

## 大客車骨架結構輕量化設計與分析

陳奕安<sup>1</sup>、張祐誠<sup>2</sup>、廖慶復<sup>3</sup>

<sup>1</sup>財團法人車輛研究測試中心(工程師)

<sup>2</sup>財團法人車輛研究測試中心(工程師)

<sup>3</sup>財團法人車輛研究測試中心(分項計畫主持人)

E-mail: [lostsky93@artc.org.tw](mailto:lostsky93@artc.org.tw)

### 摘要

本項研究技術是源自於經濟部能源局所主導之「105年度重型車輛耗能管制與節能應用技術推廣計畫」中子項目，係針對國內所生產製造之遊覽車骨架結構進行輕量化分析，主要目標為減輕骨架重量達原構型之15%，且在輕量化目的下，要能符合國內車輛安全基準法規第550項「大客車車身結構強度」之要求。在輕量化過程中，先以試驗設計法DOE(Design of Experiment)分析各設計變數(骨架厚度)之敏感度；再採用基因演算法GA(Genetic Algorithm)作為最佳化程序；並以各骨架厚度為設計變數，規範翻覆強度為拘束條件，骨架重量最小做為優化目標；以分析結果而論，最終將車身骨架重量由3.812ton降至3.224ton，減輕重量達0.588ton；佔原況骨架重量15.42%，同時又能通過大客車車身結構強度之要求。

**關鍵詞：**最佳化、試驗設計法、基因演算法。

### 1. 前言

國內大客車結構法規(550 大客車車身結構強度)已於民國97年底實施，國內業者對其車體結構設計是以補強結構方式來強化，能符合通過國內大客車結構強度法規之規定，卻增加車體重量，亦影響載客數配置，這對於油耗及載客成本效率將造成影響，故經濟部能源局所指導之重型車輛節能應用技術計畫輔導大客車輕量化議題，主要是進行骨架輕量化設計。

為了提高油耗水準及增加節能成效，本計畫針對車體輕量化技術進行研究，藉助CAE電腦輔助工程分析針對車身結構骨架進行整車優化，先以DOE法評估各車身骨架組件對目標值-重量之影響程度，並從中挑選數組骨架作為優化標的，在結構位移最小拘束條件下，透過優化演算法技術，以骨架厚度當作設計變數，透過疊代求解過程，獲得各骨架厚度的最佳化設計值。進而建立3D車體輕量化模型，並參考國內大客車車體結構強度法規(車輛檢測基準550)，進行車體安全電腦模擬分析驗證，以符合國內外車體安全相關法規規範，如此可以減少設計與計算時間，同時達到結構減輕重量與強度要求目標。

本計畫分析設計流程為應用基因演算法程式，搭配有限元素分析軟體ABAQUS及優化軟體HyperStudy，演算最佳化目標函數值，最終得出最佳化設計參數值。

### 2. 設計分析流程

在分析設計作業前，首先依照原況大客車之骨架設計圖建立3D-CAD及有限元素模型，並依照550法規規範建立生存空間後，選定10組車身骨架以DOE法分析骨架厚度對於整體重量與翻覆強度之敏感度，再從中挑選出6組骨架進行重量最佳化程序，最佳化後之骨架厚度參數經工程化後，代入有限元素模型進行翻覆強度分析，最終結果為符合翻覆強度法規規範-未侵入生存空間，則此6組骨架優化及工程化後厚度參數及所減輕之重量即達成研究目的。整體輕量化設計分析流程圖如圖1所示，輕量化設計步驟如圖2所述。

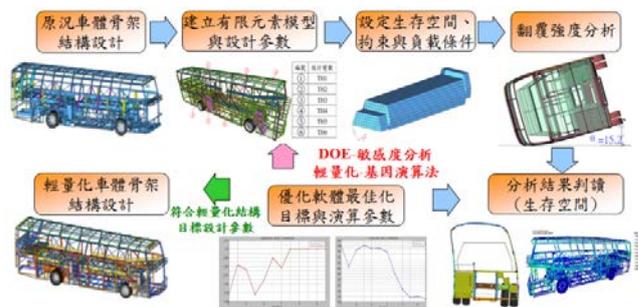


圖1 輕量化設計分析流程

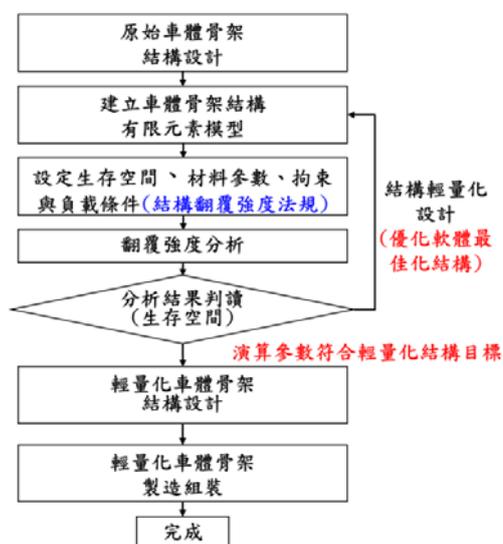


圖2 輕量化設計步驟

## 2.1 大客車車身結構強度法規

因輕量化主要拘束條件為引用大客車車身結構強度法規規範依據，其技術規範主要來自於交通部所頒布之車輛安全檢測基準第 550 項，該項法規為規範大客車車身結構強度之測試方法，主要內容為將大客車放置於一離地八十公分之翻覆舉昇平台上，如圖 3 所示，啟動翻覆平台，以每秒鐘 5 度之角速度轉動舉昇平台，直至超過結構重心臨界角度為止，讓大客車受重力自由翻覆落下觸地，如圖 4 所示。

翻覆過程中車身骨架結構不能侵入乘員生存空間，乘員生存空間是依照座位之位置及高度來虛擬延伸出的空間，由座椅前腳踏地板垂直往上延伸 500mm 定義出座椅之 SR 點，而左右兩側之邊界為距骨架 150mm；再由 SR 點垂直往上延伸 750mm 且左右兩側邊界距骨架 250mm，以此作為頂部邊界，最前端座椅 SR 點水平往前延伸 600mm，最後端座椅 SR 點往後水平延伸 200mm，由上述邊界所組成之空間稱為乘員生存空間，如圖 5 所示。除實車測試方法外，亦可採用電腦模擬分析方式為之。



圖 3 翻覆舉昇平台

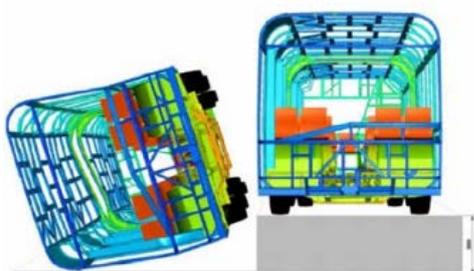


圖 4 翻覆觸地示意圖

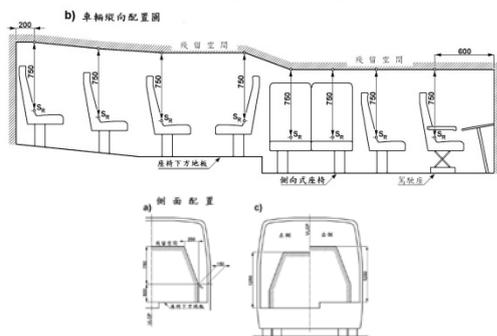


圖 5 乘員生存空間示意圖

## 2.2 大客車車身結構模型建立

本文採用有限元素法來建立分析模型，元素類型以 shell-type 為主，元素尺寸為 10mm，元素總數 655540 個，並驗證其網格收斂性在 5% 以下。下圖 6 綠色部分為乘員生存空間，車輛總重為 17ton，總有效車重為 15.771ton 座位數為 45 人座，不考慮蒙皮及其他機構裝備設施之模型，而以配重及重心量測方式來代替，如圖 7 所示，整車翻覆動能參數設定相關數據如表 1 所述。



圖 6 整車有限元素模型



圖 7 整車重心量測

參數	數值
總重	17ton
總有效車重	15.771 ton
空車重	14.275 ton
乘員數	45 人
CG (以左前輪軸心為原點)	(-2560, -1037, 778)

## 2.3 等效受力模式換算

目前大客車車身結構強度是以電腦模擬分析方式來執行為主，且允許由觸地前一刻計算起；由重心高度推算公式(式 1)及動位能量守恆公式(式 2)，可以推算出撞擊瞬間之動能能量為 136728J；因在分析大客車翻覆撞擊所採用之暫態解析方式以本案例而言，要能得到有效判斷之資訊，所需時間為 30 個小時，就最佳化程序來看不符合成本效益。

故本文以大客車翻覆瞬間車頂側著地之角度作為等效入力設定之向量方向，再取頂棚側骨架觸地面積之 nodes 為施加載荷點；載荷點數為 2240 個；向量方向夾角為觸地角度 0.2686 rad 加  $\pi/2$ ，為 0.7686 rad，F 為每個載荷點所施加力量，經換算 F 為 6.3N，以均佈壓力方式進行穩態分析可以等效出動能 136800J 之效果，以此等效力施力模式做為最佳化之載荷條件，一個分析循

環所需時間降為1個小時，可大大減少優化程序所需時間。圖8為載荷條件施加方式。

表2 翻覆撞擊參考能量 (E <sub>R</sub> )	
車體翻覆撞擊參考能量 (E <sub>R</sub> ) : 136728 J	
理論依據	
$\Delta h = \sqrt{\left[\left(\frac{W}{2}\right)^2 + h_0^2\right]} - \frac{W}{2H} \sqrt{H^2 - 0.8^2} + 0.8 \frac{h_0}{H} \dots\dots(1)$	
$E_R = M \cdot g \cdot \Delta h \dots\dots(2)$	
翻覆參考能量計算說明表	
W=車輛全寬	2.5m
H=車輛高度 (m)	3.5m
h <sub>0</sub> =垂直高度-平坦地面垂直高度	1.301m
M=總有效車重 (含駕駛 75kg)	15771kg
g=重心加速度	9.8m/s <sup>2</sup>
t=車輛重心到縱向中心之距離	7.4mm

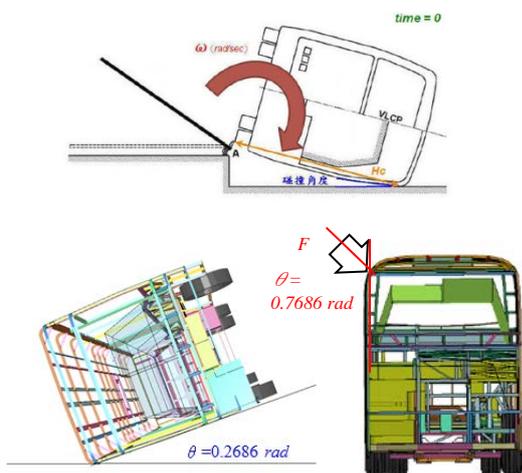


圖8 載荷條件施加模式

### 3. 優化流程步驟建立

在前述分析模型及載荷條件設定完成後，即以HyperStudy作為優化程序之介面軟體，有限元素分析軟體ABAQUS作為計算核心；先將有限元素模型檔案進行設計變數及響應函數參數化後，分別進行DOE法之敏感度分析及GA法-最佳化程序分析，最終產出一組輕量化後骨架厚度數值。相關優化流程如圖9所示。

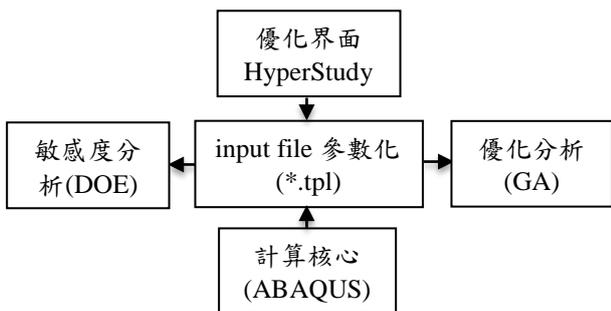


圖9 優化流程圖

### 3.1 HyperStudy 操作程序

在本項操作介面中最重要的步驟有兩項，一為將有限元素模型檔案導入程式編輯器 editor，並將欲改變之參數作設定，以本文為例，是以各骨架「厚度」為設計變數，實際作法為將 input file 中之 shell 數值部分反白圈選，按 create parameter，如此依序建立各變數參數化程式後，將檔案存成\*.tpl 格式。第二個重要步驟為將 tpl 檔案讀入 HyperStudy，並在表單 Edit 中選擇 Register Solver Script，將檔案選擇指向 ABAQUS 運算應用程式檔(abq6141.exe)。其次在 Define model 選項中 Add Model，相關重要 keyword 設定如下表3所示。

在執行上述 hyperStudy 設定及原況分析結果後，再啟動 Expression Builder 從原況分析結果檔去擷取所需訊息(如節點位移量、重量..可從 abaqus 結果檔中的\*.dat 或\*.odb 檔獲得)，用以編輯 Response Function。

表3 優化界面參數設定

Model Type	Parameterized file
Resource	/*.tpl
Solver input file	*.inp
Solver Execution Scrip	abq6141.exe
Solver input arguments	j=*.inp interactive

### 3.2 DOE 敏感度分析程序

DOE 試驗設計(Design of Experiment)，為安排實驗次數和分析實驗數據的統計學方法；試驗設計的精神為對試驗進行合理安排，以較小或較少的試驗規模與次數，來取得較理想的試驗結果。本文採用正交試驗設計法-利用正交表規格化的表格，挑選試驗條件，安排試驗計劃和進行試驗，設計採 Fractional Factorial 法-直交表 L64(2<sup>63</sup>)。至於設計變數以圖10中大客車車身結構骨架所標註之①~⑩，共計10組設計變數為主，將之標示為T1~T10。而反應函數(Response Function)則為骨架重量 Mass 及擠壓區變形位移角度 Dis-degree。車身結構骨架厚度之敏感度分析結果如圖11與圖12所示。

①主柱	②擋板	③底枕	④後板	⑤梯板
T1	T2	T3	T4	T5
⑥前柱	⑦肋柱	⑧立柱	⑨頂棚	⑩前擋
T6	T7	T8	T9	T10

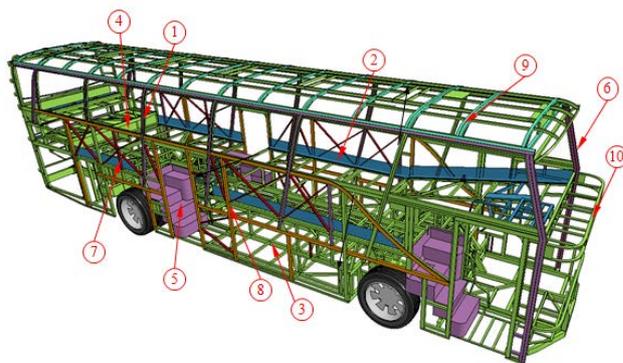


圖10 設計變數-骨架種類標示圖

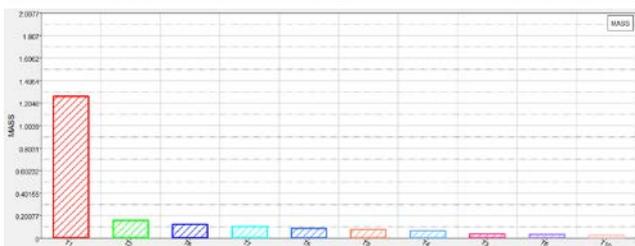


圖 11 骨架厚度-重量之敏感度圖

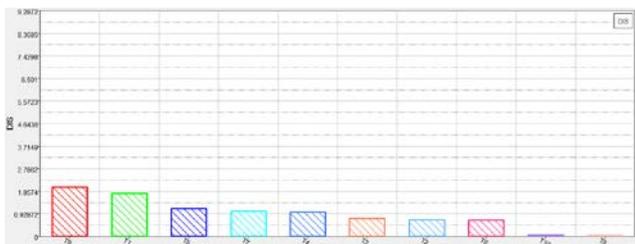


圖 12 骨架厚度-位移角度之敏感度圖

由骨架厚度-重量之敏感度圖之結果： $T1 > T2 > T8 > T7 > T5 > T9 > T4 > T3 > T6 > T10$ ；骨架厚度-位移角度之敏感度圖之結果： $T9 > T1 > T5 > T7 > T4 > T3 > T2 > T6 > T10 > T8$ ，選定對重量敏感度較高之  $T1$ 、 $T2$ 、 $T5$ 、 $T7$ 、 $T8$ 、 $T9$  骨架厚度編號作為最佳化之設計參數。

### 3.3 基因演算法之最佳化分析

車身骨架輕量化即為最佳化之程序：本文採用之最佳化演算法為基因演算法 GA(Genetic Algorithm)，基因演算法是採多點搜尋的方式在參數空間中同時尋求問題最佳解，藉由所定義的適合度函數值 (Fitness) 作為演化過程中性能指標依據，再經由演化機制-複製 (Reproduction)、交配 (Crossover)、突變 (Mutation)，適切地調整搜尋的方向及區域，使能逐漸搜尋到最佳解。由 3.2 節敏感度分析提取 6 組  $T1$ 、 $T2$ 、 $T5$ 、 $T7$ 、 $T8$ 、 $T9$  骨架厚度編號作為最佳化設計變數。

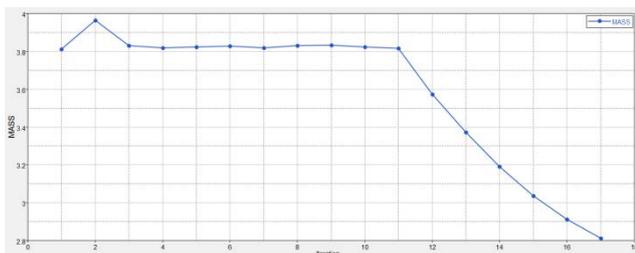


圖 13 Iteration Plot 2D-Mass

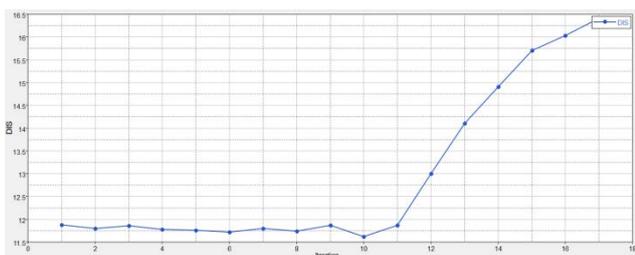


圖 14 Iteration Plot 2D-Dis-degree

表 4 最佳化後變數與響應函數值

	T1	T2	T5	T7	T8	T9	Mass	Dis
單位	mm	mm	mm	mm	mm	mm	ton	deg
原設計	3	6	5	3	3	2	3.812	11.9
最佳化	1.4	2.9	1.9	1.8	1.4	1.2	3.191	14.9
工程化	1.5	3	2	2	1.5	1.2	3.224	-

由圖 13 Iteration Plot 2D-Mass 及圖 14 Iteration Plot 2D-Dis-degree 得知，基因演算法衍生到第 14 代時，位移角度為  $14.9^\circ$ ，而最大位移角度限制為  $15^\circ$ ，重量為 3.191ton， $T1$ 、 $T2$ 、 $T5$ 、 $T7$ 、 $T8$ 、 $T9$  之工程化數值如表 4 所示。

### 3.4 最佳化骨架設計之車身結構強度分析

將上述  $T1$ 、 $T2$ 、 $T5$ 、 $T7$ 、 $T8$ 、 $T9$  工程化後數值代入分析模型，並執行一次大客車車身結構強度分析程序，圖 15 為記錄翻覆能量曲線圖，相關數據如表 5 所述，翻覆動能為 136765 J，符合大於車體翻覆撞擊參考能量 ( $E_R$ )：136728 J。

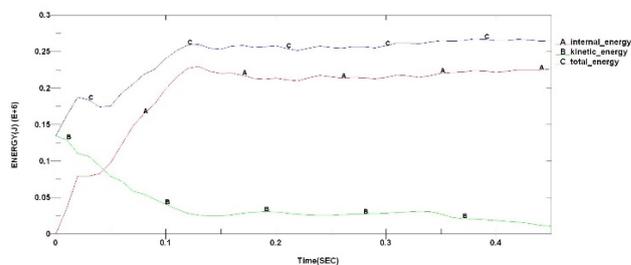


圖 15 翻覆動能曲線圖

表 5 翻覆能量列表

總能量最大值	262321 J
骨架勢能最大值	234312 J
翻覆動能最大值	136765 J

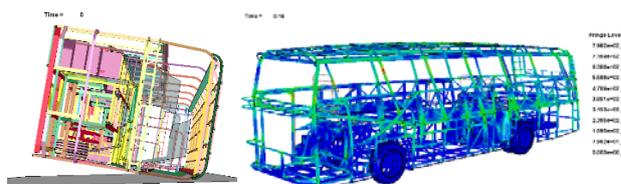


圖 16 翻覆後整車結構應力分布雲圖

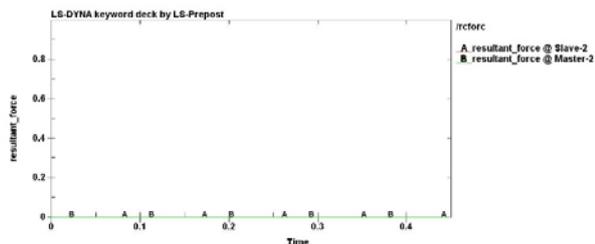


圖 17 車身結構與生存空間之接觸力曲線圖

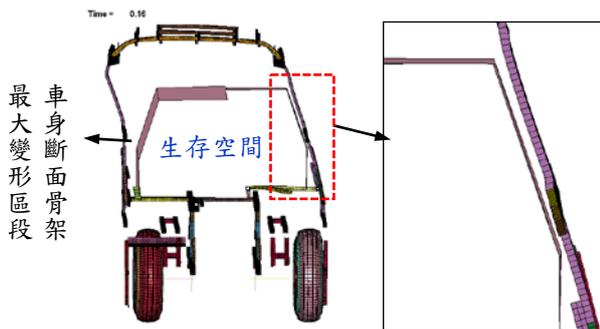


圖 18 車身結構最大變形斷面與生存空間相對位置圖

翻覆後車身結構應力分布狀態如圖 16 所示，在判斷車身骨架結構是否有入侵生存空間上，會設定兩者間有一張接觸卡片，接觸力為 0 則無入侵，由圖 17 接觸力探知為 0，再由圖 18 車身斷面骨架最大變形區段剖面圖來識別，也顯示骨架並未入侵生存空間。

#### 4. 結論

本文分析前題為滿足現況大客車結構強度法規下，僅就骨架尺寸進行輕量化議題探討，主要在於考量輕量化與耗能間具有正相關性，故不考慮材質更換、車體 NVH 效應及其他性能影響。

由前述結論可知最終已將車身骨架重量由 3.812ton 降至 3.224ton，減輕重量達 0.588ton；佔原況骨架重量 15.42%；已充分輕量化，且輕量化後之車身結構強度仍可通過法規規範-骨架未入侵生存空間。本論文已建立一套可行的大客車車體結構輕量化設計分析之流程方法，後續可運用於整車設計上；輕量化車體設計對於油耗之減少具有正面效益，車體輕量化之議題日益重要，但過度減輕結構卻往往容易造成結構安全上的疑慮，因此本文運用敏感度分析了解各骨架之影響度，並將符合國內『大客車車身結構強度』安全法規技術規範融入最佳化設計流程中，在確保整車結構安全條下，除可保障消費者乘坐安全外，並可以提昇業者產品競爭力與降低油耗營運成本。

#### 5. 致謝

感謝經濟部能源局「105 年度重型車輛耗能管制與節能應用技術推廣計畫」支援本論文撰寫。

#### 6. 參考文獻

期刊論文：

- [1] S.Narayanan and S. Azarm , *On improving multi-objective genetic algorithms for design optimization* , *Structural Optimization 18* , 146-155 , 1999 。

書籍：

- [2] 車輛安全檢測基準-550項
- [3] *ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.14, Volume II.*
- [4] *ABAQUS Keywords Manual, Version 6.14.1.*
- [5] *LS-DYNA Keyword User Manual , APRIL 2003, Version 971.*
- [6] *Altair HyperStudy 14 Design of Experiments , Optimization & Stochastic Studies.*