

出國報告（出國類別：進修）

參加「車輛動態及車輛-
軌道交互作用（Vehicle dynamics and
vehicle-track interaction）」及「歐洲
軌道交通管理系統（European Rail
Traffic Management System,
ERTMS）」課程

服務機關：國家運輸安全調查委員會

姓名職稱：林彥亨／鐵道調查組／次席調查官

劉千慈／運輸工程組／助理研究員

派赴國家/地區：英國／倫敦及考文垂

出國期間：民國 113 年 12 月 1 日至 12 月 7 日

報告日期：民國 114 年 2 月 26 日

公務出國報告提要 系統識別號

出國報告名稱：參加「車輛動態及車輛-軌道交互作用（Vehicle dynamics and vehicle-track interaction）」及「歐洲軌道交通管理系統（European Rail Traffic Management System, ERTMS）」課程

頁數：51 頁 含附件：否

出國計畫主辦機關：國家運輸安全調查委員會

聯絡人：郭芷桢

電話：(02) 8912-7388

出國人員姓名：林彥亨、劉千慈

服務機關：國家運輸安全調查委員會

單位：鐵道調查組、運輸工程組

職稱：次席調查官、助理研究員

電話：(02) 8912-7388

出國類別： 考察 進修 研究 實習 視察 訪問 開會 談判 其他

出國期間：民國 113 年 12 月 1 日至 12 月 7 日

出國地區：英國倫敦及考文垂

報告日期：民國 114 年 2 月 26 日

分類號/目

關鍵詞：車輛與軌道交互作用、歐洲軌道交通管理系統

內容摘要：

本會自 108 年 8 月起，由「飛航安全調查委員會」改制為「國家運輸安全調查委員會」，將鐵道事故調查模組正式納入編制，至 113 年底，鐵道事故調查案件累計 30 件，其中涉及正線出軌事故計 10 件，佔整體鐵道事故比例約 33%，違反避塞或號誌運轉事件致有造成列車衝撞、出軌或火災之虞者計 3 件，佔約 10%，合計佔比約 43%，

顯示鐵道事故調查，有關影響列車運行穩定性之車輛動態與輪軌介面，及鐵路交通號誌系統應用資訊議題上，仍有值得本會同仁持續精進及深入探討的空間。

英國機械工程師學會（Institution of Mechanical Engineers, IMechE）每年會定期舉辦各類工程專業課程，涵蓋鐵路工程、維修管理、安全與風險等領域，為提升本會鐵道事故調查涉及車輛輪軌介面問題及號誌系統基本知識，故派員前往參加。本次參與課程為「車輛動態及車輛-軌道交互作用 (Vehicle dynamics and vehicle-track interaction)」及「歐洲軌道交通管理系統 (European Rail Traffic Management System, ERTMS)」，內容包含講授車輛動態行為、轉向架各元件之主要功能、辨識影響車輛動態行為及安全的因素、車輛與軌道組件可能造成事故之原因分析、車輛動力學模擬與實車測試項目介紹，及歐洲軌道交通管理系統介紹與英國鐵路號誌系統概況說明。

目次

壹、目的.....	1
貳、過程.....	- 2 -
參、課程摘要與心得.....	- 4 -
肆、建議.....	- 50 -

壹、目的

國家運輸安全調查委員會（以下簡稱本會）自 108 年 8 月由飛航安全調查委員會改制後，至 113 年底共計執行重大鐵道事故調查案計 30 件，其中正線出軌事故計 10 件，佔比約 33%，違反避塞或號誌運轉事件致有造成列車衝撞、出軌或火災之虞者計 3 件，佔約 10%，為強化本會鐵道調查人員對正線出軌事故有關輪軌介面分析之專業調查能量，及建立國際鐵路交通號誌系統參考資訊，故指派本會鐵道調查組及運輸工程組人員參與英國機械工程師學會 (IMechE) 辦理之訓練課程。

本次課程共計 3 日，包含 2 日「車輛動態及車輛-軌道交互作用 (Vehicle dynamics and vehicle-track interaction)」，及 1 日「歐洲軌道交通管理系統 (European Rail Traffic Management System, ERTMS)」，其內容包含鐵路車輛動態行為、列車運行軌道曲線段之影響因素分析、轉向架懸吊系統介紹，與歐洲軌道交通管理系統之簡介及應用等主題。

貳、過程

1. 課程安排

本次課程共計 3 日，上課日期為 113 年 12 月 3 日至 5 日，有關課程內容規劃如下：

日期	課程內容	講師
12/3~12/4	Vehicle dynamics and vehicle-track interaction (車輛動態及車輛-軌道交互作用): 1. SIMPLE DYNAMIC RESPONSE 2. VEHICLE MODES OF VIBRATION 3. TRACK INPUTS 4. CONED WHEELS AND WHEEL/RAIL FORCES 5. RAILWAY VEHICLE CURVING 6. STABILITY 7. VEHICLE-TRACK INTERACTION 8. SUSPENSION COMPONENTS AND INFLUENCE ON DYNAMIC BEHAVIOUR 9. SOME BOGIE EXAMPLES OF NOTE 10. GAUGING 11. DERAILMENT 12. VEHICLE TESTING 13. STATIC TESTING CASE STUDIES 14. VEHICLE DYNAMICS MODELLING	Prof Gareth Tucker (University of Huddersfield, 赫德斯菲爾德大學)
12/5	Introduction to ERTMS -European Rail Traffic Management System (歐洲軌道交通管理系統): 1. ERTMS –WHAT'S IT ALL ABOUT? 2. AN OVERVIEW OF ERTMS–THE SYSTEM 3. WHAT EQUIPMENT IS REQUIRED TO BE INSTALLED 4. MODULE STRUCTURE 5. OPERATION 6. INSTALLATION OF ONBOARD EQUIPMENT	Martin Fenner (Engineering Consultancy)

2. 講師及參與學員

「車輛動態及車輛-軌道交互作用」課程是由赫德斯菲爾德大學軌道系統工程教授 Gareth Tucker 先生進行授課，「歐洲軌道交通管理系統」課程由具業界 19 年鐵路控制系統經驗之工程顧問 Martin Fenner 先生擔任。

參與學員主要以英國當地各鐵道營運機構員工或系統設備供應商為主。

3. 課程實施場域

本次為期 3 日訓練課程，上課採小班教學制，2 日「車輛動態及車輛-軌道交互作用」課程地點位在英國倫敦機械工程師協會（圖 2-1），1 日「歐洲軌道交通管理系統」課程位在英國考文垂先進製造訓練中心內教室（圖 2-2）。



圖 2-1 「車輛動態及車輛-軌道交互作用」英國倫敦課程地點



圖 2-2 「歐洲軌道交通管理系統」英國考文垂課程地點

參、課程摘要與心得

一、第一至二日 (12/3~12/4)：車輛動態及車輛-軌道交互作用 (Vehicle Dynamics and Vehicle-Track Interaction)

此兩日課程，涵蓋鐵路車輛之運動行為及安全性影響因素探討、轉向架懸吊系統簡介，及車輛包絡線檢查等介紹，以下分別就探討主題進行重點說明。

鐵路車輛之基本運動行為 (Simple Vehicle Dynamics)

簡單之列車運動行為，若將該模式簡化為質量、彈簧及阻尼所構成，其自然頻率公式為 $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ 。由公式得知自然頻率與彈性係數 (k) 成正比，與質量 (m) 成反比。阻尼公式為 $C_{crit} = 2\sqrt{km}$ ，其目的為吸收列車運行過程中自然產生的跳動現象。當懸吊系統採用臨界阻尼值時，將完全抑制跳動現象，但在高頻率下會不利於運行。一般合適之阻尼設計值約定為臨界值 20%。不同阻尼比例下之振幅顯示如圖 3-1。

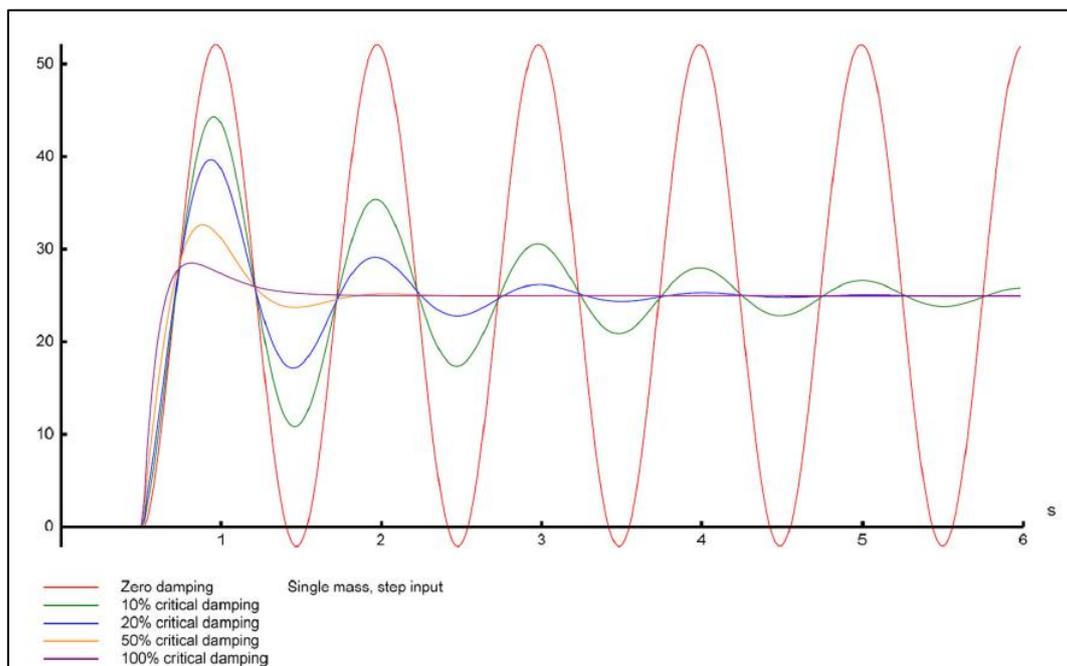


圖 3-1 不同阻尼比例下對應時間之振幅

轉向架阻尼型式包含黏性（Viscous damping）及摩擦阻尼（Friction damping）兩種，黏性阻尼會隨車速調整抵抗力，摩擦阻尼抵抗力則近似一定值。

車輛振動模式可分為縱向（longitudinal）、垂向（bounce/vertical）、頭尾上下移動（pitch）、高低左右搖擺（lower & upper sway），及水平搖擺（yaw）等 6 種。一般乘客車廂振動頻率範圍為 0.5 至 1.8Hz，其轉向架為 7 至 10Hz。另軌道線形亦會產生不同波長，使得車輛產生不同的振動現象。

週期性軌道高低不整（Cyclic Top）

指在軌道單邊或雙邊鋼軌產生週期性踏面沉陷或高低不整現象。

英國鐵路一般採用 60ft（約 18.3m）長度鋼軌接合，若軌道因兩鋼軌間接頭沉陷形成局部高低不整情形，依維修經驗，在 18.3m、9.1m、6.1m、4.6m 等鋼軌位置點，便可能使列車轉向架通過鋼軌沉陷處產生跳動，若再加上車速提高，將形成持續性的車廂載重衝擊，逐漸使鋼軌形成多點近似等距之週期性軌道高低不整區域，將可能導致列車通過時轉向架車輪於鋼軌上反覆跳動而造成出軌。

車輪轉向行為探討（Steering Behaviour）

鐵路車輛轉向架車輪踏面採用圓錐度設計（coned wheels），使得輪對（wheelset）能利用踏面斜度，自由在鋼軌產生橫向位移，如圖 3-2，並沿正弦路徑（sinusoidal path）移動，如圖 3-3。單一輪對運動波長可由公式 $L = 2\pi\sqrt{l_0 r_0 / \lambda}$ （Klingel formula）求得， l_0 為車輪接觸面半橫向間距、 r_0 為標準輪徑，及錐度為 λ 。

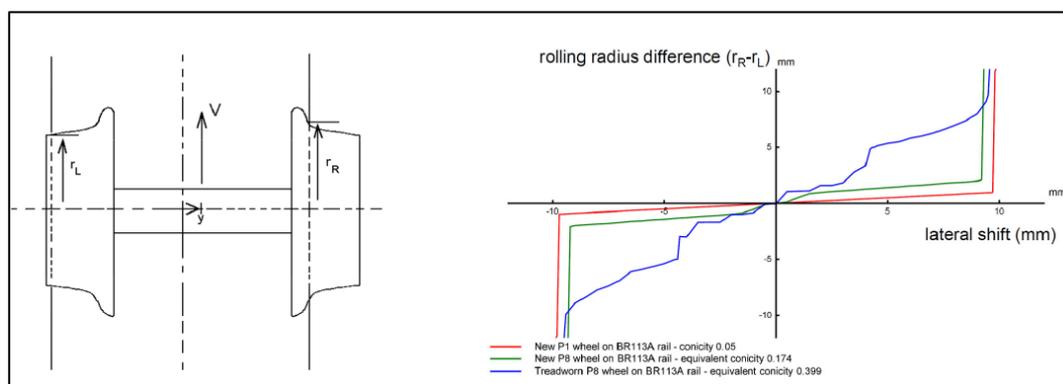


圖 3-2 輪徑差與橫向偏移之說明

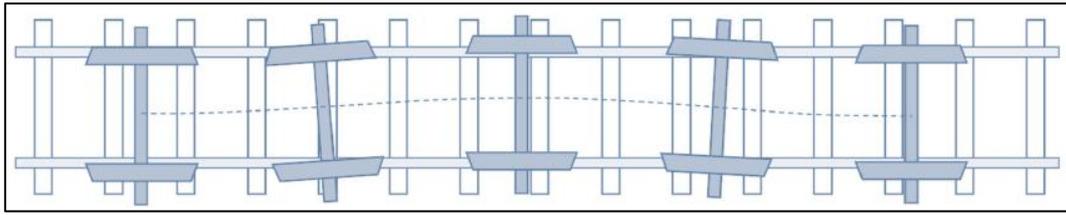


圖 3-3 輪對沿正弦路徑移動

車輪圓錐度 (Conicity)

因輪對轉向功能、輪軌磨耗及行駛曲線段出軌風險造成影響，故為評估鐵路車輛行駛穩定性的指標之一。當車輪踏面磨耗、車輪背面距離增加，或軌距變小時，會使車輪圓錐度升高。英國鐵路車輪型式與圓錐度參考值說明如表 3-1。

表 3-1 英國鐵路車輪型式與圓錐度參考值

圓錐度	參考值	車輪型式
低	0.05 (1:20)	UK P1 1:20
中	0.15~0.2	New UK P8
高	0.4~0.5	在窄軌上之磨耗車輪
非常高	大於 1.0	較不常見

歐盟規範 EN14363 訂有公式探討車輪圓錐度限制值與最大車速之關係， $\tan \gamma_e \geq 0.534 - V/900$ ， γ_e 表示錐度， V 為最大車速，如以車速 200km/h 計算圓錐度限制值為 0.31。

針對不考慮磨耗狀態下之車輪圓錐度計算公式如圖 3-4，輪對之車輪半徑差與其對應橫移量關係如圖 3-5。以車輪半徑差+4mm接觸點上，其對應橫移量為+8mm，等效錐度 (equivalent conicity) 帶入計算公式為 0.25 ($\lambda = \frac{4}{2 \times 8} = 0.25$)。

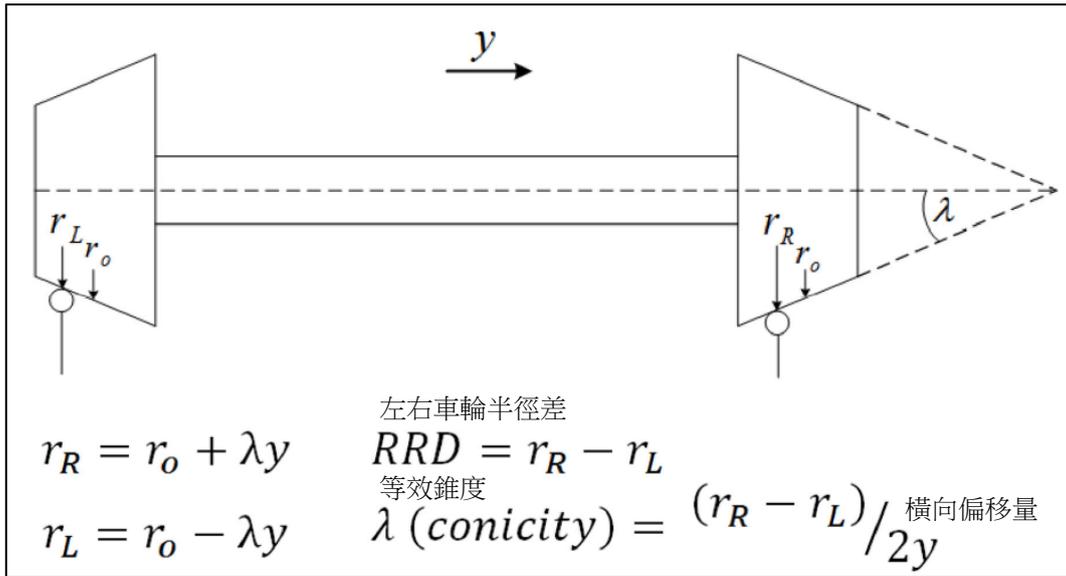


圖 3-4 不考慮磨耗狀態下之車輪圓錐度計算公式

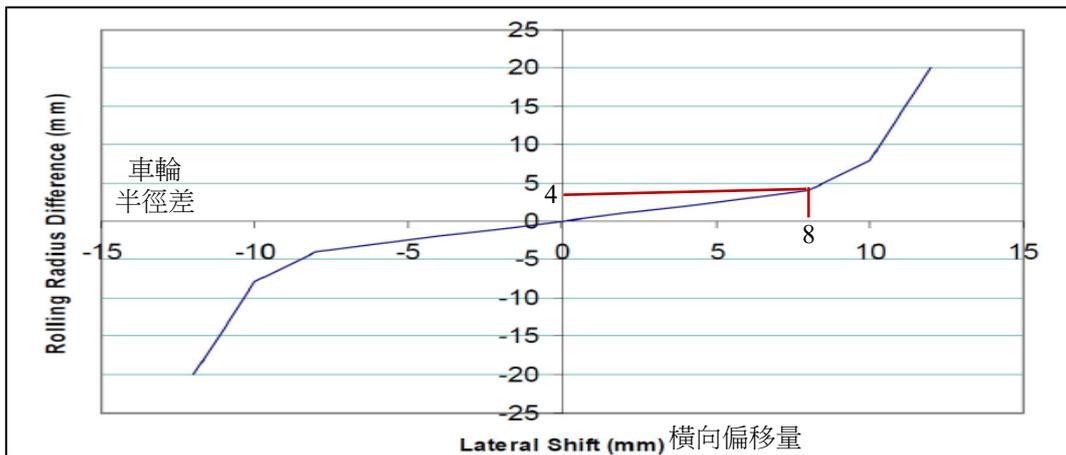


圖 3-5 輪徑差與橫移量關係

輪軌蠕變現象 (Creepage)

鐵路車輛為一沿軌道鋼軌行駛之動態模式，若將車輪與鋼軌視為彈性體，且車輪以一定速度滾動，在車輪與鋼軌接觸面彈性變形所引起的微小滑動現象稱為蠕變，如圖 3-6。當蠕變力 (creepforce，車輪與軌道接觸產生的作用力) 增加時，車輪與鋼軌間產生之蠕變現象便會升高，如圖 3-7。

$$\text{蠕變} = \frac{V_a - V_t}{V_t}, \quad V_a : \frac{\text{移動距離}}{\text{時間}} = \text{實際車速},$$

$$V_t : \Omega R = \text{理論速度},$$

蠕變 > 0 ($V_a > V_t$) : 車輪有滑動現象

蠕變 < 0 ($V_a < V_t$) : 車輪有黏著現象

黏著 (adhesion) : 輪軌接觸產生摩擦力

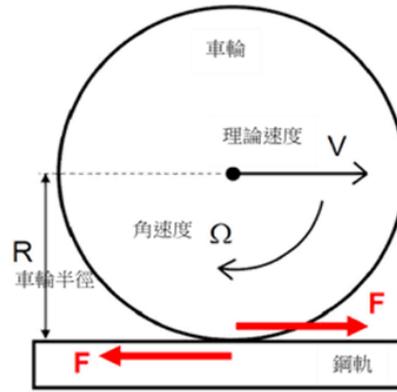


圖 3-6 車輪在鋼軌上滾動

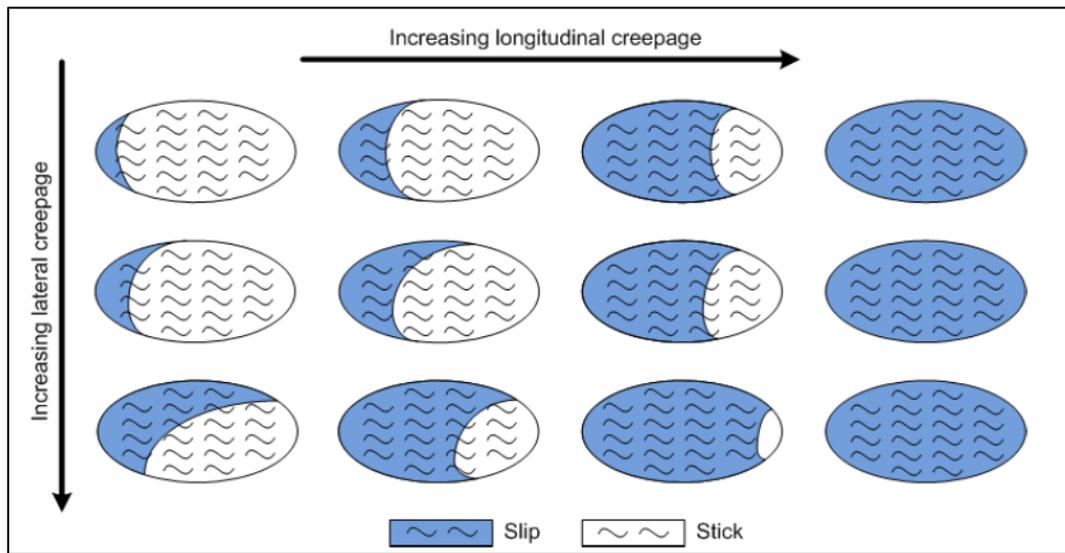


圖 3-7 車輪蠕變力與滑動現象示意

車輪與鋼軌接觸產生的蠕變力，初期形成的線性區域屬於低蠕變範圍，當蠕變超過一定值時，蠕變力便會趨於飽和，形成非線性區域，轉為高蠕變範圍。鋼軌表面處在摩擦係數較低條件下，可能發生如雨天或落葉油汙等環境，將使得鐵路車輛在行駛過程中產生的蠕變力較易超過飽和值，進而引發車輪打滑現象，當摩擦係數上升時，如乾燥環境下之鋼軌表面，可達較高之蠕變力。摩擦係數變化與蠕變力及蠕變現象之影響說明如圖 3-8。

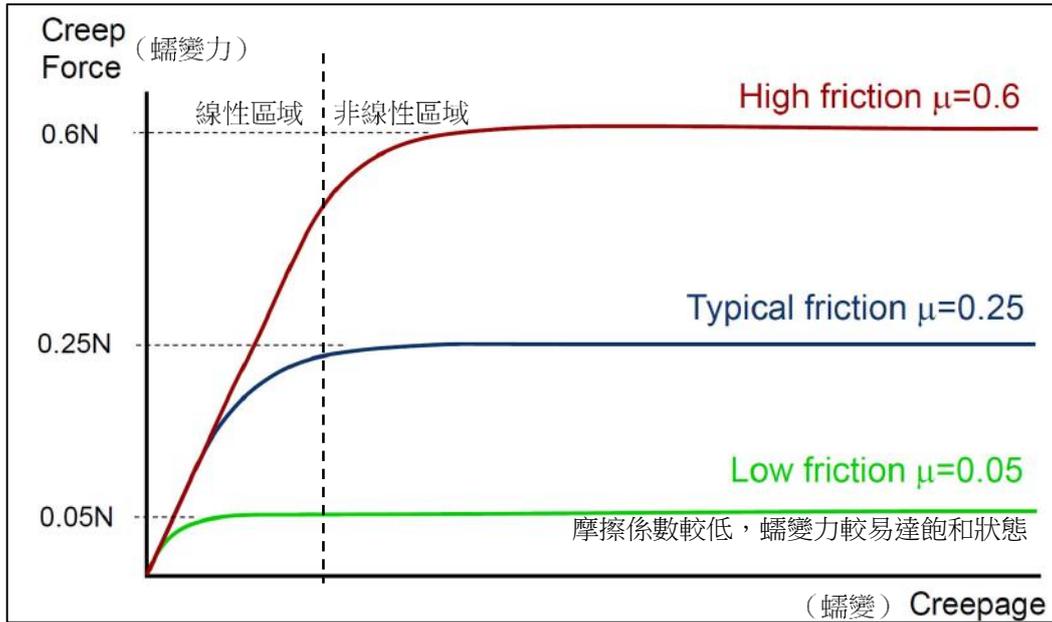


圖 3-8 摩擦係數變化與蠕變力及蠕變現象之影響

針對車輪因蠕變現象產生的作用力，進一步可分為縱向、橫向及軸向蠕變等 3 種類型，形成的可能原因說明如表 3-2。

表 3-2 縱向、橫向及軸向蠕變形成可能原因

現象	縱向蠕變	橫向蠕變	軸向蠕變
作用力示意			
形成原因	車輪組因輪徑差產生橫向位移及偏擺力矩	車輪組因轉向架旋轉產生攻角，由車輪輸出轉速與車輪組實際作用速度間之速度差形成之變化	因車輪與鋼軌接觸面旋轉及錐度變化產生軸向力，相對小於車輪組橫向力

其中當發生橫向蠕變時，因輪緣接觸會產生一攻角（angle of attack），此時除了橫向力外，在輪緣接觸的地方會有一接觸力產生，當這個接觸力達到 2 倍的橫向力時，可能會有爬軌的風險；亦或是造成軌距擴張，而有爬軌的可能。

對於行駛過程中輪對產生的作用力具以下特性，

1. 輪對產生橫向位移時，其輪緣接觸角變化及偏擺力矩會驅使輪對回到軌道中心。
2. 輪對發生水平搖擺時，會有向外的橫向力產生，並因輪緣接觸可能有軌距擴張的情形。

輪對在曲線段運行之特性 (Wheelset on Curved Track)

輪對車輪踏面 (wheel tread) 因具備圓錐度的特性，故可透過內外輪徑差異，調整列車轉向架於運行曲線段輪對接觸外軌長度大於內軌長度之影響，使輪對自動趨向平衡滾動線 (Equilibrium Rolling Line)。

對通過曲線段之轉向架，前軸輪對會因攻角而有外輪抵緊外側鋼軌情形產生；後軸輪對則為內輪抵緊內側鋼軌，故轉向架在曲線段轉向過程形成的軌距擴張力，亦為可能造成列車出軌風險升高及鋼軌磨耗的來源之一。

轉向架柔性懸吊設計特性 (Flexible Suspension)

轉向架利用柔性懸吊及輪對圓錐度調整內外輪徑差的設計，改善鐵路車輛過彎性能，並降低輪緣與鋼軌接觸產生的磨耗，相關特性說明如下，

1. 柔性懸吊：允許輪對於列車過彎時產生適度的橫向及偏擺自由運動，降低轉向架結構的剛性影響。
2. 車輪滾動輪徑差：利用車輪踏面圓錐度，使列車過彎時自動調整輪對偏移量，確保行駛穩定性。
3. 提高輪軌間摩擦係數：可建立足夠的縱向蠕變力，產生偏擺力矩 (yaw torque)，驅使輪對於通過曲線段時能順利過彎轉向。

轉向架前輪對 (Leading Wheelset) 不利於曲線段過彎的原因有：

1. 輪緣與鋼軌接觸間隙縮小導致車廂偏擺，攻角變大，使輪對橫向力升高。

2. 前輪對過彎移動時平衡滾動線更接近外軌，形成輪軌接觸狀態，輪徑差裕度減少，導致自導向功能降低及徑向力不足。

鐵路車輛運行曲線段之影響因素 (Key Factors in Curving)

以下為彙整鐵路車輛運行曲線段的影響因素，包含轉向架及軌道兩面向，提供車輛設計或軌道養護問題原因分析之參考，說明如表 3-3。

表 3-3 鐵路車輛於運行曲線段的影響因素

影響因素 key factors	分析及說明
曲率半徑 curve radius	曲率半徑越小，轉向架於曲線段通過性能越差，並使攻角增加，輪軌接觸作用力升高
軸距 wheelbase	軸距越長，導致輪軌接觸產生更大的橫向力，轉向架通過曲線段適應能力越差
超高不足量 cant deficiency	使輪軌接觸行為增加，利於車輪踏面執行過彎轉向
軌距擴大 gauge widening	輪緣與鋼軌間隙增加，減弱導向效果，降低轉向架通過曲線段能力
轉向架轉動阻力 bogie rotational resistance	前轉向架 (Leading Bogie): 先進入曲線段，受到較大偏擺阻力，通過性能較差 後轉向架 (Trailing Bogie): 依循前轉向架已調整之路徑，曲線段通過能力較佳
主偏擺剛性 primary yaw stiffness	<ol style="list-style-type: none"> 1. 採用較低剛性的懸吊設計，可提升轉向架對應軌道不同曲率半徑之變化 2. 剛性較高之懸吊設計，轉向架轉動會受到較大的限制，於通過曲線段需要更大的偏擺力矩導向，可能導致輪緣接觸力及輪軌間磨耗增加 3. 中等曲率半徑曲線段 (500 至 1000m 範圍)，剛性較高懸吊之轉向架，輪對較難調整車輪橫向位置，導致攻角增大，降低列車過彎性能 4. 較小半徑曲率 (300m 以下)，因轉向架輪對圓錐度自導向功能已達極限，除再增加機構設計提升輪對

	轉向性，縱使懸吊剛性降低，亦無法避免輪緣與鋼軌接觸及改善磨耗問題
車輪及鋼軌形狀 wheel and rail profiles	<p>可由車輪圓錐度設計，提供輪對最大滾動半徑差，使輪對自動轉向及產生橫向位移，減少輪緣接觸及磨耗</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 圓錐度較高：滾動半徑差可快速變化，有助輪對轉向，減少輪緣接觸，惟車輛高速運行可能會有蛇行現象 2. 圓錐度較低：滾動半徑差變化較慢，但穩定性高，惟車輛運行曲線段時，轉向架輪對可能需要較大蠕變力驅使轉向 3. 提高最大滾動半徑差值：可改善轉向架輪對轉向能力，但輪軌間應同時須具備足夠摩擦力以提供橫向蠕變力
輪軌間摩擦係數 wheel/rail friction	車輪若具備足夠滾動半徑差時，高摩擦力可提供較好的轉向效果，但當轉向失效時，會導致如輪對圓錐度降低、軌距擴大、通過小曲率半徑路段，及懸吊剛性過高等不良情況，促使輪軌接觸並加劇磨耗
護軌 check rails	可限制轉向架輪對橫向位移，減少輪軌間撞擊與磨耗，相對地也可能會降低輪對轉向能力
輪緣潤滑 flange lubrication	<ol style="list-style-type: none"> 1. 用以減少小曲率半徑路段輪軌接觸形成的磨耗及車輪爬軌風險 2. 因曲線段外軌輪緣接觸被潤滑後，車輛部分負荷可能轉移至內軌踏面並導致磨耗增加
牽引及煞車 traction and braking	<ol style="list-style-type: none"> 1. 車輛轉向架在牽引[動力輸出及煞車作動過程中，輪對車輪與鋼軌會形成額外縱向蠕變力，影響車輛轉向及運行穩定性 2. 當牽引輸出或制動過大，橫向蠕變力可能不足，導致轉向能力下降
輪對錯位歪斜 wheelset misalignments	<ol style="list-style-type: none"> 1. 直線段：會使轉向架需要額外轉向力矩維持直線運行，可能會有蛇行現象產生 2. 曲線段：輪對錯位偏斜可能利於某一曲線方向運行，但其他曲線方向可能會有惡化情形產生

	<ol style="list-style-type: none"> 3. 偏擺錯位 (yaw misalignment, 輪對角度偏差, 未與中心線對齊): 可能導致轉向架同側輪緣產生非對稱磨耗 4. 橫向錯位 (lateral misalignment, 輪對相對轉向架產生橫向偏移): 可能導致轉向架兩側輪緣產生非對稱磨耗
輪對直徑差 wheelset diameter difference	<ol style="list-style-type: none"> 1. 直線段或大曲率半徑曲線: 對車輛運行影響較小, 不會嚴重影響列車行駛穩定性及轉向能力 2. 小曲率半徑曲線: 輪對因兩側車輪直徑可能不一致, 在某一曲線方向轉向性能較差, 但在另一曲線方向轉向性可能獲得改善 3. 輪對直徑較小的車輪會承受較大橫向力及磨耗, 導致有不對稱輪緣磨耗, 影響列車行駛穩定性
不均勻輪緣磨耗 unequal flange wear	<ol style="list-style-type: none"> 1. 曲線方向分布不均: 如路線軌道曲線方向偏重某一方向配置 (如多為右彎曲線), 輪對在某一側輪緣會較常與鋼軌接觸形成磨耗 2. 軌道潤滑不足: 導致輪緣與鋼軌摩擦力增加, 可能影響列車所有轉向架之輪緣側

軌道曲線段線形不良對轉向架的影響性 (Effect of Poor Curving)

1. 較大曲率半徑: 轉向架前軸輪對受到縱向蠕變力影響產生的可能缺陷包括,
 - (1) 滾動接觸疲勞裂紋 (rolling contact fatigue, RCF): 車輪與鋼軌長期滾動接觸導致金屬材料疲勞, 逐漸形成表面裂紋, 易發生在高速或重載列車運行路線。
 - (2) 車輪踏面磨耗 (tread wear): 導致車輪踏面局部應力集中, 加速踏面磨耗及輪徑產生變化致影響轉向能力。
2. 小曲率半徑: 轉向架前軸輪對受到軌距擴張力 (gauge spreading force) 的影響包括,
 - (1) 軌道扣件損壞及軌距擴大: 列車通過時輪對產生較大之橫向力, 使曲線段外側鋼軌受到較大之軌距擴張力, 長期作用可能會導致軌道扣件鬆動或斷裂, 進一步產生軌距擴大, 增加脫軌風險。

- (2) 輪緣與軌距側磨耗：前軸輪對為最先產生輪軌接觸位置，易增加輪緣與軌距側磨耗。
- (3) 輪緣爬軌：轉向架輪對受到過大橫向力時，可能會使輪緣爬上鋼軌踏面而造成脫軌，在軌距擴大或摩擦力升高條件下將更為惡化。
- (4) 曲線內側鋼軌踏面磨耗與壓潰：列車於曲線段運行時，內側鋼軌會受到較大輪重導致鋼軌踏面磨耗，及車輪擠壓作用形成壓潰，影響輪緣接觸狀態。
- (5) 軌距擴大致列車出軌：曲線段軌距超過標準範圍時，可能會使車輪落軌的風險升高。

因應軌道曲線段的懸吊設計考量 (Suspension Design for Curving)

1. 低主偏擺剛性：提供輪對產生足夠轉向力矩，使車輪能徑向貼合曲線狀態，降低輪緣接觸與磨耗。
2. 高圓錐度設計：提供更大的滾動半徑差，提升轉向能力。
3. 低垂直剛性：減少列車運行曲線段因軌道不平整（如軌道扭曲、超高過大）導致輪重未承載現象發生，維持輪軌接觸狀態。

轉向架懸吊系統創新技術 (New Design Suspension)

徑向臂襯套 (hall radial arm bush)：使用實績如 Freudenberg Schwab 公司生產之襯套。該元件應用於轉向架懸吊系統，利用襯套內部使用液體充填構造，及兼具阻尼與動態剛性調整的特性，有助提高列車行駛舒適性及穩定性，如圖 3-9。

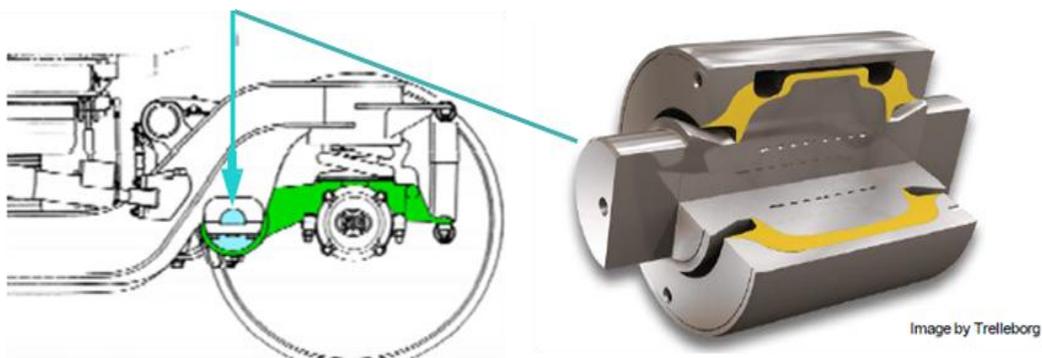


圖 3-9 徑向臂襯套零件示意

輪對交叉支撐結構設計 (cross-bracing)：透過桿件或連桿機構連接轉向架前後輪對，常與轉向架主動式轉向技術結合使用，用以提升轉向架過彎轉向能力，如圖 3-10。英國鐵路應用案例如 Scheffel Bogie (Scheffel 轉向架)、BR Cross-braced Bogie (英國鐵路交叉支撐轉向架) 及 Class 66 Locomotive (66 型機車) 等，但因轉向架結構設計更為複雜，衍生製造、維護成本及重量增加等缺點。

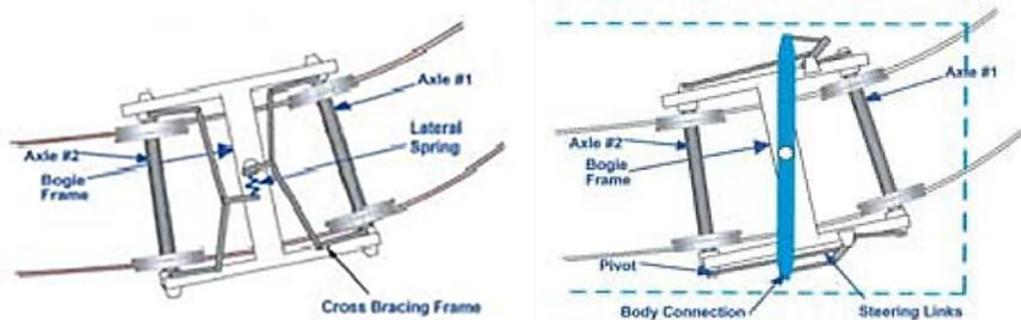


圖 3-10 輪對交叉支撐結構設計示意

轉向架懸吊系統與輪對導向行為之關聯 (Stability)

單一自由輪對在沒有懸吊系統輔助下，是無法維持穩定運行，其原因為輪對在軌道上產生左右些微橫移時，車輪踏面滾動半徑差會產生一回復力，使輪對回到中心位置，但由於過度修正，形成左右持續擺動且不穩定的蛇行運動 (hunting motion)。

轉向架懸吊系統的功能為提供輪對拘束及車輛行駛穩定性，主懸吊連接轉向架及輪對，提供縱向及橫向彈性及阻尼，次懸吊連接車體與轉向架，如空氣彈簧，進一步抑制車廂行駛過程中帶來的振動，提高乘客舒適度。

蛇行運動臨界速度 (Critical Hunting Speed)

鐵路車輛高速運行軌道時，轉向架輪對會因橫向振盪產生不穩定運動，此時會伴隨產生開始誘發蛇行運動的臨界速度，故了解臨界速度的影響因素及預測方法，將有助於檢驗車輛懸吊系統設計完整性及車輛運行穩定性。

對於鐵路車輛轉向架輪對發生蛇行運動臨界速度的影響因素，包含有車輪圓錐度、懸吊參數 (如高低剛性及減振阻尼大小)，臨界速度的判斷，可透過線性計

算法（透過運動方程式求得特徵值）預測車輛開始進入不穩定狀態的速度值；實驗及非線性計算法（數值模擬）採用觀察輪對或車廂擺盪行為來判斷，即達到臨界速度時，輪對橫向振幅會持續增加且不會衰減。

英國鐵路車輛設計主要利用 VAMPIRE PRO 軌道動力學模擬軟體，及線性/非線性計算法，探討轉向架在不同車輪圓錐度、阻尼比，及車速條件下，對車輛運行穩定性之影響。

針對不同速度與圓錐度組合下最小阻尼模式之特徵值分析案例如圖 3-11，其黑色等高線（contour）表示車輛運行最小阻尼模式降為 0% 狀態，即吸收車輛振盪衰減幅度最慢，在此模式下車輛運行最容易發生動態不穩定現象，最小阻尼模式小於 0%，表示車輛振動會持續放大。針對不同車輪圓錐度變化值（0.1~0.4），可觀察到車輪採用圓錐度約 0.23 設計時，具備最大臨界速度約 84m/s（301km/h），在列車高速運行狀態下較能維持穩定性。

最小阻尼模式（Least Damped Mode）：採用多體動力學模擬軟體建立車輛動態模型與特徵值分析進行計算，非直接由實驗數據取得。

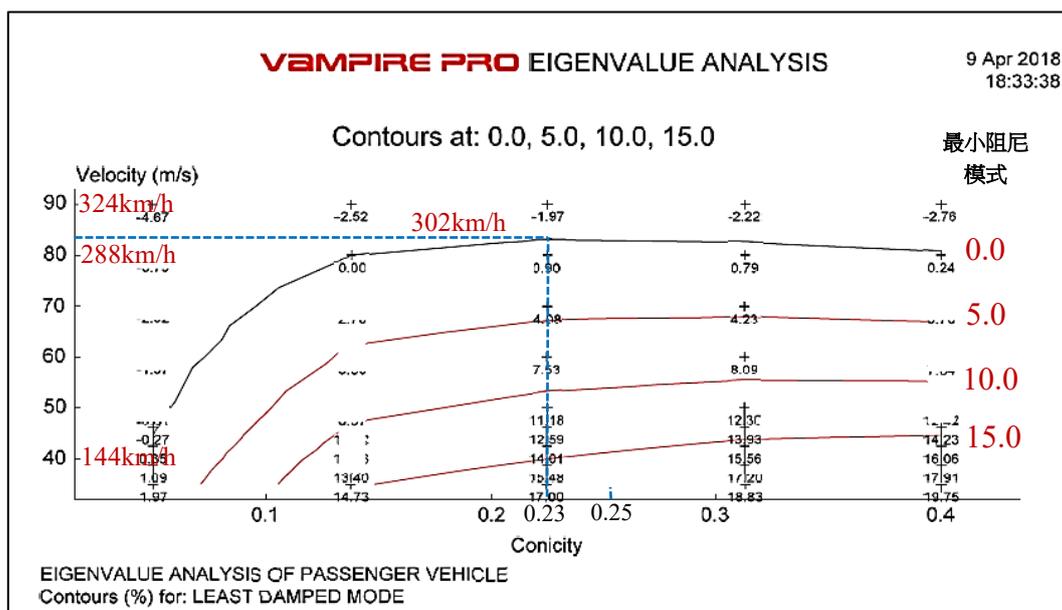


圖 3-11 不同速度與圓錐度組合下最小阻尼模式之等高線圖

利用非線性程式執行客車廂瞬態分析結果如圖 3-12，不同圓錐度與車速及橫向位移之比較結果彙整如表 3-4。

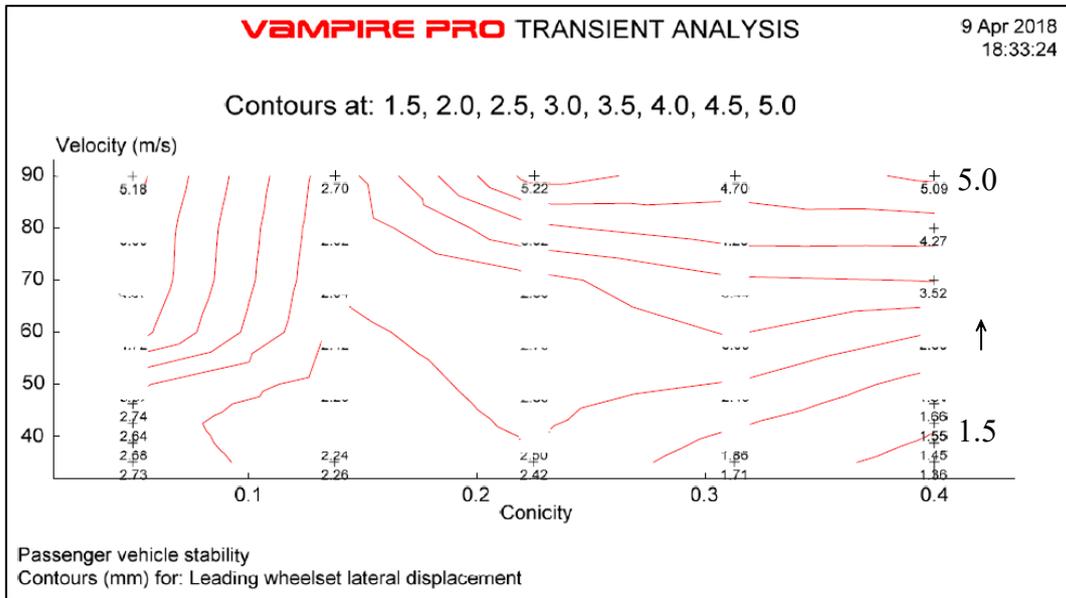


圖 3-12 不同前輪對橫向位移對應車速及圓錐度之瞬態分析

表 3-4 不同圓錐度之比較結果

比較項目	低速 (40-50 m/s) (144-180 km/h) 橫向位移	高速 (70-90 m/s) (252-324 km/h) 橫向位移
圓錐度		
低圓錐度 (約 0.1)	2.6-2.8 mm	2.7-5.2 mm
中等圓錐度 (約 0.2)	2.2-2.4 mm	4.7-5.2 mm
高圓錐度 (約 0.3-0.4)	1.7-1.9 mm	4.7-5.1 mm

轉向架與車體的不穩定蛇行運動 (Hunting Instability)

轉向架蛇行 (bogie hunting)：通常發生在列車高速運行或輪對使用高圓錐度規格所產生的車廂不穩定搖擺現象，一般發生頻率約在 7Hz，此時輪對會與轉向架框

產生相對移動，導致車輪無法穩定運行在軌道上。

車體蛇行 (body hunting)：車體運行過程產生的搖擺現象，通常發生在使用輪對圓錐度較低或車輛設計不當，導致轉向架、輪對與車體一起產生搖擺，降低乘客舒適度。一般發生頻率約在 0.5~1.5Hz。

車輪踏面形狀對蛇行運動振幅大小的影響 (Amplitude of Hunting Motion)

轉向架輪對車軸的振幅大小，擺動過程中最後會受到輪緣與鋼軌接觸的條件限制，為使車軸振幅降低，車輪踏面可採用非線性輪廓設計，將振幅限制在較小範圍內，避免因車軸過度的擺盪對車輪及軌道造成損傷。

與車輛轉向架運行穩定性有關之設計參數 (Factors Affecting Stability)

1. 主偏擺剛性 (primary yaw stiffness)：提供轉向架懸吊系統產生抵抗車廂旋轉的能力，如輪對軸箱垂向彈簧及阻尼結構，如圖 3-13。
2. 主橫向剛性 (primary lateral stiffness)：提供轉向架懸吊系統產生抵抗車廂左右橫向搖擺的能力，如輪對水平阻尼，如圖 3-13。

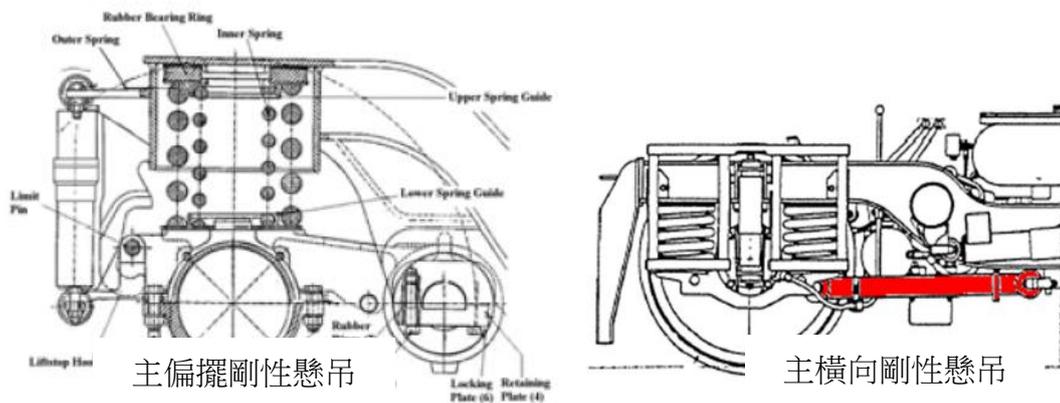


圖 3-13 轉向架懸吊系統裝配位置示意

3. 三片式轉向架 (3-piece bogies) 結構的扭曲剛性探討

主要用在貨運列車轉向架設計，結構設計由 2 組側架 (sideframes) 及 1 組搖枕 (bolster) 組成，如圖 3-14，架框允許較大彈性變形，故須具備充足的抗偏搖能力，以消除車輛運行過程的不穩定性。

另改良之擺動式轉向架 (swing motion bogie) 為增加組件結構進行連結，提升剛性強度，以抵抗框架扭曲性，增加列車運行穩定性。

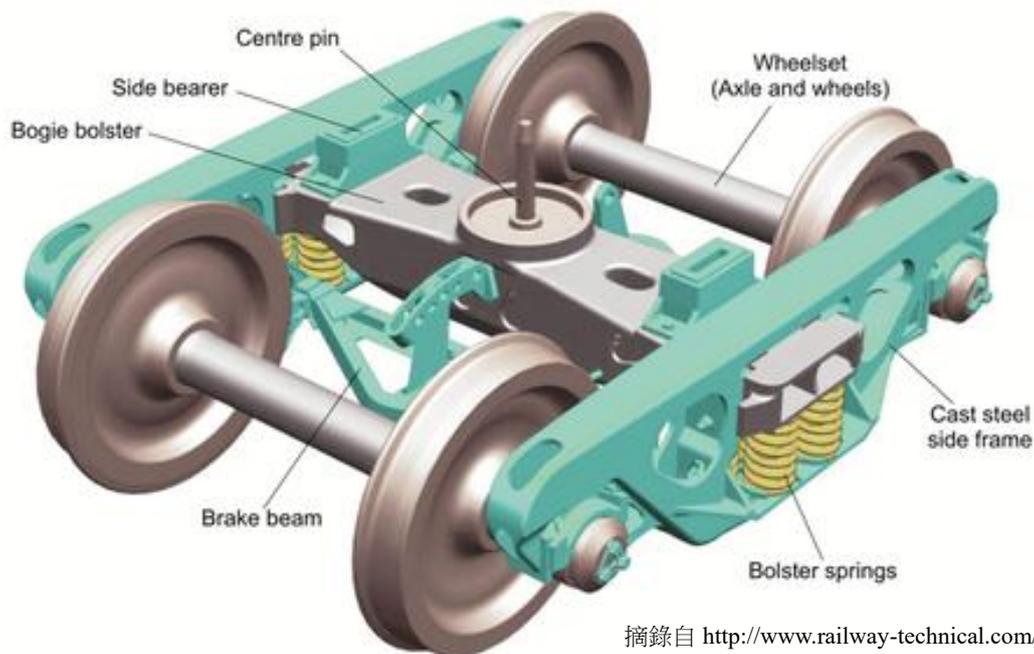


圖 3-14 三片式轉向架

4. 次偏擺阻尼 (secondary yaw damping) 在轉向架的應用

主要為抑制轉向架相對車廂形成的偏擺運動，以提高列車行駛穩定性，特別是高速運行的客車及機車，如安裝油壓阻尼器。另摩擦型側擋一般使用在貨物列車，為被動式阻尼機構，採用摩擦力來限制轉向架的過度偏擺運動，結構簡單及成本較低。

轉向架偏擺剛性的設計配套方案 (Trade Off)

偏擺剛性的高低，會影響列車通過曲線性能及直線穩定性，針對曲線及直線轉向架的偏擺剛性要求比較表如表 3-5。常見因應不同車種需求之轉向架設計配套方案如表 3-6。

表 3-5 曲線及直線轉向架的偏擺剛性要求比較表

性能需求	偏擺剛性要求	優點	缺點
良好的曲線通過性能 (good curving performance)	低擺剛性 (low primary yaw stiffness)	允許轉向架自由旋轉， 降低輪軌橫向力	直線穩定性較差，易產生 蛇行運動 (hunting instability)
良好的直線穩定性 (good stability performance)	高擺剛性 (High Primary Yaw Stiffness)	限制偏擺運動，減少高 速蛇行，提高穩定性	曲線適應性下降，增加輪 緣磨耗

表 3-6 不同車種需求之轉向架設計配套方案

方案	適用車種	優點	缺點
忽略曲線行為 (ignore curving)	貨車、低速列車	結構簡單、適合重載貨車	曲線磨耗大，不適合高速
折衷設計 (compromise)	一般客車、貨車	平衡曲線適應性與穩定性	無法達到最佳性能
轉向連桿 (steering linkages)	高性能貨車、部分 客車	減少輪緣磨耗，提高穩定 性	結構複雜，維護需求大
液壓阻尼徑向臂 (hydraulic-damped radial arm bush, HALL)	高速列車、動車組	適應速度變化，自動調整 剛度	需要液壓系統，維護成本 高
主動控制 (active control)	高速鐵路(新幹 線、TGV等)	自適應調整，最佳化穩定 性與磨耗	造價昂貴，技術複雜

車輛與軌道交互作用 (Vehicle-Track Interaction)

車輛運行軌道產生的交互作用，可分為車輪與軌道交互作用，及軌道幾何線形兩個考量因素，其作用力類型可分為垂直力、橫向力、縱向力，及組合力等，針對各作用力可再細分為靜態力、準靜態力，及高低頻力等，作用力類型及可能形成原因彙整如表 3-7，可能造成的故障癥狀如表 3-8。

組合力 (combined forces) 主要為列車運行高頻振動下輪軌交互作用造成，導致軌道表面形成週期性磨損現象，即鋼軌表面波狀磨耗 (corrugations)，影響列車行駛穩定性，及產生振動噪音。

表 3-7 作用力類型及其可能形成原因

作用力類型	垂直力 (vertical forces)	橫向力 (lateral forces)	縱向力 (longitudinal forces)
靜態力 (static forces)	軸重 (axle load)	無	無
準靜態力 (quasi-static forces)	轉彎或懸吊變形導致的輪重卸載 (wheel unloading)	曲線通過時的導向力，影響輪緣磨耗	車輛牽引與制動產生的力，影響輪軌黏著力
低頻力 (low frequency forces)	懸吊系統影響車輛上下震動，影響舒適性	轉向架導向力影響曲線適應性與穩定性	車輛牽引與制動力影響車輛運行平順性
高頻力 (high frequency forces)	軌道接縫或不平順造成的衝擊力，影響輪軌壽命	輪緣撞擊 (flange impact) 產生噪音與磨耗	軌道表面不平順造成震動與衝擊
組合力 (combined forces)	軌道波磨 (corrugations) 影響輪軌接觸壓力	軌道波磨導致的高頻橫向震動	軌道波磨影響車輛牽引與制動穩定性

表 3-8 作用力類型及可能造成的故障癥狀

作用力類型	影響性	故障癥狀
垂直力 (vertical forces)	軌道與車輪因高頻衝擊產生瞬間應力	斷軌 (broken rails)、扣件鬆動 (fastenings failure)、枕木損壞 (sleeper damage)
	車輪與軸承受衝擊，造成結構損傷	車輪踏面損傷 (wheel tread damage)、軸箱軸承損壞 (axlebox bearing damage)
	持續的懸吊系統應力影響軌道狀況	軌道幾何惡化 (track geometry deterioration)、週期性磨耗 (cyclic wear)、滾動接觸疲勞 (RCF)
橫向力 (lateral forces)	曲線通過時，高軌與低軌受力不同	高軌側面磨耗 (rail side wear)、低軌頭部磨耗 (head wear)
	軌距受力影響，可能逐漸擴大	軌距擴展 (gauge spreading)
	車輪輪緣與踏面持續受力，影響壽命	輪緣磨耗 (wheel flange wear)、踏面磨耗 (tread wear)、滾動接觸疲勞 (RCF)
	列車脫軌	輪緣爬升 (flange climbing) 或 軌距擴展脫軌 (gauge spreading derailment)
組合力 鋼軌表面波狀磨耗 (corrugations)	軌道表面不規則震動產生噪音	軌道噪音 (roaring rails)
	軌道與車輛受周期性應力影響	軌道組件疲勞 (fatigue of track components)、軸箱軸承疲勞 (axlebox bearing fatigue)

輪軌介面交互作用瞬時衝擊力 (Impact Forces)

當轉向架車輪與軌道瞬間產生交互作用時，會產生兩個不同衝擊力的峰值 (force peaks)，分別稱為 P1 力和 P2 力，如圖 3-15，其力量值的大小主要與車輪

軌道間接觸剛性、軌道結構剛性，以及車廂簧上質量有關，會造成輪軌系統整體的衝擊動態響應。P1 力和 P2 力的特性及影響範圍如表 3-9。

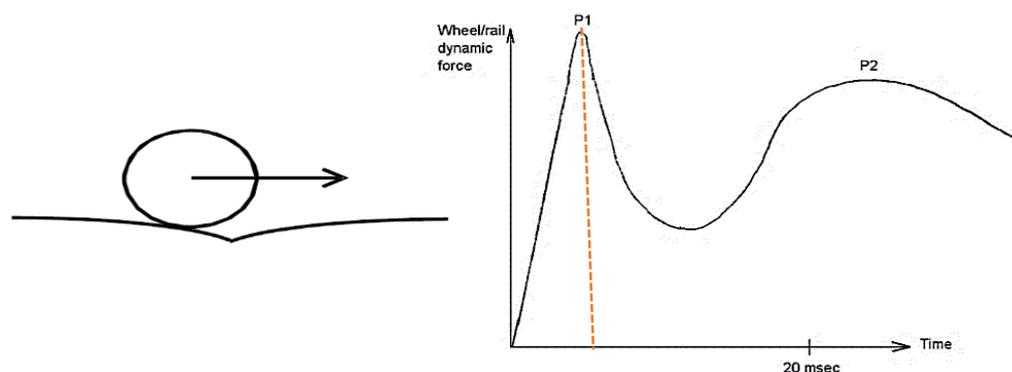


圖 3-15 衝擊力產生之 P1 力及 P2 力

表 3-9 P1 力和 P2 力的特性及影響範圍

衝擊力峰值	特性	影響範圍
P1 力 (P1 force)	促使車輪運行軌道產生加速性 (accelerates rail)	軌道受到瞬間高頻衝擊
	頻率極高 (very high frequency)	主要受輪軌接觸剛性 (wheel/rail contact stiffness) 影響，如鋼軌接頭、焊接不平整、道床沉陷、輪緣撞擊等
	來自車輪與軌道的剛性接觸	影響車輪踏面與軌道表面局部應力
P2 力 (P2 force)	使車輪與軌道減速 (decelerates wheel and rail)	軌道傳遞衝擊至軌枕與地基
	頻率較高 (high frequency)	受軌道結構剛性影響 (軌道-枕木-路基系統 rail/sleeper/ground stiffness)
	軌道與路基結構的相互作用	影響軌道壽命與路基穩定性

輪軌間垂直接觸應力 (Vertical Contact Stress)

當車輪在鋼軌上滾動接觸時，會產生一接觸面積極小及負荷大的垂直接觸應力，會影響鋼軌與車輪的使用壽命，加速磨耗量的成長。

輪軌接觸應力示意如圖 3-16，車輪與鋼軌接觸橫向移動狀態及影響性說明如表 3-10，其相關特性及對輪軌造成的影響性說明如下：

1. 接觸面積較小，一般約直徑 10mm 寬

2. 輪重負荷大，以單一輪重 5 噸為例，將導致高接觸應力
3. 接觸應力峰值約為壓力值的 1.5 倍，可能會超過鋼輪或鋼軌的材料降伏強度值，造成表面損傷
4. 接觸面積會受到多種輪軌介面使用條件影響，包含輪重負荷、輪徑大小、輪軌外形，及軌道線形與輪對橫移位置及實際磨耗的影響等

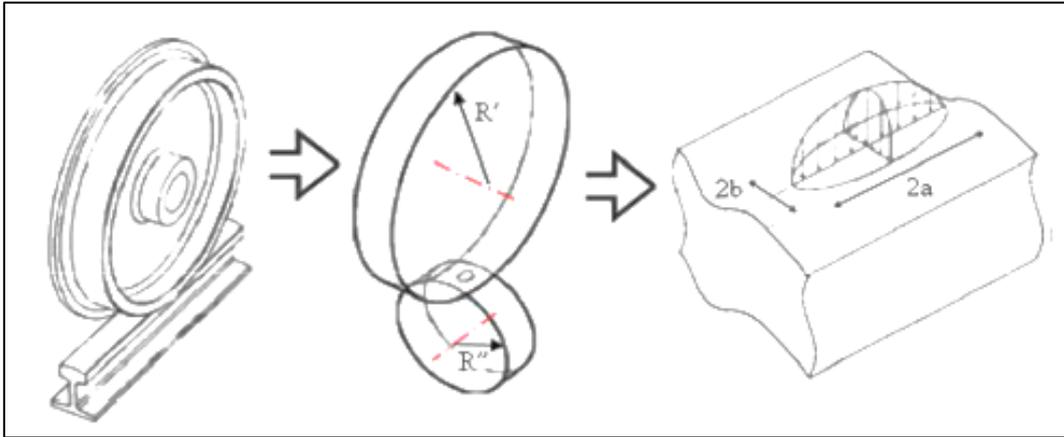


圖 3-16 輪軌接觸應力示意圖

表 3-10 車輪與鋼軌接觸橫向位移及影響性

橫向位移 (mm)	接觸形狀	現象描述	影響性
0 mm	圓形	輪緣未接觸鋼軌，正常踏面接觸	接觸應力均勻，正常運行狀態
3 mm	橢圓形	車輪橫向偏移，接觸區變窄	局部應力上升，可能增加踏面磨耗
6 mm	更窄橢圓形	接觸區進一步縮小，靠近鋼軌側面	局部應力更高，可能導致滾動接觸疲勞 (RCF)
9 mm	輪緣開始接觸	形成2區域接觸(踏面+輪緣)	增加曲線行駛摩擦，鋼軌側磨加劇
9.5 mm	僅輪緣接觸	完全依靠輪緣接觸鋼軌	極高應力，輪緣與鋼軌嚴重磨耗，行駛不穩定

接觸區域能量 (Contact Patch Energy, T_y)

主要探討車輪與鋼軌接觸面產生的能量耗散現象，以了解造成磨損及滾動接觸疲勞（RCF）的表面損壞機制，提供作為軌道研磨養護評估、車輛或軌道線形設計，及耐磨材料選用之參考。 T_γ 值可透過實測或動力學軟體模擬方式取得。

輪軌介面能量耗散公式 $T_\gamma = T \times \gamma$ ，由圖 3-17 輪軌接觸區域能量耗散與磨耗關係範例，當接觸區域能量由 0 提升至 500 J/m，磨損量將從 0 mm^2/km 增加至約 0.4 mm^2/km ，表示磨損量會隨能量耗散值上升而增加。

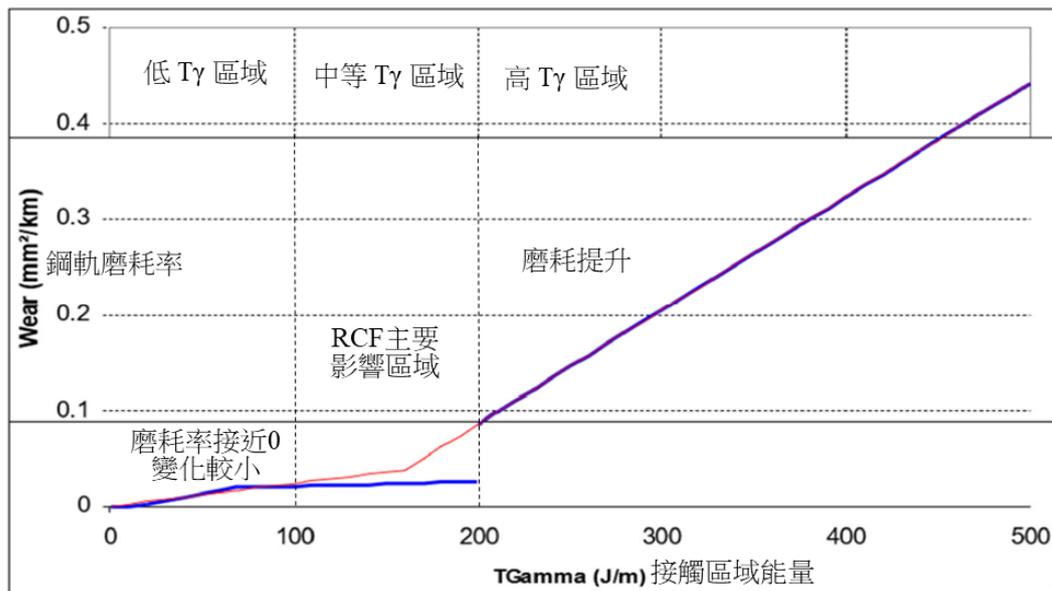


圖 3-17 輪軌接觸區域能量與磨耗關係範例

滾動接觸疲勞（Rolling Contact Fatigue, RCF）

鐵路車輛轉向架輪對在行駛過程中與鋼軌產生接觸，受縱向力影響，鋼軌會因列車牽引力形成滾動接觸疲勞，車輪則受到煞車塊制動力作用，在踏面形成接觸疲勞。車輪及鋼軌表面生成裂紋示意如圖 3-18。一般在輪軌中等接觸區域能量較易形成明顯的滾動接觸疲勞裂紋，且好發於曲線段，若接觸區域能量升高，則會被磨損現象取代。

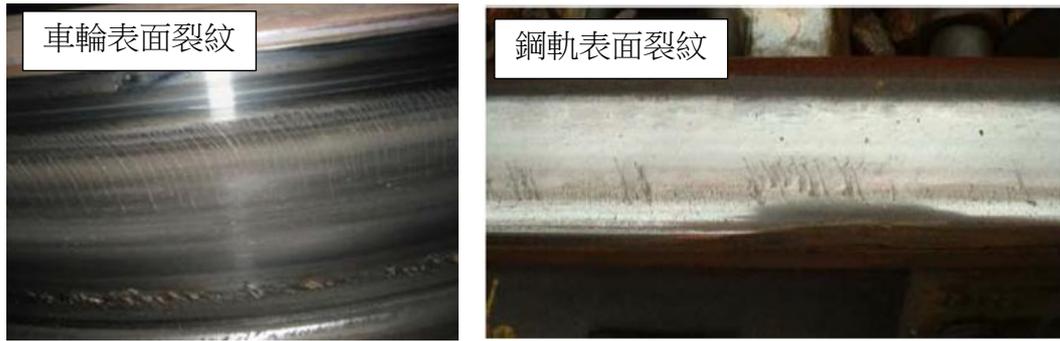


圖 3-18 車輪及鋼軌表面生成裂紋示意

英國鐵路曾於西元 2000 年 10 月，在哈特菲爾德（Hatfield）車站營運路線左彎曲線段發生列車出軌事故，經調查發現主因為軌道左（外）側鋼軌在事故前已存在嚴重的滾動接觸疲勞（RCF）損傷和裂紋缺陷，導致列車行駛過程中鋼軌持續受到橫向力作用而發生斷裂致翻覆出軌。事故現場及採樣鋼軌斷裂截面（出現金屬疲勞裂紋）照片如圖 3-19。



圖 3-19 事故現場及採樣鋼軌斷裂截面照片

軌道幾何（Track Geometry）

軌道養護狀態攸關列車行駛穩定性，其管理指標包含有高低、方向性、軌道扭曲、軌距、平均速度與曲線段超高設計，及坡度變化等，其中英國鐵路針對可能造成列車出軌風險的軌道扭曲缺陷，採用以 3m 軸距傾斜度，訂定軌道養護行動的管理值，說明如表 3-11。

表 3-11 英國鐵路軌道扭曲管理值

傾斜度限值	行動要求
1/90	立即停止營運
1/125	應於36小時內修正
1/200	曲率半徑R< 400m，1 週內修正，其餘2週內修正

鋼軌踏面週期性起伏 (Cyclic Cross-level)

當軌道線形出現鋼軌踏面週期性起伏情形，將可能引起列車運行時產生循環擺動行為，可能導致列車出軌，故英國鐵路建議之檢查維修值為 25mm/每 20~30m，並針對路線發現地點採取限速措施，車速降為 65km/h 以下，鋼軌踏面週期性起伏示意如圖 3-20。



圖 3-20 鋼軌踏面週期性起伏示意

鐵路車輛轉向架懸吊元件對列車動態行為的影響 (Suspension Components and Influence on Dynamic Behaviour)

懸吊系統的功能說明如圖 3-21，涵蓋主/次懸吊及新型懸吊的設置功能與目的。

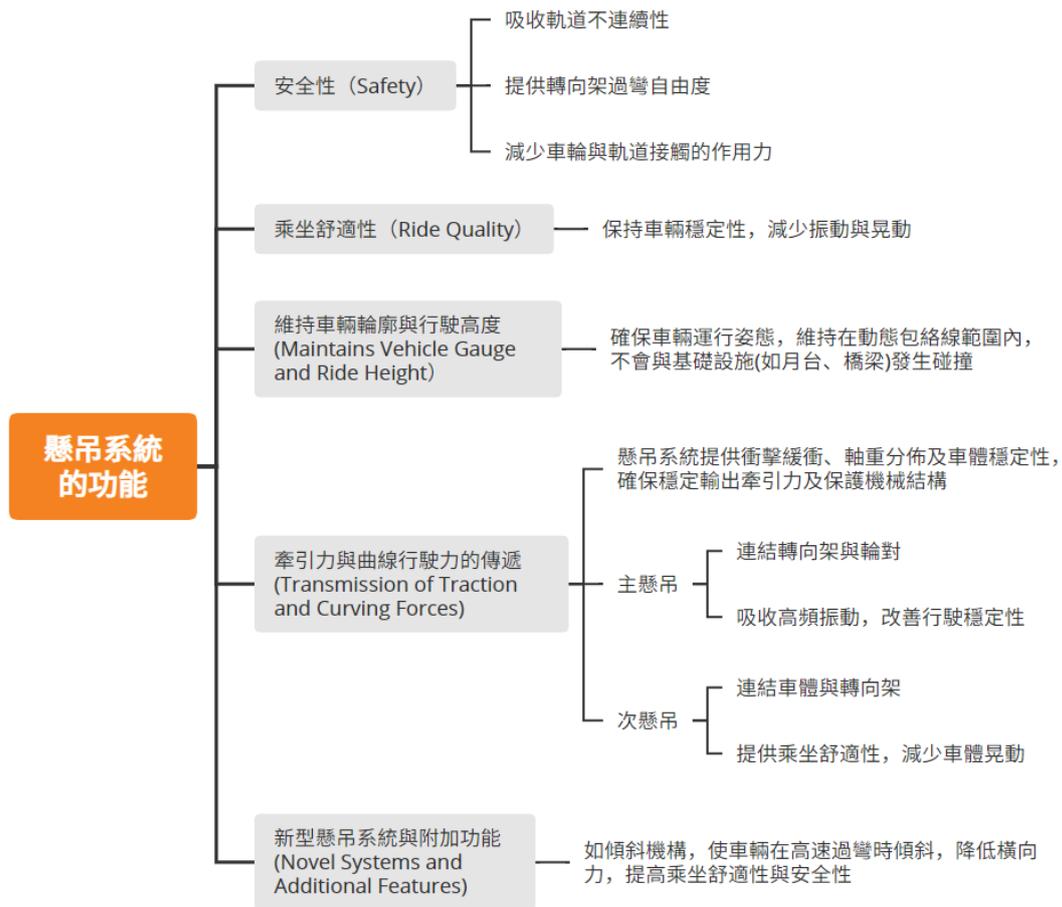


圖 3-21 鐵路車輛轉向架懸吊系統的功能

1. 主懸吊功能介紹 (Primary Suspension)

主要為維持轉向架各輪對之車輪與軌道間接觸穩定性，減少因軌道不平順帶來的衝擊力與振動量，主懸吊功能及常見設計樣式說明如圖 3-22。



圖 3-22 主懸吊功能及常見設計樣式

以下分別就葉片彈簧、螺旋彈簧、剪切彈簧、錐形橡膠彈簧等進行功能及作用特性說明。

2.1 葉片彈簧：功能、作用特性說明如圖 3-23



圖 3-23 葉片彈簧功能及作用特性

2.2 螺旋彈簧：功能及作用特性說明如圖 3-24



圖 3-24 螺旋彈簧簡介

2.3 剪切彈簧：功能及作用特性說明如圖 3-25；剪切彈簧常見表面缺陷種類說明如圖 3-26。

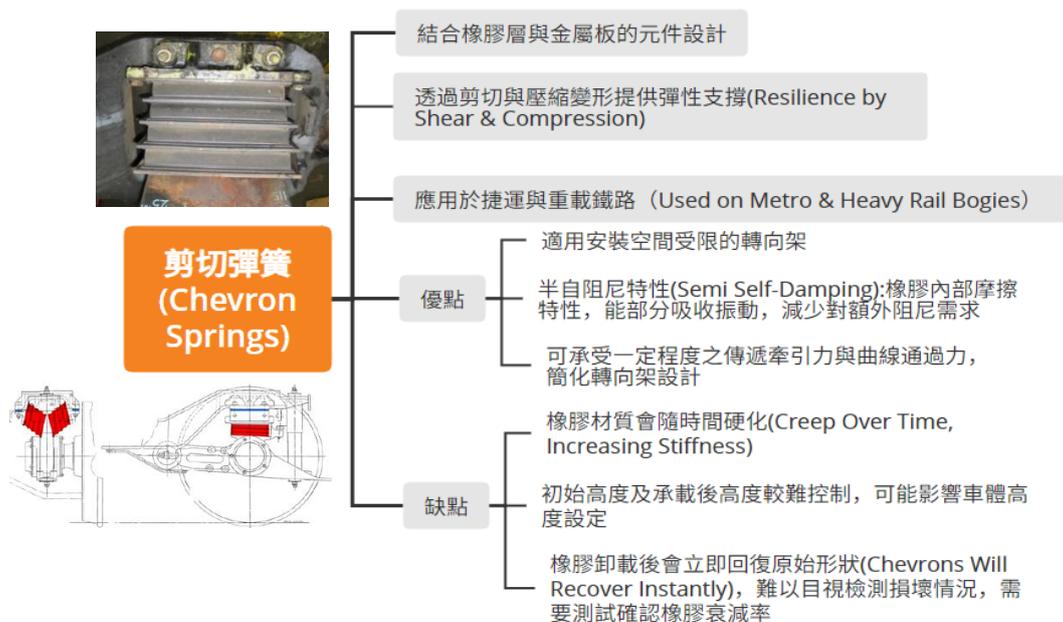


圖 3-25 剪切彈簧簡介

- (1) 折痕 (fold marks)：可能是橡膠與金屬層壓製膠合過程產生的壓痕。
- (2) 龜裂 (crazing)：表面乾燥、脆化 (dry, brittle appearance)，嚴重龜裂可能表示橡膠老化，可能會影響彈性與阻尼性能。
- (3) 塗層剝離 (overpaint delamination)：表面塗層或油漆因時間或外力作用剝落，不影響彈簧結構，但可能影響橡膠防護能力。



圖 3-26 剪切彈簧常見表面缺陷

2.4 錐形橡膠彈簧：功能及作用特性說明如圖 3-27

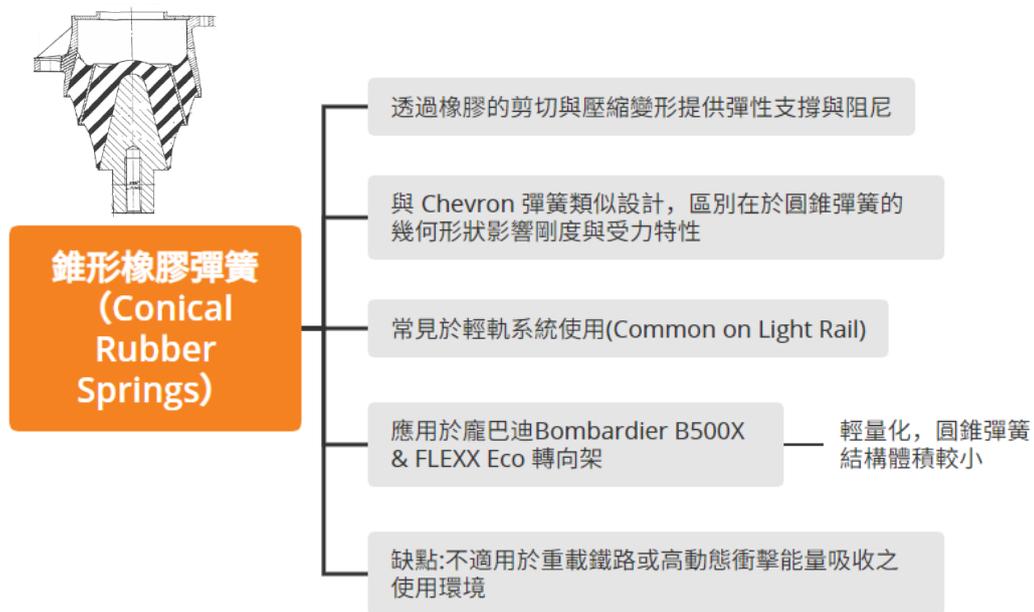


圖 3-27 錐形橡膠彈簧功能及作用特性

2. 次懸吊 (Secondary Suspension)：功能、作用特性及應用樣式說明如圖 3-28

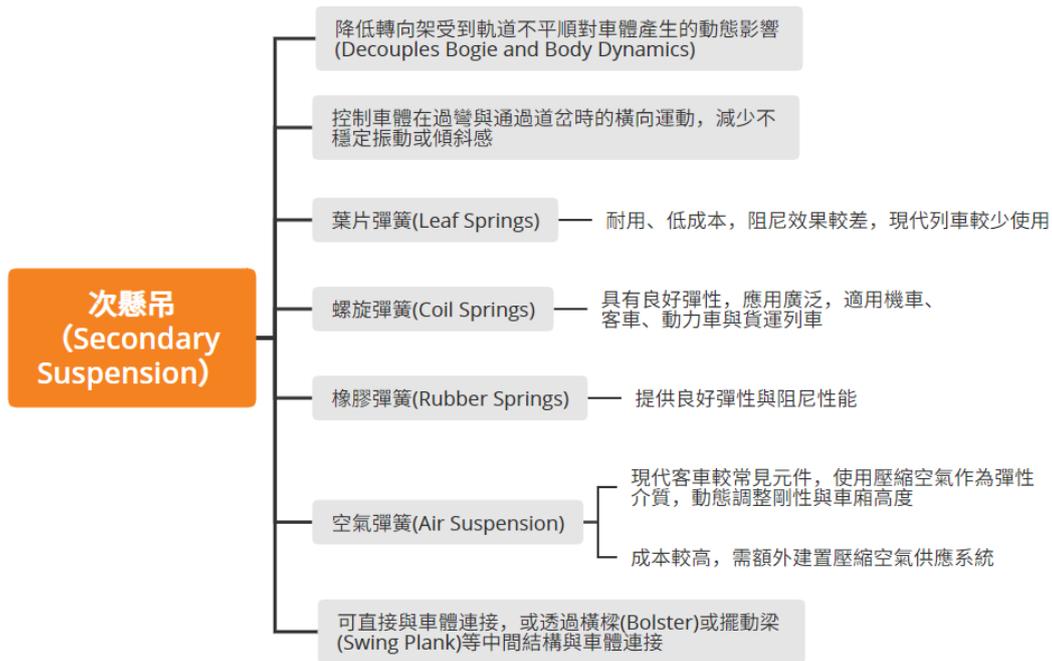


圖 3-28 次懸吊功能及特性、應用樣式

主要功能為減少轉向架與車體間行駛過程中產生相互運動的影響性，提升列車乘坐舒適度和穩定性，同時提供橫向約束（lateral restraint）與轉向架旋轉剛度（bogie rotational stiffness）。

2.1 橡膠彈簧

常見運用於貨運轉向架（freight bogies）、機車（locomotives）與捷運（metro）系統，主要透過橡膠材料壓縮、剪切和變形特性提供轉向架運行狀態下所需的彈性與阻尼，應用案例如圖 3-29。



圖 3-29 橡膠彈簧應用案例

2.2 空氣彈簧控制系統介紹

空氣彈簧為採用充氣的環狀氣囊（toroidal bag）以支撐車體重量的懸吊系統，若氣囊洩氣或故障，輔助彈簧（auxiliary spring）的備援機制可以確保懸吊系統仍可支撐車體重量，避免車體直接壓在轉向架上，造成設備損壞或影響列車運行風險，空氣彈簧實車安裝案例說明如圖 3-30。

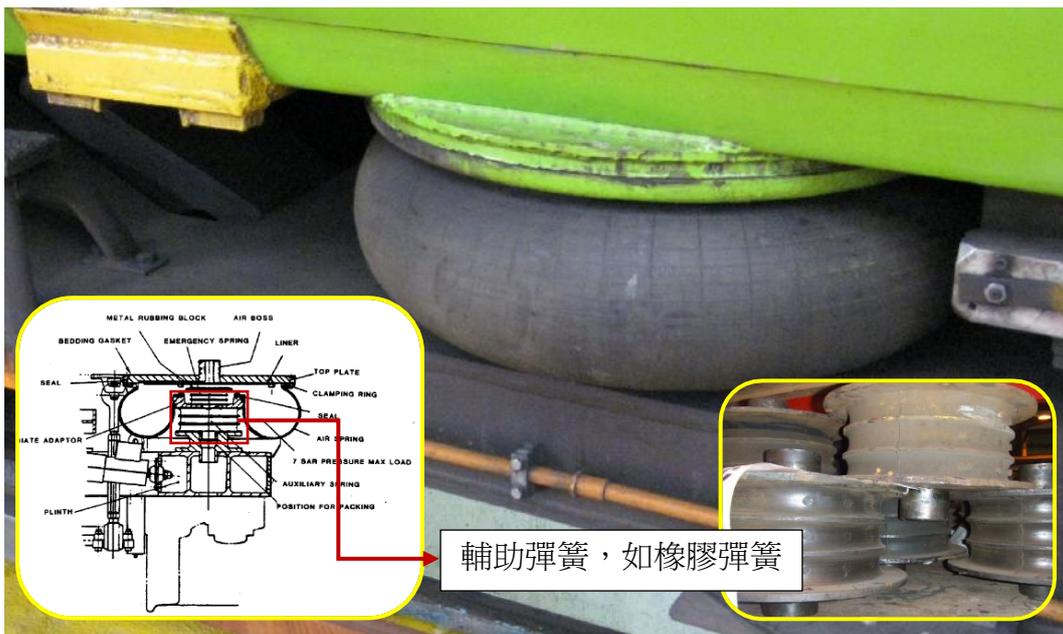


圖 3-30 空氣彈簧實車安裝案例

- (1) 空氣彈簧控制系統：空氣彈簧、氣源迴路、差壓閥及水平閥等主要元件設置說明如圖 3-31。

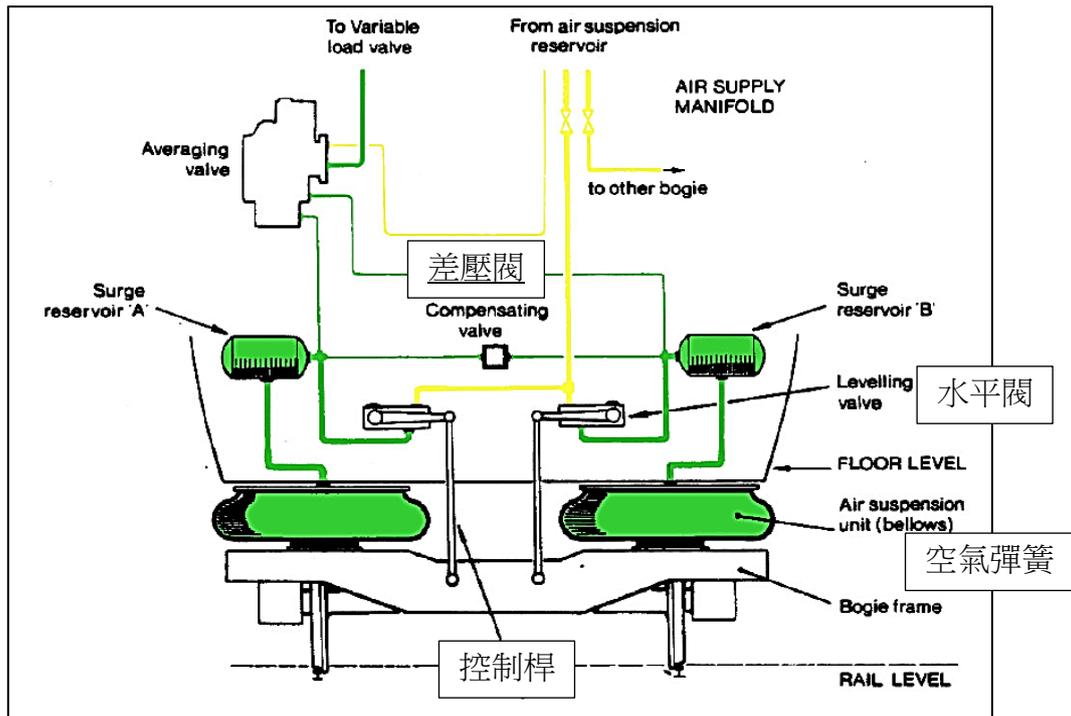


圖 3-31 空氣彈簧控制系統主要元件設置

(2) 重要元件功能說明及維護

水平閥 (levelling valves) 與控制桿 (control rods)：控制空氣彈簧充放氣啟動時機，確保車體保持適當高度及水平，防止車體過度傾斜。水平閥故障可能造成空氣彈簧過度充氣或洩氣，控制桿失效可能導致空氣彈簧調整高度基準不正確，導致車體傾斜及車輛重心偏移。

空氣彈簧密封性 (air bag integrity)：空氣彈簧極少發生完全破裂，通常會以緩慢洩漏的問題出現，初步可由差壓閥 (Compensating Valve) 自動補償氣源支撐，或採取列車降速運轉措施，確保營運中車輛仍可維持運轉能力。另轉向架設計上會加裝防傾桿 (anti-roll bar) 裝置，減少空氣彈簧因洩氣失壓後造成車體過度傾斜的影響。

空氣彈簧的維護與大修 (maintenance & overhaul)：維修後應檢測轉向架車輪負載變化 ($\Delta Q/Q$ ，輪對左右輪差異/輪對負載和) 及車身高度，確保符合列車上線營運之規範要求。

3. 阻尼 (Damper)

主要功能為消除列車動態行駛過程中，可能因軌道不平順或車輛運行姿態變化產生的振動現象，主減振器及次減振器安裝位置示意如圖 3-32，阻尼設計型式及功能分類如圖 3-33。運作原理為利用阻尼器內液體流動形成阻力來吸收衝擊能量。

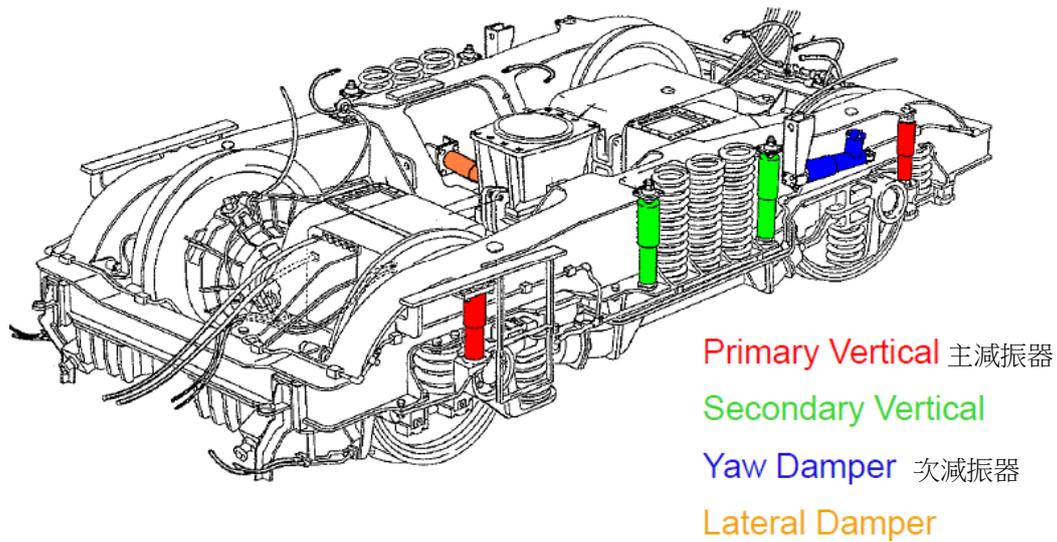


圖 3-32 主減振器及次減振器安裝位置示意

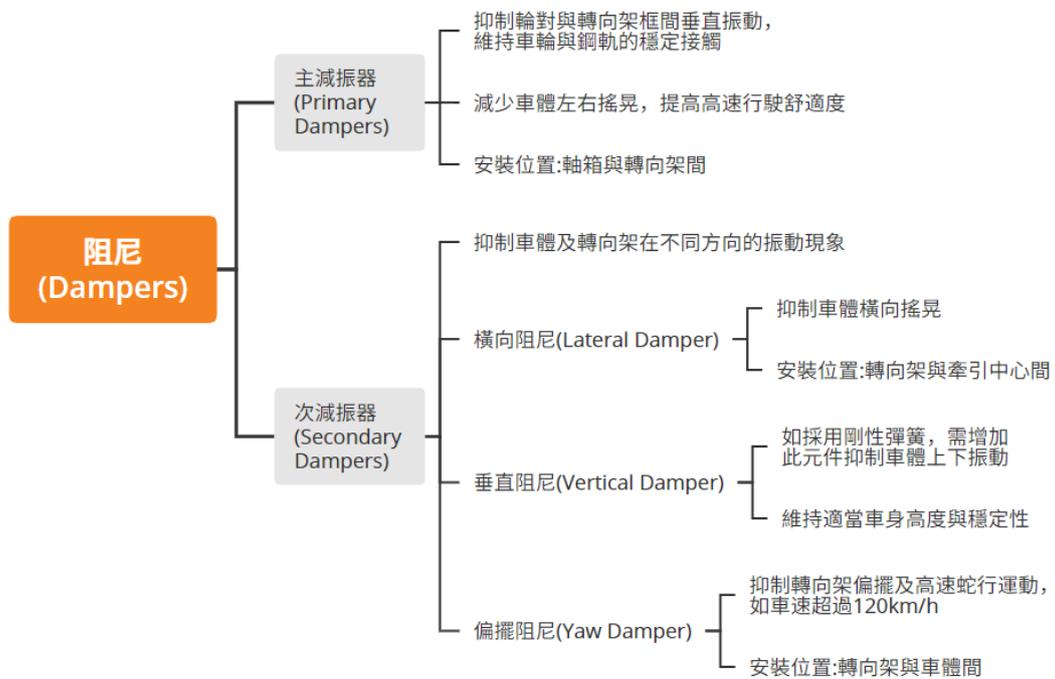


圖 3-33 阻尼設計型式及功能分類

相關阻尼故障中，以偏擺阻尼功能失效影響較大，會使列車高速行駛穩定性下降及導致蛇行運動。阻尼平時維護可透過人員目視檢查是否有漏油污染情形發生，阻尼表面漏油案例如圖 3-34。

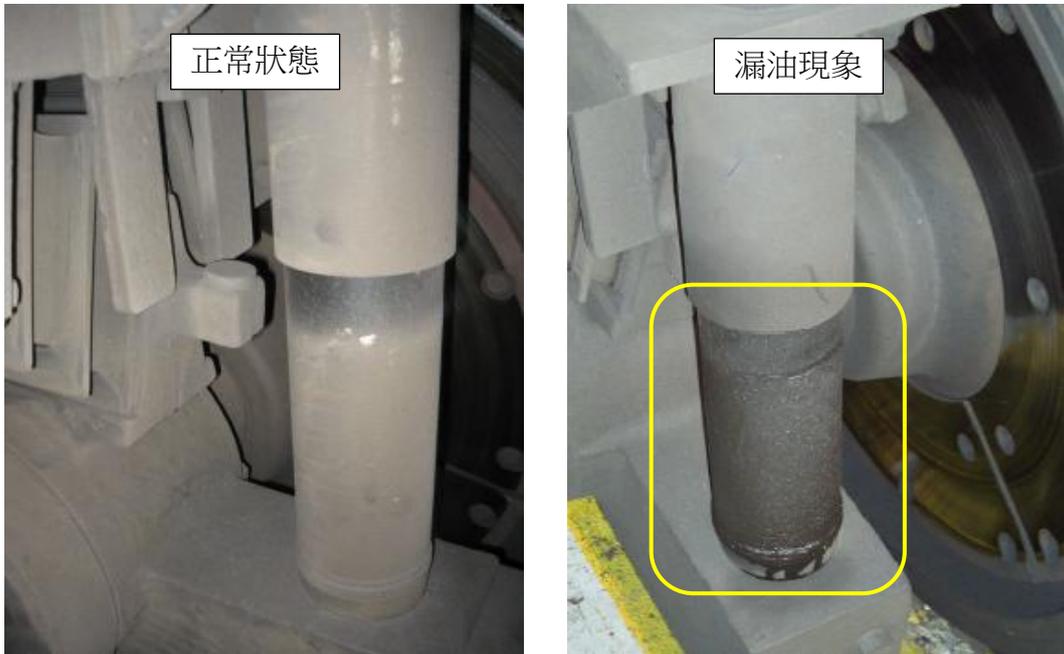


圖 3-34 阻尼表面漏油案例

4. 車輛牽引力及轉向力的有效傳遞 (Traction Force Transmission)

鐵路車輛動態運行條件下產生的縱向力及橫向力（如牽引力/煞車力及轉向力等），必須藉由輪對、轉向架與車體三者間進行有效的連結傳遞，以維持車輛行駛穩定性，故車輛各傳遞元件故障或功能失效，將可能會使車輛動態性能降低。

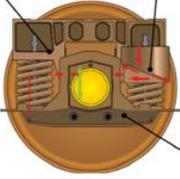
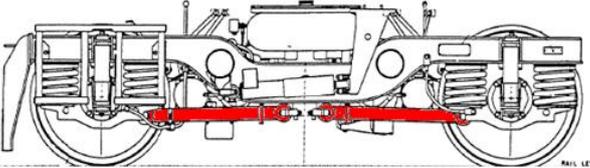
(1) 轉向架主要力量傳遞元件：各元件功能說明如圖 3-35。



圖 3-35 轉向架主要力量傳遞元件功能說明

(2) 傳遞元件：圖示說明如表 3-12。

表 3-12 傳遞元件圖示

元件名稱	圖示
輪對導框 (horn guides)	
滾動橡膠環 (rolling rubber ring units)	
徑向臂樞軸襯套 (radial arm pivot bushes)	
牽引桿 (traction rods)	

(3) 次級牽引：主要負責在車體與轉向架間傳遞牽引力與制動力，功能及重要元件說明如圖 3-36。

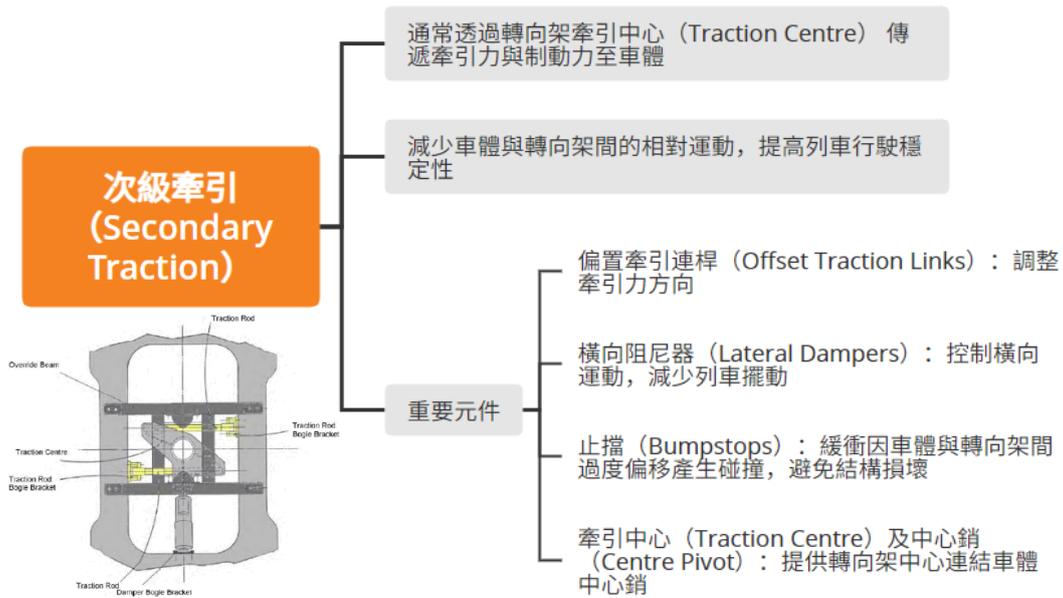


圖 3-36 次級牽引功能及重要元件說明

5. 轉向架位移限度之元件設計

為避免列車因行駛過彎、加減速度，及懸吊系統故障等狀態下，車體與轉向架間產生過度的相對運動及碰撞，以確保列車行駛穩定性，故轉向架設計有以下元件以具備各方向移動限度的功能，如圖 3-37。



圖 3-37 轉向架位移限度之元件設計

車輪缺陷與磨耗 (Wheel Condition)

車輪尺寸是否符合規範，會直接影響車輛行駛穩定性及軌道鋼軌的使用壽命，故在維修管理上落實預防檢查相對重要。

以下為常見車輪缺陷與可能潛在風險說明，可提供作為列車運行穩定性及故障原因分析之參考，如表 3-13。車輪磨耗、滾動接觸疲勞及剝落缺陷樣態如圖 3-38。

表 3-13 車輪常見缺陷與可能潛在風險

缺陷/磨損狀況	可能潛在風險
輪緣過高 (flange too high)	輪緣尖端可能接觸非軌道頭部 (道岔區轉轍器與橫渡線, S&C)，增加車輪脫軌風險
輪緣過短 (flange too short)	輪緣深度不足，造成車輪爬軌風險增加
假輪緣 / 圓錐度不佳 (false flanges, poor conicity)	轉彎性能變差，及造成車輪於轉轍器尖軌爬軌(points climb)，影響車輛行駛穩定性
輪徑真圓度不良 (out of rounds, run out)	乘坐舒適度降低，增加軌道損害風險
輪廓不連續 (profile discontinuities)	動態不穩定，影響車輛運行平穩性
輪徑不匹配 (mismatched diameters)	影響轉向架轉向性能 (crabbing 橫行現象)，增加 Y/Q 比值，影響車輛穩定性與軌道磨耗
車輪踏面凹陷 / 平坦 (tread cavities, flats)	可能與牽引/制動控制問題有關，增加軌道衝擊力，導致輪軸疲勞
車輪滾動接觸疲勞剝落 (RCF shelling)	可能是車輛牽引/制動控制問題的徵兆，會加速軌道損壞
輪距異常 (back-to-back dimension)	輪距過小，輪對可能卡在軌道間，或造成護軌 (check rail) 異常磨耗 輪距過大，輪對可能造成軌距擴大或變形，並可能撞擊道岔區岔心

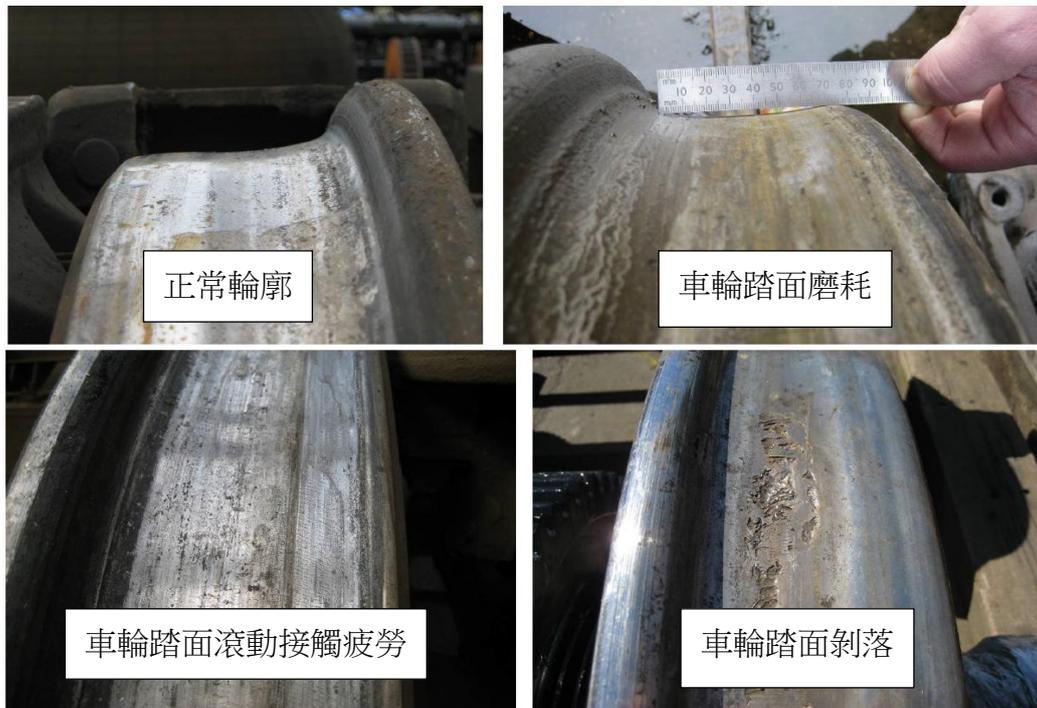


圖 3-38 車輪磨耗、滾動磨耗疲勞及剝落缺陷樣態

車輛包絡線量測（界限，Gauging）

主要目的為確保列車與基礎設施（如隧道、月台、橋樑、電線等），或與相鄰軌道上的列車之間具有足夠的間隙，以防止列車運行過程中造成與車廂碰撞或干涉情形發生。以下為涉及可能須重新量測車輛包絡線之情形，包含新車型導入、設計變更，或新路線啟用等，如圖 3-39。

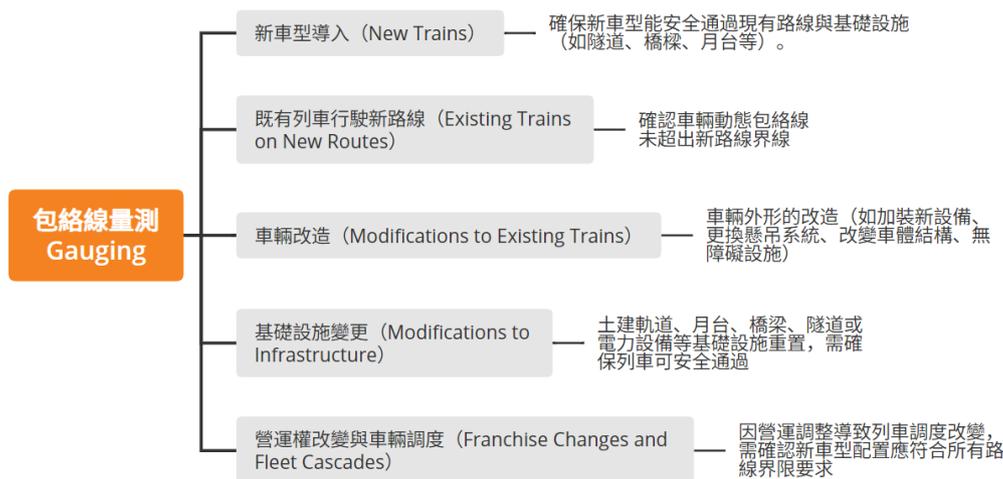


圖 3-39 包絡線量測執行之參考項目

1. 包絡線相容性驗證方式（Demonstrating Gauging Compatibility）

為評估車輛與欲投入營運路線之相容性，一般可透過包含車輛運行路線檢視、新車型或路線是否符合標準包絡線規範，及基礎設施修改與成本效益評估等項目進行檢核，常用分析方法之比較及說明如圖 3-40。

歐盟另訂有包絡線量測標準 EN15273-1 鐵路應用-包絡線-部分 1：一般基礎設施及車輛常用規則（Railway applications - Gauges - Part 1: General - Common rules for infrastructure and rolling stock），該標準主要係參照國際鐵路聯盟 UIC505-1 鐵路運輸車輛-車輛結構包絡線（Railway Transport Stock - Rolling Stock Construction Gauge）訂定。

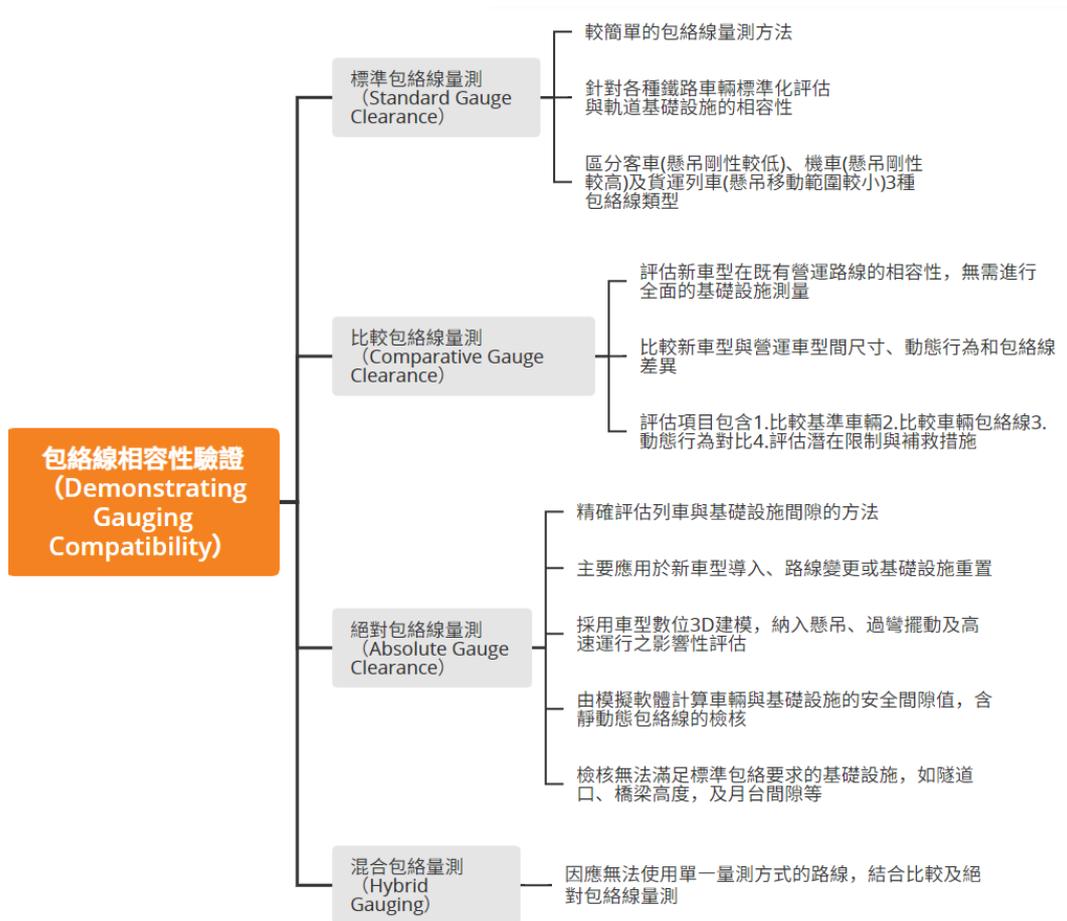


圖 3-40 包絡線相容性驗證方式

2. 車輛設計應考量之重點 (Vehicle Models and Deta)

車輛尺寸大小之適用性設計評估，應考量包含車體外型及容許值、列車運行路線可能造成之動態幾何擺動量 (geometric throws and dynamic movements)、車輛使用載重範圍及懸吊系統失效等參數定義。

2.1 車體於曲線段內側與外側擺動行為 (Inner and Outer Throw)

列車動態運行通過曲線段時，車體相對轉向架或軌道會產生橫向位移量，內側擺動量會影響月台、號誌及通訊設備、隧道壁等基礎設施的間隙設計要求，外側擺動量會影響相鄰列車或鄰近軌道之安全間隙，示意說明如圖 3-41。

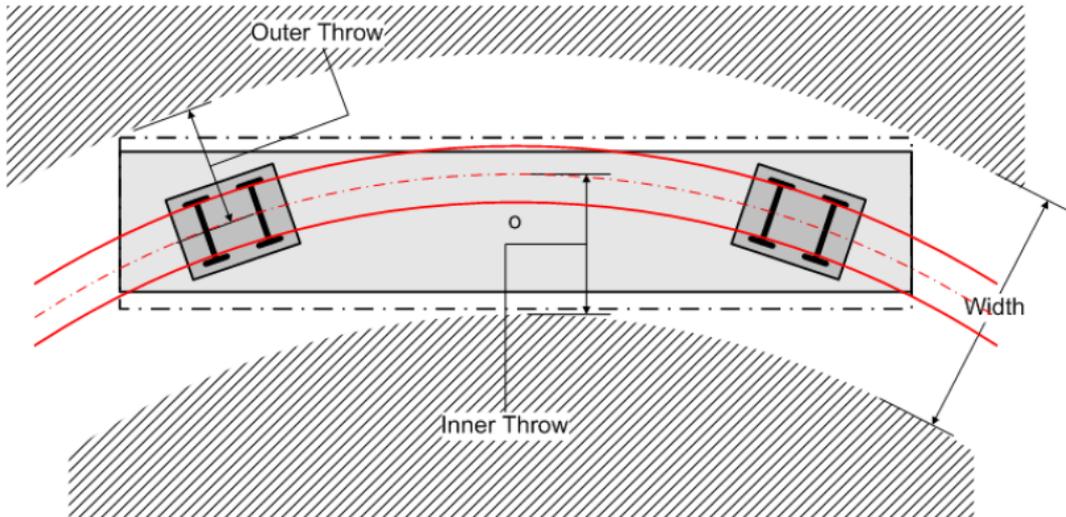


圖 3-41 車體於曲線段內外側擺動範圍示意

2.2 車輛包絡線模型最大化設計應考量項目(A Gauging Vehicle Model)

在兼顧旅客乘坐舒適性及路線營運限制條件下，為使車廂使用空間極大化，車輛尺寸設計上須將車輛包絡線模型納入考量，其評量參考指標包含移動量、外型尺寸及容許值等 3 項，說明如圖 3-42。

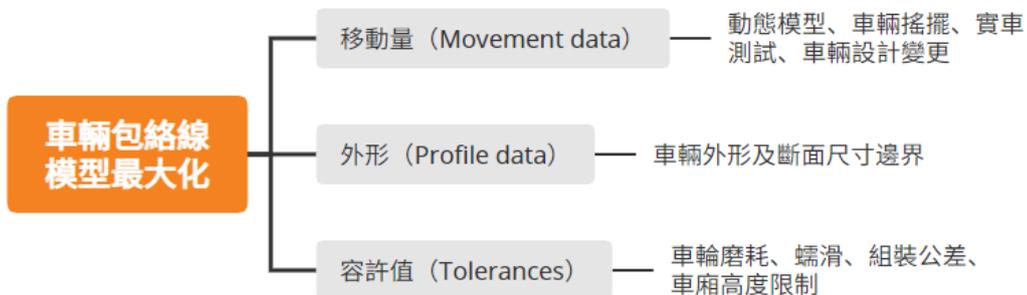


圖 3-42 車輛包絡線模型最大化設計考量項目

2.3 車輛設計變更之動態模型評估 (A Dynamic Format Gauging Model)

車輛設計變更時，應綜合考量車輛之動態行為、與基礎設施之相容性等，確保車型導入營運路線之安全性，相關評估參考指標彙整如圖 3-43。

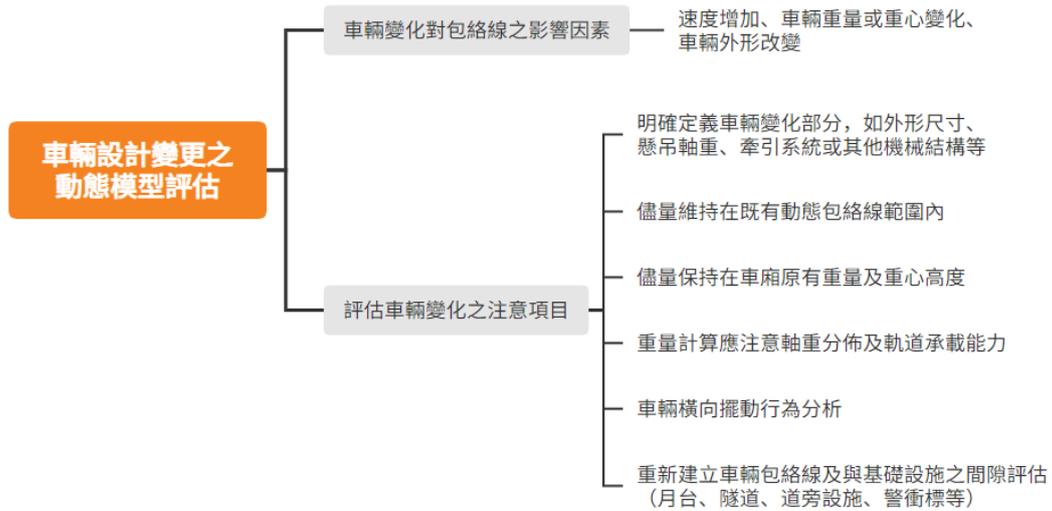


圖 3-43 車輛設計變更之動態模型評估參考指標

2.4 模型驗證 (Model Validation)

主要目的為檢核車輛動態模擬結果是否符合實際運行狀態之需求，主要驗證項目包含車輛輪重測試 (wheel loads)、輪對扭轉剛性測試、橫向擺動測試 (sway test)、轉向架旋轉阻力 (X-Factor, 轉向架旋轉剛性，與曲線通過能力有關)，及乘坐舒適性測試 (ride test) 等。

列車出軌類型及可能成因 (Derailment)

以下為探討幾種常見列車出軌類型，並說明車輛及軌道可能影響的因素，可提供作為事故調查原因分析之參考資訊，說明如圖 3-44。

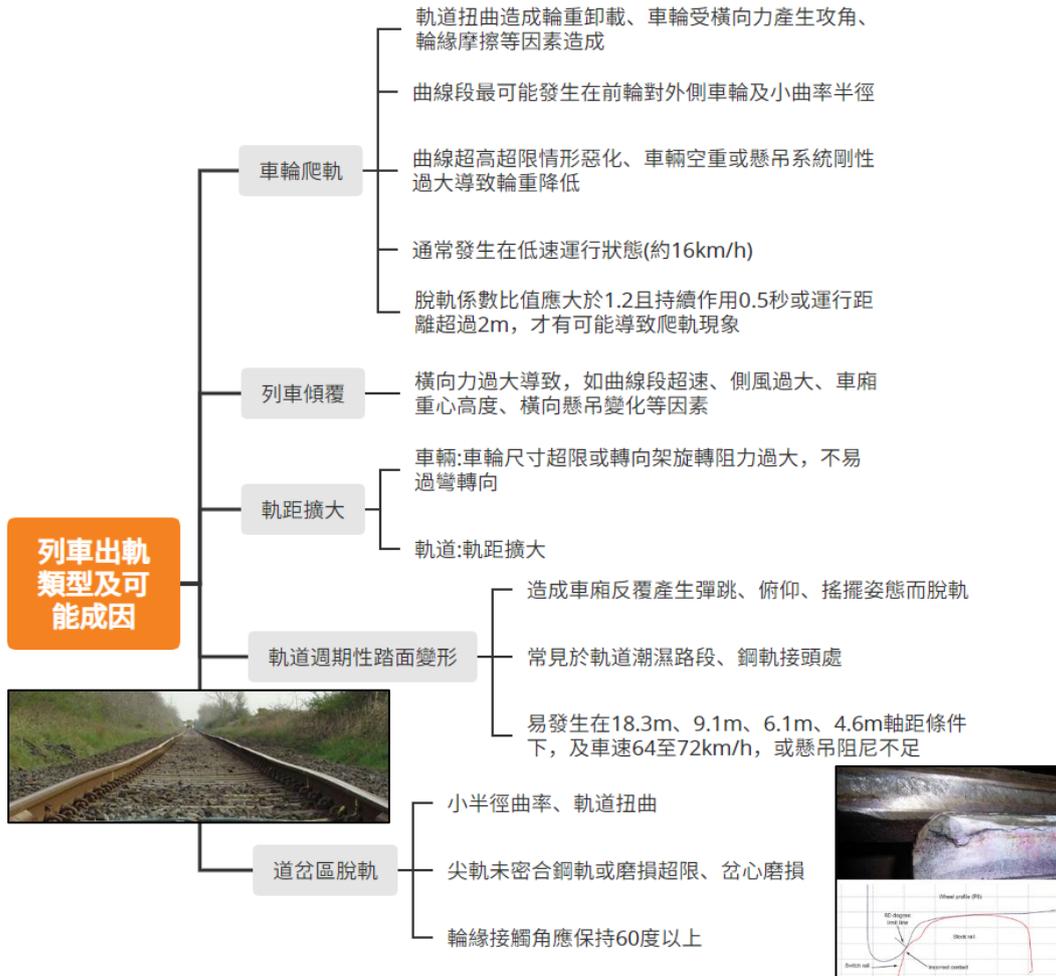


圖 3-44 列車出軌類型及可能成因

車輛測試 (Vehicle Test)

主要利用車輛靜動態測試,驗證車輛設計可靠度及符合法規要求,確保列車運行穩定性及安全性,相關測試項目及援引之國際規範說明如圖 3-45。

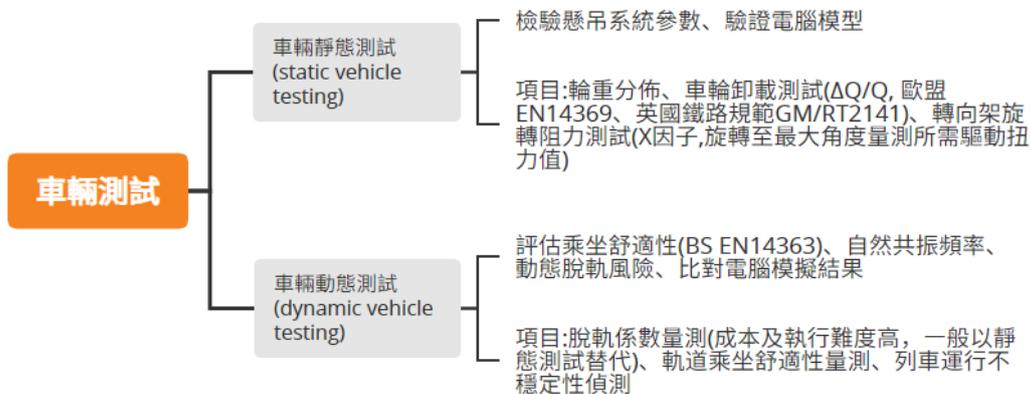


圖 3-45 車輛靜動態測試項目及援引之國際規範

二、第三日 (12/5)：歐洲軌道交通管理系統 (Introduction to ERTMS -European Rail Traffic Management System)

歐洲軌道交通管理系統 ERTMS (European Rail Traffic Management System) 組成架構，包含歐洲列車控制系統 ETCS (European Train Control System)、全球行動通訊系統-鐵道 GSM-R (Global System for Mobile communication-Railway)、及正在發展的歐洲營運規則 EOR (European Operating Rules) 及歐洲交通管理層 ETML (European Traffic Management Layer)，其架構說明如圖 3-46。

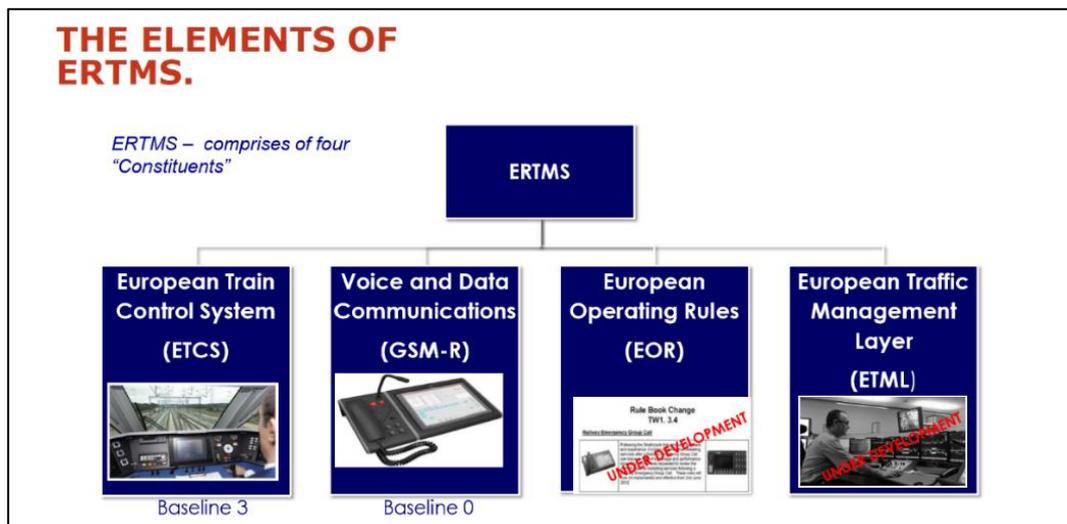


圖 3-46 歐洲軌道交通管理系統組成架構

依照 ETCS 號誌使用，將 ERTMS 分為五個等級，主要對列車移動授權、列車佔據訊號偵測、列車手動/自動駕駛，及列車煞車保護距離等評估指標進行分類，其說明如圖 3-47。

ERTMS Level	Type	Movement Authority Transmission	Train Detection	Driver Interface	Protection
*Level 0	OVERLAY	SIGNALS	Conventional Trackside	Speedometer only	Max speed
*Level NTC	OVERLAY	SIGNALS	Conventional Trackside	Speedometer only	Max speed AWS/TPWS
LEVEL 1	OVERLAY	EUROBALISE AT SIGNAL	Conventional Trackside	SIGNALS and ETCS DMI	Max speed PSR, TSR and distance
		EUROBALISE AT SIGNAL + INFILL			
*LEVEL 2	OVERLAY	GSM-R	Conventional Trackside	SIGNALS and ETCS DMI	Max speed
	NO LINESIDE SIGNALS			ETCS DMI	PSR, TSR and distance
LEVEL 3	NO LINESIDE SIGNALS	GSM-R	Trainborne (Virtual Moving Block)	ETCS DMI	Max speed PSR, TSR and distance

圖 3-47 ERTMS 等級介紹及評估指標

等級 0 (Level 0)

1. 列車配有 ETCS 設備，軌道設有常規號誌，但沒有底層列車保護或告警系統。
2. 僅防止超過列車運行最高速度。

等級 NTC (Level NTC)

1. 列車配有 ETCS 設備，軌道設有常規號誌，且具備底層列車保護或告警系統；並透過特定的傳輸模組將列車上的 ETCS 系統與行經路線上的國家列車防護系統 NTC (National train protection systems) 互相通信。
2. 除超速限制外，另具備自動告警系統 AWS (Automatic Warning System) 和列車防護&告警系統 TPWS (Train Protection & Warning System)。

等級 1 (Level 1)

1. 藉由地面裝置感應器 (Balise or Euroloop) 間歇性地更新移動授權範圍 MA (Movement Authority)。
2. 駕駛必須遵守行駛軌道的號誌。
3. 提供列車自動防護 ATP (Automatic Train Protection) 功能，但可能會影響路線使用容量。

等級 2 (Level 2)

1. 根據列車裝備，提供使用或不使用路線號誌的控制系統。
2. 由無線閉塞中心 RBC (Radio Block Centre) 透過 GSM-R 持續性低傳送 MA 給列車，並間歇性地提供列車位置，說明如圖 3-48。

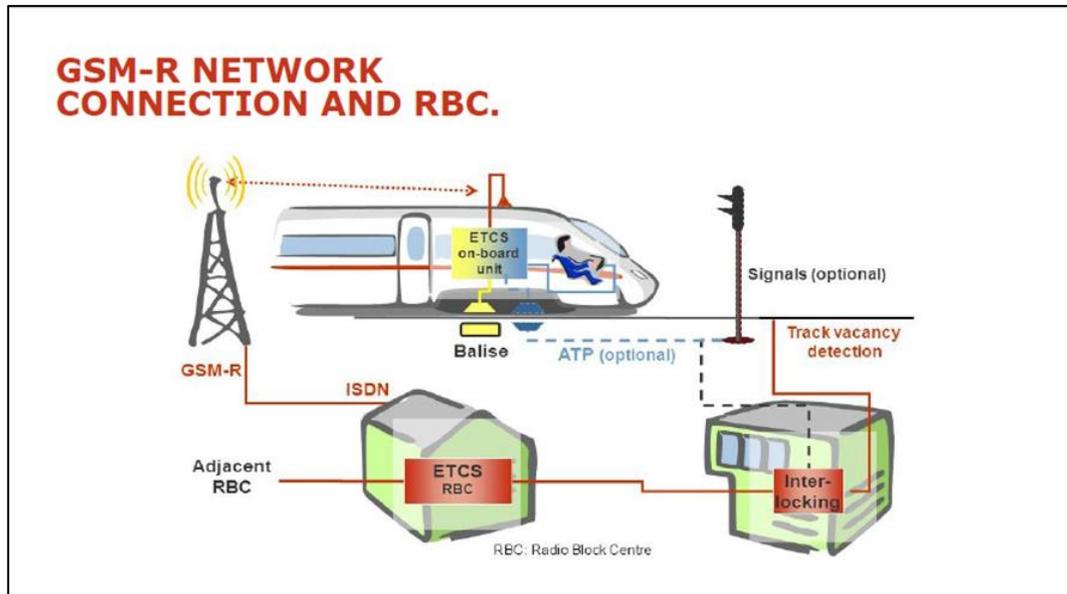


圖 3-48 GSM-R 通信系統示意圖

3. 地面裝置感應器傳送固定訊息。

等級 3 (Level 3, 英國目前未規劃使用, 主要考量路線建置及改造成本、施工複雜度及風險性)

- (1) 由列車傳送位置資訊和運行狀況。實現移動閉塞 (Moving Block) 訊號。
- (2) 除了道岔區域, 可以移除大部分軌道上的檢測設備。最大化地使用路線容量。

小結

ERTMS 並非一個完整的號誌系統, 但具備 ATP 功能, 且能與列車上的牽引裝置和煞車系統介接; 在軌道上, 仍需配置電子連鎖 (interlocking)、控制中心 (control centre) 或相關列車偵測設備。連鎖系統能避免列車路線的衝突以及確保列車進路的安全, 而 ERTMS 需要使用電子連鎖, 列車偵測設備則使用軌道電路 (track circuits) 或計軸器 (axle counters) 的形式, 說明如圖 3-49。

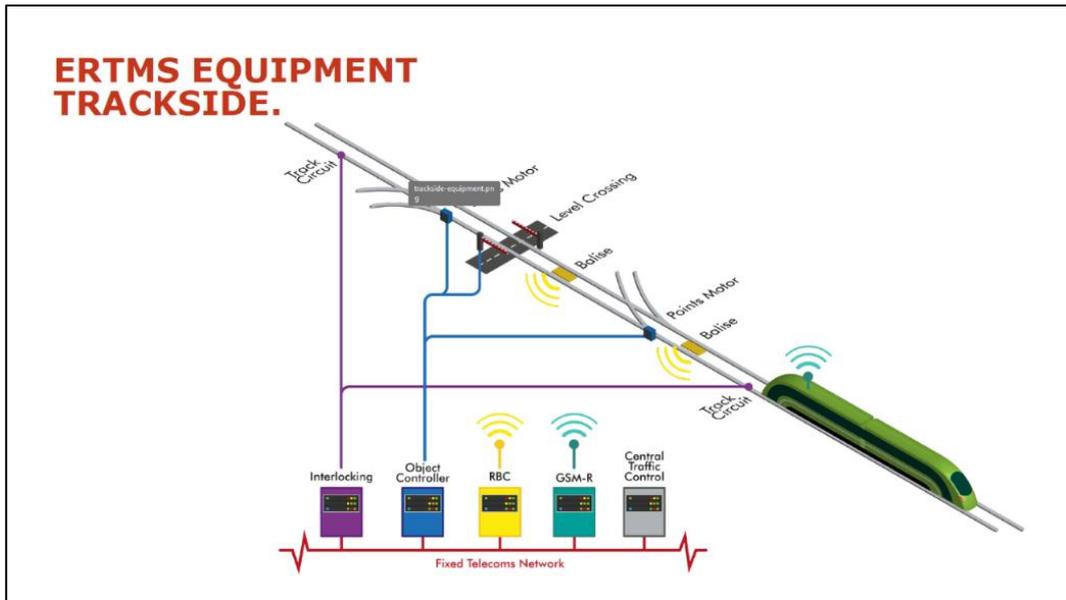


圖 3-49 ERTMS 軌道設備配置

在車載設備上，歐洲維生電腦 EVC（European Vital Computer）是車載系統的核心。它應用了 ETCS 的主要邏輯功能，提供 ERTMS 所有車載功能，包括：列車界面、速度偵測、感應器傳輸模組等，並符合系統安全完整等級 4（Safety Integrity Level 4, SIL4）的標準及應用，能計算列車的煞車曲線以配合給定的移動權限和列車特性等。如圖 3-50 及 3-51。

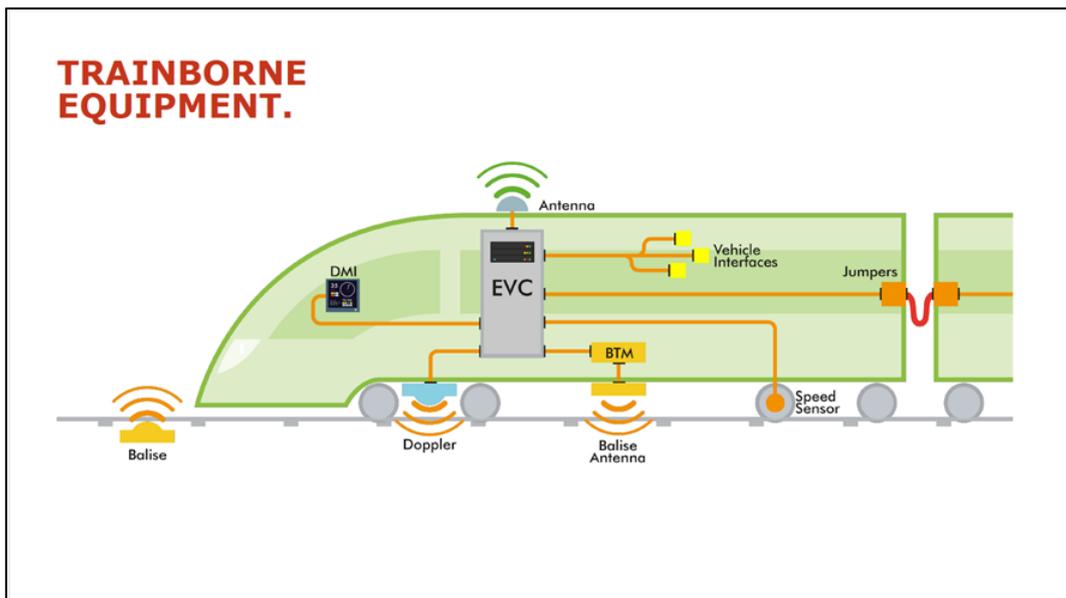


圖 3-50 列車車載設備示意圖

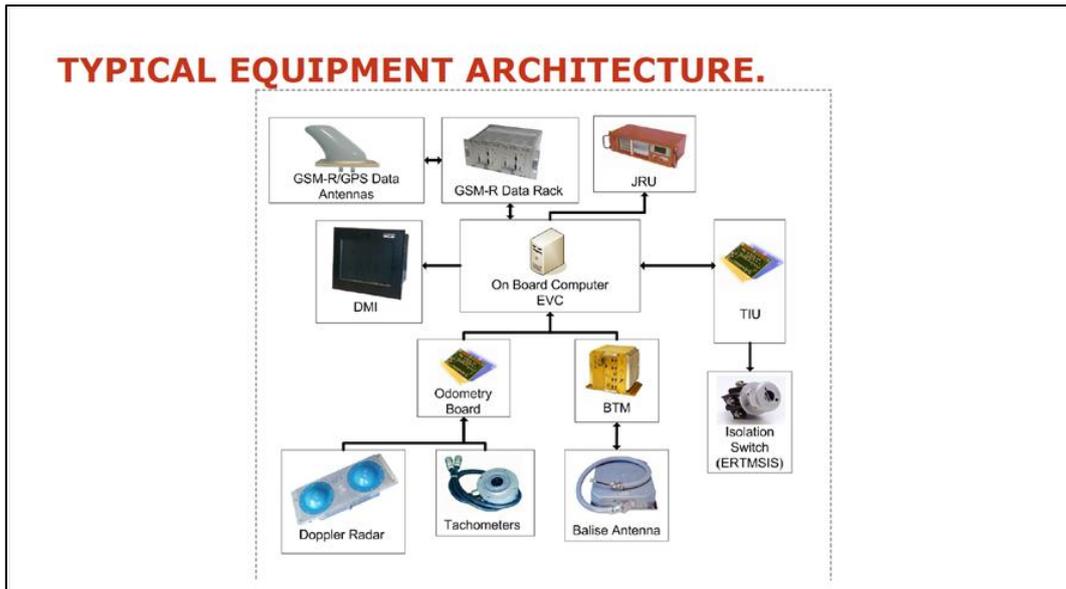


圖 3-51 等級 2 車載設備架構圖

通過這次的課程可以系統性地認識 ERTMS，初步了解當前英國鐵路網號誌系統發展概況，如圖 3-52，並進一步認識 ERTMS 是一種行車控制和通信系統，其目的為提升歐洲地區鐵道運行的安全性、載運量和互通性，並提供列車防護功能。

CURRENT UK ERTMS TRACKSIDE DEPLOYMENT.

Line1	ERTMS Configuration	Special Features	ERTMS Trackside Supplier	Status (as at 2021)
Cambrian Line	Level 2 – No Signals	Lightly used lines, passing loops	Ansaldo STS (now Hitachi STS)	Commissioned 2011
Thameslink Core	Level 2 Overlay	Automatic Train Operation	Siemens	Commissioned 2019
Paddington to Heathrow (Great Western)	Level 2 Overlay	Tunnel Operation – replacing GW ATP	Alstom	Delivery in progress
East Coast	Level 2 – No Signals	Heavily used line with freight/OTM/Charter and Heritage users	Siemens	Delivery in progress
High Speed 2	TBC	High Speed operation (350kph), ATO	TBC	Procurement

圖 3-52 英國鐵路網現行 ERTMS 發展概況

英國鐵路希望透過通用標準，統一號誌系統減少鐵道運營商於不同地區間維護的需要，節省基礎設施和運營成本；優化列車運行和減少延誤，提高鐵道運輸效率，進而減少鐵道網絡對環境的影響，如能源消耗和排放；借助即時數據傳輸和優

化路線，列車可以在不影響安全的情況下提高速，縮短長距離鐵路旅行的時間。如圖 3-53 至 3-54。

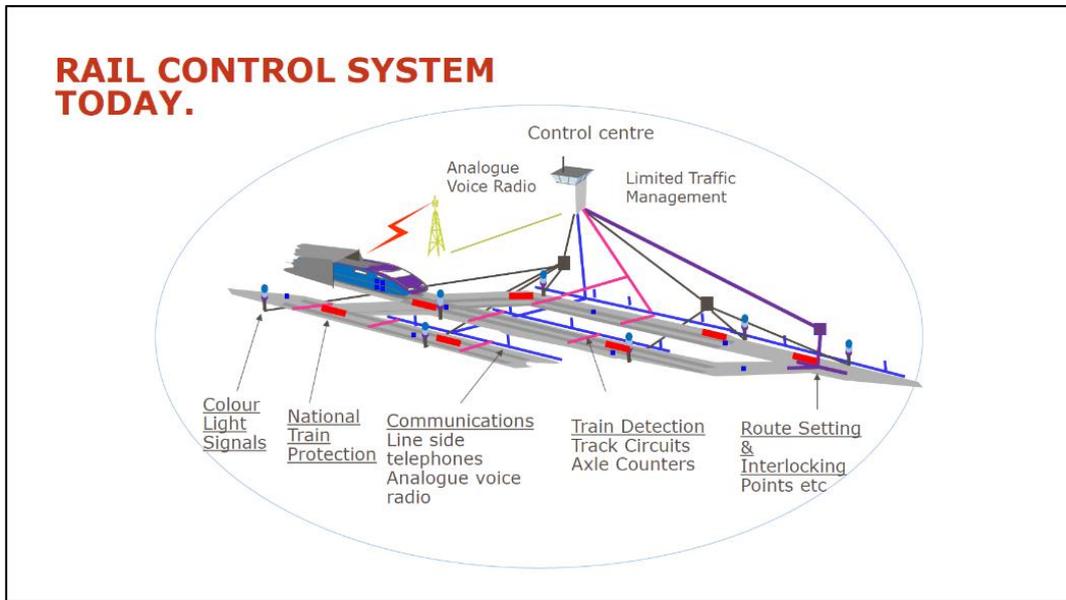


圖 3-53 現行鐵道控制系統

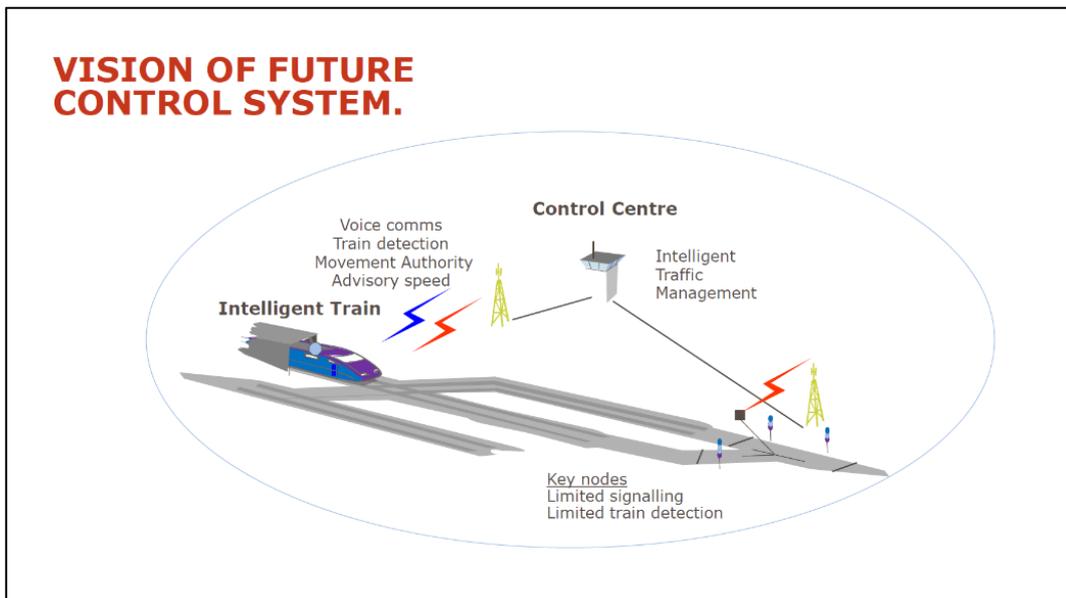


圖 3-54 鐵道控制系統未來藍圖

肆、建議

本次參與英國機械工程師學會舉辦之「車輛動態及車輛-軌道交互作用」及「歐洲軌道交通管理系統」，課程內容相當多元廣泛，在車輛動態課程中所探討包含鐵路車輛之運動行為、輪軌介面微觀蠕變現象、轉向架曲線段運行特性，及轉向架主/次懸吊系統設計重點，與對列車行駛不穩定性的關聯性等，可作為未來鐵道事故調查涉及列車出軌分析議題之參考資料，協助調查人員釐清車輛故障成因及軌道缺陷樣態。

另有關歐洲軌道交通管理系統部分，簡介英國鐵路現行號誌系統等級及建置概況，可協助調查人員了解號誌系統基本安全運作機制，及列車自動防護功能之運作模式，並可作為未來因營運單位號誌系統故障導致鐵道事故之參考資訊。

本案建議可安排本會出國人員進行課程內容分享，將車輛動態行為及號誌系統相關資訊與同仁進行知識分享與經驗交流；建立列車動態行為及輪軌介面技術分析參考簡報，逐步累積鐵道事故調查車輛及軌道系統之專業知識資料庫。

參加「車輛動態及車輛-軌道交互作用 (Vehicle dynamics and vehicle-track interaction)」及「歐洲軌道交通管理系統 (European Rail Traffic Management System, ERTMS)」課程

服務機關：國家運輸安全調查委員會

出國人職稱：鐵道調查組次席調查官 / 運輸工程組助理研究員

姓名：林彥亨 / 劉千慈

出國地區：英國 / 倫敦及考文垂

出國期間：民國 113 年 12 月 1 日至 12 月 7 日

報告日期：民國 114 年 2 月 26 日

建議事項：

	建議項目	處理
1	建立列車動態行為及輪軌介面技術分析參考簡報，累積鐵道事故調查車輛及軌道系統之資料庫，提供會內調查人員參考。	<input checked="" type="checkbox"/> 已採行 <input type="checkbox"/> 研議中 <input type="checkbox"/> 未採行
2	建議參訓人員將課程內容進行重點整理，並以簡報說明之方式，與會內同仁進行知識分享。	<input checked="" type="checkbox"/> 已採行 <input type="checkbox"/> 研議中 <input type="checkbox"/> 未採行