



財團法人國防安全研究院



主編——蘇紫雲、翟文中

2023

國防科技趨勢

評估報告 國防產業新動力

序

隨著美中競爭激化，國際正在形成以美、歐為主體的民主國家，集體抗衡以中、俄為代表的威權主義威脅；美、中也不斷透過各項協議或機制各自與其盟友合作。隨著雙邊競爭擴及軍事、科技、經濟、數位發展等領域，短期之內，此一國際競爭格局難以改變。在此競爭情勢下，《2023 印太區域安全情勢評估報告》以「民主與威權的再集結」為主題，討論兩大陣營的不同政策作為與影響。

隨著美國在《印太戰略報告》直指中國正尋求在印太地區謀求勢力範圍，美國持續與其盟友加強在印太地區的軍事安全、經濟安全合作，以反制來自中國的軍事或經濟脅迫。2022 年 2 月的俄烏戰爭，不僅改變東歐的地緣政治，強化美國及北約國家的軍事安全合作；位居印太的日本、韓國、澳洲，也關注俄烏戰爭對全球的影響，開始尋求跨洲際的戰略合作。

整體而言，面對中國在東亞區域強勢的影響力，美國當前「軸輻體系」已產生變化，各國對於中國可能侵略台灣的意圖，以及中國掌控台灣，對印太區域行為者造成的共同威脅與可能的整體衝擊，更促使「軸輻體系」預先調整的重要驅力。儘管當前國際社會已經出現反制中國的集體行動，但受限於各自國家利益或是政策立場差異，對中政策成效亦不盡相同。

中國在面對民主國家的各項圍堵作為，以及俄烏戰爭戰況不利下俄羅斯僅能「轉向東方」更加依賴中國，促使中、俄兩國有意達成進一步的戰略合作。此外，位於歐亞地緣政治核心的中亞國家，也成為中、俄兩國的拉攏對象，如今中亞儼然成為中俄兩國共同擁有的勢力範圍，更是兩強競合的緩衝地帶。

除了軍事、經濟層面的競合之外，隨著數位科技、人工智慧的快速發展，數位科技對社會實施大規模監控，已成為威權國家控制的重要手段。

中、俄兩國的數位威權治理模式，也隨著數位經濟的蓬勃發展同步向外擴張。當中國藉由跨境電商與數位經濟將其影響力向外延伸至東協國家，歐美經濟制裁對此的影響十分有限，未來「中國模式」應會持續成為東協國家數位經濟發展的主要參考對象。

如今中東地區又爆發衝突之際，民主同盟的領導者美國，可能陷入第二場戰爭；飽受國際孤立壓抑的中國，加上陷入戰爭泥淖的俄羅斯，正企圖利用這次機會改變原有地緣政治格局與不利的戰略情勢。未來只要民主與威權同盟繼續存在，對立與防範現象仍會重複發生。

在中國政軍情勢方面，2023 年為習近平於「二十大」延任後「開局之年」。中國將如何在新一屆領導班子的帶領之下，應對因疫情解封、美中持續對峙、經濟低迷及國際動盪所造成的內、外部變局呢？《2023 中共政軍發展評估報告》係從中國政軍焦點、外交動態及內部經濟、社會及科技發展等三大層面著手，剖析 2023 年中國所面對的挑戰、應對之策與影響。

中共「二十大」政治報告調整自改革開放以來以經濟工作為核心的基調，同時，國家安全成為經濟發展的基礎。中共近 5 年來，對台軍事進逼、經濟脅迫及軍事準備等相關作為，顯示習近平確有解決台灣問題的野心，且持續在能力上有所準備。儘管從現階段看來，習近平對台動武的機率不高，但台灣不能寄望於威權領導人的理性或開明，而應該不斷地強化自身應處的能力，替未來可能的衝突預作準備。對台灣而言，應該多關注中共在南中國海與南太平洋的港口經營，以及在中美對峙的國際格局下，中共積極對外布局，建立起同盟圈，厚植自身「對外鬥爭」的實力。因為這對中共屆時欲突破美軍及其盟友的圍堵具有重大意義。

在中國經濟、社會與科技發展方面，中國逐步「解封」的同時，原本受到疫情影響的中國經濟仍未有起色，房地產、地方債等經濟地雷接續出現。同時，疫情期間，為了達到封控隔離的效果，官方推出社會監控手段並未隨著「解封」而放鬆。以至在疫情後，反而讓外界對於中國內部的發展產生更多的困惑。中國所面臨的社會問題，恐成為中共能否穩定經濟狀

況的隱憂。

綜合而言，中國政治緊縮，集權趨勢不減，管制措施頻出，且經濟發展的脚步正逐漸放慢，日後的經濟前景仍未見曙光，甚至可能連帶影響到科技、產業的進一步升級。中國目前於政治、經濟、社會與軍事等各層面正處於變動中，未來台海局勢恐將益發複雜多變。

在國防科技情勢方面，《2023 國防科技趨勢評估報告》著重在我國國防科技研發成果及相關影響。尤其海鯤潛艦的自主國造，由於國際軍備發展合作的限制，以及中共的刻意打壓，國防部採取跨部會合作方式，取得若干國家的信任，順利導入若干紅區裝備，同時結合國內產官學研的努力，成功由國人主體設計並推動潛艦建造，有助國防產業升級，亦象徵我國國防科技已進入新的里程碑。

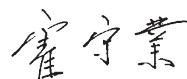
我國近年強調「不對稱戰兵力」（asymmetric force）是以小搏大的關鍵，戰史也有諸多實例證明。另外在「不平衡建軍」（unbalance force）方面，意指軍事力量對於兵種投資因為目的而有所不同，例如美國海軍曾經出現的「平衡建軍」、「不平衡建軍」的路線爭議，也就是航艦、驅逐艦、巡防艦、潛艦等部隊的投資比例差異。「不對稱兵力」是國家戰略層級的評估、「不平衡建軍」則是軍種層級的評估，上位戰略概念的確立，有助於後續用兵裝備的政策確立。

前述的不對稱兵力、不平衡建軍的核心就在有限資源下進行投資的選擇，核心是不對稱成本，除先進裝備外，靈活運用低成本、低科技裝備以求得「成本交換比」（cost-exchange ratio），享有不對稱優勢的價值，將可使總體防衛效果最大化。這也凸顯我國加速不對稱建軍的重要性。「不對稱成本」就是在兵火力選擇可搭配戰略特性進行效益規劃，以有限資源發揮最大效益。

在確立國防需求的同時，定期盤點、檢視各類具備兩用科技性質的商用產品或科技，可作為滿足國防需求的重要來源。一方面可協助防衛裝備的獲得，同時可降低成本。積極協助產業獲得新的產品去化、技術升級以產生經濟效益。

過去一年來，因為疫情和緩及解封，本院國際交流更趨熱絡，全年接待國外訪團超過三百場次，證明國際因為台海議題的國際化，期盼了解更多台灣安全情勢深入分析的觀點。尤其在 2023 年的「台北安全對話」中，本院邀請來自美國、日本、澳洲、德國、英國、法國、印度、土耳其、捷克、新加坡等國學者，針對中國與全球秩序與民主的挑戰為題進行深入討論，蔡總統親臨致詞，討論內容獲得各界熱烈回響。今年的《2023 印太區域安全情勢評估報告》、《2023 中共政軍發展評估報告》及《2023 國防科技趨勢評估報告》是本院同仁延續今年研究成果，以及觀察全球與區域重要議題的研究精華。亦祈各方先進，不吝批評指教。

董事長



中華民國 112 年 12 月 20 日

作者群

主編

蘇紫雲（國防戰略與資源研究所 研究員暨所長）

翟文中（國防戰略與資源研究所 助理研究員）

作者

江忻杓（國防戰略與資源研究所 助理研究員）

許智翔（中共政軍與作戰概念研究所 助理研究員）

舒孝煌（中共政軍與作戰概念研究所 副研究員）

楊長蓉（國防戰略與資源研究所 助理研究員）

翟文中（國防戰略與資源研究所 助理研究員）

劉姝廷（國防戰略與資源研究所 政策分析員）

劉翎端（國防戰略與資源研究所 政策分析員）

謝沛學（網路安全與決策推演研究所 副研究員）

鍾志東（國防戰略與資源研究所 助理研究員）

蘇紫雲（國防戰略與資源研究所 研究員暨所長）

專有名詞中英對照

一、報告 / 計畫 / 公約

《2022 國家安全戰略》	<i>National Security Strategy, 2022</i>
《2022 美國國防戰略》	<i>2022 National Defense Strategy of the U.S.A.</i>
《晶片與科學法》（美國）	<i>CHIPS and Science Act</i>
《商業控制清單》（美國）	<i>Commerce Control List, CCL</i>
《歐洲經濟安全戰略》	<i>European Economic Security Strategy</i>
《關於解決美國在相關國家對某些國家安全技術與產品的投資問題行政命令》	<i>Executive Order on Addressing United States Investments in Certain National Security Technologies and Products in Countries of Concern</i>
可擴張極音速多任務進氣展示機	<i>Expendable Hypersonic Multi-Mission</i>
《出口管制改革法》（美國）	<i>Export Control Reform Act of 2018, ECRA</i>
由美國本土運用武力及發射	<i>Force Application and Launch from Continental</i>
《廣島 G7 領袖聯合公報》	<i>G7 Hiroshima Leaders' Communiqué</i>
《經濟韌性與安全聲明》	<i>G7 Leaders' Statement on Economic Resilience and Economic Security</i>
極音速及高節奏機載測試能力	<i>Hypersonic and High-Cadence Airborne</i>
國際分子科學期刊	<i>International Journal of Molecular Sciences</i>

《武器貿易管制條例》（美國）	<i>International Traffic in Arms Regulations, ITAR</i>
韓國「新一代驅逐艦」計畫	Korea Destroyer Next-Generation, KDDX
多軍種先進能力極音速測試平台 混亂計畫	Multi-Service Advanced Capability Project Mayhem
《科技合作協議》	<i>Science and Technology Agreement, STA</i>
南十字綜合飛行研究實驗	Southern Cross Integrated Flight Research
《出口管制條例》（美國）	<i>The Export Administration Regulations, EAR</i>
《關於傳統武器與軍民兩用貨物與技術的出口控制的瓦聖納協議》	<i>The Wassenaar Arrangement on Export Controls for Conventional Arms and Dual-Use Goods and Technologies</i>
《美國軍品清單》	<i>U.S Munition List, USML</i>

二、專有名詞與技術

先進生化武器	advanced CBW
先進電腦	advanced computing
先進材料	advanced materials
先進電信	advanced telecommunications
信天翁	Albatross
演算法	Algorithm
全電力船艦	all-electric ships, AES
輔助器材	ancillary equipment

蟻群優化算法	Ant Colony Optimization Algorithm, ACO Algorithm
抗反射塗料	Antireflection Coating, ARC
應用程式介面	Application Programming Interface, API
人工智慧	Artificial Intelligence, AI
人工智慧與自主	artificial intelligence and autonomy
輔助裝備	auxiliary equipment
大數據	Big Data
仿生學	Biomimicry
生物材料	Biomaterial
生物科技與生物製造	biotechnology and biomanufacturing
閃擊戰	Blitzkrieg
阻礙性法律	Blocking Statue
推進－滑翔式武器	Boost-glide weapon
聊天機器人	chatbot
嵌合體	Chimera
乾淨能源	clean energy
雲端計算	cloud computig
膠原蛋白基材料	Collagen-based Material
複合式柴油引擎	combined diesel and diesel, CODAD
複合柴油引擎與燃氣渦輪機	combined diesel and gas, CODAG
複合式燃氣渦輪機	combined gas turbine and gas turbine, COGAG
複合機械推進系統	Combined Mechanical Propulsion System
指揮與管制	Command and Control, C2
共通極音速滑翔	Common Hypersonic Glide Body, C-HGB

複合材料，簡稱「複材」	Composite Material
壓縮升力	Compression Lift
運算宣傳	computational propaganda
可變螺距螺旋槳	controllable pitch propeller, CPP
傳統即時打擊	Conventional Prompt Strike, CPS
反太空武器	counterspace weapons
網宇實體系統	Cyber-Physical System
暗馬	Darkhorse
數據驅動與整合	data-driven technology and integration
深紫外線光刻機	Deep Ultraviolet Lithography, DUV
韓國防衛產業廳（或稱韓國 「國防採購計畫管理局」）	Defense Acquisition Program Administration, South Korea
對話機器人	dialog system
直升式反衛星武器	direct-ascent ASAT, DA-ASAT
定向能量	directed energy
無序多孔角蛋白網狀奈米結構	Disordered and Porous Nanonetwork of Keratin
破壞式技術	disruptive technology
動態隨機存取記憶體	Dynamic Random-Access Memory, DRAM
電子設計自動化	Electronic Design Automation
電力推進系統	Electric Propulsion System
新興科技	emerging technology
智慧移動	E-Mobility
實體清單	Entity List
出口管制分類編碼（美國）	Export Control Classification Number, ECCN
極紫外光刻機	Extreme Ultraviolet, EUV
第五代寬頻蜂巢式網絡技術標準	Fifth-generation Technology Standard

濾波器	for Broadband Cellular Networks, 5G filter
固定螺距螺槳	fixed pitch propeller, FPP
快閃記憶體	Flash Memory
升力	Force of Lift
基礎科技	foundational technologies
環繞式閘極場效電晶體	Gate-All-Around Field-Effect Transistor
同步軌道	Geosynchronous orbit
生成式人工智慧	Generative AI
生成式預先訓練模型	Generative pre-trained transformers, GPT
奇異公司	General Electric, GE
奇異海事公司	GE Marine
全球治理	Global Governance
全球定位系統	Global Positioning System, GPS
圖形處理器	Graphics Processing Unit, GPU
綠地投資	greenfield investment
砲射式投射物	gun-launched
韓國現代重工	HD Hyundai
高節奏機載測試	High-Cadence Airborne Testing, HyCAT
高溫陶瓷基複合材料	High Temperature Ceramic Matrix Composites, HT CMC
「紅外線成像導引系統 / 尾部推力向量控制」飛彈	InfraRed Imaging System Tail/Thrust Vector-Controlled, IRIS-T
高速率通訊衛星	High Throughput Satellite
人機介面	human-machine interface
極音速	Hypersonic

極音速進氣式武器概念	Hypersonic Air-breathing Weapon Concept, HAWC
極音速加速器次軌道電子火箭	Hypersonic Accelerator Suborbital Test Electron, HASTE
混合燃氣渦輪與電力	Hybrid Combined Gas and Electric, COGAL
油電複合推進系統	hybrid-electric propulsion system
極音速巡弋飛彈	Hypersonic Cruise Missile, HCM
極音速傳統打擊武器	Hypersonic Conventional Strike Weapon, HCSW
極音速滑翔飛行器	Hypersonic Glide Vehicle, HGV
超高速砲彈	Hypervelocity Projectiles
極音速飛行器	Hypersonic Vehicle
高超音速武器	Hypersonic Weapons
類人體	Humanlike
紅外線	Infrared, IR
資通訊技術	Information and Communication Technology, ICT
紅外線搜索與追蹤	Infrared Search and Track,IRST
系統與系統間整合網路	integrated network system of system
整合傳感	integrated sensing
攔截器	interceptor
中間冷卻	intercooling
情報、監視、偵察	Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance, ISR
綜合全電力推進系統	Integrated Full Electric Propulsion, IFEP
洲際彈道飛彈	Intercontinental Ballistic Missile, ICBM

慣性導引	Inertial Guidance
物聯網	Internet of Things, IoT
互操作性	Interoperability
晶片	Integrated Circuit, IC
凱夫勒纖維	Kevlar Fiber
層流	Laminar
邏輯晶片	Logic IC
長程極音速武器	Long-Range Hypersonic Weapon, LRHW
頰麟窩	Loreal Pit
低軌道	low earth orbit
機器學習	Machine Learning, ML
中軌道	Medium Earth Orbit
記憶體晶片	Memory IC
微電子學	Microelectronics
軍事仿生學	Military Biomimicry
「安培號」	MV Ampere, 2015
奈米纖維	Nanofibril
自然語言處理	Natural Language Processing, NLP
新太空	New Space
安世半導體	Nexperia
外太空條約	Outer Space Treaty
負載與投遞系統	payload and delivery systems
光伏	Photovoltaics
等離子雲	plasma cloud
定位、導航與授時	Positioning, Navigation, and Timing, PNT
算力	Power of Algorithms
電力電子	power electronics

推定禁止	presumption of denial
量子資訊技術	Quantum Information Technologies
量子科學	quantum science
量子科技	quantum technologies
「伊莉莎白女王二號」	Queen Elizabeth 2, 1967-2008
「伊莉莎白女王級」航空母艦	Queen Elizabeth-class aircraft carriers, QEC
雷達尋標器	Radar Seeker
衝壓發動機	ramjet
回流換熱	recuperation
會合太空飛行器	rendezvous spacecraft
可再生能源製造與儲存	renewable energy generation and storage
機器人	robot
勞斯萊斯公司	Rolls-Royce
超音速燃燒衝壓發動機（簡稱超燃衝壓發動機）	scramjet
第二次抵銷戰略	second offset strategy
半導體	Semiconductors
小院高牆原則	Small Yard, High Fence
社交媒體機器人	social bot
社群媒體	social media
軟體機器人	software bots
網路爬蟲	spiders
太空基	space-based
太空垃圾	space debris
（美國）太空軍	Space Force
太空政策指令	Space Policy Directive, SPD
太空競賽	space race

太空狀況覺知	Space Situational Awareness, SSA
太空交通管理	Space Traffic Management, STM
星鏈	Starlink
光刻機	Stepper
戰略防禦計畫	Strategic Defense Initiative, SDI
結構色	Structural Color
「哥倫比亞」客貨輪	SS Columbia, 1880-1907
次波長結構	Sub-wavelength Structures, SWS
浮鰾	Swim Bladder
臨時通用許可	Temporary General License, TGL
「汪達爾號」柴電動力船	Tanker Vandal, 1903-1913
拓撲結構	Topography
基於渦輪的聯合循環發動機	turbine-based combined cycle engine, TBCC
湍流	Turbulence
「42 型」驅逐艦	Type 42 Destroyer - Sheffield Class
「45 型勇敢級」驅逐艦	Type 45 Destroyer - Daring Class
無彈性織物環	Un-stretchy Fabric Rings
「坎培拉號」客輪	SS Canberra, 1961-1997
「木星號」運煤船	USS Jupiter, 1913-1920
「蘭利號」航空母艦	USS Langley CV-1, AV-3, 1922-1942
「朱瓦特級」驅逐艦	USS Zumwalt-class DDG-1000
噴水推進器	waterjet

三、部門單位 / 公司 / 組織

法國國家航空太空公司（簡稱 法國航太）	Aérospatiale
------------------------	--------------

陸軍納蒂克研究發展與工程中心	Army Natick Research, Development and Engineering Center
荷蘭艾司摩爾公司	ASML Holding N.V.
百度	Baidu
博通	Broadcom
美國商務部工業與安全局	Bureau of Industry and Security, BIS
首席數位人工智慧辦公室	Chief Digital and AI Office, CDAO
國防先進研究計畫署	Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA
美國商務部	Department of Commerce
美國商務部工業暨安全局	Department of Commerce's Bureau of Industry and Security
美國能源部	Department of Energy
國防創新小組	Defense Innovation Unit, DIU
國務院	Department of State
美國國務院國防貿易管制處	Department of State's Directorate of Defense Trade Controls
美國財政部	Department of the Treasury
動力公司	Dynetics
谷歌	Google
哈瑪斯	Hamas
哈佛大學約翰 保爾森工程與 應用科學學院	Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences, SEAS
哈佛大學	Harvard University
赫姆士公司	Hermeus
華為	Huawei Technologies Corporation, Huawei
極音速發射系統公司	Hypersonix Launch Systems

英特爾	Intel
阿布杜拉國王科技大學	King Abdullah University of Science and Technology
雷度士	Leidos
麻省理工學院	Massachusetts Institute of Technology, MIT
麥吉爾大學	McGill University
微軟	Microsoft
美光科技	Micron Technology
美國航空太空總署	NASA
對外貿易委員會	National Foreign Trade Council
輝達	Nvidia
美國財政部外國資產管理局	Office of Foreign Assets Control, OFAC
高通	Qualcomm
火箭實驗室	Rocket Lab
國際半導體產業協會	Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI
斯巴達	SPARTAN
意法半導體公司	ST Microelectronics
聯邦眾議院「中國問題特別委員會」	the Select Committee on the CCP
賓州大學	University of Pennsylvania
維珍銀河	Virgin Galactic
聞泰科技	Wingtech
世界貿易組織	World Trade Organization, WTO
耶魯－新加坡國立大學文理學院	Yale-NUS College
耶魯大學	Yale University
中興通訊	Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, ZTE

四、人名

艾斯特維茲	Alan Estevez
布林肯	Antony Blinken
布希內爾	David Bushnell
川普	Donald Trump
巴特拉	François Barthelat
伊佐	Giuseppe Izzo
艾倫	Gregory Allen
柯文	Jake Colvin
皮克爾	James H. Pikul
葉倫	Janet Yellen
拜登	Joe Biden
米勒	Matthew Miller
紹伊古	Sergei Shoigu
萊特兄弟	Wilbur Wright/ Orville Wright

五、武器裝備

先進爆裂物處理機器人系統	Advanced Explosive Ordnance Disposal Robotic System, AEODRS
AGM-183 空射快速反應武器	Air-Launched Rapid Response Weapon, ARRW
攻船飛彈	Anti-ship Missile, ASM
反坦克飛彈	Anti-tank Guided Missile, ATGM
先鋒飛彈	Avangard
彈道飛彈	Ballistic Missile
機械蝙蝠	Bat Bot
仿生無人載具	Bionic Drone

仿生機器人	Bionic Robot
HTV-3X 黑雨燕	Blackswift
拆彈機器人	Bomb Disposal Robot
布拉姆斯 II 型	BrahMos-II
下士飛彈	Corporal Missile, MGM-5
飛鏢 AE 極音速無人展示載	Dart AE
斑鳩無人機	Dove Drone
X-20 動力倍增器	Dynamic Soarer, Dyna-Soar
電子火箭	Electron
飛魚飛彈	Exocet, AM-39
超大型無人潛航器	Extra-large Unmanned Underwater Vehicle, XLUUV
光纖電纜	Fiber Optic Cable
英國軍艦（陛下的艦船）	His (Her) Majesty's Ship, HMS
英國軍艦雪菲爾號	HMS Sheffield
極音速攻擊巡弋飛彈	Hypersonic Attack Cruise Missile, HACM
極音速飛行器	Hypersonic Glide Vehicle, HGV
極音速技術載具	Hypersonic Technology Vehicle, HTV
洲際彈道飛彈	Intercontinental Ballistic Missile, ICBM
9K720 伊斯坎德飛彈	Iskander
聯合軍種爆炸物處理無人系統	Joint Service EOD, JSEOD
Kh-47M2 匕首飛彈	Kinzhal
挪威先進防空飛彈系統	Norwegian Advanced Surface-to-Air Missile System, NASAMS
奧斯卡級潛艦	Oscar Class
機器貓頭鷹	Owl Drone
無人靶機	Pilotless Target Aircraft, PTA

電磁軌道炮	railgun
機器蜂	Robobee
帆罩	Sail
R-28 薩馬特飛彈	Sarmat
響尾蛇飛彈	Sidewinder Missile, AIM-9
機械蜻蜓	Skeeter
太空船 1 號	SpaceShipOne
SS-26「石頭」飛彈	Stone
潛射彈道飛彈	Submarine Launched Ballistic Missile, SLBM
超級軍旗攻擊機	Super Étendard
終段高空區域防禦系統	Terminal High Altitude Area Defense, THAAD
魚雷發射管	Torpedo Tube
通用運輸－裝置－發射車	transporter-erector-launcher, TEL
龜艇	Turtle
勇壯級驅逐艦	Udaloy
水下機器人	Underwater Robot
無人空中載具，通稱「無人機」	Unmanned Aerial Vehicle, UAV
無人水面載具，又稱「無人艇」	Unmanned Surface Vehicle, USV
無人潛航器	Unmanned Underwater Vehicle, UUV
無人車	Unmanned Vehicle, UV
X-51 乘波者	Wave Rider
亞森級潛艦	Yasen Class
3M22 鋳石飛彈	Zircon
桑瓦特級驅逐艦	Zumwalt-class destroyer, DDG 1000

六、外交 / 軍事 / 戰略 / 安全名詞

阿斯彭安全論壇	Aspen Security Forum
冷戰	Cold War
福克蘭戰爭	Falklands War
波斯灣戰爭	Gulf War
環太平洋操演	Rim of the Pacific Exercise, RIMPAC
	Ex
應對經濟脅迫協調平台	The Coordination Platform on Economic Coercion
第一次世界大戰	World War I, WWI
第二次世界大戰	World War II, WWII

七、度量衡單位

節	Knot
千伏	kV
馬赫	Mach
兆瓦	megawatt, MW
毫米	Mini-meter, MM
三維	Three-Dimensional, 3D
二維	Two-Dimensional, 2D

目錄

序	i
作者群	v
專有名詞中英對照	vii

緒論	1
-----------	----------

第一篇 兩用科技發展 13

第一章 太空兩用科技發展現況 15

壹、前言	15
貳、太空科技為軍事作戰帶來的變革	15
參、太空兩用科技作為未來作戰勝負核心之發展	20
肆、太空產業的角色與未來發展評估	25
伍、小結	26

第二章 極音速科技發展 29

壹、前言	29
貳、極音速武器發展現況	29
參、極音速飛機概念的推動	39
肆、極音速關鍵科技	44
伍、小結	46

第三章 仿生技術的軍事應用 47

壹、前言	47
------	----

貳、模仿生物特性的武器裝備	48
參、仿生技術軍事應用情況	52
肆、仿生技術應用的挑戰與發展趨勢	61
伍、小結	63
第四章 電力推進的兩用科技發展	65
壹、前言	65
貳、電力推進的組成與原理	65
參、當前電力推進的商業與軍事運用	68
肆、電力推進軍事運用的潛力與展望	70
伍、小結	73
第五章 軟體機器人在社交媒體的應用	75
壹、前言	75
貳、智慧化發展	76
參、多元化應用	80
肆、武器化趨勢	82
伍、小結	85
第二篇 美中科技競爭	87
第六章 美中科技競爭的本質、意涵與影響	89
壹、前言	89
貳、反映中國崛起下的美中競爭格局	90
參、美中科技競爭主要論述內容	92
肆、科技競爭對軍事準備與經濟發展具關鍵影響	95
伍、小結	99

第七章 美中的科技競爭與兩用技術以「電腦兵棋」為例	101
壹、前言	101
貳、美軍的電腦兵棋系統運用概況	102
參、解放軍電腦兵棋系統概況	107
肆、小結：美中電腦兵棋發展的評估	110
第八章 美國對中國的科技管制	115
壹、前言	115
貳、美對中科技管制領域重點	116
參、美國出口管制體系	120
肆、美國科技管制措施之後果	124
伍、小結	125
第九章 中國對美國科技管制的回應及其影響	127
壹、前言	127
貳、美國對中國科技管制的重要項目	128
參、中國對美國科技管制的反制作為	131
肆、美中科技競爭白熱化對全球的影響	135
伍、小結	137
第十章 美國科技制裁對中國軍事發展的影響	139
壹、前言	139
貳、美國的制裁	139
參、中方的反制	143
肆、美國高科技制裁對人民解放軍的影響	146
伍、小結	148
結論	151

表目錄

表 1	未來 20 年國防預算與軍事投資評估（億新台幣）	8
表 2-1	極音速載具種類及任務	31
表 8-1	美國出口管制法規體系比較	121

圖目錄

圖 3-1	斑鳩無人機	57
圖 3-2	鸚鵡螺 100 仿生潛艦	59
圖 3-3	潛射飛魚群	59
圖 3-4	潛射飛魚武器	59
圖 3-5	鰻魚無人潛航器	59

壹、前言

軍事史以小搏大防衛成功的案例所在多有，例如進行中的俄烏戰爭，俄國防預算規模為 659 億美元，相形之下烏克蘭國防預算僅 59 億美元，¹ 兩者差距達 11 倍之譜，且地形上由於烏俄兩國邊界長達 1,400 餘公里不利防守。在預算及戰場地形都對烏克蘭不利情勢下，烏軍憑藉劣勢兵力阻絕俄軍優勢地面部隊，可說是當代不對稱戰的成功案例。相對地，具海峽阻隔的台灣，考量總體防衛態勢、戰場地理、軍事科技發展趨勢，選擇合乎我國既有優勢的科技與產業作為優先選項，更具有成功防衛的條件。特別是考量面對俄國威脅的波蘭決定自 2024 年將國防預算提高到 GDP4%，² 更凸顯防衛決心與資源投入的重要。

事實上中華民國的生存與安全面對複合威脅，除國際空間、軍事威脅之外，自然環境的氣候變遷、國際產業的競爭等都是重要的外部影響因素，其中以武力威脅最為直接而嚴重，因可在短時間藉由暴力改變政治現狀徹底摧毀台灣的民主與自由。由於台灣國防資源有限，面對中共質量都具優勢的軍事威脅進行防衛作戰，必須全面思考戰略思維，而核心就是國防資源的運用。尤其是台灣海峽的地理空間距離有限，現代火力投射武器可快速跨越，所能提供的空間屏障也相對壓縮，故若能善用現代軍事技術與既有產業的優異條件，可在有限時間內發揮資源效益快速強化並獲得足夠防衛戰力。

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所研究員暨所長。

1 “Face-off with Russia over Ukraine Lifts Military Spending in 2021, Think Tank Says,” *Reuters*, April 25, 2022, <https://www.reuters.com/world/europe/face-off-with-russia-over-ukraine-lifts-military-spending-2021-think-tank-says-2022-04-25/>.

2 *Reuters*, “Poland’s 2024 Budget to See Big Spending on Defence, Social Benefits,” *Reuters*, August 24, 2023, <https://is.gd/McqDaT>.

相對之下，中共 2023 年度軍費支出達 1.55 兆人民幣（約 6 兆 5,410 億台幣）規模相較前年度成長達 7.2%，³ 對照同期中國大陸經濟成長率僅為 3%，反映出雖然疫情衝擊經濟，但北京仍持續提高軍事能力的意志與極權心態。進一步對照習近平於 2012 年第一任期開始時的國防預算為 1,003 億美金（約 3 兆台幣）則軍費增加 2.2 倍。以國際安全智庫一般估算中國隱藏性軍事預算，應為官方名目預算的 140% 左右，此給台灣乃至全球造成明顯威脅。⁴

進一步比較，我國同年度國防資源，以常年預算為 4,151 億列計，中共軍事預算為我國 15.7 倍，即使加計「特別預算」達 5,863 億台幣，中共也為 11.1 倍之譜，⁵ 使共軍在質與量皆大為提升。因此台灣需認真思考，不對稱戰力與正規兵力並非零與一的選擇，而是應對各種戰力投資的比例與優先順序，才能使有限的資源與時間發揮最大防衛效益。

另一方面中共本身的戰略環境相形複雜，其依照防衛環境區分為五大戰區需分散軍事資源，因此台灣不必與中國軍備競賽，但合理預算投入可建構足夠自衛，大幅增加防衛成功公算。因此在戰爭與和平間，墨家兵法的核心精神「自衛維和」，可作為我國所面對的防衛環境以及應對方向。

貳、防衛資源的挑戰

一、預算支出與人力資源

我國雖然國家量體較小，但總和國力的表現卻令人矚目，依照國際貨幣組織（IMF）統計，台灣的 GDP 總額達到 8,286 億美元，在全球 191 個

³ 艾米，〈中國 2023 年國防開支預算增加 7.2% 法新社盤點中國軍力〉，《法廣 RFI》，2023 年 3 月 5 日，<https://reurl.cc/jvDQkq>。

⁴ 本文部分摘自蘇紫雲，〈台灣防衛—墨子兵法的小國善守〉，「2023 民間國是會議論壇」座談會談話（台北：國際會議中心，2023 年 3 月 18 日）。

⁵ 國防部，〈國防部發布新聞稿說明行政院核列 112 年度國防部主管歲出預算〉，《中華民國國防部新聞稿》，111 年 8 月 25 日，<https://reurl.cc/K30dQe>。

經濟體中超越瑞士成為世界第 21 大經濟體。⁶ 相對地由於人口、國防資源投入規模等剛性條件受限，因此再強化防衛能力的挑戰主要有以下兩項因素。

（一）國防預算規模

長期來看國防預算規模換算平均維持在 GDP2% 上下浮動，同時名目預算的增加也必須需導入「消費者指數」（Consumer Price Index, CPI）的變動，也就是購買力的變動才能有意義的還原增加率。若由時間軸作為取樣觀察，可藉由代表性的台海飛彈危機 1996 年至 2016 年的 20 年為例，亞洲金融風暴前的 1998 年國防預算為 2,574.8 億元。⁷ 相對地，2016 年度國防預算 3,217 億元，⁸ 若比對同時期（1998 年至 2016 年）CPI 指數的增幅達 19.8%，⁹ 則 2016 年的國防預算僅相當等值於 1998 年的 2,654 億，在比例上呈現停滯。也就是在 1996 年至 2016 年的 20 年區間，台灣國防預算的實質增加率僅為 3%，對比中共軍事開支成長率可說嚴重不足，也使得 20 年來中共軍力崛起的威脅更為嚴峻。

持平來說，任何國家的軍事預算不可能無限擴張，特別是資源有限的小國，但可觀察預算結構，以民主國家的國防預算為人力維持、作業維持、裝備投資三大區塊平均各佔預算的 30% 作為基準，因此以我國國防預算目前人力維持費約 1,790 億台幣規模為準，¹⁰ 可合理推估每年約 5,400 億新台幣會是最小的基礎。如此作業維持費才能有效維繫裝備妥善率，軍事投資費也才能擁有足夠規模維持穩定的裝備研發與生產規劃，保持現役

⁶ 姚惠茹，〈超越瑞士晉升第一名，臺灣去年 GDP 全球排第 21 大！「人均 GDP」2003 年來首次超車南韓〉，《今周刊》，2003 年 4 月 12 日，<https://reurl.cc/q0MxRp>。

⁷ 行政院主計總處，〈中華民國 87 年度中央政府總預算〉，<http://win.dgbas.gov.tw/dgbas01/87ctab/87c130.htm>。

⁸ 〈105 年度國防預算增 89 億元〉，《中央社》，2015 年 8 月 20 日，<http://www.cna.com.tw/news/aip/201508200281-1.aspx>。

⁹ 行政院主計總處，〈消費者物價指數與購買力換算〉，http://estat.dgbas.gov.tw/cpi_curv/cpi_curv.asp。

¹⁰ 謝菊華，〈113 年國防預算創歷史新高〉，《新頭殼》，2023 年 8 月 24 日，<https://newtalk.tw/news/view/2023-08-24/885489>。

部隊得以逐步獲得新式裝備，確保有效戰力，這都有賴決策者的決心與穩定。同時，導入國防經濟的概念，讓國防投資發揮「加值型」（value added）效益，也可促進國防需求及經濟發展的正向循環。

（二）人力資源減少

國家人口結構也是影響國防人力的關鍵要素，由我國可徵役男的人數變動趨勢觀察，面臨的問題較為嚴峻。由人口金字塔觀察，同樣以前述「台海飛彈危機」後的 20 年區間作為觀察取樣，我國人口出生率在 1998 年開始持續降低，由當年可徵役男數 148,042 人，至 2016 年役男減少為 111,041 人¹¹ 及齡役男的來源人數縮減達 33%，對部隊人力需求造成結構性問題。因此，若想僅倚賴募兵滿足部隊人力需求將面對極大挑戰，或需與其他職業競爭付出極高的人力成本。除前述 20 年區間時期趨勢外，內政部人口統計適齡役男自 2016 年開始由 11 萬人持續開始遞減，預估至 2025 年進一步縮減到 7.4 萬人，並逐年遞減。因此以 2021 年現住人口（18 歲至 32 歲）男女為 4,127,123，男性為 2,146,821 人。若以 2016 年至 2021 年，5 年區間志願士兵招獲總數為 70,495 員，換算年均約 14,099 員。相當於 0.3%，或千分之三，符合民主國家募兵比例的常態。是以，少子化若使可徵人口減少至目前三分之二，則換算適齡人口數志願士兵每年約僅能招獲 9,305 員，恐難滿足未來部隊規模的需求。

役期為 5 年的志願役人力組成的武裝部隊，可穩定單位的人力結構、降低訓練成本，可獲得符合成本效益的專業化部隊，但由於我國少子化導致人口結構改變，因此志願役士兵人數受限。且中共不斷增進投射能力，包括氣墊船、直升機等立體多元登陸手段，加上可藉由約 70 艘正規兩棲登陸艦、戰時動員 60 艘以上的商用客滾輪，乃至中共陸航 1,000 架直升機可進行快速的兵力投射，使共軍具有快速投射的戰略突襲能力，將擠壓我國後備動員的應變時程，故保持一定規模的現役部隊極為重要。

¹¹ 行政院主計總處，〈現住人口出生、死亡、結婚、離婚統計〉（台北：行政院主計總處，2016 年）。

如同「捍衛戰士 2」電影目的之一就是為了加強徵募海軍飛行員，¹²凸顯包含美國、歐盟在內的民主國家都面臨志願役人員招募的挑戰。其主因為民主國家的民眾由於生活方式，加入武裝部隊的平均比率都偏低，各國在此情況下無不想盡辦法招募志願兵，這對人口較少的國家，例如瑞士、挪威、瑞典等國就更為困難。而恢復徵兵就成為維繫武裝部隊人力的重要方式。

二、資源調整提高效能

《中華民國憲法》保有國民服役義務，具體做法則規範在普通法層次的兵役法規定「4 個月訓練役」、「一年兵役」，並給權責機關行政裁量權，可以依照實際需要自行決定恢復兵役。這將有助提高台灣的「防衛韌性」，也就是有飛彈阻止敵軍登陸，有更充足的人力防止前述敵軍可能的兩棲或空降的突襲。

我國自 2024 年恢復一年期兵役，可說是前述人口結構有限下的合理選擇。事實上，以人口數較少的民主國家為例，具代表性的包括瑞典 1,024 萬人口，依照男女性別服 9 至 12 個月兵役、挪威人口 542 萬，男女皆需服 12 個月兵役、以色列人口 888 萬人，男女皆需服 2.5 年不等之兵役，這都是同時考量威脅以及人口數量。參考歐洲國家的經驗，對照台灣海島防禦為主的情境，較前述國家易守難攻，役期若維持 12 個月便可在兼顧國家安全與國民生涯規劃的平衡點。

義務役與志願役的關聯並非零與一的二分法。民主國家的志願役軍隊屬「軍隊公民」（soldier-citizen），而義務役為主的屬「公民軍隊」（citizen-soldier），受威脅導向的國家通常以公民軍隊為主要機制，兩者如同網球雙打一般相輔相成。同時規劃國防人力（manpower），以及常備與後備部隊的比例配置，便可在有限資源的限制下發揮最大效益。

¹² 徐筠庭、蕭明正，〈搭《捍衛戰士 2》熱潮！美國海、空軍募新血 我國防部也跟風〉，《TVBS 新聞台》，2022 年 6 月 7 日，<https://is.gd/1fyCU9>。

2024 年恢復徵兵後，各權責機關同步參酌其他國家實務規劃以提高新兵訓練的安全與專業技能，包括增加民防訓練，以在災害發生時協助災害救援。軍事作戰則集中適性、戰鬥、體能，並將延長的役期予以整體評估，如基礎訓練 / 進階銜接訓練 6 個月，在營 / 演訓 6 個月等。同時針對役男與社會關係展開跨部會政策配套，例如教育部修訂大學學期制，使役男得以於 4 年內修完學分、獲得學歷並完成兵役。經濟部則評估中小企業人力補助等，這是國防與社會生產所需的人力資源及培訓的重要關聯。

同樣邏輯，應嚴肅考慮合理的增加預算。中華民國的國防思維基礎為戰略守勢，軍事戰略層面為「防衛固守，重層嚇阻」，用兵的作戰層面為「拒敵於彼岸、擊敵於海上、毀敵於水際、殲敵於灘岸」，而造兵的兵力整建則結合不對稱兵力、及正規兵力以發揮最大防衛效益。

然而，同樣面對威脅的以色列則是將國防預算列為政府支出的優先，文化上同屬「華人」國家的新加坡，將國防預算作為首位，再如同前文所述俄烏戰爭後對俄羅斯備感威脅的波蘭，也決定將國防預算提高到 GDP4%，這都是值得我方有效維持足夠防衛能力的參鑑之處。

以國防預算結構主要分為人力維持、作業維持、軍事投資三者，估算我國防預算應為 5,400 億規模為基礎，若進一步考量 2022 年我國 GDP 產值為 8,286 億美金規模，以 GDP3% 換算即 240 億美金的量能，相當 7,200 億台幣規模，則可提高、加速並穩定總體防衛能力。

易言之，依照台灣的經濟量體，國防預算應在 5,400 至 7,200 億元台幣區間，可作為未來政策之參考依據。面對外來武力威脅增加，學者菁英與跨部會支持，一方面增加軍事投資，另一方面善用「經濟加乘」（multiplier）效果，可同時滿足國防需求與經濟的發展，投入國防資源產生正向循環。

參、國防資源投入預估

後續章節中，除各作者所列舉的軍事技術分析與評估外，也須預估未來所需的兵火力投資能量，就須先行評估國防預算的規模，也就是可掌控

的資源，如此在規劃時將有所依據。

以 2023 年為基期，本年度法定國防預算為 5,863 億台幣，較前年 5,147 億增加 13.9%，¹³ 但若進一步拆解，扣除特別預算、非營業特種基金等，筆者認為此為不可控的預算，因此應以穩定以「常年預算」為 4,151 億元新台幣為基準，較前年增加 475 億元，年增率 12.9%。但 12.9% 的成長率也非常態，因此以 3% 作為年均成長率之基準較為合宜。

同時採用複合成長公式計算未來國防預算之投入：

【複合成長公式】

$$(FV) = \text{現值} (PV) \times (1 + r)^t$$

其中的 FV 指終期價金、PV 為各期國防預算、r 為年成長率、t 為時間。

【變數設定】

PV 設定為 2024 年之常年預算，4,406 億新台幣

r 設定為 3%、t 為 20 年

則可得出年度軍事投資，由 2024 年開始，預估未來 20 年軍事投資的總和為 2 兆 9,396 億新台幣。第一個 5 年總和為 5,670 億新台幣，其他各期程之軍事投資請見表 1。依照此一中常期的預算評估，結合威脅之判定，可更合理選擇兵力規劃與作需投資，發揮最大效益。

一、強化用兵與造兵的關聯

以資訊較透明的美軍為例，其對兵力籌獲採「聯合戰力暨發展系統」(Joint Capabilities Integration and Development System, JCIDS) 改革，結

¹³ 賴于榛，〈政院拍板 112 年度國防預算大增 716 億，成長 13.9%〉，《中央社》，2022 年 8 月 25 日，<https://is.gd/WwuVII>。

表 1 未來 20 年國防預算與軍事投資評估

(億新台幣)

年度	年預算	年增預算	年度軍事投資 (平均 25% 列計)	週期累進投資
2024	4,406	124.5	1,068	
2025	4,402	128.23	1,100	
2026	4,534	132.08	1,133	
2027	4,670	136.04	1,167	
2028	4,810	140.13	1,202	5 年期 5670
2029	5,103	148.66	1,275	
2030	5,257	153.12	1,314	
2031	5,414	157.71	1,353	
2032	5,577	162.44	1,394	
2033	5,744	167.32	1,436	5 年期 6772 累進 10 年為 12442
2034	5,916	172.34	1,479	
2035	6,094	177.71	1,523	
2036	6,277	182.83	1,569	
2037	6,465	188.32	1,616	
2038	6,659	193.97	1,664	5 年期 7851 累進 15 年為 20293
2039	6,859	199.97	1,714	
2040	7,065	205.78	1,766	
2041	7,277	211.95	1,819	
2042	7,495	218.31	1,873	
2043	7,720	224.86	1,931	5 年期為 9103 累進 20 年為 29,396
合計			29,396	
以年度預算為準，不含特別預算因具不穩定性				

合採購系統 (acquisition system)，¹⁴ 此造兵與用兵是一種創新戰法，讓軍事科學法則不授科技發展影響，而歷久彌新。我國近年強調「不對稱戰兵力」(asymmetric force) 可說是以小搏大的關鍵，戰爭史中也有諸多實

¹⁴ Mo Mansouri, Michael McGrath, Donald Schlomer, Dinesh Verma, and Philip S. Anton, *Report on Joint Capabilities Integration and Development System* (Stevens Institute of Technology, 2022), p. 3.

例證明其效益。例如冷兵器時期的坎尼會戰，漢尼拔將方陣兵力重新配置，以騎兵擊敗占優勢的羅馬軍團。二戰時期德國將戰車集中使用，擊潰戰車數量優勢卻分散的法軍。日本海軍集中航艦，得以在太平洋戰爭初期掌握海權。這都是經典的代表案例。在兵器部分，以台海戰場反登陸的特性所需的反艦飛彈為例，1967年埃及率先以「艦對艦」飛彈擊沉以色列驅逐艦、1982年福克蘭戰役阿根廷戰機以「空對艦」飛彈擊沉英國巡防艦、2022年烏克蘭海軍以「岸對艦」飛彈擊沉俄國「莫斯科號」驅逐艦，此三個代表案例都象徵不對稱兵器的潛力與價值。

另一項需思考的是「不平衡建軍」(unbalance force)，意指在一軍事力量中對於兵種的投資不同，例如美國海軍曾經出現的「平衡建軍」、「不平衡建軍」的路線爭議，也就是在航艦、驅逐艦、巡防艦、潛艦等兵科部隊的投資比例。可以這麼說，「不對稱兵力」是在國家戰略層級的評估、「不平衡建軍」則是在軍種層級的評估，上位階的確立，方有助於後續用兵裝備的政策確立。

接著則是造兵與資源投資，無論前述的不對稱戰力、不平衡建軍的核心就在有限資源下進行投資的選擇，因此核心就是不對稱成本(asymmetric cost)，除先進裝備外，靈活運用低成本、低科技裝備以「成本交換比」(cost-exchange ratio)創造不對稱優勢的價值，將可使總體防衛效果最大化。

由軍事管理科學來看，這都說明不對稱戰的核心就在成本，也就是前述「不對稱成本」，所謂低成本不對稱武器可以是利用戰略、組織、科技等方式，以較敵方低成本方式創造戰術優勢，進而累積並創造戰略上的優勢。以軍備相對造價舉例而言，各國主力戰機平均造價約為6,000萬美元以上，而防空飛彈平均成本則僅為100萬美元。又如作為艦隊主角的巡防艦造價平均為10億美金以上，而反艦飛彈均價僅約100萬美元。

藉由成本評估及戰略需求思考，可在用兵與造兵的選擇上同步考量戰略需求及效益規劃。

二、技術選擇與評估

我國在進行各種裝備、軍事科技選擇時，或可導入「技術可用度」(Technology Readiness Level,TRL)的方式。此為美國太空總署所創設，並為美國國防部用以評價各式科技發展與應用時的主要方式之一，其主要分類如後。

基本原則的評估，科技可用度(TRL)是用於評估特定科技成熟度的量測系統。每個技術項目都根據每個技術等級的參數進行評估，再根據各個項目的發展進度進行評級。劃分為9個科技發展與可能的等級。TRL 1最低，TRL 9最高。

TRL 1 初步研究：當一項技術處於科學研究初始，就列為意指是正在轉化為未來的研究和開發。

TRL2 概念發展：一旦基本原理研究並且可實際應用於這些初步發現，就會進入TRL 2，此階段技術具有很強的推測性，因為該技術的概念幾乎沒有實驗證明。

TRL 3 可行性驗證：是研究和設計階段開始時，此技術可列為TRL 3。一般而言，在這個等級上需要進行分析和實驗室研究，以確定一項技術是否可行，並在開發過程中準備好進一步推進。通常在TRL 3期間，會構建一個概念驗證模型。

TRL4 整合測試：一旦科技完成概念驗證，就會將對多個組件進行相互測試。

TRL 5 系統建立：達到5的科技意指建立原型(麵包板)，且相對TRL 4的技術進行更嚴格的測試。模擬應盡可能接近現實的環境。

TRL 6 原型建立：技術具有功能齊全的原型或代表性模型。

TRL 7 環境測試：工程原型或原型在實際環境中進行展示與測試。

TRL 8 實際完成全系統測試與認證：科技已經過測試並符合要求，可在現有技術或技術系統中實施。

TRL 9 可執行並滿足實際任務操作：此科技可在實際任務環境下成功

作業獲得，證明其符合操作測試與改進之性能，即可稱為 TRL 9。¹⁵

若能參考此類已經應用的科技評價模式，在用兵指導原則下，合理選擇與評估軍備體系的研發科技，或由既有各類科技進行「向上建軍」的政策，如此可合理的進行下貫式（top down）、上饋式（bottom up）的雙向決策，以滿足短中長程的建軍、兵力整建、戰備需求。

肆、小結：以小搏大的關鍵是資源運用

前文提及中共國防支出是台灣的 15 倍，但由於四周競爭者眾，國防資源與軍力較分散。相對地台灣僅需面對單一威脅，類似《孫子兵法》的「我專而敵分，我專為一，敵分為十」，這也是台灣的局部優勢。只要國防預算合理增加並結合後文所列的各種關鍵科技，可獲得充足防衛能力，提高防衛作戰成功公算。

軍事史也客觀反映出此一事實，包括馬拉松戰役等若干以小搏大的成功防衛案例，也包含進行中的烏俄戰爭，如同文前所述開戰前俄國國防預算為烏克蘭 11 倍之多，類似台海兩岸的對比情勢，戰場地形有利俄國快速入侵。在不利的情况下，烏克蘭遭遇突襲的第一時間，以劣勢兵力成功阻絕優勢的俄軍入侵。

再如戰術戰法層面，英國在二戰時面對納粹德國 V1 巡弋飛彈的心事威脅，曾以「防空氣球」（barrage balloon）藉低科技、低成本手段攔截納粹德軍 300 枚以上的 V1 飛彈。¹⁶ 類此經驗都可使我們思考，低價、低科技的手段抵銷部分威脅，因此考量北部淡水河口、東部空軍基地、西部重要軍事關鍵設施的低空來襲的巡弋飛彈、無人機等威脅，都可評估以此類防空氣球作為防空輔助手段。

¹⁵ DoD, “Technology Readiness Levels in the Department of Defense,” *Defense Acquisition Guidebook*, 2010, <chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://api.army.mil/e2/c/downloads/404585.pdf>.

¹⁶ “A Day Out ‘Doodling’ at Duxford,” *Balloon Barrage Reunion Club*, March 2008, <http://www.bbrclub.org/Doodling%20at%20Duxford.htm>.

參考其他民主國家合理提高國防預算的趨勢，結合台灣可運用的成熟科技，可提供更多元更全面的規畫思考，即以低價高效的方式抵銷敵方的備台優勢。例如以導引彈藥遂行「以陸制空、以陸制海」創造有效的拒止區。在立於不敗的前提下，搭配合理比例的船艦，戰機擔負反制灰帶行動任務，爭取時間籌獲新式備台的正規兵力，形成良性循環。善用守勢作戰的主場優勢，完整地結合戰場地理、軍事科技等要素，如同墨家思想的「備城門」一般，有效結合不對稱兵力與正規兵力，相輔相成達成防衛任務。

PART 1

.....

兩用科技發展

第一章 太空兩用科技發展現況

第二章 極音速科技發展

第三章 仿生技術的軍事應用

第四章 電力推進的兩用科技發展

第五章 軟體機器人在社交媒體的應用

第一章 太空兩用科技發展現況

許智翔*

壹、前言

過往，太空科技曾是美蘇兩強的關注重點。自 1950 年代開始的「太空競賽」(space race)，成為了冷戰前期自 1957 年到 1975 年間，雙方角力的關鍵領域之一。儘管 1975 年後開啟了太空合作的年代，然而伴隨著太空競賽的科技突破成長的，正是雙方用以確保徹底推毀對手的核子武器投射能力；¹事實上，如回顧中國的太空科技發展歷程，也能從早期的「兩彈一星」口號中，了解到過往中國在太空科技的發展上，與其軍事作戰需求密不可分的軍民兩用特性。簡言之，太空科技的發展，長期以來就與軍事能力，特別是與核武器相關的長程打擊能力有著密切關聯。而在新太空(New Space)蓬勃發展的現在，太空科技不只是未來人類科技生活的必須，更是軍事作戰中致勝的絕對關鍵，美國「星鏈」(Starlink)系統近年在烏克蘭戰場上展現的軍事運用潛力，正揭示著太空兩用科技在未來國家安全上所扮演之巨大角色的冰山一角。

貳、太空科技為軍事作戰帶來的變革

一、冷戰時期發展之技術為現代太空與軍事科技重要基礎

冷戰時期的技術發展與太空競賽，可說是現代太空科技的基礎，也形塑了現代作戰科技概念。整體而言，美蘇雙方在冷戰開始後進行的核武競賽及太空競賽，奠定了雙方火箭技術的發展，並且導致了洲際彈道飛彈

* 國防安全研究院中共政軍與作戰概念研究所助理研究員。

¹ Eric Betz, "Apollo-Soyuz Mission: When the Space Race Ended," *Astronomy*, July 21, 2020, <https://www.astronomy.com/space-exploration/apollo-soyuz-mission-when-the-space-race-ended/>.

(Intercontinental Ballistic Missile, ICBM) 的誕生，因此太空能力的進展，其實與核武的發展與相關能力息息相關；此外，人造衛星也帶來了「太空基」(space-based) 情報能力上的發展。² 值得注意的是，儘管蘇聯在 1957 年發射的人類史上第一顆衛星「史普尼克 1 號」(Sputnik-1) 為美國帶來極大心理震撼，然而艾森豪總統卻早在 1955 年時就已計畫制定太空政策，並推動太空物體的「自由飛越」概念、成為發展偵察衛星的重要法律與政策先驅，因此事實上就太空與軍事的發展而言，美蘇兩強可說是齊頭並進。在艾森豪總統推動衛星相關能力與概念發展的同時，美國空軍則更積極，甚至希望發展能在軌道或次軌道上，進行包含偵察、轟炸等多種任務的 X-20「Dyna-Soar」太空飛行器。³

由於對太空軍事化的擔憂，國際社會催生了包含《外太空條約》(Outer Space Treaty) 在內的多個國際規範，嘗試避免太空淪為戰場。雖然這樣的努力，避免冷戰雙方在對抗及軍備競賽中，將核武或大規模毀滅性武器置於軌道上，也禁止各國對太空提出主權聲索，甚或進行占領作為，然並不能阻礙太空科技的高度兩用特性在作戰層面上扮演更重要的角色。冷戰後期，美國不僅開始部署目前廣為全球軍民大量運用的「全球定位系統」(Global Positioning System, GPS)，更在 1980 年代發動了俗稱「星戰計畫」(Star Wars Program) 的「戰略防禦計畫」(Strategic Defense Initiative, SDI)，計畫研發大量先進衛星與飛彈、動能武器、定向能武器等各式武器，並運用包含從陸基到太空基在內，各作戰層面的監視、追蹤、攔截、作戰管理、通訊等，龐大的 ICBM 防禦及反衛星系統。

雖然 SDI 曾被認為是美國最後在冷戰擊敗蘇聯的重要因素，然而證據顯示蘇聯並未確實投入了軍備競賽進行大量消耗，因此是否真有助於結束冷戰仍有疑義，但就太空科技發展而言，這項計畫確實讓美蘇雙方都更

2 Craig Boucher, "On Space War," *Modern War Institute at West Point*, January 6, 2022, <https://mwi.usma.edu/on-space-war/>.

3 Major Jeremy J. Grunert, "The Other Space Race: Eisenhower and the Quest for Aerospace Security," *Air University Press*, March 1, 2021, <https://www.airuniversity.af.edu/AUPress/Book-Reviews/Display/Article/2518927/the-other-space-race-eisenhower-and-the-quest-for-aerospace-security/>.

進一步發展了先進的飛彈、火箭技術，以及反衛星系統。⁴ 當 SDI 計畫於 1993 年終止時，其目標已由綿密複雜的多層次防禦系統抵禦蘇聯對美國本土的大規模 ICBM 攻擊，轉變為針對全球、防禦有限打擊的系統。⁵

然而拋開巨大且前瞻的 SDI 計畫，以及在核武作戰中的地位以外，太空實際上在冷戰中後期，已逐漸發展為各領域軍事作戰中的核心角色。在美國用以擊敗蘇聯的「第二次抵銷戰略」（second offset strategy）中，先進科技的發展使得美軍再次取得軍事作戰上的優勢，而太空能力正是其中的核心，尤其前述之 GPS，正是其中關鍵；儘管美蘇雙方並未真正爆發毀滅性的世界大戰，但美軍及北約國家在「第二次抵銷戰略」所建立的先進科技及現代作戰概念，在 1991 年的波斯灣戰爭中以極低的損失徹底擊敗了伊拉克軍隊。⁶

目前除了美國之外，已有多種主要的 GPS 衛星導航系統提供服務，如前蘇聯 / 俄羅斯的 GLONASS、歐洲的伽利略（Galileo）以及中國的北斗衛星等主要系統出現。而在各種情報、監視、偵察（Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance, ISR），以及通訊用途的各種衛星支援之下，太空領域所能提供的衛星通訊、定位導航與授時（Positioning, Navigation, and Timing, PNT）、地球觀測等能力輔助，已成為現代武裝部隊的基本作戰能力。隨著太空技術的發展，以及武裝部隊對太空能力的依賴日漸提高，太空領域更與網路空間（cyber）一同被北約定義為傳統「陸、海、空」以外的新作戰領域。⁷

4 Pavel Podvig, “Did Star Wars Help End the Cold War? Soviet Response to the SDI Program,” *The Technical Basis for Arms Control, Disarmament, and Nonproliferation Initiatives*, Vol. 25, 2017, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08929882.2017.1273665>; Ken Adelman, “The Phantom Menace: How An Unproven, Widely Mocked Technology Scared the Soviets into Ending the Cold War.,” *Politico*, May 11, 2014, <https://www.politico.com/magazine/story/2014/05/the-phantom-menace-106551/>.

5 Jon Harper, “SPECIAL REPORT: The Legacy of the Strategic Defense Initiative,” *National Defense*, April 23, 2019, <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2019/4/23/special-report-the-legacy-of-the-strategic-defense-initiative>.

6 Andrew Davies, “The Ephemeral Offset Strategy,” *The Strategist – ASPI*, August 3, 2016, <https://www.aspi.org.au/ephemeral-offset-strategy/>.

7 Major General Gianluca Carai, “The ‘Land Approach’ to the Space Domain: Developing Space Expertise in Land Forces,” *The Journal of the JAPCC*, Edition 32, August 2021, <https://www.japcc.org/articles/the-land-approach-to-the-space-domain/>.

二、美中對抗的脈絡下太空兩用能力的關鍵性

美中對抗與大國競爭的重新白熱化，是太空兩用科技發展的關鍵。自歐巴馬時期的「重返亞洲」及「亞太再平衡」戰略開始，習近平於 2012 年上台後日趨侵略性的對外政策下，美國在川普（Donald Trump）時期開始大幅增加與中國的對抗，而 2022 年 2 月 24 日俄羅斯對烏克蘭發動的入侵，更使民主與獨裁的陣營對立明顯化。在這樣的脈絡下，太空兩用科技不僅關鍵，也是雙方在競合中的重要對抗場域。

對中國而言，長期以來大力發展太空兩用科技的目的，同樣是基於太空科技的高度軍民兩用特性上，從冷戰時期的「兩彈一星」計畫開始，中國的太空科技就與其核武，以及彈道飛彈的發展密不可分；1990 年代時，受到美軍展現的先進能力震撼，中國開始全力發展先進科技能力，其中太空正是其重點之一。共軍自 2000 年開始大力發展太空科技，如開始發展北斗衛星導航系統等科技；自 2015 年以來，中國發射了包含高速率通訊衛星（High Throughput Satellite）、數十顆低軌道（low earth orbit）通訊與情報收集衛星等，北斗系統也在 2020 年完成全球覆蓋，而中國也曾把名義上屬於國營企業的民用衛星轉為軍事用途。⁸

整體而言，中國當前在太空科技的軍事發展上，一方面藉由建設自身的太空能力，構築其所謂之「信息化作戰」能力；透過現代化與高科技的研發，試圖趕上西方武裝部隊的作戰能力。由於美國為首的西方，在軍事作戰，甚至經濟與社會上都高度倚賴太空能力，因此對中國而言，如能在太空方面擊敗西方，就可以為整體的作戰態勢，以及系統性競爭上取得極大優勢。⁹也因此，太空作戰能力，在中國的「體系破擊戰」概念中的多個作戰領域裡，都扮演重要地位，¹⁰ 中國的太空資產將可以為解放軍在

⁸ Michael Dahm, "China's Desert Storm Education," *U.S. Naval Institute*, March 2021, <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2021/march/chinas-desert-storm-education>.

⁹ Ken Moriyasu, "China Can 'Grapple' US Satellites with Robotic Arm, Commander Says," *Nikkei Asia*, April 21, 2021, <https://asia.nikkei.com/Politics/International-relations/US-China-tensions/China-can-grapple-US-satellites-with-robotic-arm-commander-says>.

¹⁰ Jeffrey Engstrom, "Systems Confrontation and System Destruction Warfare," *RAND*, 2018, https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR1708.html.

包含侵台在內、周邊區域，甚至長距離的各種武力投射任務中，得到所需支援，並且在對抗美軍介入的相關任務上，扮演關鍵角色。¹¹ 習近平上台後，更自 2015 年的軍改開始，將太空與網路等新興作戰領域的資產與能力，整合進入新軍種「戰略支援部隊」進行統籌運用。

目前，中國及俄羅斯等西方民主盟國的體制性對手，已將「反太空（counter-space，也作 anti-space）能力」作為其太空科技發展的核心關鍵方向。有鑑於相關能力的快速發展，這些國家的反太空能力受到美國情報機構的高度重視，並且認為中國在 2019 年時，就已經開始部署運用「直升式反衛星武器」（direct-ascent ASAT, DA-ASAT），如反衛星飛彈，以及可能用來致盲或損害衛星的雷射系統等，也因為相關能力的高度發展，中國被美國認為是其中的最大威脅。¹²

針對大國競爭下的太空作戰需求，美國在川普時期大力發展太空能力。川普上任後連續簽署了 7 個「太空政策指令」（Space Policy Directive, SPD），不僅重啟載人太空探索計畫、進行法規最佳化、發展太空交通管理（Space Traffic Management, STM）與太空狀況覺知（Space Situational Awareness, SSA）等確保安全，更在 2019 年的「太空政策 4 號指令」（SPD-4）建立了「太空軍」（Space Force）與「太空司令部」（Space Command），強化太空作戰能力。

川普政府也在 2019 年時成立美軍的太空發展署（Space Development Agency, SDA），與民間產業合作建構「國防太空框架」（National Defense Space Architecture, NDSA），後改名為「增強作戰人員太空架構」（Proliferated Warfighter Space Architecture, PWSA）。PWSA 為一具有 7 層次的「單一、連貫」作戰架構，包含用以預警、追蹤與標定先進飛彈威脅的「追蹤層」（tracking layer），連結「追蹤層」與地面攔截器及其他

¹¹ Mark Stokes et. al., "China's Space and Counterspace Capabilities and Activities," *U.S.-China Economic and Security Review Commission*, March 30, 2020, https://www.uscc.gov/sites/default/files/2020-05/China_Space_and_Counterspace_Activities.pdf.

¹² Joe Gould, "China Aims to Weaponize Space, Says Intel Community Report," *Defense News*, April 15, 2021, <https://www.defensenews.com/congress/2021/04/14/china-aims-to-weaponize-space-says-intel-community-report/>.

武器系統的「傳輸層」(transport layer)，用以支援標定機動地面資產的「監視層」(custody layer)、提供太空基指揮管制的「戰鬥管理層」(battle management layer)，為 GPS 能力可能將遭到拒止的作戰環境提供 PNT 服務的「導航層」(navigation layer)，用於檢測深太空潛在敵對行動的「嚇阻層」(deterrence layer)，以及協助前述各層衛星操作的「支援層」(support layer) 等，預計將包含約 550 顆衛星，並進行全球覆蓋。¹³

參、太空兩用科技作為未來作戰勝負核心之發展

在大國競爭再起及美中對抗的國際局勢發展脈絡下，美中之間在太空領域已然形成一個新的「太空競賽」。¹⁴ 值得注意的是，隨著新太空時代的到來，太空領域已然是目前新興科技的核心要項之一，不僅各種源自太空探索而生的科技運用廣見於人類生活的各層面，未來各領域高度倚賴的網路通聯，也將與太空密不可分，甚至預期到 2050 年時，太空將與全面、廣泛的各種經濟部門，在科技、市場與運用等層面有更深入的融合。¹⁵ 換言之，太空領域將會是國家在承平時與戰時都需高度倚賴，並維繫其運作的關鍵科技。單就戰場運用而言，也由於現代的先進軍事作戰對相關能力的高依賴性，以及中國在太空及反太空能力上的大力發展，致使美軍也評估認為一旦中國武力犯台，太空將極可能成為最初的交戰場域。¹⁶

一、太空兩用科技在軍民間的模糊性

2022 年 2 月 24 日，俄羅斯對烏克蘭發動入侵後，烏克蘭副總理兼數

¹³ “Hypersonic Missile Defense: Issues for Congress,” *Congressional Research Service*, Updated August 21, 2023, <https://sgp.fas.org/crs/weapons/IF11623.pdf>.

¹⁴ Bryan Bender, “‘We Better Watch Out’: NASA Boss Sounds Alarm on Chinese Moon Ambitions,” *Politico*, January 1, 2023, <https://www.politico.com/news/2023/01/01/we-better-watch-out-nasa-boss-sounds-alarm-on-chinese-moon-ambitions-00075803>.

¹⁵ James Black et. al., “Future Uses of Space Out to 2050: Emerging Threats and Opportunities for the UK National Space Strategy,” *RAND*, 2022, https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA609-1.html.

¹⁶ 曹晏郡、邱福財，〈中印相繼投資太空科技 美憂中反太空能力威脅全球〉，《公視新聞網》，2023 年 7 月 27 日，<https://news.pts.org.tw/article/648458>。

位轉型部長費德羅夫（Mykhailo Fedorov）隨即在推特上籲請馬斯克（Elon Musk）提供其 SpaceX 公司的低軌通訊衛星座「星鏈」系統支援，並得到應允。「星鏈」高效率協助烏克蘭在俄軍的強大火力投射下，維持醫院、學校、消防，乃至於通訊、能源在內的各種關鍵基礎設施的運作，更成為烏克蘭武裝部隊高效運用的通聯網路。¹⁷「星鏈」的運用，事實上也使得戰場及後方的各種資訊、影像，能快速地散播至世界各地，協助烏克蘭強化在國際上的宣傳工作與爭取各國支持。

「星鏈」在烏克蘭戰爭中的表現，展現了「新太空」時代的新興科技，在作戰上的高度潛力。然而，SpaceX 公司在烏克蘭戰爭中，也多次停止或減少提供服務，為基輔當局在作戰上造成相當的困難。¹⁸是故，未來在軍事作戰上將當前蓬勃的商業太空能力轉為支援國家安全用途上，仍存在進一步形塑規範與評估其可能風險的空間。

除此之外，前述軍民兩用的模糊性，也呈現在「反太空」能力上，如中國的「實踐—17 號」衛星即為一例；「實踐—17 號」是一枚實驗衛星，可以用來進行通訊與廣播，並追蹤太空垃圾，然其也配備了機械臂，被美軍認為可以用來攻擊或抓捕其他衛星。¹⁹

二、確保太空資產的作戰能力與生存性

承前所述，太空能力在未來的人類科技生活、社會機能的穩定運作，乃至於軍事安全層面上都具備高度的重要性。因此，太空資產如衛星等裝

¹⁷ Vivek Wadhwa and Alex Salkever, “How Elon Musk’s Starlink got Battle-Tested in Ukraine,” *Foreign Policy*, May 4, 2022, <https://foreignpolicy.com/2022/05/04/starlink-ukraine-elon-musk-satellite-internet-broadband-drones/>; Baranjot Kaur and Abinaya Vijayaraghavan, “Starlink Helped Restore Energy, Communications Infrastructure in Parts of Ukraine – Official,” *Reuters*, October 13, 2022, <https://www.reuters.com/world/starlink-helped-restore-energy-communications-infrastructure-parts-ukraine-2022-10-12/>.

¹⁸ Alisha Rahaman Sarkar, “Elon Musk ‘Stopped Ukraine Military Using Starlink for Military Operation’,” *Independent*, August 1, 2023, <https://www.independent.co.uk/news/world/europe/elon-musk-starlink-ukraine-war-b2384702.html>.

¹⁹ Brian G. Chow and Brandon W. Kelley, “Op-ed/Peace in the Era of Weaponized Space,” *Space News*, July 28, 2021, <https://spacenews.com/op-ed-peace-in-the-era-of-weaponized-space/>.

備的作戰能力與生存性的維護，實際上已可視為是一種關鍵基礎設施保護，而在當前的美中陣營對抗的國際安全環境，以及中國與俄羅斯等國在反太空能力上進行了長期大量投資與發展的脈絡下，從地面到地球軌道上的太空能力的安全與韌性，更被認為應進一步重視與強化從感測器、訊號、資料與酬載在內的「太空系統」保護。²⁰

由於維持太空能力在和戰時期都具備關鍵重要性，因此「韌性」（Resilience）一詞，在近年也同樣廣泛見於太空作戰與安全的相關議題上。包含會合太空飛行器（rendezvous spacecraft）、陸基雷射，以及網路攻擊等反衛星武器，都可能在 2020 年代發展成熟，²¹ 因此必須進一步探討應對的手段。

各國對太空系統韌性的關注，並不僅是因為中俄等國大幅強化反衛星能力所導致。事實上，因為太空垃圾（space debris）的遍布，以及低軌道上將會出現「新太空」時代的大量低軌衛星等因素，使得 SSA 與 STM 是當前各主要太空行為者最關注的重要議題；然而，中俄等國在 DA-ASAT 的研發與試驗，確實進一步製造了大量的太空垃圾，如中國在 2007 年發射的反衛星武器，就製造了有史以來最大的太空垃圾群，單就可追蹤的碎片就超過 3,000 枚，並致使 2022 年時國際太空站被迫進行機動以躲避其中一些太空垃圾。²²

針對中國與俄羅斯的可能太空動態，美國除與友盟國家繼續合作強化前述 SSA 及 STM 能力外，也持續遵循 PWSA 的規劃，透過分散式的來源與架構，強化太空資產的韌性，並建立監視網路。必須注意的是，儘管美國並未確實研發生產 DA-ASAT 的作戰能力，但美國擁有的飛彈防禦攔截器也同樣具備攻擊低軌道衛星的能力，同時美國在干擾衛星導航以及快速

²⁰ Frank Cilluffo and RADM (Ret.) Mark Montgomery, “Time to Designate Space Systems as Critical Infrastructure,” *Foundation for Defense of Democracies*, April 14, 2023, <https://www.fdd.org/analysis/2023/04/14/time-to-designate-space-systems-as-critical-infrastructure/>.

²¹ Brian G. Chow and Brandon W. Kelley, *ibid.*

²² Greg Hadley, “Saltzman: China’s ASAT Test War ‘Pivot Point’ in Space Operations,” *Air and Space Forces Magazine*, January 13, 2023, <https://www.airandspaceforces.com/saltzman-chinas-asat-test-was-pivot-point-in-space-operations/>.

研發完成具反太空能力的定向能武器等層面上，也具備有足夠的科技，惟目前仍將重心置於 SSA 上。美國本身自冷戰開始，就部署了大量且廣布在世界各地的陸基雷達、望遠鏡，以及太空基的望遠鏡等監視網路；美國目前正進一步更新這些感測系統，並在南半球部署新的雷達及望遠鏡，強化尋求商業能力的投入。²³

美國也正進一步部署先進太空基系統，以確保能夠有效監視來自中俄等國的潛在威脅，如規劃在 2023 年後半發射的「沉默吠叫者」（SILENTBARKER）衛星，儘管美軍並未公開其詳細的技術細節，然應可接近相關的潛在太空威脅，並拍攝其詳細影像，此系統預期在 2026 年建立完全作戰能力（full operational capability）；值得注意的是，類似的太空接近偵察行動早已在美中等國之間展開。²⁴

在美國之外，由於烏克蘭戰爭的教訓，建立具韌性的太空能力已然成為各國的當務之急，如歐盟在 2023 年 2 月 14 日通過的「衛星構成之韌性、互聯及安全基礎設施」（Infrastructure for Resilience, Interconnection and Security by Satellites, IRIS²）多軌衛星星座系統計畫即為一例；歐盟將透過官方與民間的合作，建立一個由低軌道、中軌道（Medium Earth Orbit）、同步軌道（Geosynchronous orbit）混合的韌性系統，並與原有的「伽利略」（Galileo）及「哥白尼」（Copernicus）衛星系統整合，為歐洲國家提供包含導航與遙測在內，且具有完全歐洲主權的完整能力。²⁵

²³ Brian Weeden and Victoria Samson, eds., “Global Counterspace Capabilities: An Open Source Assessment,” *Secure World Foundation*, April 2023, https://swfound.org/media/207567/swf_global_counterspace_capabilities_2023_v2.pdf.

²⁴ Theresa Hitchens, “SILENTBARKER ‘Watchdog’ to be ‘Exponential’ Leap in DoD Monitoring of Chinese, Russian Sats,” *Breaking Defense*, August 31, 2023, <https://breakingdefense.com/2023/08/silentbarker-watchdog-to-be-exponential-leap-in-dod-monitoring-of-chinese-russian-sats/>.

²⁵ “Adoption by the European Parliament of IRIS², Europe’s New Infrastructure for Resilience, Interconnection & Security by Satellites,” *European Commission: Defence Industry and Space*, February 14, 2023, https://defence-industry-space.ec.europa.eu/adoption-european-parliament-iris2-europes-new-infrastructure-resilience-interconnection-security-2023-02-14_en.

三、對抗極音速武器的重要環節

極音速武器（hypersonic）是近年在軍事領域上，另一個關鍵新型科技之一，意指能達到音速 5 倍以上高速的武器。²⁶ 當前受各國高度關注的極音速武器，主要分為使用「乘波體」（waverider）構型，能在滑翔至目標的途中持續進行不規則機動的「極音速滑翔載具」（Hypersonic Glide Vehicle, HGV），以及使用超燃衝壓引擎（scramjet）、能以極高速度低空襲擊目標的「極音速巡弋飛彈」（Hypersonic Cruise Missile, HCM）等兩個類型。除此之外，近年還有不需要前二者的先進技術，而是透過空射方式投射彈道飛彈，使其以超過 5 馬赫的高速攻擊目標的類型，如源自於 9K720「伊斯坎達爾」（Iskander）短程彈道飛彈的 Kh-47M2「匕首」（Kinzhal）等，相較於前二者而言較容易攔截。

必須注意的是，出現已久的洲際彈道飛彈等長程打擊武器，實際上早已具有超越前述極音速武器的高速，然而當前的新型極音速武器不論 HGV、HCM 還是空射彈道飛彈，都是在大氣層內投射，前二者更是傳統反飛彈能力中較為不足的領域，高速且精準的能力也使其可能以傳統彈頭就能有效摧毀目標。其中，能持續機動的 HGV，更大幅提升傳統反飛彈系統的攔截難度。是故，需要透過分層方式對抗這種難以防禦的裝備，而部署在太空的感測器等資產，正是其中的關鍵要項。²⁷

針對 HGV 的威脅，美軍的「飛彈防禦署」（Missile Defense Agency）與 SDA 自 2019 年川普時期開始，就基於《2019 飛彈防禦評估》（2019 *Missile Defense Review*）報告開始研發「極音速與彈道追蹤太空感測器」（Hypersonic and Ballistic Tracking Space Sensor, HBTSS）衛星；在規劃中，

²⁶ Kelly M. Saylor, “Hypersonic Weapons: Background and Issues for Congress,” *Congressional Research Service*, Updated October 14, 2022, <https://sgp.fas.org/crs/weapons/R45811.pdf>.

²⁷ Iain Boyd, “How Hypersonic Missiles Work and the Unique Threats They Pose – An Aerospace Engineer Explains,” *The Conversation*, April 15, 2022, <https://theconversation.com/how-hypersonic-missiles-work-and-the-unique-threats-they-pose-an-aerospace-engineer-explains-180836>; Emmanuelle Maitre and Stéphane Delory, “HCoC Research Paper No.12: Hypersonic Missiles: Evolution or Revolution for Missile Nonproliferation and Arms Control Instruments?” *The Hague Code of Conduct*, February 2023, <https://www.nonproliferation.eu/hcoc/wp-content/uploads/2023/03/Hypersonic-weapons-non-proliferation-and-arms-control.pdf>.

HBTSS 是一種具備「中視場」(medium field of view)感測器的衛星，隨後整合進入前述的「追蹤層」衛星星座架構之中，「追蹤層」部署於低軌道，具備「寬視場」(wide field of view)感測器，與 HBTSS 整合可加強持續追蹤與監控飛行中 HGV 的能力，協助飛彈防禦系統進行攔截。²⁸

近期，美國太空軍的 SDA 在 2023 年 7 月 7 日更進一步宣布將授予合約並發展稱為「軌道支援戰爭戰士射控」(Fire-control On Orbit-support-to-the-war Fighter，縮寫為 FOO Fighter/F2)的計畫，預計將建立由 8 顆配備紅外線與光學感測器的衛星所組成的星座，整合雷達等感測器，以及各種攔截器(interceptor)，建立一個由衛星協助偵測、追蹤，然後引導攔截器對抗極音速武器的系統，並希望在 2026 年時推出原型。²⁹

肆、太空產業的角色與未來發展評估

太空科技原本就屬於高度軍民兩用的範疇，在進入「新太空」時代後，民間產業將可能在太空的國安與軍事等層面上扮演更加重要的角色。必須注意的是，「新太空」時代中民間新創的角色，已因為「星鏈」在烏克蘭戰爭中大放異彩而受到矚目。因此，民間公司將可能在未來，也為國安及軍事作戰提供重要能力。

軍民兩用之間的模糊性，讓太空領域的軍事作戰與安全問題進一步複雜化，然針對此需求，美國太空軍已經開始制定初步框架，以求在戰時或危急時刻可以有效運用商業太空的能力，其中將包含五個要素：合約、規劃、政策、營運以及產業界的回饋。³⁰

²⁸ “Hypersonic and Ballistic Tracking Space Sensor (HBTSS),” *Missile Defense Advocacy Alliance*, July 2, 2020, <https://missiledefenseadvocacy.org/defense-systems/hypersonic-and-ballistic-tracking-space-sensor-hbtss/>.

²⁹ Brett Tingley, “Space Force Wants ‘Foo Fighter’ Satellites to Track Hypersonic Missiles,” *Space.com*, July 13, 2023, <https://www.space.com/satellites-hypersonic-missile-foo-fighter-pentagon>.

³⁰ Courtney Albon, “Space Force Crafting Framework for Commercial Fleet Access in A Crisis,” *C4ISRNET*, April 21, 2023, <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/space/2023/04/20/space-force-crafting-framework-for-commercial-fleet-access-in-a-crisis/>.

就通訊而言，儘管「星鏈」等商業系統因烏克蘭戰爭而仍存在有國防運用上的疑慮，然 SpaceX 仍為了提供公部門在國安與軍事作戰上的需求，進一步成立了「星盾」（Starshield）部門，以負責該領域未來的可能業務，並提供地球觀測（earth observation）與強化安全等級的通訊衛星座。³¹

此外，美軍目前也啟動了將與商業太空發射服務合作的「戰術型反應太空」（tactically responsive space）計畫。美軍正尋求民間太空產業為其提供更靈活，並能在不同地點進行太空發射任務的商業服務，協助美軍快速發射衛星，可以協助擴大衛星座的規模，也能在作戰中快速更換替補遭到攻擊的衛星，美軍正藉此種方式，已快速發射、軟體更新以及機動能力等各層面的發展，建構「動態太空作戰」（dynamic space operations）能力。³²

伍、小結

大國競爭的再起，使得太空作戰重新成為國防安全上的關鍵議題，而「新太空」時代的出現，則讓各國發展太空能力的門檻大幅下降，使得太空的安全議題，不再僅限於核心大國之間。同時各國大量出現的太空新創產業，也讓太空兩用科技的發展大幅加速，同時也重新構成世界各國對「太空軍事化」的擔憂；這種擔憂不僅植基於近年中國與俄羅斯等國在反衛星武器上的持續發展，也在於目前太空科技在當前的擴散，以及其對未來整體社會與國安、軍事關鍵地位，這也導致多個國家紛紛建立太空作戰部隊，甚至軍種以因應相關威脅。

正如同人工智慧、無人載具等新興科技（emerging technologies）般，

³¹ Courtnet Albon, “SpaceX Forms ‘Starshield’ Business Unit to Focus on National Security,” *C4ISRNET*, December 5, 2022, <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/space/2022/12/05/spacex-forms-starshield-business-unit-to-focus-on-national-security/>.

³² Sandra Erwin, “U.S. Space Command Supports Use of ‘Responsive Launch’ to Deter China and Russia,” *Space News*, November 29, 2022, <https://spacenews.com/u-s-space-command-supports-use-of-responsive-launch-to-deter-china-and-russia/>.

太空兩用科技不僅逐漸成為陣營對抗的最前線，「新太空」時代要如何重新形塑國際的太空管理與治理規範，正是當前在技術發展外，各國正在進行角力的場域。

就台灣的角度而言，太空兩用科技的發展，不論在確保我國在未來科技產業上不至於落後於世界各國，還是在國家安全與軍事作戰上維持基本的作戰能力，都有其必要性。目前國家太空中心正在進行第三期太空計畫，而我國也在 2021 年 5 月 31 日三讀通過了《太空發展法》，並且較過往更大幅度地投資了太空相關科技的發展，顯示台灣並不想在國際發展的浪潮中缺席。事實上，由於「新太空」時代科技的快速擴散與行為者的增加（包含了中小型國家與新創產業等），使得未來世界各國重塑太空相關的國際規範時，實際上也包含了台灣可能進一步參與的機會。不過就科技發展、國際太空產業供應鏈中的位置，以及軍事能力的建立而言，我國仍需更有效整合能量，有效運用有限的資源，並協助正在起步的本土太空產業站穩腳跟，然而仍有賴於政府長期戰略擘劃、資金資源的持續投入、強化人才培育，以及尋找進入國際供應鏈，讓產業能有效營利、成長，才能真正在太空兩用科技領域上站穩腳跟。

第二章 極音速科技發展

舒孝煌*

壹、前言

一般對極音速（Hypersonic）的定義，指以 5 馬赫（或 5 倍音速，Mach 5，約相當於時速 5,471 公里或 3,400 哩）以上速度飛行，¹ 最大速度可能達到 25 馬赫，此一領域涵蓋許多不同速度與應用範圍的飛行器及載具，以及不同的物理特性與運用。本章分三個方向探討目前極音速技術發展，一是極音速武器，二是極音速飛機，三是極音速的關鍵科技。

貳、極音速武器發展現況

極音速指以超過 5 馬赫速度在大氣中飛行。極音速的研究始於 1930 年代的德國，二次大戰之後，研究興趣轉向彈道飛彈及太空旅行。其實任何太空載具，包括彈道飛彈或是太空艙，在重返大氣層時，其速度都超過 25 馬赫，或時速 17,500 哩，因此從 1960 年代載人太空飛行開始以來，極音速飛行就已成爲現實，只是時間很短暫。²

極音速載具在本質上與重返大氣載具不同，主要差別在於載具或武器本身要在極音速情況維持長時間飛行，在飛行階段可以操控。極音速載具大約有以下數種類別：

* 國防安全研究院中共政軍與作戰概念研究所副研究員。

1 Yasmin Tadjeh, “SPECIAL REPORT: Defense Department Accelerates Hypersonic Weapons Development,” *National Defense Magazine*, July 11, 2019, <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2019/7/11/defense-department-accelerates-hypersonic-weapons-development>.

2 John T. Watts, Christian Trotti, and Mark J. Massa, “Primer on Hypersonic Weapons in the Indo-Pacific Region,” *Atlantic Council*, August 17, 2020, <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/report/primer-on-hypersonic-weapons-in-the-indo-pacific-region/>.

一、極音速滑翔飛行器（Hypersonic Glide Vehicle, HGV）

為一種彈道飛彈類型，又稱推進—滑翔式武器（Boost-glide weapon），彈頭具有特殊氣動力外型，與彈道飛彈同樣以火箭助升器推進至大氣層，但 HGV 的彈體脫離後在重返階段，彈體撞擊大氣層後仍可以極音速滑翔，並變換軌道，使飛彈防禦系統難以攔截。

二、極音速巡弋飛彈（Hypersonic Cruise Missile, HCM）

使用超音速燃燒衝壓發動機（scramjet，簡稱超燃衝壓發動機）等進氣式發動機推進，使載具或彈體本身達到極音速飛行。

三、極音速飛行器（Hypersonic Vehicle）

使用超音速燃燒衝壓發動機等進氣式發動機達到極音速的飛機，使用火箭雖也可達到極音速，如美國的 X-15 實驗機，但其火箭燃燒時間很短，無法持續飛行。目前使用超燃衝壓發動機概念的飛行器，也尚在實驗階段，距離載人飛行恐仍有一段距離。次軌道飛行器飛行高度約在 100 公里以上，X-15 實驗機也可推升至 100 公里高度。美國空軍未實現的 X-20 「動力倍增器」（Dyna-Soar）也是一種次軌道飛行器，後來中止發展。

目前民間公司也運用商用技術發展次軌道飛行，如「維珍銀河」的太空船 1 號（SpaceShipOne）。而使用超燃衝壓發動機的極音速飛行器也會在次軌道飛行。中共「中國航天科技集團」的次軌道運載飛行也在 2022 年 8 月首次試驗成功，其具備升力式外型，類似美國 DARPA 發展的 XS-1 或是維珍銀河公司的太空船 1 號。

四、砲射式（gun-launched）投射物

使用新技術發射超音速或極音速砲彈的火砲或電磁軌道砲，其砲彈

或投射物也會以極高速度飛行，但前者是以現有的 155 榴砲發射採用衝壓發動機的「超高速砲彈」（hypervelocity projectiles），使砲彈離開砲管後仍會持續加速飛行，以增加射程；後者則以電磁方式將投射物加速至極音速，雖然這兩種武器的射程均較短，速度也僅達到極音速的最低標準，約 6 至 8 馬赫，但在未來發展防空及飛彈防禦系統，或反制對手的陸射及海射武器時，可成為一種低成本的選擇。³

五、彈道飛彈（Ballistic Missile）

本身也屬極音速載具，當彈頭脫離助升火箭重返大氣層期間，也是以極音速飛行。俄羅斯發展多型空射極音速飛彈，即是將彈道飛彈直接掛載於大型機如 Tu-22M3、Tu-160 轟炸機，或是 MiG-31 這種大型戰機之上。

表 2-1 極音速載具種類及任務

運用	推進型式	射程／航程	速度	發射模式
傳統打擊武器	推進—滑翔	3,400 哩 +	20 馬赫	潛射、海上、陸上
地對地彈道飛彈	推進—滑翔	1,500 哩 +	20 馬赫	潛射、海上、陸上
打擊飛彈 （反艦等）	超燃衝壓 推進—滑翔	250-1,500 哩 +	8 馬赫 20 馬赫	潛射、海上、空中
攔截飛彈	超燃衝壓	250 哩	5-7 馬赫	海上、陸上
軌道砲等	砲射 （電磁或火藥）	100 哩	6-8 馬赫	海上、陸上
載人／偵察	有人飛行器	10,000 哩	5 馬赫	自力推進

資料來源：“Primer on Hypersonic Weapons in the Indo-Pacific Region,” *Atlantic Council*, August 17, 2020, <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/report/primer-on-hypersonic-weapons-in-the-indo-pacific-region/>.

目前除美國、中國、俄羅斯都在發展極音速武器外，其他國家也有類似的發展計畫，對現有飛彈防禦系統造成挑戰，使極音速武器擴散成為國際秩序的新威脅。

³ Ibid.

一、美國的發展計畫

在極音速技術上，仍屬美國最為先進，除飛行器外，在極音速武器或實驗載具上，美國航空太空總署（NASA）、國防部麾下的先進研究計畫署（DARPA），以及陸、海、空各軍種都有自己的發展計畫，主要發展方向有二，一是極音速滑翔載具，二是極音速進氣式武器（Hypersonic Air-breathing Weapon Concept, HAWC）。

（一）極音速滑翔載具

通常由飛彈或火箭發射，「彈頭」本身不具推進器，重返階段以極音速滑翔。美國空軍目前有二種極音速武器，即 AGM-183 空射快速反應武器（Air-Launched Rapid Response Weapon, ARRW）與極音速攻擊巡弋飛彈（Hypersonic Attack Cruise Missile, HACM），分別採用極音速滑翔及極音速進氣推進兩種不同概念。2018 年時，美國空軍曾同時發展二種推進—滑翔武器，除 ARRW 外，另一種為「極音速傳統打擊武器」（Hypersonic Conventional Strike Weapon, HCSW），但因預算限制，2018 年決定放棄 HCSW，僅發展 ARRW，編號 AGM-183，並在 2018 年授予洛克德馬汀公司合約，原因是 HCSW 體積太大，ARRW 較小且先進，除轟炸機可攜帶 2 倍數量外，還可由 F-15 戰機攜掛。⁴

ARRW 使用一枚助推火箭，將彈體推至極音速。ARRW 經歷多次測試，但一直不順利，直到 2022 年 5 月完成首次成功測試，ARRW 飛彈助推器成功點火，使彈體達到 5 馬赫，⁵ 7 月再度成功試射；⁶ 12 月 9 日

⁴ “Roper: The ARRW Hypersonic Missile Better Option for USAF,” *Air & Space Forces Magazine*, March 2, 2020, <https://www.airandspaceforces.com/arrw-beat-hcsw-because-its-smaller-better-for-usaf/>.

⁵ “Air Force Conducts Successful Hypersonic Weapon Test,” *U.S. Air Force*, May 16, 2022, <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/3033416/air-force-conducts-successful-hypersonic-weapon-test/>.

⁶ “Air Force Completes Another Successful Hypersonic Test,” *U.S. Air Force*, July 13, 2022, <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/3092249/air-force-completes-another-successful-hypersonic-test/>.

完成首次全功能測試，包括助推火箭及滑翔飛行器，⁷ 測試過程均使用 B-52H 轟炸機掛載及發射。

不過因 ARRW 受到國會及外界質疑，而發展過程一直不順利，美國空軍在 2023 年 3 月決定不採購 AGM-183，但 ARRW 計畫並不算被取消，美國空軍仍會完成後續二次測試。而美國空軍將持續推動 HACM 計畫，這是一種進氣式極音速武器，體積更小，可由 F-15EX 攜帶，但這也給空軍及雷神更大的壓力，因為至少在公開項目上，這是目前空軍唯一發展中的極音速飛彈。⁸

另外，空軍早先取消的 HCSW，也是超音速滑翔載具的一種，陸軍及海軍的型式仍持續發展，被稱為「長程極音速武器」（Long-Range Hypersonic Weapon, LRHW）計畫，也是一種推進—滑翔飛彈，但射程達 2,770 公里（1,725 哩），使用兩級火箭推進，配備與海軍相同的「共通極音速滑翔」（Common Hypersonic Glide Body, C-HGB）彈體，預計可達 5 馬赫或更快速度，使其難以被飛彈攔截。陸軍的 LRHW 由陸軍發射車發射。

海軍的「傳統即時打擊」（Conventional Prompt Strike, CPS）則將配備在其朱瓦特級驅逐艦（Zumwalt-class destroyer, DDG 1000）上。⁹

（二）極音速進氣式武器

美國 DARPA 過去發展的「極音速進氣式武器概念」（Hypersonic Air-breathing Weapon Concept, HAWC），為使用超燃衝壓發動機推動的極音速武器概念，超燃衝壓發動機屬衝壓發動機（ramjet）的一種，但超燃衝壓發動機的進氣在進入發動機時，仍保持超音速狀態，使載具能達到更

⁷ “Air Force Conducts First ARRW Operational Prototype Missile Test,” *U.S. Air Force*, December 12, 2022, <https://www.eglin.af.mil/News/Article-Display/Article/3240613/air-force-conducts-first-arrw-operational-prototype-missile-test/>.

⁸ “Air Force Pulls Plug On Much-Hyped Hypersonic Missile,” *The Drive*, March 30, 2023, <https://www.thedrive.com/the-war-zone/air-force-pulls-plug-on-much-hyped-hypersonic-missile>.

⁹ “The U.S. Army’s Long-Range Hypersonic Weapon (LRHW),” *Congressional Research Service*, March 31, 2023, <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF11991>.

高的飛行速度。

美國航空太空總署的極音速實驗機 X-43，即使用超燃衝壓概念，X-43A 曾在 2004 年 11 月一次實驗飛行時，達到 9.6 馬赫（時速接近 7,000 哩，相當於 11,265 公里）的速度紀錄，是目前速度最快的進氣式飛機，而有人進氣式飛機的紀錄保持者，仍是 SR-71，時速達 3.2 馬赫，¹⁰ 載人飛機的最快速度則是 X-15 實驗機在 1967 年 10 月創下，達到 6.7 馬赫，但 X-15 使用的是火箭發動機。¹¹

美國空軍與波音公司合作的 X-51「乘波者」（Wave Rider）極音速實驗機，是 X-43 的後續計畫，也使用超燃衝壓發動機，但機體使用特殊的乘波體外型，不具備機翼，乘波體設計使飛機可利用超音速飛行時產生震波，造成飛行的壓縮升力（Compression Lift），其基本概念雖簡單，但載具的設計則十分困難，機體需要極鋒利的前緣以減少阻力，但熱傳導問題則需鈍化機身，因此機身需要設計特殊的冷卻系統。¹² 過去運用壓縮升力概念的飛機，僅有美國空軍放棄的 XB-70 超音速轟炸機計畫。X-51 結合乘波體及超燃衝壓發動機，其設計至今仍屬十分先進，但僅完成四次試飛，僅在第四次試飛時維持 5.1 馬赫、6 分鐘的持續飛行。¹³

HAWC 計畫在 2023 年 1 月完成最後一次飛行測試，達到 5 馬赫飛行速度，高度超過 6 萬呎，飛行距離超過 300 哩。¹⁴ DARPA 預計進入下一階段發展計畫，即「極音速進氣式武器概念後續計畫」（More Opportunities with HAWC, MOHAWC），另外，空軍的 HACM 也是 HAWC 的技術繼承者。

HACM 也採用超燃衝壓發動機概念。2020 年美國與澳洲合作發展的

¹⁰ “X-43A,” *NASA*, <https://www.nasa.gov/missions/research/x43-main.html>.

¹¹ “X-15: Hypersonic Research at the Edge of Space,” *NASA*, February 24, 2000, <https://history.nasa.gov/x15/cover.html>.

¹² “Hypersonic Vehicle Design,” *Aerospaceweb*, <https://aerospaceweb.org/design/waverider/design.shtml>.

¹³ “X-51A Waverider,” *U.S. Air Force*, <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104467/x-51a-waverider/>.

¹⁴ “Hypersonic Scramjet Missile HAWC Successfully Tested for Last Time,” *Air & Space Forces Magazine*, January 30, 2023, <https://www.airandspaceforces.com/hypersonic-scrumjet-missile-hawc-successfully-tested-for-last-time/>.

「南十字綜合飛行研究實驗」(Southern Cross Integrated Flight Research Experiment, SCIFiRE)，發展極音速飛彈原型，洛馬與雷神公司在 2021 年分別獲得 15 個月合約，完成初步設計，該概念後來成為 HACM 的原型。洛馬與雷神也在 HAWC 計畫下合作，不過在 2022 年 9 月，雷神公司獲得 HACM 發展合約，發展可掛載在戰機上的進氣式極音速飛彈，超燃衝壓發動機則由諾斯洛普格魯門公司發展，預計在 2027 年開始生產。¹⁵

另外，美國空軍在 2022 年啟動「混亂計畫」(Project Mayhem)，授予雷度士(Leidos)一項合約，發展一種比 AGM-183 更大的進氣式極音速載具，可搭載各種感測器，執行打擊或情監偵任務，此一目的在打造 DARPA 的 HAWC 武器平台。¹⁶從 2021 年文件來看，該計畫目的在發展一種實驗平台，用於支持先進高速噴射發動機的發展，其完整計畫名稱從「可擴張極音速多任務進氣展示機」(Expendable Hypersonic Multi-Mission Air-Breathing Demonstrator)變成「極音速多任務情監偵及打擊」，另一過去名稱「多任務巡航者」也與該計畫相關。計畫詳細內容仍為保密，但似乎是一種更大型的 platform，而且是一種可重複使用、非「可消耗性」的平台。美國空軍先前已授予多項小型合約，被認為與該計畫的相關技術發展有關。先前報導指出，該計畫的最終產品為何，仍有待觀察。¹⁷

該計畫的極音速系統使用超燃衝壓發動機產生推力，以超過 5 馬赫速度進行長距離飛行，系統設計代理團隊(SDA)將發展一種大型 platform，其機身、推進系統、助升器、航電系統及子系統，都比目前發展的載具要大。¹⁸

¹⁵ “Raytheon Wins Hypersonic Attack Cruise Missile Contract,” *Air & Space Force Magazine*, September 22, 2022, <https://www.airandspaceforces.com/raytheon-wins-hypersonic-attack-cruise-missile-contract/>.

¹⁶ “Leidos Wins Hypersonic Project ‘Mayhem’ Deal, Worth Up to \$334M,” *Air & Space Forces Magazine*, December 16, 2022, <https://www.airandspaceforces.com/leidos-wins-hypersonic-project-mayhem-deal-worth-up-to-334m/>.

¹⁷ “Hypersonic Strike Aircraft Capability Is Part of the Air Force’s Shadowy Project Mayhem,” *The Drive*, December 20, 2021, https://www.thedrive.com/the-war-zone/43545/hypersonic-strike-aircraft-capability-is-part-of-air-forces-shadowy-project-mayhem?_trms=4463d33e0f3f7f8e.1688243510381.

¹⁸ “Kratos Receives Mayhem Hypersonic Missile Program Contract Award,” *Defence Blog*, January 19, 2023, <https://defence-blog.com/kratos-receives-mayhem-hypersonic-missile-program-contract-award/>.

二、中國與俄羅斯的發展

（一）中共的極音速武器

中共在2019年10月1日首度展出東風17飛彈，彈頭採乘波體（Wave Rider）設計，使用一截火箭發動機推進，在重返大氣層時以打水漂式的「錢學森彈道」撞擊大氣層，其彈體具舉升體形狀，可藉壓縮升力及震波飛行，並控制飛行方向，非單純拋物線，軌跡難以推算，終端速度可能達20馬赫，東風17也可能用於打擊航空母艦等重要目標，對美國現有的陸基或海基飛彈防禦系統將構成嚴重挑戰。另外中國也可能將東風21D掛載於轟6轟炸機上，成為另一種空射式極音速飛彈。

東風17可能由過去曝光的WU-14極音速載具發展而來，由2014年開始實驗，使用高升阻比的乘波體外型，在高空層進行極音速滑翔飛行時，可修改飛行軌跡，進行空中機動，使其彈道無法預測，從而躲避反飛彈系統的攔截。另外外界也傳聞中國在發展極音速飛機，以及極音速發動機，然皆無確切訊息可證實其發展情況，也有報導指出，中國極音速飛機發展仍有技術門檻有待跨越，距成功研發極音速飛機為時尚早。¹⁹

（二）俄羅斯的極音速武器

俄羅斯發展多型極音速武器，並聲稱其難以被美國的飛彈防禦系統攔截，然而俄羅斯雖對烏克蘭發動任意式的飛彈攻擊，但由於其情報及目標標定能力過於緩慢，未能跟上變化快速的戰場動態，並低估其實現戰爭目標所需的飛彈打擊規模，加上烏克蘭開始獲得西方先進防空飛彈，如愛國者飛彈、挪威先進防空飛彈系統（Norwegian Advanced Surface-to-Air Missile System, NASAMS）及「紅外線成像導引系統／尾部推力向量控制」飛彈（InfraRed Imaging System Tail/Thrust Vector-Controlled, IRIS-T）等，也有效攔截俄製飛彈。²⁰

¹⁹ 〈專家：中國高超音速飛機還面臨多個技術門檻〉，《人民網》，2015年9月21日，<http://politics.people.com.cn/n/2015/0921/c70731-27614425.html>。

²⁰ “The Failure of Russia’s Missile War in Ukraine,” *Defense News*, May 11, 2023, <https://www.defensenews.com/opinion/2023/05/11/the-failure-of-russias-missile-war-in-ukraine/>.

依據公開資料，俄目前擁有 4 種極音速飛彈，包括 9M720 伊斯坎德飛彈 (Iskander)、Kh-47M2「匕首」(Kinzhal) 飛彈、「先鋒」(Avangard) 飛彈、3M22「鋯石」(Zircon) 飛彈，和正處於研發階段的 Kh-95 新型遠程極音速飛彈。俄雖聲稱這些飛彈是極音速武器，但似乎都是彈道飛彈的衍生型，僅先鋒飛彈及發展中的 Kh-95 是使用極音速飛行器 (hypersonic glide vehicle, HGV) 概念的長程飛彈。

1. Kh-47M2「匕首」(Kinzhal) 飛彈

為一種空射型極音速飛彈，射程 2,000 公里，速度可達 10 馬赫，可攜帶傳統彈頭或核彈頭，在飛行時可進行閃避動作，避免遭飛彈攔截。匕首飛彈可由 Tu-22M 轟炸機或 MiG-31 戰機發射。匕首飛彈目的在嚇阻美國和北約軍艦對俄彈道飛彈系統的威脅，它可在發射後幾秒鐘內加速到極音速，並在飛行過程中隨時進行機動，以克服任何已知的西方防空或飛彈防禦系統，包括愛國者、終段高空區域防禦系統 (THAAD) 系統，或海軍的神盾作戰系統。此外，因其為空射式彈道導彈，可以從難預測的位置發射，可能對不具 360 度涵蓋角的扇形預警雷達造成壓力，例如愛國者系統的雷達，這能為俄羅斯提供極大戰略嚇阻力。²¹

2. 9K720 伊斯坎德飛彈 (Iskander)

北約賦予代號為 SS-26「石頭」(Stone)，為一種單級、固態燃料推進的戰術短程彈道飛彈，射程約 500 公里，由俄製通用運輸—裝置—發射車 (transporter-erector-launcher, TEL) 搭載，可進行道路機動，即時發射，機動性極佳。其飛行速度約為 5.9 馬赫，使用慣性導航、光學目標辨識，以及衛星定位導引。其飛行中仍維持彈道飛彈的飛行軌跡，但在最後階段進行規避機動並釋放誘餌以穿透飛彈防禦系統，在飛行過程中不會離開大氣層。

²¹ “Kh-47M2 Kinzhal (‘Dagger’),” *Missile Defense Advocacy Alliance*, June 28, 2018, <https://missiledefenseadvocacy.org/missile-threat-and-proliferation/todays-missile-threat/russia/kh-47m2-kinzhal-dagger/>.

伊斯坎德飛彈有三種次型，伊斯坎德 K 為次音速巡弋飛彈，伊斯坎德 M 為短程彈道飛彈，伊斯坎德 E 為出口型，射程限制在 280 公里。

3. 3M22「鋯石」(Zircon) 飛彈

北約代號為 SS-N033，也是一種極音速飛彈，配備在水面艦及潛艦上，速度可達 8 至 9 馬赫，射程約 1,000 至 2,000 公里。鋯石飛彈使用極音速衝壓發動機，為一種執行反艦任務的極音速巡弋飛彈，由 NPO 設計局的極音速實驗飛行載具發展而來。該飛彈有一截固體燃料助推器，將其加速至超音速後，啟動彈體中使用液態燃料的主發動機，加速至極音速。鋯石彈體約為戰斧巡弋飛彈的 2 倍，其 9 馬赫高速使其難以被艦艇的防空武器攔截，而其在大气層中高速飛行，彈體前方大气壓力會產生等離子雲 (plasma cloud)，具吸收電磁波能力，使其難被主動式雷達發現，但其彈體上的導引系統也會因此失效。其彈道軌跡的最後一段將在極短時間完成，艦上反制系統可能沒有足夠時間完成攔截程序，被認為對大型水面目標如航空母艦極具殺傷力。

2023 年 1 月，鋯石飛彈首度部署在 22350 型巡防艦首艦高希可夫號上，而基洛夫級巡洋艦也在進行現代化改造，以便配備鋯石飛彈，用於長程反艦任務。另外，勇壯級 (Udaloy) 驅逐艦、奧斯卡 (Oscar) 級潛艦、亞森 (Yasen) 級潛艦也在接受現代化改裝，將可配備鋯石飛彈。鋯石和「布拉姆斯 II」(BrahMos-II) 飛彈間可能有類似之處，似是鋯石飛彈的出口版本。

4. 「先鋒」(Avangard) 飛彈

先鋒飛彈採用極音速滑翔飛行器概念，其射程超過 6,000 公里，可攜帶核彈頭或傳統彈頭。其彈頭由彈道飛彈推進，舉升段採用 SS-19 飛彈的彈體，但未來會改用 R-28 薩馬特 (Sarmat) 飛彈。當飛彈被推升至 100 公里高度的軌道頂端，接著彈頭與彈體分離，穿透大气層進行巡航，據稱可以保持 20 馬赫的極音速，並進行機動，這將使其彈道不可預測，從而使攔截變得十分困難。目前尚無先鋒飛彈 HGV 的公開畫面，推測其可能

為短楔形，具有小型安定翼面。該型飛彈應已在 2019 年開始部署。²²

5. Kh-95 新型遠程極音速飛彈

一種空射型戰略巡弋飛彈，與「匕首」及「鋁石」類似，可由 Tu-22M 或 MiG-31 等大型飛機攜帶並發射，其射程可能超過 1,000 公里，俄國防部長紹伊古（Sergei Shoigu）表示，這些極音速武器系統，將構成俄羅斯非核嚇阻力量的支柱。²³

參、極音速飛機概念的推動

美國空軍認為，匿蹤技術有其限制，而偵測技術的發展將使匿蹤飛機更難以躲藏，但高飛行速度將使敵方難以攔截，從而恢復生存性。因此極音速科技在未來將能大幅提升作戰飛機的生存性。極音速飛機因飛行速度快，即使攜帶傳統武器，同樣也可快速達到目標區，即使目標移動，也能靈活反應，極音速飛機也較傳統飛機更易於躲避防空飛彈攻擊。另外，極音速飛機可以在任務結束後飛返基地，重複再使用，減少戰場消耗，美國國防部 2021 年研究發現，一枚極音速飛彈成本達 8,900 萬至 1 億美元之間，幾與一架 F-35 戰機相當，國會預算辦公室在 2023 年估算每枚成本僅 4,100 萬美元，但仍然很高，也限制其採購數字。²⁴

過去美國空軍 SR-71「黑鳥」偵察機，最大速度達 3.3 馬赫，最大升限達 85,000 呎（24,285 公尺），已達到同溫層高度。SR-71 配備 2 具普惠 J58 渦輪噴射發動機，結合複雜的可變幾何軸對稱進氣道與旁通流系統，在飛行時，可移動的進氣錐可控制震波，變換旁通氣流量，使噴射發動機變成渦輪—衝壓發動機。在起飛及次音速飛行時，一部分空氣進入發動機

²² “Avangard,” *Missile Threat*, July 31, 2021, <https://missilethreat.csis.org/missile/avangard/>.

²³ “X-95 Long-range Hypersonic Missile,” *Global Security*, <https://www.globalsecurity.org/wmd/world/russia/kh-95.htm>.

²⁴ “Hypersonic Multitasker: USAF Project Mayhem Takes Shape,” *European Security & Defence*, August 1, 2023, <https://euro-sd.com/2023/08/articles/32901/hypersonic-multitasker-usaf-project-mayhem-takes-shape/>.

渦輪進行壓縮，成為核心氣流，另一部分空氣經由進氣錐及進氣道壓縮，成為旁通氣流，從渦輪周邊直接進入後燃器，與發動機共同產生推力；在 3 馬赫超音速巡航時，90% 推力來自旁通氣流，其中 60% 推力來自旁通氣流、30% 來自排氣，僅 10% 是來自噴射發動機。但在達到 3 馬赫的高速，需要複雜的結構改變發動機的進氣方式，飛行員必須持續監控進氣道的運作，甚至以手動操作，早期類比式電腦要分析量測到的進氣道壓力、飛行姿態等數據，以控制進氣錐位置，有時仍可能造成未預期的失速情況，後來改用數位電腦才改善。不過 SR-71 失事率仍然極高，但多發生在試飛、訓練時，從未在執行任務時遭擊落或失事。

若要提升至更高速度，例如 3 馬赫至 6 馬赫範圍，則需使用更先進的複合式渦輪—衝壓發動機。以目前公開的 SR-72 想像圖來看，渦輪噴射發動機要提供由起飛至 3 馬赫範圍的推力，雙模式衝壓發動機提供極音速飛行的動力，而渦輪噴射發動機與衝壓發動機使用同一個進氣道與排氣口，以減少阻力。

為加速發展極音速飛行能力，美國國防部也尋求民間技術發展極音速的技術展示機。美國國防部「國防創新小組」（Defense Innovation Unit, DIU）在 2022 年 9 月發布一項通知，尋求商業界對極音速測試飛行器的建議，即「極音速及高節奏機載測試能力」（Hypersonic and High-Cadence Airborne Testing Capabilities, HyCAT）。

由於中共、俄羅斯均在發展極音速科技，為免落於中俄發展之後，美國國防部已開始加速極音速科技的發展，除各軍種的極音速武器外，極音速載具及相關科技的發展也全力推動中。

美國有幾項極音速實驗飛行器計畫正在進行中。X-51「乘波者」（Wave Rider）是美國航空太空總署與波音公司共同開發的極音速實驗計畫，使用超燃衝壓發動機，在 2013 年曾達到 5.1 馬赫的最高速度紀錄。該項計畫為後來極音速技術的實際運用，包括飛彈及武器、偵察、運輸、進氣式太空系統的先導研究。

國防先進計畫署原也計畫發展極音速技術載具（Hypersonic Technology Vehicle, HTV）實驗計畫，計畫全名為「由美國大陸運用武力

及發射」(Force Application and Launch from CONTinental United States, FALCON)計畫，分為HTV-1、HTV-2、HTV-3等三個計畫，分別是低性能極音速滑翔機、高性能極音速滑翔機、可重複使用極音速滑翔機，後來衍生為HTV-3X黑雨燕(Blackswift)，由洛馬臭鼬工廠、波音、ATK等三家公司設計及發展，動力為渦輪發動機及衝壓發動機混合式動力，速度可達6馬赫，不過計畫在2009年取消。²⁵ HTV-2也曾進行二次測試，均未成功。

美國國防部國防創新部門(Defense Innovation Unit, DIU)從2015年起，已啟動極音速飛機計畫，被稱為「高節奏機載測試」(High-Cadence Airborne Testing, HyCAT)，預計發展可運用的極音速飛機，可在超過5馬赫的極音速情況下飛行，除機體和動力系統外，還包括酬載、導航、通訊、低成本製造材料和技術等。

HyCAT第二階段，將選擇可提供有效酬載及其他技術，以整合在極音速載具上，包括導航、通訊、製造技術及低成本材料等。²⁶

美軍也嘗試引進民間新創公司開發極音速技術。2022年，美國海軍選擇雷度士(Leidos)旗下的「動力」(Dynetics)公司發展「多軍種先進能力極音速測試平台」(Multi-Service Advanced Capability Hypersonic Test Bed, MACH-TB)，為極音速飛行測試提供其他選項。由於風洞、測試載具等基礎設備限制，發展進度受限制，每年僅能進行幾次試驗，但MACH-TB則能將測試節奏提高至每週一次，以收集數據並提供給相關部門，用於評估其武器系統、需要的能力、哪些類型的技術等。²⁷

2023年6月17日，火箭實驗室(Rocket Lab)的「極音速加速器次軌道電子火箭」(Hypersonic Accelerator Suborbital Test Electron, HASTE)

²⁵ “VIDEOS: DARPA Cancels Blackswift Hypersonic Test Bed,” *Flight Global*, October 14, 2008, <https://www.flightglobal.com/videos-darpa-cancels-blackswift-hypersonic-test-bed/83405.article>.

²⁶ “Defense Innovation Unit Eyes First Flight of Hypersonic Testbed,” *Defense News*, June 3, 2023, <https://www.defensenews.com/battlefield-tech/2023/06/02/defense-innovation-unit-eyes-first-flight-of-hypersonic-testbed/>.

²⁷ “Pentagon Test Bed to Ramp up Development of Hypersonics,” *Defense News*, November 8, 2022, <https://www.defensenews.com/pentagon/2022/11/08/pentagon-test-bed-to-ramp-up-development-of-hypersonics/>.

首次發射成功。HASTE 火箭源自該公司的「電子」(Electron) 火箭，但具有用於極音速有效酬載的末端，其客製化整流罩選項可適應不同的有效酬載，包括進氣式、彈道重返載具、助推—滑翔，以及太空應用等。藉「電子」火箭具世界上發射頻率最高的商用火箭特性，可提供真正的商業測試能力，並降低測試成本。²⁸

另外，美國國防部也選擇澳洲極音速發射系統公司(Hypersonix Launch Systems)，在 HyCAT 計畫下發展「飛鏢 AE」，這是一種可在 5 至 7 馬赫飛行的載具，將裝置由氫燃料驅動的「斯巴達」(SPARTAN) 超燃衝壓發動機。飛鏢 AE 要先將飛行器速度提升至 5 馬赫，再由「斯巴達」發動機提供動力。飛鏢 AE 的發展可用於探索極音速飛行的條件、數據傳輸、機動性等，與現有極音速載具相比，因為其設計簡單，可動式零件很少，且以「積層製造」技術生產，並使用氫燃料，發動機為進氣式，它可以更經濟的成本獲取有價值的資訊。其發射的推進火箭即為火箭實驗室的電子火箭。²⁹ 飛鏢 AE 機體長 3 公尺，重 200 公斤，射程達 1,000 公里，速度達 7 馬赫，可由導引或非導引火箭發射，也可由空中發射，以降低發射成本。飛鏢 AE 預計 2024 年試飛。³⁰

除新創公司的發展外，極音速載具另一項另人矚目的發展是洛馬公司的 SR-72，該計畫因為電影《捍衛戰士 2》而被炒熱。然而「SR-72」是否有實機存在仍然是謎。2013 年時，有報導指出，洛克希德馬汀公司旗下的「臭鼬工廠」正在發展 SR-71「黑鳥」偵察機的後繼機。與電影所想像的不同，SR-72 可能是一種無人駕駛的極音速飛機，可重複使用，擔任偵察、監視及打擊任務。SR-72 可配備洛馬發展的高速打擊武器，以 6 馬赫高速飛行，其起飛速度較 SR-71 為快，能提高快速反應能力。但其運用

²⁸ “Rocket Lab Debuts HASTE Rocket with First Successful Suborbital Launch from Virginia,” *Rocketlabusa*, June 17, 2023, <https://www.rocketlabusa.com/updates/rocket-lab-debuts-haste-rocket-with-first-successful-suborbital-launch-from-virginia/>.

²⁹ “DART AE Hypersonic Vehicle, Australia,” *Airforce Technology*, August 30, 2023, <https://www.airforce-technology.com/projects/dart-ae-hypersonic-vehicle-australia/>.

³⁰ “DART AE Hypersonic Vehicle, Australia,” *Airforce-technology*, August 30, 2023, <https://www.airforce-technology.com/projects/dart-ae-hypersonic-vehicle-australia/>.

的科技在 2013 年時仍不成熟，因此計畫延遲數年，不過現今所運用的科技，包括數位工程、極音速衝壓發動機科技等，已可運用於 SR-72 上。目前仍無具體時間表。洛馬公司 2018 年 2 月指出極音速技術正推動武器計畫發展，未來隨技術成熟，「可重複使用的載具」（reusable vehicle）終將實現。該年 11 月又表示，SR-72 原型將在 2025 年首度飛行，2030 年進入服役。³¹

另外，在 2022 年 12 月，由美國空軍實驗室推動「混亂計畫」（Project Mayhem），授予雷度士一項合約，計畫發展比 AGM-183 更大的進氣式極音速載具，能攜帶多種酬載，進行打擊或情、監、偵任務。³² 目前尚不知混亂計畫的最終產物，但可能會是一種極音速載具。雖然該計畫的官方說法是「消耗性極音速多任務情報、監視、偵察和打擊」，但它並未被賦予單次自殺性任務，但其應該表示，空軍願意派遣無人機（UAV）執行高風險任務，並願意接受其較高風險的潛在損失。

2022 年 4 月新的招標說明中指出，混亂計畫重點在「提供更大型的進氣式極音速系統，能夠藉標準化有效酬載界面執行多項任務，提供重大的技術進步和未來能力」。標準化有效酬載界面將為同一極音速系統中的各種有效酬載整合創造多種機會。雷度士已開始運用數位工程及基於模型的系統工程，進行設計及發展，以及初始概念測試。整項計畫包括機體、推進系統、助推器、航電設備及載具子系統，預計 2028 年完成。³³

³¹ “Lockheed Martin’s Mysterious SR-72 Could Enter Service in the 2030s,” *National Interest*, December 3, 2021, <https://nationalinterest.org/blog/reboot/lockheed-martin%E2%80%99s-mysterious-sr-72-could-enter-service-2030s-197320>.

³² “Leidos Wins Hypersonic Project ‘Mayhem’ Deal, Worth Up to \$334M,” *Air & Space Force Magazine*, December 16, 2022, <https://www.airandspaceforces.com/leidos-wins-hypersonic-project-mayhem-deal-worth-up-to-334m/>.

³³ “Hypersonic Multitasker: USAF Project Mayhem Takes Shape,” *European Security & Defence*, August 1, 2023, <https://euro-sd.com/2023/08/articles/32901/hypersonic-multitasker-usaf-project-mayhem-takes-shape/>.

肆、極音速關鍵科技

極音速技術挑戰極高，面臨的關鍵技術領域挑戰包括：³⁴ 先進的飛行器設計，以實現高效能的極音速飛行、以碳氫化合物推進的超燃衝壓發動機、管理高溫及應力方法，極音速載具外殼需能應付在大氣層中高速飛行所產生的極端高溫，這與在大氣層內以低速飛行的巡弋飛彈，或是主要飛行階在大氣層之外的彈道飛彈不同；還需要保護彈體內攜帶的敏感電子儀器，並預測高溫華氏 3,000 度（攝氏 1,648 度）下的空氣動力學，這需要大量測試數據，但近年測試遭遇多次失敗，推遲這一領域的進展。

國防創新部門指出，HyCAT 後續階段為革命性技術（HyCAT II），旨在利用 HyCAT I 正在開發的模塊化有效酬載能力，支持相關環境中新型極音速技術的原型測試。這些感興趣的技術包括：低成本製造和材料、可選擇性導引、導航和控制系統及組件、推進系統，包括進氣式、火箭推進、聯合循環等，以及其他新穎、低成本、低訊號特徵的技術、通訊系統和組件，包括遙測和安全數據鏈路。³⁵

製造聯合循環發動機被認為是一項重大的技術挑戰。進氣式的極音速推進系統，集點仍集中在超燃衝壓發動機上，傳統噴射發動機使用內部風扇葉片壓縮流導入空氣，空氣與燃料混合後再點燃，而超燃衝壓發動機則是使空氣以極高速度（通常為 3 馬赫或更高）進入發動機時產生自然壓縮，這使其可在極大範圍內實現持續的極音速飛行。由於超燃衝壓發動機通常無法在低於 3 馬赫速度下正常工作，因此該飛機可能需要聯合循環推進系統，結合傳統的高性能噴射發動機或衝壓發動機，以及超燃衝壓發動機，以傳統發動機起飛並加速至超音速，飛機達到 3 馬赫或更高速度時，超燃衝壓發動機將啟動並加速到極音速。傳統發動機則在任務結束時再次啟動，以利著陸。

³⁴ “Hypersonic Air-breathing Weapon Concept (HAWC),” *DARPA*, <https://www.darpa.mil/program/hypersonic-air-breathing-weapon-concept>.

³⁵ “DIU Asks Industry for Help Getting Hypersonic Test Jet Closer to Lift off,” *Breakingdefense*, January 24, 2023, <https://breakingdefense.com/2023/01/diu-asks-industry-for-help-getting-hypersonic-test-jet-closer-to-lift-off/>.

但整合傳統發動機和超燃衝壓發動機，面臨不阻礙超燃衝壓發動機氣流，以及將重量保持在可接受範圍內的困難。洛馬公司一直在研究這項技術，作為 SR-72 的一部分，該計畫早於「混亂計畫」，並且也希望用於開發極音速戰機概念。然而迄今為止，還沒有公司或機構公開承認，在設計聯合循環發動機方面取得成功。

為了實現預期的速度和航程目標，混亂計畫可能仍需採用超燃衝壓發動機作為主要推進系統。但赫姆士（Hermeus）公司正在開發一種能夠實現極音速的非超燃衝壓發動機推進系統。「嵌合體」（Chimera）是一種基於渦輪的聯合循環發動機（turbine-based combined cycle engine, TBCC），是一種渦輪噴射發動機和衝壓發動機的混合發動機。向衝壓發動機推進的過渡發生在 2 馬赫和 3 馬赫之間。Hermeus 希望通過嵌合式發動機實現 5 馬赫的持續速度，並將該技術應用於民用和軍用飛機。該公司計畫在「暗馬」（Darkhorse）無人機展示機上使用 TBCC，希望在 2025 年試飛。「暗馬」預計可達到 5 馬赫高速。³⁶

飛鏢 AE 極音速系統則由單具斯巴達超燃衝壓發動機提供動力。這是由 Hypersonix 開發的第五代可重複使用氫動力超燃衝壓發動機。除了零二氧化碳排放外，清潔燃燒的氫燃料還使發動機能夠在飛行過程中多次開啟和關閉，這允許實現傳統火箭無法實現的非彈道式飛行軌跡。與整合到飛鏢 AE 機身中的控制面一起，可賦予飛鏢 AE 獨特的高速機動性。此外，與其他超燃衝壓發動機相比，氫燃料的航程更大。Hypersonix 於 2023 年 6 月獲得使用技術的美國專利。「斯巴達」的固定幾何形狀是其獨特的特徵，有助於其運用先進製造方法。該超燃衝壓發動機採用 Inconel 718 高溫合金製成，速度可達 7 馬赫。技術展示版本則採用高溫陶瓷基複合材料（HT CMC）生產，HT CMC 具有承受強烈加熱和快速冷卻重複循環的能力，使其成為可重複使用極音速飛行器的首選材料。在 Inconel 718 上使用 HT CMC，使發動機能夠承受最高速度為 12 馬赫時出現的高溫。³⁷

³⁶ “Hypersonic Multitasker: USAF Project Mayhem Takes Shape,” *European Security & Defence*, August 1, 2023, <https://euro-sd.com/2023/08/articles/32901/hypersonic-multitasker-usaf-project-mayhem-takes-shape/>.

³⁷ “DART AE Hypersonic Vehicle, Australia,” *Airforce-technology*, August 30, 2023, <https://www.airforce-technology.com/projects/dart-ae-hypersonic-vehicle-australia/>.

伍、小結

目前極音速載具的主要發展領域仍在軍用部分，在極音速武器方面，雖然美國技術最為先進，然而中國及俄羅斯在飛彈的運用及部署上已取得領先，使美國亦急起直追。然而美國各軍種極音速武器發展計畫仍遭遇諸多困難，美國審計署也指出其發展計畫過程中的困境，目前這些極音速武器計畫，要達到初始戰力並開始部署，仍需一段時間。

在極音速載具方面，技術挑戰則更高，這包括機體結構、耐極高溫的材料、可持續使用的極音速發動機，不論是整合式渦輪發動機及超燃衝壓發動機，或是其他新式概念，另外尚包括可用的酬載、航電系統、極音速環境下的通訊、導航等相關技術，要實現實用化的極音速載具，不論是載人或是無人系統，仍需更多時間及資源投入，而目前在軍事的運用上，仍是驅動極音速科技發展最主要的動力。

第三章 仿生技術的軍事應用

江圻杓*

壹、前言

師法自然，可以找到人類環境難題的解答，¹ 這是仿生學 (Biomimicry) 的精神與目的。向生物學習是軍事仿生學 (Military Biomimicry) 的重要課題，生物的構造和外形、對於環境的適應性和互動性，以及生存智慧等行為能力，往往成為軍事武器設計和戰術戰法借鑑應用的學習對象。² 戰爭史中經常可以發現人類的武器裝備和戰術戰法大多是向生物學習總結的產物，特別是生物集體活動的智慧所產生的巨大效益，也成為軍事應用的重點。

生物在長時間的進化過程中，為了生存、競爭、自衛和發展需要，往往會發揮與生俱來的優異本能。禽鳥善於飛行，魚類善於游泳，四足動物善於奔跑，例如，走獸兇猛異常、狐狸狡詐多變、毒蛇奇毒無比等，以達到生存發展的目的。動物的這些本能往往成為兵家模仿和學習的對象，軍事仿生學遂應運而生。

一般將軍事仿生學的發展區分為三個階段：從最早模仿生物結構和外形的「仿形」階段；進展到模仿生物獵食行為能力的「仿性」階段，再進化到模仿生物，特別是模仿生物的感知能力、思維邏輯和判斷能力的人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 廣泛應用的「仿智」階段。³ 本文首先概述模仿生物特性的武器裝備，接著區分仿生技術的軍事應用類型與成果，然後歸納軍事仿生學面臨的挑戰與發展趨勢，提供國家科工研究發展政策

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所助理研究員。

1 高宜凡，〈師法自然，可找到人類環境難題的解答〉，《遠見》，第 339 期，2014 年 8 月 26 日，<https://www.gvm.com.tw/article/19556>。

2 江圻杓，〈軍事仿生學：無人載具的群體化應用〉，《青年日報：韜略談兵》，第 97 期，2023 年 5 月 25 日，頁 7。

3 史小敏，〈軍事仿生：由形似到神似〉，《解放軍報》，2022 年 9 月 9 日，頁 11。

參考。

貳、模仿生物特性的武器裝備

一、來自鳥禽和昆蟲飛行的啟發

人類研究鳥禽和昆蟲，觀察到這些生物除了有翅膀提供飛行之外，都具有輕盈的體態、流線的外型以及剛性的飛行結構。⁴ 特別是從信天翁（albatross）的飛行姿態發現，其翅膀的長度為身體的 15 倍，由此揭開翱翔天際的密碼：翅膀的形狀和身體長度比例 —— 展弦比（aspect ratio） —— 是影響飛行升力（force of lift）的關鍵。⁵ 經過一系列飛行原理和飛行動力學的研究，促進了人類對飛機的發明和製造。1903 年，萊特兄弟（Wilbur Wright/ Orville Wright）發明世界第一架飛機，終於讓人類上天飛行的夢想成為現實。

科學家觀察蜻蜓（dragonfly），發現其翅膀兩側翼面有厚厚的角質層，它可以抵銷飛行擾流對翅膀產生的阻力和震顫。⁶ 依此原理，科學家在飛機兩翼增加重量，解決了飛機容易折翼的問題。同時也從鳥類和昆蟲飛行時將雙腳緊貼下腹，著陸時再伸出雙腳的動作得到啟發，將飛機的設計從雙翼改為單翼，將固定式起落架改為收放式機輪，大幅降低飛行阻力，飛機性能進一步提升，飛機結構得到進一步優化。

飛機優化的過程往往是根據需要所做的一種改變。第一次世界大戰時期的飛機被用來執行偵察任務；二次大戰前夕，美、英、法、德等國紛紛組建航空連或飛機連，並在戰爭期間加入戰鬥。當時的飛機並沒有武裝，飛行員一邊開飛機，一邊拿著手槍射擊；後來又攜帶手榴彈；又經過一段

⁴ “How Birds Fly,” *Science Learning Hub*, <https://reurl.cc/kXayQG>.

⁵ Nicholas Landell-Mills, “Albatrosses Can Soar Indefinitely into the Wind by Stealing Momentum from the Wind,” *Research Gate*, October 2019, p. 16.

⁶ Erfan Salami, Elham Montazer, Thomas A Ward, Nik Nazri Nik Ghazali1, and Irfan Anjum Badruddin, “Aerodynamic Performance of a Dragonfly-Inspired Tandem Wing System for a Biomimetic Micro Air Vehicle,” *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Vol 10, Issue 787220, May 18, 2022, p. 2.

時間後，法國率先在機頭加裝機槍，從而促成第一代戰鬥機的誕生。⁷ 此後戰鬥機、轟炸機、偵察機……等各種軍用飛機得到廣泛應用，進入 21 世紀以來，無人機的研製和發展則成為一股新興趨勢。

二、來自魚類於水中優游的啟發

水母 (jellyfish)、烏賊 (squid) 以及魚類能夠在水中自在上浮和下潛的能力，給予科學家提供靈感。花帽水母 (flower hat jelly) 具備一種非常奇妙的浮鰾 (swim bladder)，通過感應細胞控制上下姿態；烏賊透過調節體內水分的密度，達到上浮、下潛或推進的效果；⁸ 魚類則擁有非常精巧的魚鰾，可控制氣體的吸入和排出，使其輕易於水中上下優游。潛艦的設計即係根據這些原理，最初是藉由水櫃的充水和排水，實現潛艇的下潛和上浮。

1776 年，美國布希內爾 (David Bushnell) 研製出全世界第一艘單人潛艇，稱為龜艇 (Turtle)，依靠人力搖動俾葉推進。1800 年，法國富爾頓 (Robert Fulton) 研製出鸚鵡螺號 (Nautilus) 人力潛艇，該潛艇將水面和水下的推進系統分開，允許兩人在水下作業 5 個小時。⁹ 隨著科技進展，潛艇的設計獲得很大的提升。例如潛艇的動力從一開始的人力，進展到電動機、柴油機、汽油機，甚至核動力。不過，早期潛艇結構設計不科學，存在速度慢、效率低等問題。

分析發現，海豚 (dolphin) 除了具備流線的體型，還在於其特殊的三層皮膚結構：表皮層、真皮層和底層。真皮層由一系列的乳突構成，乳突

⁷ Dave Roos, "How Airplanes Were Used in World War I," *History*, February 11, 2022, <https://www.history.com/news/world-war-i-aviation-airplanes>.

⁸ Ian K. Bartol, Paul S. Krueger, Joseph T. Thompson, and William J. Stewart, "Swimming Dynamics and Propulsive Efficiency of Squids throughout Ontogeny," paper present at the Annual Meeting of the Society for Integrative and Comparative Biology (San Antonio, Texas: January 2-6, 2008), p. 721.

⁹ Evan Andrews, "9 Groundbreaking Early Submarines," *History*, June 1, 2023, <https://www.history.com/news/9-groundbreaking-early-submarines>.

間充滿體液；最下層由彈性纖維組成。¹⁰ 海豚高速游動時，真皮層的乳突型態會凸顯出來，使光滑的表皮變得凹凸不平。這種不規則形態可以改變海豚周圍的流場，將阻力大的湍流（turbulence），改變成阻力小的層流（laminar）。¹¹ 因此，人類模仿海豚皮的組織，並將其應用於艦船結構，大幅提高船舶的效率和速度。

冷戰（Cold War）時期，美、蘇潛射彈道飛彈（submarine launched ballistic missile, SLBM）射程都不夠遠，但都希望給對方造成核子嚇阻態勢，而北極的厚冰恰恰可以降低對方偵察能力。但潛艦必須突破冰層上浮才能發射飛彈，為了克服破冰上浮的難題，科學家發現鯨魚（whale）在冰層下活動，每隔幾十分鐘就會破冰上浮呼吸空氣，其輕易破冰倚靠的就是其異常堅硬、狀似小山的鯨背。¹² 於是模仿鯨背的設計，特別強化潛艦帆罩（sail）結構，產生奇佳效果。

三、借鑑毒蛇與飛魚的能力特性

1947年，美國第一枚導引飛彈——下士飛彈（Corporal missile, MGM-5）——成功試射，1954年服役。¹³ 之後擴及地對地、地對空、空對地以及空對空4種飛彈類型，涵蓋洲際彈道飛彈（intercontinental ballistic missile, ICBM）及單兵反坦克飛彈（anti-tank guided missile, ATGM）等數百種。這些飛彈研製的靈感有些直接來自生物，例如響尾蛇飛彈（Sidewinder missile, AIM-9）和飛魚飛彈（Exocet, AM-39），其仿生原理分述如下：

¹⁰ Junhua Ji, Ghulam Nabi, Xianyuan Zeng, Yujiang Hao, and Ding Wang, “Histological Variation in Blubber Morphology of the Endangered East Asian Finless Porpoise (*Neophocaena Asiaorientalis sunameri*) with Ontogeny and Reproductive States,” *Zoological Studies*, Vol. 58, No. 42, 2019, p. 8 of 11.

¹¹ 海豚是游泳健將，其游速每小時約40至48公里；受驚擾時，時速可以提高到70至100公里。

¹² John C. George, Christopher Clark, Geoff M. Carroll, and William T. Ellison, “Observations on the Ice-Breaking and Ice Navigation Behavior of Migrating Bowhead Whales (*Balaena mysticetus*) Near Point Barrow, Alaska, Spring 1985,” *Arctic*, Vol. 42, No. 1, March 1989, pp. 26-27.

¹³ “MGM-5 Corporal,” *GlobalSecurity.org*, <https://www.globalsecurity.org/wmd/systems/corporal.htm>.

（一）響尾蛇飛彈

響尾蛇（rattlesnake）臉頰兩邊各有一個黃豆大小的凹陷，稱為「頰麟窩」（loreal pit），使其具備優異的紅外線搜索與追蹤（infrared search and track,IRST）能力，精度高達千分之一度的溫差。¹⁴自然界絕對溫度大於零的生物，都會散發紅外線，因此儘管響尾蛇的視力趨近於零，其頰窩仍可輕易感應出一些小生物的紅外線跡訊，從而很快地捕捉到小兔子和田鼠。

武器專家將這種感應能力和特性應用在響尾蛇飛彈的研製，在其導引控制部裝置靈敏性極高的紅外線偵測器，其功能類似響尾蛇的「頰麟窩」。這款飛彈能夠偵測目標散發出來的紅外線或熱源，透過探測和追蹤空中目標的熱源進行攻擊。¹⁵響尾蛇飛彈服役以來，具有豐富的作戰經驗，並且擁有輝煌戰績，是一種具有劃時代意義的「空中殺手」。

（二）飛魚飛彈

早期攻船飛彈（ant-ship missile, ASM）發射後，由於飛得很高，很容易被艦載雷達偵知，並採取反制行動。武器專家思考將飛彈巡航過程的高度降低到 5 公尺以下——雷達偵測的盲區，於是一種飛魚（flying fish）的活動軌跡進入設計者的眼簾。海面上經常可見一些魚在跳躍飛行，以躲避大型魚類的獵捕，這些飛魚為了躲避追捕，會躍出水面 8 至 10 公尺，之後以每秒 200 公尺的速度滑翔 150 至 200 公尺，¹⁶然後入水，最終逃脫天敵的追蹤。

1970 年代，法國國家航空太空公司（Aérospatiale，簡稱「法國航太」）根據飛魚特性研製飛魚飛彈，其性能與飛魚飛行姿態一樣，發射後

¹⁴ Elena O. Gracheva, Nicolas T. Ingolia, and Yvonne M. Kelly et al., “Molecular Basis of Infrared Detection by Snakes,” *Nature*, Issue 464, 2010, pp. 1006-1011.

¹⁵ Victor V. Klemas, “Remote Sensing and Navigation in the Animal World: An Overview,” *Sensor Review*, Vol. 33, Issue 1, January 2012, pp. 3-5.

¹⁶ Hyungmin Park and Haecheon Choi, “Aerodynamic Characteristics of Flying Fish in Gliding Flight,” *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 213, Issue 19, October 1, 2010, pp. 3269-3279.

巡航高度為 15 公尺，進入接戰區高度下降為 2 至 5 公尺，接近至目標區高度再降至 0.5 至 3 公尺，完全脫離艦載雷達的偵測範圍；其於巡航階段採慣性導引（inertial guidance），進入目標區後開啟彈鼻雷達尋標器（radar seeker），偵測並攻擊目標。1982 年福克蘭戰爭（Falklands War），阿根廷空軍超級軍旗攻擊機（Super Étendard）發射飛魚飛彈擊沉英國雪菲爾號（HMS Sheffield）驅逐艦，¹⁷ 一戰成名，被稱為「海上殺手」。

四、得自貓頭鷹夜視能力的啟迪

貓頭鷹（owl）具有優異的夜視能力，其視力高出人眼的 100 多倍，牠在茫茫的夜裡，能夠清楚看到遠在幾十公尺外的小動物。科學家研究發現，貓頭鷹的瞳孔可以放大 10 幾倍，達到 12 毫米（mini-meter, mm），且其眼睛並不反射光線，而人類和其他的晝行動物都不具備這些特點。¹⁸

根據貓頭鷹的夜視特性，工程師秉持兩個原則研究微光夜視鏡：一是口徑要盡可能大；二是能夠吸收多波段光線。其原理是吸收自然光加以處理放大，然後顯影顯示圖像，這樣即可於夜間清楚辨識目標動態。¹⁹ 接著再應用眼鏡蛇辨識紅外線的能力，研製出兼具微光和紅外線功能的夜視鏡，並進一步將其體量縮小，成為個人的攜行裝備，軍隊將能夠在無光的夜暗環境中無礙行動。

參、仿生技術軍事應用情況

軍事仿生學是仿生學的一個重要分支，已經有幾千年歷史。它是模仿

¹⁷ “Surface Vessel Weapon System-MM38/AM39/SM39/MM40 Exocet-antiship Missile,” *Seaforces Online – Naval Information*, <https://www.seaforces.org/wpnsys/SURFACE/MM38-Exocet-SSM.htm>.

¹⁸ Rebecca Heisman, “‘Owl’ Be Seeing You: Amazing Facts About Owl Eyes,” *American Birds Conservancy*, March 4, 2022, <https://abcbirds.org/blog/owl-eyes/>.

¹⁹ Julius Orłowski, Wolf Harmening, and Hermann Wagner, “Night Vision in Barn Owls: Visual Acuity and Contrast Sensitivity under Dark Adaptation,” *Journal of Vision*, Vol. 12, No. 13, December 2012, pp. 1-2.

生物系統的原理和特異功能來創造武器裝備、發展戰術技術、提高自動化指揮和後勤保障能力的科學。²⁰ 人類向生物學習的歷史就是一部生產力發展的歷史，而與生物的「相愛相殺」則是人類掌握戰爭技巧的啟蒙。隨著生物學、物理學及數學等學科的蓬勃發展，軍事仿生學獲得在戰爭中施展拳腳的有力支撐，並跟隨著戰爭實踐的演進而不斷發展，²¹ 其於軍事領域的應用充滿生機蓬勃前景。

仿生技術的軍事應用幾乎已經融入各個軍事領域，囿於篇幅限制，本節僅引介較為成熟的仿生材料、仿生機械、仿生武器、仿生偽裝以及仿生後勤等類別的技術應用情況。

一、仿生材料

21 世紀以來，新的生物材料（biomaterial）朝向強固、質輕和奈米化發展。各國科學家利用蠶絲（mulberry silkworm）製造出與蜘蛛絲（spider silk）一樣強，甚至更強韌的奈米纖維（nanofibril）。²² 美國海軍利用鷹嘴魚（hagfish，鰻魚的一種）黏液製造堪比凱夫勒纖維（kevlar fiber）的防護材料，用來強化艦艇防彈、防火、防污、防魚雷以及人員防鯊魚攻擊等能力，²³ 並可廣泛應用於國防與民生領域。

根據材料的拓撲結構（topography）原理，在次波長範圍內與空氣混合的材料，表面會呈現抗反射的特性。例如，多細孔或紋理的表面。研究人員在葉蟬（cicada）的複眼或翅膀上得到應用特定次波長結構（sub-wavelength structures, SWS），設計能夠吸收各種頻率抗反射塗料

²⁰ 趙方、遠洋，〈仿生武器或顛覆未來戰爭？〉，《北京日報》，2016 年 10 月 26 日，<https://www.chinanews.com.cn/m/mil/2016/10-26/8044000.shtml>。

²¹ 石海明、劉一鳴，〈生物逆襲戰：軍事仿生技術顛覆戰爭格局〉，《每日頭條》，2020 年 4 月 29 日，<https://kknews.cc/zh-tw/military/6rnqk5p.html>。

²² Jiatian Li, Sitong Li, Jiayi Huang, Abdul Qadeer Khan, Baigang An, Xiang Zhou, Zunfeng Liu, and Meifang Zhu, "Spider Silk-Inspired Artificial Fibers," *Advanced Science*, Vol. 9, Issue 5, February 2022, pp. 2103965 2-4 of 20.

²³ "The US Navy is Synthesizing Hagfish Slime to Defend Against Torpedoes and Sharks," *Interesting Engineering*, July 10, 2017, <https://interestingengineering.com/innovation/us-navy-synthesizing-hagfish-slime-defend-against-torpedoes-and-sharks>.

(antireflection coating, ARC) 的靈感。²⁴ 這種抗反射塗料可以提高載台的匿蹤性，降低被偵測率。

美國麻省理工學院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 和耶魯—新加坡大學文理學院 (Yale-NUS College) 從蝴蝶 (butterfly) 翅膀的特殊結構得到靈感，製造出吸收效果更好的三維 (three-dimensional, 3D) 列印太陽能電池板，²⁵ 不僅可提高太陽能光伏 (photovoltaics) 的發電效率，亦可應用於利用太陽能產生動力的無人載具。例如，無人艇、高空偵察氣球、衛星及太空站。

加拿大麥吉爾大學 (McGill University) 教授巴特拉 (François Barthelat) 等學者受到魚鱗 (fish scale, FS) 保護能力的啟發，嘗試複製動物的鱗片所具備的保護力和靈活性。²⁶ 沈銘原等多位台灣學者的研究證實，魚鱗可以增強瀝青的附著力、黏彈性、溫度敏感性和對永久變形的抵抗力。²⁷ 魚鱗是已知最堅韌的膠原蛋白基材料 (collagen-based material)，這些研究都證明了魚鱗具備製作仿生防護材料的應用潛力。例如，可以用來製造具有抗穿刺性能力的防護手套。

麻省理工學院研究團隊成功研製出仿海螺殼 (conch shell) 的抗衝擊複合材料 (composite material，簡稱「複材」)，其性能較傳統的複材提高 70%，較硬質材料提高 80%，可製造性能更好的防護裝甲，²⁸ 提高防彈衣和防彈鋼板的抗衝擊能力，使人員和裝備的安全防護得到更高的保障。

²⁴ Natarajan Shanmugam, Rishi Pugazhendhi, Rajvikram Madurai Elavarasan, Pitchandi Kasiviswanathan, and Narottam Das, “Anti-Reflective Coating Materials: A Holistic Review from PV Perspective,” *Energies*, Vol. 13, Issue 2631, May 21, 2020, p. 13 of 93.

²⁵ Angela Chen, “Butterfly Wings Inspire A Better Way to Absorb Light in Solar Panels,” *The Verge*, October 20, 2017, <https://www.theverge.com/2017/10/19/16503258/butterfly-wings-engineering-solar-cell-energy-biomimicry>.

²⁶ Katherine Gombay, “Protective Wear Inspired by Fish Scales,” *McGill*, January 19, 2017, <https://www.mcgill.ca/newsroom/article/protective-wear-inspired-fish-scales>.

²⁷ Shang-Hao Liu, Ming-Yuan Shen, Cheng-You Yang, and Chin-Lung Chiang, “A Study on Circular Economy Material Using Fish Scales as a Natural Flame Retardant and the Properties of Its Composite Materials,” *Polymers*, Vol. 13, Issue 2446, 2021, p. 2 of 15.

²⁸ Grace X. Gu, Mahdi Takaffolil, and Markus J. Buehler, *Hierarchically-enhanced impact resistance of bioinspired Composites* (Weinheim, Germany: Wiley VCH, 2017), p. 9.

二、仿生機械

利用仿生學原理研製出性能更強、外觀更多樣、運作更高效的仿生機械是仿生領域基礎和應用研究的重點。²⁹ 仿生機械以仿生機器人（bionic robot）和仿生無人載具（bionic drone）較具成效，分述如下：

（一）仿生機器人

仿生機器人有別於傳統的機器人，傳統機器人的表面結構過於剛性，無法表現出類人體（humanlike）皮膚的柔軟度，若在較複雜的地形活動往往有其侷限，或需更大的體量以彌補其不足。仿生機器人則能夠提高在複雜地形的移動能力，結合人工智慧的應用，其擬人化的仿真度將更為細緻，達到幾乎難以分辨其真偽的程度。

美國賓州大學（University of Pennsylvania）機械工程教授皮克爾（James H. Pikul）將矽膠埃入纖維網中，製作出一種類似章魚和烏賊皮膚的二維（two-dimensional, 2D）材料，可以透過充氣拉成各種複雜紋理的3D結構。這種矽膠纖維材質和頭足類動物（Cephalopod，又稱「無脊椎動物」）一樣柔軟，在軟性材料中添加無彈性織物環（un-stretchy fabric rings）模仿頭足類動物的肌肉結構，最終很有可能製造出軟體機器人。³⁰

（二）仿生無人載具

無人載具的研發、製造與應用於上世紀末興起，進入本世紀大行其道。無人載具的靈感主要來自模仿禽鳥和動物的形狀和特性（仿形與仿性），隨著科技的進展，研究人員漸漸能夠賦予無人載具一定程度的「智力」，提高其算力（power of algorithms），使仿生載具邁入「仿智」的階

²⁹ 王磊、刁天喜、張音、劉術、魏曉青、樓鐵柱、李長芹、李鵬、王靜雪、王小理，〈2017年國防生物與醫學領域科技發展綜述〉，李向陽主編，《國防科技發展報告（綜合卷）》（北京：國防工業出版社，2018年），頁159。

³⁰ J. H. Pikul, S. Li, H. Bai, R. T. Hanlon, I. Cohen, and R. F. Shepherd, "Stretchable Surfaces with Programmable 3D Texture Morphing for Synthetic Camouflaging Skins," *Science*, Vol. 358, Issue 6360, October 13, 2017, pp. 210-211.

段。科學家顯然不以此為足，秉持精益求精的態度，將「仿形」、「仿性」和「仿智」三者進一步融合，研發出與禽鳥、昆蟲與魚類性狀相同的仿生無人載具及其群體應用。

仿生無人載具依照空中、陸地、水面以及水下的功能，可區分為無人空中載具（unmanned aerial vehicle, UAV，俗稱「無人機」）、無人車（unmanned vehicle, UV）、無人水面載具（unmanned surface vehicle, USV，通稱「無人艇」）和無人潛航器（unmanned underwater vehicle, UUV）。然而這些無人載具與禽鳥、昆蟲或魚類的外形相較，相去甚遠，鮮少真正能夠達到「仿形」的擬真目標，這當然是因為受到技術和材料的限制使然。

1. 無人機

在這些無人載台當中，無人機的發展最早，始於 1917 年，後在第二次世界大戰期間，美國和德國將其當作無人靶機（pilotless target aircraft, PTA）使用；³¹ 1990 年代初，波斯灣戰爭（Gulf War）之後，以色列將其發揚光大，讓無人機從偵察型向打擊型轉變；從此受到各國軍方廣泛重視，並列入軍火庫清單中的重要儲備項目之一。

目前具備擬真外形的仿生無人機有機械蝙蝠（Bat Bot）、機器斑鳩（Dove Drone）、機器蜂鳥（Meta Fly）、機器貓頭鷹（Owl Drone）、機器蜂（Robobee）和機械蜻蜓（Skeeter）等，這些迷你型仿生無人機通常被各國特種部隊列為重要的武器清單。

受制於技術與成本效益考量，與禽鳥外形相似度較高者以小型和微型仿生空中無人載具為主。例如，斑鳩無人機（dove drone，如圖 3-1），是一種偽裝很好的微型偵察無人載具。³² 測試時甚至出現鳥群伴飛的情況，可見其仿生度極高。無人機群體化應用即為「蜂群」或「鳥群」（swarm），

³¹ 〈飛機的學生兄弟 —— 無人機，從 1917 年的發展歷史〉，《無人機玩家》，<https://reurl.cc/ZWWAYg>。

³² Robert Skopec, "China's Robotic Spy Birds Take Surveillance to New Heights," *Scientific Research and Community/ Journal of Biotechnology & Bioinformatics Research*, Vol. 2, Issue 3, No. 113, August 15, 2020, p. 2 of 5.

以色列在 2021 年 5 月對巴勒斯坦激進組織哈瑪斯（Hamas）的作戰中，開啟了無人機蜂群實戰化應用的先河。³³



圖 3-1 斑鳩無人機

資料來源：Robert Skopec, “China’s Robotic Spy Birds Take Surveillance to New Heights,” *Scientific Research and Community/ Journal of Biotechnology & Bioinformatics Research*, Vol. 2, Issue 3, No. 113, August 15, 2020, p. 2 of 5.

2. 無人車

無人車的發展起步相對較晚，主要得力於「智慧移動」（E-Mobility）概念的興起和發展。早期無人車結合機械手臂功能，發展出拆彈機器人（Bomb Disposal Robot）；後期克服無人車模組和次系統的操作安全性，³⁴發展出蟻群優化算法（ant colony optimization algorithm, ACO algorithm），有效降低運輸成本，提高工作效率，為後勤保障做出巨大貢

³³ 江忻杓，〈軍事仿生學：無人載具的群體化應用〉，《青年日報：韜略談兵》，第 97 期，頁 6。

³⁴ Mark V. Mamchenko, Mariya A. Romanova, and Peter M. Trefilov, “Defining the Critical Characteristics of Unmanned Vehicles in a Smart City,” *IFAC Papers Online*, Vol. 54, No. 13, 2021, p. 490.

獻。儘管無人車於軍事領域的應用已經實現，仍然以能夠節約運輸成本的無人車蟻群物流保障為主。

3. 無人艇

隨著空中和地面無人載具的蓬勃發展，仿生無人艇的研發也急起直追。現階段無人艇的發展區分為水面無人艇（無人水面載具）和無人潛航器（無人潛艇）。

（1）水面無人艇

水面無人艇的發展雖亦始於第二次世界大戰，大行其道卻要到 1990 年代以後，即便是在近幾年，相關國家都還在持續測試其系統的穩定性和可操作性。美國海軍第三艦隊所屬四艘原型無人艇在 2022 年環太平洋演習（Rim of the Pacific Exercise, RIMPAC Ex）中進行測試，它們攜帶酬載物資、蒐集情報，³⁵ 驗證與載人艦艇作戰的協同性和分工性，以確定其於大規模艦隊中扮演的角色。

（2）無人潛航器

嚴格而論，水下潛航器（UUV）的發展早於無人艇（USV），UUV 的形狀通常會根據其運輸載台的吊放空間或投射能力來設計。例如，由水面艦船搭載的 UUV，其外觀多為類似魚雷的柱狀形，並附有掛環以利吊放和回收；由潛艦投射的 UUV，其尺寸大小近似於魚雷的外形，如此設計可以於通過魚雷發射管（torpedo tube）投射和回收；大型 UUV 的外形設計則近似沒有帆罩的潛艦，其性能直追載人柴電潛艦。

四、仿生武器

英國皇家海軍研究未來潛艦概念，靈感來自海洋生物，例如，發展一種形狀像魷魚（manta ray）的載人母艦，配備偵測器莢艙的鰻魚無人艇，這些莢艙可根據需要分散（dissolve）以避免被敵人發現，而魚形魚雷則

³⁵ Naval News staff, “Four Prototype USVs Are Participating in RIMPAC 2022,” *Naval News*, July 26, 2022, <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/07/four-prototype-usvs-are-participating-in-rimpac-2022/>.

可執行魚群攻擊敵艦，這些概念可望在未來 50 年內徹底改變水下作戰方式。³⁶

在追求仿生無人載具的綜合能力下，英國披露的未來潛艦概念以「仿生」為發展重點，包括「鸚鵡螺 100」（Nautilus 100）仿生潛艦、「鰻魚」仿生無人潛航器以及仿生武器，如圖 3-2、3-3、3-4、3-5。這些概念的靈感都是來自海洋生物，有望在未來 50 年內顛覆水下作戰方式。

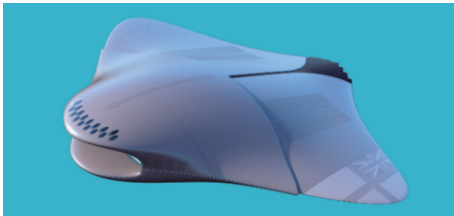


圖 3-2 鸚鵡螺 100 仿生潛艦



圖 3-3 潛射飛魚群

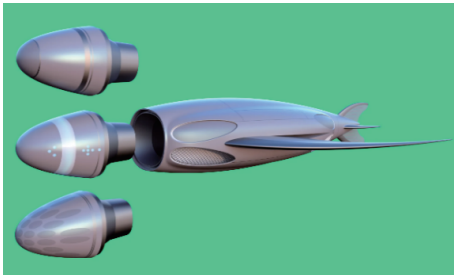


圖 3-4 潛射飛魚武器

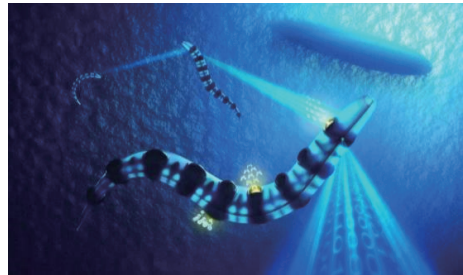


圖 3-5 鰻魚無人潛航器

資料來源：Matt Burgess, “These Futuristic Royal Navy Submarine Concepts Look and Act Like Fish,” *Wired*, August 28, 2017, <https://www.wired.co.uk/gallery/royal-navy-submarine-concepts>.

³⁶ “Royal Navy Unveils Radical Future Submarine Concepts,” *Royal Navy*, August 28, 2017, <https://www.royalnavy.mod.uk/news-and-latest-activity/news/2017/august/28/170828-royal-navy-unveils-radical-future-submarine-concepts>.

五、仿生偽裝技術

仿生偽裝體現在陸戰領域，主要是利用生物根據外部環境變化而改變體表顏色的原理，尋求變色偽裝技術的提升。《國際分子科學期刊》（*International Journal of Molecular Sciences*）2022年12月號，有篇論文探討魷魚、章魚和墨魚等頭足類動物皮膚細胞的反光蛋白具備改變皮膚顏色或調節其反射光的特性，可以藉由調整其皮膚的色素、虹彩、透明度和光散射，融入或出現在周圍的環境中，堪稱是動物界的偽裝大師。³⁷ 這種反光蛋白應用在軍服，可以擾亂紅外線偵測效果。

皮克爾也根據頭足類動物的變色特性，研究能夠在幾秒內融入環境形狀和顏色的偽裝技術，牠們可以在幾毫秒內從其皮膚上投射出分層結構，形成廣泛的紋理偽裝。研究人員據以研發一種合成的組織，允許將二維的可拉伸表面轉變為三維樣貌，模仿自然界的石頭和植物形狀，並改變自身的顏色，融入其背景環境當中，³⁸ 形成極佳的偽裝效果。

美國哈佛大學約翰·保爾森（Harvard John A. Paulson）工程與應用科學學院（School of Engineering and Applied Sciences, SEAS）的研究人員與沙烏地阿拉伯阿布杜拉國王科技大學（King Abdullah University of Science and Technology）合作，在鳥類羽毛的結構色（structural color）的基礎上，研發出一種仿生的無序多孔角蛋白網狀奈米結構（disordered and porous nanonetwork of keratin），不僅可以防刮傷，還可以提高車輛在可見光之下的匿蹤效果。³⁹

³⁷ Junyi Song, Baoshan Li, Ling Zeng, Zonghuang Ye, Wenjian Wu, and Biru Hu, “A Mini-Review on Reflectins, from Biochemical Properties to Bio-Inspired Applications,” *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 23, Issue 15679, December 10, 2022, p. 1.

³⁸ J. H. Pikul et al., “Stretchable Surfaces with Programmable 3D Texture Morphing for Synthetic Camouflaging Skins,” *Science*, Vol. 358, Issue 6360, p. 210.

³⁹ Leah Burrows, “Disordered Nanonetwork Produces Robust and Vibrant Colors for Vehicles, Biomimetic Tissues and Camouflage,” *PHYS.ORG*, November 28, 2016, <https://phys.org/news/2016-11-disordered-nanonetwork-robust-vibrant-vehicles.html>.

六、仿生後勤

美國陸軍納蒂克研究發展與工程中心（Army Natick Research, Development and Engineering Center）早於 1990 年代即著手進行「強化戰力的食品成分：提升戰鬥口糧的食品成分評估」（Food Components to Enhance Performance: An Evaluation of Potential Performance-Enhancing Food Components for Operational Rations），運用生物技術對天然食品進行生化製作，研製可在高原、沙漠、熱帶雨林和嚴寒地帶等特殊作戰環境使用的口糧食品。⁴⁰

肆、仿生技術應用的挑戰與發展趨勢

美國陸軍利用仿生學，製造能夠在飛行途中改變形狀的無人機，⁴¹ 這種兼具「變色龍」和「變形蟲」的作用，可造成雷達上的回跡大小不斷變化，將對操作手的判斷造成混淆，偽裝欺敵的效果十足，這一偽裝技術將對未來的軍事行動產生革命性的影響。

美國哈佛大學（Harvard University）和耶魯大學（Yale University）教授合作研發水下機器人（underwater robot），觀察各種魚類的游動特徵、生活習性和動作特點，發現金槍魚（tuna）具備平滑的線條，極快的游動速度以及其於水中的高度靈敏性，⁴² 因此成為新一代無人水下潛航器，或稱水下機器人設計參考模仿的對象。

早期的無人水下潛航器以從事海底調查、水下目標探測及獵除水雷為主，但由光纖電纜（fiber optic cable）控制，存在作業距離有限、電纜

⁴⁰ Irwin A. Taub, "Optimizing the Design of Combat Rations," in Bernadette M. Marriott, ed., *Food Components to Enhance Performance: An Evaluation of Potential Performance-Enhancing Food Components for Operational Rations* (Washington, D.C.: National Academy Press, 1994), p. 77.

⁴¹ U.S. Army Research Laboratory, "Research Leads to Drones That Can Change Shape Mid-Flight," *Lab Manager*, June 22, 2020, <https://www.labmanager.com/research-leads-to-drones-that-can-change-shape-mid-flight-23069>.

⁴² Dylan K. Wainwright and George V. Lauder, "Tunas as A High-performance Fish Platform for Inspiring the Next 4 Generation of Autonomous Underwater Vehicles," *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020, pp. 7-8 of 34.

防護力脆弱、作業母船運轉力受限制等缺點；後期朝大型自航式 UUV 發展，使其功能大增，但其技術難題尤甚，因此目前僅中、小型 UUV 納入一些國家海軍的戰鬥序列，儘管迄今尚未有足數軍事應用的大型 UUV 服役，不過為期不會太遠。

因應未來海軍作戰任務需要，必須讓無人潛艇更加聰明，強化措施包括：一、以指揮與管制（command and control, C2）系統將 UUV 與其他水面艦船連結。二、整合最新的水下偵測技術 —— 運用先進聲納系統。以及三、充分應用機器學習（machine learning）和人工智慧演算法（algorithms）。⁴³ 受到潛艦投射和回收無人潛航器的限制，UUV 在過去 30 年來與水面艦船的連結非常高，基於 UUV 的運用潛力巨大，美國海軍正加緊測試驗證，讓超大型無人潛航器（extra-large unmanned underwater vehicle, XLUUV）加入戰鬥序列。

無人車是一種「智慧移動」的概念，透過人工智慧、物聯網（Internet of Things, IoT）和 5G 的結合而實現，瑞士意法半導體公司（ST Microelectronics）亞太區副總裁暨台灣區總經理伊佐（Giuseppe Izzo）預估，由於迄今為止尚未有任何一個國家對無人車制定完善的安全規則或立法，大量無人車上路還需至少 10 年的時間。⁴⁴

美國海軍發展聯合軍種爆裂物處理無人系統（Joint Service EOD, JSEOD）計畫，其中先進爆裂物處理機器人系統（Advanced Explosive Ordnance Disposal Robotic System, AEODRS）的模組化開放式爆裂物處理機器人系統能夠提高不同系統之間的互操作性（interoperability）。⁴⁵ 模組化設計的好處是能夠節約成本和一體適用，也是無人操作系統的發展趨勢。

由於自然界生物結構存在複雜性，材料工程對仿生應用的發展非常重要。具體而言，裝置需具有低表面摩擦或具有高強度及靈活性，偵測器材

⁴³ “Unmanned Underwater Vehicles,” *General Dynamics*, <https://gdmissionsystems.com/underwater-vehicles>.

⁴⁴ 任立萍，〈智慧移動是生活更是新經濟！〉，《產業特輯》，2019 年 5 月，頁 15-16。

⁴⁵ Mark A. Hinton, Michael J. Zeher, Matthew V. Kozlowski, and Matthew S. Johannes, “Advanced Explosive Ordnance Disposal Robotic System (AEODRS): A Common Architecture Revolution,” *Johns Hopkins APL Technical Digest*, Vol. 30, No. 3, 2011, p. 257.

料必須耐腐蝕、耐高壓且不會阻礙訊號傳輸，因此材料特性是關鍵角色。此外，為了模仿生物的複雜表面結構，能夠製作複雜幾何特性的材料製程也是一大挑戰。⁴⁶而操作複雜載具的控制技術則是另一項必須克服的難關，一旦單機操控自如，則群體化軍事應用將可水到渠成。

伍、小結

儘管一般對軍事仿生學發展階段認知係始於「仿形」，繼而「仿性」，然後進入「仿智」階段。然經研究發現，軍事仿生學三個模仿階段殆無疑義，惟實際順序應該是先從模仿動物攻擊與防衛能力的「仿性」階段開始；接著為了提高自主化與自動化能力，加入人工智慧，而進入「仿智」階段；然後為了滿足偽裝的需要，更精緻的「仿形」工程乃應運而生。

人類進化只有 500 萬年，而生命進化已經歷 35 億年的歷史。⁴⁷武器裝備的發展模仿自然的潛力和機會無窮。但並非針對某些生物的某些特殊結構或特殊機能進行簡單的複製和模仿，而是透過對生物系統的優異技能和特殊本領的研究得到啟示，再藉由人類的聰明才智，創造出生物系統無法比擬的武器裝備。換言之，仿生技術的軍事應用暨要「源於生物」，更要「高於生物」。

軍事仿生要達到栩栩如生，兼具「仿性」、「仿智」和「仿形」於一身的仿真程度，「材料科技」和「裝備控制」是仿生科技發展的關鍵因素，此二者亦是未來具有發展潛力的研究領域。無人載具的群體化應用已經愈來愈成熟，包括空中飛的蜂群、陸地跑的蟻群以及海面或海下游的狼群，國防科工應積極著力於軍事仿生學的研究領域，俾利滿足軍事應用需要。

⁴⁶ 賴渝翔、林有駿、林佑叡、楊鏡堂，〈仿生機制與運用介紹——向海洋生物學習〉，《農業生技產業季刊》，第 61 期，2020 年，頁 69-70。

⁴⁷ 易馳科技，〈恐龍滅絕到人類出現，歷經 6000 萬年，這段時間什麼生物主宰了地球〉，《人人焦點》，2021 年 1 月 8 日，<https://ppfocus.com/0/pe4620f7c.html>。

第四章 電力推進的兩用科技發展

翟文中、劉翎端*

壹、前言

艦船推進系統的發展與人類運用船舶的歷史一樣地久遠。最初，船舶係以人力與風力作為推進的動力，由於人力可提供的動力有限，加上來風方向不定導致船舶操控不易。在這種情況下，為了克服前述缺陷，採用人力與風力複式推進的槳帆船（galley）應運而生。工業革命後，內燃機、蒸汽機、燃氣渦輪機與核子反應器相繼成為艦船推進的原動機（prime mover），由於不同原動機具有不同的輸出特性，當船舶配置一種或多種型式原動機組成的複式推進系統後，不僅可以提高船舶燃油效率（fuel efficiency），同時亦可滿足各類型船舶的不同操作速率需求。1980年代開始，隨著電子科技的進一步發展，電子組件尺寸減縮，電子控制精度不斷提升，這些技術突破使運用已逾百年的電力推進系統再度受到人們青睞，民用與軍用電力系統推進的船舶相繼問世，未來其有可能成為艦船推進的最主要形式。為對此系統在軍民兩用領域的未來發展進行分析，本文首先將對此系統的組成與工作原理進行扼要的說明，接者論述其在商業與軍事領域的運用現況。最後，將對電力推進系統軍事運用的潛力與展望進行分析，這有助吾人了解各國新造軍艦均採此系統作為艦船推進構型的原因所在。

貳、電力推進的組成與原理

船舶的推進系統係以柴油、重油、燃煤、燃氣等能源所產生之動力，驅動螺旋槳葉片（或作「俥葉」）等推進裝置，使船舶能夠進行機動與航

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所助理研究員；國防安全研究院國防戰略與資源研究所政策分析員。

行。傳統船舶推進系統多依賴柴油機提供動力，搭配齒輪組構成之減速齒輪，將原動機產生的能量傳送至俾葉推動船舶進行運動。船上裝備所需電力則多取自另外設置的獨立柴油發電機，這種配置方式無法提供艦船較佳的燃油效率，原因在於內燃機需高速運轉才可減少能源消耗，此際其輸出功率往往超過艦船航行所需的動力，因而造成不必要的燃料消耗，即使輔以減速齒輪使船舶在內燃機高速運轉時能以較低推力航行，惟其運用亦僅限於定速與定航之貨輪或液化石油氣船。整體而言，艦船航行時呈現的情況是，推進系統的原動機以中低負載運轉，船用電機為了滿足裝備高用電需求，必須經常在高負載情況下運轉。¹簡言之，兩者皆在不平衡的狀況下長期進行操作。

對軍艦在內的大型船舶言，採高速航行的時間於總航程時間占比甚小，其對航速變化則有更多需求，因此發展出「複合機械推進系統」（combined mechanical propulsion system），其結合柴油機、燃氣渦輪機及推進馬達等不同裝備，以及「固定螺距俾葉」（fixed pitch propeller, FPP）、「可變螺距俾葉」（controllable pitch propeller, CPP）、「噴水推進器」（waterjet）等不同推進裝置，主要類型計有以下四種：「複合式柴油引擎」（combined diesel and diesel, CODAD）、「複合柴油引擎與燃氣渦輪機」（combined diesel and gas, CODAG）、「複合柴油引擎或燃氣渦輪機」（combined diesel or gas turbine, CODOG）與「複合式燃氣渦輪機」（combined gas turbine and gas turbine, COGAG）等。²

此外，20世紀初期開始，船舶動力逐漸試行電力推進系統。1980年代，隨著電機、電力電子驅動技術提升，其較機械驅動更具競爭力與成本效益，電力推進才蔚為船舶應用的主流，後續因功率半導體在工業應用的普及，推進系統的電力形式遂由直流電力轉為以交流驅動為主，從而改善

¹ 胡卓瀚，〈複合推進系統與全電力推進系統之應用〉，《海軍學術雙月刊》，第54卷第2期，2020年4月1日，頁85-103，<https://navy.mnd.gov.tw/Files/Paper/6-.pdf>。

² 同註1；“Combined Propulsion Systems,” *RENK*, <https://www.renk.com/en/products/marine-propulsion/hybrid-propulsion/combined-propulsion-systems>；劉建國、鄭裕民，〈美國2020年巡防艦艇需求與技術之預測〉，《海巡論壇》，第10期，<https://www.cga.gov.tw/GipOpen/wSite/public/Attachment/f1261041417415.pdf>。

了電力推進系統的變頻調速能力。³ 當前採用電力推進的船舶可概略分為兩類：其一係電力與其他原動機結合的推進方式，如前述之柴電混合動力，當船舶自動化部件增加時，其設備架構更加地複雜、對電力需求亦相應地提高，遂產生了「油電複合推進系統」（hybrid-electric propulsion system）；其二為全電力推進，包括發電機、推進馬達、濾波器（filter）、變頻器、傳葉和推進控制系統，以及船上搭載電氣裝置，皆由單一的總電源提供所需電力，近來因減碳、降低污染與提升能源效率等意識抬頭，以及軍艦抗噪音與強化戰力的需要，出現「綜合全電力推進系統」（integrated full electric propulsion, IFEP），其可能成為海軍艦船推進未來的發展主軸。⁴

「全電力推進系統」可將艦上推進系統及日用電力系統進行整合，包含「輔助裝備」（auxiliary equipment）以及控制系統等等，相較分離發電系統，電力整合系統除可降低能源耗損外，亦可減少分離式發電設備部件維修和採購時的額外成本。⁵ 船舶近來由傳統的軸承和齒輪機械傳動，逐漸過渡至變頻器與電纜為主，具電氣操作與處理的「全電力推進系統」。雖然電力傳輸系統不若傳統機械傳動系統的滿載負載效率高，但全電力推進系統可藉由獲得推進系統的部分電力進行調度，從而提高整體能源效率。⁶ 相較傳統推進系統，「全電力推進系統」藉由「中間冷卻」

³ “History of Electric Propulsion Technology,” *The Electro-Technical Officer (ETO)*, <https://electrotechnical-officer.com/history-of-electric-propulsion-technology/>; Lena Bergh and Ulrika Helldén, “Electrical Systems in Pod Propulsion,” *Master of Science Thesis of Electric Power Engineering, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University Of Technology*, 2007, <https://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/Bergh&HelldenMSc.pdf>.

⁴ Hai-Chun Niu, Mei-Lian Zhao, and Fu-Zhen Qin, “Study on the Ship Electric Propulsion System and Its Development,” *2017 7th International Conference on Applied Science, Engineering and Technology (ICASET 2017)*, pp. 212-216, https://www.researchgate.net/publication/317609471_Study_on_the_Ship_Electric_Propulsion_System_and_Its_Development; 周佑誠，〈船舶動力系統介紹〉，《國立中山大學海下科技研究所》，http://uicl.iut.nsysu.edu.tw/courses/110-1/SMEEDP/Lecture_Slides/20211210/SMEEDP_20211210.pdf。

⁵ LCdr R.R.A. Sauvé, “Electrical Propulsion: The Future in Warship Propulsion,” *Canadian Forces College Service Paper*, 2016, <https://www.cfc.forces.gc.ca/259/290/318/192/sauve.pdf>.

⁶ A. R. Greig, J. Coombes, D. J. Andrews, and R. P. Pawling, “Modelling the Heat Distribution in A Warship,” *World Maritime Technology Conference (WMTC 2009)*, 2009, <https://imare.in/wp-content/uploads/2022/07/paper-no3a-2-dr-agreig.pdf>.

(intercooling)、「回流換熱」(recuperation)等方式，可減少 10% 至 25% 燃料消耗，在不同的船速下優化引擎負載的輸出，並降低氮氧化物污染和碳排放量。⁷ 在減少碳排放量與操作成本的雙重考量下，「全電力推進系統」未來可能成為艦船推進系統的最佳選項。

參、當前電力推進的商業與軍事運用

商船電力系統可上溯至 1880 年建造的美籍「哥倫比亞」客貨輪 (SS *Columbia*, 1880-1907) 之船載直流設備，爾後直到 20 世紀初期乃至第一次世界大戰，隨著交流電動機和柴油發動機等發明相繼地推出，其於潛艦、電池、汽輪機等應用亦獲得突破性進展，具代表性的包含 1903 年俄籍柴電動力船「汪達爾號」(Tanker *Vandal*, 1903-1913)，以及美國海軍 1913 年推出的全球首艘渦輪電力推進艦「木星號」(USS *Jupiter*, 1913-1920) 運煤船；二次世界大戰期間，美國更大量生產採用渦輪電力推進的 T2 型油輪 (T2 Tanker)。⁸ 1960 年代世界首艘交流電客輪「坎培拉號」(SS *Canberra*, 1961-1997) 問世，1980 年代電力電子技術革命後，遂開始朝向「全電力船艦」(all-electric ships, AES) 的方向進行研發，例如「伊莉莎白女王二號」(Queen Elizabeth 2, 1967-2008) 於 1987 年進行全面改裝，其為全球首艘柴電混合動力船，其後經多年演進與發展，2015 年全球首艘全電力船「安培號」(MV *Ampere*, 2015) 問世，標誌著全電力推進系統

⁷ Abdul Rahman, Antariksa, Bambang Semedi, and Slamet Wahyudi, "The Conceptual of Re-design Propulsion System and Ship Electricity Management to Reduce Waste Emission," *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 2021, 06(02), pp. 104-113, <https://gjeta.com/sites/default/files/GJETA-2021-0021.pdf>; G. Doulgeris, T. Korakianitis, P. Pilidis, and E. Tsoudis, "Techno-economic and Environmental Risk Analysis for Advanced Marine Propulsion Systems," *Applied Energy*, November 2012, 99, pp. 1-12, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261912003121>.

⁸ Espen Skjong, Egil Rødskar, Marta Molinas, Tor Arne Johansen, and Joseph Cunningham, "The Marine Vessel's Electrical Power System: From its Birth to Present Day," *IEEE Proceedings 2015*, 2015, https://folk.ntnu.no/toramj/IEEE_Proceedings_Skjong_2015.pdf.

至此進入了一個嶄新的發展階段。⁹

就軍事領域言，近期為人周知的「全電力推進系統」運用案例，應是2020年時交付美國海軍的「朱瓦特級」驅逐艦（USS Zumwalt-class DDG-1000），該級驅逐艦採用全電力推進模式，推進功率72兆瓦（megawatt, MW），該系統對全船的日用電力和推進裝置提供電力，相關裝備計有推進馬達、變速驅動器與配電盤和高壓設備等等，電力驅動器能增加能源效率，可有效降低艦艇對傳葉和減速齒輪的依賴，減少噪音聲源暴露蹤跡，從而提升作業的隱蔽性。¹⁰

如美國海軍般，英國皇家海軍亦引進「全電力推進系統」，並將此系統配備於大型戰艦，例如皇家海軍新型的「伊莉莎白女王級」（Queen Elizabeth-class aircraft carriers）航空母艦，該型航艦配置兩部額定功率36兆瓦（MW）的MT30燃氣渦輪機（MT30 Marine Gas Turbine），以及與船舶50年預期使用年限匹配可提供約5,000家戶電力所需之低壓配電系統。「伊莉莎白女王級」航艦航速超過25節，「全電力推進系統」由勞斯萊斯公司（Rolls-Royce）負責設計製造、測試與交付，大幅降低海軍武器載台（包含先進偵蒐、推進以及戰鬥系統）所需的燃氣渦輪機部件數量，可滿足搭載60架艦載機及電動車之「伊莉莎白女王級」航艦用電需求。¹¹

此外，英國海軍亦與奇異海事公司（GE Marine）合作推出全球首款「全電力推進系統」驅逐艦，此即取代「42型雪菲爾級」驅逐艦（Type 42 Sheffield Class）的「45型勇敢級」驅逐艦（Type 45 Daring Class），英國國防部與產業界共同檢視先前採用「混合燃氣渦輪與電力」（Hybrid

⁹ 同註9：“USS Langley (CV-1, later AV-3),” *National Museum of the U.S. Navy*, <https://www.history.navy.mil/content/history/museums/nmusn/explore/photography/ships-us/ships-usn-l/uss-langley-cv1-av-3.html>; “The Queen Elizabeth 2 (QE2),” *Royal Museums Greenwich*, <https://www.rmg.co.uk/stories/topics/queen-elizabeth-2-qe2>.

¹⁰ “GE Powers US Navy’s 1st Full-Electric Power and Propulsion Ship,” *GE Power Conversion*, June 11, 2020, <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-powers-us-navys-1st-full-electric-power-and-propulsion-ship>.

¹¹ “Rolls-Royce Pitches MT30 Engines to Indian Navy,” *Defence Star*, October 20, 2021, <https://www.defencestar.in/military/navy/rolls-royce-pitches-mt30-engines-to-indian-navy/5948/>.

Combined Gas and Electric, COGAL) 推進系統艦船，並將其與「全電力推進系統」比較後，認為「全電力推進系統」有相對較佳的性能與壽期成本，因此決定採用後者作為皇家海軍水面軍艦推進之用。值得注意的，「45 型勇敢級」驅逐艦雖非功率最高的「全電力推進系統」海軍艦船，其排水量為 7,500 噸，功率達到 40 兆瓦，船上電網電源電壓為 4.16 千伏，無須變壓器即可用於驅動推進馬達。¹²

在此同時，美英外的其他國家海軍亦積極地引進電力推進系統。例如 2019 年起，勞斯萊斯公司與印度海軍展開合作，擬以「全電力推進系統」及「MT30 燃氣渦輪機」來推動印度海軍航艦戰鬥群的現代化計畫。¹³ 此外，韓國防衛產業廳（或稱韓國「國防採購計畫管理局」）2023 年 5 月表示，將於同年底完成韓國首艘電力驅逐艦，該型軍艦排水量 6,500 噸，此韓國「新一代驅逐艦」計畫（Korea Destroyer Next-Generation, KDDX）於 2020 年時由韓國現代重工（HD Hyundai）得標並建造，擬於 2036 年前完成並交付韓國海軍 6 艘「KDDX」驅逐艦，該型驅逐艦以推進馬達提供艦船前進與機動所需的動力，不再使用變速齒輪作為能量轉換，從而提高能源效率以及達成降噪目的，可在反潛作戰時降低為敵潛艦偵獲的機率；此外全電力系統亦適合未來在「KDDX」艦上安裝超高壓、大功率先進武器系統，如電磁軌道炮（railgun），並使艦上雷達系統得以最佳化。¹⁴

肆、電力推進軍事運用的潛力與展望

當前，電力推進已廣泛地運用於民用與軍用兩個領域，隨著電子與

¹² “Case Study: Type 45 Destroyer – Daring Class World’s First Full Electric Propulsion Combatant Ship,” *GE Power Conversion*, January 18, 2022, <https://www.gepowerconversion.com/case-study/type-45-destroyer-daring-class-worlds-first-full-electric-propulsion-combatant-ship>; “In focus: The Power Improvement Project for the Royal Navy’s Type 45 Destroyers,” *Navy Lookout*, October 10, 2022, <https://www.navylookout.com/in-focus-the-power-improvement-project-for-the-royal-navys-type-45-destroyers/>.

¹³ “Rolls-Royce Keen to Partner the Indian Navy’s Electrification Journey for Its ‘Fleet of the Future,’” *Rolls-Royce*, October 20, 2021, <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2021/20-10-2021-rr-keen-to-partner-the-indian-navys-electrification-journey-for-its-fleet-of-the-future.aspx>.

¹⁴ Ko Dong-hwan, “KDDX to be Korea’s First Electric-powered Attack Ship,” *The Korea Times*, May 14, 2023, https://www.koreatimes.co.kr/www/nation/2023/09/113_350942.html.

電力科技的不斷提升，其現已成為一個發展成熟的兩用科技。對民用船舶言，電力推進具有較佳燃油效率，可以大幅降低燃油支出，在減少溫室氣體排放上亦可做出相當貢獻。對海軍艦船言，電力推進雖非嶄新概念，但當前採用的整合電力系統不同於傳統的電力推進方式。過去電力推進係由原動機產生電力驅動主馬達，再由主馬達帶動俾葉提供艦船運動所需的動力。另一方面，艦用裝備與日常用電則由其他原動機提供，這套系統電力無法進行轉移，因此在電力負載失衡或戰損故障出現時無法提供及時支援。目前，各國海軍採用的電力推進系統，例如美國海軍「朱瓦特級」驅逐艦¹⁵、英國皇家海軍 45 型「勇敢級」驅逐艦¹⁶與「伊莉莎白女王級」航空母艦¹⁷，這些艦船將推進系統與日用電力系統的電能整合至一個系統，因此兩者已非各自獨立而是能相互支援的集成系統。因此，可對全艦電力系統的電力運用與負載分配進行調控，藉此可提高電力調度的彈性使艦船的整體動力運用得到優化。

除可提供艦用電力調度的高度彈性外，電力推進運用於海軍艦船尚可獲得以下各項利得。首先，採用電力推進時俾葉位置可彈性配置，甚至可將俾葉完全移除以裝置於船體外的篋艙取代。由於改變了傳統原動機、減速齒輪與俾葉的艙間配置方式，加上可以電纜取代了原先的機械裝置，原動機甚至可置於水線以上艙間，¹⁸這使得海軍工程師在從事艦船設計時能有更大的自由。其次，電力推進可有效地提升艦船的生存力。在移除了減速齒輪後，船體產生的機械振動與輻射噪音將可大幅降低。若軍艦船體進一步採用新式的俾葉 / 艙部構型設計，將使水面艦的艙跡信號（wake signature）相應地減少，這可抵銷艙跡歸向魚雷長期具有的性能優

¹⁵ “DDG 1000,” *Naval Sea Systems Command*, <https://www.navsea.navy.mil/Home/Team-Ships/PEO-Ships/DDG-1000/>.

¹⁶ “Type 45 Destroyer – Daring Class World’s First Full Electric Propulsion Combatant,” *GE Power Conversion*, January 18, 2022, <https://www.gepowerconversion.com/case-study/type-45-destroyer-daring-class-worlds-first-full-electric-propulsion-combatant-ship>.

¹⁷ “Queen Elizabeth Class (CVF),” *Naval Technology*, <https://www.naval-technology.com/projects/cvf/>.

¹⁸ Ronald O’Rourke, *Electric-Drive Propulsion for U.S. Navy Ships: Background and Issues for Congress*, p. CRS-19.

勢，有效迴避魚雷的鎖定與攻擊。¹⁹再者，電力推進係一個分散式電力系統（distributed power source），當推進系統或日用電力因戰損喪失電力供給時，可透過架設緊急電纜方式對其提供電力。²⁰因此，電力推進賦予艦船較佳的存活性，軍艦在承受戰損時亦能及時與有效地進行損害管制。此外，採用電力推進可以有效降低燃油支出，即以美國海軍的「朱瓦特級」驅逐艦為例，相較採用傳統機械推進方式，預估其可減少近 25% 燃油消耗，這使得電力推進系統的操作成本更加低廉。

就海軍電力推進言，其最具潛力的發展應是可與電能武器結合，兩者結合後將賦予海軍作戰截然不同面貌。電能武器（electric weapon）係指運用儲存電能作為摧毀機制的一種武器，其可概分為兩大類：定向能武器（directed-energy weapons, DEW）與電磁脈衝發射器（electromagnetic launchers）。若將其進一步細分，前者包括了雷射武器、粒子束武器（particle beam weapons）與高功率微波（high-power microwave）或無線電頻率（射頻）武器；後者則有軌道砲（rail gun）、線圈砲與感應驅動器（induction drivers）等三種型式。當前，各國海軍皆不遺餘力地進行各項電能武器研發。2021 年 5 月，美國海軍兩棲船塢登陸艦「波特蘭號」（USS Portland, LPD 27）成功地完成了一次海上雷射武器測試，這艘軍艦運用安裝其上的「雷射武器展示器」（Laser Weapon System Demonstrator）Mk2 Mod0，發射瞬間就使一具無人飛行載具（unmanned aerial vehicle）失去作戰能力。²¹除高能雷射外，電磁軌道砲（electromagnetic rail gun, EMRG）係電能武器中另一可望於未來部署至海軍艦艇的武器系統。雖然，美國海軍因技術問題暫時中止了這個項目研發，但是中國與俄羅斯等其他國家仍持續進行電磁砲的研發，中國是當中最積極並且獲得進展較顯著的國家，惟目前並無公開資訊顯示其已成功開發並完成實際部署。即令如此，由於

¹⁹ *Ibid.*

²⁰ *Ibid.*, p. CRS-20.

²¹ “USS Portland Conducts Laser Weapon System Demonstrator Test,” *U.S. Indo-Pacific Command*, <https://www.pacom.mil/Media/News/News-Article-View/Article/2197905/uss-portland-conducts-laser-weapon-system-demonstrator-test/>.

相關科技發展與日俱進，海軍研發與部署高能雷射武器已成為不可抗拒的趨勢。

電力推進系統已成為各國海軍建造新一代艦船標準配備，這不僅來自其可大幅降低人員操作成本的後勤考量，作戰需求則是另一個重要的驅動因素。隨著飛彈的速度與精確性不斷地提升，海軍在反制攻船與彈道飛彈的需求下，積極研發能對敵方飛彈威脅進行快速回應與接戰的武器系統，由於高能雷射可以光速進行目標接戰，「從感測器到射手」（sensor-to-shooter）的時間差被壓縮至零，這意味著偵獲目標即能同步接戰並且進行反擊。在運用電能武器對抗攻船飛彈時，將使配備此系統的水面艦船取得了「不對稱」優勢，同時尚能對敵發起的飽和攻擊進行有效地反制。雖然，當前電力推進的技術已相當成熟，然而電能武器實際部署仍有許多技術瓶頸必須予以克服，在這當中尤以「脈衝功率技術」（pulse-power technology）為然，此技術用以儲存電能並能快速放電提供電能武器所需的大量電力。²² 電力推進與電能武器的發展仍視下列科技能否獲得突破進展，相關領域包括了儲能領域的電容、電池、飛輪與超導磁能儲存（superconducting magnetic energy storage, SMES）；脈衝功率裝置的磁通壓縮發電機（magnetic flux generators）與磁流動力發電機（magnetohydrodynamic generators）；熱能管理系統以及艦船整合設計。²³ 換言之，電力推進使得電能武器部署成為可能，電能武器亦促成了電力推進廣泛運用，兩者交互影響將可加速彼此發展。

伍、小結

就船舶推進歷史言，電力推進的運用已有百餘年時間，過去由於電子電機技術發展未臻成熟，電力推進系統的運用僅限於少數特殊勤務船

²² Stuart Moran, *The Basics of Electric Weapons and Pulsed-Power Technologies* (Dahlgren, VA.: Naval Surface Warfare Center, 2012), p. 51.

²³ F. C. Beach and I. R. McNab, *Present and Future Naval Applications for Pulsed Power* (Washington, D.C.: Naval Directed Energy & Electric Weapons, Naval Sea Systems Command, June 2005), pp. 2-7.

船。近年來，在減少碳排放量與操作成本考量下，船舶電力推進系統再度受到人們重視。就商用領域言，採用電力推進系統的初期較傳統推進系統為高，電力系統的操作與維修亦須專業人員為之。因此，如純電動車與油電混合車發展初期般，電力推進系統的全面性運用仍需相當時日方能有以致之。然而，在全球減少碳排放與碳中和政策的支持下，商用船舶採用電力推進的趨勢可說是方興未艾。另一方面，電力推進在海軍的運用由來已久，尤其全電力推進在艦船匿蹤、機動操控、損害管制、燃料效率與整體設計等方面，較採用傳統機械推進系統的艦船明顯地具有壓倒性優勢。因此，美英西方國家甚或人民解放軍海軍，其新造艦船皆不約而同地採全電力推進設計。或許更重要的，各國海軍積極發展中的電磁砲與雷射裝置等電能武器，皆需要大量的電能方能進行操作，全電力推進系統的艦船由於可對全艦電能進行整合運用與彈性調配，遂成為海軍部署電能武器的唯一與最理想載台。就此觀之，無論就商業與軍事領域言，電力推進成為未來船舶推進系統的主要發展方向指日可待。

壹、前言

國際對於作戰的理解範圍已擴及多領域，未來的戰場除了傳統的陸地、海上及空中，亦涵蓋太空與網路等新興領域，並進入到認知的層次，科技如何應用於認知作戰，是備受關注的議題。隨著網路、行動裝置及社交媒體（social media）的發展與普及，「有組織的社交媒體操縱」（Organized Social Media Manipulation），例如有心人以社交媒體為平台，從事大規模的政治宣傳、假訊息散播等認知影響行動，成為全球重視的安全議題，¹而軟體機器人（software bots）在其中扮演關鍵角色。軟體機器人在社交媒體的應用型態，主要可分為社交媒體機器人（social bot）與聊天機器人（chatbot）。隨著2016年Facebook、Twitter等社交媒體相繼開放應用程式介面（Application Programming Interface, API），鼓勵開發聊天自動化軟體，加上人工智慧（Artificial Intelligence, AI）、自然語言處理（Natural Language Processing, NLP）、機器學習（Machine learning, ML）、演算法（Algorithm）及大數據（Big Data）等技術的突破，當前社交媒體機器人與聊天機器人不僅參與民眾的日常社交生活，或成為國家在平時與戰時的認知作戰工具。

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所政策分析員。

¹ Samantha Bradshaw and Philip N. Howard, “Troops, Trolls and Troublemakers: A Global Inventory of Organized Social Media Manipulation,” *Computational Propaganda Research Project*, 2017, pp. 1-37, <https://reurl.cc/zYvaA6>.

貳、智慧化發展

一、應用型態

軟體機器人一詞源自於機器人（robot），其透過軟體程式模擬人類行為並提供服務。有別於機器人呈現硬體的人形外觀和部分特徵，軟體機器人指的是觸發某些動作、執行特定行動的應用程式，也就是使用者或其他軟體代理的自動化電腦程式。² 在資通訊技術（Information and Communication Technology, ICT）快速發展與資訊的爆炸下，大量網頁的整理、歸檔成為亟需解決的問題，以網路爬蟲（spiders）為主要型態的軟體機器人應運而生，其可模擬使用者瀏覽網頁的狀態，結合人工智慧、機器學習等技術進行掃描，針對網頁中的細部資料，透過搜尋關鍵字，依據語言處理和線索辨識網頁的資訊，並以演算法與該資訊對照比較，利用電腦程式進行自動抓取，由此獲得搜尋結果，作為搜尋引擎的重要組成部分。

社交媒體機器人則是在上述自動化程式基礎發展而來的機器人類型，其利用虛擬的社交媒體帳號，模擬使用者在社交媒體上的行為，例如按讚、發布評論、傳送私訊及追蹤要求等，透過自動化操作的方式，讓使用者難以發現其與機器人互動。有研究指出，在線上的社交網絡中，社交媒體機器人甚至可比人類更有效地傳遞資訊。³ 正因如此，社交媒體機器人若被大規模的惡意利用，例如大量散播錯誤的資訊，透過「機器人流量詐騙」（bot fraud）的手法，影響社交媒體的演算法，恐進一步操縱公眾的輿論。⁴ 有研究針對國家資助的社交媒體機器人網絡進行分析，發現中共近年利用社交媒體機器人擴大宣傳，這些受中共資助的社交媒體帳號往往與中共的外交部發言人、官方媒體及共青團等組織協力合作，在網路上推

² 黃漢邦、康志豪，〈智慧型機器人簡介〉，《科儀新知》，2015年12月，頁6-11。

³ Gorwa, R. and Guilbeault, D., “Unpacking the Social Media Bot: A Typology to Guide Research and Policy,” *Policy & Internet*, Vol. 12, No. 2, 2018, pp. 225-248, <https://doi.org/10.1002/poi3.184>.

⁴ Yazan Boshmaf, Ildar Muslukhov, Konstantin Beznosov, and Matei Ripeanu, “Design and Analysis of A Social Botnet,” *Computer Networks*, Vol. 57, No. 2, 2013, pp. 556-578, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.06.006>.

動如「反美」等標籤主題的大規模影響力行動。⁵

軟體機器人的另一社交媒體應用型態為聊天機器人，其從文本形式的自動化程式，透過蒐集與分析使用者數據，感知周遭環境變化並規劃行為軌跡，在使用者不介入的情況下，做出人格化與客製化的服務與回應，發展出多媒體的互動模式。⁶近年快速興起的生成式預先訓練模型（Generative pre-trained transformers, GPT）為代表的「生成式人工智慧」，催生出如「ChatGPT」的聊天機器人。「ChatGPT」以反覆訓練與生成內容回饋等策略，在巨量資料中自主學習，將過去聊天機器人產出的罐頭式模版內容，轉變為訓練模型加持的創造性深度創作。⁷在「ChatGPT」聊天機器人的推展下，可根據使用者需求、偏好及背景生成客製化的內容，進而提升使用者的體驗滿意度，使之內容更具說服力與吸引力。

二、產業發展

近年以聊天機器人為主的軟體機器人應用，帶動相關產業的投資與服務型態的創新。根據研究統計報告，預計至 2030 年，聊天機器人領域將可達到 36.2 億美元的市場規模，顯示聊天機器人未來的普及程度與發展潛力。⁸由微軟（Microsoft）投資的公司 Open AI 所開發的「ChatGPT」聊天機器人，自 2022 年 11 月正式推出，在全球引發「生成式人工智慧」風潮，註冊人數 5 天即達百萬人次，上線 2 個月內使用人數破億，成為增長最迅速的軟體應用程式，並帶動科技大廠相繼投入聊天機器人的研發。⁹

5 Charity S. Jacobs and Kathleen M. Carley, “#WhatIsDemocracy: Finding Key Actors in A Chinese Influence Campaign,” *Computational and Mathematical Organization Theory*, July 1, 2023, <https://doi-org.proxyone.lib.nccu.edu.tw/8443/10.1007/s10588-023-09380-9>.

6 林翠絹，〈社交媒體機器人應用於臺灣數據導向選戰之初探性研究〉，《傳播研究與實踐》，第 13 卷第 1 期，2023 年，頁 115-148，<https://dx.doi.org/10.53106/222114112023011301004>。

7 王亞坤、李強、石戈，〈ChatGPT 對社交機器人技術發展的影響分析〉，《無人系統技術》，第 6 卷第 2 期，2023 年，頁 95-102。

8 〈聊天機器人的未來：關鍵趨勢與最新統計數據（上）〉，《MarsGo》，2023 年 2 月 22 日，<https://reurl.cc/DAINgO>。

9 吳碧娥，〈ChatGPT 掀起生成式 AI 大對決〉，《經濟日報》，2023 年 2 月 23 日，<https://reurl.cc/VLMYr5>。

2023年5月谷歌（Google）正式推出聊天機器人「Bard」，¹⁰其模擬人類口吻，生成回應的文本內容，與使用者進行對話，與「ChatGPT」主要差異在於「Bard」針對提問是以段落的形式回覆，而不是逐字產生。¹¹隨後，作為中國第一大搜尋引擎的百度（Baidu），宣布推出「文心一言」聊天機器人，標榜該模型的中文能力，¹²強調其可依照使用者的需求，回應文字、圖片、語音或影音等內容，以及在文學創作、商業文案等領域的多元應用，宣稱「文心一言」綜合能力實測得分超越「ChatGPT」。¹³

人工智慧晶片被廣泛應用於物體偵測、影像分類、語音轉文字及自然語言處理等技術，作為生成式人工智慧訓練系統的關鍵配件，在聊天機器人的蓬勃發展下，全球人工智慧晶片出現爆炸性的需求，並為晶片製造、晶片設計、晶片封裝產業帶來巨大商機，例如人工智慧晶片公司輝達（Nvidia）股價的暴漲。不僅如此，聊天機器人需具備大量的雲端運算能力，涵蓋半導體、雲端伺服器以及網路頻寬等，帶動全球人工智慧伺服器市場的成長。¹⁴除此之外，伴隨聊天機器人的技術發展，促使第三方軟體業者開發更多的衍生服務，例如即時圖文或影像辨識、語音服務等整合性應用，使得伺服器產業鏈如晶片業者、伺服器業者以及雲端大廠等皆積極拓展邊緣運算市場。¹⁵

三、國際競爭

前揭微軟、谷歌與百度等科技巨頭在聊天機器人領域的激烈競爭，反

¹⁰ 陳冠榮，〈Google AI 聊天機器人 Bard 全面開放，支援英日韓文〉，《科技新報》，2023年5月11日，<https://reurl.cc/dDyK3D>。

¹¹ 〈Google 大哥沒輸！谷歌 AI 聊天機器人 Bard 「這功能」贏 ChatGPT〉，《城市學》，2023年3月23日，<https://reurl.cc/3x4dG1>。

¹² 〈百度文心一言性能陸居冠，綜合評分超越 ChatGPT〉，《理財網》，2023年8月8日，<https://reurl.cc/EokjKm>。

¹³ 丘力龍，〈文心一言 3.5 擺脫人工智障臭名？百度：綜合能力勝 ChatGPT〉，《TVBS 新聞網》，2023年6月27日，<https://reurl.cc/p6vqoZ>。

¹⁴ 〈ChatGPT 帶動 AI 晶片龐大需求！工研院：雲端服務業將推出自主研發晶片以平衡成本〉，《太報》，2023年6月16日，<https://reurl.cc/WGAan5>。

¹⁵ 〈研調：聊天機器人帶動邊緣 AI 伺服器成長〉，《中央社》，2023年3月1日，<https://reurl.cc/r53dmb>。

映美中科技競爭與地緣政治問題。美國此前數度對中國半導體產業發動全面制裁的貿易戰，2019 年要求台積電等公司禁止銷售晶片給中國華為公司之後，導致華為的生產線全面停擺，2022 年美國公布《晶片與科學法案》（*Chips and Science Act, CHIPS Act*），要求擁有美國綠卡與國籍的公民，不得在中國半導體公司任職，避免科技機密遭中國竊取，藉此鞏固美國的科技優勢地位。¹⁶ 值得注意的是，人工智慧晶片作為聊天機器人及未來相關產業的關鍵動力，美國實施制裁的出口管制措施，使得中國無法取得先進的人工智慧晶片，如輝達公司生產的加速器 Nvidia A100 及其後續產品 H100 在內的晶片，致使中國聊天機器人及相關產業發展陷入瓶頸。¹⁷ 在此情況下，中國試圖發展國產人工智慧晶片，包含百度、韓武紀等公司，但相關評論指稱，由於中國的晶片設計與製造，仍相當仰賴國外的軟體、工具及其他技術，短期內中國晶片研發與運算能力等皆無法趕上美國。¹⁸

在科技巨頭設立高門檻及美中的高度競爭之下，台灣針對聊天機器人領域，特別是生成式人工智慧，仍具有優勢與機會。就聊天機器人生成式人工智慧的底層架構而言，台積電作為人工智慧晶片公司輝達的代工主力，¹⁹ 擁有技術的絕對優勢，而大數據處理是打造大型人工智慧語言模型的根基，目前在台灣供應鏈中以高速運算的超級電腦，如廣達、緯創等伺服器業者具發展實力，華碩旗下的台智雲亦投入雲端與運算能力的服務市場。另一方面，在聊天機器人的應用層面，如八維智能、叡揚資訊等等人工智慧商業應用服務商，陸續開發企業服務的聊天機器人，例如布建於公司網頁並擴充於 LINE、FB 等社群媒體中。²⁰ 整體而言，台灣在聊天機器

¹⁶ 呂嘉鴻，〈美中半導體大戰進入深水區 人工智能 AI 晶片為何成為關鍵〉，《BBC 中文網》，2023 年 6 月 13 日，<https://reurl.cc/RzLnR6>。

¹⁷ 黃淑玲，〈美擬禁晶片設計軟體輸陸〉，《經濟日報》，2022 年 8 月 4 日，<https://reurl.cc/p691qx>。

¹⁸ 〈中國拿不到先進晶片 研發聊天機器人被掐住〉，《中央社》，2023 年 3 月 4 日，<https://reurl.cc/946o18>。

¹⁹ 〈輝達新晶片台積全拿 但黃仁勳有句話沒說〉，《經濟日報》，2023 年 6 月 2 日，<https://reurl.cc/WGAq1D>。

²⁰ 〈【產業前鋒】聊天機器人 ChatGPT 來襲 台廠卡位人工智慧新浪潮〉，《鏡週刊》，2023 年 3 月 4 日，<https://reurl.cc/WGAqgO>。

人生成式人工智慧的底層供應鏈與上層應用方面已有一定的基礎，並有能力延伸於其他的商業應用開發。

參、多元化應用

聊天機器人從傳統制式的網站對話機器人（dialog system），隨著民眾媒體使用習慣的改變而出現嶄新的樣貌，例如 FB、LINE 等社交媒體投入聊天機器人的研發與創新，使用者可利用社交媒體平台與聊天機器人進行對話，並由此發展出多元的應用情境，包含醫療照護、教育學習、政治倡議等多元領域。

一、醫療照護

醫療照護為目前聊天機器人的主要應用領域，聊天機器人利用自然語言學習技術，維持深度、近似人類的對話，為患者提供即時的醫療協助。聊天機器人著重於民眾端的互動，包含與患者充分溝通，提供疾病或基礎健康資訊，使患者完整而深入理解疾病或治療計畫的相關資訊。²² 例如美國健康技術公司 Belong.Life 推出「Dave」針對癌症患者的聊天機器人，主打全天候回答患者問題，協助患者初步掌握病況，進一步與醫生討論。²³ 聊天機器人具有支持陪伴與安撫情緒的作用，可為焦慮症、抑鬱症及自閉症患者提供協助，²⁴ 也有助於緩解老年人的孤獨感，成為長時照護的助手。美國微軟公司的聊天機器人「ChatGPT」與台灣人工智慧實驗室宣布合作計畫，導入微軟先進的人工智慧技術，加速台灣醫療院所的數位轉

21 吳凱中，〈ChatGPT 醫療應用 開全球首例〉，《經濟日報》，2023 年 4 月 27 日，<https://reurl.cc/RzLylx>。

22 許桂芬，〈ChatGPT 在醫療應用之潛能〉，《工商時報》，2023 年 5 月 10 日，<https://reurl.cc/7k4MxQ>。

23 〈醫生用 ChatGPT 幫你看病，越來越有必要〉，《科技新報》，2023 年 6 月 20 日，<https://reurl.cc/DAINgO>。

24 〈聊天機器人的未來：關鍵趨勢與最新統計數據（上）〉，《MarsGo》，2023 年 2 月 22 日，<https://reurl.cc/DAINgO>。

型。

二、教育學習

教育是聊天機器人另一潛力應用場域，聊天機器人協助學習語言或某個領域的知識，並根據不同領域和年齡階段產生不同的學習功能，針對學生的學習行為資料，客製化教材活動，並透過與學生互動，提供即時的回饋，成為提升教學效率的輔助工具。²⁷ 微軟創辦人 Bill Gates 曾表示，聊天機器人有助於線上教育的創新，根據學生的需求，提供量身定制的學習方法，並可從中儲存和分析數據，評估學生與教學進度，甚至可跨越資源的差距，改善學子受教育的機會。²⁸ 2023 年 2 月 Meta 公司執行長 Mark Zuckerberg 宣布推出大型的人工智慧語言模型「LLaMA」，用以解決數學問題或科學研究，可見聊天機器人在教育、學術及人類知識學習的發展潛力。²⁹ 就台灣而言，將社交媒體機器人運用於陪伴與教育為近年發展趨勢，以 LINE 聊天機器人為例，學生可與 LINE 聊天機器人學習課程和問答互動，作為聊天機器人在教育學習的。

三、政治倡議

社交媒體機器人在社群媒體上生成與發布內容，具有轉發、評論、點讚與聊天等互動功能，在網路空間日漸發揮重要作用，包括社會運動的號召、政治議題的倡議等。社交媒體機器人除了透過帳號發布內容，也會以

²⁵ 〈瑞士 AI 社交機器人 可全天候長輩盼分擔護理員辛勞〉，《公視新聞網》，2023 年 7 月 7 日，<https://reurl.cc/ID8xR9>。

²⁶ 吳凱中，〈ChatGPT 醫療應用 開全球首例〉，《經濟日報》，2023 年 4 月 27 日，<https://reurl.cc/RzLylx>。

²⁷ 〈《教育停看聽》聊天機器人在教育上的應用〉，《台灣醒報》，2023 年 2 月 20 日，<https://reurl.cc/nDqrEl>。

²⁸ “Can AI Fix Education? We Asked Bill Gates,” *The Verge*, April 26, 2016, <https://reurl.cc/GA5jjG>。

²⁹ 〈聊天機器人廣泛應用 傳統教育該如何改革〉，《星島日報》，2023 年 2 月 25 日，<https://reurl.cc/VL0N6A>。

「追蹤者」的身分進而連結其他的追蹤者參與社會運動，過去美國「The Black Lives Matter」社會運動，建立了名為「StayWokeBot」的社交媒體機器人，儘管當時人工智慧仍待開發，但社交媒體機器人即時更新抗議資訊，具有凝聚與動員社會運動支持者的媒介作用。³⁰近年來社交媒體機器人被引入政治傳播領域，用以塑造政治人物聲量並影響公眾輿論。例如社交媒體機器人透過強化公眾特定觀點和態度，進而「製造共識」，被認為是英國「脫歐運動」的推手。此外，社交媒體機器人被用來支持特定政治人物立場，針對不同選民群體投放特製內容，從而影響選民觀點。³¹

聊天機器人在台灣政治傳播領域已成為選戰的科技工具之一，特別是強化與選民互動。例如2018年柯文哲為選戰推出打造人工智慧聊天機器人「柯語錄機器人」，以互動式對答拉近與民眾的距離。2020年各黨總統候選人利用LINE聊天機器人推出不同風格的推播訊息，強調與選民的互動，但研究結果顯示，各候選人的LINE聊天機器人仍以單向推播競選活動與政見為主，互動設計偏向回覆簡短的文字與貼圖，進行多輪式提問便呈現跳針與答非所問，顯見聊天機器人在政治選戰的技術應用仍待突破。³²新型態的聊天機器人對於網路資訊傳播具有更巨大的影響力，2023年2月，國科會主委吳政忠表示已著手布局代表台灣的聊天機器人，在凸顯民主價值與繁體中文優勢上，聊天機器人可成為國家對外發聲的平台，回應國際上對台灣的偏見論述。³³

肆、武器化趨勢

根據《2022 全球數位報告》，截至2022年1月，全球社交媒體使用者已超過46.2億，相當於全球總人口的58.4%，為2012年同期的3倍，

³⁰ “The Rise of Political Bots,” *DW*, August 6, 2016, <https://reurl.cc/51DD77>.

³¹ 趙蓓、張洪忠，〈議題轉移和屬性突顯：社交機器人、公眾和媒體議程設置研究〉，《傳播與社會學刊》，第59期，2022年，頁81-118。

³² 林翠絹，〈社交媒體機器人應用於臺灣數據導向選戰之初探性研究〉，《傳播研究與實踐》，第13卷第1期，頁115-148，2023年，<https://dx.doi.org/10.53106/222114112023011301004>。

³³ 〈國科會擬推出台灣版ChatGPT防中國偏見論述〉，《中央社》，2023年2月13日，<https://reurl.cc/DAKOZm>。

顯示社交媒體對當前網路資訊傳播的影響力。³⁴就社交媒體的使用者規模而言，Twitter 以高達 4.36 億的使用者數量排名在前，其中有 4,800 萬的帳號為社交媒體機器人。³⁵近年俄國、中國等威權政府投注大量資源輸出假訊息與運算宣傳（computational propaganda），強化有利的敘事以維護其政治利益。在此脈絡下，社交媒體機器人、聊天機器人在社交媒體平台被賦予作戰任務。

一、戰場應用

除了平時應用於認知戰外，聊天機器人在實體的戰場中具有重要的情報分享功能。2022 年 2 月俄烏戰爭爆發，烏克蘭數位轉型部在社交媒體 Telegram 上打造「eVorog」與「eBopor」聊天機器人，透過驗證公民身分並授權發文，提供民眾於官方管道回報俄軍動向和軍事設備位置的文字、圖片、影音等訊息的溝通管道，藉此蒐集全國各地的即時戰爭情報。³⁶根據烏克蘭巡邏警隊的說法，有超過 20 萬烏克蘭人使用「eVorog」與「eBopor」聊天機器人，協助烏克蘭守軍打擊大量入侵的俄軍。³⁷由於上述兩款聊天機器人並非獨立的應用程式軟體，因此俄國無法對其實行直接的封鎖。由此而言，社交媒體機器人可謂資訊時代的重要戰爭利器，透過全民情報網掌握戰場上的情資並能即時溝通，不僅有利於即時的防禦，更能強化反擊的力道。

³⁴ “We Are Social And Hootsuite’s Global Report Digital 2022 – Most Of The Connected World Continues To Grow Faster Than It Did Pre-Pandemic,” *Lovely Mobile News*, January 26, 2022, <https://reurl.cc/51DD77>.

³⁵ 陳虹、張文青，〈Twitter 社交機器人在涉華議題中的社會傳染機制 —— 以 2022 年北京冬奧會為例〉，《新聞界》，第 2 期，2023 年，頁 87-96。

³⁶ Audrey Kurth Cronin, “Open Source Technology and Public-Private Innovation Are the Key to Ukraine’s Strategic Resilience,” *War on the Rocks*, August 25, 2023, <https://reurl.cc/WGjnO7>.

³⁷ 〈烏克蘭聊天機器人立大功 逾 20 萬人即時回報俄軍動向〉，《自由時報》，2023 年 3 月 29 日，<https://reurl.cc/nDqldn>。

二、作戰潛力

在人工智慧高速運算與資料分析的基礎上，聊天機器人在多領域的作戰環境中或可發揮指導作用，特別是在多型態情報的處理與認知、作戰規劃和場景決策及網路對抗上皆具備應用潛力。根據《全球防衛雜誌》的分析，人工智慧聊天機器人的軍用潛力，有助於戰場上的管制成效，例如其可利用對資訊的掌握，為士兵提供所需的即時資訊，改善指揮官戰場空間的決策，並協調戰場空間，提升作戰行動效率，針對戰場空間不同行動進行風險評估，提升戰場指揮官決斷能力，有效地協調戰場所有領域的行動。另一方面，聊天機器人也可能被利用於情報分析，例如分析大量公開文本資料，簡要總結資訊，快速分辨關鍵資訊，並識別潛在的威脅及可能的機會，為決策者提供正確資訊。在後勤部分，人工智慧聊天機器人也具備精準管控後勤補給品的軍用潛力，例如分析文本資料，取得補給路線、運輸時間及成本，分析出運補最佳效率的方式。³⁸

三、風險評估

建立在人工智慧模型基礎上的聊天機器人，具有多元轉化應用在不同領域的潛力，也可能放大其威脅範圍，其演算法黑箱特性與學習能力也可能讓其生成的內容產生隱私、道德與歧視的風險。不僅如此，在使用者提問超出人工智慧模型的運算能力時，就可能出現捏造不實的內容。除了內容層次外，在機制的運作上，鑑於社交媒體機器人的傳播互動性與號召性，當負面情緒易受到人們注意與情緒反應，在人工智慧推波助瀾下，社交機器人或可能優先傳播這類負面情緒的內容，以提高社交媒體機器人被關注的程度，因此目前關於社交媒體機器人的研究，多半環繞在惡意假帳號機器人與假訊息傳播。在人工智慧恐助長不可控的惡意武器發展下，2023年2月美、中等50國召開會議，聚焦人工智慧負責任的軍事用途，

³⁸ 〈成立首席數位人工智慧辦公室 美國防部全力發展 AI 戰力〉，《青年日報》，2022年2月8日，<https://reurl.cc/XEZree>。

就人工智慧武器化與相關規範上尋求共識，然而，在美、中等軍事科技大國高度競爭的背景下，國際社會目前恐仍無法對此達成共識。³⁹

伍、小結

2022年2月，美國國防部成立首席數位人工智慧辦公室（Chief Digital and AI Office, CDAO），推動美軍數位化及其在人工智慧領域的發展，除了加強與產業夥伴合作，並成立資料分析專家小組，以應對危機與未來挑戰。⁴⁰同年10月，習近平於「二十大」強調「提高新領域作戰力量的比重，加快發展無人化、智能化作戰能力，促進網路信息系統的發展和應用」。⁴¹由此觀之，未來戰場在人工智慧的催化下愈趨複雜，各國正戮力準備並嚴正以待。本文探討軟體機器人在社交媒體的應用，以聊天機器人作為個案分析，理解其平時與戰時的應用。在各國提倡多領域作戰理念的脈絡下，認知層面的攻防涉及複雜的資料蒐集、分析、整合及傳播的過程，民主國家或可以聊天機器人的發展為標的，掌握認知作戰新形態威脅，從而研擬反制與攻勢的方案，並藉此強化國家整體的數位能力，帶動相關產業及提升技術能量，以創新思維擴大作戰的應用。

³⁹ 〈負責任的 AI 戰爭？規範軍事人工智能邁出第一步〉，《中央廣播電台》，2023年3月1日，<https://reurl.cc/v7pjQN>。

⁴⁰ 〈當人工智慧與軍事相遇：淺談 ChatGPT 的軍用潛力與風險省思〉，《聯合新聞網》，2023年3月23日，<https://reurl.cc/K0d2Dy>。

⁴¹ 〈習近平：高舉中國特色社會主義偉大旗幟 為全面建設社會主義現代化國家而團結奮鬥——在中國共產黨第二十次全國代表大會上的報告〉，《新華網》，2022年10月25日，<https://reurl.cc/jDxAEM>。

PART 2

.....

美中科技競爭

- 第六章 美中科技競爭的本質、意涵與影響
- 第七章 美中的科技競爭與兩用技術以「電腦兵棋」為例
- 第八章 美國對中國的科技管制
- 第九章 中國對美國科技管制的回應及其影響
- 第十章 美國科技制裁對中國軍事發展的影響

第六章 美中科技競爭的本質、意涵與影響

鍾志東*

壹、前言

隨著美中競爭態勢不斷升高，華府與北京在科技上的負面競爭，也隨之日趨白熱化。美國對中國高科技產品和生產設備的出口管控，也愈來愈嚴厲。根據《路透社》（Reuters）2023年2月10日報導，美國拜登（Joe Biden）政府計畫直接禁止對一些中國科技公司的投資，並加強對其他中國公司的審查，以遏止美國投資者將資本與有價值且敏感的技術，轉移至可能有助於提升中國軍事能力的中國科技公司。拜登政府此強化管制規定，基本上是延伸美國2022年10月針對向中國出口人工智能（AI）晶片、晶片製造設備、超級計算機等技術實施的新限制措施。¹而以美國為首的西方七大工業國（G7）高峰會2023年5月19日至21日於日本廣島召開，針對眾所矚目如何因應中國挑戰，5月20日公布的《廣島G7領袖聯合公報》（G7 Hiroshima Leaders' Communiqué），在經貿科技上，提出降低依賴尋求去風險（de-risking）而非脫鉤（decoupling）的經濟關係，以及強調反制經濟脅迫與保護關鍵技術的基本原則。²其後即傳出，美國和全球最大、最先進晶片製造光刻機的生產國荷蘭聯手打擊中國晶片製造產業，將進一步限制對中國銷售先進的晶片製造設備。³

針對美國對中國進行一連串「科技戰」，中國國家主席習近平先於2023年3月6日政協會議，罕見地公開點名批評美國對中國國家發展進

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所助理研究員。

1 弗林，〈拜登政府據報計畫禁止對部分中國科技公司投資〉，《法國國際廣播電台》，2023年2月11日，<https://reurl.cc/EoMMpR>。

2 “G7 Hiroshima Leaders' Communiqué,” *The White House*, May 20, 2023, <https://reurl.cc/Ov0GV3>.

3 松仁，〈美國連出「組合拳」限制對華半導體設備出口 中國接招口誅筆伐加「去美國化」〉，《美國之音》，2023年6月30日，<https://reurl.cc/lDjjoq>。

行「全方位的遏制、圍堵、打壓」。⁴ 其後習近平 6 月 7 日內蒙古考察產業園區的談話中，更示警地提出所謂「極端」思維，並將之運用於經濟領域，他表示中國高水平科技必須「自立自強」，並在「可以預見和難以預見的狂風暴雨、驚濤駭浪中」做好自己的事。他還暗示，如今中國在美貿易戰、晶片領域所面臨的困境，強調「當別人不給我們開門的時候，我們自己還能活下去、活得更好」。⁵ 美中雙邊的科技負面競爭，明顯已逐步升級至準「衝突」態勢。

貳、反映中國崛起下的美中競爭格局

科技安全就是國家安全。美中科技競爭態勢的升高，主要是源自美中競爭結構下彼此之負面安全認知。習近平自 2012 年成為中國領導人以來，提出深具民族主義意涵的「中國夢」，追求「中華民族偉大復興」的國家願景。北京對內，透過所謂習近平之「中國式現代化」，追求富國強兵戰略目標；對外，揚棄鄧小平「韜光養晦」思維，採取對外擴張主義（expansionism），積極落實其對周遭領土主張，例如在台海與南海。此外，習近平還提出「一帶一路」戰略，透過基礎設施的投資，建立中國與沿線國家在政治、經濟與人文的關係。中國正結合改革開放以來累積的綜合國力，積極參與國際事務以彰顯其影響力，挑戰現行以美國為首，由西方世界主導的國際秩序。北京基於民族主義的對外擴張主義言行，引發美國對中國崛起現象的不安與威脅感，此也讓美中關係陷入 1979 年建交以來最低潮。

美國國務卿布林肯（Antony Blinken）2023 年 6 月 18 日至 19 日的中國「破冰」行，被視為美中在負面競爭不斷升高態勢下，雙邊企圖透過高

⁴ 〈習近平在看望參加政協會議的民建工商聯界委員時強調 正確引導民營經濟健康發展高品質發展 王滬寧蔡奇丁薛祥參加看望和討論〉，《新華社》，2023 年 3 月 7 日，<https://reurl.cc/NqQYbk>。

⁵ 〈WSJ：習近平兩度強調為「極端」情況做準備 包括與西方衝突〉，《太報》，2023 年 6 月 13 日，<https://reurl.cc/jDlzp>。

層對話機制，進行停損管理的一次關鍵性訪問。事實上此次布林肯中國行，也是2018年前國務卿龐佩奧（Mike Pompeo）訪中以來，美國到訪中國的最高級別官員。儘管拜登政府視中國為美國「最嚴峻的競爭者」（most serious competitor），但華府基於避免美中「競爭」升級為「對抗」的基本立場，因此始終企圖維持對中國「去風險」但「不脫鉤」的雙邊關係。積極重建美中高層對話機制，即是落實此思維的具體展現。美國國務院發言人米勒（Matthew Miller）在一份聲明中指出，布林肯6月13日與中國外長秦剛通電話時表示，討論保持開放的溝通渠道以負責任地管理美中關係「避免誤判和衝突」的重要性，同時也明確表示「美國將繼續利用外交接觸來提出關注和潛在合作領域」。⁶

中共中央外委會辦公室主任王毅與布林肯會談則是指責華府，中美關係陷入低潮，根源在於「美方抱持錯誤對華認知，導致錯誤對華政策」，宣稱「美方有必要深刻反思，同中方一道，共同管控分歧、避免戰略意外」。王毅還以「中國式現代化」闡釋中國發展振興的歷史邏輯和必然趨勢，敦促美方不要拿「國強必霸」模板來鏡像中國，不要用西方傳統大國走過的軌跡來誤判中國，因為「這是美國對華政策能否真正回歸客觀理性的關鍵所在」。準此，王毅要求美方「停止炒作中國威脅論」、「取消對華非法單邊制裁」、「放棄對中國科技發展打壓」。⁷王毅定位美中關係時，全面地甩鍋美方，將雙邊低迷緊張關係，完全歸咎於美方，並挑釁地表示這是美方的抉擇，「中美關係正處在一個關鍵節點，需要就對話還是對抗、合作還是衝突作出選擇」。相較於王毅咄咄逼人的「黑臉」攻勢，習近平接見布林肯展現正面溫和的「白臉」懷柔。習近平表示，中國「不會去挑戰和取代美國」，但「美國也要尊重中國，不要損害中國的正當權益」，他還期望「讓中美關係穩下來、好起來」。⁸

面對中方戰狼外交針鋒相對攻擊，布林肯採取各說各話方式，就美

⁶ 同前註。

⁷ 〈王毅會見美國國務卿布林肯〉，《人民網》，2023年6月20日，<https://reurl.cc/VLvvly>。

⁸ 〈布林肯訪華：習近平會晤美國國務卿促「讓中美關係穩下來好起來」〉，《BBC中文網》，2023年6月19日，<https://reurl.cc/11aa08>。

中歧異問題，婉轉而堅決地表達美方立場，希望透過外交的高層對話，建立穩定和可預測的雙邊關係，以預防美中對峙危機升高並對此進行有效管理。布林肯在記者會上表示，美國總統拜登相信美中兩國「有義務和責任管理好彼此關係」，這樣做符合兩國利益。他同時指出，中美雙方均同意須穩定雙方關係，而直接接觸是最佳途徑，但美國將繼續採取針對性行動保護美國國家利益。針對中方指控美方打壓中國經濟發展的國家核心利益，布林肯表示，美國無意在經濟上圍堵中國，也沒有興趣將美國經濟與中國「脫鉤」。⁹事實上，針對美中關係定位，布林肯早在2021年3月3日他首場外交政策演說時就表示，中國具有足夠的能力與企圖，挑戰現行世界運作方式以及美國所建立的規則與價值，因此面對中國挑戰，美國應在「該競爭時競爭，能合作時合作，必須對抗時就對抗」。¹⁰在2023年5月以美國為首的G7高峰會聯合聲明上，更是空前而直率地將雙邊歧異，直接攤在檯面之上，並強勢表達出將與中國競爭而不退讓的基本態度。因此，儘管美中都透過所謂溝通對話，進行危機和衝突的預防與管理，不過雙邊同時也積極做好當衝突爆發時應有的準備，以捍衛彼此在相關議題上的基本立場。美中科技競爭不斷惡化，即是反映華府與北京間難解的歧異本質。

參、美中科技競爭主要論述內容

美中科技競爭在論述內容上，主要意涵反映於兩方面，其一透過經貿戰，確保彼此經貿優勢與發展有利環境；其二華府避免關鍵敏感技術，被用於提升中國軍工科技與產業發展，進而削減美國在軍事科技的領先地位。始於美國前總統川普（Donald Trump）的美中貿易戰，2018年3月22日川普簽署行政命令，指控「中國偷竊美國智慧財產權和商業秘密」，並依據《301調查結果》計畫對中國課徵近600億美元進口關稅；其中以

⁹ 同上註。

¹⁰ 徐葳婷，〈布林肯首場外交演說 將抗中列入8大優先工作〉，《中央通訊社》，2021年3月4日，<https://reurl.cc/qLk7W0>。

科技產品為主，並設定其他貿易限制，以迫使中國改變其「不公平貿易行為」，落實雙邊經貿往來的平等互惠（reciprocal）原則。¹¹ 2020年民主黨拜登總統上台後，華府表態將持續透過關稅手段，反制中國的貿易不公現象，但對美中經貿談判，抱持開放與積極態度。不過拜登政府明顯地將經貿安全，拉高至國家安全層次，以因應美中競爭格局下，中國在雙邊經貿議題上的挑戰。

拜登政府對中國科技競爭定位，除將之提升到國家安全外，更積極聯合美國的盟邦夥伴，共同制衡中國。2023年5月在日本舉行的G7高峰會表態，將採取共同立場與行動，擁護國際原則和共同價值觀的基本原則，以因應全球第二大經濟體中國在經貿上的挑戰。對此，G7首次提出具體因應的雙重作為：一方面將採取「去風險而非脫鉤」方式，積極投資自我的經濟活力與韌性（resilience），並在關鍵產業供應鏈上降低對中國依賴；另一方面為應對中國經濟脅迫（economic coercion），須強化經濟上的韌性，建構公平競爭國際貿易體系，反制中國扭曲全球經濟的非市場導向（non-market）政策與作為，打擊具惡意（malign）的非法技術轉移與數據洩漏，並保護可用來威脅國家安全的先進關鍵科技。¹²

針對中國「經濟脅迫」挑戰，G7高峰會在另一份《經濟韌性與安全聲明》（*G7 Leaders' Statement on Economic Resilience and Economic Security*）則指出，「經濟脅迫」在於「尋求利用經濟脆弱性和依賴性為武器，藉以破壞他國之國內外政策和立場」。為改善對「經濟脅迫」的共同評估、應對、威懾以及遏制，G7將設立「應對經濟脅迫協調平台」（*Coordination Platform on Economic Coercion*），在避免全球經濟分裂前提下，於重要資源與半導體領域建立經濟安全防護網，以減輕依賴特定國家之風險；對於重要礦物、半導體、電池相關物資，將與非G7成員國合作強化供應鏈；針對防堵尖端科技遭竊並且被用於威脅國際和平，G7亦將加強協調合

¹¹ 曹郁芬，〈美中貿易戰開打！川普下令對中國課徵1.76兆關稅〉，《自由時報》，2018年3月23日，<https://reurl.cc/3xllOI>。

¹² “G7 Hiroshima Leaders’ Communique,” *The White House*, May 20, 2023, <https://reurl.cc/Ov0GV3>.

作。¹³

美國與其西方盟邦在 2023 年 G7 高峰會，空前而直率地將與中國在經貿科技競爭的歧異，直接攤在檯面之上，並強勢表達出對中國「經濟脅迫」，將採積極應戰而不退讓的基本立場。不過在與中國經貿科技競爭上，G7 引人注目地提出「去風險」與「不脫鉤」兩原則。這展現在全球化影響下，G7 與個別的國家包括美國在內，考量到中國經貿力量與全球影響力，為保留與中國交往餘地，只視中國為「挑戰」，而未將其定位為「威脅」，以避免西方國家與中國間競爭關係，惡化升級至過去與蘇聯的冷戰對抗關係，進而影響他們與中國的實質經貿關係。美國企圖積極恢復與中國高層對話機制，就是明顯的例子，此在中美經貿關係上也是如此。所以繼國務卿布林肯 2023 年 6 月訪問中國後，美國財政部長葉倫（Janet Yellen）緊鑼密鼓地於 7 月 6 日至 9 日訪問中國，以落實經貿「不脫鉤」的政策。美國「對外貿易委員會」（National Foreign Trade Council）總裁柯文（Jake Colvin）認為，葉倫此次訪問可能有助於雙方建立一個「新常態」，並在雙邊關係中確立基礎。但他認為，美國不會取消前任總統川普政府施加的關稅措施，以及目前的出口管制。¹⁴

北京反制華府步步進逼的經貿科技戰的論述，一方面定性這是美國對中國發展的惡意阻撓與打壓，另一方面則是高舉「中國式現代化」正當化中共對發展典範的另類途徑貢獻。習近平 2023 年 3 月在政協會議的民建工商聯界委員時表示，「我國發展的外部環境急劇變化，不確定難預料因素顯著增多，尤其是以美國為首的西方國家對我實施了全方位的遏制、圍堵、打壓，給我國發展帶來前所未有的嚴峻挑戰。」面對此挑戰他強調，「必須做到沉著冷靜、保持定力，穩中求進、積極作為，團結一致、敢於鬥爭。」¹⁵ 外長秦剛則嚴詞批評美國所謂的「競爭但不尋求衝突」，實

¹³ 鍾志東，〈布林肯中國行難解美中競爭之歧見本質〉，《國防安全雙週報》，2023 年 6 月 21 日，<https://reurl.cc/51yy1z>。

¹⁴ 〈葉倫訪中國 分析：聚焦建立中美新常態〉，《中央通訊社》，2023 年 7 月 6 日，<https://reurl.cc/r5jj64>。

¹⁵ 〈習近平在看望參加政協會議的民建工商聯界委員時強調 正確引導民營經濟健康發展高品質發展 王滄寧蔡奇丁薛祥參加看望和討論〉，《新華社》，2023 年 3 月 7 日，<https://reurl.cc/NqQYbk>。

質上是「全方位遏制打壓，就是你死我活的零和博弈。」並指控稱，「這不是公平競爭，而是惡意對抗，犯規了！」他強勢表態，「要中國打不還手，罵不還口，但這辦不到！如果美方不踩剎車，繼續沿著錯誤道路狂飆下去，再多的護欄也擋不住脫軌翻車，必然陷入衝突對抗。」¹⁶ 對於 G7「經濟脅迫」的論述指控，中國則反控「美國大搞單邊制裁、『脫鉤斷鏈』，才是把經貿關係政治化、武器化的真正『脅迫者』。我們奉勸七國集團不要做經濟脅迫的同謀和幫兇。」¹⁷

此外，北京還提出「中國式現代化」論述，捍衛中共統治下中國特有的經貿科技發展模式。「中國式現代化」指的是，中國共產黨領導的社會主義現代化。習近平在「兩會」人大閉幕發言強調，「堅持統籌推進『五位一體』總體布局、協調推進『四個全面』戰略布局，加快推進中國式現代化建設。」¹⁸ 中國外長秦剛則指出，「中國式現代化」的成功，「打破了『現代化 = 西方化』的迷思，創造了人類文明新形態，也給世界各國特別是廣大發展中國家帶來重要啟示」。¹⁹ 秦剛高調凸顯「中國式現代化」意義，在於提供所有開發中國家在追求現代化過程中的另類選擇，此明顯有別於西方自由民主國家現代化的成功經驗。藉此，北京則可以與西方國家在經貿科技發展上，進行理念價值與模式途徑的競爭，並正當化目前被美國指控「經濟脅迫」與「貿易不公」的相關舉措。

肆、科技競爭對軍事準備與經濟發展具關鍵影響

華府發動美中科技競爭，是基於國家安全優先與關鍵科技領先思維下之作為，其具體實踐反映於確保軍事準備（preparedness）與經濟發展

¹⁶ 〈外交部長秦剛就中國外交政策和對外關係回答中外記者提問〉，《中華人民共和國外交部》，2023年3月7日，<https://reurl.cc/OVMYjv>。

¹⁷ 〈外交部發言人就七國集團廣島峰會炒作涉華議題答記者問〉，《中華人民共和國外交部》，2023年5月20日，<https://reurl.cc/zYe1gy>。

¹⁸ 〈人大會議閉幕會 習近平發表重要講話（全文）〉，《香港文匯網》，2023年3月13日，<https://reurl.cc/vkKgNj>。

¹⁹ 〈外交部長秦剛就中國外交政策和對外關係回答中外記者提問〉，《中華人民共和國外交部》，2023年3月7日，<https://reurl.cc/OVMYjv>。

的優勢。就國家安全之關鍵科技部分，根據美國白宮 2022 年 10 月 12 日發布之《2022 國家安全戰略》（*National Security Strategy, 2022*），依序列舉七項基礎科技（foundational technologies）領域，包括：微電子學（microelectronics）、先進電腦（advanced computing）、量子科技（quantum technologies）、人工智慧（artificial intelligence）、生物科技與生物製造（biotechnology and biomanufacturing）、先進電信（advanced telecommunications）、乾淨能源（clean energy）等，將成美國關注焦點，以確保其國安科技領先優勢。²⁰ 隨後，2022 年 10 月 27 日公布之《2022 美國國防戰略》（*2022 National Defense Strategy of the U.S.A.*）則指出，反太空武器（counterspace weapons）、高超音速武器（hypersonic weapons）、先進生化武器（advanced CBW）、負載與投遞系統（payload and delivery systems）等傳統武器與非戰略核武，以及人工智慧（artificial intelligence）、量子科學（quantum science）、自主性（autonomy）、生物科技（biotechnology）和太空科技（space technologies）等，將會是快速演進軍事科技下之指標性科技。據此，美國國防部在軍事科技上，聲稱在「做對的科技投資」原則下，列舉之焦點軍事科技投資有：定向能量（directed energy）、高超音速（hypersonic）、整合傳感（integrated sensing）、網絡（cyber）、生物科技、量子科學、先進材料（advanced materials）、乾淨能源。於此同時，也將大舉投資於可商業化之軍用相關科技，如：人工智慧與自主（artificial intelligence and autonomy）、系統與系統間整合網路（integrated network system of system）、微電子學、太空、可再生能源製造與儲存（renewable energy generation and storage）、人機介面（human-machine interface）、數據驅動與整合（data-driven technology and integration）。²¹ 上述報告所列相關科技項目，可視為美國在建構軍事準備能力應對解放軍挑戰的關鍵技術，此也將成美中科技競爭中的指標性項目。

²⁰ “National Security Strategy,” *The White House*, October 12, 2022, <https://reurl.cc/GXZvyD>.

²¹ “National Defense Strategy,” *U.S. Department of Defense*, October 27, 2022, <https://reurl.cc/p6jjre>.

自 18 世紀以來的工業革命經驗顯示，科技是產業競爭的核心，而產業競爭力則攸關國家經濟發展的大動脈。進入 21 世紀的第四次工業革命（4IR），著重所謂的網宇實體系統（Cyber-Physical System, CPS），強調各個實體裝置和電腦運算網路的整合連結，「是一個結合實體與虛擬運算模型的整合系統。透過實體設備所收集、感測到之大量數據搭配電腦運算進而實現自我感知、決策與控制，來達到全面智慧化。」²² 在第四次工業革命中，半導體科技產業的先進晶片，是《2022 國家安全戰略》所列七項基礎科技領域的核心所在，因此也成為美國對中國進行科技競爭的焦點所在。拜登政府自 2022 年 10 月以來，對中國半導體產業頒布一系列的出口管制，嚴格限制相關軟硬體設施與人力資源向中國輸出，許多中國企業則被列入實體清單（Entity List）遭受管制。而根據華府近來加強對北京科技管制顯示，針對中國的一系列禁令甚至還會進一步升級，除了考慮進一步加強對人工智慧晶片出口、雲計算服務出租等管制外，拜登政府正準備透過行政命令，限制對相關特定行業的投資。對此，華府智庫戰略與國際研究中心（CSIS）人工智能和先進技術中心主任艾倫（Gregory Allen）表示，相關限制的本質，就是為了「根除中國整個先進技術生態系統」；《紐約時報》（*New York Times*）則稱美國對中國晶片封鎖行動，「是一種戰爭行為」。²³ 對華府而言，先進晶片可用之於超級電腦、人工智慧與軍事科技攸關美國國家安全，同時藉由反制與孤立中國半導體產業，確保美國在第四次工業革命中，持續享有在經濟發展與產業的競爭優勢。

華府發動對中國的晶片戰爭，是美中在軍民兩用科技競爭持續惡化態勢下的新亮點。美國商務部副部長艾斯特維茲（Alan Estevez）正當化對中國晶片出口管制措施時稱，其主要目的在於防止「具有軍事用途的敏感技術」被中國獲取。因此美國將限制中共取得先進運算晶片、發展和維繫超級電腦，以及製造先進半導體的能力。以避免相關設備被中國用來生產先進軍事系統，包括大規模殺傷性武器（WMD），甚至被拿來侵犯人

²² 〈網宇實體系統與製造應用〉，《經濟部技術處》，2023 年 8 月 3 日，<https://reurl.cc/x7jja4>。

²³ 孫承，〈美中科技戰若升級，中國誓言「我必犯人」，但手中好牌有限〉，《美國之音》，2023 年 7 月 22 日，<https://reurl.cc/qLjivR>。

權。《華爾街日報》（*Wall Street Journal*）引述一位美國高階官員說，華府相信北京正透過美國晶片、軟體、工具和技術的先進運算能力，正促進中國軍事現代化，因此「允許中國和其軍方取得最先進的晶片和晶片製造設備，會（為美國）帶來深遠國安風險。」²⁴ 值得注意的另一態勢新方展則是，拜登政府在「外交為核心」積極拉攏盟邦夥伴，採取一致步伐對中國競爭策略上，在對中國晶片戰爭中，艾斯特維茲即表示，「威脅環境不斷變化，今天更新政策（晶片出口），是要確保我們確實因應中國帶來的挑戰，同時持續接洽並與盟友夥伴合作。」2023年G7高峰會表示將協調合作，在半導體領域建立經濟安全防護網，同時防堵尖端科技遭竊並且被用於威脅國際和平。歐盟執委會2023年6月20日提出《歐洲經濟安全戰略》（*European Economic Security Strategy*）儘管沒有點名中國，但在「去風險」思維下，將加強對民用和軍用商品的出口管制，以免一些出口和投資可能將「具有軍事意義的一小部分關鍵技術」洩漏給外國的敵人，並多次提及三個重要領域：量子電腦、人工智慧和先進半導體，以解決境外投資帶來的安全風險。²⁵ 美國在印太主要盟邦日本，則是自2023年7月下旬開始，對晶片製造機台實施出口管制，儘管低調不點名，但這實際上就是配合美國限制中國生產先進半導體能力的政策。²⁶ 中國則是指控美國實施「技術恐怖主義」，同時就美國對半導體和其他相關技術的出口管制向世界貿易組織（WTO）提起訴訟。2023年7月19日中國駐美國大使謝鋒在阿斯彭安全論壇（Aspen Security Forum）指出，中國不希望與美國發生貿易戰或科技戰，不過他強硬表示，「人不犯我我不犯人，人若犯我我必犯人」，如果美方繼續實施新的對華製裁，中方面對挑釁不會袖手旁觀，將會予以回擊。²⁷

²⁴ 徐薇婷，〈美宣布新出口管制 估讓中國晶片製造倒退數年〉，《中央通訊社》，2022年10月8日，<https://reurl.cc/Ov885g>。

²⁵ 田習如，〈劍指中國 歐盟將管制先進半導體、AI科技輸出〉，《中央通訊社》，2023年6月20日，<https://reurl.cc/4o77LY>。

²⁶ 李雅雯，〈日本管制晶片設備出口 分析：中國半導體恐止步於14奈米製程〉，《中央通訊社》，2023年5月24日，<https://reurl.cc/7kvvVvk>。

²⁷ 熊超然，〈中國駐美國大使謝鋒：若美方繼續實施新的對華製裁，中方將會予以回擊而A非袖手旁觀〉，《觀察者》，2023年7月20日，<https://reurl.cc/WGZZO5>。

伍、小結

科技競爭是政治競爭的延伸，美中科技競爭本質反映美中負面競爭格局。因此，只要美中競爭態勢持續惡化，華府與北京間的科技競爭也將隨之白熱化。由於北京的對外擴張主義企圖改變既有地緣政治國際秩序，拜登政府將中國定位美國「最嚴峻的競爭者」（our most serious competitor）。儘管美中均希望避免雙邊競爭關係升級為對抗關係，但在競爭態勢未見緩和下，加上中國無所不用其極的技術偷竊，美中的科技競爭，事實上已升級至相互對抗的緊張關係，美國對中國發動的晶片戰即是最明顯的例子。美國為確保在科技領先優勢，以維持其對中國的經濟與軍事優勢，拜登政府持續加強自 2022 年下旬一系列對中國高科技出口管制措施，並積極考慮不續約 1979 年所簽《美中科技合作協定》。此外，為建構有利戰略環境以對中國進行科技競爭，拜登政府積極透過外交方式，聯合美國的盟邦夥伴採取聯合戰線，反制中國在高科技特別是軍民通用技術的發展，並取得初步的成就。科技安全就是國家安全，美中科技競爭正逐漸升級為科技對抗，此不僅將對美中關係產生負面影響，其對國際政治影響也正方興未艾。

第七章 美中的科技競爭與兩用技術以「電腦兵棋」為例

謝沛學*

壹、前言

近年，美軍發展出以「實兵、虛擬與建構式」兵力（Live, Virtual and Constructive, LVC）為組合的「合成化作戰模擬」體系。其中「建構式」兵力（Constructive）主要是以「電腦生成兵力」（Computer-generated Force, CGF）為主的作戰模擬。又可進一步分為「電腦輔助式兵推」（Computer-assisted Wargame）與「模式模擬」（Modeling & Simulation）兩類。前者是以「圖板兵棋」（Boardgames）為基礎發展出來，其主要目的在於「軍事決策訓練」；後者則是以「數學模型」為核心的「作業研究學」（Operations Research）發展出來，主要目的在於以隨機模擬所生成的統計數值，對不同作戰方案與兵力配置進行效益評估。兩者關注的議題重疊性高，且都採用「電腦生成兵力」作為分析的輔助工具，美軍也經常把 wargame 與 simulation 混用。因此，「電腦輔助式兵推」與「模式模擬」可歸類於「電腦兵棋」的大範疇。

「電腦兵棋」除了有能力進行不同行動方案的實驗與分析評估，亦可以做到真正的 safe to fail，目前已成為美軍最重要的作戰方案擬定、驗證與訓練的工具之一。由於缺乏實戰經驗，近年來中國亦大力發展「電腦兵棋」，冀望透過「電腦生成兵力」的輔助，提升解放軍的作戰能力。本文分別介紹美軍與解放軍在電腦兵棋系統的運用概況，並進一步探討兩國在電腦兵棋發展上的優劣。

* 國防安全研究院網路安全與決策推演研究所副研究員。

貳、美軍的電腦兵棋系統運用概況

誠如上述所言，「分析式」的電腦兵棋系統主要源自於以「數學公式計算」為重點「作業研究」領域，也就是現今被稱為「模式模擬」的主要工具。以美軍為例，「延伸式防空作戰模擬」（Extended Air Defense Simulation, EADSIM）以及「合成化戰區作戰研究模式」（Synthetic Theater Operations Research Model, STORM）是目前發展最成熟、使用最廣泛的「分析式」電腦兵棋系統。EADSIM 由美國國防廠商 Teledyne Brown 於 1987 年專門為美空軍開發，主要用於進行防空作戰、空中作戰、飛彈攻防、對敵防空制壓（SEAD）、密接空中支援（Close Air Support）、電子戰及太空作戰等想定場景的模擬。其系統的解析度可精細到對單一載具 / 武器，如單架 F-35B、單枚 AGM-158 的建模，屬「任務 / 接戰」（Mission/ Engagement Level）層級，可執行「一對一乃至多對多載台」的交戰分析。¹ 經過 30 多年的不斷擴展與升級，EADSIM 已成為美國空軍、美國飛彈防禦署（Missile Defense Agency, BMA）、美國戰略司令部（USSTRATCOM），以及美國陸軍太空與飛彈防禦司令部（United States Army Space and Missile Defense Command, USASMDC）等單位，在作戰需求分析與及作戰計畫規劃與評估的主要分析工具。例如，第一次波灣戰爭期間，美軍即大量使用 EADSIM 作為空襲任務、防空制壓、加油作業的規劃與評估之用。² 「STORM」最初係由美國空軍所開發，作為替代該軍種使用多年的 THUNDER 模擬系統之用。唯後續因功能與涵蓋範圍擴及陸、海等多重作戰領域，該新系統也被賦予「合成化戰區」（Synthetic Theater）的名稱，並進一步取代美軍使用多年的「整合戰區接戰模式」（Integrated Theater Engagement Model, ITEM），被其他軍種接納作為「戰役層級」（Campaign-level）場景的主要模擬分析工具。³ STORM 後續的

¹ Teledyne Brown Engineering, "About EADSIM," <https://www.tbe.com/missionsystems/eadsim>.

² Matthew B. Caffery Jr., *On Wargaming: How Wargames Have Shaped History and How They May Shape the Future* (Rhode Island: U.S. Naval War College, 2019), p. 164.

³ Christian N. Seymour, *Capturing the full potential of the Synthetic Theater Operations Research Model* (Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2014).

維護與升級研發則委由系統合約商 Group W 承包。

除了前述的 EADSIM 與 STORM，美軍所使用的「分析性」電腦兵棋系統，較為著名的另有由美國國防部長辦公室（Office of the Secretary of Defense, OSD）主導開發的「戰役層級」模擬工具——「聯合分析系統」（Joint Analysis System, JAS），用戶包括美國國防部長辦公室、參謀長聯席會議（Joint Chiefs of Staff）和聯合作戰司令部（Unified Combatant Command, UCC）等。⁴由波音公司與美國空軍研究實驗室（Air Force Research Laboratory, AFRL）合作開發的「模擬、整合與建模的先進架構」（Advanced Framework for Simulation, Integration and Modeling, AFSIM），則是以「任務」與「接戰」層級的分析為主。⁵至於由美空軍所主導開發的「聯合建模與模擬系統」（Joint Modeling and Simulation System, JMASS），可以對陸、海、空、等多個領域的個別載台與武器，進行「接戰」乃至「工程」層級的模擬，所得出的模擬數據則可向上回饋給較高層級的模擬系統。

這類「分析式」電腦兵棋系統的最大特點在於「隨機模擬」（Stochastic Simulation）。即以「蒙地卡羅法」（Monte Carlo）所產生的隨機數據，求取不同作戰方案、兵力配置在特定「效益量測指標」（Measurement of Effectiveness, MOE）下的統計量值（例如平均數、變異數等），進一步分析與比較其效益，作為後續作戰概念與準則的研擬、作戰計畫的修訂、兵力評估研究與軍備採購分析等之依據。此外，美軍所使用的「分析式」電腦兵棋系統，原則上都是由五角大廈、各軍種及其所屬實驗室，或是軍工產業廠商所研發設計的軍規產品，極少有使用「商用現成軟體」（Commercial-off-the-shelf Software, COTS）的例子。畢竟「軍事模擬分析」與「作戰研究」領域的專業性與高門檻，有能力涉獵的民間業餘軍事迷人數，無法支撐開發以大眾市場為導向的商用軟體。模擬分析所需的武器諸

⁴ JAS 最初的名稱為「聯合戰爭系統」（Joint Warfare System, JWARS）。

⁵ CSIAAC, “AFSIM: The Air Force Research Laboratory’s Approach to Making M&S Ubiquitous in the Weapon System Concept Development Process,” *CSIAAC Journal*, Winter 2020: Vol. 7, Issue 3, <https://csiac.org/articles/afsim-the-air-force-research-laboratorys-approach-to-making-ms-ubiquitous-in-the-weapon-system-concept-development-process/>.

元數據亦非一般民間企業所能取得。因此，就「分析式」電腦兵棋系統這塊領域，即使是美軍也難有「商用現成技術」的支援。

相對地，在「推演式」電腦兵棋系統領域，「商用現成技術」則扮演了非常關鍵的角色。美軍所使用的「推演式」電腦兵棋系統源自於「圖板兵棋」的電腦化。此類「圖板兵棋」為 19 世紀初（1820 年代）普魯士王國所發明，並將之引進軍隊，作為軍官訓練及制訂作戰方案的工具。這套德文稱為「Kriegsspiel」的兵棋系統，包含了地圖、棋子、骰子與戰裁結果計算表等供模擬軍隊交戰過程的工具，便成為日後「作戰推演」的基本模式。美軍接納與學習了這套作戰模擬工具，並於兩次世界大戰有許多運用。隨後以詹姆斯·鄧尼根（James F. Dunnigan）為首的美國退伍軍人，則是將實戰經驗帶入「圖板兵棋」的設計，陸續成立許多兵棋出版社，大量開發出高品質的民間版兵棋。1970 年代末，隨著偏重戰術層級分析、並以「數學公式計算」為重點「作業研究」（Operations Research, OR）在越南戰場分析的失利，美軍開始重新重視傳統的「兵棋推演」。⁶ 1980 年，五角大廈聘請鄧尼根等民間兵棋專家，協助美軍改造既有的作戰分析工具，建立了以鄧尼根所設計的一款圖板兵棋「北約師指揮官」（NATO Division Commander）為原型的「MTM 電腦兵棋模型」（McClintic Theater Model）。MTM 系統後來結合了部分「作業研究」的分析方法，升級為「聯合戰區層級模擬系統」（Joint Theater Level Simulation, JTLS）。這也是為何 JTLS 系統的運作地圖長期以來亦採取六角格式，改版的 JTLS-Global Operations（JTLS-GO）才以全景式的 GIS 地圖系統替換六角格式地圖。⁷ 我國則是最遲於 2003 年引進 JTLS，作為每年「漢光演習」的電腦兵推階段的使用工具。

美國有大量的民間版電腦兵棋發行，這些電腦兵棋雖然是廣義上的電腦遊戲，但更精確的分類是「嚴肅遊戲」（Serious Games），即在擬真的應用情境下，具有學習與分析功能之遊戲。其整體運作概念、推演「戰

⁶ James F. Dunnigan, *Wargames Handbook: How to Play and Design Commercial and Professional Wargames*, Third Edition (NY: William Morrow and Company, 2000), p. 248.

⁷ Matthew B. Caffrey Jr., *On Wargaming*, p. 100.

裁」機制，亦是經過兵推與軍事分析的「議題領域專家」（subject matter experts）的研討及協助下所設計，並非無中生有。涵蓋的主題多半為「史實戰爭」，甚至是未來可能發生的地緣衝突。透過市場的競爭對民間版電腦兵棋去蕪存菁，再加上美軍豐富的實戰經驗，進一步提供檢視民間兵棋的機會，優秀的民間電腦兵棋最終也能回饋美軍使用。也因此，美軍各軍種的作戰單位、訓練部門及所屬的實驗室，大量使用直接從市場上採購的「商用現成」電腦兵棋軟體，並與這些原先不屬軍工產業的民間遊戲廠商密切合作，有意識地培育「嚴肅兵棋」的市場。例如，現今全球最大的商用電腦兵棋發行商——「矩陣遊戲」（Matrix Games），近年來成為美軍最主要的兵棋系統供應商之一。⁸ 旗下的產如如戰役層級的「戰爭藝術」系列（The Operational Art of War, TOAW）與「燃點戰役」系列（Flashpoint Campaigns），以及「任務」與「接戰」層級的「戰鬥任務」系列（Combat Mission）獲美陸軍、海軍陸戰隊的青睞，採用為「軍事決策流程」（Military Decision-Making Process, MDMP）的訓練工具。⁹

由於商用電腦兵棋的銷售與市場導向，十分重視「使用者的回饋」，即軟體系統的設計是否能讓玩家產生扮演戰場指揮官的「沉浸式體驗」，採取的是「人在迴圈」（Human in the Loop, HITP）的操作模式，這也是商用電腦兵棋獲得美軍青睞，成為「專業軍事訓練」（Professional Military Education, PME）輔助工具的原因。然而，這項「優點」卻也是為何絕大部分商用電腦兵棋僅適用於「推演式」的任務，協助軍官從事決策訓練，而無法勝任進一步分析比較不同作戰方案效益之角色。由於商用電腦兵棋的「戰裁」機制，通常採取「蘭徹斯特法則」（Lanchester's laws）或是「殺傷率」（Probability of Kill, PK），這類屬於「確定性模型」（Deterministic Model）的方法。¹⁰ 因此，當交戰雙方的兵力數值在給定

⁸ Matt Martin, "Slitherine and Matrix Games Complete Merger," *GamesIndustry.biz*, May 7, 2010, <https://www.gamesindustry.biz/slitherine-and-matrix-games-complete-merger>.

⁹ Marcello Perricone, "Slitherine and Matrix Games are Developing Training Software for the US Military," *Game Watcher*, March 8, 2018, <https://www.gamewatcher.com/news/2018-08-03-slitherine-and-matrix-games-are-developing-training-software-for-the-us-military>.

¹⁰ Matrix Games, *Game Manual: Flashpoint Campaigns Southern Storm*, October 9, 2013, [https://cdn.akamai.steamstatic.com/steam/apps/330720/manuals/FC-RS_Manual_\(e-book\).pdf?t=1575552987](https://cdn.akamai.steamstatic.com/steam/apps/330720/manuals/FC-RS_Manual_(e-book).pdf?t=1575552987).

的條件下，所得出的戰損結果是「固定的」，並不會因為多次重複模擬而產生不同的戰損結果。每一個交戰場景只需要進行單次裁決，玩家依據裁決結果進行決策調整，再進行下一輪新的交戰，直至整個戰局抵定。這也導致商用電腦兵棋的戰裁機制難以透過多次隨機的方式，產生出可以分析比較不同作戰方案效益所需的統計量值。當然這是因為「推演式」電腦兵棋系統所強調的，係呈現使用者在面臨不同想定狀況時，如何制定相對應決策之推演過程，並從中學習不同方案的可行性，戰損結果計算的「精確度」並非「推演式」電腦兵棋系統的關鍵。

然而，前述「商用現成電腦兵棋」在美軍的運用僅限於「推演式」任務的現象，近年來已開始出現轉變。Matrix Games 所發行的《指揮：現代作戰》（*Command: Modern Operations*，以下簡稱 CMO），其預設資料庫提供從二戰結束至今，世界上幾乎所有主要國家的武器、基地與兵力部署等資料。能夠支援橫跨在陸、海、空、太空等多個領域，進行「1對1」的「接戰層級」到「多對多」的「戰役層級」之作戰推演，是目前市面上最複雜、擬真度最高的「商用現成兵棋軟體」。¹¹ 更重要的是，Matrix Games 為 CMO 開發了軍用專業版（*Command: Modern Operations Professional Edition*，以下簡稱 CMO PE），增加「蒙地卡羅隨機模擬」的戰裁機制，使用者得以分析比較不同作戰方案與兵力配置的效益。因此，CMO PE 近年來屢獲美國及其盟友相關軍事單位青睞，不僅採用為作戰推演與訓練的工具，更進一步作為「分析式」模擬系統，在作戰方案評估與武器籌獲分析上，發揮重要作用。¹² 此外，位於美國麻州劍橋市的 MAK Technologies 所開發的 MAK ONE 系統，提供了使用者進行「合成化」

¹¹ Bruce Postlethwaite, "Command: Modern Operations Review – Prettier and Smarter," *Game Watcher*, November 14, 2019, <https://www.wargamer.com/command-modern-operations/review>.

¹² 這些採用 CMO PE 的各國單位包括，美國陸海空三軍與陸戰隊、美國海軍研究所（United States Naval Research Laboratory, NRL）、英國皇家空軍、英國皇家國防科學與科技實驗室（Defense Science and Technology Laboratory, DSTL）、德國聯邦國防軍空軍（Luftwaffe）等軍事單位，以及波音、洛克希德·馬汀（Lockheed Martin）、英國航太等國防產業大廠。Matrix Games, "Command Professional Edition," https://command.matrixgames.com/?page_id=3822; Bruce Postlethwaite, "Command: Modern Operations Review-prettier and Smarter," *Wargamer*, January 21, 2021, <https://www.wargamer.com/command-modern-operations/review>.

(Live, Virtual and Constructive, LVC) 戰場模擬分析的環境。¹³ MAK ONE 亦允許以「隨機模擬」的方法，針對不同行動方案與兵力配置，進行效益評估分析。¹⁴ MAK Technologies 的模擬系統亦獲得如美空軍、陸戰隊，以及波音、雷神與 BAE System 等國防大廠採購，作為推演訓練與作戰方案評估之用，亦是另一個「商用現成系統」運用在「分析性」兵棋的成功案例。¹⁵

參、解放軍電腦兵棋系統概況

由於缺乏如西方自「Kriegsspiel」以來所累積的兵棋推演傳統，再加上美國限制軍規的電腦兵棋系統與技術對中國的出口，解放軍的「作戰模擬」是以「作業研究」（中國稱「軍事運籌學」）為基礎的「模式模擬」（中國稱「仿真建模」）為切入點發展而來。例如，中國的軍工相關單位分別在 1979 年與 1989 年創辦了《指揮控制與仿真》及《系統仿真學報》，作為解放軍對「作戰模擬」領域的理論交流平台。¹⁶ 然而，「作業研究」的主要議題聚焦於武器次系統效果的「工程層級」分析，或是「1 對 1」與「小組對小組」之間的「接戰層級」分析。不僅容易陷入「見樹不見林」的盲點，「作業研究」的模擬工具亦不適用於作戰訓練，更不利於聯合作戰概念與準則的發展。

因此，當美軍於第二次波灣戰爭前夕，在卡達駐軍進行了一場複雜的大型電腦兵棋推演（Internal Look 2003），而後續美軍於 2003 年入侵行動的成果，基本上與這次電腦兵推吻合。¹⁷ 再加上台灣於 2003 年透過軍售

¹³ MAK Technologies Inc., *MAK Commander*, <https://www.mak.com/training-solutions/mak-commander>.

¹⁴ Yuval Zak et al., "Facilitating the Work of Unmanned Aerial Vehicle Operators Using Artificial Intelligence: An Intelligent Filter for Command-and-Control Maps to Reduce Cognitive Workload," *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, April, 2022,

¹⁵ MAK Technologies Inc., *MAK Customer Successes*, <https://www.mak.com/learn/customer-successes>.

¹⁶ 前者現為「中國船舶集團」旗下的科研刊物；後者則為「中國航天科工集團」所屬。

¹⁷ Global Security, "Internal Look," <https://www.globalsecurity.org/military/ops/internal-look.htm>.

案從美方引進 JTLS 電腦兵棋系統，納入漢光演習的電腦兵推階段，作為軍事決策流程訓練之用。這些情勢讓北京體認到必須透過電腦兵棋提升解放軍「作戰模擬」層次的重要性。解放軍「國防大學」的「戰役兵棋教研空」，於 2007 年接獲研發大型電腦兵棋系統的任務。據傳該電腦兵棋的原型於 2010 年底完成，隔年 6 月投入當時尚存在編制的「濟南軍區」的演習，進行首次測試，並於 2014 年「宣布」成功自行建構中國第一款軍規的電腦兵棋系統。¹⁸除了「國防大學兵棋中心」，解放軍的「軍事科學院」所屬的「聯合作戰實驗中心」亦可能開發有另一套戰役層級的聯合作戰電腦兵棋系統。¹⁹由於擁有中國版的 JTLS 是促使解放軍投入電腦兵棋開發的動力，儘管相關的公開情資非常有限，我們仍可合理推斷前述兩套解放軍所主導開發的工具，應當屬於「推演式」的電腦兵棋系統，主要目的在於協助作戰方案擬定與戰場決策訓練。

中國投入大量的時間與預算開發自有的電腦兵棋系統，從「國防自主」的角度看雖有必要性，但其中亦有不得不然的「無奈」。畢竟美國與其盟友所使用的軍規兵棋系統，對中國有嚴格的輸出管制。然而，中國缺乏如西方國家有著近 200 年以「圖板兵棋」訓練軍隊與擬定作戰方案的傳統，亦曾長期缺乏足以支撐軍事專業研究的民間兵棋市場與社群，就電腦兵棋向西方取經學習仍屬必要。美國蓬勃的民間「嚴肅遊戲」市場所發行的電腦兵棋，常可見到在設計與擬真度上不輸軍規系統的產品，美國的民間電腦兵棋自然成為解放軍引進，甚至「仿製」相關技術的最佳來源。²⁰也因此我們可以在許多所謂的「中國自製」電腦兵棋系統上看到美系產品的影子。例如，由「濟南棋戰」網路科技公司所開發的「鐵甲突擊群」陸軍戰術電腦兵棋系統，曾獲選為由中國指揮與控制學會主辦的「全國兵棋推演大賽」的指定競賽平台，目前仍是「北京高校兵棋推演大賽」的指定平台。²¹該系統即呈現類似於 Flashpoint Campaigns 系列的六角格地圖與

¹⁸ 〈穿越下一場戰爭的迷霧 —— 國防大學兵棋團隊科研攻關紀實〉，《解放軍報》，2014 年 6 月 30 日，<http://military.people.com.cn/BIG5/n/2014/0630/c1011-25215758.html>。

¹⁹ 盧曉琳，〈解放軍首個聯合作戰實驗平台：提前發現隱患問題〉，《新浪軍事》，2018 年 1 月 14 日，<http://mil.news.sina.com.cn/2018-01-14/doc-ifyqqciz6787788.shtml>。

²⁰ Matthew B. Caffrey Jr., *On Wargaming*, p. 166.

²¹ 濟南棋戰網絡科技公司，〈陸軍戰術兵棋推演系統〉，<http://www.hexwar.cn/>。

操作模式。

最明顯的例子莫過於位於北京的「華戎防務」旗下的「未來指揮官」系列電腦兵棋。據華戎宣稱，此套系統可以運用在「新型作戰概念研究、作戰／演習方案評估、智慧藍軍研究、戰法創新與驗證、指揮員謀略訓練、裝備作戰運用研究」上，並已獲得國防軍工企業、軍隊科研單位與軍事院校等的採用。²² 特別是自 2019 年的第三屆「全國兵棋推演大賽」以來，「未來指揮官」系列電腦兵棋取代其他原先的模擬系統，成為大會唯一競賽平台。²³ 然而，從操作介面、作戰地圖、核心功能、運作邏輯來看，華戎防務的「未來指揮官」系列兵棋基本上就是 Matrix Games 的 CMO 的翻版。系統內的武器資料庫亦是使用 CMO 的 DB3000 為基礎，甚至連軟體內建的教學想定，都是直接照搬 CMO 的想定檔。事實上，華戎防務也不否認，「未來指揮官」系列兵棋，確實是向 Command: Modern Operations「致敬」。²⁴ 華戎防務亦模仿 Matrix Games 的發展路徑，為旗下產品開發了以軍事單位為目標客戶群的專業版——「墨子·未來指揮官」，及以民間軍武迷與玩家為客戶群的一般版——「智戎·未來指揮官」。若從近期中國的「中北大學」某研究團隊運用「墨子平台」，進行「陸基彈道飛彈打擊美航艦戰鬥群」的模擬分析來看，「墨子·未來指揮官」確實如 CMO Professional Edition 一樣，擁有以「人不在迴圈」的多次蒙地卡羅隨機模擬，產出交戰結果的統計數值，進行不同作戰方案效果評估的功能。²⁵ 也就是說，「未來指揮官」系列兵棋與 CMO 一樣，可同時滿足「推演式」與「分析式」作戰模擬的需求。

除了前述的產品，近年中國比較著名的自製電腦兵棋系統還有位於北

²² 華戎防務，〈墨子：聯合作戰推演系統〉，《產品概述》，<http://www.hs-defense.com/col.jsp?id=124>。

²³ 墨子杯，〈2020 第四屆全國兵棋推演大賽在北京舉行啟動儀式新聞發布會〉，《中國指揮控制學會》，2020 年 6 月 14 日，<http://www.c2.org.cn/h-nd-558.html>。

²⁴ 〈號外！由 CICC 與華戎防務聯合打造的國防科普及兵棋推演系統來了！〉，《華戎防務》，2021 年 5 月 11 日，<http://www.hs-defense.com/nd.jsp?id=1>。

²⁵ 王國岩等人，〈基於墨子系統的對艦打擊策略設計與分析〉，《測試技術學報》，第 37 卷第 4 期，2023 年。

京的「華如科技」所開發的「XSim 數位戰場」系列，可具體應用於陸、海、空、網電等領域的對抗訓練，以及透過蒙地卡羅隨機模擬進行作戰方案的實驗評估等。²⁶ 位於廈門的「淵亭科技」，旗下產品則有 AI 訓練與建模協助工具的「天機系列」、作戰訓練與決策輔助的「天衍系列」，以及戰場態勢感知的「天鑒系列」。這些系統同樣具有「推演訓練」以及「分析評估」的功能。²⁷ 至於「北京方圓奇正科技」所推出的「突破·聯合指揮官」系列，以及位於南京的「博智安全」發行的「學生仿真靶場」系列有「兵棋推演」與「網路攻防演練」兩種產品。²⁸「北京方圓奇正」與「博智安全」的電腦兵棋系統亦曾獲選為「全國兵棋推演大賽」的平台，惟從公開情資來看，他們的產品應不具備隨機模擬的「分析型」功能，僅能作為「推演訓練式」工具。

其他與電腦兵棋相關的輔助系統，則有中國科學院自動化研究所開發的「CASIA－先知」人工智慧系統，作為「墨子·未來指揮官」兵棋 AI，目前已發展至 2.0 版。²⁹ 中國國防科技大學系統工程學院亦研發「戰顛」人工智慧系統，並曾在第三、四屆「全國兵棋推演大賽」的「電腦 vs. 電腦」對抗賽連續奪冠，目前亦發展至 2.0 版。³⁰「恆歌科技」的「FreeXGIS」平台，則提供了戰場情勢可視化，以及電子沙盤推演的功能，展示交戰雙方的兵力部署與攻防態勢演進。³¹

肆、小結：美中電腦兵棋發展的評估

由前述討論可知，中國對於發展「電腦兵棋」協助作戰模擬與訓練一

26 華如科技，〈「XSimStudio」產品概述〉，<http://www.huaru.com.cn/comProduct?id=29616c19001d4165b780d4dfb722d15c>。

27 淵亭科技，〈天衍：作戰仿真推演〉，《方案優勢》，<http://www.dataexa.com/solution/military-simulation>。

28 博智科技，〈學生仿真靶場〉，《產品簡介》，<https://elxtec.com/eter/300.html>。

29 〈機器人與人工智慧技術〉，《中華人民共和國國家科學院》，2018 年 12 月，https://www.cas.cn/zt/kjzt/40kjcjg/gjxq/201812/t20181218_4674174.html。

30 〈遠超阿爾法狗？「戰顛」成戰場輔助決策「最強大腦」〉，《新浪科技》，2021 年 4 月 9 日，<https://finance.sina.cn/tech/2021-04-19/detail-ikmyaawc0452690.d.html?fromtech=1>。

31 〈FreeXGIS〉，《恆歌科技》，https://www.henggetec.com/?mod=product_detail&id=4。

事，雖然解放軍內部不乏有識人士的呼籲，但長期以來心有餘而力不足，缺乏相關的必要技術與人才，直到 2007 年以後才跨出建置兵棋系統的第一步。若 2014 年成功研發第一套自製電腦兵棋的「官宣消息」無誤，距今亦不到 10 年的時間。當然，持平而論，中國近年來在「電腦兵棋」領域確實有不小的進展。除了前述各家兵棋系統陸續問市，「後發優勢」也讓中國在電腦兵棋系統的開發上，可以預先針對國外現行兵棋系統的不足或缺點進行改進。「華戎防務」的「未來指揮官」系列即納入許多 CMO 缺乏的輔助功能，如多人即時推演、任務甘特圖、行動後檢視工具（After Action Review, AAR），以及兵棋 AI 訓練平台等。「華如科技」與「淵亭科技」的系統亦包含類似的輔助功能。這些中國電腦兵棋系統也都能同時滿足「決策推演訓練」與「作戰方案實驗與評估」的功能。此外，自 2013 年第一屆「北京高校兵棋推演大賽」以來，中國陸續有數項全國性（2017 年墨子杯）與區域性（京津冀地區、江蘇省、安徽省、山西省等地）的兵棋推演競賽舉辦。透過這些年度兵棋比賽，中國官方有意識地培養民間的兵棋社群。甚至傳聞解放軍正在使用電腦兵棋 AI 模擬最佳的攻台方案。³²

如果只看這些「成果」，容易讓外界有「中國是電腦兵棋的引領風潮者」的錯覺。實際上，解放軍在電腦兵棋上的技術、發展歷程明顯落後於美國及其友盟國家，中國本身的部分條件也侷限了發展的可能性。首先，以國軍漢光兵推所使用的「聯合戰區層級模擬系統」（JTLS）為例，美軍於 1980 年代便開發成功，並提供友盟軍事相關單位使用，我國最遲於 2003 年便引進 JTLS，陸續還有 EADSIM、STORM、JCATS 等軍事模擬分析系統。中國自製的電腦兵棋效能可否比擬已發展超過 30 年，並有數十國家的相關單位使用與驗證的美製系統，仍不無疑問。³³ 特別是，美國的電腦兵棋已形成一個包含上百種從戰略層級到工程層級模型的龐大「生

³² Ryan Fedasiuk et al., “Harnessing Lightning: How the Chinese Military is Adopting Artificial Intelligence,” *CSET Analysis*, October 2021, <https://cset.georgetown.edu/publication/harnessed-lightning/>.

³³ 謝沛學，〈網傳「中國以 AI 完成攻台兵推」或有誇大之嫌〉，《國防安全即時評析》，2021 年 11 月 5 日，<https://indsr.org.tw/focus?typeid=30&uid=11&pid=214>。

態體系」(Ecosystem)。針對戰場上不同的狀況，可找到數種以上相對應的模擬工具進行分析評估。相對地，以近期中國的幾個主要電腦兵棋系統來看，其發展走向有「一套產品解決所有模擬問題」的趨勢。這不僅可能在技術發展上有「廣而不精」的缺點，更可能出現不同廠商的產品之間功能重複，彼此相互競爭而非相互支援，共同解決軍事客戶問題的狀況。

此外，美國的電腦兵棋與作戰模擬領域，有著一群類似 Matrix Games 與 Bohemia Interactive 以大眾市場為主要銷售對象的系統供應商。這些公司產品的設計初衷是面向一般消費大眾，從民間玩家社群吸收使用經驗回饋以提升產品品質，最終為軍方單位所青睞而進入國防產業供應鏈。其公司的存續與產品的銷售並不全然取決於與美國國防部的合作，這些企業所開發的系統才稱得上是「商用現成軟體」。然而，以中國目前的例子來看，除了華戎防務的「未來指揮官」系列兵棋軟體算得上是「面向一般消費大眾」的發展模式。其他的主要供應商，例如「華如科技」與「淵亭科技」等，其產品並不適合大眾市場，合作客戶也是軍方或軍工科研單位等。這些兵棋供應商的成立時間基本上都是在 2010 年與 2014 年這兩個時間點左右，與解放軍第一款自製電腦兵棋的原型上線測試及正式完成的時間點吻合。因此，這些供應商的成立或許與解放軍需要電腦兵棋技術的進一步支援有關，包括以民間廠商的身分，向國外引進電腦兵棋的「商用現成技術」。隨著美中對峙的氛圍持續升溫，華盛頓是否會限制部分「商用現成兵棋軟體」向中國輸出，進而限縮了解放軍透過此管道獲取電腦兵棋的技術，亦是值得觀察的重點。

最後，將人工智慧運用到電腦兵棋是美中軍事科技競爭的一個熱點。中國的電腦兵棋系統也多強調內建有 AI 訓練平台，幾個官方的科研單位亦宣稱成功研發出具有戰場決策能力的兵棋 AI。然而，AI 的訓練與生成需要巨量資料。美軍擁有大量實戰或實兵演訓經驗，是訓練可供電腦兵棋使用的 AI 上的一大優勢。相對地，解放軍極度缺乏透過實戰經驗收集相關數據之機會。中國近年來積極舉辦各類的兵棋推演大賽，除了培育專業人才，也具有以電腦兵推競賽收集相關數據的用意。惟此種純粹透過電腦兵棋公開連線競賽所收集到的想定數據，是否能發揮如同從實戰或實兵演

訓場域所收集而來的數據的類似效益，有很大的疑問。關鍵在於，透過開放式全民參與的電腦兵棋競賽所收集來的想定數據，可能存在不少設定上的錯誤。以中北大學為例，中北大學係「全國兵棋推演大賽」的協辦單位，該校參賽者已經連續六屆拿下競賽冠軍，並且每年亦使用「墨子平台」舉辦山西省的兵棋競賽。中北大學的兵棋社群理應具有相當的軍事模擬素養。但該校研究團隊利用「墨子平台」所發表的模擬飛彈攻擊航艦之文章，其想定設計卻存在明顯不合理之處，必須在對美軍極端不利的條件下，才有可能得出接近該篇分析的模擬結果。³⁴ 倘若解放軍真的以公開競賽或這類學術研究設想的想定為訓練 AI 的資料來源，其結果可能會是「垃圾進、垃圾出」（garbage in, garbage out）。

³⁴ 陶本和，〈幕後 / 中共 24 枚東風殲滅美軍航母？台灣兵推專家實測結果首曝光〉，《ETtoday 新聞雲》，2023 年 7 月 7 日，<https://www.ettoday.net/news/20230707/2534715.htm>。

第八章 美國對中國的科技管制

楊長蓉*

壹、前言

自 2018 年起美中貿易競爭白熱化，美國採取一系列措施對抗中國崛起，透過立法、監管以及許可證實務（licensing practices）等方式。這幾年更是針對「軍民兩用」（dual-use）貨物與技術的出口管制體系（Export Control Systems）進行了重大修訂。美國採取這些措施部分原因係出於中國在相關領域的發展對其造成不小威脅，尤其是中國的國家領導產業政策模式（state-led industrial policies）、¹「軍民融合」體制，被視為其發展迅速關鍵。美國認為，中國藉由表面上合法合規的商業手段發展科技產業，實則帶有軍事目的且為擴張國家權力，這也挑戰美國對軍民產品的分類與出口管制模式。

由於中國在先進技術（advanced technologies）與軍民兩用領域之發展，已影響美國原本的領導地位，因此，美國對中國的科技貿易管制措施聚焦於如何管控新興與基礎技術（emerging and foundational technologies），包括強化相關技術管制與許可實務，藉由多邊途徑（multilateral engagement）途徑確保美國的管制措施具有效力，並考量對美國經濟的影響，例如被管制的美國產品在國際市場上之可獲取性（foreign availability）。

今（2023）年，美國與中國之間的科技貿易戰仍在延續，甚至到達了轉捩點，美國重點在於限制中國科技與軍事相關發展。相較於去年，今年無論是在聯邦或州的層級，美國對中國相關管制的法律或法規增加了至少

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所助理研究員。

¹ 例如《中國製造 2025》（*Made In China 2025*），《中華人民共和國國務院》，2015 年 5 月 8 日，http://big5.www.gov.cn/gate/big5/www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2873744.htm。

40%，² 涵蓋了投資限制、制裁措施、平台監管等，這些將進一步影響美中關係。本文就 2022 年到 2023 年美國重要科技管制措施做一說明。

貳、美對中科技管制領域重點

今年美國在對中國科技管制最受矚目措施之一即是美國總統拜登（Joe Biden）在 8 月 9 日所簽署的《關於解決美國在相關國家對某些國家安全技術與產品的投資問題行政命令》（*Executive Order on Addressing United States Investments in Certain National Security Technologies and Products in Countries of Concern*），³ 限制向中國某些敏感技術領域進行投資，也是美中競爭的核心項目：半導體與微電子（semiconductors and microelectronics）、量子資訊技術（quantum information technologies）、人工智慧（artificial intelligence）三大領域。⁴ 該行政命令的主要目的乃是避免美國的資本與專業知識技術，直接或間接協助中國發展可能支援其軍事現代化、損害美國國家安全的技術。

這些措施主要針對研發晶片設計軟體、製造晶片工具的中國企業，並限制了美國私募基金（Private Equity Fund, PE Fund）、創業投資（Venture Capital, VC）、合資企業（Joint Venture）以及綠地投資（Green Field Investment）等領域的活動。拜登表示，中國等國在軍事、情報、監視、網路能力等敏感技術與產品領域取得的進展對美國帶來威脅，故將致力保護對下一代軍事創新至關重要的技術來確保美國的國家安全。⁵ 意即，美

² “The Shifting Landscape of US-China Competition and What It Means for Your Organization,” *Fiscal Note*, August 17, 2023, <https://fiscalnote.com/blog/us-china-competition-analysis>.

³ “Provisions Pertaining to U.S. Investments in Certain National Security Technologies and Products in Countries of Concern (Proposed Rule),” *Office of Investment Security, Department of the Treasury*, August 14, 2023, <https://reurl.cc/edDrVK>.

⁴ “President Biden Signs Executive Order on Addressing United States Investments in Certain National Security Technologies and Products in Countries Of Concern,” *The White House*, August 9, 2023, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2023/08/09/president-biden-signs-executive-order-on-addressing-united-states-investments-in-certain-national-security-technologies-and-products-in-countries-of-concern/>.

⁵ *Ibid.*

國認為中國在這些領域的崛起對美國造成不僅是商業，而是國家安全層級的影響，必須加以克制以維護美國的國家利益。關於領域重點說明如下。

一、人工智慧

近年 AI 已成為國際科技競爭的新戰場，隨著 AI 對於經濟增長與軍事實力的影響日益加大，處於 AI 創新前端的國家的所作所為將對國際秩序帶來深遠影響。美國乃是位居全球 AI 技術的領先地位，且對 AI 在國防、軍事等領域都有相當程度的研發與投資。不過，中國近年無論是在資金投入、專利取得以及研究產出等關鍵領域，有迎面趕上之態勢，AI 領導地位的爭奪可能在未來的美中競爭中扮演決定性的角色。惟美國目前傾向將 AI 視為促進經濟增長的工具，例如 ChatGPT 這類聊天機器人，以及使用個人助理（personal assistants）作為輔助使用。相較之下，中國則是積極調整其 AI 策略，以強化其軍事實力，並在無人作戰（unmanned combat）、預警系統（early warning systems）等國防技術領域進行大量投資。目前美國在 AI 的私領域投資乃是中國的 3 倍。⁷

（一）半導體

美國在 AI 領域競爭中的關鍵優勢為先進的半導體（semiconductors）製造，其在支援 AI 技術之高度專業化與頂尖半導體芯片方面，目前明顯優於中國。半導體產業供應鏈的各環節皆須經美國與其盟友，包括我國（台灣）的控制。而中國作為晶片的主要進口國，其半導體貿易逆差高達 2,620 億美元。⁸

⁶ “Summary of Ndaa Provisions Highlights – Laying Groundwork to Compete with the Chinese Government, Advance Ai, and More,” *CQ*, July 2023, <https://info.cq.com/wp-content/uploads/2023/07/CQ-NDAA-Provisions-Highlights.pdf>.

⁷ “Artificial Intelligence Index Report 2022,” *Stanford University*, 2022, https://aiindex.stanford.edu/wp-content/uploads/2022/03/2022-AI-Index-Report_Master.pdf.

⁸ “China’s Chip Imports Plunge in 2022 Amid Zero-Covid Supply Chain Disruption and US Trade Restrictions on the Sector,” *South China Morning Post*, January 13, 2023, <https://www.yahoo.com/news/chinas-chip-imports-plunge-2022-093000165.html>.

美國更是充分發揮半導體主要出口國優勢，透過出口管制等措施限制中國相關產業的發展。在 2022 年 8 月，拜登簽署了 2022 年《晶片與科學法》（*CHIPS and Science Act*），該法將加強美國的製造業、供應鏈以及國家安全，並對美國國內半導體產業帶來歷史性超過 200 億美元的投資，目的在於確保美國在奈米技術（nanotechnology）、乾淨能源（clean energy）、量子運算（quantum computing）以及人工智慧等未來行業的領先地位。而在同年 10 月，美國商務部工業暨安全局（Department of Commerce's Bureau of Industry and Security, BIS）進一步實施出口管制措施，目的在於限制中國取得先進運算晶片、發展與維持超級電導以及製造半導體，以限制其軍事發展。¹⁰ 對部分重要關鍵管制措施說明如下：¹¹

1. 在《商業控制清單》（*Commerce Control List, CCL*）中納入特定高性能運算晶片（advanced and high-performance computing chips）與相關商品，以及含有這些晶片的商品。
2. 對向中國出售應用於超級電腦或半導體開發生產項目加入新許可制度（new license requirements）。
3. 擴大《出口管制條例》（*Export Administration Regulations, EAR*）的適用範圍，涵蓋特定外國生產的先進計算產品，以及針對超級電腦終端用途生產的產品。
4. 增加受管制的外國生產項目（foreign-produced items），包括在實體清單（Entity List）中位於中國的 28 個實體。
5. 將特定半導體製造設備與相關項目新增於《商業控制清單》。
6. 對於受管制項目運送至中國用於製造符合規定的積體電路（Integrated

⁹ “FACT SHEET: CHIPS and Science Act Will Lower Costs, Create Jobs, Strengthen Supply Chains, and Counter China,” *The White House*, August 9, 2022, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/08/09/fact-sheet-chips-and-science-act-will-lower-costs-create-jobs-strengthen-supply-chains-and-counter-china/>.

¹⁰ “Commerce Implements New Export Controls on Advanced Computing and Sem,” *Bureau of Industry and Security*, October 7, 2022, <https://www.bis.doc.gov/index.php/documents/about-bis/newsroom/press-releases/3158-2022-10-07-bis-press-release-advanced-computing-and-semiconductor-manufacturing-controls-final/file>.

¹¹ *Ibid.*

Circuit, IC) 之半導體製造廠，必須事前取得許可。針對於中國實體所有的設施，原則上採取「推定禁止」(presumption of denial) 審查方式，而對於跨國企業所有的設施將進行個案評估。相關管制標準如下：

- (1) 使用 FinFET 或 GAAFET 16 奈米或 14 奈米或更先進製程的多閘極電晶體邏輯晶片 (Logic chips with non-planar transistor architectures)。
 - (2) 使用 18 奈米半間距 (18nm half-pitch) 或更先進製程的 DRAM 晶片。
 - (3) 使用 128 層推疊 (layers) 或更先進推疊技術的 NAND Flash 晶片。
7. 美國公民需獲得許可方可協助中國境內半導體製造廠進行積體電路的設備開發或生產製造。
 8. 需要取得許可證才得出口用於半導體製造設備及相關項目的商品。
 9. 引入臨時通用許可 (Temporary General License, TGL)，允許特定、有限的製造活動，進行與中國境外使用的項目相關，以儘量減少對半導體供應鏈的短期影響。

這些出口管制的主要意圖在於削弱中國生產與購買先進晶片的能力，¹² 其邏輯為，先進晶片及其驅動的超級電腦與人工智慧系統可被用於生產新的武器與情監偵設備。然而，這些措施影響範圍極廣，甚至影響了中國之外的國家 (例如韓國)。¹³ 紐約時報甚至評價此為「戰爭行為」。¹⁴

(二) 量子資訊技術

依據《關於解決美國在相關國家對某些國家安全技術與產品的投

¹² 〈美国宣布全面限制向中国出售尖端芯片〉，《紐約時報中文網》，2022 年 10 月 8 日，<https://cn.nytimes.com/usa/20221008/biden-chip-technology/>。

¹³ “How US Chip Controls on China Benefit and Cost Korean Firms,” *PIIE*, July 2023, <https://www.piie.com/publications/policy-briefs/how-us-chip-controls-china-benefit-and-cost-korean-firms>.

¹⁴ 〈「這是一種戰爭行為」：解碼美國對華晶片封鎖行動〉，《紐約時報中文網》，2023 年 7 月 13 日，<https://cn.nytimes.com/usa/20230713/semiconductor-chips-us-china/zh-hant/>。

資問題行政命令》內容，美國在量子資訊技術（quantum information technology）部分尚未施行全面的出口管制措施，美國財政部（U.S. Department of the Treasury）仍在考量未來是否應禁止量子電腦及其零組件（components）生產之相關投資。¹⁵ 而其他與量子的相關投資禁令則僅適用於特定的「終端用途」（end uses），例如中國的量子感測平台用於用於軍事、情報或監察應用的設計，則不得投資；或是量子通訊系統作為「專門用於安全通訊設計」（designed to be exclusively used for secure communications）的用途，亦不得投資。這在人工智慧系統方面也是類似的邏輯，只有當此類系統被用於「軍事、政府情報或大規模監視最終用途」（military, government intelligence, or mass-surveillance end uses）時，相關投資與開發才會被禁止。在政策與法規上，將投資禁令限於終端控制相當重要，以免過大的限制範圍妨礙美國對中國有益民用技術之投資。

參、美國出口管制體系

在法規體系部分，美國的出口管制體系（US Export Control System）主要分為兩大類：一是管制武器、軍用產品與服務的《武器貿易管制條例》（*International Traffic in Arms Regulations, ITAR*），二是管制「軍民兩用」（dual-use）產品與服務的《出口管制條例》（*Export Administration Regulations, EAR*）。¹⁶ 除了上述兩種，尚須注意美國相關經濟與貿易制裁（economic and trade sanctions）的相關規範。無論是 ITAR 或 EAR 皆由一系列的法規所組成，並非單一法律，內容複雜，主管機關亦不相同。在銷售的國際市場上，軍火商亦要求其供應需必須為「武器貿易管制條例合規」（ITAR compliant），且必須向美國國務院國防貿易管制處（Directorate of Defense Trade Controls, DDTC）登記。相關規範比較可參考下表 8-1：

¹⁵ “The Treasury Department is Considering A Prohibition on U.S. Persons Undertaking A Transaction with A Covered Foreign Person Engaged in Activities Involving: (...)” 前註 4，<https://www.federal-register.gov/documents/2023/08/14/2023-17164/provisions-pertaining-to-us-investments-in-certain-national-security-technologies-and-products-in#p-128>.

¹⁶ “EAR,” *Bureau of Industry and Security*, <https://www.bis.doc.gov/index.php/regulations/export-administration-regulations-ear>.

表 8-1 美國出口管制法規體系比較

規範	主管 / 監管機關	範圍	出口商責任
《出口管制條例》(EAR)	美國商務部工業暨安全局 (US Department of Commerce's Bureau of Industry and Security)	嚴格商業 (Strictly commercial)、軍民兩用, 以及低敏感的軍事物品、軟體以及技術。	確認是否屬於 BIS 關注方清單 (parties of concern)。確認該項目是否受 EAR (ECCN 或 EAR99) 管制。若有需要, 應申請許可證。
《武器貿易管制條例》(ITAR)	美國國務院國防貿易管制處 (US Department of State's Directorate of Defense Trade Controls)	國防物品與國防服務 (提供關鍵的軍事或情報能力)。	確認產品是否在美國軍品清單 (USML) 中。確定是否需要許可證或其他核可制 (approval)。
經濟貿易制裁 (Economic and Trade Sanctions)	美國財政部外國資產管理局 (Office of Foreign Assets Control, OFAC)	基於美國外交政策與國家安全目的之制裁 (sanctions); 其可適用於外國、恐怖分子、國際販毒者、從事與大規模殺傷性武器擴散與其他對美國國家安全、外交政策或經濟構成威脅有關的活動者。	所有美國人, 無論身在何處, 皆須遵守 OFAC 法規。OFAC 鼓勵所有出口商維持嚴謹風險導向 (risk-based) 的合規計畫。

資料來源: "Int. Traffic in Arms Regs.," *export.gov*, October 20, 2016, <https://www.export.gov/article?id=International-Traffic-in-Arms-RegulationsInternational-Traffic-in-Arms-Regulations>.

1990 年代後, 因促進中美科技貿易, 美國實務上對中國的技術出口限制並不多。¹⁷ 但因現在美中對抗情勢, 美國工業暨安全局在 2022 年 10 月、¹⁸ 12 月¹⁹ 以及 2023 年 1 月²⁰ 分別對《出口管制條例》的相關規則

¹⁷ "U.S. Export Controls and China," *CRS*, March 24, 2022, <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF11627>.

¹⁸ 前註 10。

¹⁹ "Additions and Revisions to the Entity List and Conforming Removal From the Unverified List," *BIS*, December 19, 2022, <https://www.federalregister.gov/documents/2022/12/19/2022-27151/additions-and-revisions-to-the-entity-list-and-conforming-removal-from-the-unverified-list>.

²⁰ "Implementation of Additional Export Controls: Certain Advanced Computing and Semiconductor Manufacturing Items; Supercomputer and Semiconductor End Use; Entity List Modification; Updates to the Controls To Add Macau," *Bureau of Industry and Security*, January 18, 2023, <https://www.federalregister.gov/documents/2023/01/18/2023-00888/implementation-of-additional-export-controls-certain-advanced-computing-and-semiconductor>.

與實體清單進行重大修訂。修訂後的條例，針對性地限制了中國取得先進電腦晶片、製造超級計算機與先進半導體的能力。此舉體現美國持續加大對中國出口管制措施的力度，對中國產業發展有重大影響。由於美國對中國的相關管制主要以 EAR 為主，以下說明美國 EAR 制度。

一、美國出口許可制度（licensing approach）概述

美國工業暨安全局主要依據貨品之「技術特徵」（technical characteristics）、「輸出目的地」（destination）、「最終使用者」（end user）及物品之「最終用途」（end use）進行規範。在受管制之客體部分，EAR 係以「商用控制清單」（Commercial Control List, CCL）規範「軍民兩用」物品及較低敏感度軍用物品（例如 600 series），分為「物品」（Commodities）、製造物品之「技術」（Technology）及「軟體」（Software）。而若是屬於 ITAR 體系，若是屬於《美國軍品清單》（*U.S. Munition List*, USML）之物品於出口時均需要申請。

而受管制之物品有一組「出口管制分類編碼」（Export Control Classification Number, ECCN），列在 CCL 上，每個 ECCN 編碼都由包含五個數字與字母的組合組成，代表了物品的種類、用途以及受到管制的原因。例如美國製的晶片，其 ECCN 為 3A001，出口到中國需要許可證。至於管制程度較低的為 EAR99 產品，對一般國家出口時無需許可。

美國工業暨安全局並設立四種不同的清單，以掌握美國對外出口的軍民兩用物品與部分純民用、純軍用產品。這裡所指的「產品」包括物品、軟體及技術，分別是「實體清單」（BIS Entity List）、「被拒絕人員清單」（Denied Persons List）、「未核實清單」（Unverified List）以及「軍事最終用戶清單」（Military End User List）。自 2018 年以來，美國擴大「實體清單」的適用以限制部分與中國的軍民兩用交易，即將特定有疑慮的中

國公司列入清單中。²¹

二、《出口管制改革法》

美國 2018 年的《出口管制改革法》（*Export Control Reform Act of 2018*, ECRA）重新建立了美國總統在出於國家安全與外交政策理由下，對軍民兩用物品的控制權（authority），並協調多邊出口管制體系，同時提供控制設定的政策要求。美國工業暨安全局負責管理軍民兩用的出口管制，並主持政府內部的協調流程，包括國防部（Department of Defense, DOD）、國務院（Department of State）以及能源部（Department of Energy）。工業暨安全局即是透過 EAR、CCL 進行相關控制來實施這些控制。

在 CCL 裡，「國家安全」（National Security, NS）控制項目（controlled items）屬於《關於傳統武器與軍民兩用貨物與技術的出口控制的瓦聖納協議》（*The Wassenaar Arrangement on Export Controls for Conventional Arms and Dual-Use Goods and Technologies*，簡稱瓦聖納協定，Wassenaar Arrangement）的「多邊控制清單」（multilateral control list）中。EAR 對於可能直接且重大地支持中國軍事的國家安全申請案的採取「推定禁止」（presumption of denial），若非有證據證明交易行為不會對美國國家安全及外交政策產生不利影響，將拒絕發放許可。此外，其他相關法規與規定也管制核（nuclear）材料與技術以及國防物品與服務。自 1989 年以來，美國法律已經明令禁止向中國出售軍事裝備。國會亦另有規定禁止向中國出口衛星與太空設備之政策。²³

²¹ “Additions of Entities to the Entity List and Removal of Entity From the Entity List,” *Bureau of Industry and Security*, June 14, 2023, [https://www.federalregister.gov/documents/2023/06/14/2023-12726/additions-of-entities-to-the-entity-list-and-removal-of-entity-from-the-entity-list#:~:text=These%20entries%20are%20listed%20on,the%20United%20Kingdom%20\(2\).](https://www.federalregister.gov/documents/2023/06/14/2023-12726/additions-of-entities-to-the-entity-list-and-removal-of-entity-from-the-entity-list#:~:text=These%20entries%20are%20listed%20on,the%20United%20Kingdom%20(2).)

²² “Export Control Reform Act of 2018,” *U.S. Congress*, August 13, 2018, <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/5040#:~:text=This%20bill%20grants%20the%20President,of%20U.S.%20persons%2C%20wherever%20located%2C.>

²³ “The U.S. Export Control System and the Export Control Reform Initiative,” *CRS*, August 27, 2020, <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46814.>

肆、美國科技管制措施之後果

美國對外出口管制的效力範圍很廣，以 EAR 而言，其不僅管制直接出口（export）行為，同時也管轄從進口方國家再次出口到第三方國家的再出口（reexport）行為，以及在進口方國家境內的國內轉讓（transfer in country）行為。

而企業如果違反相關 EAR，可能面臨行政責任與刑事責任，以及民事罰款、經濟制裁、喪失出口權利以及其他制裁方式，例如沒收與扣押等。企業須注意 EAR 的「合規性」，這些對個別企業甚至整個科技產業界都有不少影響。

在行政責任部分，違反 EAR 屬於「嚴格責任」（strict liability），只要違反了 EAR，就可能受到處罰，無需證明相關主體是否有違法意圖或知情的要件。行政責任可能會導致高達 30 萬美元或交易價值的 2 倍的罰款（以金額較高者為準，行政處罰的最高金額每年會根據通貨膨脹進行調整），並撤回已獲得的許可證，以及行為主體可能會被禁止從事出口、再出口或國內轉讓 EAR 管制的物品。例如，2022 年 8 月，中國最大的電線電纜公司遠東電纜（Far East Cable）被美國工業暨安全局指控（Charging Letter）違反 18 項 EAR 規定。美國工業暨安全局指出，遠東電纜在 2014 年至 2016 年期間，涉嫌與電信公司中興通訊（Zhongxing Telecommunications Equipment Corporation）進行交易，以規避美國對伊朗的限制。²⁴ 美國工業暨安全局表示將對遠東電纜實施嚴格的行政處罰，包括最大的民事罰款（maximum civil penalty）、禁止從事出口（denial of export privileges）、禁止從事美國工業暨安全局相關業務以及其他法律責任等。²⁵

²⁴ “Charging Letter,” *Bureau of Industry and Security, Office of Export Enforcement*, July 29, 2022, <https://efoia.bis.doc.gov/index.php/documents/export-violations/export-violations-2022/1385-far-east-cable-signed-charging-letter-for-filing-7-29-22/file>.

²⁵ “Bis Issues Charging Letter Against Chinese Company Far East Cable for Violating U.S. Export Controls Related to Shipments to Iran,” *Bureau of Industry and Security*, August 8, 2022, <https://www.bis.doc.gov/index.php/documents/about-bis/newsroom/press-releases/3111-08-08-2022-bis-press-release-far-east-cable-charging-letter/file>.

而依據 2018 年的《出口管制改革法》，刑事處罰包括最高 100 萬美元罰款（\$1 million in fines per violation），可能會被判處 20 年以下之刑期，或者併罰。不過，刑事責任則需要證明故意與過失，包括犯罪意圖與知情等要件，成罪較不容易。

伍、小結

美國對中國的出口管制政策已不限於原本「出口管制」模式，現進一步到「投資管控」，這一變化顯示表明美中之間的高科技競爭正在不斷升級，且局勢加劇甚至會影響其他國家產業發展。目前美國在人工智慧、半導體生產技術等領域占據主導地位，但中國卻是最大的半導體的銷售市場，因此，拜登政府在限制中國先進晶片發展的同時，亦需要考慮美國國內產業界的利益。美國產業界近期一直在遊說政府，試圖減小投資禁令的範圍。雖然最新的禁令已經比最初的計畫縮小很多，但未來仍存在不確定性，可能對美國在類似領域的對華投資產生寒蟬效應。

隨著時間的推移，限制措施的範圍預計將擴大，對產業的影響將變得更加嚴重，進一步減少美國對中國投資。這一政策舉措將重新定位美國資本與專業技術的流向，使其遠離最大的競爭對手中國。因此，許多美國公司可能會撤回、放棄或重新評估在中國的投資計畫。這一舉措傳遞出中美之間的地緣政治與國家安全風險已經成為常態，所有市場主體都必須謹慎對待，而且可能會引導其他國家效仿或跟隨這一政策，形成全球範圍內的趨勢。

第九章 中國對美國科技管制的回應及其影響

黃恩浩*

壹、前言

近年美中「科技競爭」（或稱「科技戰」）可以被視為美中「科技競爭」（或稱「貿易戰」）的重要一環，主要是從時任美國總統川普於 2017 年 11 月訪問北京會見中國國家主席習近平時，公開強調要平衡史上美中最大貿易逆差開始，而當時川普要解決美中貿易逆差的邏輯就是要對中國進口商品加徵關稅。2018 年 3 月 22 日，川普簽署「中國經濟侵略」總統備忘錄之後，宣稱「中國竊取美國智慧財產權和商業秘密」，根據美國 1974 年《貿易法》第 301 條要求美國貿易代表對從中國進口的商品徵收關稅，估計涉及商品總計估達 600 億美元關稅。¹再者，於 2018 年 3 月 27 日，美國貿易代表辦公室發布針對中國的 301 報告，企圖要懲罰中國對美國知識產權和商業秘密的盜竊。對此，當時中方表示，堅決反對美方這種單邊主義和貿易保護主義行徑，必將採取所有必要措施，堅決捍衛自身合法權益。因此，當時媒體始稱此為美中大國競爭下雙方進行「貿易戰」的序幕。

在 2018 年 4 月，美國商務部（Department of Commerce）下屬工業與安全局（Bureau of Industry and Security, BIS）以中國電信設備製造商中興通訊（Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, ZTE）違反美國制裁伊朗與北韓為由，²宣布禁止美國企業向 ZTE 銷售零件，直到 2018 年 7 月 13 日，ZTE 繳交 14 億美元罰款及保證金並宣布將展開檢討後，美

* 國防安全研究院國防戰略與資源研究所副研究員。

1 〈貿易戰來勢洶洶，美宣佈對華 600 億美元商品加稅〉，《BBC 中文網》，2018 年 3 月 22 日，<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/chinese-news-43500214.amp>。

2 〈中興通訊聲明：美國拒絕令危及中興生存也傷害美企業〉，《法國國際廣播電台》，2018 年 4 月 20 日，<https://www.rfi.fr/tw/中國/20180420/中興通訊聲明美國拒絕令危及中興生存也傷害美企業>。

國商務部才正式解除對該公司的出口禁令。³此時，媒體乃開始流行美中「科技戰」或「科技管制」的說法迄今。科技可以說是現代國家綜合國力發展的重要因素之一，不僅是國家經濟發展的重要基礎，也是軍事力量發展的關鍵資產。前述美國的「301」報告主要重點在於，美方認定中方以各種不當手段，迫使美國企業轉讓並流失科技，這是造成美中貿易失衡的主因，而美方隨後也對中方祭出科技管制的行動。

因為科技能力與軍事力量息息相關，所以美方認為中國科技崛起是「迫切軍事威脅」。為了遏止中國從西方獲得科技，在拜登政府時期，BIS 乃於 2022 年 10 月 7 日宣布科技管制範圍更廣泛的新法規，嚴格規定美國企業往後若要向中國出口先進晶片（Integrated Circuit, IC）、晶片製造設備等高科技產品，都必須向政府申請許可。此外，新法規也將限制美國公民協助中國半導體業者研製先進晶片。根據該法規，中國企業將再也買不到美國生產的超級電腦晶片、AI 應用的顯示晶片圖形處理器（Graphics Processing Unit, GPU）、製造先進邏輯晶片（Logic IC）與記憶體晶片（Memory IC）的設備。⁴可見，美國正以國家安全為由，不計後果地全面遏止中國科技發展，而此將會對中國經濟造成嚴重影響，⁵包含其「中國製造 2025」與「中國標準 2035」計畫。然而，究竟北京會如何回應華府的科技管制？及其對全球的影響又為何？此乃是本文所要觀察的議題。

貳、美國對中國科技管制的重要項目

美中貿易戰自 2018 年初爆發後，由美方率先宣布對中國多項商品加徵關稅，隨後中國也對美國商品加徵關稅予以反制，造成美中輪流提高

3 〈晶片之爭預警「經濟冷戰」？中興「罪與罰」的前前後後〉，《BBC 中文網》，2018 年 4 月 24 日，<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/business-43858521>。

4 陳艾伶，〈美中科技戰，拜登不惜一切代價遏止中國高科技業崛起！學者：台灣、南韓、日本恐成報復對象〉，《風傳媒》，2022 年 10 月 15 日，<https://www.storm.mg/article/4565098>。

5 Jon Bateman, “Biden is Now All-In on Taking Out China,” *Foreign Policy*, October 12, 2022, <https://foreignpolicy.com/2022/10/12/biden-china-semiconductor-chips-exports-decouple/>.

關稅使雙邊貿易戰逐漸升溫。在美國轉向對華為（Huawei Technologies Corporation, Huawei）與中興通訊實施禁令後，美中貿易戰乃逐漸變為美中之間爭奪超級電腦、AI 顯示晶片處理器、生物技術、5G 通訊，以及半導體等高科技產業的科技競爭。這場由美國發起的科技戰背後，其戰略目的不外乎就是要制衡中國近年來科技影響力的擴張，而這從北京推行「中國製造 2025」與「中國標準 2035」計畫的企圖就可以看出端倪。

「中國製造 2025」是前中國國務院總理李克強在 2015 年所提出的製造業政策，由於美國認為此不但是中國推行科技民族主義的表現，更具有在高科技方面超越美國的野心，所以華府自 2018 年以來就開始透過貿易戰來壓制北京野心。在貿易戰開始之後，北京不僅在 2020 年提出《國家標準化戰略綱要》，並在 2021 年提出《國家標準化戰略行動計畫》，而這個標準化戰略即是《中國標準 2035》行動方針。該方針的目的不外乎就是北京已經逐漸認知到，在美中科技勢必然脫鉤之前提下，試圖能夠擺脫依賴國外技術現狀的槓桿，並以此掌握未來全球市場的競爭主導權。⁶ 同時，北京積極對內提高製造業產品的品質與產量標準，對外則推廣中國與國外標準體系相容，以共同標準促進產業合作和經貿發展，以期最後成為國際標準話語權的掌握者。⁷

目前美國對中國科技管制的重要項目，整理歸納如下：

一、先進運算晶片限制

美國對中國出口的一些高科技產品進行限制，特別是在與國家安全與軍事相關的領域，例如：在 2022 年 10 月，美國商務部 BIS 提出新的出口管制項目，包含製程設備、先進運算晶片以及超級電腦等。在製程設備方面，限制 14/16 奈米以下邏輯晶片製造設備、18 奈米以下「動態隨機存

⁶ 黃健群，〈解析「中國標準 2035」發展及戰略〉，《風傳媒》，2021 年 5 月 14 日，<https://view.ctee.com.tw/economic/29363.html>。

⁷ 陳文蔚，〈走了「中國製造 2025」後再推「中國標準 2035」圖奪全球數位權力霸主〉，《中央廣播電臺》，2020 年 4 月 28 日，<https://www.rti.org.tw/news/view/id/2061754>。

取記憶體」(Dynamic Random-Access Memory, DRAM) 製造設備，以及 128 層以上「快閃記憶體」(Flash Memory) 製造設備售予中國。⁸

二、高性能電腦限制

限制對中國出口高性能計算和超級電腦領域的技術，以防止中國在這一領域的發展和應用。關於先進運算晶片與超級電腦方面，美國對其出口管制條件包括：限制運算效能達 4,800 TOPS¹ 以上和訊號連接傳輸頻寬達 600 GB/s 以上的晶片，和體積在 41,600 立方英尺以下且能執行雙精度浮點運算的超級電腦（效能超過 100 petaFLOPS²）銷售給中國。⁹

三、軟體技術限制

美國通過加強軟體技術轉移的監管，限制中國企業和個人獲取美國的敏感技術和專利，這包括對中國企業投資美國高科技公司的限制和加強技術出售的審查。例如：美國商務部 BIS 在 2022 年 8 月宣布將輔助 3 奈米以下「環繞式閘極場效電晶體」(Gate-All-Around Field-Effect Transistor) 晶片設計所需之「電子設計自動化」(Electronic Design Automation) 軟體列入對中國的出口管制清單，¹⁰ 而這將影響中國在 AI 與 5G 先進製程技術的發展。

四、5G 和通訊設備限制

美國限制中國企業在美國建設 5G 網絡和提供相關設備，擔憂中國

⁸ 鄭凱安，〈美國持續加強對中國大陸管制，長期恐將使中國大陸成熟製程更具競爭力〉，《工商時報名家評論》，2022 年 12 月 4 日，<https://view.ctee.com.tw/technology/46918.html>。

⁹ 鄭凱安，〈美國科技管制對中國大陸半導體產業之影響〉，《財團法人海峽交流基金會》，2023 年 4 月 13 日，<https://www.sef.org.tw/article-2-129-13637>。

¹⁰ 翁世航，〈美管制 3 奈米 EDA 出口，中國先進製程恐受阻，台企超前部署「第四代半導體」劍指元宇宙〉，《關鍵評論》，2022 年 8 月 16 日，<https://www.thenewslens.com/article/171738>。

企業可能將其技術用於間諜活動或對美國國家安全構成威脅。例如：於 2019 年 5 月，美國宣布將華為及其 68 家子公司列入出口管制「實體清單」（Entity List），禁止華為向「高通」（Qualcomm）、「英特爾」（Intel）、「博通」（Broadcom）等美國晶片大廠採購晶片。¹¹ 以及在 2020 年 5 月，美國進一步宣布 2020 年 9 月起將禁止華為取得美國技術製造的 5G 手機處理器晶片。¹² 這一系列對中國的管制，就是藉此限制華為在 5G 手機市占率與基礎設施的擴展。

五、對個人和企業制裁

美國對一些中國企業、機構和個人實施制裁，限制其在美國金融體系中的活動和交易，以回應中國在人權、知識產權和其他方面的行為，美方亦指出這些公司代表了一系列潛在的國家安全風險。美國自 2018 年起迄今已經對約上百家中國企業發起多輪制裁，涵蓋高科技、通訊與建設等不同領域。對企業制裁，正成為美方採取軍事與外交並用施壓中國的重要手段。¹³

參、中國對美國科技管制的反制作為

中國對美國科技管制措施採取了多種回應。一方面，北京表示反對美國對中國科技出口管制，認為這損害了中國企業的合法權益和國際自由貿易原則。另一方面，北京也加強了自主研發和創新的努力，希望能夠在技術領域取得更多的自主控制權以減少對外依賴。此外，中方還推動了自主

¹¹ Kara M. Bombach, Cyril T. Brennan, Sonali Dohale, and Melissa P. Prusock, “Latest U.S. Trade Restrictions Target Huawei,” *GreenbergTraurig*, May 2019, <https://www.gtlaw.com/en/insights/2019/5/latest-us-trade-restrictions-target-huawei>.

¹² 方鈞，〈第三波華為禁令，聯發科還能獨佔鰲頭嗎？〉，《理財週刊》，2020 年 9 月 3 日，<https://www.moneyweekly.com.tw/Magazine/Info/%E7%90%86%E8%B2%A1%E5%91%A8%E5%88%8A/48809>。

¹³ 張淑伶，〈美國 2 年制裁 300 中企，中國難回擊〉，《中央社》，2020 年 8 月 27 日，<https://www.cna.com.tw/news/aopl/202008270179.aspx>。

可控的產業發展戰略，鼓勵本土企業發展和投資關鍵技術領域。近期中國對美國科技管制的回應措施如下：

一、進行外交抗議

中國自 2018 年以來就不時透過外交管道向美國表達不滿和抗議，強調其反對單邊制裁和貿易保護主義的立場，呼籲國際社會共同維護自由貿易和平等互利的環境，同時也向世界貿易組織（World Trade Organization, WTO）控訴美國單方偏離公平競爭原則，並且違反國際經貿規則。中國外交部在 2022 年 10 月 8 日表示「中方堅決反對美方肆意泛化國家安全概念、濫用出口管制措施、無理打壓中方企業的做法」且「將同國際社會一道反對單邊主義和科技霸凌行徑，堅持開放、公平、非歧視的原則，共同維護世界經濟體制、規則、基礎的穩定，推動世界經濟復甦發展」。¹⁴ 中國商務部在同年 10 月 10 日更指出，美國對中國科技管制不僅影響供應鏈穩定，更是典型「科技霸凌」做法。¹⁵ 從上述中國對外言論可知，北京試圖把這場美中科技戰塑造成美國與國際的對抗，以轉移中國受到科技管制的壓力。

二、實施出口管制規範

在 2020 年 10 月 17 日，中國通過首部《出口管制法》，並於同年 12 月 1 日實施。該法規定管制物項包括「兩用物項、軍品、核以及其他與維護國家安全和利益、履行防擴散等國際義務相關的貨物、技術、服務等」，管制物項包括物項相關的技術資料等數據。該法還規定，中國對管制物項的出口實行許可制度，出口商必須申請許可證才能出口管制清單中

¹⁴ 廖士鋒，〈再駁晶片禁令，陸外交部：堅決反對美方肆意泛化國安概念〉，《經濟日報》，2022 年 10 月 14 日，<https://money.udn.com/money/story/5603/6686900>。

¹⁵ 唐佩君、周慧盈，〈美祭晶片出口等管制，中國批威脅供應鏈穩定〉，《中央社》，2022 年 10 月 11 日，<https://www.cna.com.tw/news/acn/202210110036.aspx>。

所列或受臨時管制的任何物項。¹⁶ 由於該法頒布時，正處於中美貿易戰白熱化期間，該法律允許中國政府對海外組織或個人進行懲罰，這表明北京有可能試圖用該法來限制全球敏感技術的銷售。

三、推動科技創新自主

在中共十九屆五中全會於 2020 年 10 月 26 日至 29 日召開期間，北京通過《中共中央關於制定國民經濟和社會發展第十四個五年規劃》（簡稱「十四五規劃」）訂定未來 5 年（2021-2025）中國經濟社會發展方向與目標。該「十四五規劃」時期的中國正面臨經濟成長趨緩、美國對中國發動貿易戰，以及美中科技戰衝擊中國科技產業發展，所以促使中國產業供應鏈被迫調整和轉型。習近平在「二十大」政治報告中也呼籲，¹⁷ 要在高科技發展上通過自力更生，贏得「關鍵核心技術」的爭奪戰。¹⁸ 這似乎也意味著，在中共二十大之後對美科技制裁的反制措施將全面展開。¹⁹ 為了因應美國對中國發動科技管制，北京因此決定加大對自主創新的投資，以科技創新及自主研發激發新發展動能，努力減少對美國科技產品的依賴，並落實「中國製造 2025」、「中國標準 2035」以及半導體和 5G 網通等產業發展政策，以緩和美中科技戰對中國科技產業發展和競爭力造成的負面影響。²⁰

16 〈中國的出口管制〉，《人民網》，2021 年 12 月 29 日，<http://politics.people.com.cn/BIG5/n1/2021/1229/c1001-32319829.html>。

17 〈習近平：高舉中國特色社會主義偉大旗幟為全面建設社會主義現代化國家而團結奮鬥——在中國共產黨第二十次全國代表大會上的報告〉，《中華人民共和國中央人民政府》，2022 年 10 月 16 日，<http://www.gov.cn/zhuanti/zggcddescqgdbh/sybgqw.htm>。

18 〈中共二十大報道：面對美國高科技管制，習近平強調科技自立自強〉，《美國之音》，2022 年 10 月 17 日，<https://www.voacantonese.com/a/6792159.html>。

19 盧伯華，〈回應美晶片禁令，中共 20 大後反制措施將展開全面較量〉，《中時新聞網》，2022 年 11 月 1 日，<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20221101004902-260409?chdtv>。

20 張建一，〈解讀中國大陸制定「十四五規劃」〉，《兩岸經貿》，2020 年 12 月 28 日，<https://www.sef.org.tw/files/12281/E22763B5-75B7-4B7F-9324-47E0A112E89E.pdf>。

四、提出「阻斷性法律」

面對美國一連串的貿易管制，中國商務部於 2021 年 1 月 9 日發布《阻斷外國法律與措施不當域外適用辦法》，這是一項「阻礙性法律」（Blocking Statue），允許中國境內企業就北京政府所認定之不公平貿易限制措施提出民事損害訴訟。此辦法與歐盟、加拿大及俄羅斯等國所制定的阻斷立法概念相似，允許中國境內企業可對第三方因遵守特定境外法律所產生之損害提起訴訟。²¹ 中國提出該規範的目標不外乎就是針對美方對中國所採取的制裁與管制措施。根據該規範，若北京認為美方限制是不公平且侵犯中國合法權益，則遵守美國限制措施之企業可能需承擔民事損害責任。換言之，該辦法可能迫使中國境內企業必須選擇遵守美國制裁或遵循中國規範，一旦有企業選擇遵循美國法律，北京將可能依該辦法對該企業提出訴訟以反制美國制裁。²²

五、制定《反外國制裁法》

為了反制美方對中國政府機關、組織、官員，以及多家中國企業實施制裁，北京在 2021 年 6 月 10 日公布並實施的《反外國制裁法》規定，中國政府有關部門可以決定將直接或間接參與制定、決定、實施歧視性限制措施的個人、組織列入反制清單，其中還可以包括這些個人的配偶和直系親屬、組織的高級管理人員等。具體反制措施可以包括不予簽發簽證、不准入境、查封、扣押在中國境內的動產、不動產等。²³ 該法不僅便於北京對西方國家的制裁採取反制行動，而且該法本身有很大的嚇阻作用，讓外

²¹ 羅絮，〈中國大陸針對美國一系列制裁及貿易限制提出「阻礙性法律」反制〉，《臺灣服務業聯盟》，2021 年 1 月 14 日，<https://twcsi.org.tw/Business.aspx?ID=1398&pg=1&key=&d=8261>。

²² 許祐寧，〈中國大陸商務部頒布《阻斷外國法律與措施不當域外適用辦法》維護國際經貿發展權益〉，《財團法人資訊工業策進會科技法律研究所》，2021 年 3 月，<https://stli.iii.org.tw/article-detail.aspx?no=67&tp=5&d=8624>。

²³ 《中華人民共和國反外國制裁法》，2021 年 6 月 10 日，中華人民共和國第十三屆全國人民代表大會常務委員會第二十九次會議通過，<http://www.npc.gov.cn/npc/c30834/202106/d4a714d5813c4ad2ac54a5f0f78a5270.shtml>。

國政府了解到如果對中國進行制裁，那些制定制裁措施的外國政客和官員將會遭受來自中國的懲罰。²⁴

六、管制美國科技產品

中國國家互聯網資訊辦公室於 2023 年 5 月 21 日宣布，因審查發現美國最大記憶體晶片廠美光科技（Micron Technology）產品存在嚴重網路安全問題隱憂，所以規定中國境內關鍵資訊基礎設施運營者應停止採購美光產品。此中國之舉，可被視為是中國反制美國科技管制首度出手回擊的實際行動，雖然華府和北京都釋出希望雙方關係朝要正面發展的訊息，然而美光是英特爾之外，美國另一個重要半導體生產製造商，此次中方大動作封殺美光產品，顯示美中科技戰仍相當激烈。²⁵

肆、美中科技競爭白熱化對全球的影響

美中科技戰爭日趨白熱化，華府積極聯合全球盟邦與夥伴的影響力，擴大與中國科技脫鉤項目的範圍，企圖壓制北京發展高科技產業的步驟與速度。這場美中科技交鋒局勢背後的戰略動機，不外乎就是美中政治影響力、經濟權力與軍事實力的競爭。可預知的是，這場美中科技競爭所造成的連鎖反應將可能影響全球未來數十年的科技產業發展，對全球生活的後續影響可能會遠遠超過 2050 年。²⁶ 近期美中科技戰爭對全球的影響，有下列幾項歸納觀察重點：

²⁴ 〈中國制定《反外國制裁法》應對美國「工具箱」的四個看點〉，《BBC 中文網》，2021 年 6 月 10 日，<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/chinese-news-57399524>。

²⁵ 楊晴安，〈反制第一槍，陸對美光產品啟動網路安全審查〉，《工商時報》，2023 年 4 月 1 日，<https://www.chinatimes.com/newspapers/20230401000121-260202?chdtv>。

²⁶ Agathe Demarais, “How the U.S.-Chinese Technology War is Changing the World,” *Foreign Policy*, November 19, 2022, <https://foreignpolicy.com/2022/11/19/demarais-backfire-sanctions-us-china-technology-war-semiconductors-export-controls-biden/>.

一、科技創新與領導地位方面

美中科技競爭推動了兩國在關鍵技術領域的競爭和創新。這對全球科技發展具有重要意義，像是 AI 晶片、5G 通訊、無人載具、半導體和量子科技等領域，因為美國和中國是全球最大的經濟體和科技強國，他們的技術領導地位將對全球科技產業結構、創新生態系統與全球價值鏈產生重大影響。²⁷ 就半導體而言，中國每年半導體進口需求占全球需求逾 75%，而大多數半導體生產都涉及美國技術，因此半導體變成為華府在美中科技戰中的王牌。值得注意的是，一旦雙方半導體技術脫鉤，此將可能讓中國藉此強化自主研發半導體能量與產量，未來美方就不見得能繼續以管制半導體技術手段來抗衡中國。²⁸

二、經濟體系和市場貿易方面

美中科技競爭與貿易戰之間的盤根錯節其實不容易嚴格區分，但是並定會對全球經濟和貿易關係結構亦產生深遠的影響。美中科技競爭激化了科技領域「去中化」與「去美化」的對立，尤其是在關鍵領域如 AI 科技、5G 通信、半導體等，這些都關係到全球的供應鏈和市場板塊的變化，也讓全球科技領域開始去思考「一個世界、兩套系統」的現象甚至開始建構可能的避險策略。²⁹ 未來，美中之間的科技競爭、貿易限制和市場管制等問題，會讓全球去考慮究竟要用「美國標準」還是「中國標準」的問題，而此將對全球經濟成長和貿易流動產生直接和間接的連鎖反應。

三、國家安全和地緣政治方面

美中兩國科技競爭對全球地緣政治和國際安全構造產生了重大影響，

²⁷ 陳信宏，〈美中科技戰對全球價值鏈的影響〉，《FINDIT》，2020年6月22日，<https://findit.org.tw/researchPageV2.aspx?pageId=1435>。

²⁸ 同前註。

²⁹ 林浩鈺、何志峰，〈美「中」科技戰之情境分析與臺灣產業因應策略研究〉，《展望與探索》，第18卷第10期，2020年10月，頁37-63。

不僅展現在軍事科技、數位安全、資訊戰和太空衛星等領域的競爭，也直接影響到全球戰略平衡和國際安全環境。此外，兩國之間的科技競爭也引發了關於技術轉移、知識產權保護和數據安全等問題的國家安全爭議。在這美中科技競爭的態勢中，可發現當代核心科技競爭已經開始有邁向「國家化」與「武器化」之趨勢，這促使國家在當代國際關係中產生了以「科技權力」主導地緣政治的戰略思維，也就是說國家安全已經不再由地理因素來界定，也不再透過控制領土或海洋而達成，而是利用「權力化」後的關鍵科技來控制他國發展。³⁰

四、關於全球科技治理方面

「全球治理」（Global Governance）是指國際社會共同協商、制定和實施規則、原則和機制，以應對全球性問題和挑戰，並促進國際合作和協調。其涵蓋各個領域，包括：經濟、貿易、科技、安全、環境、人權等，並涉及到國家、國際組織、非政府組織和其他利益相關方的參與和合作。³¹這場美中科技競爭清楚顯示出，國家對「科技權力」的爭奪正在挑戰現行全球科技治理體系，這也促使各國開始對科技治理和規範等議題的重視。³²美中科技競爭開打之後，中國就積極在發展自己的科技生態體系，也預告著中國與西方在科技領域將分而治之。這個趨勢不僅促使兩國在數據隱私、AI 倫理、數位貨幣與軍事技術等領域的競爭，也將會引起了全球對於科技發展的道德、法律和規範等議題的關注。

伍、小結

美中貿易戰發生，正值中國《十四五規劃》期間，以及推行《中國製

³⁰ 曹宇帆，〈地緣政治科技武器化，台灣需智慧面對〉，《中央社》，2023年3月10日，<https://www.cna.com.tw/news/acn/202303100111.aspx>。

³¹ 楊惟任，〈如何實踐有效的全球治理？〉，《全球政治評論》，第75期，2021年，頁45-70。

³² 楊智傑，〈當科技等於權力，傳統階級結構的崩塌〉，《數位時代》，2016年10月25日，<https://www.bnext.com.tw/article/41404/tech-power->。

造 2025》與《中國標準 2035》計畫時期。為了應對美國來勢洶洶的科技管制，中國今後的科技戰略目標，如同習近平在中共二十大所強調，就是要促進科技產業自立自強，包括：加快推動中國自主研發體系的進程、研發關鍵基礎材料與先進基礎工藝、全力發展半導體產業、打造資通訊產業的在地化自主供應鏈，以及降低關鍵技術與關鍵零組件依賴國外供應的比例，以確保科技產業能持續發展。就美中科技競爭對國際影響而言，其實美中科技競爭對全球的影響是一個複雜且多方面的安全議題。其不僅影響到國際科技領域的創新和發展，還涉及到經濟、貿易、國家安全和全球治理等方面。這場美中科技競爭促使各國開始去重新思考科技發展戰略，加強技術創新能力和保護知識產權，亦同時讓各國開始去思考要如何處理平衡跨國科技合作和全球競爭的挑戰。

第十章 美國科技制裁對中國軍事發展的影響

謝沛學、翟文中*

壹、前言

美國拜登政府上任以來，延續了川普時期的對中遏制戰略，並在此基礎上拓展到更多領域，採用了更多圍堵手段。經過磨合與調整，華盛頓的戰略已從「脫鉤」轉變為「去風險」，即以「小院高牆」（Small Yard, High Fence）原則，針對選定的關鍵科技領域建構從「終端成品、軟硬體設備到人才與資金引進」的嚴格封鎖。而在其餘中、低端技術產品，則仍允許美中之間的貿易與交流。¹ 依據這個考量，拜登政府對中國的科技產業逐步建構了以「晶片」為核心的圍堵。其背後邏輯係先進晶片乃發展「量子運算」與「人工智慧」的關鍵，這些科技具有運用到軍事領域並大幅提升作戰能力的可能性。2023年8月，拜登不顧進一步激化原已日漸惡化的美中關係，簽署一項行政命令授權美國財政部長禁止或限制美國在三大領域對中國企業的投資，包括半導體和微電子、量子科技以及某些人工智慧（AI）系統。由於這些技術與解放軍軍事智能化發展息息相關，下文中將對美國對中國的高科技制裁、中國的反制作為及對解放軍的軍事建設產生的可能影響進行分析說明。

貳、美國的制裁

拜登政府最新的晶片禁令，管制了包含「運用 16、14 奈米及以下等

* 國防安全研究院網路安全與決策推演研究所副研究員；國防安全研究院國防戰略與資源研究所助理研究員。

¹ Du Zhihang and Matthew Walsh, “US Shifts from ‘Decoupling’ to ‘Small Yard, High Fence’ on China,” *NIKKEI ASIA*, February 16, 2021, <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Caixin/US-shifts-from-decoupling-to-small-yard-high-fence-on-China>.

「非平面式電晶體架構」製程的邏輯晶片」、「18 奈米動態隨機存取記憶體（DRAM）」與「128 層以上儲存型快閃記憶體（NAND Flash）」。² 在輸出管制下，中國現已無法取得輝達（NVIDIA）生產的高端 GPU 晶片— A100，與運算能力更強的 H100 型晶片。為繞開對中出口禁令，輝達採取了生產專為中國市場而設的 A800（A100 降階版）及 H800（H100 降階版）系列晶片的模式。³ 由於美國對華禁令有愈演愈烈之趨勢，甚至傳出拜登政府考慮連 A800 與 H800 系列晶片也納入管制名單的消息，使得這些「特供」晶片在中國市場出現囤積與價格暴漲的現象，也給中國 AI 應用相關產業的發展造成相當大的壓力。

在「小院高牆」政策原則下，華盛頓對中國取得高端晶片的圍堵，不僅阻攔對終端產品的採購，更體現在對中國企業晶片自製能力的「扼殺」。中國在晶片研發上首缺「光刻機」（Stepper）。就當前言，即令全球光刻機龍頭廠的荷蘭艾司摩爾公司（ASML Holding N.V.），光刻機也並非獨家技術。在製造機台的過程中必須向全球數百家包括美國、德國、日本等地的供應商採購零組件，這給了華盛頓封鎖中國取得光刻機的切入點。2019 年來，艾司摩爾公司不再向中國出售能製造先進晶片的「極紫外光刻機」（Extreme Ultraviolet, EUV）。最新消息係艾司摩爾公司宣布 2024 年起，連成熟製程晶片生產的「深紫外線光刻機」（Deep Ultraviolet Lithography, DUV）亦納入對中出口管制清單。⁴

除硬體設備外，中國也被禁止獲得工業設計領域的基本工具——「電子設計自動化」軟體（Electronic design automation, EDA）。沒有 EDA 軟體系統，即使獲得光刻機，這些硬體設備一樣無法運作。目前 EDA 軟體由 Synopsys、Cadence、Mentor 等三家公司壟斷，全部都是美

² “The CHIPS Act of 2022,” *The Senate*, <https://www.commerce.senate.gov/services/files/592E23A5-B56F-48AE-B4C1-493822686BCB>.

³ Josh Ye, “Focus: Inside China’s Underground Market for High-end Nvidia AI Chips,” *Reuters*, June 19, 2023, <https://www.reuters.com/technology/inside-chinas-underground-market-high-end-nvidia-ai-chips-2023-06-19/>.

⁴ Cagan Koc and Sarah Jacob, “ASML Says It Can Ship Restricted Chip-Making Gear Until Year End,” *Bloomberg*, August 31, 2023, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-08-31/asml-says-it-can-ship-restricted-chip-making-gear-until-year-end>.

國企業。⁵ 雖然中國亦有企業投入資金與人力開發 EDA 軟體，如「華大九天」與「廣立微電子」。由於 EDA 軟體屬資本密集且投資開發週期長，中國開發的 EDA 系統性能遠不如市場認可和應用廣泛的美製 EDA 軟體。⁶ 華盛頓已不是第一次透過限制 EDA 軟體出口對中國科技發展「掐脖子」。早在 2018 年與 2019 年，川普政府便分別對中興通訊（ZTE）與華為祭出斷供 EDA 的制裁。拜登政府的最新做法則是全面對中國的晶片企業進行封鎖，力圖一舉阻斷中國先進晶片研發和製造升級之路。⁷

除荷蘭外，另一個晶片製造所需設備主要生產國——日本，也跟隨美國以「國家安全」為由，加大對中國的晶片製造技術的封鎖。日本經濟產業省 2023 年 5 月宣布，將於 7 月 23 日起針對不友好國家（又是針對中國），就 23 種包含化學物料在內的晶片製造設備採取出口限制措施。用較戲謔的方式比喻，華盛頓的制裁只是讓中國晶片產業沒有「炒菜的工具」，而東京的加碼制裁，則是讓中國連「炒菜的原料」都沒有。制裁生效後，中國廠商連 40 奈米或以下的成熟製程晶片，像是家電與電動車的零組件的生產都將受影響。日本此舉對中國科技產業發展所造成的衝擊，比起美國的政策更為嚴重。⁸

美國對中晶片圍堵，亦從「人才與技術交流」層面著手，《晶片法案》限制任何美國人（含美國公民、持綠卡之永久居民或依美國法律成立的法人實體）未經許可不得協助中國開發或生產高階晶片。美國國會刻在檢討美中間《科技合作協議》（*Science and Technology Agreement, STA*）的存廢。這項 1979 年鄧小平訪美期間，由卡特政府簽署的 5 年一期雙邊

5 Research and Markets, "Global Electronic Design Automation Software Market Trends/Forecasts, 2023-2030: Mentor Graphics, Cadence Design Systems, and Synopsys Dominate the Market," *Yahoo Finance*, July 19, 2023, <https://finance.yahoo.com/news/global-electronic-design-automation-software-100300792.html>.

6 江泰傑，〈一文解析：斬向華為的屠龍刀「EDA」產業〉，《鉅亨網》，2020 年 5 月 19 日，<https://news.cnyes.com/news/id/4479516>。

7 Dick Weisinger, "Semiconductors: Export Controls on EDA Software Will Hurt Chinese Chip Manufacturers," *Formtek*, August 29, 2022, <https://formtek.com/blog/semiconductors-export-controls-on-eda-software-will-hurt-chinese-chip-manufacturers/>.

8 弗林，〈日本尖端半導體製造設備出口限制正式生效〉，《法廣中文網》，2023 年 7 月 23 日，<https://wooo.tw/RJhhD3u>。

合作協議，在過去 40 多年，為中國的企業、學校乃至軍工科技單位，提供了獲取美國最先進科技與人才的合法渠道。⁹ 根據中國的《網路安全法》、《國家安全法》和《國家情報法》，所有中國的法人與私人都有義務向中國政府提供所需的情報。¹⁰ 中國的大學等科研單位不能單純地視為「學術機構」。因此，聯邦眾議院「中國問題特別委員會」（the Select Committee on the CCP）主席蓋拉格（Mike Gallagher）及其他 9 名共和黨眾議員聯名致函國務卿布林肯（Antony Blinken），呼籲應於 2023 年 8 月 27 日到期後，廢除這項「引狼入室」協議。¹¹ 儘管拜登政府最終以「與中方談判改善協議內容」為由，決定「延長」該合作協議半年。¹² 將與中國間的科技合作管道視為對國家安全威脅的疑慮，現已成為美國國內主流意見。美國國會和多州議會擬立法限制美國的「公共退休基金」和大學名下的捐贈基金對中國市場進行投資。若此立法通過，涉及金額高達數十億美元，將進一步影響中國科技產業從西方募資的管道。¹³ 因此，未來美中對峙情勢若持續地升高，此類中國獲取美方科技的民間交流管道亦可能遭到切斷。

相較川普政府的單打獨鬥，拜登政府對中國的科技圍堵體現了與友盟間的密切合作。除推動日韓和解外，亦重啟了兩國的半導體貿易交流，促成了「晶片四方聯盟」（Chips 4），建立涵蓋印太地區重要半導體生產國——美、台、日、韓的合作網絡。在華盛頓的影響下，幾個歐洲主要國家也陸續對中國試圖透過併購的方式，獲取先進晶片技術的管道

⁹ “Science and Technology Agreements,” *State Department*, <https://www.state.gov/key-topics-office-of-science-and-technology-cooperation/>.

¹⁰ 喬龍，〈中國新法要求公民在海外協助收集情報〉，《自由亞洲電台》，2018 年 12 月 7 日，<https://www.rfa.org/mandarin/yataibaodao/zhengzhi/ql1-12072018100022.html>.

¹¹ Michael Martina, “Republican Lawmakers Urge U.S. to Scrap China Science Deal,” *Reuters*, June 27, 2023, <https://www.reuters.com/world/republican-lawmakers-urge-us-scrap-china-science-deal-2023-06-27/>.

¹² David Matthews, “US Extends Science and Technology Agreement with China, Buying Time to Renegotiate the Deal,” *Science Business*, August 23, 2023, <https://sciencebusiness.net/news/international-news/us-extends-science-and-technology-agreement-china-buying-time-renegotiate>.

¹³ 編譯盧永山，〈美擬立法 限制公共退休金、大學基金對中投資〉，《自由時報》，2023 年 7 月 3 日，<https://ec.ltn.com.tw/article/paper/1591715>。

進行封鎖。例如，英國 2023 年 6 月以國安為由命令中國「聞泰科技」（Wingtech）旗下「安世半導體」（Nexperia）出售其在 2021 年收購的紐波特晶圓廠（Newport Wafer Fab）至少 86% 股份。德國也否決了一家中資公司收購位於多特蒙德的晶片廠。荷蘭政府證實將對中資的「安世半導體」收購荷蘭 Nowi 公司一案進行嚴格審查。¹⁴

參、中方的反制

為對中國高科技的發展進行全面圍堵，美國政府首先限制中國企業向美國廠商購買電子零件，接著對半導體裝備輸出與中國取得先進製程技術設定了諸多限制，如此中國半導體技術只能維持在當前水準，無法製造出高性能晶片，從而對其新興產業發展與軍事能力提升形成相當程度的制約。在這種情況下，中國只能改變既有策略，在現有裝備與技術條件下尋求發展嶄新製程來尋求突破。2020 年 10 月媒體報導指出，中芯已運用 FinFET N+1 技術成功開發出「類 7 奈米」晶片。雖然，此製程生產出的晶片良率偏低且成本較高，由於毋須使用遭到美國輸出禁令管制的艾司摩爾極紫外光刻機，這可視為中國反制美國對其高科技制裁的一項重要突圍手段。¹⁵ 即令如此，由於此製程尚須其他半導體設備支援，在美國掌控全球多數半導體設備的情況下，仍可透過出口管制對中芯發展新一代製程進行限制。¹⁶ 尤有甚者，中芯的「類 7 奈米」晶片能否滿足人工智慧等高科技發展需求，仍需進一步地進行檢證與持續地進行觀察。

除發展嶄新製程外，中國在半導體產業採行的另一反制手段，即是

¹⁴ Katie Prescott, "Forced Sale by Nexperia Would 'Cripple' Chinese-owned Newport Wafer Fab," *the Times*, March 27 2023, <https://www.thetimes.co.uk/article/forced-sale-by-nexperia-would-cripple-chinese-owned-newport-wafer-fab-kkmw73gzr>; Pieter Haeck, "Netherlands to Probe Chinese Chips Takeover," *Politico*, June 1, 2023, <https://www.politico.eu/article/netherlands-probe-china-microchips-takeover-nowi-nexperia-wingtech/>.

¹⁵ 楊日興，〈中芯 N+1 製程突破股價飆升〉，《工商時報》，2020 年 10 月 13 日，<https://www.chinatimes.com/newspapers/20201013000243-260203?chdtv>。

¹⁶ Atkinson，〈中芯國際 7 奈米生產高效能晶片難度高，美國還是能卡脖子〉，《TechNews 科技新報》，2022 年 7 月 22 日，<https://technews.tw/2022/07/22/smhc-still-has-to-use-other-equipment-to-assist-in-the-production-of-7nm/>。

擴大成熟製程晶片產能。目前，最先進晶片係 3 奈米製程，成熟製程晶片則指 28 奈米以上傳統製程晶片，前者係發展人工智慧與高速運算等先進技術不可或缺的關鍵核心，缺少此等晶片甚難發展相關能力。另一方面，智慧手機、電源管理、車用晶片與軍事硬體等不同領域，成熟製成晶片即可滿足其所需的各項性能要求。為回應美國的晶片出口禁令，中國採取的另一作為則是擴大成熟製程晶片的生產。根據「國際半導體產業協會」（Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI）估計，至 2026 年中國將建造 26 座 200mm 和 300mm 晶圓的晶圓廠，相較美洲地區僅有 16 座晶圓廠。¹⁷ 隨著中國在此領域產能擴大，極可能透過傾銷手段將競爭對手趕出市場，這將形成壟斷並導致各國對中國供應鏈的過度依賴，將對美國與盟國的經濟發展與國家安全構成潛在性威脅。此外，中國宣布將投入資金發展第三代半導體，期望透過此新技術的運用獲得「彎道超車」機會，惟其必須在製程設備與晶片生產等領域克服眾多技術瓶頸方能有以致之。¹⁸

另一方面，中國亦試圖透過運用出口管制手段，對美國及其他國家加諸其身的高科技管制進行反制。例如：2021 年 12 月發布的《中國的出口管制》白皮書第 48 條載明，「任何國家或者地區濫用出口管制措施危害中華人民共和國國家安全和利益的，中華人民共和國可以根據實際情況對該國家或者地區對等採取措施」¹⁹ 此法條的立法意旨雖在對他國濫用出口手段進行嚇阻，但在實踐上仍須具有諸多條件支撐，否則流於形式無法發揮任何效用。由於中國在半導體產業供應鏈上對他國存在著高度依賴，其範圍由硬體的生產機具與裝備到軟體的人才與先進製程不一而足，面對美國在此領域日趨全面與滴水不漏的管制，除非中國能建立自主的半導體研發與生產能量，不然其採行的反制作為都不會改變其在半導體產業供應鏈

17 〈彭博：中國大量生產成熟製程晶片，敲響美歐警鐘〉，《財經新報》，2023 年 8 月 1 日，<https://finance.technews.tw/2023/08/01/cn-mature-process-chips/>。

18 汪哲仁，〈2021 年中共經濟情勢與半導體發展策略〉，李冠成、洪銘德主編，《2021 中共政軍發展評估報告》（台北：五南圖書出版股份有限公司，2021 年 12 月），頁 149。

19 中華人民共和國商務部，〈中華人民共和國出口管制法〉，《中國出口管制信息網》，2021 年 12 月 30 日，<http://exportcontrol.mofcom.gov.cn/article/zcfg/gnzcfcg/fffg/202111/226.html>。

所處的不利態勢。2023年5月，中國政府宣稱美國美光公司晶片存在安全問題，會對中國關鍵訊息基礎設施供應鏈造成重大的安全風險，下令禁止關鍵基礎設施採用美光公司晶片。由於美光晶片可以其他晶片取代，其他高階晶片就非如此，這亦反映出中國在半導體領域所處的被動挨打不利態勢。²⁰

2023年7月，中國海關總署發布公告，為維護國家安全和利益需要，將對鎘、鎳相關物項實施出口管制，相關物項出口必須向商務部申請許可，俟審查後發給許可證件始得出口。此次納入管制品項包括鎘相關物項，計有金屬鎘、氮化鎘、氧化鎘、磷化鎘、砷化鎘、銦鎘砷、硒化鎘與銻化鎘；鎳相關物項則有金屬鎳、區鎳鎳錠、磷鎳鎳、鎳外延生長襯底、二氧化鎳與四氯化鎳。²¹ 中共這項政策宣示立即引發了國際社會的高度關注，雖然其實質效果與可能對外界造成的衝擊有待後續觀察，然其向外界傳達了一個明確訊息，中國可對其具有優勢的產品禁止出口，同時實施的時點、對象與範圍完全由其全權控制，中國在高科技競爭中是有意願且有相應能力進行回應的。²² 中國此番對鎘鎳物項進行的出口管制，令人想起過往中國將「稀土武器化」的相類似作為。2010年中日東海危機後，中國曾試圖以稀土禁運作為武器對日本施加外交與經濟壓力。然而，此舉卻引發了國際社會強力的回應，²³ 中國「未蒙其利先受其害」，因此運用出口管制對他國施壓係「雙面刃」，判斷錯誤甚至可能對已形成反噬效果。

20 〈中國美光禁令，經濟現實限制成效〉，《TechNews 科技新報》，2023年6月5日，<https://technews.tw/2023/06/05/cn-usa-micron/>。

21 相關規定參見中華人民共和國商務部安全與管制局，〈商務部海關總署公告2023年第23號，關於對鎘、鎳相關物項實施出口管制的公告〉，《中華人民共和國商務部》，2023年7月3日，<http://www.mofcom.gov.cn/article/zwgk/gkzcfb/202307/20230703419666.shtml>。

22 〈風評：中國反擊鎘鎳出口管制，意含比效果更重要〉，《風傳媒》，2023年7月10日，<https://www.storm.mg/article/4827371?page=1>。

23 中國這項舉措引發日本強烈不滿，其隨即向「世界貿易組織」（World Trade Organization）提起訴訟，2014年8月該組織以中國違反世貿組織規則與入會時的承諾，判決中國稀土出口管理措施違規，中國則在敗訴後取消了行之多年的稀土出口配額制度。參見馬金順，〈稀土出口配額制取消難改行業現狀，關稅調整成關鍵〉，《人民網》，2015年1月14日，<http://finance.people.com.cn/BIG5/n/2015/0114/c1004-26380587.html>。

肆、美國高科技制裁對人民解放軍的影響

2019年7月，中國在發布的《新時代的中國國防》白皮書中，提出了「智能化」戰爭的概念，該份文件指出：「在新一輪科技革命和產業變革推動下，人工智能、量子信息、大數據、雲計算、物聯網等前沿科技加速應用於軍事領域，國際軍事競爭格局正在發生歷史性變化，以信息技術為核心的軍事高新技術日新月異，裝備遠程精確化、智能化、隱身化、無人化趨勢更加明顯，戰爭形態加速向信息化戰爭演變，智能化戰爭初現端倪」。²⁴ 其後，中國戰略學者開始對「軍事智能化」與「智能化戰爭」進行了廣泛的討論，內容涵蓋了致勝機理、戰爭型態與武器系統等議題。在此同時，中國軍方亦將「智能化戰爭」視為接續「資訊化戰爭」的新型戰爭型態，「軍事智能化」遂成為了人民解放軍未來兵力整建與科技研究的重點。然而，中國軍方能否發展並完善「智能化戰爭」的相應能力，很大程度取決於其能否將數項新興科技運用於軍事作戰領域，這些新興科技包括了大數據、人工智慧、雲端計算（cloud computig）與量子技術等等。因此，國內外學者對中國「軍事智能化」相關議題進行分析時，對於中共軍方能否取得相關科技多所著墨。

為加速「軍隊智能化」的發展，中國軍方除在裝備建設引進智能科技外，在軟體開發與人才培訓亦投注了相當心力。例如，2017年9月，解放軍軍事科學院成立了國防科技創新研究院，該院下設一個人工智能研究中心，主要從事大數據、智能算法、認知通信與智能軟件（機器人操作系統）等技術研發。²⁵ 為對「智能化戰爭」涉及的指揮管制、軍事安全與倫理等問題進行探討，解放軍軍事科學院與國防大學國家安全學院分別召開了「軍事大數據論壇」²⁶ 與「智能化戰爭研討會」等一系列研討會議。²⁷

²⁴ 中華人民共和國國務院新聞辦公室，《新時代的中共國防》白皮書，2019年7月24日，<http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/39912/41132/41134/Document/1660318/1660318.htm>。

²⁵ 〈國防科技創新研究院基本情況〉，http://jyxy.tju.edu.cn/upfiles/2018/TJU_jkxy_yjyj.pdf。

²⁶ 2018年7月，軍事科學院在北京舉辦了首屆「軍事大數據論壇」，會議期間與會專家對軍事大數據戰略與規劃、軍隊大數據理論與技術以及大數據軍事應用等三項議題進行了討論。中華人民共和國國防部，〈第一屆軍事大數據論壇於7月5日至6日在京舉辦〉，http://www.mod.gov.cn/big5/topnews/2018-07/06/content_4818945.htm。

此外，為了加速人工智能研發人才培育，2018年時更在北京理工大學開設了「智能武器系統實驗班」。尤其重要的，北京當局現積極地透過「軍民融合」發展戰略，促進人工智能技術軍民雙向轉化，從而形成全要素、多領域、高效益的人工智能軍民融合格局。²⁸換言之，中國透過軍方、高校與軍工集團等相關資源的整合，為其「軍事智能化」的發展提供了堅實的物質基礎，這有助解放軍開展軍事智能化相關計畫。就中長期言，軍隊智能化建設已成為人民解放軍建軍規劃的首要目標，因此相關軍事技術的取得就成為能否順利開展軍事智能化建設的關鍵因素。

藉由前文說明不難發現，人民解放軍為落實「軍事智能化」，在作戰理論建構、軍隊裝備建設與高尖人才培育皆投入了相當的資源。2017年7月，中國大陸國務院公布《新一代人工智慧發展規劃》，對中國未來的人工智慧產業發展提供了明確規劃與發展目標，²⁹這份規劃雖未提及軍事領域運用，惟因人工智慧技術具有高度「軍民兩用」雙向屬性，民用領域技術的提升有助將其效應外溢至軍事領域，對人民解放軍的戰力提升做出實質的貢獻，相同情況亦見於大數據、互聯網與太空科技等其他領域。即令如此，這些新興科技的未來發展與半導體硬體與軟體技術能否取得突破息息相關，尤以半導體的硬體（製程）技術為然，這是各國不斷投入資源在先進製程尋求突破的主要原因。換言之，中國即使具有強大的半導體設計能力，在不具製造高階晶片先進製程能力情況下，發展大數據與人工智慧無異緣木求魚。就此觀之，美國施加中國半導體產業的全面圍堵與嚴格管制，對中國人工智慧的未來發展將會形成嚴重的衝擊，中國建設世界一流軍隊的目標極有可能面臨失敗結局。

²⁷ 2019年12月，國防大學國家安全學院召開首屆「智能化戰爭」研討會，與會人員對戰爭形態演變、智能化戰爭理論與應對智能化軍事挑戰進行廣泛討論。〈首屆「智能化戰爭」研討會在京舉行〉，《人民網軍事》，<http://military.people.com.cn/BIG5/n1/2019/1228/c1011-31527057.html>；〈第二屆「智能化戰爭」研討會在京舉行〉，《新華網》，http://www.xinhuanet.com/mil/2020-12/27/c_1210949207.htm。

²⁸ 同前註。

²⁹ 游奕恬，〈中國大陸人工智慧產業發展現況研析及對台灣之影響初探〉，《經濟研究》，第18期，頁406，<https://reurl.cc/edDeDx>。

在「小院高牆」政策指導下，美國除半導體產業外並未與中國全面脫鉤，惟透過此精細計算後採行的輸出管制做法，不僅對中國高科技的發展形成相當程度的制約，中國半導體產業再也無法透過與他國公司的合作或併購，取得本身欠缺的專業人才與先進製程。或許最重要的，這種做法不僅使《中國製造 2025》的產業政策難於達其目標，更使人民解放軍的「軍事智能化」發展陷入停滯不前的困境。事實上，在美方開始對中國半導體產業進行制裁後，中國軍方就甚少在公開場合提及「軍事智能化」相關議題，足見美方高科技輸出管制對中國軍事現代化的影響不容小。過去數十年間，中國軍方儘管在飛彈、戰機和戰艦等軍事硬體上取得了重大突破，但本質上仍是在追趕西方國家的先進科技，人工智慧提供人民解放軍一個「彎道超車」的機會之窗，惟在美國高科技圍堵情況下，中國無法取得國外先進技術用以進行軍事技術創新。雖然，中國軍事技術未來仍將持續發展，惟其意欲拉近與西方國家間差距的目標將變得難於實現，解放軍推動的「軍事智能化」將大打折扣。

伍、小結

2023年8月，中國華為公司在美國商務部長雷蒙多（Gina Raimondo）訪華期間，突然發布預售新款手機 Mate 60 Pro 新聞，此舉措似乎向美方傳達中國不畏美國的高科技制裁，美方的輸出管制是無法阻止中國在高科技領域的持續發展。此新聞揭露後，美國國會議員隨即要求拜登政府，應對中國的華為與中芯兩家公司進行更為全面與嚴格的技術封鎖，用以防止中國企業繼續取得美國生產的高技術晶片。半導體產業不同於消費性商品，由於其資本密集加上相關製程受到專利保護，除非開發出破壞式技術（disruptive technology），否則產業強者恆強規律甚難挑戰。此外，中國政府投入巨額資金補貼半導體產業的做法，不但無法建立該產業的國際競爭力，反而造成各方競逐瓜分國家寶貴資源，導致金錢浪費與產業空洞的惡果，中國近期半導體廠出現倒閉清算潮即是最佳例證。因此，美國對中國的高科技制裁產生的效應是明確而深遠的。

面對此種不利的產業與科技發展趨勢，中國在大數據與人工智慧領域的發展將會受到制約，這將對中國軍方「軍事智能化」的開展形成嚴重衝擊。中國軍方在無法取得先進晶片支援下，其裝備與載台的功能將得不到進一步提升，倘若這種存於晶片的「代差」持續地存在，原本已處於落後追趕的中國軍隊，其相對軍力與整體態勢遠較當前更為不利。人民解放軍雖可在現有的基礎上，將武器與載台進行有效整合，甚或開發出嶄新的作戰模式，如兩次世界大戰間德國軍方的成功案例，將戰車、無線電與俯衝轟炸機三者結成發展出「閃擊戰」（Blitzkrieg）戰術。然而，在其無法以人工智慧支援「觀察—認知—決策—行動」（observe, orient, decide, act; OODA）循環時，其在部隊機動與武器接戰時將處於被動狀態。換言之，當中國軍隊無法取得先進晶片用以提升軍隊戰鬥效能時，相較取得此能力的西方國家軍隊，中國軍隊不僅無法取得主動甚至將會處於挨打局面，其成為世界一流軍隊的目標也將難以實現。

結論

在過去一年間，軍事科技面向最令人印象深刻的發展有二，其一係俄烏戰爭間大量的民用科技被運用於戰場；另一則是中美兩國間的科技競爭愈演愈烈，美國對中國進行了前所未有的輸出管制，藉此對其高科技發展與人民解放軍的戰力提升形成制約，從而確保美國在科技領域的主導地位。兩者間似乎並無太大的關聯，在經仔細推敲與深入研究後，兩者間關係之深實超過一般人的想像。由於軍民兩用科技相互滲透，兩者間的界限日趨模糊甚至可說不復存在，因此對兩用科技的管制日益困難，這是美國對中國科技管制範疇不斷擴大的原因所在。另一方面，由於軍民兩用科技範圍極廣，因此美國對中國科技輸出管制的後續發展及可能影響，都成為舉世各國關切的焦點。在年度報告中，將對當前成熟發展的軍民兩用科技進行說明，並對美中科技競爭衍生的議題進行分析與探討。

在本報告第一部分，扼要說明當前的軍民兩用科技，諸如太空科技、仿生技術、電力推進與智慧機器人等科技，內容涵蓋了前揭技術在商業領域的應用現況，以及其在軍事領域運用具有的巨大潛力。例如：俄烏戰爭期間，民用科技即被用來支援軍事作戰，最為人周知的例子即是馬斯克（Elon Musk）創辦 SpaceX 公司提供的「星鏈」（Starlink）衛星通信服務，此系統在協助烏克蘭對抗俄羅斯發揮了相當程度的助力。此外，SpaceX 公司在美國太空計畫與太空軍事能力建構亦做出了巨大貢獻。相類似的，則是各種不同型式商用無人機被俄烏雙方用來執行情監偵與精準打擊任務，這種發展方興未艾。仿生學的出現，則使科學家能從生物演化的角度，將其運作機理適用於商業與軍事領域，當前在此兩個領域均獲得了若干程度進展。在可預見未來，商用科技將支援更多軍事科技與作戰行動。

在本報告第二部分，對中美間日益尖銳的科技競爭進行了深入分析。2020 年起，美國採取一系列措施用來限制中國取得美國的高科技技術，

其採用的方法包括國會立法、監督管理及許可措施等不同途徑。相較過去加諸蘇聯的高科技輸出管制，美國當前運用了諸多多邊管制手段對中國進行全面圍堵，同時並將先進製程相關的生產裝備與人才軟體一併納入，這些手段所欲達成的目標即是讓中國無法取得或製造出先進晶片。除先進晶片外，美國政府亦明令禁止或限制美國企業對中國企業的投資，相關領域包括了量子科技與人工智慧等等。就表面言，美國加諸中國的高科技輸出管制，旨在保有美國在先進科技的主導權並對中國未來的經濟發展形成制約。深入探究不難發現，美國對中國進行管制的高科技均可用於軍事用途，亦是解放軍開展「軍事智能化」的關鍵性要素。因此，美國對中國科技管制的最主要目的，乃在限制中國進一步提升其軍事能力，從而確保美國在軍事領域的優勢地位。

鑑於民用科技在軍事運用的巨大價值，以及其對未來兵力整建與戰力發揚的深遠影響，國防部應成立專責機構對其發展密切掌控，並與經濟部合作對民間國防工業量能進行評估，具軍事潛力的廠商與項目可予必要的資金協助。此外，該機構應具將民用科技轉化為軍事用途的能力，亦即在綜合分析各軍種提出的作戰需求後，能在商用市場快速找到現有成熟科技，其後透過工程整合或創意運用等不同途徑，用以支援軍事作戰任務遂行，最佳例子即是俄烏戰爭期間，烏克蘭將商用無人機改裝後執行各項軍事任務。台灣在半導體製程具有全球領導地位，其可為國軍發展高速運算與人工智慧等先進技術提供支撐，透過這些技術協助可使國軍的武器系統與整體戰力獲得實質提升，用以化解台灣國防資源有限不利戰力發展的困境。隨著美國對中國高科技管制更加地嚴格，這亦為台灣開啟了一個機會之窗，台灣應能利用本身在半導體產業的優勢地位整合先進技術，從而建構一個可恃而具韌性的國防力量。

國家圖書館出版品預行編目 (CIP) 資料

國防科技趨勢評估報告. 2023 : 國防產業新動力 / 蘇紫雲, 翟文中主編.

-- 初版. -- 臺北市 : 五南圖書出版股份有限公司, 2023.12
面 ; 公分

ISBN 978-626-366-855-3(平裝)

1.CST: 國防戰略 2.CST: 科學技術

595

112020708

**2023 國防科技趨勢評估報告——
國防產業新動力**

出版機關：財團法人國防安全研究院

發行人：霍守業

總策劃：陳明祺

主編：蘇紫雲、翟文中

發行地址：100 台北市中正區博愛路 172 號

電話：(02) 2331-2360

承印商：五南圖書出版股份有限公司

地址：106 台北市大安區和平東路 2 段 339 號 4 樓

電話：(02) 2705-5066

傳真：(02) 2706-6100

網址：<https://www.wunan.com.tw>

版次：初版一刷

出版日期：中華民國 112 年 12 月

定價：新臺幣 500 元整