

綠色運輸試驗基金
渡輪的柴油-電力驅動系統試驗
(天星小輪有限公司)
最終報告

(2018年8月1日)

張鎮順博士

本報告內監察及評估小組的意見並不一定反映香港特區政府環境保護署的意見

監察評估小組成員

張鎮順博士（小組主任）

教授

機械工程學系

香港理工大學

熊永達博士（署理小組主任）

理大科技及顧問有限公司

香港理工大學

吳駿博士工程師

高級技術主任

機械工程學系

香港理工大學

綠色運輸試驗基金
渡輪的柴油-電力驅動系統試驗
(天星小輪有限公司)

最終報告

(試驗時間：2016年12月1日 - 2017年12月31日)

行政摘要

1. 介紹

1.1 綠色運輸試驗基金（下稱：基金）旨在鼓勵運輸業界試驗各類綠色創新運輸技術，為改善香港的空氣質素及公眾健康作出貢獻。天星小輪有限公司（下稱：天星小輪）獲基金資助，在一艘現存渡輪（世星）上改裝柴油-電力驅動（DEP）系統，進行試驗，DEP 系統取代了渡輪上原有的柴油發動機和發電機，預計可減少渡輪的油耗和空氣污染物排放。天星小輪依照與政府簽訂的資助協議招標程序，委託梁穩記船廠在世星安裝柴油-電力驅動系統（下稱：DEP 渡輪）作試驗。

1.2 原渡輪已改裝為 DEP 渡輪。由於沒有其他渡輪行走與 DEP 渡輪的相同路線，因此會使用渡輪改裝前的舊記錄與試驗收集的 DEP 渡輪資料作比較。

1.3 理大科技及顧問有限公司（PolyU）獲環境保護署（EPD）委託為獨立第三方評核者，監察試驗並與相應傳統渡輪作比較下評估試驗的綠色創新運輸技術的表現。

1.4 本報告匯報在 12 個月的試驗期中與原渡輪（下稱：傳統渡輪）比較下 DEP 渡輪的表現。

2. 試驗產品和渡輪

2.1 DEP 系統包括兩台 465 bkW (425 ekW) Caterpillar 柴油發電機組，一台 118 ekW Caterpillar 柴油發電機組，兩台 500 kW 電動機和相關的控制設備。兩台 465 bkW 發電機符合國際海事組織（IMO）Tier II 和美國國家環境保護局（USEPA）Tier 3 排放標準。一台 465 bkW 發電機為電動機提供馬力推動渡輪而那台 118 ekW 發電機提供電力為船上的裝備使用。另一台 465 bkW 發電機是應海事處要求為了安全理由作為後備用途。DEP 系統取代了渡輪上原有的一台 1990 前的 540 kW 柴油發動機和兩台 40 kW 柴油發電機。此外，在 DEP 系統內亦安裝了一組海水簾式廢氣洗滌器（那是綠色運輸試驗基金的試驗產品）以減少廢氣內的空氣污染物，例如二氧化硫和黑烟。

2.2 DEP 系統、DEP 渡輪和傳統渡輪的主要特點和照片分別載於附錄 1 和附錄 2。DEP 渡輪提供每日兩次來回尖沙咀碼頭至迪士尼碼頭、一次青馬大橋及一次海港遊服務。DEP 渡輪每日營運大約 11 小時提供以上的服務。

3. 試驗資料

3.1 試驗於 2016 年 12 月 1 日開始，為期 12 個月。但是，2016 年 12 月至 2017 年 3 月期間，雖然 DEP 渡輪已開始提供服務，但因天星小輪仍在熟習/測試 DEP 系統和渡輪的表現和特性，此四個月試驗被當作是準備試驗階段。比較有代表性的試驗應該認定是從 2017 年 4 月起正常的日常運作時開始。天星小輪提供了由 2016 年 12 月至 2017 年 12 月的資料作分析。

3.2 天星小輪必須搜集和提供試驗資料包括 DEP 渡輪的運作資料和維修紀錄。DEP 渡輪運作資料包括乘客人數、運作時間、柴油耗油量和費用。維修紀錄包括 DEP 渡輪上與 DEP 系統表現有關的定期和非定期維修費及營運時間損失。亦需要提供傳統渡輪的類似資料。除了有關開支的資料外，亦須提供 DEP 渡輪的維修報告、運作困難紀錄和船長/乘客的意見，以反映 DEP 渡輪的任何問題。

4. 試驗結果

4.1 營運費用

4.1.1 下表概括 DEP 渡輪和傳統渡輪的統計數據。DEP 渡輪每小時耗油量比傳統渡輪稍多 0.6 公升 (1%)。因統計數據包括不確定因素，所以從統計角度來說，DEP 渡輪和傳統渡輪的耗油量並無差別。

表 1：各渡輪的主要運作統計 (2016 年 12 月至 2017 年 12 月)

	DEP 渡輪 ^[1]	傳統渡輪 (舊紀錄)
總行駛時間 (小時)	2,276	-
平均油耗 (公升/小時)	63.2	62.6 ^[2]
平均燃油費用 (HK\$/小時) ^[3]	1,055	1,045 ^[4]
每小時總營運費用(HK\$/小時)	1,080	1,189
營運損失時間 (工作日) ^[5]	20	16.9 ^[6]

^[1] 因為 2016 年 12 月 - 2017 年 3 月是準備試驗階段而收集的數據並無代表性，所以評估是從 2017 年 4 月至 2017 年 12 月

^[2] 2001-2010 的平均油耗，不包括 2007 因為 2007 的油耗相比其他年份的特別低

- [3] 按照公佈油價
- [4] 按照 DEP 渡輪的平均油價
- [5] 營運損失時間是由渡輪不能營運的日期起計，至渡輪回復營運的日期為止。
- [6] 2009 和 2010 年內平均 9 個月的營運損失時間

4.1.2 相對傳統渡輪，DEP 渡輪的耗油量沒有增加或減少，主要原因是因 DEP 渡輪的重量在改裝後增加了和海水簾式廢氣洗滌器的額外重量和其耗油量。此外，運作模式上的改變，由短途較長迨速運作轉為長途較短迨速運作，亦可能導致耗油量的增加。再者，DEP 系統在定速每分鐘 1,800 轉運作而舊引擎的巡航速度大約是每分鐘 800 轉而迨速時大約是每分鐘 520 轉。因此，DEP 系統可能比傳統渡輪消耗更多燃油。但是，由於缺乏詳細資料作分析，未能量化由運作模式上的改變和 DEP 系統導致的額外油耗。

4.1.3 在 2016 年 12 月至 2017 年 12 月的試驗期內，DEP 渡輪有兩次定期維修和九次非定期維修。DEP 渡輪在 2017 年 3 月進行半年度定期維修，包括清理船殼、海水入口格柵和進行試航；但是，此定期維修是在有代表性試驗期(2017 年 4 月至 12 月)外，因此不包括入評估內。第二次半年度定期維修在 2017 年 9 月進行；包括測試三部發電機組運行情況和法定大修（包括上排作外部檢查；螺旋槳、船軸、船舵和齒輪箱的清理；船殼油漆；試航和清理兩部海水簾式廢氣洗滌器缸和噴嘴）。定期維修共牽涉港幣 57,084 元和 19 日營運損失時間。五次非定期維修牽涉發電機組和海水簾式廢氣洗滌器的輕微修理工作，在有代表性試驗期內合共損失一天營運時間。由於仍在保養期內，無須支付保養維修費用。

4.1.4 DEP 渡輪的每小時總營運費用為港幣 1,080 元；而根據舊紀錄，傳統渡輪的每小時總營運費用是港幣 1,189 元。與傳統渡輪相比，DEP 渡輪的平均總營運費用較低約 9.2%。DEP 渡輪和傳統渡輪與定期維修和非定期維修相關的營運損失時間分別是 19 日和 16.9 日，因此，試驗期內 DEP 渡輪的可使用率是約 93%而傳統渡輪的可使用率是約 94%。

4.2 性能表現和可靠性

4.2.1 幾位船長負責操作 DEP 渡輪。在試驗期內訪問了三位船長，他們對 DEP 渡輪的運作有不同的意見。其中兩位普遍對 DEP 渡輪的意見正面，但他們認為 DEP 系統噪音較大而且推進系統反應較慢。另一位船長對渡輪的操作感到有困難，亦覺得性能有退化和噪音較大。

4.2.2 乘客們的意見普遍非常正面，但部份乘客認為引擎噪音較大。

4.2.3 天星小輪認同綠色渡輪可幫助改善空氣質素，亦會以綠色渡輪取代所有傳統渡輪。

4.2.4 試驗期內 DEP 渡輪的總耗油量是 140,359 公升柴油，但在扣除海水簾式廢氣洗滌器的相關油耗後，比傳統渡輪的耗油量稍低 2.4%。假設傳統渡輪與 DEP 渡輪的運作時間相同，傳統渡輪的油耗是 142,478 公升柴油。試驗期內節省的燃料大約是 2,119 公升柴油並可相應減少二氧化碳當量 (CO₂e) 排放 5,545 公斤。

5. 空氣污染物排放

5.1 除了收集 DEP 渡輪的運作資料和維修紀錄外，亦量度了廢氣中的氮氧化物 (NO_x)，二氧化硫 (SO₂) 和黑煙煙度以比較 DEP 系統和傳統渡輪上的舊柴油引擎的環保表現。

5.2 DEP 系統的所有發動機都符合 EPA Tier III/IMO II 排放標準。發動機排放的 NO_x 濃度亦有測量。基於測量的 NO_x 的濃度，計算所得的 BSNO_x 數值 (每千瓦時 5.69 至 6.39 克，平均每千瓦時 6.09 克) 比 IMO II 的 NO_x 排放限制值 (在 1,800 RPM 轉速時每千瓦時 7.85 克) 為低。

5.3 按照香港大學在 2008 年 9 月在一艘渡輪 (日星號) 上進行的使用海水簾式廢氣洗滌器的可行性研究 (下稱：HKU 2018 研究)，渡輪使用與 DEP 渡輪同類的舊柴油引擎，估算 NO_x 的排放量為每千瓦時 19.4 克，大概是 DEP 渡輪估算平均 NO_x 排放量 (每千瓦時 6.09 克) 的三倍，或 DEP 系統能減少 NO_x 排放量約 69%。

5.4 在傳統渡輪進行變速操作時所出現的黑煙，在 DEP 渡輪上未有觀察到，這表示 DEP 系統的黑煙排放明顯地比傳統渡輪減少了。在 DEP 系統的廢氣排放，量度了黑煙煙度，在行駛時的平均煙度是 1.9 HSU。按照 HKU 2018 研究，日星號在行駛時的平均煙度是 6.0 HSU，顯示在渡輪上使用 DEP 系統後黑煙排放下降了約 68%。

5.5 在行駛時，DEP 系統的平均 SO₂ 排放是 6.0 ppm。HKU 2018 研究顯示，舊柴油引擎廢氣內的平均 SO₂ 濃度是 34.3 ppm。結果顯示 DEP 渡輪廢氣內的 SO₂ 排放明顯地減低了 (約 83%)。根據天星小輪，2008 年的柴油含硫量是 0.33%。由 2014 年起法定含硫量由 0.5% 收緊至 0.05%。因此，廢氣內的 SO₂ 排放顯著下降主要是由於近年收緊法定燃油含硫量所致，而不是由於發動機技術上的改進。

6. 總結

6.1 本測試顯示，在本地運作情況下 DEP 系統可符合使用者的營運要求。而且在測試期間 DEP 系統沒有對營運者制造任何困難，亦能夠應付需要的任務。DEP 渡輪的船長們普遍表示操作渡輪並無問題，但發覺 DEP 系統噪音較大。渡輪能夠應付指派的工作、運作暢順。DEP 渡輪和用作對比的傳統渡輪的可使用率大致相同。

6.2 數據分析顯示從統計角度來說，DEP 渡輪和傳統渡輪的耗油量並無差別，主要是因為（1）DEP 渡輪的重量在改裝後增加了、（2）海水簾式廢氣洗滌器的額外重量和其耗油量、（3）運作模式的改變 和（4）DEP 系統的較高引擎轉速等導致額外燃油消耗。如果排除海水簾式廢氣洗滌器的額外重量和燃油消耗，DEP 系統可以節省約 2.4% 燃料並相應減少二氧化碳當量排放 5,545 公斤。另外，沒有數據顯示在試驗期間耗油量有惡化跡象。

6.3 此外，亦量度了 DEP 系統廢氣排放中 NO_x ， SO_2 和黑煙煙度以比較 DEP 系統和傳統渡輪上的舊柴油引擎的環保表現。測量的 NO_x 結果顯示 DEP 系統符合 IMO II 及 USEPA Tier 3 排放標準；而與舊柴油引擎比較，DEP 系統減少 NO_x 排放和黑煙煙度分別達約 69% 和 68%。與過去使用 0.33% 含硫量柴油的舊柴油引擎比較，DEP 系統廢氣排放內（進入海水簾式廢氣洗滌器之前）的平均 SO_2 排放量減少了約 83%；那是由於近年收緊法定燃油含硫量至 0.05% 所致，而不是由於發動機技術上的改進。

附錄 1：試驗涉及試驗產品和渡輪的主要特點

1. 渡輪上的柴油-電力驅動（DEP）系統

主發電機組

發電機組數目：	2
廠名：	Caterpillar
型號：	C18 船用發電機組
功率：	425 千瓦 (531 KVA) @1800 rpm, 60 Hz
引擎：	直列六缸柴油引擎
排放標準：	IMO II / EPA Tier 3

輔助發電機組

發電機組數目：	1
廠名：	Caterpillar
型號：	C7.1 船用發電機組
功率：	118 千瓦 (148 KVA) @1800 rpm, 60 Hz
引擎：	直列六缸柴油引擎
排放標準：	IMO II / EPA Tier 3

驅動電動機

電動機數目：	2
廠名：	Dezhou Hengli
型號：	YVF2-4503-8-H
功率：	500 千瓦，440 V，60 Hz

2. DEP 渡輪

船名：	World Star
類別：	第 1 類別渡輪船隻
註冊港：	香港
總長度：	46.00 米
最大寬度：	9.3 米
輕載排水量：	337,000 公斤
總噸位：	364,000 公斤
淨噸位：	109,000 公斤
載客量：	408 人
製造日期：	1989; 2016 年改裝柴油-電力驅動系統

3. 柴油引擎系統驅動的傳統渡輪

船名：	World Star
類別：	第 1 類別渡輪船隻
註冊港：	香港
總長度：	46.00 米
最大寬度：	9.3 米
輕載排水量：	323,390 公斤
總噸位：	352,000 公斤
淨噸位：	186,000 公斤
載客量：	755 人
製造日期：	1989
主機：	MAN 6L 20/27；900 rpm，540 千瓦
發電機組：	2*Cummins 6B5.9；1500 rpm，40 千瓦 [合共 80 千瓦]

附錄 2：渡輪和柴油-電力驅動系統的照片



渡輪 - 前方



渡輪 - 側面



1 號主發電機組(驅動用)



2 號主發電機組(驅動用)



輔助發電機組



驅動電動機