

數位系統故障診斷

編著者 ■ 周 坦 博士



新學誠友出版中心 編行

關於 新學識文教出版中心

● 組合性質

由大專校、教、所長
科系主任及專家學者
百餘人所聯組、具有
作者、讀者、出版者
綜合特質的文教單位

● 共同理想

開 發 心 智 能 源
創 造 出 版 成 果
分 享 讀 者 作 者

● 一致行動

全面推行科學中化
促進國家學術獨立
提高國民精神所得

出版說明

■ 隨著數位系統（數位電路、數位計算機）在國民經濟和國防各部門的廣泛應用，如何提高和保證這些系統的有效性和可靠性就成了一個很迫切的問題。故障診斷技術就是解決這個問題的方法之一。它在計算機科學中是一個新課題，才只有十幾年的歷史。它的一些概念和方法正在迅速地變化，而且一些主要問題還沒有完全解決。雖然在這方面做了大量工作，但是，許多成果的資料却分散在各種技術雜誌、會議文集和內部資料裏。本書試圖對以前的故障診斷技術發展歷史和情況以及新的動向作一比較全面的介紹。以幫助讀者找到故障診斷技術的入門。

■ 本書共有六章：第一章是全書內容概述；第二章敘述了故障診斷技術的一些基本概念和歷史背景；第三章介紹了當時較成熟的產生故障測試模式的幾種方法；第四章對一個實際的故障模擬程序系統——時序分析程序進行了剖析；第五章闡述了把模擬數據編成故障字典的幾種方法；第六章介紹了一些新的動向。由於此一技術時在進步之中，所以對新的不同程度地進展，還需不斷參考其他文獻。

■ 本書可供數位電路系統、數位計算機設計工作者、軟件編制人員參考，也可供有關計算機專業的工程技術人員和大專學生參閱。

■ 由於故障診斷是一個新的課題，且本書在國內尚屬初創性出版，許多術語尚未統一，不少內容尚在發展，其缺點在所難免，至盼讀者批評指正。

新華書店出版中心 李曉 謹誌
發行人兼主編

第1章 緒論

- 1-1 正確操作計算機 (1-1)
- 1-2 元件故障的應變準備 (1-1)
- 1-3 檢修現代計算系統的測試過程 (1-2)

第2章 診斷數位電路故障的基本認識

- 2-0 本章簡介 (2-1)
- 2-1 定義和假設 (2-2)
- 2-2 計算機診斷技術的回顧與檢討 (2-8)
- 2-3 典型的測試過程之模式 (2-10)
- 2-4 思維實驗 (2-11)
- 2-5 時序與組合的測試過程 (2-12)
- 2-6 故障字典在組合測試中的應用 (2-14)

第3章 測試的產生、選擇和檢驗

- 3-0 本章簡介 (3-1)
- 3-1 產生測試的組合電路(d-算法介紹) (3-2)
- 3-2 產生測試的時序電路 (3-32)
- 3-3 測試最小化的方法 (3-44)
- 3-4 模擬故障的方法 (3-61)

第4章 時序分析程序

- 4-0 本章簡介 (4-1)
- 4-1 分析程序的功能 (4-2)
- 4-2 分析程序的步驟 (4-4)

4-3 程序結構 (4-18)

4-4 分析程序的應用 (4-25)

第5章 故障字典

5-1 引言 (5-1)

5-2 嚴格的匹配字典 (5-2)

5-3 輔助方法 (5-6)

5-4 影響「字典」的因素 (5-12)

5-5 結論 (5-14)

第6章 數位電路故障診斷技術的發展

6-0 本章簡介 (6-1)

6-1 數位故障模擬技術的新動向 (6-1)

6-2 故障診斷技術的新成就 (6-7)

6-3 未來的預測 (6-10)

1

緒 論

1-1 正確操作計算機

隨着數字計算系統應用範圍的擴大，保證計算機系統工作的正確性的任務，逐步成爲一個重要的課題。過去，計算機主要應用在孤立作業和批量處理方面，因而未檢測出的硬件故障造成的危害還不很大。現在我們看到計算機聯機與及（分）時應用與日俱增，例如，化學過程和核反應堆的控制。軍事系統的管理和控制……凡此任何一方面的應用，計算機的不正確操作都將會導致一場災難。同時，數字計算機的容量擴大和複雜性的增加也使確保機器正確操作變得越來越困難。

1-2 元件故障的應變準備

對付元件故障有兩種基本不同的途徑。其中哪一種方法都可以用硬件、軟件或兩種結合起來實現。一個途徑是**掩蔽故障**造成的影響，另一個途徑是用診斷程序來**檢測故障**。故障掩蔽可以延遲損壞的時間，如果時間很長，大量故障積起來，最後總掩蔽不住。因此，掩蔽故障的方法祇適用於宇宙飛船的制導等應用，那裏需要在較短的時間內保證機器正常工作，而修理確很困難，甚至不

可能。但像單獨作業或批量處理裝置，允許停機，故可採用故障診斷加修理的方法。雖然這對用戶不便，並給批量處理服務造成困難，但在檢測出故障並修復後，任務仍可以重新開始，並無嚴重後果。

在一定意義上，「故障掩蔽」和「故障診斷」是不相容的，因為直至另一故障在掩蔽機構中發生以前，被掩蔽的故障是不可能被查覺或診斷的。然而，待提出了許多巧妙的方法後，使得測試時冗餘機構變為非冗餘的，這就使**故障掩蔽和診斷技術可以結合起來**。這樣的結合又恰是及（分）時處理控制和聯機信息處理（信息恢復系統和新的計算機應用）所需要的。在這種情況下，重要的是在整個系統的很長的工作周期裏防止系統的中斷。這意味着必須利用冗餘技術在故障存在情況下允許機器正常工作，還意味着必須利用故障檢測和診斷以便可以迅速地排除故障。否則，故障掩蔽裝置最後將會被故障所“淹沒”。

雖然，故障掩蔽和故障診斷技術都是聯機及時系統的兩個重要組成部份，但是掩蔽技術一直比診斷技術更多地受到注意。惟本書則以診斷技術為主，故強調其檢修。

故障診斷的發展歷史表明，早期的計算機由熟練的技術人員維護，他們凭着“調機經驗”，對有問題的系統使用直觀方法維護，用所謂診斷程序作為輔助手段。但是，由於最後結果不完善，主要的負擔落在技術人員肩上。然而，對於現代的數字計算機，結果“調機經驗”是很困難的。一方面由於這樣的經驗從一個人轉給另一個人很不容易；另一方面由於新的電路正在不斷地引進，並且現代的元件很難出現故障。

1-3 檢修現代計算系統的測試過程

現代計算系統的故障診斷由於使用集成電路而變得更複雜，對這種電路是不能探測到其內部某一點信號的，引入大量檢驗點也是不現實的。因此，需要有這樣的測試過程：

由電路的正常輸入和輸出就能得到故障檢測和定位的信息。值得指出的是，這樣的積體電路完全可以由幾百個邏輯閘組成。還要求過程是高度自動化的，迅速重新組織系統，以建立不中斷服務的子系統，要求以電子速度完成故障檢測。

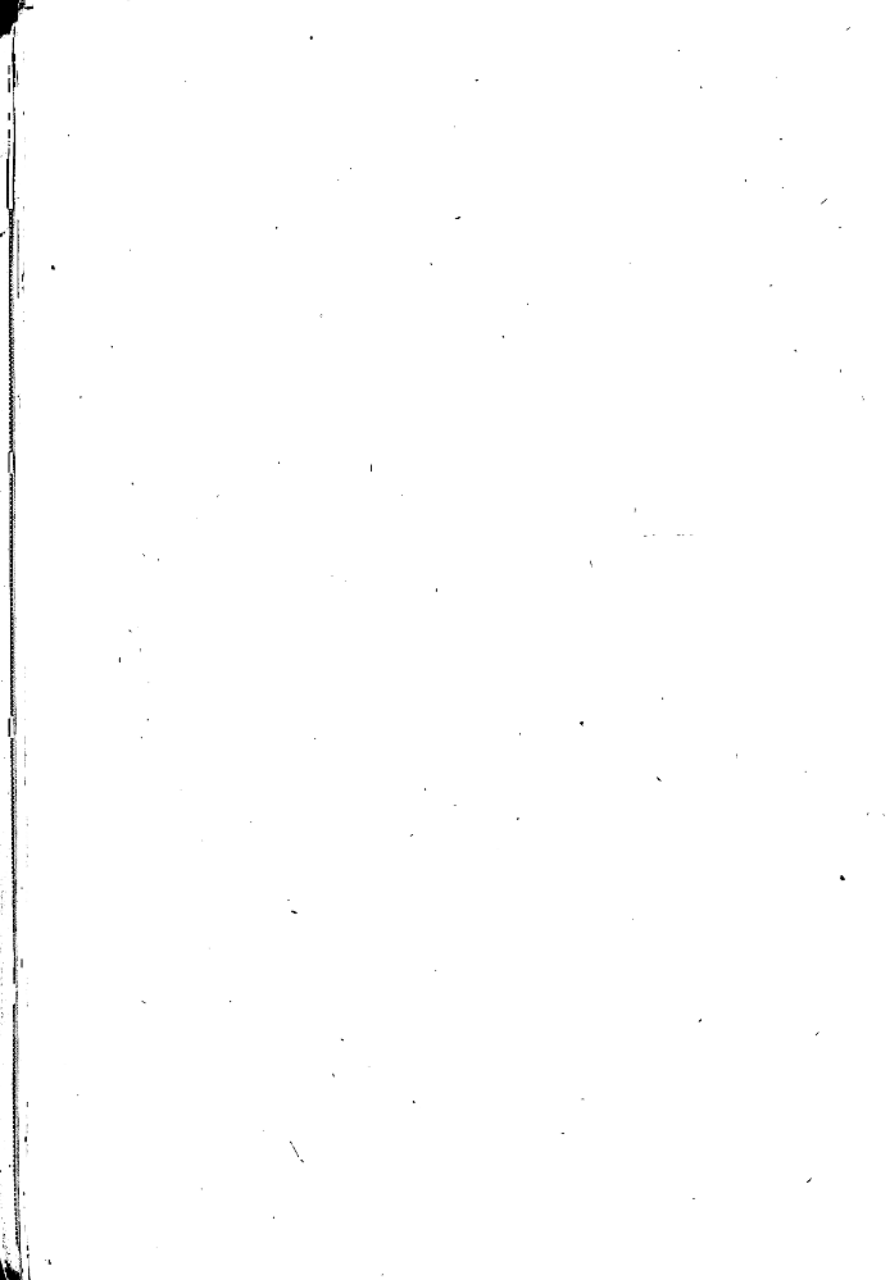
因此，本書主要探究數位系統的自動診斷程序的產生、選擇和評價有關技術問題。這些技術必須處理時序電路和組合電路，並且必須只利用構成系統的電路的可接觸端點。在這些技術中用的主要方法是用計算機模擬無故障電路和存在故障的電路。

第二章敘述建立有故障的邏輯電路的數學模型所必要的基本定義和假定，還對早期的故障診斷的一些途徑予以評述。另外，概要地敘述了在其他學科中所獲得的一些具體成果，這些成果在以後的章節之討論中還要涉及到。

第三章給出了組合電路和時序電路測試的產生和選擇的方法。還扼要地談到了由IBM公司研究的用在（IBM/360系列信息處理機上）專門的特大型時序電路中的一些技術。

第四章討論了時序分析程序，即一種模擬和產生邏輯電路的測試程序系統。這種分析程序從它們模擬有故障的組合電路與時序電路的能力來看，是現代數字電路模擬裝置的典型；而從它自動產生邏輯電路的測試序列的能力來看也是獨特的。在這一章中，首先討論了分析程序的應用，隨之，根據這些應用而得的經驗對現行的分析程序的各種方案進行評述。由於前幾章的許多內容對理解時序分析程序很重要，所以在第四章還統一敘述了本書前幾章所討論過的內容。

借助某種模擬程序一經得到一組診斷數據，那就需要找出一種能解釋診斷所得結果的方法，以便給出供修理的信息。解決這一問題的途徑在第五章中討論。最後一章概述現正在研究的一些問題，它們包括：改進模擬技術以克服現在的故障模擬程序的缺點；產生更易診斷的數字系統設計原理的研究；描述數字系統功能語言和高級語言的發展，以及系統設計和自動編譯等等。最後，介紹了一些尚未解決的問題作為本書的結束。



2

診斷數位電路故障的基本認識

2-0 本章簡介

在這一章，將扼要地闡述一些要完整地理解本書內容所必需的基礎知識，部份論述，對於讀者單靠此來彌補知識空白來說是太簡略了。因此，更多的了解應通過查閱參考更多的文獻來達到。

這一章可分為三部份：1 定義和模型；2 歷史背景；3 自動機理論的某些成果與測試理論。2-1 節的內容為基本定義和模型，這一節給出了關於數位系統、組合電路和時序電路以及電子數字電路的故障模型的基本定義。還概述了關於同步時序電路的莫爾（Moore）模型和米利（Mealy）模型以及異步時序電路的赫夫曼（Huffman）模型，並且引進了測試的概念。這一節內容對於理解全節特別重要。

2-2 節歷史背景不很重要，但也許有助於讀者正確地看待本節。我們的目的是想說明故障診斷是如何成為一個重要問題的，以及早期解決故障診斷的方法的種種嘗試是如何演變的。

最後，2-3 節敘述了關於思維實驗的莫爾概念和關於測試方法的某些基本思想。和2-1 節一樣，這一節內容對理解全節也很重要。

2-1 定義和假設

這裏所說的「定義」和「假設」是指建立故障邏輯電路的數學模型所必需的基本定義和假設；茲分爲「數位系統」「數位電路的故障」和「測試」等三方面闡述：

2-1.1 數位系統

數位系統一詞一般表示一個處理有限值的離散信號的彼此相聯的元件集合。電子數字計算機、電話交換系統、數字控制系統都是數字系統，在開關電路理論中已研究了數字系統的分析和綜合方法。因此，人們常把數位系統看作組合開關電路和時序開關電路的相互聯接[●]。

如果一個開關電路的輸出信號 $z_1, \dots, z_m$ 可以用它的輸入信號 $x_1, \dots, x_n$ 之布爾函數表示：

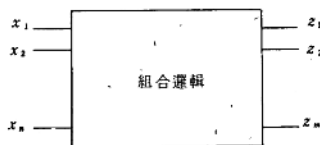
$$\begin{aligned} z_1 &= a_1(x_1, \dots, x_n) \\ z_2 &= a_2(x_1, \dots, x_n) \\ &\dots\dots\dots z_m \\ z_m &= a_m(x_1, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (2.1)$$

或簡單地寫成

$$Z = A(X)$$

那麼，這一開關電路就是**組合電路**。組合電路的框圖在〔圖2-1〕示出。

如果一個開關電路在某一時刻的輸出值不僅依賴於現時刻加於它的輸入端之信號，而且還依賴於先前加在這些輸入端的信號，那麼它就是**時序電路**。先前的輸入概括爲電路的S狀態[●]。因此，對於時序電路，可以得到下面的關係式：



〔圖2-1〕組合電路方框圖

- 在本書中，電路(circuit)和系統(system)常常是相對於“小”和“大”的網絡下使用的。在不同場合，“小”和“大”的意義必須由前後文來決定。
- 狀態(state)這一概念可以在許多開關理論的標準教科書中找到。

$$Z = A(X, S) \quad (2.2)$$

如前所述，其中 A 是矢變量的矢值函數。〔圖 2-2〕給出了時序電路的框圖。

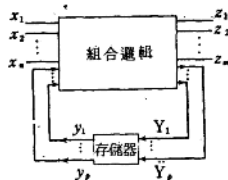
〔圖 2-2〕的電路有 n 個原始輸入端 $x_1, \dots, x_n$ 和 m 個原始輸出端 $z_1, \dots, z_m$ ，以及 p 個反饋輸出端 $Y_1, \dots, Y_p$ 。有兩種根本不同類型的時序電路：**同步時序電路**和**異步時序電路**。對於同步電路，原始輸出端信號 Z 和反饋輸出端信號 Y ，可以寫成爲原始輸入信號 X 和反饋過來的輸入信號 y 的布爾函數

$$\begin{aligned} Z_t &= A_t(y) \\ Y_t &= B_t(X, y) \\ y_{t+1} &= Y_t \end{aligned} \quad (2.3)$$

這個同步電路的模型是米利 (1955) 提出的。另一個關於同步電路的一般模型是莫爾 (1956) 年提出的。其中

$$\begin{aligned} Z_t &= A_t(y) \\ Y_t &= B_t(X, y) \\ y_{t+1} &= Y_t \end{aligned} \quad (2.4)$$

照例， A 和 B 是矢變量的矢值函數。在上述兩種情況下下標 t 和 $t+1$ 表示電路的性能在離散時刻被時鐘驅動。事實上，上面提到的那些量亦只是在不同的時刻 $t = 0, 1, 2, \dots$ 有定義。換言之，在 t 時刻的原始輸出信號和反饋輸出信號是由在時刻 t 的原始輸入信號和反饋輸入信號所確定。現時刻的反饋輸出矢量 Y_t 在存儲元件中延遲後依次地成爲下一時刻 $t+1$ 的反饋輸入矢量 y_{t+1} 。

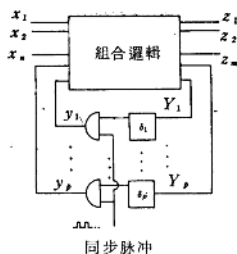


〔圖 2-2〕 時序電路方框圖

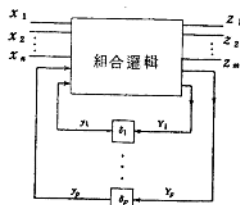
比較等式 (2.2) 和 (2.3) 就可得出一個結論：**反饋輸入矢量 y 表示電路的 S 狀態**。事實上，這是對的。常常把 y 稱爲電路的現在狀態，把 Y 稱爲電路的下次狀態。還要指出，這裏的模型是假設所有內部延遲都集中在反饋線路上，並且模型的組合電路部份對 X 和 y 輸入是瞬時反應的。這種模型亦能有效描述非瞬時電路，只要反饋延遲大於

組合部份最壞組合的延遲時間。兩種同步模型的框圖見〔圖 2-3〕。

異步電路的性能是不同步的。因此就不存在外部時鐘。如〔圖 2-4〕所示，假設每個反饋電路都有一個有限的、正的純延遲。為使異步電路能正常工作，要求滿足以下條件：



〔圖 2-3〕 同步時序電路框圖



〔圖 2-4〕 異步時序電路框圖

(1) 組合邏輯假定為無險態的，並且電路在下一輸入改變發生以前，要穩定下來。

(2) 相繼的輸入是必須是“相鄰”的（即彼此只相差一位）。

(3) 不能有振蕩發生。因此，把一合理的輸入加到處於任一穩定狀態[●]的電路中，電路最終必須進入某一穩定狀態。這個條件保證下一個穩定狀態存在。

(4) 可以有競態（即在某一時刻存在兩根以上的不穩定的反饋線[●]），但必須不是臨界的。即，最終達到的穩定狀態必須是相同的，並且與不穩定線變為穩定的次序無關。實際上，這意味着任意地改變延遲 $\{\delta_j\}$ 的任一子集，下一穩定狀態不變。因此，這條條件保證下一穩定狀態的唯一性。

我們把上述的模型稱為赫夫曼模型，因為這是由赫夫曼引入的（1954）。還要指出，如果讀者對所述內容還不清楚的話，可以參考任何一本關於時序理論的書籍（見書末的資料附錄）或赫夫曼的經典報告。本書第四章很多地方涉

● 穩定狀態是 $y = Y$ 的那些狀態。

● 如果 $y_j \neq Y_j$ ，則稱第 j 反饋線是不穩定的。

及這些概念。

2-1.2 數位電路的故障

所謂**數位電路的故障**●就是造成電路功能錯誤的一個或幾個元件的**真正損壞**。按照物理起因的不同，故障大致可以分爲以下幾種：衰老或製造上的故障造成元件的逐漸變壞，顯現爲“**邊緣**”故障；臨界時間、噪聲和過份嚴格的公差可以造成**間隙故障**。這種情況下，故障是時隱時現的。許多最初是間隙性的故障最終還是會變成固定的故障。於是，在修理前功能一直是錯誤的。例如，如〔圖2-5〕所示，晶體管的集電極或基極的通路始終斷開，就是**固定性故障**。由於這些故障，晶體管的輸出 Q 始終呈現爲高電平（固定在高電平）。相反，晶體管的集電極和發射極短路，常使輸出 Q 始終呈現爲低電平（固定在低電平）。數字電路的許多故障是固定的高電平或固定的低電平故障，這些故障統稱爲**邏輯故障**。分析有故障系統的許多方法都是以假定邏輯故障作前提的。

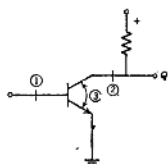
爲此，本書的所有討論，除特別說明外，都是對於固定的、邏輯故障而言的。這個限定條件是根據技術上的限制，並非說這是合理的。處理邊緣的、間歇的或者非邏輯型的故障是進一步研究的必要課題。

雖然本書大部份篇幅是分析帶故障系統性能的方法，但舉了一個有助於理解“方法”的概要簡例。〔圖2-6〕畫出了一個「及閘」。無故障時輸出信號 Q 實現輸入信號的布爾函數

$$Q = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

如果輸入兩極管 x_1 是斷開的，那末，「及閘」的功能顯然與不存在輸入端 x_1 一樣。換言之，變量 x_1 固定爲 1 ($s_a = 1$)。因此

$$Q|_{x_1=1} = \bar{x}_2 \cdot x_3 = x_2 \cdot x_3$$



- ① 基極開路；
- ② 集電極開路；
- ③ 集電極到發射極短路

〔圖2-5〕 三極管的故障類型

● 英文中常用 fault 和 failure 來表示故障這一概念，雖然它們的英文原意上有區別，由於在這方面是通用的，故都名爲“故障”。

通常，這類故障簡寫為 x_1s-a-1 故障。與此類似，晶體管的集電極與發射極短路被稱為 $Qs-a-0$ 故障。

2-1.3 測試

在這一節，介紹一些關於測試的基本概念和定義。目的是為讀者閱讀 2-3.2 節作準備，在那裏敘述了測試理論中很有趣的結果。

為了確信系統正確的操作，當故障一出現時，必須能立即發覺。同時，為使機器能及時修復，還要能相當準確地

指出故障的部位。這可用測試來完成這兩個任務。測試 T_k 就是加在電路上的一輸入向量序列 $X_{k1}, \dots, X_{ks}$ 和相應的該電路的輸出向量序列。整數 s 就是所謂測試長度。如果需要有幾個測試，那麼這些測試的全體就構成一個測試集或測試序列（後一名稱是用於按一定次序進行測試的場合）。經受測試的電路或系統稱為測試對象。

測試可分為兩類：故障檢測測試和故障診斷測試。

故障檢測測試只有兩種可能的結果：

- (1) 測試對象不包含規定類型的故障；
- (2) 測試對象含有某個（不特定的）規定類型的故障。

現在，看一個長度為 1 的測試，

$$T_k = \{X_{k1}, Z_{k1}\}$$

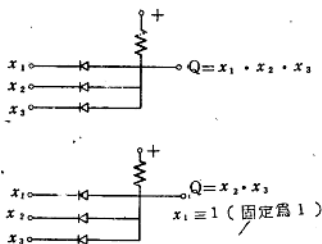
這式表示輸入向量 X_{k1} 加到無故障的測試對象產生輸出向量 Z_{k1} 。現在，假設因為存在某個故障 f 而使輸出向量 Z_{k1} 變為 W_{k1} ，

$$W_{k1} \neq Z_{k1}$$

這樣就可以說，測試 T_k 檢測故障 f ，因為可以用 T_k 來確定故障 f 是否存在。若測試對象是時序電路，常常要用測試長度大於 1 的測試。因此

$$T_k = \{X_{k1}, \dots, X_{ks}; Z_{k1}, \dots, Z_{ks}\}$$

那麼，當含有故障 f 時，產生的輸出向量序列與 $Z_{k1}, \dots, Z_{ks}$ 在某些處不同時， T_k 就檢測故障 f 。



〔圖 2-6〕 有故障（上）和無故障（下）的 [及 開]

給出真值表是用於小型組合電路的一般測試方法。例如，看一個有兩個輸入信號 x_1, x_2 以及一個輸出信號 z_1 的「及開」。無故障「及開」的真值表和有 x_1 為 s-a-1 型故障時「及開」的真值表分別在 [表 2-1a] 和 [表 2-1b] 繪出。比較這兩表可以發現，測試輸入向量

$$X = (0, 1)$$

可以檢測此故障，這時輸出為

$$z_1 = 0 \quad (\text{無故障時})$$

和

$$z_2 = 1 \quad (\text{有故障時})$$

作為另一個例子，再看同一個開的含有 z_1 為 s-a-1 型的故障的真值表，此表在 [表 2-1c] 中給出。[表 2-1c] 說明，向量 $X = (0, 1)$, $X = (1, 0)$ 和 $X = (0, 0)$ 中的任何一個都可檢測此故障。這兩個例子總起來說明了一個給定的故障可以用幾個測試來檢測。而且，一個給定的測試也可以檢測幾個故障。對某一測試對象，能夠檢測所規定類型的每一故障的一組測試稱為該測試的對象的完全測試集

圖 [表 2-1] 兩個輸入端的「與」開真值表

(a) 正常的; (b) x_1 為 s-a-1;
(c) z 為 s-a-1。

x_1	x_2	z
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

x_1 (s-a-1)	x_2	z
1	0	0
1	1	1
1	0	0
1	1	1

x_1	x_2	z (s-a-1)
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	1

總之，故障檢測測試只告訴我們，系統正常還是有故障。它們並不告訴我們關於故障定位的信息。能給出故障定位信息的測試就稱為診斷測試。由於診斷測試給出的這樣信息量可粗略地稱為測試的分辨率。這樣，故障檢測測試亦就是診斷分辨率為零的故障診斷測試。

如果測試對象是由分離元件構成，往往需要測試能把故障定位到單個二極管或電晶體。為此，要求診斷測試組具有很高的診斷分辨率。另一個極端情況是，假如有一天，大規模集成電路 (LSI) 技術使得整個測試對象在一個單個可替換的片子上，這時有診斷分辨率為零的測試（即故障檢測測試）就足夠了

。簡單地把整個測試對象換掉，就達到修理的目的。

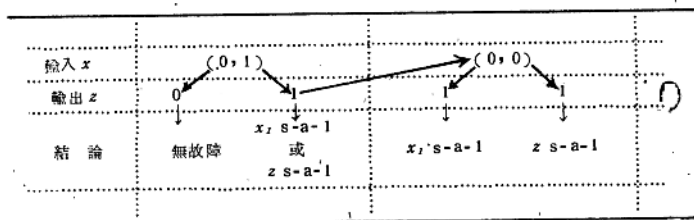
舉一個簡單的例子具體地說明這一思想。再看〔表 2-1〕，這時測試

$$X = (0, 1)$$

即能檢測故障 $x_1 s-a-1$ ，又能檢測故障 $z_1 s-a-1$ 。但是，要區分它們，單用這一個測試是辦不到的，因為對這兩種故障，電路的輸出都是“1”。因此，如果我們只希望把故障確定到一個閘時，這個測試對這兩種故障都是一個合適的診斷測試。另一方面，如果希望把故障確定到單個二極管或晶體管時，就要再加別的測試輸入向量。事實上，長度為 2 的測試完全滿足要求。對於故障的測試

$$T = \{(0, 1), (0, 0); (0), (0)\}$$

圖〔表 2-2〕 測試結果



輸出由〔表 2-2〕給出。通常，一個測試的長度隨着它被要求提供的診斷分辨率的提高而增長。

2-2 計算機診斷技術的回顧與檢討

在這一節，試圖說明故障診斷是怎麼成爲一個重要的問題的，並且敘述一下解決這個問題的一些早期嘗試。這要從 1950 年左右第一台數字電子計算機出現時談起。

1 早期的計算機靠有經驗的維修人員和專門的設備來診斷故障。那時，廣泛地採用電壓表、測試示波器和檢驗電路。這一途徑，最完整的使用要算是在 1953 年埃克特 (Eckert) 所描述的 BINAC 計算機。BINAC 機由兩個完全相同的處理器構成。這兩個處理器同步地進行所有的運算操作，兩個處理器的操作結果不斷地用比較電路進行比較，根據比較是否一致來檢測故障。當兩個處理器的結果不一致時，兩個處理器就立刻停下來。因此，故障造成的後果被限