第二十五篇
電 子 計 算 機

第一部分　類比計算機

目　　錄

頁

第 一 章 緒　　論

1•1 類比裝置之歷史……………………………………25— 1
1•2 類比計算機與數位計算機之比較……………………25— 2
1•3 類比計算機如何代表數學關係………………………25— 2
1•4 計算結果之形成……………………………………25— 5
1•5 類比計算機能解之題目類型…………………………25— 5

第 二 章 類比計算機之主要元件

2•1 基本計算元件………………………………………25— 7
2•2 運算放大器…………………………………………25— 7
2•3 電位器………………………………………………25— 12
2•4 伺服乘法器…………………………………………25— 14
2•5 伺服分解器…………………………………………25— 16
2•6 函數產生器…………………………………………25— 19
2•7 記錄器………………………………………………25— 20

第 三 章 大小與時間比例因素

3•1 爲何需要比例因素…………………………………25— 21
3•2 選擇大小比例因素之方法……………………………25— 23
3•3 選擇時間比例因素之方法……………………………25— 30

第 四 章 解微分方程式

4•1 常係數線性常微分方程式……………………………25— 32
4•2 變係數線性常微分方程式……………………………25— 45

4•3 初態條件……25— 47
4•4 非線性常微分方程式……25— 48
4•5 問題計劃步驟摘要……25— 50

第五章 模擬法

5•1 線性傳遞函數之模擬……25— 52
5•2 回授控制系統之模擬……25— 56
5•3 阻抗網路分析……25— 58
5•4 經濟系統之模擬……25— 60
5•5 磁滯與 Backlash 之模擬……25— 61

第六章 代數矩陣模型

6•1 代數方程式……25— 62
6•2 矩陣之乘法……25— 64
6•3 特性值問題……25— 65

第七章 電晶體類比計算機

7•1 電晶體與眞空管演算元件之比較……25— 67
7•2 電晶體運算放大器……25— 67

第二部分　數值計算機

第八章 數值計算機

8•1 數值計算機之基本運算原理……25— 69
8•2 數值計算機之方塊圖……25— 70
8•3 數值計算機之結構……25— 72
8•4 數值計算機之種類……25— 80

第九章 程序計劃

9•1 程序計劃基本單元……25— 82
9•2 計算機數字系統與運算……25— 84
9•3 錯誤，有效位數之損失及資料表示……25— 93

第十章　電子資料處理 (Electronic DATA Processing)

10•1 布爾代數 ……25—100
10•2 數字系統及碼 ……25—103
10•3 邏輯設計及各種線路 ……25—122
10•4 程式 ……25—137

第十一章　統計方法

11•1 統計方法引論 ……25—152
11•2 統計運用及計算 ……25—153
11•3 乘冪譜之計算 ……25—154
11•4 亂數之產生及 Monte-Carlo 方法 ……25—156

第十二章　電力系統的計算控制

12•1 簡介 ……25—160
12•2 作業的構成 ……25—160
12•3 操作控制計算機 ……25—161
12•4 操作計算機之主要部分 ……25—162
12•5 掃瞄、記載及警報 ……25—163
12•6 測量操作機構之工作狀態 ……25—163
12•7 次序的監察 ……25—163
12•8 經濟的供電 ……25—165
12•9 控制回路 ……25—166

第二十五篇
電 子 計 算 機

張　去　疑

第一部分　類比計算機

第一章　緒　　論

1·1　類比裝置之歷史

類比之英文 analog 一字乃從希臘文 analogous 演變而來，其意義爲「依照適當的比或比例」。因此，類比計算器顧名思義乃爲一種計算裝置，其中問題的變數是以物理數，如長度、壓力、電壓表示的。最早之類比計算也許是測量問題（3800 B.C.)之圖解法，土地邊界之大小乃按照適當比例縮小於紙上，在紙上計算所得之面積即可推知土地之實際面積。眞正的類比計算器之濫觴應溯自公元 1600 年左右所發明的計算尺。這種計算尺，我們都知道它有一固定尺與一滑動尺，其上皆刻有對數之比例尺。當兩數相乘時，只要求兩數之對數和然後再取其反對數即可。因此乘法在計算尺中可簡化爲加法，同理，除法可簡化成減法。加減法的運算要比乘除法簡單得多。除計算尺以外，諸如 1814 年 J. H. Herman 所發明的測面器（planimeter）、1882 年 C.V. Boys 所發明的積分器（integraph）、1927 年 Vannevar Bush 在 MIT 所發明的微分分析器（differential analyser）等等，皆可稱爲類比計算器。吾人現在所討論的類比計算機乃指以直流運算放大器（D—C operational amplifier）爲其主要元件的電子微分分析機而言，簡稱電子類比計算機或類比計算機（analog computer）。第二次世界大戰期間，英國與美國相繼研究發展這種類比計算機，其中功臣首推貝爾公司的 C. A. Lovell 及 D. B. Parkinson 兩人，其後於 1947 年 Ragazzini、Randall 與 Russell 三人首次發表論文（proc. IRE may 1947, PP 444～452），論述如何應用運算放大器於計算機中，1949 年以後，類似的類比計算機相繼問世。儘管新機器層出不窮，然而基本理論仍然未變，若有所不同，不外增進機器之精確度與使機器的操作簡單化而已。現在的計算機，已由 20 個放

大器增加爲 500 個，甚至 1000 個放大器，由於數位計算機 (digital computer) 的廣泛應用，現在的類比計算機和數位計算機已可以携手合作而變成一家人了，我們稱之爲類比數位複合計算機 (hybrid analog-digital computer)，兼取兩種計算機之優點——精確度高，速度快，規劃容易。

1·2　類比計算機與數位計算機之比較

許多人知道電子計算機有兩種，其一爲類比計算機，另一爲數位計算機。這兩種計算機都普遍應用於科學上的研究、資料處理、控制系統等方面。然而它們的操作方法却完全迥異，因此難免有人會問那一種計算機較適合於解決工程上之問題。問題的答案是：兩種計算機都需要。在理論上兩者皆能解任何數學題目，但也都有其應用上的極限。每一種計算機都有其獨特的優點，非另外一種計算機所能望其項背的。因爲數位計算機所計算者乃一大堆不連續的數列的運算，其答案型式爲不連續之數值，但類比計算機之答案則爲連續量，如果要做連續資料的積分，例如加速表 (accelerometer) 輸出曲線之積分，則以用類比計算機較方便。數位計算機要比類比計算機精確。如果輸入資料精確，輸出資料也要求精確的話，則以用數位計算機較佳。解聯立的微分方程式，用類比計算機較快，因規劃較簡單，計算時間也較短。微分方程式則更適合於用類比計算機來解，因爲它本身就是積分器。有時如果兩種計算合併起來用，可收截長補短之效，譬如一個題目需要很精確的答案，然而題目中之變數之範圍却無從知道時，可先用類比計算機，以嘗試及誤差法，很快的求出答案之近似値，然後再利用數位計算機求其較精確之答案，這樣即可節省寫程式計劃及計算所浪費的時間。

1·3　類比計算機如何代表數學關係

類比計算機所計算的問題，可能是些變數 $x_1, x_2, \cdots\cdots, x_n$ 之間的關係，也可能是計算這些變數對時間 t 之變化情形。在類比計算機中，變數 $x_1, x_2, \cdots\cdots, x_n$ 可用相對應的電壓來表示，或用機器之變數 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 來表示，通常 x_n 與 X_n 之間都要有一適當的比例，也就是說，問題中之變數要與機器中之變數有個類比，因此，原來問題中諸變數間之關係，乃類比於機器中諸變數之關係。爲明瞭起見，先看底下數列：

例 1：兩個機器變數之關係如下：

$$\begin{cases} x_0 = x_1 + 5x_1^2 \\ x_0 = \sin x_1 \end{cases}$$

上式中 x_0 與 x_1 皆表電壓，x_0 爲 x_1 之函數，若 x_1 有所改變，則 x_0 必定依上式之關係而變。下面方塊圖即可表示類比計算機如何用來代表這個數學關係：

圖 25•1•1

圖 25•1•1 中 x_1 代表輸入電壓，x_o 爲輸出電壓，如果選用適當的計算元件，則 x_o 即爲吾人所需 x_1 之函數，要特別注意的是：上圖中之方塊，通常都是「單行道」，x_1 進，x_0 出，若反其道而行，x_0 進，x_1 出之關係不一定成立。

例 2：通常 x_o 可能爲數個機器變數之函數，例如：

$$\begin{cases} x_0 = x_1 + 9x_2 + \cos x_3 \\ x_0 = x_1 x_2^2 \end{cases}$$

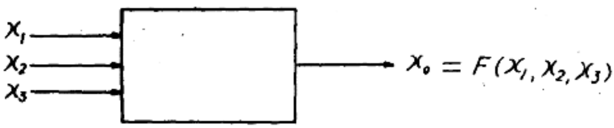

圖 25•1•2

圖 25•1•2 表示 x_1、x_2、x_3 三個輸入電壓混合起來產出加電壓。

例 3：在許多題目中，常需要知道機器變數對時間 t 之變化情形，例如：

$$x_1 \doteq x_2 \quad , \quad x_2 = \sin t$$

上式表示機器變數 x_1 與 x_2 皆隨時間 t 而變。此時時間 t 當做對機器之輸入電壓，當然機器要有一個元件，產生之電壓爲時間之函數，例如包含有電容器之電路，於是機器變數卽可按照所需的關係隨時間而變。

例 4：物理量對時間之變化率，如 $\frac{dx}{dt}$ dx 表示機器變數之變量——類比於物理變量。時間 t 之變量由時鐘決定之。爲實用方便計，吾人定義 $\frac{d}{dt} = P$，於是 $\frac{dx}{dt} = Px$，Px 本身可能是時間之函數，可隨 t 而變，於是吾人可定義 $\frac{d_2x}{dt^2} = P^2x$，稱爲 x 對時間 t 之二次微分，高次微分可依此類推。

若計算元件之輸出電壓 x_o 跟輸入電壓之時間微分成比例，則稱此計算元件爲微分器，但積分器之輸出電壓 x_o 則跟輸入電壓之時間積分成比例，如下圖所示：

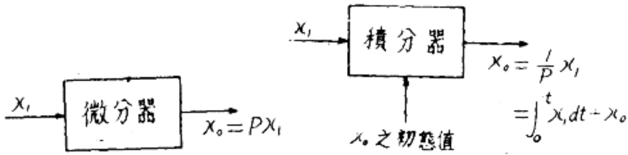

圖 25•1•3

例 5：解常微分方程式

方程式中之變數（未知數），若爲另一變數及其微分之函數，則稱爲常微分方程式。

類比計算機解微分方程式最爲拿手，例如微分方程式 PX＝Y，PY＝－X 之解爲 X＝C sin（t＋φ），Y＝C cos（t＋φ），此處 C 與 φ 皆表任意常數。下圖表示如何用類比計算機來代表這種數學關係：

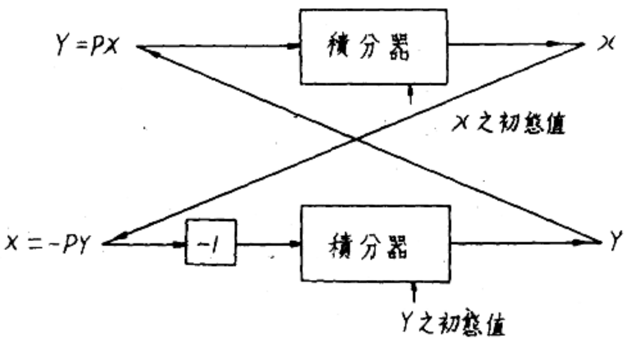

圖 25•1•4

因 X、Y 爲機器變數，所有機器變數之微分也以電壓來表示，所以也是機器變數。這些電壓 PX＝Y 與 PY＝－X 在上圖中之處理，好像把它們當做已知，輸入積分器而產生機器變數 X 與 Y，由於回授（feedback）線路使機器變數（machine variable）X、Y、PX 與 PY 之變化滿足所需之數學關係。

由上例題知道，類比計算機至少應該有以下各種計算元件：

(1) 將機器變數乘以一常係數之裝置。

(2) 將數個機器變數加起來之裝置。

(3) 產生兩機器變數乘積之裝置。

(4) 產生機器變數之各種函數之裝置。

(5) 產生機器變數之時間積分之裝置。

這些裝置，將於下一章詳述之。

1•4　計算結果之形式

類比計算機的答案爲時間變數之連續函數，可以觀察，亦可記錄。函數值通常爲電壓、電流或轉軸之角度，這些值都是連續時間之函數值，需要記錄下來才有用，如果題目是靜態的，即題目之答案只有一固定值，不會變動，則這個值可以用電壓表量出來（指針電壓表或數位電壓表皆可），如果題目之答案爲時間變數之連續函數，則應以時間爲變數，記錄其函數值，常用者爲記錄器（recorder，第二章詳述之），其記錄形式如下圖，圖中橫坐標爲時間 t ，亦可爲另一變數 x：

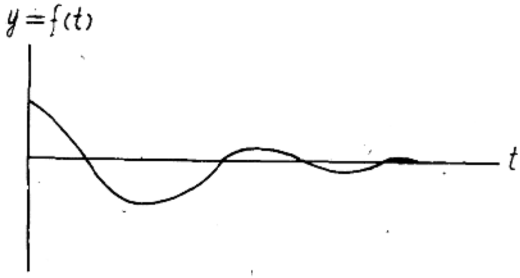

圖 25•1•5

這種記錄器通常稱爲 X－Y 記錄器。

示波器可以用來觀測答案之部分結果（受螢面及掃描時間之限制），如果要永久記錄，則需用照相機照相。

1•5　類比計算機能解之題目類型

就類比計算機之應用範圍，題目類型可分兩大類：

A. 數學模型，B. 模擬 (simulation) 。茲分別述之於下：

A. 數學模型：

(1) 常係數或變係數之線性常微分方程式：常係數性線常微分方程式之解法較簡單，變係數線性微分方程式較難，通常還需要有產生變係數之裝置。

(2) 非線性常微分方程式：類比計算機還不能解所有之非線性常微分方程式。但特屬之非線性常微分方程式，大多可解，其解法跟線性者大致相彷，不過還需要有非線性之產生器、分解器、乘法器等裝置。

(3) 偏微分方程式：這類題目可用有限差分方法 (finite-difference)解之。

(4) 矩陣與數學規劃問題：這類題目之解法，用類比計算機要比數位計算機好得多，因其求解簡單快速。

(5) 求定積分：類比計算機最拿手的就是求時間函數之積分。

(6) 積分方程式：這類題目較難解，但是在許多情況之下，類比計算機還是比數位計算機好用。

B. 模擬：類比計算機最大之用途，也許是用在模擬這方面，亦即利用類比計算機來模擬，物理模型（第五章詳述之）模擬在研究上佔著很重要的地位，尤其某些系統既繁雜又是非線性，要以數學來描述這個系統實非易事，但類比計算機可以用來模擬這個系統，進而預測系統之可能行爲。最常見之模擬對象有：

(1) 火爐控制系統。

(2) 飛機飛彈之導航系統。

(3) 操作控制系統 (process control)。

(4) 飛機控制系統之設計。

(5) 微波管之設計。

(6) 非線性回授控制系統。

第二章　類比計算機之主要元件

2·1　基本計算元件

嚴格說，類比計算機並不能計算，因爲它沒有人類之思維能力，它祗是一堆物理系統之簡單之電子模型而已。不過，這些模型如果給予適當的控制，則能夠產生吾人所需之物理量，吾人所要之計算元件要能夠完成加法、乘法、積分及產生任意函數，如 1·3 節所述。主要計算元件並不多，不外是運算放大器、電位器及 RC 網路而已，茲分別述於下。

2·2　運算放大器（operational amplifier）

運算放大器是類比計算機最主要之元件，它有兩大功能：①用作「加的方式」，即將輸入電壓變符號，將數個輸入電壓加起來並變其符號，以及將輸入電壓乘以一常數並變其符號。②用作「積分的方式」，即將一個電壓或數個電壓之和對時間來積分。因此類比計算機中之運算放大器不一定祗當做積分器，它還可以用來當做變號器、加法器、高增益放大器。茲分別詳述其各項功能於下：

(1) 符號與乘一常數：先看圖 25•2•1，以便瞭解運算放大器之原理。

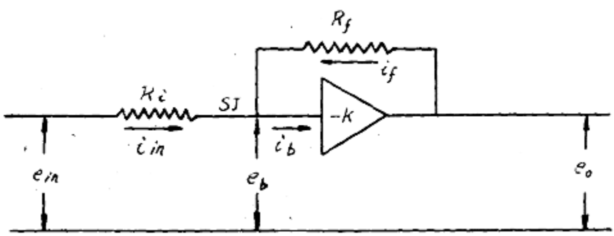

圖 25•2•1

圖中輸入 e_{in}，接合點 e_b，輸出電壓 e_0，皆對參考面而言（通常參考面爲地面），爲了簡單明瞭起見，以後的線路，參考面都以對地而言，不再把它標出來，圖中三角形代表高增益直接耦合放大器，其增益爲 $-K$，以後的線路，圖中也將省略，不把 $-K$ 標出來。

高增益直接耦合放大器（圖中之三角形），有一個回授電阻 R_f，與一個輸入電阻 R_i，此放大器之設計，應滿足以下三條件：

a. 在計算機之電壓範圍內，放大器之輸出電壓 e_0，接合點電壓 e_b 及放大器之增益 K 三者有如下之關係

$$e_0=-Ke_b$$

b. 放大器之電流 $i_b \cong 10^{-8}$ 安培幾乎可以忽略。

c. 放大器之開路增益非常高（$K>1000$），通常在 D—C 要高至 10^8。

利用克希荷夫（Kirchhoff）電流定律，以 ST 爲電流之匯合點，得電流方程式

$$i_b=i_{in}+i_f$$

或由歐姆定律，上式可改爲

$$i_b=\frac{e_{in}-e_b}{R_i}+\frac{e_0-e_b}{R_f}$$

因 $i_b\cong 0$ 可以忽略，e_b 以 $e_0/-K$ 代之得

$$\frac{e_{in}}{R_i}+\frac{e_0}{KR_i}=-\frac{e_0}{KR_f}-\frac{e_0}{R_f}$$

或

$$e_0=\frac{-\dfrac{R_f}{R_i}e_{in}}{1+\dfrac{1}{K}\left(\dfrac{R_f}{R_i}+1\right)}$$

因 R_f 與 R_i 之比通常皆小於 30，且 K 比 1 大得多，故上式可再化簡爲：

$$e_0=-\frac{R_f}{R_i}e_{in}$$

由上式吾人可以看出運算放大器之一重要特性：回授阻抗與輸入阻抗之比，唯一決定了輸入與輸出電壓之關係。利用這個重要公式，運算放大器之各種功能將可做進一步探討。

當兩個電阻相等，即 $R_f=R_i=R$ 時，放大器之輸出電壓與輸入電壓相等，且反符號。於是完成了變符號之數學運算，即

$$e_0=-\frac{R_f}{R_i}e_{in}=\frac{-R}{R}e_{in}=-e_{in}$$

若兩個電阻不相等，結果是把輸入電壓乘一常數。

例如：若 R_f 爲 1 M，R_i 爲 100 K，則

$$e_0=-\frac{R_f}{R_i}e_{in}=-\frac{1\,M}{0.1\,M}e_{in}=-10\,e_{in}$$

若 R_f 與 R_i 之電阻値互換，即 R_f 爲 100 K，R_i 爲 1 M，則

$$e_0=-\frac{0.1\,M}{1\,M}e_{in}=-\frac{1}{10}e_{in}$$

(2) 加法：如果輸入電阻有兩個以上並聯，亦即有兩個以上之輸入時，其線路圖如下：

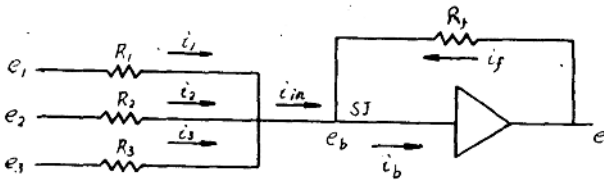

圖 25•2•2

以 ST 爲電流之匯合點，得電流方程式：

$$i_1+i_2+i_3+i_f-i_b=0$$

利用歐姆定律，上式可改寫爲：

$$\frac{e_1-e_b}{R_1}+\frac{e_2-e_b}{R_2}+\frac{e_3-e_b}{R_3}+\frac{e_0-e_b}{R_f}=0$$

因 e_b 與 $i_b \cong 0$ 可忽略，上式再化簡爲

$$e_0=-\left[\frac{R_f}{R_1}e_1+\frac{R_f}{R_2}e_2+\frac{R_f}{R_3}e_3\right]$$

若輸入電阻有 N 個，則上式之普遍式爲

$$e_0=-\left[\frac{R_f}{R_1}e_1+\frac{R_f}{R_2}e_2+\cdots+\frac{R_f}{R_n}e_n\right]$$

由此可知上式完成了加法之數學運算。

(3) 積分：圖 25•2•2 中之回授電阻 R_f，若改爲電容 C，即可將輸入電壓對時間積分，其線路圖如下：

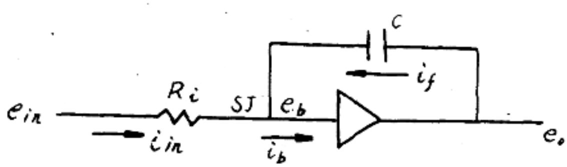

圖 25•2•3

依照電容之定義 $C=\frac{Q}{V}$，V爲電容器兩端之電壓，Q 爲電容器一端之電荷，但電荷與電流之關係，若以積分形式表示，應爲 $Q=\int_0^t i\,dt$。

4 15/5 B37

所以若電容器上沒有初態電荷，則電容器電壓、電荷三者之關係爲：

$$e=\frac{1}{C}\int_0^t i\ dt$$

於是回授電容器兩端之電壓降 e_0-e_b 可以表示爲：

$$e_0-e_b=\frac{1}{C}\int_0^t i_f\ dt$$

上式若對時間微分，可得方程式

$$i_f=C\frac{d}{dt}\ (e_0-e_b)$$

上式爲一微分方程式，其解爲

$$e_0=-\frac{1}{R_1C}\int_0^t e_{in}\ dt$$

由上式可知，吾人可將輸入電壓對時間而積分。因此我們得到了一個做積分運算的簡單裝置，這是類比計算機最拿手之運作。

若有 N 個輸入，則上式之普遍式爲；

$$e_0=-\int_0^t\left[\frac{e_1}{R_1C}+\frac{e_2}{R_2C}+\cdots+\frac{e_n}{R_nC}\right]dt$$

上式表示輸入電壓代數和之積分，等於輸出電壓且反符號。

(4) 放大器之普遍公式：有了以上之概念，吾人將於本節再做一較普遍化之解說，普遍化之線路圖如下：

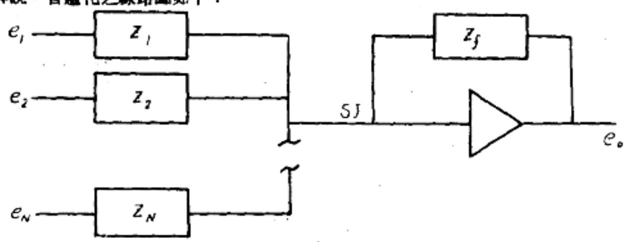

圖 25•2•4

圖中 $Z_1, Z_2, \cdots, Z_n$ 爲輸入電阻抗，Z_f 爲回授阻抗。輸入與輸出電壓之關係爲：

$$e_0=-\sum_{n=1}^{n=N}\frac{Z_f}{Z_n}e_n=-\left[\frac{Z_f}{Z_1}e_1+\frac{Z_f}{Z_2}e_2+\cdots+\frac{Z_f}{Z_n}e_n\right]$$

電阻器之阻抗等於其電阻之歐姆數，$Z_R=R$ 電容器之阻抗爲時間之函數，吾人

已知電容器兩端之電壓為 $E=\frac{1}{C}\int_0^t i\,dt$，於 1•3 節，吾人定義

$$P\equiv\frac{d}{dt} \quad 及 \quad \frac{1}{P}\equiv\int_0^t dt$$

故上式可簡寫成

$$E=\frac{i}{PC}$$

因阻抗之定義為電壓降與電流之比，故電容器之阻抗為

$$Z_c=\frac{1}{PC}$$

簡而言之，若 Z 為電阻，則以 R 代之；若 Z 為電容，則以 $\frac{1}{PC}$ 代之。

(5)規劃符號 (programming symbols)：高增益直接耦合放大器之符號為：

圖 25•2•5

變號器如圖 25•2•6：

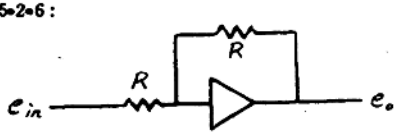

圖 25•2•6

其增益等於 1，因輸入與回授電阻相等，其符號為：

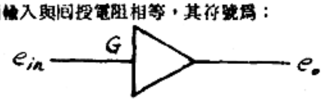

圖 25•2•7

圖中 $G=\frac{R_f}{R_i}$。

若有數個輸入，其符號為（加法器）：

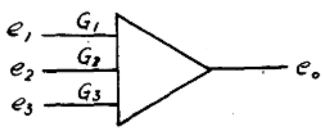

圖 25•2•8

圖中 $G=\frac{R_f}{R_1}$，$G_2=\frac{R_f}{R_2}$，$G_3=\frac{R_f}{R_3}$　。

積分器之符號爲：

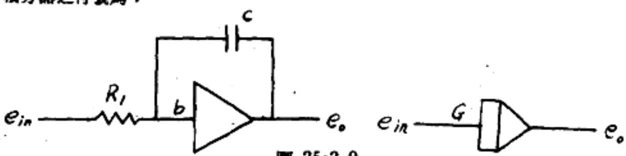

圖 25•2•9

積分器與加法器符號不同之處，爲積分器在三角形之一邊加一小長方形以示區別。

若積分器有數個輸入，則符號爲

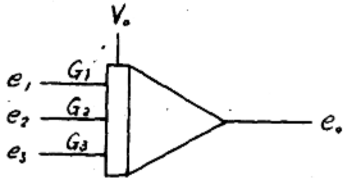

圖 25•2•10

圖中 $G_1=\frac{1}{R_1C}$，$G_2=\frac{1}{R_2C}$，$G_3=\frac{1}{R_3C}$。V_0 爲 e_0 之初態値，即放大器開始運作時已有之電壓（將於 4•2 節詳述之）。

有些類比計算機之面盤上，並不標明輸入電阻之大小，而祇標明其增益因素，如：

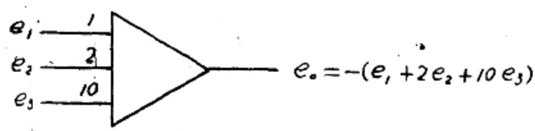

图 25•2•11

2•3 電 位 器

上節已經說過如何利用運算放大器，把輸入電壓乘一常數，如果這個常數小於 1，通常可利用一較簡便的裝置，稱爲電位器，來完成這個任務；因爲利用運

算放大器，將輸入電壓乘以小於 1 之常數，未免小題大作，倒不如用電位器來得經濟方便。

電位器通常是個圓筒形之電阻，中心有一個轉動軸，接一橫桿在電阻上滑動，電阻之大小約在 10 K 至 300 K 之間（若爲電晶體線路，則在 2 K 至 30 K 之間），當電阻兩端加上電壓時，橫桿之一端即可引出一電壓，如圖 25•2•12 所示：

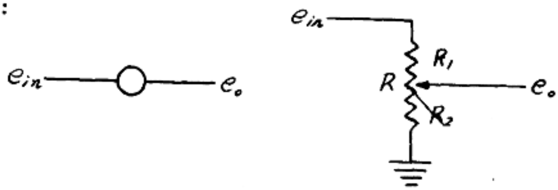

圖 25•2•12

$$e_0=\frac{R_2}{R}e_{in} \text{ 或 } e_0=ae_{in}\text{，}\quad a=\frac{R_2}{R}\text{，}\quad R=R_1+R_2$$

其中　　$0\leq a\leq 1$

上式即表將輸入電壓乘　小於 1 之常數。

若電位器之輸出端有負載電阻，如圖 25•2•13：

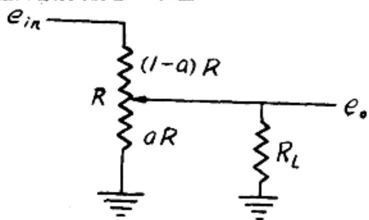

圖 25•2•13

則 $e_0=ae_{in}$ 之關係不再成立。由上圖可得電流方程式：

$$\frac{e_0-e_{in}}{(1-a)R}+\frac{e_0}{aR}+\frac{e_0}{R_L}=0$$

解上式得

$$\frac{e_0}{e_{in}}=\frac{a}{1+a(1-a)R/R_L}$$

由上式知，若欲得原來 $e_0=ae_{in}$ 之關係，則 R/R_L 應使之愈小愈好，不過仍然有誤差存在。

2•4 伺服乘法器

上兩節所提到的是將輸入電壓乘以一常數之方法。若兩輸入電壓要相乘，則需要有另一元件，稱爲乘法器者，先看圖 25•2•14：

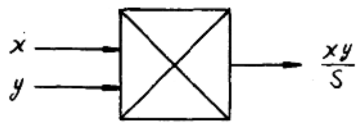

圖 25•2•14

這個「黑箱」代表乘法器，x 、y 爲其兩個輸入電壓，其輸出爲 x 與 y 之乘積除以一個大小比例因素 S（第三章詳述之）。若計算機之運作電壓範圍爲 ±10 伏特，x 與 y 各爲 10 伏特，則 x、y 之乘積爲 100 伏特，因此吾人將取比例因素 $\frac{1}{S}=0.10$，使得輸出電壓不致於超過 10 伏特。通常眞空管類比計算機之運作電壓範圍爲 ±100 伏特，電晶體類比計算機爲 ±10 伏特或 ±15 伏特。

圖 25•2•14 中，若 x=y，則乘法器可做一數之平方，如圖 25•2•15。

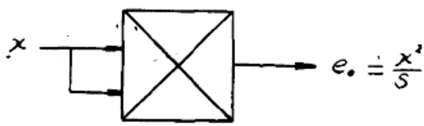

圖 25•2•15

若將乘法器接在高增益放大器之回授電路上，則乘法之反運算，卽除法，亦不難完成，如圖 25•2•16：

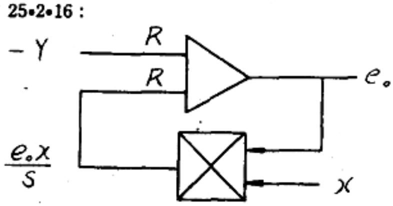

圖 25•2•16

因放大器柵極之電流很小，所以流經兩相同電阻 R 之電流和爲零。