

美、中航艦艦載機出動能力模擬分析

謝沛學

網安與決策推演研究所

壹、前言

中國第三艘航空母艦「福建號」(Type 003 *Fujian*)於2022年下水，並開始進行海上測試，代表了解放軍對第一島鏈所施加的軍事壓力達到新高。美、中兩強的海上競爭進入白熱化，亦引發對兩國航艦作戰能力的分析與比較。¹ 正如同「垂直發射系統」(Vertical Launch System, VLS)的發射單位元數量，在評估驅逐艦與潛艦等戰鬥艦艇作戰能力上的角色；作為投射空中武力的海上平台，衡量航空母艦作戰能力最關鍵的指標之一，即「艦載機出擊架次率」(Sortie Generation Rate, SGR)。² 以美海軍為例，不僅航艦打擊群(Carrier Strike Group)指揮官需要參照SGR來擬定每趟任務的作戰與後勤整補計畫；海軍也經常以最新技術將為新建造的航艦提升多少比例的出擊架次率，作為向國會爭取預算之說帖。³

因此，本文先建立計算「艦載機出擊架次率」的數學模型，並選擇美海軍演習的實際數據為基準案(Baseline)，透過數值計算軟

¹ Kyle Mizokami, "China Confirms It's Building a 4th Aircraft Carrier—and the Tables Are Turning," *Popular Mechanics*, Mar 12, 2024, <https://www.popularmechanics.com/military/navy-ships/a60116121/china-building-a-4th-aircraft-carrier>; Brandon J. Weichert, "China's New Aircraft Carriers Have a 'Sizeable Edge' over U.S. Navy for 1 Reason," *National Interests*, September 5, 2024, <https://nationalinterest.org/blog/buzz/chinas-new-aircraft-carriers-have-sizeable-edge-over-us-navy-1-reason-209948>; Sam Roggeveen, "Chinese Aircraft Carrier's Voyage Hints at Plan for 'Post-U.S.' Navy" *Nikkei*, May 17, 2024, <https://asia.nikkei.com/Opinion/Chinese-aircraft-carrier-s-voyage-hints-at-plan-for-post-U.S.-navy>.

² Aidan Quigley, "Downey Confident Ford Can Meet Sortie-generation Rate Requirement," *Inside Defense*, January 24, 2022, <https://insidedefense.com/daily-news/downey-confident-ford-can-meet-sortie-generation-rate-requirement>; Loren Thompson, "The Logic of Aircraft Carrier Strike Groups," *Lexington Institute*, September 2019, <https://www.lexingtoninstitute.org/wp-content/uploads/2019/10/Brief-The-Logic-of-Aircraft-Carrier-Strike-Groups2.pdf>.

³ Admiral S. J. Paparo, "Aircraft Carriers: Still Indispensable," *USNI Proceedings*, July 2024, <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2024/july/aircraft-carriers-still-indispensable>.

體 MATLAB 進行隨機模擬。⁴若本文建立的數學模型所得之數據與基準案之間沒有統計上的顯著差異，再進一步對「福建號」進行模擬，比較美、中航艦在出擊架次率上的不同。本文試圖建立單艘航艦艦載機最大出擊能量的分析模型，作為後續相關研究之基礎。

貳、艦載機起降能力數學建模

一、艦載機起降作業流程

如圖 3-1 所示，航空母艦艦載機出動流程依作業場域可劃分為「航艦端」與「空中端」兩大區塊，並依序分別由「彈射」、「空中任務」、「降落回收」與「後勤維保」四個階段所組成。在「彈射」階段（圖 3-1 中的梯型圖示），當日排定第一波出發的艦載機，經過前一天任務結束後的維護補保，已預先於停機區待命，一旦接獲出擊命令，立即滑行至律定的彈射位置進行彈射起飛。「空中任務」階段（圖 3-1 中的菱型圖示），已起飛的艦載機則在航艦附近空域盤旋與加油，等待僚機陸續起飛後，編隊飛往指定的集結區執行任務。⁵

「降落回收」階段（圖 3-1 中的橢圓型圖示），結束任務返航的艦載機群，於距離航艦約 5 海里左右的上空盤旋，形成數個所謂「馬歇爾堆疊」（Marshall Stack）的等待降落隊列圈，再依順序陸續進場，於「斜角甲板」（Angled Flight Deck）著艦降落；未能順利著艦者，如下降角度不佳等因素，造成艦載機攔阻索掛勾失敗時，需立即拉起復飛，重新加入空中的等待降落隊列圈。⁶成功降落後，則進入第四個階段「後勤維保」（圖 3-1 中的四方型圖示），由甲板後勤小

⁴ MATLAB 為 The Math Works 所開發的程式語言，可用於演算法開發、數值模擬計算與資料分析。本院 War Room 引進的版本為 R2023b。

⁵ Rajarshi Ghosh Dastidar and Emilio Frazzoli, “A Queueing Network Based Approach to Distributed Aircraft Carrier Deck Scheduling,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, March 2011, <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2011-1514>.

⁶ 這種攔截索掛勾失敗，必須拉起重飛的狀況，美軍專門術語稱之為“Bolter”，詳見“NATOPS General Flight and Operating Instructions,” *Office of the Chief of Naval Operations*, <https://www.cnatra.navy.mil/tw6/vt10/assets/docs/training/cnaf-3710.7.pdf>; LCDR Joe “Smokin” Ruzicka, “How To Land A Fighter On An Aircraft Carrier On A Stormy Night,” *The War Zone*, July 2, 2020, <https://www.twz.com/3559/how-to-land-a-fighter-on-an-aircraft-carrier-on-a-stormy-night>.

組牽引至停機位進行檢測。未出現毀損與故障的艦載機，直接在甲板上進行加油與彈藥補充等後勤工作；升降機則是將故障或需大幅保養的艦載機調運至下層機庫甲板，並直接以機庫備援的妥善機替換，避免維修任務佔用停機位與跑道，影響飛行甲板起降作業。⁷

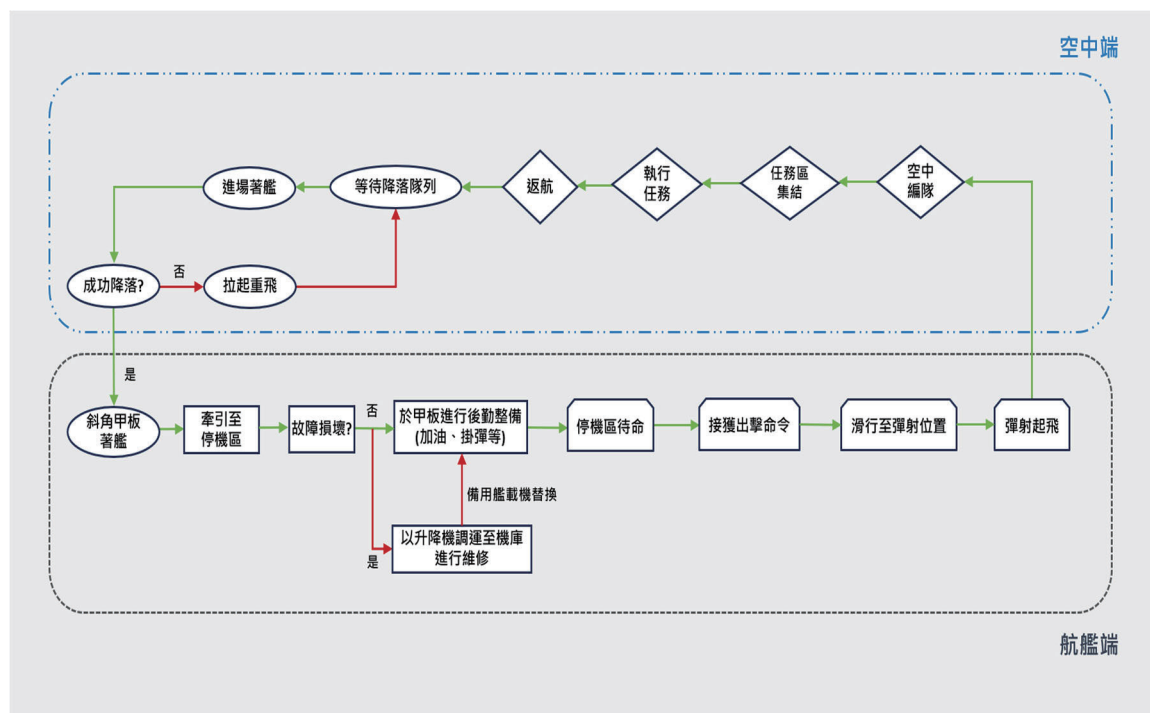


圖 3-1、艦載機起降作業流程圖

資料來源：作者自製。

二、出擊架次數學模型

「艦載機出擊架次率」係指，一艘航空母艦上部署的艦載機，在一個飛行任務日內，完成了從「彈射」、「空中任務」、「降落回收」再到「後勤維保」，完整的「任務週期」(Mission Cycle)之平均出擊次數。⁸以美國海軍的運作模式為例，一個任務週期以 1 小時為基準，並依任務目標與性質的不同，向上疊加所需的額外時長間隔，如 1+5 週期，即該任務預計於 65 分鐘內完成；1+10 則是 70 分鐘

⁷ Aircraft Elevators and Ship Lifts for Aircraft Carriers” Defense Redefined, August 29, 2022, <https://defencereDEFINED.com.cy/l3harris-aircraft-elevators-and-ship-lifts-for-aircraft-carriers-photos/>; “Brief analysis of aircraft carrier elevators,” *Inertial World*, August 15, 2024, <https://inertialworld.com/post/7a35bd49-b13b-459e-8326-577226330d5b>.

⁸ James W. Harris, Jr., “The Sortie Generation Rate Model,” *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2002, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1172972>.

的任務週期，並以此類推。儘管理論上，任務週期越短，每個任務日所能執行的任務波次就越多；唯 1+00 週期所能提供甲板調配輪轉的作業時間過短，對後勤人員甚至是飛行員的負荷過重，無法作為常態性的任務模式。⁹ 每架艦載機能夠執行的任務週期回合數，除了取決於單一任務週期的長度，更受限於飛行任務日的總天數與總時數。例如：「雷根號」航艦戰鬥群（USS Ronald Reagan CVN-76）赴南海執行為期 5 天的演訓任務；根據演訓目標，律定每個飛行任務日程為橫跨晝夜共 12 小時（12:00 至 24:00）。若任務週期採 1+10 時長，此次 5 天的演訓任務期間，約有 51 個任務週期回合供「雷根號」艦載機群進行晝夜起降訓練。因此，一艘航空母艦艦載機總出擊架次的具體計算方式為，可表為如下公式：

$$N_{\text{總出擊架次}} = \left(\frac{T_{\text{任務週期時長}}}{T_{\text{單機完成任務週期}}} \right) N_{\text{任務週期回合數}} N_{\text{艦載機總數}} \dots\dots\dots (1)$$

其中， $T_{\text{任務週期時長}}$ 與 $N_{\text{任務週期回合數}}$ 依任務目標與性質律定，本文不再贅述。從前述第一小節航艦艦載機出動作業流程可知，一個完整的任務週期可分為「空中端」與「航艦端」兩大階段，因此：

$$\begin{aligned} T_{\text{單機完成任務週期}} &= T_{\text{空中端}} + T_{\text{航艦端}} \\ &= T_{\text{空中任務}} + T_{\text{降落回收}} + T_{\text{後勤維保}} + T_{\text{彈射}} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

⁹ Angelyn Jewell and Maureen A. Wigge ed., “USS Nimitz and Carrier Airwing Nine Surge Demonstration,” *The Center for Naval Analyses*, April 1998, <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA362472>.

而 $T_{\text{空中任務}}$ 又可拆解為「空中編隊」、「任務區集結」、「作戰停留」與「返航」四個部份，表為如下算式：

$$T_{\text{空中任務}} = T_{\text{編隊}} + T_{\text{任務區集結}} + T_{\text{作戰停留}} + T_{\text{返航}} \dots\dots\dots (3)$$

其中「任務區集結時間」與「返航時間」分別可由「任務區航程」除以艦載機「巡航速度」(Cruise Speed)求得。「作戰停留時間」則可由艦載機「作戰半徑」(Combat Radius)除以艦載機「戰鬥速度」(Military Speed)求得。必須注意的是，作戰半徑的計算並非直接取「最大航程」(Maximum Range)的一半。因為除了考量往返航程，艦載機還需預留一定的燃料供戰區上空停留之用。基於經驗法則，一般將「最大航程」劃為三等分，扣除往返航程所需的各一段作戰半徑，剩餘的三分之一距離則是艦載機抵達戰區後的燃料冗餘。¹⁰

$$T_{\text{任務區集結}} = T_{\text{返航}} = \frac{\text{任務區航程}}{\text{巡航速度}}$$

$$T_{\text{作戰停留}} = \frac{\text{作戰半徑}}{\text{戰鬥速度}} \dots\dots\dots (4)$$

決定 $T_{\text{降落回收}}$ 的關鍵因素之一在於艦載機「是否重飛」。雖然理論上艦載機可能因為失誤而必須進行多次重飛，在美海軍運作實務上，單架次重飛超過一次的機率微乎其微。因此，本文設定單架艦載機在單次任務週期內，最多重飛一次。需要進行重飛的艦載機，其降落所耗費的總時長則為正常成功著艦降落艦載機的 2 倍，表為如

¹⁰ “Aircraft Combat Radius Calculation Procedure for Various Mission Profiles and External-Store Configurations,” RAND, April 1969, <https://apps.dtic.mil/sti/trecms/pdf/AD0688482.pdf> ; William Stanley and Gary Liberson, “Measuring Effects of Payload and Radius Differences of Fighter Aircraft,” RAND, 1993, https://www.rand.org/pubs/documented_briefings/DB102.html.

下公式 5。其中 μ 為一個服從均勻分佈的隨機數，其範圍介於 0 到 1 之間。¹¹當 μ 數值為 1，代表艦載機降落過程出現失誤，必須重飛； T_{ij} 則代表第 i 架艦載機於第 j 個任務週期進行著艦降落所耗費的時長。

$$\begin{cases} \mu \sim U(0, 1) \\ \text{if } 0 \leq \mu < 1; T_{\text{降落回收}} = T_{ij} \\ \text{if } \mu = 1; T_{\text{降落回收}} = 2T_{ij} \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

成功降落著艦後，影響「航艦端」的「後勤維保」與「彈射」任務耗費時長之關鍵因素，在於「升降機」與「彈射器」的數量。此處可以「作業研究」(Operations Research)領域的「排隊理論」(Queueing Theory)來看，將「升降機」與「彈射」設施類比為服務站，降落的艦載機類比為客戶，服務站的數量與客戶等候服務的時長成反比。此處的數量並非單純的「名目」數量，而是在客戶抵達的當下，處於「可用狀態」的服務站數量。¹²以本文探討艦載機作業為例，航艦的噸位與甲板面積越大，則有更多空間設置「彈射」與「升降」設施，但這只是名目上的設施數量。除了故障率之外，影響設施可用數量的因素，以「甲板同時停放艦載機數量」最為關鍵。在極為有限的甲板空間條件下，同時停機的數量越多，越可能佔據本要作為調運滑行的空間，甚至必須臨時佔用彈射器區域及升降機的空間進行後勤補保，從而增加艦載機接受維護及彈射的等待時間。以美海軍的操作實務與條令規定來看，甲板同時停放艦載機數量上限，除非獲得艦隊司令部的核可，不得超過該航艦所配署艦載機總數的 80%，因為這將造成航艦喪失最基本的彈射起飛，進行緊

¹¹ 本文模擬過程，以 MATLAB 的函數 rand 產生介於 0 與 1 之間的隨機數值，用以計算艦載機降落出現重飛的機率。

¹² Dennis C. Dietz and Richard C. Jenkins, "Analysis of Aircraft Sortie Generation with the Use of a Fork-Join Queueing Network Model," *Naval Research Logistics*, Volume 44, Issue 2, March 1997, pp. 153-228.

急接戰的能力。¹³

本研究分析的美軍「尼米茲號」(USS *Nimitz* CVN-68) 航艦設置有四條彈射器 (Catapult) 與四座升降機 (Elevator)；解放軍的「福建號」則有三條彈射器與二座升降機。如下方公式 6 與 7 所示，在模擬計算的設定上，此處依美軍的操作經驗，設定排水量 10 萬噸的「尼米茲號」，其甲板同時停放艦載機數量上限為所配署艦載機總數的 80%，超過此上限則全部彈射器與升降機將無法使用。隨著甲板同時停放艦載機數量按比例遞減，當少於 20%，全部甲板設施的使用皆不受影響；排水量 8 噸的「福建號」，其甲板停機數量上限則設定為 60%，並按比例遞減至 20%。如公式 8 所示，再將「故障率」納入考量，即可分別計算出艦載機降落著艦的當下，甲板可用的彈射器與升降機數量。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{when } C_{\text{彈射}} = 4; E_{\text{升降}} = 4 \\ \text{if } D_{\text{停機數量}} > 80\%; C_{\text{受影響彈射}} = 4, E_{\text{受影響升降}} = 4 \\ \text{if } 80\% > D_{\text{停機數量}} > 60\%; C_{\text{受影響彈射}} = 3, E_{\text{受影響升降}} = 3 \\ \text{if } 60\% > D_{\text{停機數量}} > 40\%; C_{\text{受影響彈射}} = 2, E_{\text{受影響升降}} = 2 \\ \text{if } 40\% > D_{\text{停機數量}} > 20\%; C_{\text{受影響彈射}} = 1, E_{\text{受影響升降}} = 1 \\ \text{if } D_{\text{停機數量}} < 20\%; C_{\text{受影響彈射}} = 0, E_{\text{受影響升降}} = 0 \end{array} \right.$$

..... (6)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{when } C_{\text{彈射}} = 3; E_{\text{升降}} = 2 \\ \text{if } D_{\text{停機數量}} > 60\%; C_{\text{受影響彈射}} = 3, E_{\text{受影響升降}} = 2 \\ \text{if } 60\% > D_{\text{停機數量}} > 40\%; C_{\text{受影響彈射}} = 2, E_{\text{受影響升降}} = 2 \\ \text{if } 40\% > D_{\text{停機數量}} > 20\%; C_{\text{受影響彈射}} = 1, E_{\text{受影響升降}} = 1 \\ \text{if } D_{\text{停機數量}} < 20\%; C_{\text{受影響彈射}} = 0, E_{\text{受影響升降}} = 0 \end{array} \right.$$

..... (7)

¹³ "Navy Aircraft Carriers: Cost-Effectiveness of Conventionally and Nuclear Powered Carriers," General Accounting Office Report, August 27, 1998, <https://www.gao.gov/products/nsiad-98-1>.

$$\begin{cases} C_{\text{可用彈射}} = C_{\text{未受影響彈射}} \times P_{\text{故障}} \\ E_{\text{可用升降}} = C_{\text{未受影響升降}} \times P_{\text{故障}} \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

根據「排隊理論」，我們設單位時間 Δ_t 內到達的艦載機數量為 λ_n ，當 n 達該航艦甲板同時停放數量的上限，則甲板無法再接收艦載機，故 λ_n 為 0（如公式 9 所示）。甲板設施（彈射器與升降機）在單位時間 Δ_t 的平均服務能力為 μ_n ，當 n 超過該航艦甲板可用設施數（ $D_{\text{可用設施數}} = C_{\text{可用彈射}} + E_{\text{可用升降}}$ ）， μ_n 必須服從於 $D_{\text{可用設施數}}$ 的限制，故為 $D\mu$ （如公式 10 所示）。¹⁴

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda, n \in [1, N_{\text{甲板停機上限}} - 1] \\ 0, n \in [N_{\text{甲板停機上限}}] \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

$$\mu_n = \begin{cases} \mu, \text{if } n \in [1, D_{\text{可用設施數}}] \\ D\mu, \text{if } n \in [D_{\text{可用設施數}} + 1, N_{\text{甲板停機上限}}] \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

因此，該航艦的甲板設施在單位時間 Δ_t 的服務強度為 $\rho = \lambda_n / \mu_n$ ，每架艦載機在甲板設施的平均排隊等待時間為：

$$T_{\text{排隊時間}} = \frac{\rho}{\mu_n - \lambda_n} \dots\dots\dots (11)$$

¹⁴ Dennis C. Dietz and Richard C. Jenkins, "Analysis of Aircraft Sortie Generation with the Use of a Fork-Join Queueing Network Model," *op cit.*

參、個案設計

首先，以美海軍的操作經驗為例，艦載機出擊可分為「高峰」模式（Surge Operations）與「持續」模式（Sustained Operations）。¹⁵前者為應對高強度的作戰目標，必須在短時間內全天候、無間斷地出動，投入最大兵力打擊敵戰力。由於對後勤人員與飛行員的負荷過重，「高峰」模式僅能維持數日，通常運用在行動任務初期，敵方防空體系未遭受破壞，仍保有最大作戰能力時，由己方施以飽和打擊並突穿防禦。後者則是追求對敵陣地與目標，長時間、穩定地輸出空中兵力。通常運用在作戰中、後期，敵防禦體系已遭嚴重削弱，己方艦載機持續對剩餘敵軍進行壓制與掃蕩。由於採 12 小時出擊、12 小時休整與補給的輪替節奏，「持續」模式通常可維持數週，甚至達 30 天的作戰長度。¹⁶ 本研究目的在於探究單艘艦載機最大出擊能力，因此想定主軸設為：美、中航艦在第一島鏈海域偵獲的敵方關鍵海上目標，以「高峰」模式投送空中兵力進行飽和打擊。

美太平洋艦隊第三艦隊（Third Fleet, USPACFLT）於 1997 年所進行的「高峰 97」演習，是截至目前為止，對單艘航艦艦載機出擊能力極限值的最大規模測試。¹⁷ 因此，本文以「高峰 97」演習的數據為基準案，先透過數值運算軟體 MATLAB，進行 1 千次的蒙地卡羅隨機模擬，檢視前揭所建立的出擊架次數學公式。倘若該公式所得之「尼米茲號」艦載機出擊架次模擬數據，經統計檢定後，與「高峰 97」演習的結果沒有顯著差異，則進一步以相同方法模擬並得出「福建號」的艦載機出擊數據。幾個關鍵參數，例如任務週期長度、假想敵目標區距離，以及飛行任務日的總天數與總時數等，我們皆參照「高峰 97」演習的實際數據。倘若不對這些參數進行控制

¹⁵ “Navy Aircraft Carriers: Cost-Effectiveness of Conventionally and Nuclear Powered Carriers,” *op cit.*

¹⁶ *Ibid.*

¹⁷ Angelyn Jewell and Maureen A. Wigge ed., “USS Nimitz and Carrier Airwing Nine Surge Demonstration,” *op cit.*

，則因為給予的時間長度條件不同，將嚴重影響航艦艦載機能夠出擊的頻率，所得出的模擬結果不具可比較性。

其次，本研究分析標的之選擇原則，係具有「彈射起飛／攔阻回收」能力（Catapult Assisted Take-Off But Arrested Recovery, CATOBAR），且「滿載排水量」達 8 萬噸以上的「超級航空母艦」（Supercarrier）。¹⁸此類最先進的航艦目前僅美、中兩強有能力建造與操作，而「福建號」更是中國第一艘「超級航艦」，以其作為分析對象當屬合理。至於美軍航艦不選擇最新的「福特號」（USS *Gerald R. Ford* CVN-78），仍以「尼米茲號」的原因在於，除了本研究分析的基準案——「高峰 97」演習係以「尼米茲號」為測驗對象。從目前美海軍的造艦規劃與進度來看，即使到了 2027 年的「戴維森窗口」（Davidson Window），甚至是習近平宣稱中國將「基本實現國防和軍事現代化」的 2035 年，「尼米茲級」各型航艦仍是解放軍海軍面對的最主要對手。¹⁹

再者，航艦艦載機有「定翼機」（Fixed-wing）與「旋翼機」（Rotary-wing）兩類，執行的任務包括「戰鬥」與「戰鬥支援與其他」等項目。前項任務包含奪取空優、對水／地面打擊、對敵防空壓制（Suppress Enemy Air Defense, SEAD）等，基本上由定翼機執行；後項任務則包括空中加油、預警、航艦防衛圈的偵搜與反潛、搜救等，通常由旋翼機與部份定翼機協同執行。以美海軍的操作經驗，「

¹⁸ 「福萊斯特號」（USS *Forrestal* CV-59）航艦是人類史上第一艘達到此標準的超級航艦。

¹⁹ 即使依美海軍原訂的規劃，在 2035 年之前，最多只有 4 艘「福特級」服役，現有的「尼米茲級」則至少還會有 7 艘在役。然而，原訂在 2029 年服役，計劃取代「艾森豪號」（USS *Dwight D. Eisenhower* CVN-69）的「福特級」3 號艦「企業號」（USS *Enterprise* CVN-80），目前傳出進度延宕。在 2035 年之前有 4 艘「福特級」服役的規劃恐落空。Megan Eckstein, “US Navy Mulls Timing of New Double-carrier Award Amid Enterprise Delay,” *Defense News*, October 27, 2023, <https://www.defensenews.com/naval/2023/10/26/us-navy-mulls-timing-of-new-double-carrier-award-amid-enterprise-delay/>.

戰鬥」任務佔了艦載機起降架次的絕大多數比例（約八成）。²⁰本研究僅探討定翼機執行戰鬥任務的起降架次，這除了可簡化模擬分析流程，亦可排除以旋翼機等非戰鬥任務機種的起降，拉高整體艦載機出擊次數，造成該航艦作戰能力不俗的假象與偏誤。此外，本研究亦不考量正在研發測試或甚至仍在「概念假想」（Hypothetical）階段的武器，僅分析已服役的艦載機。透過這些設定，可以避免探討如空警-600 與殲-35 這類遲遲未正式服役的載台。

此外，由於本文試圖以美軍的演習經驗，推論出解放軍「福建號」航艦艦載機「最大出動能力」。故「效益量測指標」（Measure of Effectiveness, MOE）設為攻擊方的艦載機是否能成功起飛至作戰區並返航完成降落，不模擬實際接戰場景，亦不計算攻守雙方的戰損。想定場景中的防守方僅作為目標區示意之用，預設攻擊方的目獲問題已解決，一開局便已獲得守方的部署位置。攻擊方的艦載機飛抵作戰區停留其最大航程三分之一的時間，即判定完成作戰任務，進入返航著艦作業，所掛載的武器僅作為影響艦載機燃料消耗與航程的因素。最後，由於本案探討的是單艘航艦依其自身條件進行艦載機出動能力的測試，故不討論空軍岸基機場出動的定翼機與其它水面艦編隊的協同作戰。本文所使用的武器參數，皆來自於公開情資。

肆、個案探討

本研究的基準案——「高峰 97」演習係由「尼米茲號」航艦所領軍的「第七航艦打擊群」（Carrier Strike Group Seven）與所配署的「第九航空聯隊」（Carrier Air Wing Nine）進行。²¹「尼米茲號」航艦的飛行甲板長度約為 1,092 呎（約 333 公尺）、寬度為 252 呎（約

²⁰ Angelyn Jewell and Maureen A. Wigge ed., “USS Nimitz and Carrier Airwing Nine Surge Demonstration,” *op cit.*

²¹ *ibid.*

76.8 公尺)、總面積至少有 18,211 平方公尺。²² 最大適航吃水 (Max Navigational Draft) 為 40 呎 (約 12.2 公尺), 水線長度為 1,040 呎 (約 317 公尺)、寬度為 134 呎 (約 40.8 公尺), 滿載排水量 (Full Displacement) 可達 10 萬噸以上。此外,「尼米茲號」配備的二座西屋 A4W 核反應爐與四座蒸汽渦輪發動機,可產生約 194 兆瓦的動力,使其最大航速達 30 節以上。²³

如此龐大的體積與甲板面積,讓「尼米茲號」有足夠的空間設置多達四條蒸汽彈射器 (Steam Catapult) 與四座飛機升降機 (Aircraft Elevators)。如下圖所示,紅色線條 1 至 4 標示 4 條彈射器位置,主軸向甲板與斜角甲板分別設有二條彈射器。藍框 1 至 4 分別標示四座升降機位置;其中,三座位於右舷(艦島前二座、艦艏一座)、另一座設於左舷艦艏附近。

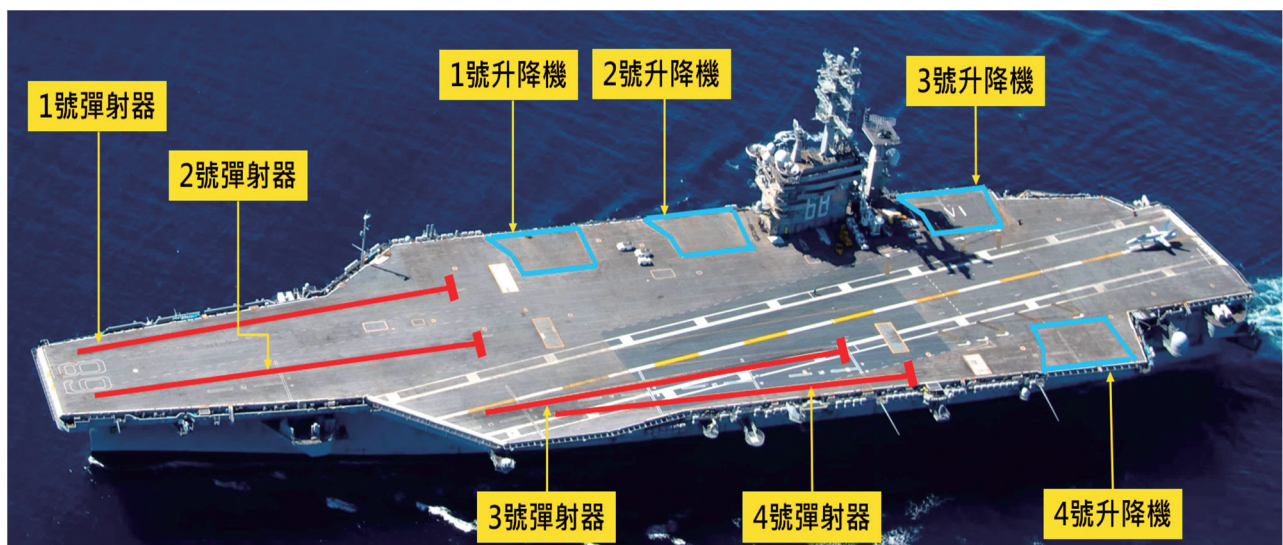


圖 3-2、「尼米茲號」(CVN-68) 甲板配置圖

資料來源：作者修改自原圖，CVN-68 Nimitz-class, Sea Forces,
<https://www.seaforces.org/usnships/cvn/CVN-68-USS-Nimitz.htm>。

²² NAVSEA Shipbuilding Support Office, “USS NIMITZ (CVN 68),” *Naval Vessel Register*, https://www.nvr.navy.mil/SHIPDETAILS/SHIPSDETAIL_CVN_68.HTML.

²³ John F. Schank and Mark V. Arena eds., “Refueling and Complex Overhaul of the USS Nimitz (CVN 68): Lessons for the Future,” *RAND*, April 1, 2002, https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph_reports/MR1632/RAND_MR1632.pdf.

「尼米茲號」航艦最大可搭載約 85 至 90 架艦載機（定翼與旋翼）。²⁴「高峰 97」演習期間，「尼米茲號」部署了共 68 架定翼機，符合甲板最大同時停機數 80% 的上限，其中，執行「戰鬥」任務的機型，如 F-14A、F/A-18C 與 EA-6B 共部署 54 架，亦符合「戰鬥」任務佔所有部署艦載機約 8 成的比例。

表 3-1、「尼米茲號」航艦艦載機配置²⁵

機型	數量	任務內容	武器掛載
F-14A	14	奪取空優	• AIM-54C*4 • AIM-9M*2 • AIM-7P*2
F/A-18C	36	對水面打擊	• AGM-84D*2 • AIM-120A*2
EA-6B	4	對敵防空壓制	• AGM-88C*2 • AN/ALQ-99I ECM POD*2

資料來源：作者自製。

演習期間，「尼米茲號」以平均約 1+20 的任務週期長度，向平均距離約 200 海里遠的數個假想敵目標區投送空中兵力，進行連續 4 天、全天候出動的攻擊與起降演練。排除因為部分因素，無法順利起飛或必須提前中止的出勤，上述各類型艦載機群共完成了 769 架次的「打擊」任務，平均每日每架出擊率為 3.56 次。²⁶

我們透過 MATLAB R2023b，以前揭建立的出擊架次數學公式，對「高峰 97」演習基準案進行 1 千次的蒙地卡羅模擬。運作的系統

²⁴ “Developing Home Port Facilities for Three NIMITZ-Class Aircraft Carriers in Support of the US Pacific Fleet,” *Department of Navy*, July 1999, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA365590.pdf>.

²⁵ 此配置係依照「高峰 97」演習數據，惟目前美海軍的 F-14 已全面退役，「尼米茲號」的艦載機攻擊中隊也已改配署 F/A-18E Super Hornets。

²⁶ 「高峰 97」演習數據的總打擊任務是 771 架次，惟其中有 2 架次是由 S-3B「維京式」反潛機完成。而該機型在演習期間主要是以非戰鬥的支援任務為主（共執行了 88 架次），故在模擬分析上把 S-3B 的 2 架次排除。Angelyn Jewell and Maureen A. Wigge ed., “USS Nimitz and Carrier Airwing Nine Surge Demonstration,” *op cit*.

環境為 Win 11 專業工作站版、Intel Xeon Silver 4208 CPU 2.10 GHz 與記憶體 32GB。所得的模擬數據為「尼米茲號」艦載機群 4 天內共完成了 794 架次的「打擊」任務，平均每日每架出擊率為 3.68 次、標準差為 2.437。

為了比較以數學公式模擬得出的平均出擊率，與「高峰 97」演習實際觀察到的數值之間是否有統計上的顯著差異，此處採取「單樣本 t 檢定」，以雙尾檢定、顯著水準 0.05 的條件，檢定假設如下：

• $H_0: \mu = 3.68$ (兩個日均出擊率數值沒有顯著差異)

• $H_a: \mu \neq 3.68$ (兩個日均出擊率數值存在顯著差異)

由於 $N=1,000$ ，檢定拒絕域的臨界值 $t_{0.05,1000} = \pm 1.96$ ；若 $-1.96 < t_{\text{統計量}} < 1.96$ ，則無法拒絕虛無假設 (H_0)。經計算， $t_{\text{統計量}}$ 為 1.558，並未落在左右端任一拒絕域內，故接受虛無假設 (H_0) 成立，本文建立的艦載機出擊率數學公式所模擬得到的數據，與「高峰 97」演習基準案的結果，沒有統計上的顯著差異。

接著以相同的數學模型對「福建號」航艦進行模擬。「福建號」航艦的飛行甲板長度為 1,036 呎 (約 316 公尺)、寬度為 249 呎 (約 76 公尺)，總面積至少有 16,330 平方公尺，滿載排水量可達 8 萬噸以上。²⁷此外，從船體結構來看，採傳統動力的「福建號」至少可配備不亞於前型「山東號」數量的柴油發動機，並搭配數座渦輪發動機。雖然詳細的發電機型號與動力未知，若以前型「山東號」航艦的速度來推估，「福建號」最大航速應亦可以達 30 節以上。²⁸

²⁷ “How Advanced Is China’s Third Aircraft Carrier?” *China Power Project CSIS*, <https://chinapower.csis.org/china-type-003-fujian-aircraft-carrier/>.

²⁸ Richard Thomas, “What we know about the Fujian, China’s new aircraft carrier,” *Naval Technology* May 9, 2024, <https://www.naval-technology.com/news/analysis-what-we-know-about-the-fujian-chinas-new-aircraft-carrier/?cf-view>.

不同於美軍「尼米茲號」的四彈四升配置，「福建號」僅設有三條電磁彈射器（Electromagnetic Catapult）與二座飛機升降機。如下圖所示，紅線 1 至 3 標示三條彈射器位置，由於「福建號」的斜角甲板角度較小，向外延展的空間不足，故僅能設置一條彈射器。藍框 1 至 2 分別標示二座升降機位置，皆位於右舷（艦島前後各一座）。

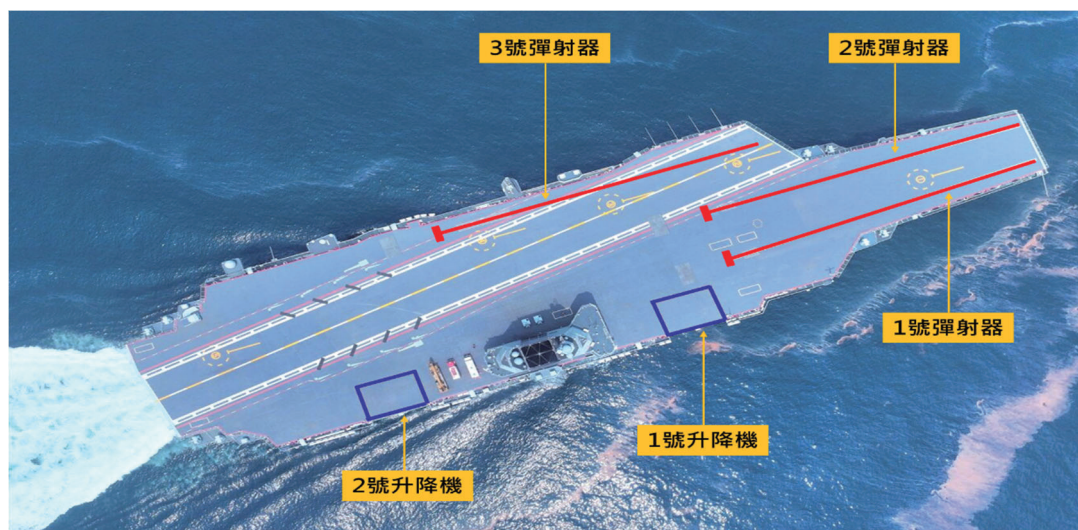


圖 3-3、「福建號」甲板配置圖

資料來源：作者修改自原圖，〈中國海軍福建艦順利完成首次航行試驗，達到預期效果〉，《俄羅斯衛星通訊社》，
<https://big5.sputniknews.cn/20240508/1058884587.html>。

以公情資料來推估，「福建號」航艦最大可搭載約 60 架艦載機（定翼與旋翼）。²⁹ 此處依前揭建立的公式律定，「福建號」甲板最大同時停機數上限約為最大可搭載數量的 60%；其中，執行「戰鬥」任務的機型，如 J-15T 與 J-15D，則律定約佔所有部署艦載機約 8 成以上的比例，本文設定總共 34 架，任務掛載簡述如下：

²⁹ Ibid.

表 3-2、「福建號」航艦艦載機配置

機型	數量	任務內容	武器掛載
J-15T	10	奪取空優	• PL-15*6 • PL-10*2
J-15T	22	對水面打擊	• YJ-83K*2 • PL-8C*2
J-15D	2	對敵防空壓制	• YJ-91*2 • PL-8C*2

資料來源：作者自製。

我們同樣透過 MATLAB 進行 1 千次的蒙地卡羅模擬，上述「福建號」艦載機群共完成了 403 架次的「打擊」任務，平均每日每架出擊率約為 2.96 次、標準差為 1.751。在採取「單樣本 t 檢定」，雙尾檢定、顯著水準 0.05 的條件下，比較「福建號」與「尼米茲號」艦載機群日均出擊率差異的檢定假設如下：

- $H_0: \mu = 2.96$ （福建號與尼米茲號日均出擊率**沒有**顯著差異）
- $H_a: \mu \neq 2.96$ （福建號與尼米茲號日均出擊率**存在**顯著差異）

由於 $N=1,000$ ，檢定拒絕域的臨界值 $t_{0.05,1000} = \pm 1.96$ ；若 $-1.96 < t_{\text{統計量}} < 1.96$ ，則無法拒絕虛無假設（ H_0 ）。經計算， $t_{\text{統計量}}$ 為 -7.419，落在左端拒絕域內，故拒絕虛無假設（ H_0 ）的成立，「福建號」與「尼米茲號」艦載機群日均出擊率的模擬數據，確實存在統計上的顯著差異。

由於本研究已經控制任務週期時長等參數，亦不考量飛行員與甲板人員因素對艦載機出擊的影響（註：本文假定解放軍航艦人員的訓練度和技術水準與美軍相當）；因此，我們可以推論，造成美

、中航艦在艦載機最大出擊率差異的主要關鍵因素，在於航艦本身硬體設備的條件。「滿載排水量」決定了單艘航艦每次出航所能搭載的艦載機、飛行中隊與甲板運作部門人員的總數量，連帶影響了「任務妥善」(Mission-ready)、能隨時出擊的艦載機數量。而「甲板尺寸」則決定「彈射器」與「飛機升降機」的最大設置數量，進一步限制了艦載機出擊的波次頻率與每一波次出擊數量上限。

2023 年「山東號」在沖繩縣宮古島以南海域進行遠航訓練期間，艦載機實際起降的數量，與本文模擬的「福建號」起降數量之間的差距，亦可用來說明航艦本身的硬體條件對艦載機出動的影響。根據日本防衛省統合幕僚監部所公布的情資，「山東號」在 10 月 28 日至 11 月 5 日，共 9 天的期間，J-15 艦載機共起降約 420 次（日均 46.6 架次），每架 J-15 的日均出擊率則約為 1.94 次（以總搭載數量 24 架計算）。³⁰ 「山東號」滿載排水量約 6 萬噸，飛行甲板長度約 305 公尺、寬度約 75 公尺。³¹ 不僅艦船體量與能搭載的艦載機數量明顯少於「福建號」，本身亦無彈射起降能力。儘管無法確定 2023 年 10 月的這次遠航，「山東號」是否正在進行艦載機出動極限能力的測試。從所能獲得的公開情資來看，日均出動 46.6 架次 J-15，已是「山東號」自 2019 年服役以來的最大出擊率。簡言之，「福建號」在硬體條件上的優勢，直接反映的就是其艦載機出擊率的預期極限值，相較於「山東號」目前所能錄得的最大出擊數據，有非常顯著的提升。

本文並非否定人員等「軟因素」對於航艦運作效率的重要性。美海軍分析中心在「高峰 97」演習後的檢討報告，確實點出航艦上

³⁰ 〈中国海軍艦艇の動向について〉，《統合幕僚監部報道発表資料》，2023 年 11 月 6 日，https://www.mod.go.jp/js/pdf/2023/p20231106_01.pdf。

³¹ “What Do We Know (so far) about China’s Second Aircraft Carrier?” *China Power Project CSIS*, <https://chinapower.csis.org/china-aircraft-carrier-type-001a/>。

部署的相關人員之關鍵，例如，是否滿編、訓練度、疲勞度等。³²必須注意的是，這份報告是對「尼米茲號」演習前後的效果進行比較，分析的標的只有「尼米茲號」，是在控制硬體相關參數一致的條件下進行比較。當硬體設備的上限已確定，此時人員等「軟因素」自然成為提升艦載機出擊率的關鍵。惟「有無彈射能力」、「升降機與彈射器數量」、「飛行甲板面積」等物理條件，已經決定了某型航艦在單位時間內艦載機出擊率的上限。人員等「軟因素」提升的用處，更多是在於盡可能發揮航艦本身的硬體潛能，實難以跨過物理限制的鴻溝。

伍、小結

本研究探討了基於硬體條件不同下，美、中航艦在艦載機最大出擊能力上的差異。後續的研究除了可運用本文所發展的數學模型，作為其它電腦兵棋系統，在處理包含航艦作戰的想定場景時，艦載機出擊數據輸入之參照。並可進一步從單艦擴充為數個航艦打擊，甚至是納入美國及其友盟海軍的多艦區域聯防模型，探討在第一島鏈針對解放軍艦隊的聯合作戰之效果。

本文作者謝沛學為美國內布拉斯加大學林肯分校政治學博士，任職於國防安全研究院，現職為網安與決策推演所副研究員，研究領域為兵棋推演、模式模擬、軍備競賽、地緣政治、國防經濟。

³² Angelyn Jewell and Maureen A. Wigge ed., "USS Nimitz and Carrier Airwing Nine Surge Demonstration," *op. cit.*

Simulation Analysis of the Sortie Generation Capabilities of U.S. and Chinese Aircraft Carriers

Pei-Shiue Hsieh

Division of Cyber Security and Decision-Making Simulation

Abstract

China's third aircraft carrier, Type 003 *Fujian*, was launched in June 2022 and is undergoing sea trials, marking a significant escalation in military pressure exerted by the People's Liberation Army (PLA) vis a vis the First Island Chain. This development intensifies maritime competition between China and the United States. The Sortie Generation Rate (SGR) is a crucial metric to measures the operational capability of an aircraft carrier.

The author developed a mathematical model, using data from a U.S. Navy exercise, Surge 97, as the baseline to calculate SGR. The results indicated that over a four-day period, the U.S. carrier *Nimitz* completed 769 strike sorties, averaging 3.56 sorties per aircraft per day. In contrast, the *Fujian* achieved 403 strike sorties, with an average of approximately 2.96 sorties per aircraft per day. The primary factors contributing to the disparity in maximum sortie rates between U.S. and Chinese carriers include hardware specifications such as 'full displacement', 'deck size', and 'the number of catapults and elevators.

These elements fundamentally determine both the frequency of sorties and the maximum number of aircraft that can be launched in each mission cycle. While improvements in personnel training and other soft factors can enhance operational efficiency, they are unlikely to overcome inherent physical limitations. Future research can leverage this mathematical model for integration into various computer wargaming systems to simulate scenarios involving carrier operations.

Keywords: Aircraft Carrier, Sortie Generation Rate, Nimitz CVN-68, Type 003 Fujia