

串聯式液壓混合動力系統之研究



報告人：陳志鏗 教授
大葉大學 機械與自動化工程學系

1

系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab



Outline

- 一、緒論
- 二、HHS介紹
- 三、SHHS平台規劃與設計
- 四、平台操控與硬體迴路建構
- 五、SHHS實驗與分析
- 六、結論

2

系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

一、緒論 - 前言

- **混合動力車輛**是使用多種能源動力的車輛，目前混合動力車大多為油電混合，能源來自電池及內燃機。可由內燃機對電池充電而不必另外充電，消耗汽油較少，而加速表現卻較佳。
- 受限於現今電池技術，目前油電混合系統多數應用於機器腳踏車、小型客貨車等，若是較大的車體則需要很大功率的電池，應用上較為困難。
- 對於**重型運輸車輛**（如公車、大貨車）來說，CO₂的排放更高且燃料相對使用量也更大，不適合使用油電混合系統，因此**油壓混合動力車**便發展起來。

3

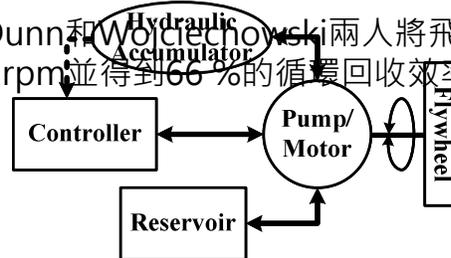
一、緒論 - 前言

	油壓混合動力車	電力混合動力車
動力源	液壓能	電能
動力機構	液壓幫浦馬達	電動馬達
蓄能器	儲油槽、蓄壓器	電池
能源回收模式	煞車時幫浦將油打入高壓蓄壓器儲存，啟動時釋放以驅動油壓馬達	使用輪內馬達作為發電機產生煞車力，發電電能則充電到電池儲存
功率密度 (Power density)	高	低
能量密度 (Energy density)	低	高

4

一、緒論 - 文獻回顧1

- 1972年，Dunn和Wojciechowski運用的5加侖高壓蓄壓器、可變量液壓元件、慣性矩為 $3.98 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 的飛輪及福斯引擎來實驗。下圖為其基本概念。得到原本為煞車消耗掉約50%的動能回收到蓄壓器並再生利用。
- 1974年，Dunn和Wojciechowski兩人將飛輪初始速度設定在270 rpm，並得到66%的循環回收效率。



5

一、緒論 - 文獻回顧2

- 1974年，Dewey、Elder和Otis運用三個2.5 liter的蓄壓器、定量軸向活塞幫浦及兩個慣性矩為 $0.847 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 的飛輪來進行實驗，並得73%的能源回收效率。
- 1992年，Pourmovahed、Beachley及 Fronczak針對各元件，包括幫浦馬達、飛輪、蓄壓器使用效率做模擬分析，利用實驗驗證系統模型的分析結果，結果顯示液壓混合動力系統將能量從回收至蓄壓器再釋放利用時，回收效率變化介於61%到89%之間；因此，回收效率最重要的關鍵在於液壓元件的發揮。

6



Outline

一、緒論

二、HHS介紹

三、SHHS平台規劃與設計

四、平台操控與硬體迴路建構

五、SHHS實驗與分析

六、結論

7

二、HHS介紹 - 系統配置

依液壓系統元件配置於車體的方式及作動型態，可大致分為：

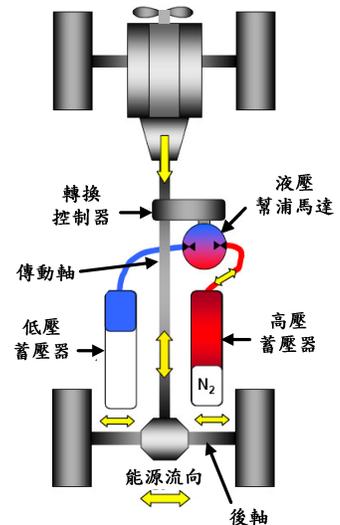
- 並聯式液壓混合動力系統
(Parallel Hydraulic Hybrid System)
- 串聯式液壓混合動力系統
(Series Hydraulic Hybrid System)

8

二、HHS介紹 - 系統配置2

並聯式液壓混合動力系統

- 以車輛引擎動力為主
- 保有傳動軸
- 可直接依附於現有車輛
- 透過轉換控制器以液壓能帶動傳動軸，減少引擎的負擔，以減少廢氣排放及減損。



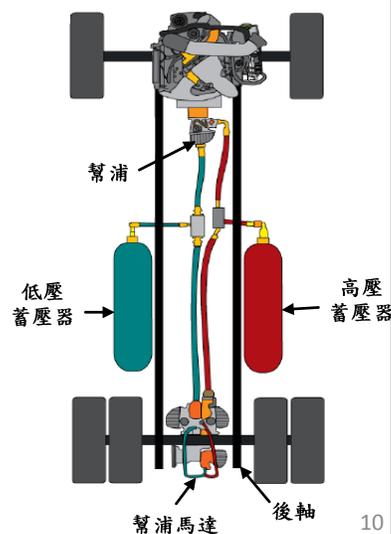
9

系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

二、HHS介紹 - 系統配置3

串聯式液壓混合動力系統

- 以液壓幫浦為動力來源
- 無傳動軸
- 直接透過液壓系統運轉
- 使用「液壓幫浦馬達」進行驅動或回收煞車能
- 驅動時以馬達形式將動力傳予車輪軸
- 煞車時為幫浦模式，將車體機械能轉為液壓能存入蓄壓器。



10

系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

二、HHS介紹 - 元件介紹1

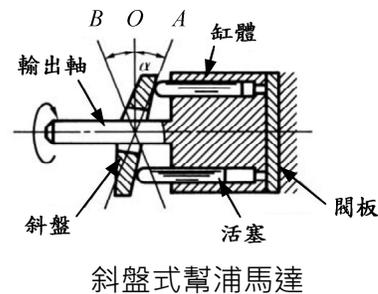
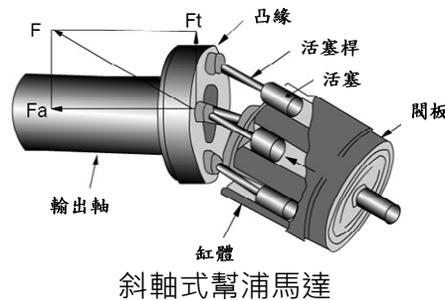
任何一種液壓混合動力系統基本構成元件必定包含四大元素：

- 液壓油 (Oil)
- 幫浦馬達 (Pump/Motor)
- 蓄壓器 (Accumulator)
- 液壓控制閥 (Valves)

11

二、HHS介紹 - 元件介紹2

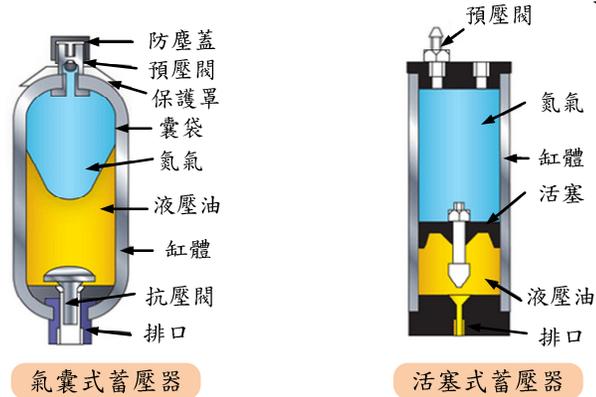
液壓幫浦馬達 (Piston type)



12

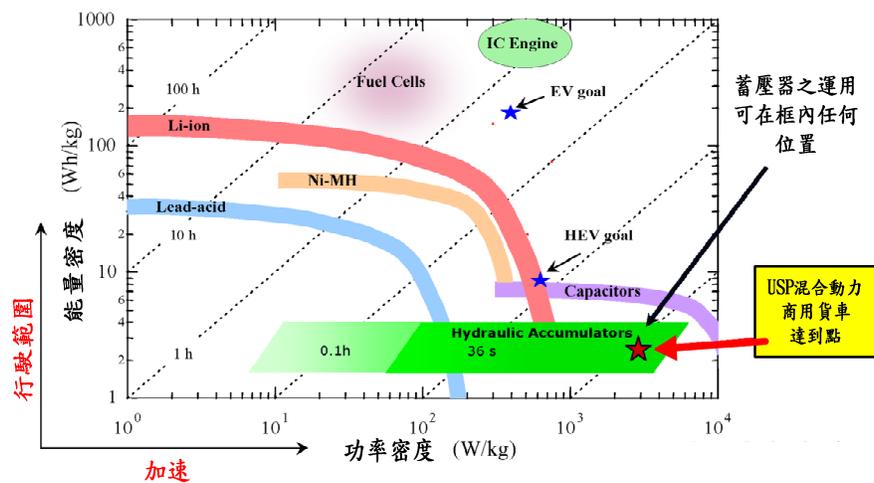
二、HHS介紹 - 元件介紹3

液壓蓄壓器



13

二、HHS介紹 - 能量儲存特性



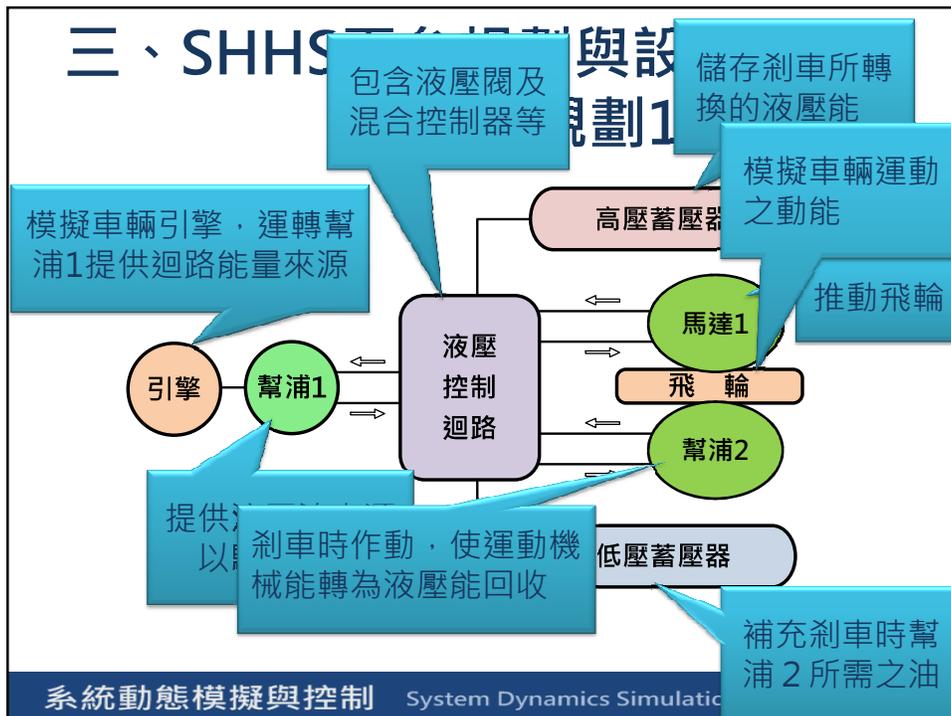
14



Outline

- 一、緒論
- 二、HHS介紹
- 三、SHHS平台規劃與設計
- 四、平台操控與硬體迴路建構
- 五、SHHS實驗與分析
- 六、結論

15



三、SHHS平台規劃與設計 - 平台規劃2

為降低實驗風險，平台以模擬四分之一的2.5t貨車，重量為625 kg，假設時速60公里下之動能，同時計算實驗中相對應之飛輪動能，並依照以下公式：

$$K = \frac{1}{2} m_v v^2 = \frac{1}{2} I \omega^2$$

車重	車速	飛輪慣性矩	飛輪轉速	動能
m_v (kg)	v (km/hr)	I (kg · m ²)	ω (rpm)	K (J)
625	60	10.3	1240	86837

17

三、SHHS平台規劃與設計 - 平台規劃3

飛輪計算後之結果與其他重型車種作比較：

車輛淨重	時速	動能	平台動能 倍數
m (kg)	v (km/h)	K (kg · m ² /s ²)	
2500 (小貨車)	60	347222	4倍
4000 (小巴士)	60	555555	6倍
9000 (貨車)	60	1250000	14倍
15000 (巴士)	60	2083333	24倍

18

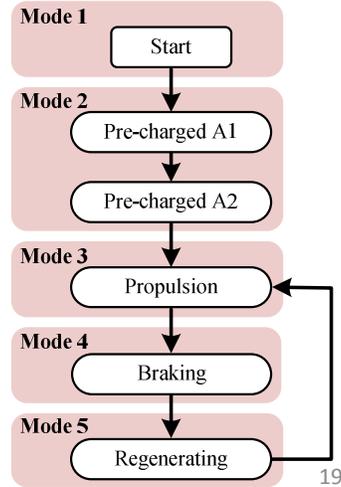
三、SHHS平台規劃與設計

- 平台作動流程與模擬

- 將整個液壓混合動力平台從啟動到回收再生分為五個步驟：

1. 初始模式
2. 預備模式
3. 行駛模式
4. 剎車模式
5. 能源再生模式

- 依照各元件參數進行Matlab模擬分析，利用Simulink/SimScape元規畫油路及作動方式並進行分析。



19

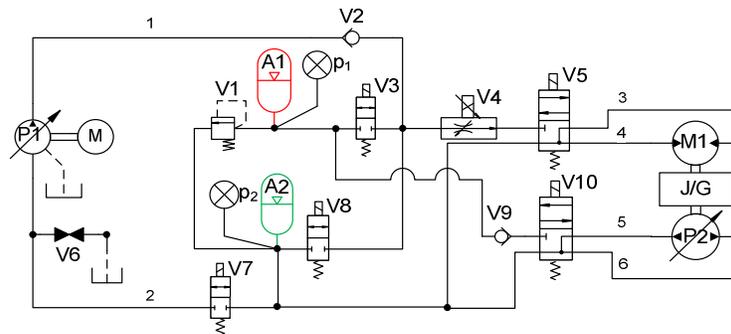
系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

三、SHHS平台規劃與設計

- 平台作動流程介紹1

1. 初始模式

- A1氣體預壓120 bar · A2預壓2 bar。



20

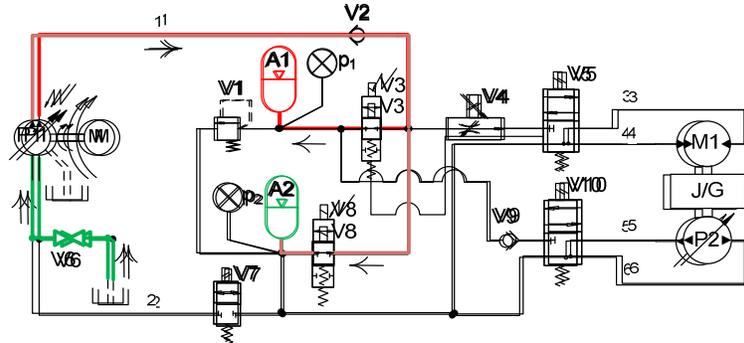
系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

三、SHHS平台規劃與設計

- 平台作動流程介紹2

2. 預備模式

- 液壓油預壓A1至140 bar；A2充入足夠油料，壓力略上升。



21

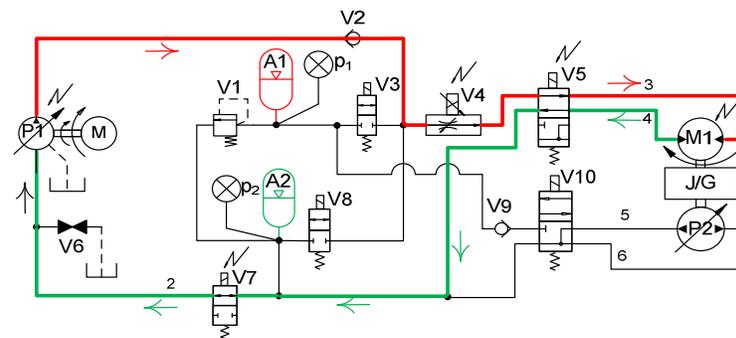
系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

三、SHHS平台規劃與設計

- 平台作動流程介紹3

3. 行駛模式

- 以幫浦1模擬實車動力源直接驅動油壓馬達帶動飛輪機構加速至1100 rpm並行駛一段時間。

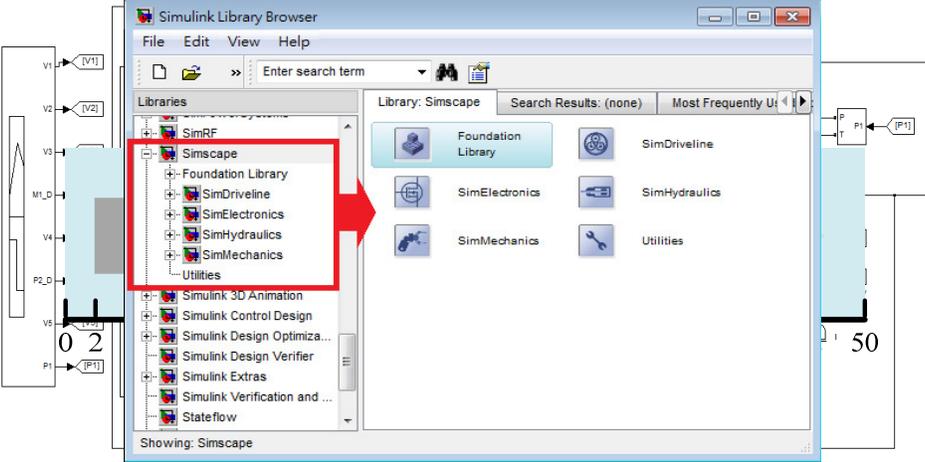


22

系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

三、SHHS平台規劃與設計

- 平台系統迴路模擬分析1



25

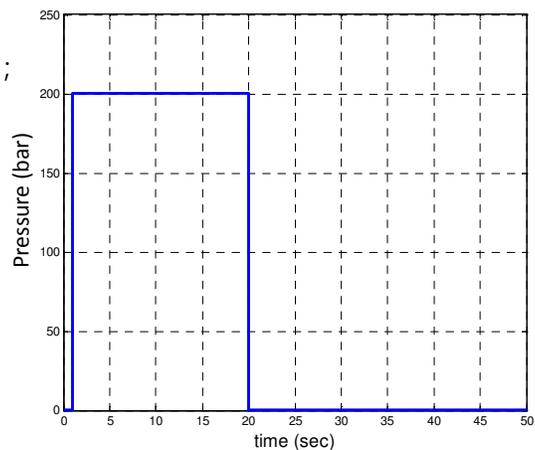
系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

三、SHHS平台規劃與設計

- 平台系統迴路模擬分析2

P1輸出壓力：

- 2秒時輸出200 bar運轉M1；
- 行駛一段期間
- 於20秒停止，壓力降為0 bar。



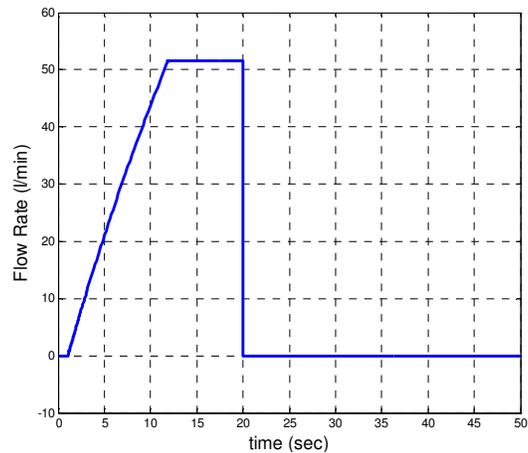
26

三、SHHS平台規劃與設計

- 平台系統迴路模擬分析3

P1流率：

- 2秒啟動，流率逐漸上升。
- 11秒時上升到51 l/m；
- 2~11秒視為加速，11~20秒視為行駛；



27

系統動態模擬與控制

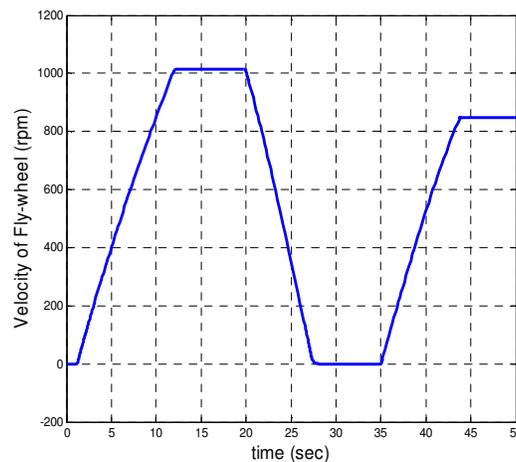
System Dynamics Simulation and Control Lab

三、SHHS平台規劃與設計

- 平台系統迴路模擬分析4

飛輪轉速：

- 2秒開始速度增加
- 11秒時到達轉速1014 rpm；
- 20秒開始煞停，P1停止，P2作動，於27.5秒時煞至0；
- 於35秒時釋放出A1之高壓油並轉動飛輪，使轉速到達852 rpm。



28

系統動態模擬與控制

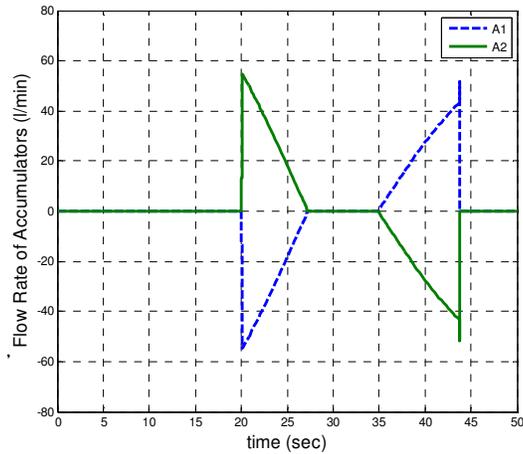
System Dynamics Simulation and Control Lab

三、SHHS平台規劃與設計

- 平台系統迴路模擬分析5

A1、A2流率：

- 系統為封閉狀態，兩者流率呈相對狀態。
- 20秒煞車，A2流出液壓油供給P2並存入A1。
- 煞停時27.5秒停止進出；
- 35秒再起動，將存於A1的液壓油放出，作動後留回A2到達巔峰轉速。
- 44秒時停止進出。



29

系統動態模擬與控制

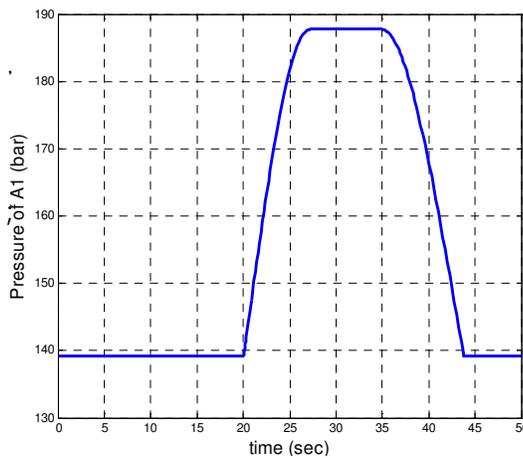
System Dynamics Simulation and Control Lab

三、SHHS平台規劃與設計

- 平台系統迴路模擬分析6

A1壓力：

- 20秒煞車，P2使高壓油存入，瓶內壓力油預壓約140 bar 逐漸上升
- 煞停時27.5秒處至188.6 bar
- 35秒洩放並轉動FW
- 將壓力全部釋放至0時為44秒；此時FW轉速便不在上升，即為回收所能達到最高轉速。



30

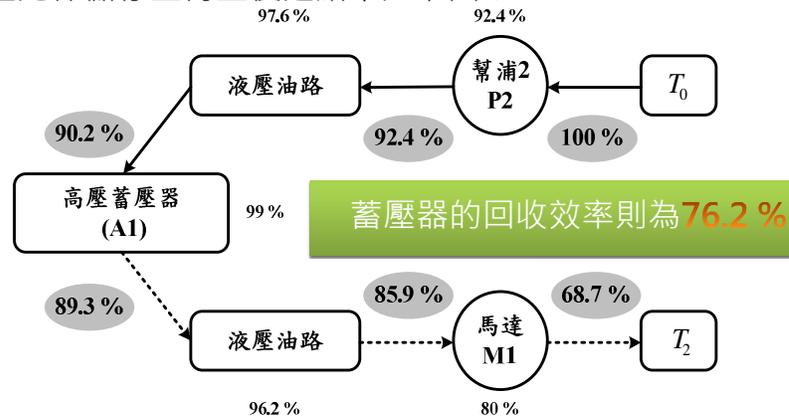
系統動態模擬與控制

System Dynamics Simulation and Control Lab

三、SHHS平台規劃與設計

- 平台系統迴路模擬分析7

透過模擬，將剎車所帶來的制動能視為100%，經過液壓元件儲存並再生後之結果如下圖：



31



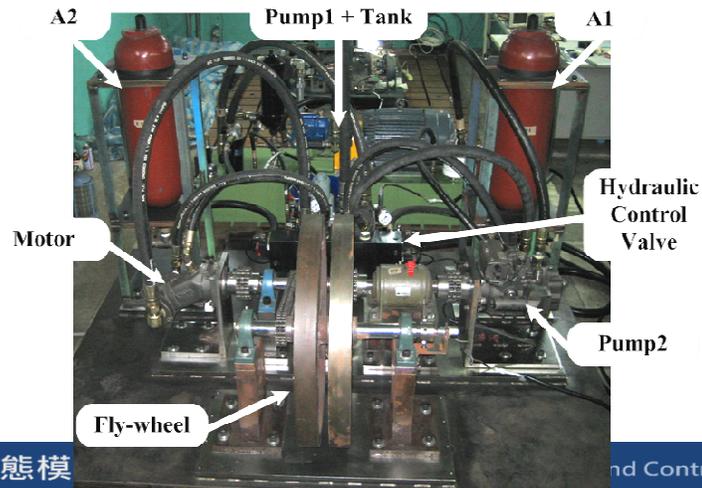
Outline

- 一、緒論
- 二、HHS介紹
- 三、SHHS平台規劃與設計
- 四、平台操控與硬體迴路建構
- 五、SHHS實驗與分析
- 六、結論

32

四、平台操控與硬體迴路建構

SolidWorks配置後完成實體平台的建立：



33

系統動態模

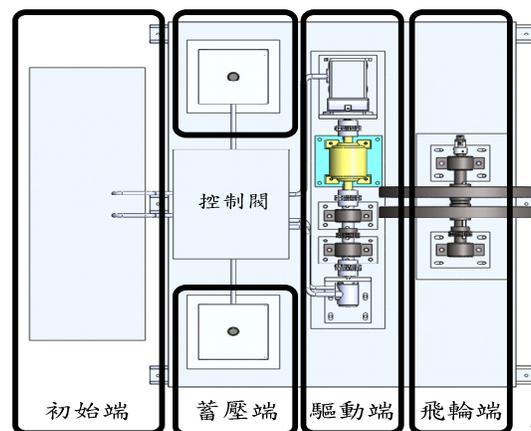
nd Control Lab

四、平台操控與硬體迴路建構

- 實驗平台硬體設備說明

實驗平台硬體建構時，分成4個部分作介紹：

- 平台初始端
- 平台蓄壓端
- 平台驅動端
- 平台飛輪端



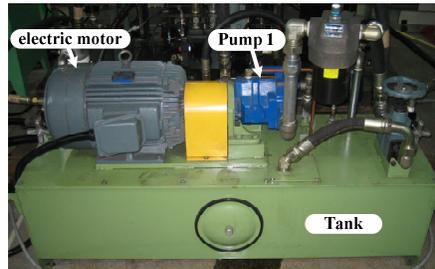
34

系統動態模擬與控制

System Dynamics Simulation and Control Lab

四、平台操控與硬體迴路建構 - 平台初始端

- 設備上部分除了電控馬達及P1外，還包含放油閥及進出口的液壓油過濾器等元件。



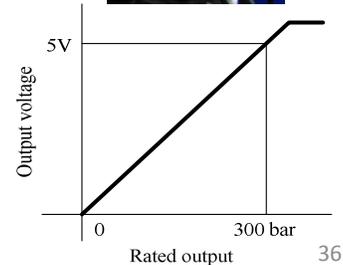
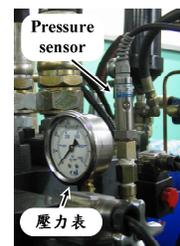
- P1為Piston pump，透過電控馬達驅動抽取底部油箱中的油，打出提供平台使用，其中可透過調整調節閥的彈簧來控制輸出液壓油的壓力值，最高輸出壓力為200 bar。

35

系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

四、平台操控與硬體迴路建構 - 平台蓄壓端

- 包含高、低壓蓄壓器，皆採用20 liter的囊式蓄壓器，可承受最大工作壓力為330 bar。
- 另外，裝設壓力感測器在兩個蓄壓器的出油口迴路上。
- 感測器最高為30 Mpa約為300 bar，其中將0~300 bar的壓力以0~5 V來做轉換，如右表所示。外部亦有壓力錶可直接觀看。



36

系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

四、平台操控與硬體迴路建構

- 平台驅動端

驅動端主要包含液壓馬達(M1)、液壓幫浦(P2)及傳動的鍊輪。液壓馬達為斜軸式定量液壓馬達；液壓幫浦為活塞式可變量幫浦。

液壓馬達(M1)			
排量	最大扭力	最大壓力	最高轉速
$54.8 \text{ cm}^3/\text{rev}$	306 Nm	350 bar	2600 rpm
液壓幫浦(P2)			
最大排量	最大扭力	最大壓力	最高轉速
$75 \text{ cm}^3/\text{rev}$	858 Nm	420 bar	2850 rpm

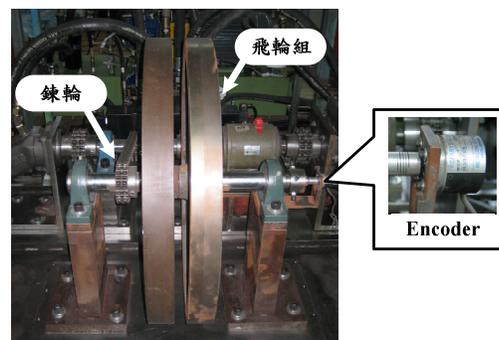
37

系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

四、平台操控與硬體迴路建構

- 平台飛輪端

此部分包括2個直徑700 mm的飛輪，總慣性矩如前面所述為 $10.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ；使用Encoder擷取飛輪轉速。



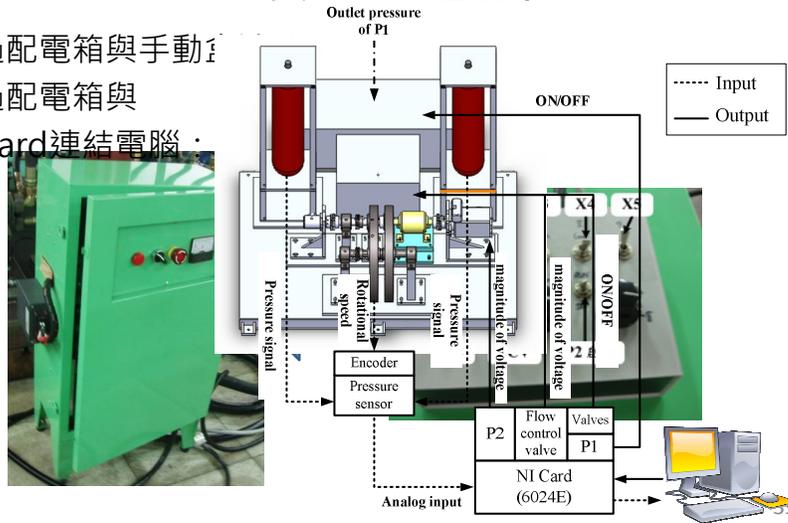
38

系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

四、平台操控與硬體迴路建構

- 實驗平台控制架構

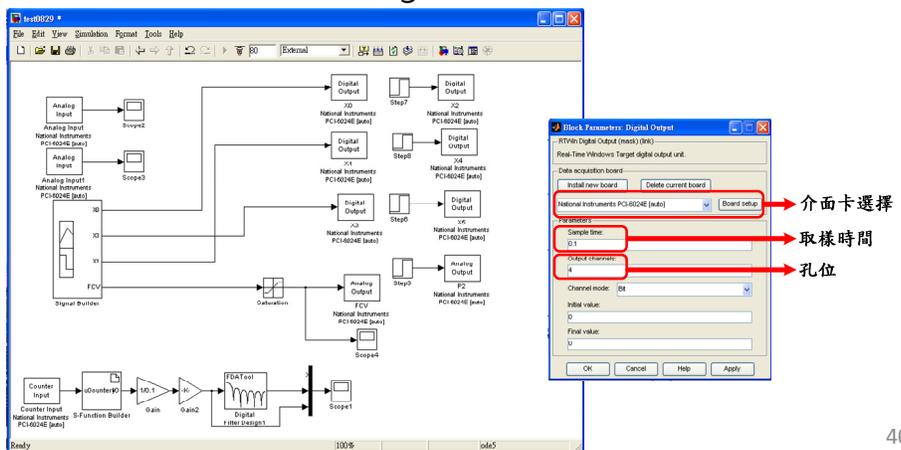
- 透過配電箱與手動控制
- 透過配電箱與 NI card 連結電腦



四、平台操控與硬體迴路建構

- 實驗平台控制架構2

- Real-time Window Target





Outline

一、緒論

二、HHS介紹

三、SHHS平台規劃與設計

四、平台操控與硬體迴路建構

五、SHHS實驗與分析

六、結論

41

系統動態模擬與控制 System Dynamics Simulation and Control Lab

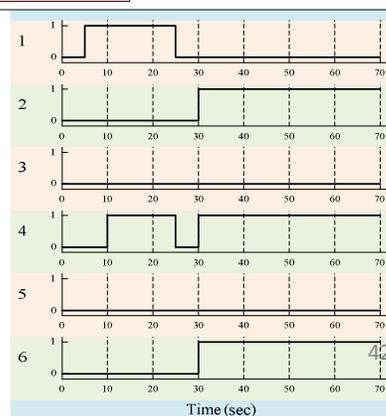
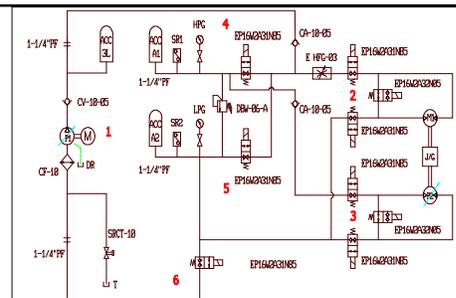
P1與A1蓄壓器壓力響應實驗

- 本實驗以P1輸出高壓油直接蓄入A1，再放出推動飛輪。
- 對照右圖：
 - 5秒P1(1)啟動
 - 10秒A1閥門(4)開啟
 - 25秒時P1、A1關閉
 - 30秒再開啟A1閥門(4)，同時開啟M1迴路閥門(2)及回流閥(6)轉動飛輪。
- A1預壓氮氣140 bar，
P1輸出壓力分別為：

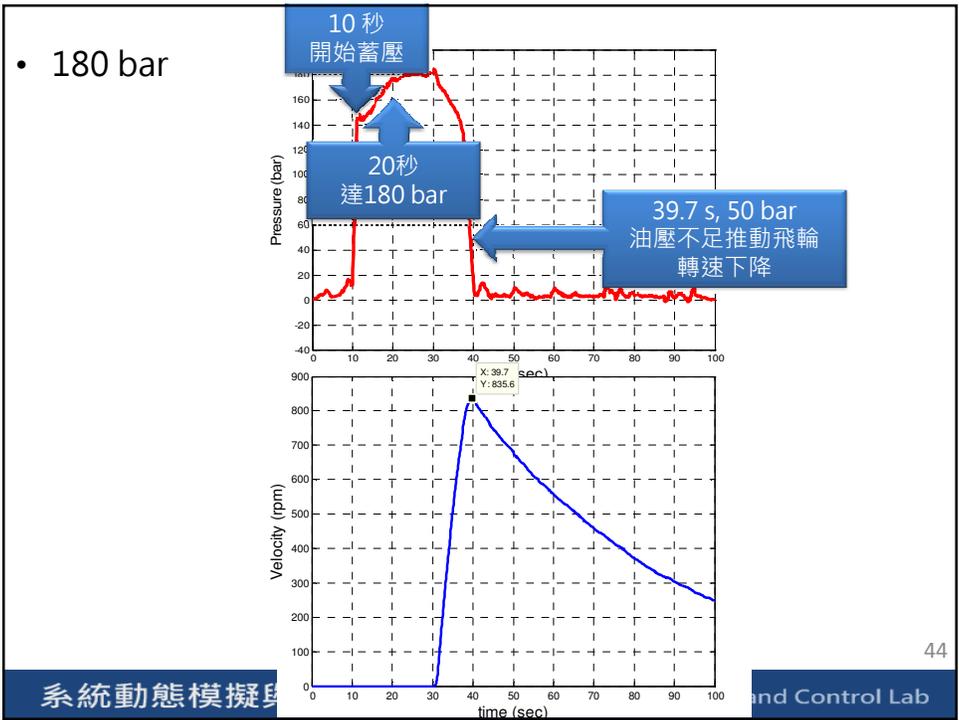
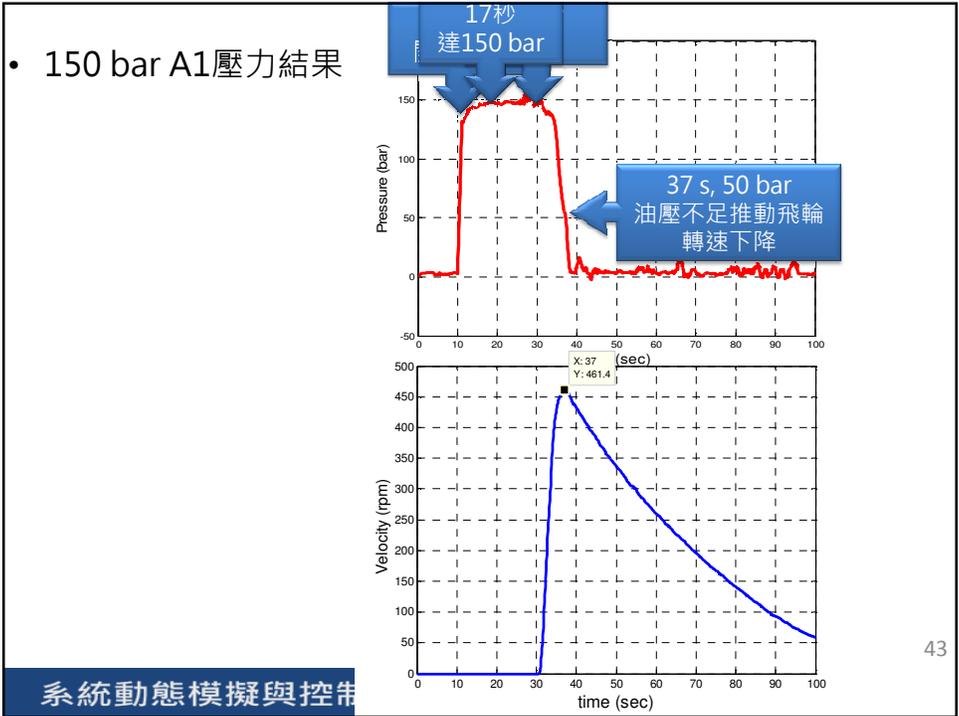
Case 1 : 150 bar

Case 2 : 180 bar

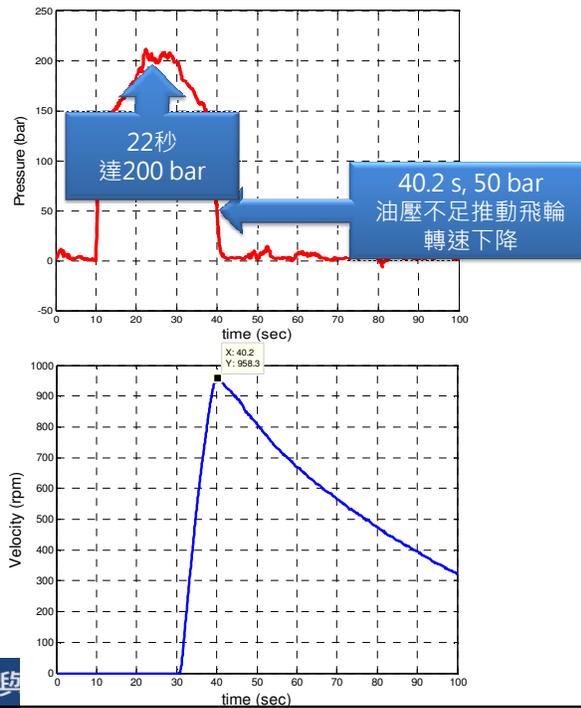
Case 3 : 200 bar



42



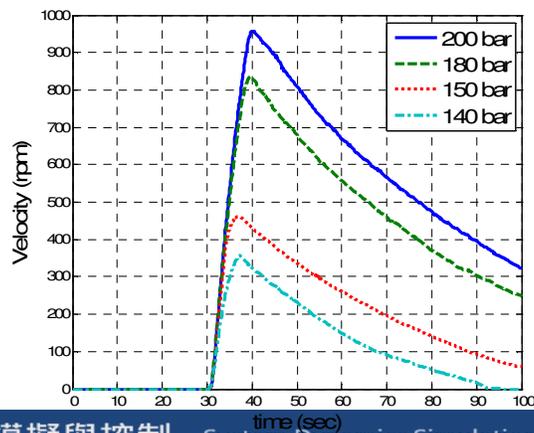
- 200 bar



45

- 140 bar~200 bar飛輪轉速結果：

FCV皆設定開度100%的情況下，蓄壓器釋放液壓油驅動飛輪之加速度皆相同，壓力越高表示儲存能量越多，可以驅動得較久，當壓力降到140 bar 耗盡蓄壓器儲存的油量時，油管內殘餘液壓油會繼續推動一小段時間(加速度跟著變小)，直到壓力不足夠驅動為止。



46

五、SHHS實驗與分析

- A1蓄壓器之儲能計算 1

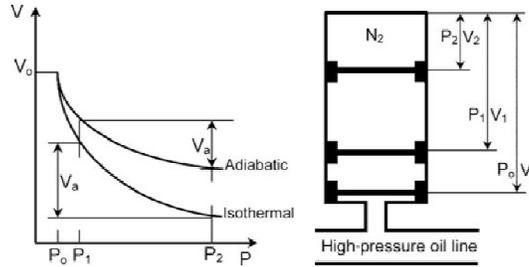
- 透過A1前後壓力變化及飛輪最高轉速來計算，蓄壓器能量輸出可參考以下公式，依照波以爾定律：

$$PV^k = P_0V_0^k = P_1V_1^k = P_2V_2^k = Constant$$

$$E = \int PdV$$

$$\rightarrow V = \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{k}} V_0$$

$$\text{Then } dV = \frac{V_0 P_0^{1/k}}{kP^{(k+1)/k}} dp$$



47

五、SHHS實驗與分析

- A1蓄壓器之儲能計算2

- 因此

$$E_{acc} = \frac{V_0 P_0^{1/k}}{k} \int_{P_0}^{P_1} P^{-1/k} dp = \frac{V_0 P_0^{1/k}}{k-1} \left[P_1^{(k-1)/k} - P_0^{(k-1)/k} \right]$$

- 其中，

$$\begin{aligned} E_{acc} &= \text{蓄壓器儲存之液壓能} \cdot J ; \\ P_0 &= \text{蓄壓器預壓壓力 (氣囊氣體壓力)} \cdot Pa ; \\ P_1 &= \text{蓄壓壓力} \cdot Pa ; \\ V_0 &= \text{蓄壓器容量} \cdot m^3 ; \\ k &= \text{液壓油的比熱比} ; \end{aligned}$$

- 假設蓄壓器在蓄壓及洩壓期間沒有熱的問題，視為絕熱狀態則 $k=1.4$ 。

48

五、SHHS實驗與分析

- A1蓄壓器之儲能計算3

- 再透過飛輪的動能方程式，計算出實際飛輪所接受到並應用的能量，並比較兩者差異，其中飛輪動能公式如下：

$$E_{fw} = \frac{1}{2} I \omega^2$$

- 其中， E_{fw} = 飛輪轉動之機械能， J 。
- 結果如下表所示：

	P_1	ω	E_{fw}	E_{acc}
	(bar)	(rpm)	(J)	
Case 1	150	461.4	1.2023×10^4	1.3935×10^4
Case 2	180	835.6	3.9433×10^4	5.2111×10^4
Case 3	200	958.3	5.1864×10^4	7.5096×10^4

49

五、SHHS實驗與分析

- A1蓄壓器之儲能計算4

- 計算出蓄壓器儲存過程中前後壓力差所帶來液壓能 (E_{acc})，並以轉動飛輪所產生的機械能 (E_{fw}) 做比較，同時計算出蓄壓器的儲能效率 (η)，如以下公式所示：

$$\eta = \frac{E_{fw}}{E_{acc}} \times 100\%$$

- 結果如下表所示：

	Case 1	Case 2	Case 3
P_1	150 (bar)	180 (bar)	200 (bar)
η	86.3 %	75.7 %	69.1 %

50



Outline

一、緒論

二、HHS介紹

三、SHHS平台規劃與設計

四、平台操控與硬體迴路建構

五、SHHS實驗與分析

六、結論

51

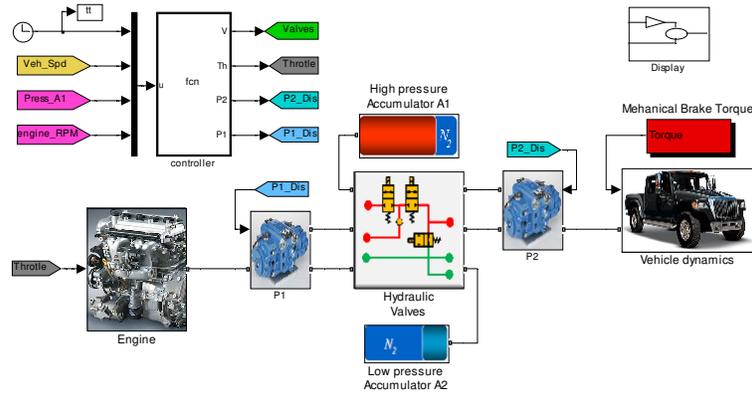
六、結論

- 本研究規劃出串聯式液壓混合系統架構，設計其液壓迴路，並實際製作測試實驗台，以測試實際液壓元件之性能，結合模擬程式進行比較
- 透過SimScape模擬程式來模擬系統整體運作成效，理想狀況下回收之效益為68.7%的動能回收再利用。
- 實驗台實驗目前對實際蓄壓器儲能效率進行測試，透過熱力學和動力學方法計算蓄壓器所儲能量與推動飛輪時所能達到的動能，後續將繼續進行其他部分的實驗，並與模擬結果作詳細比較。

52

六、結論 - 目前研究現況

- 串聯式液壓混合動力車模擬程式，結合引擎及車體動態模型



53

簡報完畢 Q & A



54