

中共海軍核動力潛艦永磁推進電機之研析

著者／沈達萬、賴璽互

國防大學理工學院 97 年班，國防大學海軍指揮參謀學院 109 年班、
國防大學船研所碩士班 106 年班，現服務於海軍造船發展中心

海軍軍官學校 90 年班、國防大學海軍指揮參謀學院 102 年班、
國立臺灣大學國家發展研究所碩士，現服務於國防大學海軍指揮參謀學院

中共海軍的造艦技術不斷精進，尤其對於潛艦的性能要求，除依作戰需求須具備一定的打擊力及續航能力外，潛艦推進系統的低噪音、高效率及穩定性是重要性能指標，而中共近期研製的第三代核動力潛艦推進系統將採用永磁推進電機，其是以永久磁鐵替代傳統推進電機勵磁裝置的技術，且均可同時滿足上述所追求之性能指標。永磁推進電機的研發也表明：中共已成熟運用稀土資源於軍事領域的關鍵技術，且突破以往「技術外援」窠臼，進而領先其他先進國家核動力潛艦的發展水平。提高其軍事優勢！

運用 SWOT 分析永磁推進電機的優弱勢、可能創造的機會與未來面臨之威脅，所謂「以敵為師可以知興替」：為了防備中共海軍核動力潛艦降噪技術突進發展的威脅，我國應開始重視磁性偵測儀的運用效益，而非僅是應用聲紋截收之方式，俾使未來反潛戰術更趨靈活與多元，可使中共新一代的核動力潛艦喪失預期之隱蔽優勢，以提高我未來反潛偵蒐作為之效益。

壹、前言

核動力潛艦是重要海上威嚇力量，世界海軍強國均已投入大量的資源研發其關鍵技術，特別是推進系統的技術研發一直都是世界海軍強國的重點。發展核動力潛艦的初衷是利用核反應爐的大功率特性，使核動力潛艦潛航時能夠獲得長時間的高航速優勢，且利用其不依賴空

氣潛航而獲得隱蔽性。但是隱蔽性僅是倚賴長時間潛航是相當不足的，潛艦如要具備優異的隱蔽效果，而不被敵方的聲納所偵測發現，其潛航期間必須非常安靜，故噪音值才是潛艦隱蔽性的重要評定指標。

1986 年，德國西門子公司率先開發永磁推進電機應用至海軍水面艦艇，發現能降低噪音，並提高輸出功率。促使世界海軍強國潛艦陸續

研製永磁推進電機，先由日本蒼龍級潛艦及德國 214 型潛艦等常規動力潛艦應用案例，證實了永磁推進電機應用在潛艦的可行性。目前美、英、法等世界海軍強國都已經公開宣布：下一步的發展是開始在核動力潛艦上運用大功率永磁推進電機的研究。

美國海軍現役最新型的第四代戰略導彈核動力潛艦為俄亥俄級潛艦（Ohio-class submarine），該型潛艦首艘自 1976 年開始服役，迄今已近 40 餘年。考量現代對應的偵潛科技日益先進，且潛航時的輻射噪音特性為潛艦之重要戰力指標，美國海軍已於 2016 年與通用動力電船公司簽署《潛艇通用建造戰略》（Submarine Unified Build Strategy, SUBS），其主要目的是開發下一代「哥倫比亞級核動力潛艦」（Columbia-class submarine），以逐步取代俄亥俄級潛艦，因此該項計畫亦稱《俄亥俄級潛艦取代專案》（The new Ohio Replacement Program, ORP）。研發計畫提及：美國海軍的新一代核動力潛艦推進系統也將引入永磁推進電機的概念設計，以提高其作戰性

能，預計於 2021 至 2039 年間陸續產製 12 艘次。¹

此項新的科技，中共也並未缺席。中共海軍近年來投入大量成本於永磁推進電機的研製，² 中共國家船舶動力與機電領域的著名專家馬偉明教授帶領研發團隊，突破永磁推進電機的關鍵技術奠定基礎，產製了 2 兆瓦級的陸基永磁推進電機，並於 2016 年 1 月 8 日中共國家科學技術獎勵大會上獲得國家科學技術進步獎及創新團隊獎等殊榮。³ 因此研判中共對於核動力潛艦永磁推進電機科技，已持續投入大量的研發成本，⁴ 未來中共核動力潛艦是否能夠如同常規動力潛艦般，呈現跨越式發展，值得持續關注。⁵

據 2017 年 10 月 23 日中船重工的官方發表指出：中共海軍七一二所研發的首艘安裝永磁推進電機之排水量 3000 噸潛艦已於海南三亞試成功，惟相較於排水量高達 7000 噸的核動力潛艦仍有相當大的發展空間，其軸馬力差距有 5 倍之多，故可研判中共海軍仍有部分關鍵技術尚待突破。

本文章的研究目的：基於中共海軍核動力潛

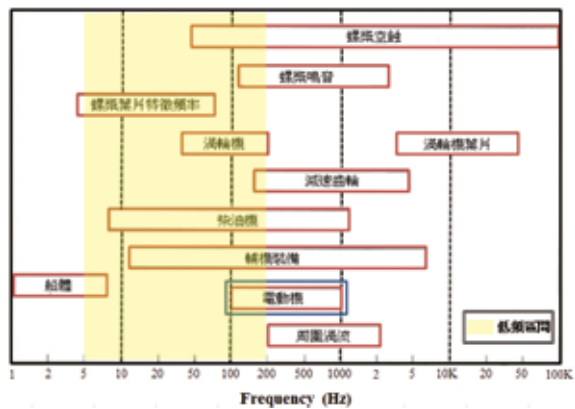
- 1 Dave Majumdar, “Beyond the Ohio-Class: Inside American’s Next -Generation Missile Submarine,” The national interest, 2016/5/19, <https://nationalinterest.org/feature>（檢索日期：2020 年 2 月 25 日）
- 2 李亞旭，〈永磁同步推進電機－潛艦新型推進系統〉，《NAVAL FORCES》，第 4 期，1996 年，頁 49。
- 3 熊蜂，〈中國全電化艦船技術世界領先「戰艦有」中國心〉，《環球網》，2016 年 3 月 28 日，<https://mil.huanqiu.com/article/9CaKrkJUQnt>（檢索日期：2020 年 5 月 12 日）
- 4 楊家鑫，〈中國大陸首台潛艇！永磁電機實挺試驗成功〉，《中時電子報》，2017 年 10 月 24 日，<http://www.chinatimes.com/amp/realtimenews/20171024002904-260409>（檢索日期：2020 年 4 月 12 日）
- 5 相關專有名詞說明：中共海軍對於核動力潛艦稱之「核潛艇」，並依用途區分為「彈道導彈核潛艇」及「攻擊型核潛艇」等兩種類型，國內文獻大致分別以「戰略彈道飛彈核潛艦」及「核攻擊潛艦」稱之；中國船舶重工集團公司，《人民海軍艦艇全譜》，（北京：現代船艦雜誌社，2017 年），頁 52。

貳、中共海軍核動力潛艦發展永 磁推進電機之需求

一、解決核動力潛艦噪音過大之問題

潛艦推進系統設計相當繁雜。⁷

核動力潛艦的噪音來源計有「機器噪音」、「葉噪音」及「流體噪音」等三大類，其中最主要來源是核反應爐及推進系統所產生「機器噪音」，偵潛的定位方式是藉由噪音特徵識別。噪音劃分為高、中及低頻帶等三類，而低頻噪音為 5 ~ 200Hz 區間：在物理特性上，低頻噪音傳播較不易衰減，故潛艦的低頻噪音較易被偵獲，而致使潛艦的方位暴露。⁸ 低頻噪音源為繁雜的機械元件構成之推進系統，而推進電機的噪音亦為來源之一（頻帶 100 至 1000Hz 區間，如圖 1 所示）。



目前中共海軍現役核動力攻擊潛艦的低頻帶噪音分析比較圖（如圖 2 所示），雖然第一、二代核動力潛艦的低頻噪音有降低之趨勢，⁹但仍超出 140dB 吵雜（Noisy）等級指標以上，且相較於美軍現役的維吉尼亞級核動力潛艦，仍然有相當大的差距。在海洋環境中除了載具自身所產生出的噪音外，主要還有海洋背景噪音約 90 分貝（如圖 3 所示），如果能夠將潛艦的低頻噪音值減至海洋背景噪音值以下，則將難以藉由聲納裝備偵知潛艦的水下方位及距離，美軍的維吉尼亞級核動力潛艦目前噪音值 95 分貝已相當接近水下背景噪音。因此，相較於中共在水下靜音部分仍取得相當之優勢。

中共 093B 型核攻擊潛艦於 2018 年 1 月 12 日曾遭受水下聲波監聽系統的壓制，被迫在東海浮出水面，可顯見噪音過大的問題已限制其作戰運用。¹⁰

家的核動力潛艦推進系統應用永磁推進電機之主要優勢是低噪音，且能夠提供高功率密度的穩定輸出。¹³ 因此，據聞中共海軍七一二所當局正積極研發永磁推進電機的技術，以解決中共海軍核動力潛艦長久以來噪音過大的問題。

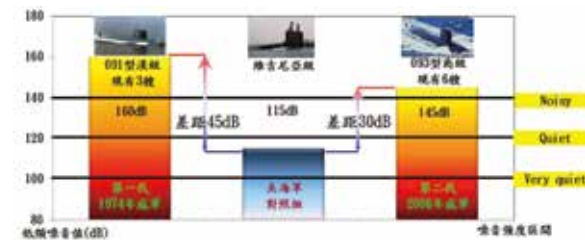


圖 2 中共海軍核動力潛艦低頻噪音分析比較圖

資料來源：Matt, “Submarine Noise“, Submarine Matters, 2016/10/6, <<https://gentleseas.blogspot.com>>

（檢索日期：2020 年 4 月 9 日）

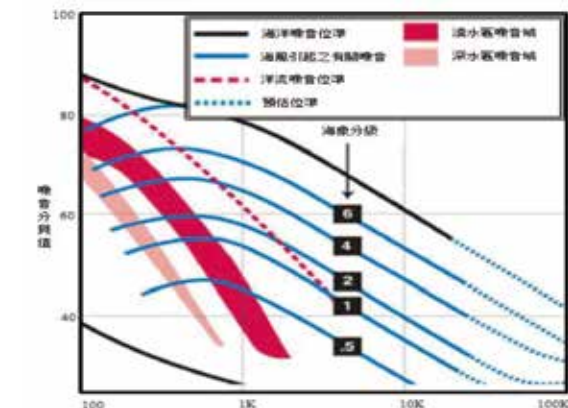


圖 3 海洋環境噪音主要聲源分布圖 (Wenz 1962)

資料來源: Royal Institute of Technology, "Some statistical properties of the ambient noise in the Baltic Sea and its relation to passive sonar," 2015, pp. 5.

10 軍武中心，〈海底 SOSUS 系統全程監聽，解放軍被逼出水面？〉，《Ettoday 新聞雲》，2018 年 1 月 16 日，〈<https://www.ettoday.net/news/20180116/1093744.htm>〉（檢索日期：2020 年 5 月 12 日）

11 India, “Understanding China’s submarine capabilities: Undersea competition in the Indo-Pacific,” 2019 年 6 月, No. 33, pp. 11.

12 平可夫，〈從 094 戰略核潛艇設計看 JL-2 核導彈〉，《漢和防衛評論》，2012 年 4 月，頁 28。

13 梅瑞經，〈船艦電力推進的發展方向〉，《船電技術》，第 5 期，1998 年 6 月，頁 48。

二、第三代核動力潛艦性能提升之迫切需求

核動力潛艦是極具有威嚇效果的戰略性武器，世界先進國家已近代持續投入大量成本進行關鍵技術研發。中共海軍長久以來亦將核動力潛艦列為優先研製的載具，永磁推進電機為降噪及推進系統性能提升的改善方案選項之一。中共海軍核動力潛艦的戰略運用區分計有「戰略彈道飛彈核潛艦」及「核攻擊潛艦」等兩個型式，其中，核動力戰略導彈潛艦搭配巨浪系列潛射飛彈之威嚇，對區域勢必造成極大的威脅，另外核攻擊潛艦亦能擔任戰略巡航，尤其未來可肩負航母戰鬥群水下護航兵力。

（一）戰略彈道飛彈核潛艦方面

2019 年 10 月 19 日時，中共 094 型戰略彈道飛彈核潛艦在南海區域意外曝光蹤跡，首先揭示了中共勢必要確保在海上通道及補給線的暢通，¹⁴ 另外也證實了中共有計畫提升核動力潛艦的作戰性能，以在必要時刻反制敵軍的突襲。¹⁵

中共國防面對「印太戰略」的軍事脅迫壓力之下，中共於 2019 年 7 月發表「新時代的中國國防」白皮書強調，要求解放軍「著眼捍衛國家統一，加強以海上方向為重點的軍事鬥爭準備」，將在西太平洋阻絕美軍之反介入作戰為

首要目標，中共海軍勢必要積極投入新一代核動力潛艦之研製階段，提高中共在印太區域戰略佈局重點。¹⁶

戰略彈道飛彈核潛艦所裝配的「巨浪二型」潛射戰略導彈射程高達 7,400 公里，足以威嚇印太區域的台海、南海及印度國土等關鍵區域，但中共海軍的南海艦隊現僅有四艘戰略彈道飛彈核潛艦，仍不足應付印太區域的兵力部署。且現役的 094 型戰略彈道飛彈核潛艦的輻射噪音仍然過大，易被美軍所偵潛反制，因此中共海軍對於第三代核動力潛艦的兵力需求實為迫切，且降噪方面的研製需求更為重要。另外，中共海軍於 2019 年 7 月 28 日至 8 月 2 日時，



圖 4 中共導彈射程範圍說明圖

資料來源:Office of the Secretary of Defense, “Military and Security Developments Involving the People’s Republic of China 2019,” 2015/5, pp. 46.

在東海區域試射最遠射程可達 12,000 公里的「巨浪三型」潛射戰略導彈，¹⁷ 足見中共海軍未來將部署戰略彈道飛彈核潛艦至相關區域，搭配潛射戰略導彈之威嚇，對其印太區域造成極大的威脅，更能夠對美國本土政經重點區域構成核威懾（射程範圍說明如圖 4 所示）。¹⁸

（二）核攻擊潛艦方面

核攻擊潛艦所擔負的任務除戰略巡航外，另有各個任務編組的重要水下護航兵力，其中尤以航母戰鬥群護航兵力為中共當前重要課題。

國防安全研究院所公布的「2019 中共政軍發展評估報告」提及：中共海軍計畫 2030 年將建立 4 個航空母艦戰鬥群，以中共海軍航母戰鬥群的任務需求而言，航母編隊需要具有相當的續航力及攻擊力的護衛。¹⁹ 一個航母機動編隊需要配置核攻擊潛艦至少 1 艘次，再以「三三制」替換計算（一艘值勤、一艘訓練及一艘維修之原則），²⁰ 一個航母機動編隊至少有 3 艘核攻擊潛艦之兵力需求，中共海軍為了滿足未來 4 個航空母艦機動編隊的發展計畫，應有 12 艘的核

攻擊潛艦的兵力建制預估量，對照中共現僅有 6 艘核攻擊潛艦，²¹ 顯見中共核攻擊潛艦兵力已無法滿足 2030 年航母戰鬥群建置需求，足見其兵力需求確實甚迫！

中共核攻擊潛艦自 2006 年起以平均每 15 個月之頻次產製 1 艘次，²² 並由衛星偵照情資顯示：中共渤海造船廠的核動力潛艦生產線，自 2017 年起已暫緩核攻擊潛艦的產製，研判中共第二代核動力潛艦有噪音過大等致命缺陷仍無法改善，研製重心應改為第三代核攻擊潛艦，續研製第三代 095 型核攻擊潛艦擔任航母護航兵力。

²³

三、自主發展新科技突破「技術外援」窠臼

中共在國防科技研製過程不想完全仰賴國外採購的管道進行，主要是有兩個原因：第一，中共有「國防自主」的目標要求；第二，中共有時也對於國外採購進口的裝備不甚滿意。因此，中共目前積極用進口或共同生產零組件，自力組裝武器裝備，以突破先進裝備系統的關鍵技術，進而主導整個研製過程，期能達到「成

14 林永鵬，〈中共的南海策略與我國因應之道〉，《海軍學術雙月刊》，第 5 期，2019 年，頁 45。

15 劉宜庭，〈勾到越南漁網？中共核潛艦南海意外曝光〉，《自由時報新聞網》，2019 年 10 月 19 日，〈<http://news.ltn.com.tw/news/world/paper/1325869>〉（檢索日期：2020 年 4 月 12 日）

16 中華人民共和國國防部，〈新時代的中國國防白皮書〉（法規文獻），頁 1-16，《中華人民共和國國防部》，〈http://news.mod.gov.cn/big5/regulatory/2019-07/24/content_4846424_16.htm〉（檢索日期：2020 年 4 月 17 日）

17 財團法人國防安全研究院，〈2019 印太區域安全情勢評估報告〉，2019 年 12 月，頁 23。

18 同註 9，頁次 15。

19 財團法人國防安全研究院，〈2019 中共政軍發展評估報告〉，2019 年 12 月，頁 100。

20 晃彥，〈官方首次明確「第二艘航母」消息 或已施工建造〉，《香港文匯網》，2015 年 2 月 1 日，〈<http://news.wenweipo.com/2015/02/01/IN1502010019.htm>〉（檢索日期：2020 年 2 月 25 日）

21 D-Mitch, 〈The People’s Liberation Army Navy submarines today〉，《NavalAnalyses》，2018 年 4 月 22 日，〈<https://www.navalanalyses.com/2018/04/infographics-31-peoples-liberation-army.html?m=1>〉（檢索日期：2020 年 2 月 25 日）

22 Congressional Research Service, “China Naval Modernization: Implications for U.S. Navy Capabilities – Background and Issues for Congress,” 2020, 04, 24, pp. 7.

23 平可夫，〈中國製造航空母艦〉，《漢和防衛評論》，2010 年 9 月，頁 30-31。

本節約」與「突破技術外援」等目的要求。²⁴

中共核動力潛艦與常規動力潛艦發展歷程不同，早期無法獲得蘇聯援助，因此只能採取「自主研發」的途徑，在無外援狀況下，其核動力潛艦始終存有無法解決的問題。其發展核動力潛艦可追溯至 1960 年代，中共海軍於 1967 年 6 月在葫蘆島啟動第一代及第二代之兩階段的戰略彈道飛彈核潛艦計畫，但中共在當時對於核動力潛艦的關鍵技術及建造經驗相當不足。

（一）第一代 091 型核攻擊潛艦：研製的最後階段仍需要法國的技術外援，才能夠在 1970 年順利下水，但該艦仍存在著推進系統噪音過大的致命缺點。

（二）第二代 093 型核攻擊潛艦：研製過程相當緩慢，其原因是推進系統及戰系裝備等關鍵技術難題無法克服，也是經由俄羅斯魯賓海洋工程設計局（The Central Design Bureau for Marine Engineering “Rubin”）的技術外援，且構型在仿製俄羅斯勝利 3 型潛艦的基礎上進行，直至 2002 年才順利下水。²⁵

綜觀中共海軍第一、二代核動力潛艦的發展沿革，雖然建造過程均需要法國與俄羅斯等先

進國家技術外援，才能夠突破大量的關鍵技術難題，如耐壓船殼、推進系統、靜音設計、戰鬥系統、武器系統和匿蹤設備等項目。但是，中共海軍在核動力潛艦的設計、建造及關鍵技術，應累積相當多的研製基礎。

中共高層也深知國防科技研發一再依賴技術外援及仿製等方式存在高風險，因此希望透過自主研製方式突破關鍵技術，以穩定中共本身的國防科技發展。中共海軍目前積極發展永磁推進電機應用至核動力潛艦的推進系統，在控制系統及大功率輸出仍然有控制問題及成本問題等關鍵技術需要突破，2019 年，唐任遠於《現代永磁電機－理論與設計》書中論述永磁推進電機確實具有相當多的優勢，且未來該技術的應用領域遍及共軍各個軍事工業領域。²⁶ 如果能夠將永磁推進電機裝備在第三代核動力潛艦推進系統，除了能夠解決長久以來水下噪音的難題，將不用再受限關鍵技術無法取得的困境。

參、中共海軍核動力潛艦永磁推進電機之發展現況

中共海軍為了核動力潛艦推進系統降噪的問題付出許多研製成本，仍無法徹底解決核動力潛艦噪音過大的問題，其中推進系統的各個機械單元均是噪音源。而主推進馬達的降噪關鍵技術研發是噪音過大問題的必要解決手段之一。²⁷ 據悉，中共海軍於 90 年代已著手研製永磁電機裝配於第三代核動力潛艦的推進系統，以解決核動力潛艦長久以來噪音過大之問題。

推進電機建立內部磁場計有勵磁及永磁等兩種方式，勵磁推進電機是在勵磁繞組通以電流來產生磁場，而這種方式需增配勵磁繞組及對應的組件，在運轉過程中會有過多的能量損耗。²⁸ 統核動力潛艦的主推進系統是採用勵磁電機，但卻有效率低及噪音過大等問題存在；另外永磁推進電機是利用永磁材料的特性，不再需要勵磁繞組就能建立磁場。

表 1 效益分析表

優勢	體積	重量	輸出效率	噪音值
增益值	減少 60%	減少 40%	增加 4 ～ 13%	降低 20dB
應用價值	替內部船艙空間有限的核動力潛艦，增加空間應用彈性，未來可提高彈藥酬載。 ²⁹		增加運動速率	輸出轉矩充裕，不需藉由減速齒輪來提高軸馬力，故噪音量可明顯降低約 20 分貝。 ³⁰

資料來源：筆者自行綜整繪製

一、效益分析

永磁推進電機具有四個主要效益，詳細分析（如表 1 說明）

第二代 093 型核攻擊潛艦的低頻噪音值 145dB，假設未來第三代核動力潛艦能夠順利應用永磁推進電機，它的低頻噪音值研判可降至約 125dB，雖然其噪音值尚未低於海洋環境噪音 90dB，但已相當接近美國現役維吉尼亞級核動力潛艦的 115dB 噪音等級。

由於，水中的噪音是藉由「水」介質來傳遞聲波能量，而水下噪音計有音強、音頻及持續時間等三個量測指標。一般常見的分貝量值是聲音強度的表示單位：簡言之，在相同量測距離下量測兩個相差 3dB 的聲源，其聲音強度相差了兩倍；而相差 20dB 的聲源的強度實際上相差了 100 倍，因此對於中共海軍應用永磁推進

24 Richard Fisher, “Military Sales to China: Going to Pieces,” China Brief, 2002/11/21, <https://www.strategycenter.net/research/pubID_14/pub_detail.asp>（檢索日期：2020 年 3 月 10 日）

25 牧仁，〈中共潛艦武力之發展〉，《青年日報》，2005 年 11 月 7 日，版 3。

26 唐任遠，《現代永磁電機－理論與設計》（北京：機械工業出版社－電工電子分社，2019），頁 122。

27 張延飛，〈跨入 21 世紀的潛艇技術〉，《現代軍事》，2000 年 9 月，頁 41。

28 吳海鷹，〈潛艦永磁發電機〉，《船電技術》，第 2 期，2001 年，頁 60。

29 李亞旭，〈永磁同步推進電機－潛艦新型推進系統〉，《Naval Force-SUBCON》，第 11 期，1996 年，頁 49。

30 翁存海，〈潛艦推進系統中的永磁推進電機和永磁發電機〉，《NAVAL FORCES》，第 8 期，1996 年 6 月，頁 37。

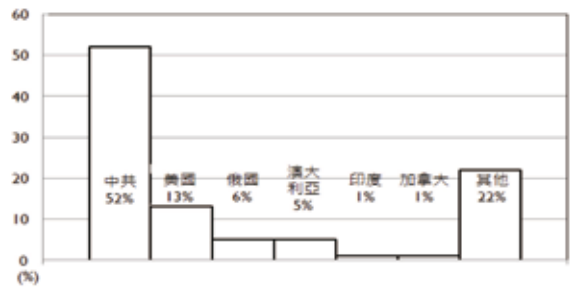


圖 5 世界各國稀土資源比例分布圖較圖
資料來源：邱林，〈稀土的軍事價值越來越重要〉，《中國有色金屬報》，第 4 版，2017 年 10 月，頁 1。

電機降噪 20dB 的效益是相當大的，對於偵知距離能夠大幅減少，不可不慎！

二、關鍵優勢

中共在永磁推進電機的發展之所以能夠顯著進步，這和中共國家天然資源及全國研製能量大量挹注等兩個關鍵優勢有必然的關聯性存在，這也確立了中共核動力潛艦未來應用永磁推進電機的發展基礎。

（一）稀土存量世界最高

永磁推進電機的研製與稀土資源發展有密切關聯，由於中共國家本土的稀土儲量占世界總量 52%，次為美國僅有 13%(如圖 5 所示)，大幅提高了中共發展永磁推進電機的資源優勢。

³¹ 但是目前中共對於稀土的開發能量，相較美國及日本等先進國家較為不足，因此中共在稀土

開發能量方面仍有相當大的進展空間。

稀土除了能夠淬鍊成為永磁電機的磁性材料，另可廣泛應用於航太零件、電子、雷射、核能工業及超導體等尖端產業的範疇，故稀土資源對於國家未來科技發展的應用價值是不容小覷。

（二）國家研製能量大量挹注

中共對於永磁推進電機的新式科技已投入大量研製成本，於 1963 年創立的中船重工七一二所，為中共國家的船艦電力推進系統及其附屬設備之研發基地。³² 而在七一二所的組織當中，青島海西電機公司是最具有電力推進相關研發能量之核心結構。

隸屬於中船重工的渤海造船廠，是中共國家唯一具有產製核動力潛艦能力的造船廠，其具有三條核動力潛艦的生產線，可同時產製 6 艘次，³³ 相較於美國民間造船廠僅有一條核動力潛艦的生產線，僅可同時產製 2 艘次，故中共核動力潛艦產能目前已明顯領先世界各國。³⁴

三、尚待克服的限制因素

中共海軍現役的常規動力潛艦及核動力潛艦均是沿用傳統勵磁推進電機推動，永磁推進電機仍是處於研製的階段，而中共七一二所已先後開發了 25kw、51.5kw 及 200kw 等規格的永磁

表 2 限制因素分析表

區分	主要因素		次要因素	
說明	熱穩定性不足	電機內部磁密度極高，有運轉溫度過高的問題，易引發不可逆的退磁現象。	經驗基礎不足	由於中共過往對於永磁推進電機的經驗基礎不足，故需要重新分析電機起動、運轉及停機過程的磁場變化，尤以內部氣隙為重點，而完成最適化設計。 ³⁵
	機電尚未整合	永磁體與控制機電元件的結合為核心技術，以調節控制電機的轉速及轉矩等參數。 ³⁶	產製成本過高	由於永磁原料目前的提煉成本過高，故稀土永磁推進電機的產製成本仍較傳統電勵磁推進電機大。
解決途徑	要在短時間內突破，需循『仿製』或『技術外援』途徑。		在中共挹注大量國家研製成本之下，必能逐一克服。	

資料來源：筆者自行綜整繪製



圖 6 SWOT 分析說明圖
資料來源：筆者自行綜整繪製

推進電機實驗模型，為了達到核動力潛艦的推進軸系高轉速及高轉矩等輸出標準，就目前文獻資料顯示，大功率永磁推進電機的研製過程中尚有四個主要及次要限制因素需克服（如表 2 所示）。

綜上所述：中共在永磁推進電機的研發、製

造和應用等方面起步相較於其他西方先進國家較晚。但近年來，中共中船重工七一二所及海軍工程大學等科研所在永磁推進電機領域已逐步突破許多核心技術方面，在中共挹注大量研製成本的發展條件之下，以上各個限制因素必能逐一克服。

肆、綜合分析

面對中共海軍永磁推進電機應用於核動力潛艦技術創新，本文運用「SWOT」分析方法（說明如圖 6 所示），³⁷ 先從中共海軍核動力潛艦的視角思考：其本身具有的優劣勢；再研析近代反潛偵蒐裝備所帶來之外部威脅，以及水下戰場可利用的因應之道，最後再延伸探討潛艦推進器之未來發展方向。

31 邱林，〈稀土的軍事價值越來越重要〉，《中國有色金屬報》，第 4 版，2017 年 10 月，頁 1。
32 《中國船舶第七一二研究所官網》，〈<http://www.csic712.com/>〉（檢索日期：2020 年 6 月 14 日）
33 每點新防務，〈渤海造船廠承建我國全部核潛艇，095、096 型建造工藝流程不輸歐美〉，《KKNEWS 新聞網》，2017 年 9 月 28 日，〈<https://kknews.cc/military/8bpl29l.html>〉（檢索日期：2020 年 6 月 14 日）
34 盧伯華，〈陸渤海集團生產線落成或造新 096 戰略核潛〉，《中時電子報》，2016 年 8 月 31 日，〈<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20160831003179-260417?chdtv>〉（檢索日期：2020 年 6 月 14 日）

35 尹斌傳，〈艦船推進用永磁同步推進電機數學模型及控制系統研究〉，《船電技術》，第 8 期，1997 年 2 月，頁 7。
36 劉曉林，〈潛艇永磁電力推進控制系統研究〉〈哈爾濱工程大學碩士論文，2002 年〉，頁 3。
37 許如欽，〈做好策略規劃之 SWOT 量化分析手法〉（台南：成大出版社，2017），頁 75。

中共海軍核動力潛艦的永磁推進電機科技，就「降低自身噪音」及「提高運動速率」的顯著優勢而言，不論是就「潛艦作戰」或是「反制潛艦」的角度來看：增進自身聲納偵蒐效能、避免遭敵監偵的機率及降低被音響導引魚雷擊中的機率等三個應用價值。³⁸ 中共海軍未來具有遠距水下封鎖與隱蔽性良好的兵力投射能力，以威脅關鍵區域的主要海上交通航道，且我國周遭海域有高密集的商船往來，極易在水下環境造成大量背景雜訊，更增加了我反潛作戰的困難。

換言之，未來中共核動力潛艦的威脅將不容小覷，因此需持續蒐集周遭海域的水溫、背景、噪音、變速及深度等水文環境資料，以提升我聲納偵蒐的準確性。

一、永磁推進電機的優劣勢

在流場複雜的海域之中，中共海軍過往所研

製的第一、二代核動力潛艦推進系統所產生之低頻噪音，是容易遭被動式聲納所偵獲的主要來源。雖然，其應用永磁推進電機的使用模式與音頻特徵雖仍未知，但研判確實具有「大幅減少核動力潛艦的機械噪音」之主要優勢；並在輸出效率提升的效益之下，亦具有「提高運動速率」之次要優勢。

經由提高永磁推進電機內部的磁通量及磁密度，縱然能夠大幅提高輸出功率、降低工作溫度及機械噪音的強度，³⁹ 但隨著近代研製的稀土永磁產生的磁密度逐漸增加（如表 3 所示），⁴⁰ 其中鈷鐵硼稀土磁鐵磁密度竟高達 397.9（單位：J/m³），接續衍生了不利作戰因素：永磁推進電機所造成的磁場擾動，無法藉由潛艦之外殼遮掩而消除。

中共海軍核動力潛艦永磁推進電機，其內部永久（稀土）磁鐵的磁性特質是永久存在的，

表 3 歷代稀土磁鐵磁密度說明

項次	稀土永磁材質	研製年代	磁密度（單位 J/m3）
1	RC05	1967	199
2	R2C017	1973	258.6
3	鈷鐵硼	1983	397.9

資料來源：唐任遠，《現代永磁電機－理論與設計》（北京：機械工業出版社－電工電子分社，2019），頁 32。

38 陳企韶，〈反潛作戰〉，《海軍軍事參考譯著》，第 76 期，2000 年 11 月 30 日，頁 90。
39 楊耀民，《永磁式發電機磁通量及散熱效率改進之研究》（新竹：國立交通大學機械工程系碩士論文，2010 年），頁 79。
40 同註 23。

⁴¹ 且不會因為推進電機停止輸出動力而造成磁性衰減，因此可以研判中共海軍第三代核動力潛艦的永磁推進電機之磁通量必然較高，會顯著影響周遭環境磁場變化（潛艦周圍磁力線示意如圖 7），容易遭受磁性偵測儀反制偵獲。因此在磁場擾動之問題尚未改善以前，中共未來第三代核動力潛艦仍是無法獲得隱蔽優勢。

二、永磁推進電機創造的機會

自美國為了防堵中共海軍核動力潛艦的威脅兵力突破第一島鏈，長久以來和日本合作以科學前沿研究、海洋環境偵測、災害預警等方面需求，投入大量資源在印太關鍵區域建構水下聲波監聽系統（Sound Surveillance System, SOSUS），此系統也能截收潛艦的水下聲紋資訊，故亦稱為「魚鉤水下防衛線」（英文代號：Fish Hook，如圖 8 所示），其部署範圍涵蓋了宮古海峽、台灣東部海域、巴士

海峽至菲律賓海域等關鍵節點通道。⁴²

美國水下聲波監聽系統的發展背景：在冷戰時期為應對蘇聯潛艦威脅所建構的水下防衛線，其建構概念是在適宜的聲波傳導深度架設水下監控裝置，蒐集水中聲波和磁場的變化數據，以監測潛艦行動。⁴³ 中共海軍核動力潛艦未來在「大幅減少核動力潛艦的機械噪音」之主要優勢下，研判極有可能突破水下聲波監聽系統之束縛，而有機會對美國關鍵政經區域形成核威懾能力。

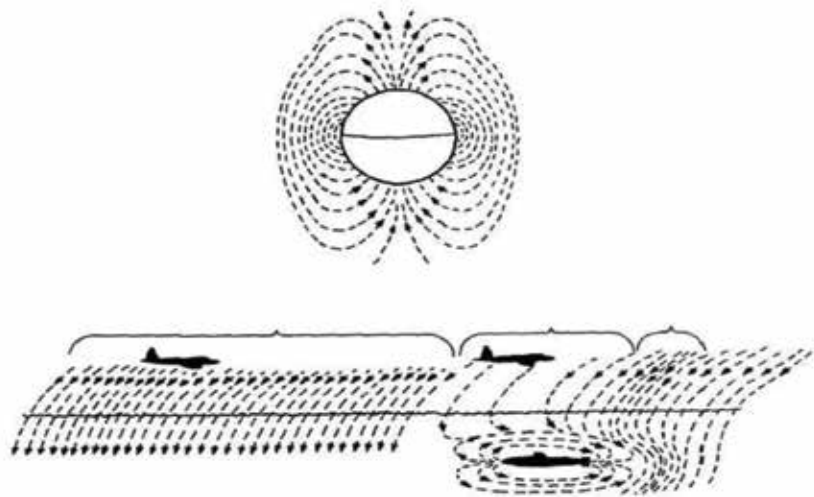


圖 7 潛艦周圍磁力線示意圖
資料來源：“Airman - Aviation theories and other practices“, ASW SUMMARY, <<https://navyaviation.tpub.com/14014/css/Magnetic-Anomaly-Detection-Mad-172.htm>>（檢索日期：2020 年 4 月 9 日）

41 Cullity, B. D.,” Introduction to Magnetic Materials.” Wiley-IEEE, 2008.
42 路西，〈日美部署最新水下監聽系統監視中國潛艇〉，《BBC News 新聞網》，2015 年 9 月 9 日，<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/world/2015/09/150909_japan_china_submarine>（檢索日期：2020 年 5 月 12 日）
43 The Australian National University, “Japan’s ocean surveillance and coastal defence capabilities,” 2015, pp. 51.

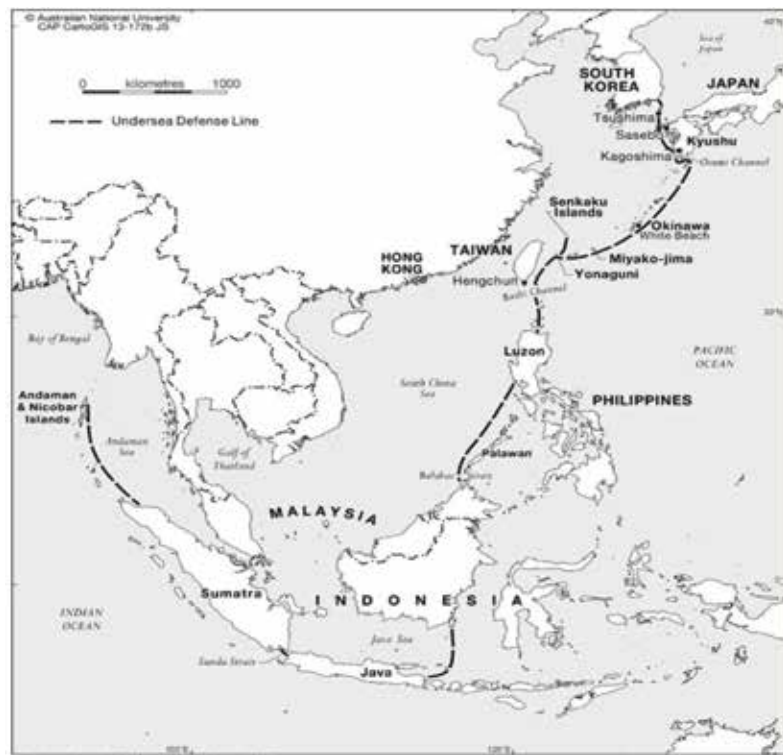


圖 8 水下聲波監聽系統示意圖

資料來源：The Australian National University, "Japan's ocean surveillance and coastal defence capabilities," 2015, pp. 54.

三、永磁推進電機所面對的威脅

目前主要偵潛定位裝備計有主動式、被動式聲標與磁性偵測儀，惟聲標裝置對於中共減噪後核動力潛艦的偵蒐效益減少。⁴⁴

（一）主要威脅

磁性偵測儀（Magnetic anomaly detector, MAD）可視為一個效益較高的偵潛裝置，它是利用潛艦本身的金屬艇殼會使地球磁力線集中，

形成疏密對比現象的特性來偵察潛艦的存在，且磁性偵測儀幾乎不受戰場的水文環境之影響。但因為只有飛機才適合運用磁性偵測儀偵測，且它的偵測涵蓋寬度通常小於一千公尺，也說明了飛機實施磁探清掃時，必需要以較低的高度飛行，因此都是

在其他探測裝備測得潛艦可能位置後，再用磁性偵測儀進行攻擊前的再確證或定位。

磁性偵測儀靈敏度會隨著潛艦目標的磁性強度、位置深度及飛行高度而訂定。在深海域時，磁性偵測儀對核動力潛艦的偵測距離可達水下 450 公尺，已足以應付共軍現役 093 型核攻擊潛艦的作戰深度 300 至 400 公尺；⁴⁵ 在淺海域時，偵測距離仍可達水下 350 公尺，⁴⁶ 可知磁性偵測儀無法偵測超出偵潛深度限制的深潛目標，另外常規動力潛艦的偵測距離僅有水下 260 公尺，故對於磁性偵測儀對於核動力潛艦的偵測效益較大。

美國海軍曾實際運用重量僅 38 磅的小型無人

飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）搭配磁性偵測儀，以 90 節的速度巡弋約 45 分鐘執行反潛任務，且在 P-3C 反潛定翼機上即可發射使用，驗證可大幅提高偵蒐效益，⁴⁷ 可供我國海軍反潛兵力能量建置方向借鑒。

相較於美國、以色列及中共等主要 UAV 無人機產製國家，我國對於 UAV 載具的研製雖然尚處於起步階段，但迄今已投入相當多的資源發展，因此我國中科院目前已研製的 UAV 定翼型載具計有騰雲、銳鳶及紅雀等三種型式，其中騰雲（Teng Yun）是屬於重量 600 公斤以上的大型無人機，驗證其耐航力可達 24 小時之久，⁴⁸ 如能仿效西方先進國家在無人機裝配磁性偵測儀，必能提高反潛偵蒐效益，且對於中共核動力潛艦採用永磁推進電機為推進系統的計畫，必能形成一大反制威脅因素。

（二）次要威脅

除了上述磁性偵測儀的主要威脅以外，中共新一代核動力潛艦仍會產生「特徵音紋」、「溫度」及「內波軌跡」等三個徵兆，而遭偵知其可能之方位。

1. 特徵音紋：無論核動力潛艦是採何種推進

裝備，依當今世界技術發展近況：流場推進力仍需經軸系裝置的能量轉換程序，因此俾葉在超過限制轉速時，其渦音是必然會隨之產生。另外，核動力潛艦也無法如同常規動力潛艦透過沉坐海底進行掩蔽，其核反應系統的冷卻泵仍會產生特徵音紋訊號。⁴⁹ 因此，透過被動式聲納進行核動力潛艦辨識的音紋分析也就相當重要。

2. 溫度：隸屬於美國中情局的科學技術局，曾於 1972 年出版《蘇聯反潛作戰能力報告》載明：核動力潛艦推進系統的核反應爐會產生大量的廢熱，所以單艘核動力潛艦的冷卻水每分鐘用量至少數千加侖，會明顯提高環境溫度至少 10℃，從而導致周遭海水的物理特性產生變化。⁵⁰ 因此，以紅外線感測的反潛裝置偵蒐核動力潛艦行蹤是極具效益之選項。

3. 內波軌跡：核動力潛艦的排水量相較於常規動力潛艦大，因此在潛航時造成的海洋內波軌跡會在海面上形成顯著的波痕，亦稱為「開爾文波（Kelvin -Wave）」。

44 霍普金斯著，張元岱譯，〈太平洋上的反潛黑洞〉《潛艦與反潛作戰》，第 5 期，1989 年 3 月，頁 158。

45 宋磊，〈大陸核動力潛艦發展近況〉，《觀察網》，2018 年 10 月，〈<http://www.observer-taipei.com/article.php?id=2190>〉（檢索日期：2020 年 4 月 8 日）

46 孟陽，〈常規動力潛艇 PK 反潛機〉（北京：機械工業出版社，2014），頁 40。

47 John Keller, "Industry asked to develop MAD-equipped UAV for ASW," Military Aerospace Electronics, 2004/10/9, <<https://www.militaryaerospace.com/unmanned/article/14034795/antisubmarine-warfare-asw-uav-magnetic-anomaly-detector-mad>>（檢索日期：2020 年 4 月 9 日）

48 The center for the study of the drone at bard college, "The Drone Databook," 2019, pp. 50.

49 西風，〈當代潛艇和反潛作戰〉（北京：中國市場出版社，2018），頁 42。

50 江飛宇，〈美國也不知的俄國偵潛高科技〉，《中時電子報》，2017 年 10 月 25 日，〈<https://www.chinatimes.com/amp/realtime/20171025005685-261802>〉（檢索日期：2020 年 6 月 14 日）

可能蹤跡。⁵¹

四、潛艦推進器未來發展方向

中共海軍核動力潛艦推進器，由於已投注相當多成本在永磁推進電機的研製，故未來核動力潛艦推進器的技術勢必將以「永磁推進電機」的理論基礎發展「集成電機推進器」及「磁流推進器」等兩項，目前世界先進國家尚未將這些前衛技術應用至核動力潛艦上，可知中共有企圖在核動力潛艦的新科技範疇領先世界各國。

（一）集成電機推進器

永磁推進電機的研製技術成熟後，下一步可將電動機、軸系及俾葉整併集結至艏導流管內，即為集成電機推進器（如圖 9 所示）。

減少常規軸系的複雜構型，可消除軸系的振動與雜訊等噪音源，其效益計有節省軸向空間、提高推進效率及簡化結構設計等三項。

（二）磁流推進器

永磁電機可供高功率電源：整合高負載的磁流推進器（如圖 10 所示），以取代常規軸系及俾葉的推進方式。

減少常規俾葉的構型設計，可消除俾葉空蝕效應及特徵頻率等兩個顯著噪音源。其效益計有提高匿蹤性、機動性及穩定性等三項。

五、小結

綜上永磁推進電機的優劣勢、機會及威脅分

析顯示，預判未來中共核動力潛艦完成永磁推進電機的研製應用後，降噪效果將明顯提升，我應重視磁性偵測儀的運用：審慎研擬現有可裝配磁性偵測儀各型戰具之相關戰術（法），獲致最大戰果，並蒐整建立其他可運用之水文資料庫，深入探討，針對其中共新一代核動力潛艦可能之弱點，以為剋制之道。

伍、結語

本文已針對核動力潛艦電力推進系統進行了深入的探討，考量永磁推進電機是極為複雜且先進的裝備，另有熱穩定性不足、機電尚未整合、經驗基礎不足及產製成本過高等四個限制因素尚待突破，近代對於核動力潛艦的大功率密度永磁推進電機研究經驗並不多，所以中共海軍沒有經驗可以借鑒的狀況下，進行第三代核動力潛艦的研製，如能領先美國等先進國家將永磁推進電機應用至核動力潛艦，將能突破以往「技術外援」窠臼，並領先其他先進國家核動力潛艦的發展水平。

永磁推進電機對於核動力潛艦推進系統的應用是未來必然趨勢，由前述中共未來核動力潛艦永磁推進電機之探討：首先，瞭解未來第三代核動力潛艦的低頻噪音值必然可大幅改善；第二，可知中共海軍長期以來在核動力潛艦的

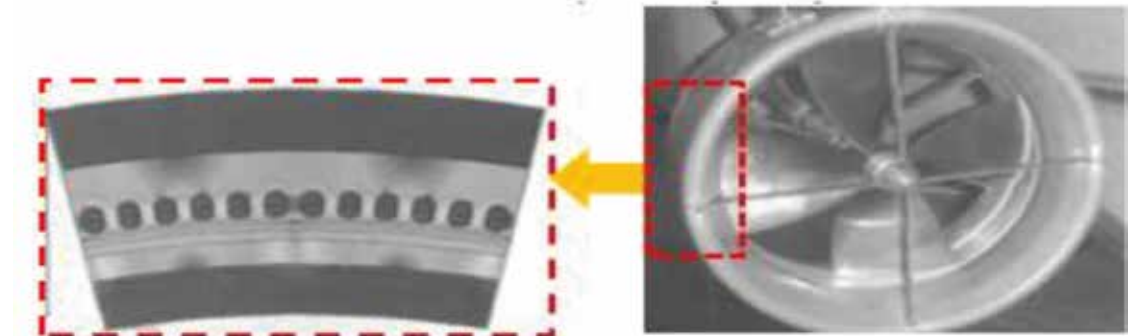


圖 9 集成電機推進器

資料來源：汪勇等，〈新型集成電機推進器設計研究〉，《中國船艦研究》，第 6 卷第 1 期，2011 年 2 月，頁 85。

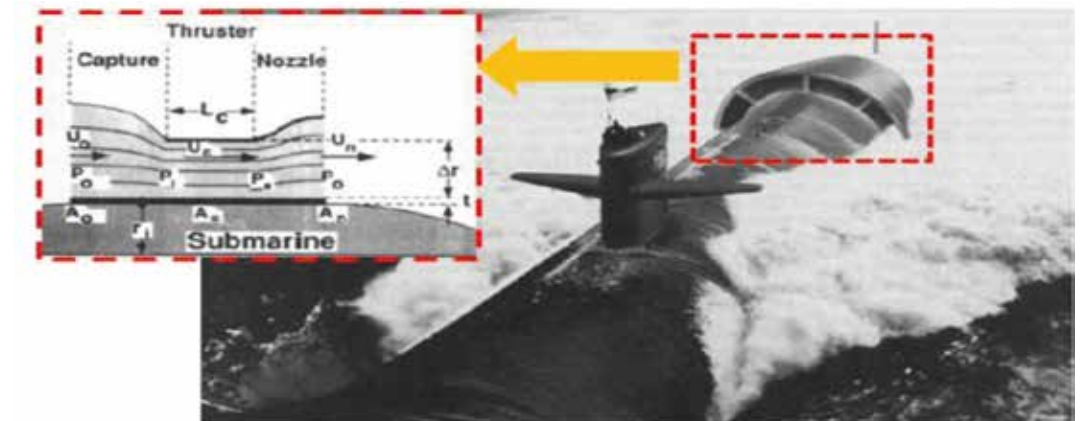


圖 10 磁流推進器

資料來源：Daniel W. Swallow, "Magnetohydrodynamic Submarine Propulsion Systems," 1991/5, pp. 146.

科技方面，企圖領先西方先進國家；第三，我國不應和中共較量潛艦的研製能力，而應在反潛裝備構成對比優勢；最後，我國應重視磁性偵測儀的運用，必能提高偵蒐效益。

為提升反潛偵蒐之效益，須達到我軍現有水下、水面及空中載具的整合運用，而非僅重視

單一載具的偵蒐力，俾能使多載具聯合作戰之反潛戰術更趨靈活與多元。另外，我國如能仿效西方先進國家在無人機裝配磁性偵測儀，必能節約戰場資源的挹注，且能夠加強我軍反潛預警能力，使得中共新一代核動力潛艦喪失其應有的隱蔽優勢，而掌握水下戰場的主導權。

51 〈海洋內部因素對潛艦作戰的影響〉，《KKNEWS 新聞網》，2018 年 3 月 27 日，〈<https://kknews.cc/military/61189yq.html>〉（檢索日期：2020 年 6 月 14 日）