

淺談新一波「海軍軍事革新」 —全電力推進與電能武器的發展

Emerging Naval Revolution in Military Affairs-
The development of Integrated Power System and Electric Weapon

翟文中 先生

提 要：

- 一、海軍艦船採用電力推進由來已久，過去由於存在著電子組件體積過大、電能與機械能間轉換效率太差等因素，因此始終無法取代機械推進成為軍艦推進系統的主流。隨著電子與半導體技術進步，加上海軍艦船執行任務對不同速率的需求，「全電力推進系統」就在這種情況下應運而生。
- 二、「全電力推進系統」係將推進系統與電力系統兩者整合成為一體，並可在發電、輸電、配電與負載間進行調控，艦船的整體動力運用得到優化；尤其重要的是，此系統與海軍發展中的「電能武器」，例如雷射與電磁砲可進行適當地結合。此類武器可快速地接戰，並對敵方攻船巡弋飛彈或彈道飛彈的飽和攻擊形成相當程度地反制。
- 三、全電力推進與電能武器的發展，不僅可能改變未來的海軍作戰場景，亦有可能催生新一波的「海軍軍事革新」。因此，對電能武器相關科技的發展，海軍應持續瞭解各國的發展狀況；至於全電力推進系統則可評估將其引進未來新造艦船中，藉以提升海軍艦隊整體戰力，維護國家安全。

關鍵詞：全電力推進、電能武器、脈衝功率技術、海軍軍事革新

Abstract

- 1.Navy has been adapted electric propulsion for a long time. Due to increased volumes for electric components, and inefficient conversion of power from mechanical to electric, electric propulsion was not mainstream of naval power systems. Modern electric and semi-conductor technologies advance triggered Integrated Power System(IPS) applications for Navy.
- 2.IPS could integrate ship's propulsion and electric systems to a single sys-

tem. Therefore, power generation, power transmission, and load management would achieve the possibility optimization. Most importantly, IPS could combine with developing electric weapons, such as high-power laser and electromagnetic gun, for countering small boats, unmanned aerial vehicle(UAV) and radically maneuvering missiles.

3.This assemble could strengthen ship's anti-cruise and anti-ballistic missiles capabilities in enemy's situation attack. With IPS and electric weapon combination, they could change naval operational scenarios and engagement modes, introducing new wave naval revolution in military affairs.

Keywords: Integrated Power System (or Integrated Full Electric Propulsion), Electric Weapon, Pulsed Power Technology, Naval Revolution in Military Affairs

壹、前言

英國海洋戰略學者柯白(Julian S. Corbett)在其所著的《德芮克與都鐸王朝海軍》(Drake and the Tudor Navy)一書中指出：「海軍戰略的精義是海上持久力，亦就是艦隊在海上活動能力的程度。海軍戰術的精義在於動力性質，亦就是人類控制艦隊或是艦船運動到達何種程度。」¹這說明了作戰艦艇的操控性能與有效遂行作戰任務息息相關，而推進系統就是執行艦船海上航行與戰術機動的重要艦用系統。長期以來，海軍研究者與觀察家在論述海軍艦船系統時，多將注意力置於指管、射控、飛彈與戰鬥系統，卻經常忽視了對艦船推進系統的探討與分析。即令如此，這並未減損推進系統隨著現代科技進步相應的創新與成長。

目前，先進國家海軍基於任務需求、減少噪音與降低燃油等不同考量，紛紛朝向「

混合暨電力推進系統」(Hybrid and Electric Propulsion System)與「全電力推進系統」(Electric Propulsion System)方向發展；尤其重要的，當海軍艦艇推進實現全電力化後，可與發展中日漸成熟的電能武器結合。這一舊一新不同科技的融合，不僅將使海軍艦船的操控性能大增，並能大幅地提升艦船的攻擊與防禦能力，改變未來海軍作戰的接戰方式與戰鬥場景，新一波的「海軍軍事革新」隱然成形。

本文首先針對海軍電力推進與電能武器的發展予以說明，並對兩者結合對海軍作戰可能形成的影響進行分析，以凸顯新科技之價值與貢獻。值此政府大力推動海軍「國艦國造」政策之際，藉此亦可增進海軍官兵對此兩項重大裝備與新武器議題的認識，更期望能對海軍建軍備戰發展做出貢獻，這也是撰寫本文的主要目的。

註1：Julian S. Corbett, Drake and the Tudor Navy: With A History of the Rise of England as a Maritime Power, Vol.I (London: Longmans, Green, and Co., 1898), p.2。

貳、艦船全電力推進的演進與發展

人類運用船舶的歷史可說是由來已久，船舶橫渡水面必須克服海流與強風帶來的阻力，方能順利地抵達目的地；在這種情況下，必須提供船舶一定動力方能達成。最初，船舶推進係以人力與風力做為主要的來源，然這兩者可以提供的動力極其有限，致使船舶在機動性與靈活度上受到很大程度的制約。以下將對海軍推進系統與全電力推進的發展，分項說明如后：

一、海軍推進系統的演進與發展

18世紀「工業革命」(Industrial Revolution)後，隨著船舶機械工程的不斷演進與發展，蒸汽機、柴油機、燃氣渦輪機與「壓水式反應器」(Pressurized Water Reactor, PWR)²，相繼成為艦船推進系統的原動機。這些原動機將化學能或原子能轉變為電能或機械能，推進動力裝置透過馬達或是減速齒輪，再將前述能量傳至俾葉做為船舶動力。換言之，海軍推進方式的發展係與當代工業技術息息相關。例如1950年代核能技術日趨成熟，美國海軍上將李高佛(Hyman G. Rickover)引進此技術並將其運用於艦船推進，至此海軍艦船獲得了無限期的海上持久

力，使得艦船的部署與運用不再受到攜行燃油的限制。³換言之，海軍歷史上出現的數次推進系統革命，⁴不僅強化了艦船的機動力與靈活性，亦在海軍的戰略、作戰與後勤等面向注入了嶄新的活力。

二、軍艦任務與速率間的調和

(一)海軍艦艇執行的任務相當廣泛，不同的任務需要不同的速率支持，例如就戰鬥部位時需要船舶高速前進；執行反潛偵蒐時，則需維持在低速狀態，否則過大的俾葉噪音會對偵潛裝備的操作形成不利影響。就裝備操作而言，存在任務遂行與推進速率間的需求必須得到滿足，採單一型式原動機提供動力的機械直接推進系統，對此則力有未逮；然而此種推進方式卻為各國海軍艦船普遍採用。為解決前揭問題，海軍工程師遂將兩種(或以上)不同或相同型的原動機結合成為「複合機械推進系統」，包括「柴油機與柴油機聯合推進」(Combined Diesel and Diesel, CODAD)、「柴油機與燃氣渦輪機交替推進」(Combined Diesel and Gas Turbine, CODOG)、「燃氣渦輪機與燃氣渦輪機聯合推進」(Combined Gas Turbine and Gas Turbine, COGAG)與「燃氣渦輪機與燃氣渦輪機交替推進」等。⁵

註2：「壓水式反應器」是將高溫高壓的水送至「蒸汽產生器」，在此將熱傳遞給流過管線的水，使之沸騰產生蒸汽，蒸汽被送往汽機廠房，轉動汽輪機發電，我國「核三廠」即為此發電類型。〈核能與科技：壓水式反應爐(上)〉，痞客邦，2012年12月31日，<https://medialiteracy.pixnet.net/blog/post/83423126>，檢索日期：2022年2月27日。

註3：劉秉宜，〈從《為將之道-海軍指揮道德的重要性》談成功領導〉，《海軍學術雙月刊》(臺北市)，第55卷，第5期，2021年10月1日，頁11；Ronald O' Rourke, Electric-Drive Propulsion for U.S. Navy Ships: Background and Issues for Congress, CRS Report for Congress Order Code RL30622 (Washington, D.C.: Congressional Research Service, 31 July 2000), p.1。

註4：海軍推進系統曾出現過數次革命，從最初的人力到風力、內燃機以及核子動力，每次革命均使艦船的機動性與持久力獲得大幅提升，從而對海軍戰術與海軍戰略形成了深遠的影響。

註5：複合機械推進系統有關「柴油機與柴油機聯合推進」(CODAD)、「柴油機與燃氣渦輪機交替推進」(CODOG)、「燃氣渦輪機與燃氣渦輪機聯合推進」(COGAG)與「燃氣渦輪機與燃氣渦輪機交替推進」(COGOG)等，不同推進系統組合的機器布置、操作方式、動力結構組成與當前各國海軍使用型式等，參考胡卓瀚，〈油電複合推進系統與全電力推進系統之應用〉，《海軍學術雙月刊》(臺北市)，第54卷，第2期，2020年4月1日，頁87-92。

(二)另一方面，軍艦等船舶為了降低「複合機械推進系統」在低速下高油耗的缺點，海軍工程師遂在俾葉上安裝了一個推進馬達，使軍艦在低速航行時，係由馬達而非原動機來提供動力，此稱為「油電複合推進系統」，包括「柴油電力與燃氣渦輪機聯合推進」(Combined Diesel Electric and Gas Turbine, CODELAG)、「柴油電力與燃氣渦輪機交替推進」(Combined Diesel Electric or Gas Turbine, CODELOG)與「燃氣渦輪機電力與燃氣渦輪機聯合推進」(Combined Gas Turbine Electric and Gas Turbine, COGELAG)等。⁶複合推進系統雖然具有控速範圍大與燃油效率高等優點，由於原動機數量與組件較多，加上機器、管線布置複雜，艦船操作與維修保養的人力需求相對較高。

三、電力推進系統的演進與發展

(一)當前，「整合動力系統」(Integrated Power System, IPS)或稱「整合全電力推進」(Integrated Full Electric Propulsion, IFEP)係先進國家海軍競相研發與運用的推進模式，這套系統配置是在原電力推進的基礎上發展而成，海軍艦船與潛艦運用馬達推進也已有百年的歷史；因此電

力推進絕非一個嶄新概念。例如由運煤船「木星號」(Jupiter)改裝成的美國首艘航艦「蘭利號」(Langley)即採電力推進；此外，戰鬥艦「馬里蘭號」(Maryland)、「新墨西哥號」(New Mexico)、「加利福尼亞號」(California)與「西維吉尼亞號」(West Virginia)等主力艦艇亦採相同推進設計，⁷到1944年時，美軍海軍有超過870艘的渦輪電力與940艘的柴油電力艦船服役中。⁸當時電力推進雖然獲得廣泛運用，然由於存在著電子組件體積過大、電能與機械能間的轉換效率太差，以及維護成本過高等缺點，⁹致始終無法取代傳統機械推進模式，更無法成為海軍艦船推進主流；因此，其運用主要限於潛艦與少數特殊勤務需求艦船。

(二)1980年代開始，隨著電子與半導體技術的突飛猛進，電機組件與控制系統的體積越來越小，且精度不斷提升。在這種情況下，「電力推進」再度受到各國海軍重視。1995年，美海軍開始推動「整合動力系統」計畫(Integrated Power System, IPS)；1996年，英國海軍也發起「整合全電力推進」計畫(Integrated Full Electric Propulsion, IFEP)；此外，法國、德國、荷蘭、義大利與俄羅斯等國海軍亦開始了類似研

註6：目前使用於艦艇的「油電複合推進系統」包括「柴油電力與燃氣渦輪機聯合推進」(CODELAG)、「柴油電力與燃氣渦輪機交替推進」(CODELOG)與「燃氣渦輪機電力與燃氣渦輪機聯合推進」(COGELAG)等3種，各系統的說明及機器布置，詳如註5，頁92-96。

註7：T. J. Doyle, H. O. Stevens, and H. B. Robey, "An History Overview of Naval Electric Drive," Proceedings: Naval Symposium on Electric Machine, 1997, pp.137-157, quoted in Jess W. Arrington, The Analysis of Components, Designs, and Operation for Electric Propulsion and Integrated Electric System, Master Thesis (Monterey, California: Naval Postgraduate School, September 1998), p.2。

註8：M. Aprianinen, K. Juurmaa, K. Laukia, M. Mini, K. Jarvinen, and P. Noble, "Naval Architecture of Electric Ships - Past, Present and Future," Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions, Vol.101, 1993, pp.583-607, quoted in Jess W. Arrington, op. cit., p.2。

註9：Ibid., p.5。



圖一：全電力推進系統艦船

說明：圖右為美軍「朱瓦特級」驅逐艦、圖左為英國「伊莉莎白女王級」航艦。

資料來源：參考〈南海爭端：中英美航空母艦規格和戰鬥力如何比〉，2021年7月22日，BBC NEWS中文網，<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/world-57083551>，檢索日期：2022年2月27日；劉秉宜，〈從《為將之道-海軍指揮道德的重要性》談成功領導〉，《海軍學術雙月刊》(臺北市)，第55卷，第5期，2021年10月1日，頁14，由作者整理製圖。

究，並計畫將此系統運用於其相關的艦船之上。¹⁰

四、全電力推進系統的優點

(一)目前，全電力推進系統已成為美國海軍「朱瓦特級」(Zumwalt class, DDG 1000)驅逐艦¹¹與英國皇家海軍45型「勇敢級」(Daring class)驅逐艦¹²與「伊莉莎白女王級」(Queen Elizabeth class)航空母艦¹³所採用(如圖一)。這套系統和以往使用的電力推進原理類同，兩者間的最大差異係全電力推進系統將艦上所有的動力整合至單一系統，而非如以往構型一般，船艦之推進系統與電力系統各自獨立互不相連。「傳統電力推進」係由原動機產生的電力驅動馬達運轉

，日用電機則提供全艦各部位用電，這套系統平時運作經常出現負載失衡，當故障發生時亦無法進行電力轉移相互支援。「全電力推進」系統可將發電、輸電、配電與負載進行有效整合，透過控制電力系統各裝備的一致標準，藉此可提高電力轉換的靈活度，以取得最佳的負載分配。

(二)儘管全電力推進系統已為英、美等海軍大國所廣泛接受，然其初期投資成本過高與電力系統設計複雜等因素，亦對其廣泛運用形成某種程度的制約。¹⁴此外，電力推進在組件方面亦存在著若幹的技術風險，包括推進馬達與控制器、電力分配系統(Electrical Distribution System)與全系統的

註10：Ronald O' Rourke, Electric-Drive Propulsion for U.S. Navy Ships: Background and Issues for Congress, pp. CRS-26~CRS-30。

註11：“DDG 1000,” Naval Sea Systems Command, <https://www.navsea.navy.mil/Home/Team-Ships/PEO-Ships/DDG-1000/>，檢索日期：2021年11月15日。

註12：“Type 45 Destroyer Daring Class: World's First Full Electric Propulsion Combatant”，https://www.gpowerconversion.com/sites/default/files/MARINE_GEA20338%20-%20Type%2045%20-%20Case%20Study.pdf，檢索日期：2021年11月15日。

註13：“Queen Elizabeth Class (CVF),” Naval Technology, <https://www.naval-technology.com/projects/cvf/>，檢索日期：2021年11月15日。

註14：Ronald O' Rourke, Electric-Drive Propulsion for U.S. Navy Ships: Background and Issues for Congress, p.CRS-21。

設計與整合，這些挑戰需要工程上的突破或進一步研發，方能予以優化。¹⁵

參、電能武器的發展現況

當前海軍使用的各類傳統武器，無論使用炸藥或動能來摧毀目標，主要依賴化學能做為摧毀機制。近年來，隨著半導體與能量儲存技術的進步，運用電能做為武器已經指日可待。「電能武器」(Electric Weapon)係運用儲存電能做為摧毀機制的一種武器，儲存的電能並能快速放電，以提供武器運用的科技稱為「脈衝功率技術」(Pulse-Power Technology)。¹⁶當前，海軍發展中的電能武器並獲初步進展的包括「定向能武器」與「電磁軌道砲」，兩者的現況與運用前景，分項進行說明：

一、定向能武器(Directed-Energy Weapons, DEW)

(一)嚴格而論，定向能武器運用於軍事領域已有相當長的時間(如圖二)，廣為世人耳熟能詳的例子就是「雷射眩目器」(Laser Dazzlers)，此裝置可使人們短暫地失能卻不具致命性效果。近年來，隨著次音速與超音速攻船飛彈的擴散，艦艇遂行自衛作戰時面臨著數倍於往昔的嚴苛挑戰。這些飛彈的「雷達截面積」(Radar Cross Section, RCS)很小，且採掠海飛行模式，因此艦船無



圖二：定向能武器示意圖

資料來源：〈定向能武器〉，百科知識，<https://www.easyatm.com.tw/wiki/定向能武器>，檢索日期：2022年2月27日。

法進行長距離偵測；當發現飛彈接近時，往往距離過近，導致艦艇反應時間過短，幾乎無法進行有效攔截或反制。如同小型船舶與無人飛行載具，亦具相同屬性的威脅。

(二)過去數十年間，工業用固態雷射的研發已獲得突破性進展，美國海軍已將其引進做為軍艦短程防禦之用。¹⁷「高能固態雷射」具有巨大能量，可對目標造成實體性的破壞，未來可做為水面艦船反制攻船飛彈與彈道飛彈的一個武器選項；¹⁸此外，雷射裝置可藉控制輸出能量，對目標進行偵測、標定、「喪能」(Disable)與摧毀等不同軟、硬殺作為，在運用上具有相當大的彈性。¹⁹2021年5月，美國海軍太平洋艦隊兩棲船塢運輸艦「波特蘭號」(USS Portland, LPD 27)成功地進行了一次海上高能雷射武器測

註15：Ibid., p.CRS-41。

註16：Stuart Moran, *The Basics of Electric Weapons and Pulsed-Power Technologies* (Dahlgren, VA.: Naval Surface Warfare Center, 2012), p.51。

註17：Ronald O' Rourke, *Navy Lasers, Railgun, and Hypervelocity Projectile: Background and Issues for Congress* (Washington, D.C.: Congressional Research Service, October 21, 2016), p.4。

註18：John F. Schank, Scott Savitz, Ken Munson, Brian Perkinson, James McGee, and Jerry M. Sollinger, *Designing Adaptable Ships: Modularity and Flexibility in Future Ship Designs* (Santa Monica, Calif.: RAND Corporation, 2016), p.55。

註19：Ibid., p.56。

試，該艦使用安裝其上的「雷射武器展示器」(Laser Weapon System Demonstrator) Mk2 Mod0，成功使一具「無人飛行載具」(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)失去作戰能力。²⁰種種跡象顯示，海軍水面艦船部署高能雷射武器已成為不可抗拒的趨勢，這種發展將使海軍作戰出現截然不同場景，亦使擁有雷射裝置的海軍享有較敵方為佳的戰場態勢。

二、電磁軌道砲(Electro Magnetic Rail Gun, EMRG)

(一)「電磁軌道砲」係電能武器中除高能雷射外，另一可望於未來部署至海軍艦艇的武器系統。百年多前，科學家即已開始研究運用電力與磁力來發射砲彈，這個概念相當地簡當，即發展「線性馬達」(Linear Motor)，其原理是利用橫穿平行軌道電路產生的「羅倫茲力」(Lorentz force，係指磁場中的運動電荷所受到磁場對它的作用力)將一個金屬砲彈加速後射出，這種裝置被稱為「電磁發射器」或「軌道砲」。1970年代，澳洲「坎培拉大學」(Australian National University in Canberra)的巴柏(John Barber)與馬歇爾(Richard Marshall)兩位科學家，研發建造一款550百萬



圖三：美海軍電磁軌道砲基座

資料來源：參考〈High-powered gun launch system〉，Official U.S. Navy Page，<https://www.flickr.com/photos/56594044@N06/5915535936/>，檢索日期：2022年2月27日。

焦耳(Mega-Joules, MJ)能量的軌道砲，成為電磁軌道砲的原始構型，²¹更為此裝置的實用化與軍事運用提供了紮實的基礎。

(二)2005年，美國海軍開始研發電磁軌道砲，最初是做為海軍「水面火力支援」(Naval Surface Fire Support, NSFS)的一環，當海軍陸戰隊在向岸投射兵力時，對其提供火力支援；其後研發目標則置於對攻船巡弋飛彈與攻船彈道飛彈的反制。²²相較於傳統火炮，「電磁軌道砲」的初速大且可進行調整，因其並非採用「炸藥基發火系統」(Explosive-Based Firing System)，因此安全性高，在彈藥儲存管理與處理上相對較容易(如圖三)。²³此外，美國海軍在發展「

註20：“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/>，檢索日期：2021年12月15日。

註21：巴柏與馬歇爾兩人利用儲存在電容器組(capacitor banks)中的能量，將一個質量3公克的彈體，加速至5.9公里/秒，達成所謂的超高速(hypervelocity)目標，為其後的電磁軌道砲研究開啟了大門。參見R. A. Marshall, and W. Yang, Railguns: Their Science and Technology (Beijing: China Machine Press, 2004), quoted in Ryan James Pifer, Modeling of the Electric Ship, Master Thesis (Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2010), p.47。

註22：Sam LaGrone, “Navy Wants Rail Guns to Fight Ballistic and Supersonic Missiles Says RFI,” USNI News, January 5, 2015, quoted in Ronald O’ Rourke, Navy Lasers, Railgun, and Hypervelocity Projectile: Background and Issues for Congress, p.12。

註23：以野戰砲為例，其最大初速約為1.7公里/秒，此限制來自氣體推進劑性質；此外，使用「炸藥基發火系統」是耗費錢財與極度危險的。R. A. Marshall, and W. Yang, op. cit., p.47。



圖四：美軍超高速砲彈

資料來源：參考〈High-powered gun launch system〉，Official U.S. Navy Page，<https://www.flickr.com/photos/56594044@N06/5915535936/>，檢索日期：2022年2月27日。

電磁軌道砲」的同時，亦在研發一型由該裝置發射的「超高速砲彈」(Hypervelocity Projectile, HVP)，電磁軌道砲可以每分鐘6至12發的速度發射超高速砲彈(如圖四)，²⁴該砲彈以近6倍音速的速度飛行，並接戰50至100哩外的目標。依據美國海軍先前規劃時程，電磁軌道砲與超高速砲彈可望在2025年前完成戰備。²⁵

三、海軍電能武器的發展現況與瓶頸

2021年6月，一則媒體報導指出，由於

在2022年的美國海軍預算清單中未編列「電磁軌道砲」的相關預算，研判美國海軍可能因為技術問題無法克服，因此中止了這項計畫；目前，尚在進行電磁軌道砲研發的僅有中共海軍，其未來會追隨美國海軍的腳步停止相關研究，或是持續進行計畫尚不得而知。²⁶當前「全電力推進系統」的發展日漸成熟，英、美等先進國家海軍已將此系統運用在其新造艦艇上，咸信未來有更多國家海軍會選擇此系統，用以取代傳統推進或混合暨電力推進系統；然而，原本計畫與此推進系統搭配部署的電能武器系統，卻面臨了諸多的物理限制與工程瓶頸，從而影響了研發進程，²⁷相關挑戰概要說明如后：

(一)雷射武器的問題比較小，美國海軍已成功地進行了數次測試，首艘配備「奧丁」(ODIN)雷射系統的杜威號(DDG-105)驅逐艦曾現身中共東海水域，此系統號稱能干擾甚至精準打擊敵方的艦船或軍機，標示著此系統已能執行實戰任務；²⁸另一方面，電磁軌道砲的研發卻不太順利。從美軍公開揭露

註24：相較傳統砲彈，超高速砲彈由於體積比較小，每一艘「朱瓦特級」驅逐艦可攜行2,400發砲彈，此數量是攜行傳統砲彈的4倍。由於「電磁軌道砲」係以電流做為加速砲彈的動力來源，毋須燃燒推進劑來推進砲彈，亦無火箭發動機(Rocket Motor)或推進劑藥包的需求；而發射一枚超音速砲彈的成本約需3加侖燃油。相關說明參見J. Bachkosky, D. Katz, R. Rumpf, and W. Weldon, Naval Electromagnetic (EM) Gun Technology Assessment (Arlington, VA: Naval Research Advisory Committee, February 2004), pp.15, 27, and 31。

註25：超高速砲彈係一種通用型砲彈，除電磁軌道砲外，可由海軍現有的5吋砲(巡洋艦與勃克級驅逐艦)與155mm砲(配置於朱瓦特級艦)發射。使用5吋砲發射時，超高速砲彈的飛行速度為3馬赫(約每小時3,675公里)；使用電磁軌道砲發射時，砲彈飛行速度可以達到6馬赫。Ronald O' Rourke, Navy Lasers, Railgun, and Hypervelocity Projectile: Background and Issues for Congress, pp.14-20。

註26：Kyle Mizokami, "The Navy's Railgun Is Finally Dead," Popular Mechanics, Jun 16, 2021, <https://www.popularmechanics.com/military/weapons/a36633707/us-navy-railgun-is-finally-dead/>，檢索日期：2021年12月15日。

註27：定向能武器具有快速接戰、光速傳輸、接戰成本低與降低連帶損害等優點，但亦存在著若干的限制。例如傳輸能量受到大氣與氣象因素的影響衰減，使得此系統的效率往往低於10%。參見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, Jun 2005), p.1; and Stuart Moran, op. cit., p.54。

註28：游存仁，〈美艦配「奧丁系統」雷射武器現東海，陸專家控想實戰，有這2意圖...〉，新頭殼newtalk，2011年11月9日，<https://newtalk.tw/news/view/2021-11-09/663641>，檢索日期：2022年2月22日。

的資料可知，相關挑戰計有額外空間需求，例如一座電磁軌道砲總重約1,000噸，將占據砲塔下方的甲板空間，而砲管長約40英尺（約12.2公尺）加上相關的動力與控制裝備，估計需要約40×20英尺（約12.2×6.1公尺）的地板面積；這些額外空間需求，可由配備全電力推進系統後節省的空间予以補償，問題並不是很大。²⁹

（二）比較難處理的，電磁軌道砲發射時需要巨大電能，這往往超過艦上電力系統所能提供，須藉由大型儲能裝置給予必要的支援；此外，電磁軌道砲提高發射功率時，其衍生而來的大量廢熱必須要由艦用冷卻系統予以排除。例如一具48百萬瓦電磁軌道砲的功率效率由百分之三十升至百分之六十六時，預估將會產生至多34百萬瓦的廢熱，這些巨大熱量必須藉由冷卻系統排散，這項需求遠超過現有艦船的處理能力，這些額外的需求自然增加了艦用系統安排的複雜度。³⁰

綜上所述，在可預見的未來，高能雷射與電磁軌道砲等電能武器能否實際部署運用，端視下列各領域的相關科技能否獲得突破性的發展，它們包括了儲能領域的電容、電池、飛輪與「超導磁能儲存」（Super-

conducting Magnetic Energy Storage, SMES)；脈衝功率裝置的「磁通壓縮發電機」(Magnetic Flux Compression Generators)與「磁流體動力發電機」(Magnetohydrodynamic Generators)；熱能管理系統以及艦船整合設計，³¹這些科技的突破，將可有效地解決電能武器裝置於艦艇上部署面臨的尺寸、能量、儲能與散熱等各項嚴苛挑戰。

肆、隱然成型的新一波「海軍軍事革新」

回顧整個海軍歷史發展，不難發現許多新興科技或存在已久的成熟科技，透過海軍計畫者與工程師的創意式結合，不僅改變了海軍競爭的遊戲規則、翻轉了雙方原處的優劣態勢，甚至對國家安全與國際政治形成深遠的影響。1920年代，英、美兩國海軍將飛機與水面艦船結合，發展出以艦載機為攻擊武器的航空母艦作戰模式，原有的海軍主力艦對決時代至此劃下了句點。1960年代，核子動力潛艦與潛射彈道飛彈兩者的結合，這不僅提升了擁核武國家的「第二擊」(Second Strike)能力，同時對確保核武嚇阻的可信度與核武競賽國間的戰略平衡，做出了

註29：艦船使用全電力推進系統後，受惠於原動機數量減少，加上毋須使用減速齒輪以及軸系的長度可縮減等因素的影響，推進系統的空間需求得以大幅度降低。

註30：1具100千瓦的高能雷射裝置需要300千瓦至1百萬瓦的電力進行操作，美國海軍「提康德羅加級」(Ticonderoga class) 巡洋艦的電力容量為7.5百萬瓦；「勃克級」(Arleigh Burke class) 驅逐艦的電力容量為9百萬瓦，操作一具高能雷射裝置不致造成電力系統負荷過重，然而戰系裝備與武器系統亦需大量的電能供其正常運作。雖然，全電力系統可提供較大電力，但高能雷射與電磁軌道砲仍須與推進系統與艦用系統競爭電力。參考John F. Schank, et al., op. cit., pp.56-58。

註31：「超導磁能儲存」是利用超導體的電阻為零特性製成的儲存電能的裝置，不僅可以在超導體電感線圈內無損耗地儲存電能，還可以通過電力電子換流器與外部系統快速交換有功和無功功率，用於提高電力系統穩定性、改善供電品質；「磁通壓縮發電機」是一種已初步用於軍事並逐步拓展套用領域的脈衝功率電源。目前正在研究的新概念武器主要有定向能(強雷射、高功率電磁脈衝、粒子束)武器和電發射動能武器兩大類等。「磁流體動力發電機」係將機械能轉變成電能的電機，通常由汽輪機、水輪機或內燃機驅動，小型發電機也有用風車或其他機械經齒輪或皮帶驅動。參考F. C. Beach, and I. R. McNab, op. cit., pp.2-7。

具體貢獻。

如同前述說明，飛機與水面艦是存在已久的戰爭資產，結合成為嶄新的戰爭工具並沒有太多的新興科技成份在內，核子動力潛艦與潛射彈道飛彈則是新興科技結合後的產物，然而其對海軍作戰形成的革命性變革卻是無分軒輊；另一方面，由於電力推進係屬成熟科技，然電能武器的發展仍有許多技術瓶頸亟待克服。即令如此，此兩者結合仍具有巨大的軍事潛力，其不僅改變了艦船傳統的電力分配模式，電能武器的部署、運用，更使防空與水面作戰出現了截然不同的場景。以下將對這些浮現中的經濟效益與軍事潛力進行說明，兼論其對海軍作戰可能形成的巨大衝擊。

一、降低操作成本

「全電力推進系統」使用的原動機數量比較少，加上「渦輪-電力發電機」(Turbo-Electric Generators)具有較佳燃油效率(Fuel Efficiency)，因此油料支出可以大幅降低。即以全電力推進的「朱瓦特級」驅逐艦為例，相較於採用傳統機械推進方式，預估其可減少近百分之二十五的燃油消耗；若以該艦的全壽期計算，可省下近8,000萬美元(約新臺幣24億元)的油料支出。³²美國海軍進一步地估算，若水面艦船採「篋艙推進器」(Pod propeller，如圖五)構型，因其可有效地提升艦船構型的流體動力效率(Hydrodynamic Efficiency)，可再進一步減少百分之四至十五的燃料需求。³³此外，



圖五：篋艙推進器

說明：「篋艙推進器」又稱「POD推進器」，是一種集推進和操舵裝置於一體的新型船舶推進裝置，一般裝置於船艙外部，直接與俾葉相連，
資料來源：〈可360度水平旋轉：神奇的艦艇吊艙電力推進系統〉，每日頭條，2017年5月4日，<https://kknews.cc/tech/4q9veyq.html>，檢索日期：2022年2月27日。

「全電力推進系統」的維修與人力需求亦較採用傳統機械推進或混合暨電力推進系統為低，這使得整個系統的操作成本會更低廉。

二、動力整合為一

傳統機械推進系統的推進與電力兩個系統係各自獨立的，由於兩者不能相互支援，導致大量電力資源浪費。「全電力推進系統」將推進系統與電力系統產生的電能整合，故可提供更多電能，而軍艦就能配備功能強大但耗電較多的雷達、聲納與武器系統，這是海軍其他「隔離推進系統」(Segregated System)力有未逮的。透過發電、輸電與配電的整合控制，全電力推進系統可在艦艇機動、武器發射與裝備日常運作三者間進行合理的分配，適時地填補指管與戰系等系統同時運作產生的電力缺口，有效提升艦艇整體戰鬥能力。尤其重要的，發展中的「電能武

註32：B. A. Bassham, An Evaluation of Electric Motors for Ship Propulsion, Master Thesis (Monterey, CA.: Naval Postgraduate School, 2003), quoted in Ryan James Pifer, op. cit., p.7。

註33：Ronald O' Rourke, Electric-Drive Propulsion for U.S. Navy Ships: Background and Issues for Congress, p. CRS-17。

器」都需要大量電力，傳統電力系統即使可以提供，卻必須在分配給其他系統電力間進行取捨；換言之，「全電力推進系統」是艦船部署電能武器的充分且必要條件。

三、艦船設計具有彈性

「全電力推進系統」在俾葉進行能量交換時，毋須如機械推進系統需經過減速齒輪將原動機的能量傳到俾葉；這樣一來，俾葉的位置就可進行較具彈性的安排。此外，還可對大軸的長度進行縮減，必要時甚至可將俾葉完全地移除或將俾葉與馬達整合後裝於船體外的篋艙。³⁴當採取這種「俾葉/船艙構型」(Propeller/Stern Configuration)時，大軸向外傳送能量毋須貫穿船體，置於船外的篋艙可做360度旋轉，控制推力的方向即可改變艦船的航向，原有控制方向的舵葉即可從推進系統中移除。由於改變了原動機、減速齒輪與俾葉的固有位置安排，海軍工程師在進行船舶設計時，對於裝備與艙間的安排將更具彈性；另由於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。³⁵換言之，全電力推進系統賦予了海軍工程師設計艦船時的最大自由度。

四、提高艦艇生存能力

「全電力推進系統」使用電力推進，加上移除了減速齒輪後，船體產生的機械振動與輻射噪音也大幅地降低。此外，由於使用的原動機數量相對減少，進氣與排氣所需的通道體積亦相應地較低，這樣一來艦船的紅



圖六：美海軍「自由級」濱海戰鬥艦

資料來源：〈僅服役11年，首艘獨立級濱海戰鬥艦退役〉，科技新報，2021年8月10日，<https://technews.tw/2021/08/10/uss-independence-retired-after-only-11-years-of-service/>，檢索日期：2022年2月27日。

外線徵候(Infrared Signature)與雷達截面積就可降低；這些特性使得艦船的匿蹤能力得以提升，更降低了為敵方感測器偵測的機率。若船體採用新式的「俾葉/艙部構型」設計，可降低水面艦的艙跡信號(Wake Signature)，更可有效抵消艙跡歸向魚雷設計上的性能優勢。³⁶由於電力供給來自於一個分散式電力系統(Distributed Power Source)，因此在艦艇遭到戰損時復原較易，並透過架設電纜方式，可快速地將電力供給至重要艦用系統；³⁷在這種情況下，由於良好的損害管制能力，更賦予全電力推進系統較佳的戰場存活性。

五、提高飛彈防禦能力

攻船巡弋與彈道飛彈技術的擴散，使得水面艦船面對著數倍於往昔的飛彈威脅；相對水面艦船造價而言，攻船飛彈確實是一個

註34：Ryan James Pifer, op. cit., pp.6-7。

註35：Ronald O' Rourke, Electric-Drive Propulsion for U.S. Navy Ships: Background and Issues for Congress, p.CRS-19。

註36：Ibid。

註37：Ibid., p. CRS-20。

低成本與高收益的軍武投資。舉例而言，美國海軍造價最低的濱海戰鬥艦(Littoral Combat Ship, LCS, 如圖六)，每艘單價為5億8,700萬美元(約新臺幣176億元)，這個價位足以購買數百枚攻船飛彈。³⁸因此，防禦者在這場成本競賽中最後肯定會輸掉比賽的；所以必須藉由其他手段來翻轉這種存於攻勢一方的「非對稱」優勢，「高能雷射」與「電磁軌道砲」就是在這種需求下開始研發的。前者(指高能雷射)受惠於工業界在此領域的不間斷研發，雷射裝置現已部署至艦艇，並且具有實戰價值，未來若能在單艦上配備多具雷射裝置，結合艦上感測器與近迫武器系統，即能對敵方發起的飛彈飽和攻擊進行反制；這種發展極有可能讓飛彈防禦的優勢朝向守勢一方移動。至於電磁軌道砲的部署與實戰運用，仍待儲能相關科技進一步地突破，方能達到同樣效果。

伍、結語

海軍艦船使用電力推進已有百年歷史，「二次世界大戰」期間此型推進系統獲得更廣泛地運用。在機械推進系統主宰海軍動力的年代中，電力推進並未停止其進化的腳步，混合暨電力推進的出現就是最佳的例子。近年來，海軍在反制攻船與彈道飛彈的需求下，加速對「高能雷射」與「電磁軌道砲」等電能武器的研發，這些裝備需要艦用電力系統在極短時間內提供大量電能方可操作；同時電能武器又需艦用系統提供高電壓與大


電流，這項需求使得配備全電力推進系統的艦台，成為部署電能武器的唯一可行選項。即使軍艦沒有配備電能武器，「全電力推進系統」本身具有的低可偵測性(Detectability)、電力調度彈性，以及高機動性與存活率等特點，均使軍艦在戰術行動與作戰選項獲得有利態勢；此外，全電力推進系統還可節省燃油支出、降低人員需求，使得艦船的全壽期成本大幅降低。

未來，若「全電力推進系統」與「電能武器」能有效結合，當前者提供的電能可支持多具高能雷射或電磁軌道砲操作時，海軍的艦船自衛與飛彈防禦將會出現嶄新面貌。電能武器固然無法終結飛彈時代，但是攻船巡弋飛彈與彈道飛彈對水面艦船的「非對稱性」優勢，極可能由原攻勢方向守勢方移動，此等武器可對飽和攻擊進行有效反制。高能雷射可以光速接戰，「從感測器到射手」(Sensor-to-Shooter)的時間差被壓縮至零，偵得目標即能實時接戰。至於電磁軌道砲的接戰時間雖較高能雷射為長，因其功率、效率較高，故可用來打擊遠距目標；若能在其砲彈彈頭裝上精密導引裝置，就能有效遂行遠程精準打擊或對敵方飽和攻擊進行反制。

由於「電能武器」彈頭體積不大，甚至毋須彈頭(例如雷射)，一艘軍艦可攜行的數量超過原配置之飛彈數量的數十倍以上，加上發射成本低廉，擁有此裝置的一方在成本競爭中將可遠遠甩開對手，並在軍械數量上取得壓倒性的優勢。面對此種科技、武器發

註38：Defense Acquisitions: Assessment of Selected Weapon Programs (Washington, D.C.: Government Accountability Office, March 2013), p.95。Robert Haddick著，童光復譯，《海上交鋒：中共、美國與太平洋的未來》(臺北市：國防部政務辦公室，民國106年2月)，頁289。

展，我國海軍必須有前瞻規劃的遠見，方能掌握其具有的「非對稱利得」，並應持續地關注兩者的最新發展，方能在未來的海軍建

軍方向取得有利態勢，提升海軍艦隊整體戰力，有效達成護衛海疆任務。 

作者簡介：

翟文中先生，備役海軍上校，海軍軍官學校74年班，淡江大學國際事務與戰略研究所碩士85年班。曾任職國防部參謀本部情報參謀次長室、國防部戰略規劃司、國防部整合評估司與國家安全會議，並擔任美國能源部Sandia國家實驗室訪問學者，現服務於國防安全研究院國防戰略與資源研究所。

老軍艦的故事

慶陽軍艦 DDG-909

慶陽軍艦原為美軍Fletcher級驅逐艦，編號DD-528，由舊金山伯利恆鋼鐵公司承造，1943年4月23日完工成軍，曾參加第二次世界大戰與越戰。民國60年9月接艦官兵編組赴美國，以現況交接方式接收本艦，同年10月6日於加州長堤舉行交接典禮，因慶祝她是我國第一艘自費購買的陽字型軍艦，故命名為「慶陽」軍艦，編號DD-9(後改為DD-909)。

民國64年4月2日十時十分，該艦成功發射海軍第一枚防空飛彈，使海軍從此邁入了飛彈時代。75年5月至77年4月，持續完成雄風二型飛彈試射任務，成為兼具三度空間作戰的現代化戰艦。

慶陽軍艦在海軍服役28年餘，歷經20任艦長，擔負偵巡、外島運補護航、護漁及各項演訓等任務，於民國88年7月16日除役。(取材自老軍艦的故事)

