



# 輕軌車輛轉向架國產化開發

國立屏東科技大學特聘教授 / 陳勇全  
交通部鐵道局副組長 / 李開熙  
國立屏東科技大學計畫研究員 / 張奕信

關鍵字：軌道車輛、轉向架框、EN 13749、有限元素分析、疲勞壽命

## 摘要

交通部鐵道局為建立鐵道系統自主技術能力及完善產業發展，因此提出了鐵道產業發展補助計畫，本研究即是轉向架系統自主技術提升計畫之研究成果。輕軌車輛之轉向架系統主要包括：轉向架框架本體、動力系統、懸吊系統、煞車系統及軸橋。其中動力系統包含馬達、齒輪箱、軸承箱及鋼輪。本文主要是探討輕軌轉向架框的結構設計。

轉向架框的結構設計主要是依據EN 13749標準，本研究之設計流程是結合拓樸最佳化、參數最佳化以及有限元素分析。設計目標是要符合標準規定的強度及疲勞壽命，在強度方面要通過標準規定的特殊負載及營運負載強度分析，而壽命方面則是通過 $10^7$ 次的疲勞循環負載壽命分析。經以上設計分析

流程，本研究所提出的轉向架框在特殊負載情況下，其最大von-Mises應力均低於材料之容許應力，滿足強度需求。疲勞循環負載之疲勞壽命分析也滿足 $10^7$ 次之要求，另外在實際軌道行駛壽命也大於使用年限25年。

## 一、軌道車輛產業現況

### （一）軌道車輛的發展

鐵道運輸發展至今已成為最便捷的陸上交通方式之一，與一般公路交通相比，其載重量大、耗能低而且安全性高，是兼具環保、安全、便利的一種交通方式。除了高運量的傳統鐵路系統，現今也發展出可以直接在路面或街道旁行走的輕軌運輸系統。除了具有原本軌道運輸的優點外，由於行駛速度較慢，因此路線規劃曲率半徑可以較小，軌



道的鋪設較為靈活，乘坐平穩且舒適性高，還有美觀、環保等優點。

## （二）軌道車輛技術瓶頸

目前國內軌道車輛的轉向架均由國外進口，國內業者並沒有轉向架設計分析之能力。由於電腦科技快速發展，驅使各大廠商漸漸使用電腦輔助工程分析軟體（CAE）來進行結構強度分析，以減少開發成本與時間。而隨著CAE的發展，有限元素法已成為結構強度分析之主要方法。軌道車輛的發展迅速加上結構強度之安全性要求高，歐盟標準EN 13749 [1]針對轉向架框結構，訂定了許多在模擬時所需要之條件及各負載之計算公式。本文也是利用有限元素分析的方式配合相關標準，來進行轉向架框之設計。

## 二、轉向架框結構設計

### （一）分析流程

本文之分析流程如圖1所示，首先對轉向架結構進行空間規劃，確定初始模型的尺寸後，建立轉向架結構之有限元素模型並進行拓樸最佳化分析，得到轉向架框大致的材料分佈後，進行參數最佳化分析。

最佳化分析主要是以結構的強度及重量為目標，分析時所使用的負載皆是依據相關標準計算。當最佳化分析皆完成後，會進行最終

的靜態強度及疲勞壽命分析，確保在不同的負載條件下，結構的設計皆有符合標準規定。

### （二）拓樸最佳化分析

拓樸最佳化的目的是在特定的目標函數及限制函數下，找出最佳的材料分佈。這個函數可以是重量、應力或是位移等，本文是利用拓樸最佳化的方式來找出轉向架結構的大致雛形。圖2為轉向架框結構多次拓樸的過程，拓樸的初始模型是一個經過空間規劃的轉向架框雛型，在空間規劃時已經考慮了動力系統、懸吊系統、煞車系統、車廂等設備的空間需求。拓樸分析主要的分析目標是轉向架框本身，因此與其他設備連接的部分都會設為非設計區。本文拓樸分析分為多次進行，好處在於可以透過多次拓樸的結果來確認同一個位置的材料分佈趨勢。最終經過多次拓樸分析後的最終模型如圖3所示，此模型整體皆是由板組成，接下來將使用此模型進行參數最佳化分析。

### （三）參數最佳化分析

參數最佳化分析的基本概念是在已知結構材料分佈的前提下，給定邊界、負載條件及材料參數，並且滿足限制條件及設計目標，透過參數最佳化分析找到結構的最佳參數組合。本文主要使用Isight Design Gateway軟體，針對轉向架結構的板厚及尺寸進行參數最佳化分析。這一過程將結合電腦輔

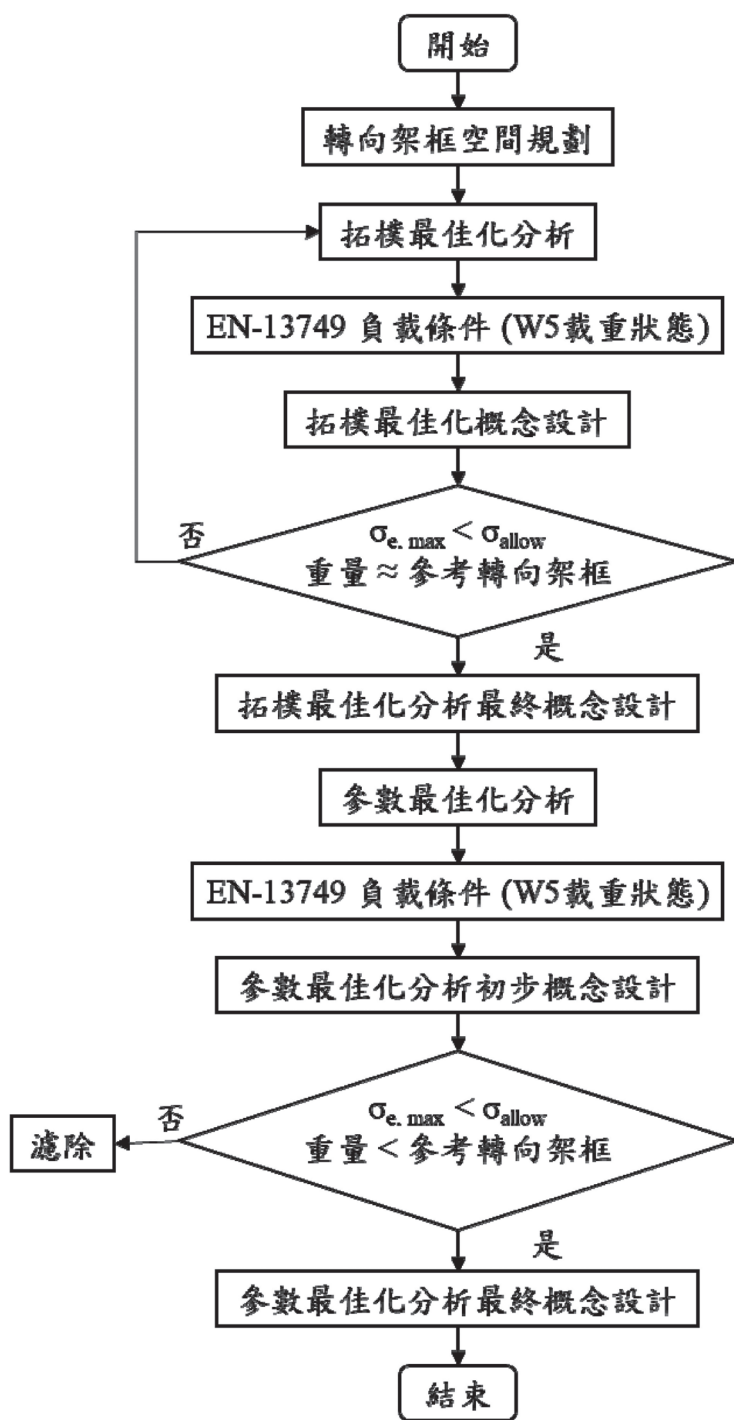


圖 1 轉向架框結構設計流程

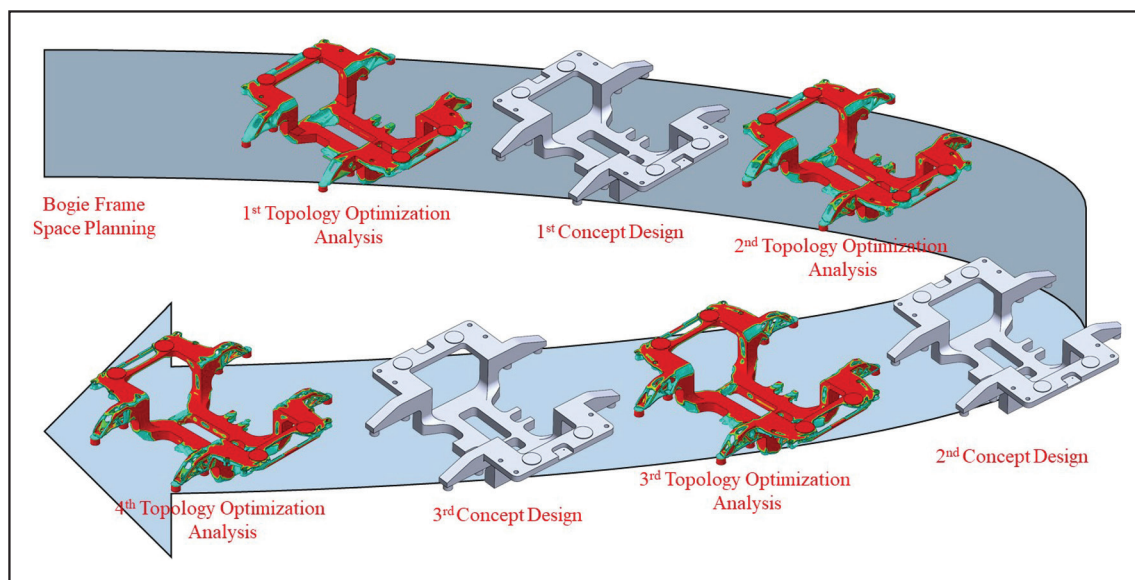


圖 2 轉向架結構拓樸最佳化分析流程

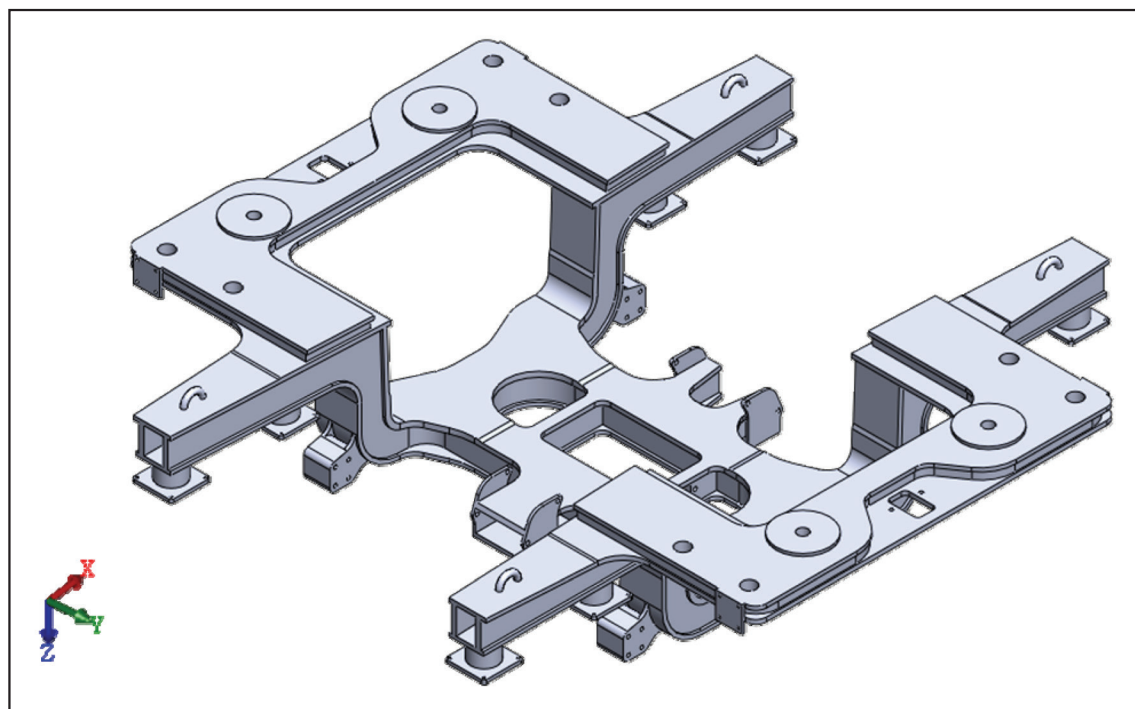


圖 3 拓樸最佳化分析所得轉向架框之概念設計圖



助設計軟體SolidWorks、有限元素分析軟體ABAQUS及疲勞壽命分析軟體fe-safe，來進

行串聯分析，圖4是各軟體串聯的示意圖。圖5是經過參數最佳化分析後的轉向架框結

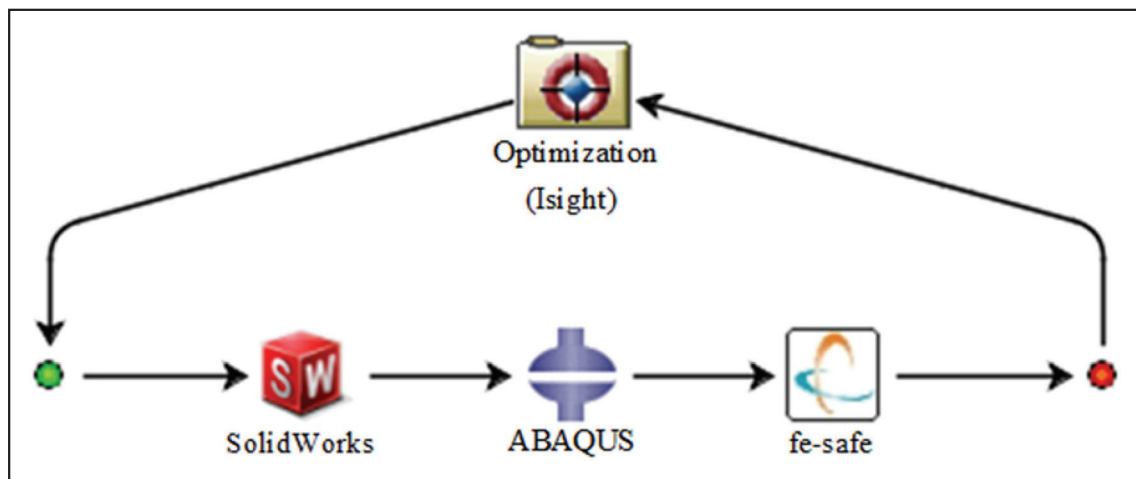


圖 4 參數最佳化分析各軟體串聯分析示意圖

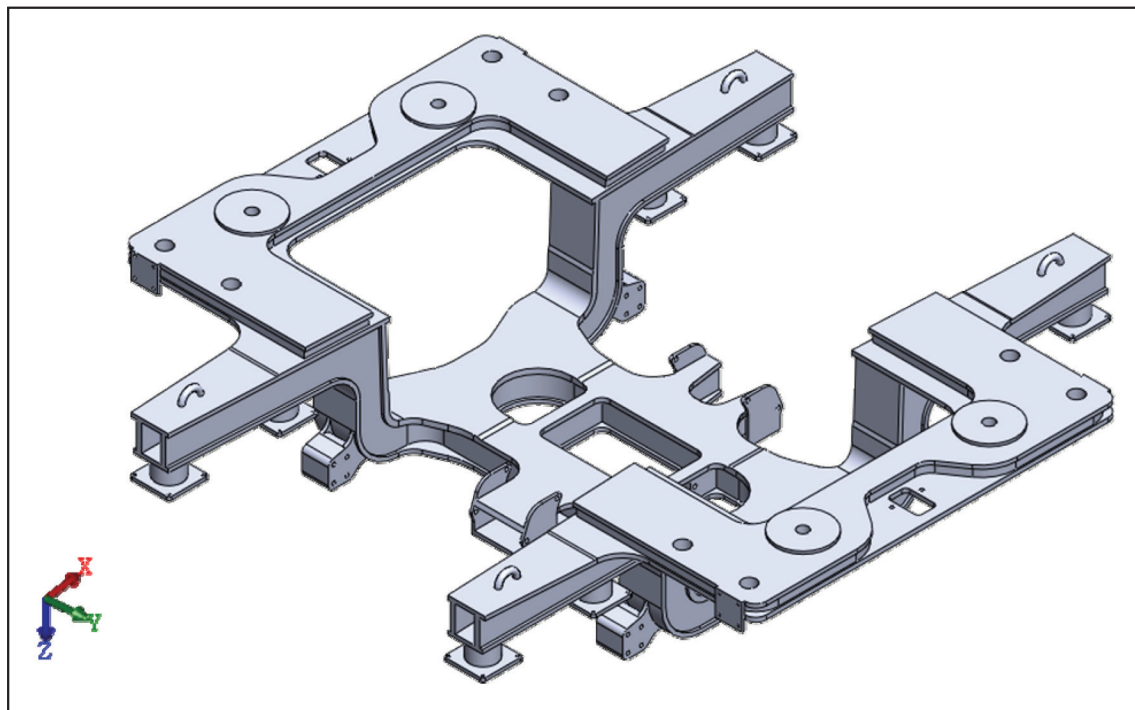


圖 5 參數最佳化分析所得轉向架框之概念設計圖

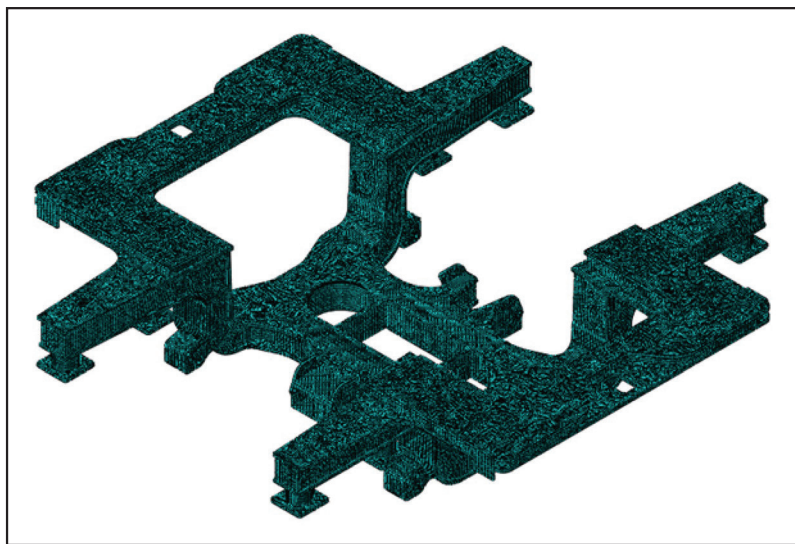


圖 6 轉向架框之有限元素模型

構，在外型上不會有太明顯的差異，因為是細部尺寸的調整。

### 三、轉向架結構有限元素分析

#### (一) 分析模型

圖6本文分析採用的三維彈塑性有限元素模型，元素型式為三維六面體八節點元素。經收斂分析後，模型之元素數量為355,778個，節點數量547,040個。材料是採用SM490YB，其降伏強度約為400 MPa。

#### (二) 特殊負載強度分析

EN 13749中的靜態強度分析，分為特殊負載強度分析以及營運負載強度分析[2,3,4]。前者是模擬轉向架結構於嚴苛情況

下的受力情況，目的是要確認轉向架在嚴苛的條件下仍能維持其正常功能，後者則是模擬一般營運狀態下的受力情況。模擬分析時，轉向架框結構所承受的負載，主要是依據EN 13749規定的公式及加速度來進行計算。表1為EN 13749所規定之特殊負載加速度表。

#### (三) 疲勞循環負載壽命分析

疲勞循環負載分析，是模擬轉向架框於疲勞測試機台上之實際測試情形[5,6]。其負載是由靜態負載 $F_s$ 、準靜態負載 $F_{qs}$ 以及動態負載 $F_d$ 所組成。第一階段承受負載循環共600萬次；第二階段是將負載 $F_{qs}$ 、 $F_d$ 乘以1.2倍，並承受此循環負載200萬次；第三階段則是將負載 $F_{qs}$ 、 $F_d$ 乘以1.4倍，並承受此循環負載200萬次。



表 1 EN 13749 所規定之特殊負載加速度表 [1]

Load case	Vehicle body masses					Bogie masses			
	$a_{zc}$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_{yc}$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_{ycc}$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_{xc}$ (m/s <sup>2</sup> )	$q$ (N/m <sup>2</sup> )	$a_{zb}$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_{yb}$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_{ycb}$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_{xb}$ (m/s <sup>2</sup> )
Switches	3,2	2,2	—	Emergency braking rate	600 <sup>a</sup>	30	16	—	Emergency braking rate
Running through Curves	1,6	1,3	2,0	Emergency braking rate	600 <sup>a</sup>	12	6,5	2	Emergency braking rate

<sup>a</sup> Wind speed of 105 km/h.

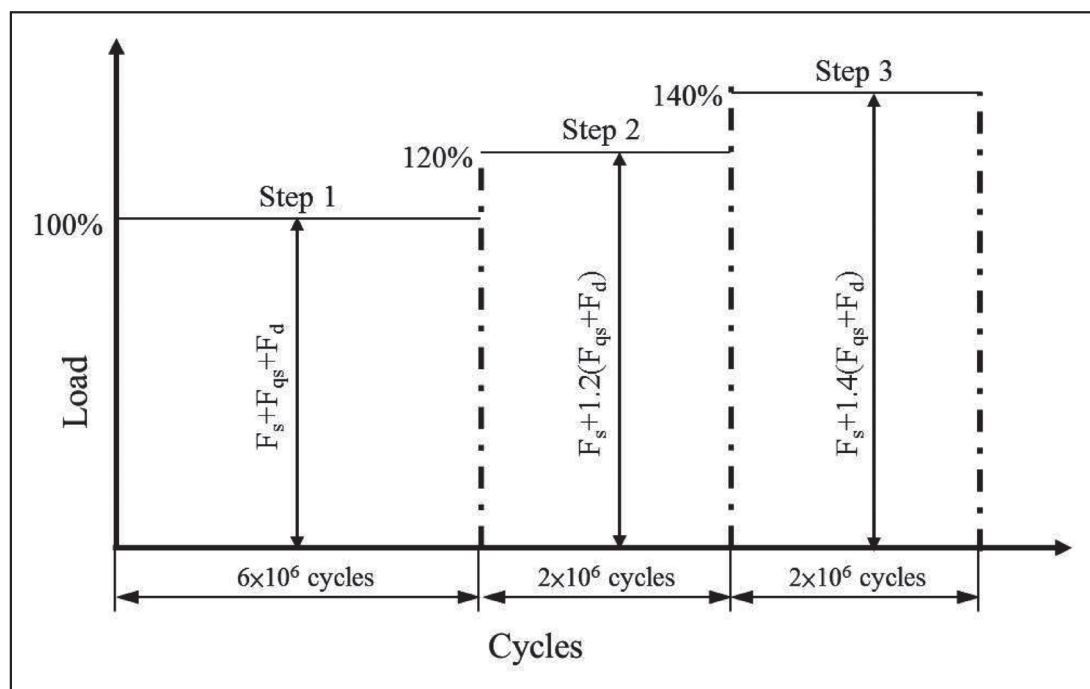


圖 7 疲勞循環負載壽命分析之三階段示意圖 [1]

圖7為三階段負載之示意圖，圖中之負載僅包含垂向及橫向負載，軌道扭曲負載施加之次數在EN 13749標準中另有說明，其次數較少。第一階段負載循環60萬次，第二及第三階段各20萬次，並且同樣加入1.2及1.4

之安全係數。疲勞壽命分析是模擬結構長時間受力的情況，因此計算完成的負載也非定值，而是會依照特定規律變化的，本文以曲線的形式呈現，其中一部分的負載曲線如圖8所示。

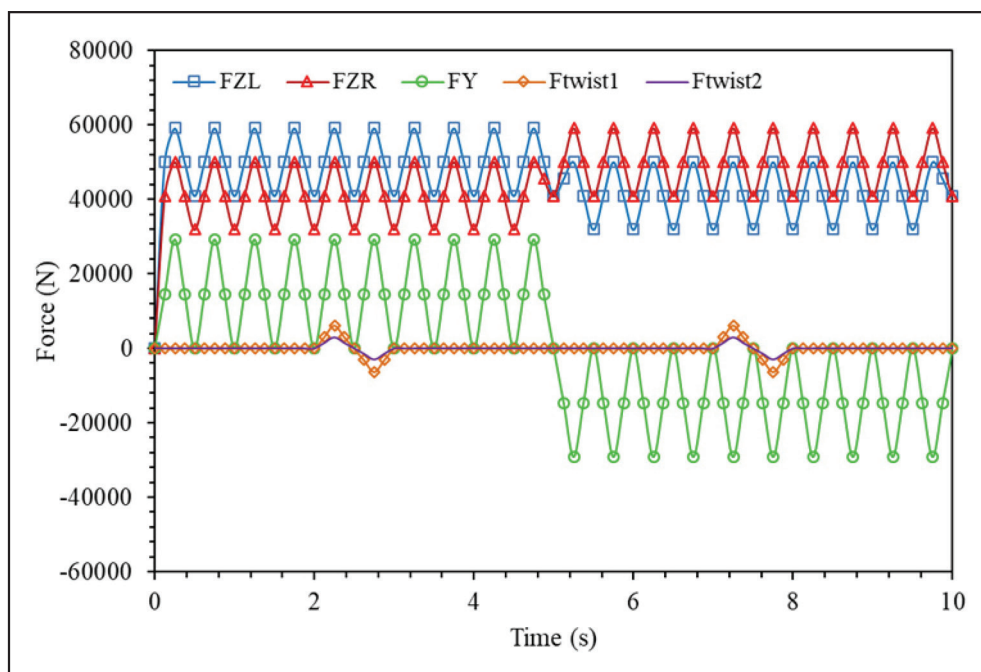


圖 8 第一階段疲勞循環負載前 10 秒示意圖

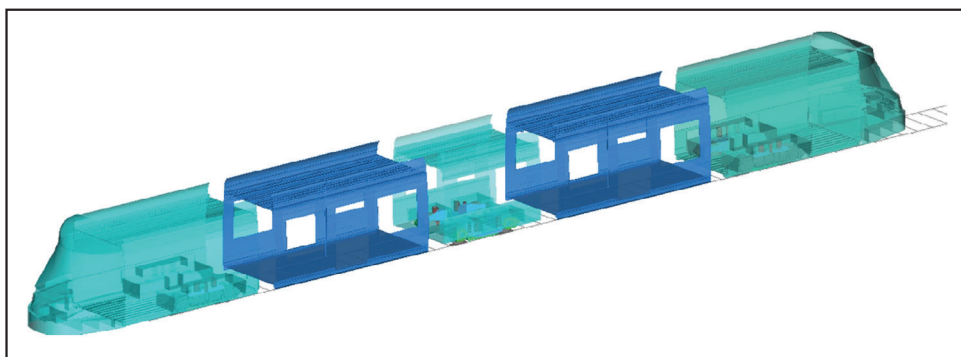


圖 9 輕軌整列車多體動力學模型

#### (四) 軌道不平整疲勞壽命分析

軌道不平整疲勞壽命分析是模擬轉向架行駛於輕軌路線時的疲勞壽命，主要是為了確認其壽命是否符合研發需求的使用年限 25 年。本文是利用多體動力學模擬軟體

Simpack，來模擬輕軌列車依照理想速度曲線行駛輕軌路線時[7~10]，擷取動力轉向架上懸吊系統和各項零組件鎖點的受力情況，作為其疲勞分析時的負載條件。圖 9 為多體動力學模擬時所使用的輕軌整列車模型，圖 10 是進行軌道不平整疲勞壽命分析時，負

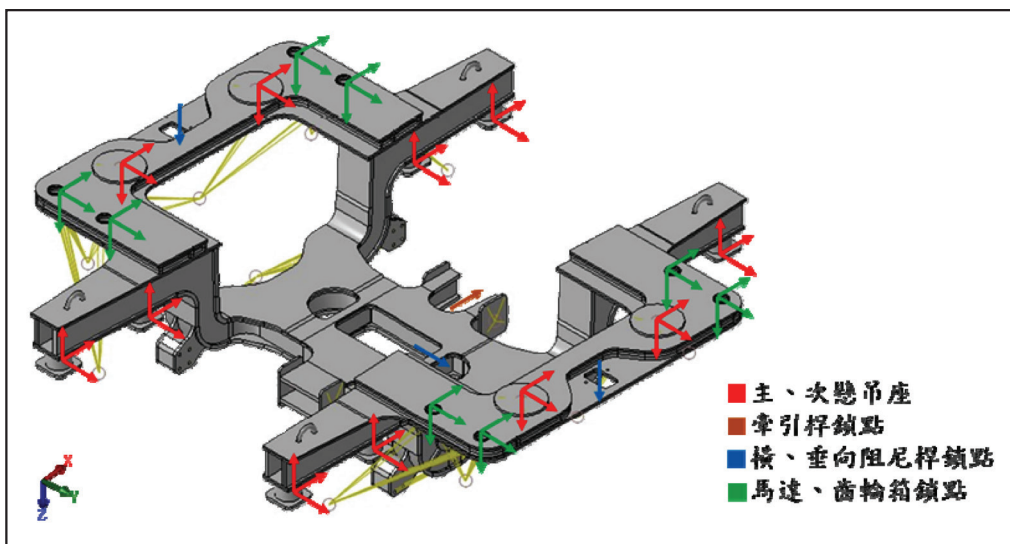


圖 10 軌道不平整疲勞壽命分析之負載施加位置示意圖

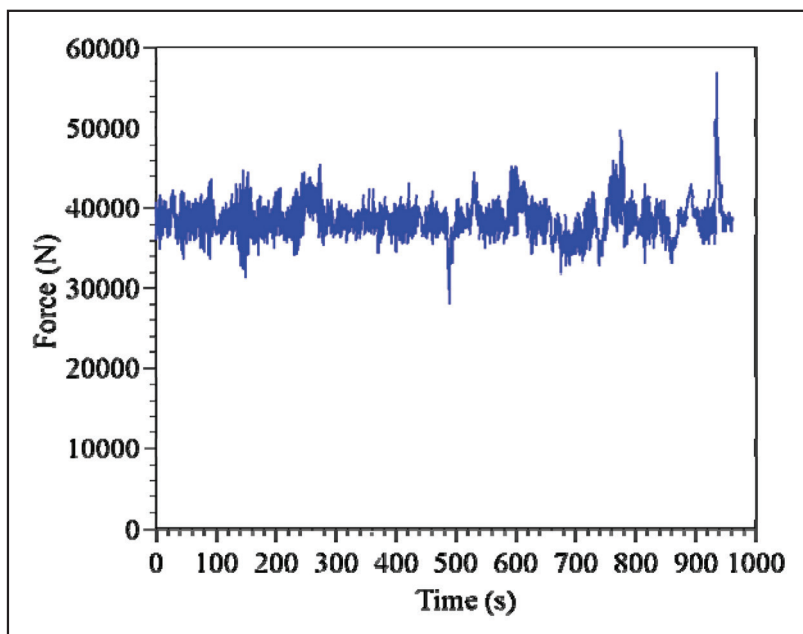


圖 11 單一次懸吊座施加之垂向負載訊號

載的施加位置，包含了主、次懸吊的位置、牽引桿、阻尼桿以及馬達齒輪箱等零組件的位置。以上零組件都是與轉向架框有直接連

接的零件，每一個位置所施加的負載都不一樣。圖11是施加軌道不平整之訊號後，模擬所得其中一支次懸吊位置的垂向負載訊號。

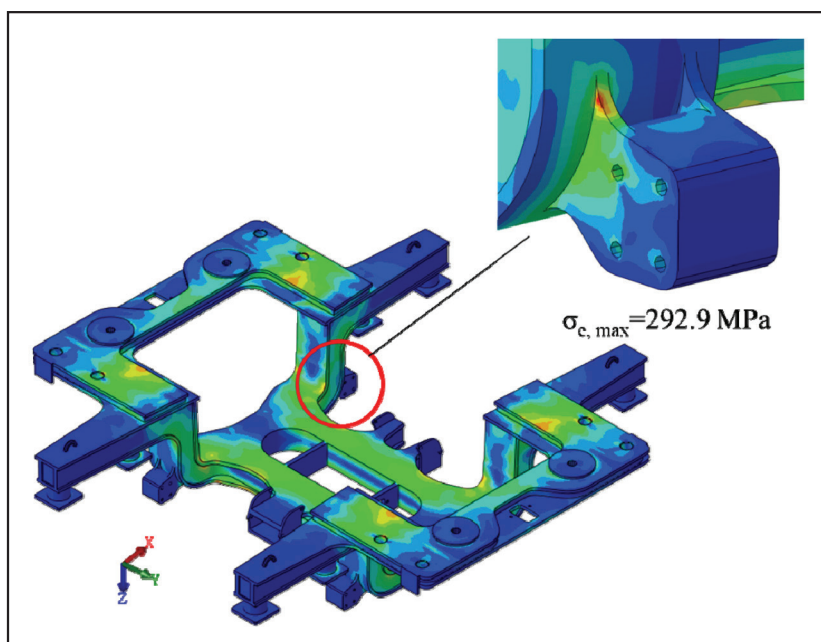


圖 12 特殊負載工况最大 von-Mises 應力位置

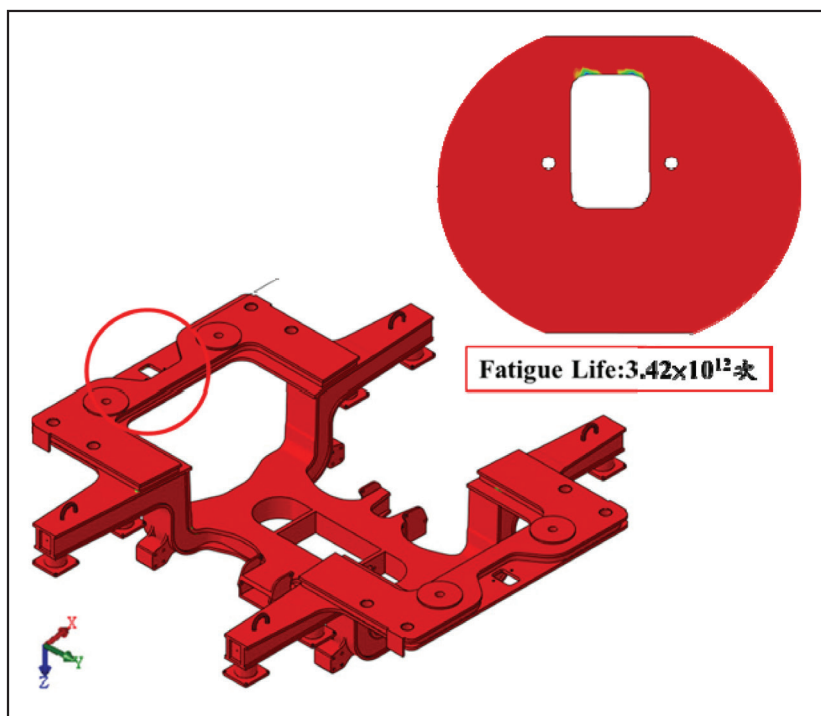


圖 13 轉向架承受疲勞循環負載之疲勞壽命分佈圖

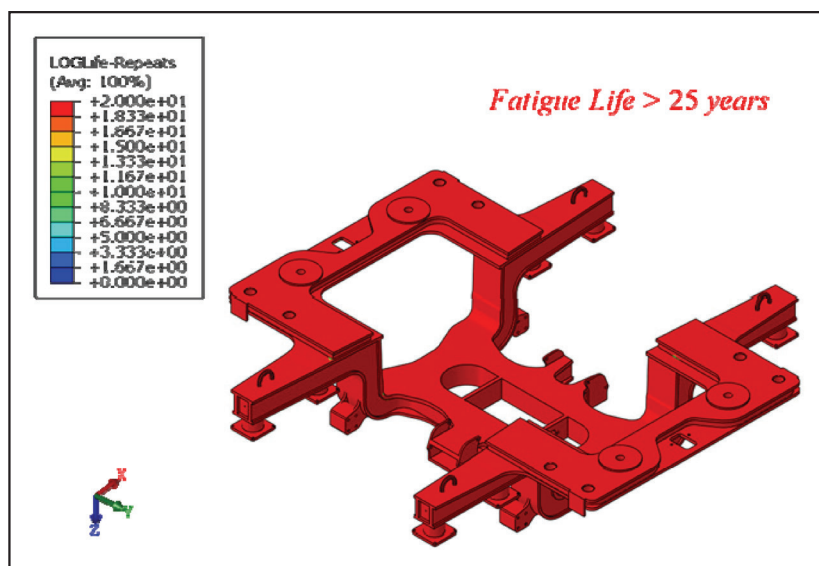


圖 14 轉向架框承受軌道不平整負載之疲勞壽命分佈圖

#### 四、結果與討論

大於 $10^7$ 次，符合標準之規定。

##### (一) 特殊負載強度分析

依照EN 13749標準，本研究所提之轉向架框經特殊負載與營運負載之強度分析，其所有工況的安全係數皆大於1.3。最小安全係數是發生在特殊負載過轉轍器之工況，發生於電磁式軌道煞車座的位置，最大von-Mises應力為292.9 MPa，如圖12所示。

##### (二) 疲勞循環負載壽命分析

圖13為經EN 13749所規定之1000萬次疲勞循環負載分析所得之壽命結果，由圖13可得知疲勞壽命為 $3.42 \times 10^{12}$ 次，最小壽命處為垂向阻尼鎖點。整體轉向架框之疲勞壽命均

##### (三) 軌道不平整疲勞壽命分析

依照研發需求，轉向架框是每年行駛80,000公里，連續使用至少25年，所以總壽命要求是200萬公里。圖14是轉向架框承受軌道不平整之負載條件下，模擬分析所得之疲勞壽命分佈。由於模擬所使用之路線其一次行駛的距離為8.46 km，經計算其行駛壽命大於25年。因此，所提轉向架框的設計也滿足研發需求書之要求。

謝誌：本文於交通部鐵道局計畫「輕軌車輛轉向架系統自主技術提升計畫」支持下完成。



## 參考文獻

1. EN 13749, 2021, "Railway Applications-Wheelsets and Bogies-Method of Specifying the Structural Requirements of Bogie Frames" .
2. M. Kassner, "Fatigue strength analysis of a welded railway vehicle structure by different methods," *International Journal of Fatigue*, Vol. 34, pp. 103-111, 2012.
3. D.Y. Chen, S.G. Sun, Q. Li, " Strength evaluation of a bogie frame by different methods," *Mechanical Engineering Science*, Vol. 1, No.1, pp. 54-64, 2019.
4. D. W. Karmiadji, B. Haryanto, O. Ivano, M. Perkasa, A. R. Farid, "Bogie frame structure evaluation for light-rail transit (LRT) train: A static testing," *Automotive Experiences*, Volume 4, pp. 36-43, 2021.
5. J. W. Seo, H. M. Hur, H. K. Jun, S. J. Kwon, D. H. Lee, "Fatigue design evaluation of railway bogie with full-scale fatigue test," *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2017, Article ID 5656497, 2017.
6. G. B. Richard, J. N. Keith, "Shigley' s Mechanical Engineering Design 11/e," chapter 6, 2020.
7. ERRI B176 PR1, Bogies with steered or steering wheelsets. Report No. 1, Volume 1: Preliminary studies and specifications Volume 2: Specification for a bogie with improved curving characteristics Volume 3: Specifications for a bogie with improved curving characteristics designed for body tilt. Tech. rep., ERRI. 1989.
8. P. Kurowski, A. Martowicz, T. Uhl, G. Lasko, "Analysis of the rail roughness influence on vehicle dynamic behavior by means of multibody simulation. " *Archives of Transport*, Vol. 23, No. 1, pp. 23-35, 2011.
9. N. Kuka, C. Ariaudo, R. Verardi, J. Pombo, "Impact of rail infrastructure maintenance conditions on the vehicle-track interaction loads. " *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 235, pp. 2952-2967, 2021.
10. A. Haigermoser, B. Lubert, J. Rauh, G. Gräfe, "Road and track irregularities: Measurement, assessment and simulation. " *Vehicle System Dynamics*, Vol. 53, No. 7, pp. 878-957, 2015.