



「集電弓—電車線」系統在 鐵路提速的技術課題

黃晟豪／國立台北科技大學車輛工程系 助理教授

隨著前瞻計畫的進行，以及台灣鐵路網的發展，國內目前正積極發展環島鐵路電氣化、鐵路立體化、雙軌化、鐵路提速等鐵道路網優化建設。以臺鐵花東雙軌化為例，在改善路網運量瓶頸的同時，鐵道系統之建設強度，亦將未來預期達到時速 160 km/h 的東部快鐵作為重要考量，而預作準備。因此在集電弓與供電線的接觸行為上，便面臨許多提速時的關鍵技術課題。本文先從電車線與集電弓個別系統進行簡介，再導入車弓網耦合關係之介紹，說明影響車弓網接觸穩定性的幾項關鍵設計因子，及其基本設計概念。最後以提速角度，探究集電弓—電車線系統之設計，在提速過程中可能面臨的問題，以及各車弓網接觸設計因子之間的耦合影響關係。從文中可以發現，車弓網接觸是一複雜耦合動態行為，若要達到系統最佳化的效果，需將所有因子都納入考慮，進行統一調整。因此必須了解每一項因子背後的意義、確實掌握每一項因子調整的能力、具有各因子耦合影響分析的技術。集電弓—電車線系統在鐵路提速的技術課題，是一個既深又廣的大問題，本文整理提速過程可能面臨的相關問題，有賴國內相關學者專家持續探究，以持續精進我國自主技術。

全國高快速鐵路網整體規劃介紹

我國鐵路運輸系統自 1887 年全臺鐵路商務總局開始規劃以來，歷經超過 100 年的建設，直到 1991 年臺鐵南迴線通車，才使得環島鐵路網正式成形，完整串接我國北中南東之交通運輸，也奠定了我國整體鐵路網的雛型。爾後隨著人口的成長以及對鐵道運輸的需求，又陸續興建各種都市捷運與城際鐵道運輸系統，1996 年台北捷運開始營運，開啟都市大眾運輸新紀元，至 2020 年時台北捷運年運量已近 7 億人次。隨後台灣高鐵於 2007 年完工通車，加入西部運輸走廊服務，成功串聯北高兩地形成一日生活圈，其安全快捷的運輸方式，為台灣西部走廊帶來關鍵性的改變，除造成西部走廊航空運輸完全改變為高速鐵路運輸以外，更促使高鐵、台鐵、捷運等鐵道系統分工更加明確。整體鐵道網發展至今，從高鐵、臺鐵，到都會捷運，已建構遠程運輸、城際運輸、都市捷運等層次分明之鐵道系統，提供民眾不同旅運特性之運輸服務。

隨著高鐵通車營運逾 15 年，其高速、準時、安全且載運量大等特性深受國人依賴，已成為影響臺灣國土空間及區域發展的重要骨幹，並為我國西部生活圈帶來顯著改變。我國西部走廊於民國 80 年代，搭乘鐵道運輸完成台北高雄之旅程最短時間約需 4.5 小時，當時城際旅行並不方便，直至高鐵通車後，北高旅運時間可以大幅縮短至 90 分鐘，大幅增加城際旅行的可能性與便利性，因此促使西部都市間交流更加緊密頻繁，讓整個西部走廊成為一日生活圈，時至今日，民眾已習慣一日內完成北高來回的差旅行程，改變了以往的生活型態。

因此越來越多民眾認為我國交通運輸應以鐵路系統作為國家發展之基石，並提升整體路網營運速度，未來此一高快速鐵路網完成後，透過鐵路快速聯繫，將使各區域資源充分共享共榮，進一步帶動我國交通、產業、文化、觀光的发展，提升國家經濟發展競爭力，成為臺灣區域均衡再發展的重要骨幹(如圖 1)。

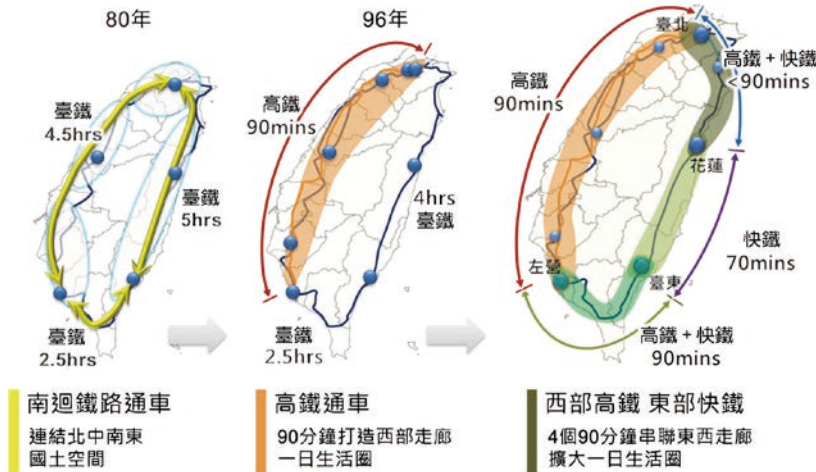


圖 1 全國高快速鐵路網目標願景 (來源：交通部鐵道局)

檢視我國整體運輸能量，可以發現東部地區與西部地區差異極大，特別是目前鐵路系統運輸效率，在東、西部的時間差異可達接近 3 倍 (如圖 2)，為縮小此一差異，近年來政府開始致力於改善臺灣東部交通，如公路建設：蔣渭水高速公路、蘇花公路改善計畫、台 9 線南迴公路拓寬改善後續計畫及台 9 線拓寬改善工程等。

但相較於公路系統，鐵路系統的高運量與環保效益，在綠能運輸意識抬頭的今日，受到極大的矚目與期待。並且在南迴鐵路電氣化通車後，西部幹線的高速電氣列車已可以由高雄直接開往台東、花蓮，因此如何改善東部鐵道基礎建設，以提升鐵道營運速度，是非常重要的課題。

政府近幾年透過前瞻計畫投入大量經費改善東部鐵

路運輸能量，並提出「東部快鐵」計畫，目的是透過改善上述東部鐵道運輸瓶頸，嘗試將臺鐵東部幹線既有路廊升級並將鐵路最高營運速度提速至 160 km/h，在不影響現行臺鐵鐵路營運的情況下，針對臺鐵窄軌系統，如何改善鐵道既有線形，以及土建鐵道、新建機電、號誌系統及交通立體化改善等設施，搭配電氣化、雙軌化工程等，朝快鐵營運速度 160 km/h 發展，並比照高鐵和捷運朝向自動控制逐步提升營運速度。

鐵道局並已於 108 年 11 月 19 日將「全國高快速鐵路網整體規劃」陳報交通部，作為未來鐵路網發展政策，後續將以「西部高鐵、東部快鐵」為主軸 (如圖 3)，臺北/高雄/臺東/花蓮間鐵路旅行時間皆可縮短至 90 分鐘以內，全國鐵路網 6 小時串聯環島，北、中、南、東皆



圖 2 東西部鐵道運輸效率差異與面臨問題 (參考交通部鐵道局資料製圖)



圖 3 東部幹線提速與需解決的幾項問題 (來源：交通部鐵道局)

將成為國土核心。東部幹線在「東部快鐵」的提速前提下，將面臨許多工程問題，鐵道承载力必須提升、列車採購標準必須改變（設計速度需大於 160 km/hr），當然，其中最重要的供電系統，也必須重新檢視原始設計是否能滿足 160 km/hr 所需，必要時必須做出設計改變。

鐵道供電系統與集電弓簡介

隨著環島鐵路電氣化的完成，我國主線鐵道車輛也將全面進入電氣車輛時代，我國鐵道系統的供電方式，主要可以分為「架空線」與「第三軌」兩種形式，其中又可細分為採用 DC 750V 或 AC 25KV 兩種電壓形式（如表 1）。一般而言，第三軌距離地面較近，容易使人員產生危害，因此不適合採用高電壓，且高電壓可能會因第三軌與地面過近，而造成與地面之間的放電行為，但第三軌具有佔用淨空小的特性，因此第三軌適合用在隧道、地下段、750V 供電網、專用封閉路權的鐵道系統，以台灣來說，各大都市重運量、中運量捷運大多採第三軌供電形式。而架空線系統，雖佔據較大淨空空

間，但對人員安全較有保障，且較適用高電壓傳輸，目前廣泛應用於台鐵與高鐵的系統中，做為供電之用。

以鐵道局在全國高快速鐵路網規劃中所提出的東部快鐵為例，台鐵採用的即是架空線系統，搭配 AC 25KV 電壓進行供電，其電力由變電站傳輸至車輛之過程中，設備項目可以分為地面設備與車載設備。電化鐵路之電力供應係自電力公司之 69/161 kV 變電所，將三相雙迴路電力引入牽引變電站，使用變壓器轉換成 25 kV 之電源，由電車線分別向上、下行方向供電，單相供電範圍約 20 公里。列車利用集電弓接觸電車線將電力引入，提供車輛所需電力，並以鋼軌及架空地線形成迴路，將電流回送至變電站。

在「地面設備」方面：電車線設備由電桿、桁架、落臂架、絕緣礙子、懸臂組、主吊線、接觸線及其他支持配件組成。其功能係將 25 kV 交流電線架於鐵道上方，並維持在固定高度，列車以集電弓碰觸電車線下緣將電力引入，以供應電力列車運轉所需電源。因行車運轉及安全需要，在不同的環境、地形採用不同型式之電車線設備（如圖 4）。

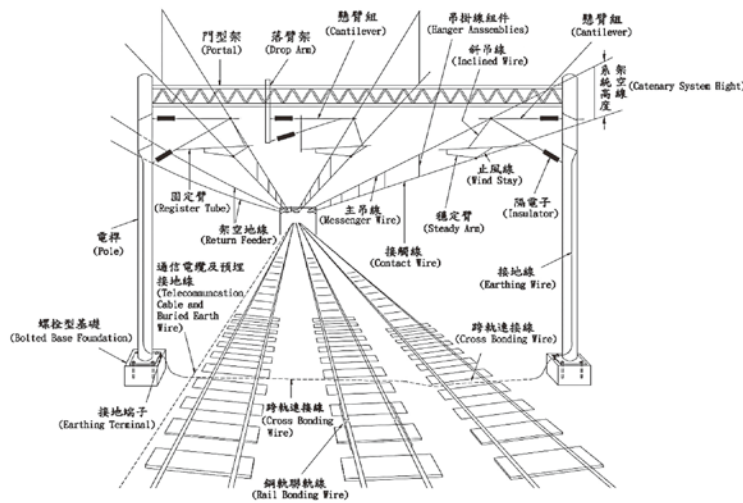





圖 4 架空線供電系統地面設備示意圖（來源：交通部鐵道局）

表 1 台灣常見鐵道系統供電形式

電壓	DC 750V	DC 750V	AC 25KV
第三軌	V		
架空線		V	V
實際應用案例	各都市捷運重運量與中運量系統	淡海輕軌、安坑輕軌	台鐵、高鐵
參考照片			

在「車載設備」方面：集電弓是列車車廂上的導電與集電設施，目的是與鐵道上的電車線正常接觸取得電力。集電弓一般由底座（底座框架、絕緣礙子等）、升降弓裝置（彈簧、電動缸、氣壓缸等）、主結構（上臂桿、下臂桿、運動機構、阻尼器等）、集電設備（集電舟、集電碳刷、導電線）與其他零散組件組成（如圖5）。

集電弓是鐵路車輛重要設備之一，是為需要電力和機械接口的車輛提供動力的重要裝置。一般鐵路車輛使用電力為動力源，此時集電弓的供給作用就是從電車線將實際電力傳送到鐵路車輛。其利用頂端的集電碳刷與接觸線接觸引導高電壓進入車輛內部作為動力來源。然而，集電弓引導成效的關鍵即是在集電碳刷的特性與接觸線的運動作用。集電碳刷係裝置於集電弓頂部的集電舟上，集電舟的造型類似雪橇形狀的倒置而得名，其設計非一整片的，而好像一個四角框架，中間鏤空。為了避免離線率（集電弓與電車線脫離太遠導電不良）過高或產生電弧，集電弓通常採弧形設計並設有支架。為了能夠使集電弓緊貼著高壓電纜，集電弓底部設有上升裝置，在升起後，會發出推力，逼使其不斷升高，直到碰觸到電車線電纜為止。

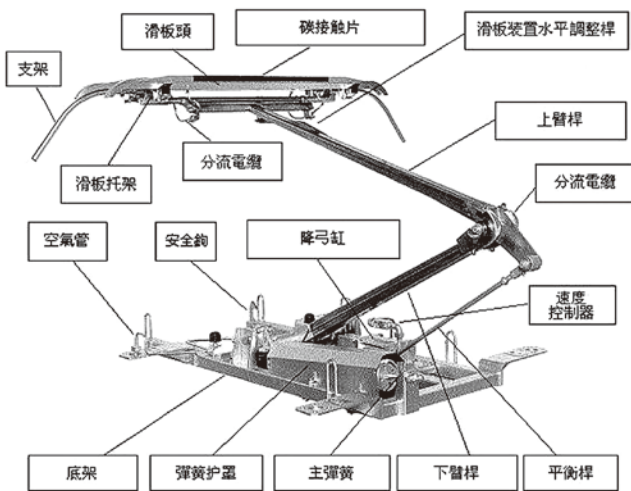


圖5 太魯閣號集電弓示意圖（來源：台鐵局）

車弓網耦合關係介紹

列車的動力來自於鐵道邊的高壓電，而電力輸送靠列車上的集電弓與電網接觸，由集電弓和接觸網組成的電力系統就叫弓網系統（Pantograph-Catenary system）。

弓網系統動力問題（pantograph-catenary dynamics）為研究電氣化鐵道車輛集電弓與接觸電網動態作用關係與振動問題的科學領域。電力車輛是通過集電弓滑板與接觸網導線間的滑動接觸而獲取電能的，當運動的集電弓通過電車線接觸網時，接觸網受到外力干擾，於是在集電弓和接觸網兩個系統間產生動態的相互作用，弓網系統即產生特定形態的振動。

集電弓都會帶有提供上舉頂升力的裝置，一般將集電弓上舉力設定在 70 ~ 85 N 之間，以確保集電弓與電車線能保持穩定接觸。當集電弓上舉力不足時，可能造成集電弓與接觸導線脫離接觸，形成離線，產生電弧和火花，加速電器的絕緣損傷，對通信產生電磁干擾，更嚴重的是直接影響集電弓受流，甚至會造成供電瞬時中斷，使列車喪失牽引力和制動力。而若將集電弓上舉力調整為較大時，雖可降低離線率，但接觸導線與集電弓間之磨耗增大，使用壽命縮短。

此外，集電弓底座直接安裝在車輛頂部，車輛在運行過程中的任何振動將通過車頂直接傳遞給集電弓，進而影響弓網動態相互作用。當鐵道存在幾何不平整時（實際線路常常如此），車輛與鐵道的耦合振動增強，而在車輛運行中這種耦合振動則更為劇烈。相應地，由車頂傳至弓網系統的振動干擾也將加大。因此，車弓網耦合問題，在架空線系統中便顯得相當重要（如圖6）。

電車線偏位

供電線若為直線布設，將與集電弓碳刷接觸在固

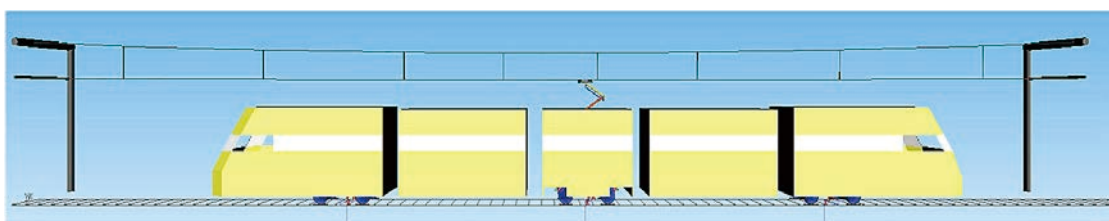


圖6 車弓網系統示意圖

定點位附近，造成集電弓碳刷產程局部磨耗，因此，一般而言會將供電線採「之字型」布設，期望能獲得較均勻的碳刷磨耗結果。一般常見偏位設定為左右各 150 ~ 250 mm 之間（如圖 7）。

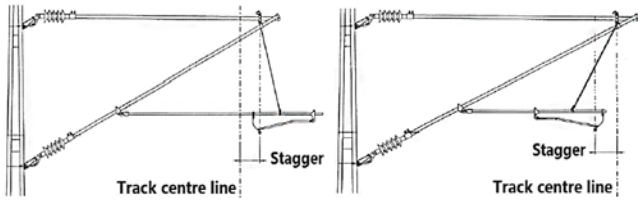


圖 7 架空電網偏位 (stagger) 架設方式示意圖
(照片來源：鐵道局)

電車線張力

為使弓網接觸性能穩定，通常會在電車線兩端吊掛重錘，對電車線施加張力，每一張力區間，均裝設自動張力調整裝置，利用平衡錘調整電車線的張力，使得接觸線保持水平，才能讓列車集電弓順利接觸通過（如圖 8）。



圖 8 電車線張力施加示意圖
(照片來源：鐵道局、新北捷運局)

集電弓上舉力

如前所述，集電弓的上舉力是維持弓網接觸的重要條件，太小的上舉力可能造成離線率增加，太大的上舉力則會造成碳刷過度磨損。營運單位可透過集電弓上的張緊彈簧調整螺絲進行調整，以找到最合適的集電弓上舉力（如圖 9）。

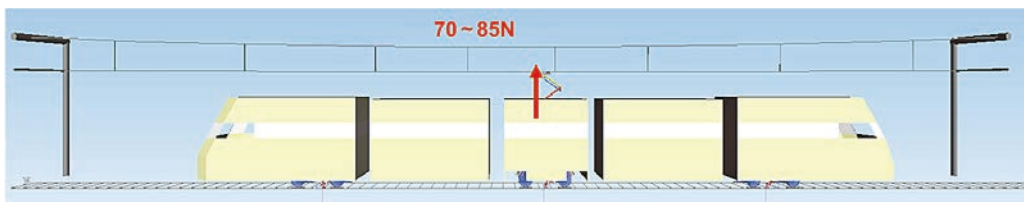


圖 9 集電弓上舉力與張緊彈簧示意圖

集電弓系統提速面臨的問題

隨著南迴鐵路電氣化的落成，越來越多電氣化鐵道車輛將從西部直接開往東部，且在未來全國高快速鐵路網的規劃下，目前全國新建或整建之鐵路系統，均直接考量電車線系統需可承受 160 km/hr 列車營運時速之設計，南迴電氣化以依此原則進行相關設計、進行中的花東鐵路雙軌化亦朝 160 km/hr 進行設計。

但當採用架空線供電的鐵道系統要進行提速時，需考慮的問題相當多，包括電桿與懸臂的結構強度、電車線截面積供電量是否充足、電桿設立間距、電車線張力、電車線偏位量設定以及許多絕緣與分隔區間的設定等，是一個非常全面且深入的問題。

集電弓上之碳刷安裝方式及品質與電車線安全息息相關，經由集電弓上之碳刷與接觸線平滑接觸將電力傳送至列車使用，電車線之接觸線以鐵道中心左右偏移方式架

設，讓集電弓碳刷與接觸線接觸面能平均左右移動，避免碳刷之磨耗程度不平均。集電弓碳刷需定期檢視，一有發現異常磨損或磨損已達極限，應立即更換，有瑕疵之碳刷在列車高速行駛下有可能造成電車線設備之損壞，依據經驗所得一旦發生集電弓與電車線糾纏事故，其設備損失都相當嚴重，所以集電弓碳刷之預防檢查非常重要。

弓網接觸不良，輕則造成集電弓碳刷磨耗異常（如圖 10），弓網離線率增加；重則可能導致及電弓勾落電車線造成行車安全事故^[1]。碳刷之磨損，主要成因有「機械磨損」、「化學磨損」、「火花磨損」等三種原因，而這些磨損的機制，又與集電弓之上舉力道、弓電線張力、鐵道列車動態、列車行駛速度、鐵道線型與不整...等極多因素相關，集電弓與電車線間接觸力道過大過小都不合適，因此在提速過程中，必須重新考量車弓網耦合動態下的最佳設定參數。

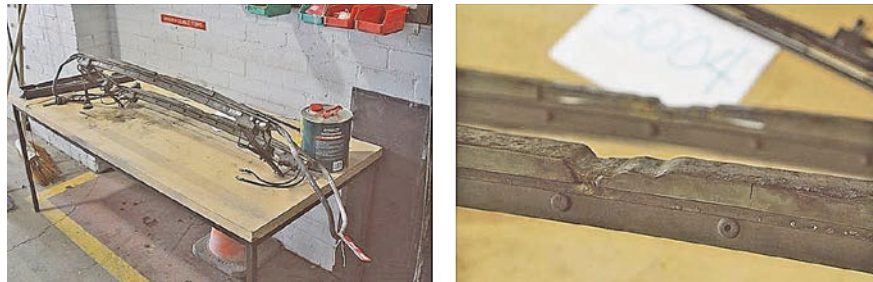


圖 10 弓網接觸不佳可能使集電弓碳刷不均勻耗（國外示意圖）

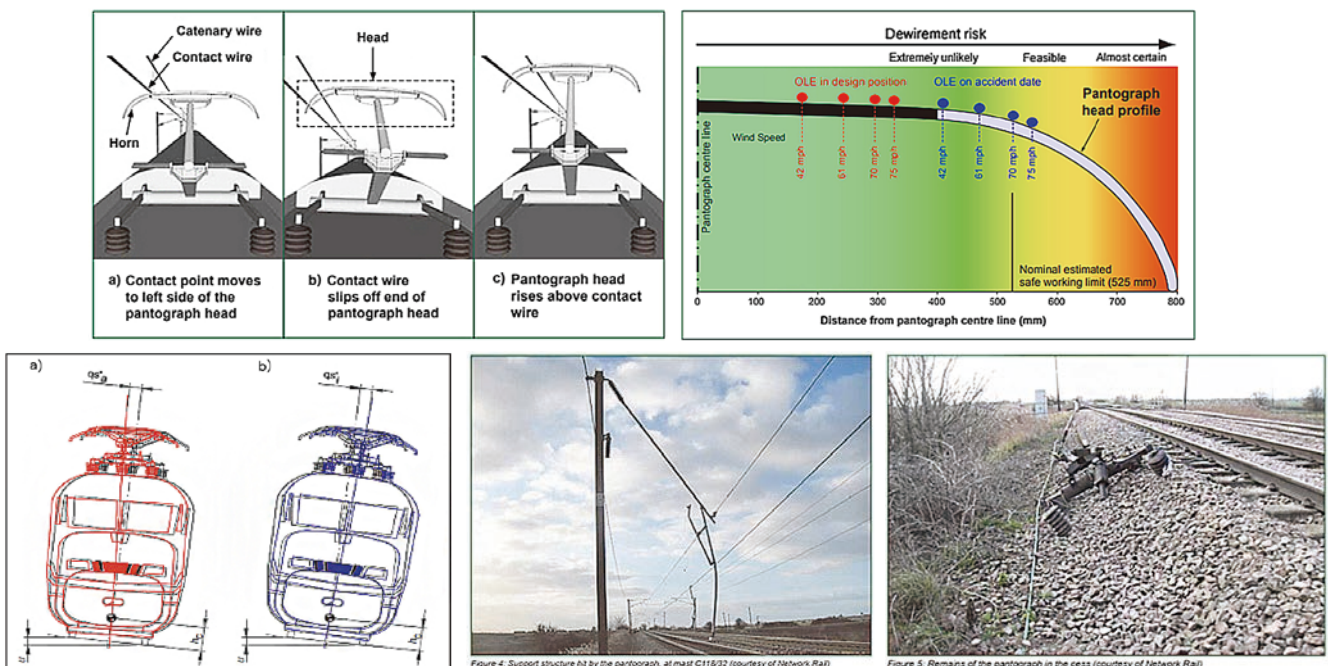


圖 11 列車動態改變，可能使弓網接觸行為改變^[2,3]

2012年在英國劍橋，更曾因為強風造成車輛橫向擺動幅度過大，致使集電弓脫離電車線後，自上方將電車線往下勾落之情況，由此可知，提速過程中，需考量車弓網耦合特性，以評估集電舟寬度是否可承受提速後的列車振動幅度（如圖 11）。

由此可知，在提速過程中，最重要的是要維持集電弓與電車線的合理接觸，然而集電弓屬與機構機械振動，電車線則為柔性波動，兩者的耦合振動行為極為複雜，再加上列車的高速行駛帶來的額外效應，因此提速過程中應考量的因素非常多，以下舉例幾項重要且必須的項目，但實際需考量因子將比下列項目還多：

電桿間距

列車提速，將對弓網接觸產生波動幅度較大的衝擊接觸力，要承受此一力量，可將電桿間距做適當調整，透過電桿吊掛強度，維持弓網接觸穩定性，特別是在小半徑彎道區段，電車線原本就處於波動較不穩定區間，電桿間距的調整影響也就越大。

電車線張力

電車線一般張力強度設定為 1,000 kgf (10KN)，在列車提速過程中，若其他條件（如電桿間距、集電弓上舉力）無法改變，可透過提升電車線張力達到維持弓網接觸穩定的效果。但張力提升有一定限制，以免電車線遭遇斷裂或疲勞的風險，另外提升電車線張力，也必須同時考慮是否減少每一段張力區間間距，以方便養護時調整正確張力。

集電弓上舉力

集電弓上舉力，是維持弓網接觸穩定的必要條件之一，適當的上舉力，可以讓弓網間產生良好的追隨性。一般集電弓上舉力設定在 70 ~ 85 N 之間，當其他因素（如電桿間距、電車線張力）無法調整時，可透過提升集電弓上舉力達到弓網接觸穩定的效果，但過大的上舉力可能會增加碳刷磨耗量。

弓網接觸發熱量

當列車提速時，因為弓網之間摩擦的增加，以及高速列車功率的提升，將造成集電弓與電車線的發熱量增加。依據材質特性，發熱量增加將導致集電系統最大可傳輸電流下降、摩擦黏滯行為增加，影響弓網接觸之間摩擦與磨耗等行為。

空氣動力因素

列車高速行駛時，集電弓所受空氣動力影響將大幅上升（如圖 12），隨著集電弓的順風與逆風運行，集電弓與風向所夾的弓角，將使集電弓產生一個額外向上或向下的推力，等同改變了集電弓的上舉力（如圖 13）。因此高速集電弓通常需考慮集電舟的外型設計^[4]，必要時需增加空氣動力穩定翼，協助維持弓網接觸力的穩定。並且需考量高速空氣動力所造成的噪音，必要時需增加導流罩等裝置，除可降低高速噪音外，亦可引導氣流順利通過集電弓^[5]。

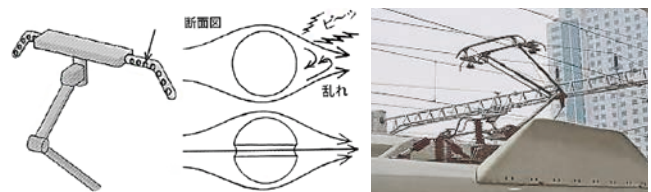


圖 12 高速空氣動力關係可能造成噪音問題^[6,7]，可透過設計改善，必要時需添加導流罩等裝置

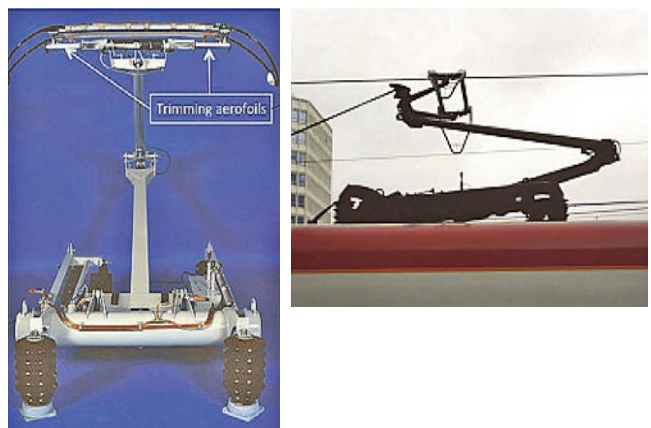
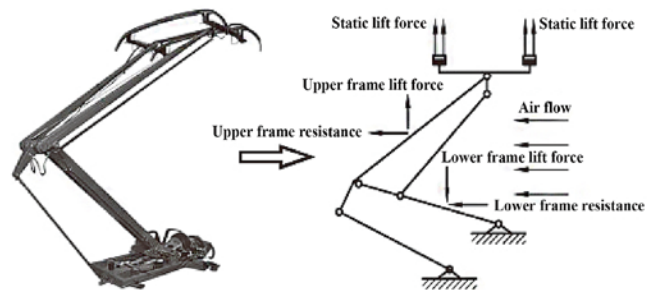


圖 13 列車在高速受空氣動力影響下，將影響集電弓上舉力，必要時需增加空氣動力穩定設計 (Train Aerodynamics, 2019)

電桿懸臂結構設計

因應不同車速與電壓電流，導電系統所需的電車線截面積與絕緣礙子數量亦不相同，且弓網接觸力也

有所改變，這都將影響電桿懸臂所受之力量。加上電車線偏位，將使電桿懸臂有很大幅度的外伸量，因此在列車提速時，需整體考量電桿懸臂的結構強度，以達到維持電車線懸掛穩定的要求。

電車線偏位

電車線偏位與集電弓碳刷磨耗有著密切關係，然而電車線偏位受限於吊掛系統，與電桿間距、電桿懸臂強度等因子息息相關，過於高或低頻的偏位頻率，都與弓網接觸摩擦力方向有關，最終將影響弓網接觸時電車線擺動行為，需與其他吊掛設備一起進行整體評估。

提速車輛牽引馬達功率

若提速時，車輛牽引馬達功率較原本大，意味著在相同供電電壓下，需要使用較大的電流量。同時，列車高速移動時，弓網摩擦發熱將使導電材質電阻率下降，所以提速時可能面臨原電車線截面積導電量不足的問題，必要時需更換截面積較大的導電線。一旦更換不同粗細的導電線，就將影響礙子使用數目，導電線自重也會增加，影響到電桿懸臂架的結構設計，以及電車線張力的設定，都是環環相扣的問題。

車輛動態反應

列車提速時，車軌之間動態反應將加劇，列車左右偏擺的幅度也將增加，影響弓網橫向接觸行為（與電車線偏位及摩擦等有關），而列車的上下振動則影響弓

網接觸力（與集電弓上舉力及摩擦等因素有關）^[8]，此外，以台鐵 EMU900 為例，一列車上有三組集電弓，列車車廂間相互影響，將使三組集電弓與電車線之間有不同接觸反應，因此，列車動態是提速時絕對必須列入考量的項目之一^[1]。

限於文章篇幅，上述因子無法一一舉例說明，以下本文舉其中「電車線張力因子」對提速影響進行說明，本文以國際著名之 Simpack 列車動態分析軟體，採國外某輕軌列車模型為例，建立車弓網耦合電腦分析模型，設定在直線無鐵道不整之路段，單純探究弓網接觸穩定性問題，本文模擬之假設條件如表 2，並對以下針對幾個常見弓網接觸參數與提速之關係提出說明：

表 2 本研究進行車弓網耦合模擬之分析條件

路線形式	直線無鐵道不整
電桿間距	50 m
電車線預張力	1,000 kgf
集電弓上舉力	85N

電車線張力對列車行駛速度的影響

為討論車速與弓網接觸之關係，以本研究所建立之車弓網耦合模型進行電腦分析（如圖 14），從圖中可以發現，橫軸為列車行駛時間（即代表行駛距離），縱軸為弓網接觸力，隨著列車時速上升，弓網接觸力將變大，且將變得較不穩定，致使弓網離線率增加。

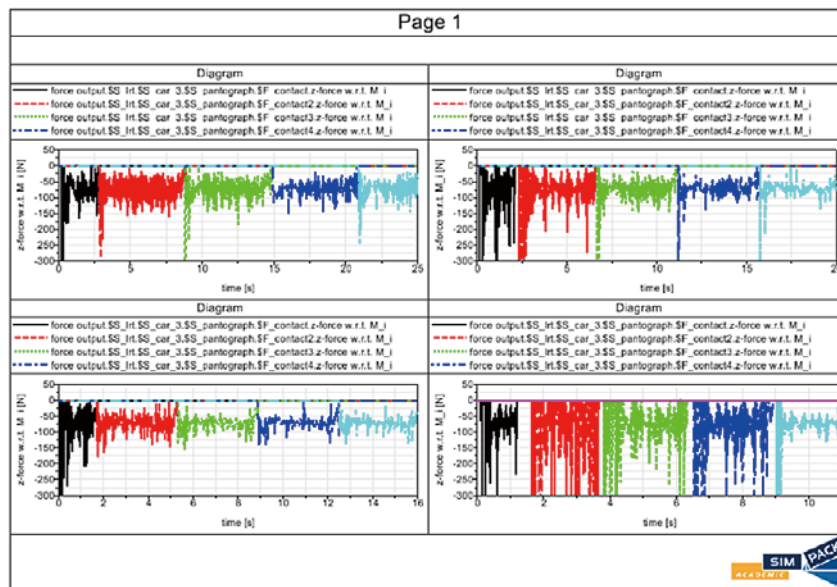


圖 14 不同行駛時速下，弓網接觸力分析結果

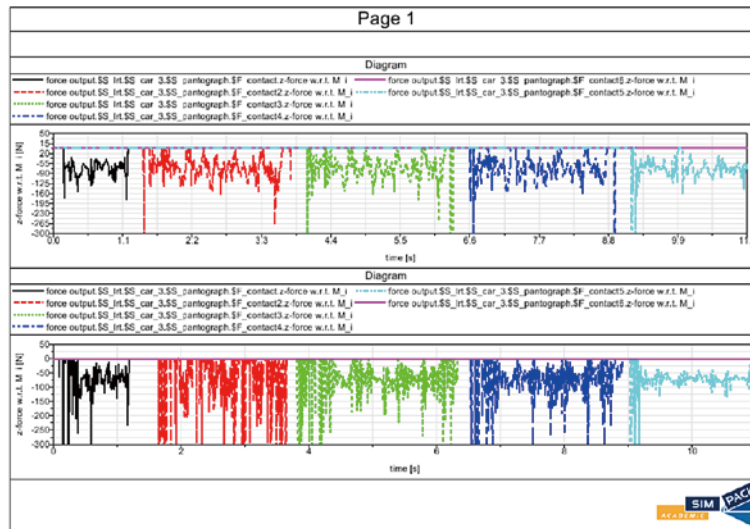


圖 15 時速 70 km/hr 下，不同電車線預拉力所造成的弓網接觸力分析結果

從圖 14 可以發現，列車時速 70 km/hr 時，弓網接觸力即開始產生不穩定現象。若調整電車線預拉張力，將預拉力從 1,000 kgf 調整上升至 1,100 kgf，則可以發現，同樣在時速 70 km/hr 下，弓網接觸力穩定性有顯著改善（如圖 15）。

結語

對於一般城際列車而言，因牽引動力馬達功率高，為降低電流量，往往採用高電壓供電系統，因此除非有特殊考量，否則架空線搭配集電弓是最常見的電力供應方式。當考慮提速問題時，需將車弓網耦合系統進行整體考慮，衡量列車振動以及弓網接觸的綜合條件，使弓網保持在最佳穩定接觸狀態。

從前述討論中，可以發現提速時影響弓網接觸穩定性的因素眾多，例如「電桿間距」、「電車線張力」、「集電弓上舉力」、「集電設備發熱量」、「電桿懸臂結構設計」、「電車線偏位」、「牽引馬達弓率」、「列車動態反應」……等都將影響弓網接觸穩定結果，且上述只是重要項目，尚有許多可能影響的細項需列入考慮，所以可以了解，列車提速所造成的供電系統課題相當複雜。

而每個因子都是環環相扣的，舉例來說，改變電車線截面積，需同時調整電車線張力、變更電車線張力區間、重新計算電桿懸臂結構強度、必要時需調整電桿間距與集電弓上舉力。若只單純改變電車線截面積而不對其他因子做調整，只能稱得上是一個堪用系統，而不是最佳系統，且可能因此產生額外問題（如發熱量改變與碳刷磨耗程度改變等）。

因此，若要達到系統最佳化的效果，需將所有因子都納入考慮，進行統一調整。而這也意味著，我們必須了解每一項因子背後的意義、確實掌握每一項因子調整的能力、具有各因子耦合影響分析的技術。集電弓－電車線系統在鐵路提速的技術課題，是一個既深又廣的大問題，有賴國內相關學者專家持續探究，以持續精進我國自主技術，從了解 → 嘗試維修 → 嘗試設計 → 國產化，透過國內不斷成長的過程，期盼達到最終具有完全國產化技術的能力。

參考文獻

- Nåvik, P., Rønquist, A., and Stichel, S. (2017). Variation in predicting pantograph-catenary interaction contact forces, numerical simulations and field measurements. *Vehicle System Dynamics*, 55(9), 1265-1282.
- Report 06/2013: Accident involving a pantograph and the overhead line near Littleport (2014). RAIB, Rail Accident Investigation Branch, UK.
- Nickel, T. and Puschmann, R. (2017). Technical Specification Energy 2015–Harmonized Design of Overhead Contact Lines. *Problemy Kolejnictwa*.
- Wu, Z., Xie, Z., Wang, P., and Ding, W. (2020). Aerodynamic Drag Performance Analysis of Different Types of High-speed Train Pantograph Fairing. *Journal of Applied Science and Engineering*, 23(3), 509-519.
- Baker, C., Johnson, T., Flynn, D., Hemida, H., Quinn, A., Soper, D., and Sterling, M. (2019). *Train aerodynamics: fundamentals and applications*. Butterworth-Heinemann.
- Lee, Y., Rho, J., Kwak, M., Lee, J., Kim, K., and Lee, D. (2009, August). Aerodynamic characteristics of high speed train pantograph with the optimized panhead shape. *International Conference on FLUID MECHANICS and Aerodynamics*.
- Kitagawa, T. and Nagakura, K. (2000). Aerodynamic noise generated by Shinkansen cars. *Journal of Sound and vibration*, 231(3), 913-924.
- Vera, C., Suarez, B., Paulin, J., and Rodriguez, P. (2006). Simulation model for the study of overhead rail current collector systems dynamics, focused on the design of a new conductor rail. *Vehicle System Dynamics*, 44(8), 595-614.