

車輛頂平系統側伸臂組結構優化

黃舉錐,臧祥甫,聶素珍

國家中山科學研究院 飛彈火箭研究所

摘要

某車輛頂平系統側伸臂組之初步設計，以 Abaqus 之 Submodel 分析方法的分析結果顯示有局部塑性變形及螺釘破壞現象。為改善初步設計，本文再執行尺寸優化分析，以側伸臂組各板件之板厚為設計變數，在不增加重量之拘束條件下，得到側伸臂組端部應力最小的最佳板厚，並因此發現初步設計負荷考量不週延之問題，有效改善側伸臂組的結構安全性。

關鍵字：側伸臂組、尺寸優化

一、緒論

車輛頂平系統之作用在車輛停放後，側伸臂張開並將車輛頂起，以增加車輛之穩定性及確保負載裝備之水平。頂平系統一般包括支撐結構組、側伸臂組及支撐缸體組，本設計之側伸臂組由板件焊接而成，與頂平支撐缸體組之內缸、外缸同為頂平系統之主要承力組件。

本文先執行頂平系統側伸臂組初步設計之結構分析，分析結果顯示：側伸臂多處位置有局部塑性變形，固定端板結合螺釘負荷過大，可能發生螺釘斷裂現象。

為有效改善初步設計之問題，本文使用尺寸優化方式，以側伸臂組各板件之板厚為設計變數，擬在不增加重量之拘束條件下，尋求側伸臂組端部應力最小的最佳板厚，優化結果得到具體之設計改進。

二、幾何結構與材料性質

2.1 幾何結構

某車輛頂平系統主結構如圖 1，側伸臂組與支撐缸體組藉由固定端板結合。側伸臂組由平板、縱板、端板、加強板所組成，如圖 2，端板與固定端板間除以 7 顆 M10 螺釘鎖合外，固定端板與平板、縱板間有 15mm 寬之接觸台位；固定端板與固定板間除以 8 顆 M12 螺釘鎖合外，上下方亦有 10mm 寬之接觸台位；固定板則直接焊接於外缸上。

2.2 材料性質

側伸臂組之平板、縱板、端板、加強板，以及固定端板、固定板、內外缸均為 AISI 4130，並考慮材料塑性。

三、初步設計分析模型

3.1 模型建立

考慮側伸臂組、固定端板、支撐缸體組之內外缸等主結構之分析模型如圖 3，焊接部位以共用節點處理。

3.2 負荷條件

頂平系統負荷條件分別考慮重力、路面傾角及風壓。

3.3 反力分析

由於車輛負載重心不在對稱軸上，且有風壓作用，故車輛的 4 組頂平系統受力並不相等，故需執行反力分析。分析結果顯示頂平系統所受的最大反力將近最小反力的 2 倍，故本文之側伸臂組所在位置將取最大反力處。

3.4 邊界條件

- (1) 固定邊界：頂平系統與地面接觸位置設為位移固定邊界。
- (2) 強制邊界：本文採用 Abaqus 之 Submodel 分析方法，亦即於頂平系統細部分析模型 (Local Model) 之側伸臂組端部，施加全車主結構 (Global Model) 分析結果 (強制變位)，頂平系統 Global Model 及 Local Model 的變位分佈如圖 4，無論最大變位值或變位分佈，兩者均極為接近。

(3)接觸邊界：考量頂平系統所有組件間之接觸現象，包括板件間未焊接部位，如圖 5。

四、初步設計分析結果

4.1 應力分析結果

側伸臂組之平板、縱板、加強板非線性(考慮塑性、接觸)應力分析結果如圖 6，局部有發生塑性；端板之應力分佈如圖 7，焊接處應力大於 AISI 4130 之焊接強度；固定端板之應力分佈如圖 8，局部有發生塑性；固定板之應力分佈如圖 9，焊接處應力大於 AISI 4130 之焊接強度；內外缸之應力分佈如圖 10，可滿足結構安全需求。其中，固定端板及固定板之塑性位置，係接觸或板件交界之小範圍塑性，不會影響結構安全性；唯側伸臂組應力明顯較大，有改善空間。

4.2 結合螺釘結構安全評估

結合螺釘之模擬方式，係採多點束制條件(MPC)模擬。執行螺釘結構安全評估時，抗剪安全係數如下式：

$$SF = \tau_a / \left(\frac{4V}{3A} \right)$$

其中， τ_a 表螺釘抗剪強度， V 為螺釘所承受之剪力， A 為螺釘之有效面積。

分析結果顯示：端板與固定端板之結合螺釘(M10)抗剪安全係數僅 0.68。故若側伸臂組主結構不進行研改，螺釘尺寸需加大，但從設計觀點，使用螺釘組承受剪力並非一個好的設計方案。

五、側伸臂組結構優化分析

頂平系統初步設計結構分析結果顯示側伸臂組有塑性發生，有進一步研改空間，故本文將針對側伸臂組進行結構優化分析。因側伸臂組係以板件為主，故優化方式將採尺寸優化，以板厚為設計變數，尋找在不增加重量之拘束條件下，側伸臂組端部應力最小的最佳板厚。優化分析使用之工具軟體為 HyperWorks/HyperStudy。

5.1 簡化之模擬模型及分析結果

側伸臂組初步設計簡化之模擬模型如圖 11，平板、縱板、上加強板、下加強板均以等厚板殼元素模擬，其中，平板厚 14.5mm，縱板厚 8.5mm，上加強板厚 8mm，下加強板厚 5mm，且因端部固定，故忽略端板之影

響。負荷則施加由於車重所造成之集中力、彎矩及扭矩。

簡化模擬模型分析結果如圖 12，最大應力發生於端部下緣之元素編號 e1920 位置。此處的應力值將作為結構優化的目標函數。

5.2 設計變數

- (1)平板厚度(dv1)：預設值為 14.5mm，設計空間為 8mm~16mm。
- (2)縱板厚度(dv2)：預設值為 8.5mm，設計空間為 8mm~16mm。
- (3)上加強板厚度(dv3)：預設值為 8mm，設計空間為 0.1mm~8mm。
- (4)下加強板厚度(dv4)：預設值為 5mm，設計空間為 0.1mm~8mm。

5.3 拘束條件、目標函數與優化方案

(1)拘束條件

初始設計重量(mass)為 w ，拘束條件為優化方案之重量不超過初始設計重量。

(2)目標函數

側伸臂組端部下緣元素編號 e1920 位置的應力(stress-e1920)最小化。

(3)優化方案

滿足 $mass < w$ 之最小 stress-e1920。

5.4 分析流程

STEP I：建立側伸臂組原設計簡化之有限元素分析模型，如前所述，以確認分析模型無誤。

STEP II：為更能掌握 4 個設計變數的影響，本文先執行「試驗設計」(DOE, Design of Experiments)分析，分別得到不同設計變數的敏感度。

STEP III：執行「近似」(Approximation)分析求出「近似解」，再配合拘束條件及目標函數，由「近似解」的內插方式快速求出「近似最佳解」。

STEP IV：因不是直接執行優化分析求得最佳解，故最後需依據「近似」分析得到之優化設計變數，重新修改分析模型及求解，檢查其分析結果是否滿足需求。

5.5 「試驗設計」分析結果

「試驗設計」分析結果如圖 13，4 個設計變數中，縱板厚度(dv2)對側伸臂組端部應力(stress-e1920)的敏感度最高，其次為平板厚度(dv1)，再其次為下加強板厚度(dv4)，上加強板(dv3)的敏感度最小。

5.6 「近似」分析結果

「近似」分析結果如圖 14，對側伸臂組端部應力(stress-e1920)近似值與分析值的誤差僅 0.0275%，故後續可以「近似」分析結果求「近似最佳解」。

5.7 「優化」分析

經以不同初始條件執行優化分析，最佳解之設計變數、拘束條件、目標函數優化迭代過程收斂情況如圖 15，平板厚度(dv1)最佳解 13.7mm，縱板厚度(dv2)最佳解 14.0mm，上加強板厚度(dv3)最佳解 0.3mm，下加強板厚度(dv4)最佳解 0.1mm。優化分析結果顯示平板及縱板厚度最佳解相近，接近 14mm，而上加強板及下加強板則近乎可以忽略。其原因為該車輛頂平系統前後跨距大於左右跨距甚多，故對單一頂平系統而言，扭矩的影響比彎矩的影響更大，故會得到外殼等厚、而無需內加強板的分析結果。

5.8 「優化」方案分析結果

由於優化分析結果顯示平板及縱板厚度之最佳解相近，接近 14mm，而上加強板及下加強板則近乎可以忽略。故「優化」方案為平板及縱板厚度 14mm，並移除上加強板及下加強板。唯為配合初始設計尺寸，本文將「優化」方案調整為平板厚度 14.5mm、縱板厚度 15mm。結構分析結果說明如下：

5.8.1 應力分析結果

側伸臂組(平板、縱板、加強板、端板)之應力分佈如圖 16，平板及端板不再發生塑性，其應力值均大幅改善至彈性範圍內。其他如固定端板、固定板、內外缸，因非結構優化析之對象，且與初始設計差異不大，為節省篇幅，本文不再贅述。

5.8.2 變位分析結果

「優化」方案 Global Model 與 Local Model 之變位分佈如圖 17，Global Model 與 Local Model 側伸臂組的變位分佈及最大值，差異亦甚小。若比較初始設計與「優化」方案變位分佈之差異，初始設計由於側伸臂組的勁度相對較小，故側伸臂組兩端的變位差較大；而「優化」方案側伸臂組的勁度相對較大，故側伸臂組兩端的變位差較小。

5.8.3. 結合螺釘安全評估

端板與固定端板結合螺釘(M10)之抗剪安全係數由 0.68 大幅提高至 6.62，故「優化」方案的 M10 螺釘毋需加大尺寸。其原因為側伸臂組縱板變厚，且與平板厚度相近，抗扭

性提高，端板相對變形減小，故結合螺釘受力變小。

六、結論

此車輛頂平系統側伸臂組側伸臂組在設計之初，僅考量了車重所造成的垂向剪力及彎矩，未考量到頂平系統前後跨距大於左右跨距甚多、扭矩的影響比彎矩的影響更大，故有上下平板較厚、而左右側縱板較薄及內置加強板之初步設計構型。而這是在未執行結構分析前不易發現的問題。

本文採用 Abaqus 之 Submodel 分析方法，全車負荷(含車重、風力、路面傾角等)所造成的剪力、彎矩、扭矩自動施加在頂平系統之 Local Model 上，故分析結果會反應出側伸臂組初步設計時負荷考量的不週延，並顯示結構安全性不足。

為改善初步設計，本文執行了側伸臂組之尺寸優化分析，分析結果顯示平板與縱板接近等厚、且加強板可以移除，因而發現初步設計之問題，有效改善側伸臂組的結構安全性。

八、參考文獻

- [1]Abaqus Analysis User's Manual, Version 6.11.
- [2]Abaqus/Standard Example Problems Manual Volume I.
- [3]HyperWorks Documentation, *HyperStudy Introduction*, Version 11.0.
- [4]HyperWorks Documentation, *OptiStruct Optimization*, Version 11.0.

九、圖片

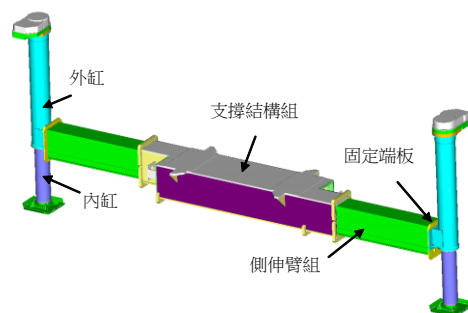


圖 1 頂平系統主結構

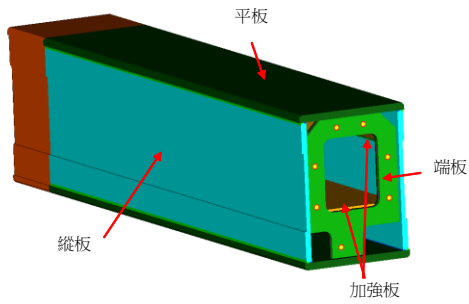


圖 2 側伸臂組主結構

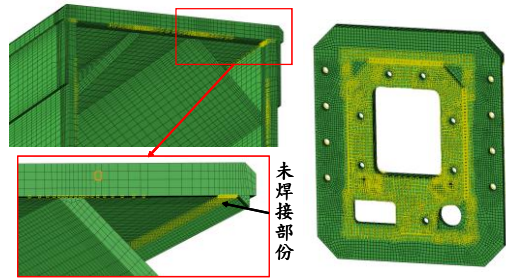


圖 5 板件間未焊接到部位之接觸設定

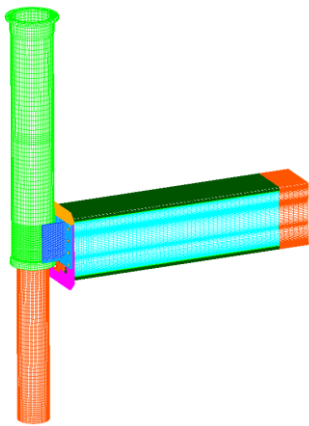


圖 3 頂平系統主結構細部分析模型

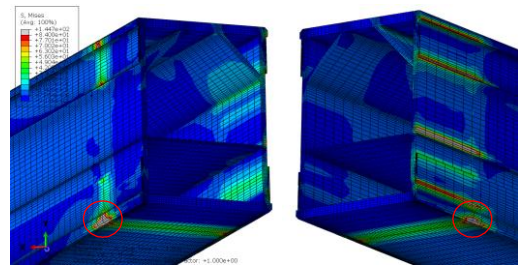
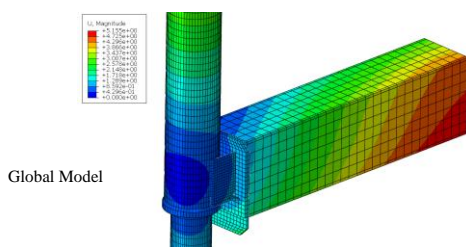


圖 6 初步設計平板、縱板、加強板之應力分佈



Global Model

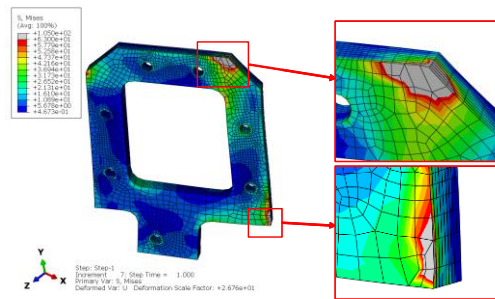
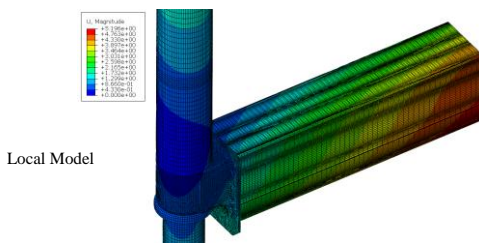


圖 7 初步設計端板之應力分佈



Local Model

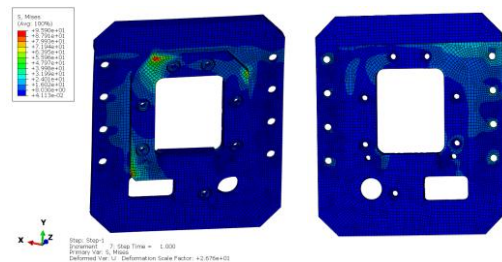


圖 8 初步設計固定端板之應力分佈

圖 4 頂平系統初始設計 Global Model 及 Local Model 的變位分佈

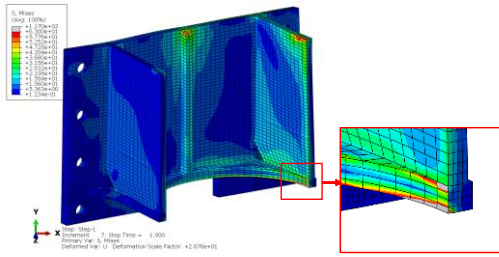


圖 9 初步設計固定板之應力分佈

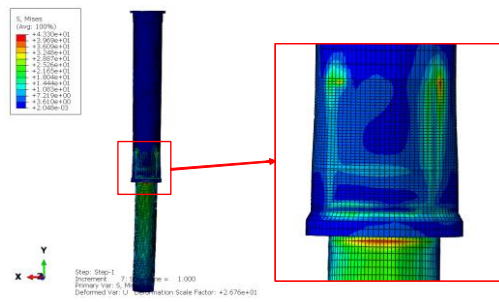


圖 10 初步設計內外缸之應力分佈

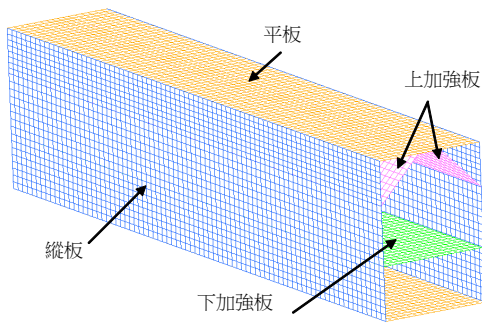


圖 11 側伸臂組初始設計簡化之模擬模型

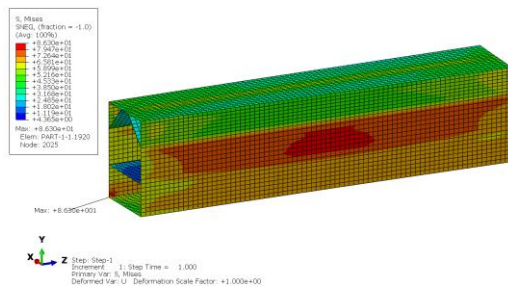


圖 12 側伸臂組初始設計簡化模型分析結果

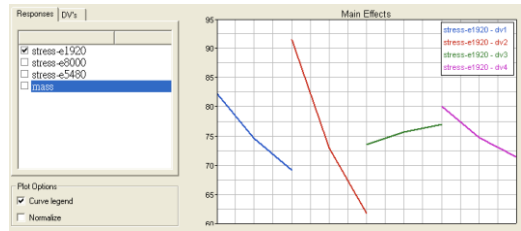


圖 13 「試驗設計」分析結果

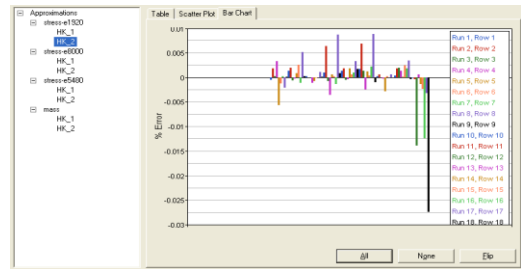


圖 14 「近似」分析結果

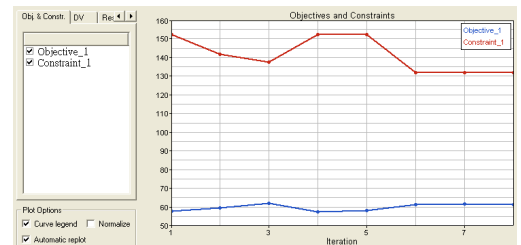
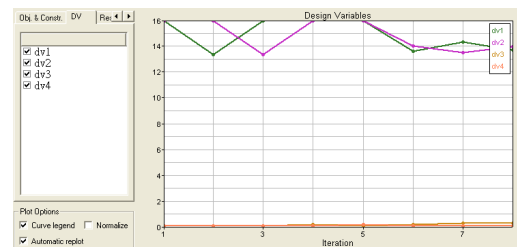


圖 15 設計變數、拘束條件、目標函數優化迭代過程收斂情況

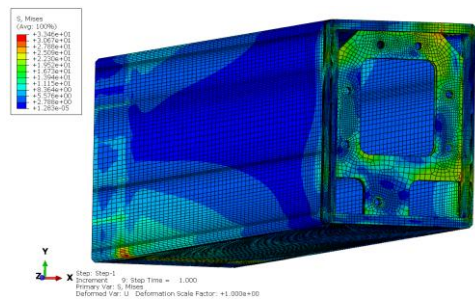


圖 16 「優化」方案側伸臂組(平板、縱板、加強板、端板)之應力分佈

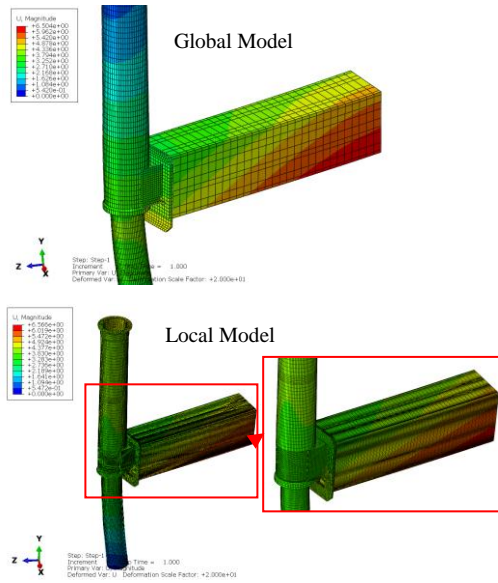


圖 17 頂平系統「優化」方案 Global Model 及 Local Model 的變位分佈