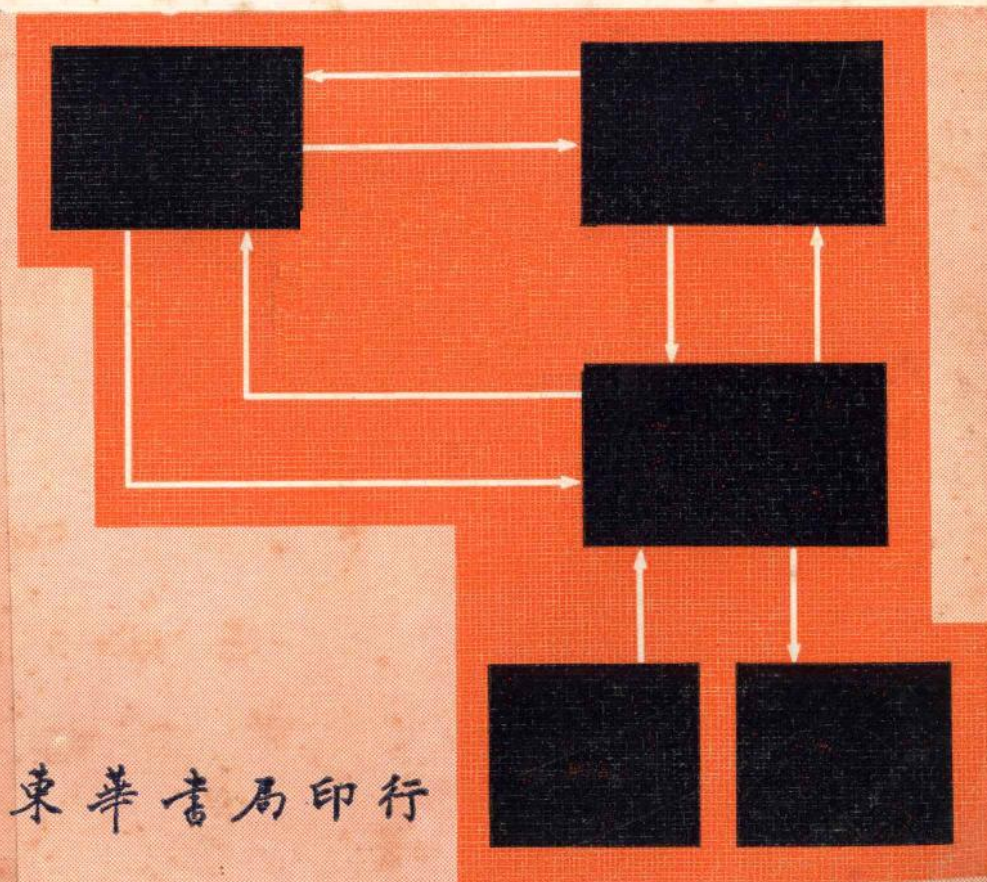


M. MORRIS MANO
Digital Logic
and Computer Design

數位邏輯與
計算機設計

上 冊

張 煌 譯



東華書局印行

數位邏輯與 計算機設計

(1979)

上 冊

原著者 M. MORRIS MANO

譯 者 張 煜

國立臺灣大學電機工程學系教授

東華書局印行



版權所有・翻印必究

中華民國六十九年十一月初版

中華民國七十年九月二版

大學
用書 **數位邏輯與計算機設計** 上冊

定價 新臺幣壹百四十元整

(外埠酌加運費滙費)

譯者	張	煌
發行人	卓	鑫 森
出版者	臺灣東華書局股份有限公司	
	臺北市博愛路一〇五號	
	電話：3819470 郵發：6481	
印刷者	合	興 印 刷 廠

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零柒貳伍號
(69035)

序 言

數位邏輯對數位組件與模組間的互相連接有關聯，它是一種用於指示數位系統設計與分析的名詞。最著名的數位系統實例為通用的數位計算機。本書提出數位系統設計與分析中所使用的基本觀念，及介紹數位計算機組織與設計的原理。它提供適合於各式各樣數位系統設計應用的許多不同的方法與技巧。它涵蓋由電子閘電路至微計算機系統複雜結構的一切數位系統全貌。

第一章至第六章以古典觀點提出數位邏輯設計技巧。布耳代數與真理表用於組合電路的分析與設計，而狀態轉變用於順序電路的分析與設計。第七章至第十二章以記錄器 - 轉移觀點提出數位系統設計方法。數位系統被分成許多記錄器小單位，而這系統以一覽記錄器 - 轉移陳式表來指定，描述記錄器中所儲存的諸資訊間之運算轉移。記錄器 - 轉移方法被用來作處理單位，控制單位，計算機中心處理機的分析與設計，以及描述微處理機與微計算機的內部運算。第十三章論及數位電路的電子學，及介紹最普通的積體電路數位邏輯族。

建立數位系統所用的元件均以積體電路形式製造的。積體電路在一個單獨而小的封裝內包含大量互相連接的數位電路。中型積體 (MSI) 裝置供應數位函數，而大型積體 (LSI) 裝置供應整個計算機模式。非常重要地，邏輯設計者應熟悉積體電路形式中所遭到的各種數位元件。為了這種理由，許多 MSI 與 LSI 電路予以介紹，並將它們的邏輯作用加以解釋。積體電路在數位系統設計中的使用，本書是用實例以及每章末的問題來加說明。

本書原先計劃作為作者所著計算機邏輯設計 (Computer Logic

2 數位邏輯與計算機設計

Design, Prentice - Hall, 1972版)的再版。因為增加大量新的材料以及已作廣泛的修訂,本書採用新的名稱似乎更較適當。本書約三分之一內容出現在以前的書本中,其他三分之二則構成新的或修訂的資訊。關於校正與增添的基本因素是因數位電子學技藝中的發展而發生的。最顯著的要歸因於MSI與LSI電路以及使用積體電路的設計方法。本書涵蓋數元片段的各式LSI組件與微計算機的各樣種類。它提出僅讀記憶器(ROM)與編寫邏輯行列(PLA)的應用。再者,記錄器-轉移設計方法中的進步發展致令本書的後半部完全重寫。

第一章申述各式樣的二進位系統,適合於數位組件中表示資訊。二進位數字系統予以解釋與二進碼加以說明,以指示十進位與字數資訊的表示法。二進邏輯在進行布耳代數正式定義之前則以直覺觀點予以介紹。

布耳代數的基本公設與定理在第二章中找得到。布耳表示式與閘的等效互接兩者間的相互關係着重加強。二個變數的所有可能邏輯運算予以研討,及從此處可推導出最有用的邏輯閘。在本章中首先介紹合用於積體電路形式中數位閘的特性,但是描述閘內部結構的更詳細分析則留待在最後一章論述。

第三章供給簡化布耳函數的圖解法與列表法。圖解法是用來簡化AND, OR, NAND, NOR, 及線結邏輯閘所結構的數位電路。不同的簡化程序被摘要成容易參照的列表形式。

關於組合電路的設計與分析程序在第四章中供備。數位系統設計中所使用的一些基本組件,例如加法器與碼轉換器,則以設計或分析實例介紹。這章研討使用多階NAND與NOR組合電路的可能製作。

第五章論及組合邏輯的MSI與LSI組件。常所使用的作用諸如並加器,解碼器,及多工器予以解釋,而它們在組合電路設計中的用處則以實例來說明。僅讀記憶器與編寫邏輯行列予以介紹,而它們在複雜組合電路設計中的用處則舉例證明。

第六章略述鐘控順序電路設計與分析的各式不同方法。本章以介

紹各種正反器與它們被觸發的方法作開始。狀態圖，狀態表，及狀態方程式亦作為分析順序電路的合適工具。所提出的設計方法使順序電路變換成一集合布耳函數，來指明至正反器電路的輸入邏輯。這輸入布耳函數是由激勵表推導而得，而用圖解法來簡化。

在第七章中，記錄器，移位記錄器，及計數器的各種類相似於積體電路封裝中可用者予以介紹。隨意出入記憶器（RAM）的作用亦予解釋。本章中所介紹的數位作用為基本的構造方塊，從這些方塊可結構更複雜的數位系統。

第八章介紹關於描述數位系統的記錄器 - 轉移方法。它說明數位系統的諸記錄器間如何將運算順序表示成符號形式。對內部記錄器轉移，算術，邏輯，及移位微運算作符號定義。在計算機記錄器中要儲存不同資料的種類則詳細地包羅。有些典型實例用來說明計算機指令如何被表示成二進編碼形式，及由指令所指明的運算如何能以記錄器 - 轉移陳式來表示。本章用極簡單的計算機設計來證明計算機系統設計的記錄器 - 轉移方法作終結。

第九章從事於數位計算機的處理機單位。它討論關於用漚流排或草稿記憶器來組織一處理機單位的各方法。典型的算術邏輯單位（ALU）被提出，而對於任何別的ALU組態則發展出一程序。在處理機中通常所找得的其他組件，諸如移位器與狀況記錄器，亦予介紹。通用累積器的記錄器設計着手研討，由一群指定的記錄器 - 轉移運算開始，而達到一邏輯圖作終結。

控制邏輯設計的四種方法在第十章中介紹。其中二種方法構成一硬體線結控制。其他二種方法介紹微程式的觀念與如何用編寫邏輯行列來設計一控制器。四種方法均以實例來證明，以指示設計演算法的發展，與說明得到系統控制電路的程序。最後一節介紹LSI微程式順序器，及說明它如何能被用來設計一微程式控制單位。

第十一章專述小型數位計算機的設計。計算機中的諸記錄器各作定義，而一群計算機指令則要指定。計算機的描述正式以記錄器 - 轉

4 數位邏輯與計算機設計

移陳式詳述諸記錄器間的微運算，並以控制函數啓發這些微運算。這控制函數列在記錄器 - 轉移陳式內，供給控制單位設計時的資訊。計算機的控制單位用三種不同的方法設計，即硬體 - 線結控制。P L A 控制，與微程式控制。

第十二章集中於組成微計算機系統的各种 L S I 配件。典型微處理機的組織將予描述及它的內部運算要解釋。一群微處理機的典型指令要介紹而不同的定址模態要解釋。以硬體觀點着眼，要涵蓋堆層的運算以及次常式與中斷的處置。本章亦說明至微處理機匯流排系統的記憶器切片連接，及和輸入 - 輸出裝置作通信的各種介面單位運算。它以描述直接記憶器出入模態轉移作終結。

第十三章詳述七種積體邏輯族中基本閘的電子電路。這最後一章應視作一附錄，如要求的話可以略去。本章承擔基本電子學較重要的知識，但是對本書其餘部分言並不是特殊必備讀物。

每章包含一套問題與一系列參考文獻。部分問題的答案列在附錄中，供學生一種幫助及輔助獨立的讀者。出版廠商備有習題詳解手冊，僅供授課老師使用。

本書適宜作電機工程學系或計算機工程學系中的數位邏輯與計算機設計課程。它亦可用作計算機科學系中的計算機組織課程。本書各部分可用種種方法教：(1)作為數位邏輯或交換電路的初級課程者適用第一章至第七章，或許連第十三章；(2)作為數位計算機邏輯課程而已預先讀畢基本交換電路課程者適用第五章及第七章至第十二章；(3)作為微處理機與微計算機硬體導論者適用第八章至第十二章。

總之，我要說明本書中所提出有關下面材料的原理。有關描述數位電路的作用，古典方法在過去曾佔優勢。由於積體電路的來臨及尤其是微計算機 L S I 組件的採用，古典方法似乎遠離實際應用。古典方法雖然對描述複雜的數位系統並不直接適用，但對了解許多數位作用的內部結構，布耳代數，組合邏輯，及順序邏輯程序仍然重要。在另一方面言，在數位系統中，對於描述不同模式間的運算，其記錄器 -

轉移方法供給一較好的表示法。它和一串數元並聯轉移有關係，而被視作數位系統表示法階團中高一階。在本書中由古典方法轉變成記錄器 - 轉移方法以積體電路 MSI 的函數來做。第五章與第七章包括積體電路可獲得的許多數位函數。它們的運算以組成各個數位電路的閘與正反器來解釋。每一 MSI 電路被視作執行各個運算的功能單位。然後這運算以記錄器 - 轉移方法的記法來描述。因此，記錄器的分析與設計以及其他數位作用均用古典方法來做，但是在描述數位系統運算中這些功能的使用則以記錄器 - 轉移陳式來指明。於是，記錄器 - 轉移方法被用來為計算機指令作定義，將數位運算表示成簡明的形式，證明數位計算機的組織，以及對數位系統設計指定硬體組件。

我敬向 John L. Fike 博士評審原稿與 Victor Payse 教授採用本手稿授課時指出修正，深表謝意。大部分稿件由 Lucy Abbett 太太打字，我對她的熟練幫助非常感激。我要向我妻致最大的感謝，她提出所有建議增進本書可讀度，以及她在本書準備期間全力鼓勵與支持。

梅 諾 (M. Morris Mano)

目 次

序 言

第一章 二進位系統

1-1	數位計算機與數位系統	1
1-2	二進位數字	4
1-3	數字底數轉換	7
1-4	八進位與十六進位數字	10
1-5	補數	11
1-6	二進碼	18
1-7	二進位儲存與記錄器	25
1-8	二進邏輯	29
1-9	積體電路	34
	參考文獻	36
	問題	36

第二章 布耳代數與邏輯閘

2-1	基本定義	39
2-2	布耳代數的公理定義	41
2-3	布耳代數的基本定理與特性	45
2-4	布耳函數	49
2-5	典式與標準式	54
2-6	其他邏輯運算	61

2 數位邏輯與計算機設計

2-7	數位邏輯閘	64
2-8	積體數位邏輯族	68
	參考文獻	78
	問題	78

第三章 布耳函數的簡化

3-1	圖解法	82
3-2	二變數與三變數圖	82
3-3	四變數圖	88
3-4	五變數與六變數圖	91
3-5	諸和的積簡化	94
3-6	NAND與NOR製作	98
3-7	其他二階製作	105
3-8	隨意條件	111
3-9	列表法	113
3-10	必要項的確定	114
3-11	必要項的選擇	120
3-12	終結的評述	122
	參考文獻	124
	問題	125

第四章 組合邏輯

4-1	概論	129
4-2	設計步驟	131
4-3	加法器	132
4-4	減法器	137
4-5	碼轉換	140
4-6	分析步驟	143

4-7	多階 NAND 電路	147
4-8	多階 NOR 電路	155
4-9	互斥 - OR 與互合函數	160
	參考文獻	165
	問題	166

第五章 用 MSI 與 LSI 的組合邏輯

5-1	概論	170
5-2	二進並加器	171
5-3	十進加法器	178
5-4	大小比較器	181
5-5	解碼器	184
5-6	多工器	193
5-7	僅讀記憶體	200
5-8	編寫邏輯行列	208
5-9	終結的評述	215
	參考文獻	215
	問題	216

第六章 順序邏輯

6-1	概論	221
6-2	正反器	223
6-3	正反器的觸發	230
6-4	鐘控順序電路的分析	239
6-5	狀態簡化與指定	247
6-6	正反器激勵表	253
6-7	設計步驟	256
6-8	計數器設計	267

4 數位邏輯與計算機設計

6-9 以狀態方程式設計	271
參考文獻	276
問題	277

第七章 記錄器、計數器，與記憶器單位

7-1 概論	281
7-2 記錄器	282
7-3 移位記錄器	289
7-4 鏈波計數器	299
7-5 同步計數器	304
7-6 定時順序	311
7-7 記憶器單位	316
7-8 隨意出入記憶器範例	323
參考文獻	330
問題	330

附錄：——部分問題答案	334
-------------------	-----

索引	345
----------	-----

第一章

二進位系統

1-1 數位計算機與數位系統

數位計算機 (digital computer) 已經使許多科學的，工業的，與商業的進步，在其他方面曾經不能得到的成為可能。我們的太空計劃沒有即時，連續的計算機監督，將不會可能，而許多商業企劃僅在自動資料處理輔助下，才更有效。在科學上的計算，商業與事務的資料處理，航空交通控制，太空導引，有關教育的領域，及許多其他範圍方面，都要使用計算機。數位計算機最引人注意的特性是它的通用性。它能遵循稱謂程式 (program) 的一串指令順序，來運用所定的資料。使用者依照特殊需要，能指明和改變程式及 / 或資料。這種容易適應特性的結果，通用數位計算機能執行許多種類的資訊處理工作。

通用數位計算是數位系統 (digital system) 中最有名的實例。其他事例包含電話接轉交換器，數位伏特計，頻率計數器，計算機器，及電傳打字機。數位系統的特性是它能操作資訊的分立成分 (discrete element)。這種分立成分可能是電脈衝，十進數位，英文字母，算術運算，標點符號，或任何別組有意義的符號。資訊分立成分的並列代表資訊量。例如，字母 *d*，*o*，與 *g* 形成英文“狗”字。數位 2 3 7 形成一個數目。因此，一組順序的分立成分形成一種語言，那就是傳送資料的紀律。早期數位計算機大部分用於數量上的計算。在這種情形下，所使用的分立成分為數位。由於這種應用，數位計算機這名詞就出現。對數位計算機更合適的名稱將是“分立資訊處理系統”。

資訊的分立成分在數位系統中係由稱為信號 (signal) 的物理量

來表示。電方面的信號諸如電壓與電流是最普通的。所有目前電子數位系統中的信號只有二個分立的值，而稱為二元性 (binary, 即二進位)。數位系統設計者限制使用二元信號，這是因為可分多值的電子電路可靠性較低。換句話講，具有十個狀態的電路，每個狀態使用一個分立電壓值，是可以設計的，但是它將具有工作的可靠性極低。相反地，電晶體電路具有通電與截止二種可能的信號值，能建立起極高的可靠性。因為配件的這種物理限制，又因為人們對邏輯趨向二元性，數位系統曾被限制於需要分立值者又再被限制於採用二元值。

資訊的分立量可能由處理的本性中出現，或來自連續處理中有意地使其量化。例如，薪資表是一種固有的分立處理，包含有員工姓名，社會保險號碼，月薪，所得稅等。每位職員工資支票使用分立資料值，諸如英文字母（姓名），數位（薪資），及特殊符號（\$）來處理。在另一方面言，一位做研究的科學家可能觀察一連續性的程序，但僅在格表紙中記錄特殊的數量。於是這位科學家使他的連續性資料量化。在他的表格中每個數字都是資訊的分立成分。

許多實際系統能用微分方程式作數學上的描述，它的解答為時間的函數，供給這項處理的全部數學行為。類比計算機 (analog computer) 執行實際系統的直接模擬 (simulation)。計算機的每部門是類比於研究中處理的一些特定部分。類比計算機中的變數通常由隨時間連續性變化的電壓信號來表示。這些信號變數被視作類比於處理中的變數，而它們具有相同的行為。因此，類比電壓的量度能被代替作處理中的變數。類比信號這名稱有時作為連續性信號用，此乃因為“類比計算機”已有操縱連續性變數的計算機意思。

為模擬數位計算機中的實際處理，其數量必須予以量化。當處理中的變數以即時的連續性信號呈現時，其後者必須由類比 - 至 - 數位轉換裝置使其量化。以數學方程式描述行為的實際系統，在數位計算機中是用數字方法來模擬的。如在商業應用中，當要處理的問題本來就是分立時，其數位計算機則以本來的形式操縱其變數。

數位計算機的方塊圖如圖 1-1 所示。記憶器單位儲存程式，亦儲存輸入，輸出，及中間資料。處理機單位依照程式所指定來執行算術上及其他資料處理工作。控制單位監督各單位間的資訊流程。程式儲存在記憶器中，控制單位從程式中一個個地取還指令。關於每個指令，控制單位告知處理機來執行指令所指明的運算。程式和資料都已儲存在記憶器中。控制單位監督程式指令，而處理機操縱程式所指定的資料。

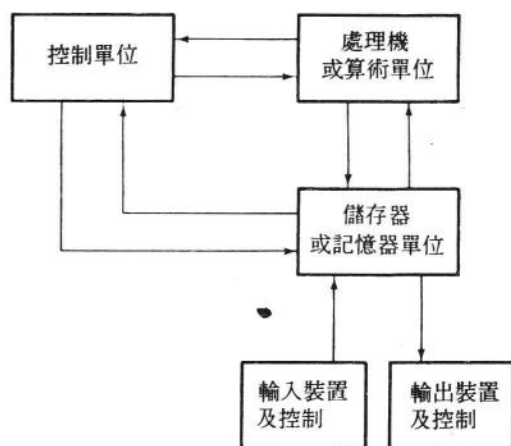


圖1-1 數位計算機的方塊圖。

程式和資料由使用者所準備，而用輸入裝置 (input device) 諸如打卡讀取機或電傳打字機將它們轉移至記憶器單位。輸出裝置 (output device) 諸如列印機接收計算的結果而印出這結果送給使用者。輸入與輸出裝置為特殊的數位系統，由機電部門來推動，及電子數位電路來控制。

電子計算器 (calculator) 為一種類似於數位計算機的數位系統，用鍵盤為輸入裝置，及數字顯示為輸出裝置。指令在計算器中憑作用鍵諸如加和減來送入。資料則經過數字鍵加入。其結果直接以數字型式顯示出。有些計算器具有列印能力與編寫設備，已到達極像一具數

位計算機。可是，數位計算機是一部比計算器更有力量的裝置。數位計算機能適應許多其他輸入與輸出裝置；它不但能算術計算，而亦能邏輯運算，並能做程式以內部與外面情況為根據來下決定。

數位計算機是一種許多數位模式的互相連接。為瞭解每個數位模式的運算，就需要有數位系統及它們一般行為的基本知識。本書前半部論述一般性數位系統，供給它們設計所需要的背景。本書後半部討論數位計算機的種種模式，它們的運算，及其設計。記憶器單位的工作特性在第七章中解釋。處理機單位的組織與設計在第九章中寫述。關於設計控制單位的各種方法在第十章中介紹。小型整部數位計算機的組織與設計則在第十一章中提出。

當處理機和控制單位相組合而形成一組件時，這組件稱為中央處理單位 (central processor unit, 簡寫為 CPU)。在小型積體電路封裝中所包含的 CPU 稱為微處理機 (microprocessor)。記憶器單位和控制微處理機與輸出入裝置間界面的部分可被包含在微處理機封裝內，或亦可能另裝在別的小型積體電路封裝中。一個 CPU 和記憶器及界面控制相組合而形成一小型計算機者稱為微計算機 (microcomputer)。微計算機組件的可用性已將數位系統設計的工藝革新，給設計者自由創作以前認為不經濟的結構。微計算機系統的各種組件在第十二章中提出。

曾經提及過，數位計算機操縱資訊的分立成分，而這些成分以二元形式表示。關於計算所使用的運算數則可以用二進位數字系統來表示。其他分立成分包含十進數位者則以二進碼來代表。資料處理是由使用二元性信號的二進邏輯元件來實行。數量儲存在二進儲存元件中本章的目的是介紹多種二進位的觀念，作為後繼各章中更要深入研究時的參照材料。

1-2 二進位數字

一個十進位數字 (decimal number) 代表一個數量，儲如 7392 等

於 7 個千加 3 個百加 9 個十加 2 個一，其中千，百等是等於係數位置所所有的 10 乘冪。更正確地，7392 應寫成

$$7 \times 10^3 + 3 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 2 \times 10^0$$

可是，公認慣例是僅寫係數而將它們位置中所需要的 10 乘冪省去。一般而言，帶有十進位小數的一數字由一連串的係數作表示如下：

$$a_5 a_4 a_3 a_2 a_1 a_0 \cdot a_{-1} a_{-2} a_{-3}$$

其係數 a_j 為十個數位 (0, 1, 2, ..., 9) 中的一個，其註腳值 j 為位置值，而因此，其係數必須乘 10 的乘冪，即

$$10^5 a_5 + 10^4 a_4 + 10^3 a_3 + 10^2 a_2 + 10^1 a_1 + 10^0 a_0 + 10^{-1} a_{-1} \\ + 10^{-2} a_{-2} + 10^{-3} a_{-3}$$

因為十進位數字系統使用十個數位及其係數須乘以 10 的乘冪，這系統的底數 (base) 或基數 (radix) 為 10。二進位系統為一種不同的數字系統。二進位數字 (binary number) 系統的係數有二個可能的值：0 與 1。每個係數 a_j 應乘以 2^j 。例如，二進位數字 11010.11 的十進位等效值為 26.75，這可用係數乘以 2 的乘冪表示，即

$$1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} \\ + 1 \times 2^{-2} = 26.75$$

一般而言，在底數 r 的系統中要表示一個數字，應將其係數乘以 r 的乘冪，即

$$a_n \cdot r^n + a_{n-1} \cdot r^{n-1} + \cdots + a_2 \cdot r^2 + a_1 \cdot r + a_0 \\ + a_{-1} \cdot r^{-1} + a_{-2} \cdot r^{-2} + \cdots + a_{-m} \cdot r^{-m}$$

其中係數 a_j 值在 0 至 $r-1$ 的範圍內。為區別不同底數的數字，我們將係數用括弧包着，而寫其註腳等於其所用的底數（有時十進位數