臺鐵電車線系統配合動力列車提速可行性研究

關鍵詞：電車線系統、鐵路電氣化、提速

台灣世曦工程顧問股份有限公司／電機工程部／協理／林啟豊 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／電機工程部／技術經理／陳彥均 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／電機工程部／副理／劉孝先 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／電機工程部／計畫工程師／莊佑翔 ❹

摘 要 ABSTRACT

民國60年政府推動鐵路電氣化工程，其中動力列車最高速度為130km/hr，隨著臺鐵新一代列車如太魯閣、普悠瑪等車種車已具行駛至設計速度150km/hr性能，爰此，針對臺鐵電車線系統配合動力列車提速之研究有其必要，故參考歐盟電車線設計相關標準規範，並考量臺鐵現行軌道現況及電車線系統現況在無法大幅度修改與相關條件限制下，如何在既有架構底下作最小變動，如提高電車線張力、調整吊掛線、採用輕量化設備等方向辦理，作為電車線提速之研究及優化思考方向為本篇研究重點。

壹、前言

隨著臺灣都會區之蓬勃發展，城際旅運需求快速增長，以長遠考量及兼顧營運安全的策略，提升列車行車速度、維持系統穩定性及可靠度，實有其必要。臺鐵列車行駛係由列車集電弓經接觸電車線而輸送電力供列車機車使用，其間須經機械與電氣等相關變化方能達成，每一環節均影響著列車運行速度與安全。為確保接觸線與集電弓有良好的接觸，本文就電車線配合動力列車提速之設計、標準及設備改善進行初步評估說明。

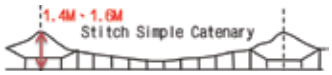
貳、臺鐵電車線系統架構及列車種類

一、電車線系統架構

目前世界上較常用的電車線系統可概分為簡單懸垂式(Simple Catenary)、Y型懸垂式(Stitch Simple Catenary)及複合懸垂式(Compound Catenary)三大類，其架構及特點分別說明如表1所示。各系統架構均以滿足列車電源引接功能且兼具安全可靠、少維修及故障率低為目標。

臺鐵電車線系統為簡單懸垂式(Simple Catenary)，目前最高行車速度為130km/h，其接觸線具有預置弛度，並以平衡錘自動調整張力，使主吊線和接觸線，在運轉中之任何溫度下，均能確實維持1,000kgf張力，其主要構造、材質、設備及配置，如圖1所示。經考量若配合列車速度提升而變更電車線系統，須大幅修改現有電車線系統之桿距、系統高度等，對於現

表1 常見電車線系統型式

型式	簡單懸垂式 (Simple Catenary)	Y型懸垂式 (Stitch Simple Catenary)	複合懸垂式 (Compound Catenary)
			
營運速度	0km/hr~350km/hr		
營運實績	台灣、日本、法國、中國	日本、德國、法國、中國、西班牙	台灣(高鐵)、日本
系統結構	結構簡單	略複雜簡單懸垂式	結構複雜
接觸線上揚	桿距中點與懸掛點之上揚振幅較不均勻，且接觸線振盪衰減較慢	振幅均勻且接觸線振盪衰減較快	振幅均勻且接觸線振盪衰減較快
穩定性	集電弓與接觸線之動態特性較差	穩定性良好	穩定性良好
系統高度	一般為1.2M、1.4M	一般為1.4M、1.6M、1.8M	一般為1.5M
施工分析	施工較易	施工略複雜於簡單懸垂式	施工複雜且繁瑣
維修特點	維護及搶修時間短	維護及搶修時間長	維護及搶修時間長
經濟性	工程造價較低	工程造價中等	工程造價較高

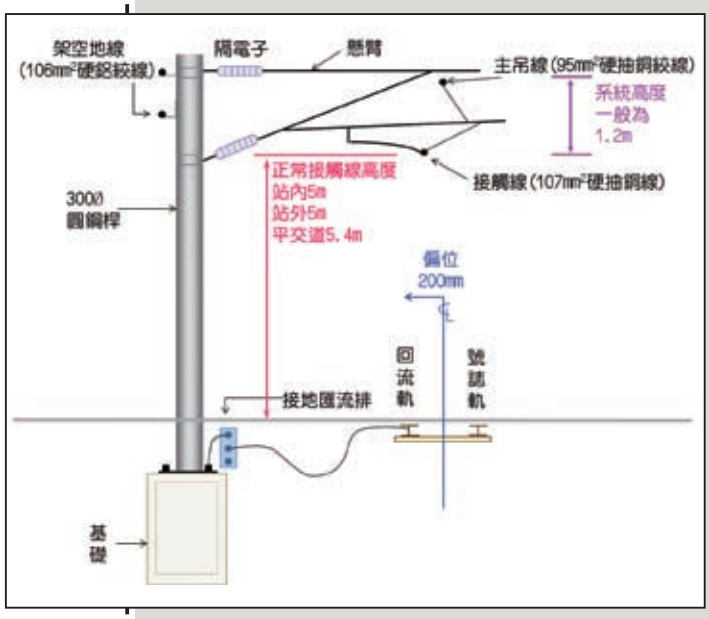


圖1 臺鐵電車線系統主要構造示意圖

有路線、跨越橋梁、隧道淨空等之影響，其涉及影響層面甚大，實不可行，故後續相關評估與構想均架構於現有之簡單懸垂式系統。

二、現況電力列車種類

民國60年政府十大建設之一「鐵路電氣化」，即由臺鐵陸續引進電力機車，計有英國GEC(General Electric Company)公司製造之E100型電力機車及美國GE(General Electric)公司製造之E200型、E300型、E400型電力機車。E100型、E200型、E300型電力機車最高車速可達110km/hr，E400型最高車速可達130km/hr，皆可牽引客運15輛，牽引重量達525噸。

後續由於運輸需求成長快速，陸續引進電聯車計有EMU100型、EMU200型、EMU300型、EMU400型、EMU500型、EMU600型、EMU700型、EMU800型、PP車、TEMU1000型(太魯閣號)及TEMU1000型(普悠瑪號)等車種，其設計皆採用自動速度控制，並依路線坡度、彎度條件自動調節馬達輸出與煞車，大幅提升旅客服務品質。而近年來臺鐵新一代主力列車的普悠瑪號及太魯閣號更搭載傾斜式系統，於彎道時推動

車體傾斜適當角度，減少離心力，以提高行車速度，其最高設計速度可達150km/hr以上[1]。

列車行駛需經由集電弓與電車線有良好接觸。故評估提速對電車線影響時，需考量集電弓配置、靜態力(N)、舉昇率(N-sec^2/m^2)、集電弓之重量(kg)、彈簧剛性(N/m^2)與相關阻尼係數(N-sec/m)等，其簡化模型如圖2所示。

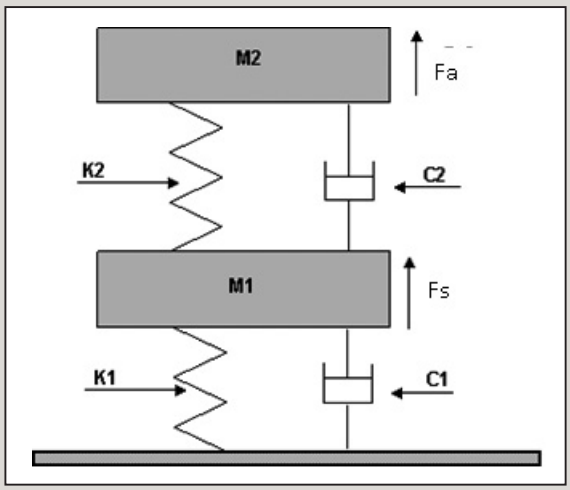


圖2 集電弓模型[7]

參、電車線系統標準規範介紹

電車線系統設計時，應考量列車特性、營運路線、維護成本及生命週期作為設計條件，而目前國際間最常使用之電車線系統設計標準規範，可分為國際電工委員會(International Electrotechnical Commission, IEC)標準、國際鐵路聯盟(International Union of Railways, UIC)標準、歐洲標準(European Norm, EN)及日本工業標準(Japanese Industrial Standard, JIS)等，其訂定目標皆以鐵路行車安全為主要目標。本章考量歐洲地區有著成熟的鐵路技術及完善的鐵路網，以下將介紹歐洲標準之主要標準規範。

一、歐洲電車線系統標準規範架構

歐盟組織為確保接觸線與集電弓有良好的接觸，建置一系列之電車線系統標準規範，並由歐洲電工標準化委員會(European Committee for Electrotechnical Standardization, CENELEC)制定發佈，其成員國包含歐洲共同體12個國家委員會(比利時、丹麥、德國、法國、希臘、英國、愛爾蘭、義大利、盧森堡、荷蘭、葡萄牙、西班牙)及歐洲自由貿易協會(European Free Trade Association, EFTA)7個國家委員會(芬蘭、冰島、挪威、奧地利、瑞典、瑞士、英國)。

規範主要架構可分為一般理論規範、主要系統規範及整體設計規範三大部分，如表2所示。一般理論規範分別定義鐵路電氣化之電磁相容性、固定裝置、絕緣裝置、設備環境條件、導線材質及供電電壓範圍等標準；主要系統規範係為一般理論規範加以歸納與整合而成之規範；整體設計規範則以EN 50367為設計及驗收最終判斷標準。綜整三大部分規範，即為歐盟電車線系統規範標準架構，形成一套完整的電車線設計規範標準體系，如圖3所示。

表2 歐洲電車線系統標準規範

類別	規範	名稱
一般理論規範	EN 50121	Railway applications. Electromagnetic compatibility.
	EN 50122	Railway applications. Fixed installations.
	EN 50123	Railway applications. Fixed installations. D.C. switchgear.
	EN 50124	Railway applications. Insulation coordination.
	EN 50125	Railway applications. Environmental conditions for equipment.
	EN 50149	Railway applications. Fixed installations. Electric traction. Copper and copper alloy grooved contact wires.
	EN 50163	Railway applications. Supply voltages of traction systems
主要系統規範	EN 50119	Railway applications. Fixed installations. Electric traction overhead contact lines.
	EN 50317	Railway applications. Current collection systems. Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line.
	EN 50206-1	Railway applications. Rolling stock. Pantographs. Characteristics and tests. Pantographs for main line vehicles.
	EN 50206-2	Railway applications. Rolling stock. Pantographs. Characteristics and tests. Pantographs for metros and light rail vehicles.
	EN 50318	Railway applications. Current collection systems. Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line.
整體設計規範	EN 50367	Railway applications. Current collection systems. Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access).

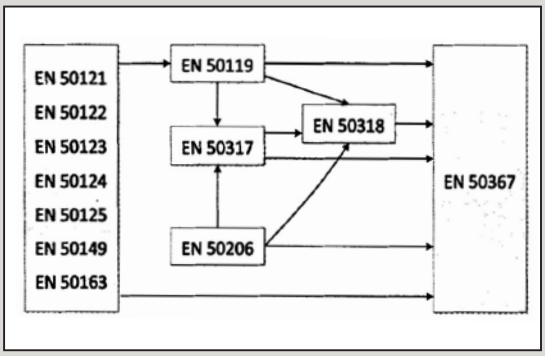


圖3 歐洲電車線系統標準規範架構[2]

二、歐洲主要電車線系統標準規範概述[3]~[8]

因歐洲電車線系統相關規範眾多，本章就主要系統規範及整體設計規範，分別概述其主要規範內容及範圍。

(一) EN 50119:2009

本規範就架空電車線之設計限制、結構計算、零組件規定及相關測試等內容，分別訂定規範專章，並適用於電氣化之鐵路及輕軌。

(二) EN 50317:2002

本規範就集電弓與架空電車線系統之間動態相互作用之量測要求、量測方法、量測項目及精確度等內容，分別訂定規範專章，並針對量測設備可能造成電車線系統測量誤差加以規範。

(三) EN 50206-1:2010 ; EN 50206-2:2010

本規範就電力列車之集電弓特性、試驗、絕緣設備、滑板材料、接觸力等內容，分別訂定規範專章，並依據集電弓型式，區分為地下鐵用、輕軌用及一般鐵路用三大類。

(四) EN 50318:2002

本規範就集電弓與架空電車線系統之間動態相互作用之模擬結果、模型建立方法、模擬需求及軟體驗證步驟等內容，分別訂定規範專章，以驗證此模擬軟體成果之準確性。

(五) EN 50367:2012

本規範就集電弓與架空電車線系統相互作用之特性參數、接觸線上揚量、接觸力、集電弓與接觸線之磨耗、列車運行速度、離線率等內容，分別訂定規範專章，並依據供電系統，區分為交流系統(AC)及直流系統(DC)分別訂定規範。

肆、電車線系統提速項目分析

經參考歐洲標準及相關文獻資料[9]，若欲提升行車速度須分析集電弓與電車線系統之相關因素，方可深入了解其間之變化。

一、上揚量(Uplift)

當電力列車行駛時，接觸線受集電弓之接觸力(F)產生上揚，將隨著電力列車集電弓運行而產生波動，如圖4所示。為使上揚量均勻，EN 50119訂定接觸線在桿距間之上揚量不得大於計算或模擬的2倍；穩定臂部分，不得大於計算或模擬的1.5倍。

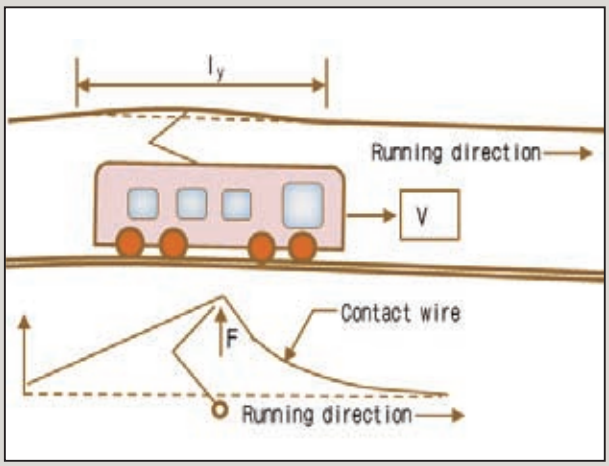


圖4 電力列車行駛之上揚現象

二、彈性均勻度(Uniformity degree of elasticity)

依接觸線上揚特性，會產生相應的接觸力(Contact Force)，其作用產生的上揚量(Uplift)即為彈性(上揚量/接觸力)，經參考相關文獻資料[9]，最大彈性係數(e_{max})通常會發生於跨距中點，如圖5所示。依彈性係數(e)定義公式，式1可知，跨距(l)、接觸線張力(H_{CW})、主吊線張力(H_{CA})等，均影響彈性大小。即跨距(Span)愈高，彈性係數(elasticity)越高；接觸線與主吊線張力越大，彈性係數越小。然彈性係數又影響彈性均勻度(Uniformity degree of elasticity)，係指電車線系統彈性變化率，如式2。彈性均勻度越低表示震動越小，電車線系統越平穩。故若欲使電車線系統越平穩，則需跨距愈小，張力越大。

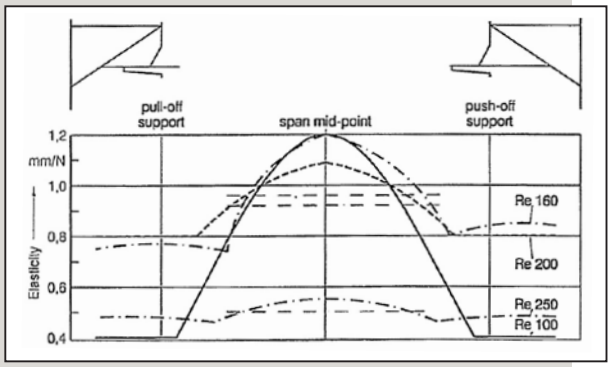


圖5 電車線系統彈性分佈[9]

$$e = \frac{l}{[k \cdot (H_{CW} + H_{CA})]} \quad \text{式1}$$

$$\eta = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\max} + e_{\min}} \times 100\% \quad \text{式2}$$

三、平均接觸力(Mean contact force)

電車線與集電弓應保持平滑接觸不可有

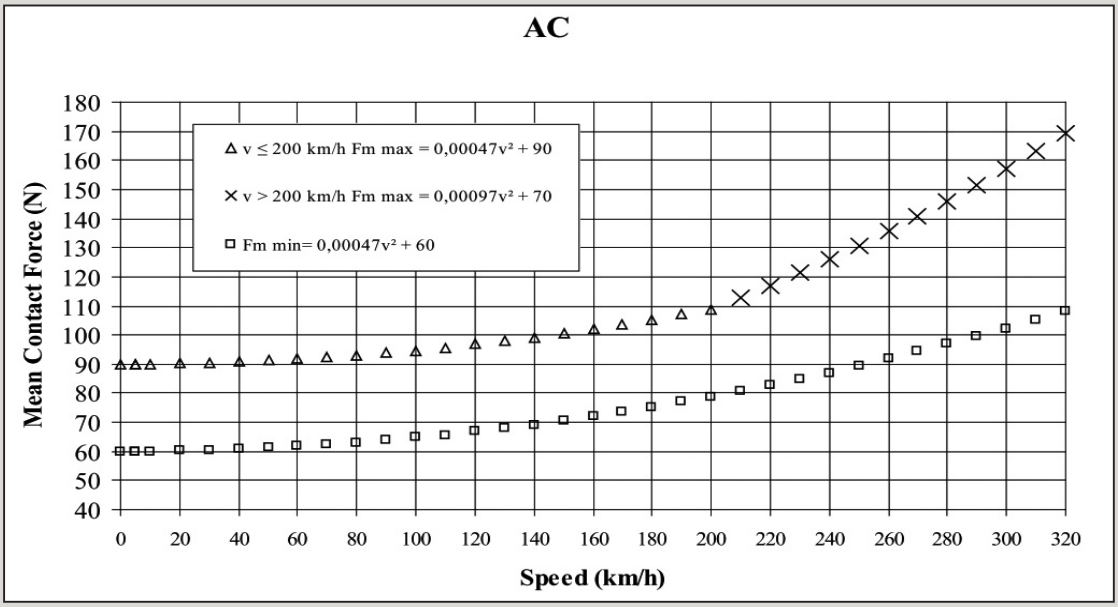


圖6 平均接觸力標準[8]

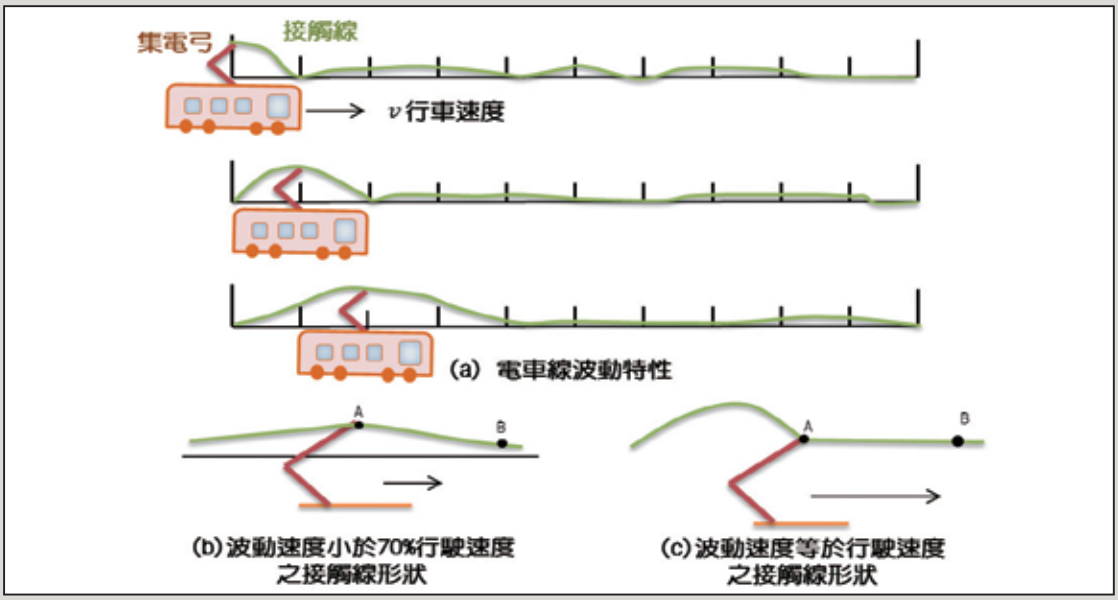


圖7 行駛中波動傳遞特性與接觸線示意圖

中斷的情形，隨著速度提升，接觸力的變動將直接影響供電品質，而接觸力取決於集電弓靜態接觸力、空氣阻力及垂直運動方向之慣性力等相關力矩，其中接觸力越小則接觸電阻將越大，進而產生過熱現象及增加離線之風險，若接觸力越大，則會增加集電弓與接觸線之磨耗量，降低接觸線使用年限。為此EN 50367依據行車速度，分別訂定平均接觸力之限制範圍，如圖6所示。

四、波動傳遞速度(Wave propagation velocity)

列車行駛時集電弓以一定接觸力施予接觸線，使接觸線產生一上揚量，當接觸線受到集電弓通過擾動時，即會產生波動，並傳播能量，即稱為波動特性，如圖7所示。若行車速度大於電車線波動傳遞速度時，恐造成電車線大幅度波動產生離線(Loss of contact)，該現象將使得集電弓之接觸力無法平滑隨著接觸線之波

表3 接觸線坡度標準[3]

Speed up to	Maximum gradient		Maximum change of gradient	
km/h		‰		‰
50	1/40	25	1/40	25
60	1/50	20	1/100	10
100	1/167	6	1/333	3
120	1/250	4	1/500	2
160	1/300	3,3	1/600	1,7
200	1/500	2	1/1 000	1
250	1/1 000	1	1/2 000	0,5
> 250	0	0	0	0

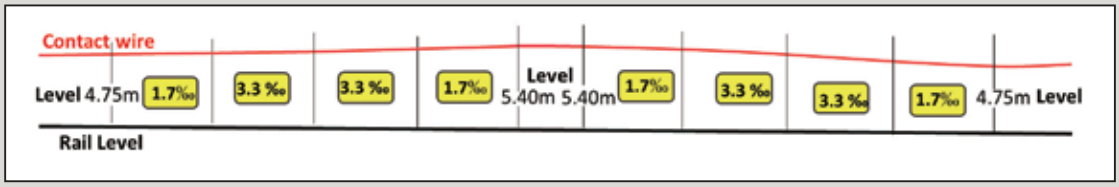


圖8 列車時速160km/h之接觸線坡度設計限制值

動曲線變化而滑動，將使得接觸線與集電弓間之接觸不斷變化而產生火花致無法獲得理想之集電性能而影響電力列車正常運轉。

依EN 50119規定，行車速度(v_{max})需小於0.7倍波動傳遞速度(C)，方使系統有良好的集電性能。其中波動傳遞速度(C)與接觸線之張力強度(H_{CW})與其單位重量(m'_{cw})有關，公式如式3。簡言之，若欲使行車速度提升，波動傳遞速度要快(增加)，即要增加接觸線張力，或接觸線單位重量減少(面積變小)，然通常減少接觸線單位重量較不可行，故多從增加張力強度上考量，以提高波動傳遞速度。

$$C = 3.6\sqrt{\frac{H_{CW}}{m'_{CW}}} \quad ; \quad v_{\max} \le 0.7C \qquad \text{式3}$$

五、接觸線坡度(Contact wire gradient)

提速之接觸線坡度要求亦須較嚴格，坡度變化太大將會影響接觸線的動態特性，為此EN 50119規定，依據行車速度，分別訂定了接觸線所需之坡度限制，如表3所示。以列車時速160km/hr為例，坡度變化不得超過3.3‰，接觸線高度變化之坡度的起點及終點不得超過1.7‰，如圖8所示。

六、離線(Loss of contact)

車輛行駛中集電弓瞬間離開接觸線之現象稱之為離線，將產生火花等現象，如圖9所示。

圖9 行駛中集電弓離線狀態

表4 離線率之標準[8]

Requirement	$v \le 160$ km/h	160 km/h < $v \le$ 250 km/h	$v > 250$ km/h
Percentage of arcing at maximum line speed, *NQ* (%) (minimum duration of arc 5 ms)	≤ 0,1	≤ 0,1 for AC ≤ 0,2 for DC	≤ 0,2 for AC

引起離線之原因有架線之施工不當、偏位過大、坡度變化、硬點(即接觸線不平整或附著其他異物等)，隨著車輛行駛速度提升而產生的擺動或震動將使離線的情形更容易發生。因離線引起電弧或衝擊，將可能導致接觸線或集電弓損壞及磨耗，進而造成車輛運轉故障，故於設計或安裝時須避免該狀況發生。依EN 50367標準，離線之容許限度通常以離線率NQ(percentage of arcing)表示，亦即離線時間長於5ms之時間總合(tarc)與大於額定電流30%之量測時間(ttotal)的比值，如式4。其標準，如表4所示。

$$NQ = \frac{\sum t_{arc}}{t_{total}} \times 100 \qquad \text{式4}$$

伍、現有電車線系統提速改善建議

綜上分析，雖現行臺鐵電車線系統架構條件均可滿足營運的安全和技術，惟若配合列車行駛速度，尚有部分設備與架構須調整，相關建議改善方向分述如下。

一、提高接觸線之張力

由波動傳遞速度理論可知，提高接觸線之張力，可提高波動傳遞速度，進而達到提升行車速度之目標。惟尚須考量相關設備之安全係數。

二、調整吊掛線位置

參考國外資料，電車線系統之吊掛線最大間隔一般取10M至12M(臺鐵現況為11M)；其中間距越小雖對系統較穩定，但不符合經濟原則。故建議後續可利用電腦軟體模擬進行較佳的間隔選擇，以取得了良好效果。

三、減輕穩定臂之重量

當行車速度提升時，很小的阻力都會構成硬點，使得車輛行駛中集電弓瞬間離開接觸線，引起電弧或衝擊現象。建議將原懸臂組穩定臂，更換輕量化穩定臂，以減輕於接觸線上的重量。

四、降低電車線系統硬點發生

隨著列車速度增加，將造成接觸線變化而構成硬點，致使集電弓損壞，故應避免施工時發生硬點造成事故。

陸、結論

臺鐵電車線系統，在臺鐵局相關人員努力與經驗傳承，持續維持著鐵路營運安全。然隨著列車技術提升行車速度增快，電車線設備配合列車行駛速度之提升而有所改變，將為未來所需面對之發展趨勢。

配合提速需求，經研析電車線相關規範與檢視現有電車線系統架構，就現行電車線設備改善，初擬相關建議，如接觸線之張力提高、調整吊掛線位置、設備輕量化、減少硬點發生等。希望能藉由較少之架構改變，降低營運衝擊、節省建設費用之方向，以達成現行臺鐵電車線系統提速之目標。

參考文獻

1. 施景徽、林武鍵，「TEMU2000 設計速度(150kph)實車驗證測試」，臺鐵資料季刊，352期，2015年，第53-71 頁。
2. 郭雅婕，歐洲弓網系統標準體系特徵研究，西南交通大學研究生學位論文，2013年。
3. British Standard, “BS EN50119 Railway applications - Fixed installations - Electric traction overhead contact lines”, 2009.
4. British Standard, “BS EN50317 Railway applications - Current collection systems - Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line”, 2002.
5. British Standard, “BS EN50206-1 Railway applications - Rolling stock - Pantographs - Characteristics and tests - Pantographs for main line vehicles”, 2010.
6. British Standard, “BS EN50206-2 Railway applications - Rolling stock - Pantographs - Characteristics and tests - Pantographs for metros and light rail vehicles”, 2010.
7. British Standard, “BS EN50318 Railway applications - Current collection systems - Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line”, 2002.
8. British Standard, “BS EN50367 Railway applications - Current collection systems - Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access)”, 2012.
9. Kiessling, Puschmann, Schmieder, Schneider “Contact Lines for Electric Railways”, Siemens, 2nd edition, 2009.