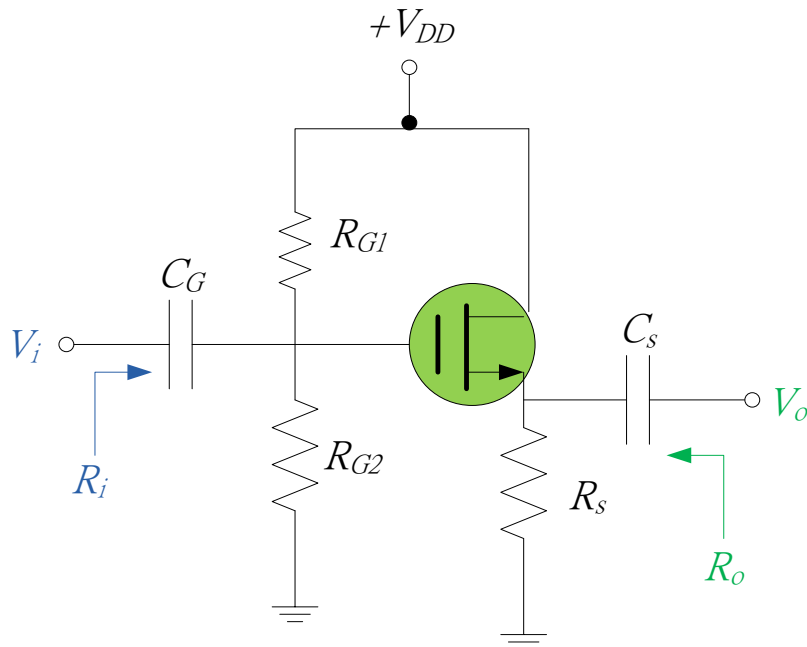
National Taiwan Normal University

講師：邱稜翔

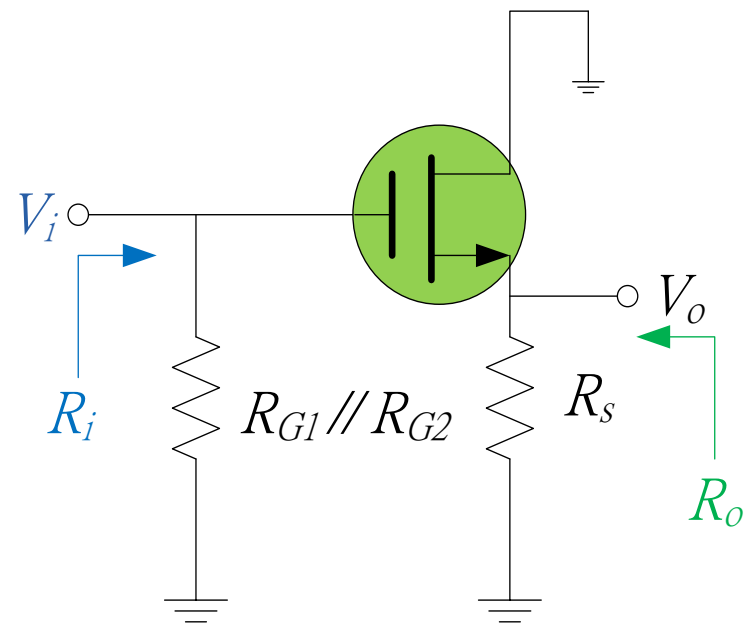
一、共汲極放大器

以閘極端為輸入端、源極端為輸出端、
汲極端為共接端之放大組態，稱為
共汲極(CD)放大器。

分壓式偏壓共汲極放大電路



(a) 放大電路



(b) 小信號等效電路

一、共汲極放大器

直流分析：求FET之 V_{GSQ} 及 I_{DQ}

依直流偏壓分析可得

$$\begin{cases} V_{GSQ} = V_{DD} \times \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} - I_{DQ} \times R_S \\ I_{DQ} = k \times (V_{GSQ} - V_{GS(t)})^2 \end{cases}$$

由上兩是聯立方程式，可解得 V_{GSQ} 及 I_{DQ}

一、共汲極放大器

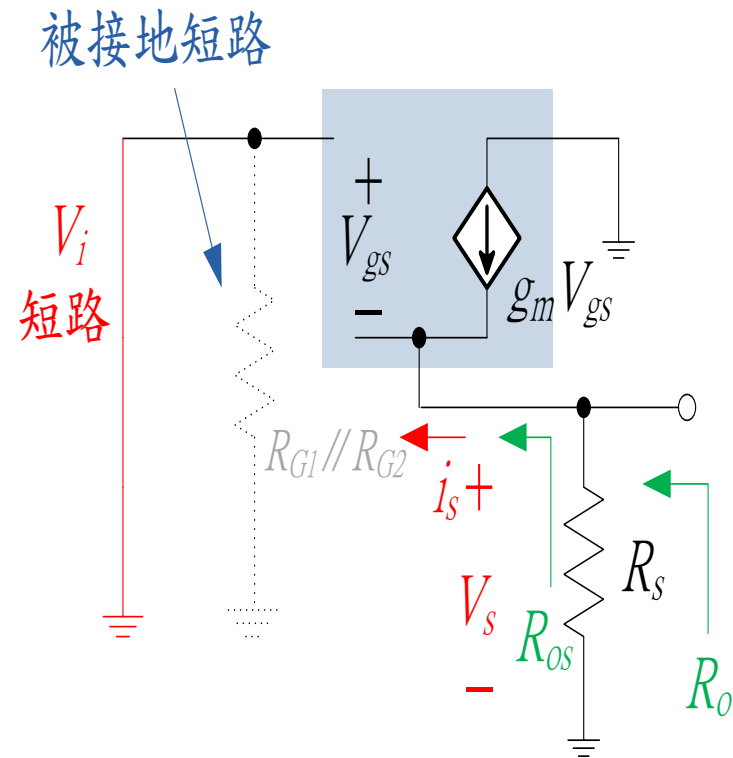
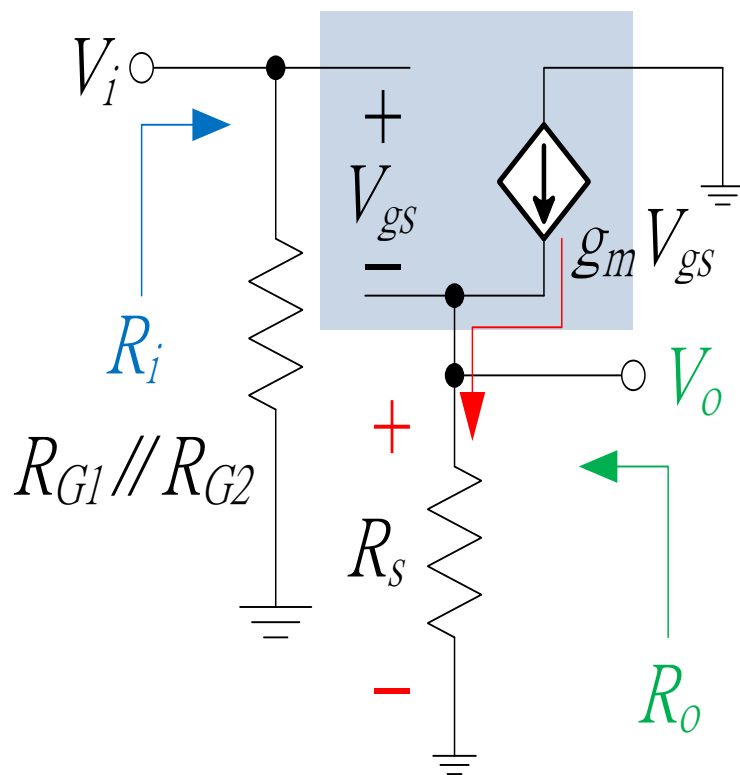
交流小信號分析：求FET之 g_m 及 r_o 。

依FET小信號等效電路模型定義，可得

$$g_m = 2\sqrt{k \times I_{DQ}} \quad \text{或} \quad r_o = \frac{V_A}{I_{DQ}}$$
$$g_m = 2k \times (V_{GSQ} - V_{GS(t)})$$

一、共汲極放大器

交流小信號分析：求放大電路之 A_v 、 R_i 及 R_o 。



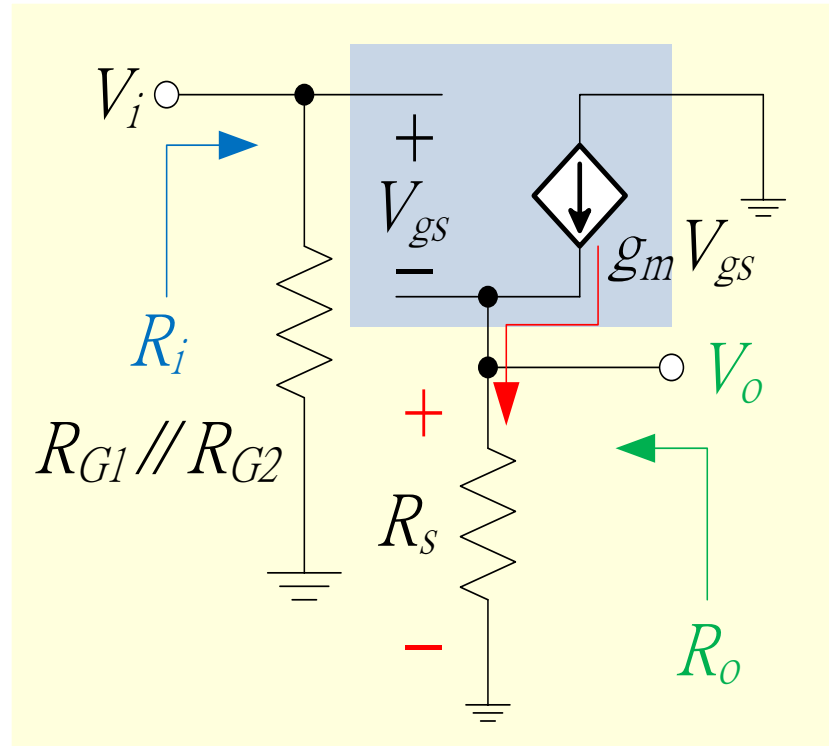
(a) FET不含 r_o 的小信號等效電路 (b) 求輸出電阻 R_o 等效電路

一、共汲極放大器

由圖可得

$$R_i = R_{G1} // R_{G2}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{g_m \times v_{gs} \times R_s}{V_{gs} + g_m \times v_{gs} \times R_s}$$
$$= \frac{g_m \times R_s}{1 + g_m \times R_s}$$



上式表示共汲極放大電路之電壓增益為正且 $A_v \leq 1$ ，因為電流由上往下流過電阻 R_s ，輸出電壓 V_o 為正。當 $g_m \times R_s \gg 1$ 時，共汲極電壓增益 $A_v \approx 1$ 。

一、共汲極放大器

求輸出電阻 R_o 時，輸入信號要設為0，即輸入電壓信號要短路，如圖所示等效電路。由圖分析，可知

$$v_s = -v_{gs} \quad \text{與} \quad i_s = -g_m \times v_{gs}$$

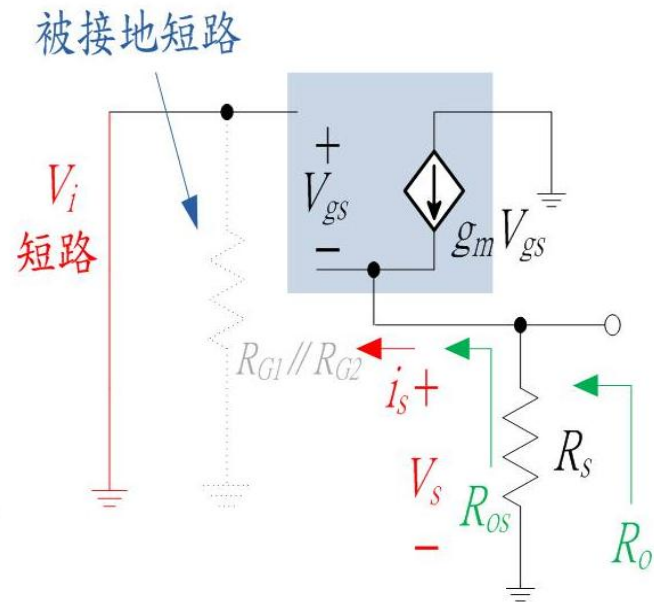
(負號產生的原因是彼此的方向相反所致)，可得FET由源極端看入之等效電阻為

$$\frac{1}{g_m}, \text{ 即}$$

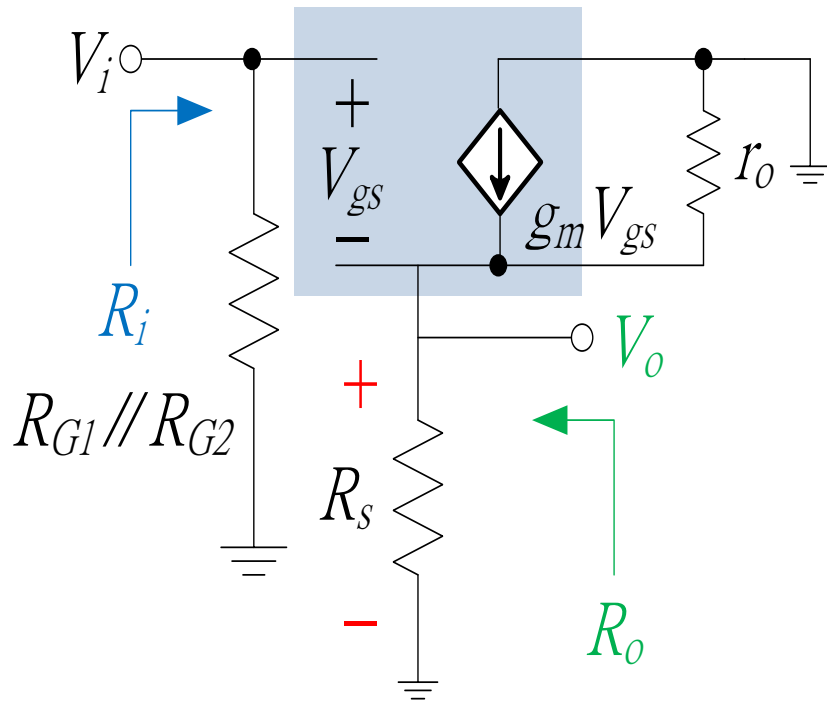
$$R_{os} = \frac{V_s}{i_s} = \frac{-v_{gs}}{-g_m \times v_{gs}} = \frac{1}{g_m}$$

最後可得輸出電阻

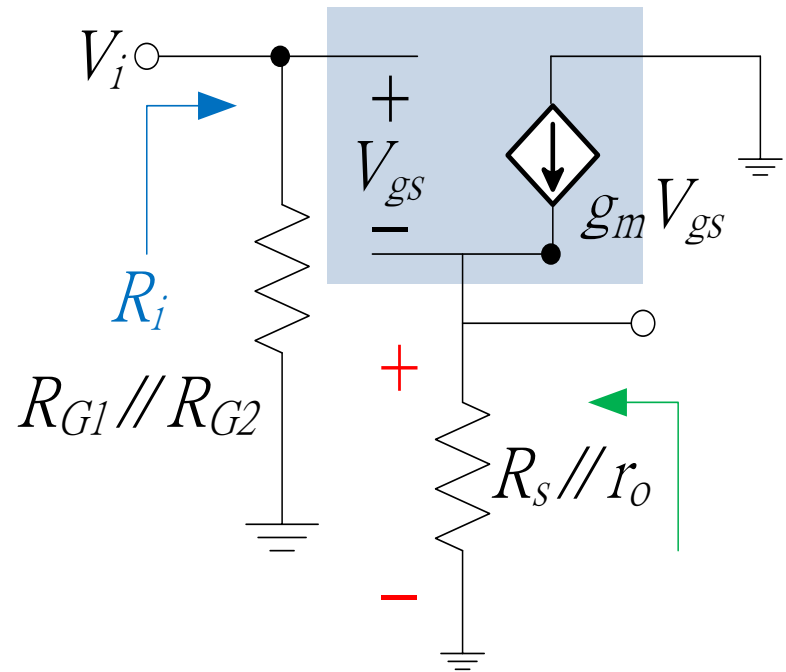
$$R_o = R_S // R_{OS} = R_S // \frac{1}{g_m}$$



一、共汲極放大器



(a) FET含 r_o 的小訊號等效電路



(b) 化簡等效電路

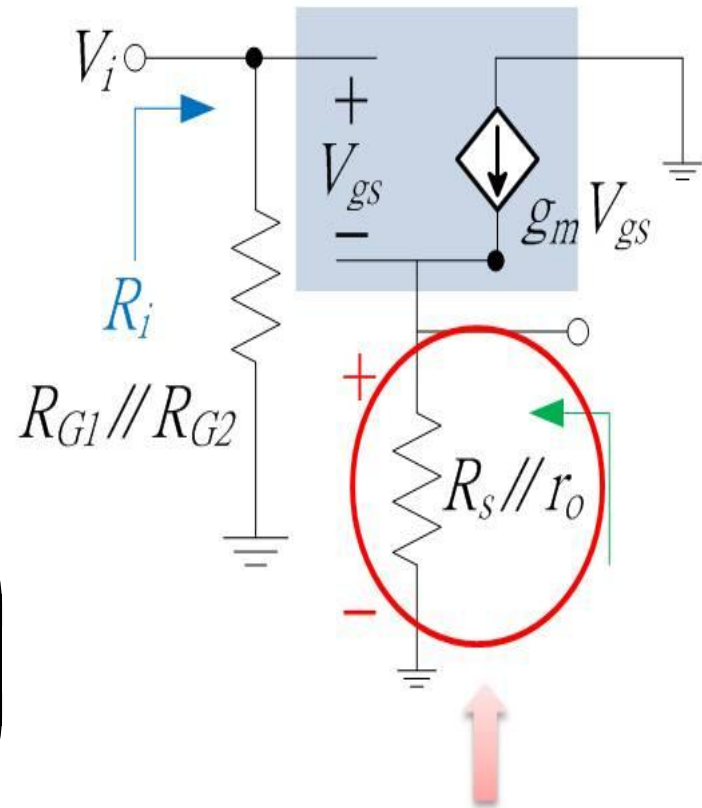
一、共汲極放大器

若考慮FET之小信號等效輸出電阻 r_o 時，由(a)(b)可得

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{g_m \times (R_S // r_o)}{1 + g_m \times (R_S // r_o)}$$

$$R_i = R_{G1} // R_{G2}$$

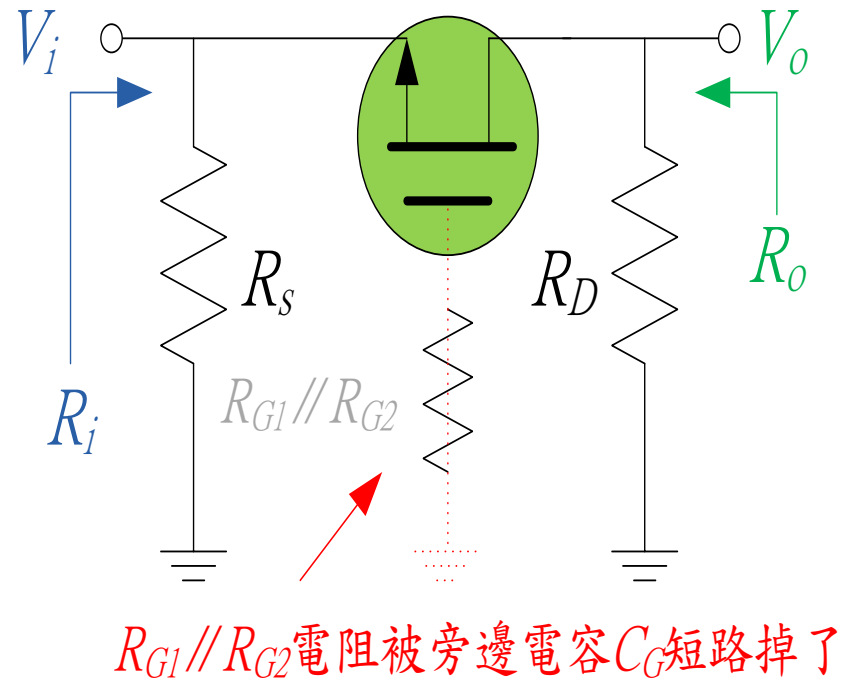
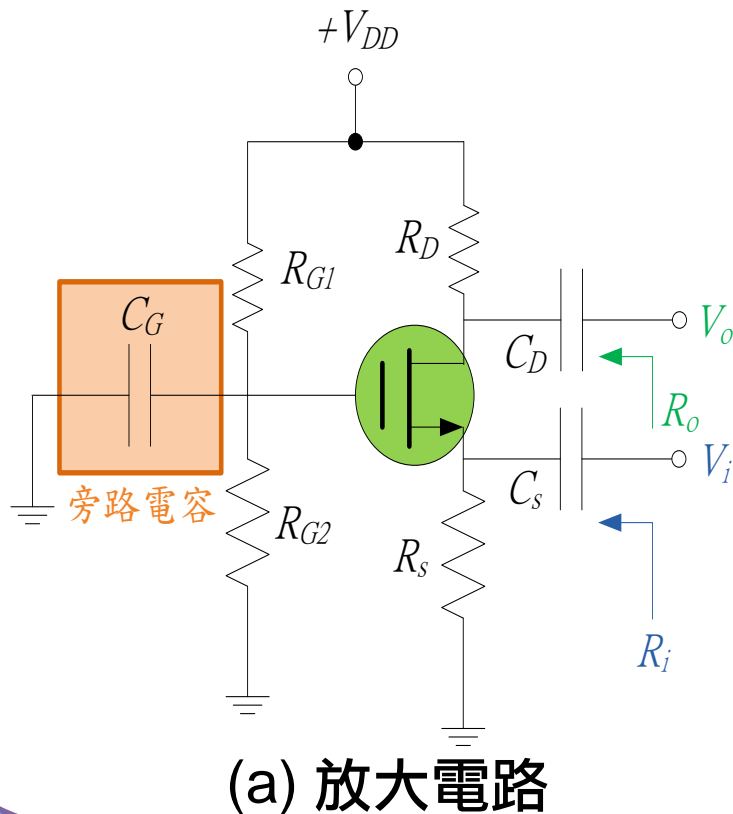
$$R_o = R_S // R_{os} = R_S // \left(r_o // \frac{1}{g_m} \right)$$



二、共閘極放大器

以源極端為輸入端、汲極端為輸出端、閘極端為共接端之放大組態，稱為共閘極(CG)放大。

分壓式偏壓共閘極放大電路



二、共閘極放大器

直流分析：求FET之 V_{GSQ} 及 I_{DQ}

依直流偏壓分析，可得

$$\begin{cases} V_{GSQ} = V_{DD} \times \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} - I_{DQ} \times R_S \\ I_{DQ} = k \times (V_{GSQ} - V_{GS(t)})^2 \end{cases}$$

由上兩是聯立方程式，可解得 V_{GSQ} 及 I_{DQ}

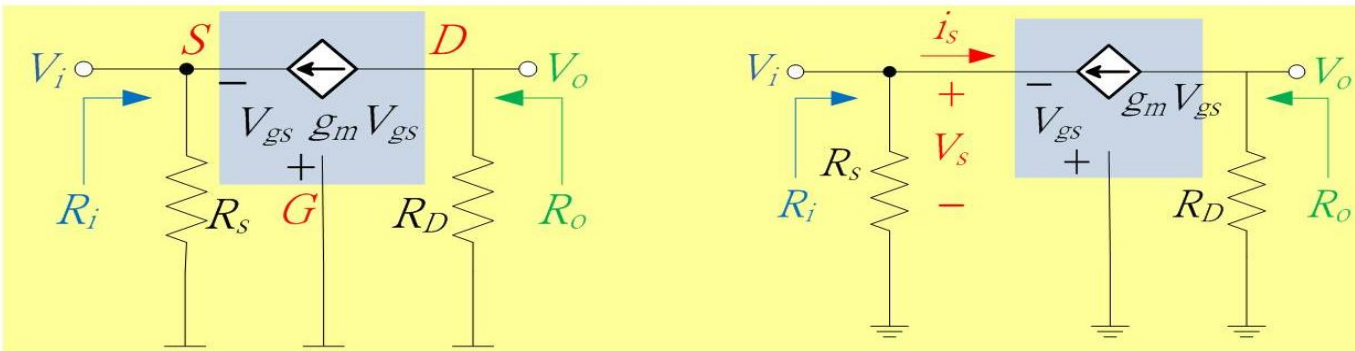
二、共閘極放大器

交流小信號分析：求FET之 g_m 及 r_o 。

依FET小信號等效電路模型定義，可得

$$g_m = 2\sqrt{k \times I_{DQ}} \quad \text{或} \quad g_m = 2k \times (V_{GSQ} - V_{GS(t)})$$
$$r_o = \frac{V_A}{I_{DQ}}$$

交流小信號分析：求放大電路之 A_v 、 R_i 及 R_o 。



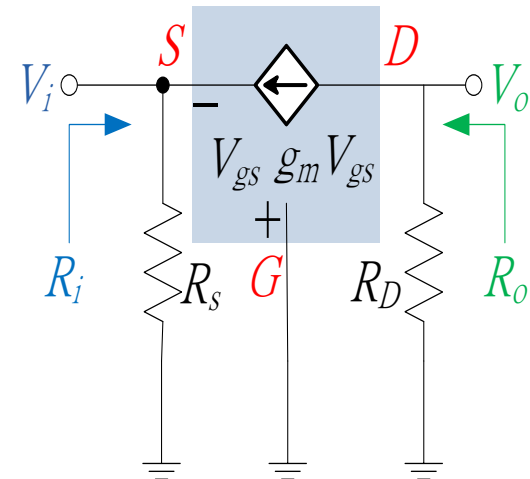
(a) FET不含 r_o 的小信號等效電路

(b) 由源極端看入之等效輸入電阻 R_{is}

二、共閘極放大器

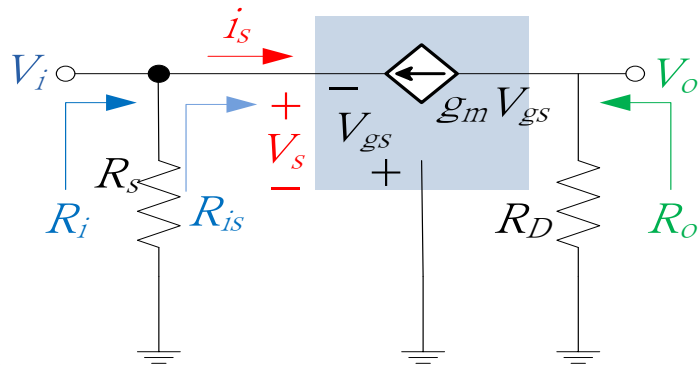
圖為FET不含 r_o 之小信號電路可得

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-g_m \times v_{gs} \times R_D}{-v_{gs}} = g_m \times R_D$$



上式結果表示，共閘極放大電路之電壓增益為正值，及輸入與輸出為同相關係，此與共汲極放大器相同，但與共源極放大器不同。由圖分析，可得FET由源

極端看入之等效電阻為 $\frac{1}{g_m}$ 即，

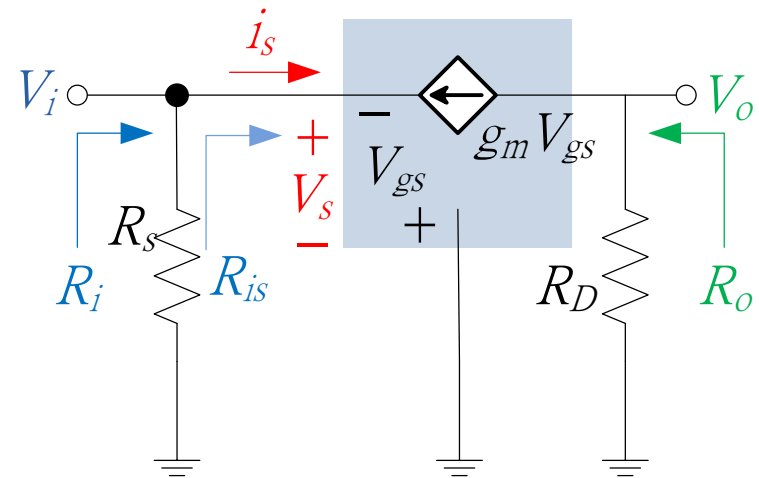


$$R_{is} = \frac{V_s}{i_s} = \frac{-v_{gs}}{-g_m \times v_{gs}} = \frac{1}{g_m}$$

二、共閘極放大器

上式表示共閘極放大電路的FET等效輸入電阻 $R_{is} \neq \infty$ ，此和共源極與共汲極放大地路的等效FET輸入電阻 $R_{ig} = \infty$ 不相同。其原因是共閘極放大電路的輸入端源及電流 $i_s = -g_m \times v_{gs} \neq 0$ 而共源極與共汲極放大電路的輸入端閘極電流 $i_g = 0$ 。因此可得共閘極放大電路之輸入電阻為

$$R_i = R_S // R_{is} = R_S // \frac{1}{g_m}$$
$$R_o = R_D$$



三、理想運算放大器簡介

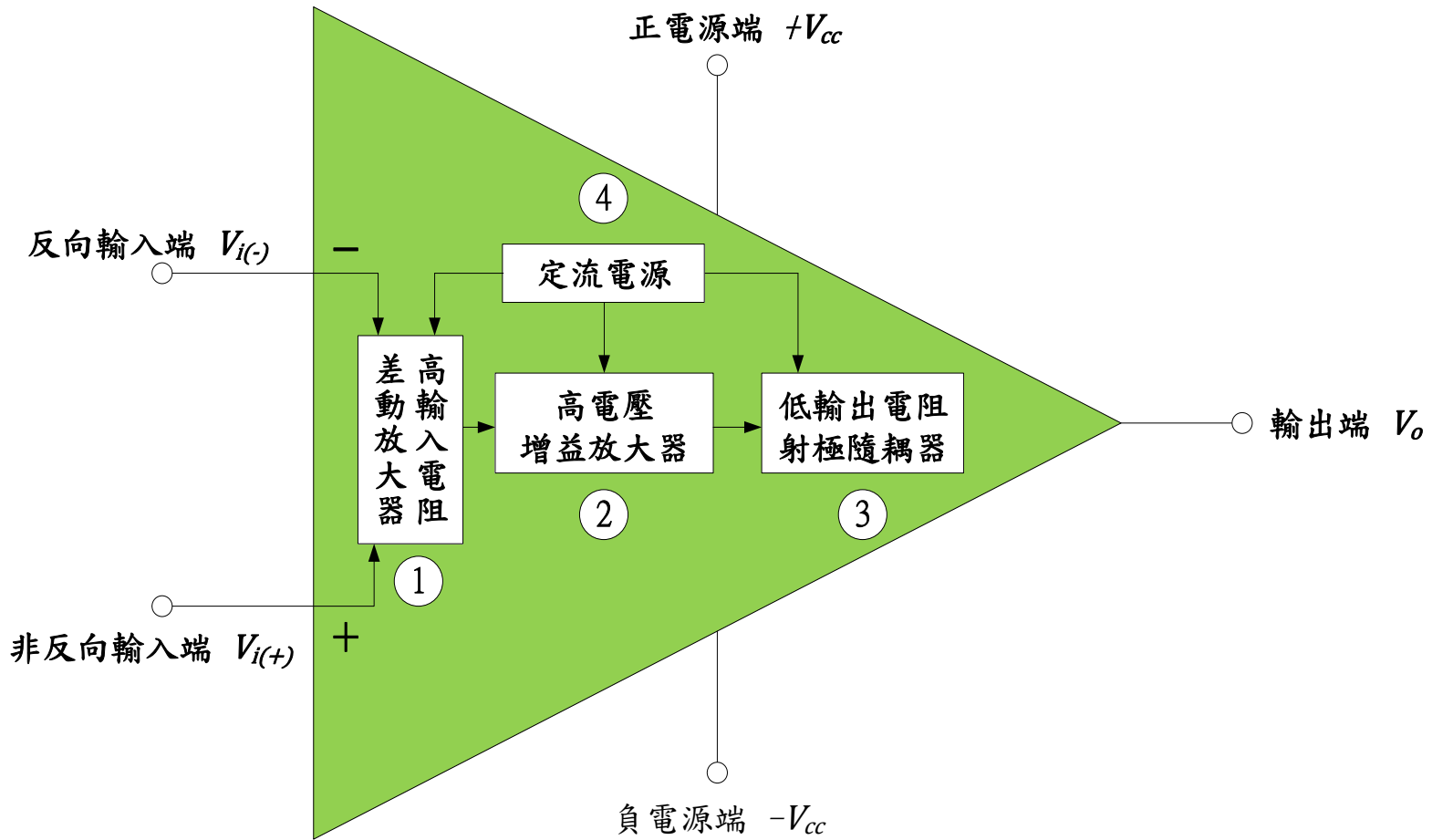
運算放大器

(Operational AMPlifier，OP AMP又簡稱為OPA)

運算放大器內部基本組成電路，分為四大部份：

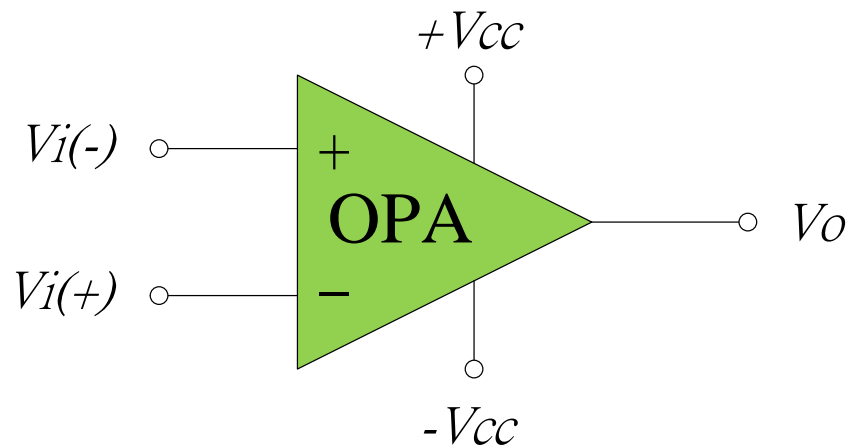
1. 具有兩個輸入信號端的高輸入電阻差動放大電路
2. 高電壓增益放大電路
3. 具有低輸出電阻的射極隨耦放大電路
4. 定電流源電路

三、理想運算放大器簡介



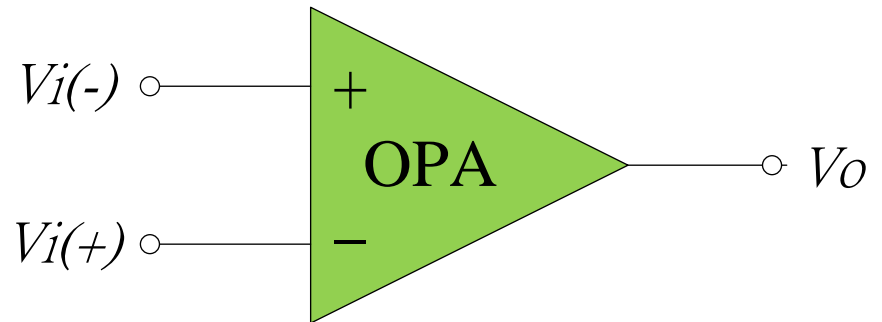
圖(a)為運算放大器IC之結構方塊圖

三、理想運算放大器簡介



(a) 標準電路符號

(b) 省略電源端之電路符號

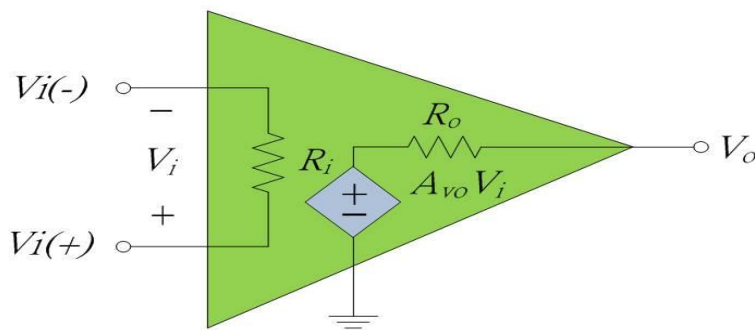


三、理想運算放大器簡介

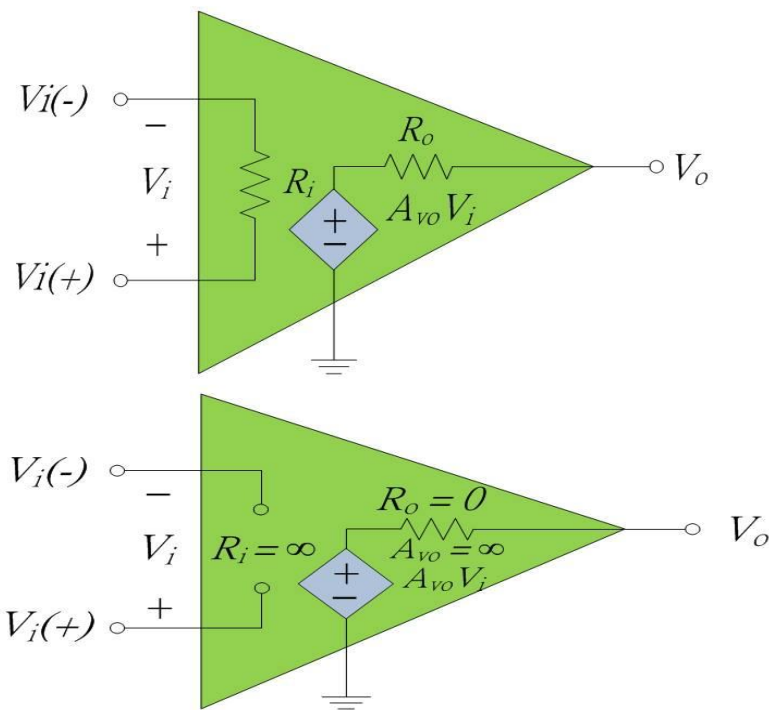
運算放大器的等效電路模型

一般放大器只有一個輸入信號端，而運算放大器有兩個輸入信號端，圖(a)為實際運算放大器的等效電路模型，圖(b)為理想運算放大器的等效電路模型，比較其差異，可知理想運算放大器具有下列特性：

1. 輸入電阻無窮大極
 $R_i = \infty$ 。
2. 輸出電阻為0 即 $R_o = 0$ 。
3. 開迴路電壓增益無窮大即
 $A_{vo} = \infty$ 。



(a) 實際等效電路模型



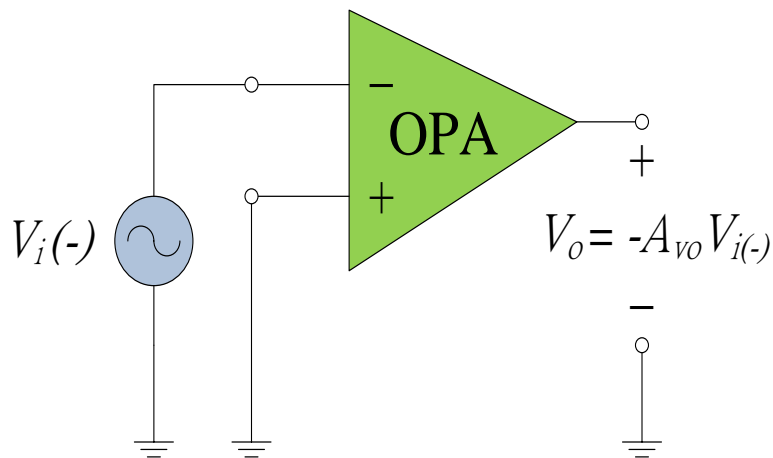
(b) 理想等效電路模型

三、理想運算放大器簡介

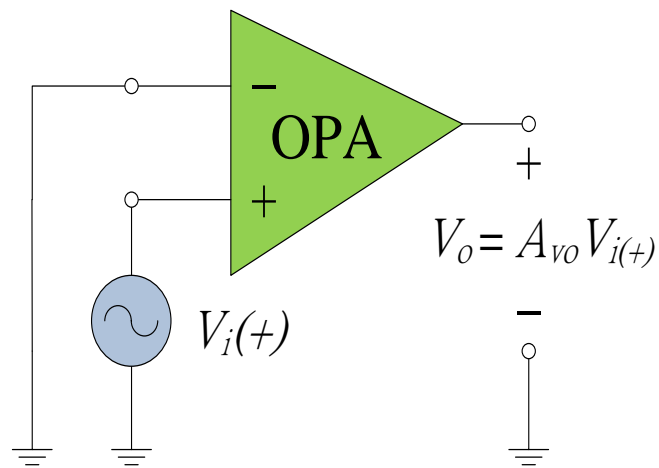
運算放大器輸入模式

運算放大器的輸入工作模式可分為單端輸入模式(single-ended input mode)、差動模式(differential input mode)與共模輸入模式(common input mode)。

單端輸入模式



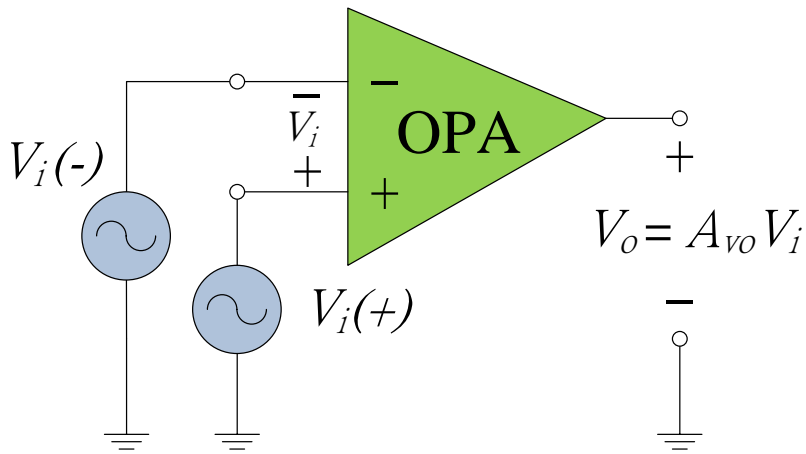
(a) 反相輸入模式



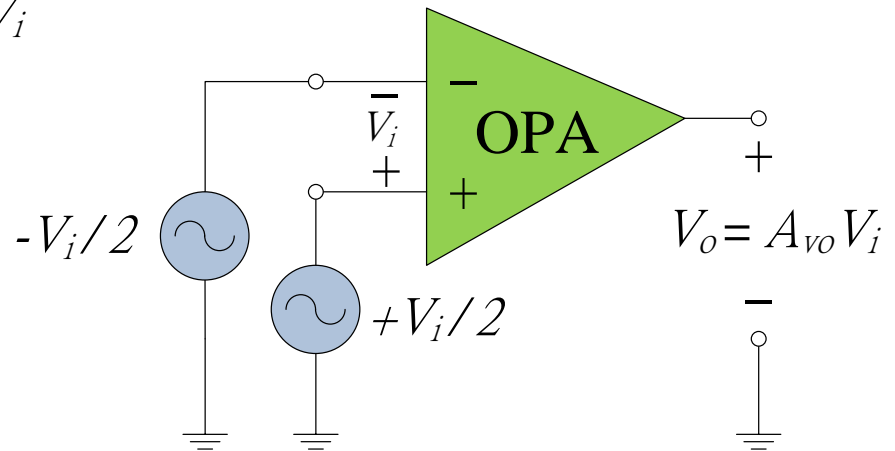
(b) 非反相輸入模式

三、理想運算放大器簡介

差模輸入模式



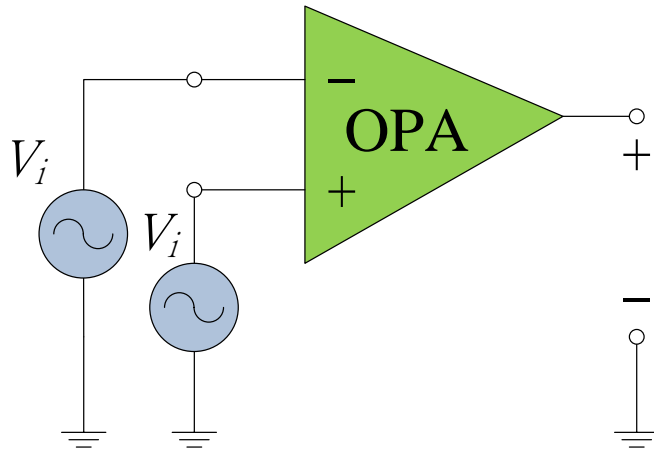
(a) 原始差模輸入模式



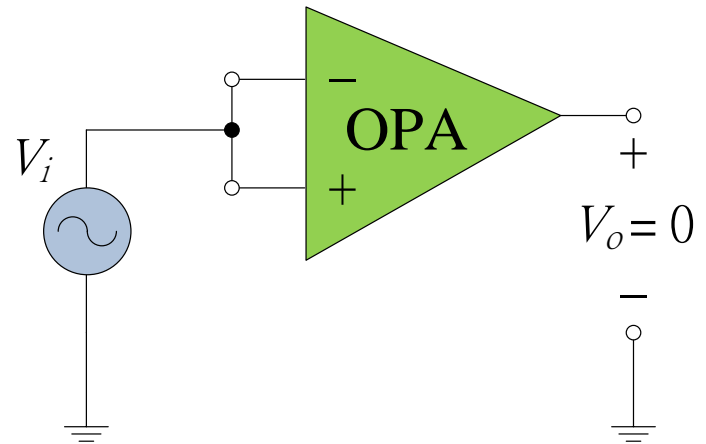
(b) 等效差模輸入模式

三、理想運算放大器簡介

共模輸入模式



(a) 原始共模輸入模式

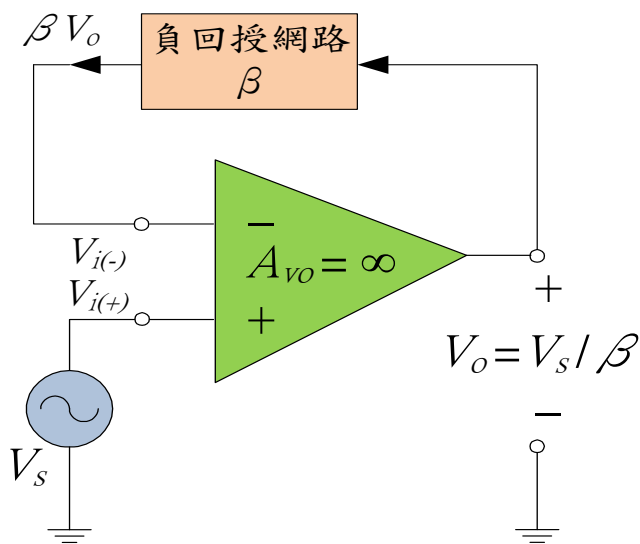


(b) 等效共模輸入模式

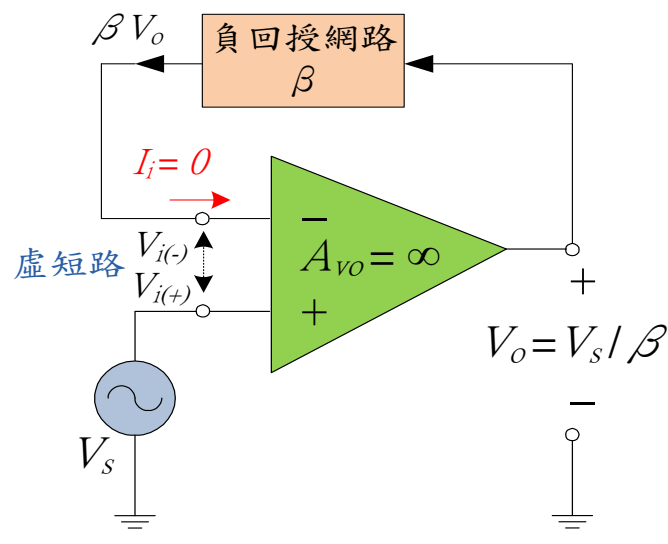
三、理想運算放大器簡介

運算放大器的基本功能特性

因理想運算放大器的開迴路電壓增益為無窮大，在作為放大器使用時，必須加入負回授網路，以控制其必迴路增益值。如圖(a)為OPA加入負回授網路後之等效方塊電路。



(a) 負回授網路等效方塊電路



(b) 虛段路特性

三、理想運算放大器簡介

$$\beta = \frac{V_{i(-)}}{V_o} \quad A_{vo} = \infty \quad \text{為理想OPA之開迴路電壓增益值}$$

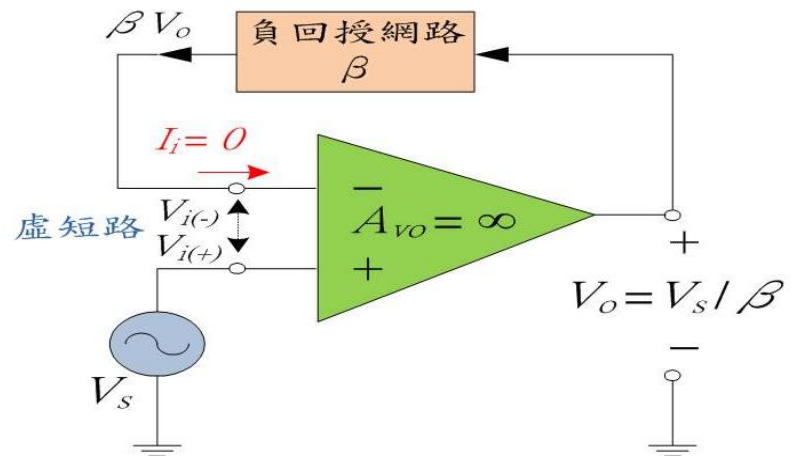
$$V_o = A_{vo} (V_{i(+)} - V_{i(-)}) = A_{vo} \times (V_{i(+)} - \beta V_o) = A_{vo} \times V_{i(+)} - \beta A_{vo} \times V_o$$

$$\Rightarrow V_o + \beta A_{vo} \times V_o = A_{vo} \times V_{i(t)}$$

$$\Rightarrow V_o = \frac{A_{vo}}{1 + \beta A_{vo}} \times V_{i(t)} = \frac{1}{\frac{1}{A_{vo}} + \beta} \times V_{i(t)} = \frac{1}{\frac{1}{\infty} + \beta} \times V_{i(t)} = \frac{1}{0 + \beta} \times V_{i(t)} = \frac{1}{\beta} \times V_{i(t)}$$

開迴路增益值

$$A_{vf} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_{i(t)}} = \frac{1}{\beta}$$

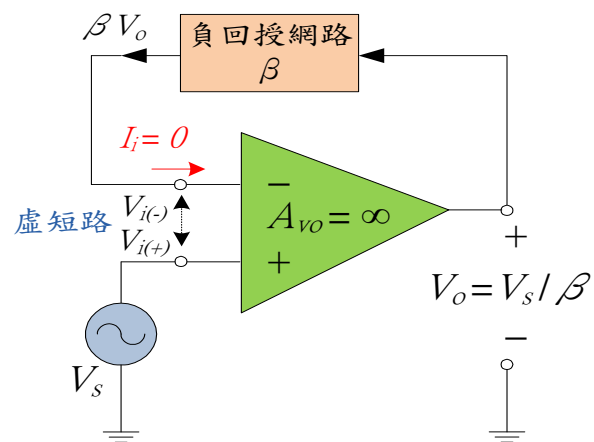


三、理想運算放大器簡介

放大器的負回授虛短路(虛接地)功能特性

由圖可得
$$V_{i(-)} = \beta V_o = \beta \times \frac{1}{\beta} V_{i(+)} = V_{i(+)}$$

上式結果表示，OPA加入負回授網路後，會使反相輸入端的電壓追隨非反相輸入端的電壓而改變 $V_{i(-)} = V_{i(+)}$ ，此時 $V_i = V_{i(-)} - V_{i(+)} = 0$ 相當於短路特性，但由於OPA輸入電阻 $= \infty$ ，使得OPA輸入電流 $I_i = 0$ ，相當於斷路特性，故 $V_i = 0$ 及 $I_i = 0$ 的特性稱為OPA之虛短路特性，如圖所示。當非反相輸入端為接地時，則虛短路又稱虛接地特性。



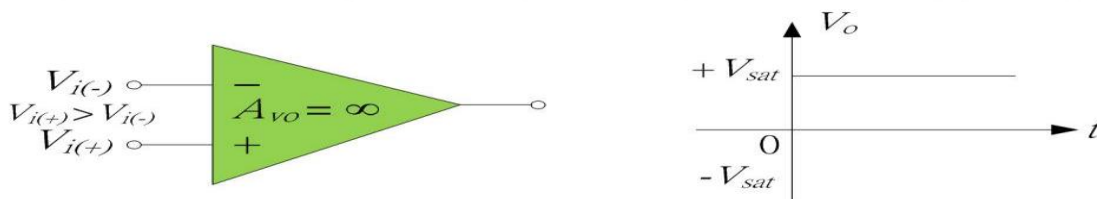
三、理想運算放大器簡介

比較器的功能特性

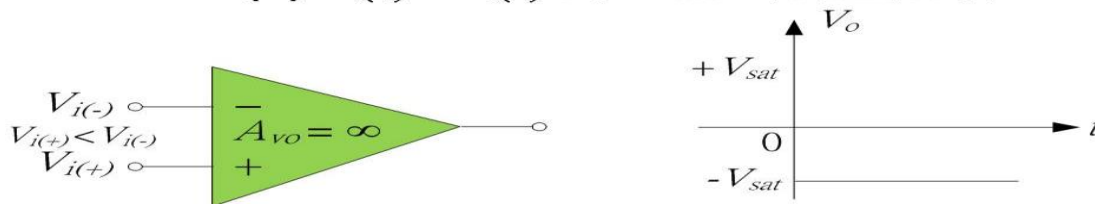
當理想運算放大器未接上任何負回授網路時，其功能特性相當於比較器，此時輸出電壓

$$V_o = A_{vo} \times (V_{i(+)} - V_{i(-)}) = \infty \times (V_{i(+)} - V_{i(-)})$$
$$\begin{cases} V_{i(+)} > V_{i(-)} \Rightarrow V_o = +\infty = +V_{sat} \approx V_{CC} \\ V_{i(+)} < V_{i(-)} \Rightarrow V_o = -\infty = -V_{sat} \approx V_{CC} \end{cases}$$

上式結果說明，OPA作為比較器使用時，因受限於外加電壓 $\pm V_{CC}$ 及內部電晶體導通電壓降關係，其輸出電壓只能為正或負飽和值(saturation)電壓，即 $V_o = -\infty = -V_{sat} \approx V_{CC}$ 或 $V_o = +\infty = +V_{sat} \approx V_{CC}$ 如圖。



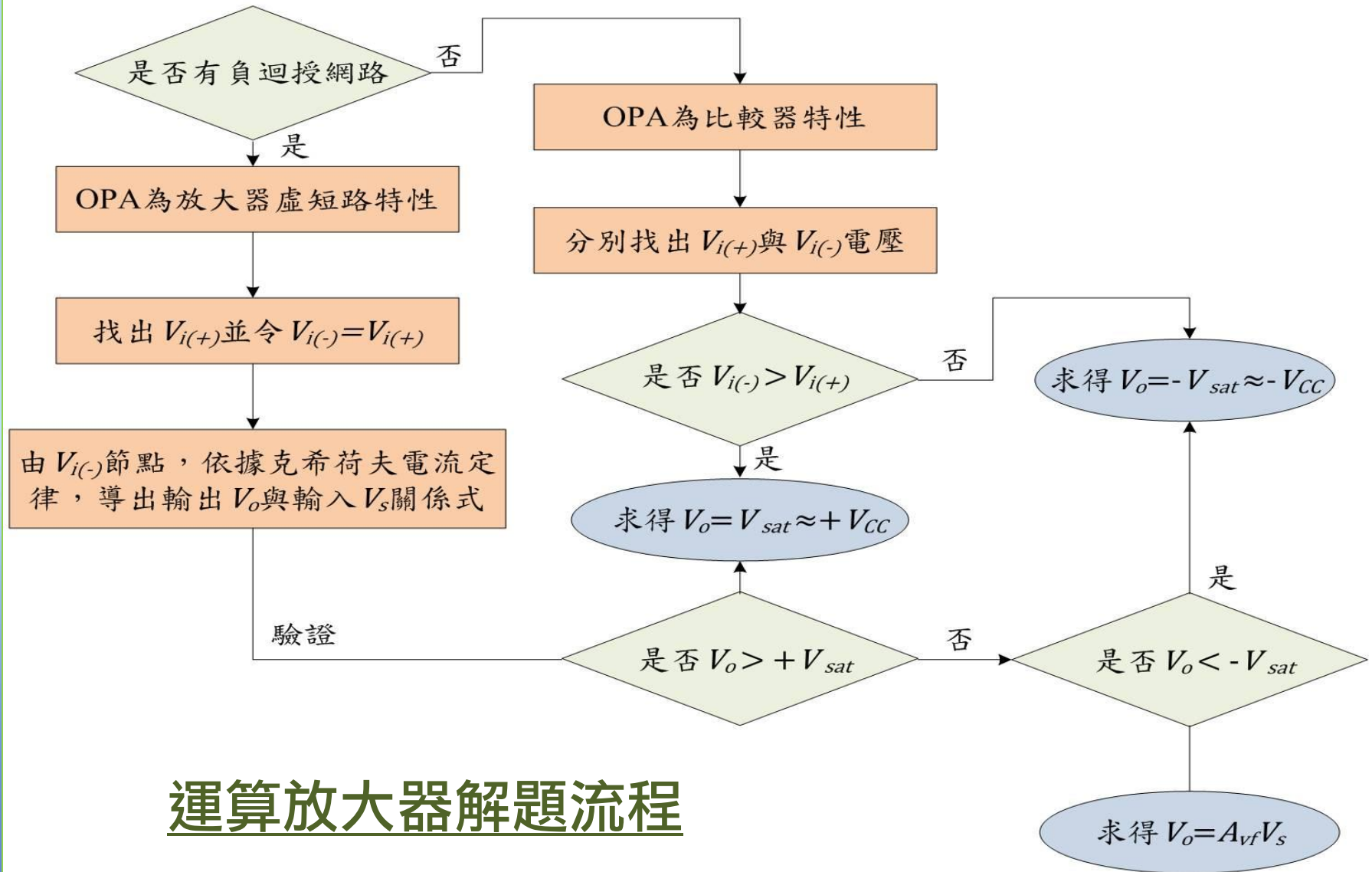
(a) $V_{i(+)} > V_{i(-)}$ 時，輸出為正飽和



(b) $V_{i(+)} < V_{i(-)}$ 時，輸出為負飽和

三、理想運算放大器簡介

求解OPA應用電路



運算放大器解題流程