

科學圖書大庫

現代運算電路之設計

譯者 陳漢時

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

現代運算電路之設計

譯者 陳漢時

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會

科學圖書大庫

監修人 徐銘信 科學圖書編譯委員會主任委員
編輯人 林碧銓 科學圖書編譯委員會編譯委員

版權所有

不許翻印

中華民國六十五年九月二十四日再版

現代運算電路之設計

基本定價 2.20

譯者 陳漢時 美國丹佛精密電子儀表研究班畢業

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(63)局版臺業字第0116號

出版者 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686號
發行者 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第15795號
承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號 電話9719739

我們的工作目標

文明的進度，因素很多，而科學居其首。科學知識與技術的傳播，是提高工業生產、改善生活環境的主動力。在整個社會長期發展上，乃對人類未來世代的投資。從事科學研究與科學教育者，自應各就專長，竭智盡力，發揮偉大功能，共使科學飛躍進展，同將人類的生活，帶進更幸福、更完善之境界。

近三十年來，科學急遽發展之收穫，已超越以往多年累積之成果。昔之認為若幻想者，今多已成為事實。人類一再親履月球，是各種科學綜合建樹與科學家精誠合作的貢獻，誠令人無限興奮！時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就科學人才，促進科學研究與發展，尤為社會、國家的基本使命。培養人才，起自中學階段，此時學生對基礎科學，如物理、數學、生物、化學，已有接觸。及至大專院校專科教育開始後，則有賴於師資與圖書的指導啟發，始能為蔚為大器。而從事科學研究與科學教育的學者，志在貢獻研究成果與啟導後學，旨趣崇高，彌足欽佩！

本基金會係由徐銘信氏捐資創辦；旨在協助國家發展科學知識與技術，促進民生樂利，民國四十五年四月成立於美國紐約。初由旅美學人胡適博士、程其保博士等，甄選國內大學理工科優秀畢業生出國深造，前後達四十人，惜學成返國服務者十不得一。另曾贈送國內數所大學儀器設備，輔助教學，尚有微效；然審情度理，仍嫌未能普及，遂再邀請國內外權威學者，設置科學圖書編譯委員會，主持「科學圖書大庫」編譯事宜。以主任委員徐銘信氏為監修人，編譯委員林碧鏗氏為編輯人，各編譯委員擔任分組審查及校閱工作。「科學圖書大庫」首期擬定二千種，凡四億言。門分類別，細大不捐；分為叢書，合則大庫。為欲達成此一目標，除編譯委員外，本會另聘從事

Handwritten signature and date: 4/8/04

翻譯之學者五百餘位，於英、德、法、日文出版物中精選最近出版之基本或實用科技名著，譯成中文，供給各級學校在校學生及社會大眾閱讀，內容嚴求深入淺出，圖文並茂。幸賴各學科之專家學者，於公私兩忙中，慨然撥冗贊助，譯著圖書，感人至深。其旅居國外者，亦有感於爲國人譯著，助益青年求知，遠勝於短期返國講學，遂不計稿酬多寡，費時又多，迢迢乎千萬里，書稿郵航交遞，其報國熱忱，思源固本，至足欽仰！

今科學圖書大庫已出版一千餘種，都二億八千餘萬言；尚在排印中者，約數百種，本會自當依照原訂目標，廣續進行，以達成科學報國之宏願。

本會出版之書籍，除質量並重外，並致力於時效之爭取，舉凡國外科學名著，初版發行半年之內，本會即擬參酌國內需要，選擇一部份譯成中文本發行，惟欲實現此目標，端賴各方面之大力贊助，始克有濟。

茲特掬誠呼籲：

自由中國大專院校之教授，研究機構之專家、學者，與從事工業建設之工程師；

旅居海外從事教育與研究之學人、留學生；

大專院校及研究機構退休之教授、專家、學者

主動地精選最新、最佳外文科學名著，或個別參與譯校，或就多年研究成果，分科撰著成書，公之於世。本基金會自當運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。尚祈各界專家學人，共襄盛舉是禱！

徐氏基金會 敬啓

中華民國六十四年九月

譯 序

本書的作者John I. Smith 先生，在著作本書之前，曾從事於類比計算裝置及運算放大器之設計工作。所以本書中所有被選為範例的運算電路，都是他親手製作，並經試驗後的成果，圖中的數字尤為珍貴。讀者可將此作為實驗的參考，必能事半功倍。

書中有些電路圖所附列的算式，未能作詳細的推證，譯者已選擇其重要部份加以補充，導出其算式之由來，藉以引導讀者，從數學上明瞭其真意。

從第一章到第五章，特別介紹運算放大器的幾個基本電路——反相，積分，微分以及耦合電路等。第六第七章更說明它與二極體和電橋聯合使用的效果。第八章指出它在伏特計和電流計電路中所發揮的功用。第九章談到它本身的誤差，以及如何予以補償。最後，由儀表電路，計算電路，交換電路以及運算體系，而使它多采多姿的效用，盡情地放出了它的光輝。

所以本書為一專門化的技術結晶，能使讀者在運算電路方面開創新的園地，對類比計算電路及儀表電路之設計者，更有莫大的貢獻。這些只有當讀者研讀本書以後，才能證明譯者在此並未作誇大的介紹，而是就事論事的加以說明。

目 錄

譯 序

第 一 章	增益爲一的反相器.....	1
第 二 章	反相放大器的電路.....	9
第 三 章	積分器與微分器.....	15
第 四 章	耦合器和具有增益的耦合器.....	18
第 五 章	對稱性電路.....	25
第 六 章	精確的二極體電路.....	29
第 七 章	惠斯登橋路.....	45
第 八 章	電壓計及電流計的電路.....	53
第 九 章	放大器的誤差——輸入電壓與輸入電流.....	63
第 十 章	動態誤差及穩定度.....	85
第十一章	儀表.....	101
第十二章	計算電路.....	124
第十三章	交換電路.....	146
第十四章	運算體系.....	174
第十五章	實習室實習的意見推薦.....	204

第一章 增益爲一的反相器

在運算電路 (Operational Circuitry) 中，正負極性的電壓相對地代表着正負信號的數值。所謂信號，可能是由測試而得的物理量，其值因時間的不同而變化；也可能代表一個從典型的或是模擬的系統中所產生的變值；在大多數抽象的情況下，信號的正負（或零）數值，均指示其爲一個方程式或一組方程式，經求解而得的代數學上的一個數。

運算放大器 (Operational Amplifier) 的輸出端，對零電位而言，必須能正能負。因此，就需用正負電源加於此放大器。這種放大器爲直接耦合放大器；對於快慢變化不同的信號，電路中均以相同的方法處理之。例如一個正在充電的電池，它變化非常緩慢的端電壓，也可以像放大聲波電壓一樣地容易放大。實際上，所以用電池電源爲範例者，完全以簡單而強調的方法，說明此種放大器對直流電壓的輸入全部有效。說明此電路特性的另一種方法，就是：電路響應 (Circuit Response) 對低頻並無限制——直流或頻率爲零之輸入信號最爲歡迎。

運算放大器和運算電路必須有明確的區別。運算放大器只爲運算電路中的一部份。一個明顯的現象，就是電路的行爲與放大器的特性，大部份都毫無關係，而這種現象也是放大器的設計者所奮力追求的主要目標。關於特性的探討，以圖 1.1 開始。圖中所示者爲運算放大器在一個十分普通的運算電路中工作的情況。電路的輸入信號爲 e_i ，輸出電壓爲 e_o ，負荷阻抗 (Load Impedance) 爲 Z_L 。而 Z_L 並未出現於運算式中，其超然的理由就是因爲這一個電路的行爲在適度的限制下，可以說與負荷無關。這是因回授的技巧所顯出的效能。運算放大器有兩個輸入端和一個輸出端。每一個輸入端附有一個代數符號，有負號者爲反相輸入端 (Inverting Input)，由此端輸入的電壓放大後，結果不但放大而且與原有輸入信號的符號相反。附有正號者爲非反相或直接輸入端 (Direct Input)，由此端輸入的電壓，只能放大並不相反。當信號僅加於反相輸入端，則直接輸入端常與特性地 (High Quality Ground) (特性地並非真實的地或電源的地，而是具有特殊

2 現代運算电路之設計

意義的地，如浮接的輸入信號，它並未真正的接地，但它具有如地一樣的參考點，在圖中的特性地就是如此（譯者註）相接。此時，運算放大器的輸出與運算电路者相符合。這只是常態，但不是絕對不變的。

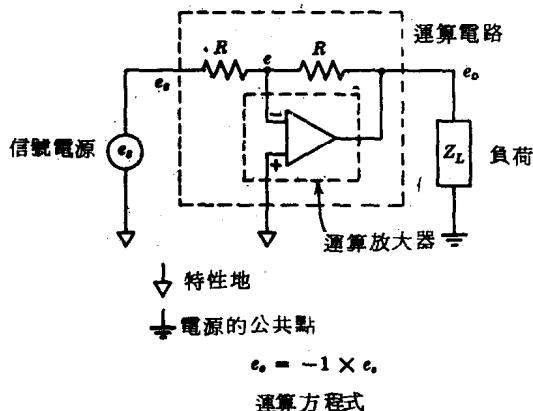


圖 1-1 運算的反相器电路

研究運算电路的目標，就是要徹底明瞭其功能。現在分三部份加以探討：(1)說明此电路做些什麼，(2)簡述其功能與作用，(3)詳盡地解釋它所以能如此的原因。

在圖 1-1 中，將運算放大器連接成反相的運算电路。輸出電壓 e_o 與輸入電壓 e_i 能精確相等，但極性相反。如果輸入信號為負，則輸出為正，而大小相等，在任一瞬間均能保持此種關係。圖 1-2 就是在此種關係下的輸入對輸出的曲線圖。如以水平的時軸為準，則輸出電壓 e_o 正如輸入電壓 e_i 在鏡中所成的虛像一樣。

爲了便以明瞭反相电路的作用，特提出兩點假定：(1)運算放大器的輸入端，不允許電流流進或流出放大器，(2)因回授的作用，使反相輸入端的電壓 e 爲零（因直接輸入端爲特性地，爲輸入的零電位（譯者註））。這些假定將於以後的討論予以證明。

如果一個電阻的一端爲零電位，則流過此電阻的電流與該電阻另一端的電壓成正比。圖 1-1 中的輸入電阻就是處於這種情形。按照上節所述的第二個假定，輸入電阻的右端爲零電位，因此其中的輸入電流與輸入信號電壓成正比。輸入電阻如此連接的結果，就可當作轉變電壓爲電流的轉換器 (Transducer)。

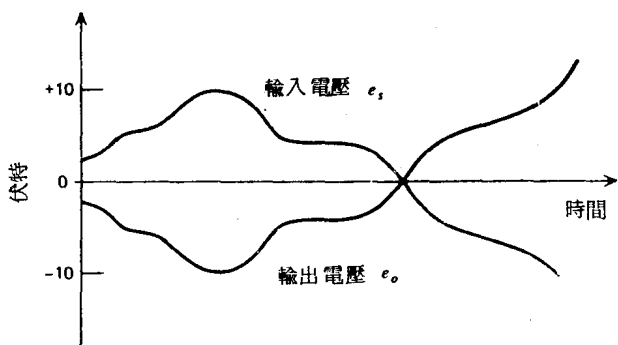


圖 1-2 圖 1-1 所示電路之輸入輸出關係圖

根據假定(1)，由輸入端流入放大器的電流為零，則由輸入電阻流出的電流究係流向何方？唯一的通徑就是回授電阻。而此回授電阻的左端，依照假定(1)，知其為零電位，而右端與放大器的輸出端，即輸出電壓 e_o 相接。則輸出電壓必須為何值時，才能使輸入電阻中的電流全部流經回授電阻？其值大小必須與輸入電壓相等，極性必須相反。

以上的論證，完全根據一項假設：就是輸入電阻與回授電阻的歐姆數相等。如果回授電阻為輸入電阻的兩倍，則其結果又將如何？這是顯而易見的，輸出電壓必須二倍於輸入電壓，才能使輸入電流全部從回授電阻中流過。依此類推，回授電阻為 $10R$ 或 $100R$ 時，其結果亦可採用與此相同的方式推算。總之，此放大電路的放大因數(Magnification Factor)由二個電阻之比值決定。

圖 1-1 的運算電路中，除開放大器外，僅有兩個電阻所組成的網路，現在用圖 1-3 單獨表出其連接情形。此網路的中點與放大器的反相輸入端相接，網路的兩端分別和輸入電壓 e_i ，輸出電壓 e_o 相接。因為放大器的輸入端沒有電流進出，兩個電阻又是等值，所以在中點的電壓 e 為加於網路兩端二電壓的平均值。再就運算電路的運用原則，是使此中點電壓為零，亦即

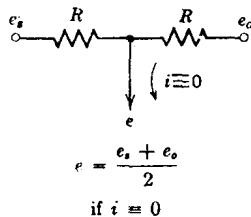


圖 1-3 電壓平均網路

4 現代運算電路之設計

使 $e = 0$ ，如此才能獲得穩定平衡 (Stable Equilibrium)。依照圖示之網路及算式，只有 $e_o = -e_s$ 時才能如此。欲使兩電壓的平均值為零，也只有使此兩電壓大小相等，極性相反。

因為當平衡現象存在時，其輸出電壓必須使放大器的輸入電壓 e 為零。要證實此一假定，必須確定運算放大器內部的作用。圖1·4即為表示其內部功能的方塊圖。運算放大器隱含着時間積分器 (Time Integrator)，電壓增益 ω_H ，以及反相符號。由此觀察，而得下列兩點：(1)當輸入為零時，積分器的輸出為常數 (零值的積分為常數)，(2)當輸入為 V 伏時，積分器的輸出變率 (Rate of Change) 為每秒 V 伏而升高的斜坡 (常數對時間的積分為斜坡函數 [Ramp Function])。這些特性與反相的符號結合在一起，足以說明穩定平衡的現象。

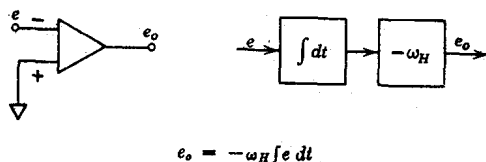


圖 1-4 以特性化的方式表示運算放大器的方塊圖

如果輸出電壓正好是穩定平衡時的數值，則 $e = 0$ ，積分器的輸出不變。如果輸出電壓的負值不夠大，則 $e > 0$ ，由於符號反相，使積分器的輸出電壓向負值增加。反之亦然，當輸出電壓之負值過大時，此不平衡即存在，而產生一種作用，使輸出電壓之負值降低而趨於平衡。

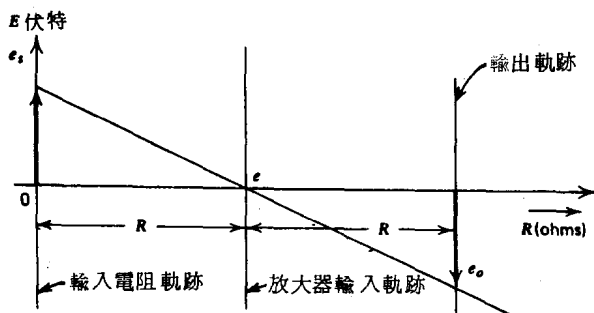


圖 1-5 圖 1-1 中電路的電壓對電阻的圖解

上面所陳述的觀念，可以逼真地用圖線表示出來。圖1·5就是反相器在平衡時，電壓對電阻的變化圖。它與通常電壓對電流的變化圖不同。其縱坐標代表電壓，橫坐標代表電阻，電流係二者之比值，可用圖中斜線的斜率表之。輸入的信號電壓 e_s 作在過原點的垂直軸上，放大器反相輸入端的電壓作在距原點右方 R 處的水平軸上，此間的 R 為輸入電阻的值，此點的作法係根據假定(2)確定反相輸入端的電壓為零而定於水平軸上。輸出電壓的軌跡為一垂直線，此垂線與水平軸的交點在原點右方 $R + R$ 之處。其中的第二個 R 即代表回授電阻。這一根傾斜的直線，以其各點的斜率相等的關係，而代表着流入輸入電阻的電流，必須全部流經回授電阻。也表示着反相輸入端沒有電流流進或流出放大器。此傾斜的直線與輸出軌跡（Output Locus）相交而決定輸出電壓的值。此簡單的圖形，除掉歐姆定律（Law of Ohm）和克希荷夫定律（Law of Kirchoff）外，並無其他隱晦不明的地方。圖1·6與1·7是以同樣的技巧作圖形分析，表示具有增益因數（Gain Factor）的運算電路。由這些圖形觀察，就很清楚地明瞭何以電學的傑出先進者稱反相電路為“電子槓桿（Electronic Lever）”的道理。

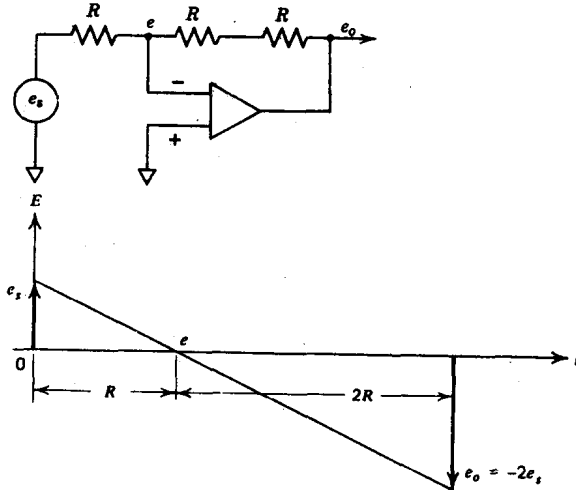


圖 1-6 增益為負2的圖解

圖1·6以特性化的方式表示放大器的作為，更適於說明運算電路之動態響應（Dynamic Response）。對於步進響應（Step Response）特別具有教學的意義。其意向並非為了本身的緣故而探討動態的情形，實在是使回授環路（Feedback Loop）中各種情節之合於理論的性質趨於明朗。回授電路

中最使人發生困難的，就是印象的混淆，將其中每種情況都設想為同時發生，事實上並非如此，同時發生的困擾問題只是一個錯覺。

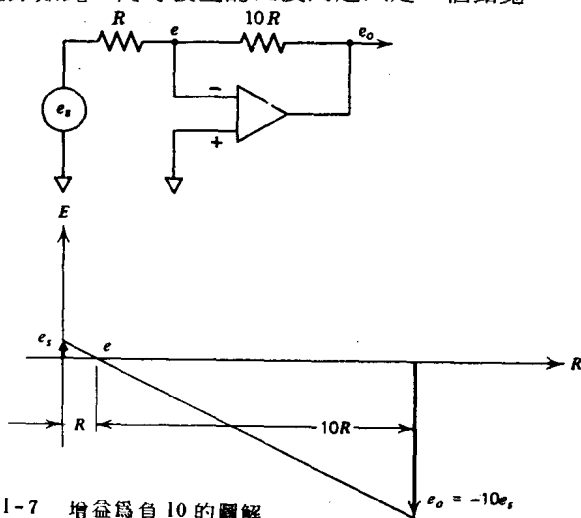


圖 1-7 增益為負 10 的圖解

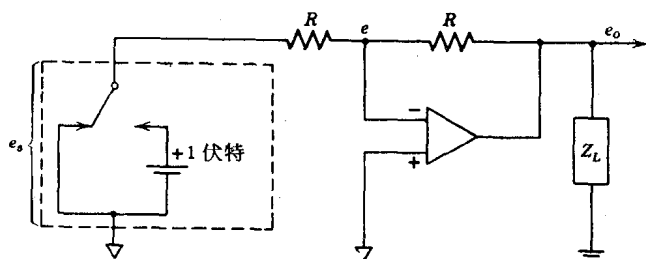


圖 1-8 具有步進輸入的反相器

將圖 1.1 重繪成圖 1.8，把輸入信號 e_s 改為一伏特的電池與一個單刀雙擲的開關。假定在時間為零之瞬間，將開關投擲到電池的正端，於是得到電壓對時間的關係圖 1.9a。開始之前，電路在平衡狀態，三個電壓（ e_s ， e ， e_o ）均為零。時間在零之瞬間，信號電壓 e_s 躍升為正一伏，輸出電壓 e_o 並未改變，因為反相輸入端的電壓 e 為其它二者之平均值，所以也躍升至 0.5 伏。輸出向負方向變更的情形，依照方塊圖 1.4 的說法，時間積分器的輸出為每秒負 0.5 伏上升的斜坡。在圖 1.4 中的係數方塊（Coefficient Block）標以 w_{11} 者，代表固定的乘數。對於通常的運算放大器而言，其值均為 10^7 。這兩個函數性方塊的聯合效果為：輸出電壓 e_o 以每秒五百萬伏的始變率（

Initial Rate) 負向遞增——此一變率常寫為 5 伏/微秒。此僅為始值 (Initial Value)，復經電壓平均網路的回授作用，此始變率立即進行遞減。此乃輸出響應降低“誤差信號” e 的事實，也因此使響應的變率趨於緩和。圖 1-9a 中 b 和 c 的曲線由正 0.5 伏和零而漸趨於零和負 1 伏。

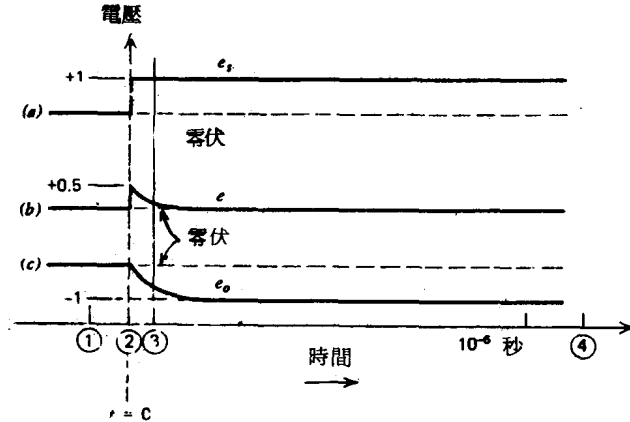


圖 1-9a 圖 1-8 所示反相電路中的電壓對時間的關係圖

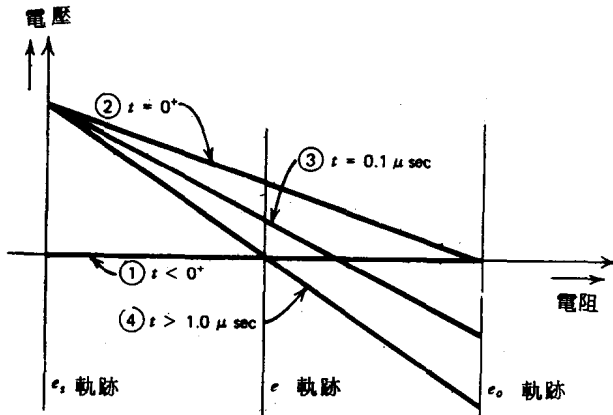


圖 1-9b 圖 1-8 所示電路在步進響應時，描繪四個瞬間的電壓對電阻之關係圖

此等響應曲線係以一次平直微分方程 (First-Order Linear Differential Equations) 對此電路系統所描述之典型衰減的指數函數 (Exponential Functions)。具有一次積分的放大器，其作為猶如備有能量儲存元件的物理系統。這些曲線的其他特性也應予注意。曲線 b 上每一瞬時的值，就是曲線 c 在相當瞬時的斜率之負值。反過來說，曲線 c 代表着曲線 b 與橫軸間

相當面積之負值。進一步說，在一或二微秒以後，反相輸入端的輸入電壓 e 又回復到零值。於是假定(2)因此而得以證明。雖則如此，在後章中對其微妙性質的展開研究，仍有其實際的需要。

在習慣上都將反相輸入端認為“虛地 (Virtual Ground)”，所以如此的，因其電位保持在（非常接近於）零電位。而所以冠以“虛”字的，因其與地間並不是真正的無抗通路。由於回授環路的作用，使該點極力摹仿着地的功能。如果將放大器的輸入電路認為是通地（虛地）的電阻，則假定(2)包含着假定(1)；也就是零電壓產生零電流，即使對低電阻而言仍為適合。所以雖則未經嚴正的證明，但此兩種假定確是相互一致的。

當有步進信號輸入時，各瞬間的響應可以繪成電壓對電阻的圖形（參看圖 1.9b），藉以說明瞬間的情形。

運算放大器時間積分的特性，與第三章所介紹的運算積分器的積分特性必須予以區分。一方面為開路時本身的特性，而另一方面為封閉環路 (Closed Loop) 運算積分器的特性。

第二章 反相放大器的電路

圖 1.6 和圖 1.7 係增益為負 2 和負 10 的反相器，其圖解情形代表輸入為正的結果。圖 2.1 表示某些瞬間輸入信號改變之情況，而此輸入信號可能為正弦波等。圖中第三瞬間的圖解，代表輸入為零的軌跡。進一步說，增益 n 可為任何正的實數。但何以需要分數的增益呢？增益小於一的放大器，用來做什麼呢？前面曾提及運算的行為與其負荷並無關係——是一個重點。圖 2.2 具體地表示出一個精確的衰減器 (Attenuator)，可作分壓器 (Voltage Divider)，且能免除負荷的誤差，同時可得到反相的結果。運算放大器所供給的負荷電流，在額定範圍以內，可以推動任何負荷，而不影響運算的效果。

反相輸入端電壓歸零的特性，顯著地具有許多應用的效果。在反相輸入端連接一個電阻，此電阻與輸入電壓可以決定輸入電流的大小。所以此一電阻可以充作由電壓變為電流的轉換器。如此連接的幾個電阻，相互間並不發

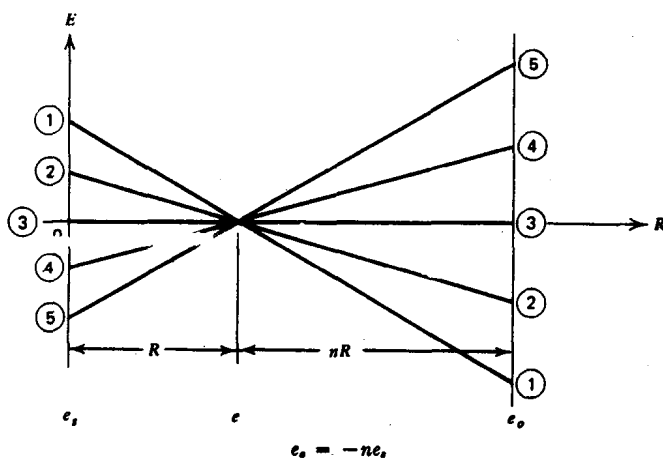


圖 2-1 輸入信號的瞬時值改變時，在增益為負 n 的放大器中，各瞬間輸出的圖解

生影響；這稱為反交連 (Decoupled)。幾個流向反相輸入端的電流總和與各電阻另一端的輸入電壓的總和也成比例。請參閱圖 2.3，其中電流的總和為代數和。因為如果有一個輸入電壓為負的話，則其所產生的電流方向與圖中箭頭的方向相反，對總和而言將會抵消與其反向的電流。由各個輸入電阻流向反相輸入端的電流，亦即總和輸入電流，和以前所討論的結果一樣，只有一條通路可引此總和輸入電流離開反相輸入端：那唯一的通路就是回授電阻。回授電阻和輸入電阻相接的一端（即此二者之公共接點）與虛地相接。因此，依據歐姆定律，其輸出電壓應該為總和輸入電流與回授電阻之乘積，而總和輸入電流的方向決定輸出電壓正負的極性。

於是下面相繼的三個步驟，為計算代數和的幾個重要部份：

1. 每一個輸入電阻，都具有將電壓轉變為電流的特性。
2. 由反相輸入端的匯流作用，而產生電流的總和（反相輸入端亦稱為總和點 [Summing point] 就是這個道理）。
3. 回授電阻具有將電流轉變為電壓的功能。

信號的反相，在實際上是很方便的固有特性，但並不常用。

運算電路的行為，前曾述及，並不以放大器為明顯的參考。由於虛地的建立，由於其對負荷的推動，而產生有用的輸出，放大器本身性能反而處於

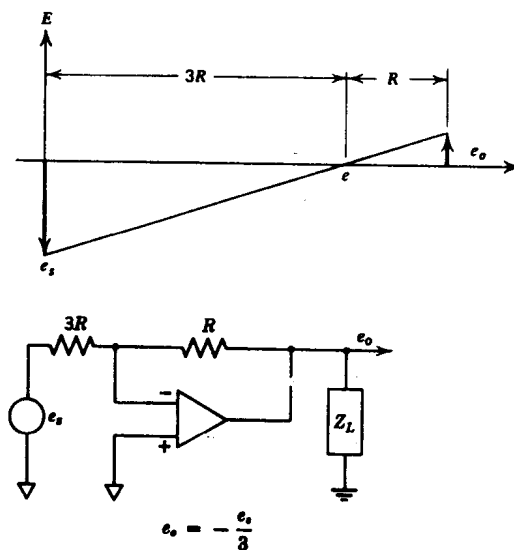


圖 2-2 3:1 精確的衰減反相器