

# 第三章關鍵軍事科技的發展

許智翔、蔡榮峰<sup>1</sup>

## 前言

古今戰史上總能找到科技差距成為戰爭勝敗決定性因素的例子，而最近的明顯例子，正是 1990 年代初期的波灣戰爭。該役展示在世人面前的，是美軍為主的聯軍在科技優勢之下以懸殊的比例，消滅了當時擁有強大陸空軍力的伊拉克軍隊，證明軍事科技維持優勢的重要性。在 21 世紀已經過了接近二十年的現在，各種軍事技術的發展又再次到了關鍵節點，當前發展的技術很可能在不久的未來大幅改變戰場的樣貌，甚至戰爭的形式。

## 壹、戰場機器人

不同於一般機器學習 (machine learning) 多處於封閉或半封閉式環境，變幻莫測的戰場屬於開放式環境，即使對於搭載人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 的機器人來說，仍然是一大挑戰。世界各國現階段尚未有任何全自動武器系統，能夠將戰術目標誤判機率維持在人類士兵同等水準，並在沒有人工涉入的狀態下，自動完成從偵測、追蹤、辨識、獨立接戰等戰場及時應處，大多仍處於人工遙控的階段。最先進的技術也僅能在相對單純的戰術環境下，完成自主偵測與殲敵任務，且無法完全脫離人工監控。

戰場機器人的性能評估共有四大面向：火力 (firepower)、機動性 (mobility)、續航力 (endurance)、通訊技術 (communications)。當前大部分的戰場機器人研發，主要目標擺在人機協同作戰，因此輔助性質多於單兵作戰，大多研究聚焦維持續航力，以及整合戰情資訊兩方面。<sup>2</sup>戰場機器人依其戰術自主程度，可分為以下三種等級：

「人工控制」(human-in-the-loop weapons)：目標選擇與火力射控皆由人類下指令。

「人工監控」(human-on-the-loop weapons)：機器人可在人類監視下，自主完成目標選擇與火力射控，必要時以人工指令介入程序。

「無人工涉入」(human-out-of-the-loop weapons)：自主完成目標選擇與火力射控，過程無須任何人機互動。<sup>3</sup>

戰場機器人與工業機器人最大的差別在於，前者需要在複雜環境當中擁有判

<sup>1</sup> 許智翔，國防安全研究院先進科技與作戰概念研究所博士後研究，負責本章第貳、參、肆節；蔡榮峰，國防安全研究院國防資源與產業研究所研究助理，負責本章第壹節。

<sup>2</sup> Horowitz, Michael C., "Military Robotics, Autonomous Systems, and the Future of Military Effectiveness," in *The Sword's Other Edge*, Cambridge University Press, 2017, pp. 161–96.

<sup>3</sup> Docherty, B., "Losing Humanity: The Case Against Killer Robots," *Human Rights Watch & International Human Rights Clinic*, November 19, 2017, p. 2, [https://www.hrw.org/sites/default/files/reports/arms1112\\_ForUpload.pdf](https://www.hrw.org/sites/default/files/reports/arms1112_ForUpload.pdf)。

別敵方單位的能力。若接戰所需的關鍵技術未達門檻，戰場機器人戰術誤判的風險，很可能導致戰略失敗而失去其運用價值。因此戰場機器人發展初期階段，可能率先投入實戰的，集中於無人載具技術與穿戴型兩大類，而是否導入支援人機協同作戰的 AI 與配備何種先進控制技術，則將決定下一代戰場機器人性能優劣。

## 一、最新發展

美國國防部 2018 年 8 月 28 日公布《2017-2042 無人系統整合藍圖》(Unmanned Systems Integrated Roadmap 2017-2042)，針對 2035 年為止，美軍應具備之「機器人與自動化系統」(Robotic and Autonomous Systems, RAS) 能力水準，提出了戰術整合概念，作為未來 20 年技術推進目標，主要內涵有以下 8 項指標。

「具有學習能力」(ability to learn)：RAS 能夠透過自動學習如何與戰鬥人員互動或適應環境。

「擴大戰況覺察」(greater situational awareness)：RAS 能夠在日趨複雜的戰場上，搜集跨領域資訊、分析整合並依重要性排序，供戰術決策使用；

「超越人類的勤務表現」(enable higher performance)：環境耐受度、持久性與資訊處理速度能優於人工控制系統。

「提升戰場效率與效能」(improve efficiency and effectiveness)：RAS 能應用的戰場類型多元化，可大幅提升部隊作戰表現。

「裝備相容更有彈性」(provide greater flexibility)：RAS 軟硬體更新與支援將更有彈性，以便配合聯合作戰部隊 (Joint Forces)。

「加快機器運轉節奏」(increase tempo by operating at machine speed)：RAS 能夠運用情報監視偵查系統 (Intelligence, Surveillance and Reconnaissance Systems) 現場資訊，進行大數據運算，搶先敵方自動部署至戰術有利位置。

「提供量產潛力」(provide potential to generate mass)：有別於現階段聯合作戰部隊使用的武器大多昂貴精密且難以短時間大量製造，RAS 較有機會以相對低廉之價格量產。

「有利分散式戰術行動」(enable distributed and dispersed operations)：考量到敵方科技發展屆時精準度與範圍已有所提升，過度集中容易遭敵實施重點打擊，透過 RAS 進行分散式戰術行動能降低任務失敗風險。<sup>4</sup>

依照上述 8 項指標，以下選出 5 種即將邁入實用化以及研發中的戰場機器人先進科技：

### (一) 無人地面載具

無人地面載具 (Unmanned Ground Vehicle, UGV) 本質上是一種地面機器人載台，目前大多屬於遠程控制，搭載 AI 後可部分自主行動。被認為可用來克服

---

<sup>4</sup> “Unmanned Systems Integrated Roadmap 2017-2042,” U.S. Department of Defense, August 28, 2018.

戰場環境的枯燥 (dull)、危險 (dangerous)、骯髒 (dirty) 的「3D 問題」。UGV 能夠長時間監視與偵查，協助提高地面作戰單位的「戰況覺知」(situational awareness)、減輕兵員荷重來提高戰場效能與機動性、強化第一線後勤補給能力。搭載火力的 UGV 還能掩護部隊移動、擴大有效縱深及擴張接戰距離。<sup>5</sup>UGV 的類型與尺寸也能針對不同地形與戰術需求來設計，例如體積小、具機器單臂、專門用於偵察的機器車「龍行者」(Dragon Runner)。<sup>6</sup>或是屬於「仿生機器人」(biomorphic robot)、能夠負重 182 公斤達 32 公里之遠的「LS-3」，<sup>7</sup>或是能夠負重 150 公斤、時速 10 公里、能爬 35 度角坡度、專門用在後勤支援的大型機器狗「BigDog」。<sup>8</sup>

美國陸軍「次世代戰鬥車輛跨職掌團隊」(Next Generation Combat Vehicle Cross Functional Team) 負責人卡夫曼准將 (Brig. Gen. Richard Coffman) 表示，下一代幾乎所有戰鬥車輛都會具備不同程度的無人自主功能或是搭載機器人，如「可置換載人戰鬥車」(Optionally Manned Fighting Vehicle, OMFV) 未來將取代「布萊德雷型戰鬥車」(Bradley fighting vehicle, BFV)，作為下一代重裝部隊運輸車。「M113 裝甲人員運輸車」將被「武裝多功能車」(The Armored Multi-Purpose Vehicle, AMPV) 取代。美國陸軍也打算發展支援空中部隊或輕裝步兵的「機動掩護火力 (Mobile Protected Firepower, MPF) 輕型坦克」、機器人戰鬥車 (Robotic Combat Vehicle, RCV)，以及足以取代現有 M1 主戰坦克 (M1 Abrams main battle tank) 之無人坦克系統。<sup>9</sup>

除了美國之外，俄羅斯軍工企業卡拉什尼科夫 (Kalashnikov) 也於 2018 年 1 月宣布該公司的 7 噸輕量無人坦克「Soratnik」進入實測階段，遙控有效範圍 10 公里，時速達 40 公里，除了火力之外，還可負責偵察巡邏及排除地雷。<sup>10</sup>已經列裝的多功能機器坦克「Uran-9」與「Uran-6」則首次於 5 月 8 日勝利日閱兵亮相，俄國軍方進一步表示擬研發 BMP-3 及 T-72B3 型無人坦克，<sup>11</sup>中國解放軍的「59 式遠程控制無人坦克」也傳出進入驗證階段。<sup>12</sup>

---

<sup>5</sup> “U.S. Department of the Army,” *The U.S. Army Robotic and Autonomous Systems Strategy*, March 2017.

<sup>6</sup> “Dragon Runner,” *Qinetiq North America*, <https://qinetiq-na.com/products/unmanned-systems/dragon-runner/>。

<sup>7</sup> “LS-3,” *Boston Dynamics*, <https://www.bostondynamics.com/ls3>。

<sup>8</sup> “BigDog,” *Boston Dynamics*, <https://www.bostondynamics.com/bigdog>。

<sup>9</sup> “Robot Aircraft For Robot Tanks: GD & AeroVironment Team Up,” *Breaking Defense*, October 9, 2018, <https://breakingdefense.com/2018/10/robot-aircraft-for-robot-tanks-gd-and-aerovironment-team-up/>。

<sup>10</sup> “Russia tests robotic strike vehicle in conditions close to real combat,” *TASS*, January 19, 2018, <http://tass.com/defense/985821>。

<sup>11</sup> “УВЗ начал работу над танком-роботом на альтернативном «Армате» шасси Т-72,” *РБК*, August 8, 2018, <https://www.rbc.ru/politics/08/08/2018/5b62d8979a794742d5e293fd>。

<sup>12</sup> <俄專家：中國測試無人駕駛坦克，是新聞但並不轟動>，《俄羅斯衛星通訊社》，2018 年 3 月 30 日，<http://big5.sputniknews.cn/opinion/201803301025044263/>。



圖 3-1、大型機械狗 (BigDog)

資料來源：Boston Dynamics。



圖 3-2、「龍行者」機器車 (Dragon Runner)

資料來源：QinetiQ North America。

## (二) 外骨骼

「市街戰」(urban warfare) 作為未來戰爭的主要型態之一，複雜的都市環境

以及建築障礙物，使正規部隊大規模火力受到限制，如何提高步兵單位的偵察裝備與輕兵器的效率、提高近距離戰術能力，逐漸受到重視。此外，提高士兵生存率，也有助於降低民主政府的決策風險。「外骨骼」(Exoskeleton) 穿戴式人體載具，即為此趨勢而生，這種先進單兵戰鬥系統，整合了人體載具與新式裝甲的複合功能，可提供單一士兵具備更強的負重能力與抗彈性能，提高單兵戰術價值，源起於 2008 年美國國防部的「陸地戰士」(Land Warrior) 系統，其主要目的在於整合步兵的指揮、管制、通訊、觀測，使其具備完整的戰場管理能力、提高主動作戰能力。同時，負重及抗彈等被動防護能力也獲得提升。對於攻堅部隊來說，可作為輔助裝備，增加瞬間打擊力；在守勢作戰、場站後勤的搬運用途等不需長時間倚賴補給的情況，將可立即發揮效益。<sup>13</sup>

俄國「中央精密機械研究所」(TsNiiTochMash) 於 2018 年 8 月底公布「Ratnik-3」戰術外骨骼系統，美軍的「ONYX」以及「TALOS」系統也預計在 2021 年前陸續投入實戰。<sup>14</sup>不過，外骨骼裝備的應用現階段受限於續航力，使得實際應用價值大打折扣；俄國的「Ratnik-3」電池續航力低於 4 小時，而美國的「ONYX」測試也僅有 8 小時，無法滿足野戰部隊的需求。如何改良電池技術以及尺寸小型化，成了目前美俄兩國在外骨骼開發上的競爭重點。<sup>15</sup>

### (三) 非侵入性腦機介面系統

借重神經科學所發展出來的義肢控制技術，已經能夠用腦波做為輸入訊號，然而這類技術控制訊號精確程度有限，易受外在環境干擾，也離不開醫學手術，並不完全適用於肢體健全、在複雜環境移動的操縱者。

美國「國防先進研究計畫署」(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 在「Neuro-FAST」侵入性腦神經研究專案 (Neuro Function, Activity, Structure, and Technology) 於 2018 年暫告一段落後，<sup>16</sup>同時開啟了「次世代非手術神經科技計畫」(Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology program)，又被稱為「N<sup>3</sup>」計畫，希望利用接下來 4 年的時間，發展出一套雙向 (bidirectional)、即時 (real-time)、非侵入性 (noninvasive) 的腦機介面系統 (brain-computer interfacesystem)。

結合生醫工程學、神經科學、合成生物學以及奈米技術，「N<sup>3</sup>」系統將研發目標設定為為可攜式、零手術、高解析度的大腦訊息讀取與輸入系統。利用機器學習能力，「N<sup>3</sup>」系統將能自動校正不同操控者生理差異，自動對接大腦訊號與

<sup>13</sup> 蘇紫雲，《外骨骼載具的科技競爭與分析》，《國防安全週報》，第 12 期，國防安全研究院，2018 年 9 月 7 日。

<sup>14</sup> “This Army unit will be first to test an exoskeleton that lightens combat load,” *Army Times*, June 5, 2018, <https://www.armytimes.com/news/your-army/2018/06/05/this-army-unit-will-be-first-to-test-an-exoskeleton-that-lightens-combat-load/>。

<sup>15</sup> Patrick Tucker, “Russia, US are in a military exoskeleton race,” *Defense One*, August 30, 2018, <https://www.defenseone.com/technology/2018/08/russia-us-are-military-exoskeleton-race/150939/>。

<sup>16</sup> “Neuro Function, Activity, Structure, and Technology (Neuro-FAST),” DARPA, <https://www.darpa.mil/program/neuro-function-activity-structure-and-technology>。

操作訊號。如何克服外部環境以及人類身體組織對大腦訊息的干擾，預料將是「N<sup>3</sup>」系統所面對的首要難題。<sup>17</sup>

#### (四) 戰聯網

伴隨著戰場機器人功能的多樣化，有些可能外觀像人類，有些可能體積小如昆蟲，海、陸、空、太空、網路五大領域的戰場機器人，該透過何種戰術控制系統來進行虛實整合將成為一大考驗。讓機器人彼此之間能進行即時戰況交流、協助人機與多機協同作戰的「戰聯網」(Internet of Battle Things, IoBT)，正悄悄進入各國國防部的視野，例如美國國防部就與產學單位成立「協作研究聯盟」(Collaborative Research Alliance, CRA)，<sup>18</sup>擴增研發能量，並推出「分散式協同情資系統與技術」(Distributed and Collaborative Intelligent Systems and Technology, DCIST) 研究計畫希望加速戰聯網投入實際應用。<sup>19</sup>

雖然戰聯網仍然還在發展初期，不過在架構上起碼必須具備以下能力，才算是邁入實用門檻：

「情報分發」(intelligence distribution)：能即時判斷那些戰情該送給那些協作單元，並且能依照重要性而非時間排序傳送；

「異團體控制」(heterogeneous group control)：指令下達能夠因為次團體戰術任務之差異而有所不同，自動拆解成細部單元指令，達成化整為零之目標；

「分析彈性」(analytical resilience)：複雜戰場環境的訊息來源繁雜，必須能夠將接收戰情標準化以利決策，AI 戰場機器人必須要能考慮「整體」戰術目標，適時調整與環境的互動方式；

「多重介面相容性」(multi-interface compatibility)：戰聯網的升級與配備相容性需要特別設計，以符合國防工業產業生態之特性，並且在人機互動介面需要顧慮人類與機器人資訊處理速度之差異。

目前，戰聯網面臨的主要挑戰在於機器學習的戰場反應仍無法跟上人類士兵的水準，因此情資分送與分析彈性程度有限、網路攻擊抵抗能力不足、人機溝通介面無法滿足實際戰況需要。未來這三個面向，將是戰聯網建置需要克服的重點項目。

#### (五) 太空衛星組建能力

美國海軍學院(USNA)研發中的「智慧太空組裝機器系統」(Intelligent Space Assembly Robot System, ISAR)，目標是在衛星軌道上高速移動的情況下組建衛星。第一台 ISAR 機器人名為「RSat」，是一顆 3 單位立方衛星機器人(30 cm x 10

---

<sup>17</sup> “Nonsurgical Neural Interfaces Could Significantly Expand Use of Neurotechnology,” DARPA, March 16, 2018, <https://www.darpa.mil/news-events/2018-03-16>。

<sup>18</sup> “Internet of Battlefield Things (IoBT) Collaborative Research Alliance (CRA),” Duke University, May 8, 2017, <https://researchfunding.duke.edu/internet-battlefield-things-iobt-collaborative-research-alliance-cra>

<sup>19</sup> “Distributed and Collaborative Intelligent Systems and Technology (DCIST),” United States Army Research, Development and Engineering Command (RDECOM), <https://www.dcist.org/wp-content/uploads/2018/07/DCIST-CRA-Introduction-1.pdf>。

cm x 10 cm)，擁有一台 3D 攝影機與環境感測器，以及兩隻長度 60 公分、4 個關節、最大移動角度 7 度的機器手臂，皆配備零後座力馬達以及前端 2D 攝影機。

「RSat」預計 2018 年 12 月在紐西蘭與 NASA ELaNa XIX 立方衛星一起，由 Rocket Lab 公司承包發射升空。「RSat」機器人輕巧的體積，將有利修復細部破損，或是建造立方衛星。<sup>20</sup>而 NASA 的「蜻蜓軌道衛星組建計畫」(Dragonfly On-Orbit Satellite Assembly Program) 則是注重在機器手臂的功能多樣化，能夠修理目前已經運作的各式太空基礎建設。<sup>21</sup>

希望開發近地軌道衛星低成本開發技術的國防先進研究計畫署「鳳凰計畫」(Phoenix program)，2017 年 10 月則是直接從國際太空站施放了 6 枚「HISat」微衛星 (Hyper-Integrated Satlets)，於 2018 年啟動「eXCITE」實驗計畫評估其施放成效與運作情況；「鳳凰」計畫採取的策略則是將微衛星結構模組化，提高衛星的替代性。<sup>22</sup>

## 二、應用

戰場機器人科技涉及 AI、機器人學 (Robotics)、控制理論 (Control Theory) 三大領域。因此具有軍民兩用特性，相關技術能夠轉入民生、厚實工業，使得各國競相發展。當前投入最多資源發展戰場機器人的前 11 大國，正好也是全球武器輸出占比最高的國家。<sup>23</sup>然而同時，也因為戰場機器人被歸類為「致命自主武器系統」(Lethal Autonomous Weapon Systems, LAWS)，諸多技術應用議題牽涉到戰爭倫理問題，國際輿論、非政府組織、AI 專家近年來紛紛疾呼，國際間應該比照大規模毀滅性武器，將機器人軍事化的風險管控，納入國際條約體系。如何降低風險，可說是戰場機器人開發近年來遇到的一大難題。

《聯合國特定常規武器公約》(Conventions on Certain Conventional Weapons, CCW) 123 個締約國已同意，各國政府自 2017 年起針對包括機器人與無人機技術在內的 LAWS，定期召開討論會議，邀集政府專家與非政府組織共商監管機制；參與國家包括美國、中國、俄羅斯等戰場機器人主要開發國家。然而 2017 年 11 月、2018 年 4 月及 8 月三場會議以來，各方意見仍然有待整合。<sup>24</sup>

---

<sup>20</sup> Dakota L. Wenberg, Thomas L. Lai, and Jin S. Kang, “Miniaturizing the Robotic Assembly of Spacecraft: ISAR Development and On-Orbit Demonstration,” United States Naval Academy, SpaceOps Conferences Paper, January 1, 2018, <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2018-2704>。

<sup>21</sup> “NASA Awards SSL Next Phase Funding for Dragonfly On-Orbit Assembly Program, Demonstrates Confidence in Public Private Partnership for Space Robotics,” *SSL*, September 11, 2017, <https://www.sslmda.com/html/pressreleases/2017-09-11-NASA-Awards-SSL-Next-Phase-Funding-for-Dragonfly-On-Orbit-Assembly-Program-Demonstrates%20Confidence-in-Public-Private-Partnership.php>。

<sup>22</sup> “On-Orbit Assembly of Space Assets: A Path to Affordable and Adaptable Space Infrastructure,” The Aerospace Corporation, February 2018, [https://aerospace.org/sites/default/files/2018-05/OnOrbitAssembly\\_0.pdf](https://aerospace.org/sites/default/files/2018-05/OnOrbitAssembly_0.pdf)。

<sup>23</sup> 美國、英國、俄羅斯、法國、義大利、日本、以色列、韓國、德國、印度、中國（未按軍火出口占比順序），參見“Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems,” *SIPRI*, November 2017.

<sup>24</sup> “2018 Group of Governmental Experts on Lethal Autonomous Weapons Systems (LAWS),” UNOG, [https://www.unog.ch/80256EE600585943/\(httpPages\)/7C335E71DFCB29D1C1258243003E](https://www.unog.ch/80256EE600585943/(httpPages)/7C335E71DFCB29D1C1258243003E)

考慮到快速浮出的國際法爭議，預料率先投入實戰之戰場機器人相關科技，將首先處理如何優化人機協同作戰的問題，以及在尚未成為人類士兵戰場的太空爭奪制太空權以防止遭到敵方剝奪軍事偵察能力。

### （一）人機一體控制系統

非侵入性腦機介面系統的發展，也預示人機一體的時代即將到來。一旦如波士頓動力公司（Boston Dynamics）的 Atlas 系列等人型機器人技術成熟之後，除了能自主思考的 AI 戰場機器人之外，由士兵腦控的「阿凡達」（avatar）戰場代理機器人，將成為另一種「避免道德困境」的研製選項。當然，過渡階段也可能發展出由單兵阿凡達帶領一群 AI 機器人的戰術戰法。

此外，這類腦機控制系統也能將戰聯網「微觀調控」的特性，導入戰鬥人員與其操作的武器系統之間，如飛行員頭盔能在戰機高速飛行的狀況下，逆向輸入訊號穩定飛行員大腦。又或是狙擊手頭盔能在潛伏時保持大腦清醒、狙擊時提高專注能力並且能透過腦波校正槍枝瞄準等等。除了武器裝備與人型機器人以外，各類遙控無人機的操作介面也可能更加「隨心所欲」。未來人機一體控制系統外溢效應更可能促使外骨骼技術向「巨大化」、「多功能化」的方向發展。

### （二）讀心戰情指揮系統

搭載 AI 的戰聯網，未來將能夠做到透過戰場資訊即時蒐集，預先分析敵方可能採取的下一步動作，若能取得敵方指揮官各種人際互動資料，甚至可能做到透過演算法預測出未來可能採取的策略選項有哪些，提供戰情指揮決策者使用。暫且可以將其想像為目前網路社群商業 AI 運用模式轉化為國防用途。此外，戰聯網也能夠用來分析敵方戰聯網如何預測我方下一步，以利人類指揮官發動不對稱戰術或奇襲。

值得注意的是，戰聯網搭配人機一體控制系統之後，理論上將使得目前由單人指揮的機器人數量上升到戰場規模，種類還可能同時橫跨陸海空、網路及太空，在 AI 的協助下，它們將表現得像是協同作戰的士兵，而且十分「善解人意」。真實戰場指揮將與策略性電玩操作產生趨同現象，在人類參與較少的戰場上，電子兵推的準確度也會大幅提升，其結果進而對各國領導人之戰爭決策產生，影響層面將遠遠超越軍事範疇。

### （三）衛星軌道戰術運用

軍事衛星在戰情指揮以及戰略武器攻防上的應用價值，以及難以取代的精密特性，使其容易成為敵方重點打擊目標。當前的太空機器人科技受制於現有衛星技術的特性所影響，側重「遠端控制」（remote control）以及「一次性打擊」（one-off destruction）。不過隨著太空軍事化的趨勢逐漸白熱化，可重複利用的火箭系統、低成本的立方衛星（CubSat-Class satellite）逐漸普及，衛星防護策略開始從

原有的「本體防護」轉向「撒豆成兵」，藉由模擬核武平台多樣化來保證太空戰略優勢；只不過與海中的核子潛艦不同，未來的太空戰略將不再以衛星匿蹤能力為主軸，而是以韌性（resilience）為核心，意即原有衛星遭摧毀後，能迅速藉由其他衛星的替補來恢復運作。

太空基礎建設出現微型化趨勢，具有相同功能的衛星體積正快速縮小，進入立方衛星的時代，而擁有微衛星模組化技術，意味著敵方反衛星能力失去其作用，進而影響到其區域拒止的太空打擊效用。更有甚者，發展初期只用來修復的太空組裝機器人，一旦技術成熟，將可在衛星軌道上以「無發射建造」方式，來部署己方衛星，或是寄生、撞擊敵方衛星。不僅對於地球上的戰況產生作用，在本世紀的月球資源探勘競爭上，應用潛力不容小覷。

## 貳、匿蹤科技

自 1991 年波灣戰爭中美軍 F-117A 匿蹤戰機成功穿透伊拉克防空網、一戰成名以來，對抗雷達偵測的匿蹤技術成為各大國技術單位於軍方最高度注意之技術項目之一，而近年來對抗各式偵測手段的技術皆得到大力發展及應用。

匿蹤（stealth），又稱「低觀測度」（low observability），為透過設計、特殊材料、塗料等方式，減少透過可見光、雷達、紅外線、聲納等媒介偵測到載具之技術。其中尤以降低雷達截面積（Radar Cross-Section, RCS）為目前對匿蹤一詞最常見的含意，並成為現今戰機設計最重要的指標之一。此種針對雷達偵測之匿蹤技術近年來可於飛行器、船舶、飛彈在內等多種武器系統上見到其運用，船艦雖然同樣可運用匿蹤技術降低其可偵測性，然而其本身即極為龐大的體積與海面雜訊等使其在運用匿蹤設計上運用仍然相對有限。由於匿蹤的高技術門檻，使得當今實際操作匿蹤戰機的國家仍然有限，僅美國已有大量具高度匿蹤性能的戰機服役運用，中國與俄羅斯則緊追在後、研發具相當匿蹤性能之戰機。

### 一、當前發展與軍事應用

就武器系統而言，當前最受矚目的即是包括美國 F-22、F-35、B-2 在內的匿蹤航空器，以及匿蹤船艦如美國朱瓦特級（Zumwalt class）驅逐艦等，而台灣海軍所操作之法製康定級巡防艦與沱江級巡邏艦，亦是在設計之初即考慮匿蹤性的艦艇。以下以當前最具發展之降低雷達 RCS 匿蹤技術為主，簡要提及紅外線訊號匿蹤技術，並對當前發展進行評估。

#### （一）降低 RCS

目前減低 RCS 主要的手段有二，包含透過運用材料以減少雷達波反射，與匿蹤外型設計。前者包含了機身材料與雷達波吸收材料二者；早期先由降低雷達波反射材料打造機身開始，延伸到以雷達波吸收材料（radar-absorbing materials, RAMs）作為材料及塗層，以減少遭到雷達發現的機率。最重要的則是藉由載具本身的外型設計，盡可能降低雷達反射面數量減少低雷達回波，其方式包括採用

：減少垂直面，邊緣平行，鋸齒狀結構，蛇行進氣道，將武器內置於彈倉中等各種方式，以減少外掛武器在匿蹤上的不利影響。藉由三者（外型設計、機身材料與塗料）相互配合，達成高度匿蹤。隨著匿蹤技術的進展，匿蹤戰機早已不再需要如同早年美國 F-117A 戰機一般極具特色的稜角幾何外觀、而出現更為流線，較能兼顧氣動力與空戰機動的設計。

當前最新式戰機的設計方向有二，首先是追求更佳匿蹤性能，如 2018 年英國宣布之下一代戰機「暴風」(Tempest) 以及德法將共同發展的未來空戰系統 (Future Combat Air System) 等，皆走向透過如過往美國 ATF 計畫中落敗的 YF-23 一般，多以融合水平尾翼與垂直尾翼為一體等方式，進一步嘗試加強其匿蹤性。但戰機設計需考量其空戰機動性能，因此匿蹤外型設計仍需與氣動力構型互相妥協。此外，目前亦有多種新式戰機設計相當程度運用匿蹤設計，但有相當程度妥協，例如維持傳統外掛武器方式，以尋求較低的技術門檻與成本，以求加速研發，如韓國 KF-X 戰機計畫，這種戰機預計在第二批次 (Block 2) 才追加內部武器艙。<sup>25</sup> 土耳其的 TFX 戰機計畫也選擇了傳統的通用電器 F110 發動機，亦可視為一種妥協。<sup>26</sup> 事實上，對於技術與資源較少的國家而言，後者亦是可能之途徑，以減少與擁有先進匿蹤戰機的國家之技術及與之造成的軍事劣勢。此外，日本近年亦曾投注大量資源研發、驗證 X-2「心神」驗證機，然在技術驗證完成後即因龐大經費負擔而停止發展，未進一步發展為實際服役之武器系統。<sup>27</sup>

就目前其他國家實際服役及較有進展的研發計畫來看，中國殲 20 戰機的外型包含其前翼等設計仍可看出其為氣動力妥協之處。俄羅斯研製之 Su-57 匿蹤戰機雖在外型設計上較符合匿蹤設計之概念，然目前仍缺乏良好匿蹤塗料與之配合。因此，目前可說美國在匿蹤技術上仍佔據絕對優勢。在美國匿蹤戰機開始服役後，匿蹤技術包含設計以及塗料等亦開始應用在傳統第四代戰機上，以降低其 RCS，如 F/A-18E/F 超級大黃蜂戰機設計上，即已考量一些匿蹤要素，而大量運用匿蹤塗料，也有效幫助第四代戰機有效降低其 RCS。目前台灣 F-16 戰機升級為 F-16V 的升級案，即包含美軍的 Have Glass 匿蹤技術。在上述的匿蹤重點項目之外，俄羅斯已研發多年的「電漿匿蹤」是另一途徑。透過注入電漿流以吸收雷達波、並減低反射，如研發成功，或可因此不需考量外型之匿蹤設計，然此項概念目前仍未能順利實用化。

在船艦上，則因前述包含船艦本身體積與海面雜波、船舶的尾流等各種因素都會使得匿蹤設計更加複雜，並且其應用亦不若在飛機上發達。當前的許多主力船艦如我國康定級 (法國拉法葉級)、英國 45 級驅逐艦及美國目前主力的柏克級

<sup>25</sup> Defense Industry Daily staff, "KF-X Fighter: Korea's Future Homegrown Jet," *Defense Industry Daily*, October 23, 2018, <https://www.defenseindustrydaily.com/kf-x-paper-pushing-or-peer-fighter-program-010647/>。

<sup>26</sup> Burak Ege Bekdil, "General Electric beats Rolls-Royce to power Turkey's indigenous fighter jet," *Defense News*, October 31, 2018, <https://www.defensenews.com/industry/2018/10/31/general-electric-beats-rolls-royce-to-power-turkeys-indigenous-fighter-jet/>。

<sup>27</sup> "空自の F 2 後継機、F 3 5 など既存機ベースに共同開発案＝関係者," *Reuters*, March 8, 2018, <https://jp.reuters.com/article/jasdf-replacement-f2-idJPKCN1GK05S>。

(Arleigh Burke Class) 神盾驅逐艦等船隻，皆在設計時已將匿蹤外型加入其設計考量中。除此之外，台灣自製的沱江級巡邏艦也是匿蹤外型的作戰艦艇。許多匿蹤船艦同樣運用塗料以降低雷達反射。

目前最值得注意的匿蹤主力艦艇則是美國海軍朱瓦特級驅逐艦，該級驅逐艦除了達到 14000 噸等級的巨大排水量並搭載先進火炮系統(Advanced Gun System, AGS) 155mm 先進艦砲與 80 組垂直發射系統(VLS) 等強大火力外，其獨特的匿蹤外觀亦是此級艦的一大亮點。朱瓦特級的匿蹤設計超越以往船隻、能降低因海面雜波加強的雷達反射；據稱，其匿蹤設計能使該級艦的 RCS 降到僅為美國目前主力柏克級神盾驅逐艦的 1/50。接下來觀察美國於船艦上運用匿蹤技術的重點，在於其戰力核心的航空母艦在雷達上是極度顯眼的巨大目標，因此如何進一步運用更好的匿蹤技術於船艦上，以及類似技術是否會大量應用在美國下一代巡洋艦 CG(X)、甚至下一代巡防艦 FFG(X)上，而且又要能夠配合整體航艦戰鬥群之運用。就目前所能接觸的消息來看，朱瓦特級的匿蹤船體設計正是 CG(X)計畫所可能採用的方案之一，但後續之發展則仍待觀察。另外，由於海面雜波在雷達偵測上的巨大影響，各種干擾手段如干擾絲與主動干擾系統等，透過干擾甚至「製造」海面雜波以提高自身匿蹤效果，這對各種艦艇匿蹤的重要性，有時候可能更高於外型上的匿蹤設計考量。

在車輛運用上，針對紅外線軌跡與聲音等其他方面的匿蹤，可能較降低雷達 RCS 的設計更加重要。但近年仍能注意到幾款包涵匿蹤考量的地面裝備。過往最值得注意的可能是波蘭於 2013 年所推出之 PL-01 匿蹤輕戰車，其設計概念中，就包含了考量匿蹤的外型與雷達波吸收材料。

最後，這些降低 RCS 的匿蹤技術目前儘管大放異彩、特別在空戰更是如此，但仍有對抗匿蹤的雷達偵測手段。傳統上低頻雷達即是能偵測匿蹤戰機的一個手段，惟其精度有限、目前仍難以導引攻擊匿蹤戰機。當前包含中國及俄羅斯在內可能面對美國高性能匿蹤戰機威脅的國家，都在研發新技術如量子雷達(quantum radar) 等，以求與之對抗。2016 年 9 月，中國方面宣稱其量子雷達已經研發完成，並能在 100 公里的範圍內有效偵測匿蹤戰機。<sup>28</sup>加拿大滑鐵盧大學也在 2018 年 4 月宣布其正在研發新式的量子雷達，而俄羅斯也在 2018 年 7 月宣稱其正在研發一無線電光子雷達(radio-photonic radar)，並可能成為匿蹤戰機殺手等。<sup>29</sup>然而，即使此類技術能有效對抗匿蹤戰機，仍然需要相當程度的研發之後，才可能在戰場上大規模部屬運用，對雷達的匿蹤技術仍在相當時間內難以遭到反制。包含中俄在內各國目前研發中的新一代戰機計畫，都仍然將匿蹤技術作為其中之重要部分，顯見其在未來仍將持續扮演重要角色。

---

<sup>28</sup> 瓦西里·卡申，〈俄專家：中國量子雷達或致美現代戰機失去存在意義〉，《俄羅斯衛星通訊社》，2016 年 9 月 26 日。http://big5.sputniknews.cn/military/201609261020833490/。

<sup>29</sup> Dave Majumdar, "Stealth Killer? Russia's Sixth-Generation Fighter Might Have a "Radio-Photonic Radar"," *National Interest*, July 9, 2018, <https://nationalinterest.org/blog/buzz/stealth-killer-russias-sixth-generation-fighter-might-have-radio-photonic-radar-25361>。

## （二）降低紅外線訊號

針對紅外線訊號的匿蹤技術，不僅對飛機等航空器至關重要，也影響車輛、船艦、甚至人員等。紅外線訊號根據其波長可分為近紅外線、短波長、中波長、長波長以及遠紅外線等不同種類。在軍事應用上紅外線訊號根據其波長不同，分別可應用在夜視鏡、熱顯像儀，甚至到空戰中運用的紅外線導引飛彈（又稱熱導引或追熱飛彈）等各種不同領域。就戰機設計而言，目前為止減少熱紅外線訊號主要透過設計，使熱與冷卻空氣結合，藉排氣尾管的形狀設計以減少其截面積，透過內部油箱分布減少電子設備發熱，使用碳複合材料減低紅外線訊號，或是採用更高旁通比的引擎等方式進行。此外，一些雷達波吸收塗料同樣提供了一定程度減少紅外線訊號的能力。

近來特定材料科學的研究，或許為降低紅外線訊號作為未來的關鍵方向。2018年6月報導顯示，美國威斯康辛麥迪遜大學(University of Wisconsin-Madison)正在研發一基於半導體材料「黑矽」(Black Silicon)的降紅外線訊號材料，有極小的厚度、並可隔絕約94%的紅外線。這種材料在面對各種透過熱顯像進行的偵測系統、甚至紅外線導引武器時，皆可能達到高度匿蹤，極具應用潛力。不過目前這項技術仍在研究初期，有待進一步研發。<sup>30</sup>

就陸上裝備如車輛及人員而言，降低紅外線訊號同樣十分重要。除了類似飛行器的設計方式外，亦使用具減少紅外線訊號功能的偽裝網或是人員野戰服加強效果。貝宜近年開發的ADAPTIV迷彩系統則是透過輕量、六角形的片材遍佈在載具上，改變溫度影響其紅外線訊號，並可以偽裝成如民用車輛，甚至岩石的熱訊號以欺騙對手。

然而，在陸戰中所需顧慮的並不僅只有紅外線訊號問題，尚包括可見光在內的各種偵測手段。因此，不少當前發展的類似產品不僅止於針對紅外線訊號，同樣包含了對可見光、雷達波偵測等多重頻譜的匿蹤能力。

## （三）多頻譜與可見光匿蹤

如前節所述，多頻譜的匿蹤技術的目的為抵擋包含可見光、雷達波等多重偵測手段而生，近年來亦成為西方各國重視的項目，並紛紛開始測試或是採用，如瑞典紳寶梭子魚(Saab Barracuda)公司生產的移動偽裝系統(Mobile Camouflage System)等設備。這種新式偽裝網除了傳統視覺偽裝功能外，對多種光譜皆能遮蔽，包括能有效減少紅外線訊號、雷達波反射與視覺偽裝等功效。<sup>31</sup>

除了前面提到的各種設計及技術外，透過各種材料嘗試減低肉眼的可辨識性同樣是當前正在努力的目標。除了傳統迷彩服持續發展之外，俄羅斯 Rostec 集

<sup>30</sup> Sam Million-Weaver, “‘Stealth’ material hides hot objects from infrared eyes,” University of Wisconsin-Madison, June 21, 2018, <https://news.wisc.edu/stealth-material-hides-hot-objects-from-infrared-eyes/>。

<sup>31</sup> “Germany’s KMW Orders Saab’s Mobile Camouflage System For Leopard 2 Tanks,” *Defense World*, December 20, 2017, [http://www.defenseworld.net/news/21568/Germany\\_\\_\\_s\\_KMW\\_Orders\\_Saab\\_\\_\\_s\\_Mobile\\_Camouflage\\_System\\_For\\_Leopard\\_2\\_Tanks#.W-jYsJMzaUk](http://www.defenseworld.net/news/21568/Germany___s_KMW_Orders_Saab___s_Mobile_Camouflage_System_For_Leopard_2_Tanks#.W-jYsJMzaUk)。

團在 2018 年 8 月展出了一款新式迷彩材料，宣稱其電子操作 (electrically-operated) 塗料能使其隨著環境改變色彩、強化偽裝能力，惟目前仍未實際展示與驗證其功能。<sup>32</sup> 類似技術並不只有俄羅斯正在致力開發，以色列本古里安大學 (Ben-Gurion University) 的研究團隊亦宣稱設計出一種能偏轉光線使人能隱身的方式，但仍需嘗試做出原型。<sup>33</sup> 儘管這些概念及構想在未來戰場上可能發揮極大作用，然而進一步的發展與驗證皆仍待進行，可以推估各種構想仍須相當時日才能實際進入應用

## 參、極音速載具

此項技術為軍民兩用，主要應用在武器、航空器以及太空飛行器 (Spacecraft) 等三種方式。當用於軍事用途時，現有主要的兩種極音速載具發展為：透過火箭加入推進至高層大氣 (但較傳統彈道飛彈為低) 並釋放之極音速滑翔載具 HGV，及透過超燃衝壓發動機使其達到 5 馬赫以上速度之極音速巡航飛彈 (hypersonic cruise missile, HCM)。

極音速載具之技術相關概念在數十年前即已提出發展，近年則有長足進步。美國在 2001 年開始測試之 X-43 在 2004 年創下 9.68 馬赫的飛行速度計錄；2010 年開始，並至 2013 年為止共進行四度測試之 X-51 HCM 即採用「乘波體」(Waverider) 設計，使其能藉由飛行產生衝擊波為其自身提供升力；武器化用途亦曾有配合其「迅速全球打擊」(prompt global strike) 概念之「先進極音速武器」(Advanced Hypersonic Weapon) 實驗、及國防先進研究計畫署與洛馬公司合作之 HTV-2 極音速滑翔載具 (hypersonic glide vehicles, HGV) 實驗等。美國並在 2013-2016 年及 2016-2017 年間分別與多家軍火巨擘合作，進行不同的極音速武器研究計畫。然近年來俄羅斯與中國在此技術及其軍事化上，亦受到世人矚目，美國也因而在相關的武器系統研發加緊腳步。

### 一、當前發展

目前致力於發展此項科技的主要為美、俄、中三國。除此之外，包含日、澳、印及歐洲國家等在內，多項相關技術之研究計畫正在進行。然仍以前述三個國家為主要的技術領先者，其餘國家如印度、法國、澳洲等各國之極音速研究計畫，仍多仰賴與美俄等國進行國際合作。在民用載具方面，包括美國的波音公司與歐盟之空中巴士集團等航空巨擘皆正在進行民用極音速載具之研究，然當前最受到矚目的則屬其軍事用途。

就武器裝備上目前的發展而言，俄羅斯在 2018 年 3 月 1 日宣布了射程 2000

---

<sup>32</sup> Daniel Brown, "Russia just showed off new stealth camouflage that supposedly can change colors rapidly to conceal troops," *Business Insider*, August 21, 2018, <https://www.businessinsider.com/russia-shows-off-new-stealth-camouflage-but-it-appeared-to-be-static-2018-8>。

<sup>33</sup> Shoshanna Solomon, "Israeli researchers develop invisibility cloak – but you can't see it, yet," *Times of Israel*, November 14, 2017, <https://www.timesofisrael.com/israeli-researchers-develop-invisibility-cloak-in-theory/>。

公里、10 馬赫高速之「匕首」(Kh-47M2 Kinzhal) 空射極音速飛彈，可裝置在 MIG-31 戰機及 Tu-22M3 轟炸機上。根據俄方宣稱、此型武器由後者裝載將使其威脅半徑達到 3000 公里之遠。此外，俄羅斯另外亦有一 Project 4202 極音速滑翔武器計畫，預計在將來搭配新型洲際彈道飛彈 RS-28 Sarmat 上，負責搭載核子彈頭，突穿對手的彈道飛彈防禦系統。匕首飛彈應為 9K270 伊斯坎達 (Iskandar) 陸基短程彈道飛彈的空射型，然根據美方估計，其在 2020 年才能完成戰備。<sup>34</sup>Project 4202 如研發順利，將在 2020-2025 年之間服役。<sup>35</sup>值得一提的是，相較於美俄兩國，中國在相關領域為較晚進的參與者，但透過大力投資發展，近年積極進行極音速載具研究，並於 2018 年 8 月進行「星空二號」HGV 相關測試。中國在「星空二號」上，如同美國的 X-51 極音速飛行器一般，採用「乘波體」設計。2018 年 9 月 21 日，中國在酒泉衛星發射中心，對三種不同的極音速載具設計之縮尺模型，進行設計驗證技術細節。<sup>36</sup>中國也曾研發代號為 WU-14 的 HGV，整體來說已經累積相當研發經驗與能量。除三個技術領先的國家之外，印法亦透過與俄羅斯的合作取得極音速武器之相當進展，如印度與俄羅斯共同研發之 BrahMos II 型 HCM 等，在相關武器系統發展上領先美俄中之外的其他國家。

由於各方極音速武器仍需數年研發時間才有可能服役及實際形成戰力，而美國在極音速技術上仍具有相當領先實力，為因應俄中在將其武器化的作為，美國於 2018 年開始加速發展極音速武器，以避免在極音速武器的技術上產生落後，並陷入戰略劣勢。美國在 2018 年與洛馬公司簽約，開始全力投入「極音速傳統打擊武器」(Hypersonic Conventional Strike Weapon) 等計畫。<sup>37</sup>在這些國家之外，日本亦宣布研發其稱為「高速滑空彈」之 HGV，並預計在 2025-26 年投入運用，並於 2028 年的第二批次 (Block 2) 性能提升型上，加上「乘波體」設計。<sup>38</sup>

## 二、軍事應用

蘭德公司在 2017 年報告中指出，極音速技術應用在武器上具有改變當前世界「遊戲規則」的能力；HGV 可在武器系統許可的範圍內、在飛行中更新其攻擊目標，並且能以難以預測之軌跡滑翔。換言之，過往用以攔截彈道飛彈之系統、包含能對抗機動重返載具 (maneuverable re-entry vehicle, MaRV) 之飛彈防禦系統，皆無法反制 HGV 攻擊。HCM 則透過其高速與可操作性同樣大幅壓縮防

<sup>34</sup> Dave Majumdar, "Russia: New Kinzhal Aero-Ballistic Missile Has 3,000 km Range if Fired from Supersonic Bomber," *National Interest*, July 18, 2018, <https://nationalinterest.org/blog/buzz/russia-new-kinzhal-aero-ballistic-missile-has-3000-km-range-if-fired-supersonic-bomber>。

<sup>35</sup> "Objekt 4202 / Yu-71 / Yu-74," *Global Security*, March 4, 2018, <https://www.globalsecurity.org/wmd/world/russia/objekt-4202.htm>。

<sup>36</sup> "China tests three hypersonic missiles at one go," *The Economic Times*, September 30, 2018, <https://economictimes.indiatimes.com/news/defence/china-tests-three-hypersonic-missiles-at-one-go/articleshow/66014665.cms>。

<sup>37</sup> Joseph Trevithick, "American Hypersonic Weapons Could Shower Their Targets In Deadly Fragments," *The Drive*, October 30, 2018, <http://www.thedrive.com/the-war-zone/24582/american-hypersonic-weapons-could-shower-their-targets-in-deadly-fragments>。

<sup>38</sup> "防衛省、滑空弾研究ブロック化、25年に早期装備型," *JWING*, November 9, 2018, <http://www.jwing.net/news/6855>。

禦系統的對抗能力。需注意的是 HGV 與傳統彈道飛彈概念不同，由於其在較低的高度上持續飛行，因此需強化其飛行能力、設計上須考量低阻力與高升力，並可藉此持續機動。

除了目前攔截系統幾乎無法與之對抗的特性外，極音速武器另外的戰略意義是其大幅縮短決策與反應的時間。因此除了對現有飛彈防禦系統能力的挑戰外，此類型的武器同樣對傳統的決策組織帶來巨大挑戰。其目前仍無法被攔截之特性，使得目前在武器化發展上著墨較多的俄羅斯相當重視透過 HGV 投射戰略核武，藉以擊敗美國當前領先的飛彈防禦技術。美國則因為俄羅斯原本即擁有大量搭配核彈頭的洲際彈道飛彈緣故，認為極音速武器用於核武投射上，並無法對整體戰略情況產生較大衝擊，故更著重於其作為戰術上之運用價值。其對美軍過往所提倡的「迅速全球打擊」概念上扮演極關鍵角色。然而，雖然此種極具威力的武器能夠提供使美國在進行第一擊或是針對關鍵目標發動攻擊時，能取得極大優勢，並在戰略上提供核武以外的另一選項，但面對擁有核子武器的對手，特別是俄中等同樣具有戰略核武打擊能力的國家時，使用此類武器仍須考量對手可能的激烈反應使衝突升級。此外，投射 HGV 時，由於對手難以判斷是否遭遇核子攻擊，因此可能立即遭到核報復。然而，對美軍而言，此類武器在全球海外介入以及遭遇反介入情況時，仍然極具價值。

就 HCM 類型武器而言，進行常規作戰時的用處即非常高。不論是面對陸上高價值目標、或是攻擊海軍艦隊等，皆因其無法防禦之特性，具有極高價值。衝壓發動機用於極音速武器上時的技術難度，也遠高於一般超音速飛彈。因此，當前能發展之國家同樣有限。不過，2018 年 6 月時，以色列展示其能以 F-16 戰機發射、源自於「EXTRA」砲兵火箭之空射型音速飛彈「Rampage」。<sup>39</sup>此飛彈雖非宣稱為極音速武器，但這種類似俄羅斯將 9K270 伊斯坎達飛彈修改為空射極音速飛彈的方式，將可能是其餘國家進入極音速武器研發領域的一可能方式。相較於伊斯坎達飛彈需由 MIG-31 等重型戰機，甚至 Tu-22 轟炸機才能掛載的重型武器，以色列的方式或許更適合缺乏重型戰機的國家發展。台灣身為少數有完整衝壓引擎開發經驗的國家之一，進一步研發超燃衝壓引擎，或許是可能之發展方向。極音速武器無法防禦的特性，使其在戰術及戰略上皆能對未來戰場環境產生根本性的影響，因此在可預見的將來，將會使其成為主要大國禁止武器技術擴散的重要對象之一。

## 肆、集群式攻擊

「集群式攻擊」一詞原用以敘述自然界中集體合作行為，故又稱為「蜂群」。這種概念與無人機結合，使小無人機群在民間運用及軍事行動上皆創造極多的可能性，並能因此進行各種複雜工作。

---

<sup>39</sup> Judah Ari Gross, "Israel says new 'Rampage' rocket will break bunkers, but not the bank," *Times of Israel*, June 14, 2018, <https://www.timesofisrael.com/israel-says-new-rocket-will-break-bunkers-but-not-the-bank/>。

「集群式攻擊」為當前無人機領域重要之發展方向之一，並能在未來軍事應用上扮演重要角色。從非國家行為者藉由較原始的方式，以大量小型無人機發動攻擊，到先進國家以高科技操縱無人機群進行複雜工作，甚至伴隨未來戰鬥機系統執行任務等皆是。就後者來說，無人機群的操作基於自動化與資訊共享，透過軟體建立體系以針對「集體系統」進行操作、並達成單一無人機所無法達成之工作。無人機群組應用上包含二重要特性：「分散式運算」及「系統重構性」。前者意味著無固定長機的無人機群將各自單獨運算，即時交換訊息並各自操作；後者則意味著集群式攻擊整體的運算能隨著外力對結構改變，而立即重新建構，以持續任務進行。

## 一、當前發展

以國家行為者來說，美俄中歐是目前在無人機領域上發展較為進步的主要國家。無人機技術具有高度的軍民兩用特性，其技術發展帶來的功能多半可同時用於民用與軍用等雙重用途。因此，當前所發展之技術與用途，皆可說是或多或少帶有軍事上的意涵。在 2018 年 2 月南韓的平昌冬季奧運開幕式中，英特爾公司展示了其在 2017 年 12 月所預錄，以 1218 架迷你四軸無人機同時升空快速編隊，排出滑雪選手比賽及奧運會五環標誌等圖像，顯示出無人機群組的巨大潛力。

在操作上較為困難的固定翼無人機上，美國與中國則仍在激烈競爭中。中國不斷嘗試刷新其同時操控的固定翼無人機數量，2018 年 5 月中國宣稱已經成功完成 200 架固定翼無人機的群集飛行。與有人戰機的合作運用更可回顧到 2016 年 10 月，美軍當時以 3 架 F/A-18E/F 超級大黃蜂戰機成功投放 103 架小型 Perdigon 無人機群。<sup>40</sup>針對美國在有人戰機與無人機群整合方面的技術優勢，空中巴士（Airbus）於 2018 年 9 月在德國波羅地海沿岸的軍方測試場，進行無人機群與有人飛機的協同操作測試，希望在此美國已經領先的領域上迎頭趕上。<sup>41</sup>

此外，英國勞斯萊斯公司在 2018 年 7 月於法茵堡（Farnborough）航空展上，宣布了維修用微型機器人群組之研發計畫，並將透過此項技術、以這些「無人機群組」進入飛機引擎結構內部，深入各縫隙部位檢測。操作人員可以藉此對其受損部位進行修補，顯示出無人機群組技術在戰鬥或監視、偵查等用途之外的新可能性。

## 二、軍事應用

蓬勃發展使得其軍事應用逐漸分化為小型無人機集群式攻擊與高價、極端複雜、匿蹤之大型無人機兩種截然不同的方向。瑞典 SIPRI 在其報告中指出，目前的技術使無人機群組在軍事上的運用可分為幾種主要用途：協調機動，使陸上、空中或海上的系統能協調進行編隊移動，不論作為長機引導或是僚機；在大型區

<sup>40</sup> Chris Baraniuk, "US military tests swarm of mini-drones launched from jets," *BBC*, January 10, 2017, <https://www.bbc.com/news/technology-38569027>。

<sup>41</sup> "Airbus conducts MUT test flights," *Shephard Media*, October 4, 2018, <https://www.shephardmedia.com/news/uv-online/airbus-conducts-mut-test-flights/>。

域內協調進行情報、監視與偵查 (intelligence, surveillance and reconnaissance, ISR)；反介入/區域拒止 (A2/AD) 調度及分散式殺傷 (Distributed Lethality)。

嚴格說來，小型無人機集群式攻擊在軍事應用上仍在實驗發展階段，然目前已能透過各種資訊推敲其發展與運用。無人機集群式攻擊由於使用小型廉價（小型無人機在造價上遠較大型精密的高性能無人機便宜）的機型，故而在數量上極為龐大，可以透過群體工作的方式完成各種細微縝密的工作，從監視偵查、到前述維修引擎皆有可能。其龐大的數量亦使其在作戰任務中有較好耐戰損的能力，敵方亦不容易消滅數量龐大的小型無人機群。因此，在戰術運用上衍生出與高價的大型精密無人機不同的運用方式。例如美國國防先進研究計畫署提出的「攻勢集群式戰術」(Offensive Swarm-Enable Tactics, OFFSET)，就規劃讓步兵單位配合超過小型 250 個無人飛行/地面載具，以執行在複雜城市環境中的任務、快速部署與部署突破能力等。<sup>42</sup>在複雜的城市環境中，各種包括地下道等各式複雜地形，同樣能交由小型無人機進行偵查與地圖繪製。同時，單就攻擊來說，小型無人機群較難以發現，如能有效運用，則可收奇襲之效。除了中國方面媒體宣稱其可藉此對美軍航空母艦在內的大型艦艇進行打擊外，小型無人機群組對各戰略要點、重要設施包括防空系統與雷達，甚至要人等，皆可能透過奇襲方式取得戰果，在整體作戰上取得優勢地位。2018 年 7 月，綠色和平組織在網路上發佈一短片，片中赫然見到其操作小型無人機，衝撞法國核廢料儲存設施，以顯示此類設施對類似攻擊的無力與無防備的嚴重程度。但此短片亦顯示出小型無人機難以被發現的特性，使其在攻擊行動中，可能造成奇襲效果。

在各國軍方的規劃中，將來無人機集群式攻擊除了地面及海上發射使用外，也能從戰機等飛行器中投放，並與之成為整合作戰系統。在空戰中，小型無人機的用途上並不限於偵查、監視與攻擊，無人機同樣可以保護有人戰機、執行防禦任務。從前面提到的發展可知，美國在此方面仍有較領先之技術。但環顧美俄中歐（包含英國的暴風式戰機與德法的未來空戰系統）等各項對未來戰機的規劃與計畫，皆有意將無人機與有人戰機整合為全面性之系統，足見此技術的重要性，及其在未來戰場上的地位。未來以微型機器人集群式維修引擎的技術，亦或可為飛行器在必要時提供應急修理，在民間及軍事上皆可能有極大用途。

在高科技的無人機集群式攻擊作戰之外，如同前面所提到的非國家行為者同樣嘗試以較簡單的方式，進行類似集群式攻擊的作戰方法。2018 年 1 月，俄軍在敘利亞遭到敵對武裝份子以 13 架簡易無人機進行攻擊，成功造成俄方人員傷亡及停放在機場的多架俄國軍機受損。雖然俄羅斯軍方宣稱其捕獲三架無人機，同時防空砲火擊落另外兩架，<sup>43</sup>其造成的損失單就價值上來說，遠超過這些小型無人機群。可見得小型無人機在非國家行為者的使用上，甚至遭到恐怖分子運用

---

<sup>42</sup> Dr. Timothy Chung, "OFFensive Swarm-Enabled Tactics (OFFSET)," *Defense advanced Research Projects Agency*, <https://www.darpa.mil/program/offensive-swarm-enabled-tactics>。

<sup>43</sup> Neil MacFarquhar, "Russia Says Its Syria Bases Beat Back an Attack by 13 Drones," *New York Times*, January 8, 2018, <https://www.nytimes.com/2018/01/08/world/middleeast/syria-russia-drones.html>。

時，同樣可能造成嚴重損害。最簡單的例子，就是台灣目前在機場旁設立禁航區。其禁止範圍同樣包括民用的各種小型無人機，因其可能造成重大飛安事故，危及旅客生命財產安全。

事實上，小型無人機進行簡易改裝後成為自殺炸彈等攻擊方式，早已被 ISIS 採用。雖然前述 2018 年初俄軍所遭受的攻擊事件，由於實際上操作方式仍十分原始，故不應輕易以集群式攻擊稱之，然而各武裝團體對小型無人機的廣泛應用，使得各國國土確實存在將來遭到小型無人機群組攻擊的可能性。更進一步來說，非國家行為者如武裝團體藉由小型無人機和簡易程度的技術，能達到如此攻擊效果，當實際面對具備高度無人機技術及集群式攻擊能力的對手時，一旦遭遇此類奇襲、受到的損傷可能將會遠高於此。

就反制上來說，不少軍工大廠皆針對小型無人機的威脅進行研究，或者提出能與之對抗的方案。如雷神（Raytheon）公司的郊狼（Coyote）反無人機系統，幾乎可說是「以無人機擊落無人機」；萊茵金屬（Rheinmetall）公司研發的 Skyranger 防砲系統，其中一個重點對抗的目標，就包含小型四軸無人機。在這些「硬殺」手段之外，透過各種干擾裝置，切斷其與控制單元的訊號，以對抗小型無人機的「軟殺」方法，亦是當前對抗無人機及集群式攻擊的重要方式。

## 小結

本章節錄當前幾個重要的技術領域，雖然在簡短篇幅中難以詳細介紹技術概念及目前所有的發展計畫，然而綜觀這些領域的目前技術進展，可以發現這些在未來十年內可能會實現的技術，皆能改變未來的戰爭樣貌。戰場機器人，包含 AI 等相關技術的應用，即使不直接用於交戰上，也將使得從前線戰士、後方勤務到指揮官決策等各種方面的任務效率，都大幅提升。匿蹤技術的持續發展，同樣將使戰場上具備強大匿蹤技術所佔的優勢更加巨大，尤以空戰為甚。極音速載具幾乎不可防禦的特性，則使各掌握技術的大國，如同管制核武器般避免其擴散，但這同樣成為小國對抗大鯨魚的關鍵兵器。最後，無人機集群式攻擊能使操作者不論在空中、地面還是海上，皆有執行各種複雜任務的彈性與能力，並且在民用領域上亦有巨大潛力。最重要的是，台灣在不同領域上，皆已有一定程度的科技研發能量與基礎，如何進一步發展，以達成技術上的不對稱優勢，正是當務之急。