數位與類比電路

編著者：張　煋　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

第二章　組合電路

第三章 順序電路

第四章 積體電路——製作與特性

第五章 大型積體電路

第六章 運算放大器特性

第七章 運算放大器系統

第八章 磁放大器系統

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)，現稱爲布耳代數(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，通常稱它們爲眞(true)與僞(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，分別代表眞與僞。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，當變數是眞時代表 1 值，當它是僞時代表 0 值。如此，此眞與僞就有 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，它爲：

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

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。

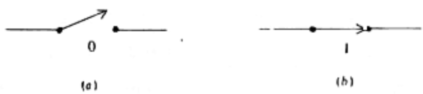


圖 1-1　一個開關的二種動作狀態，
(a)開關開斷代表 0 ，(b)開關接通代表 1

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

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

補數定則　$0'=1\ ,\ 1'=0$　(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）。

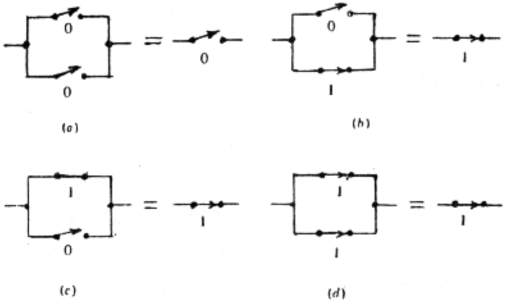


圖 1-2　邏輯加法以並聯開關表示，(a) 0 + 0 = 0 ，(b) 0 + 1 = 1 ，(c) 1 + 0 = 1 ，(d) 1 + 1 = 1

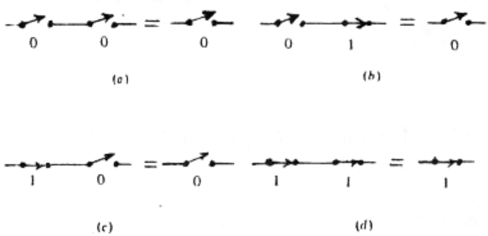


圖 1-3　邏輯乘法以串聯開關表示，(a) 0・0 = 0 ，(b) 0・1 = 0 ，(c) 1・0 = 0 ，(d) 1・1 = 1

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

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）

$$A+A=A \tag{1-3a}$$

$$A\cdot A=A \tag{1-3b}$$

圖 1-5 (a)與(b)所示分別爲同體性定理公式（1-3a）與（1-3b）的對應交換電路，前者邏輯加法，後者爲邏輯乘法。因爲二個都是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。

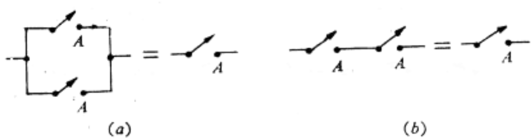


圖 1-5　同體性定理的對應交換電路，(a)公式（1-3a），(b)公式（1-3b）

[2] 互換性律（commutative law）

$$A+B=B+A \tag{1-4a}$$

$$A\cdot B=B\cdot A \tag{1-4b}$$

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

[3] 結合性律（associative law）

$$A+(B+C)=(A+B)+C \tag{1-5a}$$

$$A\cdot(B\cdot C)=(A\cdot B)\cdot C \tag{1-5b}$$

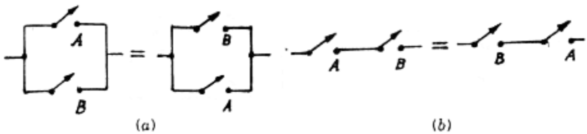


圖 1-6　互換性定理的對應交換電路，(a)公式（1-4a），(b)公式（1-4b）

圖 1-7 (a)與(b)所示分別爲結合性定理公式（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。

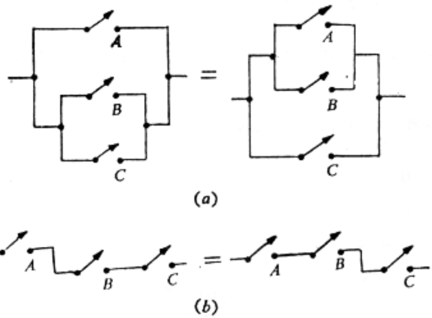


圖 1-7　結合性定理的對應交換電路，(a)公式（1-5a），(b)公式（1-5b）

［4］　分配性律（distribvtive law）

$$A\cdot(B+C)=(A\cdot B)+(A\cdot C) \qquad (1\text{-}6a)$$

$$A+(B-C)=(A+B)\cdot(A+C) \qquad (1\text{-}6b)$$

圖 1-8 (a)與(b)所示分別爲分配性定理公式（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

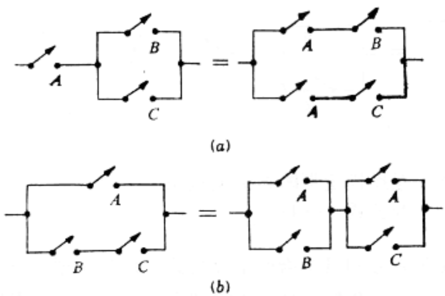


圖 1-8　分配性定理的對應交換電路，(a)公式 (1-6a), (b)公式 (1-6b)

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)

$$A \cdot 0 = 0 \tag{1-7a}$$

$$A + 0 = A \tag{1-7b}$$

$$A \cdot 1 = A \tag{1-7c}$$

$$A + 1 = 1 \tag{1-7d}$$

圖 1-9 (a)、(b)、(c) 與(d) 所示分別爲同一性定理公式 (1-7a) 至 (1-7d) 的對應交換電路。因爲 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)

$$A + A' = 1 \tag{1-8a}$$

$$A \cdot A' = 0 \tag{1-8b}$$

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

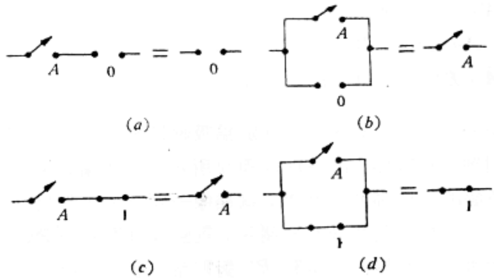


圖 1-9　同一性定理的對應交換電路，(a)公式（1-7a），(b)公式（1-7b），(c)公式（1-7c），(d)公式（1-7d）

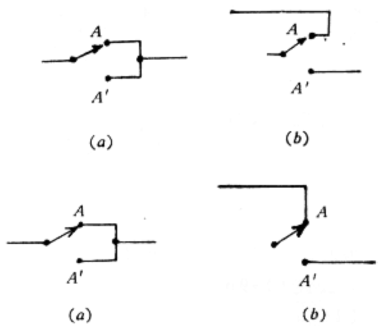


圖 1-10　補數性定理的對應交換電路，(a)公式（1-8a），(b)公式（1-8b）

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）

$$A + A \cdot B = A \qquad (1\text{-}9a)$$

$$A \cdot (A+B) = A \tag{1-9b}$$

$$(A+B') \cdot B = A \cdot B \tag{1-9c}$$

$$A \cdot B' + B = A + B \tag{1-9d}$$

圖 1-11 (a)、(b)、(c)、與(d)所示分別爲吸收性定理公式（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，因爲有開關 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。

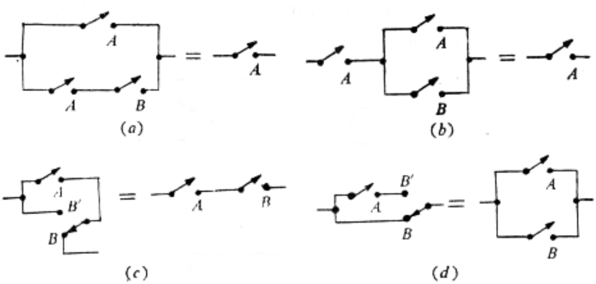


圖 1-11　吸收性定理的對應交換電路，(a)公式（1-9a）(b)公式（1-9b），(c)公式（1-9c），(d)公式（1-9d）

［8］　乘方性律（involution law）

$$(A')' = A \tag{1-10}$$

圖 1-12 所示爲乘方性定理公式（1-10）的對應交換電路。在電路中，不論 A 爲 0 或 1，其開關 A 爲 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）。

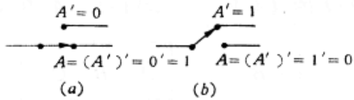


圖 1-12　乘方性定理的對應交換電路，(a)在 $A=1$ 時，(b)在 $A=0$ 時

[9]　第摩根定理（DeMorgan's theorem）

$$(A+B)'=A'\cdot B' \tag{1-11a}$$

$$(A\cdot B)'=A'+B' \tag{1-11b}$$

第摩根定理爲非常有用的定理，它是一種反及閘與反或閘的運算，其有關的交換電路將在第 1.5 節中再述。

1.2 及　閘

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

$$A\cdot B=AB=A\cap B=A\wedge B \tag{1-12}$$

及閘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，則其及閘的運算應寫成

$$A\cdot B\cdot C=ABC \tag{1-13}$$

而讀作"A 及 B 及 C"。

及閘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 ）。

及閘的運算，如將 0 與 1 代入變數，由它們的眞值表可知，其數式爲

$$
\begin{array}{ll}
0\cdot 0=0 & 0\cdot 0\cdot 0=0 \\
0\cdot 1=0 & 0\cdot 0\cdot 1=0 \\
1\cdot 0=0 & 0\cdot 1\cdot 0=0 \\
1\cdot 1=1 & 0\cdot 1\cdot 1=0 \\
 & 1\cdot 0\cdot 0=0 \\
 & 1\cdot 0\cdot 1=0 \\
 & 1\cdot 1\cdot 0=0 \\
 & 1\cdot 1\cdot 1=1
\end{array}
\qquad (1\text{-}14)
$$

其運算情況與普通算術的乘法相似。

及閘的邏輯運算，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 祗少有一個被打開不通爲 0 ，而電燈熄滅

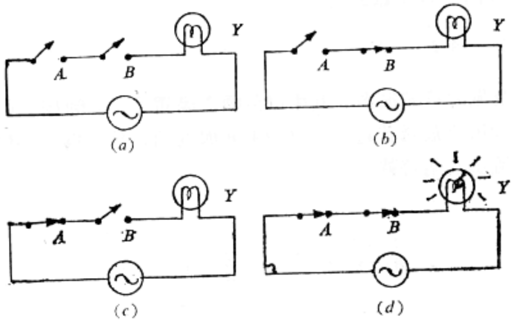


圖 1-13　及閘引證，(a) $A=0$ ，$B=0$ ，$Y=0$ ；(b) $A=0$ ，$B=1$ ，$Y=0$ ；(c) $A=1$ ，$B=0$ ，$Y=0$ ；(d) $A=1$ ，$B=1$ ，$Y=1$

表 1-3　及閘眞值表

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

爲 0 ，但在圖 1-13 (d)所示中，開關 A 與 B 同時接通爲 1 ，致使電燈發亮爲 1 。將這電燈與開關的四種關係，列出眞值表如表 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 的關係爲一個及閘的運算。圖 1-13 所示電路稱爲及閘電路。其中 A 與 B 稱爲輸入，Y 稱爲輸出，其及閘運算公式即

$$Y = AB \tag{1-15}$$

如果圖 1-13 所示中，開關有 A 、B 、……、N 個相串聯，即及

閘輸入有N個，其運算公式爲

$$Y = AB \cdots\cdots N \tag{1-16}$$

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爲普遍。圖 1-14 (a)與(b)所示分別爲二個輸入與N個輸入的流項及閘符號。

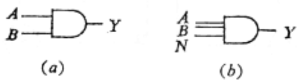
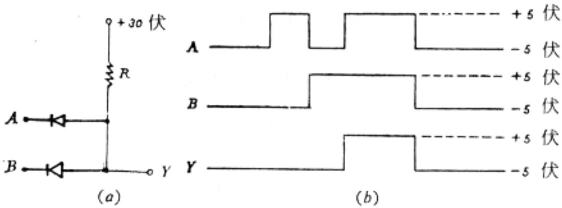


圖 1-14　(a)二個輸入及閘符號，(b) N個輸入及閘符號



輸　入		輸出
A	B	Y
−5伏	−5伏	−5伏
−5	+5	−5
+5	−5	−5
+5	+5	+5

輸　入		輸出
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

(c)

圖 1-15　(a)及閘電路，(b)輸入與輸出電壓波形，(c)眞値表

圖 1-15 (a)所示爲二極體及閘電路。爲容易了解起見，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 $V_r = 0$；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