

散裝航運公司船舶能源效率改善成效 影響因素之分析¹

AN ANALYSIS ON THE FACTORS INFLUENCING SHIP ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT OF BULK SHIPPING COMPANIES

韓子健 Tzeu-Chen Han²
賴家農 Chia-Nung Lai³
鄭信鴻 Hsin-Hung Cheng⁴
鍾政棋 Cheng-Chi Chung⁵

(109 年 4 月 13 日收稿，109 年 6 月 8 日第一次修改，109 年 7 月 7 日第二次修改，
110 年 2 月 19 日定稿)

摘 要

2020 年全球海運燃料含硫量 0.5% 限制，影響國際燃油供需市場；燃料成本控管成為航運公司營運競爭優勢的關鍵因素之一。散裝船舶能源效率改善不僅與船舶特性節能技術密切相關，更考量散裝航運市場特性及其經營模式。本文以問卷調查及訪談方式，蒐集國內外普遍採行的節能技術，採用重要度績效分析及模糊品質機能展開法，檢視船舶能源效率改善資源配置與權管部門營運需求，建立服務品質需求構面，探求各項改善技術執行重要度。散裝船舶大小與能源消耗比例有關，主機燃油消耗量占比隨著船型噸位的增加而升高，大型散裝船加強「降低船舶之阻力、船舶推進之

-
1. 本文作者感謝審查委員提供的寶貴意見，及科技部專題研究計畫 (MOST108-2410-H-019-021) 之經費贊助。
 2. 國立澎湖科技大學航運管理系專任副教授。
 3. 國立臺灣海洋大學航運管理研究所碩士、新健海運股份有限公司工務部輪機長。
 3. 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系所博士、交通部運輸研究所運輸安全組副研究員。
 5. 國立臺灣海洋大學航運管理學系暨研究所特聘教授；(聯絡地址：20224 基隆市中正區北寧路 2 號；電話：(02)2462-2192 轉 3412；E-mail：jackie@ntou.edu.tw)。

效率、航行時間之優化」高相關度指標維護，則可事半功倍。航運公司透過仲介公司管束與派遣外籍船員素質，在中國沿海經濟發展迅速，薪資待遇缺乏誘因，資深普通船員返鄉轉業下，「人員能力與素質」需求指標已成為散裝船舶能源效率改善的重要課題。

關鍵詞： 散裝船、船舶能源效率、重要度績效分析、模糊品質機能展開法

ABSTRACT

The international bunker supply and demand markets have been greatly influenced by the 2020 global sulphur cap, making fuel cost control one of the key factors of competitive advantage for shipping companies. Since energy efficiency improvement of bulk carriers is not only closely related to ship characteristics and energy-saving technologies, this research considered both the characteristics and operation models of the bulk shipping market. It first collected energy-saving technologies by questionnaires and interviews; then examined the resource allocation of ship energy efficiency improvement and the operational demands of influential departments by the importance-performance analysis and the fuzzy quality function deployment. The service quality demand dimension was set up to explore the implementation importance of each improvement technology. It was found that there is a significant difference between the tonnage of bulk ships and the proportion of energy consumption. The higher the fuel consumption of the main engine the larger the tonnage of the ship. Therefore, if large bulk carriers strengthen the maintenance of high-relevance indicators, including "Reducing Ship Resistance," "Improving Ship Propulsive Efficiency," and "Voyage Optimization," they can yield twice the result with half the effort. On the other hand, the shipping companies manage and dispatch the quality of foreign seafarers through labor broker agencies due to the rapid development of coastal economy in China. However, the lack of incentives for salaries made senior ordinary seafarers return to hometown or switch jobs. As a consequence, the demand indicator of "Personnel Competence and Quality" has become an important issue for improving the energy efficiency of bulk carriers.

Key Words: Bulk carriers, Ship energy efficiency, Importance-performance analysis, Fuzzy quality function deployment

一、前言

散裝航運屬於服務性產業，經營環境始終隨著全球經貿需求而改變。根據世界貿易組織 (World Trade Organization) ^[1] 資料顯示，國際貿易量自 1981 年起逐年成長，接連帶動

散裝航運市場運力需求。依據經濟合作暨發展組織 (Organization for Economic Cooperation and Development) ^[2] 統計，2005~2017 年間散裝船噸供給量始終高於拆船量，每年有 400~2,100 萬載重噸過剩。依據 Clarksons ^[3] 調查，2016 年起船舶利用率回穩，但船舶大型化趨勢致大量非公開貨物長期運送契約產生，市場過度樂觀情形下，船東除須面對開源不易之環境，更須有效強化企業體質，方能提升市場競爭力。

與貨櫃航運經營模式不同，散裝航運因備船模式多樣化而更具彈性，可依公司體質現況分階段選擇最適合的經營策略。本文透過文獻回顧與深度訪談，了解散裝航運市場需求及散裝船舶特性，針對現成散裝船能源效率改善問題，彙整能源效率管理關鍵影響因素，以構建船舶能源效率需求指標，應用重要度績效分析法 (Importance- Performance Analysis, IPA) 繪製二維矩陣，對各項能源效率指標進行分析調查，以檢視公司的資源配置情形。

散裝航運因未有固定船期與航行路線，每航次裝卸港間之差異直接影響能源效率營運指數 (Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI) 計算結果，增加衡量散裝船舶能源效率之困難度。因此，本文採用模糊品質機能展開法 (Fuzzy Quality Function Deployment, FQFD)，研擬當前散裝航運普遍可行的節能技術措施，分析專家問卷調查資料後，採用模糊數學方法以降低不同專業背景的主觀意識偏差，將其量化為易於理解的數據資料，建立船舶能源效率品質需求和技術構面相關矩陣。

最後將各項技術項次與標準化權重相乘求得絕對權重，標準化排列各項節能技術之優先順序，以作為營運管理決策方針，期能達成長期改善船舶能源效率之目的。除了整體分析，本文亦進行分群分析以探討不同屬性群體之認知差異，以制定更為精確適宜之因應作法。

二、國際公約對散裝航運業之影響

有鑑於地球暖化與氣候鉅變之情況，空氣污染防治問題成為國際輿論關注課題，尤其硫化物與碳排放限制，對航運業影響更甚鉅。

2.1 硫化物排放限制

國際海事組織 (International Maritime Organization, IMO) 所轄海洋環境保護委員會 (Marine Environment Protection Committee, MEPC) 在 2016 年 10 月第 70 屆會議達成決議，宣佈 2020 年起開始實施船舶使用燃料含硫量 0.5% 之限制，對航行排放控制區 (Emission control area) 更限制含硫量不得超過 0.1%。航運業者為因應含硫燃料上限規定，除燃用低硫燃油 (Low Sulphur Fuel Oil, LSFO) 外，或以船舶加裝排煙洗滌裝置 (Exhaust Gas Cleaning System, EGCS)、建造新船採用替代燃料作為考量選項。對於燃用低硫燃油，國際燃料工業協會 (International Bunker Industry Association, IBIA) 提出警訊，許多港口將無法及時供應足夠低硫燃油取代既有高硫燃油 (High Sulphur Fuel Oil, HSFO) 需求，將加劇非

競爭性燃料價格並引發額外的環境污染。根據國際能源署 (International Energy Agency, IEA) 推估，低硫燃油需求量一旦激增，短期油品價格勢必大幅上漲。根據國際航運商會 (International Chamber of Shipping, ICS) 預測，高硫燃油和船用輕柴油 (Marine Gas Oil, MGO) 市價均差，可能擴大至每噸 400 美金以上。因此基於經營模式差異，散裝航運業在燃料選用上將有截然不同的因應對策，以符合硫含量限制暨公司經營管理收益最大化。

2.2 碳排放限制

為有效管制船舶碳排放問題，IMO^[4] 通過防止船舶污染國際公約 (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78) 對附則第 VI 章修正案，確立新造船能源效率設計指數 (Energy Efficiency Design Index, *EEDI*) 及船舶能源效率管理計畫 (Ship Energy Efficiency Management Plan, *SEEMP*) 規定；依據 IMO^[5] 要求，從事國際航行及總噸位 5,000 噸以上之船舶，於 2019 年起應向船旗國授權認證機構，透過排放數據收集系統 (Data Collection System, IMO-DCS)，主動申報航次消耗燃料種類及數量、船舶位置與航行軌跡等數據。

根據 IMO^[4] 對不同船型與噸位的新造船業者，透過新式節能設計，以規範具體能源效率範圍。以 2008 年為基準，分階段達 2030 年節能減碳 40% 目標，使造船廠採用能源效率更佳的引擎與設備。船舶設計建造者可自由選用最具成本效益方案，以新造船能源效率設計指數 (*EEDI*) 衡量船舶每單位載重航速之碳排放量，如式 (1) 所示。

$$EEDI = \frac{\sum C_F \cdot SFC \cdot P}{Capacity \cdot V_{ref}} \quad (1)$$

C_F 為碳排放轉換係數 (公噸二氧化碳/公噸燃料)； SFC 為燃料消耗率； P 為設備消耗功率 (千瓦)； $Capacity$ 為載運能力 (散裝船單位為載重噸)； V_{ref} 為 75% 主機額定功率輸出下之航速 (海浬)。

式 (1) 分子為船舶運輸過程中各項能源消耗設備，如主機、發電機、鍋爐所產生的碳總排放量，扣除船舶加裝節能裝置後減少之碳排放量；由此可知，*EEDI* 數值愈小，代表船舶設計能源效率愈高。

根據 IMO^[5] 對所有 400 總噸以上現成船，要求建立船舶能源效率管理計畫 (*SEEMP*)；此規定羅列各項節能技術，使管理者提高能源效率管理機制，並透過能源效率營運指數 (*EEOI*) 作為船舶碳排放參考指標，如式 (2) 所示。

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \cdot C_{Fj}}{m_{cargo} \cdot D} \quad (2)$$

FC 為燃料消耗量 (公噸)； C_F 為碳排放轉換係數 (公噸二氧化碳/公噸燃料)； m_{cargo} 為貨物裝載重量 (公噸)； D 為航行距離 (海浬)； j 為燃料類型。

EEOI 用於計算船舶每單位貨物航行距離之碳排放量。根據劉伊凡等人^[6] 指出，當前

多透過船舶營運統計數據，結合灰色預測、人工神經網絡等方法進行預測，或對船體、螺旋槳、傳動系統等分別建模後再推算船舶碳排放量。而嚴新平等^[7]指出，預測或推估結果始終受限於建模理論假設和實船航行測得數據間誤差，導致與實際排放差異過大。

2.3 船舶特性與節能技術

為確保船舶營運績效和市場競爭力，Veenstra and Ludema^[8]指出，船東自新造船簽約前，即謹慎考量各項重要之船舶設備性能規範，以符合航運市場或傭船人之需求；造船廠則致力於使船舶能達到 *EEDI* 標準。交船營運後，燃料成本受經營者高度重視，Bialystocki and Konovessis^[9]指出，船舶吃水、船殼與螺旋槳粗糙度等條件惡化時，會導致船舶能源效率降低而增加燃料成本，須施行各類節能技術措施，設法提升能源效率。

在最佳航行路線規劃上，依 Lu 等人^[10]研究顯示，船長在航行過程中，若能根據氣象導航更新資料，評估洋流、季風、船舶迎風角、平均速率和天候海況等變化，修正航行路徑，可降低 11% 燃料消耗量。

在航行速率 (Travelling speed) 與主機輸出功率 (Power output) 上，散裝船多配置固定螺距螺旋槳 (Fixed Pitch Propeller, FPP)，根據 MAN Diesel and Turbo^[11]研究，船舶航行速率與螺旋槳轉速成正比，而主機輸出功率又與螺旋槳轉速立方成正比，根據孫台豐^[12]研究指出，降低 20% 航行速率，節約主機燃料消耗量可達 50%。

在船舶阻力 (Ship's resistance) 方面，船舶航行受海水與空氣兩種流體的反作用力影響，依形成原因主要可分為空氣阻力、摩擦阻力 (Friction resistance) 和剩餘阻力 (Residuary resistance)。空氣阻力大小取決於船體水線上面積多寡；摩擦阻力大小則取決於船體水線下面積多寡；剩餘阻力由渦流阻力和興波阻力組成。窩流阻力乃海水接觸船殼後水流分離產生渦流阻力所導致的能量損失，以船艉部分為劇；興波阻力則為船舶前進時產生的波浪所導致的能量損失，與船速平方成正比。根據 MAN Diesel and Turbo^[13]研究指出，低速散裝船的船舶阻力約有 70~90% 來自於摩擦阻力，8~25% 來自於興波阻力。

當船舶遭遇嚴峻天候海況時，螺旋槳推進動力易受興波阻力抵耗，即便增加主機輸出功率亦無法有效提升船速，反而容易使主機過扭 (Torque-rich) 運轉，導致主機氣缸內平均有效壓力與熱負荷過度增加，引發活塞環斷裂、活塞冠龜裂與氣缸襯套裂損等故障，甚至使船舶喪失動力而翻覆。根據 Zhao 等人^[14]認為，在天候海況惡劣情況下，應適度降低主機轉速，減少無效輸出功率與燃料消耗，並且確保航行安全。

船舶常數 (Ship's constant) 為新船交付營運一段時間後，測得空船重量與出廠時所測空船排水量之差值。根據李國定^[15]與黃雪忠等人^[16]表示，貨物裝載量與各方切身利益息息相關，在貨物裝卸和運輸過程中，託運人、運送人或受貨人皆期望能提高船舶常數測定精確度，以準確掌握貨物裝載量。船舶長期營運後，載有一定數量的污水、垃圾、破舊料件、貨物殘餘、船體附著海生物，及壓載水帶入水艙淤泥，重量不易精算，誤差致使貨物裝載量與實際不符，因此每次裝載前及卸載後，大副皆須測定船舶常數，作為貨物裝

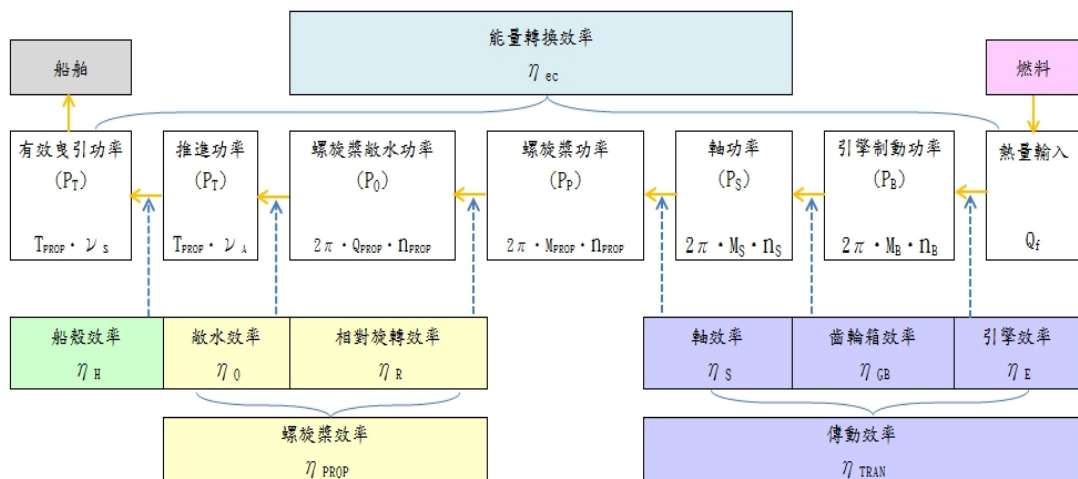
載量計算依據。

船殼常年浸泡在海水中，容易孳生海生物導致阻力增加；財團法人中國驗船中心^[17]指出，即使很薄的海藻覆蓋都會增加 5~15% 燃料消耗，嚴重髒污可達 40%，對船速與油耗有相當大影響。根據 IMO^[18] 統計，全球船舶平均有 9% 能源效率損失來自船殼污染。基於此，船舶塢修時會重新補強外板塗裝，特別在水線下之船殼表面，塗上防污漆以防止海生物附著污染。

船殼塗裝品質好壞，從作業前油漆選用和塗佈面積、油漆噴塗散失率、塢內時間、天候、溫濕度等條件評估，到作業過程中高壓洗水、掃砂、吹氣清潔、局部補漆、剷除翹皮、全面噴塗等，每道工序皆至關重要，且易受人為與環境因素影響。塗裝品質不良致航行阻力增加，影響出塢後至下次塢修 2~5 年間之油耗。傳統舊型防污漆著重於抑制海生物孳生，關鍵技術在於防污成分分配製與溶出速度；近年環保意識抬頭，有機錫成分已被國際禁用。當前業界廣泛採用的新型防污漆，則有自拋光與釋放水凝膠兩種型式，根據吳偉國^[19] 分析大量實船航行數據顯示，水線下船殼外板採用低阻力防污漆，可節省 4~5% 燃料消耗量。

在最小安全吃水 (Draft) 與俯仰差 (Trim) 方面，航行阻力會隨吃水增加，船長考量船舶穩度、船體受風面和操船舵效等因素，注入適量壓艙水；吃水過淺時，螺旋槳浸沒率不足導致推進效率降低。根據 Class ABS^[20] 資料顯示，維持最小吃水可降低燃料消耗約 1~2%。船體線型按特定吃水而設計，在不同吃水與航速狀態下，有不同的最佳俯仰差；若能適當分配貨物和壓艙水，掌控船舶重心分佈，使船體保持適當俯仰差狀態下航行。根據 Hochkirch and Bertram^[21] 研究顯示，主機輸出功率與俯仰差需求之差異可超過 10%。

船舶推進效率 (Ship's propulsion efficiency) 為燃料消耗轉化為船舶運動過程中各項效率之乘積；有關船舶推進效率轉化過程，如圖 1 所示。



資料來源：Woud and Stapersma^[22]。

圖 1 船舶推進效率轉化過程示意圖

由圖 1 可知，船舶推進效率乃傳動效率、螺旋槳效率和船殼效率所組成。而彭斌^[23]假設理想推進效率趨近於 1 之情況，一般航行推進效率僅達 0.42~0.72。若排除船舶阻力影響，仍有 18%~40% 能量損失在推進系統中，主要來自於傳動機構能量損失、螺旋槳葉端橫向繞流引起的渦流損失和螺旋槳後端的尾流損失；而現成船可透過下列方式提升。

1. 採用自動操舵，以小舵角保持良好的航向穩定性，在環境條件較差情況下亦能減小船艏偏差；根據 Buhaug 等人^[24] 研究，可減少 0.4~2.5% 燃料消耗。
2. 螺旋槳後端加裝轂帽鰭 (Propeller with Boss Cap Fins)，降低螺旋槳尾流損失，特別在配有超長衝程主機、螺旋槳螺距大的船舶上效果更佳；依據 Class ABS^[20] 資料，可減少 2~6% 燃料消耗。
3. 透過定期保養維持主機良好運轉情況，使熱效率提高並降低單位功率油耗量。

有關船用引擎專家診斷系統 (Diagnosis system) 與標準燃料消耗率 (Specific fuel consumption)，船用引擎造機廠多提供有性能診斷服務，由輪機員定期在引擎持續平穩運轉狀態下，測定引擎在特定負荷所對應的透平增壓機轉速、引擎轉速、最大爆發壓力、壓縮壓力、排氣溫度、油門指數、掃氣壓力等各項運行參數後，診斷引擎是否在良好工作情況下運轉。利用性能診斷紀錄長期追蹤引擎運轉情況，不僅可預先發現徵兆，防範引擎故障和延伸性事故於未然，並可作為調整維修保養間隔之參據，使引擎維持良好的燃料消耗表現。

船用柴油機製造大廠 MAN Diesel and Turbo^[25] 指出，標準燃料消耗率乃透過燃油日用系統流量計讀數以溫度係數修正燃油比重後之燃料消耗率，扣除容許誤差，並經工作環境修正、低熱值修正 (Correction for lower calorific value)、機體自帶泵修正 (Correction for engine mounted pumps)、排氣背壓修正 (Correction for exhaust gas back pressure) 及燃用輕柴油 MGO 修正後所得，而計算過程中，許多修正係數乃經驗值或理想設計值，經繁複測量計算後，精確度極易受誤差影響。此外，近年來歐洲航商為降低人工成本及減少燃料消耗，Abduljabbar 等人^[26] 在研究中提及研發利用人工智能技術提高運輸效率，例如藉由高級自主水運應用 (Advanced Autonomous Waterborne Applications, AAWA) 使得高效能運輸的自主船技術已開始再次受到關注。

在蒸汽系統損耗 (Steam loss) 方面，自工業革命以來，蒸氣係廣泛被應用的工作介質，發明之初期即普遍作為蒸汽船動力來源^[27]，現今尚且作為加熱、清潔、消防之用；一般散裝船設置輔鍋爐，主要目的為加熱劣質燃油和柴油引擎暖缸等使用。在蒸汽生產過程，根據中技社節能技術發展中心^[28] 指出，鍋爐可能受燃燒器、鍋爐本體、熱回收、空氣、鍋爐給水和蒸汽系統影響導致效率低落。蒸汽熱循環過程中，有大量的能量散失，根據美國能源部 (U.S. Department of Energy)^[29] 指出，主要包含鍋爐輻射熱損失 (Boiler radiation loss)、爐水吹放損失 (Boiler blow-down loss)、除氧櫃溢散損失 (Deaerator vent loss) 等；根據 Swagelok^[30] 之研究，能量損失總和可高達 47.3%。

2.4 綜合評析

2020 年限硫令帶來衝擊，航運業界普遍認為可行解決方案有三種：燃用低硫燃油、安裝脫硫裝置、以液化天然氣為燃料。散裝航運安裝脫硫裝置及以液化天然氣為燃料成本風險高，大多選擇燃用低硫燃油。依據日本國土交通省海事局^[31]及 Veritas^[32]報告指出，使用低硫燃油有承擔高設備故障風險；IMO 統計，超過 7 萬艘船舶因此遭受影響。推行國際防止船舶空氣污染公約，等同對次標準船設下退場機制，有助於改善航運市場船貨供需，使優良經營者立於公平基礎上競爭。

散裝航運未有固定航行路線，每航次航程、季風、水文等差異，直接影響船舶 *EEOI* 計算結果。根據國際氣候變遷委員會 (International Panel on Climate Change, IPCC) 指出，船舶碳排放量不確定性來自於計算過程的活動數據和排放因子，主要因素有 (1) 吃水俯仰差、側傾角等造成油艙測量誤差。(2) 溫度錶、壓力計、傳感器、流量計等測量儀器之誤差。(3) 因油艙內部油溫不均勻所造成燃油密度差異之誤差。(4) 周遭環境如溫度、濕度、大氣壓力、海水溫度、洋流、季風、海況等波動性。(5) 燃料成分之不確定性。(6) 船體與設備之不確定性。(7) 船舶行駛方法之不確定性。

根據張曦與李大屹^[33]研究指出，散裝航運業較難獲得精確的排放數據，增加船舶能源效率評估之困難。而 Acomi and Acomi^[34]研究發現，即便同一艘船載運相同貨物，並航行相同路線，*EEOI* 都有 18~20% 之差異。根據 Rehmatulla 等人^[35]研究表示，當前已有眾多船舶節能技術透過實船實驗確立功效；然實驗多透過廠商與船東合作，將節能技術應用到相同船型姊妹船比較，或由造船廠依特定初始條件，從源頭開始設計優化，藉由水槽試驗比對驗證。根據 Class ABS^[20]和 IMO^[36]指出，當一艘船舶同時並用多種節能技術時，能源效率改善成效或因共同性質相互抵觸，致某種程度之削弱，雖成效最終反映在初級能源消耗表現上，但過程中仍存有過多變數，唯有透過長期不斷地觀察、評估並落實節能措施，方能使節能效益最大化。

三、研究方法

本文依文獻探討及業界專家訪談問卷調查資料，採用重要度績效分析法、模糊理論、模糊品質機能展開法進行分析，構建能源改善效率需求和服務品質構面，探求能源改善技術重要度 (排序)。

3.1 重要度績效分析法

現成船能源效率改善幅度，容易受限於船型、船況、設備規格、運務需求等限制，或與成本支出成正比，妥善分配有限資源，方可符合經濟效益落實長期改善。重要度績效分析法 (IPA) 透過評估者對受評項目之重視與滿意程度，根據 Martilla and James^[37]以重要

度與績效的平均值為軸，可繪製各項船舶能源效率改善指標的重要度績效分佈矩陣，將其劃分為 4 個象限，協助決策者檢視船舶能源效率改善之資源配置。

「優秀保持區域」於第一象限，受普遍重視且滿意度高，在整體市場環境中具競爭優勢。「過度重視區域」於第二象限，受重視度較低，滿意度較高，資源有限時可減少投入。「次要改善區域」於第三象限，受重視度低滿意度低，無需立即改善。「優先改善區域」於第四象限，受高度重視滿意度低，為公司組織發展主要劣勢，應優先考慮將資源投入，採行適當營運策略提升服務品質。

根據 Yang^[38] 研究顯示，當兩個項目間重視與滿意程度相近時，可能分別座落於鄰近 2 個不同區域，而難以決定改善優先順序，此時可採用改善係數 (Improvement index) 予以判別，如式 (3) 所示。

$$\text{改善係數} = \frac{\text{滿意度} - \text{重視度}}{\text{重視度}} \quad (3)$$

改善係數即評估者滿意度與重視度之差距比例，由於多數評估者的重視度會高於滿意度，因此改善係數一般係為負值，負值愈大者即為改善迫切性愈高。

3.2 模糊理論

於現實生活中，人類思維與許多問題有難以界定之模糊性質；現代科學研究對象多為繁複龐雜之系統，常具有多重屬性，易受不同因素影響。基此，Zadeh^[39] 提出模糊理論 (Fuzzy Theory)，以模糊集合 (Fuzzy set)、模糊邏輯 (Fuzzy logic)、模糊度量 (Fuzzy measures) 處理難以數學建模、具模糊性之問題，近年來被廣泛應用於解釋各種管理實務問題。

模糊理論以模糊集合為基礎，將各種具模糊現象存在事實，量化為易於理解的數據信息。而 Dubois and Prade^[40] 將模糊數加以定義，認為其為一隸屬函數介於區間 (0,1) 集合的模糊數集。令 U 為全集合 (Universal set)， $\mu(x)$ 為一函數，則隸屬函數 $\mu(x) : U \rightarrow [0,1]$ 有以下三項特性：

1. $\mu(x)$ 必須是有界 (Bounded) 且連續 (Continuous)；
2. $\mu(x)$ 是一凸模糊集 (Convex fuzzy set)；
3. $\mu(x)$ 為正規的模糊集合，即至少存在一實數 X_0 ，使得 $\mu(X_0)$ 等於 1。

$\mu(x)$ 在定義上代表某一元素 x 在 U 集合的隸屬程度，因此 $\mu(x)$ 亦稱為 U 的隸屬函數，當 $\mu(x)$ 值愈接近 1，表示 x 在 U 集合中的隸屬程度愈高。

於定義上，三角模糊數 (Triangular fuzzy number) $\tilde{x} = (l, m, u)$ ，其中 l 和 u 為 $\tilde{x}$ 的上下邊界， m 則為峰值。根據 Tzeng and Teng^[41] 研究，可應用重心法去模糊化。假設 x 為 $\tilde{x}$ 的精確數值，則如式 (4) 所示。

$$x = |(u - l) + (m - l)| / 3 + l \quad (4)$$

利用式 (4) 將三角模糊數轉化為精確之數值。

3.3 模糊品質機能展開法

品質機能展開法 (Quality Function Deployment, QFD) 起源於日本，由赤尾洋二與水野滋於 1972 年提出，曾應用於船舶設計與產品製程，旨在確保產品能符合顧客需求。根據 Vanegas and Labib^[42] 主張，QFD 法可將顧客需求轉換為符合需求的工程特性。於實務上，散裝航運公司有業務部、船務部、工務部、船上作業等，各部門專業背景與觀點不同，每個環節卻直接影響船舶能源效率改善成效。QFD 法為人與人相互交流提供合理管道，有助於打破部門間隔閡，擅於解決多方面業務問題。根據 Dube 等人^[43] 研究，需求指標並非皆係有形或可量化，透過與技術構面之相關性，探求各項需求指標權重排序作整體策略參考，根據 Sullivan^[44] 研究指出，可有系統性地評估企業本身能力，在資源有限情況下達到改善品質之目的。

傳統 QFD 法根據經驗尋求目標值，容易主觀判斷使工程特性難以達到最佳化，模糊理論以區間值反映人類思維模糊性，幫助不同外在環境下選擇目標定位。根據 Mohammad and Mohsen^[45] 指出，許多研究實例表明，模糊品質機能展開法 (FQFD) 應用在決策選擇上，具有相當有效且可靠。本文採用 FQFD 依序執行步驟如下：(1) 根據文獻回顧與業界專家訪談結果，建立服務品質需求構面 (品質屋左牆)。(2) 評估專家問卷統計結果，獲得需求品質的標準化權重 (品質屋右牆)。(3) 彙整營運部門對服務品質需求構面各指標研擬的改善技術，構建服務品質技術構面 (品質屋天花板)。(4) 利用模糊法整合專家評估值，去模糊化後建立需求技術關係矩陣 (品質屋房間)。(5) 將需求技術關係矩陣各項次與相對應的需求品質之標準化權重相乘後，獲悉各項品質技術的相對權重，亦即執行重要度之順序 (品質屋底部)。

四、實證分析與討論

本節針對散裝船能源效率需求構面與服務品質技術構面的構建、問卷發放與回收加以說明，彙整受評估船舶差異性進行分析與討論。

4.1 散裝船能源效率需求構面

依散裝航運產業特性與結構進行調查，將市場需求與船舶特性關鍵影響因素納入以構建需求構面，使散裝船能源效率管理與日常營運結合。散裝船能源效率需求構面及其內涵說明，如表 1 所示。

表 1 船舶設備可靠性原為適航性 (Seaworthiness) 考量，因適航性涵義廣泛，除船舶本體及設備須處安全狀態；根據 Kassem^[53] 研究指出，還須確保船員適任性、燃料充足性及裝載貨物適宜性 (Cargo-worthiness) 等，使特定船舶能於特定水域安全航行，並完成約

定貨物之運輸，為避免與其他指標相關性過高影響評估而作成。

表 1 散裝船能源效率需求構面及其內涵說明

需求構面	需求構面內涵	資料來源
減少能源之消耗	能量消耗主要分布在推進系統、電力系統、熱源系統和使用一次能源之裝置。檢討船上電力設施可提高能源效率，掌控優化電力系統可提高安全性並降低油耗	IMO ^[36] ；中國船級社 ^[46] ；Radan ^[47]
航行時間之優化	改善航次計畫有助於獲得最佳航行路徑，以及增進能源效率。航次優化不但可以提高船舶能源效率，亦可減少航運產業整體的溫室氣體排放	IMO ^[36] ；Lu 等人 ^[10]
提升貨物承載率	提高貨物承載率可降低每噸貨物的燃料成本。相同油耗量下，貨物承載率愈高，EEOI 值愈小；於航運市場需求不變下，航運產業整體碳排放量可減少	Class ABS ^[20] ；IMO ^[48]
船舶推進之效率	船、機、槳匹配優化可提高推進效率。改善螺槳進水可減少油耗。推進效率影響油耗甚鉅，即使 30 μ m 螺旋槳葉片粗度差異致 6%油耗差異。未來碳排放交易基礎，經濟和環境壓力將促進推進效率改善技術應用	IMO ^[36] ；中國船級社 ^[46] ；Class ABS ^[20] ；Molland 等人 ^[49]
降低船舶之阻力	降低船殼阻力是體現船舶節能的主要方式之一。良好的船底表面保養可省下相當可觀的燃料成本。即使特殊省油塗料與一般防污塗料之配套價差達數萬美金，仍然受到業界廣泛採用	Class ABS ^[20] ；Molland 等人 ^[49]
人員能力與素質	訓練船員節能意識可節省燃料達 10%，對資源有限小型航運公司特別重要。儘管當前有大量研究可用於提高航運能源效率，但節能措施成效往往受到人為因素影響而無法達到預期	Adland 等人 ^[50] ；Kitada ^[51]
測量計算精確度	為評估競爭性節能措施或精準比較船舶整體能效，測量計算精確度是不可或缺。計算過程小偏差會放大反映在營運成本上，因此計算精確度對決策至關重要，特別在當前航運利潤微薄環境下	Bialystocki and Konovessis ^[9] ；Class ABS ^[20]
船舶設備可靠性	定期保養與機況監測可以使船舶設備維持在良好狀態下運行，在改善船舶能源效率之同時，亦提升了船舶航行安全性	IMO ^[36] ；業界專家訪談
船期的準確程度	與港口保持良好聯繫，獲悉碼頭船席有利採取最適航速減少燃料消耗。以論程傭船營運，無法於期限內到達港口將造成裝卸延遲須付延滯費。準確船期不僅改善船舶能效，亦可提升港口與銜接鐵路公路服務效率	IMO ^[36] ；Class ABS ^[20] ；Ballou ^[52]

4.2 服務品質技術構面

透過歷史文獻回顧及業界專家訪談，從服務提供者角度，彙整一般散裝航運公司營運部門針對改善船舶能源效率相關之技術共 30 項，以構建服務品質技術構面，如表 2 所示。

表 2 服務品質技術構面

船舶能源效率改善技術構面（服務品質技術構面）	船上作業部門	構面內涵	資料來源
		根據洋流、季風、海況規劃最佳航線，而非地理位置最短航程	Lu 等人 ^[10] ；Ishsan 等人 ^[54] ，Zaccone and Figari ^[55] ；IMO ^[36]
		根據海況及天候調整主機輸出功率	Sun 等人 ^[56]
		根據預期到港時間調整船速	Zaccone and Figari ^[55] ；IMO ^[36]
		考量天候海況，調整船舶至螺旋槳完全浸沒水中的最小安全吃水	Shaw and Tzu ^[57] ；IMO ^[36]
		裝貨時能盡量排空壓艙水，增加裝貨量	Zhao 等人 ^[58]
		降低非必要之船舶常數，如淡水、垃圾、貨物殘餘、污水水、庫存破舊機件、器材、物料等	Zhao 等人 ^[58]
		節約非必要電力消耗	Fotis 等人 ^[59] ；IMO ^[36]
		每航次檢查船殼及螺旋槳是否有海生物附著污染	Zhao 等人 ^[58] ；Owen 等人 ^[60]
		調整船舶俯仰差至最佳化	Tu 等人 ^[61] ；Vigna 等人 ^[62] ；IMO ^[36]
		根據船舶設備保養計畫落實維修保養工作	Zhao 等人 ^[58] ；IMO ^[36]
		加熱蒸汽消耗量的控管	Jin and Yang ^[63]
	船務海技部門	定期宣導正確的節能觀念，強化船員節能意識	Zhao 等人 ^[58]
		透過在岸培訓加強船員專業能力	Zhao 等人 ^[58]
		建立並蒐集歷史資料，實施年度評鑑及獎勵辦法	業界專家訪談
		將船舶節能成效列入船員考核標準	業界專家訪談
		落實船員仲介公司考評制度，從源頭確保派遣船員整體質量	業界專家訪談
		針對船舶節能措施制訂標準作業流程	Zhao 等人 ^[58]
	運務業務部門	經濟速率航行	Lu and Li ^[64] ；Ishsan 等人 ^[54]
		使用資訊平台隨時掌握船隊動態	張曦與李大屹 ^[33]
		根據運務選擇最適船型	業界專家訪談
		提升船舶調配能力，減少空放航程	IMO ^[36] ；業界專家訪談
		維持適當燃油存量，增加裝貨量	Lu and Li ^[64]
		船體及螺旋槳附著海生物時，立即安排清除作業	Zhao 等人 ^[58] ；IMO ^[36]
		提供氣象導航服務	Perera and Soares ^[65] ；IMO ^[36]
	工務補給部門	縮短訪船間隔，查核船舶設備運轉情況	業界專家訪談
		確保船舶塢修時外板塗裝的施工品質	Göler and Erdoğan ^[66] ；Zhao 等人 ^[58] ；IMO ^[36]
		船殼外板採用低阻力油漆	Göler and Erdoğan ^[66] ；Yeginbayeva and Atlar ^[67]
		利用專家診斷系統追蹤改善引擎效能	業界專家訪談
		測量設備與儀器的定期保養與檢查校正	張曦與李大屹 ^[33] ；業界專家訪談
		加裝節能裝置	IMO ^[36]

由表 2 可知，有關服務品質技術構面，乃由散裝航運公司相關部門，針對船舶能源效率需求指標所擬訂之改善技術所構建，技術項目內容可因應公司經營船舶特性與營運模式之差異作調整，以提供決策者更為精準之策略選項。

4.3 問卷發放與回收統計

透過當面訪談及電子郵件，本文問卷發放對象包含臺灣、日本、新加坡、中國、香港等地，從事散裝航運高階經理人，含船東、船舶管理及傭船人公司的部門主管。根據鍾政棋等人^[68-69]、陳永順與王旭堂^[70]、Cullinane^[71]等人指出，論時傭船 (Time charters, T/C) 係指船東與傭船人約定期間，為傭船人提供船舶與船員，並透過提供貨物運送服務來向傭船人收取租金；於論時傭船期間，在船東同意情況下，傭船人有權將船舶再轉租給再傭船人 (Subcharterers)，利用傭船鏈方式經營，賺取租金差額收益。論程傭船 (Voyage charters, V/C) 則是指船東與傭船人以「貨物」為中心，透過傭船經紀人商定傭船契約，在約定的港口或地點間，遵守運送契約的約定條件，船東以船舶完成貨物運送之任務，傭船人則依載貨證券貨物數量支付運費給船東。不同傭船營運模式，其法律性質及營運特性有明顯差異。大型散裝船舶經濟效益高，卻易受船舶吃水與裝載貨物種類限制，必須停靠少數特定碼頭；小型散裝船舶可裝載貨物種類具多樣性，為因應各類型之運務需求，能源消耗變項也多，營運上相對靈活；同時依中國船級社^[46]可知，主機、發電機、鍋爐等能源消耗占比會因船型而有較大差異。

除整體分析外，本文又依傭船模式區分「論時傭船 (T/C) 營運為主、論程傭船 (V/C) 營運為主」；船型大小區分「海岬型船 (Capesize) 與巴拿馬極限型船 (Panamax) 歸類為大型船舶，超輕便極限型船 (Supramax) 與輕便型船 (Handysize) 歸類為小型船舶」進行分群分析，以了解不同屬性群體的認知差異。有關散裝船能源效率專家問卷發放與回收情形，如表 3 所示。

表 3 散裝船能源效率專家問卷發放與回收情形

問卷調查			發放份數	回收份數	有效份數	有效回收%
分 群 分 析	傭船 模式	以 T/C 營運為主	22	21	19	86.36
		以 V/C 營運為主	18	17	13	72.22
	船型 大小	以大型船舶為主	16	16	15	93.75
		以小型船舶為主	24	22	17	70.83
整體分析			40	38	32	80.00

由表 3 可知，經分群分析結果，傭船模式以 T/C 營運為主有 19 份，以 V/C 營運為主有 13 份；船型大小以大型船舶為主有 15 份，以小型船舶為主有 17 份。整體分析結果顯示，共發放 40 份問卷，回收 38 份，有效份數 32 份，有效回收率占 80%。此回收率在社

會科學問卷中普遍較高，可在相關後續資料分析結果中呈現相關解釋。

4.4 重要度績效分佈情形

問卷調查統計結果，受評散裝船能源效率指標之重要度績效分佈，如圖 2 所示。

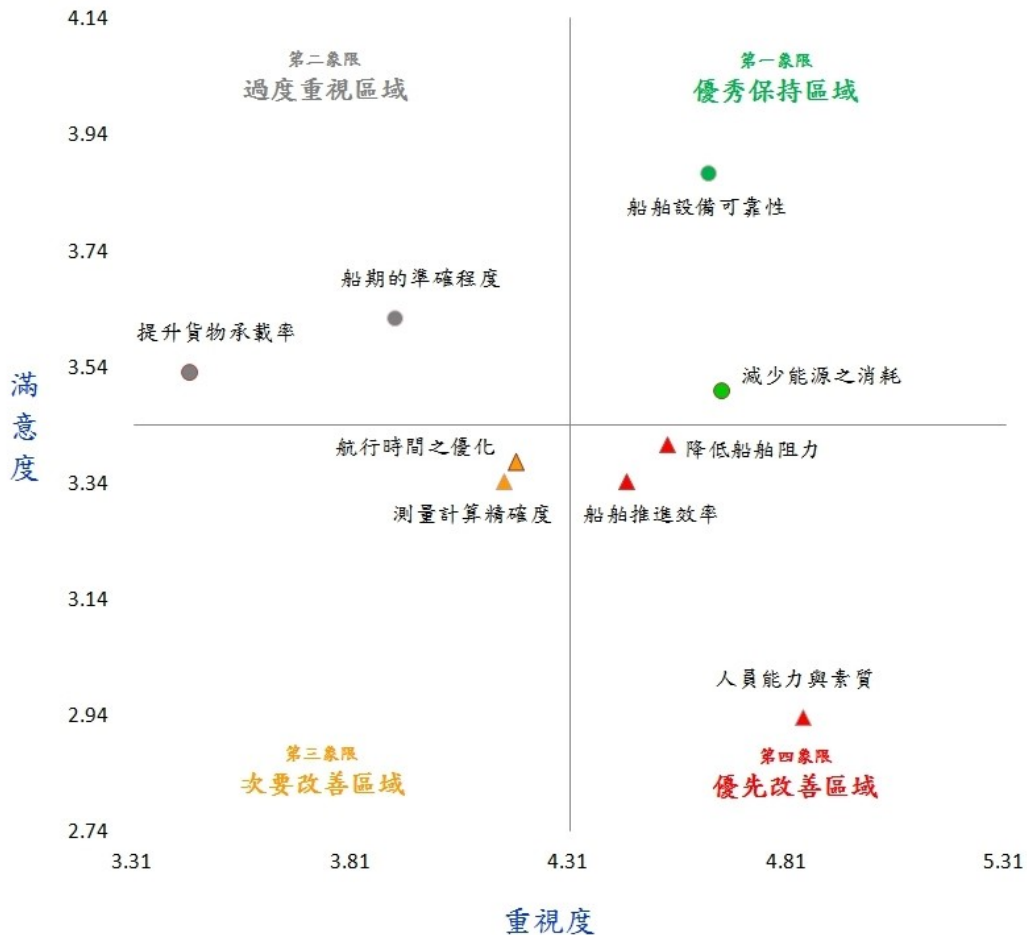


圖 2 受評散裝船能源效率指標之重要度績效分佈

由圖 2 可知，在受評船隊 9 項品質需求指標中，平均重視度為 4.31，平均滿意度為 3.44。評估者普遍對「人員能力與素質、船舶推進之效率、降低船舶之阻力」3 項指標重視度較高而滿意度較低，應優先投入資源並採取措施改善。「船舶設備可靠性、減少能源之消耗」2 項指標受到普遍重視，且滿意度較高，在整體環境中具有競爭優勢，應予以繼續保持。「航行時間之優化、測量計算精確度」位於次要改善區域，受重視程度較低，且滿意度也低，當資源遊刃有餘時可進行改善。「船期的準確程度、提升貨物承載率」由於受重視度

較低，即使受評船舶表現優秀卻不易影響整體滿意度，因此無須投入過多資源在此 2 項指標上。

「提升貨物承載率、船期的準確程度」2 項指標普遍受重視度不高，深入訪談主因依 IMO^[48] 研究，貨物承載量雖為散裝船 *EEOI* 構成要素，卻經常受港口吃水、生產速率與庫存、航運市場景氣、航行路徑及運河、貨物銷售規模、裝載貨物特性等條件限制，因此在能源效率改善過程中往往並非主要考量因素。船期的準確程度因天候海況非人力可控範疇，散裝運輸過程受各方不同營利目的影響較大；以港口調度而言，港埠經營者以港口作業效率為先，船舶經營者則以營利為先，哪裡可賺取有利運費，船舶就調配前往，一旦推算船期受候裝期限 (Laycan) 限制，便要求船長加俾趕往。

4.5 標準化權重與分群分析結果

4.5.1 標準化權重

標準化權重乃需求指標的原始權重除以原始優先權總和之值。其中，原始優先權為重視度與滿意度排序差值 (差異指數) 排序，原始權重則為原始優先權之逆向排序。透過重視度與滿意度之調查結果，將各項能源效率指標之得分平均值轉換後由大到小加以排名，並彙整出能源效率指標之標準化權重，如表 4 所示。

表 4 能源效率指標之標準化權重

能源效率指標	整體分析	依傭船模式分群		依船型大小分群	
		T/C 船舶	V/C 船舶	大型船舶	小型船舶
減少能源之消耗	0.0667	0.0889	0.1778	0.0667	0.1778
航行時間之優化	0.0889	0.0444	0.1333	0.1333	0.0667
提升貨物承載率	0.0222	0.0222	0.0444	0.0222	0.0444
船舶推進之效率	0.1556	0.1778	0.1556	0.1111	0.1556
降低船舶之阻力	0.1111	0.1556	0.0889	0.1778	0.1333
人員能力與素質	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
測量計算精確度	0.1333	0.1333	0.1111	0.1556	0.1111
船舶設備可靠性	0.0667	0.1111	0.0667	0.0889	0.0889
船期的準確程度	0.0444	0.0667	0.0222	0.0444	0.0222

將各項能源效率需求指標之平均得分轉換為標準化權重後發現，無論在整體分析或分群分析，「人員能力與素質」之權重皆為最高。經調查顯示，受訪船舶中多數聘僱中國籍船員，近年中國沿海經濟發展迅速，所得水平大幅提高，對居住沿海城市的船員而言，船

上薪資待遇已不如過往般之吸引力，許多經驗豐富的資深普通船員返鄉轉業特別嚴重。而中國籍船員上船工作透過仲介公司管束與派遣，仲介公司實際上才是船員心中真正的「公司」，一旦航運公司約束力與待遇吸引力不足時，難以確保船舶營運第一線工作人員素質。

4.5.2 依傭船模式分群分析結果

散裝船在 T/C 與 V/C 營運特性與法律性質不同，經 IPA 分析調查得知主要差異和原因如下。

1. 「航行時間之優化」：T/C 營運船舶收入為租金，燃料成本由傭船人負擔；V/C 營運船舶收入為運費，燃料成本由船東負擔。V/C 營運船舶管理者普遍希望藉「航行時間之優化」減少燃料與時間成本，反映受評船舶所屬公司以市場地位與成本考量，同時證明船舶能源效率受到各方營利目的之影響。
2. 「船舶設備可靠性」：航運市場持續低迷時，締結中長期 T/C 契約之傭船人，勢必面臨高租金壓力，船舶設備發生故障，傭船人較可能藉機解約，以規避鉅額租金損失。為避免此類情事發生，設備可靠性應受船東管理者高度重視。
3. 「降低船舶之阻力」：散裝船於 T/C 契約營運期間，船東與傭船人會約定承租船舶油耗與船速，當航行阻力過大而無法達雙方約定水平時，傭船人會向船東求償額外時間及燃料成本損失；如何降低船舶之阻力應受管理者格外重視。

4.5.3 依船型大小分群分析結果

鑒於船舶設備初級能源消耗比例，在船型大小不同時有明顯差異，經 IPA 分析調查得知主要差異及原因如下。

1. 「降低船舶之阻力」：大型船舶船殼面積大，需裝設輸出馬力大引擎，才能提供充足推進動力，維持航行速率與安全操縱性能；主機燃料消耗比例會隨船型增大而變得更高。
2. 「減少能源之消耗」：大型散裝船裝載貨物具有集中性，以鐵礦砂及煤礦為主，航行路線較單純，以岸上機具裝卸。小型散裝船航行路線與裝卸貨物具有多樣性，多自攜甲板起重機具進行裝卸，以符合偏遠港口或錨地裝卸的運務需求；航行狹窄水道時，設有船艏側推裝置以提高低速航行的安全操縱性能。小型船舶影響能源消耗變項遠較大型船舶多，普遍被認為仍有改善空間。

4.6 模糊品質機能展開結果

採用模糊品質機能展開法 (FQFD)，對船舶能源效率需求指標和改善技術間的相關度進行模糊分析，去模糊化後可求得兩構面間之相關矩陣，再將矩陣中各項改善技術之值乘上標準化權重後，改善技術於需求指標之總和即為絕對權重。各項改善技術絕對權重轉化為百分比相對權重後，將數值由大至小排序，即可獲悉能源效率改善技術之執行重要度排序，如表 5 所示。

表 5 能源效率改善技術之執行重要度排序

能源效率改善技術		相對 權重	排序
船上作業部門	根據洋流、季風、海況規劃最佳航線，而非地理位置最短航程	4.16	1
	根據海況及天候調整主機輸出功率	3.90	2
	根據預期到港時間調整船速	3.32	17
	考量天候海況，調整船舶至螺旋槳完全浸沒水中的最小安全吃水	3.64	7
	裝貨時能盡量排空壓艙水，增加裝貨量	3.00	25
	降低非必要之船舶常數，如淡水、垃圾、貨物殘餘、污水水、庫存破舊機件、器材、物料等	3.06	23
	節約非必要電力消耗	3.09	22
	每航次檢查船殼及螺旋槳是否有海生物附著污染	3.75	4
	調整船舶俯仰差至最佳化	3.86	3
	根據船舶設備保養計畫落實維修保養工作	3.27	18
	加熱蒸汽消耗量的控管	2.64	29
船務海技部門	定期宣導正確的節能觀念，強化船員節能意識	3.21	19
	透過在岸培訓加強船員專業能力	3.73	5
	建立並蒐集歷史資料，實施年度評鑑及獎勵辦法	3.42	15
	將船舶節能成效列入船員考核標準	3.10	21
	落實船員仲介公司考評制度，從源頭確保派遣船員整體質量	3.61	12
	針對船舶節能措施制訂標準作業流程	3.66	6
運務業務部門	經濟速率航行	2.66	28
	使用資訊平台隨時掌握船隊動態	2.86	26
	根據運務選擇最適船型	2.72	27
	提升船舶調配能力，減少空放航程	2.39	30
	維持適當燃油存量，增加裝貨量	3.12	20
	船體及螺旋槳附著海生物時，立即安排清除作業	3.62	10
	提供氣象導航服務	3.49	13
工務補給部門	縮短訪船間隔，查核船舶設備運轉情況	3.02	24
	確保船舶塢修時外板塗裝的施工品質	3.63	9
	船殼外板採用低阻力油漆	3.49	14
	利用專家診斷系統追蹤改善引擎效能	3.62	11
	測量設備與儀器的定期保養與檢查校正	3.64	8
	加裝節能裝置	3.34	16

4.7 綜合討論

本文彙整受評船舶在整體分析與分群分析情況，各項能源效率改善技術的執行重要度排序差異，如表 6 所示。

表 6 各項能源效率改善技術的執行重要度排序差異

能源效率改善技術		整體分析	分群分析			
			備船模式		船型大小	
			T/C 船舶	V/C 船舶	大型 船舶	小型 船舶
船上作業部門	依洋流、季風、海況規劃最佳航線非地理最短航程	1	4	1	1	1
	根據海況及天候調整主機輸出功率	2	2	5	6	2
	根據預期到港時間調整船速	17	16	21	10	23
	考量天候海況，調整螺旋槳浸沒水中最小安全吃水	7	10	6	12	8
	裝貨時能盡量排空壓艙水，增加裝貨量	25	21	27	23	24
	降低非必要船舶常數，如淡水、垃圾、貨物殘餘、污水、庫存破舊機件、器材、物料等	23	23	18	22	20
	節約非必要電力消耗	22	19	23	17	26
	每航次檢查船殼及螺旋槳是否有海生物附著污染	4	3	16	3	14
	調整船舶俯仰差至最佳化	3	1	14	2	11
	根據船舶設備保養計畫落實維修保養工作	18	17	22	19	21
	加熱蒸汽消耗量的控管	29	28	28	28	27
船務海技部門	定期宣導正確的節能觀念，強化船員節能意識	19	26	10	26	16
	透過在岸培訓加強船員專業能力	5	14	3	9	6
	建立並蒐集歷史資料，實施年度評鑑及獎勵辦法	15	22	11	18	13
	將船舶節能成效列入船員考核標準	21	24	19	25	18
	落實船員仲介考評制度，從源頭確保船員整體質量	12	20	8	16	12
	針對船舶節能措施制訂標準作業流程	6	13	2	11	3
運務業務部門	經濟速率航行	28	27	24	29	22
	使用資訊平台隨時掌握船隊動態	26	25	29	20	30
	根據運務選擇最適船型	27	29	25	27	25
	提升船舶調配能力，減少空放航程	30	30	26	30	29
	維持適當燃料存量，增加裝貨量	20	18	20	24	17
	船體及螺旋槳附著海生物時，立即安排清除作業	10	5	4	5	9
	提供氣象導航服務	13	11	17	7	19
工務補給部門	縮短訪船間隔，查核船舶設備運轉情況	24	15	30	15	28
	確保船舶塢修時外板塗裝的施工品質	9	8	7	8	7
	船殼外板採用低阻力油漆	14	6	9	4	10
	利用專家診斷系統追蹤改善引擎效能	11	7	13	21	4
	測量設備與儀器的定期保養與檢查校正	8	9	12	14	5
	加裝節能裝置	16	12	15	13	15

由於各家散裝航運公司經營模式與策略不同，如經營航線、平均使用船齡、船型、船員政策、管理體系等，都將造成船舶營運期間成本差異，由表 6 可知，省油效益高的改善技術排序未必優先，乃受整體營運現況評估結果影響。30 項能源效率改善技術中，「根據運務選擇最適船型、提升船舶調配能力減少空放航程、使用資訊平台隨時掌握船隊動態」等項目，由於受經營規模和備船模式之限制，對經營船舶數量較少或以 T/C 營運船舶較多之公司，在船舶能源改善過程中並無明顯助益，因而未受重視。

當前「船期的準確程度」指標未獲普遍重視，IMO^[36, 72-73]已意識到規範商業活動之困難性，著手研議現成船能源效率指數 (Energy Efficiency Existing Ship Index, *EEXI*)，對其營運進行控管，每艘船可選擇合適的節能措施，以達成強制性要求水平。市場上部分營運中船舶，或受能源消耗比例與市場長年低迷景氣影響，而偏向於再降低航速以符合 *EEXI* 要求，一旦船速普遍受限，不僅牽動整體航運市場運力供給，亦將使船期準確度受到更多重視。

多數船東對透過仲介公司管束與派遣外籍船員素質普遍感到憂心，專業能力可透過教育訓練予以加強，但人員素質需經長期潛移默化方見成效。若能致力於健全船上管理制度、提供合理福利待遇、營造良好工作與生活環境、重視船員長期表現，勢必能獲得改善；至於如何尋求船員成本與服務品質之平衡點，成為船東重要研究課題。

此外，依現有船舶節能技術發展情況下，Ouyang and Cheng^[74]提出船舶未來將以電力取代內燃機。但電力技術而言，短期內仍無法運用於大型、長程的國際航線船舶。因此，有關於船舶未來使用電力來取代燃油，未來將是一件非常值得探討的課題。

五、結論與建議

在市場景氣持續低迷時，散裝航運公司如何運用有限資源，針對船隊內部現況與外部市場環境擬訂有效改善能源效率措施至關重要，本文研究結論與建議如下。

5.1 結論

1. 國際環境議題抬頭之際，散裝航運公司如何運用資源，檢視船隊現況因應激烈競爭市場風險，由國內外文獻探討與問卷調查訪談 IPA 分析結果知悉，散裝船舶能源效率需求構面，主要包含「減少能源之消耗、航行時間之優化、提升貨物承載率、船舶推進之效率、降低船舶之阻力、人員能力與素質、測量計算精確度、船舶設備可靠性及船期的準確程度」。
2. 散裝船舶營運時船舶能源效率牽涉層面甚廣，當船舶油耗表現不符預期時，以往多半將原因歸咎於天候海況或船舶設備；然本文研究發現，有更多導致能源效率低落的因素來自於人員素質、航行安全考量和營運方面營利操作行為，不僅增加數據蒐集、訂立標準和排放監控上之難度，亦使整體過程存有許多不確定性。應用 FQFD 能妥善地處理此

難以數學模式構建、具有模糊性質的實務問題，並從研擬到落實各項能源效率改善技術之過程，為各職掌部門間提供一個相互交流理性溝通管道，能夠整合公司內部資源，兼顧市場地位，為決策者提供一個更全面的經營策略，長期改善船舶能源效率而避免節能流於形式。

3. 根據 Stopford^[75] 研究，燃料成本在航次成本占比可達 70%，維持良好船舶能源效率，有助於公司具備市場競爭優勢。船舶以論程傭船 (V/C) 或貨物長期運送契約方式營運，船東可因燃料成本降低獲得高航次淨收益；船舶以論時傭船 (T/C) 營運，傭船人樂見其成，船東有更多機會締結較佳傭船契約，賺取更高租金收益。根據方信雄^[76] 研究，散裝航運公司經營，若能提供較佳服務品質及滿意度，則更容易增加貨源與利潤；隨著貨載承運噸數成長，船舶能源效率改善所帶來的經濟效益愈發明顯。

5.2 建議

1. 當前科技資訊日新月異，各類船舶設備節能設計、營運模式與國際環保規範不斷推陳出新，散裝航運市場經營環境可謂是瞬息萬變，經營管理者宜定期召集權責部門滾動式檢討營運現況，因應經營環境需求擬訂新的改善技術，方能使營運策略與時俱進。掌握所屬船隊改善技術執行重要度順序後，對施行技術成本效益加以綜合評估，從中選取經濟效益較高的技術項目，以長期改善船舶能源效率，提升公司營運競爭力。
2. 近年來各種新法規、港口國管制檢查、特定港口及水域特殊規定對於造訪船舶之管束，導致在船工作之船員無論在體能或精神上皆面臨相當大負擔，若能透過修法要求船舶建造設計者，提供操作者更為明確簡便之操作資訊，如船舶吃水與最佳俯仰差對照表，或有助於船舶營運期間能源效率改善之成效。
3. 散裝航運經營形態多變，但終歸以營利為目的，船舶能源效率改善問題之於散裝航運產業，並非僅存於船舶載具之環節，實務上仍有許多滯礙難行之處有待解決。以論時傭船為例，船舶低速航行雖可大幅降低燃料消耗，但當主機長時間過低負荷運轉時，劣質燃油燃燒不良將導致船東的保養維修成本增加，突發性故障面臨離租之風險亦大幅增加，而省下的燃料成本卻為傭船人所享有。因此，在經營環境缺乏誘因前提下，即便未來輔以碳稅制度之施行，自由市場機制恐仍成為最大破口。在散裝航運市場整體運力需求不變情況，若能增設一體適用之調節機制，將可遏止碳洩漏發生在散裝航運產業，有助於改善全球碳排放總量。

參考文獻

1. World Trade Organization, *World Trade Statistical Review 2018*, Switzerland, 2018.
2. Organization for Economic Cooperation and Development, *Shipbuilding Market Developments Q2 2018*, France, 2018.

3. Clarksons, “Market Report Shipping and Offshore”, *Clarksons Platou*, London, 2018.
4. IMO, *2012 Guidelines on Survey and Certification of the Energy Efficiency Design Index (EEDI)*, Resolution MEPC.214(63), International Maritime Organization, 2012.
5. IMO, *2016 Guidelines for the Development of a Ship Energy Efficiency Plan (SEEMP)*, MEPC 70/18/Add.1, International Maritime Organization, 2016.
6. 劉伊凡、孫培廷、張躍文、張鵬，「船舶能效營運指數預測的建模及仿真分析」，*哈爾濱工程大學學報*，第 37 卷，第 8 期，民國 105 年，頁 1015-1021。
7. 嚴新平、李志雄、劉正林、楊平、朱漢華、楊忠民，「大型船舶推進系統與船體耦合動力學研究綜述」，*船舶力學*，第 17 卷，第 4 期，民國 102 年，頁 439-449。
8. Veenstra, A.W. and Ludema, M.W., “The Relationship between Design and Economic Performance of Ships”, *Maritime Policy and Management*, Vol. 33, Iss. 2, 2006, pp. 159-171.
9. Bialystocki, N. and Konovessis, D., “On the Estimation of Ship’s Fuel Consumption and Speed Curve: A Statistical Approach”, *Journal of Ocean Engineering and Science*, Vol. 1, Iss. 2, 2016, pp. 157-166.
10. Lu, R.H., Turan, O., Boulougouris, E., Banks, C., and Incecik, A., “A Semi-empirical Ship Operational Performance Prediction Model for Voyage Optimization towards Energy Efficient Shipping”, *Ocean Engineering B*, Vol. 110, 2015, pp. 18-28.
11. MAN Diesel and Turbo, **MAN B&W G70ME-C9-TII - Project Guide**, 1st Ed., Germany, 2013.
12. 孫台豐，「船舶柴油主機極低速航行省油效益之研究」，臺灣海洋大學商船研究所碩士論文，民國 102 年。
13. MAN Diesel and Turbo, *Basic Principles of Ship Propulsion*, Denmark, 2011.
14. Zhao, F.Y., Yang, W.M., Tan, W.W., Chou, S.K., and Yu, W.B., “An Overall Ship Propulsion Model for Fuel Efficiency Study”, *Energy Procedia*, Vol. 75, 2015, pp. 813-818.
15. 李國定，「船舶常數測定精度的研究」，*大連海事大學學報*，第 37 卷，第 2 期，2011 年，頁 9-20。
16. 黃雪忠、梁志強、楊威，「船舶常數的產生及修正措施的研究」，*江蘇船舶*，第 34 卷，第 3 期，2017 年，頁 38-40。
17. 財團法人中國驗船中心，「中國驗船中心電子報」，第 133 期，頁 1-15，<https://www.crclass.org/chinese/content/technical-information/news-summary/download/no133/index.html>，民國 103 年。
18. IMO, *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014*, London UK, 2014 Report, International Maritime Organization, 2015.
19. 吳偉國，「船舶低摩擦阻力塗料省油效益之研究」，臺灣海洋大學商船研究所碩士論文，民國 101 年。
20. Class ABS, “Ship Energy Efficiency Measures Advisory”, Houston, USA, 2013.
21. Hochkirch, K. and Bertram, V., “Options for Fuel Saving for Ships”, *Mare Forum 2010: Maritime Transportation of Energy*, Houston, USA, 2010.
22. Woud, H.K. and Stapersma, D., *Design of Propulsion and Electric Power Generation*

- Systems*, IMarEST Publication, London, 2003.
23. 彭斌, 「船舶節能技術綜述」, **艦船科學技術**, 第 27 卷, 增刊, 2005 年, 頁 3-30。
 24. Buhaug, Ø., Corbett, J.J., Endresen, Ø., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., Lee, D.S., Lee, D., Lindstad, H., Markowska, A.Z., Mjelde, A., Nelissen, D., Nilsen, J., Pålsson, C., Winebrake, J.J., Wu, W., and Yoshida, K., "Prevention of Air Pollution from Ships", Second IMO GHG Study 2009, *International Maritime Organization*, London, 2009.
 25. MAN Diesel and Turbo, *L28/32DF Project Guide - Marine*, Four-stroke GenSet Compliant with IMO Tier II, 2015.
 26. Abduljabbar, R., Dia, H., Liyanage, S., and Bagloee, S., "Applications of Artificial Intelligence in Transport: An Overview", *Sustainability*, Vol. 11, No. 1, 2019, pp. 189-199.
 27. 鄭信鴻, **蒸汽渦輪機**, 教育部出版, 臺北市, 民國 106 年。
 28. 中技社節能技術發展中心, **蒸汽鍋爐高效率作業技術手冊**, 臺北, 民國 89 年。
 29. U.S. Department of Energy, *Steam Pressure Reduction: Opportunities and Issues*, U.S. Department of Energy, Washington DC, 2005.
 30. Swagelok, *Steam System Thermal Cycle Efficiency - Part One*, Swagelok Energy Advisors, Inc., 2011.
 31. 日本國土交通省海事局, **2020 年 SOx 規制適合船用燃料油使用手引書**, 東京, 日本, 2019 年。
 32. Veritas, *Bunker Alert 35/2018*, Veritas Petroleum Services Group, Rotterdam, The Netherlands, 2018.
 33. 張曦、李大屹, 「船舶二氧化碳排放量計算的不確定性分析」, **艦船科學技術**, 第 40 卷, 第 11 期, 2018 年, 頁 52-54。
 34. Acomi, N. and Acomi, O.C., "Improving the Voyage Energy Efficiency by Using EEOI", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 138, No.14, 2014, pp. 531-536.
 35. Rehmatulla, N., Calleya, J., and Smith, T., "The Implementation of Technical Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Measures in Shipping", *Ocean Engineering*, Vol. 139, No.15, 2017, pp. 184-197.
 36. IMO, *Effective Date of Implementation of the Fuel Oil Standard in Regulation 14.1.3 of MARPOL Annex VI*, MEPC 70/18/Add.1, Annex 6, International Maritime Organization, 2016.
 37. Martilla, J.A. and James, J.C., "Importance-Performance Analysis", *Journal of Marketing*, Vol. 41, Iss. 1, 1977, pp. 77-79.
 38. Yang, C.C., "Establishment and Applications of the Integrated Model of Service Quality Measurement", *Managing Service Quality*, Vol. 13, No. 4, 2003, pp. 310-324.
 39. Zadeh, L.A., "Fuzzy Sets", *Information and Control*, Vol. 8, Iss. 3, 1965, pp. 338-353.
 40. Dubois, D. and Prade, H., "Operations on Fuzzy Numbers", *International Journal of Systems Science*, Vol. 9, Iss. 6, 1978, pp. 613-626.
 41. Tzeng, G.H. and Teng, J.Y., "Transportation Investment Project Selection with Fuzzy Multiobjectives", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 17, No. 2, 1993, pp. 91-112.

42. Vanegas, L.V. and Labib, A.W., “A Fuzzy Quality Function Deployment (FQFD) Model for Deriving Optimum Targets”, *International Journal of Production Research*, Vol. 39, Iss. 1, 2010, pp. 99-120.
43. Dube, L., Johnson, M.D., and Renaghan, L.M., “Adapting the QFD Approach to Extended Service Transactions”, *Production and Operations Management*, Vol. 8, Iss. 3, 2009, pp. 301-307.
44. Sullivan, L.P., “Quality Function Deployment”, *Quality Progress*, Vol. 19, Iss. 6, 1986, pp. 39-50.
45. Mohammad, A. and Moshssen, M., “Fuzzy Quality Function Deployment: An Analytical Literature Review”, *Journal of Industrial Engineering, Hindawi Publishing Corporation*, Vol. 2013, Article 682532.
46. 中國船級社，船舶能量消耗分布與節能指南，北京，中國，2014 年。
47. Radan, D., “Integrated Control of Marine Electrical Power Systems”, Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor, Dept. of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, Norwegian, 2008.
48. IMO, *Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)*, MEPC.1/Circ.684, International Maritime Organization, 2009.
49. Molland, A.F., Turnock, S.R., and Hudson, D.A., *Ship Resistance and Propulsion*, Cambridge University Press, USA, 2011.
50. Adland, R., Cariou, P., Jia, H., and Wolff, F.C., “The Energy Efficiency Effects of Periodic Ship Hull Cleaning”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 178, 2018, pp. 1-13.
51. Kitada, M., “Managing People and Technology: The Challenges in CSR and Energy Efficient Shipping”, *Research in Transportation Business and Management*, Vol. 17, 2015, pp. 36-40.
52. Ballou, P.J., “Ship Energy Efficiency Management Requires a Total Solution Approach”, *Marine Technology Society Journal*, Vol. 47, No. 1, 2013, pp. 83-95.
53. Kassem, A.H., “The Legal Aspects of Seaworthiness: Current Law and Development”, Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy of Law, University of Wales, UK, 2006.
54. Ishsan, M., Pradana, M.F., and Noche, B., “Estimation and Optimization of the Voyage Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) on Indonesian Sea Tollway Corridors”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 673, Broad Exposure to Science and Technology 2019, Aug. 7-8, 2019, Bali, Indonesia.
55. Zaccone, R. and Figari, M., “Energy Efficient Ship Voyage Planning by 3D Dynamic Programming”, *Journal of Ocean Technology*, Vol. 12, No. 4, 2017, pp. 49-71.
56. Sun, C., Wang, H., Liu, C., and Zhao, Y., “Dynamic Prediction and Optimization of Energy Efficiency Operational Index (EEOI) for an Operating Ship in Varying Environments”, *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 7, No. 11, 2019, Article 402.
57. Shaw, H.J. and Tzu, F.M., “The Strategy of Energy Saving for Smart Shipping”, *Advances in Technology Innovation*, Vol. 4, No. 3, 2019, pp. 165-176.
58. Zhao, G., Li, W., and Li, C., “Study on Accounting Methods of Ship Carbon Emission and Measures of Emission Reduction”, *Advances in Engineering Research*, Vol. 170, 7th

- International Conference on Energy and Environmental Protection, 2018, pp. 1449-1454.
59. Fotis, D.K., Amjad, A.M., and Josep, M.G., “Smart Shipboard Power System Operation and Management”, *Inventions*, Vol. 1, No. 4, 2016, pp. 1-14.
60. Owen, D., Demirel, Y.K., Oguz, E., Tezdogan, T., and Incecik, A., “Investigating the Effect of Biofouling on Propeller Characteristics Using CFD”, *Ocean Engineering*, Vol. 159, 2018, pp. 505-516.
61. Tu, T.N., Kraskowski, M., Chien, N.M., Anh, V.T., Luu, D.L., and Phuong, N.K., “Numerical Study on the Influence of Trim on Ship Resistance in Trim Optimization Process”, *Naval Engineers Journal*, Vol. 130, No. 4, 2018, pp. 133-142.
62. Vigna, V., Altosole, M., Figari, M., and Ferrati, A., “A Ship Energy Efficiency Analysis by Considering Trim Influence and Waste Recycling”, *Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies*, Vol. 3, 2019, pp. 316-324.
63. Jin, Z. and Yang, Y., “Analysis of Waste Heat Utilization of Ship Main Engine”, E3S Web of Conference 165, Article 06027, 2020.
64. Lu, C.Y. and Li, W., “Study on EEOI Influencing Factors of Large Bulk Carrier”, *Advances in Engineering Research*, Vol.170, 2018, pp.1486-1490.
65. Perera, L.P. and Soares, C.G., “Weather Routing and Safe Ship Handling in the Future of Shipping”, *Ocean Engineering*, Vol. 130, 2017, pp. 684-695.
66. Göler, H. and Erdoğan, O., “Increasing Operational Efficiency of High Speed Ro-Ro Vessels via New Hull Coating Technologies”, 18th Annual General Assembly of the International Association of Maritime Universities, Vol. 1, and *Global Perspectives in MET: Towards Sustainable, Green and Integrated Maritime Transport*, 2017, pp. 319-329.
67. Yeginbayeva, I.A. and Atlar, M., “An Experimental Investigation into the Surface and Hydrodynamic Characteristics of Marine Coating with Mimicked Hull Roughness Ranges”, *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, Vol. 34, Iss. 9, 2018. pp. 1001-1019.
68. 鍾政棋、黃承傳，「散裝船傭船鏈經營形態之分析」，*運輸學刊*，第15卷，第1期，民國92年，頁99-113。
69. 鍾政棋，「我國散裝航運公司船舶設籍與營運績效之分析」，交通大學交通運輸研究所博士論文，民國93年。
70. 陳永順、王旭堂，「國際乾散貨航運市場報酬時變動差實證研究」，*航運季刊*，第13卷，第1期，民國93年，頁1-17。
71. Cullinane, K., “A Portfolio Analysis of Market Investments in Dry Bulk Shipping”, *Transportation Research B :Methodological*, Vol. 29, Iss. 3, 1995, pp. 181-200.
72. IMO, *Reduction of GHG Emissions from Ships - Energy Efficiency Improvement Measure for Existing Ships*, MEPC 74th Session, Agenda Item 7, Submitted by Japan, International Maritime Organization, 2019.
73. IMO, *Further Consideration of Concrete Proposals to Improve the Operational Energy Efficiency of Existing Ships, with a View to Developing Draft Amendments to Chapter 4 of MARPOL Annex VI and Associated Guidelines, As Appropriate*, MEPC.74, 7th Session, Agenda Item 2, International Maritime Organization, 2020.
74. Ouyang K. and Cheng, H.H., “Guidelines of an Unmanned Autonomous Vessel for

Seaworthiness”, *The International Journal of Organizational Innovation*, Vol. 12, No. 2, 2019, pp. 155-166.

75. Stopford, M., *Maritime Economics*, 3rd Ed., Routledge, London, 2009.

76. 方信雄，「散裝航運經營關鍵成功因素與經營績效之研究—以我國散裝國輪公司為例」，臺灣海洋大學航運管理研究所碩士論文，民國 93 年。

