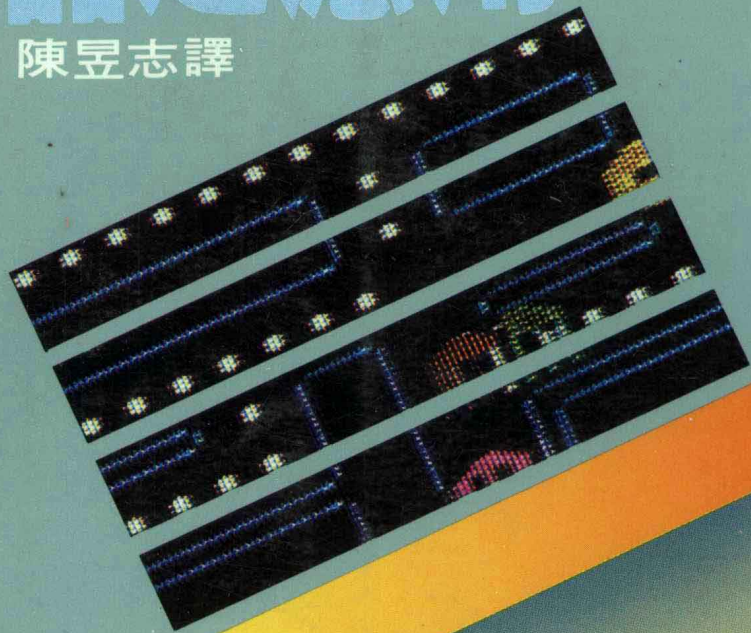


工程科技叢書

# 聲頻積體電路運算 放大器之應用

張煌 劉嘉亮 陳昱志譯



工程科技叢書

# 聲頻積體電路運算放大器之應用

張 焯、劉嘉亮、陳昱志編譯

工程科技叢書編審委員會

主任委員：虞兆中

編審委員：于惠中

呂維明

於幼華

郭德盛

黃正義

葉超雄

羅文偉

王瑞材

林世昌

施振纓

陳義男

黃丕陵

鄧啓福

李家同

孟繼洛

夏鑄九

陳興時

黃秉鈞

劉清田

# 聲頻積體電路運算放大器之應用

74.8.700

中華民國七十四年九月初版

定價：新臺幣二〇〇元

保有版權 翻印必究

	張	煜
編譯者	劉嘉	亮
	陳昱	志
發行人	王必	成

出版者 聯經出版事業公司  
臺北市忠孝東路四段561號  
電話：7631000—695  
郵政劃撥帳戶第0100559-3號

行政院新聞局出版事業登記證局版臺業第0130號

· 44006-8 ·

# 目 錄

## 第一章 運算放大器複習

- 1-1 甚麼是運算放大器..... 1
- 1-2 負反饋、非理想放大器和外部補償.....13
- 1-3 與頻率有關的特性.....18
- 1-4 雜訊.....24
- 1-5 有限開環增益所造成的誤差.....26

## 第二章 聲頻積體電路運算放大器緒論

- 2-1 通用性積體電路運算放大器.....33
- 2-2 適用於聲頻電路的特殊用途積體電路運算放大器...34
- 2-3 標準補償及稍出：偏差電壓調整.....39
- 2-4 防範誤用情況的保護措施.....45
- 2-5 最佳接地穩定原則.....54

## 第三章 聲頻應用中重要的運算放大器參數

3-1	開環增益	59
3-2	增益頻寬乘積	61
3-3	變動率	76
3-4	失真	91
3-5	雜訊	108

#### 第四章 轉換成聲頻應用的基本運算放大器組態

4-1	反相放大器	123
4-2	正相放大器	126
4-3	電壓追隨器	128
4-4	差額放大器	130
4-5	基本組態的修改	131

#### 第五章 使用積體運算放大器的實用聲頻電路

5-1	標準聲頻電壓放大器	135
5-2	增加功率輸出的聲頻放大器	138
5-3	聲頻前置放大器	152

#### 第六章 等化放大器和有源濾波器

6-1	斜坡等化器	169
6-2	共振等化器	173
6-3	通用有源濾波器	175

#### 第七章 其他聲頻電路

7-1	和放大器	207
-----	------	-----

7-2	立體分音電路.....	210
7-3	阻抗匹配技巧.....	211
7-4	無變壓器平衡傳輸系統.....	215
7-5	精確VU計放大器 .....	218
7-6	線性反饋增益控制級.....	219
7-7	正弦波振盪器.....	221
7-8	函數波形產生器.....	231
7-9	電壓控制放大器 (VCA) .....	239
<b>第八章 系統設計技巧</b>		
8-1	保護電路.....	243
8-2	雜訊的防止.....	247
8-3	無源零件.....	250
<b>附錄 裝置資料.....</b>		
		253

## 第一章

# 運算放大器複習

在這一章裏面，我們先對運算放大器作一個簡單的複習。由於篇幅的限制，我們無法講得很詳細，僅能作個扼要的敘述。

對於運算放大器已相當熟悉的讀者可以略過這一章，直接閱讀第二章，但最後一節與後面數章可能較有關係，最好能先行閱讀。如果讀完本章仍對運算放大器不太了解，希望讀者能參考任何有關運算放大器的專書。

### §1-1 甚麼是運算放大器

要使用運算放大器，我們必須先知道運算放大器是甚麼。本節將複習一下運算放大器的構造、特性和一些重要規格，也將討論一些應用到運算放大器的重要組態。

運算放大器是一種直接耦合 (direct-coupled)、高增益放大器，通常加上反饋來控制整個響應特性。

運算放大器的概圖如圖 1-1 A 所示，其等效電路繪如圖 1-1 B。大多數的運算放大器都使用差額輸入 (differential input) 以電壓  $E_1$  和  $E_2$  分別加於反相 (inverting) 和正相 (nonin-

verting) 端；輸出  $E_o$  和  $E_1$  之間的增益是負的，而放大率  $E_o/E_2$  則是正的。

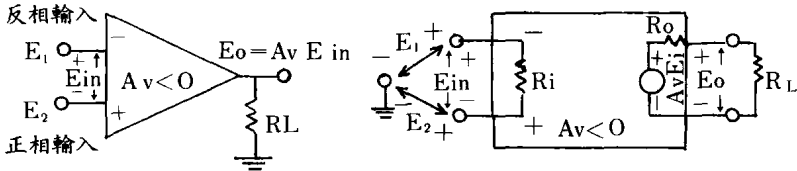


圖1-1 (A)基本運算放大器; (B)低頻等效電路

理想 (ideal) 的運算放大器具有下列特性:

1. 無窮大的電壓增益 ( $A_v \rightarrow -\infty$ )
2. 無窮大的輸入電阻 ( $R_i \rightarrow \infty$ )
3. 零輸出電阻 ( $R_o \rightarrow 0$ )
4. 無窮大的頻寬 (經由放大器的訊號不會有延遲 (delay))
5. 當  $E_1 = E_2$  時,  $E_o = 0$

實際上, 上述的特性都是理想化的, 但是在很多應用上都可以用上述近似的特性。

運算放大器的第一級是差額放大器。差額放大器對差額訊號 (圖1-1中的  $E_2 - E_1$ ) 有很高的增益, 而對同時加於兩輸入端的訊號 (共模訊號, common mode signals) 則只有很低的增益。

圖1-2是一個差額輸入放大器 (differential amplifier, 簡寫為 *DIFF AMP*)。一般說來, 它的功能是将兩個訊號的差額予以放大。

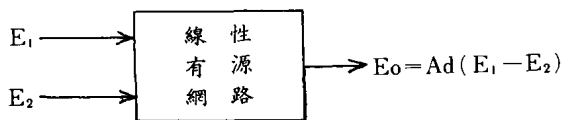


圖1-2 差額輸入放大器



圖1-2中，一個線性有源網路 (linear active network) 有兩個輸入訊號  $E_1$  和  $E_2$  和一個輸出訊號  $E_o$ 。在一個理想的差額放大器中，輸出訊號  $E_o$  應該為

$$E_o = A_d (E_1 - E_2) \quad (\text{式1-1})$$

此處  $A_d$  是差額放大器的增益。

(式1-1) 說明了理想差額放大器中，兩個輸入的共同訊號對輸出沒有影響，但是在實際的差額放大器中，輸出不僅與兩個訊號的差額訊號有關，而且也與我們稱為共模訊號的平均值  $E_c$  有關，在這裏

$$E_d \equiv E_1 - E_2; \quad E_c \equiv \frac{1}{2} (E_1 + E_2)$$

因此，(式1-1) 應該修正為

$$E_o = A_1 E_1 + A_2 E_2 \quad (\text{式1-2})$$

此處  $A_1$  ( $A_2$ ) 是輸入 2 (1) 接地時從 1 (2) 到輸出的放大率。而

$$E_1 = E_c + \frac{1}{2} E_d; \quad E_2 = E_c - \frac{1}{2} E_d \quad (\text{式1-3})$$

將 (式1-3) 代入 (式1-2) 得到

$$\text{其中 } E_o = A_d E_d + A_c E_c \quad (\text{式1-4})$$

$$A_d \equiv \frac{1}{2} (A_1 - A_2); \quad A_c \equiv A_1 + A_2 \quad (\text{式1-5})$$

$A_d$  即差額訊號的電壓增益， $A_c$  為共模訊號的電壓增益，我們希望  $A_d$  愈大而  $A_c$  愈小愈好 ( $A_c$  最好是 0) 以使這個放大器接近於理想。

我們定義共模拒斥比 (common mode rejection ratio) 為

$$CMMR \equiv \rho \equiv \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad (\text{式1-6})$$

$\rho$  可作為一個差額放大器性能的指標； $\rho$  愈大，這個差額放大器愈接近於理想。

差額放大器並且對任意外加的輸入訊號提供一個極高的輸入

阻抗。

輸入級之後有如圖1-3所示的中間級（可能不只一級）以提供額外的增益；中間級的最後一級是緩衝級（buffer），它的作用是作為位準移位器（level shifter），使得零輸入時輸出為0。輸出級必須是低輸出電阻的，並且必須提供足夠的電流以驅動負載。

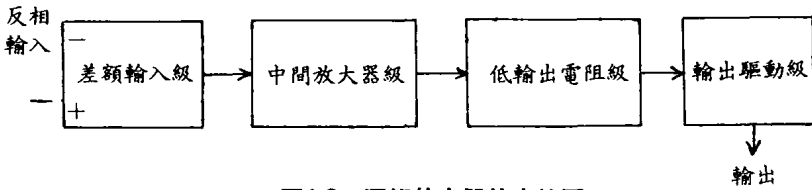


圖1-3 運算放大器的方塊圖

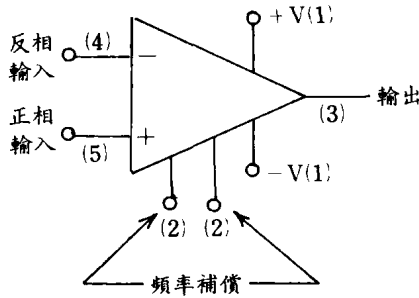


圖1-4 運算放大器的端點

圖1-4是運算放大器端點的說明：

- (1)為 +V 和 -V 電源電壓端。
- (2)為頻率補償（frequency compensation）防止運算放大器電路發生振盪。
- (3)為輸出端。
- (4)為反相輸入端。
- (5)為正相輸入端。

下面說明運算放大器的一些規格：

1. 開環增益 (open loop,  $A_{ol}$ ): 沒有反饋時的放大器增益, 通常此增益值為數千。
2. 輸入偏差電壓 (offset voltage,  $V_{os}$ ): 放大器會產生一些不希望的小訊號出現於輸入端, 使得輸入為 0 時仍然產生輸出電壓, 必須加上輸入偏差電壓於輸入端以平衡放大器。即是當  $V_{os} = V_{B1} - V_{B2}$  時,  $E_o = 0$ ,  $V_{os}$  通常是數  $\mu V$ 。
3. 偏壓電流 (Bias current  $I_B$ ): 驅動運算放大器輸入級所需的電流; 亦即必須供給輸入電晶體的基極電流。當  $E_o = 0$  時,  $I_B = (I_{B1} + I_{B2}) / 2$ 。
4. 輸入偏差電流 (offset current,  $I_{os}$ ): 運算放大器的兩個輸入電晶體所需的偏壓電流的差。當  $E_o = 0$  時,  $I_{os} = I_{B1} - I_{B2}$ 。  $I_{os}$  通常介於數  $nA$  到數百  $nA$  間。

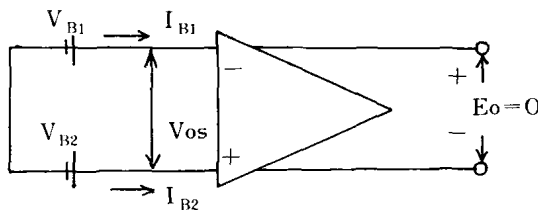


圖1-5 輸入偏壓電流  $I_{B1}$ 、 $I_{B2}$  以及偏差電壓  $V_{os}$

5. 輸入電阻:  $R_i$  通常大於  $1M\Omega$  ( $10^6\Omega$ ), 但也可以大到幾百  $M\Omega$ 。
6. 輸出電阻:  $R_o$  通常小於數百  $\Omega$ 。
7. 絕對最大額定:
  - a. 最大功率消耗;
  - b. 工作溫度範圍;
  - c. 最大電源電壓 (supply voltage);

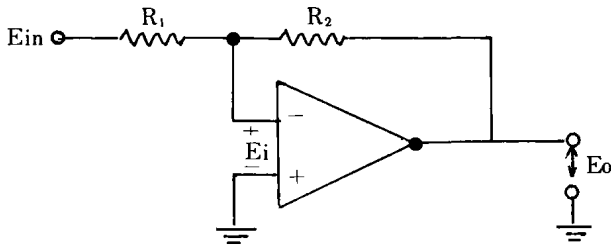
- d. 最大差額輸入電壓；
- e. 最大共模輸入電壓。

假如任一數據超過這些額定值，運算放大器將會損壞。

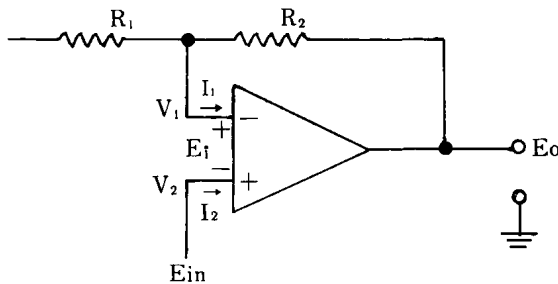
圖 1-6A 是反相放大器組態。因為  $R_f \rightarrow \infty$ ，所以流經  $R_1$  的電流  $I$  也都流經  $R_2$ ；並且  $E_1 = E_o/A_v \rightarrow 0$ （因為  $|A_v| \rightarrow \infty$ ）。所以反相端與正相端間在理想情形下沒有電壓差，它們是接地的。因此

$$A_{vf} = \frac{E_o}{E_{in}} = \frac{-IR_2}{IR_1} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (\text{式1-7})$$

此 (式1-7) 是反相放大器的放大率。



(A)



(B)

圖1-6 (A)反相放大器；(B)正相放大器

圖1-6B 是正相放大器組態。同樣的由於  $E_t = E_o/A_v \rightarrow 0$  與  $R_t \rightarrow \infty$ ，所以  $V_1 = E_{tn}$  及  $I_1 \rightarrow 0$ ，因此

$$\frac{E_o - V_1}{R_2} = -\frac{V_1}{R_1}$$

將  $E_{tn}$  代入  $V_1$ ，

$$\frac{E_o - E_{tn}}{R_2} = -\frac{E_{tn}}{R_1}$$

或

$$E_o = E_{tn} \left( \frac{R_2 + R_1}{R_1} \right) \quad (\text{式1-8 a})$$

及

$$A_{vf} = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \quad (\text{式1-8 b})$$

此 (式1-8 b) 是正相放大器的放大率。

圖1-7 是一個差額輸入放大器。若  $E_2$  接地， $E_o = E_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} E_1$ ；若  $E_1$  接地， $E_o = E_{o2} = E_2 \frac{R_2'}{R_1' + R_2'} \times \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ ；如果  $\frac{R_2'}{R_1'} = \frac{R_2}{R_1}$ ，則  $E_{o2} = \frac{R_2}{R_1} E_2$ 。當  $E_1$  與  $E_2$  均不接地為零時，則

$$E_o = E_{o1} + E_{o2} = -\frac{R_2}{R_1} (E_1 - E_2) \quad (\text{式1-9})$$

此 (式1-9) 中已經假設  $\frac{R_2'}{R_1'} = \frac{R_2}{R_1}$ 。

圖1-8是一個電壓追隨器 (voltage follower)。 (式1-8 a) 中， $R_2 = 0$ ， $R_1 = \infty$ ，所以  $A_{vf} = 1$ ，即  $E_o = E_{tn}$ ，輸出「追隨」輸入。

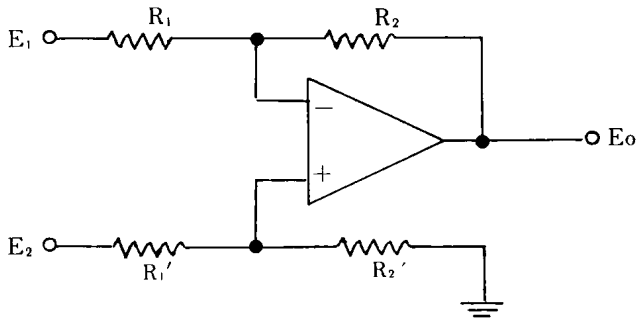


圖1-7 差額輸入放大器

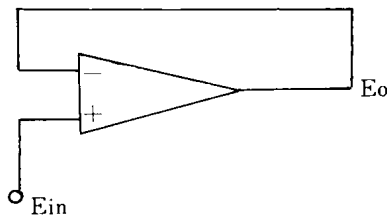


圖1-8 電壓追隨器

由重疊原理及反相放大器的放大率可知，圖1-9中的輸出為

$$E_o = -(E_1 + E_2 + \dots + E_n) \quad (\text{式1-10})$$

此意即應用反相放大器作加法器。

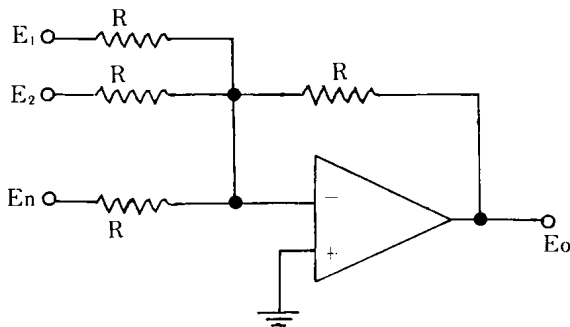


圖1-9 反相加法器

同理，圖1-10中正相端的電壓為

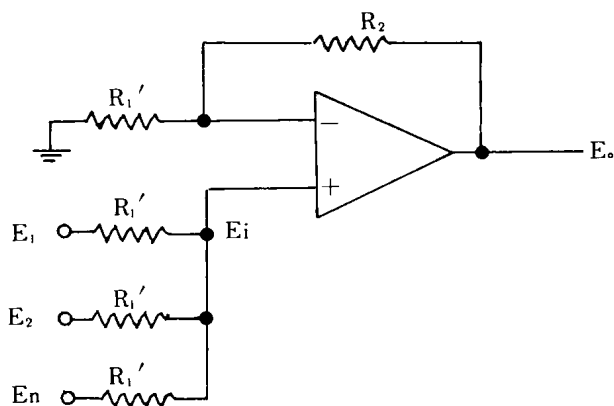


圖1-10 正相加法器

$$E_t = E_1 \times \frac{\frac{R'}{n-1}}{R' + \frac{R'}{n-1}} + E_2 \times \frac{\frac{R'}{n-1}}{R' + \frac{R'}{n-1}}$$

$$+ \dots + E_n \times \frac{\frac{R'}{n-1}}{R' + \frac{R'}{n-1}} = \frac{1}{n} (E_1 + E_2 + \dots + E_n)$$

又應用 (式1-8 a) 正相放大器的輸出為

$$E_o = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) E_t$$

$$= \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \times \frac{1}{n} (E_1 + E_2 + \dots + E_n)$$

設若  $\frac{R_1 + R_2}{R_1} = n$ , 則

$$E_o = (E_1 + E_2 + \dots + E_n) \quad (\text{式1-11})$$

此即應用正相放大器作加法器。

如果將圖1-6A 中的  $R_1$  和  $R_2$  推廣成  $Z_1$  和  $Z_2$ , 則如圖1-11所示,

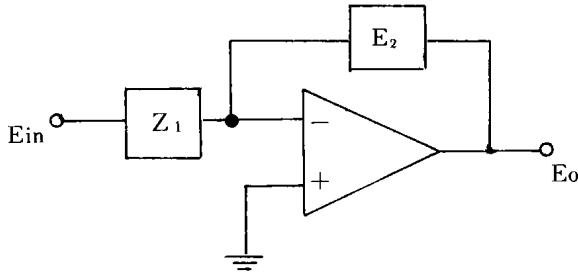


圖1-11 反相運算放大器的一般接法

其放大率為

$$A_{vf} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

圖1-12A中其輸出為

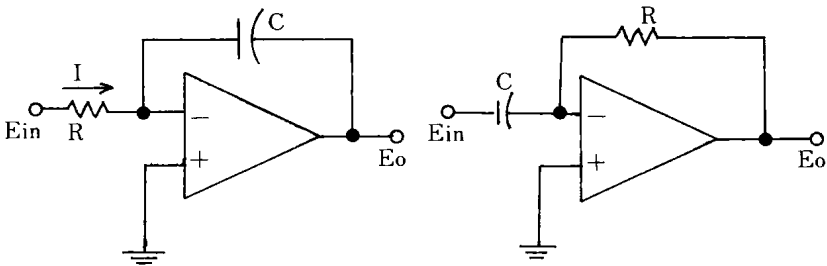
$$E_o = -\frac{1/sC}{R} E_{in} = -\frac{1}{sRC} E_{in} = -\frac{1}{RC} \int E_{in} dt \quad (\text{式1-12})$$

所以圖1-12A的電路可作為積分器。

圖1-12B中其輸出為

$$E_o = -\frac{R}{1/sC} E_{in} = -sRCE_{in} = -RC \frac{dE_{in}}{dt} \quad (\text{式1-13})$$

所以圖1-12B的電路可作為微分器。



(A)

(B)

圖1-12 (A)積分器; (B)微分器



比較器 (Comparator) 的理想轉移曲線 (transfer curve) 如圖1-13A所示, 而其實際轉移曲線則如圖1-13B所示。圖中的  $V_R$  是參考電壓, 圖1-13表示: 當  $V_i < V_R$  時  $V_o = V(0)$ , 當  $V_i > V_R$  時,  $V_o = V(1)$ 。

運算放大器可以用來作為比較器, 如圖1-14所示。當  $V_i > V_R$  時,  $V_o = V_{z1} + V_D \equiv V(1)$ , 而當  $V_i < V_R$  時  $V_o = -(V_{z2} + V_D) \equiv V(0)$ , 其中  $V_{z1}$  與  $V_{z2}$  為曾納二極體的崩潰電壓, 及  $V_D$  為曾納二極體的切入電壓。

圖1-15A是一個史米特觸發器 (Schmitt trigger)。輸入電壓加於反相端; 反饋電壓加在正相端而反饋因數 (factor) 為  $\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 。

定義  $V_0 \equiv V_z + V_D$ 。並假設現在  $v_i < V_1$  使得  $v_o = +V_0$ , 則正相端的電壓為

$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_R + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0 \equiv V_1 \quad (\text{式1-14})$$

假如現在  $v_i$  逐漸增加, 但仍小於  $V_1$ , 則  $v_o$  保持在  $+V_0$ ,  $v_1$  保持在  $V_1$ ; 直到  $v_i = V_1$  時,  $v_o$  變為  $-V_0$ , 並且只要  $v_i > V_1$ ,  $V_0$  一直保持在這個值。此部份的轉移特性畫在圖1-15B。

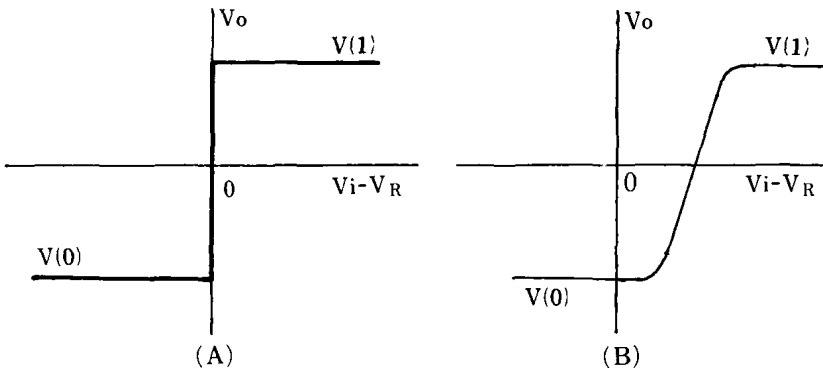


圖1-13 (A)比較器的理想轉移特性; (B)比較器的實際轉移特性