



淡海輕軌國車國造創新特色與 BIM 技術運用

新北市政府捷運工程局副局長 / 李政安
新北市政府捷運工程局總工程司 / 凌建勳
新北市政府捷運工程局淡海工務所主任 / 涂貫迪

關鍵字：淡海軌輕、國車國造、輕軌創新特色

摘要

台灣軌道運輸系統自民國 85 年 3 月 28 日第一條木柵線捷運通車開始，已開始邁入軌道運輸系統的新紀元，經過 20 多年的各項重大軌道運輸工程建設，國內相關廠商已累積許多軌道運輸工程之規劃、設計、監造、施工之技術與經驗，逐漸累積以全生命週期考量的執行實力。

而在軌道系統部分，新北市在發包策略上採取全生命周期成本最佳化的思考模式，將相關路網所需之核心機電系統以一次性採購方式辦理，以利維修管理單純化，並降低相關成本，以期達成最有利標的效益最大化。

而長期以來國內軌道車輛與機電系統採購大都採取國際標，國內廠商皆因製造實績不足，標案大部分皆由國外廠商得標。過去

由於外商為避免產生未來的競爭者，不願充分移轉技術給我國廠商，致使工業合作始終未能取得核心技術，然經由新北市輕軌系統的採購策略，並以淡海輕軌專案為第一階段，後續配合發包策略，導入完整之設計體系以建立我國軌道工業獨立自主與解決人才不足的窘境，除落實國車國造政策外，還可提升車輛設計的能力，期盼能帶動國內零組件廠商之投入，形成一產品供應鏈，進而推動國內軌道車輛產業在地化。

淡海輕軌第一期統包工程行經淡海新市鎮（綠山線）及漁人碼頭（藍海線），讓淡海輕軌的列車系統不僅為有效率的大眾運輸工具，而是同時兼具交通及觀光的功能，經由 BIM 技術運用與管理及精巧之設計工藝結合地方特色，並配合國內首次以運輸系統為規劃基礎的公共藝術，讓都市輕軌不只是交通建設，更可營造輕軌電車成為移動的城市地



標。輕軌系統穿越都市之市中心，車輛、車站與軌道佈設之美學設計可提升視覺促使城鎮美化，並與城市之整體發展緊密融合。讓都市輕軌不只是交通建設，更希望塑造成移動的藝術作品，更希望可以為文明的都市交通習慣注入活力，鼓舞民眾多利用大眾運輸，其親和性與便利性使民眾樂於親近與使用。

一、前言

近 20 多年以來因技術門檻及法令限制，台灣軌道車輛主要向國外採購，採購對象包括美國、德國、日本及韓國等主要國家。各國產品間系統無法完全相容，後續維修與備品亦受制國外原廠，產生相當多的社會成本。但軌道車輛中有相當比例之組件、設備原產地為台灣，僅受限業界缺少系統整合、分析設計之實務經驗與能力。因此各界開始積極思考，台灣軌道車輛提升本土自製率之可能性。

國內車輛生產廠商正藉由各專案執行之機會，致力升級轉型。由早期人力組裝代工階段，逐漸朝向發展全方位之設計、製造、安裝、測試及驗證等全系列技術。以淡海輕軌車輛系統為例，首列輕軌列車關鍵子系統如煞車、動力、車門、集電、儲能等系統雖仍外購，但車廠已開始和國外車輛設計團隊合作及技術移轉，提升國內軌道車輛之設計整合能力。國內本土廠商掌握設計能力後，供應鏈的國產化才有後續發展的可能。也希望藉由淡海輕軌國車國造計畫，打破國內軌道產業長期受外商壟斷系統技術的現況，取得輕軌車輛製造的關鍵技術。

二、文獻回顧

輕軌系統之發展可追溯到 19 世紀末期，德國成功製造出第一台有軌電車。但隨著汽車工業的發展，有軌電車不論是駕駛速度或是乘坐舒適性，都比不上私人汽車，所以有軌電車逐漸被汽車所取代。

一直到了 1960 年代，因為工業化快速發展導致城市規模及人口數量迅速增加，導致城市交通狀況擁擠不堪。加上環保意識的提升，在 1970 年代各國就開始重新考慮發展新一代城市軌道交通系統。

輕軌運輸 Light Rail Transit (LRT)，主要由國際公共運輸聯盟 (UITP) 於 1978 年 3 月在比利時的布魯塞爾召開的第一次輕軌委員會中提出新型的軌道系統，在會議上正式定義為「輕軌交通」。

美國運輸研究學會 (TRB) 在 1989 年提出之定義，輕軌運輸係指「一種電力驅動之都區軌道運輸系統，可以以單節車廂或短列車行駛於地面、地下、高架之隔離式專用車道，或偶爾行駛於街道上。其車輛設計可允許以低月台在軌面平面上運送乘客，或高月台在車輛底板平面上運送乘客。」

經濟部自民國 88 年起推動工業合作計畫，藉軌道車輛及重要機電設備採購案執行工業合作互惠協定，截至民國 99 年，臺鐵通勤電聯車由台灣車輛公司得標，國產化比例約 52%；其中重要的移轉技術包括車體加工、內裝及照明、充電系統、空調系統、牽引馬達加工、轉向架加工組裝等。



圖 1 淡海輕軌第 1 期路網

依據交通部「輕軌系統建設及車輛技術標準規範」：「輕軌系統係指有人駕駛、使用導引、電力驅動之客運運輸系統，可因地制宜，同一路線可單獨或混合採用專用路權、隔離路權」；另依據大眾捷運法第 3 條略以：「大眾捷運系統為非完全獨立專用路權者，其共用車道長度，以不超過全部路線長度四分之一為限。」

淡海輕軌第一期統包工程包含綠山線與藍海線兩部份，路線全長約 9.7 公里，共設置 14 座車站，1 座機廠，路線及車站如圖 1。其中預計於 107 年底優先完工的綠山線由捷運淡水信義線紅樹林站起，沿中正東路、淡金路北上，經濱海路、沙崙路至新市六路止，全線長約 7.3 公里，其中約 5.1 公里為高架橋路段 (A 型路權)，其餘約 2.2 公里為平面路



圖 2 淡海輕軌車輛發展概念圖

段 (B 型路權)，沿線設有紅樹林、竿蓁林、淡金鄧公、淡江大學、淡金北新、新市一路、淡水行政中心等 7 座高架候車站，濱海義山、濱海沙崙、淡海新市鎮、崁頂等 4 座平面候車站，以及 1 座機廠。

另第一次國車國造的淡海輕軌列車已於 105 年 11 月 16 日正式對外亮相，是全國第一列國車國造的輕軌車輛，列車外型是採用 I-Voting 票選結果，以海為意象的流線型設計，材質部分配合淡水地區氣候及地理環境特別選用不銹鋼與耐候鋼，車廂內外都採用水藍色系設計，與淡水地區的藍天海景相呼應，發展概念如圖 2。該列車為五個車廂模組雙向駕駛，屬於輕運量有人駕駛的 100% 低底盤車輛，最高運行速度 70km/hr，相關列車參數如圖 3。

三、技術移轉 - 國車國造

淡海輕軌由統包商中鋼集團得標後，列車交由台灣車輛公司與德國福伊特公司 (Voith Engineering Service) 共同設計、製造、測試並取得德國第三公證單位南德公司的驗證，完整導入 3D 設計、分析模擬、圖文管理系統，自主產出各車輛系統模組 3D 繪圖、機械



型式	鋼軌、鋼輪		
電聯車列數	15 列車		
最小轉彎半徑(主線)	25m		
最大爬坡度(主線)	7%		
尺寸(列) 長×寬×高	34,450 mm×2,650mm×3,600mm		
從軌頂面至車廂地板面高度	350mm		
車體材質	不鏽鋼+耐候鋼		
載客容量	每列車載客量	265 人/列車	
	座位與立位人數	座位	立位
		62 人	203 人
座椅配置	『縱向與橫向』混合排列		
煞車系統	電力煞車、油壓煞車及軌道煞車		
車內緊急逃生設備	緊急對講機、緊急開門裝置、緊急逃生窗		
最大營運速度	有架空線路段 70km/h		
	無架空線路段 50km/h		
供電方式	750 VDC 架空線/儲能系統(鋰電池)		
號誌系統	輕軌與平面交叉號誌系統		

圖 3 淡海輕軌列車諸元

軟體	功能
CATIA	3D 繪圖設計
SIMPACK	動態模擬分析
ANSYS	車體結構、轉向架框設計驗證、強度評估
ENOVIA	產品生命週期管理

圖 4 車輛使用之軟體說明

CATIA 3D繪圖設計	
模組名稱	數量 (套)
1 基本模組	24
2 钣金模組	12
3 曲面模組	14
4 管路模組	7
5 電氣模組	8
6 檢測模組	4



圖 5 設計軟體說明

與電氣施工圖、結構應力模擬分析、結構疲勞強度模擬分析、結構撞擊模擬分析(如圖4、圖5)，藉由上述軟體與系統投資，大幅強化設計與驗證能力，使得全車從設計、製造

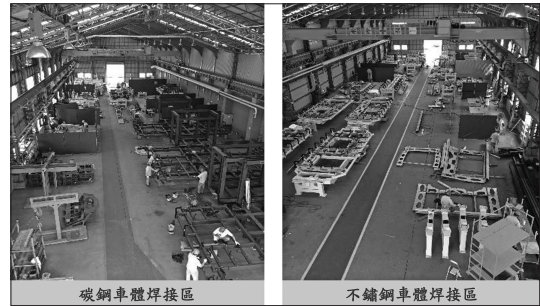


圖 6 車體生產線照片

到相關部分測試都在台灣進行。

於技術轉移、軟體環境、驗證認證、海外受訓、生產線建置及測試廠房與設備方面投資數億元(如圖6)，掌握關鍵技術(Know How)，為「國車國造」之重要里程碑。

四、淡海輕軌列車組成構面

淡海輕軌於平面段是利用原淡海新市鎮道路之中央分隔島作為車站及路線線型考量的範圍，故在各橫交路口之平整面及車站硬體建設都需配合列車進行整合設計。

而輕軌系統在於強調以乘客舒適品質導向之設計，例如上下車之便利性，所以在系統上必須發展的關鍵技術包含：克服小轉彎半徑、增加便捷性、適應既有月臺設施、高制動能力、降低輪軌滾動的噪音、模組化結構、輕量化設計、節省能源等。

以下分別以車輛的設計層面、軟體層面、硬體層面、測試認證、軌道車輛國產化策略分析，說明淡海輕軌車輛於專案中的創新特色及科技應用。

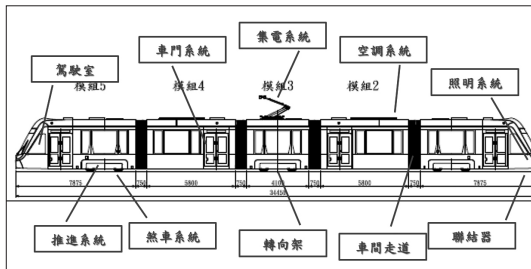


圖 7 列車架構圖

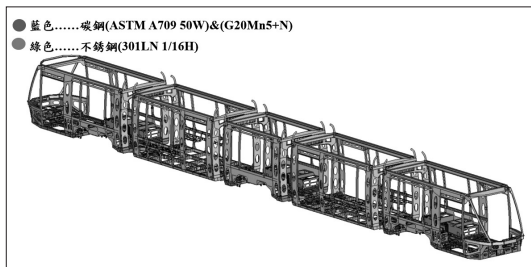


圖 8 列車材料圖

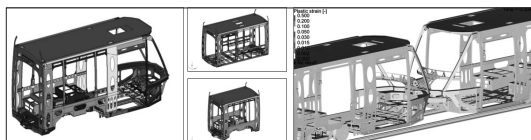


圖 9 有限元素分析車廂模組幾何模型

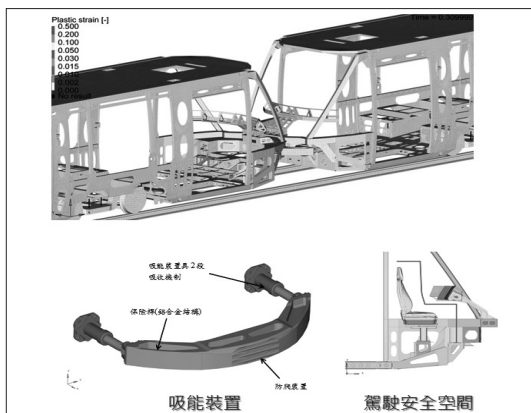


圖 10 抗撞分析幾何模型

(一) 車體結構系統

淡海輕軌列車為五組車廂，雙向駕駛模組的設計，而車輛工程的組成構面可分為推進系統、煞車系統、轉向架、車門系統、集電系統、空調系統、照明系統及聯結器系統所組成 (如圖 7)。

其中車體結構在 M3 模組因為底盤平整不易應力集中，採用不鏽鋼結構，與 M1/M5 相較又承受較少之撞擊力，另在轉向架上方底盤轉折多，應力易集中。

且此處底盤需承受轉向架所帶來之承載應力，所以採用碳鋼組成 (如圖 8)。

另透過 ANSYS FEM 的應力分析、疲勞強度、轉向架框及車體結構配合抗撞幾何模型的強度評估 (如圖 9、圖 10)，並考量台灣的交通習慣後，將車頭的吸能裝置首度提昇具備 500kN 車端抗壓縮力之輕軌車輛 (一般為 200 ~ 400kN)。可最小化碰撞時的損害與維修工序，超越 EN15227 標準。

(二) 聯結器系統

淡海輕軌車輛 1、5 模組車廂長度將近 8 公尺長，2、4 模組將近 6 公尺長，第 3 模組約為 4 公尺長，為了避免影響路人及鄰近建物並增加轉彎能力，列車針對小轉彎半徑，藉由改變車廂長度及配備鉸接裝置來達成車輛行駛時的動態包絡線範圍較小之目標 (如圖 11)。

而在關節式聯結器之設計強度與可撓範圍可承受正常營運、機廠調度、維修作業及緊急拖救下所發生之各方向作用力而不會產

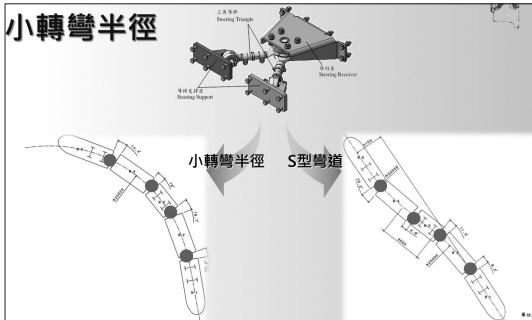


圖 11 鉸接裝置功能圖

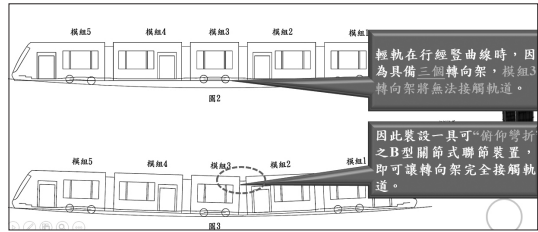


圖 13 豎曲線關節器作用示意圖

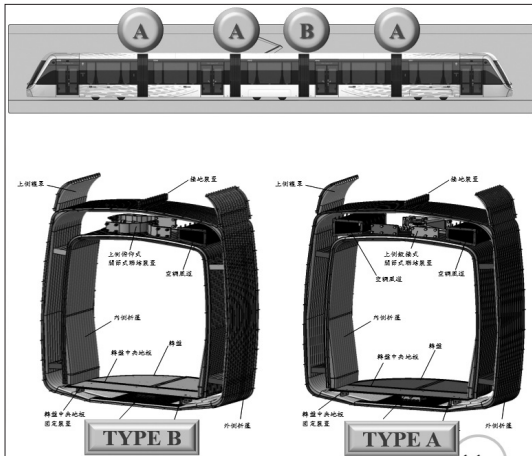


圖 12 關節式關節裝置



圖 14 轉向架框疲勞測試

生永久變形或導致車廂分離，並且能吸收列車加、減速所產生之縱向能量，而本身無橫向相對運動，乘客可安全站立在此空間 (如圖 12)。

另在 M2 及 M3 模組間則採用上側俯仰彎折之 B 型關節式關節裝置 (如圖 13)，其他採用上側鉸接式關節裝置，讓列車在行經豎曲線時轉向架可完全接觸軌道，增加列車營運安全。

(三) 轉向架系統

淡海輕軌的轉向架框為國產化的項目之一，並通過執行 600 萬次週期之疲勞測試 (如圖 14)，且分別於測試 200 萬次、測試 400 萬次及測試 600 萬次時執行非破壞性檢測 (MT)，並確認數據是否符合測試要求，以確保轉向架框之結構達到設計及規範之要求。

在配置上 M1/M5 模組下方為動力轉向架，M3 模組為非動力轉向架 (如圖 15)，而轉向架之功能除了能將動力產生的車輪旋轉力轉換為推進力傳送提供為車輛前進外，為了達到低底盤設計，配合輪軸組及獨立車輪的設計，讓車內走道可以降低至 350mm 以達到 100% 低底盤，轉向架在設計同時，相關

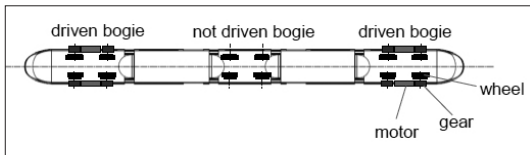


圖 15 轉向架配置圖

設備也需要向外側安裝，包含牽引設備和煞車設備等。

為瞭解車輛在實際運行中，通過各種軌道線形的能力以及其安全性，以驗證轉向架上彈性組件（彈簧、橡膠襯套與避震器，如圖 16）之特性是否正確，及評估乘車品質等動態特性，需進行多體模擬 (Multi-Body Simulation, MBS)，後續利用 SIMPACK 軟體進行動態分析，並搭配 Matlab 後處理完成設計 (如圖 17)。

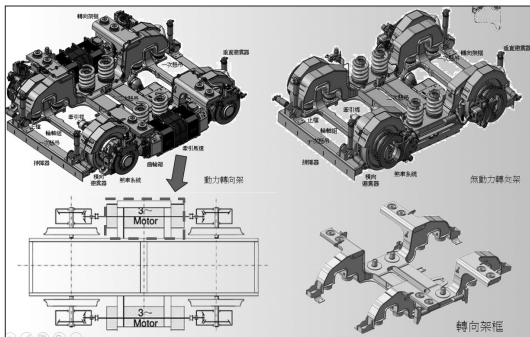


圖 16 轉向架設計系統

(四) 推進系統

推進系統換流器是將架空線的能量從直流電轉換為可變電壓、頻率及電流的交流電給牽引馬達使用 (如圖 18)，並透過推進系統的控制單元來控制，而淡海輕軌之電力來源主要為架空線，行經部分無架空線路口段車輛需降弓改由儲能裝置供應電力 (如圖 19)，而其中之輔助電源供應器、高速斷路器、牽引系統整流器、牽引馬達、煞車電阻及牽引電池等設備係由 ABB 所提供，其中推進系統核心整流器係使用 CC400 Converter，該設備採用模組化設計之理念，目的在於發生故障或異常時得以於最短時間內完成維修作業，僅需針對發生故障或異常之模組予以更換，藉此達到提升營運之服務品質。

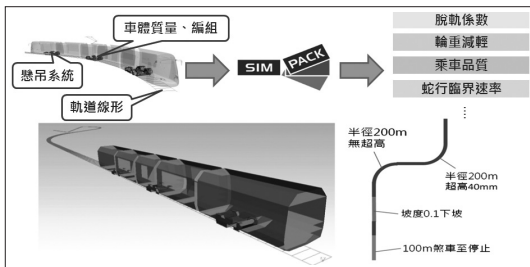


圖 17 SIMPACK 軟體進行動態分析

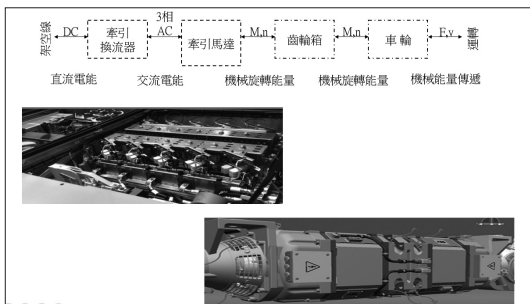


圖 18 推進系統圖

(五) 煞車系統

由於淡海輕軌系統路線包括了高架及平面路段，在高架路段之坡度在紅樹林站約 6.1%，在高架轉平面之橋台段及部分平面路段，因為淡水地形關係也有約 4.8%；而在平面道路汽、機車及行人併行，為了能夠即時反應各種突發狀況，輕軌系統煞車能力設



計時，需考量上述環境因素的影響。

淡海輕軌的設計優先採用電力煞車，直到速度降到 5 km/h 時，電力煞車力開始下降直到速度降到 3 km/h，同時電子液壓摩擦煞車開始作動直到列車停止；但當緊急狀況發生時，則需要採用緊急煞車模式，同時作動電力煞車、摩擦煞車及電磁式軌道煞車(如圖 20)。

當輕軌車輛在彎道、斜坡或是雨天的情況發生時，可藉由撒砂裝置來提高輪軌間的摩擦係數，當然在緊急煞車時同時也會作動撒砂裝置來加強煞車能力(如圖 21)。

(六) 車門系統

淡海輕軌每列車皆有 8 具電控滑塞門，具備全玻璃門板、全週氣密、外觀與車體齊平來營造美觀整齊特性(如圖 22)。而在車門的安全系統上，車門系統、推進系統及煞車系統三者間具備相互連鎖功能，確保車門關妥後始得啟動列車。

車門警示系統於列車開啟/關閉車門前，車門音響單元發出警示聲響提醒乘客；輕軌系統車門係由駕駛員授權後，由乘客自行操作車門按鈕開啟車門。

(七) 節能設計

淡海輕軌列車為國內首度採用非金屬複材於車體結構(車頂)之軌道車輛。與同強度之傳統金屬結構相較，複材結構可大幅減輕重量，以達節能減碳之效(如圖 23)。膠合工法與焊接相較，可帶來更平均的應力傳輸特性。

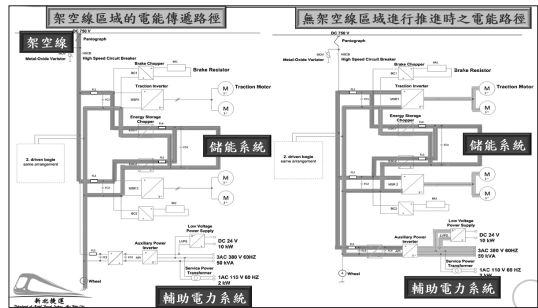


圖 19 架空線 / 無架空線電力系統

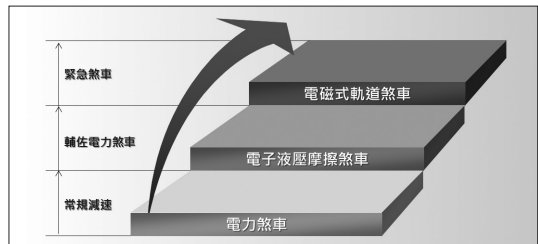


圖 20 煞車系統說明

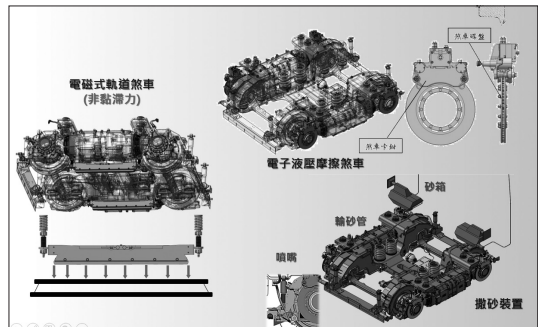


圖 21 淡海輕軌煞車及撒砂裝置

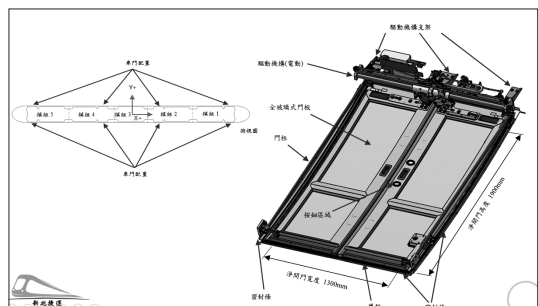


圖 22 車門配置及架構圖

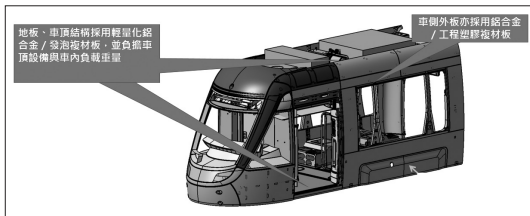


圖 23 車體複合材料構造圖

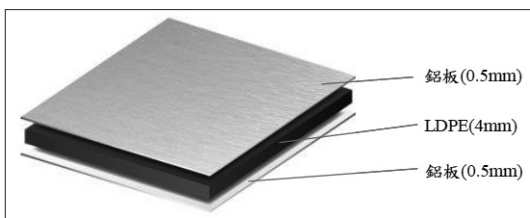


圖 24 三明治板構造圖

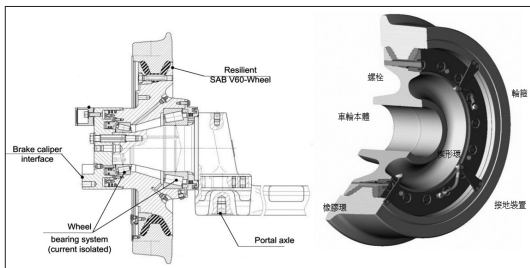


圖 25 彈性車輪



圖 26 GIS/BIM 設計整合

而其中之車廂頂板、及外板係由兩片鋁質薄板及包覆於薄板內層之低密度聚乙烯 (LDPE) 組成 (如圖 24)，於生產時完成空調通風口及廣播孔等鑽孔作業，再藉由多次冷加工滾軋製程彎成 10,000mm 之曲率半徑；而地板則是 17mm 厚之複合式材料夾板，表層板為 1mm 上有底漆之鋁板，二層面板間則填滿 PET 發泡材質構成如三明治結構之夾板，其內部具有鋁擠型骨架以增加強度，並提供內裝元件安裝之鎖固介面，並於台灣進行頂板與車體結構之膠合作業。

(八) 車輪系統

為減少列車行駛時所產生之振動與噪音量，輕軌車輛採用彈性車輪，車輪內有橡膠環用以吸收來自軌道的振動以達到要求 (如圖 25)，可多次鍍削。

五、BIM 技術應用

(一) BIM+GIS

目前國內應用建築資訊模型 (Building Information Modeling, BIM) 技術，大都為建築物或車站，為「點」的概念，未能完全符合輕軌及捷運系統「線」之特性及需求。淡海輕軌將 BIM 技術由候車站的「點」推展至輕軌路線的「線」及周遭建物的「面」，並配合上述國車國造之設計特點與軟體搭配進行科技應用。

其中 BIM 模型整合至 GIS 為國內先例，BIM 模型中豐富的資訊可與 GIS 結合形成完整的數位化三維城市模型 (如圖 26)，結合 GIS 與 BIM 內所包含之豐富資訊，未來還可以應用於城市規劃、城市景觀規劃、城市環



境分析、城市建設管理、城市公共資產管理等議題。

本計畫於設計階段及完工後共兩次建置全線空拍攝影測量三維模型，涵蓋路線外 250 公尺範圍內之地表及鄰近建物。施工階段 BIM 與 GIS 之結合可協助執行專案管理掌控進度與品質。

(二) BIM+VR

本次透過國車國造的技術移轉，將車輛以虛擬實境 VR(Virtual Reality) 提供沉浸式的體驗，能讓國產化後之業主、客戶或一般民眾不需具備專業知識，就能藉由 VR 技術和虛擬物件進行互動。淡海輕軌創新應用將 BIM 模型結合 VR 技術，建立淡海輕軌列車及候車站之 VR 場景，協助體驗者身歷其境，以人因工程之角度探討設計議題，展示設計成果 (如圖 27、28)。

BIM 技術是包含豐富的建築全生命週期 3D 模型資料庫，當 BIM 模型要轉換成 VR 時，首先須挑選出要展示的專案模型，匯入 3DMAX 軟體去除不需要展示的元件，留下將要在 VR 內呈現的部分即完成初步雛型；接著將模型匯入動畫軟體進行編輯，最後以 3D 場景匯出成 VR 的執行檔案，提供使用者身歷其境之效果 (如圖 29)，並可依需求呈現各種預想之設計，配合各組件國產化的目標，後續可以供客戶利用科技來做選擇 (如圖 30、31)。

六、結論

國車國造不僅為台灣軌道產業的亮點，在新北市整體輕軌路網機電系統單純化之願

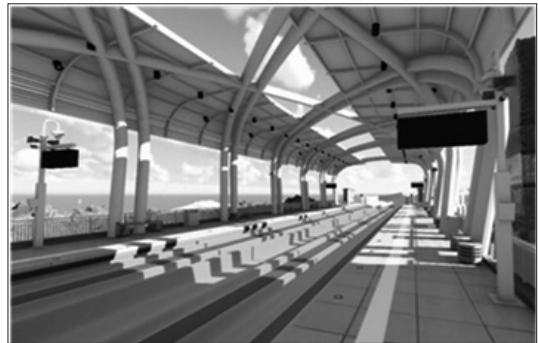


圖 27 高架車站設計整合



圖 28 列車與車站介面整合設計



圖 29 VR 技術討論設計成果



圖 30 客製化需求展示設計成果

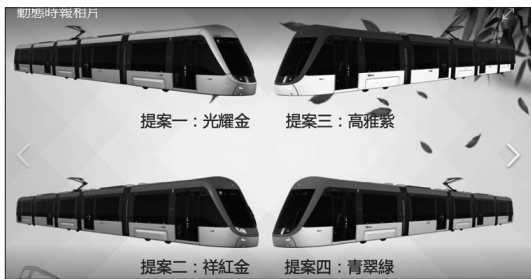


圖 31 客製化需求展示設計成果



圖 32 淡海輕軌實車及施工照片

景而言是一重要里程碑，對國車國造更是邁出一大步，從設計到製造都在台灣完成的輕軌列車，不但為輕軌產業立下重要里程碑，對未來國內推展輕軌系統亦能有效降低建

置、營運及維修成本，更可確保後續系統擴充的相容性，不再處處受制於國外廠商，奠定本國自行研發輕軌系統之基礎。

淡海輕軌列車全車在台灣設計、製造與測試 (如圖 32)，國內廠商逐步掌握關鍵技術與設備規範後，於國內挑選適合的零件供應商或配合國內研究單位協助廠商開發，協助國內建立自主的軌道車輛工業、零組件供應鏈，目標在民國 114 年將輕軌零組件國產化推展至 50% 以上；目前初步規劃國產化項目為車體結構、車內空調、客室玻璃、客室座椅、車上燈具、駕駛台、轉向架框等，預期可創造國產化產值至少新台幣 38 億，後續營運維修商機達 30 億元以上，若將其他縣市輕軌電車建設及後續維運費用納入，國產化商機將可達 144 億元，邁向規模經濟後，進而參與國外軌道工程標案，屆時可帶動上下游相關產業發展，預計創造 670 億元以上的產值。

七、未來展望

為了提升國內軌道產業技術及產值，需在相關法令及產業的經濟規模提升下，才可建立相關子系統完整的供應鏈，並增加國內就業機會與培養國內軌道車輛與機電系統設計、製造、驗證與維修人才，提出以下建議：

- (一) 由中央邀集相關部會召開軌道產業推動會報，並定期檢視相關法令、技術研發與產製等成果，建立良好的投資管道及環境。
- (二) 制定軌道國產化關鍵項目國家標準。提供符合採購法之國內廠商參與軌道建設機制，提昇廠商的投資意願。



- (三) 成立軌道技術研究驗證中心，協助測試認證環境與國際接軌。
- (四) 配合上述建議執行期程，整合政府部門及民間軌道相關產業公司團體的軟、硬資源建立相關軌道人才培育的短、中、長程計畫，以深耕及培養技術人才。 ◆

參考文獻

1. 新北市政府資訊網，<http://www.ntpc.gov.tw>。
2. 新北市政府捷運工程局資訊網，<http://www.dorts.ntpc.gov.tw>。
3. OPEN33! 三環三線進度公開專頁，<http://open33.ntpc.gov.tw/index>。
4. 淡海輕軌運輸系統綜合規劃(核定本)，交通部高速鐵路工程局(規劃主辦機關)及新北市政府(建設主管機關)，102年3月。
5. BIM於捷運車站生命週期應用，捷運技術半年刊第47期(P15-P22)，台北市政府捷運工程局，101年7月。
6. BIM運用於台北捷運之探討，捷運技術半年刊第47期(P159-P166)，台北市政府捷運工程局，101年7月。
7. 淺談國車國造，中國工程師學會會刊，工程 Vol.88 No.6，104年12月
8. 陳俊融，那些年我們一起迎接輕軌，高雄市。