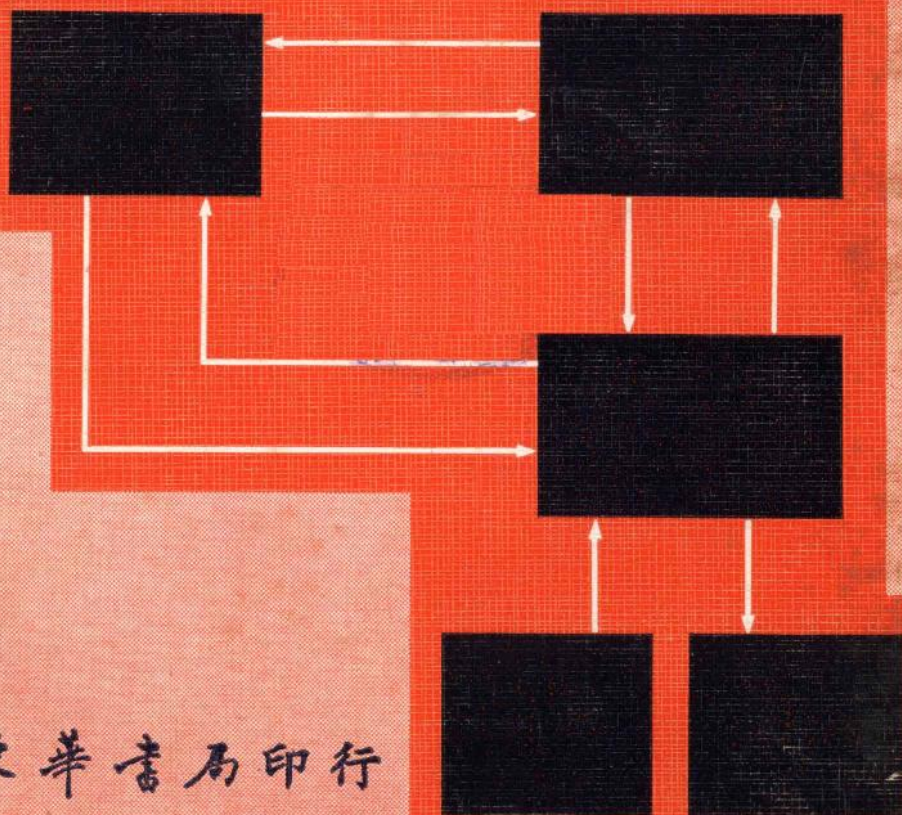


M. MORRIS MANO
Digital Logic
and Computer Design

數位邏輯與
計算機設計

下 冊

張 煌 譯



東華書局印行

數位邏輯與 計算機設計

(1979)

下 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

中華民國七十年二月初版

中華民國七十年六月二版

大學
用書

數位邏輯與計算機設計

下冊 定價 新台幣壹百肆十元整

(外埠酌加運費滙費)

譯者 張 焜

發行人 卓 鑫

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 郵撥：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

(70004)

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。它討論關於用匯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种介面單位運算。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 Abbert 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

第八章 記錄器轉移邏輯

8-1	概論	1
8-2	內部記錄器轉移	4
8-3	算術、邏輯，及移位微運算	13
8-4	條件控制陳述	18
8-5	定點二進資料	19
8-6	溢位	25
8-7	算術移位	27
8-8	十進資料	30
8-9	浮點資料	32
8-10	非數字資料	35
8-11	指令碼	40
8-12	簡單的計算機設計	46
	參考文獻	55
	問題	55

第九章 處理機邏輯設計

9-1	概論	61
9-2	處理機組織	62
9-3	算術邏輯單位	71
9-4	算術電路設計	72
9-5	邏輯電路設計	80

9-6	算術邏輯單位設計.....	83
9-7	狀況設錄器.....	86
9-8	移位器設計.....	90
9-9	處理機單位.....	92
9-10	累積器設計.....	97
	參考文獻.....	109
	問題.....	109

第十章 控制邏輯設計

10-1	概論.....	115
10-2	控制組織.....	118
10-3	硬體線結控制範例一.....	124
10-4	微程式控制.....	134
10-5	處理機單位控制.....	140
10-6	硬體線結控制範例二.....	146
10-7	PLA 控制.....	154
10-8	微程式順序器.....	158
	參考文獻.....	165
	問題.....	166

第十一章 計算機設計

11-1	概論.....	171
11-2	系統組態.....	172
11-3	計算機指令.....	176
11-4	定時與控制.....	183
11-5	指令執行.....	186
11-6	計算機的記錄器設計.....	192
11-7	控制設計.....	198

11-8 計算機控制台	208
參考文獻	209
問題	210

第十二章 微計算機系統設計

12-1 概論	214
12-2 微計算機組織	217
12-3 微處理機組織	222
12-4 指令與定址模式	231
12-5 堆層、次常式，與中斷	240
12-6 記憶器組織	251
12-7 輸入 - 輸出界面	257
12-8 直接記憶器出入	268
參考文獻	273
問題	274

第十三章 數位積體電路

13-1 概論	278
13-2 雙極電晶體特性	280
13-3 RTL 與 DTL 電路	285
13-4 積體注入邏輯 (I^2L)	289
13-5 電晶體 - 電晶體邏輯 (TTL)	291
13-6 射極耦合邏輯 (ECL)	302
13-7 金氧半 (MOS)	306
13-8 互補 MOS (CMOS)	309
參考文獻	312
問題	312

附錄 部分問題答案	315
-----------------	-----

索引	322
----------	-----

第八章

記錄器轉移邏輯

8-1 概 論

數位系統乃是用正反器與邏輯閘所構成的順序邏輯系統。在以上二章中已指出一種順序電路可利用狀態表來設計。但是，一個大的數位系統想要以一個狀態表來詳細表明，雖然不是不可能，可是由於狀態數量多，做起來將是非常困難的。要克服這種困難，大的數位系統一定採用模式方法 (modular approach) 來設計。所謂模式方法就是將要設計的系統分割成執行各功能的模式小系統。標準的模式係由記錄器，計數器，解碼器，多工器，算術元件，及控制邏輯等數位功能分別結構組成。各不同的模式以共用資料與控制路徑互相連接來形成一數位計算機系統。典型的數位系統模式為數位計算機的處理機單位 (process or unit)。

數位功能互相連接來形成數位系統模式，不能用組合邏輯或順序邏輯技術來描述。這些技術乃描述邏輯閘與正反器階層上的數位系統而發展的，並不適合於描述數位功能階層上的系統。要描述諸如加法器，解碼器，及記錄器等功能組成的數位系統，需要使用較高級的算術記號。記錄器轉移邏輯 (register-transfer logic) 方法就是滿足這要求的。在這方法中，選擇記錄器是數位系統中的最初組件，不願像順序邏輯中選擇邏輯閘與正反器。這樣地做，在諸記錄器中所儲存的資料，就很容易清楚地描述它們之間的資訊往返及處理工作。記錄器轉移邏輯方法使用一組表白或陳述，像程式語言中所用的陳述相似。這種記號對各種數位功能間說明所規定的互相連接，供給了必需的工

2 數位邏輯與計算機設計

具。提出這記錄器轉移邏輯方法，其重要特性是它的方法與人們喜歡說明數位系統的運算有密切關係。

這方法的基本組件就是描述運算階層中數位系統的那些組件。數位系統的運算最好以下列說明來描述：

1. 系統中一組記錄器以及它們的功能。
2. 記錄器中所儲存的二進碼資訊。
3. 記錄器中所儲存資訊要執行的運算。
4. 起動運算順序的控制功能。

這四部分是描述數位系統所用記錄器轉移邏輯方法的基礎。

照記錄器轉移邏輯記號中所定義者，記錄器(register)不但含有第七章中定義作一群二進儲存格，而亦包括各類其他記錄器，諸如移位記錄器，計數器，及記憶器單位。計數器被視作為記錄器者，其功能即將它內部所儲存的資訊增量1。記憶器單位被視作能存資訊的一群儲存記錄器。單獨一個正反器作為一個1 - 數元記錄器。在事實上，照這命名的方法，任何順序電路的正反器及其有關的閘均稱為記錄器。

記錄器中所儲存的二進資訊(binary information)可為二進位數字，二進編碼十進位數字，字數符元，控制資訊，或其他二進編碼資訊。對記錄器中所儲存資料執行運算視所遭遇的資料種類而定。數字以算術運算來操作，而控制資訊則常用邏輯運算來操作，例如記錄器中要指定的定置與清除數元，就要邏輯運算操作。

在記錄器中要儲存資料所執行的運算稱為微運算(microoperations)。微運算為一種基本運算而在一個鐘衝週期之間能並行執行者。其運算的結果能取代記錄器的以前二進資訊，或被轉移至另一記錄器。微運算的實例為移位，計數，相加，清除，與加載。在第七章中所介紹的數位功能是實現微運算的記錄器。用並行加載的計數器有執行微運算增量與加載的能力。雙向移位記錄器有執行右移與左移微運算的能力。第五章中所介紹的組合MSI功能能用於執行微運算的一些應用中。關於有二進位數字的二個記錄器內含要執行相加微運算，一個二

進並加器是有用的。若這運算是以並行來做的話，一個微運算僅需要一個鐘衝就可執行。在串型計算機中，一個微運算需要等於系統中字組時間的許多脈衝。這情形是等於移位記錄器中的數元數目，當執行一個微運算時，就串列轉移資訊。

起動運算順序的控制功能由定時信號組成，每次連續一個運算。某些全看以前運算結果的情況亦可能決定控制功能的狀態。控制功能為一個二進變數，當在一個二進狀態時它起動一運算，而在另一個二進狀態時，它則制止該運算。

本章的目的是稍作詳細介紹記錄器轉移邏輯方法。本章提出一種符號標記，以表示記錄器，指定記錄器內含中的運算，及指明其控制函數。這符號標記有時稱為記錄器 - 轉移語言 (register-transfer language) 或計算機硬體描述語言 (computer hardware description language)。此處所採用的記錄器轉移語言以愈單純愈好，可是，應予了解，對於記錄器轉移語言尚無標準的符號法，不同的來源採用不同的慣例。

記錄器 - 轉移語言中的陳述由控制函數 (control function) 與一系列微運算組成。其控制函數 (有時亦可能略去) 指明其控制條件及執行所列微運算的定時順序。微運算指定記錄器中所儲存的資訊在某一時衝期內要執行的基本運算。在數位系統中最常遇到的微運算型式可分成四類：

1. 當二進資訊由一個記錄器轉移至另一個記錄器時，內部記錄器轉移 (interregister-transfer) 微運算並不變改其資訊內含。
 2. 算術微運算 (arithmetic microoperation) 執行記錄器中所儲存數字中的算術。
 3. 邏輯微運算 (logic microoperation) 執行記錄器中所儲存各對數元的運算，諸如AND與OR者。
 4. 移位微運算 (shift microoperation) 指定移位記錄器的運算。
- 第 8-2 節至第 8-4 節為一組基本的微運算作定義。對該組中的微

4 數位邏輯與計算機設計

運算指定有特別的符號，而每個符號被詳細地說明，連同對應的數位硬體，使能完成所陳述的微運算。現有事實重要須了解的，記錄器轉移邏輯符號是直接有關於它定義的諸記錄器與其數位的功能，而不能相分離的。

在記錄器中所儲存的資訊上執行微運算，視其記錄器中存在的資料型別而定。在數位計算機中通常所找到的二進資訊可分成三類：

1. 數字資料，諸如二進位數字，或二進編碼十進位數字，用於算術計算方面。
2. 非數字資料，諸如字數符元或其他二進編碼符號，用於特別的應用方面。
3. 指令碼，位址，及其他控制資訊，用於指定系統中資料處理需求方面。

第 8-5 節至第 8-9 討論對於算術微運算的數字資料表示法以及它們的關係。第 8-10 節解釋關於處理非數字資料的邏輯微運算法。指令碼的表示法以及它們用微運算的操作則在第 8-11 節與第 8-12 節中介紹。

8-2 內部記錄器轉移

數位系統中的記錄器用大寫字母（有時跟有數字）來標明，指示記錄器的作用。例如，關於記憶器單位存放位址的記錄器常稱為記憶位址記錄器（memory address register），而以英文字首大寫字母 MAR 標示。記錄器的別種標示計有 A, B, R1, R2, 及 IR。 n -數元記錄器的正反器或諸格自左或自右順次由 1 至 n （或由 0 至 $n-1$ ）編號。圖 8-1 所示為以方塊圖形式表示記錄器的四種方法。圖 8-1 (a) 所示以矩形方塊，在其中有記錄器的名稱，為表示記錄器最通常的方法。圖 8-1 (b) 所示能區別個別的格，每格以字母 A 右下角數字標示，其字母 A 指示記錄器的名稱。一個記錄器中諸格的編號由右至左在方塊頂上標出，如圖 8-1 (c) 所示為 12 數元記錄器 MBR。一個 16 數元記錄器被區

分成二部分，如圖 8-1 (d)所示，數元 1 至 8 被指定為符號字母 L （對低的言），而數元 9 至 16 被指定為符號字母 H （對高的言）。這 16 數元記錄器的名稱為 PC 。符號 $PC(H)$ 指記錄器的八個高階格，及符號 $PC(L)$ 則指記錄器的八個低階格。

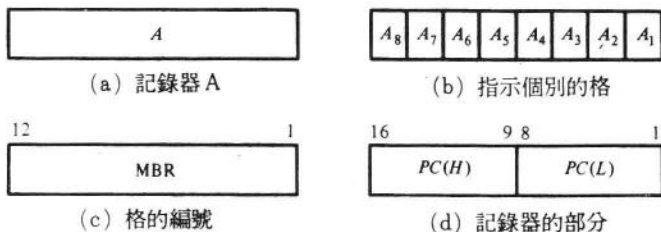


圖8-1 記錄器的方塊圖。

在記錄器轉移語言中，記錄器可用宣告陳述 (declaration statement) 來指明。例如，圖 8-1 所示的記錄器能用宣告陳述作定義，如

```
DECLARE REGISTER A(8), MBR(12), PC(16)
DECLARE SUBREGISTER PC(L) = PC(1-8), PC(H) = PC(9-16)
```

可是，在本書中我們決定不用宣告陳述來定義記錄器；而將以圖 8-1 中方塊形式表示記錄器代替之。為模擬目的而言，方塊所示的記憶器能容易轉換成宣告陳述。

由一個記錄器至另一個記錄器的資訊轉移可利用替換運算子 (replacement operator) 以符號形式來標示。其陳述：

$$A \leftarrow B$$

指示記錄器 B 的內含轉移至記錄器 A 中。它指明 A 的內含以 B 的內含來替換。依照定義，原始記錄器 B 的內含在轉移之後並不改變。

指明記錄器轉移 (register transfer) 的陳述，意含着原始記錄器的輸出至預定記錄器格輸入的電路為可用的。在正常時，我們不要

這種轉移在每一個時衝發生，而僅在預定的情形下才實現。決定轉移發生時的二進情形稱為控制函數。控制函數為一個二進函數，這意謂它可以等於 1 或 0。轉移運算陳述包含有控制函數者如下：

$$x'T_1: A \leftarrow B$$

此控制函數以一冒號終止。它以符號表示其需求，僅當布耳函數 $x'T_1 = 1$ ，就是當變數 $x = 0$ 與定時信號 $T_1 = 1$ 時，其硬體才執行其轉移運算。

在記錄器轉移語言中每個陳述意含要完成轉移時的硬體結構。圖 8-2 所示為以上所寫陳述的製作。記錄器 B 的輸出被連接至記錄器 A 的輸入，而在這連接中接線的數目是等於記錄器中數元的數目。記錄器 A 必須有一加載控制輸入，以便當其控制函數為 1 時，它才能被啟用。雖在圖中尚未畫出，但記錄器 A 已假設有另一外加輸入連續地接受同步鐘衝。控制函數是利用一個反相器與一個 AND 閘來產生的。產生定時變數 T_1 的控制單位亦假設和作用於記錄器 A 的同一鐘衝相同步。其控制函數等待在一個鐘衝週期中（當其定時變數等於 1 時），及其轉移則在鐘衝的次一轉變期間發生。

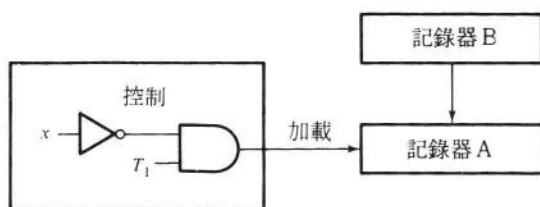


圖8-2 陳述 $x'T_1: A \leftarrow B$ 的硬體製作。

記錄器轉移邏輯的基本符號如表 8-1 所列。大寫字母（可能跟有數字）是用來指示記錄器。註腳則用來區別記錄器個別的格。括弧是用來定義記錄器的一部分。箭頭指示資訊的轉移與其轉移的方向。冒號終止一控制函數，而逗點是用來分開二個或更多個在同時執行的運算。其陳述