

輕軌弓網接觸系統模擬與磨耗預測

李政安¹、林逸羣¹、鄭凱元¹、黃晟豪^{2,*}、彭文佑²

¹ 新北市政府捷運工程局

² 國立臺北科技大學車輛工程系

hch@ntut.edu.tw

摘要

新北市所轄之淡海輕軌，是國內第一個採用集電弓，並全程使用架空線供電的輕軌系統(除部分轉彎路口無法以架空線供電以外)，並且是國內唯一採用 DC 750V 供電的架空線系統，因為其特殊性，在營運初期就產生集電弓碳刷磨耗異常問題。經過前期研究，並對集電弓上舉力與電車線偏位進行初步調整後，已有初步減緩碳刷磨耗情況。但相較於臺鐵或高鐵採用 25kV 供電系統，淡海輕軌使用的 750V 供電系統會伴隨大電流問題，先天上即會使碳刷磨耗問題比臺鐵或高鐵嚴重，加上輕軌的都市穿梭性，必然具有小半徑彎道、短站距與急加速等問題，這些都是造成碳刷磨耗的主因。為了持續改善集電弓碳刷磨耗現象，並希望透過了解磨耗成因以提供改善磨耗改善方案，本研究先透過理論分析了解磨耗參數之敏感性，接著透過國際知名列車模擬軟體 Simpack 建立車軌弓網動態耦合系統，分析淡海輕軌列車行進中之弓網接觸行為，釐清列車加減速度與軌道不整等各種因素對於弓網磨耗的影響與改善成效，並參考輕軌集電弓養護慣例，提出可能減緩集電弓磨耗之建議方向，以及集電弓磨耗預測結果，以供未來國內輕軌營運維護上之參考。

關鍵字：輕軌、弓網接觸、碳刷磨耗、架空線、simpack

1. 前言

淡海輕軌是繼高雄捷運環狀輕軌後，台灣第二座輕軌運輸系統，也是臺灣北部第一條輕軌系統。由於淡海輕軌是國內第一條採全程架空線供電之輕軌建設(除部分無法架設電線之路口外)，於營運初期曾發現集電弓碳刷有局部過度磨耗之現象。為深入了解碳刷磨耗的可能成因，以做為持續改善及後續相關輕軌建設之設計參考依據，因此希望透過本研究，建立車—弓—網耦合分析模型，期能透過加入列車動態之考慮，探究集電弓碳刷局部磨損的可能成因與建議改善方法。

在淡海輕軌營運初期，即有集電弓碳刷局部過度磨損問題，李政安[1]等人針對淡海輕軌弓網接觸做了深入探討，並提出四項改善方案，透過增加集電弓上舉力至 85N 以及加大電車線偏位量至 250mm 的方式，來使弓網接觸更穩定，並分散弓網接觸位置以減少局部磨耗現象。此外，該研究亦透過減少電車線重疊區間數量以及設計電車線重疊區間偏位等方法，降低電車線結構局部硬點，經過這些改善後，可以降低碳刷磨耗量約 30%，取得初步良好成效。針對弓網接觸議題，Y. Song[2]等人探討電車線不整對鐵路系統弓網接觸的影響，在此研究中，發現電車線不整會對弓網接觸力的穩定性有極大的影響，電車線的跨距與副吊線間距，亦會對弓網接觸力帶來改變，此研究說明，電車線的設計與配置，確實會對弓網接觸結果有很大的影響。在 2013 年 J.Pombo[3]等人探討電車線振動對集電弓之影響，該研究透過分析具雙集電弓的列車，探究前集電弓對後集電弓動態行為的影響。該研究發現前集電弓經過後會使電車線系統產生振動，使後集電弓的接觸力的幅值增大，並會有離線的狀況產生，顯見電車線波動對弓網接觸穩定性有顯著影響。

為探討弓網接觸行為，G.POETSCH 等人[4]嘗試開啟以電腦模擬的方式模擬電車線與集電弓的相互動態行為，該研究有限元素軟體搭配多體動力學軟體 Simpack 進行模擬，透過簡化電車線系統模型與集電弓模型，進行弓網耦合分析，探討弓網耦合問題。在 2012 年 J. Ambrósio[5]等人詳細探討在電腦模擬過程中，如何模擬集電弓與電車線系統，該研究詳細介紹了模型的設定與簡化方式。並說明了在模擬時可能面臨的困難與細節，來確保模擬的結果的正確性，是進行弓網接觸電腦模擬的重要參考依據之一。

而在弓網接觸設定上，Y. Yao[6]探討了集電弓的機構模擬方法以及在行駛過程中的升降的行為，該研究在集電弓與接觸線的接觸設定方式上，提出了採用了多邊形接觸模型 PCM(polygon contact model)建立集電弓與接觸線接觸行為的方法，是後續類似研究中，設定弓網接觸的重要參考方法。在集電弓模擬方面，早期多數文獻中模擬集電弓多是以單自由度的簡化彈簧質量塊系統來建立模型，1988 年 S.D.Eppinger 等人[7]提出了以多自由度機構模型進行集電弓模擬，

較為精確描述集電弓的多連桿運動行為。在 2016 年 N.Zhou[8]將集電弓以簡化彈簧質量塊及剛柔混合模型與電車線系統做互制分析。Rodríguez 等人[9]結合多體動力學及有限元素法模擬，計算集電弓與供電線之接觸狀況，並以弓網接觸力品質(接觸力標準差/平均值之比值)及電流傳輸品質(電弧發生之時間比)來做為評估標準。

而在碳刷磨耗預測方面，Bucca & Collina [10][11]列出導線與碳刷磨耗的三種機制來源：機械負載、電流加載、電弧放電，並考量三種因子間之交互作用，根據實驗量測提出磨耗率當量(normal wear rate, NMR)之公式整合模型，並以實驗室之測試結果與 Lim & Ashbey[12]所提之磨耗機制圖找出相關模型中之磨耗參數。本研究將基於上述文獻在弓網接觸與磨耗量測之經驗，建立符合淡海輕軌現地狀況之 Simpack 模型，模擬不同工況下，對於弓網磨耗影響程度。

2. 研究方法

本研究使用多體動力學軟體 Simpack 進行分析與建模，該軟體是一種泛用多體動力學軟體，可以針對各種機械系統及動力學模型進行動態分析模擬，其中特有的鐵道模組，可以精確表達輪軌關係，對於軌道車輛之模擬較為精確，它可以精準的計算列車行駛的動態行為、輪軌接觸力及輪軌磨耗等，亦可以導入柔性體模型進行剛柔耦合模擬。本研究將基於此軟體，建立完整車—弓—網耦合分析模型，將列車動態與軌道條件納入考慮，完整分析弓網接觸行為。研究流程如圖 1，各部件建模整合完後，探討各種工況對於弓網磨耗與使用壽命之影響。

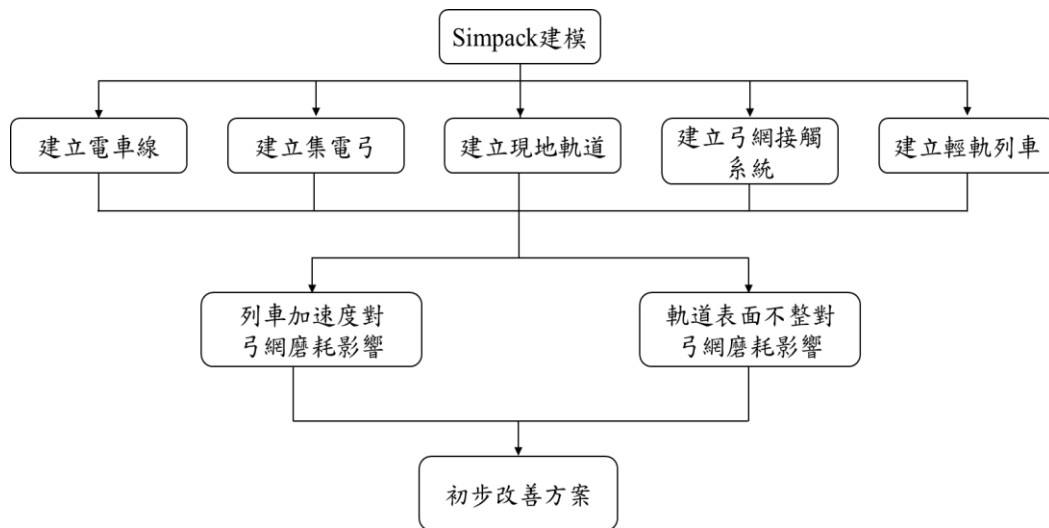


圖 1 研究流程

2.1 磨耗參數敏感性分析

由於碳刷與供電線在使用過程中之持續磨耗情形，預測使用壽命與規劃適當的保養週期顯得相當重要。根據 Bucca & Collina[10][11]之集電弓與接觸供電線磨耗模型，常規磨耗率(Normal Wear Rate, NWR)為單位 km 里程數之材料磨耗體積(mm³)如式(1)。

$$NWR=k_1 \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_c}{I_0} \right) \right]^{-\alpha} \left(\frac{F_m}{F_0} \right)^\beta \frac{F_m}{H} + k_2 \frac{R_c(F_m)I_c^2}{HV} (1-u) + k_3 u \frac{V_a I_c}{V H_m \rho} \quad (1)$$

上式中之符號意義如下： F_m ：實際弓網接觸面接觸力(N)； F_0 ：弓網接觸面之參考接觸力(N)； k_1 ：與接觸負載相關磨耗參數(實驗獲得)； k_2 ：與傳導電流相關磨耗參數(實驗獲得)； k_3 ：與電弧沖蝕相關磨耗參數(實驗獲得)； α, β ：磨耗模型中之參數(實驗獲得)； I_0 ：參考電流(A)； I_c ：列車行駛時通過集電弓之總電流(A)； H ：接觸材料之硬度(MPa)； R_c ：接觸電阻(\square)； V ：弓網接觸面滑動速度(m/s)； V_0 ：參考弓網接觸面滑動速度(m/s)； u ：接觸面喪失接觸分率； V_a ：實驗時接觸面兩側導線與碳刷之電位差(V)； H_m ：導線材料之熔解潛熱(kJ/kg)； ρ ：導線材料之質量密度(kg/m³)。

本研究希望透過理論磨耗預估式進行參數敏感性分析，以了解各參數變化時對碳刷磨耗量之影響。因為本研究無法取得列車行駛過程中產生電弧的次數與位置，加上前述推導中，在無明顯高離線率情況下，電弧項次影響較小，故後續本研究將只取前兩項次進行碳刷磨耗量評估，其中標準分析條件為，集電弓上舉力=85N，電車線張力=12000N， $k_1=22.4$ ， $k_2=10.3$ ， $I_0=500$ ， $F_0=90$ ， $H=700$ ， $V=44.4$ ，其於車速等條件，將做為變因依序改變進行測試。

2.2 淡海輕軌系統模擬

(1) 電車線模擬

為考慮電車線波動效應，需使用柔性體建立電車線電腦模型，但柔性體將大幅增加但腦運算時間，故本研究參考文獻方法進行簡化電車線架構[13]，將懸臂組頂管、穩定臂與吊掛線以等效彈簧模擬，在每一跨距內有 3~7 條吊掛線，其參數如表 1。再將這些物件架設於剛體的電桿上，並且依照供電系統竣工圖設定電車線長度，建立電車線模型。

表 1 電車線系統設定參數

參數名稱	參數
跨距	依竣工圖設定電桿位置
主吊線和接觸線的距離	200mm~1180mm (依不同位置進行設定)
主吊線/接觸線張力	12000N/12000N
吊掛線在一跨距內的位置	2.5m、11.67m、20.84m、30.01m、39.18m、

吊掛線長度	48.35m、57.52m(以最長 60m 桿距為例) 1.04m、0.57m、0.29m、0.2m、0.29m、 0.57m、1.04m(以最長 60m 電桿間距為例)
-------	---

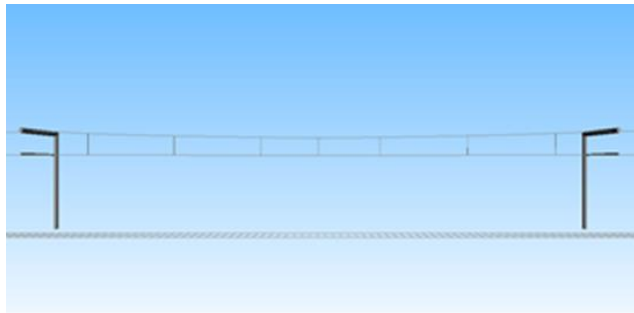


圖 2 本研究建立之電車線模型(以 7 吊線為例)

(2)集電弓系統模擬

本研究使用之集電弓模型，係參考文獻建議以連桿及質量塊方式進行模擬 [14]，電刷與集電舟之連結方式，以等效彈簧進行簡化模擬，模型架構如圖 3(a)。而集電弓之上臂，以平行四連桿的結構使集電舟能維持垂直升降，各轉軸處以 hinge 方式連結，其結構如圖 3(b)。

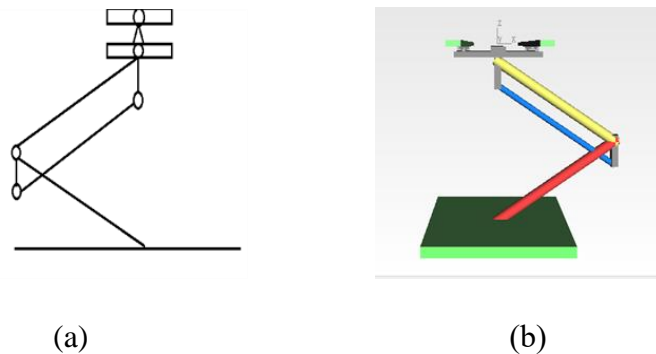


圖 3 (a)簡化集電弓示意圖 (b) 本計畫建立集電弓模型

(3)軌道模擬

本研究依據淡海輕軌施工竣工圖建立平面軌道線形，該竣工圖上明確記載軌到各項參數（如軌道里程、彎道半徑、曲線長度等），經設定後得到軌道曲線模型如圖 4。而在淡海輕軌部分，軌道分為平面路段與高架路段，在平面路段通常採用嵌埋式軌道，而在高架段為了養護便利，則改採工字鋼軌。本研究依照實際軌道斷條件進行電腦模擬，於平面路段使用槽型鋼軌(54G2，如圖 5(a))，高架段為工字型鋼軌(50E2，如圖 5(b))，以求獲得最真實正確的情況。

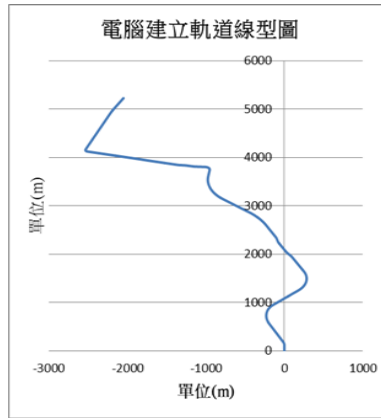


圖 4 本研究建立之 simpack 淡海輕軌軌道平面線形

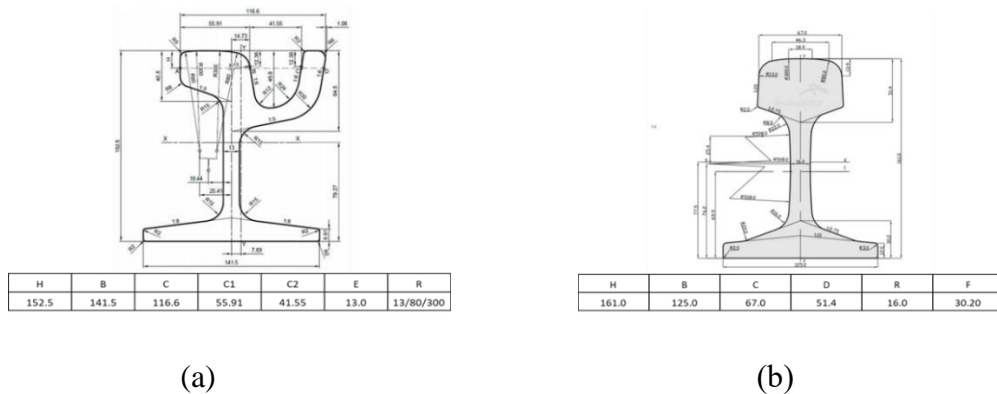


圖 5 (a)平面段使用 54G2 槽型鋼軌 (b)高架段使用 50E2 工字鋼軌

(4) 弓網系統接觸設定

本研究模擬過程中使用 Simpack 中的力元件 PCM Contact (polygonal contact method) 來量測接觸力[15]，PCM 是由物體表面進行多邊形離散化而鋪設多邊形網格，分成三個步驟：

- (a) 將兩接觸物體之接觸點分別生成多個多邊形元素
- (b) 定義接觸物體表面的面積
- (c) 依據接觸面積，將第一步之多邊形生成多邊形網格。

在每個接觸配對的物體上，定義標定框架 M 的恆定距離 r_{RM} 及定義一個由參考框架 R 指向標定框架 M 的方向 A_{RM} 。PCM 利用參考框架中多邊形網格上的標點 M_e 、 M_f 作為代表物體 E 、 F 的表面，如圖 6。在進行接觸分析的時候，需要位置向量 R_{MeMf} 、方向矩陣 A_{MeMf} 及速度向量 V_{MeMf} 、 ω_{MeMf} 去運算其接觸行為。

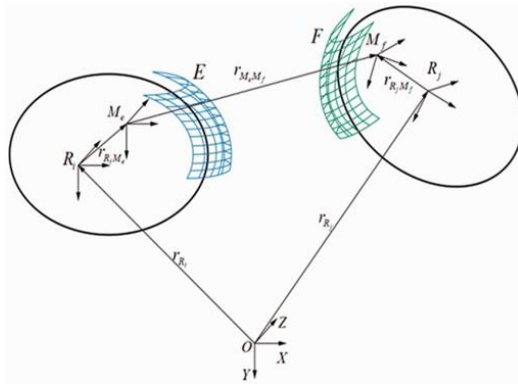


圖 6 接觸配對示意圖

(5) 列車模擬

淡海輕軌電聯車採動力分散式設計，前後車廂具備動力轉向架，中間車廂具備無動力轉向架，設計時速在高架段為每小時時速 70 公里，平面段 50 公里。本研究向台車公司取得淡海車輛設計尺寸與懸吊參數，因保密協定僅能公開基本參數如表 2 所示。最後將車體、轉向架、車廂連接器等進行組裝，並設定懸吊系統連接，以及 Traction Bar 連接。再將車廂與集電弓模型連接，並帶入柔性電車線模型及軌道模型，即完成模型建立，如圖 7。

表 2 淡海輕軌車輛基本參數

列車編組	5 模組絞接車體	營運速度	有架空線路段 70km/hr 無架空線路段 50km/hr
UIC 軸式	Bo' +2'+Bo'	啟動加速度	4.104 km/h/s
車輛長度	34,450 mm	常用減速度	4.32 km/h/s
車輛闊度	2,650 mm	緊急減速度	10.08 km/h/s
車體高度	3,750 mm	供電制式	DC 750V
軌距	1,435 mm	牽引電動機	ABB 製牽引系統
車體材質	骨架:不鏽鋼與耐候鋼 車殼:鋁合金複材與 FRP	控制裝置	ABB IGBT-VVVF BORDLINE CC400 系列

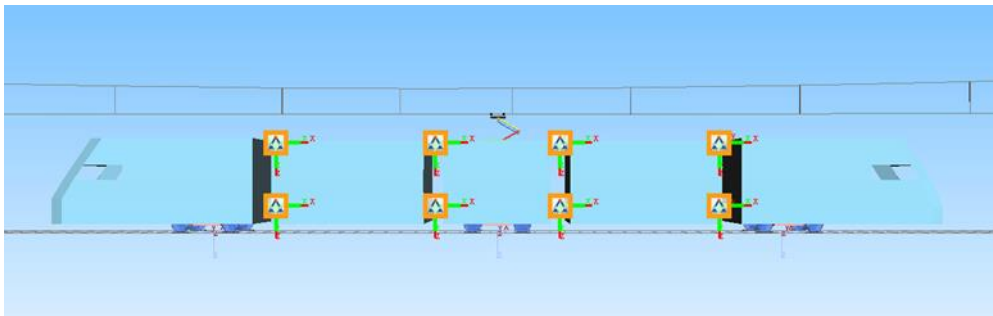


圖 7 淡海輕軌整體車弓網軌耦合模型結構圖

3. 分析結果

3.1 磨耗參數敏感性分析

本處基於第 2.1 節之計算式，分別探討電流、集電弓上舉力、列車行進車速等因素對集電弓碳刷磨耗之影響，影進行敏感性分析，了解各因子對集電弓碳刷磨耗之關鍵性：

(1) 電流對磨耗之影響

從圖 8 可以發現，當集電弓上舉力保持恆定(85N)，電流增加時會因電流潤滑效應，使機械磨耗量下降，不過同時電力磨耗量會增加。若電流量大於 550A，集電弓碳刷總體磨耗量將呈現拋物線上升，磨耗量大幅增加。因為大電流時產生的碳刷磨耗量為非線性成長，因此，須避免過大的電流造成碳刷急遽磨耗。

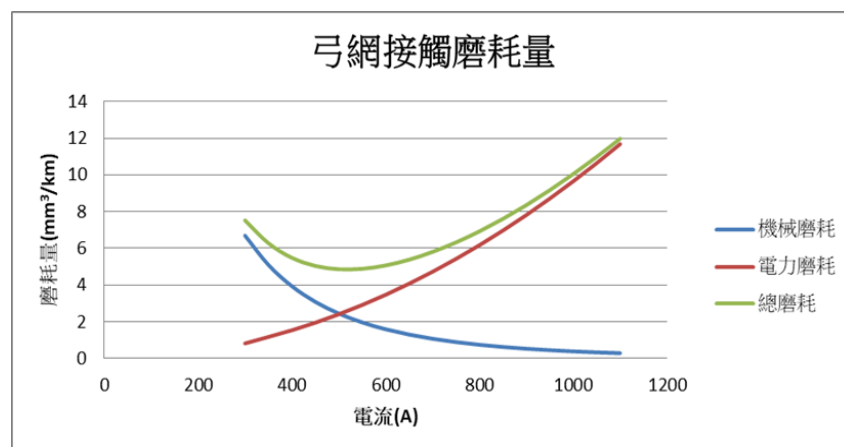


圖 8 電流對磨耗量之影響

(2) 上舉力對磨耗之影響

如圖 9，首先在固定電流情況下，當集電弓上舉力增加時，因弓網接觸力增加，帶來額外的機械磨耗量，弓網磨耗量呈現上升趨勢。另一方面，同一上舉力情況下，磨耗量會隨電流變化呈現拋物線非線性趨勢。因此要盡量使弓網接觸趨於穩定，避免瞬間過大接觸力產生大量磨耗。

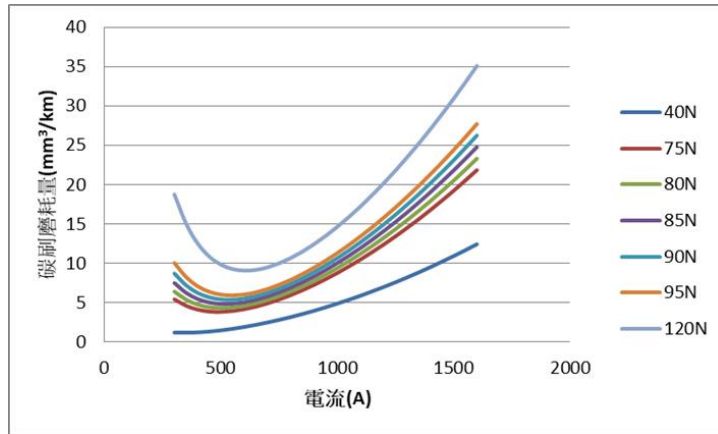


圖 9 上舉力對磨耗之影響

(3) 車速對磨耗之影響

本研究以淡海輕軌目前設定條件，集電弓上舉力為 85N，分別探討車速在 20km/h~70km/h 等淡海常用速度區間，弓網磨耗量隨著電流之變化。分析結果如圖 10，當車速提高，磨耗點移動速度增加時，因為動摩擦行為下降，電車線不易因摩擦呈現拉扯擺動情形，整體磨耗率下降。若是在低車速高電流的情況下，磨耗量將遠大於高車速低電流狀態，而通常低車速高電流，會出現在車輛從靜止開始加速時，若能降低列車加速度，可減少電流量，即可緩和磨耗情況。

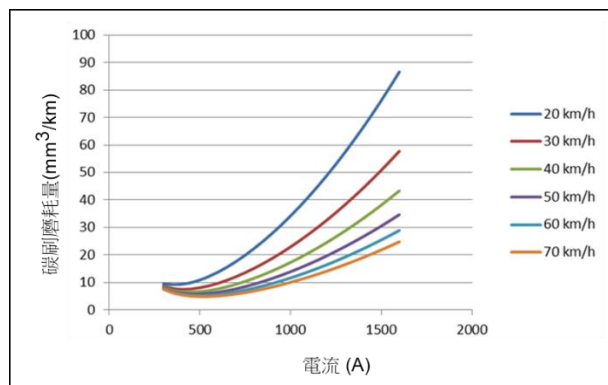


圖 10 車速對磨耗影響

3.2 弓網接觸特性分析

本節將探討車—弓—網耦合分析過程中，參數變化對弓網接觸之影響性，為以量化方式探討弓網接觸特性，本研究將透過「弓網平均接觸力」與「弓網接觸品質」這兩項較為重要的量化指標做為比較的依據，該二指標之計算方式說明如下：

➤ 弓網平均接觸力

弓網接觸力是集電弓與電車線接觸的介面，代表了弓網接觸性，同時弓網接觸力大小也是碳刷磨耗的重要因素之一，因此本研究中定義「弓網平均接觸力」為模擬全程中，集電弓與電車線的接觸力的總平均值。後續將可透過觀察車速或其他變因改變時，是否使「弓網平均接觸力」改變，以避免過大的弓網接觸力產生過大的碳刷磨耗

➤ 弓網接觸品質

在相同的「弓網平均接觸力」下，若接觸力變化標準差較大，亦代表著弓網接觸較不穩定，因此本研究中定義「弓網接觸品質＝標準差與平均接觸力比值」，即：

$$\text{弓網接觸品質} = \frac{\text{弓網接觸力標準差}}{\text{弓網平均接觸力}}$$

根據 EN50119 的標準，標準差與平均接觸力的比值(即弓網接觸品質)需要小於 0.3，所以此數值越大代表弓網接觸越不穩定，相反的，此數值越小，代表弓網接觸越穩定，接觸品質越好。

(1) 車速對弓網接觸穩定性之影響

本節主要在模擬與比較列車在不同行駛速度下，對弓網接觸的影響，在此使用了 5 種不同的車速分別為 17km/h、30km/h、40km/h、60km/h、70km/h 進行動態分析，這五種車速分別代表淡海輕軌全程列車平均行駛速度 17km/h、實車量測常見車速 30km/h、40km/h、現地量測最高車速 60km/h、列車設計最高車速 70km/h，並以這些速度進行定速行駛動態模擬，並將動態模擬結果進行比較，模擬結果數值如表 3

表 3 不同車速模擬結果表

行駛速度	17km/h	30km/h	40km/h	60km/h	70km/h
弓網平均接觸力(N)	84.6	83.5	83.3	90.1	96.5
標準差(N)	16.3	18.9	19.2	25.9	28.7
弓網接觸品質	0.193	0.226	0.230	0.288	0.297

從圖 11 中可以發現，於低速(40km/h 以下)行駛時，弓網接觸力平均值大致維持穩定，但當車速持續上升時，因為列車與電車線的動態互制效應，將使弓網接觸力平均值持續增大，過大的弓網接觸力平均值將對碳刷磨耗量造成直接影響，因此車速將是集電弓碳刷磨耗考量的重要參數之一。

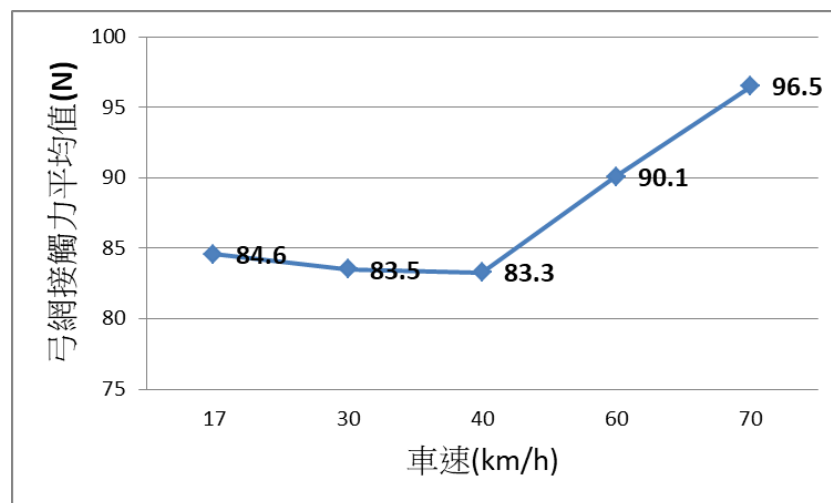


圖 11 參數敏感性：車速對弓網平均接觸力之影響分析

從圖 12 中可以發現，慢速時弓網接觸品質尚能保持良好，但隨著車速上升，弓網接觸品質持續下降，至車速為 60 km/h~70km/h 時，接觸品質甚至接近不佳的臨界值 0.3，表示弓網接觸力的變化幅度大，將有瞬間過大弓網接觸力情況產生，將對碳刷磨耗量造成直接影響。

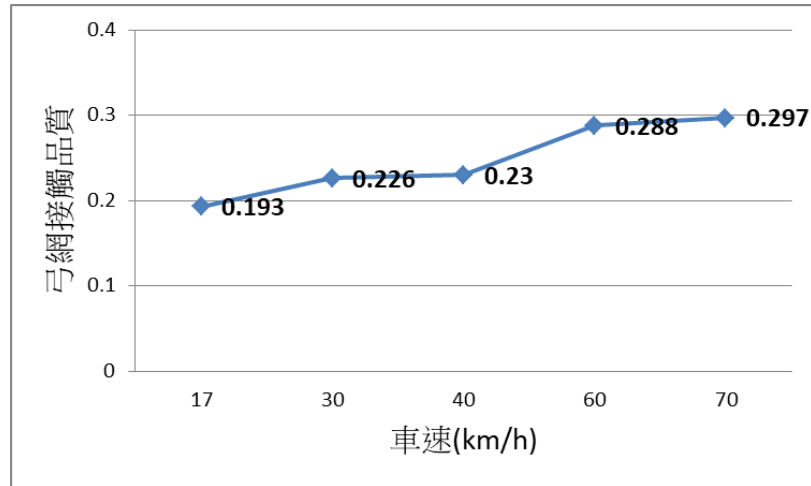


圖 12 車速對弓網接觸品質影響

(2)調整集電弓上舉力對弓網接觸穩定性之影響

依前期文獻研究結果，調整集電弓上舉力對提升弓網接觸穩定有幫助，本節即在透過模擬比較不同的集電弓上舉力設定條件下，弓網系統的動態行為，以了解其機制與原理。在此使用了 17km/h、70km/h 兩種車速進行動態分析，這兩種車速分別代表列車平均行駛速度與列車設計最高車速，模擬結果數值如表 4。

表 4 不同集電弓上舉力模擬結果

行駛速度	17km/h	17km/h	17km/h	70km/h	70km/h	70km/h
集電弓上舉力	80N	85N	90N	80N	85N	90N
弓網平均接觸力(N)	78.3	84.6	88.9	92.7	96.5	101.2
標準差	16.8	16.3	17.1	29.8	24.8	23.9
弓網接觸品質	0.214	0.193	0.192	0.322	0.257	0.236

從圖 13 中可以發現，當列車慢速(17km/h)行駛時，弓網接觸力平均值非常接近設定的集電弓上舉力(85N)。但隨著車速上升，到車速為 70km/h 時，實際弓網接觸力平均值都將大於設定的集電弓上舉力。從此

分析可以發現，當列車車速越快時，應避免隨意調高集電弓上舉力，以免實際弓網接觸力超過預期，造成碳刷過度磨耗。

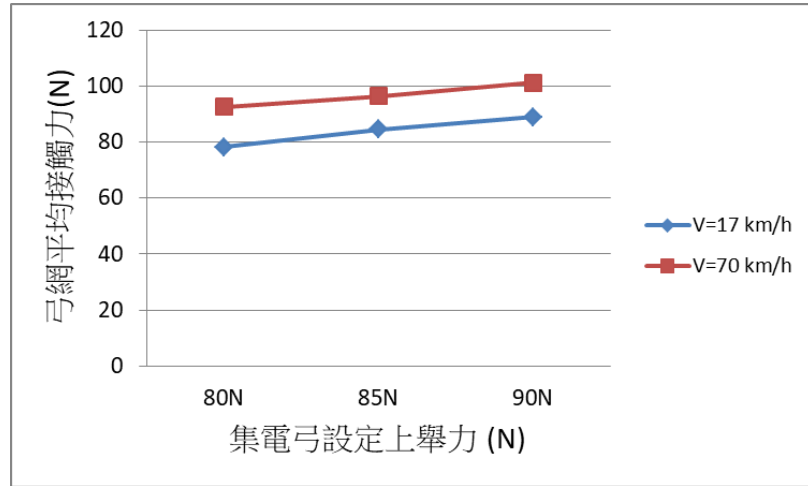


圖 13 參數敏感性：集電弓上舉力對弓網平均接觸力之影響分析

從圖 14 中可以發現，在淡海輕軌常用的速度下，當列車慢速 (17km/h)行駛時，弓網接觸品質大約都在 0.2 上下，表現相當良好。但隨著車速上升，到車速為 70km/h 時，若設定的集電弓上舉力較小(80N)，會使弓網接觸品質變差，此時若提升集電弓上舉力，可有效改善弓網接觸品質。由此可知，當車速變快或弓網接觸品質不佳時，調升集電弓上舉力可有效改善弓網接觸品質，避免不穩定的弓網接觸力，造成瞬間弓網接觸力過大，導致碳刷過度磨耗或磨耗不均問題。

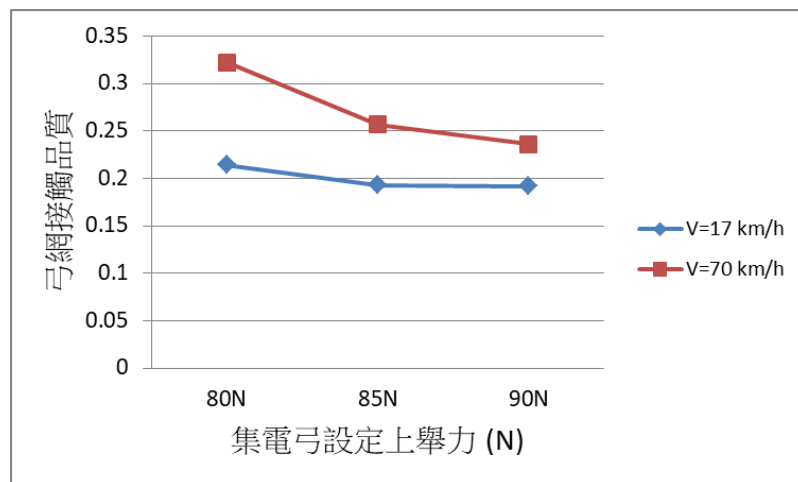


圖 14 參數敏感性：集電弓上舉力對弓網接觸品質之影響分析

(3)調整電車線張力對弓網接觸穩定性之影響

在弓網接觸過程中，除即電弓外，另一重要元件即為電車線，本節主要在模擬與比較不同的電車線張力設定條件下，弓網系統的動態行為，並將動態模擬結果進行比較，模擬結果數值如表 5。

表 5 不同電車線張力模擬結果

行駛速度	17km/h	17km/h	17km/h	70km/h	70km/h	70km/h
電車線張力	10000N	11000N	12000N	10000N	11000N	12000N
弓網平均接觸力(N)	84.4	84.2	84.6	96.1	95.9	96.5
標準差	21.3	17.8	16.3	27.9	25.5	24.8
弓網接觸品質	0.252	0.211	0.193	0.291	0.266	0.257

從圖 15 中可以發現，弓網接觸力不隨著電車線張力改變而有明顯變化。從此分析可以發現，調整電車線張力，對整體弓網平均接觸力幾乎沒有影響，因為集電弓的升降彈性功能會自動調節接觸力。

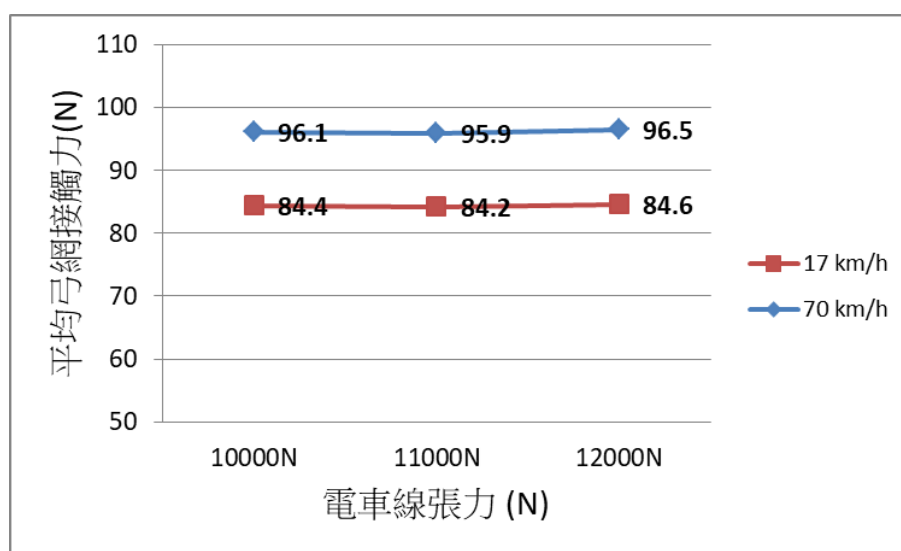


圖 15 參數敏感性：電車線張力對弓網平均接觸力之影響分析

但從圖 16 中可以發現，弓網接觸品質會隨電車線張力而改變，當電

車線張力越大時，弓網接觸品質越好。由此可知，當調整電車線張力，雖然幾乎不改變弓網接觸力平均值，但可以大幅改善弓網接觸品質，使弓網接觸力恆定，有助於降低磨耗量與磨耗不均問題。

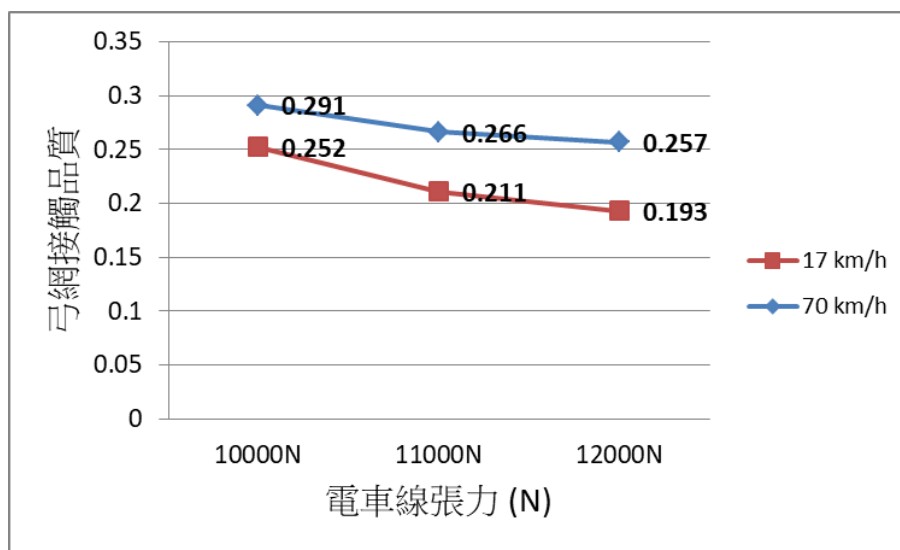


圖 16 參數敏感性：電車線張力對弓網接觸品質之影響分析

3.3 列車加速度對弓網磨耗量影響預估

本節主要探討列車加速時，可能產生較大電流，而電流對集電弓碳刷磨耗影響很大，必須列入考慮。假設基本車輛電器負載電流大約為 200A，牽引馬達，每顆最大功率約 126kW，每列車有兩個動力轉向架，每個動力轉向架有 4 個牽引馬達，故整列車有 8 個牽引馬達。因淡海輕軌處於營運初期，模擬時為符合現況，以探究碳刷磨耗原因，根據交通部「輕軌系統建設及車輛技術標準規範」在此車輛載重將取 W1(整列 53659kg)為代表。

本研究分為兩方案進行評估，Case1：依照規範允列車最大加速度 1.3 m/s^2 (現地實車量測最大約 1.1 m/s^2) 進行磨耗評估；Case2：調整列車最大加速度為 0.85 m/s^2 進行磨耗評估。並依照淡海輕軌養護慣例，碳刷厚度至少需有 6mm，而碳刷最厚處約有 18mm，因此假設碳刷上有任一點位磨耗深度達 12mm，則視為碳刷破壞，並且假定列車每天跑滿 20 單程趟次的情況下，進行碳刷使用壽命預估。

如表 6 所示，若將列車最大容許加速度從 1.3 m/s^2 限制到 0.85 m/s^2 ，則碳刷可使用天數約可從 129 天增加至 196 天，約增加 52% 之使用天數。如圖 17 所示，改變列車加速度碳刷磨耗量明顯下降。

表 6 改變列車最大加速度對碳刷磨耗之比較

	允許列車最大加速度(m/s^2)	每一趟次(約 7.2km)，集電弓磨耗最快處之磨耗量(mm)	以磨耗 12mm 深為限，可使用期限
case1	1.3	0.004608	129.6 天
case2	0.85	0.000305	196.7 天

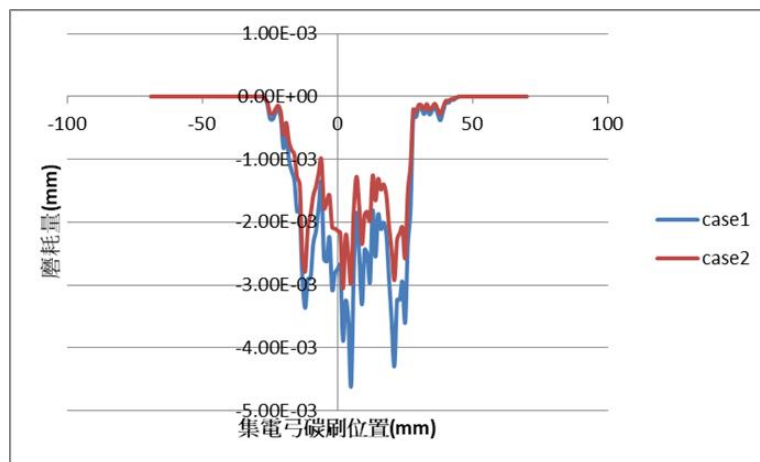


圖 17 改變列車最大加速度對碳刷每趟次磨耗量之比較

3.4 軌道表面不整對弓網磨耗影響

本節主要探討軌道表面不整對弓網接觸磨耗之影響，因本研究無法取得淡海輕軌線地軌道不整狀態，故以 Simpack 軟體內建之德國高干擾軌道譜為設定條件，德國高干擾軌道譜為長期監測之軌道不整平均值，具有一定代表性與參考性。如圖 18 所示，當有軌道不整時，碳刷磨耗量可能增加，如表 7 所分析，無軌道不整情況下，碳刷使用壽命約 130.2 天，有軌道不整情況下，碳刷使用壽命約 103.0 天，顯見在德國高干擾軌道譜下，將減少集電弓約 21% 的使用時間。然而，這是在全程皆為高干擾軌道不整的狀況下，實際情形中，軌道可能不會全程都處於高度不整狀態，因此在此建議，盡可能保持軌道不整在較低狀態，即可延長碳刷使用壽命。

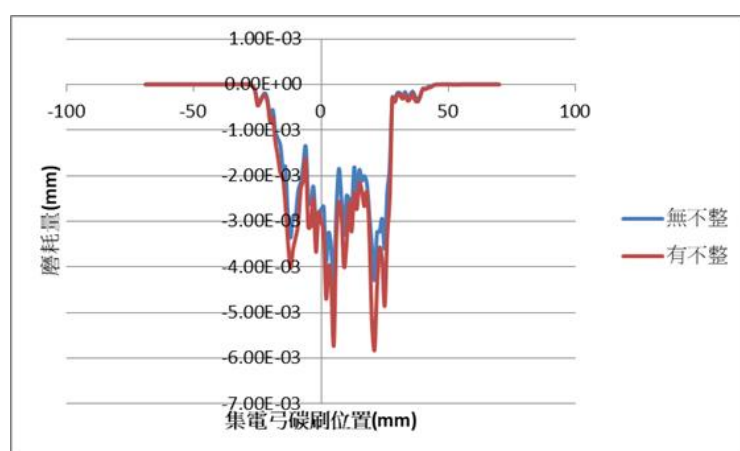


圖 18 軌道不整對碳刷每趟次磨耗之影響

表 7 有無軌道不整對碳刷磨耗之比較

	允許列車最大加速度(m/s ²)	每一趟次(約 7.2km)，集電弓磨耗最快處之磨耗量(mm)	以磨耗 12mm 深為限，可使用期限
無軌道不整	1.3	0.004608	130.2 天
有軌道不整	1.3	0.005818	103.0 天

4. 結論

- (1) 本研究探討國內首個 DC750V 架空線供電鐵道系統之弓網接觸與磨耗特性，具有參考價值，相關成果可貢獻於未來相關系統設計或國內自主集電弓系統研發
- (2) 電流是影響碳刷磨耗的重要因素，在考量移運條件時，可盡量避免大電流的營運條件出現。調整集電弓上舉力有助增加弓網接觸穩定性，但過大的接觸

力可能反而造成碳刷磨耗，因此上舉力調整須與碳刷磨耗量進行整體考量。

- (3) 增加電車線張力可有效增加弓網接觸穩定性，但本研究尚未考慮電車線疲勞與張力破壞等因素，調整電車線張力時，仍應注意電車線是否仍承受過大的張力值。
- (4) 根據研究結果，集電弓通過電流量越大，造成的碳刷磨耗越顯著，一般狀況下，列車行駛時加速度越大，代表通過碳刷的電流越大，也會造成越大的預估碳刷磨耗量，依據量測結果，淡海輕軌實際列車加速度約為 $1.0\text{m/s}^2\sim 1.2\text{m/s}^2$ ，建議可在容許範圍下，稍微降低列車最大加速度以降低碳刷磨耗量。但輕軌具有站間距離較短、車站密集、加減速頻繁等特性，並且須考量站間營運時間等問題，因此仍需與營運部門討論作通盤考量，並在營運需求優先下做出均衡決定。
- (5) 弓網接觸力雖然平均值不變，但跳動變異性增加，穩定性變差，容易出現瞬間極大接觸力值，造成局部或不均勻磨耗產生。在軌道不整處於較嚴重狀態下，列車連續密集營運，可能影響集電弓壽命達 21%，因此保持軌道不整處於良好狀態，或於發現軌道不整後盡快養護，有助於降低碳刷磨耗，提升碳刷使用壽命。

誌謝與說明

本文乃依據新北市政府捷運工程局之研究案成果進行摘要後投稿，因淡海輕軌為國內第一個採用全程 750V 直流電架空線供電之軌道系統，因此面臨到集電弓碳刷磨耗問題。新北市政府捷運工程局本於研究成果公開與各界分享之精神，因此將研究成果與以摘要進行投稿，供各界分享，並期各界能在此基礎上，進行深入研究探討，共同促進本土自主技術發展，使國內對軌道系統弓網接觸機制與原理能有更深入之了解。

5. 參考文獻

- [1]李政安、林逸羣、詹家維、盧映阡、姜大駿，「新北市輕軌捷運電車線的營運遭遇的問題與改進」，中興工程，第 149 期，第 81-86 頁 (2020)。
- [2]Song, Y., Antunes, P., Pombo, J., and Liu, Z., “A methodology to study high-speed pantograph-catenary interaction with realistic contact wire irregularities,” *Mechanism and Machine Theory*, 152, 103940 (2020).
- [3]Pombo, J., & Ambrósio, J. (2013). Environmental and track perturbations on multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains. *Computers & Structures*, 124, 88-101.
- [4]Poetsch, G., Evans, J., Meisinger, R., Kortüm, W., Baldauf, W., Veitl, A., &

- Wallaschek, J. (1997). Pantograph/catenary dynamics and control. *Vehicle system dynamics*, 28(2-3), 159-195.
- [5] Ambrósio, J., Pombo, J., Pereira, M., Antunes, P., & Mósca, A. (2012). Recent developments in pantograph-catenary interaction modelling and analysis. *International Journal of Railway Technology*, 1(1), 249-278.
- [6] Yao, Y., Zhou, N., Mei, G., and Zhang, W., “Analysis of collision dynamics of lifting the pantograph during vehicle operation,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 09544097211042690 (2021).
- [7] Eppinger, S. D., O’Connor, D. N., Seering, W. P., & Wormley, D. N. (1988). Modeling and experimental evaluation of asymmetric pantograph dynamics.
- [8] Zhou, N., Zou, H., Li, R., Mei, G., & Zhang, W. (2016, July). Dynamic behavior of different pantograph models in simulation of pantograph and catenary interaction. In 2016 35th Chinese Control Conference (CCC) (pp. 10242-10247). IEEE.
- [9] Rodríguez, P., Suárez Esteban, B., Chover Álvarez-Monteserín, J. A., Terrón, J., and Sanz Bobi, J. D. D., “Pantograph wear assessment in overhead conductor rail systems,” *IAVSD 2011: 22nd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, 14-19 (2011).
- [10] Bucca, G., & Collina, A., “A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system,” *Wear*, 266, 46–59 (2009).
- [11] Bucca, G., & Collina, A., “Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model,” *Tribology International*, 92, 47–56 (2015).
- [12] Ashby, M. F., and Lim, S. C., “Wear-mechanism maps,” *Acta Metallurgica*, 35(1), 1-24 (1990).
- [13] Pil Jung, S., Guk Kim, Y., Sung Paik, J., and Won Park, T., “Estimation of dynamic contact force between a pantograph and catenary using the finite element method,” *Journal of computational and nonlinear dynamics*, 7(4) (2012).
- [14] 黃世豪，「電車線系統與集電弓動態行為研究」，碩士論文，國立臺灣科技大學機械工程系，台北市(2019)。
- [15] Hippmann, G., “An algorithm for compliant contact between complexly shaped bodies,” *Multibody System Dynamics*, 12(4), 345-362 (2004).