

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-1/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，將使水面艦的艤跡信號（wake signature）相應地減少，這可抵銷艤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。