

# 艦艇磁訊跡生成與艦艇磁性抑制技術

胡卓瀚<sup>1</sup> 林聖義<sup>2</sup> 閻家維<sup>1</sup> 葉彥辰<sup>1</sup> 曹紹航<sup>3</sup> 黃宇川<sup>4</sup> 蘇俊連<sup>5</sup> 林炳昌<sup>5</sup>

1 海軍造船發展中心  
2 大葉大學 電機工程學系  
3 海軍左營後勤支援指揮部  
4 海軍軍官學校 電機工程學系  
5 國立高雄科技大學 電機工程學系

關鍵詞：鐵質導磁材料、船體磁場、艦艇磁訊跡、艦艇磁隱匿性、艦艇磁訊跡抑制

## 摘要

艦艇船體結構建造除了少部分特殊船舶會採用鈦合金、複合材料等非鐵質導磁材料建造外，一般大多數艦艇造艦之船體結構所選用的依舊以鐵質導磁材料為主，且艦艇內部電氣設備材料、安裝及電纜佈設走向等因素都會造成船體磁場差異，況且地球本身即是一個天然巨型的磁場，當艦艇運動航行於不同海域時會與地球磁場產生交互作用下，會造成可追溯的磁場扭曲變異軌跡，此便是所謂的艦艇磁訊跡；在軍事上即可運用此艦艇特性進行偵測探搜，更甚者是以具磁感測能力之水雷或磁性感測導引魚雷進行攻擊，故為確保艦艇磁隱匿性及戰場存活率，世界各國紛紛投入艦艇磁訊跡抑制技術的研發工作，本論文就目前世界各國艦艇所使用的船磁抑制方法或技術進行概略性討論。

## 前言

德國自第一次世界大戰至第二次世界大戰中期內先後研發出「磁性水雷」、「音響水雷」及「壓力水雷」，對盟軍於海上運輸與作戰產生巨大壓力及艦船損傷；二次世界大戰期間德國海軍為阻斷英國大西洋的海上補給線，除了以潛艦為主的狼群戰術外，另一個令英國皇家海軍損失慘重的利器就是水雷，早期傳統水雷所起爆的方式是採觸碰式引爆，然而二戰初期的德國潛艦和水雷成為英軍軍艦與商船的巨大威脅，經統計第一次世界大戰至第二次世界大戰期間，世界各國佈設約 110 萬顆水雷，造成約 4200 多艘船隻沉沒、失聯或損毀 [1]。而後英國海軍在獲得德國海軍所佈設磁性水雷後，加以研究並破解其奧秘後，研製出相對應的反制措施，才使得艦船因水雷所造成的損失得以減少。現今科技技術發展更佳精密先進，武器引爆裝置不再是單一功能，而是採多重複合式感測式裝置，而且啟動觸發所需的感測偏異值（靈敏度）更小，故軍艦如何得以存活於現代戰場之中，其艦艇的磁訊跡管理與抑制是一項重要的課題。

## 艦艇磁訊跡的生成

除了特殊用途之艦船（例如掃獵雷艦一般以木材或特種金屬（如鈦、鋁、低磁性不鏽鋼等））會

以特殊材質之材料作為船體結構與外板資材外，一般艦船大多採用鐵磁性金屬（如高碳鋼，高張力鋼等）來做為船體結構與外板材料，然而就是因為艦船結構及板材是鐵磁性金屬會與地球磁場產生交互影響，進而使船體產生磁化現象形成船體自生磁場，以及艦船在不同海域航行時，亦會造成小區域地磁場的畸變，故地球磁場是艦艇磁訊跡主要生成原因之一，以下就地球磁場生成與艦艇磁訊跡影響作概略性說明。

### 1. 地球磁場

地球本身的磁場(以下簡稱地磁)源自於地心，地心的外核主要成份是由液態金屬礦物（如鐵、鎳、錳和稀有金屬等）構成，地心熔融、高溫的液態金屬因熱對流運動而產生渦流電流，而渦流電流環流也同樣感應產生磁場，如此週而復始循環便是地磁的產生，在受地磁影下同樣會改變地心熔融金屬的物理性[2]。地磁可以想像成在地心內部引含一個巨大的條狀磁鐵並延伸到地球表面，實際上地磁北極與地理北極兩者是有所偏差，其偏差夾角約 11.9°，實際地理距離相差約 1500 公里左右(如圖 1 所示)。

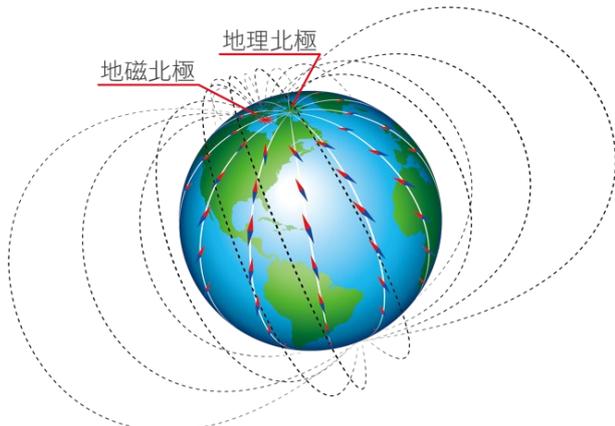


圖 1 地球磁場示意圖

## 2. 地球磁場的變動

地球磁場並非如同一般永久磁鐵一樣，具備固定恆久且規律的磁力線，它是雖具有方向性，但卻是複雜且變動的展現，在不同的地理區域會有不同的磁場強度，依據國家地球物理數據中心的研究顯示，地磁在地球上各個區域都不相同且每年都會有些許變化異動[3]，例如大洋脊(Mid-Ocean Ridges)是在海底的板塊運動所形成的山脈系統，其紀錄了造山運動當時地殼的磁場方向，經過研究分析發現，地磁在歷史上曾經出現反轉現象。

此外，英國地質調查局(British Geological Survey)對地球地磁量測與預測分析中(如圖2所示[4])，可以明顯觀察出 2020 至 2025 年地磁總強度的改變，另該局也就地球的地磁極(Geomagnetic Pole)和磁極傾角(Magnetic Pole)的移動遷移變化進行紀錄分析與推估(如圖3所示[5])，圖 3 為 1900 年至 2025 年間地磁極(Geomagnetic Pole)和地磁極傾角(Magnetic Pole)在地理地圖上相對位置顯示，由內容可看出地球南北地磁極與所謂的地理南北極是不同的，兩者存在有距離的差異，再者南/北地磁極的位置以及地磁磁傾角度也不是恆久固定的，每年會有所變動遷移。

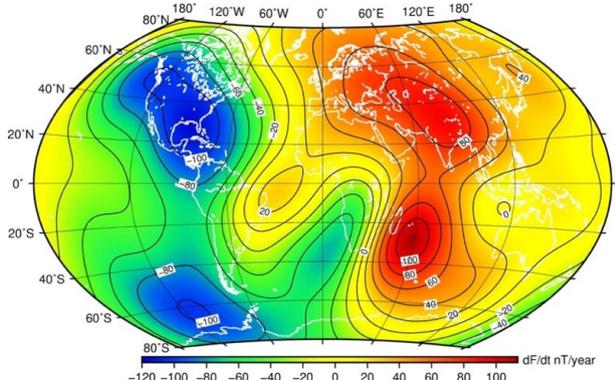


圖 2 2020 年至 2025 年地球磁場強度變化率

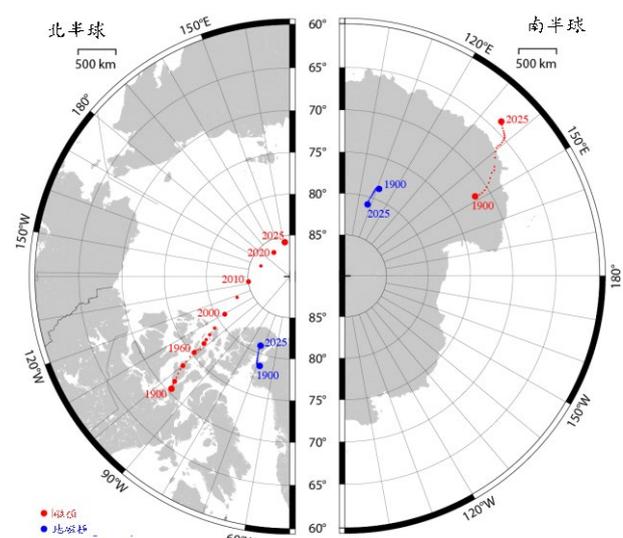


圖 3 1900 年至 2025 年地球地磁極和磁極歷年變化

## 3. 磁場與材料特性

人類發現不具磁性的鐵材透過接觸磁石後會變成磁鐵，此類材料通稱為鐵磁性材料，此外，鋼與鐵會因為磁場通過而產生磁性，而其他金屬(如銅、鋁、錫...等)則不具有這樣的特性。

另外將物體放至於一個磁場內時，則通過該物體地磁通量密度英表示式為：

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu H$$

其中，B 為磁通量密度(magnetic flux density)，單位是特斯拉(T)或高斯(Gs)，H 為磁場強度(magnetic field intensity / strength)，單位是安培/米(A/m)， $\mu_r$  為材料的相對導磁率(relative permeability)， $\mu_0$  為自由空間的絕對導磁率(permeability of free space)， $\mu$  為材料的絕對導磁率(absolute permeability)，導磁率的單位都是H/m，而鐵磁性材料的導磁率可能比  $\mu_0$  高出 2000 倍以上，也就是說鐵磁材料會較容易受到外界磁場/地磁的影響，在經過一段時間後，鐵磁材料本身也會帶有磁性，此便稱為磁滯現象(Magnetic hysteresis)。

## 4. 地球與艦艇的磁場作用

在地球這個空間內除了在赤道線上的位置之外，地磁與地表都會存在一個夾角，此稱為地磁傾角(inclination angle)，並進一步的去解析任何位置的磁場向量就可以得到該位置在 XYZ 軸向上的磁場分量，而將這些分量作用在汪洋中航行的艦艇上時，則其所受到的磁場表現也會有所差異。

例如假設當艦艇位處於磁北極處並且船體是均勻磁化狀態下，其所呈現的垂直、縱向、橫向等三個分量特徵(如圖4(a)所示[1])，其中亮區代表正磁性、暗區代表負磁性，並用等高線的方式表示，其

與右上方的磁通量分布進行比較，可以看出垂直磁化特徵形狀，同樣的，艦艇在赤道上並向北航行時，會受到地磁影響產生縱向磁化(如圖4(b)所示)，若艦艇改往西航行時，則會受到地磁影響產生橫向磁化(如圖4(c)所示)。

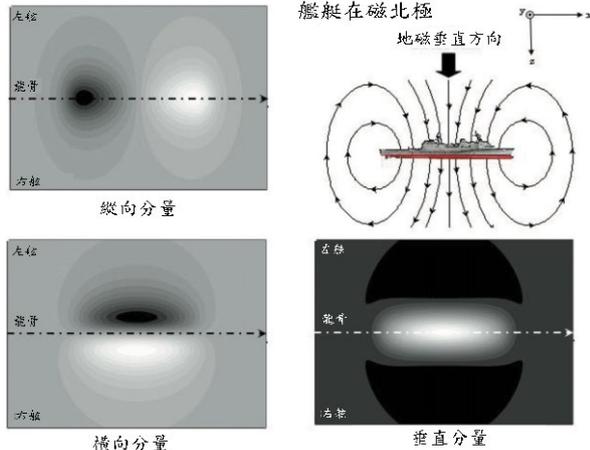


圖 4(a)

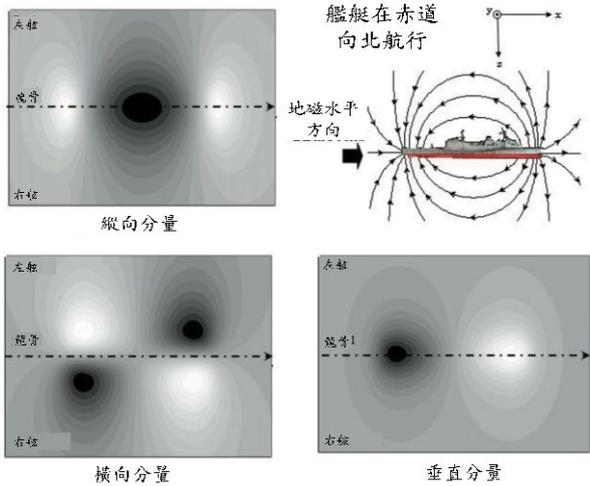


圖 4(b)

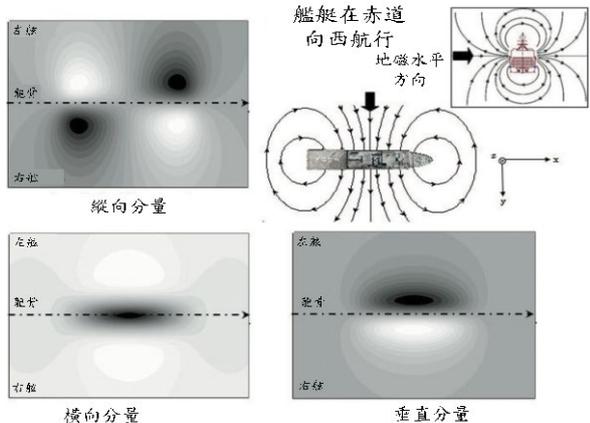


圖 4(c)

## 5. 艦艇磁場型態

現代新式水雷為了有效阻擊敵方艦艇，會採用含複合性引信包含磁性、聲音、壓力等，藉由艦艇所傳遞出來的磁訊跡、振動頻率及船體排水壓力來引爆裝置，其中磁場感應引爆更是早在第一次世界大戰即投入戰場應用，故艦艇研發時導入艦艇磁性匿蹤的概念，如何使艦船磁場盡可能極小化或消除艦船磁場，從而使艦船遭受磁性水雷攻擊的機率盡可能小或完全避免。基於此了解艦船磁場特性是為了更有效地消除艦船磁場，從而達到磁性匿蹤的目的。在目前的研究發現指出，艦艇產生的磁場有以下四種型態。

### 5.1 永久磁場

艦艇在設計階段依據作戰、任務及性能選用適宜的材料建造船體載台，考量材料取得與強度一般多以鋼鐵材料為主，鋼鐵材料具備有耐壓、抗爆能力，且具有基本的防護能力，耐用不易變形，發生火災時也能防止火勢蔓延，另易加工製造，研製成本較其他材料低等優勢，因此，世界各國艦艇多採用鋼鐵為結構的主要材料。此外，艦艇內部的主機、輔機及各種裝備也多使用鋼鐵材質，由艦艇建造期間受到造艦地區的地磁影響，與環境當中的磁場交互作用產生磁滯現象或留痕效應(Remanence effect)，使的這些鐵質材料便自帶有磁性特徵。由大量的鐵質材料組成的艦艇就會產生明顯的磁場特徵，惟艦艇在服役一段時間後，因受到外來應力及環境影響，艦艇原本自帶磁場特徵也會受到改變。

### 5.2 感應磁場

近代艦船一般多採用鋼鐵材料建造，艦船內的主機、輔機及各種設備、武器等也均是多由鋼鐵材料製成，個物件依實需而設計安裝分布於各個船艙或甲板上適當位置，就以物理特性觀點上可將其視為大型的導磁物件，加上各艙間內的電氣設備及佈滿全艦各部位的電纜，當艦艇航行在海洋任一位置時，基於法拉第電磁感應定律的原理即會產生感應的磁場，在局部空間內形成了疊加於地磁的附加磁場，這將使原本為均勻分佈的地磁，在船體周遭局部空間中產生了磁場扭曲，進而形成獨特的磁訊跡。

當艦艇航行經過不同的海域時，因氣候與海象狀態影響，艦艇會呈現一定頻率的橫搖和縱搖的運動，此時將造成橫向與縱向的磁場變異，再加上各海洋區域環境的差異，地磁所呈現狀態也不盡相同，會使得艦艇產生一定頻率的磁訊跡，於此同時對於感應磁性的導航系統(如磁羅經、磁導舵等)會

產生不良影響。即使艦艇在相同海域內，若以不同的航向和航速，亦會造成磁訊跡的不同。

### 5.3 渦流磁場

伴隨時代科技的演進，目前艦艇運用多項電氣設備、系統，當大量且強大的電流藉由各式各樣電纜線路流通到艦艇的各個部位，依據安培定律會產生環繞在艦艇上的磁場，這也是艦艇磁場主要的來源之一。一般電氣設備的電磁頻率多落在 0~3Hz 的超低頻率上(ultra-low frequency, ULF)，但隨大功率的發電機組、電力推進系統、高能量密度輸配電系統與裝置在艦艇上服勤，其中 3~3kHz 的極低頻率(extremely low frequency, ELF)的電磁頻率也變得更為顯著，然而這些磁場強度大小取決於艦艇各電氣設備的輸出功率，故以相同噸位的艦艇作比較，則具較高功率電力系統的艦艇，其所展現的磁場強度會較強。

### 5.4 雜散磁場

艦艇的雜散磁場中，有一部分是因為電氣設備的主動力電力與裝備控制電源等，在運作過程中產生的磁場，這會因為艦艇不同的裝備、系統的佈置而有所差異，並產生不同磁場特徵。另一部分則是與艦艇腐蝕因素有關，因船殼鋼板的異質性如板材厚度、漆模厚度、材質不同、品質差異、銲接處理等，當船體材料長期浸泡在海水中，使的船體在不同區域形成伽凡尼電池(galvanic cell)的陰極和陽極，除了導致結構的腐蝕之外也同樣產生磁場，為了避免這樣情況通常艦艇都會加裝陰極防蝕系統(ICCP)，該系統在船體使用與腐蝕電流相反的直流電，以抑制腐蝕產生(如圖5所示[6])，然而這套系統的運轉會造成額外的磁場產生。在艦艇航行期間螺旋槳運轉過程中，如果形成了伽凡尼電池，腐蝕電流會經由大軸、軸承再流向船體，並且在大軸旋轉過程中產生旋轉變動磁場[7]，而這樣帶有頻率的磁訊跡很容易遭受感知(如圖6所示[8])。

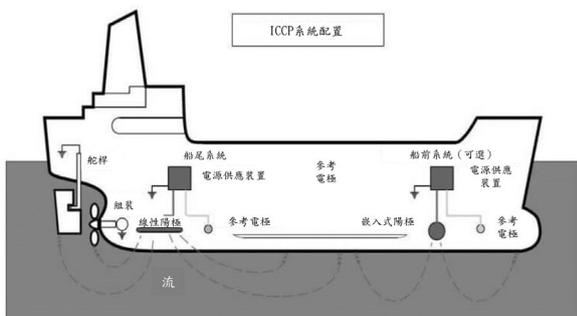


圖 5 ICCP 系統配置圖

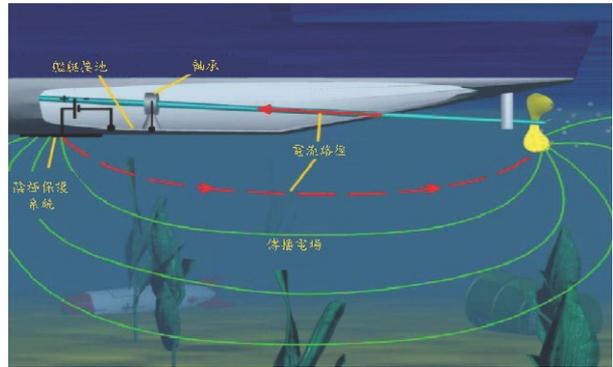


圖 6 艦艇旋轉變動磁場產生示意圖

## 6. 艦艇磁訊跡抑制技術

以感磁性水雷觀點其作用與否在於感磁靈敏度，因此艦艇的磁訊跡特徵便是重要的關鍵，在圖7中顯示出水雷引信作動與艦艇相對的影響與衝擊，圖內當艦艇進入或靠近紅色及橘色區域時，水雷引信所產生的衝擊波將導致艦艇龍骨、船體嚴重變形或斷裂，進而使艦艇嚴重損毀、沉沒，然而水雷引信作動區域的大小、深淺設定值均是各國機敏資訊。

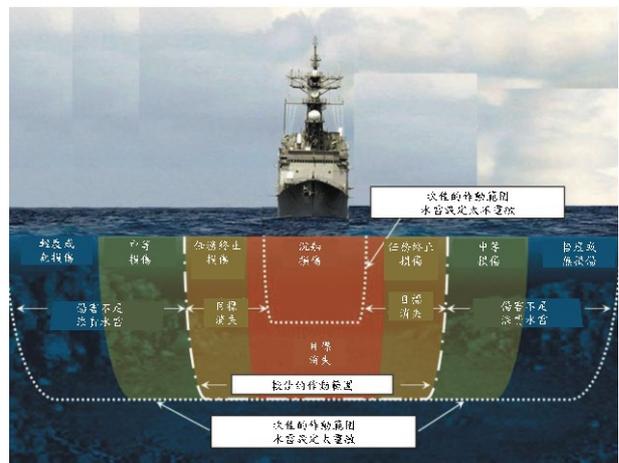


圖 7 水雷引信作動靈敏度示意圖

因此以防護艦艇避免水雷攻擊或是無損傷的概念來訂定艦艇磁訊跡防護的標準，一般而言可區分為四個等級：

#### 無防護：

艦艇不考慮進行磁性防護，如軍用小型輔助艦艇、港勤拖船、小型登陸艇等。

#### 僅執行消磁處理：

艦艇定期進入消磁站進行消磁作業，如戰時徵用漁船、一般輔助艦(救難艦、中型登陸艦)、小型攻擊艇(飛彈快艇、魚雷快艇、巡邏艇)等。

#### 有磁性要求標準：

艦艇有一定磁性要求並裝有消磁系統，如大型且昂貴的輔助艦艇(大型登陸艦、潛艦救難艦、油彈補給艦、兩棲登陸艦)、主戰艦艇(巡防艦、驅逐艦、潛艦、直升機母艦、航空母艦)等。

**極低磁性要求：**

艦艇搭配各項磁性抑制技術，以將整體磁場降至極低，如獵雷艦、掃雷艦。

**6.1 水面艦艇磁訊跡抑制技術**

前面已就艦艇磁場與地磁之間的成因與交互影響進行說明，為了避免艦艇的磁訊跡遭敵偵獲或是攻擊，磁訊跡抑制技術就是盡可能的將艦艇自身的磁場減小，最理想狀況是趨近於操作海域的地磁，就各國家研製艦艇技術而言，大多數是建構在國家內部的造艦能量基礎下，並逐步將新的技術與材料應用到新型艦艇建造或現役艦艇加改裝工程內，因此，艦艇各設計階段透過各種不同系統、材料選用、佈設位置等規劃手段，以達到艦艇磁場降低的效果，本項技術並非採單一系統即可以達成，以下就目前世界上有應用的部分方法進行說明：

● 艦艇大小及船殼材質

就作戰艦艇而言，排水噸位較小的艦艇，其所產生的磁場也較小，研究發現如以美軍濱海戰鬥艦(littoral combat ship, LCS)大小噸位如以鋼材建造，在不使用任何消磁技術下，其磁場強度與美軍勃克級驅逐艦相較其船磁小約近 3 倍，另在同樣材質的船體鋼板下，若選用鋼板厚度越薄則所產生的磁訊跡也會越小，因此匹配艦艇噸位來所選用適合的板材及肋材厚度的調整。

此外，世界各國也有將低(無)磁性材料運用到船體，如鉻/鎳合金鋼、無磁鋼(如 Fe-Mn-AL-C、Mn-V 等系列)、無磁不鏽鋼、鋁合金、鈦合金或複合材料等，對於磁訊跡的抑制效果會更佳[9]，例如瑞典偉士比級護衛艦即採用玻璃纖維強化樹脂(FRP)作為主要船體材料(如圖 8 所示[10])，則可大幅減少艦艇磁場的產生。



圖 8 偉士比級護衛艦外觀圖

然而，不論使用複合材料、鋁合金或低磁/無磁金屬材料製作船體，考量機械強度因素仍有艦艇大

小限制存在，同時造艦成本也相對提高，並且有加工修改困難的問題，此外低磁鋼的防護漆材質與一般碳鋼不同，需另外考量國內產製能量、取得及價格等因素需評估。此外即便是使用非磁性材料(如不鏽鋼、鋁合金、鈦合金等)建造船殼，惟艦內的電纜、電氣設施，在艦艇運動過程中，仍會產生感應渦流磁場，亦有觸發引爆磁性水雷的可能。

● 防護塗裝及接地

在前面提及艦艇泡在海水中會因為形成「伽凡尼電池」效果，進而產生磁場以及船體腐蝕作用，故在船體塗上防護漆可以阻絕海水這個電解液，避免形成腐蝕電流，並達到磁場抑制的效果，但須注意的是艦艇在定期保維護時，應檢查船體漆膜是否有破損之處，必要時需去除塗漆並重新塗佈防護漆。

倘若螺槳與船體形成「伽凡尼電池」狀態，會產生旋轉變動磁場，則需在大軸上加裝接地系統(如圖 9 所示)以防止腐蝕電流的形成，進而抑制艦艇磁場的產生。

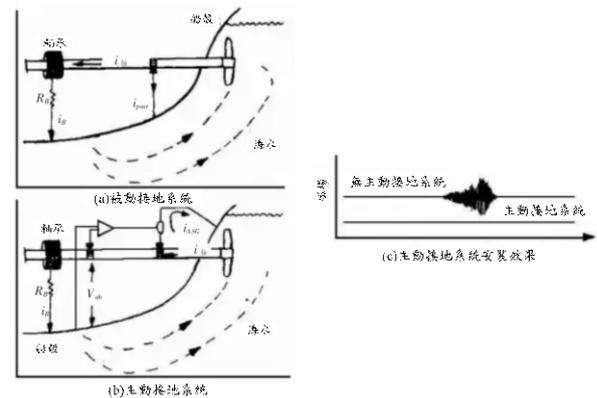


圖 9 大軸接地系統示意圖

● 電氣設備及電纜規範

現代化船艦配置了大量的電氣設施，相對電纜網路佈設繁雜，所產生的雜散磁場也會造成顯著的磁訊跡，故美軍在 1981 年起發佈了降低雜散磁場的電纜佈置、蓄電池組、直流發電機和馬達設計等規範[11][12][13]，其中說明在錯誤的佈置狀況下，將會導致不必要的磁場增生，因此於艦艇設計階段納入考量，便可在艦艇發展前期就以經濟與有效率的方式大幅減少雜散磁場。

● 消磁系統

在水面艦艇上安裝消磁系統(Degaussing systems)主要的目的在於消除因艦體材料、電氣設施所導致的磁場，所以在艦艇內安裝數個橫向(A)、縱向(L)及垂直(M)等方向的磁力線圈(如圖 10 所示[14])，安裝在艦艇上的現圈產生逆向磁場以調節艦艇的磁場強度及方向，以減少艦艇在不同方向下的磁場特徵。此外，線圈的材料改以新式材料與技術，傳統

消磁線圈採用以銅為主要材料的纜線，然而銅的電阻高、耗能大，所以要達到具消磁效果，就必須加大消磁電流，如此將增加電力系統負擔外，線圈本身發熱也是需要注意的問題，近幾年外國學者研製出高溫超導體(High Temperature Superconductor, HTS)，因該技術具有耗能低的特質，在應用於消磁系統後，在產生相同的感應磁動勢下，電纜所需總長度小於銅質電纜約 90%，使系統整體更輕巧、發熱小、安全性也相對提高[15][16]，美軍以將該系統應用在戰鬥艦，並規劃於 2023 年 9 月份完成兩棲艦艇 HTS 消磁系統換裝[17]。

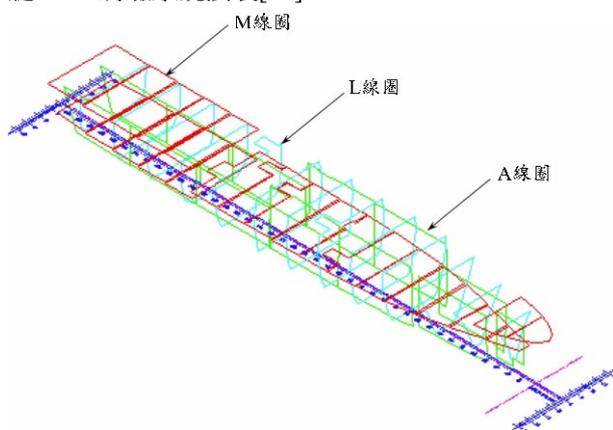


圖 10 消磁系統線圈配置圖

目前國際上生產船用消磁系統的廠商其技術控制概念大致上相近似，以德國聯邦海軍艦艇使用的 DEG-COMP MOD 1 消磁系統(如圖 11 所示[18])，則是運用消磁控制單元透過所有導航、磁力計信號，演算出所需的磁場補償資訊，並將訊號傳遞給線圈的功率放大器供應適切的電流強度，透過所佈設的固定消磁線圈產生逆向磁場，以降低艦艇整體磁場強度。

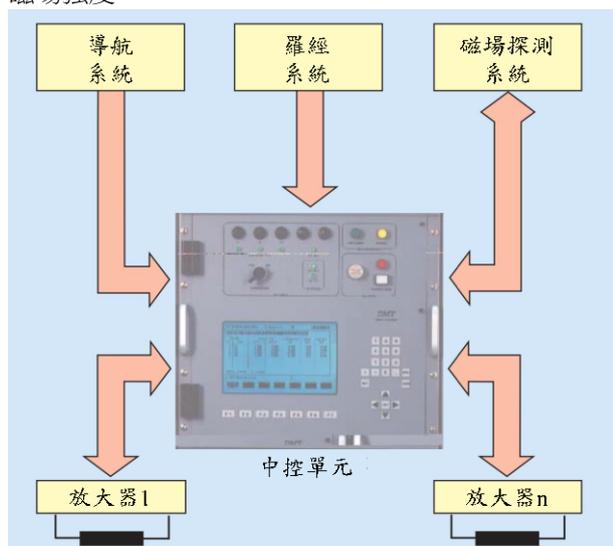


圖 11 DEG-COMP 消磁系統控制架構示意圖

定期的進行消磁工作能使艦艇上的消磁系統得以最佳化運作。此外，如果消磁系統因故而導致線圈失效，艦艇恐產生較原本高於數倍的磁場特徵[19]，因此需要有完善補償系統或檢修機制，以免洩漏出的磁訊跡而遭受偵獲或攻擊。

## 6.2 潛艦磁訊跡抑制技術

潛艦本身的特性講求的就是隱匿，長時間在水面下航行所執行的任務多具機敏性，若未針對艦體磁訊跡加以抑制，則容易暴露行蹤或引爆水雷，因此潛艦的磁訊跡抑制必須是全面性全艦整體性考量及規劃，通常船殼材質部分會選用低磁性的材料，如鈦合金或低磁性鋼，以德國現役 212 型潛艦為例以採用高強度低磁性不鏽鋼製作船體(如圖 12 所示[20])。



圖 12 212 潛艦外觀圖

在消磁系統部分，潛艦的消磁線圈配置與水面艦艇完全不同，是採數個環狀線圈纏繞在壓力殼上(如圖 13 所示[21])，安裝在艦艇上的現圈產生逆向磁場以調節艦艇的磁場強度及方向，以減少艦艇在不同方向下的磁場特徵，並且研究發現，雙殼潛艦的外殼與單殼潛艦處於同樣地磁下，產生的磁場特徵相近，在消磁系統安裝考量上，目前將雙殼潛艦的內外殼視為一體，但在施加補償磁場時，潛艦外部與內部磁場變化規律會有所差別，這與單殼潛艦產生的變化規律不同[22]，同時研究發現在潛艦使用消磁系統消弭永久磁場後，在航行、轉向時產生的感應磁場，將是遭到偵獲的主要特徵[23]，所以在設計階段上就必須進行相關的實驗分析，方能達到最好的磁訊跡抑制效果，同時在潛艦在航行一段時間後需要至消磁站進行消磁作業，使的消磁系統效能達到較佳狀態。



圖 13 潛艦消磁線圈模擬配置圖

## 結論

世界各國研製建造各式的艦艇，鐵質導磁性材料充斥在船體結構、設施及武器等各個部位，並且裝設大量的電氣設備，大量信號及電力電纜環繞艦艇內部，因此艦艇自身就會帶有一定的磁場，當艦艇在操作航行過程中，自身的磁場與地磁又會交互影響而下產生明顯的磁訊跡，且同一艘艦艇在不同的海域、時節、操船條件等狀況下，其艦艇磁訊跡特徵也有所差異，而科學家就是運用這樣自然產生的物理特性，發展出磁性偵測裝置或磁性魚雷、磁性水雷等攻擊武器，且在戰場上有顯著的成效。

由於艦艇磁訊跡的成因複雜，若要達到有效抑制，則必須在艦艇設計階段進行全面性系統綜合規劃考量，並非由單一系統或裝置即可達成，然而，我國目前的在艦艇的磁訊跡抑制系統仍仰賴國外的官方或廠家，各項關鍵的技術及資料庫均涉及軍事機密故獲取不易，因此為提升我國海軍艦艇戰場存活率，艦艇磁訊跡抑制技術未來應投入相關資源進行研究發展確實有其必要性。

## 參考文獻

- Holmes, J.J., "Exploitation of a ship's magnetic field signatures" Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics, Morgan & Claypool, pp.1-78(2006)
- Drchal, V., Kudrnovský, J., Wagenknecht, D. & Turek, I., "Alloy Disorder and Fluctuating Magnetic Moments in The Earth's Core," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, North Holland, Elsevier, Vol. 475, pp. 1-17 (2018).
- Wikipedia, Earth's magnetic field, 網址：[https://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s\\_magnetic\\_field#cite\\_note-selfconsistent-1](https://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_magnetic_field#cite_note-selfconsistent-1), 檢索日期：2024年2月29日。
- BGS, The Earth's Magnetic Field: An Overview, 網址：<http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html#top>, 檢索日期：2024年2月29日。
- BGS, Magnetic Poles, 網址：<https://geomag.bgs.ac.uk/education/poles.html>, 檢索日期：2023年5月17日。
- 船舶中心, 船舶之船殼腐蝕與外加電流「陰極防蝕 (ICCP)」- 建造和作業, 網址：<https://www.soic.org.tw/船舶之船殼腐蝕與外加電流陰極防蝕iccp-建造和作/>, 檢索日期：2024年2月29日。
- Wu, Z. Zhu, X. & Li, B., "Modeling and measurements of alternating magnetic signatures of ships" Sen. Trans., Vol.186, No.3, pp.161-167(2015).
- Hasril, N, Mahdi, C.I., Mohd Moesli, M., Nik Hassanuddin, N.Y., Mohd Subhi, D.Y. & Irwan Mohd, N., "Management of naval ships' electromagnetic signatures: a review of sources and countermeasures" Defence S&T Tech. Bull., Vol.6, No.2, pp.93-110(2013).
- Holmes, J. J., "Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures", Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics, Morgan & Claypool, San Rafael, California, pp.1-68(2008).
- 維基百科, 偉士比級護衛艦, <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/偉士比級護衛艦>, 檢索日期：2024年2月29日。
- DOD., "Cable Arrangement for Minimum Stray Magnetic Field" DOD-STD-2133, pp.1-4(1988).
- DOD., "Storage Battery Arrangement for Minimum Stray Magnetic Field" DOD-STD-2134, pp.1-17(1981).
- DOD., "Design of Direct Current Generators and Motors, Low Stray Magnetic Field" DOD-STD-2146, pp.1-18(1983).
- Holmes, J. J., "Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures", Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics, Morgan & Claypool, San Rafael, California, pp.1-68(2008).
- B. K. Fitzpatrick, E.M. Golda, J. T. Kephart, "High temperature superconducting degaussing - cooling two HTS coils with one cryocooler for the littoral combat ship" AIP Conference Proceedings, pp.277-283(2008).
- 張小平、李健、季少波, "超導技術在艦船上的應用前景", 船電技術, 第36卷、第12期, pp.77-80(2016).
- Shephard, US Navy wants superconducting degaussing system, <https://www.shephardmedia.com/news/naval-warfare/us-navy-wants-superconducting-degaussing-system/>, 檢索日期：2024年2月29日。
- SAM Electronics, Degaussing System DEG-COMP MOD 1, [https://iter3d.partcommunity.com/3d-cad-models/FileService/File/sam\\_electronics/naval\\_equipment/degaussing\\_system.pdf](https://iter3d.partcommunity.com/3d-cad-models/FileService/File/sam_electronics/naval_equipment/degaussing_system.pdf), 檢索日期：2024年3月4日。
- Kim, D.W., Lee, S.K., Kang, B., Cho, J., Lee, W.S., Yang, C.S., Chung, H.J. & Kim, D.H., "Efficient re-degaussing technique for a naval ship undergoing a breakdown in degaussing coils", J. Mag., Vol.21, pp.197-203(2016).
- 軍武狂人夢, 212A 型傳統動力攻擊潛艦, <http://www.mdc.idv.tw/mdc/navy/euronavy/212-6.jpg>, 檢索日期：2024年3月4日。
- Demilier, L., Cauffet, G., Chadebec, O., Coulomb, J. L., & Rouve, L.L., "Validation of Closed Loop Degaussing System for Double Hull Submarines", marine system and technology, hal-00567150, Ver.1, pp.1-5(2010).
- 曹軍宏、莊颺、母海方、樊鑫、周國華, "雙殼體潛艇磁場變化的實驗研究與特性分析", 海軍工程大學學報, 第27卷, 第1期, pp.11-15(2015).
- 單志超、曲曉慧、楊日杰、周正, "潛艇航向對直升機磁異探潛的影響", 火力與指揮控制, 第38卷, 第2期, pp.62-65(2013).