行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

太陽能燃料電池混合動力直接驅動車之研發與展示--子計畫四：太陽能燃料電池混合動力車車體結構設計及能量管理系統研發(3/3)

研究成果報告(完整版)

計 畫 類 別 ：整合型
計 畫 編 號 ：NSC 95-2218-E-002-021-
執 行 期 間 ：95 年 08 月 01 日至 96 年 07 月 31 日
執 行 單 位 ：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：楊宏智
共同主持人：鄭榮和
計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：林逸祥、張智凱、林家緯、黃奕超、李喬婷

處 理 方 式 ：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 96 年 10 月 14 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

※ 太陽能燃料電池混合動力直接驅動車之研發與展示 ※

※子計畫四：太陽能燃料電池混合動力車車體結構設計及能量管理系統研發※

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

計畫類別：□個別型計畫 □整合型計畫

計畫編號：NSC 93－2218－E－002－134－

執行期間： 93 年 8 月 1 日至 96 年 7 月 31 日

計畫主持人：楊宏智教授 Email: hyoung@ccms.ntu.edu.tw

共同主持人：鄭榮和教授 Email: jhcheng@ntu.edu.tw

計畫參與人員：林逸祥、張智凱、李喬婷、林家緯、黃奕超

本成果報告包括以下應繳交之附件：

□赴國外出差或研習心得報告一份

□赴大陸地區出差或研習心得報告一份

□出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

□國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學 機械工程學研究所

中 華 民 國 96 年 10 月 11 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

太陽能燃料電池混合動力直接驅動車之研發與展示

子計畫四：太陽能燃料電池混合動力車車體結構設計及能量管理系統研發

Development of the structure and energy management system of solar and fuel cell hybrid vehicle

計畫編號：NSC 93－2218－E－002－134－

執行期限：93 年8 月1 日至96 年7 月31 日

主持人：楊宏智教授 Email: hyoung@ccms.ntu.edu.tw

共同主持人：鄭榮和教授 Email: jhcheng@ntu.edu.tw

計畫參與人員：林逸祥、張智凱、李喬婷、林家緯、黃奕超

國立台灣大學 機械工程學研究所

一、 中文摘要

1.1 車體結構設計

本計畫車體結構設計部分，以三年時間設計製造完成混合動力車體，針對此總計畫提供共用測試平台。本研究前兩年度完成了車體設計 ESO (Evolutionary Structural Optimization)分析及初步的結構繪製，及以車體的剛性需求為設計目標，進行全車等效殼元素模型的分析，完成了車體結構初步的設計。第三年度首先以車體進行三明治結構的材料鋪放最佳化 ESSO (Evolutionary Sandwich Structural Optimization)，及以結構局部補強、膠合測試等材料試驗進行細部的結構設計，最後再進入製程的規劃，以完成整車結構的設計製造。

關鍵詞：等效殼元素模型、ESO、ESSO

1.2 能量管理系統研發

本研究主要為發展燃料電池車能量管理系統。本燃料電池車使用燃料電池與鋰蓄電池複合作為電力來源，研究發展其動態調變燃料電池輸出的能量管理策略， 並集合了series thermostat、series power follower、parallel electric assistance 三種現存複合電動車能量管理的優點，作為本燃料電池車的能量管理策略。改善現存能量管理策略在燃料電池功率偏小時，蓄電池容易過低的問題，並且仍保有良好的燃料效率。

關鍵詞：燃料電池車、複合動力、能量管理系統

Abstract

1.1 Car body structure development

It will take three years to design and build the car body as a test platform for the main project. The ESO analysis and preliminary drawing of the body structure has completed in the last year. This year, we will further modify the structure to achieve a high stiffness design by using effective shell models developed. In addition, the mechanism of the equipment on car will also be designed to complete structure integrity.

Keywords: Optimization Shell element、ESO、ESSO

1.2 Energy management system development

This project is mainly focused on developing energy management strategy of a fuel cell hybrid vehicle. The fuel cell hybrid vehicle uses both fuel cells and lithium-polymer batteries as electric source. It also develops dynamic adjusting strategy, which adjusts fuel cell output power dynamically according to the state of charge (SOC) of the lithium - polymer battery. The strategy adopts concepts of three existing methods: series thermostat, series power follower, and parallel electric assistance, thus keeps the individual advantage of them. Furthermore, we improve a low SOC hazard when the fuel cell power scale is small, and provide a fine fuel economy performance.

Keywords: Solar cell，Fuel cell，Energy management system

二、前言

2.1 車體結構設計

燃料電池車為先進國家汽車製造商積極研發深具潛力之未來車種，但大部分汽車廠仍沿用引擎車車體改裝製造成燃料電池車體，因此仍有車體過重，空阻過高，耗能過高及車內空間配置不良等問題存在，係違背節省能源之初衷。本研究計畫，針對太陽能及燃料電池混和動力車，設計嶄新車體結構，以全面輕量化設計，配合低滾阻電動車專用胎，低空阻外型，以有效利用能源確實發揮電動車性能，使其能於目前引擎動力車並駕齊驅。

2.2 能量管理系統研發

台大機械系自2005 年初開始研究零污染排放商用車輛，採用燃料電池搭配鋰離子蓄電池作為複合的形式，（以下簡稱混合動力車）。使用燃料電池可以有效提高續航力，並有著便於補充能量的特

點，但缺點是無法進行瞬間大電流放電。為了補足燃料電池的缺陷，本研究並聯鋰電池系統，使其負責提供瞬間的能量變化需求。本混合動力車的使用場合設定為市區多交通號誌，反覆停等、啟動的行車狀態，可望藉由煞車時的回充，以及行車時(起步加速與巡航)合適的燃料電池與蓄電池搭配，提升能量效率。本研究達成電力系統的設計、搭配，以及中控電腦的網絡規劃。並建立燃料電池車全車數學模型，同時設計不同能量管理策略，放入模型中進行模擬，收斂其結果並加以比較，以求得最合適的能量管理策略。

三、研究目的

3.1 車體結構設計

為了提高車輛的安全性以及運動性能，一般的靜力加載之設計條件已經無法滿足現今車輛於結構設計上之需求，取而代之的是越來越高的結構剛性設定。

藉由先前的設計研究，我們成功的利用演化式最佳化方法透過三種基本之重力加載：3G、煞車及轉向需求，完成了基礎的結構外型。但是經由剛性測試模擬，結構上初步的材料匹配是無法滿足其需求的。因此，為了使本計畫之車輛也能擁有良好的安全性及運動性能，本年度的研究將朝向提高剛性的目標，對原先的結構與材料規劃進行修正。另外，也將去設計車體上的相關機構，使整個結構設計更加的完整。

3.2 能量管理系統研發

本混合動力車設計使用習慣要與一般商用車輛相近，車輛出廠後，只需要充填氫氣燃料，不需要額外充放蓄電池，所以能量管理的首要目標是在任何情況都維持蓄電池 SOC 在特定範圍變動，不可發生過充或過放。

所以本混合動力車能量管理將以蓄電池不發生過充或過放為前提下，盡可能提升燃料效率，最後才是講求加速性能的滿足。

SOC不可過充過放

符合UDDS&US-06
行車情境之能量需求

最大化mpg

符合US-06加速性能

圖 1 能量管理目標之優先順序

四、文獻探討

4.1 車體結構設計

近幾年來，車體結構於剛性上的需求已經越來越高，由較早期 PNGV(The partnership for a Generation of Vehicle)的規範：Static torsion stiffness_7500 Nm/deg、Static bending stiffness_6500 N/mm，到最近 ULSAB(UltraLight Steel Auto Body)的剛性規範：Static torsion stiffness_13000 Nm/deg、Static bending stiffness_12200 N/mm。其數值需求就幾乎提高了一倍。同時，經由許多相關的車體設計技術報告或論文便可以發現，目前的設計幾乎都用剛性作為最初步的設計考量，且當剛性滿足需求時，大多的靜力加載條件就都自然滿足了。

除了計算單位位移量下的施力值外，車體剛性的好壞亦可以使用自然震動頻率的大小來判斷。且不當的結構補強，甚至會使的車體的比剛性及自然震頻降低。因此，我們於車體結構的修正與補強必須分外小心，依照分析結果之受力情形，決定強化或修正的方式。

4.2 能量管理系統研發

4.2.1 能量管理流程

本混合動力車並不像太陽能車比賽，有已知的行駛里程，所以無法使用反向式的概念回推蓄電池 SOC 與車速，必須使用正向式的概念計算能量分配。雖然本混合動力車的全車模擬將使用反向式的順序採用正向式的概念。

4.2.2 SOC 規劃

本混合動力車的 SOC 規劃重點在於，SOC 的操作上下限的訂定。ADVISOR[1]的建議是，SOC 的操作範圍盡量選在蓄電池內電阻較低的區間，如此可以有較少的能量損失。典型的鋰電池 SOC 操作範圍為 40%~60%。

而考慮能量管理的最基本要求，蓄電池不可過充過放，所以再額外加上充放電限制，當 SOC 低於 20%時，不可放電，當 SOC 高於 80%時，不可充電。此 SOC 充放電限制，是能量管理的第二道防線。

檢視能量管理模擬結果時，SOC 應落 60%~40%，若超出此操作範圍，落在第二道防限所設定的 20%~80%，表示能量管理失敗，當除去第二道防線時，有可能發生過充或過放。

4.2.3 燃料電池的特性

燃料電池雖然也是能量輸出元件，但燃料電池其實應該稱為能量轉換裝置，只能放電，無法回存充電，這是跟蓄電池很大的不同。

而燃料電池受限於氣體反應速率，輸出功率反應並不像一般蓄電池這麼快速。還有若燃料電池膜

極組設計不良或運轉環境高壓高溫使輸送氣體管道形變，則有可能造成流體擴散不均或管內具有二次流（secondary flow）。當負載增加，需要的氫氣流量變大，但由於二次流造成某些區段阻塞，使得氣體無法順利流入流道內，燃料電池電壓便因此下降，這就是所謂的 choke[2]。

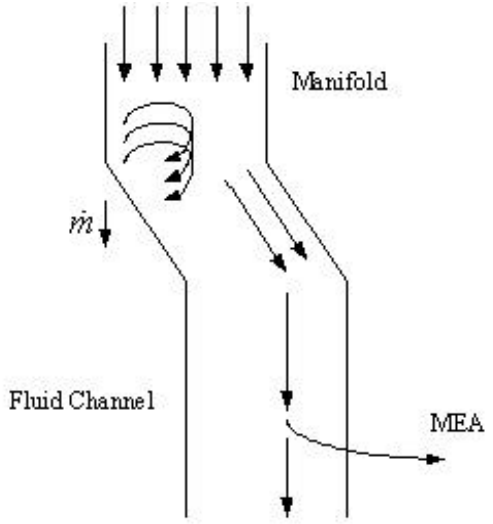


圖 2　燃料電池氣體流道二次流示意圖

4.2.4 串聯式與並聯式的能量管理方法

最原始的串聯式能量管理方法 series thermostat，只能最佳化一個電力元件，例如油電混合車上的引擎或本混合動力車上的燃料電池，而無法顧及剩下的其他元件，例如馬達與蓄電池。在其後發展的，不管是串聯式的變形或並聯式的方法，都朝向同時最佳化多個電力元件為目標，例如設定輸出為燃料電池在額定功率，而蓄電池在充放電內電阻較低的 SOC 區間的交集，以提升 mpg。本研究所要發展的能量管理方法也採用類似的概念。

五、研究方法

5.1 車體結構設計

將上一年度建立好的結構代入剛性判準進行分析，觀察整體結構之受力與形變情形，先對全車的主體結構修改。修改時參考新的最佳化分析結果、國外類似車輛的結構以及相關研究論文，以減少錯誤嘗試的次數。另外，結構的修改也盡量整合內裝結構與外殼，以減少材料及空間上的浪費。並針對車體結構所需的剛性及強度需求，對全車進行分區的演化式三明治結構最佳化，以遠高於傳統方法之效率達到最佳化之材料參數組合，以完成初步的設計。

細部設計上，針對三明治結構的應力集中處進行幾何設計的修正，或是局部的補強，建構出較連續的力量傳遞路徑，在接合處以分析及實驗方法確定接合強度。局部補強處：於剛性不足面材受力過大處，增加心材的厚度、表面碳纖維層數，於承載過大剪應力處更換強度更大的材料。接合處：以 ASTM 實驗取得膠的材料常數，並加入膠合元素進行分析，確定較有效率的接合方式，及預測破壞模

式、破壞力量，在確保強度的需求下以完成結構的細部設計。

在製程規劃上，則進行脫模的試驗及材料鋪放的規劃。

而於機構設計上則由 2D 簡化幾何進行機動與力學分析，確認機構動作正常後在進一步建立 3Dcad model 進行干涉考量，最後設計結構接面細部，安裝於全車模型上。

5.2 能量管理系統研發

5.2.1 混合動力車的模型

本研究使用 Matlab/Simulink 建立混合動力車模型，將全車切割成五大區塊：vehicle、motor、power splitter、fuel cell、battery。程式啟始時會使用文字檔輸入各區塊的參數。當抽換不同尺寸的馬達、燃料電池等元件時，使用者只要修改文字檔內的數值，不需要更動 Simulink 模型的內容。只有在抽換不同能量管理方法時，需要更動 power splitter 區塊的內容。區塊間以車速、扭力或功率等高階的資訊(而非低階的電壓或電流等資訊)互向傳遞訊息。模擬過程是以查表方法讀取各區塊的參數，所以本模擬假設各元件處於穩定狀態，不考慮暫態情況。

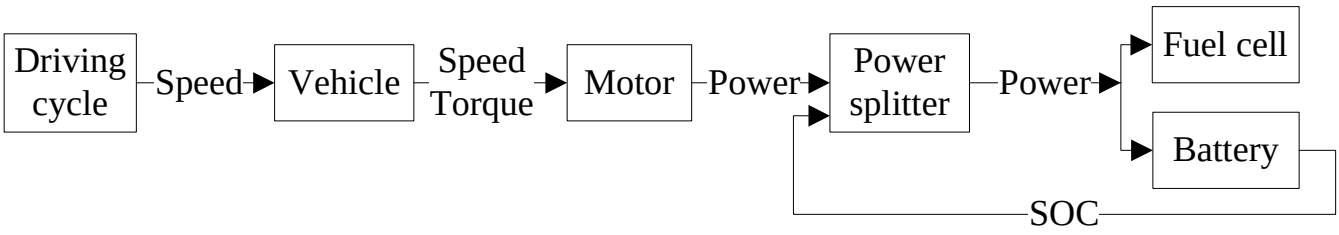


圖 3　混合動力車模型架構

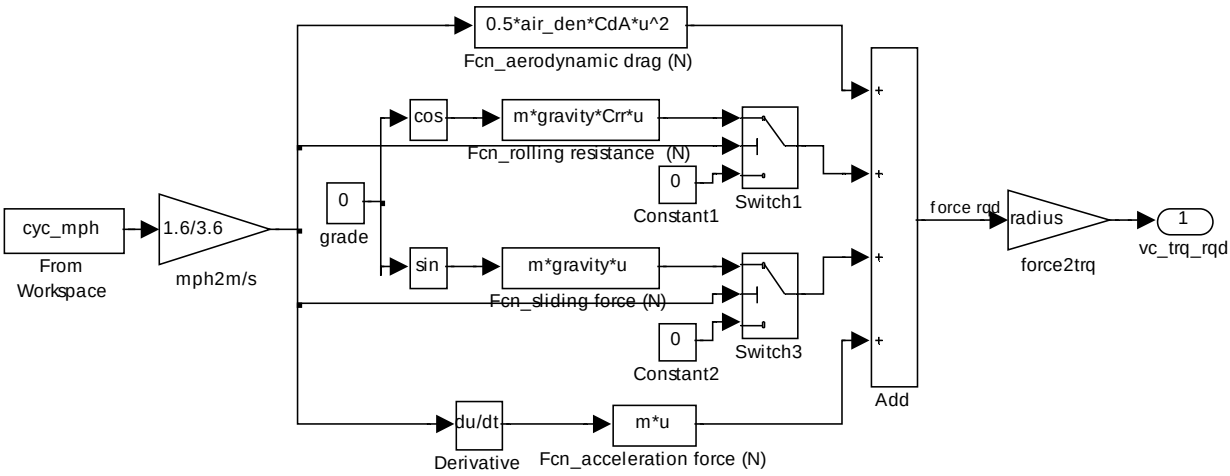
模擬過程以查表方法讀取各區塊的參數，所以本模擬假設各元件處於穩定狀態，不考慮暫態情況。

5.2.2Vehicle 區塊

Vehicle 區塊包含的參數有，車重、C_dA、輪胎半徑。並且負責將行車情境所描述的車速轉換成驅動車輛所需的扭力，包括空氣阻力、滾動阻力、下滑力以及加速所需的慣性力。

$$
\begin{aligned}
F_{car} &= \text{空氣阻力} + \text{滾動阻力} + \text{加速慣性力} \\
&= \frac{1}{2}\rho C_d A \times V^2 + mgC_{rr} + ma \\
&= F_{rqd} = \frac{T_{rqd}}{r}
\end{aligned}
$$

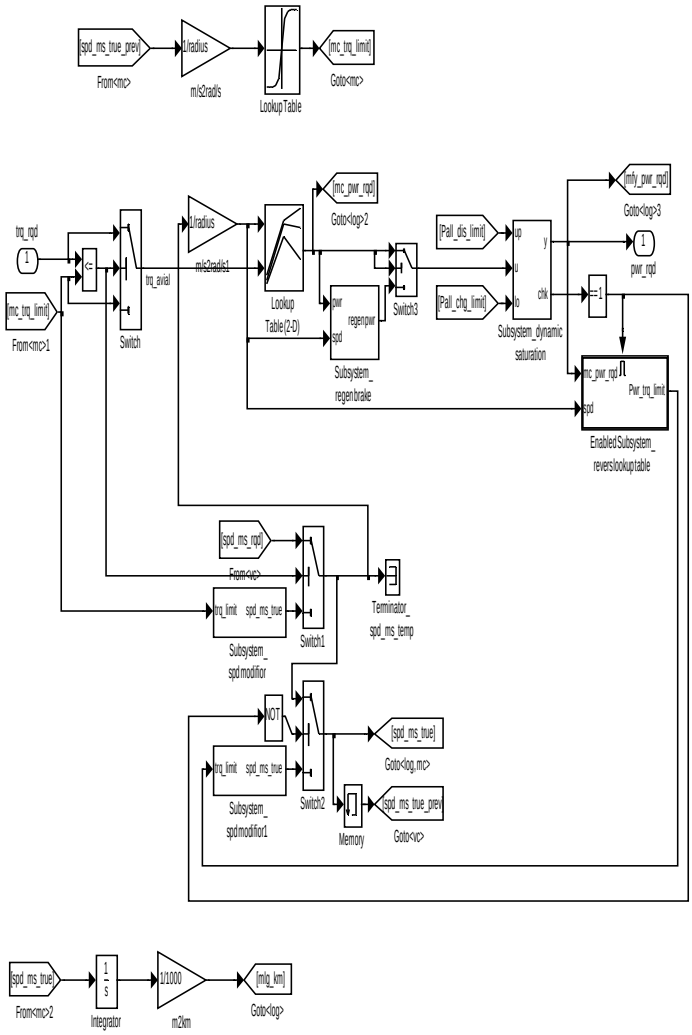
其中 r 為車輪半徑。



Vehicle 區塊

5.2.3 Motor 區塊

Motor 區塊包含的參數有，馬達轉速對扭力的效率 contour 圖、最大扭力限制以及回充煞車比例。Motor 區塊的計算包含四大項目，請見下圖標示。



Motor 區塊

（1）檢查扭力限制。由於本混合動力車使用直驅輪轂馬達，沒有離合器、齒輪變速箱等一般汽油引擎車的傳動部分，減速比為 1：1，所以在本模型假設馬達與輪胎之間效率為 100%，沒有損失。Motor 區塊直接接收從 Vehicle 區塊傳來的扭力需求 T_{rqd} 後，檢查是否超出馬達所能提供的最大扭力。

（2）檢查功率限制。從馬達效率 contour 圖查表推出功率需求。當功率需求為負值，表示充電，則計算回充煞車。當功率需求為正值，表示放電。所計算出來的功率也不可超出馬達以及燃料電池和蓄電池所能提供的範圍。正的功率限制取決於燃料電池加上蓄電池的最大放電能力，負的功率限制則取決於蓄電池的最大充電能力。

（3）若超過（1）或（2）的限制則進行修正，正經過扭力修正與功率修正後，才是馬達真正可以輸出的扭力 T_{motor}

則車輛的力平衡方程式改寫成：

$$F_{car} = \frac{1}{2}\rho C_d A V^2 + mgC_{rr} + ma' = F_{motor} = \frac{T_{motor}}{r}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2}\rho C_d A V^2 + mgC_{rr} + m\frac{V - V_{prev}}{dt} - \frac{T_{motor}}{r} = 0$$

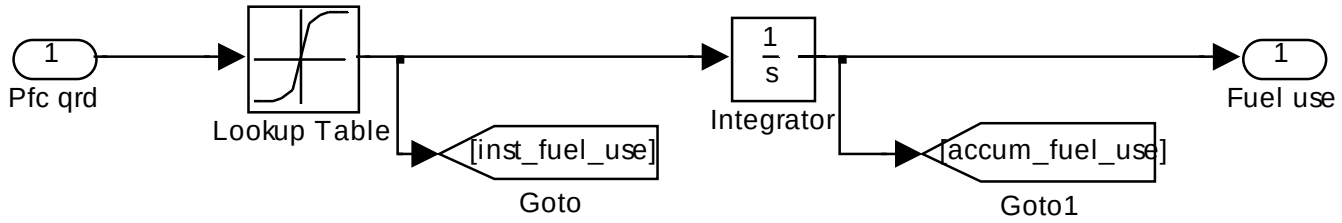
$$\Rightarrow \left(\frac{1}{2}\rho C_d A\right)V^2 + \left(\frac{m}{dt}\right)V + \left(mgC_{rr} + \frac{mV_{prev}}{dt} - \frac{T_{motor}}{r}\right) = 0$$

所以只要帶入前一時刻的車速 V_{prev}，上式就會變成 V 的一元二次方程式，可以很容易地用公式解求出的真正車速 V。

（4）最後將修正後速度積分計算總里程。

5.2.4 Fuel cell 區塊

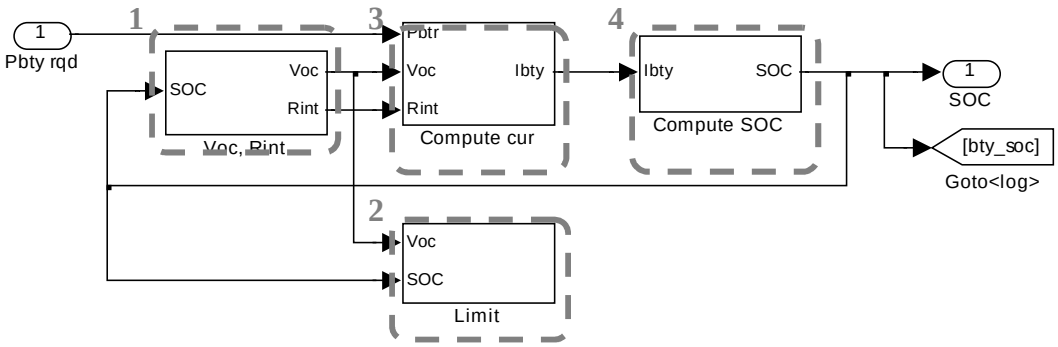
Fuel cell 區塊需要輸入的參數為各種輸出功率下的燃料消耗，單位為 g/s。本區塊依據消耗功率查表得出燃料消耗，並積分計算消耗總量，以與 motor 區塊算出的總里程相除計算 mpg。本區塊模擬不包含 cold start、choke 等暫態。



Fuel cell 區塊

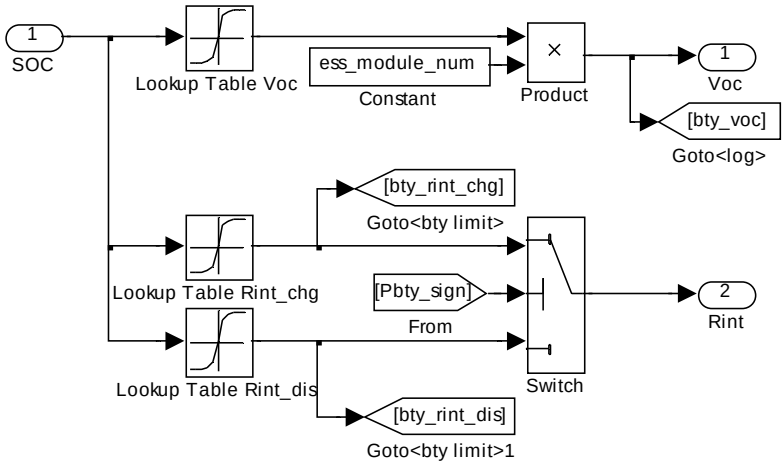
5.2.5 Battery 區塊

Battery 區塊包含了四大範疇，請見標示。



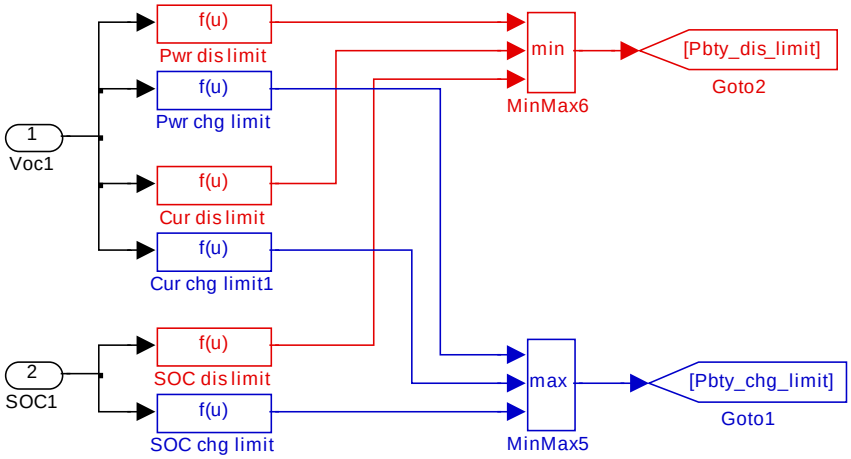
Battery 區塊

（1）首先查表求出蓄電池開路電壓以及充放電內電阻



查表求蓄電池開路電壓與內電阻

（2）計算蓄電池充放電限制，其中包含蓄電池本身的功率限制、充放電電流限制，以及 SOC 限制。



蓄電池充放電限制

- 放電功率限制

以放至開路電壓 V_{OC} 的二分之一為限，此時電流表示成：

$$I = \frac{V_{oc} - V_{oc}/2}{R_{int,\,dis}}$$

其中 $R_{int,\,dis}$ 為蓄電池放電內電阻。

放電功率表示成：

$$P = I \times \left(V_{oc} - I \times R_{int,\,dis}\right) = \frac{V_{oc}^{\ 2}}{4R_{int,\,dis}}$$

- 放電電流限制

最大放電電流以該電池規格所述的最大放電 C 數為限，此時放電功率表示成：

$$P = I_{max\,dis\,C\ rate} \times \left(V_{oc} - I_{max\,dis\,C\ rate} \times R_{int,\,dis}\right)$$

其中 $I_{max\,dis\,C\,rate}$ 為蓄電池最大放電電流，在本混合動力車上為 200 安培。

- 放電 SOC 限制

則是當 SOC 低於 20%，放電功率設成 0，強制保護蓄電池不會過放。

綜合以上三種放電限制，取最小者為準。

- 充電功率限制

以充至蓄電池最高電壓為限，此時電流表示成：

$$I = \frac{V_{oc} - V_{max}}{R_{int,\,chg}}$$

其中 $R_{int,\,chg}$ 為蓄電池充電內電阻。

充電功率表示成：

$$P = I \times \left(V_{oc} - I \times R_{int,\,chg}\right) = \frac{\left(V_{oc} - V_{max}\right) \times V_{max}}{R_{int,\,chg}}$$

- 充電電流限制

最大充電電流以該電池規格所說的最大充電 C 數為限，此時放電功率表示成：

$$P = I_{max\,chg\,C\ rate} \times \left(V_{oc} - I_{max\,chg\,C\ rate} \times R_{int,\,chg}\right)$$

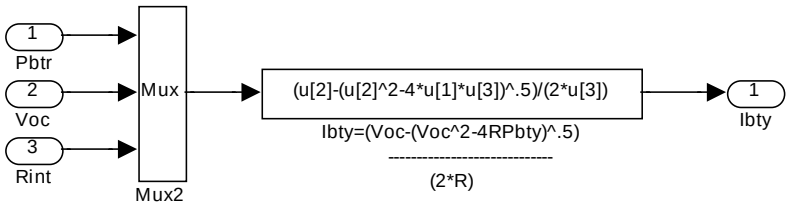
其中 $I_{max\,chg\,C\,rate}$ 為蓄電池最大充電電流，在本混合動力車上為 20 安培。

- 充電 SOC 限制

是當 SOC 高於 90%，充電功率設成 0，強制保護蓄電池不會過充。

以上三種充電限制皆為小於或等於零，取最大者為準。

(3)計算蓄電池充放電流。當輸出功率已知，對照內電阻模型的等效電路(**錯誤! 找不到參照來源。**)，則真正的蓄電池輸出電流可以由 $P = I \times V_{oc} - I^2 \times R_{chg}$ 這個電流的一元二次方程式求出。

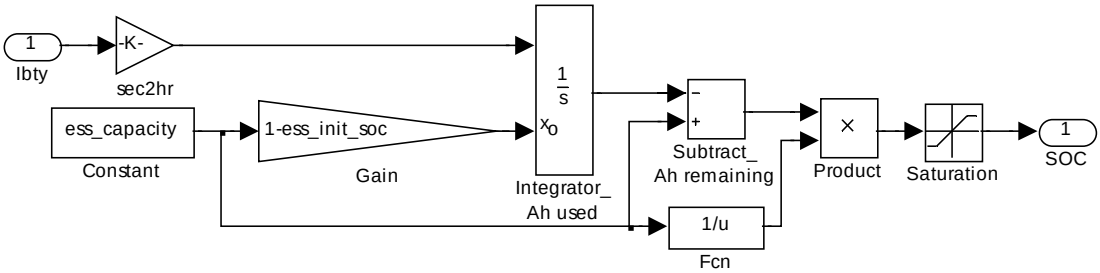


計算蓄電池充放電流

(4) 最後以安培積分法[3]，計算 SOC

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t} I_{bty}\,dt$$

其中 SOC_0 為初始值，C 為蓄電池容量，I_{bty} 為蓄電池電流。



計算 SOC

5.2.6 Power splitter 區塊

是真正進行能量分配計算的區塊，此區塊的輸入是 motor 區塊輸出的功率需求以及 battery 區

塊回授的 SOC，然後根據這兩個資訊，計算出合適的能量分配。所要達成的目標是在經歷任何的行車情境蓄電池都不可以過充或過放（如前一小捷所述，能量管理設定 SOC 應落在 40%~60%之間），而燃料電池的輸出改變量則要儘量平緩，終極目標則是提高 mpg 與達到 US-06 行車情境的加速性能。

本研究模擬了五種能量管理方法，方塊圖請見 04，五種方法的統整請見

表 1。

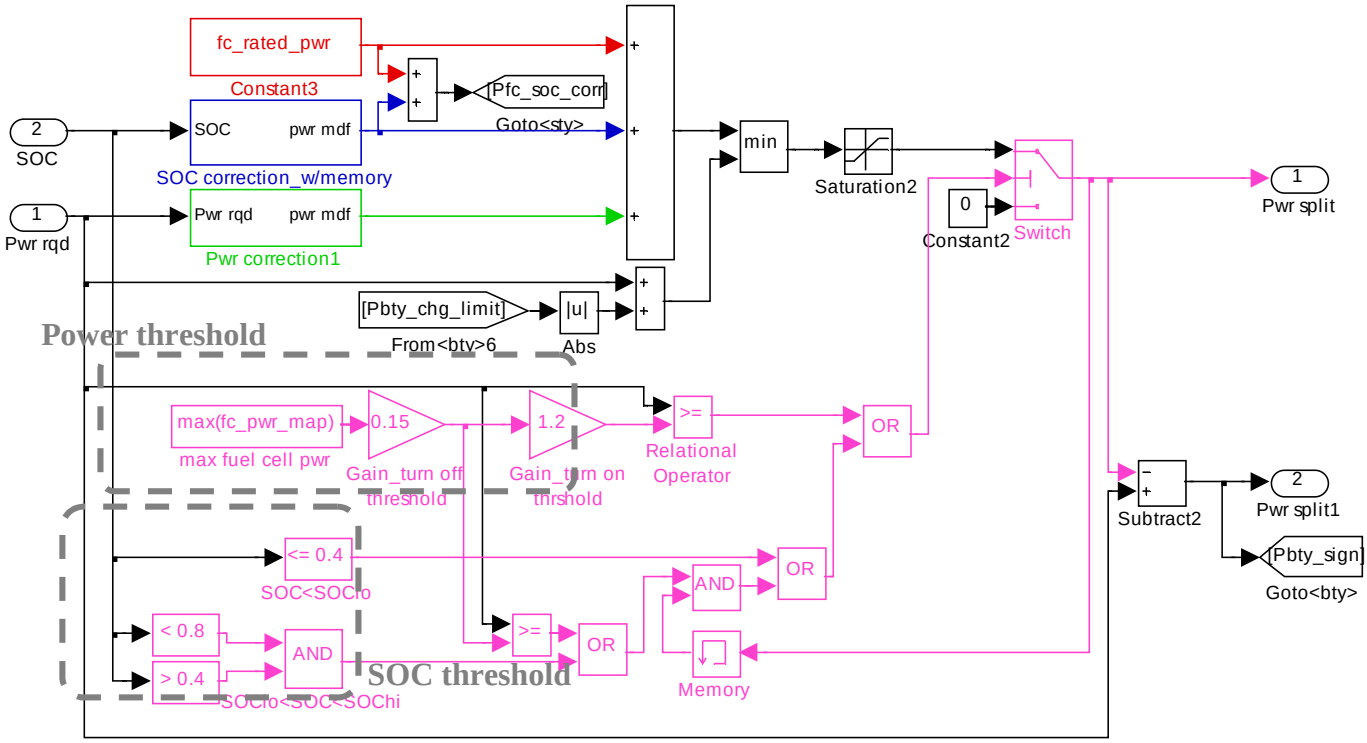


圖 4 動態調變燃料電池輸出方塊圖

此五種能量管理方法都將計算區分成兩個 scope：（1）是否要輸出燃料電池，以及（2）燃料電池輸出功率的大小。

（1）0 中粉紅色的部分負責判斷是否要輸出燃料電池，包含 power threshold 與 SOC threshold。Power threshold 如第二章所述，燃料電池關閉上限為其最大功率的 15%、開啟下限為關閉上限關閉上限的 1.2 倍。

（2）0 中紅色、藍色和綠色三個方塊則負責計算燃料電池的輸出功率大小。紅色方塊為燃料電池的額定功率，為一常數。藍色方塊為 SOC 的回授修正，本研究採用兩種修正方法（請見 0 與 0），一個是 ADVISR 原本的方法，，表示成：

$$P_{SOC\ corr} = P_{byt\ chg} \times \left(\frac{\frac{SOC_{up} + SOC_{low}}{2} - SOC}{\frac{SOC_{up} - SOC_{low}}{2}} \right)$$

另一個是帶有記憶效應的累加。本研究將上述公式中的 $P_{byt\ chg}$ 減小至 100W（原為 1000W），然後將 SOC 修正改成帶有記憶效應的累加，成為：

$$P_{SOC\ corr} = P_{SOC\ corr,\ prev} + P_{byt\ chg} \times \left(\frac{\frac{SOC_{up} + SOC_{low}}{2} - SOC}{\frac{SOC_{up} - SOC_{low}}{2}} \right)$$

0 中以紅色標示出與兩種 SOC 修正不同之處。

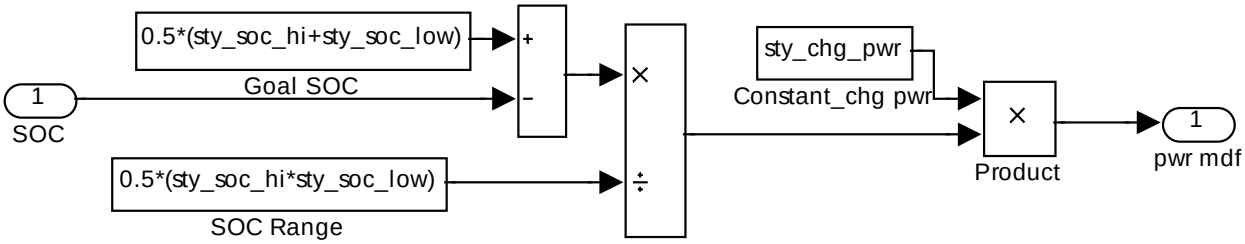


圖 5　　ADVISOR 的 SOC 修正方塊圖

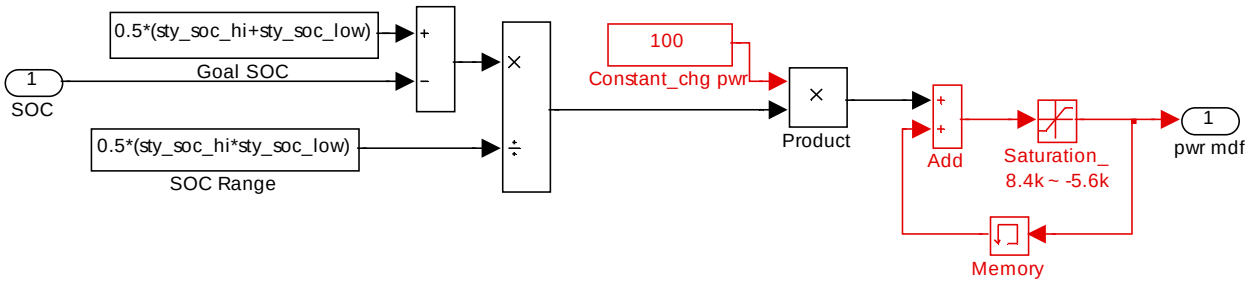


圖 6　　帶有記憶效應的 SOC 修正方塊圖

帶有記憶效應的 SOC 修正使燃料電池的輸出範圍不僅限於額定功率的+-1000W，而是隨 SOC 大小，動態地在 0~14kW 的全範圍變動，可以適應 SOC 很高與很低的情況，調節充放蓄電池的功率範圍。見圖 7 示意圖，左圖為原始 ADVISOR 的 SOC 修正下燃料電池輸出的結果，右圖則為帶有記憶效應累加的 SOC 修正下燃料電池輸出的結果。

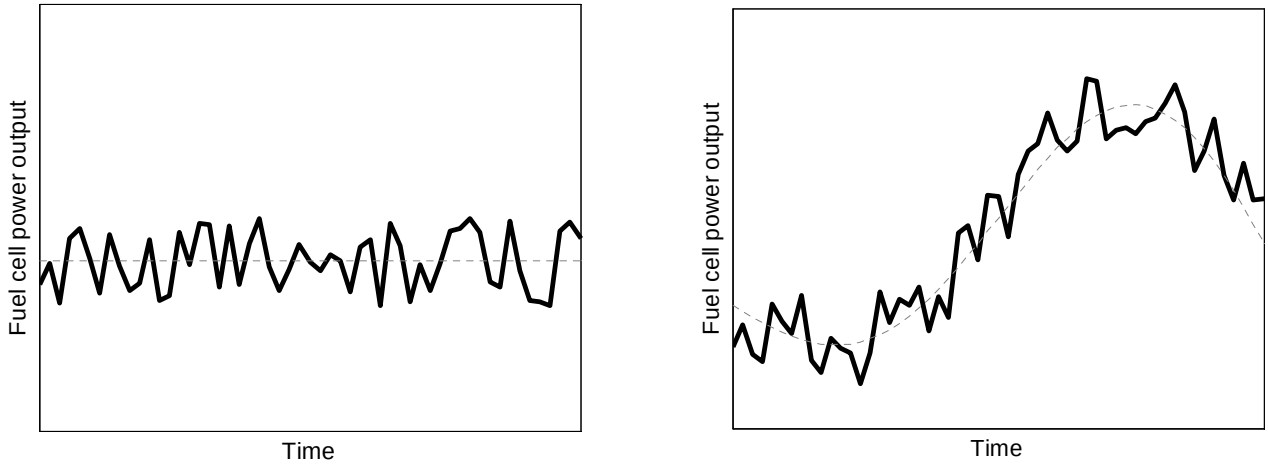


圖 7 燃料電池輸出震盪示意圖

綠色方塊是功率修正，其內容如圖 8 所示，將 motor 區塊傳遞過來的功率需求取 30 秒鐘 moving average 後，以與 SOC 修正類似的概念映射至燃料電池剩餘可輸出功率範圍。取 30 秒平均是為了使燃料電池輸出的變量盡量平緩。

$$P_{pwr\ rqd\ corr} = \frac{P_{throttle\ rqd}}{P_{dis\ limit}} \times P_{fc\ avail}$$

$$P_{dis\ limit} = P_{fc\ max} + P_{byt\ dis\ limit}$$

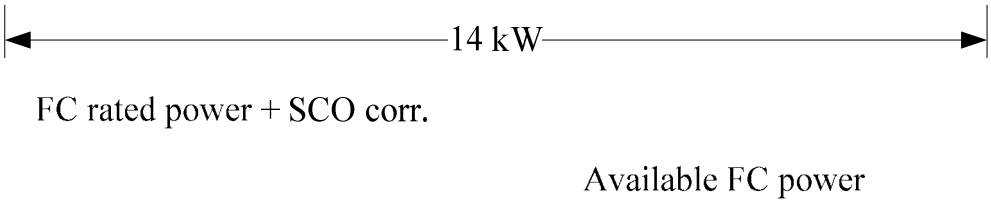


圖 8 燃料電池剩餘可輸出功率範圍

在功率方面有三種選擇：完全不回授、直接使用原始功率需求、或使用**錯誤! 找不到參照來源。**所示的經過映射的修正值。

以下為五種能量管理方法的敘述：

- series thermostat

在 0 中，若單使用 SOC threshold 的部分加上紅色方塊，即為 series thermostat 方法的額定功率輸出。

- series power follower

若使用 SOC threshold 及 power threshold 加上藍色方塊（使用 ADVISOR 的 SOC 修正）以及原始功率需求，即為 series power follower。

- modified follower_1

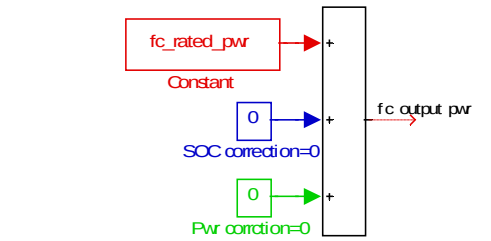
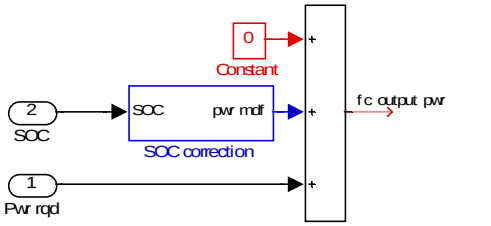
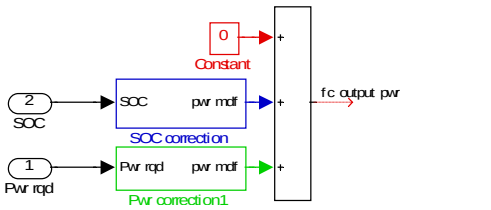
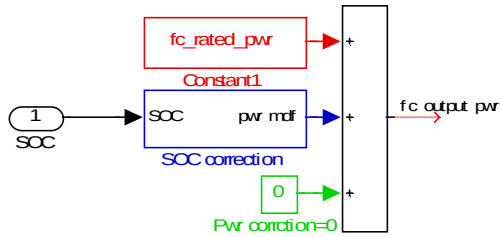
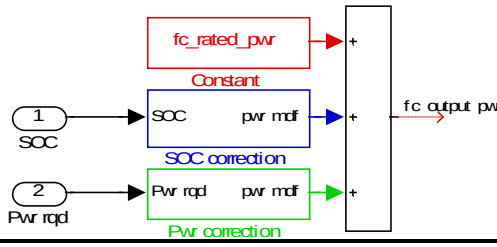
若使用 SOC threshold 及 power threshold 加上紅色方塊與藍色方塊(使用 ADVISOR 的 SOC 修正），是為第一種 series power follower 的變形。

- modified follower_2

若使用 SOC threshold 及 power threshold 加上藍色方塊（使用 ADVISOR 的 SOC 修正）以及綠色方塊，是為第二種 series power follower 的變形，modified

應的 SOC 修正（藍色方塊），做動態調變燃料電池輸出。

表 1　能量管理方法統整表

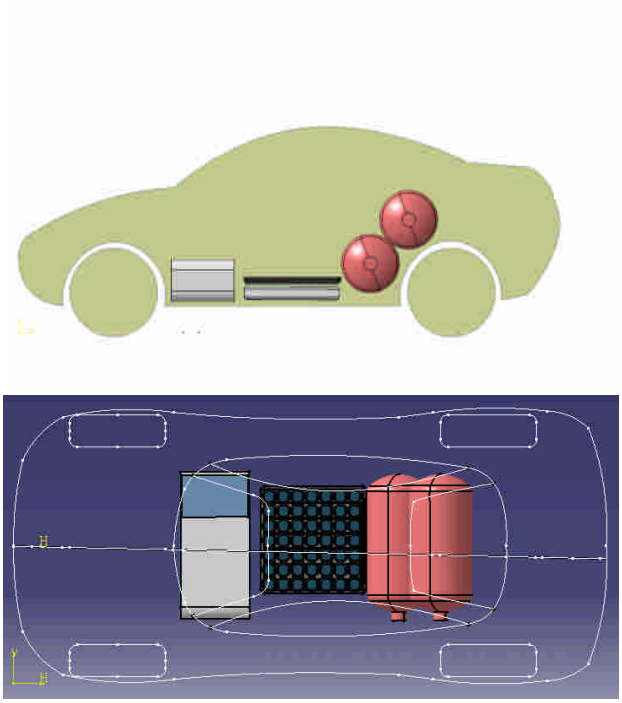
能量管理方法名稱	燃料電池輸出敘述	燃料電池輸出功率方塊圖
Series thermostat	額定功率輸出（無 SOC 修正 & 無 power threshold）	
Series power follower	原始功率需求+SOC 修正（有 power threshold）	
Modified follower_1	額定功率+SOC 修正（有 power threshold）	
Modified follower_2	功率修正+SOC 修正（有 power threshold）	
動態調變方法	額定功率+功率修正+SOC 修正（有 power threshold）	

六、成果及進度報告

6.1 車體結構設計

6.1.1 進度概述

經由前兩年度計畫的執行，車體的設計已經由一個初步的外型及主要元件空間配置(圖 9)，透過演化式結構最佳化方法(Evolutionary Structural Optimization)(圖 10、11)得到一個基本的結構雛形。並經由分析結果的規劃整理完成了初步的結構外型、材料配置與重量估算。(車體：2cm honeycomb 板＋上下 8 層 CFRP　三明治結構。車殼：2cm honeycomb 板＋上下 4 層 CFRP 三明治結構。懸吊接點：2cm 巴沙木(S67)＋上下 8 層 CFRP　三明治結構。代入材料密度：碳纖維編織布：$1500Kg/m^3$，巴沙木(S67)：$110Kg/m^3$，Honeycomb：$48Kg/m^3$)



Items	Mass (kg)	Pos.
Structure	220	2000
Driver	140	2200
FC	100	1310
H2Tank	100	2700
Battery	50	2000
Motor	50	3400
UC	25	2000
Solar	20	2000
MainComputer	5	600
Controller	5	3800
Front Sus	30	1000
Rear Sus	25	3400
Other	30	3800
Front Reac.	-400	1000
Rear Reac.	-400	3400
total	800	

圖 9、主要元件空間概念配置

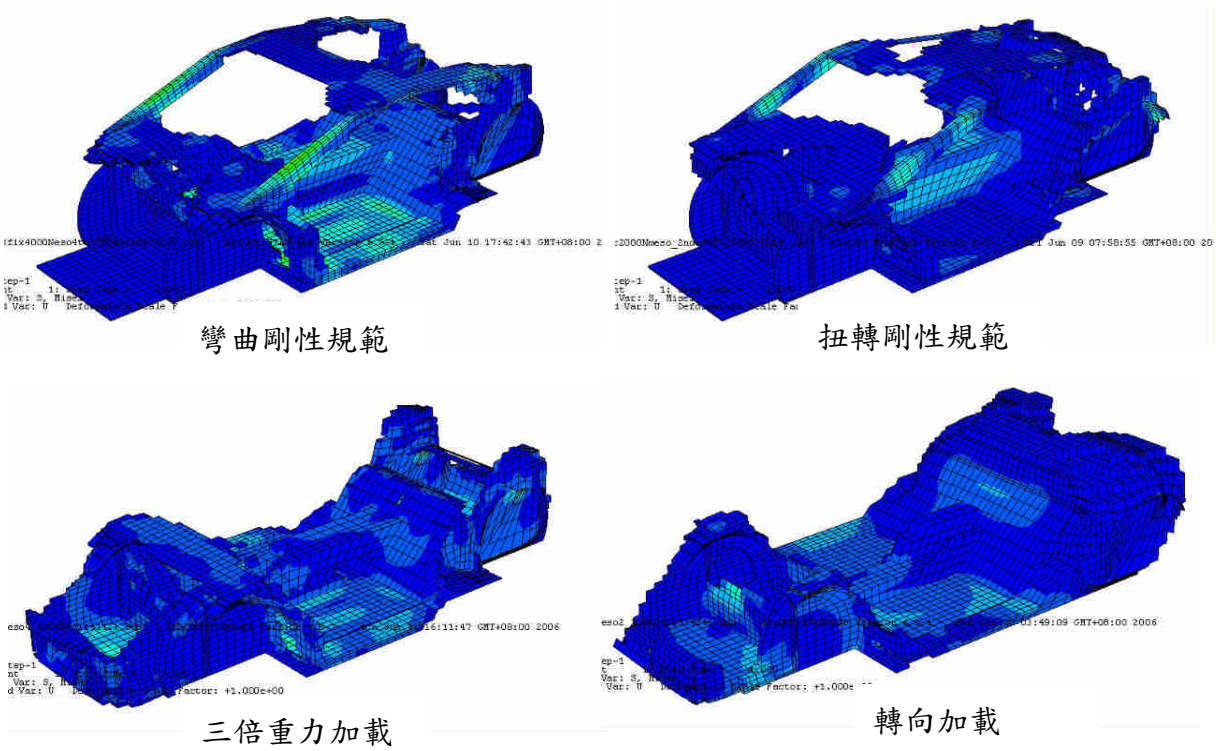


圖 10、不同條件下 ESO 分析結

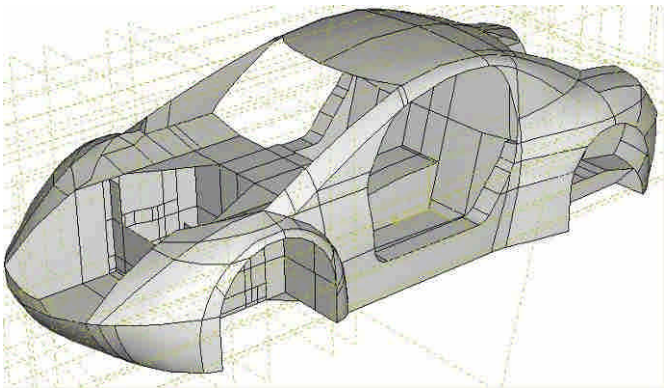


圖 11、ESO 分析結果聯集後所得之結構

6.1.2 結構設計流程

本章主要介紹複材三明治車體結構最佳化所使用之剛性及強度判準，簡述傳統三明治設計方法之流程及缺點，提出演化式三明治結構最佳化方法(Evolutionary Sandwich Structural Optimizaton, ESSO)及等效殼元素(equivalent shell element)取代傳統演算法及材料模型，以基礎模型驗證其準確性及效率，最後並說明其應用於車體結構最佳化之參數設定方法。

三明治車體車體結構設計流程，如(**錯誤! 找不到參照來源。**12)所示將分為初步設計、最佳化及細部設計三個主要階段。初步設計始於車輛功能性、基本型態之概念設計，及重量、行車負載、尺寸等規格之訂定。由外型設計及電腦輔助計算流體力學(Computaional Fluid Dynamics, CFD)分析降

低外型空阻，兼顧美觀、空阻降低、內部空間需及車輛功能等需求，確定外型設計。

最佳化階段完成車體大部份結構形狀、材料厚度、種類等參數之決定，第三階段細部設計則以實體模型，對於結構接合方式進行設計及結構局部集中受力處，例如懸吊桿件與車體接合處，設計面及心材補強方法以達到足夠之強度或剛性。

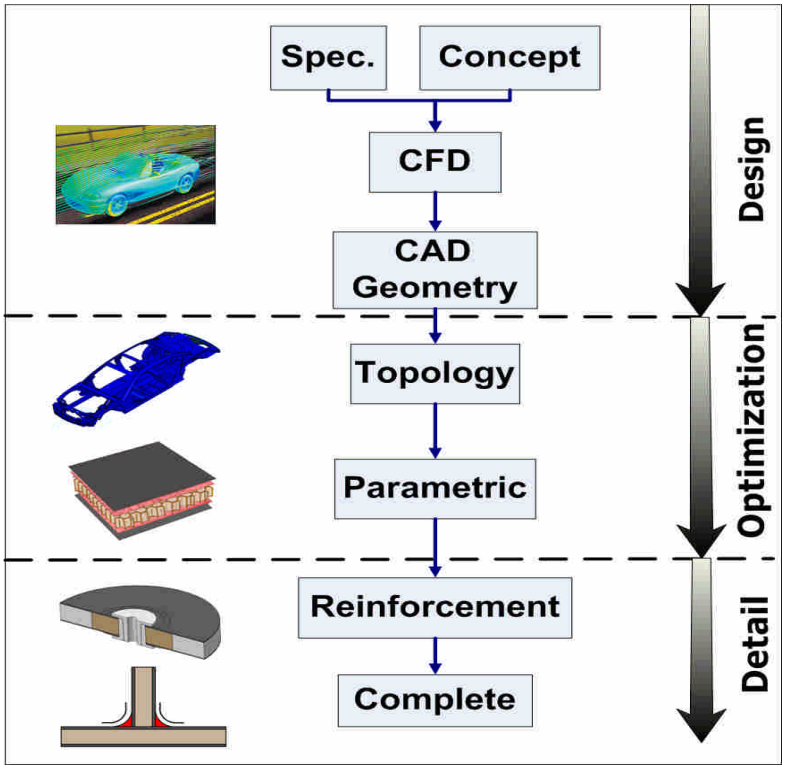


圖 12、結構設計流程

6.1.3 結構初步設計

繼續上年度的結構設計，我們開始進行結構的細部修整補強，使車體可以達到剛性上的需求。但卻發現了一些問題：

一、boundary condition 的架設不當

使得先前分析之結構剛性高估。造成材料的不當移除，結構外型不正確。(圖 13)

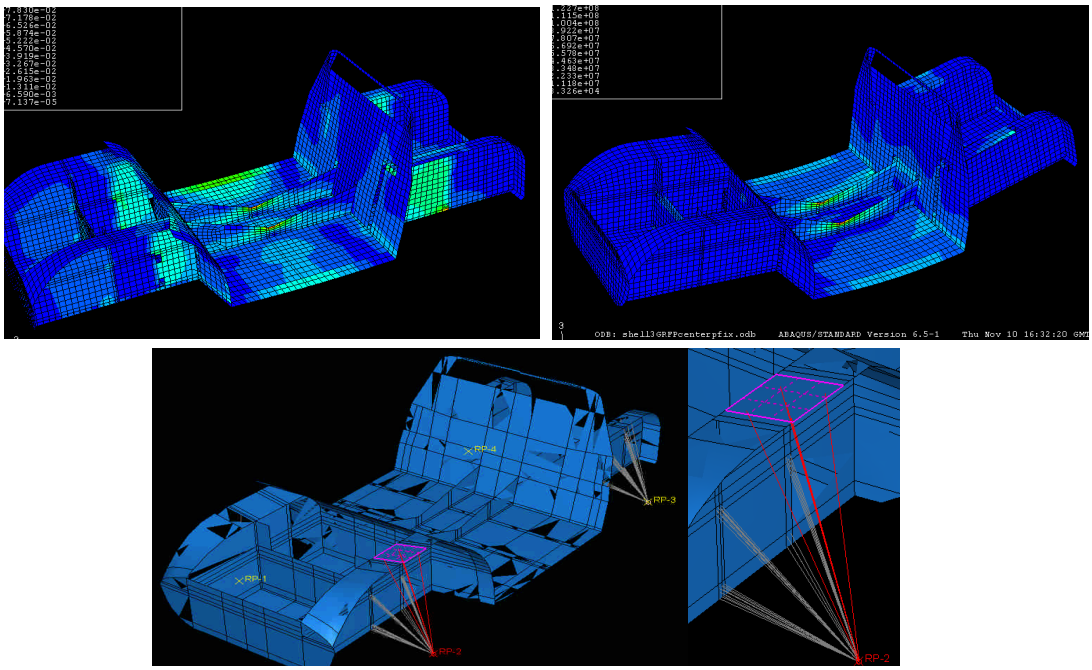


圖 13、改變邊界條件之比較

(左上：原先設定，右上：新設定，下：真實表現出懸吊接面及特性)

二、剛性需求較強度需求難滿足

在先前所有的 ESO 最佳化結構設計與 shell model 分析之中，主要的設計考量情形為以下三種：(1)全車 3G 荷重加載、(2)煞車加載(1G 重力向前、1G 重力向下)以及(3)轉向加載(1G 重力向外側、1G 重力向下)。另外，全車結構設計的收斂條件為材料是否發生破壞。即在三種加載之下三明治結構表面材料的 TSAIH 破壞判準值不可大於 1，而心材所承受的 shear stress 不可以超過其材料的 ultimate shear stress。但是後來發現，現今車輛於剛性上的需求，遠超過此三種加載條件。因此，修正了這些問題後，整個車體重新進行設計。以下將敘述新結構之演進與設計結果。

<u>第一次修改：</u>

因為 B.C 的錯誤設定，使設計出來的結構於 3G 加載時剛性過低(最大位移＝ 2cm)。

經由重新分析，保留了 A 柱、B 柱、C 柱與車頂的部分。另外，參考了先前結構之缺點(圖 14)以及類似車輛之結構外型(圖 15)，於繪製結構主體外型時，不單只依照最佳化結果去繪製外型，同時也會去考慮結構與外型的整合、力量傳遞的連續…等等，使得結構更加緊密且輕量化。(圖 16)

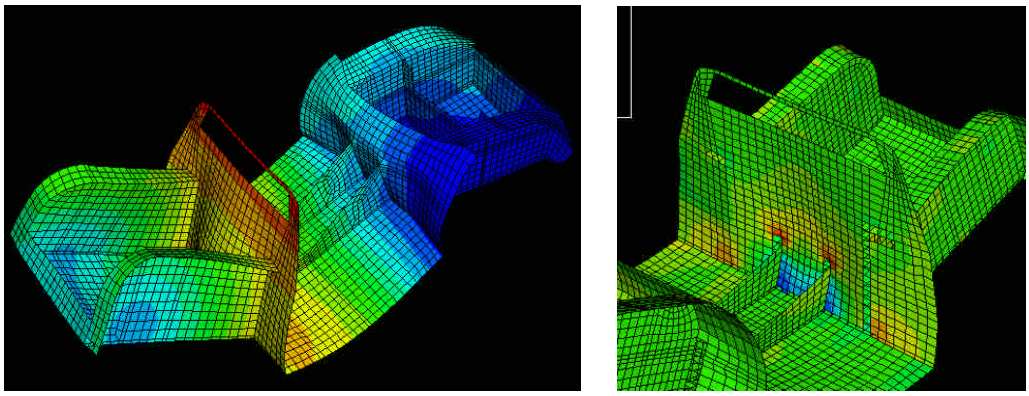


圖 14、初始結構之缺陷
(左：剛性不足，右：力量的傳遞不佳，局部應力高且變形大)

圖 15、類似車體結構參考

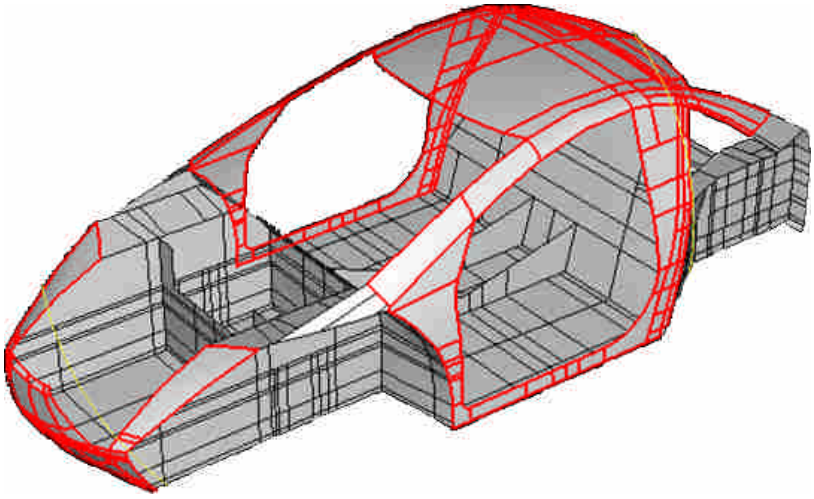


圖 16、新車體結構外型

比較前後兩組設計，可以發現於相同的加載下(此時以自重 3G 加載為例)。新設計的形變小了許多，且力量的傳遞與分佈小界為良好均勻。(圖 17)

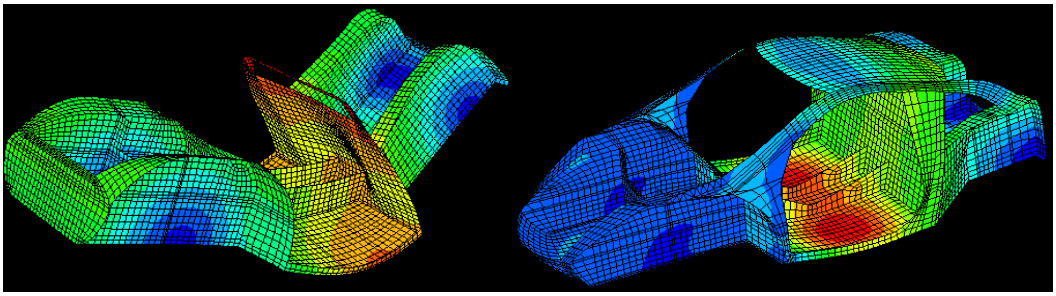


圖 17、結構 3G 加載分析比

第二次修改：

不符合現今一般車種的剛性需求，結構需要再行強化。局部地區應力集中情形嚴重。

透過資料的蒐集，找到了 ULSAB(UltraLight Steel Auto Body)對於車體剛性的需求：Static torsion stiffness：13000 Nm/deg；Static bending stiffness：12200 N/mm。將之代入新的結構外型發現不但未達需求，且材料亦發生損壞。(圖 18)

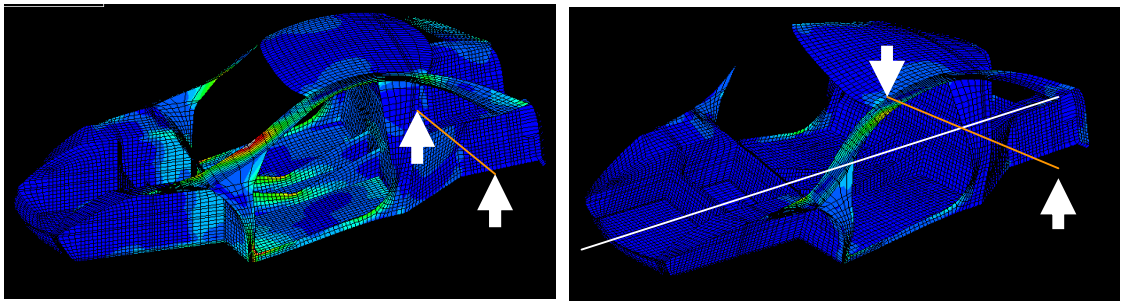


圖 18、結構剛性分析結果

經過檢討後歸咎於幾個原因：1 駕駛室剛性差 2 三個主要空間的連結太弱 3.未充分利用外殼 4 不良的應力集中點。所以為了解決這些問題，又將結構作了以下幾種修正：

1. 加粗 A 柱、門檻
2. 移除後方側面 PC，連結 B、C 柱
3. 底板強化(加入空氣流道)
4. 整合外殼、內裝
5. 以大圓角取代應力集中位置結構(圖 19)

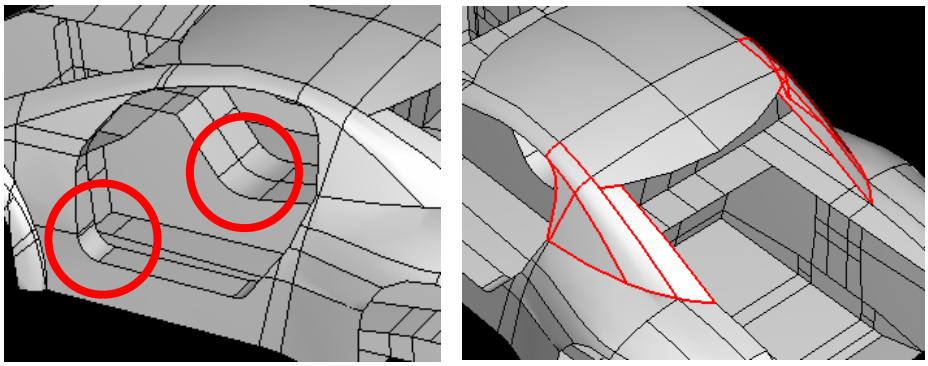


圖 19、加入大 R 角及 BC 柱以有效傳遞力量

6.1.4 三明治結構演化式方法

最佳化三明治車體結構，即以最輕重量滿足設定之強度及剛性條件，一般可使用直接搜尋演算法，例如 Complex Method [12]控制面、心材厚度或種類，尋求最佳組合。然而，對於複雜的車體結構，各部分依需求需要不同材料組成，隨之而來過多的變數將大幅增加疊代過程鎖死(locking)情況發生而無法完成收斂之可能性 [13]。另一方面，現有直接搜尋法必需在連續變數範圍內尋找最佳值，而實際上三明治結構可用材料常是離散，例如碳纖維編織布面材積層(laminate)厚度是以其單層厚度(約 0.25 mm)倍數變動，心材如泡棉也僅由廠商生產有限選擇厚度或密度。換言之，典型直接搜尋可能花費許多時間嘗試實際上不存在之材料厚度或密度，最終最佳化結果也通常不符可用材料而需要以鄰近選擇取代，卻不一定保證修正後結果不違背所有限制條件。

為改善傳統設計方法及直接搜尋演算法之缺點，開發演化式三明治結構最佳化方法(ESSO)，重點在於以演化式概念，將過強(redundant)材料逐漸削減，同時將過弱而破壞材料逐漸增強，且僅以可用離散材料厚度及密度選擇進行演化。根據文獻，簡單三明治梁之剛性性最佳化結果常以低密度高厚度心材及薄面材組成，ESSO 假設此現象在複雜車體結構亦然，建議初始設計即選用最厚且低密度心材，此後演化維持心材厚度不變僅進行密度(即代表剪切剛性)之必要提升。初始面材則設定於可允許最大厚度，於爾後演化逐漸進行削減。

ESSO 目標在於以重量限制下最大化結構剛性同時滿足所有強度條件，其詳細流程如(**錯誤! 找不到參照來源。**12)所示，首先對結構依功能性進行分區，並以 i 表示分區編號。以不干涉駕駛 、動力系統及 、懸吊轉向 、置物等空間需求為原則給定每區心材最大厚度 c_i，面材厚度 $(t_i)_n$ 及心材密度 $(\rho_i)_m$ 則分別設定其最大及最小值，其中 n 及 m 皆為整數，代表材料選擇編號，例如 n 為纖維層數，m 為心材密度等級。

完成材料、厚度、密度等設定之車體殼元素模型又有限元素軟體如 ABAQUS 計算其面材 Tsai-Hill 值、心材橫向剪應力 $(\tau_c)_i$、面材應變能(strain energy)等數值。ESSO 對於面材應變能最小區域認定為面材過剩，對於心材剪應力最大值發生區域則認定為心材過弱，並皆以符號*標示之。對於面材過剩區域，降低其面材厚度至下一個等級，即由 n 演化成 n-1，並檢查車體之 Tsai-Hill 值，判斷是否因此修改造成任何面材破壞。實際上，根據剛性優先假設，強度條件遠較剛性條件容易滿足，特別是當

面材初始厚度最大化情況下，面材破壞不太可能發生，當面材於削減過程發生破壞說明初始設定面材厚度太薄，無法滿足剛性優先之假設而需加厚。心材剪應力與其強度之比較則可判斷是否有任何心材破壞發生，當某一區域之心材發生破壞，則該區之心材密度將被提升一等級，即由 m 演化至 m+1，直到沒有任何心材破壞發生，面及心材的削弱及增強演化持續至車體重量小於目標重輛 W_T 即完成最佳化。

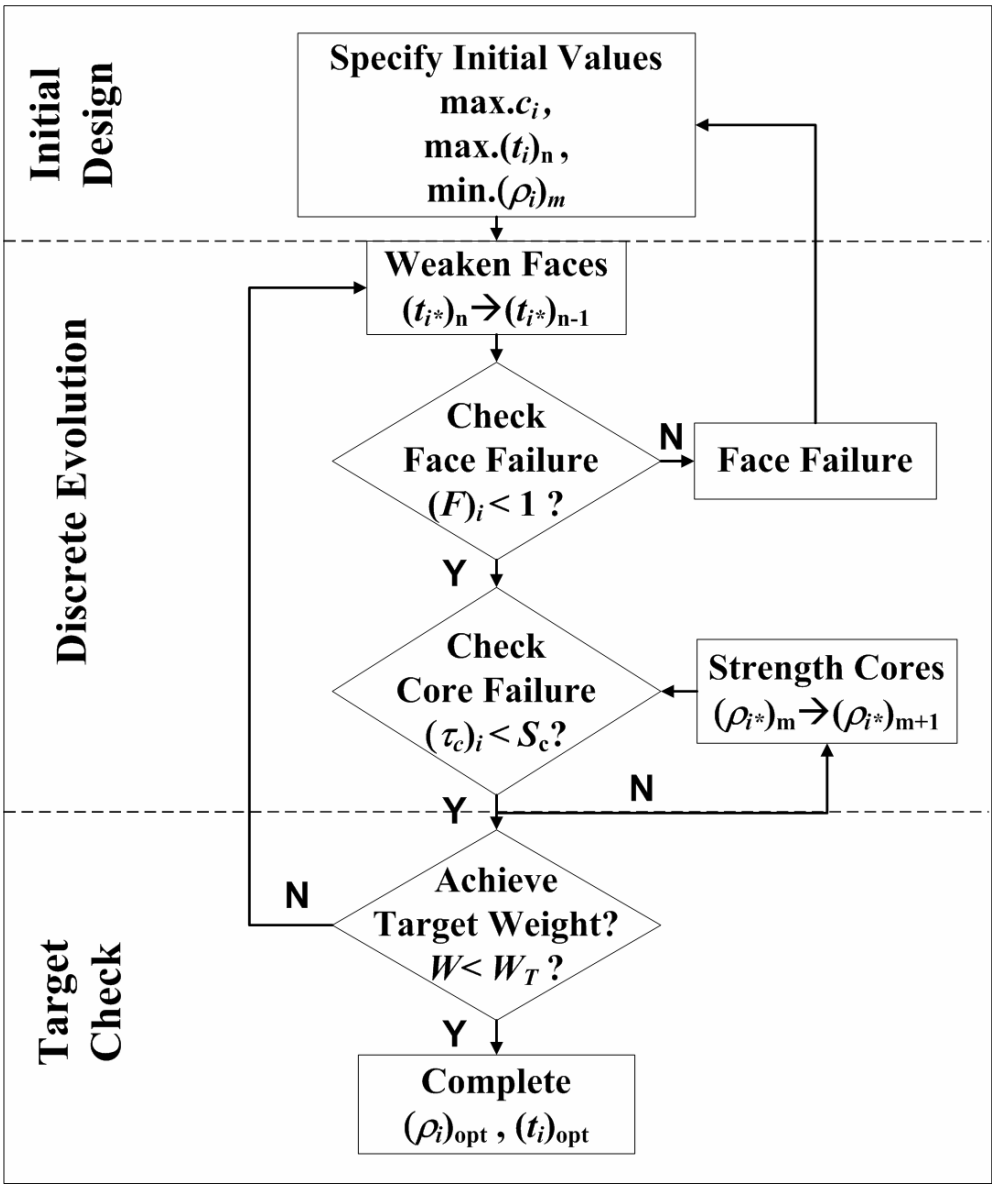


圖 20、演化式三明治結構最佳化流程

<u>ESSO 準確性及效率驗證</u>

最佳化目標為最大化三明治梁彎曲剛性，即最小化中央變形量，限制條件為重量小於 0.3 kg，變數控制方式如(02)所示，根據 Complex 於 ESSO 特性進行區分，面材厚度 t 於使 Complex 方法時為連續變數，但於 ESSO 時為離散變數，0.25n 表示為每層厚度 0.25 mm 之整數倍(n = 1~6)；PU 泡棉心材厚度於使用 ESSO 時為常數且固定於最大值 20 mm；心材密度於使用 ESSO 時，設為離散變數，並以最小密度為初始值，於 Complex 時則由最大值為初始。

表 2、ESSO 與 Complex 最佳化參數

Variable	Value (mm)		Initial (mm)	
	Complex	ESSO	Complex	ESSO
t	0.25~1.5	$0.25n$, n=1~6	1.5	1.5
c	5~20	20	20	20
ρ_c	48~288	48, 64, 80, 96, 128, 192, 288	288	48

以 ESSO 與 Complex 演算法進行最佳化之結果比較列於(03)，其中 Complex 方法所得最佳面材厚度t_{opt}及心材密度$\rho_{c\ \text{opt}}$原分別為 0.85 mm 及 68.72 kg/m^3，但因不符可用材料選擇，必須人為增加至 1 mm 及 80 kg/m^3，其結果包含最佳心材厚度c_{opt}、面材破壞判準$\sigma_f/\sigma_{\text{Y}}$及心材破壞判準$\tau_c/S_c$與 ESSO 方法所得完全相同，但所需疊代運算次數則相差甚劇。由此可證 ESSO 方法相較於傳統直接搜尋演算法，具有相當的準確度但大幅縮減演算時間。

表 3、ESSO 與 Complex 最佳化結果比較

Items	Complex	ESSO
c_{opt}	20	
t_{opt}	1	
$\rho_{c\ \text{opt}}$	80	
W_{opt}/W_T	0.9	
σ_f/σ_Y	0.85	
τ_c/S_c	0.79	
Iterations	113	5

<u>材料參數設計</u>

一般三明治結構材料設計參數包含面材及心材種類、密度、厚度、方向等，而車體結構各處需要不同之材料分佈，其自由度遠高於一般可解析計算之梁或板模型，因此需掌握三明治車體結構特性，對參數進行必要性分析，以節省可能大量耗費之最佳化疊代時間。

根據文獻，一般三明治簡單梁或板，其常用參數最多為四個，即面、心材厚度(t，c)及心材剪切剛性、密度(G_c，ρ_c)，因三明治結構纖維面材相較於純纖維複材結構通常甚薄，甚至只有一層，且因層數不多不適用具高度非等向性之單向纖維布(unidirectional lamina)，而常使用正交編織布(woven fabric)，因此纖維積層最佳化常考慮之纖維佈放角度(orientation)及順序通常不考慮，得以避免過多的設計變數造成最佳化收斂困難。

依據(021)之典型參數分析流程，首先判斷使用之心材剪切剛性是否固定而不做為設計變數，例如若已因價格或現有材料決定使用某種特定心材，其密度已固定則不管任何型態結構，理論上皆可由面 、心材厚度變化對目標函數(例如剛性重量比)作圖，由圖形觀察出全域最佳解，即得到最佳面、心材厚度值。雖然求解過程單純，然而因為心材剪切剛性其密度已預先給定，此最佳解必不可能優於心材可變情況。

當心材可變情況，則進一步判斷所用心材之剪切剛性與密度是否可以函數擬合，則可以解析方法求最佳解，例如文獻上常用之硬質 PU 泡棉，其剪切剛性與密度約成二次乘冪關係，可以公式求得最佳心、面材重量、面材厚度、心材厚度及密度。然而若擬合乘冪關係接近線性時(大部分心材皆如此)，則目前文獻公式通常無法求解。另一方面，當剪切剛性與密度沒有簡當函數關係時，則四個變數問題通常無法以傳統解析方法求解，而常仰賴各式數值演算法進行。

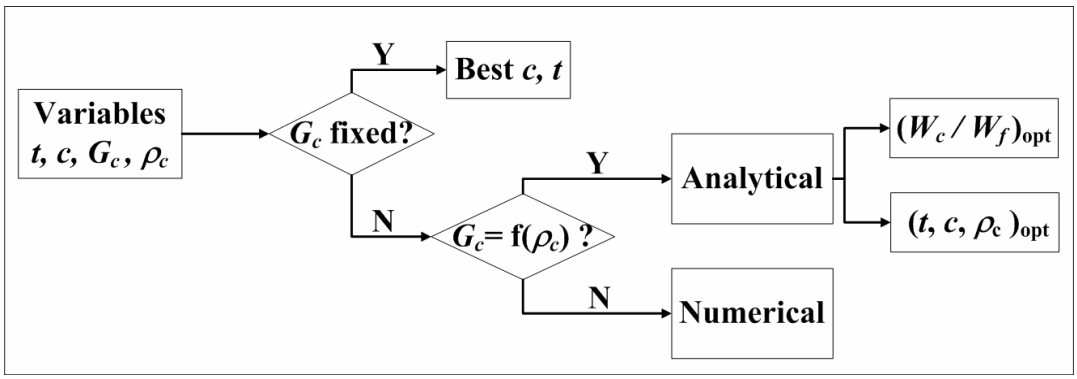


圖 21、三明治簡單結構參數分析流程

對於車體結構而言，不若簡單梁或板問題只求解最多四個變數，而是各區域如底盤、車頂、外殼皆有各自材料配置，因此變數量動輒數十個，且邊界及負載條件多樣化，將不可能以傳統解析或作圖法求最佳解。然根據本論文第三章，常用心材之剪切剛性與密度皆可以函數擬合，且不需考慮解析公式要求之二次方關係，可僅以心材密度為變數，且面材通常可容易以價格、比剛性等特性直接選擇，故最佳化變數如(022)為各分區(以 n 表示)之面、心材厚度及心材密度，變數總量為 3n。變數量多將劇烈提高最佳化數值演算疊代次數及無法收斂的可能性，必須盡量於變數量上進行縮減，若統一心材即各區心材皆為同一密度，則變數量可再減為 2n+1。

此外，根據不同車體結構型態，判斷其心材厚度是否預先選定，例如太陽能車不具有剛性規範，即無限定變性量，僅要求於車體重量限制下最大化剛性值，可預先設定各區允許最大心材厚度，適合以本研究提出之 ESSO 演算法大幅縮減最佳化時間，其變數僅為各區面材厚度及心材密度(t, ρ_c)；另一實例複合動力車體，其結構則較為複雜，預先限制心材厚度可能無法得到理想最佳化結果，則以本研究開發之等效殼元素取代傳統三明治建構方法，將變數轉變為各區等效均質厚度h、面材厚度比例係數k及等效密度ρ，雖仍使用現有直接搜尋演算法(如 Raplex)，亦可有效縮短最佳化演算時間。

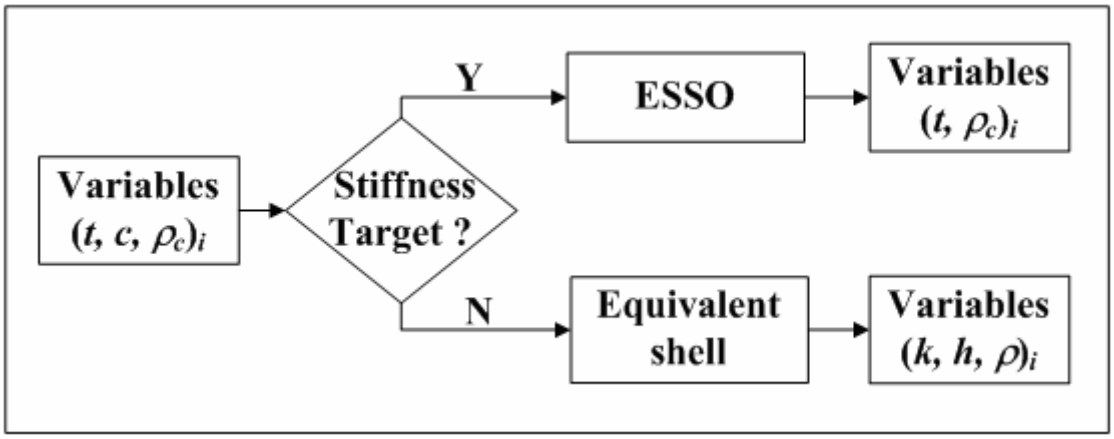


圖 22、三明治車體結構參數選擇

6.1.4 細部設計

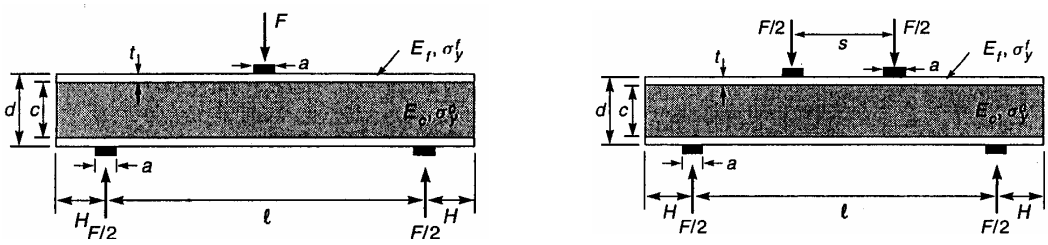
三明治車體結構主要以有限元素殼元素模型進行應力、變形分析及藉最佳化軟體進行拓撲設計及參數最佳化，但通常為方便設計工作進行，常需採行簡化模型、假設材料為完全彈性、忽略細部破壞模式等手段。模擬分析亦無法顧及複合材料許多複雜材料特性及破壞模式，常可能高估材料之剛性及強度性能，因此為求車體設計之完整性及安全性，需多重要的實驗及細部設計是驗證設計、發現非預期破壞模式、及更準確預測結構性能所必須。

本章首先對三明治板最重要之三點及四點彎曲剛性及強度測試，整理文獻上試片設計之方法，以彌補測試規範之不足。續對於三明治結構組成常需使用之 T 型及 L 型接合，分別研究三種不同接合方式並比較其優劣特性，提供不同設計需求之參考。最後對於傳遞集中負載之套筒，測試其承載特性及破壞模式，對於其仰賴之膠合強度，說明其實驗方式。

根據三明治結構集中施力之套筒，強度設計上進一步探討其破壞模式、建立參數模型及分析後提出補強設計之參考，剛性設計上提出新的代數化公式取代現有不準確之近似公式及繁瑣之有限元素計算，提供設計者快速準確計算套筒位移量之工具。

三明治板彎曲實驗

三明治板實驗以如(023)三點及四點彎曲為最基本(three-point-bending，3PB 及 four-point-bening，4PB)且重要，一般根據 ASTM-C393[14]測試規範進行，但此規範並未提供充分試片尺寸設計參考，可能導致非預期破壞如壓點局部潰縮(indentation)，而無法準確量測三明治板之剛性及強度。於試片設計時可參考 Ashby [15]等學者曾對三明治板彎曲實驗，根據(023)之參數設定討論如(04)三種破壞模式：面材斷裂(face yield)、心材剪斷(core shear)及局部壓潰，及其對應之極限負載值，其中 a 為壓塊寬度，b 為試片寬，c 及 t 為三明治板心材及面材厚度，l 為下方支撐距，s 為上方壓頭距，σ_y^f 為面材抗拉或壓強度，τ_y^c 及分別 σ_y^C 為心材剪切及抗壓強度。



(a)三點彎曲　　(b)四點彎曲

圖 23、三明治板彎曲實驗 [11]

表 4、三明治板彎曲實驗破壞負載

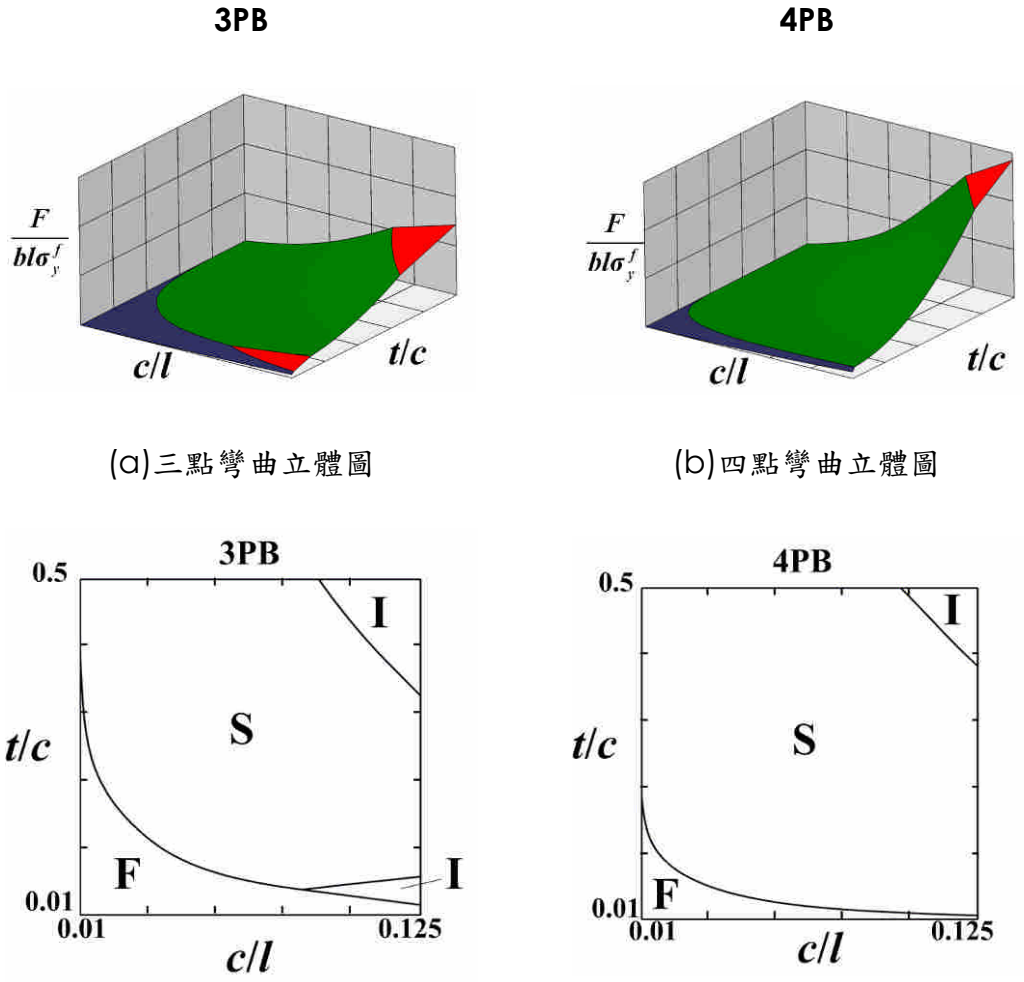
	3PB	4PB
Face yield-F_{fy}	$\frac{4bt(c+t)}{l}\sigma_y^f$	$\frac{4bt(c+t)}{l-s}\sigma_y^f$
Core shear-F_{cs}	$\frac{4bt^2}{l}\sigma_y^f + 2bc\tau_y^c$	$\frac{4bt^2}{l-s}\sigma_y^f + 2bc\tau_y^c$
Indentation-F_i	$2bt\sqrt{\sigma_y^C\sigma_y^f} + ab\sigma_y^C$	$2(2bt\sqrt{\sigma_y^C\sigma_y^f} + ab\sigma_y^C)$

例如以碳纖維面材及蜂巢(HRH 10-1/8-3.0)心材製作三明治試片，試片參數如(05)所示，以不同面、心材厚度搭配，則根據(04)各破壞模式極限負載公式，則可繪製如(024)之破壞模式分區立體圖及其於 x-y 平面之投影圖。其 x 軸為心材厚度對支撐距之比值 c/l，y 軸為面材對心材厚度比 t/c，z 軸則為無因次化極限負載 $F/bl\sigma_y^f$，投影圖中可明顯表示各破壞模式(F: face yield，S: core shear，I: indentation)分佈區域，立體圖則顯示其對應負載之大小。

藉由此破壞分區圖，即可挑選適當之c/l及t/c比值之三明治板，使其發生預期破壞模式，例如一般情況希望首先發生心材剪斷而非其他破壞，不論於三點或四點彎曲皆需避免極小或極大的c/l及t/c組合，但三點彎曲可允許組合區域較四點彎曲為小。

表 5、三明治彎曲試片參數

a	b	l	s	$\sigma_{..}^{f}$ (MPa)	$\tau_{..}^{c}$ (MPa)	$\sigma_{..}^{C}$ (MPa)
25	75	400	200	500	1.07	1.86



(a)三點彎曲立體圖　(b)四點彎曲立體圖

(c) 三點彎曲投影圖　(d) 四點彎曲投影圖

圖 24、三明治板彎曲實驗破壞模式分區圖

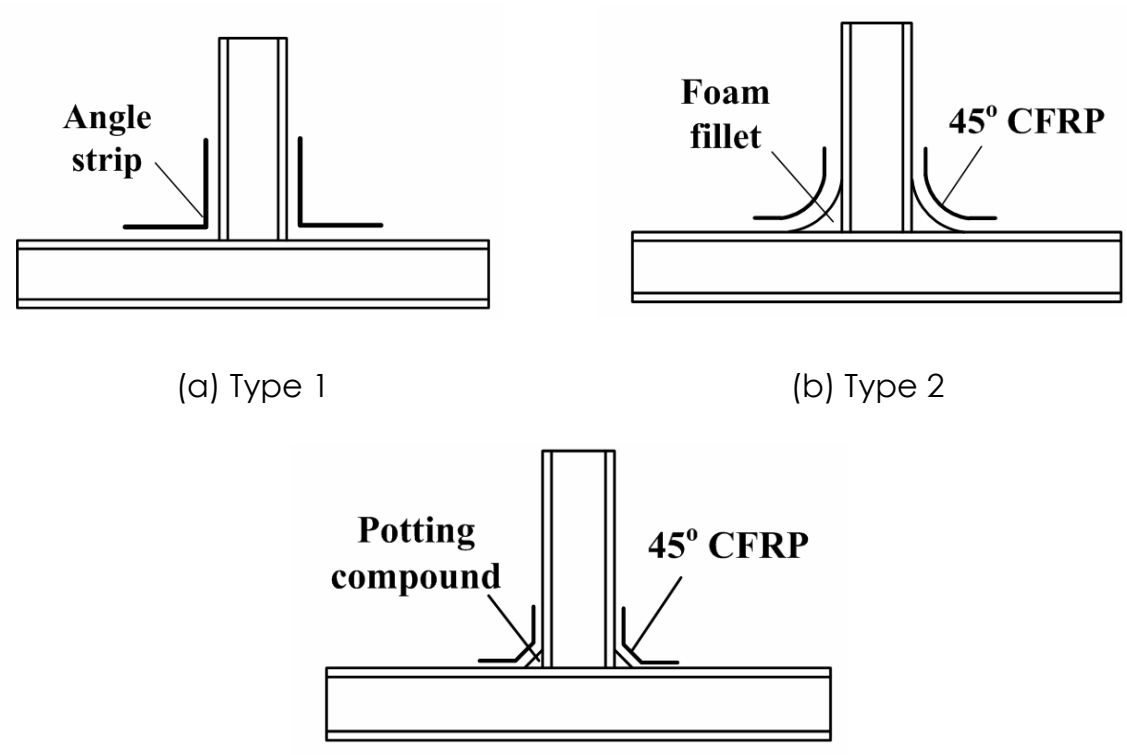
<u>T-joint 接合實驗</u>

三明治結構於實際製作時常需將板件間以 T 字形方式垂直膠合，例如(**錯誤! 找不到參照來源。**

25)太陽能車肋板(bulkhead)與底殼之接合，需能提供足夠之強度及剛性以維持結構功能。當底殼受到垂直表面負載時，此些T形接合面位置常需承受正向拉力，而一般膠合面適合之剪力負載，若無適當之設計及施工將導致接合面剝離甚至結構瓦解。而由文獻回顧可知T形接合之破壞模式複雜且無法以解析或有限元素法進行準確預測，故通常需要仰賴實驗方式同時確認設計及製程之優劣。

圖 25、T 型接合應用例圖

本研究為比較不同接合方式之特性及提供車體設計及製造之參考，設計如(026)三種不同類型T形接合進行比較，其待接合三明治板統一皆為 17.53 mm 厚蜂巢心材(HRH-10-1/8-3.0 [16])搭配 1 mm 厚之面材(4 層 CFRP 編織布)，寬度及長度則分別為寬 100 及 180 mm。第一種接合方式為預先製作由 4 層 45° CFRP 編織布成形，邊長 40 mm 之補強角條(angle strip)後，使用室溫硬化環氧樹脂(WH-115 A/B epoxy [17])以 0.1 MPa 壓力黏固；第二種使用 PEI 泡棉(Airex® R82.110 [66])製作邊長 20 mm 之三角補強條(fillet)，以同樣環氧樹脂黏著與接角並加覆 2 層寬 80 mm 之 45° CFRP 編織布，以 0.1 MPa 壓力成形；第三種則將膠環氧樹指與空心玻璃砂(Renshape® DT 081 [15])以 1:3 體積比混合成封膠(potting compound)，製作 5 mm 邊長之 R 角補強取代泡棉。



(a) Type 1

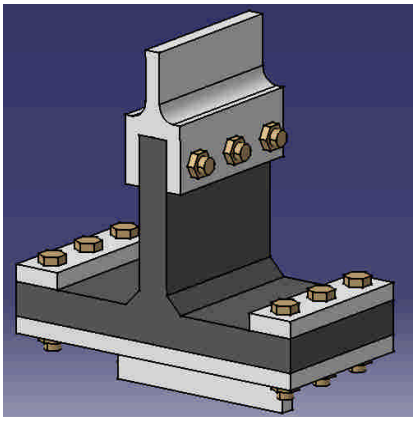
(b) Type 2

(c) Type 3

圖 26、T 型接合構造圖

將三種不同之 T 形接合試片，以如(027)之鋁合金夾具鎖固夾持於 MTS 810 測試機以 1 mm/min 位移速率進行拉伸破壞測試，試驗機荷重元(load cell)為 10 kN，其拉伸位移及作用力以 4 Hz 頻率紀錄。

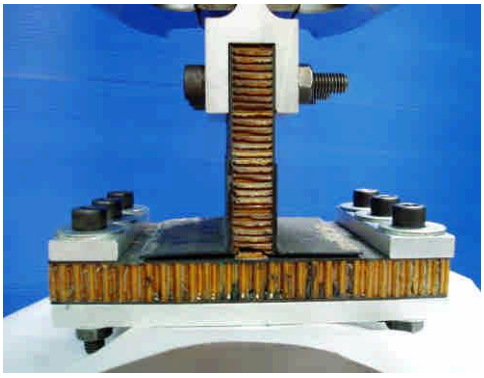
各 T 形接合拉伸破壞模式示於(028)，力量對位移曲線示於(**錯誤! 找不到參照來源。**29)。其中第一種接合方式具有最高之剛性表現，破壞模式為膠合面正向剝離，但破壞時變形量最小，整體表現脆性；第二種之剛性次之，但可大幅提升允許變形量，破壞發生於膠合面與泡棉正向剝離，並達到最高之破壞強度；第三種之剛性及破壞強度皆最低，但破壞發生前可達到最大之變形量。



(a)實驗夾具

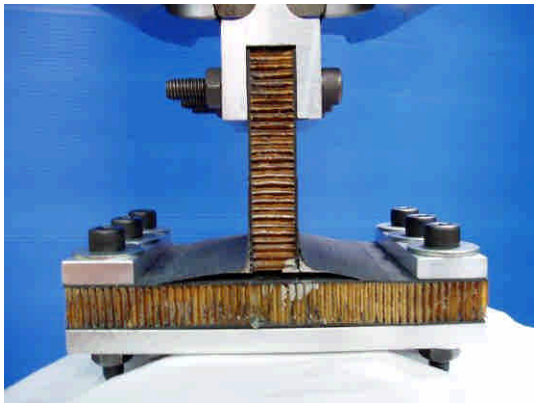
(b)試驗機架設

圖 27、T 型接合拉伸實驗架設



(a) Type 1

(b) Type 2



(c) Type 3

圖 28、T 型接合破壞模式

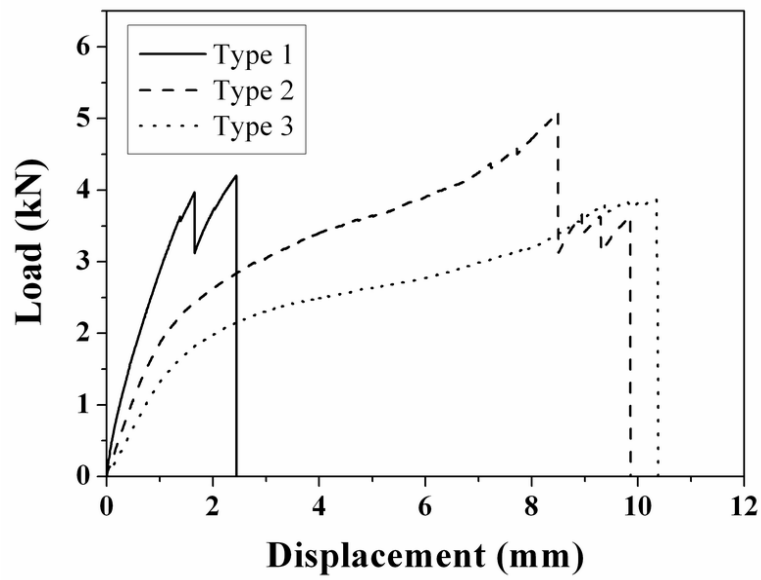


圖 29、T 型接合力量-位移圖

根據文獻可知 T 型接合之強度常正比於 R 角大小 [19]，由本研究之實驗結果同樣可發現此一現象，但實際上差異較大的是變形量，即剛性表現之不同，以此三種接合方式而言，各有其適應之結構應用，例如對車體主結構要求高剛性位置，可使用第一或第二種接合方式，前者特別適用於變形量限制高之懸吊系統附近，但預成形角條通常需要額外模具，並不利於曲面接合，後者雖然彈性區域(小變形時)剛性稍差，但可達到甚高之變形量及最高強度，應可提供較高之安全性；對於高彈性結構如輪罩之接合則可考慮使用第三種接合方式。另將各接合方式之初始破壞負載(F_{crit})、該接合方式增加於三明治板之重量及以F_{crit}除以重量比較其效率於(06)，可發現第二及三種補強之重量效率接近，且高於第一種接合方式，尤以第二種即以泡棉製作大型 R 角之接合方式表現最佳。

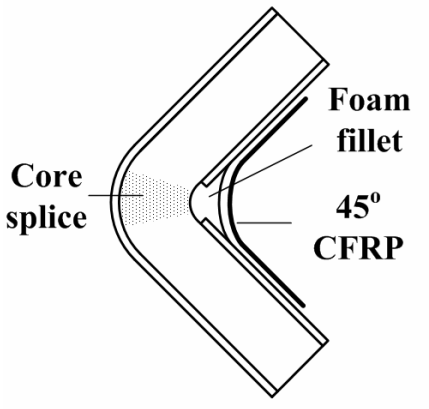
表 6、T 型接合效率比較

Type	F_{crit} (kN)	Weight (g)	F_{crit}/Weight
1	3.97	28.8	0.28 (1)
2	5.08	23.6	0.43 (1.56)
3	3.86	18.2	0.42 (1.54)

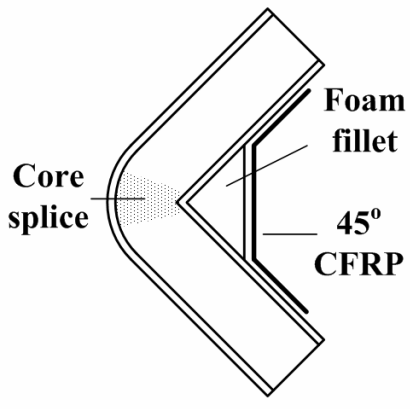
L-joint 接合實驗

L 型接合是除了 T 型接合以外，另一重要結構元素，另外，三明治板若經彎折固定成 L 型，可大幅提高結構剛性。以製造而言，可分為切縫折合固定(cut-and-fold [20])之二次接合方式及一體成形兩種方式，前者將三明治板單側面材切開後彎折成直角，續以泡棉及鋪貼纖維方式固定接角，後者則需要使用模具，將上下面材及中央心材，以彎曲狀態硬化同時黏合成連續體結構。不論使用何種方式，欲彎折處心材需為蜂巢板，且彎折處因受壓變形已失去原始剛性及強度，需以發泡膠(core splice [21])進行心材蕊填充補強。

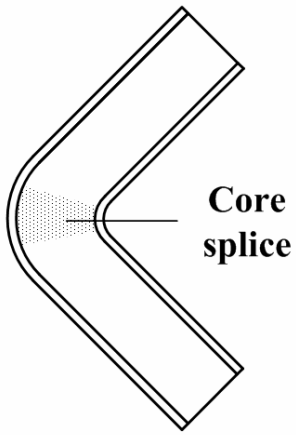
本研究以(030)三種不同 L 型接合設計進行比較，前兩種屬於二次接合，分別以泡棉(Airex® R82.110 [66])製作圓弧形及邊長 20 mm 三角形轉角，並於泡棉上外覆 2 層寬 80 mm 之 45° CFRP 編織布，泡棉與三明治板及補強纖維間使用環氧樹脂(WH-3800 [19])黏合，於高溫(150°C)及 0.1 MPa 壓力下成形，最後一種則於模具內一體成形，使用片膠(Scotch-Weld™ AF-163-2K [20])黏合面及心材。



(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3

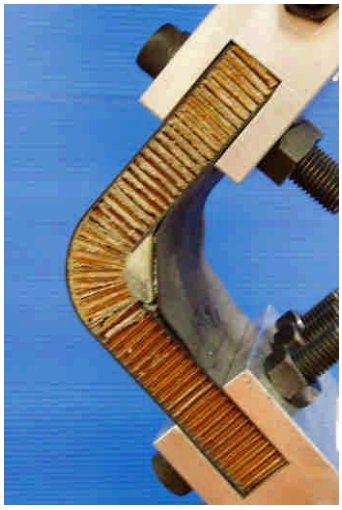
圖 30、L 型接合構造圖

將此三種不同 L 型接合試片，以(031)鋁合金夾具鎖固夾持於 MTS 810 拉伸試驗機，以 1 mm/min 速率進行拉伸破壞測試，使用 5 kN 荷重元，並以 4 Hz 頻率紀錄其拉伸位移及作用力。將各 L 形接合拉伸破壞模式並列於(032)，及力量對位移曲線示於(**錯誤! 找不到參照來源。**33)進行比較，發現第一種接合方式之初始剛性略高於其餘兩者，破壞始於內側泡棉與補強纖維之裂縫成長，並造成急遽承載能力降低；第二及三種接合方式之初始剛性幾乎一致，前者破壞發生於轉角外側纖維面材與蜂巢間剝離及蜂巢與發泡膠介面剪斷，內側三角泡棉補強未明顯破壞，仍持續提供負載能力，後者則同樣發生外側纖維面材與蜂巢間剝離，但內側纖維無法提供甚高之負載能力，而使承載力量曲線下滑。

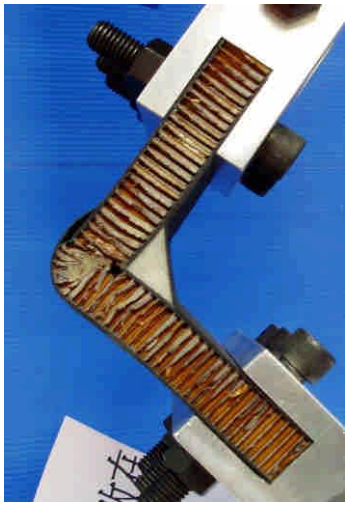
(a) 拉伸試驗機架設

(b) 夾具夾持方式

圖 31、L 型接合拉伸實驗架設



(a) Type 1



(a) Type 2

(a) Type 3

圖 32、L 型接合破壞模式圖

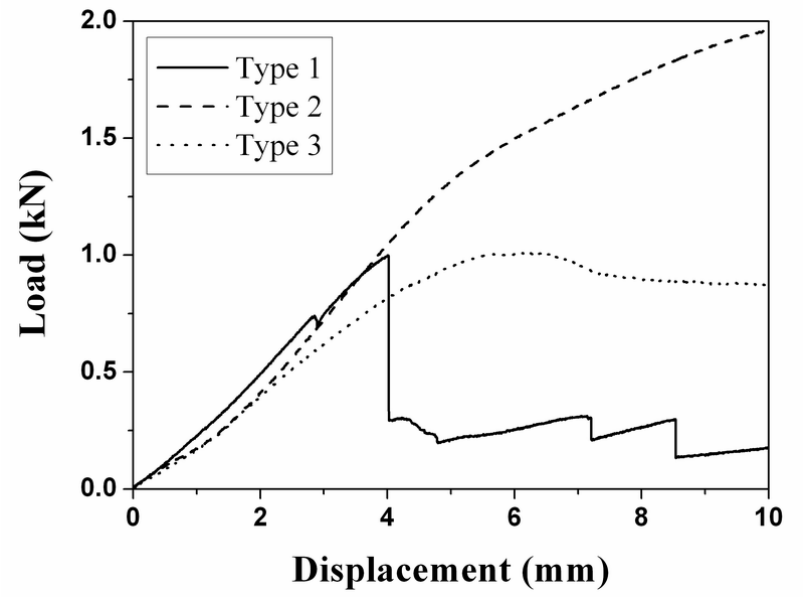


圖 33、L 型接合力量-位移圖

由以上之比較總結而言，以三角形泡棉為補強之第二種接合方式，類似於 T 型接合，具有最高之破壞及破壞後強度，能提供最高之安全性；第一及第三種之破壞負載接近，但後者初始破壞發生後仍能維持尚高之承載能力，惟其為需要模具之一體成形構造，需於製造方變形上進行設計取捨。

<u>套筒拉伸實驗</u>

於三明治板承受集中荷載處，例如(**錯誤! 找不到參照來源。**34)複材車體與金屬懸吊接合，需以金屬套筒傳遞並分散應力，而適當設計的套筒能避免局部破壞發生及過大的受力變形。承受懸吊件高力量負載，特別是垂直三明治板受力方向，一般使用如(**錯誤! 找不到參照來源。**35)雙凸緣式套筒(double-flanged insert)，其通常分為上下兩部分零件，組合方式為自三明治板孔兩側嵌入，以膠合或螺紋鎖固方式結合，與三明治板間則完全仰賴膠合固定。因次，套筒本身為等向性金屬材質，其剛性及強度表現通常可以有限元素準確模擬，與三明治板之膠合面因受膠料性質甚至施工方法之影響甚劇，特別是當受垂直表面荷載時，受力端膠合面將承受其最脆弱之正向拉力，需要以實驗方法驗證其強度，並觀察軟體分析所不容易預知之破壞模式。

為能盡量準確檢驗套筒之承載能力並觀察可能之破壞模式，本研究測試如(**錯誤! 找不到參照來源**。35)兩種不同大小套筒，其凸緣直徑分別為 60 及 45 mm，內徑則同為 30 mm，並設計如(**錯誤! 找不到參照來源**。36)之夾持裝置進行實驗，其中直徑 150 mm 圓形三明治板由 2 mm 厚面材(8 層 CFRP 編織布)與 17.53 mm 蜂巢板(HRH-10-1/8-3.0 [13])組成，中央鑽孔後將上下兩半套筒零件置入，藉螺紋鎖固同時以環氧樹脂(Epocast®-1511 A/B [21])與三明治板膠合，套筒中央安裝質球接頭(ball joint)，如(037)於 MTS 810 試驗機上，夾持為拉伸施力端；三明治板周圍以 8 個孔藉螺栓及厚墊圈(washer)鎖固於鋁質厚底板(base)上，底板中央夾持於試驗機為固定端.。試驗機以 1 mm/min 位移速率進行拉伸破壞測試，試驗機荷重元為 20 kN，其拉伸位移及作用力以 4 Hz 頻率紀錄。

圖 35、雙凸緣式套筒

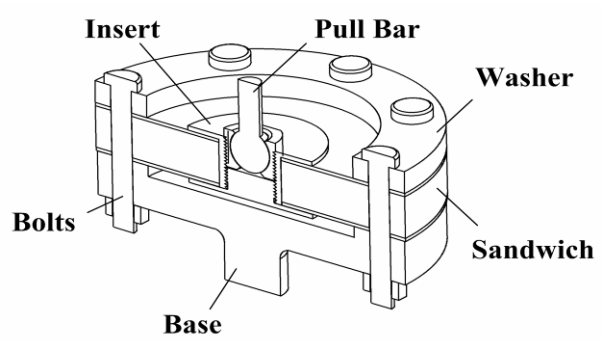
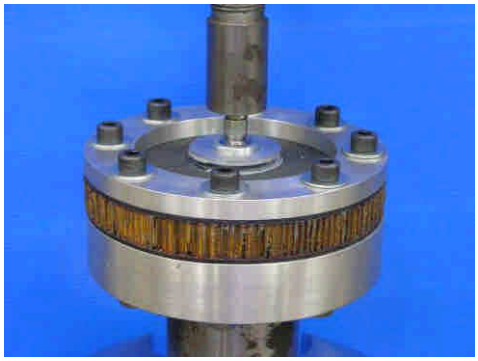


圖 36、套筒拉伸實驗架設圖

(a)試驗機架設



(b)局部放大圖

圖 37、套筒拉伸實驗圖

實驗力量對位移關係曲線示於(038)，可發現凸緣直徑 60 mm 之大套筒(D 60)合理地初始剛性較高，但迅速發生首次破壞，該力量(3.53 kN)轉折處對應之破壞為受拉力膠合面剝離，此後另一端凸緣仍能維持一定負載能力，並持續發生心材剪斷及纖維面材局部破壞，最後則發生套筒與凸緣間剪切斷裂；此外，小套筒(D 45)雖然初始剛性稍差，但可於三明治板變形甚大時(5.65 mm)始發生首次破壞，與大套筒同樣為受拉力膠合面剝離，亦於最後發生凸緣斷裂，其最後之破壞試片如(039)所示。

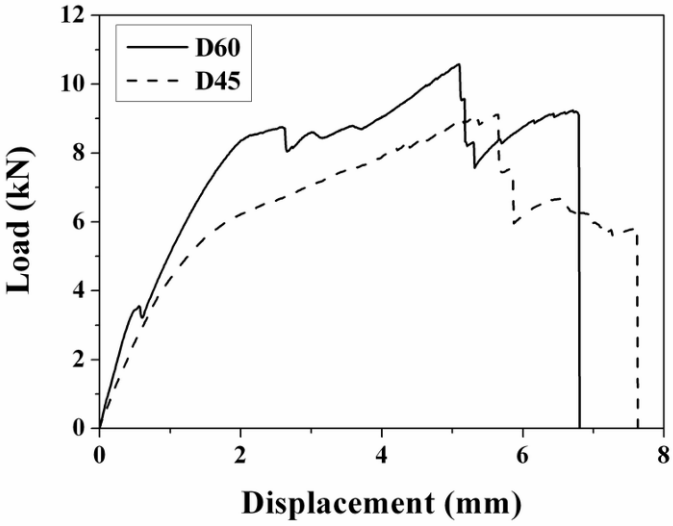


圖 38、套筒拉伸實驗力量-位移圖

(a) 膠合面拉伸剝離　　(b) 套筒斷裂

圖 39、套筒拉伸破壞試片

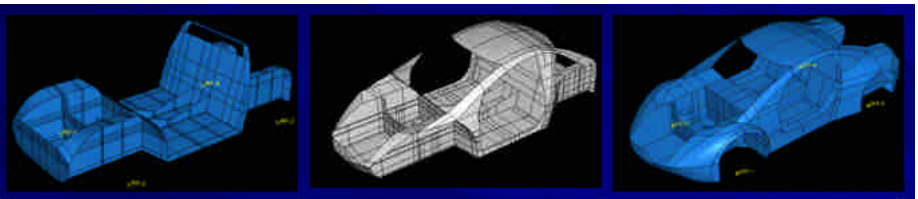
經由兩種不同大小套筒受拉實驗，同樣可發現膠合面拉伸剝離較文獻探討之心材剪斷及面材斷裂容易發生，以現有經驗公式 [25]、高階三明治理論 [26]解或有限元素分析數種套筒強度分析分法，皆常假設膠合面為完美接合以簡化問題，而高估套筒負載能力。此外，由基本公式估算，雖然大套筒理論上應有較大之剛性及承載能力，但實驗卻說明其反而較容易發生膠合面拉伸剝離，因此，現有套筒設計方法並不充分安全，還有後續探討的空間。

最終設計結果之剛性數據

依據疊層及厚度最佳化的結果，最後設計出來的車體結構剛性如下

Bending stiffness：1010N/mm　　Torsion stiffness：10960 N-m/度

雖然最後 Bending stiffness 尚未達到規範的要求，但是材料破壞的情形已不會再發生，以下將比較前後三種設計的相關數據：



車體重量	56.605kg	72.61kg	117.49kg
全車總重	70.39kg	80.83kg	120.4kg
3G加載最大位移	20mm	2.56mm	1.1mm

實體結構外型繪製

在主體結構形狀確定後，便要將只有外型特徵的 shell model 轉換為具有實際厚度尺寸(各部份因為心材及面材使用的厚度與層數不同，佔有空間必須列入考量)與細部接面特徵的實體結構圖，以供將來全車的空間配置以及規劃製程時使用。此實體結構將會包含車門、車窗、前後蓋等部分。(圖 40)

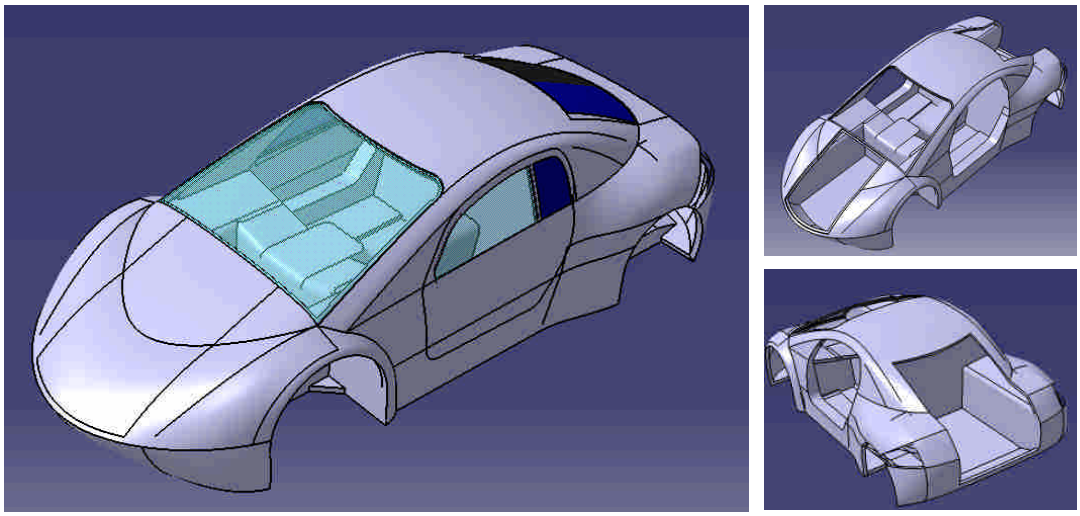


圖 40、結構實體外型

6.1.5 製程規劃

在車體外型設計完成後，接著進行模具的設計(圖 41)，確定分模面，先以以代木鋪出大略的形狀(圖 42)，再以 CNC 加工，完成後表面再經過噴漆及研磨的處理(圖 43，44)，再經過脫模的實驗，確定模具的表面品質是可以脫模的。

模具製造處理完成後，接著要規劃材料的鋪放順序(圖 45)進行積層(圖 46)，抽真空成形(圖 47)，本計劃目前進行到下車殼的表材積層，後續的車體製造還持續在進行當中。

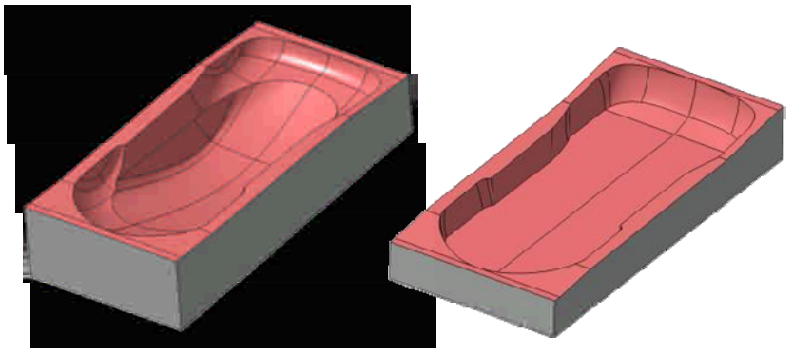


圖 41、上車殼模具及下車殼模具

圖 42、鋪放代木於下車殼模具

圖 43、經過噴漆處理的上下車殼模具

圖 44、模具進行表面研磨

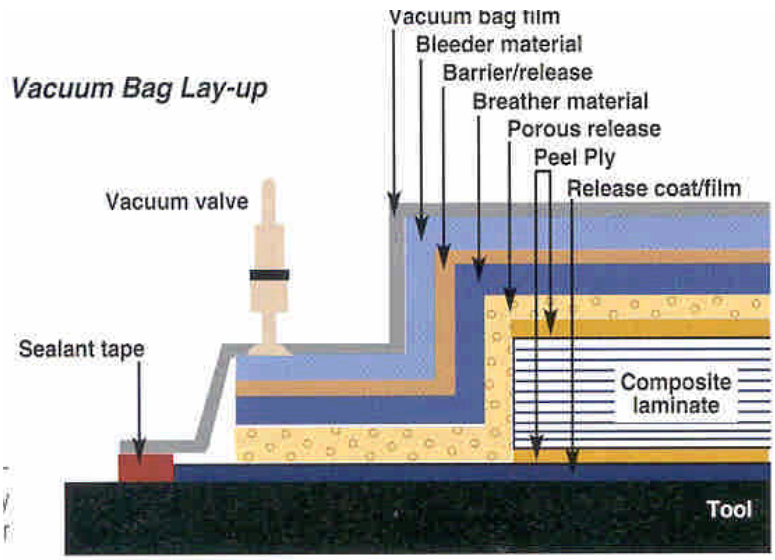


圖 45、材料疊層規劃

圖 46、積下車殼

圖 47、抽真空成形

6.2 能量管理系統研發

6.2.1 模擬結果

本混合動力車在報告撰寫時仍在製造階段，尚未能進行實車測試，所以接下去將以純燃料電池無蓄電池複合能源輔助的形況做為對照組，進行一系列相對比較。

<u>功率範圍匹配測試</u>

首先仿效 Friedman 的作法，將模擬所計算出的耗能依大小繪成頻譜與所採用的燃料電池之額定功率一起比較，檢驗本混合動力車所選用的燃料電池功率範圍是否與車輛耗能相匹配。結果請見圖 48。

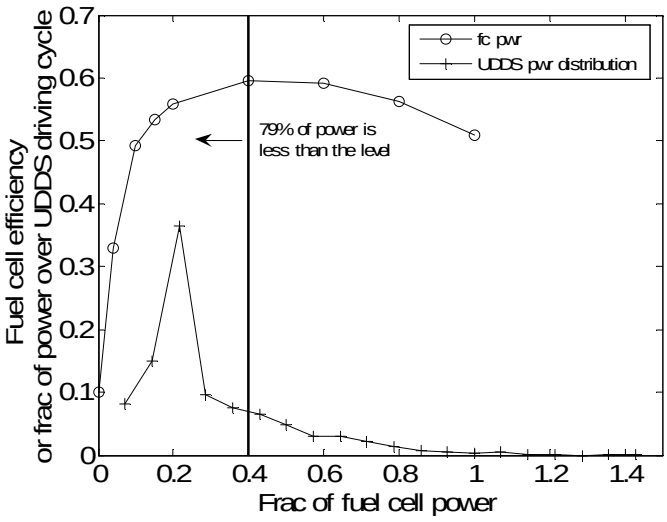


圖 48、UDDS 行車情境之耗能頻譜

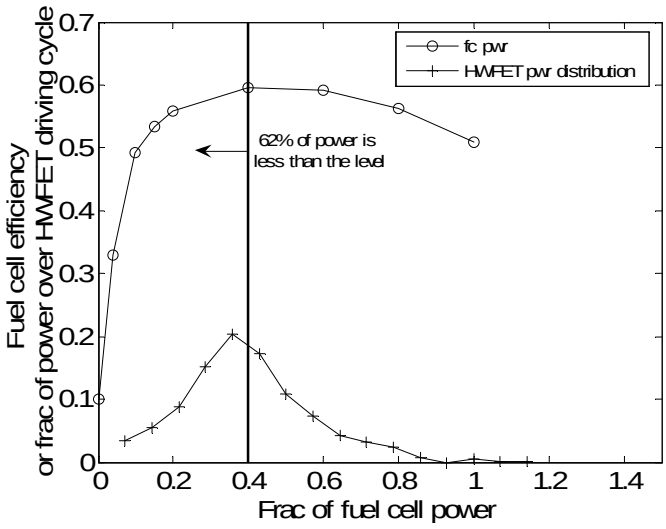


圖 48、HWFET 行車情境之耗能頻譜

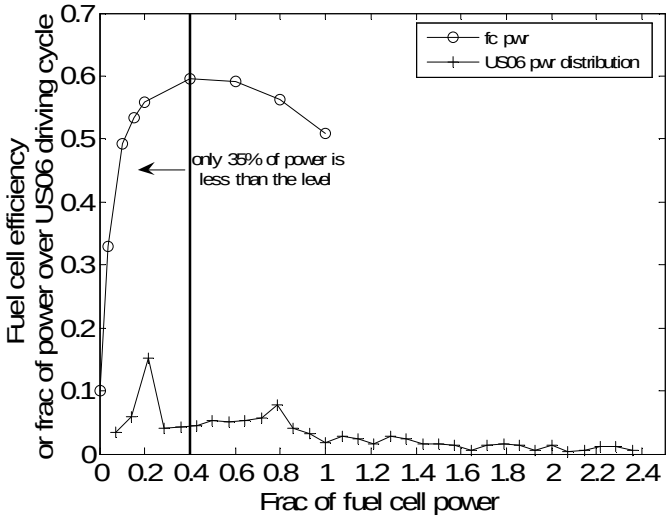


圖 48、 US-06 行車情境之耗能頻譜

根據耗能頻譜分析，在 UDDS 行車情境下，本混合動力車有 79%的操作落在燃料電池額定功率以下；在 HWFET 行車情境下，有 62%的操作落在燃料電池額定功率以下。此兩行車情境多數時候，處於低電量行駛（相較於燃料電池的功率），所以在額定功率定值輸出（series thermostat）或在額定功率附近震盪輸出（modified follower_1），而沒有功率回授或修正的能量管理方法，最後平衡的 SOC 應該會較高。而在 US-06 行車情境，則只有 35%的操作落在燃料電池額定功率以下，有大半以上的操作高於燃料電池額定功率，同樣的，上述的能量管理方法，將會需要很大的比例需要蓄電池輔助輸出，蓄電池將會有過放的危機。

由耗能頻譜所得的初步分析可知，本混合動力車的燃料電池足以提供 UDDS 與 HWFET 行車情境的操作，而且在功率層面（而非速度層面），UDDS 與 HWFET 是很類似的，Friedman 甚至只進行了 UDDS 行車情境的模擬作為代表。而本混合動力車的燃料電池功率在 US-06 行車情境則略不足，接下來所有能量管理方法的調整，都將致力於改善 US-06 行車情境時燃料電池輸出不足的問題。

對照組：純燃料電池

本研究以純燃料電池，無蓄電池輔助作為燃料效率 mpg 相對的比較依據。此對照組在 UDDS、HWFET 與 US-06 三種行車情境下的 mpg 分別為 33.70、56.24、31.32。

另外，從 049 可知，純燃料電池無法達成 US-06 的加速要求。這是由於供能元件輸出功率不足所制。此時全車最大輸出功率就是燃料電池的最大功率，14kW。

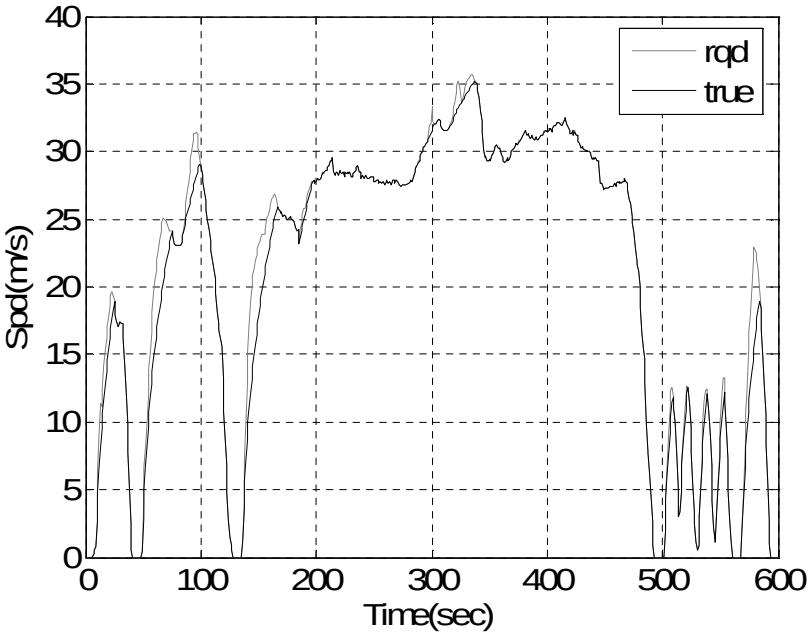


圖 49、純燃料電池之 US-06 車速模擬結果

其他複合能量管理方法模擬結果

依據 SAE J1711 規範，模擬前後 SOC 變動必須在+-0.5%以下。

各不同策略之模擬結果如 02 所列，表中 SOC_{end} 表示此行車情境結束，SOC 達平衡時的大小(單位：%)。整體 mpg 則是使用先前所述 SAE J1711 的定義：

$$mpg = \frac{1}{0.55/mpg_{UDDS} + 0.45/mpg_{HWFET}}$$

表 7、模擬結果

能量管理方法名稱	UDDS 行車情境		HWFET 行車情境		US-06 行車情境		整 體
	SOC_{end}	mpg	SOC_{end}	mpg	SOC_{end}	mpg	mpg
純燃料電池		33.70		56.24		31.32	41.12
Series thermostat	**0.4130**	39.39	**0.4077**	60.02	**0.2029**	42.38	46.60
Series power follower	0.5756	38.18	0.6273	58.95	**0.3936**	33.31	45.37
Modified follower_1	**0.8999**	37.75	0.7367	59.97	**0.2034**	38.45	45.30
Modified follwer_2	**0.4018**	38.75	**0.3354**	59.58	**0.2029**	41.44	45.98
動態調變方法	0.6007	39.19	0.6060	59.50	0.6000	34.91	46.30

表 7 將模擬結果 SOC_{end} 落在 40~60%以外的組別以粗體字特別標示出來。五種能量管理方法在 UDDS 與 HWFET 其 SOC 都大致可以落在 40~60%（只有兩組數據除外），而 US-06 則大部分方法都發生 SOC 過低，以達強制限制放電的第二道防線，只有動態調變方法仍能夠達到 SOC 的平衡。

以下將與 mpg 相關的 UDDS 和 HWFET 兩個行車情境合併討論，與加速性能相關的 US-06 則放到最後討論。

（1）UDDS 與 HWFET 行車情境

模擬結果顯示 series thermostat 與 modified follower_1（額定功率+SOC 修正）剛好呈現兩個極端情況。Series thermostat 的 SOC 已達 40%的下限邊緣，而 modified follower_1 則貼近 80%的上限，甚至在 UDDS 時 SOC 已超過 80%，已使用到強制限制充電的第二道防線。此結果顯示先前號能頻譜的預估只對的一半，在低電量需求的行車情境，以額定功率定值（或附近震盪）輸出，SOC 將會傾向要不是過充，就是過放。Series thermostat 過放的原因是因為沒有 power threshold 可以適時的將燃料電池輸出開啟，而時常保持關閉不輸出的狀態，所以大部分靠蓄電池供能。而由 series thermostat 這個最簡單的能量管理方法，也可以確定本混合動力車所使用的燃料電池功率的確偏小，所以連帶額定功率也低，連在低耗能的行車情境也無法用以同時支撐馬達耗能與回充蓄電池。

而 modified follower_1 則因為修正後的功率時常高過 power threshold，燃料電池持常保持開啟，而使蓄電池過充。

Modified follower_2（功率修正+SOC 修正）則沒有達到預計的效果。原先功率修正的用意在於使燃料電池輸出的變量盡量平緩，但卻發生顧此失彼的情況，30 秒 moving average 的確有效使燃料電池輸出以緩慢速度變化，伴隨發生的時常需要蓄電池大功率放電來達成瞬間高峰值輸出，使蓄電池很快就沒電了，請見 050。而雖然此時 SOC 回授修正量很大，燃料電池也足夠同時提供馬達耗能與對蓄電池充電，但蓄電池本身卻有最大 1C 的充電限制，而無法「快速」地將 SOC 充回一定的水準。所以本燃料電池車也有車輛瞬間峰值與蓄電池充電限制不匹配的問題。由模擬結果發現，依照本混合動力車的蓄電池與燃料電池搭派，功率修正方法一定要與其他修正搭配使用，否則任何行車情境 SOC 將持續維持低水準。

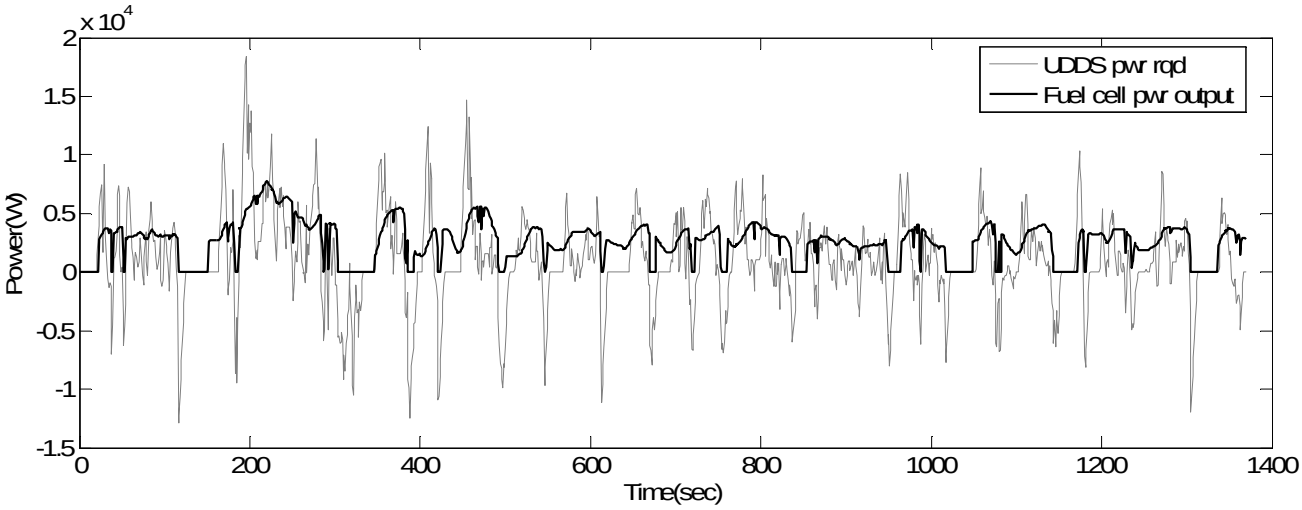


圖 50、 Modified follower_1 在 UDDS 的功率需求與時實際的燃料電池輸出功率

而 series power follower 與動態調變方法在此兩個行車情境則表現很好，可以達成 SOC 平衡，並且 mpg 也比燃料電池車優良。但其實 series power follower 有燃料電池輸出變動過快的現象，實際上，燃料電池不一定能夠達成如此快速的功率輸出切換。

（2）US-06

模擬結果，所有使用蓄電池複合的能量管理方法皆能夠提供 US-06 加速所需功率，此結果証實複合能量的確可以提升車輛加速性能。但此時換成車輛扭力需求受到馬達最大扭力限制，所以仍無法完全達到 US-06 的車速規定，由此可知，本燃料電池所設定的馬達規格也是略微 under design。

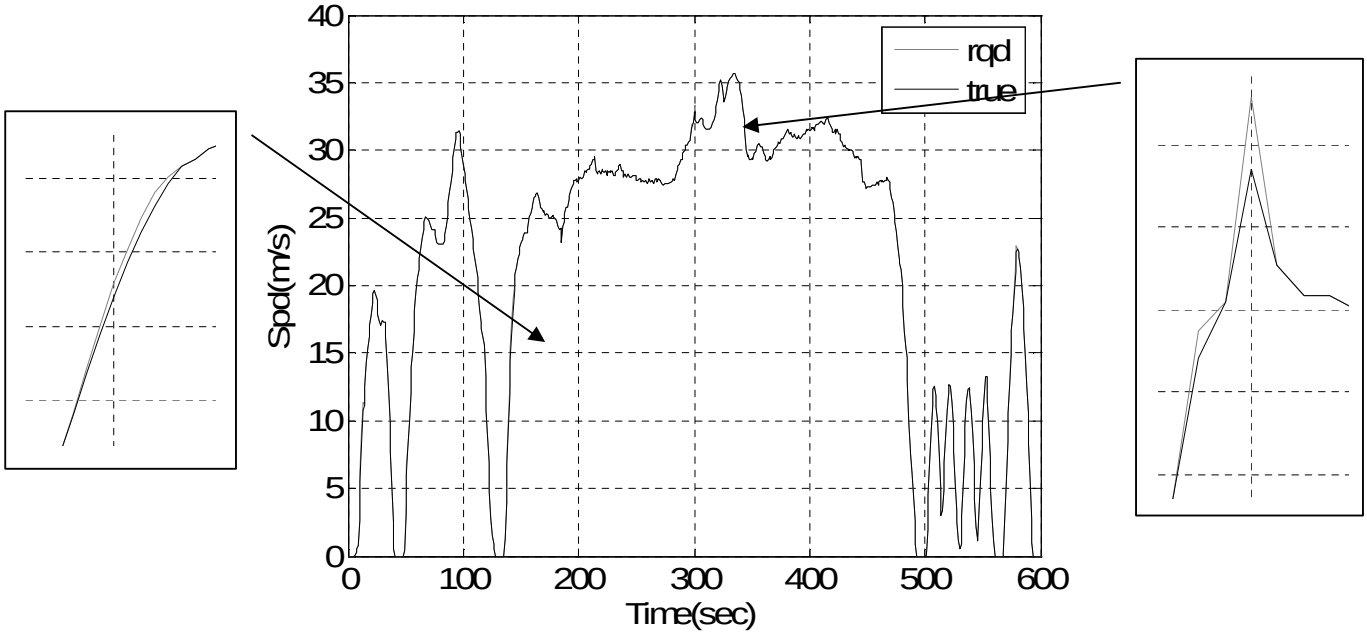


圖 51、使用複合能量管理方法的 US-06 車速模擬結果

另外值得一提的是，前面四種能量管理方法的 SOC_{end} 都無法落在 40~60%內，甚是有些是落在 20%的水準，需要靠 SOC 的第二道防線對蓄電池強制限制放電，亦即 US-06 的功率需求超出此四種能量管理方法所能處理的範圍。而且當發生需要使用到第二道 SOC 防線的時候，其實混合動力車已經在以純燃料電池行駛，無法發揮複合能量提升 mpg 的效果。

此四種能量管理方法有一共通弱點：其計算結果，燃料電池都緊咬住某一特定功率附近輸出，無法應付所有功率需求大小不同的行車情境，更嚴格來說，都只適用於某一特定功率需求大小的行車情境。當功率需求過大時，蓄電池必定傾向過放，反之，功率需求過小時，蓄電池必定傾向過充。動態調變方法則可以有效克服這個問題。

在動態調變方法中，使用 SOC 的高低作為調變的基準。當 SOC 持續減少時，表示燃料電池輸出不足，則加大燃料電池輸出功率，而累加的 SOC 修正使得燃料電池可調變的範圍從原先的 5.6kW 額定功率附近，放大到 0~14kW，使得使用的行車情境擴大很多。而此動態調變成功的在 US-06 行車情境達成 SOC 落在策略接受的範圍內，甚至在模擬的三種行車情境，都保持 SOC 在 60%。053 及 052 為動態調變方法在 SOC 初始值為 65%時進行 US-06 的模擬結果。052 顯示，當 SOC 高於 60%時，SOC 修正為遞減，而當當 SOC 低於 60%時，SOC 修正為遞增。053 灰色線為動態調變經過功率修正的燃料電池輸出，黑色線則是加上蓄電池 1C 充電限制後燃料電池的真實輸出，由灰色線可知，動態調變方法確實使燃料電池功率以緩慢變動輸出，但受限於蓄電池僅 1C 的充電限制，有些時候燃料電池輸出功率仍無法避免會發生急速下降（因為蓄電池沒辦法吃那麼多進去）。

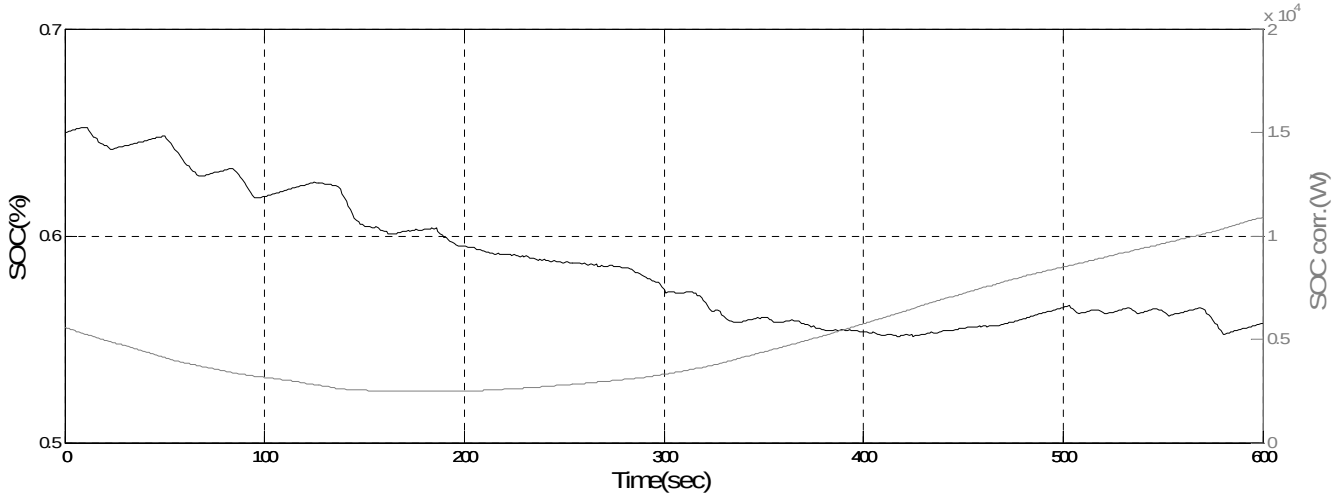


圖 52、 SOC 與對應的帶有記憶效應之 SOC 修正

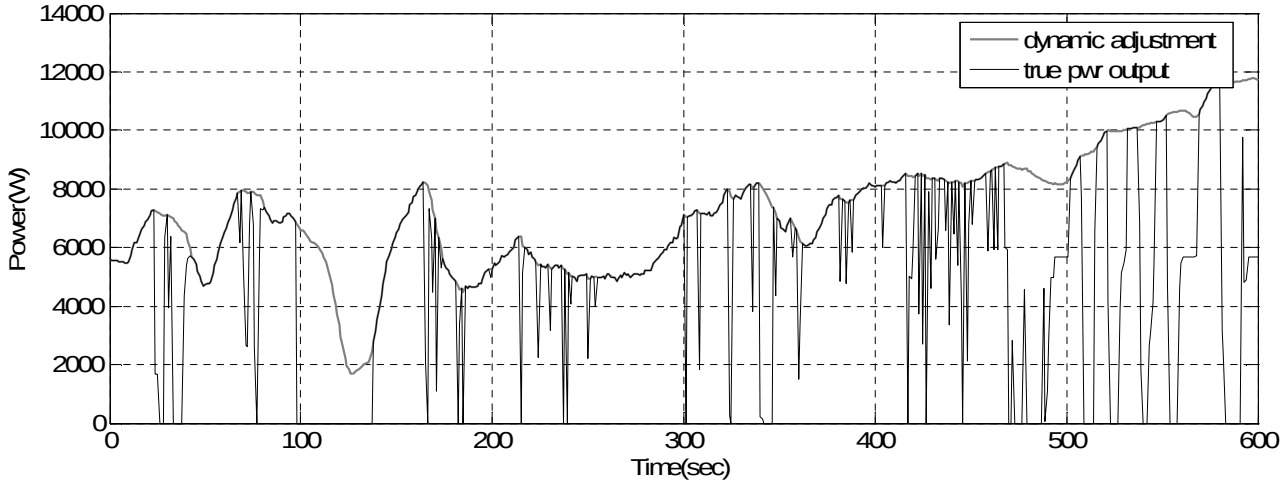


圖 53、動態調變的燃料電池輸出以及受蓄電池充電限制下真實的燃料電池輸出

而動態調變方法的 mpg 在前面 UDDS 與 HWFET 行車情境時與其他四種方法相近，甚至稍微高於其他四種方法，但在 US-06 時則顯低於其他四種方法，這是可以想見的，所短少的 mpg 被用在補償 SOC 維持一定水準。然而 SAE J1711 計算整體 mpg 時，並不考慮 US-06，他僅被用來檢驗加速性能。

所以最終整體 mpg 以動態調變方法最佳，而且他可以在所有行車條件下維持 SOC 落在策略規劃的範為。其中後者是更重要而且是其他方法所無法達成的。

6.2.2 討論

本混合動力車受限於市面上可得的動力元件選擇，在先天上就已存在著某些不匹配之處，例如燃料電池與馬達略微 under design，而蓄電池則有最大 1C 的充電限制，這些是設計過程中必然會碰到的妥協。這些電力元件不匹配的先天不良會在某些設計不當的能量管理方法上，造成蓄電池有過充

或過放的危機，或是限制了車輛的加速性能。

模擬結果顯示不同能量管理方法用於同一種行車情境時，但 mpg 則都差異不大（偶有例外），表示這些能量管理概念上或多或少都有相似之處（在本混合動力車上為將 SOC 回授修正以維持在 60%），只有在很嚴苛的行車情境下，如 US-06，特出的能量管理方法才會顯現出其優劣。但發生劣化時，此能量管理方法連最基本的 SOC 平衡都無法達到。而此時混合動力車將只能以純燃料電池無複合的狀態行駛，無法改善燃料效率。

模擬結果也顯示不同能量管理方法在不同行車情境會有不同的 SOC 平衡水準，這表示每種行車情境的功率需求特性是很不相同的。而和適於某一行車情境的能量管理方法不見得和適於其他功率需求的行車情境，只有帶有適應性概念，調變燃料電池輸出才能夠使此能量管理方法適用於所有場合。本研究所提出的動態調變方法則完全合乎一開始設定的目標優先順序，在 US-06 行車情境下，先犧牲 mpg，成功地維持了 SOC 平衡。

七、參考文獻

1. AVL, ADVISOR2004 User's Guide, April 2004
2. 洪翊軒，"燃料電池系統性能提升之技術"，機械工業月刊，第 272 期，第 112-124 頁，2004 年 11 月。
3. S. Piller, M. Perrin and A. Jossen, “"Method of state-of-charge determination and their applications," *J. Power Source* 96(2001), pp. 113-120.
4. B. Brant， *Build Your Own Electric Vehicle*， McGraw-Hill， Inc. (1994).
5. 林百福， 汽車設計 ，全華圖書 (2000)
6. B.P. Siegler, L, Butler, A.J. Deakin and D.C. Barton，*The application of finite element analysis to composite racing car chassis design*， Sport engineering (1999)
7. M. Avalle， *Structure Optimization of a Composite Under For Racing car*， Department of Mechanical Engineering, Politecnico di Torino, Torino, Italy
8. Juan Pablo Leiva, Liangsheng Wang, Sebastien Recek and Brian C. Watson， *Automobile Design Using the GENESIS Structural Optimization Program*，Vanderplaats Research & Development, inc
9. Jin yi-min， *Analysis and Evaluation of Minivan Body Structure Finite Element Methods*， Technology Research Institutd Beiqi Futian Vehicle Co.,Ltd
10. M. E. Botkin， Structural Optimization of Automotive Body Component Based on Parametric Solid Modeling，GM R&D Center, Warren ,MI, USA (2002)
11. S. Milton and S.M. Grove ， Composite Sandwich Panel Manufacturing Concepts for a Lightweight Vehicle Chassis， ACMC, University of Plymouth
12. M. J. Box, "A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with Other Methods," *The Computer Journal*, Vol. 8, pp. 42-52, 1965.
13. S.-Y. Hu and J.-H. Cheng, "Development of the Unlocking Mechanisms for the Complex Method," *Computers and Structures*, Vol. 83, pp. 1991-2002, 2005.
14. ASTM C393, "Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure," *Annual Book of ASTM Standards*, 2006.
15. M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson and H. N. G. Wadley, "Metal Foams: A Design Guide," *Butterworth-Heinemann*, Woburn, MA, USA, 2000.
16. Hexweb, "HRH-10," *Hexcel Corporation*, Pleasanton, California, USA,
17. U. Ringertz, B. Esping and J. Backlund, "Computer Sizing of Sandwich Constructions," *Composite Structures*, Vol. 5, pp. 251-279, 1986.
18. Renshape®, "DT 081 Lightweight Filler," *Huntsman Advanced Materials Americas Inc.*, Auburn Hills, MI, USA,
19. C. Kildegaard, "Experimental and Numerical Fracture Mechanical Studies of Frp Sandwich T-Joints in Maritime Constructions," *Proceedings of the Second International Conference on Sandwich Construction*, Gainsville, Florida, USA, 1992.
20. K. Noakes, "Successful Composite Techniques," *Osprey Publishing*, Londin, UK, 1989.

21. L. J. Gibson and M. F. Ashby, "Cellular Solids-Structures and Properties," *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, 1997.

22. HexWeb,"HoneycombSandwichDesignTechnology,"http://www.hexcelcomposites.com/Markets/Products/Honeycomb/Sand_design_tech/default.htm

23. Scotch-Weld™, "AF-163-2K Structural Adhesive Film," *3M Co.*, MN, USA,

24. "Epocast® 1511-A/B," *Vantico Ltd.*, Cambridge, UK,

25. ESA, "Insert Design Handbook," *European Space Agency*, 1987.

26. O. T. Thomsen and W. Rits, "Analysis and Design of Sandwich Plates with Inserts-a High-order Sandwich Theory Approach," *Composites Part B*, Vol. 29, pp. 795-807, 1998.