

數位與類比電路

編著者：張 煌 江德曜 許振發

中國電機工程學會編印

數位與類比電路

目 錄

第一章 數位基本電路

1-1	基本邏輯上布耳代數與交換電路之關係	1
1-2	及 閘	9
1-3	或 閘	14
1-4	反 閘	19
1-5	反及閘與反或閘	22
1-6	互斥 - 或閘與符合閘	27
1-7	DTL 電路	32
1-8	TTL 電路	36
1-9	RTL 電路與DCTL 電路	46
1-10	ECL 電路	50
1-11	I ² L 電路	52

第二章 組合電路

2-1	設計步驟	55
2-2	二進加法器	56
2-3	二進減法器	64
2-4	二進比較器	72
2-5	同位核對器 / 產生器	77
2-6	換碼器	81
2-7	解碼器	101
2-8	編碼器	105
2-9	多工器	110
2-10	解多工器	116

2 數位與類比電路

2-11 2 補數器	117
2-12 分析步驟	121

第三章 順序電路

3-1 順序電路基本觀念	125
3-2 SR 正反器	127
3-3 JK 正反器	134
3-4 T 正反器與 D 正反器	138
3-5 移錄器	141
3-6 計數器	146
3-7 N 進計數器	156
3-8 BCD 計數器	161
3-9 鐘控順序電路設計	170

第四章 積體電路——製作與特性

4-1 積體電路的製作	176
4-2 壘晶的生長	180
4-3 罩幕及蝕刻	181
4-4 雜質的擴散	182
4-5 單晶電晶體的製作	186
4-6 單晶二極體	192
4-7 積體型電阻器	194
4-8 積體電容器與電感器	196
4-9 單晶電路的佈線安排	198
4-10 場效電晶體積體電路	201
4-11 額外的絕緣隔離方式	204

第五章 大型積體電路

5-1 動態 MOS 位移暫存器	207
5-2 無比型位移暫存器	211

5-3	MOS 僅讀記憶器	215
5-4	可抹除可規畫僅讀記憶器	218
5-5	可規畫邏輯陣列	223
5-6	隨機接達記憶器	225
5-7	讀寫記憶單元	232
5-8	電荷耦合裝置 (CCD)	239
5-9	CCD 結構	244
5-10	CCD 記憶組織	251
5-11	微處理器及微算機	255
5-12	積體注入邏輯	259
5-13	注射邏輯電路	264

第六章 運算放大器特性

6-1	基本運算放大器	270
6-2	訊差放大器	273
6-3	差額放大器的轉移特性	279
6-4	運算放大器的設計	280
6-5	補償誤差的電壓與電流	292
6-6	運算放大器各參數的度量	296
6-7	運算放大器的頻率響應	301
6-8	主極點補償	304
6-9	極點與零點補償	305
6-10	領先補償	311

第七章 運算放大器系統

7-1	基本運算放大器的應用	313
7-2	訊差放大器的應用	318
7-3	交流耦合的放大器	321
7-4	類比微分和積分	323
7-5	有功濾波器	329

4 數位與類比

7-6 有功的諧振帶通濾波器	335
7-7 精密交流 / 直流變換器	340
7-8 取樣並保持的電路	345
7-9 類比式多工器與解多工器	348
7-10 對數與指數放大器	350
7-11 數位類比變換器	357
7-12 類比數位變換器	363

第八章 磁放大器系統

8-1 緒論	371
8-2 磁電抗器理論	372
8-3 磁放大器鐵心材料	377
8-4 飽和電抗器	391
8-5 電抗 - 整流放大器	402
8-6 磁勢控制	411
8-7 重定控制	416
8-8 非可逆輸出電路	422
8-9 可逆輸出電路	430
8-10 混合放大器	436
8-11 單一電抗器 - 可逆輸出放大器	442

索引	448
----	-----

第一章 數位基本電路

1.1 基本邏輯上布耳代數與交換電路之關係

英國數學家布耳 (George Boole) 在 1854 年發表一篇有關邏輯的系統處理 (systematic treatment of logic) 論文。其後向農 (Claude E. Shannon) 根據布耳的觀念，在 1938 年發展一種雙值的交換代數 (switching algebra)，現稱為布耳代數 (Boolean algebra)。

布耳代數與傳統代數 (Conventional algebra) 不同，它所有的變數只有二種數值，通常稱它們為真 (true) 與偽 (false) 其它名稱諸如是與否，有與無，開與關，高與低，正與負等亦均可以。布耳變數沒有量方面的數值，通常以 1 與 0 兩個符號，分別代表真與偽。有時它們可與某一事件的情況發生聯貫。例如，變數 A 代表一個開關，當 $A = 1$ 時，指開關被接通；而 $A = 0$ 時，指開關不接通。或則設變數 B 代表某一信號電壓，有該信號電壓存在時以 $B = 1$ 代表，而無信號電壓的情況則以 $B = 0$ 代表。

布耳變數雖然沒有量方面的數值，但它可代表與量有關的資料。例如，一個 4 數元的二進位數，就可以用四個變數代表，當變數是真時代表 1 值，當它是偽時代表 0 值。如此，此真與偽就有 16 種組合，即可代表 16 個不同的二進位數。此說明布耳代數能與二進位數字系統相配合。

布耳代數用來表達邏輯中的一些問題。在設計交換電路 (switching circuits) 中，它可將許多設計過程簡化，將繁複的邏輯關係，設計出簡單而有效的實用電路，對於數位電子計算機的發展，功效極大。

在邏輯問題中，有一組完全的基本操作式，用以構成布耳代數，並決定其所有的關係，它為：

2 數位與類比電路

$$\begin{aligned}\text{若 } x \neq 0 \quad \text{則 } x &= 1 \\ \text{若 } x \neq 1 \quad \text{則 } x &= 0\end{aligned}\tag{1-1}$$

這情形應用於交換電路，可用交換電路中一個最簡單的普通開關元件來說明，如圖 1-1 所示，一個開關只有二種動作狀態，不是開就是通，或者不是通就是開。我們將開關的開斷代表 0 與接通代表 1，就是同公式 (1-1) 一樣。

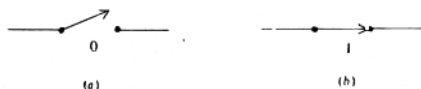


圖 1-1 一個開關的二種動作狀態，
(a)開關開斷代表 0，(b)開關接通代表 1

在布耳代數中又有十個基本公理，它們為

邏輯加法

$$0 + 0 = 0, 0 + 1 = 1, 1 + 0 = 1, 1 + 1 = 1 \tag{1-2a}$$

邏輯乘法

$$0 \cdot 0 = 0, 0 \cdot 1 = 0, 1 \cdot 0 = 0, 1 \cdot 1 = 1 \tag{1-2b}$$

$$\text{補數定則} \quad 0' = 1, 1' = 0 \tag{1-2c}$$

如以交換電路表示，邏輯加法公式 (1-2a) 相當於圖 1-2 所示的並聯開關電路，邏輯乘法公式 (1-2b) 相當於圖 1-3 所示的串聯開關電路。

補數定則可用一個單極雙擲開關表示，如圖 1-4 (a) 所示中，下面的開關不通，即為 0，上面的開關接通，就是 1。反之，在圖 1-4 (b) 所示中，下面的開關接通，而為 1，上面的開關不通，變成 0。單極雙擲開關的二個開關可以互為 1 的補數，此處我們採用補數的符號為字右上角上一撇。所以，圖 1-4 (a) 中的 1 為 0 的補數，即 $1 = 0'$ ，圖 1-4 (b) 中的 0 為 1 的補數，即 $0 = 1'$ 。這情形符合補數定則公式 (1-2c)。

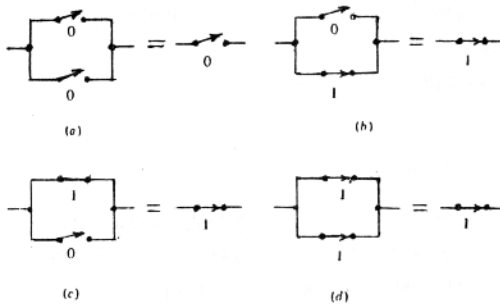


圖 1-2 邏輯加法以並聯開關表示，(a) $0 + 0 = 0$ ，
(b) $0 + 1 = 1$ ，(c) $1 + 0 = 1$ ，(d) $1 + 1 = 1$

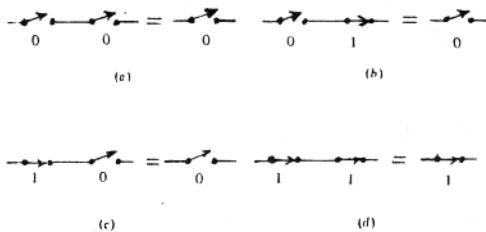


圖 1-3 邏輯乘法以串聯開關表示，(a) $0 \cdot 0 = 0$ ，
(b) $0 \cdot 1 = 0$ ，(c) $1 \cdot 0 = 0$ ，(d) $1 \cdot 1 = 1$



圖 1-4 補數定則用一個單極雙擲開關表示，(a) $0' = 1$
(b) $1' = 0$

4 數位與類比電路

布耳代數的基本定理計分下列九類。其中所用大寫英文字母代表布耳變數，實際上，任何符號都可使用。現將它們的分類及對應的交換電路分述如下

[1] 同體性律 (idempotent law)

$$A + A = A \quad (1-3a)$$

$$A \cdot A = A \quad (1-3b)$$

圖 1-5 (a)與(b)所示分別為同體性定理公式 (1-3a) 與 (1-3b) 的對應交換電路，前者邏輯加法，後者為邏輯乘法。因為二個都是 A 的開關工作時，一定是同時接通，或者同時不接通，所以，它們與一個開關 A 工作者一樣。

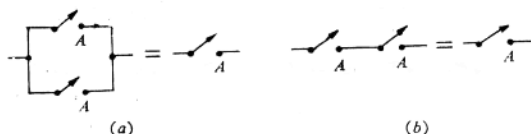


圖 1-5 同體性定理的對應交換電路，(a) 公式 (1-3a)，
(b) 公式 (1-3b)

[2] 互換性律 (commutative law)

$$A + B = B + A \quad (1-4a)$$

$$A \cdot B = B \cdot A \quad (1-4b)$$

圖 1-6 (a)與(b)所示分別為互換性定理公式 (1-4a) 與 (1-4b) 的對應交換電路。因為開關的位置對於电路的工作結果無關，所以圖示中的電路相等效。

[3] 結合性律 (associative law)

$$A + (B + C) = (A + B) + C \quad (1-5a)$$

$$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C \quad (1-5b)$$

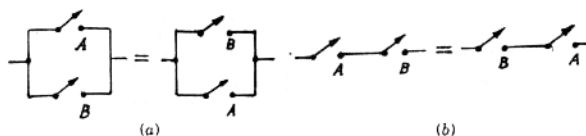


圖 1-6 互換性定理的對應交換電路，(a)公式 (1-4a)，
(b)公式 (1-4b)

圖 1-7 (a)與(b)所示分別為結合性定理公式 (1-5a) 與 (1-5b) 的對應交換電路。圖示中，顯然可見，開關結合的先後次序，對於電路的工作不受影響。

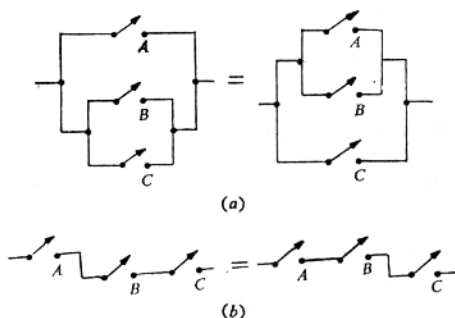


圖 1-7 結合性定理的對應交換電路，(a)公式 (1-5a)，
(b)公式 (1-5b)

[4] 分配性律 (distributive law)

$$A \cdot (B + C) = (A \cdot B) + (A \cdot C) \quad (1-6a)$$

$$A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C) \quad (1-6b)$$

圖 1-8 (a)與(b)所示分別為分配性定理公式 (1-6a) 與 (1-6b) 的對應交換電路。在電路中二開關 A 各有一端共同連接，其接通與不通的工

6 數位與類比電路

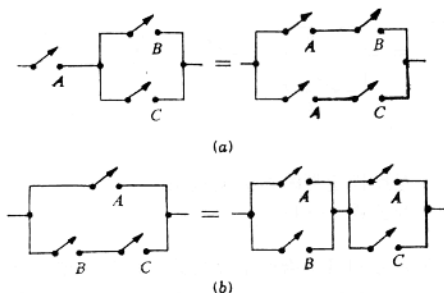


圖 1-8 分配性定理的對應交換電路，(a)公式 (1-6a)，
(b)公式 (1-6b)

作一致，可作一個開關看待，對於整個電路作用沒有影響，電路因此互相等效。

[5] 同一性律 (identity law)

$$A \cdot 0 = 0 \quad (1-7a)$$

$$A + 0 = A \quad (1-7b)$$

$$A \cdot 1 = A \quad (1-7c)$$

$$A + 1 = 1 \quad (1-7d)$$

圖 1-9 (a)、(b)、(c) 與 (d) 所示分別為同一性定理公式 (1-7a) 至 (1-7d) 的對應交換電路。因為 1 代表通路，0 代表不通，顯然地，各電路互相等效。

[6] 補數性律 (complement law)

$$A + A' = 1 \quad (1-8a)$$

$$A \cdot A' = 0 \quad (1-8b)$$

圖 1-10 (a) 與 (b) 所示分別為補數性定理公式 (1-8a) 與 (1-8b) 的對應交換電路。因為 $A = 1$ ， $A' = 0$ 或 $A = 0$ ， $A' = 1$ (注意，變數 A 可

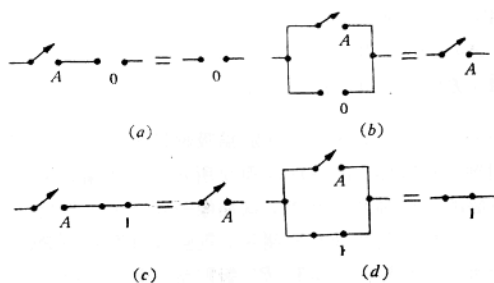


圖 1-9 同一性定理的對應交換電路，(a)公式 (1-7a)，
(b)公式 (1-7b)，(c)公式 (1-7c)，(d)公式
(1-7d)

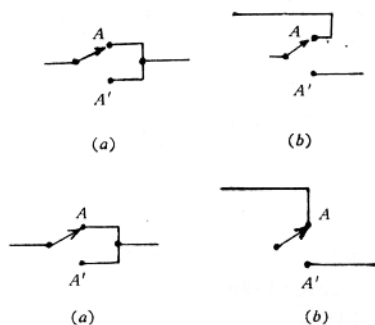


圖 1-10 補數性定理的對應交換電路，(a)公式 (1-8a)，
(b)公式 (1-8b)

以分別為 0 或為 1)，因此圖 1-10 (a) 所示開關電路永遠接通而為 1，圖 1-10 (b) 所示開關電路永遠不通而為 0。

[7] 吸收性律 (absorptive law)

$$A + A \cdot B = A$$

(1-9a)

$$A \cdot (A + B) = A \quad (1-9b)$$

$$(A + B') \cdot B = A \cdot B \quad (1-9c)$$

$$A \cdot B' + B = A + B \quad (1-9d)$$

圖 1-11 (a)、(b)、(c)、與(d)所示分別為吸收性定理公式 (1-9a) 至 (1-9d) 的對應交換電路。圖 1-11 (a) 與(b) 所示中，開關 B 的作用對整個電路言是多餘的，去掉開關 B 後，電路像一個開關 A 作用一樣。圖 1-11(c) 所示，因為有開關 B' 的關係，電路像 A 與 B 的邏輯乘法一樣。圖 1-11(d) 所示，顯然可知開關 B' 對電路不發生作用，它像 A 與 B 的邏輯加法一樣。

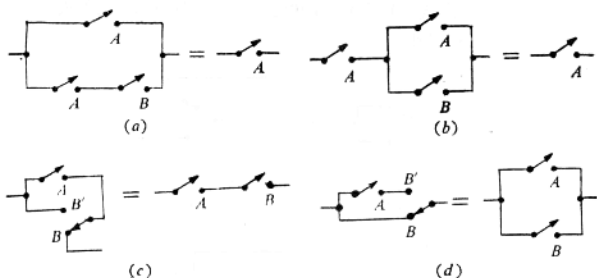


圖 1-11 吸收性定理的對應交換電路，(a) 公式 (1-9a) (b) 公式 (1-9b)，(c) 公式 (1-9c)，(d) 公式 (1-9d)

[8] 乘方性律 (involution law)

$$(A')' = A \quad (1-10)$$

圖 1-12 所示為乘方性定理公式 (1-10) 的對應交換電路。在電路中，不論 A 為 0 或 1，其開關 A 為 A' 的補數，即 $A = (A')'$ 。在圖 1-12 (a) 中，設 A 等於 1， $A = (A')' = (1')' = 0' = 1$ ，而在圖 1-12 (b) 中，設 A 等於 0， $A = (A')' = (0')' = 1' = 0$ ，均符合公式 (1-10)。

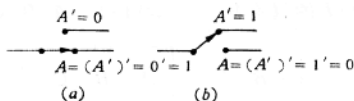


圖 1-12 乘方性定理的對應交換電路，(a)在 $A = 1$ 時，
(b)在 $A = 0$ 時

[9] 第摩根定理 (DeMorgan's theorem)

$$(A + B)' = A' \cdot B' \quad (1-11a)$$

$$(A \cdot B)' = A' + B' \quad (1-11b)$$

第摩根定理為非常有用的定理，它是一種反及開與反或開的運算，其有關的交換電路將在第 1.5 節中再述。

1.2 及 開

及開 (AND gate) 的運算有下列數種符號，設有兩個二進變數 A 與 B ，它們的及開運算為

$$A \cdot B = AB = A \cap B = A \wedge B \quad (1-12)$$

及開在形式相當於普通代數裏的乘法運算，實際上它是邏輯乘法，讀作“ A 及 B ”。如有三個二進變數 A 、 B 與 C ，則其及開的運算應寫成

$$A \cdot B \cdot C = ABC \quad (1-13)$$

而讀作“ A 及 B 及 C ”。

及開的運算定義是這樣的：當所有二進變數同時等於 1 時，它的及運算才等於 1，否則等於 0。我們知道二進位的二個變數 A 與 B 有 4 ($= 2^2$) 種不同情況的組合，二進位的三個變數 A 、 B 、與 C 有 8 ($= 2^3$) 種不同情況的組合。將所有 0 與 1 的不同組合，依二進數由

表 1-1 $A \cdot B$ 的眞值表

A	B	$A \cdot B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

表 1-2 $A \cdot B \cdot C$ 的眞值表

A	B	C	$A \cdot B \cdot C$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

小而大的順次排列，分別列出及運算的表格如表 1-1 與表 1-2。這種表格稱爲眞值表 (truth table)。

及開的運算，如將 0 與 1 代入變數，由它們的眞值表可知，其數式爲

$$\begin{array}{ll}
 0 \cdot 0 = 0 & 0 \cdot 0 \cdot 0 = 0 \\
 0 \cdot 1 = 0 & 0 \cdot 0 \cdot 1 = 0 \\
 1 \cdot 0 = 0 & 0 \cdot 1 \cdot 0 = 0 \\
 1 \cdot 1 = 1 & 0 \cdot 1 \cdot 1 = 0 \\
 & 1 \cdot 0 \cdot 0 = 0 \\
 & 1 \cdot 0 \cdot 1 = 0 \\
 & 1 \cdot 1 \cdot 0 = 0 \\
 & 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1
 \end{array} \tag{1-14}$$

其運算情況與普通算術的乘法相似。

及開的邏輯運算，用事實來引證，更易了解。現以圖 1-3 所示邏輯乘法的串聯開關 A 與 B ，再串聯一控制電燈 Y ，接成電路如圖 1-13 所示。電路中所控制的電燈發亮爲 1，熄滅爲 0。因此，圖 1-13 (a)、(b) 與 (c) 所示，開關 A 與 B 祇少有一個被打開不通爲 0，而電燈熄滅

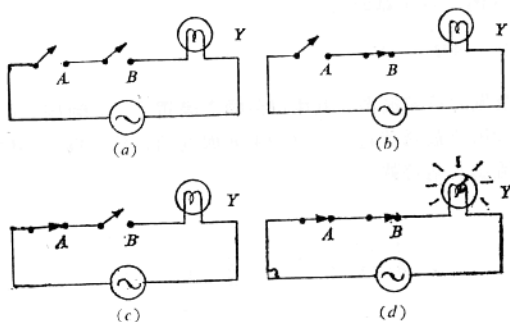


圖 1-13 及開引證，(a) $A = 0$ ， $B = 0$ ， $Y = 0$ ；
 (b) $A = 0$ ， $B = 1$ ， $Y = 0$ ；(c) $A = 1$ ， $B = 0$ ，
 $Y = 0$ ；(d) $A = 1$ ， $B = 1$ ， $Y = 1$

表 1-3 及開真值表

A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

為 0，但在圖 1-13 (d) 所示中，開關 A 與 B 同時接通為 1，致使電燈發亮為 1。將這電燈與開關的四種關係，列出真值表如表 1-3。

如將此表與表 1-1 相比較，其情況完全一樣，可知 Y 與 A、B 的關係為一個及開的運算。圖 1-13 所示電路稱為及開電路。其中 A 與 B 稱為輸入，Y 稱為輸出，其及開運算公式即

$$Y = AB \quad (1-15)$$

如果圖 1-13 所示中，開關有 A、B、……、N 個相串聯，即及

12 數位與類比電路

閘輸入有 N 個，其運算公式為

$$Y = AB \cdots N \quad (1-16)$$

代表及閘的符號很多，其中以美國電機電子工程師學會與美國標準協會所標用者最為普遍。圖 1-14 (a) 與 (b) 所示分別為二個輸入與 N 個輸入的流項及閘符號。

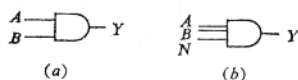


圖 1-14 (a) 二個輸入及閘符號，(b) N 個輸入及閘符號

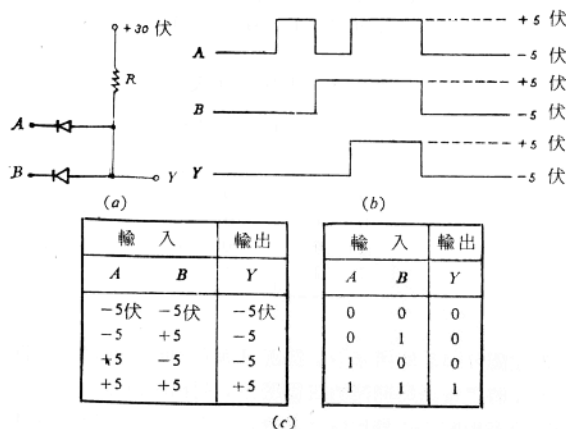


圖 1-15 (a) 及閘電路，(b) 輸入與輸出電壓波形，(c) 真值表

圖 1-15 (a) 所示為二極體及閘電路。為容易了解起見，首先將二極體在順向偏壓時視作短路，即把順向內阻 $R_f = 0$ ，及臨界電壓 $V_c = 0$ ；在逆反偏壓時視作斷路，即把逆向內阻 $R_r = \infty$ 。在此電路中，輸