

模式模擬在武器系統概念設計階段扮演之角色—以高能雷射武器作為防空系統為例

賀增原

網路安全與決策推演研究所

壹、前言

依據武器系統獲得發展的流程，任何武器系統規格從任務需求開始。藉由敵我雙方戰力間隙的評估，首先檢討非軍品解決方案，然後才考慮武器系統的研究發展、性能提升與製造測試。不過如何去分析武器系統適應性與效應性？各軍種歷經每年各式戰訓、演訓與演習，期望藉由模擬「戰場迷霧」來反映實戰場景，反覆檢討成效以便找出缺失，做為改進戰術（戰法）或者更新武器的方向。隨著科技創新，運用新知識和新技術生產新的武器系統，以提高其作戰效能。加上配合新的整體後勤服務，國軍應該隨著時代的進步，選擇系統適應性與效應性，縮短敵我雙方的戰力間隙，以滿足任務需求。

國軍遵守國防自主的政策，在國防法第二十二條揭示「結合民間力量，發展國防科技工業，獲得武器裝備，以自製為優先，向外採購時，落實技術移轉，達成獨立自主之國防建設」。因此，國防部秉持「確立核心、整合能量、策略聯盟、分工合作」原則，運用外部資源，整合民間技術，擴大國防工業產製規模，加速武器裝備生產與部署，積極建立國防自主能量，以厚植國軍戰力發展之基礎。不過，如果強調國防自主，在沒有足夠的研發時間、充足人力、適當的資金投入，如何製造出適合國軍各軍種所需要的武器系統以應付敵情威脅？所以，在有限的資源之下，如何選擇適合國軍實際需要的武器？如何系統性評估所需武器的數量？如何評估出該武器部署的適當位置，則需運用合適的模式模擬來分析，在不同想定、不同場景、依據敵情威脅、戰力間隙、軍種需要，去評估各種

狀況，方可獲得強化戰力的最佳方式。

貳、兵棋推演與模式模擬在武器系統獲得中之角色

兵棋推演的歷史幾乎與人類戰爭史一樣，中國人玩兵棋推演歷史悠久，可以溯源至 4500 年前。¹遠古時代，部落之間的攻打，粗略在沙地上模擬進攻的路線，到後來象棋、圍棋、西洋棋等遊戲，皆可以視為一種簡單的兵棋推演。《國軍軍語辭典》定義「兵棋」（Wargame）乃「戰術研究的一種技術，係按照規定之推演規則，模擬實戰之各種狀況，運用計畫作為因素，以分析某一科目所涉及各種行動方案」，其可分為「決策推演型兵棋」（Decision-Making Games）與「分析性兵棋」（Analytic Wargames）兩類。然而，兵棋推演的種類一般可以分為：「議題式兵推」、「桌上兵推」、「電腦兵推」等三類，並且隨著資訊科技的發展，電腦兵推使用模式模擬的軟體，以及結合親身體驗的擴增實境（Augmented Reality, AR），增加受訓者的感受。²本文將限縮兵棋推演於模式模擬，利用模式模擬的評估去發展武器的規格，藉由系統整合、安裝、測試去驗證武器發展的技術備便水準（Technology Readiness Level, TRL），如圖 1。接著發展完成的武器系統，如何去取捨武器數量的多寡？如何在有限國防預算下，去平衡國防自主與引進技術支援以提升國防戰力？以下各節會以模式模擬為核心，來闡述彼此之間的關聯性。

¹ 譚傳毅，〈國戰會論壇〉兩岸的兵棋推演 誰的真、誰的假？，〈中時新聞網〉，<https://www.chinatimes.com/opinion/20211106000055-262110?chdtv>。

² 〈軍事智慧化擴增實境（AR）兵棋推演系統〉，〈全球動力科技股份有限公司〉，2020 年 3 月 11 日，<http://www.bigxreality.com/tw/blog/detail/51/>。

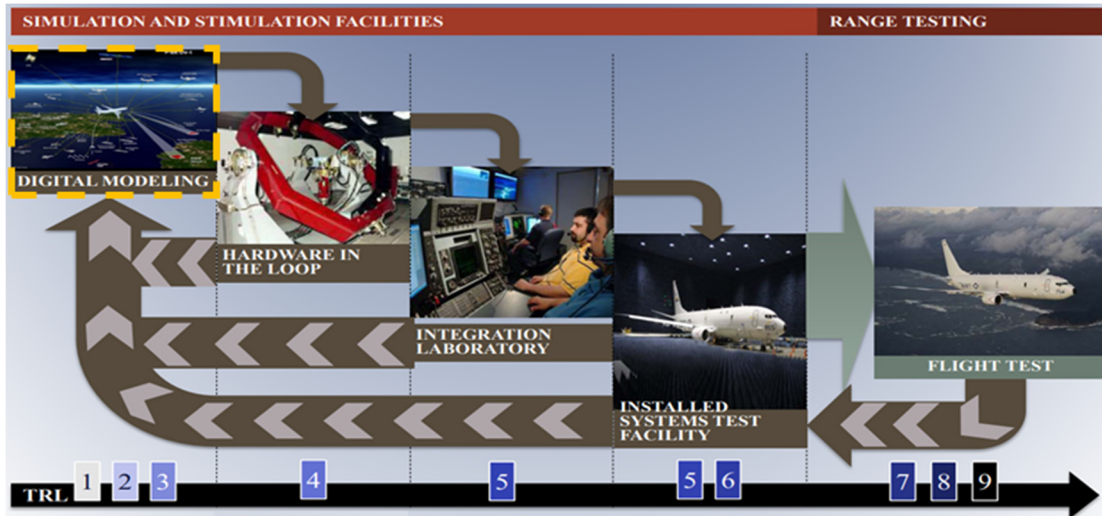


圖 1、模式模擬在系統發展的角色

資料來源：John Auburn, Paola Pringle, “Test and Evaluation in Acquisition of Capabilities,” 34th Annual International Test and Evaluation Symposium, October 2-5, 2017

一、戰略到戰術執行彼此之間的驗證

烏俄戰爭從 2022 年 2 月 24 日開始，作戰迄今，仍然未見結束的跡象；弱勢防守的烏克蘭，如何挺住俄羅斯大規模的進攻，依據報章媒體報導，其初期所憑藉不是威力十足的戰機、戰車等主力裝備，而是靠刺針、標槍飛彈等反裝甲小型兵器立功。³加以戰爭是對意志的考驗，配合各項後勤的支援，以及人民的決心與勇氣。使得烏克蘭可以弱敵強，發揮保家衛國的精神。

至於我國，共軍不斷加強攻擊演練，從「拒止作戰」、「導彈攻擊」、「海上封鎖」、甚至「空中攻擊梯隊」與「空中作戰管制」；我國的戰略構想從「濱海決勝、灘岸殲敵」，演進「多維防禦、重層阻殲」的方向。如此的更改，背後的意涵是什麼？近年來我國研製攻擊武器發展有成，包括雄二 E 巡弋飛彈、空軍萬劍彈、海軍雄風三型超音速反艦飛彈等；外購的武器系統，也因為美中關係破裂，而獲得大幅度成長，未來服役的岸射魚叉反艦飛彈、M142 海馬斯多管火箭與陸軍戰術飛彈（ATACMS）、增程型距外陸攻飛

³ 呂昭隆，〈新聞透視〉建軍政策急轉彎 勿以人廢言〉，《中時新聞網》，<https://www.chinatimes.com/newspapers/20220314000298-260118?chdtv>。

彈（SLAM-ER）等，都讓我國擁有跨海打擊的能力。⁴不過戰略的改變，落實到戰術的執行，需要藉由不斷的戰演訓去考核，至於新式的武器系統，也需要藉由兵棋系統模式模擬，以評估及驗證新戰術的成效。

二、戰略位置部署考量武器數量的多寡

延續前一節論述，所以不同戰略間並沒有相互衝突，反倒是可以相輔相成。所謂「多維防禦、重層阻殲」的新戰略其實也可以整合小型、分散、機動、精準、致命武器的部署，畢竟在有限的國防預算情況下，以及國內少子化的衝擊，更彈性的武器採購、更多元的武器部署、更精準的彈藥選擇，這些層面背後往往需要大量的計算，客觀的分析數據，以及實際戰演訓去驗證，運用兵棋系統進行模擬，將可以藉由多次的演算去承擔這種角色。

三、武器系統成本效益評估

模式模擬有其系統的限制與條件，所謂「Garbage in, Garbage out」，因此合適的想定，訓練有素的分析者著實重要。結合兵棋模式模擬中的演算法則（algorithm），分析評估系統執行之後的數據，以瞭解作戰效益。以導彈防禦為例，如何透過不同的防禦系統，做高、中、低的防禦與搭配，來防禦政府機關、軍事單位、民生設施等，皆可藉由兵棋系統模擬對方來襲不同的導彈及數量，瞭解對我國不同目標的摧毀情況；及衡量不同設施的防禦能力。也可以評估我方不同防空系統的部署、數量，以及需要增援部隊的影響；藉由執行模擬模式軟體之後，可以將防禦飛彈的獲得成本代入整個評估模式計算，以期能獲得最佳的戰力組合。

四、國防自主與技術支援的平衡

對外軍事採購可以引進國外先進系統的技術，並且藉由技術的

⁴ 王臻明，〈濱海決勝或重層阻殲？從「整體防衛構想」看台海防禦思維的論辯〉，《聯合報》，<https://opinion.udn.com/opinion/story/120873/5240865>。

提昇以增進國防自主，不過彼此之間該如何取得平衡？向國外採購，將減少國內勞工製造、組裝，甚至研發經費；而國防自主相對的可以增進國內就業市場、提高人民就業機會、增加經濟效益；不過，除軍品的研發條件較為嚴苛，在國軍有限批量的投資效益，以及戰備急需的時程壓縮考量下，將造成廠商投資意願降低。尤其是武器系統在小批量產的初期階段，一般國內有資格的廠商，在考慮承受極大風險的條件下，常常不願意冒然投資研發，而喪失武器系統在日後大批量產的商機。有鑑於此，模式模擬更顯得其重要性。武器系統的研發由敵情威脅、作戰場景的模擬、研發中可能產生應力集中、機械干涉、人因介面、化生放核的考慮、電信（電力）界面的整合，以至於武器系統的組裝，由模式模擬整合各式物理模式的模擬，甚至結合人工智慧的擴增實境讓軍種需求者，可以體驗到新式武器系統操作的過程，減少初期研發過程的成本與時間，達到快速部署的目的。

參、模式模擬個案探討

個案探討先從敵情威脅開始，假定共軍持續運用各式無人機侵擾台海周邊空域，進行各種模擬攻防演練與情資搜索。本案參考先進國家投資研發的高能雷射武器 60 千瓦作為反制無人機的方法，另外配上防空飛彈，具有兩種不同防空系統，將相關想定輸入 CMO 專業版模式模擬軟體進行模擬。個案採用體系工程的概念，運用客觀分析方法去評估無人機與巡邏艇任務效能，並且進一步瞭解無人機與巡邏艇的戰鬥績效、甚至可以在技術階層去評估無人機攻艦飛彈、巡邏艇防空飛彈與高能雷射武器各別表現，此模擬結果可以提供未來高能雷射武器部署在海基載台時呈現的效能。

一、想定設計

想定設計藍方為我國 E 型艇，「加裝」艦載高能雷射武器系統（系統內選擇，目前我國並未擁有艦載高能雷射武器系統，該系統

擁有 60 千瓦)；與 W 型艇，搭配 2 × 8 聯裝 (海劍二型防空飛彈)；紅方為解放軍派遣兩架不同型的無人機：彩虹 5 型 (CH-5) 4 架，搭載 AR-1 (攻艦飛彈 6 枚)；翼龍 2 型 (GJ-2) 4 架，搭載 LJ-7 (攻艦飛彈 6 枚)。利用三種不同想定包含攻擊方與防禦方，其載具與武器數量如表 1。軟體內執行高能雷射接戰情況立體示意圖如圖 2 (a)、以及高能雷射接戰情況平面示意圖如圖 2 (b)。

表 1、CMO 模式作戰想定

想定	紅方 (攻擊方)			藍方 (防禦方)		
	一	二	三	一	二	三
載具(數量)	GJ-2(4) +CH-5(4)	GJ-2(4) +CH-5(4)	GJ-2(4) +CH-5(4)	E 型艇 (1)	W 型艇 (1)	E 型艇 (1)+W 型 艇(1)
武器(數量)	LJ-7(6) +AR-1(6)	LJ-7(6) +AR-1(6)	LJ-7(6) +AR-1(6)	雷射(∞)	海劍二 型(16)	雷射(∞) +海劍二 型(16)

資料來源：作者整理。

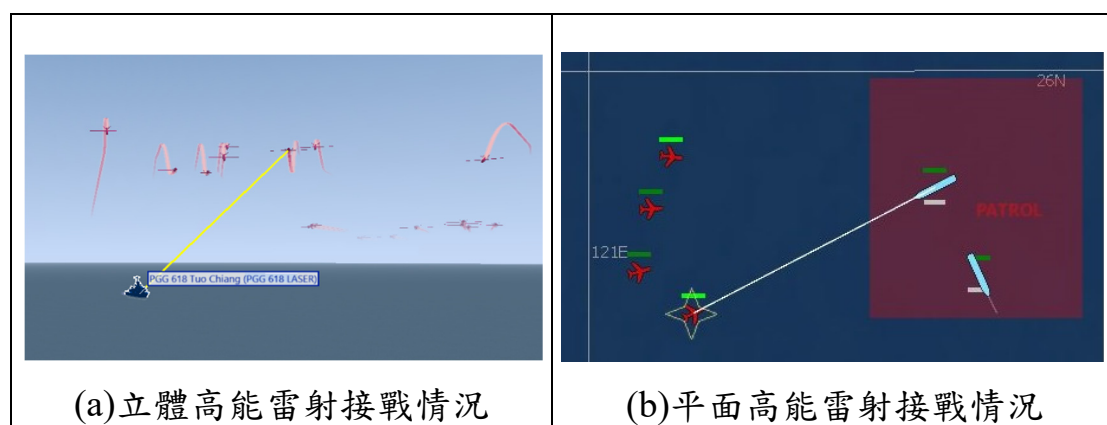


圖 2、高能雷射接戰情況示意圖

資料來源：作者整理。

二、分析方法

個案採用體系工程 (System of Systems) 為分析方法，因此考量派遣 2 艘具有不同防空系統的巡邏艇，去接戰無人機與武器；在體系階層由於同時考慮兩艘艦艇接戰狀況，因此任務效能比率

(Mission Effectiveness Rate, MER)⁵ 是一種整體艦隊防空的模擬，其數學式如下：

$$MER = \frac{\sum_{i=1}^n ns_i \times Cboat_i}{\sum_{i=1}^n nv_i \times Cuav_i} \quad (1)$$

方程式(1)中， ns 代表巡邏艇艘數， $Cboat$ 代表巡邏艇獲得成本； nv 代表無人機架數， $Cuav$ 代表無人機獲得成本。

系統階層則是分別探討 E 型艇、W 型艇、翼龍 2 型與彩虹 5 型各系統的摧毀比率，其意思為以上各式武器系統在整個交戰過程中被擊中 (hit) 或者被擊毀 (kill)，擊毀的意思是擊中一次立刻喪失功能，擊中多次墜地或者油料不足，最後造成整個功能喪失謂之摧毀 (destroy)，數學式如下：

摧毀比率 (Destroyed Rate, DR)

$$DR = \frac{\sum_{i=1}^n nd_i}{\sum_{i=1}^n nt_i} \quad (2)$$

方程式(2)中， nd 代表摧毀個數， nt 代表載具總個數 (此載具代表巡邏艇與無人機)。

技術階層中則是考慮攻艦飛彈 LJ-7、AR-1 與高能雷射與防空飛彈 (海劍二型)，各式武器擊毀比率與未命中比率數學式如下：

技術階層的擊毀比率 (Kill Rate, KR)

$$KR = \frac{\sum_{i=1}^n nk_i}{\sum_{i=1}^n nf_i} \quad (3)$$

方程式(3)中， nk 代表擊毀個數， nf 代表發射個數 (此發射武器包含攻艦飛彈、防空飛彈與雷射武器)。

未命中比率 (Miss Rate, MR)

$$MR = \frac{\sum_{i=1}^n nm_i}{\sum_{i=1}^n nf_i} \quad (4)$$

⁵ Qijia Yun, Bifeng Song and Yang Pei, "Modeling the Impact of High Energy Laser Weapon on the Mission Effectiveness of Unmanned Combat Aerial Vehicles", *IEEE Access*, Vol. 8, 2020, pp. 32246-32257.

三、執行成果

結合 E 型艇與 W 型艇將執行完數據代入數學式(1)至數學式(4)，在 CMO 專業版模式模擬軟體中執行蒙地卡羅 50 次，作戰期程為 4 小時。可以評估雷射武器體系階層的任務效能比率（有效位數取小數點後兩位）如表 2。

表 2、任務效能比率

想 定	一	二	三
不同階層	60kW(系統)	防空飛彈(系統)	60kW+防空飛彈(體系)
任務效能比率	MER ₁ =0.00	MER ₂ =0.18	MER ₃ =0.00

資料來源：作者整理。

表 2 中 MER 為 0 代表藍方沒有損失，想定二 MER₂=0.18，代表其中 W 型艇有一艘被摧毀，而紅方翼龍 2 型與彩虹 5 型分別被摧毀 200 架與 199 架，其中 E 型艇獲得成本 21 億元，⁶W 型艇獲得成本 54.7 億元，⁷翼龍 2 型獲得成本 3 千萬元，彩虹 5 型獲得成本 1.2 億元，⁸因此任務效能比率為 $(\frac{1 \times 54.7}{199 \times 1.2 + 200 \times 0.3} = 0.18)$ 。

系統階層中巡邏艇（E 型艦與 W 型艦）與無人機（翼龍 2 型與彩虹 5 型）摧毀比率，在雷射武器 60kW 執行後數據代入數學式(2)，可獲得表 3。

表 3、摧毀比率

系統(摧毀比率)	E 型 艦	W 型 艦	翼龍 2 型	彩虹 5 型
60kW	0	N/A	1	1
防空飛彈	N/A	0.02	1	1

資料來源：作者整理。

說明：數據 0 代表沒有被摧毀，1 代表全數被摧毀。

由表 3 中可以觀察來襲 4 架無人機，無論是高能雷射，或者是

⁶ 涂鉅旻，〈立委「異」見多 沱江艦、潛艦預算擇日再審〉，自由時報，2018 年 11 月 29 日，<https://news.ltn.com.tw/news/politics/breakingnews/2628187>。

⁷ 羅添斌，〈立委批沱江級量產單艦成本暴增 8.2 億元 海軍：戰備彈藥量納入採購〉，自由時報，2021 年 10 月 09 日，<https://news.ltn.com.tw/news/politics/breakingnews/3698676>。

⁸ <https://www.defenceprocurementinternational.com/features/air/>，檢索日期：2022 年 12 月 22 日。

防空飛彈，均可以全數殲滅。

技術階層擊毀比率與未命中比率，先整理防空武器與攻艦飛彈三種不同想定，軟體執行數據如表 4。

表 4、防空武器與攻艦飛彈各式數據

想 定	交 戰	擊 毀 比 率	未 命 中 比 率
一	雷射對翼龍	0	0.71
	雷射對彩虹	0	0.68
二	海劍二型對翼龍	0.68	0.32
	海劍二型對彩虹	0.67	0.33
	AR-1 對 W 型艦	0	0.67
三	海劍二型對翼龍	0.65	0.33
	海劍二型對彩虹	0.66	0.37

資料來源：作者整理。

表 4 中擊毀比率為 0，表示未擊毀目標，數據愈大，代表擊毀目標數量愈多；未命中比率數據愈大，則代表未命中目標數量愈多；另外由於系統內建除了擊毀目標、未命中目標、還包含擊中 (hit) 與燃料用盡，本文不列入考慮。數據中也可以解釋為何雷射對無人機擊毀 (kill) 為 0，因為高能雷射要一次擊毀無人機，在物理上是不可能，必須擊中 2 至 3 次甚至無人機飛到燃料用盡、才會摧毀。另外在想定三中由於海劍二型射程較高能雷射遠，因此可以發現軟體會執行出其擊毀比率較高，而雷射在軟體中僅發射 33 次，擊中 9 次，沒有擊毀機率。

個案分析中未獲得中共攻艦飛彈成本，因此未進行成本效益分析；另外，由於高能雷射武器在國內是屬於先進關鍵技術，目前正處於研發階段，相關數據資料必須保密。因此本文參考國外文獻，在功率 25 千瓦，波長 1.064 微米，在間隔 5 毫秒照射 6061 鋁合金厚度 0.18 公分，歷時 4 秒，造成 13x13 平方公分的孔洞，⁹以證實系統

⁹ C. D. Boley, K. P. Cutter, S. N. Fochs, P. H. Pax, M. D. Rotter, A. M. Rubenchik, R. M. Yamamoto,

內建的數據具有一定可信度。本個案執行接戰的效果，可以提供未來在進行武器系統與載台整合時作戰效能的參考。

肆、結論

由於中共對我國軍事威脅日益增高，本院身為國家級的智庫，可以運用客觀的分析工具，協助提供武器系統在概念設計階段的兵推性能參考方向。本文從戰略到戰術執行，模式模擬可以在其中扮演評估與驗證的角色；接著說明戰術位置中部署武器數量多寡、武器系統防禦的能力、武器系統獲得的成本，在執行模式模擬後進一步可以評估成本效益；然而在國防自主的政策下，如何平衡國外與國內的技術，如採用合適的系統，減少實驗的次數，縮短研發的時間，提升國內武器系統生產的技術，達到快速部署滿足國軍任務的需求。接著利用個案探討來評估先進系統—高能雷射武器系統與防空飛彈迎戰來襲無人機的任務效能比率、無人機與巡邏艇摧毀比率、防空武器與攻艦飛彈擊毀比率與未命中比率等，藉由個案模擬評估可以探討現有與未來可能獲得的武器系統之間搭配的效益，以提供建案者對未來武器系統的運用獲得進一步的概念。

本文作者賀增原為國防大學中正理工學院國防科學研究所博士，現為財團法人國防安全研究院網路安全與決策推演研究所研究員。主要研究領域為：決策分析、國防武器獲得管理、系統工程。

“Interaction of a High-Power Laser Beam with Metal Sheets,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 107, No. 4, February 2010, 043106, <https://doi.org/10.1063/1.3284204>.

The Role of Model Simulation in the Conceptual Design Phase of a Weapon System: High-energy Laser Weapon as an Air Defense System

Tzeng-Yuan, Heh

Division of Cyber Security and Decision-Making Simulation

Abstract

According to the process of weapon acquisition development, any weapon system's specifications start from mission needs. By evaluating the combat capability gap between the enemy and us, non-materiel solutions are reviewed before considering the research and development, performance enhancement, and manufacturing testing of weapon systems in this paper. However, with technological innovation, new knowledge and new technology are used to produce new weapons systems to improve the effectiveness of weapons in combat. In addition, coupled with the new overall logistics service, the ROC military can choose the better adaptability and effectiveness of the system to close the capability gap between the enemy and our military along with the progress of the times to meet mission requirements.

The Ministry of National Defense adheres to the principles of "core establishment, energy integration, strategic alliance, and division of labor and cooperation", combines external resources, integrates civilian technologies, expands the scale of defense industry production, accelerates the production and deployment of weapons and equipment, and actively establishes independent national defense capacity to strengthen the foundation for the development of the national military's combat capabilities. In this paper, the best way can be found by applying model

simulations to perform various situations in different scenarios, according to military needs, enemy threats, and capability gaps between combat forces.

Keywords: Defense Strategy, Military Technologies, Modeling Assessment of War