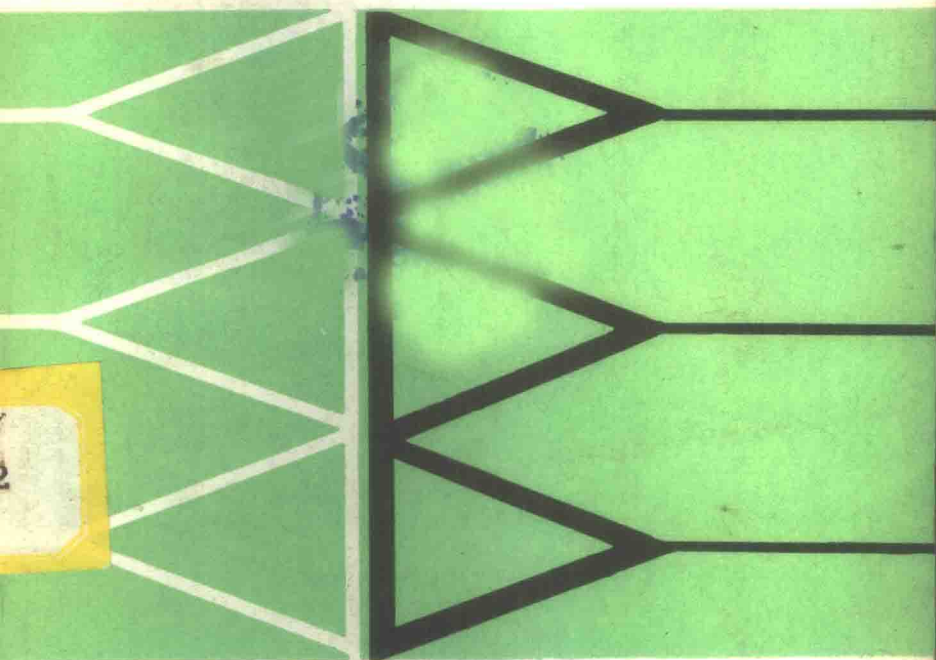


运算放大器原理与应用 (I)

(原理篇)

魏哲和博士主编 蔡中博士编著



全华科技图书公司

運算放大器原理與應用

(原理篇)

魏哲和博士 主編 蔡 中博士 編著



全華科技圖書公司印行

序

時至今日，運算放大器已因其性能優越、使用簡便，及價格低廉而成爲最普及的電子元件之一。非但在高級的電子儀器裏，運算放大器屢用不鮮；就是一般的消費性電子產品中，以運算放大器爲組成要項的線性積體電路也逐漸成爲寵兒。因是之故，對一個“稱職”的現代電子設計從業人員而言，熟習瞭解運算放大器的基本功能及其應用技巧者乃爲必備之知識。其實，在今日科技領域中，對許多非電子專業的科學或工藝工作者運算放大器也未必是陌生的元件。從事實驗工作的物理、化學、地質科學家均視運算放大器爲不可或缺的基本電子元件，這種元件已被廣泛的應用在度量及偵測儀器裏。而就核工、化工、控制、機械，及醫事工程師而言，運算放大器更大量被運用在其週遭。一般的科技人員如能就這種元件多所了解，顯然有助於其工作之遂行。

有鑑於此，應全華陳繩龔先生之邀，期能有助於海內外的中文讀者以其母語來研習此一重要之電子元件，乃有本叢書之編著。書分三冊，首

詳論線性積體電路之製作，運算放大器內部電路之解析、基本之特性及其作用，及介紹常見的運算放大器“家族”，希讀者能借此一窺放大器全貌，非僅皮毛而已。次冊則泛論正、反相放大器、比較器、波形產生器、計時器、穩流及穩壓電源、差額式之儀器及橋式放大器、加、乘法器、類比至數位(A/D)及數位至類比(D/A)轉換器等多項基本應用，期讀者能舉一反三，熟以生巧。最後一冊以通信之濾波器電路之應用為主，泛論各種調變、解調、變頻應用，更詳述各式常見之濾頻器之功能與設計，期能有助於日漸興起的電信工程於萬一。

本書之推出，除內容力求其完整可用，也兼顧理論之探討。所舉之例，力求詳明，可供讀者參考。雖不敢遽論巨細靡遺，但求“麻雀雖小，五臟俱全”。希望讀者們不吝指正。

編者謹誌於國立交通大學

目 錄

第一章 運算放大器簡介	1
1-1 理想之運算放大器	1
1-2 非理想之運算放大器	8
1-2-1 有限增益所產生的偏差	8
1-2-2 有限輸入電阻所產生的偏差	10
1-2-3 非零輸出電阻所產生的偏差	11
1-2-4 有限頻寬所產生的偏差	12
1-2-5 關於輸入補償的問題	14
1-3 與電晶體放大器之比較	14
1-3-1 增 益	15
1-3-2 頻 率 響 應	15
1-3-3 輸 入 電 阻	15
1-3-4 輸 出 電 阻	15
1-3-5 差 額 放 大 器 的 形 成	16
第二章 運算放大器的內部構造	21
2-1 積體電路之技術	21
2-2 μA 702 運算放大器的分析	23
2-2-1 電 源 部 門	24
2-2-2 放 大 部 門	26
2-2-3 輸 出 部 門	30
2-3 μA 702 運算放大器的分析	35

2-3-1	電源部門	36
2-3-2	放大部門	41
2-4	LM 101 運算放大器的分析	43
2-4-1	電源部門	46
2-4-2	輸入放大級	50
2-4-3	輸出放大級	61
2-5	其他運算放大器的特色	64
2-5-1	電源部門	64
2-5-2	保護電路	66
2-5-3	電容器 30pF	67

第三章 運算放大器的特性參數 69

3-1	參數的種類	69
3-1-1	最大使用範圍的參數	70
3-1-2	電性的參數	71
3-2	參數的測試	74
3-2-1	輸入補償電壓及其溫度係數的測試	74
3-2-2	輸入偏壓電流、輸入偏壓電流溫度係數、輸入補償電流及輸入補償電流溫度係數的測試	75
3-2-3	共模斥拒比的測試	76
3-2-4	輸入電阻、輸入電容及輸出電阻的測試	77
3-2-5	開路電壓增益的測試	80
3-2-6	單位增益頻率的測試	80
3-2-7	電壓轉動率的測試	80
3-3	參數所引起的誤差	82
3-3-1	關於輸入補償的問題	82
3-3-2	有限頻寬的問題	85
3-4	影響穩定的因素	99

3-4-1 負載含有電容性	99
3-4-2 輸入電容的影響	102
3-4-3 其他因素	104

第四章 運算放大器的選擇 107

4-1 運算放大器的分類	107
4-1-1 一般用途者	108
4-1-2 高速者	109
4-1-3 高壓者	110
4-1-4 低漂移者	110
4-1-5 低補償電壓者	111
4-1-6 可程式化	111
4-1-7 單一電源供給器者	112
4-1-8 寬頻者	112
4-2 運算放大器的應用特性	120
4-2-1 一般用運算放大器	120
4-2-2 低雜波放大器	121
4-2-3 低輸入放大器	121
4-2-4 高輸入阻抗放大器	122
4-2-5 大信號放大器	122
4-2-6 微功率放大器	123
4-3 選擇運算放大器的考慮因素	124

第五章 運算放大器的運用 129

5-1 反相放大電路的基本設計	129
5-2 非反相放大電路的基本設計	139
5-3 保護電路	145
5-3-1 輸入端的保護電路	145

5-3-2 輸出端的保護電路.....	148
5-3-3 電源端的保護電路.....	149



運算放大器簡介

1-1 理想之運算放大器

當我們要設計一個放大器時，我們必須注意這個放大器與其前級和後級間的關係。如果本級的輸入電阻不夠大，它就會影響前級放大的輸出負載而改變了前級的增益。又如本級的輸出電阻不夠小，就須特別注意下一級輸入電阻之設計，以避免影響本級之負載。所以，長久以來，對一個放大器設計者來說，如能有一個放大器它的輸入電阻很大，幾乎是無限大，如此就不會影響前級的負載；它的輸出電阻很小，幾乎等於零，這樣後級就不會影響本級的增益。而且希望它增益的大小可以隨意調整；它的頻率範圍越寬越好，最好是無限地寬。這種放大器，早在真空管時代就有人嘗試了，它不能用一個真空管來達成，它是用數個真空管與一些被動元件合製而成。這就是所謂的「運算放大器」。它的特性雖尚未達到完全理想，但也相當不錯了。在下節裏，我們要討論實際的情形。雖然運算放大器有

2 運算放大器原理與應用

如許之特點，但在真空管時代是無法被廣泛地應用，因為它的體積與重量為一般應用所不允許。到半導體時代，雖然電晶體取代了真空管，體積減小、重量減輕，但以分立元件 (Discrete Components) 接起來的運算放大器還是不能被廣泛地應用。

到了1960年代，情況改變了，半導體的技術走入了一個新的領域。電子工廠不再像以前那樣，只製造一個個的分立元件，而可以製造一個個的電路，稱之為積體電路。1963年第一種積體電路型式的運算放大器 ($\mu A 702$) 為美國快捷半導體公司 (Fairchild Semiconductor Co.) 所製成。接著該公司在1965年又推出一種較佳的 $\mu A 709$ 運算放大器，這種放大器到現在還在使用著。積體電路之半導體技術使得整個運算放大器又輕又小。圖(1-1)是 $\mu A 709$ 的矽晶表面之電路圖。它的面積只有1.95平方公厘，它的厚度還不到半公厘。當然，當我們買到手裡時，它已包裝在比它大很多的外殼裏了。圖(1-2)就是它的整個電路圖。積體電路技術的可貴處就是它能夠將那麼複雜的電路全部「擠」在那一小片晶片裏。目前，運算放大器的應用已非常普遍，如用作放大器、作控制器、作波形產

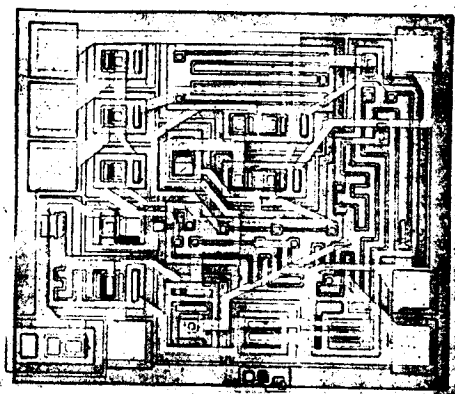


圖 1-1 $\mu A 709$ 之實體圖

生器等等。有用作各種加、減、乘、除、積分及微分的運算，以及各種儀器設備如類比計算機，信號處理等等。

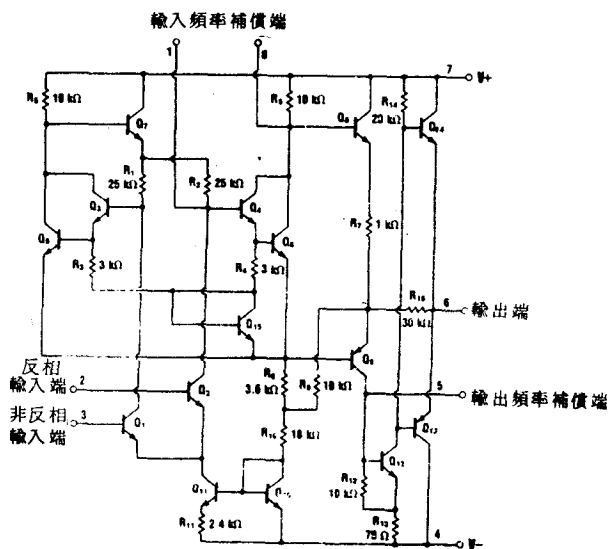


圖 1-2 $\mu A 709$ 之電路圖

我們已在前面簡述了運算放大器的由來及其發展經過。可知若無積體電路之半導體技術，其應用絕無今日這樣的廣泛。故知一件理想的元件也需要一個理想的製作方式才能使之發揚光大。在實用方面，僅有個理想的觀念是不夠的，運算放大器的想法早就在那兒，一直到最近的技術才把它實現出來。當然，這不是說目前的技術已到最完美的地步。而是說，它已到足夠的地步可使我們看出運算放大器的實用性。

當我們討論電阻、電容、或電感等電路元件時，首先我們都要從它的理想形態出發點導出一套演算的法則來。例如兩個電感器相加，我們只把它們看成兩個純電感來處理，暫不考慮附生在它們上面的並聯電容量或串

聯之電阻值。當然，我們經常會考慮後者的影響的。但對前者，我們只有在應用的頻率接近或超過該電感器的本身振盪的頻率時才加以考慮。所以，當我們在討論運算放大器時，我們也把它看成電路上的一個元件。從它的理想形態作出發點來探討它本身的特性與演算的法則。

運算放大器的理想形態如圖(1-3)所繪。它的輸入端有兩個，一個稱之為反相輸入端(Inverting Input)；另一為非反相輸入端(Non-Inverting Input)。它們分別以「-」與「+」符號來表示。從反相輸入端進來的信號到了輸出端，其極性會與輸入時相反，就好像乘了一個負號一般

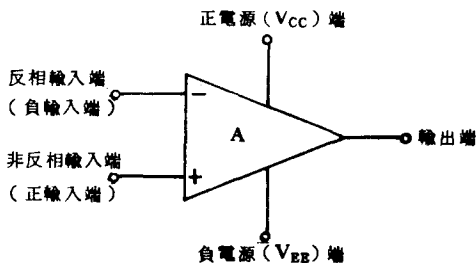


圖 1-3 運算放大器的幾個主要端點

；但從非反相輸入端進來的信號到了輸出端，其極性與輸入時一樣，不反轉，就好像乘了一個正號一般。當如兩端均有信號時，則此運算放大器只放大它們的差額部份而捨棄它們相同的部份，這是很容易看出來的。假設放大器的增益為 A ，則反相輸入端的信號 V_- 到了輸出端就成為 $(-AV_-)$ ；而非反相輸入端的信號 V_+ 到了輸出端就成為 $(+AV_+)$ 。因此輸出端的信號 V_o 即可由下式表出：

$$V_o = A(V_+ - V_-) \dots \dots \dots (1-1)$$

故運算放大器是一個具有差額輸入及單端輸出的放大器。一般不以差額方式作輸入的放大器，例如以一個主動元件，如真空管、電晶體等，與一些電阻、電容所構成之放大器，它的信號是從輸入端與參考點（或地）輸入的。當所需放大的信號從此端輸入時，一般的雜波（noise）也跟

著輸入，對放大的效果有影響。但在以差類方式輸入的運算放大器中，我們所要放大的信號 V_i ，就是兩輸入端的差別信號，如圖(1-4)所示。而一般雜波，在圖中以 V_n 表示，就成為兩輸入端的共模信號 (Common-Mode Signal)。故知在輸出信號 V_o 中只含有輸入信號 V_i 而無 V_n 之雜波。也許大家會想，運算放大器之輸出端是單端，雜波會在此與地之間出現。這是對的，但因輸入的信號經過放大後已遠大於此雜波了，故其影響也就微不足道了。

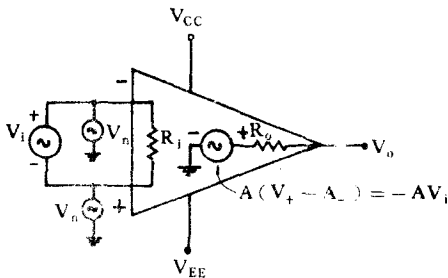


圖 1-4 運算放大器的等效電路

在說明了運算放大器的形態後，現在可設下它的理想性質，它們是：

1. 電壓增益無限大，即 $A = \infty$ 。
2. 輸入電阻無限大，即 $R_i = \infty$ 。
3. 輸出電阻等於零，即 $R_o = 0$ 。
4. 頻率寬度無限大，即 $BW = \infty$ 。
5. 輸入補償電壓為零，即 $V_n = 0$ ，如果 $V_i = 0$ 。

在這裏，第二點、第三點、第四點，我們都說明過了，它們的好處也是顯而易見的。關於第五點有什麼好處呢？大家在設計真空管或電晶體放大器時，在級與級間都要接一個耦合電容器，使得級間沒有直流電流的往來而利於偏壓的建立，且使得交流信號好像無阻礙地通過。但在運算放大器內，其輸出之直流電壓為零，故輸出只有交流電壓，這樣當然不需要在級間加個電容器了，而是直接耦合的。所以當 V_i 等於零時， V_o 也等於零，就

是說明此放大器的輸出偏壓為零。關於第一點的性質，似乎有點奇怪。增益固然愈大愈好，但也不需要到無限大。如果我們把一個信號放大到無限大，恐怕還沒有一個負載能承受得了。事實上，增益的無限大使得我們在使用時多了一個限制，那就是其輸入端的差別信號要無限的小。如此，我們在分析電路時多了一個理想的條件，就是輸入端「+」與「-」之間的電壓為零。

一個無限大的增益使得兩輸入端的電位差要無限小。這使得我們要對第二點性質再說明一下。因為輸入電阻無限大，則有限的輸入信號均將使輸入電流等於零了。如此，對我們分析電路時又多了一個條件，那就是進出「+」與「-」輸入端的電流為零。這兩個條件在分析電路時甚為有用。

雖然關於此種放大器的運用要在第五章內詳述。但為了說明上列五點的性質，我們介紹一個理想的放大器。它的電路圖示於圖(1-5)。我們將「+」端接地。在「-」端與信號源 V_s 之間接一電阻 R_s 。並接一回饋電阻 R_f 於輸出端與負輸入端之間。

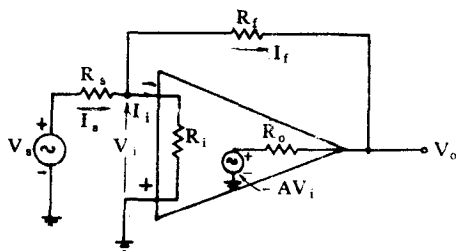


圖 1-5 反相放大電路

由於第一點性質， V_i 等於零，所通過 R_s 的電流 I_s 是：

$$I_s = \frac{V_s - V_i}{R_s} = \frac{V_s}{R_s} \dots\dots\dots (1-2)$$

又流過回饋電阻 R_f 的電流 I_f 是：

$$I_f = \frac{V_i - V_o}{R_f} = -\frac{V_o}{R_f} \dots\dots\dots(1-3)$$

由於第二點性質， I_i 等於零。故 I_s 等於 I_f 。所以：

$$\frac{V_s}{R_s} = -\frac{V_o}{R_f}$$

$$\therefore \frac{V_o}{V_s} = -\frac{R_f}{R_s} \dots\dots\dots(1-4)$$

故此放大電路的放大倍數由 R_f 、 R_s 電阻值來決定，達到我們可隨意變更其增益的目的。在電阻值比數前的負號即為本放大電路名稱之由來。為了說明無限大增益的原因，讓我們作較詳細地分析這個電路。因為在 A 點， I_s 等於 I_i 加 I_f ，即：

$$\frac{V_s - V_i}{R_s} = \frac{V_i}{R_i} + \frac{V_i - V_o}{R_f} \dots\dots\dots(1-5)$$

又

$$V_o = -AV_i + R_o \left(\frac{V_i - V_o}{R_f} \right) \dots\dots\dots(1-6)$$

上二式聯解得：

$$\frac{V_o}{V_s} = -\frac{R_f}{R_s} \left[\frac{1}{1 - \frac{R_f + R_o}{R_o} \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_i} \right)} \right] \dots\dots\dots(1-7)$$

假如將第一點、第二點、第三點性質代入式(1-7)後，其結果即為式(1-4)。由此可見，此三性質的作用使放大的倍數完全由外加的電阻來表示。再因第四點性質，式(1-4)亦與頻率無關。由於第五點，式(1-6)內並無直流電壓在內。故運算放大器的五個性質，使其在設計方面成為理想的元件。

1-2 非理想之運算放大器

在 1-1 節裏，我們討論了一個理想運算放大器的性質。但在物理世界裏，我們很難有這麼理想的東西存在。其實這也沒關係，一個設計工程師，經常是在理論上找其理想的型態，而在實際運用時找個類似於理想的而達到同樣的目的。例如前面所推導的式 (1-4) 與式 (1-7)，前者是在理想狀況之下而後者是在非理想狀況之下。但如我們仔細查看式 (1-7) 時，我們會發現只要 R_f 趨於零， R_i 及 A 足夠大就可以使式 (1-7) 趨近式 (1-4)。

在本節內，我們要討論理想與實際之間的差別。以便在應用時可以選擇適當的運算放大器使其效果接近於理想。以下我們將分別探討引起差別的因素。

1-2-1 有限增益所產生的偏差

對一個運算放大器來說，它本身有一個增益數值，當加上一個回饋電路後又有一個增益數值。我們稱前者為開路增益 (Open-Loop Gain)，後者為信號增益 (Signal Gain)。今後將以 A 代表前者， A_f 代表後者。有限值的開路增益事實上是偏差的主要來源。對寬頻率範圍者，其 A 僅有 1000 的樣子；但對某些特殊用途者可達到 10^6 之高。一般用途者差不多在 10^5 上下。這些數值都不是無限大，且同一類型的運算放大器，也因製造時品質的不易控制，其值亦有大有小。又它也會因溫度，負載而有些許的改變。

讓我們來看看由有限增益所引起的偏差。我們先假設其餘的放大器性質均為理想狀況來討論。我們還是使用圖 (1-5) 所示之電路。其信號增益為將式 (1-7) 之 R_i 及 R_f 以其理想值代入而得：

$$A_f = \left(-\frac{R_f}{R_i} \right) \left[\frac{1}{1 + \frac{R_i + R_f}{AR_i}} \right] \dots\dots\dots (1-8)$$

在此式中，右邊的第一個括號內的式子與式(1-4)同，是理想放大值的表示。但右邊第二個括號就是偏差的因素。讓我們詳察這個偏差因素所代表的意義。從圖(1-5)內，如我們將 V_o 短路後，則輸入端與輸出端的電壓比應為：

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{R_i}{R_i + R_f} \dots\dots\dots (1-9)$$

由此式子可知，當回饋電阻 R_f 等於零時， V_i 等於 V_o ，可稱之為百分之一百回饋。但當 R_f 愈大時， V_i 則愈小。所以我們介紹一個新的名詞 β ，稱之為回饋因數(feedback factor)，即：

$$\beta = \frac{R_i}{R_i + R_f} \dots\dots\dots (1-10)$$

將式(1-10)代入式(1-8)內，成：

$$A_f = \left(-\frac{R_f}{R_i} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A\beta}} \right) \dots\dots\dots (1-11)$$

所以，如要信號增益接近理想值，就要使 A 與 β 的乘積愈大愈好。但我們可以看出，如我們要設計一個信號增益很大的放大器，那就要令 R_f 遠大於 R_i 。而從式(1-10)則得 β 為一很小的數值，如此，如要使偏差因素不影響理想式子，那就需要一個很大的 A 才行。可見如 A 不是無限大時，則由 A 與 β 來決定偏差的大小。 $A\beta$ 稱為迴路增益(Loop Gain)。迴路增益愈大，則放大器愈趨近於理想。

讓我們從另一個角度來看式(1-9)。此式本是在 V_o (參考圖1-5)為零時，輸入端與輸出端電壓的比。在前段，我們把這輸入端的電壓看成是從輸出端回饋過來，故有回饋因數如式(1-10)。但我們在前節說明過