

# 海軍艦艇設備預知維護的技術與管理

海軍少校 陳睿岳、海軍上尉 徐裕倫

提 要：

- 一、本軍採用美軍傳統週期性之計畫性保養(PMS)制度，此種方式或有可能帶來欠缺或過度維護的問題，除可能造成不必要的維護預算增加，還可能因維護不足而引起故障的風險；而「預知性維護」是一種新的維護技術，值得探討並加以運用。
- 二、預知性維護係在「造艦設計」完成後運用設備「狀態監測」技術，使艦艇「服勤操作」時可藉由智慧型整合感測系統獲得設備運轉的參數資料與數據，將偵知所得「故障診斷」問題，實施警報排除之初步處置。承修廠在「修前勘估」階段，利用施工造船廠管理系統，比對資料庫實施「故障預測」；工程修護單位在「計畫交修」時，依照已建立之「維修規劃」技術，採取適當之維護保養工作，將可達到減輕修護資源不足的壓力，提高設備妥善率。
- 三、艦隊為降低裝備故障，提高機動妥善率，除應採用「預知性維護」技術外，仍須從根本著手，不僅仰賴全體官士兵不斷加強自我本質學能，並持恆專注操作維保本務，才能發揮系統裝備最大之能量。

關鍵詞：預知性維修、狀態監測、故障診斷、故障預測、維修規劃

## 壹、前言

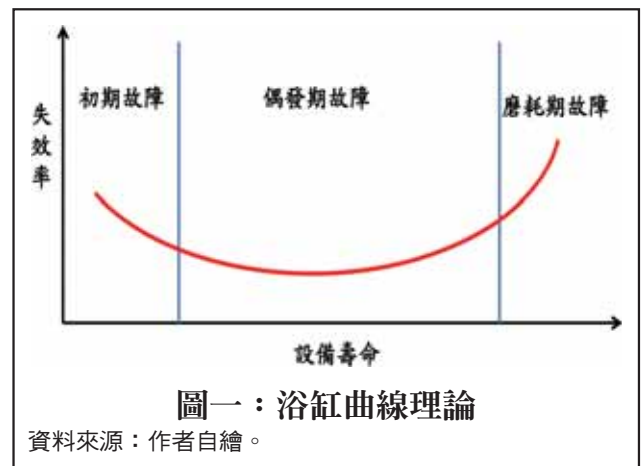
《孫子兵法》〈軍形篇〉提及「善戰者，先立於不敗之地，而不失敵之敗也。是故勝兵先勝，而後求戰；敗兵先戰，而後求勝。」其中「勝兵先勝」，指的就是打勝仗的部隊，在戰前就已具備各項戰勝的條件。而在作戰行動中，兵馬未動，糧草先行，無論糧秣供應、油彈補給、野戰保修，必須仰賴

源源不絕的後勤支援，才能讓第一線作戰官兵無後顧之憂，達成作戰勝利目標。

「後勤為先」不是口號，是海軍艦隊戰力發揮之基石。因此，後勤維修政策攸關戰力維持。本軍採用美軍傳統週期性之計畫性保養(PMS)制度，此種方式或有可能帶來過度或欠缺維護的問題，除造成不必要的維護預算增加，也可能因維護不足，提高引發故障的風險。二戰期間，英國學者沃汀頓

(C. H. Waddington)曾對美軍支援之B-24轟炸機維保頻次與故障率進行研究，並提出「沃汀頓效應」(The Waddington Effect)<sup>1</sup>，也就是說增加定期維修對裝備妥善並不一定有利。所以在海軍後勤維修管理制度上，有必要導入新的設備預知維護技術，來提高妥善率，以求在瞬息萬變的戰場上，將設備發揮最大戰力，保障任務順遂執行，這與操作精良的武器殲滅敵軍同等重要。

要將本軍現行PMS維護制度，變革導向預知性維護，應即著重在設備監控及物資檢驗後，再採取維修規劃之作法，整個過程並非一蹴可幾，尚需要一系列的配套政策及技術一起推動發展。首先本軍可在新一代造艦設計合約規劃上，導入工業4.0<sup>2</sup>技術，設計採購一套能偵測、診斷、預測到自我控制的智慧型整合感測系統；再者，必須獲得管理階層的支持，並設置專職負責的預知維修人員，有足夠的資料庫與系統實施有效率的資料蒐集與分析，這樣才能採取正確維護修正的動作，消除非必要的保養工作，並降低因設備失效導致的戰力損失，同時增進設備系統的運轉壽命，提升妥善率，這也是撰寫本文主要的目的。期望有更多人投入相關研究，共同提升海軍艦艇設備預知維護的技術與管理。



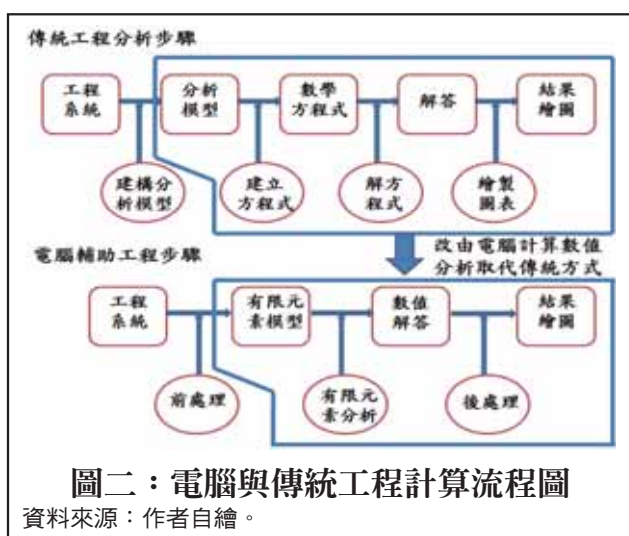
## 貳、提升製造技術降低設備故障

設備的生命週期依照浴缸曲線(Bathtub Curve)理論<sup>3</sup>(如圖一)，故障失效率隨生命週期時間而變化，分為三個時期：「初期故障」造成的原因可能是裝備設計不成熟、內裝零件的瑕疵或安裝、運送...等等的問題，所以失效率稍高，改善對策是在初期採購階段就做好運轉測試驗收。本軍艦艇裝備採購安裝多選用軍規產品，而且有嚴格的驗收品管作業，所以初期故障失效率會較浴缸曲線理論值為低。「偶發期故障」係在設備壽命的中期，設備進入運轉平順，失效率最低；故障造成的原因多半是操作步驟不當或疏忽執行PMS保養及檢查，此時就要加強人員啟停、操作步驟訓練，並落實設備預知保養維護。「磨耗期故障」指在設備壽命的末期

註1：1943年當時傳統觀念認為對每架飛機進行更多的計畫保養項目，將修復更多的初期故障。英國科學家康拉德·哈爾·沃汀頓搜集研究駐防於北愛爾蘭之B-24轟炸機「定期50小時計畫保養」後，發現做完定期計畫保養後，故障率馬上大幅上升，隨著時間推移而下降，直到下一次定期保養，故障率又大幅上升。根據這些維修數據圖表他得出結論指出，保養後故障率增加是因為它擾亂相對令人滿意的狀況，從而造成傷害；後來英國空軍轟炸機隊增加預定維修週期間隔後，有效增加了百分之六十的飛行時數。〈The Waddington Effect〉，Prisoner of hope，2014年1月14日，<https://blog.aopa.org/aopa/2014/01/14/the-waddington-effect/>，檢索日期：2020年1月10日。

註2：工業4.0是德國政府推動的「高科技戰略」，又稱為第四次工業革命，技術基礎是以智慧型整合感測系統及透過電腦物聯網分析各種巨量資料，並以高度自動化達成解決客戶的需求方案。

註3：設備產品生命週期失效函數主要由本質失效、非本質失效、磨合失效組合出像浴缸的形狀，稱之為浴缸曲線。

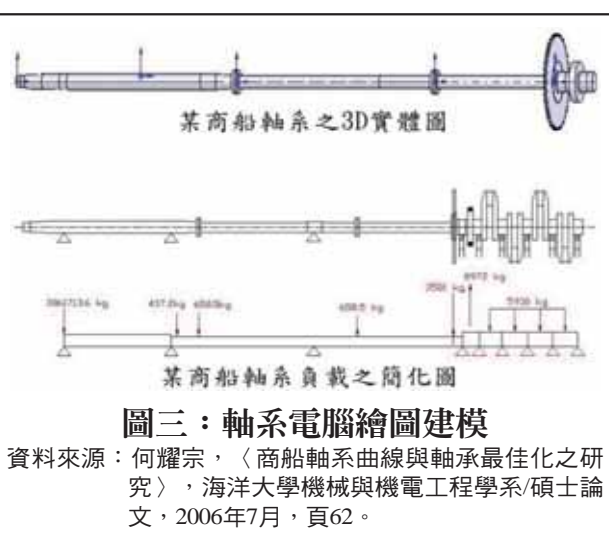


，裝備泰半到了設計壽命疲乏年限，需要汰換，此時失效率最高，這時改善對策就要更換部分次總成件、實施設備改善，以延長使用壽命。

針對裝備不良設計對故障產生的影響，除可用電腦模擬技術達成設計製造最佳化外，尚須考慮裝備後續維保之便利性等設計才能減輕本軍修護負荷，分別介紹如後：

### 一、由不良設計造成之故障

當設備設計生產製造後，有些設計上的瑕疵必須是長時間使用後才會發現，例如汽車大廠BMW在2005年至2011年生產之318i、320i、325i車系，因車輛的空調鼓風機功率調節器採用了鍍錫工藝，電鍍層容易發生磨損腐蝕，導致電阻增大、電鍍層老化後的插頭，會在大功率使用空調鼓風機時發熱，可能會熔損並燒毀周邊零件，增大車輛起火風險，所以BMW公司不惜耗費大量成本，召回原廠換新配件就是一例。近期另一案例是美



國波音737MAX型客機防失速裝置設計，僅靠單一資訊輸入就做出反應，沒有另一套交叉系統確認資訊輸入是否正確，因此當攻角感測器故障，傳送高角度錯誤訊息時，防失速裝置會迫使飛行員喪失飛機控制權，自動判定將飛機機頭向下推，這也是造成印尼獅航和衣索匹亞兩起重大墜機空難原因之一<sup>4</sup>。

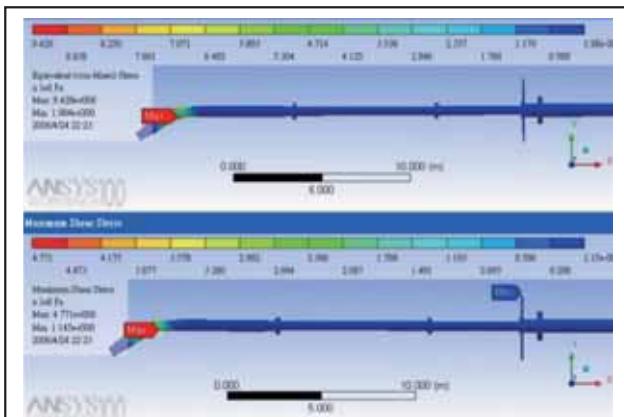
### 二、電腦模擬設計提升可靠度

在過去電腦輔助工程、設計、製造尚不發達的年代下，各裝備模型設計均採用人工計算(如圖二)。除了速度慢且可能發生計算錯誤，造成部分設備無法精準做最佳計算配置，長時間操作下，裝備可靠度會降低，並造成設備故障。像早期商船大軸軸系設計，使用三灣矩公式法<sup>5</sup>之理論並採人工運算，以瞭解大軸之正向力、剪應力及彎曲應力變化。現今，可利用三維Auto CAD軟體繪製軸系3D實體圖<sup>6</sup>(如圖三)，並給予多種不同負載與選定不同軸承位置，分別匯入有限元素

註4：〈印尼獅航空難原因出爐〉，鉅亨新聞網，2019年10月26日，<https://www.google.com/amp/s/amp-news.cnyes.com/news/id/4401226>，檢索日期：2020年1月10日。

註5：大軸在荷重下會產生撓曲變形，三灣矩公式法即用於計算軸之正向力、剪應力及彎曲應力。

註6：Auto CAD軟體是由美國Autodesk為電腦上應用電腦輔助設計技術而開發的繪圖程式軟體。



圖四：軸系負載電腦模擬計算結果

說明：大軸應力計算顯示：藍色負載較小、綠色次之、黃、紅色所受之應力負載較大。

資料來源：何耀宗，〈商船軸系曲線與軸承最佳化之研究〉，海洋大學機械與機電工程學系/碩士論文，2006年7月，頁91。

理論法之「ANSYS軟體」<sup>7</sup>做快速運算分析比較，即可從最平均受力分布圖中，算出軸承最佳設計位置(如圖四)，避免大軸因軸承位置的設計未達最佳化，或過度集中受力與振動，造成大軸軸瓦磨損及燒毀。除了結構力矩模擬外，其他諸如氣體動力、液體流體、熱應力、電磁效應、聲波分布……等，都可使用電腦數值模擬達成設備最佳化設計，提升設備可靠度，降低故障風險。

### 三、設計須考慮維保之便利性

設備的製造設計需考慮全壽期整體後勤支援之維修，便利性，一旦出現故障，要讓修護者能容易發現故障、易拆、易檢修、易安裝及可維修度要高。而維修困難度的高、

低程度，直接影響維修工時、費用。所以設備的設計必須要朝向簡單化、標準化、模塊化、互通性、防差錯、識別標誌、維修安全及故障檢測方向去發展，才能使本軍裝備後續維保便利，減少修護窒礙。像一般MTU柴油主機其曲拐軸中心設有滑油通道，運轉操作期間，必須相當重視滑油品質管理及壓力監控，避免引擎缸套金屬磨耗雜質堵塞曲拐軸中心滑油潤滑通道，產生主機重大故障。像一般主機W6級<sup>8</sup>(20,000小時)維保週期一到，引擎必須吊場翻修分解，耗費的時間、人力、物力、財力甚巨，一旦程序出錯，無形中也影響艦艇戰力。故本軍在設備的選購上，為了降低人力保養巡查的負荷、節省修費並提升可靠度，選用具有預知維護的技術與管理功能之設備，方為突破解決修護窒礙之道。

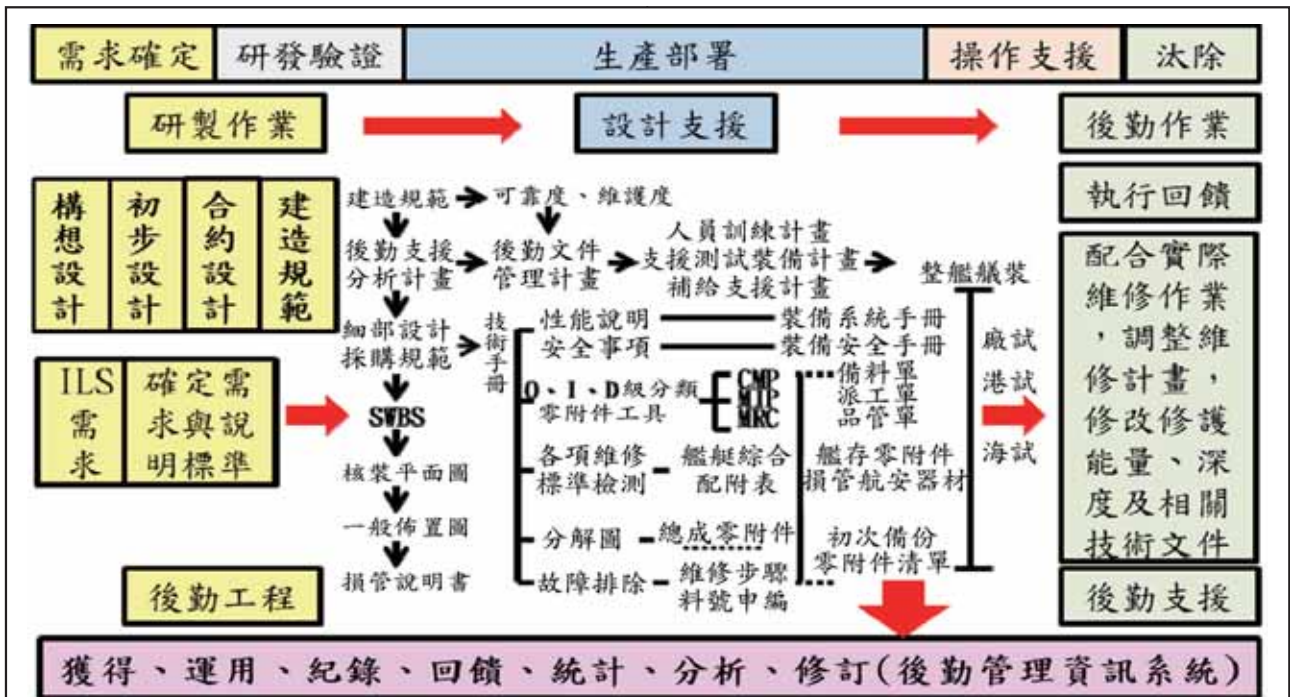
### 參、設備預知性維修

「設備預知性」維修是一門新的技術，早期在設備維護策略上，遇到零件屆期或者損壞才換，除了降低設備可靠度外，嚴重時甚至產生設備重大故障，影響艦艇服勤機動。後來發展出預防保養，這是一種時間基準維修(Time Based maintenance, TBM)<sup>9</sup>，此維護方式有可能帶來過度維護或欠缺維護的問題，不僅造成不必要的預算增加，相對的

註7：「ANSYS軟體」是美國ANSYS公司研製的計算工程模擬軟體，適用於結構力場、振動、流體、電場、磁場、聲場、熱場個別及耦合模擬分析，找出最佳化之構型設計，可減少開發製造者的生產設計成本。

註8：德國MTU公司依使用時數對不同系列引擎，訂定不同維修深度保養等級。W1：每日，運行啟動保養；W2：每月或250小時；W3：每年或250小時；W4：2年或2500小時(W2-W4為不拆發動機的情況下，進行定期維修)；W5：每6年或10,000小時，需拆卸部分發動機；W6：每12年或20,000小時，完全分解大修。

註9：時間基準維修是根據生產計畫和經驗，按規定的時間間隔進行停機檢查、檢查、更換零件，以防損壞，一般的計畫性維修或定期性維修屬之。



圖五：整體後勤支援 (ILS)

說明：整體後勤支援ILS旨在武器從無到汰除各個階段，讓管理者及執行者瞭解規劃各執行、管制階段任務。  
資料來源：作者自繪。

還增加欠缺維護引起的故障風險。舉例來說空調壓縮機到了計畫保養維修週期，但各項品管數據(電流、壓力、滑油化驗、測振值)顯示合格、運轉良好，若仍按計畫進行吊場分解檢修後回裝，卻有可能因曲拐軸與軸瓦、連桿組合工作間隙錯誤、對中誤差、環境惡劣(除鏽鐵粉進入電路系統)等因素，反而肇生更大的故障問題。由以上案例似乎也呼應了「沃汀頓效應」，凸顯越多的計畫維修項目不是越好，過度維修有可能擾亂了設備相對令人滿意的狀況。因此，現今發展的「

預知性維修」是一種蒐集數據、設備狀態、有需要再主動的維護方式，以下針對預知性維修發展源起及事故案例，說明介紹如後：

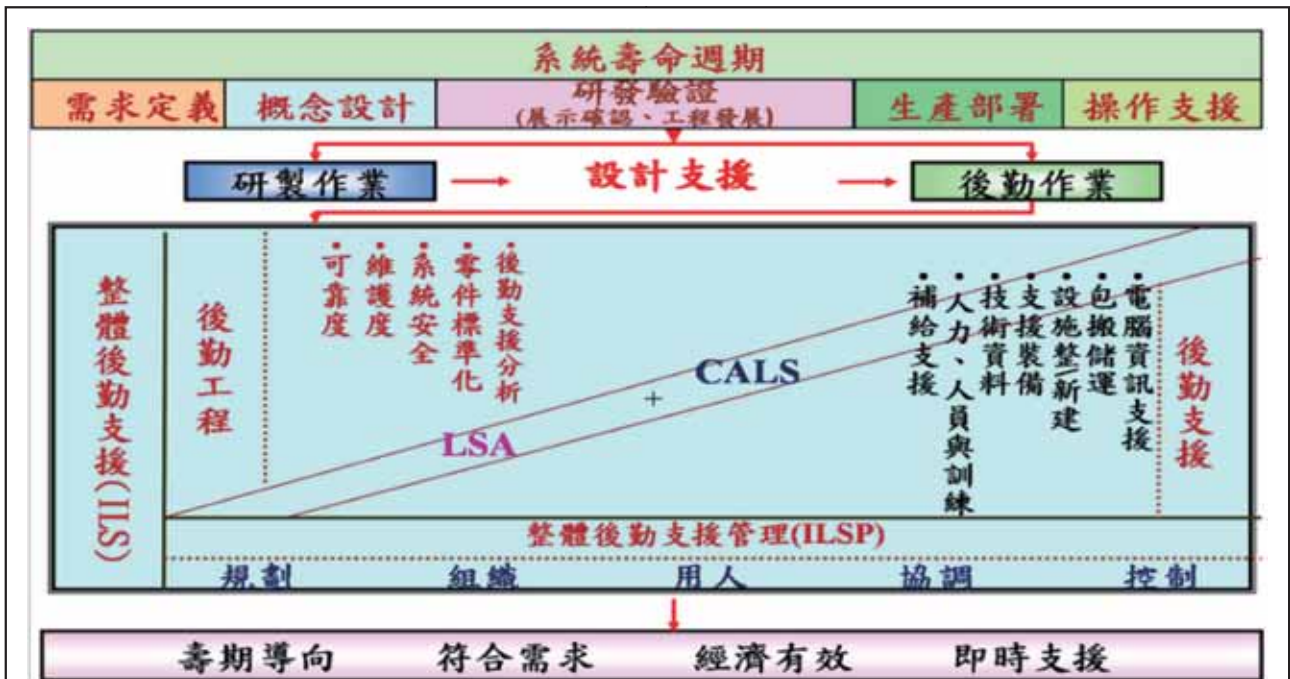
### 一、預知性維修發展源起

70年代以來，維修科學的發展，由美國的整體後勤支援(Integrated Logistic Support, ILS)、後勤支援分析(Logistic Support Analysis, LSA)<sup>10</sup>(如圖五、六)、英國的設備綜合管理工程<sup>11</sup>及日本的全員生產維修制度(Total Productive Maintenance, TPM)<sup>12</sup>的建立，逐漸發展出「預知性

註10：後勤支援分析LSA旨在依作戰需求律定之妥善率目標下，執行評估、擇優工作，選擇兼顧造艦與成軍後支援之最適設備。

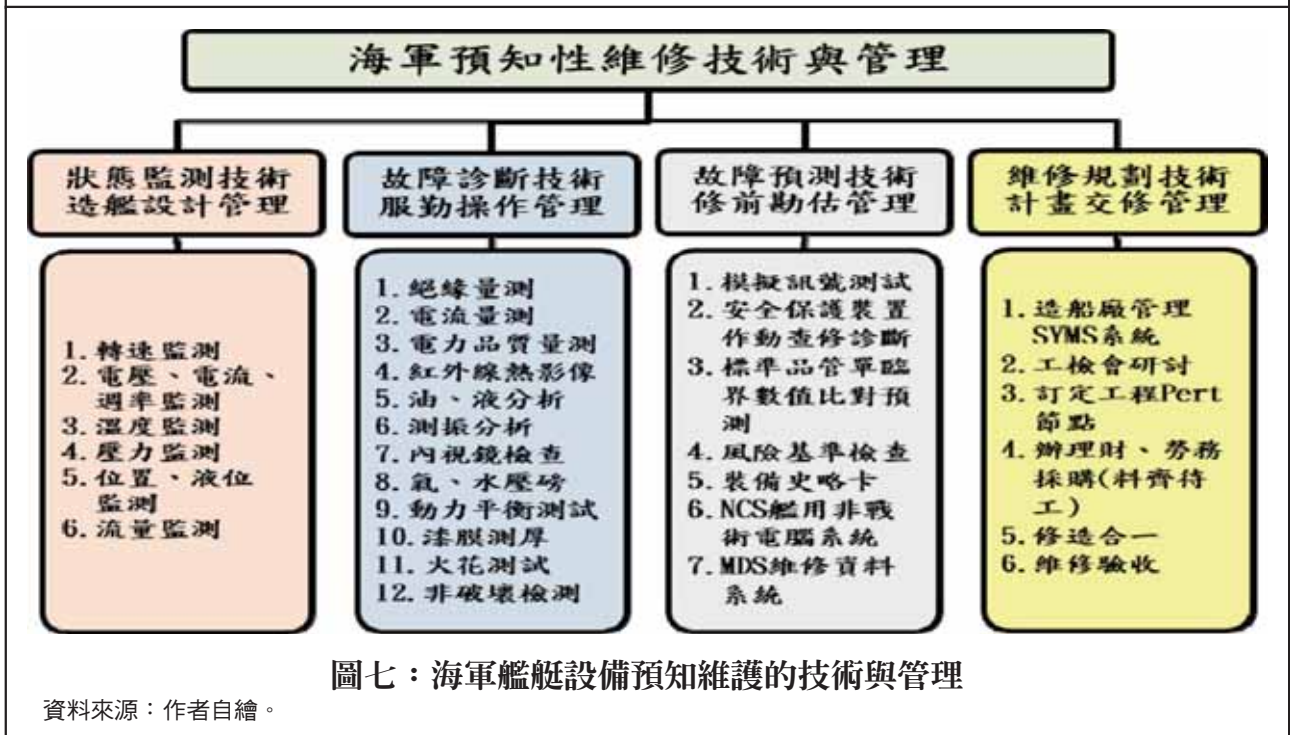
註11：設備綜合管理工程是運用長遠的、全面的系統的觀點，採取一系列技術的、經濟的、組織的措施，力求設備壽命週期費用最經濟，綜合效率最高，從而獲得最佳經濟效益。

註12：全員生產維修制度TPM為日本吸收歐美設備綜合管理工程研究結果的基礎上，加強教育，展開小組自主活動，推進生產維修。



圖六：海軍後勤支援分析(LSA)

資料來源：〈整體後勤支援作業簡介〉，中華民國海軍網頁，<https://navy.mnd.gov.tw/Links/PolicyInfo.aspx?ID=8&CID=30054&PID=21>，檢索日期：2020年1月10日。



圖七：海軍艦艇設備預知維護的技術與管理

資料來源：作者自繪。

維修」(Predictive Maintenance, 簡稱PdM)；從設備的狀態和維修的時機，可分為「故障前」和「故障後」維修。故障後維修是最低階的保養策略，它並無特別的監測，缺乏功能及現況評估，直到損壞才進行維修；而故障前維修則按照依據的不同，區分為預防性維修(Preventive Maintenance)和預知性維修(PdM)。

### (一) 預防性維修

海軍稱為PMS保養，屬中階保養；是以時間為依據的維修週期，並根據設備性能保養說明書，按規定的時間間隔(如日、週、月等期限)<sup>13</sup>進行停機檢查、保養、分解、更換定更件、定檢件，以預防設備故障或突發性毀壞。這種PMS保養屬機械式的保養，只針對被訂定的項目實施檢查維護，至於有些需要較高技術判斷的設備劣化的潛勢，就無法同時得知。例如人員雖按週期執行更換冰機壓縮機冷凍油，且每次滑油取樣送驗結果都正常，但仍有可能肇生曲軸斷裂損壞情事，它可能是曲軸端的主軸間隙異常，產生擺動或搖晃，致使曲軸端受力過大而折斷。因此，必須經進一步執行測振比對故障資料庫後，才可準確研判發現曲軸主軸瓦間隙超限，透過即時修理，避免斷裂故障發生。

### (二) 預知性維修

是以狀態為依據的維修，屬於最高階的

保養。它在設備運轉時進行監測和診斷，預測設備未來發展的潛勢及可能的故障模式，並預先制定維修計畫，規劃設備維修節點(Program Evaluation and Review Technique, 簡稱PERT)<sup>14</sup>圖及所需的物料。它的架構在狀態保養上，配合設備使用操作的條件，建立可預測異常失效的模型，預先規劃並修正作為。所以預知性維修是包含了「狀態監測」、「故障診斷」、「故障預測」、「維修規劃」等四大階段(如圖七)，使用感測器蒐集信號參數，並利用可程式化邏輯控制器(Programmable logic controller, 簡稱PLC)<sup>15</sup>透過信號參數回授實施控制，確保設備正常運作；且能發出訊號讓使用者知道做什麼預防處置，以避免故障。另外，還能將維修技術經驗導入電腦，讓無經驗的維修者也能依照指令步驟實施維修。例如晶圓廠無塵室的空氣調節箱，在風扇及馬達端裝設工業加速規<sup>16</sup>做振動量測，並將訊號傳至監測系統，電腦診斷分析後若發現震動達臨界值，將發出警戒通知技師做維修排程，可大幅避免故障發生。

## 二、未落實預知性維修案例

### (一) 高雄氣爆

1. 2014年7月31日夜間，高雄市前鎮區與苓雅區發生石化氣爆炸事件<sup>17</sup>，就在當晚9點時，民眾通報疑似有瓦斯洩漏，由於當地

註13：日、週、月、季、半年、年、期、限等保養項目中，「期」指每個大修間隔週期、「限」指使用某一期限或現況需要時的保養項目，如每運作100小時要換料件、或每逢遭雨淋時、或每次接用岸電時要量測絕緣等保養間隔。

註14：PERT圖是把工程項目用圓型描繪成一個節點編號網絡圖，並且標註每個圓型節點的工項任務、工期、開始與結束時間，若前一個節點進度落後，則須重新全盤檢視並修正工進規劃。

註15：可程式化邏輯控制器是一種具有微處理器的數位電子裝置，用於自動化控制的數位邏輯控制器，接收感測器輸入訊號經程式處理後，發送輸出電子訊號來監督及控制各種機械及電氣系統。

註16：加速規又稱加速計，是測量作用力的變化來計算出加速度的裝置，國防工業應用於飛彈或航空器的姿態運動監測，工業中常用於馬達振動量測。

註17：〈2014年高雄氣爆事故〉，維基百科，2014年8月1日，<https://zh.m.wikipedia.org/zh-hant/>，檢索日期：2020年1月10日。



圖八：苓雅區發生石化氣爆炸

資料來源：〈高雄氣爆〉，自由時報，2014年8月10日，<https://news.ltn.com.tw/news/society/breaking-news/1072142>，檢索日期：2020年1月10日。



圖九：普悠瑪列車出軌事故

資料來源：〈普悠瑪車速140公里釀禍〉，青年日報網頁，2018年10月23日，<https://www.ydn.com.tw/News/310063>，檢索日期：2020年1月10日。

有輕軌工程，一度以為是施工挖斷瓦斯管線，誤判延誤遏阻大規模氣爆發生之良機。幾個小時後該區域發生連環爆炸，致32人死亡、321人受傷，並造成多條重要道路嚴重損壞，周邊店家也因為爆炸破壞，造成重大經濟損失(如圖八)。

2. 經事後調查，認定係華運公司到李長榮化工公司大社廠間，丙烯管線遭不當包覆於排水箱涵內，致管壁由外向內腐蝕並日漸變薄，當無法負荷輸送管內之壓力而破損外洩引起爆炸。事故肇因起於確認步驟程序並未落實、便宜行事，且未派人巡查造成；就預知性維修而言，李長榮化工公司除未落實狀態(壓力)監測外，也未將石化管線做定期故障診斷、水壓測試及超音波腐蝕檢測作業，所以無法預測故障，更不會有維修規劃，

才會造成此次重大災損。

#### (二) 普悠瑪自強號新馬站出軌事故

1. 2018年10月21日，臺鐵6432次普悠瑪列車由樹林站出發前往臺東，行駛期間因2組主風泵故障，使得列車前後10次因總風缸空氣壓力不足，觸發安全機制，造成動力切斷<sup>18</sup>，除晚14分鐘進宜蘭站外，並經短暫搶修仍未安全修復，調度員卻指示司機繼續行駛到花蓮換車。後因司機嘗試排除問題，並將自動列車防護系統(ATP)<sup>19</sup>隔離並通報，惟遠端監控系統未連線<sup>20</sup>，故未發出警告訊號，司機員以加速企圖追回落後時間，致高速通過新馬車站時出軌翻覆，造成逾200人死傷之重大事故<sup>21</sup>(如圖九)。

2. 檢視臺鐵在新型普悠瑪列車採購作業上，雖已加裝ATP(運用人工智慧預知性判斷

註18：主風泵功能為製造壓縮空氣，壓縮空氣主要用於煞車、真空廁所、空氣彈簧(傾斜裝置)、自動門等系統，為避免煞車時空氣壓力不足，列車的安全機制會在總風缸壓力低於設定值時，切斷列車動力。

註19：自動列車防護系統(ATP)會監測獲取線上各趟列車位置信息，計算並告知行車電腦最新限速。列車司機須根據儀表板上顯示的ATP限速運駛，一旦超速，行車電腦將自動減速，直到符合限速為止。

註20：臺鐵未將遠端監控系統列入車輛採購之驗收項目，在事故當下ATP跟遠端的配線是未連接。

註21：新馬車站為無人站，轉彎半徑300公尺，屬急彎路段，傳統列車速限為65公里/小時，普悠瑪速限為75公里/小時，當時事故列車以時速141公里/小時通過，故造成翻車。



的防護設備系統)，且可以遠端監控。但弔詭的是，未將遠端監控系統列入採購驗收項目。在事故當下系統因未連接、亦未發出警告訊號；再者檢視司機為追趕故障造成行車落後之時間，設定高速行駛，但在危險路段未採取任何修正車速處置；另發現公司內部SOP教育訓練不足，未能訂定各種可能故障及對應處置措施，且調度員未能即時向更高層反映尋求換車或停駛修復之決策，最後在人員、程序、設備、組織都有問題狀況下，一道道的補救防線都失守，終究造成無法挽回之憾事。

鑒於上述兩起血淋淋的重大傷亡事故教訓，凸顯落實預知維護的技術與管理將能避免重大事故發生，不僅可以保障裝備財產安全，更重要的還能保護人員生命。

## 肆、本軍現行各階段預知性維修技術與管理

本軍艦艇種類多樣、任務頻繁，為達作戰要求之妥善率，所需後勤修護作業龐雜，若能在新一代艦設計上，先期將設備之監控技術、維修動序、料件獲得、技術圖書、藍圖予以完整規劃，將有助「預知性維修」技術與管理落實。本軍的預知性維護係在「造艦設計」完成後，運用設備「狀態監測」技術，使艦艇「服勤操作」時可藉由智慧型整合感測系統，獲得設備運轉的參數資料與數據，將偵知所得「故障診斷」問題，實施警報排除之初步處置。承修廠則在「修前勘估」階段，利用造船廠管理系統(SYMS)，比對資料庫實施「故障預測」；而工程修護單位

則在「計畫交修」時，依照已建立之「維修規劃」技術，採取適當之維護保養工作，達到減輕修護資源不足的壓力，提高設備妥善率。

以下針對預知性維修技術與管理各階段之作業規劃，分項研討如後：

### 一、狀態監測技術－造艦設計管理階段 (一)設備狀態監測

1. 一般設備除了狀態監測外，尚需搭配保護裝置的設計。最簡單的保護裝置設計像是電機類過載保護安全裝置(斷路器、保險絲、積熱電譯、溫度、壓力感測器、逆電流保護裝置、轉速計、極限開關等)等設計，少部分是機械性保護裝置(如卸壓閥、彈簧、連桿、避震墊、凸輪、卡榫等)。這些簡單的保護裝置，在傳統型艦上靠著機械臨界飽合狀態作動產生保護作用，是屬於個別獨立的保護設計，並未整合；往往造成巡查人力負荷，且異常狀態問題如未能及時處理，將使設備由「預知性維修」演變成「故障後維修」，造成維修經費增加。

2. 新一代艦設計多採用觸控式液晶螢幕的工業電腦，加入整合控制軟體執行系統性監測與控制。當某些設備監測值已達運轉操作臨界條件時，整合控制軟體即以人工智慧強制轉換設備運行模式或停機，以達到設備保護作用，待操作人員重新排除故障限制條件並解除警報，才能重新恢復設備運轉使用。以本軍「康定級」艦為例，艦艇輪機控制室設置有推進、輔機、電力、損管等操控台，各系統主要設備分別裝上不同之感測器(Sensor)，感測器測得運轉數據值會分別回

饋至各操控台。這些狀態監測技術在造艦設計階段就已納入考量，當運轉數據狀態出現異常時，即會亮黃色(警告)警報，提醒操控台值更人員須至設備處實施預知性維修檢查，並將問題排除後恢復設備使用；若未重視黃色警報，則有可能演變成紅色(故障)警報，導致設備故障或停機。因此，整合監測設備除節省人力負荷外，也能降低設備發生故障機率。

## (二) 造艦設計規劃

### 1. 合約設計：

從海軍「光華六號計畫」(新型飛彈快艇)設計、沱江艦、磐石艦等新造艦過程中，已參考國際船舶新的、效能最佳的裝備狀態監測技術，納入軍艦建造設計規劃作業，並透過可行性研究、初步設計、合約設計、細部設計等階段，結合民間船舶產業能量，導入新科技帶動艦艇設備可靠度提升，且執行成效良好；另對服勤中艦艇，亦可透過加改裝(輪控系統性能提升)、延壽等專案執行系統換裝構改，以提升設備性能。

### 2. 模組化設計：

設計建造階段即將模組化設計納入考量，一旦受監測之設備效能逐漸降低時，可採用總成或模組更換方式維修，並在故障發生前，採取預知性維修以減少修護成本；換下之總成(例如主機、發電機、艙推APU、海水泵、淨油機、PLC控制模組、電控箱等)亦可納入可修件交修作業，而修復之可修件再變成周轉件，循而復始，以維艦艇戰力不墜。

### 3. 標準化：

設備系統之模組化及標準化，確實符合當前新造艦艇之需求，畢竟過多構型將造成維修採購成本上升，並使管理作業複雜。因此，不管未來建造大、小型艦艇及設備，若監測技術及部分所需感測器相同，不僅增加通用性，亦可相互支援，減少運維成本。

## 二、故障診斷技術—服勤操作管理階段

### (一) 現行故障診斷技術

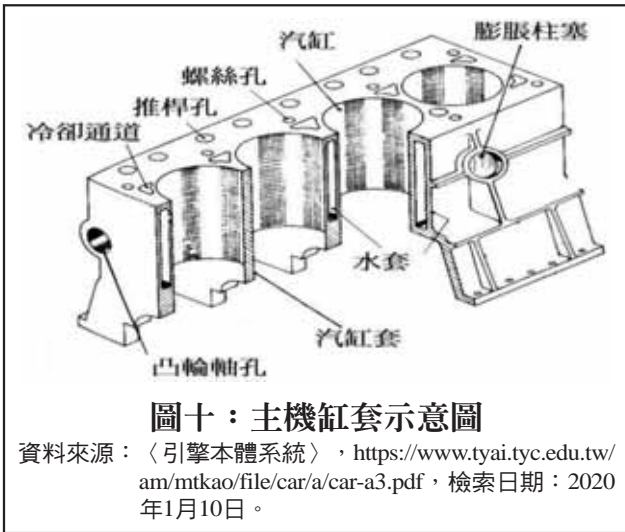
#### 1. 絕緣、電流量測：

絕緣值可使用三用電錶或高阻錶量測。當電機設備或馬達絕緣持續降低，甚至低於1M歐姆時，持續使用即有燒毀可能，此時必須予以清洗、烘烤或包紮電纜破損處；電流值可使用卡流錶量測。當設備電流異常變大時，有可能是軸承、泵端、壓縮機負載變大，進而需要換軸承或檢修泵端、壓縮機；也有可能是電源線路老化或零件功能損壞，須即時更換。故當設備電流值逐漸變大，尤其是超過額定值，必須採取預知性維修，以降低維修成本。

#### 2. 電力品質分析：

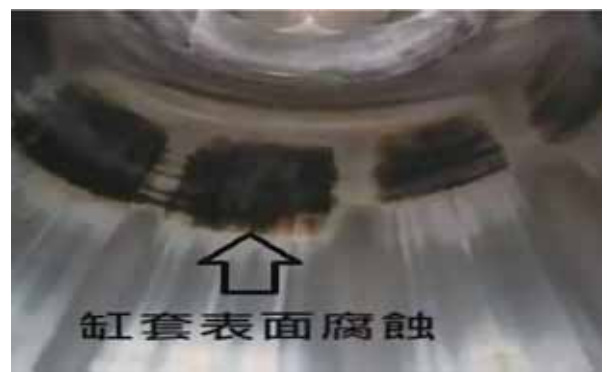
電力品質因素如電力諧波<sup>22</sup>、電壓閃爍、三相不平衡等可由電力分析儀測得，不良電力的品質因素會對電機、電子設備造成長期危害。就本軍戰系通雷裝等設備而言，不良的電力品質因素會影響性能表現(如系統誤差失準)；當諧波嚴重影響電力系統時，除系統供電品質不穩，亦可能破壞電力設備或造成不正常運轉，造成如功率因素降低、擊穿電容器，變壓器及電纜過熱或絕緣破壞等事故。

註22：供電系統有一60HZ基本正弦波，由於其他電子設備(整流器、轉換器、反流器)等非線性負載產生其他頻率、相位之電力波型統稱諧波。



圖十：主機缸套示意圖

資料來源：〈引擎本體系統〉，<https://www.tyai.tyc.edu.tw/am/mtkao/file/car/a/car-a3.pdf>，檢索日期：2020年1月10日。



圖十一：主機缸套表面腐蝕

資料來源：〈淺談瓦錫蘭主機缸套的低溫腐蝕〉，每日頭條，2016年9月23日，<https://kknews.cc/zh-tw/news/a62p8n.html>，檢索日期：2020年1月10日。

### 3. 紅外線熱影像偵測分析：

紅外線熱影像技術係運用光電技術，以偵測物體熱輻射之特定紅外線波段訊號(如配電板、馬達軸承、大軸軸承等設備組件)，除將該訊號轉換成影像圖形，並進一步計算出溫度值，讓人員可以「看得到」物體表面之溫度分布情形。在電力負載時，可以完整的將系統異常情形呈現出來，使結果分析更接近實際狀況，可用於火災之預防及電力設備過載異常狀況監視；若發現熱源無法解決，就必須設法提高散熱效果或更換使用設備，避免零附件燒毀。

### 4. 油、液分析：

由於各金屬、材料有不同的光譜特性表現，對於引擎、變速箱或液壓系統等機械運作設備，均訂定滑油取樣作業，藉送驗分析潤滑油品所含材料成分，可顯示其磨損和污染程度，來決定更換潤滑油品或採取預知性維修。在主機燃油系統中，應定期取樣送驗，若含鐵量異常增加，說明缸套磨損；若含鉻量異常增加，說明活套環磨損；在主機缸

套冷卻水系統中，為了防止缸套穴蝕、腐蝕和水垢，除添加主機水精保護外，必須實施水質化驗監控來瞭解其酸鹼度、硬度值是否達到保護要求標準(如圖十)。尤其在鍋爐水系統中，為排除給水溶解氣體的可能，必須使用給水加熱除氧櫃，盡量除去給水中的溶解氣體，並每日對爐水實施酸鹼值監控化驗，及早處置可避免情況惡化。

### 5. 測振分析儀：

設備在運轉時，不可避免多少會產生震動，當設備老舊或狀況惡化時，其老舊零件或損壞零件的振動量會隨之增高。分析振動設備之頻譜，可得知設備運動時機件之振動特性，當故障潛勢漸漸產生時，作用於設備上的振動會隨著故障潛勢改變，產生故障振動頻譜，因而影響了健康的振動訊號。本軍可從振動頻譜的變化，來分析發生潛化劣勢的機件以進行維護，並利用振動的量測及分析，做為維護保養工作之依據。

### 6. 內視鏡：

柴油裡或多或少都含有硫的成分，而硫

磺在主機內燃燒後與燃燒所產生的水分結合就會形成硫酸，並在缸套表面慢慢地形成凹坑(如圖十一)，活塞環也會發生磨損，慢慢形成拉缸，產生重大故障。人員除於潤滑油內添加微量碳酸鈣中和外，亦透過內視鏡檢查缸套腐蝕，可及早發現清潔修補，以免衍生後續重大故障。

#### 7. 氣、水壓磅測試：

當油、水櫃空艙破洞換板或閥體檢修完成後，須依規定實施空氣壓磅測試，確保艙間功能正常不洩漏。一般油、水櫃及海底門閥體檢修工程均須進塢執行；出塢後，若發生異常，必須再度進塢才能實施故障維修，不僅造成翻工，且耗費鉅額成本，將得不償失。

#### 8. 動力平衡檢測：

旋轉設備若配重不平衡，運轉時將產生一個離心力，並隨著轉速升高逐漸變大，離心力通過軸承傳達到設備上，引起整個設備的振動，產生噪音、加速軸承的磨損、降低設備的壽命，甚至使設備控制失靈，發生嚴重事故。透過維修廠運用動力平衡機，可實施俾葉、發電機轉子、馬達等中、低動平衡作業，至於渦輪增壓機高轉速動平衡量測，則採定期委商施修，確保裝備正常作動。

#### 9. 漆膜厚度檢測：

船體因與海水接觸，必須塗上防護油漆，以確保船體不致鏽蝕，而漆膜層厚度未達標準，將降低船體防蝕保護作用，必須重新噴漆至符合標準厚度為止。當設備機體為金屬材料時，漆膜儀利用激勵線圈在導電的機體表面產生渦電流，此渦電流將激發一個反

向磁場，而抵銷漆膜儀激勵線圈上的磁場強度，其抵銷程度的大小即可計算出漆膜層厚度，並做為檢測施修依據。

#### 10. 火花測試：

大軸為了避免遭海水腐蝕，外層會包覆玻璃纖維(FRP)。欲檢測是否完整包覆，本軍採用高電壓低電流放電機，電極一端連接大軸，另一端以環型電極來回巡掃。若有包覆不完整之處，電壓將從此處放電產生火花，代表此處須重新包覆缺改，直至火花放電測試合格為止。

#### 11. 非破壞檢測：

一般非破壞檢測項目繁多，如「X射線檢測(RT)」能輕易穿透鐵板，故X光檢測設備常用於焊縫缺陷檢測找出氣孔、縮孔、夾渣、裂紋等焊接缺陷。「超音波檢測(UT)」是頻率高於20KHZ的機械波，這種機械波在材料中以一定的速度和方向傳播，遇到聲阻抗不同的異質介面(如缺陷或被測物件的底面等)就會產生反射，本軍即是運用超音波探傷儀對鋼材焊接缺陷及管路腐蝕檢測；另外測厚儀利用聲速在待測物傳遞之時間，就可計算出船體鐵板厚度是否超限。至於「滲透檢測(PT)」多用在俾葉檢測，透過毛細管效應，滲透劑會沿著開口的裂紋滲入內部，經乾燥處理噴塗顯影劑，裂紋顯影很容易對比，做為施修判斷依據。

#### (二)服勤操作管理

##### 1. 艦方：

各部門應按艦上「裝備保養項目索引表」<sup>23</sup>，依保養的近、中、遠程排定「週期配

註23：裝備保養項目索引表：依據裝備目錄將每一裝備所需之保養要項摘要列出。

當表」<sup>24</sup>，且根據計畫週期執行PMS保養。在基層官、士兵執行一般「0級」保養<sup>25</sup>工作時，部門主管幹部應落實督導及要求教育訓練簽證，並持續協洽地區後支部見習與技轉，以提升部分「I」、「D」級維保能量。艦上各級幹部應配合裝保校閱執行時機，抽測所屬MR卡實作，以驗證所屬設備操作熟練度及單位保養能量，發掘因操作保養欠當，肇生重大故障風險。

### 2. 艦隊部：

應督導屬艦輪機行政，管制定期送驗檢測期程；另針對送驗結果給予分析建議，並指導維保方向。有關「I」級工程協助屬艦落實教育訓練，適時加以抽測驗證，並管制艦方對設備使用不滿意或裝備停產之消失性商源，填報加改裝建議，以維護裝備妥善。

### 3. 承修支部：

「D」級工程預知性維修多由承修廠負責執行，尤其遇重大工程必須做好紀實工作(含縮時攝影)，將維修工程工法、步驟、料件需求紀錄文件化，以節省後續修護時效及避免技術斷層所造成之翻工。加強關鍵性物料之基準存量建立與籌補，遇艦艇緊急物料需求時能即時支援料件更換。並藉由派員委外見學預知維護技術、增加精密量具、機工具的投資採購，以維護護能量不墜。

## 三、故障預測技術－修前勘估管理階段

### (一) 本軍現行故障預測技術

#### 1. 訊號模擬測試：

測試主機轉速超速限制功能時，若直接

啟動主機全馬力實測，容易造成設備損傷，可利用模擬測試取代設備臨界過載實測，透過外加電源電壓與轉速計在主機超速狀態發出的電壓相同，來檢測模擬主機超速時警報是否會作動，以確定設備功能狀況是否正常。其他如微電流、電阻、外部壓力或溫度…等，都可用來評估設備表現、觀察狀態反應作動正常與否，以決定是否需要採取預知維修。

#### 2. 安全保護裝置作動查修診斷：

狀態監測一旦發現異常，甚至觸動安全保護裝置作動，艦艇操作人員應立即巡檢實施錯誤排除，若未實施設備檢查即復歸安全保護裝置，將會損壞設備造成故障及危險。

#### 3. 完備標準品管程序：

本軍依據各型艦之裝備技術手冊、裝備性能說明書，訂定標準品管單。這即是故障預測判定之標準資料庫，標準品管單內標註各臨界上、下限數值，可供操作使用者比對、判斷，據以填報請修單實施預知性(或航修)維修。例如絞機、馬達均有標準額定電流，若運轉實測電流大於標準，則需報請支部協修，各後支部收到請修單後須細部檢查馬達軸承有無異常、控制系統電子零件有無損壞、液壓系統效能有無降低、齒輪系統咬合有無異常、絞盤錨鍊有無變形不順等問題，再針對問題實施預知性維修。

#### 4. 風險基準檢查：

使用各項機、儀具測得設備狀態數據，再根據設備各狀態監測之資訊進行分析，採

註24：週期配當表：根據艦艇裝備保養項目索引表將各分組季以上的保養項目，平均分配編排於兩次大修週期中之各季。

註25：維保工作通常採用三級維修機構：基層(O)級由艦艇裝備使用操作人員維保；中繼(I)級由艦隊部輔修輔訓小組使用精工儀具檢修；基地(D)級則由後支部工廠大部件翻修。

取預知性維修，並充分掌握資源，降低意外風險。例如電力分析儀測得電力諧波大於百分之五時<sup>26</sup>，應逐步分段隔離電力設備實施電力分析檢測。發電機發電電力品質異常與設備反饋造成之諧波所需維修資源並不同，若發電機發電電力品質異常造成之諧波，則需要將發電機吊場分解檢修；如屬裝備反饋造成之諧波，則可對裝備實施故障查修或透過電源濾波器加以改善，均屬降低風險之作為。

### (二) 修前勘估管理

#### 1. 裝備史略卡：

各項設備均配有史略卡，紀錄過去故障維修歷史(這也是故障預測判定參考之資料庫)。在預防保養維護前可檢視史略卡藉以瞭解本項設備常態徵候，據以推估可能造成故障因素，再針對設備故障特性採取重點式加強修護，例如發電機若曾經換過軸承或整流器燒毀，計畫修期進廠交修勘估作業時，必須針對過去發生之故障原因，加以評估逐項排除，其他部發電機也需一併評估是否採取相關修護前置準備。

#### 2. 艦用非戰術電腦系統(NCS)：

艦艇PMS保養紀錄及定更、定檢料件換用狀況，均需紀錄於艦用非戰術電腦(NCS)中。系統亦可依需要調取過去維保紀錄、保養用料紀錄、各類量測數據紀錄，以決定增、刪修護工項及料件。

#### 3. 維修資料系統(MDS)：

艦方針對主、電機等重大裝備使用時數均需定時登載於MDS系統，透過系統掌握主電、機使用時數，可即早預排主電、機維修

工程於計畫修期內。由於主(電)機維修所需料件若須由國外採購獲得，交貨期程較長，透過預定的交修計畫，可提早納入計畫備料採購各級維保所需料件資源，以達料齊待工、縮短施修過程中料件採購開標、交貨等待時間。

## 四、維修規劃技術－計畫交修管理階段

### (一) 維修規劃技術

艦艇維修前，各後支部驗估員均會提前登艦實施修前勘估，並利用造船廠管理系統(SYMS)下達派工單及備料，SYMS本系統派工單針對各式設備維修步驟、工序、工種、工法、工時、所需料配件均有完整紀錄參考可稽。許多設備(尤其同一型艦)均是反覆定期執行維修。因此，透過本系統提供之修護技術及紀錄做為參考依據相當重要。

### (二) 計畫交修管理

#### 1. 工檢會研討：

維修前需召開工程研討會，以釐清各單位配合(委託)工項及所遇窒礙(料件籌補進度)除採取適當修護策略及作為，並檢討修能不足、欠缺機具施工項目辦理勞務委商作業。若遇設備消失性商源、無修復價值、使用者功能不滿意(未達功能)，建請艦艇填報加改裝申請完成審查後，進行裝備構改，以恢復裝備功能。

#### 2. 訂定工程節點管制：

為維工程進度順遂，避免程序、步驟錯誤造成翻工，應於維修前訂定工程Pert節點據以執行。若有進度落後未達節點，需適當採取因應作為(如加班趕工)；另為降低設備

註26：IEEE電機電子工程協會標準/Std519-1992規範，系統若混合發電機與馬達，電壓失真要控制在5%內。

全壽期管理成本，應善加利用「修造合一」政策，責由建造廠整合維修技術資源，並負責保修(固)、保修責任，以提高設備可靠度。

### 3. 辦理財、勞務採購：

維修所需之料件、工程委商均需透過採購獲得，且本軍亦屬公務機關，逾公告金額十分之一之採購作業，即應依照《政府採購法》辦理公開招標作業。藉由先期計畫備料、撰寫委商施工說明書，以提早辦理採購作業，務求料齊待工，達成如期、如質完工維修出廠之目標。

### 4. 維修驗收：

為確保艦艇大修後，各項裝備均能達到原性能標準，以恢復執行任務之能力，本軍訂定有一套嚴謹的維修驗收標準作業程序。從修前物資總檢驗(所有裝備實施性能評估報告)列出需改善項目、開工後30天召開材料檢討會掌握缺料狀況、修期一半時，召開工程期中檢討會，掌握窒礙工程、開工後90天召開補給整備驗收作業，掌握軍品帳籍配賦狀況。完修前，艦隊會試階段依照品管單標準實施工廠驗收測試(FAT)<sup>27</sup>、港內接收測試(HAT)<sup>28</sup>，以掌握裝備性能狀況。最後，交由檢驗單位全系統組合複查驗收及爭議協調，確實管制各承修廠在施工技術與品質上達到要求標準。

## 伍、建議一代結語

預知維修保養打破傳統PMS保養維護，

以防患故障於未然，讓設備維持高可靠度。吾人已熟知預知維修保養的精髓要義與平日的設備維保息息相關，須從根本的造艦設計規劃即須納入考量。雖然目前本軍尚未導入工業物聯網、利用雲端平台與大數據分析做為修決策整合，但在艦艇使用者本身狀態監測外，還有艦隊輔修(訓)小組及承修支部共同廠艦合作，提供技術指導，並善用現有精工儀具及資訊系統，仍可在設備維護上發揮最大的狀態監測能量，使本軍艦艇兵力妥善率提升、維持戰力不墜。以下就個人工作經驗做下列六點建議：

### 一、管制艦艇官兵具備本質專長基礎證照

艦艇的操作維保有賴於優良的人力素質，人力素質提升有賴於專業基礎知識，專業知識學習則建立在專長基礎證照上。故應管制艦艇官兵具備本質專長基礎證照，有強化自修能量。本軍艦艇編制龐大，士官均為長留久用之幹部，取得相關證照有助於儘速發掘設備預知性故障(設備潛勢劣化)，或僅需廠方供料後，即可自力施作完成檢修。若維修工作分散於平日保養，而非大量累積集中於年度修期，均將有助於設備保養深度之建立；如因年度修期末屆，即擱置不處置，將造成更重大之故障、將耗費更多之修護資源，大大減損戰力。簡言之，艦艇各級士官幹部有了基礎證照的學理知識，加上落實的維保訓練簽證，士官、兵就能清楚熟悉設備系

註27：FAT(Factory Acceptance Tests)工廠驗收測試，係屬靜態初驗，置重點於檢查設備完整性、品管單驗證、功能驗證、規格最終檢查、廠艦協議等5大項。

註28：HAT(Harbor Acceptance Trial)港內接收測試，係屬靜態的港內繫泊測試。

統功能原理及限制條件、進而熟練設備操作、強化設備維修保養，如此才能發揮武器最大戰力，完成精準打擊。

## 二、落實要求艦方見學及協修

利用計畫定保、大修時機，由艦長針對各項工程派工單內容，要求艦上相對應士官幹部參與見學、協修。讓艦艇官兵熟悉更深一層系統原理，以利持續加強支部「D」級工程技轉艦隊(艇)之深度，將有助於增加平日服勤時基礎自修能量，避免艦艇完工出廠後，因人為操作保養程序不熟悉，造成設備故障報請航修，徒增修護預算與工作負荷。

## 三、加強新型料件研改替換

本軍艦艇現有裝置之偵煙、泛水、火警警報偵測……等感測器，數量龐大，惟這些偵測器若屬舊型設計，在面對後續修護或需換新之採購上，常面臨消失性商源或廠商蓄意哄抬價錢等問題。提早掌握現今市面早已可匹配系統之同等品物料技術，且性能材料也可能優於舊規格，在未涉及艦結構強度、性能、穩度等改變，或裝備性能、系統變更等重大加改裝工程，則建議簡化構改申請行政程序，授權由支部核定，試行後成果報請保指部核定。如此循序漸進導入替換舊式物料，將可節省維修經費，避免老舊構型構改作業被冗長行政程序綁死，且易遭受特定廠商挾持哄抬物料售價，造成修費額外負擔。

## 四、支部各工場編列急需物料預算

現各艦艇每月均編有大賣場小額採購預算，做為維保消耗料件採購。而支部負責所有水面艦艇維修，有些非大賣場品項，且一般市面電子材料元件並無料號，無料號就無

法以預算採購支應，產生該換料件未換，易導致故障維修。故建議業管之核心工場(如內燃機場、電工場、鉗工場)若能固定編有一定額度預算，俾用做採購無料號之緊急用料，將可快速達成艦艇預知性修護彈性，澈底做到「後勤即先勤」。

## 五、強化造艦合約設計

本軍為改善主、電機舊型系統監控功能，提升輪機裝備監控及自動化，現正委由中科實施康定級艦「輪控系統性能提升」換裝中；尤其未來海軍「國艦國造」政策執行的造艦規劃計有潛艦國造、快速布雷艇、兩棲船塢運輸艦、沱江後續艦、新一代巡防飛彈艦、新型救難艦、微型突擊艇等建案。這些新造艦艇之預知監控系統(輪控系統)均可委由國內具蒐羅整合設計能力之廠商實施研究評估，導入新一代工業4.0技術，納入合約設計撰寫，避免輪控系統關鍵技術、物料受制於國外，將可厚植國防科技於民間產業，提升國內造艦工藝及水準。

## 六、導入市場新科技技術

聘請採購可靠度技術與管理服務的專業顧問廠商，為海軍建置設備健檢系統平台，或派遣專職人員委外受訓，並籌購新式監測預知機儀具，藉以導入市場設備綜效輔導科技，以人性化設備綜效技術與管理專業輔導，為本軍專案客製化提供「簡單、快速、有效、人性化」的設備預知維護的技術。

最後，吾人須知精良武器設備有賴於優秀人才操作，為消除非必要的保養工作，增進設備系統的運轉壽命、節省修費並提高可靠度，除管理階層支持預知性維護保養技術



、機具、系統採購建置外，仍有賴艦艇官兵及修護技師不斷提升本質專長素養，從熟悉

系統運作並落實基礎維保開始，才能避免重大故障，確保裝備妥善及任務順遂執行。⚓

作者簡介：

陳睿岳少校，國防大學中正理工學院91年班，國立臺灣海洋大學輪機工程研究所碩士107年班，曾任艦指部輪機官、海軍第二號浮塢塢長，現服務於海軍左營後勤支援指揮部。

徐裕倫上尉，海軍官校102年班，曾任左營後勤支援指揮部機維場主任、中平軍艦輪機官，現服務於海軍張騫軍艦。

## 老軍艦的故事

### 鄱陽軍艦 DD-910

鄱陽軍艦由美國伯利恆鋼鐵公司製造，1944年6月2日完工成軍，編號731。民國61年7月6日美國將該艦售予我國，我海軍命名為「鄱陽」軍艦，編號DD-10，後改成DD-928隸屬驅逐艦隊，擔任海上巡弋及外島護航等任務，民國68年再改編號為DD-910。

該艦成軍後除擔任海上防衛任務外，曾先後參加漢光、聯興、獵鯊等演習，民國73年6月30日，由於主機嚴重損壞，艦體也老舊不堪，而奉命除役。(取材自老軍艦的故事)

