

● 作者/Artem Sherbinin, Richard Kuzma & Thomas Wester

● 譯者/李永悌

● 審者/馬浩翔

擷節成本的艦艇保修

Better, Faster, Cheaper Ship Maintenance—Now!

取材/2022年1月美國海軍學會月刊(*Proceedings*, January/2022)

透過先進分析、擴增實境與3D列印等技術強化海軍維修體系，維持裝備妥善，將可為艦隊帶來立竿見影的功效。

由於年度保養預算縮減，加上大國競爭而增加作戰需求，美軍艦艇與各造船廠已沒有經費與時間來完成重大的定期保養(Upkeep)。¹ 美海軍軍令部部長吉爾戴(Michael M. Gilday)上將表示，估計有六成艦艇未按時結束保修出廠，

並將其中25%至30%的延後出廠歸咎於「規劃與預測不良」。² 美國政府問責署(Government Accountability Office)表示，2008至2018年等待維修的攻擊潛艦共計「閒置1萬又363天」。³

在此同時，美海軍航空部隊的C類事故(Class C



Mishap)發生率增加三倍——飛機受損或非嚴重損害的損失達5萬至50萬美元——而美陸戰隊的航空事故則增加超過一倍。⁴ 時任美海軍大西洋航空部隊指揮官凱利(Roy Kelley)少將告知眾議院軍事委員會，多數事故發生在「日常保養進程期間」，係因從事保養的士官兵「缺乏足夠經驗與訓練」。⁵

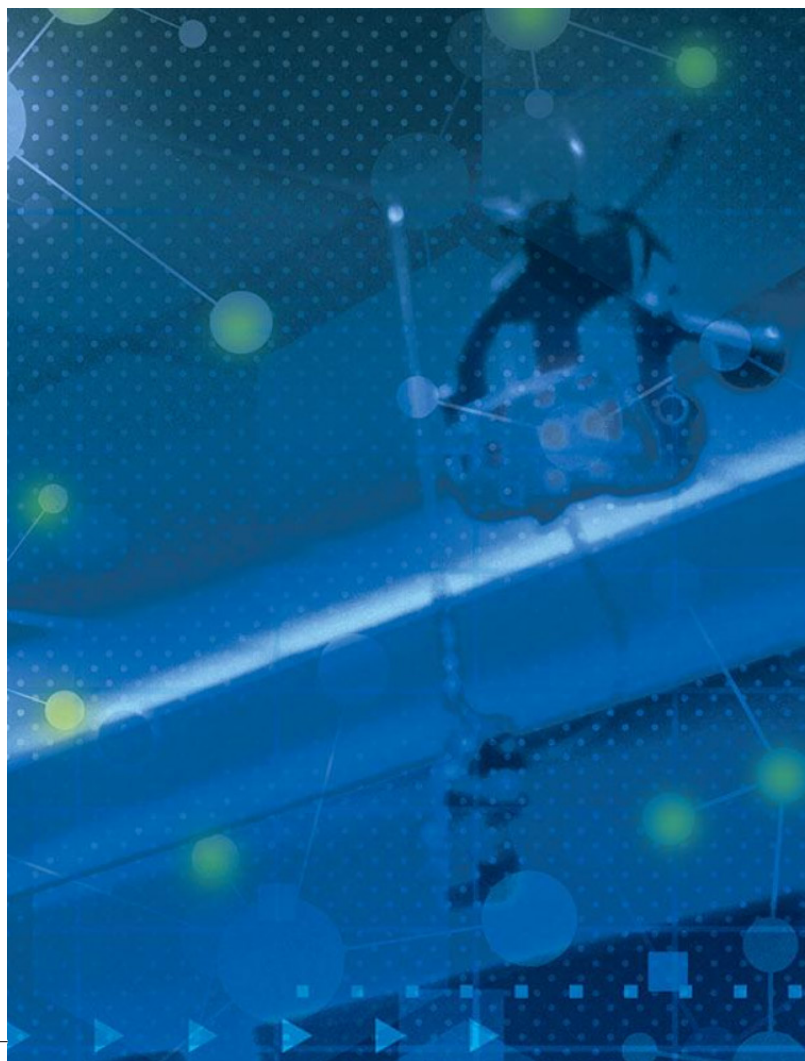
若不加以管制，則這些缺失將使美海軍難以從容面對實力伯仲對手的挑戰。預期維修(Predictive Maintenance，將多個感測器資料融合，並搭配先進分析能力，可在裝備故障發生前加以預測)的效果可大幅超越傳統維修技術。目前美海軍迫切須因應兵力緩慢衰減的問題，同時還要擲節全艦隊經費與工時。同樣地，積層製造(Addi-

tive Manufacturing，亦稱為「3D列印」)與擴增實境(Augmented Reality, AR)已是能解決美海軍其他保修問題的成熟技術。該軍種的《標準組織規定手冊》(Standard Organization and Regulations Manual)律定海軍艦艇應維持最高可行等級的物資整備，以滿足必要作戰相關需求。⁶ 為達此目標，美海軍必須採行新做法並且運用經過驗證的技術。

必須改變保養排程做法

美海軍水面部隊以名為SKED的計畫排程軟體，建構與管理其保修工作。該系統可協助艦上官兵在特定活動發生前，或在其認為有必要時，定期安排與執行預防保養。然而SKED並未考量特殊情況，包括裝備在某段時間的使用量、環境，或可能影響使用壽命或性能等外在因素。因此，若艦上官兵未輸入資料，則艦上空調機冷水泵每季使用數十小時者，與同一季另一部使用數千小時者，將接受相同日常保養。背景環境也很重要：在鹽度與水溫較高的南海上所使用的泵，以及在鹽度與水溫相對較低的白令海上使用的泵，接受相同保養檢查，惟此兩個泵腐蝕速度並不相同。儘管如此做法不一定有用，但通常都會導致不必要的保養工作，浪費艦上官兵的時間與海軍的資源，或未能解決裝備潛在問題的無效保養。

在許多情況下，鑑於航行時程緊湊且艦上人員不足，除非裝備損壞或動作異常嚴重，否則艦上官兵已愈來愈難以察覺問題。⁷ 最後，預測維修需要大量可用資料與有效分析。美海軍目前已有能蒐集與儲存裝備資料的系統，惟該系統欠缺共享



海上戰場

與處理能力，導致無法充分利用資料以更深入瞭解並預測裝備損壞的情況，並且在須進行大修前先進行小修正。

為改善資料蒐集，美海軍近期在配備機械控制系統(Machinery Control System)的艦艇上安裝整體情況評估系統(Integrated Condition Assessment System, ICAS)。⁸ 該系統可監控蒐集自各輪機裝備的感測器資

料，甚至向艦外發送資訊。值更人員會記錄「紅色讀數」(Red Readings)，亦即不符合操作說明的讀數。若艦上某特定裝備持續出現紅色讀數，輪機長與輪機官將會收到一封系統自動發出的電子郵件，警告特定系統無法正常運作。惟整體情況評估系統的主要缺點，就僅限在監控輪機裝備。此系統並未同時監控主要由電路板與其他

電子零件組成之戰鬥系統裝備。此外，紅色讀數的作用，與紙本註記異常的處理流程並無不同。值更人員檢視讀數時註記異常之處，若能發現問題，則可能會申請技術支援俾利予以修正。這往往會為艦上官兵帶來判定異常的根本成因與決定改正措施的負擔。

換言之，整體情況評估系統不過只是一系列已布設好的感

美海軍年度保養預算縮減，造成重大保養期程延宕。有關單位若不加以正視，恐在美「中」大國競爭中敗下陣來。

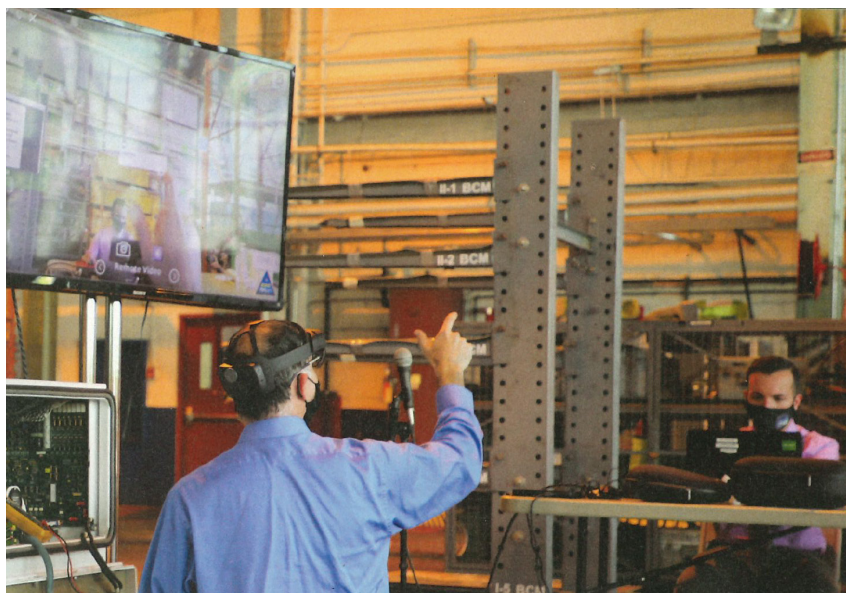
(Source: USN)



測器——而目前這套設計於1970年代的維修與物資管理(Main-tenance, Material, and Management, 3M)系統自啟用以來，從未進行重大變革。儘管整體情況評估系統代表美海軍已朝正確方向邁進一大步，但如未加以持續分析與回饋來改善艦艇保養，美海軍目前擁有只是結合舊有流程的新感測器技術。維修與物資管理系統必須予以更新，其執行模式也必須改變。

預期維修與預防性保養不同

預期維修預測的是狀況而非時間，使其具有前瞻性，而非只是防患未然。連接重要組件的感測器持續監控裝備情況，諸如溫度、電壓、速度、振動與其他性能資料，確保其在可接受範圍內。這些感測器將資料輸入能學習特定錯誤的——包括過熱、劇烈震動、轉速降低等——機器演算法，俾利自動測得潛在裝備故障。如此將有助於保養與督導人員在故障發生前預測發生時間，進而減少因緊急維修工作而導致意外、違



擴增實境技術可讓艦上官兵有如專家在側，讓維保變得可行。圖為美海軍空中作戰中心飛機部門(Naval Air Warfare Center Aircraft Division)工程師示範如何使用攜帶式擴增實境遠距保養支援服務(Augmented Reality Remote Maintenance Support Service)系統。(Source: USN/Brittany Dickerson)

規事件與航程縮短。現代船艦與飛機配備具監控性能的感測器，但若無分析資料，就無法瞭解或獲取真正優勢。

機器學習(Machine Learning)可透過分析來自這些感測器的大量資料來改變此種情況。即便有20年海上經驗，艙底人員(Snipe)——無論是機工、鍋爐、輪機、艦體或其他科別——也不可能對各式機具都擁有同等年資的知識，因為海上航行期間不見得都用在監控特定裝備。不過有效的預期維修系統可隨

時隨地監控各項裝備。此外，預測模型可以從數十或數百艘在海上已航行多年的艦艇蒐集資料，並從位處世界各地、條件各異的機器上獲取讀數，俾利更妥善瞭解並且預測裝備可能發生故障之處，從而讓艦上官兵能更有效進行處理。於人機團隊(Human-Machine Teams)中透過預期維修協助艦上官兵，預期可：

- 改善裝備可用時間。
- 延長裝備使用年限。
- 降低成本。



海上戰場

- 讓維修人員得以將其有限時間花在維修暴露風險最高的設備上。
- 讓補給部門能在故障發生前申請重要零件，或在系統偵知即將發生故障時自動申請零件。
- 發現並除去有缺陷或製造不良的零件。
- 讓艦長或戰隊長通盤瞭解每艘船艦上的設備狀況，俾利進行更適任務計畫。⁹

其他軍種與民間產業

製造業與運輸業刻正實施預期維修解決方案。¹⁰ 美海軍應以其他軍種為師，利用商用技術，而非從頭開始建構自家流程與演算。

美空軍在意識到航空業變化後，展現了預期維修的可行性，並且已降低某些載臺的非表定保修近三成。¹¹ 美空軍自試行計畫開展以來已節省6,800萬美元，並在2020年就已規劃將採用預期維修的飛機增加至兩倍。¹²

美陸軍亦仿倣美空軍，針對布萊德雷戰鬥車(Bradley Fighting Vehicle)進行預期維修，而美陸戰隊則是投資M88裝甲救濟車的預期維修。¹³ 美空軍部長辦公室估計，預期維修擴大至所有空軍載臺後，可提升飛機四成的可用時間。¹⁴ 美國國防部的商用技術獲得部門國防創新小組(Defense Innovation Unit)協助促成空軍與陸軍的預期維修合約，該部門預估在將此種維修擴大至全空軍後，每年將可節省150億美元。¹⁵ 相較之下，美海軍在2020年的預算中要求艦艇採購預算238億美元，飛機採購預算186億美元。¹⁶ 2021年要求的艦艇採購預算金額則為199億美元。¹⁷ 無論美海軍

艦艇數量高於或低於355艘，每年若能節約150億美元，對採購與戰備皆有重大影響。¹⁸

美海軍在仿倣空軍做法時，應利用其既有兩大優勢：現有艦載感測器基礎設施，以及作戰行動近乎連續之本質。有異於其他軍種的，是美海軍將大部分時間用在執行駐留任務與保護海上交通線，這代表隨時有約二成至三成的艦艇與潛艦在海上航行。事實上，水面艦艇官兵有23%的時間不在母港。¹⁹ 在航艦艇的裝備全天24小時運作，有異於飛行時間較有限的飛機。機器學習可透過大量資料蓬勃發展。若300艘艦艇當中有兩成隨時在海上航行，則每部裝備每年將可產出超過50萬小時的監控資料。

擴增實境

當預期維修結合大數據與人工智慧的力量，藉以發掘保修問題時，擴增實境可立即將這些資訊交付至維修人員手中。擴增實境透過疊加數位資訊以強化使用者所見之物體影像，民營部門已將此技術用在維修與生產來減少人為錯誤，進而節省時間和金錢，並且提升從事複雜工作的能力。²⁰ 波音公司透過投資擴增實境公司，協助其將複雜的飛機佈線生產時間縮短25%。²¹

在美海軍，擴增實境可以將頂尖分析資料轉化為可進行工作。例如水面作戰艦艇上的預期維修軟體會測得問題，例如冷卻水泵的重要零件顯示在可接受範圍邊緣的溫度與振動讀數，而其他水泵的振動顯示即將發生故障時。整合式系統會直接將此資訊發送給負責維修水泵的機工士(Machinist Mate, MM)，而非由人員從電腦解讀此資



整體情況評估系統可監控輪機裝備的感測器資料(圖為美海軍飛彈驅逐艦哈波號[Hopper])，但並未包括戰鬥系統裝備——且相應分析程序已然過時。

(Source: USN/Kyle Cregge)

料後再派遣維修人員。

機工士的擴增實境眼鏡將可顯示空調系統中不同次系統，故得以看見重要組件。擴增實境眼鏡可進一步顯示每部裝備的預測健康等級，以及過去溫度或振動讀數資訊，還有該裝備保養歷程。這項歷程紀錄包括先前值更人員對系統留下的任何數位註記。機工士可在正確裝備上判定要解決哪一個問題，而後在眼鏡上透過語音命令叫出對應的保養需求卡(Maintenance Requirement Card)，無須動手就能即時獲取所需資訊。²² 一旦找出即將故障的裝備，維修人員在獲得警示並掌握必要資訊後，即可展

開維修工作。

至於有關無預警發生之問題，擴增實境眼鏡上有攝影鏡頭，可將影像回傳至中心，甚至是艦外的技術支援站，讓專業人員可遠距觀看機工士眼前所見。這能讓值更人員充分瞭解狀況，並使最有經驗的艙底人員或專家得以指導艦上官兵完成故障排除程序。有了現代化的擴增實境軟體，維修人員甚至能使用電腦在串流視訊中進行註記與重點標示，俾利在精確度最重要的棘手狀況中進行通暢的知識傳遞。

就訓練目的來看，擴增實境技術也扮演重要角色；鑑於近期航空部門保修問題，擴增實

境更是特別具有其價值。美海軍應該效仿美陸軍運用擴增實境與模擬，利用現有技術進行維修訓練。²³ 擴增實境眼鏡上顯示的教學影片，可協助艦艇官兵在進行空間演練時增進對裝備的實際理解。自學課程中可示範不常執行或危險的複雜工作，而記錄艦上官兵進行保養的影片則可用於評估其能力、訓練與策進作為。

3D列印即時交付零件

即便有最新保養工具，零件還是會損壞，而有些零件損壞的速度甚至太快，而導致無法及時採購以滿足任務需求。隨時視需要透過3D列印來製作零件的能力，可減少為接收重要零件而進行緊急海上整補或靠港的需求。此外，積層製造技術的成熟度很高，並已在具高度技術但脆弱的系統中驗證確實可行。例如目前與美空軍合作的新創公司「相對論空間」(Relativity Space)已展示其以3D列印製作整具大型火箭的能力。²⁴ 美海軍已在艦艇上使用3D列印零件，例如用在航空母艦高壓蒸汽系統的過濾器。²⁵

海上戰場

儘管在承平時期的這只是更方便作業，但由於海軍供應鏈在戰時恐遭受攻擊，屆時此種能力很快就會變得至關重要。然而在美海軍整體艦隊中僅有部分艦艇擁有3D列印機，這些機器現在被視為酷炫的小裝置，而非解決問題的重要工具。美海軍各型艦艇皆應配備積層製造技術，而所有海軍作戰兵科的官兵也都應接受使用此類裝備的訓練。

協調技術

讓艦艇在海上持續航行同時進行保修的挑戰，是迫切的財政與戰略問題。若美海軍戰備遲滯不前，則其作戰節奏恐顯鬆懈，敵人也就會搶得優勢。美海軍軍令部部長吉爾戴在其2020年的要旨命令(Fragmentary Order)中強調以改善艦艇維修作為首要作戰行動主軸(Line of Effort)——近期更將海上自修(Self-sustainment at Sea)列

入戰技獎(Battle Effectiveness Award, Battle E，譯註：此為美海軍的年度績效競賽評比，優勝單位將可在駕駛台或煙囪兩側漆上白色的大「E」)的紫色績優獎(Efficiency Excellence Award, Purple E，譯註：此為美海軍指揮績效獎[Command Efficiency Award]項目之一，共有六項評比項目，各以不同顏色代表，例如綠色為指揮管制，藍色為後勤管理；艦艇必須獲得

註釋

1. David B. Larter, "Despite Record Budgets, the U.S. Navy Is Short Hundreds of Millions for Maintenance," *Defense News*, 19 August 2019; John S. Van Oudenaren, "The Impact of Great Power Competition on the U.S. Navy," *National Interest*, 10 April 2019; Robert Faturechi, Megan Rose, and Christian Miller, "Years of Warnings, then Death and Disaster," *Pro Publica*, 7 February 2019.
2. ADM Michael Gilday, USN, remarks at 2019 Naval Institute Defense Forum Washington Conference.
3. David B. Larter, "With the Navy's Submarine Maintenance Woes, There May Yet Be Hope," *Defense News*, 8 May 2019.
4. Megan Eckstein, "Less Experienced Mariners Contribute to Rise in Naval Aviation Mishaps," *USNI News*, 22 June 2018.
5. Roy Kelley, "Statement on Aviation Readiness and Safety Before the House Armed Services Committee Subcommittee on Readiness," 21 June 2018.
6. Standard Organization and Regulations of the U.S. Navy, OPNAVINST 3120.23D W CH-1, 29 May 2012.
7. Geoff Ziezulewicz, "No Rest for the Weary: Lack of Sleep Threatens Safety and Readiness," *Navy Times*, 19 September 2017; Sam LaGrone, "Fleet Forces: Navy Short 6,200 at-Sea Sailors Now to Meet New Manning Requirements," *USNI News*, 26 February 2019.
8. Mike Diulio, "Revolutionizing Maintenance through Remote Monitoring via ICAS & Distance Support," NAVSEA OSD Great Ideas Program, 28 October 2002.
9. Mark Haarman and Michael Molders, "Predictive Maintenance 4.0 beyond the Hype: PdM 4.0 Delivers Results," Price Waterhouse Cooper, September 2018.
10. Barbara Bukovac, "Transportation and Logistics Deals Insights," Price Waterhouse Cooper, 15 May 2021.
11. John Tirpak, "Smart Sustainment," *Air Force Magazine*, 1 November 2019. Mark Gruss, "Could Artificial Intelligence Save the Pentagon \$15 Billion a Year?" *C4ISR Net*, 16 April 2019.
12. Rachel Cohen, "USAF Tripling Data Driven Maintenance Efforts in 2020," *Air Force Magazine*, 26 May 2020.
13. Sonja Jordan, "Army Investing in Predictive Maintenance for Bradleys," *National Defense*, 26 September 2018. Jordan Harper, "Defense Innovation Unit Shifts into Higher Gear,"

四項指揮績效獎才能參加戰技獎評比)，以進一步強調艦艇維修。儘管維修已獲得更多重視，但執行方式卻依然維持不變。目前已有可用來協助美海軍的大量感測器與新技術；這些感測器與新技術可用以分析大量資料並迅速加以改進，以維持裝備妥善。同樣地，這些技術已能加快人員訓練與重要零件的製作，即便在出海期間也不受影響。如今，先進分析、擴增實境及3D列印技術，已能快速且經濟地運用在海軍維修體系，對全艦隊產生立即且實際的影響。正如美海軍軍令部長所言：「妥善維持戰備比用錢買回戰備更加划算。」²⁶

作者簡介

Artem Sherbinin海軍中尉為水面作戰軍官，現駐聖地牙哥，目前擔任撰寫美海軍人工智慧戰略的小組長，先前曾成立負責美海軍水面部隊的人工智慧發展管理的「霍珀小組」(Hopper Group)。

Richard Kuzma陸軍上尉為陸軍資料科學家，曾為海軍水面作戰軍官。他在美國國防部國防創新小組從事電腦視覺軍事應用工作。

Thomas Wester海軍上尉為水面作戰軍官，現駐日本橫須賀。畢業於美海軍官校，於史丹福大學取得碩士學位，主修國家安全與科技政策。

Reprint from *Proceedings* with permission.

- National Defense*, 11 February 2020; Morgan Scott, “U.S. Marine Corps to Use Uptake’s Artificial Intelligence Software to Increase Operational Readiness of M88 Recovery Vehicles,” *Uptake*, 4 November 2019.
14. Gruss, “Could Artificial Intelligence Save the Pentagon \$15 Billion a Year?”
15. Gruss.
16. Congressional Budget Office, “An Analysis of the Navy’s Fiscal Year 2022 Shipbuilding Plan,” 16 September 2021.
17. Lara Seligman, “Navy Prepares to Slash Funding for New Warships,” *Foreign Policy*, 10 February 2020.
18. Sam LaGrone, “CNO Gilday Calls for Budget Increase to Reach 355 Ship Fleet; New Battle Force Count Won’t Include Unmanned Ships,” *USNI News*, 14 January 2020.
19. Mark Faram, “The Busiest Ships, Subs, and Squadrons—Who’s Really Away from Home the Most,” *Navy Times*, 7 March 2018.
20. Kelly Potter, “Augmented Reality Becoming a Focus in Maintenance Technology,” *Geospatial World*, 16 January 2019.
21. Alwyn Scott, “Boeing Forms Venture Group, Invests in Two Tech Startups,” *Reuters*, 6 April 2017; Charlie Fink, “How Boeing Uses Upskill Skylight AR to Boost Productivity,” *Forbes*, 26 February 2019.
22. Lauren Williams, “Army Tests Out Augmented Reality with Training,” *Federal Computer Week*, 13 October 2020.
23. Jen Judson, “U.S. Army’s Jumping to the Next Level in Virtual Training,” *Defense News*, 18 May 2019.
24. Michael Sheetz, “3D Printer Relativity Space Is Expanding with Giant New Facility to Build Reusable Rockets,” *CNBC*, 30 June 2021.
25. Tia Vialva, “NAVSEA Approves First Medal 3D Printed Shipboard Component for U.S. Navy,” *3D Printing Industry*, 12 October 2018.
26. Gilday, Fragmentary Order 01/2019 updating *A Design for Maintaining Maritime Superiority 2.0*, 1 December 2019, https://media.defense.gov/2020/jul/23/2002463491/-1/-1/1/CNO%20FRAGO%2001_2019.PDF.