

並聯式液壓混合動力車輛燃油經濟性探討

蘇泉群¹、許龍興²、高實祥³
^{1,2,3}財團法人車輛研究測試中心

¹E-mail: groesu@artc.org.tw
能源局計畫：101-D0406

摘要

溫室效應的影響、氣候的變遷及能源的逐漸匱乏，使得能源的使用效率變成為一重要的議題。而隨者國際間重型車輛的燃油經濟性議題日益受到重視，近年來開始有適用於重型車輛的液壓混合動力系統節能產品推出。目前市面上液壓混合動力車輛主要訴求可以回收煞車能量，然而除此功能之外，液壓混合動力車輛可以控制引擎操作於節能區間，而獲得更大的省油效果。為能瞭解液壓混合動力車輛的燃油經濟性，本論文使用一輛可開啟使用液壓系統及關閉液壓系統的 16 噸液壓混合動力車輛，設定在不同目標速度的加減速狀態及載重的實驗條件下進行燃油經濟性的測試，過程中以嚴苛的全油門急踩到底加速，以提供基本煞車安全性能的 0.3g 減速。由測試結果，液壓混合動力車輛比起一般傳統使用內燃機引擎的車輛約可有 2.6~11.3% 的省油效果。

關鍵詞：液壓混合動力車輛、煞車能量回收、燃油經濟性

1. 前言

混合動力車輛由於能有效提升燃油經濟性，因此逐漸受到重視。液壓混合動力車輛原理近似油電混合動力車輛，藉由回收與儲存煞車能量，以待下次車輛起步時使用，因此可將引擎操作於高效率區間，增進燃油經濟性。又因其回收能量特性：煞車能量回收，因此特別適合使用在走走停停的道路上，如：車輛擁擠的都會區。惟在構造上，液壓混合動力車輛係使用：泵浦/馬達回收能量、蓄壓器儲存能量並搭配控制閥組與油管等液壓元件。

液壓混合動力車輛具有高功率密度的特性，因此特別適合應用於大型運輸車輛，可因構造不同分為二類：並聯式(圖 1)及串聯式(圖 2)。並聯式液壓混合動力車輛保留傳統車輛傳動架構，另輔以液壓系統做為第二種動力源，當車輛需要高負載輸出時，由蓄壓器釋放出高壓液壓油能量，推動液壓馬達，提供引擎以外的輔助動力源。串聯式液壓混合動力車輛，則是將傳統車輛之變速箱及傳動軸以液壓元件取代，將引擎保持在高效率操作區域，車輛的行駛則是藉由引擎驅動泵浦，泵浦帶動馬達，馬達輸出能量使車輛前進。

液壓混合動力車輛最早可追溯於 1972 年 Dunn 和 Wojciechowski 於能源轉換工程研討會中發表文章[1]，研究由福斯公司 VW311 車輛引擎來運轉飛輪、模擬整車能量，裝置有 5 gallon 的蓄壓器、4.8 in3/rev 的可變

量泵浦等液壓元件，透過液壓泵浦回收模擬之車輛減速能量，儲存於蓄壓器並供後續釋放驅動車輪使用。

1992 年 Pourmovahed、Beachley 及 Fronczak[2]針對液壓混合動力系統各元件進行模擬配組，由實驗得知，飛輪模型的能量回收可達 61%~89%。

2007 年 S. Baseley 等人[3]發表利用液壓混合動力系統回收煞車能量之混合動力車輛。針對二種不同重量的車輛：10 噸及 25 噸，進行液壓混合動力車輛與傳統內燃機車輛的燃油經濟性比較。研究結果顯示，使用液壓混合動力車輛回收煞車能量可增進車輛燃油經濟性。

2008 年 K. A. Stelson 等人[4]模擬不同結構的液壓混合動力車輛：串聯式、並聯式及串並聯式在不同型的行車型態，市區路線型態及高速公路的路線型態的燃油經濟性比較，並以能量管理的觀點進行最佳化改善。模擬結果顯示，不同的路線型態會影響液壓混合動力車輛燃油經濟性，而液壓混合動力車輛在走走停停的行駛型態具有較佳的燃油經濟性，其中又以串並聯式的液壓混合動力車輛擁有較佳的燃油經濟性。

2010 年 Sun Hui 和 Jing Junqing[5]針對並聯式液壓混合動力車輛進行能量管理策略探討，分別顯示液壓混合動力車輛於行駛時，蓄壓器的壓力、煞車回收能量、速度及加速度的相互關係。研究結果，平緩的煞車模式可以使液壓混合動力系更有效率的回收煞車能量。

本論文為能了解並聯式液壓混合動力車輛的燃油經濟效益，使用一輛可開啟使用液壓系統及關閉液壓系統的 16 噸液壓混合動力車輛，搭配不同的目標速度及載重進行燃油經濟性的比較。

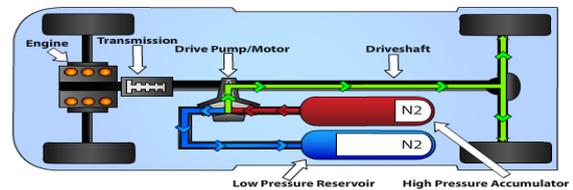


圖 1 並聯式液壓混合動力車架構圖[7]

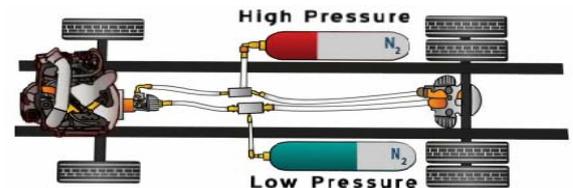


圖 2 串聯式液壓混合動力車架構圖[7]

2. 並聯式液壓混合動力車輛介紹

液壓混合動力車輛是由液壓混合動力系統與車輛載具組合而成，保留傳統車輛型式，能量的輸出仍以傳統內燃機為主要來源，另以液壓元件回收煞車能量及提供第二動力源的輸出。

圖3為Bosch Rexroth公司的液壓式再生煞車系統(Hydrostatic Regenerative Braking System, HRB)，屬於液壓混合動力系統車輛的一種，為並聯形式的液壓混合動力車輛，其架構包含一組液壓軸向柱塞泵浦馬達(3)與一組齒輪變速器(2)，兩者整合為一單元。齒輪變速器由多片式離合器(Multi-disk Clutch)控制柱塞泵浦與車輛之動力連接。傳動軸(1)、(5)分別與車輛變速箱輸出端及後驅動輪組差速器連接。

並聯式液壓混合動力車輛回收煞車能量方式為在車輛減速時，把輪胎傳動軸旋轉的能量切換到帶動液壓泵浦工作，而液壓泵浦再將儲油箱的油帶到蓄壓器內儲存能量，然後視車輛能量管理策略，適時釋放出高壓液壓油，推動液壓馬達，進而再帶動傳動軸使輪胎轉動。而釋放完能量的液壓油，則回流到儲油槽，等待下次的加壓使用，相關流程如圖4所示。

以Bosch Rexroth系統為例(圖3)，柱塞泵浦為單一元件具有兩種功能，當切換為泵浦模式時，能接收後驅動輪組所傳遞之能量，而驅動柱塞泵浦使蓄壓器(4)充壓貯存能量。而在馬達模式下，能接收蓄壓器釋放高壓液壓油能量，驅動柱塞馬達與齒輪變速器，提供車輛加速所需之扭力。使用過後的低壓液壓油則是儲放於液壓油貯槽(7)中。控制閥組(6)提供HRB系統所有液壓開關與安全控制之功能，控制閥組與離合器則由導壓閥(14)以液壓節能方式來驅動，導壓閥同時附有小型蓄壓器蓄積所需的控制用液壓油。基於上述的原理，車輛在走走停停的操作下，可有效減少車輛的油耗。

而與油電混合車輛比較，液壓混合動力車輛具有大功率能量的特性，如圖5所示，橫軸代表功率密度，即單位質量可輸出之功率；縱軸代表能量密度，即單位質量可釋放的能量。電池雖然有較高的能量密度，但能量功率相對於較低，因此不適合用在需要瞬間加速的場合。而超級電容雖能夠瞬間釋放能量，但蓄電量不大且價格昂貴。相較之下，液壓蓄壓器輸出功率大且能源轉換時間快，可快速回收/釋放能量，加上液壓元件裝設需要一定的容納空間，因此特別適合使用於重型車輛，尤其是以經常走走停停的車輛，如：市區公車、垃圾車。然而亦因為液壓元件的特性，使得液壓混合動力車輛具有較低能量密度的缺點，無法長時間的使用，因此對於並聯式液壓混合動力車而言，其能量的管理策略亦為決定燃油經濟性的優劣關鍵因素之一

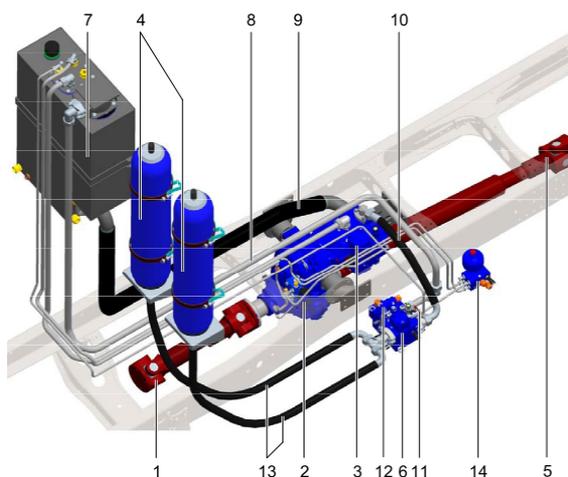


圖3 液壓式再生煞車系統圖[6]

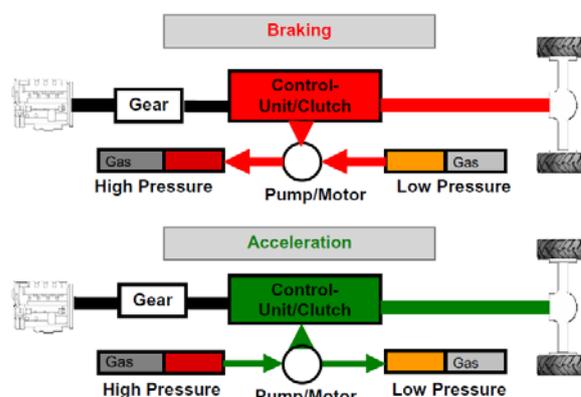


圖4 並聯式液壓混合動力車輛能量回收與釋放操作圖 [3]

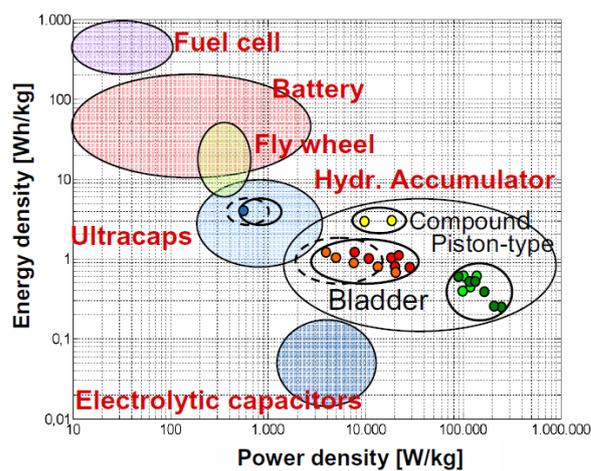


圖5 Ragone Diagram [3]

3. 實驗設備與設計

本實驗係以Mercedes-Benz Atego 1524 重型車輛搭載市面上可以購得的並聯液壓混合動力系統產品，進行一組開啟使用液壓系統及關閉液壓系統的油耗比較測試，所使用的車輛及液壓系統主要規格如表1所示

表 1 並聯液壓混合動力車輛規格表

	主要規格項目	規格內容
車輛部份	引擎型式	6-cyl., 6,374 c.c.
	變速箱型式	6 速自動排檔
	最大馬力/轉速	175.00 kW / 2,200 rpm
	最大扭力/轉速	843 N-m / 1,600 rpm
	軸距 / 最小迴轉半徑	4160 mm / 8.00 m
	最高速率 / 最大爬坡	111 km/hr / 34.0 %
	主煞車型式	雙迴路, 全空氣式, ABS
液壓系統部份	混合動力系統型式	並聯
	可變量軸向柱塞泵馬達	210 ccm
	最大馬力	250 kW
	最大扭力	1100 N-m
	蓄壓器容量	2 x 20 L
	蓄壓器最大壓力	325 bar

3.1 實車油耗測試場地

本實驗之道路油耗測試，於車輛中心國際級試車場之高速周回路進行試驗。該測試道主要測試項目有：加速、最高速率、速度/里程計校正、燃料消耗、排污耐久、里程累積、高速操安、乘適性能與高速耐久等測試。

3.2 速度量測設備

本研究使用之速度量測設備為德國 CORRSYS-DATRON L-350 Aqua 非接觸式之光學速度計，如圖 6 所示，相關規格如表 2 所示。

表 2 CORRSYS-DATRON L-350 Aqua 速度量測計規格

廠牌	型號	規格
CORRSYS-DATRON	L-350 Aqua	<ol style="list-style-type: none"> 更新頻率：250 Hz 速度 量測範圍：0.3~250 km/h 線性度：<math>\pm 0.1\%</math> 量測距離 精確度：<math>\pm 0.1\%</math> 解析度：1.5 mm CAN Bus 輸入：CAN 2.0B 電壓輸入：0~10 VDC 數位輸出：1~1000 pulses/m³

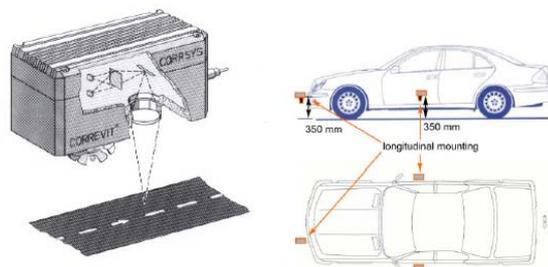


圖 6 德國 CORRSYS-DATRON L-350 Aqua 光學速度計示意圖

3.3 油耗量測設備

本實驗之油耗量測儀器採用德國 CORRSYS-DATRON DFL 體積式燃油流量計，如圖 7

所示，可精確量測動態油量消耗量，常使用於機車、小客車及重型客貨車之回油或不回油式引擎，且具有「熱交換」及「冷卻泵浦」溫控系统維持油溫穩定，確保流量量測之精確度，其相關規格如表 3 所示。

表 3 CORRSYS-DATRON DFL 燃油流量設備規格

廠牌	型號	規格
CORRSYS-DATRON	DFL-2	<ol style="list-style-type: none"> 適用燃料：汽油、柴油 流量量測範圍：0.5~60 l/h 解析度：0.333 cm³ 精確度：±0.5% F.S. 重現性：±0.2% 適用壓力：Max 5bar 數位輸出：1500 pulses/cm³
CORRSYS-DATRON	DFL-3	<ol style="list-style-type: none"> 適用燃料：汽油、柴油 流量量測範圍：1.0~150 l/h 解析度：0.333 cm³ 精確度：±0.5% F.S. 重現性：±0.2% 適用壓力：Max 5bar 數位輸出：500 pulses/cm³

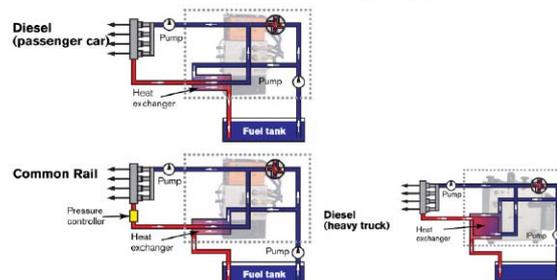
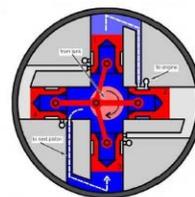


圖 7 體積燃油計示意圖

3.4 車輛載重

本實驗針對不同的車輛載重進行考量，包括：空車、半載及滿載。該車重為 11,410 kg；載具的最大載重限制為 16,100 kg，表 4 為試驗車輛安裝液壓混合動力車輛之載重。

3.5 車輛實驗速度

本實驗操作速度部份，參考都會區域車輛操作速度，設定分別進行目標速度為 20、35 與 50 km/h 的加速、煞車至停止試驗。此加減速度實驗是指車輛由靜止以全油門開度加速至目標速度，然後由以 0.3g 的減速度從目標速度減速至車輛停止狀態，操作情況如圖 8 所示，其中的 0.3g 減速驗證車輛能提供基本的安全車性能要求，且不影響原車輛制動裝置的動作。反覆地依圖 8 行駛模式，將車輛穩定地操作於停止狀態與目標速度之間共 15 次，並量取油耗，行駛里程資料，計算燃油

經濟性的平均結果。

表 4 液壓混合動力車輛燃油經濟性之試驗車重表

車重狀態	車重 (kg)	試驗設備及人員重 (kg)	合計重量 (kg)
空車	11,310	100	11,410
半載	13,750	100	13,805
滿載	16,000	100	16,100

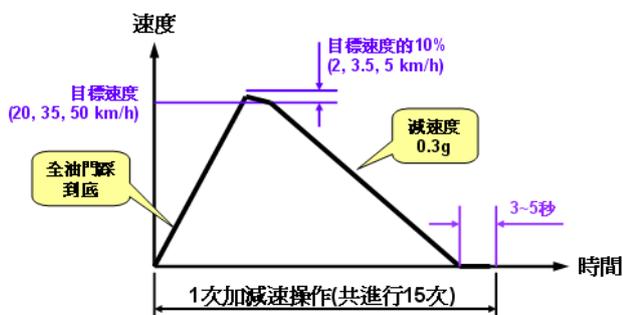


圖 8 液壓混合動力車輛加減速操作圖

4. 結果與討論

液壓混合動力車輛能量回收方式是將輪胎傳動軸旋轉能量切換到帶動液壓泵浦工作，產生具有能量的高壓液壓油，將此液壓油儲存在蓄壓器。因此液壓泵浦的液壓油排量和蓄壓器的容量及行駛型態為影響能量儲存的重要因素。

4.1 不同速度對燃油經濟性的影響

圖 9 為在相同載重、不同的目標速度下的燃油經濟性比較。可發現，目標速度為 35 km/hr 的燃油經濟最佳。一般而言，液壓混合動力車輛對於能量管理可分為二個部份，回收能量及釋放的能量。回收能量是藉由液壓泵浦回收煞車能量，蓄壓器儲存能量，因此液壓泵浦的液壓油排量及蓄壓器容量大小為決定回收能量多寡的因素。因此推估液壓混合動力車輛在目標速度為 20km/hr 時，液壓泵浦及蓄壓器均可有效回收煞車能量，然而在此行駛型態下，蓄壓器所儲存的能量(高壓液壓油)並未充滿，因此其回收的能量並未足夠於下次起步時使用。而在目標速度為 50 km/hr 的情況下，液壓泵浦及蓄壓器仍可有效回收煞車能量並且充滿，但由靜止起步至目標速度為 50km/hr 需要更多能量，因此當蓄壓器能量耗盡，而仍未達到目標速度時，此時車輛行駛所需的能量將由引擎提供，因此造成燃油經濟性降低。而在目標速度為 35 km/hr 的情況下，液壓泵浦不僅可有效回收煞車能量及充滿蓄壓器能量，並可有效提供車輛起步及加速至目標速度所需的能量，因此其燃油經濟性較佳。

4.2 車輛載重對於燃油經濟性的影響

車輛的載重對於頻繁加減速度的車輛油耗表現影響甚大。由圖 10 可比較不同載重對於車輛油耗的影響。由圖 10 可以發現，車輛載重增加，確實影響油耗的表現，車載越重，燃油經濟性越低。然而比較相同的

載重，液壓混合動力車輛仍具有較佳的燃油經濟性，其中仍然以目標速度為 35km/hr 的燃油經濟性表現最佳。主要原因推估仍在於該液壓混合動力車所搭配的液壓泵浦及蓄壓器較為適合此加速及減速的型態，載重的變化則未影響液壓混合動力系統的省油效果。

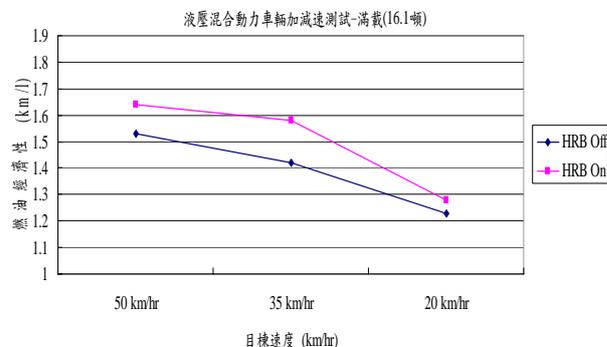
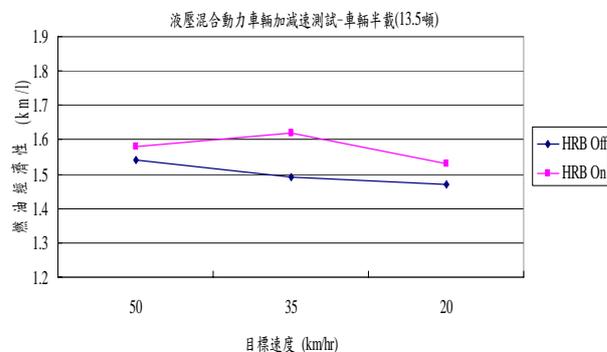
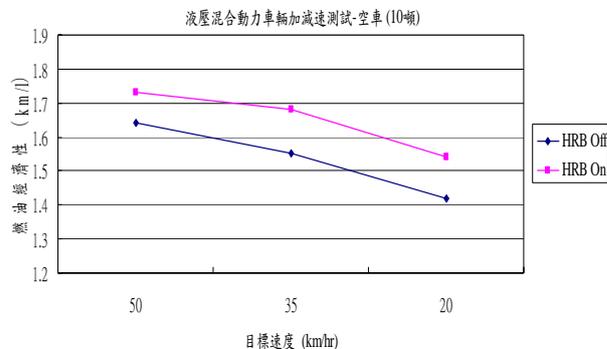


圖 9 不同定目標速度下車輛油耗測試之情況

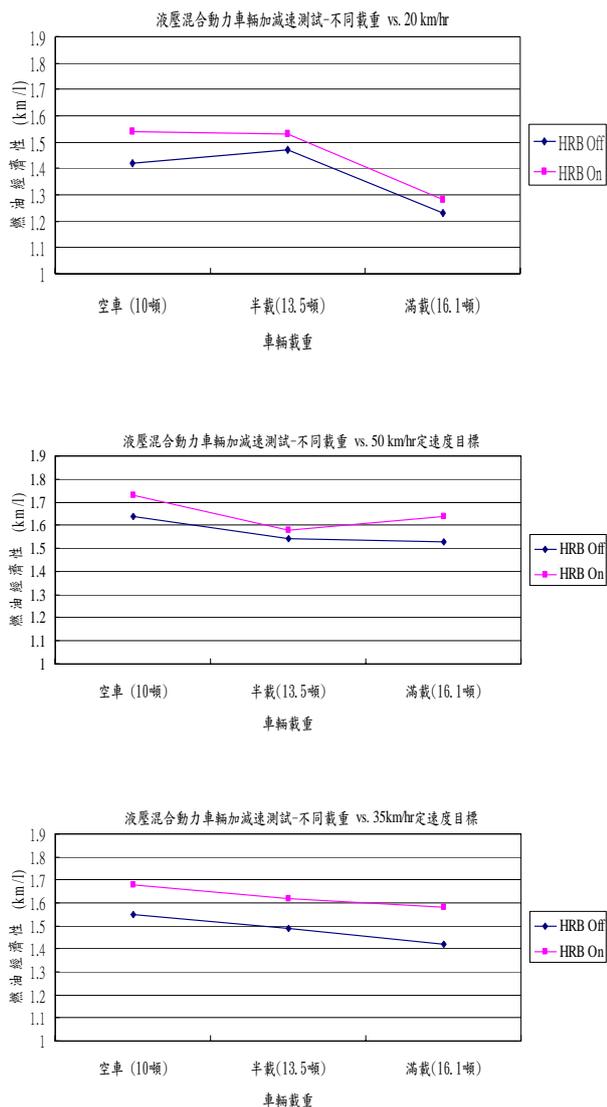


圖 10 不同載重下車輛油耗測試之情況

5. 結論

液壓混合動力車輛為近幾年來逐漸受到重視的混合動力車輛。並聯式液壓混合動力車，除使用內燃機引擎做為主要動力源外，另藉由液壓元件及蓄壓器所回收煞車能量做為輔助的動力源，以提供車輛在需要高負載能量時使用，而又因其高功率密度的特性及裝載所需要的空間，特別適合用在大型車。本論文針對一市售的可開啟及關閉液壓系統的 16 噸並聯式液壓混合動力車輛進行不同目標速度及不同載重，以全油門加速，提供 0.3g 的減速度進行燃油經濟性測試，此並聯式液壓混合動力車輛約有 2.6~11.3% 的節油效果。由實驗可知，車輛的載重會影響燃油經濟性，然而卻不影響液壓混合動力車輛的省油效果。而影響液壓混合動力車輛最主要的因素有可能在於車輛的行駛型態。液壓泵浦的排量、效率及蓄壓器的容積，會關係到可回收多少煞車能量。因此，為能有效的回收煞車能量，若車輛行駛的特性可以符合液壓元件最佳的能量回收效率，則可以使燃油經濟性得到有效的提升。因此以並聯式的液壓混合動力車輛

而言，若能依據行駛路線的型態，選擇適合的泵浦/馬達及蓄壓器，則可有效提升其燃油經濟性。

6. 致謝

本研究承蒙經濟部能源局計畫輔助，經濟部能源局契約編號 101-D0406，由於經費支持使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

7. 參考文獻

期刊論文：

- [1] H. S. Dunn and P. H. Wojciechowski, "High-Pressure Hydraulic Hybrid with Regenerative Braking" *Proceeding of the 7th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, San Diego, CA, pp.989-995, 1972.
- [2] A. Pourmovahed, N. H. Beachley and F. J. Fronczak, "Modeling of a Hydraulic Energy Regeneration System – Part I: Analytical Treatment," *ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, pp.155-159, 1992.
- [3] S. Baseley, C. Ehret, E. Grief and M. G. Kliffken, "Hydraulic Hybrid Systems for Commerical Vehicles" *SAE PAPER*, 2007-01-4150, 2007
- [4] K. A. Stelson, J. J. Meyer, A. G. Alleyne and B. Hency, "Optimization of a Passenger Hydraulic Hybrid Vehicle to Improve Economy" *Proceedings of the 7th International Symposium on Fluid Power*, TOYAMA, pp.143-148, 2008
- [5] S. Hui and J. Junqing, "Research on the System Configuration and Energy Control Strategy for Parallel Hydraulic Hybrid Loader," *Automation in Construction*, Volume 19, Issue 2, pp213-220, 2010.
- [6] 蘇泉群、高實祥，「液壓混合動力車輛的測試與試做」*機械月刊*，第443期，文6~16，2012年6月

書籍：

- [7] 行政院環境保護署/中興工程顧問股份有限公司(李文賢)，"99年度垃圾清運體系調查規劃及垃圾車更新專案工作計劃(EPA-99-H101-02-221)"，2011年3月

其他：

- [8] 「美國環保署網站之液壓混合動力車輛技術介紹」，2011年8月10日取自 <http://www.epa.gov/otaq/technology/research/research-hhvs.htm>