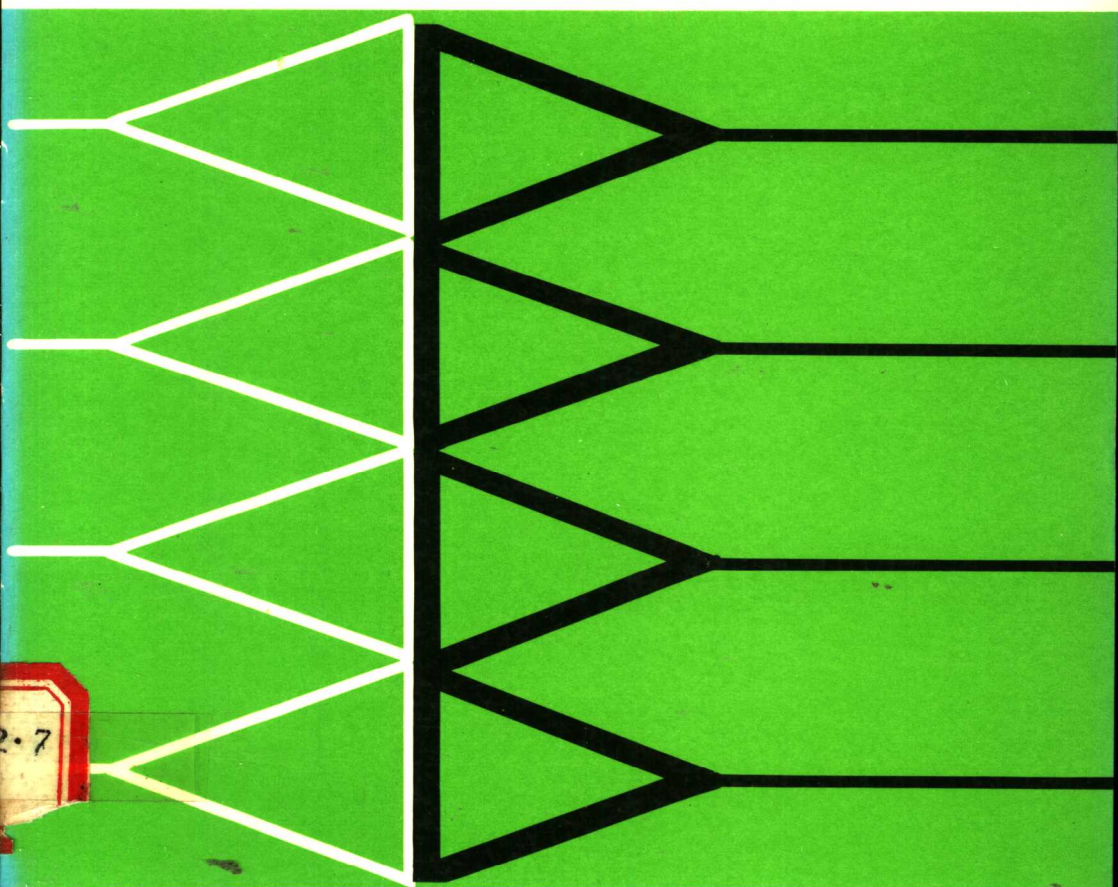


運算放大器原理與應用 (I)

(原理篇)

魏哲和 博士 主編 蔡 中 博士 編著



2.7

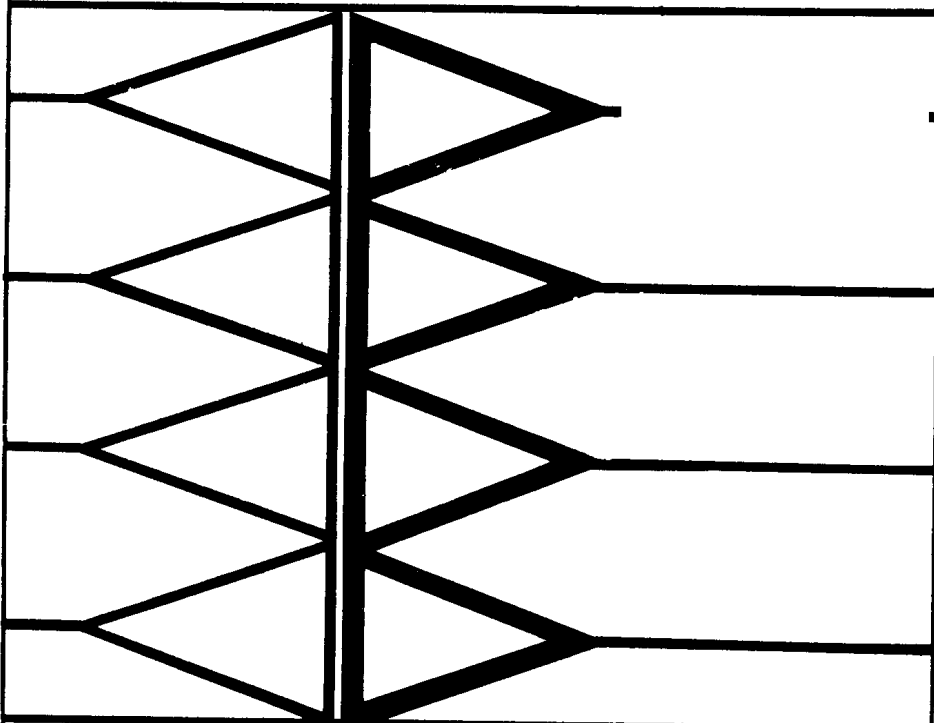


全華科技圖書公司印行

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



全華圖書

法律顧問：陳培豪律師

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

出版者 全華科技圖書股份有限公司
地址 / 台北市龍江路76巷20-2號2樓
電話 / 5071300 (總機)
郵撥帳號 / 0100836-1號

發行人 陳本源
印刷者 宏懋打字印刷股份有限公司
電話 : 5084250 • 5084377

門市部 全友書局(黎明文化大樓七樓)
地址 / 台北市重慶南路一段49號7樓
電話 / 3612532 • 3612534

定價 新台幣 100 元
九版 / 77年 9月

行政院新聞局核准登記證局版台業字第〇二二三號

版權所有 翻印必究

圖書編號 029236

我們的宗旨：

**推展科技新知
帶動工業升級**

**為學校教科書
推陳出新**

感謝您選購全華圖書
希望本書能滿足您求知的慾望

「圖書之可貴，在其量也在其質」，量指圖書內容充實，質指資料新穎夠水準，我們本著這個原則，竭心盡力地為國家科學中文化努力，貢獻給您這一本全是精華的“全華圖書”

為保護您的眼睛，本公司特別
採用不反光的米色印書紙！！

序

時至今日，運算放大器已因其性能優越、使用簡便，及價格低廉而成為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，以運算放大器為組成要項的線性積體電路也逐漸成為寵兒。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為必備之知識。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為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，應全華陳繩籌先生之邀，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

冊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。雖不敢遑論巨細靡遺，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。積路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

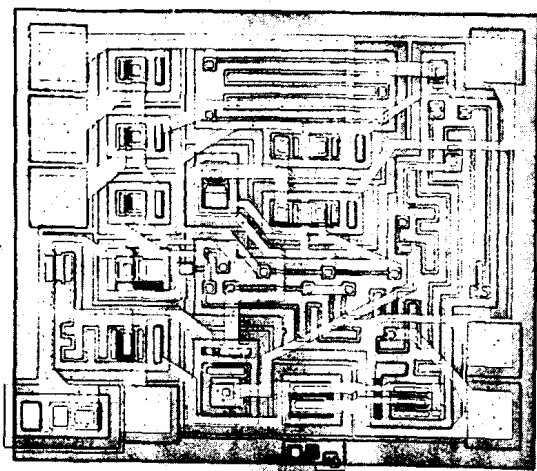


圖 1-1 $\mu A 709$ 之實體圖

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。

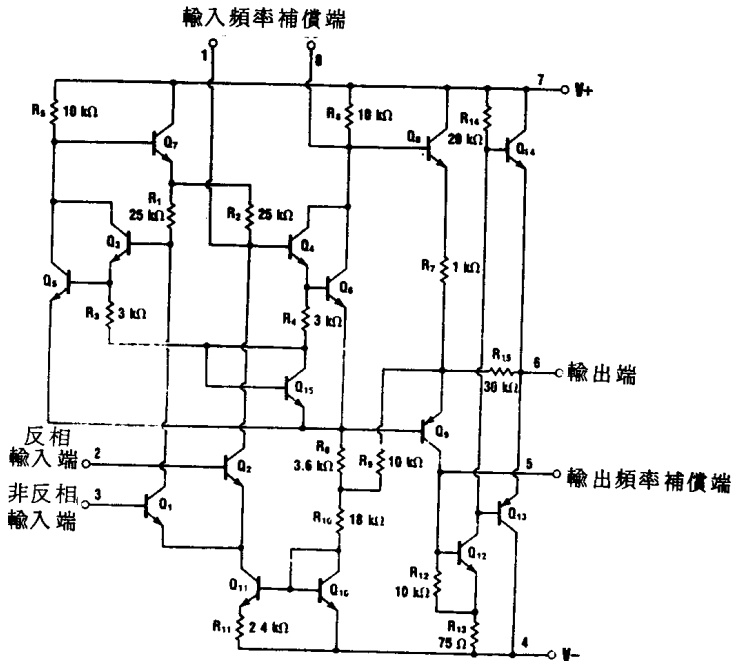


圖 1-2 μA 709 之電路圖

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作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

4 運算放大器原理與應用

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

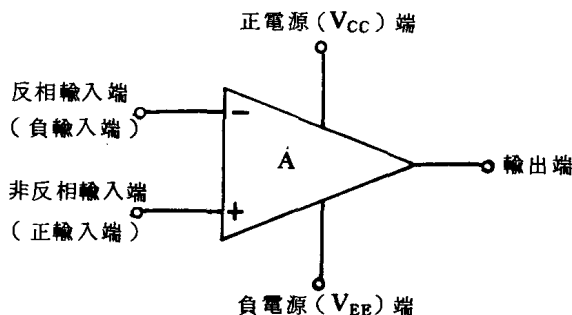


圖 1-3 運算放大器的幾個主要端點

；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。但在以差額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。

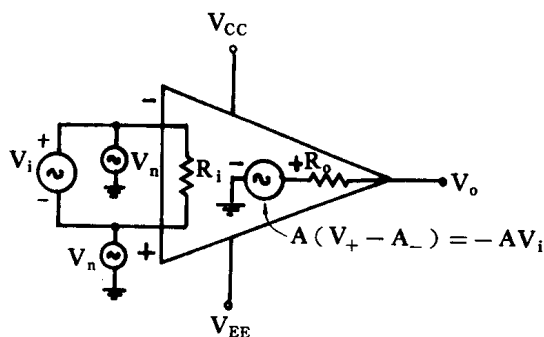


圖 1-4 運算放大器的等效電路

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 $V_o = 0$ ，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。

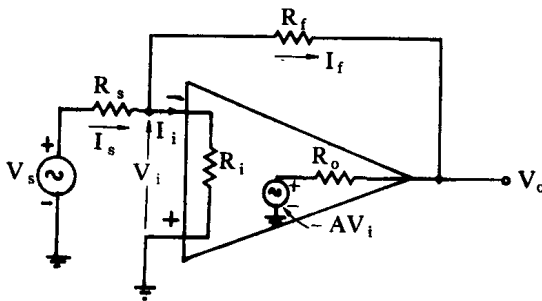


圖 1-5 反相放大電路

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。爲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。因爲在 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：

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

故如將第一點、第二點、第三點性質代入式 (1-7) 後，其結果即爲式 (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，使其在設計方面成爲理想的元件。