

# 船用混油與劣質重油燃燒之數值分析

周皓平\*<sup>1</sup> 鄭宗呈\* 林瑞國\*\*

\*國立臺灣海洋大學 輪機工程學系, 研究生  
\*\*國立臺灣海洋大學 輪機工程學系, 助理教授

關鍵詞：淨油機、流體力學、數值模擬、碳排放、混油

## 摘要

隨著新冠後疫情時代來臨，國際航運需求仍有增無減，而多數航運燃油倚賴重油作為主要能源，重油黏稠性及低溫固化問題，及劣質燃油中可能含鐵鏽、水、金屬碎片及固體顆粒等等，使噴油器及燃油系統效能降低，影響船舶產生機械故障等安全性隱憂，而淨油機作為廣泛應用於航運工業領域，確保引擎運作及燃燒效率優化等功能，藉此探討並滿足航運之需求。

本研究係依據流體力學計算方法於淨油機燃油混油與劣質燃油導致船舶之影響，進行數值模擬分析，淨油機透過旋轉產生離心力來保證油品純淨度，效能與參數設定等密不可分，淨油機正確操作上參數設定，可延長引擎壽命減少機械磨耗，確保油水分離避免水氣進入引擎本體，減少未來設備之維護成本下，且提高燃油效率減少碳排放危害氣體等環保議題迫於眉睫，藉以模擬可長期觀察劣質油品及混油對於主機之影響，未來設計更有效率淨油機等予航運相關產業參考。

## 前言

交通普遍發達地現代社會，若考慮其性價比航運仍然是有不可取代性，而倚賴重油作為能源的航運產業，由原油提煉經常壓蒸餾及真空蒸餾後可得重油，而重油較一般燃油有更高密度及黏稠性，在輸儲及使用過程中以往需加熱使用，且在燃燒過程中較易產生汙染及相對高的含硫量，複雜成份須更特殊處理及控制，依據國際海事組織(IMO)對船舶燃油之含硫規定下，在西元 2016 年訂定於 2020 年 1 月 1 日強制船舶用油含硫量上限降為 0.5%，目的為了控制氮氧化物及顆粒物排放，改善沿海區域及環境空氣品質外，推動綠色航運使用低硫燃料油不僅落實減碳對於環保法規落實，且對於引擎主機金屬件產生腐蝕現象也能減少，含硫量過多以及雜質引起的燃燒不完全，也容易產生沉積物及鏽垢，阻塞燃油系統管道與過濾器噴嘴等等.....然而依據船舶對於燃料需求，除前端石化工廠提高脫硫品質外，後續處理安裝脫硫設備也能適當處理高硫問題，而燃料油混摻可能會造成相容問題，沉積物沉積油槽、堵塞濾網，相容性問題通常發生於重質燃油和直餾燃料混合，因而在外部條件無法改變下淨油機操作過濾後，供給於船舶主機使用就顯得格外重要。

混油及使用劣質重油容易產生燃燒效能不良，比方主機與發電機運轉功率損失及不穩定性提高，引擎燃燒室內部碳垢沉積物增加，甚至無法啟動，產生爆震[1]，國際航線無可避免，靠港補充燃油依

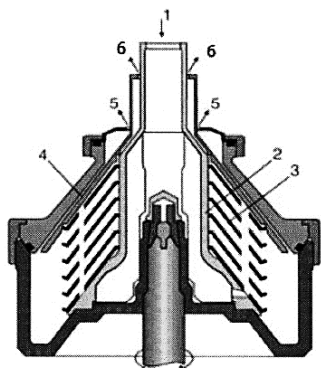
各國生產不同燃油產生的混油問題，增加相對設備維護成本，整體系統需更頻繁檢修相關設備，避免此問題發生，淨油機的使用顯得格外重要，淨油機在船舶上理所當然是重要設備，內部構造複雜日常使用上無法輕易觀測內部情形，通常以震動噪音判別故障與否，淨油原理主要分為重力分離與離心分離法，重力分離法顧名思義因相差及密度差分別出油料中灰塵顆粒，離心分離法更具效力，但由於離心產生動能使用時更加得注意非預期震動，定期收集淨油機狀態監測保持正常機械數據，包含潤滑油溫度、震動特徵、汙染物，有助於判斷機械正常與否。



圖 1. 離心分油器(圖片來源: [2])

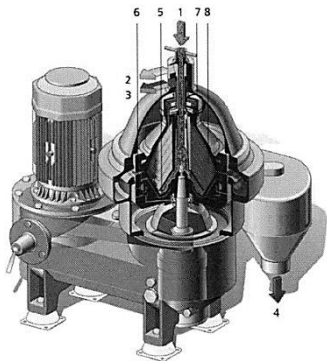
圖 2 為 Alfa-Laval 公司設計的 BDB-104 型碟式分離機轉鼓部件的結構簡圖。

<sup>1</sup> 聯絡作者 周皓平 ([rorty0831@gmail.com](mailto:rorty0831@gmail.com))



(1)油進口 (2)分配器 (3)碟片組 (4)頂層碟片 (5)重相出口 (6)輕相出口  
圖 2. Alfa-Laval 公司 BDB 104 型碟式分離機 (\*資料來源：原廠說明書)

圖 3 為德國 GEA Westfalia 公司設計的 OSD 30-01-0.7 型碟式分離機[19]。該離心機有自清理功能，分離機分離處的固體在固相空間儲存到一定程度後會被排出。整個過程轉鼓做 8,200rpm 的高速旋轉。用於被分離的油品密度最大可至 1,050kg/m<sup>3</sup>，固體顆粒密度最大可至 1,400kg/m<sup>3</sup>。該設備可以將 5~109μm 顆粒粒徑內的水滴從油相中分離開，另外還能應對油井生命週期中水相成分變化的分離條件。



(1)油進口 (2)輕相流體出口 (3)重相流體出口 (4)排渣出口 (5)操作水進口  
(6)操作水出口 (7)雙離心泵 (8)固相存儲空間  
圖 3. GEA Westfalia 公司 OSD 35-01-0.7 型淨油機 (\*資料來源：原廠說明書)

以臺灣現行法規而言，年滿五年之汽機車須定期檢驗有害氣體排放，如同海洋法規法規，船舶設備維護內含淨油機系統，影響燃燒效率及環保議題一直是難以拿捏的界線，船用淨油機對於燃燒效率有著密不可分的直接關係，淨油機構造複雜將重油分離雜質後純淨度與否，無法直接肉眼觀察內部流場情形，因此本文探討使用流體力學計算 (Computational Fluid Dynamics) 對此結構內流場情形及運轉中情況進行分析，以此達到效率最佳化，首要建立幾何模型後，設定邊界條件及計算後處理，依據設定進行優化改善流場分佈進而提供有效之工

程精進，利用 Ansys Fluent® 軟件進行數值模擬後計算淨油機分離後油水兩相地分離介面。

## 文獻回顧

輪機人員對於船體設備，對於操作及維護層面有必要一定培訓及專業背景，然而淨油機維護不周情形大致與不熟悉機械、時間緊迫及人員專業度不夠為主[3]，重油可能含有催化粉末，雜質等催化物等等超越一定含量時，形成燃燒不完全及燃燒效率差，摩擦燃油噴嘴進油泵相關設施，也因淨油機若非配置監測裝置，操作人員若未多加留意，且離心淨油器因產生較大離心力，錯誤的操作下可能對人體產生危險。

淨油機為過濾細粒雜質經過濾器孔徑的縮小可能造成內部循環因流體壓力過小，造成後續衍生性問題，透過 CFD 軟體研究燃料流體混合灰塵及雜質，可確定是離心淨油機流體速度越快情況下，通常伴隨著更好的過濾效果[4]，如今淨油機當然是趨近於成熟之工業產品，廣泛使用在船舶、發電廠及航空業，但隨時代演進如位於臺灣基隆中山區唯一的燃油發電廠，就是以燃燒重油來發電，以鄰近台灣中油股份有限公司經長途管線輸送至發電廠來燃燒發電，油管也因老舊汰換等問題或多或少影響油料品質，重油發電引發環評問題也迎來時代汰換，將來油品品質提升或替代能源轉型，淨油機的使用或許會成歷史，科技未有突破性進展前，利用軟體分析改進過濾效果還是相對重要的。

John Gorman 等[5]在概述 CFD 建模時比較不同方程式與最終結果，除層流等問題較簡單流體現象外，其他流體似乎都無精確計算軟體能完整計算湍流現象，進入三維空間下的黏稠流體計算相對複雜，以 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) 扮演核心作用 S. Rajendran [6]用 ANSYS-CFX 計算離心泵內部情形，在研究中 CFX 軟體可預期內部流動，離心泵作為旋轉而傳遞流體之機械，與淨油機作用原理相似，在該篇研究中隨著葉片角度的不同，以及內部流場壓力分佈等計算數學模組，設計參數的變化模擬流體在內部壓力分佈，因而設計出相關配置供給未來設計離心泵作為依據，在節能減碳的前提下未來數值模擬分析能更有效率研發相對應之工商業產品，而[7]研究中對於燃油雜質未經完整過濾，對引擎之傷害等，離心機高轉速使雜質分離之過程撞擊離心機內殼，也使用 ANSYS 軟體進行流體分析，添加額外設備來延長機械壽命，得此結論在現代科學精進下軟體分析結構，能有效找出讓機械損害原因藉此優化設備。

燃油大略由碳氫化合物組成，離心機分離雜質過濾的行為不只在工業上普遍使用，也廣泛用於生物醫學，用於生物醫療上可想而知其複雜性更勝分

離燃油雜質等過程，在[8]研究中也提及使用離心機搭配模擬軟體代入模型中，可準確且得到實證，透過旋轉轉速搭配參數設定不同，觀察該細胞進入分離機後反饋情形，在上文結果表示在離心機模擬高轉速後的過程，較低轉速容易造成更多的細胞損傷狀況發生，藉此反思如概念引用至離心機分離燃油過程，是否造成相同情形，如離心機過濾功能不佳或產生油品劣質化等，在多篇引文下可一步步印證 CFD 軟體模擬分離機運動過程是有其正確性，可倚賴作用於旋轉機械模擬使用。

## 數值模式

### 轉鼓的結構

根據離心機原理結構和機械設計原理，對離心機中最重要的轉鼓部件進行了計算設計，包括對碟片、中軸、支撐套筒、托盤、離心筒等零件的設計與校核。轉鼓的工作原理如下：

- (1).首先，高速馬達通過皮帶帶動旋轉軸上的帶輪轉動，則整個旋轉軸開始運動，此時卡在軸上的幾十層碟片也將伴隨其作同步旋轉運動，整個轉鼓內部會產生較大的負壓；緊接著，含有固體顆粒等雜質的混合液壓油將通過托盤內部的油路通道進入轉鼓內部，而進入轉鼓內的油液是不斷增加的，故碟片間隙始終充滿液壓油；
- (2).再來，轉鼓內部特別是碟片間的液壓油，會在碟片旋轉運動的影響下旋轉起來，由於滑油、固體顆粒、氣體等物質的密度不同，其離心加速度必然有差異，則雜質將從滑油中沉澱到碟片上；
- (3).最終，更加純淨的滑油向上流動並通過中心軸內部的油液出口排出，氣體從離心筒最上部中間的排氣閥釋放，而密度較高的液態水和固體顆粒被收集到離心筒外壁的廢油櫃內。

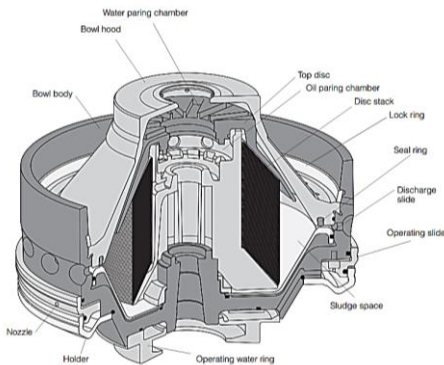


圖 4. 轉鼓結構簡圖 (資料來源：原廠說明書)

### 物理建模

本文主要研究的是轉鼓內流場，故僅對流體域進行建模，將流體域邊界的零件簡化成無厚度的邊

界；另外，固液分離現象主要發生在碟片間隙，距離碟片較遠處分離效果幾乎可以忽略不計，故本研究僅對碟片附近流體域進行分析。則簡化的物理模型如圖 5 所示。

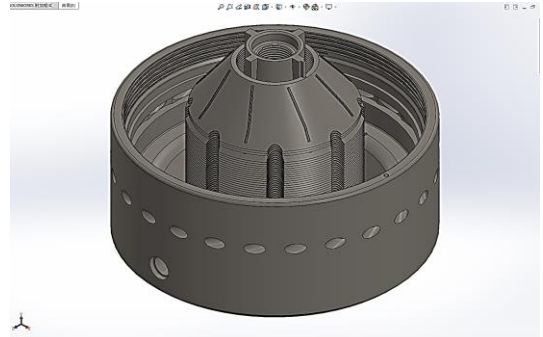


圖 5. 轉鼓的簡化物理模型 (資料來源：本研究幾何模型)

### 網格剖分

分析碟式淨油機的實際結構有 50 個葉片，共形成了 49 層分離間隙，而被分離油品是從轉鼓下部進入工作區域逐層向上分離，故下部分離通道的分離效果更明顯，越上層間隙分離率越低。因此，首先選取位於最下面部分的 10 層分離通道為主要計算域，以減小網格數量和節約計算時間。

由於整個流體域是以碟片旋轉軸正向為軸向的 360°週期性結構，為了減少網格數量並進一步提高網格劃分效率，我們首先利用 ICEM CFD 軟體對 180°週期內的模型進行網格劃分，並設置週期性邊界條件；然後將 ICEM 生成的網格檔導入 Fluent 中，借助其中的“圖形週期性”操作面板即可陣列形成由 12 個相同結構組成的完整流體域。其效果如圖 6 所示。

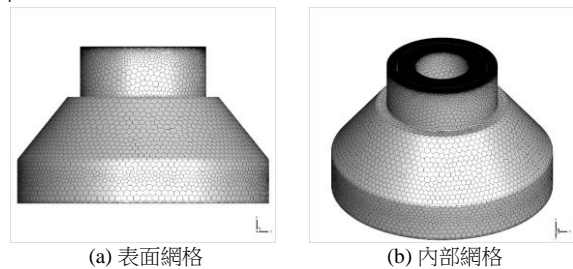


圖 6. 轉鼓區域的網格 (資料來源：本研究幾何模型)

## 結果與分析

### 問題描述

本研究先以實驗模型進行初始條件與數值方式的選擇，確認數值求解方法與環境變因數據，進而改變初始條件，增加不同環境變因。根據第二章對碟片組的設計計算結果，可以確立轉鼓內部流場結構尺

寸。圖 7 為模型的結構尺寸示意圖。具體尺寸數值見表 1。

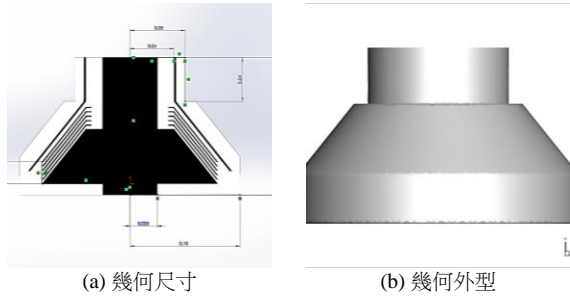


圖 7. 幾何外型示意圖 (資料來源：本研究整理)

表 1. 幾何外型結構尺寸

結構參數	尺寸	結構參數	尺寸
碟片大端半徑 $r_1$	90mm	入口半徑 $r_i$	4mm
碟片束高度 H	20mm	出口長度 $H_1$	40mm
模型總高度 $H_3$	130mm	碟片組數 z	5
碟片母線錐角 a	45 度	頂部碟片半徑 $r_p$	30mm
碟片小端半徑 $r_2$	30mm	入口流道高度 $H_2$	50mm
轉鼓壁內徑	200mm		

資料來源：本研究整理

### 三維流場分析

由於三維流場幾何模型較為複雜，因此選擇利用 CATIA 軟體完成建模工作。考慮到網格建立及調整時需要觀察流場內部造型，因此在 CATIA 軟體中建立 1/2 流場模型，劃分網格之後旋轉複製完成整體流場的網格模型建立。其具體幾何參數。轉鼓內流場幾何模型如圖 8 所示。

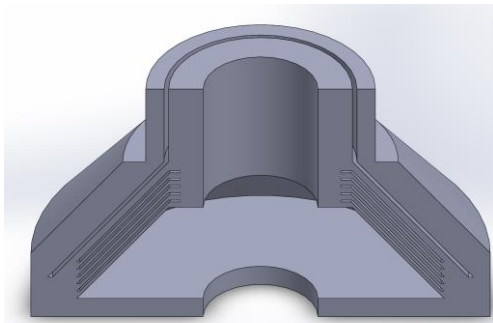


圖 8. 轉鼓內流場幾何模型 (資料來源：本研究整理)

由於只有 1/2 個流場，需要設置網格週期性。Blocking-global mesh parameters-setup periodicity 中定義週期性，類型為旋轉週期，坐標軸為 y 軸，角度為 180 度。此外還應在 blocking-edit block-periodic vertices 中指定 x-y 平面和 y-z 平面上對應 vertical 的週期性。

利用 ICEM CFD 軟體 pre-mesh params-edge params 功能對流場設置網格的邊界層及局部網格加

密。生成網格，刪除 periodic 下的面網格，利用 edit mesh-mesh transformation tools 旋轉複製所有網格資訊，勾選 copy 和 merge nodes，角度(angle)為 360 度，旋轉軸為 y 軸。最終生成的全流場模型如圖 9 所示。

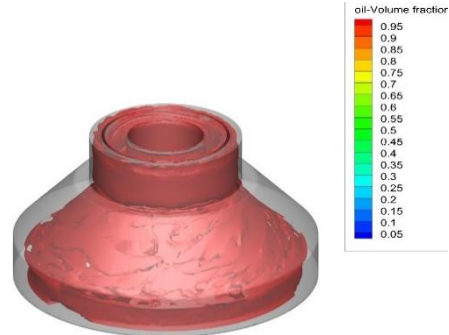


圖 9. 三維全流場模型 (資料來源：本研究整理)

### 與網格數無關測試

為了觀察計算的收斂情況，設置全流場的油相流量的監控。在 Volume Monitors 對整個流場建立相平均體積分數(volume-average)監控。進行網格無關性驗證。採用相同網格劃分方式、相同求解器設置、只改變網格節點密度的情況下，對網格數量為 470,120、640,223、927,154、1,067,400、1,327,500 的網格模型進行六萬步計算。其相應的流場內油相平均體積分數如表 2 所示。

表 2. 與網格數無關性驗證

序號	網格數量	油相平均體積分數
#1	470,120	0.47215991
#2	640,223	0.42180257
#3	927,154	0.59172916
#4	1,067,400	0.52057445
#5	1,327,500	0.53182381

由表可以看出，網格數量達到 106 萬個以後油相平均體積分數變化不大。由於本次類比為三維模型，網格基數較大，且運行耗時較長，為了保證計算效率，選擇 4 撐網格模型，網格數量為 1,067,400 個。Determinant 3×3 指標下最差網格品質為 0.856，網格品質良好。

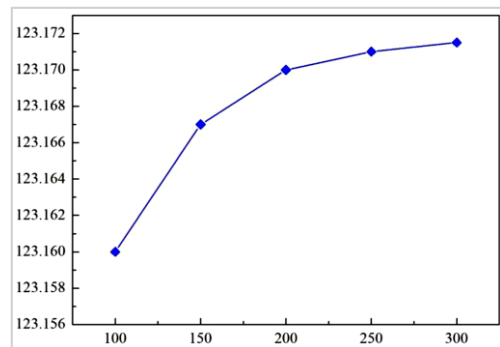


圖 10. 網格無關性驗證 (資料來源：本研究整理)

### 模型合理性分析

對轉速 8,000rpm、水相粒徑 100 $\mu$ m、入口流速 1 m/s、碟片角度為 45。碟片間隙 1mm 的流場模型完成二維數值類比，圖 11 為 x=0 截面的油相濃度分佈雲圖。

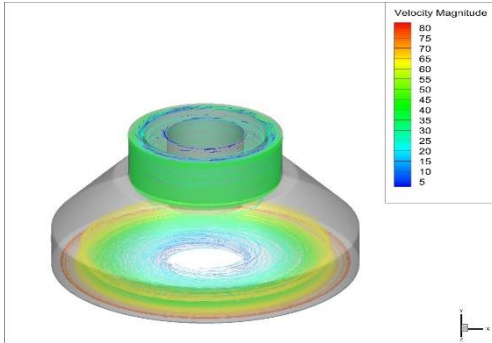


圖 11. x=0 截面處油相濃度分佈雲圖

通過雲圖可以看出，油水混合物在轉鼓內完成離心分離。被分離流體在入口處的油相體積分數為 70.000%，油相出口處的油相體積分數 99.963%，模型的分離效果良好。如圖 12 所示為 x=0 截面處壓力分佈雲圖。

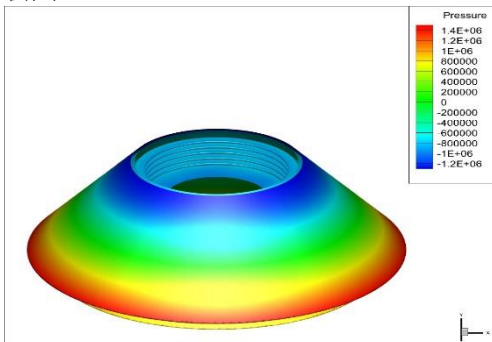


圖 12. x=0 截面處壓力分佈雲圖

轉鼓壁面至油水混合物入口處壓力降為 35019.740Pa。油水混合物入口至水相出口壓力降為 140078.959Pa。徑向方向上，壓力從轉軸到轉鼓壁漸漸增大。碟片組間隙流道的壓力在軸向上變化並不大，水相出口處壓力最低。壓力隨著角速度及半徑的增大而提高，壓力分佈與理論趨勢相一致。

### 轉速變化對內流場的影響

根據離心機的原理與類似機器的工作情況，碟式分離機的轉速較高（通常大於 6,000r/min），故本論文模擬了轉鼓在 2,000~8,000r/min 範圍內（僅取三種轉速）的工作情況。周向速度是流體在淨油機轉鼓中的旋轉線速度，其值的大小決定了分離因數的高低。轉速在 6,000~10,000r/min 變化時 Q 面的周向速度如圖 13-14 所示，其中，的轉速逐次增加 3,000rpm。由圖可知：

- (1).在這 3 種轉速下，靠近轉鼓內壁的流體通道內的周向速度都是最小的，但速度變化相對複雜，且存在周向速度小於 0 的部位，表明此處流體的旋轉滯後現象最明顯且形成了漩渦流；
- (2).碟片間隙區域的周向速度分佈都比較規律，速度的等值線基本位於相同的回轉半徑上，隨著回轉直徑的增加周向速度而逐漸變大；
- (3).流場的最大周向速度是隨著轉速的增加而增大的，但最小周向速度卻越來越小；
- (4).出口處存在周向速度的局部社區，說明流體出口處存在外壓，且對流體的紊流產生了抑制作用使出口的流體排出更穩定。

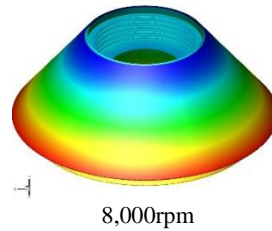
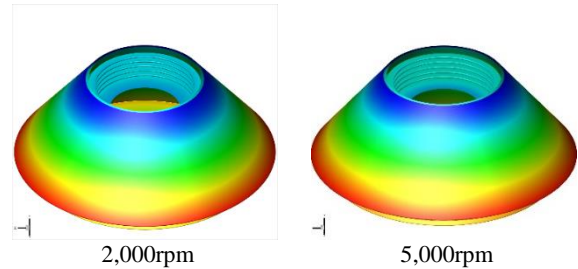


圖 13. disc-pressure

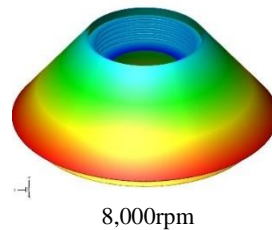
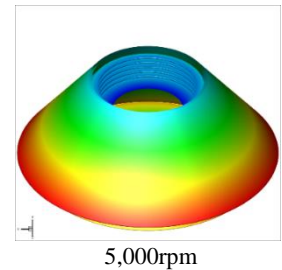
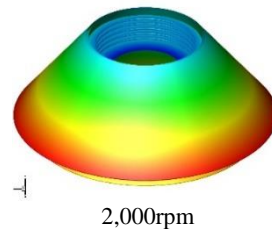


圖 14. disc-velocity-magnitude

本論文根據碟式分離機常規設計理論，以 Alfa Laval 公司設計的小型臺式淨油機的性能參數為參考，完成了轉鼓內部碟片組結構尺寸設計。並利用 CFD

技術在 ICEM CFD 軟件中進行二維、三維流場的建立及結構網格的劃分，在 FLUENT 軟件中完成數值計算。

利用 Eulerian 多相流模型、Realizable k-e 模型、Ax1 symmetric Swirl 方法完成轉鼓內部流場的二維穩態模擬。分析油相濃度分佈雲圖、壓力分佈雲圖和速度分佈可知模型建立合理，並較好地完成了油水混合物的離心分離。

### 參考文獻

1. Anghel, C. I. (1997), "A study concerning elastic of disk centrifugal separators," *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, Vol. 144(3-4), pp. 275-285.
2. Janoske, U., and Piesche, M. (1999), "Numerical simulation of the fluid flow and the separation behavior in a single gap of a disk stack centrifuge", *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 22(3), pp. 213-216.
3. Xue, X., Marson, S., and Patel, M. K. (2011), "Progress towards the design and numerical analysis of a 3D microchannel biochip separator", *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, Vol. 27(11), pp. 1771-1792.
4. Muller, W. G., Link, T., and Li, Q. (2014), "A novel TiO<sub>2</sub>-assisted magnetic nanoparticle separator for treatment and inactivation of bacterial contaminants in aquatic systems", *RSC Advances*, Vol. 4(89), pp. 48,267-48,275.
5. Alfa-Laval Sharples, Doman Road, and Camberley et al (1991), "Decanter and disc-stack centrifuge systems", *Filtration & Separation*, Vol. 28(6), pp. 387-388.
6. Schimmelpfennig, W., Lantow, H., and Riggers, W. (2001), "The disk plasma separator-a new type of plasma separation", *Transfusion & Apheresis Science*, Vol. 24(2), pp. 189-189.
7. Pelanti, M., Shyue, K.-M. (2019), "A numerical model for multiphase liquid-vapor-gas flows with interfaces and cavitation", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 113, pp. 208-230.
8. Onyiriuka, E. J., Obonor, A. I., and Mahdavi, M. (2018), "Evaluation of single-phase, discrete, mixture and combined model of discrete and mixture phases in predicting nanofluid heat transfer characteristics for laminar and turbulent flow regimes", *Advanced Powder Technology*, Vol. 29(11), pp. 2644-2657.
9. Steijl, René, Barakos, G. N. (2018), "Parallel evaluation of quantum algorithms for computational fluid dynamics", *Computers & Fluids*, Vol. 173, pp. 22-28.
10. 哈子銘, 田文國, "船舶科技", 第三十八期, pp. 72-73 (2010).
11. Dwaraka Prasad Sanadhya1, Rameshwar Prasad Sharma "International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology," Volume 8 Issue II Feb, pp. 260-261(2020).
12. Cagatay Kandemir, "Applied Ocean Research" Volume 88, pp.317-325 (2019).
13. Jung, Ho., "Numerical Visualization of Fluid Flow and Filtration Efficiency in Centrifugal Oil Purifier", *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, pp.84-91 (2010).
14. John Gorman., "Applications of Computational Fluid Dynamics Simulation and Modeling," *Turbulence Models Commonly Used in CFD*, Gothenburg.
15. S.Rajendran, Dr.K.Purushothaman, "Analysis of a centrifugal pump impeller using ANSYS-CFX," *International Journal of Engineering Research & Technology*(2012).
16. Mr. S. D. Chavan, "International Research Journal of Engineering and Technology," Volume:03 Issue (2016).
17. Shekhawat, L.K., Sarkar, and J., Gupta, R(2018)" Application of CFD in Bioprocessing: Separation of mammalian cells using disc stack centrifuge during production of biotherapeutics", *Journal of Biotechnology*, Vol. 267, pp.1-11.

## **Numerical Analysis of Marine Blended Oil and Inferior Heavy Oil Combustion**

*Chou, hao-ping\* Zheng, Zong-Cheng\* Lin, Reui-Kuo\*\**

\*Department of Marine Engineering, National Taiwan Ocean University, Master student

\*Department of Marine Engineering, National Taiwan Ocean University, Assistant Professor

*Keywords: Liquefied Natural Gas (LNG), Sloshing, Ship Motion, Methane, Free Liquid Level, Numerical Analysis*

### **ABSTRACT**

With the advent of the new crown after the epidemic era, the international shipping demand is still increasing, and most of the shipping fuel relies on heavy fuel oil as the main source of energy, heavy fuel oil viscosity and low-temperature curing problems, and the poor quality of the fuel oil may contain rust, water, metal fragments and solid particles, etc., so that the injector and fuel system performance is reduced, the impact of the ship to produce mechanical failures and other security concerns, and the purifier as a wide range of applications in the maritime industry, to ensure that engine operation and combustion efficiency optimization and other functions to explore and meet the needs of the shipping industry. The fuel purifier is widely used in the field of shipping industry to ensure the optimization of engine operation and combustion efficiency, so as to explore and meet the needs of shipping.

This study is based on hydrodynamic calculations in the oil purifier fuel mixing and poor quality fuel caused by the ship's impact on the numerical simulation analysis, oil purifier through the rotation of centrifugal force to ensure the purity of the oil, the effectiveness of the parameters set up and so on are inseparable, the correct operation of the oil purifier on the parameter settings, can extend the life of the engine to reduce mechanical wear, to ensure that the oil is separated from the water to avoid water entering the engine body, reduce the maintenance costs of the equipment in the future. Maintenance costs, and improve fuel efficiency to reduce carbon emissions and hazardous gases and other environmental issues are pressing, the simulation can be a long-term observation of the impact of poor quality oil and oil mixing on the host, the future design of more efficient oil purifier to the shipping-related industries for reference.