



空軍預測性後勤管理系統 架構之研究

黃秀英

提要

- 一、繼美國政府於2017年底公布的首份國家安全戰略報告，將我國及其印太區域的軍事與安全相連結，又川普總統於2018年底簽署亞洲再保證倡議法案，將臺灣地區納入印太戰略一環。
- 二、美國提倡自由開放印太戰略（Free and Open Indo-Pacific Strategy），對我參與印太區域安全合作，是契機也是挑戰，值此關鍵時刻，我應掌握契機，更可順勢積極參與印太地區聯防事務，主動扮演區域內友盟航機修護、航材補給品供給及轉運等中繼協防角色，提供即時後勤補保支援。
- 三、本研究依實證文獻分析歸納，導入PHM預知與健康管理創新思維及AI人工智慧科技等新興技術於空軍後勤補保體制，具體且有步驟的規劃發展空軍PLMS預測性後勤管理系統架構，並提出四項建議：1.爭取將PLMS系統納入國軍發展規劃、2.成立系統建置整合小組、3.建立大數據雲端資料中心，先期廣泛蒐集資訊、4.籌建後勤維護預知管理科研自主能量；除改善我後勤實質能量，也藉此創造地緣戰略契機與價值，持續與理念相近國家合作，促進區域的穩定和平與繁榮努力。

關鍵詞：預測性維修、預知與健康管理、AI人工智慧、大數據、雲端運算

壹、前言

從軍用飛機維護方式與策略的演進探討，傳統的飛機修護工作，是在無法得知飛機是否故障的情況下進行，隨著飛機性能的逐漸提升，系統變得更多且複雜，傳統維護模式也愈顯無效率。¹依研究統計，從飛機上移除的組件，實際上經廠級維修工廠檢測後，重新測試正常高達50%。²依美政府責任署（Government Accountability Office, GAO）公布美軍機隊平均機齡28年，隨著機齡壽期逐年累增、器材短缺以及消失性商源問題等，亦逐年影響機隊可支援度。³又美國會預算辦公室（Congressional Budget Office, CBO）統計F-16等13型機隊操作及維持成本，機齡與維持成本成正比，與妥善率恰成反比，估

算1999-2016年間維持費成本，漲幅約1.5%-4.1%。⁴美國防部為提升飛機可支援度，要求將預知與健康管理技術（Prognostics and Health Management, PHM）納入產品需求規範。⁵我國空軍多數機型循美軍售管道獲得，F-16等型機自1996年服役迄今機齡均已屆中壽期，美軍現階段所面臨器材短缺及消失性商源等後勤補保問題，亦直接影響我空軍後勤運作維持。

我國空軍機隊用以執行飛機故障診斷與排除作業程序，除參照各系統專屬維修手冊及技令（Technical Order）外，⁶硬體構面仍參照內建自測功能（Built In Test, BIT）；軟體部分則有後勤資訊系統（Logistic Information Management System, LIMS），將裝備平日修補作業予以「資訊化」，以蒐集修護經歷紀錄

- 1 Atlas, L., Bloor, G., Brotherton, T., Howard, L., Jaw, L., Kacprzyński, G., Karsai, G., Mackey, R., Mesick, J., Reuter, R., and Roemer, M, "An Evolvable Tri-Reasoner IVHM System," 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Big Sky, MT, USA: IEEE, 2001/03/10-17), p. 6-3022-3037.
- 2 Borky, J., Lachenmaier, R., Messing, J., and Frink, A. (1998), "Architectures for Next Generation Military Avionics Systems," 1998 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Snowmass at Aspen, CO, USA: IEEE, 1998/03/28), p. 265-281.
- 3 United States Government Accountability Office, "Actions Needed to Rebuild Readiness and Prepare for the Future," Air Force Readiness, <https://www.gao.gov/assets/700/694923.pdf>, retrieved 17 Dec 2018.
- 4 CONGRESS OF THE UNITED STATES CONGRESSIONAL BUDGET OFFICE, "Operating Costs of Aging Air Force Aircraft," 2018/09, <https://www.cbo.gov/publication/54113>, retrieved 17 Dec 2018.
- 5 DoD 5000.2 Policy Document, Department of Defense INSTRUCTION, "Operation of the Defense Acquisition System," <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodd/500001p.pdf>, retrieved 17 Dec 2018.
- 6 修護○○技術命令（空軍司令部），民國106年7月20日修訂版。

資料。⁷然此類屬「結構化資料」，雖能將多數維修紀錄表單資訊化，集存於資料庫中，但資料的大量累積且未能有效處理與分析運用，使得資料呈現大量及分散的狀態，不易萃取出有用的資訊，供專業修機人員故障排除作業時參考。其次，航空飛機用於檢視裂紋的內視鏡影像等「非結構化資料」，⁸以及EC-225健康使用監控系統(Health Usage Monitor System, HUMS)與UH-60M整合機載健康管理系統(Integrated Vehicle Health Management, IVHM)等監控數據均未能納入LIMS系統運用。⁹

LIMS系統受限於軟硬體配備，現僅能蒐集「結構化」資料，未能將「非結構化」數據及EC-225與UH-60M兩型機「傳感器監測數據」納入系統分析處理。系統建置迄今近30年，雖已蒐集龐大的「結構化」數據資料庫，惟未能與時俱進改善並提升系統效能，使其具備分析、運算與智能推理能力，以處理龐大後勤數據資料。隨著機隊機齡老化，故障頻次、複合式或跨系統故障趨勢持續攀升，致耗費高工時修機後，誤判失效情況屢

見不鮮，影響機隊管理及裝備妥善甚鉅。本研究目的(1)藉深度文獻研析，探討PHM理論基礎與技術演進；¹⁰(2)歸納並分析PHM系統實證案例應用；(3)導入PHM新興維管概念與技術，於空軍後勤維管工具，以構建預測性後勤管理系統(Predictive Logistics Management System, PLMS)架構，藉智能化的軟硬體設備輔助後勤事務管理，精準預測故障、採購備料需求及透明物流管理，發揮國防預算最大效益。

貳、文獻探討

本研究以文獻歸納法蒐整有關建置PHM系統架構學術文獻研析、整理並歸納，希冀藉由分析結果提出建議空軍導入一智能化PHM技術模型，以提高後勤作業效率，基此，定義搜尋相關學術研究文獻中包含：「故障偵測與診斷」、「預測性維修」、「PHM」、「大數據」及「物聯網」等中、英文關鍵字，搜尋國內外包含CEPS華藝中文電子期刊、ScienceDirect Online (SDOL)、Elsevier、IEEE

7 空軍○○資訊作業手冊(空軍司令部)，民國105年6月30日修訂版。

8 涂子沛，《數據之巔大數據革命，BIG DATA歷史、現實與未來》(香港：中和出版有限公司，西元2015年2月9日)，頁351。

9 AIRBUS Helicopters, “monitoring gear boxes with HUMS accelerometer,” 2016, p. 178, <http://www.aibn.no>, retrieved 17 Dec 2018.

10 Vepa A., Kamal M., Pierre D., Benjamin L. and Noureddine Z., “Prognostics and Health Management for Maintenance Practitioners-Review, Implementation and Tools Evaluation,” INTERNATIONAL JOURNAL OF PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT, Vol. 8, No. 60, 2017, p.31.

及網路資訊等資料庫。

一、文獻搜尋與歸納

搜尋資料庫後共獲得541篇相關文獻（篩選流程如圖一），排除與軍機、民用航空與工業設備無關或內容未包含故障偵測與診斷及PHM與雲端運算等相關概念的文章，進行資料整合分析與歸納，最後共計收錄21篇文獻，歸類有：PHM技術理論概念5篇；PHM設計架構3篇；PHM實務應用案例等13篇，其中收錄自IEEE10篇；ScienceDirect1篇；Elsevier1篇；Springer1篇，以及網路資料庫8篇等學術研究。

（一）PHM理論概念

說明故障診斷功能自BIT內建測試起，至感測元件發展，迄PHM新興監控技術演進過程，除瞭解故障隔離診斷技術的歷程，同

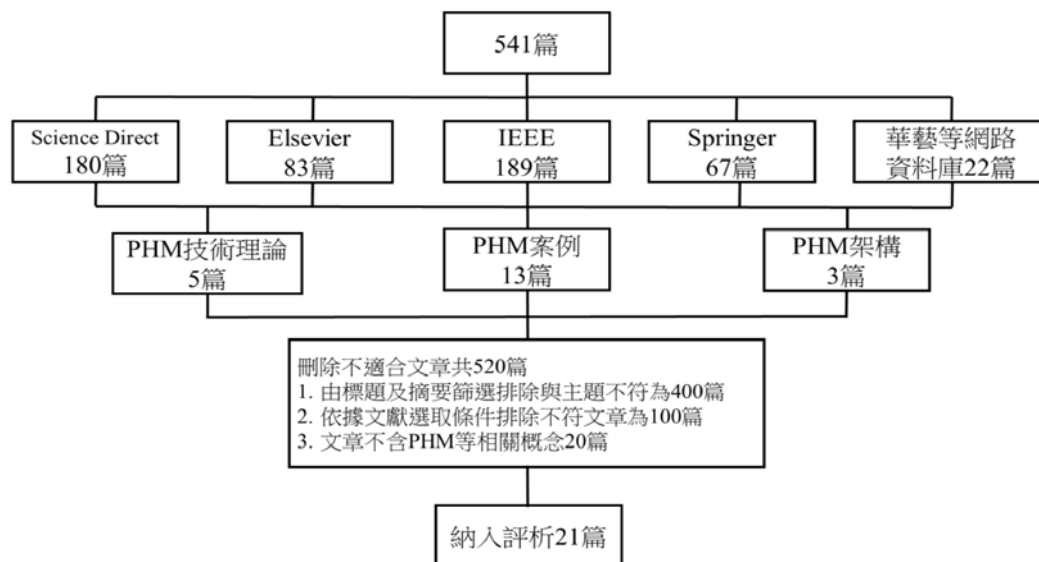
時自PHM預知文獻回顧，也領略PHM技術透過設備即時監控，可有效管控失效發展趨勢，從而節省人力與成本，同時提高可靠度與支援度，蒐整PHM理論概念文獻計5篇（如表一）。

（二）PHM設計架構

以系統化方式闡述PHM建構流程，並運用感測元件即時監控，以及大數據技術分析失效狀態、故障趨勢與剩餘壽期預判等技術，建構PHM系統架構（收錄文獻如表二）。

（三）PHM案例實證

收整PHM案例實證研究分析計13篇（如表三），其中探討演算法運用及成效評估11篇（含實體建模5篇；資料數據3篇；可靠度法2篇及融合法1篇）；維護體制差異性研究1篇及成本效益評估1篇。



圖一 PHM系統架構文獻篩選流程圖

（資料來源：本研究繪製）

表一 PHM理論概念收錄文獻

作者	方法	研究主題	研究結果
Lord等人(1981)	故障診斷	BIT設計及評估方法	藉BIT效能指標、可靠度及設計成本等達優化BIT系統設計
Clutz(2002)	預知理論	預知技術推理架構	發展最適預知感測元件的數學模式
Gupta等人(2008)	故障偵測與隔離	發動機故障偵測與隔離	以PHM技術監控發動機衰退並對即將產生的故障偵測及隔離
Sarkar等人(2008)	故障診斷與隔離	發動機故障偵測與隔離	以動態符號濾波及圖形辨識，偵測發動機運作情況
Tahan等人(2017)	文獻回顧	發動機預知及健康監控	評估渦輪效能監控發展趨勢

資料來源：本研究整理

表二 PHM設計架構收錄文獻

作者	研究主題	研究結果
Luo(2006)	健康管理智能診斷設計流程	運用智能圖像及數學模型，發展整合診斷技術與模擬環境，評估診斷效益、產生程式碼，同時驗證診斷策略等
GU等人(2009)	電子設備的健康評估及預知	以剩餘壽期可靠度法，評估電子設備導入PHM技術具效益，未來PHM可靠度預測，將是衡量電子產品成本效益指標
Zhang等人(2015)	飛機整合健康管理系統	建構安全可靠且符合成本效益之整合健康管理即時監控，運用大數據分析預判故障趨勢

資料來源：本研究整理

二、文獻歸納評析

藉搜尋國內外期刊資料庫，蒐整與建構PLMS系統相關基礎方法理論及架構設計技術與案例運用等實證學術研究文獻，經分類萃取有用資料後嚴謹分析比較，綜整並歸納研究結果（如表四）。

（一）PHM演算法運用

評析PHM運用可靠度與實體建模等方法，在技術面可準確偵測及識別故障，並能預判失效與RUL剩餘壽期，就運作效能與飛行安全考量，則可掌握裝備衰退趨勢，減少風險，因而提高系統運作效能，確保飛行安

全，另以成本考量，導入PHM技術可降低維護成本、減少壽期維護成本，同時提高飛機運作經濟效益。

（二）維護體制比較

比較視況維修流程，在飛機的支援度、任務失效率及每飛行小時所耗維修工時的表現，均優於傳統維修體制。

（三）成本效益評析

發展並導入PHM技術於軍機及航空等產業，藉準確故障診斷，以較少的成本維持機隊運作。

表三 PHM實證案例收錄文獻

作者	方法	研究主題	研究結果
Powrie等人(1999)	PHM實體建模	邁向全預知技術監控	實體建模監控發動機外物及磨耗，可有效偵測及識別外物
Shetty等人(2002)	PHM實體建模	太空梭剩餘壽命評估	運用負載實體模型，評估及預判組件壽命
Anastasios Tsoutis (2006)	CBM與傳統維修比較	分析F-35自主後勤系統	研究CBM在飛機的支援度及任務失效率所耗維修工時
Tuchband等人(2007)	PHM實體建模	運用預知技術於軍用設備	PHM技術可追蹤故障趨勢預判壽命，同時減少壽命成本
Rong等人(2010)	PHM可靠度模型	發動機壽命預測及維護	研究發動機維修及拆裝時距，可減少故障產生風險及成本
Ferreiro等人(2010)	PHM融合法	以網路預測剎車磨耗	以預測性維護概念，預測飛機剎車磨損及組件衰退趨勢
He等人(2011)	PHM成本效益	成本效益模型	美陸軍AH-64發展PHM成本效益模型，以較少的成本維持機隊
Zhao等人(2011)	PHM實體建模	飛機加熱器故障診斷	分析實體參數換熱器，可有效即時監測換熱器物理變化
Miao及Wang(2014)	PHM實體建模	飛機燃油系統適航健康管理系統	透過即時推理偵測故障，可確保飛行安全並提高經濟效益
Tsui等人(2014)	PHM資料數據	資料數據預知健康管理	運用數據資料法，準確預測軸承裂紋成長趨勢及RUL壽命
Compare等人(2017)	PHM可靠度法	PHM可靠度模型	可靠度法預知評估機械部件疲勞退化
SUN等人(2018)	PHM資料數據研究	以數據資料法監控空調系統	數據資料法監控空調系統，可有效識別系統衰退狀況
Hong及Yin(2018)	PHM資料數據	神經網路預測軸承壽命	以感知神經的深度學習模型，可精確的預測軸承的剩餘壽命

資料來源：本研究整理

表四 歸納實證案例研究結果

類別	研究區分	研究結果歸納
PHM演算法運用	可靠度、實體建模、數據資料及融合法	1. PHM功能技術面： - 可偵測及識別故障 - 可預判衰退狀況及RUL剩餘壽命 2. 運作效能與安全： - 掌握衰退趨勢，減少風險 - 提高系統運作效能，確保飛行安全 3. 成本考量： - 減少壽命成本 - 降低風險及維護成本 - 提高飛機經濟效益
維護體制	CBM與傳統比較	CBM作業優於傳統維修體制
成本效益	成本效益模型	發展PHM可以減少故障發生，以較少的成本維持機隊運作

資料來源：本研究整理

參、空軍後勤維保策略探討

本研究藉由文獻歸納法深度研析相關PHM實證文獻案例，探索飛機與機械設備維護策略發展歷程，引領進入故障診斷技術發展領域，並系統性歸納各相關文獻元素，建構空軍PLMS系統架構，以提出新興科技運用的創新維修與管理思維。

一、維護策略演進歷程

一般常見的系統維護策略主要區分為反應式及主動性維護兩類：¹¹

(一) 反應式維護

過去傳統的維護作業被視為僅指維修工作，從設備運行迄失效或出現異常警訊時，才由維護人員採取矯正行動(Corrective Maintenance)，這種無失效前兆的故障，需要備存大量庫存品，以及設備因故障停機維護，將導致生產速率與品質損失等無效成本

耗費。¹²

(二) 主動性維護

1. 預防或定期性維護(Preventive或Time-Based Maintenance, TBM)是以時間為基礎的主動性維護作為，在設備失效前或輕微異常時，能透過預先排定的保養檢查工作，事先將可能損壞的組件修復，避免情況惡化並維持系統的妥善。

¹³但此種維修策略如果在零件尚未損壞前就更換，不僅增加維修零件的使用量，也會增加維修的次數及維護成本與人力需求。¹⁴

2. 預測或視況維修策略(Predictive或Condition-Based Maintenance, CBM)是藉感測器對機械設備即時監控，由事先預測出的系統失效時間，備妥器耗材執行維修作業規劃，以充分發揮設備的效能，降低設備平均維護成本。¹⁵ Aladesay

11 R. Keith Mobley, AN INTRODUCTION TO PREDICTIVE MAINTENANCE, (Imprint: utterworth-Heinemann, 2002), p. 437.

12 Joung Taek Yoon, Byeng D.Youn, Minji Yoo, Yunhan Kim, Sooho Kim, "Life-cycle maintenance cost analysis framework considering time-dependent false and missed alarms for fault diagnosis," Reliability Engineering and System Safety, Vol.184 (2019), p. 181-192.

13 Wim J.C. Verhagen, Lennaert W.M. De Boer, "Predictive maintenance for aircraft components using proportional hazard models," Journal of Industrial Information Integration, Vol.12, 2018/12, p. 23-30.

14 Canh Ly, Kwok Tom, Carl S. Byington, Romano Patrick, George J. Vachtsevanos, "Fault Diagnosis and Failure Prognosis for Engineering Systems: A Global Perspective," 5th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering (Bangalore, India, 2009), p. 108-115.

15 S.Takata, F.Kirnura, F.J.A.M.van Houten, E.Westkamper, M.Shpitalni, D.Ceglarek, J.Leeg, "Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management," CIRP Annals, Vol. 53, No. 2 (2004), p. 643-655.

(2008)綜整1950-1990年飛機事故肇因(如表五),其中人為因素(飛行員失誤及其它人為因素)多因未遵照相關安全操作規定所肇致,可由加強人員訓練及要求遵守相關安全與作業規定等途徑予以改善,而屬機械失效則可藉加裝傳感監控器,除可即時監測系統運作情況,亦可透過數據蒐集,預測故障趨勢。¹⁶ Vandawaker (2015)以飛機維護、飛機結構、電子組成件及整體運作等

構面,比較CBM及健康監控壽期成本效益,整體CBM效能表現均優於傳統維修體制(如表六)。¹⁷

二、故障診斷與隔離發展進程

(一) BIT內建自測

早期的類比式飛機修護只能依靠人工及經驗累積,透過原理圖、電壓表和飛行員的歸詢報告來診斷問題,BIT係裝設於機內的自我診斷系統,用來隔離機上故障的停機線可更換件(Line Replaceable Unit, LRU)。隨

表五 1950-1990年飛機事故肇因統計表

肇因	1950	1960	1970	1980	1990
飛行員失誤	43	34	26	29	30
其它人為因素	2	8	9	7	7
天候	15	9	12	14	8
機械因素	19	19	21	19	20

資料來源:同註16

表六 視況維修及健康監控壽期成本效益

類別	成本擷節效益
飛機維護	40%飛機維護成本節約
飛機結構	擷節30-50%飛機蓋板的磨耗成本
電子組成件	減少10%航空器材的成本耗費
整體運作	較波音777客機節約50-80%的整體後勤運作費用

資料來源:同註17

16 Matthew Aladesaye, "Application of Predictive Maintenance to Industry Including Cestrum Analysis of A Gearbox," (Doctor of Philosophy, Institute of Technology and Engineering, Massey University Auckland, New Zealand, 2008/07), p.202.

17 Robert M. Vandawaker, "INTEGRATED SYSTEMS HEALTH MANAGEMENT AS AN ENABLER FOR CONDITION BASED MAINTENANCE AND AUTONOMIC LOGISTICS," (Doctor of Philosophy, AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Wright-Patterson Air Force Base, 2015/09), p.161.

著尖端科技持續不斷的創新，當飛機性能逐漸獲得提升，系統變得更加複雜，BIT對失效徵狀的識別與判斷，也愈見難以負荷。¹⁸

(二) 故障偵測與診斷

故障偵測與診斷 (Fault Detect and Diagnostic) 主要在識別故障何時發生，以及精確定位故障位置與類型，藉系統內傳感器數據的蒐集，分析與預期值之間的差異，檢測並推斷故障原因。¹⁹美海軍 (NAVAIR) 自發展先進飛機以來，即持續以具備飛機診斷能力為設計目標，第一次全面性診斷能力的成功案例要歸功於A-7E攻擊機，於部署服役初期，即遭遇發動機不正常運作而危及飛行安全，因而發展出發動機監測系統，自監測器完成加裝後，皆未因發動機故障，而造成飛機失事事件，本起成功案例即說明採用至當有效的監測與診斷系統，可確保人機安全。²⁰

三、空軍後勤維保現況

(一) LIMS系統架構

LIMS (Logistic Information Management System) 系統目的是將修護補給作業資訊化，

以掌握裝備妥善及器材耗用與修機進度，區分修護 (Maintenance Management System, MMS) 及補給管理系統 (Supply Management System, SMS)；另依組織區分為基地 (Base-LIMS)、高司 (Command-LIMS) 及專業指部 (Depot-LIMS) 等資訊系統版本，系統間各自獨立，無法資訊共享 (如圖二)。

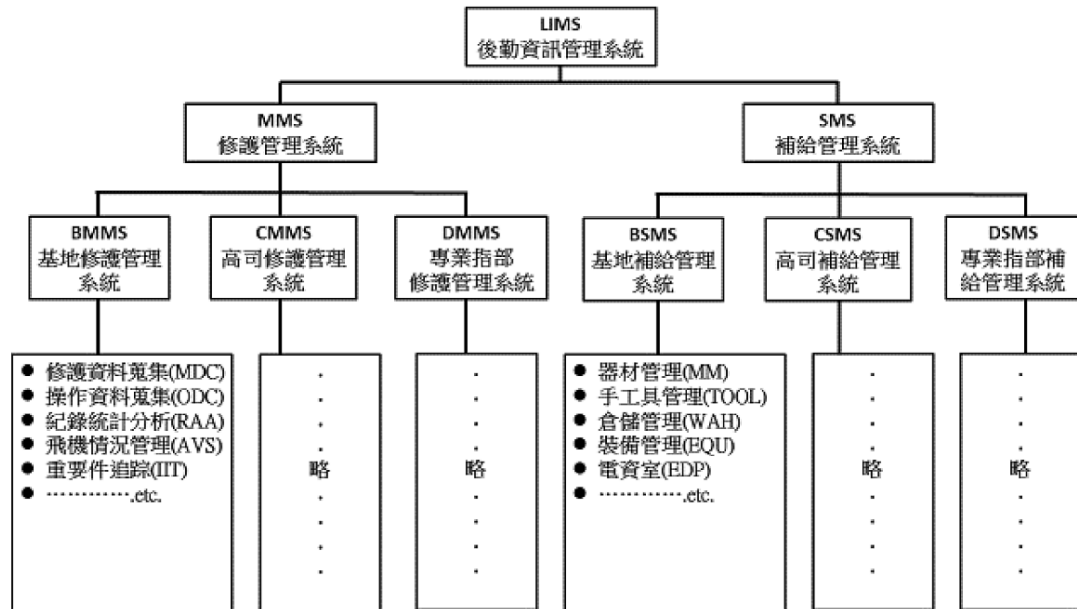
(二) 修護補給作業流程 (如圖三)

1. 飛機落地後將相關飛行操作資料填入任務歸詢單，經由基地修護管理系統 (Base Maintenance Management System, BMMS) 登輸入操作資料蒐集模組 (Operation Data Collection, ODC)，並藉修護資料蒐集模組 (Maintenance Data Collection, MDC) 發工檢修。
2. 檢修完工後，工單則儲存於工單資料庫分析統計 (Record And Analysis, RAA)。
3. 檢修過程中，如因器材或零組件故障，則需另循基地補給管理模組 (Base Supply Management System, BSMS) 申請器材。

18 Palmer, Kyle A., Hale, William T., Han, Lu, Jacobson, Clas A., Bollas, George M., "Built-in Test Design for Fault Detection and Isolation in an Aircraft Environmental Control System," IFAC-PapersOnLine, Vol. 49, No. 7, 2016, p. 7-12.

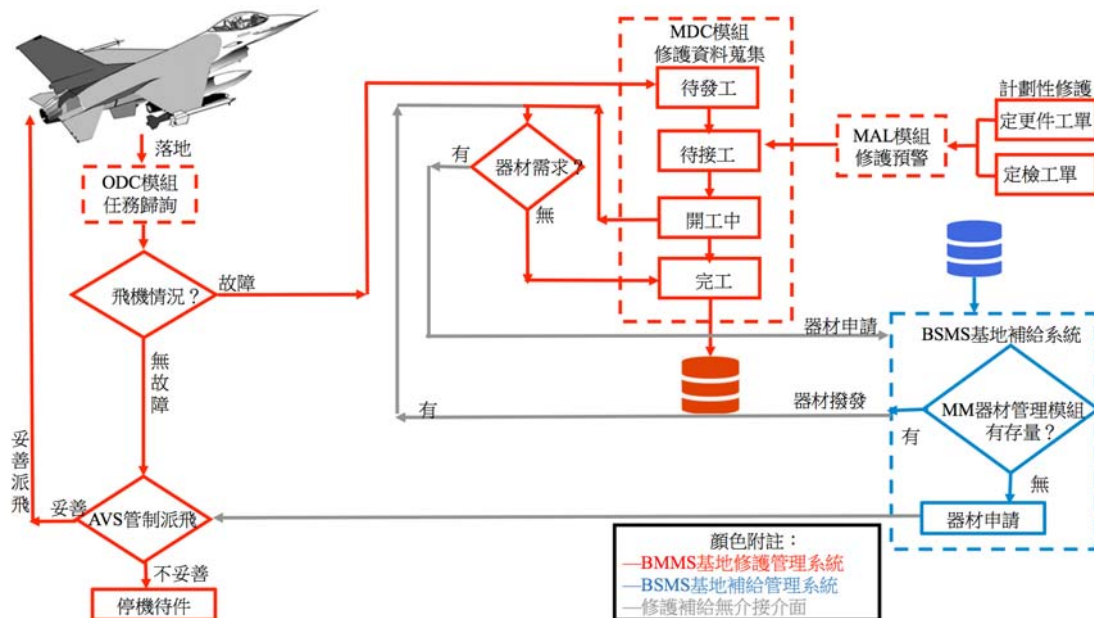
19 M. Thirumarimurugan, N. Bagyalakshmi, P. Paarkavi, "Comparison of Fault Detection and Isolation Methods: A Review," 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO) (Coimbatore, India, 2016/1/7-8), p. 6.

20 Andrew Hess, "Prognostics, from the Need to Reality - from the Fleet Users and PHM System Designer/Developers Perspectives," Aerospace Conference (Big Sky, USA, 2002/3/9-16), p. 2791-2799.



圖二 LIMS各系統架構圖

(資料來源：本研究繪製)



圖三 修護補給作業流程圖

(資料來源：本研究繪製)

(三) 修護紀錄與資料蒐集流路 (如圖四)

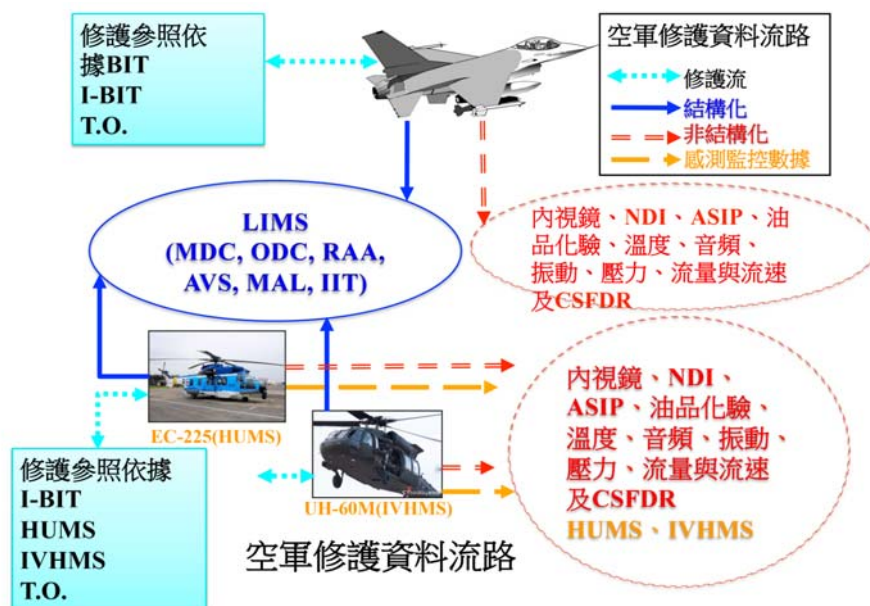
飛機修護紀錄的蒐集屬「結構化資料」儲存於LIMS資料庫，而內視鏡影像檢視等「非結構化」紀錄，及EC-225與UH-60M兩型機健康監測管理數據，則未納入LIMS系統。

綜上，本研究依空軍現行修補作業流程及修護紀錄蒐集流路，歸納問題與提出策進建議（如表七），期藉由導入PHM等新興技術與管理思維，發展空軍PLMS系統架構，改善

空軍後勤運作窒礙。

四、導入PHM系統說明

PHM預知系統是藉由監控、測試及推論等精準的預測演算分析，可以掌握裝備的失效時間，減少不必要的定期維護保養作業；²¹並參照診斷及預測資訊、裝備運作情況與可用的修護資源等，做出理性的決策。²²PHM系統透過即時機上診斷，精確預知零組件剩餘有用的壽期（Remaining Useful



圖四 修護資料流路圖

(資料來源：本研究繪製)

- 21 Kai Goebel, Abhinav Saxena, Matt Daigle, Jose Celaya, Indranil Roychoudhury, "Introduction to Prognostics," First European Conference of the Prognostics and Health Management Society (NASA Ames Research Center, 2012), p. 72.
- 22 Tangbin Xia, Yifan Dong, Lei Xiao, Shichang Du, Ershun Pan, Lifeng Xi, "Recent advances in prognostics and health management for advanced manufacturing paradigms," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 178, (2018), p. 255-268.

表七 後勤問題與改善建議表

類別	現況與問題		改善建議
體制	修護體制及流程繁瑣耗時		PLMS以故障趨勢預判，採視況維修
LIMS系統	硬體	各基地均建置有硬體設備 各基地系統相互獨立	建構雲端資料庫中心，資料透明且資源共享，減少IT人員作業負荷
	軟體	程式語言不一 修護補給系統各自獨立 僅能蒐整結構化修護紀錄 不具非結構化健康監控數據處理能力 無法分析故障趨勢	構型統一，發展PLMS大數據中心 修護與補給系統同一平臺 使結構化、非結構化及健康監控修護紀錄，經智能演算分析後，提供故障趨勢預判及補給採購等決策建議
飛機健康監控	不具傳感器或健康監控系統 不具PHM技術		發展具PHM技術之PLMS系統

資料來源：本研究整理

Life, RUL)。²³準確估計設備RUL可以及時發現潛在問題，從而採取應對措施，有效避免故障的發生，對延長設備使用壽命、降低維護成本、改善系統運作效能等有重要意義。²⁴

(一) PHM系統架構與流程

在學術與實務應用上研究PHM的技術、運用與方法很多，選擇合適的PHM方法與演算技術，可發揮最佳及精準預測，PHM架構及作業流路（如圖五）分述如后：²⁵

1. 資料獲得：為PHM重要的初始步驟，蒐

集的數據可區分感測器數據及事件資料，其中感測器數據是藉由振動、壓力及電流等實體元件感測；而事件資料則包括組件修理、拆裝與保養潤滑等修護改正措施。

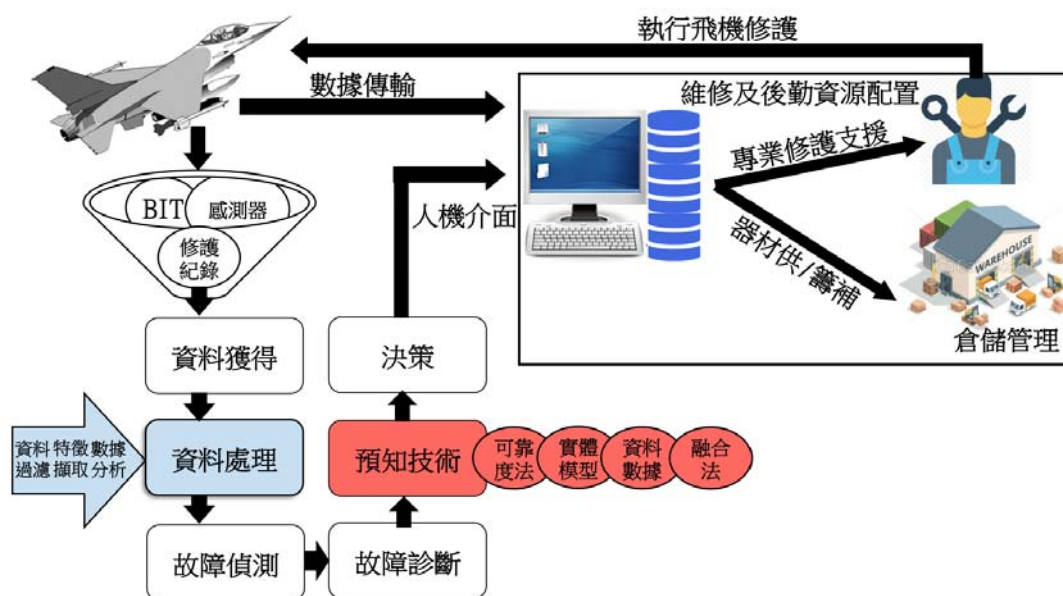
2. 資料處理：從原始資料中將錯誤或無效資料濾除，經特徵擷取及評估等分析程序，可呈現故障成長或組件衰退趨勢資訊。

3. 故障偵測：健康狀況的監控是要能偵測

23 Xiao-Sheng Si, Wenbin Wang, Chang-Hua Hu, Dong-Hua Zhou, "Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches," European Journal of Operational Research, Vol. 213, No. 1 (2011), p. 1-14

24 Li Wanling, Wang Zhensheng, Chen Yan, Song Xiangjun, "Research on Economic Benefit for PHM," 4th IET International Conference on Wireless, Mobile & Multimedia Networks (Beijing, China, 2011/11/27-30), p.4

25 Hatem M. Elattar, Hamdy K. Elminir, A. M. Riad, "Prognostics: a literature review," Complex & Intelligent Systems, Vol. 2, No. 2 (2016), p. 125-154.



圖五 PHM架構及作業流路圖

(資料來源：本研究繪製)

並識別即將發生的失效，將實際不連貫的運作表現或行為，與正常期望值進行比較。

4. 故障診斷：是對故障偵測、隔離及衰退的評估，診斷的結果可以用於採行主動性維修決策。
5. 預知：預知技術主要應用於剩餘壽期預測及預判即將發生的故障。
6. 決策：決策的過程是從幾個維修作業選項中，選擇適當的維修行動，並將修護作業目視所觀測組件健康狀況及分析

資料等即時圖像呈現。

(二) 預知技術

1. 可靠度法 (Reliability Approach)：經驗法或統計法等均屬可靠度方法類別，這種方法並無實體模型主要參照相同組件群及平均失效時間等巨量的歷史數據，及持續不斷對零組件的裝用情況統計分析。Compare等人 (2017) 以可靠度法評估機械部件的疲勞退化趨勢與即時模擬的可靠度相近。²⁶
2. 實體模型法 (Physics-Based Approach)：

26 Michele Compare, Luca Bellani, Enrico Zio, "Reliability model of a component equipped with PHM capabilities," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 168 (2017), p. 4-11.

此法係以實體建模來診斷及評估系統效能，以模型對系統健康監控及對未來可能負荷預判，預測系統或組件的剩餘壽期。實體建模的優點在於它的精準且易於審認與認證，但發展高精確度的剩餘壽期預估模型所費不貲，且實體建模具有系統獨特性，可攜性不高。美軍F-35聯合攻擊戰鬥機 (Joint Strike Fighter, JSF) 於發動機裝設數個感測器，監控發動機導管組件退化、機件磨耗及外物等狀況，實證結果對外物偵測、識別及未來可能發生的發動機損壞有助益，且顯著地提高系統運作效能。²⁷

3. 資料數據法 (Data-Driven Approach)：是以AI演算工具，將系統壓力、溫度、速度及振動等參數關聯到系統衰退及故障成長趨勢，建立變量模型，並預判剩餘壽期。²⁸開發資料數據預知系統的關鍵需求，是要能取得多元系統正常操

作、運作失效，以及在特定操作條件下系統衰退情況等的全面數據，以建立能透過訓練學習的演算模型。

4. 融合法 (Hybrid or Fusion Approach)：是結合資料數據及實體建模的複合預知技術，實體建模可以補償數據的貧缺，而資料數據則可補償對實體系統知識的不足，實體建模及資料數據融合，以預判剩餘壽期，在許多情況下採用此法預知RUL剩餘可用壽期是最有效益的。²⁹

綜上，基於資料數據預知演算工具可轉移性，且開發演算工具成本低，以及系統開發人員無需具備對實物理論知識等特點，許多的預知應用軟體，均以資料數據法建置。³⁰Tsui等人(2014)即運用數據資料法，準確預測軸承的裂紋成長趨勢及RUL剩餘壽期。³¹然而依經驗法則而言，沒有任何一種方法能滿足每一個理想的診斷系統，需視系統

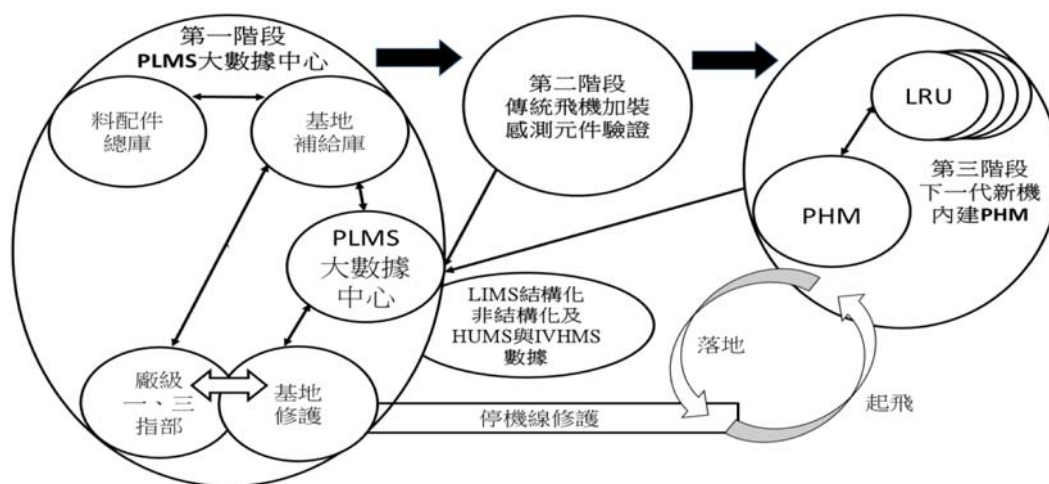
- 27 H.E.G. Powrie and C.E. Fisher, "Engine Health Monitoring: Towards Total Prognostics," Aerospace Conference (Snowmass at Aspen, USA:IEEE, 1999/3/7), p.10.
- 28 時旺, 孫宇鋒, 王自力, 趙廣燕,〈PHM系統及其故障預測模型研究〉《火力與指揮控制》(北京),第34卷第10期,西元2009年10月,頁5。
- 29 Shankar Sankararaman and Kai Goebel, "Why is the Remaining Useful Life Prediction Uncertain?," Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society (Moffett Field, USA), Vol. 4, No. 48 (2013), p. 13.
- 30 Chuan-Jun Su, Shi-Feng Huang, "Real-time big data analytics for hard disk drive predictive Maintenance," Computers and Electrical Engineering, Vol. 71 (2018), p. 93-101.
- 31 Kwok L. Tsui, Nan Chen, Qiang Zhou, Yizhen Hai, "Prognostics and Health Management: A Review on Data Driven Approaches," Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2015 (2014), p. 17.

個別需求，選擇最適預知法。³²

肆、發展空軍PLMS系統架構

空軍現僅EC-225與UH-60M兩型機內建健康監控系統，受限國防預算，無法將全數飛機加裝健康監控感測裝置，經參照Hess

(2002)³³、Smith等人(1997)³⁴及Sun等人(2012)³⁵對PHM系統建置架構及設計流程等相關學術研究，依空軍現行後勤補保體制及資源與未來後勤展望規劃等面向考量，將空軍PLMS系統架構區分：大數據中心建立、傳感器加裝，以及因應新生代機種內建PHM即時監控等三階段建置規劃(如圖六)。



圖六 三階段建置空軍PLMS系統

(資料來源：本研究繪製)

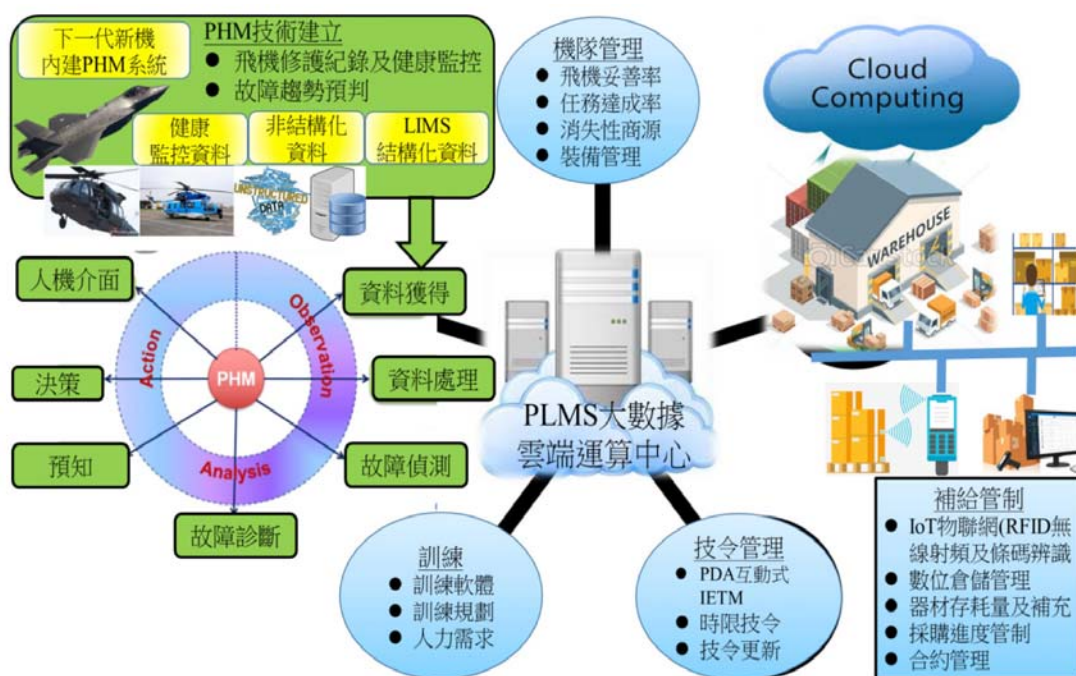
- 32 Xiaosheng Si, Wenbin Wang, Donghua Zhou, "Remaining useful life estimation-A review on the statistical data Driven approaches," European Journal of Operational Research. Vol. 213 (2011), p. 1-14.
- 33 Andrew Hess, "The Joint Strike Fighter (JSF) PHM Concept: Potential Impact on Aging Aircraft Problems," IEEE Aerospace Conference (Big Sky, MT, USA, 2002/3/9-16), p. 6-3021-3026.
- 34 G. Smith, J.B. Schroeder, Wright Laboratory, "Development of a Prognostics & Health Management Capability for the Joint Strike Fighter," IEEE Systems Readiness Technology Conference (Anaheim, USA, 1997/9/22-25), p.676-682.
- 35 Wanguo Sun, Hongbing Ye, Kai Wang, Yongjun Song, "Design of Autonomic Logistics Information System based on System Integration Model," Advanced Materials Research, Vol. 472-475 (2012), p. 2650-2654.

一、第一階段 PLMS大數據中心建立

參照Terrissaa (2016) 及Yang等人 (2016) 研究有關PHM融合雲端運算及大數據建構程序與步驟,³⁶以PHM系統為核心技術,將機隊管理、人員訓練以及供應鏈等後勤維管功能含括於PLMS大數據決策中心,透過智能化管

(一) 系統需求及效益評估

確認PLMS軟、硬體系統需求，再依可靠度、維護度及維修成本與經濟可行等因素為著眼，評估PLMS系統建置成本效益及投資



(資料來源：本研究繪製)

- 36 Labib Sadek Terrissa, Safa MERAGHNI, Zahra BOUZIDI, Nouredine ZERHOUNI, "A New Approach of PHM as a Service in Cloud Computing," International Colloquium on Information Science and Technology (Tangier, Morocco, 2016/10/24-26), p. 610-614.
- 37 Lu Yang, Jian Wang, Guigang Zhang, "Aviation PHM System Research Framework Based on PHM Big Data Center," International Conference on Prognostics and Health Management (Ottawa, Canada, 2016/6/20-22), p.5.

報酬率。³⁸

(二) 數據中心架構建立

依空軍修護紀錄、資料表格及產出型式等資料來源，區分結構化、非結構化及健康監控等修護數據，依資料結構屬性或類別，擷取實用數據，透過PHM技術分層資料分析與演算後，匯入PLMS大數據中心匯算。

1. PLMS大數據中心數據資料來源與存儲：

- (1) 結構化資料：凡存儲於 LIMS系統或人工抄錄紙本表格與表單等修護紀錄資料均屬之，LIMS現累存資料庫內巨量之飛機修護紀錄，應擷取有用紀錄留用；另屬人工抄錄維保紀錄表單，應將程序化繁為簡，對重複性表單予以減整併，並全數數位電子化。
- (2) 非結構化資料：內視鏡影像資料、超音波及渦電流檢驗等非結構性均屬之。
- (3) 健康監控數據：裝設於EC-225及UH-60M齒輪箱振動感測器，應依系統監控紀錄數據格式，整併於PLMS數據中心匯算。
- (4) 統一資料儲存架構，對分析與演算巨量資料尤其重要，可加速資料處理速

度，應視系統作業需求，建立構型統一資料庫環境。³⁹

2. PLMS資料數據演算流程：

- (1) 資料處理：濾除錯誤或無效數據，擷取與健康狀況有關的資料。
- (2) 故障偵測：與正常期望值比較，要能識別即將發生的失效。
- (3) 故障診斷：零組件完全或即將失效前偵測、診斷與隔離故障。
- (4) 預知：選用適當演算工具，預測零組件剩餘壽期及預判故障趨勢
- (5) 決策：從全般維保作業環境，提供維修、補給採購策略等建議方案，並以可攜式顯控、筆記型電腦等人機介面裝置，突顯健康狀況及數據分析結果。

3. 智能化物流倉儲管理：

- (1) 導入無線射頻辨識技術 (Radio Frequency Identification, RFID)：將RFID應用於軍事物流管理，以讀取器辨識軍品物資，可縮短器材申補與庫存清點時間、節省人力與備料成本，有效掌握庫儲總資產。⁴⁰
- (2) 建置物聯網架構：藉感測器監控及網

38 Bruno P. Leao, Kevin T. Fitzgibbon, Lucas C. Puttini, Gustavo P. B. de Melo, "Cost-Benefit Analysis Methodology for PHM Applied to Legacy Commercial Aircraft," IEEE Aerospace Conference (Big Sky, MT, USA, 2008/3/1-8), p.13.

39 Jaime Camposa, Pankaj Sharma, Unai Gorostegui Gabiria, David Baglee, "A big data analytical architecture for the Asset Management," The 9th CIRP IPSS Conference, Vol. 64, 2017, p. 369-374.

40 蕭亞洲，〈軍品導入無線射頻技術之探討〉《國防雜誌》(桃園)，第21卷第6期，2006年12月，頁139-147。

路傳輸，發展高效物聯網路架構，以快速且低成本傳輸、大量而多元的資訊即時收集，以及高速數據處理與分析能力，時時掌握物流狀況，優化物品撥發與倉儲管理效能。⁴¹

(3) PLMS數據中心：智能化物聯網數位倉儲管理系統，將器材以RFID建置資產透明貨物清單，透過PLMS系統精算器材存耗量，同時根據飛機健康狀態資訊及故障診斷結果，預先配置所需備料。⁴²

4. 機隊管理：包含飛機與裝備妥善情況管制、任務達成率計算、各項零附件採購進度與合約管理，以及消失性商源管制等，以掌握修護與補給作業全般動向，提供最佳後勤管理決策建議。
5. 訓練管制：互動式教學等訓練軟體開發、教範與教材發展與管理及人員修護能力評估與訓練規劃等。
6. 技令管理：互動式電子技令 (Interactive Electronic Technical Manual, IETM) 或筆記型電腦等行動裝置，提供修機時技

令查閱及文件即時更新等服務。

二、第二階段 感測器元件加裝

依空軍機隊老齡化情況，應優先從小機隊高待件、高耗、高單價及高修期等組件，以全壽期成本效益及投資報酬率，評估加裝感測器可行性及適航認證。參照Atamuradov等人(2017)PHM建構步驟，評估加裝感測器元件種類及數量，將感測器數據，依循第一階段PLMS數據中心流程運算推演(如圖八)。⁴³

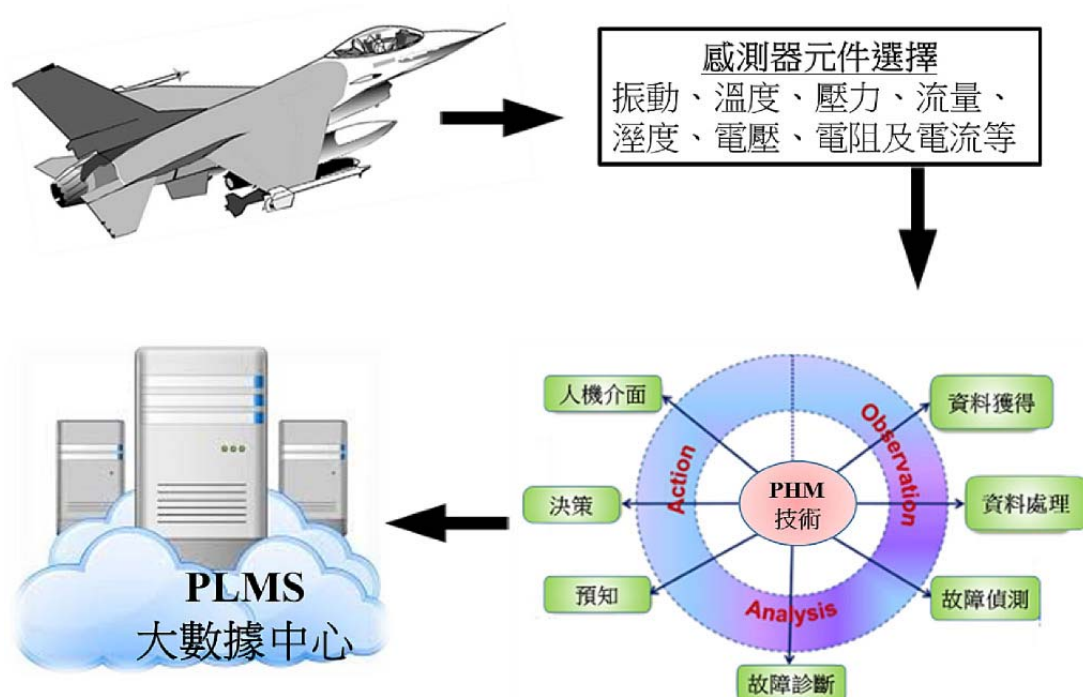
三、第三階段 結合下一代新機內建PHM系統

參考Yang等人(2016)航空系統PHM大數據中心研究，下一代新機應採購具備內建PHM系統，第三階段PHM架構建置(如圖九)，即是能透過機內感測器元件即時監測飛機操作狀態，運用內建PHM演算技術功能，自動執行故障偵測與診斷，配合地面PLMS數據中心網路系統，精準預測RUL剩餘壽期及故障趨勢預判，飛機落地前，即將飛行操作情況及修機所需零附件耗材等，傳送至地面PLMS數據中心，待飛機落地，專業人員已備

41 邱創鈞、張益昇，〈軍事物流導入RFID之成本效益分析—以空軍某防空武器系統為例〉《創新與經營管理學刊》(臺中)，第3卷第1期，2012年7月，頁43-61。

42 張志勇、石貴平、翁仲銘、廖文華，〈物聯網智慧應用及技術特訓教材〉(臺北：基峰資訊，西元2016年7月)，頁400。

43 Vepa Atamuradov, Kamal Medjaher, Pierre Dersin, Benjamin Lamoureux and Nouredine Zerhouni, "Prognostics and Health Management for Maintenance Practitioners-Review, Implementation and Tools Evaluation," International Journal of Prognostics and Health Management, Vol.8, No. 60 (2017), p. 31.



圖八 PHM感測器元件架構圖

(資料來源：本研究繪製)

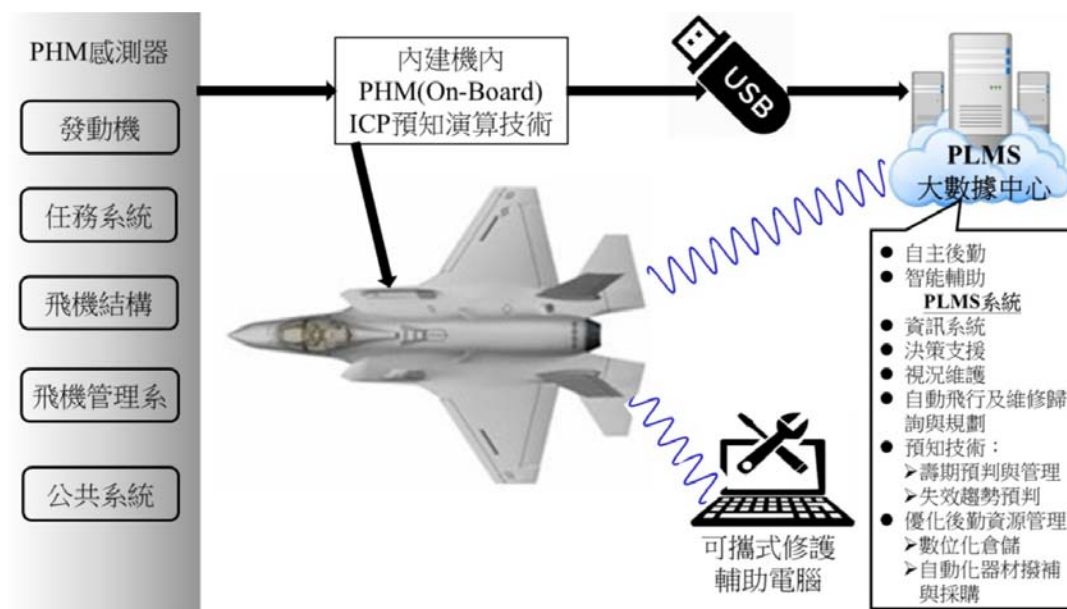
妥修機所需器具，可大幅減少故障排除及器材申補等待時間，同時提升飛機任務支援度及妥善率。⁴⁴

四、PLMS預測性後勤系統全架構

綜上，第一階段PLMS大數據中心，已將結構、非結構與健康監控等修護數據紀錄，經PHM演算程序，提供預測結果與建議；從第二階段經成本效益及投資報酬率評估，加裝感測器，所蒐集數據匯入PLMS大數據中心運算；第三階段配合新機接收於機內配置PHM系統，可於機上即時監控飛機運作狀況，

透過機內演算工具與分析，與地面PLMS大數據運算中心傳送即時訊息，如此即完成PLMS預測性後勤系統全架構（如圖十）。PLMS系統從飛機上蒐集飛行數據、自機場獲取航機操作資料、由器材庫取得存量、從基地或維修廠獲取維修情況紀錄，透過PLMS智能化PHM技術與大數據為運算核心，有效運用數位網路系統，對所蒐集資訊進行綜合分析及資料挖掘與智能學習，根據分析結果PLMS可以精準診斷與預判飛機故障情況，精實預測備份器材需求，提高作業效率與飛機妥善

44 同註37，頁5。



圖九 第三階段新生代飛機內建PHM架構建置

(資料來源：本研究繪製)

率，減少產資囤積，將有限國防預算發揮最大功效。

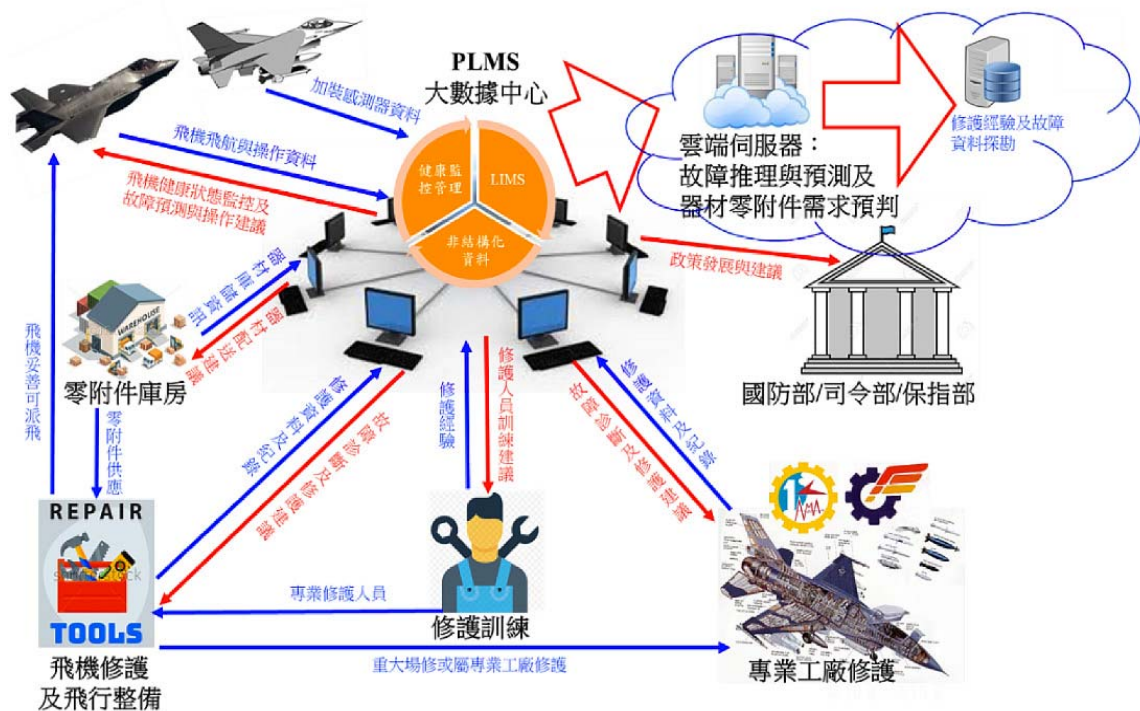
五、PLMS系統關鍵成功因素

本研究參照PHM系統架構實證案例，以空軍後勤運作現況與未來需求，分階段繪製空軍PLMS系統建構藍圖，並依架構流程詳述各組成要點，現依後勤軟硬體設備及條件與組織運作結構等考量，評估PLMS系統建構關鍵成功因素，提供建案規劃參考。

(一) 確定需求及早建案

依國防部主計局近十年預算占中央政府總預算比率及國防預算結構分析統計等資料所見，⁴⁵歷年來國防預算均維持定額配賦，當前全球經濟在國際局勢變動下，美中貿易戰仍未見好轉，且因著極端天候變化等議題，都將加深景氣變化的不確定性，也勢必影響我經濟與國力的成長幅度，未來空軍建構PLMS系統所需預算需求規劃，無論循軍事投資或作業維持管道獲得，必將排擠其它軍事投資與建案發展，建案單位應及早確

45 國防部主計局，〈近十年國防預算占中央政府總預算比率統計及近十年國防預算結構分析統計〉，中華民國統計資訊網，<https://www1.stat.gov.tw/ct.asp?xItem=15477&CtNode=4774&mp=3>，檢索日期：西元2018年12月17日。



圖十 建置PLMS全系統概念圖

(資料來源：本研究繪製)

定系統需求，分年分批規劃建置。

(二) 預知技術智能管理

依美陸軍評估72%武器系統全壽期成本用於後勤維持，其中三分之一成本是耗費在沒必要或不精準的維護作業，PHM技術即是運用以管控成本的方法之一。⁴⁶PHM以視況維修策略，精準估算RUL剩餘壽期，未來透過PLMS智能化後勤系統，以視況維修取代定期/時距更換的維護概念，可大幅擷節系統

及組件的壽期成本，降低備份件庫存、裝備維修與人力負荷，減少修護次數，藉由對系統運作情況的健康監控，避免任務失敗或取消的風險。

(三) 建構雲端數據中心

LIMS自完成建置以來，各階段即因建置期程與導入技術不一，系統飽受軟硬體構型不符，資訊無法互通共享資源等窒礙，未來PLMS系統應優先以發展軟硬體統一

46 He Hou-bo, Zhao Jian-min, Xu chang-an, "Cost-benefit Model for PHM," *Procedia Environmental Sciences*, Vol 10, Part A (2011), p. 759-764.

構型，建構高效快速雲端資料運算中心，為PLMS系統成功至要關鍵，國內研究以船艦維修資料樣本，驗證雛形雲端運算環境與傳統資料運算分析差異，在雲端運算架構下查詢及比對巨量資料時，均呈現整體優勢，此現象與本研究探討將結構化、非結構化修護紀錄資料及健康監控等數據，融入PLMS雲端數據中心建構理論，於處理巨量資料之陳述吻合。⁴⁷

（四）鏈路加密分層保護

雲端大數據運算中心雖然具備對3V巨量數據（巨量、速度及多樣性）等資料處理能力優點，但資通安全議題乃為關鍵成功因素，雲端管理系統需具備安全防護能力，以防止惡意病毒入侵、損毀或擅改機敏數據，致癱瘓系統運作等網路攻擊；並要能識別及拒絕未經授權或非法存取資訊的使用者；⁴⁸PHM架構應依各別系統適用性分層建構，其中資通安全層因涉及機敏性數據傳輸，資料傳輸雖可由鏈路加密獲得保護，但在發展軍用系統時仍需在每個資料的產出階層與傳輸方式，定義安全指導方針與程

序，確保資通安全。⁴⁹

伍、結論與建議

一、結論

面對中國人民解放軍逐年擴增的國防軍備預算及持續壯大的軍力與對我與日俱增的武力威懾，我國軍應重新檢視軍備能力為著眼，持續以新科技、論述與制度等創新思維，不斷開創我國軍現代化後勤體系建設新局面，本研究綜觀我空軍現行修護補給作業流程、LIMS系統功能與修護資料蒐集流路、後勤現況問題與挑戰，以及未來後勤管理系統需求展望與願景等，參照PHM相關學術研究實證案例，藉導入PHM技術、AI演算與大數據分析等新興科技與創新管理思維，具體且有步驟的發展空軍PLMS系統架構規劃，藉提升空軍後勤維保軟硬體設施，使系統具精準趨勢預判能力，提供最佳修護、補給及訓練等決策建議，進而得以妥善規劃修機排程，以及減少因長期停機，所延伸預購備用零件需求，肇致庫儲資產資金積壓等長期以來後勤維管問題。

47 王國良，〈海軍艦艇修護資訊系統以雲端與傳統運算架構之效益比較分析〉《海軍學術雙月刊》（高雄），第47卷第2期，西元2013年4月，頁4-16。

48 Zhao Yang, Ming-qing Xiao, Xin Zhao, De-long Feng, Lei Zhang, Hai-fang Song, “Cloud Computing and Exploration of its Application to Test Field and PHM,” Prognostics and System Health Management Conference (Chengdu, China, 2016/10/19-21), p.4

49 Charles Crabb, “A Reference Stack for PHM Architectures,” ANNUAL CONFERENCE OF THE PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT SOCIETY (NJ, USA, 2014), p. 14.

美國提倡自由開放印太戰略 (Free and Open Indo-Pacific Strategy)，對我參與印太區域安全合作，是契機也是挑戰，軍事方面隨著我軍機隊逐年老齡化，相關零組件獲得困難，因而相繼挹注高額預算於改善機隊運作效能的同時，當同步提升後勤維管軟硬體設備，建置PLMS系統除可改善我後勤補保實質質量外，更可積極投入參與印太地區聯防事務，主動扮演區域內航機修護與器材供補中繼角色，成立印太區域航機保修及航材物流轉運供應中心，透過PHM預知技術、物聯網運用等AI人工智慧科技，提供友盟即時後勤補保支援，將後勤資源最佳化運用，也藉此提高我國國際能見度，創造地緣戰略價值等重要貢獻。

二、建議

本研究有關空軍預測性後勤管理系統架構建置，基於本研究論述與結論綜整相關問題，提出個人淺見與建議事項如后：

(一) 爭取將PLMS系統納入國軍發展規劃

籌備PLMS系統架構時，可妥善運用現有的網路基礎設施及基本雲端的架構下，適時部署於空軍基地試行，以利後續評估整體解決方案，可減少重複設備投資與維護人力負荷，有利預算爭取。

(二) 成立系統建置整合小組

新科技在國防上的運用，橫跨作戰、人事、後勤、通資等領域，為能全面整合軍種資源，建議應成立跨部門整合分析建案目標與機制的小組，以發揮系統運用的最大綜效；另

國軍後勤組織及兵力結構因應建軍目標所需持續調整並邁向組織創新。

(三) 建立大數據雲端資料中心，先期廣泛蒐集資訊

在大數據的世界裡，資料的價值會因為蒐集的量、時期及廣度，呈現正向關係，在資訊蒐集層面上，建議先行建置大型資料儲存裝置與架構，以利長期後勤維修資料蒐集，待預算、技術與政策面均支持航機後勤保修中心建案時，進行數據分析運用，使系統更具精準趨勢預判能力，提供最佳修護、補給及訓練等決策建議。

(四) 籌建後勤維護預知管理科研自主能量

綜觀世界先進國家大多以國防科技需求帶動其國內工業發展，或以國防科技輸出列為其重要經濟發展政策，進而使國防科技與經濟實力融為一體，因此，PLMS系統自主研发，除可降低倚賴外購的政治不確定風險，不僅帶動高科技研發、刺激我國防產業提升與經濟，更能累積國防自主能量，強化備戰能力，亦符合當前新政府的國防政策。

作者簡介

黃秀英上校，空軍通信電子學校女性專業軍官班82年班、空軍航空技術學院後勤參謀班91年班、南華大學企業管理碩士97年班、美國大學教育學系100年班、國防大學管理學院戰略班108年班；現任職空軍第一後勤指揮部軍電廠廠長。