

# 綠色船舶 設計新思維

葉榮華

船舶設計技術的改善具有巨大的節油潛力，  
能為海運業節省約 30% 的油耗，並能減少氮氧化物、硫氧化物與二氧化碳的排放。

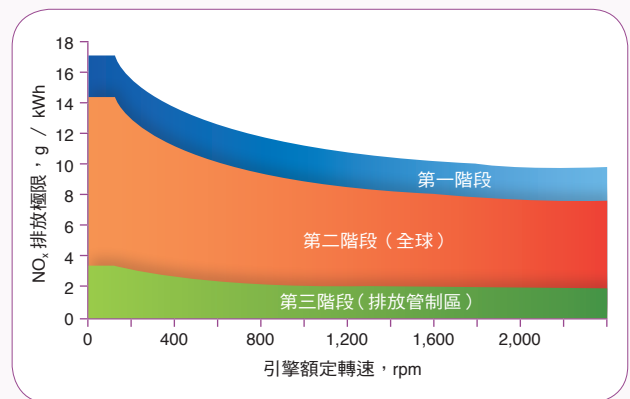
## 新船排氣的限制

大型船舶的低速柴油機排氣的主要成分中，氮氧化物、硫氧化物與二氧化碳是破壞環境的元凶。國際海事組織對於新船的設計，已有限制排放的規範。

氮氧化物是所有氮與氧原子化合物的統稱，主要包括一氧化氮及二氧化氮。當引擎燃燒溫度達攝氏 1,920 度以上時，燃燒反應生成物中便有一氧化氮，而在接下來的膨脹及排氣過程中，約有 5.0% 及 1.0% 的一氧化氮會轉變成為二氧化氮及一氧化二氮。隨著溫度繼續升高，氮氧化物的量會以指數型式增加。

船舶燃燒用的重油含有硫，燃燒時會生成二氧化硫，與空氣中的水蒸氣結合後，形成亞硫酸與硫酸液體而嚴重污染大氣，尤其形成的酸雨對植物的危害特別嚴重。因此，國際海事組織對於船舶的硫氧化物訂定了排放的標準。自 2020 年起，航行於國際海域的船舶其燃料油含硫量必須低於 0.5%，而行駛於排放管制區的商船，自 2015 年起更必須低於 0.1%。

二氧化碳是海運排放溫室氣體中的主要成分，約占整個海運排放量的 96%，而大部分的二氧化碳是由船舶柴油主機、發電機和鍋爐所排放。雖然全世界航運每年排放二氧化碳的總



國際海事組織限制引擎每千瓦的輸出功率每運轉 1 小時氮氧化物的排出克數。第一階段適用於 1990 年 1 月～2000 年 1 月間所製造的，第二階段則適用於 2011 年 1 月以後製造的船用柴油機。此外，針對操作於排放管制區（包括北美、北海與波羅地海等區域）的船用柴油機，也於第三階段更嚴格地規範所有於 2016 年 1 月以後製造的引擎。

## 為了能有效減少排放物， 燃用液態天然瓦斯的主機與發電機已開始取代使用傳統燃料的機器。

量約僅占全球總排放量的 3%，但國際海事組織規定，從 2013 年起，所有總噸位大於 400 噸的新船都必須符合「能源效率設計指數」，即每單位船舶載重噸位每節船速的二氧化碳排放率。這個規畫以 2008 年為參考基準，從 2015 年開始，所有符合規定的船舶須降低能源效率設計指數 10%，2020～2024 年間再降低 10%，2025 年以後則要達到減排二氧化碳 30% 的目標。

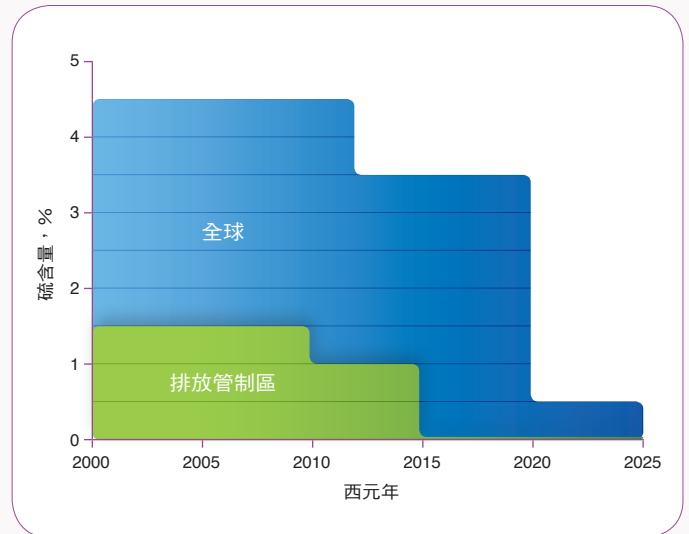
經濟合作暨發展組織表示，柴油機設計技術的改善具有巨大的節油潛力，能為海運業節省約 30% 的油耗。不過這種方法主要適用於新船，需要較長時間才能展現出綜合效應。其他一些能在短期內達到節能、省油的目的，並能減少氮氧化物、硫氧化物與二氧化碳排放的措施簡介如後。

### 廢氣洗滌器系統

為了合乎法規規定的硫排放限制，有些船公司在船舶上安裝了廢氣洗滌器系統。這系統可選用海水或淡水，如果使用海水則把硫酸轉換成硫酸鹽，再與從廢氣抽出的微小粒子一起沖刷到海裡。但在港口、海灣、河流或其他較敏感的區域，洗滌器操作時則使用再循環的淡水，並以氫氧化鈉中和硫酸，混合後產生的稀泥狀物質是無害的硫酸鈉，可與船上的汙泥一起送至岸上的廢棄物收受機構處理。目前，洗滌器系統可從排氣中去除約 98% 的硫氧化物與 80% 的微粒子。

### 液化天然氣燃料

為了能有效減少排放物，燃用液態天然瓦斯的主機與發電機已開始取代使用傳



自 2020 年起，航行於國際海域的船舶其燃料油含硫量必須低於 0.5%，而行駛於排放管制區的商船，自 2015 年起更必須低於 0.1%。

統燃料的機器。選用液化天然氣做為船舶動力燃料，除需考量燃料價格與取得方便性外，船舶還需要大幅的改裝。除了氣缸頭上閥件與管路的更換外，還需加裝電子控制燃料噴射系統、液化天然氣儲存櫃、氣體管路系統、惰性氣體系統、通風系統與安全裝備等。

由於在操作上有相當的風險，船上所有工作人員必須取得相關設備操作與處理的證照，特別是充分了解在充填液化天然氣燃料時，每位船員所需負的責任與注意事項。液化天然氣燃料最主要的優點是對環境影響較小，可以減少 10～20% 的二氧化碳排放量、90% 的氮氧化物排放量，以及 100% 的硫氧化物和微粒子排放量。

## 先進的船殼油漆

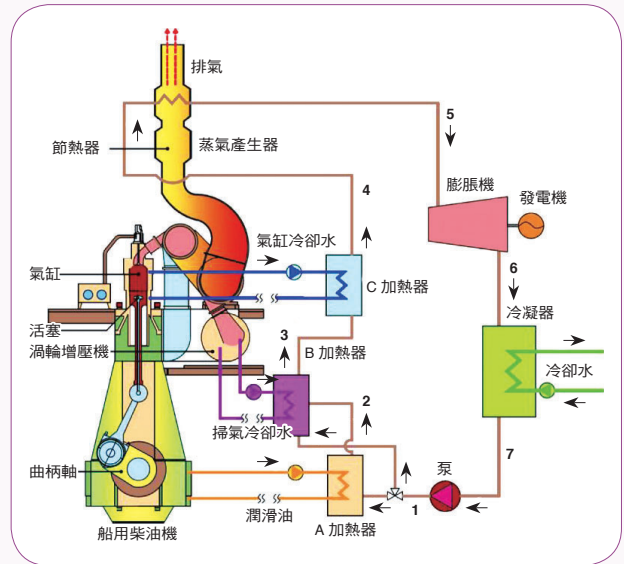
選擇適當的船殼油漆，可有效降低船舶在海上前進時所承受的摩擦阻力，達到省油的目的。然而，一般防止海生物附著在船舶上的油漆中含有生物殺滅劑，像銅與三丁酸錫的化合物會抑制海藻、甲殼動物，以及其他海洋生物的生長，但也會導致貝類、蝦與蟹的畸形。因此，國際海事組織已公告所屬會員國自 2008 年起全面禁用。

目前市面上有一種具有水凝膠塗層且不含生物殺滅劑的油漆，塗抹在船殼上可以降低船舶航行的興波阻力。這種油漆除了可減少海生物的附著外，也具有較小的興波阻力，可節省約 3 ~ 8% 的燃油。大部分的船型與各式各樣的外形都可使用這種塗料。

## 廢熱回收系統

廢熱回收系統是使用船舶主機排氣的廢熱來加熱水產生蒸氣，提供住艙與貨艙的暖氣，也可用來加熱重油。此外，更進一步使用「郎肯循環」（Rankine cycle），可把水加熱成蒸氣後再供給渦輪發電機發電。這種廢熱回收系統依構造的不同，可以節省約 7 ~ 14% 的燃油。

為了更進一步回收船舶的廢熱，減少更多的燃油消耗量，近年發展出「有機郎肯循環」，以有機冷媒取代水做為工作流體。船舶上的廢熱很多，以一部瓦錫蘭主機於 85% 負載輸出時為例，除了主機的排氣（約攝氏 300 度）外，尚有主機缸套冷卻水（約攝氏 90 度）、增壓進氣冷卻淡水（約攝氏 76 度），以及滑油冷卻淡水（約攝氏 60 度）。為了有效使用這些低溫的廢熱，



回收廢熱的郎肯循環

必須以沸點較低的有機冷媒做為工作流體。

為了符合環保的需求，這些工作流體都具有零臭氧破壞的特性。有機郎肯循環的發電成本低，平均 3 年左右便可回收，最重要的是可以有效降低二氧化碳等有害物質的排放。

## 燃油添加水系統

氮氧化物的形成與氣缸套的溫度息息相關，降低氣缸內燃燒的溫度可有效降低氮氧化物的產生。在燃油噴入氣缸燃燒之前，把水加入燃油內便可降低燃燒的溫度。

燃油摻水的方法有二種，其一是燃油摻水乳化法，但只能大約降低 20% 的氮氧化物排放量。主要是因為水與燃

氮氧化物的形成與氣缸套的溫度息息相關，降低氣缸內燃燒的溫度可有效降低氮氧化物的產生。

油的比值最高只能達到 0.3%，而採用這項技術還需要一套高容量的燃油處理系統才能維持引擎出力。對於蒸餾油而言，水在燃油中的乳化效果不穩定，因此在限制氮氧化物排放的區域，這種方法的效果非常有限。此外，燃油噴射器需依高流量做最佳化的調整或設計，當不需乳化而關掉水時，引擎的性能也會大打折扣。

另一種是直接噴水法，這是降低燃燒溫度較有效的方法，是直接把水噴入燃燒室中。若以燃燒循環來看，為了使燃油在點火前及預燃期間冷卻，需在油尚未噴入之前就先噴入水。因此，燃油噴射器便包含了兩個針型噴嘴，分別提供燃油及水。這種方法若再結合最佳的噴油正時與歷時，降低氮氧化物排放量會更具效果。直接噴水可以降低氮氧化物的排放量達 50 ~ 60%，且燃油可自由選擇，使用重燃油或蒸餾油都可獲得最佳功效。而且這種噴水系統的體積小，適於安裝在船舶上。

## 延遲噴油

在燃燒過程中若延遲噴油，則燃油滯留在氣缸內燃燒的時間縮短，燃燒溫度降低，因而減少氮氧化物的排放量。但由於延遲噴油會導致燃燒不完全、排氣溫度上升、排煙濃度增加及熱效率下降，使燃油消耗率增加。

若想單獨以這種方法降低 50% 的氮氧化物排放量，其耗油率將提高 20 ~ 30%。為重新建立低耗油率，必須靠提高壓縮比來彌補。如此一來，延遲的噴油時間與高壓縮比結合後，勢必要在噴油率上修正，複雜的噴油設計便成為這一概念是否實用

的關鍵。因此，有些廠牌的柴油引擎已發展出可在運轉中改變延遲噴油的方法，可以依照要求立即調整為延遲噴油模式，而一旦離開了規定較嚴格的海域，又可立即調回到最佳的耗油情況。

## 廢氣再循環系統

降低氮氧化物的形成，除了可採降低氣缸溫度的方法外，另一有效的方法是降低燃燒時空氣中氧氣的含量。排氣再循環系統可以減少進氣的含氧量，而排氣中高熱容量的水蒸氣及二氧化碳（共約 10%）都能降低燃燒溫度，氮氧化物的形成量便得以減少。

這一種方法是把船舶主機燃燒過的廢氣，經淨化處理後送入掃氣室與主機的進氣混合，使空氣中氧氣的成分由 21% 降至 18%，低濃度的氧氣於燃燒室內與燃油混合燃燒時，可降低燃燒與氣缸的溫度。實際操作時，從船舶主機排氣側所量測到的數據可知，使用廢氣再循環系統最多約可減少 80% 氮氧化物的量。

## 壓艙水管理系統

船舶在空船或載重不足航行時，為求降低重心，使其能處於安全且適航狀態，往往會在艙底注入適量的水，這就是船舶的壓艙水；反之，當船舶進入港域裝載貨物時，為減輕載重則需排放出壓艙水。

依據國際海事組織估計，全世界所有船舶每年排放的壓艙水多達 30 ~ 50 億噸。這些被排出流放至他處港域的海水，卻很可能會把原來港域的海生物及大量的病原體帶往異地的港埠，而對他國海域的生態

環境造成重大威脅。此外，壓艙水會增加船舶的載重量與行進時的阻力，導致耗油量增加，也增加不少污染物的排放。有鑑於此，國際海事組織已於 2017 年 9 月 8 日要求全球實施「船舶壓艙水與沉積物管理國際公約」，即所有船舶必須於特檢時加裝壓艙水處理系統。

壓艙水的處理方式大致可分成化學與物理兩類。化學類包括以紫外線輻射、超音波、放電、脫氧等方法，與臭氧、氯、有機酸、銅與銀等化學系統搭配使用。物理類則包括大洋海水交換、換水提高鹽度、加熱與過濾 / 水流漩渦。

壓艙水處理系統所使用的原料，不僅價格昂貴，且在船舶長期的使用下，不免會污染港域，同時耗費大量能源。在過渡時期（2017 ~ 2021 年），船舶壓艙水於離岸至少 50 海里且水深 200 公尺以上的水域換水，是目前國際海事組織認可的方式之一。主要是因為深海區的強大海流擁有自然的淨化能力，外來的海生物會因為海流沖刷而漂散，不易聚生繁衍。

最近，日本的造船研究所、設計建造研究所及多家著名造船廠共同合作，設計開發無壓艙水船舶。這種無壓艙水超級油輪是把船身設計為呈明顯向下凸出的 V 字型，船體的下半部分更為細長，使船舶處於空載重量時也有足夠的吃水深度。除非是遇到狂風巨浪，這時視風浪等級再汲入壓艙水以保護船體免於傾覆，平常則不需再汲入壓艙水。

全球暖化日益嚴重，只有讓節能減碳的綠色意識融入每位航運工作者的日常生活中，才能真正為保護地球盡一份力。

---

葉榮華

高雄科技大學輪機工程系

---

