

現代電子技術叢書

數字系統 的原理和應用

· 上册 ·



7
DIGITAL
SYSTEMS

DIGITAL SYSTEMS

投資本編著

聯發書店出版

前 言

本書廣泛而深入地介紹了現代數字系統的原理和最新技術成就。

雖然基本的電子學知識將有助於理解本書，但是，本書有百分之九十以上的內容却並不要求讀者事先具備電子學方面的訓練。因此，本書不僅可作為電腦專業學生的教科書，也可供其他專業的學生或有興趣的讀者自學參考。

本書除了包括有一般性內容之外，還編入了數字集成電路（晶體管—晶體管邏輯電路（TTL），金氧半導體（MOS），互補金氧半導體（CMOS），射極耦合邏輯電路（ECL），三態邏輯電路（TRI-STATE LOGIC）等）的最新資料，以及有關譯碼、編碼、多路傳送、數據分配、選通、數據總綫系統、微處理機等內容。

全書敘述力求通俗詳盡及循序漸進，在第八章以前均採用方框圖方法講解基本的數字邏輯操作，使讀者不致一開始就被複雜的內部電路難住，而影響到對基本原理的理解。每章均附有習題。

在實際應用方面，介紹了頻率計數器、數字鐘、鍵盤輸入編碼器、控制定序器、數字伏特計、同步數據傳送系統及數字電腦等技術。全書分上、下兩冊出版。

由於編者水平所限，錯誤之處在所難免，衷心希望讀者批評指正。

編者謹識

目 次

前 言	1
第一章 基本概念	1
§ 1.1 數值表示	1
§ 1.2 數字系統和模擬系統	3
§ 1.3 數字的數系	4
§ 1.4 二進制數的表示	9
§ 1.5 脈衝的特性	12
§ 1.6 存 儲	15
§ 1.7 數字電腦	15
§ 1.8 小 結	18
習 題	20
第二章 用布爾代數分析邏輯電路	21
§ 2.1 布爾常量和布爾變量	21
§ 2.2 布爾邏輯運算	22
§ 2.3 「或」運算	23
§ 2.4 「與」運算	27
§ 2.5 「非」運算	29
§ 2.6 邏輯電路的代數描述	30
§ 2.7 求邏輯電路輸出的值	32
§ 2.8 由布爾表達式完成電路	34
§ 2.9 「或非」門和「與非」門	35
§ 2.10 布爾代數的本領	37

§ 2.11	布爾定理	38
§ 2.12	邏輯電路的化簡	45
§ 2.13	「與非」門和「或非」門的普適性	48
§ 2.14	等效邏輯表示	49
	習題	51
第三章	邏輯電路設計	53
§ 3.1	「積之和」與「和之積」表達式	53
§ 3.2	由真值表導出表達式: 「積之和」形式的解	54
§ 3.3	由真值表導出表達式: 「和之積」形式的解	58
§ 3.4	「積之和」形式的解轉化為「與非」門	61
§ 3.5	「和之積」形式的解轉化為「或非」門	64
§ 3.6	「異」電路和「同」電路	66
§ 3.7	有多個輸出的邏輯電路	70
§ 3.8	不用真值表進行設計	71
	習題	73
第四章	觸發器	74
§ 4.1	由邏輯門電路組成的觸發器	76
§ 4.2	S-C 型觸發器	79
§ 4.3	時鐘信號	81
§ 4.4	S-C 型時標觸發器	82
§ 4.5	J-K 型時標觸發器	86
§ 4.6	D 型時標觸發器	88
§ 4.7	同步的和異步的觸發器輸入	90
§ 4.8	主從觸發器	92
§ 4.9	觸發器操作: 轉移操作	98
§ 4.10	觸發器操作: 移位寄存器	100
§ 4.11	觸發器操作: 計數	104
§ 4.12	單穩電路	107
§ 4.13	觸發器電路的分析	108

習 題	111
第五章 數系和代碼	113
§ 5.1 二—十進制轉換	113
§ 5.2 十—二進制轉換	114
§ 5.3 二進制加法	116
§ 5.4 正負數的表示	117
§ 5.5 在補碼系統中的加法	120
§ 5.6 在補碼系統中的減法	122
§ 5.7 二進制數的乘法	123
§ 5.8 二進制除法	124
§ 5.9 八進制	125
§ 5.10 十六進制	128
§ 5.11 二—十進制代碼	129
§ 5.12 二—十進制的加法	132
§ 5.13 餘3代碼	134
§ 5.14 葛萊碼	135
§ 5.15 字母數字代碼	138
§ 5.16 檢測錯誤用的奇偶性方法	140
習 題	142
第六章 運算電路	145
§ 6.1 運算器	145
§ 6.2 並行二進制加法器	147
§ 6.3 全加器的設計	149
§ 6.4 完整的並行加法器電路	151
§ 6.5 進位傳送	153
§ 6.6 集成電路並行加法器	154
§ 6.7 補碼系統	156
§ 6.8 串行加法器	160
§ 6.9 用補碼的串行減法	163

§ 6.10 串行和並行的比較	164
§ 6.11 二-十進制加法器	165
§ 6.12 二進制乘法器	168
習 題	173
第七章 計數器及其應用	175
§ 7.1 異步(串行)計數器	175
§ 7.2 自停串行計數器	179
§ 7.3 模數為任意數的計數器	180
§ 7.4 異步下行計數器	185
§ 7.5 異步上/下行計數器	187
§ 7.6 串行計數器的傳播延遲	188
§ 7.7 同步(並行)計數器	190
§ 7.8 並行的下行計數器和上/下行計數器	193
§ 7.9 同步/異步計數器	195
§ 7.10 計數器的譯碼	196
§ 7.11 譯碼尖脈衝	200
§ 7.12 BCD計數器的串聯	204
§ 7.13 可預置的(程序可控的)計數器	205
§ 7.14 移位寄存器組成的計數器	206
§ 7.15 計數器應用: 頻率計數器	211
§ 7.16 計數器應用: 數字鐘	216
習 題	220
附錄 I 2 的乘方	223
附錄 II 化簡邏輯電路的卡諾圖方法	224
§ II.1 卡諾圖的形式	224
§ II.2 合併相鄰的「1」而進行化簡	226
§ II.3 完整的化簡手續	230
習題答案	236

第一章

基本概念 (Introductory concepts)

在科學、技術、商業等領域，實際上可以說在人類活動的絕大多數領域內，我們都經常要和量 (Quantity) 打交道。我們用各種方法對這些量進行測量、觀察、監視、記錄，以及進行算術運算等。如何把這些量的數值有效地和準確地表示出來，是一件十分重要的事。

§ 1.1 數值表示 (Numerical representations)

有兩種基本的方法可以用來表示量的數值，那就是模擬法和數字法。

模擬表示 (Analog representations)

在用模擬表示的時候，我們是用另外一個與被表示量成正比的量來表示一個量。例如，汽車的速度表就屬於一種模擬表示，表針的偏轉角度是與汽車的行車速度成正比例的。表針的角位置表示出車速的值，當車速加快或減慢的時候，表針的位置也跟着變化。

另一個例子是常見的控制室溫用的恆溫器 (Thermostat)。恆溫器的雙金屬片的彎曲是與室溫成正比的。當房間內的氣溫逐漸變化時，雙金屬片的曲率跟着按比例地變化。

大家所熟悉的麥克風 (Microphone) 也是屬於模擬表示之一。在這種裝置中，輸出電壓與入射到麥克風的聲波的振幅成正比。輸出電壓的變化是與輸入聲音的變化相一致的。

上面所列举的模擬量 (Analog quantity) 有一個重要特徵：它們能在一個連續的數值範圍內逐漸地變化。汽車的速度可以是零和某個值 (例如每小時100英里) 之間的任何數值。類似地，麥克風的輸出可能是在 0 至 10mV 範圍內的任一電壓 (也就是說，輸出電壓可以是 1mV, 2.3724mV, 0.9999mV 等等)。

數字表示 (Digital representations)

在數字表示中，量不是用成比例的另一個量來表示，而是用一種叫做數字 (Digits) 的符號來表示。跳字鐘就是一例。它直接用代表小時、分、秒的十進位數字顯示的形式來報告時間。我們知道，時間是連續變化的，但跳字鐘的讀數却不是連續變化的，而是以一分鐘 (或一秒鐘) 為單位改變一次。換句話說，這種時間的數字表示是斷續的、一步一步地變化的，它和普通手表提供的時間的模擬表示不一樣，因為普通手表表面上的讀數是連續變化的。

所以，模擬量和數字量 (Digital quantity) 之間的主要區別可以簡單地表示為：

模擬 — 連續

數字 — 分立 (一步一步地)

由於數字表示的這種分立的本性，當我們讀出一個數字量的值的時候，不會有任何的含糊不清，但一個模擬量的值却常常還有解釋的餘地。

例1.1 下面的情況哪些表示模擬量？哪些表示數字量？

- (a) 沿着輸送帶運動時能數出物體的電子計數器。
- (b) 電流表。
- (c) 一天內的溫度變化。
- (d) 海灘上的沙粒。

解答：

(a) 數字量。(b) 模擬量。(c) 模擬量。(d) 數字量，因為沙粒的數目只能是某些分立的數字 (整數)，而不是取一個連續範圍內的任意值。

§ 1.2 數字系統和模擬系統

(Digital and analog systems)

所謂數字系統 (Digital system)，簡單地說就是某些裝置（電氣的、機械的、光電的等等）的一個組合體，我們用這個組合體去完成某些用數字來表示的作用。而在一個模擬系統中，所有的物理量本質上是模擬量。許多實際的系統是屬於所謂的混合系統 (Hybrid system)，其中不但有數字量，也有模擬量，而且兩種表示之間經常有轉換發生。

比較常用的數字系統有數字電腦 (Digital computer)，計數機 (Calculator)，數字伏特表 (Digital voltmeter) 和數控機械 (Numerically controlled machinery) 等。在這些系統中，電量和力學量僅以分步的形式變化。模擬系統 (Analog system) 的例子有模擬電腦 (Analog computer)、無線電廣播系統和錄音機等。在模擬系統中，量在一整個連續的範圍內逐漸變化。舉例來說，在調幅廣播 (AM broadcasting) 系統中，你可以在535~1,605kHz之間的連續波段內任意選擇一個頻率收聽。

一般地說，數字系統具有速度快，準確性高，以及存儲 (Memory) 容量大等優點。此外，數字系統不像模擬系統那樣容易受零件特性波動所影響，因而穩定性好；而且對各種不同用途的適應性也較模擬系統強。

在實際世界中，大多數的量在本質上都是屬於模擬量，而這些量又正是我們經常要測量、檢知或控制的。因此，儘管數字系統有許多優點可以利用，我們仍必須用到大量的混合系統。例如工業上的生產過程控制或工藝程序控制 (Process control) 系統，就是一種典型的混合系統。在這種系統中，溫度、壓力、液面高度和流速等等的模擬量是需要被測量和加以控制的。圖 1.1 是這種系統的符號方框圖。如圖所示，模擬量被測量，而測量到的值再由一個模擬-數字轉換器 [Analog-to-digital (A/D) convertor] 轉換成數字量。然後，中央處理機 (Central processor) 對這個數字量進行運算（該過程完全是數字化的），運算結果再在

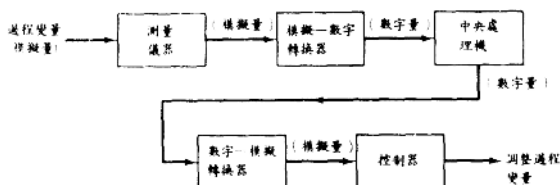


圖1.1 典型的混合過程控制方框圖

一個數字-模擬轉換器〔Digital-to-analog (D/A) convertor〕中重新被轉換成一個模擬量。這個模擬輸出被饋入 (feed) 到一架控制器內，該控制器就對生產過程施加某種作用而調整原先測量到的那個模擬量。

§ 1.3 數字的數系 (Digital number systems)

在數字技術中用到許多的數系 (Number system)。最常用的是十進制、二進制、八進制和十六進制等數系 (或稱數制)。十進制當然是人們所最熟悉的一種數制，因為我們每天都要用到它。下面我們要回顧一下十進制的特點，這對於幫助理解其他數制是有益的。

十進制 (Decimal system)

十進制包含有10個通常被人們叫做數字 (Digit) 的符號 (Symbol)。這10個符號是 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9; 利用這些符號，我們可以表示出任何的量。因為十進制有10個數字，可以想像它是與人類有10隻手指這個事實有密切關係的。事實上，英文的「數字」(Digit) 一詞，正是拉丁文的「手指」。

十進制是一種位值數系 (Positional-value system)，因為在十進制中，一個數字的位置決定了它的數值。例如，考慮一個十進制數453。我們知道，數字4實際上是代表四百，5代表五十，而3代表三個單位。本質上，4在這三個數字之中所佔的份量最重，所以我們把它叫做最高

位 (Most significant digit 或 MSD)。3 佔的份量最少，故稱作最低位 (Least significant digit 或 LSD)。

讓我們再看另外一個例子：27.35。這個數實際上等於兩個十加上七個單位，再加十分之三，再加百分之五，或寫作 $2 \times 10 + 7 \times 1 + 3 \times 0.1 + 5 \times 0.01$ 。小數點的作用是把整數和分數部份分開。

更嚴格地說，相對於小數點的各個不同位置的權重 (Weight) 不同，這些權重 (或簡稱權) 可以用 10 的幂表示出來。圖 1.2 表示出 2,745.214 這個數的位值情況，小數點 (更嚴格地說是十進制小數點) 把 10 的正幂 (Positive power) 與負幂 (Negative power) 分開。2,745.214 這個數於是

$$(2 \times 10^3) + (7 \times 10^2) + (4 \times 10^1) + (5 \times 10^0) + (2 \times 10^{-1}) \\ + (1 \times 10^{-2}) + (4 \times 10^{-3})$$

一般地，任何數都可以寫成爲各個數字與其相應的位值的乘積的和。

當我們用十進制計數時，是從個位的「0」開始，順次採用各個符號 (數字) 一直到「9」爲止。然後在下一位進上一個「1」，重新在原先的個位從「0」開始計數 (見圖 1.3)。這個過程一直繼續到 99 爲止。我們在第三位進上「1」而十位和個位的數字則全是「0」。這樣的過程可以一直進行下去，直到我們想要計數的那個數目爲止。

應該注意，在十進制計數中，個位 (最低位) 在計數中是一個單位，一個單位地向上增加，十位則是每十個單位地增加，而百位則更是每一

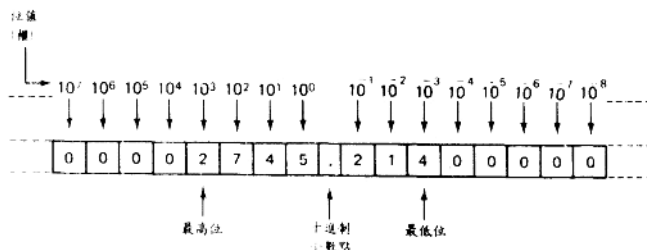


圖 1.2 十進制的位值用 10 的幂表示

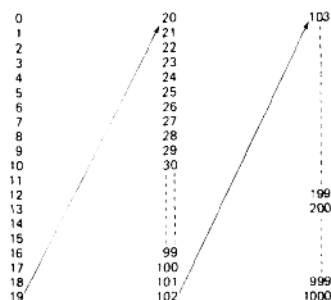


圖1.3 十進制計數

百個單位地增加，等等。

十進制的另一個特點是：只需利用兩位就可以數出 $10^2 = 100$ 個不同的數目（0 到 99）*。用三位就可以數出 1,000 個數目（0 至 999）；依此類推。一般地，用 N 位就可以數出 10^N 個不同的數目，（當然是從「0」開始，並把「0」包括在內）。 N 位數的最大數值等於 $10^N - 1$ 。

二進制 (Binary system)

遺憾的是，十進制計數方法在數字系統中使用起來卻並不方便。例如，我們很難設計出一種以 10 個不同的電平 (Voltage level) 工作的電子儀器，使每個電平能分別代表十進制符號 0~9 的其中一個。另一方面，設計一種僅以兩個不同電平工作的、簡單而精確的電子線路，却是十分容易的事。由於這個原因，幾乎所有的數字系統都是用二進位計數制 (Binary number system) 作為其運算的基本數制；雖然其它的數制也常常與二進制連起來用。

在二進制中，只有兩個符號或數碼：「0」和「1」。**但是，這種

*「0」也作為一個數計算。

**「二進位計數制」，可簡稱為「二進數制」或「二進制」。也可叫做「以 2 為基數的進位制」，所謂基數 (base) 就是某數制中可能用到的數碼的個數。

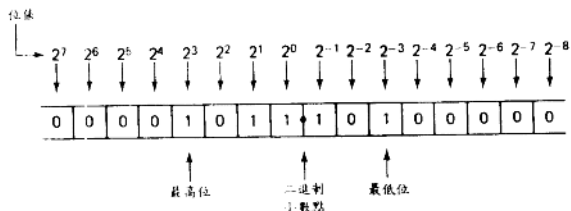


圖1.4 二進制的位值用2的冪表示

數制可以用來表示出任何用十進制或其他數制所能表示的量；雖然一般來說，為表示同一個量，二進制所用的數比十進制的大。

前面所有有關十進制的陳述，均適用於二進制。二進制也是一種位值系統，只是每一個二進制數位的位值或權重，是由2的冪來表示而已。這種情況畫於圖1.4中。這裏，二進制小數點左方的位值是2的正冪，而右方的位值則為2的負冪。圖中我們用二進制數1011.01為例。為了找出該數是相應於十進制中的哪個數，只要把每個數字乘以其位值，然後相加就行了：

$$\begin{aligned}
 1011.01_2 &= (1 \times 2^3) + (0 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (1 \times 2^0) + (1 \times 2^{-1}) \\
 &\quad + (0 \times 2^{-2}) + (1 \times 2^{-3}) \\
 &= 8 + 0 + 2 + 1 + 0.5 + 0 + 0.125 \\
 &= 11.625_{10}
 \end{aligned}$$

在上面的算式中，我們用下標2和10來表示該數是什麼數制的數，這是為了避免引起混亂。

在二進制中，二進制數位 (Binary digit) 這個詞常簡稱為位 (Bit)。這樣，在圖1.4的數中，二進制小數點左方有4位，代表着該數的整數部分；而在小數點右方則有3位，代表着分數部分。最左方的位是最高位 (Most significant bit, 簡寫 MSB)，其權最大。最右方的位是最低位 (Least significant bit, LSB)，其權最小。

本書的附錄 I 中有一張2的乘方表，包括正冪和負冪在內，當需要

在二進制和十進制之間進行轉換時可利用此表。

二進制計數 (Binary counting)

在用二進制計數的時候，我們從第一位（個位）的「0」開始，下一個就是個位的「1」。然後在第二位進「1」，並且從第一位的「0」重新開始數。如圖1.5所示。當數到 11_2 的時候，應在第三位進「1」，並從前兩位的「0」開始計數，依此類推。

二進制計數序列 (Binary counting sequence) 有一個重要特點。由圖 1.5 我們可以看出，個位（最低位）是「0」和「1」交替地改變的，而第二位（或稱 2 的位置，two's position）則是兩個「0」和兩個「1」交替出現。第三位（4 的位置）在開始四次計數時均是「0」，而後接着四個「1」，然後又是四個「0」，等等。第四位（8 的位置，eight's position）則是八個「0」和八個「1」交替地出現。如果我們還想繼續數下去，那就要增加更多位數，而「0」和「1」則會以 2^{N-1} 的數目成羣地交替出現。比方說，第五位的數字將是16個「0」和16個「1」交替出現（ $2^{5-1} = 2^4 = 16$ ）。

和十進制完全一樣，用N位的二進制數可以包括 2^N 次計數。例如，用 2 位數，就可以進行 $2^2 = 4$ 次計數（從 00_2 到 11_2 ）；用 4 位則可以進行 $2^4 = 16$ 次計數（從 0000_2 到 1111_2 ）；依此類推。而且，相同位數的

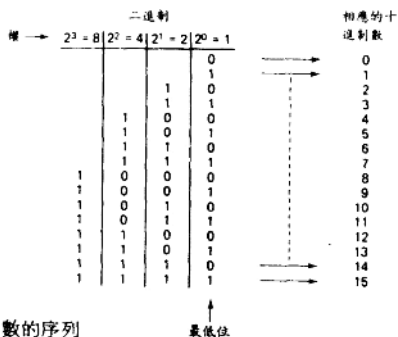


圖1.5 二進制計數的序列

數之中，最大的一個數全是由「1」所組成(例如三位數最大的是 111_2)，並等於十進制的 $2^N - 1$ 。比如，用 4 位數時最大數 $1111_2 = 2^4 - 1 = 15_{10}$ 。

§ 1.4 二進制數的表示 (Representing binary quantities)

在數字系統中，所要處理的信息 (Information) 常是以二進制的形式出現。任何裝置，凡是只有兩個操作狀態或兩種可能的性態，都能用來表示二進制量。例如，一個普通開關只有兩種狀態：開或關。我們可以 (任意地) 選擇開啓的開關代表二進制數字「0」，而讓閉合的開關代表二進制數字「1」。有了這個約定，我們就可以像圖 1.6(a) 那樣表示出任何的二進制數了 (該圖中各開關的狀態合起來代表一個二進制數 10010_2)。

圖 1.6(b) 所示的是另一個例子，是用紙帶上穿的孔來代表二進制數。有孔就表示二進制的「1」，沒有孔則代表「0」。

其他還有許多種裝置具有此類性質，即只有兩個操作狀態，或者只能在兩種極端狀況下運行。例如：燈泡 (亮或暗)，二極管 (導通或不導通)，繼電器 (接通或斷開)，晶體三極管 (截止或飽和)，光電管 (被照亮或遮黑)，恆溫器 (開或閉)，機械離合器 (嚙合或分離)，以及磁帶 (磁化或去磁)。

在電子數字系統中，二進制信息是用各種電子電路的輸入輸出的電訊號來表示的。在這類系統中，二進制的「0」和「1」是用處在兩個相

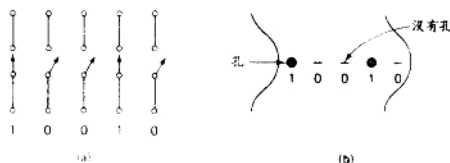
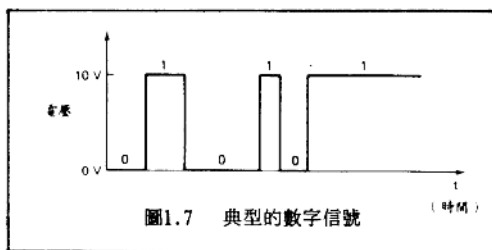


圖 1.6 (a) 利用開關和 (b) 穿孔紙帶來表示二進制數

反極端的電壓來代表。舉例來說，我們可以用0V代表二進制的「0」，而以+10V代表二進制的「1」*。在規定的誤差範圍之內，所有輸入和輸出的信號將不是0V就是+10V。圖1.7表示出典型的數字波形，波形的特點是只能取兩種電平之一。



並行傳遞及串行傳遞 (Parallel and serial transmission)

在實踐中，我們必須要設法把代表由幾位組成的完整的二進制數的信號，從系統的某一部分傳遞到另一部分去。採用的基本方法有兩種：並行傳遞和串行傳遞。

在二進制數的並行表示 (Parallel representation) 或並行傳遞中，每一位是從一個單獨的電路輸出，並經由單獨的綫而傳遞。圖1.8(a)說明對一個5位數如何進行並行傳遞的情形。每一電路的輸出代表二進制的一個數位，它或者是0V (二進制的「0」) 或者是+10V (二進制的「1」)。五個電路的輸出是同時進行的，所以在任何時候都可以在輸出端得到一個完整的二進制數。圖1.8(a)中所表示的數是10110。

圖1.8(b)表示的是串行傳遞的安排，僅用一條信號輸出綫來傳遞二進制數。這條輸出綫按次序傳送二進制數的各個數位，一般是先傳送最低位的。很明顯，爲了區別不同的數位，需要有某種定時方法。圖中，

* 電壓的選擇在此是任意的。常用的表示是用0~0.8V代表二進制「0」，而2V~5V代表二進制「1」。

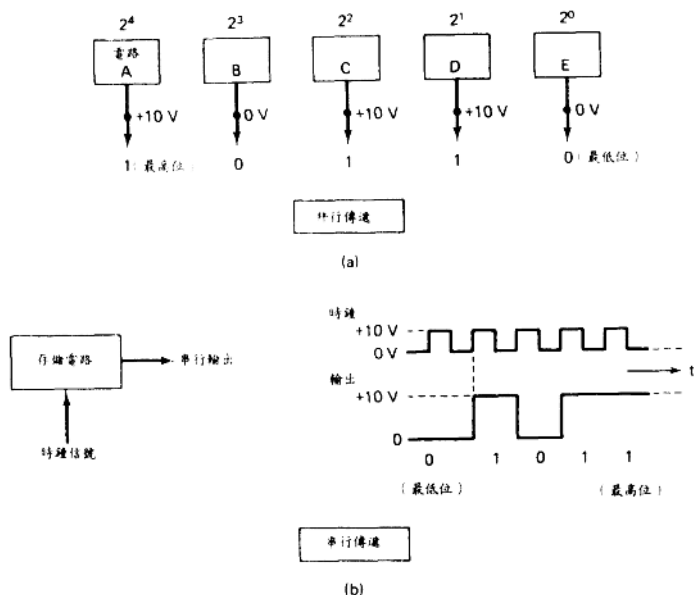


圖1.8 二進制數的並行傳遞和串行傳遞

使用了一種時鐘信號 (Clock signal) 來排序。在大多數數字系統中，時鐘信號都是一個十分重要的組成部份，其作用是提供操作的準確定時。在串行傳遞中，每當有一個時鐘脈衝 (Clock pulse) 發生的時候，輸出信號就轉變到所傳送的二進制數的下一位。圖1.8(b)中，輸出順序是01011 (注意時間是由左至右增加的)。而被傳遞的二進制數是 11010。

並行傳遞和串行傳遞各有特點。一般來說，當一個數字系統是用並行法表示二進制數，其運算的速度就快得多，因為所有數位是同時被顯示出來的；而串行表示在某一時刻則只能顯示一個數位。在一些電腦中，會使用大的二進制數，例如有36位，這時並行傳遞的優點就更加明顯。但在另一方面，並行表示的電路結構却較複雜。因此，正如我們在