

運用SWOT分析探討導入無人機 空軍軍機維保作業調整策略

空軍少校 洪澤顥 陸軍上校 周傑泰

提 要

近幾年來由於兩岸情勢逐漸升溫緊張，共軍在我防空識別區域周圍及臺海中線執行軍機繞臺，國軍即派遣飛機攔截及驅離，此舉在每年有限的國防預算編列下，已造成我空軍維保作業在無形中承受莫大壓力。

在科技日新月異的變化下，要如何運用當今最新科技來替代軍機執行空中任務，藉以提升軍機維保作業效能，就成了本次研究思考的方向，並參考現今烏俄國際戰事，針對未來空軍軍備發展方向提出相關建議，將是重要的課題。

本次研究方向以探討無人機導入於空軍中應用，減緩空軍軍機平時的演訓及共軍軍機繞臺攔截，期使飛行時數倍增情況下，讓我後勤部隊能有效支援，並運用SWOT分析法提出改進建議，在有限的國防預算內能有效發揮我空軍維保作業之效能，進而達成空軍各項戰演訓任務。

關鍵詞：共機擾臺、無人機、維保作業、國防預算

前 言

近幾年來，共軍頻繁在我防空識別區域周圍及臺海中線執行軍機繞臺，其2020年9月至2023年6月經統計共計4,784次，¹我軍派遣軍機跟監攔截，伴隨著飛行時數的大幅提升，重要及關鍵器材壽限亦相對應的大幅縮減，同時衍生空軍維保作業維持費增加，然相關器材籌補時程冗長，將導致維護成本逐年遞增和機隊妥善率的降低，且在國防預算有限情況下，持

續的預算壓力可能會限制空軍投資新的維護技術、人員培訓和基礎設施升級的能力。

國防經費支出部分，由中央政府歲出政事別編列情形表，國防支出113年編列4,312億元，較112年度增加387億元；²另依112及113年國防部單位預算書表空軍分支計畫表內空軍司令部140118軍事單位裝備零附件購製及保修費中，辦理F-16等各型機所需軍事裝備及設施養護費統計分別計需約368億元³及約346億元，⁴其

1 梁師音，《美國對臺軍售與軍事衝突相關性之研究-以2020年～2023年共軍擾臺為例》，國防雜誌，第39卷 第3期，2024年，頁44。

2 行政院，《中央政府總預算案》，2024年，頁29。

3 國防部，《112年度國防部所屬單位預算案書表》，2023年，頁335-336。

4 國防部，《113年度國防部所屬單位預算案書表》，2024年，頁331-332。

差異金額遞減22億元，在共機擾臺情況下，113年國防經費支出較112年增加387億元，惟各型機所需軍事裝備及設施養護費遞減22億元，顯示空軍軍機後勤維保預算的不足。

中華民國空軍主力戰機計有F-16型機、幻象型機及IDF型機，迄今已服役約30年，空軍機隊正逐年趨向維修需求高峰，其器材零附件供補需求亦逐年遞增，隨著科技的快速發展無人機技術在軍事領域的應用日益廣泛，在烏俄戰爭中，無人機在烏克蘭的運用下，展現了不對稱作戰形態與高科技武器整合的重要性，也突顯了創新思維在資源有限情況下的效益。

本研究主要在參考當今國際戰爭經驗法則及科技發展趨勢，運用現行最新科技技術取代傳統的維保作業舊思維，分析將無人機引入我空軍機隊，所產生的維保作業效益和長期的機隊發展規劃建議，使我空軍機隊管理達到最佳妥善狀況，達成空軍各項戰演訓任務目標。

空軍軍機維保作業的文獻回顧

本文獻回顧探討了空軍軍機維保作業的重要性、現況分析以及面臨的挑戰。完善的維保作業體系對於確保空軍戰力至關重要，不僅能提高裝備可靠性和延長使用壽命，還能降低維護成本、保障飛行安

全和任務執行。現行空軍維保體系以保修指揮部為核心，強調定期檢查和故障排除，並結合軍民力量構建完整的維修保養體系，惟空軍維保作業仍面臨諸如機齡日益老化、⁵維修成本高昂、⁶國防預算有限及人力短缺等挑戰。

一、空軍軍機維保作業的重要性

空軍維保作業體系在過去幾十年間經歷了多次轉型和發展，從最初的依賴外援，到逐步實現自主維修，再到如今的精準維修和迎接無人機時代的挑戰，其發展軌跡與臺灣的歷史、經濟、科技發展密切相關，空軍維保作業的歷史可以追溯到空軍成立之初，隨著航空技術的發展，維保作業系統也不斷演進：

(一)早期階段：初期的維保作業主要依賴於簡單的機械維修和定期檢查。

(二)二戰時期：大規模空戰的需求推動了維保作業系統的快速發展，形成了較為完善的維修體系。

(三)冷戰時期：隨著噴氣式飛機的普及，維保作業變得更加複雜，需要更專業的技術和設備。

(四)現代化階段：電子系統的廣泛應用使得維保作業進入了新的階段，需要更高水平的技術支持，隨著科技的進步，臺灣空軍開始導入精準維修的概念，透過數據分析和預測性維護，提升維修效率和飛

5 徐志豪，《探討影響空軍軍機商維推廣效能之關鍵因素》，發表於「國防管理學術暨實務研討會」，2011年，第十九屆，頁776-785。

6 葉招麟，《戰機使用時數與修護維持費關係之研究》，南華大學科學研究所碩士論文，2007年，頁22-23。

機妥善率。⁷

(五)人工智能階段：無人機的快速發展也對空軍維保作業提出了新的契機，如何導入及維護新型無人機已然成為新的課題。

空軍軍機維保作業對於維持空軍戰力和執行任務至關重要，主要體現在確保飛行安全與任務執行能力、⁸提高戰機妥善率與戰備水準、降低維護成本、應對複雜作戰環境、提升整體戰力、支援全天候作戰能力、實現國防自主等幾個方面，故完善的維保作業體系是確保空軍戰力的關鍵，空軍需要持續強化維保作業能力，以應對日益複雜的安全環境。

二、空軍軍機維保作業現況

(一)現行空軍維保體系架構

空軍司令部下設有保修指揮部，負責統籌空軍各基地飛機的維修保養工作，其維保體系層級可分為單位維護、場站修護及工廠修護工作，⁹近年來空軍積極推動與民間航太產業的商維合作，以補充軍方維修能量，主要作法包括：¹⁰

1.選擇適當機種釋出維修業務給民間廠商。

2.結合民間已獲認證的維修能量支援武器裝備維修。

3.建立長期商維夥伴關係。

總體來說，空軍維保體系以保修指揮部為核心，強調定期(週期)檢查、定期更換與非計畫性故障排除，並貫徹各項標準作業程序紀律，結合軍民力量，通過分級維修、人才培育及資訊化等手段，構建了一個較為完整的維修保養體系，以確保空軍戰力的持續性。

(二)維保作業內容介紹

飛機的維保作業內容主要概分為定期(週期)檢查、定期更換與非計畫性故障檢修等三大類，分述如後：

1.定期(週期)檢查：以F-16型機為例，當飛機飛滿200小時、400小時或必須達到其他規定時間時，需要進場執行週期檢查，通常需要14至30天的進場檢查時間，由修管單位負責協調各專業單位安排工作排程，按週期計畫排程表施工，¹¹並管制飛機如期如質的出站。

2.定期更換：根據製造商預測的故障時間更換零件，特別是對於像滾珠軸承或高速軸這樣的高磨損項目，¹²定期更換零

7 周峻銘，《航空維修業機隊商維妥善率提升探討以A公司T型機為例》，高雄大學碩士論文，2019年，頁24-25。

8 陳柏璋，《國軍維保作業政策對任務影響分析-以空軍偵蒐系統為例》，崑山科技大學碩士論文，2020年，頁I。

9 空軍司令部，《空軍修護管理作業手冊》，2018年，頁39-40。

10 鄭世昌，《軍機商維履約品質顧客滿意度評估之研究》，逢甲大學碩士論文，2004年，頁7-8。

11 翁紹軒，《中壽期飛機可靠度研究及後續維保作業規劃》，成功大學碩士論文，2015年，頁18。

12 Mar. P. Gaguzis, "Effectiveness of Condition Based Maintenance In Army Aviation," United States Military Academy, (2009), pp. 42-44.

件以防止故障發生，通常基於使用情況或時間間隔，飛機零組件的定期更換作業是確保飛機飛行時的安全性、可靠性和作戰準備狀態的關鍵過程，涉及一個結構化的檢查、維修及組件計畫性更換作業，保持飛機處於最佳狀態，並延長飛機的操作壽命。

3.非計畫性故障檢修：指對飛機進行的維護活動，以應對意外問題或故障，其與定期維護不同，這些修復並未提前計畫，通常需要緊急處理，準確識別故障的根本原因可能很複雜，特別是在大型機隊營運中，不同的技術人員在各種飛機上工作，以維持飛機妥善與作戰準備。

綜上，飛機的定期檢查及定期更換旨在防止問題的發生，而非計畫性的故障檢修則針對飛機故障問題執行診斷與解決修復，¹³其三大類維保作業內容均為確保軍用飛機的安全性、可靠性和作戰準備性無虞。

(三)維保成本效益面向

在保持飛機最佳性能與管理成本之間取得平衡仍然是一個持續的挑戰，飛機維護旨在通過採用創新的維護策略、預測分析和生命週期管理技術來優化成本效

益，通過在不妥協安全或性能的情況下最小化開支，目標是在預算限制內有效分配資源，成本效益分析中的關鍵因素應考慮飛機的整個生命週期，包括獲取、操作及維護成本，進而匡列相關國防預算之作業維持費，成本效益考量方面計有：

1.初始投資：實施新維護系統或技術相關的投資成本，以空軍最新一批F-16V戰機採購案為例，採購66架F-16V戰機，總預算約新臺幣2,570億元，¹⁴平均每架成本約新臺幣39億元。

2.訓練成本：對人員進行新維護程序或技術的訓練費用，以空軍F-16戰機的訓練成本做以下分析：

(1)飛行員訓練計畫：臺灣空軍計畫派遣65名人員赴美接受F-16訓練，¹⁵訓練時間為期一年。

(2)訓練預算：約新臺幣3,665萬元，¹⁶平均每人訓練成本約新臺幣56萬元。

(3)修護人員培訓：對於像F-16這樣的複雜戰鬥機的修護訓練可能會非常廣泛，持續時間可能長達幾個月到一年，且F-16的先進系統需要高度專業的訓練，其技術複雜性增加了成本；¹⁷另隨著飛機系統的升級，維修人員需要持續培訓，以保

13 周元龍，《機隊維保作業排程管理研究-以軍用直升機隊為例》，中央大學碩士論文，2024年，頁10。

14 《台灣將接收第一批新型F-16V戰鬥機》，臺灣新聞，<https://www.taiwannews.com.tw/news/5935058> (檢索日期：2024年10月15日)。

15 Taiwan to receive first F-16 Block 70 fighter jet by end of September, Defense News Aerospace, <https://armyrecognition.com/news/aerospace-news/2024/taiwan-to-receive-first-f-16-block-70-fighter-jet-by-end-of-september> (檢索日期：2024年11月18日)。

16 同註14

17 於下頁。



後勤保修

持最新知識修復飛機故障情況，雖然沒有提供F-16維修人員訓練成本的確切數字，但顯然這些成本因飛機的複雜性和高維護需求而相當可觀，F-16維修的密集性突顯了受過良好訓練的人員在保持這些先進戰鬥機運行和作戰準備方面的重要性。

(4)為了管理這些高昂的訓練成本，空軍可能會考慮：

A.增加使用模擬器以減少實際飛行時間，同時保持熟練度。

B.優化訓練課程以確保效率而不妥協質量。

C.實施留任獎金和激勵措施以留住經驗豐富的飛行員，可能節省新訓練成本。

3.營運成本：持續的飛行及維護活動開支，包括勞動和零件，以F-16為例，其每飛行小時需要大約16小時的維護，且F-16每小時飛行的成本接近約新臺幣88萬元，¹⁸這些數字突顯了F-16維護的密集性及其對營運成本的重大影響。

4.作業維持費：預算概述根據國防部所屬單位預算案的報告，140118軍事單位裝備零附件購置及保修的預算主要用於國軍主要武器系統及其支援裝備的零附件購置與保修，下轄用途別計有1,000人

事費、2,000業務費、3,000資訊設備及投資等3項，空軍113年度預算計有約355億元。¹⁹

總結來說，對空軍軍機運作與維護進行徹底的成本效益評估需要考慮整個飛機生命週期中的多個因素。雖然先進技術和維護策略可以帶來顯著的好處，但需要仔細分析以證明初始投資的合理性，並確保長期的成本效益。

(四)維保面臨的挑戰與問題

雖然飛機維護的目標明確，但對於空軍來說，維護是一項艱巨的任務，面臨著許多廣泛的挑戰，包括：

1.妥善率下降：空軍司令部部頒妥善率為7X%，某年平均妥善率約為6X%，經檢討發現機隊長久以來僅勉可維持部頒妥善標準，甚而有低於部頒妥善率情況產生，由此可見機隊無法持恆穩定的維持戰機妥善情況，且還有部頒妥善率逐年下修情況。²⁰例如，F-16戰機的設計壽命約為8,000飛行小時，但隨著時間推移，F-16機隊已經接近或超過這一限制。由於戰機的老化和使用頻率高，空軍面臨著戰機妥善率下降的挑戰。²¹

2.維修成本高昂：對於關鍵飛機零件

17 陳德明，《航空維修訓練架構之發展-新進人員訓練》，清華大學碩士論文，2009年，頁12-14。

18 Lister, T., & Liebermann, O., No'silver bullet: Ukraine faces many challenges in getting the F-16 into combat, CNN, <https://edition.cnn.com/2023/08/29/europe/ukraine-f-16-fighter-jets-intl/index.html> (檢索日期：2024年11月18日)。

19 同註4。

20 馬松群，《從美軍效益後勤探討國軍飛機後勤維持之研究—以空軍A聯隊為例》，成功大學碩士論文，2012年，頁20。

21 Bryan S. Manes, "Extending USAF F-16 Force Structure," Air Command and Staff College Air University, (April 2001), pp. 9-14.

依賴於複雜的全球供應鏈，如中斷將導致機隊無法正常運作之擔憂。例如，備份件短缺或交付延遲，可能會對飛機的妥善率產生重大影響，確保備份件的及時供應和有效管理是維持高作戰準備水平的關鍵挑戰。

3.經費限制：維持老化機隊的成本，採購專用零件、投資於技術升級以及滿足嚴格的合規標準，顯著增加了維持成本，有限的國防預算限制了空軍的維修投入，進而影響軍機妥善率。

4.人力短缺：高素質的維修人才一直是臺灣空軍維保作業的關鍵，吸引和留住高技能的維護人員是一個重要問題，特別是在競爭激烈的勞動力市場中，空軍面臨技術維修人員的重大短缺，這是由於勞動力老化、退休以及吸引新人才的困難，²²人力資源的短缺使現有的員工承受壓力，可能導致工作量增加和倦怠，對飛機修護任務構成了重大挑戰。

5.消失性商源：我國現代高科技武器系統不論是戰機、飛彈與雷達等，走向日趨精密複雜境界，必須仰賴許多零組件組合成武器系統，才能發揮其強大的功能。由於我國武器獲得的管道多元，武器系統的獲得來自於外購，使用年限長達數十年，在武器系統服役壽期中經常會遭遇到消失性商源及物料短缺問題，如不加以解決會讓武器系統不能擔任戰備任務，造成

武器系統全壽期成本增加。²³

空軍維保作業正處於一個技術快速發展、資源受限、需求複雜的時代，隨著空軍在維護機隊、應對技術進步和減輕供應鏈中斷的複雜性中前行，創新的解決方案至關重要，未來的發展方向可能包括進一步的技術創新、更智能的資源管理以及更靈活的維護策略，以應對不斷變化的作戰環境和技術挑戰。

無人機在軍事領域的應用

無人機在空軍現代軍事行動中的多功能性和日益重要性，涵蓋了從戰鬥和情報收集到後勤和人道主義努力的各個方面，為提高飛機維護操作的效率、安全性和準確性提供了顯著的應用，而人工智慧、自主能力和先進傳感器的整合進一步擴展了軍事無人機的潛力，使其成為當代戰爭和防禦策略中不可或缺的資產，雖然目前在法規和數據安全方面存在挑戰，但在烏俄戰爭中，應用於實戰方面成功證明了這項技術，在軍事航空中的可行性和潛在好處。

一、無人機技術發展現況

(一)科技快速進步：軍事無人機市場在耐力、載荷能力和隱形特性等方面正經歷顯著的改進，其材料科學、電池技術和微型化的創新使無人機能夠飛行更長時間、攜帶更重的負載，並更有效地避免被

22 Hryniewicz, R., 7 Main Problems in Aviation Maintenance, <https://nsflow.com/blog/problems-in-aviation-maintenance> (檢索日期：2024年11月20日)。

23 洪崇凱，《國機國造與軍購的差異分析研究》，成功大學碩士論文，2017年，頁82。



探測。

(二)人工智慧與自主能力的整合：軍事無人機中人工智慧和自主能力的整合日益加深，未來的無人機將具備在最少人類干預下運作的能力，根據數據分析和傳感器輸入做出即時決策，執行複雜任務而實現最快的增長。

(三)群體技術：無人機群的概念，即多架無人機作為協調單位共同運作，正逐漸受到各軍事國重視應用，其群體技術可增加備援、擴充性和任務成功率。

(四)擴展續航力：軍事無人機的推進系統和能源效率提升，延長了其航程和續航力，能夠在空中停留長時間的長航時無人機，對於持續偵察和監控變得越來越重要。

(五)模組化有效負載和感測器整合：未來的軍事無人機將強調模組化有效負載和傳感器整合，以實現更大的任務靈活性，先進的感測器，包括多光譜成像和合成孔徑雷達，將提供更詳細和全面的數據。

(六)與其他防禦系統的整合：軍事無人機正越來越多的與其他防禦系統整合，以創造一個有凝聚力和互聯互通的網絡中心戰爭能力。

綜上，這些發展突顯了無人機技術在軍事應用中的快速演變和日益重要性，

重點在於增強能力、自主性以及與更廣泛防禦系統的整合。

二、無人機在不同軍事環節的應用

無人機或無人航空載具(UAV)在各個軍事領域中變得越來越重要，徹底改變了作戰方式並提升了能力。以下是無人機在不同軍事領域中的應用概述：

(一)監視與偵察：無人機在收集情報和執行監視任務中扮演著至關重要的角色。它們提供實時數據收集和監控能力，使軍事部隊能夠進行敵方領土的空中偵察、監控邊界地區並檢測潛在威脅、收集視覺和電子情報、執行長時間的監視任務而不危及人類生命。²⁴無人機可以提供即時視頻和影像資料，使軍事指揮官能夠做出明智的決策。

(二)作戰行動，無人機有多種用途

1.精確打擊：武裝無人機可以對敵方陣地或高價值目標進行精確攻擊。

2.近距離空中支援：無人機在戰鬥情況下為地面部隊提供空中支援。

3.蜂群戰術：無人機蜂群可以用於協調攻擊或和監視。²⁵

(三)搜尋與救援

軍事無人機在搜救行動中是寶貴的資產，在艱難地形中尋找失蹤人員、向孤立單位運送緊急物資及協助災難應對和人道主義任務。

24 Gabor Horvath, "Comprehensive Study of Military and Civil Drone Applications: Assessing Key Areas of Significance and Future Prospects," Repulestudományi Kozlemenyek, Vol. 35, No. 3 (September 2023), p. 3.

25 M. A. Vensuslaus, "An Intrusion Detection System for Drone Swarming Utilizing Timed Probabilistic Automata," Drones, Vol. 7, No. 4 (April 2023), p. 1.

(四)物流與供應鏈

1.貨物運送：將醫療用品、彈藥及其他重要物品運送到偏遠或危險地區。²⁶

2.設備維護：進行軍事資產和基礎設施的空中檢查。

3.庫存管理：無人機可以用來監控庫存水平並識別短缺。

(五)通信與網絡：無人機增強了軍事通信能力，在基礎設施有限的地區作為空中通信中繼站，在戰場環境中建立臨時通信網絡。

(六)訓練與模擬：無人機被用於軍事訓練演習，模擬敵方飛機或目標以進行空防訓練，提供現實的戰鬥訓練場景，無需冒險人員或昂貴設備的風險。

(七)電子戰與網絡安全：先進的軍事無人機能夠進行電子戰行動攔截和干擾敵方通信保護軍事網絡免受網絡威脅，²⁷並分為信號情報收集、電子干擾及網路戰等3類分述如下：

1.信號情報收集：無人機可以配備傳感器來探測和分析敵方通信。

2.電子干擾：無人機可以用來干擾敵

方的通信和電子系統。

3.網絡戰：無人機可以用來對敵方網絡發動網絡攻擊。

綜上，無人機在這些軍事領域的整合顯著提升了作戰效率，降低了對人員的風險，並根據無人機的能力、任務需求和作戰環境而有所不同，改善了整體軍事能力。隨著無人機技術的不斷進步，它們在軍事行動中的應用可能會進一步擴展，塑造未來的戰爭和防禦策略。

三、無人機對未來戰爭形態的影響

(一)軍事行動的轉型：無人機將在21世紀徹底改變戰爭，並改變軍事交戰和策略的性質，²⁸無人機技術在各國之間的擴散速度正在迅速增加，目前已有超過70個國家擁有這項能力，還有許多國家正在尋求獲得這項技術。²⁹

(二)無人機AI增強的群體：未來的戰爭可能會看到人工智慧增強和啟用的自主武器系統(AWS)的部署，特別是以無人機群的形式，³⁰這些先進的無人機將提供增強的範圍和準確性、更大的自主協調和智慧、在衝突情況下提高速度。

26 M. H. M. Hanafiah, "Analysis and Optimization of Care-purpose Drone For Medical-Based Applications," 2024 IEEE 20th International Colloquium on Signal Processing & its Applications (CSPA), (February 2024), p. 1.

27 Q. Zeng, "A HITL-Integrated Machine Learning Approach to Secure Drone Networks for IIoT Applications," IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), (December 2023), p. 1.

28 A. Long, "The Future of Warfare in the 21st Century: Dueling Asymmetries: International Terrorism, Insurgency and Drone Warfare in the 21st Century," Political Science, (2014), p. 13.

29 Mahmood Ahmad, "The Use of Drones in Pakistan: an Inquiry into the Ethical and Legal Issues," The Political Quarterly, Vol. 85, No. 1 (April 2014), p. 1.

30 James Johnson, "Artificial Intelligence, Drone Swarming and Escalation Risks in Future Warfare," RUSI Journal, Vol. 165, No. 2 (April 2020), p.1.



(三)無人化戰爭：自主戰鬥機和轟炸機在接下來的20年內，專家預測自主戰鬥機和轟炸機將廣泛使用，進一步減少人類在直接戰鬥中的參與。

(四)威懾與核安全：人工智慧與無人機群的整合可能會對威懾策略和核安全產生重大影響，³¹這些系統能力的提升可能會改變權力平衡，並為維持戰略穩定帶來新的挑戰。

(五)升級風險：部署增強人工智慧的無人機和AWS使核武裝國家之間的衝突升級風險加劇，在衝突情境中面臨使用這些系統的壓力可能導致快速升級，並可能產生災難性的後果。

(六)倫理和法律問題：無人機的使用，特別是在非戰鬥區域，提出了重大的倫理和法律問題，問題包括無人機攻擊在主權領土上的合法性、平民傷亡和附帶損害、無人機操作中的責任制和透明度。

(七)無邊無際的衝突：無人機技術的廣泛採用可能導致一場「無邊界、無止境的戰爭」，這一轉變可能會導致外交政策的軍事化加劇、潛在的不必要衝突及在定義和尊重傳統戰鬥區域方面的挑戰。

(八)科技軍備競賽：隨著各國持續發展和提升無人機能力，技術軍備競賽可能會隨之而來，³²這場競爭將推動在以下領域的進一步創新於人工智慧整合、網絡戰能力及反無人機技術。

綜上，無人機對未來戰爭的影響深遠且多面向，雖然提供了顯著的戰術優勢，但無人機技術的擴散也帶來了在戰略穩定性、倫理考量和升級潛力方面的新挑戰，隨著這項技術的不斷演變，國際機構制定全面的框架以規範無人機在軍事行動中的使用，並減輕其部署所帶來的風險將變得至關重要。

軍機與無人機導入維保作業SWOT分析

空軍導入無人機應用決策，需從整體後勤支援上看，用以確認、分析、規劃，並提供武器系統所需的整合性後勤支援與資源，以確保武器系統能在最低廉的壽期成本下，有效運作與維持，就現行空軍整體後勤面臨之主要問題為作業維持預算不足、國外器材無法有效支應及機齡老化機隊管理不易，故以上面向需要重點考慮以下因素：

一、經濟效益分析

軍機和無人機在經濟效益上的分析涉及多方面的考量，主要包含採購成本及作業維持費2大類，其分述如後：

(一)軍機面向

1.採購成本：空軍在2019年同意以約新臺幣2500億的價格購買66架F-16V Block70戰機，³³平均每架約新臺幣37億元，F-16的初始採購成本通常較高，這是

31 同註30

32 V. Tretiak, "Analysis of the development of technological transformations in future wars," International Scientific Conference, (January 2024), pp. 3-4.

33 於下頁。

因為其複雜的設計和高性能要求。

2.作業維持費：依113年國防部單位預算書表空軍分支計畫表內140118軍事單位裝備零附件購製及保修費，針對F-16型機裝備零附件採購所需軍事裝備及設施，計需約新臺幣52億元；另所需軍事裝備設施養護費，計需約新臺幣17億元，合計約新臺幣69億元。³⁴

(二)無人機面向

1.採購成本

(1)MQ-9 Reaper死神無人機

MQ-9 Reaper是一款多用途的無人機系統，主要用於執行攻擊、情報、監視及偵察(ISR)任務。³⁵其可在高達50,000英尺的高度連續飛行長達14小時，搭載地獄火空對地導彈、雷射導引炸彈和聯合直接攻擊彈藥等多種武器，並配備先進的傳感器和攝像設備，可執行高效的ISR任務，靈活應用於不同類型的軍事任務。於2023年5月台灣國防部宣布已向美國購買四架MQ-9 Reaper無人機，總成本為新臺幣217億元，平均每架約新臺幣54億元。³⁶

(2)RQ-4 Global Hawk全球鷹

RQ-4 Global Hawk是一種高空長航時無人偵察機，專門用於戰略偵察，單架飛



圖1 MQ-9 Reaper死神無人機

資料來源：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/維基百科>

機的成本約新臺幣50億元，每天可偵察大約10萬平方公里的面積，相當於南韓或冰島國土全境，由於「全球鷹」可以自主起降飛行，又能連續滯空30多個小時，24小時全天候監控戰場易如反掌，這反映出其先進的技術和長時間的飛行能力。³⁷



圖2 RQ-4 Global Hawk全球鷹

資料來源：<https://www.navair.navy.mil/product/MQ-4C/>美國海軍官網

33 《空軍27年後再獲新戰機 66架F-16V戰力強》，中央社，<https://www.cna.com.tw/news/firstnews/201908190254.aspx> (檢索日期：2024年10月16日)。

34 國防部，《113年度國防部所屬單位預算案書表》，2024年，頁331-332。

35 William Leister, "MQ-9 Reaper Unmanned Aircraft System," December 2015, p.6.

36 Taiwan buys four Reaper drones for 2025 delivery, 台北時報，<https://www.taipeitimes.com/News/front/archives/2023/05/05/2003799179> (檢索日期：2025年3月12日)。

37 李忠謙，《被伊朗擊落的美軍無人機「全球之鷹」究竟有何本事》，風傳媒專欄報導，<https://www.storm.mg/article/1410342> (檢索日期：2024年10月23日)。

(3)MQ-1C Gray Eagle灰鷹

MQ-1C Gray Eagle具備長程監視和偵察能力，可作為通信中繼站，並能攜帶武器執行打擊任務，可通過衛星通信在最大2,500海里(4,630公里)範圍內操作，飛行持續時間超過42小時，³⁸其2013年的一份成本估算報告顯示，31架MQ-1C Gray Eagle的總採購成本約新臺幣1,150億元，平均每架約新臺幣37億元。³⁹

2.作業維持費

(1)MQ-9 Reaper死神

MQ-9 Reaper作為遠程遙控飛行器(RPA)，在情報、監視、偵察和精確打擊



圖3 MQ-1C 灰鷹

資料來源：https://odin.tradoc.army.mil/WEG/Asset/MQ-1C_Gray_Eagle_American_Medium-Altitude/美國陸軍官網

任務中扮演著關鍵角色，這導致了飛行時間增加，以及更多接觸戰鬥相關事件的機會(如摧毀敵方資產和敵軍)，⁴⁰雖然沒有具體的作業維持費，但MQ-9 Reaper的營運維護成本可能相當可觀。

(2)RQ-4 Global Hawk全球鷹

RQ-4 Global Hawk系統採用了一種綜合承包商支持(Integrated Contractor Support)模式，這種模式在降低部署和營運成本方面發揮了重要作用，⁴¹相關文獻雖然沒有提供具體的作業維持費，但它強調了RQ-4 Global Hawk系統通過採用綜合承包商支持模式來降低成本的策略，這種方法使得Global Hawk在營運和維護成本方面可能比軍修方案更具優勢。

(3)MQ-1C Gray Eagle灰鷹

查美國陸軍戰鬥能力發展司令部(CCDC)航空工程局的維護工程部門最近才開始建立無人機系統平台運用，雖然陸軍有數十年的旋翼機維護經驗，但無人機項目對陸軍來說是相對較新的領域，在系統生命週期的早期階段，並未獲取作業維持費相關資訊，初估平均約70%的項目成本，主要用於維護工作。⁴²

38 General Atomics Wins \$389M US Army MQ-1C Gray Eagle Drone Contract, The Defense Post, <https://thedefensepost.com/2023/12/04/general-atomics-gray-eagle-drone/> (檢索日期：2024年11月25日)

39 "MQ-1C Gray Eagle Unmanned Aircraft System," Selected Acquisition Report (SAR), December 2017, p.45.

40 J. A. Ouma, "Facets of Occupational Burnout Among U.S. Air Force Active Duty and National Guard/ Reserve MQ-1 Predator and MQ-9 Reaper Operators," (June 2011), p.7.

41 J. Kohn, "Global Hawk - Integrated Contractor Support to Military Operations and Corresponding Implications to Homeland Security," AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, (June 2012), p.1.

二、器材供應效益分析

(一)軍機面向

F-16器材與零件的可靠性與飛機年齡密切相關，隨著機隊老化，維修需求增加，零件供應鏈面臨壓力。研究顯示，F-16維護效率與零件可靠性及飛機年齡密切相關。⁴³因此，老舊機型可能需要更多時間來等待零件供應，進而影響整體籌補時程，特別是一些關鍵組件，如火控雷達中的雙模發射器，需要定期維修和更換，美國空軍已經與私營部門合作，通過公共-私營合作夥伴關係來維護這些組件，以提高維修效率並降低成本。⁴⁴

預算維護需要考慮整個壽命週期的成本，而不僅僅是初始採購費用，其後續的器材供應方面，F-16依賴於一個全球性的供應鏈來確保零部件的可用性，包括零部件供應和裝備維護。這些因素對於確保飛機的持續運作至關重要；⁴⁵另查2024年空軍維修預算，針對F-16的零件及維修編列了50億元新臺幣的預算。⁴⁶

(二)無人機面向

1.MQ-9 Reaper死神

MQ-9 Reaper是一種多功能無人機，主要用於情報、監視、偵察(ISR)和攻擊任務。⁴⁷其器材供應效益受到以下幾個因素的影響：

(1)操作需求與供應壓力：由於MQ-9 Reaper在全球多個戰區的高需求，維護和零件供應面臨壓力，隨著操作頻率的增加，維修需求也隨之上升，這對供應鏈造成了挑戰。

(2)維修與零件更換：與其他無人機相比，MQ-9的操作環境較為嚴苛，因此其零件磨損較快，特別是飛行控制系統和傳感器設備。這些零件的更換需要高效的後勤支持，以確保無人機能夠保持高可用性。

(3)遠程操作的挑戰：由於MQ-9 Reaper的遠程操作特性，其維護和補給可能需要跨國運輸，這進一步增加了供應鏈的複雜性和時間延遲。

42 V. Ramos, "Re-strategizing Army MQ-1C System Sustainment Support Post-Production & Deployment Phase," AHS International 75th Annual Forum and Technology Display, (May 2019), p.1.

43 Min-Seok Hur, "Performance measure of maintenance practices for F-16 fighter jets by data envelopment analysis," International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 39, No. 1 (March 2021), p. 1.

44 L. Junek, "Depot Maintenance: Status of the Public-Private Partnership for Repair of the Dual-Mode Transmitter in the F-16 Fire-Control Radar," United States Government Accountability Office, (January 2015), p. 2.

45 Potts, D. G., "Simulation Modeling and Analysis of Deployed F-16 Operations and Logistics Support," Published Engineering, (2017), pp. 1-4.

46 《2024年度空軍針對F-16戰機的零件及維修編列了50億元新臺幣的預算》，聯合新聞網，<https://udn.com/news/story/10930/8233193> (檢索日期：2024年11月7日)。

47 P. Lee, "The distance paradox: reaper, the human dimension of remote warfare, and future challenges for the RAF," Royal Air Force Air Power Review, Vol. 21, No. 2 (Summer 2018), p. 2.

總體而言，MQ-9 Reaper的供應效率受到其全球部署範圍和高頻次使用的影響，需要強化維修計畫和零件供應鏈管理來保持作戰能力。

2.RQ-4 Global Hawk全球鷹

RQ-4 Global Hawk是一款高空長航時無人機，專門用於長距離ISR任務。其器材供應效益具有以下特點：

(1)技術複雜性與零件依賴：RQ-4配備了先進的傳感器和通信設備，其技術複雜性使得零件供應更加依賴專業化供應商，由於其高科技設備，任何關鍵部件的短缺都可能導致長時間停機，從而影響任務執行。

(2)維護需求：由於RQ-4進行的是長航時、高空飛行，其結構和系統需要定期檢查和維護，這些維護工作通常需要專門設施和技術人員，因此補給過程可能會比其他無人機更耗時。

(3)全球部署挑戰：RQ-4通常部署在遠離主要基地的地區，因此其補給和維修需要跨國協調，這導致了供應鏈在時間和成本上的挑戰，需要提前計畫，以減少潛在的延誤。

總體來看，RQ-4 Global Hawk的供應效率受制於其技術複雜性和全球部署需求，必須依賴高度協調的後勤支持來保持營運。

3.MQ-1C Gray Eagle灰鷹

MQ-1C Gray Eagle是一款戰術級無人機，主要用於美國陸軍的偵察、監視、攻擊及通信中繼等任務，其器材供應效益具有以下特點：

(1)持續支援挑戰：根據美國陸軍的一份報告，由於Gray Eagle無人機系統在生命週期初期未能明確定義持續支援要求，因此在後期階段面臨著維修和補給上的挑戰。⁴⁸約70%的項目成本來自於持續支援，因此如何有效管理這部分成本對提升供應效率至關重要。

(2)多功能性與需求增長：Gray Eagle具備多種功能，包括偵察、攻擊、電子戰等，其多樣化任務需求使得不同類型零件(如傳感器、武器系統)的補給變得更加複雜。⁴⁹隨著需求增長，維護工程部門必須開發創新策略來確保產品支援能夠滿足作戰需求。

(3)升級與改進：Gray Eagle不斷進行升級以提高續航能力和載荷能力(如Improved Gray Eagle, IGE)，這些升級也帶來了新的零件需求，使得供應鏈必須靈活適應新技術要求。⁵⁰

總體而言，MQ-1C Gray Eagle的供應鏈受到持續支援計畫不完善以及多樣化任務需求的影響，亦隨著升級項目的推進，其後勤支援正在逐步改善。

48 同註42

49 Cote, C., "MQ-1C Gray Eagle Unmanned Aircraft System (MQ-1C Gray Eagle)," Defense Technical Information Center, (2015),p.6.

50 同註49, p.7.

三、機隊管理效益分析

軍機和無人機在機隊管理效益分析方面可分為維護需求、簡化流程縮短時效、系統可靠性、降低營運成本及滿足武器系統之全壽期整體後勤支援需求等面向，其分述如後：

(一)軍機面向

1.減少操作維護需求

F-16戰機的操作和維護需求是其營運成本的重要組成部分，根據美國空軍和國防部的研究，操作與支援(O&S)成本模型已被用於F-16系統的採購和管理中，這有助於識別和控制主要成本運作因素。⁵¹通過分析O&S成本模型，空軍可以更好地預測和管理維護需求，從而減少不必要的維修工作，並優化資源分配；另外研究指出，唯一項目識別(UID)計畫對於管理F-16航電系統資產至關重要，UID系統可以幫助準確追蹤零件的狀態，減少重複維修和錯誤診斷，從而降低維護需求。⁵²

2.簡化流程縮短時效

F-16戰機的維護過程涉及多個步驟，包括診斷、零件更換和測試，其有效的持續維護始於設計和開發一個可靠的系統流程，⁵³為了簡化這些流程，可以採取以下

措施：

(1)改進診斷工具：減少診斷錯誤率，可以顯著縮短維修時間。例如，針對低功率射頻(LPRF)系統的研究表明，通過改進診斷工具，可以有效提高飛機可靠性。

(2)加強預防性維護：通過實施預防性維護計畫，可以提前發現潛在問題，從而避免重大故障，並縮短停機時間。

3.提高系統可靠性

提高F-16戰機的可靠性是管理效益的重要目標之一，根據一項針對F-16C/D型號營運與支援成本的研究，總生命週期系統管理(TLCSM)應該是管理這類複雜武器系統的基礎。TLCSM方法強調通過整合設計、維護和後勤支援來提高系統可用性；另外，研究還建議使用飛行小時成本(CPFH)預測技術來估算未來的營運成本，這可以幫助空軍提前規劃資源分配，以確保提升戰機妥善率。⁵⁴

4.降低營運支援成本

降低F-16戰機的總成本(TOC)是提升管理效率的要素。研究表明，透過識別主要成本因素並實施最佳策略，可以顯著減少O&S成本。⁵⁵例如：

51 W. Davis, "A Summary and Analysis of the Logistics Support Cost Model Application to the ACF/F-16 Weapon System Acquisition," Air Force Institute of Technology, (June 1979), p. 1.

52 W. P. Roberts, "Implementing an In-Service F-16 Avionics Unique Item Identification Program," Air Force Institute of Technology, (2003), p. iv.

53 A. Cobianu, "Analysis and Forecasting of Operating and Support costs for F-16 C/D," Naval Postgraduate School, (June 2006), pp. 44-94.

54 同註53, pp. 91-94.

55 同註53, pp. 77-79.

(1)零件標記與追蹤技術：UID技術不僅可以提高資產管理效率，還能降低零件遺失或重複訂購的風險。⁵⁶

(2)策略性商維關係：美國空軍已經與商業部門合作，以更有效地管理F-16零件供應鏈，並降低維修成本。⁵⁷

5.滿足武器系統之全壽期整體後勤支援需求

為了滿足F-16戰機全壽期整體後勤支援需求，必須考慮到其長期營運中的各種挑戰，TLCISM方法強調在武器系統設計初期就應考慮到其後勤支援需求，以確保在未來能夠有效地進行維護和升級。⁵⁸

另外，針對國外軍事銷售(如巴基斯坦購買F-16)的案例研究表明，在武器系統出售後，持續的後勤支援至關重要，這包括確保零件供應、技術支援及人員培訓等方面，以確保武器系統在不同環境下能夠長期穩定運行。⁵⁹

綜上，針對機隊管理效益需要從多個方面探討，通過採取這些措施，可以顯著提升F-16戰機在其服役期間內的作戰效能，同時降低總成本，並延長其使用壽命。

(二)無人機面向

MQ-9 Reaper、RQ-4 Global Hawk和MQ-1C Gray Eagle是美國軍方使用的無人機(UAV)，它們在機隊管理方面各具優勢，以下是對這三種無人機在機隊管理方面的分析：

1.MQ-9 Reaper

(1)減少操作維護需求

A.設計與模組化：MQ-9 Reaper採用模組化設計，允許更快速且簡單的部件更換，從而減少維護時間和所需的人力資源。

B.自動化系統：其先進的自動化飛行控制系統減少了人工操作的負擔，從而降低了維護頻率。

C.更高的使用率：MQ-9 Reaper每年每架飛機的飛行時數可達近1,500小時，而有人駕駛的偵察機通常在400-800小時之間，無人機可以執行30小時以上的長時間任務，⁶⁰而不受人類飛行員耐力的限制。

(2)簡化流程縮短時效

A.遠程維護監控：Reaper配備了先進的診斷和監控系統，地面控制站可遠程監控飛機狀況，無需在現場部署大量人員，提前發現潛在問題，從而縮短維修

56 同註52

57 同註51

58 同註53

59 A. Greenlee, "Peace Gate: A Case Study of F-16 FMS (Foreign Military Sales) Management," Air Force Institute of Technology, (September 1984), pp. 27-34.

60 General Atomics MQ-9 Reaper, 維基百科, https://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-9_Reaper (檢索日期：2024年11月25日)。

時間。⁶¹

B.模組化設計：MQ-9可以快速拆卸和重新組裝，便於運輸和部署。

(3)提高系統可靠性

高可靠性：MQ-9 Reaper的設計使其能夠長時間執行任務，配備外部油箱時可持續飛行42小時，⁶²並且其可靠性高，有助於提高任務達成率。

(4)降低營運支援成本

A.燃油效率：MQ-9 Reaper的燃油效率較高，並且使用較少人員進行操作和維護，有助於降低營運成本。

B.降低人事成本：無需空勤操作員與減少地勤人員人力，且無人機系統可採用合約物流支援(CLS)，⁶³由承包商負責提供設備、系統或平台的維護、修理、營運和其他相關服務，有助於提高供應鏈的靈活性。

(5)滿足武器系統之全壽期整體後勤支援需求

A.可持續性升級：MQ-9 Reaper的開放式架構允許隨著技術進步進行升級，確保其能夠滿足長期後勤需求。⁶⁴

B.建立培訓體系：建立完善的無人機

飛行員和維護人員培訓體系，滿足後勤支援需求。

2.RQ-4 Global Hawk

(1)減少操作維護需求

A.長航時能力：RQ-4 Global Hawk具有超長航時能力(超過30小時)，這意味著它可以在不頻繁返回基地的情況下，執行長時間任務，從而減少了維護需求。⁶⁵

B.系統安全可靠：執行與載人飛機相同的任務，而不會有飛行員損失的風險，無人機的數量在美國運營的將在未來持續增加。⁶⁶

(2)簡化支援流程

A.自動化操作與診斷：RQ-4 Global Hawk配備了先進的自動飛行系統和自診斷功能，使得地面人員能夠更快地識別和解決問題，從而簡化了支援流程。

B.建立管理平台：實現數據管理及資訊共享，加快決策和支援速度。

(3)提高系統可靠性

A.高可靠性與低故障率：由於其設計專注於可靠性，Global Hawk的故障率較低，因此可以保持較高的作戰妥善率。

B.優化維護策略：增加平均故障

61 同註60

62 同註60

63 Under Secretary of Defense for Acquisition, T. and L, "Department of Defense Report to Congress on Future Unmanned Aircraft Systems Training, Operations, and Sustainability," 1984, pp.8-10.

64 同註60

65 RQ-4 Global Hawk, U.S Air Force, <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104516/rq-4-global-hawk/>(檢索日期：2024年11月27日)。

66 Thomas B. Billingsley, "Safety Analysis of TCAS on Global Hawk Using Airspace Encounter Models," Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, (June 2006), p. 62.



間隔時間(MTBF)並減少平均修復時間(MTTR)。

(4)降低營運支援成本

A.無需大量人力支援：Global Hawk的自動化程度高，減少了對地勤人員的依賴，同時也降低了整體營運成本。

B.預測性維護：減少意外故障和緊急維修，降低總體維護成本。

(5)滿足武器系統之全壽期整體後勤支援需求

A.全球部署能力強大：該無人機可以在全球範圍內部署，並且具備強大的遠程通信和後勤支援能力，以滿足其整個生命週期中的後勤需求。

B.先進技術：運用先進的數據管理技術，支持長期的趨勢分析和決策支持。

3.MQ-1C Gray Eagle

(1)減少操作維護需求

A.通用平台設計：Gray Eagle基於MQ-1 Predator平台進行改進，其設計考慮到維護的便捷性，並且與其他系統共享許多零部件，從而減少了專用零件的需求。

B.續航時間長：Gray Eagle的改進型號(IGE)進一步提高了續航時間，可達50小時，進一步降低了維護頻率，且該系

統採用模組化設計，便於快速更換和維修。⁶⁷

C.平衡排配置：每個排配備4架飛機及相關支持設備和有效載荷，實現資源的高效利用。⁶⁸

(2)簡化流程縮短時效

A.模組化維修：Gray Eagle的模組化設計允許快速更換損壞零件，縮短了維修時間，並簡化了支援流程。

B.自動起降系統：包括兩個戰術自動著陸系統，減少人工操作，提高效率。⁶⁹

C.地面控制站：使用通用地面控制站和通用地面數據終端，標準化支援設備，簡化操作流程。

(3)提高系統可靠性

A.全天候作戰能力：Gray Eagle能夠在各種天氣條件下執行任務，其穩定的性能有助於提高系統可靠性。

B.預測性維護：提前識別潛在問題，避免意外故障。⁷⁰

(4)降低營運支援成本

A.共享零附件和技術基礎設施：Gray Eagle與其他無人機共享技術和零附件，使得後勤支援更具經濟效益，有助於降低營運成本。

B.策略性商維：通過集成承包商支

67 Finnerty, R., General Atomics lands first order for modernised Gray Eagles, <https://www.flightglobal.com/military-uavs/general-atomics-lands-first-order-for-modernised-gray-eagles/158573.article> (檢索日期：2024年12月6日)

68 Baxter, T., MQ-1C Gray Eagle Unmanned Aircraft System (MQ-1C Gray Eagle), <https://doi.org/10.21236/ada613350> (檢索日期：2024年12月13日)

69 同註68

70 同註42, pp.3-6.

持(ICS)模式，減少全軍事人員配置的成本。⁷¹

(5)滿足武器系統之全壽期整體後勤支援需求

A.持續升級與現代化改造潛力：Gray Eagle的開放式架構，隨著技術進步進行升級，以滿足未來任務需求和後勤支援挑戰。

B.全面支援策略：實施全面的產品支持策略，確保系統在整個生命週期內的可持續性。⁷²

4.綜上分析，此3款無人機的機隊管理效率都體現了現代無人機系統管理的先進理念，通過集中化管理、先進技術應用和優化策略，在減少支援需求、簡化流程、提高可靠性、降低成本和滿足全生命週期需求等方面都取得了顯著成效，這種綜合性的管理方法對於提高無人機系統的整體效能和持續性具有重要意義。

四、軍機與無人機之SWOT分析

(一)軍機(F-16)SWOT分析

1.優勢(Strengths)

(1)多功能性強：可執行空中優勢、對地攻擊等多種任務。

(2)成熟的技術：經過長期發展和改進，技術成熟可靠。

(3)全球供應鏈：擁有廣泛的全球供應鏈支持。

(4)高性能：具備優秀的機動性和作

戰能力。

2.劣勢(Weaknesses)

(1)維護成本高：操作和維護成本較高。

(2)人員依賴：需要大量訓練有素的飛行員和地勤人員。

(3)機齡老化：隨著機隊老化，維修需求增加，零件供應面臨壓力。

(4)飛行時間限制：受飛行員耐力限制，單次任務時間有限。

3.機會(Opportunities)

(1)升級潛力：通過持續升級和改進，延長服役壽命。

(2)國際合作：通過國際合作項目，分享成本和技術。

(3)新技術整合：整合新型傳感器和武器系統，提升作戰能力。

(4)先進訓練系統改進：發展先進的模擬訓練系統，降低訓練成本。

4.威脅(Threats)

(1)新型戰機競爭：面臨第五代戰機等新型軍機的競爭。

(2)預算壓力：國防預算限制可能影響維護和升級計畫。

(3)技術過時：隨著新技術發展，現有系統可能面臨過時風險。

(4)地緣政治變化：國際局勢變化可能影響零件供應和技術支持。

71 同註42, pp.3-6.

72 同註42, pp.3-6.

表1 軍機SWOT歸納分析

優勢	劣勢
1. 多功能性強。 2. 成熟的技術。 3. 廣泛的全球供應鏈。 4. 高機動性。	1. 維護成本高。 2. 人員依賴。 3. 機齡老化。 4. 飛行時間限制。
機會	威脅
1. 升級潛力。 2. 國際合作。 3. 新技術整合。 4. 先進訓練系統改進。	1. 新型戰機競爭。 2. 預算壓力。 3. 技術過時。 4. 地緣政治變化。

資料來源：研究整理。

(二)無人機(MQ-9 Reaper、RQ-4 Global Hawk、MQ-1C Gray Eagle)SWOT分析

1.優勢(Strengths)

(1)長航時能力：可執行30-50小時的長時間任務。

(2)低人員風險：無需機上飛行員，降低人員風險。

(3)高效率：每年飛行時數高，使用率高。

(4)模組化設計：便於維護和升級。

2.劣勢(Weaknesses)

(1)通信依賴：高度依賴遠程通信系統，易受干擾。

(2)有限的載荷：相比有人機，載荷能力較低。

(3)法律和道德爭議：在某些情況下使用無人機存在爭議。

(4)初期支援不足：如MQ-1C Gray Eagle在生命週期初期未能明確定義持續支援要求。

3.機會(Opportunities)

(1)技術進步：人工智能和自主系統

的發展，可進一步提升無人機能力。

(2)民用領域：可拓展至民用領域，如災害監測、環境保護等。

(3)國際合作交流：通過國際合作擴大資訊共享和技術交流。

(4)多領域整合：與其他軍事系統的深度整合，提升整體作戰效能。

4.威脅(Threats)

(1)反無人機技術：反無人機系統的發展可能威脅無人機的生存能力及功用。

(2)網絡安全風險：高度依賴數據鏈路，面臨網絡攻擊風險。

(3)國際法規限制：無人機使用的國際法規可能變得更加嚴格。

(4)技術擴散：無人機技術的擴散可能導致對手國家快速趕上。

(三)綜合軍機及無人機之經濟效益、器材供應及機隊管理面向，運用SWOT分析獲得結果如後：

1.經濟效益分析：無人機的採購和維護成本普遍低於傳統軍機。例如MQ-9 Reaper無人機的單機成本約為F-16戰機的1/3，且維護成本更低。

表2 無人機SWOT歸納分析

優勢	劣勢
1. 長航時能力。 2. 低人員風險。 3. 高效率。 4. 模組化設計。	1. 通信依賴。 2. 有限的載荷。 3. 法律和道德爭議。 4. 初期支援不足。
機會	威脅
1. 技術進步。 2. 民用領域。 3. 國際合作交流。 4. 多領域整合。	1. 反無人機技術。 2. 網絡安全風險。 3. 國際法規限制。 4. 技術擴散。

資料來源：研究整理。

2.器材供應分析：無人機系統的零件需求相對簡單，供應鏈較為靈活，而傳統軍機如F-16依賴複雜的全球供應鏈，零件籌補時程較長。

3.機隊管理分析：無人機系統可減少操作維修需求、簡化支援流程、提升系統妥善率、降低營運成本，但也面臨技術複雜性和全球部署的挑戰。

SWOT分析結果顯示，導入無人機系統具有降低成本、減少人員風險、提高任務靈活性等優勢，但也存在技術成熟度、法規限制等劣勢，機會包括應對人力資源短缺、提高成本效益等，威脅主要來自安全風險和資訊安全隱患。

結論與建議

本研究主要依據SWOT分析探討導入無人機技術對空軍維保作業帶來的革命性影響，藉由現代化戰爭了解無人機在戰場中的應用，似乎已變成未來不可或缺的必備武器。故將軍機與無人機維保作業SWOT分析之結果，歸納出重要之研究結論，並說明本研究未來建議的改進方向。

一、結論

空軍軍機維保作業面臨機齡老化、維修成本高、國防預算有限及人力短缺等挑戰，導入無人機系統可在一定程度上緩解這些問題，提升維保作業效率。

無人機技術在軍事領域的應用日益廣泛，對未來戰爭形態產生深遠影響，無人機具有成本效益高、降低人員風險、提高任務靈活性等優勢，在偵察、監視、攻

擊等任務中發揮重要作用；另無人機技術與人工智慧、自主系統的結合，將進一步擴展其在軍事領域的應用潛力，如群體技術、長航時無人機等新興技術將重塑未來戰場。

無人機技術的導入對提升空軍維保作業效率具有顯著潛力，特別是在當前國防預算有限的情況下，無人機能夠有效降低軍機的使用壓力，惟無人機技術的應用仍需克服技術、政策和安全等方面的挑戰。

透過SWOT分析，突顯了軍機和無人機各自的優勢和面臨的挑戰，軍機擁有成熟的技術和多功能性，但面臨高維護成本和人員依賴的問題，而無人機則以長航時和低人員風險為優勢，但需要克服通信依賴和法律爭議等問題，其兩者都面臨技術更新和國際局勢變化帶來的機遇和挑戰，未來的發展趨勢導向是兩種系統的優勢互補，共同提升整體作戰能力。

二、建議

無人機技術在軍事後勤領域展現了巨大潛力，建議應進一步加大投資與研究力度，推動其在軍事後勤中的廣泛應用，隨著技術進步，無人機將在未來軍事後勤中發揮越來越重要的作用，並帶來以下深遠影響：

(一)提升後勤效率：無人機通過自動化巡檢、遠程診斷等功能，能夠快速發現設備故障，減少人工檢查時間，提高維修效率；於未來人工智能與無人機的結合，將實現更智能化的預測性維護，進一步降



低設備故障率。

(二)降低後勤成本：無人機可執行危險或難以達成的任務，減少人員風險，同時降低人力成本，隨著無人機載重能力提升，未來可實現更大規模的物資運輸，降低運輸成本。

(三)提升後勤靈活性：無人機在戰時或緊急情況下，可快速投送關鍵物資，提高後勤響應速度；於未來無人機集群技術的發展，將使後勤系統具備更強的適應性與抗干擾能力。

(四)創新技術的結合：無人機與創新技術的結合，將催生更多創新應用，例如3D列印技術與無人機結合，可實現遠程零件製造與運送，其區塊鏈技術的應用，將提升後勤供應鏈的透明度與安全性。

(五)加大研發投入：藉由中科院及空軍航發中心的研發，重點突破大型無人機續航能力、載重能力、智能化水平等關鍵技術，期投入我空軍運用。

(六)加強人才培養：建立專業的無人機後勤人才團隊，建立無人機駕駛員、維修工程師等專業技能培訓，加強無人機應用領域知識培訓。

綜上建議，相信無人機技術必將為空軍後勤帶來革命性變革，大幅提升軍隊作戰保障能力。

參考文獻

中文文獻

期刊譯著

1.梁師音，《美國對臺軍售與軍事衝突

相關性之研究-以2020年~2023年共軍擾臺為例》，國防雜誌，第39卷 第3期，2024年，頁44。

學位論文

- 1.葉招麟，《戰機使用時數與修護維持費關係之研究》，南華大學科學研究所碩士論文，2007年，頁22-23。
- 2.周峻鉉，《航空維修業機隊商維妥善率提升探討以A公司T型機為例》，高雄大學碩士論文，2019年，頁24-25。
- 3.陳柏璋，《國軍維保作業政策對任務影響分析-以空軍偵蒐系統為例》，崑山科技大學碩士論文，2020年，頁1。
- 4.鄭世昌，《軍機商維履約品質顧客滿意度評估之研究》，逢甲大學碩士論文，2004年，頁7-8。
- 5.翁紹軒，《中壽期飛機可靠度研究及後續維保作業規劃》，成功大學碩士論文，2015年，頁18。
- 6.周元龍，《機隊維保作業排程管理研究-以軍用直升機隊為例》，中央大學碩士論文，2024年，頁10。
- 7.陳德明，《航空維修訓練架構之發展-新進人員訓練》，清華大學碩士論文，2009年，頁12-14。
- 8.馬松群，《從美軍效益後勤探討國軍飛機後勤維持之研究—以空軍A聯隊為例》，成功大學碩士論文，2012年，頁20。
- 9.洪崇凱，《國機國造與軍購的差異分析研究》，成功大學碩士論文，2017年，頁82。

研討會論文

- 1.徐志豪，《探討影響空軍軍機商維推廣效能之關鍵因素》，發表於「國防管理學術暨實務研討會」，2011年，第十九屆，頁776-785。

官方文件

- 1.行政院，《中央政府總預算案》，2024年，頁29。
- 2.國防部，《112年度國防部所屬單位預算案書表》，2023年，頁335-336。
- 3.國防部，《113年度國防部所屬單位預算案書表》，2024年，頁331-332。
- 4.國防部，《中華民國112年國防報告書》，2023年，頁71-72。
- 5.空軍司令部，《空軍修護管理作業手冊》，2018年，頁39-40。
- 6.國防部，《113年度國防部所屬單位預算案書表》，2024年，頁331-332。

網際網路

- 1.《台灣將接收第一批新型F-16V戰鬥機》，台灣新聞，<https://www.taiwannews.com.tw/news/5935058>(檢索日期：2024年10月15日)。
- 2.《法國原廠已汰除的幻象2000》，風傳媒，<https://www.storm.mg/article/5236708> (檢索日期：2024年10月15日)。
- 3.《空軍27年後再獲新戰機66架F-16V戰力強》，中央社，<https://www.cna.com.tw/news/firstnews/201908190254.aspx> (檢索日期：2024年10月16日)。
- 4.Taiwan buys four Reaper drones for

2025 delivery, 台北時報, <https://www.taipeitimes.com/News/front/archives/2023/05/05/2003799179> (檢索日期：2025年3月12日)。

- 5.李忠謙，《被伊朗擊落的美軍無人機「全球之鷹」究竟有何本事》，風傳媒專欄報導，<https://www.storm.mg/article/1410342>(檢索日期：2024年10月23日)。
- 6.《2024年度空軍針對F-16戰機的零件及維修編列了50億元新臺幣的預算》，聯合新聞網，<https://udn.com/news/story/10930/8233193> (檢索日期：2024年11月7日)。

外文文獻

期刊論文

- 1.M. A. Vensuslaus, "An Intrusion Detection System for Drone Swarming Utilizing Timed Probabilistic Automata," Drones, Vol. 7, No. 4 (April 2023), p.1.
- 2.Mahmood Ahmad, "The Use of Drones in Pakistan: an Inquiry into the Ethical and Legal Issues," The Political Quarterly, Vol. 85, No. 1 (April 2014), p.1.
- 3.James Johnson, "Artificial Intelligence, Drone Swarming and Escalation Risks in Future Warfare," RUSI Journal, Vol. 165, No. 2 (April 2020), p.1.
- 4.Min-Seok Hur, "Performance measure of maintenance practices for F-16 fighter jets by data envelopment analysis," International Journal of Quality &



Reliability Management, Vol. 39, No. 1 (March 2021), p.1.

學位論文

- 1.Mar. P. Gaguzis, "Effectiveness of Condition Based Maintenance In Army Aviation," United States Military Academy, (2009), pp.42-44.
- 2.Bryan S. Manes, "Extending USAF F-16 Force Structure," Air Command and Staff College Air University, (April 2001), pp. 9-14.
- 3.Gabor Horvath, "Comprehensive Study of Military and Civil Drone Applications: Assessing Key Areas of Significance and Future Prospects," Repulestudományi Kozlemenyek, Vol. 35, No. 3 (September 2023), p.3.
- 4.M. H. M. Hanafiah, "Analysis and Optimization of Care-purpose Drone For Medical-Based Applications," 2024 IEEE 20th International Colloquium on Signal Processing & its Applications (CSPA), (February 2024), p.1.
- 5.Q. Zeng, "A HITL-Integrated Machine Learning Approach to Secure Drone Networks for IIoT Applications," IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), (December 2023), p.1.
- 6.A. Long, "The Future of Warfare in the 21st Century: Dueling Asymmetries: International Terrorism, Insurgency and Drone Warfare in the 21st Century,"

Political Science, (2014), p.13.

- 7.V. Tretiak, "Analysis of the development of technological transformations in future wars," International Scientific Conference, (January 2024), pp.3-4.
- 8.J. A. Ouma, "Facets of Occupational Burnout Among U.S. Air Force Active Duty and National Guard/Reserve MQ-1 Predator and MQ-9 Reaper Operators," (June 2011), p.7.
- 9.J. Kohn, "Global Hawk-Integrated Contractor Support to Military Operations and Corresponding Implications to Homeland Security," AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, (June 2012), p.1.
- 10.V. Ramos, "Re-strategizing Army MQ-1C System Sustainment Support Post-Production & Deployment Phase," AHS International 75th Annual Forum and Technology Display, (May 2019), pp.1-6.
- 11.L. Junek, "Depot Maintenance: Status of the Public-Private Partnership for Repair of the Dual-Mode Transmitter in the F-16 Fire-Control Radar," United States Government Accountability Office, (January 2015), p.2.
- 12.Potts, D. G., "Simulation Modeling and Analysis of Deployed F-16 Operations and Logistics Support," Published Engineering, (2017), pp.1-4.
- 13.P. Lee, "The distance paradox: reaper, the

human dimension of remote warfare, and future challenges for the RAF," Royal Air Force Air Power Review, Vol. 21, No. 2 (Summer 2018), p.2.

- 14.Cote, C., "MQ-1C Gray Eagle Unmanned Aircraft System (MQ-1C Gray Eagle)," Defense Technical Information Center, (2015), pp.6-7.
- 15.W. Davis, "A Summary and Analysis of the Logistics Support Cost Model Application to the ACF/F-16 Weapon System Acquisition," Air Force Institute of Technology, (June 1979), p.1.
- 16.W. P. Roberts, "Implementing an In-Service F-16 Avionics Unique Item Identification Program," Air Force Institute of Technology, (2003), p.iv.
- 17.A. Cobianu, "Analysis and Forecasting of Operating and Support costs for F-16 C/D," Naval Postgraduate School, (June 2006), pp.44-94.
- 18.A. Greenlee, "Peace Gate: A Case Study of F-16 FMS (Foreign Military Sales) Management," Air Force Institute of Technology, (September 1984), pp.27-34.
- 19.Thomas B. Billingsley, "Safety Analysis of TCAS on Global Hawk Using Airspace Encounter Models," Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, (June 2006), p.62.

官方文件

- 1.William Leister, "MQ-9 Reaper Unmanned Aircraft System," December 2015, p.6.
- 2."MQ-1C Gray Eagle Unmanned Aircraft System," Selected Acquisition Report (SAR), December 2017, p.45.
- 3.Under Secretary of Defense for Acquisition, T. and L, "Department of Defense Report to Congress on Future Unmanned Aircraft Systems Training, Operations, and Sustainability," 1984, pp.8-10.

網際網路

- 1.Taiwan to receive first F-16 Block 70 fighter jet by end of September, Defense News Aerospace, <https://armyrecognition.com/news/aerospace-news/2024/taiwan-to-receive-first-f-16-block-70-fighter-jet-by-end-of-september> (檢索日期：2024年11月18日)。
- 2.Lister, T., & Liebermann, O., No'silver bullet': Ukraine faces many challenges in getting the F-16 into combat, CNN, <https://edition.cnn.com/2023/08/29/europe/ukraine-f-16-fighter-jets-intl/index.html> (檢索日期：2024年11月18日)。
- 3.Hryniewicz, R., 7 Main Problems in Aviation Maintenance, <https://nsflow.com/blog/problems-in-aviation-maintenance> (檢索日期：2024年11月20日)。
- 4.General Atomics Wins \$389M US Army MQ-1C Gray Eagle Drone Contract, The Defense Post, <https://thedefensepost.com>.

com/2023/12/04/general-atomics-gray-eagle-drone/ (檢索日期：2024年11月25日)。

5. General Atomics MQ-9 Reaper.，維基百科，https://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-9_Reaper (檢索日期：2024年11月25日)。

6. RQ-4 Global Hawk, U.S Air Force, <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104516/rq-4-global-hawk/> (檢索日期：2024年11月27日)。

7. Finnerty, R., General Atomics lands first order for modernised Gray Eagles, [https://www.flightglobal.com/military-uavs/general-atomics-lands-first-order-for-](https://www.flightglobal.com/military-uavs/general-atomics-lands-first-order-for-modernised-gray-eagles/158573.article)

[modernised-gray-eagles/158573.article](https://www.flightglobal.com/military-uavs/general-atomics-lands-first-order-for-modernised-gray-eagles/158573.article) (檢索日期：2024年12月6日)。

8. Baxter, T., MQ-1C Gray Eagle Unmanned Aircraft System (MQ-1C Gray Eagle), <https://doi.org/10.21236/ada613350> (檢索日期：2024年12月13日)。

作者簡介

洪澤顥少校，空軍航空技術學院99年班、後參班103年班，曾任飛修官、教官、股長，國防大學空軍學院正規班114年班學員。

周傑泰上校，管院企管系90年班、資源管理研究所95年班，曾任補給分庫長、陸勤部補給處補參官、國防部後次室後參官。現為國防大學管理學院國管中心後勤組戰略教官。



UH-60M型直升機 (照片提供：葉秀斌)