

不同懸吊參數對捷運軌道車輛脫軌係數影響之研究

陳勇全¹、林明璋²、蕭子修³

¹ 教授，國立屏東科技大學車輛工程系 chuan@mail.npust.edu.tw

² 碩士生，國立屏東科技大學車輛工程系 M10538002@mail.npust.edu.tw

摘要

本研究主要是利用多體系統動力學分析軟體SIMPACK，來建立捷運軌道車輛之分析模型，並進行動態性能模擬分析。首先，建立捷運軌道車輛之分析模型，並結合捷運之軌道路線規劃進行動態性能模擬分析，來探討主懸吊及次懸吊參數改變對軌道車輛脫軌係數之影響。文中探討三種主懸吊及三種次懸吊參數之影響。分析結果顯示，改變主懸吊參數對於捷運軌道車輛之脫軌係數，相較於次懸吊，有較大之影響。

關鍵字：捷運軌道車輛、動態性能模擬、SIMPACK、脫軌係數

一、緒論

SIMPACK軟體是由德國INTEC GmbH公司所開發之軟體，也是著名之多體系統動力學分析軟體，可以針對機械系統、機電系統之運動學及動力學做模擬分析，並以多體系統計算動力學(Computational Dynamics of Multibody Systems)為基礎。SIMPACK用來模擬之系統，可以是簡單之單自由度系統，也可以是複雜之多自由度系統，因此可以應用在機械新產品設計、研發或是最佳化之任何階段。包含多種專業模組之系統，例如：軌道車輛使用之輪軌模組(Rail/Wheelset)、機車模組(Biomotion Motorcycle)及汽車模組(Automotive)等[1]。而SIMPACK之輪軌模組是由德國宇航中心(DLR)集合20多年來輪軌接觸模擬之經驗，所得之技術結晶。其可以同時分析系統之振動特性、各部件受力狀況及加速度等，描述並預測複雜多體系統之運動學及動力學性能。也是目前軌道車輛動力學模擬軟體先驅之一，故可以用來解決軌道車輛之動力學模擬問題[2]。Iyengar及Jaiswal[3]研究了軌道不平整之型式，提出高斯數學模型，可以預測最高幅度之峰值，並以功率頻譜(PSD)來描述隨機不平整度，他們所提之垂向隨機不平整度已被應用於軌道車輛模擬中。楊[4]使用SIMPACK建模，探討某軌道曲率半徑300 m之路段，採用德國高干擾不平整，當主懸吊縱向剛性從5 MN/m提升到20 MN/m時，脫軌係數從0.514提升到0.582、1號輪對磨耗功從3.12 kN-m/s增加到4.41 kN-m/s；次懸吊縱向剛性從50 kN/m提升到500 kN/m時，脫軌係數從0.508提升到0.638、1號輪對磨耗功從3.76增加到4.26。楊[5]使用SIMPACK建模，探討在某軌道曲率半徑200 m之路段，速度為60 km/h，抗側滾扭桿剛性值由20 MN-m/rad增加至60 MN-m/rad，分析結果表示，隨著抗側滾扭桿之剛性值增加，脫軌係數從0.5提升到0.6。張[6]用SIMPACK建立了重載貨車動力學模型，車速為80 km/h，在某

軌道曲率半徑600 m之路段，改變軸承箱之縱向定位剛性由6 MN/m提升到24 MN/m，結果表示1號輪對最大接觸壓力由2000 MPa提升到4300 MPa，因為輪軌接觸區域變小，使輪軌最大接觸應力上升，使得輪軌磨耗增加。

由以上相關文獻蒐集可知，在SIMPACK軌道車輛模擬中，大部分都是在某段軌道路線下進行分析，並無探討完整軌道路線下之情況。故本研究之主要目的是提出一捷運軌道車輛動力學模型，並結合捷運之軌道路線規劃，作為捷運軌道車輛動態性能模擬分析之目標。

二、研究方法

2.1 脫軌係數

脫軌係數是判斷軌道車輛脫軌之基本標準，一般定義為輪軌接觸側向力(Y)與垂向力(Q)之比值。各國依據實際經驗及研究成果，所採用之脫軌係數標準不盡相同。國際鐵路聯盟(International Union of Railways, UIC)規定脫軌係數值 ≤ 1.2 、北美鐵路與中國皆規定脫軌係數值 ≤ 1.0 ，而日本新幹線及德國ICE高速列車試驗標準之脫軌係數值皆 ≤ 0.8 。

2.1.1 Nadal標準

根據鋼輪作用於鋼軌之側向力與垂向力來評估鋼輪抗脫軌之安全性方法，1896年由法國科學家Nadal提出。當鋼輪與軌道接觸時，採用側向力(Y)與垂向力(Q)之比值做為脫軌係數，定義了鋼輪爬軌所需之最小脫軌係數(Y/Q)。鋼輪爬軌趨勢之靜平衡公式可以表示為：

$$Y = N \sin(\alpha) - \mu N \cos(\alpha) \quad (1)$$

$$Q = N \cos(\alpha) + \mu N \sin(\alpha) \quad (2)$$

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan\alpha - \mu}{1 + \mu \tan\alpha} \quad (3)$$

式中，Y是鋼輪作用在鋼軌之側向力、Q是垂向作用力、N是作用在輪軌接觸區域上之正向力(Normal Force)、 α 為最大輪緣角(Flange Angle)、 μ 為摩擦係數、 μN 為輪軌接觸區間之摩擦力。

三、捷運軌道車輛動力學模型與軌道模型建立

本研究利用多體系統(Multibody System, MBS)動力學分析軟體SIMPACT，採用相對座標系建模，可以快速建立系統之動力學模型，其中包括物體(Body)、鉸接(Joint)及力元(Force Element)，如表1所示。軌道車輛動力學模型建立時，所使用之慣性參數如表2所示，表3則是結構參數。本研究所使用之3種主懸吊參數及3種次懸吊參數，如表4及表5所示。

建立捷運軌道車輛動力學模型時，模型包括一個簡易車廂、兩個框架、四個輪對、八個軸承箱及八個鋼輪。車廂以次懸吊與轉向架框架連接，轉向架框架則是以主懸吊系統連接軸承箱，軸承箱以旋轉鉸與輪對連接。次懸吊系統包括空氣彈簧、橫向減震器、牽引拉桿及抗蛇行減震器，主懸吊包括彈簧及阻尼。其中，主懸吊系統及次懸吊系統皆需定義彈簧縱向、橫向、垂向之剛性及阻尼。建立完成之捷運軌道車輛動力學模型，如圖1所示。

依據捷運之路線規劃，總路線長度約為13.1公里，其中包含直線段及曲線段，建立軌道路線模型時，定義軌道之曲率半徑、超高及坡度，軌道路線示意圖如圖2所示。進行分析前，需考慮實際之軌道不平整，依據美國聯邦鐵路管理局(FRA)各路線等級之參數，進行軌道不平整之輸入。在此以軌道等級6之垂向不平整度示意，如圖3所示。

四、分析方法

本研究之捷運軌道車輛SIMPACT分析流程圖如圖4所示。首先，建立捷運軌道車輛動力學模型，接著建立軌道路線，定義路段型式、路線長度、曲率半徑、超高及坡度等。考慮實際軌道表面不平整之影響，建模時依據美國聯邦鐵路管理局(FRA)路線等級之參數，進行軌道不平整之輸入，來模擬真實之軌面情形。藉由改變主、次懸吊參數，探討捷運軌道車輛之脫軌係數。經由之前分析結果，發現在不同速度以及不同軌道等級下，2號鋼輪的脫軌係數最為嚴苛，所以以2號鋼輪為分析目標。分析時，軌道等級設定為Track class 6。

4.1 不同主懸吊參數之脫軌係數分析

藉由固定次懸吊參數值，來觀察主懸吊參數變

化對脫軌係數之影響。圖5為次懸吊參數固定為 $K_x = 0.12 \text{ MN/m}$ 、 $K_y = 0.12 \text{ MN/m}$ 、 $K_z = 0.398 \text{ MN/m}$ 及 $C_z = 10 \text{ kN-s/m}$ 時，Type 1、Type 2及Type 3三種不同主懸吊參數對2號鋼輪脫軌係數變化之影響。由結果可知，隨著主懸吊參數之增加，其2號鋼輪之Y/Q值會隨著行駛速度v之增加而增加。圖6是 $v=60 \text{ km/h}$ ，由(a)~(c)分析結果可得知，2號鋼輪之側向力在3種主懸吊參數變化下分別為45545 N、34078 N及32009 N。因為隨著主懸吊彈簧剛性及阻尼值增加，側向力有明顯之降低，所以脫軌係數有降低之趨勢。

4.2 不同次懸吊參數之脫軌係數分析

本節則是固定主懸吊參數值，來觀察次懸吊參數變化時對脫軌係數之影響。圖7是為主懸吊參數值固定為 $K_x = 0.741 \text{ MN/m}$ 、 $K_y = 0.741 \text{ MN/m}$ 、 $K_z = 0.878 \text{ MN/m}$ 及 $C_z = 5 \text{ kN-s/m}$ ，Type 4、Type 5及Type 6三種不同次懸吊參數對2號鋼輪脫軌係數變化之情形。由結果可知，隨著次懸吊參數之增加，其Y/Q值會隨著行駛速度v之增加而增加。圖8是 $v=60 \text{ km/h}$ ，由(a)~(c)分析結果可得知，2號鋼輪之側向力在3種次懸吊參數變化下分別為45545 N、45537 N及44509 N。因為隨著次懸吊彈簧剛性值及阻尼值增加，側向力有稍微降低，故脫軌係數仍有降低之趨勢。但相較於改變主懸吊參數，改變次懸吊參數對脫軌係數之影響不大。

五、結論

本研究主要是利用多體系統動力學分析軟體SIMPACT，探討不同懸吊參數對捷運軌道車輛動態性能之影響。分析時，探討三種不同行駛速度 $v = 40 \text{ km/h}$ 、 $v = 60 \text{ km/h}$ 及 $v = 80 \text{ km/h}$ ，在軌道等級6下對脫軌係數之影響。由分析結果可以得到以下幾點結論：

1. 本研究提出一捷運軌道車輛動力學模型，結合捷運之軌道路線規劃及FRA軌道不平整進行分析，並建立一套軌道車輛多體系統動力學之建模及分析流程。
2. 分析結果得知，隨著主、次懸吊參數之增加，對於捷運之脫軌係數有降低之趨勢；
3. 從分析結果顯示，在軌道等級6下，改變主懸吊參數對於捷運之脫軌係數，相較於次懸吊，有較大之影響。

六、參考文獻

1. 方向華、傅秀通、繆炳榮與羅世輝，2008，*SIMPACT 動力學分析基礎教程*，西南交通大學出版社，成都。
2. 王哲、陽光武、傅秀通、繆炳榮、羅仁與羅世輝，2010，*SIMPACT 動力學分析高級教程*，西南交通大學出版社，成都。
3. Iyengar, R. N., and Jaiswal, O. R., 1995, "Random

Field Modeling of Railway Track Irregularities,” *Journal of Transportation Engineering*, Vol.121, No. 4, pp. 303-308.

4. 楊緒杰，2014，「基於幾何與動力學參數的山區線路地鐵車輛輪軌磨耗控制研究」，碩士論文，重慶交通大學，車輛工程系，重慶。
5. 楊琳，2017，「基於SIMPACK的二次懸吊參數對軌道車輛曲線通過性能影響之研究」，西南交通大學希望學院，成都，pp.18-20。
6. 張良威，2008，「重載貨車輪軌磨耗研究」，碩士論文，西南交通大學，車輛工程系，成都。

七、表格

Name	Symbol
Body	SF_B_Wheelset
Joints	
Force element	

表 1、拓樸圖連接之元件

Parameter name	Parameters	Unit
Carbody mass	48000	kg
Bogie frame mass	4842	kg
Axle bearing box mass	142	kg
Wheelset mass	1294	kg

表 2、捷運慣性參數表

Parameter name	Parameters	Unit
Carbody height	1126	mm
Bogie height	315	mm
Wheelset height	2300	mm
Track gauge	1435	mm
Primary suspension spacing	2100	mm
Secondary suspension spacing	2100	mm

表 3、捷運結構參數表

	Type1	Type2	Type3	
主懸吊	Kx(MN/m)	0.741	1.000	1.260
	Ky(MN/m)	0.741	1.000	1.260
	Kz(MN/m)	0.878	0.889	0.901
	Cz(kN-s/m)	5	20	35

表 4、捷運主懸吊參數表 Type1~Type3

	Type4	Type5	Type6	
次懸吊	Kx(MN/m)	0.12	0.14	0.16
	Ky(MN/m)	0.12	0.14	0.16
	Kz(MN/m)	0.398	0.410	0.430
	Cz(kN-s/m)	10	40	70

表 5、捷運次懸吊參數表 Type4~Type6
八、圖片

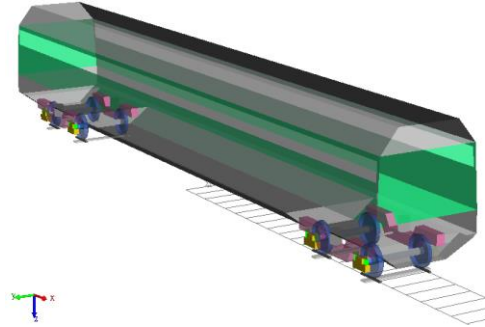


圖 1、捷運軌道車輛模型

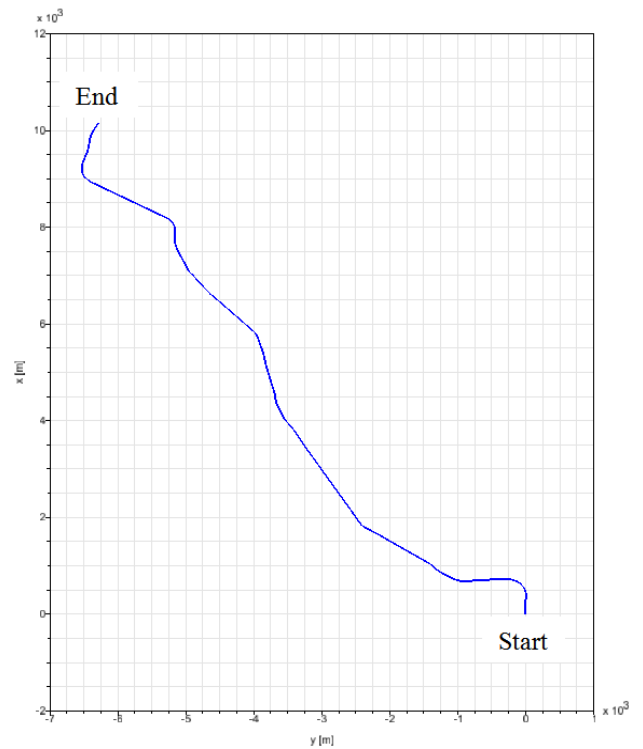


圖 2、軌道路線示意圖

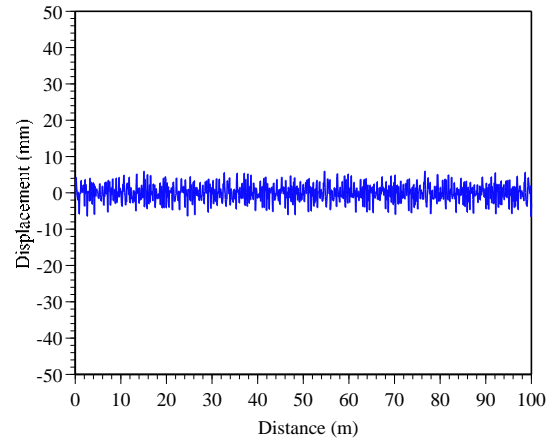


圖 3、軌道等級六之垂向不平整度

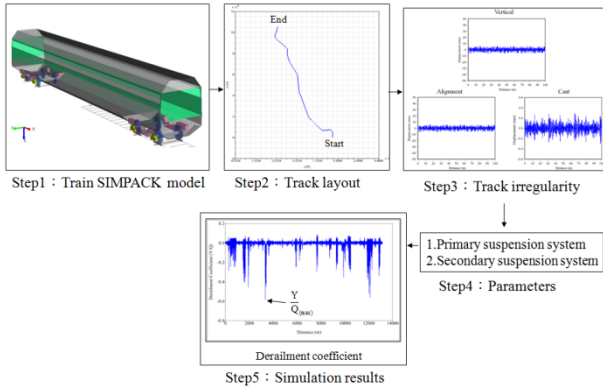


圖4、捷運軌道車輛SIMPACK分析流程圖

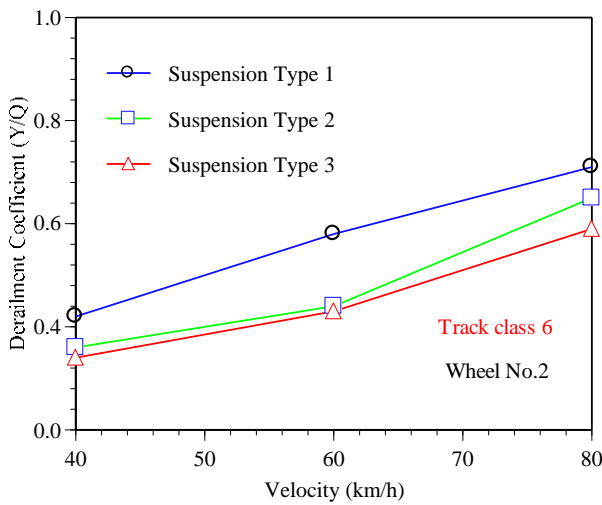
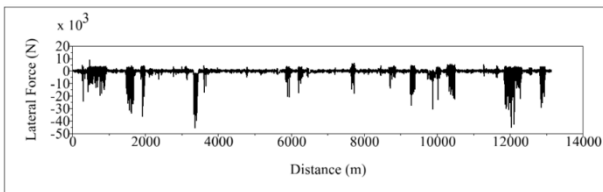
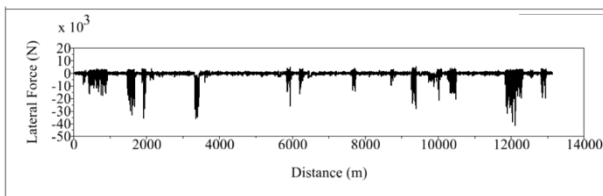


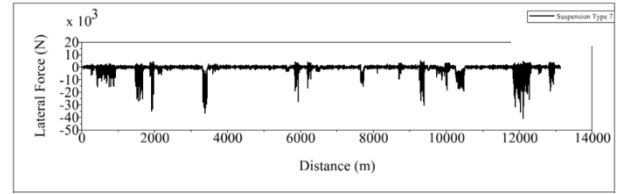
圖5、3種主懸吊參數變化對2號輪脫軌係數之影響



(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3

圖6、3種主懸吊參數變化之側向力變化

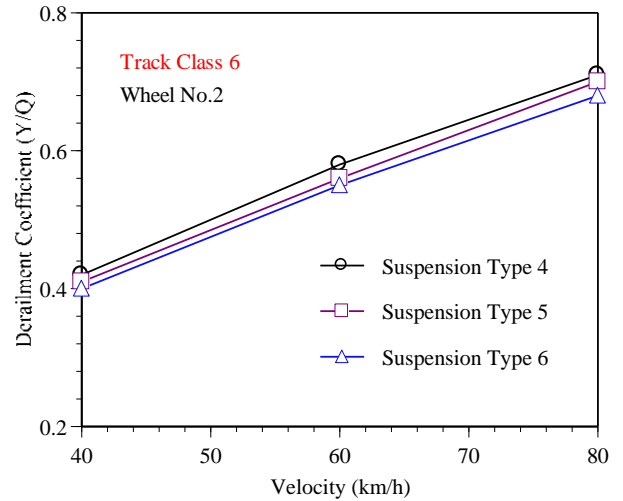
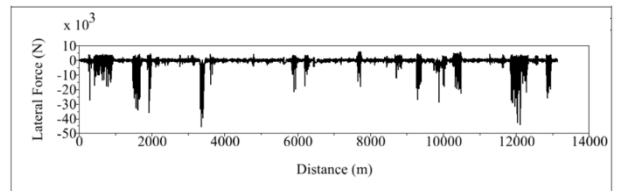
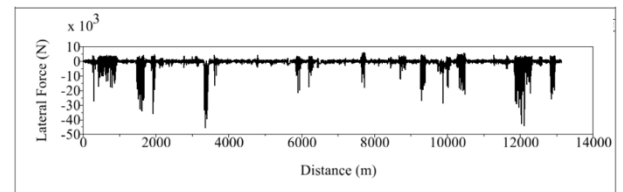


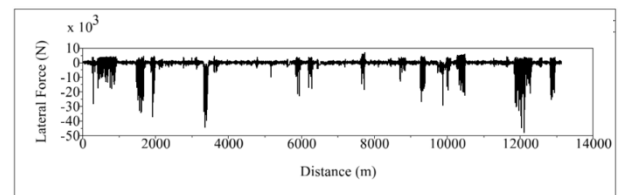
圖7、3種次懸吊參數變化對2號輪脫軌係數之影響



(a) Type 4



(b) Type 5



(c) Type 6

圖8、3種次懸吊參數變化之側向力變化