



工程

- ▶ 本會與台灣軌道工程學會簽訂合作協議
- ▶ 智慧鐵道發展架構與推動策略
- ▶ 鐵路事故分析方法之綜述-以複雜網路理論為例
- ▶ 捷運工程於BIM建築資訊模型結合混合實境應用之前導研究
- ▶ 臺鐵電務智慧化-以68站號誌連鎖系統更新案為例
- ▶ 軌道養路工程車之智慧化應用



智慧軌道 運輸安全行



* 臺鐵南迴鐵路電氣化
縱橫四界的願景擊劃者

中興公司負責範圍從臺鐵南迴線枋寮站至台東站，長約98.2公里
本標計畫含10座客貨運站、2座號誌站、5處廢站
及臺鐵臺東機務分段，協助辦理電氣化工程細部設計工作
如質如實的完成最後一哩鐵路電氣化，達成環島鐵路電氣化目標。



鐵道建設工程

中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統
機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發
園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

105409 臺北市松山區南京東路五段171號
電話：(02) 2769-8388 傳真：(02) 2763-4555
E-mail : sinotech@sinotech.com.tw
<https://www.sinotech.com.tw>

正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破

中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.





智慧軌道運輸安全行

為了因應節能減碳的趨勢與綠色交通運輸的達成，政府就全國軌道運輸網之發展與建置做了整體性的規劃，於106至111年總計投入約千億元特別預算推動軌道建設，打造臺灣軌道系統未來成為安全便利永續、兼具觀光與自主製造產業發展的軌道運輸服務體系。現代化軌道建設之實踐，除了土建、軌道、車站水電環控、核心機電等設計、施工各領域的新技藝之採用外，還必須加入智慧化的元素與系統，同時尚需涵蓋營運與維修的所謂全生命週期成本最佳化的考量。本期專輯旨在闡述我國智慧軌道發展策略、更新改善案例探討、以及國際間相關軌道智慧化實務報導等。

活動報導

- 02 生醫工程與防疫研討會
- 04 本會與台灣軌道工程學會簽訂合作協議
- 06 專案管理實務暨第20屆公共工程金質獎專案管理得獎專案分享研討會

智慧軌道運輸安全行

客座主編：林根勝 / 中興工程顧問股份有限公司 副總經理

- 11 智慧鐵道發展架構與推動策略 / 楊正君、楊振忠、林啟豐、王翔正
- 27 鐵路事故分析方法之綜述-以複雜網路理論為例 / 陶冶中
- 42 軌道設備智慧化在運輸安全之應用 / 莊英震、高榮崇、張相胤
- 58 捷運工程於BIM建築資訊模型結合混合實境應用之前導研究 / 李政安、陳加乘、王仲民、黃正翰、吳書嫻、謝禎謙
- 68 以BIM輔助開發捷運建築設計、校核工具與智慧化逃生檢核工具 / 陳柏愷、王思涵、洪晨璋、賴建名
- 90 智慧軌道交通 / 林忠正、孫郁鈞、楊政儒、楊昆霖
- 105 臺鐵電務智慧化-以68站號誌聯鎖系統更新案為例 / 曾啟鵬、林根勝、楊惇惠、周祖德
- 116 機場捷運與延伸線號誌系統的共融性 / 李文杰、陳永森、何建勳、陳諸賢、陳景池、史春華、王村竹、吳鳳慶、劉建宏
- 138 高雄輕軌一、二階供電系統整合技術與實務 / 劉智閱
- 146 軌道養路工程車之智慧化應用 / 廖正堅、黃劉乾、施瑞潮、鄭文龍、楊忠哲、王兆賢、郭林堯

工程與技術

- 168 時分復用諧振式光纖陀螺背向散射噪聲研究 / 黃廉閱

理事長：施義芳

常務理事：李世光 胡湘麟 許鈺漳 楊偉甫

理事：王宇睿 王錫欽 伍勝園 江秀丹

余信遠 宋裕祺 李順欽 杜俊

林聰利 俞克維 張武訓 莫仁維

陳仲賢 陳哲生 陳國隆 楊正宏

楊宗興 廖學瑞 歐善惠 鄭文隆

鄭光遠 賴建信

常務監事：廖慶榮

監事：邱琳濱 高宗正 陳宗德

秘書長：李元唐

副秘書長：李瑋聆

發行所：中國工程師學會出版委員會

主任委員：黃炳勳

委員：王宇睿 李元唐 吳天寶 林建華

林根勝 孫幸宜 莫仁維 陳哲生

陳榮貴 楊正宏 廖學瑞 蘇程裕

總編輯：張鈺輝

客座主編：林根勝

編輯：李宥萱 李綺馨 林秀琴 袁雅玲

梁愛倫 許舜雅 蔣雪芬

聯絡地址：114710 臺北市內湖區陽光街323號

電話：(02) 8797-3567轉8200、8225、8234

傳真：(02) 8797-4585

會址：100026 臺北市仁愛路二段1號3樓

電話：(02) 2392-5128

傳真：(02) 2397-3003

網址：<http://www.cie.org.tw>

郵政劃撥：00059892

戶名：社團法人中國工程師學會

編印：英杰企業有限公司

地址：106411 臺北市大安區復興南路二段293-3號10樓之1

電話：(02) 2732-1234

行政院新聞處出版事業登記證局版臺誌0765號

中華郵政臺北誌字第721號執照登記為雜誌交寄

入會申請手續請上本會網站查詢



生醫工程與防疫研討會

近年來，基因編輯技術CRISPR/Cas9（CRISPR Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats與Cas9蛋白核酸酶）新工具研發成功，帶來許多「來自意想不到的突破」，有效激勵研發誘因和成就，如生醫工程、組織工程、基因定序等都有顯著案例，尤其在疫情肆虐下，疫苗、基因和組織影響人類健康。本會智庫委員會與中華民國生物醫學工程學會特聯合舉辦「生醫工程與防疫研討會」，分享時髦又及時的新知，藉由微觀工程的探討，讓工程師們有另一番細膩的體驗和思維。

研討會於110年11月29日假中興工程顧問公司召開，首先由智庫委員會邱琳濱主任委員及中華民國生物醫學工程學會賴健文理事長致詞，活動邀請中央研究院生醫轉譯研究中心吳漢忠特聘研究員兼主任、成功大學新創中心葉明龍教授、有勁基因公司亞太區營運主管陳崇斌總監分別就「癌症及傳染病新療法」、「創新材料與培養技術的發展於組織再生的應用」、「次世代定序技術的發展與應用」進行專題演講。

吳博士說明全球及台灣生技醫藥產業的發展趨勢，包含全球藥品市場、台灣生技產業

發展現況以及介紹國家生技研究園區，另外也探討癌症的最新療法與傳染病例如新冠肺炎的疫苗、治療藥物及診斷試劑的最新發展等。

葉教授表示組織工程技術已發展超過20年，針對身體內自行修復或再生能力不足以自行修復的組織器官，提供工程方式的細胞



▲ 邱琳濱主委致詞



▲ 賴健文理事長致詞



▲ 邱琳濱主委主持綜合座談

生物自行再生治療，除了對細胞性質、分化再生能力的基本理解，早期提供修復所需的支持結構，及培養過程輔助的生物、物理、化學的刺激，長期以來一直是組織工程界探究的主題。此次演講以幾個臨床上常探討的軟骨、硬骨、血管為例，根據個別解剖生理及功能上的需求，說明其在材料種類、特性、細胞來源選擇及培養過程所提供的不同樣態的生化分子、化學物質、及力學、光學、電磁等刺激與適當的植入過程之研究進行報告。

陳總監說明DNA定序技術發明已逾40年，無法普及並確立其應用價值的主因為定序效率不高，以及人們對基因體的瞭解有限。自從次世代定序技術開始發展，至今定序成本已經明顯降低，基因研究的進展速度也因之加快，此亦意味著基因檢測普及化的時代即將來臨。此演講的內容將針對推動時代巨輪的次世代定序、與目前基因檢測（包括非侵入產前檢測與癌症檢測）的應用進行介紹。

綜合座談時與會人員對細胞再生及基因定序的研究及發展等提出許多問題，並表示此領域應用涵蓋廣泛，建議本會可再舉辦相關議題之研討活動，讓民眾更加瞭解工程應用於醫學之範圍，以及未來對人類及社會發展的影響。本次研討會以線上及實體方式開放與會人員共同參與，計約90多人出席，反應相當的踴躍，活動順利圓滿成功。



▲ 與會貴賓合影



本會與台灣軌道工程學會簽訂合作協議

為擴大與各專門領域的工程學術團體建立合作關係，進一步整合更多工程學術資源，本會於110年12月14日（星期二）假本會會議室與台灣軌道工程學會簽訂合作協議。

簽約儀式由本會會員委員會王宇睿主任委員主持，施義芳理事長與台灣軌道工程學會杜微理事長分別代表兩會簽署合作協議，將共同推展我國工程技術，以促進國家建設現代化，並且加強會務推動交流。

施理事長於致詞時首先恭喜杜微局長獲選擔任台灣軌道工程學會理事長，並表示台灣軌道工程學會成立20年，是我國推動軌道

研究、提昇軌道技術品質與服務水準最重要的學會組織。杜理事長現任台灣鐵路管理局局長，在台鐵資歷超過30年，相信在杜理事長豐富的專業知識及卓越領導力下，軌道學會的會務活動將持續蓬勃發展。



▲ 杜微理事長致詞



▲ 施義芳理事長致詞



▲ 出席貴賓合影



▲ 兩會互換合作協議書



▲ 施理事長致贈本會會旗予杜理事長

施理事長續表示，在數位經濟時代迫切需要各領域的工程人員攜手合作，尤其目前全球面臨空氣品質惡化及氣候變遷等嚴重的挑戰，世界各國對環境與永續發展相關議題相當重視。我國前瞻基礎建設計畫大力推動智慧運輸與軌道建設，提供人民安全便捷可靠及環保減碳的智慧運輸服務。相信今天這個合作協議的簽署，對於強化彼此的會務推動經驗，會有莫大的助益，可擴大我們工程界進一步攜手合作，讓智慧運輸有更快速的發展。

本會包括胡湘麟常務理事、楊偉甫常務

理事、會員委員會王宇睿主任委員及余信遠副主任委員、李元唐秘書長、李瑋聆副秘書長均到場觀禮見證。台灣軌道工程學會出席的則包括鄭光遠常務理事、何泰源理事、張辰秋理事、賴興隆秘書長及3位會務人員。

兩會理事長最後期許未來可進一步擴大有關服務領域及層面，為更多的工程人員提供更好的服務，並結合各專門工程學會之專業與資源，共同提昇國內的工程專業水準。本學會目前已與27個專門工程學會訂有合作協議。



專案管理實務暨第20屆公共工程金質獎 專案管理得獎專案分享研討會

本會專案管理認證委員會與社團法人國際專案管理學會台灣分會於110年12月17日假國立臺灣大學工學院應用力學研究所國際會議廳，共同舉辦專案管理實務暨第20屆公共工程金質獎專案管理得獎專案分享研討會，共95人出席與會，活動圓滿完成。

本次研討會特別邀請榮獲「2021年PMI（國際專案管理學會）專案管理大獎」及「第20屆公共工程專案管理金質獎」等7項專案，進行專案管理實務研討及經驗分享，包括林同棧工程顧問股份有限公司營管部凌志同經理主講「大型工程專案管理案例分享-臺灣桃園國際機場第三航站」、中鼎工程股

份有限公司煉油石化專案管理部王奉鈺專案控制組長主講「以LIWA SCU談JV聯合承攬專案的執行」、致伸科技股份有限公司iIDD事業部PM長李環擘、PM1主管姚汝彤、PM2主管黃俊雯共同主講「專業電子製造業PM與工程師的協奏曲」、亞新工程顧問股份有限公司張暉苑副總工程師主講「縣道157線29K+800~30K+912（蒜頭大橋）拓寬改建工程」、中興工程顧問股份有限公司郭世芳計畫經理主講「沙崙綠能科學城核心區-C區開發工程（第一期）」、晶淨科技股份有限公司謝智偉經理主講「下水污泥處理碳化示範驗證廠統包工程」、台灣世曦工程顧問股份有限公司江炳祈計畫經理主講「台北市內湖區



▲ 本會李元唐秘書長致歡迎詞



▲ 國際專案管理學會台灣分會陳威良理事長致歡迎詞



▲ 李元唐秘書長致贈演講人感謝狀



▲ 亞新工程公司進行分享

瑞光公共住宅統包工程」。

藉由研討會的交流分享與經驗傳承，有助於各企業提昇專案管理能力，增強台灣專

案管理實力，以拓展台灣產業全球競爭力。因防疫規定，現場無法容納更多人員親臨參與，爰特以本會臉書粉絲頁全程直播研討會內容，分享得獎專案執行過程的寶貴經驗。



智慧軌道運輸安全行－專輯序言

中興工程顧問股份有限公司副總經理 / 林根勝

為了因應節能減碳的趨勢與綠色交通運輸的達成，政府就全國軌道運輸網之發展與建置做了整體性的規劃，依「高鐵臺鐵連結成網」、「臺鐵升級及改善東部服務」、「鐵路立體化或通勤提速」、「都市推捷運」及「中南部有觀光鐵路」等5大主軸，於106至111年總計投入約千億元特別預算推動軌道建設，打造臺灣軌道系統未來成為安全便利永續、兼具觀光與自主製造產業發展的軌道運輸服務體系。

現代化軌道建設之實踐，除了土建、軌道、車站水電環控、核心機電等設計、施工各領域的新技藝之採用外，還必需加入智慧化的元素與系統，同時尚需含蓋營運與維修的所謂全生命週期成本最佳化的考量。本期專輯主題為「智慧軌道運輸安全行」，共有文章十篇受邀發表，旨在闡述我國智慧軌道發展規劃、推動策略與系統更新改善案例探討、以及國際間相關軌道智慧化實務報導等，同時對於鐵道事故因素分析方法、及以

建築資訊模型(BIM)為基礎的系統開發與應用等亦有篇幅報導。

本期「智慧鐵道發展架構與推動策略」係由參與全國鐵道系統規劃、營運安全監理及軌道產業發展等業務甚深的鐵道局楊正君副局長主筆，協同作者楊振忠組長、世曦工程顧問公司林啟豐資深協理及王翔正工程師，闡述我國智慧鐵道的發展架構、策略及以機場捷運作為試驗場域驗證可行性，本文提出諸多寶貴的見解、對軌道領域產官學界而言深具參考價值。「鐵路事故分析方法之綜述-以複雜網路理論為例」，則由淡江大學運輸管理學系陶冶中教授所撰。陶教授為德國柏林工業大學交通運輸與應用力學系工學博士，長期鑽研軌道運輸、智慧運輸系統及永續運輸等專業領域。民國108年8月起擔任國家運輸安全委員會兼任委員。陶教授學養兼備，內文敘述，言簡意賅，以複雜網路理論應用於臺鐵事故因素分析之案例，甚具實用價值，令人獲益匪淺。



台北市捷運公司自85年3月全臺首條無人駕駛10.5公里中運量捷運系統-木柵線通車，迄110年3月營運路線總長達146.2公里、通車屆滿25週年。「軌道設備智慧化在運輸安全之應用」則由莊英震副總經理所率成員，將北捷公司數十年來為提升各類設備之自主管理與維護效能，經由運用標準化、IOT物聯網、大數據等創新科技開發建置之數項智慧化管理系統匯整發表，其開發的緣由與構思，搭配實務的運用，展現了北捷公司在營運安全與維護創新等方面的諸多成效。林同棧工程顧問公司林忠正副總工程師（亦曾派駐重慶擔任林同棧國際工程顧問公司總工程師及交通大學特聘兼任教授），於軌道工程具30餘年專業顧問與教學經驗，林副總工程師協同軌道運輸部所著之「智慧軌道交通」將智慧軌道建設的趨勢、價值、構建途徑以及創新技術在全生命週期的結合應用等相關內涵與技術，做了深入詳實的描繪，值此政府大力推展智慧化的時刻、對國內產業界類似系統的研發實有莫大助益。

新北市十年來境內捷運路線成長54公里、車站44座，在三環三線架構下，升級捷運路網為三環六線，109年新北環狀線、淡海輕軌藍海線通車，新北市捷運局在李政安局長的積極領導下捷運建設五年有成。「捷運工程於BIM建築資訊模型結合混合實境應用之前導研究」一文，展現了新北市捷運局團

隊的創新研發成果。中興工程顧問公司軌道工程二部亦由賴建名技術經理領銜著有-「以BIM輔助開發捷運建築設計、校核工具與智慧化逃生檢核工具」呈現有效應用BIM之工作成果以饗讀者，其所研發之「以旅客觀點結合BIM與人流分析優化車站逃生及轉乘系統」榮獲中華智慧運輸協會110年度智慧運輸應用獎。

「臺鐵電務智慧化-以68站號誌聯鎖系統更新案為例」、「高雄輕軌一、二階供電系統整合技術與實務」、「軌道養路工程車之智慧化應用」、「機場捷運與延伸線號誌系統的共融性」等四篇，則是分別由中興工程顧問公司機電事業責任中心系統及電氣工程部、機電監造工程部以及機場捷運延伸線工程處與臺鐵局、鐵道局各工程主辦機關所報導的工程實務案例。臺灣的鐵路建設迄今已百餘年，期間包括廠站、路網、核心機電、運維系統等均需隨著科技的演進與服務水準的要求持續提升，臺灣鐵路管理局電務智慧化6年提升計畫始自106年，西部幹線68站號誌系統由繼電器改為電子聯鎖、以及新一代軌道養路工程車之更新採購建置，誠屬臺鐵整體電務智慧化的重要環節。

基於計畫預算編列或土地徵收等等因素的影響，國內軌道建設需分路線、分路段或分階段執行，又因工程均需依採購法發包選



商，是故有同一路線由不同廠商執行不同階段的建置工作，「機場捷運與延伸線號誌系統的共融性」與「高雄輕軌一、二階供電系統整合技術與實務」即分別為號誌系統與供電系統的整合案例，內容詳述系統差異、整合技術與相關測試等，經驗分享供讀者參考。

最後，謹此感謝各撰稿人於農曆年間犧牲假期撥冗投入，使本專輯得以順利付梓，也期盼藉此拋磚引玉，使未來能有更多產官學界先進提出更佳的理念與創意，為國內軌道智慧化的提升與建置、為運輸服務的品質、舒適與安全，開展出更完善的境界，是所至盼。



智慧鐵道發展架構與推動策略

交通部鐵道局副局長 / 楊正君

交通部鐵道局機電技術組組長 / 楊振忠

台灣世曦工程顧問股份有限公司系統及機電事業群資深協理 / 林啟豐

台灣世曦工程顧問股份有限公司電機部計畫工程師 / 王翔正

關鍵字：智慧鐵道、工業物聯網、雲平台、數位建設

摘要

鐵道系統需投入大量資源執行設施設備檢查維護、運轉操作、確認告警、安全防護等作業，且鐵道系統建置投資大、各式核心機電系統常採用不同廠商產品，導致各系統多僅考量自己的垂直整合需求，實質上屬於封閉性系統，且多不具跨系統所需橫向整合介面，因此鐵道系統數位化過程面臨數據資料格式不一、難以取得或系統整合不易等實務困難。

近年來國內部分鐵道機構致力於發展數位化及智慧化，已成功累積諸多應用在鐵道營運、維修或安全的智慧化個案，例如月台門異常偵測、路線異物入侵智慧告警、軸溫

偵測…等，惟各自發展之系統架構不盡相同，資料格式及通訊協定亦未能一致，勢將不利系統整合擴充及產業參與等長期發展。

為改善前述各自發展智慧化過程面臨之長期系統整合問題，交通部鐵道局、桃園捷運公司、台灣世曦顧問公司及工研院合作進行「建立5G智慧鐵道運輸及監理環境計畫」，充分考量鐵道系統水平與垂直整合需求，推動鐵道環境數位轉型，達成鐵道系統國產化與智慧化之目標。

本計畫透過建立標準化規範，以雲端技術、5G通訊連結我國所有智慧化鐵道，達成引導鐵道系統數位轉型及智慧化之目的外，亦期引領國內廠商投入打造技術自主之智



慧鐵道產業；該計畫並以機場捷運作為試驗場域，實際驗證智慧鐵道標準規範執行之可行性。

一、前言

近年隨著資通訊技術的快速發展，新一代行動通訊技術、雲端和邊緣運算能力的提升以及物聯網科技的普及，數據資料蒐集的速度與數量大幅增加，促使機器學習和深度學習等人工智慧（Artificial Intelligence，簡稱AI）技術開始運用於各行各業中，而其中一個重要實現領域便是鐵道運輸系統。

鐵道運輸的發展經由傳統機械人力控制，逐步發展至現在的電力化與數位、電腦自動控制，並朝智慧鐵道運輸目標前進。隨著資通訊技術（Information and Communications Technology，簡稱ICT）的發展，鐵道營運機構也運用越來越多的資通

訊技術來提升鐵道系統的安全性、可靠性以及創新服務。近年來人工智慧等資通訊技術蓬勃發展，許多產業領域亦逐漸導入人工智慧，並結合領域知識與資通訊技術，將人工智慧融入各種應用服務系統，提升營運競爭力。

智慧鐵道即是透過導入資通訊技術，如人工智慧、物聯網、大數據、雲端運算以及行動網路通訊等，結合鐵道領域知識，利用ICT技術融合操作科技（Operation Technology，簡稱OT），針對鐵道環境進行大數據蒐集、分析模型建立與未來趨勢預測，納入智慧運輸系統（Intelligent Transport System，簡稱ITS），提供鐵道環境安全監控、預警維修、列車巡檢與旅運資訊服務等應用服務，藉以提升鐵道行車安全與營運效能，完善旅運服務品質，並透過智慧化資通訊技術的導入，提升鐵道營運品質、滿足鐵道服務核心價值，智慧鐵道組成如圖1所示。

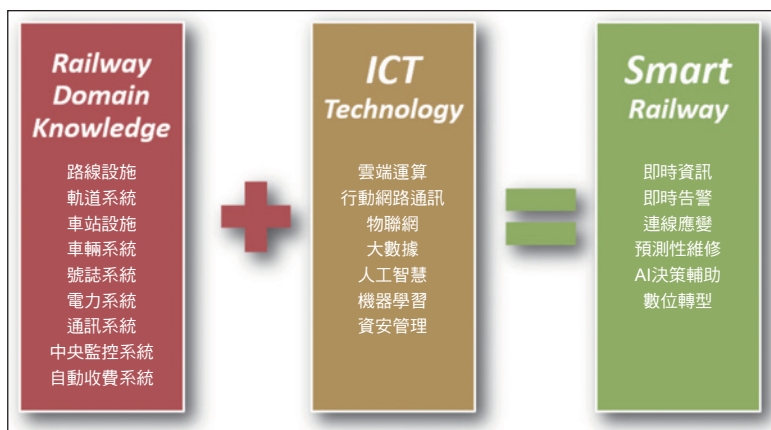


圖 1 智慧鐵道的組成與核心價值

國際鐵道業界陸續導入安全管理系統（Safety Management System，簡稱SMS），而國內對於鐵道安全監理及營運機構自主管理機制亦迫切需要與國際接軌之相關技術與鐵道產業生態的建立，隨著第四代行動通訊（4th generation mobile networks，簡稱4G）推展至第五代行動通訊（5th generation mobile networks，簡稱5G）、人工智慧物聯網（The Artificial Intelligence of Things，簡稱AIoT）、雲端運算等資通訊技術快速發展，交通部「推動5G提升智慧交通服務效能與安全計畫」之「建立5G智慧鐵道運輸及監理環境計畫」（下稱本計畫）由鐵道局執行，規劃搭配5G技術，建立發展鐵道運輸安全、即時預警及決策支援環境的鐵道雲平台，以及研擬智慧鐵道系統之雲、網、端標準架構，並以桃園市政府桃園大眾捷運公司桃園機場捷運作為試驗場域，透過本計畫補助，辦理系統開發整合，達成監理、安全管理及技術規範之驗證，其作業成果將納為後續施政之參考。

二、國內外智慧鐵道發展現況

目前國內鐵道機電、資訊系統多為國外廠商建置，相關系統之資訊傳遞、控制因採封閉式架構，其智慧化應用難以發展，但透過國內鐵道產業及專家的努力，以各式資訊技術突破此限制，現已取得初步成果，本文參閱智慧鐵道發展架構及策略研訂成果報告[1]，彙整部分重要案例如下：

（一）台灣高鐵

台灣高鐵自行研發智慧應用項目與規模日漸擴大，包含營運、維修、票務、行銷、資訊技術等單位跨部門合作，除了創新各項服務之外，營運管理方面亦成功突破日本原廠技術限制，多年來陸續推出多項服務及效率強化機制，逐步達成策略目標，如建置列車 Wifi、發展智慧化列車運行管理系統（Train Operation Management Information System，簡稱TOMIS）、研發電動巡檢機車等。

於列車運行管理系統方面，台灣高鐵於2011年透過技術研發，在確保系統之封閉性與安全性之下，運用全球定位系統（Global Positioning System，簡稱GPS）及電腦視覺/影像辨識等先進資訊技術，取代以人工作業收集營運相關資訊之程序，獲取即時列車動態資訊，完成列車運行管理系統，有效提升營運及應變管理效率。

而電動巡檢機車為委託工研院共同設計開發「軌道智慧化電動巡檢機車」與「路線巡檢資訊系統」之成果如圖2所示，所開發之機車具輕量化、電動化、便利化、智慧化四大特色。其充電作業包括自動夾持、鎖固、通訊、智慧充電連續動作一次完成，可在15秒內完成取車與還車，20分鐘內快速充電完畢，加速作業效率。台灣高鐵與工研院共開發22台「軌道智慧電動巡檢機車」，除



資料來源：智慧鐵道發展架構及策略研訂成果報告

圖 2 台灣高鐵 - 軌道智慧化電動巡檢機車

以電動化取代燃油外，亦可協助台灣高鐵縮短勘災時間、提升傳統人力步巡勘災效率，所搭配智慧雲端應用軟體亦能強化緊急搶修時效。

(二) 臺北捷運

臺北捷運為高度自動化之軌道系統，目前持續透過以各種感應器蒐集列車、基礎設施與車站之即時狀態，將資料回送至行控中心、維修站、機廠、後勤等單位進行監控外，同時也一併進行大數據分析，朝智慧鐵道目標發展邁進。

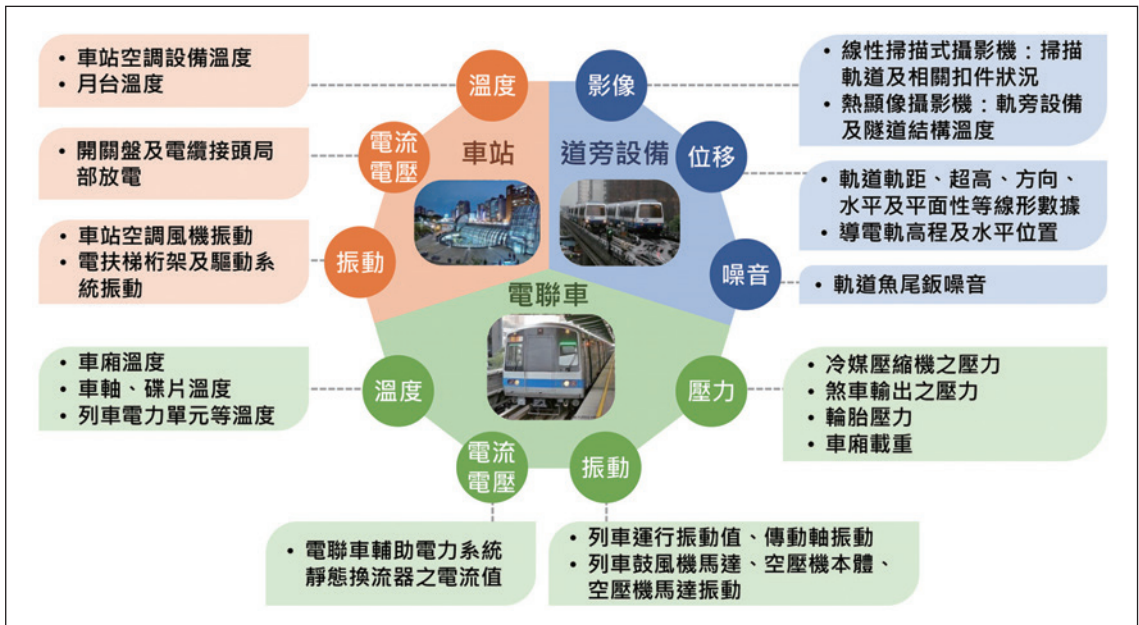
於臺北捷運物聯網（Internet of Things，簡稱IoT）項目，主要配合維修需求，以物理特性資料蒐集，包括溫度、電流電壓、振動、影像、位移等，可以做為未來將維

修方式由「Time Base」（定期維修）轉而為「Condition Base」（狀態維修）的維修型態，整體規劃架構如圖3所示。

在智慧維修資訊管理平台部分，為利於軌旁及車輛分別建置系統，電聯車採4G傳輸，並經列車監控資訊系統（Train Supervision Information System，簡稱TSIS）伺服器收集相關資訊，傳回行控中心及調度室，提供即時告警及進行大數據分析，系統架構如圖4所示。

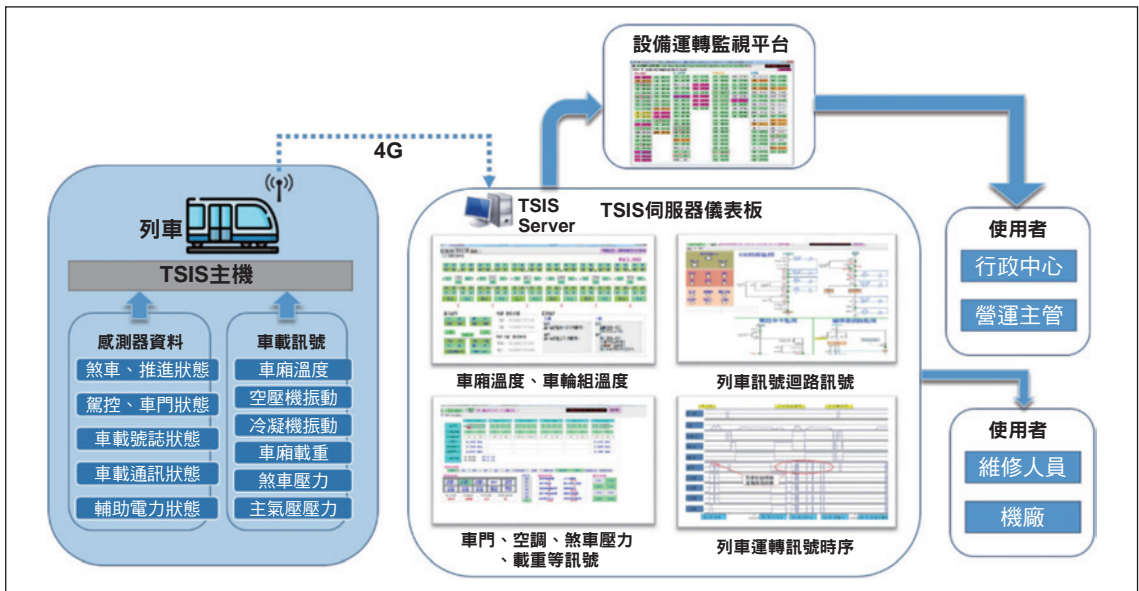
(三) 桃園捷運

桃捷於物聯網設備應用方面，利用薄型溫度感測器偵測車廂溫度，並以車廂內的閉路電視系統（Closed-Circuit Television，簡稱CCTV）攝影機監控車廂擁擠度、利用分



資料來源：智慧鐵道發展架構及策略研訂成果報告

圖 3 臺北捷運物聯網項目



資料來源：智慧鐵道發展架構及策略研訂成果報告

圖 4 臺北捷運電聯車動態數據資訊架構



資料來源：智慧鐵道發展架構及策略研訂成果報告

圖 5 桃園捷運薄型溫度感測機監控車廂內溫度

析加速感測器資料提升乘客舒適度，如以薄型溫度感測器可利用偵測數值，自動調整空調運作、研判車廂環境是否異常等應用，其設備如圖5所示。

此外，桃園捷運亦發展「列車佔據偵

測輔助系統」(Train Occupancy Detection System, 簡稱TODS)，其主要是透過「影像辨識技術」，擷取列車即時資訊及回播運行狀態畫面如圖6所示，其顯示列車車次資料、列車軌道電路等相關資訊，同時可協助事故調查，以提高列車即時資訊精準度並導入電腦輔助決策系統。

(四) 德國鐵路

德國鐵路股份公司(Deutsche Bahn AG, 簡稱DB或德鐵)[2]其近年來大量應用資通訊技術力推智慧鐵道，希望透過該計畫讓客貨運輸和經營管理較過去更具效率。經德鐵內部評估研析，未來之公共和私有運具間的隔閡差異會因科技持續導入而縮小，因此運輸的關鍵議題會是：如何以更安全、穩定、可靠及永續的方式來完成旅客和貨物運送服務，此亦是決定未來交通產業是否能夠成功



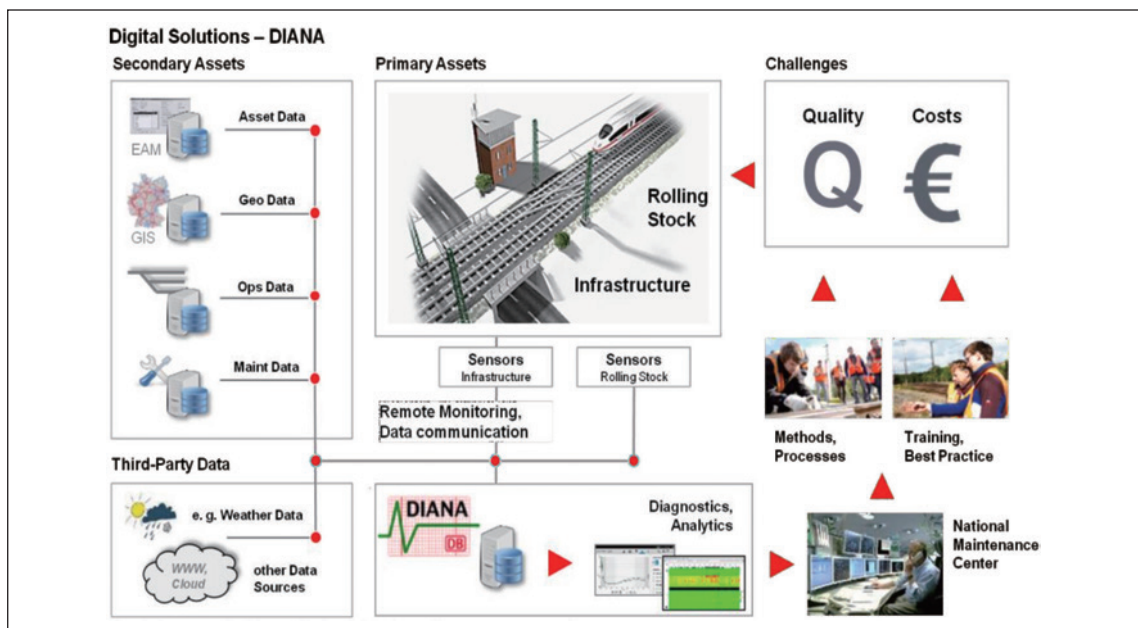
資料來源：智慧鐵道發展架構及策略研訂成果報告

圖 6 桃園捷運列車佔據輔助系統介面示意圖

的重要課題。而其中較具代表性的鐵道設施診斷與分析平台DIANA（取自Diagnosis and Analysis之縮寫）是用於鐵路狀況監測以及車輛和基礎設施資產的預測性維護數位工具。德鐵用DIANA進行來監控、分析和維護資產，可於維修前提供參考資訊以減少檢查時間。轉轍器監測為例，其監測項目包括有：電流、震動、濕度、溫度…等，並依照正常、可能發生故障及已故障三種狀態回傳至行控中心，以進行預測性維護。因德國氣溫變化大，高溫達35°C以上，低溫達-10°C以下，且有降雪，故轉轍器都有融雪設備，以避免轉轍器被冰卡住。而DIANA結合溼度、溫度和天氣資料，以掌握適當時間點啟動融冰機制，使轉轍器可自動化的克服天候因素。

若轉轍器出現異常狀態，例如岔間與岔心遭異物卡住導致無法正確扳轉，則馬達運作電流會偏離正常範圍，此時感應器會將電流異常現象紀錄下並回傳到就地號誌室，同時也會將資料傳送到相關人員之行動裝置上，並由權責人員派工至現場進行維修，而非等到故障進行故障維修。

其中資料異常狀況亦可透過資料融合（Data Fusion）的方式進行後端資料判讀處理，當前述監測項目所回傳的數值，超過門檻值或者大幅偏離正常值時，則可預先進行異常訊息判斷，讓權責人員派工進行預測性維修，DIANA系統架構詳圖7所示。



資料來源：智慧鐵道發展架構及策略研訂成果報告

圖 7 德鐵 -DIANA 鐵道設施診斷示意圖



三、鐵道系統數位轉型課題

近年來人工智慧、物聯網快速發展，將工業自動化推向4.0，並使各產業積極思考如何數位轉型，在鐵路方面相較於其他交通運輸產業，其鐵路與水運、空運同樣具有運具高度自動化控制之特性，但其運行路線鐵路則完全受限於軌道範圍，不若水運、空運具較大運行彈性；而同屬於陸運的公路運輸，其運行範圍雖限制於道路路面，但與鐵路路權特性截然不同，且其運具控制自動化技術尚在發展階段，發展重點著重於運具間通訊、運具與路側通訊、運具對環境反應行為，故鐵路運輸的數位轉型勢必與水運、空運、公路運輸有著不同的發展方向。

因應鐵路系統特性，在有大量人力需求、重複性高、具標準流程的維護保養、異常處理與經營管理作業，應為數位轉型之重點，其可透過跨系統領域之智慧化整合及建置AI數據庫，來達成預防性保養、預警處理與提昇營運效率等數位轉型目標，已是各先進國家鐵路系統積極推動之新方向。

參考國外發展智慧鐵道經驗除需仰賴資通訊軟硬體的建置，另更重要的是資通訊技術導入營運作業的流程，目前國內鐵道系統仍有相當程度採人力執行巡查、確認告警、安全檢查等作業，整體鐵道維護管理數位化程度尚待持續強化。

又由於鐵道建設投資大、期程長，各式核心系統機電多由個別廠商建置，僅考量其自身系統之垂直整合需求，未具備跨路線、跨系統之橫向整合介面，因此，我國在推動智慧鐵道轉型發展將面臨的課題如下：

(一) 鐵道事業數位轉型目標及策略缺乏整體規劃

數位轉型已為現今許多企業的重要發展目標，運輸領域推動智慧交通更是不遺餘力，由於鐵道系統場域設備及鐵道專業技術的特性，國內鐵道機構發展智慧應用現況多以個案應用建置為主，缺乏由高階領導人直接參與領導並引進外部資通訊技術結合內部鐵道專業，就其鐵道事業數位轉型進行整體規劃，以做為其資訊基礎設施、物聯網建置、既有系統數據整合及應用服務發展的指導藍圖。

(二) 鐵道系統平台無共通資訊標準，難以跨系統整合應用

傳統鐵道系統各式資訊化系統經常獨立建置，未具共同之平台及標準資訊介面，難以進行跨系統之整合性分析，且造成同一系統資料重複收集，對於長期擴充發展、產業技術升級等皆受到相當大之限制，其所受困境課題如圖8所示。然而各鐵道既有系統特性雖有不同，但基礎技術、工具、方法具有相當程度可相互應用性，為確保長期發展並

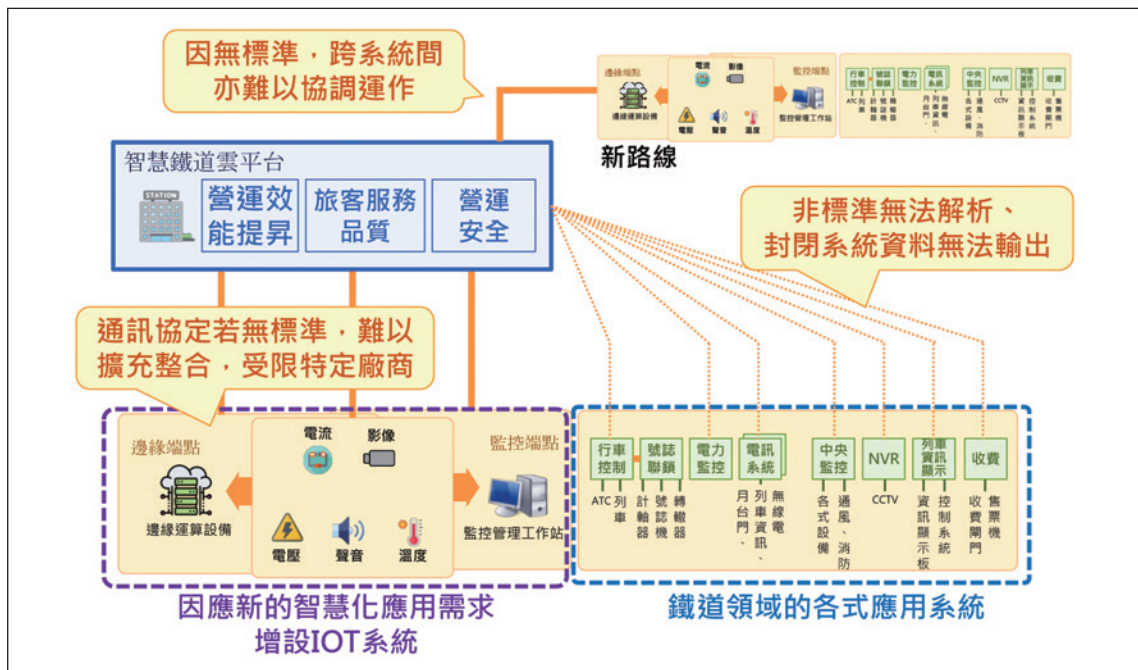


圖 8 智慧鐵道系統整合課題

解決各系統獨立建置不易整合之困境，應藉由資訊基礎設施（雲平台）標準架構及資料通訊標準的制定以提供鐵道機構及產業依循。

（三）發展新資訊標準卻無合適試驗場域，不利推動鐵道技術本土化

為引導鐵道營運機構遵循技術規範之資訊標準，應透過補助機制槓桿原理，引領鐵道營運機構建置鐵道試驗場域之雲、網、端及安全管理系統設備。相關補助計畫應與技術規範研訂及整合各鐵道營運機構資訊之鐵道雲平台建置期程相互配合，並建立專案管

理審核控管補助應用情形，確保試驗場域符合規範標準，以利本土廠商進行驗證。

鐵道局為促進鐵道營運安全、效率及國產化目標，積極推動智慧鐵道標準化作業，規劃加強與國內各鐵道營運機構傳達智慧鐵道期程與溝通未來配合做法，對國內鐵道產業相關廠商則提出其智慧軌道的產業價值與國產化之目標。

而目前各項智慧鐵道發展課題之問題多來自於無可依循之資訊標準，故發布鐵道資訊標準可為解決此一困境之方向，惟標準的制定與推動涉及鐵道監理機關、鐵道營運機



構、相關設備系統廠商與投資者，如何取得各利害關係人的共識，為推動標準所需面對的關鍵課題。

四、智慧鐵道推動策略

為解決我國智慧鐵道發展課題，鐵道局於「建立5G智慧鐵道運輸及監理環境計畫」將訂定基於5G、AIoT、雲端運算、邊緣運算等資通訊最新技術，發展以雲平台、雲原生為主軸的智慧鐵道基礎環境標準規範，以加速交通運輸智慧移動與創新應用服務，提升服務效率與便利安全，持續蒐集未來科技發展趨勢，積極盤點相關技術布局，扶植產業在鐵道智慧運輸進行場域實證，累積成功案例以提昇國內鐵道產業技術能量，同步帶

動資訊及通訊技術或資訊通訊科技智慧應用之相關產業技術輸出，智慧鐵道整體架構及主要推動工作內容如圖9所示，其執行策略包括：

(一) 由上而下的智慧鐵道發展架構

本計畫將於鐵道局建立智慧鐵道雲平台，並依循標準規範接收我國所有鐵道營運機構分別建立之雲平台所上傳營運資訊，透過營運資料上傳要求，各鐵道營運機構將發展出符合自身智慧化營運需求特色的雲平台，且其各項上層營運子系統至現場終端設備，亦依標準規範形成智慧鐵道環境，並將標準資料整合至營運機構雲平台，建立發展各項可跨系統整合之智慧應用。

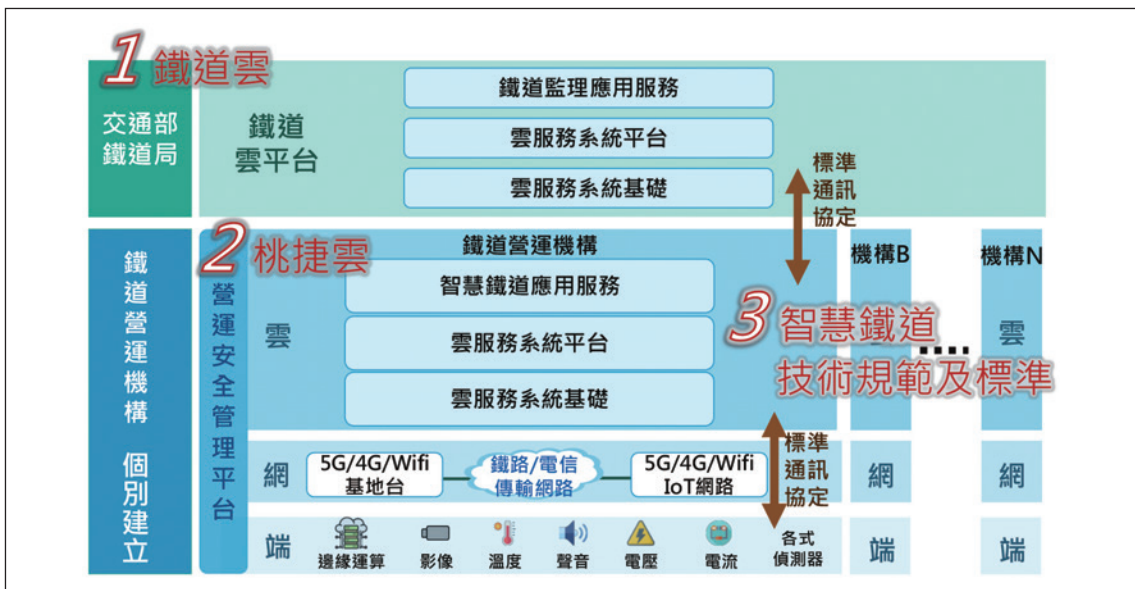


圖9 「建立5G智慧鐵道運輸及監理環境計畫」主要推動工作



為引領全國鐵道機構可依循標準規範發展智慧鐵道之目標，除推動標準規範為交通部頒規格外，作為監理機關的鐵道局亦將建立各項鐵道系統建置的審查與檢測機制，確保整體鐵道系統由上至下（Top-Down）皆朝向共同目標前進。

（二）開放且利於擴充的智慧鐵道標準規範

為解決目前鐵道系統因各自獨立且封閉，相關資訊難以跨系統水平垂直整合，造成同一資訊取得需重複投資建置且不易長期發展擴充之課題。本計畫將制定智慧鐵道發展標準規範，透過全國統一的標準系統架構與資料格式，導入新建或更新的鐵路系統，以逐步打破資訊封閉之情況。

而本計畫將以桃園捷運作為試驗場域，透過桃捷智慧系統建置實際驗證智慧鐵道標準規範執行之可行性，同時推動修法促請營運機構上傳提供資訊，期引領國內廠商持續投入發展，確保智慧鐵道產業國產化之能量，並以此經驗指引未來新建或更新之鐵道系統機電，使其具開放性與加值性，創造自主強健之鐵道產業。

（三）新舊兼容的數位建設模式

鐵道營運機構導入標準規範建置、更新系統時，可參照本計畫所提供建置作業指引建議方式執行，針對新系統或IoT系統之建置

將標準規範納入功能要求，則廠商即可據以發展符合智慧鐵道之系統；至於既有系統或傳統鐵道領域系統，則建議可以中繼伺服器或外部技術方式，以不侵入影響系統運作的方法獲取並轉換為標準資訊格式，達成智慧鐵道資訊整合之需求。

（四）結合 ICT 產業優勢，輸出國際市場

我國為世界重要的ICT產品供應鏈成員，並掌握大量關鍵技術趨勢，透過本計畫與國內廠商技術能力的結合，可發展出符合未來科技應用潮流的智慧鐵道系統。其國內廠商因智慧鐵道發展而具備足夠相關系統設備研發、生產、製造與維護能力，並有完整的檢測、驗證與人才培訓體系，使其產品、解決方案可輸出國際市場，結合國內政府所推動政策計劃如「行政院公共工程委員會補助國內工程產業策略聯盟赴海外拓點計畫」執行，可創造更高產業價值，如高速公路電子收費系統（Electronic Toll Collection，簡稱ETC）的輸出，即是交通科技出口國際的成功案例。

「建立5G智慧鐵道運輸及監理環境計畫」是以4年期的實作與驗證計畫，參照圖9之工作內容，有三大項目，分別為鐵道雲、桃捷雲（試驗場域）與智慧鐵道技術規範及標準，三者間有其相互關係，如技術規範提供鐵道雲與桃捷雲資訊交換的標準，桃捷雲依標準收集各分項計畫系統資訊送至鐵道

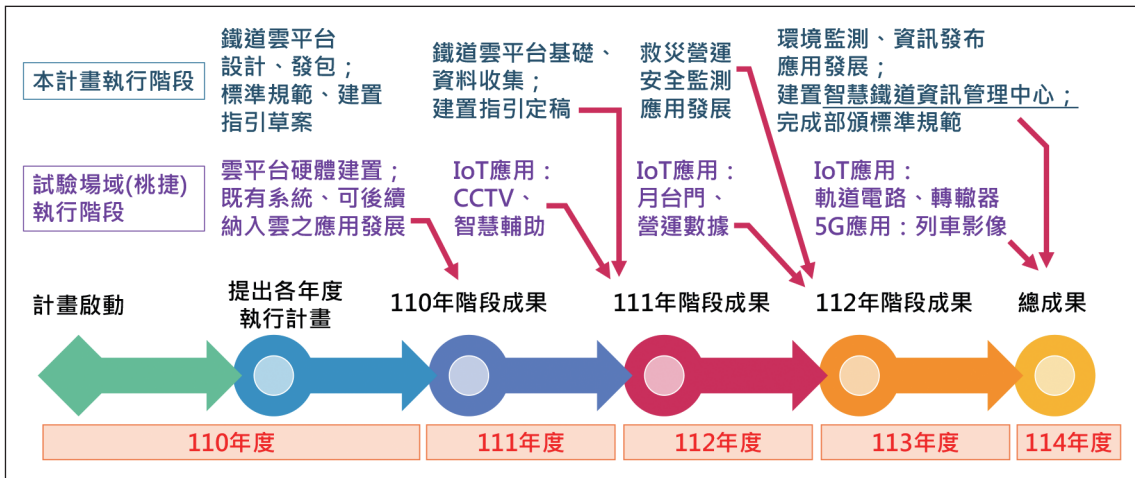


圖 10 「建立 5G 智慧鐵道運輸及監理環境計畫」重要里程碑

雲，並回饋其可行性或窒礙難行之處至每年度標準規範研討會議檢討，而雲平台將所收集標準資料轉換為鐵道局即時需求資訊，並回饋是否滿足其業務發展。透過以上流程持續改進技術規範，最後形成可提送部頒規範審查之標準，做為未來各鐵道營運機構發展智慧鐵道之依循。整體計畫期程與重要里程碑彙整如圖10所示。

五、智慧鐵道技術規範概述

為滿足智慧鐵道系統未來不受限特定廠商功能技術，以利未來系統垂直水平擴充之長期持續發展，本計畫標準技術規範採開放性、通用性之產業標準或國際標準訂定，訂定內容範圍包含雲平台規範、通訊協定標準、端通訊介面標準，而網路通訊部分採開

放標準不於本規範訂定，另除標準技術規範外，本計畫亦提供智慧鐵道建置作業指引，其內容是以各項系統建置前期之評估分析階段，於需求面、管理面、雲平台、網路資安所需檢核、考量之要點項目，有助於鐵道營運機構逐步規劃導入智慧鐵道之參考依據。有關智慧鐵道標準技術規範與雲、網、端間關係如圖11所示。

前述於本計畫所訂定之雲、網、端技術規範為達成我國智慧鐵道願景與建立智慧鐵道生態環境之基礎，此規範參照國際標準、產業標準與近未來科技發展主流趨勢，考量新設與既設鐵路系統整合，以易遵循並可長期發展為主要精神制訂，其主要內容如下說明：

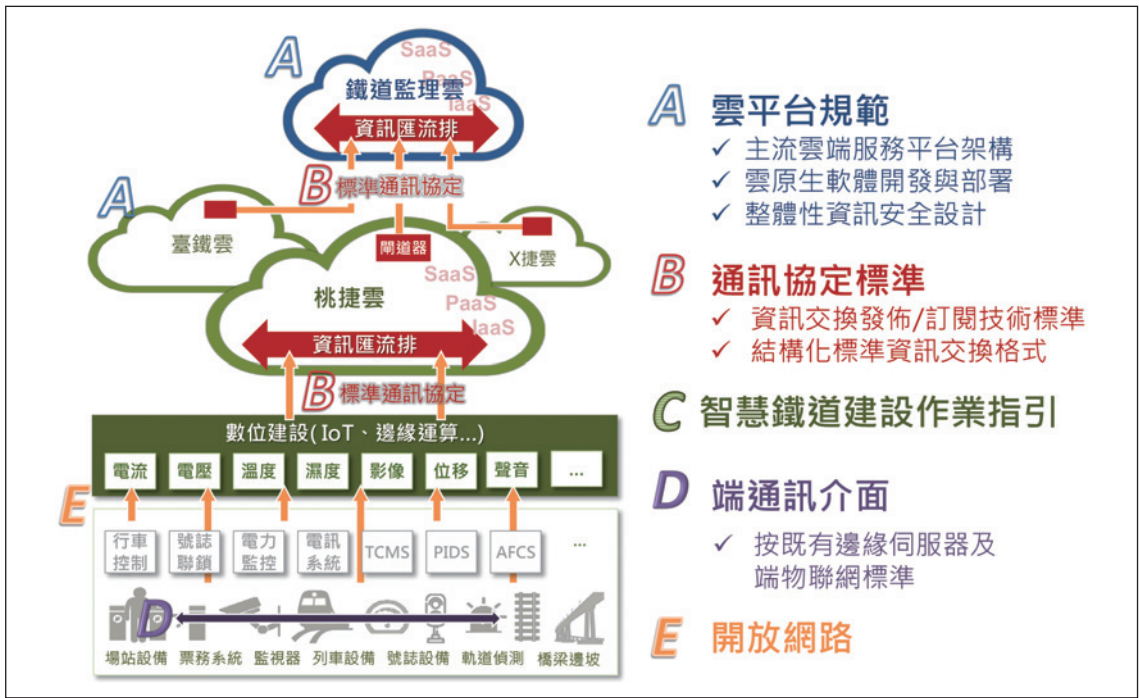


圖 11 智慧鐵道技術規範及標準種類

(一) 雲平台規範

傳統應用服務以虛擬機器與實體主機為架構進行運作，且有部分之應用軟體服務對虛擬機器的使用的依賴程度高，易造成數據資料、軟體資源、硬體資源不能共享、資安難以管理的困境。而新雲端技術則以「雲原生」的核心概念進行發展，並以容器化微服務作為運行核心，以達成資源共享、減少各項資源浪費。

為符合實務應用及主流雲端技術發展方向，本計畫訂定雲平台架構應採融合虛擬機器與容器，以軟體定義資料中心（Software-

A 雲平台規範

- ✓ 主流雲端服務平台架構
- ✓ 雲原生軟體開發與部署
- ✓ 整體性資訊安全設計

B 通訊協定標準

- ✓ 資訊交換發佈/訂閱技術標準
- ✓ 結構化標準資訊交換格式

C 智慧鐵道建設作業指引

D 端通訊介面

- ✓ 按既有邊緣伺服器及端物聯網標準

E 開放網路

Defined Data Center，簡稱SDDC）架構提供系統管理者可動態配置運算、儲存與網路資源，並搭配備援技術以達成高可用性系統，以建立整體雲平台基礎設施即服務（Infrastructure as a Service，簡稱IaaS），同時針對雲平台管理、應用部署等，以平台即服務（Platform as a Service，簡稱PaaS）架構於基礎設施上，並加強整體運作時的資訊安全，而應用軟體建議以軟體即服務（Software as a Service，簡稱SaaS）建構，惟應用內容及軟硬體規格則由鐵道機構自行發展，規範上不做限制，整體規範架構如圖 12 所示。

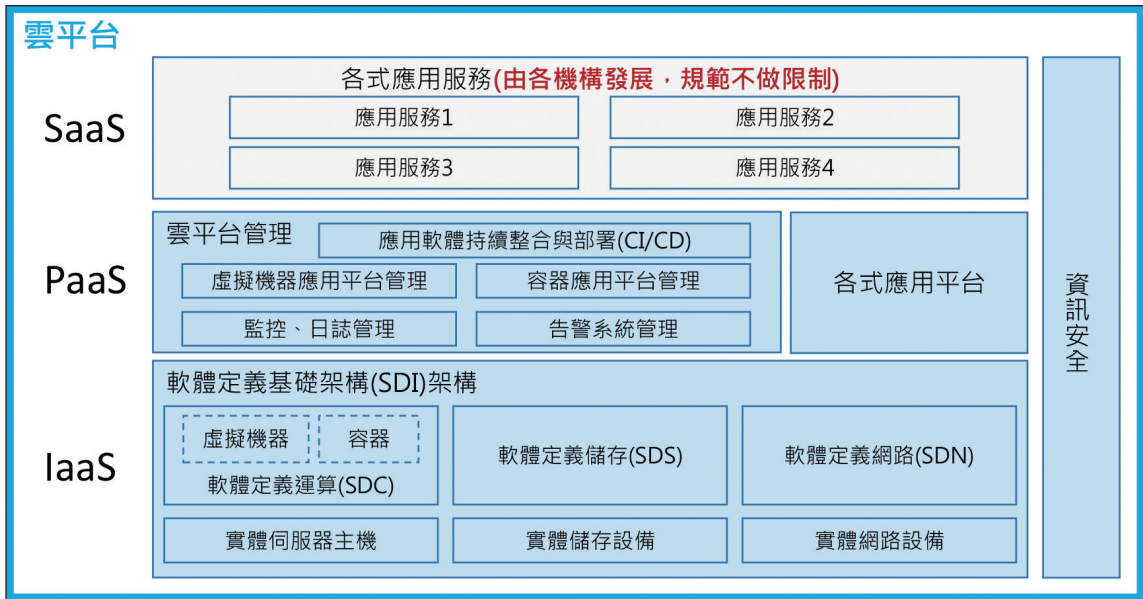


圖 12 智慧鐵道雲平台標準架構圖

(二) 開放網路系統介面與通訊協定標準

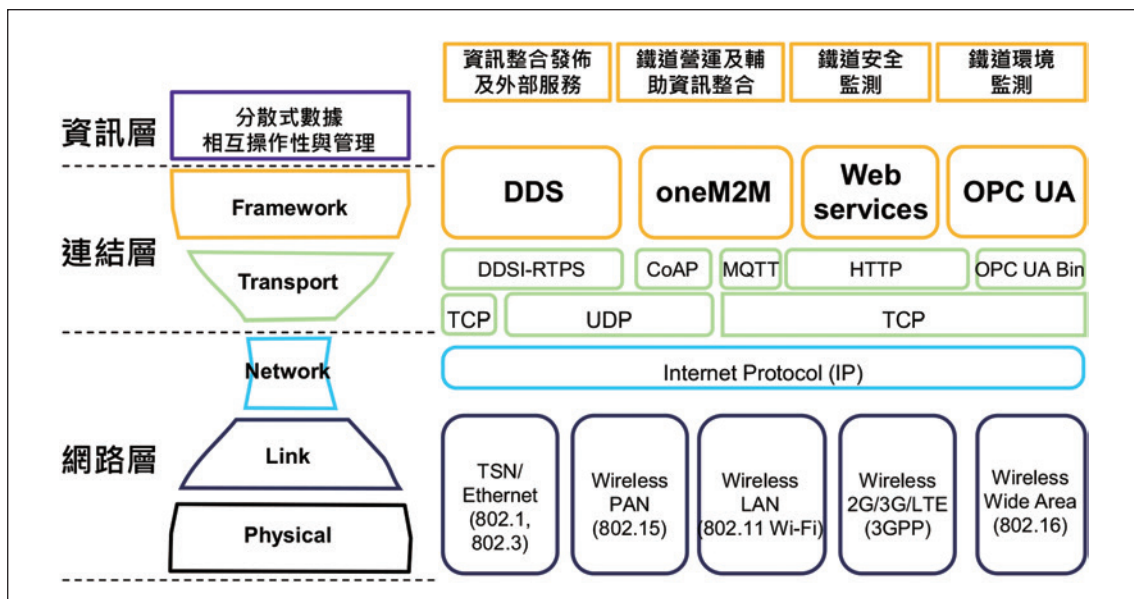
為利於系統擴充、發展，不受限跨系統廠商整合限制，應於雲平台納入資訊匯流排功能，因應物聯網技術之快速發展，本計畫採開放技術提供智慧鐵道資料交換之通訊協定。依據工業物聯網聯盟（Industrial Internet Consortium，簡稱IIC）[3]建議，將資訊交換劃分為資訊層、連結層及網路層，而資訊匯流排技術則建立於資訊連結層之不同框架技術。

資訊連結於不同應用場域推出各項軟體間之資訊連結（交換）等標準，目前市場上主流之框架技術如圖13所示，相關特性比較如表1，而本規範採用IIC建議標準以DDS、oneM2M、Web services、OPC-UA建立資料

匯流排。資料交換格式部分則參照交通部頒布之PTX所採用標準為基礎，並發展其底層鐵道系統及元件之交換內容。

(三) 端通訊介面

此部分規範分為邊緣伺服器及物聯網端設備兩部分。邊緣伺服器為分散雲平台處理工作、加速現場反應的一種新型態系統架構方式，其負擔雲端中心（北側）與終端設備（南側）溝通之橋梁且數量繁多，因此，必須以具備相容異質系統的框架進行設計，並可透過雲平台進行統一管理，本規範參照開放式工業物聯網邊緣運算框架EdgeX Foundry，以開放性、擴展性、維護性與跨平台介接需求訂定，故依循本框架可建構出



資料來源：Industrial Internet Consortium

圖 13 工業物聯網資訊連結框架應用標準示意圖

表 1 工業物聯網資訊連結框架技術比較表

	核心標準規範	DDS	Web Service	OPC UA	One M2M
1	提供語義互操作性	O		O	O
2	具獨立且國際治理的開放標準	O	O	O	O
3	橫向且中性的適用各式產業	O	O	O	O
4	穩定且可部署於多重垂直產業	各式軟體整合與自主性環境	O	製造業	智慧城市試驗場域
5	具備標準定義的核心開道器可連接其他標準	Web Services, OPC UA, oneM2M	DDS, OPC UA, oneM2M	Web Services, DDS, oneM2M	Web Services, OPC UA, DDS
6	具備連結框架功能	O	X	已在發展中	O
7	具備非功能性需求，如效能、可擴展性、可靠性和使用彈性	O	X	已在發展中	N/A
8	具備安全性要求	O	O	O	O
9	組件無須依賴特定供應商	O	O	O	O
10	已具有商用及開源的 SDK	O	O	O	O

資料來源：Industrial Internet Consortium

一套富有彈性、不受特定技術限制的靈活系統。

物聯網端設備的應用需求相當多元，這些應用於鐵道物聯網最主要應具有連續偵測



與監控、即時通訊或精準定位等功能，以確保行車安全，而本規範內容將著重於核心標準資料匯流排架構規範、設備直接連網規範與資安規範。

六、結論

2015年德鐵有鑑於工業4.0蓬勃發展，取其系統自動化、數位化之變革精神導入鐵道營運流程建構出DB4.0架構，包含基礎建設（Infrastructure）4.0、行動服務（Mobility）4.0、物流（Logistics）4.0、營運維護（Production）4.0、工作環境（Working Environment）4.0、資訊科技（IT）4.0等功能區塊，整體系統架構涵蓋鐵路經營管理所需功能，包含組織人才培育、工作流程、供應鏈等，非僅在鐵路業務或技術上執行變革，其各功能區塊內的系統整合、資料數據應用、資訊查詢展示為智慧鐵道關鍵發展重點，不僅成功數位轉型，亦將智慧鐵道解決方案包裝成為商業模式之產品輸出。

我國智慧鐵道發展係採取「由上而下（Top-Down）」，並以利於擴充的雲平台標準架構及通訊協定標準、新舊兼容的數位建設模式等策略推動執行，預期可降低鐵道系統水平與垂直整合之障礙，促使系統更新汰換不受限特定廠商，加速鐵道事業數位轉型，達成資源、資料、運算、儲存的分享與共享，形成智慧鐵道產業生態環境。

全國各個營運機構導入智慧鐵道架構後，可透過蒐集大數據、建立分析模型並預測未來趨勢等應用方法，提供鐵道環境安全監控、預警維修、列車巡檢與旅運服務等服務，並可營運機構間共享相關成果，藉以提升鐵道行車安全與營運效能，滿足鐵道營運機構提昇營運效能、旅客服務品質、營運安全等核心價值。

此外前述數位建設及轉型過程可培養我國智慧鐵道產業及研發團隊、鐵道領域數據專家與新世代鐵路經營團隊，推升我國智慧鐵道技術及產業能量，並朝智慧鐵道產業整體輸出的目標努力。

參考文獻

1. 交通部鐵道局，智慧鐵道發展架構及策略研訂成果報告，民國 109 年。
2. DIANA Platform, <https://infraview.net/en/platform>
3. Industrial Internet Consortium, The Industrial Internet of Things Volume G5: Connectivity Framework, V1.01, 2018.
4. DB Engineering & Consulting GmbH, DIANA Condition Monitoring and Diagnostics, 2020.



鐵路事故分析方法之綜述 - 以複雜網路理論為例

淡江大學運輸管理學系教授 / 陶冶中

關鍵字：鐵路事故分析、複雜網路理論、相繼安全傳播

摘要

本文首先針對當前鐵路事故分析方法提出宏觀面向的綜述；然後以可顯示系統全局屬性與呈現複雜相互作用之拓樸特徵的複雜網路理論為例，運用該理論建立臺鐵事故與事件的複雜網路模型，並從中找出關鍵因素；最後再依據相繼故障理論提出相繼安全傳播分析方法，以發現哪些因素可大幅降低事故與事件的發生機率並提出相關改善建議，以防止事故或事件的發生。

一、前言

現代運輸是由鐵路運輸、公路運輸、水路運輸、航空運輸及管道運輸所組成，為人類社會提供安全、快速、舒適、便利的運輸

服務，其中又以「安全」是所有運輸事業永恆的主題。

由於鐵路運輸有運量大及速度快等特性，因此若發生重大事故時，必將導致眾多死傷與經濟損失。回顧近年全球鐵路重大事故案例，例如：2005年日本發生的福知山線出軌事故（造成107死555傷）、2008年中國發生的膠濟鐵路列車相撞事故（造成70死416傷）及2013年西班牙高鐵出軌事故（造成78死145傷）等事故，死傷人數之高皆令人悲痛。我國亦曾發生鐵路重大事故，例如：1991年造橋列車對撞事故（造成30死112傷）、2018年普悠瑪新馬出軌事故（造成18死215傷）以及2021年太魯閣號清水隧道事故（造成49死218傷）。



發生鐵路事故皆有其必然與偶然的因素，若欲有效預防事故的發生，應藉由科學方法針對導致事故發生的可能因素，進行分析與控制，以助於填補系統的漏洞而防止相同的事再次發生。本文將宏觀回顧當前鐵路事故分析方法；然後以複雜網路理論（Complex Network Theory, CNT）為例，運用CNT建立臺灣鐵路管理局（以下簡稱臺鐵）事故與事件的複雜網路模型，從中找出關鍵因素；最後再運用相繼安全傳播分析方法，發現哪些因素可大幅降低事故與事件的發生機率並提出相關改善建議，以防止事故或事件的發生。

二、當前鐵路事故分析方法之綜述

目前國內外對於鐵路事故的研究範疇主要分為鐵路事故模型、鐵路事故因素分析、鐵路事故風險分析與鐵路事故預測方法等四大類別。

（一）鐵路事故模型

Leveson（2004）認為鐵路事故是事故的一種特例，並定義事故係反應一種複雜的系統現象。Qureshi（2007）將鐵路事故分析統整出順序事故模型、傳染病事故模型與系統化事故模型等三種基本模型。

順序模型是最初提出一種簡單的事務分析模型，該模型認為按照一定順序發生的一

系列特殊事件而導致事故的發生。骨牌模型（Domino Model）是第一個順序事故模型。另一個順序事故模型是事故演化與障礙模型（Accident Evolution and Barrier Model），該模型認為一系列事件或障礙失效會導致事故的發生，其關鍵點在於何時會出現錯誤。順序模型並不侷限於一個事件順序集合，亦可以分層或網路形式表示，例如：傳統的事故樹、關鍵路徑模型、派翠網路（Petri Net）。對於簡單系統中由物理元件故障或人為失誤而導致的事故，順序模型尚稱有效；然而面對複雜系統的事故，順序模型便顯得力不從心，取而代之者即為傳染病模型。

傳染病模型係將事故比作疾病，事故的發生是一些明顯的與潛在的因素恰巧在同一時間與空間組合的結果。Reason（1990）提出的瑞士乳酪模型（Swiss Cheese Model）是一種典型的傳染病事故模型，該模型雖將事故肇因考量直接失效與潛在失效因素間之關聯，但在實際系統中存在多個不同層次的防禦，同時每個層次又都存在一定的固有缺陷，若不安全因素通過系統多個不同層次的防禦，則事故將會發生。傳染病模型的價值在於提供可考慮複雜事故的一個基礎，並突破順序模型的侷限性。然而，傳染病模型並無法用簡單的因果順序來描述潛在因素的相互作用，系統化模型因此而產生。

由於前兩種模型皆無法解釋相互作用與



相互依賴的動態變化特性，因此一個事故既無法描述為因果序列亦無法描述為因果網路。系統化事故模型強調以理解系統功能的特性為基礎，並非基於內部相互作用的假設而進行事故分析。該模型避免將事故描述為一個順序或有序的單獨事件或潛在條件的鏈結，因此很難用圖形的方法去描述。再者，因事故本身具有動態變化特性，事故發生的機率及內部複雜性導致人們無法全面理解事故，故藉由系統化模型可有效結合各種導致事故發生的因素，進行全面的分析。目前系統化事故模型可分為系統理論方法與認知系統工程方法兩大類型：

1. 系統理論方法

常用的系統理論方法主要有事故地圖 (AcciMap)、人因分析與分類系統 (Human Factors Analysis and Classification System, HFACS)、系統理論事故模型與過程 (Systems-Theoretic Accident Model and Processes, STAMP)。AcciMap是在 Rasmussen (1997) 的風險管理架構模型的基礎上，用於確認六個社會技術系統層次 (政府政策與預算、監管者與監管協會、地方政府規劃與預算、技術與營運管理、實體過程與參與者行為、設備與環境) 之間錯誤的方法。HFACS模型 (2001) 是在瑞士乳酪模型的基礎上，對不安全行為、不安全行為的前提條件、不安全管理、組織影響等四個層次進行分類。STAMP模型是美國麻省理工學院教授Leveson (2004) 所提出，是一種基於約

束的模型，該模型認為導致事故發生的原因並非事件，而是系統中的約束。STAMP模型認為導致事故發生的原因是由於對安全相關的約束不夠充分，因此強調系統組成要素與該系統中所應用的控制原理之間的關係，其中包含人為失誤，以更加符合系統中有人為控制因素的解釋。

2. 認知系統工程方法

常用的認知系統工程方法主要有認知可靠性與失誤分析方法 (Cognitive Reliability and Error Analysis Method, CREAM)、功能共振分析方法 (Functional Resonance Analysis Method, FRAM)。CREAM模型主要任務在於目標環境進行分析進而確定相對應的人為失誤發生機率，其認為不同的目標環境下可能對應不同的控制模式，而人為失誤機率直接由控制模式確定，因此控制事故發生的關鍵環節在於控制模式的設計。FRAM模型是用於分析系統元件的功能如何因共振產生危害，進而失控導致事故發生。

(二) 鐵路事故因素分析

一般而言，導致鐵路事故的因素可從人為、設備、環境、管理等四個面向進行探討，針對不同類型的鐵路事故，找出導致事故的關鍵因素，一直是鐵路安全研究的熱點。Baysari等人 (2008) 以19件澳洲鐵路事故資料，利用人因分析及分類法及認知錯誤的回顧和預測分析法來分析19件事故的人



為因素，該研究發現人因分析及分類法找出的人為因素較認知錯誤的回顧和預測分析法為多，而認知錯誤的回顧和預測分析法可將人為因素更詳細的分類，雖然其無法判斷出組織的影響，但該方法可找出重複之人為因素。Ferjencik (2011) 提出一種改進根本原因分析方法IPICA，其目的在於將安全管理中的事故調查程序整合成全面性的架構而提供不同類型的因果結果。

Hassall等人(2014)提出一個新式的人因分析技術稱為提升復原力之策略分析(Strategies Analysis for Enhancing Resilience, SAfER)，可協助管理者在預期、未知、不確定的情況下，針對事故發生時，確認其關鍵因素並選取適當的控制策略。Kyriakidis等人(2015)利用15年的鐵路事故資料，提出績效型塑因子(Performance Shaping Factors, KSF)來識別重要的人為影響因素，基於帕雷圖(Pareto)原則可識別出90%事故發生的12個風險因素。

孫千山等人(2016)以阿里山森林鐵路出軌事故資料，利用失誤樹(FTA)、事件樹、簡易領結模型及魚骨圖方法來分析事故資料，並找出出軌之原因，亦針對林務局提出軟體與硬體面的改善建議。Zhan(2017)將航空事故因素分析方法引入高鐵事故因素分析，提出HFACS-Ras的事故混合學習方法，其包括事故、人為與組織因素分類模型之建構、網路分析法、模糊決策實驗與評估實驗

法的量化關聯性分析方法。

王珊珊(2018)以美國鐵路事故資料，採用複雜網路理論與風險量化來分析事故資料，並找出事故的關鍵因素為鐵軌未固定良好與人員缺乏注意時的調車，該研究還加入動態權重，以模擬現實生活中網路的變化，進而判斷哪些節點是有關單位須注意者。Lam與Tai(2019)以日本鐵路事故資料，運用複雜網路理論分析事故資料。首先針對各因素進行分析，分析各因素間的關聯性，並判斷何種因素會導致其他因素發生與大部分因素會導致何種因素產生。然後該研究將各因素歸類成四類：外部入侵(如車輛闖入平交道)、技術故障(如引擎故障、感測器故障等)、人為因素(如不正確的列車營運)及不安全情況(如地震、強風等)，並探討各因素對於其他類因素的影響以及對於事故的影響，最後該研究分析四個類別中的個別因素對於哪些因素有重要之影響。

(三) 鐵路事故風險分析

目前鐵路事故風險分析方法主要有故障樹(FTA)、派翠網路(Petri Net)與貝式網路三種。美國貝爾實驗室首先提出FTA，後經由波音公司與美國原能會的推廣，逐漸成為當今應用最廣的系統安全分析技術。FTA是從系統層功能故障出發，遵循邏輯演繹分析的原則，經由系統功能劃分與迭代推演，最終找到位於底層的故障誘發條件。Petri



Net模型係一個有向圖，可用一個六元組來表示，具有描述問題的強大能力，且非常適合分析系統變化的動態行為。貝式網路易於描述有很多相關變數的事故，可依據事故資料學習掌握各變數間之關係與結構。

Ladkin等人(2005)使用Why-Because分析方法(WBA)，以語意與邏輯為基礎來建構WB-Graph並形式化證明WB-Graph的正確性，進而分析事故的肇因，以1999年澳洲藍山的Glenbrook列車碰撞事故為應用案例並同時與AcciMap事故分析結果進行比較，結果顯示WBA較AcciMap更能精準找出事故因素。

另一種常見的模型是機率統計迴歸模型，其利用機率論以機率的形式將誘因與後果刻劃出來，事故往往是由多個因素所決定，哪個因素導致事故具有隨機性，其出現的頻繁程度可用機率表示。常用的機率統計迴歸模型有參數估計與非參數估計兩種模型，前者是基於事故資料具有隨機、離散、非負數等特性；後者則不使用資料分布的先驗知識，對資料分布不附加任何假定，而是一種出自資料樣本本身研究分布特徵的方法。

(四) 鐵路事故預測方法

常用的鐵路事故預測方法概可分為三類：數理統計模型、人工智慧方法與組合方法。數理統計模型是指對隨機變數及隨機

變數之間的關係進行量化描述的模型，包括：時間序列模型(如ARIMA、GARCH)、卡曼濾波模型、基於灰理論的灰模型GM(1,1)、支持向量機(SVM)。人工智慧方法即為模擬人類思維的演算法，包括：馬可夫模型、隨機森林決策樹、反向類神經網路(BPNN)、深度類神經網路、貝式類神經網路、小波轉換類神經網路等等。組合方法則是將2種或2種以上的方法加以組合，亦可分為三類：數理統計模型組合(如ARIMA+GARCH)、人工智慧方法組合(如遺傳演算法+小波轉換類神經網路)、數理統計模型與人工智慧組合(如ARIMA+深度類神經網路、K鄰近非參數迴歸+卡曼濾波+貝式類神經網路)。

綜合上述，國內外對於鐵路事故的模型、因素分析、風險分析與預測方法等課題的研究仍是持續不輟且成果豐碩。近年來，隨著物聯網、5G、雲端運算、大數據及人工智慧等數位科技的蓬勃發展，許多新的研究方法相繼產生，因此是否有合適的新方法可用於鐵路事故分析以獲取更精確的結果，遂成為近年來鐵路安全研究領域的熱門課題。

在眾多新方法中，複雜網路理論應用於鐵路事故因素分析仍處於剛起步的階段。在以往的網路研究中，僅有規則網路、小世界網路與隨機網路的相關研究，但1998年複雜網路理論問世，該理論認為所有複雜系統皆可透過網路形式呈現並進行分析，同時隨著



資料量的爆炸成長、資料蒐集技術的日新月異與電腦運算能力的提升，建構複雜網路模型變得較為容易且能更能顯示實際的情況。與傳統方法相較，複雜網路理論較能以全面性且整體性來分析事故因素，同時亦能發現整體事故因素間的關聯性或因果關係，更能觀察事故發生後路徑演變的影響（徐偉豪，2021）。

三、複雜網路理論應用案例

本文所探討之鐵路事故與事件是依據鐵路行車規則第122條中所定義之重大行車事故、一般行車事故及鐵路行車異常事件，有關鐵路事故與事件之名詞說明如表1所示。

本文蒐集臺鐵營運安全處及國家運輸安

表 1 鐵路事故與事件名詞說明

分類	名詞	說明
重大行車事故	正線衝撞事故	於正線發生列車互相、車輛互相、或列車與車輛互相間之衝撞或撞觸
	正線出軌事故	於正線發生列車或車輛傾覆或脫離軌道
	正線火災事故	列車或車輛於正線發生火災
一般行車事故	側線衝撞事故	於側線發生列車互相、車輛互相、或列車與車輛互相間之衝撞或撞觸
	側線出軌事故	於側線發生列車或車輛傾覆或脫離軌道
	側線火災事故	列車或車輛於側線發生火災
	平交道事故	列車或車輛於平交道與道路車輛或行人發生衝撞或碰撞
	死傷事故	列車或車輛運轉或跳、墜車致發生人員死亡或受傷之情事
	設備損害事故	列車或車輛運轉且非因天然災變造成設備或結構物新臺幣一百五十萬元以上之損害
	運轉中斷事故	列車或車輛運轉且非因天然災變造成一小時以上之運轉中斷
鐵路行車異常事件	列車或車輛分離	列車或車輛非因正常作業所致之分離
	進入錯線	列車或車輛進入錯誤軌道，或於應停止運轉之工程或維修作業區間內運轉
	冒進號誌	列車或車輛停於顯示險阻號誌之號誌機內方或通過未停
	列車或車輛溜逸	列車或車輛未經駕駛員或相關人員操作控制、或錯誤操作之移動
	違反閉塞運轉	列車進入未辦理閉塞區間
	違反號誌運轉	列車或車輛未依號誌指示運轉
	號誌處理錯誤	人員錯誤操作號誌裝置或應操作而未操作
	車輛故障	車輛之動力、傳動、行走、連結、集電設備、車門、軀機、車體或其他裝置等發生故障、損壞或功能異常等影響運轉之情事
	路線障礙	土木結構物或軌道設備發生損壞、變形或功能異常致影響列車正常運轉之情事
電力設備故障	變電站設備、電車線設備、電力遙控設備及其他附屬裝置等發生故障、損壞或功能異常致影響列車正常運轉之情事	

分類	名詞	說明
鐵路 行車 異常 事件	運轉保安裝置故障	列車自動控制裝置、聯鎖裝置、行車控制裝置、軌道防護裝置、轉轍裝置、列車偵測裝置、號誌顯示裝置、冒進防護裝置、災害偵測裝置及其附屬設備發生故障、損壞或功能異常致影響列車正常運轉之情事
	外物入侵	人員或外物侵入鐵路路權範圍、破壞鐵路設備、擱置障礙物或其他行為，致影響列車或車輛正常運轉之情事
	危險品洩漏	瓦斯、火藥或其他危險品從列車或車輛顯著洩漏之情事
	駕駛失能	駕駛人員於駕駛列車或車輛過程中，因身心健康因素，致無法安全駕駛或完成勤務之情事
	天然災變	強風、豪大雨、洪水、地震等其他自然異常現象，致影響列車正常運轉之情事
	列車取消	未依規定或未經核准取消時刻表訂列車班次之情事

全調查委員會的鐵路事故與事件資料報告，並將兩個單位所提供的資料合併進行分析。首先建立資料進行事故因素鏈，並將各因素進行編碼，然後建立複雜網路模型，最後則是建立相繼安全模型。本文資料統計時間為2018年1月至2020年4月，合計28個月，共計1560筆資料，其中1347筆為有效資料。

（一）基本統計量分析

1. 事故事件發生次數

臺鐵各類事故事件發生次數與百分比以車輛故障為最常發生之事故事件，其發生比例為45.22%，相當於10起事件中至少會有4起為車輛故障。而其次為運轉保安裝置故障，包含號誌故障及轉轍器故障等，其發生比例為19.50%。

2. 事故事件發生路線別

臺鐵各路線發生事故事件次數與百分比

以縱貫線北段發生事故與事件的件數為最多；在支線中，集集線發生事故與事件的件數最高；在貨物路線中，臺中港線發生事故與事件的件數為最多。

3. 事故事件發生時間

臺鐵事故事件發生時間次數與百分比以5點時發生事故與事件的比例最高（8.79%），與其他時間相比均高出1.5倍至2倍，次高發生事故與事件的時間為9點（7.31%）。從表5中可知，6點至12點發生事故與事件的比例最高（32.26%），次高為12點至18點（28.09%），此兩個時段發生的事件與事件占全日的60.35%。

4. 各車種車型故障次數

臺鐵各車種與車型故障次數與百分比以區間車的故障比率最高，其次為電力機車。若按照車型，EMU500故障率最高，佔26.67%，其次為E200型，佔16.45%，第三為



E1000（推拉自強號），佔14.18%，此三種車型的故障率佔整體車輛故障的57.3%。

（二）複雜網路模型

本文建立的複雜網路模型中，節點代表事故事件因素，連接線代表各因素間的關聯，而模型建構的流程如下：

步驟 1：分析臺鐵事故或事件的經過，並且找出事故事件因素作為網路模型中的節點。

步驟 2：透過 Apriori 演算法找出因素間的關聯，並且建立相鄰矩陣，若兩因素有關聯則在矩陣中以 1 表示，若兩因素無關聯則在矩陣中以 0 表示。

步驟 3：透過上述兩個步驟找出的節點與相鄰矩陣建立複雜網路模型，在相鄰矩陣中第 i 行第 j 列與第 j 行第 i 列的因素為 1，則將節點 i 與節點 j 以

連接線連接，若為 0 則不連接。

本文分析1560筆事故與事件資料，其中1347筆資料為有效資料，且可從有效資料中找出159個因素，這些因素可大致分為四類，分別為設備因素、人為因素、管理因素及其他因素，除這些因素之外，本文同時亦將最後發生的事故或事件進行編碼，共有11個最終事故或事件。在編碼表中EM代表設備因素、H代表人為因素、M代表管理因素、O代表其他因素及A代表最終發生的事故或事件。

找出事故事件因素與相鄰矩陣後，藉由 Pajek 軟體可建立複雜網路模型，共有170個節點及581條連接線，並將複雜網路模型視覺化後，如圖1所示，其中包含設備因素節點、人為因素節點、管理因素節點、其他因素節點及最終發生的事故事件節點，共有五種類別的節點。

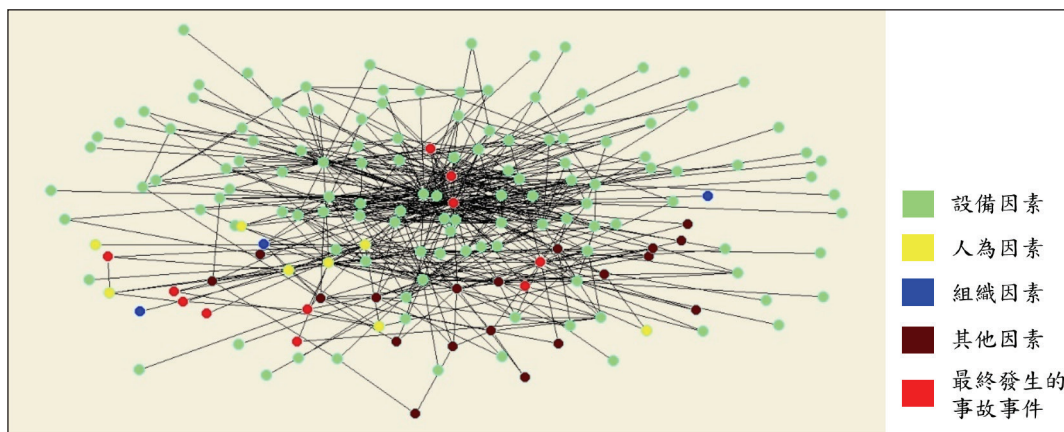


圖 1 整體事故事件複雜網路模型圖

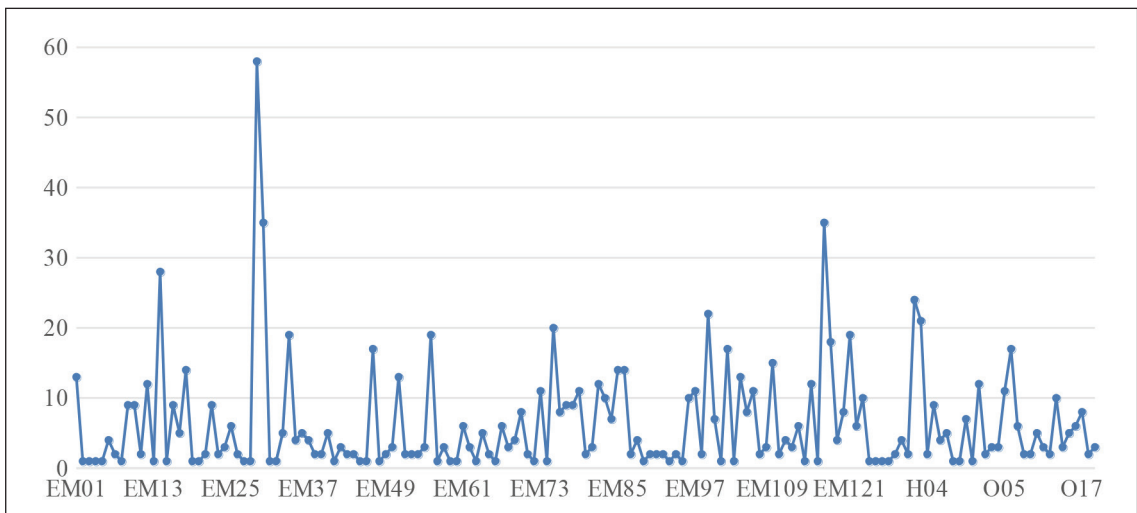


圖 2 整體事故事件複雜網路模型之節點度值分布圖

臺鐵整體事故事件複雜網路模型中各節點度值，如圖2所示。模型的平均節點度值為6.8353，代表平均每個因素都會與6到7個因素有關連，從圖2可看出大多節點度值不超過20，但其中有幾個節點的度值非常大，稱為Hub點，包含EM14（VCB不閉合）、EM29（列車動力異常）、EM30（列車鬆軔異常）、EM99（繼電器故障）及EM117（號誌故障）這5個因素節點。除因素節點之外，還有2個最終事故與事件節點，代表最終事故與事件最常發生者為A06（列車延誤）及A07（列車無法行駛）。在整個複雜網路模型中最重要的節點為列車動力異常，若能避免其它4個Hub點因素發生，則可降低事故或事件發生的機率。

複雜網路理論之介數是計算通過節點的

最短路徑與整體最短路徑的比值，因此可找出出現次數但地位相當重要的節點。圖3所示之平均節點介數為0.0058，且大多節點度值不超過0.05，但其中仍有5個節點的介數較大，分別為EM29（列車動力異常）、EM85（線路脫落/斷裂）、H02（人員違反規定）、H03（人員未注意）及M02（人員訓練不足），這些都是相當重要的節點，因為介數越大代表通過該節點最短路徑越多，只要避免這些節點連線，即能降低事故或事件發生的機率。

本文經由節點度值與節點介數可找出臺鐵事故與事件的關鍵因素，並且借助軟體可將關鍵節點視覺化，結果如圖4所示，在圖的左半邊為經由度值找出的關鍵節點，而右半邊為經由介數找出的關鍵節點，越接近圓心

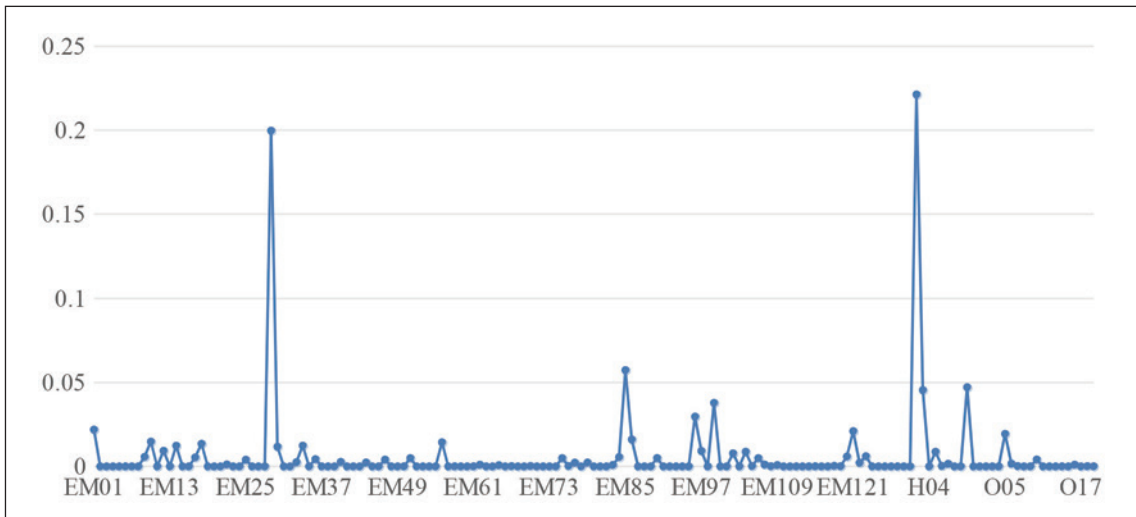


圖 3 整體事件事件複雜網路模型之節點介數分布圖

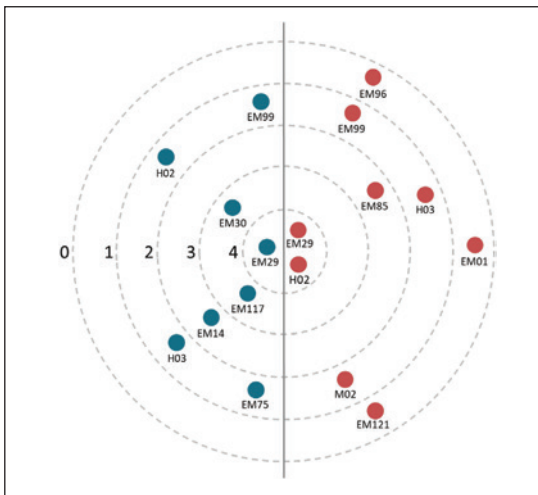


圖 4 整體事件事件複雜網路模型之關鍵節點視覺化結果

的節點代表越為關鍵的因素節點，其中同時出現在圖中的關鍵節點有四個因素：列車動力異常（EM29）、繼電器故障（EM99）、人

員違反規定（H02）及人員未注意（H03），表示此四個因素為最需要改善的項目。

整體事件事件複雜網路模型之處理流程如前所述，亦可特別針對車輛故障的事件建立複雜網路模型，執行方式則可重複前述步驟，結果如圖5所示。車輛故障複雜網路模型中各節點度值平均值為6.2435，代表平均每個因素會與6至7個因素有關聯，而且其中有3個因素節點的度值比較大，分別為EQ14（VCB不閉合）、EQ28（列車動力異常）及EQ29（列車鬆軔異常），此3個節點都是在網路模型中相當重要的節點。車輛故障複雜網路模型中各節點平均介數為0.0137，但其中仍有4個節點的介數比較大，分別為EQ01（ATP故障）、EQ29（列車鬆軔異常）、EQ89（線路脫落/斷裂）及HU02（人員違反

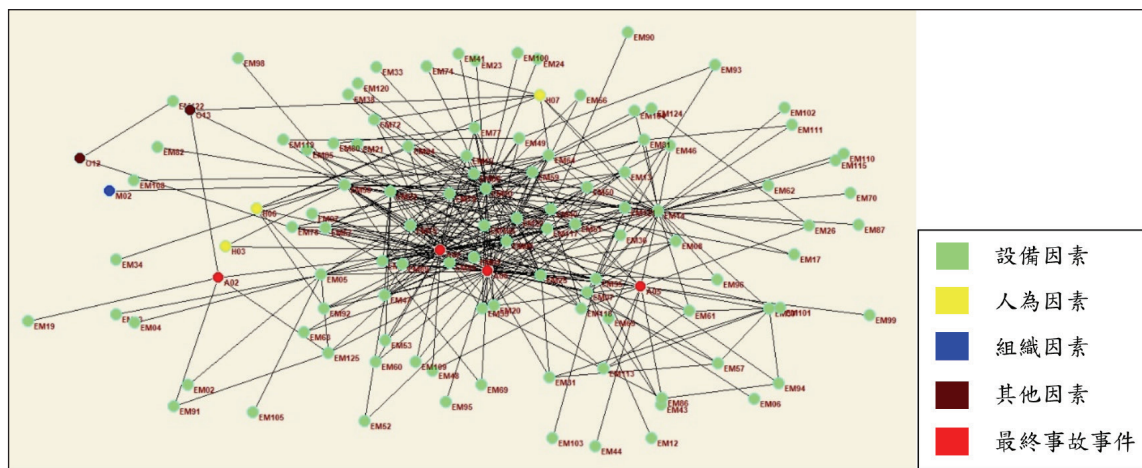


圖 5 車輛故障事件複雜網路模型圖

規定)，因此若能避免前述重要節點發生，就能降低事故或事件發生的機率。

(三) 相繼安全傳播

為更有效利用資源來降低事故或事件的發生，本文以相繼故障理論為基礎，並參考相關文獻所提出的相繼安全傳播分析方法，在該方法中，首先針對關鍵因素增加足夠的防護，確保該因素處於安全狀態且不會導致事故或事件發生，若有剩餘的防護值，則將以一定的規則傳播給相鄰的因素。

在相繼安全傳播中，首先要將某個因素節點賦予初始防護，用來當作網路中該節點所對應的初始負載，此值即初始防護值。假設某個因素節點的防護值達到一定值時，則該因素處於完全安全狀態，此時該因素不

再導致事故或事件發生，此值即相繼故障理論中節點所對應的節點容量，即為安全門檻值。

因列車動力異常（EM10）此一節點的度值最高，因此本文選擇EM10進行相繼安全傳播分析之案例。圖6為列車動力異常（EM10）從 $t = 1$ 至 $t = 6$ 之相繼安全傳播複雜網路圖，從圖6可看出網路中已有許多節點與連接線漸漸被移除，當網路中的節點與連接線越少，網路傳播效率就會越差，事故或事件發生的機率亦會降低。

經過相繼安全傳播後，本文計算每個時間下網路效率變化，如表2所示。

從表2可知，當節點EM10的防護值增加為初始防護值的2倍時，網路效率可降低至



表 2 列車動力異常網路效率的變化

	t = 1	t = 2	t = 3	t = 4	t = 5	t = 6
N'	167	133	97	75	73	71
E (EM10)	1	0.796	0.581	0.449	0.437	0.425

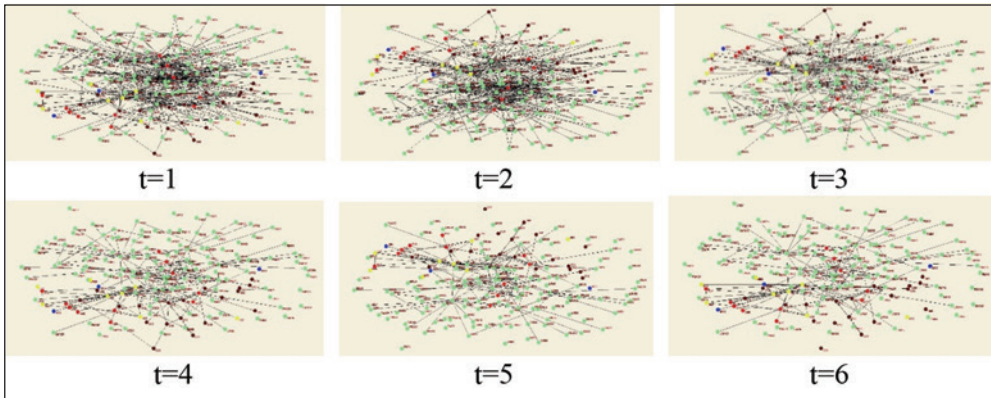


圖 6 列車動力異常從 t = 1 至 t = 6 之相繼安全傳播複雜網路圖

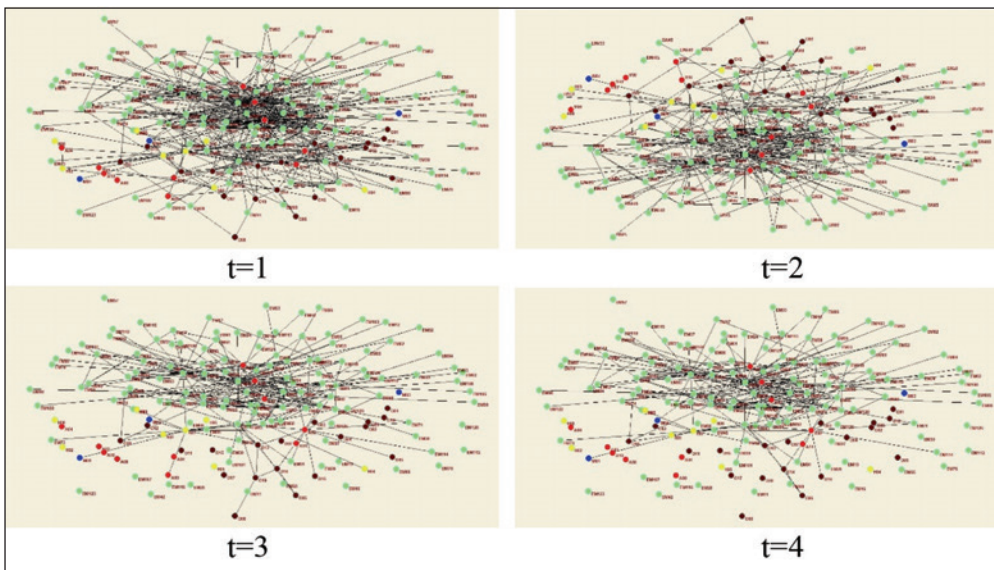


圖 7 人員違反規定從 t = 1 至 t = 4 之相繼安全傳播複雜網路圖

0.425，因此只要提高節點EM10的防護值至2倍，事故或事件的發生率可降低57.5%，且

經由相繼安全傳播，亦可讓額外的96個節點處於安全狀態。

表 3 人員違反規定網路效率的變化

	t = 1	t = 2	t = 3	t = 4
N'	167	155	108	89
E (H06)	1	0.928	0.647	0.533

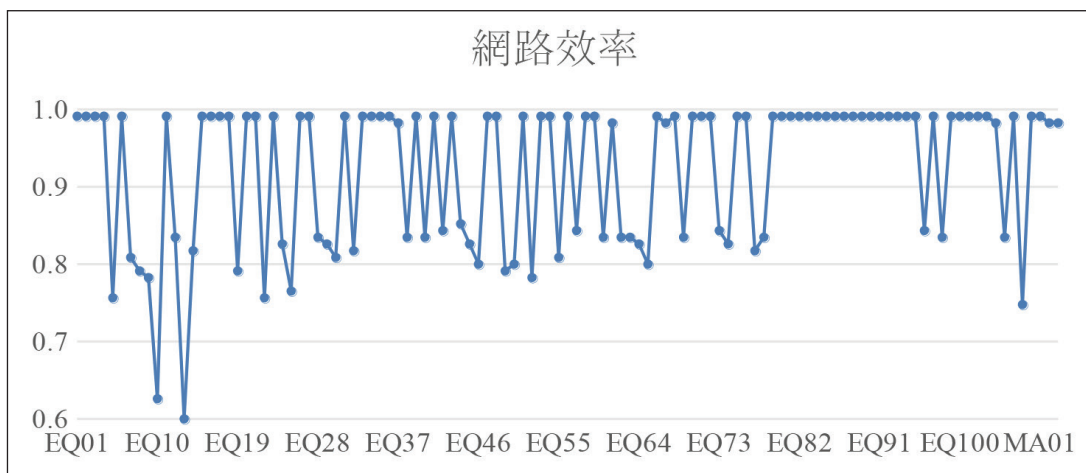


圖 8 車輛故障節點安全傳播後網路效率圖

若以介數最高的節點進行相繼安全傳播分析，亦可參照前述步驟執行，如前所述，介數最高的節點為人員違反規定（H06），圖7為人員違反規定（H06）從 $t = 1$ 至 $t = 4$ 之相繼安全傳播複雜網路圖。

經過節點H06相繼安全傳播後，本文計算出每個時間下網路效率變化，如表3所示。從表3可知，當節點H06的防護值增加為初始防護值的2倍時，網路效率可降低至0.533，因此只要提高節點H06的防護值至2倍，事故或事件的發生率可降低47%，且經由相繼安全傳播，亦可讓額外的78個節點處於安全狀態。

本文亦針對車輛故障事件進行相繼安全傳播分析。圖8為各節點的網路效率分布圖，本文假設若分別給予5個因素節點2倍的防護值後，可使車輛故障的機率降低24%至40%，這些節點分別為ATP故障、列車動力異常、列車鬆軔異常、主風泵故障及人員違反規定。避免ATP故障可降低24%；避免列車動力異常可降低37%；避免列車鬆軔異常可降低40%；避免主風泵故障可降低24%；避免人員違反規定可降低25%。

（四）管理意涵

依據前述應用案例分析結果，本文提供



臺鐵管理階層以下建議：

1. 降低EMU500型與E1000型故障頻率

車輛故障中EMU500型與E1000型的故障率是最高的兩種車型，EMU500型佔整體的26.48%；E1000型佔整體的13.83%，此兩種車型即佔車輛故障中將近40%，若能降低這兩種車型的故障，應可使事件發生的件數隨之減少。

2. 減少列車動力系統的異常

列車動力異常及列車鬆軔異常是事故與事件中非常重要的兩個因素，尤其是列車動力異常因素是整個網路模型中最重要節點，若將一定的人力及物力資源用來避免列車動力異常發生，則能使事故與事件的發生率降低57.5%。

3. 減少號誌設備的故障率

經由網路模型分析後，可發現號誌故障亦為事件的關鍵因素節點，因此，若能避免號誌設備故障，應可降低事件發生的次數，同時亦能增加列車的行車安全。

4. 加強人員訓練

除人員違反規定之外，人員未注意亦常是導致事故或事件發生的關鍵因素之一，因此應加強人員的訓練，不僅能避免人員違反規定，亦能改善人員未注意的情況，進而降低整體事故或事件的發生。

5. 增加ATP與主風泵的妥善率

若能使ATP故障與主風泵故障此兩個節點處於完全安全狀態，則能降低車輛故障發生的機率24%，因此若增加ATP與主風泵的妥善率，則能大幅降低車輛故障，同時亦能降低事故事件的發生。

四、結論與未來發展

(一) 以往國內對於臺鐵事故因素分析研究相對較少。本文運用複雜網路理論進行臺鐵事故因素分析，有別於以往針對單一事故或少量事故，而以整體性觀點呈現因素間之關聯，較具前瞻性。

(二) 藉由複雜網路理論度值的計算，可找出對於影響臺鐵事故或事件發生的重要因素，分別為列車動力異常、列車鬆軔異常、號誌故障、人員未注意及人員違反規定等因素，而這些因素大多為設備因素，其中列車動力異常為影響最大的因素。

(三) 本文從無向性網路模型之建立開始築底，並採用 Apriori 演算法來分析事故因素間的關聯，再確立其關聯因素間的網路圖之後，將有利於未來有向性複雜網路模型之建立。

(四) 未來若能導入文本挖掘與自動分類的技

術，針對鐵路事故文本挖掘出有關事故因素之屬性，再輔以物聯網平台相關數據分析結果，提出相對應之改善策略，將更具有實務操作價值。

參考文獻

1. 國家運輸安全調查委員會，重大鐵道事故調查作業處理規則（109）。
2. 交通部臺灣鐵路管理局，鐵路行車規則（106）。
3. 王珊珊，基於複雜網路的鐵路系統事故致因與風險分析，北京交通大學碩士論文，107年06月。
4. 孫千山等人，風險式與自主式鐵路安全管理制度之實務調查與分析，交通部運輸研究所 MOTC-IOT-103-SDF005，105年06月。
5. 徐偉豪，複雜網路理論應用於鐵路事故與事件因素之研究 - 以臺鐵為例，淡江大學運輸科學研究所碩士論文，110年06月。
6. Baysari M. T. Mcintosh A. S. and Wilson J. R.2008. "Understanding the Human Factors Contribution to Railway Accidents and Incidents in Australia". *Accident Analysis & Prevention* 40(5) : 1750-1757.
7. Celik M. and Cebi S. 2009. "Analytical HFACS for Investigating Human Errors in Shipping Accidents. *Accident Analysis and Prevention* 41: 66-75.
8. Ferjencik M. 2011. "An Integrated Approach to the Analysis of Incident Causes. *Safety Science* 49(6): 886-905.
9. Hassall M. E. Sanderson P. M. and Cameron I. T. 2014. "The Development and Testing of SaFER: A Resilience-Based Human Factors Method". *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* 4(1).
10. Hollnagel E. 2012. "An Application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to Risk Assessment of Organisational Change". Swedish Radiation Safety Authority.
11. Klockner K. and Toft Y. 2017. "Railway Accidents and Incidents: Complex Socio-Technical System Accident Modelling Comes of Age". *Safety Science* 110:59-66.
12. Kyriakidis M. Majumdar A. Ochieng Y. 2015. "Data based Framework to Identify the Most Significant Performance Shaping Factors in Railway Operations". *Safety Science* 78:60-76.
13. Ladkin P. B. 2005. "Why-Because Analysis of the Glenbrook, NSW Rail Accident and Comparison with Hopkins's Accimap". Report RVS-RR-05-05. Faculty of Technology. Bielefeld University.
14. Lama C.Y. and Tai K. 2020. "Network Topological Approach to Modeling Accident Causations and Characteristics: Analysis of Railway Incidents in Japan". *Reliability Engineering and System Safety* 193.
15. Leitner B. 2017. "A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis". *Procedia Engineering* 87:150-159.
16. Leveson N.G.2004. "A New Accident Model for Engineering Safer Systems". *Safety Science* 42(4):237-270.
17. Qureshi Z. H.2007. "A Review of Accident Modelling Approaches for Complex Socio-Technical Systems". SCS '07: Proceedings of the twelfth Australian Workshop on Safety Critical Systems and Software and Safety-related Programmable Systems 86: 47-59.
18. Rasmussen J. 1997. "Risk Management in a Dynamic Society: A Modeling Problem. *Safety Science*. 27 (2):183-213.
19. Reason J. 1990. "Human Error". Cambridge University Press. Cambridge. UK.
20. Zhan Q J. 2017. "A Hybrid Human and Organizational Analysis Method for Railway Accidents based on HFACS-Railway Accidents (HFACS-RAs)". *Safety Science* 91(1): 232-250.



軌道設備智慧化在運輸安全之應用

臺北大眾捷運股份有限公司副總經理 / 莊英震
臺北大眾捷運股份有限公司高級工程師 / 高榮崇
臺北大眾捷運股份有限公司正工程師 / 張相胤

關鍵字：物聯網（Internet of Things）、大數據（Big Data）、人工智慧（Artificial Intelligence）、安全關鍵項目（Safety Critical Items）、真因（Root Cause）

一、前言

「安全」是軌道運輸的最高考量，然而，為了要符合「運輸安全」的各項指標，我們可以透過檢修量測及IoT感測器，主動記錄蒐集各設備的靜態及動態資訊，建立分析大數據資料庫，了解設備過去曾經發生什麼事、現在的服務水準以及未來可能的劣化趨勢，並預先研擬維修或更新計畫，將故障維修轉化為預測維修，消弭設備設施可能發生的潛在故障，確保行車安全。

臺北捷運於1996年開始運營全臺第一條木柵線捷運系統，迄今已開通運營6條路線，合計達146公里，在新冠肺炎疫情前，每日運量可達216萬人次，109年的可靠度指標

MKBF為1248.6萬車廂公里。約相當於每12萬車次僅發生1次列車延誤5分鐘以上事件，意即可靠度高達99.999%，109年委託第三方調查全路網旅客滿意度更高達97.2%。如此高標準的營運績效除需系統的高度自動化，尚需配合營運維修人員的持續精進改善，方能達成。

本文說明臺北捷運設備設施維修智慧化的精進歷程，從導入ISO標準化、設施設備管理e化、IoT物聯網等方法及工具來蒐集設備設施資訊，再經由建置Metro PROMIS（預測性軌道營運管理資訊系統）提供線上單位的即時調度應變資訊，而營運過程累積的維修Big Data（大數據）則提供工法分析來設定系統的警戒值及告警值，作為邁向預測維修的

基礎，以增加系統設備設施整體可靠度。

二、軌道設備智慧化的方法

本節說明設備智慧化過程中所運用的科學方法及改善工具，分述如下：

(一) 實施 ISO 標準化

本公司自92年1月10日高運量捷運系統「檢修服務」通過ISO 9001品質驗證迄今，除將設備原廠維修手冊規範化為標準作業程序外，並透過維修經驗的累積與精進，陸續建置完成近一萬五千份不同位階及類別的標準化文件，包含系統文件、程序文件、工作說明書及表單等四階文件，如圖1；應用標準化品質文件，作為人員在執行維修作業之依據，要求說寫做的一致性，使不同人員在不

同時間面對不同設備機組，都能完成SOP的相同要求，包含該作業的目的、適用範圍、作業流程、作業方式、相關文件、參考資料及附件等。同時佐以組織內部外部的交叉稽查，缺失改善及矯正作業等，經由不斷的改善進版，方能完善設備的妥善率及可靠度。標準化的過程雖煞費苦心，卻是奠定整體維修作業品質的基石，有標準化才能彰顯數據資料的可信，因此，標準化可說是智慧化維修的第一道門檻。

(二) 導入 EFMS 設施設備管理 e 化

為有效管理捷運路網之設備設施，臺北捷運於2006年11月完成建置設備設施管理系統（EFMS，Equipment and Facilities Management System），包含各捷運路線、小巨蛋、貓纜及兒童新樂園等之設備設施維護

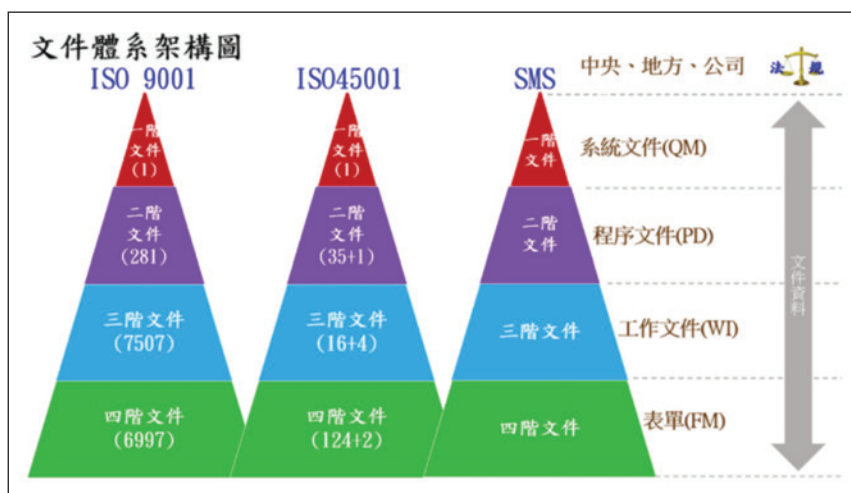


圖 1 臺北捷運公司 ISO 文件體系架構圖

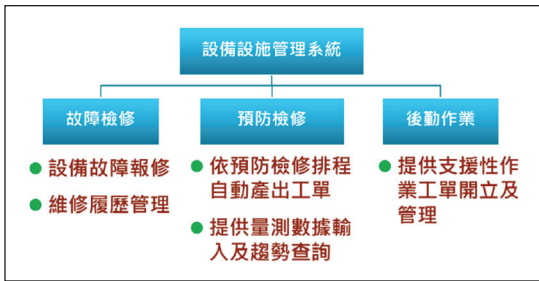


圖 2 EFMS 系統功能架構圖

管理，依維修作業型態，EFMS可分類為故障檢修、預防檢修及後勤作業等功能，如圖2。

EFMS系統將各類維修工作e化並全面控管，目前共計有51個子系統，管控設備及設施數量超過63萬個，可提供相關設備及設施基本資料、照片、維修履歷及統計報表等。各類統計分析資料有利進行工法分析、月報及稽催作業；同時依使用者權限，主動提供每日工作事項，俾能快速掌控報修及派工處理情形。EFMS也與其他相關的營運管理資訊串聯，建立（包括人事、物料備品、財產、成本、財會、權限管理等系統）不同資料庫體系間的動態資訊流之拋轉應用，如圖3。

自此，臺北捷運進入e化管理時代，每一張工單，從報修、查料（領料）、派工、施工到完工，關聯的物料備品、工時成本、管控節點、檢修數據等都可在EFMS系統上一覽無遺，設備狀態的變化趨勢、歷史資料也都可以直接從遠端調閱分析，不再需要去工作現場找資料，EFMS的e化大幅提升維修作業效能，也奠定了邁向智慧化維修的基石。

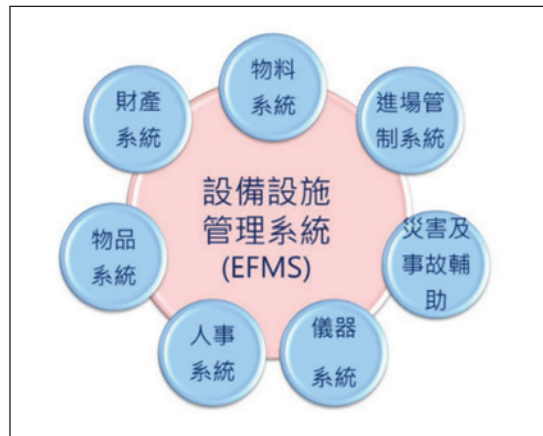


圖 3 EFMS 系統關聯圖

（三）建置 IoT 物聯網

隨著感測技術及通訊科技的快速發展，軌道設備狀態資訊除了製造商已提供之既有項目外，臺北捷運也從多年維修經驗中發現可以透過加裝各種感測器，傳送即時的設備狀態資訊，來建置捷運設備物聯網（IoT, Internet of Things），包括在電聯車、車站及道旁設備上增加各種溫度、濕度、壓力、電壓、電流、電阻、震動、影像、位移及噪音等感測器（如圖4），從中蒐集監控設備運轉的動態資訊數據並傳送至各終端設備主機。

各終端設備主機所蒐集的動態數據，經編碼加密後再以4G、藍芽、區域網路（Wi-Fi、光纖）等通訊網絡，回傳至系統數據平台（如圖5），再進行數據的解碼、紀錄、彙整，並提供後續設備狀況監視及工法分析所需數據資源。



圖 4 捷運物聯網 (IoT) 建置

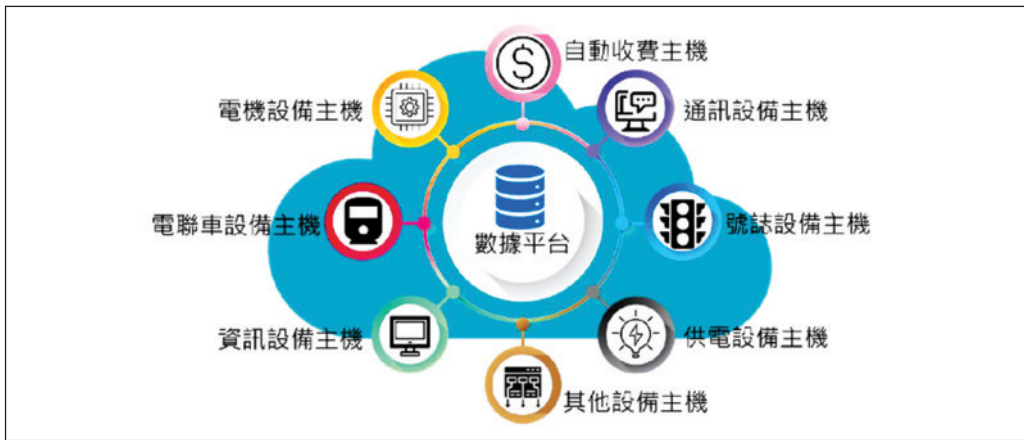


圖 5 建置數據平台

(四) Metro PROMIS 預測性軌道營運管理資訊系統

前述物聯網蒐集到的設備動態資訊，回傳到數據平台後，經過預測性軌道營運管理資訊系統 (Metro PROMIS, Predictive Rail

Operations Management Information System) 讀取特定的設備狀態指標，並經由預先設定的警戒值及告警值來評估判斷設備運轉即時狀態，提供給行控中心作為行車調度參考；線上維修站也據以派工檢修，排除潛在可能發生的故障；機廠調度室則據以安排正線換



車作業，避免高風險列車設備發生異常影響營運，如圖6。

Metro PROMIS可蒐集整合包括列車、號誌、通訊、供電、軌道、車站機電設備之維修檢測資料、運轉動態感測數據等，透過自行開發之拋轉軟體，克服不同的資料格式、通訊協定的存取，匯集傳輸至數據平台，並可定期自動上傳至雲端數據資料庫儲存，以提供各維修單位進行工法分析改善及加值應用。

Metro PROMIS架構依照相關應用可分為：即時監視、即時告警及分析模組等主要功能，對於即時發生的警訊、或未來可能發生的風險、設備劣化趨勢等，預先準備應對計畫，並安排必要的行車調度調整及設備檢修、大修、更新、重置等作業。

(五) 建構 Big Data 大數據生態系統

數據平台上的Big Data大數據資料，經由工法小組的統計分析，可以顯示出在垂直（系統設備上下游之間）、水平（同類設備不同機組間的差異比較）及時間（病歷表）上的運作狀態及變化程度，將其與實際的故障報修資料對照後，進行數據長期趨勢分析，可找出具顯著統計意義的管理指標，再經由敏感度分析來設定設備狀態指標的警戒值及告警值，透過分析預測模組，達到預測性維修之目標，並提升設備維修智慧化在運輸安全之應用。

針對容易影響系統運轉的安全關鍵項目（Safety Critical Items），實施專案品管稽查及改善作業，找出故障真因（Root Cause），

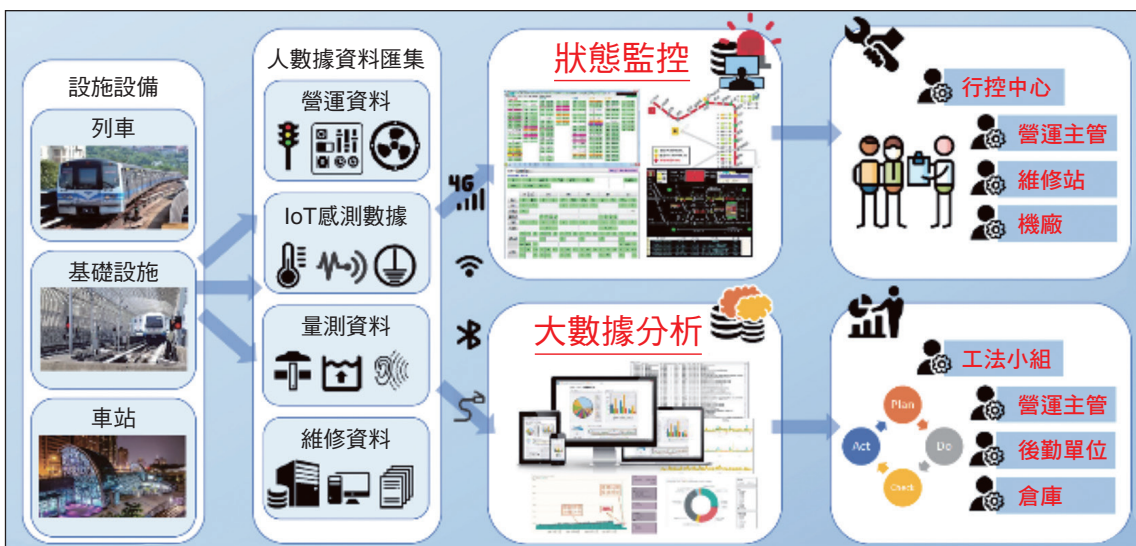


圖 6 數據資料應用架構

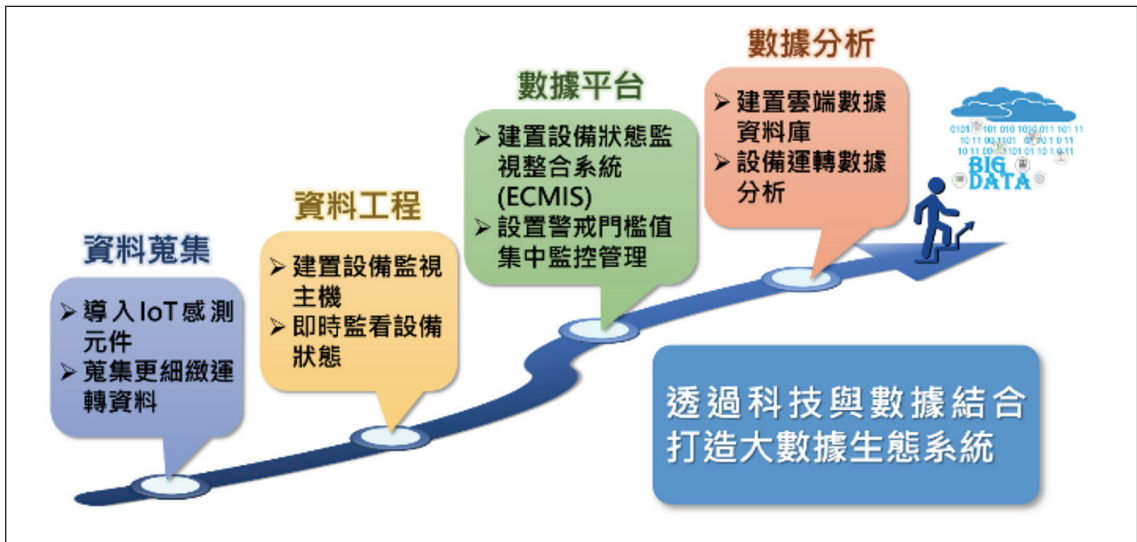


圖 7 Big Data 大數據生態系統

設法對症下藥，應用PDCA循環概念，在硬體、軟體、程序、訓練等各方面不斷的精進改善，以提昇系統設施設備整體可靠度及安全性。因此，建置Big Data大數據生態系統可說是推動軌道智慧化應用的必要基礎，如圖7。



圖 8 維修模式之演進

傳統的預防維修係依時間週期或行駛里程執行維護保養作業，來減少故障發生機率，而透過Metro PROMIS則可依設備運轉狀況或劣化趨勢執行維護保養作業，以消弭潛在可能發生的故障，達到預測性維修功效。

未來更計畫逐步將傳統上按時間週期或行駛里程執行的預防維修提升為按設備運轉狀況指標或劣化趨勢執行預測維修，如圖8，

將可大幅提升維修作業的精準度，降低設備維護成本，消弭潛在可能故障。

三、設備智慧化在運輸安全的應用實例

臺北捷運近年來致力於自主研發，導入IoT、資通訊技術及影像辨識等創新科技，提升設備的智慧化程度，本節摘要部分改善案例的實務應用成果，說明如下：



(一) 開發列車智能監督預警資訊系統 (TSIS)

列車智能監督預警資訊系統 (TSIS, Train Supervision Information System) 系統可提供列車設備動態的即時監控，包括：車門、空調、推進、主氣壓缸壓力、煞車壓力、鉛封開關、駕駛模式、速度碼、實際速度、超速警告、故障燈、斷路器及ATP與ATO的各項資訊。萬一列車發生如：車門意外開啟、設備故障、氣壓缸壓力不足、煞車異常、空壓機或冷凝器異常震動、鉛封開關被開啟、

ATP作動等異常狀況，TSIS系統皆會發出告警聲響及畫面（如圖9），提醒司機員及行控中心採取必要應急處置，避免發生影響行車安全事件。

臺北捷運初期路網之高運量電聯車（301/321/341型）早期並未配置可偵測電聯車重要設備運轉狀態之監督系統，導致電聯車於主線發生設備故障時，司機員及行控中心皆無法獲得即時完整列車訊息，以致增加故障排除時間。此外，電聯車因缺乏行車事

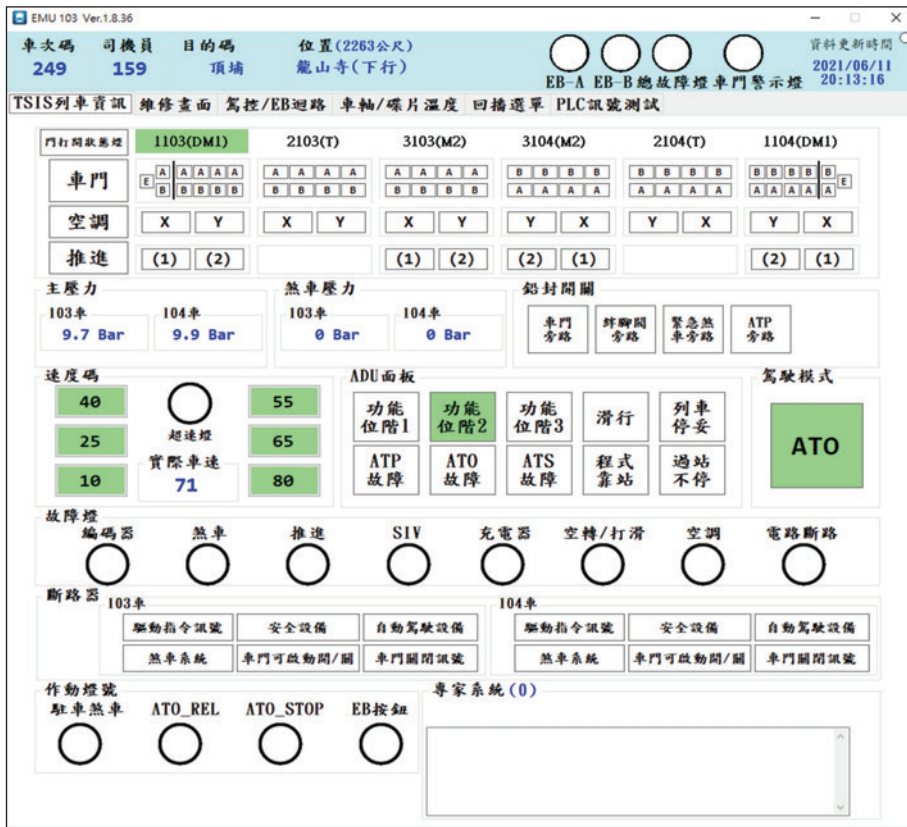


圖 9 TSIS 監控設備狀態畫面

件記錄功能（即俗稱黑盒子），無法得知故障當時之動態資訊，造成設備查修或事故調查的困難，為改善此狀況及減少列車故障延誤時間，因此本公司針對高運量301/321/341型電聯車（共計64列車）研發一套列車監督資訊系統，並於2007年底完成全車隊裝設。後續並提昇為列車智能監督預警系統（TSIS 2.0），透過電聯車增設TSIS機上盒、電信網路、可程式邏輯控制器（PLC）及感測器（例如：溫度、壓力、振動感測器等），蒐集列車動態資訊並透過電信網路回傳至行控中心，以達到即時告警、資料紀錄及預測性維修等目的，升級後之TSIS 2.0系統架構詳如圖10。

本公司TSIS 2.0列車智能監督預警系統已蒐集近10萬組各型電聯車偵測訊號，並客製化即時監控畫面及即時告警項目，用以

提供即時列車設備異常告警，以利於行控中心及早因應處理，降低列車設備發生故障時對系統營運之影響。TSIS 2.0係由本公司同仁自購設備安裝及自行撰寫監控軟體，相較於委託專業廠商建置，可節省大筆費用，且後續維護不再受制於廠商，擴增修改均能迅速完成。運用TSIS自動監控設備運轉狀態取代維修人員執行電聯車之預防檢修量測作業項目，目前，每年可節省數百萬元之維修費用。

透過自行開發的監控軟體，現場行控中心及各機廠調度班人員可即時監控線上各列車位置（如圖11）及設備運轉狀態。行控中心應用上述行車監控資訊，經由團隊腦力激盪，分工合作，自行開發列車線上故障排除專家系統，可迅速指引人員對應之緊急故障排除程序。2020年該專家系統已有效將2件

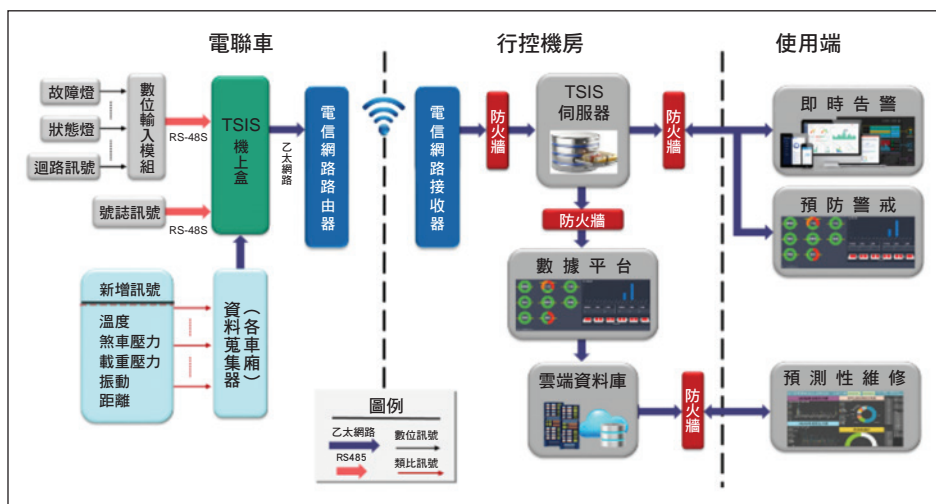


圖 10 TSIS 系統架構圖



列車智能監督預警系統 Ver 2.13.0_M 【2021/06/11 20:11:05】

全車組 告警畫面 歷史查詢 預警/警戒 專家系統告警

線別	板南線					
<input type="checkbox"/> R	234	101/102	新埔(下行)	992	147/148	機廠列車
<input type="checkbox"/> G	249	103/104	龍山寺(下行)	247	149/150	板橋(上行)
<input checked="" type="checkbox"/> B	237	105/106	忠孝復興(上行)	210	151/152	機廠列車
<input type="checkbox"/> O	200	107/108	機廠列車		153/154	
<input type="checkbox"/>	245	109/110	機廠列車	246	155/156	機廠列車
<input type="checkbox"/>	200	111/112	機廠列車	216	157/158	永春(下行)
<input type="checkbox"/>	221	113/114	江子翠(上行)	219	159/160	後山埤(上行)
<input type="checkbox"/>	640	115/116	土城(上行)	248	161/162	善導寺(下行)
<input type="checkbox"/>	239	119/120	海山(上行)	204	163/164	海山(下行)
<input type="checkbox"/>	241	121/122	永寧-頂埔	212	165/166	龍山寺(上行)
<input type="checkbox"/>	206	123/124	昆陽(下行)	224	167/168	機廠列車
<input type="checkbox"/>	213	125/126	頂埔(上行)	289	169/170	江子翠(下行)
<input type="checkbox"/>	244	127/128	西門(下行)		171/172	
<input type="checkbox"/>	223	129/130	南港展覽館(下行)		175/176	
<input type="checkbox"/>	238	131/132	台北車站(B)(上行)	251	201/202	國父紀念館(下行)
<input type="checkbox"/>	242	133/134	機廠列車		203/204	
<input type="checkbox"/>		135/136			205/206	
<input type="checkbox"/>	233	137/138	國父紀念館(上行)	288	207/208	機廠列車
<input type="checkbox"/>	218	139/140	忠孝復興(下行)	236	209/210	昆陽(上行)
<input type="checkbox"/>	243	141/142	亞東醫院(下行)		211/212	
<input type="checkbox"/>	635	143/144	南港展覽館(下行)			
<input type="checkbox"/>	287	145/146	機廠列車			

：超過1分鐘無資料更新

圖 11 TSIS 監控列車位置畫面

5分鐘以上延誤事件降級為5分以下事件。

應變措施，可避免發生嚴重行車意外延滯，提升行車安全。

(二) 偵測車軸及煞車碟片溫度

列車在運行中，軸承異常產生燒軸現象，將造成行車安全高度風險。

因此，在各路線軌道旁安裝溫度感測器，自動化測量並回傳經過該位置各電聯車組的車軸及煞車碟片溫度，如圖12；監控其溫度變化情形，掌握軸承運轉品質，若偵測到異常值，可對行控中心及機廠調度室提出即時預警，以便安排線上檢修或更換列車等

(三) 號誌監測及預警系統

號誌系統是臺北捷運路網的重要設備，其中又以道旁之轉轍器及軌道電路設備更為重中之重，其故障影響對營運衝擊非常巨大。

轉轍器能變換軌道號誌路徑，使列車前往不同的目的地，如轉轍器無法扳轉，可能嚴重影響列車運行，導致延誤事件。軌道電



EMU 159 Ver.1.8.36											
車次碼	司機員	目的碼	位置(994公尺)	資料更新時間							
223	496	亞東醫院	台北車站(B)下行(已離站)	2021/07/12 17:49:25							
EB-A EB-B總故障燈車門警示燈											
TSIS列車資訊 維修畫面 駕駛/EB迴路 車軸/碟片溫度 回播選單 PLC訊號測試											
1159(DM1)		2159(CT)		3159(M2)		3160(M2)		2160(CT)		1160(DM1)	
資料接收時間: 2021/07/12 17:47:06											
車軸溫度											
34	36	36	34	35	35	37	36	36	36	38	37
X	A		Y	X	A		Y	X	A		Y
	(DM1)				(T)				(M2)		
	B				B				A		
32	33	33	33	32	32	34	34	35	35	36	36
平均:	33.9	平均:	34.4	平均:	36.1	平均:	36.2	平均:	35	平均:	36.6
資料接收時間: 2021/07/12 17:47:06											
碟片溫度											
34	34	36	34	32	33	35	34	35	36	36	36
X	A		Y	X	A		Y	X	A		Y
	(DM1)				(T)				(M2)		
	B				B				A		
34	35	37	37	34	35	36	37	38	38	39	40
平均:	35.1	平均:	34.5	平均:	37.2	平均:	36.2	平均:	34.4	平均:	33.2

圖 12 車軸及煞車碟片溫度監測

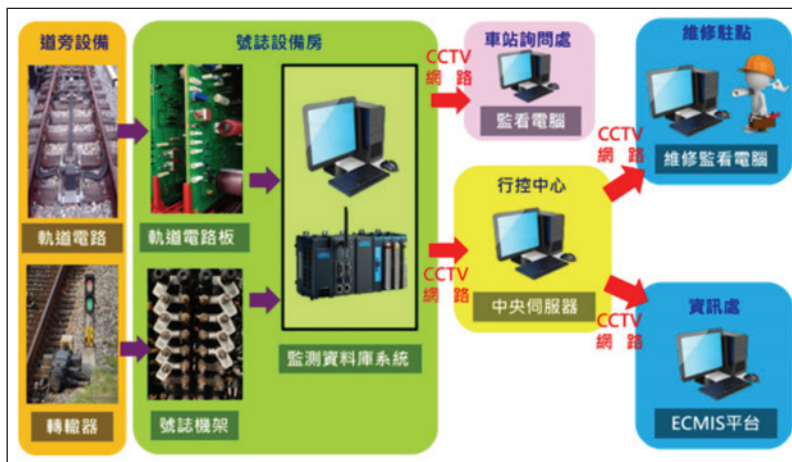


圖 13 號誌監測系統架構圖

路則是偵測列車行進位置，如果故障而發生誤佔據，列車將無法正常以全自動模式依速度碼行駛，須改採限制手動模式（RM, Restricted Manual Mode）限速25km/h行車，亦將嚴重影響列車運行，造成營運延誤事件，及增加行車安全上的風險。

因此，為維持系統營運正常，建置號誌監測系統乃成必要作為，透過IoT設備監測重要號誌設備，例如：記錄轉轍器之電壓、電流、定位訊號、呼叫訊號及軌道電路之發射電壓、接收電壓、電流、佔據等運轉數據，系統架構如圖13。



號誌監測系統可有效掌握號誌設備運轉狀況，即時監測設備動態，針對設備運轉即時數據逾越管理值項目可預先發出警報，提供行控中心及號誌維修站前置時間，進行必要行車調度及搶修作業。後續對大數據資料進行工法分析，亦可找出設備劣化趨勢，作為預防性檢查或故障檢修時，掌握釐清異常設備及故障真因，並研訂改善維修計畫，俾利提升號誌設備系統可靠度及安全性。

以轉轍器為例，實務經驗發現轉轍器扳轉電流值會因基板、桿件磨耗及外部環境等影響而上升，當工作電流有逐漸上升趨勢時，若瞬間電流過大容易造成轉轍器扳轉定位的失敗。

據此，我們在每一部轉轍器對應的設備機架擷取相關運轉訊號，傳至監測系統，並建立資料庫，紀錄整個扳轉過程變化，經過統計分析後，針對不同的轉轍器分別訂定警戒值及維修告警值。日後，每次扳轉時，就可即時比較其消耗電流差異及耗時，並在逾越管理值時，產生警戒或維修告警（如圖14）。經由此一改善，就可在設備即將故障前，先行派員維修，以避免潛在的行車延滯問題。

（四）電聯車載重監測及車廂擁擠度之應用

為提供旅客於列車進站前即可得知車廂擁擠程度資訊，讓旅客可以預先選擇乘客較少的車廂搭乘，以降低車廂載客不均勻之擁

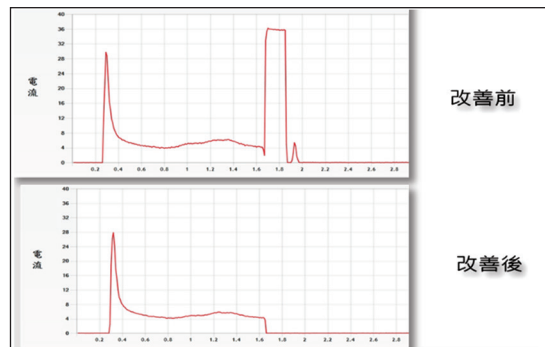


圖 14 轉轍器改善前後波形圖



圖 15 月台電子看板顯示車廂擁擠度

擠情形，避免發生互相推擠等安全問題；臺北捷運公司運用車廂載重資訊，轉換為車廂擁擠指標資訊，提供予旅客辨識及行控中心調度參考，旅客可透過車站月台上電視之電子多媒體顯示系統（Electronic Multimedia Display System，簡稱EMDS）或旅客手機APP得知車廂擁擠資訊，如圖15，並在候車時先行移動到適當車廂位置，可達到人潮分流效果，有效提升列車服務品質。

其運作係利用電聯車懸吊系統空氣彈簧氣路之載重壓力感測器，擷取即時列車載重



壓力值，經運算後，由電信網路回傳後端伺服器，再把運算後的壓力資料配合列車到站資料以及列車位置訊號彙整後，傳送至月台電視（EMDS）及手機的「台北捷運Go」App顯示，功能架構如圖16。

本功能除讓旅客掌握列車內的人潮狀況外，本公司也將此數據蒐集開發特有的板南線防疫管制分析模組，透過大數據分析平台，幫助行控中心掌控列車行經沿途各站分時載客人數及擁擠程度，適時調度列車，紓解擁擠人潮。板南線已於2020年5月啟用，文湖線已於2021年3月啟用，其餘路線預計2022年3月前啟用。

（五）導電軌沉陷自動監測系統

導電軌沉陷可能導致列車行經該路段時撞擊拉扯而發生行車事故，為提升臺北捷運營運可靠度，故我們開發了導電軌沉陷監測系統，希能藉由監測系統之即時監測及收集資料進行分析比對等功能，不僅能即時發現導電軌高程異常，更可藉由收集資料建立數據分析模組，預先發現異常發展趨勢並及早進行導電軌調整修復作業，以提升捷運系統可靠度。

導電軌高程異常雖可以人工方式逐線逐路段進行檢查，惟曠日廢時且耗費過多人

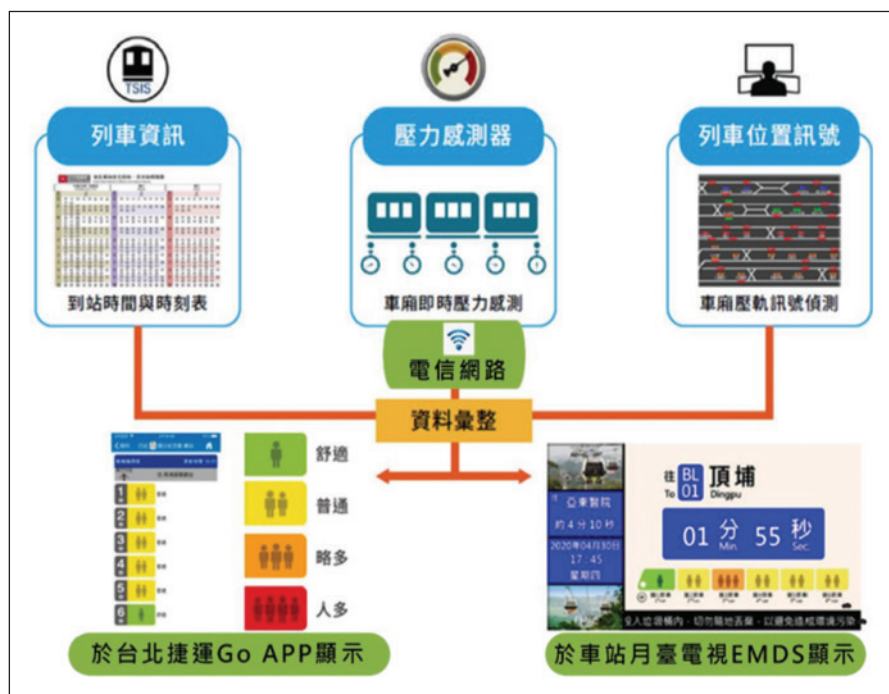


圖 16 車廂擁擠度系統功能架構

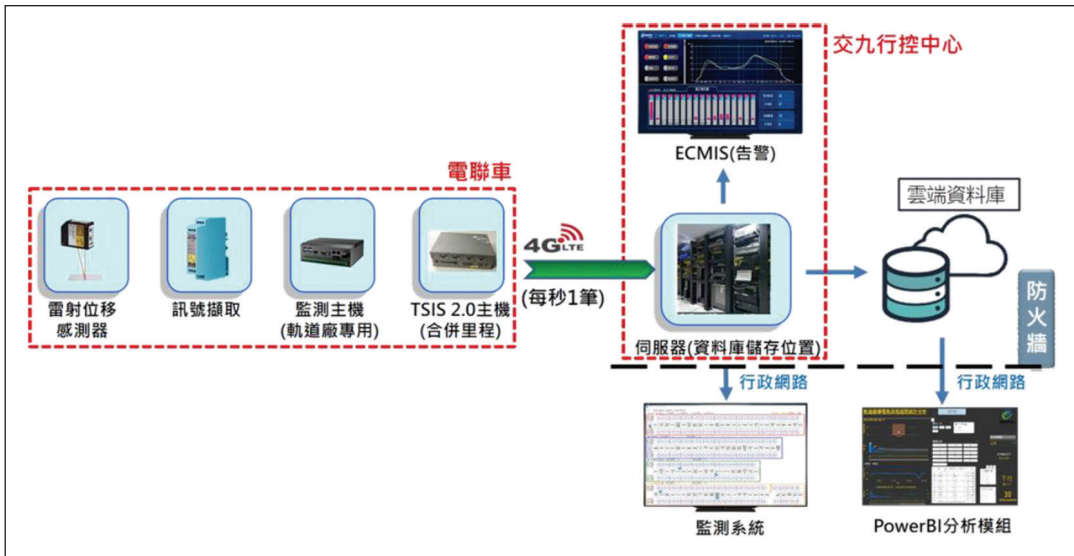


圖 17 導電軌沉陷監測系統架構

力，無法有效解決問題；若使用軌道檢查車每2個月檢查一次，雖較人工檢查有效率，但亦須受限於檢查時間須於非營運時段執行，以避免影響行車，且檢查完後仍需以人工方式進行數值與里程位置確認。為解決此問題，故規劃建置導電軌沉陷自動監測系統，包括：（1）導電軌沉陷監測須能於營運時間執行檢測。（2）導電軌沉陷監測異常時，須能即時發現並獲知異常位置，無需另行後製及人工比對。

為滿足上述需求，故藉由IoT技術，將感測元件安裝於電聯車上，進行營運時間檢測，以達到營運時間亦可即時量測之目的，另透過列車之電信網路可即時回傳導電軌高程量測數值及相對應量測位置之里程，其系統設計架構如圖17所示，詳細執行方式說明如下：

導電軌沉陷監測系統可於維修站透過有安裝感測器之列車行駛，即時監視目前導電軌高程量測數據（如圖18），並藉由列車號誌系統獲得列車行駛里程，將感測器量測之數值與里程數結合，即可隨時掌控導電軌沉陷狀況，並於發現異常時提供即時告警。

「導電軌沉陷監測系統」為近年內開發之預警系統，結合IoT與無線通訊技術，並導入預測性維修及大數據分析之概念，後續可藉由告警訊息及歷史紀錄製作數據分析模組，依量測數據篩選出可能超限點位之趨勢、分佈站間及時間履歷等，藉此評估最佳導電軌調整及更換時機，並搭配Metro PROMIS數據平台即時告警，有效提升系統可靠性及安全性。

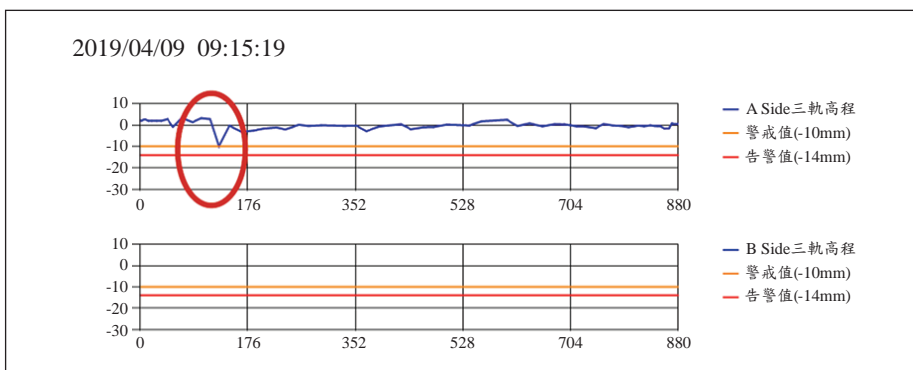


圖 18 導電軌沉陷量測數據實例

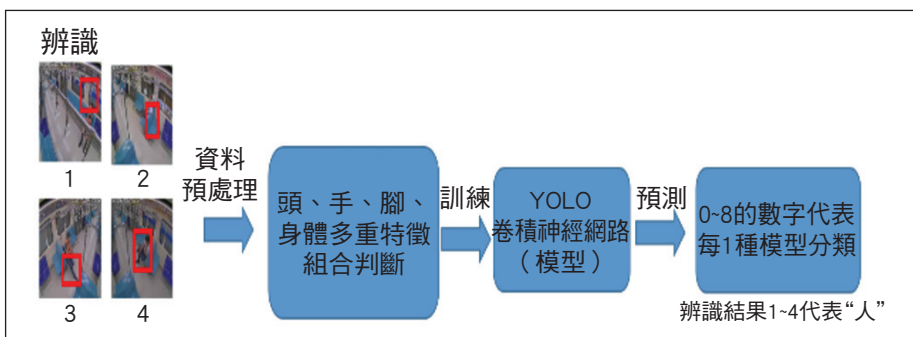


圖 19 列車旅客清車影像辨識系統

(六) 發展中影像辨識技術應用

近年影像辨識技術快速發展，藉由深度學習類神經網路達成人工智慧（AI；Artificial Intelligence）的境界，臺北捷運公司也陸續試著引進影像辨識技術來解決各項軌道問題與需求，如：（1）列車終端旅客清車，藉由車廂內攝影機影像辨識是否還有旅客、（2）捷運列車出車設備外觀檢查，確認列車外各設備箱是否關閉妥當、（3）捷運列車內旅客異常行為奔跑、移動影像辨識偵測、

（4）軌道扣件影像辨識應用等，以下將陸續說明。

首先是列車終端旅客清車部分，因捷運列車在部分終點站要先進行旅客清車後，再將列車回送機廠收車，藉由車內攝影機及影像辨識AI軟體，可自動辨識車廂內是否還有旅客逗留，若有旅客逗留即發出報警提示司機員，立即派保全勸導旅客下車，避免意外將旅客載入機廠，產生安全疑慮，系統示意圖如圖19所示。

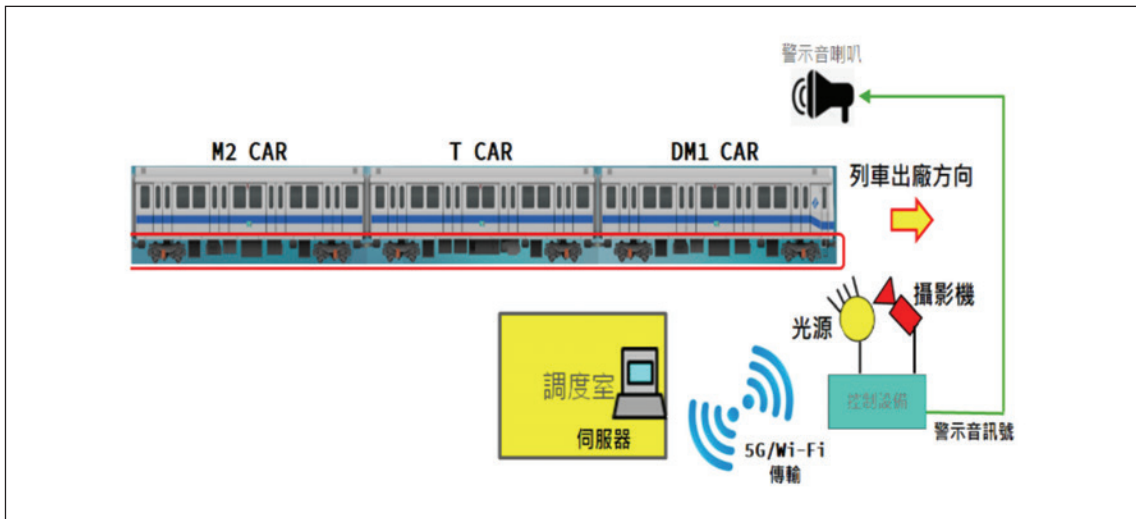


圖 20 列車外觀檢測影像辨識應用

其次是在工作人員完成出車檢查後，當列車駛出維修廠時，影像辨識系統輔助系統會自動重複比對檢查列車外觀，以避免人工檢查不確實之風險；捷運列車出車前的設備外觀檢視，其影像辨識需應用3D建模技術，建立捷運列車外觀模型標準，再透過影像辨識技術，比對各設備外觀特徵輪廓，當列車各設備外觀輪廓符合標準時方可出車；若檢測出不符標準時，代表有設備箱未關妥或其他問題，須再派工檢查以排除異常，系統檢視示意圖詳如圖20。

另外，針對捷運列車內旅客異常行為為奔跑、異常移動影像辨識偵測之應用，因捷運列車車廂內為半密閉空間，所以發生旅客異常行為，常引發其他旅客慌張，造成人群傷害等，故臺北捷運公司針對列車內緊急求

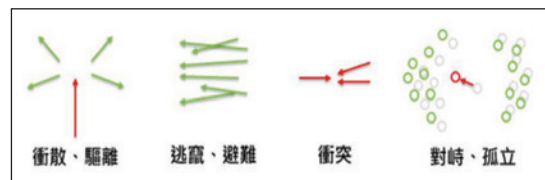


圖 21 旅客異常行為影像辨識示意圖

救按鈕已陸續建置完成，現透過影像辨識技術，針對旅客可能的逃竄、避難、沖散、驅離、衝突、對峙行為進行影像辯視，盼能藉由AI深度學習機制達到影像辨識效果，能再發生事件當下，由車內攝影機進行影像辨識，對旅客行為影像辯視偵測，提供更完善安全列車搭乘環境，防止各種可能擴大危害。人群行為移動在影像辨識可能轉換為箭頭、圓圈去表示各種可能的行為，如圖21，為旅客可能發生之異常行為。



最後，有關軌道扣件影像辨識應用部分，臺北捷運公司也希望透過影像辨識技術，藉由車下攝影機經過軌道扣件上標誌箭頭時，將影像進行快速比對檢測，當軌道扣件上標誌箭頭有偏移狀況、角度變化等鬆動特徵時，將發出相關告警，期望能達到早期預警效果，避免可能的軌道異常事件。

上述影像辨識技術應用皆為解決客製化需求，從現行各既有行為透過影像標記、資料學習過程達到影像辨識應用；而可用影像辨識應用準確率應在9成5以上，才是可以進入實戰應用之影像辨識技術。

四、結論

本文歸納臺北捷運公司自83年7月成立迄今，全體從業人員筆路藍縷，披荊斬棘，運用創新科技，精進改善系統設備，藉由逐步導入ISO標準化、EFMS設施設備管理e化、IoT物聯網等方法工具，蒐集儲存設備動靜態資訊，再經由建置Metro PROMIS預測性軌道營運管理資訊系統，提供行控中心即時行車調度應變資訊，營運維修過程所累積的Big Data大數據，則可經由工法分析來設定管理指標的警戒值及告警值，作為設備劣化趨勢的管理指標，奠定邁向預測維修的基礎，藉由軌道系統設備的智慧化，來增加系統可靠度，並提升軌道運輸安全。

There is always a better way. 新科技的應

用導入一直是臺北捷運公司長期努力追求的方向，在穩定的系統營運下，我們不斷地求新求變，檢討再檢討，精進再精進，在一萬五千餘份SOP文件不斷改版進化的背後，是無數同仁的智慧結晶，冀求以最經濟的營運維修成本，提供民眾最安全便捷的服務，符合環境保護、社會責任及公司治理的永續經營理念。

五、未來展望

每一座城市都有它獨特DNA及文化底蘊，其所能供給的資源或有差異，但對軌道運輸的殷切期盼則沒有不同；藉由本文的探討與說明，希望對各城市未來發展軌道運輸，在規劃、建設、營運、維修等各階段作業，提供一些參考。

本公司未來將持續發展IoT物聯網、Big Data大數據、影像辨識及AI人工智慧等新創科技應用，朝智慧化車站、智慧化維修及智慧化行車監控方向前進，讓我們共同努力，提供市民旅客們多一些安全、多一點人性，多一份感動，共同邁向智慧化軌道運輸的嶄新時代。

參考文獻

1. 莊英震、黃家仁、李吉忠、施志龍、李儀禹，「臺北捷運文湖線的技術改善紀實-營運初期至今可靠度躍昇之行動案例」，捷運技術半年刊第49期，103年7月。
2. 方俊翔，「臺北捷運高運量電聯車營運故障改善之研究」，國立交通大學碩士論文-99年7月。



捷運工程於 BIM 建築資訊模型 結合混合實境應用之前導研究

新北市政府捷運工程局局長 / 李政安

新北市政府捷運工程局科長 / 陳加乘

新北市政府捷運工程局管理師 / 王仲民

財團法人臺灣營建研究院博士、組長 / 黃正翰

財團法人臺灣營建研究院專案副理 / 吳書嫻

財團法人臺灣營建研究院專案副理 / 謝禎謙

關鍵字：混合實境、MR、建築資訊模型、捷運工程管理

摘要

營建工程產業相較於其他科技產業，應用新科技之步伐較為緩慢，現今資訊科技發達，隨著新科技發展蓬勃，於工程產業結合混合實境技術（Mixed Reality，簡稱MR）是未來重要趨勢之一，除了MR可即時互動體驗外，亦可解決工程之介面衝突與設備維護等相關應用。故因捷運工程龐大的施工量體及維護需求，本研究透過導入建築資訊模型（BIM）應用於設施維護及工程管理面向，並結合新科技MR混合實境技術，以提升設備

維護管理效率，減少捷運施工困難及排除管線衝突，協助現場設計施工與系統維護之財產管理應用之情境。

一、前言

新北市近年來各產業發展迅速，人口及都市空間發展變化極大，為解決整體交通問題、帶動地區發展，新北市政府參考國外大型都會成功經驗，著手規劃捷運三環六線的建設藍圖，來服務新興開發地區，將捷運核心延伸至外圍地區，利用轉乘機制擴大整體

服務網面，以建立大臺北地區更完整及便捷的服務路線，提供整體都市再發展動力。

在捷運工程上針對各階段不同單位之間相互溝通的效率與完整性，迄今皆為執行工程專案成敗的關鍵因素，為更加強化各階段溝通執行上之便利性，導入MR虛擬實境技術於設計階段、施工階段與維運階段，研擬展示情境應用方式，透過混合實境之穿戴式設備相關使用情境研擬及設備導入結合BIM建築資訊模型，協助推動捷運工程專案檢討工程各階段之各介面衝突與未來設備巡檢維護作業之便利性。

二、研究背景

捷運三環六線中，第一環為文湖線加環狀線、第二環由萬大至樹林線與中和新蘆線相連、第三環由板南線、土城等線延伸至三鶯及機場線。另外六線則為原先三線，淡海輕軌、汐止民生線、安坑輕軌，及新增的三線，八里、深坑和五泰輕軌，全部完成後共涵蓋19個行政區，捷運三環六線可帶動沿線24處約1700公頃整體開發區，在大臺北市境內日運量可達到180萬人次。

捷運場站的BIM模型，概念上即為將傳統紙本圖面的資訊數位化，以資料庫的方式儲存運用，有了建物的數位資料後，等於有了所有衍生資料的骨幹，讓數位資訊能夠對應空間，後續才有機會導入資訊系統，將所

有的應用串接在一起。

BIM模型因為包含大量捷運工程相關資訊，除了最基本的應用之外，當相關資訊系統建置完成後，後續還有許多衍生的應用方式，若以正確方式規劃使用，輔以MR設備能夠展現空間感、及能夠空出雙手的優勢，將可以進一步增進BIM模型帶來的價值，其使用MR技術進行多人檢核與溝通，應用於土木工程的设计過程、施工管理、營運管理等全生命週期管理過程，這使得各階段的溝通協調更為便利，設計變更時增加修改效率與準確度、減少人為錯誤，進而提高BIM模型提供給參與者的使用效益，實為值得探討的問題。

因此本研究將協助捷運工程透過MR技術輔助設計階段檢核設計空間與機電管線建置合適性，在施工階段於施工前結構體完成時甚至可使用MR將機電管線呈現於施作完成之結構體，預先檢核結構物體內管線走向，降低機電工程管線與空間規劃變更設計之風險，此為營建產業未來努力的方向，但除了高階技術的呈現之外，一般的傳統文書施工圖本、測量工具、工程筆等隨身物品還是必須的，此時若需要挪用一隻手甚至兩隻手來操作行動裝置，會降低巡檢效率，因此，為了能夠使巡檢人員能夠在捷運工程的施工現場，更便利的透過MR混合實境結合BIM模型，可導入MR相關設備及其應用，為施工人員帶來更為便利的科技應用體驗，以下將針



對各階段導入MR技術應用內容說明。

三、各階段導入MR技術應用說明

BIM模型由於所含資訊量龐大，並且包含許多設計細節，若只從平面螢幕上瀏覽，不容易感受實際空間感，且BIM軟體操作需要一定熟練度，初學者不容易從中快速定位到需要的空間。目前雖然有部分解決方案能夠簡化模型導覽的操作，但對於完全不熟悉電腦操作的使用者，還是有一定門檻存在。

本研究運用Microsoft HoloLens 2執行相關工作項目，其導入安坑輕軌運輸系統工程K9車站之設計階段BIM模型，且此MR設備可透過手勢操作，使用方式較為直覺，可以讓從未使用過BIM軟體的使用者快速上手，不需要花額外時間熟悉快速鍵等操作，BIM工程師以外的一般使用者也能夠開始使用模型，取得模型資訊及看到最後實際完工的狀況，以便在設計初期就能提供回饋，進而減少現場修正的成本及減少浪費。

BIM模型要能在MR環境下應用，需要一套雲端資訊系統服務，於MR環境下提供各式功能，並處理、同步及儲存BIM模型及應用數據，讓所有資訊能在雲端進行管理，另需包含使用者認證機制，以確保資料安全，此MR資訊系統服務簡稱為MR系統，本研究針對以下兩式情境模擬相關MR應用方式。

(一) 設計與施工階段之情境模擬

由於設計作業整合上，須先從前端業主與使用單位的需求進行整合工作，且設計經常會快速變動調整，透過BIM整合建築結構與機電模型，避免相關碰撞問題產生，但整合過程中常會面臨多方顧問討論時，不易透過以往傳統2D平面圖呈現各系統配置進行溝通，造成溝通上的誤解而拖慢整體專案時程及增加成本，透過MR裝置呈現BIM模型及資訊，讓協同合作的過程更加順利並減少認知誤差。

1. 於MR虛擬環境瀏覽BIM模型

建模人員於軟體內建置的BIM模型，經過模型精密轉檔及處理後，透過MR系統在MR設備內開啟，須能透過雙手移動及縮放BIM模型，以利清楚檢視模型細節並找出可能的問題點，如圖1所示。

2. BIM模型系統拆分及切換

由於BIM模型元件眾多，不容易從龐大的BIM模型快速找到所需資訊，系統需要能將BIM模型進行具實務意義的拆分，讓使用者能夠快速切換、分解組合各系統，如圖2，以利在日常檢修作業時，增進BIM模型使用效率。

3. 模型剖面

由於機電管線經常位於天花板或管架上，通常視點不易從錯縱複雜的結構及管線

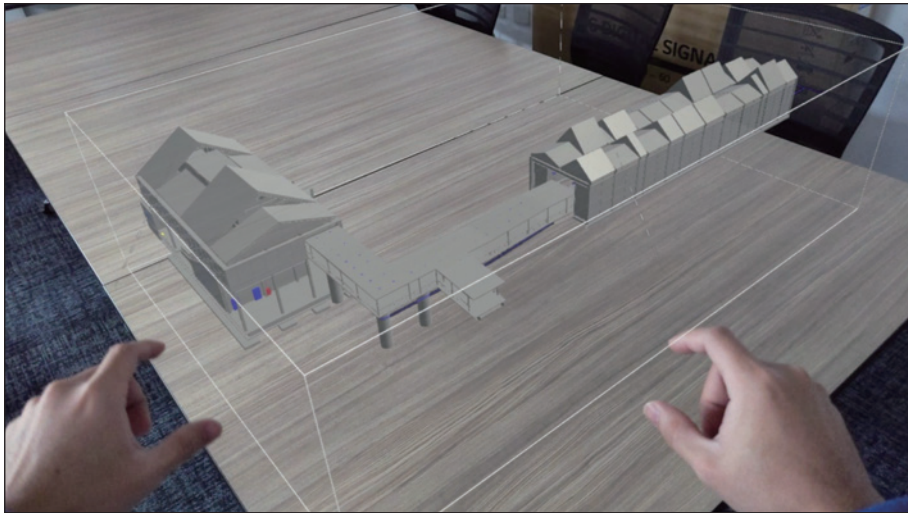


圖 1 虛擬實境 BIM 模型 -MR 環境瀏覽示意圖 (資料來源：本研究彙整)

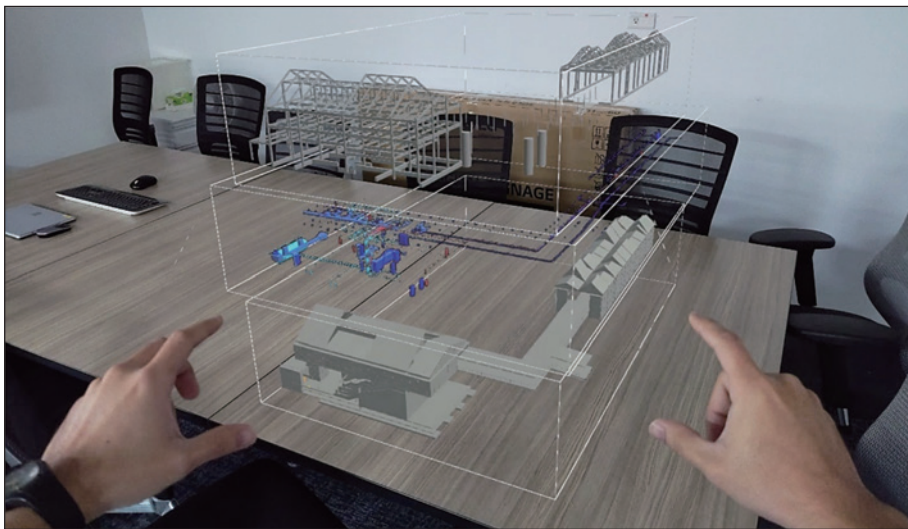


圖 2 虛擬實境 BIM 模型 -系統拆分示意圖 (資料來源：本研究彙整)

中尋找所需元件，MR系統需具備切割模型功能，如圖3，以將阻礙視線的元件排除，用以直觀檢討特地區域複雜管線配置與空間規劃等項目。

4. 衝突點檢視

BIM模型內的碰撞點，若牽涉到多個系統間的干涉，不容易於平面螢幕呈現複雜的相對關係，若以MR裝置呈現，可以更加自由

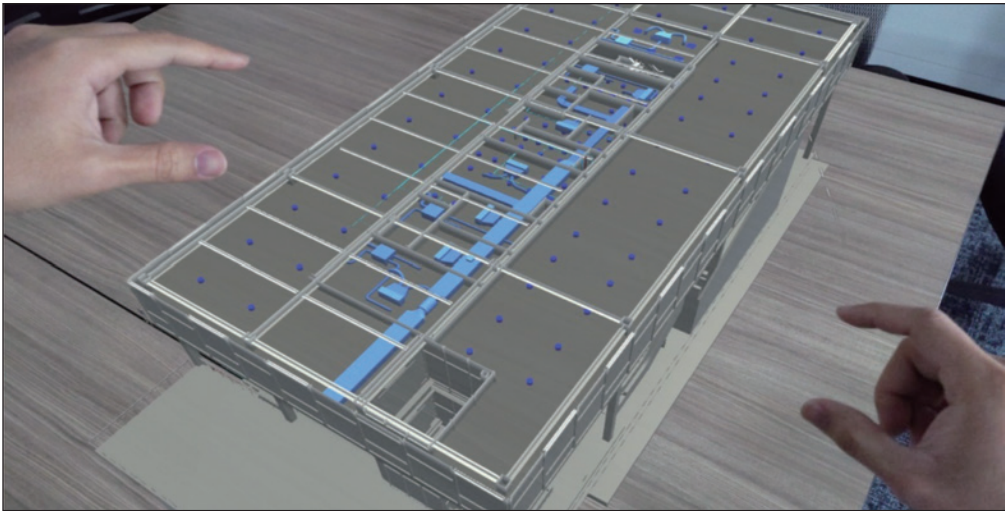


圖 3 虛擬實境 BIM 模型 - 剖切功能示意圖 (資料來源：本研究彙整)

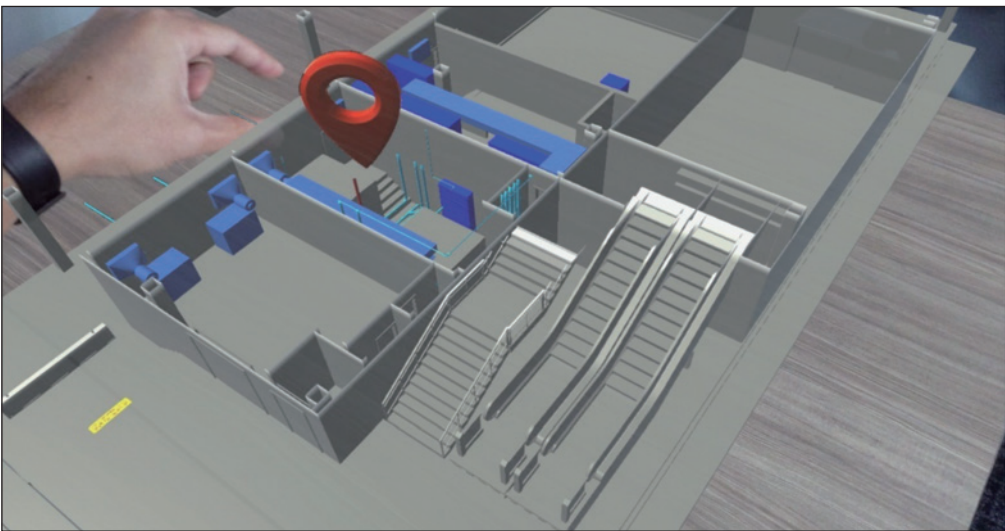


圖 4 虛擬實境 BIM 模型 - 衝突點定位檢視示意圖 (資料來源：本研究彙整)

移動視點，確認周遭物件是否有影響碰撞因素，如圖4所示。尤其針對BIM模型內管線及結構衝突，使用者可以在MR環境下檢討最佳解決方式，讓設計整合更加順暢。

5. 議題檢視、管理

於設計與施工階段，經常有各種界面需要整合，過程中需要多方顧問協調，整合議題可藉由雲端平台統一紀錄、追蹤、管理，



圖 5 虛擬實境 BIM 模型 - 多方協調示意圖 (資料來源：本研究彙整)

讓專案參與人員能在MR環境下協同討論，並於平板裝置或個人電腦管理相關紀錄，如圖5。

6. BIM資訊查詢

使用者除了BIM模型以外，需要經常查看BIM資訊，MR系統需讓使用者能夠輕鬆存取BIM模型中的重要資訊，如圖6，作為討論依據及檢核正確性。

7. 真實比例檢視、模型定位

當討論大範圍整合時，通常會利用建築微縮模型進行溝通；當討論細部時，則會需要以真實尺度1:1呈現BIM模型，並且於必要時，將BIM模型疊合至現場環境，以確認模型與現場的差異，如圖7所示。

8. 模型量測

由於MR環境下的BIM模型允許使用者自由縮放，目視模型無法判斷尺寸，需要一套工具讓使用者進行量測並取得模型內確切尺寸，如圖8所示。

(二) 維運階段之情境模擬

捷運工程的營運維護階段在建築生命週期所佔的時間最長，也是真正發揮使用價值的階段，建物內的各種設備皆有相關的維護檢修規劃，傳統透過紙本表單進行管理及記錄留存，不易即時傳遞，且需要花大量時間彙整，長期累積的大量資料也難以調閱。

透過數位化作業流程可以大幅改善以上

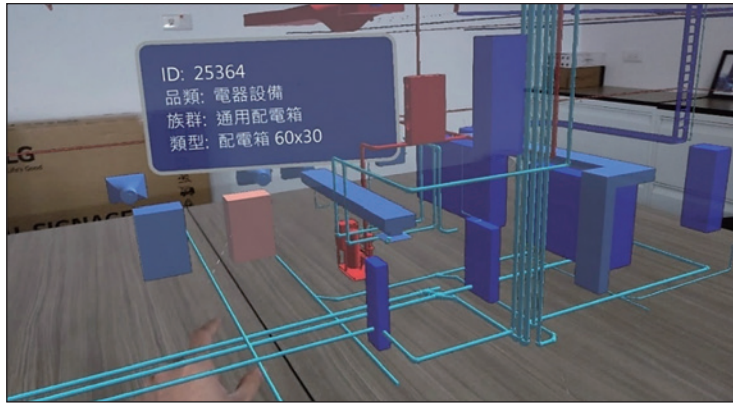


圖 6 虛擬實境 BIM 模型 -BIM 資訊查詢示意圖 (資料來源：本研究彙整)

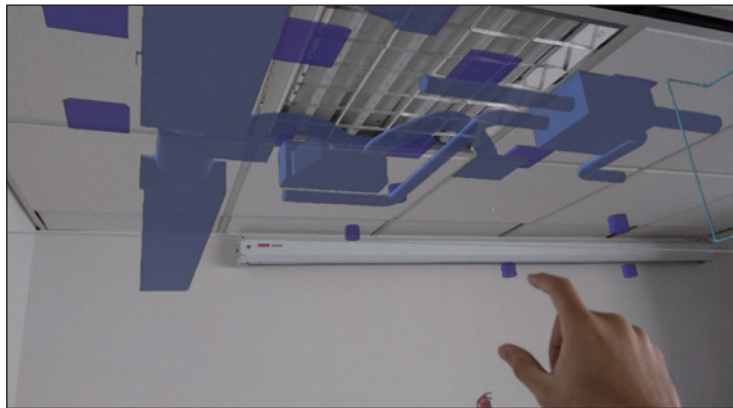


圖 7 虛擬實境 BIM 模型 - 現場真實比例檢視示意圖 (資料來源：本研究彙整)



圖 8 虛擬實境 BIM 模型 - 模型量測檢視示意圖 (資料來源：本研究彙整)

問題，但對於特定需要雙手操作的檢修作業，多帶一台手持電子裝置會成為作業負擔，透過MR裝置的手勢偵測功能，可以讓現場人員得以空出雙手進行作業，同時在檢修作業取得正確資訊。

1. 遠距技術支援

第一線人員在現場檢修專業設備時，當遇到較為複雜的技術問題時，可透過MR系統

遠端請求原廠專業技師協助，透過MR設備的空間定位功能，將操作指示標註於現場的相對空間內，讓現場能夠快速排除狀況，如圖9所示。

原廠技師亦可透過MR系統傳送設備技術文件如操作維修手冊等，讓現場人員能夠查閱相關資料，同時空出雙手進行作業，如圖10所示。



圖 9 遠距技術支援示意圖（資料來源：Microsoft）



圖 10 使用者操作示意圖（資料來源：Microsoft）



2. 遠距支援檢修紀錄影像

檢修作業後結束，為避免同一類問題重複發生，遠端協助的紀錄影像，可同步至MR系統，做為教育訓練或相關維修紀錄用途，增進日後服務品質及效率。

3. 查閱設備文件

透過MR裝置的文件檢視功能，現場人員得以在不干擾作業的同時，調閱相關的設備技術文件，如圖11。

4. 派工單檢視、維護紀錄

維運階段中維護作業流程，通常包含各式檢查表及派工單，作業結束後需要額外花時間彙整，透過MR系統整合工單紀錄，維運過程中的所有維修派工紀錄及相關維護表單，可儲存同步至雲端，在網頁介面下亦可進行管理及查看。

四、研究結果

(一) 研究成果

為提升產業執行效率，將捷運工程生命週期導入MR混合實境之新技術，避免管線與建築結構發生衝突，更能了解管線於圖面上配置，實際在現場配置後呈現的走向與規劃是否利於施作與檢核，進而控制進度與成本。於管理方面，捷運工程各式設備在完工之後被使用的過程中，關於當初購置廠商、保固商、產品規格、操作手冊等相關資訊，都可以在BIM模型技術的幫助下更有效的完整保存，運用MR實境技術達到最佳的使用與呈現方式。藉由MR與BIM等技術，將工程整個專案生命週期，進行視覺化呈現、降低各式風險，進而節省時間、成本及提升專案品質。



圖 11 查閱設備文件示意圖（資料來源：Microsoft）



本研究案將捷運工程BIM模型導入Microsoft HoloLens 2呈現設計、施工及維運階段模型於實際案場，將MR技術結合BIM模型實際於各階段進行模擬，進而模擬建築結構與機電系統碰撞衝突、機械設備維運資訊管理、維修派工作業等項目，以降低變更設計、提升現場施作精確性與營運維護資料完整性。因此本研究將運用MR技術之經驗以期將導入更多類型工程，使營建產業結合更多元的智慧科技應用，提升工程上混合實境的應用成效，增進相關產業高科技發展趨勢。

參考文獻

1. 周淵清、陳宜民，「BIM 結合 VR 之工程應用」，中興工程，第 145 期，P.15-P.20，108 年 10 月。
2. 黃琬淇、周淵清、許睿叡、廖翊含，「虛擬實境技術於工程實務之應用」，土木水利，48 卷 1 期，P.17-P.21，110 年 2 月。
3. Haythem Bahri, David Krcmarik, Reza Moezzi, Jan Koci, "Efficient Use of Mixed Reality for BIM system using Microsoft HoloLens", International Federation of Automatic Control, 2019.
4. Microsoft HoloLens 2 on web, <https://www.microsoft.com/zh-tw/hololens>



以 BIM 輔助開發捷運建築設計、校核工具與智慧化逃生檢核工具

中興工程顧問股份有限公司軌道二部建築師 / 陳柏愷
中興工程顧問股份有限公司軌道二部規劃師 / 王思涵
中興工程顧問股份有限公司軌道二部工程師 / 洪晨瑋
中興工程顧問股份有限公司軌道二部技術經理 / 賴建名

關鍵字：捷運車站、設施量、空間配置、規範校核、逃生路徑

摘要

為改造既有的捷運車站設計與校核流程，及有效應用BIM工作成果，中興工程以車站建築空間配置的創新為出發點，引領捷運設計團隊數位轉型。本文簡介中興工程因應捷運車站設計與校核需求的相關技術發展（SinoStation），包含設施及逃生檢核平台、空間配置程式、建模及規範校核API、最嚴峻逃生路徑分析程式等工具之開發與應用。

一、前言

捷運車站建築空間配置的優劣直接影響旅客進出站與候車的舒適度，以及站內各種

設備的運作效益。一般車站設計初期即須考量包含路外用地、路寬等外在限制條件，確認各出入口設置的位置；站內公共區規劃需考量旅客的水平或垂直動線，包含付費區、未付費區及通往各出入口的動線等；機電水環等機房利用非公共區空間設置，特定功能的機房之間具有相鄰或相近的需求，須以模組方式配置，若是地下車站，其進氣、排氣、釋壓等管道需要占用較大的空間，且須連通到地面出入口或特定地點的通風井。捷運車站設計流程中包含上述基本要件及其衍生細節，設施量、空間配置等設計成果需符合規範要求，另須檢討車站逃生路徑與時間。捷運車站設計規則繁多，各種設計參數環環相扣，尤其在細部設計階段需要更嚴謹

的檢閱。

設計與校核是緊密結合的工作重點。以往通常在設計成果完成以後，再進行校核，除了耗時以外，校核重點項目或標準可能偏向個人主觀認定，若非由經驗豐富的資深設計者把關，較容易產生疏失。為確保設計成果符合需求與規範，中興工程嘗試跳脫傳統作業方式的束縛，研發新工具，輔助建立新作業流程，將設計與校核工作妥善整合。以平台、應用程式、API等工具的串聯應用，實現捷運車站建築設計與校核的流程改造。

二、建立捷運車站設計與校核的新流程

捷運車站空間配置依需求而生，而需求設計參數須以業主頒布的規範為基準，以臺北捷運為例，環狀線、萬大-中和-樹林線等中運量系統設計即依據臺北市政府捷運工程局的中運量系統土建水環固定設施規劃手冊。其中，公共區設施量計算與旅運量直接相關，由各車站間尖峰小時的上行/下行與進站/出站旅客量資料，可逐步計算設施量需求，如電扶梯設置數量、樓梯寬度、售票機與驗票閘門數量等。通常設計者採用手算或是建立Excel表單等方式輔助計算，參考計算結果進行設計。各車站設計者不同，其計算方式或採用的表單也不同，標準難以掌握。因此中興首先利用公司內部計畫管理資訊系統（Project Management Information System, PMIS）的環境，建立一個計畫導向的通用工

具，將捷運車站設施量計算流程統整於一個標準化的網頁式設施及逃生檢核平台。設計者透過此單一平台執行的設施量計算結果，將保留於資料庫，作為後續空間配置階段的參考資訊，也可輔助計畫追蹤及知識管理等用途。設施及逃生檢核平台說明詳第三章。

建立捷運車站新設計流程的主要目標之一，是取代傳統以CAD平面圖為工作主軸的作業方式。在傳統空間配置流程中，CAD平面圖是資訊傳遞及跨專業溝通的主要媒介，若有建置BIM模型的需求，多半也以發展成熟的CAD平面圖為參考，建置相應的三維模型。近年來捷運建設專案相繼將BIM納入契約，因此專業顧問公司的作業方式應有適度調整。以CAD為主的作業方式，在設計方案變動時，須由CAD平面圖反映修正再回饋到三維模型，難以避免重工且影響效率；此外，在協同作業的過程中，團隊無法確知應該以CAD平面圖或是BIM模型為參考依據。有鑒於此，中興團隊以開發客製化空間配置應用程式取代CAD平面圖為策略，以期達到改造並簡化三維模型建立流程的目標。程式將介接設施及逃生檢核平台的輸出，搭配依規範參數建立的空間需求資料庫，及由設計者自定的幾何邊界條件，以演算法排列組合多種符合條件的配置方案供設計者評估，選用的方案可保存於平台。由於程式運算方案時已考量使用者選定的規範參數及其他自定設計條件，因此可視為在設計階段即同步進行一定程度的校核。



空間配置程式搭配自動建模API，可將配置方案生成基本模型。為達到此目的，程式中的特定物件，需與特定模型元件有對應的關係，因此整頓公司元件庫也是必要的前置作業。人工建模本是耗時且繁瑣的工作，若藉由空間配置程式研擬方案，及利用建模API，將加速建模流程，且完全跳脫傳統CAD繪圖的步驟。設計者也能夠利用空間配置程式輔助研擬多種方案，因應不斷變動的需求或設計條件，再由建模API產生基本模型持續深化。空間配置工具與建模API詳第四章。

車站建築三維模型在設計階段後期將包含更多內容與細節，在此階段需要針對深化後的模型成果做全面的規範校核，包含設施量、空間、逃生等主要項目。中興持續開發Revit API，以互動式介面輔助設計者在模型中檢查建置成果，將傳統人工規範校核的作業方式提升為半自動化輔助規範校核；另回饋設計成果參數到平台，輔助設計報告產出。規範校核API詳第五章。

過去的車站逃生校核方式是在平面圖上繪製最嚴峻逃生路徑，再計算逃生時間，仰賴資深設計者的經驗與判斷。為了得到更嚴謹的校核結果，中興公司與臺灣大學合作開發應用程式，依據三維模型各樓層的幾何條件、邊界、垂直動線設定，以類流體演算法辨識公共區，再以站內緊急情況的擁擠程度進行公共區佈點，依點位運算逃生路徑。以

地下島式月台車站為例，程式將針對每一個防煙區劃失火的情境，計算出由月台層經由穿堂層再通往特定出入口的最嚴峻路徑，設計者可由此得知最嚴峻的逃生情境，作為製作報告的依據。程式另具備選定出發點的功能，預計未來運用於動態逃生指標的研究。逃生路徑檢核程式詳第六章。

捷運設計已進入BIM普及的時代，中興團隊嘗試利用新工具，開發新技術，以實現捷運車站建築設計與校核的流程改造。上述平台、應用程式、API等工具的串聯應用流程與傳統作業流程的對照如圖1，各項目內容依序說明如後。

三、捷運設施及逃生檢核平台

捷運車站內的設施及設備數量、通道及月台寬度等，均以旅客運量為基礎進行規劃；並需依據車站內設施、設備的數量及旅客運量，計算逃生時間，確保旅客能於一定時間內逃離失火的車站。

參酌臺北捷運中運量系統土建水環固定設施規劃手冊有關車站設施及逃生檢核之規定，可歸納出七大檢核項目，分別為電扶梯及樓梯數量檢核、自動售票機數量檢核、驗票閘門數量檢核、月台淨寬度檢核、緊急逃生時間計算、出入口通道寬度檢核、公廁數量檢核等[1]，各檢核項目之關聯性彙整如圖2。中興公司發展網頁式設施及逃生檢核平

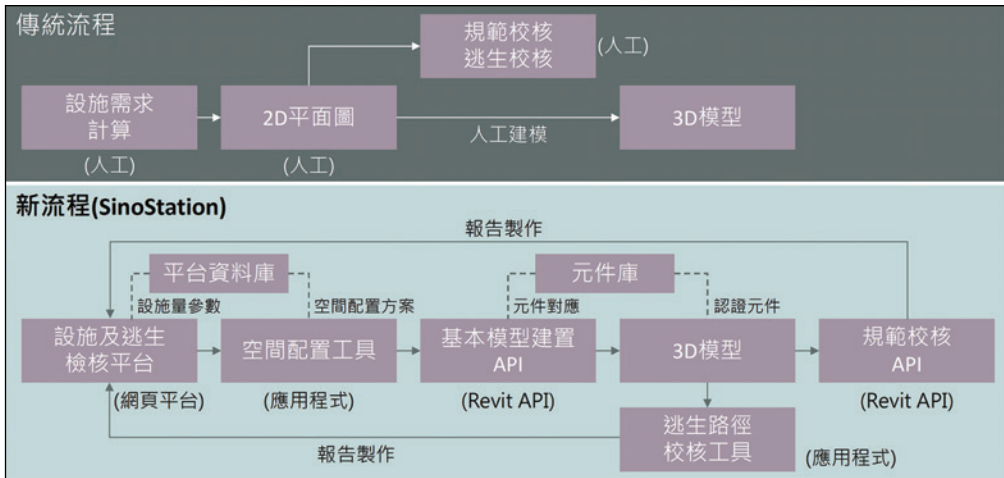


圖 1 中興工程 SinoStation 捷運建築設計及校核工具流程

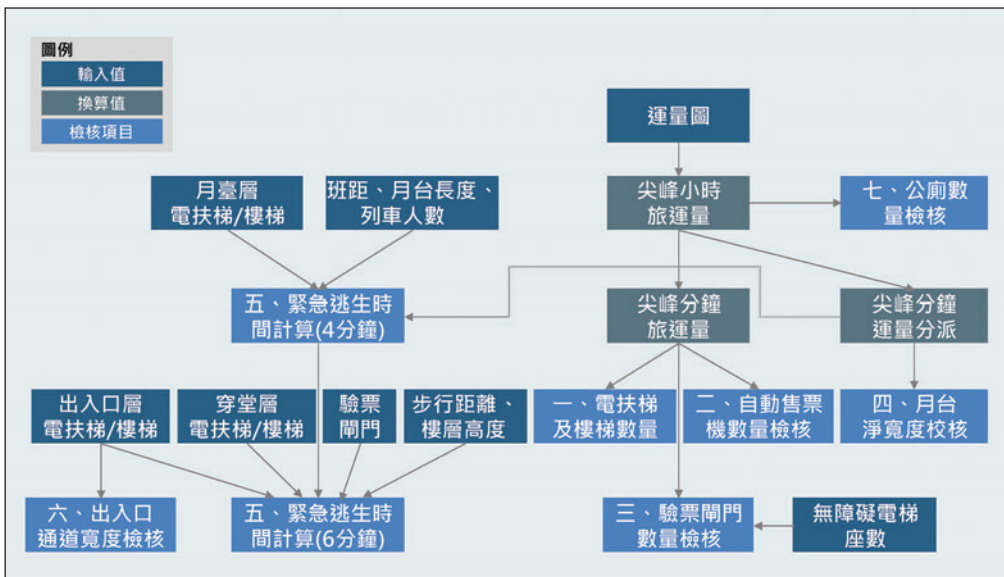


圖 2 車站設施及逃生檢核關係流程圖

台，協助設計者快速且正確地進行捷運車站配置前準備工作。捷運設施及逃生檢核平台（以下簡稱網頁檢核平台）之內容說明如本章第（一）～（六）節。

（一）捷運設施及逃生檢核平台首頁及運量輸入

網頁檢核平台介面包含首頁、運量圖及



圖 3 網頁檢核平台首頁

前述七大檢核項目。首頁的設計如圖3所示。使用者在首頁設定計畫、車站和方案等相關資料後將建立車站方案，包含一般站或轉乘站，及島式、側式及疊式等不同月台型式，同一車站也可依需求創建新的月台型式。使用者尚須輸入樓層數量、尖峰小時列車班距、月台長度、滿載列車人數等資料，其餘規範相關參數將由規範資料庫帶入作為預設值。

旅運量依據契約書中業主提供的目標年全線通車營運運量圖或運量表而得，主要分為一般車站與轉乘車站兩大類，通常於圖或表上標示有尖峰時間每小時進站、出站、轉乘旅客量，須再拆分為尖峰分鐘旅運量與尖

峰分鐘運量分派，供後續檢核計算使用，如圖4所示。

(二) 設施數量檢核

設施數量檢核主要包含電梯、電扶梯、售票機、驗票閘門等項目。

首先依據尖峰分鐘旅客流量，以及電扶梯及樓梯的運送能力，計算車站各層需設置的電扶梯最小應設數量值。臺北捷運設計方式以電扶梯設置為優先，且以每個出入口均有電扶梯可使用為原則，因此通常電扶梯即可提供足夠運載能力；若因車站空間受限無

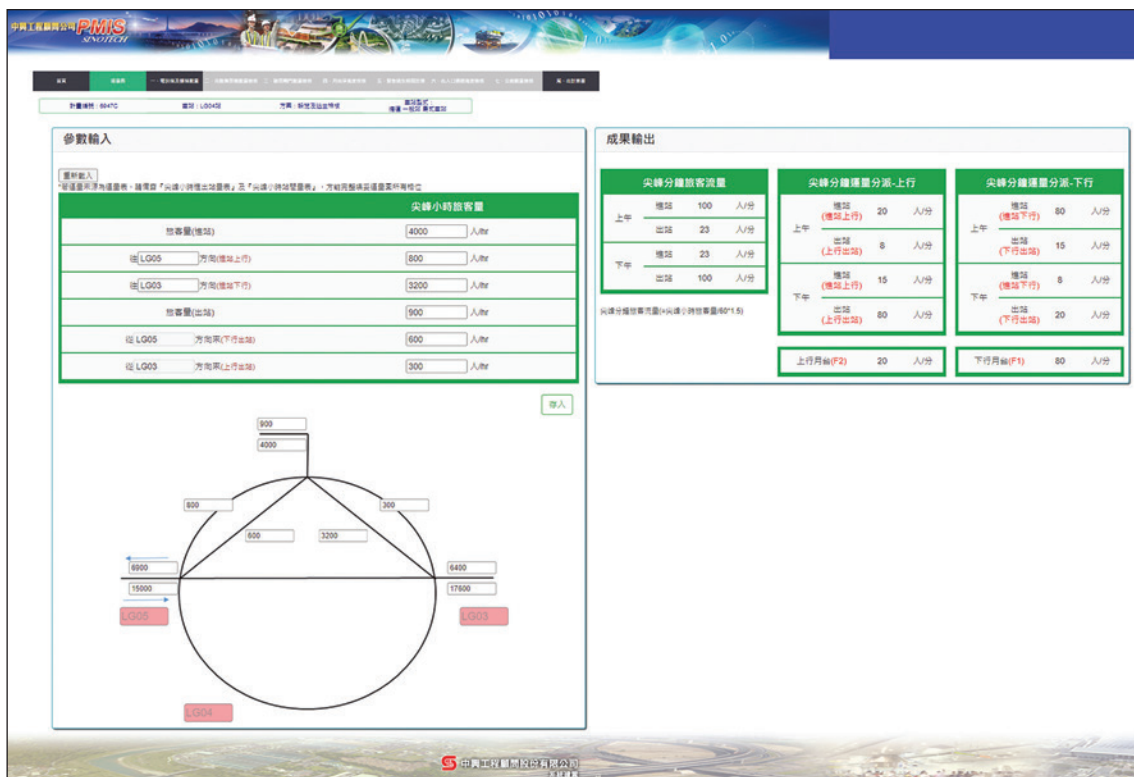


圖 4 網頁檢核平台 - 運量

法滿足電扶梯最小應設數量（需求值）時，須再檢討樓梯寬度。

自動售票機之最小應設數量（需求值），取決於上午或下午最大的尖峰分鐘的旅客流量（進站）、單程票的使用比例、自動售票機每分鐘處理人數等參數，並考量備用數量及擴充數量。

在網頁檢核平台上可以設定車站有一處或兩處售票區，網頁將跳出對應的檢核計算。以臺北捷運中運量系統為例，一處售票

區至少設置2座售票機，二處售票區至少設置4座售票機。

驗票閘門數量之最小應設數量（需求值），取決於上午或下午最大的尖峰分鐘旅客流量（進站、出站）及驗票閘門服務旅客的速度，且需考量設置備用閘門。當驗票閘門總數 < 10 座時，應設置1座備用閘門；當驗票閘門總數 ≥ 10 座時，應設置2座備用閘門。另須因應車站大廳型式（單大廳或雙大廳）預留無障礙通道，每處大廳設置1座無障礙用之驗票閘門。



參數輸入

月台門寬度(E)= 0.3 公尺(預設值)
 正常情況每位旅客需求面積= 0.8 m²(預設值)
 緊急情況每位旅客需求面積= 0.2 m²(預設值)

備註: 設計圖月台寬度為10.7m; 當站體兩側之月台最小寬度為(10.7-4.7)/2=3m, 足夠使用。

參考資料

正常情況旅客需求面積
 $(F1 + F2) \times I \times W \times E$
 尖峰時進站每分鐘乘客量(尖峰行車方向)
 (不含過站/電檢)
 $W = 2$

緊急情況
 $(2F1 + F2) \times I \times W \times E$
 尖峰時進站每分鐘乘客量(非尖峰行車方向)
 (不含過站/電檢)
 $W = 2$

F1 = 80 = 尖峰時進站每分鐘乘客量(尖峰行車方向)
 F2 = 20 = 尖峰時進站每分鐘乘客量(非尖峰行車方向)
 I = 2 = 尖峰小時列車班距(分鐘)
 W = 80 = 月臺長度(M)

成果輸出

正常營運	月台最小寬度	1.3	m
緊急狀況	月台最小寬度	1.63	m

	需求值	實設值	檢核結果
月台層上行淨寬度需大於	2.5	3	OK
取正常營運和緊急狀況月台最小寬度的最大值與2.5m比較取最大值			
月台層下行淨寬度需大於	2.5	3	OK
取正常營運和緊急狀況月台最小寬度的最大值與2.5m比較取最大值			

註:
 1.單位為m
 2.月台層淨寬度不得小於2.2m+月台門0.3m=2.5m

圖 5 網頁檢核平台 - 月台淨寬度檢核

(三) 月台淨寬度檢核

月台淨寬度之檢核，共有島式、側式或疊式等月台型式。各種型式皆須考量正常營運及緊急狀況等二種情境的月台最小寬度。

正常營運的情境，島式月台需考量上行和下行方向於月台上候車的旅客數量；側式或疊式月台，則取上行或下行旅客較多的方向計算月台上候車旅客數量。正常營運時每個旅客之需求面積為0.8 m²。

緊急狀況的情境，月台上的旅客量需加上列車延誤的考量，尖峰方向將有2倍的候車旅客數量；除了於月台候車的旅客外，尚需

考量滿載列車的旅客量。緊急情況時每個旅客之需求面積0.2 m²。

網頁檢核平台附加計算公式及淨寬度示意圖，輔助使用者了解淨寬度的計算。以島式月台之淨寬度計算為例，如圖5所示。

(四) 緊急逃生時間計算

依據臺北捷運中運量規劃手冊4.9.6、4.9.9之規定，在軌道區失火的情況下，車站之設計應能將月台乘客於4分鐘內疏散完畢，月台層以外每多一樓層必須增加2分鐘之疏散時間。以地下三層車站為例，若月台位於最低層，總疏散時間為8分鐘。



4分鐘內疏散月台層的條件是月台層總疏散容量（實設值）必須大於等於月台層總疏散需求量。月台層總疏散需求量（每分鐘）為月台候車旅客加列車滿載旅客的疏散量除以4分鐘，月台層總疏散容量（實設值）則依電扶梯（扣掉一台維修中）與樓梯設置數量計算。於網頁檢核平台上，使用者確認月台

層電扶梯及樓梯設置數量後，即可檢討月台層最後一個旅客可否於4分鐘內逃離月台層，介面如圖6所示。

以地下二層車站為例，6分鐘內抵達地面層安全地點之檢核，目前依據使用者輸入的逃生步行距離進行計算，如圖7所示。逃生時

4分鐘內逃離月台層之檢核

月台層電扶梯實設值：3 座

月台層樓梯實設值

	樓梯座數	樓梯寬度(m)	Lane 數
月台層樓梯實設值	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="1.8"/>	3L
		<input type="text" value="1.8"/>	3L
		<input type="text" value="1.8"/>	3L
月台層緊急逃生梯(往戶外)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	-
月台層緊急逃生梯(往付費區)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	-
月台層緊急逃生梯(往非付費區)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	-
總樓梯列數(b)			9L

月台層總疏散需求量	265	人/分
月台層總疏散實設值	455	人/分

月台層總疏散量(實際值) ≥ (最小值), OK

月台層疏散時間(W1)	2.32	分
-------------	------	---

月台層疏散時間(W1) < 4min, OK

圖 6 網頁檢核平台 - 緊急逃生時間 4 分鐘檢核（地下二層島式月台）



距離	出入口A	出入口B	出入口C
月台層(U3)最遠處至樓梯口的距離(m)	28.3	28.3	46.76
月台層(U3)高度(m)	5.35	5.35	5.35
U2高度(m)	5.45	5.45	5.45
穿堂層(U1)樓梯口至地面層樓梯口的距離(m)	79.65	93.22	45.99
穿堂層(U1)高度(m)	10.66	10.66	10.66
地面層樓梯口至安全地點的距離(m)	8.2	9.18	1.54

*若疏散時間不合格，則下方表格疏散時間為紅色

代號	時間	出入口A	出入口B	出入口C
T1	月台層(U3)最遠處至樓梯口的時間(min)	0.48	0.48	0.78
T2	月台層(U3)高度的時間(min)	0.36	0.36	0.36
T5	U2高度的時間(min)	0.37	0.37	0.37
T7	穿堂層(U1)樓梯口至地面層樓梯口的時間(min)	1.33	1.56	0.77
T8	穿堂層(U1)高度的時間(min)	0.72	0.72	0.72
T9	地面層樓梯口至安全地點的時間(min)	0.14	0.16	0.03
T		3.03	3.28	2.66

T=T1+T2+T3+...=T與T1-Tn的權位合併

往各出入口的疏散時間小於 8 分鐘

往各出入口的疏散時間(分)	出入口A	出入口B	出入口C
	4.87	5.12	4.5

W1	2.32	2.32	2.32
W2	1.88	1.88	1.88
W3	2.02	2.02	2.02

W1=月台層疏散時間
 W2 = 穿堂層數量 / 驗真閘門容量
 W3 = 穿堂層數量 / 出口容量
 月台層樓梯口額外等候時間 = W1 - T1
 驗真閘門口額外等候時間 = W2 - W1
 穿堂層額外等候時間 = W3 - W1

圖 7 網頁檢核平台 - 緊急逃生時間 6 分鐘檢核 (地下二層島式月台)



間計算須考量步行時間，以及在各樓層梯口與驗票閘門口的額外等候時間。於網頁檢核平台上，使用者須輸入各水平及垂直逃生路徑的距離，由平台計算各段時間及總和，檢討月台上最後一個旅客是否能於6分鐘內抵達地面層安全地點。未來將可利用最嚴峻逃生路徑校核程式進行計算，再匯出各段逃生距離與所需時間等資料到平台。

（五）出入口通道寬度檢核

出入口通道寬度檢核，可以分為正常狀況及緊急狀況兩種，正常狀況通道的輸送能力考慮雙向流通（70人/分/公尺）；而緊急狀況通道的輸送能力考慮單向流通（85人/分/公尺）。

通道容量至少須與其連接的電扶梯與樓梯之容量相等，另加上通道二側預留0.3公尺的淨空。由使用者設定向上與向下電扶梯及樓梯的數量後，網頁檢核平台可計算正常狀況與緊急狀況的通道需求寬度，並取大值作為需求值，供使用者設計時參考。

（六）公廁數量檢核

公廁數量之最小應設數量（需求值），取決於尖峰小時進站與出站旅客數。臺北捷運中運量規劃手冊4.5.14節，對於不同尖峰小時進出站乘客流量，已規定應設置之最少便器、洗面盆、無障礙廁所、親子廁所之數

量。網頁檢核平台依前述原則，以及使用者輸入之尖峰小時進站與出站旅客數，計算公共廁所應設置之相關設備之最小應設數量。

四、捷運空間配置與建模工具開發

進行捷運車站建築空間配置時，常需考慮多種方案，在符合設計概念、規範要求、業主需求等條件下，盡可能在多種可行方案裡選擇最理想的配置。空間配置設計方案最終將以三維模型的方式呈現，據以出圖及交付工作成果。建立模型的方式則因人或組織而異，例如繪製平面圖作為建模的參考即為常用的方式之一，在方案研析階段，設計者可能以平面圖為主，模型為輔；或是直接利用模型探討方案。由方案到三維模型，若能跳過平面圖繪製或是從無到有的建模步驟，將可簡化三維建築模型的建立流程，加速產出可供套圖或出圖的基本模型工作成果，提前進行跨專業協調或輔助與業主的視覺化溝通。

開發客製化空間配置應用程式是導入此新流程的必要手段。中興開發團隊選用WPF（Windows Presentation Foundation）作為單機程式介面，程式須先引導設計者設定樓層、邊界等幾何條件，再接續進行月台、公共區、垂直動線等初步規劃；配置非公共區各個機房時，則須連動規範資料庫中有關空間需求的參數，例如各機房面積的需求等。程式將依據設計者設定的幾何條件以及

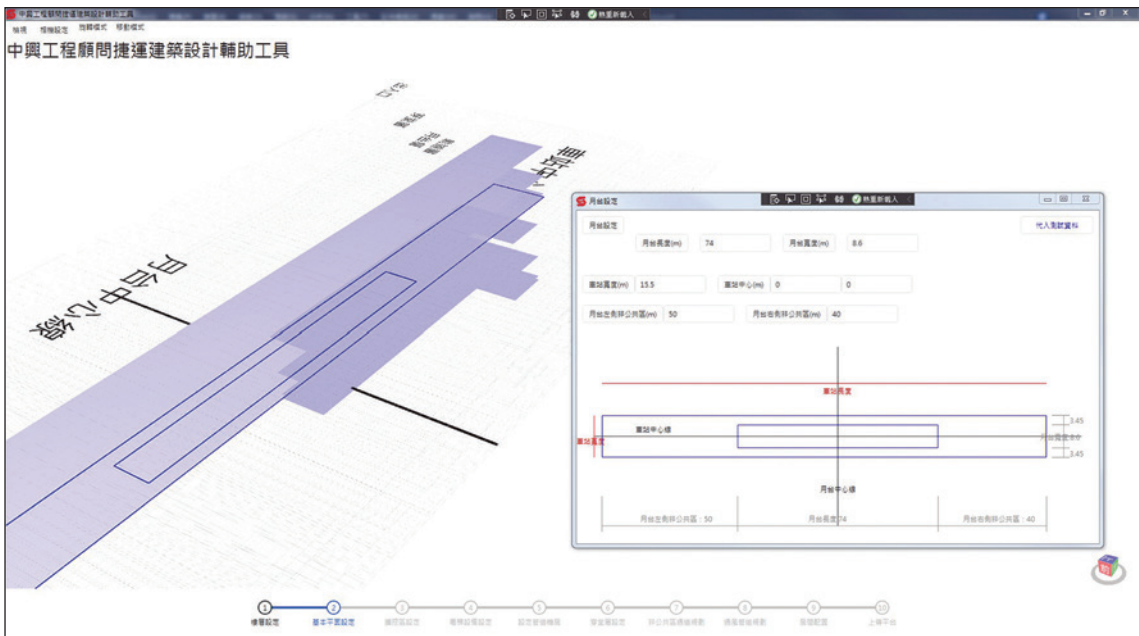


圖 8 空間配置工具預覽介面示意

空間規劃概念，應用衍生式設計[2]概念進行排列組合，運算多種可行的配置方案，另提供二維及三維預覽輔助檢視，介面示意如圖8。由於在配置過程中已將規範參數納入考量，所有的輸出成果都是可行的方案，設計者選用其中最適方案，保存於平台，再利用建模API自動生成三維模型。空間配置工具與接續建模的流程，如圖9所示。

由選定的配置方案自動化生成三維模型，須借助Revit API以及與元件庫中特定元件的連結。中興團隊盤點元件庫中的捷運建築元件，針對歷年來曾經採用的元件進行篩選、改良，歸屬於專用群組，建立認證元件、空間配置程式、建模API的對應關係。部

分與計算設施量直接相關的元件，例如售票機、驗票閘門、公共廁所等，可藉由適當的參數化設定由API依設計方案一次擺放，便於將設施需求計算結果直接反應於模型中。樓板、牆、樓梯、欄杆等元件通常利用模型中的系統元件處理，因此在空間配置程式中需針對此類元件參數預先進行設定，作為建模API執行時的參考。

空間配置程式與建模API的搭配應用，提供了一個建立三維模型的新流程。在基本設計階段，新工具取代傳統平面圖繪製的人工，輔助設計者探索更多的可能性；細部設計階段有相對明確的幾何限制條件，有助於方案收斂，加上自動建模取代人工建模，

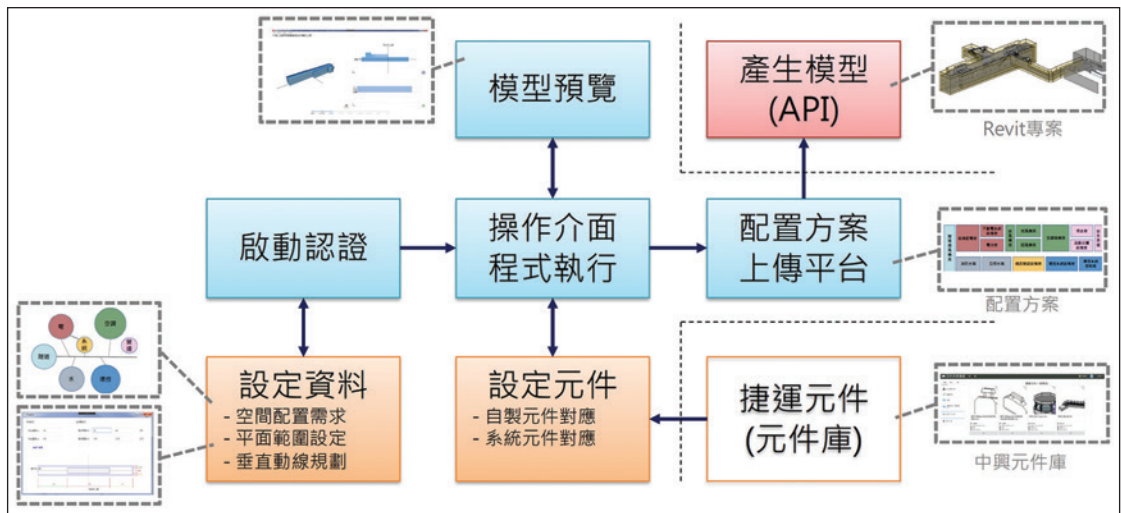


圖 9 空間配置工具與建模流程

設計者可快速得到依選定方案產出的基本模型，提升建模的效率。

五、規範校核工具開發

由自動建模生成的建築三維模型並非一步到位，隨著設計逐漸發展深化，加上跨專業協調整合，建築模型常須要不斷調整。為了確保模型內容在協同作業時或提交時仍符合業主需求與規範，中興開發規範校核API，功能包含針對設施量、空間、逃生等三大項目及其細項的檢討。

規範校核API以互動式介面輔助設計者逐項檢討需求與規範，在必要時調整模型。以房間校核為例，程式可採用來自規範資料庫或制式表單的房間幾何參數為基準，比對模型中各個房間的面積、淨高是否符合設定值

或是否在容許範圍內，校核結果以不同顏色表列，設計者也能點選欄位快速切換到欲檢視房間的所在位置，介面如圖10所示。以月台校核為例，程式也依據規範資料庫及使用者提供的相關機電系統參數，檢查軌道中心線至月台邊緣、月台邊緣至固定障礙物間的距離，表列障礙物元件供設計者快速切換至其位置檢閱或調整，並計算實際月台寬度，介面示意如圖11。設計成果完成所有規範校核後，將實際設計參數回饋到平台，自動製作各式報告文件。

六、以旅客觀點運用 BIM 及演算法開發智慧化逃生檢核工具

(一) 以旅客觀點優化逃生設計流程

過去車站內失火的逃生檢核流程，通常



房間校核

房間規範檢討 房間需求檢討 未放置房間 移除特殊符號

代碼	名稱	樓層	規範面積(m ²)	面積(m ²)	規範高度(m)	最大邊長(m)	規範淨高(m)	淨高(m)	ID
2B	站務室	穿堂層	20㎡ MAX	19.1	NA	4.85	3	3	1077460
2C	女更衣室	穿堂層	8㎡ MAX	5.2 < 8*90% = 7.2	NA	2.73	3	3	1194505
2C	男更衣室	穿堂層	8㎡ MAX	5.1 < 8*90% = 7.2	NA	2.7	3	3	1194508
2D	女廁	穿堂層	6㎡ MAX	52.6	NA	9.21	3	3	1015754
2D	女廁	穿堂層	6㎡ MAX	7.1	NA	2.67	3	3	1194514
2D	男廁	穿堂層	6㎡ MAX	29.5	NA	4.84	3	3	1015766
2D	男廁	穿堂層	6㎡ MAX	7.6	NA	2.87	3	3	1348954
2E	茶水間	穿堂層	6㎡ MAX	6.8	NA	2.97	3	3	1128217
2F	候動室	穿堂層	8㎡ MAX	7.5	NA	4.38	3	3	1087009
2G	清潔人員休息室	穿堂層	10㎡ MAX	10.3 ≤ 10*110% = 11	NA	3.38	3	3	884714
2H	垃圾室	穿堂層	10㎡ MAX	8.2 < 10*90% = 9	NA	3.85	3	3	1154974
2K	維修員工室	穿堂層	25㎡ MAX	41.9	NA	12.3	3	3	1475836
3A-1	自動收費設備室	穿堂層	12㎡ MAX	11.5	3	4.54	3	3	964926
3A-16	通訊號誌設備室	穿堂層	80㎡ MAX	86.4 ≤ 80*110% = 88	6	11	3	4	1432971
3A-17	電信室	穿堂層	40㎡ MAX	43.1 ≤ 40*110% = 44	NA	8.73	3	4	1450098
3A-2	現金室	穿堂層	20㎡ MAX	20.4 ≤ 20*110% = 22	NA	6.98	3	3	965023
3A-3	安全走道	穿堂層	NA	11.5	1.8	4.12	3	3	965762

OK
 NG
 容許範圍

圖 10 房間校核 API 介面示意

月台校核

檢核月台樓板邊緣距離 檢核月台高度 檢核月台淨高

檢核月台寬度

月台寬度: 2.5 m *檢核月台邊緣到月台上障礙物的距離

月台左側檢核範圍 37 m
 月台右側檢核範圍 37 m

月台門設定高度 0.3 m

*點擊該欄位圖下，即可觀看此元件的位置

ID	名稱	距離月台邊緣(m)	可調整方式(m)
3500204	矩形蟹框(300x1050mm)	0.3	需向下平移2.2
3500205	矩形蟹框(300x1050mm)	1.5	需向下平移1
555074	Basic Wall(RC20cm)	1.7	需向下平移0.8
1364936	Stacked Wall(W1-120x185cm磁磚板(...	1.6	需向下平移0.9
1364943	Basic Wall(W-厚路腳-7cm)	1.6	需向下平移0.9
1364944	Basic Wall(W-磁磚板120x170-10cm厚)	1.6	需向下平移0.9
1366766	Stacked Wall(W1-120x185cm磁磚板(...	1.6	需向下平移0.9
1366772	Basic Wall(W-厚路腳-7cm)	1.5	需向下平移1
1366773	Basic Wall(W-磁磚板120x170-10cm厚)	1.5	需向下平移1

圖 11 月台校核 API 介面示意

由資深設計者主觀判斷可能造成最遠逃生路徑的火源位置，再依據臺北捷運規劃手冊規

定之逃生檢核計算方法，計算旅客以此路徑從月台層逃至地面層之時間。接著採用FDS



圖 12 以旅客角度進行逃生檢核之流程

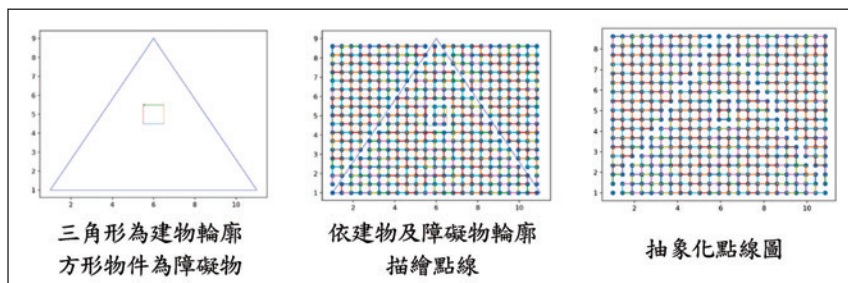


圖 13 圖像化的概念說明

(Fire Dynamics Simulator) 火災模擬軟體，以該火源位置模擬火災時的車站環境，檢討火場環境相關指標模擬結果，例如煙層下降時間等，並與計算所得的逃生時間比對。

站內失火的最嚴峻逃生情境，應由客觀方式驗證，較具說服力。中興工程與臺灣大學工管系團隊合作研發，透過演算法全面檢視所有逃生情境及路徑，從而得知最嚴峻逃生情境與相應的最遠路徑，據以計算逃生時間。另外，利用人流模擬軟體，可考量旅客間爭讓行為（考量人與人之間社會力之關係），讓逃生模擬更符合實際狀況，並視覺化呈現，同時與計算結果比對檢討。以旅客角度進行逃生檢核之新流程如圖12所示。

將三維BIM模型轉換成帶有所需基本資訊的二維點線圖，是逃生路徑程式運作的關鍵之一。其中，點表示車站內旅客可能所在的位置，相鄰兩點之間若可通過則以線將兩點連起來，代表可能路徑，圖像化的概念如圖13所示。依據臺北捷運規劃手冊之規定，於緊急狀況下，每個旅客所需之空間為 0.2 m^2 ，故以 m 為點間距進行佈點。

執行程式的前置作業，包含取得車站建築模型及機械模型的必要資訊進行合併，才進入轉換為2D點線圖的流程，包含Extended gbXML、Parsed BIM、BIM Graph及Final Graph等階段，流程如圖14，以下依序說明。

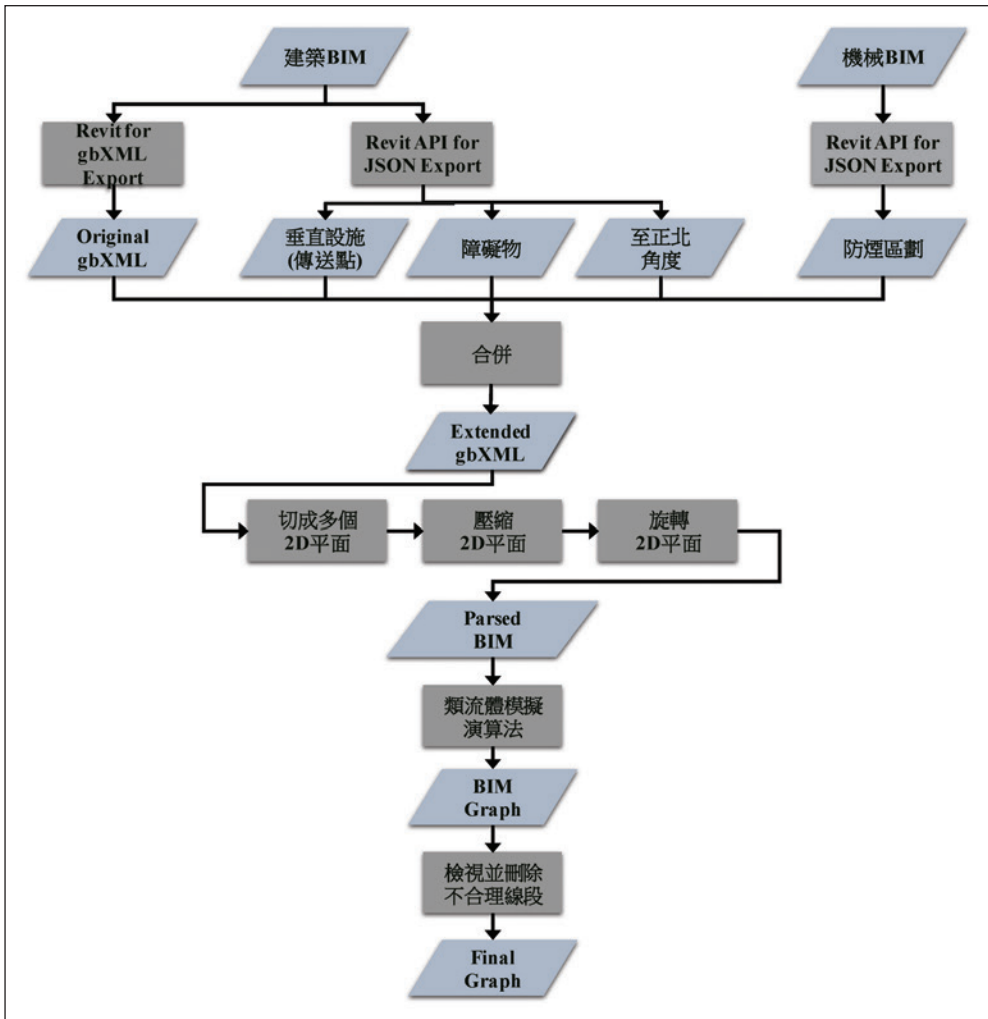


圖 14 BIM 模型轉換成 2D 點線圖之流程

1. 轉換為Extended gbXML之說明

考量需將車站空間完整保留，故先將車站建築模型轉換成只有空間資訊的gbXML (green building XML) 格式，如圖15所示。將建築模型匯出為gbXML檔，預設僅帶有基本的空間資訊，如板、牆、房間等，不包含欄杆、座椅、驗票閘門等會影響旅客

逃生動線的障礙物，也不包含垂直動線設施如電扶梯、樓梯及緊急逃生梯等。因此，須利用Revit API從建築模型取得必要的障礙物幾何資訊，以及由機械模型中取得防煙區劃資訊，以json檔型式儲存，再併入建築的gbXML檔，稱為Extended gbXML。

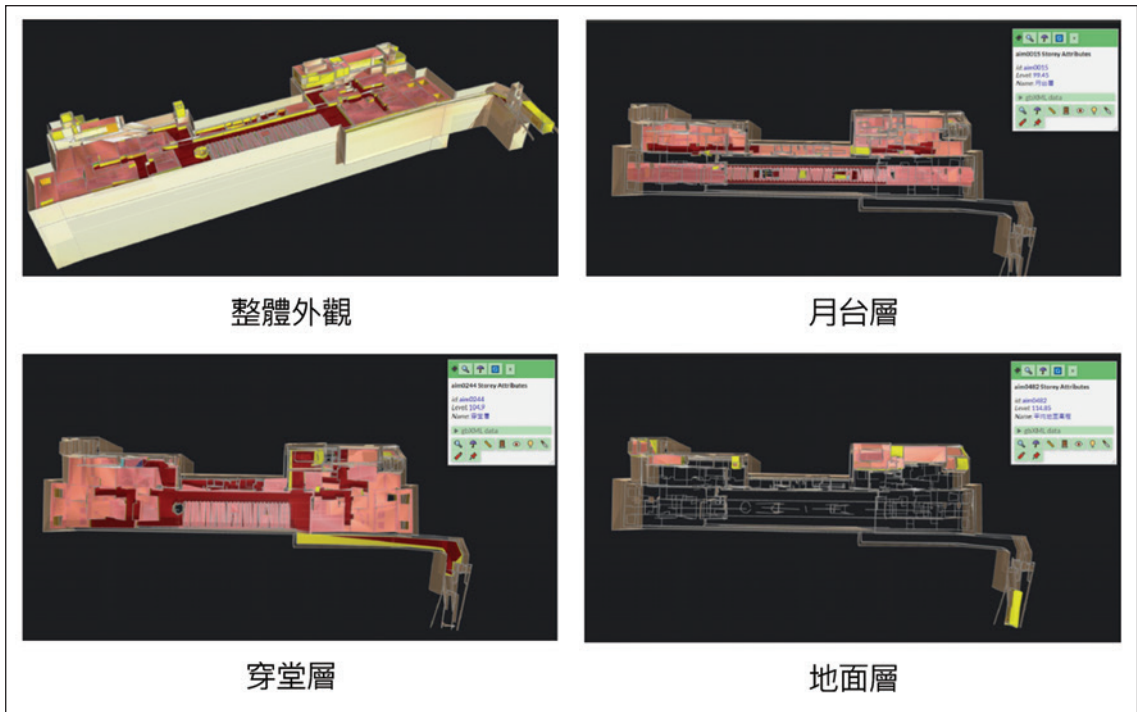


圖 15 車站 gbXML 模型

2. 轉換為Parsed BIM之說明

Extended gbXML檔將用於產出帶有資訊的各樓層2D平面底圖，例如月台層、穿堂層、地面層等。由各樓層平面高程向上每10公分切一個平面，切到200公分（考量人的高度），再將所切的各平面套疊成一個新平面，確保除了實牆以外的障礙物範圍完整，此階段稱為Parsed BIM。

3. 轉換為BIM Graph之說明

程式以類流體模擬演算法將捷運站內公共區與非公共區自動區分並且佈點，點與點之間連線表示可通行，不連線則表示兩點間

不可通行。公共區與非公共區之間有實牆區隔，且公共區內具備電扶梯等垂直動線設施，可利用其位置向外搜尋至實牆，確認公共區範圍。類流體模擬演算法在此處的應用，可想像為將水由地面出入口灌入站內，將水可流經的區域視為公共區。經過類流體模擬演算法處理後之檔案，稱為BIM graph，如圖16所示。

4. 轉換為Final Graph之說明

程式利用Parsed BIM切出的各樓層平面進行BIM Graph佈點，圖像化的正確性或準確度可能有些微偏差。程式提供一編輯介面

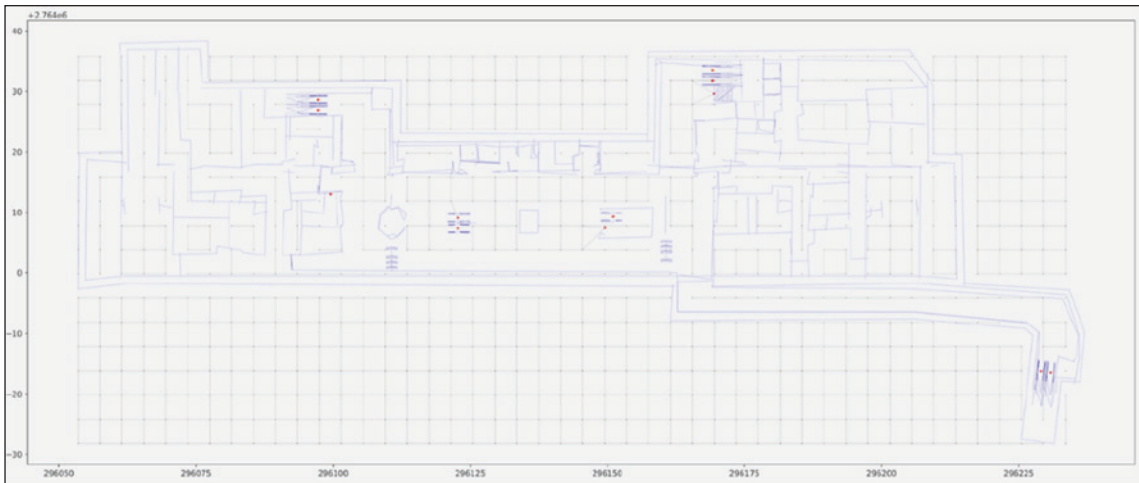


圖 16 BIM graph (以穿堂層為例)

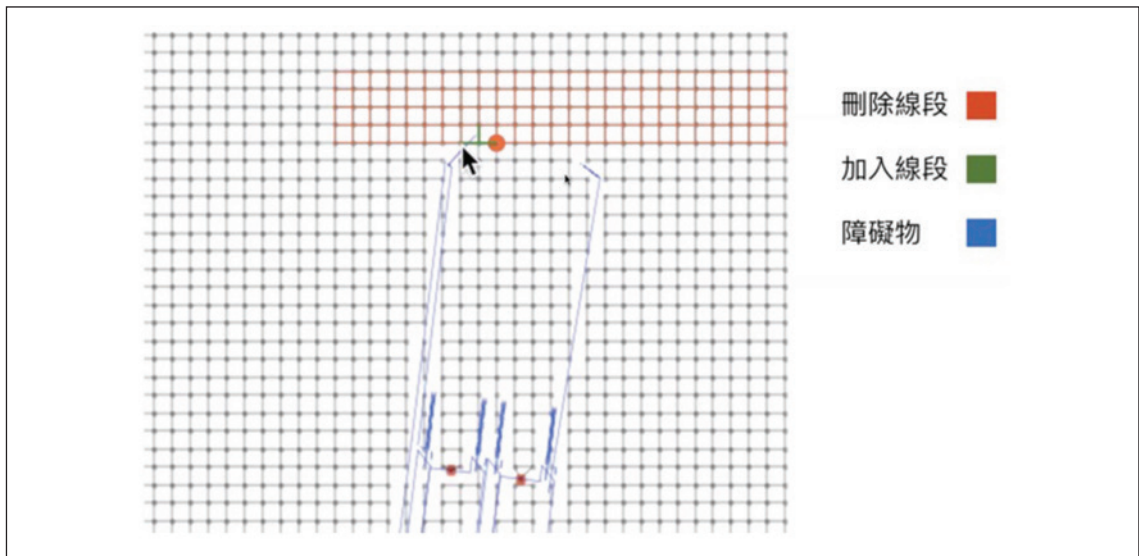


圖 17 增調整點與點之間連線或不連線之編輯介面

供使用者檢閱各樓層平面佈點的成果，必要時可自行編輯，將點與點之間連線或取消連線。例如使用者須確保垂直動線設施於各樓

層都可到達，及確認非公共區為不可到達，介面示意如圖17。

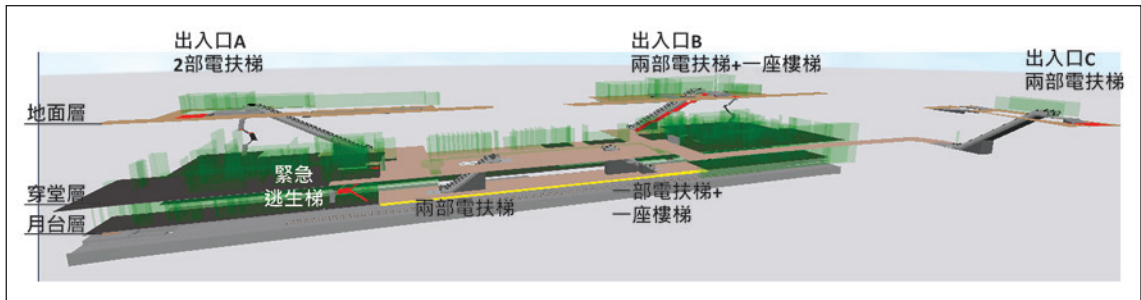


圖 18 LG10 站動線配置示意圖

(二) 以演算法尋找最嚴峻逃生情境及逃生路徑

各樓層點線圖編輯完成以後，即可開始運算路徑。程式將在不同防煙區劃失火的情形下，尋找由車站內部任一公共區內位置逃至出入口之最遠路徑，透過Dijkstra Algorithm演算法考量所有旅客可能位於車站的位置，納入逃生路徑計算。以某一節點當作出發點，在與其相鄰且尚未被選取的節點裡，選擇路徑最短的下一個節點。如此重覆加入新節點，發展路徑，直到抵達安全地點的節點為止。程式執行另有如下規則作為條件。

1. 起點（旅客位置）均勻分布。
2. 不得跨越牆壁、扶手、欄杆、詢問處等障礙物，旅客僅能從驗票閘門離開付費區。
3. 節點間的移動路徑不為對角。
4. 特定情境下，由每一起點的最佳逃生路徑中，選取最遠的路徑。
5. 各防煙區劃失火情境都需假設有一座電扶梯維修中，不能供旅客逃生使用。

6. 不考慮旅客折返的行為。例如旅客由月台層上到穿堂層時，若剛好進入火源所在的防煙區劃，該路徑不予採計。

以臺北捷運萬大線LG10站為例，如圖18所示。LG10站為地下二層車站，月台層公共區有2處防煙區劃，穿堂層有9處防煙區劃，公共區內共有9座電扶梯、2座樓梯、1座緊急逃生梯。

本站最嚴峻逃生情境如圖19所示。此情境為防煙區劃C09（圖19穿堂層紅色佈點區塊）失火及電扶梯ESCR-02（圖19月台層右側電扶梯）維修中，旅客自月台層公共區右角落開始逃生，經由月台層右側樓梯上到穿堂層，再由付費區左側閘門往出入口A（圖19地面層左上角）逃生，路徑總長約為169 m。

(三) 以人流模擬結合火場模擬方式展現最嚴峻逃生情境

依據逃生路徑程式演算法所得到的LG10

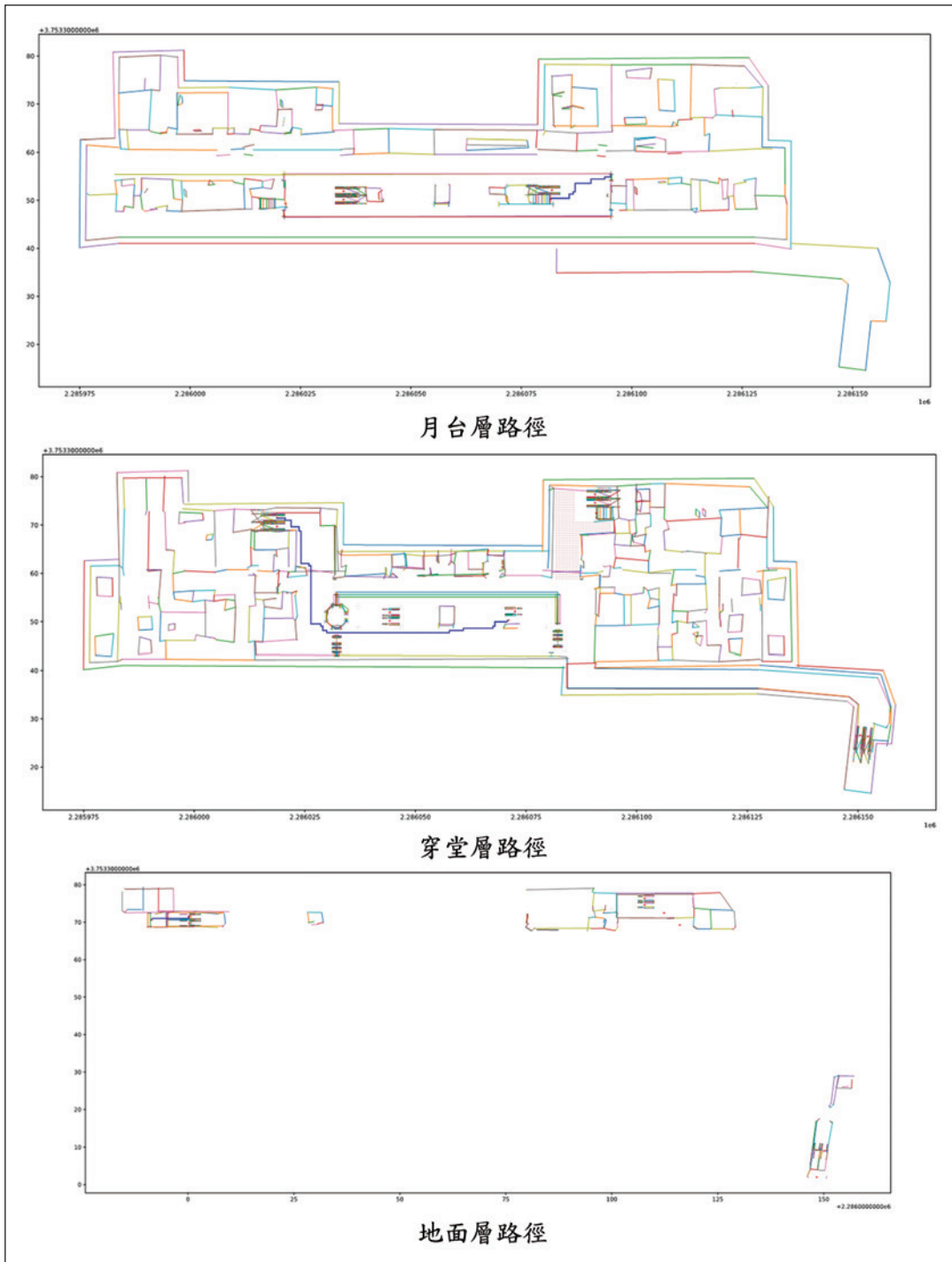


圖 19 LG10 站最嚴峻逃生情境分析結果

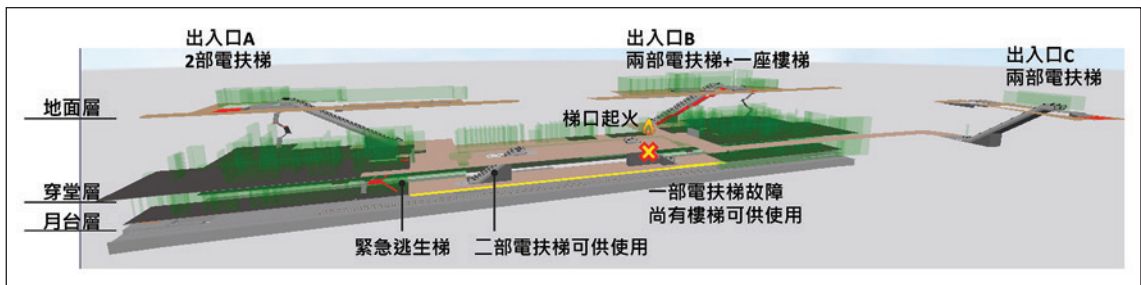


圖 20 人流模擬分析 LG10 站最嚴峻逃生情境（穿堂層出入口 B 梯口起火）



圖 21 車站內失火逃生之模擬畫面

站最嚴峻逃生情境及路徑成果，以人流模擬軟體實際測試。將火源置於穿堂層出入口B之梯口前，造成旅客無法從出入口B逃生，同時考慮月台層右側恰有一部電扶梯故障維修中，無法供旅客使用，迫使月台層右側旅客旅客需由該電扶梯旁的樓梯逃生，如圖20所示。

參考目標年運量，設定共有104位候車旅客同時由月台層開始逃生，最後一位旅客逃離月台層時間為2.06分鐘（<4分鐘），最後

一位旅客逃至出入口A之時間為4.18（<6分鐘），人流模擬畫面如圖21所示。

將人流模擬結果與計算結果比對，整理如表1。模擬結果略大於計算結果，可能原因為人流軟體模擬考慮較保守的情境，例如並非所有旅客都非常熟悉車站設施與空間關係，故不一定會選擇最有利的路徑進行疏散，且在逃生時與其他旅客之間的爭讓行為也會影響逃生效率。另外，因火源位於穿堂層，對旅客將產生半主動反應，估計火源產



表 1 人流模擬結果與規劃手冊計算結果比較表

位置	人流模擬		規劃手冊計算	
	模擬結果	模擬結果 + 半主動反應時間	計算結果	計算結果 + 半主動反應時間
出入口 A	4.18 分鐘	6.18 分鐘	3.62 分鐘	5.62 分鐘

表 2 火場環境模擬結果

NFPA130 逃生安全標準	最危險防煙區劃之安全標準維持時間 (秒) (出入口 B 火源位置防煙區劃)
能見度 > 10 m	200
溫度 < 60°C	205
CO 濃度 < 1150 ppm	>600
輻射熱強度 < 2.5 kW/m ²	55

生後旅客通報至火警系統自動警報之時間約為120秒。故總疏散時間=模擬或計算結果+半主動反應時間。

進一步與FDS (Fire Dynamics Simulator) 火場環境模擬結果比較，如表2。除了火源所在防煙區劃 (最危險防煙區劃) 之能見度、溫度與輻射熱強度，分別在200秒、205秒與55秒時會達到危險狀態，其餘防煙區劃之各項逃生安全指標在600秒內均屬安全。依較保守的人流模擬結果，最後一位旅客離開車站至地面層安全地點的時間為6.18分鐘 (<600秒)，因此判定在最嚴峻情境下，站內旅客皆能安全疏散。

七、結論

中興工程的 (SinoStation) 系列研發，

依捷運車站建築的設計、校核需求，開發各流程的相應工具，達到BIM的有效應用。

建築三維模型是捷運車站設計協同作業的主要參考依據，需要最先發展到一定程度，供結構、地工、水環、機電等專業參考。捷運工程設計已普遍納入BIM相關要求，設計時程與過去相比卻已大幅縮短，同時須兼顧對設計品質的管控，對專業顧問公司行之有年的傳統作業流程產生衝擊。因此，中興工程以改造捷運建築專業組的作業方式為出發點，提升設計效率，產出符合需求與規範的BIM工作成果，為團隊爭取寶貴的協同作業時間。若在設計過程中可即時校核工作成果，如設施量、空間、逃生等，也能夠節省設計後期校核人力，彌補人工檢閱的不確定性，維護設計品質。

空間配置、建模、規範校核等工具與



BIM模型中的元件直接關聯，中興公司將妥善維護所有元件，並隨時關注相關規範的更新，維持資料庫的正確性。若遇到規範要求並非完全明確的情況，工具宜引導設計者依專業判斷設計是否適當，在不違背規範精神的前提下發展最適當的設計方案。

開發自動化、智慧化工具的目的是改善作業流程，並非大量取代人工。捷運工程涵蓋多元專業，期望設計者都能善用工具，發揮專業價值。

致謝

感謝中興工程研資部協助建立設施需求計算平台，持續開發空間配置程式及建模API。

感謝國立臺灣大學工管系孔令傑老師團隊協助開發逃生路徑程式。

參考文獻

1. 臺北市政府捷運工程局，「臺北都會區大眾捷運系統中運量系統土建水環固定設施規劃手冊」(107年)
2. Nauata, N., Chang, K.H., Cheng, C.Y., Mori, G., Furukawa, Y. (2020) House-GAN: Relational Generative Adversarial Networks for Graph-constrained House Layout Generation. https://www.researchgate.net/publication/339971950_House-GAN_Relational_Generative_Adversarial_Networks_for_Graph-constrained_House_Layout_Generation



智慧軌道交通

林同棧工程顧問股份有限公司副總工程師、重慶交通大學特聘兼任教授、/ 林忠正
前林同棧國際工程諮詢(中國)有限公司公共交通總工程師、
前重慶城市交通研究院技術總監
林同棧工程顧問股份有限公司軌道運輸部工程師 / 孫郁鈞
林同棧工程顧問股份有限公司軌道運輸部副理 / 楊政儒
林同棧工程顧問股份有限公司軌道運輸部經理 / 楊昆霖

關鍵字：智慧軌道、交通建設、人工智慧、區塊鏈、雲計算、大數據、物聯網、建築資訊模型(BIM)、數字孿生、元宇宙

摘要

智慧軌道交通是人類社會對軌道交通發展趨勢和運作模式的抽象表現，是軌道交通發展遠景的宏觀理念和建設目標，它以人類智慧與經驗為指導，以號誌和資訊的數字化處理為基礎，以物的智慧化資訊搜集為目標，以能實現人、機、物的全面互聯的全聯網(IoT)為資訊交換和資源共享平臺，建立軌道交通系統的控制與管理過程智慧化，使之具有更透徹的感知、更廣泛的互聯互通和更深入的智慧化處理能力，進而建構集人和人類智慧、軌道交通物理網路、全聯網、智慧資訊處理技術及各類數字化資訊為一體，且高效、便捷、安全、可視、可預測、環保

和智慧的現代軌道交通系統。

隨著臺灣軌道交通快速發展，採用資訊技術營運的狀況逐漸形成，軌道交通在交通運輸體系中承擔越來越重要的角色和作用。臺灣軌道交通在建設初期雖然要求整體路網規劃，但採用一線一核，一核一建的方式，資訊系統基本上也是隨用隨建設，不僅各都市自行建設，都市與都市間也缺少整合規劃。智慧軌道交通建設可透過整合感知層、執行層及應用層既有和新增功能模塊，在既有監控系統基礎上打造智慧化運行與營運管理系統，具備運行狀態全方位精準感知、運行趨勢智慧化分析預判、資訊指令一致化主動推送、運行規則擬人化自動進化功能，進



而整合軌道交通路網，使得軌道交通在智慧化下得以快捷且安全運行。

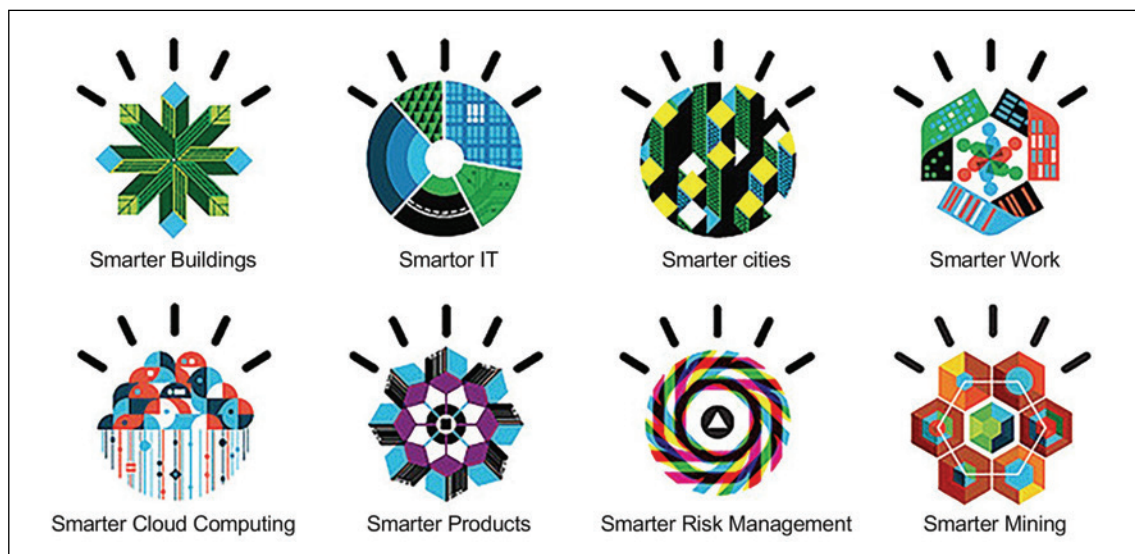
軌道交通智慧化帶來社會資源有效整合，可減少營運維修人員工作量及人工在調度管理模式下錯誤操作。軌道交通具有三十幾種專業，對專業人員的依賴性高，隨著軌道交通建設的加快，資源與人員越來越難以滿足需求，而透過雲平臺建設，除可大幅減輕人員工作量，亦可建立各專業系統間資訊即時共享，尤其是從路線到路網營運模式轉型過程中，可提供統一的智慧人員資訊執行平臺。智慧軌道資訊化建設將藉由「人工智慧技術、區塊鏈技術、雲計算、大數據、物聯網、建築資訊模型（BIM）技術、數字孿生技術、元宇宙」等技術，重新建構營運應用體系，朝向跨專業資訊整合，進一步提升軌道交通智慧化永續發展。

臺灣在全力推展軌道交通相關建設之際，惟有充分融入智慧化技術，有效結合臺灣強大的資通訊技術能量，使軌道建設智慧化、國產化，才能增進軌道運輸產業發展，打造智慧軌道交通系統，且進一步降低建設及營運成本，並提升旅客使用軌道交通的意願度、安全度及舒適度，進而達到促進地方經濟繁榮之目標及目的。

一、前言

IBM於2008年提出了智慧地球，其核心

是以更智慧的方法利用新一代資訊技術來改變政府、公司和人之間的交互方式，以提高交互的明確性、效率、靈活性和互動速度。智慧交通是智慧地球的理念在交通運輸行業的具體表現，而智慧軌道交通則是智慧交通在軌道交通（如鐵路、大眾捷運）領域的具體體現。智慧軌道交通是人類社會對軌道交通發展趨勢和運作模式的抽象表現，是軌道交通發展遠景的宏觀理念和建設目標，它以人類智慧與經驗為指導，以號誌和資訊的數字化處理為基礎，以物的智慧化資訊搜集為目標，以能實現人、機、物的全面互聯的全聯網（IoT）為資訊交換和資源共享平臺，建立軌道交通系統的控制與管理過程智慧化，使之具有更透徹的感知、更廣泛的互聯互通和更深入的智慧化處理能力，進而建構集人和人類智慧、軌道交通物理網路、全聯網、智慧資訊處理技術及各類數字化資訊為一體，且高效、便捷、安全、可視、可預測、環保和智慧的現代軌道交通系統。中國城市軌道交通協會於2020年3月12日正式頒布《中國城市軌道交通智慧城軌發展綱要》。該《發展綱要》按照「1-8-1-1」的布局結構，對智慧軌道交通進行了更系統的定義，即：創建智慧乘客服務、智慧運輸組織、智慧能源系統、智慧列車運行、智慧技術裝備、智慧基礎設施、智慧運維安全和智慧網路管理八大體系，使軌道交通更智慧化、快捷化及安全營運；建立一個城軌雲與大數據平臺；制定一套中國智慧城軌技術標準體系；對於軌道交通統籌規劃、上位設計、自主創新、重點



突破、分步實施。

近年來臺灣智慧軌道交通受到政策的加持而產生極大的發展潛能，並對軌道交通系統實施在地化，因應現代科技，軌道運輸產業正大步邁向數位化、網路化和智慧化的方向發展。

二、智慧軌道交通建設的趨勢與價值

1. 軌道交通的發展趨勢

(1) 軌道交通的定位發生變化

軌道交通的形成給都市帶來人流量和服務性質的巨大變化，進而影響都市土地利用和空間產業布局、都市空間結構與型態。軌道交通運量大、速度快的特點能夠把人流引向特定的地點並且在某個節點上集中大量之人流，此種特性決定軌道交通對於都市不僅

具有定位於交通運輸方面，更兼具都市公共空間、商業服務、文化宣傳、社會經濟等多種功能定位，因此發展出以軌道交通導向周邊開發（TOD），將軌道交通與都市規劃結合，軌道交通不僅僅是交通運輸功能，更帶動都市發展，並打造永續發展城市。

(2) 客運業務壓力不斷增大

目前都市軌道交通之客運服務，主要以人工處理為主，包含：人工諮詢、票卡處理、客流情況監控、客流疏導，而常態性資訊公告係以紙質版公告為主，缺乏智慧化的技術管控方法，尤其是在重大節慶活動，如跨年、大型演唱會等等，客流量瞬間加劇，需大量且快速處理，對於客流日益增加，傳統的服務方法難以有效處理。

(3) 營運管理效率有待提升

當前軌道交通管理所使用的自動化系統相對獨立，營運執行需要操作多個終端，為



應付不斷提升的服務需求，營運人員往往需定期執行人工巡檢。例如：需至設備現場進行操作，包括透過PSL（月臺門控制）進行月臺門手動開啟測試、開啟自動扶梯及無障礙電梯、開啟電捲門等；因此，智慧化程度極待提升。

(4) 乘客需求不斷變化和拓展

隨著互聯網資訊技術的普及推廣，乘客對軌道交通能提供之服務需求不斷提升，包括乘坐體驗多元性、資訊獲取多樣性、乘客導向及時準確性等，都須思考如何能更加滿足乘客使用上的需求。

2. 智慧軌道交通的預期價值

軌道交通主要為都市人口提供大眾化運輸服務，具有速度快、容量大、便利高的特點。放眼國外軌道交通，在新科技革命浪潮背景下推動的新一代資通訊技術，從根本上改革了軌道交通之運行、管理、服務方式，使軌道交通更加智慧化。例如新加坡捷運利用專案管理軟體於專案預算、計畫管控、成本及現金流、預測風險等方面進行營運情境分析，對乘客提供各種軌道交通即時資訊，以靈活應對市場之各種挑戰。

隨著臺灣軌道交通發展在前瞻軌道建設規劃下進入新型態，網路化營運逐漸形成，包括大臺北捷運系統、桃園捷運系統、臺中捷運系統、臺南捷運系統及高雄捷運系統，同時各縣市也發展輕軌系統，軌道交通在交通運輸體系中承擔著越來越重要的角色和作

用。臺灣軌道交通雖然對於各縣市要求整體路網規劃，但在建設初期採用一線一核，一核一建的方式，資訊系統基本上也是隨用隨建設，不僅各都市自行建設，都市與都市間也缺少統籌規劃，導致系統相對獨立，應用、數據、網路、設施設備等資源統合利用率不高。

軌道交通智慧化帶來社會資源有效整合，包括能降低營運維修人員工作量，減少人工調度下之人為錯誤操作；同時軌道交通智慧化能重整各設備及設備間介面，確保設計及生產技術、資源的有效整合；施工及偵錯標準化，有利於施工建設、設備偵錯及測試規範等明確實施；而營運管理手段也將在統一標準之基礎上得到持續改進和完善；且建立監測、監控和管理於一體之網路安全防禦體系，以實際行動落實「網路安全」理念，可確保軌道交通資安問題，防範因網路安全問題帶來之社會風險。

智慧軌道交通建構資訊化雲平臺系統建設減輕人工作業量，透過雲方案研發建立各專業系統間資訊共享，對軌道交通數據進行分析提升軌道交通營運效率與安全管控，尤其是從路線到路網營運模式之轉型過程中，提供統一的智慧人員資訊執行平臺，有助於提升整個軌道交通資訊化建設程度，以推動軌道交通智慧化發展。

此外，充分利用互聯網等資訊技術手



段，可打破資訊不對稱的瓶頸；透過數據共享和數據交換，可準確連接配置供需資訊，促進軌道交通領域資訊及資源開放共享和綜合開發利用，提供民眾多元化的資訊需求及跨越式發展服務。

三、智慧軌道交通建設途徑

智慧軌道交通建設透過感知層、執行層及應用層整合既有和新增功能模塊，在既有監控系統基礎上打造智慧化運行與營運管理系統，具備運行狀態全方位精準感知、運行趨勢智慧化分析預判、資訊指令一致化主動推送、運行規則擬人化自動進化功能。其中，資訊感知層透過既有機電號誌設備及建立新增智慧感知設備對於設備、客流、工作人員的全息感知。執行層透過結合既有系統及新增對於乘客的自主服務終端，在管理及營運網共同建立對於軌道交通的自動化運行及人員、施工、營運等綜合管理，最後在智慧化運行與營運管理系統建立整合智慧功能。該系統對於軌道交通管理採用人機高度共同合作的方式，目標建立對於乘客的全方位體驗、對於設備的全自動運行、對於運維的輔助性決策、對於事件的共管式聯動等運行效果。

1. 狀態感知

透過應用智慧傳感、影像分析等智慧感測技術，建立以新型感測為依據之軌道交通全自動智慧運行系統，進行對設備、環境、

客流、人員等對象的群體智慧主動感測與發現。透過多功能傳感器進行軌道交通環境的全面感知；依據影像智慧分析、WIFI 探測、AFC 客流等技術的綜合應用建立對客流的即時感測；應用智慧手持電子裝備建立員工高精度室內定位、人員佈設、路徑追蹤等功能。

2. 數據管理

集合各類即時數據、靜態數據、工作執行數據等，對數據進行分析、過濾轉換、加載等管理，進行軌道交通的全數字化管理。

3. 自動診斷

應用大數據智慧分析與決策技術、多源異構數據結合、智慧學習、設備消耗與健康診斷模型等，建立以軌道交通為建模對象之智慧運行系統，透過對各類營運情況下的運行數據分析，建立客流預測與預警、設備健康度分析、系統故障預警與診斷、突發時間智慧識別與聯動以及車站運行節能減排等應用功能，進行對於軌道交通運行管理與應急處置的智慧化營運輔助決策功能。

4. 軌道閉環

軌道交通管理工作需求，透過應用先進的資訊系統整合架構，並應用可視性交互系統、高效率人機共同合作、智慧化建模整合等技術，建構以可視化為核心的全自動智慧運行系統，建立基於軌道情境下的自動控制和預先聯動。

5. 持續進化

在軌道交通長期營運過程中，透過資訊化系統所積累的數據，利用雲計算、大數據、虛擬仿真、在線智慧學習、流式計算等人工智慧技術，建立局部區域的全自動智慧運行，包含對營運效果自我評估、運行策略自動修正與完善、調度決策分析建議、綜合節能、安全防範體系、綜合維修與狀態維修等，最終達到智慧軌道交通系統的持續進化。

同時持續進化根據狀態感知提供的數據管理、智慧診斷、軌道閉環等功能，進行數據建模，採用被動統計學習、主動學習、算法教學、演示學習、感測因果學習、增強學習等機器學習模式，建立智慧軌道交通核心大腦，並自動完備軌道交通的自我評估與車站運行策略。

四、創新技術在智慧軌道交通建設全生命期的結合應用

智慧軌道資訊化建設利用「人工智慧技術、區塊鏈技術、雲計算、大數據、物聯網、建築資訊模型（BIM）技術、數字孿生技術、元宇宙」等新技術，重新建構軌道交通整體應用體系，朝向跨專業軌道交通整合的方向，進一步進行軌道交通資訊化永續發展。

新技術與智慧軌道交通整合的目標包括

效率、人員、成本、安全四個方面，透過採用創新技術，提高軌道交通運行效率，減少營運人員數量和全生命周期總成本，保障軌道交通營運安全；在規劃設計、施工、營運全生命周期內確保軌道交通建設的系統投資降低、設備空間減少、管理效率提升、人員配置減少、運維成本降低、系統運能提升、安全風險降低。

1. 人工智慧技術

人工智慧透過電腦模擬人的思維過程和智慧行為，進而使得電腦進行更高層次的應用。人工智慧具備數據挖掘、機器學習、認知與知識工程、智慧計算等應用能力，是當前科學技術發展中的一門先進技術。

人工智慧技術已在各種不同領域上進行研發應用，自動駕駛便是一個很好的例子，臺灣在臺北、新北、桃園、臺南等，皆有大客車自動駕駛的場域及經驗，小汽車也採用自動駕駛結合電動節能減碳，諸如特斯



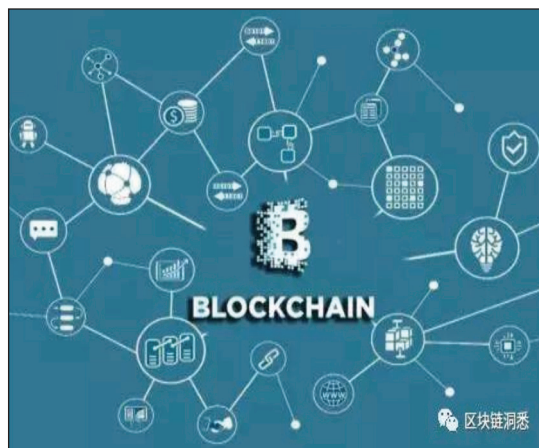


拉汽車等。自動駕駛運用感測器及人工智慧執行安全操作，尤其在行駛路線之規劃及執行，更需要人工智慧中之機器學習；人工智慧必須分析及解決不同任務，才能提供舒適安全便捷之自動駕駛。

在軌道交通領域的應用，相對於車聯網、醫療、金融、互聯網等行業而言起步較晚，目前為止人工智慧技術已逐步運用於軌道交通規劃設計、施工、營運等方面，並在實際的應用過程中發揮了作用，諸如軌道交通智慧收費模式、客流分析、智慧巡檢、智慧防護、智慧車站控制（包括空調及電扶梯等）、智慧人員管控等，能夠極大簡化實際應用流程、降低使用技術要求、提供系統智慧化程度及減少營運維修人員，人工智慧技術將推動未來智慧軌道交通的發展。

2. 區塊鏈技術

區塊鏈起源於比特幣，每個區塊為一個儲存過程，記錄各區塊節點交流資訊，透過哈希算法進行鏈結成區塊鏈，將用戶所有操作資訊永久記錄於區塊鏈且不可竄改。因此區塊鏈（Blockchain）技術是一種將數據區塊有序連接，並以密碼學方式保證其不可篡改及偽造之分散式分類帳技術。區塊鏈技術建立系統中所有數據資訊的公開透明且可追溯、不可篡改和偽造。區塊鏈核心技術本質為不依賴中心機構，在完全無信任基礎的前提下建立信任機制。區塊鏈技術服務與新型智慧都市建設相結合，可在資訊基礎設施、



智慧交通、能源電力等領域創新應用，提升都市管理的智慧化和精準化程度。

軌道交通系統具有三十幾種專業，需將各專業子系統智慧結合，才能建構高效率、安全可靠的軌道交通管理系統。為建立新型智慧軌道交通系統，將包括涉及大量的路網數據跨層次、跨區域、跨系統的高效率、有次序、低成本運作等。區塊鏈技術集合了點對點網路、數據加密、協商一致機制、智慧契約等優勢，可為可靠的軌道交通數據流通提供了一種低成本的解決方案，有效促進新型智慧軌道交通高程度發展。

目前軌道交通在營運過程中產生諸多數據，包括軌道交通本身工程數據，客流數據，安全數據等等，但這些數據多樣巨大且複雜，需進行分類分析，且數據儲存、維護、安全皆有其困難性，須訂定標準及流

程，區塊鏈技術利用其去中心化特點，可以對於軌道交通材料供應、調度、監控、通訊、收費等系統，進行區塊鏈結，且數據及資訊既獨立加密且可整體性運用，避免因其中一環之錯誤導致其他系統及區域無法操作運行，提高軌道交通運行之安全性。

3. 雲計算技術

雲端運算是透過網際網路（也就是「雲端」）傳遞伺服器、儲存體、資料庫、網路、軟體、分析、智慧功能等運算服務，以加快創新的速度，確保資源靈活，並加大經濟規模，提供企業方便且隨需求應變地透過網路存取廣大的共享運算資源，並可透過管理工作及服務供應者最少的互動，快速提供各項服務，具有共用資源、快速重新部署、隨需要應變服務等特性。目前已有都市嘗試使用雲原生技術進入智慧軌道交通建設領域，基於雲原生建構新的地理資訊服務方式，透過整合從原始數據獲取、數據中臺分



析到上層應用擴展的能力，利用雲技術建立線上即時處理數據，進而大幅提升效率。未來智慧軌道交通的建設有兩大要素：一是物理空間的全面數字化；二是空間規劃、監督管理等營運管理能力提升。在海量空間數據的基礎上，能否在線、即時、高效率處理數據將決定軌道交通的有效管理和營運效率。

雲計算技術在軌道交通之運用主要為軌道交通提供可整合管理、安全可靠的資訊化環境。軌道交通資訊不僅是即時數據處理，路網安全與維護要求格外重要，資訊管理從票務系統、客流管理、行控中心，到確保路網安全的環境、路況等資訊監測、搜集與處理。傳統數據中心已無法應付現代軌道交通資訊化需求，雲計算技術把傳統的軌道交通資訊應用及管理系統轉移到雲計算的大平臺上，將給軌道交通帶來巨大改變。雲計算技術利用雲平臺在線、即時、高效率處理數據在雲端提供快速有效資訊，讓軌道交通營運更加安全、快速、便捷，以及更加綠色環保。雲計算專家表示：「沒有應用就沒有雲計算的未來，沒有創新就沒有雲計算的生命力。」

4. 大數據技術

- (1) 大數據具有體量大、種類多、速度快、價值高等特點，經過挖掘分析可以在軌道交通建設領域得到隱藏的價值，軌道交通規劃設計、施工、營運維修等過程中會產生海量數據，且涉及大量的決策分析應用，針對軌道交通規劃設計，需



要有前瞻性，大數據技術在軌道交通中具有良好的應用前景。

軌道交通訊息資源整合應用：建立數據管理的統一標準，透過統一標準，避免數據混亂衝突、一數多源等問題，透過大數據品質管理，及時發現並解決數據品質參差不齊、數據冗餘、數據缺值等問題，規範數據在各系統間的共享流通，促進數據價值充分釋放，提高數據資源的利用程度。

(2) 軌道交通大數據分析應用：軌道交通大數據相當龐大，若沒有經過分析萃取，數據本身只是個數字而已，無法產生任何作用，透過軌道交通大數據的分析，提升軌道交通公共服務程度，譬如透過行為軌跡、社會關係、社會輿情等集中監控和分析，提供軌道交通營運指揮決策、緊急事件應急研判之參考依據。

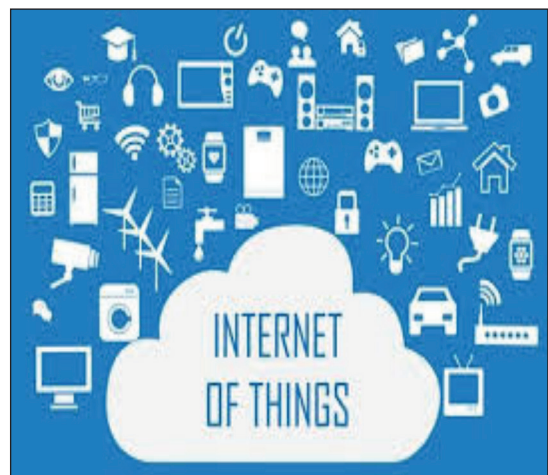
(3) 目前臺灣配合軌道交通建設，正發展以

軌道交通導向周邊開發 (TOD)，將軌道交通與都市計畫結合，打造永續城市，而軌道交通周邊區域開發，透過客流大數據分析，可了解客流來源及業種，對於區域不同產業發展及基礎建設配套措施，能起參考及支持作用。

5. 物聯網技術

物聯網 (Internet of Things, IoT) 是新一代資訊技術的重要組成部分。物聯網透過智慧感知、識別技術與普適計算等通訊感知技術應用於網路中，也因此被稱為繼電腦、互聯網之後世界資訊產業發展的第三次浪潮。物聯網技術在智慧建設、智慧工地、都市設施管理等領域有著廣泛的應用，提供可感知、可測量、可分析、可控制和可視化的智慧應用。

軌道交通客流量大，一旦發生事故，將會造成嚴重後果，臺鐵太魯閣事件就是一個





例子。為提高軌道交通的安全管理和應急效率，物聯網具有全面感知、可靠傳輸、智慧計算的特點，可在安全與應急領域進行運用，包括列車自動防護（ATP）、列車自動監督（ATS）、列車自動駕駛（ATO）等等；同時以臺北捷運文湖線為例，過去在木柵線時代通訊方式採用電線電纜方式，行車通訊傳輸較慢，內湖線通車後，利用物聯網技術，採用基於通訊的列車控制系統（Communication Based Train Control System）簡稱CBTC系統，CBTC特性為(a)不依賴軌道電路的高精度列車定位。(b)連續的車-地和地-車數據通訊網，比傳統系統可傳輸更多的控制和狀態資訊，使軌道交通號誌系統運作更為準確，且列車營運準時準點，縮短行車班距，不會有列車碰撞情況產生。(c)軌旁和車載核心處理器處理列車的狀態和控制數據，並可提供列車自動防護（ATP）、列車自動監督（ATS）、列車自動駕駛（ATO）功能。如此一來使得軌道交通列車行駛更為安全、資訊傳輸更為快速。目前政府推動5G大時代，更可利用5G快速傳輸的特性將軌道交通物聯網技術充分運用在軌道交通上。

在軌道交通工程施工時，可利用物聯網技術進行施工現場管理、物資管理、地下空間施工等方面的資訊化應用，包括人員、車輛、設備、環境、材料等管理，以及高大模板變形監測、塔吊運行監控、大體積混凝土無線測溫等安全和品質管理等應用過程，

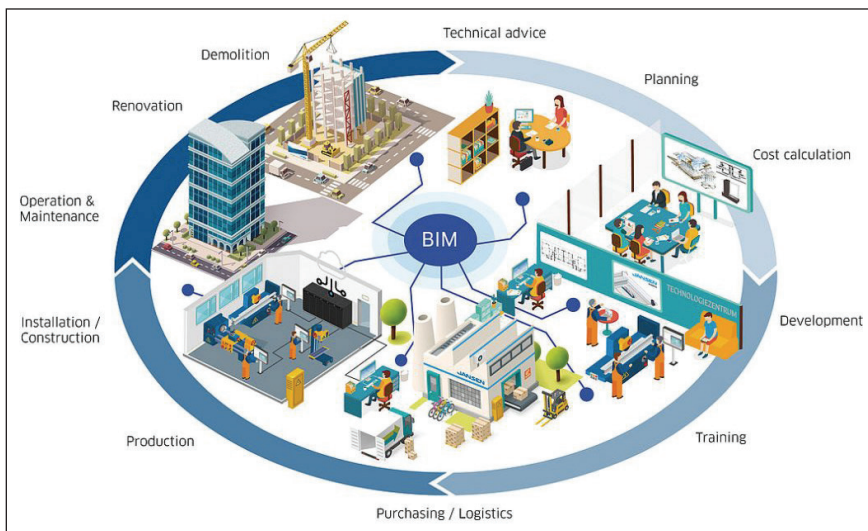
透過各種物聯網傳感器，即時自動獲取工地現場的揚塵、噪音、煙霧、溫度、濕度、風速以及用水量、用電量等數據，達到節約資源、提升效率、規範管理等目的，亦可將資訊化與工業化有效結合，提高工程施工品質、安全監控能力，以提升施工廠商之科技程度。

6. 建築資訊模型（BIM）技術

建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM）技術由美國Autodesk公司在2002年率先提出，目的在於建立建築從設計、施工直至計畫結束的完整資訊。BIM技術的發展與應用，已被公認為繼CAD技術之後建築業的二次科技革命。

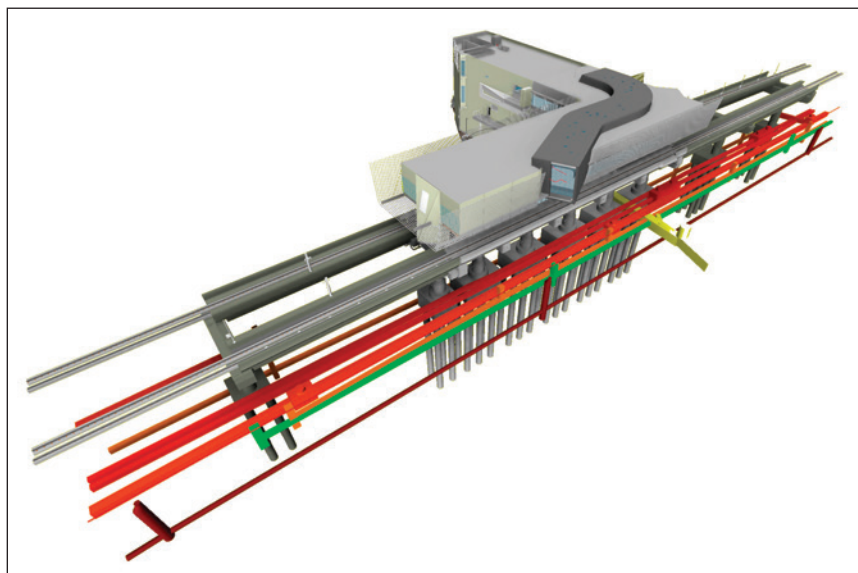
BIM技術乃應用於工程設計建造管理的數據化工具，透過參數模型整合各種計畫的相關資訊，在計畫策劃、運行和維護的全生命期過程中進行共享和傳遞，使工程技術人員對各種建築資訊做出正確判斷及作法，為設計團隊以及包括營運單位在內的各建設單位提供共同工作的基礎，在提高生產效率、節約成本和縮短工期方面發揮重要作用，目前已經在全球範圍內得到業界的廣泛認可。

BIM技術主要是透過建立虛擬的軌道交通工程三維模型，利用數字化技術，為建築資訊模型提供完整的、與實際情況一致的工程資訊庫。該資訊庫不僅包含描述建築物構件的幾何資訊、專業屬性及狀態資訊，還



包含了非構件對象（如空間、運動行為）的狀態資訊。借助這個包含工程資訊的三維模型，大大提高了工程的資訊整合化程度，進而為工程計畫的相關單位提供了一個工程資訊交換和共享的平臺。

BIM技術覆蓋軌道交通全生命期的特性將徹底改變整個行業固有的資訊獨立問題，用更程度的數字化及資訊整合對包括規劃設計、施工和營運維修在內的軌道交通全產業鏈進行優化。BIM技術主要應用包括資訊



桃園捷運綠線 G13a 車站 BIM 模型



整合、場地分析、策劃和討論以及可視化設計等。

在軌道交通方面，BIM技術可用於車站設計，BIM技術模擬車站設計之各項介面，除了能應用於初期軌道交通規劃設計外，更整合應用於後續施工階段及營運階段，提供完整的全生命周期應用，減少設計、施工及營運階段之介面及各階段內部介面之衝突。傳統軌道交通工程，營運公司可提出營運需求，納入規劃設計BIM模型，施工階段結合BIM模型及施工工序，進行BIM模型再修正，減少土機及機機介面衝突，加快施工時程及減低工程費用，並建設符合營運需求之軌道工程；軌道交通統包工程則可將營運公司需求結合設計施工，建立BIM模型，利用營運實際經驗，邊設計邊施工，滾動式優化，全過程建設。

7. 數字孿生技術

數字孿生（Digital Twin）概念由密西根大學的Michael Grieves首次提出，具體指「物理產品或資產的虛擬複製」。數字孿生的最大好處是不用費太高成本建造一個物理資產，就可以透過數字化技術進行相關操作，並且無需承擔物理資產損害的後果。

數字孿生因感知控制技術而起，因綜合技術整合創新而興。數字孿生都市是在都市累積數據從量變到質變，在感知建模、人工智慧等資訊技術取得重大突破的背景下，建



設新型智慧軌道交通的一條新興技術途徑，是軌道交通智慧化、營運永續化的先進模式，也是一個吸引高端智力資源共同參與，從局部應用到全區優化，持續更新的都市軌道路網創新平臺。數字孿生理念自提出以來不斷升溫，已成為新型智慧城市和軌道交通建設的熱點，受到政府和產業界的高度關注和認同。

數字孿生的主要核心是在網路數字空間中再造一個與現實物理軌道交通相對應的數字軌道交通，透過建構數字軌道交通與物理軌道交通相互對應配合、智慧操控的系統，使其與物理軌道交通平行運轉，透過虛擬服務現實，數據驅動管理，智慧確認一切等運行機制，進行軌道交通全數字化和虛擬化、全實時化和可視化、軌道交通運行管理智慧化，形成物理維度上的實體世界和資訊維度上的虛擬世界同生共存、虛實結合的都市發

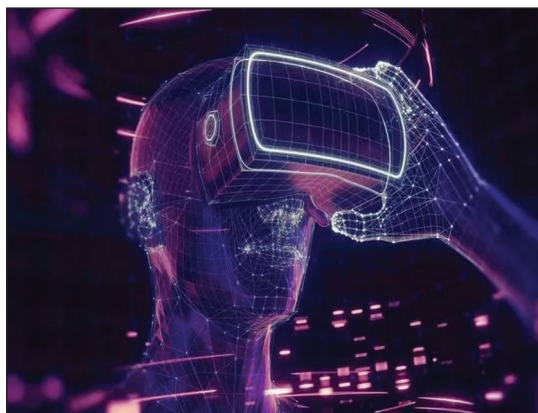


展新模式，是具有深度學習、自我優化能力的智慧軌道交通建設。

數字孿生技術可運用在軌道交通車站，利用過去相關軌道交通大數據及分析預測客流量，模擬新建車站營運狀況，建立數字化虛擬實體進行人流仿真模擬，軌道交通車站人流仿真模擬主要了解行人通行速率、設施數量、空間布設合理性等。人流仿真可模擬營運時人流出入動線，建立模型，以合理確認設計階段電梯、電扶梯及樓梯、自動收費系統、出入口等之數量及空間配置，車站大小及月臺長度等，同時也可模擬跨年、大型演唱會時人流出入動線，以進行人流疏導。

8. 元宇宙

關於元宇宙的概念最早可追溯於尼爾史蒂芬森在1992年的一部科幻小說「雪崩」，當時在網際網路尚未普及的年代裡，作者就



描繪出人們可任意穿梭於實體世界和虛擬世紀的觀念。而元宇宙就是指由現實與虛擬之間所混合而成的數位世界。維基百科對於元宇宙描述為透過虛擬增強的物理現實，呈現收斂性和物理持久性特徵的，基於未來互聯網，具有鏈結感知與共享特徵的3D虛擬空間。最根本的定義，即元宇宙是一個數字世界，它不是現實的物理世界，而是虛擬數字世界。



元宇宙與數字孿生不同的是數字孿生是以數字化方式建立物理實體之虛擬實體，借助歷史數據、實時數據、預測分析數據等，模擬、預測、驗證及執行物理實體全生命週期之技術，數字孿生技術係將物理與數字結合，物理實體與虛擬實體對應；元宇宙則為虛擬數字化型態的永生，與物理世界關聯性較小，在元宇宙下，人是以數字身份存在虛擬數字世界，獨立且脫離現實世界，支持數字孿生的技術包括網路及算力、人工智慧、模型建模（BIM、GIS）、顯示技術（VR、AR、MR），支持元宇宙的技術包括網路及算力、人工智慧、電子遊戲技術、顯示技術（VR、AR、MR）及區塊鏈，二者事實上有很多重疊，未來或許可在數字孿生的基礎下，建立元宇宙的部分虛擬世界，並且脫離物理世界，成為元宇宙的一部份。

目前工研院與臺北捷運公司合作，以工研院虛實整合實力結合MR（Mixed Reality，混合實境）技術運用，首創「文湖線電聯車MR擴增虛擬運用」系統。由於文湖線全線為無人駕駛系統，過去皆由車站站長、站務員擔任線上控制員角色，由於列車屬於封閉式車廂環境，一旦發生意外事件，不易緊急處理。此創新技術主要訓練軌道運輸人員，透過MR智慧眼鏡及仿真駕駛面板，模擬實際上路的情境。軌道運輸人員透過此沉浸式體驗訓練，幫助新進人員職前養成良好的駕駛操作程序認知及緊急應變能力。

五、結論

智慧軌道交通乃現今軌道交通之顯學，智慧軌道交通建設可透過整合感知層、執行層及應用層既有和新增功能模塊，在既有監控系統基礎上打造智慧化運行與營運管理系統，具備運行狀態全方位精準感知、運行趨勢智慧化分析預判、資訊指令一致化主動推送、運行規則擬人化自動進化功能，使得軌道交通在智慧化下得以整合且安全運行。

軌道交通智慧化帶來社會資源有效整合，可減少營運維修人員工作量及人工在調度管理模式下錯誤操作，而透過雲平臺建設，除可大幅減輕人員工作量，亦可建立各專業系統間資訊即時共享，尤其是從路線到路網營運模式轉型過程中，可提供統一的智慧人員資訊執行平臺。智慧軌道資訊化建設將藉由「人工智慧技術、區塊鏈技術、雲計算、大數據、物聯網、建築資訊模型(BIM)技術、數字孿生技術、元宇宙」等技術，重新建構營運應用體系，朝向跨專業資訊整合，進一步提升軌道交通智慧化永續發展。

臺灣在全力推展軌道交通相關建設之際，惟有充分融入智慧化技術，有效結合臺灣強大的資通訊技術能量，使軌道建設智慧化、國產化，才能增進軌道運輸產業發展，打造智慧軌道交通系統，且進一步降低建設及營運成本，並提升旅客使用軌道交通的意



願度、安全度及舒適度，進而達到促進地方經濟繁榮之目標及目的。

參考文獻

1. 林忠正，「軌道交通前沿」，全華圖書公司，2021年7月21日
2. 同炎資訊 20211102 期，重慶同炎數智公司，2021年11月2日
3. IBM 公司
4. 林同棧工程顧問公司
5. 林同棧國際工程諮詢（中國）公司
6. Google
7. 維基百科



臺鐵電務智慧化 - 以 68 站號誌聯鎖系統更新案為例

中興工程顧問股份有限公司系電部技術經理 / 曾啟鵬
中興工程顧問股份有限公司副總經理 / 林根勝
交通部臺灣鐵路管理局電務處副處長 / 楊惇惠
交通部臺灣鐵路管理局電務處處長 / 周祖德

關鍵字：電務智慧化、號誌聯鎖裝置、計軸器系統、道旁號誌設備

摘要

臺鐵局近年積極推動導入資通訊技術，建立數位化、智慧化營運管理。電務系統智慧化是達成此目標的最重要的基礎工作之一。本文藉由目前辦理中的68站號誌聯鎖系統更新案分享號誌聯鎖系統由傳統的繼電聯鎖裝置更替為電子聯鎖系統過程中，一併將號誌聯鎖裝置及道旁號誌設備等導入數位化、智慧化的辦理經驗。

一、前言

隨著國際資通訊（ICT）技術的快速成熟發展，各個事業領域企業因應未來發展爭

相導入運用，作為提昇其企業經營管理效率及安全，已是現今重要趨勢。世界各鐵路運輸先進發達國家亦積極將鐵路運輸緊密結合資通訊技術，如數位化資訊收集、大數據分析、雲計算、人工智慧、物聯網（IoT）等的運用，建構其智慧化的鐵路運輸系統。

臺鐵局配合國家產業發展政策，將鐵路智慧化的推動納入前瞻基礎建設的軌道建設項目中，並就運務、工務、機務及電務等系統領域分別擬定了各項建設及改善計畫。特別是鐵路電務系統在鐵路運輸組成架構中所扮演的角色就如同人體中的大腦及神經系統，是攸關整個鐵路系統營運能夠維持正常、準確及安全的重要支柱。故臺鐵局自民



國106年起即訂定「臺鐵電務智慧化提升計畫（106年-113年）」滾動計畫（如表1所示）積極推動智慧化提升作業。

中興工程顧問公司（以下簡稱本公司）於民國108年4月承辦臺鐵西部幹線自蘇澳新站至九曲堂站之68站號誌聯鎖系統更新技術服務案（服務範圍，如圖1所示），為確保規劃設計及建置完成的成果能夠契合臺鐵路電務智慧化的設定目標，茲就本公司辦理本案所訂定執行策略與方式分享執行經驗如后。

表 1 臺鐵電務智慧化提升計畫項目一覽表

計畫名稱	系統更新或建置計畫
號誌基礎設施提升計畫	建置號誌遠端狀態監控系統
	計軸器雙重化
	號誌聯鎖系統更新
	平交道防護設備更新
	ATP 地上設備效能提升
電訊基礎設施提升計畫	96 芯光纜第二環佈放工程
	環島光纖傳輸網路系統更新
	行車調度無線電話系統優化
	有線調度電話系統更新
	區域網路傳輸設備光纖化
	環島自動電話系統更新
電力基礎設施提升計畫	電車線系統更新
	變電站容量擴增
	購置電車線工作車、電搖車與高速檢測儀器
中央行車控制系統新建計畫	中央行車控制及電力 SCADA 新建
	行車調度無線電話系統網管中心搬遷及緊急應變中心資訊整合

資料來源：106年7月臺鐵前瞻基礎建設-軌道建設臺鐵電務智慧化提升計畫

二、現況概述及需求分析

臺灣鐵路系統創建迄今已逾百年。號誌系統亦伴隨各階段相關鐵路運輸技術的發展，逐步汰換提升。號誌聯鎖系統自民國68年將人工操作的機械聯鎖系統升級為自動化的號誌繼電聯鎖系統（RI），接著於民國93年開始，北迴線引進第一套電子聯鎖系統（EI）取代繼電聯鎖系統（RI）。其後，隨著鐵路全線各小段區間或車站的改建，逐步將原先的繼電聯鎖系統更新為電子聯鎖系統。迄民國110年底，初步統計全線已完成82站更新為電子聯鎖系統，剩餘83站仍為繼電聯鎖系統。因此，在此不同等級號誌聯鎖系統新、舊並存的過渡之際，要推動電務系統智

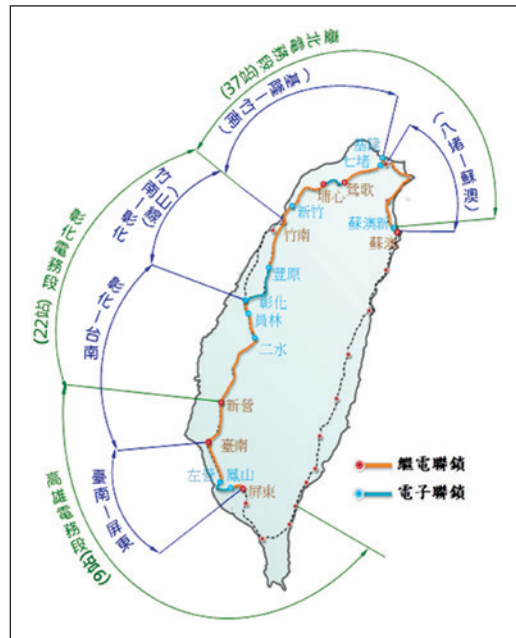


圖 1 臺鐵號誌聯鎖系統更新範圍

慧化所面臨的問題及擬定解決方案的思慮需要為更周延。

經整理，臺鐵號誌聯鎖系統推動智慧化面臨的問題，包括：

- (一) 既有法令規章及技術規範造成導入新系統架構或技術運用的約束或限制。
- (二) 部分使用中之系統設備技術老舊，多採機械、類比式繼電器元件，無法滿足數位化、智慧化等新技術的應用需求及擴充彈性。
- (三) 既有系統設備之軟、硬體、作業系統、伺服器等種類繁多，規格及傳輸標準不統一，開放性差，易導致系統間相互界面溝通困難及造成重覆投資問題。
- (四) 非模組化的系統、設備在配合施工需要或遭遇設備故障時，受到衝擊影響的範圍大。
- (五) 既有系統設備具有智慧偵測感知偵測裝置配置不足且覆蓋範圍不全面，致使系統設備之數位化、智慧化程度不足，侷限了維護保養自動化、預知化功能及營運輔助決策功能的運用。
- (六) 列車控制系統和聯鎖系統相對獨立，增加了設備建置和介面需求，增加系統建置和維護成本，亦降低系統可靠度。

(七) 系統設備數位化、智慧化需要電訊、號誌兩種系統專業整合，目前電訊系統、號誌系統均分屬各自垂直獨立單位營運、維護及管理，易造成大量資訊盲點。

臺鐵局推動電務智慧化目標，除營運、維護及管理等組織調整議題，已另案研議辦理，以下僅就68站號誌聯鎖案系統設備執行數位化、智慧化之規劃設計及整合的執行策略及具體作法，概述如后。

三、智慧化執行策略及具體作法

(一) 擬定臺鐵電務智慧化整體架構

為釐清號誌聯鎖裝置在電務智慧化中扮演的角色及在臺鐵電務智慧化提升計畫與其他各個計畫間之相互作用關聯及應具備功能，初步整合擬定臺鐵整體電務系統設備關係架構圖（如圖2所示），並提出具有可擴充發展整體電務智慧化架構圖（如圖3所示）。

號誌聯鎖裝置設置於各車站繼電器室，其功能係發送由中央行車控制系統（以下簡稱CTC）下達經由環島光纖骨幹迴路傳遞之指令至號誌機、計軸器、轉轍器、ATP及平交道防護設施等道旁號誌設施，並將所蒐集之道旁號誌設施的即時狀態資訊，經光纖骨

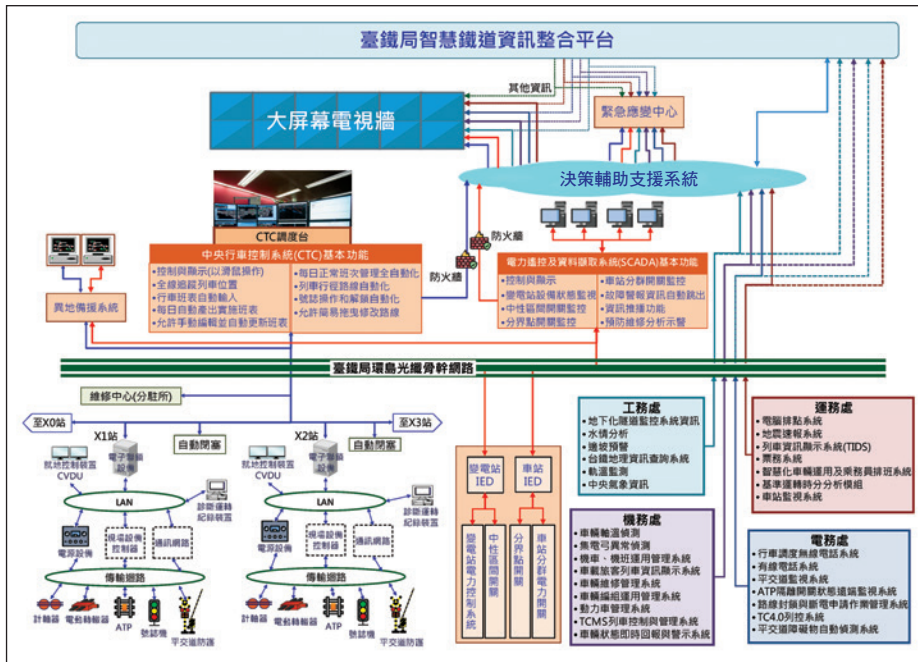


圖 2 臺鐵整體電務系統設備關係架構圖

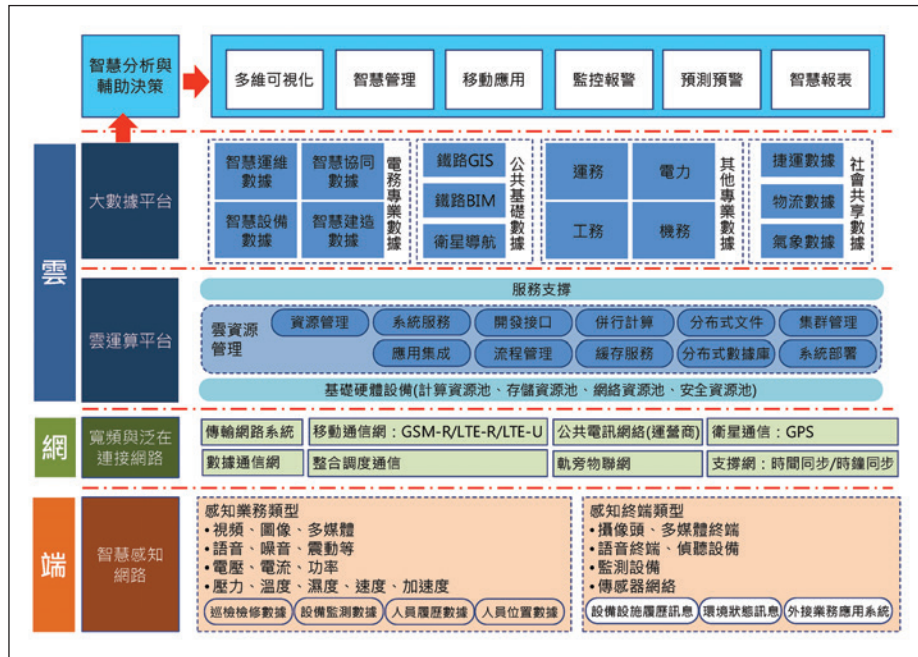


圖 3 整體電務智慧化架構圖



幹迴路傳送並顯示於CTC系統調度台螢幕，提供調度員掌握列車即時運行狀況及執行列車調度作業。

此外，運務、工務、機務及電務等各單位建置之智慧化維運模組或設施蒐集、分析所產生與列車運行調度作業相關之全線基礎設施、環境狀態的參數或監視收錄的影像資訊均可透過光纖骨幹迴路傳送至設置於中央行車控制中心（OCC）的決策輔助支援系統，再依需要可分別傳送並呈現於CTC系統調度台螢幕、緊急應變中心螢幕，提供即時現況及資訊。

由於臺鐵局屬於特定非公務機關，對於工程採購標案及預算的編列均須遵循工程會採購法及政府相關法令辦理，無法一次同時辦理完成整體規劃及更新建置，為確保將如此龐雜的系統設備在分年分標方式辦理下，仍可達成建置的系統設備規格一致、資訊交換溝通可無縫銜接的整體電務智慧化目的，本公司擬定了系統設備應具備電子化、模組化、節能化、數位化、光纖化、標準化，及智慧化設計規劃執行原則，茲針對具體作法及預期成效，簡述如后。

（二）編修既有號誌技術規範

號誌設備規範編修的項目，包括號誌聯鎖系統、號誌機、轉轍器、計軸器等道旁號誌設施。由於上述號誌設備係屬整個號誌系

統的最基層之設備，故在辦理編修作業時，除修訂規範，提升系統設備整體功能需求外，仍須考量全線尚在營運之既有系統設備之過渡性及兼容性。

技術規範修訂作業歷經臺鐵的段、處及局的各層級多次檢討研議，迄108年12月完成約計239項規範條文增修。規範增修的重點，除將原規範中部分文字定義或辭意不夠精準，易造成不同解讀或錯誤解讀及在實務上執行困難或不符現場環境條件及實際需求者外，針對推動數位化、智慧化需求增修之重點，包括：

1. 刪除原僅適用繼電聯鎖系統或限制數位化電子聯鎖系統功能者之相關條文。
2. 新增各系統設備之操作參數紀錄、趨勢分析、即時監測、故障預警等規定，以符合電子聯鎖系統設備智慧化、數位化需求及具有預知保養功能。
3. 增修簡化作業程序、便利人員操作及具有即時預警、即時通知處置等數位化運用的人機介面功能。

（三）訂定統一通訊協定標準

為達成臺鐵局未來可於不同時間、不同標案建置系統的相容性及互通性，除要求建置的系統設備須具有相同等級功能外，並應制定可供系統設備間相互溝通之統一通訊協定及格式。為因應臺鐵局未來新建中央行車



控制系統（CTC）的設置，號誌聯鎖系統已預先訂定與新建CTC系統之介面軟、硬體應具備工業用乙太網路（Ethernet）TCP/UDP/IP通訊協定和IEEE 802.3標準相容，並至少符合安全完整性等級SIL3的要求。

另外，配合未來臺鐵智慧平台建置已預先訂定資料傳輸的統一標準格式，即一般圖說、文件資料採Json格式、影音資訊採ONVIF格式、天災警訊資料，如氣象、颱風、地震、河川水情等，則配合採用中央主管機關所訂定的Cap格式。

（四）號誌系統設備數位化、模組化

要達成號誌系統智慧化目標，首要是要先做到號誌系統數位化。另外，現場之號誌設備須儘可能做到型式、構造簡單化及規格功能一致化，才能充分發會操作營運簡單、安全，維修保養人力及成本大幅降低的目的。具體作法，包括：

1. 各階層設備普遍設置運轉狀態感知偵測設施

於各階層的號誌設備、道旁設施裝設設備狀態感知偵測功能，並將偵測之即時運轉狀態，以數位化形式傳回管理系統進行儲存、分析。臺鐵局針對號誌聯鎖系統及道旁號誌新修訂技術規範中，明確規定各設備應裝設之偵測項目，彙整如下表所示。又規定於系統設備主機或號誌聯鎖系統之運轉診斷

號誌設備	監測項目
號誌機	1. 電壓值。 2. 電流值。
電源設備	1. 輸出電壓、電流值、均衡充電狀態顯示。 2. 負載開關跳脫或熔絲熔斷、蓄電池開關開路。 3. 電池充電限流、直流電源輸出異常。 4. 過高溫或通風扇故障告警 5. 輸出低電壓告警、輸出過電壓停機告警、交流輸入中斷告警、接地告警。
電動轉轍器	1. 電壓、電流值 2. 轉轍方位 3. 扳轉次數紀錄 4. 轉換時間
通訊網路	1. 纜線故障告警。
就地控制裝置 CVDU	1. 軌道佔用、號誌顯示。 2. 轉轍位置、進路設定與取消。 3. 故障監視、開關切換紀錄。
計軸器	1. 列車速度、輪軸行進方向 2. 設備故障告警

紀錄裝置應具有紀錄資料分析及狀態變化預警功能。

2. 號誌聯鎖設備電子化、模組化、雙重備援化

為建置構造簡單、安全及可減輕維修作業人力，降低設備維護成本。更新之新式號誌聯鎖設備，明確規定在設計及供應上應符合下列原則。

- (1) 號誌聯鎖系統應採用全電子聯鎖的設計，減少安全繼電器使用。另設備應採用模組式電子卡板及熱插拔設計且配置須具有擴充彈性，如圖4所示。此外，號誌系統設計必須符合「失效自趨安全（Fail-to-Safe）」原則及國際上通用標準，並應符合臺鐵局頒定之相關規章及



圖 4 號誌繼電聯鎖裝置更新為電子聯鎖裝置

設備規範要求。

- (2) 系統設計應具有高可靠度、可維修度及妥善率，其核心運算單元應至少為2 out of 2 (2oo2) 架構且執行保安功能之單元與設備應至少為 2 out of 2安全架構。
 - (3) 號誌聯鎖系統之聯鎖設備、現場設備控制裝置應符合SIL4等級，就地控制裝置CVDU則應符合SIL2等級。
 - (4) 通訊網路採雙重光纖迴路設計，具有多重備援控制、管理功能。
 - (5) 無關行車安全之監測訊號傳輸，經由固定網路部分設計採用TCP/IP/Ethernet協議，並預留未來升級號誌無線通訊傳輸的硬體介面。
3. 具有智慧化管理之雙計軸器系統
- (1) 計軸設備符合SIL4最高安全等級。
 - (2) 計軸主機與聯鎖裝置傳輸不須再透過繼電器介面，以達到計軸頭偵測之數位化

資訊可完整傳輸。

- (3) 採用雙計軸器並聯系統設計架構，即採用兩組計軸器並聯使用，取代原有之軌道電路搭配單計軸器並聯設計之列車偵測方式，可設計採專置屬處理器模組進行監督、檢查、比對和確認雙計軸系統各自獨立輸出的信號之正確性外，亦可採將兩系計軸系統之輪軸偵測結果傳送至號誌聯鎖設備，藉由比對軌道路線連續閉塞區間佔用之方向性及連續性，達到判斷該區間為占用或非占用目的，確保列車營運安全性。
- (4) 設計計軸系統可將每個計軸頭偵測到之軸數、列車行進方向及速度傳送至電子聯鎖裝置。當任一計軸頭故障時，系統可準確將發生故障之計軸頭所在位置及故障資訊傳送至電子聯鎖系統，完全消除維修人員沿線查找故障點之人力及成本消耗。

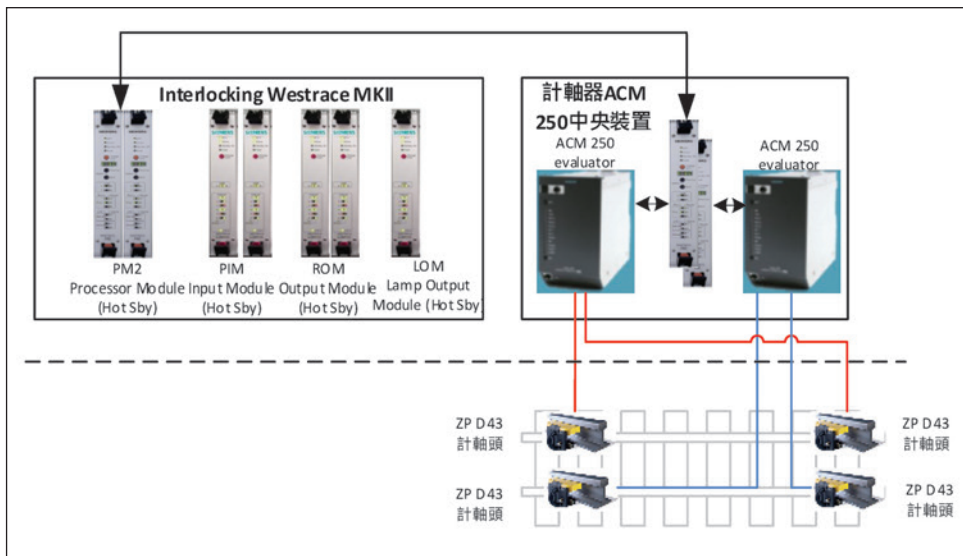


圖 5 雙計軸器系統（西門子公司提供）

4. 具有狀態監測功能之轉轍器

轉轍器新增設計之功能重點，包括

- (1) 使用設備重量更輕、體積更小，維護保養方便設備且符合SIL4最高安全等級。
- (2) 規範使用直流110V電動馬達驅動尖軌的位置，動作桿之動程條件為160 mm，推力600 kg以上且應能適用60 kg道岔，建立轉轍器規格一致性及增加操作穩定性。
- (3) 導入智慧化預知維修監視功能，以監視電動轉轍器之即時監測電壓、電流、轉轍方位、扳轉次數、轉換時間等數值資訊，建立預知保養功能。

5. 增加平交道警報延時功能

為解決臺鐵路線之平交道路段常因運輸尖峰時刻，上、下行車班會車通過密集，產

生遮斷機升起、落下間隔時間，造成平面道路用路人、車未能即時通過發生受困情事。號誌更新案改善平交道延時警報控制功能，其設計原理，概述如下：

- (1) 目前列車觸發啟動點至平交道時間30~42秒。期間，遮斷桿落下至水平約4~6秒；遮斷桿升起約2秒。
- (2) 改善為平交道之路線上之列車經過後，若偵測到現任一方向，即上行或下行方向於5秒內有列車即將經過警報啟動點，則系統會自動延長平交道警報，不升起遮斷桿，直到列車完全通過後，才解除警報，升起遮斷桿，開放人車通過，如圖7所示。
- (3) 此功能除可避免因運輸尖峰時段，發生平面道路人、車因通過時間不足，發生受困情事外，當列車班次不會發生連

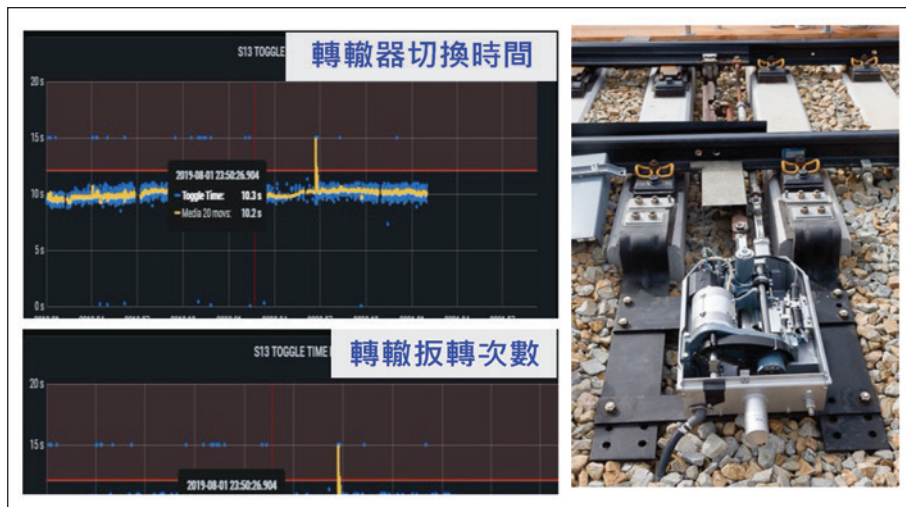


圖 6 具狀態偵測功能的轉轍器

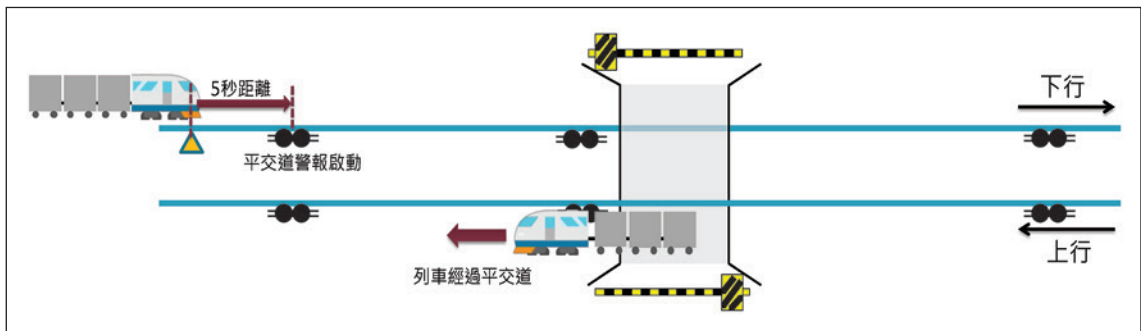


圖 7 平交道警報延時功能示意圖

續通過平交道時，平交道可依其既有設定，落下或升起平交道遮斷機，減少平面用路人、車等待時間。

(五) 智慧化、數位化、電腦化號誌維修管理系統

建立臺鐵號誌系統具有自動維修、預知維修功能亦係68站號誌聯鎖更新案重要目

標之一。在協助臺鐵局修訂完成的技術規範中，有明確規定系統設備須具有自我診斷功能，以執行確保安全繼續運轉、切換他系運轉或停止運轉，並應將診斷故障資訊及運轉狀態資訊傳送至維修中心（分駐所）顯示於監控伺服器，以通報及指引維修人員進行查修。

68站號誌聯鎖更新案現已由西門子公



司統包承攬，該公司依據規範要求已提出具有可擴充站數符合臺鐵局號誌設備維修管理自動化、智慧化的維修管理系統建置架構（如圖8所示）。此系統由數位預防維護系統（OMNES）及自動維護管理系統（HERMES）兩套軟體組成，茲就其功能概述如下：

1. 數位預防維護系統（OMNES）

數位預防維護系統（OMNES）主要功能，包括：

- (1) 可藉由設備所裝設的感知裝置監測並紀錄設備之狀態資料，提供系統執行智慧化故障和狀態數據資料，進行預測分析。
- (2) 可透過大數據分析及機器學習，早期預

知故障告警，協助維修人員執行預防性維護。

- (3) 可以視覺化方式呈現分析成果並產出報告。
- (4) 可提供維護管理系統警報資訊，設備產生故障趨勢時，可自動告警，自動安排維修作業。

2. 自動維護管理系統（HERMES）

自動維護管理系統（HERMES）主要功能，包括：

- (1) 具有資產、備品材料庫存控制管理及追蹤功能，並自動提醒採購。
- (2) 具自動安排維護作業功能，並自動產出維修工單。
- (3) 具有計畫管理及維修工作進度追蹤

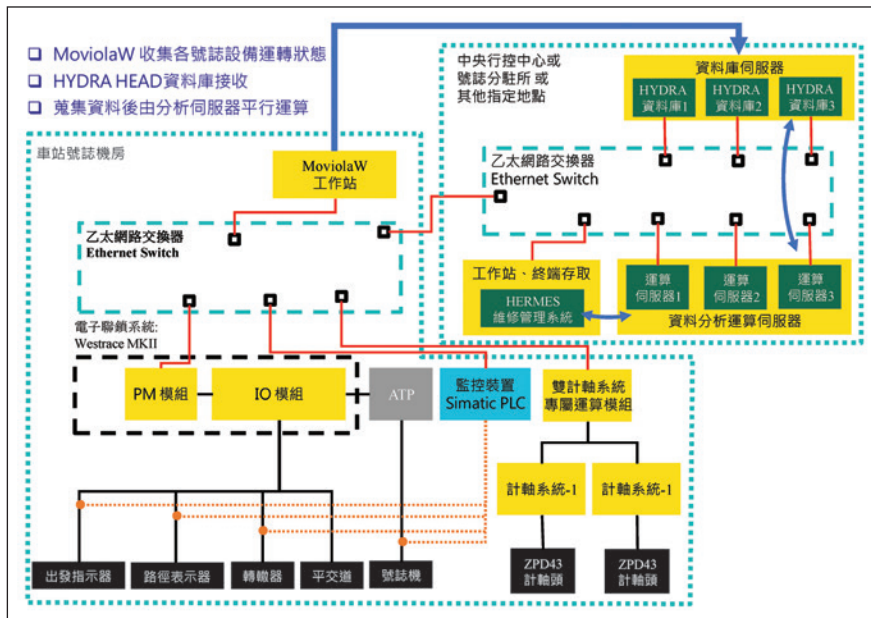


圖 8 自動化、智慧化號誌維修管理系統（西門子公司提供）



功能。

(4) 具有自動產出維修成果分析報告。

3. 系統具可擴充性

數位預防維護系統 (OMNES) 及自動維護管理系統 (HERMES) 具有開放性及擴充性，除整合68站號誌聯鎖更新案範圍內之號誌設備維修作業以外，俟全線其餘站場完成一致化傳輸資料格式及通訊協定調整及更新，以及設備狀態感知設施裝設後，均可納入此數位化、智慧化之維修管理系統，執行臺鐵局全線號誌系統的預知、自動的維修管理作業。

四、結論

推動臺鐵電務智慧化應先要建立有完整的電務智慧化架構體系，再依達成此架構的設定目標及需求條件為基準，辦理號誌、電力、電訊等各個專業項目的系統、設備規劃設計及建置。如此，即便主辦機關在不同時間、不同標案推出規劃設計或興建標案時，承辦單位均能遵循相同、相容及互通的基準執行。本公司辦理的68站號誌聯鎖系統更新技術服務案正處於臺鐵局號誌聯鎖系統的新、舊系統及觀念交替之際，幸賴臺鐵局各級長官的大力支持及多位號誌專家的鼎力協助，始能完成規範修訂及招標文件的制定，並順利招標，辦理設計及興建作業。相信在不久將來，俟臺鐵局逐步完成具備電子化、模組化、數位化及標準化的號誌聯鎖系統及道

旁號誌設施，以及具有預知維修與自動管理功能的號誌維修系統更新作業後，除可大幅提升臺鐵營運安全及減輕維修人力負擔及維護成本外，並藉由建置完成之號誌基礎設施的運行數據、狀態的蒐集、貯存及傳輸，提供臺鐵局各級營運管理單位及學術單位進行彙整、分析、計算等運用，以達成臺鐵整體營運管理智慧化的目標。

參考文獻

1. 交通部臺灣鐵路管理局「臺鐵電務智慧化提升計畫(106年-113年)」，中華民國106年4月
2. 黃靜如等，「智能電務研究與探索」，中國鐵路期刊，2018年12月，P.73-P.79
3. 交通部臺灣鐵路管理局電務處「TRAS(K)-S20013 電子聯鎖系統規範」，109年3月
4. 陶冶中教授，「智慧鐵路發展」與談人簡報，中華民國運輸學會2021年會暨學術論文國際研討會，2021.12



機場捷運與延伸線號誌系統的共融性

中興工程顧問股份有限公司機場捷運延伸線監造工程處經理 / 李文杰
中興工程顧問股份有限公司機場捷運延伸線監造工程處副經理 / 陳永森
中興工程顧問股份有限公司機場捷運延伸線監造工程處號誌主任 / 何建蒿
中興工程顧問股份有限公司機場捷運延伸線監造工程處號誌顧問 / 陳諸賢
交通部鐵道局副總工程司 / 陳景池
交通部鐵道局北部工程處副處長 / 史春華
交通部鐵道局北部工程處簡任正工程司 / 王村竹
交通部鐵道局捷運北部工程處第五工程隊隊長 / 吳鳳慶
交通部鐵道局捷運北部工程處第五工程隊號誌主辦 / 劉建宏

關鍵字：機場捷運延伸線、CBTC-EP 號誌行車控制系統、CBTC 號誌行車控制系統

一、摘要

桃園國際機場作為國家的門面，機場捷運成為先進國家重要的象徵指標，機場捷運自106年3月初正式營運通車迄今，提供往返機場的旅客，安全、便捷、舒適的另一種交通新選項。機場捷運新建的初期路線，最南邊的末端站設置於中壢區中豐北路上的A21環北站，交通部鐵道局為提供桃園與中壢地區旅客更方便的服務，早已著手規劃機場捷運延伸計畫，並與未來台鐵地下化的中壢火車站作共構銜接，因此延伸計畫將增設A22

老街溪站與A23中壢車站，A23站將作為與未來台鐵中壢火車站共同的連結車站。

機場捷運延伸計畫土建軌道施工標自102年12月28日即已開工，然而最核心的機電系統標，直至108年8月才由台灣新鈞電子/西門子/中華工程共同承攬得標，其中的號誌系統係由德商西門子負責，採用與桃園捷運綠線相同的CBTC號誌行車控制系統。目前列車行駛於A1台北車站與A21站區間，係採用原有的CBTC-EP號誌行車控制系統，將來列車繼續行駛於A21站至A22站路段，乘客並不用下



車或換車，此刻列車將會採用新的CBTC號誌行車控制系統，且同一列車可繼續駛往未來的A23中壢車站，能滿足乘坐旅客一車到底無需轉乘的便利服務。

因應同一條路線的新舊兩個路段，卻採用兩種不同型式的號誌行車控制系統，就必須於在既有列車上再增設另一套的車載號誌系統，形成兩套車載號誌系統共存共融於同一捷運列車上，以便於列車行駛於兩種不同的軌旁號誌聯鎖系統，國內先前雖有台北捷運文湖線的龐巴迪號誌系統取代原有的台北木柵捷運所採用的馬特拉號誌系統的案例，但文湖線是將原先的號誌系統全部更新成一套系統。然而機捷延伸計畫卻須在營運中同時採用兩套不同的號誌系統，是國內首例也是國外少見的案例，為達成此項深具挑戰的工作，中興工程顧問公司一路扮演全計畫生命週期總顧問與監造顧問的角色，如何讓整個計畫能步步為營的順利推展，猶如履薄冰的挑戰，以完成通車前的各項安全驗證測試，此文章彙整了詳細的新舊號誌系統的共融特性與驗證過程說明，以供業界各位先進參考。

二、前言

依據國際公共運輸聯合會（International Association of Public Transport）的定義，原A1至A21站號誌系統採用的通訊式列車控制系統-功能加強版（CBTC-EP），自動運轉等

級（Grades of Automation, GoA）為第二等（GoA 2）的半自動駕駛，係列車自動運轉及停止，但需要駕駛員關門和處理故障事件；而A21至A22站新的號誌系統則採用移動式閉塞區間的CBTC系統，其自動運轉等級為第四等（GoA 4），但為達成新、舊系統列車運作的一致性，將來仍以GoA 2之模式營運。

機場捷運延伸線機電工程其最核心的項目，就是建置一套新的號誌系統於新的車站、道旁及控制中心（OCC），同時須改裝現有的電聯車，在保留原有的車載號誌系統下，需另增設一套新的車載號誌系統，在受限於既有列車空間的條件下，改裝工程具有一定的難度與複雜度，無論是機械性的固定支架安裝或者電氣線路的佈線，均透過事前的可行性研究（feasibility study），不斷地在既有車內與車外設備間尋找空間，反覆確認，因為每一個鑽孔一旦鑽下去，就無法挽回，駕駛室增設的控制螢幕，在符合人因工程的條件下，還需要與營運單位的駕駛人員一再確認，以達最佳的視野條件，經由這些繁雜的過程，才能慢慢地堆疊出完整的改革硬體全貌。

至於新舊系統的軟體整合，將於後續章節詳細說明，藉由透過對既有電聯車與道旁間，軟硬體上的研析與評估，及與A21站新舊號誌系統切換的聯鎖關係，進行新系統的軟體開發，最終須透過測試軌與主線上的



靜、動態驗證測試，確保系統的可用性與安全性，以達成此新舊號誌系統的共融性。

三、新號誌系統與原有列車間，軟、硬體的評估與研析

(一) 新號誌系統簡介

機場捷運延伸至中壢火車站建設計畫機電系統工程ME06A標號誌系統是採用德商西門子的TGMT (Trainguard Mass Transit) 設計，Trainguard MT是西門子有實績的CBTC系統，使用移動式區間 (moving block) 設計，列車偵測無需軌道電路，此與原有DTG (Distance-To-Go) 號誌系統不同。Trainguard MT之組成包含以下4個子系統：

1. 自動列車監控 ATS (Automatic Train Supervision) 系統：

- (1) 人機介面HMI (Human Interface)：採用圖形使用者介面 (GUI: Graphic User Interface)，操控台可讓控制員進行手動控制。
- (2) 自動列車追蹤ATT (Automatic Train Tracking)：經由CBTC傳來之資料，可以將列車位置顯示在行控中心螢幕上。
- (3) 自動路徑設定ARS (Automatic Route Setting)：根據每列車之終點站，即時設定每列車之路徑，以避免衝突或延誤。
- (4) 自動列車調整ATR (Automatic Train

Regulation)：會根據時刻表調整列車的操作，使列車遵循時刻表行駛。

(5) 服務及診斷Vicos S&D (Service and Diagnostic)：可以顯示各項設備是否故障、故障原因及故障排除方法。

(6) 訓練及模擬軟體T&S (Training and Simulation system)：提供ATS路線控制員訓練之用，包括聯鎖裝置、CBTC、道旁設備、列車聯結/解聯、洗車及列車疏散。

(7) 時刻表製作軟體TTC (Timetable Construction)：以圖形化自動方式，在離線狀態提供時刻表快速製作功能。

(8) 紀錄及倒帶R&P (Record & Playback)：將訊息記錄下來並儲存，並可於日後在控制台上重新檢視，以利查修。

(9) 資料庫Archive：將系統運轉過程中各項操作資料儲存在各式檔案中，如線上設備狀態、系統狀態及控制員曾經下過之指令等。

(10) 速限管理Speed Restriction Management：讓線上控制員對列車速限可以進行速限選擇、指令下達及取消。

2. CBTC (Communications-based Train Control) 系統：

- (1) 本系統包含自動列車保護 (ATP: Automatic Train Protection) 及自動列車操作 (ATO: Automatic Train Operation) 兩個子系統，根據位置分為道旁及車載設備，彼此間以無線通訊方式交換資

料。車載設備將列車位置傳送道旁設備後，道旁設備決定移動授權（moving authority），再將移動授權傳給列車。

- (2) 列車操作模式：全自動模式AM（全自動駕駛，ATS根據時刻表自動調整靠站及站間行駛時間）、監視列車操作模式SM（司機員根據操控台上顯示的速限駕駛列車，有ATP保護）、限制列車操作模式RM（司機員必須根據道旁的標誌燈號及路線控制員的指示行駛，ATP僅有超速保護）、休眠模式Sleep Mode（列車需長時間停駐時使用此模式，在休眠模式下，列車會關閉部分設備，車載CBTC設備則維持開啟）、關機模式Cut-off Mode（在此模式下將關閉車載CBTC設備，司機員負責列車的行車安全）。
- (3) Balise應答器（reference points）：在CBTC系統中，列車位置係由裝於列車車軸上速度偵測器的轉速配合鋼輪輪徑後決定，但速度偵測器有其精度限制，會產生誤差，在行駛一段時間後因誤差累積，會導致列車位置不準確，因此必須定期修正。應答器裝設於軌道上，內部燒錄該應答器所在軌道位置之資訊，當列車通過應答器上方時，車載CBTC設備會擷取應答器內部資訊，進而用來定期修正列車位置。本計畫使用Eurobalise S21，屬於被動式應答器，不需要電池供電。列車通過時，裝設於列車上之應答器讀取器激磁，進而傳輸應答器內部資訊；萬一連續經過2個應

答器無法讀取，將會造成列車須重新初始化，而列車初始化時，只需再經過兩個應答器即可投入CBTC系統之運作，無須行駛至特定區段執行列車初始化。一般在車站附近區域，應答器密度會較高，以提供精準的靠站停車。

3. 聯鎖 IL（Interlocking）系統：

- (1) Trackguard Westrace MKII（interlocking）：屬於電腦型（computer-based）設備，可以減少大量硬體裝置，採用故障自趨安全設計。聯鎖設備連接轉轍器、第二列車偵測系統（計軸器）、緊急停車按鈕及月台門等道旁設備，並進行監測及控制。聯鎖系統提供CBTC道旁設備有關路徑設定之相關資訊，包含路徑設定、鎖定、保持及釋放。
- (2) LED號誌機：係供手動駕駛用，在正常CBTC全自動運作下，號誌燈不會打開，但當未裝有CBTC設備的列車或車載CBTC設備故障的列車接近時，號誌燈才會打開進行顯示，以利節省能源及減少故障率。列車側翼保護（flank protection）必要時，以固定閉塞區間原理，利用裝設在道旁的LED號誌機，引導司機員駕駛列車前進，本項屬於CBTC系統故障時的備援（fall-back）系統，未裝設車載CBTC設備的車輛也必須使用本功能，在列車允許經過之路徑上，鎖定所有轉轍器，以免列車出軌。



(3) 第二列車偵測系統：正常CBTC全自動運作下並不需要本系統，本系統故障亦不影響CBTC全自動運作，本系統採用西門子Clearguard ACM計軸器（axle counter）進行列車偵測，因為不需要軌道電路或軌道絕緣接頭（IRJ: Insulated Rail Joint），因此維修及操作成本均低。計軸器原理係偵測每個行車方向鋼輪進（+）出（-）的數量總和，若不為0，則代表該區間有列車佔據，通常一個站間以計軸器區分兩個區段。

4. 資料通訊系統DCS（Data Communication System）：

(1) 道旁及車載設備之間的資料通訊必須為雙向、大容量及高可靠度，本系統Airlink（ATC radio,including backbone）採用ISM（Industrial, Scientific and Medical band）5.8G公用頻道，符合IEEE 802.11 a/b/g。

(2) 道旁通訊網路WCN（Wayside Communication Network）：道旁無線電通訊系統 RCS 將軌道分為多個連續性通訊區域，稱為細胞，用不同的頻率傳輸同一筆資料，同一個位置至少會被兩個不同頻率的訊號所涵蓋，以減少資料遺失的可能性，RCS支援快速漫遊（fast roaming,<1 sec），在細胞交界處，列車會自動尋找最強的訊號，並迅速切換，同一列車前後各2支天線，2支天線分別接收153 Channel-5765 MHz、161

Channel-5805 MHz之不同頻率。

（二）新車載號誌設備硬體簡介

雙端駕駛室新增的硬體設備：人機介面（HMI）、控制台按鈕/開關面板（Desk elements）、無線電天線（Radio antenna）、資料通訊系統（DCS）、微型斷路器（MCB）、車載通訊網路設備（OCN）。第2節車廂內新增硬體設備：車載控制單元（OBCU）與繼電器端子台固定板（RTB）。第2節車廂車底新增硬體設備：信標天線（Balis antenna）、雷達傳感器（Rader sensor）與測速計（OPG）。車廂間第1~2、2~3、3~4車間頂端新增硬體設備：車間電纜（Jumper cable）及支撐架。以上之硬體設備如圖1所示。

（三）新號誌系統硬體與原有列車間的關連

有關車載之控制迴路，原有號誌系統以硬線設計為主，新號誌以軟體設計為主，可以大幅縮減硬線及繼電器之配置，達到診斷與檢修簡易化之效果。新系統車載核心設備為OBCU，其與車輛子系統（例如：新/舊號誌系統切換、牽引動力系統VVVF、煞車控制單元BCU、車門控制系統DCU…等）之連結界面為RTB，此部份之設計為本工程成敗之重要關鍵。

另外，新號誌系統也必須透過CMS（控

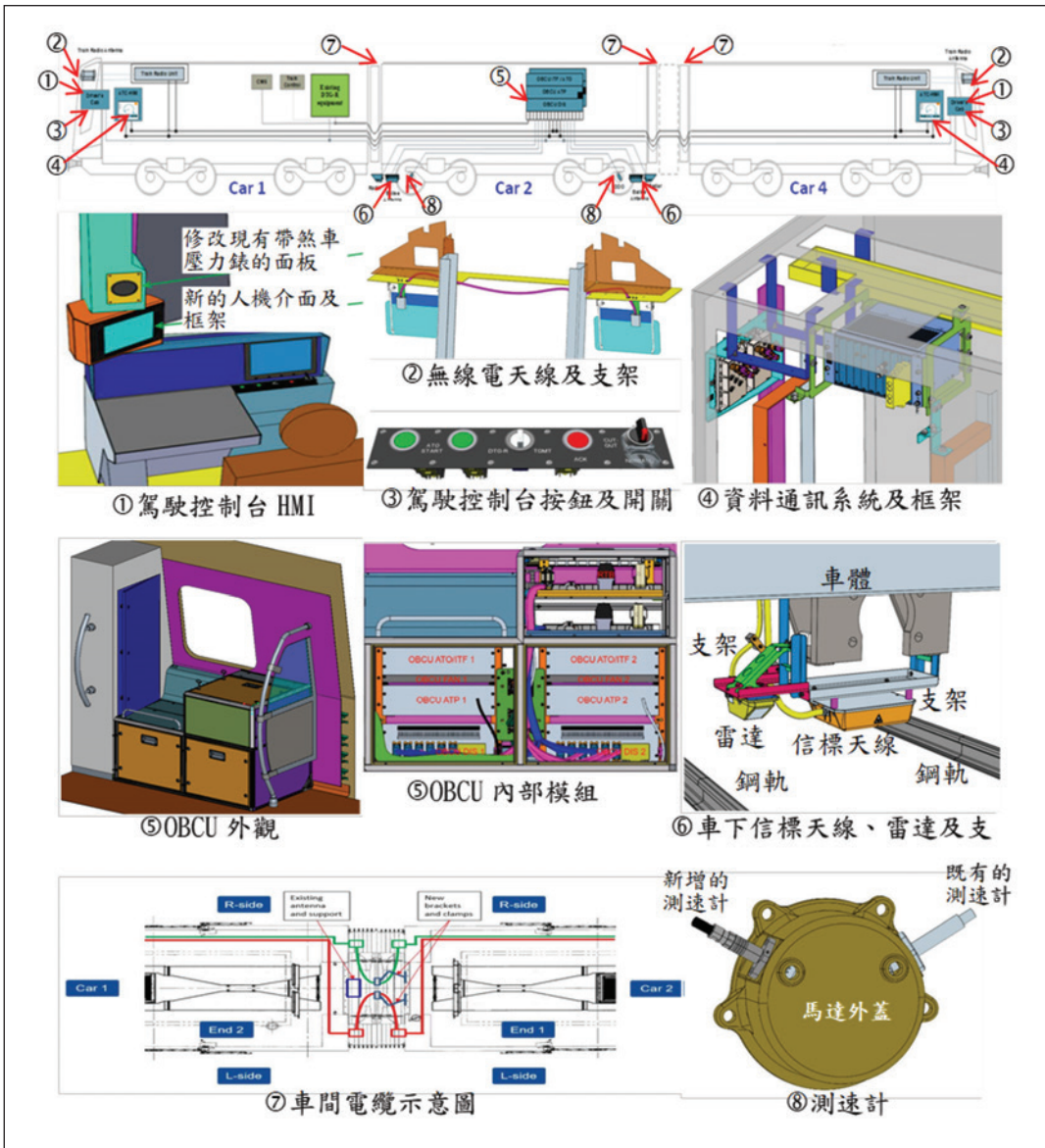


圖 1 列車新增硬體設備示意圖

制及監視系統)與TOCP(列車駕駛通訊器)做資訊之連結,如圖2紫色圖示為原有號誌系統,透過CIB(CMS界面箱)連接圖2藍色圖示CMS與其他子系統,圖2橙色圖示為新增號

誌系統,由新增RS-485區域網路及一組電路切換開關(System Switchover Circuit DTG-R/TGMT)做為新/原有號誌系統與CMS間連接之切換。

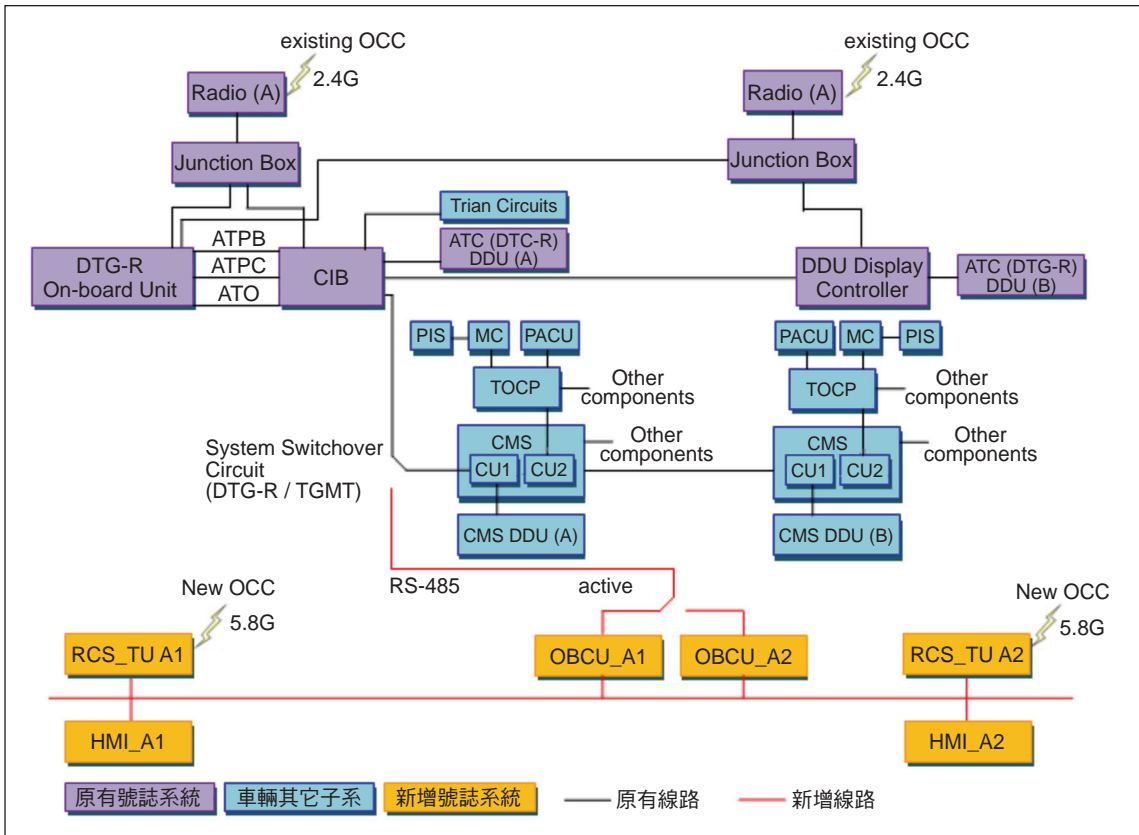


圖 2 電聯車新舊號誌系統切換示意圖

(四) 新號誌系統軟體簡介

新號誌系統的軟體由以下子系統組成，項目配置符合SSC 3.1 (Standard System Configuration標準系統配置)：

- | | |
|---|---|
| <p>1. IXL–Westrace MK2 聯鎖-西屋二代機
GSIM includes field simulation 圖形模擬器
包括現場模擬
MoviolaW 邏輯程式軟體</p> | <p>2. CBTC–Trainguard MT 通訊基礎列車控制 -
列車守衛 大眾運輸
WCU_ATP 道旁控制單元 _ 自動列車保護
WCU_TTS 道旁控制單元 _ 列車追蹤系統
OBCU 車載控制單元</p> |
| <p>3. ATS–Rail 9000 自動列車監控 -R9K 行控號
誌軟體
OCS-ATS Server 運行控制系統 - 自動列車
監控伺服器</p> | |



OCS-HMI 運行控制系統 - 人機介面
S&D with OPC UA client 服務與診斷工作
站有開放平台通信統一架構之客戶端
Falko 離線時刻表軟體

(五) 新號誌系統軟體與原有列車間的關連

新號誌系統之軟體包含Westrace MK2、R9K Core System、R9K ATT/ARS、R9K HMI、R9K R&P、Moviola、Falko、Vicos S&D、Vicos NCU、OBCU ATO、OBCU ATP、OBCU ITF、WCU ATP、WCU TTS、TDB等套裝軟體，於德國測試中心進行測試與發行，機捷延伸計畫須依據原有列車的特性需求，作為新軟體開發的設計要求，說明如下：

1. 列車特性需求：定義原有列車參數之靜態及動態數值，以作為軟體開發之設計依據。
2. 基礎設施資料規範：收集用於ATC子系統道旁軟體設計之資料，其中包含軌道佈設所需的維生和非維生基礎設施資料，例如：里程辨識碼、月台區資訊、坡度曲線、彎道曲線、速度曲線、與其他基礎設施資料（例如：既有號誌機、止衝擋、隧道區域、限制列車數量區域、禁停區域、牽引電力曲線等之里程或原因）。
3. 控制圖表：控制圖表展現出一般操作聯

鎖（IXL）的行為，且用於聯鎖（IXL）軟體組態的輸入內容；圖表項目包含如下：Route、Signal Aspects、Overlap、Incompatible Routes/Conditions、Route Entry Conditions。

4. IXL細部界面規範：描述A22站（新聯鎖）使用的WESTRACE MK II與A21站（舊聯鎖）使用的WESTRACE MK I的界面，其控制邏輯須使用原有列車參數作為輸入資料。
5. 列車參數：詳下表1。

四、新舊號誌系統的聯鎖關係

(一) 電聯車為中心的觀點

當電聯車於A20（興南）站下行出發欲經A21（環北）站往A22（老街溪）站時，車載之原舊（DTG-R）號誌系統將於A21站切換為新（TGMT）號誌系統，並繼續往A22站出發，其後列車於A22站停妥後，司機員始可開始折返發車作業（往上行），與下行相反，號誌系統將在A21站由新系統切換為舊系統，概念說明如下圖3。

1. 列車由A21站以前往A22站（原系統切換為新系統）
 - (0) 原系統主控/新系統待機：
當電聯車趨近A21站時，原系統正常



表 1 列車參數分類及名稱一覽表

項次	分類	參數名稱
1	列車尺寸	①列車總長 (TP_TRAIN_LENGTH); ②列車聯結器至第一扇車門前緣之距離 (TP_OFFS_FIRST_DOOR); ③列車車體前端至第一扇車門中線距離 (TP_OFFS_DOOR_STPWIN); ④列車門寬度 (PASSENGER_DOOR_WIDTH); ⑤列車聯結器至第一車輪軸之距離 (TP_OVERHANG); ⑥第 1 車廂第二輪軸至第 2 車廂第一輪軸之距離 (TP_DIST_BW_AXLES_MAX); ⑦列車聯結器至天線之最小距離 (MIN_OFFS_COLLECTOR)。
2	車速	①最大營運速度 (TP_MAX_TRAIN_SPEED_O); ②最大設計速度 (TP_MAX_TRAIN_SPEED_V)。
3	車重	①空車重量 (TP_WEIGHTS_AW0_RST); ②坐位滿載的重量 (TP_WEIGHTS_AW1_RST); ③正常營運負載重 (TP_WEIGHTS_AW2_RST); ④全負載車重 (坐滿 + 站滿) (TP_WEIGHTS_AW3_RST); ⑤平均分配列車重量 (空車) (TP_WEIGHTS_EQDIS); ⑥平移質量當量 (空車) (TP_WEIGHTS_ROT_RST)。
4	雷達	①向前 (ODO_1_Q_MOUNTING_DIR_DRS05); ②向後 (ODO_2_Q_MOUNTING_DIR_DRS05)。
5	測速計	① OPG 1/OPG 2 的安裝面 (ODO_1/2_Q_MOUNTING_DIR_OPG); ②安裝 OPG 1/OPG 2 的車輪的標稱 (最大) 車輪直徑 (ODO_1/2_L_WHEEL_DIAMETER); ③安裝 OPG 1/OPG 2 的車輪的最小車輪直徑 (ODO_1/2_MIN_WHEEL_DIAMETER); ④安裝 OPG 1/OPG 2 的軸類型 (ODO_1/2_Q_AXLE_TYPE)。
6	非控制煞車曲線	① OPG 1/OPG 2 非控制煞車曲線的值對數 (ODO_1/2_N_ITER_UCB); ②滑動期間 OPG1/OPG2 的實際速度和測量速度之間的最大速度差 (ODO_1/2_UCB_MODEL_DEVIATION); ③滑動時 OPG 1/OPG 2 的速度偏差給定的每一個值對應的速度 (ODO_1/2_UCB_MODEL_SPEED)。
7	控制煞車曲線	① OPG 1/OPG 2 控制煞車曲線的值對數 (ODO_1/2_N_ITER_CB); ②滑動期間 OPG1/OPG2 的實際速度和測量速度之間的最大速度差 (ODO_1/2_CB_MODEL_DEVIATION); ③滑動時 OPG 1/OPG 2 的速度偏差給定的每一個值對應的速度 (ODO_1/2_CB_MODEL_SPEED)。
8	控制牽引曲線	① OPG 1/OPG 2 的控制牽引曲線的值對數 (ODO_1/2_N_ITER_CT); ②打滑期間 OPG 1/OPG 2 的實際速度和測量速度之間的最大速度差 (ODO_1/2_CT_MODEL_DEVIATION); ③滑差時 OPG 1/OPG 2 的速度偏差給定的每一個值對應的速度 (ODO_1/2_CT_MODEL_SPEED); ④牽引力控制系統的控制週期 (ODO_1/2_T_OPG_CONTROL)。
9	信標天線	①天線 A1 前後雙端之間的距離 (TP_OFFS_ANTENNA_A1); ②天線 A2 前後雙端之間的距離 (TP_OFFS_ANTENNA_A2)。
10	緊急煞車	①最低保證緊急煞車率 (TP_SAFE_BRAKING_MODEL_EB_RATE); ②觸發緊急煞車後，直到達到 aEB (aEB_10) 10% 的時間延遲 (tEB_10); ③觸發緊急煞車後到達 aEB (aEB_90) 90% 的時間延遲 (tEB_90); ④觸發緊急煞車後到達 100% aEB 的時間延遲 (tEB); ⑤緊急煞車觸發後推進系統的反應時間 (tt_delay); ⑥緊急煞車觸發後牽引力完全切斷的時間延遲 (tt_zero)。
11	全出力常用煞車	①常用制動率 (TP_FULL_SB_MODEL_RATE); ②觸發常用煞車後，直到達到 aSB (aSB_10) 的 10% 的時間延遲 (tSB_10); ③觸發常用煞車後，直到達到 aSB (aSB_90) 的 90% 的時間延遲 (tSB_90); ④ SB 觸發後，直到達到 aSB 的 100% 的時間延遲 (Tsb)。
12	最大加速度	①特定速度 (TP_SAFE_BRAKING_MODEL_SPEED) 下加速度 (TP_SAFE_BRAKING_MODEL_AC) 的值對數 (TP_SAFE_BRAKING_MODEL_nbACPoints); ②對應最大加速度的速度值數組 (v1 .. vn)(TP_SAFE_BRAKING_MODEL_SPEED); ③對應速度區間的加速度值數組 (a1 .. an)(TP_SAFE_BRAKING_MODEL_AC)。
13	運營牽引力效率	①特定速度 (TP_PROPULSION_ACC_OP_SPEED) 下操作牽引力 (TP_PROPULSION_ACC_OP_F) 的值對數 (TP_PROPULSION_ACC_OP_nbFPoints); ②相應牽引力的速度值 (v1 .. vn) (TP_PROPULSION_ACC_OP_SPEED); ③對應速度區間的零坡度上的操作牽引力值 (F1 .. Fn) (TP_PROPULSION_ACC_OP_F)。



14	延遲參數	①在激活推進釋放命令 (PRO_REL) 後，確保推進被徹底切斷的時間跨度 (TP_ENSURE_PROPULSION_CUTOFF_DELAY); ②確保在車門釋放命令 (DOR_REL) 停用後絕對不會釋放車門的時間跨度 (TP_ENSURE_NO_DOOR_RELEASE_DELAY); ③自動反轉操作期間更改活動艙室時的重疊時間 (OP_AR_RELAY_OVERLAP)。
15	列車阻力公式	列車阻力公式由側傾和摩擦阻力係數、擾動運動阻力係數以及取決於質量和 / 或速度的空氣阻力係數組成。 露天段：隧道外列車阻力按以下公式計算 $F_{Train Resistance}(m,v) = ① C0 + ② C0_M * m + (③ C1 + ④ C1_M * m) * v + ⑤ C2 * v^2$ 隧道段：在隧道中，列車阻力的計算公式相同，但係數不同 $F_{Train Resistance}(m,v) = ⑥ C0_T + ⑦ C0_M_T * m + (⑧ C1_T + ⑨ C1_M_T * m) * v + ⑩ C2_T * v^2$ 以上 m 是當前列車重量，v 是當前列車速度。
16	常用煞車	①最大瞬時行車制動率 (TP_TRAIN_SB_MODEL_Rate); ②制動力建立時間從 0 到 90%，包括空載時間 (ATO_BRAKE_BUILD); ③氣動制動力的建立時間從 0 到 63%，包括空載時間 (ATO_PNEUM_BRAKE_BUILD); ④變阻器制動 / 動力建立時間從 0 到 100%，包括空載時間 (ATO_RHEST_BRAKE_MOT_BUILD)。
17	混合 (淡出)	①制動系統的混合啟動，ED 制動完全激活時的最低速度 (ATO_BLENDED_START); ②制動系統的混合端，EP 制動完全激活時的最高速度 (ATO_BLENDED_END); ③混合由 ATO 控制 (ATO_BLENDED_CONTROLLABILITY)。
18	ED 煞車直至停止	①列車停止時應用的制動值 (r0); ②制動力非線性時的值 (vnon-linear); ③制動力為線性的值 (vlinear)。
19	動態列車駕駛模型	①制動系統的運輸延遲 (Tt0); ②電氣系統轉換時間 (Tt1); ③氣動制動器的轉換時間 (Tt2); ④電氣系統 PT 元件的時間常數 (T1); ⑤氣動制動器的 PT 元件的時間常數 (T2); ⑥電氣系統 PT 元件的放大 (k1); ⑦氣動制動器 PT 元件的放大 (k2); ⑧ ATO 上升率電氣系統的加速度限制 (rRise_electric); ⑨ ATO 下降率電氣系統的加速度限制 (rFall_electric); ⑩ ATO 下降率氣動制動器的制動限制 (rFall_pneumatic)。
20	動態列車駕駛步驟	①整個步驟集的加速度組數 (TRACTION_STEP_CONTROL) ②整組步驟集的減速組數 (BRAKE_STEP_CONTROL)。

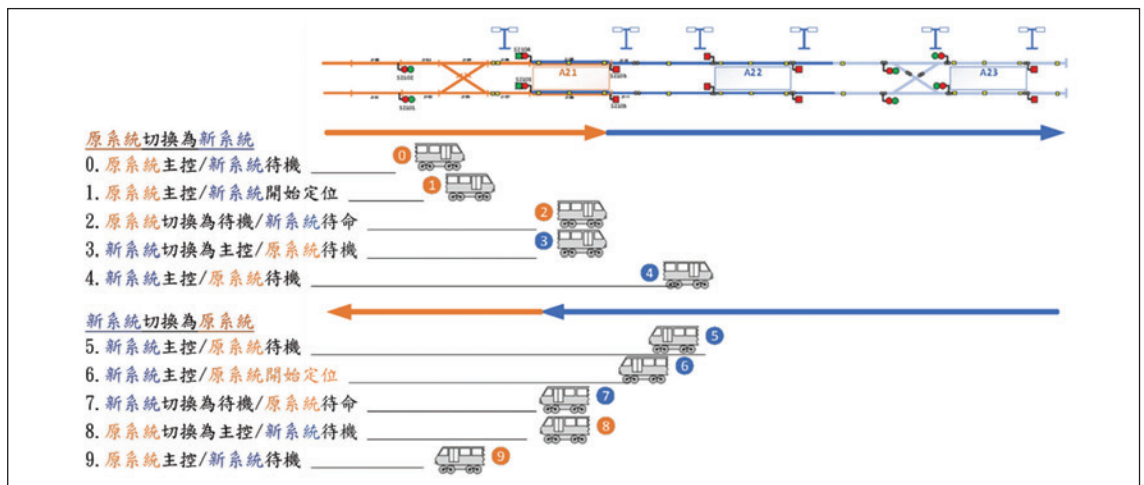


圖 3 新舊 (原) 車載號誌系統切換概念



運作，而新系統雖於待機狀態，實仍持續偵測道旁訊號。

(1) 原系統主控/新系統開始定位：

當電聯車再向A21站趨近時，電聯車已進入TGMT號誌無線電涵蓋區域，新系統已依CBTC特性開始對列車精確定位。此外，新系統位於A21橫渡線前置佈署之計軸器亦開始對列車進行計數（軸），作為雙重化確認與允行授權依據。

(2) 原系統切換為待機/新系統待命：

當電聯車ATO、SM等適當模式進A21站往中壢方向停妥月台時，司機員於駕駛室停等旅客上下車時間之適當時機，以手動切換旋鈕令電聯車上TGMT車載號誌系統主控迴路激磁（可於5秒以內完成切換），並完成安全檢核，此時電聯車TGMT系統已主控待命。並且A21站月台門啟閉，此時仍由原號誌系統（WESTRACE MK I）控制。

(3) 新系統切換為主控/原系統待機：

與2.同時，當電聯車ATO、SM等模式停妥，於旅客上下車，司機員手動切換新舊系統之主控與待機（可於5秒以內完成切換）完畢時，此後當TGMT道旁與車載之號誌皆安全檢核完成後，系統人機介面（HMI）反饋訊號給司機員後，司機員即可依據系統班表提示ATO發車（本站之停等時間為30秒）。而DTG-R原系統則因司

機員之手動切換被轉為待機，其狀態變化已不能致使電聯車EB緊急煞車（但仍持續與道旁保持連線）。

(4) 新系統主控/原系統待機：

此時電聯車已經完全進入新系統區域，往A22站出發。

2. 列車由 A22 站折返 A21 站（新系統切換為原系統）

(5) 新系統主控/原系統待機：

與步驟0相反，當電聯車由A22站趨近A21站時，新TGMT系統正常運作，而舊DTG-R系統雖於待機狀態，實仍持續偵測道旁訊號。

(6) 新系統主控/原系統開始定位：

當電聯車再向A21站趨近時，電聯車已進入A21往中壢方向DTG-R前置佈署之信標區域（上下行各3個），因原系統於待機狀態仍持續偵測道旁狀態，因此DTG-R車底信標天線一旦偵測到原系統道旁信標，即開始列車定位，據此作為後續切換回舊系統的條件之一。

(7) 新系統切換為待機/原系統待命：

當電聯車以ATO、SM等適當模式進A21站往台北方向停妥時，司機員於月台停等旅客上下車時間之適當時機，以手動切換旋鈕令電聯車上DTG-R車載號誌系統主控迴路恢復（可於5秒以內完成切換），並完成安全檢核，此時電聯車DTG-R原系統



已主控待命，而TGMT新系統則因司機員之手動切換被轉為待機（仍持續與道旁保持連線）。並且此時之A21站月台門啟閉由A22站新號誌系統（WESTRACE MK II）指揮原號誌系統（WESTRACE MK I）達成。

(8) 原系統切換為主控/新系統待機：

與7.同時，當電聯車ATO、SM等模式停妥，於旅客上下車，司機員手動切換新舊系統之主控與待機（可於5秒以內完成切換）完畢時，此後當DTG-R道旁與車載之號誌皆安全檢核完成後，系統人機介面（DDU）反饋訊號給司機員後，司機員可依據班表時間ATO發車（本站之停等時間為30秒），而TGMT新系統則因切換轉為待

機，其狀態變化已不能致使電聯車EB緊急煞車（但仍持續保持道旁偵測，待下趟要開往A22/A23站時，經A21站之列車才會再行觸發）。

(9) 原系統主控/新系統待機：

此時電聯車已經完全返回原號誌系統區域，繼續往A20站前進。

(二) 道旁為中心的觀點

前述之切換，係以車載號誌為中心之觀點，然車載號誌仍需道旁號誌設備之搭配，才能相輔相成，其道旁亦以A21站為系統之交遞重疊區域，其概念如下圖4。

上圖4說明，橙色區域係指原號誌系統

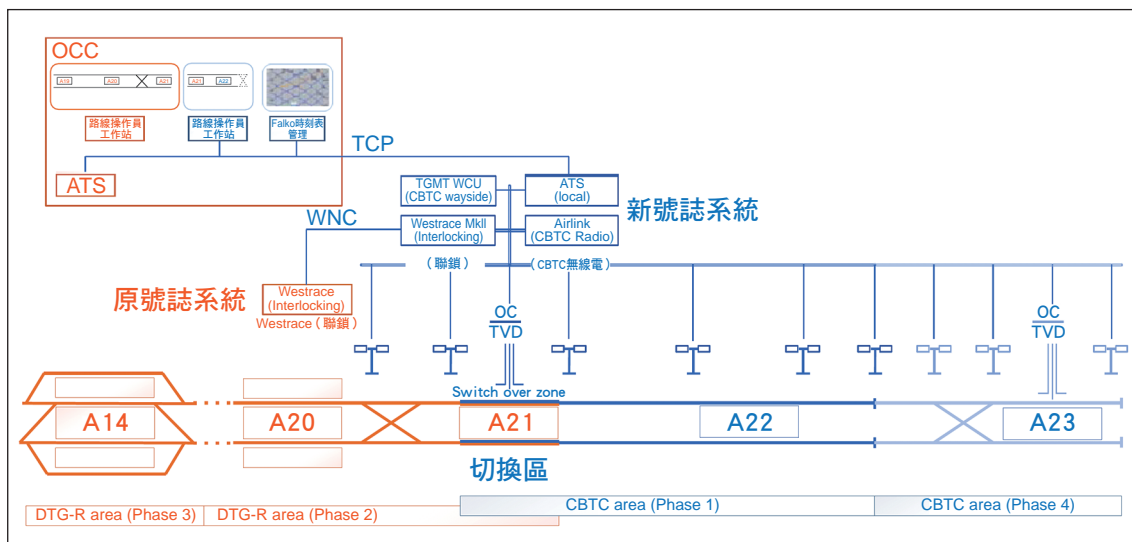


圖 4 新舊（原）道旁號誌系統區域概念



(A21站以北至A1台北車站) DTG-R, 藍色區域表示新號誌系統建置範圍, 兩系統於A21站為切換區, 使列車司機員於駕駛室得以手動切換於新舊號誌系統之間(配合上下行方向所進入之系統區域)。我們可以發現兩系統以A21站為中心, 互有重疊, 其分為信標、計軸器(新系統)、音頻軌道電路(原系統)、號誌無線電、號誌機(燈)等道旁號誌子系統。

原系統於A21站尾端取消了上下行軌原設置的往中壢端的號誌燈(以新系統號誌燈取代), 並增設6個信標(上下行各三個), 以利列車從A22站往A21站進站時原車載系統能預先定位。而新系統為因應A21站的車載系統切換, 前置佈署了號誌無線電、計軸

器、信標, 也是為了幫助新系統於列車往A21站進站前即能檢知列車並開始定位。

(三) 系統為中心的觀點

前述等段落說明了道旁與車載為中心之觀點, 續以本案號誌全架構總括全貌, 俾利對本案系統有整體之認識, 該架構分別以顏色區別, 如下圖5:

淺灰色為舊號誌系, 與新號誌系統主要有3項界面, 分別為:

1. 新系統班表(Falko 班表編輯器產出)透過 Rail 9000 (ATS) 的自動列車調度(ATR)向舊號誌系統ATS 導入班表。

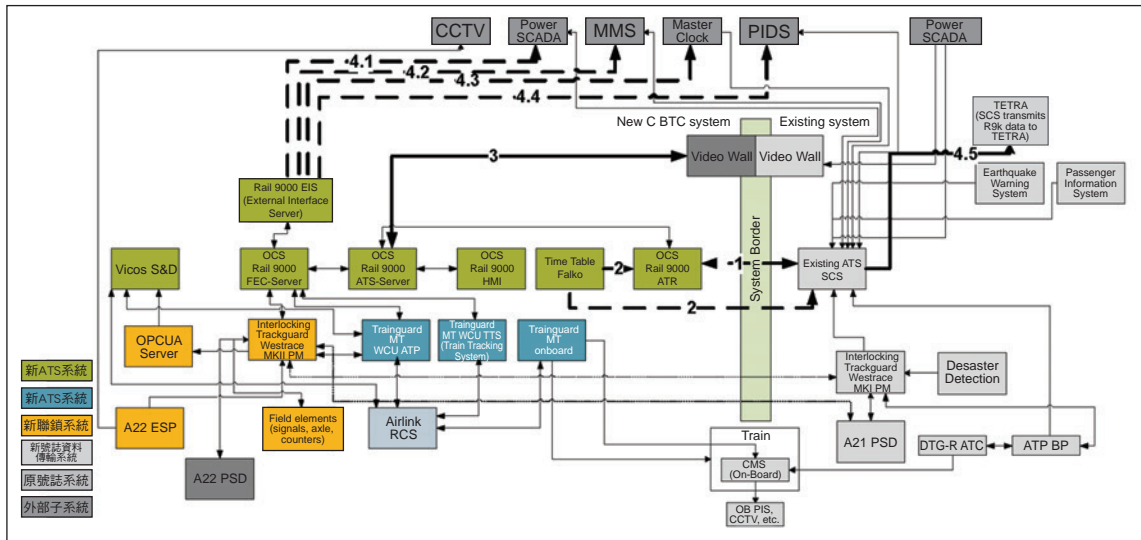


圖 5 新舊(原)號誌系統整體架構暨外部界面關係圖

2. Falko 產出的班表能對新舊系統同時使用。
3. Rail 9000 (ATS) 亦將全線車隊圖像化資料傳送至 OCC 投影與控制員工作站監控，達成人機界面功能。

深灰色為外部系統（圖中4.1/4.2/4.3/4.4，影像監視、SCADA、維修管理、子母鐘、旅客資訊系統等），其亦透過Rail 9000作為界面功能管理。新號誌系統由四色表示，綠色為ATS，多位於OCC作為車隊監督功能，黃色多屬於道旁聯鎖設備，上可聯繫行控ATS設備，下達通訊車載號誌（藍色），車載ATC與道旁皆有ATP功能達成安全保障，而淡藍色（Airlink）設備為號誌無線電，做為系統專用通訊通道。此外行控中心（OCC）於本案預計以相同新舊並存方式升級，唯班表將以新編輯器（Falko）取代舊有編輯器（HASTUS）產出之班表，班表為通用格式，因此新舊系統皆可讀取新班表指揮列車ATO駕駛。

五、改裝列車的安全驗證測試（包括測試軌的靜、動態測試及主線測試）

（一）國際標準 IEEE 1474.4 的引用

電機電子工程師學會（IEEE）自1999年起，針對通訊式列車系統（CBTC）陸續頒布了IEEE1474系列標準，其中IEEE1474.4

通訊式列車控制系統功能測試（IEEE Recommended Practice for Functional Testing of a Communications-Based Train Control (CBTC) System）建議了一個測試範圍、流程、執行方法的規範，本節主要對其規範與本專案之驗證作業，做一說明。

下圖6為IEEE 1474.4建議之功能測試流程圖，其重點為工廠→測試軌→主線之逐步擴展概念，其靠左的流程路徑表示若設計功能已經於工廠或測試軌完全驗證，即可產出認證報告。而靠右的流程為按步執行，隨範圍與程度擴大進而增加測試項目，原則上並非一次性地全數驗證，多數專案之執行皆採取逐步方式，減低工程風險，本專案亦採相同策略。

（二）IEEE 1474.4 CBTC ATP 測試項目

接下來說明IEEE建議之CBTC測試項目，CBTC之驗證測試亦脫離不開號誌系統-自動列車控制/ATC下轄之自動列車保護/ATP、自動列車操作/ATO、自動列車監督/ATS之三個範疇，以下將測試細項依ATP/ATO/ATS分類表述：

表2之ATP功能驗證，以系統能精確掌握列車位置為核心，逐步擴大驗證加減速能力、速度/方向監督控制、速度保護曲線、移動距離限制、限速條件，再復以重要之車門/月台門之控制與安全聯鎖，外部聯鎖（列

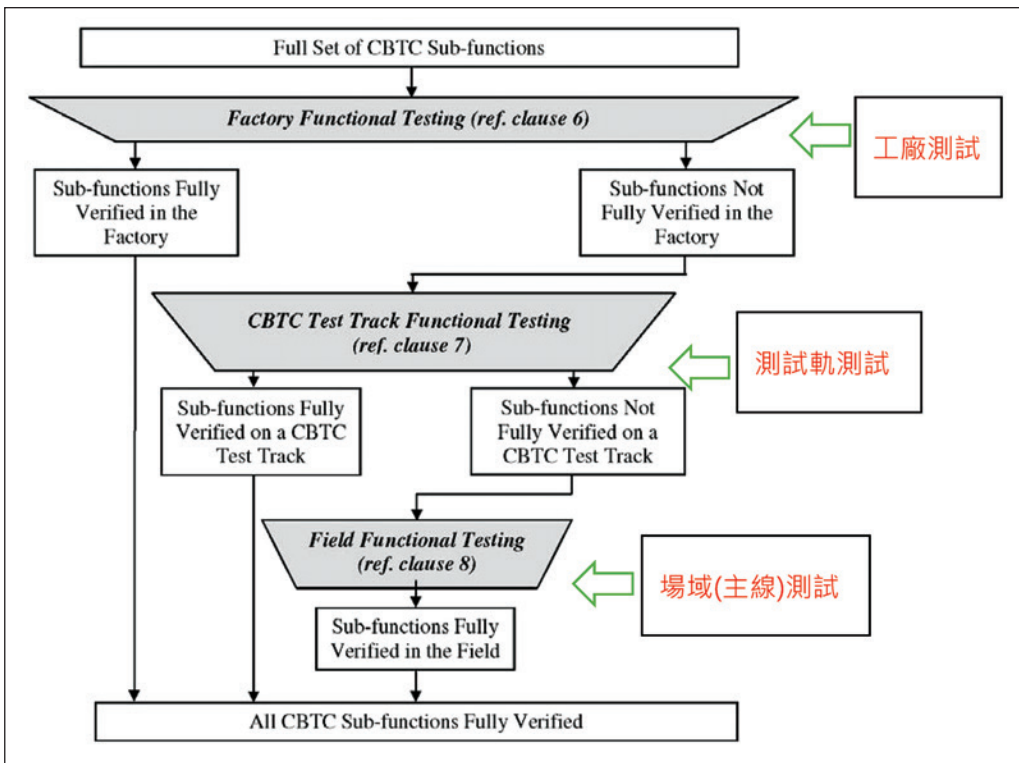


圖 6 IEEE 1474.4 CBTC 功能測試流程

車趨近、指令撤銷鎖錠)等，建立基本之 ATP 認證 (ATO 與 ATS 之系統運作皆以 ATP 為基礎，ATP 若因故障自趨安全 (fail-safe) 觸發，ATO 與 ATS 即因與 ATP 之聯鎖關係而停止)。

(三) IEEE 1474.4 CBTC ATO 測試項目

接續前述，IEEE 1474.4 CBTC 建議 ATO 測試項目如下表 3，繼掌握列車位置與速度等基本項目 (ATP) 驗證後，ATO 係以列車行車速度曲線監視控制為核心目標，擴大驗證

與月台的互動關係 (停準、開關門等)，並完成單列車的調節能力驗證。

(四) IEEE 1474.4 CBTC ATS 測試項目

最後，ATS 的驗證項目 (表 4)，係以掌握單列車全部功能為基礎後，向多列車 (車隊管理) 目標進行驗證，因此包含如各列車識別、追蹤、自動路徑 (依班表)、車隊班距調節策略、設備狀態監視管理與旅客資訊系統等。其測試項目如下表：



表 2 IEEE 1474.4 CBTC 測試細項 (ATP 項目)

IEEE 1474.4 建議 CBTC 功能測試項目表			驗證階段 (最遲)		
功能要求		說明	工廠	測試軌	主線
列車位置有關	1	CBTC train location initialization on entry to CBTC territory	→	→	→
	2	CBTC train location initialization on recovery from CBTC equipment failure	→	→	→
	3	Train length determination	→	→	→
	4	CBTC train location determination	→	→	→
	5	Position uncertainty compensation	→	→	→
	6	Parted train detection	→	→	→
	7	Occupancy status of track sections	→	→	→
	8	Protection of train with loss of train location report	→	→	→
	9	Interlocking protection with loss of CBTC train location report	→	→	→
	10	Parted train protection	→	→	→
	11	Movement of train with inoperable CBTC equipment	→	→	→
	12	Train with inoperable CBTC equipment at entry point	→	→	→
路徑安全有關	13	Occupied track ahead	→	→	→
	14	End of track	→	→	→
	15	Interlocking ahead where route not verified	→	→	→
	16	Opposing traffic direction ahead	→	→	→
	17	Blocked track ahead	→	→	→
	18	Limit of safe route	→	→	→
	19	Route status information	→	→	→
放行保護有關	20	Location of CBTC train ahead	→	→	→
	21	Limit of safe route ahead	→	→	→
	22	Broken rail condition	→	→	→
	23	Track section not confirmed safe for train travel	→	→	→
	24	Loss of switch status	→	→	→
	25	Limit of movement protection determination	→	→	→
	26	Limit of target point determination	→	→	→
	27	Permanent infrastructure speed limits	→	→	→
	28	Permanent train speed limits	→	→	→
	29	Temporary infrastructure speed limits	→	→	→
ATP	30	Temporary train speed limits	→	→	→
	31	Braking profile to target point	→	→	→
	32	Braking profile to speed restriction	→	→	→
	33	ATP profile	→	→	→
	*a	Authorized speed determination	→	→	→
	*b	CBTC train speed determination	→	→	→
	36	Speed uncertainty compensation	→	→	→
	37	Zero speed state determination	→	→	→
	38	CBTC train travel direction determination	→	→	→
	39	Supervise/enforce authorized speed	→	→	→
速度與方向監督有關	40	Include worse-case tolerance	→	→	→
	41	Supervise/enforce travel direction	→	→	→
	42	Response to more restrictive limit of movement authority	→	→	→
	43	Response to lack of updated movement authority data	→	→	→
	44	Operation beyond limit of movement protection	→	→	→
	45	Reset of emergency brakes	→	→	→
	46	Door open interlocks train doors	→	→	→
門聯鎖有關	47	Door open interlocks platform edge doors	→	→	→
	48	Departure interlock train doors	→	→	→
	49	Departure interlock platform doors	→	→	→
	50	Response to loss of train door status	→	→	→
	51	Response to loss of platform door status	→	→	→
	52	Door open interlock override	→	→	→
	53	Departure interlock override	→	→	→
	*c	CBTC equipped train approaching	→	→	→
ATP	54	CBTC equipped train approaching	→	→	→
	55	Approach locking override	→	→	→
	56	Traffic locking override	→	→	→
	57	Route locking override	→	→	→
ATP	58	Highway grade crossing warning device control	→	→	→
	59	Warning activation signal confirmation supervision	→	→	→
ATP	60	CBTC train-borne ATP display data	→	→	→
	61	CBTC train-borne ATP input data	→	→	→

- *a: 系統授權速度有關
- *b: 實際速度與方向有關
- *c: 外部聯鎖有關
- *d: 平交道監控有關
- *e: 車載 ATP 人機界面有關
- *f: 行車速度有關
- *g: 車速調節有關
- *h: 車載 ATO 人機界面有關
- *i: 列車識別有關
- *j: 列車追蹤有關
- *k: 列車路徑有關
- *l: 車隊調節有關
- *m: 車站功能有關
- *n: 列車抑制操作有關
- *o: 旅客資訊系統界面有關
- *p: 故障回報功能有關
- *q: ATIS 人機界面有關



表 3 IEEE 1474.4 CBTC 測試細項 (ATO 項目)

IEEE 1474.4 建議 CBTC 功能測試項目表				驗證階段 (最遲)		
		功能要求	說明	工廠	測試軌	主線
ATO	*f 列車停準有關	62 Determine train's ATO profile	行車速度曲線	→		
		63 Determine train berthing location platform length longer than train length	確定列車停準位置月台長度長於列車長度	→		
		64 Determine train berthing location platform length supports multiple berthing	確定列車停準位置月台長度支持再停準作業	→		
		65 Determine train berthing location platform length shorter than train length	確定列車停準位置月台長度短於列車長度	→		
	*g 門操作有關	66 Train entry into station platform	列車進站	→		
		67 Train speed regulation	列車速度調節	→	→	→
		68 Door opening train doors	列車車門開啟	→	→	→
		69 Door opening platform edge doors	列車車門開啟 - 月台門	→	→	→
		70 Door closing train doors	列車車門關閉	→	→	→
		71 Door closing platform edge doors	列車車門關閉 - 月台門	→	→	→
		72 Train door operation disable (with no platform edge doors)	車門操作失效 (無月台門)	→	→	→
		73 Train door operation disable (with platform edge doors)	車門操作失效 (有月台門)	→	→	→
		*h	74 CBTC train-borne ATO display data	車載 ATO 資訊顯示 (CBTC)	→	→
	75 CBTC train-borne ATO input data		車載 ATO 資料輸入 (CBTC)	→	→	→

*a:	系統授權速度有關
*b:	實際速度與方向有關
*c:	外部聯鎖有關
*d:	平交道監控有關
*e:	車載 ATP 人機界面有關
*f:	行車速度有關
*g:	車速調節有關
*h:	車載 ATO 人機界面有關
*i:	列車識別有關
*j:	列車追蹤有關
*k:	列車路徑有關
*l:	車隊調節有關
*m:	停站功能有關
*n:	列車抑制操作有關
*o:	旅客資訊系統界面有關
*p:	故障回報功能有關
*q:	ATS 人機界面有關

表 4 IEEE 1474.4 CBTC 測試細項 (ATS 項目)

IEEE 1474.4 建議 CBTC 功能測試項目表				驗證階段 (最遲)		
		功能要求	說明	工廠	測試軌	主線
ATS	*i	76 CBTC operating train identification	營運列車識別 (CBTC)	→		
	*j	77 CBTC ATS train tracking	ATS 列車追蹤 (CBTC)	→		
	*k	78 Route train automatically	自動列車調度	→	→	→
		79 Route train manually	手動列車調度	→	→	→
	*l	80 Automatic dispatching	自動派車	→	→	→
		81 Schedule/headway regulation	時刻表 / 班距調節	→	→	→
		82 Service brake adjustments	一般煞車調節	→	→	→
		83 Junction management	混合路線管理	→	→	→
	*m	84 Energy optimization	耗能優化	→	→	→
		85 Enforce stop at next station	過站不停 (下站停車)	→	→	→
		86 Hold at station	月台候車	→	→	→
		87 Bypass station	過站不停	→	→	→
	*n	88 Inhibit automatic door operation	自動開門抑制	→	→	→
		89 Stop immediate	立即停止	→	→	→
		90 Temporary speed restrictions	臨時速限	→	→	→
		91 Route/section blocking	路徑 / 區段鎖錠	→	→	→
	*o	92 Work zones	工作區域	→	→	→
		93 Wayside passenger information message triggers	道旁旅客資訊系統觸發	→	→	→
*p	94 Train-borne passenger information message triggers	車載旅客資訊系統觸發	→	→	→	
	95 Failure and out-of-tolerance condition reporting	故障與超出容許狀態回報	→	→	→	
*q	96 Train health data reporting	列車狀態回報	→	→	→	
	97 ATS display data	ATS 顯示資料	→	→	→	
	98 CBTC input data	CBTC 輸入資料	→	→	→	

*a:	系統授權速度有關
*b:	實際速度與方向有關
*c:	外部聯鎖有關
*d:	平交道監控有關
*e:	車載 ATP 人機界面有關
*f:	行車速度有關
*g:	車速調節有關
*h:	車載 ATO 人機界面有關
*i:	列車識別有關
*j:	列車追蹤有關
*k:	列車路徑有關
*l:	車隊調節有關
*m:	停站功能有關
*n:	列車抑制操作有關
*o:	旅客資訊系統界面有關
*p:	故障回報功能有關
*q:	ATS 人機界面有關

(五) 本案 CBTC 測試策略與流程

介紹完IEEE 1474.4之測試項目後，接下來為本專案之測試介紹，其流程架構（如下圖7），測試軌扮演重要角色，由於本案為營運中路線之新建延伸線，附帶了不同號誌系統與車載號誌的兩系切換，其新設系統勢必在既有營運條件下施工，有穿著衣服改衣服的意味，而列車作為貫穿新舊系統的載體，勢必於測試軌須能極大化的模擬主線驗證測試，從而降低改裝後的列車來往於主線的驗證所產生的營運與維護衝擊。

本專案之CBTC系統測試驗證策略，著重

於測試軌階段，與IEEE 1474.4相較，對於月台門相關之驗證測試（門聯鎖、門操作）方面，IEEE 1474.4之最遲驗證可於主線階段再完成，而本專案由於營運特性，為減低主線營運與維修衝擊，於是在測試軌增加月台門模擬器，驗證號誌系統端的相對聯鎖關係，餘下的實體月台門系統端互動聯鎖驗證，待安排主線之界面測試，依此策略，以期大幅降低對營運與維修的衝擊影響。另由於本號誌系統為雙系建置（於A21站切換），因此也必須將測試軌之號誌設備雙重化（新舊系統皆有），使列車於中間虛擬月台（測試軌共有三虛擬月台）得以執行車載號誌系統切換驗證，減少主線驗證負擔。

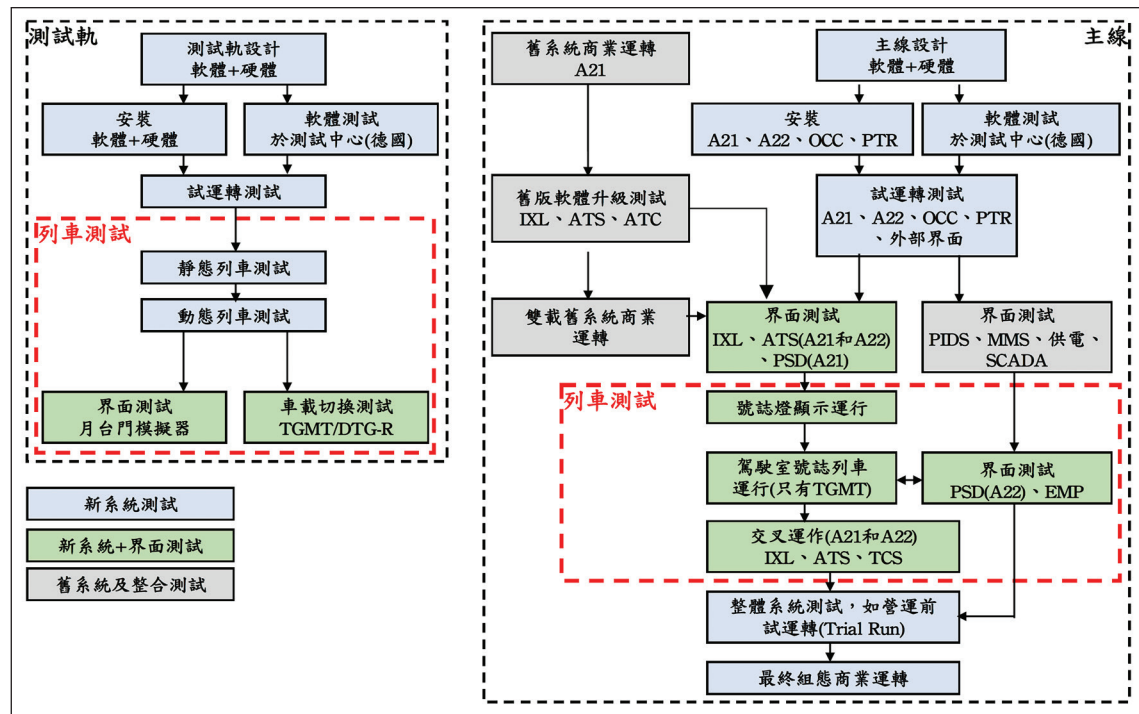


圖7 本專案 CBTC 功能測試流程



(六) 本案 CBTC 測試範例

下圖8為本案CBTC車載號誌驗證範例，里程計量驗證。該範例為CBTC核心中項目，精確列車定位要求的基礎，也就是系統能掌握列車的精確移動距離。

本測試要求列車在大於90米（設定X、Y兩點間，建議大於100米，其間無信標）的區間以手動恆定速度駕駛（20公里/時），使不確定度可控。其後，檢查車載號誌主單元/OBCU內的紀錄值，測試期間不能有車輪打滑、空轉、緊急煞車等狀況（要求精度6米內）。

(七) 本案 CBTC 測試項目

下表5為本案後續規劃之CBTC測試項目，屬於測試軌與主線階段的項目，至於工廠階段的項目已於先前廠測中執行，並有該原廠所洽第三方單位執行獨立安全評估（ISA Independent Safety Assessment），故本表所展現的項目較IEEE 1474.4為少，但不影響安全要求。

針對表列項目，打叉部分係因本案區域目前無轉轍器，因此轉轍器相關之測試皆不適用，而本測試著重三部份：


Identifier	#TDB001
Title	Odometry quality
Objective	To verify the quality of the onboard odometry
Description	<p>Train driving in RM mode passes a balise located in X moving towards Y direction at a 20km/h constant speed, keeping the uncertainty under a given threshold.</p>  <p>When distance between X and Y is over 90 m train can stop and check results on log files on both OBCUs.</p> <p>It is recommended to perform this test in an interstation area where balises are separated by distances > 100m.</p>
Preconditions	<p>Wheel diameter updated to real value.</p> <p>Train is localized at starting position X.</p> <p>No balises under the train between X and Y.</p> <p>Smooth traction/brake to avoid slip/slide,</p>
Validity	<p>Uncertainty remains below the maximum expected uncertainty: 6 m.</p> <p>No slip/slide indication on DMI.</p> <p>No train delocalization indication on DMI.</p> <p>No EBs.</p>

圖 8 本案 CBTC 車載號誌驗證範例 / 里程計量驗證

表 5 本案規劃之 CBTC 測試項目

本案規劃之 CBTC 功能測試項目表		NA	門	熱備援	外部聯鎖	其他
1	里程計驗證					O
2	列車定位					O
3	月台緊急停車按鈕功能		O			
4	月台門與列車聯鎖性 (進站)		O			
5	月台門與列車聯鎖性 (出站)		O			
6	月台門與列車聯鎖性 (對向月台)		O			
7	月台門與列車聯鎖性 (異常隔離)		O			
8	列車進入主線驗證 (放行授權) A21-A22				O	
9	列車離開主線驗證 (回收授權) A22-A21				O	
10	列車進入聯鎖區驗證 (IXLT) 本案目前無轉轍器設置	X				
11	列車離開聯鎖區驗證 (IXLT) 本案目前無轉轍器設置	X				
12	車門、月台門同步驗證		O			
13	列車重新取得授權驗證 (速度碼)					O
14	道旁緊急停車按鈕驗證 (50M)		O			
15	道旁異常停車驗證 (轉轍器離線等 / 本案目前無轉轍器設置)	X				
16	車載號誌熱備援驗證 (OCN 車載號誌通訊網路)			O		
17	車載號誌熱備援驗證 (前 OBCU)			O		
18	列車超速後緊急停車驗證 (SM)					O
19	列車超速後緊急停車驗證 (RM)					O
20	列車超速後緊急停車驗證 (TSM)					O
21	月台 / 車門可開啟 (RM 模式)		O			
22	車門與車載號誌聯鎖 (車門開啟無法出發)		O			
23	月台 / 車門重複開啟 (RM 模式)		O			
24	折返路徑保持 (轉轍器區域)	X				
25	車載號誌熱備援驗證 (後 OBCU)			O		
26	月台門異物排除後列車放行驗證		O			
27	道旁熱備援驗證 (ECC 網路 / 電子聯鎖)			O		
28	道旁熱備援驗證 (WCU / 道旁通訊)			O		
29	道旁熱備援驗證 (ECC 控制單元 / 電子聯鎖)			O		
30	車載號誌熱備援驗證 (車載號誌無線電)			O		
31	備援 ATS (行控)					O

1. 於測試軌模擬月台門相關設備之車載號誌聯鎖關係驗證。其中項目3、4、5、6、7、12、14、21、22、23、26皆與月台門有關係，而月台緊急停車按鈕、月台門各種樣

態與列車門聯鎖關係、開關門同步、月台門異物排除等因必須與實體月台門測試，故須於主線安排。



2. 號誌設備的熱備援驗證（項目16、17、25、27、28、29、30）。
3. 主要是外部聯鎖與速度有關的功能驗證與其他（項目1、2、13、18、19、20、31）。

六、結論

機場捷運延伸線雖只是往南延伸兩個車站，然而誠如上述的說明，我們可一窺整個工程的複雜性，其中最大的挑戰，在於新舊系統界面整合上的問題，新的號誌系統與原有號誌系統、電聯車、TOCP（列車駕駛通訊器）等等的界面整合是否順利，係此專案成敗重要的關鍵課題。

新號誌車載軟體的開發是一項非常棘手的工作，需考慮新號誌系統（德商西門子）與原有號誌系統（英商西門子），就號誌聯鎖 WESTRACE MK I & MK II間進行相互的確認，即使都是屬於西門子集團的號誌系統，但其間的溝通協調仍需透過雙方簽訂的協議書（agreement）據以執行；另外車載控制迴路的設計，原有號誌系統是以硬線設計為主，而新的號誌系統則以軟體設計為主的概念，都增加了設計上的困難度。同時還要與現有電聯車廠商（日本川崎重工），針對原有電聯車的設計參數進行討論，待所有參數條件逐一獲得確認後，方可進行後續新號誌系統的設計與軟體的開發，在維持原車載號誌

系統功能不變的條件下，讓新的車載號誌系統能共存共融於同一列車上。

從一開始向桃捷公司撥用的首列改裝電聯車開始，工程團隊即展開對原有車輛的拆卸與安裝及控制迴路的可行性評估，因為號誌系統的設計部門位於德國西門子，又因受新冠疫情的影響，西門子在台的現場工程師，只能透過遠端的視訊作溝通，將在現場量測的尺寸及可使用的空間，一點一滴傳回遠在德國的設計單位，甚至連現場要如何改裝的施工方式，都需逐一的反覆確認，這些新增設備的安裝位置、空間均需要設計出獨特的支撐支架，才能配合現場實際的條件進行安裝。

期間德國西門子也陸續指派國外有經驗的改車機電專家抵台，以協助解決改車遇到的難題，當新的車載號誌系統軟、硬體均順利的改裝完成，必須先於青埔機廠內測試軌進行靜動態測試，再於主線上進行新增路段及車站的靜、動態測試，以取得獨立安全驗證。正如文章一開始所述，此計畫的挑戰是國內捷運界的工程首例，於國外捷運實務案例也非常少見，見證這一路走來的心路歷程，期藉由本文的經驗分享，讓業界對於捷運號誌系統能有更深一層的了解。

參考文獻

1. CDS CS 文件編號 CKS-ME06A-ODD-ESN-0001（西門子提交文件），系統架構 System Configuration。
2. CDS CS 文件編號 CKS-ME06A-DDD-ESN-0036



- (西門子提交文件), 列車特性需求 Required Train Characteristics。
3. CSDCS 文件編號 CKS-ME06A-DDD-ESN-0040 (西門子提交文件), TGMT 子系統設計參數說明 TGMT Sub-System Design Parameters。
 4. CSDCS 文件編號 CKS-ME06A-IDD-ESN-0001 (西門子提交文件), 細部界面規範 (車載) Detailed Interface Specification (On-Board)。
 5. CSDCS 文件編號 CKS-ME06A-ISD-ESN-0005 (西門子提交文件), 車載施工計畫 Method statement onboard。
 6. SIEMENS ME06A Extension Project presentation material
 7. IEEE (2011) IEEE 1474.4-2011 Recommended Practice for Functional Testing of a Communications-Based Train Control (CBTC) System



高雄輕軌一、二階 供電系統整合技術與實務

中興工程顧問股份有限公司計畫主管 / 劉智閔

關鍵字：第一階段、第二階段、BCM-NG、充電控制盤

一、前言

高雄環狀輕軌捷運建設計畫為一環繞高雄市區之輕軌環狀路網，全長約22.1公里，起於凱旋三路與一心路口北側之臺鐵前鎮調車場，沿凱旋路旁之臺鐵臨港線路廊往南佈設輕軌設施，直至凱旋四路南端終點後，右轉進入成功二路續往北行，於成功路與新光路交叉路口沿著海邊路佈設，至新田路、英雄路交叉路口處左轉，利用舊臺鐵路廊，經光榮碼頭跨越愛河至真愛碼頭，進入駁二特區，至七賢三路口轉臨海二路至捷運橘線O1（西子灣站）轉乘。路線續佈設於目前為自行車道之臨港線鐵路路廊，往北沿臺鐵園道至美術館，沿美術館路佈設，行經市立聯合醫院後於農十六銜接大順一路，再續沿大順一~三路往東南方向佈設，最後於中正路口西

南隅之凱旋公園佈設軌道銜接凱旋二路旁之臺鐵臨港線路廊後，沿路廊接回起點，預定設置38處候車站、1處駐車場及2處避車軌，如圖1所示。其中C1~C14路段（含機廠），全長約8.7公里，為高雄環狀輕軌捷運之第一階段工程；C14（不含）~C37~C1（不含）路段（含駐車場），全長約13.4公里，為高雄環狀輕軌捷運之第二階段工程。

二、一、二階供電系統相容淺談

（一）目的

進行兩階段之供電系統相容，以達成第一階段與第二階段之兩階段購置的所有列車，均能正常營運於全段（C1~C14~C37~C1）環狀輕軌路線上。



圖 1 高雄環狀輕軌捷運路線

(二) 整合及步驟之決定

1. 依照原規劃方案，需取得第一階段相關對接介面資料，並在原供電系統上進行功能之新增、修改及整合等工作。
 - (1) 第二階段路線由C15~C37站，規劃共設置六座輕軌設備室（TSS7~TSS12）。新設TSS7及TSS12至軌旁電源分別與第一

階段TSS6及TSS1銜接，適度調整軌道饋電配置，提供電力給各候車站快速充電電源供電系統。

- (2) 將第一階段既有饋電設定相關之開關聯鎖及保護電驛設定進行檢討或調整，提供電力給各候車站快速充電電源供電系統，並優化降級轉供時之軌道饋電配置。



- (3) 超級電容供電設備與其內部隔離開關、電磁接觸器及PLC控制器之相容。
- (4) 第二階段設計應參照第一階段之控制邏輯，同時第二階段每一候車站之導電軌其高度及長度亦應參照第一階段之設計規範，以確保整體供電系統與設備之相容性。確保第一階段車輛（CAF）或第二階段車輛（Alstom）進入每一候車站，超級電容供電設備及導電軌均能依控制程序順利供電至列車。第二階段將於機廠區裝設Tag，作為第二階段列車進入機廠區架空線路段轉換參考點。
- (5) 針對第二階段工程增設之供電相關設備，電力監控系統（POWER SCADA）需進行調整。

2. 但因設備專利等因素，無法順利取得完整

「第二階段整合所需第一階段系統機電文件」之各項資料，故改採下列三項步驟，以達成第一、第二兩階段列車於全段運轉的目標。

步驟一：第二階段列車於 C14（不含）~C17 路線運轉。

步驟二：第二階段列車於全段（C1~C14~C37~C1）運轉。

步驟三：第一、第二兩階段列車於全段（C1~C14~C37~C1）運轉。

（三）整合前第一階段候車站充電架構說明

- 1. 第一階段候車站設有一架空充電系統，每一軌設置兩個電流接觸器，以匯流排連接並列。如其中之一故障，則另一個供電給在充電點上的列車。充電時間大約是 25 秒。

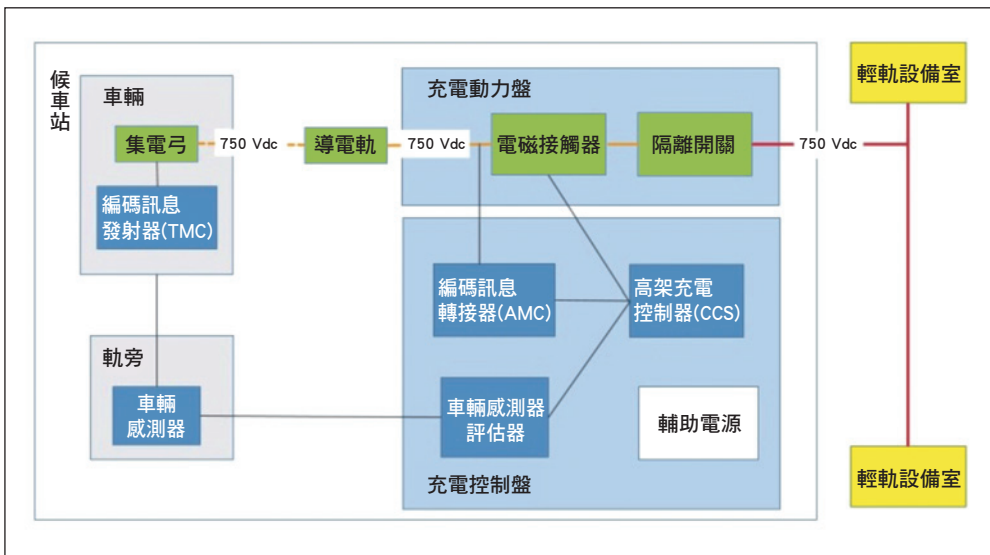


圖 2 第一階段車輛於第一階段候車站充電架構示意圖

2. TMC 是傳輸週期性的編碼訊息（大概每 50 ms），上傳訊息到 AMC，以安全偵測列車狀況，並且透過 RS-485 線傳遞至架空充電控制系統。
3. 架空充電系統透過乙太網路系統，可與行控中心及變電站進行聯繫。

（四）第二階段候車站充電架構說明

候車站設有一架空充電系統，每一軌設置兩個電流接觸器，以匯流排連接並列。如其中之一故障，則另一個供電給在充電點上的列車。充電時間大約是25秒。

列車停靠由BCM-NG檢測列車位置以及速度感測器測定距離和速度。列車一旦停

靠，BCM-NG命令集電弓向上舉弓，並向在軌道旁邊的ROCR請求電源開啟。充電滿載後（來自超級容量控制器的數據），BCM-NG向在軌道旁邊的ROCR請求電源關閉，然後命令集電弓向下回收。一旦集電弓被控制向下回收，列車則被授權離開。

（五）整合工作

為達成第一階段與第二階段供電系統相容整合，擬定三步驟並配合通車時程進度，分階段進行，依序如下說明：

1. 步驟一：第二階段列車於 C14（不含）~C17 路線運轉。

(1) 運轉方式：

- A. 第一階段列車於C1~C14運轉。
- B. 第二階段列車於C14（不含）~C17

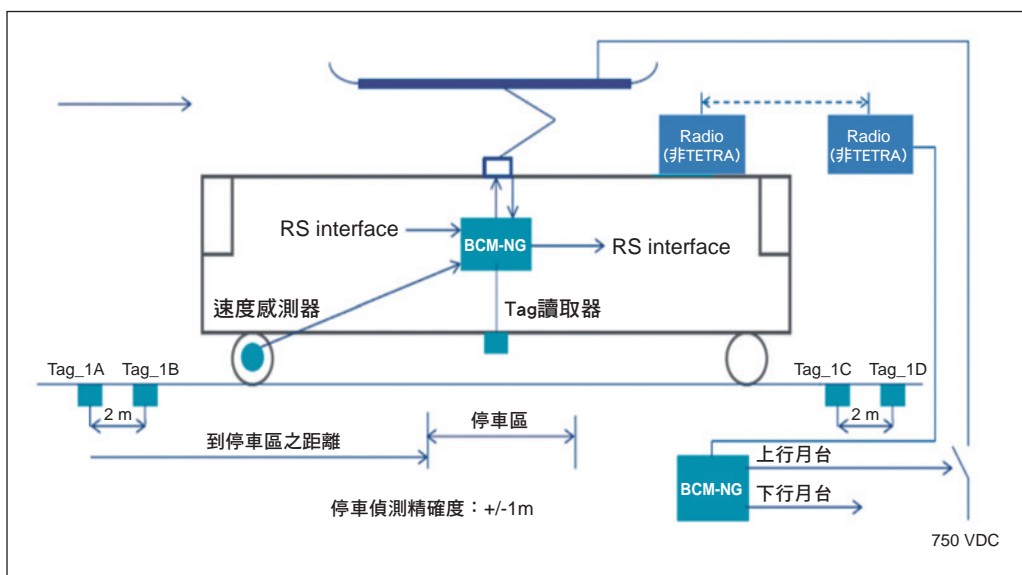


圖 3 第二階段車輛於第二階段候車站充電架構示意圖



運轉。

- (2) 第一階段TSS1至TSS6供電設備：TSS6與TSS7及TSS12與TSS1增設聯鎖控制線路及互相轉供之750V主迴路。
- (3) 第二階段TSS7-TSS12供電設備：供電設備規格與容量參照第一階段設備規格與容量設計，使第一、第二階段充電電壓及短路容量均一致。
- (4) 電力監控系統（PRC/Distributed SCADA）：第二階段將於行控中心設置第二階段電力監控（PRC/Distributed SCADA）系統，以利行控中心人員可於行控中心掌握供電系統現況，及可進行必要之操控。此時，第一階段與第二階段行控中心之電力監控將分別獨自監控。

2. 步驟二：第二階段列車於（C1~C14~C15~C17，C32~C37~C1）運轉。

(1) 運轉方式：

- A. 第一階段列車於C1~C14運轉。
- B. 第二階段列車配合通車時程進度，於C1~C14~C15~C17，C32~C37~C1運轉。

(2) 為使第二階段車輛能於第一階段充電運轉，於第一階段候車站之供電設備需進行擴充改造。第一階段車輛於第一階段候車站仍使用原控制，第二階段車輛於第一階段候車站使用新增之供電控制迴路。步驟二之供電系統架構如圖2及圖4所示。

(3) 第二階段列車於C1~C14~C15~C17，C32~C37~C1運轉，供電系統工作內容：

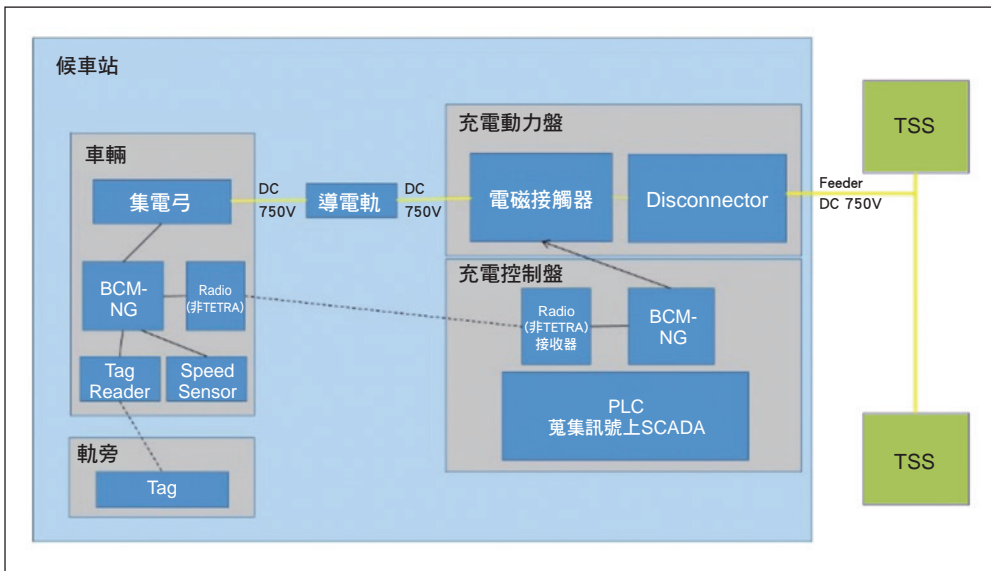


圖 4 第二階段車輛於第一階段候車站充電控制架構示意圖



- A. C1~C14候車站：
C1~C14新設BCM-NG、Radio（非TETRA）之控制盤並與既有充電控制盤並聯，來控制750V電磁接觸器盤Contactor Panel。
- B. C15~C17，C32~C37候車站及機廠：
- 新設充電控制盤有BCM-NG、Radio（非TETRA）之功能。
 - C15~C37軌旁安裝Tag，讓第二階段列車定位控制用。
 - 車輛由C36進入機廠入口處，其電車線會進行局部擴充或增設。
- C. 第一階段TSS1至TSS6供電設備：保護電驛設定檢討，配合第一、第二階段列車充電電流及運轉班距檢討調整其設定值。
- D. 電力監控系統（PRC/Distributed SCADA）：同步驟一說明。
- E. 第一階段機廠（Depot）增設Tag：在第一階段機廠（Depot）進出軌增設Tag，讓第二階段列車定位控制充電模式。
3. 步驟三：配合通車時程進度，第一階段及第二兩階段列車於C1~C14~C15~C20，C32~C37~C1運轉。
- (1) 運轉方式：
- A. 第一階段列車於C1~C14~C15~C20，C32~C37~C1運轉。
- B. 第二階段列車於C1~C14~C15~C20，C32~C37~C1運轉。

(2) 第一階段及第二兩階段列車於C1~C14~C15~C20，C32~C37~C1運轉，供電系統工作內容：

- A. C1~C14候車站：同步驟二說明。
- B. C15~C17，C32~C37候車站：一階車輛進入二階車站，採用號誌loop偵測，當loop偵測到訊號，由號誌控制盤送訊號給充電控制盤以輸出750V電力，供一階車輛充電。
- C. 電力監控系統（PRC/Distributed SCADA）：同步驟一說明。

三、系統整合技術與實務概述

(一) 供電系統一階充電控制盤改造

為能順利完成二階輕軌車輛（Alstom）行駛至一階車站（C1~C14車站）充電，乃進行供電系統一階充電控制盤改造。

1. 一階充電控制盤線路改造施工項目，內容包含有新設充電控制盤及連接線路至一階充電控制盤設備，控制二階輕軌車輛（Alstom）進入一階候車站時提供所需充電電源，並於一階候車站上方新設置數據機（MODEM）、濾波器（FILTER）、天線（ANTENNA）等設備，並連接線路至新設充電控制盤，提供二階輕軌車輛（Alstom）無線電控制傳輸，並於軌道適當位置安裝新設TAG（含BOX）設備，以提供二階輕軌車輛（Alstom）定位，如圖5。

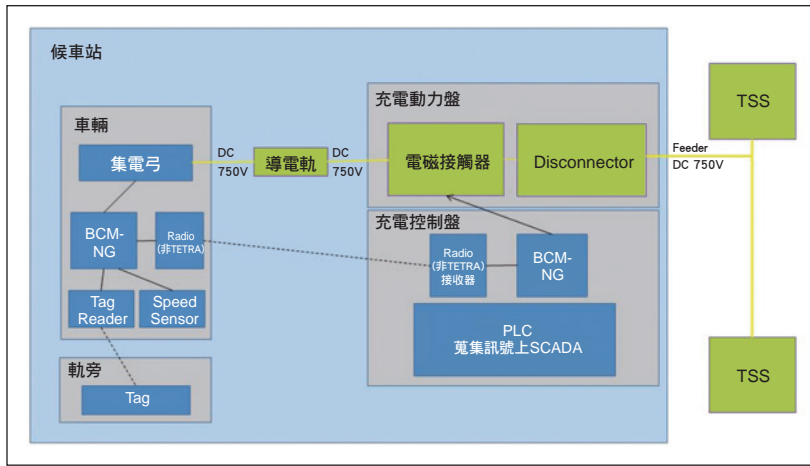


圖 5 二階車輛於一階候車站使用充電控制線路及新設充電控制盤 (MC64) 方塊圖

2. 為使高雄輕軌一、二階供電系統並行控制，使二階車輛能在一階車站充電，PLC 系統可連線至二階 PRC 系統，當發生異常時可跳脫上游的 FEEDER。故於一階每一輕軌設備室 (TSS1~TSS6) 內增設 INTERLOCK PLC PANEL，並連接線路至一階整流器 (TB01) 及一階通訊機櫃，以達到聯鎖跳脫之功能。

(二) 新設充電控制盤 (MC64)

1. 充電控制說明：

為使第二階段車輛能於第一階段候車站充電運轉，於第一階段候車站之供電設備增設充電控制盤 (MC64)，新設充電控制盤 (MC64) 與原有一階充電控制盤之充電控制線路並存。

2. 通電 (充電) 動作說明：

當二階輕軌車輛 (Alstom) 抵達候車站時，利用已識別的信號資訊 (TAG) 定位在導電軌下方，由二階輕軌車輛 (Alstom) 無線電控制系統發送訊號控制充電操作。安裝於候車站之天線 (ANTENNA) 接收訊號後，經由數據機 (MODEM) 將訊號傳送至安裝於新設充電控制盤 (MC64) 內之控制器 BCM-NG，並由控制器 BCM-NG 傳送信號經由安全電驛 (safety relay) 命令充電動力盤內之直流開關接觸器閉合，將 DC750V 電源透過導電軌傳送給輕軌列車充電。

3. 斷電動作說明：當二階輕軌車輛 (Alstom) 準備駛離車站前，車輛充滿電及車門閉鎖後由二階輕軌車輛 (Alstom) 無線電控制系統發送訊號控制斷電操作。安裝於候車站之天線 (ANTENNA) 接收訊號後，經由數據機 (MODEM) 將訊號傳送至安裝



於新設充電控制盤（MC64）內之控制器 BCM-NG，並由控制器 BCM-NG 傳送信號經由安全電驛（safety relay）命令直流開關接觸器開啟，DC750V 電源斷電。

4. 原有一階充電控制盤線路動作方塊圖，如圖 2；一階充電控制線路改造完成之動作方塊，如圖 4。

（三）一階充電控制盤整合改造工作完成後之整合測試

1. 調查並測試車站月台車站充電控制開關盤之電磁接觸器動作及上游變電站 HSCB 互動聯鎖。
2. 調查及確認電壓轉換器、電流轉換器、保險絲之規格。
3. 操作緊急按鈕及 DISABLE 開關確認各電磁接觸器之作動情形。
4. 勘查電纜路徑及安裝方式。
5. 勘查車站充電控制開關盤輔助電力設備容量。

（四）供電系統 TSS6 加入 C15~C17 候車站之整合測試

驗證供電系統功能之測試項目為以下

三項：

1. TSS6 與 C15~C17 候車站充電之傳輸跳脫測試。
2. TSS6 N02 保護跳脫測試。
3. TSS6 送電測試。

四、結論

目前配合通車時程進度，已完成第一階段及第二兩階段列車皆能於 C1~C14~C15~C20，C32~C37~C1 運轉。

為了確保高雄環狀輕軌捷運全線運行順暢，在有限資訊下，整合改造不同的機電系統，進行系統整合測試，使能夠完全配合運作及相容，並驗證不同機電系統之間實現互相協調功能，以及提供一個將來全線輕軌運輸營運的優良環境，期盼完善捷運路網，以交通建設串聯各產業園區，促進高雄經濟發展。

參考文獻

1. 中國鋼鐵股份有限公司高雄環狀輕軌捷運建設（第二階段）系統相容計畫。
2. 中國鋼鐵股份有限公司高雄環狀輕軌捷運建設（第二階段）系統整合測試計畫。
3. 中國鋼鐵股份有限公司高雄環狀輕軌捷運建設（第二階段）供電系統一階充電控制盤改造計畫書。
4. 中國鋼鐵股份有限公司高雄環狀輕軌捷運建設（第二階段）候車站充電控制盤。



軌道養路工程車之智慧化應用

中興工程顧問股份有限公司技術經理 / 廖正堅、黃劉乾
中興工程顧問股份有限公司專案工程師 / 施瑞潮、鄭文龍、楊忠哲
交通部臺灣鐵路管理局工務處處長 / 王兆賢
交通部鐵道局北工處處長 / 郭林堯

關鍵字：養路機械、軌道檢測車、超音波探傷車、鋼軌研磨車、砸道車、軌道全斷面檢測儀、石碴分佈檢測儀、軌道構件健康度檢測儀

摘要

因應國內軌道運輸已走向高速化、舒適化及高乘載運量為前提，其軌道養路作業品質勢必應有相對應之效能提升。本文將依據軌道系統（例如鋼軌、軌枕、鋼軌扣件、石碴與路基等部位）養路作業所需，針對相對應軌道養路工程車輛之作業概述、功能、用途及智慧化應用進行探討，期望未來導入養路作業智慧化後，除了使國內整體軌道養路效率及品質提升外，亦能讓軌道運輸走向更為安全、快速、舒適與高品質目標。

一、前言

軌道交通系統是大眾運輸的主動脈，綿

延的路網與軌道是各式軌道車輛行駛的道路，肩負車輛運行安全的重責大任，要達成此項任務，維持軌道結構的健康狀態是首要條件；無論白天或夜晚，南來北往的列車完成旅客與貨物運送的服務，也對軌道結構產生持續的負載與破壞，到了夜間收班後，則輪到各類型軌道養路工程車上場作業，在黎明前努力地將路軌條件回復到最適行駛狀態。

過去軌道養路作業是依據週期時間、行駛里程等要件排定養路計畫，同時運用相關的維修資訊系統，做簡單的數據統計分析，但隨著運量逐步提升、安全意識提高與服務舒適需求增加，導入先進科技以有效提升軌道養路工程車的作業功能與效率，朝向智

慧鐵道發展，是各鐵路營運機關的理想與目標。國內軌道養路作業發展趨勢，如圖1所示，早期的養路作業型態除了執行已排定的養路計畫外，面對突發性狀況多是以問題點發生後的現況對策為主，主要在探究「過去發生甚麼事」；現在的養路作業型態，除了對策現況問題點外，同時也探究問題點發生的原因，著重於「目前正在發生甚麼事」與「這件事為什麼發生」兩個面向；未來的養路作業型態，除了面對與對策當下發生的問題點外，同時須結合已逐漸發展成熟的智慧化、數位化與網路平台架構，跳脫傳統各自獨立封閉的系統邏輯，將重點聚焦在「未來發生甚麼事」，朝預測性或預防性維修的目標邁進。

面對未來國內軌道養路作業的發展趨

勢，作為第一線的各類型軌道養路工程車勢必要同步朝向智慧化架構作設計精進，才足以面對整體養路作業性能與效能面的提升；養路工程車的智慧化應用目標如圖2所示，包含「準確判斷問題點真因」、「達到預測性或預防性維修目的」、「延長維修周期與降低養路頻率」、「降低養路人力與提升作業效率」；其達成方式主要藉由搭載於各型態養路工程車上之影像辨識設備、超音波設備、雷射或各式感測器裝置，頻繁且大量的將軌道結構現場資訊擷取並回傳至大數據資料庫，再透過後台資訊技術分析與計算後，提醒養路人員進行相對應的路線維修與校正，利用高科技輔助降低重複性高且耗費人力與時間的例行巡查，避免人工巡檢的判斷誤差，同時以科學數據找出問題真因並對症下藥，節省故障排除的時間與可能的虛耗人力，減少

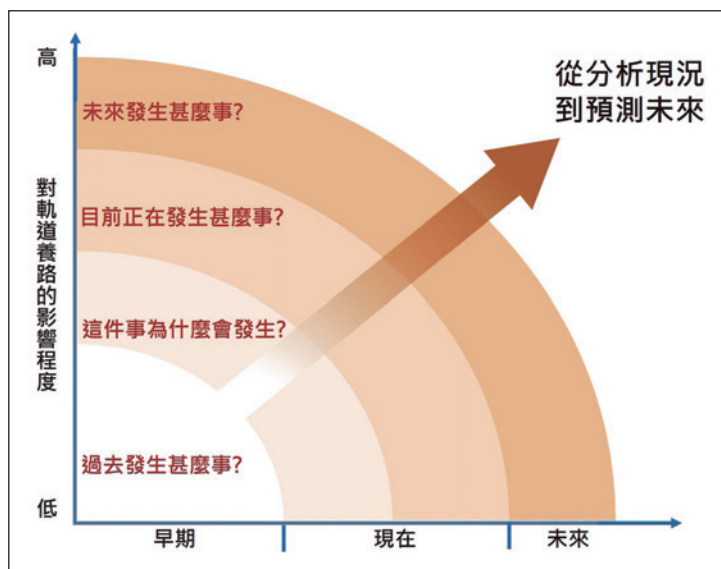


圖 1 國內軌道養路作業發展趨勢

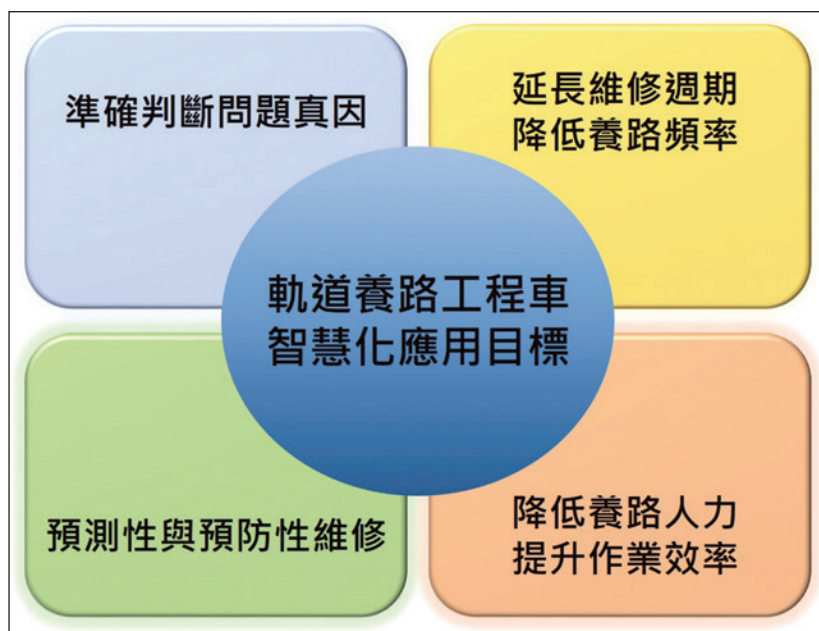


圖 2 軌道養路工程車智慧化應用目標

以人工經驗判斷或紙本紀錄的作業方式，以提升整體養路作業效能。

二、軌道系統對於大眾運輸系統的重要性

大眾運輸系統係指運用平面、高架或地下隧道等建設，提供都市或鄰近城市、鄉鎮地區間運送大量旅客之公共運輸系統，其具有固定路線、班次、車站與搭乘費率的營運特性，並具備快速、便捷、安全、舒適與運量大的服務特點。大眾運輸系統型態繁多，各有不同的服務特性與運輸量能，以滿足不同的使用者與使用情境需求。

近年來國內隨著「前瞻基礎建設計畫」

的推動，依據「高鐵臺鐵連結成網」、「臺鐵升級及改善東部服務」、「鐵路立體化或通勤提速」、「都市興建捷運系統」及「中南部發展觀光鐵路」等五大主軸，積極發展各型態軌道系統建設，以達成政府推動綠色交通運輸的目標與趨勢。

國內大眾運輸系統主要分為軌道系統（例如：高鐵、臺鐵、捷運與輕軌系統等）與公路系統（例如：市區公車與城際客運等）兩大類，各種運輸工具適用型態如下圖3所示：

綜觀上述，可瞭解到軌道系統的涵蓋範圍，於整體大眾運輸系統中佔有極高的運用



圖3 國內大眾運輸分類概述

比例，除了旅程距離長，總運量人次也較多，為國內大眾運輸系統路網的主要骨幹。

三、運輸安全與軌道養路之關聯性

隨著國內的經濟發展，國人生活品質提升，大眾運輸系統所提供的服務品質也必須不斷精進，尤其軌道運輸系統的行車安全性、乘坐舒適感及行駛準點率更是被關注的焦點，而影響此三項焦點最主要的原因皆指向同一個要素-軌道養路。

當軌道鋪設完成後，長時間受到營運列車不斷輾壓的行駛衝擊，以及天然因素（例如：豪雨、地震與氣溫變化等）的影響，使得軌道結構（包含：鋼軌、扣件、枕木、石碴與路基）逐漸產生劣化，若未能持續進行

軌道養路作業，使鋼軌面品質、軌道線形、扣件與枕木完整性及石碴與路基穩定度維持在規定且良好的範圍內，輕則影響列車行駛舒適性與乘坐品質，嚴重將導致列車行駛可靠性降低、準點率下降，甚至造成列車行駛事故的發生率提高。為確保列車行駛中，能夠達到安全、平穩且舒適的服務水平，軌道結構必須不斷的被監控、檢測、維修或更新，使軌道結構品質能夠保持在一定的安全標準狀態，其相關工作項目皆可稱作軌道養路作業，如圖4所示。

軌道結構品質是影響列車行駛安全的主要關鍵，軌道養路作業則是軌道結構品質維持的執行做法，而軌道養路前必須先了解路線可能的破壞原因及潛在風險，才能夠採取正確的養路措施，同時導入有效的預防方

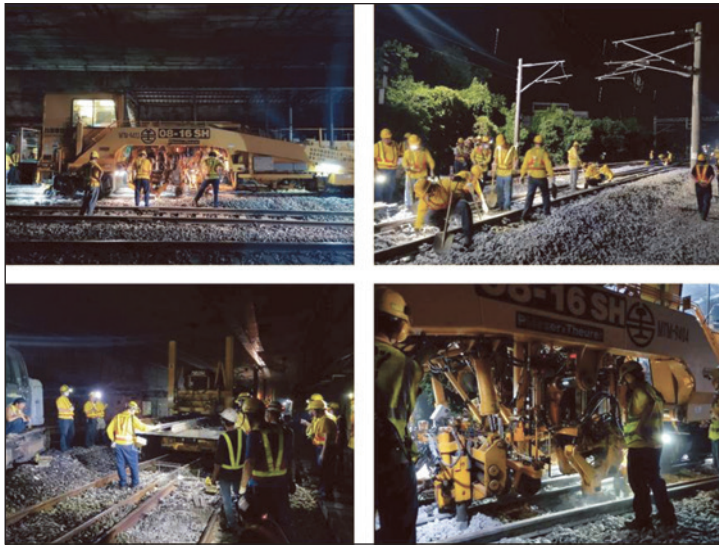


圖 4 臺鐵局養路作業實況

法，提升養路作業效能；軌道養路作業 屬於勞力密集度較高的工作，早期須倚靠大量人力以手持工具執行作業，因多數養路作業需在夜間非營運的封鎖時段完成，實際可作業時間有限，且近年來列車行駛速度與班次密集度也因營運需求而增加，故以人工為主的作業型態早已無法跟上軌道結構遭受破壞的速度；近期國內各軌道系統皆陸續導入大型養路機械（例如：砸道車、鋼軌研磨車、超音波探傷車、軌道檢測車等）作為養路作業的主力，除降低養路人力需求外，同時也大幅提高了養路作業品質與效率。

無論是人工為主的作業型態，或是大型機械化的養路作業，多數仍以軌道結構問題點發生或顯露後的現況對策為主要做法，但面對持續增加的軌道養路需求，以及日常檢

修之人力與時間不足等問題，若仍只著重於問題點的對策或硬體規格的進化，軌道養路作業效率的改善將難以再大幅提高，故軌道養路策略放眼於軌道結構問題點的預測或更為智慧化的功能運用，將是目前各式軌道養路工程車發展的主流趨勢。

四、軌道養路設備技術特點與智慧化應用

軌道養路設備種類繁多，具備的功能與技術應用各有其特殊性，但最終皆是以發現軌道潛在問題與真因、達成預防性維護、提高養路作業效率、降低養路人力需求、提升軌道安全與行車舒適性等為主要目標；本文包含7種不同的軌道養路設備，如圖5及表1所示，養路涵蓋範圍包含鋼軌、軌枕、石碴與路基的檢測、分析與作業，自鋼軌面



圖 5 智慧化軌道養路工程車與設備型態 [1-5]

表 1 軌道養路工程車智慧化應用

設備種類	智慧化應用
軌道檢測車	將非接觸光學量測系統整合為車載式，且載具由專用車輛轉為營運列車
超音波探傷車	將探傷系統裝載於一般客車，並由機車頭牽引，作為專用探傷車
鋼軌研磨車	結合其他即時偵測裝置，擷取輪軌間異常振動及噪音，實施智慧化維修
砸道車	即時擷取狀態數據，進行作業參數最佳化調整
軌道全斷面檢測儀	運用感測天線，探測路基底層結構
石碴分佈檢測儀	運用影像系統，掃描石碴分佈輪廓
軌道構件健康度檢測儀	運用雷射裝置，建立軌道構件三維輪廓

起由上而下，分別為軌道檢測車、鋼軌研磨車、超音波探傷車、軌道構件健康度檢測儀、石碴分佈檢測儀、砸道車與軌道全斷面檢測儀，以下針對技術特點與智慧化發展分別進行探討。

(一) 軌道檢測車

1. 設備用途與功能：

軌道檢測車，如圖6所示，具有量測軌道幾何、鋼軌輪廓和磨耗及鋼軌皺摺磨耗的功



圖 6 軌道檢測車 [6]

能，能整合軌道幾何、輪廓、磨耗、軌道皺摺之量測裝置以準確地分析軌道狀態，因此

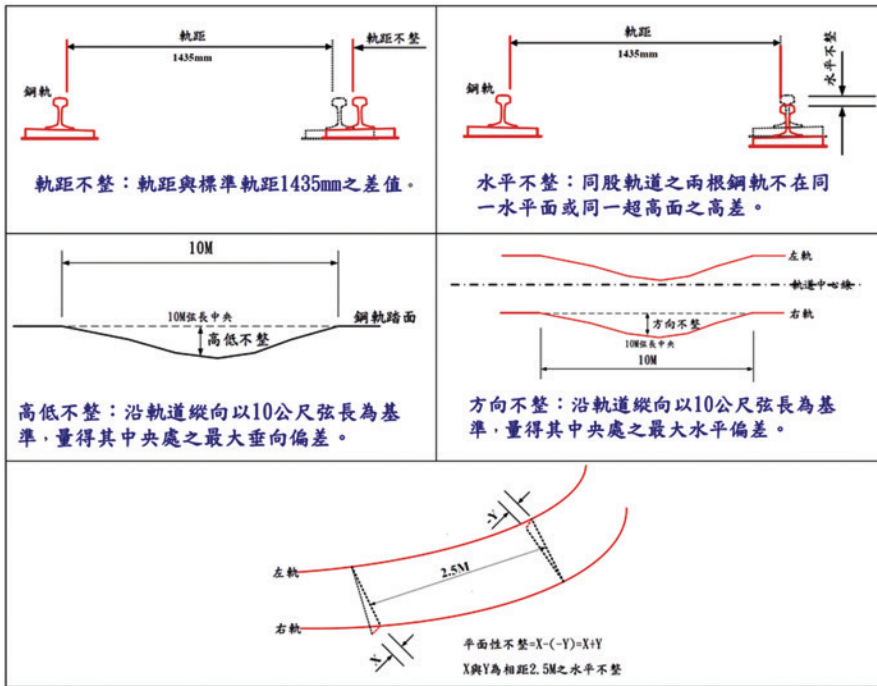


圖 7 軌道不整態樣圖 [7]

軌道檢測車主要是用以針對軌道養路維修作業中關於軌道不平整之5種檢查態樣，如圖7所示，分別是軌距不整、水平不整、高低不整、方向不整及平面性不整等之軌道維護專用車輛。

2. 作業概述與智慧化應用：

軌道檢測車的作業方式在於具有整合之量測系統，其能整合相關子系統如定位系統、軌道幾何量測系統、鋼軌輪廓量測系統、鋼軌皺摺量測系統等，並以高頻光纖匯流排將量測的資料傳送至工業電腦處理及紀錄。採用非接觸方式之光學系統組成的CMOS數位相機和雷射裝置來量測所有軌道

的參數，其配置方式如圖8所示；圖9為針對量測踏面磨耗程度、鋼軌平面下14 mm處評

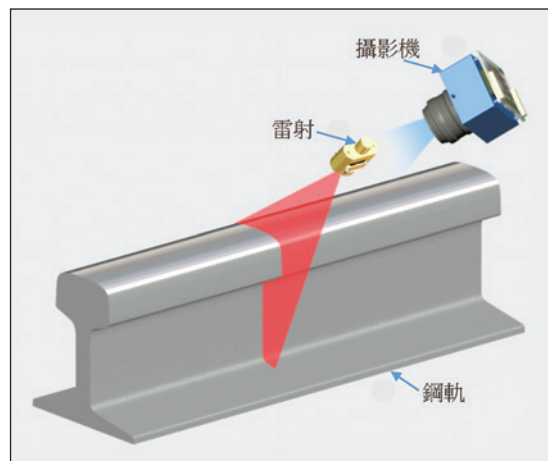


圖 8 雷射光束及相機之配置方式 [6]

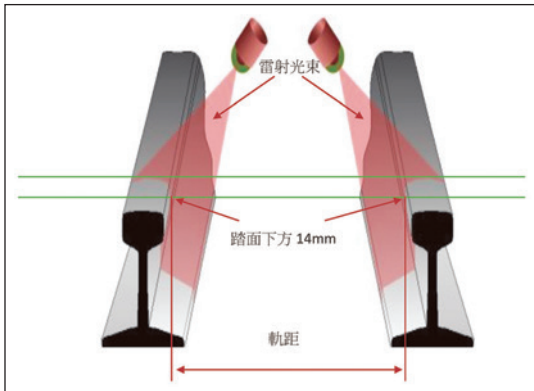


圖 9 鋼軌輪廓和磨耗量測系統設備 [6]



圖 10 車載式軌道表面裂紋測量系統 [8]

估側向磨耗程度及多點位置的磨耗程度之鋼軌輪廓量測子系統。

因鋼軌的狀態能以非接觸性檢查為之，故廠商發展出的智慧化應用為將整個光學量測系統安裝在營運列車下方，光學量測系統主要組件為雷射及照相機組，外加自行開發之數據分析應用軟體，通常整體量測系統硬體組件所需空間不大，適合整合安裝於營運列車之底盤區，形成一車載式軌道表面裂紋測量系統，能於列車運行時即能擷取鋼軌的相關訊息。

如圖10車載式軌道表面裂紋測量系統所示，其表面裂縫測量是一種用於監視軌道和車輪狀態的非接觸式技術，是一種基於鋼軌狀態的維護，並取代了傳統以時間和里程的計算來執行維修之作業模式，此種車載式軌道表面裂紋測量系統，其運行速度可以達到每小時40公里，適合定期進行鋼軌健康狀



圖 11 台灣高鐵路軌兩用鋼軌超音波探傷車 [9]

況調查。

(二) 超音波探傷車

1. 設備用途與功能：

針對軌道鋼軌因長久運行產生之缺陷所作之檢查作業，如波狀磨耗、髮絲細紋或斷軌問題等，其量測設備稱為鋼軌探傷車，如圖11所示。鋼軌探傷車採用「超音波」之檢測技術檢測鋼軌有無損傷，其與軌道檢查車差別在於此車能對鋼軌作更深層的損傷程度檢測。超音波係以非破壞性方式，利用液體



作為介質，將產生之超音波探測到鋼軌上並反射回來，並將回傳之資訊加以解析，同時產出分析報告，用以判斷並檢測鋼軌表面及深層損傷程度，確認鋼軌之健康狀態。

2. 作業概述與智慧化應用：

有關鋼軌超音波探傷設備的檢測技術，是將一定數量之超音波探頭（Probe）安裝在構件上，並具備探頭組件，作業過程中在鋼軌與探頭組件接觸面同時噴灑液體，其細霧狀液體將超音波耦合到鋼軌中，超音波依據各廠家所設計之不同探頭角度及探頭數量加以掃描鋼軌輪廓，以擷取鋼軌各部位訊息數據，並將訊息回傳到電腦及顯示器上，以供維修人員分析及資料儲存之一系列動作。

鋼軌探傷車下之超音波探頭組件其與鋼軌接觸方式，一般分為輪式（wheel type）

與滑式（靴式）（slide type）2種，如圖12所示，其安裝在裝置下方對鋼軌實施不同角度之損傷程度探測，圖13為輪式探頭之分佈與偵測範圍、圖14為輪式探頭組件構造。

針對超音波探傷設備的智慧化應用，因超音波探傷需要大量水來耦合，一般營運列車底盤無多餘空間安裝水箱，故目前為止尚無將鋼軌探傷系統安裝在客車並同時載客營運之案例，惟另有以客車改裝增加探傷系統，再由機車頭拖運方式，惟此仍視為專用的探傷車，不作為載客用。

而斷軌的偵測除了超音波探傷外，亦可以鋼軌異常之聲響或軌道電路斷開的瞬間，加以判定鋼軌有無斷軌之智慧化應用。圖15為廠商開發出便於各種軌道車輛上安裝和操作之車載型斷軌偵測系統，安裝於營運列車



圖 12 超音波探頭的類型 [1]

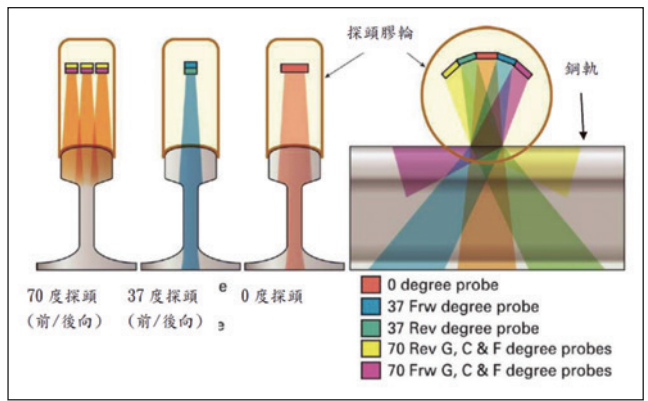


圖 13 輪式探頭分佈與偵測範圍 [1]

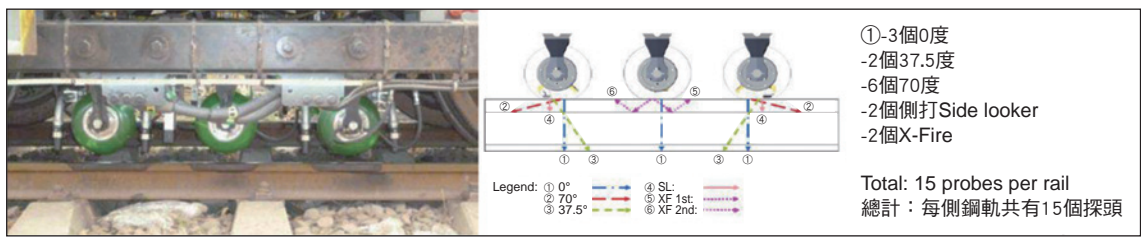


圖 14 輪式探頭組件構造 [1]

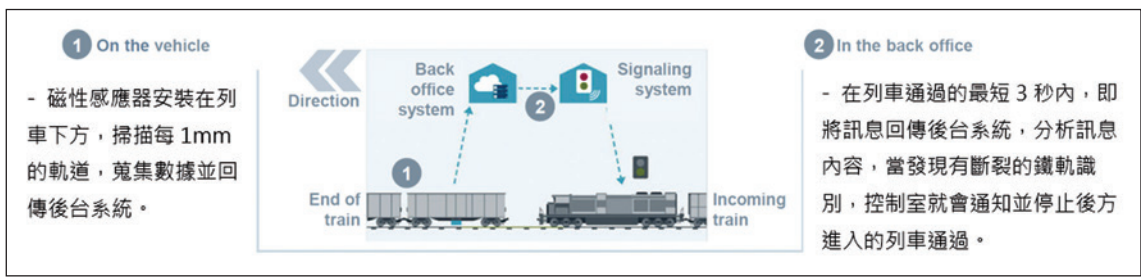


圖 15 車載型斷軌偵測系統架構 [8]

下方之感測器，能夠在軌道電路斷開之前即時識別出鋼軌斷裂之潛在風險。係使用 100 mm 內非常精確的 GPS 位置來識別導軌中的任何斷裂，以便於識別和維修。當運行的營運

列車擷取到異常訊息時，即向後台系統報告以驗證任何檢測，然後將消息傳遞到號誌系統或列車控制，以對經過定位的下一列列車立即採取措施。



(三) 鋼軌研磨車

1. 設備用途與功能：

鋼軌研磨車是以研磨方式來消除鋼軌軌頭上的各種缺陷，例如波狀磨耗、髮絲細紋、鱗狀剝落及輪擦傷等，如圖16所示。當鋼軌產生各式缺陷如波狀磨耗時，除行車舒適性降低及噪音、振動增加之外，嚴重時亦可能影響行車安全，故軌道定期養護維修是減緩前述現象之不二法門。

以鋼軌研磨車實施研磨鋼軌作業以消除鋼軌軌頭上的各種缺陷，是延長鋼軌壽命之維護方式之一，磨軌作業也是提昇行車舒適度、降低振動、降低噪音及維持運行安全之措施。

2. 作業概述與智慧化應用：

鋼軌研磨車主要是由不同數量且可變換研磨角度之磨石組成之研磨模組，來實施鋼軌研磨作業，如圖17及圖18所示，另配備有收集研磨作業中產生粉塵之集塵系統，及軌



圖 16 桃園機場捷運 L&S RGM 16 磨頭鋼軌研磨車 [10]



圖 17 研磨中的研磨模組 [10]



圖 18 鋼軌研磨作業 [11]

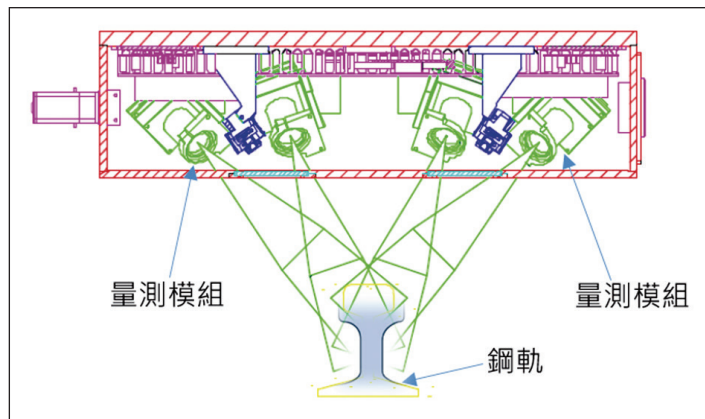


圖 19 鋼軌量測系統 [10]

道縱斷面及橫斷面之量測裝置，此量測裝置具備連續性測量，以及記錄鋼軌縱向輪廓之波狀磨耗功能，為一套非接觸式之鋼軌數據量測系統，如圖19所示。

在作業前先以量測系統針對鋼軌實施狀態數據收集，精確地測定並紀錄鋼軌軌頭之輪廓以及鋼軌波狀磨耗的幾何形狀，並於操控面板下合適之研磨指令以實施研磨作業，將軌頭之各式缺陷加以消除。

針對鋼軌研磨車的智慧化應用，因需設置集塵系統以及具作動機構之研磨系統，而客車下方並無適當空間可安裝，故鋼軌研磨作業仍需專用之特種車輛如鋼軌研磨車或鋼軌銑削車為之。惟在智慧化之應用上可朝向與其他系統（例如：道旁偵測系統）加以整合，建構智慧化軌道維修之整合思維。以高鐵為例，因其車速快，於列車上安裝可偵測異常振動及噪音現象之相關感應元件，因異

常振動及噪音亦與鋼軌的健康狀態有關，當主線上出現與鋼軌有關之異常振動及噪音時，即可在週期性維修外，出動專用之鋼軌研磨車實施鋼軌狀態維修，達到預測性與預防性維修的目的，此方式即可視為智慧化維修應用之一環，如圖20所示。

（四）砸道車

1. 設備用途與功能：

砸道車使用於有道碴軌道系統，在線路興建、線路大修和線路定期養護作業中，對一般區域軌道及道岔進行起道、撥道、砸道、水平及道床肩部夯實等作業，使軌道的線形幾何（包含：方向、橫向水平和縱向水平）可達到線路設計標準或回復至線路維修規範標準的要求，確保營運列車安全運行並提升列車行駛品質與乘坐舒適性。砸道車主要作業系統包含量測、起撥道與砸道單元，相關備置如圖21所示：

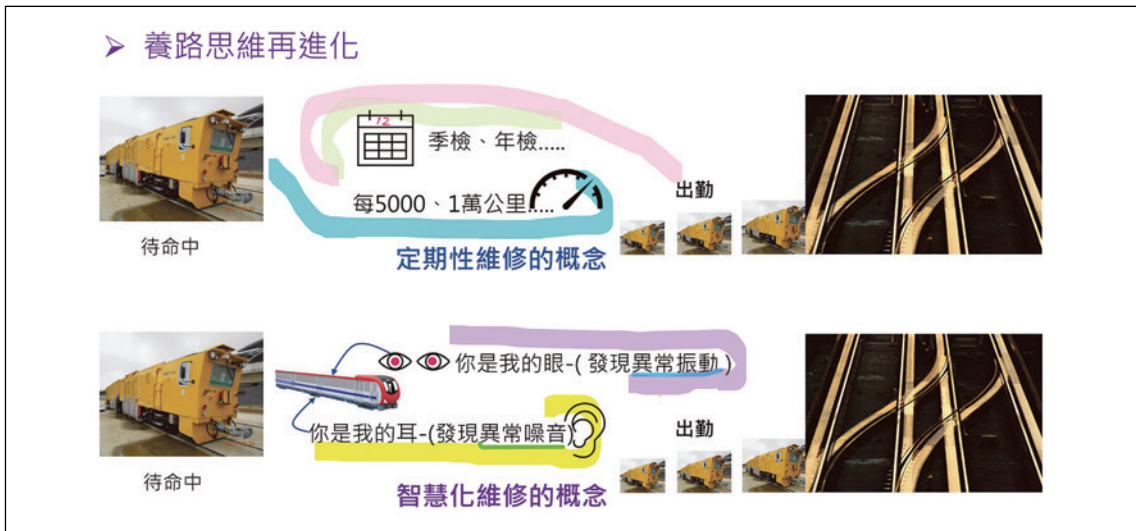


圖 20 智慧化（或預測性）維修

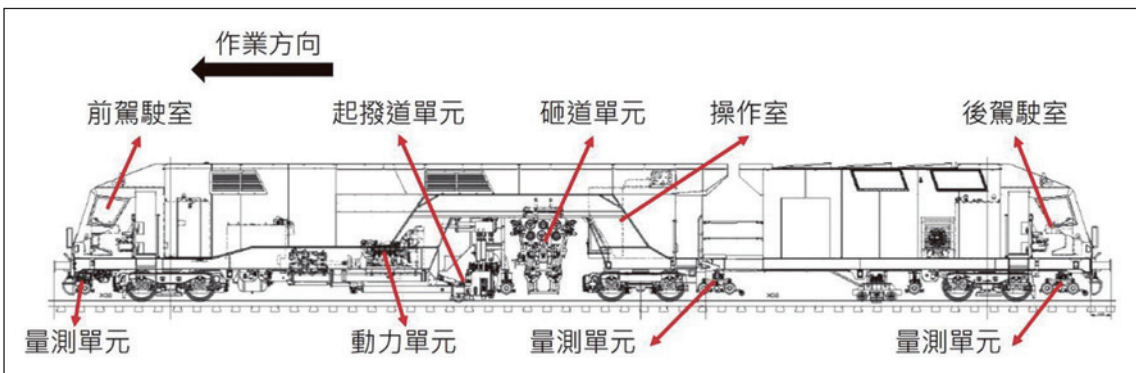


圖 21 砸道車主要系統配置圖 [3]

2. 作業概述與智慧化應用：

砸道車作業通常於封閉線路於時段進行，於作業前，砸道車在運輸模式下以自主動力或與其他機車頭連掛進入封閉區間，到達作業地點後，砸道車由運輸模式轉換為作業模式後開始執行軌道養路工作；作業時，透過車載量測單元進行實際軌道之線形數據

量測，或在已知線形資料時輸入線路的目標線形參數至運算電腦中，經系統運算後，輸出補正值供起撥道單元作動參照，同時操作人員於適當位置，依據已設定之振動頻率、振幅、砸道深度、砸鎬夾持時間與夾持壓力進行下砸動作。

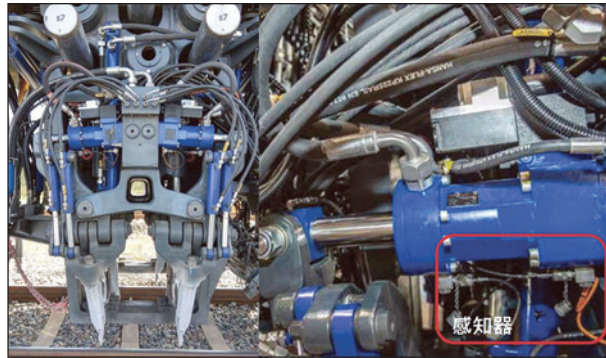


圖 22 新世代砸道單元 [3]

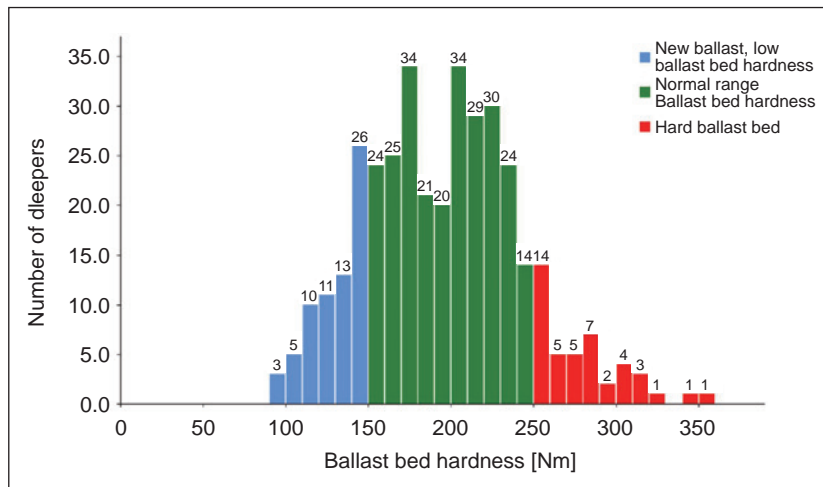


圖 23 量測數據輸出紀錄 [3]

新世代砸道單元，如圖22所示，為提升砸道作業效能與品質，透過安裝於液壓缸的壓力與位置感知器，於作業過程中同步量測壓力值與位移量，並反饋至運算電腦後即時且自動修正振動頻率、振幅、砸鎬夾持時間與夾持壓力，且能因應不同軌枕下方的石碴分佈狀況，自動進行最佳化參數設定，而不再如同早期設計，僅維持一固定參數的作業模式，將可有效提升砸道作業的品質一致性，並間接降低路線養護頻率。另外，操作

人員亦可將量測數據與作業參數彙整輸出，如圖23與圖24所示，以協助瞭解、判斷各軌枕下方的石碴狀況與可能弱點，利於道床狀態追蹤，並作為線路維護計畫排定之參考資訊。

(五) 軌道全斷面檢測儀

1. 設備用途與功能：

早期軌道養路作業型態，主要著重於已

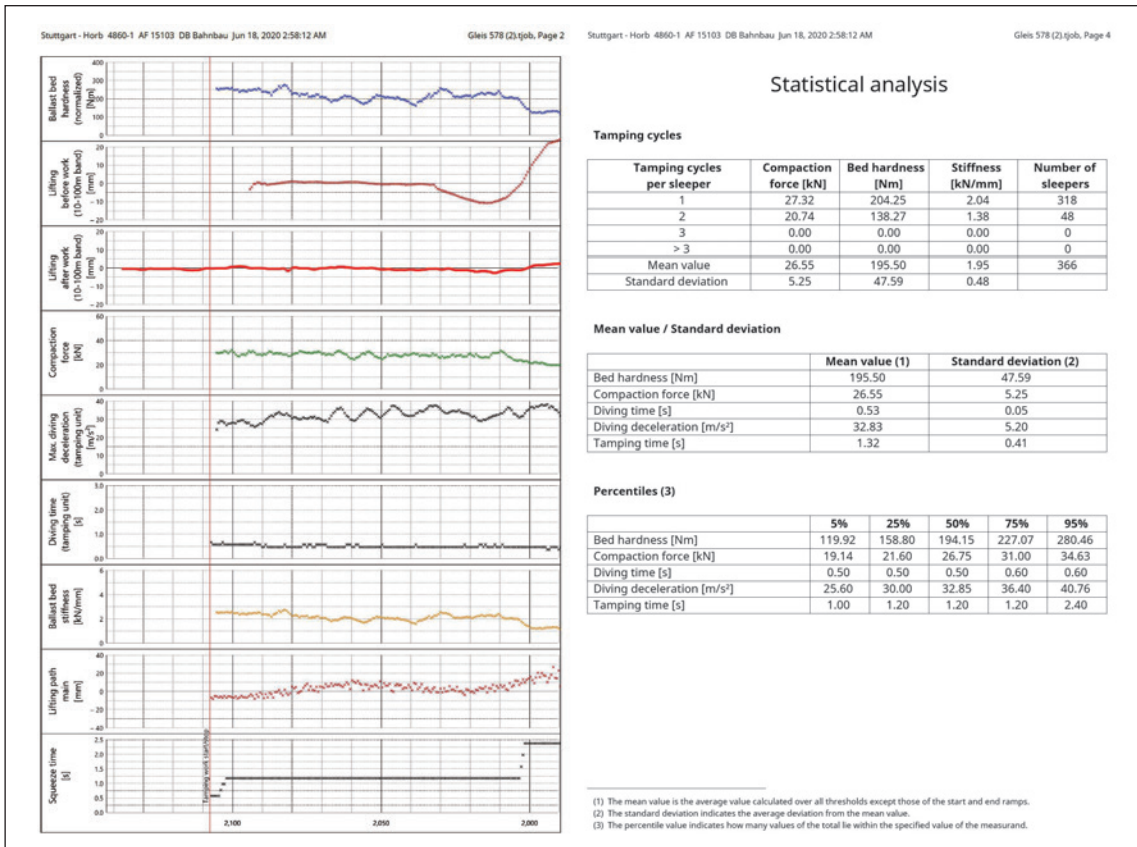


圖 24 砸道作業參數輸出紀錄 [3]

發生的問題點對策與改善，各類軌道養路工程車輛為了提高作業效率與品質，持續投入龐大的資金與時間提升設備的性能與功能，但此方式終究無法達到預防性維修的目的；軌道全斷面檢測儀可裝配於路軌兩用車或鐵路車輛，如圖25軌道全斷面檢測儀於路軌兩用車與鐵路車輛配置情形所示，其藉由完整的軌道全斷面掃描診斷，可提早發現隱藏於路基底層的結構變化問題，找出需要優先維護的熱點位置，使軌道維護人員可提前規劃養路計畫，並較為準確地匡列出養路範圍及

估計需要的作業人力與相關設備型式，避免隱藏問題造成代價更為高昂的連鎖反應，同時盡可能降低路線維護對營運的影響及避免多餘的人力浪費；軌道全斷面檢測儀主要用途及功能如下表2：

2. 作業概述與智慧化應用：

軌道全斷面檢測儀作業原理示意如圖26所示，此設備藉由配置於車輛上的感測天線，將軌道結構表面與肉眼較難察覺的軌道路基底層進行整體掃描，收集完整的軌道地

表 2 軌道全斷面檢測儀用途及功能彙整表 [4]

項目	用途及功能
1	延長石碴使用壽命
2	提升整體軌道行駛平順度
3	降低道床底層結構缺陷而引發之風險
4	準確找出問題發生點及適當的工作封鎖範圍，降低路線維護對整體營運的影響
5	確保各處的石碴與道床底層結構皆可維持在良好的維護狀態
6	找出軌道損壞的底層真因，並非只針對可觀察的表面現象與症狀進行問題對策
7	找出潛在問題，達到預防性維護的目的
8	降低路線養護成本，集中資源並明確掌握並預測何時、何地該執行養護作業



圖 25 軌道全斷面檢測儀於路軌兩用車與鐵路車輛配置情形 [2, 4]

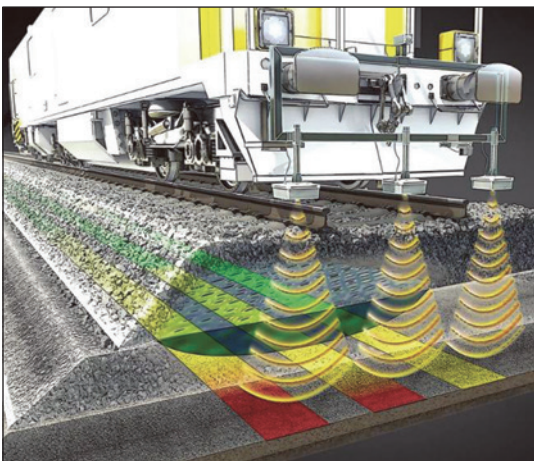


圖 26 軌道全斷面檢測儀作業原理示意 [2]

形資訊，協助確認與識別軌道路基底層的狀態及深層的問題起源。

軌道全斷面檢測儀運用400MHz的感測天線，約可收集至地下最深2.7公尺的路基資料，如特定區域需收集更深的路基資料，則可藉由低頻率（如：270MHz）感測天線達成；檢測儀裝配於鐵路車輛時，最大檢測速度約可達200公里/小時，每20公分間格點採集一次檢測數據，其檢測資訊包含石碴髒污狀態、道床相對濕度概況、軌道地形與狀

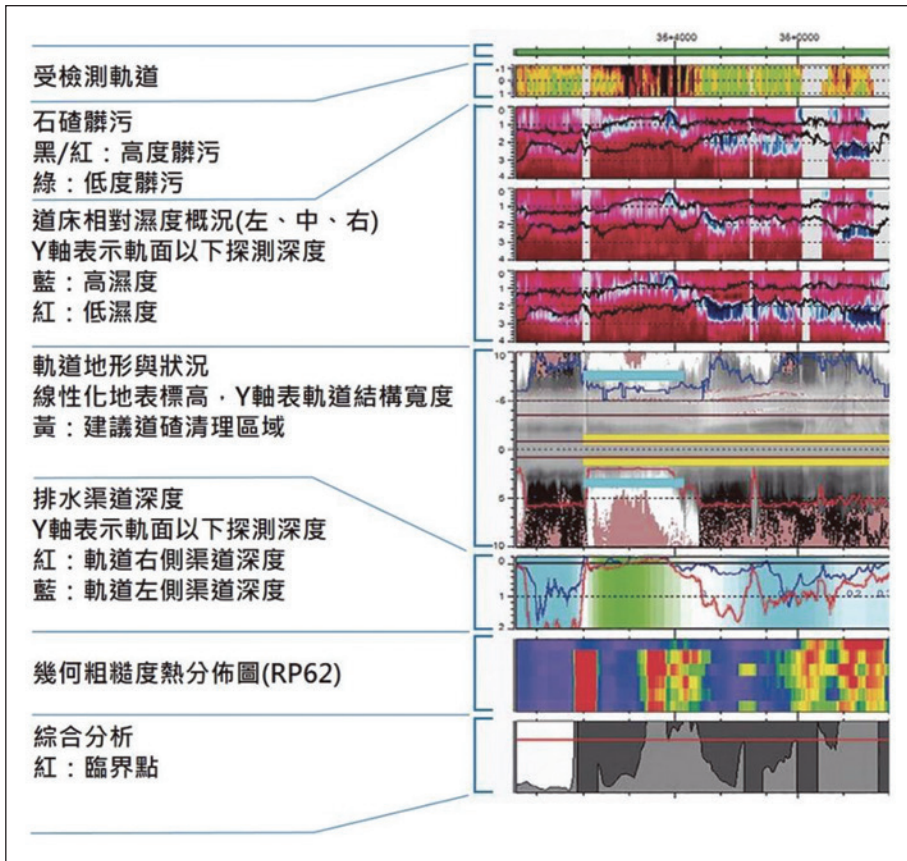


圖 27 路基底層結構健康與養護熱點分析圖 [4]

況、排水渠道深度及幾何粗糙度分佈等，如圖27所示。透過檢測資訊可較為準確地辨識路基結構健康度並找出養護熱點，若將新舊檢測資訊進行比對，也能夠藉由結構劣化情形與速率預判可能發生的問題點位置與型態，及早進行預防性的養路作業安排。實際養路作業技術層面，檢測資訊可協助養路作業人員匡列出適當作業範圍，以完整改正問題區域，同時避免過度開挖路基，造成養路資源浪費。

(六) 石碴分佈檢測儀

1. 設備用途與功能：

軌道結構中的石碴，主要功能包含將軌枕壓力平均分配至路基、吸音減振、穩固路軌與排除雨水，隨著列車不斷輾壓的行駛衝擊，石碴將逐漸被壓碎耗損，故石碴需要適時篩換或挖除，並進行補充以維持路軌穩定性，避免石碴間的多餘空隙，或不足的石碴量使軌道橫向阻力下降，導致路軌變形或位移。



圖 28 石碴分佈檢測儀於路軌兩用車輛配置情形 [4]

石碴肩部寬度與高度、軌枕端部至路肩外緣寬度、軌枕端部至石碴底緣寬度等規格，依據路線分級、曲線半徑與鋼軌型式等因素而有不同尺寸標準與碴肩斷面組成，且各路軌區段石碴耗損率不同，需要的補碴量也會有所差異；藉由石碴分佈檢測儀，如圖28所示，可先行估算路軌何處需進行補碴，及需要補充的石碴量，將可提升養路作業工作效率。

2. 作業概述與智慧化應用：

透過搭載於車輛的影像系統，掃描擷取檢測路段的實際石碴肩部輪廓，並將檢測數

據與該路段石碴肩部設計輪廓進行比對後，顯示出兩者輪廓差異，同時計算應有的補碴量與應補碴位置，如圖29所示；軌道養路作業人員可運用該數據規劃後續養路計畫，例如估算需要調派的石碴斗車數量、需運用的大型養路機械種類、大型養路機械作業區段範圍、養路人員調派數量與整體作業時間預估等。

檢測數據除了可作為養路計畫參考條件外，亦可結合GPS定位及石碴斗車自動閘門進行智慧化補碴作業，如圖30所示；依據不同區域位置應有的補碴量，適當調節石碴斗車卸碴量，使石碴分布更為均勻，以降低後續大型養路機械或人工整碴時間。

(七) 軌道構件健康度檢測儀

1. 設備用途與功能：

本檢測儀具備軌道系統構件（例如：鋼軌、軌枕、軌枕扣件及石碴區域）之檢測與健康度分析機能，主要由軌道量測/感測器

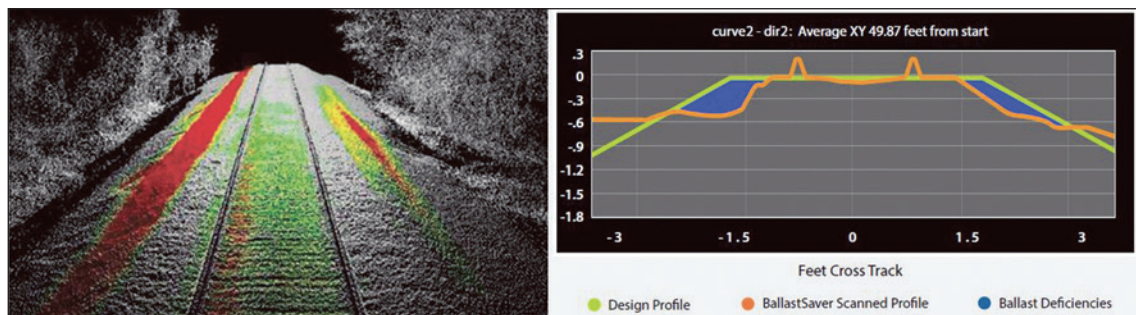


圖 29 石碴分佈檢測顯示 [4]



圖 30 智慧化補碴作業 [4]



圖 31 軌道構件健康度檢測儀於路軌兩用車輛配置情形 [5]

表 3 軌道構件健康度檢測儀用途及功能彙整表 [5]

項目	用途及功能
1	可以有效地檢視、即時掃描與分析於路線上之軌枕及鋼軌扣件健康度，並產出相關檢測資訊與報告供監測與判讀
2	資料庫中皆有明確定義不同構件之健康度樣貌，經檢測儀掃描後交叉比對與計算分析，可以快速判定作業區域之路線構件健康度是否滿足安全條件
3	對於路線上存在之破損、低健康度、非預期損壞及遺失之軌道構件，可以即時定位並檢視其狀態，作為提供路線維修人員判斷維修對策之參考，達到精準對策與維修，減少路線矯正性維修之所需時間

(配置於軌道上方以及側面區域，用以建立作業區域之軌道影像用)、GPS定位接受器、計算電腦以及資料庫等構件所構成，可以掛載於具有自主動力之軌道車輛、路軌兩用車等軌道載具進行軌道相關之檢測作業，如圖31所示。其主要用途及功能如表3：

2. 作業概述與智慧化應用：

本儀器為基於雷射量測原理之軌道檢測儀器，可架設及配置於軌道專用之車輛（例如：軌檢車、路軌兩用車等…）進行軌道路線構件檢測。構造上主要結合脈衝、高功率、不可見雷射光以及同步攝影機構成，以

高解析度圖像及三維輪廓方式對於軌道路線相關構件（包含鋼軌、扣件、軌枕及石碴等）進行掃描與圖像建立，如圖32軌枕與扣件健康度與狀態檢測顯示所示，再透過計算電腦、相關資料庫及AI判讀，對於受檢測之物件進行相關健康度之比對與解析，如圖33鋼軌扣件健康度判斷方法所示為鋼軌扣件之健康度判斷方法；解析後之數據及資訊可做為判斷路線構件維修執行與否之參考。針對低健康度以及已損壞或遺失之路線構件，該檢測儀器具備精準定位及顯示其狀態，如圖34鋼軌扣件健康度低下與損壞/脫落偵測顯示所示，讓路線維護人員可依

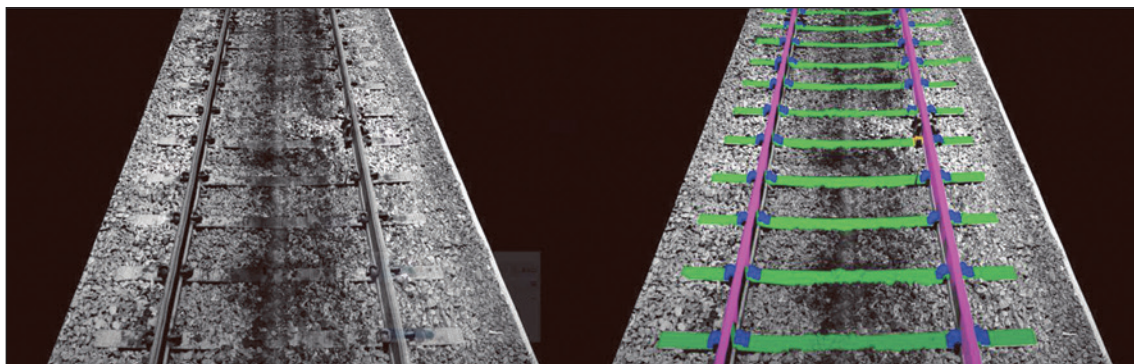


圖 32 軌枕與扣件健康度與狀態檢測顯示 [5]

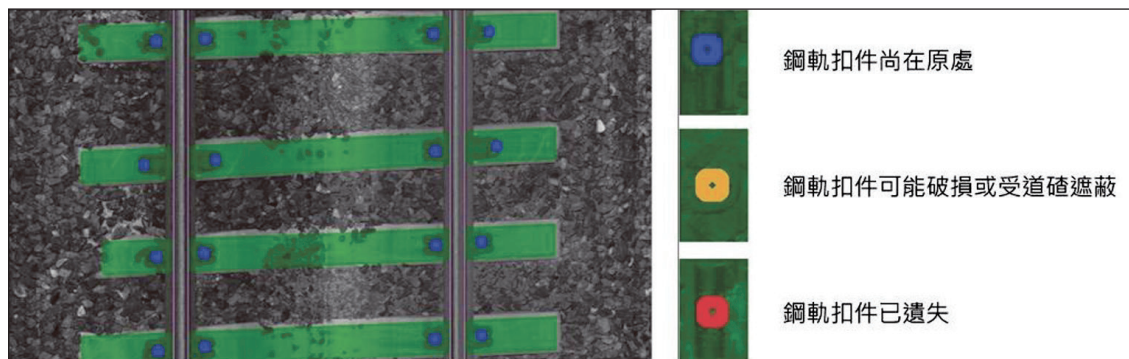


圖 33 鋼軌扣件健康度判斷方法 [5]

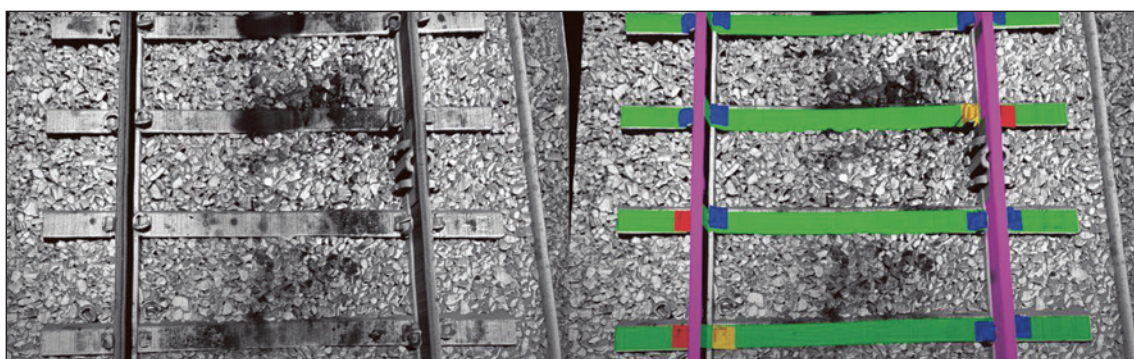


圖 34 鋼軌扣件健康度低下與損壞 / 脫落偵測顯示 [5]

情況施以所需之更換、維修以及相關養護等作業。

藉此儀器之各項數位且智慧化AI判讀以及資料庫分析，可以針對檢測過程中之路線



構件健康度提出相關資訊，若當構件發生非預期之損壞時，經掃描與分析後之相關檢測資訊與報告可以即時提供判斷損壞狀況，讓路線維護人員快速且確實地進行相對應之矯正性維修養護作業。相對於傳統人工巡軌方式可縮短更多路線養護時間，且對於路線維修方面更加精準有效率，降低不必要之營運影響與損失。

五、結論

綜觀本文所述軌道養路工程車智慧化應用，歸納以下三點結論：

（一）養路計畫排訂最佳化

早期軌道養路作業型態，著重於已發生的問題點對策與改善，並配合既定維修策略及維修計畫，依循預防性維修及故障性維修之模式，讓人員及機具之組合實施定期或臨時性維修作業，這是一種以時間和里程計算來執行維修之作業模式，例如季檢、年檢、5000公里維修等。然而，軌道維修很難確定執行此類維護任務的最佳時間，維護太頻繁，鋼軌、車輪之可用性和列車營運都會受到影響，並且浪費材料，但如果間隔時間過長，則行車安全性將受到威脅。

（二）養路能量、思維再進化

現今智慧軌道思維已逐漸廣泛運用於軌

道業各領域，與維修相關之養路機械，其各式智慧化應用也逐步向前邁進。鑒於軌道養路是一龐大、重要且耗時的工作，此項工作除需各式機具配合外，維修人員素質與能力亦是相輔相成的另一要角。各營運單位則要有整體思維，是要在利用機具之自動且大量化作業之外，如何智慧化的建構維修組織且提升單位之維修量能，亦即在維修作業效率、機具設備妥善率及系統可靠度提升上，要有完善通盤考量。

（三）養路策略精準化

軌道養路作業效能的提昇，如同性能優異的戰鬥機也要由訓練精良的飛行員來操控，才能發揮戰機最大戰力，故軌道營運單位在了解現行養路工程車之智慧化應用趨勢時，應思考人與機具如何達最佳搭配，畢竟不是將市場上最先進精良的機具買回來，即是對養路作業規劃有所交待，而應思考視需要購買適當的設備、檢視單位預算、路線型態及人力等需求，在設備購置上避免浪費，人力上則精進操作技術及強化設備維修能量，讓各項養路設備的效能放到最大。

善用各項機具功能及結合後端各式智慧化網路平台分析能量，跳脫以往各自獨立封閉系統邏輯，朝向聰明分析並預測「未來發生什麼事」，以達預防性或預測性維修目標，讓機具與人員皆可達最佳分配與使用狀態。



參考文獻

1. 美國 SPERRY 公司技術報告
2. 奧地利 Plasser&Theurer 公司技術報告
3. 奧地利 System 7 公司技術報告
4. 美國 Loram 公司技術報告
5. 加拿大 Pavemetrics 公司技術報告
6. 機場捷運計畫 - 機廠維修設備 - 軌道量測及紀錄車細部設計文件
7. 軌道工程第九章軌道養護維修課程 - 高鐵局局長朱旭
2010 年 5 月
8. SIEMENS 西門子公司產品型錄
9. TLife 台灣高鐵雜誌 -December 2018
10. 機場捷運計畫 - 機廠維修設備 - 磨軌車細部設計文件
11. 桃園捷運公司相關會議簡報資料



時分復用諧振式光纖陀螺 背向散射噪聲研究

上海 同濟大學電子與信息工程學院 信息與通信工程系 / 黃廉閔

關鍵字：諧振式光纖陀螺、時分復用、響應時間、背向散射

摘要

時分輸入復用諧振式光纖陀螺 (Time-Division Multiplexing RFOG, TDM RFOG) 通過光開關來實現光時分輸入, 使順時針 (Clockwise, CW) 與逆時針 (Counterclockwise, CCW) 光在時間上分開, 可以抑制背向散射噪聲。光開關有兩重要參數響應時間與消光比。光開關響應時間影響光纖陀螺響應時間; 消光比直接影響背向散射噪聲的大小。本文通過計算仿真得到, 光纖環行腔的精細度 F 和渡越時間 τ 對光時分輸入的影響, 精細度 $F = 88$ 和 $F = 68$ 時, 須連續注入光 296τ 和 168τ 後輸出光強可完全穩定。背向散射噪聲大小取決於消光比, 消光比時背向散射噪聲的 ARW 為 $-55.19 \text{ dB}(\circ/\sqrt{h})$; 消光比 -70 dB 時背向散射噪聲為 $-100.4 \text{ dB}(\circ/\sqrt{h})$ 。

一、引言

光纖陀螺 (Fiber Optic Gyro, FOG) 是一種由薩格納克效應 (Sagnac Effect) 產生的諧振頻率差, 來測量旋轉角速度變化的傳感器 [1]。光纖陀螺可分為干涉式光纖陀螺 (Interferometric Fiber Optic Gyroscope, IFOG) 和諧振式光纖陀螺 (Resonator Fiber Optic Gyroscope, RFOG) [2]。目前 IFOG 是相當成熟的傳感器已經應用在各個領域中, 但是 IFOG 需要超過幾千米的光纖長度才能達到 RFOG 幾十米的極限靈敏度, 這樣大大的限制了體積進一步縮小, 且由於光纖環會受溫度分布不均所引起的噪聲, 進一步限制了陀螺性能的提升, 所以 RFOG 具有較短的光纖長度、較小的體積、較大的動態範圍和集成化等等的潛在發展趨勢, 被廣泛地在各國和機構研究。在 RFOG 的光纖環形諧

振腔 (Fiber Ring Resonator, FRR) 中，會有CW與CCW的兩束光波同時在腔內傳輸，兩束光在FRR內傳輸時會有背向散射光和背向散反射光干涉主信號光；CW的背向散／反射光會干涉CCW的信號光，反之，CCW背向散／反射光也會干涉CW主信號光，所以背向散／反射噪聲是由同一時刻存在CW和CCW兩正反向光在FRR內相互傳輸干涉所致。由於，RFOG的輸出光是CW和CCW在FRR中多次環形傳輸的多光束干涉，所以RFOG需採用高相干的光源（窄激光線寬），但輸出光是由腔內無數的背向散／反射光和信號光相干疊加而成，造成噪聲和誤差增加。在RFOG中，背向散／反射是光纖陀螺的主要噪聲之一，背向散／反射噪聲基本可分為兩種：①背向散／反射光與信號光之間的干涉項②背向散／反射光的本身光強項[3]。第一種干涉項可以通過相位調製波行的電壓幅值來達到載波抑制。第二種光強項是以不同頻率調製CW和CCW，再經過同步解調來加以濾除[4]。

光開關實現光時分輸入技術可以在不使用相位調製器的情況下檢測角速度，所以光時分輸入相較於光頻分輸入在縮小成本、減小體積方面是有潛在優勢的。本文通過仿真來實現光開關的光時分輸入復用輸出RFOG結構，由光開關切換CW和CCW來抑制背向散／反射噪聲，並分析此結構的精細度 (Finesse, F)、背向散射和角度隨機遊走 (Angular Random Walk, ARW)。

二、TDM RFOG 原理

在TDM RFOG中，光開關是切換CW和CCW的時間，是整個TDM RFOG的重要元件，切換時間會因光開關的響應時間和FOG的響應時間而受限制。目前市場上的光開關已經可達到微秒量級的時間響應，所以主要切換CW和CCW的時間限制是受FOG響應時間限制。FOG響應時間是整個陀螺到達穩定所需的時間，其中FRR為FOG的核心敏感元件，所以響應時間主要以FRR響應時間為主。FRR響應時間可定義為 $f_F = F \cdot \tau$ ，其中 F 為精細度， τ 為FRR的渡越時間。如圖1所示FRR的結構圖，分析FRR響應時間對光時分輸入的影響。下面簡單分析TDM RFOG的主要參數。

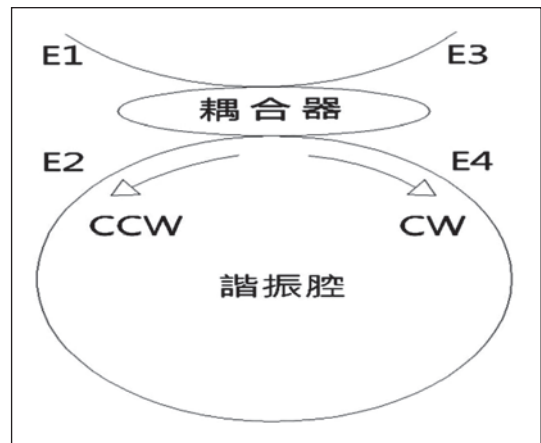


圖 1 光纖環形諧振腔結構圖

(一) 精細度指標

精細度的定義為自由頻譜寬 (FSR) 與



半峰值全寬 (FWHM) 之比, 它反映了諧振曲線的尖銳程度。在光纖陀螺中, 精細度的大小會直接影響陀螺的性能表現, 精細度值越大陀螺的靈敏度就會越高。文獻 [2] 實驗表明, 精細度會因瑞利背向散射噪聲 (Rayleigh Backscattering)、偏振波動噪聲、光源相干性、溫度所引起的誤差、克爾效應 (Kerr Effect) 等等的影響, 使得測量的精細度偏離計算值。由定義可知道精細度為:

$$F = \frac{FSR}{FWHM} \quad (2.1)$$

半峰值全寬 (FWHM) 為 FRR 的頻譜寬度為半峰值寬, 意思是功率頻譜密度的最高點往下降到一半時的頻率範圍, 也就是 3dB 頻寬。自由頻譜寬 (FSR) 為 FRR 相鄰兩個諧振峰之間的頻率範圍。FWHM 和 FSR 所對應的頻率範圍可表示為圖 2。

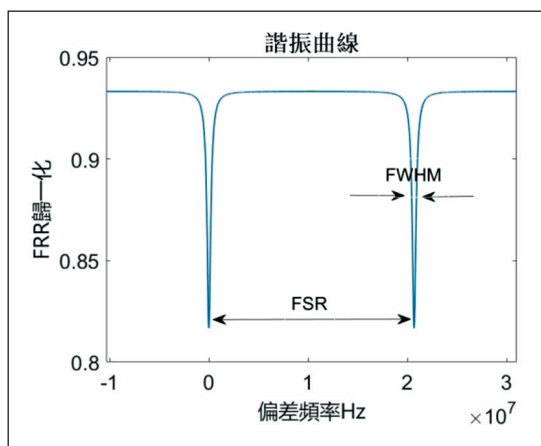


圖 2 諧振曲線示意圖

(二) 諧振腔特性

由圖 1 來分析精細度與耦合器和光纖損耗的關係。輸入光經過耦合器後, 有一部分光為 CW 和一部分為 CCW, 兩部分光會在 FRR 腔內不斷干涉後再經過耦合器輸出。

假設初始光場 E1 端口為 [5]:

$$E_1(t) = E_0 e^{i(\omega_0 t + \phi_0)} \quad (2.2)$$

式中 (2.2), E_0 初始光場、 ω_0 初始角頻率和 ϕ_0 初始相位。

E3 光場會有 E1 光場直接經耦合器輸出和 E1 光場會經耦合器再經過 FRR 後輸出。當光經光開關連續注入時間為 $t = 0$ 時, E3 的輸出光場為:

$$E_3(0) = E_0 e^{i\phi_0} \sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - K_c)} \quad (2.3)$$

當 $t = \tau$ 時, E3 輸出光場為:

$$E_3(\tau) = E_0 e^{i\phi_0} \left[\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - K_c)} - (1 - \gamma_0) K_c \sqrt{(1 - \alpha_l)} e^{i\omega_0 \tau} \right] \quad (2.4)$$

式中 (2.4), γ_0 耦合器的插入損耗、 K_c 耦合器的耦合係數和 α_l 光纖的傳輸損耗。

當 $t = n\tau$ 時, E3 輸出光場為:

$$E_3(n\tau) = E_0 e^{i\phi_0} \left\{ \sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - K_c)} - (1 - \gamma_0) K_c \sqrt{(1 - \alpha_l)} \sum_{q=0}^{n-1} \left[\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - K_c)} - (1 - \gamma_0) K_c \sqrt{(1 - \alpha_l)} \right]^q e^{i\omega_0(q+1)\tau} \right\} \quad (2.5)$$

E4 光場由 E1 光場經耦合器後在 FRR 腔內不斷干涉。當光經光開關連續注入時間為 $t = 0$ 後，E4 腔內剩餘光場為：

$$E_4^r(0) = E_0 e^{i\phi_0} \sqrt{(1-\gamma_0)K_c} \left[\sqrt{(1-\alpha_l)} + \sqrt{(1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l)^2} e^{i\omega_0\tau} + (1-\gamma_0)(1-K_c)\sqrt{(1-\alpha_l)^3} e^{i\omega_0 2\tau} + \dots \right] \quad (2.6)$$

當光經光開關連續注入時間為 $t = \tau$ 後，E4 腔內剩餘光場為：

$$E_4^r(\tau) = E_0 e^{i\phi_0} \sqrt{(1-\gamma_0)K_c} \left[\sqrt{(1-\gamma_0)} \sqrt{(1-K_c)(1-\alpha_l)^2} e^{i\omega_0\tau} + (1-\gamma_0)(1-K_c)\sqrt{(1-\alpha_l)^3} e^{i\omega_0 2\tau} + \sqrt{((1-\gamma_0)(1-K_c))^3} e^{i\omega_0 3\tau} + \dots \right] \quad (2.7)$$

當光經光開關連續注入時間為 $t = n\tau$ 後，E4 腔內剩餘光場為：

$$E_4^r(n\tau) = E_0 e^{i\phi_0} \sqrt{(1-\gamma_0)K_c(1-\alpha_l)} \times \left[\sqrt{((1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l))^n} e^{i\omega_0 n\tau} + \sqrt{((1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l))^{n+1}} e^{i\omega_0(n+1)\tau} + \sqrt{((1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l))^{n+2}} e^{i\omega_0(n+2)\tau} + \dots \right] \quad (2.8)$$

當光連續注入時，可由 (2.5) 式和 (2.8) 式得到，E3 輸出端口的光強和 E4 端口的諧振腔內循環光強：

$$\left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2 = (1-\gamma_0) - \left(\frac{(1-\gamma_0)\gamma_0 K_c}{\sqrt{(1-K_c)(1-\alpha_l)}^2 + 4\sqrt{(1-\gamma_0)} \sqrt{(1-K_c)(1-\alpha_l)} \sin^2(\pi f_0 \tau)} \right) \quad (2.9)$$

$$\left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = \frac{(1-\gamma_0)K_c}{[1 - \sqrt{(1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l)}]^2 + 4\sqrt{(1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l)} \sin^2(\pi f_0 \tau)} \quad (2.10)$$

設 FRR 工作在諧振頻率， $K_c = 1 - (1-\gamma_0)(1-\alpha_l)$ 和 $\sin^2(\pi f_0 \tau) = 1$ 此時腔內循環光強 $|E_4/E_1|^2$ 為最大，輸出光強 $|E_3/E_1|^2$ 為零 [6]。

$$\left| \frac{E_4}{E_1} \right|_{MAX}^2 = \frac{(1-\gamma_0)}{K_c} \quad (2.11)$$

由半峰全寬的定義可知道 3dB 頻寬為 $FWHM = \frac{1}{2} |E_4/E_1|_{MAX}^2$ ，可推導出：

$$\Delta f_{FWHM} = \frac{c}{\pi n_{eff} L} \frac{K_c}{\sqrt{(1-\gamma_0)(1-\alpha_l)}} \quad (2.12)$$

式中 (2.12)， c 為光速、 n_{eff} 為光纖反射率、 L 為光纖長度。自由頻譜寬為 FRR 內發生諧振時，兩個相鄰諧振峰之間的頻率差。FSR 所對應的頻率範圍可表示為：

$$FSR = \frac{c}{n_{eff} L} \quad (2.13)$$

(2.1) 式定義可由 (2.12) (2.13) 式得到精細度：

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi \sqrt{(1-\gamma_0)(1-\alpha_l)}}{K_c} \quad (2.14)$$

透過仿真結果如圖3，精細度和耦合係數 K_c 的關係圖。精細度隨著 K_c 係數的遞減後隨之遞增。

由公式(2.5)仿真結果如圖4，在不同精細

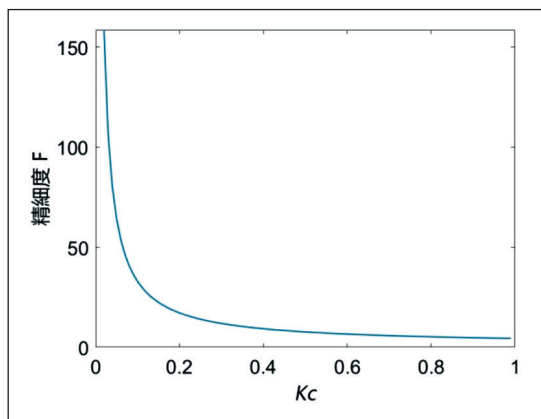


圖 3 精細度與係數的關係示意圖

度的情況下，隨著光向FRR入射時間漸漸增加，FRR的輸出光強會先減少後再增加，最終會趨於穩定。光纖精細度在88和68時，經過計算後可得當光向腔內開始連續注入時間為 $3.4F\tau$ 和 $2.5F\tau$ ，即連續注入光 296τ 和 168τ 後輸出光強與最終穩定輸出光強可完全穩定。

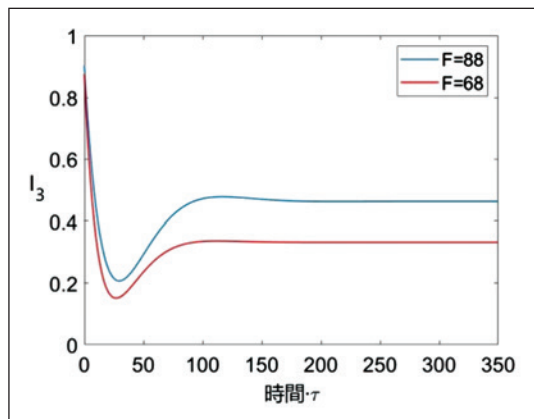


圖 4 時間對輸出光強的影響示意圖

在不同精細度的情況下，隨著光向FRR注入射時間漸漸增加，FRR的輸出也隨著光

強先減少後增加，最終會趨於穩定。上述分析可知道，光開始注入FRR後輸出光強趨於穩定的時間不論是精細度88或68，時間都不超過 $5F\tau$ 即十幾微秒左右，而市面上使用光開關的速率是在幾百微秒量級，所以只要將光開關的週期設為FRR回應時間的整數倍，就不影響陀螺的穩定輸出。

三、瑞利背向散射噪聲分析

光纖的主要材料是石英，而石英是一種無序的結構。在光纖在製造過程中會不可避免的出現材料不均勻的情況，所以瑞利背向散射是在光纖中不可避免的噪聲[7]。光在諧振腔內傳播會因為光纖長度和折射率隨環境變化而變化，因此背向散射光與信號光之間的相位差是近似隨機的。

(一) 光時分輸入的實現方法

TDM RFOG的系統結構如圖5所示，激光器發射出的光波經過隔離器再經過相位調製器後進入光開關，再透過光開關來實現CW和CCW方向上的時分輸入，之後兩束光通過耦合器進入FRR。兩束光離開FRR後，一部分通過環形器再通過探測器1後對輸出光進行同步解調；另一部分通過環形器再通過探測器2再由回饋電路來控制PZT，通過控制PZT上的電壓來調節FRR腔長，來確定CW和CCW的諧振中心頻率。CW和CCW時分輸入頻率是相同的，所以CW和CCW方向的頻率工

作點都位於FRR輸出特性曲線上的最大斜率點。

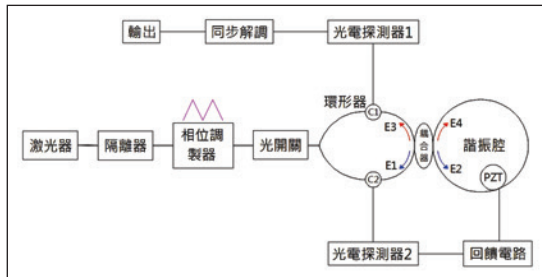


圖 5 TDM RFOG 的系統結構

透過光開關來實現光時分輸入，使CW/CCW信光和CCW/CW背向散射光在時間上分開，理論上可完全消除背向散/反射噪聲[8]，但實際工作時，光開關在切換的時候通道上仍會有信道串擾，使通道內並不只有一個方向的光，所以通道上仍有背向散/反射噪聲，且噪聲的大小直接取決於光開關的消光比[9]。由圖6來分析光開關的消光比。

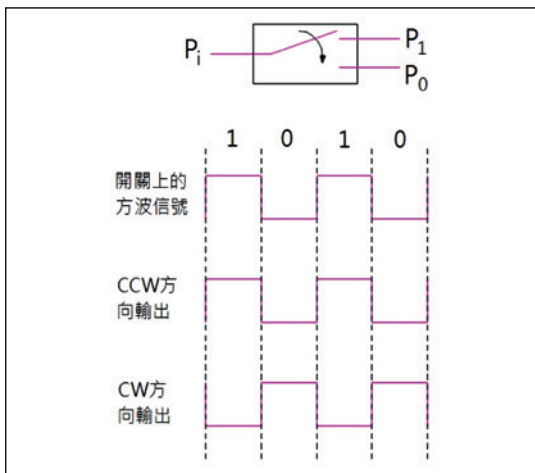


圖 6 光開關的運作原理示意圖

光開關消光比是TDM RFOG的關鍵參數，它直接影響光時分輸入抑制背向散/反射噪聲的效果。消光比為兩個端口處於 P_1 和 P_0 狀態的插入損耗之差。

$$\gamma_{on} = -10 \log \frac{P_{in}}{P_{on}}$$

$$\gamma_{off} = -10 \log \frac{P_{in}}{P_{off}} \quad (3.1)$$

$$EXT = \gamma_{on} - \gamma_{off} = -10 \log \frac{P_{off}}{P_{on}} \text{ (dB)}$$

上圖是光時分複用的工作原理，這與光頻分輸入有著明顯區別，光頻分的CW和CCW是在FRR腔內相互干涉，而光時分的CW和CCW是在FRR腔內相互交替傳輸。CW和CCW光時分複用的RFOG結構，其可直接解決Kerr效應和諧振峰不對稱誤差等問題，具有小體積和低成本優勢，且滿足RFOG慣性應用的需求。

(二) 背向散射噪聲計算與仿真

由圖5 TDM RFOG為例，光電探測器1上總電場包含了，CCW方向的信號光 $E_{ccw}(f_0 + \Delta f)$ 和CW方向的背向散射光 $\sqrt{EXT}E_{cw}^b(f_0 + \Delta f)$ 。

$$I_{PD1} = |E_{ccw}(f_0 + \Delta f) + \sqrt{EXT}E_{cw}^b(f_0 + \Delta f)|^2 \quad (3.2)$$

式中(3.2)， EXT 為光開關的消光比。

在TDM RFOG的諧振腔中，假設諧振腔內有一熔接點 z ，當光進諧振腔內時光在其中



進行多次環行渡越，每渡越一圈，都會在腔內的點處產生反射。在諧振腔內會有無數的反射點，將整個諧振腔長度進行積分處理，可得到背向散射的光場為[10]：

$$E_{cw}^b = E_0 e^{i(2\pi(f_0 + \Delta f)t)} \sqrt{EXT} \sqrt{(1 - \gamma_0)K_c} \sum_{n=0}^{\infty} T^n e^{-i\tau(2\pi n(f_0 + \Delta f))} \int_0^L \rho(z) e^{-z\alpha} e^{i\Delta\theta z} dz \quad (3.3)$$

式(3.3)， $\rho(z)$ 為位置 z 處入射場的複振幅向量， α 為強度的衰減係數， $\Delta\theta$ 為入射光與反射光的相位差， $T = \sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - K_c)(1 - \alpha_l)}$ 。

假設背向散射係數的相位是隨機的，所以忽略 $e^{i\Delta\theta z}$ 這項，以及令 $K_c = 1 - (1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)$ ，得到背向散射光的本身光強項為：

$$I_{cw}^b = I_0 \frac{EXT(1 - \gamma_0)K_c^2}{K_c^2} \frac{1}{+4(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)\sin^2(\pi(f_0 + \Delta f)\tau)} \cdot \int_0^L \int_0^L \rho^*(z_1)\rho(z_2)e^{-\alpha(z_1+z_2)} dz_1 dz_2 \quad (3.4)$$

設光纖陀螺工作在諧振曲線斜率最大處，因 $\pi(f_0 + \Delta f)\tau = \pi f_0\tau \pm \pi\Delta f\tau = N\pi \pm \pi/2F = N\pi \pm K_c/2\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)} \cdot \sin^2(\pi(f_0 + \Delta f)\tau) \approx K_c/2\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)}$ 。可改寫式(3.4)為：

$$I_{cw}^b = I_0 \frac{EXT(1 - \gamma_0)K_c}{K_c + 2\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)}} \quad (3.5)$$

$$\int_0^L \int_0^L \rho^*(z_1)\rho(z_2)e^{-\alpha(z_1+z_2)} dz_1 dz_2$$

當信號光發射到光纖長度為 L 時，將式(3.5)表示為背向散射強度改寫為：

$$\langle I_{cw}^b \rangle = I_0 \frac{EXT(1 - \gamma_0)K_c}{K_c + 2\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)}} \alpha_b LS \quad (3.6)$$

式(3.6)， α_b 為等效腔長的背向散射係數， S 為恢復因子。

在TDM RFOG最終輸出可表示為：

$$P_{TDM-out} = |E_{ccw}(f_0 + \Delta f)|^2 + EXT|E_{cw}^b(f_0 + \Delta f)|^2 \quad (3.7)$$

從光電探測器1輸出的電信號進入同步解調階段，其階段會濾除兩者乘積的所有拍頻項。

為了找到背向散射光的頻譜特性，所以需要背向散射光的功率譜密度(Power Spectral Density, PSD)。PSD與 $R_{cw}(\tau) = \langle I_{cw}^b(t)I_{cw}^b(t - \tau) \rangle$ 自我相關函數(Autocorrelation)視為一對傅立葉轉換，所以對背向散射的光場強度進行自相關的處理後在傅立葉轉換得到功率譜密度[11]。

$$S_{cw} = I_0 \frac{[EXT(1 - \gamma_0)]}{K_c^2 + 2K_c\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)}} \frac{K_c\alpha_b LS^2}{+4(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)} \quad (3.8)$$

ARW是光纖陀螺中白雜訊的一種性能指標，表徵光纖陀螺輸出的白雜訊功率譜密度

大小，功率譜密度與ARW之間的關係可表示式[12]：

$$ARW = \frac{\sqrt{S}}{60\sqrt{2}} (\circ/\sqrt{h}) \quad (3.9)$$

仿真參數如下：激光器工作波長為1550 nm、光纖有效折射率1.45、光速 $c = 3 \times 10^8$ m、耦合器的插入損耗 $\gamma_0 = 0.05$ 、耦合器的耦合係數 $K_c = 0.05$ 、光纖的傳輸損耗 $\alpha_l = 0.01$ 、光開關消光比 $EXT = -25$ dB、恢復因子 $S = 10^{-3}$ 、背向散射引起的光纖損耗 0.2 dB/km。

圖7是無抑制噪聲的仿真圖，在陀螺無轉動時，背向散射噪聲的ARW為 -30.22 dB (\circ/\sqrt{h})，由圖中可知陀螺輸出噪聲功率會先隨著頻率減少後再慢慢遞增，在頻率是1099 KHz時，有最低的ARW為 -61.6 dB (\circ/\sqrt{h})。

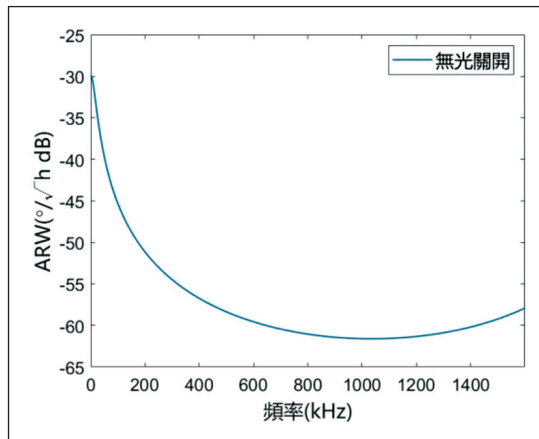


圖7 無光開關配置的 ARW 與頻率示意圖

圖8是配置光開關來抑制噪聲的仿真圖，在陀螺無轉動時， 1×2 商用光開關的背向散射噪聲的ARW為 -55.19 dB (\circ/\sqrt{h})，圖中光開

關的陀螺輸出噪聲功率也是隨著頻率先減少後再慢慢遞增。在頻率是1055 KHz時， 1×2 商用光開關地配置有最低的ARW為 -86.83 dB (\circ/\sqrt{h})。

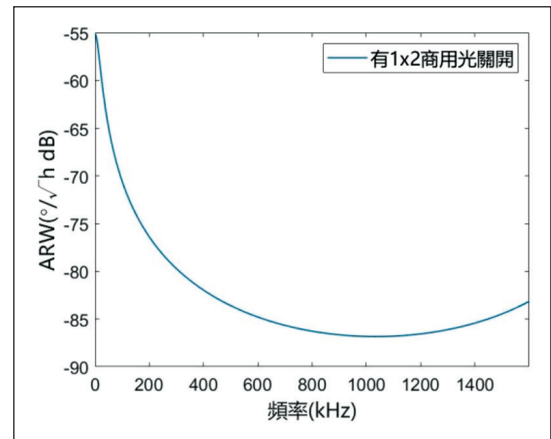


圖8 有商用光開關的 ARW 與頻率示意圖

由上可得再有光開關的配置下陀螺輸出的背向散射噪聲被抑制了不少，但對於慣性級別的陀螺要求噪聲抑制還不夠，在 1×2 光開關配置TDM RFOG的積分時間下背向散射噪聲為 1.27 nW/ \sqrt{Hz} ， $ARW = 3.02$ μ (\circ/\sqrt{h})。目前商用 1×2 光開關消光比大約在 -25 dB，若加以選用消光比更佳的光開關可以使噪聲更小。根據文獻[8]可知道 2×2 MZI (Mach-Zehnder interferometer) 光開關可達到 -70 dB的消光比，若選用 -70 dB的消光比時，背向散射噪聲的ARW可達到 -100.4 dB (\circ/\sqrt{h})。

四、結論

光纖陀螺中存在多種光學噪聲，在噪聲



中又以背向散射影響最大，這是限制陀螺精度提升的主要原因。TDM RFOG在時間上分開CW和CCW兩路光，可以有效的抑制這部分噪聲，其關鍵元件是光開關，而光開關的消光比決定串擾大小。

光開關的另一個重要參數是響應時間，目前商用光開關已達到微秒量級，所以CW/CCW的切換時間是影響FOG響應時間，其中又以FRR響應時間為主。FRR響應時間是穩定輸出需要的時間，光開關 P_{on} 和 P_{off} 時間小於響應時間，實際設計中應保證光開關的週期為FRR響應時間的整數倍。本文通過計算仿真得到，在 1×2 光開關消光比 -25 dB 時，背向散射噪聲的ARW為 $-55.19 \text{ dB}(\circ/\sqrt{\text{h}})$ ；光開關消光比在 -70 dB 時，背向散射噪聲的ARW可達到 $-100.4 \text{ dB}(\circ/\sqrt{\text{h}})$ ，在抑制背向散噪聲提高 45.21 dB ，為高精度RFOG的研製提供了新的理論參考。

參考文獻

1. 張旭琳、徐平，“諧振式光學陀螺環形諧振腔內背向反射研究”，光學學報，第29卷，第8期，2302-2307（98年）。
2. 郭麗君、王田瑞、何家杰、潘晨浩，“影響諧振式光纖陀螺精細度的因素分析”，半導體光電，第41卷，第2期，187-190（109年）。
3. Yinzhou Zhi, Lishuang Feng, Junjie Wang, and Yichuang Tang, “Reduction of backscattering noise in a resonator integrated optic gyro by double triangular phase modulation,” *Appl. Opt.* 54, 114-122 (2015).
4. Zhiguo Jiang, Zongfu Hu, and Changsong Fu, “Angular random walk limited by Rayleigh backscattering in resonator fiber optic gyros,” *Appl. Opt.* 56, 9414-9422 (2017).
5. Feng Zhang and John W. Y. Lit, “Direct-coupling single-mode fiber ring resonator,” *J. Opt. Soc. Am. A* 5, 1347-1355 (1988).
6. L. F. Stokes, M. Chodorow, and H. J. Shaw, “All-single-mode fiber resonator,” *Opt. Lett.* 7, 288-290 (1982)
7. 梅魁、蔣治國、胡宗福，“諧振式光纖陀螺的誤差及噪聲分析”，半導體光電，第41卷，第1期，29-34（109年）。
8. Zongfu Hu, Zhiguo Jiang, Jinfang Wang and Su Mei, “Resonator fiber optic gyros with light time-division input and multiplexing output in clockwise and counterclockwise directions”, *Chinese Optics Letters*, 18(03), 15-20 (2020).
9. 錢偉文、吳傳斌、林伊、馬慧蓮，“基於光開關抑制背向散射噪聲的諧振式微光學陀螺”，中國激光，第47卷，第10期，263-269（109年）。
10. 馬慧蓮、鮑慧強、金仲和，“二氧化硅光波導環形諧振腔的背向散射特性”，中國激光，第37卷，第1期，105-109（99年）。
11. P. Gysel and R. K. Staubli, “Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 8, no. 4, 561-567 (1990).
12. Hanzhao Li, Yi Lin, Lu Liu, Huilian Ma, and ZHonghe Jin, “Signal processing improvement of passive resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation-demodulation technique,” *Opt. Express* 28, 18103-18111 (2020).



Glory Diversity Family



Join us



專業製造 工程整合 E.P.C

鋼鐵廠設備
Iron and Steel Making

原料輸送設備
Material Handling System

- 連續式卸船機(Continuous Ship Unloader, CSU)
- 抓取式卸船機(Grab Ship Unloader, GSU)
- 半門型刮板式取料機(Semi-Portal Scraper Reclaimer, SCR)
- 堆取料機(Stacker Reclaimer, SR)

電廠設備
Power Plant

儲槽與壓力容器
Tank & Pressure Vessel

鑄件
Casting

軌道車輛
Rolling Stock

離岸風電水下基礎
Foundation for Offshore Wind Power

- Transition Piece (TP)
- Lower Jacket Node
- Boat Landing
- Stabbing
- Leg

天車與起重設備
EOT Crane & Lifting System

水利工程
Hydraulic Engineering

油壓缸整修與輥輪再生
Hydraulic Cylinders Repair & Roller Reclamation

CSMC 中銻機械
CHINA STEEL MACHINERY



高雄市小港區81246台機路3號
3 Tai Chi Road, Hsiao Kang, Kaohsiung 81246, Taiwan, R.O.C.
TEL / 886-7-802-0111
FAX / 886-7-802-2613
<http://www.csmc.com.tw>

中宇

卓越
誠信
技術
品質



澄清湖高級淨水處理設備工程
Chenchin Lake Advanced Water Treatment Plant



生技廠工程
Biopharmaceutical Plant



工業廢水純化場
Industrial Waste Water Purification Plant



化工廠工程
Chemical Plant



空氣污染防治系統
Air Pollution Control System

股票上市公司
ISO9001 / ISO45001

驗證通過

- 水處理及回收工程
Water Treatment & Recycling
- 汽電共生廠及發電廠工程
Co-generation Plant & Power Plant Turnkey
- 生物製劑及藥廠建廠統包工程
Turnkey Project for Biotech & Biopharmaceutical Facility
- 整廠機電及公共設施工程
Mechanical & Electrical & Utility Engineering Systems
- 廢棄物處理及空氣污染防治
Waste Treatment & Air Pollution Control
- 耐火材料工程
Refractory Engineering
- 工業級LED燈具之製作&銷售
Industrial-grade LED lighting (Production & Sales)



中宇環保工程股份有限公司
CHINA ECOTEK CORPORATION

高雄市前鎮區成功二路88號8樓
8F, NO.88, CHENGONG 2ND ROAD, CIANJIEN DIST.,
KAOHSIUNG CITY 80661, TAIWAN, R.O.C.
TEL : 07-3336138 FAX : 07-3363030
E-mail address : guest@ecotek.com.tw
Web : http://www.ecotek.com.tw



中銻集團

FUTURE IS NOW



臺鐵夢工場
販售門市

旗艦店	臺北車站1F	02-23830367
南港店	南港車站B2	02-26511417
松山店	松山車站B1	02-27474242
鳳山店	鳳山車站1F大廳	07-2358765
花蓮店	花蓮車站3F	03-8333971
臺東店	臺東車站1F大廳	089-235705



交通部臺灣鐵路管理局
Taiwan Railways Administration, MOTC.



廣告

禁止酒駕 酒後不開車 安全有保障 未滿十八歲禁止飲酒



亞新工程顧問股份有限公司
MOH AND ASSOCIATES, INC.



大地工程 | 結構工程 | 運輸工程 | 環水工程 | 專案及施工管理 | 建築、都市計劃、景觀及室內設計 | 機電工程 | 數位工程



地址：22102 新北市汐止區新台五路一段 112 號 22 樓（東方科學園區 A 棟） Website: www.maaconsultants.com
電話：(886-2)2696-1555 傳真：(886-2)2696-1166 E-mail: maagroup@maaconsultants.com



New Asia

行事穩健、態度踏實、滿足客戶需求
管理精簡、技術求新、達成永續經營



新亞建設開發股份有限公司
NEW ASIA CONSTRUCTION & DEVELOPMENT CORPORATION
台北市八德路四段七六〇號十五樓(新亞松山大樓)
電話：(02) 2528-8008 傳真：(02) 2747-7473
<http://www.newasia.com.tw>

CTCI 中鼎集團

CTCI 中鼎集團 (TWSE: 9933、TPEX: 5209、TPEX: 6803) 為國際級統包工程公司，承攬多元化重大工程。創立於 1979 年，總部位於台灣台北市，致力提供全球最值得信賴的統包工程服務。在全球逾 10 個國家設立約 40 個據點，集團員工總數約 7,000 人，並入選道瓊永續指數 (The Dow Jones Sustainability Indices, DJSI)。



業務領域

- 煉油石化
- 電力
- 環境
- 交通
- 一般工業
- 高科技設施
- 液化天然氣

服務內容

- 專案管理
- 可行性研究及前端工程設計
- 工程設計
- 工程採購
- 設備製造
- 工程建造與維修
- 工廠試車
- 智能解決方案
- 自動化控制
- 無塵室與機電配管工程
- 智能頂進工法
- 地盤冷凍工法
- 操作及維護

產品項目

- 設備製造
- 化學添加劑
- 智慧化能源管理系統

CTCI
中鼎集團

111033 台北市中山北路六段89號
Tel: (886)2-2833-9999
Fax: (886)2-2833-8833

www.ctci.com

CTCI^{EF}

財團法人中鼎教育基金會

112037 台北市北投區福善路16號2樓
Tel: (886)2-2769-8599
Fax: (886)2-2769-9299

www.ctcief.org

高鐵會員 TGO

這一刻，有一點美好

高鐵會員多元兌點 時時刻刻盡享美好



了解更多



社團法人臺灣省土木技師公會

Taiwan Professional Civil Engineers Association

會員足跡遍全省襄助國家建設全方位

公會簡介(General Description) :

- ◇ 協助政府推展國家建設
- ◇ 襄助政府制定相關法令
- ◇ 推動土木工程研究發展
- ◇ 增進會員福利發揚服務精神

業務服務(Services) :

- ❖ 從事工程之現況、安全、損壞等鑑定業務，以保障民眾權益。
- ❖ 編製鑑定手冊，以協助政府擬訂鑑定準則。
- ❖ 配合政府勘災，以協助災後復舊工作。
- ❖ 辦理高層建築結構審查，以提升結構設計之品質。
- ❖ 辦理水土保持及山坡地開發計畫審查，以提升水土保持工程技術服務需求。
- ❖ 鼓勵、支持並接受各界委託土木工程技術規範研擬及鑑定審查手冊翻修。
- ❖ 與國內外各學術機關辦理學術研討會，以推廣土木新知，促進國際交流。
- ❖ 輔導會員成立材料試驗室，以提升工程材料之檢驗水準。
- ❖ 發行「技師報」以促進資訊流通。
- ❖ 編撰及出版土木工程專業叢書。

理事長及理監事 :

(Chairman、Board of Directors、Supervisors)

理事長：施義芳

常務理事：洪啓德、陳攻英、鄭明昌、蔡震邦

理事：陳清展、賴建宏、周子劍、黃騰輝
巫垂晃、謝祥樹、陳菁雲、楊高雄
陳存永、梁詩桐

常務監事：張長海

監事：陳錦芳、呂震世、陳永成、伍勝民

總會網址：<http://www.twce.org.tw>

總會 E-mail：mail@twce.org.tw

總會會址：220 新北市板橋區三民路二段 37 號 12 樓 A3

電話：(02)8961-3968

傳真：(02)2964-1159

台北辦公室：106 台北市大安區復興南路二段 160 巷 8 號 1 樓

電話：(02)2705-0899

傳真：(02)2705-3638

中區辦公室：404 台中市北區崇德路一段 629 號 B 棟 4 樓之 2

電話：(04)2230-2778

傳真：(04)2235-1956

南區辦公室：701 台南市東區林森路一段 149 號 4 樓之 8

電話：(06)235-8212

傳真：(06)235-6596

高雄辦公室：804 高雄市鼓山區文信路 335 號 13 樓

電話：(07)522-5385

傳真：(07)522-7335



皇昌營造股份有限公司

Hwang Chang General Contractor Co., Ltd.



本公司承攬之桃園市觀音區草漯第一、三、六區整體開發單元市地重劃統包工程

本工程位於草漯市中心之成功路及大觀路上，分為三個工區，開發面積約 147.88 公頃，以綠色、韌性、循環、智慧、創新科技等五大指標，大量使用再生材料，落實循環經濟，創造智慧、綠能、低碳城市。



台北市內湖區行善路 353 號 8 樓、(02)2792-2988、www.hcgc.com.tw



環抱新北

3環6線 翻轉新北

新北市境內154站169公里

第一環：黃線

(新北環狀線-環狀線北環段南環段-文湖線)

第二環：綠線

(新莊線-萬大中和線-新北樹林線)

第三環：藍色

(板橋線-土城線-三鶯線-桃園綠線-機場線)



實線：已核定
虛線：規劃中



廣告



官方網站



粉絲專頁

三環六線，實現美好日常



廣告