



FOCUS

專題報導

● 作者/David A. Deptula, Heather R. Penny, Christopher Olsen

● 譯者/蕭光霽

● 審者/洪琬婷

美空軍無人機自主能力之分級

Beyond Pixie Dust

取材/2022年4月美國空軍月刊(Air Force Magazine, April/2022)

本文剖析作戰人員與工程師對於發展自主無人機之觀點，並據其所歸納出自主能力五級制，期望美空軍採納為框架規範施行全軍，促進跨單位人員溝通合作，以協力發展新一代自主無人機。



美陸軍RQ-7型「黑影」(Shadow)無人機。

(Source: US Army Europe/Richard Bumgardner)





過去十年來，美空軍公布的每項願景、戰略與展望計畫中，皆將次世代無人機、自主能力與人工智慧(Artificial Intelligence, AI)，視為在未來戰場上取得決定性作戰優勢之關鍵技術。未來戰場未必完全充斥載人或無人機，而是兩者兼具。長久以來，美空軍作戰人

員一直期待能運用具有自主能力之無人空中載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)，遂行不需人員介入操控(無論是在座艙操控或以遙控方式)之任務。

發展的下一步是將自主無人機、載人戰鬥機及轟炸機編隊。此「載人與無人編隊」(Manned-Unmanned Teaming,

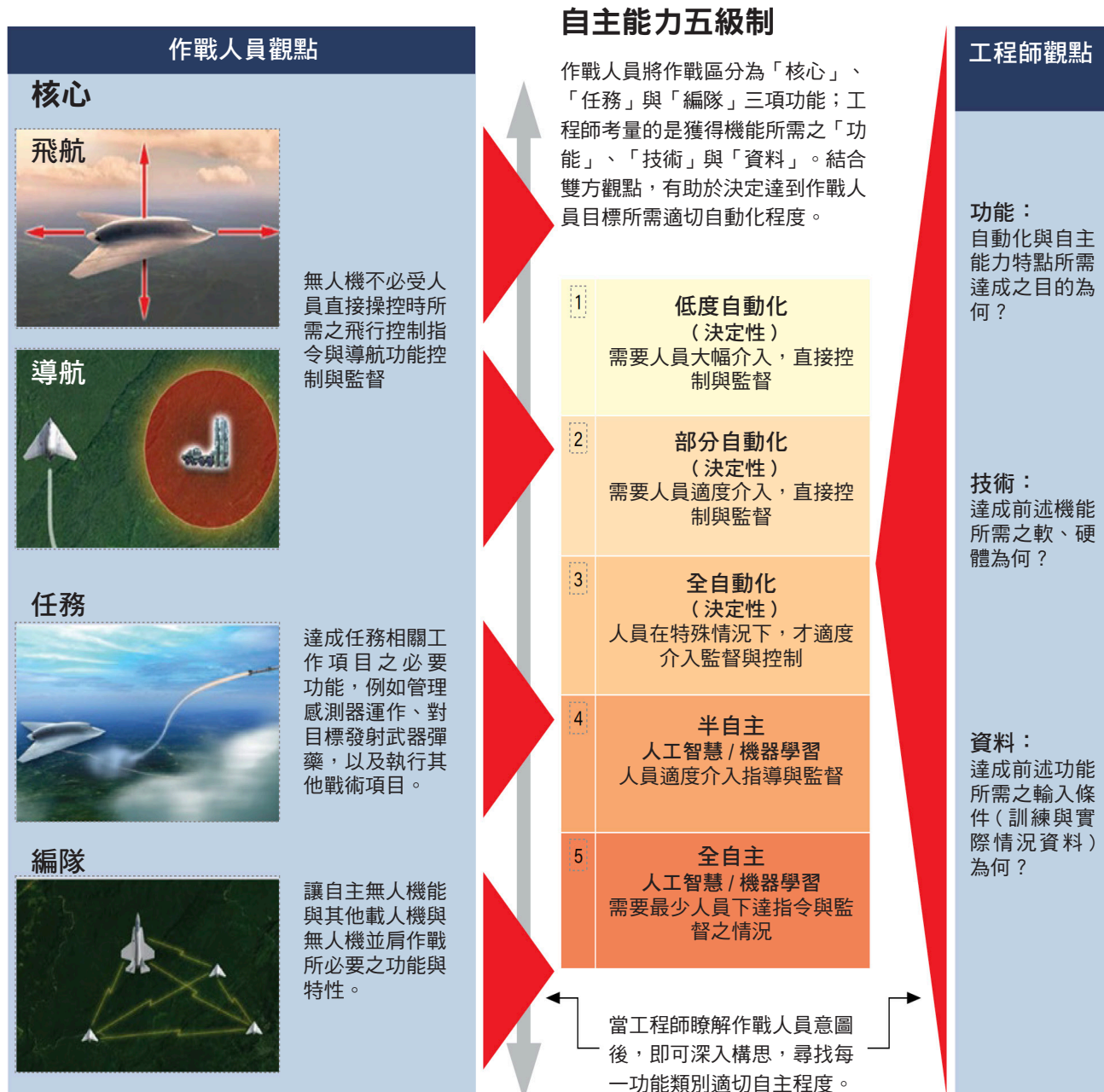
MUM-T)之目標，藉由結合載人機與自主無人機，加上成本、存活力與判斷力等優點，大幅增強作戰能力與能量。「載人與無人編隊」要能在作戰領域大放異彩，載人機與無人機就須以作戰人員能夠信賴的有效方式通力合作。程式可靠度與信賴度是重要指標，然只有在飛



此為一架無人機發射傳統空對空武器之示意圖。美國國防先進研究計畫局刻正研發具有自主反制敵威脅能力之無人機。(Source: DAPRA)

瞭解自主能力：作戰人員與工程師觀點

作戰人員與工程師所用專業術語不同，處理問題之角度各異。為加速發展自主無人機系統，建立共同框架規範，可讓不同專業背景的人員通力合作，以決定各系統功能上發揮自主的適當程度。



(Source: Mitchell Institute, Heather Penny, Christopher Olsen, Kamilla Gunzinger, Zaur Eylanbekov and Dash Parham)



行線上擔任領隊者，才能為此嶄新作法所具價值下定論。

「載人與無人編隊」作法若要奏效，工程師與作戰人員皆須瞭解自主技術與作戰效能兩者關連。然而塑造無人機行為模式與效能之軟體演算法亦同樣重要，技術圈外人士通常僅能略知一二。美空軍作戰人員與採購專業人士，多半能領會自主能力與人工智慧之潛能，然而他們多半欠缺讓此類演算法發揮作戰效益所需之高深學問。實際上，自主能力與人工智慧技術，反倒常被當作是「仙塵」(Pixie Dust)，四處撒一撒就能解決難題，並讓武器系統瞬間自主運作。以此粗略認知，尚不足瞭解未來作戰需求之所在。

美空軍正在快速更新載人戰鬥機、轟炸機與自主無人機進行編隊之概念，俾利遂行對地攻擊、制空、電戰與其他類型任務。其目標為大幅增強作戰能力與能量。人工智慧、自主能力與機器間相互學習能力，均為人工智慧強化現有戰術之研究項目，這些項目所激發想法有如湧泉噴發。眼前挑戰是要以前述技術，讓研發界與作戰部隊跨越彼此間存在的鴻溝。

為達成前述混合編隊之願景，美空軍必須在工程師與作戰人員間建立比目前更穩固、更具共識的認知。作戰人員對於自主能力可能區分之種類以及適當自動化程度，欠缺充分瞭解；而工程師亦對作戰人員的作戰需求，缺乏足夠認識。更重要的是，目前並無架構可幫助雙方克服認知差異。

為避免戰略規劃者、作戰人員與航太工程師之間發生溝通不良、缺乏互信等情事發生，各方

皆須對於自主能力之瞭解取得更佳共識。國防專業人員亟須建立共通架構，俾於相關討論過程中，協助與會者破除科技迷思，跨越彼此專業以有效溝通。

無人機現況

如MQ-1型「掠奪者」(Predator)與MQ-9型「死神」(Reaper)等無人機，在過去20年來已然轉變戰爭要素，但其主要於有利環境中運作，因而較少遭遇直接威脅，且航速高低並非任務要件。當新威脅浮現，美空軍必須思考無人航空技術的未來：自主無人機，可有效自主運作，不須依靠增程資料鏈(Extended-range Datalinks)、大量衛星頻寬，以及遙控操作員可以密集監控。

今日無人機技術尚不足以運用在未來高強度作戰空間中。舉例而言，一架可全時循軌道或航線航行或執行戰鬥空中巡邏(Combat Air Patrol, CAP)任務之無人機，約需要200名作業人員與不間斷且高頻寬的資料鏈。距離過長，會對無人機運作週期造成時間差；無人機上的感測器資料必須先回傳至遙控操作員，俾利操作員在傳送控制訊號前，評估並決定適切作為。然此過程緩慢，並且易受敵人高科技武力干擾。

控制訊號輸入後與無人機做出反應前的時間差，會讓無人機無法同步周遭環境。如以位於戰場前線臨空之飛行員與低延遲(Low-latency)的視距內資料鏈(Line-of-Sight Datalinks)，替換遠端遙控操作員與全球衛星鏈結，可以縮短時間差；但在爭奪電磁頻譜的作戰空間中，前述資料鏈恐受影響，甚或斷訊，而在前線臨空的飛行員

則會成為敵人最佳目標。若資料鏈受到干擾或斷訊時，無人機就會「失聯」，並且自動採取斷鏈程序，例如以三角航線飛行，然後在低油量時飛返基地。伊拉克叛亂分子於2009年就曾駭入一架「掠奪者」無人機資料鏈，監控訊號作為己用。儘管美軍已將訊號加密，以維護無人機鏈路控制之安全，並避免遭到情蒐，但是長程、高頻寬的資料鏈仍是無人機運作時的重大弱點。

近期，美國國防部在載人機與無人機編隊上，率先取得初步成果，將兩者編隊並邁向新局的時刻已然到來。次世代無人機為能在實際作戰環境中運作，必須發揮戰鬥所需速度，並能靈活機動，俾利匹配與其編隊的高性能戰鬥機與轟炸機。因此美軍應著手發展新型無人機，以達成上述斬新作戰概念。

雙觀點框架規範：如何運用掛載大量飛彈的無人機

針對無人機系統的核心功能，比較與調整作戰人員與工程師雙方觀點，可讓武器研發人員更快速發展戰力。以「飛彈卡車」(Missile Truck) 無人機概念為例之思考架構如下表：

	作戰人員觀點		工程師觀點
核心飛航	必須能處理從起飛至落地之間所有飛航過程，毋須遠方操作員直接操控。	自主程度：從三級全自動化至五級全自主(期望值)	全自主能力可能超越目前技術能力所及，因此研發時間與成本將會增加。達到三級(全自動化)水準，有助於加速取得基本上能派上用場之戰力，同時可持續逐步提升軟、硬體自主性。
核心導航	至少要能在不墜地、不撞擊長機或其他航空器之情況下，維持編隊中指定位置。在更高階程度上，可具備採取複雜戰術動作、閃避威脅，以及機動致勝等能力。	自主程度：從三級全自動化至五級全自主	四級半自主能力可能比一個三級無人機系統之發展與訓練更加迅速。工程師可討論研發以及應用，或探索自主能力之高低程度上之取捨。
任務	由長機飛行員選擇使用武器彈藥之種類、時間與目標。若具備更多自主能力，可提供增加殺傷力與任務效能之選項。	自主程度：從一級低度自動化，到至少是三級全自動化	剛開始，自動化程度較高對於作戰人員的優點，與無人機發展上遭遇的成本與困難問題不成比例。相對來說，當「飛彈卡車」(無人機)真正成為有智慧的僚機時，具備更高度的任務自主最終提供更大優勢。然此舉端視作戰人員對其自主能力的信任是否增強。
編隊	部分自動化即能與編隊長機直接交換資料，應該不太需要機載資料處理能力或資料整合。	自主程度：至少是二級部分自動化	以更高度自主能力進行編隊，將更著重在處理資料與發揮無人機決策能力，此舉更進一步提高對於即時資料的需求。作戰人員提升對於自主能力的信任，將是此無人機編隊能力與運作發展成熟的關鍵。



載人與無人機編隊作戰

美空軍同時面對數量與經費問題。目前其現有機數低於所需，採購新機所需經費已超過其能力所及。無人機不像載人機需要維生系統，可視為解決方案之一。如美空軍部部長肯達爾(Frank Kendall)指出，無人機將是能讓美空軍「以合理經費取得我方所需數量」的關鍵。

未來「自主無人機編隊」(Autonomous Teaming Aircraft, ATA)，須能在無任何人員下達緊密控制指令情況下，

自主航行、空中機動、管理感測器狀態，並且執行任務。

從更廣的角度來看，「自主無人機編隊」可成為載人飛行編隊長機之僚機，長機能監控無人僚機自主行動，必要時才會下達指令引導。以指揮管制角度來看，有「自主無人機編隊」加入行列的編隊模式中，人員在戰術範疇是處於「指揮環節之上」(On the Loop)，而非現今人員與無人機搭配模式中是在「指揮環節之中」(In the Loop)。自主行動的無人僚機，具備不同程度之獨立作業模

式，可自主航行、機動，並遂行所賦予之任務，同時編隊中人員長機或任務指揮官，仍擁有無人僚機控制權，以確認並許可任何武器之運用。

美空軍、美國國防部相關機構與國防產業，皆全心投入發展自主能力相關專案。美空軍研究實驗室(Air Force Research Laboratory)的「空中博格」(Skyborg)系統專案成立目的，是藉「低成本可損耗航空器系統」(Low-Cost Attritable Aircraft System)發展無人機「任務全自主」能力。「空中博



在載人與無人編隊架構下，F-35型戰鬥機飛行員可以指揮無人僚機，但不是操作它；無人僚機可以自主作戰，以其武器與感測器，助F-35型戰鬥機一臂之力。(Source: Mitchell Institute/Zaur Eylanbekov/)

格」並非航空器，而是一套自主技術的開放性系統架構，能廣泛相容於多種航空器。2021年，美空軍研究實驗室將「空中博格」系統安裝於一架克拉托斯(Kratos)公司製的「鯖鯊」(Mako)無人機與一架通用原子公司(General Atomics)製MQ-20型「復仇者」(Avenger)無人機中航測自主能力。兩型無人機皆在指定空域邊界中順利航行、回應導航指令、展示協同機動力，並能在兩型機的飛行包絡線內活動。

美國防先進研究計畫局(Defense Advanced Research Projects Agency)的「空中作戰演進」(Air Combat Evolution, ACE)專案亦在發展運動性能媲美高機動性戰鬥機之人工智慧。「空戰演進」專案中的「阿爾法纏鬥」(Alpha Dogfight)虛擬驗證項目，即讓人工智慧在基本纏鬥科目中與飛行員對抗，人工智慧在五次接戰過程中大獲全勝。洛馬公司(Lockheed Martin)用以展示載人與無人編隊技術之Have Raider無人機、諾斯洛普格魯曼公司(Northrop Grumman)的Model

437自主無人機，以及波音公司(Boeing)的「忠誠僚機」(Loyal Wingman)，同樣皆展現出全新人工智慧「自主無人機編隊」之潛能。

自主能力框架規範

美國國防部與美空軍目前採用的無人機框架規範，律定無人機為五個「種類」或「群體」。此分類主要是以最大起飛重量來區分無人機，亦將一般運作高度與空速列入考量。惟此分類作法，不再適用於具備自主能力之無人機。對載人與無人編隊之無人機而言，重量、高度與空速已非區分其種類的正確參數。

美空軍須另建框架規範取而代之，這項有關無人機分類之框架規範得要清楚明瞭、前後一致，並且嚴謹界定其所探索之自主能力。此框架規範應具備下列特質：

- 提供研發自主能力的一致架構；
- 更切合實情闡述自主能力，以研擬作戰概念；
- 針對相關自主技術，排列出理性與審慎的重點順序；

- 釐清人員在自主無人機作業時所扮演之角色；
- 為各參與方之專業，從科技面到採購、作戰與決策面，建立共同參考點；
- 讓決策者獲得充分知識，以考量戰力、風險與經費取捨；
- 鼓勵使用簡明扼要、精確到位的用語，以減少各參與方溝通不良與誤解的情況；

最終目標：此項無人機自主能力框架規範，應使作戰人員與工程師溝通更加順暢。

建議從作戰人員與工程師個別觀點，研擬分為兩部分的無人機框架規範。第一部分的「作戰人員觀點」(Warfighter View)分為「核心」(Core)、「任務」(Mission)與「編隊」(Teaming)，以反映所賦予飛行員任務，旨在讓作戰人員擬定作戰需求時就能直覺瞭解自主系統所應具備之運作方式。「核心」類別包括執行自主飛行必要之飛控指令與導航功能，再細分為「飛航」(Aviate)與「導航」(Navigate)責任項目，從而納入飛行員實際訓練所習得之基本與高級飛行技巧。



過去20年來，MQ-9「死神」是能夠扭轉戰局的無人機，但未來無人機要能與載人戰鬥機在衝突空域中並肩作戰，就必須能自主飛行，也就是不需要遠端操作員搖控。(Source: USAF/William Rio Rosado)

「核心飛航」(Core Aviate)是指能讓無人機在飛航過程各階段中飛行之所有自動特性與功能。操作員無論是以手動操控無人機之飛行操縱面，或使用自動導航、運用數位飛控技術，其主要職責為全程操控該無人機。這可視為是「桿與舵」的動作，持續不斷輸入飛控指令，讓無人機於極短的反饋時間內做出對應動作，在

基本與先進無人機的飛操技巧範圍內，從起飛至爬升、平飛、轉彎、下降、加速、減速、進場至降落。從戰術角度觀之，尚有高攻角飛行、設定升力向量、建立滾轉率與高G動作等項目。各種無人機皆具有其設計特點，且各自為能順利完成特定動作，在速度、高度與推力上皆有獨特之必要取舍。其機動動作必須對應現實條件，

其中包括天氣與地形特徵、跑道位置、可用油量以及作戰環境。在「飛航」項下，包括預防與應處飛行相關突發狀況與緊急情況，如翼面失速、發動機故障，或損失一個或多個操縱介面功能之戰損等。

「核心導航」(Core Navigate)即在飛航時為無人機達成任務引導方向，再區分為絕對與相對導航兩種功能。「絕對導

航」(Absolute Navigation)包括航路規劃及決定至空間中某固定位置之路線，並且要避開危險地形與禁航區，同時維持在指定空域邊界內航行。「相對導航」(Relative Navigation)則為相對於天氣、其他航空器與作戰空間之本身所在位置與方向。「相對導航」功能包括迴避惡劣天候與碰撞、進行空中加油、編隊飛行、機動接戰靈活目標、迴避威脅，以及採取其他攻勢與守勢動作。

「任務」類別內包括達成任務之相關次要工作，如操控感測器作業或對目標發射武器彈藥。此項目相當複雜，涵蓋多種既重複又彼此連動之時間迴圈。舉例而言，戰鬥飛行員必須不斷思索當前作戰空間中的變數，是否會制約或促成當下與未來行動，再做出決定採取執行任務之行動；同時還要思考、規劃未來行動、機動作為與其他任務選項，並排定優序，以及評估預期選項對於前述決定與行動之影響。「任務」類別與「核心」及「編隊」功能彼此相互作用，決定了所望戰果。

「編隊」(Teaming)類別包括自主無人機在和其他載人與無人機搭配執行任務時，所必須具備之功能與特性。「編隊」涵括現代作戰行動中所運用之戰術與任務整合之所有要素。與框架規範中其他項目相似，任務時間與規模亦是致勝要項。在此類別中，整合參與任務之成員單獨在時間與空間中的一舉一動，達成協同一致，對取得作戰預期成效至關重要。「編隊」功能包括以編隊方式飛行與機動、在編隊成員或外部單位間分享情資，同時協同編隊成員，在作戰空間

中發揮綜效。

自主能力五級制

綜上所述，建議將三大類各分為五個級別自主能力，從一級(Level 1)具備低度自動化能力至五級(Level 5)具備全自主能力。

汽車產業界也採行類似分級模式。美國國際汽車工程師協會(Society of Automotive Engineer, SAE)的「駕駛自動化」(Levels of Driving Automation, J3016)框架規範中，定義六個級別之駕駛自動化，從零級的無自動化，至五級為完全無需人類駕駛操控之全自動化。

無人機「作戰人員觀點」類別參考米契爾汽車公司(Mitchell International)曾提出三個級別之自動化與兩個級別之自主能力之汽車自動化框架規範。無人機自動化即為依使用者指令輸入預設規則，所採取之單項或多項行動。自動化則是依更普及的規則條件，汲取多種來源產出的大量資料，透過層層相連的決策演算，將輸入指令轉為動作輸出。依照決策能力漸增順序，一級是低度自動化；二級為部分自動化；三級為全自動化；四級為半自主能力；五級為全自主能力。

即便系統達到全自動化，仍須有人擔任監督角色，以防萬一；熟悉先進飛行管理系統、自動飛操與自動油門的各參與方人士，皆能瞭解前述自動化之程度。從起飛、爬升、巡航、下降、進場到落地，無人機會依人員所下達指令，而準確完成各項任務。

至於四級與五級自主能力，此時的無人機系統不須預設指令即會自主運作。人員仍可指揮



無人機動作，惟下達的是「任務式指令」或為達戰果所指派的工作指令，無須採取單一特定動作之操作與指示。無人機會決定遂行任務之順序與方式，其中某些工作可能就會略過。無人機會感應週遭環境、自身狀態(如燃油存量)，甚或是其僚機在「決策」環節中之舉動。因此，一個半自主或完全自主無人機系統的行為有其邏輯性，但並非總是可預測。四級半自主與五級自主能力間的差異，在於無人機系統在管理任務過程中，處理可能發生之不預期狀況的能力強弱，並視長機須介入監督與下達指令之程度而定。

運用分級制可協助航太工程師、技術人員與作戰人員更精確描述與瞭解無人機能力範圍。從「作戰人員觀點」整理出之標準規範與說法，將成為溝通基礎，讓工程師、高層領導者、決策者與產業界人士，瞭解作戰人員如何在實際作戰中運用無人機。

框架規範之工程師觀點

在詮釋工程師角度時亦可採用相同作法。「工程師觀點」(Engineer View)可在研發無人機系統時，指引發展方向，確保其設計功能與技術相契合，以符合作戰人員預期之運用作法。

下列段落為舉例說明「工程師觀點」中「核心」、「任務」與「編隊」的自主能力類別中有關之功能、技術與資料，進一步具體描述彼此關連。

「核心飛航」之主、次要功能包括維持無人機高度、調整其俯仰角度、進行協同轉彎、偏轉操縱面與調整發動機動力。執行前述功能所需之

必要技術，包括線傳(Fly-by-wire)飛控、大氣資料感測器與一臺數位飛行電腦。「核心飛航」的自動特性，會需要平時人員可判讀之飛航儀表所顯現之相同資料，如無人機高度、空速與轉彎角度表等，還有更詳細的資料，如滾轉、俯仰與偏航之角度與速率表。

「核心導航」的自動特性，可由規劃飛行路徑、航點跟隨，以及相對其他航空器之導航等功能輔助。相關技術則包括相機、雷達與航路規劃演算。為發揮導航功能，無人機系統必須取得機體目前位置、高度、空速、任何已知障礙物或威脅之地面速度與位置，以及指定空域與禁航區之邊界。相對導航則需要與「自主無人機編隊」編隊的載人與無人僚機、其他友軍與敵軍威脅之間距離、接近率與方向等資料。

在「任務」類別中，相關功能包括感測器運作與決定無人機機載感測器效能、目標識別與任務排序最佳位置。運用技術包括感測器、處理感測器資料之硬體與軟體、任務最佳效能演算，或自動識別目標的自主訓練神經網路。「任務」類別所需資料可包括無人機姿態模式、目標距離、彈藥存量，以及「教導」電腦系統排序與決策演算之訓練資料。

在「編隊」類別中，功能分析將決定與編隊中各僚機或其他載臺可以分享的資訊，俾利執行如共同接戰目標等任務期間工作項目之分配與協調。分享此類資訊所運用之科技包括整合機載資料之電腦，以及分派工作項目之演算，以及傳送資料之無線電。所需資料包括目前位置、僚機位置、感測器原始與分析後資料，或經過驗證

之戰術戰法資料庫。

實際上，「工程師觀點」才能將預期作戰能力，轉化為軟、硬體組件，打造出足以部署成軍的系統。

建議與結論

為發揮框架規範最大成效，相關人員須超前並持續密切合作，俾在無人機系統的壽期內，使作戰人員與工程師更加契合。建議以下四項步驟以達成此項目標：

一、美空軍須建立自主能力的框架規範，俾為次世代無人機的作戰需求指導定義、購案、作戰概念(Concept of Operations, CONOPS)與相關戰術、戰法與程序(Tactics, Techniques, and Procedures, TTP)之撰擬。空軍作戰人員、航太工程師與採購專業人員間目前應設立框架規範，俾利在自主能力及其運用於未來「載人與無人編隊」作戰概念與航空器之方式上協助彼此取得共識。

二、前述建議採用不同觀點所具擬之框架規範模式，以促進作戰人員、技術專家與航太工程師合作。此框架規範是從作戰飛行員思維與功能著眼，可協助作戰人員以其熟悉的作戰術語，瞭解自主無人機系統，並將其作戰方面的看法，轉達給技術專家與航太工程師，引導系統發展方向。此舉有助於各方溝通合作、加速發展具有「載人與無人編隊」能力之無人機，並且可儘速成軍，而不會侷限作戰人員與工程師。

三、美空軍主管戰略規劃的參謀次長(AF/A5)應擔任此框架規範之權責主管，並與主管作戰

的參謀次長(AF/A3)、空戰司令部(Air Combat Command)與全球打擊司令部(Global Strike Command)協力合作。AF/A5擁有職權與作戰專業，可運用其作戰經驗豐富之幕僚與專案團隊，將自主能力框架規範，有效施行於各相關單位。在空軍參謀部幕僚單位中，AF/A3與各作戰單位、美空軍作戰中心(Air Force Warfare Center)與各主要作戰司令部關係密切。AF/A5與AF/A3可共同推動、執行「整合作戰人員與工程師觀點之無人機自主能力框架規範」，並將其納入軍種作戰需求定義與採購、研發程序中。

四、美空軍全軍各相關單位應採用此框架規範，視其為研發與實驗自主能力的指導，並作為研擬新作戰概念與戰術、戰法與程序時之參考。要完全發揮此框架規範成效，AF/A5與AF/A3之幕僚、作業人員、採購專業人員、技術專家與業界人士，必須在具擬需求定義、採購與研發壽期的全般過程中緊密合作與互動。在無人機壽期全程運用此框架規範，以激發更多創意，因為作戰人員與技術專家得以透過合作，研發具備創新概念之自主編隊無人機，以及規劃相關作戰概念、戰術戰法與程序、成軍實驗，持續不斷進行現代化升級。

作者簡介

David A. Deptula備役中將為華府智庫米契爾航太研究所(Mitchell Institute for Aerospace Studies)所長。

Heather R. Penny為該所資深研究員。

Christopher Olsen少校為美空軍軟體發展長室現役軍官。

Reprinted by permission from *Air Force Magazine*, published by the Air Force Association.