

摘要

螺槳尾帽導流片 (Propeller Boss Cap Fins, PBCF) 作為一種船舶節能裝置，近年廣泛應用於商船領域，並逐漸受到軍艦設計者的關注。本文針對PBCF的基本原理、安裝方式、節能與隱身效益進行探討，並分析其在軍艦應用上的實際價值與可能挑戰。研究結果顯示，PBCF除能有效降低推進能耗外，對於減少空蝕噪音、提升隱蔽性具有潛在優勢。然而，因軍艦的高速性能與複雜的推進系統設計，該技術仍需針對軍用需求進一步優化。

一、前言

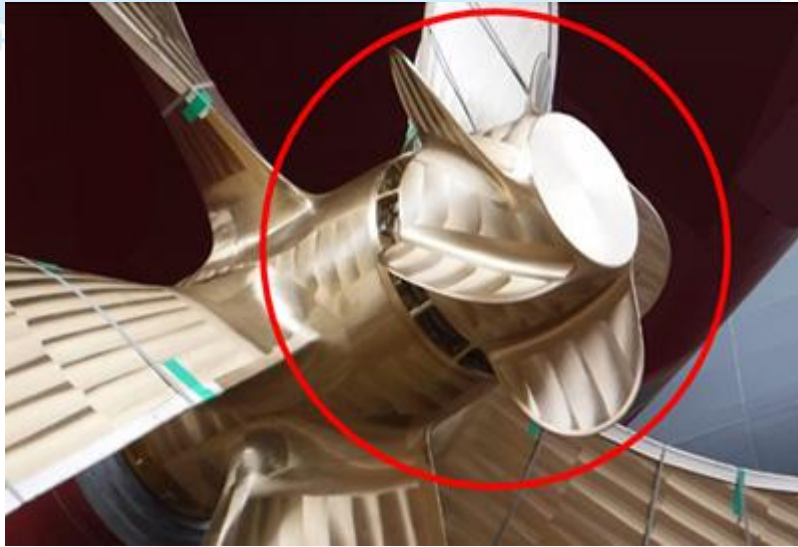
在現代海軍艦艇設計中，能源效率與隱身性能是兩大核心目標。隨著燃油成本持續上升及海上作戰需求多樣化，如何在不犧牲速度與作戰能力的情況下，提升推進效率與降低輻射噪音，成為重要議題。傳統螺槳設計雖能提供高推力，但在運轉過程中仍存在能量損耗，並產生旋渦尾流(hub vortex)與空蝕現象(Cavitation)，導致效率下降與噪音增加。

螺槳尾帽導流片 (PBCF) 作為一種改善尾流能量損失的節能裝置，最初於1980年代由日本商船三井造船公司開發，主要應用於商船以降低燃油消耗。然而，隨著軍艦對於隱蔽性與經濟性的需求日益增加，PBCF的軍事應用價值逐漸受到重視。本文將探討PBCF的工作原理、應用效益，並分析其在軍艦上的可行性與限制。

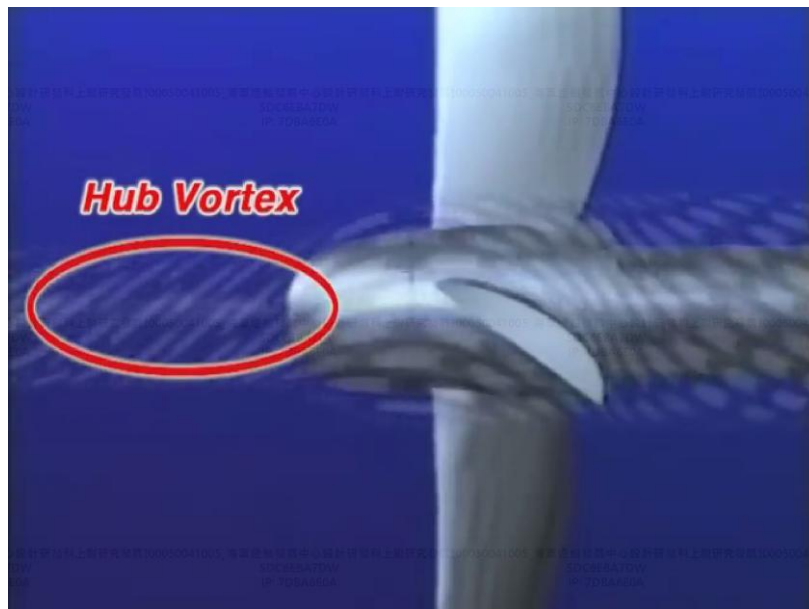
二、PBCF技術背景與工作原理

(一)結構與設計概念

PBCF安裝於螺槳尾帽位置(如圖一)，通常包含數片小型導流片，沿尾帽外周呈螺旋狀或徑向分布。其主要目的在於削弱或消除螺槳旋轉時於尾帽後方產生的強旋渦，該旋渦會引起能量損失並導致空蝕現象(如圖二)，進而降低推進效率。



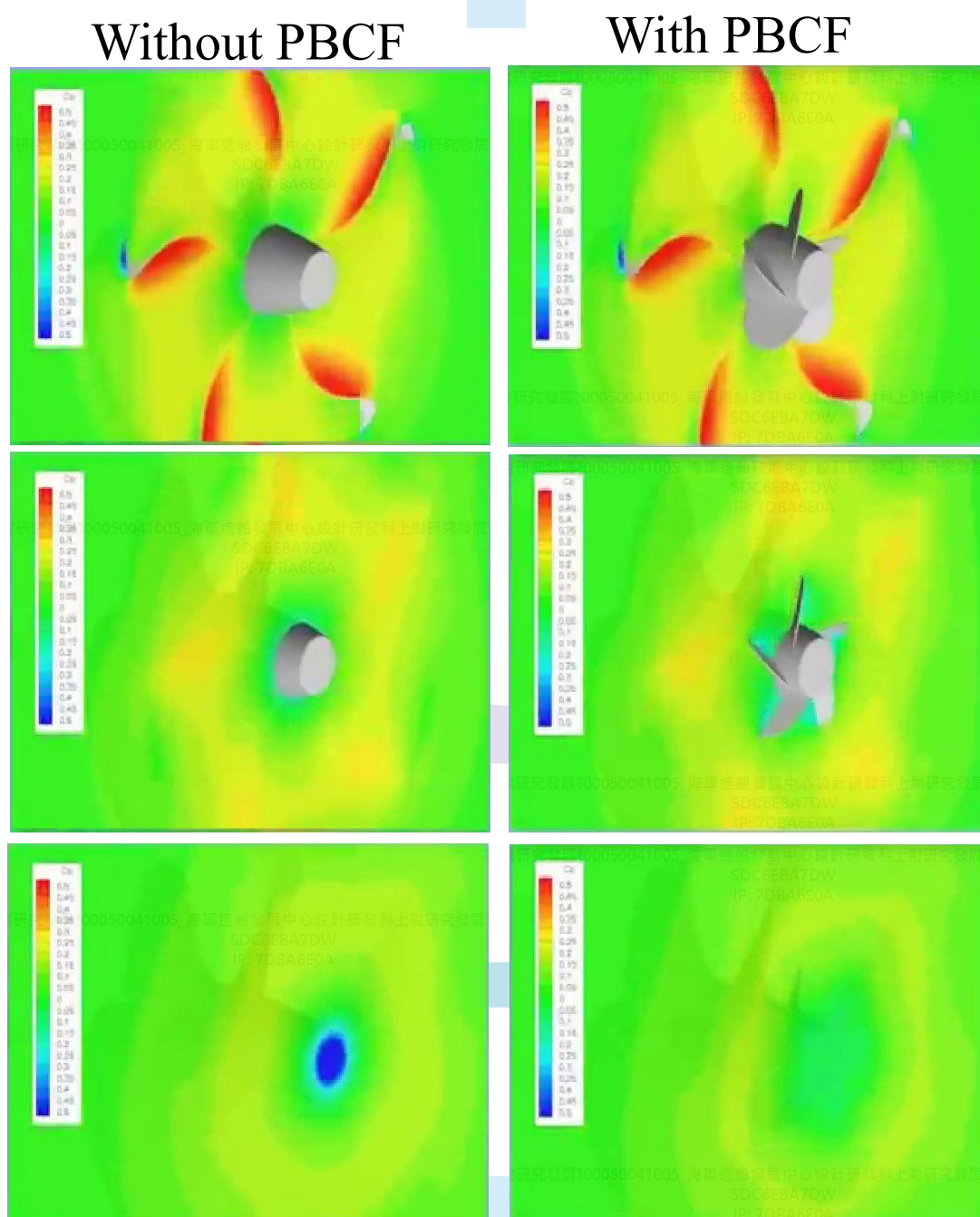
圖一



圖二

(二)工作原理

螺槳運轉時，葉片與尾帽之間的相對流速差異會產生強烈尾渦（hub vortex），該渦流帶走部分能量並造成壓力波動(如圖三)。PBCF透過導流片破壞尾渦結構，使流場更加穩定，從而降低能量損失並減少空蝕噪音。此外，尾流均勻性提升後，推進器與舵的作用效率也隨之提高。



圖三

(三) 節能與環保意義

在商船應用中，PBCF可降低約3%至5%的燃油消耗，並減少CO₂排放，符合國際海事組織（IMO）的能效設計指標（EEDI）要求。此一特性亦對軍艦有間接價值，因為降低燃料需求意味著增加航程與減少補給壓力。

三、軍艦應用之效益

(一) 節能與續航力提升

軍艦在長時間部署或遠洋作戰時，燃油消耗是關鍵問題。以驅逐艦為例，若安裝PBCF可減少3%的推進功率消耗，則在同等燃油存量下，續航力可提高約2%至4%。此效益對長航程任務，如護航或反潛巡邏，尤其重要。

(二) 降低空蝕與噪音，增強隱蔽性

軍艦在反潛作戰與躲避敵方探測時，噪音控制至關重要。螺槳尾渦引起的空蝕現象不僅會產生高頻噪音，還會增加被聲納探測的機率。PBCF藉由改善尾流，減少尾渦強度與空蝕現象發生，進而降低輻射噪音，提升水下隱蔽性能，另就潛艦而言，消除空蝕噪音能使其在相同深度下有更高的大軸轉速，提升隱蔽性外同時亦增加機動性。



德國Dolphin級潛艦之擴散型殼部



德國212A潛艦



德國212A潛艦

附註：研判212A型潛艦艏帽為類似功能置之機件。

(三)改善推進器壽命與維護成本

尾渦與不穩定流場會對螺槳及軸承系統產生附加載荷，導致疲勞與損耗加劇。PBCF改善流場後，可降低機械應力，延長螺槳與軸系的使用壽命，間接減少維修頻率與成本，對高可用性要求的軍艦而言尤為有利。

(四)安裝與改裝可行性

PBCF結構簡單，通常可在船塢維修期間進行安裝，不需對螺槳進行大幅修改。此一特性意味著現役軍艦亦可透過後裝方式獲得效益，具有良好的經濟性與作戰靈活性。

四、應用挑戰與限制

(一)高速航行性能影響

軍艦常需具備高速航行能力（30節以上），而PBCF設計主要針對中低速商船。高速狀態下，PBCF可能產生額外阻力或引發新的流場不穩定，導致效率降低，甚至增加空蝕風險。因此，需針對軍艦螺槳特性進行專門設計與CFD（Computational Fluid Dynamics）優化。

(二)戰術需求與結構可靠性

軍艦在激烈機動、倒車或高速轉向時，尾流場變化劇烈，PBCF的結構需承受較大水動力載荷，若設計不當，可能導致導流片斷裂並損壞螺槳。因此，軍用PBCF必須採用高強度材料，並經過嚴格結構強度與疲勞壽命分析。

(三)維護與損傷風險

軍艦可能在戰時遭遇爆炸衝擊或漂浮物撞擊，若PBCF受損，將影響螺槳平衡與效率。維修難度與備件補給亦需考慮，否則可能導致整體推進性能下降。

(四)戰術靈活性與噪音頻譜問題

雖然PBCF可降低空蝕噪音，但在特定流速下可能產生新的低頻或高頻噪音特徵，若未經聲學優化，可能增加被動聲納識別風險。因此，軍艦在應用PBCF時，必須同時進行水動力與聲學特性評估。

五、未來發展與改良方向

隨著CFD技術與3D列印製造的進步，針對軍艦特殊需求設計的PBCF將更趨精密。例如：

1. 可調式導流片：搭配可變式螺距螺槳(CCP)，利用伺服機構動態調整導流片角度，以適應不同航速與負載條件。
2. 複合材料應用：使用高強度、低噪音複合材料減輕重量並降低震動。
3. 整合隱形技術：將PBCF表面塗覆消聲塗層，降低反射聲波特徵，提升隱蔽性能。

六、結論

螺槳尾帽導流片（PBCF）在軍艦應用中具備節能與隱蔽效益，並有助於延長螺槳壽命。然而，其在高速航行與戰術機動條件下仍存在設計挑戰，必須針對軍事需求進行專門優化。未來，結合智慧調控、複合材料與聲學隱身技術的PBCF，將成為提升軍艦推進性能的重要輔助裝置。

參考文獻

ITTC (International Towing Tank Conference), Propeller Boss Cap Fins Performance Evaluation, 2019.

K. S. Lee et al., “Application of Energy Saving Devices for Naval Ships,” Journal of Marine Science and Technology, vol. 25, no. 4, pp. 523 – 534, 2021.

MOL Techno-Trade, PBCF Energy Saving Device Technical Guide, 2020.

NATO RTO-AVT-204, Ship Propeller Cavitation and Noise Control, 2017.

