

113-053-2338
IOT-112-EC005

鐵路供需診斷數位分身軟體平台之建置(1/2)-鐵路數位分身軟體平台雛型架構之規劃



交通部運輸研究所

中華民國 113 年 7 月

113-053-2338
IOT-112-EC005

鐵路供需診斷數位分身軟體平台之建置(1/2)-鐵路數位分身軟體平台雛型架構之規劃

著者：李宇欣、盧立昕、袁永偉、陳佑麟、賴威伸、
許修豪、陳俊斌

交通部運輸研究所

中華民國 113 年 7 月

鐵路供需診斷數位分身軟體平台之建置(1/2)- 鐵路數位分身軟體平台雛型架構
之規劃

著 者：李宇欣、盧立昕、袁永偉、陳佑麟、賴威伸、許修豪、陳俊斌

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：105004 臺北市松山區敦化北路 240 號

網 址：www.iot.gov.tw (中文版>數位典藏>本所出版品)

電 話：(02)2349-6789

出版年月：中華民國 113 年 7 月

印 刷 者：全凱數位資訊有限公司

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：非賣品

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所
書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：鐵路供需診斷數位分身軟體平台之建置(1/2)-鐵路數位分身軟體平台雛型架構之規劃			
國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號 113-053-2338	計畫編號 112-EC005
本所主辦單位：運輸工程與海空運組 主管：賴威伸 計畫主持人：賴威伸 研究人員：許修豪、陳俊斌 聯絡電話：(02)2349-6830 傳真號碼：(02)2545-0427	合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 計畫主持人：李宇欣 研究人員：盧立昕、袁永偉、陳佑麟 地址：臺南市大學路1號 聯絡電話：(06)275-7575	研究期間 自 112 年 3 月 至 112 年 12 月	
關鍵詞：鐵路、數位分身、車站瓶頸分析、車站晚點量分析、運轉模擬			
摘要： 本計畫結合本所過去累積相關研發技術，開發可整合規劃面與實際列車運行之鐵路數位分身軟體平台雛型架構，其目標可做為辦理鐵路建設計畫經費審議、政策研擬與方案評估之重要工具。為此，本計畫除蒐整國際先進國家鐵路數位分身標竿案例文獻資料，並研提我國未來鐵路數位分身藍圖規劃之參考建議，並進一步分析提出優先研發項目如平台架構及操作界面、自動解衝突、運轉模擬等部分，透過導入本所供需診斷模式軟體之核心技術，完成鐵路數位分身軟體平台雛型架構之規劃。 技術發展部分，除持續深化國際鐵路聯盟(UIC)班表壓縮法發展車站瓶頸分析技術、及車站晚點量分析技術，再透過包含彰化市鐵路高架化、集集支線基礎設施改善、高鐵彰化站等跨鐵路建設計畫之情境案例分析驗證及展示相關功能，顯示數位分身軟體平台雛形架構已有初步運轉分析能力。軟體平台研發完成後可移轉鐵道局與臺鐵局做為列車模擬與評估建設計畫方案之輔助工具。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
113 年 7 月	155	非賣品	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
備註：本計畫之結論與建議不代表交通部之意見。			

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
 INSTITUTE OF TRANSPORTATION
 MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: Construction of railway supply and demand diagnosis digital twin software platform (1/2)-Planning of prototype architecture of railway digital twin software platform			
ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER 113-053-2338	PROJECT NUMBER 112-EC005
DIVISION: Transportation Engineering Maritime and Air Transport Division DIVISION DIRECTOR: Wei-Shen Lai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Wei-Shen Lai PROJECT STAFF: Hsiu-Hao Hsu, Chun-Pin Chen PHONE: 886-2-23496830 FAX: 886-2-25450427			PROJECT PERIOD FROM March 2023 TO November 2023
RESEARCH AGENCY: NCKU Research and Development Foundation PRINCIPAL INVESTIGATOR: Yusin Lee PROJECT STAFF: Li-Sin Lu, Yune-Wei Yuan, Ju-Lin Chen ADDRESS: 1 University Road, Tainan 701, Taiwan PHONE: 886-6-2757575			
KEY WORDS: Railway, Digital Twin, Station Bottleneck Analysis, Station Delay Analysis, Operation Simulation			
ABSTRACT: This project combines the relevant research and development technology accumulated by the Institute of Transportation in the past to develop a prototype architecture of a railway digital twin software platform that can integrate planning and actual train operations. Its goal is to be able to handle railway construction design funding review, policy research, and planning which are important tools for assessment. To this end, this project not only collects case literature on railway digital twin in advanced international countries, but also develops reference suggestions for China's future railway digital twin blueprint planning, and further analyzes and proposes priority research and development projects such as platform architecture and operation interface, automatic In terms of conflict resolution, operation simulation, etc., by introducing the core technology of our supply and demand diagnostic model software, we completed the planning of the prototype architecture of the railway digital twin software platform. In addition to continuing to deepen the International Union of Railways (UIC) schedule compression method, the technology development part develops station bottleneck analysis technology and station delay analysis technology. Also, it includes the elevated railway in Changhua City, infrastructure improvement of Jiji branch lines, high-speed rail Changhua Station, etc. The situational case analysis of cross-rail construction design verifies and demonstrates relevant functions, showing that the prototype architecture of the digital clone software platform has preliminary operational analysis capabilities. After the software platform is developed, it can be transferred to the Taiwan Railways Administration and the Taiwan Railways Bureau as an auxiliary tool for train simulation and evaluation of construction plan programs.			
DATE OF PUBLICATION July 2024	NUMBER OF PAGES 155	PRICE Not for Sale	
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

目 錄	III
圖 目 錄	V
表 目 錄	VII
第一章 緒論	1
1.1 計畫緣起	1
1.2 計畫目的	2
1.3 工作項目	2
第二章 文獻回顧	5
2.1 運研所過往成果	5
2.2 鐵路數位分身之發展	8
第三章 數位分身	9
3.1 數位分身之定義	9
3.2 數位分身之特性	11
3.3 數位分身於鐵路系統之應用	13
第四章 鐵路數位分身平台發展藍圖	15
4.1 整體構想	15
4.2 平台數據	17
4.3 優先研發項目	20
4.4 短期目標	23
4.5 中期目標	23
4.6 長期目標	23
第五章 臺鐵數位分身平台設計	25
5.1 數據維護架構	25
5.2 數據組織架構	27
5.3 操作流程架構	28
5.4 軟體系統架構	29
5.5 軟體操作功能	30
第六章 運轉分析	39
6.1 整體介紹	39
6.2 整合分析的重要性	40

6.3 精準路軌模型的重要性	40
6.4 班表的重要性	41
6.5 路塞潛勢指數分析	43
6.6 運轉穩定度分析	46
6.7 容量與利用率分析	48
6.8 路線瓶頸分析	52
第七章 模擬分析	59
7.1 整體介紹	59
7.2 主要影響因子	60
7.3 模擬方法	66
7.4 擾動與趕點強度測試	66
7.5 增班測試	69
7.6 本章小結	75
第八章 案例分析	79
8.1 分析基本設計	79
8.2 案例路軌情境說明	80
8.3 案例車次情境說明	83
8.4 真實班表分析	83
8.5 增班分析	91
8.6 小結	96
第九章 結論與後續工作	99
9.1 結論	99
9.2 後續工作	100
參考文獻	103
附錄 A：期中報告審查意見處理情形表	107
附錄 B：期末報告審查意見處理情形表	123

圖目錄

圖 3.1 數位分身概念示意圖	9
圖 4.1 數位分身發展時間軸	17
圖 4.2 臺鐵行控中心顯示面板照片示例	22
圖 4.3 車站股道標籤化數據示例	22
圖 5.1 鐵路數位分身平台數據流動架構示意圖	26
圖 5.2 鐵路數位分身平台數據組織架構示意圖	27
圖 5.3 鐵路數位分身平台情境分析運算操作流程架構示意圖	29
圖 5.4 鐵路數位分身平台軟體系統架構示意圖	30
圖 5.5 鐵路數位分身平台軟體車站股道編輯畫面	31
圖 5.6 鐵路數位分身平台軟體站間軌道編輯畫面	32
圖 5.7 鐵路數位分身平台軟體路網編輯畫面	33
圖 5.8 鐵路數位分身平台運行圖畫面	34
圖 5.9 鐵路數位分身平台車次編輯畫面	35
圖 5.10 鐵路數位分身平台專案操作畫面	36
圖 5.11 鐵路數位分身平台數據管理畫面	36
圖 5.12 鐵路數位分身平台權限管理畫面	37
圖 5.13 鐵路數位分身平台系統管理畫面	37
圖 6.1 臺鐵保安站行控中心面板照片與軌道模型對照圖	41
圖 6.2 臺鐵臺南站（地下化前）行控中心面板照片與軌道模型對照圖	41
圖 6.3 班表影響容量示例	42
圖 6.4 路塞潛勢指數分級	44
圖 6.5 路塞潛勢指數分析結果畫面示例	45
圖 6.6 鐵路數位分身平台路塞潛勢指數分析操作畫面	45
圖 6.7 穩定度分析晚點量示例	46
圖 6.8 穩定度分析佔用時間示例	47
圖 6.9 鐵路數位分身平台穩定度分析操作畫面	48
圖 6.10 班表壓縮法基本概念示意圖	49
圖 6.11 部分分析區段鐵路圖	51
圖 6.12 田中車站容量分析方法示意圖	51
圖 6.13 二水車站容量分析方法示意圖	51
圖 6.14 濁水車站容量分析方法示意圖	52

圖 6.15 瓶頸分析示意圖.....	54
圖 6.16 集集線各站利用率分析（臺鐵現況班表）	58
圖 7.1 寬裕時間示意圖.....	61
圖 7.2 緩衝時間示意圖.....	62
圖 7.3 緩衝時間完全吸收延遲示意圖	62
圖 7.4 緩衝時間部分吸收延遲示意圖	63
圖 7.5 可趕點時間等於寬裕時間長度示意圖	65
圖 7.6 可趕點時間等於延遲量示意圖	65
圖 7.7 擾動強度 0.05 模擬結果.....	67
圖 7.8 擾動強度 0.10 模擬結果.....	68
圖 7.9 擾動強度 0.15 模擬結果.....	69
圖 7.10 增班 2 對模擬結果.....	71
圖 7.11 增班 4 對模擬結果.....	72
圖 7.12 增班 6 對模擬結果.....	73
圖 7.13 增班 8 對模擬結果.....	74
圖 7.14 各情境平均晚點量	75
圖 8.1 臺鐵彰化站及鄰近路段	80
圖 8.2 本案例使用之彰化站未來股道	81
圖 8.3 本案例使用之各集集線未來車站	82
圖 8.4 本案例使用之田中支線路線方案	82
圖 8.5 路塞潛勢指數（臺鐵班表）	84
圖 8.6 彰化站現況股道佈設	85
圖 8.7 晚點分析（臺鐵班表）	86
圖 8.8 趕點分析（臺鐵班表）	87
圖 8.9 車站容量分析（臺鐵班表）	88
圖 8.10 站間容量分析（臺鐵班表）	89
圖 8.11 車站利用率分析（臺鐵班表）	90
圖 8.12 站間利用率分析（臺鐵班表）	91
圖 8.13 路塞潛勢指數（增班後）	92
圖 8.14 晚點分析（增班後）	93
圖 8.15 趕點分析（增班後）	94
圖 8.16 車站利用率分析（增班後）	95
圖 8.17 站間利用率分析（增班後）	96

表目錄

表 6-1 集集線班表（逆行）	56
表 6-2 集集線班表（順行）	57

第一章 緒論

1.1 計畫緣起

交通部運輸研究所（以下簡稱「運研所」）於民國 110、111 年辦理鐵路系統供需診斷模式軟體之維護與擴充及策略分析之計畫，在臺灣鐵路管理局（以下簡稱「臺鐵局」）協助下利用歷史售票紀錄及每日班表資料建立倉儲，並導入大數據分析技術，構建鐵路系統診斷模式軟體，可在各種不同設定下，進行鐵路系統旅客運輸供需情形之診斷與情境分析。目前政府正積極推動前瞻基礎建設，其中前瞻軌道建設涵蓋高鐵臺鐵連結成網、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觀光鐵路五大推動主軸。計畫之第三期交通部將編列 388 億元，重點項目包含辦理花東鐵路雙軌化、臺南市區鐵路地下化等計畫。此外，軌道運輸系統能源使用效率優於公路公共運輸系統及私人運具，且在 2020 運輸政策白皮書之順應國際綠色潮流下，交通部刻正推動建構環島高快速鐵路網。鐵路運輸系統目前已是我國最重要的陸上運輸系統之一，在可見的未來預期將更為重要。

數位分身技術為近年來隨著資訊軟硬體日益發展而成形的新興技術。該技術之應用已快速擴及許多領域，在軌道運輸亦不例外。目前國際間已可見導入與研發數位分身技術應用於軌道領域之標竿案例，在規劃、建設、營運等均可發揮其效益。該技術主要係透過將資產可視化與蒐整運行資料，以及仿真模型與情境分析，可進行解決方案模擬分析與預測，除可應用於規劃設計方案選擇與驗證外，亦可應用營運與維護等階段提升營運效能與節省成本。

我國刻正極推動的鐵路建設計畫以及臺鐵列車車隊更新，將需要投入大量公共資源，並將影響鐵路運輸。這些重大建設案及採購案均需要政府相關單位縝密的評估分析。為此運研所乃辦理本科技計畫，結合過去累積相關研發技術，開發可整合規畫面與實際列車運行之鐵路數位分身軟體平台雛型架構，以作為辦理鐵路建設計畫經費審議、政策研擬與方案評估之重要工具。軟體平台研發完成後可移轉鐵道局與臺鐵局做為列車模擬與評估建設計畫方案之輔助工具。

本計畫名稱為「鐵路供需診斷數位分身軟體平台之建置(1/2)-鐵路數位分身軟體平台雛型架構之規劃」（以下簡稱「本計畫」）。計畫預定期程為 2 年，本計畫為其中第 1 年。本計畫之主軸在整合規畫面與實際列

車運行之鐵路數位分身軟體平台雛型架構。其中在規畫面之數據包括了車站與站間相關資訊、車輛運用計畫、人力運用計畫、運轉班表、售票紀錄等；在列車運行方面則以影響運轉速率之關鍵基礎設施資料為主，包含橋梁、隧道及平交道之位置等項目。

本計畫含有數位分身系統平台之規畫以及軟體雛型實作兩部分。對本計畫作為二年計畫第一年期而言，前者（平台規畫）為計畫之主軸，而後者（軟體雛型實作）則為進行平台規畫過程中之輔助工具。亦即，本計畫將完整規畫數位分身系統平台之架構；對於其中較關鍵性、需要用軟體測試才能確認其可行性的部分則實作雛型軟體為之。為儘量有效運用資源，本計畫於實作雛型軟體時，將儘量使所開發之軟體在未來能夠直接移作正式應用軟體的一部分。

1.2 計畫目的

本計畫之主要目的在結合運研所過去累積相關研發技術，開發可整合規畫面與實際列車運行之鐵路數位分身軟體平台雛型架構，作為政府機關辦理鐵路建設計畫經費審議、政策研擬與方案評估之重要工具，未來完成後亦可移轉鐵道局與臺鐵局做為列車運轉模擬與評估建設計畫方案之輔助工具。

1.3 工作項目

本計畫之工作項目包括以下各項：

1. 蒐整國際先進國家運用數位分身進行鐵路建設與營運管理效能提升相關之應用範例。

已將相關應用範例蒐整並載於第三章。

2. 依據國際標竿案例並針對我國臺鐵系統，勾勒適合我國鐵路系統未來發展整體數位分身之藍圖，並提出與鐵路列車運行及供需診斷攸關之優先研發部分。

數位分身藍圖及優先研發部分已整理於第四章。

3. 蒐整臺鐵列車運行相關資訊系統(包含班表、列車實際運行)及影響運轉速率之關鍵基礎設施資料(包含橋梁、隧道及平交道之位置等)。

本計畫已蒐整相關資料，以做為後續分析參考。

4. 研析鐵路數位分身之雛型架構，其中核心功能須整合本所供需診斷模式軟體之核心技術。

本計畫已完成鐵路數位分身之雛型架構之研析，詳見第五章。

5. 其他工作。

已針對計畫重要成果製作海報電子檔、完成座談會一場，並將部分成果投稿於臺鐵資料季刊。

第二章 文獻回顧

2.1 運研所過往成果

運研所在過去多年中致力於鐵路供需診斷之系列研究，本節將大略回顧過去之研究成果。

1. 臺鐵包車營運需求下列車班表之研究^[1]

本計畫為 100 年研究計畫，以臺鐵不定期列車之排點為標的，構建具有實務使用能力之數學模式以求解在一組給定的臺鐵班表中，增加不定期列車之問題。該研究以新左營至臺東、100 年 9 月 28 日改點之真實班表，以及臺鐵真實路軌狀況進行模式可用性之驗證。除了對臺鐵不定期列車之需求、供給與內部作業流程作有系統的整理釐清外，本計畫並確定所開發使用的路軌數位模型以及自動排點數學模式均為可行，並具有持續開發之潛力與價值。

2. 鐵路列車排程模式建立及運行資料分析校估之研究^[2]

本計畫為 101 年研究計畫，持續發展鐵路系統自動排點數學模式及其求解方法，成功達到自動求解臺鐵全系統班表之目標。此外並取得臺鐵真實行車紀錄資料，評估利用真實紀錄來校估基準運轉時分、最小時隔等排點參數的可行性。深入分析結果發現受到原系統設計之限制，真實行車紀錄直接用以校估排點參數可能有其困難點。

3. 鐵路列車自動化排點系統建置之研究^[3] (100 年)

本計畫為 102 年研究計畫，之主要目的在嘗試整合過往開發鐵路自動排點技術，以及伴隨之運行圖顯示、衝突檢查、班表管理等技術，並探討軟體平台之適當架構。該研究發現這種將不同技術整合成為單一系統之作法確實可行，並指出此種軟體工具可望對鐵路公共投資計畫進行前所未見的深度評估。

4. 鐵路列車自動化排點系統功能擴充與推廣應用^[4]

本計畫為 103 年研究計畫，以先前成果^[1, 2, 5]為基礎，持續精進自動排點核心技術及伴隨技術，並探討將這些技術開發成為自動排點工具，推廣予實務單位應用時所需要的使用者界面、資料介接等需求。研究除了持續提升自動排點技術之效能外，並認為在臺鐵或其他鐵路相關單位建置整套完整的軟體系統，除可達到排點作業資訊化、電子化之需外，並可應用於軌道運輸相關政策之方案評估。

5. 大數據分析技術進行鐵路供需診斷與策略分析(1/2)^[6]

本計畫為 108 年研究計畫，以臺鐵客運為範圍，目的在針對我國傳統鐵路系統開發一套有系統的方法以整合社會經濟活動所產生之運輸需求，與鐵路機構運用其資源而創造之運能供給這兩種機制完全不同，但又相互影響之體系。而乘客之選擇行為則為這兩個體系之間互動的機制，決定了運能轉化成為乘客效用的狀況。此研究之最主要成果為釐清上述運輸需求、運輸供給與乘客選擇，可用 6 個抽象模式描述之：(1)需求模式、(2)供給模式、(3)乘客選擇行為模擬模式、(4)乘客選擇參數校估模式、(5)解衝突模式、(6)系統運轉模擬模式。此研究並針對每一個模式均深入分析其性質並開發求解方法。

6. 大數據分析技術進行鐵路供需診斷與策略分析(2/2)^[7]

本計畫為 109 年研究計畫，將前期研究^[6]所提出之 6 個抽象模式具體實作成為求解引擎，並在此過程中進行模式之調整及測試。所有這些模式各有其不同目的、基本假設、輸入數據、輸出數據以及演算邏輯。為了有效整合這些各自獨立的模式成為整體系統，本計畫設計了可納入所有模式輸出入數據之整體數據架構，以及有能力承載所有模式求解引擎之軟體平台。該平台之軟體架構採積木式設計，具有充份的擴充能力，可作為長遠發展之基礎。

此外，本計畫並提出「路塞潛勢指數」，作為呈現鐵路運轉狀況之綜合指標。研究成果之技術可使用該軟體平台為工具，利用 6 個抽象模式以在規畫階段即先行呈現鐵路相關建設計畫各方案之未來運轉狀況，再以路塞潛勢指數具體衡量比較之。

7. 鐵路系統供需診斷模式軟體之維護與擴充及策略分析(1/2)^[8]

本計畫為 110 年研究計畫，以運研所研究^[6,7]為基礎，建立「智慧鐵路平台」之架構，成為具有鐵路系統供需診斷分析能力之軟體工具。除了持續修訂前期^[7]所提出之「路塞潛勢指數」使其更貼近實務應用所需外，並在軟體平台中引進「班表壓縮法」。該法為 UIC 所提出^[9,10]，目前國際最為通用之鐵路路線容量分析方法。本計畫結合運研所過去所開發之技術^[3,4]，將班表壓縮法予以本土化成為適合臺鐵使用之路線容量評估方法，成功與國際接軌。本計畫在軟體方面以建立智慧鐵路平台基礎架構為主，但已能用以分析花東地區鐵路雙軌電氣化計畫^[11]、桃園都會區鐵路地下化計畫^[12]、嘉義市區鐵路高架化計畫^[13]、基隆南港間通勤軌道建設計畫^[14]等建設計畫之預期未來鐵路運轉狀況。

8. 鐵路系統供需診斷模式軟體之維護與擴充及策略分析(2/2)^[15]

本計畫為 111 年研究計畫，接續前期^[8]之研究，持續提升智慧鐵路平台之能力以及操作方便性。在螺旋式發展過程中，智慧鐵路平台之軟體

系統在本計畫過程中經歷了全面改版。軟體發展之大方向調整為一方面作為累積、承載相關研究成果、實務數據之軟體平台系統，同時又可作為實務分析之重要工具。本計畫最重要的成果是使得智慧鐵路平台具有跨專案整合分析之能力，並在研究成果中提出彰化市鐵路高架化計畫^[16]、臺鐵集集支線基礎設施改善計畫^[17]以及田中支線建設計畫^[18]，集中在臺鐵系統彰化路段之三項重要鐵路建設計畫，在鐵路運轉面向交互影響之綜合分析。

9. 以列車運行為核心研析構建鐵路數位分身軟體平台之初探^[19]

本計畫探討以臺鐵系統為標的構建鐵路數位分身之可行性及必要性。該研究觀察到近年來，數位分身技術已在各個領域中得到廣泛應用。這項技術透過整合可視化和運行資料，並可使用抽象模型與情境分析來進行解決方案的模擬分析和預測。它不僅可以應用於規劃設計階段的方案選擇和驗證，並可在營運和維護階段提升效能並節省成本。該研究搜整了國外鐵路數位分身技術的發展與應用案例，並綜合考量臺鐵既有與未來將辦理的列車運行相關資訊系統，結合運研所鐵路供需診斷模式軟體的核心演算技術^[8, 15]，探討建立我國鐵路數位分身軟體平台的架構和內容。研究結果發現已有多個國家在軌道領域陸續導入與研發數位分身技術應用，在規劃、建設、營運等均產生效益。預期我國未來若亦構建鐵路數位分身軟體平台，除可作為運研所鐵路政策分析之工具，亦可提供路政司與鐵道局監理應用，及供臺鐵局作為營運規劃輔助工具。尤其目前政府正積極推動鐵路建設與基礎設施安全提升計畫，除了各項鐵路立體化建設之外，鐵路行車安全改善計畫^[20]等多項工程計畫亦包含了多項橋梁、涵洞等臨軌結構物之補強工程，其施工具有一定難度、期程長、分佈廣及臺鐵系統各處。工程進行過程中不可避免將影響列車營運，亟需有診斷分析工具能在規劃面與實際營運面進行診斷與模擬分析，做出最佳決策。

10. 班表壓縮法之本土化研究^[21]

運研所之前期研究^[8]將班表壓縮法予以本土化，成為適合臺鐵系統使用，同時又與國際最通用方法相接軌之方法，並實作成為智慧鐵路平台的一部分。本計畫在規畫鐵路數位分身系統時，此功能將與智慧鐵路平台充份融合。此處簡要回顧班表壓縮法之基本論述；詳細之說明可參見報告書^[8]。

班表壓縮法為 UIC (International Union of Railways) 於 2004 年首次提出^[9]，並在 2013 年更新之^[10]。該機構以「Capacity」作為這二份文件之標題，顯示作為鐵路路線容量分析主要方法之用意。在文件中所提出之最重要基本論述有下列各項：

1. 鐵路路線容量之評估方法，應同時考量路軌設施以及擬運行之班表，而非僅由路軌設施以及可能的車種組成來估算。
2. 路線容量之衡量，UIC 認為並不宜以「每小時可運行若干列次」為衡量方式，而是應該計算鐵路路線在扣除不可運行之時間（例如每晚斷電封鎖進行維修）之後的每日可運行時間長度，並分析在該路線上擬執行之班表需要佔用的最小運行時間長度。二者相除即可得知該鐵路在承載該班表之後，尚存的容量比例；其概念與「路線利用率」之觀念相接近。而分析一份班表執行時所需要佔用的最小運行時間長度的方法即為班壓縮法。
3. 該文件明確指出，鐵路執行一份班表而尚有剩餘容量時，並不同於可在該班表中加入更多之車次。欲明確評估新增車次之可行性，唯一的方法是試排班表。

2.2 鐵路數位分身之發展

隨著資訊技術及數據處理技術的快速發展，數位分身技術在 21 世紀取得了長足的發展。這種技術連結了真實世界與數位虛擬世界，使得人類能夠以全新的方式觀察真實的系統，以實現更高效率、更安全、更低成本的營運。雖然數位分身技術的歷史並不長，但在短短的二十至三十年之間，此一新技術已被廣泛運用在許多不同的領域，其中之一即為運輸領域。與運輸相關的運具機械、運輸管理、都市交通管理、場站維運等，均可看到運用數位分身的例子。本報告書後續將以專章對數位分身相關文獻作更有系統之回顧。

第三章 數位分身

3.1 數位分身之定義

數位分身 (digital twin) 的概念最早於 1993 年被提出^[22]，並稱之為「鏡中的世界」 (mirror world)。該書作者認為在不久的未來，人們將可以在電腦螢幕中看到真實的世界。在其當時想像的未來世界中，電腦中建立了真實系統的模型；經由近幾無限量資訊的持續輸入，該模型可以表現真實系統每一個面向的行為，並可以利用模型的邏輯為基礎，預測該系統在各種情境下的狀況。時至今日回顧觀之，當時該書所勾勒之遠景並未完全實現。電腦中所表現的系統並未如鏡子般，成為可完整呈現所有屬性面向的系統，但世界之科技確朝向此方向發展，並在本世紀逐漸落實成為可應用之系統。

廣義來說，數位分身是一個由實體物件、虛擬對應以及兩者之間的數據流動所構成的系統^[23]。使用感測裝置等硬體設備由實體物件所收集到的數據經由網路或其他系統傳輸到虛擬對應之後，再以電腦依據各種抽象模型運算所產生的資訊再回傳到實體物件中作為決策輔助之用。其概念可示意於圖 3.1。

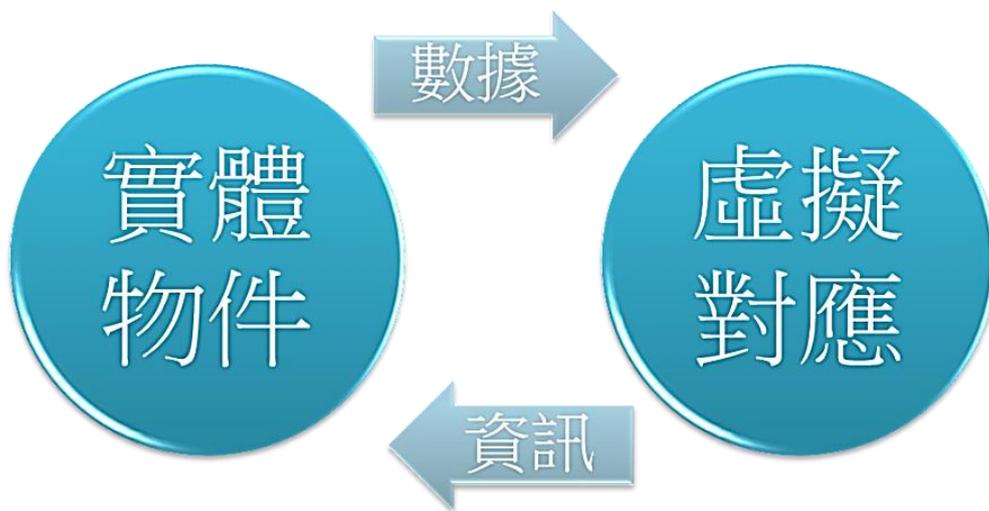


圖 3.1 數位分身概念示意圖

數位分身這個名詞的出現，可以追溯到 2012 年，美國國家航空暨太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 之報告^[24]

中提出稱之為「digital twin」之概念並作為未來發展方向之一。此後該名稱及概念被廣為接受並沿用於為各不同目的而發展之系統中。然而同時具有上述實體物件、虛擬對應與數據流動三個基本元素之系統，在該名詞出現之前早已問世並廣為應用^[25]。

在應用時，數位分身經常為先行者：在構建實體物件、系統或實體實施程序之前，先建立數位分身以預估實體可能的行為或成效。極為多樣化的應用領域與近幾無限的實現方式，使得數位分身技術得到了寬廣的發展空間，但亦同時使其至今仍無國際公認的定義。沒有明確而公認定義的事實，對數位分身技術的應用與發展並不造成限制；不同的應用範疇可依其需求及觀點而對此項工具賦與不同的定義。

文獻^[26]認為數位分身為實體或虛擬機器，或以電腦為基礎的模型，模擬、仿真、鏡像或「雙胞胎化」以表現物理實體。而該物理實體可以是物體、過程、人或人相關特徵。透過持續的數據交換而實現以虛擬表現實體的目的。其作者指出，數位分身不只是一個簡單的模型或模擬。它是具有生命、智慧和演化的模型，是物理實體或過程的虛擬對應物。數位分身遵循其物理實體的生命週期來監控、控制和優化其過程和功能。數位分身可持續預測未來的狀態（例如缺陷、損壞、故障），並允許模擬和測試新的配置，以預防性地進行維護操作。

不同的文獻由各種不同觀點對數位分身提供不同之定義。文獻^[27]認為數位分身是真實產品、服務、無形資產或其組合而成的系統的數位呈現。真實系統的一或多個生命周期中的部分屬性、性質、狀態及行為，以模式、資訊、數據的形式呈現在數位分身中。文獻^[26]作者則觀察製造業、航空運輸業、醫療、醫學等領域，注意到數位分身與人工智慧這兩大新興技術之間的關聯，認為數位分身可視為是真實系統的人工智能虛擬副本，通過各種監測設備收集高維數據，再利用大數據處理技術進行分析，再據以進行預測，以優化系統運轉之過程。

廣被引述的文獻^[28]由資訊傳輸方向及自動化程度，將將數位分身區分為數位模型（Digital Model）、數位影子（Digital Shadow）及數位分身三類。依該文獻說明，數位模型指在實體物件到電腦系統之間，雙向數據均以人工手動方式傳輸；數位影子指可自動由實體物件將數據傳輸到電腦系統，但反向傳輸則以人工手動方式為之；而數位分身則指數據在實體物件與電腦系統之間均以自動化方式傳輸之系統。這種簡化的作法提供了對數位分身一種易於操作的分類方式，但僅能代表數位分身技術眾

多面向其中之一，亦即數據在真實物與與對應的電腦系統之間傳輸的方式。再者，數據傳輸的方式本身並不能簡單明確劃分為「自動」與「人工手動」二類。實際上數據傳輸方式相當多樣化，在傳輸過程中相關人員之介入亦有極多種不同的方式。而數據採用何種方式傳輸有其系統設計之考量，通常均以整體最有利之方式設計之，因此「自動」與「人工手動」之數據傳輸方式僅有傳輸方法之不同而無高下之分。更重要的是這種分類方式完全側重於數據傳輸方式，而忽略了電腦系統在取得數據之後，予以組織化、一致化之整合能力，亦未考慮電腦系統使用這些數據進行運算以達到其設置目的之能力。畢竟電腦系統的目的在服務人群使用者，不論稱之為數位模型、數位影子或數位分身，不論數據以何種方式傳輸，數據之整合能力將對整個系統的價值產生決定性之影響；未經數據整合的系統，即使收錄的數據涵蓋廣泛，亦僅能視為是原始資料的倉儲而不能視為相當於數位模型、數位影子或數位分身。

3.2 數位分身之特性

在數位分身的概念被提出來之前，以資料庫儲存大量數據，並利用資訊技術進行各種模擬、分析之應用早已行之有年。而文獻^[29]亦認為數位分身是許多早已廣為使用的技術之整合而非全新創建之作法，例如在許多數位分身系統中使用到的建築資訊模型（Building Information Model, BIM）技術、連結實體物件與後台電腦系統之物聯網（Internet of Things, IoT）技術等，均早已廣為使用。而數位分身在整合多種技術之後，可達到為這些應用所不及之最重要特點為將數據與邏輯作高度之整合。其具體特性整理如下^[30]。

1. 關聯性

當描述一個實體物件、系統或程序時，在數位分身中所含有之資訊不僅描述實體對象本身，同時也描述了構成實體對象的各個部分之間的關係及互動邏輯。例如，單純的數據倉儲可能收納了鐵路系統的車次、車種、售票紀錄以及客座利用率，以供各種用途之查詢。但數位分身可建立車種之座位數、車上載客人數、配位規則以及計算客座利用率的邏輯。因此數位分身系統除了可提供過往統計查詢之功能外，亦可在引進新車種時，進行「倘若以某新車種運行、並採用某種配位規則，其客座利用率將如何」之進一步計算功能。

2. 一致性

以數位化方式表現實體物件、系統或程序時，常涉及龐大的數據量。

在這方面，傳統數據倉儲以收納數據為主，主要功能在介接上游資訊源以取得數據並收納在倉儲中，再提供下游系統介接以取得這些數據。其著重的面向在介面標準以及介接方式，至於數據的一致化則由取用數據的各應用系統自行達成。在另一方面，數位分身則將數據之一致性視為系統之重要功能。任何數據進入數位分身時均須經過內建邏輯之相互勾稽甚至糾錯補正，方有可能進入系統中。例如，傳統數據倉儲在接收鐵路班表資訊時，只要數據格式符合規則、內容具有一定之完整性即可收納。但合格的數位分身將具有內建邏輯及軟體功能以進一步檢查：班表中之資訊與路軌資訊是否達到一致。若偵測到其中某車次所描述運行過程與路軌資訊不一致（例如以路軌所不容許之方式跳過某站未行駛經過）則依事先建置於數位分身系統中的既定邏輯予以拒絕，或執行其他處置。

3. 智慧性

數位分身結合了數據與邏輯，因此可用以支持高度自動化的智慧性運用。以鐵路為例，結合適當能力的模式及其求解引擎軟體，在高品質並具一致性數據的支持下，數位分身將可依據運輸需求以及路軌佈設，利用最佳化技術提出服務計畫之建議方案。

4. 可追蹤性

數位分身之可追蹤性可由二方面闡述之。在實體面，若數位分身持續接收其實體對應之完整、一致性數據，則將可重現歷史以供使用者由各種不同面向反覆觀察已經發生之狀況。在虛擬面，數位分身之運算過程可留下完整紀錄，因此可供使用者詳細反覆觀察某種可能發生的現象之成因並據以適當處理。例如，若數位分身之分析顯示鐵路系統中兩項建設工程將因交互影響而不利維持高準點率，則使用者將可利用系統中之詳細數據進一步更深入分析以釐清在時間或空間中是否有發生延誤之熱區，據以研擬調整班表、調整車次或其他因應方案。

5. 模組性

數位分身之基本概念係將實體系統區分為模組，分別處理其數據、邏輯與規則。因此很適合供使用者以模組抽換的方式進行研究分析。例如運研所之過去研究成果^[6]將整個鐵路系統供需之體系區分為 6 個模式，這些模式即可各作為數位分身之一個模組。這使得未來數位分身完成之後，使用者將可單獨抽換運輸需求量而觀察各車次之載客狀況、抽換路軌而觀察各種建設方案對運轉之影響或抽換班表而觀察鐵路準點率之變

化等。

3.3 數位分身於鐵路系統之應用

相對於航空太空及其他許多領域^[26]，道路與鐵路等社會基礎建設系統長期以來對資訊技術的應用程度較為偏低^[31, 32]。然而在最近大約二十年當中這種狀況發生了根本的變化。隨著資訊相關軟體、硬體、演算法的快速發展，結伴隨工業 4.0 浪潮而開發之物聯網、雲端化計算等新技術^[33]，使得傳統的道路與鐵路系統亦發生數位化的根本變化。更方便的數據取得、更快速的數據傳輸、與更先進的軟體技術，使得數位分身技術開始進入運輸系統^[34]，而道路與鐵路系統的數位分身平台亦成為可能^[35]。

如文獻^[36]所指出，由歐盟所維運的歐洲鐵路行車管理系統（European Rail Traffic Management System, ERTMS）刻正致力於歐盟範圍內鐵路系統管理與控制的一致化，而歐洲列車控制系統（European Train Control System, ETCS）即為其中的核心系統，負責控制列車運行中的路權授權、速度碼、速率曲線以及危險狀況下的自動緊軔。這個系統由真實世界中所取得的數據主要來自道旁設施與車上設施。這些數據經傳輸之後存放於數位分身中。而數位分身之主要目的則在供系統使用者監看整個系統的狀態、模擬重現系統運轉之歷史紀錄、真實紀錄之數據分析、虛擬情境之測試與分析、提供對未來狀況之預測、作為演算法的測試環境及其他應用等。為了達到這些複雜的目的，該系統並開發了多數模式，以及求解這些模式的演算法。因此上線運轉之後，此數位分身亦具有成為 ETCS 知識庫的功能。

在另一方面，文獻^[37]針對鐵路系統之道岔，建立數位分身以瞭解軌溫及其他環境因子對道岔性能之影響。該作者針對位在波蘭的一處道岔安裝了感測設備，每小時量測數據並以無線方式回傳到電腦系統中。所量測之數據除了環境溫度外，並及於道岔各部位之內部溫度與道岔各元件之曲率、坡度、軌距、長度及其他外觀尺寸。維運管理單位可利用數位分身之能力，由各種不同面向觀察所監看的道岔在各種不同環境溫度下之行為。

文獻^[38]呈現了將數位分身應用在大眾捷運系統溫度環境管理之案例。該案例將多數溫度及濕度感測裝置安裝於埃及開羅大眾捷運系統的場站中，並將持續收集之數據回傳到數位分身系統中。該數位分身系統係以建築資訊模型為基礎，因此可供使用者以很方便的三維圖形方式觀察場

站中各處的溫度及濕度分佈狀況，並以所累積之數據找出改善空調設備的方式。除了環境控制的目的之外，數位分身亦可用於鐵路車站站體之維護、設計、運轉。案例為英國倫敦地鐵系統之 King's Cross 站^[39]，該計畫亦以建築資訊模型為基礎，將多種資訊整合於其中而得到具有高度價值之站體整體模型。

數位分身技術亦有應用於鐵路系統預防性維修計畫之潛力。文獻^[40]所提出之基本概念是在鐵路系統中裝設多數感測裝置以持續檢測系統各處之狀態傳輸至數位分身，再於數位分身中建立模式以判斷鐵路系統之整體風險狀況，據以作成最佳的預防性維修計畫。

鐵路系統之電車線、橋梁等基礎設施必須經常性檢測以確保其安全，降低運轉風險。在橋梁方面，文獻^[41]提出一套利用列車通過時所產生的振動來判讀橋梁狀況之技術，而其實作即有賴數位分身。該鐵路橋案例位在葡萄牙，為三跨各 160 公尺長之箱型鋼梁上覆混凝土版之複合結構。研究團隊在橋梁各處安裝多數感測裝置並將數據傳輸到數位分身平台，再於平台中以所建立之模型推算橋梁之狀況，據以發現異常並作為維修之決策輔助之用。在另一方面，文獻^[42]則描述英國鐵路架空電車線系統數位分身之案例。

第四章 鐵路數位分身平台發展藍圖

4.1 整體構想

考量臺鐵未來發展與數位分身系統之潛在能力，可預期為臺鐵建置一個以運轉為導向之鐵路數位分身系統，將可帶來顯著之效益^[19]。如文獻^[19]所指出，在我國目前所推動的重要建設計畫陸續完成後，臺鐵系統將成為我國國內最重要的公共運輸運具。這些重要政策包含了前瞻軌道建設之臺鐵升級及改善東部服務、推動高鐵臺鐵連結成網、鐵路立體化或通勤提速等，而 2020 年版運輸政策白皮書^[43]則確立了西部高鐵、東部快鐵的發展原則。

本計畫認為，建置鐵路數位分身平台時，應針對我國臺鐵系統而開發。其主要目的不在對臺鐵系統作即時監控，而是在整合與運轉相關之運務、工務、機務與電務數據，以在數位世界中建立一套有能力充份表現臺鐵系統之數位模型。該數位模型要能由運能之供給與需求角度來呈現臺鐵系統之運轉狀況。其長遠目標要能夠涵蓋 3 個面向的功能：由真實數據與歷史紀錄中萃取運轉參數、重現歷史運轉狀況與在虛擬情境下預測運轉狀況。三者進一步詳細說明如下。

1. 萃取運轉參數

對任何鐵路機構而言，精準掌握參數為達到有效的數據化管理與科學化決策不可或缺的必要條件。一些重要的例子包括：

- (1) 列車運行過程中在各種時段、各種車種、各種狀況下隨機擾動造成的延遲量分佈參數，為系統維持高準點率的重要參考。
- (2) 有系統分析各種巡檢所長期累積之數據以掌握各種設施之劣化趨勢參數，將有助精準設計預防性維修策略，以期用更低之成本達到更佳之管養績效。
- (3) 鐵路車輛交通量、車種組成、車速分佈及其他因素對電車線系統之接觸線磨耗速度之影響參數，攸關電車線管養策略之研擬、系統可靠度之維持以及有效管控維護成本。

雖然本計畫並未納入上述各例所涉及之全部數據，而任何鐵路數位分身平台亦不可能納入真實鐵路系統之全部數據，但本計畫預期未來必能由鐵路數位分身平台所收納、整合之數據中萃取出重要的運轉參數。同時，未來若臺鐵系統欲整理、歸納其他參數時，本平台之數據亦可作為重要參考。

2. 模擬重現歷史運轉狀況

模擬重現系統運轉之歷史紀錄為歐盟 ERTMS 系統數位分身的重要功能之一^[36]，亦為建置鐵路數位分身平台之重要目標之一。鐵路數位分身平台的使用者可利用本項功能由各種不同面向重複觀察同一段歷史紀錄，亦可在不同的系統狀態設定下，進行「如果當時某事未發生（或有發生），這件事將有什麼不同的結果」之類的分析與觀察，將對鐵路系統的深入分析及策略研擬有極大的助益。

3. 預測虛擬情境下運轉狀況

利用正確的參數項目與參數數值，可在鐵路數位分身平台中建立臺鐵的數位模型。使用者可以在這種模型中設定各種虛擬情境，並利用數位分身的運算能力來預測各種虛擬情境下可能的運轉狀況。而本項功能對相關單位之計畫審議、列車運轉模擬或評估建設計畫方案將有直接之重要助益。

政府正在積極推動的鐵路相關重大建設將需要投入可觀的公共資源，亦可預期將為臺鐵系統帶來相當的衝擊。臺鐵總營業里程約為 1065 公里，而系統中每日均大約開行 1000 車次，其中並有數十車次其運行里程超過總里程之三分之一。所有 241 處車站，平均每站每日行經（含停靠與通過）車次數超過 120 次。這些狀況明確顯示臺鐵全系統各處運轉狀況環環相扣，相互影響而不可分割。而這亦與運轉實務經驗相一致：發生在北部之擾動、事件或事故，其對運轉之影響有很大的機會將在數小時之後擴及百公里之外的南部與東部，反之亦然。

在臺鐵全系統各處運轉狀況環環相扣不可分割的現狀下，所有施作於臺鐵系統之工程建設案，甚至新車採購案，均有必要充份考量其交互影響，絕不可個別評估，否則分析結果有可能產生嚴重的偏差，造成公共投資完成之後才發現效益不如預期之重大風險。而適當的數位分身平台即可作為這種分析之有力先進工具。相關單位之使用者可在數位分身平台系統中建置臺鐵系統之數位模型、依工程建設計畫內容在數位模型中建立各種方案情境，再利用數位分身系統之運算能力呈現各工程專案未來陸續完工之後，可能的未來運轉狀況。例如使用者可假設彰化市鐵路高架化計畫^[16]、田中支線^[18]均已完工，且進一步建設串連山線與海線之環線鐵路，臺鐵系統可能提供的運能以及運轉狀況，用以評估彰化站高架化時，其南側與北側佈設二股道與四股道之差異。在評估審議的過程中，若有多種不同的可能方案，或各工程專案可能狀況的不同組合，亦均可使用此一工具逐一分析，藉以進行跨專案之觀察比較。

目前政府已著手積極推動前述多項工程計畫，但相關單位仍無具跨專案整合運轉分析之軟體工具。本計畫認為儘快完成鐵路數位分身平台之

開發，並建置於各負責推動各項鐵道建設計畫之單位作為分析審議之主要工具，實有其急迫性與必要性。

我國鐵路數位分身平台之發展時間軸構想示於圖 4.1。如前文獻回顧所說明，運研所過往研究已經累積了可觀的成果可作為鐵路數位分身平台之核心技術，而本計畫將以政府相關單位所急需之功能作為優先研發項目。之後則可在未來依短、中、長期次第發展以使該平台達到成熟而實用之境界。有關未來各階段發展之目標則將於後續相關小節說明之。



圖 4.1 數位分身發展時間軸

4.2 平台數據

本節將說明欲達到鐵路數位分身平台之長遠目標，於建立臺鐵系統數位模型時，未來所需要建立並確實整合的數據。由於平台之主要目的在表現臺鐵系統之運轉狀況，所擬建立之數據亦以此目的為最主要考量。後續各小節將說明鐵路數位分身平台之短、中、長期發展目標，而數據之取得與整合則應隨目標之需要而逐步齊備之。

1. 運務數據

在運務方面，鐵路數位分身平台所需要的數據以描述運轉型態與運轉狀況為主，包含下列各項。

- (1) 營運路線：依臺灣鐵路管理局鐵路建設作業程序^[44]第七條之規定，臺鐵本線之營運路線區分為縱貫線、臺中線、屏東線、宜蘭線、宜北迴線、臺東線及南迴線，其中成功至追分之路段歸於臺中線。此外尚有平溪線、內灣線、集集線、沙崙線及深澳線等主要支線。這些路線之詳細數據以及所有路線之所屬車站均需建置於鐵路數位分身平台之中。
- (2) CTC 紀錄：中央行車控制系統（Central Traffic Control, CTC）為臺鐵號誌系統中最重要的部分之一，其管轄範圍及於臺鐵本線全部以及部分支線。該系統全天不中斷運轉，每分鐘掃瞄全系統數十次，偵測管轄範圍內所有軌道電路之狀態以掌握列車之位置。

每次掃瞄所得之數據均即時傳送到位在臺鐵大樓之行車控制中心，以及售票系統。本計畫對鐵路數位分身之主要目的設定並不在即時監控，因此亦無即時接收之必要，但若完整收集並其他所有數據確實整合，則將可很大程度在數位分身平台上重現每日之真實運轉歷史。

- (3) 每日班表：班表所呈現的是臺鐵系統在上線運轉之前的階段，所擬開行的車次及其內容。臺鐵每日的班表中含有 2 類車次：佔大多數的常態性車次，與數量較少的臨時性車次。大略而言，前者以周為單位重複執行，包括固定每日開行及固定每周若干日開行（例如每周日、每周六日、每周六日等）之車次。至於臨時性車次則主要為無周期性之車次，例如專列及部分非辦客列車等。組成複雜且並非所有車次均有固定的周期性，使得臺鐵每日班表均有微小的差異。為此完整收納每日之班表對鐵路數位分身平台具有高度重要性。
- (4) 售票紀錄：本項數據呈現的是使用臺鐵系統的乘客在系統中移動的狀況，代表臺鐵系統所產出的運能對社會所發生的貢獻，亦代表維持運轉所投入運轉資源轉換成為使用者效用的效率。其主要內容為一般車票之售票交易紀錄，以及電子票證之刷票進出站資訊。由這些數據所統計得到的起迄資料具有極高之解析度：每一張對號車票均有所對應之車次及旅程之起迄站，而每一次的電子票證均有刷票進出的車站以及出站時間。這些數據可很大程度重建乘客之流動與搭車狀況，並在某種程度可反映社會經濟活動所產生之臺鐵運輸需求，對鐵路數位分身平台掌握乘客狀況具有相當之重要性。

2. 工務數據

鐵路數位分身平台所需要之工務方面數據，主要是用以呈現臺鐵系統直接承載列車運行之硬體設施。主要項目說明如下。

- (1) 場站：依臺灣鐵路管理局鐵路建設作業程序^[44]第四條之規定，臺鐵之「站」又分為車站號誌站及調車場三種。鐵路數位分身平台所需要之數據以車站中英文名稱、編碼、站等、經緯度等為主。
- (2) 站間鐵路：本項數據指連接相鄰站鐵路之股道數、閉塞區間數、軌道長度等項目。
- (3) 車站股道：各車站及號誌站之站內股道佈設數據，但不含調車場之股道佈設。
- (4) 橋梁、隧道、邊坡：此為鐵路路線上重要的基本設施，所需要之日常管養作為與一般路段不同，對運轉之影響亦各不相同。

3. 機務數據

在機務方面，鐵路數位分身平台所需要之數據以表現臺鐵系統所擁有之車隊以及運轉過程中各車輛編組之運用狀況為主。具體之項目如下。

- (1) 車輛：本項數據指臺鐵系統所擁有之車隊清單，包括每一輛車之種類、型號、服役或退役狀態等個別數據。
- (2) 運用計畫：為了維持系統正常運轉，臺鐵人員需要將每日班表中之所有車次予以適當區分為多組運用，每一組運用由一組編組執行。此類之數據可表現臺鐵系統運用其所擁有車隊之整體狀態。
- (3) 編組指派：本項數據係指將個別車輛連掛成為編組，再指派編組執行運用之每日紀錄。這些數據將對鐵路數位分身平台重現運轉歷史具有相當之重要性。

4. 電務數據

臺鐵系統中主要之電務相關設施包括了平交道之保安設備以及電力、號誌、通訊設備。其中電力、通訊設備與鐵路數位分身平台表現臺鐵系統運轉狀況之目標關係較少，其他各項說明如下。

- (1) 平交道設備：隨著多年來鐵路立體化以及其他消除平交道之努力，臺鐵系統之平交道已由早年超過 800 處大幅減少，但全系統仍有約 400 處平交道，為臺鐵系統中不可忽視的設施。本項數據的目的在使得鐵路數位分身平台中所建立的臺鐵系統數位模型能夠呈現真實系統中各平交道之位置、種類、所配置設備等屬性。
- (2) 號誌設備：號誌系統控制臺鐵本線全線以及部分支線所有列車之運行，而前述中央行車控制系統亦為號誌系統的一部分。鐵路數位分身平台必須先取得這些系統的基礎資訊，才能據以在平台中建立數位模型，之後系統才有能力使用所取得的 CTC 運轉紀錄來重現歷史。

5. 乘務人力數據

目前臺鐵所有列車於運轉時均需要有乘務人員隨車值勤。若鐵路數位分身平台能完整收錄乘務人員狀況將有助系統重現真實狀況。

- (1) 機班人員：此類乘務人員包括了司機員、機車助理等動力車輛駕駛人員。
- (2) 車班人員：此類人員以列車長為主。

- (3) 車勤服務人員：此類人員指附業中心所指派於部分車次之隨車服務人員。

4.3 優先研發項目

目前政府正積極著手推動多項鐵路相關工程計畫，而執行運轉以提供運能，又為任何鐵路相關工程之最重要核心目標。然現今相關單位仍缺乏具有跨專案整合運轉分析之軟體工具，鐵路數位分身平台實有必要優先研發可供各負責推動各項鐵道建設計畫之單位作為分析審議之功能項目，以助相關單位在鐵路運轉方面進行具體而深入的計畫審議。而此策略方向亦與平台表現臺鐵系統之運轉狀況之主要目的相一致。此方向之具體研發項目又可區分為使用者與需求、平台架構、分析功能、與操作界面等面向，分別說明如下。

1. 使用者與需求

科技的目的在為人類提供服務，而本軟體之重要目的在作為計畫審議的重要工具，其功能貼近使用者需求亦甚重要。本平台使用本土開發之技術在本土開發，屬高度客製化的軟體。為了使軟體能夠真正貼近使用者的需求，後續必須儘早有使用者的具體深度參與。所謂使用者指直接使用本軟體以執行其業務的人員，而其需求則是軟體功能設計的最重要依據。運研所在後續研發過程中，應優先尋求未來將使用本軟體以執行其業務的人員之具體參與。之後即可依使用者所描述對本平台的期待以及預期使用本平台的方式，有系統整理成為需求之後，再依使用者需求設計軟體並開發適合使用者運用的功能。

2. 平台架構

在鐵路數位分身平台中建立數據的主要目的在支持各種軟體引擎的複雜運算，提供查詢下載僅為附帶功能，並非主要目標。二者對數據品質之需求水準截然不同。軟體引擎係依據求解演算法而開發，著重在軟體面；求解演算法又是依模式之性質而設計，著重在發揮電腦的能力以求解複雜的數學問題；而模式則著重在抽象描述之能力，以數學邏輯為主要重點，各模式之間大都相互獨立。因此引擎模組演算時對數據的需求，以及所產出的演算結果數據均需要納入整體的架構中，才有可能在軟體面整合多個原本相互獨立的模式，使鐵路數位分身平台有能力支持各引擎，同時又使一個引擎所輸出的數據能夠供成為另一引擎的輸入數據，共同組織成為具整體性的平台。

在數據方面，數位分身平台需要整體設計並建置足以容納、整合前節所述所有數據之資料性質，同時又要方便操作人員建立、維護、取用這些數據，有必要在鐵路數位分身平台設計並建置完善的軟體架構。具體

內容包括明確定義各種數據之間的相互關係、各種數據之具體內容項目，並設計數據管理之基本邏輯。

這些設計的目的在使軟體系統能夠提供使用者所需要的功能。因此後續取得使用者之參與後，需要再檢視使用者為執行其業務所需要的功能以及數據是否可容納於本平台中，並對軟體的設計做必要的調整。

3. 分析功能

在核心技術相關模組方面，運研所在過去已經累積了可觀的可用成果，建立多種模式、開發演算法並依演算法先後開發成為軟體引擎^[6, 7, 8, 19, 15]。數位分身平台首重系統整合，納入平台的軟體引擎除了必須具備求解模式的能力外，同樣重要的是需要有能力使用數位分身平台內部資料庫所提供之數據作為其輸入項，並將其輸出數據納入相同的資料庫作為後續分析處理，或供其他軟體引擎使用。

考量我國相關單位對鐵路相關建設計畫審議工具需求之急迫性，以及運研所過往所累積之研究成果，有必要優先納入鐵路數位分身平台之分析功能計有自動解衝突、運轉模擬與分析、路塞指數計算及瓶頸分析等。除了這些分析功能之外，使用者用以進行計畫審議時可能尚有其他分析項目需求，或者有其他的分析目的。這些均有待後續進行訪談時與參與開發的使用者深入討論之。

4. 操作界面

鐵路數位分身平台配置有內建的資料庫，用以收納及管理維護複雜的各種數據，同時亦建有多種分析功能。這些數據的維護與計算功能的操作，其複雜度均非使用人員所能夠直接手動處理，而是必須仰賴適當的軟體界面為之。以下以工務之車站股道數據為例簡要陳述數據處理之複雜性，以及軟體界面如何大幅簡化使用者之操作流程。

車站股道數據之原始資料來源為臺鐵行控中心顯示面板之照片如圖 4.2 所示例。此種數據形式屬高度非結構化，雖方便人工瞭解但不易供演算之用。鐵路數位分身平台之軟體所需要之最終形式為高度正規化、標籤化數據，如圖 4.3 所示例。這些數據可精準表現每一車站範圍內所有列車可停駐之股道、橫渡線、與站外股道銜接之進出站位置，以及所有這些設施項目的相對關係。更重要的是要表現列車在站內通過、停靠、折返等活動之所有可能動線，以及多數車站組合成為鐵路系統時，車站與車站之間複雜的相對關係。然而這些數據之建立及維護並不容易，除需要對臺鐵行控中心顯示面板之照片進行人工判讀之外，必須高度依賴軟體系統所提供的工作環境，工作人員才能建立、管理、編修、維護這些數據。

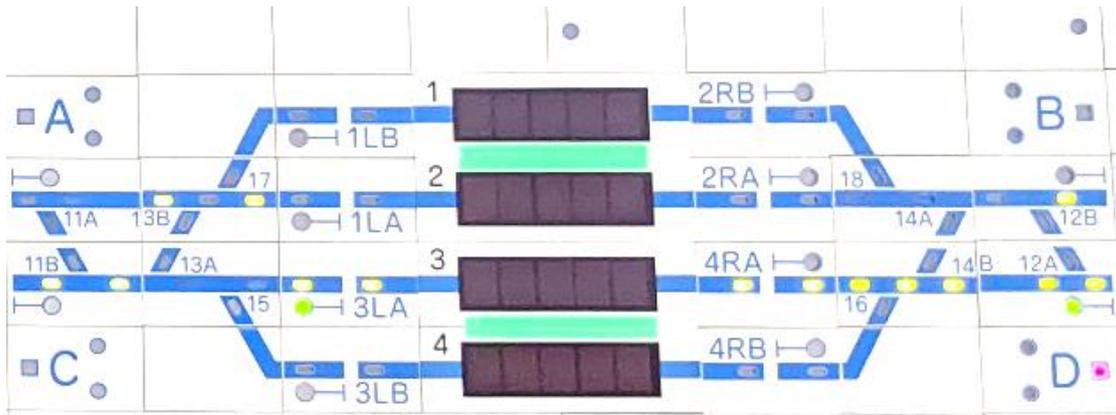


圖 4.2 臺鐵行控中心顯示面板照片示例

```

<Link Code="SI0221" IsStation="true">
  <CntMuSet>
    <CntMu Id="Cnt_R1_0_CL1_P1" Code="Cnt_R1_0_CL1_P1" Link="SI0221"/>
    <CntMu Id="Cnt_R2_0_CR1_P1" Code="Cnt_R2_0_CR1_P1" Link="SI0221"/>
    <CntMu Id="CNT_P1_cnt_0" Code="CNT_P1_cnt_0" Link="SI0221"/>
    <CntMu Id="CNT_P1_cnt_99" Code="CNT_P1_cnt_99" Link="SI0221"/>
    <CntMu Id="CNT_P2_cnt_0" Code="CNT_P2_cnt_0" Link="SI0221"/>
    <CntMu Id="CNT_P2_cnt_99" Code="CNT_P2_cnt_99" Link="SI0221"/>
  </CntMuSet>
  <MuSet>
    <MuGroup Id="1" Code="1" Dockable="FALSE">
      <Mu Id="MU_R1_0_CL1_P1" Code="MU_R1_0_CL1_P1" Tracks="0" CntA="Cnt_R1_0_CL1_P1" CntB="CNT_P1_cnt_0"/>
    </MuGroup>
    <MuGroup Id="2" Code="2" Dockable="FALSE">
      <Mu Id="MU_R2_0_CR1_P1" Code="MU_R2_0_CR1_P1" Tracks="1" CntA="Cnt_R2_0_CR1_P1" CntB="CNT_P1_cnt_99"/>
    </MuGroup>
    <MuGroup Id="3" Code="3" Dockable="FALSE">
      <Mu Id="MU_R3_0_CL1_P2" Code="MU_R3_0_CL1_P2" Tracks="2" CntA="Cnt_R1_0_CL1_P1" CntB="CNT_P2_cnt_0"/>
    </MuGroup>
    <MuGroup Id="4" Code="4" Dockable="FALSE">
      <Mu Id="MU_R4_0_CR1_P2" Code="MU_R4_0_CR1_P2" Tracks="3" CntA="Cnt_R2_0_CR1_P1" CntB="CNT_P2_cnt_99"/>
    </MuGroup>
    <MuGroup Id="P1" Code="P1" Dockable="TRUE">
      <Mu Id="SI0221_P_1_0" Code="SI0221_P_1_0" Tracks="0" CntA="CNT_P1_cnt_0" CntB="CNT_P1_cnt_99"/>
    </MuGroup>
    <MuGroup Id="P2" Code="P2" Dockable="TRUE">
      <Mu Id="SI0221_P_2_0" Code="SI0221_P_2_0" Tracks="0" CntA="CNT_P2_cnt_0" CntB="CNT_P2_cnt_99"/>
    </MuGroup>
  </MuSet>
  <PathSet>
    <Path Id="0" Code="SI02210" CntFrom="Cnt_R1_0_CL1_P1" CntTo="Cnt_R2_0_CR1_P1" MuGroup="1:P1:2" Type="1"/>
    <Path Id="1" Code="SI02211" CntFrom="Cnt_R1_0_CL1_P1" CntTo="Cnt_R2_0_CR1_P1" MuGroup="3:P2:4" Type="1"/>
  </PathSet>
</Link>

```

圖 4.3 車站股道標籤化數據示例

除了車站股道編輯之外，本平台尚需要多種操作界面功能才能方便使用者使用。然而使用者之方便性具有甚高的主觀成份，並無客觀的一致性標準。而操作方便性又與使用者接受程度習習相關。因此操作界面的設計高度依賴使用者需求。本平台目前已經開發一套具一定能力的操作界面，但設計過程中並無使用者參與提供需求。因此可合理預期未來取得使用者參與之後，操作界面的軟體模組很可能需要相當程度的改寫。

4.4 短期目標

鐵路數位分身平台最重要的短期目標是要有能力作為鐵路相關建設計畫之審議工具，以儘快投入相關單位，協助各單位在多項鐵路建設計畫之早期研究、分析、審議過程中，進行跨計畫的具體運轉分析，以大幅降低未來完工之後成效不如預期的風險。

為了達到這個短期目標，鐵路數位分身平台需要在平台架構、分析功能及操作界面三個面向，都能夠支持使用者進行所需求的操作。然而欲達到此目的，唯一的方法是對未來使用者進行直接訪談以具體釐清使用者需求，之後在與使用者密切合作逐步完成軟體之設計及實作。因此達成短期目標之最重要關鍵並不在技術面，而是在使用者之深度參與。

4.5 中期目標

運研所過往研究成果^[6, 7]提出了足以進行鐵路系統供需診斷的 6 個抽象模式，並均開發了求解演算法。其中解衝突模式及系統運轉模擬模式與計畫審議直接相關，達成短期目標時應已完整建置於平台中並完成充份整合。至於需求模式、供給模式、乘客選擇行為模擬模式及乘客選擇參數校估模式之整合則為平台發展之中期目標。

4.6 長期目標

鐵路數位分身平台之長期發展目標是要建立重現運轉歷史之能力，而重現過去歷史的目的則在精準預測未來。前述短期與中期發展目標側重在規畫及分析功能，所需之數據以路軌狀態、班表資料為主，前者屬靜態資料，而後者則為臺鐵全系統運轉之事前計畫。而本項目標則著重在真實運轉狀況之歷史紀錄。這些紀錄以中央行車控制系統之數據為主。未來完成平台架構、分析功能及操作界面三個面向的擴充以整合本項數據之後，數位分身平台將有能力重現運轉歷史，並由歷史紀錄中萃取更為精準的運轉參數。這些運轉參數將有助提高運轉分析之精準度，使這個平台對各種情境下之運轉狀況做出更精準的預測。

第五章 臺鐵數位分身平台設計

5.1 數據維護架構

確實的整合，為鐵路數位分身平台成功達到目的最重要的一環。整合的兩個最重要的項目為數據整合與引擎整合，而後者又以前者為基礎。為臺鐵系統而建立的鐵路數位分身平台，其最重要數據均來自臺鐵真實資料。而原始的真實資料各有其各自存在的目的，並非為數位分身平台而存在。因此由軟體平台的觀點視之，必定存在許多互不一致之處。這些不一致甚至相互矛盾之處不一定有礙各數據的原始目的，但對平台中數據的一致性卻有極大影響。

茲以臺鐵班表中之「談文南號誌站」為例，說明以上之論述。談文南號誌站位在臺鐵海線，談文站與大山站之間，北側距談文站 1.8 公里，南側距大山站 4.9 公里，約位在竹南站之南方 6.4 公里處。此號誌站為單線與雙線區間交界處，並無辦客業務。依分析過往臺鐵真實班表之結果，行經本路段之車次中，有些車次在真實班表之行程資料數據中有納入本號誌站，有些則無。同時，路軌資料之車站清單確有此號誌站。亦即，以南下為例，在真實班表有部分車次在本路段之行程依序為「竹南、談文、談文南、大山」，而其他車次則為「竹南、談文、大山」，彼此並不一致，而後者亦與路軌資料不全然一致。對已熟悉業務之臺鐵人員而言，在人工作業時這種不一致狀況並不造成應用困難，但對要求高標準一致性之資訊系統而言，此種狀況形同班表資訊認為鐵路中同時存在「談文至談文南」及「談文南至大山」二段站間軌道以供上述第一種狀況之車次運行，同時亦存在「談文至大山」之站間軌道以供第二種狀況之車次運行。但路軌資訊顯然僅有第一種狀況而無第二種狀況。此時若使用者或任何一套界接本平台的軟體系統，以人工或自動化之方式查詢運行「談文至大山」之車次是否有行經橋梁或隧道，則將發生軟體錯誤，因為系統中並無「談文至大山」這段軌道。

就上例而言，顯然鐵路數位分身平台必須先精準建立路軌系統數據，使軟體能夠完全掌握臺鐵系統中所有車站的正確資訊。之後在取得真實班表數據時，則自動依據車站資訊對班表數據進行一致性檢查，並對無法通過檢查的班表數據採取進一步動作。除了對本例所述的狀況以外，亦需要對所有數據均以相同的方式訂定一致性的標準、檢驗程序以及不

符標準時之處理動作。如此方能確實維持平台中數據的整體一致性。倘若僅有數據收納功能而無嚴謹的一致性維持，則整個系統將很快退化成為單純的數據倉儲而無數位分身平台應有之功能。

以上所論述之數據處理概念示意於圖 5.1。該圖最下方為各種原始數據。如前所論述，這些原始數據各有其不同之設計用途，雖然可存放於同一數據倉儲中，但彼此之間的一致性往往無法達到數位分身平台所需要的標準。這些原始數據經整合成為一致化數據之後存放於數位分身平台之主要資料庫中。平台之所有分析運算均由各式軟體引擎來達成，引擎執行運算所需之輸入數據均來自上述資料庫而非原始數據，完成運算後所產出之數據亦全數回存資料庫中，示意於圖 5.1 上方。各個軟體引擎之間則儘量避免直接交換數據，以維持引擎本身之單純性。圖 5.1 右側則為各種數據編輯用之軟體界面，使用者可利用這些界面，依其所構想之情境編輯各種數據，並均納入主資料庫中。

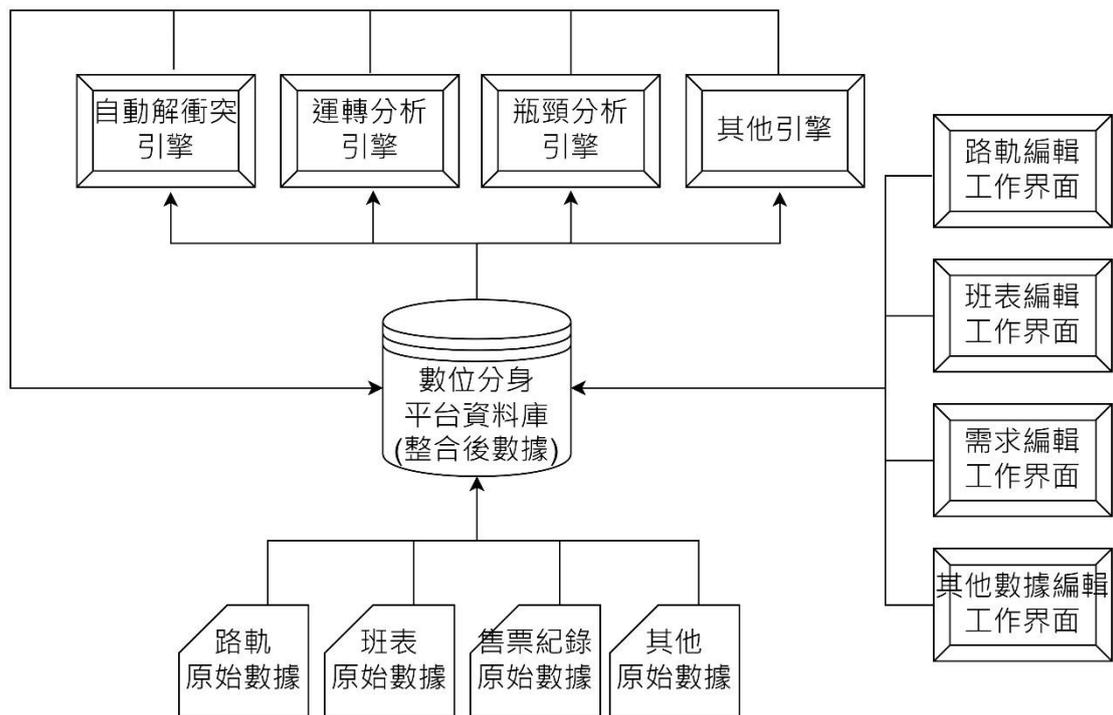


圖 5.1 鐵路數位分身平台數據流動架構示意圖

5.2 數據組織架構

本節說明鐵路數位分身平台之數據組織架構，並示意於圖 5.2。由此圖可明確觀察到，鐵路路網居於中心之位置。構成路網之基礎資訊包括車站、站間、路線等資訊，而路網又是其他多項資訊之基礎。以下將詳細說明這些資訊之組織架構。

在架構中最基礎的數據為圖左下方之車站股道數據，其內容為圖 4.3 所示例之車站股道資訊，包括站內各股道、橫渡線、與站外連接點之位置、可能的站內列車動線等。這些資訊經軟體轉換之後即成為車站樣板，亦示於圖 5.2 中。在數據組織架構中，車站樣板之用途在供使用者取用以編輯鐵路路網。

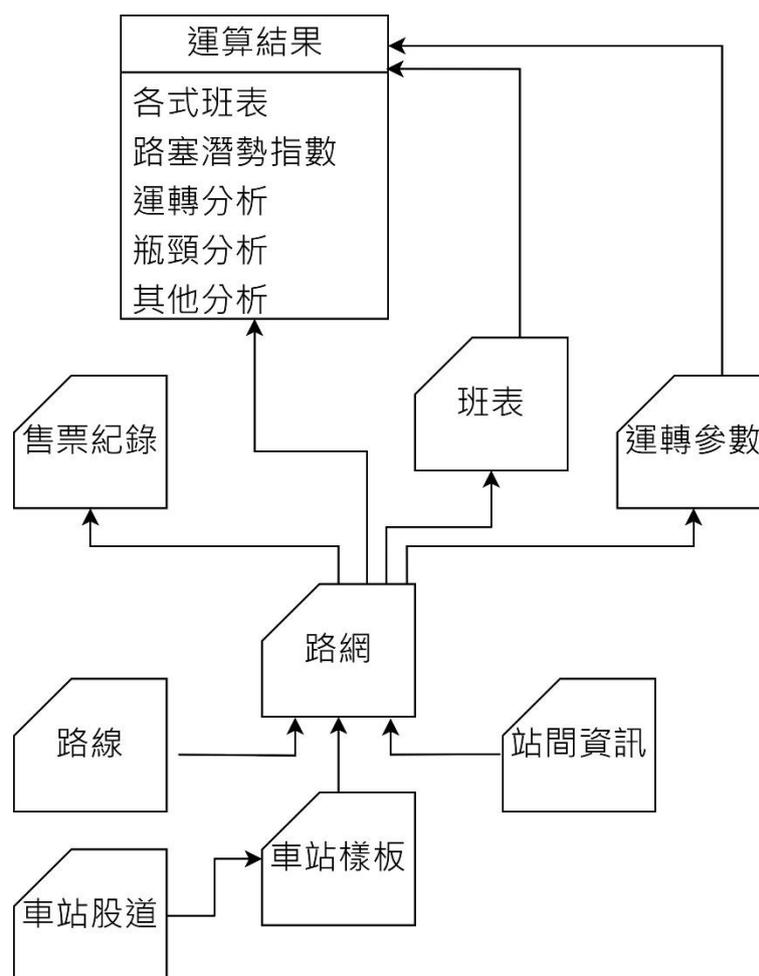


圖 5.2 鐵路數位分身平台數據組織架構示意圖

完整的鐵路路網除了含有車站資訊之外，尚需站間資訊及路線資訊，

亦示於圖 5.2 架構中。依此架構，鐵路路網為多項其他數據之基礎。以圖 5.2 架構所示之售票紀錄為例，有或無售票紀錄，均不影響路網數據。但車站資訊包含於路網中，若沒有路網資訊則無車站清單，此時售票紀錄將無意義；售票紀錄數據必須依附於適當的路網資訊方有意義。例如，臺鐵系統之售票紀錄若予對應桃園捷運之路網，將完全失去其資訊意義，反之亦然。相同之關係亦存在於圖 5.2 所示之班表資訊、運轉參數及運算結果。

在這些數據中，班表指某路網之時刻表，而運轉參數則指各種牽引種別之列車，在路網中各相鄰車站之間，兩方向運行之基準運轉時分，以及各級列車在各車站之最小停站時分等參數。運算結果則指數位分身平台進行各種運算、分析之後所得到的數據。

本軟體系統之設計，容許所有這些數據之來源均可為真實數據、數位分身運算結果或使用者手動編輯之結果。例如，軟體系統允許來自真實鐵路系統之真實班表、數位分身平台自動排點所得到的班表、使用者手動編輯之班表，或其他任何來源之班表。其他種類之數據亦是類似。

5.3 操作流程架構

如前所說明，具有跨計畫能力之運轉分析為鐵路數位分身平台應優先研發之功能，以作為計畫審議之重要工具。以下以一簡例說明鐵路數位分身平台未來完成之後，使用者進行運轉分析之操作流程架構。設若今欲比較彰化市鐵路高架化計畫，彰化站南北兩側採二股道佈設與四股道佈設，兩種情境下的運轉狀況。此時，使用者可利用平台之工作界面，以臺鐵真實路網、車站數據為基礎，依其所構想之情境置換彰化站之股道佈設，分別建立二組路軌系統：其一在彰化站南北兩側設置二股道進出車站，另一組則設置四股道進出車站。同樣的，使用者亦可自資料庫中取用臺鐵真實班表，依其所構想之情境予以調整車次（例如每小時增加對開一對運行於竹南與斗六之間，站站停的區間車）。所有這些數據均以新增數據的方式回存到資料庫中，不改變既有之真實數據。完成數據編修後，即可利用數位分身平台之自動解衝突引擎排除因使用者增加車次或調整路軌、車站而發生之衝突而得到無衝突新班表，再存入資料庫中。之後再利用運轉分析引擎對此新班表進行運轉模擬、計算路塞潛勢指數等分析，亦可利用容量及瓶頸分析引擎進行路線之容量及瓶頸分析。如前所述，所有這些引擎均自資料庫取得所需要之輸入數據，並將

運算結果自動回存資料庫；不同引擎之間並不直接交換數據。以上情境分析簡例之操作流程示意於圖 5.3。

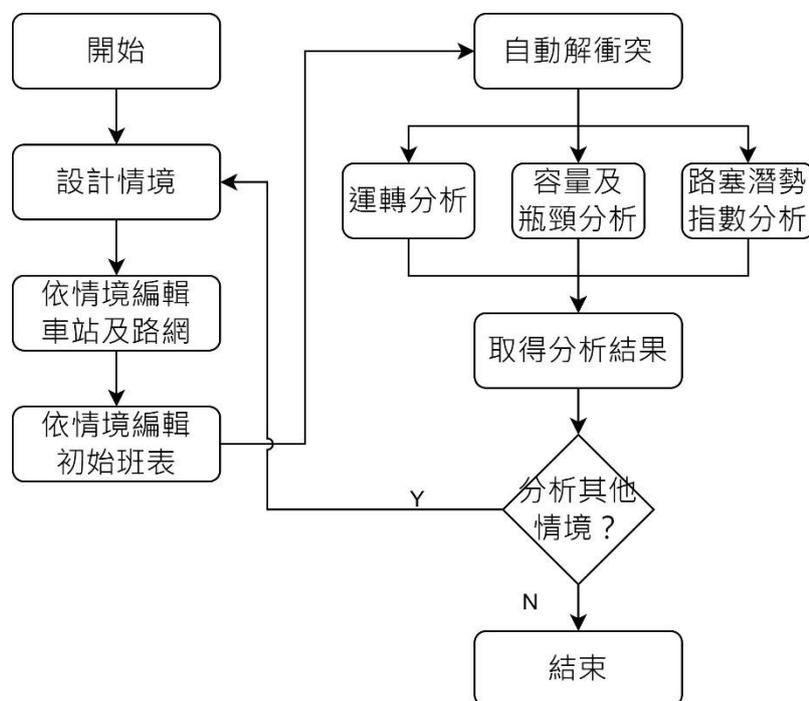


圖 5.3 鐵路數位分身平台情境分析運算操作流程架構示意圖

如圖 5.1 所示，本平台所有數據之流動均以資料庫為中心，由系統建置專用功能進行管理維護。因此，使用者執行圖 5.3 所示之編輯車站、路網、初始班表，以及自動解衝突之後所產出的無衝突班表，乃至於進行各種分析後所產生之數據，全數都由軟體系統自動在各相關模組之間傳輸，並且維持所需要的一致性。使用者完全不必為了收納、管理、編修，或在操作過程中在各種功能之間傳遞數據，而自行以檔案或其他形式管理數據。

5.4 軟體系統架構

鐵路數位分身平台之軟體架構示意於圖 5.4。整個軟體由資料庫、引擎庫及工具庫所構成。三個部分可分別安裝於不同電腦硬體上，亦可全部安裝在同一部電腦中。其中資料庫存有平台所有的數據，亦即圖 5.1 中央位置所示之平台資料庫。引擎庫則含有多數各自獨立之求解引擎，以及用以控管引擎之模組。至於工具庫則安裝於使用者之前端電腦，主要

功能在提供使用者工作環境、帳號管理等。後續小節所示之各項功能之工作環境，均為工具庫所提供。本軟體系統係採用主從式架構，主要開發語言為 C#。

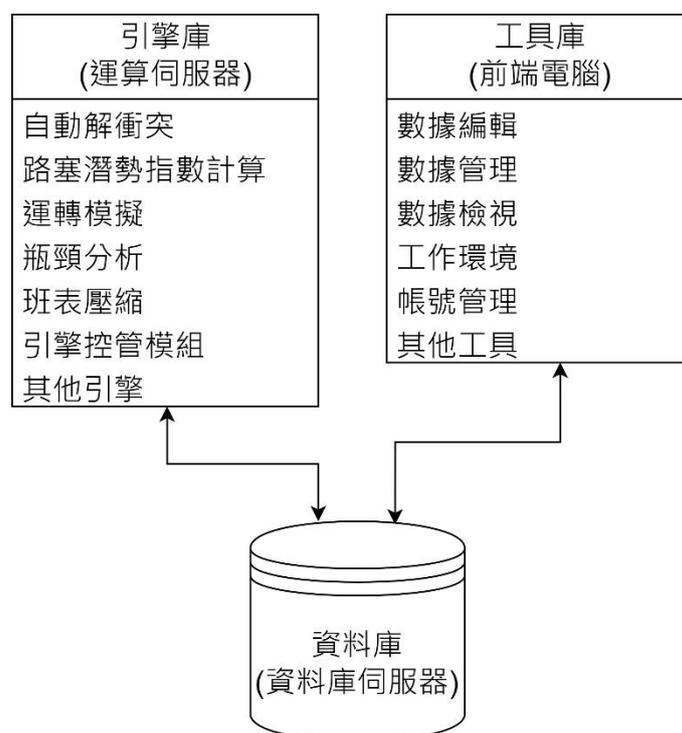


圖 5.4 鐵路數位分身平台軟體系統架構示意圖

5.5 軟體操作功能

本平台之操作功能可區分為路軌編修與管理、班表編修與管理、運算與分析、數據管理以及系統管理等 5 大類。如前所述，使用者需求與軟體操作功能之間有很密切的關聯，未來取得使用者參與並提供需求之後，可能尚需相當程度之變更設計以及軟體改寫才能符合使用者的需求。本節將分別簡述各類功能之設計，目的在提供目前軟體操作功能的整體性描述。本節之目的並不在供讀者據以熟悉軟體功能。

1. 路軌編輯與管理

本平台提供的路軌編輯與管理功能涵蓋了車站、站間及路網，以供使用者執行圖 5.3 所示之編輯車站及路網操作步驟。在車站方面軟體允許使用者在圖 5.5 所示的編輯畫面中以拉線條的方式設定所有股道及橫渡線，

並設定月台的位置。完成之後軟體可自動解析該車站之所有可能的進路與列車行經該車站的路徑，並提供使用者指定欲使用或關閉之進路及路徑。軟體提供了極高的自由度及彈性，使用者可依每一座車站之實際軌道佈設狀況精準編輯，不必為了遷就軟體的能力而對車站作粗糙的歸類。完成編輯的車站將自動以樣板形式轉為數位模型收納於資料庫中，供後續使用。

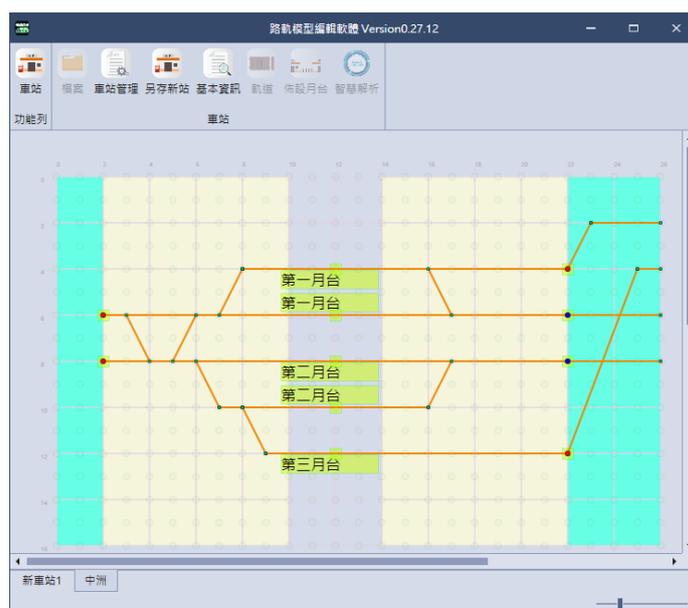


圖 5.5 鐵路數位分身平台軟體車站股道編輯畫面

本軟體編輯站間資訊之工作環境示於圖 5.6。對於使用者所指定的站間，軟體允許設定兩端車站相連接的方式、站間股道數、閉塞區間數等基本資訊。使用者可設定該站間的沿軌道距離，軟體亦有能力以兩端車站的經緯度資訊自動計算直線距離。不論站間為單線、雙線或多線，軟體之操作方法均完全相同。

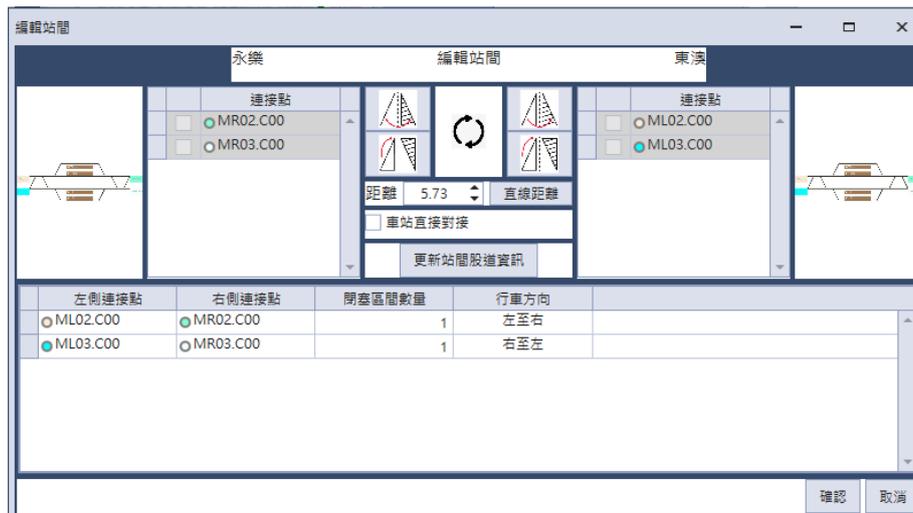


圖 5.6 鐵路數位分身平台軟體站間軌道編輯畫面

路網為多數車站與站間組合而成的鐵路。本平台對路網形式並無既定限制。單純之線狀鐵路，或含有環線、支線等較複雜之鐵路，或單線、雙線、多線混合之鐵路系統均完全可使用。以下圖 5.7 所示為鐵路數位分身平台所提供之鐵路路網編輯工作環境，使用者可在此視窗中進行設置車站位置、取用已存在之車站股道佈設樣板作為該車站之股道、設定站間軌道等操作。

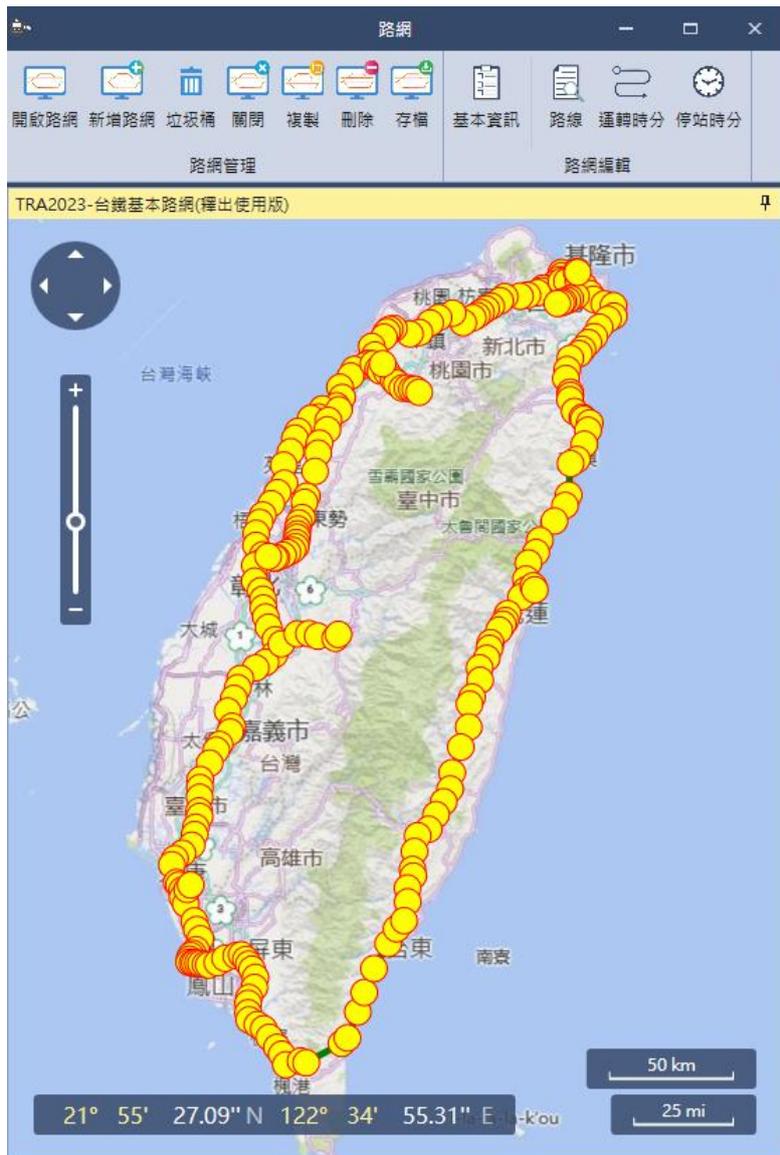


圖 5.7 鐵路數位分身平台軟體路網編輯畫面

2. 班表編修與管理

鐵路班表含有豐富的資訊，除了描述系統中所有車次在時間與空間中之移動軌跡外，並含有車種、到站任務、牽引種別、列車在行經各車站時所使用的股道等資訊。班表可用許多形式展現，其中運行圖為最常用的重要呈現方式之一。本平台亦具有呈現運行圖之能力，以下圖 5.6 即為臺鐵 2020 年 7 月 7 日真實班表在本平台呈現的部分運行圖。使用者可在這個操作環境中對班表進行各種查詢。

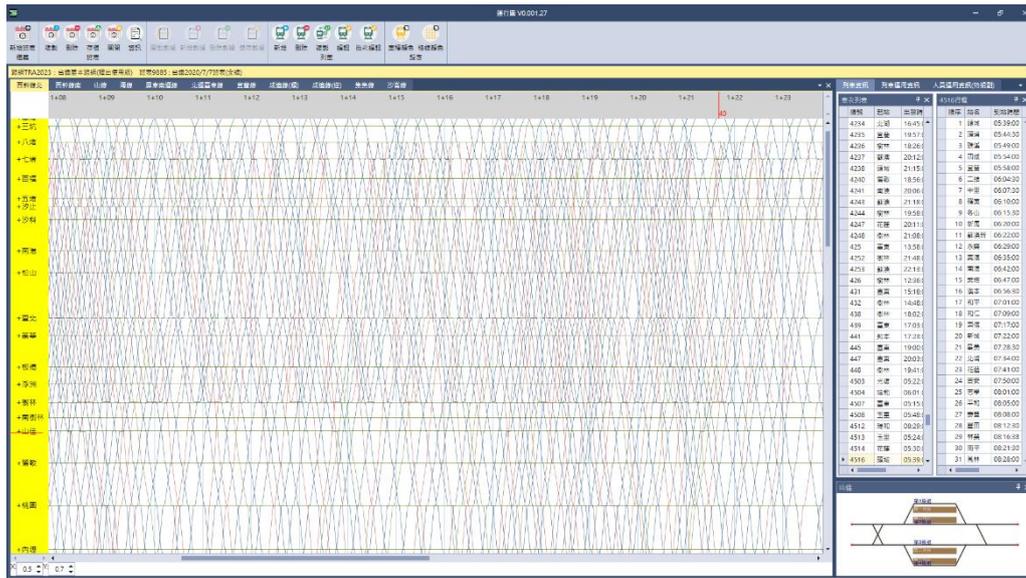


圖 5.8 鐵路數位分身平台運行圖畫面

使用者在進行計畫審議時需要對各項建設計畫進行班表試排，以具體評估各種方案情境下鐵路系統增班、調整車次的能力，亦即圖 5.3 所示之編輯初始班表步驟。為了方便這些分析操作，本平台允許使用者在運行圖的工作環境下編修班表，其工作畫面如圖 5.9 所示。使用者可在此畫面中進行車次增加、刪除、截短、延長、複製、調整行點等操作，並可編輯各車次的停站模式，以及為任一指定的車次在任一指定的車站設定禁用的股道。

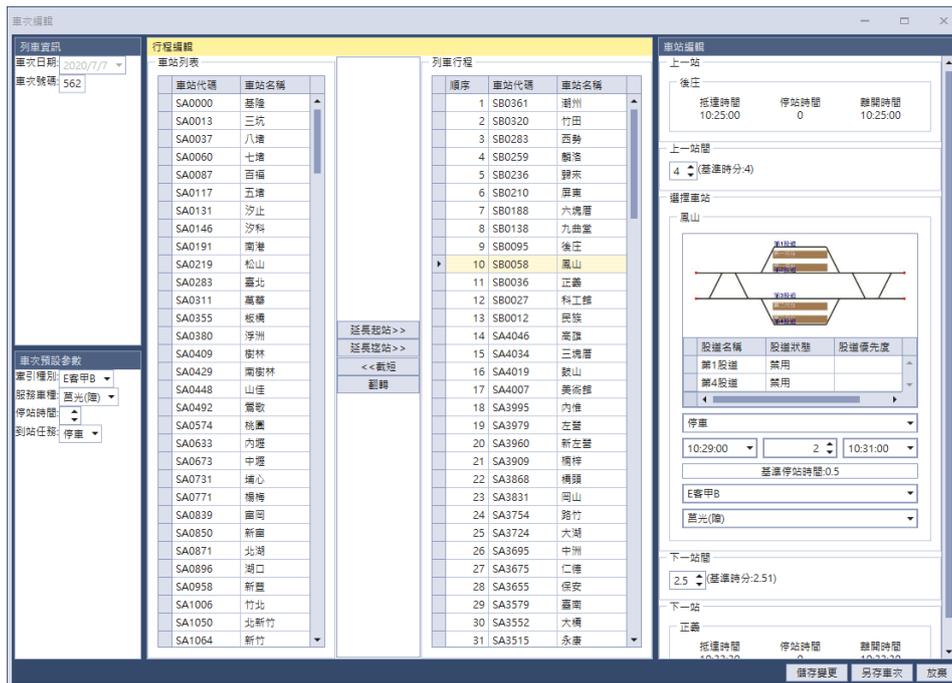


圖 5.9 鐵路數位分身平台車次編輯畫面

3. 運算與分析

本平台提供多項進行計畫審議之分析工具，如圖 5.3 所示之自動解衝突、運轉分析、容量分析、瓶頸分析、路塞潛勢指數分析等，並於完成之後取得、檢視分析結果，亦示於圖 5.3。這些分析操作有其複雜性。本軟體對此允許使用者以專案方式進行這些複雜的分析，其操作畫面示於圖 5.10。該畫面最左側即為當時使用者所擁有的專案清單。使用者點選所指定的清單之後，畫面中央的主工作區即顯示該專案已經執行過的所有分析。使用者可在此檢視所有分析的成果、下載數據，亦可新增分析或刪除先前已進行過的分析。



圖 5.10 鐵路數位分身平台專案操作畫面

4. 數據管理

如圖 5.2 所示，本平台擁有多項複雜的數據，並集中收納於資料庫如圖 5.1 所示。軟體系統除了具有自動嚴謹維持這多種數據之間的一致性之外，並提供使用者數據管理及權限管理的功能。其中數據管理功能之操作畫面示於圖 5.11，使用者可在此工作環境中查詢其可使用的數據，以及各種數據之間的關聯關係。



圖 5.11 鐵路數位分身平台數據管理畫面

本平台具有權限功能，以區隔多數使用者對數據的可使用範圍。其主要工作畫面如圖 5.12 所示。任一使用者可在此畫面中將其擁有使用權限的數據設定分享與其他使用者。

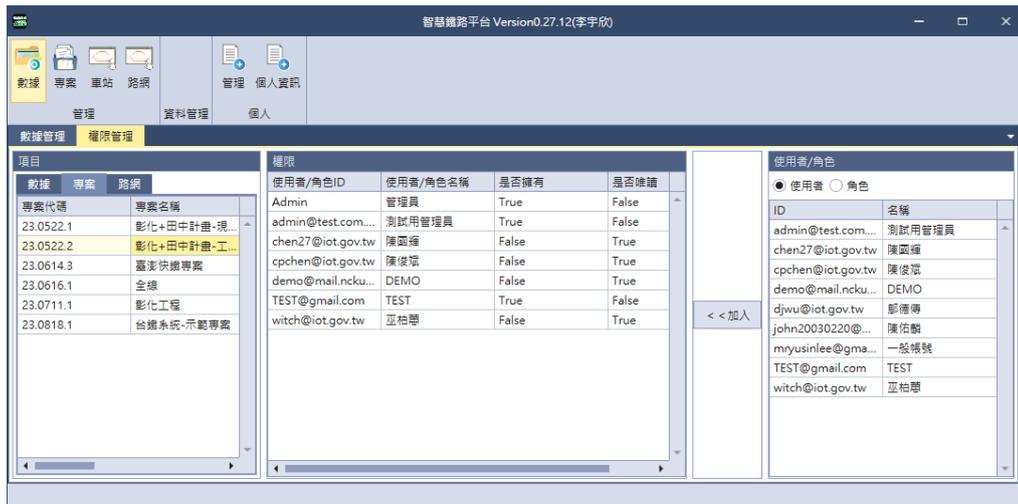


圖 5.12 鐵路數位分身平台權限管理畫面

5. 系統管理

本平台以帳號登入作為主要控管機制。具有管理員權限的使用者可利用圖 5.13 所示之畫面進行帳號新增、刪除、停用、設定權限等級、調整有效期限等管理工作。

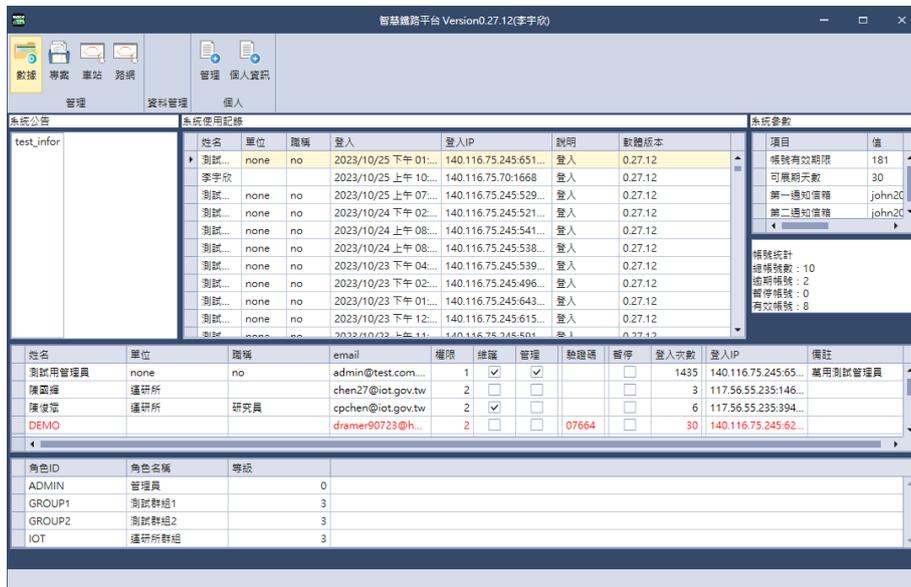


圖 5.13 鐵路數位分身平台系統管理畫面

第六章 運轉分析

6.1 整體介紹

運轉分析是鐵路數位分身平台作為計畫審議工具最直接而重要的功能。軟體所提供的運轉分析流程，為使用者利用軟體所提供的工作環境，依所擬分析的情境在平台中建立路軌模型、車次及其他參數，之後利用平台的自動排點功能得到該情境下的無衝突班表，再對班表執行進一步的分析以判讀在該情境下鐵路系統可能的運轉狀況，並計算有用的指標如路塞潛勢指數、容量、瓶頸等。軟體系統提供運轉分析功能的目的在協助使用者得以運用此軟體系統為工具，用簡便的方式操控軟體進行複雜的科學化運算，而得到有助於計畫審議的具體分析結果。本章將說明本軟體在目前的設計下可產出的分析項目，以及支持這些分析而開發的數位模型。未來得到使用者參與軟體開發設計時，可能尚需要配合使用者之需求，擴充或改寫程式而提供更多的分析項目，甚至有可能需要在系統中納入更多的不同數位模型來支持這些新增的分析項目。

鐵路數位分身平台進行運轉分析，所使用之最重要技術是自動排點與運轉模擬。運研所在較早期之研究^[1]中已對運轉模擬技術有初步探討，並在後續研究中持續精進之。其基本概念是以一組路軌與無衝突班表為基礎，在電腦軟體中模擬所有列車隨時間推移而依班表既定的行點、行程、分配股道推進之過程。在模擬的過程中並以隨機方式加入擾動與趕點。其中擾動指列車隨機延長其在站間之表訂運轉時分，或隨機延長其表訂停站時分，而趕點則指列車在遵守基準運轉時分與最短停站時分，並且在任何站均不提前發車的條件下，利用班表中的寬裕時間趕點以吸收晚點量。進行模擬的同時，軟體紀錄所觀察到的列車到離時分。比較原班表與模擬結果即可計算分析所有車次之準點、誤點與趕點狀況，有助評估在各種情境下系統的穩定程度，並可判讀弱點所在。使用者亦可經由控制擾動量大小與趕點量大小，瞭解該鐵路系統在所設定的各種情境下，系統承受擾動的能力以及維持一定的準點時對趕點作為的依賴程度。有關上述論述之更深入學理探討可參考^[45]。

鐵路數位分身平台之運轉分析係以具體可行之無衝突班表為基礎，而班表又是以精準的路軌模型為基礎，因此運轉分析可得到具體、可回溯追蹤而具參考價值之資訊。此外，路軌模型及其他設定均可同時反映多

項不同建設計畫之內容，因此先天即具備跨計畫分析之能力。

以下各節將先論述鐵路數位分身平台的運轉分析三項最主要特性：整合分析、精準路軌模型與無衝突班表的重要性，之後再逐一說明本軟體在運轉分析方面可進行的分析項目。

6.2 整合分析的重要性

如前所述，臺鐵全系統各處運轉狀況環環相扣不可分割，所有施作於臺鐵系統之工程建設案，甚至新車採購案，均有必要充份考量其交互影響。相對單純者如考慮集集線增班的可能性時，必須同時考慮到運行於西幹線的車次；較為複雜的狀況例如評估彰化車站改建時，四股道進出車站與二股道進出車站，對系統支持未來臺中環線能力之影響。各建設案個別評估將有可能產生嚴重的偏差，造成公共投資完成之後才發現效益不如預期之重大風險。

6.3 精準路軌模型的重要性

鐵路是一種精密的運輸系統。列車受制於軌道，在空間方面所有的移動均依軌道之引導，在時間方面則受號誌的管制。因此任何對鐵路運轉之分析，最基本的條件之一即為精準掌握路軌佈設狀況；分析時所使用的軌道模型的精準度將限制分析結果的精準程度。

以圖 6.1 與圖 6.2 為例，前者為臺鐵保安站之股道佈設狀況，而後者則為臺南站（地下化前）之股道佈設狀況。觀察二圖可發現二座車站之股道數量相同，而橫渡線佈設方式亦看似相似。然而二者之運轉功能差異甚大，北上列車無法在保安車站進入副正線（圖形中位在最上方之股道）待避，而在臺南站則兩方向列車均可進入副正線。若在任何與運轉相關的容量分析或其他項目的分析過程中，假設此二站之運轉相同，則分析結果必將失去其可信度。因此不論是進行相對複雜的運轉分析，或相對較單純的容量分析，均有必要確實掌握股道佈設所有細節，以有效避免發生重大偏差之風險。

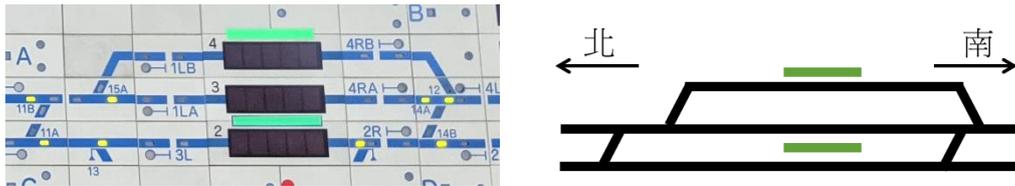


圖 6.1 臺鐵保安站行控中心面板照片與軌道模型對照圖



圖 6.2 臺鐵臺南站（地下化前）行控中心面板照片與軌道模型對照圖

傳統的類似分析受限於數位模型技術，難以精準表現車站之股道佈置狀況，因此有時須予以簡化，或甚至將所有車站股道佈設，依其外觀予以簡單歸類而忽略其運轉細節，或無法考慮兩方向行車之交互影響。然而臺鐵軌道可用空間經常受制於現地條件，審議建設計畫之不同方案時經常需要具體考量並比較個別股道、個別橫渡線之佈設所帶來之差異。以上述圖 6.1 與圖 6.2 為例，計畫審議時所使用之分析方法必須有能力具體考量兩者之差異，否則將難以產出有意義的分析成果。為了儘量避免分析產生誤差，運研所在早期已著手開發相關技術^[1]，並逐步成熟化^[46, 15]。目前技術之軌道模型已能具體完整精準表現臺鐵系統之每一處車站之列車運轉方式。

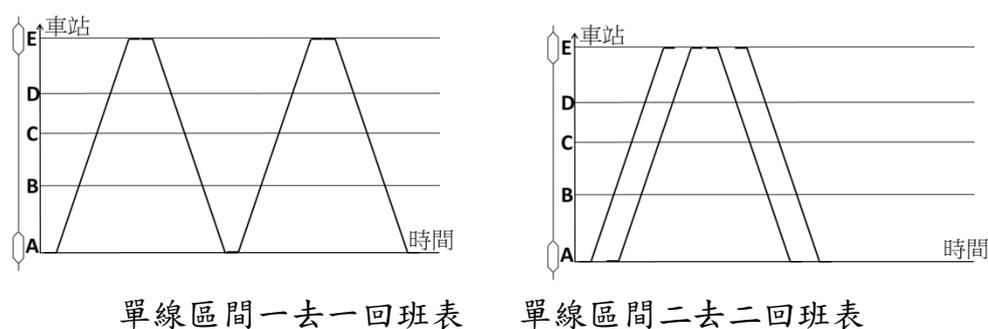
6.4 班表的重要性

鐵路系統之運轉具有中央整體控制的性質，為鐵路與公路兩系統中，車輛相互影響型態的重大差異所在。在公路運輸系統中，不同車輛間相互影響以跟車行為為基礎，所形成的整體現象，由某些角度可比照流體之流動，因此可以「車流」視之，並發展出成熟的車流理論描述之。而鐵路系統中，不同列車間相互影響深受中央控制的整體制約而非跟車行為，因此其型態與流體流動完全不同，是以鐵路系統亦無相對應的車流理論之發展。

班表是鐵路系統中，整體控制列運行運轉狀況之最重要依據。班表規範了系統中所有列車的運行路線、預定時間、所使用的股道、到站任務等，從而規範了在系統中行經所有車站、所有股道的車次以及其行經順

序。因此任何運轉相關的分析，不可能獨立於班表之外。以相對簡單的路線容量分析為例，鐵路之容量亦與容量密切相關而不可分割。至於車種組成雖然亦影響容量，但產生影響之機制其實亦間接來自班表。

以下試以一個虛擬簡例說明班表對路線容量之重大影響力^[7]。假設某單線區間設置有 A 至 E 共 5 座車站，所有的 B、C、D 中間車站均僅有單一股道無法辦理交會，而兩端之車站 A 與車站 E 則各有 2 股道。圖 6.3 以運行圖形式顯示此段鐵路之二種版本班表：左側為一去一回，而右側則為二去二回。該圖明確顯示雖然路軌系統完全相同、車種組成亦完全相同，但此二種版本班表所能達成之容量相去甚遠，二去二回之運轉型態，其所能達到的容量遠高於一去一回所能提供之水準。



資料來源：[7]

圖 6.3 班表影響容量示例

以上簡例利用很單純的狀況凸顯班表對路線容量之巨大影響力；在遠更為複雜的真實臺鐵系統亦是如此，且班表之影響力並不僅止於路線容量，而是全面影響所有運轉狀況。此亦為 UIC 文件明確主張「班表與路軌共同決定鐵路之容量」^[9, 10]之最根本考量及依據。因此不論是進行相對較單純的路線容量分析，或相對複雜的運轉模擬等進一步分析，均必須以可行的班表為基礎。

在自動排點技術成熟之前，配合分析情境而取得未來班表並不容易。以彰化市鐵路高架化計畫為例，該計畫除將部分鐵路路段由現況之平面鐵路改建成為高架鐵路之外，並設置中央、金馬二處新增車站，同時亦改變海線與西幹線之銜接方式。這些路軌的改變均使得臺鐵現況班表無法直接套用於工程完工後之軌道系統，而是需要調整大部分車次之行

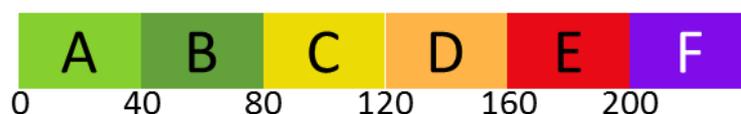
點。若同時又假設田中支線完工，支線列車改為與集集線列車串連運行，則班表需要調整之幅度更大。而欲在工程完工之後增班時，則將更難以配合排出可行之班表以供分析未來之運轉狀況。在過去排點困難的狀況下，傳統的分析退而使用隨機產生、僅有單向列車之班表進行分析。但隨機班表與臺鐵真實狀況相去甚遠，不考慮兩行車方向交互影響亦不符運轉實況，均使得分析結果產生重大誤差之風險，不可忽視。

隨自動排點技術之成熟化，鐵路數位分身平台內建自動排點功能，已可完全克服無衝突班表難以取得的障礙。本平台之所有運轉分析均以班表為基礎，以產出更高品質的分析結果。

6.5 路塞潛勢指數分析

路塞潛勢指數為運研所提出，描述鐵路系統運轉狀況的綜合指數^[7]。觀察某鐵路系統之某份班表在任一車站的車次到離站時分，可發現平均時隔長度僅與總車次數有關，與班表中各車次的行點無關，可代表軌道上的整體擁擠程度；而時隔之分佈則由班表中各車次之到離站時分決定。前後車次之間的緩衝時間與時隔，兩者之間有固定的關係，而緩衝時間又為影響車次之間晚點傳播最重要因素之一。晚點傳播之方向必為由先行列車傳播予續行列車，且發生晚點傳播時，先行列車並不會因而減少自身之晚點量，但續行列車則會增加晚點量，使得鐵路系統之總晚點量隨之增加，對整體準點狀況甚為不利。

基於以上論述，該研究^[7]設計提出路塞潛勢指數。該指數以班表為基礎，依據各車站前後車次之間的緩衝時間計算而得到每處車站的指數值。目前並不存在能夠有效預估鐵路系統準點率的技術；這個指數則反映了軌道上的整體擁擠程度以及班表中緩衝時間的分佈，可作為衡量班表預期準點績效的綜合指標。實務上列車在軌道上運行時，若先行列車因晚點而阻擋續行列車之運行，則發生「路塞」現象，同時亦使得先行列車之晚點傳播予續行列車。因此本指數稱為「路塞潛勢指數」。詳細的計算公式以及論述可參考相關報告書^[7]。為了方便運用及比較，該研究並建議將路塞潛勢分為6級，如圖 6.4 所示。



資料來源：[7]

圖 6.4 路塞潛勢指數分級

運研所前期研究^[7]提出路塞潛勢指數作為班表分析之綜合指標，用以在班表上線運轉之前的計畫階段，預估未來執行該班表的運轉狀況。鐵路數位分身平台將之結合運轉分析技術，在平台中建置了依運轉模擬結果進行路塞潛勢指數分析之功能，亦即依觀測模擬結果而得到的緩衝時間，重新計算路塞潛勢指數。本項功能有助使用者瞭解在其所擬分析的情境下，鐵路系統在各種設定的擾動及趕點強度下，在運轉過程中所經歷之路塞潛勢指數。經以真實案例測試結果，亦確實可觀察到原班表之路塞潛勢指數，與該班表進行模擬過後所見之路塞潛勢指數之間的差異。此種分析能力有助使用者針對工程計畫之各種情境以及未來增班分析時之深入探討。以下圖 6.5 所示為鐵路數位分身平台所產出路塞潛勢指數分析結果示例，圖中橫軸為所分析路線之各車站與站間，縱軸為指數值。之後圖 6.6 則為軟體之操作畫面截圖。由圖中可見，軟體提供了使用者查詢個別車站的路塞潛勢指數之功能。

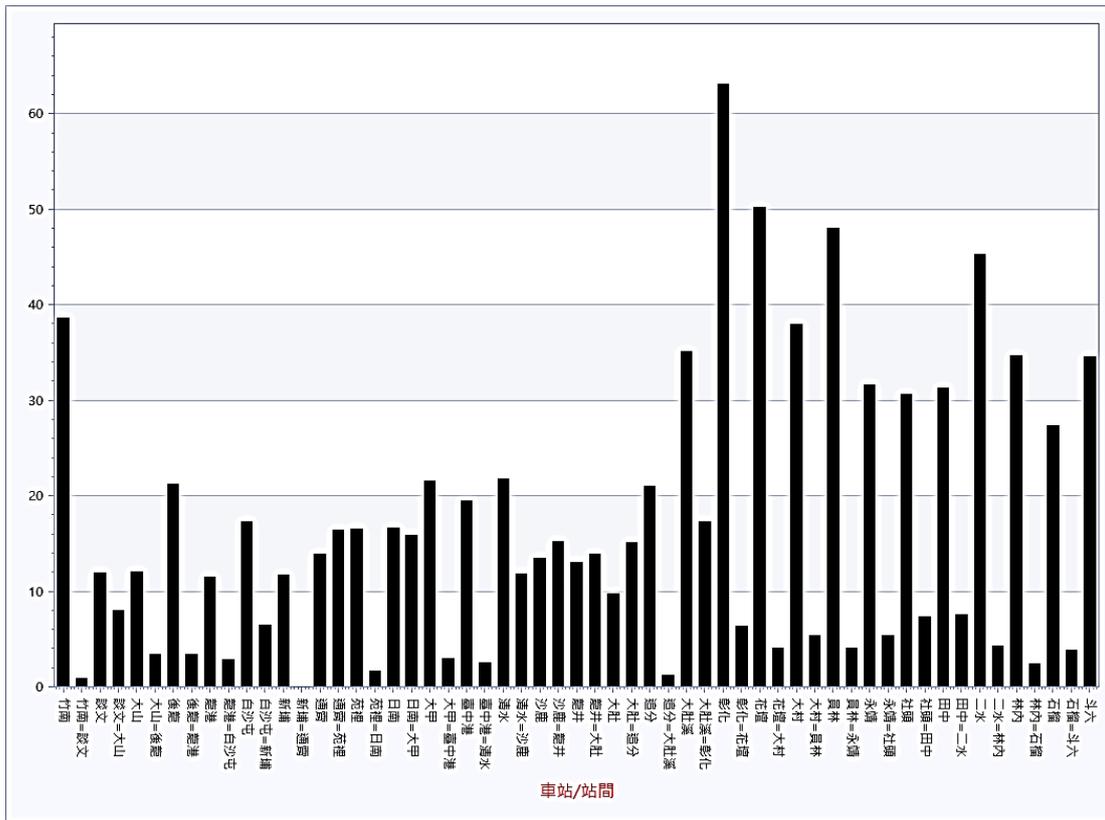


圖 6.5 路塞潛勢指數分析結果畫面示例

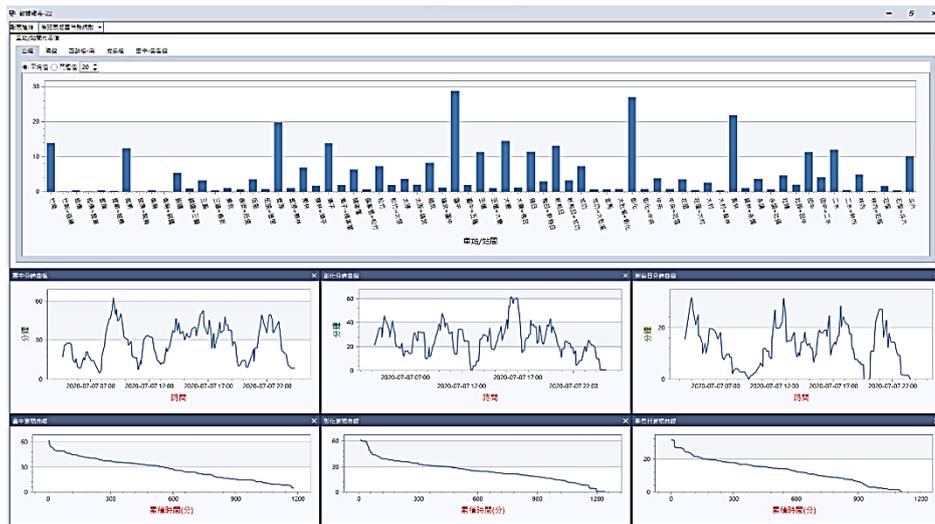


圖 6.6 鐵路數位分身平台路塞潛勢指數分析操作畫面

6.6 運轉穩定度分析

鐵路數位分身平台使用班表模擬之方法進行運轉穩定度分析作為運轉分析的一部分。當使用者在主控畫面中觸發運轉分析功能時，軟體會自動進行 100 次運轉模擬，再自動取其平均作為分析之用。所產出之數據除前述路塞潛勢指數之外，尚包含寬裕時間、緩衝時間、晚點量及列車在各車站與站間的模擬佔用時間長度分析。其中寬裕時間指在模擬過程中，觀測到列車在某處站間運轉所費之時間長度，超過其基準運轉時分的部分；或者是列車在某處車站之停靠時間長度，超過其最短停靠時間長度的部分。

以下圖 6.7 所示為鐵路數位分身平台所產出列車晚點量分析結果示例，圖中橫軸為所分析路線之各車站與站間，縱軸為模擬結果所見之晚點量，亦即模擬過程中所觀測之各車次在各車站到站時分，與班表之表訂到站時分的差異，以及依班表之表訂行點應該要抵達各站間之時分與模擬過程中所觀測之抵達站間軌道的時分之間的差異。

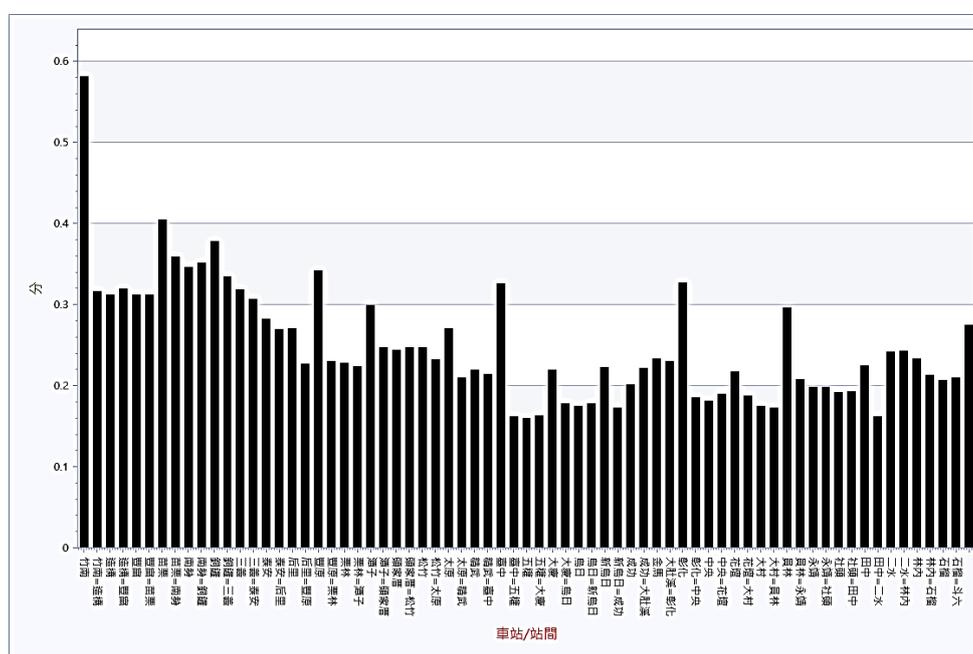


圖 6.7 穩定度分析晚點量示例

圖 6.8 所示則為列車在各車站與各站間的佔用時間變化量分析結果示例，圖中橫軸為所分析路線之各車站與站間，縱軸則為模擬結果所統計得到，各車次在車站停留，或在站間運行之時間長度，與表訂時間長度

之差。若此差異為正值表示模擬過程中所觀測到，列車在車站或站間停留或運行所費的時間大於班表所配予之時間長度，表示晚點發生；若為負值則表示模擬結果之時間長度小於班表所配予之時間長度，表示趕點發生。由於分析結果為 100 次模擬之平均值，此數據可呈現在該情境下未來鐵路系統運轉時，晚點與趕點可能發生之位置分佈，對計畫審議應有具體參考價值。

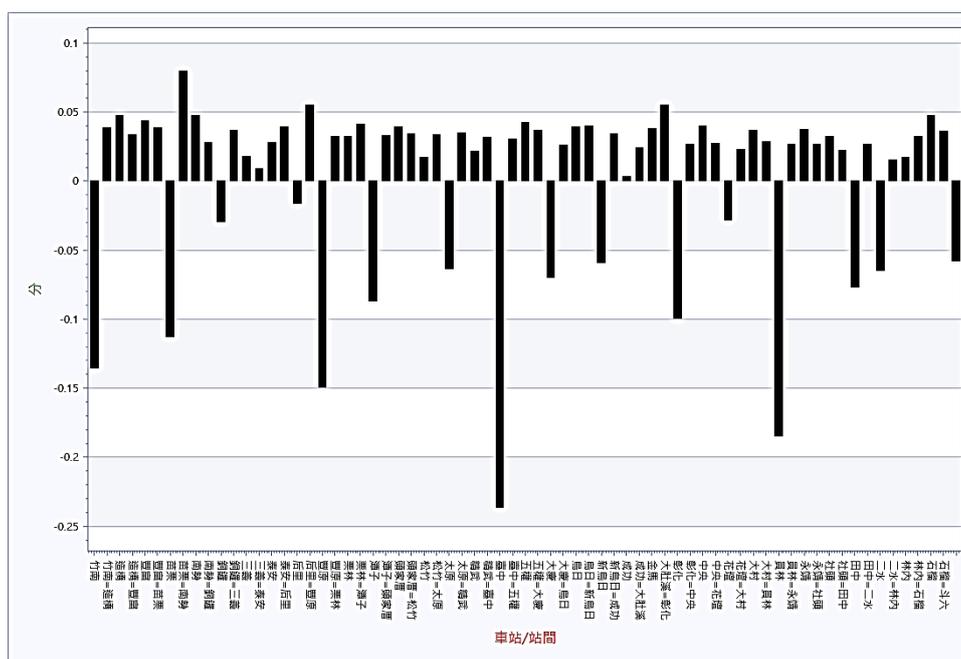


圖 6.8 穩定度分析佔用時間示例

以下圖 6.9 則為鐵路數位分身平台軟體之穩定度分析操作畫面截圖。



圖 6.9 鐵路數位分身平台穩定度分析操作畫面

6.7 容量與利用率分析

鐵路數位分身平台設計了分析路線整體以及個別車站之容量，並據以評估容量利用率之能力。分析所使用的方法為班表壓縮法。此方法為目前國際上最廣為使用之路線容量及使用率評估方法^[47]，具有完整的論述及學理基礎。班表壓縮法係國際鐵路聯盟 UIC 於 2004 年所提出^[9]，並於 2013 年發布更新版本^[10]。運研所於過往研究中成功將之本土化^[6, 7]使之完全適用於臺鐵系統，成果並發表於臺鐵資料季刊^[21]。

國際鐵路聯盟認為鐵路並沒有每小時若干車次的絕對容量^[9]；反之，其認為鐵路系統在單位時間內所能承載的列車數量係由班表與路軌所共同決定，其基本論述可參閱圖 6.3 及相關內文說明。在絕大多數狀況下，鐵路班表中均存有前後列車佔用之間的時間空檔。而 UIC 提出班表壓縮法的基本概念即是以班表為基礎，在維持最小安全時隔不變的條件下，沿時間軸儘量壓縮車次之間的時間空檔，並觀察班表能夠被壓縮的程度。此基本概念示意於圖 6.10，位於左側為原班表之運行圖，而右側則為同一份班表壓縮過後之運行圖。定義班表的「跨度」為全份班表中第一班車發車至最後一班車收車之間所經過的時間長度。比較圖 6.10 之左右二圖可發現，壓縮的過程儘量擠壓了車次之間的時間空檔，因而減少了班表的跨度。壓縮之後的班表跨度即代表了僅考慮行車運轉之技術因素，不

考慮起迄、轉乘等乘客需求時，在該鐵路系統中完成該班表運行所需要的最短時間。以扣除鐵路為了維修及其他需求必要的封鎖時間後的全部可用營業時間為分母，以上述完成班表運行所需要的最短時間為分子，相除之後所得即為該班表所佔用之時間比例，亦可視為利用率，可用下式表現之。

$$\frac{V}{C} = \text{利用率}[\%] = \frac{\text{班表最小跨度}}{\text{全日營業時間}} \times 100$$

例如，倘若鐵路系統每日可運轉 18 小時，而經壓縮後發現某班表完成該班表運行至少需要 12 小時，則相除後可知該班表需要總容量的三分之二來維持運轉，亦即在正常狀況下，該鐵路系統執行該班表時，利用率為三分之二，或相當於大約 66.7%。

若因某種需求而需要計算容量，則可以班表中之車次數為分子，以班表最小跨度（以小時為單位）為分母，相除後即可得到容量，單位是每小時車次數。然而需要注意的是，全天的各車次，所佔用的容量各不相同。例如，產生平面交叉的車次，佔用的容量比無平面交叉的車次要多，而有折返或調車操作的車次，所佔用的容量就更多。因此，以這種方法計算所得之容量，係反映鐵路系統在其路軌設施上執行該班表時所能達到的容量。由於對所分析的班表而言，容量與班表最小跨度之間為固定關係，因此容量之計算可視為使用利用率而進行之單純單位換算，並未產生新資訊。

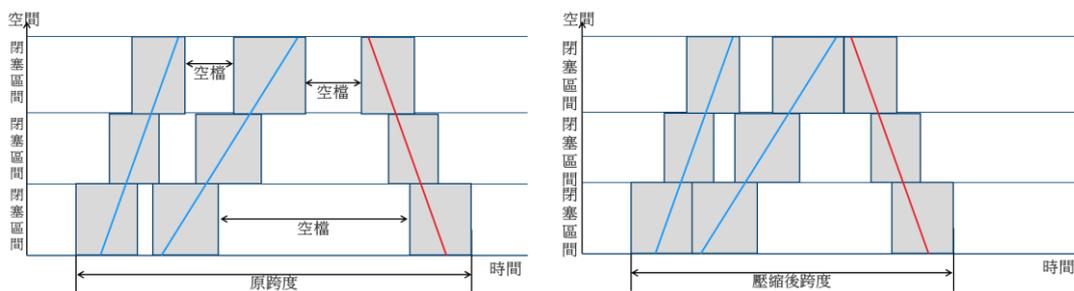


圖 6.10 班表壓縮法基本概念示意圖

相較於基本之班表壓縮法，本土化之後此方法更適用於臺鐵系統，分析結果更貼近真實狀況。臺鐵系統常有軌道資源不足而車次又密集之性質，且受到現地條件限制，車站之股道佈設型態甚為多樣化又常不盡理

想，例如圖 6.1 所示之保安站股道佈設狀況，雖站內設有三股道，但僅有一方向之列車可待避。軌道資源不足使得真實運轉時，調度人員必須配合班表而儘量妥善分配各車次所使用之股道，而股道佈設樣式之多樣化又使得任何分析均必須精準考量各車站之實際佈設狀況。本土化之班表壓縮法採納了UIC所提出之精神，但融入自動排點技術以及數位化路軌模型技術，可充份考量運轉時所使用的班表，並在維持列車順序與原班表相同之條件下自動考量股道之分配使用以求得該車站之真實壓縮量。這種技術使得容量分析之結果得以貼近真實狀況。

本土化之後的班表壓縮法可應用於單一車站、或單一站間之利用率分析，亦可應用於含有多數車站鐵路區段之利用率分析。此處所謂鐵路區段指鐵路系統中之一定範圍，其中可含有多數車站。但此範圍內之鐵路路線並不一定要呈線狀，其中的車站可以是一般車站，亦可是分歧站、末端站、編組站或其他任何形式之車站；站間軌道可以是單線、雙線、多線混合。在此範圍內之列車可以運行此區段之全部範圍，亦可僅運行部分範圍，列車之折返或長時間停留等特殊操作亦可納入成為班表的一部分。這些複雜的路軌狀況、車次狀況之任何組合均在本土化班表壓縮法能力範圍內。例如臺鐵系統在竹南站至斗六站之間的區段含有山線、海線、成追線及集集線，不但路線形狀複雜，而且真實班表中沒有任一車次之運行範圍涵蓋此區段之所有車站，且站間股道存在有單線、雙線，甚至未來有可能在彰化站兩側以四股運行。後續將以專章說明使用本土化班表壓縮法對此複雜鐵路區間進行分析之測試結果。

班表壓縮法應用於單一車站或全區段利用率分析均是以自動排點技術為基礎，並均可充份使用所給定之完整班表，但運用方式略有不同，其差異說明如下。分析單一車站時，演算法自動切取該車站以及其直接相連之站間軌道，再以班表壓縮法分析其容量。以圖 6.11 所示之分析區段為例，假設今欲以班表壓縮法分析田中站之容量。此時系統即自動以田中站為中心，並取與田中站所連接之所有站間作為班表壓縮分析之範圍，如圖 6.12 所示意。同理，若欲以班表壓縮法分析二水站之容量，則以二水站為中心進行班表壓縮分析，其範圍如圖 6.13 所示意；如欲分析支線之濁水站的車站容量，系統所自動取用之分析範圍則如圖 6.14 所示意。如進行全區段利用率分析時則取全部區段範圍。



圖 6.11 部分分析區段鐵路圖

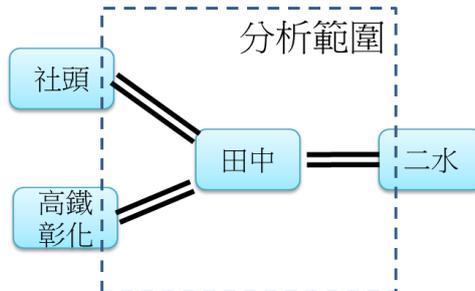


圖 6.12 田中車站容量分析方法示意圖

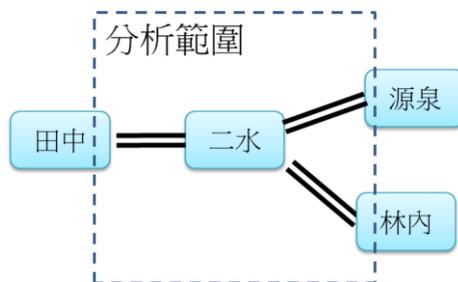


圖 6.13 二水車站容量分析方法示意圖

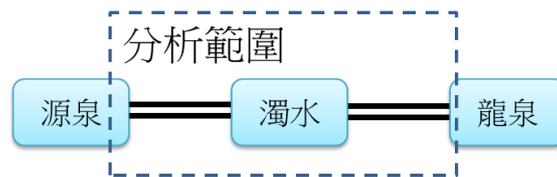


圖 6.14 濁水車站容量分析方法示意圖

在班表方面，班表壓縮法可使用現況真實班表來瞭解當下的容量利用率，亦可利用未來情境（例如增班或調整車次停站模式、行程等）的班表，用以預估未來情境之容量利用率。這種能力使得班表壓縮法成為計畫審議的重要工具。

不論是對路線或個別車站進行分析，軟體平台均使用國際鐵路聯盟 UIC 於 2004 年所提出^[9]之班表壓縮法。兩者之差異在於，對路線進行分析時，係以全路線之班表進行壓縮；對車站與站間進行分析時，則是以每次取一座車站的方式，逐一對該車站或站間之班表進行壓縮。例如假設今欲對上述竹南站至斗六站之間，含有山線、海線、成追線及集集線的範圍進行容量及利用率分析，而該範圍內含有 57 處車站與 55 處站間。則在進行路線整體容量及利用率分析時，係以完整，含有所有車站的班表進行壓縮分析。在另一方面，對該路線進行個別車站、站間之容量及利用率分析時，則以全自動的方式分 57 次，每次均僅取一處車站與其前後兩端站間之路軌範圍，及相對應的單一車站班表，進行壓縮分析；並用類似的方式自動對 55 處站間亦逐一分析其容量。在本軟體系統中，上述的分析均在使用者觸發之後全部自動完成。

6.8 路線瓶頸分析

鐵路路線之「瓶頸」是一個籠統的概念，並沒有廣為接受的一致性定義。一般認知基本上多認為鐵路路線上的瓶頸係指某處車站或某處站間，因為該處在運轉時，所承受的鐵路交通負荷已經接近其容量極限，而對整個路線造成運轉困難或無法再增加車次。

若充份觀察鐵路系統的班表，可以很明顯看到班表中的列車，對各車站的容量需求受班表內容之重大影響。臺鐵南迴線的多良站即為一明顯的例子。在南迴線電氣化之前，多良站僅有單一股道、一座月台。顯然多良站的容量並不大。但實務運轉時，該站卻不會成為南迴線之瓶頸位

置而對整個南迴線造成運轉限制。原因是絕大多數車次在多良站均通過而不停靠，因而班表對容量之需求低。今假設因為多良站風景優美或其他考量而修改班表，令所有列車均停靠多良站且停留 10 分鐘以利乘客瀏覽風光。則可以合理預期雖然路軌設施、號誌系統、車次數量、車種組成均完全沒有變動，該站將一夜之間成為南迴線之運轉瓶頸，原因是班表的變動使得對該站容量之需求大增。這個簡例很明確凸顯了一個重要的事實：班表對容量的需求具有重大影響力。而班表對容量的需求很接近該車站所能提供的極限時，就形成瓶頸。除了多良站之外，其他車站亦是如此。以上簡例很明確顯示：容量及瓶頸相關分析，必須確實考慮班表。所考慮的班表愈具真實性，分析結果亦將愈真實；反之，若所考慮的班表僅有單一方向，或為隨機產生而與真實營運無關，則分析結果亦將與真實營運無關而失去代表性。

基於上述論述及簡例可以歸納，路線之瓶頸分析必須充份考量真實營運時班表所帶來的容量需求才有意義。此為國際鐵路聯盟 UIC 於 2004 年提出班表壓縮法^[9]之重要基本論述；能夠確實考慮真實班表亦為國際廣泛接受此法的原因之一。然分析班表對各車站之容量需求將需要較高門檻之分析技術，傳統作法有時不考慮營運時之真實班表，而是簡化為僅以時隔等參數個別計算車站之容量，再以最小者作為路線之瓶頸。這種觀點有其先天上的邏輯漏洞：因為同一份班表對各車站之容量需求各不相同，容量最小的車站不一定是負荷最接近極限的車站。以過去的南迴線為例，絕大部分列車均停靠枋寮站，同時在該站又有列車折返之需求，但僅有極少數列車停靠多良站，因此對枋寮站的容量需求遠大於對多良站之需求，這也是為什麼多良站僅有單一股道、容量最低，卻不致於成為南迴線瓶頸車站的真正原因。正確的觀點是以所承受的鐵路交通負荷最接近其容量極限者為瓶頸處。

以上論述可用圖 6.15 示意之。該圖橫軸為車站，縱軸為容量，所表現的是一段具有 15 處車站的虛擬鐵路路段，並假設該路段之班表已知。對每一處車站，圖中均示意其容量、執行該班表時已使用之容量、以及剩餘容量，如圖右側圖例所說明。如前所述，傳統分析方法受限於分析技術，以容量最低處作為路段之瓶項所在。此時將判斷認為在此虛擬路段中，車站 E、F、G 之區域為路段之瓶頸。然而進一步考量剩餘容量即可發現，車站 H、I、J 之區域承受的鐵路交通負荷已經接近其容量極限，而對整個路線造成運轉困難或無法再增加車次，因此本區才是容量最為不足之處。在本例中，倘若考慮施作工程以擴充鐵路之運轉能力，則理應

擴充車站 H、I、J 之容量；擴充車站 E、F、G 區域之之容量將是投資的浪費。

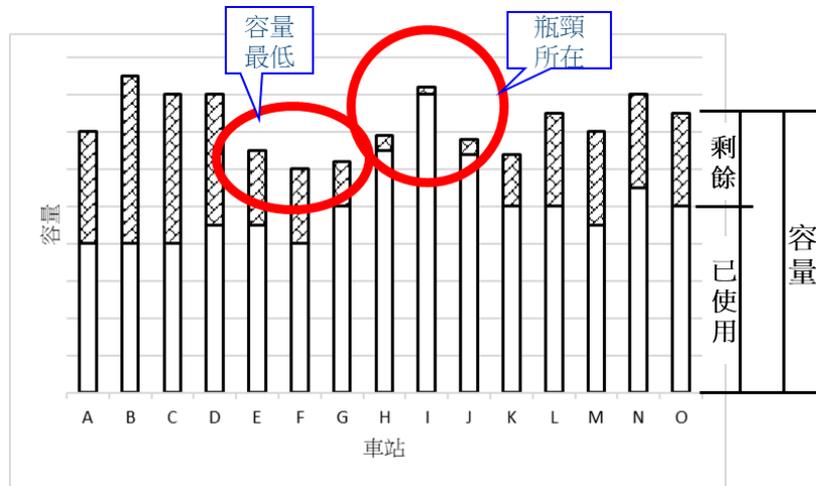


圖 6.15 瓶頸分析示意圖

上述虛擬簡例凸顯了僅考慮容量而判斷瓶頸所在所可能產生之失誤。誤判容量最低處必為瓶頸時，可能造成工程計畫之錯誤投資。而在評估投資之預期效益時，若又以該處之容量擴充，即簡單認為必可增開車次，則因為 H、I、J 之區域並未改善，將造成完工之後成效不如預期。

在另一方面，鐵路系統在運轉時將使用多少容量，係由班表所決定。因此在分析各種未來情境之可能運轉狀況時，必須依各該情境而試排未來班表，方有意義。

基於路線之瓶頸處在交通負荷最經接近其容量極限處而不在容量最小處之原理，鐵路路線之瓶頸分析必須計算所指定的班表對各車站的容量利用率。此即為前述圖 6.10 及其相關公式、內文說明之方法。鐵路數位分身平台將此分析程序高度自動化，使用者指定鐵路系統以及班表之後，軟體全自動對路線中所有車站進行各別的班表壓縮與利用率分析並產出圖表，用以供使用者判讀路線之瓶頸所在。

鐵路路線容量除了受到個別車站所限制之外，多數車站也會對路線容量共同形成限制。這種現象在鐵路系統中普遍存在，但常因同時存在許多複雜因素而不易觀察。在臺鐵系統中較易觀察這種現象的典型例子之一是集集線。此支線位在臺鐵西幹線東側，由二水站分出，並以車埕站為末端站。現況集集線僅濁水站配有股道可辦理交會待避，其餘龍泉站、集集站、水里站及車埕站均為單線配置。遷就沿線車站之股道佈設

狀況而採用之行車制度，使得一列逆行列車（行車方向由二水站往車埕站）離開濁水站之後，直至該列車在車埕折返再回到濁水站之前，下一列次之逆行列車無法再由濁水站發車。這種限制使得該支線僅能大約每 80 分鐘開行上下行各一列次，臺鐵真實班表如表 6-1 與表 6-2 所示，亦即每小時僅可開行 0.75 車次。

在另一方面，個別檢視各車站時，雖然這些車站僅配置單一股道，每一座車站之個別容量顯然遠高於每小時 0.75 列次。使用臺鐵真實班表與集集線真實股道佈設，以國際鐵路聯盟 UIC 於 2004 年所提出之班表壓縮法^[9]進行利用率分析之結果如圖 6.16 所示。由該圖可明確觀察到，所有各站之利用率均未達 50%。然而集集線無法增班卻是事實。

上述之數據以及論述指出，集集線之整體容量不高，顯非任一瓶頸車站所造成，而是所有車站共同形成之狀況限制了行車制度，導致車站無法發揮其容量。這種多數車站（或站間）共同對鐵路運轉乃至於行車制度產生影響的現象即稱為「網路效應」。而分析網路效應之方法，是觀察整體路線之容量，並與個別車站之容量相比較。若可觀察到如上述集集線之例子所顯示，整體路線運轉時無法發揮各處個別車站之容量，即顯示網路效應限制了運轉效率。

表 6-1 集集線班表（逆行）

車種	車次	區間	田中	二水	源泉	濁水	龍泉	集集	水里	車埕
區間快	2703	彰化—車埕	05:44	06:00	06:05	06:16	06:24	06:33	06:45	06:50
區間車	2705	二水—車埕		08:00	08:05	08:16	08:24	08:33	08:45	08:50
區間快	2707	彰化—車埕	09:09	09:20	09:25	09:36	09:44	09:53	10:05	10:10
區間車	2711	田中—車埕	10:30	10:40	10:45	10:56	11:04	11:13	11:25	11:30
區間車	2713	田中—車埕	11:50	12:00	12:05	12:16	12:24	12:33	12:45	12:50
區間車	2715	二水—車埕		13:20	13:25	13:36	13:44	13:53	14:05	14:10
區間車	2717	二水—車埕		14:40	14:45	14:56	15:04	15:13	15:25	15:30
區間車	2721	二水—車埕		16:00	16:05	16:16	16:24	16:33	16:45	16:50
區間車	2723	二水—車埕		17:30	17:35	17:46	17:54	18:03	18:15	18:20
區間車	2725	二水—車埕		18:50	18:55	19:06	19:14	19:23	19:35	19:40
區間車	2727	二水—車埕		20:20	20:25	20:36	20:44	20:53	21:05	21:10
區間車	2731	二水—車埕		21:40	21:45	21:56	22:04	22:13	22:25	22:30

資料來源：臺鐵局網站

表 6-2 集集線班表（順行）

車種	車次	區間	車埕	水里	集集	龍泉	濁水	源泉	二水	田中
區間快	2702	水里－彰化		05:45	05:58	06:05	06:15	06:25	06:31	06:46
區間車	2704	車埕－二水	07:00	07:05	07:18	07:25	07:35	07:45	07:50	
區間車	2706	車埕－二水	09:00	09:05	09:18	09:25	09:35	09:45	09:50	
區間車	2708	車埕－二水	10:20	10:25	10:38	10:45	10:55	11:05	11:10	
區間車	2712	車埕－二水	11:40	11:45	11:58	12:05	12:15	12:25	12:30	
區間車	2714	車埕－二水	13:00	13:05	13:18	13:25	13:35	13:45	13:50	
區間車	2716	車埕－田中	14:20	14:25	14:38	14:45	14:55	15:05	15:13	15:19
區間車	2718	車埕－田中	15:40	15:45	15:58	16:05	16:15	16:25	16:37	16:43
區間車	2722	車埕－田中	17:10	17:15	17:28	17:35	17:45	17:55	18:15	18:21
區間車	2724	車埕－二水	18:30	18:35	18:48	18:55	19:05	19:15	19:20	
區間車	2726	車埕－二水	20:00	20:05	20:18	20:25	20:35	20:45	20:50	
區間快	2728	車埕－彰化	21:20	21:25	21:38	21:45	21:55	22:05	22:12	22:20
區間車	2732	車埕－二水	22:40	22:45	22:58	23:05	23:15	23:25	23:30	

資料來源：臺鐵局網站

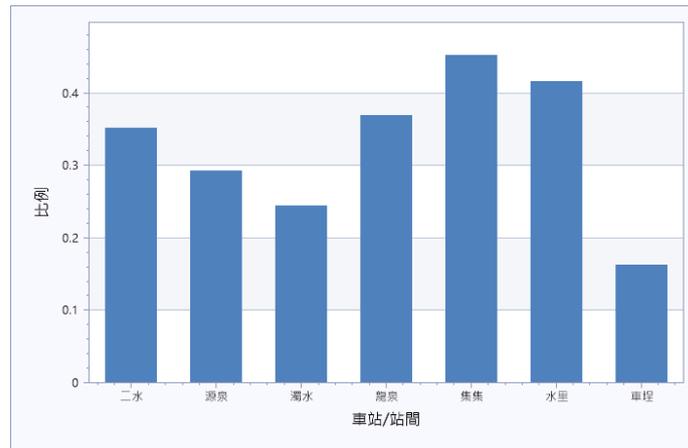


圖 6.16 集集線各站利用率分析（臺鐵現況班表）

國際鐵路聯盟 UIC 於 2004 年所提出之班表壓縮法^[9]亦可用來判別鐵路系統中存在的路網效應。方法是在以前述方法對個別車站獨立進行班表壓縮分析以得到個別車站之利用率之後，再對整體路線進行班表壓縮以得到整體的利用率。若路線之整體利用率與所有車站個別利用率最高者（亦即瓶頸所在）相近，則表示該瓶頸限制了路線之運轉。反之，若路線之整體利用率顯著高於個別車站之利用率，表示個別車站均未達滿載，但整體路線卻達滿載（即為上述集集線之狀況），即可判斷為該路段可能存在顯著的網路效應。

第七章 模擬分析

7.1 整體介紹

鐵路是一種高度計畫性的運輸系統，必須在事前完成多項縝密的資源運用計畫，再於運轉時確實依計畫執行，方能達到高效率、高安全的目的。在所有各種計畫中，居於中間地位者為班表。一份完整的鐵路班表紀錄了鐵路系統在某一段時間內所運行的車次。對每一車次均呈現其行程中所行經的車站清單，並包括該車次在該車站的服務車種、牽引種別、到站任務、到站時分、離站時分、所分配股道等多項資訊。其他的資源運用計畫則主要有人力運用與車輛運用計畫等，前者例如乘務人員工作班表、輪班表等，而後者則例如車輛編組運用計畫等。這些資源運用計畫之目的均是在符合所有相關規章、並具有一定品質的條件下，運用系統所擁有的人、車等主要運轉資源以支援鐵路系統依班表實施運轉。

在另一方面，鐵路班表亦為乘客決定旅行模式時的重要參考。為了方便乘客查閱並避免誤解誤乘，鐵路系統公開提供給不特定乘客查閱之班表均經過簡化。在大部分情況下均僅含有辦客車次，而且大部分僅列出有停靠車站之離站時分，並略去未停靠車站的資訊。

上述班表以及所有配合的其他資源運用計畫均須提前完成。上線運轉時鐵路機構各部門均依各自的計畫執行，乘客亦依班表之內容搭乘列車以達到旅行的目的。然而所有鐵路系統於上線運轉的過程中，均必受到各種複雜因素的影響而無法完全精準依計畫執行。偏離計畫的狀況甚多，其中最常見者為不準點的狀況，亦即列車雖然依計畫運行於空間中，但發生的時間點與班表之內容不完全一致。

準點，是任何鐵路系統營運者追求的重要目標之一，臺鐵也不例外。鐵路系統的準點率受到許多內在與外在因素的影響，其中班表本身與準點率有很密切的關係。以寬裕時間為例，班表中留有較多的寬裕時間將有助提高準點率，為眾所周知之事實。然而寬裕時間將同時延長列車的行車時間、降低路線容量、並使乘客耗費更多的旅行時間，因此大幅增加寬裕時間並不一定是很好的作法^[45]。較理想的作業方式是在排點的過程中即考量各種因素，適當控制安插寬裕時間的位置及大小。除了寬裕時間之外，班表本身尚有許多其他性質，以高度複雜的方式影響未來執

行時之準點率。因此雖然若能在排點之後，上線運轉之前就先評估未來上線運轉之後可能的準點狀況，將會對鐵路運轉極有幫助，但並不容易達成。

系統模擬是一種有效而低成本的評估方法^[48]。系統模擬利用電腦的運算能力，依據所設定的鐵路路軌、給定的無衝突班表以及所設定的運轉參數下，在電腦中模擬鐵路系統中所有車次依班表運行，並且受到各種因素的綜合影響下，可能的運轉狀況。依模擬過程中所觀測並紀錄的數據，即可評估該班表未來上線運轉時所可能達成的準點狀況。

本章將介紹建置於本平台中的模擬分析功能。本平台以臺鐵真實路網及路軌狀況建立精準數位模型，配合無衝突班表進行模擬之後可產出對準點狀況的各種評估數據。然而受限於無法取得部分具關鍵影響力的運轉參數而以假設值代之，因此本章的目的在呈現系統功能；分析結果並不能視為是對真實系統準點率的真實預估。

本節為整體介紹，其後各節將依序說明影響運轉延遲的主要因子與本功能所使用的主要方法。之後則呈現兩項不同的測試例，最後為結論。

7.2 主要影響因子

本節說明影響鐵路系統運轉延遲的主要基本因子。觀察真實鐵路系統可發現影響鐵路系統準點狀況的因素甚多而複雜，但可歸納為寬裕時間、緩衝時間、擾動強度及趕點強度等四種基本因子。其中前二者屬班表本身的性質，而後二者則為運轉參數。各項因子分別說明如下。

1. 寬裕時間

列車受限於軌道條件、自身性能與規章，在軌道上由 A 站運行至 B 站時存在一個最短的運行時間長度，亦即常稱之「基準運轉時分」。列車不可能以少於基準運轉時分之時間之內由 A 站運行至 B 站。基準運轉時分本身為鐵路排點時最重要的參數之一。

班表規範了所有列車在行程中所行經每一處車站之到站與離站時分。由前一站離站至次一站到站之間的時間長度即為班表配置予該車次之表訂運行時間長度。在一份合格的班表中，表訂運行時間長度必至少等於基準運轉時分。所謂寬裕時間指班表允許列車使用的時間中，表訂運行時間長度超出基準運轉時分的部分，示意於圖 7.1。圖中所標示之最短時間即為基準運轉時分，而寬裕時間即為表訂時間長度扣除基準運轉時分

後之剩餘時間。

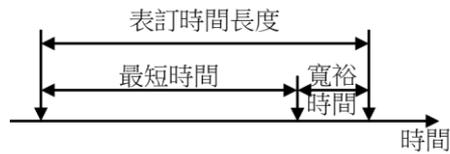


圖 7.1 寬裕時間示意圖

除了站間運轉時分之外，圖 7.1 所示意之類似的概念亦可套用於停站時間。亦即圖中之最短時間即為該車次在該車站執行到站任務所需要之最短停站時間，而表訂時間長度即為班表所配置該車次到站直至離站之間的時間長度。兩者之即為該車次在該車站所配置之寬裕時間。

列車停站時，依其到站任務之不同而設有最短停站時間，亦為鐵路排點時重要參數之一。以臺鐵常見之車種為例，辦客列車之最短停站時間常視所使用車列之車門型式、預估上下車乘客人數、該車次特殊任務等而有不同的需求，因此相同車種於同一車站，所需要的最短停站時間常因車次而異。同樣的，同一車次在不同的車站停靠時，所需要的最短停站時間亦常各不相同。至於非辦客之列車則到站任務更為多樣化，最短停站時間變化更大。然而不論最短停站時間之參數大小或考慮因素，寬裕時間之概念以及影響準點之基本邏輯均與站間運轉時分相同。

寬裕時間對列車準點的主要影響機制是使列車在發生晚點時有自行吸收的能力。以站間運行為例，若某列車在某站離站時已經延遲 1 分鐘，而班表配置有 2 分鐘之寬裕時間，則該列車仍有機會準點抵達次一車站，亦即該列車自行吸收了其延遲量。但若該列車在某站離站時已經延遲 3 分鐘，則最多僅有能力吸收其中 2 分鐘之延遲量。停站之狀況亦類似，不再重贅述。

2. 緩衝時間

在鐵路系統中，列車受制於軌道，駕駛人員並無法自由控制列車之運行軌跡。同時，鐵路列車重量甚重、運行速率高、輪軌間的磨擦力小，又使得列車在其既定的運行軌跡上，亦無法靈活加減速。因此所有鐵路系統均必須在所有行經相同股道之前後列車之間，嚴格維持最短時隔以達到安全的要求。

所謂緩衝時間指依班表之配置，於某車站前車離站時分與後車到站時分之間的差距，減去其間最短時隔之差距，如圖 7.2 所示意。

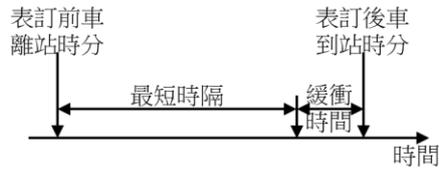


圖 7.2 緩衝時間示意圖

兩列車先後行經某站時，其間所需要的最短時隔受到股道分配的影響，因此緩衝時間亦受到股道分配的影響，並不全然由班表中的到離站時分所決定。以臺鐵真實狀況為例，在雙線區間，兩不同方向的列車基本上不會互相影響，不需要維持最短時隔，因此亦無緩衝時間。然而臺鐵系統中有許多車站受到股道佈設之限制，兩方向之列車使用相同的副正線進行待避。而同向或反向列車之間亦有可能產生平面交叉。這些運轉現象之發生或不發生，均影響二列車之間所需要最短時隔的長度，亦均由班表所決定。由上述論述可歸納，運轉分析必須正確反映軌道佈設的影響、必須同時考慮兩方向之行車、亦必須考慮班表。這些項目任何一項未能完整考慮均將使分析產生很大的偏差風險。

緩衝時間影響準點的主要機制是阻隔晚點在不同列車之間傳播。在某車站，當前車離站時分因故延遲時，若其延遲量未超過其與後車之間的緩衝時間長度，則後車仍有可能準點進站，如圖 7.3 所示意。此時前車所發生的延遲即因為緩衝時間的吸收而未傳播予後車。然而前車本身的延遲並未改變，仍然有可能在其行程中的後續各站傳播予其他列車。

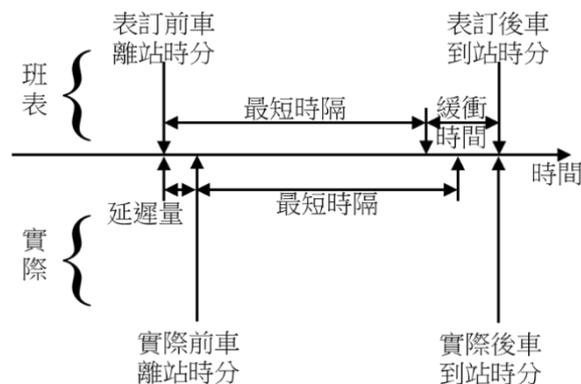


圖 7.3 緩衝時間完全吸收延遲示意圖

倘若前車之延遲量超過其後的緩衝時間長度，則該緩衝時間將無能力完全阻隔延遲之傳播，但仍可減少傳播之程度，如圖 7.4 所示意。圖中前車離站時間的延遲量超過緩衝時間的長度，而兩之間仍應維持最短時隔，因此後車的到站時間仍不可避免發生延遲，亦即延遲仍然由前車傳播到後車，但是因為緩衝時間的影響，延遲量在傳播之後有可能減少。前述這種延遲量傳播的過程，由後車的觀點視之即為路塞，亦即後車已經準點接近該車站但是受到前車延遲的影響而無法準點到站。

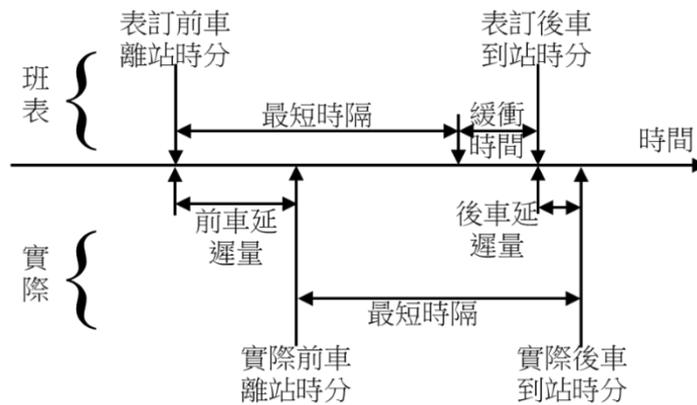


圖 7.4 緩衝時間部分吸收延遲示意圖

3. 擾動強度

列車在運行的過程中，必然受到許多隨機因素的干擾而難以精準依班表所配置之時間長度運行。部分因素源自列車本身，例如機械狀況影響出力，進而使其無法以基準運轉時分完成兩站之間的運行；亦有部分因素源自列車之外，例如停靠車站時受到乘客人數或其他需求影響而使列車需要在車站耗費比最短停站時間更長的時間才能完成到站任務。除此之外，天候狀況、司機員駕駛行為、號誌系統狀況等，亦為常見的擾動來源。

為了有系統分析擾動對準點之影響，本計畫暫不探究擾動之發生原因，而聚焦於擾動之隨機性與時間長度。定義「擾動量」為列車運行於兩站之間，或停靠於某車站時，其實際運行時間或停站時間的長度超出表訂時間長度的部分。例如，若某車次依班表之配置，應於某車站停靠 2.0 分鐘，但實際運行時因故停靠 2.2 分鐘。此時該車次在該車站停靠之擾動量即為 $2.2 - 2.0 = 0.2$ 分鐘。依此定義，擾動量必為非負值。延續前例，倘

若某車次依班表之配置，應於某車站停靠 2.0 分鐘，但實際運行時因故僅停靠 1.8 分鐘。此時該車次在該車站停靠之擾動量則為 0。亦即縮短停靠時間長度之作為並不視為擾動，而是定義為趕點，將在後續另行說明之。至於列車在站間運行時因故延長其運行時間長度之現象亦歸於擾動，其邏輯與此相同，不再另行贅述。

定義「擾動強度」為描述擾動大小的參數，指擾動量的上限，以分鐘為單位，並假設此項時間的超出量為均勻分佈。亦即，假設某鐵路系統的擾動強度為 0.5，則在該系統中，列車在運行於兩車站之間，或停靠於某車站時，某些擾動將使得實際運行或停靠時間的長度較表訂時間超出的量，為介於 0 至 0.5 分鐘之間的某隨機值。例如假設依班表，某車次應於車站 T 停靠 2 分鐘、擾動強度為 0.5、並且隨機決定該車次在該車站的擾動量為 0.2 分鐘，則該車次實際停靠於 T 站的時間長度即為 $2+0.2=2.2$ 分鐘。站間運轉之擾動量概念亦類似。

4. 趕點強度

趕點指列車利用寬裕時間以縮短在站間運行的時間長度，或縮短在站內的停靠時間長度，而彌補延遲時間的作為。真實鐵路系統中，趕點受到許多因素的影響與限制，包括調度員之引導、司機員之駕駛行為、列車狀況等均為影響因素。本計畫不探討影響趕點的發生原因，而探討其對系統準點的影響。

定義「趕點量」指列車因為採取趕點作為，而使得原本表訂在站間運行的時間，或在車站停靠時間的縮短量。例如，假設某車次表訂在某車站停靠 2 分鐘，但因趕點作為而實際停靠 1.5 分鐘，則該車次在該車站之趕點量為 $2.0-1.5=0.5$ 分鐘。列車在站間運行時亦有機會採行趕點作為而縮短其運行時間長度，其概念與前述類似，在此不重複贅述。

由前述寬裕時間之定義可知不論在站間或在站內，列車之趕點量不可能超過相對應的寬裕量時間長度。此外，列車之趕點量亦不應超過當時的延遲量。前者如圖 7.5 所示意，圖中可觀到當延遲量超過寬裕時間時，可趕點的最大幅度即為寬裕時間；後者則如圖 7.6 所示意，圖中可觀察到當寬裕時間超過延遲量時，可趕點的最大幅度即為延遲量。因此，趕點量之最大值為寬裕時間長度與延遲量兩者之小者。至於列車在站間運行時，其延遲量、寬裕時間以及可趕點的最大幅度，三者之關係邏輯亦與此相同，不另贅述之。

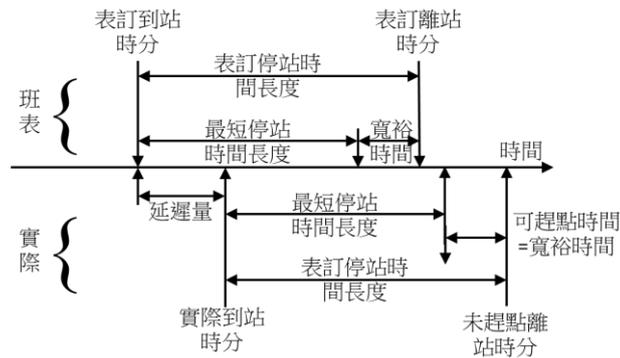


圖 7.5 可趕點時間等於寬裕時間長度示意圖

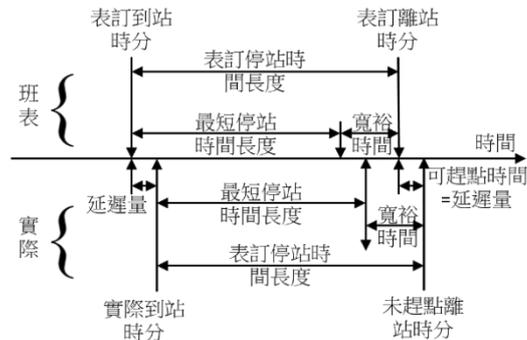


圖 7.6 可趕點時間等於延遲量示意圖

真實鐵路系統中，由於各種因素與顧慮，列車之實際趕點量並不一定會達到上面所描述的最大可趕點量，而是實際量經常略低於最大量。例如，假設某列車在於車站 A 運行至車站 B 的過程中，考量前述延遲量與寬裕時間，發現其可趕點的最大幅度為 1.5 分鐘。此時受到種種因素的影響，其實際趕點之時間長度可能僅為 1.2 分鐘。

為此，定義「趕點強度」為一個介於 0 與 1 之間，用以描述趕點量大小的參數，指實際趕點量與最大可能趕點量的比例上限。例如，假設某列車在某站間運行，或停靠於某車站，並假設當時其最大可能趕點量為 2 分鐘，而趕點強度為 0.6。則該列車在當時所可能實際達到的趕點量將不超過 $2 \times 0.6 = 1.2$ 分鐘，並為 0 至 1.2 分鐘之間，均勻分佈的隨機值。

7.3 模擬方法

本計畫所發展的模擬方法以一組已知的班表為基礎，依時間推移的概念，模擬所有列車依其在班表中既定的行程以及在各車站、各站間的股道分配，在時間-空間中推進。在推進的過程中，系統依前述規則隨機產生擾動並加到各站間運轉以及各車站停靠時間中，產生延長運行或靠站時間的效果。同時亦在各站間、站內隨機產生趕點量，產生縮短運行或靠站時間的效果。在模擬的過程中則紀錄所有列車在所行經的所有車站的到站與離站時分。進行模擬時，系統自動以不同的亂數進行 100 次的重複模擬，再輸出這 100 次模擬之平均結果。

7.4 擾動與趕點強度測試

本節與下一節將呈現測試結果。本節先呈現同一份班表在各種擾動強度與趕點強度設定下所得到的各種模擬結果，而下一節將呈現此種模擬技術觀察增班影響的能力。

本節測試使用竹南=斗六，臺鐵 2020 年 7 月 7 日真實班表，以及真實的臺鐵鐵路股道佈設。此範圍是臺鐵系統中相對複雜的區段，其中含有山線、海線、成追線與集集線。測試時使用 0.05、0.1、0.15 等三種擾動強度，以及 0.4、0.5、0.6 等三種趕點強度，其組合計有 9 種。

以下圖 7.7 所示為擾動強度設定為 0.05，對應三種不同趕點強度模擬結果所觀察到，各車次在各車站之平均晚點分鐘數。該圖橫軸為車站，縱軸為模擬所觀察到各車站的平均晚點量，以分鐘為單位。圖中可明顯觀察到模擬結果與預期相符，不論在山線或海線，在相同的擾動強度下，趕點強度愈大，晚點分鐘數愈低。比較山線及海線則可發現晚點量較大之車站，大都位在單線區間，亦與預期相一致。

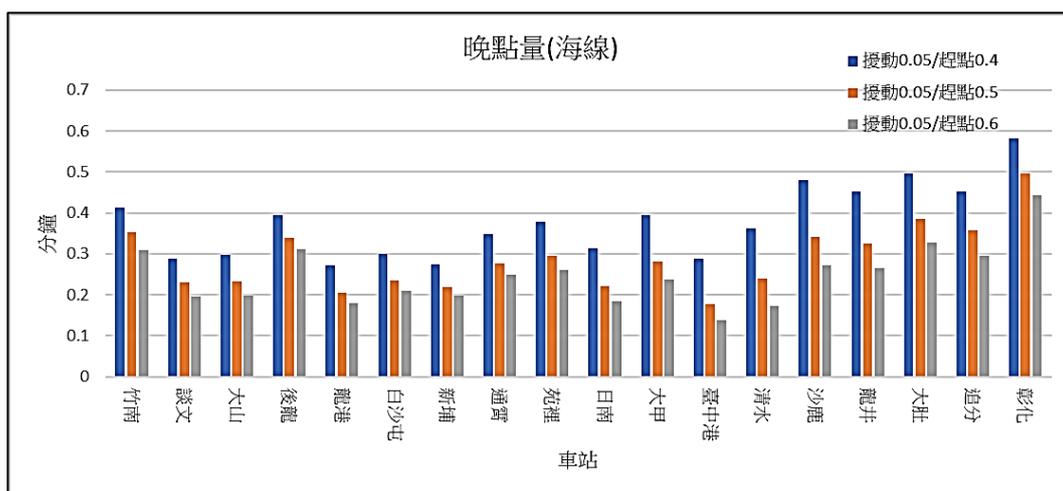
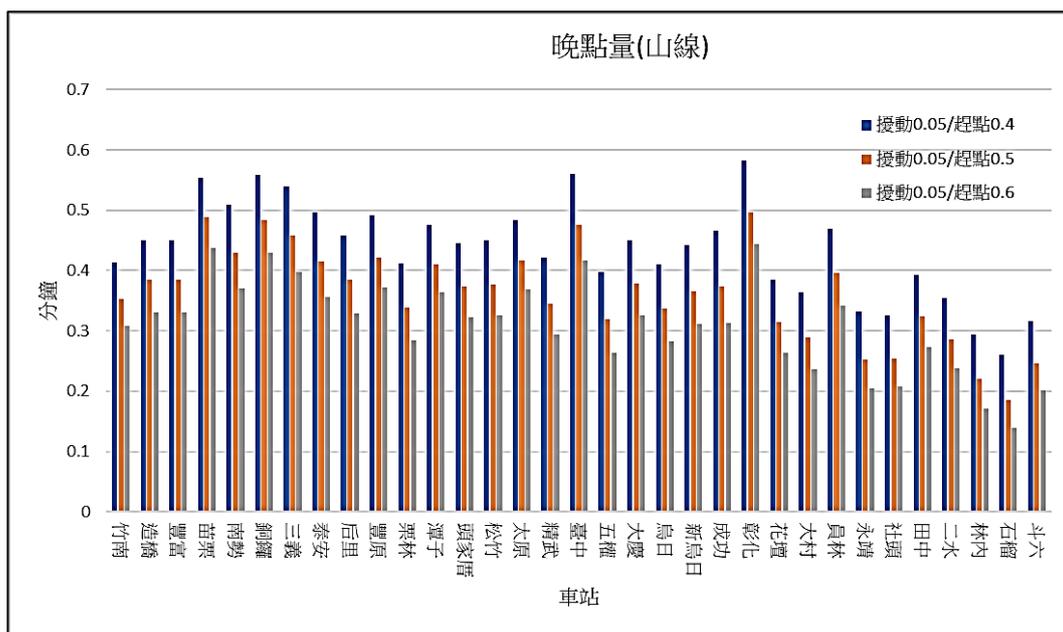


圖 7.7 擾動強度 0.05 模擬結果

以下圖 7.8 所示則為擾動強度設定為 0.10 時，三種趕點強度的模擬結果。圖中更明確顯示趕點強度愈大延遲愈少的趨勢。而比較圖 7.8 與圖 7.7 則可觀察到當擾動強度較大時，趕點強度的影響力亦變大，亦即當鐵路系統的擾動較大時，系統將更倚賴趕點來維持準點。同時亦可發現雖然擾動強度較低的圖 7.7 中，山線與海線的晚點量相當，但擾動強度增大時，海線之晚點量上升幅度比山線之上升更為顯著，顯示海線承受擾動之能力較山線更低。

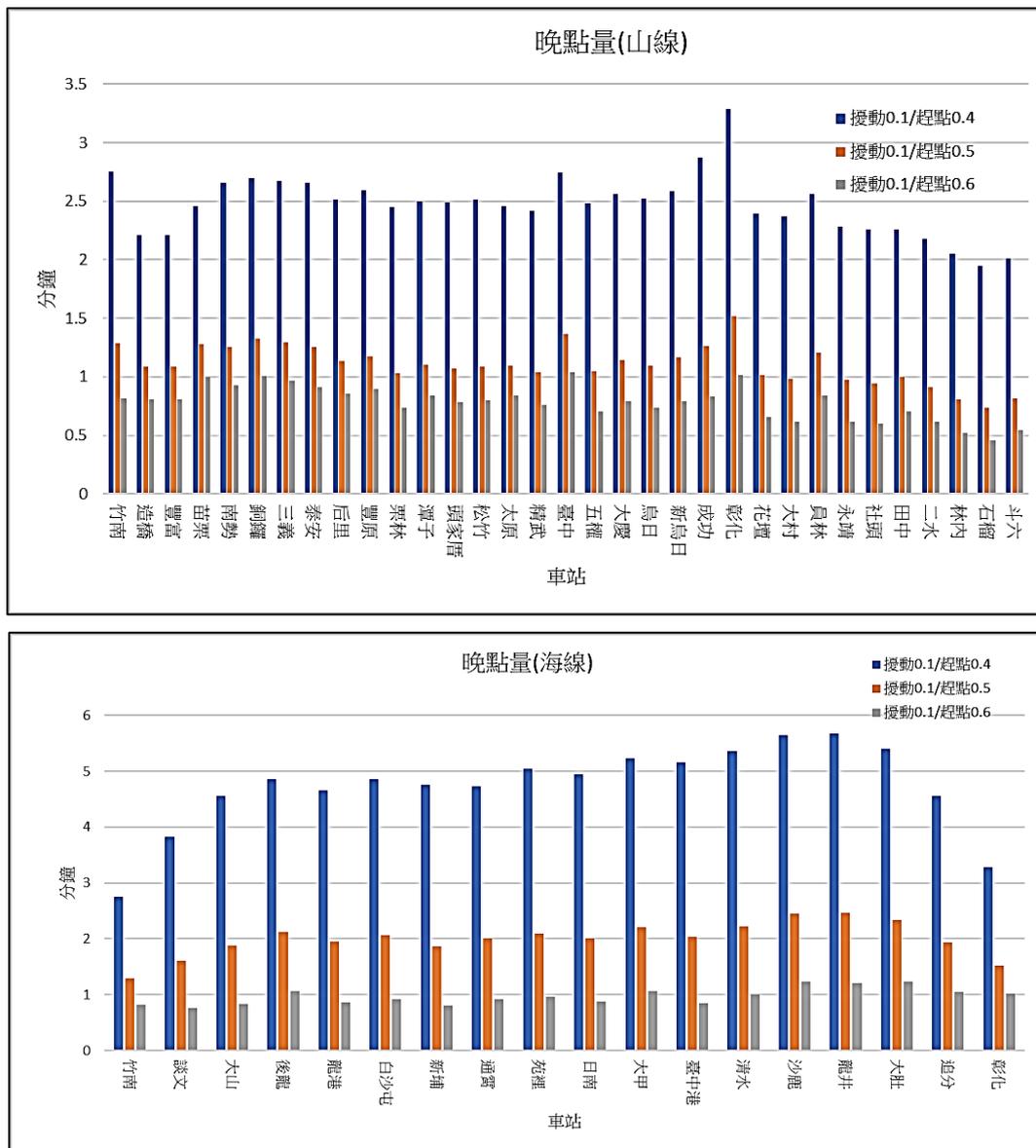


圖 7.8 擾動強度 0.10 模擬結果

最後，圖 7.9 則整理呈現將擾動強度設定為 0.15 時，在三種趕點強度下之模擬結果。除了基本趨勢與前二者相類似之外，比較圖 7.9 與圖 7.8、圖 7.7 可觀察到，擾動強度愈大，各種趕點強度之間的差異就愈大，再次顯示當系統受到的擾動愈高，愈依賴趕點的現象。同時亦可觀察到當擾動量較大導致系統晚點量普遍升高時，海線的單線區間與雙線區間的晚點量差異會縮小，再次顯示鐵路系統中不同區段之間彼此影響，不可獨立分割視之的現象。

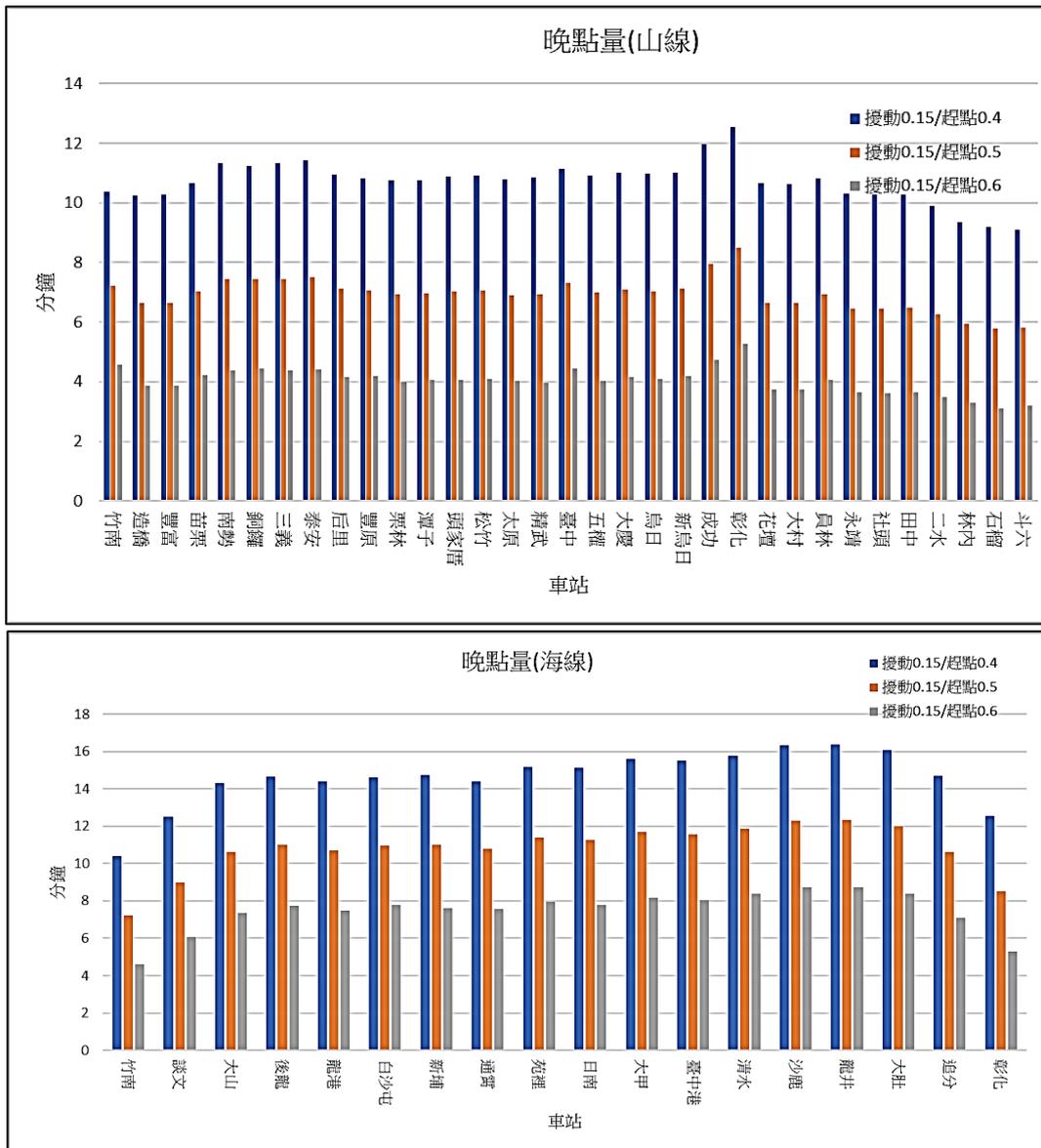


圖 7.9 擾動強度 0.15 模擬結果

7.5 增班測試

本節使用與前節相同的竹南=斗六分析區段、路軌及班表，但在其中增加車次，再觀察不同的增班方式下，所觀察到模擬結果的差異。本節所有的模擬測試均固定設定擾動強度為 0.1、趕點強度為 0.5。

增加車次的方法，是先在臺鐵真實班表中增添 8 對共計 16 列次。所有列次均運行於竹南與斗六之間，其中半數行經山線，另半數行經海線。所有添加的車次均設定為 PP 自強號。行經山線者沿途停靠竹南、苗

栗、后里、豐原、臺中、彰化、員林、田中、斗六等站，行經海線者，於海線路段停靠後龍、通霄、苑裡、大甲、清水、沙鹿等站，其餘與行經山線者相同。

在發車時間方面，這些增添的 16 列次分為 4 組，分別自竹南與斗六對開發車，每組均有南向與北向、海線及山線各 1 列次，合計 4 列次。各組車次之發車時間分散在全天當中，第 1 組之發車時間大約為上午 5:00 至 6:00 之間、第 2 組大約為 9:00 至 10:00 之間、第 3 組大約為 14:00 至 15:00 之間、第 4 組大約為 18:00 至 19:00 之間。

在進行測試時，則以臺鐵真實班表為基礎，在納入所有增添之 16 列次之後使用自動排點功能對所有車次在各車站之行點進行小幅調整，而得到無衝突班表。之後再由此班表中逐步刪去部分新增車次，並分別進行模擬測試而比較在不同數量的新增車次下，擾動強度為 0.1、趕點強度為 0.5 時可能的延遲狀況。至於臺鐵真實班表中原有的車次則在所有模擬分析中均予保留。

以下圖 7.10 所示為在臺鐵真實班表中增加 2 對車次的模擬結果，橫軸為車站，縱軸為模擬所觀察到各車站的平均晚點量，以分鐘為單位。圖中呈現的數據為無增班、增加第 1 組（發車時間大約為 5:00 至 6:00 之間）、增加第 2 組（發車時間大約為 9:00 至 10:00 之間）、增加第 3 組（發車時間大約為 14:00 至 15:00 之間）、增加第 4 組（發車時間大約為 18:00 至 19:00 之間）之模擬結果相比較。由該圖可觀察到，增加車次確實導致晚點量上升，而且上升的幅度與新增車次的時間帶有關。模擬結果顯示增加第 2 組與第 3 組車次對晚點量之影響力相對較高，而第 1 組與第 4 組之影響力則相對較低，其中第 4 組之影響又略大於第 1 組之影響。這些結果均與預期相一致，並明確顯示討論鐵路增班所可能帶來之影響時，絕不可僅考慮所增加的車次數；添加更多新增車次的時段亦同等重要。

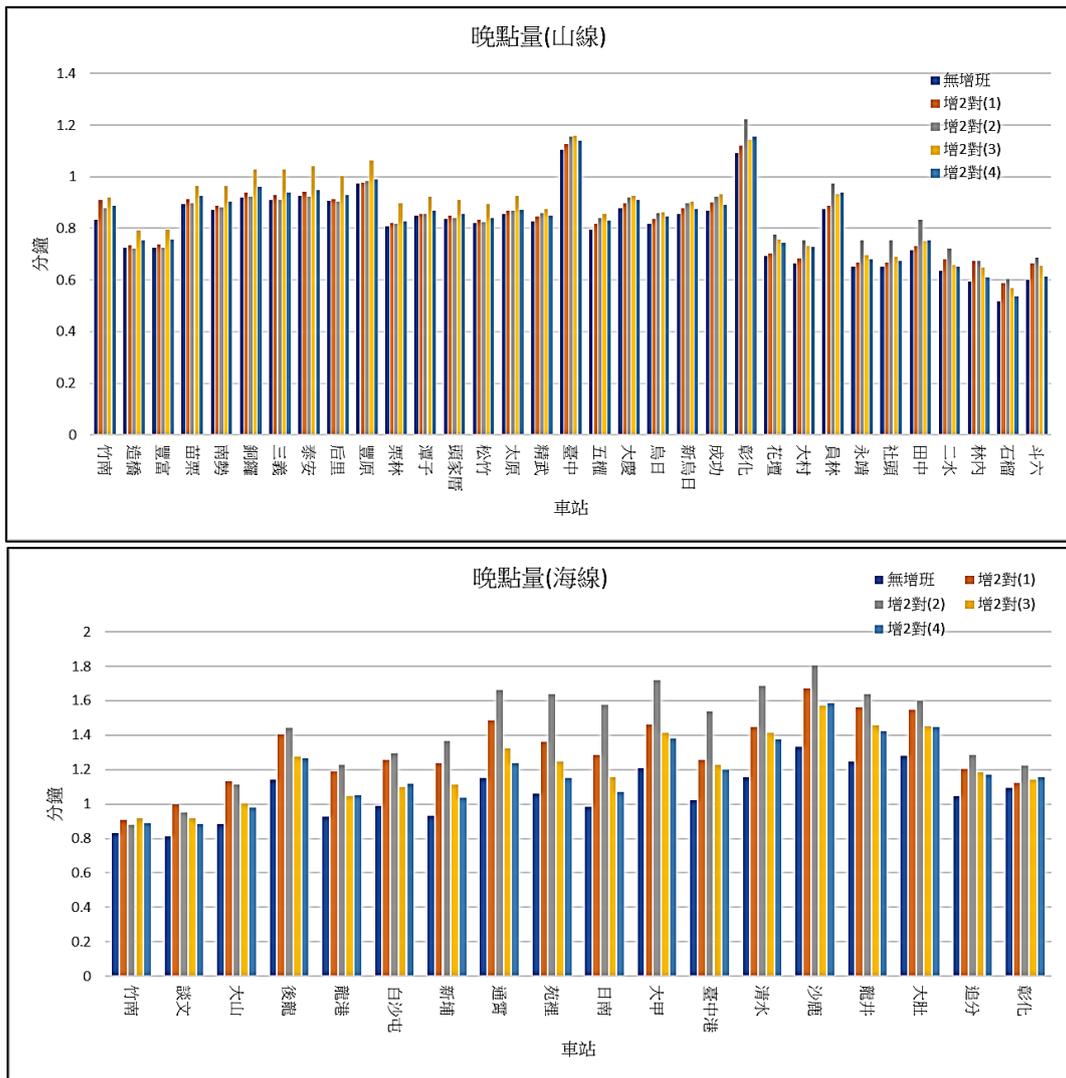


圖 7.10 增班 2 對模擬結果

以下圖 7.11 所示為在臺鐵真實班表中，增添 2 組（4 對）車次之模擬結果。由於總共有 4 組新添加車次，取其中 2 組共有 6 種可能之組合，全數均呈現在該圖中。數據顯示任何一種組合之晚點量均高於無增班之情境，與預期相一致。在這 6 種組合中，則以第 2、3 組之組合，導致最大的晚點量，而以第 1、4 組之組合，所導致的晚點量最低。其餘 4 種組合則介於其間，均與預期相一致。而比較山線及海線亦可觀察到海線的晚點量將高於山線，且比較圖 7.11 與圖 7.10 亦可發現，增添 2 組車次時，山線、海線之差距將比僅增添 1 組情境下要大。

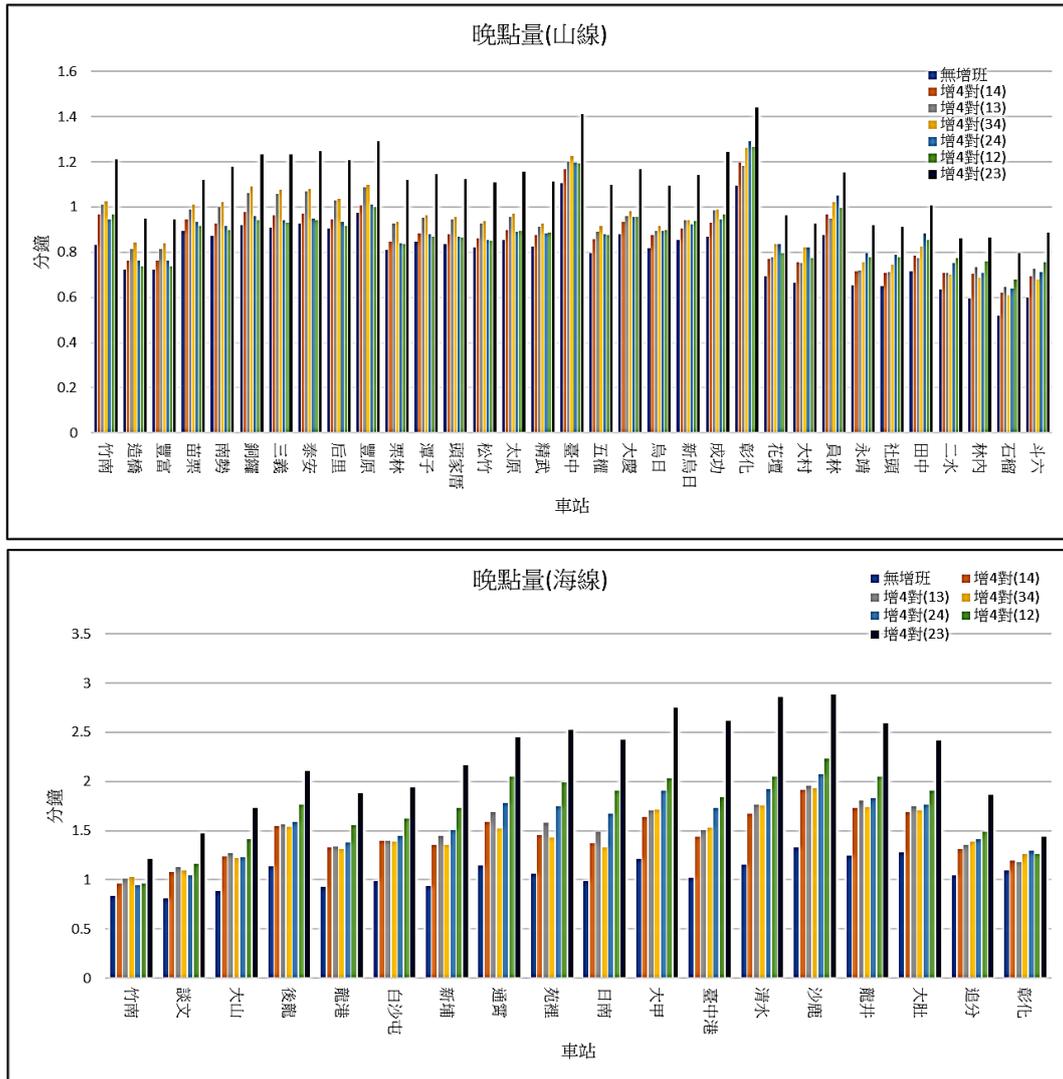


圖 7.11 增班 4 對模擬結果

以下圖 7.12 所示為在臺鐵真實班表中，增添 3 組（6 對）車次之模擬結果。在 4 組車次中選擇其中 3 組有 4 種方法，模擬結果均整理呈現於該圖中，並與無增班之情境相對照。該圖數據顯示當所增添的車次同時含有第 2、3 組時，其模擬結果所出現的晚點量高於其他 3 種情境，此種現象與預期是相符的。

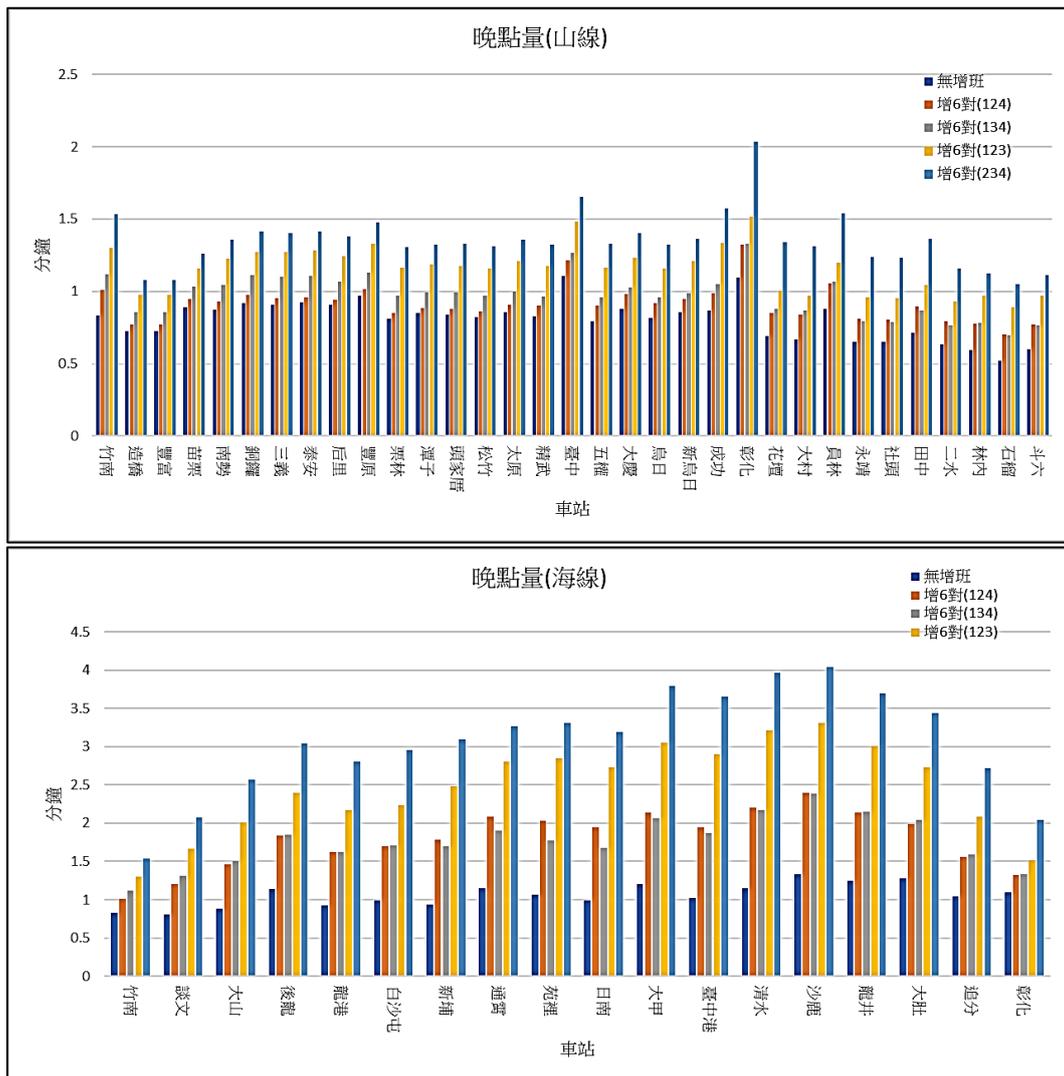


圖 7.12 增班 6 對模擬結果

以下圖 7.13 則整理呈現添增全部 4 組 (8 對車次) 情境之模擬結果，亦與無增班之情境相對照。數據明確顯示模擬結果確可呈現增加車次對運轉晚點之影響，同時亦顯示雖然在臺鐵現況班表情境下山線與海線的晚點狀況差異不大，但增加相同的車次數較多時，相同的新添加車次數對海線產生的影響遠大於對山線之影響。

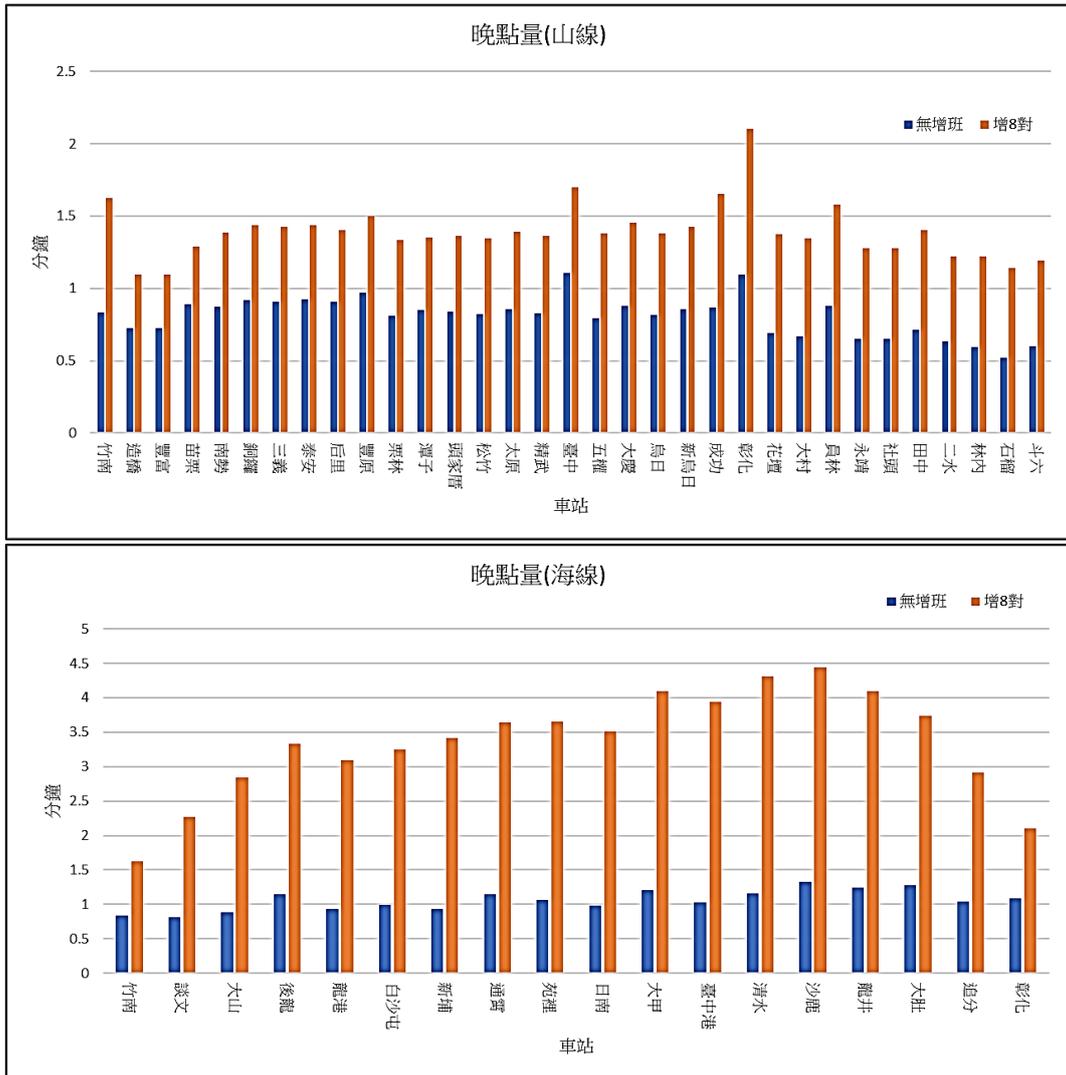


圖 7.13 增班 8 對模擬結果

最後，圖 7.14 整理前述所有 16 種可能的增添車次方式下，所有車站的平均晚點量。由其中可以觀察到平均晚點量與增添的車次數存在有顯著的遞增關係。同時，所增添的車次中含有第 2 或第 3 組車次時，其平均晚點量均偏高；同時含有 2、3 組車次時，其平均晚點量則更顯著較高。此外亦可發現增添車次之數量與晚點量並不成線性關係，而是隨增添車次之增加而加速上升。這種現象與晚點之傳播有關：當系統中的車次數量增加時，前後車次之間的緩衝時間隨之減少，增加了延遲量在列車之間傳播的機會。而這種現象亦忠實呈現在模擬結果中，符合預期。

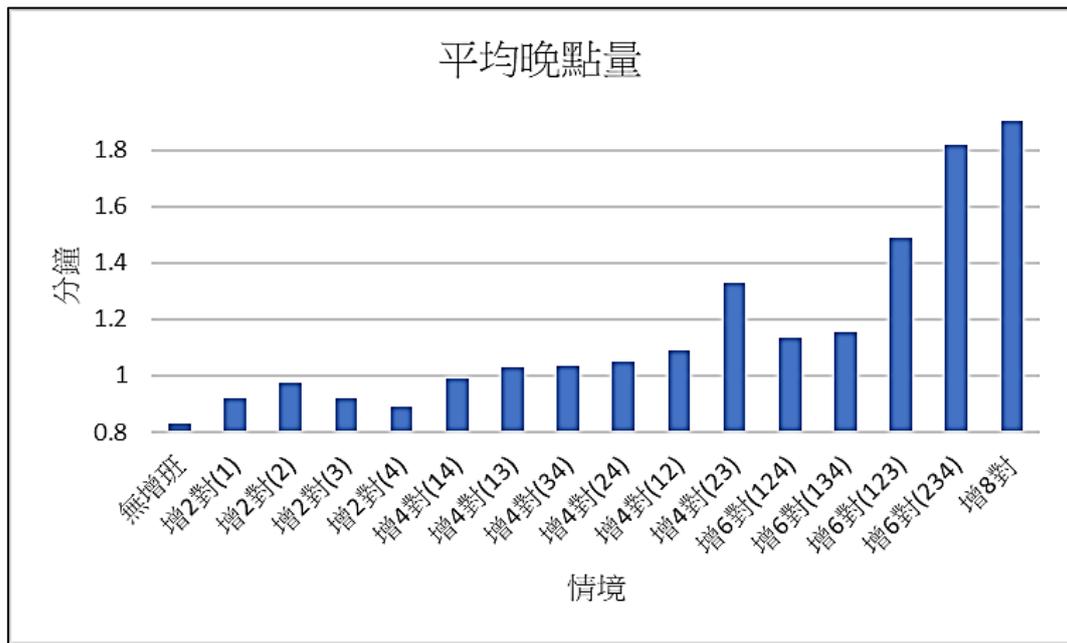


圖 7.14 各情境平均晚點量

本節所有的模擬測試均固定設定擾動強度為 0.1、趕點強度為 0.5。這種設計使得各種不同情境下所得到的數據可易於在同一基準下相互比較。而數據亦顯示增班時，晚點量將隨之增加。需要注意的是，此一結論並不能直接簡單套用到真實系統中。在臺鐵真實運轉過程中，當晚點量有增加的趨勢時，相關人員會加強其運轉整理之強度，相當於提高趕點強度。因此在真實系統中，增班或減班，對準點率雖有所影響，但班次增減與晚點增減絕非必然關係。

7.6 本章小結

本章詳細介紹了本平台的模擬分析技術，並以臺鐵真實路軌、真實班表為基礎，設計一組測試例以測試其能力。觀察模擬結果數據可歸納以下結論：

1. 技術能力

各種模擬結果均與預期相符，顯示此一技術應具有可靠的基本能力。

2. 具體班表的重要性

模擬結果顯示在相同的擾動強度與趕點強度下，在班表中增添更多的車次將增加晚點量，但亦同時顯示所增加的晚點量大小與新增車次的行點有密切關係。因此在評估鐵路系統是否適合增加車次時，不應僅考慮所擬增加的車次數目；同時考慮所增加的車次之行點亦具有相同的重要性。

3. 車次數對晚點量的影響力

本章的具體數據明確顯示添加車次的數量與鐵路系統因而增加的晚點量，兩者之間並非成簡單的線性關係。模擬結果顯示添加車次的數量愈多，每再增一班車所帶來的晚點量增加就愈高。此結果明確顯示吾人實不應將鐵路的路線容量與可負荷的車次數直接做簡單的關聯。當某項鐵路工程在其工程範圍內局部提高鐵路的路線容量時，不應據此而直接認定整個鐵路系統可承擔更多的車次；不當增添車次，存有大幅影響準點率的風險。

本章之所有模擬測試，所設定之擾動強度與趕點強度均非真實的觀測值，而是為進行模擬而設定的假設值。由於擾動強度與趕點強度為模擬過程中最重要的參數之一，本章所呈現的模擬結果並不能用以預測臺鐵系統之真實晚點量。

臺鐵系統在運轉過程中雖然有紀錄準點狀況，亦對誤點車次（抵達終點站之時間較班表延遲達 5 分鐘或更多者）紀錄其誤點原因，但並未詳細紀錄所有車次在運行過程中，在每一處車站與每一段站間發生的擾動與趕點。這些數據的數量龐大，完全以手動紀錄並不可行。較可行的方法是使用列車中央行車控制系統（Central Traffic Control, CTC）或列車自動防護系統（Automatic Train Protection, ATP）之紀錄，開發軟體梳理之，由其中萃取在各種狀況下，臺鐵系統之真實擾動強度與趕點強度。

真實的擾動強度與趕點強度除了將有助臺鐵系統未來進行更貼近真實的模擬，甚至用以在排點的過程中預測各種不同版本班表所可能出現的晚點量，而且可以在排點時，結合模擬技術而妥為安排班表中的寬裕時間。班表配予各車次的寬裕時間對列車準點有直接的影響^[49]，因此配合系統狀況而妥為安排寬裕時間將帶來極為可觀的效益。

此外，類似的技術亦可應用在運轉過程中評估各種運轉整理作為對後

續準點狀況的影響^[50, 51]。目前臺鐵之運轉整理作為均由調度員依其知識經驗為之，未來若開發具有運轉整理輔助能力的軟體系統，此將為不可或缺的重要基石。

第八章 案例分析

8.1 分析基本設計

本章案例分析之目的在利用貼近真實狀況的案例檢視鐵路數位分身作為計畫審議工具之能力。此案例將展示軟體系統的以下重要能力，以及這些分析能力所可能帶來的科學化數據：

1. 整合分析能力

本章將整合 3 項鐵路建設計畫於同一路軌數位模型中，用以顯示軟體系統之整合分析能力。所使用之建設計畫名稱及資料來源分別為：彰化市鐵路高架化計畫^[16]、集集支線基礎設施改善計畫^[17]、高鐵彰化站與臺鐵田中站轉乘接駁計畫^[18]。為此，本章之案例分析將使用二組路軌數位模型，其一為臺鐵現況路軌的模型，另一則為假設上述 3 項建設計畫全數完工之後的未來路軌模型。

2. 精準路軌能力

不論是臺鐵現況或是各建設計畫全數完工之後的未來路軌，其車站的股道佈設均相當複雜，且含有分歧站、編組站及其他多種車站股道型式；站間則有三角線、單線、雙線、多線等多種佈設同時存在。本案例分析將利用此軟體系統的能力為每一處車站與站間的現況或未來股道佈設均個別建立精準的數位模型，使用者不會因為受到軟體能力的限制而必須將高度多樣性的車站股道佈設粗略歸為少數分類。

3. 容量分析能力

本軟體有能力使用國際通用的班表壓縮法進行容量分析，提供給使用者具有學理基礎並與國際接軌的分析結果。該方法有能力分析班表，因此可充份考量運轉型態對容量的決定性影響力。同時亦真實考慮兩方向列車的交互影響。在本平台分析取得車站、站間、路線容量的同時，亦自動計算其利用率，據以供使用者有意義判讀其瓶頸所在。

4. 運轉模擬能力

不論是外部提供，或是由軟體自動排點產出的無衝突班表，本軟體均有能力進行模擬，以評估在擾動及趕點的交互作用下該系統的延誤與趕點狀況，據以呈現該路軌系統執行該班表時可能的穩定性。

5. 運轉分析能力

結合前述精準路軌、分析班表、運轉模擬等各種能力，本平台有能力產出數種不同的統計結果，供使用者瞭解在其所設定的情境下鐵路系統可能的運轉狀況。

8.2 案例路軌情境說明

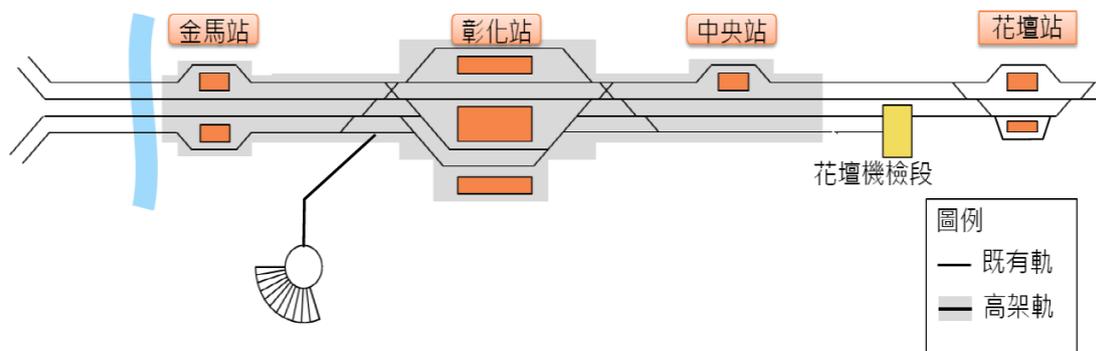
本計畫使用政府刻正推動，位於彰化站鄰近區域的數項重要鐵路建設計畫為例進行案例分析，截取進行分析的範圍北起竹南站，南迄斗六站。該路段鐵路為臺鐵全線最複雜的區段之一，簡圖示於圖 8.1。圖以彰化站為中心，其北側為山線及海線，依序以成功站、追分站為南側端點，二站之間有成追線相連接；而成追線又與大肚溪號誌站形成三角線。在彰化站南側不遠處之二水站則有集集線向東岔出，並以車埕站為支線終點。



圖 8.1 臺鐵彰化站及鄰近路段

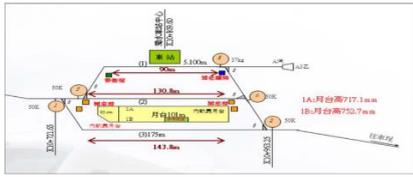
圖 8.1 所示之鐵路區段為數項重要鐵路建設計畫之範圍。除位在山線之臺中鐵路高架化計畫已完工之外，目前有彰化市鐵路高架化計畫^[16]、集集支線基礎設施改善計畫^[17]、高鐵彰化站與臺鐵田中站轉乘接駁計畫^[18]

等重要計畫正在推動中。此外並有進一步建設以串連山、海線而在臺中地區形成鐵路環線之討論。依資料^[16]之說明，未來彰化站之股道將以圖 8.2 所示之方式佈設、集集線各車站將以圖 8.3 所示之方式改善^[17]、而計畫^[18]則將與建圖 8.4 所示之田中支線鐵路。

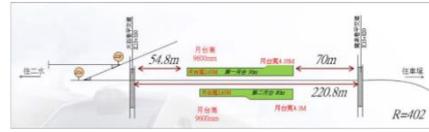


資料來源：彰化市鐵路高架化計畫^[16]

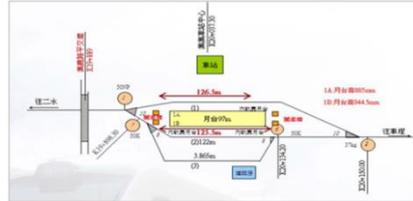
圖 8.2 本案例使用之彰化站未來股道



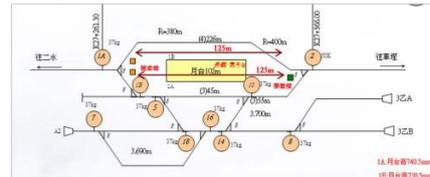
濁水站



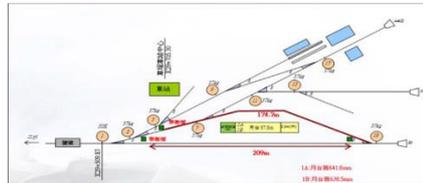
龍泉站



集集站



水里站



車埕站

資料來源：臺鐵集集支線基礎設施改善計畫^[17]

圖 8.3 本案例使用之各集集線未來車站

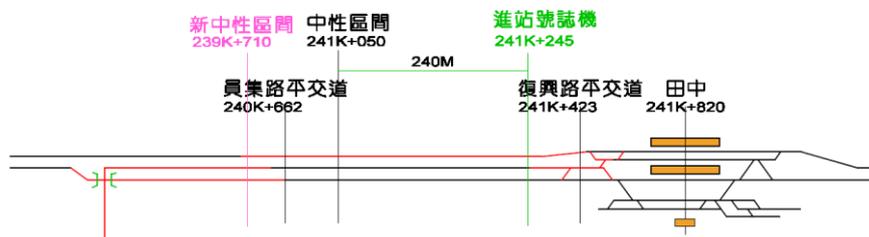


圖 4.2-3 田中支線建議路線方案示意圖

資料來源：田中支線建設計畫^[18]

圖 8.4 本案例使用之田中支線路線方案

本章之各種分析採用兩種路軌情境：

1. 現況路軌情境（工程前）

此情境指臺鐵現況，以行控中心顯示面板之資訊為準在本軟體系統中建立數位模型。

2. 未來路軌情境（工程後）

此情境假設前述三項鐵路建設計畫^[17, 18, 16]全數完工之未來情境，據以建立數位模型。

8.3 案例車次情境說明

如前所論述，任何鐵路系統之容量、運轉等分析均必須考慮運轉型態，因此均必須充份考慮具有代表性之班表。本案例使用 2020 年 7 月 7 日星期二的臺鐵真實班表為基礎，配合案例分析範圍，截取該班表中竹南至斗六路段的部分進行各種分析。在分析未來路軌情境（工程後）時，則依參考資料^[18]之描述將所有集集線之列車延駛進入田中支線，亦即以串連兩支線之方式運轉。此外，由於彰化市鐵路高架化計畫^[16]將新增中央、金馬二站，因此所有行經此路段之區間車均設定為全數停靠此二處車站，對號列車則設定為一律不停靠。

正如 UIC 文件^[9, 10]所正確指出，鐵路系統有剩餘容量並不同於必可加開車次。判斷是否能夠依所期待的方式加開車次，必須以試排班表的方式為之。本案例所參考的資料^[17, 18, 16]中均未具體說明未來擬加開車次的構想；因此本案例進行加開車次的測試時，係以在班表中加入 PP 自強號的方式為之。所新增的自強號，其停站模式比照臺鐵真實班表中 PP 自強號之停站模式。在新增車次數及發車時間方面，則自大約上午 5 時開始，每大約 4 小時分別自竹南及斗六發車對開，全日加開山線與海線各 4 對。共計 8 對、16 班車。

8.4 真實班表分析

本節使用臺鐵 2020 年 7 月 7 日的班表，對應現況路軌與未來路軌兩種情境進行運轉分析，用以瞭解這三項工程前後鐵路運轉狀況之變化。以下圖 8.5 所示為工程前與工程後之山線與海線路塞潛勢指數。圖之橫軸為山線各車站，而縱軸則為指數值。由圖中可以觀察到未來情境下大部分車站之路塞潛勢指數均略低於現況情境，顯示這些工程之效益。同時亦可觀察到彰化站受到股道佈設改善的影響，大幅降低了路塞潛勢指數。

以下圖 8.6 所示為彰化站之現況股道佈設，對照圖 8.2 即可觀察到股道佈設方式之改變。至於田中站與二水站受支線列車串連運轉之影響亦顯示於圖 8.5 中。

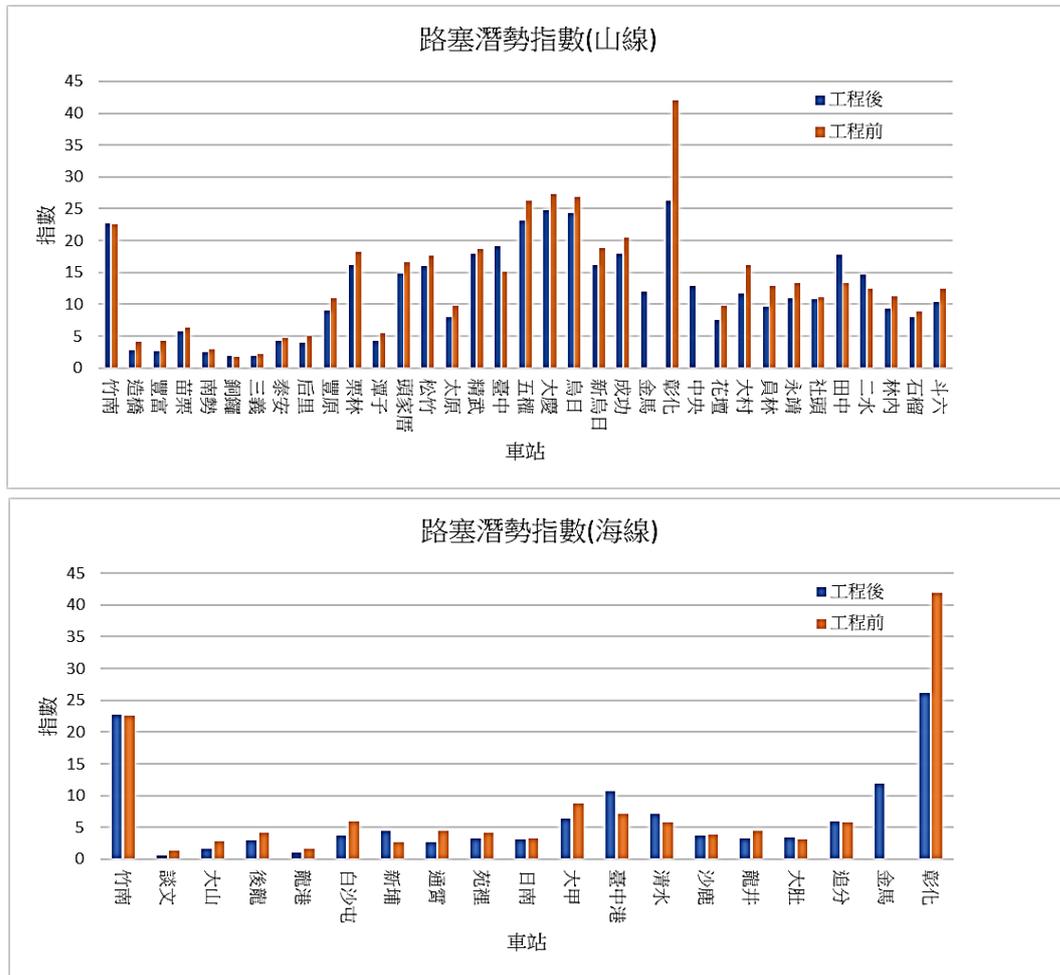


圖 8.5 路塞潛勢指數 (臺鐵班表)

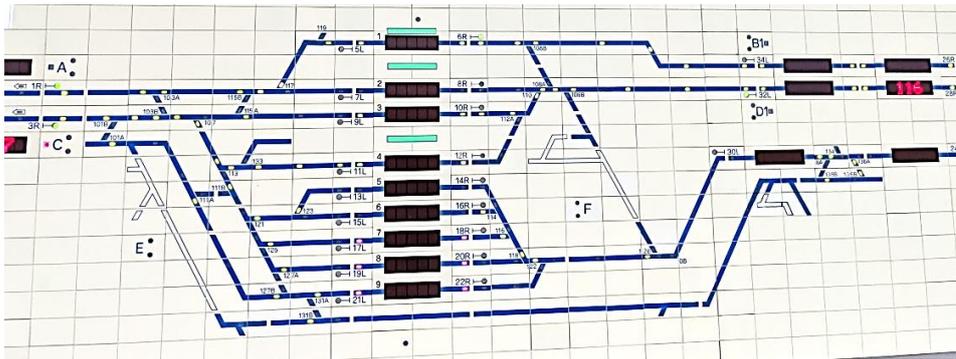


圖 8.6 彰化站現況股道佈設

以下

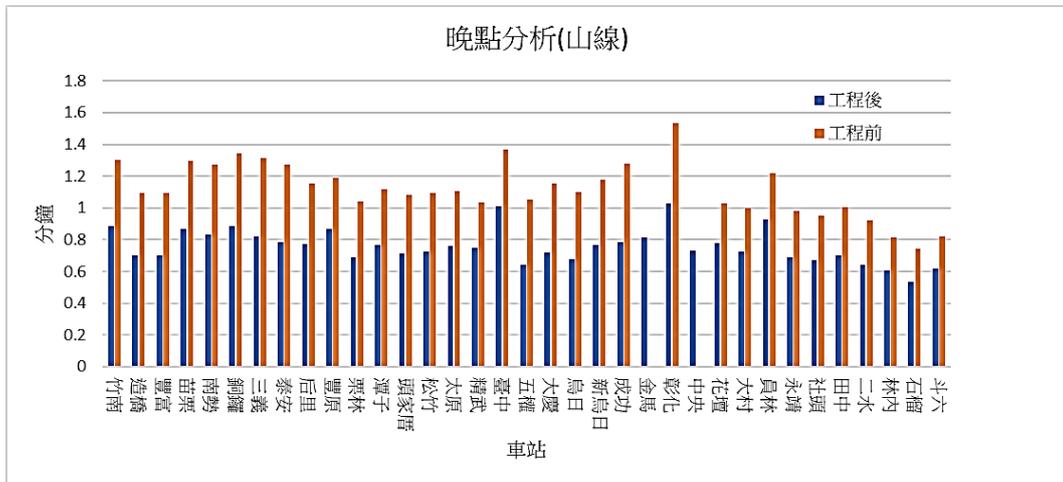


圖 8.7 呈現現情境與未來情境晚點分析之結果。這些分析的目的並不在預測未來可能的準點率或晚點分鐘數，而是欲在設定相同的擾動強度及趕點作為下，比較兩個情境中晚點量的相對變化。觀察

圖 8.7 可發現這三項工程全數完工之後，在竹南至斗六的分析範圍內絕大多數的車站均降低晚點量，亦即這些工程對臺鐵的準點率將有正面貢獻的效益，且產生效益的範圍遠超過工程範圍。

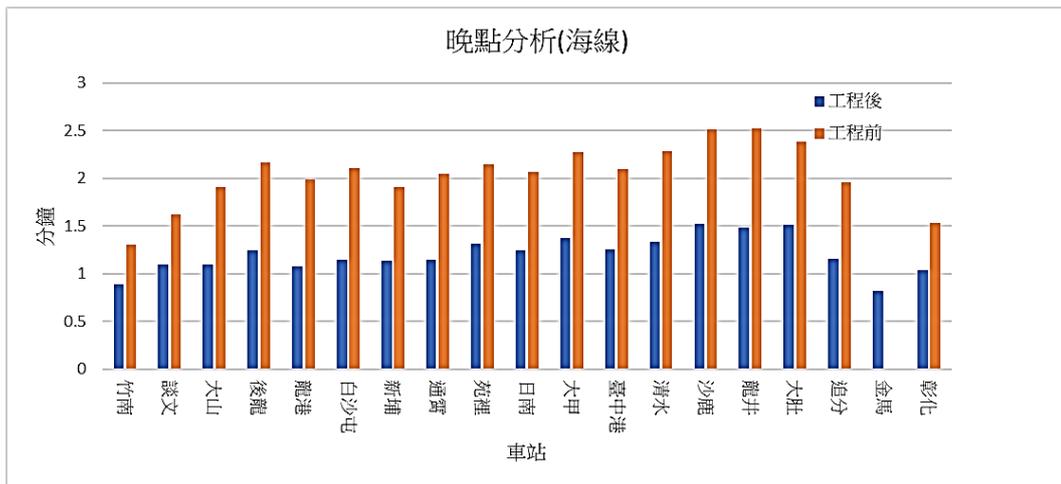


圖 8.7 晚點分析 (臺鐵班表)

以下

圖 8.8 所示為趕點分析之數據。圖之橫軸為各車站，縱軸為分鐘數。正值表示模擬結果顯示列車停留在該站之時間比表訂時間要長，亦即晚點發生；負值則表示列車停留在該站之時間比表訂時間短，亦即在該站進行趕點。以圖之山線為例，可觀察到模擬結果顯示平均各列車在造橋站產生 0.1 分鐘的晚點，而在苗栗站則在現況路軌的情境下，平均可趕點約 0.18 分鐘，而在未來路軌情境下則平均可趕點約 0.21 分鐘。由圖亦可以觀察到在工程完工之後，彰化站趕點的能力有所提升，有助準點率的進一步提高。與前述晚點分析類似，這些分析的目的並不在預測未來可能的晚點或趕點的分鐘數，而是欲在設定相同的擾動強度及趕點作為

下，比較兩個情境的相對變化。

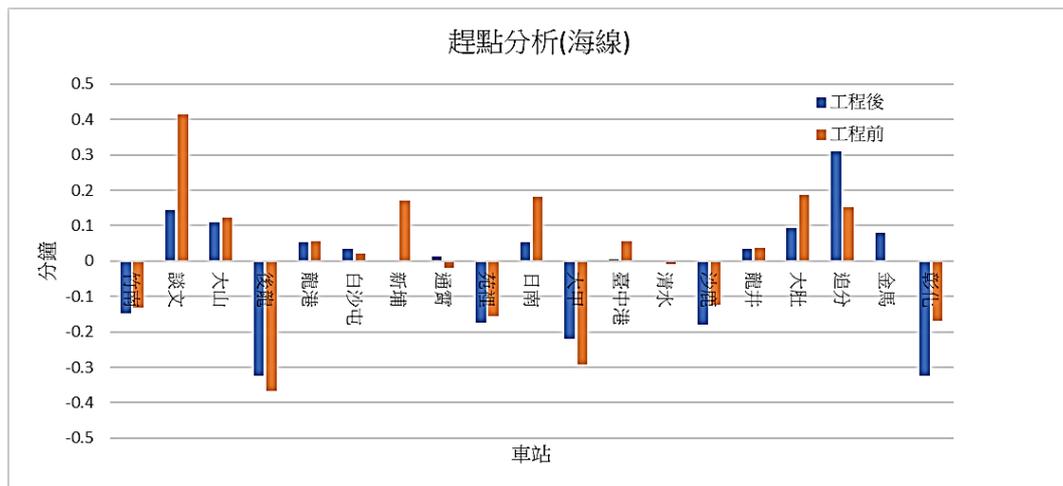
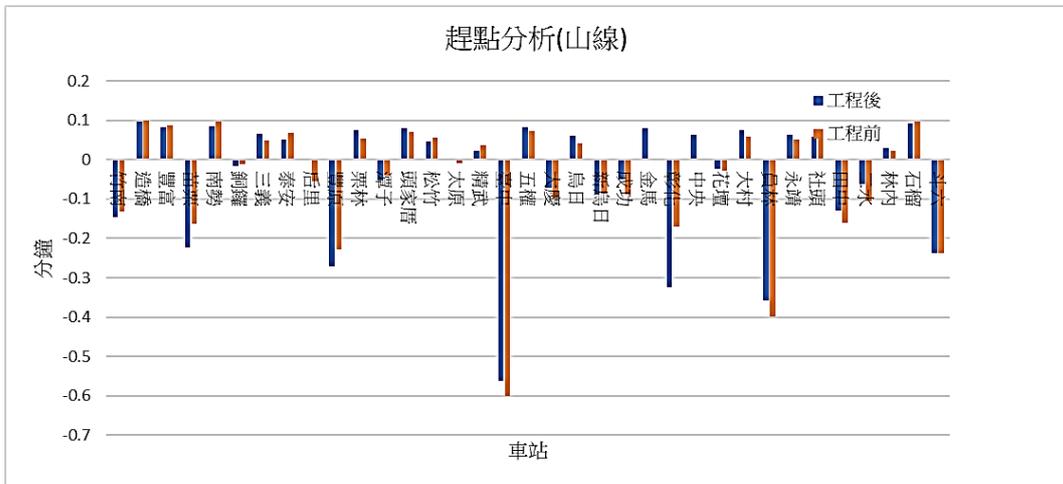


圖 8.8 趕點分析 (臺鐵班表)

站間容量分析之結果示於圖 8.10。工程範圍之外大部分站間的容量均未因工程而發生變化。而彰化站北側由於佈設 4 軌，其容量亦遠高於其他站間路段之容量。

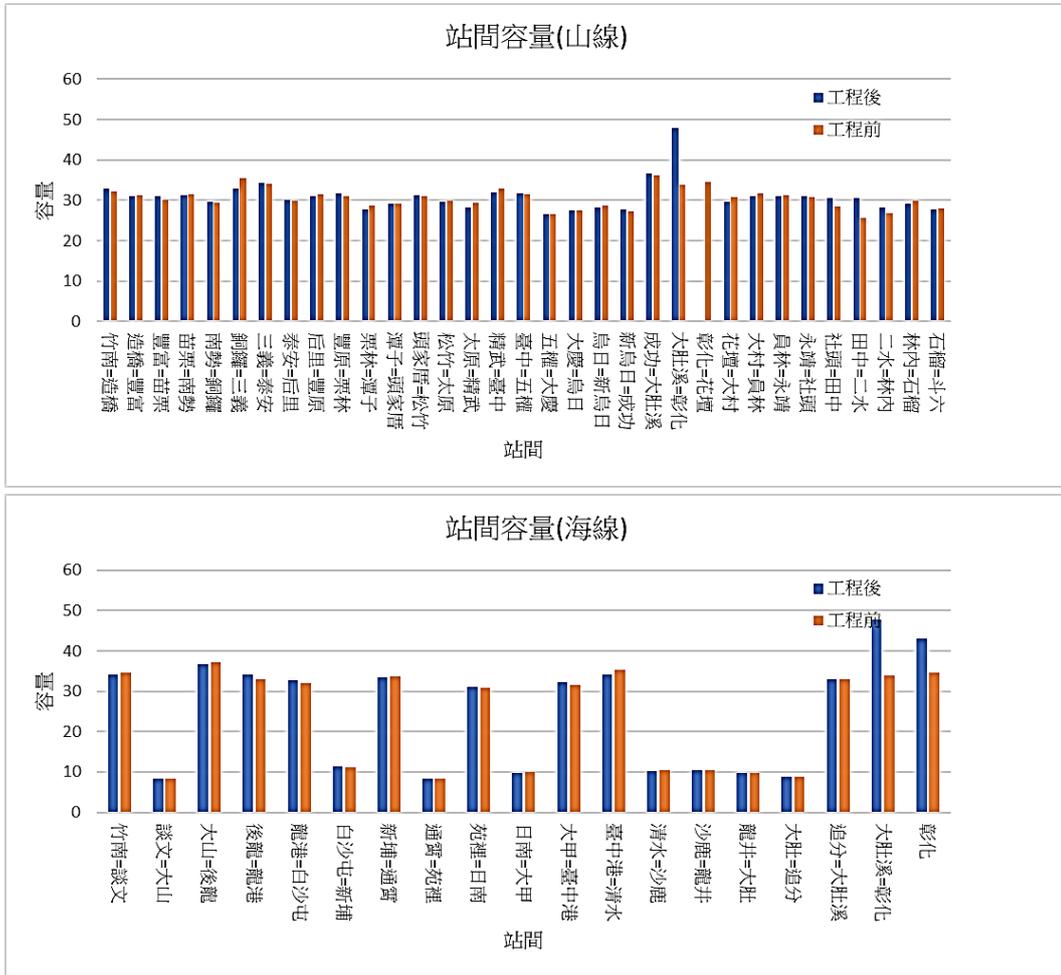


圖 8.10 站間容量分析 (臺鐵班表)

以下圖 8.11 呈現車站利用率之分析結果，圖之橫軸為各車站，縱軸為利用率。由此圖可觀察到不論是現況情境，或工程完工之後的未來情境，此區域內各車站之利用率均不高。值得注意的是在山線大慶站、烏日站及新烏日站之車站利用率均高於其前後路段，並在工程後略為小幅上升。推論或許有可能是在工程後，彰化站顯著提升其容量而產生之瓶頸轉移效應所致。

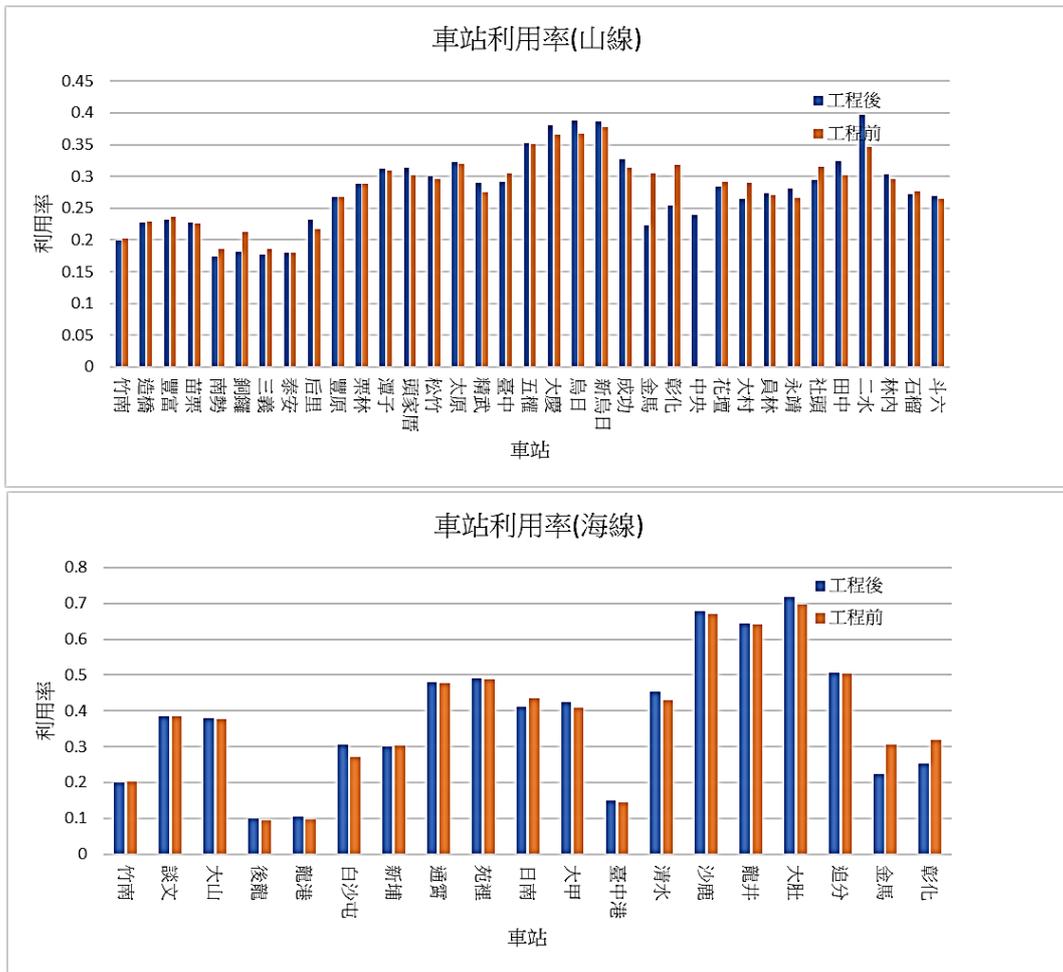


圖 8.11 車站利用率分析 (臺鐵班表)

站間路段之利用率則呈現於圖 8.12。由此圖可觀察到不論是現況情境，或工程完工之後的未來情境，此區域內各車站之利用率均不高。

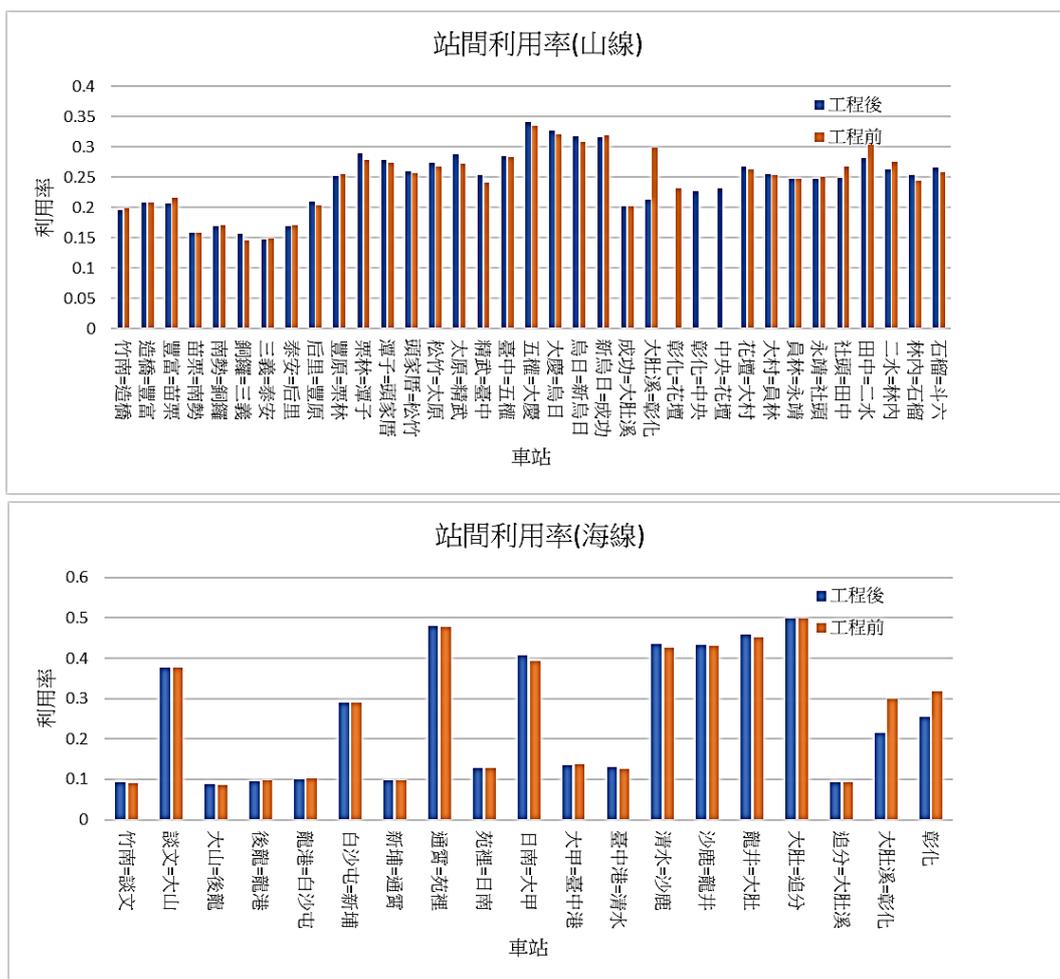


圖 8.12 站間利用率分析（臺鐵班表）

8.5 增班分析

本節使用與前節相同的兩種路軌情境（現況工程前、未來工程後），但在臺鐵 2020 年 7 月 7 日的班表之上，再增加 16 列次的 PP 自強號車次，詳細說明於第 8.3 節。本節使用這份增班之後的班表進行運轉分析。下列圖 8.13 所示為路塞潛勢指數之分析結果。若與前節圖 8.5 相比較則可觀察到增班產生路塞潛勢指數升高的效果。

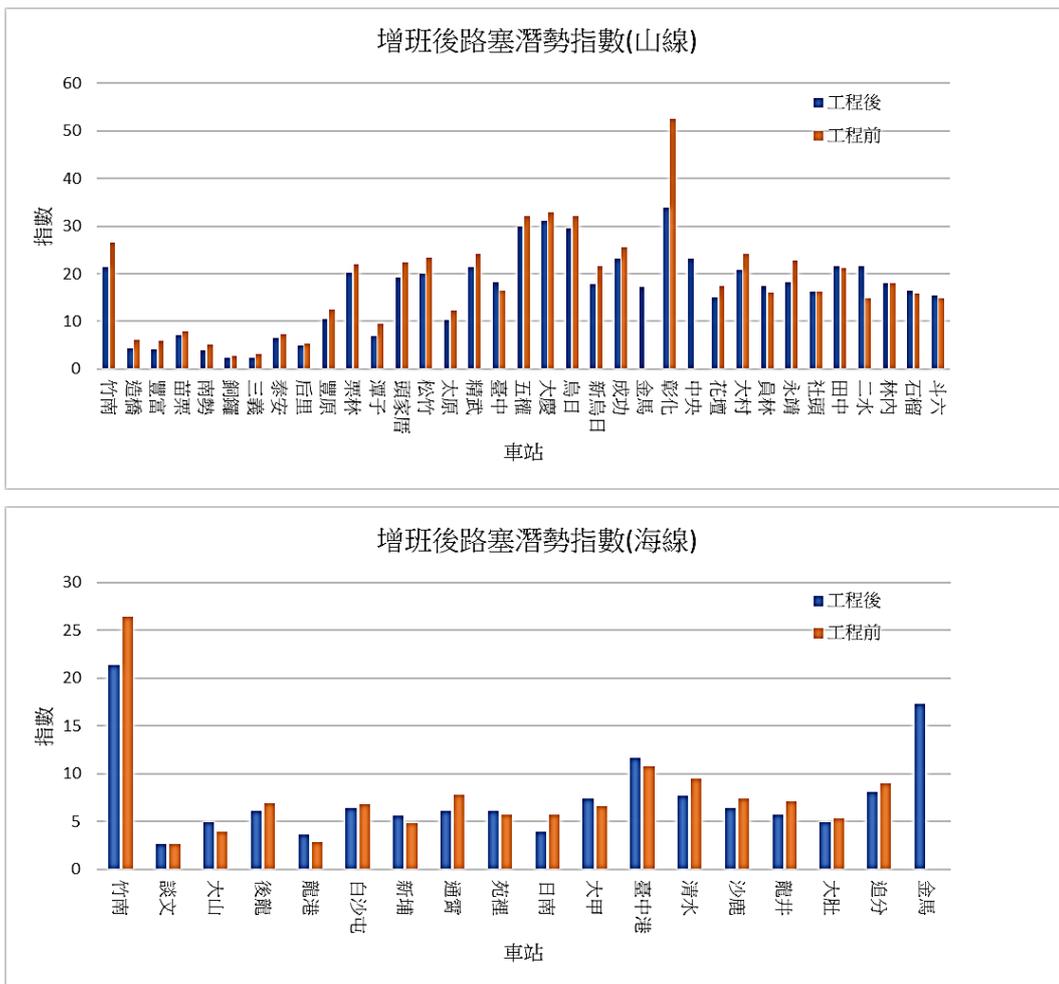


圖 8.13 路塞潛勢指數 (增班後)

晚點分析的結果示於圖 8.14。與

圖 8.7 比較亦可見增班將推升晚點量，與預期相一致。至於工程之效益亦明顯出現，與現況真實班表分析結果類似，不再贅述。值得注意的是本分析之三項工程計畫並未及於海線，但比較

圖 8.7 與圖 8.14 可以見到未來若以本分析所設定之方式增班，海線在晚點方面所受到的影響將超過山線所受之影響。至於其他方式增班是否會有類似之現象，可在未來具體研擬增班方案之後再以本軟體分析之。

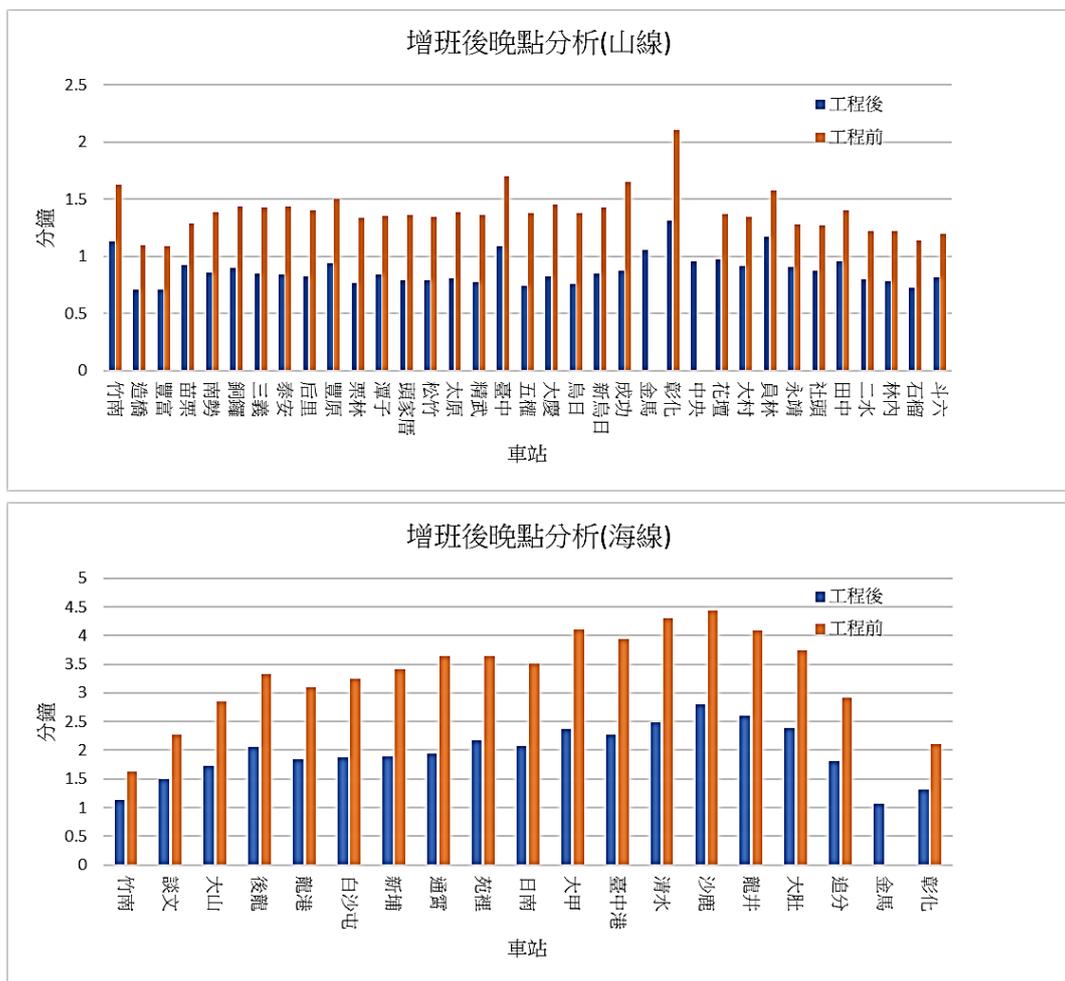


圖 8.14 晚點分析 (增班後)

使用增班後之班表進行趕點分析之結果呈現於圖 8.15。圖中可見到相較於

圖 8.8 所示未增班前之分析，山線各站發生的晚點量及趕點量變化較少，而海線則在增班之後產生較大的晚點量及趕點量。

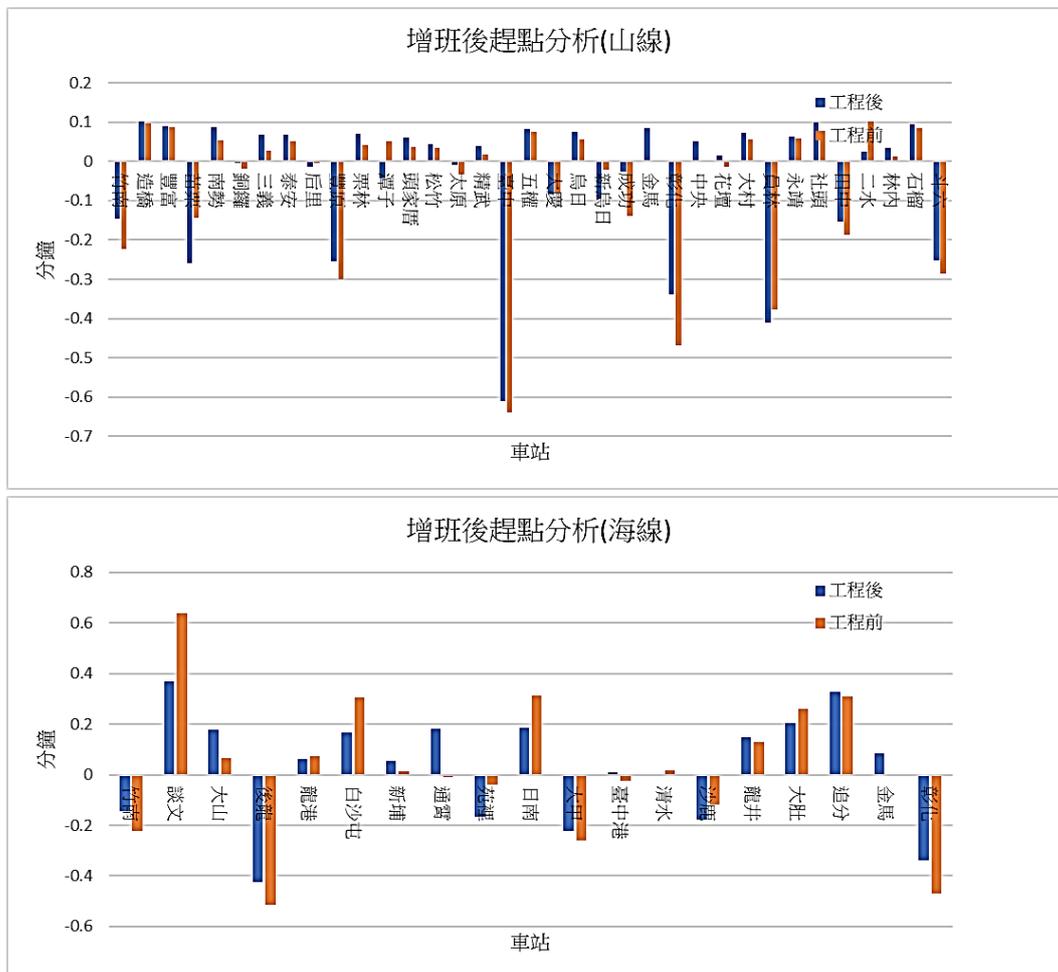


圖 8.15 趕點分析 (增班後)

增班之後的車站利用率與站間利用率分別呈現於圖 8.16 及圖 8.17。相對於真實班表所含有之 324 列次，增班所新增之車次數比例並不高。而所設定之增班方式亦未改變運轉型態，因此對車站與站間之容量影響均不大。由此可合理預期增班對車站與站間之利用率影響均不大。比較圖 8.16、圖 8.17 與圖 8.11、圖 8.12 亦可觀察到分析結果與預期相符。

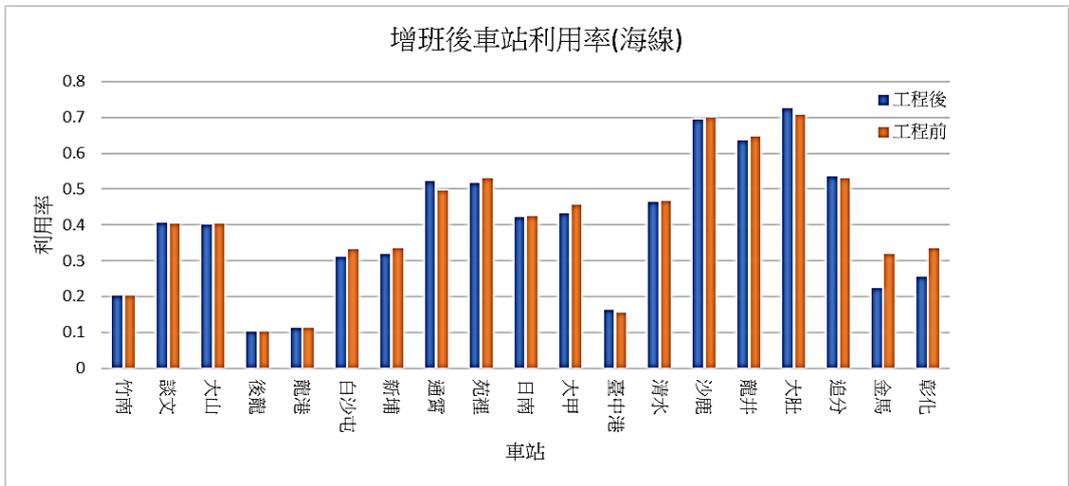
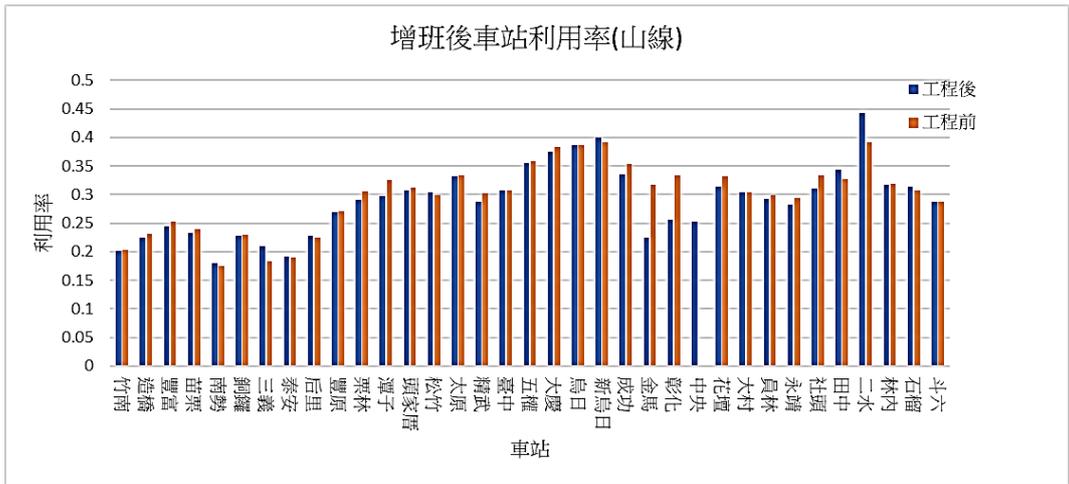
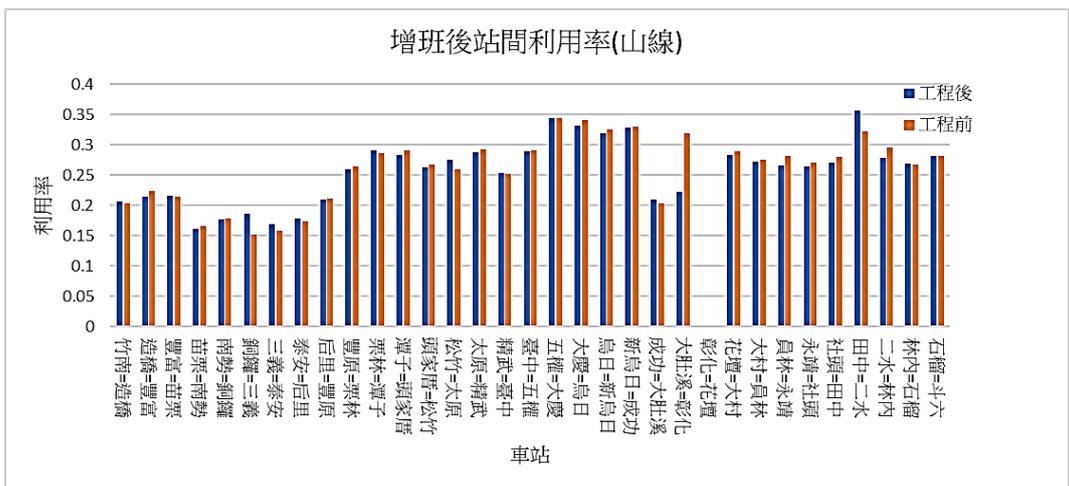


圖 8.16 車站利用率分析 (增班後)



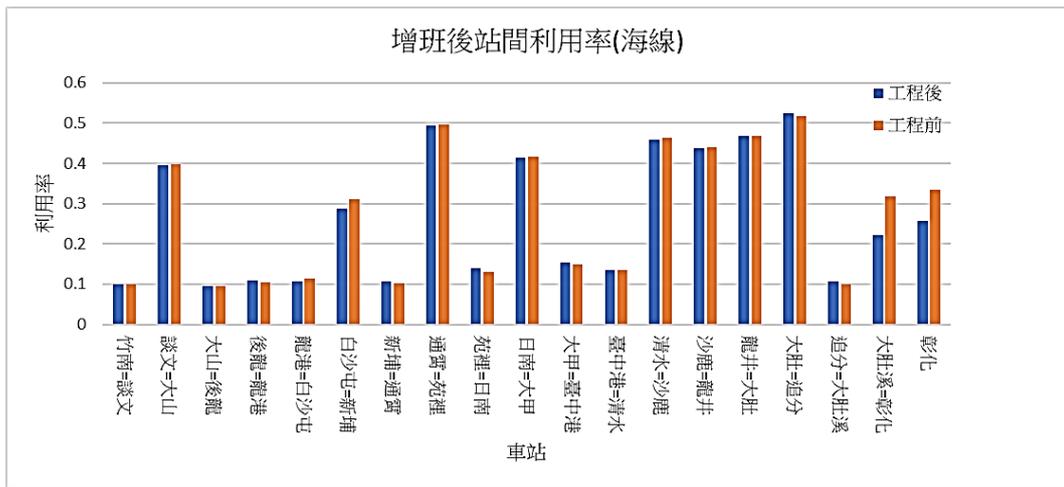


圖 8.17 站間利用率分析（增班後）

8.6 小結

綜合歸納本章各節可得到下列各項結論：

1. 已展現本平台之各項分析能力

本章各節以數據展現了本平台將三個不同的工程計畫整合到同一個數位模型中，再據以進行各種運轉分析之能力，不必各自獨立分析。而數位模型亦精準描述了現況與未來工程完工後所有車站與站間之股道佈設狀況，不必粗略簡單歸類。系統使用國際通用的班表壓縮法進行容量分析，產出合於預期之結果，而晚點分析及趕點分析則展現了運轉模擬能力之產出。

2. 可具體分析增班之影響

本章設計了增班情境並具體分析增班之影響。不同的增班方式將產生不同的影響。未來若有具體的不同增班的方式，將可使用相同的方式進行分析，預期可獲得更高參考價值的資訊。

3. 更可掌握效益

除了觀察各種影響之外，本章分析結果亦呈現其他分析方法不易呈現的效益，例如晚點分析指出在超出工程範圍的區域，工程對準點率亦將有其貢獻。

4. 更多的分析項目

未來使用者參與開發之後，可依其需求設計而擴充本軟體系統，產出更多的統計資訊及指數，產生更大的分析效益。

第九章 結論與後續工作

9.1 結論

本計畫延續運研所長期系列研究，累積過往多年計畫成果，用以發展適合我國運用的數位分身系統。此數位分身系統中可建立臺鐵系統的數位模型，用以在系統中進行運轉分析並產出多種數據。本計畫已經完成數位分身系統之設計，並實作軟體雛型。最重要的系統能力如下。

1. 整合分析能力

使用者可將多數專案之資料整合到同一個數位模型中，達到整合分析的目的。

2. 班表能力

系統可配合使用者之情境設定自動解出無衝突班表，供使用者具體掌握在其情境下可能的運轉狀況。

3. 分析能力

系統可在使用者觸發之後全自動進行複雜的運轉分析並產出數據。

4. 使用輔助能力

軟體系統提供數據管理、權限管理等系統功能，方便使用者操控以及分享複雜的數據。

本計畫除了已經在軟體系統中建立了完整而精準的臺鐵數位模型之外，更重要的成果是可依各種構想中的未來情境建立任意多組數位模型，用以預見在各種構想的情境下可能的運轉狀況。這種能力使得本平台成為計畫審議的理想工具。

為了達成前述功能，本計畫使用的技術涵蓋了數據及模式，而實作的軟體內容則涵蓋了系統的整體架構、位在後端的資料庫與引擎庫、位在前端的使用者操作界面與工具庫等。本計畫成果兩大重要特色是學理依據與精準模型，分別說明如下。

1. 學理依據

本平台所使用的重要技術均有堅實的學理或論述依據。

- (1) 自動排點：以數學為基礎的技術使得本平台有能力具體考量實際發生運轉狀況，而不必依賴簡化或隨機產生的班表。
- (2) 容量分析：與國際接軌的技術，具有紮實的立論基礎。
- (3) 瓶頸分析：以確實的論述指出鐵路瓶頸路段的識別應考量運轉狀況，以利用率為基礎；僅考量路軌所提供之容量可能會產生偏差結果。
- (4) 路軌數位模型：以數學為基礎的數位模型，用以掌握股道的幾何配置以及進路、列車路徑、衝突等列車互制行為。
- (5) 模擬技術：以完整學理論述及演算法為基礎的技術，使得本平台有能力依班表進行模擬，用以推估在各種不同情境下可能的晚點等運轉狀況。

2. 精準模型

- (1) 路軌模型：堅實的學理基礎使得本平台有能力精準描述臺鐵所有車站之股道佈設，而不必粗略分類。
- (2) 列車模型：系統設計完整的列車模型，含有各車次之車次編碼、牽引種別、運行區間、到站任務、到離站行點、使用股道等資訊，用以完整化班表所含有的資訊。
- (3) 班表模型：本平台有能力依所設定之情境而自動解得無衝突班表。這使得分析者不必再依路線容量做粗略估計，而能夠精準具體評估未來的增班或調整車次的可能性。

本計畫已經具體完成了鐵路數位分身系統的多項重要功能，亦以真實案例進行分析，顯示本平台確可達到目標設定的能力。

預期未來本平台完成之後將可產生顯著的效益。利用本平台，使用者可將多數建設計畫依分析情境建立到同一個數位模型中、試排未來班表、再進行運轉分析。情境可以是各計畫不同方案內容或進度的組合、施工過程的不同階段、未來增班或調整車次的構想，或以上所有各項的任何組合。這些功能大部分為目前無其他軟體工具可提供，但對鐵路建設計畫之高品質評估具有顯著助益。

9.2 後續工作

科技的目的是服務人，而本軟體的任務則是服務使用者。所謂使用者指直接使用本軟體以執行其業務的人員，而其需求則是軟體功能設計的

最重要依據。本計畫已經完成系統之設計以及大部分主要功能之實作，但這些成果均偏重於技術面，建議後續開發階段尚須釐清軟體所提供之功能貼近使用者需求之程度，據以精進本平台，具體工作項目如下。

1. 使用者明確化

使用者明確化及具體參與是本計畫第二年期最重要的工作項目。主要使用者可能是主導鐵路建設計畫的公務機構、更上位的政策工作者、或實際執行研究分析設計的顧問公司。這些都影響未來軟體的開發方向，使用者明確化為後續的重要工作項目。

2. 使用者的積極參與以使需求明確化

取得使用者參與之後，開發者得以進行訪談使用者以獲得需求，而使用者亦可配合在直接操作軟體的過程中提供意見回饋。建議開發者亦需要瞭解軟體應如何設計才能融入其業務中。

需求明確化之後才能夠釐清軟體所需要提供的操作功能，之後才是技術面據以開發。我國鐵路建設計畫持續推動，應早日充份運用本平台以使其發揮已經具備的分析能力。

參考文獻

1. 陳一昌、許書耕、許修豪、李宇欣、陳春益、余秀梅、李衍儒、楊承道、盧立昕、楊峻武、吳美玲、王彥傑、蔡欣恬 (2011)，「臺鐵包車營運需求下列車班表之研究」，交通部運輸研究所。
2. 陳一昌、許書耕、許修豪、陳春益、林東盈、李威勳、楊承道、李宇欣 (2012)，「鐵路列車排程模式建立及運行資料分析校估之研究」，交通部運輸研究所。
3. 陳一昌、許書耕、許修豪、陳春益、林東盈、李威勳、李宇欣 (2013)，「鐵路列車自動化排點系統建置之研究」，交通部運輸研究所。
4. 許書耕、許修豪、陳春益、林東盈、李威勳、袁永偉、郭昭佑、吳美玲、顏利憲、李宇欣 (2014)，「鐵路列車自動化排點系統功能擴充與推廣應用」，交通部運輸研究所。
5. 陳一昌、許書耕、許修豪、陳春益、林東盈、李威勳、李宇欣 (2014)，「鐵路列車自動化排點系統建置之研究」，交通部運輸研究所。
6. 李宇欣、盧立昕、袁永偉、伍彥竹、許書耕、賴威伸、鄔德傳 (2019)，「大數據分析技術進行鐵路供需診斷與策略分析(1/2)-診斷模式軟體雛型之建置」，交通部運輸研究所。
7. 李宇欣、盧立昕、袁永偉、伍彥竹、許書耕、賴威伸、鄔德傳 (2020)，「大數據分析技術進行鐵路供需診斷與策略分析(2/2)-完成鐵路系統供需診斷模式」，交通部運輸研究所。
8. 李宇欣、盧立昕、陳佑麟、袁永偉、陳蓉萱、許書耕、賴威伸、鄔德傳 (2021)，「鐵路系統供需診斷模式軟體之維護與擴充及策略分析(1/2)」，交通部運輸研究所。
9. UIC (2004). UIC leaflet 406, Capacity. France, UIC International Union of Railways.
10. UIC (2013). Code 406–Capacity. France, UIC International Union of Railways.
11. 交通部鐵道局 (2021)，「花東地區鐵路雙軌電氣化計畫」建設計畫。
12. 交通部鐵道局，(2021)，「桃園都會區鐵路地下化計畫」。[cited 2021; from <https://www.rb.gov.tw/showpage.php?lmenuid=3&smenuid=84&tmenuid=140>]
13. 交通部鐵路改建工程局 (2017)，「嘉義市區鐵路高架化計畫綜合規劃報告」。
14. 交通部鐵道局 (2019)，「基隆南港間通勤軌道建設計畫可行性研究報告」。
15. 李宇欣、盧立昕、陳佑麟、袁永偉、陳蓉萱、賴威伸、許修豪、鄔德傳 (2022)，「鐵路系統供需診斷模式軟體之維護與擴充及策略分析(2/2)」，交通部運輸研究所。

16. 交通部鐵道局，(2021)，「彰化市鐵路高架化計畫可行性分析」。
[cited 2021; from https://publicworks.chcg.gov.tw/07other/other01_con.asp?topsn=4323&data_id=17996]
17. 交通部 (2019)，「臺鐵集集支線基礎設施改善計畫」。
18. 交通部臺灣鐵路管理局 (2021)，「高鐵彰化站與臺鐵田中站轉乘接駁計畫綜合規劃期末報告」。
19. 鄔德傳 (2021)，「以列車運行為核心研析構建鐵路數位分身軟體平台之初探」。
20. 交通部臺灣鐵路管理局 (2014)，「鐵路行車安全改善計畫可行性研究暨綜合規劃報告」。
21. 許書耕、賴威伸、鄔德傳、盧立昕、陳佑麟、袁永偉、陳蓉萱、李宇欣 (2022)，「以班表壓縮法評估鐵路流量容量比」，臺鐵資料季刊 381: 1-29。
22. Gelernter, D. (1993). *Mirror worlds: Or the day software puts the universe in a shoebox... How it will happen and what it will mean*, Oxford University Press.
23. Grieves, M., J. Vickers (2017). "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems." *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*: 85-113.
24. Piasek, B., J. Vickers, D. Lowry, S. Scotti, J. Stewart, A. Calomino (2012). "Materials, structures, mechanical systems, and manufacturing roadmap." *NASA TA*: 12-12.
25. Camposano, J. C., K. Smolander, T. Ruippo (2021). "Seven metaphors to understand digital twins of built assets." *IEEE Access* 9: 27167-27181.
26. Barricelli, B. R., E. Casiraghi, D. Fogli (2019). "A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications." *IEEE access* 7: 167653-167671.
27. Stark, R., T. Damerau (2019). *Digital Twin*. CIRP Encyclopedia of Production Engineering. S. Chatti and T. Tolio. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 1-8.
28. Kritzinger, W., M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn (2018). "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification." *Ifac-PapersOnline* 51(11): 1016-1022.
29. Jones, D., C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, B. Hicks (2020). "Characterising the Digital Twin: A systematic literature review." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 29: 36-52.
30. Wikipedia. (2023). "Digital twin." [cited from https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin]
31. Lamb, K. (2019). *Principle-based digital twins: a scoping review*, DOI.
32. Chester, M. V., B. R. Allenby (2020). "Perspective: the cyber frontier and infrastructure." *IEEE Access* 8: 28301-28310.
33. Saad, A., S. Faddel, O. Mohammed (2020). "IoT-based digital twin for energy cyber-physical systems: design and implementation." *Energies* 13(18): 4762.
34. Gao, C., J. Wang, S. Dong, Z. Liu, Z. Cui, N. Ma, X. Zhao (2022).

- "Application of Digital Twins and Building Information Modeling in the Digitization of Transportation: A Bibliometric Review." *Applied Sciences* 12(21): 11203.
35. Vieira, J., J. Poças Martins, N. Marques de Almeida, H. Patrício, J. Gomes Morgado (2022). "Towards resilient and sustainable rail and road networks: A systematic literature review on Digital Twins." *Sustainability* 14(12): 7060.
 36. Kochan, A. (2020). "Digital Twin concept of the ETCS application." *WUT Journal of Transportation Engineering* 131: 87-98.
 37. Kampczyk, A., K. Dybeł (2021). "The fundamental approach of the digital twin application in railway turnouts with innovative monitoring of weather conditions." *Sensors* 21(17): 5757.
 38. Marzouk, M., A. Abdelaty (2014). "Monitoring thermal comfort in subways using building information modeling." *Energy and buildings* 84: 252-257.
 39. Kaewunruen, S., N. Xu (2018). "Digital twin for sustainability evaluation of railway station buildings." *Frontiers in Built Environment* 4: 77.
 40. Sahal, R., S. H. Alsamhi, K. N. Brown, D. O'shea, C. McCarthy, M. Guizani (2021). "Blockchain-empowered digital twins collaboration: smart transportation use case." *Machines* 9(9): 193.
 41. Meixedo, A., J. Santos, D. Ribeiro, R. Calçada, M. D. Todd (2022). "Online unsupervised detection of structural changes using train-induced dynamic responses." *Mechanical Systems and Signal Processing* 165: 108268.
 42. Ariyachandra, M., I. Brilakis (2020). "Digital twinning of railway overhead line equipment from airborne lidar data."
 43. 交通部 (2020), 「2020 運輸政策白皮書」。
 44. 臺灣鐵路管理局 (2018), 「臺灣鐵路管理局鐵路建設作業程序」。
 45. Lee, Y., L.-S. Lu, M.-L. Wu, D.-Y. Lin (2017). "Balance of efficiency and robustness in passenger railway timetables." *Transportation Research Part B: Methodological* 97: 142-156.
 46. 李宇欣、盧立昕、袁永偉、陳佑麟、陳蓉萱、許書耕、賴威伸、鄔德傳 (2022), 「軌道佈置與運轉路徑的結構化系統」, 臺灣, 110211303。
 47. Weik, N., J. Warg, I. Johansson, M. Bohlin, N. Nießen (2020). "Extending UIC 406-based capacity analysis—New approaches for railway nodes and network effects." *Journal of Rail Transport Planning & Management* 15: 100199.
 48. Ho, T., B. Mao, Z. Yuan, H. Liu, Y.-F. Fung (2002). "Computer simulation and modeling in railway applications." *Computer Physics Communications* 143(1): 1-10.
 49. Cerreto, F., O. A. Nielsen, S. Harrod, B. F. Nielsen (2016). Causal analysis of railway running delays. 11th World Congress on Railway Research (WCRR 2016), Milan, Italy.
 50. Kunifuji, T., C. Hirai, N. Tomii (2013). "Train rescheduling evaluation from the viewpoint of passengers by microsimulation of train operation

- and passenger flow." IEEJ Transactions on Industry Applications 133(7): 756-764+712.
51. Narayanaswami, S., N. Rangaraj (2013). "Modelling disruptions and resolving conflicts optimally in a railway schedule." Computers & Industrial Engineering 64(1): 469-481.

附錄 A：期中報告審查意見處理情形表

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
蕭耀榮委員		
<p>1. 數位分身著重在實體物件與電腦系統之間之數據流均以自動化傳輸，但目前顯示的成果多為實體物件上傳至電腦之自動化傳輸，對反向之自動化傳輸說明較少。</p> <p>2. 數位分身在本計畫的應用目的不在即時監控，故無即時接收之必要，但若數位分身接收到數據之時延(time delay)愈短，愈能適切分析並提出結論或預防措施，本平台對各項功能是否有理想之時延需求之分析？</p> <p>3. 計畫書之平台數據，包含了運務、工務、機務、電務，但在圖 5.1</p>	<p>1. 將數據由數位分身系統傳輸至臺鐵系統，需要有臺鐵端之資訊系統配合接收。目前臺鐵並無此接收機制。</p> <p>2. 理想時延須配合使用目的而設計。本平台預設之應用目的，係作為政府機關辦理鐵路建設計畫經費審議、政策研擬與方案評估之重要工具，以及移轉鐵道局與臺鐵局做為列車運轉模擬與評估建設計畫方案之輔助工具。這些目的均無依真實運轉狀況而即時提出結論或預防措施之需要。未來若擴大應用則可視需要而制定之。</p> <p>3. 此乃配合第四章所述之優先研發項目而規畫。至於工務、機</p>	<p>1. 同意合作單位處理情形。</p> <p>2. 同意合作單位處理情形。</p> <p>3. 同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>架構圖僅看到運務方面之規劃。</p> <p>4.在數位分身平台可依情境編輯車站，路網、初始班表，當使用者的部分編輯出現不合理的狀況時，系統是否有防呆式警示？系統有解衝突功能，提供分析結果，但是否可進一步依使用者需求，主動提供最佳方案，而非僅分析可行性。</p> <p>5.模擬中隨機加入擾動，但平台本身有大數據，應可分析判別擾動，再將擾動加入模式，減少隨機之因素。</p> <p>6.運轉分析之模擬結果如何驗證，以確認其準確性及可用性。</p>	<p>務、電務等其他項目，須配合未來可常態取得真實數據之性質而設計。</p> <p>4.本平台設有防呆機制，防止使用者作不合邏輯或不合鐵路運轉性質之設定。目前系統並未設計主動提供最佳方案之功能，未來若能取得使用者之具體需求將可研究納入之。</p> <p>5.目前臺鐵並無真實擾動數據。</p> <p>6.在缺乏真實擾動數據之狀況下並不易進行驗證。然目前所見之模擬結果均合乎預期。</p>	<p>4.同意合作單位處理情形。</p> <p>5.同意合作單位處理情形。</p> <p>6.同意合作單位處理情形。</p>
許書耕委員		
<p>1.報告書第 6 頁說明，本計畫含有數位分身系統平台之規劃以及軟體雛型實作兩部分。前者為</p>	<p>1.對本計畫作為二年計畫第一年期而言，軟體雛型實作確為數位分身系統平台規劃之</p>	<p>1.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>計畫之主軸，後者則為進行平台規劃過程中之輔助工具。只有對其中較關鍵性，需要用軟體測試才能確認其可行性的部分才實作雛型軟體為之；第25頁最下列，唯一的方法是對未來使用者進行直接訪談以具體釐清使用者需求，之後再與使用者密切合作逐步完成軟體之設計及實作。從甲方的計畫管理設計而言，能做出真正具實用的軟體雛型才是檢驗本計畫成效的簡易檢核方式，此亦與報告書的短期目標相符。因此，研究團隊不能視軟體雛型僅係輔助工具，而應係重要產出。建議至少要完成三個介面：(1)路網建置(2)班表初稿建置(3)分析的選項。</p> <p>2.報告書第27頁第三段倒數第五列說明，需要對所有數據均以相同的方式訂定一致性的標準、檢驗程序，以及不符標準時的處理動作。資料</p>	<p>重要輔助工具。對整體二年計畫而言，能做出真正具實用的軟體雛型確是檢驗本計畫成效的簡易檢核方式。第一年期與第二年期之目標、方式不同，應無衝突之處。審查意見所指示之三個介面：(1)路網建置(2)班表初稿建置(3)分析的選項，三者均已納入規畫，且在亦均已於軟體中建置完成，已可操作。</p> <p>2.資料一致性確是數位分身平台極為重要的基石，亦確是本計畫最重要的成果之一。然達到資料一致性之過程、程序、成果</p>	<p>2.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>的一致性是本計畫最為強調者，且係本計畫與前期各完成的計畫最大的不同處之一，應在本計畫各處儘可能彰顯強調。惟在圖 5.1 鐵路數位分身平台數據流動架構示意圖中，並未有數據一致性的單元，似應補充並彰顯之。</p>	<p>等，卻極難以具體化呈現在報告書中。例如，資料數據之修正過程及方法，係依不一致之態樣而個別設計，而不一致之態樣本身並無固定模式。因此在報告書中，系統化描述資料一致化之方法、標準、程序等，或以圖、表呈現修正前後之差異，或甚至簡要說明資料修正之關鍵、困難點等，均極為困難且對專案幫助不大，對日後讀者幫助亦不多。資料一致化之需要存在於軟體系統各處，並不限於某流程之任一特定階段。例如，各運算引擎所產出之演算結果在併入資料庫之前，亦常需要進行一致化之修正，使其能與全系統其他模組相容。因此鐵路數位分身平台數據流動架構示意圖中並無資料一致化之專責單元。</p>	

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>3.報告書第 28 頁第一段第七列說明，各個軟體引擎之間則儘量避免直接交換數據，以維持引擎本身之單純性。報告書第 32 頁圖 5.5 顯示，所有情境分析均以無衝突的班表為分界點，其之前有車站、路網的編輯，及初始班表的編輯工作，其後則能以同一無衝突班表進行數個分析，包括運轉分析、容量及瓶頸分析、路塞分析等。因為軟體引擎間不直接交換數據，就表示使用者需輸入無衝突班表檔名、運轉分析輸出檔名、容量及瓶頸分析輸出檔名、路塞分析輸出檔名等。當情境多時，檔案過多，檔名的管理便成為使用者的惡夢。建議，在執行某軟體引擎時，該引擎的輸出檔名係由系統自動以輸入的無衝突班表檔名產生的一個關連檔名。如此，使用者只要管理情境項(每項一個無衝突班表檔名)，而不需</p>	<p>3.各引擎之間不直接交換數據，相互之間亦無其他直接關聯，確為本平台使所有引擎得以自由組合運用的重要設計關鍵。然而不同引擎在組合運用時，這種設計確是會造成引擎之間多次交換外部數據。在本平台之設計，絕大部分之此類數據交換均是利用資料庫完成，而非利用檔案傳遞為之。而數據交換均在軟體中自動進行，使用者完全無感。而全套的引擎間數據交換功能之設計及實作，正是以前述數據一致性為其最重要基石，亦為本計畫相較於前期計畫主要精進之處，也是整個數位分身平台最重要的基礎之一。但此部分並無操作畫面、使用者無感覺，在軟體亦無獨立功能，並不易以報告書形式彰顯呈現之。</p>	<p>3.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>管理各種自創又不易記的軟體引擎輸出檔名。</p> <p>4.報告書第 39 頁之 6.5 節運轉穩定度分析說明，鐵路數位分身平台使用班表模擬之方法，進行運轉穩定度分析，作為運轉分析的一部分。當使用者在主控畫面中觸發運轉分析功能時，軟體會自動進行 100 次運轉模擬。說明班表模擬的隨機單元如何與實際的擾動建立關聯?或者，宜建立一個擾動情境與隨機變量大小的參考表，並提出班表更改的建議(刪減或拉大)。</p>	<p>4.此確為重要關鍵點。受限於真實數據，目前進行運轉模擬時，所有擾動量均為軟體自動產生之隨機值，但使用者可控制其大小範圍。隨機擾動之大小與晚點量係成正向關係，亦即隨機擾動量愈大，晚點量亦愈大。至於對班表之建議則需一併考慮班表中之寬裕量與緩衝時間之安排。以人工排點時，排除衝突已屬不易，寬裕量與緩衝時間之妥善安排則更具高難度。此亦凸顯鐵路系統引進自動排點技術的重要性。</p>	<p>4.同意合作單位處理情形。</p>
<p>5.ATP 可以提供運轉上許多參數，建議評估對本案有無重要性及如何取得。</p>	<p>5.可重現鐵路系統運轉歷史為鐵路數位分身平台未來重要目標之一。而 ATP 之紀錄即為具體而詳細重現歷史之關鍵數據。若本項數據可納入鐵路數位分身平台將可發揮關鍵性效用。至於取</p>	<p>5.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>6. 本計畫能否做出相同班表但不同路網的運輸分析差異。或者再進一步，班表也不同，不同情境的運輸分析差異。</p>	<p>得方式則須得到臺鐵之密切配合，在臺鐵系統與數位分身平台之間建立常態性、自動化之數據拋轉機制。這種機制已經實現於四代票務系統之售票紀錄數據拋轉，驗證確實可行。</p> <p>6. 班表資訊含有車次清單、各車次之起迄站與停站模式、各車次於各車站之到離站時分、各車次於各車站之使用股道等多項資訊。嚴格來說不同路網若有車站之差異，或車站內股道佈設之差異，即不可能存在相同的班表。至於跨路網、跨班表之運轉分析比較則無問題。此種跨情境、跨路網、跨班表之比較亦為路塞潛勢指數之重要功能之一。而本計畫為鐵路數位分身平台所設計之瓶頸分析、容量分析等，亦均可達到此效果。</p>	<p>6. 同意合作單位處理情形。</p>
<p>黃明居委員</p>		

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
1.第一章概說第 5-6 頁，建議新增 1.3 節計畫執行內容與期中完成程度。說明計畫執行的詳細內容與時程，以利檢核整體計畫執行的期中成果，並註明標示於期中報告書的相關頁數。	1.將在期末報告書納入工作項目完成之說明。	1.同意合作單位處理情形。
2.第二章文獻回顧第 10 頁，本章節僅說明過去團隊的研究成果，建議新增最新國際相關文獻回顧。另外，對於過去的研究核心技術，與本計畫相關的模組或演算法等，能夠新增一小節作彙整，以表格或圖形說明與本計畫的關聯性，讓閱讀者清楚了解過去的研究成果在此研究的重要性與連結性，更重要的是可以更了解本計畫主要的核心工作與技術為何。	2.將在期末報告書中增加所回顧之國內外文獻。運研所過往研究成果共同形成本計畫之重要技術基礎。而本計畫主要的核心工作為數據整合與引擎整合。	2.同意合作單位處理情形。
3.3.3 節數位分身與鐵路系統的應用第 14-6 頁，建議詳細分析與說明國外的案例，尤其是國際標竿案例的說明（需求書中的工作項目），並於	3.國外案例並無法在公開領域取得詳細資料，有可能是因為各國為保護鐵路數位分身系統帶來之實質利益而做出限制。本計	3.同意合作單位處理情形。

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
最後做小結彙整，說明目前國際上應用數位分身於鐵路的各項最新發展與功能（績效），做為本計畫的重要參考依據。	畫亦有帶來可觀效益之潛力，政府亦應考慮制成研究成果之公開發表。而報告書「數位分身之特性」乙節，即為可取得之文獻、案例等之彙整，亦為本計畫設計我國鐵路數位分身平台之重要參考。	
4.4.1 節整體構想第 18 頁，最後一段提到臺鐵系統之工程建設案，可能產生研究的偏差議題…，是否訪問過或研究過臺鐵相關工程案規劃時的想法或相關看法？	4.有關本項案例之看法已在工作會議中提出供與會單位參考。	4.同意合作單位處理情形。
5.4.1 節整體構想第 19 頁，第三段提到：「本計畫將以政府相關單位所急需之功能作為優先研發項目…」哪些相關單位？急需功能為何？是否有想法？	5.數個政府部門均有可能在其職掌業務中涉及鐵路建設計畫，例如鐵道局、臺鐵局、交通部、國發會等均屬之。而急需之功能即為「優先研發項目」乙節第一段所說明，具有跨專案整合運轉分析之軟體工具。	5.同意合作單位處理情形。
6.4.4 節短期目標第 25	6.計畫審議是一項複雜	6.同意合作單位處理

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>頁，短期目標描述：「是要有能力作為鐵路相關建設計畫之審議工具」，對於審議過程須考量的因素（了解單位審議過程考慮因素）與審議工具所需的功能，建議在報告書中清楚說明。對於未來使用者進行直接訪談，建議放入未來的工作內容中。</p>	<p>的工作，亦需使用多種工具、參考多項資料。具備計畫審議之所有功能並非鐵路數位分身平台之目標。而在鐵路數位分身平台之能力範圍內，運研所在審議的考慮因素以及所需功能等，均在本計畫多次工作會議以及持續討論中多有瞭解。後續若其他單位亦有明確之使用者可接受訪談，對本計畫亦將有顯著之助益。</p>	<p>情形。</p>
<p>7.5.1 節數據維護架構第 27-29 頁，資料一致性的重要性毋庸置疑，以過去研究成果而言，目前資料一致性的課題，最大的困難點為何？建議將各資料的 Schema 列舉詳細說明，對於未來蒐集臺鐵資料時亦可以請臺鐵協助。另圖 5.2 的資料組織架構，請說明各項數據的資料流或標準為何？</p>	<p>7.資料一致性最大的困難點在於不一致之態樣無任何標準、既定或可預期之形式，使得一致化之工作方式、流程甚至成果均無法以標準、格式、程序等方式明確表述，僅能在發現不一致時依當時所見之狀況處理之，每次處理之狀況均各不相同，而過去之經驗亦不一定能對未來具有參考價值。至於各資料之</p>	<p>7.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>8.5.4 節軟體系統架構第 32 頁，軟體系統架構圖須詳細說明軟體使用的環境（Client-Server 架構？）與開發使用的工具等，引擎庫中的各引擎資料互不溝通，其執行結果是如何與工具庫溝通？其架構為何？</p>	<p>schema，通常較適用於描述結構化原始資料之格式。然而本計畫所取得之大部分原始資料均非結構化，或無固定格式。而進入資料庫之後均為正規化、一致化之結果，與原始資料之 schema 並無固定之直接關聯。</p> <p>8.本軟體確是使用主從式架構，以 C#為開發語言，將補充於期末報告中。至於圖中所示之工具庫為抽象概念，軟體中並無所謂工具庫之程式模組。</p>	<p>8.同意合作單位處理情形。</p>
<p>朱來順委員</p>		
<p>1.有關數位分身在鐵路系統方面的應用，本計畫所蒐集文獻都偏屬即時監控，沒有運轉的案例，因本計畫目的係供運轉應用，希望執行團隊在期末可再加補充。</p> <p>2.本期計畫相較於與前期計畫，進階之處為何？</p>	<p>1.運轉分析之基礎為自動排點，此為領先國際之技術，故國際上未見類似之作法。</p> <p>2.本期計畫最主要的進階之處是鐵路數位分</p>	<p>1.同意合作單位處理情形。</p> <p>2.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>請加以說明。</p> <p>3. 臺鐵與鐵道局常在相關計畫中就如：橫渡線要不要設？是 2 軌還是 3 軌？等問題有不同見解，少一股道可節省經費，財務可行性也較高，但臺鐵認為不可減</p>	<p>身平台之架構設計及程式實作。它成功串起情境分析運算操作流程之所有步驟，使用者得以在軟體所提供之工作環境中完成全部步驟。前期計畫雖然已經完成該流程中大部分個別功能，但使用者需要經由手動，以搬移檔案之方式在流程之各步驟之間推進。遇其中有數據不一致之處，並須以手動編輯之方式修正龐大數據。本計畫設計並實作了數據處理之軟體，並在系統中完成銜接功能，使情境分析運算操作流程得以完整在軟體環境中執行。其間並改寫了相當份量之既有軟體。</p> <p>3. 本項意見所提之應用，確實即為本軟體系統之最重要功能，亦為系統用以協助計畫審議時最主要之運用方式。</p>	<p>3. 同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>少股道，如果能分析不同軌道時之結果，表達出以現行的運能，幾軌是可以的，讓臺鐵及鐵道局同仁進一步了解去做研究，或讓顧問公司能有具體數據供給委辦機關參考，都是很好的應用。</p> <p>4.集集線 80 分鐘才能開一班車不是容量的限制，而是行車制度所致，二水站到濁水站為一閉塞區間，所以一向的列車一定要行至濁水，另一向列車方能通行，應非報告所稱之網路效應。</p>	<p>4.確是如此，謝謝指點。該支線之所以實施此種行車制度，乃是受到沿線各車站股道配置之共同影響，並非由任一車站之容量所造成之限制。本計畫取本案例用以凸顯：分析個別車站之容量再據以找出路線瓶頸並不一定是正確、足夠的；計畫審議時必須一併考量多數車站所共同形成之影響。而這種多數車站共同對鐵路運轉乃至於行車制度產生影響的現象即稱為網路效應。將在期末報告書中強化說明。</p>	<p>4.同意合作單位處理情形。</p>
<p>楊正君委員</p>		

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>1.本次期中報告書所蒐集文獻均為國際相關案例，希望可再補充國內鐵路數位分身相關應用。另在國外文獻有述及歐盟應用例，及以數位分身技術了解軌溫等，希望能再深入介紹，讓大家能了解、學習，甚至願意應用在我們軌道領域。</p>	<p>1.文獻搜尋並未發現國內過往對鐵路數位分身之應用，顯示本計畫具有開創性。國外案例並無法在公開領域取得詳細資料，有可能是因為各國為保護鐵路數位分身系統帶來之實質利益而做出限制。本計畫亦有帶來可觀效益之潛力，政府亦應考慮制成研究成果之公開發表。</p>	<p>1.同意合作單位處理情形。</p>
<p>2.本計畫的數位分身技術並沒有要應用於即時監控，但數位分身通常與即時資料有關，則本計畫所稱之數位分身是否與一般數位分身的定義有衝突？建議在本計畫清楚定義。</p>	<p>2.如報告書第三章「數位分身之定義」乙節所述，數位分身並無國際公認之唯一定義。</p>	<p>2.同意合作單位處理情形。</p>
<p>3.本平台使用的數據資料如何取得(因通常是透過感測器、網路傳輸等方式讓這些數據即時回來)？若本計畫不是這樣的模型，那所需數據有沒有需另外數位化的問題？數據來源如何規</p>	<p>3.本計畫並未涉及感測器。所有數據之來源及規畫可參閱第四章「平台數據」乙節。數據確有數位化之問題，其處理方式具有相當複雜性，可參閱第五章「數據組織架</p>	<p>3.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>劃？</p> <p>4.以鐵道局鐵道雲平台規劃案為例，一般使用相關數據時，通常會希望明確數據流之間的關係，才會知道什麼數據流丟到哪裡、會產出什麼結果，數據的流動流程建議可做離型規劃；建議規劃並探討數據流、分析模組及應用程式彼此關聯性，俾達此計畫之需求及成果。</p>	<p>構」乙節。</p> <p>4.鐵道雲較接近資料倉儲，與數位分身平台有所差異，可參閱第三章「數位分身之特性」、「數位分身於鐵路系統之應用」二節，以及第五章「數據維護架構」乙節之說明。</p>	<p>4.同意合作單位處理情形。</p>
交通部臺灣鐵路管理局		
<p>1.希望本計畫系統可以對路軌的配置提出建議，供未來的鐵路建設案參用，而不是僅在路軌已經固定的情況下調整班表。</p> <p>2.建議往後會議或教育訓練可邀請顧問公司參與。</p>	<p>1.謝謝建議，本平台經鐵路機構實際使用並累積經驗之後，確可朝此方向發展。</p> <p>2.若運研所認可將配合辦理。</p>	<p>1.同意合作單位處理情形。</p> <p>2.同意合作單位處理情形。</p>
會議結論		
<p>1.審查會議各委員及與會單位研提之口頭及書面意見，請財團法人成大研究發展基金會整理「審查意見處理情形</p>	<p>1.遵照辦理。</p>	<p>1.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>表」，且逐項說明回應辦理情形，並充分納入報告之修正。</p> <p>2.本計畫經徵詢審查委員意見，期中報告初稿審查原則通過，請財團法人成大研究發展基金會納入每月工作會議查核事項進行追蹤。</p>	<p>2.謝謝。</p>	<p>2.同意合作單位處理情形。</p>

附錄 B：期末報告審查意見處理情形表

參與審查人員及其所提之 意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
東吳大學賈凱傑副教授		
<p>1. 第 4.2 節第 20 頁，4.2 節提到平台數據包括 1. 運務數據、2. 工務數據、3. 機務數據、4. 電務數據、5. 乘務人力數據等，惟後續數位分身軟體平台建置的短中長期目標，似乎未見。</p>	<p>1. 如報告書第 4.2 節所述，該節之目的在說明欲達到鐵路數位分身平台之長遠目標，於建立臺鐵系統數位模型時，未來所需要建立並確實整合的數據。而後續各節所說明為達到長遠目標過程中，短中長期各階段之階段性目標。二者並不相同。</p>	<p>1. 同意合作單位處理情形。</p>
<p>2. 第 4.3 節第 23 頁，報告書提及優先研發項目係針對「分析審議」，請問是否與未來使用者臺鐵或鐵道局有共識？請補充說明。</p>	<p>2. 本項目標為本案甲乙雙方之共識。如本報告第 9.2 節後續工作所說明，本計畫建議將使用者明確化及具體參與作為本計畫第二年期最重要的工作項目。倘若後續依此建議而進行，則可在使用者明確化之後，在其具體參與之過程中尋求研發目標之共識。</p>	<p>2. 同意合作單位處理情形。</p>
<p>3. 報告書提及目前車站股</p>	<p>3. 目前各車站、站間之</p>	<p>3. 同意合作單位處理</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>道數據來源為臺鐵行控中心顯示面板之照片-高度非結構化；請問目前前有無結構化之資料，如果沒有則建立數位分身的過程，似可利用 IOT 物聯網技術蒐集結構化資料，應優於人工判讀加軟體修正。</p>	<p>股道佈置數據，確實是來自臺鐵行控中心顯示面板照片，屬非結構化資料。目前並無結構化資料可取代。至於 IOT 物聯網，雖然技術已經存在，然而臺鐵系統中並無部署可產入股道佈置數據之 IOT 相關硬體設備，本計畫亦未知悉未來建置此類設備之規畫。</p>	<p>情形。</p>
<p>4.本計畫主題在於建立數位分身，應該跟過去幾年做的鐵路供需診斷研究不同，是否有所區隔？請補充說明。</p>	<p>4.本計畫為運研所在此領域有系統進行的長期研究之重要一環，為實現長期研究策略的一部分，並不能亦不宜與先前成果過度區隔之。</p>	<p>4.同意合作單位處理情形。</p>
<p>5.本計畫應與未來使用單位-臺鐵建立充分的共識再進行，俾利於未來成果的實際應用。</p>	<p>5.理想上確應如此，將可望大幅提高研究效率，在相同的資源、時間投入下得到更為豐富的成果。然實務上各單位各有其職責，與理想有所差距在所難免。本計畫建議將使用者明確化及具體參與作為本計畫第二年期最重要的工</p>	<p>5.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>6.模擬測試有沒有納入「意外事件」的影響？以探討「韌性」。</p>	<p>作項目。倘若後續依此建議而進行，確將有利未來成果的實際應用。</p> <p>6. 由運轉維持之觀點，隨機擾動與事故事件有顯著的差異。前者主要依賴趕點維持正常運轉，而後者則需要較多之運轉整理手段，包括車次之截短、延長、特開等均有可能。本平台僅及於擾動之模擬。</p>	<p>6.同意合作單位處理情形。</p>
<p>7.假設模擬後，證明可加開 16 班車，但臺鐵認不認同？請補充說明。</p>	<p>7. 本平台有能力依使用者之情境設定（例如加開 16 班車）而自動解得無衝突班表。系統的目的並不在為使用者決定是否應該接受此情境；系統的目的在提供使用者充份的資訊：在此情境下，鐵路系統的運轉狀況將是如何。亦即，軟體系統的目的在服務使用者，提供遠比目前實務作法更為豐富的資訊以輔助使用者選擇、比較各種情境，但軟體系統</p>	<p>7.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>8.每一站單獨切出來看，跟鄰近兩站合在一起看，結果會不會相同？或不同？請補充說明。</p> <p>9.數位分身軟體平臺有無特殊的硬體需求？請補充說明。</p>	<p>並不能，亦不應該代使用者作出決策。以加開 16 班車之情境而言，軟體系統所提供者，為加開 16 班車之後系統的運轉狀況，而非可加開或不可加開 16 班車。</p> <p>8. 必定不同。此即為報告書第 6.8 節所說明之「網路效應」。本軟體系統亦有能力就此進行自動化的分析。</p> <p>9.本軟體系統以數學技術及資訊技術克服所有計算量及資料量之障礙，因此並無特殊硬體需求。</p>	<p>8.同意合作單位處理情形。</p> <p>9.同意合作單位處理情形。</p>
本所運輸工程組許書耕前組長		
<p>1.運轉參數</p> <p>(1)報告書第 18 頁之 4.1 整體構想指出欲在數位世界中建立一套有能力充分表現臺鐵系統數位模型，以能由運能之供給與需求角度來呈現臺鐵系統之運轉狀況。長期目標有：(1)萃取運轉參數，報告書中只指出預期未來必能由鐵路數位</p>	<p>(1)依報告書第 4.2 節對平台數據之描述，未來若能在此平台上完整收集中央行車控制系統 (Central Traffic Control, CTC) 紀錄，並其他所有數據確實整合，則將可很大程度在數位分身平台上重現每日之真實運轉</p>	<p>(1)同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>分身平台所收納整合之數據中萃取出重要運轉參數，(2)預測虛擬情境下運轉狀況，利用正確的參數及參數值，可在數位分身平台建立臺鐵的數位模型，據以預測各種虛擬情境下的運轉狀況。請問：有那些運轉參數可由平台萃取出來，以及目前有那些可用又正確的參數及參數值。</p>	<p>歷史。而報告第 4.6 節所勾勒之長期目標中，即包含了由歷史紀錄中萃取出更為精準的運轉參數。如報告書第 7.2 節所說明，擾動強度及趕點強度均為運轉參數。目前臺鐵系統並無這些運轉參數的真實觀測值，因此本計畫所使用者均為假設值。然而本平台已經具備使用真實觀測值之能力。精準的運轉參數將有助提高運轉分析之精準度，使這個平台對各種情境下之運轉狀況做出更精準的預測。在報告書第 7.6 節所論述，使用列車中央行車控制系統 (Central Traffic Control, CTC) 或列車自動防護系統 (Automatic Train Protection, ATP) 之紀錄，開發軟體梳理之，可由其中萃取出在各種狀況下，臺鐵系統之真實擾動強度與趕點強度，即為此</p>	

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>(2)報告書第 59 頁之 7.1 整體介紹(模擬分析)指出，受限於無法取得部分具關鍵影響力的運轉參數而以假設值代之，因此分析結果不能視為是對真實系統準點率的真實預測。請問：部分具關鍵影響力的運轉參數是指那些，未來如何取得?是否意指 CTC 或 ATP 的資料?請在報告書中明列出來。</p>	<p>理。除了擾動強度及趕點強度均為重要的運轉參數之外，真實的號誌時隔亦為另一可由歷史紀錄萃取得到的重要運轉參數。至於目前可用又正確的參數，則包含了各種車種在各站間、各方向之基準運轉時分、各車站與站間之股道佈置等。</p> <p>(2) 如報告書第 7.6 節所說明，由於擾動強度與趕點強度為模擬過程中最重要的參數之一，本章所設定之擾動強度與趕點強度均非真實的觀測值，而是為進行模擬而設定的假設值，因此所呈現的模擬結果並不能用以預測臺鐵系統的真实晚點量。同一節亦說明，臺鐵系統在運轉過程中雖然有紀錄準點狀況，亦對誤點車次（抵達終點站之時間較班表延遲達 5 分鐘或更多者）紀錄其誤點原因，但並未</p>	<p>(2)同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>2.報告書第 23 頁之 4.3 優先發展項目報告書指出有必要優先研發可供各負責推動各項鐵道建設計畫之單位作為分析審議之功能項目。具體研發項目區分為使用者與需求、平台架構、分析功能，與操作界面等面向。報告書指出運研所在後續研發過程中，應優先尋求未</p>	<p>詳細紀錄所有車次在運行過程中，在每一處車站與每一段站間發生的擾動與趕點。這些數據的數量龐大，完全以手動紀錄並不可行。較可行的方法是使用列車中央行車控制系統（Central Traffic Control, CTC）或列車自動防護系統（Automatic Train Protection, ATP）之紀錄，開發軟體梳理之，由其中萃取在各種狀況下，臺鐵系統之真實擾動強度與趕點強度。</p> <p>2.軟體開發的過程中，使用者確實參與極為重要。而使用者係指未來將使用該軟體以執行其所職掌業務之人員。依此，目前確是未確定未來使用者。</p>	<p>2.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>來將使用本軟體以報行其業務的人員之具體參與。請問：目前是否仍未確定未來使用者名。</p> <p>3.報告書第 44 頁之 6.5 路塞潛勢指數與第 46 頁之 6.6 運轉穩定度分析報告書指出使用者在主控畫面中觸發運轉分析功能時，軟體會自動進行 100 次運轉模擬，再自動取其平均作為分析之用。所產出之數據除前述路塞潛勢指數之外，尚包含寬裕時間緩衝時間晚點量及列車在各車站與站間的模擬占用時間長度。請問：。</p> <p>(1)路塞潛勢指數係作為班表分析之綜合指標，亦係衡量班表預期準點績效的綜合指標。為何路塞潛勢指數亦需進行 100 次運轉模擬？如何進行既有班表的路塞潛勢指數分析？請補充說明。</p>	<p>(1) 路塞潛勢指數是以各股道上，前後列車之間的緩衝時間為基礎而計算所得之綜合指數。因此，使用無衝突班表（真實班表或本平台自動求解得到均可）即可用以計算路塞潛勢指數，殆無疑義。如第 6.5 節所說明，本平台系統將計算路塞潛勢指數之技術，結</p>	<p>(1)同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>(2)圖 6.6 與圖 6.9 各有三張子圖，其中下兩張各為何意？請補充說明。</p>	<p>合運轉分析技術，在平台中建置了依運轉模擬結果進行路塞潛勢指數分析之功能，亦即依觀測模擬結果而得到的緩衝時間，重新計算路塞潛勢指數。本項功能有助使用者瞭解在其所擬分析的情境下，鐵路系統在各種設定的擾動及趕點強度下，在運轉過程中所經歷之路塞潛勢指數。經以真實案例測試結果，亦確實可觀察到原班表之路塞潛勢指數，與該班表進行模擬過後所見之路塞潛勢指數之間的差異。是以，本平台有能力使用一組班表計算其路塞潛勢指數，之後進行運轉模擬，再以模擬過程中觀測之數據再次計算路塞潛勢指數，並作比較</p> <p>(2)圖 6.6與圖 6.9為軟體之操作畫面截圖。由圖中可見，軟體提供了使用者查詢個別車</p>	<p>(2)同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>(3)圖 6.7 的晚點量係各車次在各車站到站時分與班表所定的到站時分的差異，均為正值(其橫軸不能顯示車站/站間，只能顯示車站)，只有大小不同，因為只有晚到，前一站不可能早發；圖 6.8 則為各車次在各車站與各站間的占用時間變化，有正有負，負表示趕點，請問，各車站亦有負值？還是只有站間有負值？請補充說明。</p>	<p>站的路塞潛勢指數之功能。由於目前並未確定使用者，亦未能得知此種功能是否符合使用者需求，因此在報告書中並未多作著墨。此亦為報告書第 4.4 節有關短期目標之勾勒，以及第 9.2 節所建議之後續發展，均將使用者明確化及參與列為重要未來工作項目之原因。</p> <p>(3) 本平台進行運轉模擬時，均依循臺鐵，任何列車不得提早發車之規章規定，因此圖 6.7 僅有正值而無負值。圖 6.7 與圖 6.8 均同時包含了車站與站間（已標示於圖中並說明於相關文字）。圖 6.7 所示者為模擬過程中所觀測之各車次在各車站到站時分，與班表之表訂到站時分的差異，以及依班表之表訂行點應該要抵達各站間之時分與模擬過程中所觀測之抵達站間軌道的時分</p>	<p>(3)同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>4.報告書第 53 頁之 6.8 路線瓶頸分析報告書指出班表對容量</p>	<p>之間的差異。在另一方面，圖 6.8 所示為模擬結果所統計得到，各車次在車站停留，或在站間運行之時間長度，與表訂時間長度之差若此差異為正值表示模擬過程中所觀測到，列車在車站或站間停留或運行所費的時間大於班表所配予之時間長度，表示晚點發生；若為負值則表示模擬結果之時間長度小於班表所配予之時間長度，表示趕點發生。實務上趕點在車站與站均有可能發生，而本平台亦是如此。由於分析結果為 100 次模擬之平均值，此數據可呈現在該情境下未來鐵路系統運轉時，晚點與趕點可能發生之位置分佈，對計畫審議應有具體參考價值。</p> <p>4.單獨使用容量分析結果，確是實用意義不大。第一，UIC 文件明</p>	<p>4.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>的需求(必須是真實班表)具有重大的影響。而班表對容量的需求很接近該車站所能提供的極限時，就形成瓶頸。亦即路線之瓶頸分析必須充分考量真實營運時班表所帶來的容量需求才有意義。請問：是否意指容量分析本身不具太大實用意義，真正的用途在於鑑別路線的瓶頸。而路線的瓶頸必須同時分析路網與各站的容量。</p> <p>5.簡報中尚不清楚處：</p> <p>(1)簡報中有說明，未來規劃報告或可行性研究送審時需提出預定的班表，但很可能送審單位</p>	<p>確主張鐵路並沒有每小時若干車次的絕對容量(詳報告書第 6.7 節之說明)；第二，實務上臺鐵並非依容量計算之結果進行排點，而是在排點時密切注意所排入班表中各車次之間相互影響、排擠、互制之狀況；第三，第 6.8 節之論述明確指出以路線容量作為鐵路瓶頸識別有其風險。基於以上各點，識別判定鐵路瓶頸，在考量路軌的同時，必須同時考慮班表。報告書第 6.8 節以多良站為例，亦明確凸顯此一重要論述：班表對容量的需求具有重大影響力，而班表對容量的需求很接近該車站所能提供的極限時，就形成瓶頸。</p> <p>(1)本軟體系統具有全自動的解衝突能力，送審單位應可善用本軟體而克服此一障礙。</p>	<p>(1)同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>提出的是一堆充滿衝突的班表，在一般的審查程序上很難執行。</p> <p>(2)執行 100 次模擬時的擾動，會派予擾動量的是每一車站平均或是隨機選擇某些車站？請補充說明。</p> <p>(3)容量 C 的估算等於營運班次數 V 除以利用率 (U=V/C)，其有一弱點，就是在計算利用率時，分子分母均非班次數，而是營運時間。分子係壓縮後的營運時間，與既有班表及路網有直接的關係，但分母是逕予指定的一日 18 小時為最大營運時間，係一外生的固定值。此會使得相鄰兩車站：</p> <p>(A)相同設計型式時，使用率低(靠站的班次少)的容量高，而使用率高(靠站的班次多)的容量低。在做瓶頸分析時，所謂瓶頸很容易就是容量低而使用率高的車站，而不會出現容量高</p>	<p>(2)在模擬的過程中，系統依規則隨機產生擾動並加到各站間運轉以及各車站停靠時間中，產生延長運行或靠站時間的效果。</p> <p>(3)</p> <p>(A) 依第 6.7 節所示之公式，計算利用率時，分子為壓縮班表測試所得到的最小跨度，而分母則為鐵路系統的全日營業時間。兩者之單位同樣為時間，因此利用率本身</p>	<p>(2)同意合作單位處理情形。</p> <p>(A)同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
而使用率亦高的狀況。	<p>無單位。不論鐵路系統每日可用之營運時間為何，每日運轉時間必定不能超過 24 小時，此為自然界不可違抗之定律，因此在本公式中納入外生之數值不可能避免。而之所以採用營運時間而不採用 24 小時，即是為了反映所有鐵路系統均無法長態性全日 24 小時運轉，使用營運時間為分母較能反映真實狀況。</p> <p>委員所指出與容量計算相關的盲點確實存在。此亦為本公式完全不納入容量，而採用利用率之原因。若因為某種需求而必須計算容量，則可以該站全日車次數為分子，以壓縮後的最小跨度為分母，相除即可得到容量，以每小時車次數為單位。靠站班次少的車站（例如報告書第 6.8 節所指之多良站），進</p>	

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>(B)不同設計型式時，即便靠站數相同，容量高的係設計較完整、股道較多使壓縮後的營運時間較短者(使用率低)，容量低的係設計較簡單股道較少使壓縮後的營運時間較長者(使用率高)。此時，所謂瓶頸亦是容量低而使用率高</p>	<p>行班表壓縮時，可達到較小的跨度，因此計算所得之利用率亦較低。所反映者，即為靠站班次少的時候，系統在該站對容量的需求較低。至於瓶頸之判斷及識別，則如報告書圖6.15所示，必須觀察所有各車站之相對狀況，以分析的區段中容量剩餘最少者判斷為該區段之瓶頸，而非由個別車站單獨決定。因此，若其中某車站有容量高而使用率亦高之狀況，是否會被判斷為瓶頸，亦非由該車站之狀況單獨決定</p> <p>(B) 在同一路段中，各車站股道佈置方式各不相同，為臺鐵系統之常態。瓶頸之判斷及識別，則如報告書圖6.15所示，必須觀察所有各車站之相對狀況，以分析的區段中容量剩餘最少者判斷為該區段之瓶頸，而</p>	<p>(B)同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>的車站，而不會出現容量高而使用率亦高的狀況。</p> <p>(C)由以上說明知，只需容量分析或者使用率分析二者之一即可找出瓶頸，而不似報告書中所謂需同時分析容量與使用率來找出瓶頸。</p>	<p>非由個別車站單獨決定。因此，若其中某車站有容量高而使用率亦高之狀況，是否會被判斷為瓶頸，亦非由該車站之狀況單獨決定。若某車站 A 與 B，二者列車之停靠狀況類似，但 A 之股道數量較少而 B 之股道數量較多，則 A 較有機會被判斷為瓶頸，應屬合理。但若 B 之股道數量較多而同時列車之停靠更多（或甚至有折返操作），則何者較有可能被判斷為瓶頸，必須以量化之方式計算、比較 A 與 B 之利用率，無法僅依質化敘述而定之。而此亦為本平台設計、開發自動化量化瓶頸分析功能之目的所在。</p> <p>(C) 計算容量，可以班表中之車次數為分子，以班表最小跨度（以小時為單位）為分母，相除後即可得到容量，單位是每小時</p>	<p>(C)同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>(4)報告中的案例分析為何不作瓶頸分析?事前作瓶頸分析可以驗證所欲改善者即係既有的瓶</p>	<p>車次數。然而需要注意的是，全天的各車次，所佔用的容量各不相同。例如，產生平面交叉的車次，佔用的容量比無平面交叉的車次要多，而有折返或調車操作的車次，所佔用的容量就更多。因此，以這種方法計算所得之容量，係反映鐵路系統在其路軌設施上執行該班表時所能達到的容量。由於對所分析的班表而言，容量與班表最小跨度之間為固定關係，因此容量之計算可視為使用利用率而進行之單純單位換算，並未產生新資訊。以此論述，不論使用容量或利用率進行瓶頸分析，其本質均相同，但以後者計算過程較為直接而便捷。</p> <p>(4) 本報告案例分析之範圍為竹南至斗六，含成追線、集集線、田中支線（未來）等。</p>	<p>(4)同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>頸；事後作瓶頸分析可以建議後續仍需改善處。</p> <p>6.輸出指標的應用 本平台可輸出路塞潛勢指數、車站容量、車站利用率、晚點量等指標，那些與運轉有關，那些又與規劃有關：</p> <p>(1)與運轉有關：營運單位如何依據路塞潛勢指數、車站利用率、晚點量等指標來改善運轉狀</p>	<p>分析發現以臺鐵真實班表以及現況路軌而言，本線之容量均屬充裕。雖亦可以第 6.8 節所提出之方法計算剩餘容量相對最小（亦即利用率相對最高）之處，但意義不大。至於集集線則出現強烈網路效應；所有各站之利用率均未達 50%，然而實務無法增班卻是事實。集集線之整體容量不高，顯非任一瓶頸車站所造成，而是所有車站共同形成之狀況限制了行車制度，導致車站無法發揮其容量。此在第 6.8 節有詳細的論述及數據。</p> <p>(1) 本平台之目的在以運轉分析之功能，提供給使用者所需要之指標，以作為決策輔</p>	<p>(1)同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>況(例如改變班表中的間隔時間或緩衝時間?)</p> <p>(2)與規劃有關：例如公路改善會增加容量，但評估時仍以時間節省來表現效益，單獨以容量的增加無法表現建設投資的具體的效益。</p>	<p>助。在現階本軟體尚無提供改善策略建議之能力，但有能力評估使用者所構想之各種情境及策略。</p> <p>(2) 單獨使用容量，確是無法具體表現效益。如報告書圖 8.7 所示，模擬分析發現這些工程對臺鐵的準點率將有正面貢獻的效益，且產生效益的範圍遠超過工程範圍，此即為單純容量分析所無法呈現的效益之一。</p>	<p>(2)同意合作單位處理情形。</p>
鐵道局楊正君局長		
<p>1.數位分身與本計畫之定義似存有落差，建議再審酌。</p>	<p>1.如第 3.1 節所說明，文獻回顧發現不同的文獻由各種不同觀點對數位分身提供不同之定義，亦即所謂數位分身，並無國際公認的一致性定義。如第 4.1 節所說明，本計畫考量臺鐵真實狀況，以最有利於達到專案目的之方式為臺鐵建置一個以運轉為導向之鐵路數位分身系統，預期將可帶來顯</p>	<p>1.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>2.本計畫就鐵路實際路線及場站之模擬，仍應交代完整數據。</p> <p>3.就鐵路改善工程而言，本計畫所得路塞潛勢及車站利用率，應改善何種工程？請補充說明。</p>	<p>著之效益。</p> <p>2.所有數據內容均將於結案時以電子檔之形式交付予運研所。而對數據之維護架構、組織架構等，則說明交代於第五章。</p> <p>3.改善工程之設計，必須考慮用地、財務、環境、經濟、技術等諸多面向，非運轉分析所能單獨達成。然而如本報告書第 4.4 節、6.3 節、7.6 節等所論述，僅考慮用地、財務、環境、經濟、技術等面向而未完整深入進行運轉分析時，所提出之工程改善方案是否可如預期產生運轉效益，有其風險。是以本平台定位在作為計畫審議之工具，期能協助臺鐵路、鐵道局、運研所及其他單位進行計畫審議時，能提供豐富而具體的運轉分析數據，以補現況之不足。</p>	<p>2.同意合作單位處理情形。</p> <p>3.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
臺灣鐵路管理局朱來順副局長		
1.第 6 章(第 48 頁), 模擬的結果應有明確說明, 並提供解決方案。	1.由於模擬結果將在第 7 章以專章說明之, 故在第 6 章並未多加著墨以避免重複贅述。至於解決方案, 本平台之目的在以運轉分析之功能, 提供給使用者所需要之指標, 以作為決策輔助。在現階本軟體尚無提供解決方案之能力, 但有能力評估使用者所構想之各種情境及策略。	1.同意合作單位處理情形。
2.第 7 章(第 70 頁), 增班即增加誤點, 與實務的狀況下有所差異。	2.確是如此, 已在第 7.5 節文末補充說明。本節所有的模擬測試均固定設定擾動強度為 0.1、趕點強度為 0.5。這種設計使得各種不同情境下所得到的數據可易於在同一基準下相互比較。而數據亦顯示增班時, 晚點量將隨之增加。然而, 此一結論並不能直接簡單套用到真實系統中。在臺鐵真實運轉過程中, 當晚點	2.同意合作單位處理情形。

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
3.第 8 章(第 84、85 頁), 車站的利用率與容量的差別在何處, 之間的關係如何? 請補充說明。	<p>量有增加的趨勢時, 相關人員會加強其運轉整理之強度, 相當於提高趕點強度。因此在真實系統中, 增班或減班, 對準點率雖有所影響, 但班次增減與晚點增減絕非必然關係。</p> <p>3. 計算容量, 可以班表中之車次數為分子, 以班表最小跨度(以小時為單位)為分母, 相除後即可得到容量, 單位是每小時車次數。</p>	3.同意合作單位處理情形。
蘇副所長		
1. 有關本計畫後續發展, 有無可能就臺鐵發生意外事故時, 進行列車系統調整分析(如鐵路系統遭受擾動之復原分析、列車替代路線安排或增班車次調整分析)? 請補充說明。	1. 由運轉維持之觀點, 隨機擾動與事故事件有顯著的差異。前者主要依賴趕點維持正常運轉, 而後者則需要較多之運轉整理手段, 包括車次之截短、延長、特開等均有可能。本平台目前之範疇僅及於擾動之模擬。未來若有適當機會, 確有可能擴充及於意外事故運轉復	1.同意合作單位處理情形。

參與審查人員及其所提之意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
	原之決策輔助功能。	
會議結論		
<p>1.本計畫明年將接續辦理第2年度工作，相關會議仍請臺鐵局及鐵道局鼎力充分參與；後續並請運工組洽臺鐵局提供實際計畫實作分析，以供有關單位協助檢視分析結果提供具體建議，持續透過回饋建議改善本計畫不足之處。</p> <p>2.審查會議各委員及與會單位研提之口頭及書面意見，請財團法人成大研究發展基金會整理「審查意見處理情形表」，且逐項說明回應辦理情形，並充分納入報告之修正。</p> <p>3.本計畫經徵詢審查委員意見，期末審查原則通過。請財團法人成大研究發展基金會根據今日委員及相關單位之意見(含書面意見)研提處理情形答覆意見，列為修訂報告書之依據，並請於112年12月26日(二)前提供期末修訂</p>	<p>1. 謝謝。</p> <p>2.遵照辦理。</p> <p>3. 謝謝，遵照辦理。</p>	<p>1.同意合作單位處理情形。</p> <p>2.同意合作單位處理情形。</p> <p>3.同意合作單位處理情形。</p>

參與審查人員及其所提之 意見 (依發言順序)	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
版辦理後續事宜		