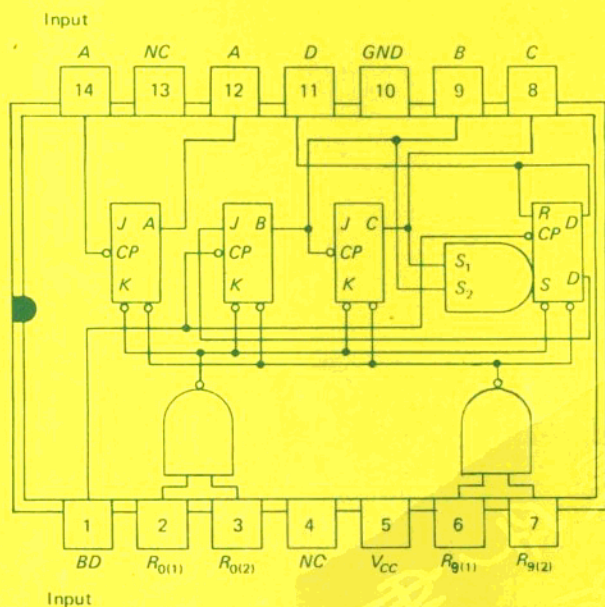


數位積體電子學

Digital
Integrated
Electronics

HERBERT TAUB
DONALD SCHILLING

王家騏 編譯



復文書局

原 序

在1956年間，McGraw-Hill 書局出版了 J. Millman 和 H. Taub 合着的教科書“脈衝和數位電路”。該書介紹了甚為完整的數位電子學。而當時半導體裝置與電路尚在萌芽階段，因此作者只在出書前幾天，於最後一章添加了與半導體元件有關的內容。十年之後，在數位電路方面半導體裝置完全取代了真空管。爲了配合這種發展，這兩位作者準備了一冊取代前書的“脈衝數位與交換波形 (pulse digital and switching waveforms)”，於1965年間出現市面。在這冊新書中，作者適當地強調半導體元件勢不可擋的重要性，而真空管電路僅偶而被提到。現在又經過了大約十年，積體電路的進步促成了本書的問世。然而，本書想作1965年版本的延續而非取代。在本書裏，我們說明和分析所有組合數位電路及系統的基本積體電路方塊。就教科書所能及，本書儘量提出最新的東西。跟前一冊書的情況一樣，爲了如何傳授而大費心思。我們儘可能使說明清晰又容易了解，且不致於犧牲內容的深度與完整性。正由於這個理由，我們希望本書不僅能在課堂上被採用，也希望能做爲想知道目前發展的讀者之自修課程。

本書曾被紐約市立學院電機系三、四年級採用爲兩學期的課程，而且也作爲兩個研究所課程的主要內容。本書內容也曾被貝爾實驗室採用爲技術人員進修的兩學期課程，同時被洛克希德地方的 NASA 採用爲工程人員進修的兩學期課程，而且被喬治 - 華盛頓大學採用爲在職進修的短期課程。

本書假設讀者已經具有半導體裝置及電路的基礎。然而，我們在第一章裏，複習一些關於半導體裝置之開關模態 (switching mode) 下運算的特殊事件。半導體具有極爲複雜和非線性的伏安特性。正確分析半導體電路可能造成相當複雜的數學運算。故在第一章中，我們提出一些方便而簡化的分析，導出一些非常有用的近似結果。

第二章第一部份討論運算放大器。這種放大器用在線性工作而不是開關模態，並非我們的主題。但是在某些情況下，我們發現運算放大器可能出現而其他零件都是數位電路。更有甚者，運算放大器經由自然的延展而導至第二部份比較器的討論。比較器是真正重要的開關裝置。

第三章介紹邏輯變數，布爾代數的觀念，也介紹了分析邏輯閘組成的電路之方法，同時提出卡氏圖及各種應用。在這一章裏，我們假設讀者沒有這方面的知識，所以詳細說明設計和分析邏輯電路的所有原理，而這是了解本書所必要的。反過來說，若讀者已經熟悉這些題材，就可跳過此章。

從第四章開始是邏輯的電子學。第一部份討論電阻 - 電晶體邏輯 (RTL)，而第二部份則討論積體 - 注入邏輯 (IIL)。在新的設計中，現在已經不使用 RTL，但仍然有一些理由值得考慮 RTL 邏輯族。它是最先使用的 IC 邏輯族，目前仍有許多設備使用這種 IC 來運算。其次，再研究其簡單特性，並經由 RTL 這個理想工具提出許多邏輯閘電子學的基本觀念和通用重要原理。最後一點，它跟最近發展的邏輯族——IIL 之間有一個有趣且微妙的關係。第五章考慮二極體 - 電晶體邏輯 (DTL)。而在 DTL 族中，我們發現了高臨限邏輯 (HTL)，其在高雜訊環境下有廣泛的用途。

第六、七兩章分別討論電晶體 - 電晶體邏輯 (TTL) 和射極耦合邏輯 (ECL)。目前這兩種邏輯是應用最廣泛的飽和及非飽和族。因此對這兩種邏輯的分析甚為深入。尤其是 ECL，它在傳輸線上的信號傳輸特性必須加以重視。不熟悉傳播的讀者將可從附錄 A 得到足夠的初步知識。前面介紹的“脈衝數位與交換波形”第三章中更詳盡的敘述，第八章提出金屬氧化半導體 (MOS) 邏輯和互補對稱 (CMOS) 邏輯。

我們已經介紹了許多種邏輯族 (第四章到第八章)，第九章我們開始研究由這些閘組合而成的基本數位結構。第九章相當詳盡的研討各類型正反器的基本原理，此外還分析了幾個代表性商用單元的電氣

特性。時序 (timing) 問題在同步系統中甚為重要，為了使正反器能修改至克服時序問題，我們也耗盡心思加以研討。第十章討論記錄器和計數器。本章說明了設計任意基數同步計數器及紋波計數器的程序，而且利用記錄器來產生假隨機 (pseudorandom) 和其他的指定序列。

第十一章研究執行運算術運算的邏輯電路。尤其強調加法 (和減法) 運算，因為通常乘法和除法可經由加法 (或減法) 運算的邏輯法則來執行。在此，我們更詳細說明負數表示法，及減法如何以 $1'$ 補數和 $2'$ 補數符號經由實際上執行加法運算的邏輯電路來實現。我們也提出每一個微處理機 (microprocessor) 心臟部份——算術邏輯單元 (arithmetic logic unit) 在加法運算方面，使用飽和邏輯來作溢位修正的情形。第十二章介紹半導體記憶體。在此我們省略了磁蕊記憶體，因為這種記憶體即將被半導體系統所取代。本章包含順序記憶體，僅讀出記憶體和任意儲取動態與靜態記憶體。而含有場效應電晶體，CCD 和雙接面電晶體的記憶體之電特性也都有詳細的說明。

第十三與第十四章，我們討論數位和類比信號之間的介面連接問題。第十三章提出了類比開，類比多 2 器，取樣和保持電路，積分和倒出電路等。而第十四章介紹了數位 - 類比系統與類比 - 數位系統。在此研究的各種類比 - 數位系統都是目前廣泛使用的代表性系統。最後在第十五章中，我們討論計時電路——不穩與不穩多諧器的積體等效電路。

本書所提供的電路都是數位電路中可能遭遇到的典型例子，我們也提出 400 多個問題，範圍從例行的練習到甚為深奧的設計問題。教師可從出版商那裏得到解答手冊。也有答案目錄。作者很高興能供給關於本書，目前在 CCNY 使用的實驗器材。

我們極為感謝同事及同學給予我們的鼓勵。尤其要感謝 T. Apelewicz 先生，為我們準備了解答手冊；J. Garodnick 博士為本書指供校對並提出許多批評和指教，Edward Jynan 先生和 Ronald Schilling 博士的慷慨幫助，我們才能得到許多非常有用的摩托羅拉

公司出版的技術文獻。最後我們由衷感激 Joy Rubin 太太為原稿打字。

HERBERT TAVB
DONALP SCHILLTNG

目 錄

第一章 電子裝置

1.1	理想的半導體二極體	1—1
1.2	二極體特性的溫度係數	1—5
1.3	二極體傳渡電容	1—6
1.4	稽納二極體	1—7
1.5	用於積體電路中的二極體	1—9
1.6	電晶體當作開關使用	1—10
1.7	電晶體特性的解析式子	1—12
1.8	截止時的電晶體	1—16
1.9	飽和狀態時的電晶體開關	1—18
1.10	衣伯—莫耳方程式對飽和的應用	1—21
1.11	場效電晶體	1—28
1.12	金—氧—半導體場效電晶體	1—33
1.13	MOS 開關	1—37
1.14	MOS FET 開關的輸入—輸出特性	1—40
1.15	互補對稱型	1—41
1.16	輸入保護	1—44
1.17	二極體的交換速度	1—45
1.18	儲存時間及過渡時間	1—47
1.19	肖特基二極體	1—49
1.20	雙極電晶體的開關速率	1—49
1.21	FET 裝置的交換速度	1—54
1.22	上升和下降時間及延遲	1—54

第二章 運算放大器與比較器

2.1	運算放大器	2—1
-----	-------	-----

2.2	虛接地	2-2
2.3	運算	2-3
2.4	輸出阻抗	2-6
2.5	運算放大器的電子學	2-7
2.6	總放大器	2-10
2.7	不反相放大時使用運算放大器	2-11
2.8	不反相放大器的阻抗	2-12
2.9	實際考慮	2-13
2.10	補償	2-14
2.11	共態排斥比	2-15
2.12	運算放大器的特性	2-16
2.13	比較器	2-18
2.14	積體電路放大器比較器	2-19
2.15	積體電路放大器比較器的計算	2-21
2.16	比較器的特性	2-26
2.17	史米特觸發器電路	2-27
2.18	史米特觸發器的實例	2-31

第三章 邏輯電路

3.1	概論	3-1
3.2	單個二進變數的函數	3-2
3.3	二個二進變數的函數	3-3
3.4	OR函數	3-5
3.5	NAND運算與NOR運算	3-6
3.6	EXCLUSIVE OR運算	3-8
3.7	其他函數	3-10
3.8	邏輯變數	3-11
3.9	0.1符號	3-14
3.10	必要及充分運算	3-15

3.11	布耳代數定理	3—17
3.12	一個範例	3—20
3.13	二進位數系統	3—22
3.14	格雷反射二進碼	3—25
3.15	邏輯函數的標準式：標準的乘積和	3—26
3.16	標準的和乘積	3—29
3.17	邏輯函數最小項及最大項之說明	3—31
3.18	邏輯函數的卡諾圖形表示法	3—33
3.19	二個、三個、四個變數的卡式圖表示法	3—36
3.20	用卡氏簡化邏輯函數	3—37
3.21	卡比圖上較大的組群	3—40
3.22	五個及六個變數的卡氏圖	3—42
3.23	卡氏圖的用法	3—44
3.24	函數下以全及項表示時的作圖	3—49
3.25	使用 NAND 或 NOR 閘的合成	3—51
3.26	不完整地指定函數	3—53

第四章 電阻器—電晶體邏輯(RTL)與積體 —注入邏輯(ILL)

4.1	電阻器—電晶體—邏輯(RTL)閘	4—1
4.2	直接耦合電晶體—邏輯(DCTL)閘	4—2
4.3	DCTL閘的電流貪取	4—6
4.4	電阻—電晶體邏輯(RTL)	4—6
4.5	扇出	4—9
4.6	串級RTL閘的輸入—輸出電壓特性	4—14
4.7	RTL緩衝器	4—20
4.8	RTL的互斥—或閘	4—24
4.9	廠商規格	4—25
4.10	並聯RTL閘	4—27
4.11	工作電壓規格	4—30

4.12	傳播延遲時間	4—31
4.13	積體注入邏輯	4—35
4.14	IIL的實體佈置	4—40
4.15	IIL解碼器	4—44
4.16	電流和電壓準位	4—44

第五章 二極體—電晶體邏輯

5.1	二極體—電晶體邏輯(DTL)閘	5—1
5.2	扇出	5—4
5.3	積體電路DTL	5—7
5.4	輸入—輸出特性	5—10
5.5	DTL閘的廠商規格	5—12
5.6	線邏輯—AND接線	5—16
5.7	高臨限邏輯	5—19
5.8	HTL閘的輸入—輸出特性	5—20
5.9	廠商規格	5—21

第六章 電晶體—電晶體邏輯

6.1	電晶體—電晶體邏輯(TTL)	6—1
6.2	TTL和DTL的比較	6—2
6.3	輸入電晶體	6—3
6.4	主動拉昇器	6—5
6.5	忽略輸入電晶體的輸入—輸出特性	6—6
6.6	輸入電晶體的輸入—輸出特性	6—13
6.7	多射極電晶體	6—16
6.8	TTL閘的輸入—安特性	6—18
6.9	TTL閘的輸出伏—安特性	6—20
6.10	廠商資料與規格：溫度關聯性與雜訊免除性	6—23
6.11	電源的電流流出	6—27

6.12	TTL 閘的類型	6—28
6.13	體基 TTL	6—32
6.14	TTL 閘的其他邏輯	6—34

第七章 射極耦合邏輯

7.1	引言	7—1
7.2	ECL 閘	7—2
7.3	ECL—電晶體的電壓	7—3
7.4	傳輸特性：OR 輸出	7—4
7.5	NOR 輸出	7—8
7.6	廠商規格：傳輸特性	7—9
7.7	扇出	7—11
7.8	運算速度	7—13
7.9	溫度補償的偏壓供給	7—15
7.10	ECL 邏輯之簡易性	7—17
7.11	負供給電壓	7—18
7.12	電位轉換	7—20
7.13	ECL 閘的聯接	7—23

第八章 MOS 閘

8.1	MOSFET 的分析方程式	8—1
8.2	溫度效應	8—4
8.3	MOS 反相器	8—4
8.4	CMOS 反相器	8—6
8.5	CMOS 反相器的傳輸特性計算	8—8
8.6	MOS 閘	8—9
8.7	MOS 閘中的上升時間	8—12
8.8	下降時間	8—14
8.9	CMOS 閘	8—16
8.10	CMOS 閘中的上升與下降時間	8—17

8.11	廠商規格	8 — 18
8.12	B J T 閘和CMOS 閘之間的介面連接	8 — 20

第九章 正反器

9.1	引言	9 — 1
9.2	專有名詞	9 — 1
9.3	正反器當作記憶元件	9 — 2
9.4	用NAND 閘的正反器	9 — 4
9.5	無震顫開關	9 — 5
9.6	時序正反器	9 — 8
9.7	正反器的交連：主奴式正反器	9 — 10
9.8	交流耦合邊緣觸發正反器	9 — 15
9.9	時序交流耦合正反器	9 — 18
9.10	電容性儲存正反器	9 — 21
9.11	傳播延遲正反器	9 — 22
9.12	J K 正反器	9 — 23
9.13	D型正反器	9 — 25
9.14	R T L S R 正反器	9 — 28
9.15	D T L 正反器	9 — 29
9.16	R T L 傳播延遲正反器	9 — 32
9.17	E C L 正反器	9 — 34
9.18	J K 交流耦合E C L 正反器	9 — 36
9.19	製造商之規格說明	9 — 39
9.20	T T L J K 正反器	9 — 40
9.21	M O S 正反器	9 — 43

第十章 記錄器和計數器

10.1	移位記錄器	10 — 1
10.2	時序	10 — 4

10.3	串聯並聯資料傳送	10—4
10.4	終止—環繞進位	10—4
10.5	移左—移右記錄器	10—5
10.6	紋波計數器	10—6
10.7	改進計數器速度的方法	10—10
10.8	非二進位計數器	10—13
10.9	基數—3 計數器	10—13
10.10	基數—5 計數器	10—16
10.11	鎖住	10—18
10.12	基數計數器的組合	10—22
10.13	其他計數器設計	10—24
10.14	上數／下數紋波計數器	10—26
10.15	上數／下數同步計數器	10—27
10.16	環計數器	10—29
10.17	序列產生器	10—32

第十一章 算術運算

11.1	兩個二進數的加法	11—1
11.2	全加器	11—3
11.3	串聯加法器	11—5
11.4	並聯加法	11—6
11.5	兩個以上的數目之加法	11—8
11.6	快速度加法器；預測進位	11—11
11.7	減法	11—14
11.8	補數	11—16
11.9	在暫存器中正負數的表示法	11—19
11.10	經由互補運算的減法及加法	11—21
11.11	2 的互補數的加法	11—22
11.12	1 之補數的加法與減法	11—23

11.13	序列正負數的相加與相減	11—25
11.14	飽和加法器	11—26
11.15	定比(比例變動).....	11—28
11.16	乘法.....	11—32
11.17	除法	11—34
11.18	算術邏輯單元	11—36

第十二章 半導體記憶器

12.1	記憶器的種類	12—1
12.2	移錄器順序記錄器.....	12—3
12.3	MOS 記錄器級	12—5
12.4	兩相非比率移錄器	12—10
12.5	四相形比例記錄器級	12—12
12.6	CMOS 記錄器級	12—13
12.7	靜態移位記錄器級	12—16
12.8	三相靜態記錄器級	12—18
12.9	僅讀出記錄器	12—20
12.10	ROM 電路	12—22
12.11	可設計和可洗掉的ROM	12—24
12.12	ROM 的應用	12—24
12.13	雙極接面電晶體任意儲取記憶元	12—27
12.14	其他雙極電晶體記憶元	12—27
12.15	MOS RAMS	12—31
12.16	RAM 的組織	12—37
12.17	半導體記憶器積體電路晶片的並聯	12—39
12.18	電荷耦合裝置	12—43
12.19	電荷的儲存	12—45
12.20	電荷的傳送	12—47
12.21	輸入和輸出安排	12—50

第十三章 類比開關

13.1	類比開基本運算原理	13-1
13.2	交換電路的應用	13-3
13.3	二極體傳輸開	13-12
13.4	雙極體接合面電晶體開	13-25
13.5	FET開	13-28
13.6	運算放大器	13-29
13.7	有運算放大器負載的FET開	13-31
13.8	取樣保持電路	13-34
13.9	FET開鹽動開	13-40
13.10	CMOS開	13-43
13.11	類比開關的應用	13-46
13.12	S/H放大器的廠商規格	13-50

第十四章 類比—數位轉換

14.1	引言	14-1
14.2	取樣定理	14-2
14.3	時間分割多2	14-4
14.4	量化	14-6
14.5	對比電阻D/A變換器	14-9
14.6	R—2R梯式等效電路	14-13
14.7	D/A變換器開關	14-16
14.8	電流驅動梯型D/A轉換器	14-19
14.9	轉化梯形D/A變換器	14-23
14.10	D/A轉換器的輸入車	14-26
14.11	D/A轉換器的規格	14-30
14.12	A/D轉換器：並聯比較器類型	14-33
14.13	連續不斷近似轉換器	14-40

14.14	計數轉換器	14 — 45
14.15	雙斜度變換器	14 — 48
14.16	各類型轉換器	14 — 50
14.17	利用電壓頻率轉換的變換器	14 — 50
14.18	使用電壓到時間轉換的轉換器	14 — 53
14.19	A/D變換器之特性	14 — 54
14.20	S/H與A/D變換器間之連繫	14 — 55
14.21	德特調變	14 — 57
14.22	調整的德特調變	14 — 61

第十五章 計時電路

15.1	CMOS多諧器	15 — 1
15.2	CMOS不穩多諧器	15 — 8
15.3	ECL闌單穩態多諧振盪器	15 — 10
15.4	短時序期間的多諧器	15 — 16
15.5	積體電路TTL單穩態多諧盪器	15 — 18
15.6	積體電路計時器	15 — 20

附錄 傳輸線

A. 引言	附 1
A. 特性阻抗	附 3
A. 反射	附 4
A. 多次反射	附 5
A. 波形上昇時間的效應	附 7

第一章 電子裝置

(ELECTRONIC DEVICES)

與類比電路一樣，用在數位處理電路中的電子裝置包括二極體、雙極體以及場效電晶體。我們假定讀者熟悉這些裝置，但主要地僅包括類比電路的應用中用作直線性元件者。在數位電路中這些裝置被使用在非線性方式方面，亦即用在交換模式中；它們突然地被驅至非導電與導電的兩極端之間。在本章中，我們將複習有關這些裝置的某種令人興趣的情形，當用作開關時，特別着重於它們的行為。

1.1 理想的半導體二極體 (THE IDEAL SEMICONDUCTOR DIODE)

就一種理想的 pn 接面二極體 (junction diode) 而言，其電流 I 對其電壓 V 的關係以方程式

$$I = I_0 (\exp^{V/V_T} - 1) \quad (1.1-1)$$

表示。依照圖 1.1-1(a) 所示，當電流由二極體的 P 邊流向 n 邊時，其電流 I 為正。其電壓 V 為 P 邊至 n 邊的電壓降。當 V 為正時，其二極體被前向偏壓著。其符號 V_T 代表溫度的電子伏特等效值，而為

$$V_T = \frac{kT}{e} \quad (1.1-2)$$

此處 k = 波茲曼常數 (Boltzmann's constant)

$$= 1.38 \times 10^{-23} \text{ 焦/}^\circ\text{K}$$

$$e = \text{電子電荷} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ 庫}$$

$$T = \text{絕對溫度, } ^\circ\text{K}$$

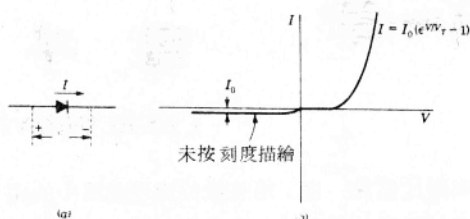


圖 1.1-1 (a) 定義式 (1.1-1) 所用的符號 I 及 V
(b) 理想二極體的伏特—安培特性曲線

代入公式，我們得 $V_T = T / 11,600$ 伏而在室內溫度 ($T \approx 300^\circ \text{K}$) 時， $V_T \approx 25$ 毫伏。

根據原理，二極體伏—安特性 (volt-ampere characteristic) 的形式如圖 1.1-1 (b) 所示當其電壓 V 為正而幾倍於 V_T 時，公式 (1.1-1) 中的指數項甚大於一，故括弧中的 -1 項可予略去。因此除了原點附近的小範圍外，其電流隨其電壓作指數式增加。當二極體被逆向偏壓，且 $|V|$ 大於 V 幾倍時 $|I| \approx I_0$ 。所以這逆向電流為恒值，而與所用的逆向偏壓無關。是以 I_0 稱作為逆向飽和電流 (reverse saturation current)。因為 I_0 值較 I 典型值少好幾個數級，圖 1.1-1 (b) 所示中的這電流使用著非常大的比例。

如照所述者，我們對二極體（及其他元件）的作用猶如開關將感興趣，當二極體在逆向偏壓時，它為一斷路開關，而在前向偏壓時，則為一閉路開關。對我們所感興趣的電路言，我們通常將獲得，當二極體應該使它在電路覺得像閉路開關時，它可有毫安數級的典型電流，即 0.1 至 10 毫安範圍。究竟要多大的電壓跨接於二極體以產生這標稱前向電流，當然須視二極體的截面積而定。若一個二極體在所加電壓 V 時產生 1 微安前向電流時，則截面積 $1,000$ 倍大的第二個二極體應產生 1 毫安電流。