

全壽期消失性商源及物料短缺的解決之道

空軍備役少將 陳宗禎 林昱甫

提 要

由於武器系統使用壽期時間長，科技發展更新周期短，以及國際環保與工業安全法規的要求，因此消失性商源及物料短缺(Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortages；DMSMS)的現象在系統研發、產製及維修期間均會發生，如同人體老化屬必然現象，無法避免，吾人必須承受。而管理者更須正視此項議題，並提供足夠資源以減低衝擊、預先防範、及早因應，必能提升全壽期成本效益，給予國軍完整解決方案。

關鍵詞：消失性商源及物料短缺、偽造品、積層製造、故障預測與健康管理、全壽期

前 言

空軍平台為中科院與空軍的交流介面，主要協助發展共同策略方案、發掘潛在合作機會、維持良好顧客關係，進而共創價值，目前雙方已簽署「空軍平台支援服務協議書」執行9大工項任務。空軍現役15型機的機隊後勤維運因消失性商源及物料短缺問題(diminishing manufacturing sources and material shortages；DMSMS)所衍生之技術服務，係現階段中科院支援服務主要且緊急的工作，如協助P-3C型反潛機隊妥善率維持作業。因此，如何有效執行DMSMS管理作為，確實值得探討與學習，對於中科院研發案借鏡及空軍機隊維持均有所助益。

國軍武器系統獲得以美國為主，而各項軍備獲得制度發展亦多採行美方體系規範，

是故，本文以美方近年聚焦的3大主題：(1)消失性商源及物料短缺的解決方案，(2)偽造品(counterfeit parts；包含仿製品及回收品)的防範，(3)新製造技術的發展現況等，將於下文進行說明。

消失性商源及物料短缺的解決方案

武器系統在全壽期運作中，DMSMS是必然現象，就像人類身體老化無法避免，必須提早在初步設計階段就預先防範及早因應。美國國防部的DMSMS準則「SD-22」，讓各專案在可以管控的風險基礎上，依準備、識別、評估、分析及執行(prepare, identify, assess, analyze, implement；簡稱PIAAI)的DMSMS管理作為，¹排定優序、投入資源、精準改善問題(如圖1)。DMSMS的問題因

1 SD-22, "A guidebook of best practices for implementing a robust DMSMS management program,"



圖1 DMSMS管理的5個步驟
(資料來源：美軍SD-22)

現階段技術侷限仍無法全然解決，僅能降低、縮減或改善其對維持成本、籌獲時程及戰備的影響。美國國防部(DoD)的國防部命令(DoDI) 5000.02「國防獲得系統的運作指導」，其中附件6律定了壽期維持的DMSMS政策為：「確認並識別老舊零件，並依照 Public Law 113-66, 第803節規定，發展適當的替代計畫」，²該法案P.L.113-66章節載明於2014年國防授權法案，要求國防部長「在武獲計畫中完成促進識別及替代老舊電子零件的程序」，³包括建立合約商或供應鏈資訊回饋機制、特定處理時限與程序、激勵措施及相關權責，詳細內容載明於DoDI 4140.01⁴「國防部供應鏈管理政策」。

在美軍DMSMS組織架構上，國防部研發暨工程次長室(Under Secretary of Defense for Research and Engineering；USD R&E)設有國防標準化計畫辦公室，並在各軍種物資

指揮部或系統指揮部成立供應中心、供補中隊、DMSMS管理小組或專案計畫室，負責處理相關問題。另外，政府工業資料交換計畫(government industrial data exchange program；GIDEP)、國防後勤局(defense logistics agency；DLA)、國防獲得大學(defense acquisition university；DAU)、國家國防製造與機械中心(national center for defense manufacturing and machining；NCDMM)及合約商均扮演重要角色，如圖2。

依DoDD 5000.01賦予專案經理的權責是，確保全壽期管理所需成本是可負擔的，而專案經理的角色也會隨系統獲得階段推移而改變，在具備初始作戰能力前，專案經理負責讓系統設計、工程發展、量產程序須符合功/性能要求及最小壽期成本。當系統服役後，負責在可負擔的情況下支援系統操作及訓練。良好的DMSMS管理作為對專案經理而言極為重要，因為它可以幫助達成以下目



圖2 美國國防部架構(資料來源：網路)

2 DoD, "Operation of defense acquisition system,"

3 Public Law 113-66, "National defense authorization act for fiscal year 2014,"

4 DoD, "DoD supply chain material management policy,"

標：(1)以DMSMS管理觀點建立替代件的評估標準，(2)協助確認系統或裝備在設計、量產或維修上所需零件的可用性，(3)控制並有效減低全壽期操作成本，(4)降低DMSMS風險，(5)儘早識別DMSMS問題及考量所有可能選項，(6)評估所有可能解決DMSMS問題的方法，(7)蒐集指標以監控專案計畫的有效性。因此專案經理應該建立更積極的DMSMS管理策略，不然稍有不慎就會導致維持成本大幅增加。⁵成本依DMSMS管理手冊「SD-22」來維持並發展適當的計畫以落實此項策略，如此將確保設計、量產、維修全壽期均能獲得有效的支援，如圖3。

根據美軍武獲流程指南(Defense acquisition guidebook；DAG)中說明，在研發階段、產製階段、維持階段的武獲流程中，執行相關重要技術審查節點(如圖4)時，就必須考量是否落實DMSMS作為。^{6,7}從備便系統審查、系統需求審查、一直到生產備便審查

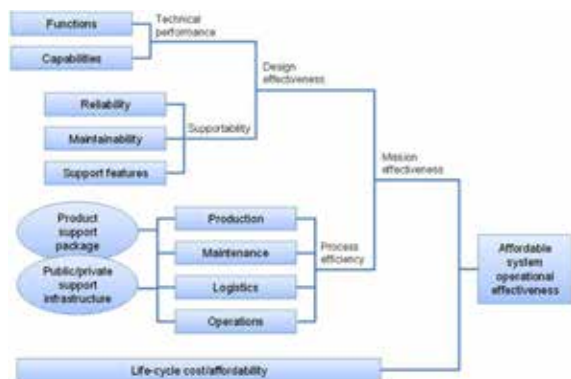


圖3 可負擔的武器系統效能參數
(資料來源：SD22)

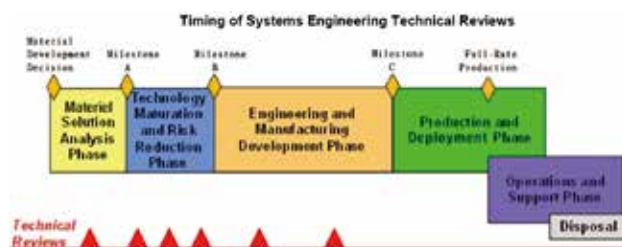


圖4 武獲流程重要審查節點
(資料來源：SD22)

階段，就DMSMS管理層面而言，每一個重要的技術審查階段，都有必須達成的目標，詳細查核項目則可參考SD-22中附錄D的資料。

就武獲流程來看，DMSMS問題影響成本甚鉅，所以在系統設計初期，專案經理就必須把這個因素列入考慮。例如：當產品已經進入生命週期末段，再投入大量資源就是不恰當的配置。就美方獲得環境來看，整個DMSMS團隊並不是一個處理DMSMS單一事務的群體，DMSMS團隊主要的責任是教導專案經理關於DMSMS的核心內容，並且協助專案經理一起處理客戶需求、成本、性能、時程等因素的平衡。如果能夠在設計階段就能夠導入是最佳的狀態，但是若受限資源和時程，不能做到嵌入設計中，最低限度也要讓DMSMS團隊幫忙整個專案持續監控零件商源消失的風險。

以下幾點因素在設計階段應該即早納入考量，可以降低商源消失的風險：

一、零件使用最佳的科技

當最新的技術問世後，往往還需要一段時間的研改調整才會穩定，所以專案不宜

5 Bill Kobren, "10 things great program managers know about product support,"

6 <https://dag.dau.mil/pages/default.aspx>

7 Defense acquisition guidebook

使用最新的技術；但是另一方面，舊技術時代的零件，雖然非常成熟，但是因為效能或成本的劣勢，可能導致幾年後被新科技給淘汰。面對新舊科技的差異，要選擇一個最佳的權衡點。

二、零件管理

在設計階段，零件管理最重要的原則就是：(1)盡量使用標準件或泛用型零件，(2)零件盡可能的重複使用。在採購上標準件會比特殊構型更具經濟規模，對於供應鏈的影響力會提高，可以降低商源消失的問題。等到設計穩定後，可以盡量微調零件，讓需要的代工廠/原始廠商數量盡量減少，可以讓物料清單更穩定、且具備易於維持的優勢。

三、硬體開放式架構

開放式的硬體往往都是基於一定的共識及商業性或公共的利益而架構起來的，具備有模組化的特點，所以一般而言都會定義標準的介面、驗證評估的規範，不至於產生不相容的問題。採取開放性架構時，當部分模組產生商源消失的問題，我們比較容易找到相容的替代性零件，完成符合外型與功/性能規格的模組。另外，在考慮開放式架構時，也應該把該套架構的未來發展路程圖一併考慮進來，當隨著技術的進步，架構亦將隨之更新，專案經理也可考慮替代部分零件或者隨著路程圖調整架構。一般而言，嚴謹的開放式架構，都具備有向下相容性的優勢，而且因為架構開放的優勢，比較容易吸引更多的供應商投入這個領域，如此一來將降低DMSMS的風險及處理成本。如果因為特殊需求，無法使用標準化的產品，盡量讓零件具

備更佳的可攜性會更好，例如超高速積體電路硬體描述語言(VHDL)，透過電腦輔助工具開發出來的晶片，就具有良好的可攜性，程式可以轉換到不同的平台，重新製造成新的晶片，有效降低商源消失的衝擊。

四、軟體開放式架構

開放式的架構，催生了硬體的即插即用功能，也讓軟體可以輕易地安裝在符合特定工業標準的硬體中。因此在軟體系統的設計上，也需要考慮軟體的未來擴充性、升級等需求。盡量讓個別的軟體模組功能獨立，俾利執行個別的測試驗證，也可以單獨的更新或修正。盡量不要讓軟體綁定特定硬體架構，可以利用獨立的驅動程式的概念，讓軟體和硬體脫鉤。開放式的軟體系統中，各模組關係偏向於離散化，軟體具備可擴充性高，程式碼可重複使用的優勢。然而這樣的概念，也可能會讓軟體架構變得十分複雜，因此在架構設計之初要特別考量系統複雜度的議題。開放式軟體架構中常用的設計概念是物件導向，物件導向讓程式碼可以最大化的重複使用，並且具備高度的可以移植性，讓程式碼可以輕易的部署到不同的平台上運作。

五、使用現貨市場商品

COTS(commercial off-the-shelf)是指現貨市場的商用零件，相對的概念則是GOTS(government off-the-shelf)，指的是由政府特定單位生產或者授權生產的零件，由於工業技術的突飛猛進，使用COTS可以大幅減少開發時間和成本，商業界也更習慣使用最新的技術於COTS零件上，所以當今武器系統

的開發趨勢，已經逐漸轉向整合COTS組合件和COTS軟體為主。但是COTS的生命週期短，而且不像是政府單位控管的GOTS零件，可以有詳細的料件清單可以輕易追蹤，所以專案經理對於武器系統使用的COTS組合件或軟體，要有特別的追蹤管理機制，最好在設計之初就已經預先考慮好COTS組合件或軟體的技術發展路程圖，並研擬COTS組合件的更新策略。盡量避免在沒有經過審慎的評估，就大幅度的修改COTS組合件或軟體，這會讓修改後的COTS變成特殊的非標準件，可能會產生某些不可預期的風險。

六、考量工具的消失性商源問題

工具是要特別注意的一環，現在武器系統無論是在電路設計、軟件設計、韌件開發、機械設計、系統設計、系統驗證、生產管理、還是產品生命週期維持計畫的規劃，都需要大量的工具來協助完成相關任務。這些工具和DMSMS議題亦有關聯性；例如某種機械設計軟體的淘汰，可能導致舊的零件無法重新出圖生產。因此DMSMS管理系統也需要對於這些工具的商源消失問題提出預警。

以上這六點，是設計階段所需考慮的重點，其餘須考量的部分可以參考美軍「SD-22」文件及相關技術文件的內容。根據工程發展的程度，我們粗略可以用初始作戰能力為基準，在初始作戰能力之前，在每個重要的技術審查節點，DMSMS管理小組需要利用預測工具和市場調查的方法監控零件是否已經產生商源消失的問題、或者近期可能發生商源消失的風險，並且持續規劃技術更新路程圖以及收集重要的技術指標參數；在初

始作戰能力之後，DMSMS管理小組至少每五年要利用預測工具和市場調查的方法對於DMSMS問題進行案例分析及監控。

根據美國防部資料顯示，強化DMSMS管理是降低戰備風險及改善全壽期管理效益的方法，DMSMS解決方案建立在最佳成本效益的基礎上，必須在問題發生前防範於未然，規避異常處理成本，建立有價值的預先因應處理作為，成功案例如下：

(一)B-1機計畫辦公室收到原廠(OEM)通知雷達系統已停產，並建議花費35,000萬美元執行構改，DMSMS管理小組監控顯示僅有少部分元件商源消失，且分析後確認可獲得代用件，運用自有專業工廠維修能量(D/L)，10年內節省31,600萬美元成本。

(二)阿帕契攻擊直升機商源消失團隊結合政府部門及合約商，早期發覺因應DMSMS風險，擬定並執行管理計畫的積極作為，使得機隊避免了物料短缺及時程延宕的情形，全壽期可節省20,000萬美元。

(三)維吉尼亞級潛艦計畫早在研發設計／建造階段即整合DMSMS管理，確保結果的一致性、重複性，專案辦公室成立技術更新產品整合小組(IPT)，制定標準操作程序、協同海軍物資系統指揮部先期購置備份件及編列預算，結果解決了超過1,260項商源消失項目，由於預先因應處理節省超過15,900萬美元成本。

(四)軍事售予(FMS)DMSMS管理小組被軍售國要求介入處理支援武器系統所需的關鍵數位顯示指示器商源消失問題，原廠(OEM)無法滿足支援需求，且報價260萬美

元重新設計，DMSMS管理小組審閱藍圖技術文件、確認件號構型、找尋原始組件廠商(OCM)，獲得了超過軍售國所需的50件數位顯示指示器，僅需32.7萬美元，節省了約230萬美元。

資訊的蒐集是識別消失性商源風險的首部曲，有充分的資訊來源才能按照DMSMS管理5步驟評估、分析，排定優先順序執行。蒐集資訊的管道如下：

一、原廠或授權的供應鏈中獲得資訊

美國國防部供應鏈管理政策中明訂，應建立合約商或供應鏈資訊回饋機制，要求原廠及其供應鏈提供物料清單，並針對產品停產或替代件等相關資訊有責任通知並揭露，空軍專案計畫訂定相關合約時可考量納入規範。

二、由政府組織或相關協會獲得資訊

美方認為每一個DMSMS的問題都是獨特的，所需要的解決策略與風險控管的程度都不同，但這些DMSMS管理小組並非單打獨鬥，因此催生了很多相關製造協會、學術單位形成一個強大的社群平台，而其中與DMSMS最有關聯的是政府工業資料交換計畫⁸(GIDEP)，該計畫是一個促進政府單位和工業界參與者、資料庫廠商間資訊交換的平台，透過緊密的資訊分享，消弭資訊不對稱的落差，避免因資源不對稱造成武器維持成本的大幅增加。但是該協會會員資格僅開放美國及加拿大政府與相關工業界廠商參與，因此我國並無法獲得GIDEP的直接服務，但

是坊間廠商的零件資料庫(如IHS MARKIT公司)都是有經過GIDEP、DLA認可的，因此我們可以間接獲得相關資訊。另外，DAU亦負責架構DMSMS的知識平台，提供DKSP⁹(DMSMS knowledge sharing portal)線上訓練課程及案例分享，均是極具價值的資源，可供運用。

三、由零件資料庫廠商獲得資訊

透過個別零件代理商搜尋相關零組件，優點是零件搜尋或者請公司協尋通常都是免費的，但是個別公司的資料庫都有限。所以如果希望能夠有更強大的資料庫更詳細的資料，就要求助於資料庫廠商。經實際拜訪IHS MARKIT、TPP(total parts plus)、Partstat、Silicon Expert等資料庫廠商，初步測試的結果，仍以IHS的資料略勝一籌，國防部及中科院均已經租用該公司資料庫。

四、由公開網路或軍售管道獲得

相關報導、法說會、期刊、部落格等公開網路資訊可廣泛搜尋。而軍事售予屬政府對政府的採購交易，必須由軍方成立軍售案，台美雙方簽署同意後始可獲得相關政府資訊，惟目前應可由廠家發布的服務通告(service bulletin；SB)或時限技令(TCTO)中獲得。

在武獲流程中DMSMS管理最重要的概念是預先因應(proactive)越早越好，越晚處理而被迫被動反應(reactive)，所需耗費的成本越高，從圖5中顯示，及早因應DMSMS問題，立刻採用其他已批准的零件，並執行相

8 <http://www.gidep.org>

9 <http://www.dau.edu/cop/dmsms/pages/default.aspx>

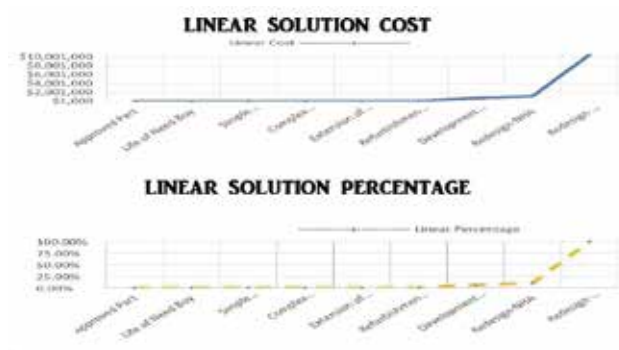


圖5 DMSMS處理成本(單位：美元)
(資料來源：NUWC簡報)

關驗證，執行成本可能只要數千美元，但是隨著時間的流逝，越晚處理DMSMS問題，可選擇的方法越少、限制條件越多、解決成本越高。DMSMS的處理策略從成本較低如使用代用件、替代商源、後市場採購現貨、壽期庫存件採購，到最終必須採用工程研析方案重新設計，或因為藍圖遺失必須採取逆向工程的手段，後期的處理作法與前期的代用件驗證成本相比，所需費用天壤之別。所以落實DMSMS管理作為，就是要從被動反應(reactive)變成預先因應(proactive)，更進一步運用資料科學及大數據的相關技術分析的方法，達到主動預測風險(predict)的目標。

偽造品的防範

偽造品是DMSMS管理關切項目之一，因為解決DMSMS問題所採購的零件可能是偽造品(包含仿製品及回收品)，這種現象常發生在代用件或更換零件的維修過程，如果這些零件是向非授權或認證的供應商採購獲得，將大幅增加系統運作的風險，必須加以防範。由於電子性廢棄物的增加及電子商務的

蓬勃發展，現今電子零件偽造品已在開放市場上擴散。而電子零件偽造方式包括：(1)複製，(2)偷竊半成品(如晶圓或封裝零件)，(3)竄改規格標示(如件號、批號、製造日期、產地)，其中竄改廢品回收的規格標示目的有：(a)使堪品顯示成新品，(b)使不同批號產品顯示成同批均質產品，(c)使產品(如一般的商用件)顯示成更好更貴且不易獲得的產品版本，(d)使產品顯示成更好更貴且不易獲得的類似產品版本，(e)使產品顯示成顧客所需的任何產品(無視產品功/性能是否符合)，上述情況除第(e)項可於測試階段檢出排除外，其他(a)~(d)項偽造品均有可能通過初步測試，進而造成使用上發生不預期的失效或災難性的損失，因此必須嚴加防範類似風險。

其中危害最大的是在原有的晶圓中附加惡意的電路，除了可能透過惡意駭入電路探知全系統的相關參數，甚至有可能把相關資料傳送給其他組織。拜半導體技術的發達，要將原有的晶圓縮裝，額外再附加其他特殊的電路在技術層面是可行的。相對於把商規件或者從廢品拆零，冒充新品賺取高額利潤，高階的晶圓複製及植入惡意電路的作法，都是由特定國家級單位發動的作為，危害程度也最大。

大部分偽造的電子零件為積體電路，但是事實上，任何形式的電氣或電子產品都可能被偽造，包括電路斷電器、內部開關、陶瓷電容等，圖6顯示ERAI公司從2012-2014年間2,000份報告中蒐集的資料，偽造電子零件種類分布情形。¹⁰

美國防部國防後勤局(DLA)評估近年所

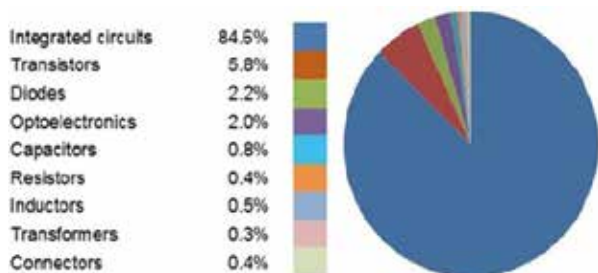


圖6 偽造電子零件分佈(資料來源：ERAI)

有供應鏈內部偽造品報告，以及來自於聯邦政府採購、國防部採購、GIDEP、企業界及相關協會等資料，發現5項遭偽造高風險產品類別為(1)電氣及電子裝備組件(2)發動機附件(3)管件、軟管、接頭(4)五金件及研磨材料(5)車用裝備組件。

美國國防部在DoDI 4140.67「DoD偽造品防制政策指導」有明確要求，不得採購偽造品(包含仿製品及回收品)，必須建立政策並賦予業管單位必要的職責以防範任何形式的偽造品進入國防供應鏈。^{11 12}為了防止國防武器的供應鏈系被源源不絕的偽造品流入，危害武器系統的功能，必須指派權責單位防制、發掘、改正、調查偽造品，並且建立必要的防禦措施。因此，美國國防採購法(DFAR)在2014年修訂增列了對國防合約商要求，合約商必須避免、發覺、遏止並主動舉報偽造品，以回應國防授權法案的要求及國防部的政策指導。美國國防部具體的要求合約商必須建立偽造品電子零件發掘與規避系統，包括：(1)訓練，(2)建立檢驗及測試技術，(3)使用原廠或授權供應商的產品，(4)向

國防部及GIDEP舉報及隔離偽造品，(5)偽造品的發掘與防範作為，執行的力道向下擴展至次合約商及整個供應鏈，(6)研析GIDEP及其他可信資訊來源中有關偽造品的訊息，(7)在產品壽期範圍內強化零件可用度，減少使用商源消失產品，並使用確定為真實的、原始設計且通過認證的電子零件。

因為DMSMS零件在現有市場上取得非常困難，也造成了偽造品有利可圖的機會，據統計超過50%的偽造電子零件屬於商源消失件號，顯示DMSMS零件因稀缺而成為高價零件，為偽造品市場提供了極高的誘因，因此在非正規市場中籌購零件有極高風險。在非正規市場中，偽造品也常常依附在合法但未授權的供應商來銷售他們的產品。國防及航空產品因為使用年限最久，最容易受到偽造品侵入，例如微電子零件壽期遠短於國防及航空產品壽期，很容易就遇到DMSMS問題，需求強勁的情況下偽造品就因應而生。因此強化DMSMS管理，能避免偽造品侵入供應鏈，讓專案更願意與授權供應商交易，這些的授權供應商包括原始組件製造商、或授權的經銷商、可信賴的製造商或擁有智慧財產權的後市場製造商等，會讓整個供應鏈形成一個好的生態系。所以透過積極的供應商管理作為或向具商譽的供應商採購，並盡力透過各種檢測分析的方法獲得真實產品、不厭其煩的確認產品來源，才能將偽造品阻擋在供應鏈之外。

10 <http://www.era.com/index.aspx>

11 Ref SAE AS5553, AS6081, AS6496

12 DoD, "DoD Counterfeit prevention policy,"

但是，專案有時會因為成本、時程或其他因素為降低風險而向未授權的供應商採購，也是目前無法避免情況。就目前的數據顯示，在非正規市場採購獲得偽造品的風險甚高，因此建立基本的檢測能力以防止偽造品進入系統是有必要的，檢驗方法包括：

- (1)目視檢查，標籤、包裝、翻新情形，
- (2)標籤耐久性測試，清除油墨或表面塗層，
- (3)表面處理測試，溶劑清除表面塗層，
- (4)X-ray(XRF)螢光成分分析含鉛產品，檢測正確塗層成分，
- (5)X-ray放射線照相，檢測內部硬體架構，
- (6)音波掃描顯微鏡，檢測內部脫層，
- (7)脫模及裸晶檢查，檢測裸晶的標示，
- (8)操作曲線圖形或直接量測電氣數值，
- (9)完整電性測試或動態特性測試等。最後，為確保資料的可信度，也可洽詢原廠審閱測試分析資料或提供相關資料進一步比對。

筆者因曾派駐美國華府任職及長期工作需要，在接觸國際各大軍事武器製造原廠，談論偽造品議題時，上述國防部政策與要求合約商必須避免、發覺、遏止並主動舉報偽造品，以及建立偽造品電子零件發掘與規避系統等，均獲得廠商確認。更有甚者，國際主要廠家因顧慮商譽及風險，均朝以積極的供應鏈管理制度，只跟授權認證的供應鏈採購零件，以避免偽造品流入，如果不得已必須向信賴名單外的廠商採購時，會有一整套機制從文件追溯、資料審認、商源查核、產品檢測、試用評估及聯合評鑑等複雜程序把關。

新製造技術的發展現況

美國防部結合產官學研全力推動新製造技術開發，舉凡雷射激光能量、積層製造(additive manufacturing；AM)、機器手臂(人)，金屬冷噴(cold spray)及故障預測與健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)等，希望能從「製造導向設計」轉變為「設計導向製造」，其中積層製造及故障預測與健康管理在機隊維運上扮演重要角色，分別介紹如下：

一、積層製造技術

就是我們一般俗稱的3D列印、快速成型、快速製造技術。它是基於三維模型數據資料，採用層狀堆疊(layer-based)方式有規則的增加材料(如圖7)，相對於這種材料堆疊累加的技術，傳統的機械加工，則是把不要的部分給切削掉。依照美國材料試驗協會(ASTM)定義¹³，將積層製造技術分成七大類，分別為材料擠製成型(Material Extrusion, ME)、黏著劑噴塗成型(Binder Jetting, BJ)、光聚合固化成型(Vat Photopolymerization, VP)、



圖7 未來的積層製造智慧工廠
(Honeywell公司提供)

13 ASTM International, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies", Designation F2792-12a, 2013.

材料噴塗成型(Material Jetting, MJ)、疊層製造成型(Sheet Lamination, SL)、粉床熔化成型(Powder Bed Fusion, PBF)、指向性能量沉積成型(Directed Energy Deposition, DED)。然而，目前國際上較為成熟之金屬型積層製造技術仍以上述後兩類，即粉床熔化成型(PBF)與指向性沉積成型(DED)為主要應用。

綜觀目前金屬型積層製造主流技術，其應用特性差異如下：在成型尺寸上，由於PBF技術受限於加工腔體及雷射光振鏡可掃描之範圍，可加工最大尺寸受限；而DED技術可成型之工件尺寸視機械手臂之移動範圍而定，亦可於非平面上直接進行加工，因此適用於大型工件製造，而機械手臂高自由度之優點亦使該技術相當適用於大型鑄件之修補工作，如工業級發動機渦輪葉片之修復作業。而在工件精度方面，DED技術之產品精度與表面粗糙度較差，且對於構型複雜及有內部流路設計需求之工件加工較為不易，因此若工件設計複雜或精度要求較高時(如異型水路等)，則應考慮採用以粉床為基底的PBF技術。

美軍實驗室及國防工業利用積層製造技術產製零組件已行之有年，成品產製逐漸符合戰地環境的要求。美國國防部先進計畫研究局(DARPA)以「生產試驗與推廣二號計畫」(MENTOR2)的名義，部署「移動遠征實驗室」搭載積層製造設備及所需要的鋁材、塑料及鋼材等材料，並規劃以卡車或直升機運送。其目的為改善目前後勤補給運作模

式，提供部隊能即時製作需要維修的零件以降低後勤維護成本，藉此實現在戰場上即時補給的想法。由於，積層製造工件之安全性尚處於需進一步測試驗證的階段。然而無人機系統不需考慮人員安全，大幅降低了安全性的需求，可作為積層製造技術現階段最佳的應用場合。英國海軍成功從皇家海軍光輝號航空母艦(Royal Navy's HMS)的甲板上，成功發射一架積層製造之尼龍材質無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)。未來視戰況所需，在軍艦配載積層製造設備及所需材料即可將無人機列印出來，並且立即投入戰場運用，可大幅提升戰術運用之彈性。¹⁴

積層製造除了可縮短研發周期及無模具生產客製化需求外，也是處理DMSMS的手段之一，當零件使用積層製造技術的比例越高，產品線的供應鏈就會越單純，生產也就越有彈性。傳統機械加工或者精密鑄造零件，常常需要有一定的經濟規模才能維持公司產線正常運作。另一方面，非電子零件在發生商源消失風險的時候，往往還可以選擇超限維修的方法或繼續拆拼修理使用，處理的優先層級常常被專案經理放到很後面，導致無法獲得足夠的資源解決該問題，而目前的積層製造技術可以緩解這些非電子零件的DMSMS問題。

另外，積層製造除運用於機械零件的製造外，也可以運用於半導體封裝上。半導體製程中，將晶圓加工成所需的積體電路，最後切割成原始的裸晶，裸晶是沒有打線接

14 江崇銘，林柏伸，陳志鵬、任國光「積層製造技術在航太及國防的應用」，新新季刊第四十四卷第一期。

合、沒有封裝的積體電路。要經過打線、封裝測試之後才會成為有功能的積體電路晶片。因為晶片逆向工程的生產數量極少，環境規格要求高，並不具備經濟規模，所以很難將訂單交給專業的半導體廠封裝代工，因此美國合作的廠商(如SRI公司)除了要自有晶圓廠外，相關的封裝測試也要自行克服才能滿足產品的需求，因此相關廠商也開發了相關的積層製造封裝技術以支應小批量裸晶封裝的需求。

二、故障預測與健康管理技術

故障預測與健康管理(PHM)起源於1980年代英國民航單位為降低直升機意外事故率，接著在1990年代發展為基於監控直升機健康狀態的系統，經統計1991至2000年期間，該系統有效降低了每10萬飛行小時的重大與非重大意外事故率，達到良好的執行效益。2000年代美國國防先進研究計畫局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)發展了結構整體預測系統(Structure Integrity Prognosis System, SIPS)及加強型視情況維護(Condition-Based Maintenance Plus, CBM+)。PHM的第一個成功案例是美國國防工業委員會建立的聯合攻擊機(Joint Strike Fighter, JSF)的自主式後勤系統(Autonomic Logistics System)。通過對健康狀態參數的監控，實現故障隔離、健康趨勢預測和維修決策輔助，大幅提高了JSF的戰略值勤能力，並降低了維護維修成本(如圖8)。因此，美國國防部自2003年起將PHM技術需求納入國防



圖8 JSF自主後勤系統(洛馬公司公開資訊)

武器獲得系統，明確要求"專案經理應透過可負擔的、整合的、嵌入式故障診斷與預測技術，以最佳化在操作上的準備"。¹⁵

由於航太與國防工業獨特的需求、嚴格的安全標準及高額的維護成本，使得PHM技術最早發展於此領域，近年來，隨著嵌入式計算與感測器技術的快速發展，以大數據為核心，運用PHM技術於廣泛的行業中，包括國防、航太、風力發電、設施工程、生產製造及工業電子等，舉例如後：(1)航太及國防系統：聯合技術公司(UTC，現為雷神科技公司)發展健康與使用管理系統(Health and Usage Management Systems, HUMS)，解決旋翼飛機軸承與齒輪軸不平衡的問題；UH-60A直升機運用PHM技術完成行星齒輪盤剩餘可用壽命(Remaining Useful Life, RUL)預測；普惠公司(P&W)在F135多用途發動機上完成先進PHM系統。(2)製造業：運用PHM技術於生產工具機主軸震動監控，減少停機時間；生產汽車所需的空壓機與機械手臂群體健康狀

15 N.-H. Kim et al., Prognostics and health management of Engineering Systems. Springer International Publishing Switzerland 2017 DOI 10.1007/978-3-319-44742-1_1

態監控；飲料生產工廠運用震動數據預測幫浦的故障。(3)電子業：運用PHM技術於手提電腦故障預測及航空電子絕緣柵雙極電晶體(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)全壽命工程。

由以上PHM技術發展的歷程可知，其主要目的是為了監控系統的健康狀態，故障分類與診斷及藉由退化模型預測剩餘可用壽命，適當預先規劃維修排成及精準備料，以達降低維護成本，同時提高系統可用度。因此，具體而言，應用PHM技術對設備進行維護可瞭解以下4個問題：(1)當前設備的運行狀態；(2)設備何時會出現故障；(3)何種故障可能會出現；(4)應該採取何種維修措施。¹⁶其執行步驟依序為資料擷取(Data Acquisition)、資料前處理(Data Pre-Processing)、特徵提取(Feature Extraction)、建立分類模型(Classification)、預測(Prognostics)或診斷(Diagnostics)、資料視覺化(Visualization)等六個步驟。(如圖9)

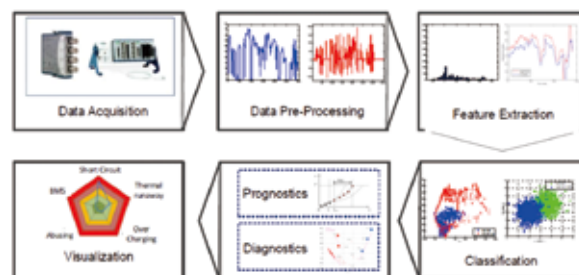


圖9 PHM技術六大步驟(IMS中心資料)

問題，特依現行主、客觀因素，制定其相關可行作業流程，俾利各計畫專案執行。系維中心亦規劃建立後續維持資訊系統(Follow-On Support Management Information System, FOSMIS)，將扮演軍種與中科院原廠間企業電子化的專屬平台及資訊服務角色，有助於後續維持作業相關專案管理上之決策應用。¹⁷目前該中心配合空軍平台需求逐步建立非院供武器DMSMS技術報告及相關資料，運作情況良好。此外，有鑑於商源消失多屬電子產品，電子所已具有DMSMS管理小組的功能單位，設置零件工程師運用資料庫執行電子零件壽命資訊管控，預應處理解決。

漢翔公司針對經國號戰機服役維持所面臨的DMSMS問題，依美軍作業準則及實際經驗，為空軍武器裝備建立DMSMS管理資料庫，其內容應涵蓋武器裝備總成、重要裝備料件清冊、技令資料、零組件基本資料、商源資料等，並定期辦理更新，適時提供空軍建議方案及發布報告，以供未來物料需求暨對外採購作業參考。

二、偽造品防範

國內發展現況

一、DMSMS管理

中科院武器系統研究發展，經歷過去五十年的成長，各項武器系統及電子通訊裝備，陸續解繳國軍使用，同樣也面臨武器系統後續維持DMSMS的問題，均將影響國軍的戰備及系統妥善率。系維中心負責院供武器系統從研發、產製至後續維持階段的DMSMS

16 Lee J., Wu F.G., Zhao W.Y., et al. Prognostics and health management design for rotary machinery systems- Reviews, methodology and applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing

17 陳紀元，廖永振，「消失性商源科技管理研究」，新新季刊第四十六卷第二期。

中科院之院供裝備在研發、產製及維持階段，常會因諸多外在因素的干擾(如輸出入許可限制、商源被併購等)，必須找尋代用零件，因此，為了避免偽造品的流入，影響院供裝備的安全與功/性能，除了做好供應鏈管理或向授權可靠供應商採購外，亦已建立部分偽造品鑑識能量，如電子所已具備如目視檢查、X-Ray(XRF)非破壞檢測及電性測試等能量，可有效防範偽造品的入侵誤用。

三、積層製造能量發展

中科院飛彈所及材電所自2014年起積極投入人力物力，發展航太級高合金粉末與積層製造技術，從設計、分析、建模、製造、檢測及驗證，完善我國航太級積層零組件全製程技術鏈，對關鍵技術如多光源高效模組、大型積層製造系統及超合金粉末等奠定基礎。¹⁸實際成果如製造新式高教機次結構組件、協助空軍機隊解決燃油歧管DMSMS問題，可靠度與品質均符合空軍需求。現階段空軍平台因應空軍需求，將協助空軍專業指部建立積層製造與維修能量，並推動航空技術學院師生見習訓練，擴大雙方合作深度與廣度。

四、故障預測與健康管理發展

雷達武器系統以電子元件為主，相對於機械系統中的摩擦損耗和應力破壞等過程來說，電子元件的健康狀態跟蹤更加困難，因為大多電子元件的失效徵兆僅在微觀尺度內呈現，並且電子元件的故障徵兆參數達到預

估失效臨界值不一定會引發預期失效，因此電子元件的失效亦更加具有難預測性和突發性。

中科院系維中心針對電子元件健康狀態預測方法進行文獻探討，發現電子放大器元件失效原因可參考下列指標：消耗功率、洩漏電流與駐波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)，駐波比越大，反射功率越高，傳輸效率越低。這類研究以電子元件的加速衰退模擬試驗為基礎，從故障預兆參數如靜態、暫態電力、電磁特性的角度總結電子元件的參數化性能衰退趨勢變化，或從微觀尺度上進行電子元件的應力損傷分析，以期實現電子元件的性能退化過程解析，由於選取可靠的失效預兆特徵是實現電子元件失效預測的重要步驟。因此系維中心將研究工作集中在故障預兆參數的篩選和進行狀態參數監測之平台開發。¹⁹

該中心已投入故障預診斷技術之研究，預期要達到4個目標：故障預測、肇因分析、基於健康指標的故障診斷與剩餘使用壽命(RUL)預測。現階段測試平台已建置，可對多項電子元件失效關鍵指標參數(電壓、電流、溫度、RF功率)進行長期的量測及記錄，並於超出預設範圍有告警訊息通知。未來將參考加速老化試驗理論及估算模型，朝向PHM技術的第4層-故障預測層發展，設計可以用於電子產品PHM開發的實驗平台，完成故障預測之系統驗證，最終目的為完成適用

18 中科院109年航太級積層製造技術成果發表資料。

19 藍辰睿，林淑娟，「故障預測與健康管理(PHM)技術導入雷達武器系統之狀態監測平台開發研究」，新新季刊第四十八卷第二期，民國109年4月號，239-241頁。

本院生產雷達系統之PHM系統架構。

此外，中科院航空所負責國機國造任務，持續蒐整國際軍機導入故障預測與健康管理發展現況及應用趨勢，從後勤管理、後勤工程及後勤支援等面向，結合產學執行先期研究，整合軍方LIMS及民間供應鏈，提供後勤預測及最佳化決策等功能的協同作業平台，期望發展出可供下一代自製戰機運用的自主後勤管理系統，達到效益後勤的終極目標。

在學術界PHM技術的研究，以逢甲大學航太與系統工程學系張淵仁教授為首位，張教授於2018年受邀前往美國辛辛那提大學智慧維護系統中心(Center for Intelligent Maintenance System, University of Cincinnati)擔任訪問學者，隨該中心主任李傑特聘講座教授(Jay Lee)學習PHM技術，回國後，除開設國內唯一工業大數據分析與應用(基於PHM技術)課程外，並協助航空、電子及傳統產業導入PHM技術，培育人才及解決產線問題。

結語

一、強化DMSMS管理功能

空軍主要武器系統多已超過中後壽期，DMSMS問題嚴重，面臨機隊小、構型特殊且缺乏技術資料，更要預先因應。目前物料籌補作業，除了軍購標準件一、二號訂單建存案供售無虞外，其餘非標準件或修理循環件常遇交期延宕或無商投標影響機隊妥善情況，建議採行下列措施，尋求改善：(1)成立DMSMS管理小組或設立專案經理官專責商源消失工作，可聘用退役專業袍澤執行，並

結合國內廠商及中科院能量共同協助，及早解決，節約成本。(2)納入現有軍售合約條款工項(如P-3C)或開立個別軍售案，要求美方提供報告及解決方案。美國防部國防後勤局(DLA)長期與民間公司合作解決商源消失問題，部分共通品項已開發完成代用件。(3)廣蒐商情，要求原廠提供相關資訊，並納入合約或協議書規範執行(4)參加DMSMS國際會議，可充分學習吸取知識，廣泛蒐集參展廠商商情資訊，持續累積DMSMS問題解決方案。

二、完整偽造品(counterfeit parts)鑑識能量

空軍零附件購(修)管道多元，除軍購及原廠商售有完整供應鏈管理外，其他如公開招標、軍機委商及軍品認修製等作法，均有偽造品流入風險，以往也曾發生案例，建議採行下列措施，尋求避免：(1)完善供應鏈管理，強化合格證評鑑驗證與零件溯源機制，加強人員專業訓練，納入合約要求規範。(2)建立鑑識能量，空軍可建立人員目視檢查的基本能量(含文件審查技巧)，而中科院已具備偽造品相關鑑識能量，可以此為基礎，再投入少量資源，建立資料庫及設備更新，讓現有裝備系統的安全度、可靠度及品質將可獲得更完整保障。(3)要求美軍提供協助及分享資訊，美國防部國防後勤局(DLA)及相關單位均有定期報告，可供參考。

三、建立積層製造與維修能量

中科院飛彈所與空軍第一、三後勤指揮部已簽署合作備忘錄，共同發展積層製造與維修能量，雙方後續將以協議書型式，分近、中、遠程目標逐步協助空軍建立完整能

量。此外，積層製造亦可運用於零組件維修，恢復原有尺寸與功能，對DMSMS問題解決亟有助益。

四、探討故障預測與健康管理

戰機是空軍主要戰力來源，維持機隊妥善率需要大量資源投入，研究指出機隊維運所需之整體費用，平均約佔全壽期成本60~80%，因此如何降低維護成本，同時提高系統可用度與增進品質安全，是值得深入研究的課題。前瞻國機國造下一代戰機或F-35的籌獲，機隊管理均需要具備系統化數據分析能力，及發展自主感知決策輔助系統，期能創新或融合現有LIMS系統，達到精準後勤的目標，而具備PHM技術知識與實務經驗，為必須先行的務實作法，建議即刻著手推動先進國防科技研究計畫提案，爭取國防部經費資源，促成產官學研合作，為智慧維修預作準備。

後 記

筆者在2019年底奉派赴美國參加DMSMS研討會，除了瞭解如何管控消失性商源問題外，亦能掌握現階段發展趨勢，期望可作為國內的借鏡。該研討會為美國國防部研發暨工程次長室(Under Secretary of Defense for Research and Engineering；USD R&E)國防標準化計畫辦公室主辦，邀集美陸海空軍與陸戰隊、產業界、學術界及相關製造技術協會共同參與研討並展覽成果，同時該研討會也是北美地區針對DMSMS問題所舉辦的最大且最專業的會議及展覽。DMSMS三天半的會議期間，共有1,600人參加、155家參展商，邀

請美國防後勤局(Defense Logistics Agency；DLA)中將局長、飛彈防禦局(Missile Defense Agency；MDA)研發主任及國防部研發暨工程次長室(Under Secretary of Defense for Research and Engineering；USD R&E)副次長等5位官員就各領域擔任大會演講，並邀請16位專家學者擔任5場大會專題論壇委員，舉辦27場次訓練課程及80場技術研討與案例分享。在展場展覽期間有多場次的技術成果小型發表會，並有得獎海報計12幅展示，整個研討會豐富專業聚焦緊湊。

由於會議舉辦多年安排適當，重視社群交流與經驗分享，因此每晚舉辦網絡(Network)聯誼，促進出席人員互動對話，期間筆者分別與美國防部、後勤局、空軍專案經理、產業界及各協會人員訪談收穫豐碩，茲將在會議期間與美方人員互動交流所提問答綜整如後：

一、在大會專題論壇(DMSMS Management Successes and Initiatives Across DoD)提問

問：中華民國為貴國主要軍售國家，中華民國空軍(ROCAF)多數機隊及武器系統來自軍事授予(FMS)，但因為機隊小、機齡老、構型特殊及欠缺工程技術資料等因素，面臨DMSMS問題更嚴重，請問美國防部對軍售國的DMSMS問題如何提供協助解決？

答：美國防部研發暨工程次長室(USD R&E)國防標準化計畫辦公室主任Mr. Gregory E. Saunders答覆，美國防部對所有軍售國家面臨的DMSMS問題均會予以協助，可以運用美軍現有的組織、功能、團體及程序執行，建議可透過貴國空軍對應的美方窗口提出具

體需求協調商源消失管理小組處理，DLA也會協助，如後續須執行DMSMS管理，則可能需要在相關的發價書(LOA)內增列工項及經費。

二、與國防部研發工程次長室(USDR&E) DMSMS及零件管理專案經理Ms. Robin Brown訪談

問：DoD DMSMS管理的組織架構及投入的人力與物力資源為何？

答：美國國會每年度的國防授權法案(NDAA)均要求國防部執行DMSMS管理，而國防部從政策指導、作業程序及手冊均完整制定推行，在組織架構上，國防部研發暨工程次長室(USDR&E)設有國防標準化計畫辦公室，軍種設有功能性組織或專案性編組，在每個計劃內均會律定負責的職掌，以美海軍為例共有2,000個計劃內均有執行DMSMS管理單位；另外，美方也致力推動產官學研共同參與，建立DMSMS團隊平台，交流資訊及心得經驗分享，更強化了DMSMS的問題解決效率及效益。

問：DMSMS管理重點及現階段最大的挑戰為何？

答：預先防範(Proactive)重於被動因應(Reactive)，及早監控及早發掘處理，對成本時程均有最大效益。需耗費大量資源解決DMSMS問題，必須審慎評估排定優先順序逐步執行。

三、與DLA專案經理Ms. Marcia L Scott訪談

問：DLA如何協助軍售國解決DMSMS問題？

答：DLA每年支援美軍處理百萬項物資

供應，而DMSMS問題也非常嚴重棘手，目前能做的是將貴國空軍的DMSMS清單提供給本人，嘗試協助找尋美軍是否已有代用件、商源或庫存情況。

四、與美空軍壽期管理中心U-2機隊維持工程師Mr. Richard Taylor訪談

問：U-2機從1956年服役迄今已逾63年，機隊仍有31架需維持至2030年，請問如何管控DMSMS問題，維持機隊運作任務達成？

答：U-2機發動機及航電系統已構改更新，目前依系統別分別與10個合約商簽訂DMSMS管理合約，各合約投入金額約為200萬美元。

問：專案面臨的挑戰為何？

答：每當合約商找到解決DMSMS方案時，預算爭取程序繁瑣文件繁多，有一定困難度；另外，合約商對DMSMS的積極度、方案完整性及履約的情形，專案經理必須經常跟催稽核才能確保執行進度順利。



圖10 研討會交流互動照片

參考文獻

- 一、SD-22, Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortages. "A guidebook of best practices for implementing a robust DMSMS management program," Defense standardization program office, January 2016. pp.11
- 二、DoD, "Operation of defense acquisition system," DoDI 5000.02, January 7, 2015, pp.5, pp.113.
- 三、Public Law 113-66, "National defense authorization act for fiscal year 2014," December 26, 2016.
- 四、DoD, "DoD supply chain material management policy," DoDI 4140.01, December 14, 2011.
- 五、Bill Kobren, "10 things great program managers know about product support," Defense AT&L November- December 2011.
- 六、See <https://dag.dau.mil/pages/default.aspx>, accessed February 11, 2014.
- 七、Defense acquisition guidebook, section 4.3.18.21, "Standardization," and MIL-STD-3018, "Department of Defense standard practice: part management," October 27, 2011.
- 八、GIDEP網站的相關資料 (<http://www.gidep.org>)
- 九、DAU,持續教育訓練知識管理模組 <http://www.dau.edu/cop/dmsms/pages/default.aspx>
- 十、ERAI公司網站提供偽造品的最新資訊 (<http://www.era.com/index.aspx>)
- 十一、See SAE AS5553, AS6081, AS6496, "Fraudulent/Counterfeit electronic parts; avoidance, detection, mitigation, and disposition."
- 十二、DoD, "DoD Counterfeit prevention policy," DoDI 4140.67, April 26, 2013, pp.1., pp.13.
- 十三、ASTM International, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies", Designation F2792-12a, 2013.
- 十四、江崇銘，林柏伸，陳志鵬、任國光「積層製造技術在航太及國防的應用」，新新季刊第四十四卷第一期，民國105年1月號，94, 97,100-101頁。
- 十五、N.-H. Kim et al., Prognostics and health management of Engineering Systems. Springer International Publishing Switzerland 2017 DOI 10.1007/978-3-319-44742-1_1
- 十六、Lee J., Wu F.G., Zhao W.Y., et al. Prognostics and health management design for rotary machinery systems-Reviews, methodology and applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 42:314-334.
- 十七、陳紀元，廖永振，「消失性商源科技管理研究」，新新季刊第四十六卷第二期，民國108年4月號，12-23頁。
- 十八、中科院民國106-109年航太級大型積層製造技術開發成果發表會議資料，109.11.19.
- 十九、藍辰睿，林淑娟，「故障預測與健康管理(PHM)技術導入雷達武器系統之狀態監測平台開發研究」，新新季刊第四十八卷第二期，民國109年4月號，239-241頁。

作者簡介

陳宗禔先生，國家中山科學研究院航空研究所，空軍平台主持人。

林昱甫先生，任職於國家中山科學研究院航空研究所。