

淺談潛艦「舷側陣列聲納」 性能分析比較

A Comparative Study on the Performance of Flank Array Sonar
in Submarines

海軍少校 許鎮顯、海軍上校 林健源

提 要：

- 一、潛艦聲納系統為現代水下作戰的核心感測裝備，其中「舷側陣列聲納」(FAS)具備補償艏、艉盲區、延伸探測基線及提升方位解析度等特性，並成為各國先進潛艦廣泛採用的主流配置。面對臺海周邊高噪音、多變水文與多方向威脅的環境特性，FAS對強化潛艦靜默監控與多向接敵能力，確實具有關鍵價值。
- 二、本文由潛艦聲納系統的分類與任務分工出發，分析FAS在現代潛艦感測架構中的戰術角色，並以德國與法國潛艦做為核心案例，比較其構型特徵、性能取向與作戰應用，並歸納其在不同戰場環境中的優勢與限制。
- 三、藉由國造潛艦「海鯤號」於「驗收測試」階段公開的資料，本文進一步分析可能採用的「舷側聲納」構型與性能方向，同時探討其在自主化建造、模組化設計、數據融合與戰術整合上的發展潛力，期為後續國造潛艦能量建構與系統升級，提供更多參考依據。

關鍵詞：舷側陣列聲納、潛艦聲納系統、被動聲學偵蒐、國艦國造

Abstract

- 1.Submarine sonar systems constitute the core sensory equipment in modern undersea warfare. Among them, the FAS has become a mainstream configuration widely adopted by advanced submarines due to its ability to compensate for bow and stern blind zones, extend the detection baseline, and enhance bearing resolution. In the high-noise, variable hydrological conditions, and multi-directional threat environment surrounding Taiwan, the FAS plays a critical role in strengthening silent surveillance and multi-directional engagement capabilities.
- 2.This paper begins with the classification and functional division of submarine sonar systems to examine the tactical role of the FAS within

modern submarine sensing architectures. Focusing on German and French systems as primary case studies, it compares their structural characteristics, performance orientations, and operational applications, and summarizes the advantages and limitations of FAS designs under various operational environments.

3. Drawing upon open-source data and publicly available observations from the HAT/SAT of Taiwan's IDS program, this study assesses the likely FAS configuration and performance orientation adopted. It further explores prospects for indigenous construction, modularized design, data fusion, and tactical integration, aiming to provide analytical insights for the future enhancement of Taiwan's undersea warfare capabilities and submarine system modernization.

Keywords: Flank Array Sonar, Submarine Sonar System, Passive Acoustic Surveillance, Indigenous Defense Submarine.

壹、前言

近年我國潛艦戰力建構進程大幅推進，其中首艘國造原型艦「海鯤號」的公開亮相與測試，應是最引發國內、外矚目的大事；期間歷時9年的研發與建造歷程，不僅是「潛艦國造」計畫的重要里程碑，亦展現我國在潛艦設計、造艦產業鏈整合與水下作戰系統自主化上的重大突破(如圖一)。¹該艦當前在「安全第一」原則下，除賡續確保各階段測試均符合安全與效能需求外，並強化測試管制與驗證程序之完整，俾成為完成國造潛艦的重要里程碑。再者，此一建造進程與作法，亦符合我

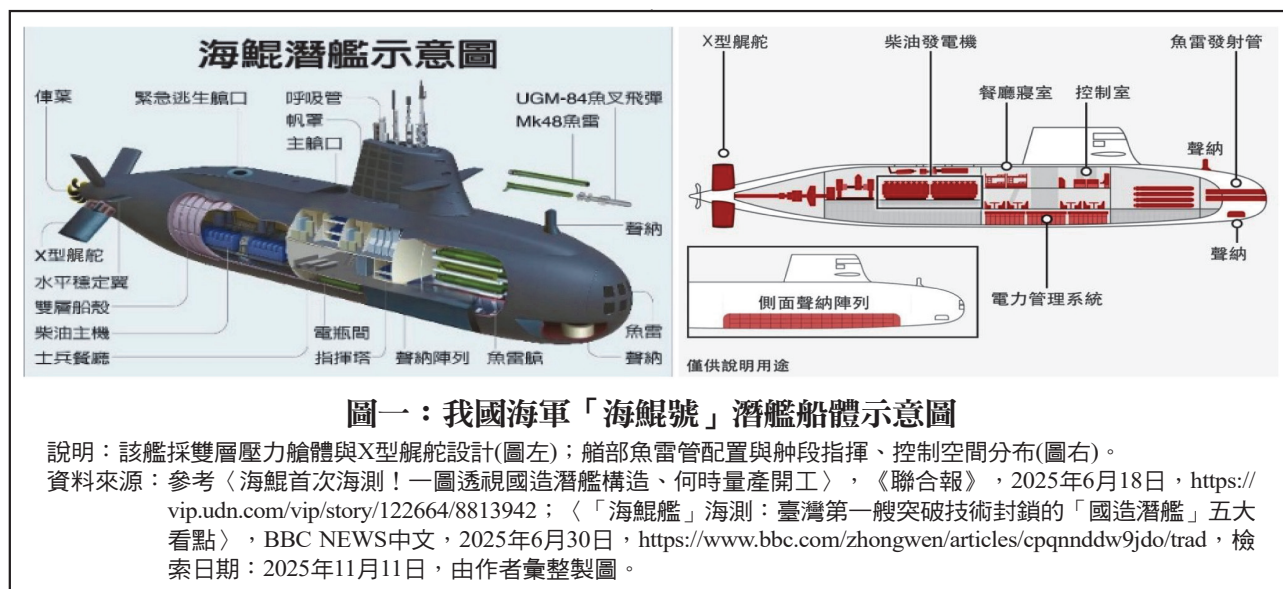
國《國防法》第22條「結合民間力量、以自製為優先」的核心精神，並帶動國內船舶、材料與電子工業的跨域合作，使潛艦國造計畫成為「國防帶動產業、產業支持國防」的最好印證。²

潛艦素有「水下系統工程極致」之譽，其建造需整合艦體結構、壓力艙工藝、靜音材料、導航感測、武器安全管理與戰系整合等多項尖端技術。在此龐大工程體系中，聲納系統更是潛艦最核心的感測與接戰資訊來源，其性能良窳與布設方式，將直接影響潛艦於水下作戰環境中的探測、識別、接敵與脫離能力。³對我國而言，周邊海域兼具高密度航運、複雜水文與

註1：朱明，〈潛艦國造7月重啟動2024年建成〉，風傳媒，2015年5月10日，<https://www.storm.mg/article/48644>，檢索日期：2025年11月2日。

註2：〈國防法〉，法務部全國法規資料庫，<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawSingle.aspx?pcode=F0010030&flno=22>，檢索日期：2025年10月23日。

註3：〈【社論】海鯤號首次海測 國防產業升級新里程〉，《青年日報》，2025年6月26日，<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1776058&type=forum>，檢索日期：2025年10月25日。



強烈敵情壓力，潛艦承擔的戰略嚇阻、交通線封鎖與水下監控等任務，更須依賴先進與全向布建的聲學感測系統，以維持長時間隱密監控與反制能力。

放眼全球，現代潛艦聲納系統已不再侷限於「艙部主動或被動陣列聲納」(Bow-Mounted Active/Passive Array，以下稱艦艙聲納、Bow)，而是逐步發展出「舷側陣列聲納」(Flank Array Sonar，以下稱舷側聲納、FAS)、「拖曳陣列聲納」(Towed Array Sonar，以下稱拖曳聲納、TAS)等多模組組合，透過「多源融合」(Multi-Source Data Fusion)與「數位波束處理」(Digital Beamforming, DBF)，⁴實現廣域監控、精準分類與高解析度感知

。「舷側聲納」在其中即扮演關鍵角色，不僅能補強艙、艙盲區並提升方位解析度，對我國高背景噪音、複雜環境與深海並重的作戰環境下尤具重要價值。當前，潛艦國造的持續推動，也成為中共操作「認知戰」的焦點，不少惡意訊息的不時出現，顯示潛艦國造似已超越軍事工程層面，成為戰略與心理戰的重要課題。⁵

因此撰寫本文主要目的，係從分析國造潛艦「海鯤號」可能的舷側聲納構型為切入點，並探討德、法國兩國「舷側聲納」(FAS)之發展經驗，分析其技術取向與戰術應用差異，同時推估我國潛艦於「驗收測試」階段之系統穩定性、探測範圍與方位解析度等驗證重點，據以提出校正與

註4：「多源資料融合」指系統可結合來自艦載各項系統感測器之資料，透過時間、頻譜與空間資訊比對與調整合，提高目標識別與判斷之可靠性；「數位波束處理」指系統可處理多筆水下環境聲波數據並進行處理，以分析與過濾水下聲波波束音頻，提升方位解析度與抑制環境噪音與干擾。

註5：葉素萍，〈資安人士：海鯤號遭錯假訊息攻擊 民眾要認清並破解〉，中央通訊社，2025年6月22日，<https://www.cna.com.tw/news/aip/202506220058.aspx>，檢索日期：2025年11月7日。

操作建議，做為後續改良與效能評估參考。另透過比較分析，凸顯FAS於水下作戰中的戰術價值，也藉由國際構型經驗之借鏡，為國造潛艦系統整合與「海上測試」(Sea Acceptance Test，以下稱SAT)建立安全可控之校正流程，進而強化臺海防衛所需之水下監偵與作戰能力。

貳、舷側聲納技術原理與構成

在潛艦水下作戰領域中，聲納系統是潛艦的「耳目」，能讓艦艇在黑暗的海底環境中感知四周動態；⁶其中「舷側聲納」(FAS)做為潛艦聲納網路的重要一環，具有其他聲納單元無法取代的特殊價值。為深入瞭解FAS的技術原理與構成，以下就聲納系統中的角色、基本聲學特性、系統構成要素，以及舷側與艦艏聲納兩者之間的互補關係，分別說明如后：

一、技術原理與聲學特性

(一) 舷側聲納在系統中的角色

現代潛艦的聲納系統通常由「艦艏聲納」(Bow)、「舷側聲納」與「拖曳聲納」(TAS)等組成，是一套綜整聲納系統的

偵蒐器。FAS固定配置於潛艦兩舷舳段位置，屬於被動聲納模組，能夠長時間隱蔽運作而不暴露潛艦行踪。⁷相較於艦艏聲納受艦體結構限制，而在前向約100度扇面內存在偵測盲區(即無法涵蓋艦艏正前方左右各約50度範圍)，⁸FAS則沿艦體縱向布置，提供更廣闊的側向探測視野，並有效降低系統在方位覆蓋的盲區。不僅如此，當FAS與TAS協同運作時，潛艦可實現近乎360度無偵測盲區的全向水下監測能力。由此可見，舷側聲納已成為潛艦綜合聲納體系中的核心組成，亦明顯強化潛艦水下各方位的目標搜索與警戒能力。

(二) 大孔徑低頻之聲學優勢

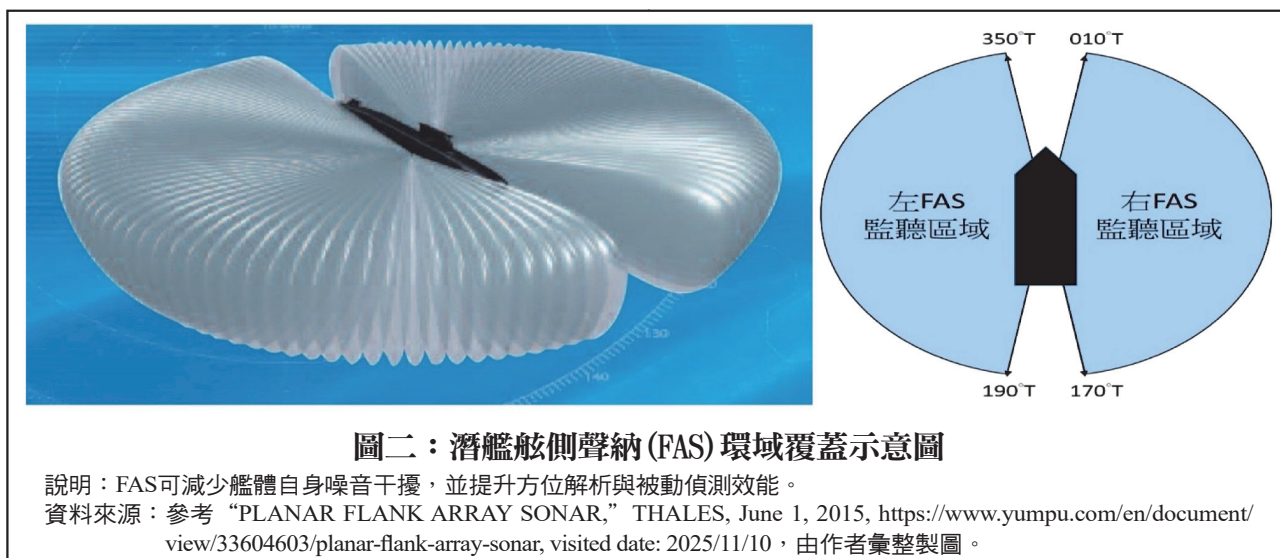
1. 「舷側聲納」(FAS)在聲學中的一大關鍵特性，在於其大尺度陣列孔徑及對低頻聲波的良好接收能力。由於係沿著潛艦艦體長度布設「長基線」⁹的聽音陣列，此款聲納在物理尺寸上，比艏聲納擁有更長的孔徑，因而具備更高的方位解析度，可以精確分辨來自不同方向的方位差異。同時，大孔徑也容許FAS能更有效接收較低頻率的聲波訊號，強化對低頻噪音目

註6：王燭華，〈獨家/潛艦原型艦設計、施工圖日前完成 潛艦國造終於有藍圖開工〉，菱傳媒，2021年12月28日，<https://rwnews.tw/article.php?news=4150>，檢索日期：2025年10月23日。

註7：Prabhat Ranjan Mishra, "Submarines to become deadlier with panoramic view of underwater threats using new tech," Mar 22, 2025, <https://interestingengineering.com/military/submarines-defense-bolsters-high-tech-sonar>, visited date: 2025/10/26。

註8：E. Honore, O. Lacour, R. Lardat, and S. Sitbon, "Improving submarine array integration for operational performance," UDT 2019 Conference Proceedings, https://cdn.asp.events/CLIENT_Clarion_96F66098_5056_B733_492B7F3A0E159DC7/sites/udt-2024/media/libraries/platform-design/51---Edouard-Honore-Paper.pdf, visited date: 2025/10/27。

註9：「長基線」(Long Baseline)指潛艦聲納陣列孔徑沿艦體長度延伸，跨越較大距離的配置方式。基線愈長，測向的解析度就愈高，能更精確分辨聲音來源的方位。



標的探測效能。¹⁰低頻音源在海中衰減較小，傳播距離較遠，因此舷側聲納常用於遠程被動偵聽，以提升潛艦對安靜目標的遠距離探測能力。¹¹

2. 據部分國際經驗與技術資料推估，FAS運作於低頻至中低頻聲波範圍，其有效偵測範圍可達10餘浬，甚至在良好環境條件下延伸至20浬(約37公里)等級。¹²然而此數據僅能做為參考值，實際效能仍受制於水下水文結構、海象變化與目標噪音強度等多重因素。由於其覆蓋艦體兩側約各160度範圍(如圖二)，可充分消除艦艏

聲納無法顧及的側舷區域；¹³透過廣域側向監聽能力，潛艦在保持自身靜音航行的同時，能對來自左右兩舷甚至艦艉方向的目標保持長時間監控。另外，FAS可在不易被敵方察覺的前提下，大幅提升潛艦對周邊動態的「態勢感知」能力。

(三) 被動測向定位與抵達時間差原理

1. 「舷側聲納」(FAS)於被動偵測、定位功能方面展現出獨特價値，尤其是運用「抵達時間差」(Time Difference of Arrival, TDA)技術；¹⁴透過比較同一聲源抵達左右舷陣列的時間差，聲納系統可推

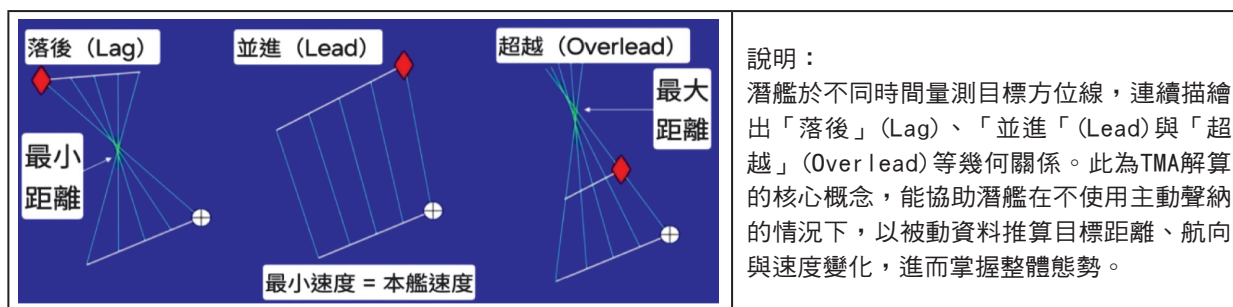
註10：S. P. Beerens, S. P. van IJsselmuide, A. C. van Koersel, “Passive Ranging with Flank and Towed Array Sensors,” UDT Europe (Undersea Defence Technology Conference), Jun. 2023, https://www.researchgate.net/publication/310464927_Passive_ranging_with_flank_and_towed_array_sensors, visited date: 2025/11/2。

註11：Lieutenant Commander Jim Halsell, U.S. Navy, “Sonar 101,” U.S. Naval Institute, Nov., 2024, <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2024/november/sonar-101>, visited date: 2025/10/24。

註12：“FAS 3-1 (CSU 83/90 Supplementary Flank Array),” CMANO-DB.COM, <https://cmano-db.com/sensor/1291/>；“TSM 2253 PVDF (DMUX 80),” CMANO-DB.COM, <https://cmano-db.com/sensor/1688/>, visited date: 2025/10/29。

註13：林澄貴，〈潛艦舷側陣列聲納的技術發展趨勢、安裝與測試之研究〉，《台船季刊》(高雄市)，第41卷，第1期，台船雜誌社，2020年6月，頁64。

註14：「抵達時間差」是一種被動定位方式，透過比較同一聲音訊號抵達潛艦左右舷陣列的時間差，推算聲源的大致方位與距離；原理如同人耳判斷聲音方向，哪一側先聽到，就代表聲音來自該側。



圖三：潛艦「目標運動分析」(TMA)幾何示意圖

資料來源：參考S. Haptonstahl, "Target Motion Analysis for the Localization of Subsurface Targets," Northern Illinois University, Dec. 3, 1999. Presented via SlideServe, Oct. 14, 2013, https://www.slideserve.com/linus/target-motion-analysis?utm_source=visited, visited date: 2025/11/15，由作者彙整製圖。

算目標方位角與相對距離，實現隱蔽而精確的被動定位。再者，由於舷側聲納橫跨艦體寬度，能提供獨立且延伸的測向基線，並可與艏部及拖曳聲納交叉比對，進一步提升定位精度。

2. 此種定位方式對「目標運動分析」(Target Motion Analysis, TMA)尤具助益，¹⁵潛艦可藉由持續量測目標方位線變化，推算目標之距離、航向與速度等參數。此一程序不僅能加速定位解算的穩定，更使潛艦能在全程靜默條件下精確掌握目標動態，達成隱蔽而安全的態勢判斷，避免因啟用主動聲納而暴露行踪(如圖三)。換言之，舷側陣列不僅補足了聲學覆蓋的不足，更在戰術上提供「先敵偵測、先敵接戰」的優勢。整體而言，其大孔徑低頻特性，結合TDA定位能力，已成為對抗靜音

航行潛艦與低噪水面艦的重要利器。

二、系統構成要素

(一)感測陣列安裝與布設

1. 潛艦「舷側聲納」(FAS)主要由感測陣列、訊號處理設備以及安裝支撐結構等部分組成。首先在感測陣列的配置方面，舷側聲納通常安裝於船體左右舷的舢段位置，其總長度約占艦長的三分之二，以確保足夠的聲學孔徑覆蓋範圍。由於潛艦結構特性，上甲板區域受到駕駛臺圍殼和武器裝載作業的限制，艦底則有壓載艙與各種進出水閥件的分布；因此，兩舷船舢被視為最適合布設大型聲納陣列的位置。¹⁶一般單殼體潛艦上，舷側聲納通常需以外掛式模組貼附於耐壓殼體外部；¹⁷而在雙殼體潛艦上，則可利用兩層殼體之間的空間，將陣列嵌入內部結構，從而兼顧聲

註15：「目標運動分析」是潛艦在靜默狀態下，長時間紀錄目標方位變化，逐步推算航向、速度與位置的過程。這可想像成連續描點，最終勾勒出目標的航跡，讓潛艦在不暴露行踪下掌握敵方動態。

註16：同註12，頁68。

註17：「單殼體潛艦」(Single-Hull Submarine)僅有一層耐壓殼體承受水壓的設計，此結構較為簡單，內部空間有限，因此外掛式聲納模組通常固定於艦體外部。

納性能與艦體流線的完整。¹⁸

2. 不論何種構型，陣列基座的安裝皆須緊密貼合艦體曲面並精確定位，以確保水聽器元件保持共線共面，從而發揮最佳波束指向性與探測效益。以法國「魷魚級」(Scorpène)潛艦為例，將舷側陣列聲納內嵌於外殼中，以降低航行阻力；而德國「212A級」與韓國「島山安昌浩(KSS-III)級」潛艦則採外掛式模組化設計。英國「機敏級」(Astute)潛艦則採用對稱式長條模組，配置於艇身兩側以擴展孔徑與基線長度；而美國「維吉尼亞級」(Virginia)潛艦則發展為多段式線型陣列，結合艦體表面散布的感測器，來強化廣域覆蓋與多方位靈敏度。這些設計雖各具差異，但共同目標皆在於延伸基線長度、擴大覆蓋範圍，同時兼顧水動力效能與結構整合(如表一)。

(二) 感測器技術與陣列結構

隨著材料、結構與訊號處理技術的進步，「舷側聲納」在感測器與模組設計上，呈現持續精進的發展趨勢。相關技術、結構概況，分述如後：

1. 在材料面上，感測器逐漸由傳統的「壓電陶瓷」(PZT)水聽器，轉向「聚偏二氟乙烯」(PVDF)薄膜水聽器。¹⁹PZT雖然技術成熟可靠，但因脆性高、耐用性不足，維護需求相對頻繁；相比之下，PVDF具備更佳韌性、寬頻響應與抗震衝擊特性，即使在水下湍流與低信噪比環境下，仍能維持穩定，亦具備有效降低訊號失真、延長使用壽命等特性。²⁰我國「國家科學及技術委員會」的研究指出，PVDF輕量且柔韌，能降低自艦噪音干擾，適合長時監聽，並有助於提升潛艦對信號微弱的目標探測能力。²¹

2. 在結構設計面上，舷側模組主要由骨架、吸音瓦、水聽器與外部護罩所構成(如圖四)。其中「吸音瓦」可有效阻絕艦體傳導雜訊，降低結構噪音對水聽器靈敏度之干擾，水聽器接收音訊經系統聲學處理與調校後，整體接收靈敏度約可提升6 dB；外層的「玻璃纖維強化塑膠護罩」則兼具透聲性與水動力優化功能，不僅可降低高速航行時的湍流噪音，亦增強潛艦抗爆震能力，使陣列得以遠離自身噪音，並

註18：「雙殼體潛艦」(Double-Hull Submarine)是在耐壓殼體外另覆一層流線外殼，兩層殼體之間形成可利用的空間，並將聲納模組嵌入外殼與耐壓殼體之間。

註19：「壓電陶瓷」(Lead Zirconate Titanate)為常用壓電陶瓷材料，具高靈敏度但脆性大、耐衝擊性差；「聚偏二氟乙烯」(Polyvinylidene Fluoride)為聚合物薄膜，質輕、柔韌，具寬頻響應與耐用特性，近年逐漸被引入並部分取代壓電陶瓷的應用。

註20：Siqi Wang, Yuhang Wang, Zhongrui Wang, Zhijian Wu, Yi Xin, and Xiaohua Zhou, "A brief review on hydrophone based on PVDF piezoelectric film," *Ferroelectrics* (Abingdon, UK), Vol. 603, Issue. Feb. 8, 2023, pp.150~156。

註21：李永春，〈PVDF壓電式水中聽音器的研究發展與應用成果報告〉(臺北市)，行政院國家科學及技術委員會，2008年，頁8~9、14~15。

表一：各國潛艦「舷側聲納」構型比較表

圖 例	潛艦級別	基 本 諸 元	陣列安裝及構型
	法國 Scorpène	單殼體設計 排水量2,000噸	平面寬頻型 外掛式
	德國 212A	雙殼體設計 排水量1,800噸	長條模組型 外掛式
	韓國 KSS-III	雙殼體設計 排水量3,300噸	長條模組型 外掛式
	英國 Astute	單殼體設計 排水量7,400噸	平面寬頻型 內嵌式
	美國 Virginia	單殼體設計 排水量7,800噸	平面寬頻型 內嵌式

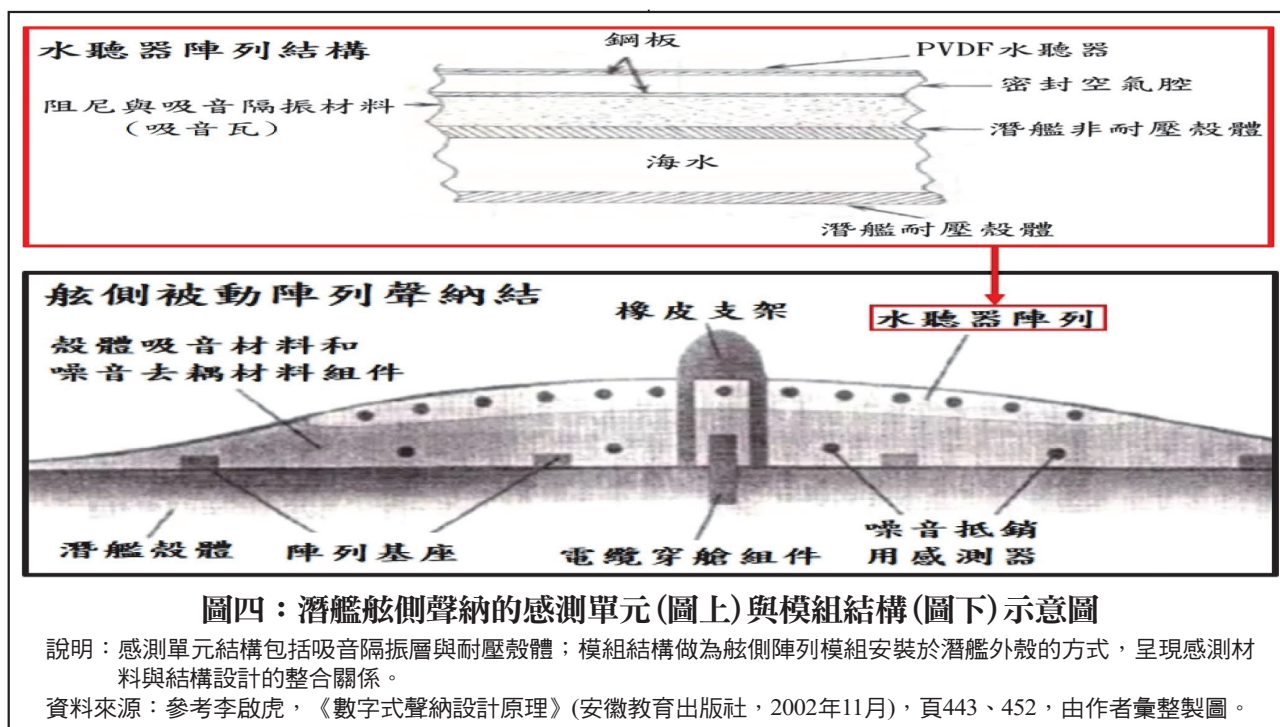
資料來源：參考“Brazilian Navy’s Riachuelo submarine completes surface and propulsion tests,” NAVALNEWS, Aug 14, 2020, <https://www.navalnews.com/naval-news/2020/08/brazilian-navys-riachuelo-submarine-completes-surface-and-propulsion-tests/>；“Type 212A class Submarine,” seaforces.org, <https://www.seaforces.org/marint/German-Navy/Submarine/Type-212A-class.htm>；“DSME kicks off construction of new KSS-III submarine for ROK Navy,” NAVALTODAY, Dec 31, 2021, <https://www.navaltoday.com/2021/12/31/dsme-kicks-off-construction-of-new-kss-iii-submarine-for-rok-navy/>；“Astute class Attack Submarine,” seaforces.org, <https://www.seaforces.org/marint/Royal-Navy/Submarine/Astute-class.htm>；“Virginia Class Submarine, SSN 774,” DEFENCETALK, Jun 29, 2009, <https://www.defencetalk.com/military/photos/virginia-class-submarine-ssn-774.36424/>, visited date:2025/10/19, 由作者彙整製表。

維持穩定接收環境。²²

3. 在訊號處理上，現代舷側聲納已不僅是單純感測單元，其核心技術為「數位波束處理」(DBF)與寬頻處理，能同時涵

蓋遠程監聽與近程分類，取代傳統僅能於單一頻段與波束運作的模式；不僅增強多目標同時偵測與噪音抑制能力，也確保潛艦在複雜水文與高雜訊環境下，仍能維持

註22：同註13，頁77。



穩定態勢感知。進一步來說，FAS亦可與艦艏及拖曳式聲納進行資料整合，為水下戰術圖像建構，提供更充分的決策基礎。

三、艦艏聲納與舷側聲納之關係

(一)涵蓋範圍的互補

「艦艏聲納」雖兼具主、被動功能，並在正前方扇形區域具有較廣頻帶的偵測能力，但先天存在約 $\pm 50^\circ$ 的側向盲區；再加上艦體結構限制，其陣列孔徑與工作頻率已難以進一步擴展，並使得長距離偵測能力較為受限。「拖曳聲納」(TAS)則能避開自身噪音影響，較易掌握於遠距低頻偵蒐，並延伸探測距離；然其在低頻偵蒐使用上，因放收時間較長及拖帶航速受

限等因素影響，降低潛艦機動性，且在淺水或狹窄水道往往無法靈活運用。相較之下，「舷側聲納」固定於兩舷船舳，能長時間穩定工作，特別適合持續監聽來自側前方與側後方的聲源，正好彌補艦艏與拖曳聲納的不足，在三者互補後，潛艦即能建立幾乎無死角的水下監測能力。²³

(二)功能特性上的互補

艦艏聲納因具備主動模式，適合近程測距與限制水域地形繪測，但在戰術運用上常因暴露風險而受限；至於拖曳聲納適用於長程低頻預警，但其單一路徑設計常造成左右舷方向辨識模糊，潛艦必須透過改變航向或輔助感測器才能消除。舷側聲

註23：林澄貴，〈潛艦舷側被動測距聲納設計及測試研究〉，《新新季刊》(桃園市)，第47卷，第1期，國家中山科學研究院，2019年1月1日，頁1~14。

表二：單模組架構與多模組架構運用之SWOT比較表

單一聲納模組 (Bow、FAS或TAS)	分析	多模組協同 (Bow+FAS+TAS)
結構簡單、操作維護需求低；空間與電力負荷小。	優勢 Strengths	幾乎無偵測盲區；低頻遠、近程精確測距互補；左右判別佳，容錯性高。
覆蓋範圍有限，存在明顯盲區；備援能力不足，一旦受損即單點失效。	劣勢 Weaknesses	系統整合複雜度高；佔用艦體空間與資源；維護負荷大。
適合小型平臺或訓練用途，具備低成本部署優勢。	機會 Opportunities	因應安靜化潛艦與多方向威脅；提升戰場態勢感知與自衛能力。
易遭敵針對性壓制或干擾；在高威脅環境下存續力不足。	威脅 Threats	敵方可能採取分層干擾壓制；任一模組受損將影響整體效能。

資料來源：作者自行整理製表。

納具備左右兩側獨立陣列，能有效解決「左右不確定性」，並在魚雷等高速威脅逼近時，提供即時方位判斷。因此，當遠方出現任何可疑噪音，TAS即可率先探知其存在，結合FAS立即分辨左右方向，再由艦艏聲納進行近距離驗證，以建構出由遠至近、由模糊到精確的分層偵測流程之水下圖像，讓潛艦在複雜環境下保持穩定的戰術感知。

(三)綜合效果與應用差異

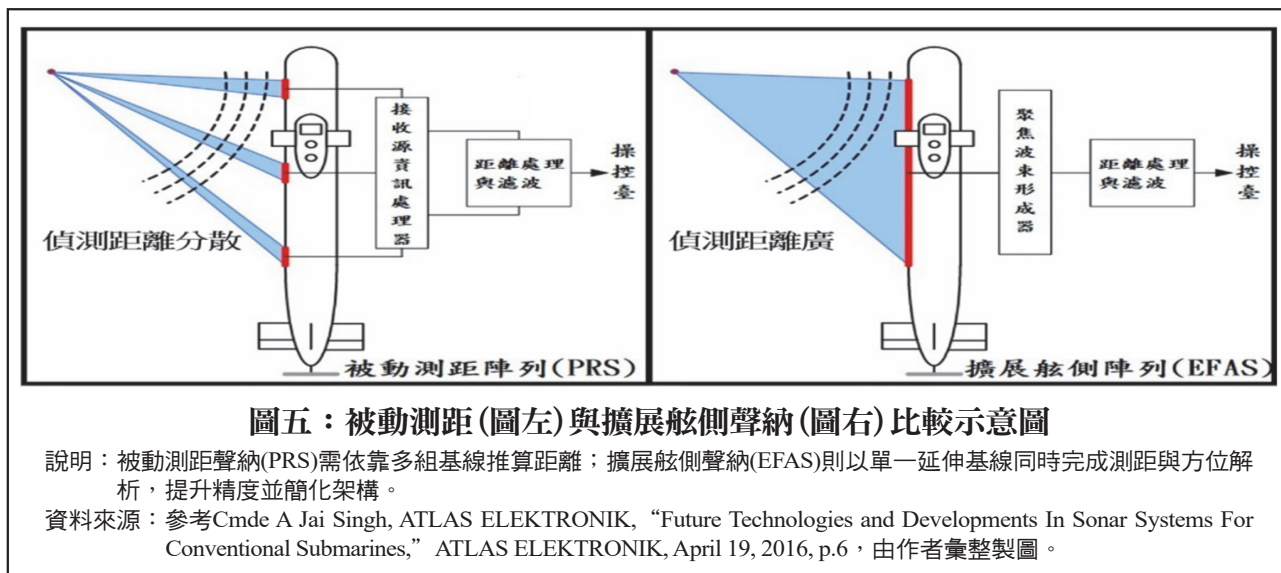
1. 在涵蓋範圍與功能特性上，艦艏、舷側與拖曳陣列聲納各有優勢；唯有透過多模組整合，方能達成近乎360度全方位監測與多層次威脅預警；其中舷側聲納除能有效彌補艦艏與拖曳聲納的盲區外，亦提供側向方位判斷與高解析度測向，進一步強化潛艦在靜默狀態下的態勢感知。隨著系統日益多模組化，雖然系統整合提升備援能力與運用彈性，但同時也增加戰鬥系統負荷、維護需要與整合風險。

2. 單模組架構雖具備管理簡便與低成

本優勢，卻難以因應高威脅環境；而多模組架構則能提供更全面的監偵與容錯能力，惟須付出更高的整合代價。故在聲納模組架構設計上，兩者各有操作特性與整合限制，透過「SWOT」分析可明顯看出其技術取向與戰術運用之影響(如表二)，並有助評估不同架構於現代潛艦作戰環境下之適用性與發展方向。

參、德、法兩國潛艦舷側聲納應用比較

觀察各國潛艦的聲納構型，不難發現舷側陣列聲納的設計往往反映出國家在作戰需求、威脅環境與技術條件下的不同取向。一般而言，發展路徑大致可分為兩類：其一是以德國「FAS-3-1」潛艦為代表的「長基線低頻型」(Long-Baseline Low-Frequency FAS)，強調深海遠距偵蒐與測向能力；其二是以法國「TSM-2253型」為代表的「平面寬頻型」(Planar Wideband FAS)設計，著重於中頻頻段的分類精度與



複雜環境適應。以下分別就德、法兩國潛艦為例，從系統構型、頻段性能、訊號處理，以及多目標追蹤與環境適應等面向加以比較，說明如后：

一、系統構型與技術設計

(一)德國「212A級」潛艦

1. 在德國潛艦聲納發展脈絡中，「FAS-3-1」屬於早期以深海遠距偵蒐為核心的代表性系統，最初隨「CSU 83/90型」聲納套裝裝配於「209型」潛艦。²⁴該系統採用長條模組型設計，藉由延伸基線長度獲得優異的測向精度，其方位精準度可達約1度；²⁵然而，其配置仍需依賴多組陣列搭配，系統整合相對複雜。

2. 後續發展的「擴展舷側聲納」(Ex-

panded Flank Array Sonar，以下稱EFAS)，則改以基線加長、增加陣元密度並導入中頻接收能力，不僅能兼顧遠距偵蒐與中距識別，還能以單一大型基線同時支援測距與測向，簡化系統架構。此種設計與傳統多組「被動測距陣列聲納」(Passive Ranging Sonar，以下稱被動測距聲納、PRS)相比，有助於集中化處理並提升測距精度(如圖五)。²⁶

3. EFAS不僅在設計上有所突破，也展現德國在潛艦聲納構型上的調整方向。分析其發展脈絡，與「FAS-3-1」舷側聲納分別代表不同階段的技術取向，前者偏重於深海環境下的長距偵測與預警，強調低頻長基線帶來的高測向精度；後者則在保

註24：“FAS 3-1 (CSU 83/90 Supplementary Flank Array),” CMANO-DB.COM, <https://cmano-db.com/sensor/1291/>, visited date: 2025/11/9。

註25：同註13，頁72。

註26：Cmde A Jai Singh, ATLAS ELEKTRONIK, “Future Technologies and Developments In Sonar Systems For Conventional Submarines,” ATLAS ELEKTRONIK, April 19, 2016, p.6。

表三：德國「FAS-3-1」與「擴展舷側陣列聲納」技術比較表

項目	舷側陣列聲納(FAS-3-1型)	擴展舷側陣列聲納(EFAS)	設計重點/演進目的
設計構型	條帶式長基線。	平面式寬頻模組。	由條帶式長基線→平面式寬頻模組，增加接收音源面積並增強靈敏度。
運作頻段	低頻(深海遠距偵蒐)	低頻+中頻雙頻段。	增加中頻接收，兼顧中距環境識別。
水聽器配置	每舷約288個，基線長度約30公尺。	陣列更長，水聽器數量與密度增加。	提升解析度，降低弱目標掩蓋風險。
訊號處理	傳統相關處理、頻譜分析。	引入自適應波束形成、多頻段整合測距。	強化抗干擾與多目標追蹤能力。
性能特徵	深海長距監測，方位解析精度約1°。	兼顧遠距偵測與中距識別，抗噪能力提升。	從「單一深海取向」走向「多環境適應」。
戰術定位	偏重深海遠距偵測與預警。	平衡深海監測與複雜環境識別需求。	可兼顧中距偵測與多目標處理，提升在高噪音與複雜環境中的分類與識別能力。

資料來源：作者自行整理製表。

持低頻優勢的同時，進一步延長基線、增加陣元密度，並導入中頻段接收能力，並強化中距離目標偵測與分類功能(如表三)。

(二)法國「魷魚級」潛艦

此型潛艦裝配的「TSM-2253型」系統屬於「平面寬頻型」FAS，採矩陣式水聽器布陣，對稱安裝於船艙，²⁷其設計理念強調大孔徑與高陣元密度，可有效縮小波束寬度，提供精細的方位解析能力，即使在多目標干擾情況下仍能維持穩定追蹤。其水聽器材料多採用「聚偏二氟乙烯」(PVDF)，²⁸具有良好的降噪能力與環境適應性，特別適合在高背景噪音與複雜環境的海域中執行分類與追蹤任務(如圖六)。

二、頻段性能與訊號處理能力比較

(一)頻段特性

1. 「FAS-3-1」系統主要運作於低頻範圍(約0.1~2.5kHz)，藉由低頻波長、繞射效應顯著的特性，能在深海與低信噪比環境下維持遠距偵蒐與預警能力。²⁹然而，低頻段的頻譜資訊相對有限，對細部特徵(如螺旋槳葉片數或機械噪音)的分類能力不足；後續改良的「擴展舷側聲納」(EFAS)，則在保持低頻優勢的同時，新增加中頻接收能力，透過雙頻段的並行運作，使其在複雜水文與高背景噪音的環境中，仍能兼顧遠距偵測與中距離識別，展現由「單一深海取向」向「多環境適應」的設計轉型。

2. 「TSM-2253型」系統則屬於「平面寬頻型」構型。其設計強調大孔徑與高陣

註27：同註13，頁74~75。

註28：“TSM 2253 PVDF (DMUX 80),” CMANO-DB.COM, <https://cmano-db.com/sensor/1688/>, visited date: 2025/10/23。

註29：同註13，頁71。



元密度，配合寬頻接收能力，能有效提升對目標特徵(如螺槳轉速、軸承噪音與共振頻率)的辨識精度；惟中頻波段在傳播距離上則受到限制，難以達到低頻系統的超遠程監測效果。這也顯示聲納效能並非僅由頻率決定，而是受到陣列孔徑大小、材料特性、訊號處理技術與海域環境等多重因素影響。

(二) 訊號處理

1. 「FAS-3-1」系統在設計初期，主要依賴傳統的相關處理與頻譜分析方法，其處理架構雖能支援基本的測向與追蹤，但在多目標同時出現或高噪音背景下的效能有限。隨後推出的EFAS，則引入「自適應波束形成」(Adaptive Beamforming)與多頻段整合測距技術，不僅提升抗干擾能力，其在複雜戰場環境中亦能同時兼顧遠距與中距，展現更高的訊號處理彈性。

2. 「TSM-2253型」系統其矩陣式平面陣列結構，能支援更高密度的訊號接收與空間採樣，結合數位化寬頻處理架構，特別適合於多目標環境下的頻譜比對與特徵識別。此種設計著重於透過寬頻接收與數位處理提升多頻段信號的辨識效率，進而增強潛艦在高背景噪音與複雜環境海域的作戰效能。


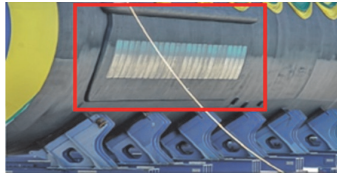

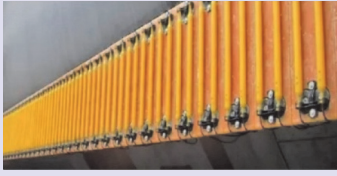
三、多目標追蹤、環境適應與戰術

(一) 多目標追蹤與系統整合

德國「擴展舷側聲納」(EFAS)在前一代基礎上，進一步加長基線，並提高陣元密度，同時導入中頻接收能力，使其能兼顧遠距與中距的偵蒐、識別，並可與潛艦戰鬥系統進行資料整合；此一設計在深海環境下維持高測向精度，並在複雜水文與高背景噪音情況下展現更強的追蹤可靠性。³⁰法國「TSM-2253型」系統則以「平面

註30：同註29。

表四：德國與法國舷側聲納系統比較表

項目	德國 FAS-3-1	法國 TSM-2253	說明/技術差異
外觀構造	 條帶式長基線	 平面式寬頻模組	外觀可見「長條」與「平面」模組的設計差異。
內部模組(水聽器)	 壓電陶瓷(PZT)	 聚偏二氟乙烯(PVDF)	不同材料反映靈敏度、耐衝擊性與寬頻響應能力。
運作頻段	低頻(約0.1~2.5kHz)。	寬頻(約10~1500 Hz)。	FAS-3-1著重深海遠距偵測；TSM-2253兼顧中距分類與多目標識別。
探測距離	約46.3公里。	約74.1公里。	實際偵測效能受水下條件影響。
訊號處理	採用較基礎的訊號處理方式，能支援基本測向與目標識別。	數位化寬頻處理，支援特徵比對。	顯示不同的處理方式與技術取向。
性能取向	偏重深海長距偵測與預警。	偏重近岸高噪音環境下的分類與多目標追蹤。	各自滿足不同作戰需求。

資料來源：參考“Type 212A submarine,” Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Type_212A_submarine；“S-Cube, el oído del S40 Riachuelo,” Infodefensa.com, January 9, 2019, <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrat/3131089/s-cube-oído-s40-riachuelo>；“FAS 3-1 (CSU 83/90 Supplementary Flank Array),” CMANO-DB.COM, <https://cmano-db.com/sensor/1291/>；“TSM 2253 PVDF (DMUX 80),” CMANO-DB.COM, <https://cmano-db.com/sensor/1688/>, visited date: 2025/10/29；林澄貴，〈潛艦舷側陣列聲納的技術發展趨勢、安裝與測試之研究〉，《台船季刊》(高雄市)，第41卷，第1期，2020年6月，頁72~73；由作者彙整製表。

化陣列」結構與寬頻接收能力為核心，能有效支援自動化目標追蹤，並在高背景噪音與複雜環境下保持對多目標的穩定處理效能。³¹

(二) 降噪技術與環境適應

「TSM-2253型」系統採用PVDF感測元件，具備低聲阻抗與高靈敏度，能降低自噪並抑制航運密集海域的背景干擾。³²「擴展舷側聲納」(EFAS)則結合加長基線與

改良後的波束處理技術。相較「FAS-3-1」具備更佳的抗干擾能力，使其在淺海或受限水域等多變環境中，仍能保持穩定偵測性能。整體而言，EFAS代表由單一低頻監測向多頻段適應的技術演進，並強化複雜環境下的偵測與識別能力；「TSM-2253型」系統則展現平面寬頻設計與數位化處理在複雜環境作戰中的優勢(如表四)。

(三) 戰術價值比較

註31：同註13，頁74。

註32：同註28。

1. 德國「擴展舷側聲納」(EFAS)的優勢在於單一延伸基線即可同時支援測距與測向，減少多組陣列整合的複雜度，並能快速生成完整的戰術態勢圖像，展現深海長距監測與多環境應用的特性，特別適合以「廣域監偵」為核心的任務需求。相較之下，法國「TSM-2253型」系統則透過平面化寬頻設計與數位化處理，強化在高背景噪音與多目標環境下的分類與識別能力，更能維持在複雜水文條件中的系統穩定效能。

2. 「擴展舷側聲納」展現深海遠距偵測與全域預警的優勢，「TSM-2253型」系統則凸顯在高噪音與多目標情境下的分類與追蹤能力；因此，若能在系統規劃上同時汲取兩者特點，並依我國周遭海域特有的高噪音與複雜水文條件進行調校，將可有效提升潛艦在多樣化作戰場景下的水下作戰能力。

肆、國造潛艦舷側聲納之運用限制與驗證需求

各國潛艦舷側聲納的應用比較，不僅揭示其技術差異，也呈現不同環境下的作戰思維。我國雖已透過潛艦國造計畫逐步建立起雙模組架構，但其在運用與驗證上仍需持續精進。以下著重於「應用與整合限制」以及「陣列校正與海上測試需求」

兩個面向，藉由分析實際運用經驗與技術挑戰，並探討潛艦聲納體系未來持續精進的可能方向，分析如后：

一、國造潛艦之聲納應用與整合限制

(一) 雙模組架構與作戰挑戰

1. 國造潛艦在聲納系統構型上，由「劍龍級」至新一代「海鯤級」已逐步走向多模組化架構，其核心在同時具備舷側與被動測距聲納(FAS+PRS)，形成「遠距偵蒐」與「中距測距」的分層配置。FAS主要負責低頻訊號的長距離截收與方位判定，能在靜默狀態下持續掌握外部聲源的方位資訊；PRS則在中距範圍內對指定目標進行距離解算，提供更具戰術價值的定位參數，³³並支援後續的「目標運動分析」，以建立完整的水下戰術態勢圖像。

2. 在我國周邊高噪音與多變水文的環境下，兩者效能均面臨限制。FAS雖具長距離偵蒐優勢，但低頻訊號在複雜背景噪音下容易受到干擾，導致弱目標訊號遭掩蓋；PRS則能提供距離資訊，但在海象變化劇烈時，準確度明顯降低，且對官兵的戰技操作與資料整合能力有高度依賴。由此可見，雙模組架構雖能提供分層感測能力，仍受限於環境因素與人員操作素養，確實難以在各種情境下維持穩定效能。

(二) 系統整合瓶頸與結構不足

1. 以海軍「劍龍級」潛艦為例，其聲

註33：同註26。

納系統以配置於兩舷的「舷側聲納」搭配「被動測距聲納」進行距離推算，³⁴建立起FAS與PRS雙系統分工整合，³⁵讓潛艦即便在臺海周邊的高噪音與複雜水文環境下，仍能獲取多層次情報。然而，FAS與PRS所得資訊仍須經過比對與融合，並與「艏陣聲納」及戰鬥系統整合，方能成為可用的戰術資訊；這不僅仰賴硬體設備與訊號處理技術，更涉及跨模組資料鏈結與戰術應用邏輯的協調，完善的設計才能將充分發揮各模組的戰術效益。

2. 潛艦未配備「拖曳聲納」，將導致舷側與被動測距聲納(FAS+PRS)必須承擔更多感測任務，無法透過多模組交互補償艦艏盲區與遠距低頻偵測。當前國際上先進的潛艦普遍配備FAS、PRS與TAS的三模組聲納系統，較僅採用FAS與PRS的雙模組聲納系統，在對抗高強度水下環境中勢必顯得單薄。換言之，我國潛艦的FAS與PRS已賦予遠距監測與中距定位能力，但戰術效能仍高度依賴訊號處理、官兵專業與系統整合速度，必須仰賴持續的校正與跨模組改良，方能克服既有限制達成作戰目標。

二、陣列校正與功能驗證需求

潛艦聲納系統效能，取決於設計、安裝與後續校正等多重環節，僅依設計與安裝尚不足以確保其準確度，特別是「舷側聲納」(FAS)與「被動測距聲納」(PRS)，皆屬於大型外掛式感測模組，其精度極易受到艦體結構誤差、安裝角度偏移及複雜水文條件影響；若未能執行嚴謹的校正程序，將導致測向與測距誤差累積，進而削弱作戰效能。³⁶依照國際潛艦建造成例，新艦下水後必須完成「驗收測試」(Acceptance Test)，包含「泊港測試」(Harbour Acceptance Test，以下稱HAT)與「海上測試」(SAT)。前者以靜態檢測與系統初步驗證為主，而真正確立戰術效能的關鍵，則在於後者的聲納校正調整與功能驗證，³⁷其過程關乎整體作戰可靠度，確實輕忽不得，摘陳如后：

(一)「泊港測試」階段

主要針對潛艦機械安裝與通道狀況進行初步檢查，透過光學或機械方式確認水聽器定位與陣列幾何，並檢視各感測單元的輸出是否正常；然而，僅憑此類靜態檢測不足以滿足實際作戰需求。由於多重路

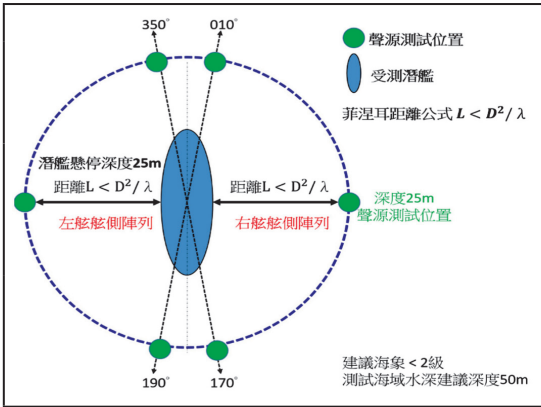
註34：吳哲宇，〈海虎潛艦3官兵落海疑因測試新裝備 何種裝備引猜測〉，《自由時報》，2023年12月22日，<https://def.ltn.com.tw/article/breakingnews/4528580>，檢索日期：2025年11月2日。

註35：〈劍龍級傳統動力攻擊潛艦〉，MDC軍武狂人夢，<http://www.mdc.idv.tw/mdc/navy/rocnavy/SS793.htm>，檢索日期：2025年10月23日。

註36：“Array geometry calibration for underwater compact arrays,” ScienceDirect, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X18303074>, visited date: 2025/10/28。

註37：游凱翔、吳書緯，〈海鯤潛艦海上測試在即 測試流程及後續規劃一次看〉，中央通訊社，2024年4月28日，<https://www.cna.com.tw/news/aip1/202404280128.aspx>，檢索日期：2025年11月1日。

表五：「舷側聲納」(FAS)校正與調整概念表

	說 明
	布置概念： 潛艦於指定深度定點，協測聲源沿預定位置環繞發射，模擬不同方位之入射聲源。
	校正重點： 潛艦接收不同方位聲源資訊，分析入射角與誤差時間，逐步校正水聽器相位與增益，調整系統資料基準，以補償安裝偏差與多重路徑效應影響。
	驗證目的： 依SAT的FAS校正與調整基準，驗證陣列波束對齊與測向及測距之精確度，確保系統解算提供數據可有效支援作戰運用與決策。

資料來源：參考林澄貴，〈潛艦舷側陣列聲納的技術發展趨勢、安裝與測試之研究〉，《台船季刊》(高雄市)，第41卷，第1期，台船雜誌社，2020年6月，頁85，由作者彙整製表。

徑效應、艦體微形變與長期沉積污染等因素，都會造成水聽器時延差與靈敏度變化，必須在「SAT」階段，透過動態環境的聲學條件，持續加以調整與修正。

(二)「海上測試」階段

驗證主要針對聲納陣列功能，可分為「校正調整」(或稱校調)及「效能驗證」(或稱效驗)兩部分，摘陳如后：

1. 「校正調整」的核心目標在於建立正確的幾何與聲學基準。具體方式為選擇條件穩定的淺水區域，潛艦保持定點懸停，外部聲源則由小型協力艦或空中兵力吊放於相同深度，並沿艦體環繞，每隔約十度釋放0.1~2.5kHz的寬頻訊號(如表五)。潛艦藉由比對理論入射角與實際接收數據，³⁸逐步修正各水聽器的相位與增益參數

。³⁹透過此過程，能有效補償安裝偏差與多重路徑效應，確保陣列輸出與戰鬥系統解算基準一致。

2. 「效能驗證」目的在於檢視系統在真實作戰情境中的可靠性與精度。常見方式包含兩類：其一為浮航與潛望鏡深度下的功能檢驗，利用水面協測艦模擬目標聲源，並透過雷達與無線電比對，評估潛艦在不同深度狀態下的測向範圍、測向誤差與測距效能；其二則為全深度條件下的綜合驗證，模擬潛艦在不同速度、深度及多目標情境中的偵測效能，進一步評估最大測距距離、測距精度，以及系統在複雜水文環境下的穩定性。⁴⁰換言之，效能驗證並非單純檢查數據，而是透過多維度的完整檢驗程序，以確保聲納在各種作戰條件

註38：菲涅耳距離公式： $L < D^2/\lambda$ ，其中D為有效孔徑長度， $\lambda=c/f$ ，c為海水聲速，f為頻率。當測試距離小於此臨界值時，即可保持在近場聲場，呈現可供修正的相位與振幅差異。

註39：同註13，頁83~85。

註40：同註13，頁86。

下，都能維持可靠性能。

綜合而言，國造潛艦「泊港測試」(HAT)僅是設備安裝與系統啟用的起點，而「海上測試」(SAT)才是確保戰鬥力的核心程序。我國潛艦雖已具備「舷側聲納」(FAS)與「被動測距聲納」(PRS)的雙模組架構，但仍應持續強化模組整合。故新造潛艦透過嚴謹的校正調整與效能驗證，可提升兩種聲納在我國周邊高噪音、強流變化的戰場環境中實用效能，並確保潛艦能將感測數據輸入轉化為可靠的戰術圖像，形成高度的水下作戰戰力。

伍、結語

「舷側聲納」做為現代潛艦聲納體系的重要模組，具備補強艏、艮盲區、延伸基線與提升方位解析度的特性，對於強化潛艦靜默監控與全向偵蒐能力至關重要。由德、法兩國潛艦系統的比較，可以看出「長基線低頻型」強調深海遠距偵蒐與測向精度；而「平面寬頻型」則重視中頻分類與複雜環境適應，兩種設計路徑分別對應不同作戰環境的需求，顯示出聲納構型在戰術定位上的多樣化取向。

再以我國海軍而言，現有潛艦以舷側與被動測距聲納(FAS+PRS)所形成的雙模組架構，確實能兼顧遠距監聽與中距測距的功能，但為提升系統整體穩定度與作戰

可用性，⁴¹仍有必要透過嚴謹的「泊港測試」與「海上驗證」，迅速完成陣列校正與功能驗證，方能克服環境干擾與安裝誤差，確保系統在臺灣周邊高噪音與強流動的水域中維持穩定效能。

展望未來，國造潛艦應進一步深化跨模組整合，結合拖曳陣列或其他新型感測裝備，將有助於建構由遠至近、由模糊至精的水下多層次聲源偵測，強化潛艦的自我防護與先敵偵測能力；這不僅能提升單艦作戰效益，更能在聯合反潛作戰中發揮整體戰術價值，對維護海上交通線與水下防禦任務具有深遠意義。正是因為「舷側聲納」的核心地位已獲確認，後續持續推動測試驗證與系統升級，將使我國新造潛艦在複雜戰場環境中保持優勢，並為國防自主與海防戰力奠定堅實基礎，此目標不僅象徵國造潛艦發展的重要里程碑，更值得國人共同期待並迅速完成。 ↴

作者簡介：

許鎮顯少校，海軍軍官學校103年班，國防大學海軍指揮參謀學院114年班。曾任海軍淮陽軍艦射控官、海軍銘傳軍艦戰系長，現服務於海軍146艦隊。

林健源上校，海軍軍官學校87年班，國防大學海軍指揮參謀學院99年班、國防大學戰爭學院戰院106年班、國立成功大學高階管理碩士。曾任海虎軍艦艦長、海軍司令部督察長室組長、海軍146艦隊副艦隊長，現服務於海軍艦隊。

註41：同註26。