

內建測試與故障隔離於電子系統 應用之研究

作者／中科院電子所研究員 王祥金・組長 李明堂・技正 孫天文

提要

近代雷達系統隨著微電子科技的快速發展，各模組的功能亦趨多元完整與複雜，因此，系統或裝備故障後，其檢修查驗的工作更形困難；而拜數位科技之賜，原本繁雜的檢修流程，可經由電腦（微處理器）的代勞，而變得簡單迅速且可靠。而內建測試(Build-in Test, BIT)的目標即在實現系統的設計和組合之實證，在系統的演化推展的過程中，隨系統的功能增強與擴大，相對增加其複雜度，而系統被要求以有效的方法涵蓋所有不同特徵類型的故障，當故障發生時，是否符合規範中所定的偵斷維修度(Quantitative Maintainability)量化與質化的需求目的。

本文探討以美軍航電系統為診斷理論基礎，結合參予內建測試之設計經驗，歸納探討在高複雜度電子的架構中，進行如何在內建測試整體方案的設計過程。文中討論內建測試之故障隔離、故障特徵擷取及消除干擾的錯誤偵斷之方法，導入內建測試主動性設計之理念，最後發展完成的內建測試之智能輔助分析儀，對日益複雜系統的檢測方法，實現品質可靠的人機一體檢測效能。

壹、前言

高性能、多功能、高妥善可靠度的系統是現代系統電子裝備所追求的，而現況系統設計係以任務功能導向，電子裝備隨積體電路技術的融入發展，結構日趨複雜，因此系統故障頻頻、危安事件頻傳、修復不易且長，其故障診斷與維修困難度迅速增加。據任務可靠度(Mission Reliability, MR)估計其故障檢測及隔離時間達維修時間的40%，即後勤支援/維修工時估計約占1/3的損耗工時成本。

在國外文獻中，早期歐美為改善軍用航電維修性，縮短查詢故障問題，於西元1970年開始在系統機內設內建測試的自我檢測技術構想。在19世紀期間，研發航空電子裝備著名的公司洛克希德・馬丁(Lockheed-Martin)設計F-16、F-22及通用動力公司(General-Dynamics) FB-111A，麥唐納道格拉斯(McDonnell Douglas)所製造F-16、F-22等型歐美軍機系統，將內建測試技術先後用於航電系統上，尋求改善其故障檢測與隔離的能力，希望降低整體負荷成本。其中工程測試範圍由局部航空雷達擴展至全航電儀控之裝備範圍，並且各裝備由傳統的獨立檢測與故障指示的型式，逐漸融入人因工程的設計理念，採用數位多功能

的整合顯控儀之型式¹。

近代，自內建測試在航空電子應用以來，著重減少維修時間，提升系統完好性，但測試可靠性也存在著極待解決問題，除希望增強系統檢測準確率和故障隔離能力(Fault Isolation Capability)外，對較複雜失效問題的輔助診斷需求，與系統故障的再現(Duplicate)。本研究之目的，有別傳統侷限實體檢測之缺陷，著重理論與實務運作經驗的闡述，以較具系統化、測試範圍化，建構專家智能整合診斷輔助之設計，提供迅速檢測及維修方法。更冀望將智能輔助診斷技術轉置現役或未來研發地基/船艦電子系統，對相關軍民資訊通信業別在自我檢測能力上，並能交互通用於國防工業及民間企業技術之特點，俾期能及早分析失效資料與瞭解失效趨勢，統合內建測試全系統成熟度缺失，提升系統可靠度和妥善性起很好作用。

貳、本文

一、現況系統診斷之需求

基於內建測試目標即在提高系統診斷(System Diagnostic)準確性與故障隔離率(Fault Isolation Rate)，使系統複雜度(System Complexity)能在短時間內檢知系統之妥善率，及將隔離故障之層級達至最小限度，快速地將測試數據轉換結果以利觀察。如此一來，廠站機務操作人員即早偵知故障發生，不斷獲知正確信息，當即採取一連串因應之改正對策，例如採取拆卸維修、指引組件的更換(Removal and Replacement)、系統隔離等措施，便是關鍵所在。

系統在發展測試階段，須一套自動測試或性能測試的工具，以協助瞭解系統可靠度情形，而系統軟硬體之失效產生與故障檢測的繁雜狀況，常造成使用者及地面維修人員之困擾。對系統裝備而言，要求確保在預知的操作中發生故障率為最小，關係即時監控系統的狀況。或者將系統置於測試設備平台上，協助系統故障之判斷，倘若系統產生故障頻率較高，對裝備可靠性帶來嚴重的質疑與信心影響，所以對系統能內建測試的診斷精確度與隔離率，一直為最高需求設計之目標。

在系統獲得生命週期之功能驗證的階段，我們亦曾發生系統有暫時失效，也就是在驗證階段時，時有偶發性的失效報出，但卻又可清除掉，但回實驗室檢修時，發現暫時失效之故障現象，無法重現問題而獲有效解決困擾。當際系統接收的驗證過程中，標準接收信心使用條件下，是逐步驗證系統偵測隔離的

¹ 願德均，夏鎮華，徐采桔，航空電子裝備修理理論與技術（北京：國防工業出版社），2001，頁 151~153。

功能，並修改檢測之精度，很難短時間通過測試條件之所有需求。根據實驗室的統計，系統曾有故障高過 30% 情形，這足以說明系統可靠度狀態對系統操作人員及顧客產生的疑慮，除會從多方面影響裝備的堪用效能，更可能對系統的可靠性失去可信度，操作人員每次獲得資訊時都必須花時間去核對其正確性，造成挫折感。

在過去十年來，系統許多可靠度的測試方法、研究和使用的提出。舉例來說，功能測試(Function Test)、路徑測試(Path-Circuit Test)、邊界掃描(Boundary-Scan)等方法，被開發在系統的測試上，但系統可靠度的測試上，有些故障無法立即被診斷出，須另外測試儀器或技術協助的缺失。而內建測試與自我測試(BIT/ST)具有開機主動式檢測的功能，可縮短維修、偵錯及更換組裝的時間，若將測試結果回饋至設計中(如：建立標準零件選用清單，零件應力負載標準、熱傳分析、系統可靠度預估)並藉由一連串篩選與測試，早期發現不良件不斷改進以提高品質，增長系統平均失效時間間隔(Mean Time Between Failure, MTBF)²。

二、內建測試診斷層次的劃分

完善診斷系統可劃分為內建測試與自測兩種模式，全系統內建測試的關鍵主要功能，滿足在預期的工作環境中獲得即時系統的狀況與故障診斷；而自測(Self-Test, ST)即在系統正常運轉中，持續性對系統操作條件內進行功能與實體之測試。故系統開發/設計工程師先從對系統可操作範圍內進行分析評估，對應內建測試模組與次組合單元的結構建立，使延伸測試層級至故障隔離到更換單元。

內建測試與自測的開始設計著眼點是系統型態項目(Configuration Item)確認，整個雷達系統分隔為數個線上可更換單元(Line Replaceable Unit, LRU)，呈現每個線上更換單元之測試項目的選定後，然後再劃分到場內更換單元(Shop Replaceable Unit, SRU)，以區塊功能性為群組的關鍵單元，如此劃分的好處，能使各線上更換單元的介面端連接較少，介面複雜情形也較低，使線上可更換單元在 I-LEVEL 能獨立測試並且能故障隔離達到場內更換單元，且能擷取檢測結果的狀態。線上可更換單元互相介面連接的多少，完全取決於是否有功能群組的關聯結構，所有線上更換單元的介面是連接主關聯通道，供線上可更換單元可在內建測試設備(Built-in Test Equipment, BITE)中，將系統置於內建測試設備之平台，提供測試向量(Test Vectors)注入到廠內更換單元以執行內建測試，經資料比對與分析，可協助系統故障進階之診斷。

² 王祥金，「因應高複雜度系統執行實體稽核對產品品質影響之研究」，中山科學研究院，電子系統研究所空電組，民國 96 年，頁 5~6。

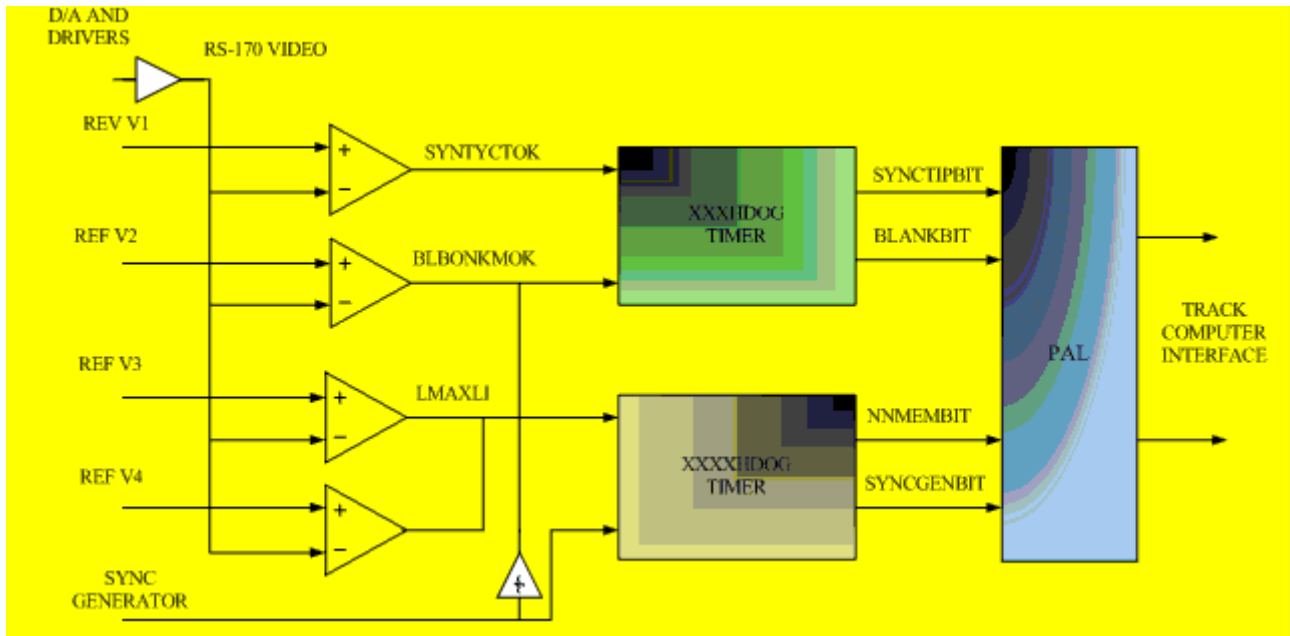
基本上軍用複雜電子系統之維持計畫方式(Maintainable Program Plan)是依據 MIL-STD-470A 要領來執行。在裝備操縱特性，質的方面要求是人機考量，操作者易於接近和維護，設計時就考慮到後續可能維修狀況，減少維護上錯誤發生。關鍵的零件納入於基本裝備中，如此在每一個維修層級對於平均修復時間(Mean-Time-To-Repair, MTTR)和可測試(Testability)需求是容易做到的，依美軍標準軍規手冊指引可略分為三個故障診斷隔離層次：(一)O-level，屬於線上更換單元的程度，系統藉著內建測試與自測可以做到故障偵測和故障隔離之線上更換單元的程度。(二)I-level，屬於場內更換單元的程度，線上更換單元之故障偵測和故障隔離藉著資料注入單板之特性與讀取技術，可以達到場內更換單元之層級。(三)Depot-Level，屬元件更換單元的程度，場內更換單元之失效偵測和故障隔離可以到故障的零件之程度。所以內建測試與自測之測試誤差容許值的相關性來說，O-level 測試誤差容許值大於 I-level，I-level 測試誤差容許值大於 Depot-Level。電子系統計算機的控制軟體能透過硬體和線上更換單元介面，決定測試向量參數之資料傳送，完成內建測試之結果擷取。

三、系統自我測試之方法

系統之自我測試時機為雷達執行模式的進行中，自我測試間斷穿插執行此功能模式，是一種持續不斷地作測試，直到系統關掉電源。圖一說明驅動自我測試與內建測試的顯示幕掃描方式，如圖中於電源開啟時，來自顯示 RS-170 VIDEO 類比控制信號與目標轉換參考電壓(REF V1)送至 2 組顯示幕掃描框的同步信號(WATCHDOG TIMER)，後經過方程式與追蹤計算機(TRACK COMPUTER)的控制介面，前者為隨時執行的自我測試，後者則在執行內建測試時之測試用。在單一標準模式裡，約略 10~15 秒鐘測完所需的項目³，通常執行雷達相關運動模式測試(Self-in Auto-Diagnostic)，其執行時機為天線迴轉運動(Turnaround)時間，並不會影響正常運作。而軍種制式雷達系統自我測試的功能作業概分有三種測試方式：(一)當雷達執行系統運作時，雷達核心計算機之軟體控制在適當時間來插入自我測試，此方式自動和連續地自測的參數變化，不會中斷或干擾系統的正常運作，且無須外在任何觸發信號，經過一段時間延遲後，測試的結果可作為詢問之資料。(二)屬於系統連續性之性能監控，不需要雷達計算機特別下指令，可達自測之功能，完全由軟硬體來執行監控的結果，供雷達作為飛操軟體(Operational Flight Program, OFP)詢問之用。(三)當雷達天線做慣性迴轉運動的掃描時，由雷達控制系統軟體設定偷取(Time Stealing)運作時間之間

³ GD-53 Fire Control Radar Added Modes Organizational and Intermediate Level Maintenance, 1990, p.5.9.028.T.

隙，持續不斷執行測試指令，若最後一個天線慣性迴轉運動時間並未回報狀態，則被認定為失效。



圖一 系統驅動內建測試與自測之顯示幕掃瞄方式的示意圖（資料來源：GD-53 Fire Control Radar Added Modes Organizational and Intermediate Level Maintenance,1990, p.5.9.028.T)

四、診斷測試狀態之顯示

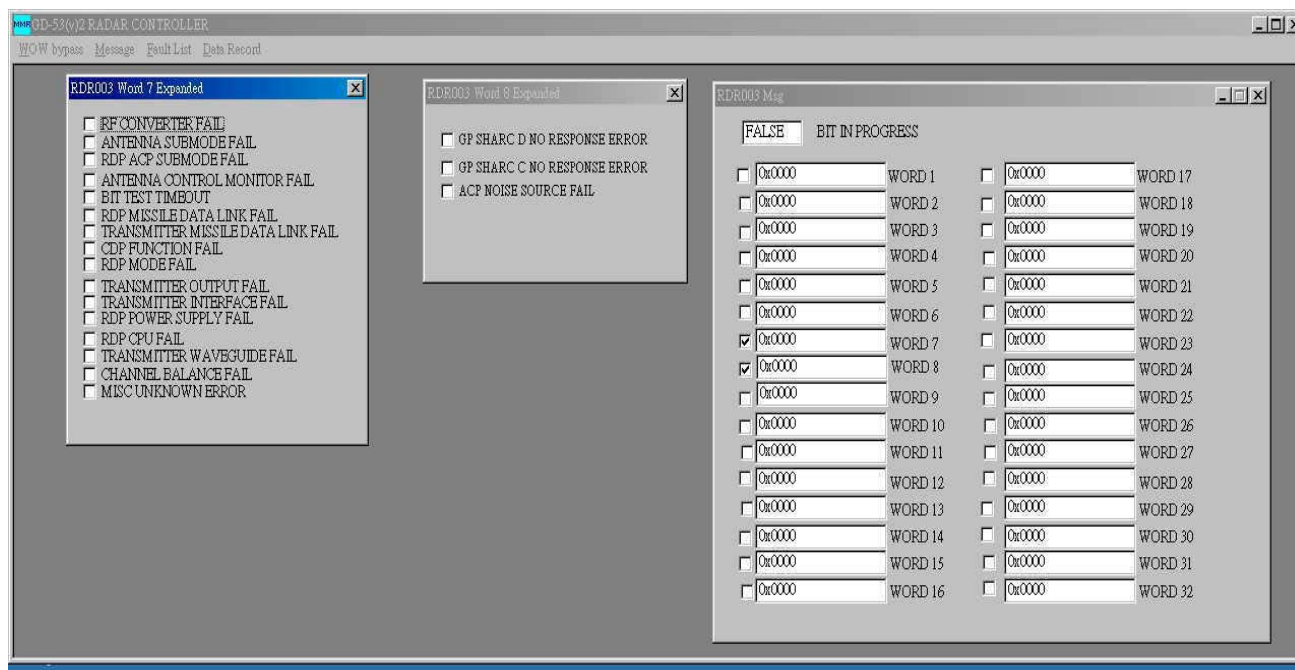
內建測試的設計診斷精度與範圍層次，端賴系統複雜度而定，若設備的介面種類很多，從診斷失效顯示方式和人機績效負荷處理為技術手法，採分為兩類：(一)啟動電源獨立自測式，為類比分佈顯示類。(二)數位整合多功能的即時觸控顯示類，選用何者為適，宜以人機介面因素的考量，降低作業人員視覺負荷，增進操作績效⁴。

當電源啟程動作時，遙控終端裝置(Remote Terminal , RT)提供系統隱藏之的內建測試程式，測試程式與功能程序將分隔不同記憶位置儲存，以便開機測試過程中，避免連續測試程序出現失能中斷現象。測試中將各部份測點採集的故障信息送到中心計算機，做資料統匯(Aggregate)與饋送(Feedback)之處理。在早期航空雷達系統其空電系統的記憶與處理容量有限，對故障檢測及故障識別的能力缺點、隔離的數據處理速度要求不高的簡單結構，專家系統測試概念未臻完善，可診斷能力與回報失效代碼不足。

但近代雷達系統受摩爾定律(Moores Law)對積體電路(Integrated Circuit , IC)科技之賜，朝向多功能/性能、能量大的要求下，系統設計愈趨龐雜，故考慮人

⁴ 願德均，夏鎮華，徐采桔，航空電子裝備修理理論與技術（北京：國防工業出版社），2001，頁 152。

機系統的交互作用之關係，整合良好實體與人機介面(Natural User Interfaces)之數控飛操軟體(Digital Flight Control System, DFCS)模式應用，自動內建測試的模式讓操作員透過控制裝置介面，可以送到中央任務計算機的集中控制顯示幕，如圖二所示為集中顯示之診斷操作畫面。同時也可依控制空間的相容性(Compatibility)或識別難易度的關係與人們期望(Expectations)，設置對應的顯示，使其績效最佳。



圖二 診斷狀態之集中顯示操作的畫面（資料來源：孫天文，「MXX 追蹤雷達系統測試與驗證」，中山科學研究院，電子系統所空電組，民國 92 年，頁 39。）

五、關鍵測試項目的選列

內建測試技術理念，乃告知系統工程人員該設備的現況動作內容與結果型態，要求對各模組間輸出入端進行裝備特性的測試，並於測試進行的期間，找出潛在錯誤，並從產生輸出的數據被發送到監視螢幕，並驗證運算總結之值(Checksum)，其旨在明確掌握疑似有故障初期徵候的即知技術。

以系統功能之可靠度關聯結構的需求，功能相似的元件，應採用感測及並聯於同一場內更換單元上，以增強故障的隔離性，測試為了滿足故障診斷的標準要求，應該實施失效分級診斷，這種內建測試分級診斷設計之作法，概略分為 Power on Bit、Radar Bit Command 和 Command Bit 有三種方式，以適應不同系統的診斷要求及故障指示。(一)Power on Bit，為雷達開機時(Logic 1)，雷達自動進行內建初始功能測試，稱為 Power on Bit，此等級方式自動地測試系統的關鍵參數，檢測流程屬於連續性，部分測試項目需外加任何向量(觸發)信號。

(二)Radar bit Command，此為 Radar Bit Command 和 Power on Bit 不同，此 Command 當為 OFF (logic 0)設定 ON (Logic 1)時為有效。(三)雷達使用當中操作選用內建測試，此時雷達終止原先使用模式而做雷達內建測試，稱為 Command Bit，由操作人員控制行使這等級的測試指令，會短暫中斷系統所有工作，但中斷恢復後，次系統間並不影響介面間聯繫，此 Command 當為 OFF (Logic 0)設定 ON (Logic 1)時，則雷達執行 640 秒 內建測試，然後邏輯重置 logic 0。若 Radar Bit Command and Command Bit 兩者都被設為 ON(Logic 1)，則系統忽略 Radar Bit Command 的信號。

例如在航電系統的內建測試，當系統電源開關被開始，雷達微控制處理機行使預存在 EPROM 邏輯程序，其指令對自我系統進行關鍵功能性的查詢測試，在系統任何工作情境的需要下，就應保證執行模式運作期間允許可被中斷，飛行員可選擇重新開始內建測試，然後系統回覆常態性作業。當雷達執行任何內建測試之要求，於某個時間內應完成所有測試項目，如有失效發生時，至少需有 95%之機會偵錯到並隔離出那失效之線上更換單元，同時測試時間不能超過系統設計規格值。同時操作員可依需求中斷內建測試，停止測試之方式有三種：(一)當飛機在地面時，如雷達內建測試執行完畢時。(二)當雷達開機約 90 秒(滿足發射機高壓暖機保護時間)且飛機已離開地面，雷達立刻中止內建測試，可執行作戰任務。(三)當執行完畢或飛行員按鍵中斷停止 Command Bit 時。

上述關鍵功能，須先完成內建測試與自測之關鍵項目的選列，選列依據以型態管理指導綱要(MIL-HDBK-61)對電子系統的型態項目(Configuration Items , CI)確認，劃定測試項目的參考基準，並輔以系統特性可靠度權重認定之結果，得出所選列關鍵測試項目。系統執行常態運作中，系統持續不間斷所做自我測試的功能，自我測試不同於內建測試，它是不允許系統操作員要求下指令的功能。自測之主要目的，在標準操作模式下，系統自我檢測此模式之列定之關鍵測試項目，核查檢視其功能可用性，過程為自動，且如有失效，需有 95%之機會能偵測到並報出失效之單元⁵。

建立內建測試與自測的關鍵測試項目如下：

(一)頻道平衡開機—執行啟始接收信號頻道的平衡校準(BIT/ST)。

(二)射頻狀態—有關升頻轉換器及接收中頻接收器有關的射頻內建測試狀態檢查測試(BIT/ST)。

(三)電源供應器狀態—檢查系統所需三種直流電源的穩定狀態 (BIT/ST)。

⁵ MIL-HDBK-470 A , Designing and Developing Maintainable Products and Systems Volume. pp.14~23.1997.

(四)天線故障隔離測試—檢測天線控制的狀態 (BIT)。

(五)中頻短迴路測試—波形產生器及中頻短迴路到接收器之信號路徑測試 (BIT)。

(六)內部 RAM 初始記憶體測試—驗證內部資料完整性及預期的資料型態相關的測試 (BIT)。

(七)LRU 之多工匯流排狀態—驗證傳送其間之規範中所定協定狀態 (ST)。

(八)信號接收處理器狀態—檢查相位誤差及同調振盪及 AGC 臨界值之狀態測試 (BIT)。

(九)天線 50Hz 狀態檢查—對天線控制系統之處理結果之狀態 (BIT/ST)。

(十)發射機狀態測試—檢查發射機控制介面狀態、微波硬體狀態及高壓電源之狀態 (BIT/ST)。

六、故障顯示之處理架構

次系統各裝備間的通訊主要為串聯(Serial)數位訊號，當內建測試執行中或內建測試執行完畢，測試結果所得資料送至任務計算機，任務計算機可以透過轉換運算值將這些資料傳送給系統工程人員。

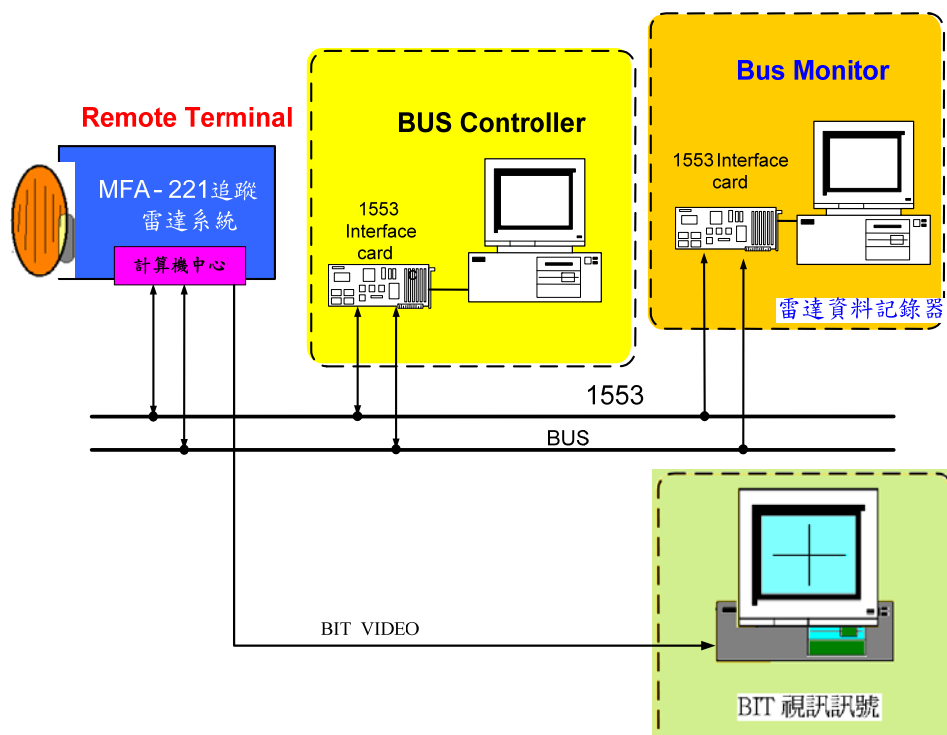
(一)系統內建測試之顯示處理，資料匯流排控制儀(Bus Controller)，主要掌握在 Bus 上資料流量與傳輸，可下達測試參數與診斷模式之指令。而資料匯流排監視器(Bus Monitor)是一被動裝置，可傾聽在 Bus 上資料，並與記錄或顯示結果，參考本研究如圖三為操控系統集成顯示內建測試與自測之方法架構。雷達系統設計有兩個內建測試狀態之傳送方式，如採用類比數位並行(Analog/Digital)雙功能的資料流，供雷達系統內建測試時，分別透過雷達計算機的 RS-170 VIDEO 的類比視頻信號輸出至多功能顯示儀(Multi-Function Display, MFD)上，以便在終端螢幕顯示內建測試的視頻圖像，或者另由 1553 Bus 上的任務計算機顯示雷達失效清單(Fault List)數據位元訊息，以供匯流排監視器不斷監視及隨機記錄雷達系統狀態⁷。操作人員也可以資料匯流排控制儀改變雷達內部參數，儲存系統狀態信息，進一步了解雷達系統操作狀況之細部機能，藉以供評估分析除錯之修改。

(二)失效問題與資料分析，系統失效的特徵隨它的功能而定，且系統的獨特功能(Function Uniqueness)是由它各部份或元素的關係所引起，故被檢測的系統和診斷軟體型態不同，其特徵類型顯示會有很大差異，不同系統間具有不同呈現的故障特徵，而相同型態的系統存不同的介面配置版本，又形成彼此差異功能

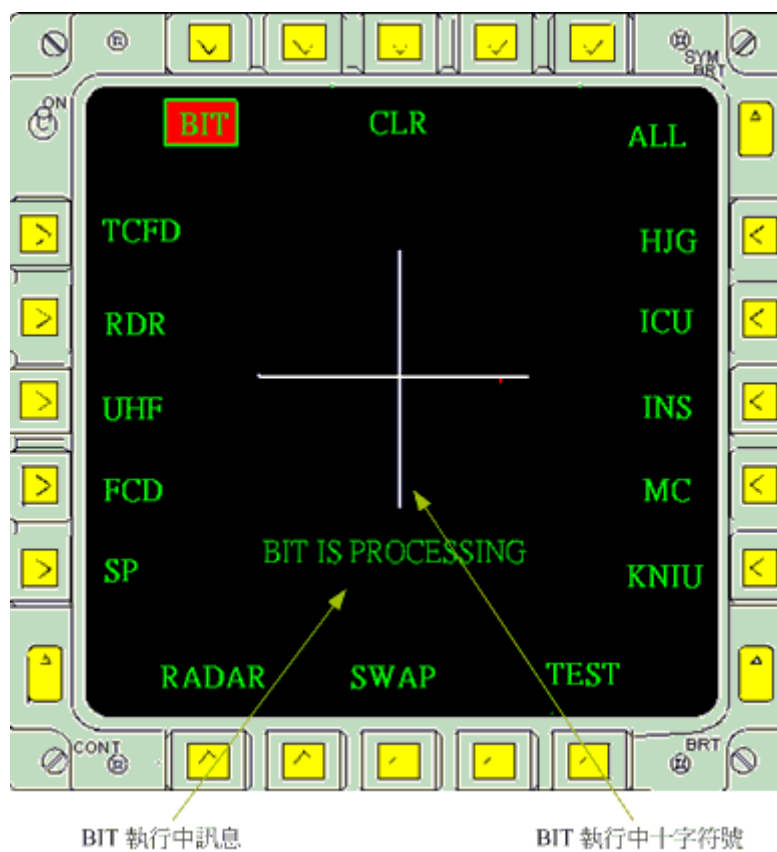
⁷ MIL-STD-1553B, Digital Time Division Command/Response Multiplex Data Bus,2007.

之結果，所以系統內建測試軟體的設計考量，對應執行內建測試所產生系統失效代碼之設計，此設計方式用意是希望提供詳盡之失效清單，給有經驗之系統工程師有跡可尋的判讀，除隔離失效之線上更換單元外，可進一步檢修至廠內可更換單元層級，但此設計理念在系統卻造成困擾，為失效發生時，在雷達系統內，某甲場內更換單元的失效卻可能造成乙的場內更換單元失效，而失效代碼(Fault Code)甲乙都可能被報出，實際上乙的場內更換單元並未失效，此現象為稱為失效報告的拓延(Propagation)現象。當有一連串拓延的失效代碼出現時，如非有經驗工程師對照故障失效代碼的檢索查詢，則難以找出真正問題所在，因此在改善此問題時，採取內建測試軟體版本的功能更新與失效清單之整合，則後續檢測將可大大減少此一失效拓延的現象。

資料匯流排監視器是一全程即時顯示在 bus 上資料，持續更新的報告系統作業動態或系統良莠情形，圖四系統執行內建測試之顯示畫面，告知內建測試正在進行中，圖五為當系統某單元故障失效，所產生偵錯列碼的清單，圖六供工程人員或操作員觀察是否產生問題的偵錯訊息。上述之測試顯示設計方式包括：(一)故障特徵的鑑識。(二)故障模式的產生。(三)故障歸屬類別。(四)故障失效代碼的擷取。(五)故障的自動告警(Alarm)或醒目閃動文字的提醒。系統內建測試數據或時間終了(Timeout)等參數訊號皆轉為訊息在資料通道上波動，即為內建測試與自測中最新的狀態，任務計算機處理這些狀態訊息(Status Word)，讓飛行員於顯控儀表上獲知系統的狀態。



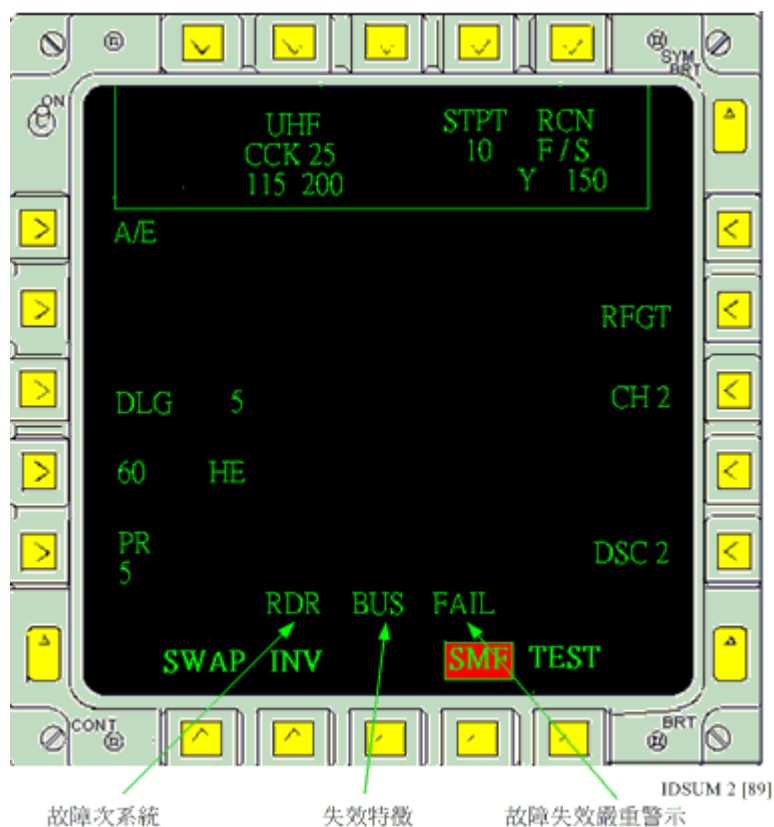
圖三 操控系統集成顯示內建測試與自測之方法架構 (作者繪圖)



圖四 系統正執行內建測試中之畫面 (作者繪圖)



圖五 故障偵錯列碼回應清單 (資料來源: CAF IF-CK1A-2-94FI-00-1, 武器系統故障隔離技術手冊, 航空發展中心, 民國 81 年, 頁 5~9。)



圖六 工程偵錯訊息 (作者繪圖)

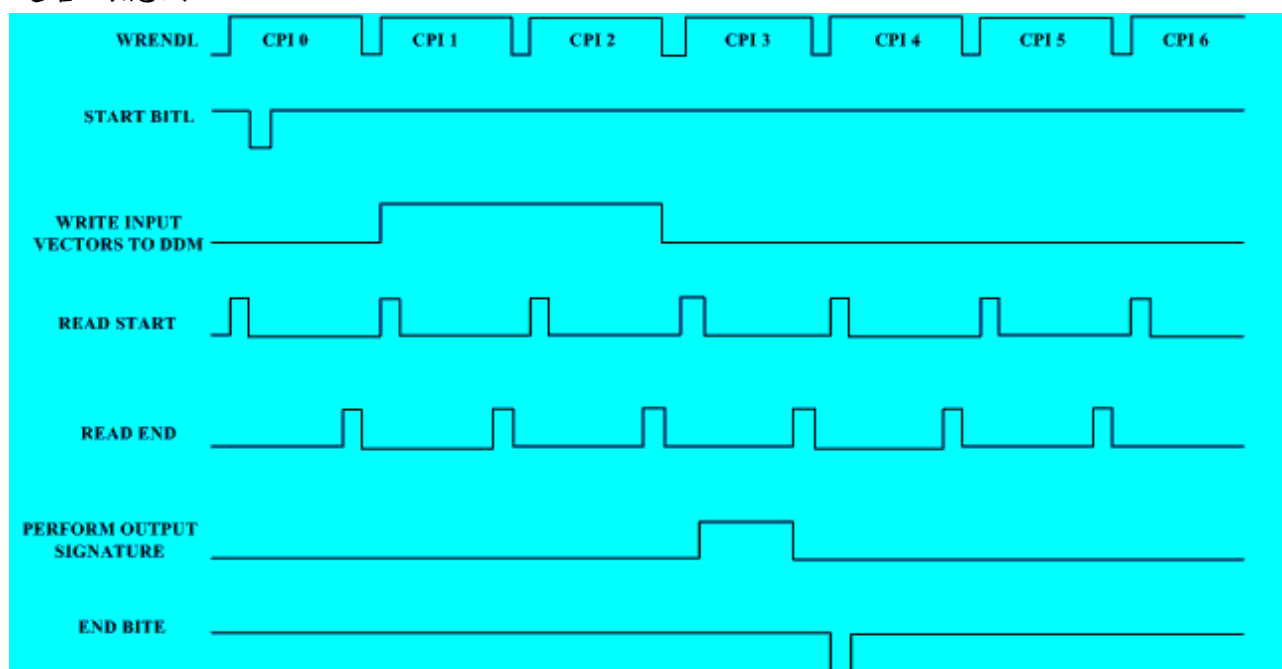
七、系統執行內建測試的方式

以航電系統說明，測試程序預存於雷達微控處理機的遠端終端裝置 EPROM 內，初始讀取記憶體之自我測試順序與對應連結功能，以便當電源啟動時(Power On Bit)，其類似微電腦作業系統方式。內建測試之測試軟體循序對系統組件之序列功能查詢，為使不會造成程序邏輯衝突問題，即預先瞭解系統操作流程與各層次功能的結構，及可能失效模式及影響。在設計上自我測試以有階層的順序，對系統模式(MODE)會去偵測失效(Detect Faults)，並且正確故障隔離出線上更換單元，也就是內建測試對一個系統的性能測試(System Performance Test)，進行系統和模組中的可操作性進行評估，將使線上更換單元能獨立的測試，且能故障隔離到換修組件⁷。為此，現代工程軟體測試控制及硬體的方法組合，實現故障診斷的邏輯架構。

圖七為模組於測試平台在內建測試與自測之控制時序圖，如圖中在同調資料處理間隔率(Coherent processing interval, CPI)為 CPI 0 時，此 START BITL 信號為低準位時，即告知現要執行自測之功能，包含注入測試機板的動態測試向量(Test Vectors)，所饋給信號處理單元之輸入端、資料讀取、結束及回報讀取測

⁷ Russell, J.D. and Kim, C.R "on the Diagnosability Symposium on Fault Tolerant Computing", Digest of the 3rd IEEE Int. Symposium on Fault Tolerance Computing. U.S.A, June 1984, pp.139-144.

試結果值等，此自測功能在三個同調資料處理間隔率之時間內完成。在動手設計機內之內建自我測試的系統時，為符合達到軍規 MIL-HDBK-472 之規範，系統須達 95%故障隔離能力和 4%誤警偵測率，應對系統故障分離結構層次的規劃確定，達到正確可更換單元，或零組件層級，然後對該結構層次的所有故障模式進行分析，確定出要實行自檢分離模式，根據嚴格評量標準的故障衡量工具，用歸納定量分析和實驗方法，分析其對應差異的失效特徵資料，強化失效模式識別方法的判別⁸。在電子數位系統其根據特殊測試儀器，量測具體失效特徵信號，常見可能是阻抗匹配(Impedance Matching)、電壓突波(Voltage Surge)、諧波失真(Harmonic Distortion)、頻率漂移(Frequency Shift)、脈衝響應(Pulse Response)、溫度變化(Temperature Allowance)、直流電流(DC current)、輸出功率(Output Transformer)等資料數據斷定。在偵斷測試時，上述失效特徵信號一經認定，下一動作傳達感應的特徵讀取測試區域與測試樣點，資料轉換的關聯設定答詢應用。

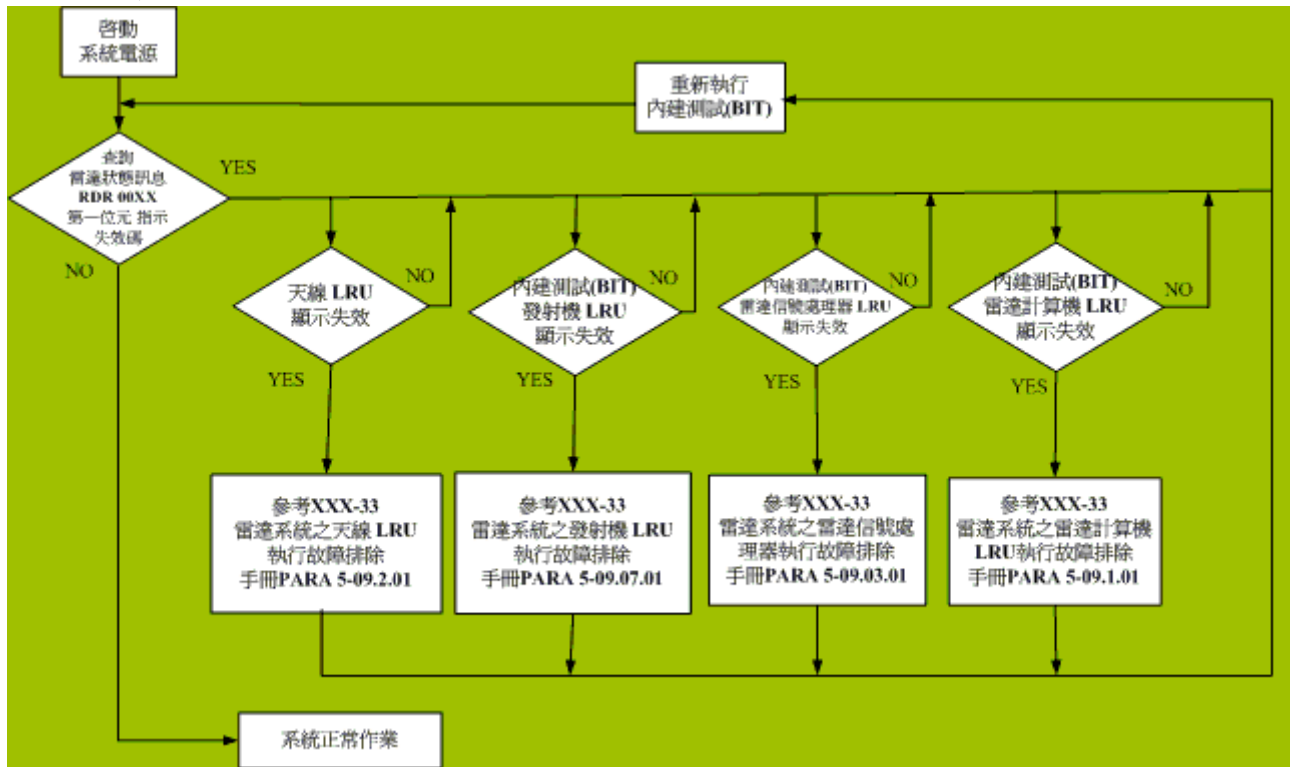


圖七 為模組之內建測試的控制時序 (作者繪圖)

圖八顯示火控雷達在內建測試故障隔離之工作流程，說明這些測試在電源開啟(TURN-ON)後，操作人員在操控及查詢故障是否確實存在，操作人員可經由系統的顯示器查詢觀測是否存在故障，此一過程視為內建測試的一部份。此系統至於哪個線上更換單元會先做測試，視線上更換單元的權重按邏輯順序被排選做測試，完全由計算機下達控制指令，順序執行的一種過程，將需要參數

⁸ MIL-HDBK-471 CANCE NOTICE 1, Maintainability Verification/Demonstration/ Evaluation, 1999.

信號載入到裝備中的各個線上更換單元，對線上更換單元做聯通式測試並監控序列執行狀況，且逐一檢測且擷取各線上更換單元的狀態信息，各結果信息並通過位元轉換數據及載入雷達計算機，進行測試點信號比較和故障隔離的邏輯運算，由多工匯流排讀取(READ)訊號，藉由匯流排介面單元的週邊傳送任務計算機，最後才顯示系統狀態，或條列維修偵錯列表及訊息，以示其故障與否，並把故障隔離資料儲存紀錄。



圖八 航電火控雷達在內建測試設備故障隔離之工作流程 (資料來源：Quantitative Maintainability Analysis-32 for GD-53 Radar, September,1993, pp.75-85)

八、複雜電子系統故障診斷之實例應用

圖九所示為複雜雷達系統執行內建測試的流程圖，雷達系統總成由數個線上更換單元組合而成一套空用火控雷達系統，其均安裝配置於 XX-1033 型戰鬥機，XX-1033B 型火控雷達包括天線、雷達信號處理器、發射機、電源過濾器及控制器等硬體單元所組成。內建測試在預期情況下在測試環境或外在測試向量(激勵)注入的設定下，對設定模組與裝備項目作開始測試，將測試過程中資料統饋與採集故障信息處理。也就是對系統執行可靠性信心測試，以便於系統部署或作業應用之前找出錯誤。

上述同時為獲有較大測試彈性與診斷範圍，端視系統作業按下述方法擇選執行內建測試測試程序，達較佳效益。

(一) 測試前檢查

參數及向量，經迴路結果，給予判讀，可提供日後操作人員的故障分析與研改之應用。

(五) 重複迴圈之持續測試

雷達系統在標準與特別之測試環境下，設定開放迴路與封閉性迴路測試路徑，其性能伴隨系統工作同步進行內建測試與自測連動有效性之連續監測管理與狀況報導。

(六) 可靠靈敏校準測試

利用硬體/軟體程式(S/W)來設定雷達的重要諸元的參數，以便在特定模式下執行劇烈操控動作，能持續性被進行連續校準，得到最佳值，又能滿足設定狀態改變時進行的執行參數微調。如中頻自動增益(IF AGC)校準、頻道平衡(Channel Balance)修正、偏頻本地振盪(Offset LO)調校，軟/硬體增益自動調整(Automatic Gain Control , AGC)之調控。

圖十為本研究對電子系統在內建測試與自測時，有感於即時系統診斷與隔離之診檢流程，過於繁雜困擾，對系統故障排除所發展完成的智能輔助分析儀，此智能輔助系統可分為應用於動態與靜態測試的環境，動態測試是經過標準的1553B MUX Bus 介面，利於線上多功能即時診斷測試、識別與回報等模式；靜



圖十 系統失效智能輔助分析 (作者繪圖)

態測試為測試平台上的應用環境使用，可進一步在系統測試平台上執行 I、D Level 較深層次之判斷，或系統診斷知識訓練之用，提供迅速故障原因與更換組件之建議訊息，大幅降低維護成本與故障訓練的時間，同時累積失效資料紀錄，作系統後續可靠度成長分析(Reliability Development /Growth Test , RDGT)，構成快速專家智能診斷分析工具，除可提供診斷強的線上支援測試儀，也可針對其他系統需求，適當調整 BUS 介面與控制參數，彈性於應用其他複雜電子之內建測試時，實現其故障疑難排除與維修利器。

參、結論與建議

本研究雖選定以複雜之數位航電系統內建測試的作業模式為探討對象，然系統人機介面設計(Pilot Vehicle Interface , PVI)理念和自測功能的結合，讓偵測結果能夠快速回應甚至是預期系統突然增加的變化，克服系統複雜度的自我測試及隔離精確性，自檢軟體功能不斷強化偵檢性，證明直接失效隔離成效可達更好可靠度，降低失效頻率，減少誘發性失效(Induce Failure)，縮短故障排除(Trouble-Shooting)時間，減少誤拆機率，加速妥善時間。

在國防軍用與民間航太系統工程中，如衛星微波通信系統、高鐵機電設備與捷運資訊通聯等等，其相關無線通訊之地面微波站台（或終端）通訊裝備外，尚包括訊號調變編碼、適當之鏈路估算(Link Budgets)、網路以及多工接取(Multiple Access)等內容自我測試之機能。在面對此結構複雜與產品類別，增加內建測試偵測主動性設計之優點，整合(All-in-One)系統啟程測試範圍與失效安全操作設計(Fail-Safe Operational Design)概念，掌握一切系統妥善率安全動作之始，皆由系統自我測試先行行動。

相信本文所探討系統自測作法的經驗及隔離設計方式，冀望提供系統工程者，可以以系統可靠度思考的模式來處理變化的系統問題，在全系統電子偵測檢修中，當採智能輔助分析工具以並行偵測與故障排除問題時，學習與研究系統的檢測與隔離的技術方法，決定重要功能組件之電子感測與並聯設計，將有效地提高電子裝備的診斷效率和品質。