

第三章 制空與防空作戰

舒孝煌、洪瑞閔*

壹、前言

制空權指運用各種手段壓制對手的空中戰力，以維持目標空域的空
中優勢，防空作戰則是阻止對手運用空中手段打擊我方或獲取空中優勢。
未來科技將使制空權大為改觀，這些科技包括新一代的空中作戰平台、防
空系統等。新作戰概念也將引領未來空戰潮流，包括將人工智慧運用於空
戰，協助飛行員減輕負擔，並加快決策處理的程序，由 AI 決定是否發動
攻擊；有人機與無人機結合，同樣也可減少我方飛機曝露在敵方防空火力
之下，由無人機代替執行危險的任務；長程空中打擊武力將運用在對地及
對海打擊上，大幅延伸空權的運用範圍。目前，各國的第 5 代戰機雖然尚
在服役，或仍在發展中，但先進國家已經前瞻未來的空防威脅，開始發展
更先進機種，以期保持與對手的領先優勢。在地面防空系統方面，各種新
式的武器，如定向能武器等，將會運用在防空上。因此，未來的維持制空
權的作戰，可能會以與現在作戰環境完全不同的樣貌進行。

貳、未來空戰趨勢

目前世界各主要國家戰機都朝向匿蹤等 5 代戰機發展，然而不僅是新
式空戰平台，新的空戰趨勢，包括運用人工智慧、結合有人機及無人機，
都將是未來發展的趨勢。

* 舒孝煌，中共政軍與作戰概念研究所助理研究員，負責本章第貳、參、肆節第一部分美國部分；洪瑞閔，國防戰略與資源研究所助理研究員，負責本章前言、第參、肆節第二部分歐洲部分、小結。

一、運用人工智慧的未來空戰

美國國防部 DARPA 展示未來美國空權上的重大進展，DARPA 與美國空軍在 2020 年 8 月 20 日進行一場空中纏鬥實驗，由飛行員對抗人工智慧（Artificial Intelligence, AI），共有 8 個團隊參加，包括洛克希德馬丁公司（Lockheed Martin）及波音公司（Boeing）等國防大廠，後由一家馬里蘭州的「蒼鷺系統」公司（Heron Systems）獲勝，結果在人類飛行員與 AI 飛行員的對抗中，以「5：0」戰果完勝。¹

這項技術實驗稱為「空中戰鬥演進」（Air Combat Evolution, ACE），目的在研究 AI 運用於最新的空戰技術。由於視距外空對空飛彈的運用，空戰已逐漸被遺忘。由於感測器及融合技術的運用，過去「1：1」空戰場景應該不會再復見，DARPA 表示，這項研究目的在運用 AI 協助軍方在空中纏鬥中，找出更佳進攻技巧，以及更有效率的戰術戰法，同時也讓 AI 獲得人類的尊重，未來讓 AI 與人共同作戰。

想像一下未來空戰，人工智慧的發展在許多領域可增強人類思想和行動的能力，包括聯合空中武力的指揮與管制（command & control, C2）。為在未來的戰爭中取得勝利，各國將需要具備以壓倒性速度跨越多個領域製造多重困境的能力，並拒止敵人。人工智慧將提供 C2 部隊所需的認知敏捷性。

除美國外，中國和俄羅斯是另外兩個大力投資 AI 的國家，它們透過在 AI 和機器學習技術上的大量投資積極參與增強其未來的防空能力。2017 年，俄羅斯總統普欽（Vladimir Putin）表示：「無論誰成為人工智慧和網路空間的領導者，都將成為世界統治者」。中國也試圖在人工智慧發展的國際競爭新階段中，掌握戰略主動性。²

¹ “AI pilot shoots down F16 Top Gun to win first ever USAF dogfight simulator competition as human pilot says he can’t cope with the robot’s aggressive tactics and warns ‘the things we do as fighter pilots aren’t working’,” *Dailymail*, August 21, 2020, <https://www.dailymail.co.uk/news/article-8649133/AI-pilot-BEATS-USA-F16-Gun-simulator-dogfight-competition-run-DARPA.html>.

² “Machine Learning, AI to Lead Future Air Warfare,” *Aviators Buzz*, September 9, 2020, <https://www.aviatorsbuzz.com/machine-learning-ai-to-lead-future-air-warfare/>.

在此領域中，AI 的核心元素是 C2。這使各國家空軍能夠攔截侵犯其領空的對手，嚇阻敵人並快速發動攻擊。如今，許多國家正在使用無人機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）進行此類行動。無人機配備推進系統、慣性或 GPS 導航、感測器、光學攝影機、可編程控制器、自動飛行系統。所有這些設備，均與旨在執行明確任務的計算機程序連接。

2018 年，《消息報》（*Izvestia*）報導說，俄羅斯空軍已經首次成功測試了裝有 AI 元件的防空自動管制系統（ACS）。該系統旨在自動分析空中情況並提供使用武器的建議，目前俄羅斯正計畫在 S-300 和 S-400 以及 Pantir 機砲防空系統中引入該系統。

北約已決定將在 2035 年之前以人工智慧裝備取代現有空中預警管制系統，現有的 E-3 預警機是美國發展，用以巡弋歐洲領空，並在阿富汗等地對抗恐怖組織，其表現至為出色，但北約認為需要更新及擴大其戰力。印度空軍（IAF）也在開發一種機載預警和控制系統（AEW & C），稱為「Netra」，裝置在 ERJ 145 飛機上，具有識別敵我識別（IFF）、電子和通信支援措施，C 波段視線和 Ku 波段衛星數位鏈路等功能。

越來越多國家投注在以人工智慧為基礎的航空系統發展上，未來空戰情節可以想像成一種機器主導的活動，而不是人類的參與。大數據（Big Data）和人工智慧技術正以驚人的速度發展，將會對戰略、作戰和戰術決策流程具有重大的潛在影響。這在作戰上的效益可能是巨大而多樣的，但目前尚未看到人工智慧技術的全部潛力，要使其功能成熟，仍需要時間。

二、先進長程打擊能力

除戰鬥機的空戰之外，由於中國在西太平洋地區以戰機及電偵機襲擾東海、台灣、南海等地區，為因應太平洋地區廣大海域環境的作戰需要，美國在西太平洋的空中活動也大為增加，其中包括 B-1 及 B-52 轟炸機的「動態武力運用」，使美國在西太平洋的軍事部署，成為「戰略可預測、戰術不可測」的部署模式。其中重點即在於發揮轟炸機航程長、載彈量大的特點，可以比海軍航空母艦更快速地部署至西太平洋或是南海等地，

迅速壓制或嚇阻情勢。由於其載彈量大，一架可以攜帶 AGM-158 飛彈達 24 枚，使其具備大量並快速壓制對手的能力。B-1 進行長程精準打擊的能力，已連續在 2018、2019 年在敘利亞成功發射 AGM-158 打擊遠程目標，而 AGM-158 的反艦型式，也賦予 B-1 轟炸機打擊海面目標的能力，使轟炸機可以實現「以空制海」的戰略運用。

正是因為長程轟炸機重新被重視，美國空軍決定重啟轟炸機計畫。2015 年 10 月，美國空軍宣布將「長程打擊轟炸機計畫」（Long Rang Strike Bomber Program, LRS-B）合約授予諾斯洛普格魯曼公司（Northrop Grumman），並賦予編號為 B-21。B-21 採用與 B-2 類似的全翼設計，但採用推力更大的 F135 發動機，與 F-35 所使用的發動機相同，不過可能因為強調優異的匿蹤設計，而影響進氣道的效率，需重新設計。³ 另外，B-21 也具新一代感測器、電腦處理器、電子系統、運用 AI 的資料管理系統等，由於其優異的匿蹤設計，可以深入敵境，打擊敵方防空網及強化防禦的區域。B-21 是美國空軍現代化優先計畫的其中一項，目的在保持美軍核武及傳統武力打擊的優勢，⁴ B-21 原型機曾在 2020 年初公開，但試飛時間將延後至 2022 年。⁵ 在現有機隊方面，美國空軍也要為 B-52 轟炸機延壽，也在評估 B-1 結構壽命，原本預計在 2032 年讓 B-1 退役，但若結構評估認為 B-1 能達到 28,000 小時的使用壽命，則將可能成為搭載視距外打擊武器的優異載台，未來尚可運用如 AGM-183 極超音速飛彈，使美國轟炸機部隊能力進一步提高。⁶

3 “Some ‘hiccups’ with engine design, but B-21 on track, Wittman says,” *Defense News*, March 7, 2018, <https://www.defensenews.com/air/2018/03/07/some-hiccups-with-engine-design-but-b-21-on-track-wittman-says/>.

4 “Senior leaders visit B-21 design, development headquarters,” USAF, March 9, 2020, <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/2105385/senior-leaders-visit-b-21-design-development-headquarters/>.

5 “USAF postpones B-21 stealth bomber first flight to 2022,” *Airway1*, September 2, 2020, <https://www.airway1.com/usaf-postpones-b-21-stealth-bomber-first-flight-to-2022/>.

6 “B-1B Structural Fatigue Test to End Next Year After Simulated 73 Years of Flying,” *Airforce Magazine*, November 17, 2020, <https://www.airforcemag.com/b-1b-structural-fatigue-test-to-end-next-year-after-simulated-73-years-of-flying/>.

三、有人機與無人機團隊

無人機是否可取代有人機，一直是爭議議題，有人指出無人機便宜及可耗損的特性，可以大量取代有人戰機，不需花費鉅資採購諸如 F-35、B-21 這樣的先進戰機或轟炸機，這樣的論點尚無法得到技術支持。不過未來空戰應會是有人機與無人機的搭配，有人機上的機員操作低成本的無人機，深入敵境執行危險的任務，如密接支援或防控制壓等任務。⁷

有人機與無人機的搭配方式，很可能改寫未來空戰戰略。⁸ 採購大量低成本、可改裝的無人機，有助於該軍種增加其機隊規模，歷如 XQ-58 「女武神」(Valkyrie) 之類的可攜式無人機，將具備 3,000 哩的航程，並可攜帶相當於重達 1,200 磅的武器，或是其他任務系統等的有效載荷。XQ-58A 可透過加密數據鏈直接與 F-35 鏈接，在飛行員控制下成為他的「忠誠僚機」(Loyal Wingman)。美國目前已在發展多種型式的忠誠僚機，例如 XQ-58 以次音速飛行，具匿蹤外型，有極大內部酬載能力，而且成本便宜，僅 2~300 萬美元，波音則在發展「空中武力團隊」(Airpower Teaming System, ATS)，這是美國空軍「低成本可耗損打擊展示計畫」(Low Cost Attributable Strike Demonstration, LCASD) 項下的一環。⁹

無人機可前進偵察，協助發現、標定、追蹤並提供目標資訊給有人的作戰飛機；執行干擾敵方雷達任務；進行武器打擊戰果及毀傷狀況評估；充當誘餌，吸引敵方防空砲火；擔任通信節點；執行防控制壓任務。「忠誠僚機」甚至可獨立執行其他任務，以提高戰機的生存性和殺傷力。

無人機可以從集裝箱式由軌道發射，在不使用跑道的情況下使用降落傘回收，因此，也將減少對機場的依賴。這是一項至關重要的能力，因為

⁷ Mark Gunzinger, "Drones = Help For Manned Fighters & Bombers, Not A Substitute," *Breaking-defense*, November 2, 2020, <https://breakingdefense.com/2020/11/drones-help-for-manned-fighters-bombers-not-a-substitute/>.

⁸ This Experimental Drone Could Change America's War Strategy, *Popular Mechanics*, Mar 17, 2020, <https://www.popularmechanics.com/military/a31122720/kratos-xq58a-valkyrie-future/>.

⁹ "F-15 Eagle Seen Loaded With Loyal Wingman Drone For Previously Unknown Tests," *The Drive*, July 21, 2020, <https://www.thedrive.com/the-war-zone/34982/highly-modified-air-launched-loyal-wingman-drone-tested-with-air-force-f-15-eagle>.

中國或俄羅斯可運用飛彈對防禦不足的戰區空軍基地實施襲擊，將會嚴重削弱其戰力。

無人機的吸引力在於其成本相對較低，航程長且適合無跑道操作，使其成為有價值的補充裝備，但不會是第 5 代飛機的替代品。不過無人飛行器有助創造高低性能混合編組的能力，並於作戰時提供獨特價值。

依美國航太大廠如諾斯洛普格魯曼公司等，已開始想像未來的空戰樣貌，下一代空優戰機會比現有戰機更為先進，包括整合式感測器模組，及與其他單位快速處理、開發並共享動態作戰場景的能力。某些消耗式無人機也可能配備整合式感測器和資訊融合模組，但是其單位成本可能會增加到千萬美元以上，而超出被視為可消耗的合理門檻。可攜式無人機若運用吸收雷達波塗層、雷達反射外形，或其他允許第 5 代飛機在高威脅環境中生存的功能，將進一步增加其成本。

考慮到中國和俄羅斯的軍隊和軍事基礎設施的規模，在未來的大國衝突中，美國空軍需要執行的目標打擊數量可能超過過去 30 年所有空戰中的總和，這增加美國空軍對戰機攜帶更多武器的要求。例如，B-2 轟炸機在不實施空中加油時的最大航程為 6,000 哩，有效酬載可達 4 萬磅，包括 80 枚 500 磅炸彈或更多的 250 磅小直徑炸彈（SDB）。這也是美國空軍計畫採購下一代 B-21 轟炸機的關鍵原因。相較之下，一架具有 600~1,200 磅有效酬載的無人機，每飛行架次可攜帶 2~4 枚 SDB 大小的武器。儘管開發攜帶更多武器的無人機沒有技術限制，但是這會大幅增加無人機的尺寸，因為需要更大的武器艙以及攜帶更多燃料以保持其長程飛行能力，這將增加其單位成本，也必須從跑道上起飛，從而抵消其可消耗的優勢。

美國空軍應該持續發展一系列無人機，並能完成現有無人機無法執行的任務，例如進行大規模的無人機空戰，並可在機場之外起降。這種作戰能力和靈活性在未來與中國或俄羅斯的衝突中至關重要。

參、下一代空戰平台

目前美國及歐洲都在發展下一代戰機，但未必可定位為「第6代」戰機，有些可能僅能算是「5代半」戰機，因第6代戰機的概念與技術仍在發展中，不過由於未來空防挑戰增加，因此除美國海、空軍外，歐洲則包括德、法，以及英國，也形成2個團隊，競相發展未來空中作戰平台。

一、美國的6代戰機計畫

美國空軍目前正採購 KC-46 空中加油機、T-7 先進教練機、F-35 聯合打擊戰鬥機等新型機種，但目前美國空軍的最高優先戰略還不是這些，其中包括核武現代化、先進戰鬥管理系統，以及新的採購戰略。

美國空軍已開始進行「下一代空中優勢平台」（Next Generation Air Dominance, NGAD）的全尺寸原型機快速發展工作，即將進行首次飛行。另外空軍高階領導人也將決定是否進入「數位世紀系列」（Digital Century Series）的採購計畫，這將使空軍可以快速向多家公司採購小批量的飛機。

美國空軍擬議「數位世紀系列」擬借鏡過去，改寫 F-22 和 F-35 的歷史。「數位世紀系列」的新採購戰略，從根本上不同於目前 F-35 和 F-22 的部署方式。這種變化可以理解，因為 F-35 及 F-22 在開發過程中都經歷巨大的成本增加和進度延遲。這種延遲部分要歸因於同時運用多種革命性功能，而不是在不同飛機上漸進式改良，或在單一型式飛機上進行採購。即使是在研發後，飛機的維護和升級成本也很高，高昂的初始開發成本還只是總壽期成本的一小部分。

與現今戰鬥機形成鮮明對比的是，1950 年代的「世紀系列」特點是快速發展、突破性創新，有時是失敗。最初的「世紀系列」至少生產 10 項新設計，包括第一架超音速戰機、第一架攜帶核武的戰術飛機，以及第一架真正將雷達和武器系統整合到設計概念中的飛機。進行新設計的時間表則相當快，原型開發後 5 年內即試飛，在 10 年內生產達 5,000 多架飛機。

世紀系列的速度，至少部分是因為願意接受失敗而實現。至少有 4 個新設計從未生產出真正的飛機，生產的幾個設計則遭受了大量戰鬥和意外損失。儘管存在這些失敗，但最初的世紀系列證明，面對技術和需求的不確定性，快速並行開發提供靈活性，而且至少有一些技術，可以用在未來的系統。¹⁰

美國空軍以敏捷開發、開放式架構和數位工程的「三合一」特徵，描述「數位世紀系列」。新的「數位世紀系列」旨在利用模組化「隨插即用」硬體和軟體、計算機輔助設計，以及虛擬建模和仿真技術，以加速新型戰機發展，快速獲取新技術，縮短現代化周期，並減少繁瑣的整合和實際測試，以免使研發陷入困境。最初的世紀系列旨在掌握當時的關鍵新興技術，包括噴射推進和超音速飛行的革命性改進，這對冷戰中核子轟炸機和防禦攔截系統的競爭至關重要。但隨著長程飛彈，太空瞄準和網路作戰的出現，有人戰鬥機不再具有同樣的戰略重要性，當今對等的技術可能是無人機、人機協同，以及指揮管制網絡，以實現重組飛行部隊。¹¹ 另外，定向能武器也將成為未來戰機的標準配備。

美國空軍官員已經證實，正在祕密設計及發展至少一架 NGAD 原型機，甚至可能已在試飛，這是 F-35 原型機首飛 20 年後，美國空軍首度再有新戰機升空。在 NGAD 的分類中，空軍為部署一系列連結空戰系統（包括戰鬥機、無人機、太空或其他網路平台）所做的努力，不過目前飛機細節還不為外界所知，美國空軍也拒絕評論有多少原型機正在試飛、哪些廠商生產，以及飛機的各種特性，例如任務、是否為無人機或可選擇有人操作，是否具備極音速飛行能力，以及匿蹤設計的特點等。不過重點是，美國空軍只進行了一年的分析，就已證明可以運用最先進技術來製造並測試，建造一個完整的原型機，以及進行試飛，這也會是第一種運用三合一技術發展的戰機。更重要的是，這些先進製造技術是商業部門所開創，所

¹⁰ “The Air Force Digital Century Series: Beyond the Buzzwords,” CSIS, November 8, 2019, <https://www.csis.org/analysis/air-force-digital-century-series-beyond-buzzwords>.

¹¹ “JUST IN: Air Force ‘Digital Century Series’ Acquisition Concept Nearing Milestone,” *National Defense*, July 14, 2020, <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2020/7/14/air-force-digital-century-series-concept-approaching-new>.

以可能會為未來新的合約商，比如說 SpaceX，成為設計 F-35 競爭者的新公司。¹²

二、歐洲的未來戰機計畫

歐洲則形成英國及歐陸以法德國兩國為首的兩大系統競爭，但嚴格來說，該兩套系統都屬 5 代半戰機。英國貝宜航太系統公司（BAE Systems）在 2018 年推出「暴風」（Tempest）戰機全尺寸模型，預計 2035 年達到初始戰力（initial operating capability, IOC），2040 年取代歐洲戰鬥機（Eurofighter），並外銷國際市場，預計可服役至 2070 年以後。暴風戰機將使用虛擬實境座艙、機器學習技術，並配備定向能武器。暴風戰機亦採用有人機—無人機協同操作概念，可運用蜂群技術來控制無人機，另一項技術是「協同接戰能力」（Cooperative Engagement Capability），即在戰場協同操作、共享感測器資訊，並協調攻擊及防禦戰術。暴風戰機配備自適應循環發動機（adaptive cycle engine），另外，勞斯萊斯公司（Rolls-Royce）將為暴風戰機配備新式嵌入式電啟動發電機（Embedded Electrical Starter Generator, E2SG），可節省機體空間，並產生更大電力，以因應未來戰機的電力負荷，包括定向能武器，或是更多的感測器。¹³

暴風戰機有比現有 5 代戰機更佳的匿蹤設計，但仍保留雙垂直尾翼，以維持戰機的可操縱性。暴風戰機為雙發動機配置，由風洞測試模型，可看出其採用 S 型尾管，以減少紅外線訊號。¹⁴ 目前已有 7 家公司加入暴風戰機團隊。

¹² “The US Air Force has built and flown a mysterious full-scale prototype of its future fighter jet,” *Defense News*, September 15, 2020, <https://www.defensenews.com/breaking-news/2020/09/15/the-us-air-force-has-built-and-flown-a-mysterious-full-scale-prototype-of-its-future-fighter-jet/>.

¹³ “Rolls-Royce develops world-first electrical technology for next-generation Tempest programme,” *Royal Air Force*, January 9, 2020, <https://www.raf.mod.uk/what-we-do/team-tempest/news/rolls-royce-develops-world-first-electrical-technology-for-next-generation-tempest-programme/>.

¹⁴ “Tempest windtunnel testing shows design detail,” *FlightGlobal*, August 2020, <https://www.flightglobal.com/defence/tempest-windtunnel-testing-shows-design-detail/139867.article>.

以法國為首的未來空中戰鬥系統（Future Combat Air System, FCAS）為一套著眼 2040 年空中作戰需求的第 6 代戰機研發計畫，最初是法國總統馬克宏（Emmanuel Macron）與德國總理梅克爾（Angela Merkel）在 2017 年 7 月提出共同開發歐洲空中戰鬥系統的倡議，在 2018 年 4 月達梭航太（Dassault Aviation）與空中巴士集團旗下的空中巴士防衛與太空（Airbus Defence and Space）正式簽署協議開始進行雙邊合作，西班牙則自 2019 年 2 月起加入 FCAS 計畫。

作為一個三國聯合開發計畫，FCAS 能夠回應參與國家的各項需求。對法國而言，目前所使用的颯風戰機，預計在 2060 年左右退役，因此，巴黎需要尋找自 1998 年以來在海軍、自 2006 年以來在空軍服役的颯風戰機的後續機種，事實上，預計在 2024 年的颯風戰機 F4 版本，它將改善飛機的連結性、電子戰能力和雷達效率，就可說是向 FCAS 邁出的第一步。此外，FCAS 也必須要承擔法國核嚇阻的任務。

德國則需要為其歐洲颯風戰鬥機準備繼任計畫，預計與法國的颯風戰機同時退役，FCAS 的設計也必須要能夠使德國繼續執行北約架構下的核子打擊任務。西班牙的 FA-18A/B 大黃蜂（Hornet）戰機即將於 2025 年退役，也必須尋求新機。

除了必須具備攜帶核子武器的能力以外，FCAS 瞄準 2040 年後的戰爭型態與空戰所需要的多功能角色。隨著俄羅斯在探測系統與反飛彈系統上的日益精進，¹⁵ 其「反介入／區域拒止」（anti-access/area denial, A2/AD）能力不斷提升，以及此類武器的擴散，大幅度提升了入侵敵方空域的難度。除此之外，戰機的匿蹤性增加、敵人系統性地使用網路、無人機群以及高超音速飛彈進行防禦，未來挑戰將是維持空優的能力，並將其與陸／海／太空防禦與網路能力進行整合。

FCAS 的另一重點在於成本考量。被選入 FCAS 計畫的法國賽峰集團（Safran S.A）與德國 MTU 航空發動機公司（MTU Aero Engines），其所

¹⁵ 如寬頻雷達系統（Wideband Radar）與俄羅斯的 S-400 防空飛彈系統。

進行的第 6 代戰機發動機先期研究計畫「Turenne 2」便已斥資 1.15 億歐元。¹⁶ 2020~2025 年的原型機開發階段預計將投入 40 億歐元，至 2030 年投入總金額將至 80 億歐元，總成本預估在 500~800 億歐元之間，對於單一國家的財政來說是難以負擔的，透過聯合開發計畫一方面可將研發成本平均分攤至各參與成員國，也可透過大規模生產降低單位成本。

FCAS 的整體系統尚在概念發展階段，其中「下一代武器系統」(Next Generation Weapon System, NGWS)，可分為如下元素：

- (一) FCAS 是具備執行攔截、空對空以及核嚇阻任務能力的戰機，因此仍將是有人駕駛，主要是考量到許多情境下的決策往往涉及高度的政治性，無人駕駛系統還面臨到遠端數據鏈結遭到干擾或破壞的風險。
- (二) 發動機的性能提升。FCAS 的目標是至少開發出最大推力為 12 噸的發動機，因應裝載「下一代武器系統」後的重量增加。如何在超音速狀態下保持強大推力與降低低空巡航時的油耗量，也就是提升發動機的空氣循環技術，則是另一重點。
- (三) 由一群大小不等的無人機群所組成的「遠端載台」(remote carrier)，這些無人機具有滲透、引誘、任務執行前的情報蒐集、攻擊的不同能力，透過 AI，具備一定的自主能力，應對各種情況。雖然駕駛員目前依舊是系統運作的核心，但 FCAS 計畫將人工智慧視為提高人類能力的手段。2018 年 3 月法國國防部下轄的「武器裝備總署」(Direction générale de l'armement, DGA)、達梭系統(Dassault Systèmes)、泰雷茲集團(Thales)開始進行「人機協作」計畫(Man Machine Teaming, MMT)，其中聚焦於未來駕駛艙與獨立系統、飛行認知系統(cognitive air system)，以及智能學習感應器(smart / learning sensors)的概念與技術。¹⁷

¹⁶ Michel Cabriol, "La France et l'Allemagne vont notifier le premier contrat du SCAF à Dassault et Airbus," *La Tribune*, February 5, 2019, <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/aeronautique-defense/la-france-et-l-allemande-vont-notifier-un-premier-contrat-scaf-a-dassault-et-airbus-806266.html>.

¹⁷ "France launches Man-Machine-Teaming programme to develop AI for combat aviation," *Airforce Technology*, 20 March, 2018, <https://www.airforce-technology.com/news/france-launches-man-machine-teaming-programme-develop-ai-combat-aviation/>.

(四) 以「空戰雲端」(Air combat cloud) 將所有作戰平台相互連結以達成聯合作戰，「空戰雲端」面對網路攻擊的抵禦能力也是關鍵要素之一，「下一代武器系統」可能必須在相當受限與擁擠的電磁環境下進行，這使得無網路連結運作的可能性必須要納入考量。FCAS 在作戰時將運用比現在更少的主力戰機，而以「遠端載台」當中的各式無人機取而代之，進一步減少損失，並增加作戰彈性。

儘管遭遇到新型冠狀肺炎 (Coronavirus Disease 2019, COVID-19) 的威脅，目前 FCAS 計畫正處於為期 18 個月的第 1A 階段，¹⁸ 除了針對西班牙的參與部分進行確認以外，法國與德國政府於 2020 年年初共同出資 1.55 億歐元，用以支持 FCAS 的研發工作。¹⁹ 相關國防企業的參與 (表 3-1)，FCAS 的研發以七大支柱的方式組織，每一個支柱代表不同的技術重點，其中將至少有一個領導企業與一個主要夥伴，藉以達成政治上的平衡，並收集思廣益之效。

表 3-1 FCAS 計畫國防廠商參與情況

支柱名稱	開發廠商	
	領導企業	主要夥伴
戰機	達梭航太	空中巴士
發動機	賽峰集團	MTU 航空發動機公司
「遠端航母」	空中巴士	歐洲導彈集團 (MBDA)
空戰雲端	空中巴士	泰雷茲集團
感測器	英德拉 (INDRA)	泰雷茲集團
隱形技術	未定	未定
支柱間協調與模擬	達梭航太、空中巴士、賽峰集團、MTU 航空發動機公司	

資料來源：洪瑞閔整理自 Sénat, “Rapport d’information sur le système de combat aérien du futur (SCAF),” July 15, 2020。

¹⁸ 在 1A 階段之後，1B 階段將會定義 FCAS 原型機的架構。下一個階段 (第 2 階段) 將會在這此上進行製造、組裝與測試。

¹⁹ 其中近 0.9 億歐元用於戰機項目、0.18 億歐元用於發動機項目、0.2 億歐元用於「遠程航母」項目、0.15 億用於雲端項目。

肆、未來防空系統

由於飛彈攔截成本不斷攀升，為了降低攔截武器的成本，並增加運用與部署效率，以及應對日益精進的空中威脅，例如極音速武器、新式彈道飛彈、超音速巡弋飛彈、無人機等，因此發展及運用新概念的防空武器勢在必行，這包括定向能武器，例如雷射，以及電磁軌道砲等，而防禦無人機的迫切需求，也使反無人機系統快速發展。

一、定向能武器

一般而言，定向能武器係指雷射。雷射武器以熱效應的邏輯進行運作，將雷射光束集中在物體的表面，使其溫度升高，最終以燃燒或融化的方式達成穿透的效果。目前所有正在試驗中的雷射武器需要幾秒鐘的照射時間以摧毀無人機與火箭，它們的功率大約為 10~30 千瓦 (KW)，隨著面對的武器系統的精密與複雜（如飛機、船艦或車輛），其所需要的能量也越多。

在作戰上，雷射武器具有諸多不可忽視的優勢。第一，雷射武器的指向性 (directivity) 極高，可以進行長距離射擊（理論上可達數幾百公里），而不會產生能量分散；第二，與其他彈藥（砲彈或飛彈）相比，雷射武器每發射擊的成本幾乎可以忽略不計，其成本估計不到 1 美元，這使得雷射武器在替代昂貴的短程地對空飛彈相當更具優勢；²⁰ 第三，雷射的功率可以根據需要（是否能夠致命）和目標類型（小型無人機或飛機）進行調整，具備高度彈性。

但是雷射在作戰應用上仍有許多缺點。首先，在大氣環境中使用雷射武器，一部分能量會被環境吸收。像所有光學系統一樣，雷射光束對天氣條件非常敏感。雲、雨、灰塵或煙霧會吸收或反射雷射光束的大部分能

²⁰ Andy Cheng, 〈美軍部署全球首款可實戰的雷射武器，每次發射成本僅 1 美元〉，《明日科學》，2017 年 8 月 4 日，<https://reurl.cc/N6gN2q>。

量，將大幅度減小雷射光束的功率與有效範圍，在某些情況下（例如濃霧或沙塵暴），雷射武器甚至完全無法使用；第二，像任何光學系統一樣，與目標之間的可見性（intervisibility）是必要的，換句話說，雷射武器必須要在直接針對目標進行射擊的方式下進行操作，其不可能被使用在與被掩蔽目標的交戰中；第三，隨著雷射武器的威力變得越來越強大，出自於每次發射之後的系統冷卻與每次發射之間的設備充電之雙重需要，發射間距拉長，不利於戰場上的發揮。

就中短期而言，前面所述的各項限制使得雷射武器目前仍難以替代現有武器成為戰場上的主角。然而，雷射武器為現代戰爭帶來新的功能與思考，可在許多情況下扮演輔助性的角色。目前雷射武器的大多數應用將不會用於破壞目的，而是將用於目標鎖定、反制攻擊、探測等用途上，效果歸納如下：

1. 非致命性的短暫眩光：以可見光譜（綠色光波）發射低功率的雷射，藉以產生暫時性的視覺干擾。
2. 光電反制措施：雷射武器可以用來使作為接受器的低功率光電感測器（optoelectronic sensor）無法運作甚至是將其摧毀。
3. 「未固化結構」（uncured structure）武器系統的破壞：根據一些研究顯示，包括無人機、飛機與小型船艦等武器系統在內，可以以約 100 千瓦功率的雷射對其進行破壞。²¹ 如美國海軍在 2014 年所開始進行測試的雷射武器系統（Laser Weapon System, LaWS），其功率約為數十千瓦，在短距離的範圍內（約 2 公里）可協助打擊來襲的無人機與小型船艦。
4. 固化結構武器系統的摧毀：面對較為強固、較為迅速或距離遙遠的目標，可以以接近兆瓦功率的雷射武器將其毀壞。

²¹ Philippe Gros, “Les armes laser : vers une entrée timide dans l’arène du combat naval à l’orée de la prochaine décennie,” *Défense & Industries*, October, 2018, <https://www.frstrategie.org/publications/defense-et-industries/armes-laser-entree-timide-arene-combat-naval-oree-prochaine-decennie-2018>.

在制空的領域上，一個可能的立即應用是將雷射武器用於輔助短程地對空防禦系統。並且可以彌補近程武器防禦系統的不足，²² 特別是用於對抗無人機與飛彈的威脅上。

（一）美國雷射武器發展

美國早在 1960 年代雷射剛剛發明時，即已在討論其在軍事上的價值，雖然當時重量、尺寸、能量都無法加以軍事化。化學能雷射可產生足夠能量摧毀目標，但必須夠大的載台來搭載，不過近幾年固態雷射（Solid-state, SSL）、光纖雷射（fiber laser）的發射，使得高能雷射的武器化已成為可能。²³

美國主要的國防廠商，如波音、洛克希德馬丁、雷神公司（Raytheon）都在發展雷射武器，並已在不同的系統，諸如史崔克（Stryker）戰鬥車、海軍艦艇，或是空軍飛機上測試了不同型式的雷射武器，陸軍甚至在 AH-64 阿帕契（Apache）攻擊直升機上進行高能雷射測試。洛克希德馬丁已將雷射武器與感測器結合至現有裝備上，用以對抗第 1 級及第 2 級大小的無人機，並將外部雷達與其指管系統連結，這顯示其實際操作的有效性。

美國海軍的努力在於提升固態雷射的成熟度、光學目眩攔截器、水面艦海軍雷射武器增量 1 階段，包括高能雷射目眩及監視系統（High Energy Laser with Integrated Optical-dazzler and Surveillance, HELIOS）、高能雷射反制反艦飛彈計畫（High Energy Laser Counter-ASCM Program, HELCAP）。HELIOS 正在紐澤西州進行系統整合，將在 2021 年整合至勃克級驅逐艦（Arleigh Burke class destroyer）上，可為艦隊提供額外的保護。依美國國會研究處 2020 年 11 月《海軍雷射、軌道砲、砲射導引彈頭》（*Navy Lasers, Railgun and Gun-Launched Guided Projectiles*）報告，

²² 如美國的方陣近迫武器系統（Phalanx Close-In Weapon System）、俄羅斯的 AK-630 近迫武器系統、荷蘭的守門員近迫武器系統（Goalkeeper Close-In Weapon System）。

²³ “Laser weapons get ready for the big time,” *Military & Aerospace Electronics*, July 23, 2020, <https://www.militaryaerospace.com/home/article/14180250/military-laser-weapons>.

雷射可提高艦艇保護其艦艇抵禦敵人的能力，用於干擾或混淆敵方情監偵系統，並對付飛彈及蜂群無人機攻擊，未來甚至可用於反制飛彈，變成海軍短程防空系統，不過它尚無法用於對抗所有的威脅。²⁴

雷神公司指出，雷射武器將會是未來層次化空防系統的核心，雷神正將高能雷射武器系統（High Energy Laser Weapon System, HELWS）配備在全地形車輛上，用以偵測、識別及擊落敵方無人機。雷神與美國空軍實驗室（Air Force Research Laboratory, AFRL）合作，將第一具 HELWS 進行戰場實驗，用於對付無人機，另一套即將接受海外部署測試的則是戰術高能作戰反應系統（Tactical High Power Operational Responder, THOR），以及洛馬的先進戰術高能裝備（Advanced Tactical High Energy Asset, ATHENA），可用於反制火箭、無人機、車輛、小艇等近迫威脅。陸軍也將在 2022 年部署配備 5 萬瓦雷射的史崔克戰鬥車，保護士兵免受迫砲、火箭、無人機的威脅。

美國空軍特戰司令部則計畫將 6 萬瓦的雷射整合在 AC-130J 砲艇機上，這顯示特戰司令部也對雷射產生興趣。另外，洛克希德馬丁公司已預計在 2025 年讓空載雷射武器實用化，用以擊落戰術武器，如空對空或地對空飛彈，並可在高速運動時仍能瞄準目標。²⁵

（二）戰術先進雷射光學系統

作為歐盟防衛署（European Defence Agency, EDA）下轄計畫「國防研究籌備行動」（Preparatory Action on Defence Research, PADR）的一部分，「戰術先進雷射光學系統」（Tactical Advanced Laser Optical System, TALOS，以下簡稱 TALOS 計畫）自 2019 年 9 月開始進行，為期 36 個月

²⁴ “Navy Lasers, Railgun and Gun-Launched Guided Projectiles,” Congressional Research Service, November 11, 2020, <https://fas.org/sgp/crs/weapons/R44175.pdf>.

²⁵ “Lockheed Martin aims to put laser weapon on aircraft in five years,” *FlighterGlobal*, September 17, 2020, <https://www.flightglobal.com/fixed-wing/lockheed-martin-aims-to-put-laser-weapon-on-aircraft-in-five-years/140204.article>.

的 TALOS 計畫由法國的雷射工業公司（Compagnie industrielle des lasers, CILAS）所主導，其中包含來自 9 個歐盟國家的 16 家參與國防企業與研究機構（見表 3-2），並得到歐盟近 540 萬歐元的財政支持。

表 3-2 TALOS 計畫參與成員

參與成員	國家	歐盟贊助資金（單位／歐元）
雷射工業公司	法國	852,922.50
TNO 應用科學研究所 （Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, TNO）	荷蘭	505,625.00
李奧納多（Leonardo）	義大利	381,200.00
德國航空太空中心 （Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt）	德國	204,205.00
歐洲導彈集團法國分部（MBDA）	法國	1,160,027.50
艾丁諮詢（Erdyn Consultants）	法國	102,500.00
捷克科學院光電與電子研究所 （Ustav Fotoniky a Elektroniky AV CR V.V.I.）	捷克	177,765.00
CMI 防務公司（CMI Defence）	比利時	52,925.00
利摩日大學（Université de Limoges）	法國	447,265.00
華沙董布羅夫斯基軍隊技術學院 （Wojskowa Akademia Techniczna im Jaroslawa Dabrowskiego）	波蘭	967,125.00
AMS 技術公司（AMS Technologies sp. z o.o.）	波蘭	89,525.00
QinetiQ 國防技術公司（QinetiQ Limited）	英國	86,525.00
空中巴士國防與航太（Airbus Defence and Space）	德國	119,833.75
AERTEC 航太（AERTEC Solutions SL）	西班牙	79,375.00
法國國家航太實驗室 （Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales, ONERA）	法國	124,980.00
Stelar 安全科技法研究公司 （Stelar Security Technology Law Research UG）	德國	47,206.25

資料來源：洪瑞閔整理自“Tactical Advanced Laser Optical System (TALOS),”
European Defence Agency, https://www.eda.europa.eu/docs/default-source/documents/20190828_padr-talos-projectweb_v2.pdf。

「戰術先進雷射光學系統」計畫的目的是為未來的研發行動提供必要的框架，制定發展關鍵雷射技術的路線圖，並確保戰略自主權和供應安全。此一路線圖將針對歐盟在雷射技術領域所遭遇的技術能力不足問題提出解決方案，以克服布魯塞爾對非歐盟國家供應商的依賴以及來自非歐盟

國家所施加的風險，特別是希望擺脫美國的《國際武器貿易管制條例》（*International Traffic in Arms Regulations, ITAR*）以及《出口管制規則》（*Export Administration Regulations, EAR*）對歐盟在雷射技術發展上所造成的限制。

此外，TALOS 計畫還將開發和展示一些關鍵雷射定向能量武器技術，為未來十年歐盟在高功率雷射效應器設計與製造的軍事應用領域奠定基礎，其中包含「高功率雷射源」（high-power laser source）、「大氣渦流補償」（atmospheric turbulence compensation）、「精確目標追蹤與雷射指向系統」等。

（三）反無人機系統

面對無人機在情報蒐集與爆炸襲擊方面所帶來的威脅，同時考量到無人機的低成本、多樣性與取得容易，雷射武器也被嘗試應用在反制無人機的領域中。如以法國為例，法國武器裝備總署以及雷射工業公司正在合作開發反無人機系統 HELMA-P，²⁶ 該武器為一套強調機動性，當無人機來襲時可快速反應的防禦系統，安裝在地面車輛上的 HELMA-P 可以協助車隊與戰術單位的護衛。HELMA-P 的目標是發展出一套多功能的雷射武器系統，除了可以擊毀來襲的無人機或光電武器系統，最終希望可以發展成對火箭、大砲與迫擊砲的有效反制工具，目前 HELMA-P 已經進入實際的測試階段。²⁷

²⁶ “L’innovation numérique,” *Actu Défense*, February 6, 2020, <https://www.defense.gouv.fr/english/content/download/576518/9863910/Actude%CC%81fense%20du%20jeudi%20%20fe%CC%81vrier%202020.pdf>.

²⁷ “HELMA-P : un système laser pour la lutte anti-drone,” *Agence de l’innovation de défense*, October 12, 2020, <https://www.defense.gouv.fr/aid/actualites/helma-p-un-systeme-laser-pour-la-lutte-anti-drone>.

二、電磁軌道砲

電磁軌道砲（Electromagnetic Railgun, EMRG）的概念很早就已經出現，但隨著材料科學與物理學的發展，才使其在軍事上的應用開始變得可能。電磁軌道砲作用原理為在一個包覆彈丸的導電靴中，當其中一條導軌通電後，其電流藉由靴型件傳導到另一條導軌，就會產生一個磁場，當中的通電彈丸就會藉著導軌的磁場作用彈射出去。就軍事上的應用而言，電磁軌道砲具有許多優勢。

第一，電磁軌道砲的砲彈砲口初速（muzzle velocity）極快，已經到達每秒 2,500 公尺以上的速度。美國海軍於 2008 年所進行的電磁軌道砲原型機首次試射，3.5 公斤的砲彈其砲口初速可達每秒 2,520 公尺。²⁸

第二，高速可以大幅度減少其飛行時間，僅需數分鐘就可以集中數百公里外的目標，提高敵人攔截的困難度。

第三，隨著速度的提高其射程也變得更遠，相較於有效射程最多數十公里火炮，電磁軌道砲的有效射程可達 200 公里以上。

第四，高速會在撞擊時產生更大的動能，帶來更佳的穿透力，因此僅依靠這種能量，便可摧毀目標。

第五，由於電磁軌道砲利用電磁能量推進砲彈，除了可以避免火藥使用的風險性，節省下來的空間可以攜帶更多的砲彈。

電磁軌道砲若應用在制空領域上，將可扮演重要角色，如可協助船艦對抗未來的超音速飛彈威脅。然而，電磁軌道砲依舊面臨許多待突破的問題。一方面，電磁軌道砲需要大量的能量，32 兆焦耳的電磁軌道砲（1 分鐘可發射 12 發）之每分鐘耗電量為 30 千瓩，除了必須要能夠及時且重複提供等量能量以外，根據射速的不同，其所需能量可能更高，這意味著必須要提供大量電力，船艦的動力系統將需重新設計，因應電力輸出的需要。

²⁸ Philippe Langlois, "Le canon électromagnétique va-t-il changer l'artillerie navale?," *Areion 24 News*, October 19, 2018, <https://www.areion24.news/2019/02/19/le-canon-electromagnetique-va-t-il-changer-lartillerie-navale%E2%80%89/>.

歐洲防衛署「國防研究籌備行動」的下一個計畫「使用電磁軌道砲增加遠程效果的砲彈」(Projectiles for Increased Long-range effects Using Electro-Magnetic railgun, PILUM)自2020年第三季開始啟動，為期共計24個月(表3-3)。PILUM計畫由「聖路易法德聯合研究所」(Franco-German Research Institute of Saint-Louis)主導，是歐洲電磁軌道砲的研究重鎮，在過去已經開發出兩種測試用系統，分別是砲口初速達每秒2,500公尺的PEGASUS與針對反艦飛彈的RAFIRA。²⁹整個PILUM計畫共有來自5個歐盟會員國家的9名成員，共獲得歐盟近150萬歐元的贊助。

表 3-3 PILUM 計畫參與成員

參與成員	國家	負責項目
聖路易法德聯合研究所	法國	電磁加速與計畫協調
戴爾防務 (Diehl Defence)	德國	砲彈製造
艾丁諮詢 (Erdyn Consultants)	法國	歐洲合作計畫管理
Explomet 高爆炸能技術研究所 (Zaklad Technologii Wysokoenergetycznych ExplometGalka, Szulc Sp.j.)	波蘭	金屬爆炸塗層 (coating of metals by explosion)
ICAR 工業用電容器公司 (ICAR S.p.A. Industria Condensatori)	義大利	高密度電容器
海軍集團 (Naval Group)	法國	系統整合
奈克斯特系統公司 (Nexter Systems)	法國	系統整合
馮卡門流體力學研究所 (The von Karman Institute for Fluid Dynamics)	比利時	流體力學與推進

資料來源：洪瑞閔整理自 Philippe Langlois, “EDA selects the “PILUM” consortium, a disruptive-technology research project for innovative electromagnetic railgun,” Naval group, June 11, 2018, <https://reurl.cc/Y65q00>。

PILUM 計畫的初始目標是以數據模擬以及科學實驗來驗證電磁軌道砲的概念，接著則進行將其整合至陸地與海上平台的研究，同時進行未來其他應用的可能性探討。因此，PILUM 計畫可說代表著歐盟邁向開發出

²⁹ Xavier Vavasseur, “EDA Launches ‘PILUM’ Research Study On Electromagnetic Railguns,” *Naval News*, May 7, 2020, <https://www.navalnews.com/naval-news/2020/05/eda-launches-pilium-research-study-on-electromagnetic-railguns/>.

真實尺寸電磁軌道砲原型機的決定性步驟，布魯塞爾希望藉由此一計畫能夠在 2028 年進行大規模電磁軌道砲的實地測試，最終開發出砲彈速度可每小時 7,200 公里的電磁軌道砲（6 倍音速）。³⁰

伍、小結

從新一代的空戰平台發展可以看出，除了主力戰機本身採用革命性技術，如更佳的匿蹤性、結合 AI、網路、雲端等技術，並配備雷射等武器，大幅提升作戰能力外，更重視其他不同平台與新技術的整合，強調的是整體的戰力發揮。未來空中戰鬥系統可以說是「多種系統的系統」（systems of system），有人機及無人機搭配的「忠誠僚機」、「遠端載台」與「空戰雲端」等平台與技術，這將是未來空中作戰的關鍵；雷射、電磁軌道砲等定向能武器，將可成為革命性的防空武器平台，解決目前在反制敵方多樣化空中威脅，例如極音速武器、彈道飛彈、超音速巡弋飛彈、無人機、迫砲、火箭等，成為另一種選項。

然而，這樣精緻昂貴的系統並非所有國家都能夠負擔，因此，對於資源與技術相對不足的國家來說，制空應該從務實的角度出發，不應該將資源浪費在相當艱鉅的新世代空戰平台的開發，而是著重低成本與高生存率，從此觀點出發，儘管定向能武器系統多數尚處於研發階段，然其研發成本相較於主力空戰平台依舊低廉許多，因此，包括雷射武器與電磁軌道砲在內的定向能武器系統，可以成為如台灣在內等小國建制不對稱防禦能力時的另一種考量。

³⁰ Yohan Demeure, L'Union européenne veut fabriquer un canon électromagnétique," *SciencePost*, July 20, 2020, <https://sciencepost.fr/lunion-europeenne-veut-fabriquer-un-canon-electromagnetique/>.

