

# 基本運算放大器電路

——補充資料——



## 1. 何謂積體電路

積體電路 (integrated circuit) 簡稱為 IC。IC 是把許多電晶體、電阻器……等電子元件密集的裝在同一個外殼裡而成。IC 的內部可能是一個完整的電子電路，一加上電源就可工作；也可能不是完整的電路，必須在 IC 的外面再接一些零件才能正常工作。使用 IC 的好處是配線可以簡化，而且電路的體積可以縮小。本實習所用之運算放大器就是 IC 的一種。

## 2. 運算放大器的基本認識

### 2-1 理想的運算放大器之特性

運算放大器 (operational amplifier) 簡稱為 OP-Amp，是一個具有極高電壓增益之差動放大器。因為當初開發這種高增益放大器的目的是為了製作類比計算機 (analog

computer) 以完成各種數學運算 (例如：加法、減法、微分、積分)，因此將其稱為“運算”放大器。由於積體電路 (IC) 製造技術的進步，運算放大器不但性能優良而且體積小巧、價格低廉，因此被廣泛應用於各種電子電路裡。

運算放大器的電路符號如圖 25-1 所示，是具有兩個輸入端及一個輸出端之放大器。當標有「+」號之輸入端被加上信號電壓時，會在輸出端產生同相的輸出電壓 (請參考圖 25-2)，因此「+輸入端」被稱為「同相輸入端」。若在標有「-」號之輸入端加上信號電壓，則會在輸出端產生反相的輸出電壓 (請參考圖 25-3)，因此「-輸入端」被稱為「反相輸入端」。只要巧妙的利用「+」、「-」兩個輸入端，即可構成各種不同功能的電子電路。

理想的運算放大器具有下列各項特性 (請參考圖 25-4)：

- (1) 電壓增益為無限大。亦即  $A = V_o / V_i = \infty$ 。
- (2) 輸入阻抗為無限大。亦即  $Z_{i1} = \infty$ ，因此不需輸入電流。
- (3) 輸出阻抗為零。亦即  $Z_o = 0 \Omega$ 。
- (4) 沒有任何偏差電壓存在，亦即當  $V_1 = V_2$  時 (此時  $V_e = 0$ ) 輸出電壓  $V_o$  恰為零伏特。
- (5) 頻帶寬度為無限大。也就是對任何頻率之輸入信號皆具有相同的電壓增益。
- (6) 共模拒折比為無限大。亦即  $CMRR = \infty$ 。

2011/11/11

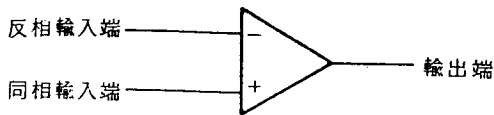


圖25-1 運算放大器之電路符號

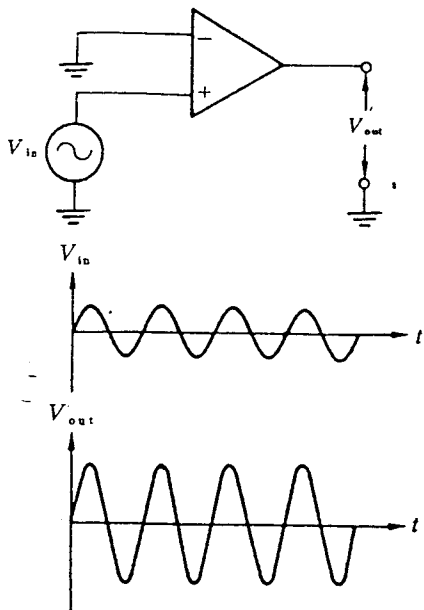


圖25-2 信號由「+」端輸入是同相放大

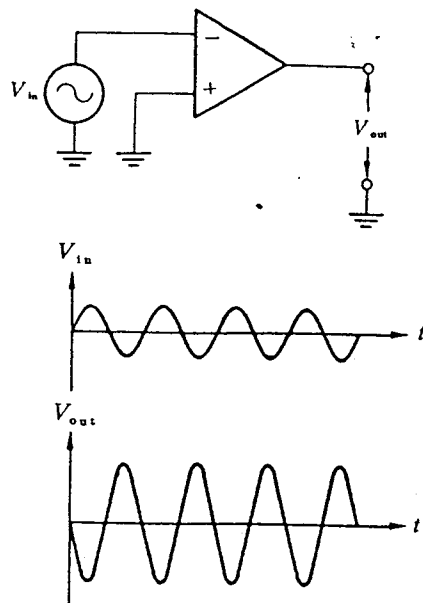


圖25-3 信號由「-」端輸入是反相放大

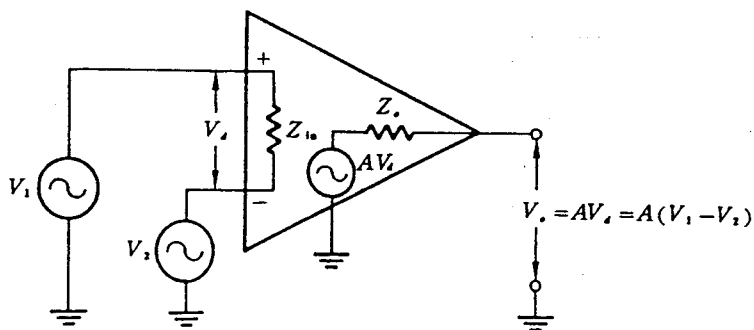


圖25-4 運算放大器之等效電路

(7) 上列六項特性不會因溫度之影響而產生劣化。

實際的運算放大器之特性雖然無法做到像上面所說的那樣完美，但是對於大部份的應用而言，目前的運算放大器之特性已極接近上述理想狀況。

### 2-2 虛接地

由於運算放大器的電壓增益為無限大，因此欲得到任何輸出電壓時（輸出電壓絕對不會大於運算放大器之電源電壓，而一般運算放大器的電源很少會超過 30 伏特）所需之信號電壓  $V_d$  幾乎為零，亦即

$$V_d = \frac{V_o}{A} = \frac{V_o}{\text{無限大}} = 0$$

所以就輸入端而言，當運算放大器被用來擔任放大作用時「同相輸入端」與「反相輸入端」之間為同電位，可視為短路。

運算放大器在擔任放大作用（輸出端與“-”輸入端間接有負回授元件）時，若如圖 25-5 所示將其「+」輸入端接地，則「-」輸入端亦等於對地電位（對地為零伏特），此種特性稱為運算放大器的虛接地（virtual ground）。

在分析運算放大器所構成的電路時，虛接地的觀念對我們有很大的幫助。

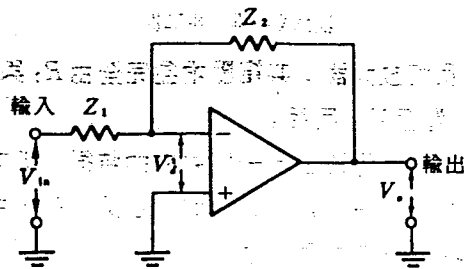


圖25-5 輸出端與“-”輸入端間接有負回授元件Z之電路， $V_+ = 0$

### 3. 運算放大器的基本應用電路

#### 3-1 反相放大器

運算放大器的應用很廣，圖 25-6 所示之反相放大器（inverting amplifier）為其最基本之應用電路。由於“+”輸入端被接地，故“-”輸入端為一虛接地點，與地同電位。即：

$$I_1 = \frac{V_{in} - V_d}{R_1} = \frac{V_{in} - 0}{R_1} = \frac{V_{in}}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_o - V_d}{R_2} = \frac{V_o - 0}{R_2} = \frac{V_o}{R_2}$$

由於運算放大器的輸入電阻極大，輸入電流  $I_2$  幾乎為零，故  $I_1 = -I_2$ （負號表示  $I_1$  與  $I_2$  的電流方向相反），亦即

$$\frac{V_{in}}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2}$$

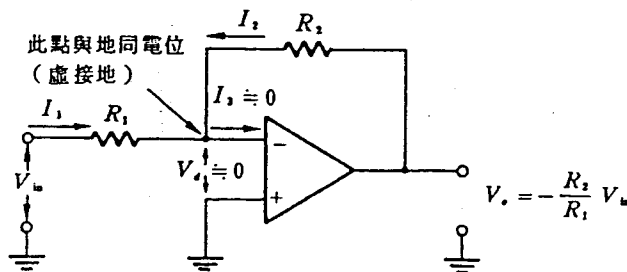


圖25-6 反相放大器

$$\text{輸出電壓 } V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} \quad (25-1)$$

$$\text{電壓增益 } A = \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (25-2)$$

由上式可知圖 25-6 所示之反相放大器，其電壓增益完全由  $R_1$  與  $R_2$  之電阻比決定。式中之負號表示輸出電壓  $V_o$  與輸入電壓  $V_{in}$  反相。

凡是用運算放大器構成之放大電路都有一個共同的特徵，即有一外加負回授元件（例如電阻器或電容器）接在輸出端與“-”輸入端之間（在圖 25-6 中是  $R_2$ ）。在此類電路中之“-”輸入端均可視為與“+”輸入端同電位。

### 3-2 反相器

若令圖 25-6 之電阻  $R_1 = R_2 = R$ ，則成為圖 25-7 之電路。此時由 (25-1) 式及

(25-2) 式可得知

$$\text{輸出電壓 } V_o = -\frac{R}{R} V_{in} = -V_{in} \quad (25-3)$$

$$\text{電壓增益 } A = -\frac{R}{R} = -1 \quad (25-4)$$

輸出電壓  $V_o$  與輸入電壓  $V_{in}$  恰好大小相等，相位相反。此種電路被稱為反相器 (inverter)。

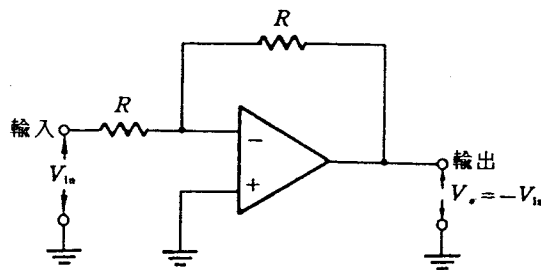


圖25-7 反相器

### 3-3 同相放大器

圖 25-8 所示之同相放大器 (noninverting amplifier)，信號  $V_{in}$  是加在“+”輸入端，因為輸出端與“-”輸入端間接有負回授元件  $R_2$ ，故  $V_d \cong 0$ ， $V_{R1} = V_{in}$ ，圖 25-8 可分析如下：

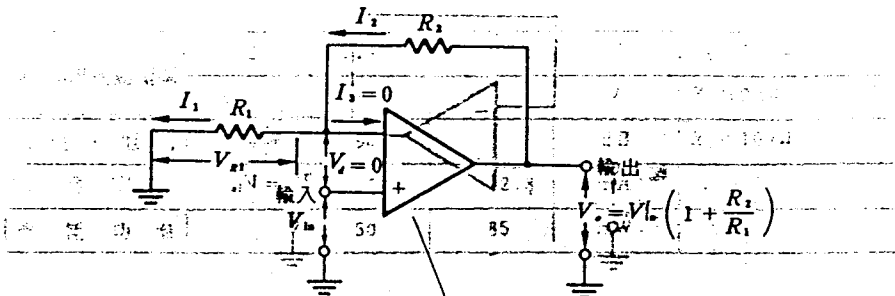


圖25-8 同相放大器

$$I_1 = \frac{V_{R1}}{R_1} = \frac{V_{in}}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_o - V_{R1}}{R_2} = \frac{V_o - V_{in}}{R_2}$$

但運算放大器之輸入電流  $I_3 \cong 0$ ，故  $I_1 = I_2$

亦即 
$$\frac{V_o - V_{in}}{R_1} = \frac{V_o - V_{in}}{R_2}$$

整理上式可得

$$V_o = V_{in} \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) = V_{in} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (25-5)$$

$$A = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (25-6)$$

上面的公式指出  $V_o$  是與  $V_{in}$  同相，而且電壓增益完全由電阻值控制。

### 3-4 電壓隨耦器

若令圖 25-8 之電阻  $R_1 = \infty$ ， $R_2 = 0\Omega$ ，則成為圖 25-9 之電路，此時由 (25-5) 及 (25-6) 式可得知

$$V_o = V_{in} \quad (25-7)$$

$$A = 1 \quad (25-8)$$

這種輸出電壓  $V_o$  與輸入電壓  $V_{in}$  完全一樣的電路，人們將它稱為電壓隨耦器 (voltage followers)。運算放大器之優良特性使電壓隨耦器具有「輸入電阻非常大，輸出電阻非常小」之特點。

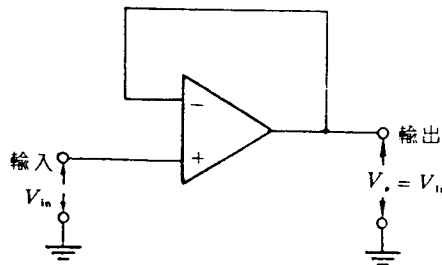


圖 25-9 電壓隨耦器

## 4. 運算放大器的最大額定值及電氣特性

目前較常用的運算放大器有  $\mu A 709$ 、 $\mu A 741$ 、 $\mu A 747$ 、CA3130、CA 3140 等，其最大額定值、電氣特性、接腳圖等均可由廠商發行的資料手冊 (data book) 中查得。表 25-1 是目前最價廉、易購的運算放大器  $\mu A 741$  之規格表，可供參考。

### 4-1 最大額定值

規格表中之最大額定值 (absolute maximum ratings) 是該零件所能承受的最大極限值。一旦應用狀況超出最大額定值，該元件即損毀。例如  $\mu A 741$  若被加上 15V 以上之輸入信號即會損壞 (請參考表 25-1)。

### 4-2 運算放大器的電氣特性

茲將運算放大器之重要參數說明於下：

- (1) 大信號電壓增益 (large signal voltage gain)：在  $R_L \geq 2k\Omega$ ， $V_o = \pm 10V$  時運算放大器之電壓增益。

表25-1  $\mu$  A741規格表

| 25°C時之最大額定值：                          |  |          |     |            |   |
|---------------------------------------|--|----------|-----|------------|---|
| 電源電壓                                  | ..... $\pm 18$ V                                 |          |     |            |   |
| 消耗功率                                  | ..... 310 mW                                     |          |     |            |   |
| 輸入電壓                                  | ..... $\pm 15$ V                                 |          |     |            |   |
| 差動輸入電壓                                | ..... $\pm 30$ V                                 |          |     |            |   |
| 儲存溫度範圍                                | ..... $-55^{\circ}\text{C}$                      |          |     |            |   |
| 應用溫度範圍                                | ..... $0^{\circ}\text{C}$ 至 $70^{\circ}\text{C}$ |          |     |            |   |
| 25°C時之電氣特性：                           |  |          |     |            |   |
| 《註》下表是在電源電壓 $V_{cc} = \pm 15$ V時之測試結果 |  |          |     |            |   |
| 參數                                    | 最 小  | 典 型      | 最 大 | 單 位        | 測 試 條 件   |
| 大信號電壓增益                               | 50000  | 200000   |     |            | $R_L \geq 2\text{k}\Omega, V_{om} = \pm 10\text{V}$ |
| 輸入電阻                                  | 0.3  | 2.0      |     | M $\Omega$ |   |
| 輸入電容                                  |  | 1.4      |     | PF         |   |
| 輸出電阻                                  |  | 75       |     | $\Omega$   |   |
| 輸入抵補電流                                |  | 80       | 500 | nA         |   |
| 輸入抵補電流                                |  | 20       | 200 | nA         |   |
| 輸入偏差電壓                                |  | 1.0      | 5.0 | mV         | $R_s \leq 10\text{k}\Omega$                         |
| 偏差電壓調整範圍                              |  | $\pm 15$ |     | mV         |   |
| 輸出短路電流                                |  | 25       |     | mA         |   |
| 迴轉率                                   |  | 0.5      |     | V/ $\mu$ S | $R_L \geq 2\text{k}\Omega$                          |
| 輸入電壓範圍                                | $\pm 12$   | $\pm 13$ |     | V          | $V_{cc} = \pm 15\text{V}$                           |
| 輸出電壓擺動範圍                              | $\pm 12$   | $\pm 14$ |     | V          | $R_L \geq 10\text{k}\Omega$                         |
|                                       | $\pm 10$   | $\pm 13$ |     | V          | $R_L \geq 2\text{k}\Omega$                          |
| 共模斥拒比                                 | 70   | 90       |     | dB         | $R_s \leq 10\text{k}\Omega$                         |
| 供應電流                                  |  | 1.7      | 2.8 | mA         |   |
| 消耗功率                                  |  | 50       | 85  | mW         |   |

- (2) 輸入電阻 (input resistance)：兩輸入端間之電阻值。
- (3) 輸入電容 (input capacitance)：兩輸入端之間的電容量。
- (4) 輸出電阻 (output resistance)：輸出端與地之間的電阻。
- (5) 輸入偏壓電流 (input bias current)：兩輸入端的輸入電流之平均值。
- (6) 輸入抵補電流 (input offset current)：當輸出電壓為 0V 時，兩輸入端輸入電流的差。
- (7) 輸入抵補電壓 (input offset voltage)：當輸出電壓為 0V 時，在兩輸入端間之電壓差。
- (8) 輸出短路電流 (output short circuit current)：輸出端被短路至地時，由輸出端流出之電流。
- (9) 迴轉率 (slew rate)：當輸入電壓變化時，輸出電壓變化之速率。
- (10) 共模斥拒比 (common mode rejection ratio)：差動信號的放大率與共模信號的放大率之比值。

## 5. 實習前應具有之基本知識

- (1) 本書的實習項目所用之運算放大器全部為  $\mu A741$ ，其接腳如圖 25-10 所示。
- (2) 在電路圖中為了繪圖方便起見，運算放大器大多不繪出電源的接線，但在實際運用時不要忘了如圖 25-11 (b) 所示加上電源。

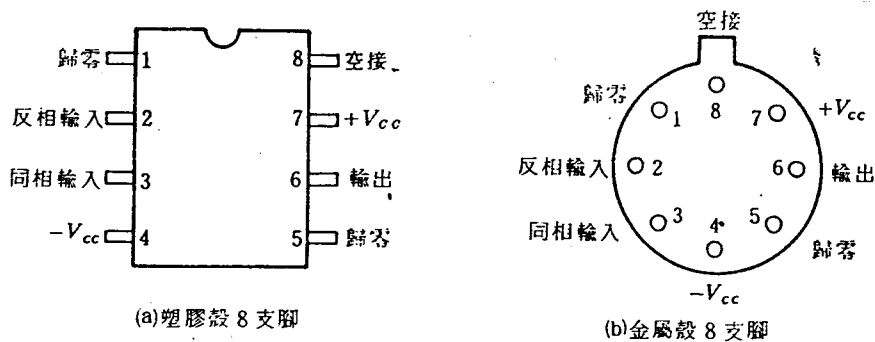


圖 25-10  $\mu A741$  之頂視圖

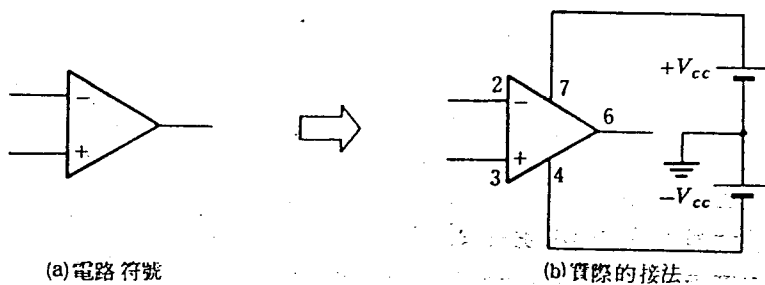


圖 25-11 不要忘了把  $\mu A741$  加上電源

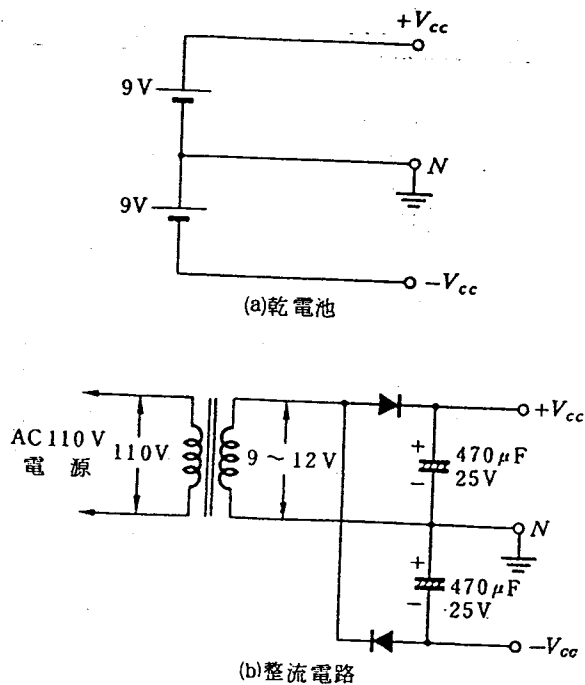
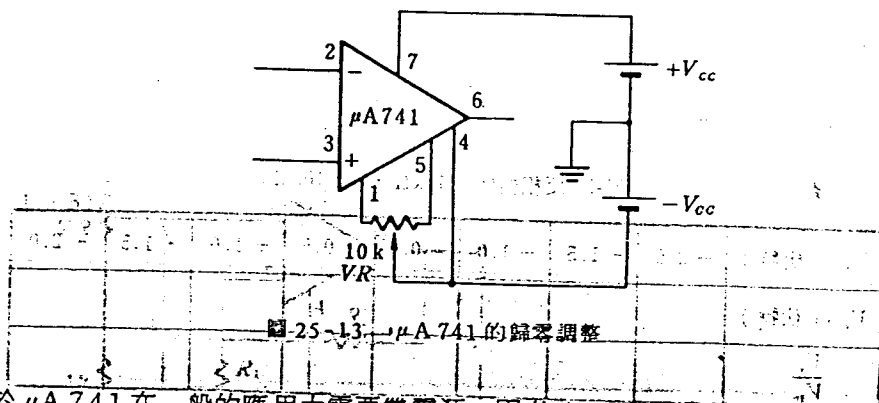


圖 25-12 運算放大器的電源

10  
10  
10



- (3) 由於  $\mu A 741$  在一般的應用中需要雙電源，因此實習時你必須參考下述方法取得所需之電源：
- ① 用兩個 9V 之乾電池串聯起來供電，如圖 25-12 (a) 所示。
  - ② 以圖 25-12 (b) 之整流電路獲得所需之直流電源。
  - ③ 由市售電源供應器得到  $\pm 9V \sim \pm 16V$  之直流電源。
- (4)  $\mu A 741$  的第 1 腳和第 5 腳是作為歸零 (offset null) 之用，如圖 25-13 所示接線，可把輸出端之電壓調整為零伏特。
- (5) 欲將運算放大器插入免焊萬用電路板或 IC 座時，必須先把電源關掉。要將運算放大器折離電路之前也必須先關掉電源。