

104-100-1356

MOTC-IOT-103-PBB004

單線連續區段軌道容量模式分析 暨整體容量軟體改版研究(1/2)



交通部運輸研究所

中華民國 104 年 9 月

104-100-1356

MOTC-IOT-103-PBB004

單線連續區段軌道容量模式分析 暨整體容量軟體改版研究(1/2)

著者：黃笙玹、鍾志成、李治綱、賴勇成、盧麗嵩、
張恩輔、林 蓁、施佑林、蘇振維、劉昭榮、
江明益

交通部運輸研究所

中華民國 104 年 9 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究. (1/2) / 黃筌玟等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民 104. 09
面 ; 公分
ISBN 978-986-04-6027-8(平裝)

1. 鐵路管理 2. 運輸系統

557

104019147

單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究(1/2)

著者：黃筌玟、鍾志成、李治綱、賴勇成、盧麗嵩、盧麗嵩、張恩輔、林
蓁、施佑林、蘇振維、劉昭榮、江明益

出版機關：交通部運輸研究所

地址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網址：www.iot.gov.tw (中文版>圖書服務>本所出版品)

電話：(02)23496789

出版年月：中華民國 104 年 9 月

印刷者：良機事務機器有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 90 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定價：180 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號・電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

GPN：1010401804

ISBN：978-986-04-6027-8

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：單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究(1/2)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-04-6027-8	政府出版品統一編號 101041804	運輸研究所出版品編號 1041001356	計畫編號 103-PBB004
本所主辦單位：運輸計畫組 主管：蘇振維 計畫主持人：蘇振維 研究人員：劉昭榮、江明益 聯絡電話：(02)23496805 傳真號碼：(02)25450428	合作研究單位：財團法人中興工程顧問社 計畫主持人：黃笙珖、鍾志成、李治綱、賴勇成 研究人員：盧麗嵩、張恩輔、林蓁、施佑林 地址：臺北市南京東路5段171號 聯絡電話：(02)87919198 ext. 426 傳真號碼：(02)87912198		研究期間 自 103 年 2 月 至 103 年 11 月
關鍵詞：傳統暨區域鐵道系統、軌道容量分析、模擬模式			
<p>摘要：</p> <p>為因應國內各種鐵道系統建設需要，本所進行了一系列相關研究計畫，針對傳統鐵路系統發展了軌道容量分析模式與軟體，以便能掌握系統的供需能量及服務水準。然而，過去的連續區段軌道容量分析模式不適用於單線運轉的情況，且使用者對容量分析軟體有愈來愈多的功能需求，因此，本所展開了「單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究」兩年期計畫。</p> <p>本研究為此計畫的第一年，主要工作項目為發展單線連續區段軌道容量分析模式。本模式以離散事件模擬方法為基礎，導入軌道預約機制來避免列車運轉死結的發生，使模式能夠考量多車種交通組成、列車追越交會行為、車站軌道配置、號誌安全時距等多項因素，藉以評估一單線運轉鐵路之路線容量。</p> <p>在案例分析中，本研究設計了一系列的案例進行測試，以確認模式的特性與先驗知識相符。此外，更以臺鐵臺東線對象分析其容量現況，了解其容量瓶頸所在，同時，也評估了雙軌化工程、增加站內軌，以及增加快車臨時停車處等措施對容量改善的效果。</p>			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
104 年 9 月	228	180	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。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>密 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密</p> <p>（解密條件：<input type="checkbox"/> 年 月 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密， <input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密）</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>普通</p>			
備註：本研究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: Development of Capacity Model for Continuous Single-Track Sections and Update of Rail Capacity Software (1/2)			
ISBN(OR ISSN) 978-986-04-6027-8	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 101041804	IOT SERIAL NUMBER 1041001356	PROJECT NUMBER 103-PBB004
DIVISION: Planning Division DIVISION CHIEF: Cheng-Wei Su PRINCIPAL INVESTIGATOR: Cheng-Wei Su PROJECT STAFF: Jau-Rong Liu, Ming-Yi Jiang PHONE: 886-2-23496805 FAX: 886-2-25450428			PROJECT PERIOD FROM February 2014 TO November 2014
RESEARCH AGENCY: Sinotech Engineering Consultants, Inc. PRINCIPAL INVESTIGATOR: Sheng-Hsuan Huang, Jyh-Cherng Jong, Chi-Kang Lee, Yung-Cheng Lai PROJECT STAFF: Li-Song Lu, En-Fu Chang, Jen Lin, You-Lin Shih ADDRESS: 171 Nanking E. RD. SEC. 5, Taipei, Taiwan, R.O.C. PHONE: 886-2-87919198 ext. 426 FAX: 886-2-87912198			
KEY WORDS: Conventional Railway, Rail Capacity Analysis, Simulation Model			
ABSTRACT: <p>In order to accommodate the needs of developing rail transportation, the Institute of Transportation carried out a series of research projects. These projects have been developing models and software to analyze rail capacity for conventional railway systems. However, the past capacity model for continuous rail sections can not be applied to single-track railway, and the users of capacity software require increasingly more functions. Thus, the Institute of Transportation launched the two-year project "Development of Capacity Model for Continuous Single-Track Sections and Update of Rail Capacity Software".</p> <p>In the first year of this project, the purpose of this research is to develop a rail capacity model for continuous single-track sections. This simulation model is based on discrete event-orientation simulation, and uses Dynamic Route Reservation method to avoid deadlocks. The factors considered in the model are traffic composition, overtaking/meeting, station layout, and signal close-in time etc.</p> <p>In the case study, we designed a series of test cases to confirm that the behavior of this model is consistent with practical experience. Furthermore, we applied the model to evaluate the capacity of Taitung Line to find out the bottleneck. This study also analyzes the effects of the capacity improvement with several strategies, including rebuilding double-track sections, constructing new tracks in stations, and additional dwell stations.</p>			
DATE OF PUBLICATION September 2015	NUMBER OF PAGES 228	PRICE 180	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

	頁 次
目 錄	III
圖 目 錄.....	VII
表 目 錄.....	XI
第一章 緒論.....	1 - 1
1.1 研究動機.....	1 - 1
1.2 全程計畫概要	1 - 2
1.3 研究目的	1 - 3
1.4 研究內容與工作項目	1 - 3
1.5 研究方法與流程	1 - 4
第二章 研究範圍與對象.....	2 - 1
2.1 研究範圍	2 - 1
2.2 研究對象	2 - 2
第三章 文獻回顧.....	3 - 1
3.1 本所軌道容量研究現況	3 - 1
3.1.1 研究成果回顧	3 - 1
3.1.2 應用實績介紹	3 - 4
3.1.3 小結	3 - 8
3.2 單線軌道容量分析相關文獻	3 - 9
3.2.1 單線單一區段容量分析相關模式	3 - 9
3.2.2 單線連續區段容量分析相關模式	3 - 13
3.2.3 小結	3 - 21
3.3 處理列車運轉死結問題相關文獻	3 - 22
3.3.1 列車運轉死結問題	3 - 22
3.3.2 造成死結的必要條件與解決策略	3 - 23
3.3.3 避免發生死結的方法	3 - 25

3.3.4 小結	3 - 37
第四章 單線連續區段軌道容量分析模式	4 - 1
4.1 模式架構	4 - 1
4.2 基本概念	4 - 2
4.3 假設條件	4 - 4
4.4 整體流程	4 - 5
4.4.1 車種決定方式	4 - 6
4.4.2 預訂軌道機制	4 - 7
4.4.3 檢核機制	4 - 12
4.4.4 後移量計算	4 - 14
4.4.5 回溯機制	4 - 16
4.4.6 路線容量評估	4 - 17
4.5 演算範例展示	4 - 19
第五章 案例分析	5 - 1
5.1 測試案例	5 - 1
5.1.1 基本測試例	5 - 1
5.1.2 進階測試例	5 - 3
5.1.3 複線改單線測試例	5 - 8
5.2 臺鐵案例	5 - 9
5.2.1 現況路線容量	5 - 9
5.2.2 階段性雙軌化	5 - 18
5.2.3 情境分析	5 - 21
第六章 結論與建議	6 - 1
6.1 結論	6 - 1
6.2 建議	6 - 3
參考文獻	參- 1
附錄 A 期中工作會議資料	A - 1
附錄 B 期中工作會議紀錄	B - 1
附錄 C 期中簡報資料	C - 1
附錄 D 期中審查意見處理情形	D - 1

附錄 E 期末工作會議資料	E - 1
附錄 F 期末工作會議紀錄	F - 1
附錄 G 期末簡報資料	G - 1
附錄 H 期末審查意見處理情形	H - 1

圖 目 錄

	頁 次
圖 1-1 全程計畫概要	1 - 3
圖 1-2 研究流程圖	1 - 4
圖 1-3 單線區間發生死結的範例	1 - 5
圖 2-1 軌道容量的研究範圍	2 - 2
圖 2-2 臺鐵營運路線圖	2 - 3
圖 2-3 臺鐵屏東線軌道佈置圖	2 - 4
圖 2-4 臺鐵南迴線軌道佈置圖	2 - 5
圖 2-5 臺鐵臺東線軌道佈置圖	2 - 5
圖 2-6 臺鐵海線軌道佈置圖	2 - 6
圖 2-7 臺鐵歷年旅客人次	2 - 6
圖 2-8 臺鐵歷年各級列車之客座利用率	2 - 7
圖 3-1 本所歷年軌道容量系列研究	3 - 1
圖 3-2 軌道容量分析的泛用架構	3 - 2
圖 3-3 傳統暨區域鐵路系統單一區段軌道容量分析架構	3 - 3
圖 3-4 傳統暨區域鐵路系統軌道容量整體分析程序	3 - 4
圖 3-5 IMPROVERAIL 單線區間最小運轉時隔的計算方式	3 - 13
圖 3-6 Parametric Capacity Model 軌道容量曲線	3 - 15
圖 3-7 閉塞時間階梯圖	3 - 17
圖 3-8 UIC Code 406 班表壓縮範例圖－壓縮前	3 - 18
圖 3-9 UIC Code 406 班表壓縮範例圖－壓縮後	3 - 18
圖 3-10 UIC Code 406 容量利用率計算之架構圖	3 - 19
圖 3-11 UIC Code 406 路網切割點示意圖	3 - 20
圖 3-12 鐵路系統發生死結的情況	3 - 22
圖 3-13 預先檢視兩個區間以避免死結	3 - 22
圖 3-14 無法有效避免死結的情況	3 - 23

圖 3-15 Banker's Algorithm 的流程圖	3 - 26
圖 3-16 Banker's Algorithm 範例一	3 - 27
圖 3-17 Banker's Algorithm 範例二	3 - 28
圖 3-18 Petersen & Taylor Algorithm 範例一	3 - 30
圖 3-19 Petersen & Taylor Algorithm 範例二	3 - 30
圖 3-20 MCA 之必然結果定義示意圖	3 - 31
圖 3-21 MCA 範例一	3 - 32
圖 3-22 MCA 範例一之演算結果	3 - 32
圖 3-23 MCA 範例二	3 - 33
圖 3-24 MCA 範例二之演算結果	3 - 33
圖 3-25 DRR 預訂軌道規則 2 之範例	3 - 34
圖 3-26 DRR 預訂軌道規則 3 之範例	3 - 34
圖 3-27 DRR 預訂軌道規則 4 之範例	3 - 35
圖 3-28 DRR 預訂軌道規則 5 之範例	3 - 35
圖 3-29 DRR 範例之演算過程 1	3 - 36
圖 3-30 DRR 範例之演算過程 2	3 - 36
圖 3-31 DRR 範例之演算過程 3	3 - 36
圖 3-32 DRR 範例之演算過程 4	3 - 37
圖 4-1 單線連續區段與單一區段容量分析模式整合架構圖	4 - 1
圖 4-2 單線連續區段容量分析模式之演算概念	4 - 2
圖 4-3 列車到站事件和離站事件示意圖	4 - 3
圖 4-4 單線連續區段容量分析模式整體流程圖	4 - 6
圖 4-5 軌道預訂規則一範例	4 - 7
圖 4-6 軌道預訂規則二範例	4 - 7
圖 4-7 軌道預訂規則三範例	4 - 8
圖 4-8 軌道預訂規則四範例	4 - 8
圖 4-9 軌道預訂規則五範例	4 - 8
圖 4-10 軌道預訂規則六範例	4 - 9
圖 4-11 軌道預訂規則七範例	4 - 9
圖 4-12 軌道預訂規則八範例 1	4 - 9

圖 4-13 軌道預訂規則八範例 2	4 - 10
圖 4-14 軌道預訂規則九範例	4 - 10
圖 4-15 軌道預訂規則十範例	4 - 11
圖 4-16 列車追越條件範例	4 - 11
圖 4-17 預訂軌道機制之流程圖	4 - 12
圖 4-18 檢查列車是否於站間追撞先行列車示意圖	4 - 13
圖 4-19 檢查列車是否於站間對撞反向列車示意圖	4 - 14
圖 4-20 站間追撞先行列車時的後移量計算示意圖	4 - 14
圖 4-21 站間對撞反向列車時的後移量計算示意圖	4 - 15
圖 4-22 到站號誌時距不足時的後移量計算示意圖	4 - 15
圖 4-23 離站號誌時距不足時的後移量計算示意圖	4 - 15
圖 4-24 反向交會號誌時距不足時的後移量計算示意圖	4 - 15
圖 4-25 僅調整進站事件會影響運轉時間	4 - 16
圖 4-26 從前一離站事件進行調整不影響運轉時間	4 - 17
圖 4-27 評估容量所使用的時間範圍示意圖	4 - 19
圖 4-28 演算範例	4 - 19
圖 4-29 演算範例展示 1	4 - 20
圖 4-30 演算範例展示 2	4 - 20
圖 4-31 演算範例展示 3	4 - 20
圖 4-32 演算範例展示 4	4 - 21
圖 4-33 演算範例展示 5	4 - 22
圖 4-34 演算範例展示 6	4 - 22
圖 4-35 演算範例展示 7	4 - 22
圖 4-36 演算範例展示 8	4 - 23
圖 4-37 演算範例展示 9	4 - 23
圖 4-38 演算範例展示 10	4 - 23
圖 5-1 基本測試例之軌道佈置圖	5 - 2
圖 5-2 不同亂數種子下的模擬列車數與容量值之關係	5 - 3
圖 5-3 車站數增加方式示意圖	5 - 4
圖 5-4 車站數與容量值之關係	5 - 4

圖 5-5	區段數增加方式示意圖	5 - 5
圖 5-6	區段數與容量值之關係	5 - 5
圖 5-7	中間站軌道數與容量值之關係	5 - 6
圖 5-8	交通組成對容量之影響	5 - 7
圖 5-9	快車臨時停站數與容量值之關係	5 - 8
圖 5-10	假設事故發生時各區間運轉狀況	5 - 9
圖 5-11	臺鐵臺東線單複線區間配置狀況	5 - 10
圖 5-12	海端站改為一島一岸壁三軌道之型式	5 - 21

表 目 錄

	頁 次
表 3.1 軌道容量分析應用實績彙整表	3 - 5
表 3.2 本所傳統暨區域鐵路系統軌道容量模式發展現況	3 - 8
表 3.3 Banker's Algorithm 範例一之演算過程	3 - 27
表 3.4 Banker's Algorithm 範例二之演算過程	3 - 29
表 3.5 各種避免死結的方法之優劣比較	3 - 38
表 4.1 單線連續區段容量分析模式與離散事件模擬組成要素 對應表	4 - 3
表 4.2 五種號誌安全時距符號定義	4 - 13
表 4.3 事件類型與檢核項目對照表	4 - 13
表 4.4 通過號誌安全時距檢查的條件	4 - 14
表 4.5 不同情況下的後移量計算方式	4 - 16
表 5.1 基本測試案例之參數設定	5 - 2
表 5.2 臺東線各站軌道佈設情況	5 - 11
表 5.3 臺東線尖峰三小時交通組成情況	5 - 11
表 5.4 臺東線全天交通組成情況	5 - 12
表 5.5 各車種於臺東線各站的停站時間	5 - 12
表 5.6 各車種於臺東線各站間的運轉時間	5 - 14
表 5.7 臺東線尖峰三小時之路線容量分析結果	5 - 16
表 5.8 花蓮—萬榮採單一區段容量分析之結果	5 - 16
表 5.9 光復—玉里採單一區段容量分析之結果	5 - 17
表 5.10 東里—山里採單一區段容量分析之結果	5 - 17
表 5.11 臺東線全日路線容量分析結果	5 - 18
表 5.12 第一階段雙軌化後臺東線尖峰三小時路線容量分析結 果	5 - 19
表 5.13 第一階段雙軌化後臺東線全日路線容量分析結果	5 - 20

表 5.14 第二階段雙軌化後臺東線尖峰三小時路線容量分析結果	5 - 20
表 5.15 第二階段雙軌化後臺東線全日路線容量分析結果	5 - 20
表 5.16 兩方案對東里－山里尖峰三小時容量改善效果比較	5 - 22
表 5.17 兩方案對東里－山里全日容量改善效果比較	5 - 22

第一章 緒論

1.1 研究動機

為了達到永續綠運輸以及節能減碳的願景，發展公共運輸與推動鐵道建設一直是國內交通運輸發展之重要政策，自民國 93 年開始臺灣鐵道建設的預算核列數超越公路建設^[12]，且逐年攀升，而整體鐵道運輸的旅運量亦逐年增加。

臺灣鐵路為國內唯一具有環島路網的鐵道系統，肩負鐵道運輸重要的使命，近年來積極提升服務品質、改善形象，隨著旅客量的增加，為了應付如北部地區在平日尖峰時段列車人滿為患，或如花東線每逢年節假日一票難求之現象，提升運能是未來重要之工作。不過鐵道系統建設成本甚鉅，如何在面臨政府財務壓力下有效地提升運能，需要進行容量分析相關研究，以提供擬定運能提升方案並評估其效益之分析工具。

因此，交通部運輸研究所（以下簡稱本所）自民國 92 年開始進行一系列的相關研究計畫，在「軌道容量研究—臺鐵系統容量模式之建構分析」及「運輸系統容量分析暨應用研究—軌道系統」中，針對臺鐵系統建構了單一區段軌道容量分析模式、發展臺鐵列車平均延滯模擬模式，並開發「傳統暨區域鐵路系統軌道容量分析軟體」與編訂「臺灣地區鐵道容量手冊」，以提供國內鐵道業者有關容量分析的知識與工具。之後，在「軌道系統容量與可靠度分析研究」中，更將原本僅考慮單一區段的容量分析，進一步考量列車實際運轉時在時空上的連續性移動變化，發展了連續區段軌道容量分析模式。

然而，現有的連續區段容量模式僅適用於複線運轉的路線，尚無法處理單線運轉的情況。過去對於單線運轉區間的容量分析方法，係將整個路線依站間切分為許多區段，並假設每區段都是獨立而不受相

鄰區段影響，來逐一計算每區段之容量。但實際上，列車的運行在時空上為連續地移動變化，相鄰區段的列車特性與車站配置會相互影響容量，例如：當一列車要連續通過多個區段時，對向列車必須等到其完全通過後才能前進，導致實際上每一區段都難以保持如同計算單一區段容量時的理想狀態，而較完善的分析方法應該要考量各區段之間的交互影響。有鑑於此，本研究要進一步考量在連續路段交互影響下，發展適用於單線的容量分析方法，以完備國內對於傳統區域鐵路的容量分析技術。

此外，本所開發「傳統暨區域鐵路系統容量分析軟體」至今已超過五年，隨著對容量分析日漸重視，實務應用的頻繁，使用者對該軟體的回饋意見也愈來愈多，諸如簡化繁瑣的參數設定、自訂參數預設值與合理範圍、號誌時距可由使用者自行輸入、更加人性化符合直覺的操作介面等，考量當時的軟體架構已無法支援將來可能的功能擴充，而且現今電腦資訊科技日新月異，因此有必要儘早進行調整改版，以符合未來趨勢。

1.2 全程計畫概要

「單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究」為兩年期之研究計畫，全程計畫概要如圖 1-1，第一年度的研究重點在於發展適用於單線的連續路段容量分析方法，第二年度的研究重點則是在容量軟體中開發單線連續區段容量分析功能。

本研究為「單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究（1/2）」，亦即此計畫的第一年度（民國 103 年）。

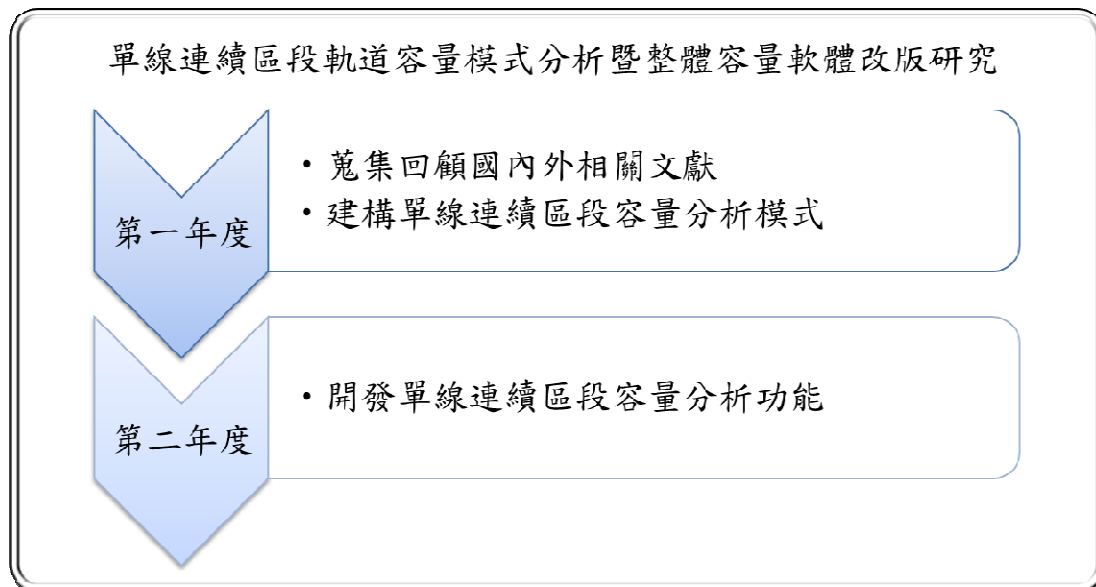


圖1-1 全程計畫概要

1.3 研究目的

本年度研究之主要目的在於完備國內對於傳統區域鐵路的容量分析技術，目前國內對於臺鐵系統的軌道容量分析方法，已經有通用於單複線的單一區段容量分析模式，以及僅適用於複線的連續區段容量分析模式，獨缺一個泛用的單線區間連續路段的容量分析模式，因此希望透過本研究完成此項任務。

1.4 研究內容與工作項目

欲達成前述之研究目的，本年度的研究包含下列幾項主要工作項目：

1. 蒐集回顧國內外相關文獻

回顧國內外軌道容量研究相關文獻，瞭解目前單線運轉區段容量分析的研究現況、相關方法論與發展。

2. 單線運轉的連續區段容量分析模式之建構

以本所過去的軌道容量研究成果為基礎，深入探討臺鐵單線運轉的特性，在考量路線、交通及控制條件等各項影響軌道容量的因素下，發展適用於單線運轉的連續區段容量分析模式。

1.5 研究方法與流程

本研究的流程規劃如圖 1-2所示，其重點與方法說明如下。

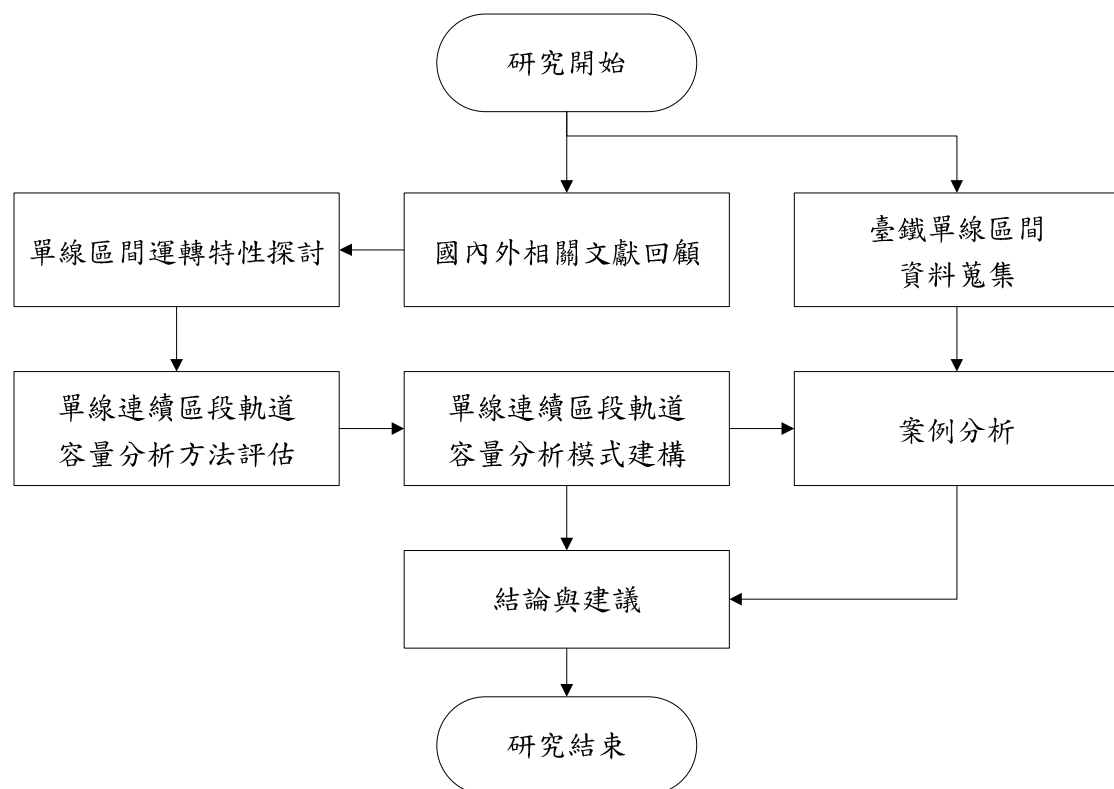


圖1-2 研究流程圖

1. 國內外相關文獻回顧

首先整理本所對容量分析課題的多年研究成果以及相關應用實績，同時針對單線區間軌道容量的評估方法與連續路段的軌道容量分析等議題，蒐集國內外容量相關研究文獻進行回顧。

2. 單線區間運轉特性探討

單線區間內，兩車站間僅有一條軌道供雙向列車運行，因此其運轉特性與複線不同，尤其是死結（Deadlock）問題（如圖 1-3），在實務上無論是排點時或是現場調度時均要注意。此外，在單線區間內若連續開行兩列同向列車，則此兩列車間則又是複線運轉的情況，使得單線連續區段的容量分析變得更加不易，因此有必要對單線區間的運轉特性深入了解與探討。



圖1-3 單線區間發生死結的範例

3. 單線連續區段軌道容量分析方法評估

從文獻中可知，軌道容量的評估方法大致可分為三種方法：

(1) 解析方法

解析方法通常考慮鐵路設施與班表的特性，在一些設計與假設的條件下推導出容量計算的公式，較為簡單且容易使用，但因其考慮的因素有限，故其精確性較差。

(2) 模擬方法

模擬方法則是根據模式建構時考慮的因素，以及分析時所設定的情境，建立一套描述軌道系統運作的工具，由於可考慮較多複雜的因素，故可反應系統內些微差異對於容量的影響。

(3) 最佳化方法

最佳化方法則是運用最佳化的概念，建立一套描述問題的數學模型與演算邏輯，使其根據所訂定之求解目標尋求最佳解或優

良解。最佳化的方法相當多，最常見的包含線性規劃法、分枝定限法、啟發式演算法…等。

根據過去本所發展複線連續區段容量分析模式的經驗，本研究決定同樣採用模擬方法來發展模式。

4. 建構單線連續區段軌道容量分析模式

在考量單線區間的運轉特性與限制下，以模擬方法來建立單線連續區段之軌道容量分析模式，而在模擬的過程中，必須隨時避免系統發生死結的情況。此外，本研究透過電腦程式來實作模式，以利後續進行案例分析，同時，在編寫程式的過程中不時地進行白箱與黑箱測試，以確保程式有按照模式的邏輯運作。

5. 案例分析

除了自行設計案例，利用本研究所發展單線連續區段軌道容量分析模式進行分析之外，同時也向臺鐵申請蒐集臺東線的路線條件、交通條件、控制條件等資料，分析該路線的路線容量現況以及評估未來雙軌化工程對容量之影響。

第二章 研究範圍與對象

2.1 研究範圍

一個完整的鐵道運輸過程，是從旅客或貨物的旅次起點開始，利用聯外運輸系統到達車站進入鐵道運輸系統中，之後經過車站站房至月臺層等候列車，待列車到站後方能上車或裝貨。接著，旅客或貨物搭乘著列車透過軌道行車系統抵達目的車站，在旅客下車或貨物卸貨至月臺後，經過車站離開鐵道運輸系統，最後利用聯外運輸系統接駁抵達旅次終點為止。

在上述的過程中，不論是聯外運輸系統，乃至於鐵道運輸系統內的車站配置、旅客及貨物動線的規劃、電扶梯或樓梯的大小、月臺的面積、軌道行車系統，包括路線條件、交通條件及控制條件等，皆會影響到整個鐵道運輸的運送能力。但一般而言，軌道容量分析著重在軌道行車系統的部分，主要是討論以列車為客體單位的容量分析，通常不直接考慮聯外運輸系統、站房、月臺的影響。

因此，本研究「軌道容量」的研究範圍，界定在「軌道行車系統」的部分，如圖 2-1所示，也就是探討「軌道行車設備的最大輸送能力」，而非整個軌道運輸系統的容量。

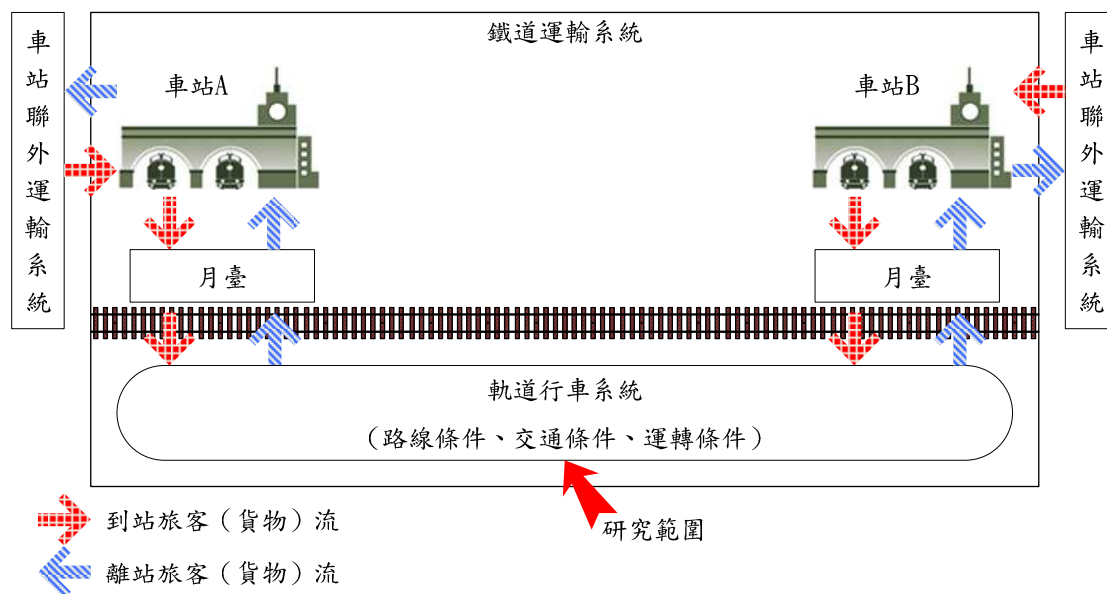
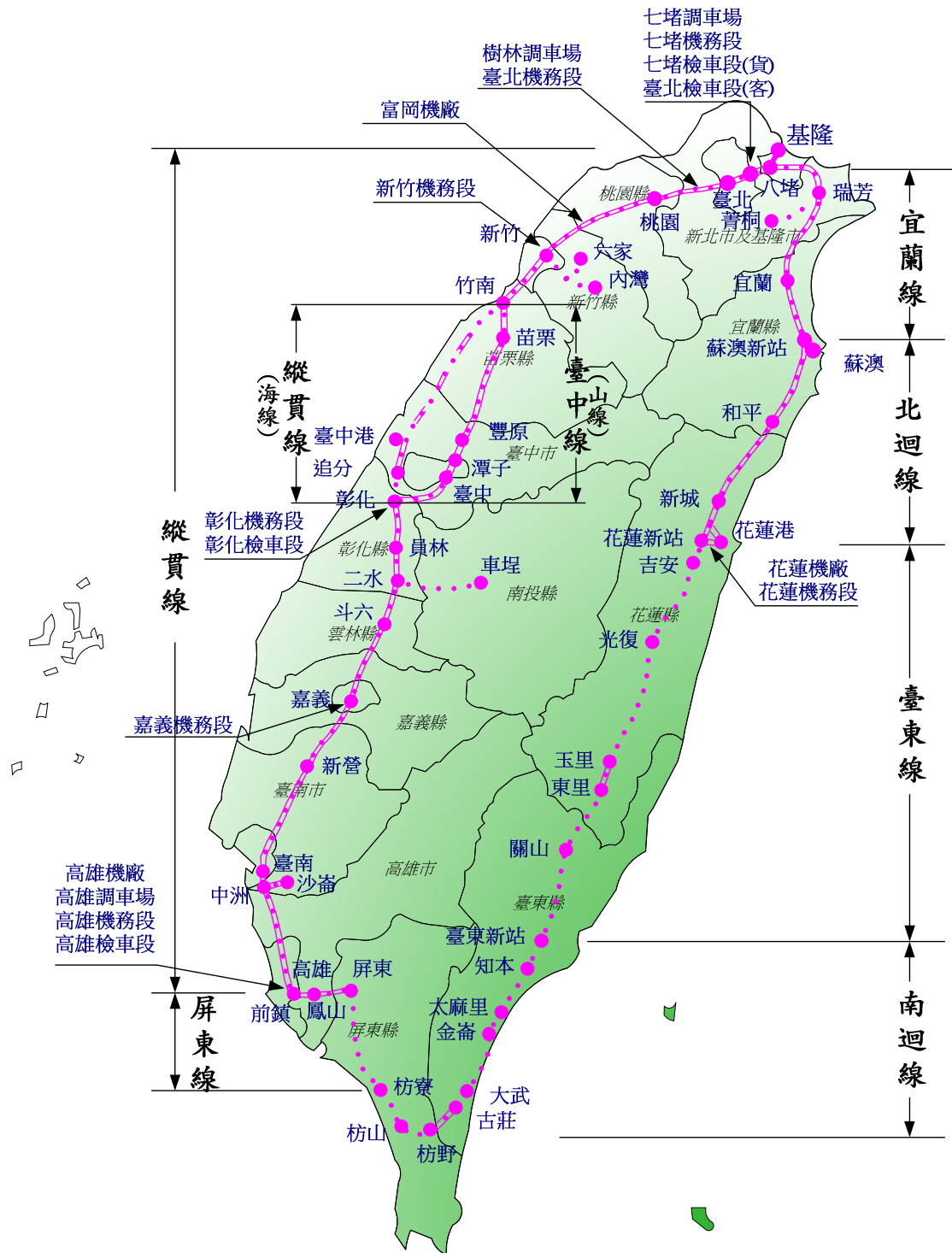


圖2-1 軌道容量的研究範圍

2.2 研究對象

本研究的研究對象為臺灣鐵路系統（以下簡稱臺鐵），是臺灣最早的鐵道運輸系統，自清朝興建迄今已逾百年，經過不斷的擴建，於民國 80 年完成環島路網，全路網共可分為三大系統：西部幹線系統、東部幹線系統以及支線系統，沿線分別設有 7 個機務段、4 個檢車段及 3 座機廠，以執行臺鐵各型車輛之各級檢查、保養與維修以及車輛清洗等作業，如圖 2-2。



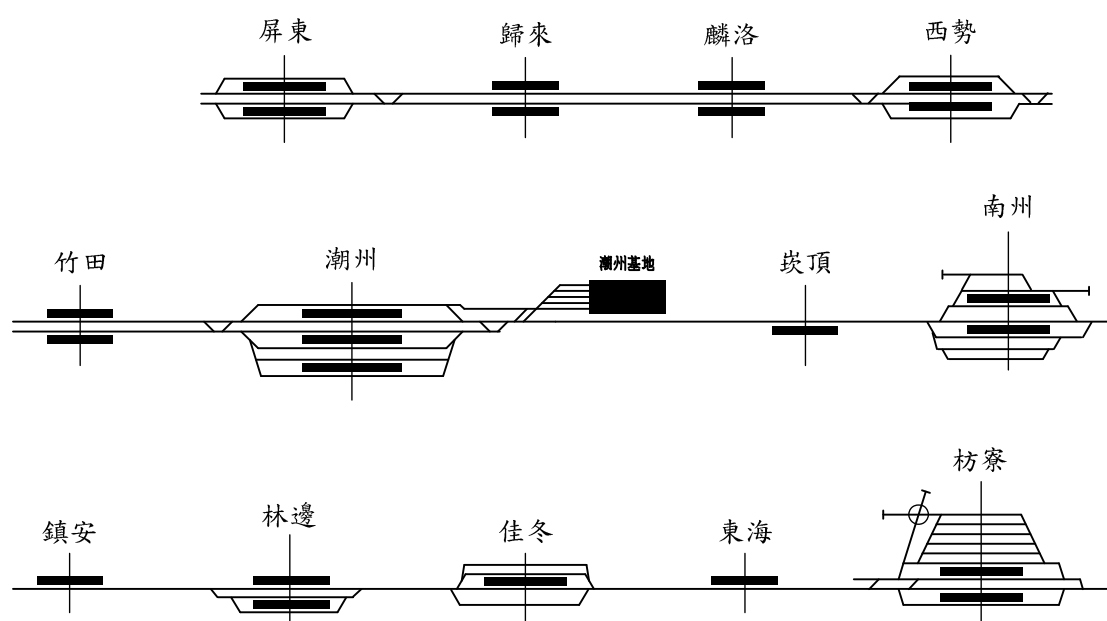
資料來源：本研究整理

圖2-2 臺鐵營運路線圖

臺鐵的號誌系統係採用固定式閉塞號誌系統（Fixed Block Signaling System, FBS），其路線根據路側號誌機區分為許多閉塞區間，由司機員以目視方式遵照號誌指示行駛。為了確保行車安全，另

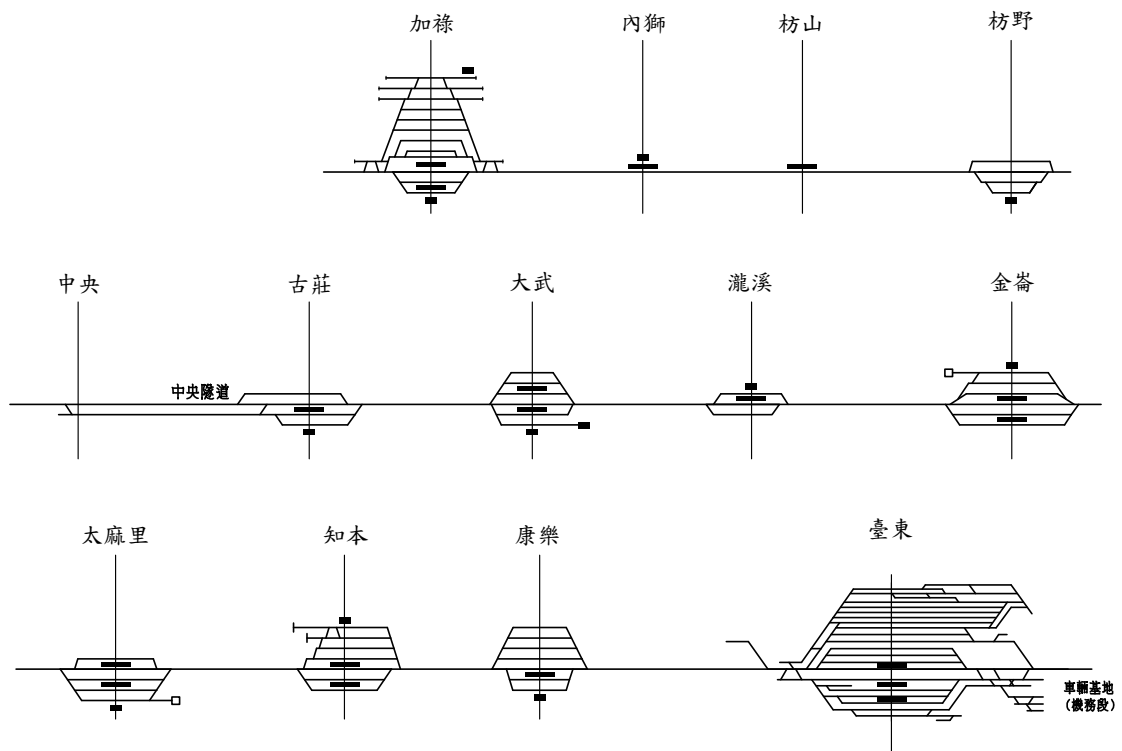
裝設有列車自動保護系統（Automatic Train Protection, ATP），將列車的速​​度從單點監控提升至線的監控。另外，臺鐵對於運轉車輛的調度監控係採用中央行車控制系統（Centralized Traffic Control, CTC），在 CTC 區間是由臺北車站四樓的綜合調度所集中控制全線的列車運轉。

根據臺鐵民國 102 年的統計資料^[10]，總營業路線里程全長約 1,061.3 公里，其中複線長達 683.9 公里，佔全線 64.4%；而單線長達 377.4 公里，佔全線 35.6%。環島路網中的單線區間主要分布在屏東線、南迴線、臺東線上，其軌道佈置情況如圖 2-3、圖 2-4和圖 2-5所示；海線的部分則是單複線混合配置，其軌道配置狀況如圖 2-6，而目前正在進行的「花東線鐵路瓶頸路段雙軌化暨全線電氣化計畫」^[11]，還預計將壽豐—南平與瑞穗—三民段雙軌化。此外，支線系統也絕大部分為單線區間，如花蓮港線、深澳線、平溪線、集集線，以及內灣線竹中—內灣段等。



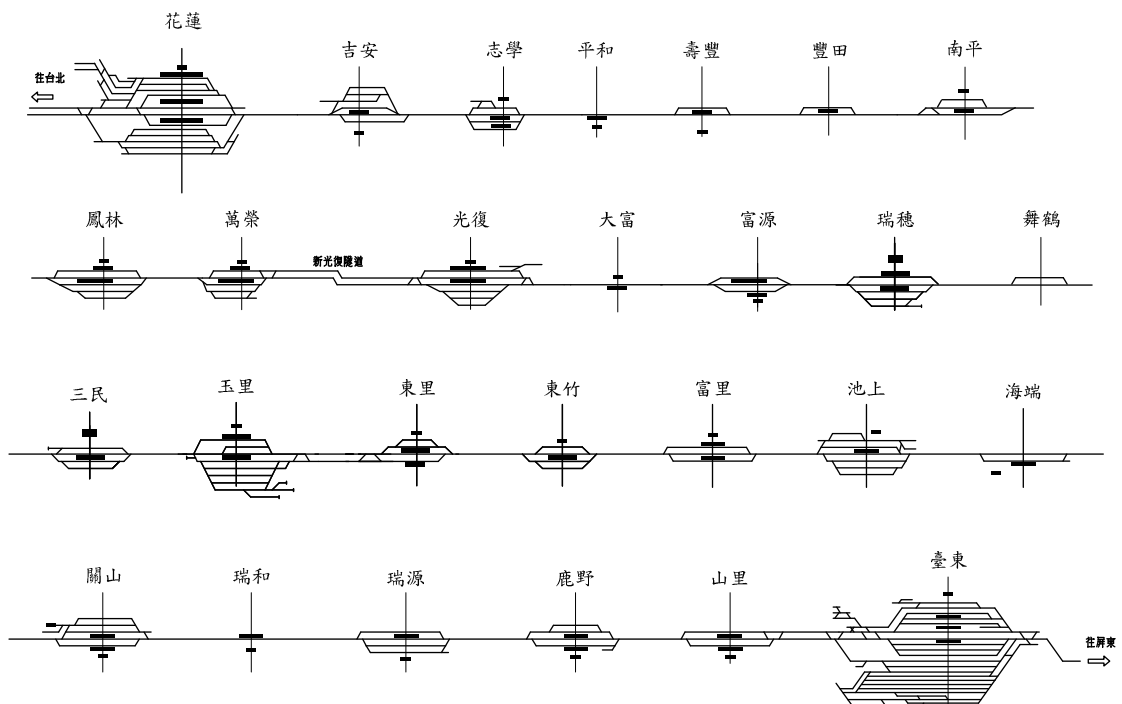
資料來源：本研究整理

圖2-3 臺鐵屏東線軌道佈置圖



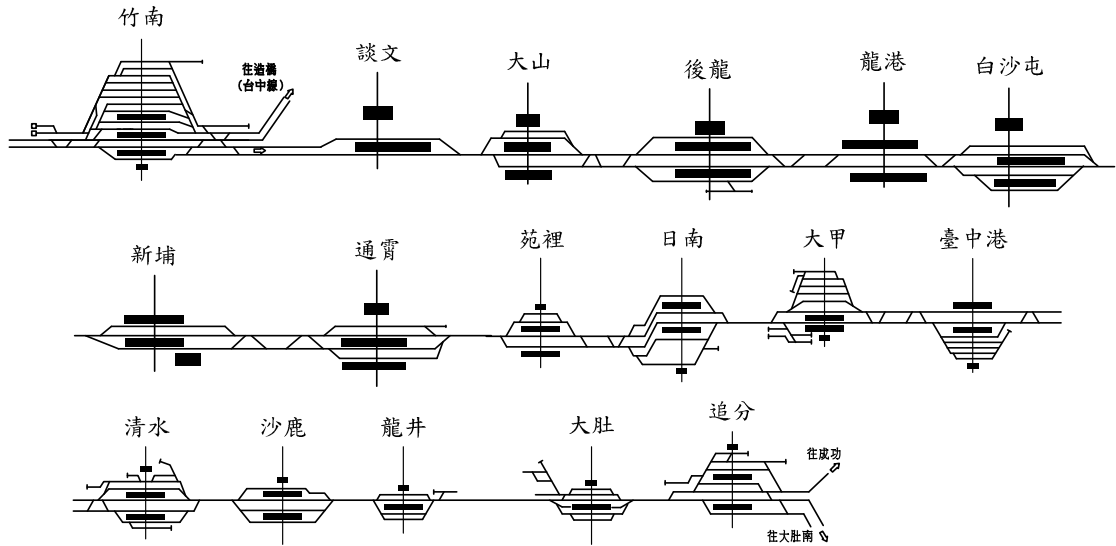
資料來源：本研究整理

圖2-4 臺鐵南迴線軌道佈置圖



資料來源：本研究整理

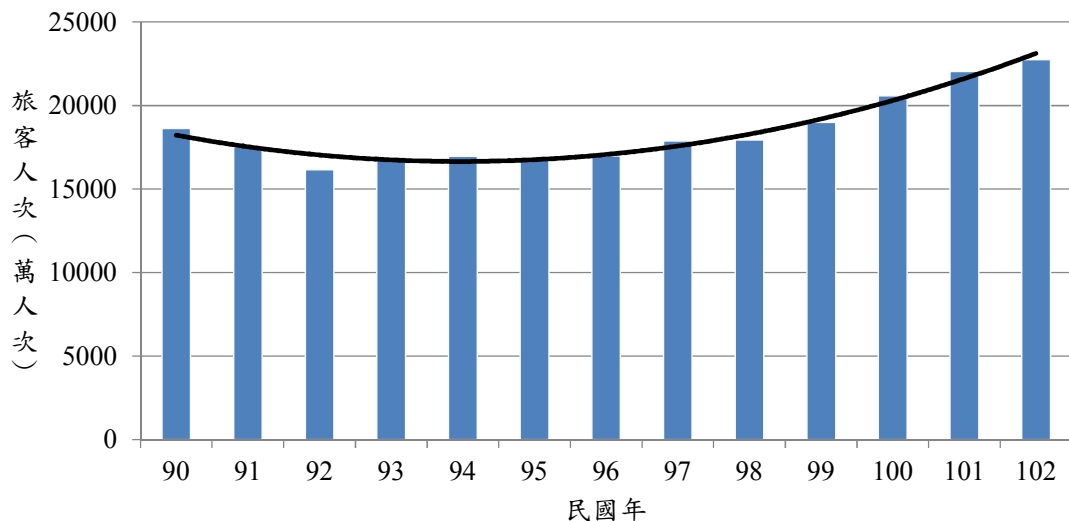
圖2-5 臺鐵臺東線軌道佈置圖



資料來源：本研究整理

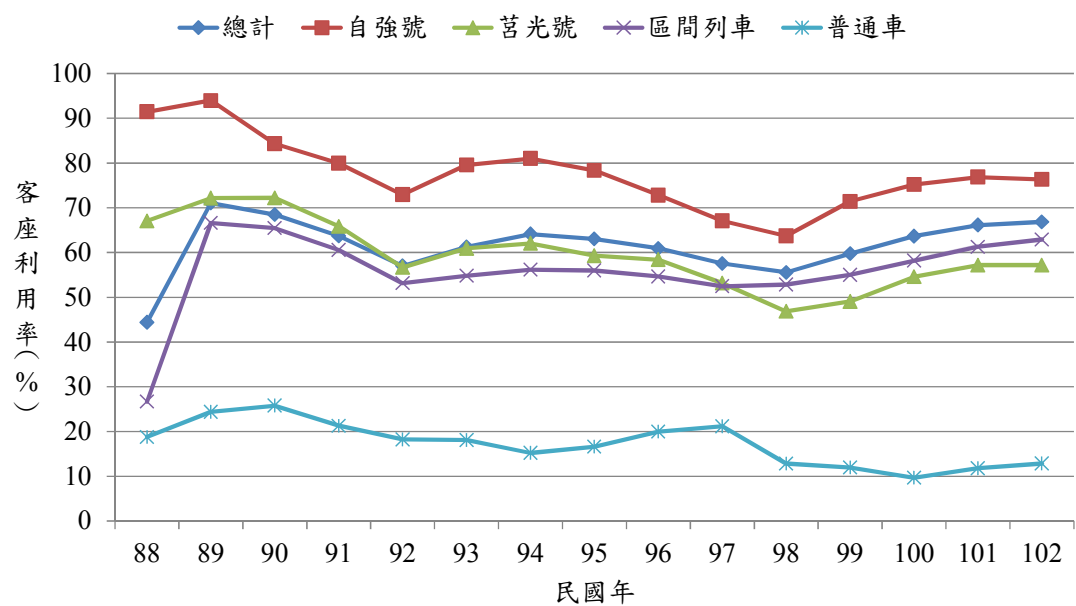
圖2-6 臺鐵海線軌道佈置圖

在旅客運輸方面，臺鐵每日平均開行的列車數超過一千個班次，在民國 102 年所載運的客運人數約為 2 億 2,729 萬人次，較上年增加 3.46%，歷年旅客人次變化如圖 2-7，可發現臺鐵的旅客人次已創下近十幾年來新高。在客座利用率部份，圖 2-8顯示近幾年臺鐵各級列車客座利用率有逐漸上升的趨勢，自強號為七成多，居各級列車客座利用率最高，而最低者為普通車，約為 10%左右。



資料來源：[10]及本研究整理

圖2-7 臺鐵歷年旅客人次



註：區間列車含復興號

資料來源：[10]及本研究整理

圖2-8 臺鐵歷年各級列車之客座利用率

第三章 文獻回顧

基於本研究的主要研究內容，本章之內容首先在於了解本所過去相關研究成果，同時回顧國內外可用於單線區間的容量分析模式，而欲以模擬方法求取單線軌道容量時，將會面臨到死結問題的處理，因此亦針對此課題之相關文獻進行介紹與探討。

3.1 本所軌道容量研究現況

3.1.1 研究成果回顧

為因應國內各種軌道系統建設之規劃與發展，本所從民國 92 年開始了軌道容量分析課題的相關研究，希望發展完整且系統化的容量分析方法與工具，以便能掌握軌道系統的供需能量以及服務水準，歷年的研究計畫如圖 3-1所示。經過多年研究，成果相當豐碩，研究的對象包含傳統區域鐵路系統與都會捷運系統，研究課題也從軌道容量延伸至服務水準和可靠度，以下主要針對傳統區域鐵路系統軌道容量相關的研究成果進行介紹。

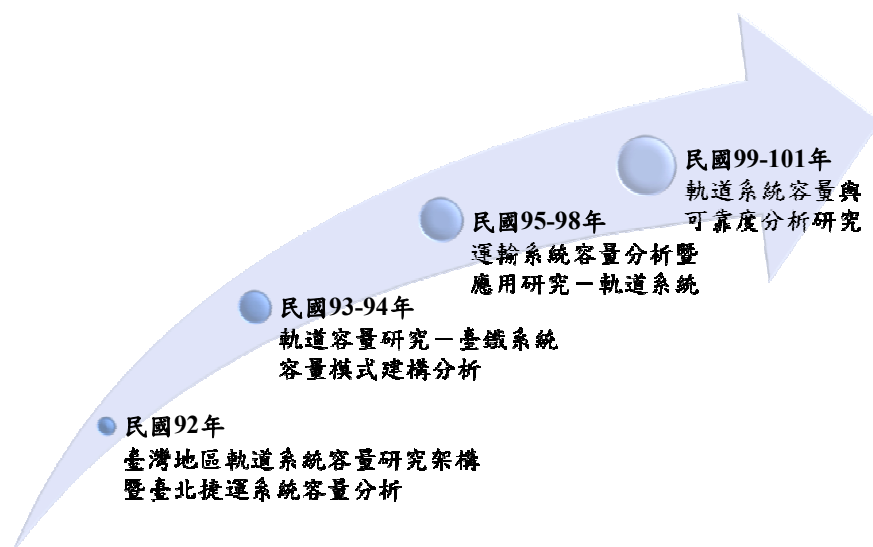
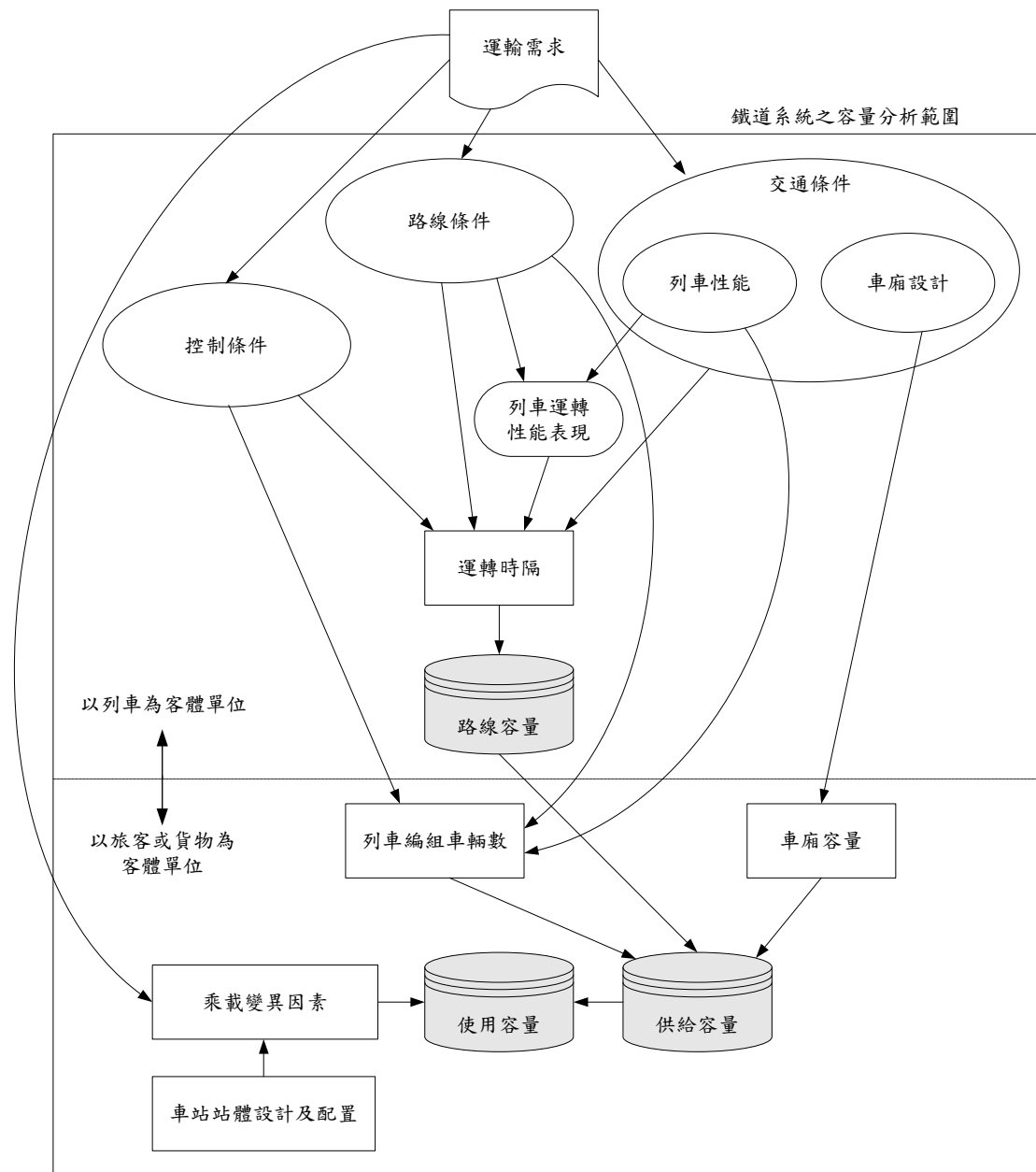


圖3-1 本所歷年軌道容量系列研究

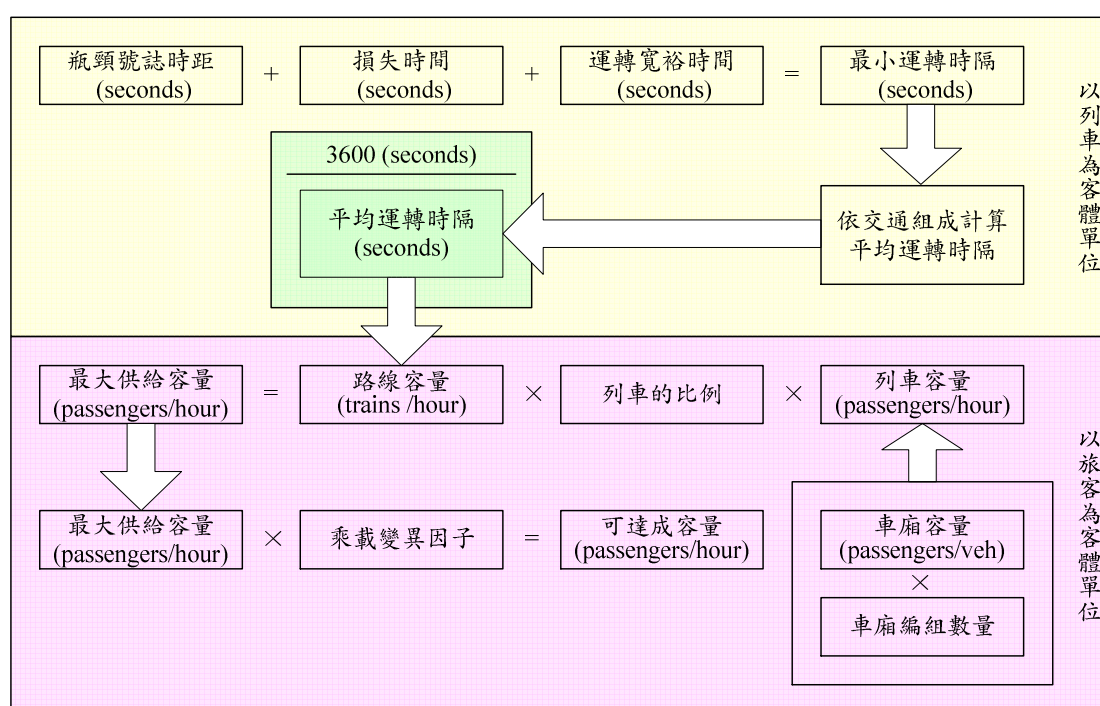
首先，在民國 92 年的「臺灣地區軌道系統容量研究架構暨臺北捷運系統容量分析」中，建立了軌道容量分析的泛用架構，如圖 3-2，並且擬定了鐵道容量手冊的編定原則與內容架構，同時建議未來容量研究的方向與時程規劃，進而展開後續一系列的軌道容量研究。



資料來源：[2]與本研究整理

圖3-2 軌道容量分析的泛用架構

接著，民國 93 年開始的「軌道容量研究—臺鐵系統容量模式之建構分析」兩年期計畫，以臺鐵系統為對象，第一年度主要根據臺鐵號誌系統的運作邏輯，考量列車性能、車站股道配置、號誌機位置、寬裕時間等多項影響因素，建構了號誌安全時距計算公式，進而發展了以列車為客體單位的容量分析模式，也就是圖 3-2 上半部。而第二年度則是承襲第一年度繼續發展以旅客為客體單位的容量分析模式，如圖 3-2 下半部，此時，傳統暨區域鐵路系統軌道容量模式已有完整之架構，如圖 3-3 所示。

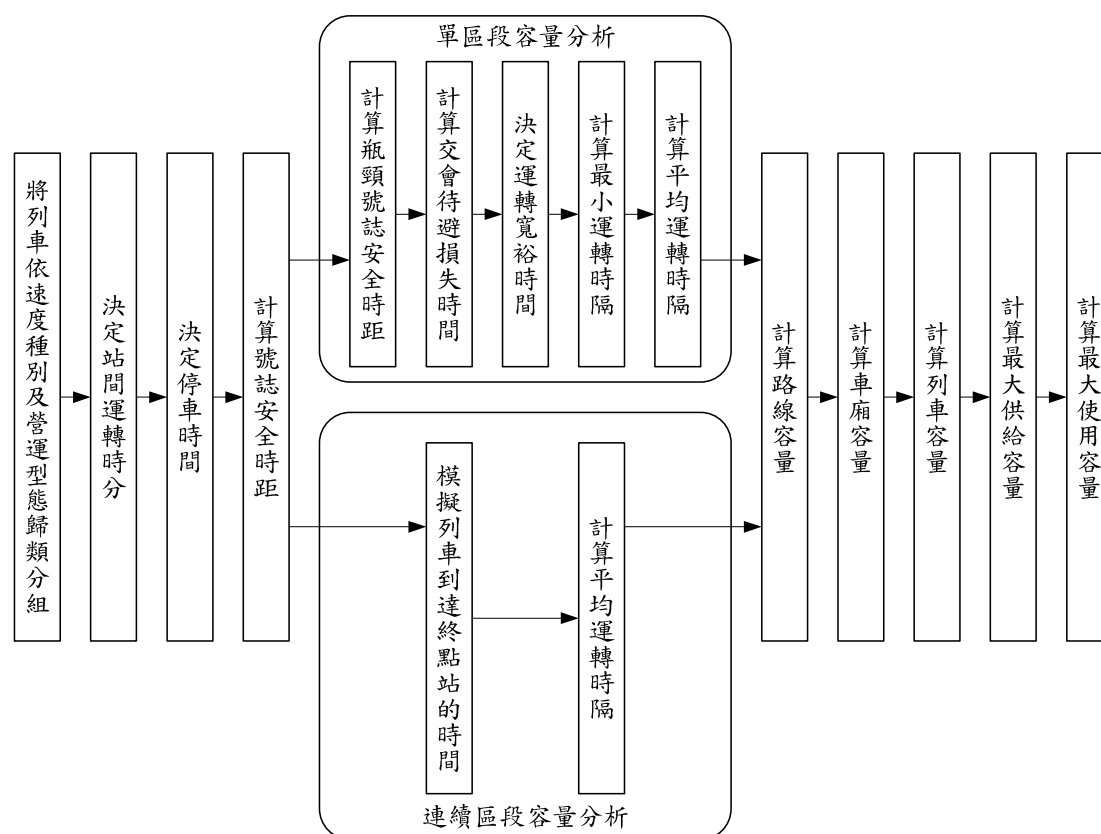


資料來源：[8]

圖3-3 傳統暨區域鐵路系統單一區段軌道容量分析架構

在模式建構完成後，自民國 95 年起的「運輸系統容量分析暨應用研究—軌道系統」四年期計畫，其中對於傳統區域鐵路系統的部分，主要將容量分析模式開發成了「傳統暨區域鐵路系統軌道容量分析軟體」，以降低模式的使用門檻，提升容量分析之效率。同時著手彙整過去研究成果編訂了「臺灣鐵道容量手冊」，並進行了多場教育訓練，積極向產官學界推廣軌道容量分析的概念與應用。

有鑑於過去發展的容量模式僅能分析單一區段，為了能更符合列車實際運轉情況，民國 99 年進行了「軌道系統容量與可靠度分析研究」三年期計畫，其中有關軌道容量課題，便是考量列車運轉的連續移動變化以及相鄰區間的交互影響，發展可適用於複線運轉的連續區段軌道容量分析模式。至此，傳統暨區域鐵路系統軌道容量分析模式的整體分析流程如圖 3-4。



資料來源：[4]

圖3-4 傳統暨區域鐵路系統軌道容量整體分析程序

3.1.2 應用實績介紹

經過多年的研究與推廣，國內軌道營運業者或政府相關部門已逐漸了解到容量評估的重要性，在許多軌道相關的研究案或規劃案中，採用「傳統暨區域鐵路系統軌道容量分析軟體」做為評估軌道容量與研擬改善策略之分析工具，目前實務應用的實績彙整如表 3.1，除了「臺

鐵北迴線蘇新~花蓮間瓶頸路段改善可行性研究」和「臺灣整體鐵道網規劃（二）」正在進行外，其他計畫之相關內容簡要介紹如下。

表3.1 軌道容量分析應用實績彙整表

計畫名稱	業主	年期
臺鐵軌距 1067mm 改為 1435mm 可行性研究	交通部臺鐵局	97~98
臺鐵列車排點改善之基礎作業探討	交通部臺鐵局	97~98
軌道運輸系統總體規劃(2/2)-我國軌道運輸系統發展政策之研究	本所	98~99
臺鐵臺北機廠遷建富崗基地專管監造	交通部臺鐵局	98~101
臺鐵中長程建設及營運策略研究規劃	交通部臺鐵局	99~100
桃園段高架化建設計畫委託工程專案管理技術服務	交通部臺鐵局	99~106
臺灣整體鐵道網規劃（一）	交通部鐵工局	100~101
臺鐵北迴線蘇新~花蓮間瓶頸路段改善可行性研究	交通部臺鐵局	進行中
臺灣整體鐵道網規劃（二）	交通部鐵工局	進行中

1. 臺鐵軌距 1067mm 改為 1435mm 可行性研究

本研究分為兩個部份，第一部份在探討將臺鐵現行採用之 1067 公厘窄軌系統，改為 1435 公厘之標準軌系統的可行性；第二部分則是維持臺鐵目前軌距，研究其他軌道運輸系統與臺鐵共軌營運的可行性。

有關第二部份的研究，由於都會捷運系統班次密集，若與臺鐵共軌營運，將會對臺鐵造成很大的衝擊，故本研究只探討臺灣高鐵與臺鐵共軌營運的可能性，即高鐵自左營站繼續往南延伸營運，利用臺鐵路綫經高雄站至臺鐵潮州站。然而要與臺鐵共軌營運，需要考量該路段的路綫容量，在滿足臺鐵營運需求及長途、區間運輸特性後，尚有餘裕供其他軌道運輸系統與其共軌營運時，探討共軌營運的可行性才

有意義，因此，利用容量分析軟體來評估臺鐵是否有足夠的容量再加入高鐵列車營運，以及分析加入高鐵列車之後的容量變化情形。

2. 臺鐵列車排點改善之基礎作業探討

本計畫的目的在研擬符合臺鐵營運與旅客需求之行車計畫制定方式、提出適合臺鐵的電腦排點演算核心，同時針對東部幹線（花蓮—臺東），檢討列車的基準運轉時分、分析路線容量及研擬容量改善策略，以提昇臺鐵營運競爭力。

有關本計畫對於路線容量計算的課題，係採用路線容量分析軟體作為分析工具，分別從路線容量和路線利用率等兩種觀點探討容量瓶頸區間所在，並以列車一來一回運轉的保守情況下，分析潛在的瓶頸區間，最後，針對各種瓶頸改善策略比較其容量提升效益。

3. 軌道運輸系統總體規劃(2/2)—我國軌道運輸系統發展政策之研究

本研究之目的在透過對我國當前整體軌道運輸系統發展之課題分析，研議提出政策願景與策略，以作為我國未來整體軌道系統發展之依據，同時亦作為交通部未來軌道施政方向及研提軌道政策白皮書之基礎。在研究過程中，需對國內各種軌道運輸系統的供需概況有所掌握，其中有關臺鐵全線之路線容量與利用率，係透過本所發展的容量分析軟體計算獲得。

4. 臺鐵臺北機廠遷建富岡基地專管監造

在本案中，利用容量分析軟體評估新竹機務段移設至富岡基地後，路線利用率的變化情況，其分析情境為：(1)原訂抵達新竹站後進機務段列車，需回送至富岡基地；(2)原訂以新竹站為起點列車，需提前從富岡基地調車至新竹站再行發車；以及(3)富岡至湖口間增設北湖口站，分析結果顯示竹北新竹間有容量不足的情形。

5. 臺鐵中長程建設及營運策略研究規劃

本計畫以民國 101 年為臺鐵之行動元年，擘劃 102 年至 121 年的中長程發展策略規劃，從戰略上的角度來思考臺鐵未來的發展遠景及策略，工作內容除了要探討整體運輸市場的發展概況及未來趨勢外，也要了解臺鐵的現有系統設施、業務經營情況及相關改善計畫等，以作為臺鐵未來遠景規劃的起點。在臺鐵經營效率的部分，可從路線容量、動力車可用率、客座利用率以及人員利用效率等的角度來分析，而其中路線容量則是引用本所的研究以了解臺鐵全線路線容量使用情況。

6. 桃園段高架化建設計畫委託工程專案管理技術服務

本技術服務案在協助臺鐵局於預定時程與預算內，如期如質且安全地完成「桃園段高架化建設計畫」，該計畫範圍起自鶯歌鎮經桃園站、內壢站、中壢站至平鎮市，全長 15.95 公里，除現有鐵路與車站改建高架外，沿線並增設捷運通勤車站包括鳳鳴站、國際路站、永豐路站及中原大學站。

該建設計畫的前期綜合規劃係以臺鐵容量公式分析結果為基礎來設計軌道配置，然而該公式隱含單線運轉的假設，與臺鐵實際運作上採複線運轉的情況不同，因此會低估路線容量。此外，桃園鐵路高架後加上增設數個通勤車站，列車的運轉時間將有所變動，也會進而影響容量。因此，本案採用中興工程顧問社所開發的列車運轉模擬軟體 TrainSim 重新評估運轉時間後，再以本所的路線容量分析軟體進行分析，以求路線容量之正確性。

7. 臺灣整體鐵道網規劃（一）

為因應民國 101 年交通及建設部鐵道局的成立，以國土發展為經、運輸需求為緯、車站為市鎮發展節點，考量環境、工程與民意之限制與期望，規劃「臺灣整體鐵道網計畫」，並於完成後報請交通部參考，作為臺灣鐵道未來長期發展之藍本。

本計畫藉由服務水準評估以瞭解鐵道服務改善的方向，作為鐵道網規劃之重要參考，其提出的本土化鐵道服務績效指標包含安全、可靠、舒適、容量與便捷等五個構面，其中路線利用率為可靠類的指標之一，因為當路線利用率越高時，一旦列車發生延誤，將更難恢復正常營運狀態，甚至可能讓原本的班表大亂嚴重影響旅客。

由於臺鐵一直深受容量不足的困擾，因此本計畫亦特別針對臺鐵，根據其軌道配置圖、列車性能、列車編組與基準運轉時分等資料，分析環島路線尖峰與全日路線利用率，並提出階段性改善建議。

3.1.3 小結

從以上回顧可預見未來國內對於鐵道系統相關研究案、規劃案、改善建設計畫等，將會愈來愈重視軌道容量分析工作。目前國內對傳統暨區域鐵路系統的軌道容量研究已相當深入，但仍有不足之處，表3.2彙整了上述容量分析模式的發展現況，若是要分析單一區段，現有模式可處理單線運轉和複線運轉的情況；但若要分析連續區段，現有模式僅能處理複線運轉的情況，因此有必要發展單線連續區段軌道容量模式，如此傳統暨區域鐵路系統軌道容量模式將更能夠處理各種容量分析問題。

表3.2 本所傳統暨區域鐵路系統軌道容量模式發展現況

分析範圍 運轉方式	單一區段	連續區段
	單一區段	連續區段
單線運轉	√	—
複線運轉	√	√

3.2 單線軌道容量分析相關文獻

3.2.1 單線單一區段容量分析相關模式

3.2.1.1 臺鐵容量計算公式

臺鐵所自行發展的經驗公式，如下式

$$C_l = \frac{1440}{\frac{t_U + t_D}{2} + t_s} \times \delta \times \eta \times n_t \quad (3.1)$$

式中： C_l =路線容量 (TU/day)

t_U =上行客貨列車所佔比例之混合運轉時分 (min)

t_D =下行客貨列車所佔比例之混合運轉時分 (min)

t_s =辦理閉塞及號誌時間 (min)，臺鐵採用 1.5

δ =路線利用率，外國採用 0.65~0.75，臺鐵採用 0.7

η =行車制度效率因素，又稱續行係數，人工閉塞區間為 1.0，

在 CTC 區間依站間閉塞區間的數目來制定，以兩個閉塞區間為基本值 1，每增加一個閉塞區間則增加 0.1

n_t =軌道數 (單軌、雙軌、三軌)

由公式中可知，列車的站間運轉時分是以上下行列車的平均運轉時分來計算，隱含著列車是以一列上行、一列下行交替的方式進行的單線運轉，因此可用於評估單線區間之容量，但無法有效反映上下行列車分布不均的情況。

此外，臺鐵公式中雖有考慮營運以及部分號誌系統的特性，但對於辦理閉塞及號誌時間是採用一固定的數值，無法充分反映號誌系統、路線配置及列車性能等因素。而且鐵路運轉具有許多變異性，包括列車運轉的速差、車輛操控的精準性、停車時間的變異、運轉整理的恢復時間、交會待避延誤時間等，為維持鐵路運轉的可靠度，通常

容量計算需保留運轉寬裕，然而依臺鐵容量計算公式並未考量寬裕，因此計算結果可能會高估容量。

3.2.1.2 本所單一區段容量分析模式

本所針對臺鐵系統發展單一區段軌道容量計算公式^[5,6,7]，其架構如圖 3-3所示。此模式在計算單線區間之容量時，首先需計算交會車站在各種先續行列車組合下的反向號誌安全時距，公式如下：

$$T_{s,M} = t_p + t_r - \sqrt{\frac{2(s_t - s_x - L_i)}{K_b b_i(G_i)}} \quad (3.2)$$

式中： $T_{s,M}$ =列車交會的號誌安全時距（sec）

t_p =先行列車進站時，車尾通過道岔位置後，解除主正線的進路、轉轍器扳轉、鎖定副正線的進路，以及號誌變換的整體作業時間（sec）

t_r =司機員確認出發號誌的反應時間（s）

s_t =進站道岔與出發號誌機的距離（m）

s_x =列車於車站停車時車頭與出發號誌機的距離（m）

L_i =先行列車的長度（m）

K_b =減速性能折減因子

$b_i(G_i)$ =先行列車在坡度 $G\%$ 的減加速度

接著以(3.3)和(3.4)式，分別計算交會損失時間與運轉寬裕時間，然後以(3.5)計算最小運轉時隔。

$$t_l = \frac{1}{2}(t_i + t_j) \quad (3.3)$$

$$t_m = \beta(T_s + t_l) \quad (3.4)$$

$$h_{ij} = T_s + t_l + t_m \quad (3.5)$$

式中： t_l =列車交會的損失時間（sec）

t_i =先行列車的站間運轉時間 (s)

t_j =續行列車的站間運轉時間 (s)

t_m =運轉寬裕時間 (s)

β =寬裕時間係數，建議採用 0.3

T_s =瓶頸號誌時距 (s)

h_{ij} =續行列車 j 跟隨先行列車 i 的最小運轉時隔 (s)

最後根據先續行車組合的比例計算平均運轉時隔，如(3.6)式，進而得到路線容量，如(3.7)式。

$$\bar{h} = \sum h_{ij} \cdot p_{ij} \quad (3.6)$$

$$C_l = \frac{3600}{\bar{h}} n_l \quad (3.7)$$

式中： \bar{h} =平均最小運轉時隔 (s)

p_{ij} =續行列車 j 跟先行隨列車 i 的相對頻率

C_l =路線容量 (TU/h)

n_l =路線的軌道數目

此模式考量了路線條件、交通條件、控制條件等眾多因素，可評估每小時的通過列車數，雖然計算過程有些繁複，但本所亦開發了容量評估軟體來輔助計算^[13]。在單線容量的計算上，係假設列車為一來一回交替運轉，但仍可利用同向與反向的比例來處理上下行列車分布不均的情況^[9]，然而，此模式僅能分析單一區段，沒有考慮相鄰區間的交互影響。

3.2.1.3 日本運轉局簡易式

日本軌道容量分析仍著重於路段容量計算，並不考慮銜接點、車站對於容量之影響，對於單線區間的容量計算採用運轉局簡易式^[1]，公式如下：

$$C_l = \frac{1440}{t + t_s} \times \delta \quad (3.8)$$

式中： C_l =單線區間的路線容量 (TU/day)

t =列車於站間之平均運轉時分 (min)

t_s =辦理閉塞所需的時間 (min)，自動閉塞制及聯動式閉塞制為 1.5 min，電氣路牌式閉塞制為 2.5 min

δ =路線利用率，一般採 0.6

此公式以列車於站間之平均運轉時分，而非最慢列車於最長區間的運轉時間為計算的依據，公式中同時考慮到路線利用率的因子，將容量作適度的折減。運轉局簡易式與臺鐵容量計算公式類似，因此同樣有無法充分反映號誌系統、路線配置及列車性能等因素，以及未考量寬裕時間等缺點。

3.2.1.4 IMPROVERAIL 公式

IMPROVERAIL 計畫所提出的容量與資源管理評估方法中^[36]，對於單線區間的軌道容量分析計算方式如圖 3-5，公式為：

$$h_{ij} = \frac{(n_s - 1) \cdot h_{ijs} + h_{ijo}}{n_s} \quad (3.9)$$

$$C_l = \frac{T}{h} \delta \quad (3.10)$$

式中： h_{ij} =列車 j 跟隨列車 i 的最小運轉時隔

n_s =連續同向運轉的平均列車數

$h_{ijs} = t_{s,ij} + t_{m,ij} + \max(t_i - t_j, 0)$ ，為列車 i 與列車 j 同向運轉的最小時隔 (min)

$h_{ijo} = t_i + t_{m,ij}$ ，為列車 i 與列車 j 反向運轉的最小時隔 (min)

C_l =路線容量

T =計算容量的時間涵蓋範圍 (min)

$h = \sum h_{ij} \cdot p_{ij}$ = 平均最小運轉時隔 (min)

p_{ij} = 列車 j 跟隨列車 i 的機率或相對頻率

δ = 路線利用率

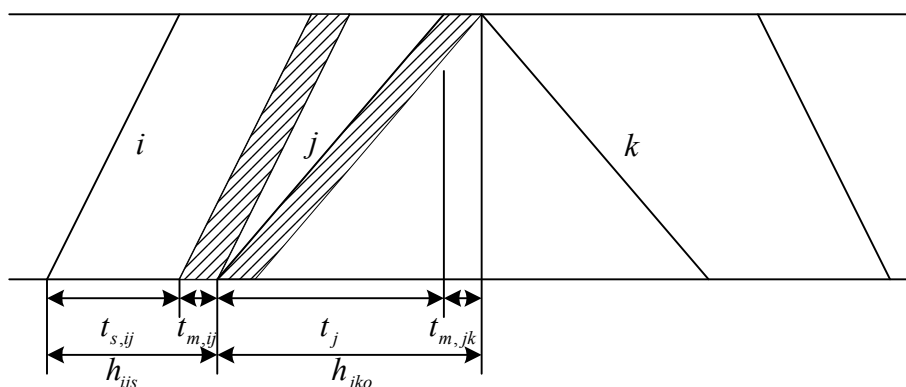


圖3-5 IMPROVERAIL 單線區間最小運轉時隔的計算方式

首先在運轉時隔的計算上，有考量了列車同向與反向運轉的分布情況，而路線容量的計算則和其他模式大同小異，其中路線利用率參數是用來反映實際營運時間的比例，或是路線容量的期望使用比例，以保留部分容量彈性運用或進行路線維修工作。IMPROVERAIL 所建議的容量計算方式，已充分考慮到號誌安全時距、列車交會待避損失時間，以及運轉寬裕時間，算是相當地完整。但對於號誌安全時距的計算細節則未交代。

3.2.2 單線連續區段容量分析相關模式

3.2.2.1 TCQSM

在 2013 年，美國運輸研究委員會 (Transportation Research Board, TRB) 推出了大眾運輸容量暨服務品質手冊 (Transit Capacity and Quality of Service Manual, TCQSM) 第三版^[22]，當中對於軌道容量的計算提出了下列一般化的流程：

1. 步驟一：決定不受干擾下的運轉時隔 (Non-Interference Headway)

2. 步驟二：依路權型式決定最小運轉時隔
3. 步驟三：決定銜接點（Junction）時隔
4. 步驟四：檢核電力系統限制
5. 步驟五：決定主控運轉時隔（Controlling Headway）
6. 步驟六：決定末端站滯留時間
7. 步驟七：計算路線容量
8. 步驟八：計算旅客容量

以上流程中有關單線容量的部分主要在步驟二裡，對於單線區間的運轉時隔計算公式如下，然後再用 3600 秒除以運轉時隔獲得路線容量。

$$t_{st} = S_m \left[\left(\frac{N_{st} + 1}{2} \right) \left(\frac{3v_{\max, st}}{d} + t_{jl} + t_{br} \right) + \frac{L_{st} + L_t}{v_{\max, st}} \right] + N_{st} t_d + t_{sw} + t_{om} \quad (3.11)$$

$$h_{st} = 2t_{st} \quad (3.12)$$

式中： t_{st} = 穿越單線區間所需時間（s）

L_{st} = 單線區間長度（m）

L_t = 列車長度（m）

N_{st} = 單線區間內的車站數

t_d = 列車平均停站時間（s）

$v_{\max, st}$ = 單線區間內的最大速度（m/s）

d = 減速率（m/s²）

t_{jl} = 列車急衝度限制寬裕時間（s）

t_{br} = 列車駕駛與煞車系統反應時間（s）

S_m = 速度寬裕

t_{sw} = 轉轍器運作時間（s）

t_{om} = 運轉寬裕（s）

h_{st} = 最小單線運轉時隔 (s)

此公式考量了列車性能、路線條件、控制條件等因素，其中包含單線區間內車站數，顯示本模式可用來分析連續區段容量，但從(3.11)式中可發現，在此所指的連續區段為多個不可交會的區間。此外，此公式僅考慮單一車種，不適用於如臺鐵多車種的系統中。

3.2.2.2 Parametric Capacity Model

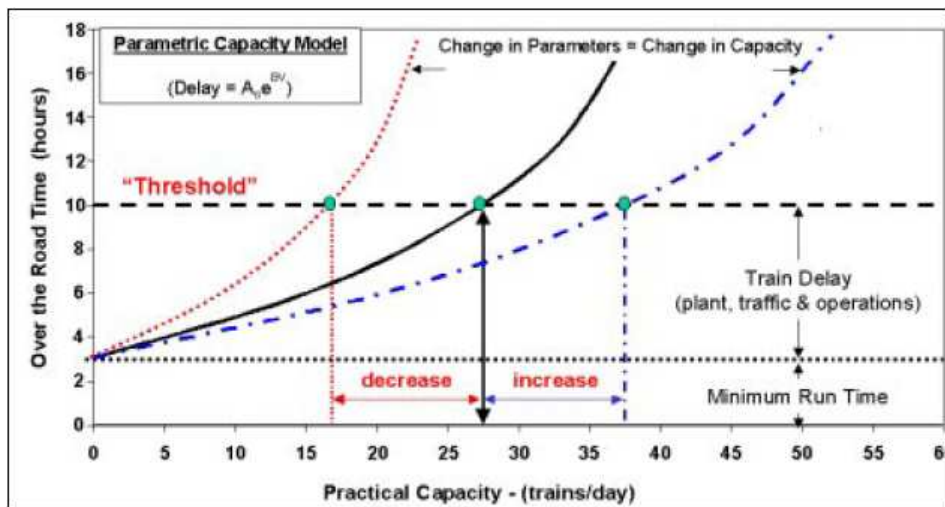
此模式是加拿大國鐵使用於路線容量規劃之決策輔助工具^[23]，可針對大區域之路線進行軌道容量分析。該模式雖是透過模擬分析建立各項影響因素與容量的關係，但本質上算是解析模式，此模式先以(3.13)式得到軌道容量曲線，如圖 3-6，再由可接受的最大旅行時間門檻（Maximum Trip Time Threshold），也就是圖中 Y 軸的值，來得到所對應的軌道容量，也就是圖中 X 軸的值。

$$Delay = A_0 e^{BV} \quad (3.13)$$

式中： A_0 = 聯合係數

B = 常數

V = 列車容量



資料來源：[23]

圖3-6 Parametric Capacity Model 軌道容量曲線

公式(3.13)中的 A_0 ，是考量設備相關 (Plant)、交通 (Traffic) 相關，與運轉作業 (Operating) 相關等三類參數聯合計算所得的係數，包含下列項目：

1. 設備相關參數

- (1) 路線長度 (Length of the Subdivision)
- (2) 列車交會待避處的平均間隔 (Meet Pass Planning Point Spacing)
- (3) 列車交會待避處的分布 (Meet Pass Planning Point Uniformity)
- (4) 號誌間隔和側線間隔比率 (Intermediate Signal Spacing Ratio)
- (5) 複線百分比 (Percent Double Track)

2. 交通相關參數

- (1) 交通尖峰因子 (Traffic Peaking Factor)
- (2) 列車優先或然率 (Priority Probability)
- (3) 速差比率 (Speed Ratio)

3. 運轉作業相關參數

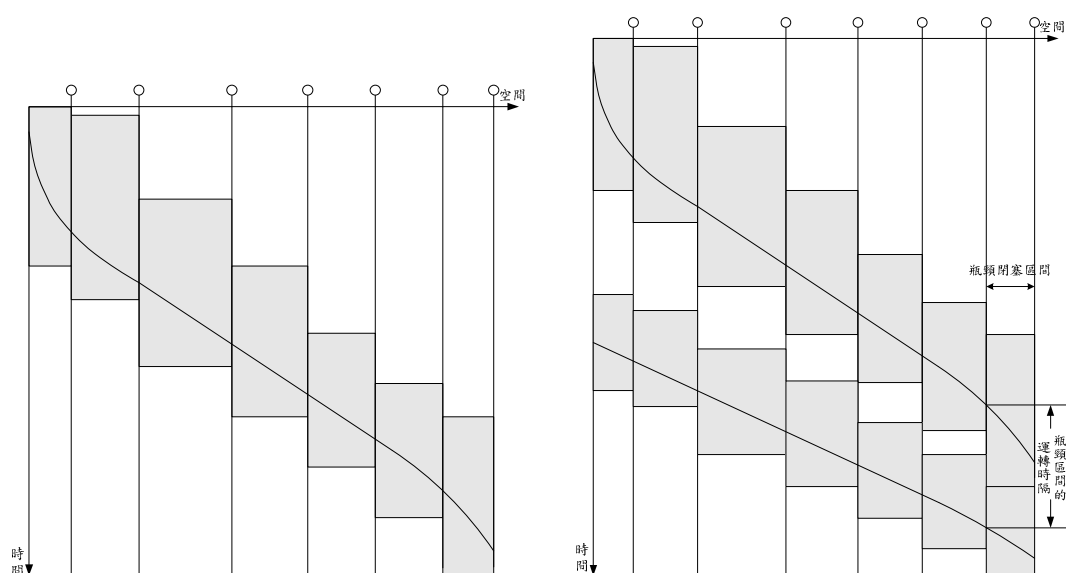
- (1) 軌道中斷 (Track Outages)
- (2) 慢行處 (Temporary Slow Orders)

「Parametric Capacity Model」具有解析模式簡單易用的特性，透過調整「複線百分比」參數，除了可分析單線連續區段之容量，也可分析單複線混合的情況，例如全長 200 公里的路線中，單線區間共 70 公里，複線區間共 130 公里，表示「複線百分比」為 65。但文獻中對於此模式的推導過程與邏輯並沒有清楚的說明，理論上雖能以模擬模式的結果來探討軌道容量與影響因素的關係，進而發展解析模式來評估容量，不過「Parametric Capacity Model」背後所採用的模擬模式是

根據加拿大鐵路之特性所發展，若要直接應用該模式至其他系統，可能仍須針對該系統發展詳細的模擬模式，分析大量案例來探討容量與影響因素的關係後，方能建立容量分析模式。

3.2.2.3 UIC Code 406

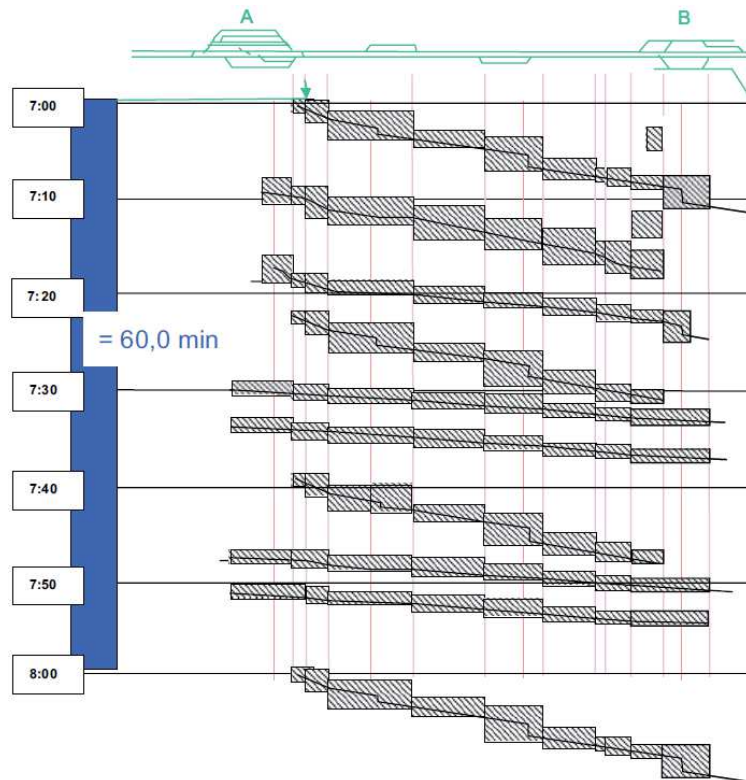
國際鐵路聯盟（International Union of Railways、UIC）提出的 UIC Code 406^[21]是在基礎設施與時刻表已知的情況下，以閉塞時間（Blocking Time）的觀念，來壓縮時刻表來計算容量利用率（Capacity Consumption）。其基本概念可以圖 3-7 為例來說明，其中圖 3-7（a）是將某一列車所經過的區間以閉塞時間繪製成閉塞時間階梯圖（Blocking Time Stairway），以呈現單一系列車運行所導致其鄰近閉塞區間處於封閉狀態。若將兩連續列車的閉塞時間階梯圖繪製在一起如圖 3-7（b），並儘可能使兩列車靠近到有任一閉塞時間相連時，該閉塞區間稱為臨界閉塞區間或瓶頸閉塞區間（Critical Block Section）。從 UIC 報告^[20]裡的範例可以明顯看出班表壓縮前與壓縮後的差異如如圖 3-8 與圖 3-9，但值得注意的是此時不考慮任何寬裕時間，而是在容量利用率計算時才納入考慮。



（a）單一系列車之閉塞時間圖

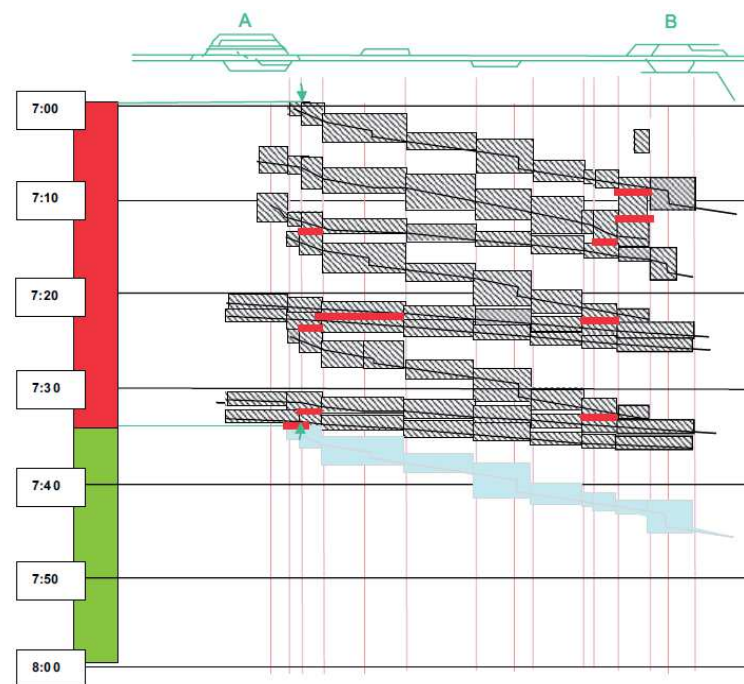
（b）連續兩列車之閉塞時間圖

圖3-7 閉塞時間階梯圖



資料來源：[20]

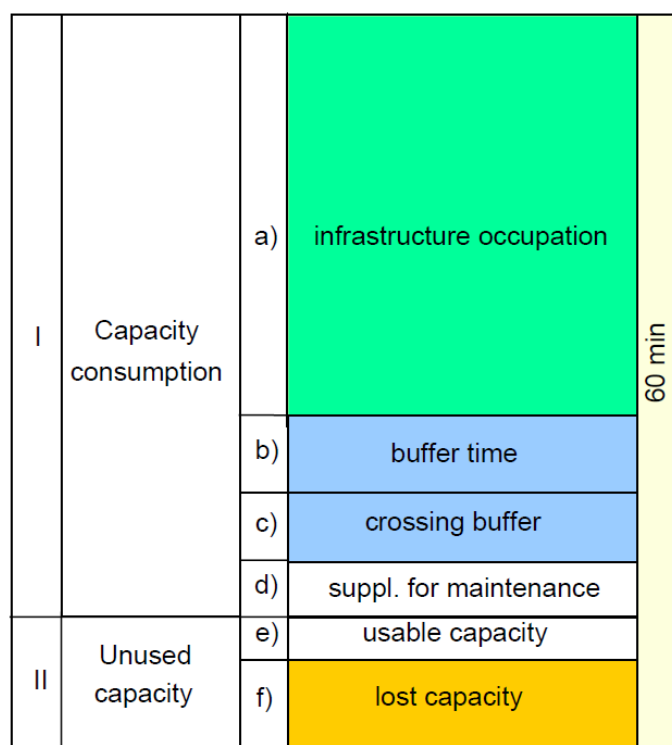
圖3-8 UIC Code 406 班表壓縮範例圖－壓縮前



資料來源：[20]

圖3-9 UIC Code 406 班表壓縮範例圖－壓縮後

UIC Code 406 計算容量利用率的架構如圖 3-10，軌道容量的組成分可分為兩大塊包含「容量消耗量」與「未使用容量」，其中「容量消耗量」包含 4 個組成，其中第一項(a)就是前一步驟一班表壓縮後的總時間；第二項(b)則是寬裕時間，但文中並沒有提供計算方式或建議值，僅約略提到寬裕時間可全面的給予一個數值或兩連續列車間逐一考慮。第三項(c)則是基於單線運轉所額外考慮的寬裕；最後一項則是基於維修所需的時間，以上四項即為容量消耗量的總數。至於「未使用容量」的部份則包含了「可用容量」與「損失容量」兩部分，文獻中提到若要使用剩餘的可用容量時，由於會更改到班表，因此需要再進行一次新的容量利用率分析。



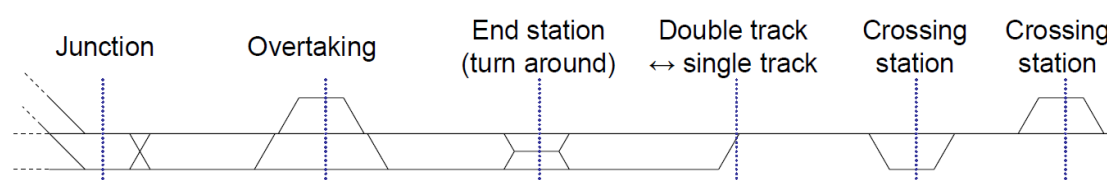
資料來源：[21]

圖3-10 UIC Code 406 容量利用率計算之架構圖

自從 UIC Code 406 被發表之後，有眾多報告書引用該方法進行容量利用率分析，但該方法所需資料相當繁雜，包含號誌與閉塞配置、列車運行績效（Train Performance）、可行時刻表等資料，均僅有在

營運階段方可能取得，在規劃設計階段幾乎無法應用，這是此方法的使用限制。而即使是營運中的系統，當容量接近飽和時，排班會相當困難，而此方法卻需要時刻表方能執行，將導致進退失據的窘況。

值得注意的是，此方法在進行壓縮班表之前，必須先依列車可交會待避處，如圖 3-11，將路網切割為數個分析單元，由於路網切割是後續壓縮班表的基礎，因此如何切割將影響結果，Landex^[25]以丹麥尖峰時段為例進行測試，發現不同切割方法計算出來的容量利用率差距高達 38%~45% 之間，這是 UIC Code 406 公式使用上的另一個盲點。



資料來源：[25]

圖3-11 UIC Code 406 路網切割點示意圖

3.2.2.4 商用模擬軟體

由於近年來資訊技術的進步，目前市面上有許多專為鐵路系統開發的商用模擬軟體，如 Rail Traffic Controller (RTC)、Railsys、SIMONE、VISION 等，這些軟體通常可以考慮相當多鐵路系統的細節，如號誌系統、列車性能、路線線形、轉轍器等，適合應用於營運期間驗證列車班表，亦可衡量系統之最大容量，故有許多研究人員採用這些軟體進行容量相關研究^[19,26,27,34]。其中北美各營運業者較常使用的 RTC^[18]，更是被認為具有較高的參考程度，其模擬成果與列車實際運轉行為相當接近^[24,35]。

模擬軟體雖可應用來評估單線連續區段的容量，且可獲得較為精確的容量分析結果，但一般都需要給定時刻表，而且所需要的參數相當繁雜、鉅細靡遺，這些參數在規劃設計階段通常不易獲得，即便是營運階段，要將所蒐集到的鐵路系統資料整理輸入至模擬軟體之中也

是相當費時之工作。此外，可能是基於商業機密，通常也無法了解模擬軟體內部的運作邏輯，從各家軟體使用手冊中，僅有 Railsys 明確表示其使用 UIC 406 之方法計算容量^[31]。

3.2.3 小結

綜觀以上文獻，單線單一區段容量分析模式大多以列車一往一返為前提，僅有少數有考量雙向列車方向分布不同的情況，而過去本所發展的模式和其他應用於單一區段的容量模式相比，除了能處理方向分布因素之外，在號誌時隔的計算上也考量了更多影響因素，唯其假設前提為不考慮前後相鄰區間之影響，因此需要進一步發展連續區段的容量分析模式。

回顧過去其他單線連續區段容量模式發現，「Parametric Capacity Model」雖可分析單複線混合的情況，但其僅由一個參數控制混合比例，無法反映單複線位置配置不同的差異，且該模式難以應用於其他系統。而 TCQSM 提出之分析方法需以連續區段內不得有可交會車站為前提，且僅考慮單一車種，這將大幅限制了其應用範圍。至於 UIC 406 的模式實際上在計算容量利用率而非直接求取容量，此外必需先有時刻表才能進行分析，所以難以應用於規劃設計階段，即便營運階段，光是單線排點就相當費時費力，使得實用性大減，而且其分析範圍和 TCQSM 一樣在連續區段內不得有可交會車站的限制。最後有關商用模擬軟體的部分，和 UIC 406 一樣需先給定時刻表，且需要相當詳細的輸入資料，因此也不適用於規劃設計階段，同時，由於無法得知其背後運作的邏輯細節，對本研究模式發展的幫助相當有限。

有鑑於此，本研究係以臺鐵系統為對象，發展一套單線連續區段軌道容量分析模式，可用於多個可交會車站所組成之單線區間，且不僅在營運階段，亦能在規劃設計階段，還沒有可行時刻表的前提下進行軌道容量分析評估。

3.3 處理列車運轉死結問題相關文獻

單線連續區間的列車運轉除了必須遵行列車的行車規則之外，更重要的是必須避免列車打死結。一旦發生打死結的情形，列車必須退行，否則整條路線將動彈不得。計算路線容量時，必須是實務上可以達成的容量，因此無可避免的必須處理死結的問題，下面就列車死結問題的文獻進行回顧。

3.3.1 列車運轉死結問題

死結是指在一个资源分配的系统裡，發生兩個以上的程序同時互相在等待對方釋放其資源才能繼續運作時的情況^[33]。鐵路系統可視為一個資源分配的系统，列車使用軌道（資源）才能運行，因此也可能發生死結的情況，如圖 3-12，四列車都互相在等待其他列車往前運行後，才能再繼續運轉。

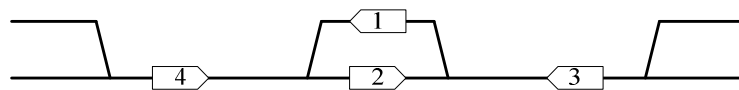


圖3-12 鐵路系統發生死結的情況

在實務上，無論是列車排點還是線上運轉調度，都要避免死結的發生，而在列車運轉模擬軟體中，死結的避免也是相當重要的課題^[28]。目前大多數的模擬軟體是在模擬列車進入下一區間前，先檢視兩到三個區間，來避免列車運行後發生死結^[32,33]，在圖 3-12的例子裡，若在列車 4 從車站內開出前，預先檢視之後兩個區間，如圖 3-13，便能發現列車 4 不能開行，否則將造成死結。然而這樣的方法並不能有效地避免死結發生，例如圖 3-14的情況，在列車 8 開出前即使檢視整條路線，若不仔細推敲，仍無法發現列車 8 開出後將會造成死結。

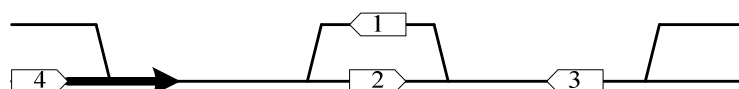


圖3-13 預先檢視兩個區間以避免死結

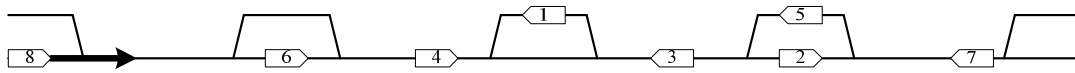


圖3-14 無法有效避免死結的情況

3.3.2 造成死結的必要條件與解決策略

雖然鐵路的歷史悠久，但有關死結問題的研究，最初是在資訊科學（Computer Science）領域中開始發展，目的是為了避免大型電腦系統將資源分派給各個程序時發生死結。早在 1971 年，Coffman 等人^[15]就提出了造成死結的四個必要條件：

1. 互斥（Mutual Exclusion）

每項資源同時只能被一個程序使用，在鐵路系統中，係指每一段軌道或閉塞區間，同個時間內只能被一列車占用。

2. 等待（Wait for）

當一個程序無足夠的資源可用時，可以等待直到其所需資源被其他程序釋放後再繼續執行，以鐵路系統來說，列車可以等待直到其所要進入的軌道被釋放後，再繼續行駛。

3. 非搶占（No Preemption）

一個程序只能在前一個程序釋放資源後才能使用該資源，而不能直接搶用，同樣在鐵路系統裡，列車必須在前一列車駛離軌道後，才能進入該軌道。

4. 循環等待（Circular Wait）

系統內會發生兩個以上程序互相等待對方釋放資源，形成一個封閉循環的情況，對應到鐵路系統就是發生如圖 3-12 的情況，列車 1 等待列車 4 離開、列車 4 等待列車 2 離開、列車 2 等待列車 3 離開，而列車 3 又在等待列車 1 離開，如此一直不斷反覆地等待下去。

然而，電腦系統與鐵路系統的特性全然不同，因此資訊科學領域所提出的死結解決方法，並不能直接應用於列車運轉死結問題，不過可作為借鏡，綜觀這些方法的策略有以下三種^[16]：

1. 偵測與回復 (Deadlock Detection and Recovery)

在系統運作的過程中能夠自動偵測死結的發生，一旦發生死結，則中斷或重啟造成死結的其中一個程序，或者將系統回復到死結發生前的狀態，然後重新安排各程序的執行順序。此策略為資訊科學界處理死結問題的主流，卻不適用於鐵路，實務上列車運轉調度時，不應該讓死結發生，然後要列車倒車回去再重開，也不可能像電腦中斷程序一樣讓列車在系統中消失；縱使在模擬時，造成死結的原因可能距離真正發生死結的時間點相當遠，例如圖 3-14 的列車 8 開出後，系統內部分列車都還可以繼續運轉，等到死結發生，即便將其回復到發生死結前一刻的狀態，仍然無法排除死結。

2. 預防 (Deadlock Prevention)

調整演算法或重新設計系統，設法移除至少一項造成死結的必要條件，讓死結不會發生，例如讓一個程序只有在確保其所需資源都足夠的情況下才能被執行，就不會有等待的行為，如此就不會發生死結。但是上述造成死結的四個必要條件中，前三項是鐵路系統運轉的基本規則，不可能移除，而第四項則跟路線配置有關，要移除只能透過施工改變路線設施，因此，此策略不適用於處理列車運轉的死結問題。

3. 避免 (Deadlock Avoidance)

此策略係在系統運作的過程中加入控制機制，隨時避免死結的發生，也就是在指派資源給程序時，避免產生循環等待的情況。過去文獻中，對於解決列車運轉死結的方法幾乎都是採取此策略，在允許列車進入下一段軌道前，先檢查是否會導致未來發生死結，若是會導致死結，則不讓該列車開行，以保持系統內所有列車均能順利運轉，有關這些避免發生死結的方法將於下一節進行說明。

3.3.3 避免發生死結的方法

過去研究針對如何避免列車運轉死結提出了許多方法，但主要的方法有 Banker's Algorithm^[17]、Petersen & Taylor Algorithm^[30]、Movement Consequence Analysis^[28]，以及 Dynamic Route Reservation^[28]等，而其他研究^[29,14,16,33]則大多以這些方法為基礎來發展，因此本節僅就這四種方法介紹其演算流程。

3.3.3.1 Banker's Algorithm

此方法最初是用於銀行業務系統（Banking System），目的在避免發生可用金錢不足的風險，後來被應用處理列車發生死結的問題上。在列車運轉的過程中，每當列車要使用下一個資源時，就透過圖 3-15 之流程來檢查是否可能導致死結發生，在此所指的資源可以是軌道段、車站或站間等，可根據要處理微觀或巨觀問題來定義之，而圖 3-15 中的符號定義為：

S_0 = 待處理的列車集合

S_1 = 已處理的列車集合

AR = 目前系統中的可用資源（Currently Available Resource）

OR = 目前某一列車已使用的資源（Currently Occupied Resource）

MR = 某一列車的的最大所需資源（Maximal Required Resource）

為了讓讀者更容易明瞭 Banker's Algorithm 的演算邏輯，以下透過兩個例子詳細說明之。

範例一如圖 3-16 之情況，列車 4 即將要離開車站 A 進入 L1 區間，以 Banker's Algorithm 來檢查是否會導致死結，一開始如圖 3-15 的流程 1，所有列車都在 S_0 之中，而 S_1 為空集合， AR 則是沒有被列車佔用的資源，包含車站 A、車站 B 和車站 C 內的一條軌道（括弧 1 表示之），以及 L3 和 L4 兩段區間，但不包含列車 4 即將要使用的 L1 區間。接著進入流程 2，從 S_0 中選取列車 1，根據其預定行駛的路線， MR 為車站 B、L2 區間、L1 區間和車站 A，而目前使用的資源 OR 為車站 B。

然後在流程 3 中發現 MR 裡的 $L2$ 和 $L1$ 區間不在 AR 或 OR 中，因此進入流程 4，而 S_0 內還有列車未處理，所以回到流程 2。

在流程 2 中選取 S_0 內的下一列車—列車 2，並設定 MR 和 OR 兩個集合，接著在流程 3 發現 MR 裡的所有資源都在 AR 或 OR 中，因此進入流程 5，將列車 2 由 S_0 移入 S_1 ，而 OR 內所有資源則移入 AR 。由於 S_0 內還有列車未移入 S_1 中，所以又再回到流程 2。如此反覆演算，其詳細過程如表 3.3，最終顯示範例一的列車 4 進入 $L1$ 區間不會導致死結發生。

而範例二如圖 3-17 之情況，同樣是檢查列車 4 進入 $L1$ 區間後是否會導致死結，其詳細演算過程請參閱表 3.4，在此不再贅述，結果顯示列車 4 進入 $L1$ 區間會導致死結發生。

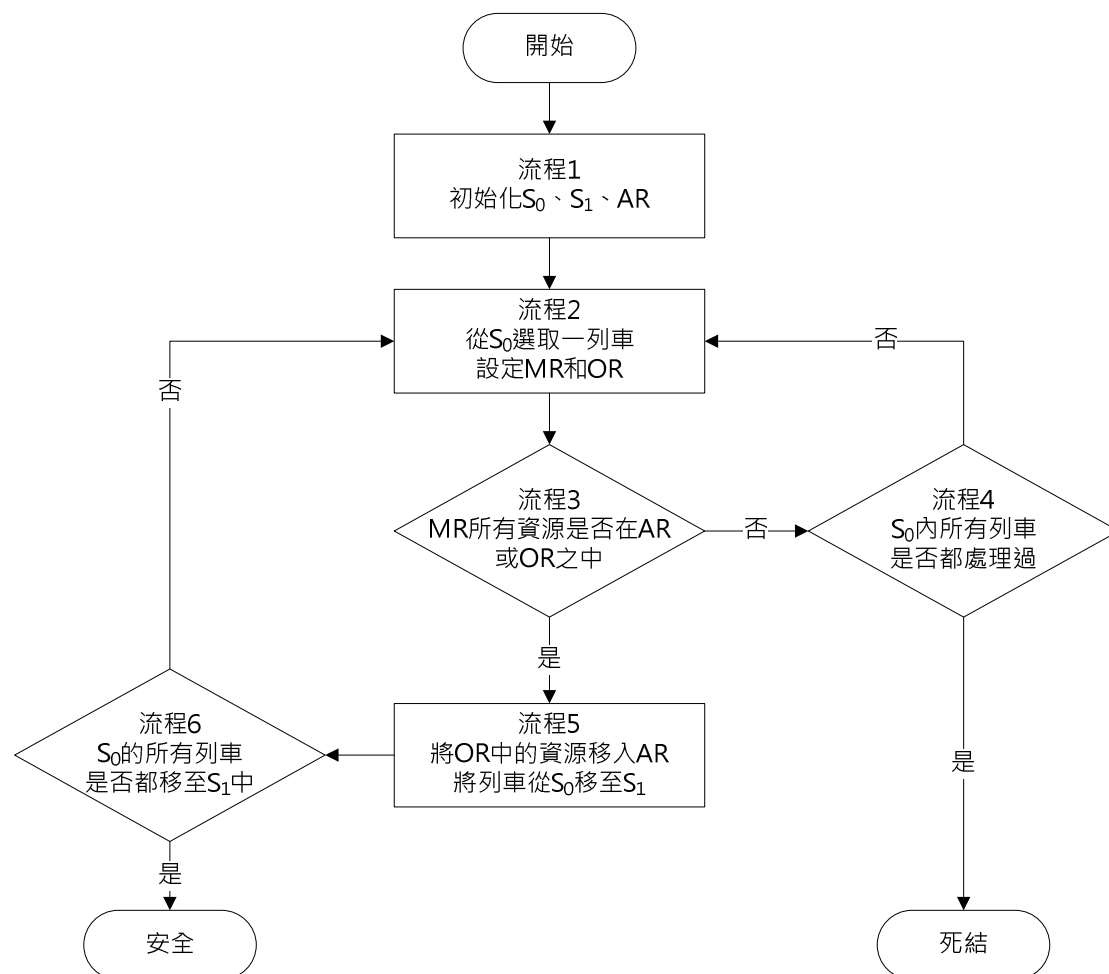


圖3-15 Banker's Algorithm 的流程圖

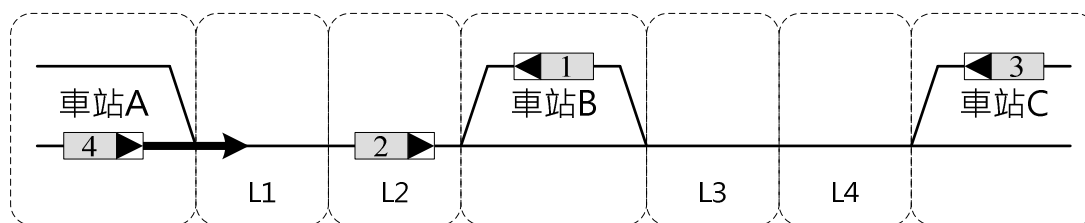


圖3-16 Banker's Algorithm 範例一

表3.3 Banker's Algorithm 範例一之演算過程

流程編號	過程說明
流程 1	$S_0 = \{\text{列車 1、列車 2、列車 3、列車 4}\}$ ， $S_1 = \{\}$ ， $AR = \{\text{車站 A(1)、車站 B(1)、L3、L4、車站 C(1)}\}$
流程 2	從 S_0 選取列車 1 $MR = \{\text{車站 B、L2、L1、車站 A}\}$ ， $OR = \{\text{車站 B}\}$
流程 3	MR 內的 L2 和 L1 不在 AR 或 OR 之中
流程 4	S_0 內的列車 2、列車 3、列車 4 還未處理
流程 2	從 S_0 選取列車 2 $MR = \{\text{L2、車站 B、L3、L4、車站 C}\}$ ， $OR = \{\text{L2}\}$
流程 3	MR 內所有資源都在 AR 或 OR 之中
流程 5	$S_0 = \{\text{列車 3、列車 4、列車 1}\}$ ， $S_1 = \{\text{列車 2}\}$ ， $AR = \{\text{車站 A(1)、L2、車站 B(1)、L3、L4、車站 C(1)}\}$
流程 6	S_0 內尚有列車沒有移入 S_1 中
流程 2	從 S_0 選取列車 3 $MR = \{\text{車站 C、L4、L3、車站 B、L2、L1、車站 A}\}$ ， $OR = \{\text{車站 C}\}$
流程 3	MR 內的 L1 不在 AR 或 OR 之中
流程 4	S_0 內的列車 4、列車 1 還未處理
流程 2	從 S_0 選取列車 4 $MR = \{\text{車站 A、L1、L2、車站 B、L3、L4、車站 C}\}$ ， $OR = \{\text{車站 A、L1}\}$

表 3.3 Banker's Algorithm 範例一之演算過程（續）

流程編號	過程說明
流程 3	MR 內所有資源都在 AR 或 OR 之中
流程 5	$S_0 = \{\text{列車 1、列車 3}\}$ ， $S_1 = \{\text{列車 2、列車 4}\}$ ， $AR = \{\text{車站 A(2)、L1、L2、車站 B(1)、L3、L4、車站 C(1)}\}$
流程 6	S_0 內尚有列車
流程 2	從 S_0 選取列車 1 $MR = \{\text{車站 B、L2、L1、車站 A}\}$ ， $OR = \{\text{車站 B}\}$
流程 3	MR 內所有資源都在 AR 或 OR 之中
流程 5	$S_0 = \{\text{列車 3}\}$ ， $S_1 = \{\text{列車 2、列車 4、列車 1}\}$ ， $AR = \{\text{車站 A(2)、L1、L2、車站 B(2)、L3、L4、車站 C(1)}\}$
流程 6	S_0 內尚有列車
流程 2	從 S_0 選取列車 3 $MR = \{\text{車站 C、L4、L3、車站 B、L2、L1、車站 A}\}$ ， $OR = \{\text{車站 C}\}$
流程 3	MR 內所有資源都在 AR 或 OR 之中
流程 5	$S_0 = \{\}$ ， $S_1 = \{\text{列車 2、列車 4、列車 1、列車 3}\}$ ， $AR = \{\text{車站 A(2)、L1、L2、車站 B(2)、L3、L4、車站 C(2)}\}$
流程 6	S_0 內無任何列車
	安全

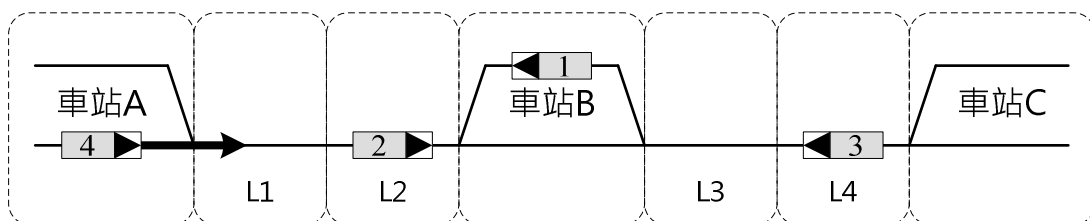


圖3-17 Banker's Algorithm 範例二

表3.4 Banker's Algorithm 範例二之演算過程

流程編號	過程說明
流程 1	$S_0 = \{\text{列車 1、列車 2、列車 3、列車 4}\}$ ， $S_1 = \{\}$ ， $AR = \{\text{車站 A(1)、車站 B(1)、L3、車站 C(2)}\}$
流程 2	從 S_0 選取列車 1 $MR = \{\text{車站 B、L2、L1、車站 A}\}$ ， $OR = \{\text{車站 B}\}$
流程 3	MR 內的 L2 和 L1 不在 AR 或 OR 之中
流程 4	S_0 內的列車 2、列車 3、列車 4 還未處理
流程 2	從 S_0 選取列車 2 $MR = \{\text{L2、車站 B、L3、L4、車站 C}\}$ ， $OR = \{\text{L2}\}$
流程 3	MR 內的 L4 不在 AR 或 OR 之中
流程 4	S_0 內的列車 3、列車 4 還未處理
流程 2	從 S_0 選取列車 3 $MR = \{\text{L4、L3、車站 B、L2、L1、車站 A}\}$ ， $OR = \{\text{L4}\}$
流程 3	MR 內的 L2、L1 不在 AR 或 OR 之中
流程 4	S_0 內的列車 4 還未處理
流程 2	從 S_0 選取列車 4 $MR = \{\text{車站 A、L1、L2、車站 B、L3、L4、車站 C}\}$ ， $OR = \{\text{車站 A、L1}\}$
流程 3	MR 內的 L2、L4 不在 AR 或 OR 之中
流程 4	S_0 內所有列車皆處理過
	死結

3.3.3.2 Petersen & Taylor Algorithm

此演算法是第一個針對鐵路列車運轉死結問題所發展出演算法，適用於每座車站內軌道配置皆是兩軌的單線區間。其計算方式非常單純，當要檢查一列車開行是否會導致死結發生時，首先定義一個起始值為 1 的計數器，從列車開行的起始點往其終點站的方向沿著路

線巡視，在巡視的過程中若遇到同向列車，則將計數器加 1；若有可供交會的側線，則將計數器減 1。當計數器的數值變成為 0，或者能順利巡視到達終點站，表示該列車開出後，兩方向的車隊還是能順利交會，不會造成死結。

以圖 3-18 為例，若列車 4 離開車站 A 進入 L1 區間，根據上述 Petersen & Taylor Algorithm 的演算結果，可以順利巡視到達列車 4 的終點，因此不會發生死結；而在圖 3-19 的例子中，同樣是檢查列車 4 進入 L1 區間，巡視到 L4 區間時發現無法再繼續下去，因此會導致死結。

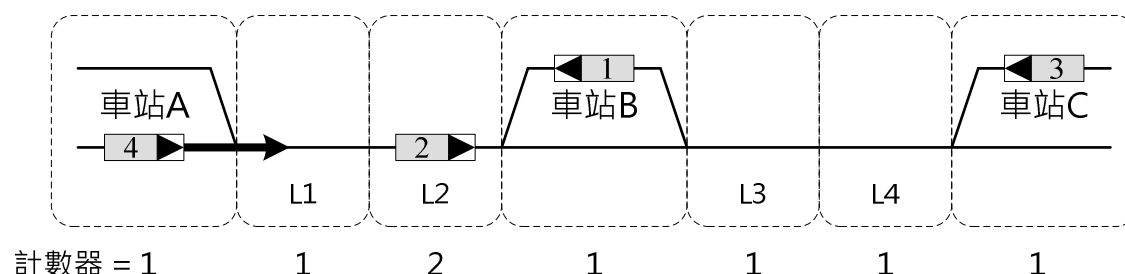


圖3-18 Petersen & Taylor Algorithm 範例一

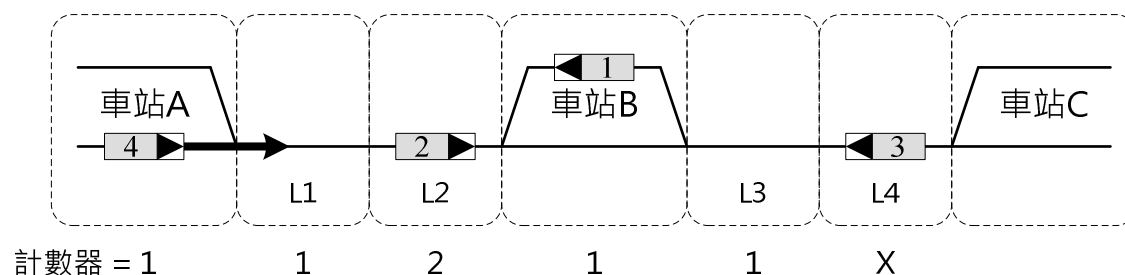


圖3-19 Petersen & Taylor Algorithm 範例二

3.3.3.3 Movement Consequence Analysis (MCA)

列車在系統中運行的過程，可視為是一系列進出各個軌道段的動作，而這些動作之間彼此有因果關係，以同一列車自身來說，離開一段軌道就是進入下一段軌道；而不同列車間，當列車要進入一段軌道

前，其先行列車一定要先離開該段軌道。在此方法中，將這些關聯的動作分為以下兩類：

1. 主要結果（Primary Consequence）

主要結果代表某一列車能夠順利往前移動的先決條件及前提，屬於其他列車的動作。主要結果來自於不同列車之間要保持安全的間距，包含：

- (1) 當列車要進入一個軌道段時，則該軌道段的列車必須先離開。如圖 3-20中列車 3 要進入軌道(12)，其主要結果便是列車 1 要進入軌道(11)。
- (2) 當列車要進入有對向列車的區間時，則最後一列對向列車必須離開該區間。如圖 3-20中列車 2 要進入軌道(11)，其主要結果便是列車 1 要進入軌道(20)。

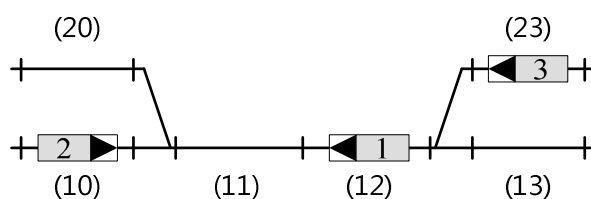


圖3-20 MCA 之必然結果定義示意圖

2. 從屬結果（Secondary Consequence）

從屬結果代表某一列車移動之後，為了不阻礙其他列車的運轉，所必須完成的延伸移動。從屬結果來自於列車本身，使其不會擋住對向列車的運行路徑。如圖 3-20中，列車 2 要進入軌道(11)，除了產生主要結果列車 1 要先進入軌道(20)之外，由於列車 2 在軌道(11)會擋住列車 3 的運行路徑，因此還會產生列車 2 進入軌道(12)和列車 2 進入軌道(13)兩個從屬結果。

當要檢查一列車開行是否會導致死結發生時，此方法首先根據該列車進入下一段軌道的動作，依上述之定義產生主要或從屬結果，而

這些結果又會再繼續產生其主要或從屬結果，最後只要這一連串的結果都不會使用到最初列車所要進入的下一段軌道，則表示不會導致死結發生。以圖 3-21 為例，列車 4 要進入軌道(11)，會產生列車 4 進入軌道(12)和列車 4 進入軌道(13)兩個從屬結果，這兩個結果中，前者會產生列車 2 進入軌道(13)的主要結果；後者產生列車 2 進入軌道(14)的主要結果，而列車 2 進入軌道(14)還會再產生列車 2 進入軌道(15)以及列車 2 進入軌道(16)兩個從屬結果，這一系列的動作彙整如圖 3-22，由於後續的結果都沒有使用最初列車 4 所要進入的軌道(11)，所以不會導致死結。

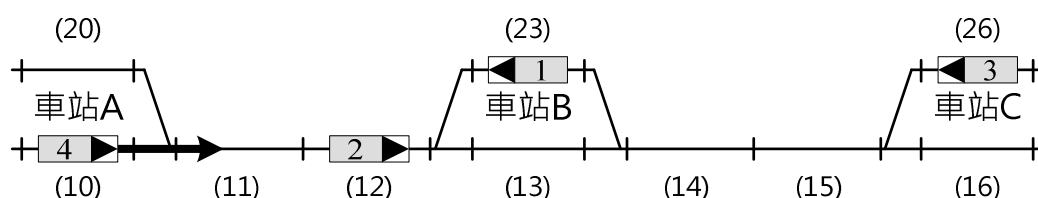


圖3-21 MCA 範例一

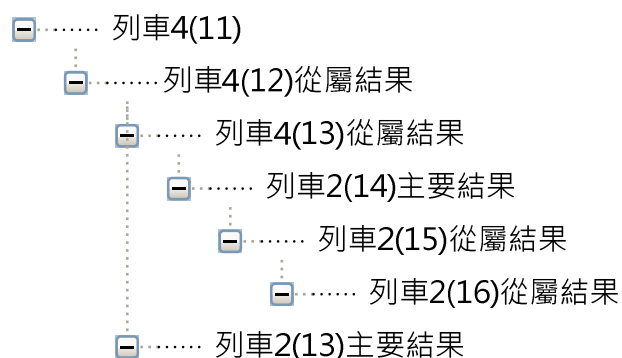


圖3-22 MCA 範例一之演算結果

另一個例子如圖 3-23，與前例相比，同樣欲檢查列車 4 要進入軌道(11)是否會導致死結，但列車 3 的位置不同。因此在列車 2 進入軌道(14)的主要結果後面還會產生列車 3 進入軌道(23)的主要結果，並繼續產生列車 1 進入軌道(12)的主要結果以及列車 1 進入軌道(11)的從屬結果，如圖 3-24 所示，此時發現列車 1 必須使用列車 4 欲進入的軌道(11)，因此表示列車 4 進入軌道(11)後將導致死結發生。

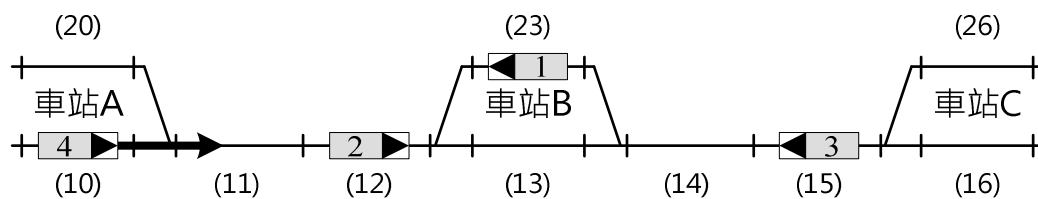


圖3-23 MCA 範例二

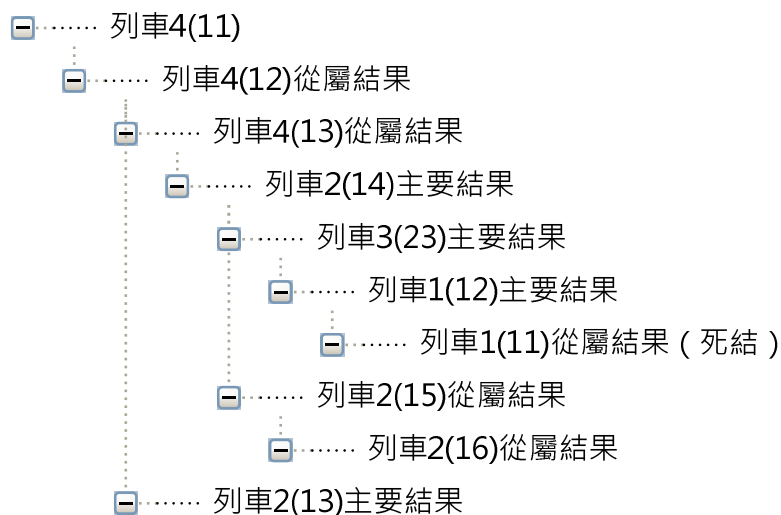


圖3-24 MCA 範例二之演算結果

3.3.3.4 Dynamic Route Reservation (DRR)

此方法是在列車運行的過程中，必須先根據一定的規則來預訂軌道，若列車無法預訂軌道，或者不是預訂的第一位，則不能進入該軌道，當列車依照預訂的次序使用軌道，便能避免死結的發生，這些預訂軌道的規則如下：

1. 規則 1

列車被授權進入一段軌道前，必須先預訂之。

2. 規則 2

若預訂的軌道是雙向使用（站內軌除外），則離開該軌道的軌道也要預訂，如圖 3-25 中的列車 1，由於車站 A 和車站 B 間的軌道皆是雙向使用，所以必須一直預訂到車站 B 的站內軌為止。

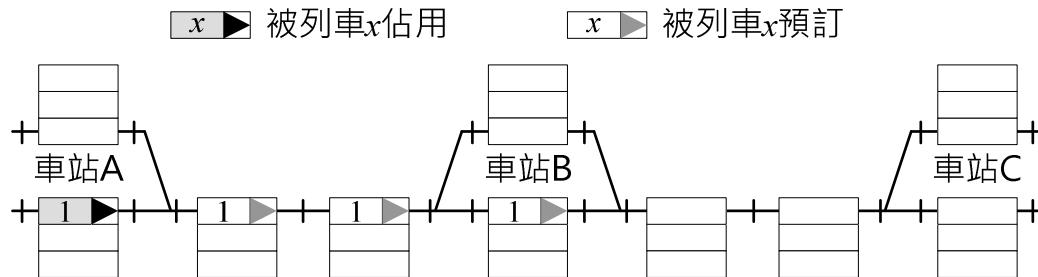


圖3-25 DRR 預訂軌道規則 2 之範例

3. 規則 3

若要預訂的軌道已經被其他列車預訂或佔用，則依序排在其他列車後面預訂，如圖 3-26 中的列車 2 於車站 B 前一區間，以及車站 B 的站內軌都必須接續在列車 1 之後預訂。

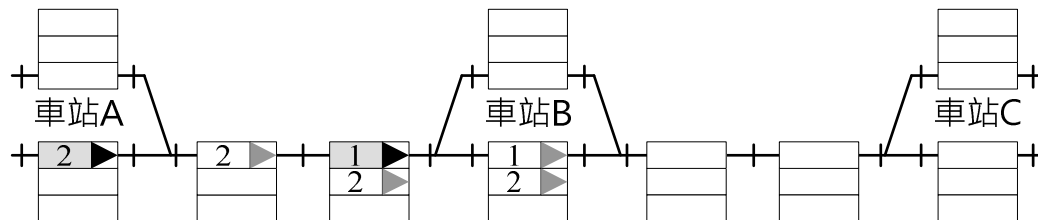


圖3-26 DRR 預訂軌道規則 3 之範例

4. 規則 4

若列車所預訂的軌道後面有其他列車預訂，則該列車必需有預訂進入下一段軌道，圖 3-26 的車站 B 之站內軌，由於列車 1 後面有列車 2 預訂，因此列車 1 還要繼續預訂其之後的軌道，如圖 3-27，根據規則 2，列車 1 必須一直預訂到車站 C 的站內軌為止。

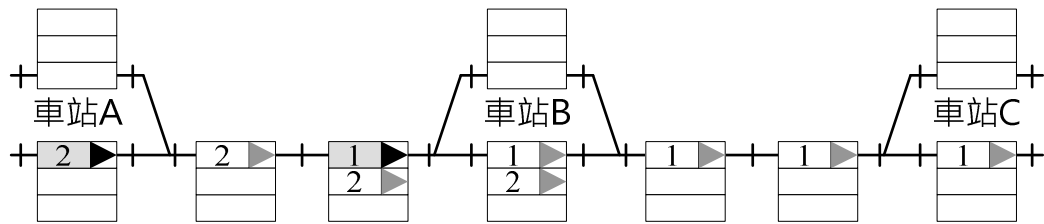


圖3-27 DRR 預訂軌道規則 4 之範例

5. 規則 5

若要預訂的軌道已經被其他反向列車預訂，而反向列車需依規則 4 預訂下一段軌道，若該下一段軌道與原列車的軌道相同，則預訂失敗，如圖 3-28 中的列車 2 於車站 B 不能預訂和列車 1 相同之軌道，但可以預訂另一條軌道。

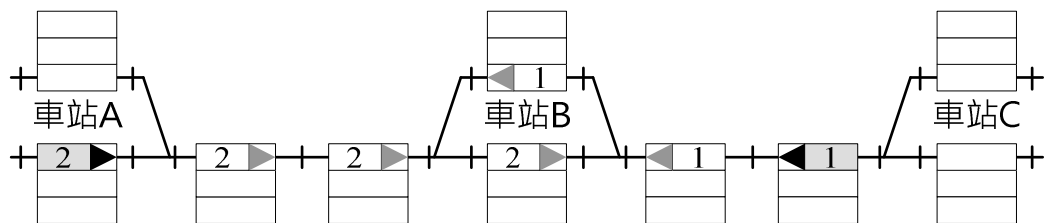


圖3-28 DRR 預訂軌道規則 5 之範例

6. 規則 6：

一個預訂可以成功的條件，包含依規則 2 和規則 4 所延伸的所有預訂也必須成功。

7. 可依實際應用情況彈性修改或增加規則

上述之規則在此透過一範例說明之，以便讓讀者可更明瞭其演算過程，首先如圖 3-29，列車 1 要離開車站 C 之前，根據規則 2 要先預訂車站 C 到車站 B 之間的兩段站間軌，以及車站 B 的站內軌，由於列車 1 是第一位預訂的列車，因此可以順利進入下一段軌道。接著進行到列車 2 要離開車站 A，如圖 3-30，此時列車 1 已經移動至車站 C

與車站 B 之間，而列車 2 則依規則 2 預訂了後續的軌道，也可以順利運行至下一段軌道。

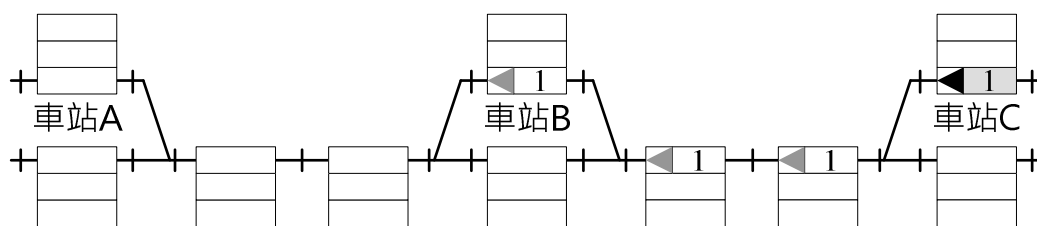


圖3-29 DRR 範例之演算過程 1

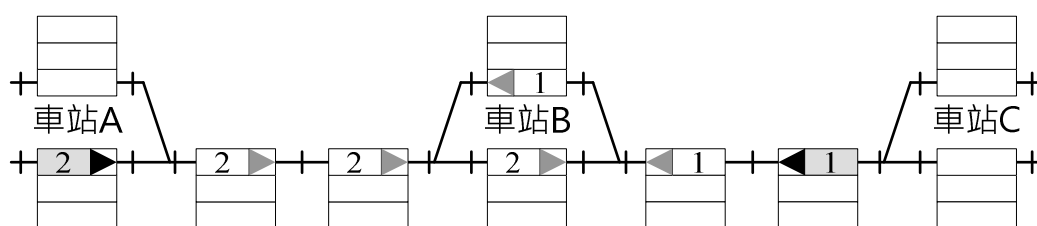


圖3-30 DRR 範例之演算過程 2

隨著時間來到了如圖 3-31，列車 1 和列車 2 都行駛至站間，而列車 3 要離開車站 C，依規則 2 預訂了其後續的軌道，而列車 1 於車站 B 預訂的站內軌，則依規則 4，必須繼續預訂至車站 A 的站內軌。之後進行如圖 3-32 之情況，此時列車 1 以經進入車站 B，列車 2 和列車 3 還在站間行駛，而列車 4 要離開車站 A，根據預訂軌道的規則 3，列車 4 只能接續列車 1 後面預訂車站 A 至車站 B 的站間軌，由於列車 4 不是第一位預訂，因此還不能離開車站 A 進入站間軌，否則將導致死結發生。

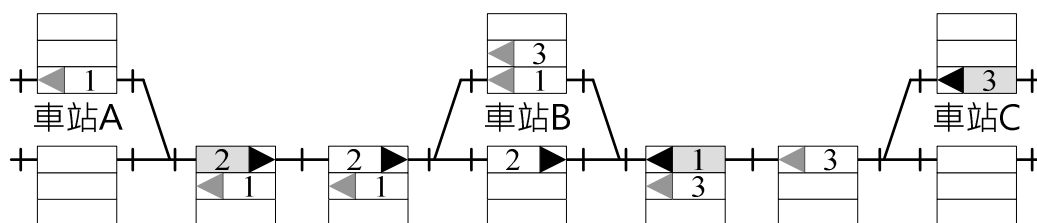


圖3-31 DRR 範例之演算過程 3

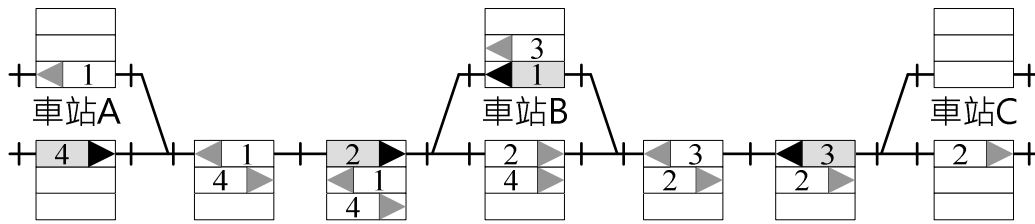


圖3-32 DRR 範例之演算過程 4

3.3.4 小結

綜整上節所介紹的各種方法，其最基本的概念都是透過檢查區間內是否有足夠的軌道供列車進行交會，來避免列車運轉發生死結。Banker's Algorithm 和 Petersen & Taylor Algorithm 兩方法主要是透過計算數量，來評估軌道是否足夠列車交會，然而列車佔用軌道的情形是隨時間一直變動，為了確保列車到達時能順利交會，不會造成死結，這兩個方法的評估較為保守。有鑑於此，MCA 和 DRR 兩方法則加入了軌道使用情況的動態考量，因此能更精確地判斷，但其演算過程就較為複雜。

比較四種方法之優劣如表 3.5，Banker's Algorithm 雖然單純容易，但較為保守，且每次評估須檢視系統內所有列車至少一次以上，效率較差。Petersen & Taylor Algorithm 同樣是可簡單快速判定死結，不過僅適用於各車站內皆是兩軌的單線區間。而 MCA 雖然有考量軌道使用的動態，並且每次檢查只須檢視可能有影響的列車，效率較好，但最大的問題在於過程複雜、不夠直觀。

最後 DRR 有 MCA 的優點，雖然要制定許多繁雜的規則，不過這些規則大多是將實務上列車的運作方式條列化，並具有調整的彈性。DDR 的演算過程中，比其他方法需要維護較多資料，如軌道的預訂與使用狀況，但操作上卻相當直觀，若未來開發成工具程式，則維護資料工作就交由電腦處理，因此本研究決定採用 DRR 作為處理死結的方法來發展模式。

表3.5 各種避免死結的方法之優劣比較

方法名稱	優點	缺點
Banker's Algorithm	<ul style="list-style-type: none"> • 流程單純 • 容易實作 	<ul style="list-style-type: none"> • 演算效率較差 • 較保守
Petersen & Taylor Algorithm	<ul style="list-style-type: none"> • 規則簡單 • 運算快速 	<ul style="list-style-type: none"> • 適用範圍小 • 較保守
MCA	<ul style="list-style-type: none"> • 考量軌道使用的動態 • 僅須檢視有影響的列車 	<ul style="list-style-type: none"> • 演算過程複雜且不直觀 • 不易實作
DRR	<ul style="list-style-type: none"> • 考量軌道使用的動態 • 規則具有調整的彈性 	<ul style="list-style-type: none"> • 規則較繁雜 • 運算時需維護較多資料

第四章 單線連續區段軌道容量分析模式

本章從單線連續區段軌道容量分析模式的架構與基本概念開始，逐一介紹模式操作的內容細節，並於最後以一範例對模式運作方式進行展示。

4.1 模式架構

本研究係以本所容量系列研究的成果為基礎，繼續發展單線連續區段容量分析模式，與過去單一區段容量分析模式的整體架構如圖 4-1，本模式的輸入參數除了來自單一區段容量模式原有之輸入，如車站參數、站間運轉時間、停站時間和交通組成等，也納入了單一區段容量模式之部分輸出，如進站和離站號誌安全時距。

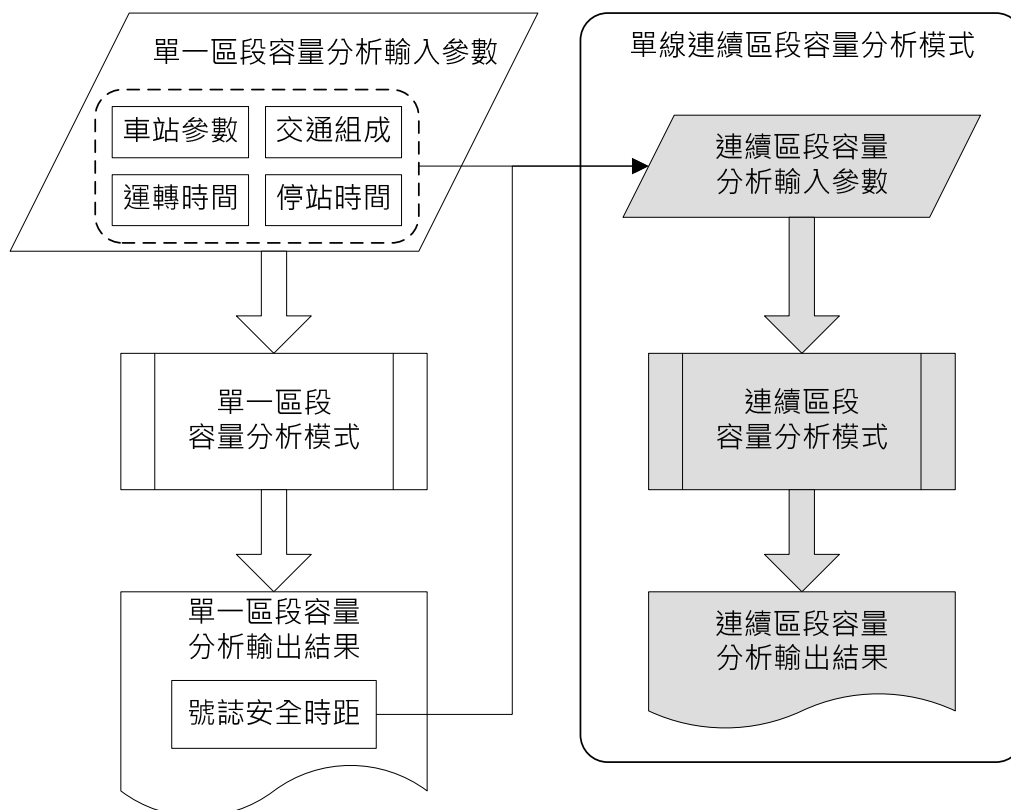


圖4-1 單線連續區段與單一區段容量分析模式整合架構圖

4.2 基本概念

容量可視為最大頻率或最大流率，也就是每單位時間最多可通過多少列車，因此本模式演算的基本概念如圖 4-2所示，在一個連續單線運轉的路線兩端不斷地發送列車，透過模擬方法將列車依運轉基本規則推進至終點站，最後觀察單位時間內列車到達兩端終點站的情況，藉此來評估此連續區段之容量。

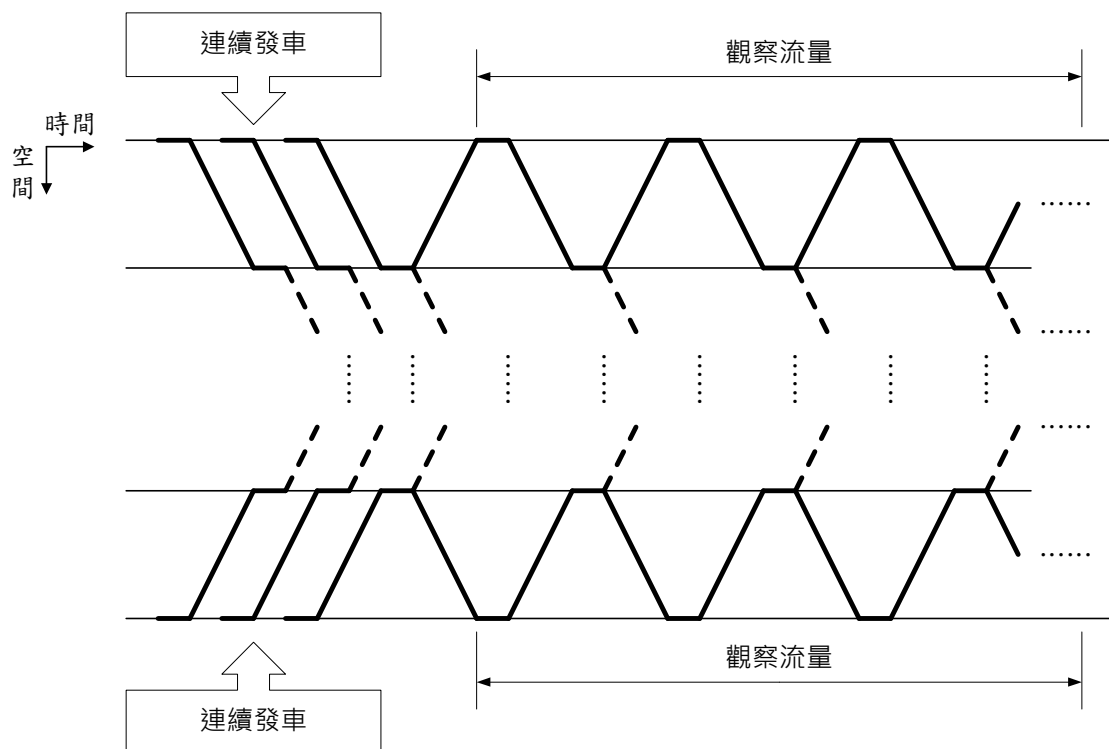


圖4-2 單線連續區段容量分析模式之演算概念

本模式對於模擬列車從兩端點運行到終點的運轉過程，採用了離散事件導向（Discrete Event-Oriented Simulation）的系統模擬方法，其中組成離散事件模擬之要素，如實體（Entity）、資源（Resource）、事件（Event）、規則（Rule）與狀態（State）等，本模式與之對應項目如表 4.1所示。

表4.1 單線連續區段容量分析模式與離散事件模擬組成要素對應表

組成要素	對應項目
實體	列車
資源	站間軌道、站內軌道
事件	列車到站、列車離站
規則	列車運轉基本規則
狀態	列車佔用軌道的情況

在模式中係以每列車到達和離開各車站的運行過程當作成一連串的事件，如圖 4-3所示，列車 n 於車站 k 到站事件的時間為 $t_A(n,k)$ ，離站事件的時間為 $t_D(n,k)$ 。隨著事件依序發生，系統的時間便會不斷往前推進，同時也會改變列車佔用軌道的情況，其中軌道分為兩類：一類為站間軌，站間軌皆為雙向使用，可讓多列同向列車接續通過，但不能同時存在有相反方向的列車；另一類為站內軌，站內軌可為雙向或某一方向使用，一次只能讓一列車佔用。

而整個在模擬過程中，透過調整事件的發生時間，來避免系統不會發生死結，並確保各列車遵循運轉基本規則運行，當所有事件都完成後，便結束模擬。

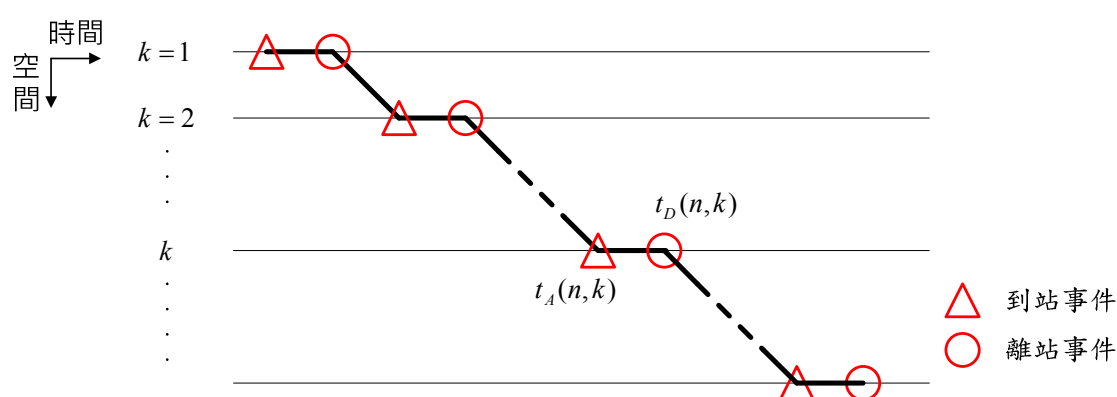


圖4-3 列車到站事件和離站事件示意圖

4.3 假設條件

本模式在模擬的過程中，列車遵循著運轉基本規則運行，包括(1)先續行列車要保持足夠的號誌時距；(2)列車在站間運行時不能追越前車，亦不能與反向列車發生對撞；(3)站內列車數不可超過股道數量。

由於本模式目的在求取「實用容量」，也就是「時刻表容量」，而非「最大容量」，因此進行模擬還要保持車的站間運轉時間不變，以及列車於各車站的停站方式不變。

此外為了便於模式的發展與操作，本模式在應用上有以下假設條件：

1. 分析範圍內各車站之間皆為單線

本模式之目標在於求取單線連續區段之容量，因此分析範圍內的各車站之間皆為單線。若面臨單、複線交錯混雜的路線，本模式可處理其中單線的部份，而複線的部份則可由本所已發展的複線容量模式來求取容量。

2. 所有列車均行經連續區段中的每個區段

在本模式所分析的路線範圍中，每一列車皆從路線的始發站出發，經過中間所有的區段最後到達終點站，而沒有列車以中間的任何車站作為起迄點。在實際應用時，可根據列車運轉特性與範圍，切分為數個連續區段進行分析。

3. 列車於路線起迄車站皆有停靠

本模式假設列車於路線的始發站必須停靠後才能出發，而在到達終點站時也必須停靠後才能離開路線，此外對於行經的中間車站是否停靠則沒有限制。若實際應用時，有列車不停靠始發站或終點站的狀況，則可以設定為停靠極短暫的時間，例如 1 秒鐘。

4. 雙向列車的數量與車種組成皆相同

與實務上會考量列車雙向平衡相同，在本模式所分析的路線範圍內，從兩端點站出發的列車數量相同，且車種組成的比例也相同。其中雖然車種組成相同，但不表示兩端列車的車種順序相同，模式中會依比例分別隨機決定雙向列車的車種。

4.4 整體流程

圖 4-4為本模式的模擬流程，首先依照交通組成決定各列車的車種，根據該車種的運轉時間和停站時間設定來產生列車的到站與離站事件，並將每列車的第一個事件放入事件列表中。接著便依照事件預計發生的時間先後逐一處理列表中的事件，處理的過程包含預訂軌道、進行檢核，若還不能使用軌道或沒通過檢核，則計算後移量，調整事件的發生時間後，將事件放回事件列表中；若可以使用軌道且通過檢核，則表示該列車可以完成該事件，然後將列車的下一事件放入事件列表。如此反覆進行，直到事件列表中的所有事件都完成為止，便能根據列車到達終點站的時間來評估容量。對於整個過程中的車種決定方式、預訂軌道機制、檢核機制、後移量之計算、回溯機制以及評估路線容量等流程，如圖 4-4中灰色區塊，則分別詳細說明如下。

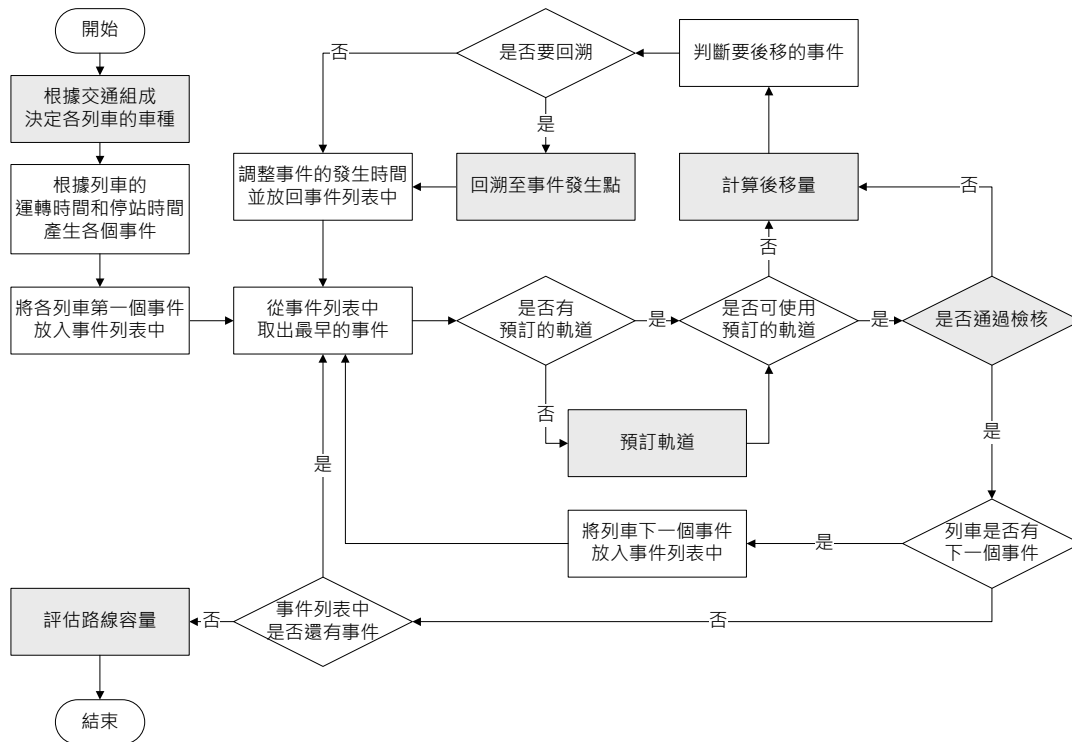


圖4-4 單線連續區段容量分析模式整體流程圖

4.4.1 車種決定方式

在決定車種方面，首先依車種組成的比例以公式(4.1)計算各車種出現的機率，根據此機率來決定列車的車種，雙向各列車都是採用相同的機率來決定車種，不會受前一系列車或對向列車影響，亦即相互獨立。

$$P_{\tau} = \frac{n_{\tau}}{\sum n_{\tau}} \quad (4.1)$$

式中： P_{τ} = 第 τ 種車種的出現機率

n_{τ} = 交通組成中第 τ 種車種所占的比例

4.4.2 預訂軌道機制

就如 3.3.4 節所述，本模式採用了 DRR 方法來避免在模擬的過程中發生列車打死結的情形，因而在演算流程中有了預約軌道的機制，但為了切合本模式的應用，各項規則調整為：

1. 規則一：列車被授權進入一段軌道前，必須先預訂之，如圖 4-5 之列車 1 在離開車站 A 之前，須先預訂車站 A 到車站 B 的站間軌。

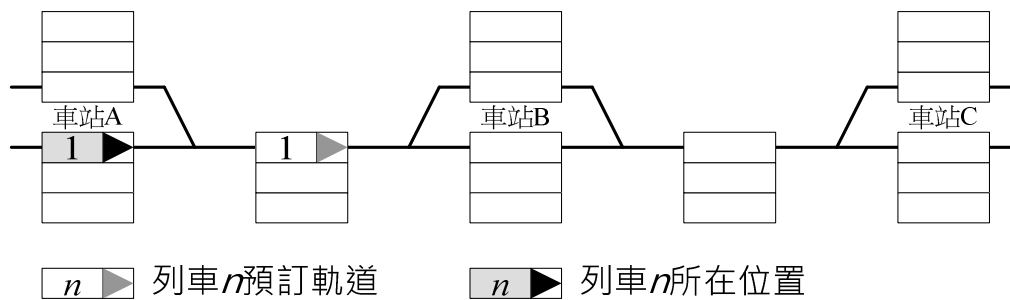


圖4-5 軌道預訂規則一範例

2. 規則二：預訂的若是站間軌道，則須再預訂下一段軌道，如圖 4-6 之列車 1 除了預訂車站 A 到車站 B 的站間軌之外，還須繼續預訂車站 B 的站內軌。

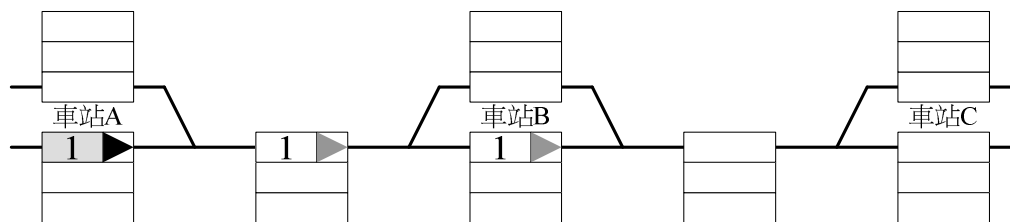


圖4-6 軌道預訂規則二範例

3. 規則三：預訂的若是站內軌道，但列車於該站不停站，也須再預訂下一段軌道，如圖 4-7 之列車 1 不停靠車站 B，所以須繼續預訂車站 B 到車站 C 的站間軌，同時因為規則二，便一路預訂至車站 C。

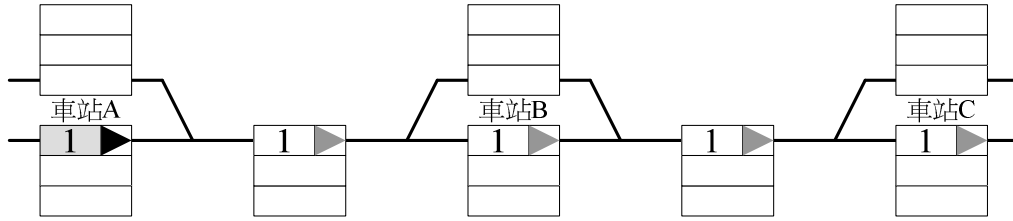


圖4-7 軌道預訂規則三範例

4. 規則四：當列車使用完軌道後，將其從列表中標記為已使用，如圖 4-8之列車 1 進入車站 A 到車站 B 的站間軌後，原來於車站 A 所使用的站內軌則標記為已使用。

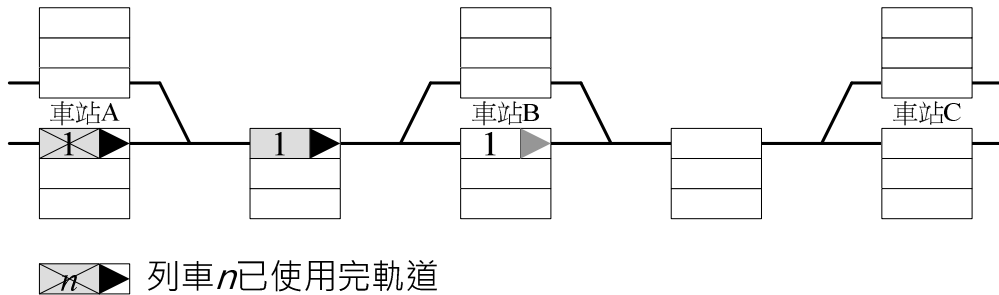


圖4-8 軌道預訂規則四範例

5. 規則五：若要預訂的軌道已經被其他列車預訂或佔用，則依序排在其他列車後面預訂，如圖 4-9，列車 2 接續在列車 1 後面預訂軌道。

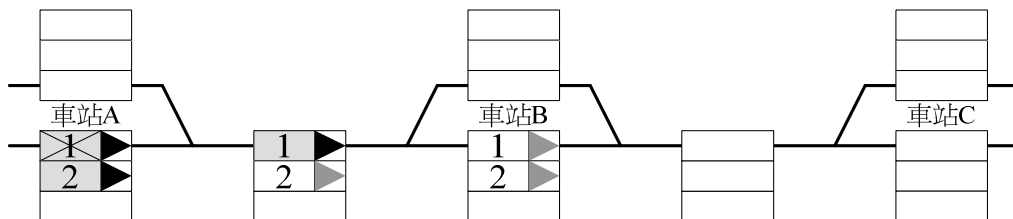


圖4-9 軌道預訂規則五範例

6. 規則六：若列車所預訂的軌道後面有其他列車預訂，則該列車必需有預訂進入下一段軌道，圖 4-9中的列車 1 於車站 B 所預訂的軌道後面有列車 2 預訂，因此必須預訂後續的軌道，如圖 4-10。

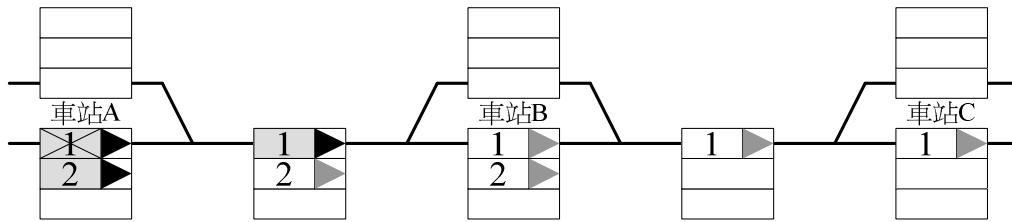


圖4-10 軌道預訂規則六範例

7. 規則七：若某一列車要預訂的軌道已經被其他反向列車預訂，而反向列車需依規則六預訂下一段軌道，若該下一段軌道已經被原列車預訂，則預訂失敗，如圖 4-11 之列車 3 若接續在列車 2 預訂車站 B 的站內軌，而列車 2 依規則六所需預訂的下一段軌道剛好又是被列車 3 所預訂，因此列車 3 於車站 B 的預訂失敗。

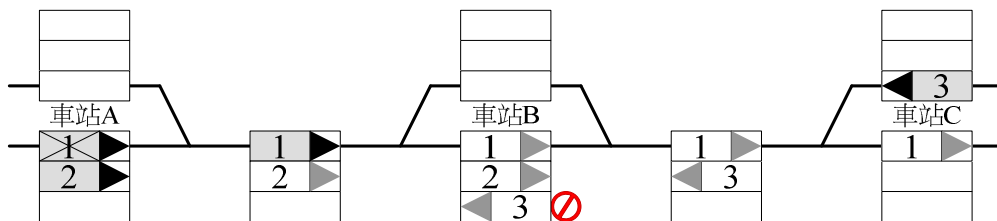


圖4-11 軌道預訂規則七範例

8. 規則八：一個預訂可以成功的條件，包含依規則二、規則三和規則六所延伸的所有預訂也必須成功。以圖 4-12 為例，由於列車 3 預訂車站 B 的站內軌失敗，因此連車站 B 到車站 C 站間軌的預訂也失敗，若例子改為如圖 4-13，則列車 3 所有的預訂都可以成功。

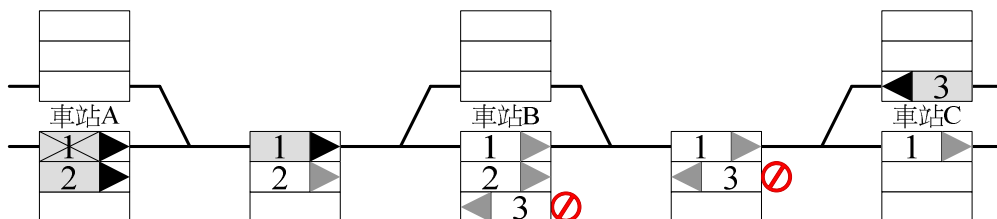


圖4-12 軌道預訂規則八範例 1

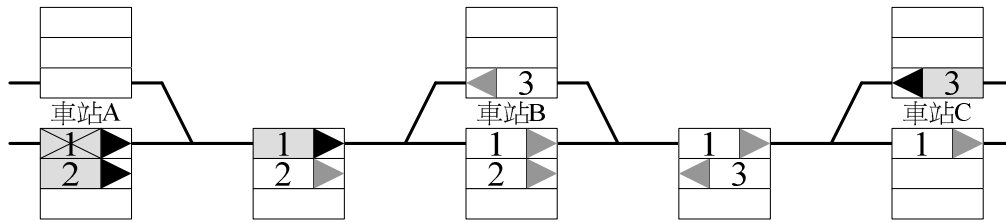


圖4-13 軌道預訂規則八範例 2

9. 規則九：列車必須是第一位預訂者，才能使用站內軌。若是使用站間軌，即使不是第一位預訂者，只要與前一列車的運轉方向相同便可接續使用，如圖 4-14中之列車 2，由於與列車 1 運轉方向相同，因此可接續使用車站 A 到車站 B 的站間軌。

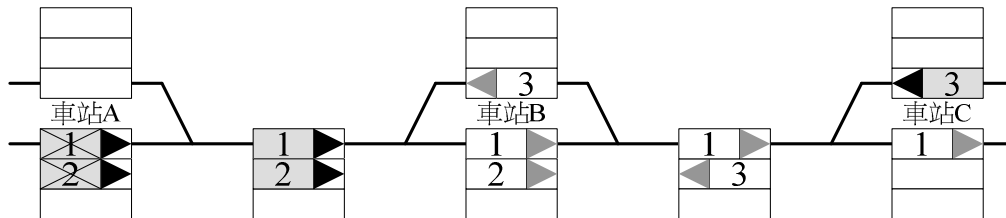


圖4-14 軌道預訂規則九範例

10. 規則十：列車在預訂站內軌時，若要追越同向的先行列車時，則不能預訂與同向先行列車相同的軌道，如圖 4-15中之列車 2 若要在車站 B 追越列車 1，則不能預訂與列車 1 相同的軌道，而是另一條軌道。而模式中對於列車可進行追越的條件為：

- (1) 列車於車站內不停靠，而其同向的先行列車為慢車，且有停靠。
- (2) 列車與其同向的先行列車於前一站間為相鄰列車，亦即兩列車之間沒有其他列車，如圖 4-16(A)的列車 1 與列車 2 為相鄰列車，而圖 4-16(B)的列車 1 與列車 2 為不相鄰。
- (3) 車站內有足夠的軌道進行追越，亦即除了同向先行列車所預訂的軌道之外，在符合預訂規則的前提下，還有其它軌道可供預訂。

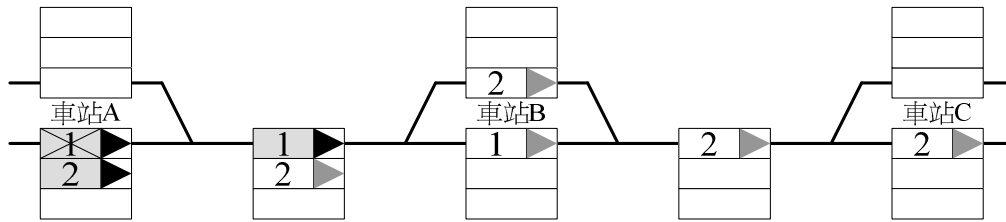


圖4-15 軌道預訂規則十範例

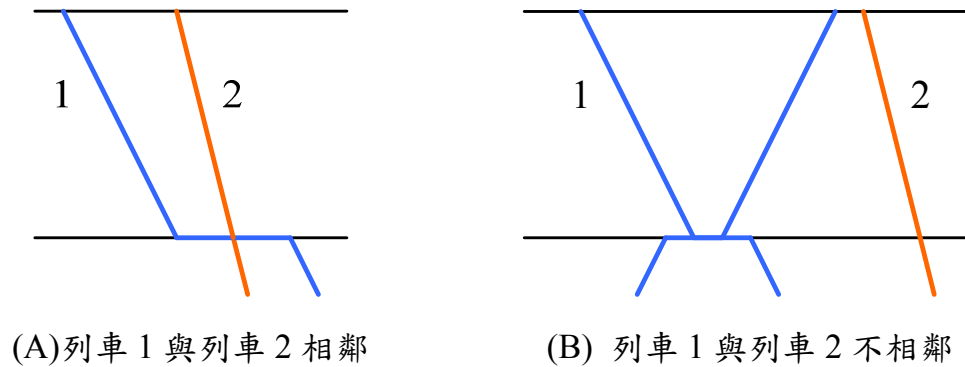


圖4-16 列車追越條件範例

預訂軌道的流程如圖 4-17所示，當列車 n 要預約軌道 s ，一般情況下列車 n 要繼續預訂下一段軌道，直到所預訂的軌道為站內軌且列車有停站為止。但若列車 n 不是第一位預約者，且前一位預訂的列車沒有預訂其後續的軌道，則前一系列車要繼續預訂其後續軌道。此時如果前一系列車的後續軌道同樣為軌道 s ，或者後續的預訂無法順利進行，而列車 n 也沒有其它軌道可選擇，則整個預訂流程失敗。

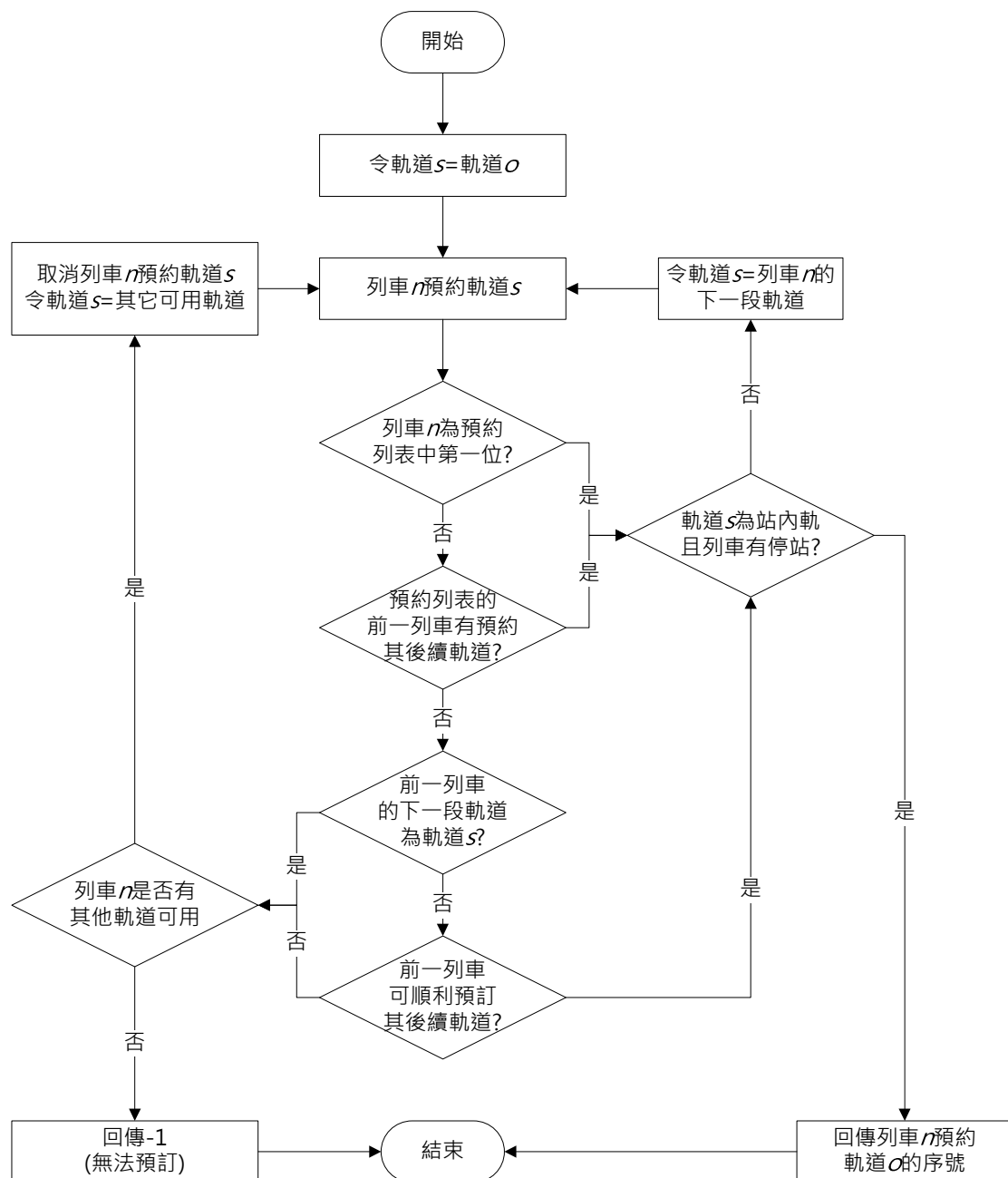


圖4-17 預訂軌道機制之流程圖

4.4.3 檢核機制

檢核的目的為確保在模擬的過程中，各列車之間能保持足夠的號誌安全時距、在車站內不會同時佔用同一股道，以及在站間避免發生列車追越或對撞等運轉基本規則，其中號誌安全時距包含同股道到站、不同股道到站、同股道離站、不同股道離站，以及反向交會等五種，如表 4.2。

表4.2 五種號誌安全時距符號定義

先續行列車運轉方向	號誌時距種類	同一股道	不同股道
同向	到站	$T_{s,A1}$	$T_{s,A2}$
	離站	$T_{s,D1}$	$T_{s,D2}$
反向	—	—	$T_{s,M}$

而根據事件的類型，檢核的項目有所不同，如表 4.3所示。關於檢查站間追撞先行列車方面，如圖 4-18，續行列車的到站時間不能比先行列車還早，因此要通過檢查的條件為 $t_A(n,k) > t_A(m,k)$ ；而在檢查站間對撞反向列車方面，如圖 4-19，續行列車的離站時間必須在反向列車到站後之後，因此通過檢查的條件為 $t_D(n,k) > t_A(m,k)$ 。至於號誌安全時距方面的檢查則整理於表 4.4，而站內軌道重複佔用方面，由於列車之間已經被號誌時距隔開，所以不用再做額外檢查。

表4.3 事件類型與檢核項目對照表

事件類型	檢核項目
到站事件	<ul style="list-style-type: none"> ● 站間追撞先行列車 ● 站內軌道重複佔用 ● 與同向到站列車號誌時距不足
離站事件	<ul style="list-style-type: none"> ● 站間對撞反向列車 ● 與同向離站列車號誌時距不足 ● 與反向進站列車號誌時距不足

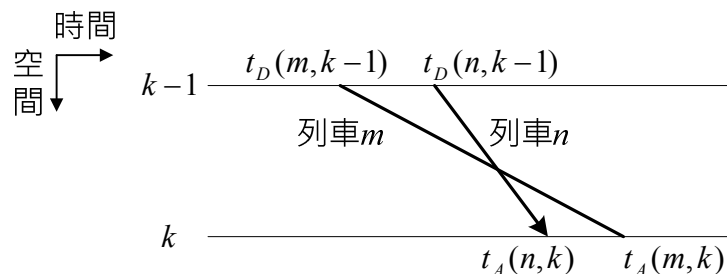


圖4-18 檢查列車是否於站間追撞先行列車示意圖

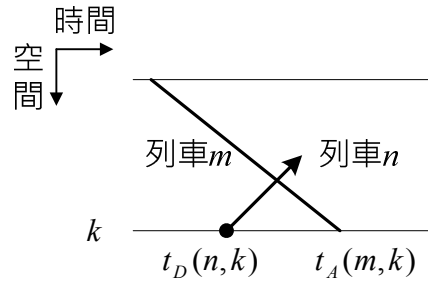


圖4-19 檢查列車是否於站間對撞反向列車示意圖

表4.4 通過號誌安全時距檢查的條件

先續行列車 運轉方向	號誌時距 種類	同一股道	不同股道
同向	到站	$t_A(n, k) - t_A(m, k) \geq T_{s, A1}$	$t_A(n, k) - t_A(m, k) \geq T_{s, A2}$
	離站	$t_D(n, k) - t_D(m, k) \geq T_{s, D1}$	$t_D(n, k) - t_D(m, k) \geq T_{s, D2}$
反向	—	—	$t_D(n, k) - t_A(m, k) \geq T_{s, M}$

4.4.4 後移量計算

當列車還不能使用預訂的軌道或檢核機制不通過時，如圖 4-20～圖 4-24 等情況，則是將該事件的發生時間延後，而時間的後移量 Δt 在不同的狀況下有不同的計算方式，表 4.5 為各種情況下的後移量計算方式。由於調整時間後的事件可能比事件處理列表中的其他事件更晚發生，因此必須將該事件重新放入事件處理列表中等待處理，以確保所有事件皆按照時間先後順序發生。

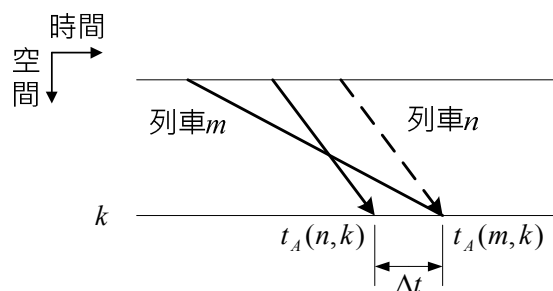


圖4-20 站間追撞先行列車時的後移量計算示意圖

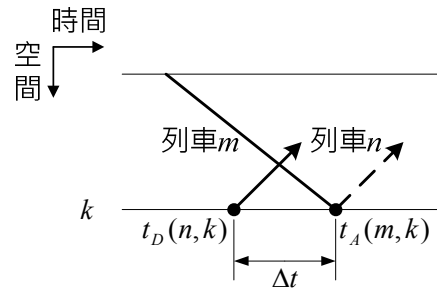


圖4-21 站間對撞反向列車時的後移量計算示意圖

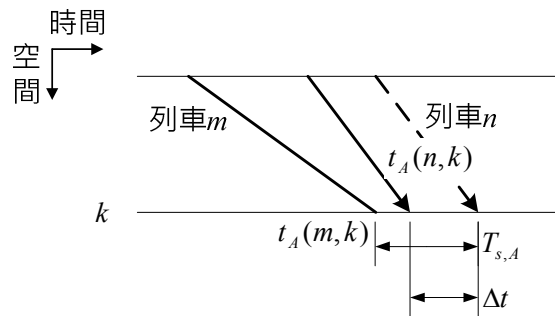


圖4-22 到站號誌時距不足時的後移量計算示意圖

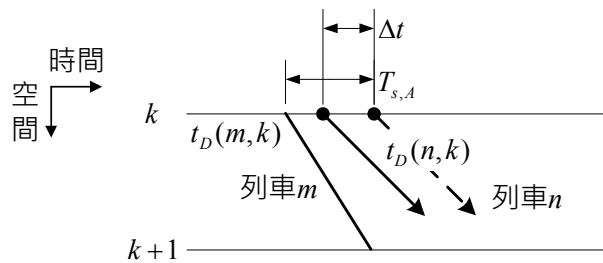


圖4-23 離站號誌時距不足時的後移量計算示意圖

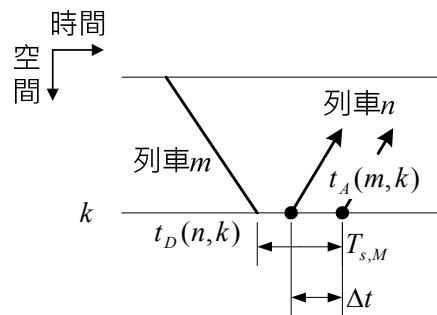


圖4-24 反向交會號誌時距不足時的後移量計算示意圖

表4.5 不同情況下的後移量計算方式

檢核不通過的情況	後移量計算方式
還不可使用預訂的軌道	$\Delta t = t_r - t_A(n, k)$ 或 $\Delta t = t_r - t_D(n, k)$
站間追撞先行列車	$\Delta t = t_A(m, k) - t_A(n, k)$
站間對撞反向列車	$\Delta t = t_A(m, k) - t_D(n, k)$
同股道到站號誌時距不足	$\Delta t = T_{s,A1} - t_A(n, k) + t_A(m, k)$
不同股道到站號誌時距不足	$\Delta t = T_{s,A2} - t_A(n, k) + t_A(m, k)$
同股道離站號誌時距不足	$\Delta t = T_{s,D1} - t_D(n, k) + t_D(m, k)$
不同股道離站號誌時距不足	$\Delta t = T_{s,D2} - t_D(n, k) + t_D(m, k)$
反向交會號誌時距不足	$\Delta t = T_{s,M} - t_D(n, k) + t_A(m, k)$

註： t_r 為前一個預約的預計發生時間

4.4.5 回溯機制

本模式所要求取的為時刻表容量，因此在整個模擬的過程中，列車的運轉時間不可任意改變，但在預訂軌道或檢核機制不成功時，可能需要調整列車到站事件的發生時間，這將使得列車無法按照時刻表所規定的運轉時間運行，如圖 4-25，因此在調整列車到站事件的時間時，必需從上一個停站處的離站事件來調整，如圖 4-26。

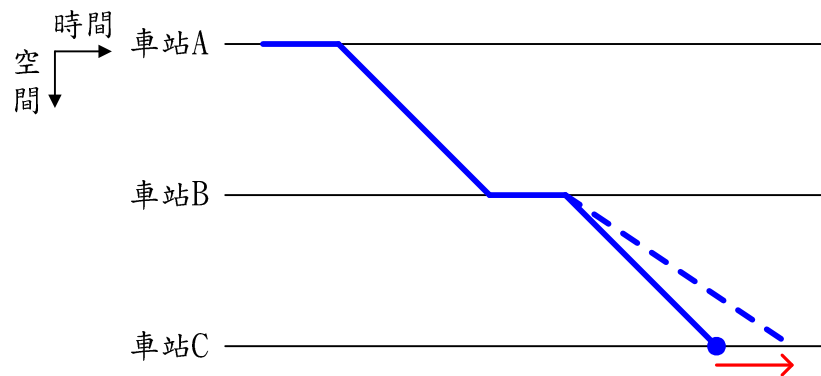


圖4-25 僅調整進站事件會影響運轉時間

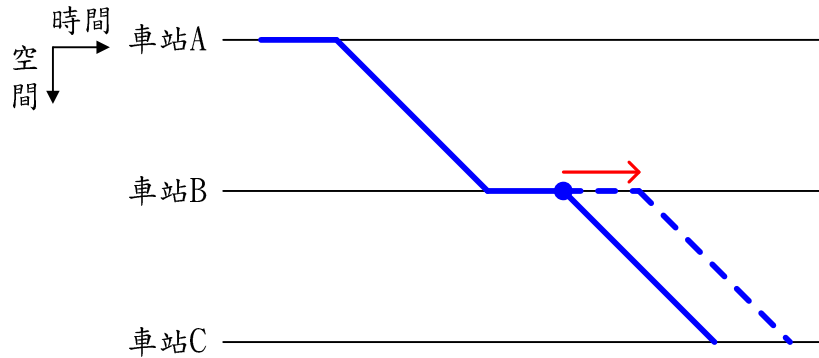


圖4-26 從前一離站事件進行調整不影響運轉時間

然而，調整了上一個停站處離站事件的時間，可能還會進而影響後續的其他事件，因此本模式加入回溯機制，將系統的狀態回復到該列車上一停站處離站事件的時間點，如此將該時間調整後再繼續進行模擬，便能把後續對其他事件的影響納入考慮。

回溯機制所要回復的狀態包含事件列表，以及各個軌道預約列表的使用情況，回復此兩列表的方法說明如下：

1. 事件列表

在模擬過程中，每次從事件列表所取出的事件可以成功執行時，則將該事件放入另一個已執行列表中，當系統要進行回溯時，則從這個已執行列表裡，把回溯時間點之後的事件全部依序搬回事件列表，再將多餘事件刪除（同一列車僅保留最早發生之事件），如此便完成事件列表的系統回溯。

2. 軌道預約列表的使用情況

在4.4.2節中說明每當列車使用完軌道後，會在該軌道的預約列表中標記為已使用，在進行回溯時，若使用軌道的時間在回溯時間點之後，則重新標記成未使用，即可回復預約列表的使用情況。

4.4.6 路線容量評估

由於模擬模式在開始進行模擬之初須經歷一段暖機階段，而在模擬接近結束之前，也會有一段列車陸續離開系統但不再有列車進入系

統的階段，在評估容量時不應將此兩階段納入考量，故本模式評估容量所使用的時間範圍，從雙向都有列車到達終點站開始，直到其中一方向的最後一列車離開始發站為止，如圖 4-27 所示。

此外，鐵路系統中的號誌轉換、轉轍器操作、停車時間以及列車運轉過程均為隨機程序（Stochastic Process），不可能百分之百精準地依預定的計畫來運作，因此運轉計畫中，列車的運轉時隔必須加計運轉寬裕時間，以備列車因故延誤時有趕點的空間。實務上，在排點時大多是以經驗值，或是以 30 秒進整的方式來加入寬裕，但本研究認為當平均時隔愈大，其產生的變異也愈大，應保留較大的運轉寬裕時間以確保時刻表的穩定度，所以本模式以按比例計算的方式來決定寬裕。

綜整上述對本模式的路線容量計算方式的說明，其數學公式為：

$$\bar{h} = \frac{t_A(n) - t_A(1)}{n} \times (1 + \beta) \quad (4.2)$$

$$C = \frac{3600}{\bar{h}} \quad (4.3)$$

式中： \bar{h} = 平均時隔（s）

$t_A(n)$ = 時間範圍內最後一列到達終點站的時間（s）

$t_A(1)$ = 時間範圍內第一列到達終點站的時間（s）

n = 時間範圍到達終點站的列車數

β = 運轉寬裕時間係數

C = 路線容量（TU/h）

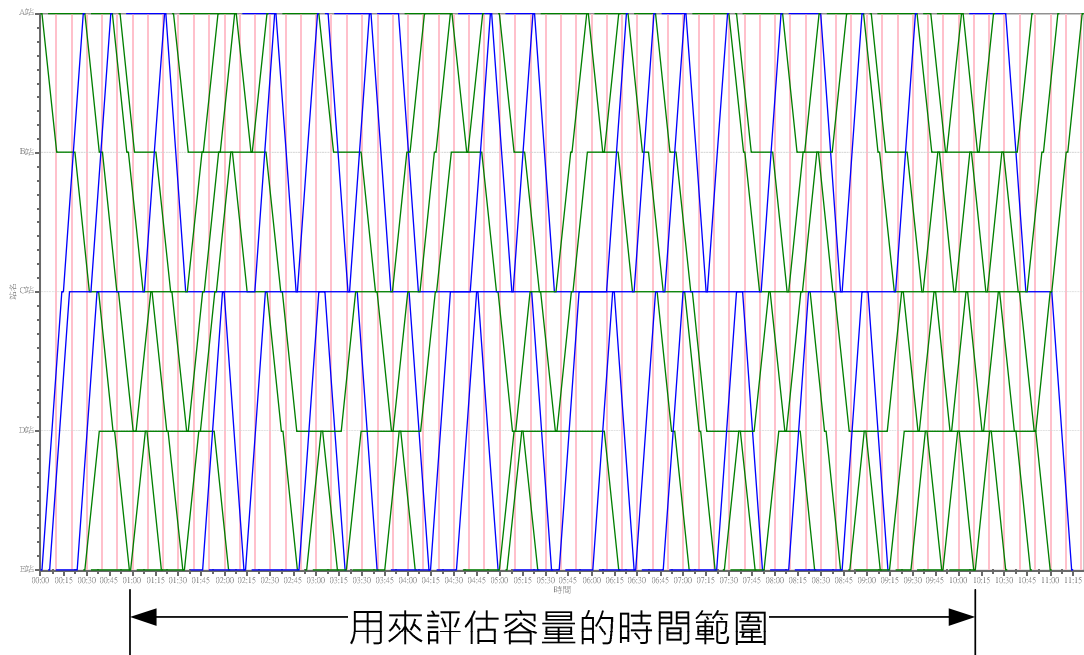


圖4-27 評估容量所使用的時間範圍示意圖

4.5 演算範例展示

為使讀者能更清楚本模式的運作方式，本節以圖 4-28之範例展示本模式之模擬流程，圖中為三個車站之路線，本範例共有四列車：列車 1 和列車 3 由車站 C 開往車站 A，列車 2 和列車 4 由車站 A 開往車站 C。事件列表內已經分別將四列車最早發生的事件依時間先後排序，其中列車 1 和列車 2 為慢車，每站皆停；列車 3 和列車 4 為快車，只停靠車站 A 和車站 C。

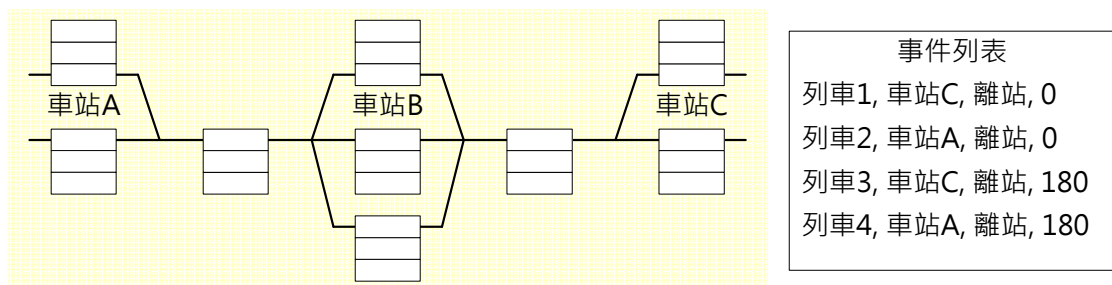


圖4-28 演算範例

首先處理列車 1 於車站 C 的離站事件，如圖 4-29，依照預訂軌道機制預訂了車站 C 到車站 B 的站間軌和車站 B 的站內軌，檢核也符合運轉基本規則，因此可以順利離站，將列車 1 移入站間軌，並標示已使用完車站 C 的站內軌，同時也將列車 1 的下個事件（於車站 B 的到站事件）放入事件列表，如圖 4-30。接著事件列表中最早發生的事件變成為列車 2 於車站 A 的離站事件，其處理過程如同列車 1 一樣可以順利進行，處理完成後如圖 4-31。

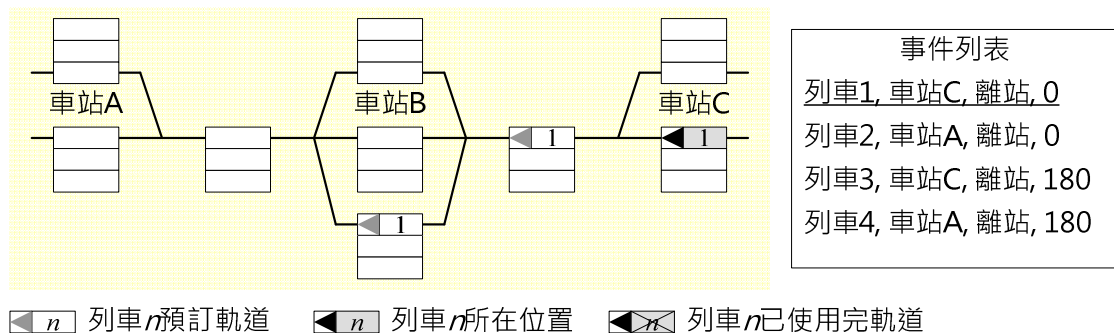


圖4-29 演算範例展示 1

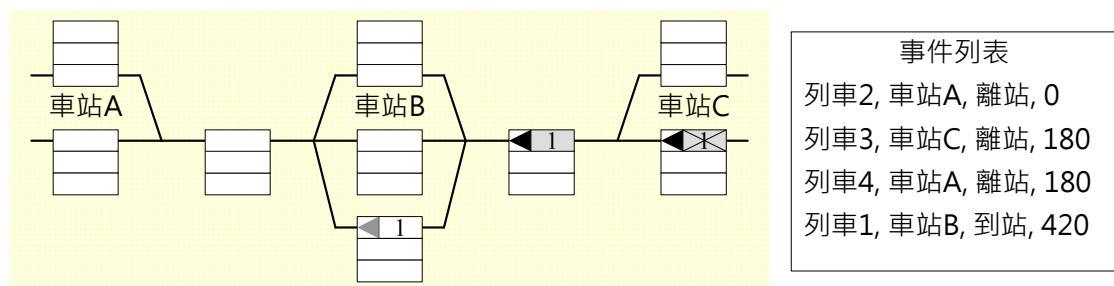


圖4-30 演算範例展示 2

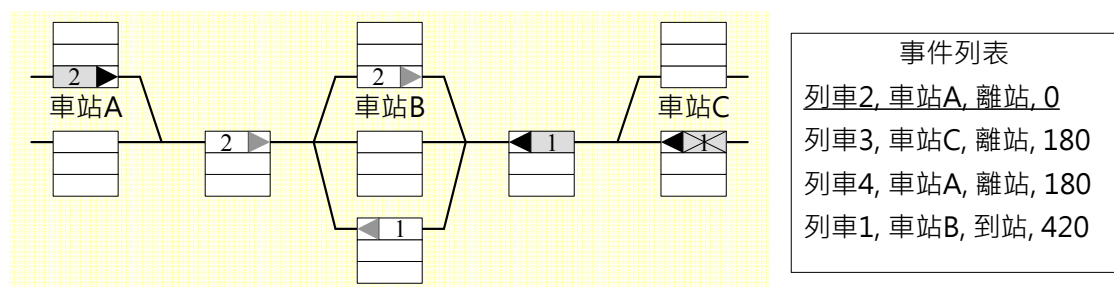


圖4-31 演算範例展示 3

再來輪到列車 3 於車站 C 的離站事件，如圖 4-32，同樣要先預訂車站 C 到車站 B 的站間軌和車站 B 的站內軌，但此時根據預訂軌道的規則，列車 3 能夠在車站 B 追越列車 1，所以列車 3 在車站 B 預訂了與列車 1 不同的軌道。此外，因為列車 3 不停靠車站 B，還要預訂其後續的軌道，包含車站 B 到車站 A 的站間軌和車站 A 的站內軌。完成預訂後，檢核列車 3 與列車 1 之間號誌時距足夠，因此可以離站進入站間軌。

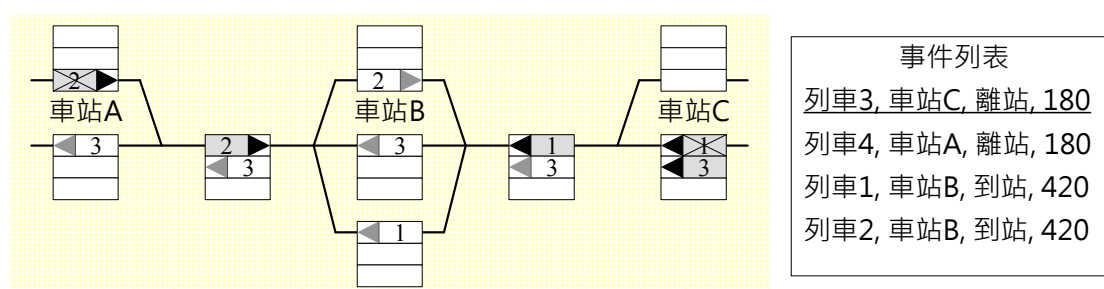


圖4-32 演算範例展示 4

而後續列車 4 與列車 3 一樣是快車，但情況有些不同，如圖 4-33 所示，在預訂車站 A 到車站 B 的站間軌和車站 B 的站內軌後，根據預訂軌道的規則，發現列車 4 不能在車站 B 追越列車 2，因此在車站 B 預訂了與列車 2 相同的軌道，根據預訂軌道的規則，列車 2 必須再預訂其後續的軌道，包含車站 C 到車站 B 的站間軌和車站 B 的站內軌，而列車 4 因不停靠車站 B，也必須預訂後續的車站 C 到車站 B 的站間軌和車站 B 的站內軌。完成預訂後，可發現列車 4 不是車站 A 到車站 B 站間軌的第一位預訂者，且與前一位預訂之列車的運轉方向不同，因此列車 4 不得開出，只能調整其離站事件的時間後，再將事件放回事件列表中。

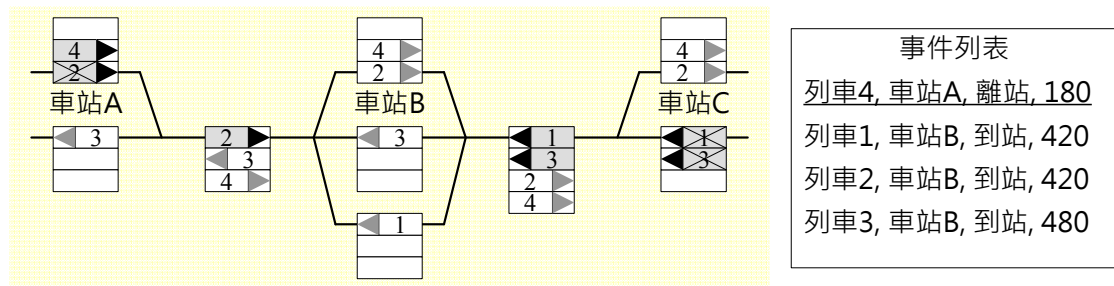


圖4-33 演算範例展示 5

接著處理列車 1 於車站 B 的到站事件，如圖 4-34，列車 1 為車站 B 站內軌第一位預訂者，且沒有違反運轉規則，因此可以順利執行。而後續列車 2 於車站 B 的到站事件，也是相同的情況，完成如系統狀態如圖 4-35。

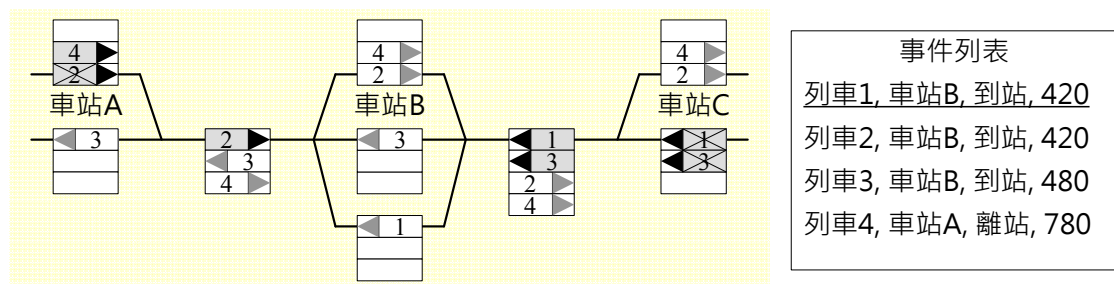


圖4-34 演算範例展示 6

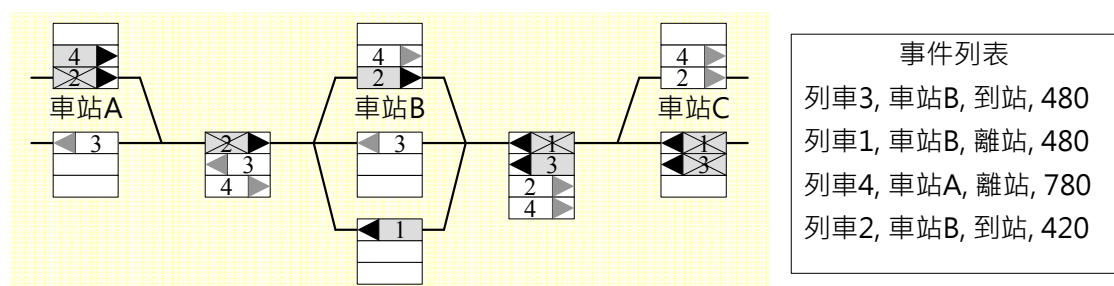


圖4-35 演算範例展示 7

然後處理列車 3 於車站 B 的到站事件，如圖 4-36，雖然根據預訂規則，列車 3 可以使用車站 B 的站內軌，但經過檢核會發現列車 3 與列車 1 的到站號誌時距不足，所以列車 3 的到站事件時間必須後移，依照回溯機制，系統必須要回復到列車 3 於車站 C 離站時的情況，如

圖 4-37。在調整列車 3 於車站 C 離站事件的時間後，列車 4 於車站 A 的離站事件變成為列表中最早發生的事件，但因為不是車站 A 到車站 B 間軌的第一位預訂者，且與前一位預訂之列車的運轉方向不同，所以列車 4 仍然不得開出，在調整其離站事件的時間後，將事件放回事件列表中，如圖 4-38，之後才再處理列車 3 於車站 C 的離站事件。如此持續地依據 4.4 節之流程進行後續的模擬，直到所有列車都到達終點站為止，便能評估此路線之容量。

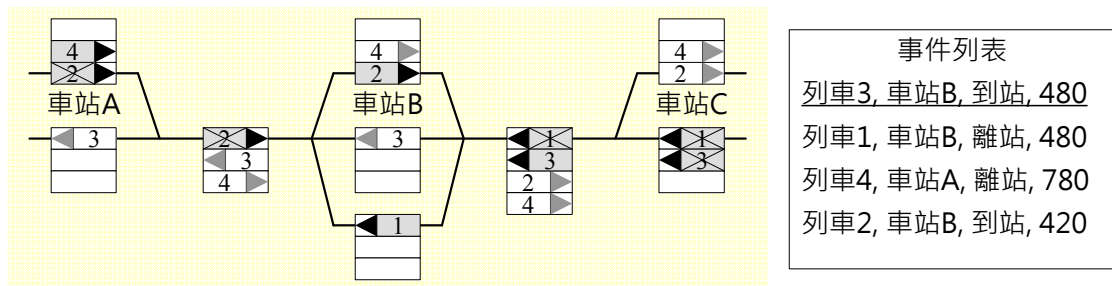


圖4-36 演算範例展示 8

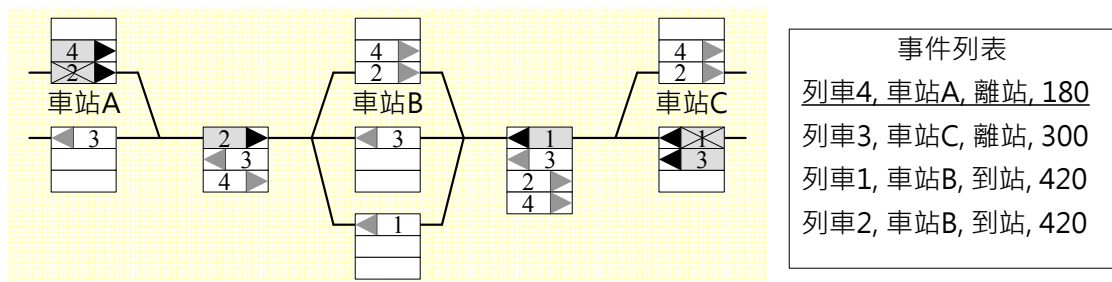


圖4-37 演算範例展示 9

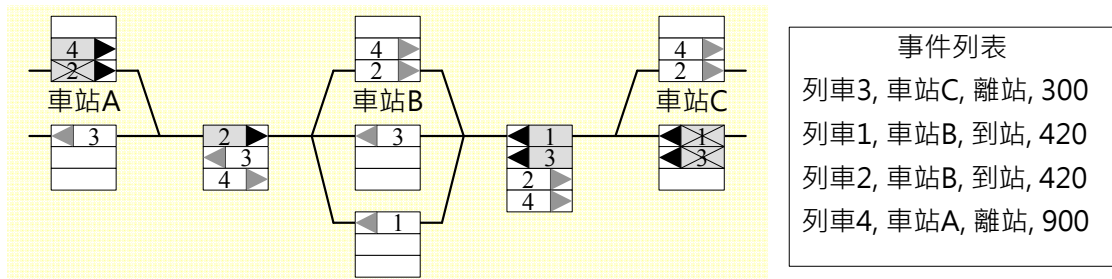


圖4-38 演算範例展示 10

第五章 案例分析

本章案例分析共包含兩大部份，首先為本研究自行設計的測試案例，目的在於了解本模式是否有達成預期的成果；之後為臺鐵實際案例，以展示本模式在實務面上之應用。

5.1 測試案例

在測試案例中，本研究先從一個最單純的基本測試例開始，以確認模式是否如預期運作，接著以基本測試例為基礎發展出數個進階測試例出，以了解各種因素對單線連續區段容量之影響，最後則是針對複線區間因故必須改採單線運轉時的測試案例。

5.1.1 基本測試例

圖 5-1 為本研究所設計的基本測試例之軌道佈置情形，系統中各項參數設定如表 5.1，若以本所單一區段容量模式來進行分析，兩個區段的結果皆為每小時 6.67 列車，但本例的快車不停靠中間站，當兩列快車對開時，勢必有一列車要等對向列車到達終點後才能開出，此情況對容量有一定的衝擊，然而單一區段容量模式無法反映此影響。若改以本研究所發展的連續區段容量模式，以不同的亂數種子，模擬雙向對開 2000 列車次後，所得到的結果如圖 5-2，整條路線的容量為平均每小時 5.68 列車。

同時從圖 5-2 可發現，不同亂數種子在模擬列車數較少的時候，其計算結果差異較大，但隨模擬列車數增加，差異則逐漸減少。大約模擬超過 1000 列車時，不同亂數種子造成的差異已經相當小，且容量值已趨於穩定，考量演算效率與結果精確度，後續測試例模擬雙向對開的列車數為 1000 列，且亂數種子皆採用相同的數值，以消除亂數種子造成的影響，便於後續的比較。



圖5-1 基本測試例之軌道佈置圖

表5.1 基本測試案例之參數設定

項目	設定
車種數	2 種
交通組成	1 : 1
車站數	3 座
車站軌道配置	皆兩軌
停站模式	快車：只停靠起點與終點站 慢車：每站皆停
停站時間	皆 1 分鐘
運轉時間	快車：每區間皆 6.5 分鐘 慢車：每區間皆 9.5 分鐘
號誌時距	同軌道到開：4 分鐘 反向：1 分鐘 其它：3 分鐘
寬裕係數	0

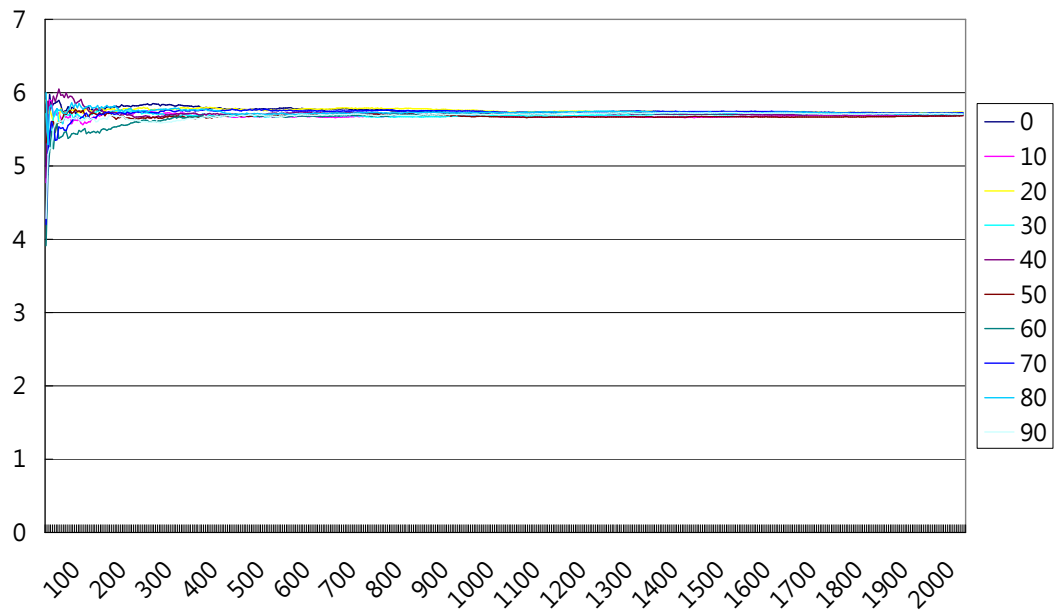


圖5-2 不同亂數種子下的模擬列車數與容量值之關係

5.1.2 進階測試例

5.1.2.1 車站數之影響

本例係在了解相同路線下，中間車站的數量對路線容量之影響，因此以上節之基本測試例的路線為基準，依照圖 5-3的方式增加中間車站，增加車站後，快車只停首末站，慢車每站皆停，而列車的運轉時間則依比例調整，例如增設一車站後，區間數由兩段變成三段，每段的運轉時間則變為原來的三分之二，如此對快車來說，總旅行時間不變；對慢車來說，總旅行時間只再增加中間站的停站時間。

透過單線連續區段容量模式進行分析後，所得到的結果如圖 5-3所示，增加中間車站意味著增加了列車可交會的地點，也減少了各站間的運轉時間，因此對容量有正面的效益，但此效益並不會無止境提升下去，隨著車站總數增多，效果會逐漸不明顯。

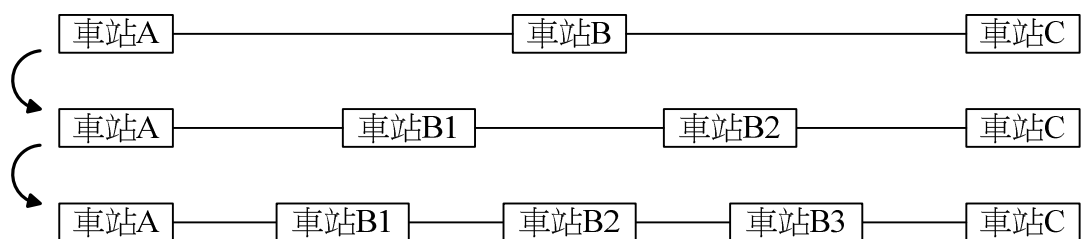


圖5-3 車站數增加方式示意圖

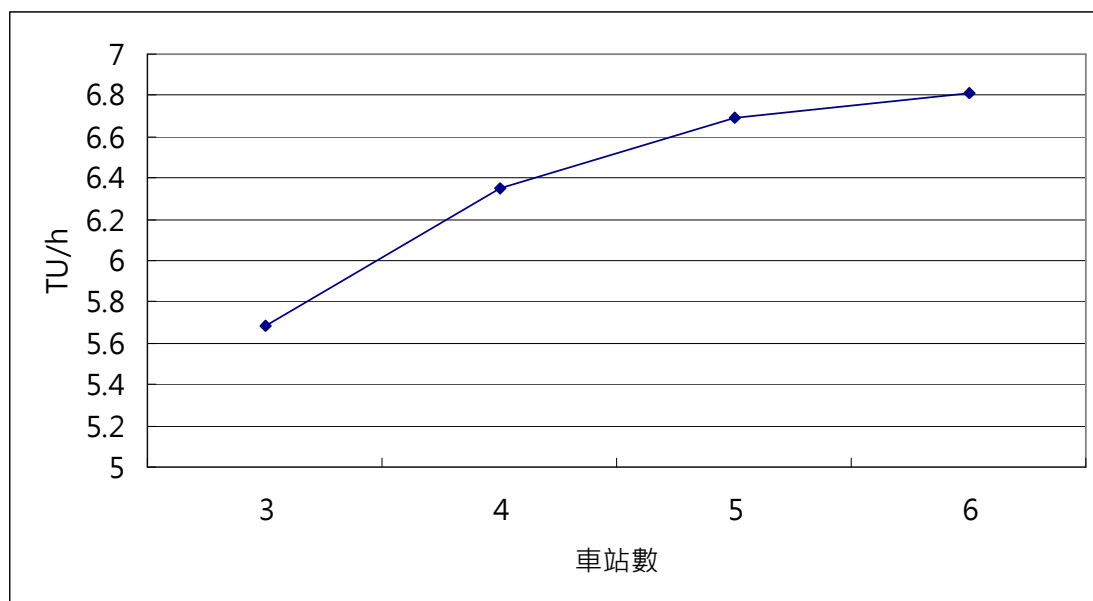


圖5-4 車站數與容量值之關係

5.1.2.2 連續區段數之影響

以基本測試例為基礎，在本測試例中以圖 5-5 之方式增加區段數，區段數增加後，快車仍然只停首末站，慢車同樣是每站皆停，其餘參數則與基本測試案相同。

透過本模式分析得到的結果如圖 5-6，由於快車不停靠中間站，因此隨著區段愈多，快車要連續通過的路線長度就愈長，對容量的影響也愈大。若此時能增加站內軌道數或者讓快車可以於中間站臨時停車進行交會，則可減少連續區段數增加對容量的衝擊，相關分析可參見第5.1.2.3和5.1.2.5節。

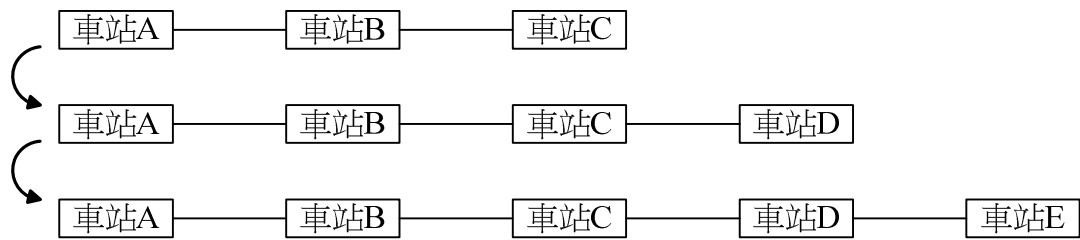


圖5-5 區段數增加方式示意圖

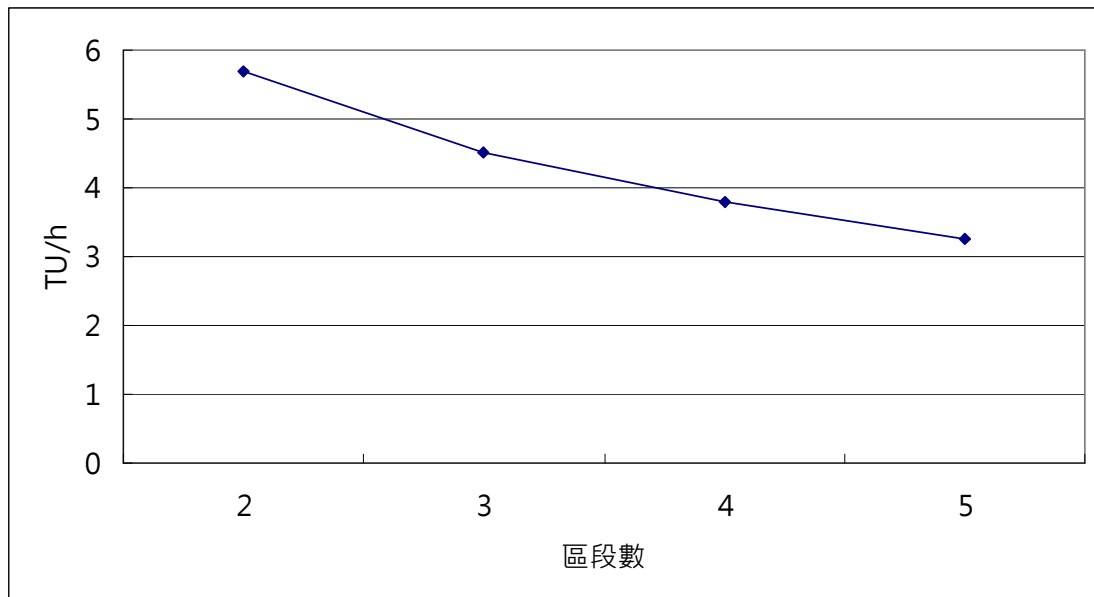


圖5-6 區段數與容量值之關係

5.1.2.3 站內軌道數之影響

本測試例以5.1.2.2節五段連續區段的例子為基礎，增加其中間站的站內軌道，提供交會待避的空間，透過本模式分析可發現，站內從兩軌增為三軌時，對容量提升有較大的幫助；但從三軌再增為四軌，對容量提升的效果就不顯著，如圖 5-7。主要原因應該是受到站間單線區間的影響，雖然增加站內軌可讓列車進行交會待避，但站內軌多到一個程度後，路線上的主要瓶頸便移到了站間，此時再增加站內軌道對容量提升的效果便不大。

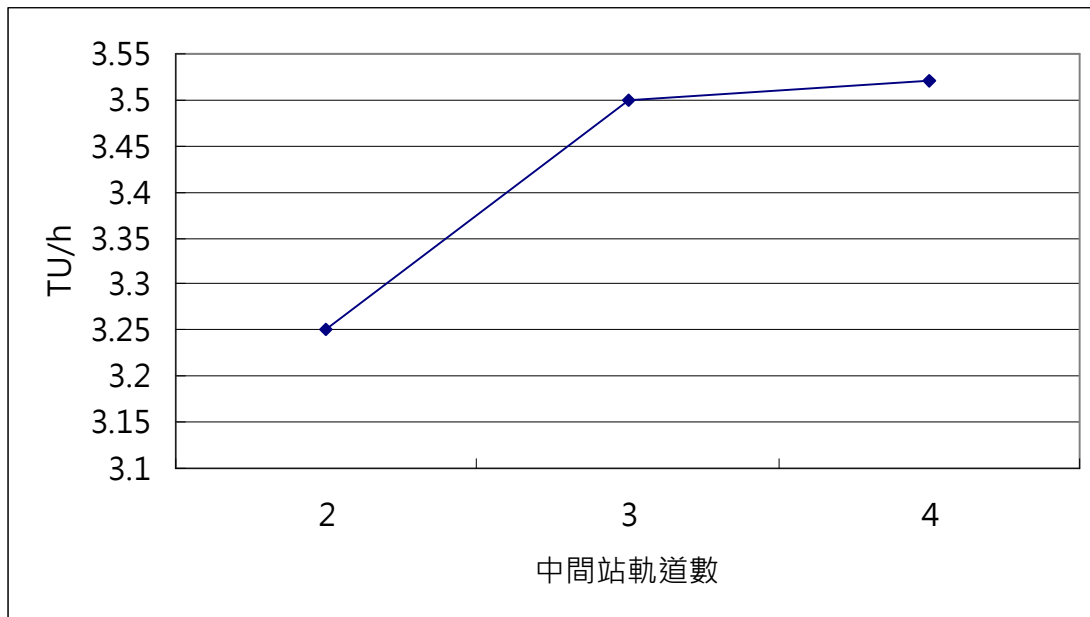


圖5-7 中間站軌道數與容量值之關係

5.1.2.4 交通組成之影響

本測試係以5.1.2.3節中間站內為四軌的例子，調整其快慢車的組成比例並分別計算容量，分析的結果如圖 5-8，從完全沒有快車到 10% 的快車，容量值有些微的提升，而之後隨快車的比例增加，容量值隨之降低。

快車有運轉時間短與停靠站少的特性，運轉時間短使得快慢車間的交會時間比兩慢車間的交會時間還短，對容量有正面效益；而停靠站少又會導致兩快車間的交會時間增加，對容量是負面效益。因此本例在最初只有快車不多時，快車帶來的正面效益比負面效益高，所以容量有些許提升，而當快車愈來愈多時，其負面效益便高過正面效益，使容量下降。

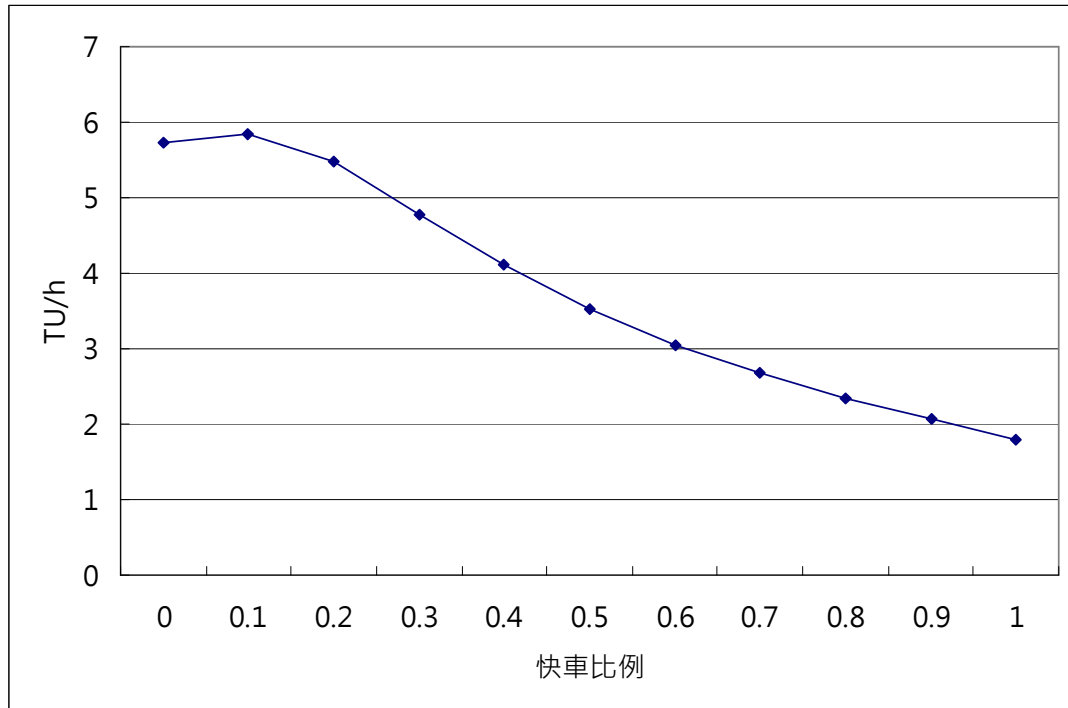


圖5-8 交通組成對容量之影響

5.1.2.5 快車臨時停站數之影響

在5.1.2.2節中可知快車連續通過的區段數愈多，會讓路線容量愈低，也因此第5.1.2.4節的分析中，當快車的比例為 100%時等於整條路線同時只能有一列快車在運行，所以路線容量最低。排點實務上碰到兩列快車同時對開的情形，會讓其中一列臨時停靠中間站進行交會，此舉能讓路線容量提升，因而能在相同時間範圍內排入較多列車。

利用本模式可反映快車臨時停靠中間站對容量提升的效果，本節以5.1.2.4節中快慢車比例為 1：1 的測試例為基準，另外設定讓快車臨時停中間站，分析得到的結果如圖 5-9，當快車臨時停站數愈多，容量愈高，但除此之外，臨時停靠的車站位置亦會影響容量提升的效果，基本上，只要能讓快車在路線上最長的連續通過區段變得愈短，則容量提升效果愈好。

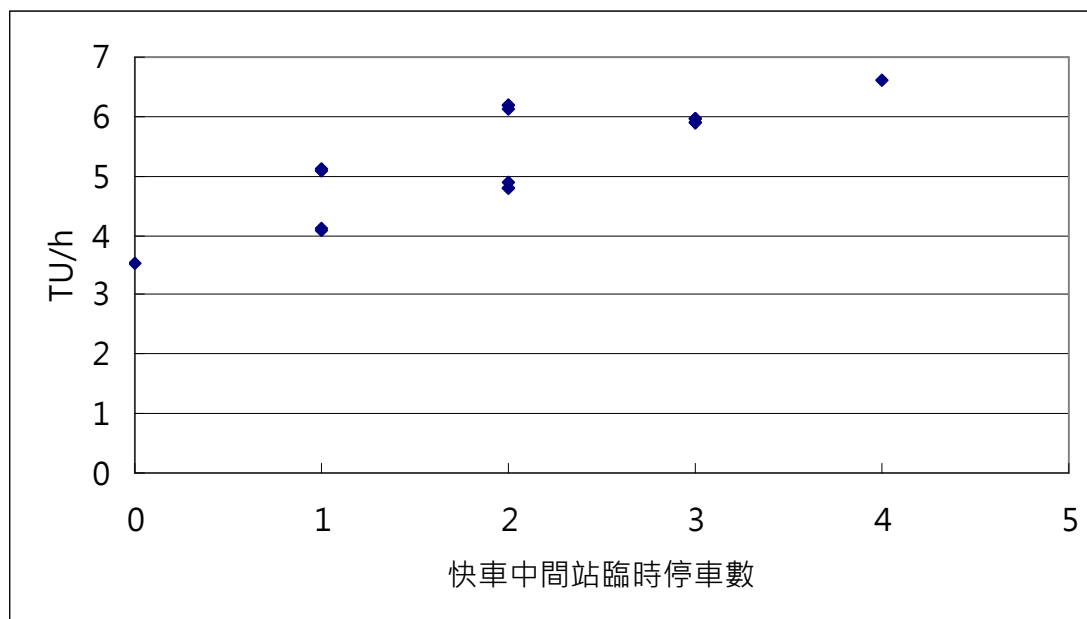


圖5-9 快車臨時停站數與容量值之關係

5.1.3 複線改單線測試例

雖然現代的鐵路系統大多是全線雙軌，且原有的單線區間將來也可能逐步進行雙軌化，但並非表示未來的鐵路系統就完全不會有單線運轉的情況，例如路線上有一列車故障或電車線掉落等事故，可能導致站間只剩一條軌道可用，此時為了維持營運就只能採用單線運轉。

本情境測試即以過去研究對臺鐵七堵－樹林的容量分析案例為例^[3]，探討上述情況對容量的衝擊。過去研究對七堵－樹林進行連續區段容量分析結果為下行每小時 10.96 列車、上行每小時 10.22 列車，今假設南港至臺北間因故改採單線運轉，如圖 5-10 所示，由於單線運轉區間的容量遠低於複線運轉區間，因此南港－臺北將會影響著整體的容量表現，透過本模式分析得知路線容量會降為雙向每小時 7.95 列車，僅為原來容量的 40% 左右。

由此例可見鐵路系統若因故改採單線運轉時，會對容量造成非常大的影響，尤其在列車密度較高的區間，勢必造成班表大亂，若有掌

握路線容量變化，將能預估運轉整理回常態運轉所需的時間，以便及早擬定因應對策。

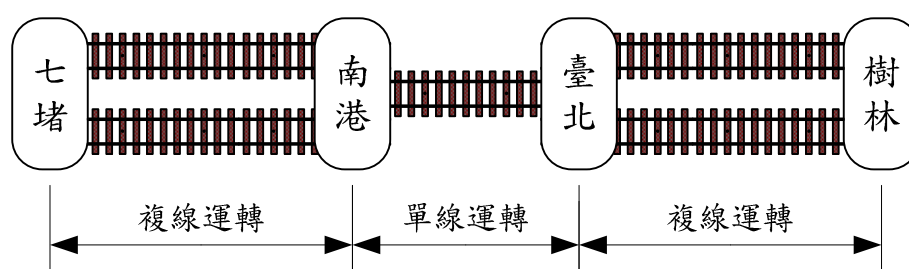


圖5-10 假設事故發生時各區間運轉狀況

5.2 臺鐵案例

本研究最後以臺鐵臺東線為對象進行實際案例分析，由於該路線正在進行雙軌化工程，因此除了現況的路線容量外，也針對未來雙軌化工程對路線容量提升的效果進行分析。

5.2.1 現況路線容量

目前臺鐵臺東線的單線區間為花蓮—萬榮、光復—玉里以及東里—山里，總長共 130.6 公里；而複線區間為萬榮—光復、玉里—東里、山里—臺東，總長共 20.4 公里，如圖 5-11所示。

因為本研究的主題為單線連續區段容量分析，所以本案例首先針對花蓮—萬榮、光復—玉里、東里—山里等三段連續的單線區間進行容量分析，並假設臺東線於尖峰時段的路線利用率接近 100%，來推估目前系統中的運轉寬裕時間係數，作為未來模式應用時的參考。接著比較連續區段模式與單一區段模式所得的分析結果之差異，最後結合過去本所發展的複線容量模式，對臺東線進行整體路線容量評估。

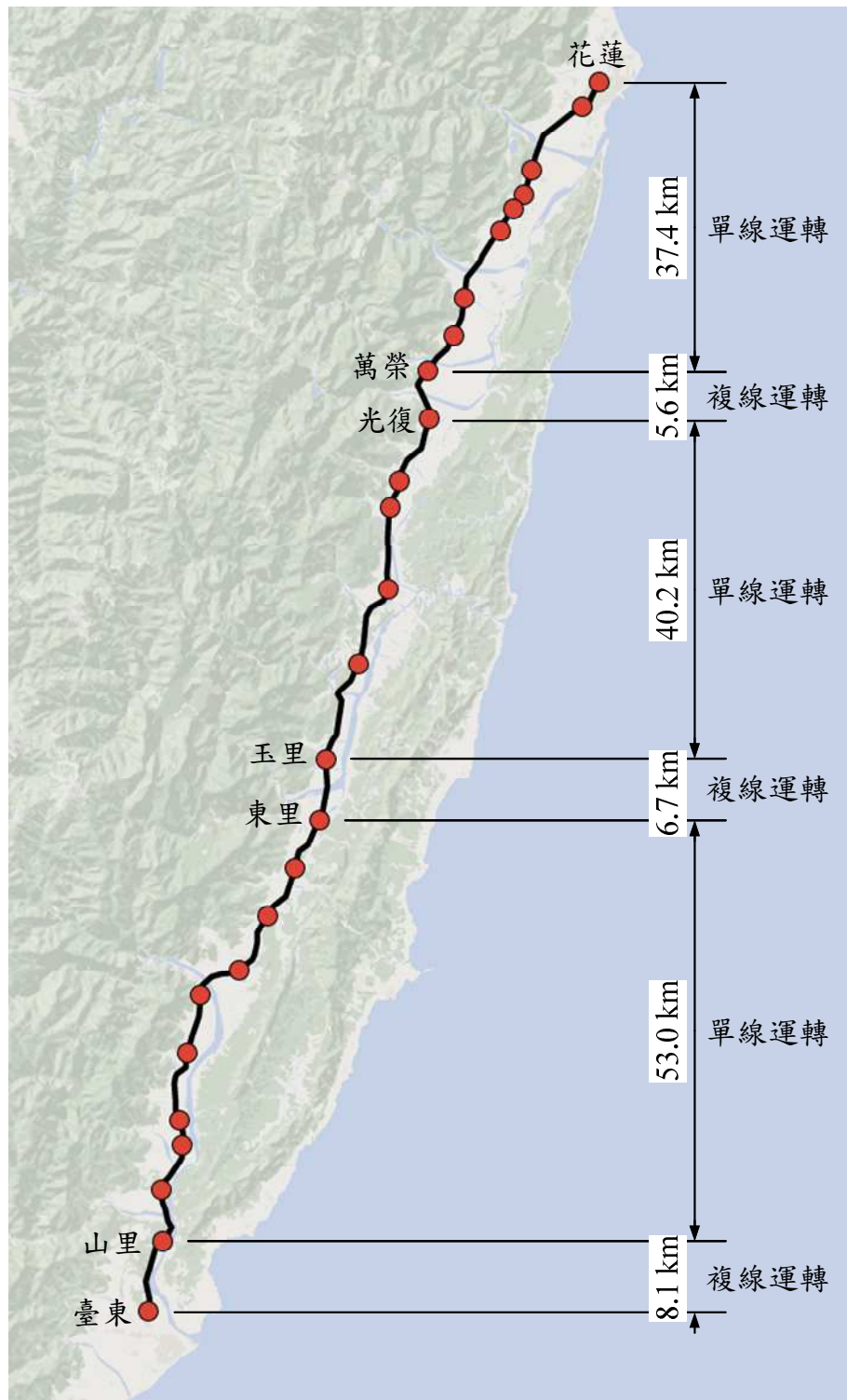


圖5-11 臺鐵臺東線單複線區間配置狀況

5.2.1.1 參數設定

根據臺鐵局所提供的資料，本案例的各項參數設定如下：

1. 車站內軌道佈設情況

從軌道臺東線的軌道佈置圖（詳見圖 2-5），整理臺東線各車站營運時列車可用的軌道數如表 5.2。

表5.2 臺東線各站軌道佈設情況

站名	花蓮	吉安	志學	平和	壽豐	豐田	南平	鳳林	萬榮
臨月臺 軌道數	5	2(1)	3	1	2	2	2(1)	3	3
站名	光復	大富	富源	瑞穗	舞鶴	三民	玉里	東里	東竹
臨月臺 軌道數	3	1	3	3	0(2)	2	3	3	2
站名	富里	池上	海端	關山	瑞和	瑞源	鹿野	山里	臺東
臨月臺 軌道數	3	2(1)	1(1)	3	1	2(1)	3	3	6

註：括弧中為不臨月臺面，但可讓列車進行追越或交會的軌道數。

2. 交通組成

從現行的時刻表中，本案例將開行於臺東線較常見的列車，分為傾斜式自強號、傳統自強號、莒光號和區間車等四種車種。而每天所開行的列車數不盡相同，一天之中各時段的列車數也不同，本案例以開行列車數最多週六為基準，並以各區段列車流量最大的連續三個小時作為尖峰，依上述分類統計各車種的車次數組成情況，對於尖峰三小時與全日的交通組成設定如表 5.3與表 5.4。

表5.3 臺東線尖峰三小時交通組成情況

區段	傾斜式自強號	傳統自強號	莒光號	區間車
花蓮－萬榮	2	2	1	2
光復－玉里	3	2	1	1
東里－山里	2	3	1	2

表5.4 臺東線全天交通組成情況

區段	傾斜式自強號	傳統自強號	莒光號	區間車
花蓮－萬榮	10	9	5	6
光復－玉里	10	9	5	5
東里－山里	10	9	5	6

3. 列車停站時間

列車在實際營運時，即便是同一車種也可能停靠不同的車站，臺東線各車種較常見的停站方式與停站時間如表 5.5所示。其中值得注意的是，在進行花蓮－萬榮、光復－玉里、東里－山里等三段單線連續區段容量分析時，由於模式限制列車於起迄車站必須停靠，所以若傾斜式自強號、傳統自強號和莒光號於萬榮、光復、東里和山里等站為通過的話，則改成設定短暫停靠 1 秒鐘。另外舞鶴站為號誌站，除非有列車要追越或交會，否則不會停靠，因此設定區間車在此短暫停靠 1 秒鐘，若需與高級列車追越或交會時，模式會自動調整讓其停站時間足夠。

表5.5 各車種於臺東線各站的停站時間

車站	傾斜式自強號	傳統自強號	莒光號	區間車
花蓮	180	180	180	180
吉安	0	60	60	60
志學	0	60	60	60
平和	0	0	0	30
壽豐	0	60	60	60
豐田	0	0	60	60
南平	0	0	0	30
鳳林	0	60	60	60
萬榮	0	0	60	60
光復	0	60	60	60

單位：秒

表 5.5 各車種於臺東線各站的停站時間（續）

車站	傾斜式自強號	傳統自強號	莒光號	區間車
大富	0	0	0	30
富源	0	0	60	60
瑞穗	0	60	60	60
舞鶴	0	0	0	0
三民	0	0	0	60
玉里	60	60	60	60
東里	0	0	60	60
東竹	0	0	60	60
富里	0	60	60	60
池上	0	60	60	60
海端	0	0	0	30
關山	0	60	60	60
瑞和	0	0	0	30
瑞源	0	0	60	60
鹿野	0	60	60	60
山里	0	0	0	60
臺東	180	180	180	180

單位：秒

4. 列車運轉時間

有關運轉時間的設定上，傾斜式自強號、傳統自強號、莒光號和區間車等四種車種，依序分別採用 TEMU、DMU、E 客甲 B 以及電車等牽引種別的運轉時間，如表 5.6，由於平和、大富與瑞和站內僅有一軌，列車無法進行交會待避，因此將其前後區間合併成為志學－壽豐、光復－富源以及關山－瑞源等區間，運轉時間也做相對應的加總，而區間車還要加上在平和、大富與瑞和等車站的停站時間。

表5.6 各車種於臺東線各站間的運轉時間

	順行方向				逆行方向			
	傾斜自強	傳統自強	莒光	區間	傾斜自強	傳統自強	莒光	區間
花蓮								
吉安	04:00	05:00	06:30	05:00	04:00	04:00	05:00	05:00
志學	05:00	06:00	09:00	08:00	05:00	06:00	08:30	10:00
壽豐	02:30	03:00	06:30	06:00	02:30	03:00	06:30	08:00
豐田	01:30	02:00	04:00	03:00	01:30	02:00	04:30	03:30
南平	04:00	06:30	08:00	08:00	04:00	05:00	09:00	10:00
鳳林	02:00	02:30	04:30	06:00	02:00	02:30	05:30	05:00
萬榮	03:30	03:00	05:00	06:30	02:30	03:00	08:00	06:00
光復	04:00	03:30	06:30	05:00	03:00	04:00	05:00	07:00
富源	06:00	06:30	10:00	12:00	05:00	07:00	10:30	12:00
瑞穗	04:30	05:30	08:30	08:00	04:30	05:30	08:30	10:00
舞鶴	02:00	03:30	03:30	03:30	02:00	03:30	03:30	03:30
三民	02:30	04:00	04:00	04:30	02:30	04:00	04:00	04:30
玉里	06:30	09:00	09:00	13:00	06:30	09:30	09:00	10:00
東里	04:00	07:00	07:00	06:30	04:30	06:00	06:00	06:00
東竹	03:00	04:30	06:00	06:30	04:00	05:00	06:00	07:00
富里	03:00	04:00	06:30	07:00	03:00	04:00	06:00	07:00
池上	03:30	04:00	07:00	07:00	03:30	04:00	06:30	08:00
海端	03:00	04:00	05:30	07:30	03:00	04:00	05:00	08:00

單位：分:秒

表 5.6 各車種於臺東線各站間的運轉時間（續）

	順行方向				逆行方向			
	傾斜自強	傳統自強	莒光	區間	傾斜自強	傳統自強	莒光	區間
海端								
	03:30	04:00	06:30	07:30	03:30	05:00	06:00	09:00
關山	05:00	06:30	10:30	11:00	05:00	07:00	09:30	12:00
瑞源	03:00	03:30	06:30	06:30	03:00	03:30	06:00	06:00
鹿野	03:30	04:00	06:00	07:30	03:00	04:30	05:30	07:00
山里	06:00	07:00	07:30	08:00	06:00	08:30	07:30	09:00
臺東								

單位：分:秒

5. 號誌安全時距

本案例的號誌安全時距採用臺鐵排點所使用的時距，同軌道到開時距為 4 分鐘，不同軌道到離站時距為 3 分鐘，反向時距為 1 分鐘。

6. 其他參數

模式中的其他參數尚有亂數種子和模擬列車數，本案例中設定亂數種子為 0，模擬列車數為雙向各開 2000 列。

5.2.1.2 分析結果

1. 運轉寬裕寬裕係數校估

針對花蓮—萬榮、光復—玉里、東里—山里等三個區間，透過本研究所發展的單線連續區段容量分析模式分析後，分別得到其尖峰三小時的路線容量如表 5.7，倘若臺東線於尖峰三小時的路線利用率已接近 100%，藉由調整不同運轉寬裕時間係數 β 來計算容量，並與實際上尖峰三小時所開行的列車數相比，可推估運轉寬裕時間係數應為 0.1 較為適當，但考量到實際上高級列車有臨時停車交會的情況，其列車

流量會比模式模擬的情況還高，因此未來使用本模式進行容量分析時，建議運轉寬裕時間係數值採用 0.2。

表5.7 臺東線尖峰三小時之路線容量分析結果

區段	平均時隔	尖峰 3 小時容量			現行列車數
		$\beta=0$	$\beta=0.1$	$\beta=0.2$	
花蓮－萬榮	641.71 秒	16.83	15.30	14.03	13
光復－玉里	743.80 秒	14.52	13.20	12.10	13
東里－山里	697.67 秒	15.48	14.07	12.90	14

2. 與單一區段容量模式分析結果相比較

將花蓮－萬榮、光復－玉里、東里－山里等三個區間，透過本所過去發展的單一區段容量模式分析後，得到的結果如表 5.8～表 5.10，表中底線所標示的分別為該三個區間的容量瓶頸所在，與表 5.7相比可發現，連續區段容量分析的結果比單一區段容量模式還低，此情況與 5.1.1 節的結果相呼應，連續區段容量模式能夠多反映出相鄰區間的交互影響，因此所求得的容量值較低。

表5.8 花蓮－萬榮採單一區段容量分析之結果

區段	尖峰 3 小時容量
花蓮 → 吉安	24.39
吉安 → 志學	<u>17.4</u>
志學 → 壽豐	25.17
壽豐 → 豐田	39.15
豐田 → 南平	18.3
南平 → 鳳林	30.3
鳳林 → 萬榮	25.5

表5.9 光復－玉里採單一區段容量分析之結果

區段	尖峰 3 小時容量
光復 → 富源	16.35
富源 → 瑞穗	19.77
瑞穗 → 舞鶴	35.91
舞鶴 → 三民	31.26
三民 → 玉里	<u>14.79</u>

表5.10 東里－山里採單一區段容量分析之結果

區段	尖峰 3 小時容量
東里 → 東竹	22.71
東竹 → 富里	23.94
富里 → 池上	22.71
池上 → 海端	23.7
海端 → 關山	21.6
<u>關山 → 瑞源</u>	<u>15.54</u>
瑞源 → 鹿野	25.62
鹿野 → 山里	23.31

3. 臺東線整體容量表現

結合本所發展的各種容量模式計算臺東線全日之路線容量，其結果如表 5.11 所示，並與目前全日開行的列車數相較。整體來說，臺東線全日之路線容量為 75 列車，而目前的路線利用率約在 7 成左右，在各個區間中，光復－玉里是路線容量最低，同時也是路線利用率最高的區間，為容量瓶頸所在。

表5.11 臺東線全日路線容量分析結果

區段	方向	全日容量 (TU/day)	現行列車數	路線利用率
花蓮－萬榮	雙向	90	60	66.67 %
萬榮－光復	上行	171	30	17.54 %
	下行	193	30	15.54 %
光復－玉里	雙向	75	58	77.33 %
玉里－東里	上行	187	29	15.51 %
	下行	168	29	17.26 %
東里－山里	雙向	79	60	75.95 %
山里－臺東	上行	180	30	16.67 %
	下行	212	30	14.15% %

註：以全日營運 18.5 小時為基準

5.2.2 階段性雙軌化

目前臺東線正在進行「花東線鐵路瓶頸路段雙軌化暨全線電氣化計畫」，此工程之效益不僅可讓東部鐵路快捷化、列車動力一元化等，預計未來陸續完成壽豐－南平和瑞穗－三民雙軌化後，也將能提升臺東線的路線容量，且除了雙軌化區間的容量會有明顯改善外，其餘的單線區間也同樣有部分改善效果，本研究即針對此情境進行容量分析，探討此工程對整體路線容量提升的成效。

5.2.2.1 參數設定

有關壽豐－南平和瑞穗－三民雙軌化的時程，預計壽豐－南平會先完成，之後才是瑞穗－三民，因此本案例將分別探討此兩階段的容量變化情形。

第一階段為壽豐－南平雙軌化後，臺東線連續的單線區間將變為花蓮－壽豐、南平－萬榮、光復－玉里，以及東里－山里等四處；而後續第二階段瑞穗－三民雙軌化後，連續的單線區間則再增為花蓮－

壽豐、南平—萬榮、光復—瑞穗、三民—玉里，以及東里—山里等五處。

由於現階段無法得知未來工程完成後，各車站確切的軌道佈置情形、交通組成、列車停站服務型態、運轉時間等參數，因此本案例對於這些參數皆參考現況，亦即5.2.1節之設定。

5.2.2.2 分析結果

對於未來臺鐵臺東線兩階段雙軌化後，路線容量分析的結果分別如表 5.12～表 5.15 所示，在第一階段雙軌化完成後，花蓮—壽豐和南平—萬榮兩段單線區間之尖峰三小時容量可分別提升 25%與 77%，全日容量可分別提升 30%與 91%，不過就整體而言，容量瓶頸仍然在光復—玉里；待第二階段雙軌化完成後，光復—瑞穗和三民—玉里兩段單線區間之尖峰三小時容量可分別提升 18%與 12%，全日容量可分別提升 28%與 17%，此時光復—玉里不再是瓶頸區間了，容量瓶頸則移到了東里—山里。

表5.12 第一階段雙軌化後臺東線尖峰三小時路線容量分析結果

原區段	改善後之區段	尖峰 3 小時容量	容量提升百分比
花蓮—萬榮	花蓮—壽豐	19.12	24.97 %
	南平—萬榮	27.14	77.36 %
光復—玉里	光復—玉里	13.20	—
東里—山里	東里—山里	14.07	—

表5.13 第一階段雙軌化後臺東線全日路線容量分析結果

原區段	改善後之區段	全日容量 (TU/day)	容量提升百分比
花蓮－萬榮	花蓮－壽豐	117	30.00 %
	南平－萬榮	172	91.11 %
光復－玉里	光復－玉里	75	—
東里－山里	東里－山里	79	—

註：以全日營運 18.5 小時為基準

表5.14 第二階段雙軌化後臺東線尖峰三小時路線容量分析結果

原區段	改善後之區段	尖峰 3 小時容量	容量提升百分比
花蓮－壽豐	花蓮－壽豐	19.12	—
南平－萬榮	南平－萬榮	27.14	—
光復－玉里	光復－瑞穗	15.52	17.56 %
	三民－玉里	14.80	12.12 %
東里－山里	東里－山里	14.07	—

註一：三民－玉里採用單一區段容量模式分析

表5.15 第二階段雙軌化後臺東線全日路線容量分析結果

原區段	改善後之區段	全日容量 (TU/day)	容量提升百分比
花蓮－壽豐	花蓮－壽豐	117	—
南平－萬榮	南平－萬榮	172	—
光復－玉里	光復－瑞穗	96	28.00 %
	三民－玉里	88	17.33 %
東里－山里	東里－山里	79	—

註一：三民－玉里採用單一區段容量模式分析

註二：以全日營運 18.5 小時為基準

5.2.3 情境分析

從上節的分析結果可知在兩階段雙軌化後，臺東線之容量瓶頸將落在東里—山里區間，而從5.1.2節的各項測試中可知，增加站內軌道或者增加快車臨時停車處可提升容量，因此本節將分別以此兩方式嘗試改善東里—山里容量，並透過模式來計算其改善效益。

5.2.3.1 參數設定

在增加站內軌道方面，從表 5.2 中可發現東里—山里間除了東竹、海端、瑞和之外，其餘車站內都有三條以上軌道，本案選擇將海端站改為一島一岸壁三軌道的型式，如圖 5-12，此外其他如交通組成、列車停站服務型態、運轉時間等參數，皆與5.2.1節之設定相同。

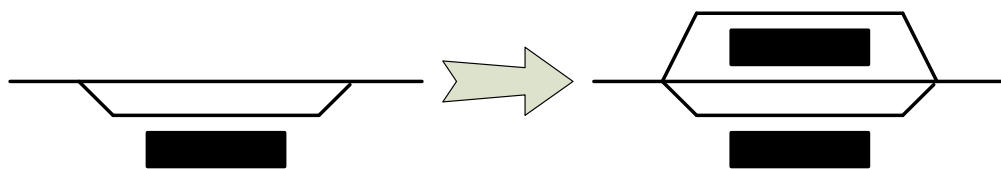


圖5-12 海端站改為一島一岸壁三軌道之型式

而在增加快車臨時停車處方面，表 5.5 顯示傾斜式自強號於東里—山里間完全不停靠任何車站，亦即當兩列傾斜式自強號對開時，對於容量的衝擊相當大，若有臨時停車處進行交會將可提升容量。在本案中考量關山站大致位於東里—山里路線的中央，因此設定傾斜式自強號可於關山站臨時停車，此外其餘參數皆如同5.2.1節之設定。

5.2.3.2 分析結果

兩方案經過單線連續區段容量模式分析後，所得到的結果如表 5.16 和表 5.17，其中將海端站增為三軌對容量提升的效果不顯著，可能原因在於東里—山里間已經有大多數車站為三軌以上之車站，而若讓傾斜式自強號可臨時停車於關山站，雖然會使其總旅行時間稍微增加，但對整體容量提升有顯著的效果。

表5.16 兩方案對東里－山里尖峰三小時容量改善效果比較

方案	尖峰 3 小時容量	容量提升百分比
原方案	14.07	—
海端站增為三軌道	14.26	1.35 %
傾斜式自強號臨停關山	16.80	19.40 %

表5.17 兩方案對東里－山里全日容量改善效果比較

方案	全日容量 (TU/day)	容量提升百分比
原方案	79	—
海端站增為三軌道	80	1.27 %
傾斜式自強號臨停關山	99	25.32 %

第六章 結論與建議

本研究以本所過去軌道容量系列研究之成果為基礎，針對單線運轉區間發展連續區段軌道容量分析模式，並以該模式進行多項案例分析，最後得到以下結論與建議。

6.1 結論

1. 過去本所發展的單一區段容量模式可處理單線運轉和複線運轉的情況，但連續區段容量模式僅能處理複線運轉，而本研究成功發展了單線連續區段容量模式，補足了國內對於傳統區域鐵路容量分析的技術。
2. 本研究所發展之單線連續區段軌道容量分析模式，比過去單一區段的模式多加考慮了上、下游區段的交互影響，以及列車於中間站進行交會或待避的行為，能提供更貼近實務的容量分析結果，將有利於進行鐵路供給面軌道容量分析，作為相關單位決策參考依據。例如可提供交通部及政府相關部門，作為審議推動相關臺鐵系統改善計畫及制訂相關軌道系統發展政策之參考與依循。
3. 透過本研究設計的測試案例可知，雖然亂數種子的設定會影響模式的分析結果，但只要模擬的列車數夠多（約超過 1,000 列）時，可忽略亂數種子所造成的差異。
4. 經由進階測試例的分析，可了解到：
 - (1) 在一單線路線中增加中間站，不僅提供列車可交會的地點，也讓站間長度變短，而縮短列車於站間一來一回的運轉時間，對路線容量有正面提升的效果。不過此效益隨著車站總數增多，會因為列車頻繁地加減速以及停站，使得容量提升效果逐漸不明顯。

- (2) 當快車進入一段連續通過的區間時，其它的慢車可以在車站內進行待避或交會，但對向的快車只能等該快車離開該區間後才能進入，因此快車連續通過的區間長度愈長，對容量的負面影響就愈大，此時增加站內軌道數或讓快車臨時停靠中間站，可減少此負面影響。
 - (3) 增加站內軌道數可提升路線容量，但當站內軌數量多到一個程度後，站間便成了路線容量瓶頸所在，此時再增加站內軌道對容量提升的效果有限。
 - (4) 讓快車臨時停靠中間車站可提升路線容量，不過臨時停靠的車站位置會影響提升的效果，其關鍵在於臨時停靠的車站位置是否可讓快車在路線上的最長連續通過區段變短，連續通過區段變得愈短，容量提升效果愈好。
 - (5) 由於運轉時間短與停靠站少的特性，使得快車在交通組成中的比例大小對單線連續區段容量之影響並非都是正向的，運轉時間短可讓快慢車之間的交會時間變短，對容量有正面效益；但停靠站少會導致兩快車間的交會時間增加，對容量是負面效益，此兩效益隨著交通組成不同而對容量有不同的影響力度，當正面效益比負面效益高，容量會提升，反之則下降。
- 5. 本模式除了應用於純單線的連續區段外，亦可應用於複線區間因故改採單線運轉的情況，透過分析可知一旦此情況發生，對容量的衝擊相當大，表面上是站間兩條軌道剩一條可用，但實際上能提供的運能剩不到一半。
 - 6. 有關模式中的運轉時間寬裕係數 β ，在假設目前臺鐵臺東線於尖峰三小時之路線利用率接近 100%的前提下校估反推，並考量實際行車狀況後，建議採用 0.2。
 - 7. 本研究利用所發展的模式分析了臺鐵臺東線的路線容量現況，結果顯示目前臺東線的容量瓶頸發生在光復—玉里段，與實務經驗

相符，但差異在於透過模式不僅能得到量化的數值，亦能用來評估鐵路改建計畫對容量之影響。

8. 除了針對臺鐵臺東線現況進行容量分析外，本模式亦可用於評估未來逐步雙軌化後對其餘單線區間容量改善的效果：
 - (1) 在壽豐—南平雙軌化後，剩餘的花蓮—壽豐和南平—萬榮兩段單線區間之容量可分別提升 30%與 91%，雖然容量瓶頸還是在光復—玉里，對整體運能提升的幫助可能不大，但容量提升的區間表示其路線利用率下降，對系統可靠度的提升有所幫助。
 - (2) 在瑞穗—三民雙軌化後，容量瓶頸所在的光復—玉里將可獲得改善，剩餘的光復—瑞穗和三民—玉里兩段單線區間之容量可分別提升 28%與 17%。
9. 本研究嘗試分別以增加站內軌道與增加臨時停車處兩種方式，探討對東里—山里容量提升之效益，結果發現增加臨時停車處比增加站內軌道有顯著之效益。目前臺鐵臺東線在列車較密集的時段，也會讓高級列車臨時停站與對向高級列車交會，便是為了要有足夠的路線容量來滿足運輸需求。

6.2 建議

1. 由於本研究所建構的單線連續區段容量分析模式為模擬模式，需逐一處理各列車的到站與離站事件，且運算的過程中需要維護相當多的資料，如事件列表、軌道預約列表，如此大量繁複之計算，亟需透過電腦工具予以輔助，建議後續應開發相關的電腦程式軟體，以提高本模式之分析效率與實用性。
2. 本所的「傳統暨區域鐵路系統軌道容量分析軟體」已經發展多年，未來欲將本模式開發為電腦程式時，應與該軟體高度整合，有利於本模式與其它現有模式交互運用。

3. 本研究使國內對於傳統暨區域鐵路的軌道容量分析技術更加精進，未來可將相關的成果編入「臺灣軌道容量手冊」之中。此外，根據國內軌道容量手冊之架構，「高鐵及機場捷運系統篇」以及「輕軌運輸系統篇」兩篇尚未編訂，建議後續可進行相關的軌道容量分析研究。
4. 建議未來臺鐵相關建設計畫，如立體化、捷運化、改建等，應要求於報告書中納入軌道容量分析評估，以檢驗該計畫對容量造成的影響或帶來的改善效益。
5. 實務上當路線利用率愈高，將會影響列車服務可靠度，過去本所發展的容量模式皆有對應之可靠度模式，以了解路線容量、列車流量與列車平均延滯時間之關係，能評估在一定平均延滯水準之下，路線容量的可用程度。為求本系列研究之完整性，建議未來應針對單線連續區段發展列車服務可靠度模式，另外也可考慮與臺鐵對於班表穩定度之需求相結合。
6. 在本研究裡，引用了文獻中方法來避免列車於單線區間運行時發生死結問題，此技術有助於未來發展電腦輔助排點系統時的死結偵測，或者應用於鐵路系統多列車運轉的模擬上。
7. 在臺鐵系統中有些車站兼具中間站與折返站的角色，如花蓮車站，有些城際列車到達花蓮站後還會繼續運行下去，但有些以花蓮站為始發或終點站，此外通勤列車會在花蓮站折返，此時車站內的軌道佈設情況、轉轍器位置、連鎖、進路等因素，會影響著該車站在單位時間內可以運行的列車數量，此問題與本研究所探討的路線容量不同，屬於車站容量課題，可納入本所未來的容量研究方向之一。
8. 過去為了考慮使用的便利性與推廣的需要，本所以解析模式來計算傳統暨區域鐵路系統的號誌安全時距，不過該模式係以三位式號誌系統為前提，無法應用於未來臺鐵可能透過號誌系統升級來

改善容量的課題，此外若要考量更多細節，如轉轍器號數，則必須發展高精度的模擬模式。

9. 目前本所的容量系列研究皆在探討列車在常綠下運轉的時刻表容量，不過最大容量以及運轉調度最適化亦是實務上較感興趣之議題，可作為未來研究方向之參考。

參考文獻

1. 日本國有鐵道，**運轉概論**，日本國有鐵道。
2. 交通部運輸研究所，**2013 年臺灣鐵道容量手冊**，交通部運輸研究所，民國 102 年 6 月。
3. 交通部運輸研究所，**軌道系統容量與可靠度分析研究（1/3）**，交通部運輸研究所，民國 100 年 6 月。
4. 交通部運輸研究所，**軌道系統容量與可靠度分析研究（3/3）**，交通部運輸研究所，民國 102 年 6 月。
5. 交通部運輸研究所，**軌道容量研究－臺鐵系統容量模式之建構分析（一）**，交通部運輸研究所，民國 94 年 3 月。
6. 交通部運輸研究所，**軌道容量研究－臺鐵系統容量模式之建構分析（二）**，交通部運輸研究所，民國 95 年 4 月。
7. 交通部運輸研究所，**運輸系統容量分析暨應用研究－軌道系統（1/4）**，交通部運輸研究所，民國 96 年 4 月。
8. 交通部運輸研究所，**運輸系統容量分析暨應用研究－軌道系統（2/4）**，交通部運輸研究所，民國 96 年 12 月。
9. 交通部臺灣鐵路管理局，**臺鐵列車排點改善之基礎作業探討**，交通部臺灣鐵路管理局，民國 98 年 6 月。
10. 交通部臺灣鐵路管理局網頁 <http://www.railway.gov.tw>。
11. 交通部鐵路改建工程局網頁 <http://www.rrb.gov.tw/>。
12. 林國顯，「我國陸路運輸建設之檢討與未來發展方向」，**我國陸路交通政策展望研討會－創造永續、均衡與關懷的生活環境論文集**，交通部運輸研究所，民國 95 年。

13. 鍾志成、李治綱、張恩輔、黃笙玗、林國顯、劉昭榮，「傳統暨區域鐵路系統軌道容量分析電腦軟體之開發」，第22屆中華民國運輸學會論文集，民國96年12月。
14. Belik, F., “Deadlock Avoidance with a Modified Banker's Algorithm”, *BIT*, 27, pp.290-305, 1987.
15. Coffman, E. G., Elphick, M. J., and Shoshani, A., “System Deadlocks”, *Computing Surveys*, Vol. 3, No. 2, pp.67-78, 1971.
16. Cui, Yong, **Simulation-Based Hybrid-Model for a Partially-Automatic Dispatching of Railway Operation**, Dissertation, Institute of Railway and Transportation Engineering, University of Stuttgart, 2009.
17. Dijkstra, E. W., “The mathematics behind the Banker's Algorithm”, *Selected Writings on Computing: A Personal Perspective*, Springer-Verlag, pp.308-312, 1982.
18. Dingler, M. H., Lai, Y. C., and Barkan, C. P. L., “Impact of Train Type Heterogeneity on Single-Track Railway Capacity”, *Transportation Research Record*, No. 2117, p.41-49, 2009.
19. Ferrovie dello Stato Spa - Divisione Infrastruttura, **European Railways Optimisation Planning Environment - Transportation Railways Integrated Planing, EuROPE-TRIP**, 2000.
20. International Union of Railways (UIC), **Influence of ETCS on line capacity. Generic study**, UIC, France, 2008.
21. International Union of Railways (UIC), **UIC leaflet 406 Capacity**, UIC, France, 2004.
22. Kittelson & Associates, Inc., **Transit Capacity and Quality of Service Manual 3rd Edition (TCRP Report 165)**, Transportation Research Board, National Research Council, U.S.A., 2013.

23. Krueger, H., "Parametric Modeling in Rail Capacity Planning", *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, 1999, pp. 1194-1200.
24. Lai, Y. C., **Increasing railway efficiency and capacity through improved operations, control and planning**, Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL., 2008.
25. Landex, A., Kaas, A. H., Schittenhelm, B. & Schneider-Tilli, J., "Evaluation of railway capacity", *Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University*, Denmark, 2006.
26. Middelkoop, D. and Bouwman, M., "Testing the Stability of the Rail Network", *Computers in Railways VIII*, 2002, pp.995-1002.
27. Middelkoop, D. and Bouwman, M., "Train Network Simulator for Support of Network Wide Planning of Infrastructure and Timetables", *Computers in Railways VII*, 2000, pp. 267-276.
28. Pachl, J., "Avoiding Deadlocks in Synchronous Railway Simulations", *2nd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, Hannover, Germany, 2007.
29. Pachl, J., "Deadlock Avoidance in Railroad Operations Simulations", *Presented at 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., USA, 2011.
30. Petersen, E. R., Taylor, A. J., "Line block prevention in rail line dispatch and simulation models", *INFOR Journal*, Vol. 21, No. 1, 1983, pp.46-51.
31. RMCON, **Railsys 6.0 User Manual**, 2008.

32. Sahin, I., “Railway Traffic Control and Train Scheduling Based on Inter-train Conflict Management”, *Transportation Research Part B: Methodological*, 33, pp. 511-534, 1999.
33. Simon, B., Jaumard, B., and Le, T. H., “Deadlock Avoidance and Detection in Railway Simulation Systems”, *2014 Joint Rail Conference*, Colorado Springs, Colorado, USA, April 2–4, 2014.
34. Sogin, S., Barkan, C. P. L., and Saat, M. R., “Simulating the Effects of Higher Speed Passenger Trains in Single Track Freight Networks”, *Proceeding of 2011 Winter Simulation Conference*, Phoenix, USA., 2011.
35. Thompson, W., CREATE Update, Proceeding of AREMA 2006 Annual Conference, AREMA Louisville, KY. 2006.
36. Transport, Innovation and Systems (TIS.PT) et al., **Improved Tools for Railway Capacity and Access Management (IMPROVERAIL), Deliverable D6 – Methods for Capacity and Resource Management**, Competitive and Sustainable Growth Programme, 2003.

附錄 A 期中工作會議資料

單線連續區段軌道容量模式分析 暨整體容量軟體改版研究(1/2) 期中工作會議資料（103.05.29）

1. 會議資料摘要

本會議資料包括下列課題

- (1) 目前工作進度
- (2) 未來工作計畫
- (3) 問題討論

2. 目前工作進度

本研究主要工作為發展單線連續區段容量分析模式，而該模式最大的挑戰便是在於如何處理列車運轉發生死結（如圖 2-1）的問題，因此蒐集回顧了相關文獻，採用較佳之方法應用於模式之中。此外，對於單線連續區段容量分析模式的發展已有初步成果，最後以一測試例檢視模式的成效，以下分別進行說明。

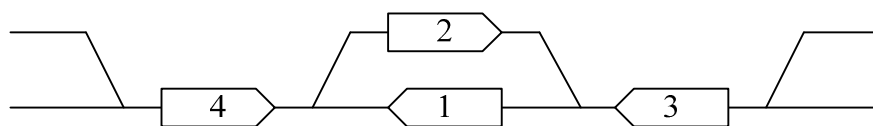


圖2-1 單線區間發生死結之範例

2.1 列車運轉模擬死結處理相關文獻

2.1.1 Banker's Algorithm

此方法最初在處理銀行借貸問題，後來被應用於處理列車發生死結的問題上，演算流程如圖 2-2，其中的符號定義為：

- S_0 ：待處理的列車集合
- S_1 ：已處理的列車集合
- AR：目前可用資源（Currently Available Resource）
- OR：目前已使用資源（Currently Occupied Resource）
- MR：最大所需資源（Maximal Required Resource）

在此所指的資源可以是軌道段、車站或站間等，係根據要處理微觀或巨觀問題來定義之。

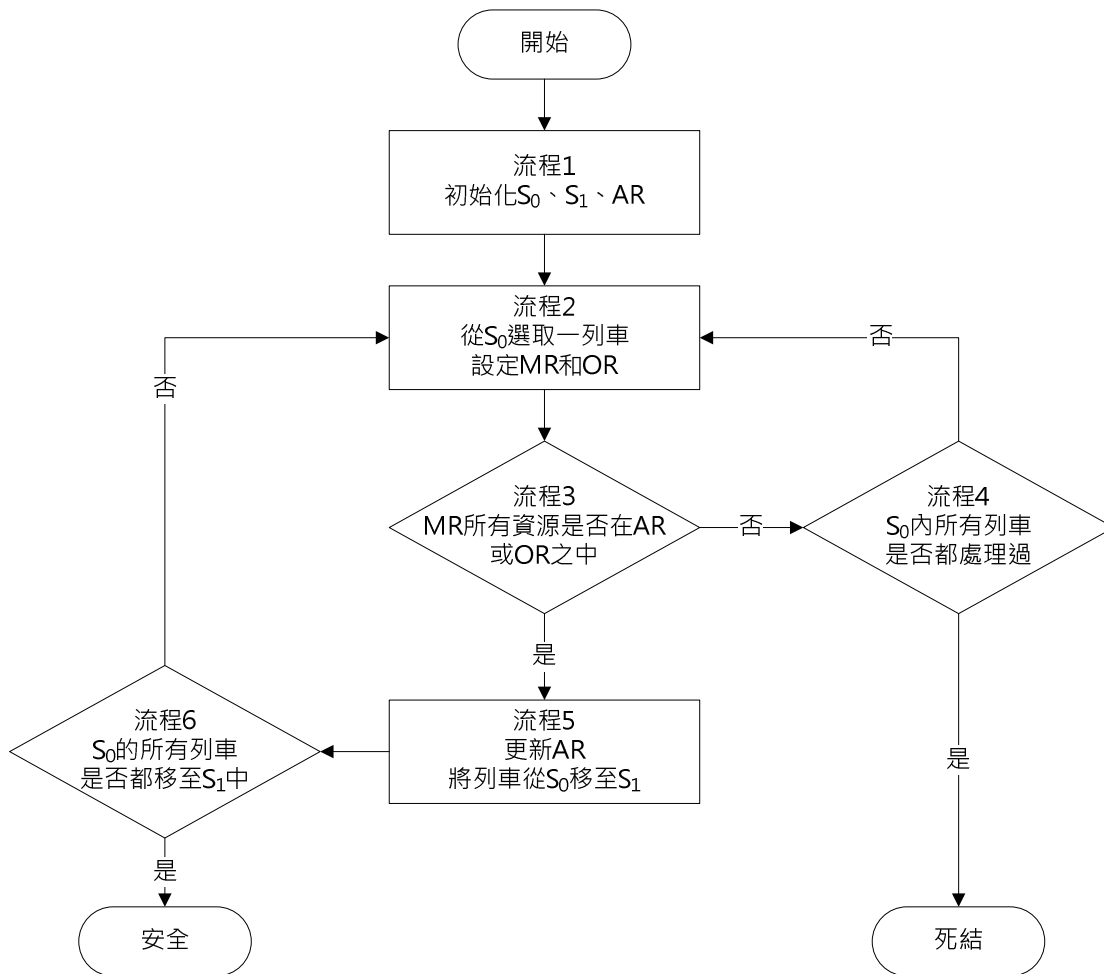


圖2-2 Banker's Algorithm 的流程圖

當系統中一列車要使用某個資源的時候，便可透過上述流程來判定是否會造成死結，以圖 2-3 為例，若 t_1 列車要離開 A 站進入 L1 區間，利用 Banker's Algorithm 來判斷是否會發生死結的演算過程如表 2.1，結果顯示會造成死結。

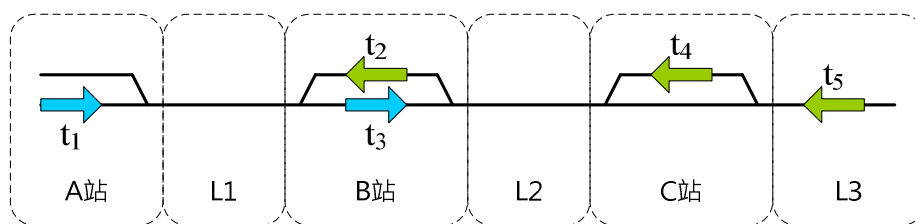


圖2-3 Banker's Algorithm 範例

表2.1 Banker's Algorithm 範例之演算過程

流程編號	過程
1	$S_0 = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$, $S_1 = \{\}$, $AR = \{A \text{ 站}(1), L2, C \text{ 站}(1)\}$
2	從 S_0 取出 t_1 $MR = \{A \text{ 站}, L1, B \text{ 站}, L2, C \text{ 站}, L3\}$, $OR = \{A \text{ 站}, L1\}$
3	MR 內的 B 站和 L3 不在 AR 或 OR 之中
4	S_0 內的 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 列車還沒處理
2	從 S_0 取出 t_2 $MR = \{B \text{ 站}, L1, A \text{ 站}\}$, $OR = \{B \text{ 站}\}$
3	MR 內的 L1 不在 AR 或 OR 之中
4	S_0 內的 t_3 、 t_4 、 t_5 列車還沒處理
2	從 S_0 取出 t_3 $MR = \{B \text{ 站}, L2, C \text{ 站}, L3\}$, $OR = \{B \text{ 站}\}$
3	MR 內的 L3 不在 AR 或 OR 之中
4	S_0 內的 t_4 、 t_5 列車還沒處理
2	從 S_0 取出 t_4 $MR = \{C \text{ 站}, L2, B \text{ 站}, L1, A \text{ 站}\}$, $OR = \{C \text{ 站}\}$
3	MR 內的 L1 不在 AR 或 OR 之中
4	S_0 內的 t_5 列車還沒處理
2	從 S_0 取出 t_5 $MR = \{L3, C \text{ 站}, L2, B \text{ 站}, L1, A \text{ 站}\}$, $OR = \{L3\}$

3	MR 內的 L1 不在 AR 或 OR 之中
4	S_0 內所有列車皆處理過
	死結

2.1.2 Petersen & Taylor Algorithm

此方法適用於每座車站的軌道配置皆是兩軌的單線區間，其計算方式非常單純，要檢驗一列車開行是否會造成死結，其方法為先定義一個起始值為 1 的計數器，從列車開行的起始點沿著路線巡視，在巡視的過程中若遇到同向列車，則將計數器加 1；若有可供交會的側線，則計數器減 1。當計數器的數值變成為 0，或者巡視過程能順利列車到達終點站，表示該列車開出不會造成死結。以圖 2-4 為例，若 t_1 列車要離開 A 站，根據 Petersen & Taylor Algorithm 計算的結果，不會發生死結。

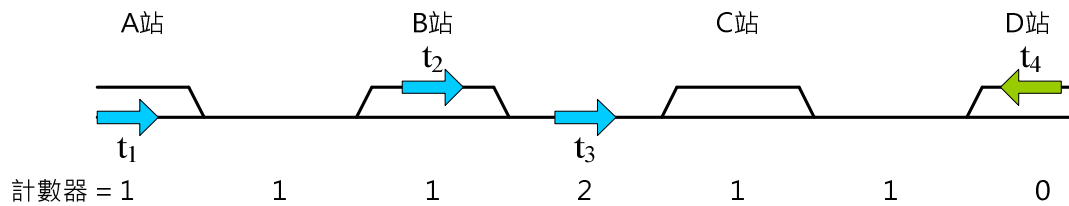


圖2-4 Petersen & Taylor Algorithm 範例

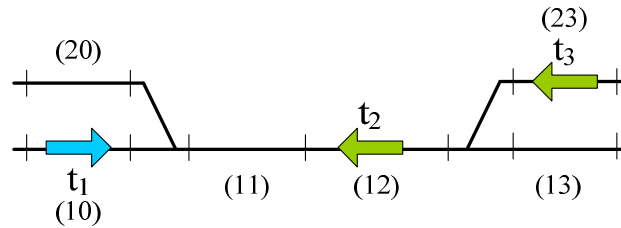
2.1.3 Movement Consequence Analysis (MCA)

此方法透過分析列車運行所造成的一系列的必然結果，來判定該列車運行是否會造成死結，在此所稱的必然結果分為兩類：

(1) 主要結果 (Primary Consequence)

主要結果來自於不同列車之間要保持安全的間距，包含：

- 當列車要進入一個軌道段時，則該軌道段的列車必須先離開。如圖 2-5 中 t_3 列車要進入軌道(12)，其主要結果便是 t_2 列車要進入軌道(11)。
- 當列車要進入有對向列車的區間時，則最後一列對向列車必須離開該區間。如圖 2-5 中 t_1 列車要進入軌道(11)，其主要結果便是 t_2 列車要進入軌道(20)。



(2) 從屬結果 (Secondary Consequence)

以圖 2-6 為例，若要測試列車 1 要進入軌道 11 是否會造成死結，透過 MCA 演算的結果如圖 2-7，最後列車 4 也必須使用軌道 11，因此會造成死結。

圖2-6 MCA 範例

圖2-7 MCA 範例之演算結果

2.1.4 Dynamic Route Reservation (DRR)

此方法是在列車運行的過程中，必須先根據以下規則預定軌道，若列車無法預訂軌道，或者不是預訂的第一位，則不能進入該軌道，當列車依照預訂的次序使用軌道，便能避免死結的發生。

- 規則 1
列車被授權進入一段軌道前，必須先預訂之。
- 規則 2
若預訂的軌道是雙向使用（站內軌除外），則離開該軌道的軌道也要預訂，如圖 2-8 中的列車 1 和列車 2。

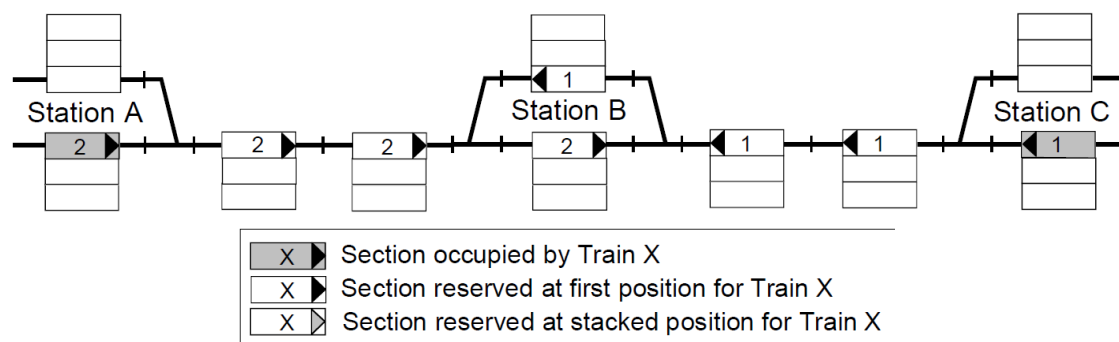


圖2-8 DRR 範例一

- 規則 3
若要預訂的軌道已經被其他列車預訂或佔用，則依序排在其他列車後面預訂，如圖 2-9 中的列車 3。

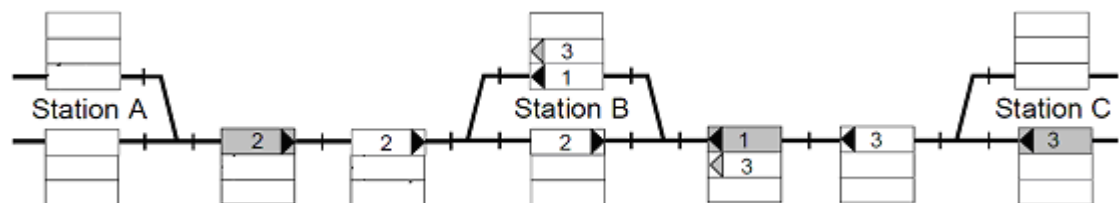


圖2-9 DRR 範例二

- 規則 4
若列車所預訂的軌道後面有其他列車預訂，則該列車必需有預訂進入下一段軌道，如圖 2-10 中的列車 1。

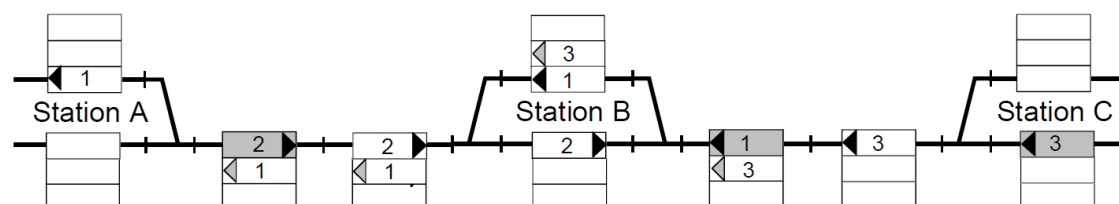


圖2-10 DRR 範例三

- 規則 5

若要預訂的軌道已經被其他反向列車預訂，而反向列車需依規則 4 預訂下一段軌道，若該下一段軌道與原列車的軌道相同，則預訂失敗，如圖 2-11 中的列車 4 於車站 B 不能預訂列車 3 所預訂之軌道，但可以預訂另一條軌道，如圖 2-12。

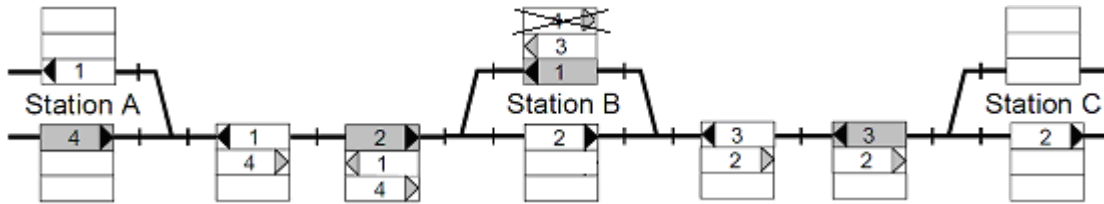


圖2-11 DRR 範例四

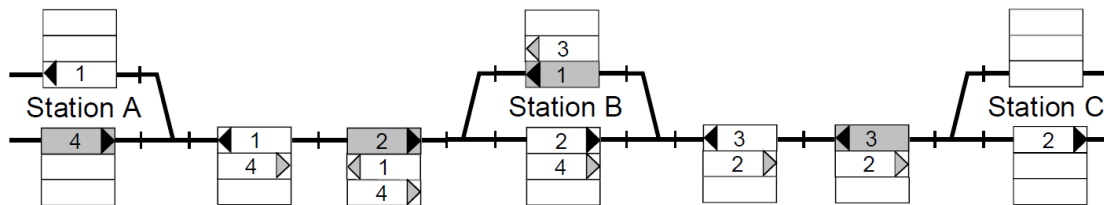


圖2-12 DRR 範例五

- 規則 6：

一個預訂可以成功的條件，包含依規則 2 和規則 4 所延伸的所有預訂也必須成功。

- 可依實際應用情況彈性修改或增加規則

2.1.5 小結

從以上各種方法歸納可知，要避免列車運轉發生死結，便要隨時檢視區間內是否有足夠的軌道供列車進行交會。Banker's Algorithm 和 Petersen & Taylor Algorithm 兩方法主要是透過計算數量，來評估軌道是否足夠列車交會，然而列車佔用軌道的情形是隨時間一直變動，為了確保列車到達時能順利交會，不會造成死結，這兩個方法的評估較為保守，例如圖 2-3 之範例，雖然透過 Banker's Algorithm 評估會發生死結，但只要適當地安排列車運行的順序還是能後避免。有鑑於此，MCA 和 DRR 兩方法更加入了動態的考量，而其中 DRR 的演算方式又較 MCA 直觀，所以本研究決定採用 DRR 作為處理死結的方法來發展模式。

2.2 單線連續區段容量分析模式

2.2.1 模式概觀

本研究係以過去容量研究成果為基礎來發展單線連續區段容量分析模式，本模式的輸入參數除了包含單一區段容量模式原有之輸入，如車站參數、站間運轉時間、停站時間和交通組成等，也納入了單一區段容量模式之部分輸出，如進站和離站號誌時距，兩者關聯如圖 2-13。

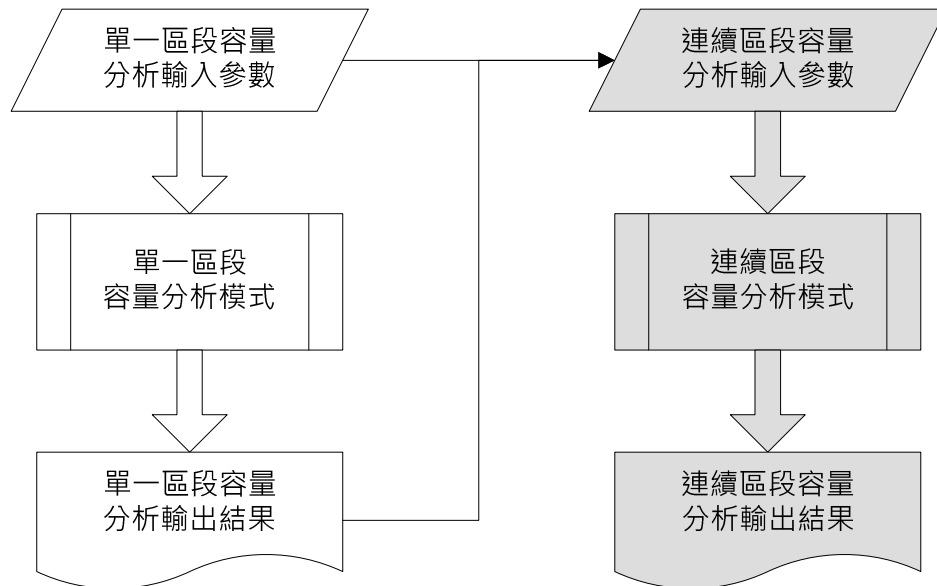


圖2-13 單線連續區段與單一區段容量分析模式關連圖

容量可視為最大頻率或最大流率，也就是每單位時間最多可通過多少列車，因此本模式演算的基本概念即為在單線連續區段的兩端連續地發送列車，然後觀測列車到達兩端終點站的情況來評估此連續區段之容量，如圖 2-14。

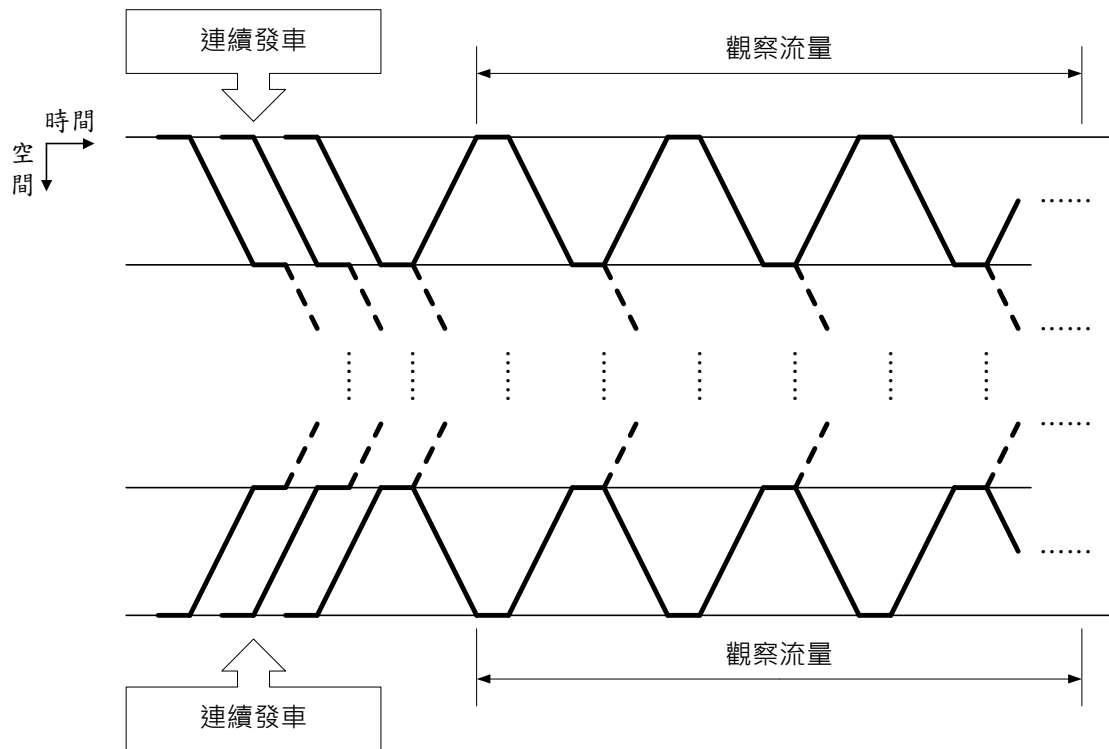


圖2-14 單線連續區段容量分析模式之演算概念

本模式採用離散事件導向 (Discrete Event-Orientation Simulation) 的系統模擬方法，來模擬列車從兩端點運行到終點的運轉過程，對於組成離散事件模擬之要素，如實體 (Entity)、資源 (Resource)、事件 (Event)、規則 (Rule) 與狀態 (State) 等，本模式與之對應項目如表 2.2 所示。

表2.2 單線連續區段容量分析模式與離散事件模擬組成要素的對應項目

組成要素	對應項目
實體	列車
資源	站間軌道、站內軌道
事件	列車到站、列車離站
規則	列車運轉基本規則
狀態	列車佔用軌道的情況

在模式中係以每列車到達和離開各車站的運行過程當作成一連串的事件，如圖 2-15 所示。隨著事件依序發生，系統的時間便會不斷往前推進，同時也會改變列車佔用軌道的情況，其中軌道分為兩類：站間軌道可讓同向列車接續通過，而站內軌道同時只能讓一列車佔用。在模擬過程中，透

過調整事件的發生時間，來避免系統不會發生死結，並確保各列車要遵循下列運轉基本規則。當所有事件都完成後，便結束模擬。

- (1) 先續行列車要保持足夠的號誌時距。
- (2) 列車在站間運行時不能追撞同向先行列車，也不能對撞反向列車。
- (3) 列車的運轉時間不可改變。

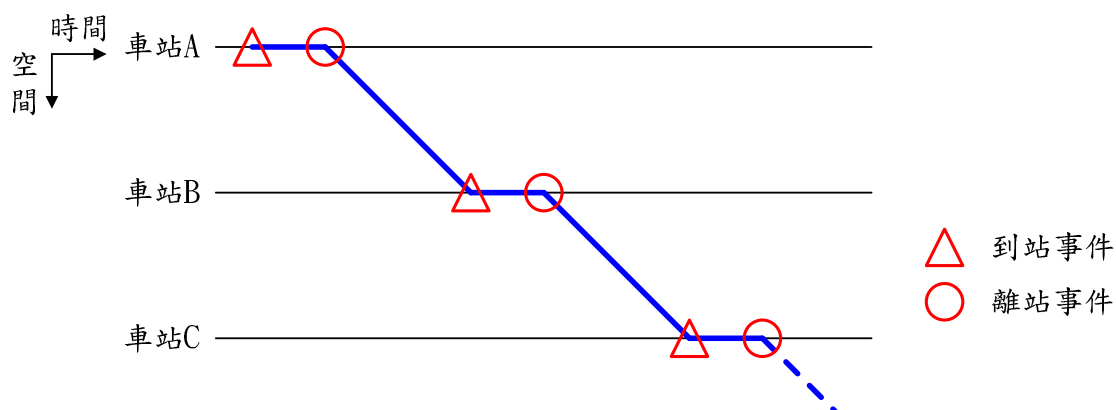


圖2-15 列車的進/離站事件示意圖

2.2.2 整體流程

圖 2-16為本模式的模擬流程，首先根據列車運轉時間和停站時間設定來產生各列車的到站與離站事件，並將每列車的第一個事件放入事件列表中，接著便依照事件預計發生的時間先後逐一處理列表中的事件，處理的過程包含預訂軌道、進行檢核，若還不能使用軌道或沒通過檢核，則計算後移量，調整事件的發生時間後，將事件放回事件列表中；若可以使用軌道且通過檢核，則表示該列車可以完成該事件，然後將下一事件放入事件列表。如此反覆進行，直到事件列表中的所有事件都完成為止，對於整個過程中的預約軌道機制、檢核機制、後移量之計算以及回溯機制則分別說明如下。

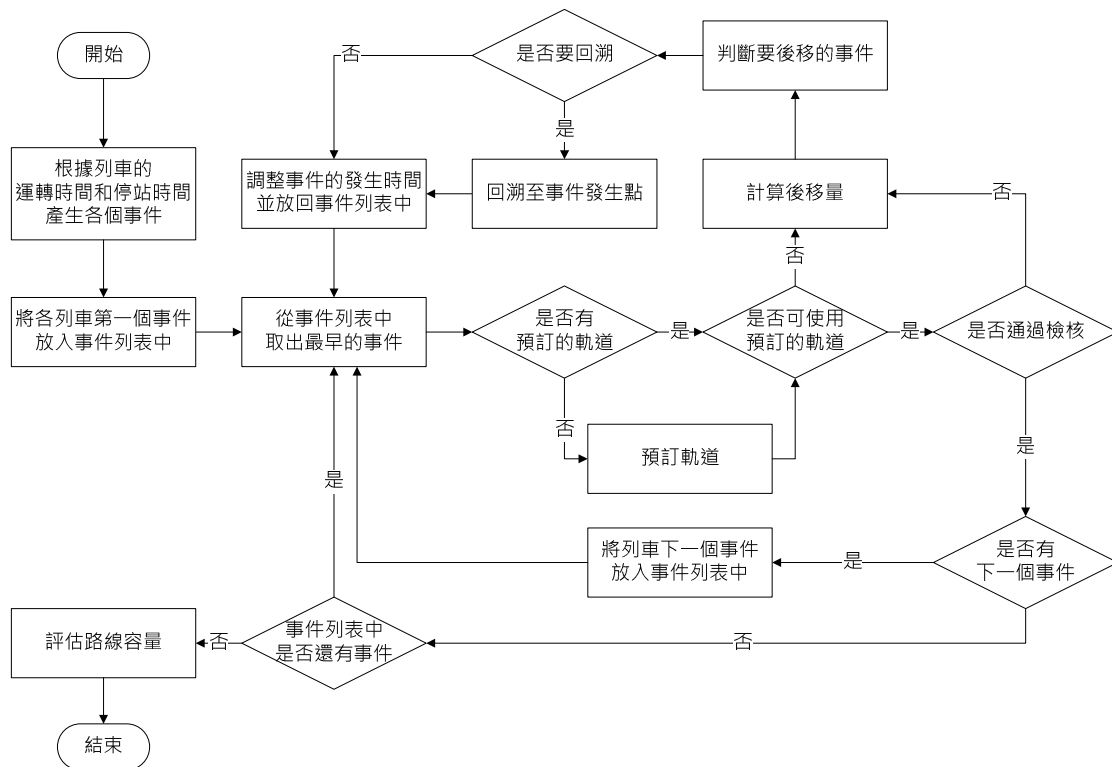


圖2-16 單線連續區段容量分析模式整體流程圖

(1) 預訂軌道機制

預訂軌道機制是為了避免在模擬的過程中發生列車打死結的情形，本機制係以 DRR 方法為基礎改良而成，差異在於當列車使用完軌道後，本機制只將其從預約列表中標記為已使用，而不是如原本 DRR 的做法將其移除，以圖 2-17 為例，列車 1 離開車站 C 後，則標記列車 1 已使用完車站 C 的站內軌。

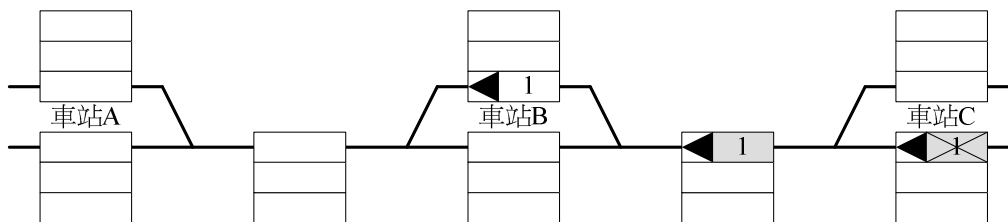


圖2-17 預訂軌道機制範例一

此外，由於本模式的軌道模型只區分站間軌與站內軌，不像原本 DRR 將一個站間切分成數個軌道區間，因此列車若要使用站間軌，即使不是第一位預訂者，只要與前一列車的運轉方向相同便可使用，以圖 2-18 為例，列車 3 離開車站 C 後，可接續在列車 1 之後使用站間軌道；若是站內軌，則同樣必須為第一位預訂者才能使用。

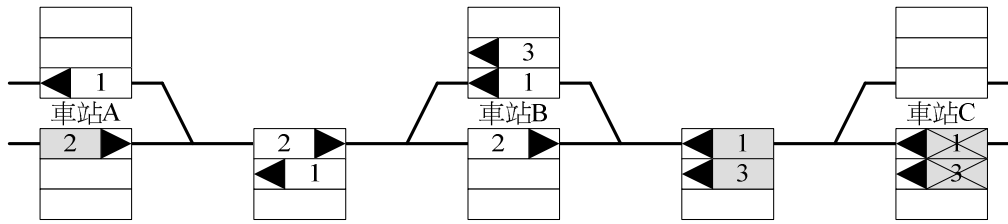


圖2-18 預訂軌道機制範例二

(2) 檢核機制

檢核的目的為確保在模擬的過程中，各列車之間能保持足夠的號誌時距、在車站內不會同時佔用同一股道，以及在站間避免發生列車追越或對撞等運轉基本規則，而根據事件的類型，檢核的項目有所不同，如表 2.3 所示。

表2.3 事件類型與檢核項目對照表

事件類型	檢核項目
到站事件	<ul style="list-style-type: none"> ● 站間追撞先行列車 ● 站內軌道重複佔用 ● 與同向到站列車號誌時距不足
離站事件	<ul style="list-style-type: none"> ● 站間對撞反向列車 ● 與同向離站列車號誌時距不足 ● 與反向進站列車號誌時距不足

(3) 後移量之計算

當列車還不能使用預訂的軌道或檢核機制不通過時，則是將該事件的發生時間延後，而時間的後移量在不同的狀況下有不同的計算方式，如表 2.4。

表2.4 不同狀況下的後移量計算方式

狀況	後移量之計算
還不可使用預訂的軌道	後移至前一預約的發生時間之後
站間追撞先行列車	後移至先行列車進站的時間之後
站間對撞反向列車	後移至反向列車進站的時間之後

站內軌道重複佔用	後移至先行列車離站的時間之後
號誌時距不足	後移至號誌時距足夠

(4) 回溯機制

當調整列車到站事件的發生時間時，會使列車無法按照時刻表所預訂的運轉時間運行，如圖 2-19，如此所求得的容量則不是本模式所要求取的時刻表容量，因此在調整列車到站事件的時間時，必需從上一個停站處的離站事件來調整，如圖 2-20。

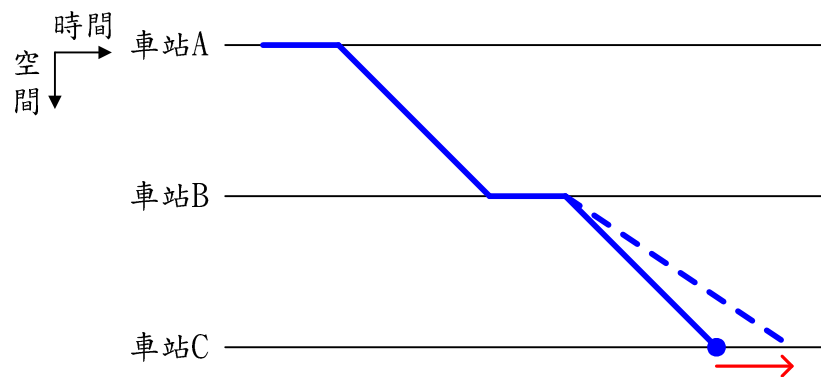


圖2-19 僅調整進站事件會影響運轉時間

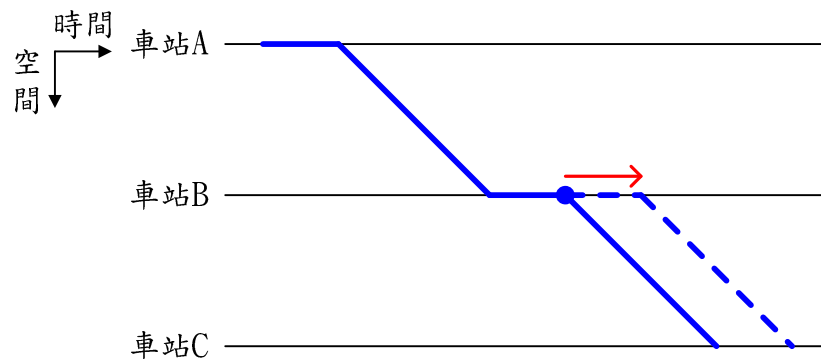


圖2-20 從前一離站事件進行調整不影響運轉時間

然而，調整了上一個停站處離站事件的時間，可能還會進而影響後續的其他事件，因此本模式利用回溯機制，將系統的狀態回復到該列車上一停站處離站事件的時間點，如此再繼續進行模擬，便能將後續對其他事件的影響納入考慮，回溯的內容除了事件列表外，還有各個軌道的預約列表與使用情況。

2.2.3 範例展示

本節以圖 2-21之範例展示本模式之模擬流程，圖中為 4 個車站之路線，處裡列表內已經分別將 4 列車最早發生的事件依時間先後排序，首先處理列車 1 於車站 D 的離站事件，依照預訂軌道機制預訂了車站 D 到車站 C 的站間軌和車站 C 的站內軌，檢核也符合運轉基本規則，因此可以順利離站，將列車 1 移入站間軌，並標示已使用完車站 D 的站內軌，同時也將列車 1 的下個事件（於車站 C 的到站事件）放入事件列表，如圖 2-22，此時事件列表中最早發生的事件變成為列車 2 於車站 A 的離站事件，其處理過程如同列車 1 一樣可以順利進行。

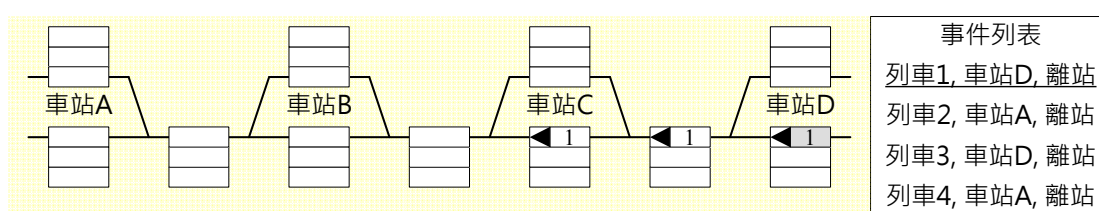


圖2-21 範例展示 1

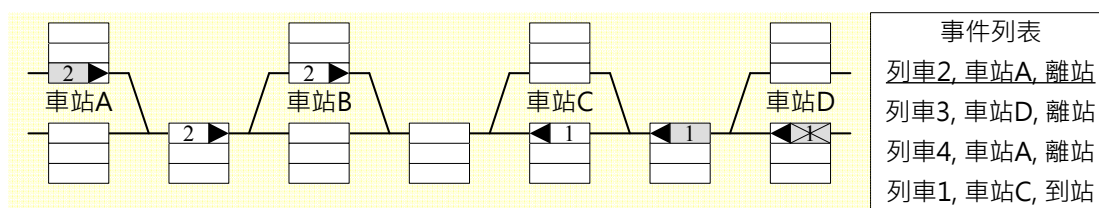


圖2-22 範例展示 2

再來輪到列車 3 於車站 D 的離站事件，如圖 2-23，同樣要先預訂車站 D 到車站 C 的站間軌和車站 C 的站內軌，根據預訂軌道的規則，列車 1 還必須繼續預訂後續的軌道：車站 C 到車站 B 的站間軌和車站 B 的站內軌。完成預訂後，列車 3 與列車 1 之間也符合運轉規則，因此可以離站進入站間軌。而後續列車 4 的處理情況與列車 3 相似，如圖 2-24所示。

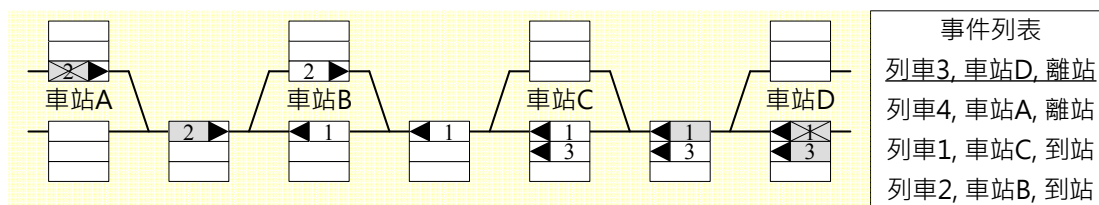


圖2-23 範例展示 3

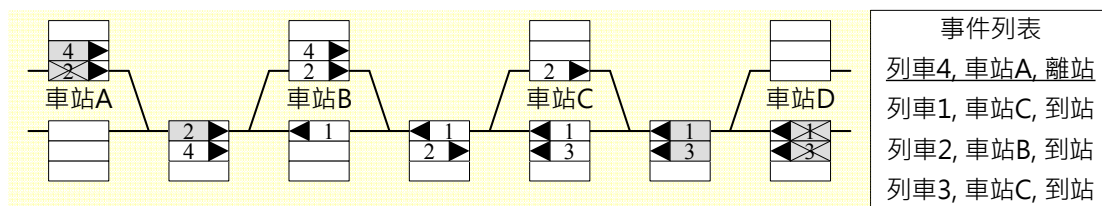


圖2-24 範例展示 4

處理完列車 4 於車站 A 的離站事件後，此時系統的狀態如圖 2-25，此時要處理列車 1 於車站 C 的到站事件，已經有預訂軌道，也是第一位預訂者，而且沒有違反運轉規則，可以順利執行，如圖 2-26。後續列車 2 於車站 B 的到站事件，也是相同的情況。

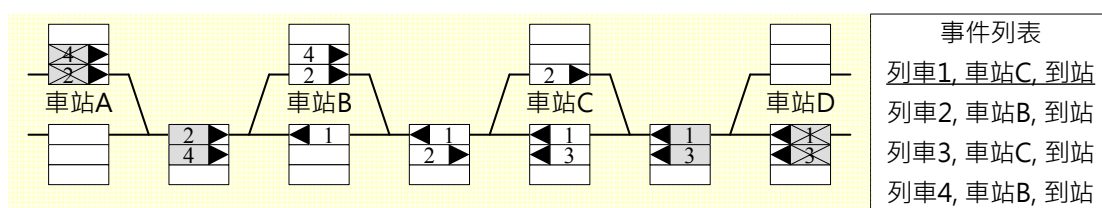


圖2-25 範例展示 5

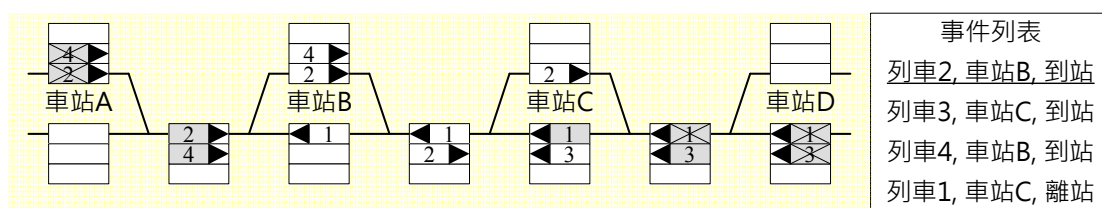


圖2-26 範例展示 6

然後是處理列車 3 於車站 C 的到站事件，如圖 2-27，由於其預約的軌道已經被列車 1 佔用尚未離開，所以列車 3 的到站事件時間必須後移，依照回溯機制，系統要回復到列車 3 於車站 D 離站時的情況，如圖 2-28，調整列車 3 於車站 D 的離站事件時間後，列車 4 於車站 A 的離站事件變為列表中最早發生的事件，如此根據流程繼續後續的模擬。

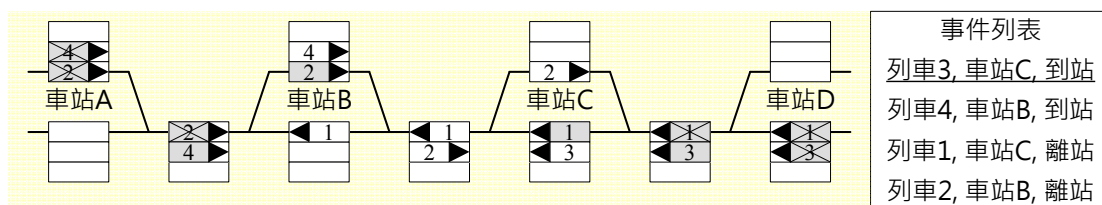


圖2-27 範例展示 7

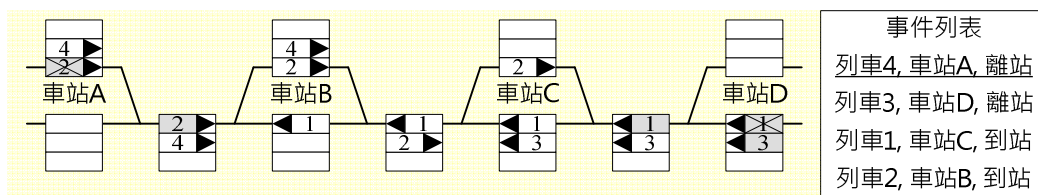


圖2-28 範例展示 8

2.3 案例測試

本研究自行設計案例來檢驗本模式的成效，此案例為一連續單線區段，其各項設定如表 2.5，根據這些設定可以預期若雙向列車連續對開，最後的結果應是一來一回整齊地交錯運行，而本模式模擬也確實得到這樣的結果，如圖 2-29所示，然後以中間列車最密集的時段來計算容量，此例之雙向容量約為 6.67 TU/hr。

表2.5 測試案例之各項設定

項目	設定
車站數	10 座
車站軌道配置	皆兩軌
車種數	1 種
列車數	雙向各 50 列
停站模式	每站皆停
停站時間	皆 1 分鐘
運轉時間	皆 8 分鐘
號誌時距	同軌道到開：4 分鐘 反向：1 分鐘 其它：3 分鐘

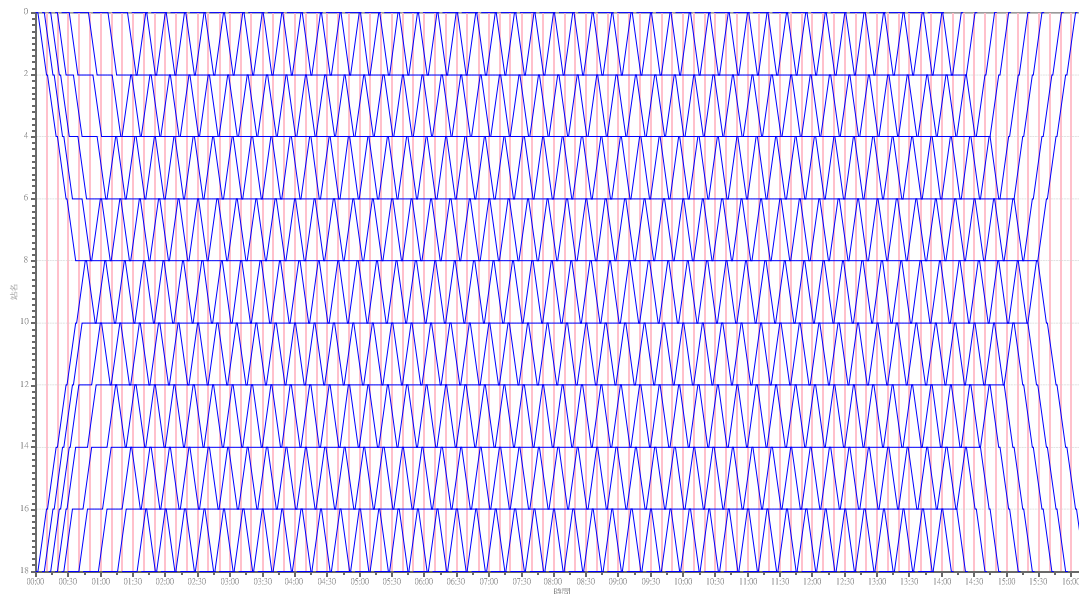


圖2-29 案例測試結果

3. 未來工作計畫

未來欲進行的後續工作內容如下：

1. 撰寫期中報告
2. 加入多車種組成的影響因素
3. 案例分析
4. 撰寫期末報告

4. 問題討論

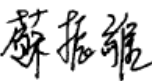
附錄 B 期中工作會議紀錄

「單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究(1/2)」

期中工作會議紀錄

一、時 間：103 年 5 月 29 日(星期四)上午 9 時 30 分

二、地 點：交通部運輸研究所七樓運輸規劃科技研究室

三、主持人：蘇組長振維、鍾志成博士  紀錄：黃笙琰

四、出(列)席單位及人員：

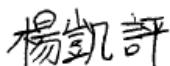
國立成功大學交通管理科學研究所鄭教授永祥



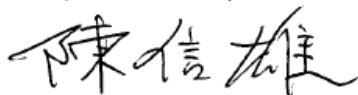
交通部鐵路改建工程局規劃組施副組長文雄



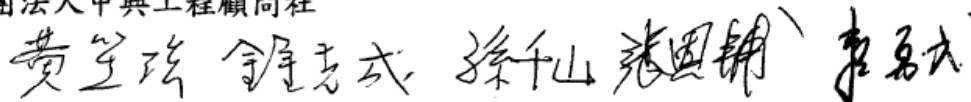
交通部臺鐵局楊站務員凱評



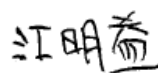
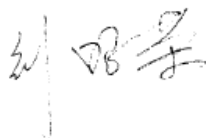
臺灣高鐵公司陳協理信雄



財團法人中興工程顧問社



本所運計組



五、主席致詞：(略)

六、簡報：(略)

七、出席人員發言要點：

(一) 國立成功大學交通管理科學研究所鄭教授永祥

1. 就剛剛的介紹中，DRR 相對於前面三種方法，會不會有前面方法能做到的，DRR 做不到？DRR 是否包含過去方法的優點。

鍾志成博士答覆：基本上，在死結的判斷與避免方面，由於 DRR 不僅考慮了軌道是否足夠列車交會，還加上軌道佔用動態的評估，因此 DRR 甚至比前面三種方法更精確地判斷與避免死結。

黃笙玗研究員答覆：不能說 DRR 完全包含過去方法的優點，至少在演算效率上，明顯就會比 Petersen & Taylor Algorithm 還差，但整體來說 DRR 是優於過去的方法。

2. 請問這模式是固定列車要每站皆停嗎？還是不同車種可以有不同的停站方式？

黃笙玗研究員答覆：目前本模式沒有限制列車的停站方式，除了起終點站必停之外，中間站皆可設定停靠或通過，未來加入多車種組成因素後，不同車種可以設定不同的停站方式。

3. 將來報告中對於各種死結處理的方法是否可以更清楚的說明？甚至可以在簡報中用動畫展示？

黃笙玗研究員答覆：未來在報告中，會詳加介紹各種死結處理方法的流程，並舉例說明。在期中審查的簡報中，若時間許可，會

用動畫的方式進行介紹。

(二) 交通部鐵路改建工程局規劃組施副組長文雄

1. 就剛剛對各種處理死結方法的介紹，DRR 演算法是最符合直覺的，但為何卻是到最近幾年才被提出？

黃笙玗研究員答覆：我認為主要原因在於資訊科技的進步，受限過去電腦的運算能力，縱然有較好的演算法，也難以被實作、被驗證，更不具實用性。直到近年來電腦記憶體容量大增、速度更快，且 CPU 也從單核心變成多核心，才使得此方法能夠被實現。

2. 請問模式中所謂的運轉時間，是否已經含有餘裕？

黃笙玗研究員答覆：運轉時間是否含有餘裕，以及含有多少餘裕，皆可由使用者自行設定，而模式中則會直接採用其設定值來進行演算，由於本模式目的在求取時刻表容量，因此模擬過程中，列車於每個站間的運轉時間不會改變。

3. 請問未來臺鐵來進行案例分析，預計要以哪個區間來進行分析？另外本模式是否可分析列車區間折返的情況？

黃笙玗研究員答覆：目前臺鐵系統中，臺東線、南迴線以及屏東線有連續多個單線區間，都是可進行案例分析的對象。其中臺東線由於比較有運量的壓力，且最近在進行電氣化工程也將部分區間改成雙軌，或許較為適合。

鍾志成博士答覆：本模式的前提是列車必須從路線起點一路開行至路線終點，若要分析列車區間折返的情況，可將整條路線從折返點分為兩段，然後兩段各別分析。

4. DRR 方法中，站間是以閉塞區間分成多個軌道段，而本研究的模式則是合併成站間軌，請問是怎樣的考量？

黃笙玗研究員答覆：此做法可大幅減少計算量，提升演算效率。由於模式中會隨時檢核列車在站間不能追越前車，且近離站時都要保持足夠號誌時距，因此也不會有不合理的運轉情況發生。

鍾志成博士答覆：，DRR 方法原先是用在多列車運轉模擬上，但本模式在計算容量時，其實不需要模擬列車在站間運行的細節，而是著重在列車進出站的事件。

(三) 交通部臺鐵局楊站務員凱評

1. 請問最後的測試例是否假設站間距離和運轉時間皆相同？

黃笙玗研究員答覆：是的，這樣的設計容易了解模式運作是否有問題，當然未來還會加入各種不同測試例，以確認模式的正確性，最後也希望臺鐵能提供資料，讓我們進行實際的案例分析。

2. 實務上當路線利用率愈高，運輸效率就愈差，請問這個模式是否可以反映這樣的現象？

鍾志成博士答覆：在過去運研所的容量系列研究中，曾發展過可

靠度模式，可反映當列車流量增加，則列車的延滯時間會呈指數成長，因此，理論上評審所述的模式是可以發展出來，不過不在這次研究案的工作範圍內。

(四) 臺灣高鐵公司陳協理信雄

1. 會議資料中所介紹的前三種方法是在檢驗是否會發生死結，而 DRR 是在過程中就排除死結的可能性，如果怎樣排除都無法避免，最終會不會還是發生死結？。

黃笙玗研究員答覆：在本模式中，若發現某一列車進入系統後會發生無法避免的死結，我們則會讓列車不要再進入系統之中。

2. 建議會議資料中 2.2.3 節的範例再多寫幾步，以利讀者了解。

另外在圖 2-13 中也再詳細說明連續區段容量模式和單一區段容量模式的關係，例如是使用了單一區段容量模式的哪些參數，又是用了哪些單一區段容量模式的演算結果當作參數。最後的測試例是否可以多設計幾種，由簡入繁，以確認這模式的正確性。

黃笙玗研究員答覆：感謝評審建議，將會在期中報告裡加強。

3. 模式在未來加入多車種的影響因素後，運轉時間是否會不同？

黃笙玗研究員答覆：加入多車種的影響因素後，每種車種可以各自設定其運轉時間。

(五) 交通部運輸研究所運計組蘇組長振維

1. 有關死結處理的各種方法，最後是否就決定採用 DRR 演算法，另外未來報告中會有各種方法的優劣比較嗎？

黃筌珖研究員答覆：因為 DRR 演算法同時考量了資源的運用與動態變化，且演算流程非常直觀，實作起來沒有如 MCA 方法那樣複雜，所以決定採用 DRR 來發展模式。將來報告中除了文字說明外，也會製表對各方法之優劣進行比較。

2. 對於模式演算的範例，是否可採用臺鐵系統來說明？

鍾志成博士答覆：範例的目的是希望將來讀者能夠容易了解模式操作的過程，因此建議是設計較單純的例子來說明，但期末報告就會以臺鐵的實際案例來進行分析。

3. 以目前單線連續區段容量分析模式的狀況，每次分析所需的演算時間為何？

黃筌珖研究員答覆：以本測試例有 10 座車站，雙向各開行 50 列車的規模，求解時間約為 0.09 秒，在演算效率方面應該算是不錯的。

4. 本研究未來是否有可能延伸應用在臺鐵實際的列車運轉調度上？

鍾志成博士答覆：若要實際應用在列車運轉調度上，則是要建置

一個系統，隨時接收列車的即時資料並進行分析運算，根據分析的結果可以用來輔助調度員進行列車調度。但值得注意的是，由於實際上列車仍然在運行，因此分析的速度必需要夠快才有實用價值。而且這當中還有個最大的問題，就是目前號誌電腦為一個封閉系統，無法將資料匯出供其他系統使用。

八、散會

附錄 C 期中簡報資料



交通部運輸研究所
Institute of Transportation, MOTC

單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究 (1/2)

期中簡報



簡報人：黃筌琰 研究員

 財團法人中興工程顧問社

中華民國103年7月22日

簡報內容

暨整體容量軟體改版研究 (1/2)
單線連續區段軌道容量模式分析

- 一、計畫背景介紹
- 二、研究工作流程
- 三、相關文獻回顧
- 四、單線連續區段容量模式
- 五、案例測試
- 六、後續研究方向



計畫背景介紹

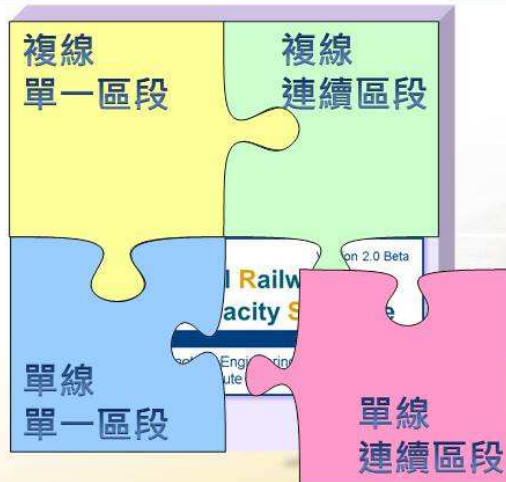
臺灣地區軌道系統容量研究架構暨臺北捷運系統容量分析

軌道容量研究－臺鐵系統容量模式建構分析

運輸系統容量分析暨應用研究－軌道系統

軌道系統容量與可靠度分析研究

單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究(1/2)



財團法人中興工程顧問社 3



計畫背景介紹

• 全程計畫概要

單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究

第一年度

- 蒐集回顧國內外相關文獻
- 建構單線連續區段容量分析模式

第二年度

- 開發單線連續區段容量分析功能
- 承襲既有功能進行容量分析軟體改版

單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究(1/2)

財團法人中興工程顧問社 4



研究工作流程



相關文獻回顧

• 單線軌道容量分析模式相關文獻

TCQSM	<ul style="list-style-type: none">連續區段內不得有可交會車站僅考慮單一車種
Parametric Capacity Model	<ul style="list-style-type: none">無法反映單複線位置配置不同不適合應用於其他系統
UIC Code 406	<ul style="list-style-type: none">計算容量利用率而非直接求取容量需先有時刻表才能進行分析
商用模擬軟體	<ul style="list-style-type: none">需先有時刻表才能進行分析無法得知其背後運作的邏輯細節

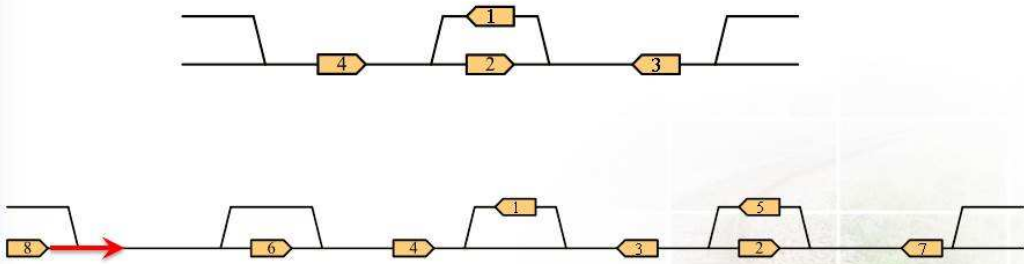
6 財團法人中興工程顧問社



相關文獻回顧

- 列車運轉死結處理相關文獻
 - 列車運轉死結問題

單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



7
財團法人中興工程顧問社



相關文獻回顧

- 列車運轉死結處理相關文獻
 - 造成死結的必要條件

單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



8
財團法人中興工程顧問社



相關文獻回顧

- 列車運轉死結處理相關文獻
 - 解決死結的策略



相關文獻回顧

- 列車運轉死結處理相關文獻
 - 避免發生死結的方法

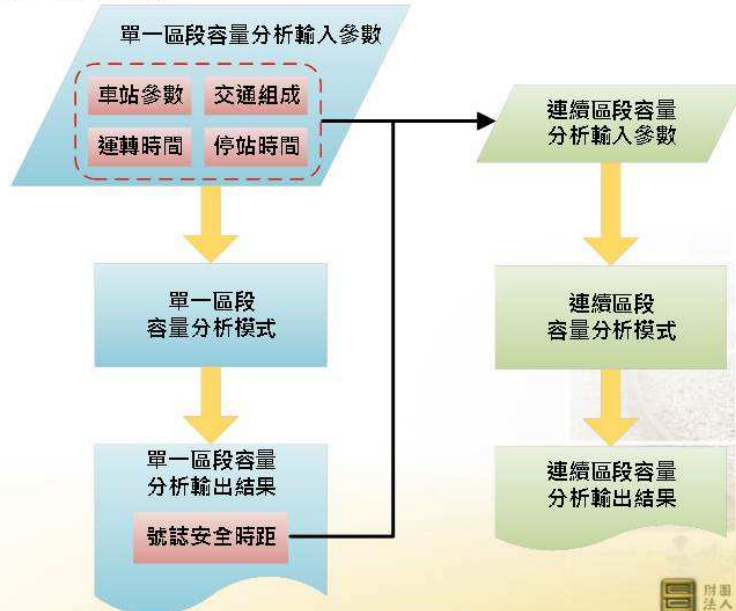
方法名稱	優點	缺點
Banker's Algorithm	<ul style="list-style-type: none"> 流程單純 容易實作 	<ul style="list-style-type: none"> 演算效率較差 較保守
Petersen & Taylor Algorithm	<ul style="list-style-type: none"> 規則簡單 運算快速 	<ul style="list-style-type: none"> 較保守 適用範圍小
Movement Consequence Analysis (MCA)	<ul style="list-style-type: none"> 考量軌道使用的動態 僅須檢視有影響的列車 	<ul style="list-style-type: none"> 演算過程複雜且不直觀 不易實作
Dynamic Route Reservation (DRR)	<ul style="list-style-type: none"> 考量軌道使用的動態 規則具有調整的彈性 	<ul style="list-style-type: none"> 規則較複雜 運算時需維護較多資料



單線連續區段容量分析模式

- 模式架構

單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究(1/2)



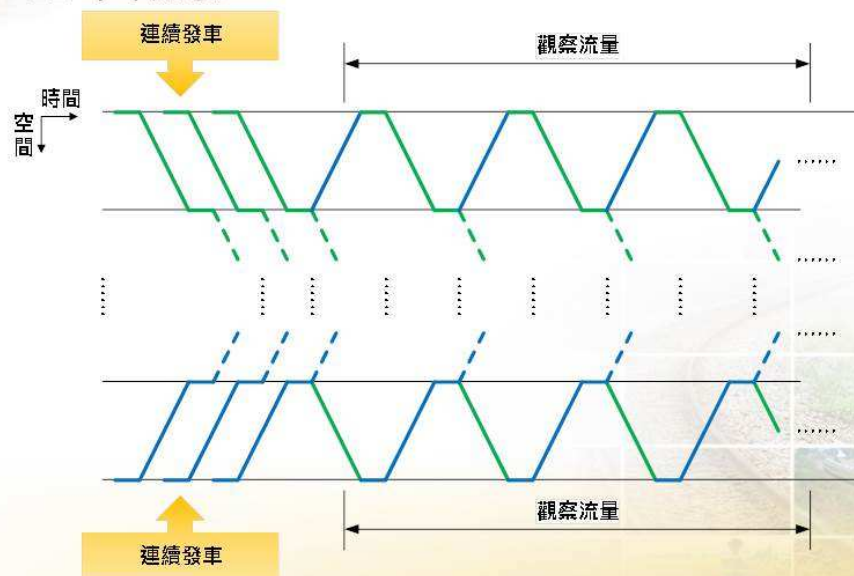
財團法人中興工程顧問社

11



單線連續區段容量分析模式

- 基本概念



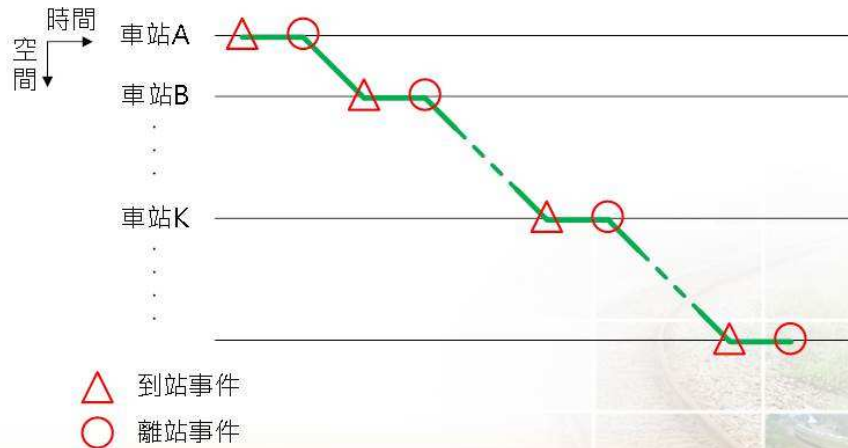
財團法人中興工程顧問社

12



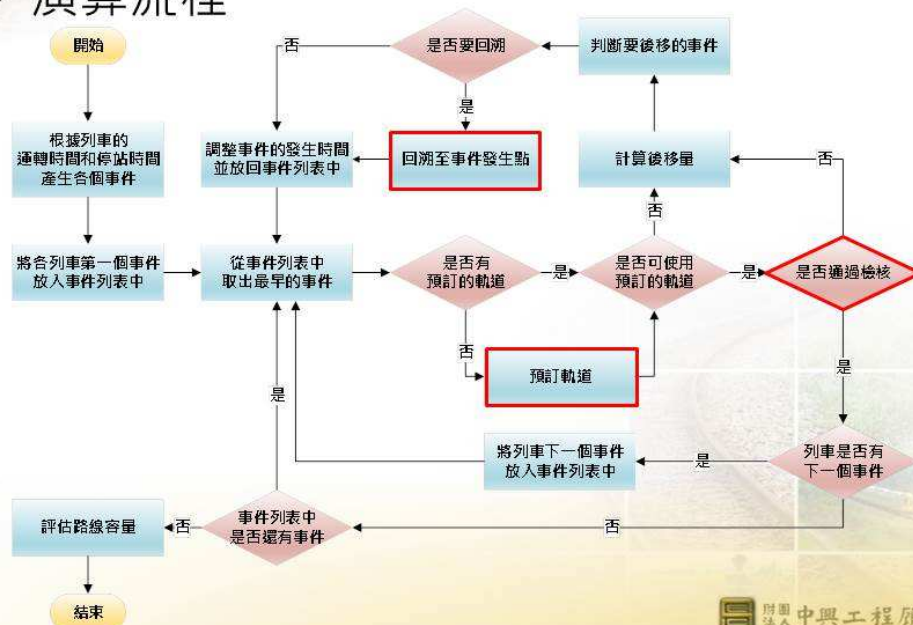
單線連續區段容量分析模式

• 基本概念



單線連續區段容量分析模式

• 演算流程



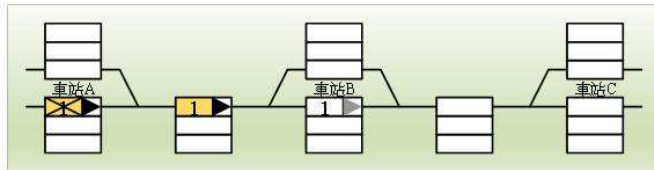


單線連續區段容量分析模式

• 演算流程

— 預訂軌道

- 規則1
列車被授權進入一段軌道前，必須先預訂之。
- 規則2
若預訂的是雙向使用的軌道（站內軌除外），則須再預訂下一段軌道。
- 規則3
當列車使用完軌道後，將其從列表中標記為已使用。

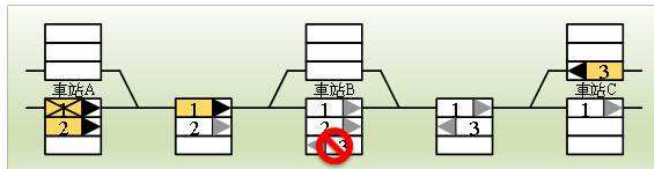


單線連續區段容量分析模式

• 演算流程

— 預訂軌道

- 規則4
若要預訂的軌道已經被其他列車預訂或佔用，則依序排在其他列車後面預訂。
- 規則5
若列車所預訂的軌道後面有其他列車預訂，則該列車必需有預訂進入下一段軌道。
- 規則6
若某一列車要預訂的軌道已經被其他反向列車預訂，而反向列車需依規則5預訂下一段軌道，若該下一段軌道已經被原列車預定，則預訂失敗。





單線連續區段容量分析模式

• 演算流程

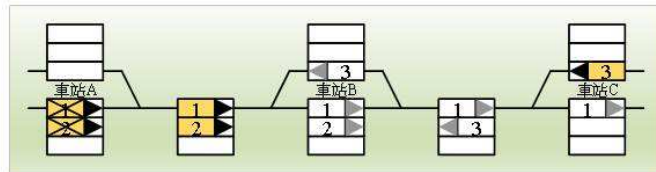
— 預訂軌道

• 規則7

一個預訂可以成功的條件，包含依規則2和規則5所延伸的所有預訂也必須成功。

• 規則8

列車必須是第一位預訂者，才能使用站內軌。若是使用站間軌，即使不是第一位預訂者，只要與前一列車的運轉方向相同便可接續使用。



單線連續區段容量分析模式

• 演算流程

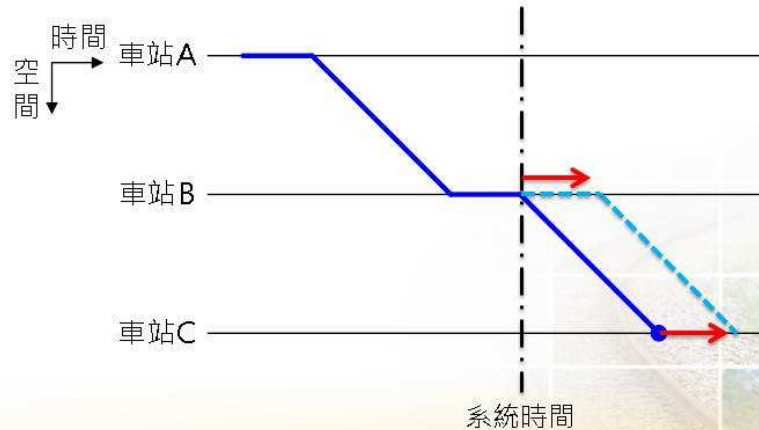
— 檢核內容

事件類型	檢核項目
到站事件	<ul style="list-style-type: none"> • 站間追撞先行列車 • 站內軌道重複佔用 • 與同向到站列車號誌時距不足
離站事件	<ul style="list-style-type: none"> • 站間對撞反向列車 • 與同向離站列車號誌時距不足 • 與反向進站列車號誌時距不足



單線連續區段容量分析模式

- 演算流程
 - 回溯機制



單線連續區段容量分析模式

- 演算流程
 - 回溯機制
 - 回溯事件列表

事件列表

列車3,車站C,到站
列車4,車站B,到站
列車1,車站C,離站
列車2,車站B,離站

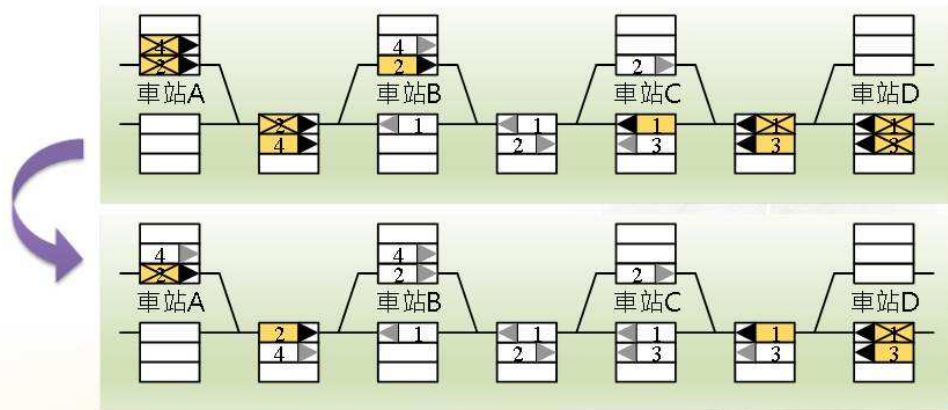
已執行列表

列車1,車站D,離站
列車2,車站A,離站
列車3,車站D,離站
列車4,車站A,離站
列車1,車站C,到站
列車2,車站B,到站



單線連續區段容量分析模式

- 演算流程
 - 回溯機制
 - 回溯軌道預約與使用情況



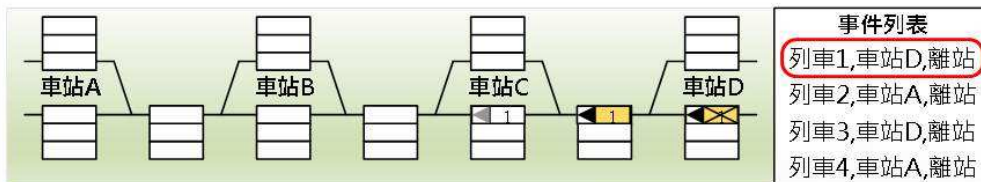
單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



單線連續區段容量分析模式

- 範例展示

◀ n 列車 n 預訂軌道 ◀ n 列車 n 所在位置 ◀ n 列車 n 已使用完軌道



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



案例測試

- 基本測試
 - 參數設定

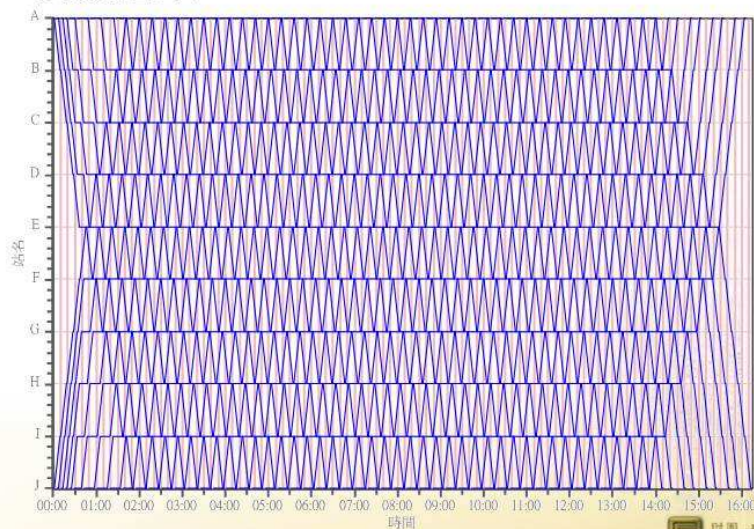
項目	設定
車站數	10座
車站軌道配置	皆兩軌
車種數	1種
列車數	雙向各50列
停站模式	每站皆停
停站時間	皆1分鐘
運轉時間	皆8分鐘
號誌時距	同軌道到開：4分鐘 反向：1分鐘 其它：3分鐘

單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



案例測試

- 基本測試
 - 模擬結果

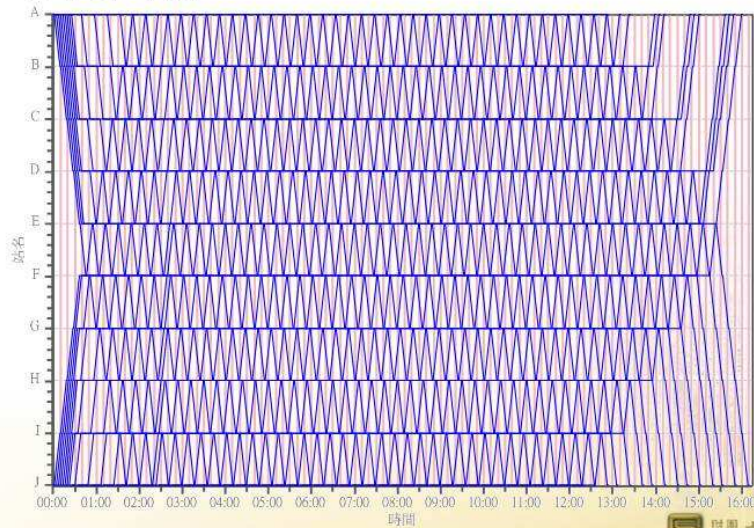


單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



案例測試

- 進階測試
 - 站內三軌



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

25

財團法人中興工程顧問社



案例測試

- 進階測試
 - 跳站停靠



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

26

財團法人中興工程顧問社



案例測試

- 進階測試
 - 各站間距離不同



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

27 財團法人中興工程顧問社



案例測試

- 效能測試

車站數 列車數	4	7	10	13	16
50	0.06	0.06	0.09	0.17	0.63
100	0.22	0.25	0.33	0.5	1.37
200	1.41	1.53	1.78	2.31	4.74
400	10.57	10.62	11.75	13.65	22.39
800	81.63	82.17	87.34	96.16	132.37

單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

28 財團法人中興工程顧問社



後續研究方向

加入多車種組成的影響因素

確認容量評估方式

進行臺鐵案例分析

簡報結束 敬請指教



單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究(1/2)

附錄 D 期中審查意見處理情形

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
交通部 鐵路改 建工程 局規劃 組施副 組長文 雄	Dynamic Route Reservation (DRR)方法應用於單線容量之分析最為直觀，但模式發展應先從簡單案例再進階至實務複雜案例，惟目前臺鐵系統於花東線及南迴線尚有部分區間係複線(甚至雙單線)與單線混雜運行之情況，並無單純之單線營運型態，且電氣化後亦併存有花蓮—高雄及花蓮—臺東區間折返之運行模式，本研究模式應如何因應處理上述實務複雜之營運型態，建議補充分析。	誠如評審所言，模式發展應從簡再繁，本模式現階段僅能處理連續單線區間，而過去已有發展模式可處理連續複線區間，因此若要應用於單、複線混雜之路線，必須依單、複線分布情況將之先切分成數個連續區段，再分別進行分析。 至於未來花東線電氣化後，將有花蓮—高雄及花蓮—臺東區間折返之運行模式，由此可知花蓮—臺東與臺東—高雄的交通組成顯然不同，因此可以臺東站為界，切分成兩區段分別進行分析。	同意承辦單位之處 理意見
	另有關花蓮—高雄及花蓮—臺東區間折返之相關資源競合，及折返列車與通過列車併行之問題，本研究模式可否處理，建議亦應妥為考量分析。	花蓮—高雄及花蓮—臺東區間折返之營運模式，在路線容量上可分別分析花蓮—臺東與臺東—高雄兩區段之容量。但對於臺東站內之通過與折返列車的軌道資源運用，實屬於另外一種稱作車站容量之課題，與本研究所探討之課題差異甚大，但若國內有此需求，可作為運研所未來研究之方向。	同意承辦單位之處 理意見

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
交通部 鐵路改 建工程 局規劃 組施副 組長文 雄	運轉時隔於複線運行時至為重要，惟有關單線與複線銜接處之運轉時隔應如何處理，建議亦應考量。	單線與複線區間的路線容量係分開處理，亦即，將銜接車站視為端點車站，在分析單線區間的路線容量時，銜接車站是考慮列車離站、進站，以及列車交會時隔；而在分析複線區間的路線容量時，則是考慮列車離站及進站時隔。	同意承辦單位之處 理意見
	不同車種組成與列車優先順序皆會影響路線容量，就營運策略而言可從「整體平均運轉時間最短」或「整體列車待避時間最短」二者擇一執行，惟選擇何種營運策略將會決定調度策略及容量大小，亦會影響列車整體準點率，故本研究模式係如何權衡考量，請補充說明。	本研究希望在盡量排除人為因素的影響下來評估路線容量，因此調度策略以「先到先服務」為原則。至於車種組成以及列車在始發車站的運行順序，模式中將會根據交通組成比例隨機產生大量列車，如此便能考量各種車種與順序組合可能性來計算容量。	同意承辦單位之處 理意見
	有關本模式演算流程規則 5 條「若列車所預訂的軌道後面有其他列車預訂，則該列車必須有預訂進入下一段軌道」，惟若該列車之優先順序較後面列車為低，則該列車是否應選擇待避而不需預訂進入下一段軌道，建請考量。	目前本模式僅考量一種車種，因此暫無列車優先順序，後續研究將會加入多車種考量，此時規則 5 可能就必須做適當之修改。	已於期 末 報告中回 應處理
成功大 學鄭教 授永祥	報告之文獻回顧中提到解決死結（Deadlock）策略之「預防」及「避免」，其在處理上有何差別，建議可於報告中說明。	依評審意見辦理。	同意承辦 單位之處 理意見

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
成功大學鄭教授永祥	有關文獻中避免死結 (Deadlock) 之 Dynamic Route Reservation (DRR) 方法中，其缺點係為規則較複雜，其係指因系統之複雜性而使規則自然衍生抑或需透過專家學者加以因應制訂而產生，建議再說明。	依評審意見辦理。	同意承辦單位之處 理意見
	DRR 方法未來運算時需維護較多資料，為因應實際狀況之操作需求，其需維護那些資料，建議於報告中補充說明。另針對未來使用者操作需要，其需要何種訓練、養成方式，建議補充說明。	所謂須維護較多資料，係指和其他方法相比，DRR 方法演算的過程中須額外維護各軌道的預約列表等資料，若未來開發了工具程式，則維護這些資料的工作將由電腦來做，不會增加使用者負擔，未來報告中將會補充說明。	已於期 末 報 告 中 回 應 處 理
	本研究雖為單線容量分析研究，惟未來是否有機會作為臺鐵系統複線於發生事故時，以單線運轉即時調度之應用，建議考量，俾提升本研究之價值。	本模式之功能在於計算路線容量，未來可應用於評估若臺鐵系統複線於發生事故時，而改以單線運轉時的容量變化，有助於臺鐵擬定旅客疏運替代方案。但若要應用於輔助線上即時調度，最大問題在於號誌電腦為封閉系統，其他系統無法介入。	同意承辦 單位之處 理意見
	因未來本研究之單線及連續區段長度皆可能影響模式之處理規則及資料處理量，故建議有關區段之長度定義應補充說明。	依評審意見辦理。	同意承辦 單位之處 理意見
臺鐵局 運務處 綜合調 度所楊 調度員 凱評	報告 P2-4 至 P2-6 之軌道佈置圖部分有誤，如圖 2-5 花東線之部分車站及圖 2-6 之「大甲」站皆需更新，請檢視修正。	依評審意見辦理，同時也請臺鐵局能提供最新資料協助修正。	同意承辦 單位之處 理意見
	P3-1 之臺鐵容量公式符號前後不一致，請檢視修正。	依評審意見辦理修正。	同意承辦 單位之處 理意見

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
臺鐵局 運務處 綜合調 度所楊 調度員 凱評	有關案例測試部分之內容，其中 P5-1 表 5-1 之「停站時間」皆假設為 1 min，是否為遷就列車交會之需，因實務運作不可能停站時間僅 1 min，建議補充說明。	案例中之「停站時間」參數代表列車最小的停站時間，模式模擬時若遷就列車交會，可以停超過一分鐘，依評審意見在未來報告中補充說明。	已於期 末 報 告 中 回 應處理
	圖 5-1 及本章各案例之測試模擬結果究係為「使用容量」或「最大容量」，建議應有明確定義說明。	本研究所探討的問題並不是「最大容量」，而是「實用容量」，也就是「時刻表容量」，依評審意見在未來報告中補充說明。	已於期 末 報 告 中 回 應處理
	有關各站間距離不同之測試案例部分，因單線路段最主要之瓶頸係在站間距離最長之路段，其亦決定其路線容量，故分析單線之路線容量為何不直接分析站間距離最長之路段，而仍需將所有路段皆納入模式分析，請補充說明。	單線路線的主要瓶頸確實是會發生在站間距離最長之路段，但若僅分析該路段之容量，而沒有考慮其相鄰路段之影響，將會高估容量。當車種愈複雜，列車之間追越/交會行為愈多，則這種影響就愈顯著。 目前該案例僅考量一種車種，且每站皆停，因此模擬所得之結果相當接近最長路段之容量，然而在本研究後續加入多車種考量後，便會發現其差異。	同 意 承 辦 單 位 之 處 理 意 見

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
臺鐵局 運務處 綜合調 度所楊 調度員 凱評	目前臺鐵實務上之容量分析作法係直接以瓶頸路段進行分析，以目前部分雙軌化後之花東線為例，目前之瓶頸為三民—玉里站間，係因該區間為單線且站距最長，故該路段之容量即為整體花東線之容量，約為 100 列次/日，惟實務上排班若超過 60 列次/日，營運即遭遇瓶頸，其是否即反映即是實務上「使用容量」與「最大容量」，及班表穩定度與容量之差別關係。	此例正好可以說明僅分析單線最長路段的容量，會高估連續區段容量的現象。另外，有關使用容量、最大容量，以及班表穩定度的關係，過去在文獻中便有學者以等候理論來進行解釋，當列車流量愈大時，列車平均延滯時間呈指數成長，若要將延滯時間控制在一定水準之下，則容量不能用盡。在運研所容量系列研究中亦曾發展模式來探討「使用容量」、「最大容量」與「列車平均延滯時間」之關係，只不過該模式僅以複線區間為對象，或許運研所未來可再針對單線區間發展相關模式。	同意承辦單位之處 理意見
臺灣高 鐵公司 陳協理 信雄	P1-4 流程圖與簡報 P5 及圖 4-1 之架構圖內容不一致，請檢視修訂。	依評審意見辦理。	同意承辦 單位之處 理意見
	P4-5 本研究模式之演算流程增加規則 7、8，但報告中並未敘明，請再補充說明。另有關預訂站內軌之規則部分，因測試案例有設計跳站停靠之案例，因後續案例仍有不同等級列車混合跳站停靠之情形，建議應先確認本研究模式是否能處理。	依評審意見辦理，未來模式加入多車種的影響因素後，可能還會增加其他規則。	同意承辦 單位之處 理意見

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
臺灣高 鐵公司 陳協理 信雄	DRR 方法係可將一個站間切分為數個區間來處理，而本研究係以一個站間當作一區間進行處理，二者有何差別，因後續有跳站停靠之測試案例，且其容量有降低現象，是否因上述之處理方式所致，請說明。	兩者的基本演算邏輯相同，但本研究減少所要處理的區間數量，因此效率較佳。對於跳站停靠案例的容量降低現象，並非是將一個站間當作是一區間所致，而是跳站停靠使得列車能進行交會的地方變少，列車必須運行更長的距離才能進行交會，亦即在路線上佔用更長的時間，所以導致容量降低。	同意承辦單位之處 理意見
	P4-9 表 4.5 有關不同情況之「後移量」計算方式，後續建議舉圖例加以說明，俾利讀者理解後移量之產生方式。	依評審意見辦理。	同意承辦單位之處 理意見
	P5-6 效能測試部分，建議可進行趨勢分析，例如列車數之成長與求解時間之關係為何，及列車數與車站數間之關係等。	依評審意見辦理。	同意承辦單位之處 理意見
	本研究之模式分析係透過 DRR 之原則進行模擬，並透過 Programming 方式進行測試，惟有關 Programming 之結果是否忠實反映其設定之原則，建議可於報告中針對驗證部分補充說明。	本研究在 Programming 的過程中，一直都有反覆進行測試驗證，依評審意見將會在報告中適當處補充說明。	已於期 末 報告中回 應處理
本所運 工組	本研究模式中所設計之機制規則即在描述軌道系統實際之運行條件，而本研究之機制規則對於運行條件之容量處理掌握程度為何，建議作說明。	本模式的檢核機制便是在確保模擬過程中能確保列車遵循基本運轉規則，亦即運行條件，如保持足夠號誌時距等，未來報告中將會針對此部分再加強說明。	已於期 末 報告中回 應處理

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
本所運 工組	對於運轉時間之改變，本研究模式設計回溯機制進行調整，惟該處理 Loop 是否可確定一定能收斂，建議補充說明。	依評審意見辦理，將在未來報告中說明。	已於期末報告中回應處理
	本研究文獻回顧已蒐集許多容量分析方法，後續是否可針對本模式之容量分析結果與蒐集之分析方法進行比較，以瞭解其差異之處。	本研究已於 3.1 節回顧各種容量分析方法之差異與不足處。	同意承辦單位之處 理意見
本所運 計組 (書面 意見)	P2-4 圖 2-3 中「屏東」與「歸來」站間是否增設「廣東」一站，請確認。	依評審意見辦理。	同意承辦 單位之處 理意見
	P3-8 有關 3.1.2.2 節之 Parametric Capacity Model，公式(3.13)係如何透過 Delay 反推容量？另圖 3-3 係如何由可接受的最大旅行時間門檻來得到軌道容量，及如何界定應用該公式？建議再補充說明。	依評審意見辦理。	同意承辦 單位之處 理意見
	P3-31 有關表 3.3 中 DRR 方法之缺點其一為「運算時需維護較多資料」，其內容為何？建議再補充說明。	依評審意見辦理。	同意承辦 單位之處 理意見
	P4-1 有關圖 4-1 中僅呈現「單一區段容量分析模式」與「連續區段容量分析模式」之整合架構，似未明確呈現「單線連續區段容量分析模式」，建議再修正調整。	依評審意見辦理。	同意承辦 單位之處 理意見
	P5-3 有關站內三軌之進階測試部分，除各站都是兩軌及三軌之情境，為確保可適用較複雜之軌道情境，是否能增加部分兩軌、部分三軌之測試情境。	依評審意見辦理。	同意承辦 單位之處 理意見
	另為了解不同情境對容量之影響，建議可依情境之差別逐一比較其容量差異程度，以了解該參數對容量之影響程度。	依評審意見辦理。	同意承辦 單位之處 理意見

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
本所運 計組 (書面 意見)	P5-6 效能測試部分，為確保本模式確能處理最複雜之情境，相關之測試是否已考慮較複雜或較特殊之案例，尤其是為排除「死結」問題之情境，而使模式處理時間大幅提升、容量大幅下降之案例情境。	目前的測試例皆是在路線兩端密集發車，透過模式內的機制來排除死結的發生，使雙向列車能順利運行至終點，以現階段模式僅考慮一種車種的情況下，已經是最難處理之狀況，而根據測試的結果，演算時間主要受到列車數和車站數的影響。 未來加入多車種影響因素後，要人工設計複雜的特殊案例並非易事，本研究會以隨機的方式產生各式案例，透過大量的模擬測試以檢驗模式能否處理各種情況。	同意承辦單位之處 理意見
	本研究主要皆以站間單線為分析對象，是否也可針對類似花東線(臺東線)之站間單、雙線並存之情境進行測試，並比較其容量之差別。	由於過去已發展了複線連續區間的容量模式，再搭配本次研究所發展的模式，因此，對於類似花東線單、複線混雜之路線，可先依單、複線分布情況將之切分成數個連續區段，然後分別進行分析以評估路線容量。	同意承辦單位之處 理意見
	有關測試案例，建議可結合動畫展示，俾利讀者了解。	在 4.4 節中已盡量將整個演算流程逐步以圖形呈現，但要在報告書中呈現動畫有技術上之困難。	同意承辦單位之處 理意見

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
本所運 計組 (書面 意見)	P6-1 有關多車種組成對於單線區間容量之影響應至為關鍵，建議可及早測試並確認本模式可處理，並綜合考慮路線條件(站內及站間軌道數)、交通條件(車種組成)及控制條件(列車先續行型態、號誌時距)之組合情境進行測試，俾利後續之容量分析可滿足各種實務需要。	依評審意見辦理。	同意承辦單位之處 理意見
	P6-1 有關容量評估方式確認，以目前單一車種依經驗係採第一列車到達終點後直到最後一列車離開起點之間取 8 成來評估容量，惟其可能係單一車種及同一種站內軌道數之均質狀況，後續若各種條件混雜時，其容量評估方式可能將不同，上述評估方式是否仍適用？請考量	同意評審看法，未來條件複雜時，容量的評估方式會再視情況做改進。	同意承辦單位之處 理意見
主席結 論	臺鐵之花東線、南迴線及西部縱貫線(海線)之部分路段仍為單線運轉，其瓶頸路段之容量問題應列為優先處理要項，從實務面問題之決策制定而言，應可從系統面進行處理後再依專業判斷是否需進行相關改善工程。	依主席裁示辦理。	同意承辦單位之處 理意見
	本研究應為臺鐵系統容量問題之最後一部分，高鐵及捷運系統相較於臺鐵系統其車種及營運型態較為單純，其容量分析問題亦較為單純。	依主席裁示辦理。	同意承辦單位之處 理意見
	有關臺鐵系統單線之容量分析，後續仍應著重與臺鐵系統務實應用之結合及回饋修正，以凸顯本研究之實用價值及應用成效。	依主席裁示辦理。	同意承辦單位之處 理意見
	有關本會議各與會學者專家及代表所提意見，請規劃單位充分考量納入報告修正及列表回應；至本次期中報告審查通過，請依合約續辦相關作業。	感謝諸位評審的肯定。	--

「單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體
改版研究(1/2)」
期中報告審查會議紀錄

一、時 間：103 年 7 月 22 日(星期二)上午 9 時整

二、地 點：交通部運輸研究所 10 樓第二會議室

三、主持人：林所長志明

林志明

記錄：劉昭榮

四、出(列)席單位及人員：

成功大學交通管理科學研究所鄭教授永祥

鄭永祥

交通部路政司魏科長瑜

魏 瑜

交通部鐵路改建工程局規劃組施副組長文雄

施文雄

交通部臺鐵局運務處綜合調度所楊調度員凱評

楊凱評

臺灣高鐵公司陳協理信雄

陳信雄

臺灣鐵路管理局企劃處

請 假

財團法人中興工程顧問社

金 永 成 黃 望 琇

本所運工組

許 仰 宏

張 名 大

李 治 綱

運計組

薛 振 龍

劉 如 學

江 明 益

附錄 E 期末工作會議資料

單線連續區段軌道容量模式分析 暨整體容量軟體改版研究(1/2) 期末工作會議資料（103.10.16）

1. 會議資料摘要

本會議資料包括下列課題

- (1) 目前工作進度
- (2) 未來工作計畫
- (3) 問題討論

2. 目前工作進度

本研究在期中審查時已經發展了單線連續區段容量分析模式的雛形，下半年度的研究則是繼續完成單線連續區段容量分析模式，並且進行臺鐵案例分析，以下分別說明模式的發展情況、測試結果，以及臺鐵案例分析的初步成果。

2.1 單線連續區段容量分析模式

有關單線連續區段容量分析模式後續的發展，主要有進行加入多車種組成影響因素與確認容量評估方式等兩項工作，

2.1.1 加入多車種組成影響因素的改變

為因應加入多車種組成的影響因素，模式的整體流程改變如圖 2-1所示，首先在一開始增加了「根據交通組成決定各列車的車種」的流程（灰底方塊），此流程中會先透過下式計算各車種出現的機率，再依此機率來決定列車的車種。

$$P_{\tau} = \frac{n_{\tau}}{\sum n_{\tau}} \quad (2.1)$$

式中： P_{τ} = 第 τ 種車種的出現機率

n_{τ} = 交通組成中第 τ 種車種所占的比例

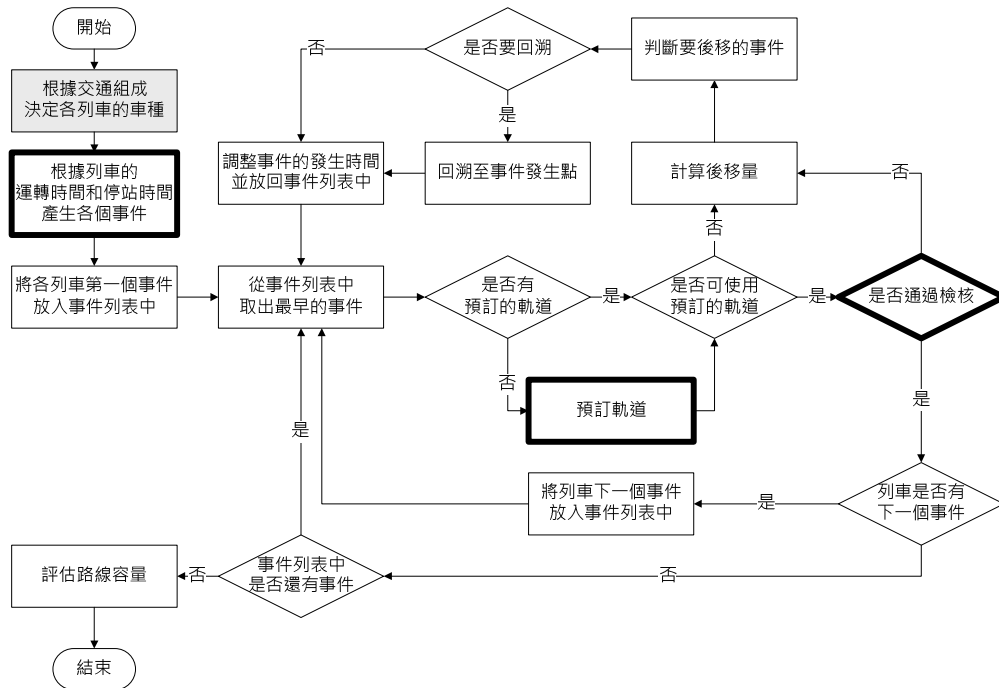


圖2-1 單線連續區段容量分析模式整體流程圖

而之後的事件產生、預定軌道機制以及檢核機制等流程（粗框方塊），也必須因為加入多車種組成因素而做些許的調整，其中事件產生和檢核機制的調整較為單純，僅須讓運轉時間、停站時間以及號誌時距要能依據車種選擇相對應的值，至於預定軌道機制的規則調整為：

1. 規則 1：列車被授權進入一段軌道前，必須先預訂之，如圖 2-2 之列車 1 在離開車站 A 之前，須先預訂車站 A 到車站 B 的站間軌。

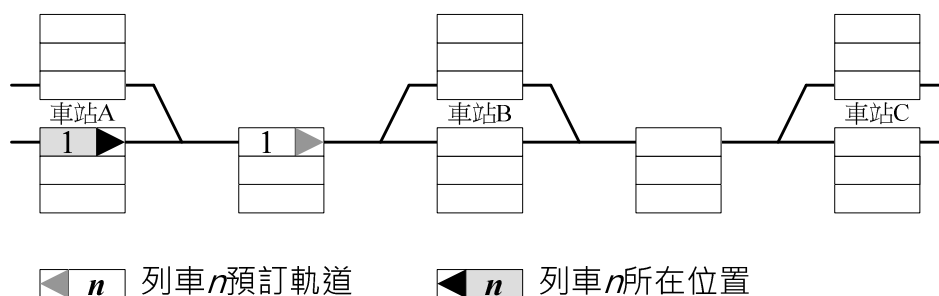


圖2-2 軌道預訂規則 1 範例

2. 規則 2：預訂的若是站間軌道，則須再預訂下一段軌道，如圖 2-3 之列車 1 除了預訂車站 A 到車站 B 的站間軌之外，還須繼續預訂車站 B 的站內軌。

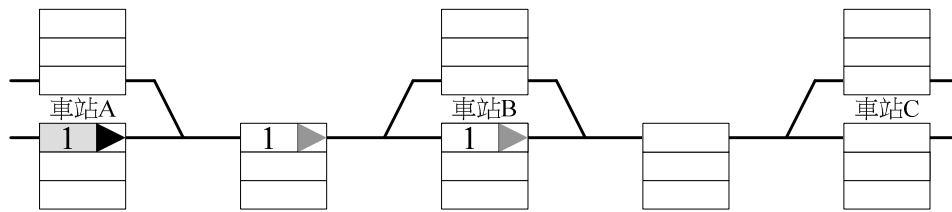


圖2-3 軌道預訂規則 2 範例

3. 規則 3：預訂的若是站內軌道，但列車於該站不停站，也須再預訂下一段軌道，如圖 2-4 之列車 1 不停靠車站 B，所以須繼續預訂車站 B 到車站 C 的站間軌，同時因為規則 2，便一路預訂至車站 C。

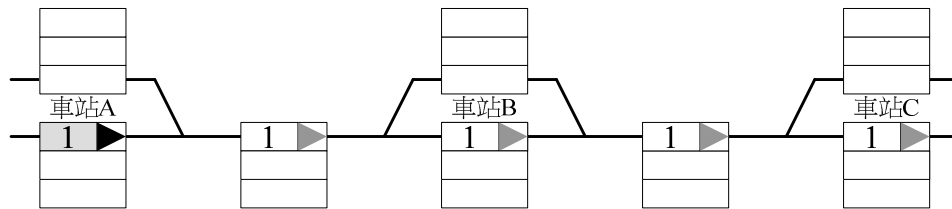
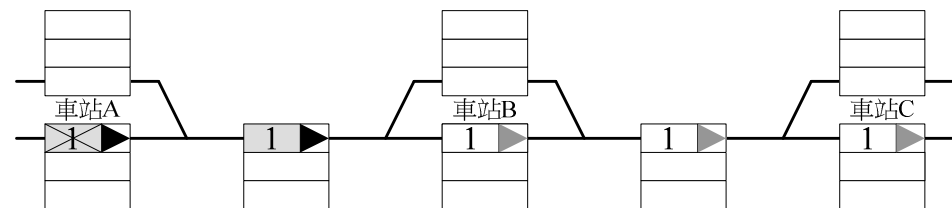


圖2-4 軌道預訂規則 3 範例

4. 規則 4：當列車使用完軌道後，將其從列表中標記為已使用，如圖 2-5 之列車 1 進入車站 A 到車站 B 的站間軌後，原來於車站 A 所使用的站內軌則標記為已使用。




 列車 n 已使用完軌道

圖2-5 軌道預訂規則 4 範例

5. 規則 5：若要預訂的軌道已經被其他列車預訂或佔用，則依序排在其他列車後面預訂，如圖 2-6，列車 2 接續在列車 1 後面預訂軌道。

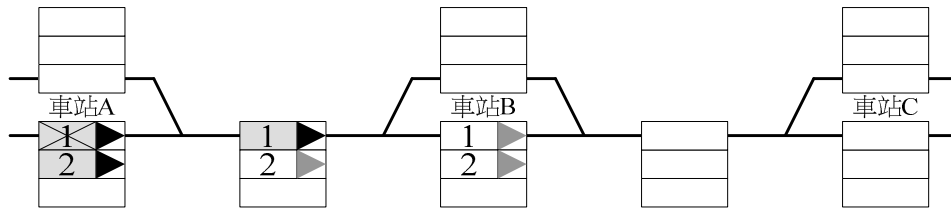


圖2-6 軌道預訂規則 5 範例

6. 規則 6：若列車所預訂的軌道後面有其他列車預訂，則該列車必需有預訂進入下一段軌道，以圖 2-6 為例，列車 1 於車站 B 所預訂的軌道後面有列車 2 預訂，因此必須預訂後續的軌道，如圖 2-7。

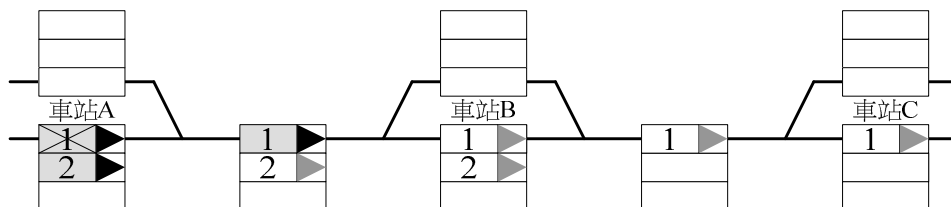


圖2-7 軌道預訂規則 6 範例

7. 規則 7：若某一列車要預訂的軌道已經被其他反向列車預訂，而反向列車需依規則 6 預訂下一段軌道，若該下一段軌道已經被原列車預訂，則預訂失敗，如圖 2-8 之列車 3 若接續在列車 2 預訂車站 B 的站內軌，而列車 2 依規則 6 所需預訂的下一段軌道剛好又是被列車 3 所預訂，因此列車 3 於車站 B 的預訂失敗。

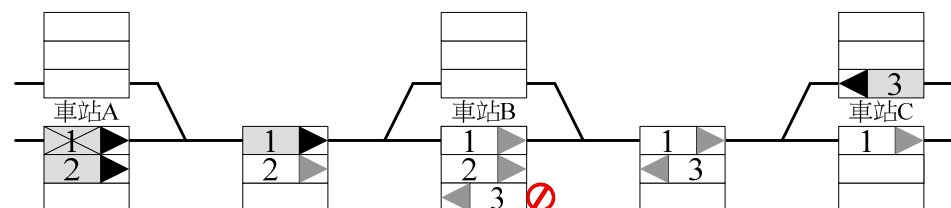


圖2-8 軌道預訂規則 7 範例

8. 規則 8：一個預訂可以成功的條件，包含依規則 2、規則 3 和規則 6 所延伸的所有預訂也必須成功。以圖 2-9 為例，由於列車 3 預訂車站 B 的站內軌失敗，因此連車站 B 到車站 C 站間軌的預訂也失敗，若例子改為如圖 2-10，則列車 3 所有的預訂都可以成功。

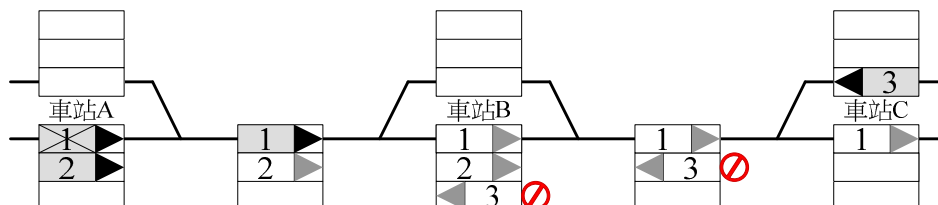


圖2-9 軌道預訂規則 8 範例 A

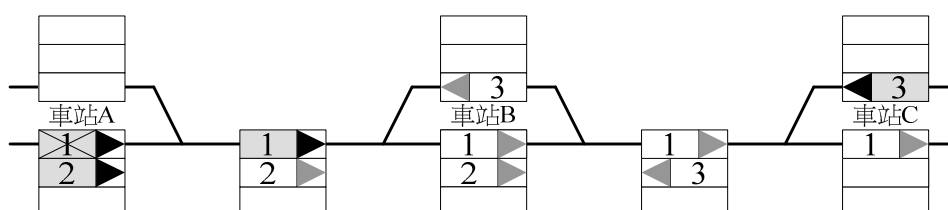


圖2-10 軌道預訂規則 8 範例 B

9. 規則 9：列車必須是第一位預訂者，才能使用站內軌。若是使用站間軌，即使不是第一位預訂者，只要與前一列車的運轉方向相同便可接續使用，如圖 2-11 中之列車 2，由於與列車 1 運轉方向相同，因此可接續使用車站 A 到車站 B 的站間軌。

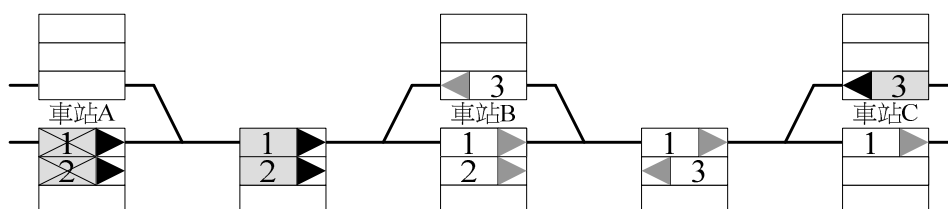


圖2-11 軌道預訂規則 9 範例

10. 規則 10：列車在預訂站內軌時，若要追越同向的先行列車時，則不能預訂與同向先行列車相同的軌道，如圖 2-12 中之列車 2 若要在車站 B 追越列車 1，則不能預訂與列車 1 相同的軌道，而是另一條軌道。

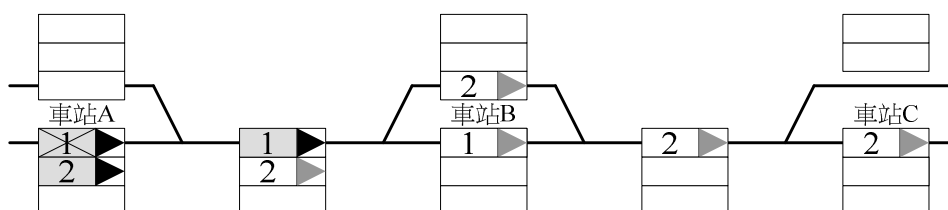


圖2-12 軌道預訂規則 10 範例

而模式中對於列車可進行追越的條件為：

1. 列車於車站內不停靠，而其同向的先行列車為慢車，且有停靠。
2. 列車與其同向的先行列車於前一站間為相鄰列車，亦即兩列車之間沒有其他列車，如圖 2-13(A)的列車 1 與列車 2 為相鄰列車，而圖 2-13(B)的列車 1 與列車 2 為不相鄰。

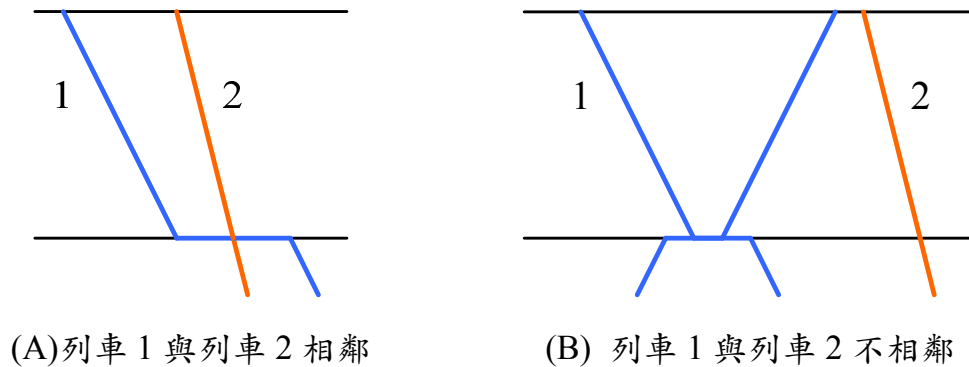


圖2-13 列車追越條件 2 範例

3. 車站內有足夠的軌道進行追越，亦即除了同向先行列車所預訂的軌道之外，在符合預訂規則的前提下，還有其它軌道可供預訂。

2.1.2 容量評估方式

由於模擬模式在開始進行模擬之初須經歷一段暖機階段，而在模擬接近結束之前，也會有一段列車陸續離開系統但不再有列車進入系統的階段，在評估容量時不應將此兩階段納入考量，因此在本模式評估容量所使用的時間範圍，從雙向都有列車到達終點站開始，直到其中一方向的最後一列車離開始發站為止，如圖 2-14所示，然後透過下列公式計算路線容量。

$$\text{平均時隔 (秒)} = \frac{\text{時間範圍 (秒)}}{\text{時間範圍內到達終點站的列車數}} \times (1 + \text{運轉寬裕係數}) \quad (2.2)$$

$$\text{路線容量 (列車/小時)} = \frac{3600}{\text{平均時隔 (秒)}} \quad (2.3)$$

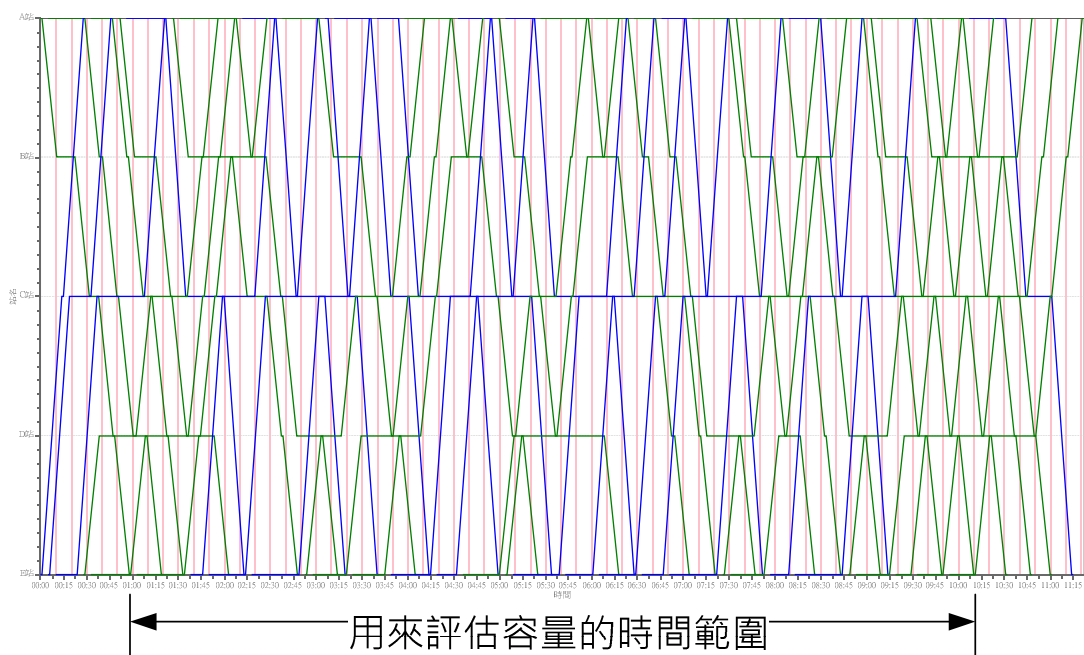


圖2-14 評估容量所使用的時間範圍示意圖

2.2 模式測試

本研究設計了一些測試例進行分析，以了解本模式之特性是否符合先驗知識，以下分別說明之。

2.2.1 基本測試

本研究首先嘗試一個最單純的測試例，其各項參數設定如表 2.1。此基本測試例若利用過去單區段容量模式進行分析，得到的結果為每小時 6.67 列車，然而此例中的快車不停靠中間站，當兩列快車對開時，勢必要其中一列車到達終點後，另一方向的列車才能開出，因此對容量有一定的衝擊，而本研究所發展的連續區段容量模式便能反映此情況的影響，經過本模式模擬雙向對開 2000 列車次後，所得到的結果為每小時 5.72 列車。

表2.1 基本測試案例之參數設定

項目	設定
車種數	2 種
交通組成	1 : 1
車站數	3 座
車站軌道配置	皆兩軌

停站模式	快車：只停靠起點與終點站 慢車：每站皆停
停站時間	皆 1 分鐘
運轉時間	快車：每區間皆 6.5 分鐘 慢車：每區間皆 9.5 分鐘
號誌時距	同軌道到開：4 分鐘 反向：1 分鐘 其它：3 分鐘
亂數種子	0
運轉寬裕係數	0

2.2.2 亂數種子與模擬列車數之影響

為瞭解模式中之亂數種子與模擬列車數等兩項參數對計算結果的影響，除了基本測試例中以 0 作為亂數種子外，本研究另外分別以 9 種亂數種子進行分析，並比較模擬列車數與容量值的變化，結果如圖 2-15，可發現不同亂數種子在模擬列車數較少的時候，其計算結果差異較大，但隨模擬列車數增加，差異則逐漸減少。大約模擬超過 1000 列車時，不同亂數種子造成的差異已經相當小，且容量值已趨於穩定，考量演算效率與結果精確度，後續的測試例皆改為模擬雙向對開 1000 列車。

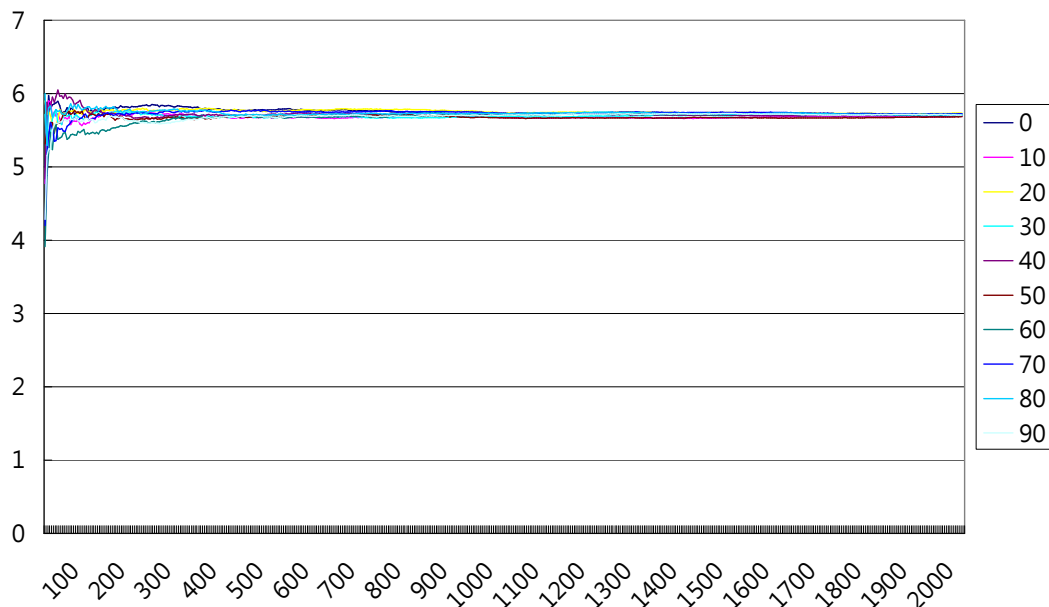


圖2-15 不同亂數種子下的模擬列車數與容量值之關係

2.2.3 增加車站數

以上述基本測試例為基礎，在本測試例中以圖 2-16之方式增加車站數，車站增加後，快車仍然只停首末站，慢車同樣是每站皆停，其餘參數則與基本測試案相同。透過本模式分析得到的結果如圖 2-17，由於快車不停靠中間站，因此隨著車站數增加，對容量的影響變愈大。

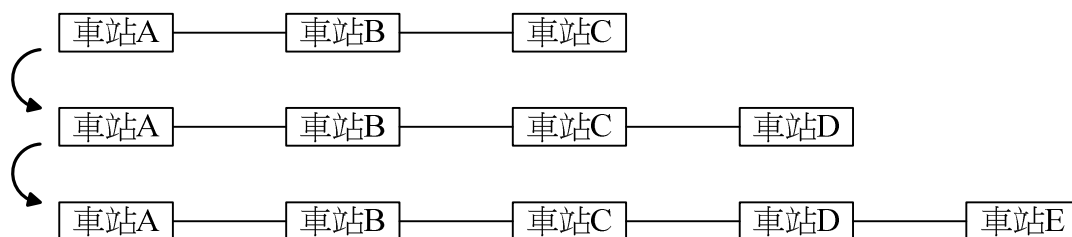


圖2-16 車站增加方式示意圖

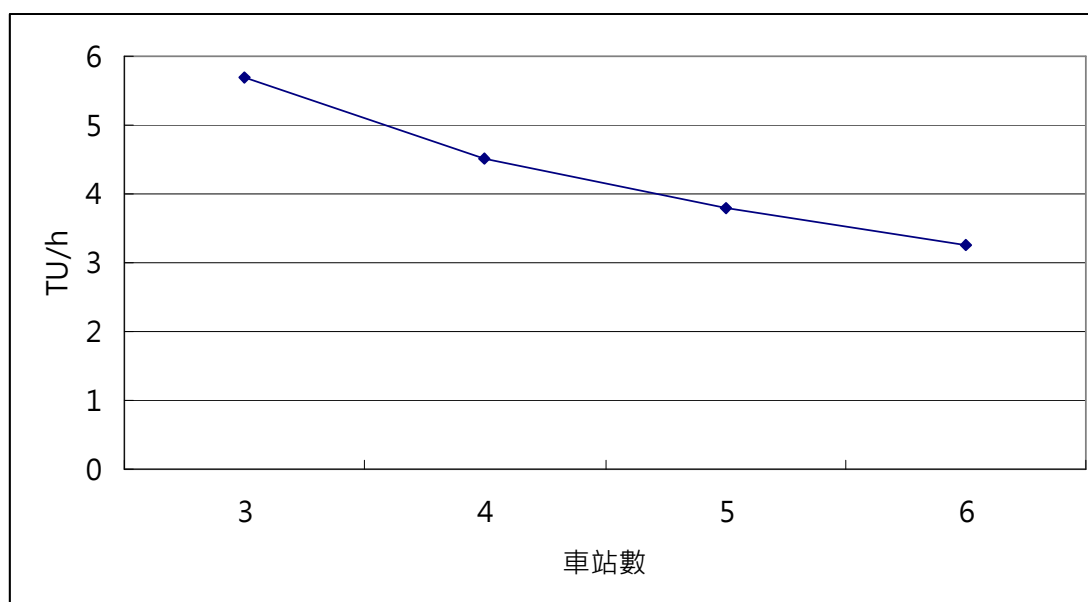


圖2-17 車站數與容量值之關係

2.2.4 增加站內軌道數

本測試例以上例 6 座車站為基礎，增加其中間站的站內軌道，提供交會待避的空間，透過本模式分析可發現，站內從兩軌增為三軌時，對容量提升有較大的幫助；但從三軌再增為四軌，對容量提升的效果就不顯著，如圖 2-18。主要原因應該是受到站間單線區間的影響，雖然增加站內軌可讓列車進行交會待避，但站內軌多到一個程度後，路線上的主要瓶頸便移到了站間，此時再增加站內軌道對容量提升的效果便不大。

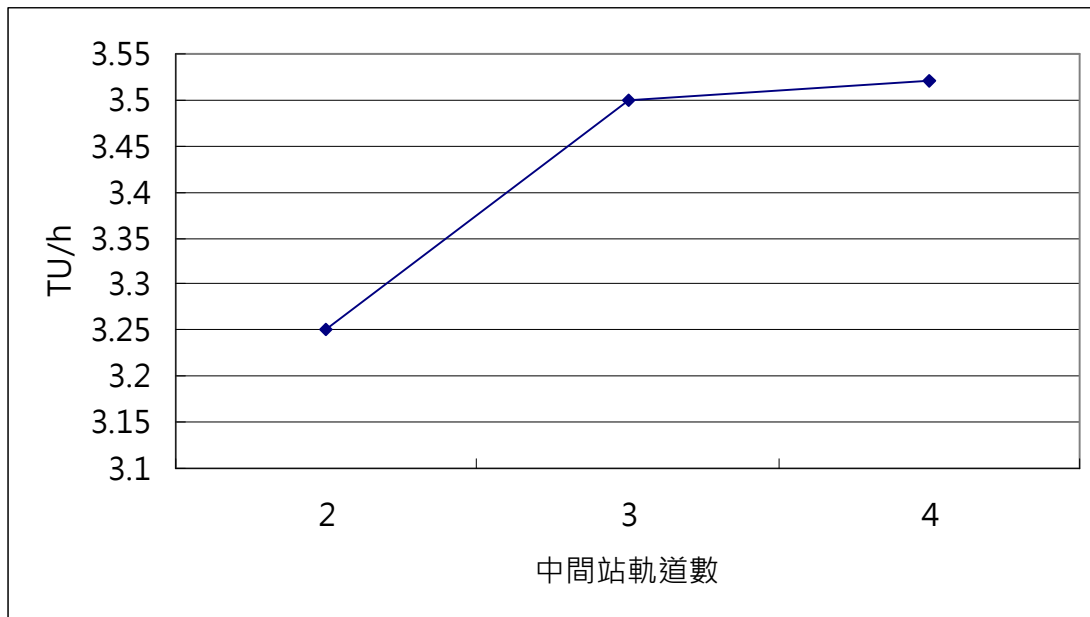


圖2-18 中間站軌道數與容量值之關係

2.2.5 交通組成變化

本測試以 6 座車站、中間站四軌為例，調整快慢車的組成比例分別計算容量，其結果如圖 2-19，從完全沒有快車到 10% 的快車，容量值有些微的提升，而之後隨快車的比例增加，容量值隨之降低。

快車有運轉時間短與停靠站少的特性，運轉時間短使得快慢車間的交會時間比兩慢車間的交會時間還短，對容量有正面效益；而停靠站少又會導致兩快車間的交會時間增加，對容量是負面效益。因此本例在最初只有快車不多時，快車帶來的正面效益比負面效益高，所以容量有些許提升，而當快車愈來愈多時，其負面效益便高過正面效益，使容量下降。

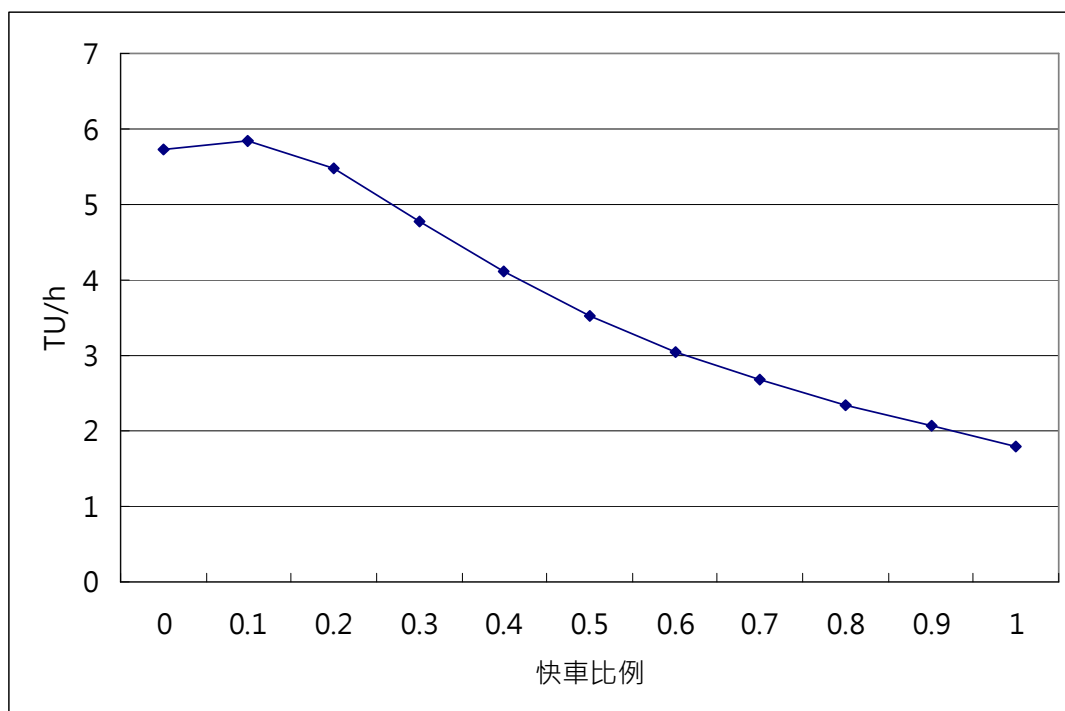


圖2-19 交通組成對容量之影響

2.3 臺鐵案例分析初步成果

本研究預計以臺鐵花東線為對象進行案例分析，由於此路線上除了萬榮－光復、玉里－東里、山里－臺東為複線之外其餘皆為單線，因此擬利用本模式對花蓮－萬榮、光復－玉里、東里－山里等三段連續單線區間進行容量分析，在本會議中先呈現東里－山里的初步分析結果。

2.3.1 參數設定

1. 交通組成

根據現行時刻表，本案例將開行於東里－山里的列車分為傾斜式自強號、傳統自強號、莒光號和區間車等四種車種，表 2.2 為各車種於週六的車次數組成情況，順行與逆行有些許差異，但本模式中假設雙向的交通組成相同，本案例設定為 10：9：5：6。

表2.2 各車種於東里－山里間開行的車次數

方向	傾斜式自強號	傳統自強號	莒光號	區間車
順行	9	9	6	6
逆行	10	9	5	6

2. 車站軌道佈設型式

根據目前向臺鐵局蒐集到的資料，東里－山里間共有東里、東竹、富里、池上、海端、關山、瑞和、瑞源、鹿野和山里等 10 站，各車站軌道佈設型式如表 2.3。

表2.3 東里－山里間各站之軌道佈設情況

站名	東里	東竹	富里	池上	海端	關山	瑞和	瑞源	鹿野	山里
臨月臺軌道數	4	2	3	2	2	3	1	2	3	2

3. 列車停站時間

列車在實際營運時，即便是同一車種也可能停靠不同的車站，在本案例中則考量較常見的停站方式來設定各車種於各站的停站時間，如表 2.4 所示，其中值得注意的是，實際上臺鐵對號車幾乎不停靠東里和山里，但本模式中限制列車於起迄車站必須停靠，因此設定傾斜式自強號、傳統自強號和莒光號在東里站和山里站短暫停靠 30 秒。

表2.4 各車種於東里－山里間各站的停站時間

車站	傾斜式自強號	傳統自強號	莒光號	區間車
東里	30	30	30	60
東竹	0	0	30	60
富里	0	60	60	60
池上	0	60	60	60
海端	0	0	0	30
關山	0	60	60	60
瑞和	0	0	0	30
瑞源	0	0	60	60
鹿野	0	60	60	60
山里	30	30	30	60

單位：秒

4. 列車運轉時間

表 2.5 為各車種行經東里—山里各站間的運轉時間，其中由於與瑞和站內僅有一軌，列車無法進行交會待避，因此將其前後區間合併成為關山—瑞源，運轉時間也做相對應的加總，且區間車還要加上在瑞和站的停站時間。

表2.5 各車種於東里—山里各站間的運轉時間

	順行方向				逆行方向			
	傾斜自強	傳統自強	莒光	區間	傾斜自強	傳統自強	莒光	區間
東里								
	03:00	04:30	04:30	06:30	04:00	05:00	05:30	07:00
東竹	03:00	04:00	06:00	07:00	03:00	04:00	06:00	07:00
富里	03:30	04:00	09:00	07:00	03:30	04:00	08:00	08:00
池上	03:00	04:00	08:00	07:30	03:00	04:00	07:30	08:00
瑞和	03:30	04:00	06:00	07:30	03:30	05:00	07:30	09:00
關山	05:00	06:30	10:30	11:00	05:00	07:00	12:30	12:00
瑞源	03:00	03:30	07:00	06:30	03:00	03:30	08:00	06:00
鹿野	03:30	04:00	06:30	07:30	03:00	04:30	06:00	07:00
山里								

單位：分鐘

5. 號誌安全時距

本案例的號誌安全時距採用臺鐵排點所使用的時距，同軌道到開時距為 4 分鐘，不同軌道到離站時距為 3 分鐘，反向時距為 1 分鐘。

6. 其他參數

模式中的其他參數尚有亂數種子、模擬列車數以及運轉寬裕係數，本案例中設定亂數種子為 0，模擬列車數為雙向各開 2000 列，而參考過去連續區段容量研究，將運轉寬裕係數設定為 0.2。

2.3.2 分析結果

透過本模式分析的結果，東里－山里的路線容量為平均每小時 3.71 列車，若以全日營運約 18.5 個小時來看，東里－山里全日之路線容量約為 68 列車，而目前時刻表於週六大約開行 60 列車，利用率為 87.5%。

3. 未來工作計畫

未來欲進行的後續工作內容如下：

1. 臺鐵案例分析
2. 撰寫期末報告

4. 問題討論

1. 臺鐵案例分析之範圍

附錄 F 期末工作會議紀錄

「單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究(1/2)」 期末工作會議紀錄

一、時 間：103 年 10 月 16 日(星期四)下午 2 時 00 分

二、地 點：交通部運輸研究所七樓運輸規劃科技研究室

三、主持人：蘇組長振維、鍾志成博士 鍾志成 紀錄：黃筌琄

四、出(列)席單位及人員：

國立成功大學交通管理科學研究所鄭教授永祥

鄭永祥

交通部鐵路改建工程局規劃組施副組長文雄

施文雄

交通部臺鐵局楊站務員凱評

楊凱評

臺灣高鐵公司陳協理信雄

陳信雄

財團法人中興工程顧問社

黃筌琄

本所運計組

黃永祥 李治儒

江明益

五、主席致詞：(略)

六、簡報：(略)

七、出席人員發言要點：

(一) 國立成功大學交通管理科學研究所鄭教授永祥

1. 有關隨機產生車種的部份，是否有加入類似條件機率的概念，

在決定前一系列車種後，會影響決定下一系列車種的機率？

鍾志成博士答覆：本模式對於各列車車種的決定皆是相互獨立的，不會受到前一系列車的影響。

2. 同一車種是否僅能有相同的停站方式？會議資料最後的臺鐵

案例分析中，如傾斜式自強號、傳統自強號、莒光號，現況並非每車次都有相同的停站方式。

黃筌珖研究員答覆：在模式的輸入參數中，一種車種對應著一種停站方式、停站時間與運轉時間等參數，在最後的臺鐵案例分析中，是採用各車種最常見的停站方式設定來進行分析。

3. 請問有針對臺鐵案例，進行站內軌道數量的敏感度分析嗎？

黃筌珖研究員答覆：針對測試例有進行敏感度分析，可發現站內軌道從兩軌增為三軌對容量的提升效果較為顯著，但從三軌再增為四軌則不明顯。沒有針對臺鐵案例進行類似的分析，主要原因在於其各站的軌道數不一，增減軌道對容量的影響會受到原車站內軌道數不同而有不同效果。

4. 是不是連續的區段數愈多，站內軌道數對容量的影響就愈敏

感？

黃笙珖研究員答覆：其實影響因素不只是連續區段數，例如列車的停站狀況也是因素之一，若連續區段數多，且快車幾乎都不停靠，則站內軌道數對容量影響就會比較敏感。

5. 有關運轉寬裕係數，目前是採用過去複線連續區段的 0.2，在單線是否也適用？

黃笙珖研究員答覆：過去研究對於運轉寬裕係數的校估採用過兩種方式，第一種是假設目前臺鐵班表尖峰時段的容量利用率已接近上限，來反算運轉寬裕係數值，另一種則是發展可靠度模式，透過可接受的列車平均延滯時間量來決定運轉寬裕係數應該設為多少。目前單區段以及複線連續區段容量模式，都有發展可靠度模式，因此可利用第二種方法來決定運轉寬裕，而本模式僅能採用第一種方法，以目前案例分析的初步成果來看，東里一山里全日的容量利用率約八成，大致符合臺鐵現況，因此寬裕係數為 0.2 應該是合適的。

鍾志成博士答覆：從現行臺鐵花東線的班表來看，在同個時段下並非每個區間都有密集的列車，因此可以在某一小時內雙向密集開行列車，只要在後續的時間裡不再密集發車，便有足夠的時間與空間來排解雙向列車交會。而本模式則是模擬每小時皆密集發

車的情況，所以求取的每小時容量值無法與臺鐵現行班表中列車密度最高的一小時相較。

(二) 臺灣高鐵公司陳協理信雄

1. 本模式若要處理同一車種有不同的停站方式，是否可以直接將其設定為兩種車種？

黃筌玗研究員答覆：可以，本模式並沒有限制車種數量，此方式同時也可處理鄭教授先前的問題，倘若發生同車種卻有不同停站方式的情況，則可以將之分為兩種車種來設定。

2. 會議資料第 5 頁的規則 9 看起來應該是模式的運作原則，但如果兩向列車的數量差異太大，是否會使得某方向的列車一直取得軌道優先使用權？

黃筌玗研究員答覆：所有的規則都是模式運作的原則。當某方向的列車數量較多時，有可能會讓那個方向的列車一直取得軌道優先使用權，因此本模式假設雙向列車數量是平衡的，而此假設也符合鐵路實務狀況，未來會在報告中明確列出模式的各項假設。

3. 會議資料中的圖 2-19，為何車種組成比例與容量變化不是呈現 U 字型的結果，而是隨快車比例增加，容量一直下降？

黃筌玗研究員答覆：因為在此測試例中，快車只停靠首末站，而本模式模擬的過程中，會衷於使用者的設定，不會讓快車增停中

間的車站，導致在此例中當一列快車進入系統後，反向快車只能等待該列車到達終點後才能出發，所以當全部都是快車時，容量最低。

4. 會議資料 2.2.3 節之測試例，都是從路線後方展延來增加車站，若是從整條路線中間插入車站，結果會如何？

黃筌珖研究員答覆：若是改成路線總長不變，而在中間插入車站，而快車同樣只停首末站、慢車每站皆停，則隨著插入的車站愈多，列車的站間運轉時間愈短，可進行交會待避的地點愈多，會使得容量愈高。

(三) 交通部鐵路改建工程局規劃組施副組長文雄

1. 隨著兩對向列車預定到路線中間時，怎麼決定哪方向的列車可以先預定軌道？

黃筌珖研究員答覆：當一列車要預定新的軌道，必定是發生在停靠某車站後的離站事件，由於在開始進行模擬之初，已經依照列車的運轉時間與停站時間先預估了列車於各站到離事件的發生時間，所以模式中係以所預估的離站時間作為哪一列車可以先進行預定軌道的依據。

2. 對於快車臨時增停中間的車站的情況，若無法在規則中加入，除了從停站方式的設定上著手，也可考慮從運轉寬裕係數下

手，去觀察快車是否有增停對容量的變化，將運轉寬裕調小，使模式所得結果能夠涵蓋快車臨時增停的情況。

黃笙玗研究員答覆：這可能是方法之一，但需再多做些案例測試才能確認。

3. 根據最近執行北宜新線案的經驗，現在關注的已經不是全日或尖峰一小時的容量，而是一個時間範圍，例如早上 9 點前臺北到花蓮，或是下午 5 點-8 點是宜蘭地區最多人要往臺北的時段，去計算這些時段內的容量，會比整天或單一小時有意義得多。

黃笙玗研究員答覆：本模式只要依時間範圍內的情況來設定參數，再將所求得之平均每小時容量值乘上時間範圍，便能評估該時間範圍內之容量大小。

鍾志成博士答覆：後續將會計算臺鐵時刻表列車最密三小時的車次數，同時透過本模式評估該時段之容量值，兩者進行比較來決定寬裕係數。

4. 整條路線若有些列車於中間站折返，例如花東線的區間車會於玉里站折返，請問此模式會怎麼處理？

黃笙玗研究員答覆：本模式假設所有列車都是從頭到尾行經整條路線，不會有中途折返的情況，同時若有區間營運，通常中途折

返站前後的交通組成會有較大的差異，所以此情況會將整條路線以中途折返站為界切分成兩段分別求取容量。

(四) 交通部臺鐵局楊站務員凱評

1. 本模式對於中間站折返的情況是將其分為兩段來求容量，但列車於折返站占用軌道的時間長短亦會影響容量，請問本研究該怎麼處理？

鍾志成博士答覆：嚴格來說，有關車站內折返、軌道運用的問題在文獻中是歸類於車站容量模式，會考慮車站內較細的軌道佈設情況、轉轍器位置、連鎖、進路等影響因素，與本研究所要探討的路線容量不同，屬於另外一個研究課題，若臺鐵有此需求，建議可納入運研所未來的研究方向之一。

2. 有關站內軌道數的測試例結果，與實務運作的經驗相符，站內三軌對容量提升有效果，但四軌的效益就不高，除非該站是固定的折返站。

黃笙玗研究員答覆：感謝評審肯定。

3. 本模式不會讓快車臨時增停中間的車站，但排點實務上，當兩對向快車在單線上碰到，就一定會安排一列車停等進行交會，請問該怎麼處理？

黃笙玗研究員答覆：本模式的列車停站方式是可由使用者自行設

定的，對於此情況，在快車的停站方式設定上，可針對中間一、兩個可能進行交會的車站給與短暫的停站時間，如 1 秒鐘，之後模式在模擬時，若快車需要增停，則會再該站增加停站時間；若不需增停，則 1 秒鐘對整體旅行時間影響不大。

4. 若本模式依上述方式處理快車臨停中間站，會議資料中的圖 2-19 是否就會呈現 U 字型的結果？

黃筌珖研究員答覆：可能會，仍要視快車臨停中間站的數量而定，若數量不多，頂多只是讓容量下降的情況緩一點。

5. 會議資料中的表 2.3 與表 2.4 內的資料可能有錯誤。

黃筌珖研究員答覆：我們將於會後另外約時間，親自至臺鐵局確認相關資料的正確性。

6. 當被要求增開班次時，其實會使可靠度下降，但很難對外說明這影響到底會有多大，過去運研所容量研究有路線利用率與可靠度的關係，請問今年是否有相關內容？

鍾志成博士答覆：這次研究案的工作內容並沒有納入可靠度的課題，或許可以跟運研所討論，待明年完成容量分析軟體改版後，規劃此相關課題的研究案。

賴勇成老師答覆：若運研所未來要進行鐵路可靠度相關研究，建議不要只考慮列車運轉的隨機效應所造成的延誤，也要將列車事

故也納入考量，因為雖然就運務處排點而言，其責任在於排出的班表能穩定準點運行即可，但就整體而言，一旦有事故發生對運輸服務造成影響，臺鐵都是必須要承擔的。

(五) 交通部運輸研究所運計組蘇組長振維

1. 本研究完成後在實務上可以有些什麼應用？

黃笙玗研究員答覆：待本研究完成後，則運研所對於處理臺鐵單線運轉、複線運轉、單區段、連續區段等容量模式皆已完備，幾乎可處理各種容量分析上的問題，以最近花東線雙軌電化工程為例，可透過本模式評估原有路線之整體容量表現，而該工程並非一次完成全線雙軌化，可利用單區段容量模式找出容量瓶頸，並以本模式搭配過去複線的容量模式，分析逐步雙軌化對容量提升的效果。

鍾志成博士答覆：容量分析在應用上有兩個層面，第一個是在規劃設計階段，例如花東線要提升容量，工程該怎麼改善；另一個則是在營運階段，例如新購列車、交通組成改變對容量的影響。

2. 本模式是否可分析單線改複線對容量的影響？或者當複線區間中因發生事故使得系統暫時採單線運轉，是否可用此模式分析容量下降情況？若可以，請在未來期末報告中的臺鐵案例，加入花東線雙軌化相關的容量分析。

黃笙玗研究員答覆：本模式僅能針對連續的單線運轉區段進形容
量分析，但若與過去所發展的複線容量模式搭配，便能處理單線
改複線或複線改單線的容量問題，將會於期末報告中加入相關案
例。

八、散會

附錄 G 期末簡報資料



交通部運輸研究所
Institute of Transportation, MOTC

單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究 (1/2)

期末簡報



簡報人：黃筌琰 研究員

 財團法人中興工程顧問社
中華民國103年12月8日

簡報內容

暨整體容量軟體改版研究 (1/2)
單線連續區段軌道容量模式分析

- 一、計畫背景介紹
- 二、研究工作流程
- 三、單線連續區段容量模式
- 四、案例分析
- 五、結論與建議



計畫背景介紹

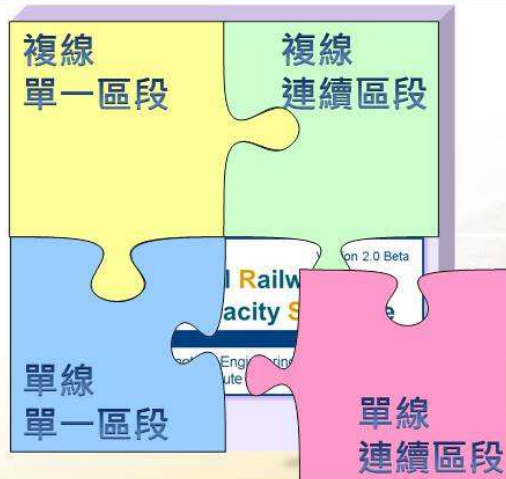
臺灣地區軌道系統容量研究架構暨臺北捷運系統容量分析

軌道容量研究－臺鐵系統容量模式建構分析

運輸系統容量分析暨應用研究－軌道系統

軌道系統容量與可靠度分析研究

單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究(1/2)



財團法人中興工程顧問社

3



計畫背景介紹

• 全程計畫概要

單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究

第一年度

- 蒐集回顧國內外相關文獻
- 建構單線連續區段容量分析模式

第二年度

- 開發單線連續區段容量分析功能
- 承襲既有功能進行容量分析軟體改版

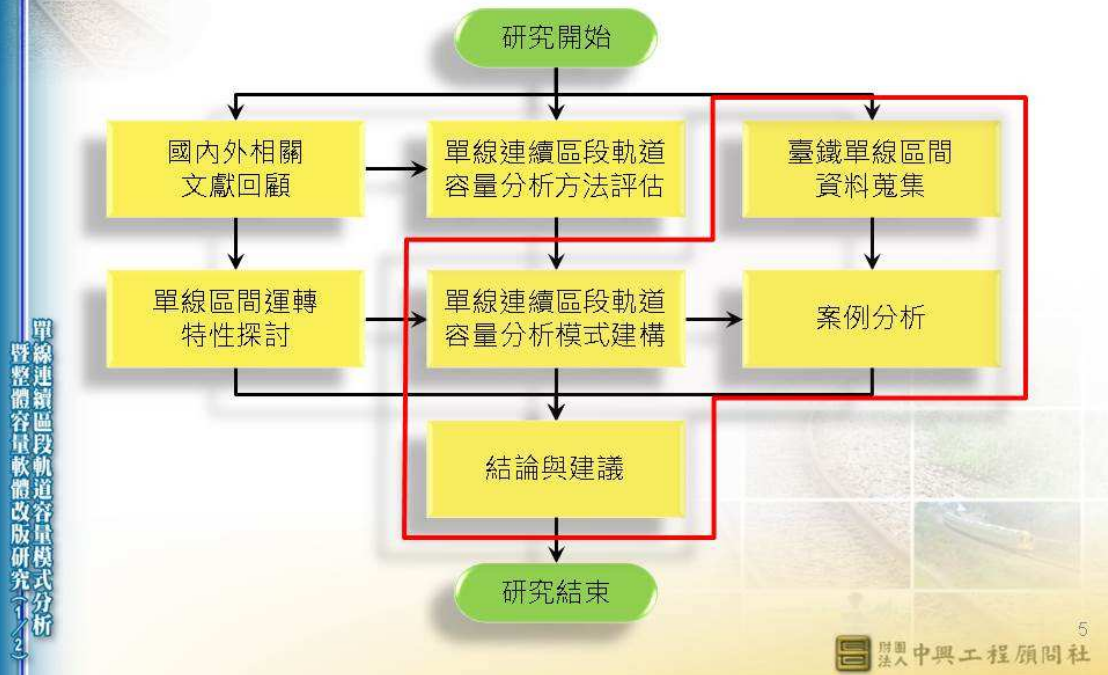
單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究(1/2)

財團法人中興工程顧問社

4

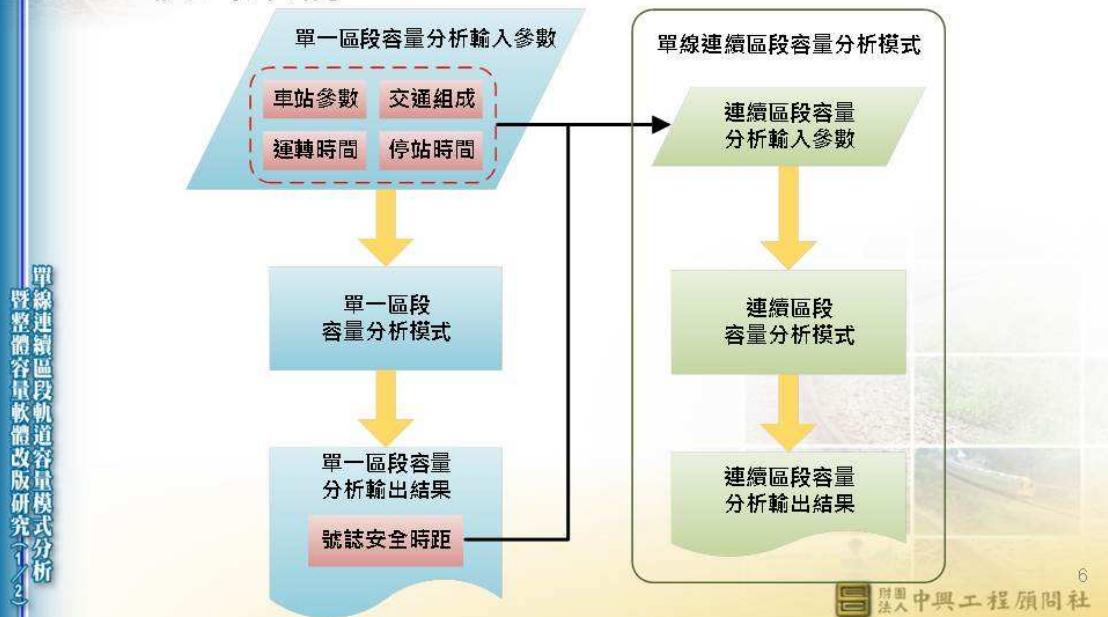


研究工作流程



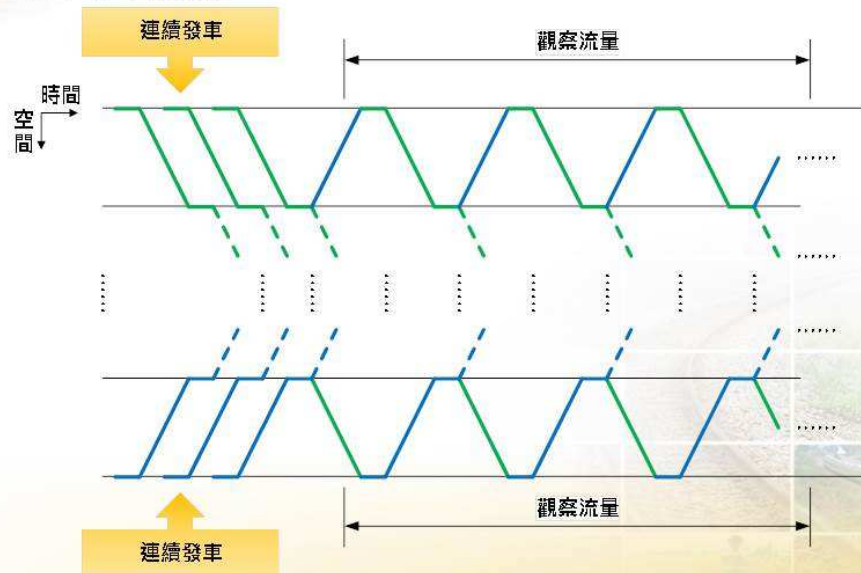
單線連續區段容量分析模式

• 模式架構



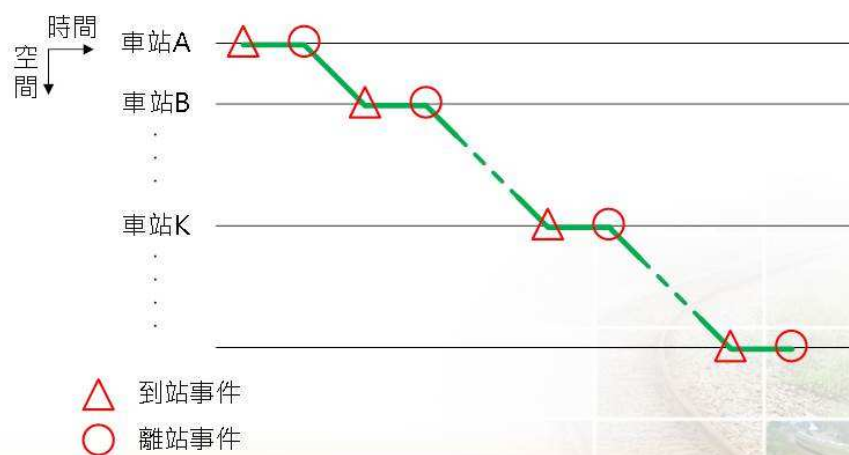
單線連續區段容量分析模式

• 基本概念



單線連續區段容量分析模式

• 基本概念





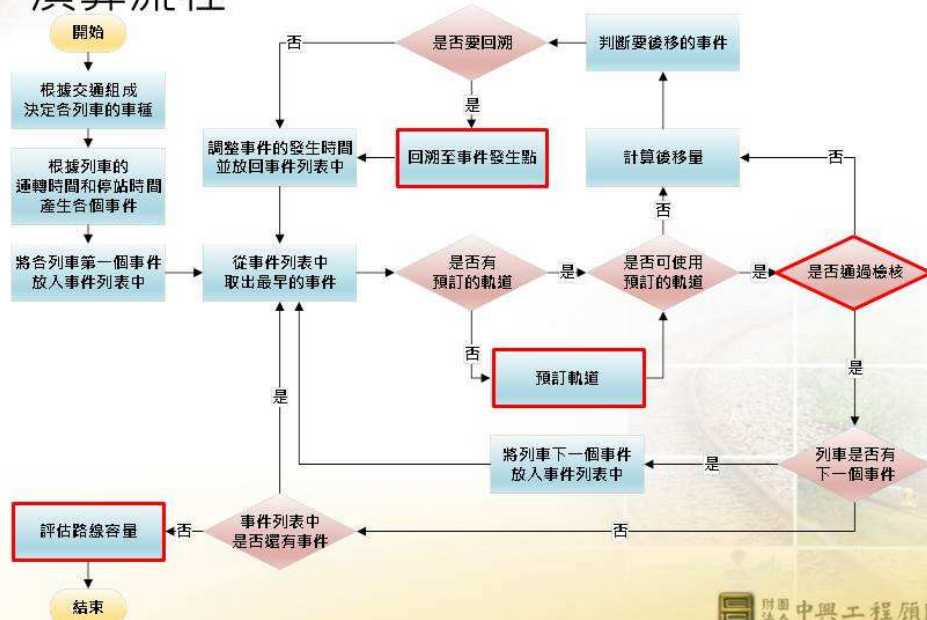
單線連續區段容量分析模式

- 假設條件



單線連續區段容量分析模式

- 演算流程



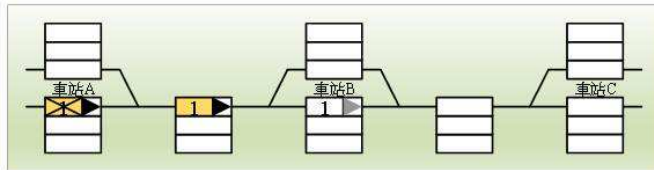


單線連續區段容量分析模式

• 演算流程

— 預訂軌道

- 規則1
列車被授權進入一段軌道前，必須先預訂之。
- 規則2
若預訂的是站間軌道，則須再預訂下一段軌道。
- 規則3
若預訂的是站內軌道，但列車於該站不停站，也須再預訂下一段軌道。
- 規則4
當列車使用完軌道後，將其從列表中標記為已使用。

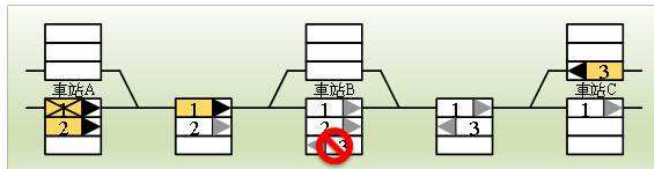


單線連續區段容量分析模式

• 演算流程

— 預訂軌道

- 規則5
若要預訂的軌道已經被其他列車預訂或佔用，則依序排在其他列車後面預訂。
- 規則6
若列車所預訂的軌道後面有其他列車預訂，則該列車必需有預訂進入下一段軌道。
- 規則7
若某一列車要預訂的軌道已經被其他反向列車預訂，而反向列車需依規則6預訂下一段軌道，若該下一段軌道已經被原列車預定，則預訂失敗。





單線連續區段容量分析模式

• 演算流程

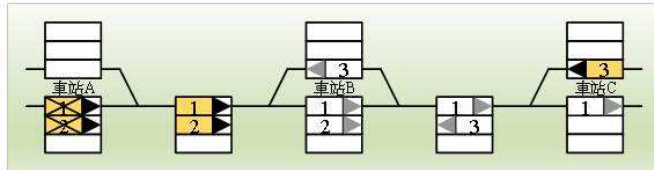
— 預訂軌道

• 規則8

一個預訂可以成功的條件，包含依規則2、規則3和規則6所延伸的所有預訂也必須成功。

• 規則9

列車必須是第一位預訂者，才能使用站內軌。但若是使用站間軌，即使不是第一位預訂者，只要與前一列車的運轉方向相同便可接續使用。



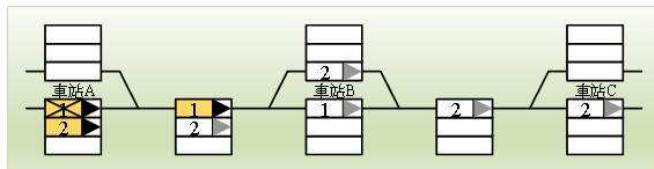
單線連續區段容量分析模式

• 演算流程

— 預訂軌道

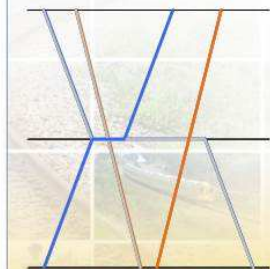
• 規則10

列車在預訂站內軌時，若要追越同向的先行列車時，則不能預訂與同向先行列車相同的軌道。



列車追越條件

- 列車於車站內不停靠
- 同向的先行列車為慢車且有停站
- 列車與同向先行列車於前一站間為相鄰列車
- 車站內有足夠的軌道進行追越





單線連續區段容量分析模式

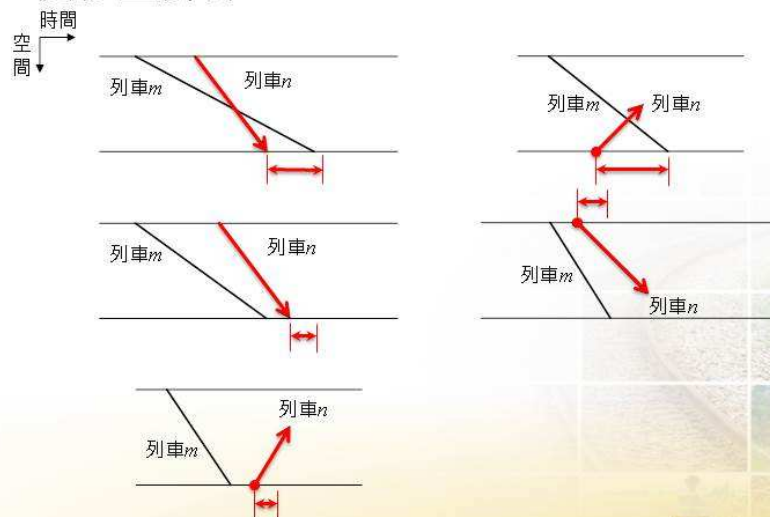
- 演算流程
 - 檢核機制

事件類型	檢核項目
到站事件	<ul style="list-style-type: none"> • 站間追撞先行列車 • 站內軌道重複佔用 • 與同向到站列車號誌時距不足
離站事件	<ul style="list-style-type: none"> • 站間對撞反向列車 • 與同向離站列車號誌時距不足 • 與反向進站列車號誌時距不足



單線連續區段容量分析模式

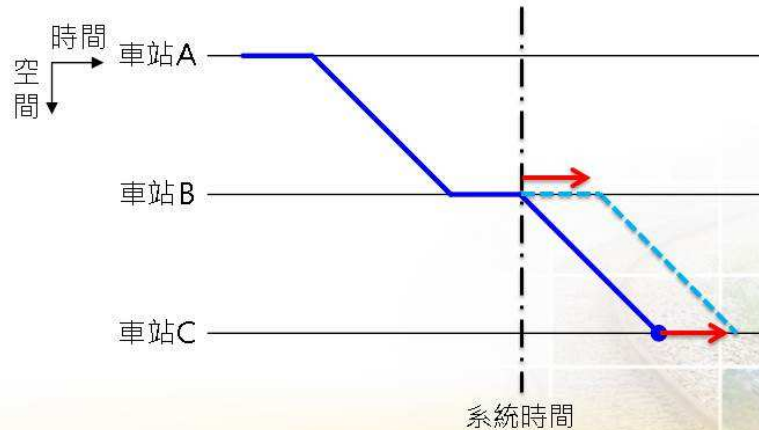
- 演算流程
 - 後移量計算





單線連續區段容量分析模式

- 演算流程
 - 回溯機制



單線連續區段容量分析模式

- 演算流程
 - 回溯機制
 - 回溯事件列表

事件列表

列車3,車站C,到站
列車4,車站B,到站
列車1,車站C,離站
列車2,車站B,離站

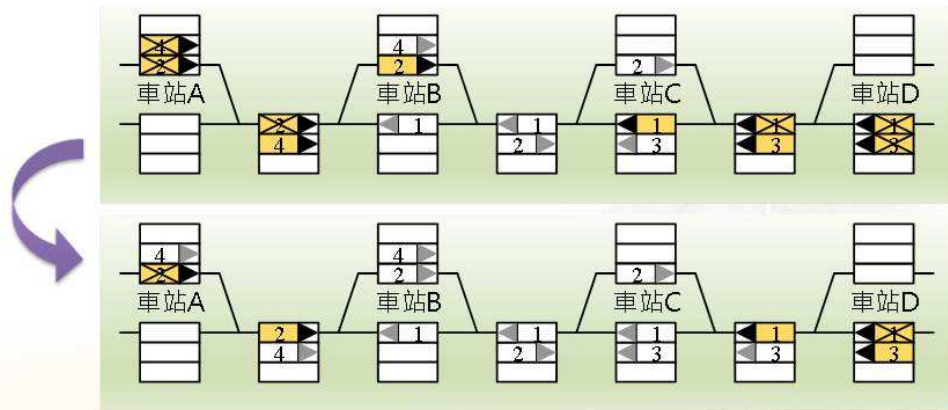
已執行列表

列車1,車站D,離站
列車2,車站A,離站
列車3,車站D,離站
列車4,車站A,離站
列車1,車站C,到站
列車2,車站B,到站



單線連續區段容量分析模式

- 演算流程
 - 回溯機制
 - 回溯軌道預約與使用情況



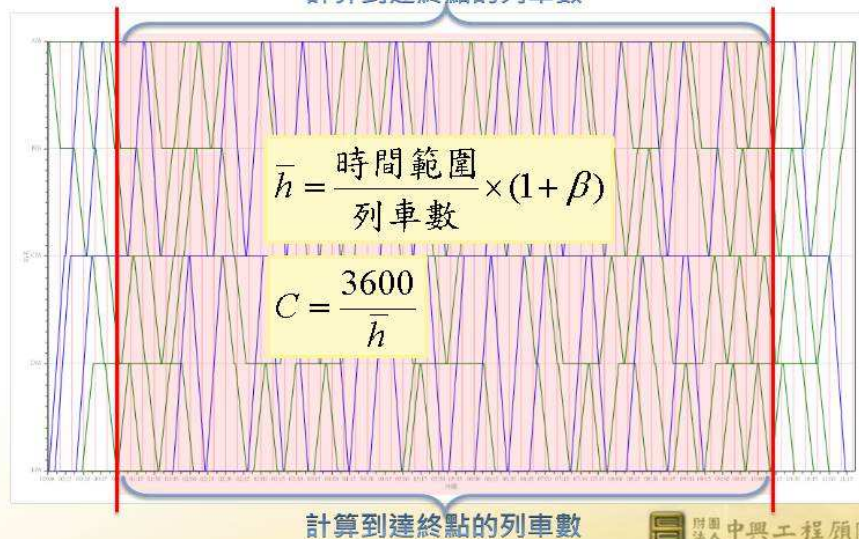
單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

19 財團法人中興工程顧問社



單線連續區段容量分析模式

- 演算流程
 - 路線容量評估
 - 計算到達終點的列車數



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

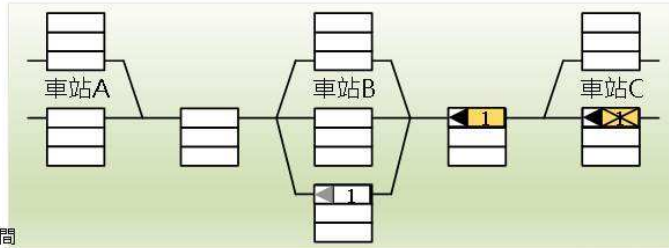
20 財團法人中興工程顧問社



單線連續區段容量分析模式

• 範例展示

◀ n 列車 n 預訂軌道 ◀ n 列車 n 所在位置 ◀ n 列車 n 已使用完軌道



事件列表

列車1, 車站C, 離站, 0
 列車2, 車站A, 離站, 0
 列車3, 車站C, 離站, 180
 列車4, 車站A, 離站, 180

單線連續區段軌道容量模式分析
 暨整體容量軟體改版研究(1/2)

21
 財團法人中興工程顧問社



案例分析

• 測試案例

— 基本測試例

項目	設定
車種數	2種
交通組成	1:1
停站模式	快車：只停靠起終點 慢車：每站皆停
停站時間	皆1分鐘
運轉時間	快車：每區間皆6.5分鐘 慢車：每區間皆9.5分鐘
號誌時距	同軌道到開：4分鐘 反向：1分鐘 其它：3分鐘

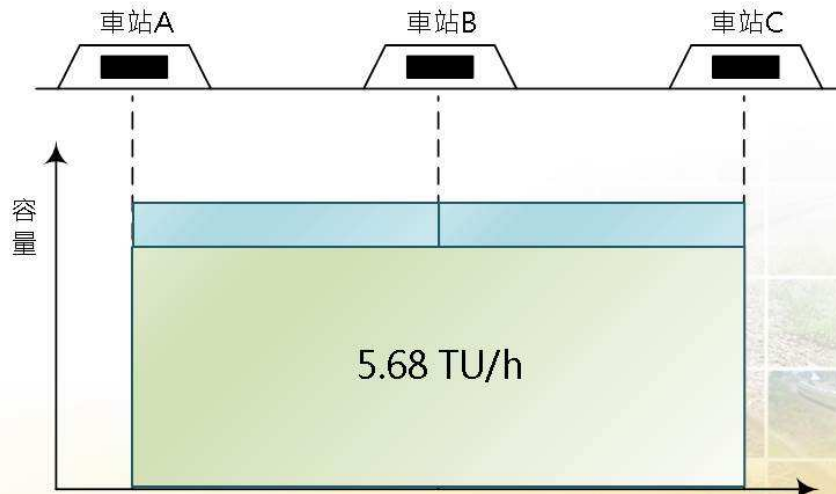
單線連續區段軌道容量模式分析
 暨整體容量軟體改版研究(1/2)

22
 財團法人中興工程顧問社



案例分析

- 測試案例
 - 基本測試例

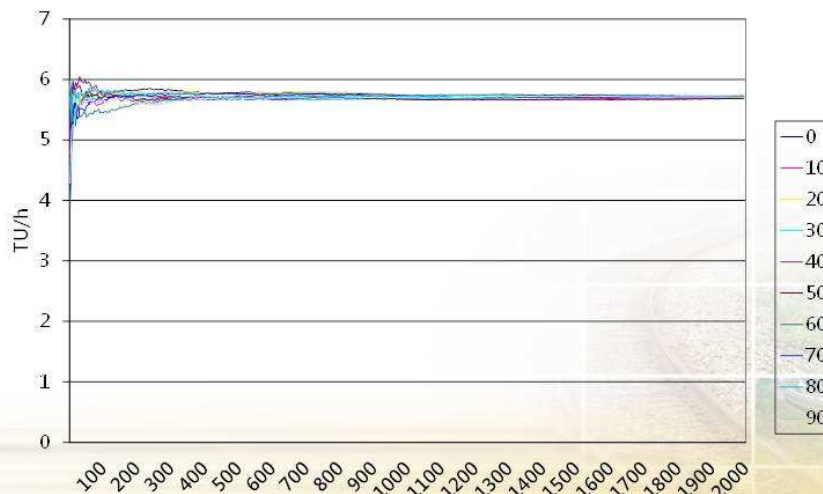


單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



案例分析

- 測試案例
 - 基本測試例



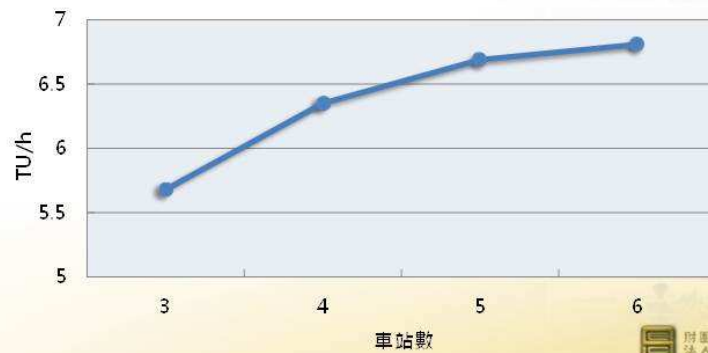
單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



案例分析

- 測試案例

- 進階測試例—車站數影響



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



案例分析

- 測試案例

- 進階測試例—連續區段數影響



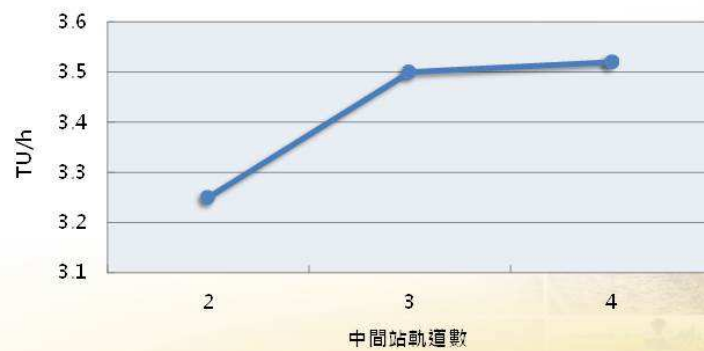
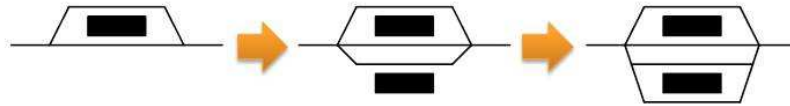
單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



案例分析

- 測試案例

- 進階測試例—站內軌道數影響



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

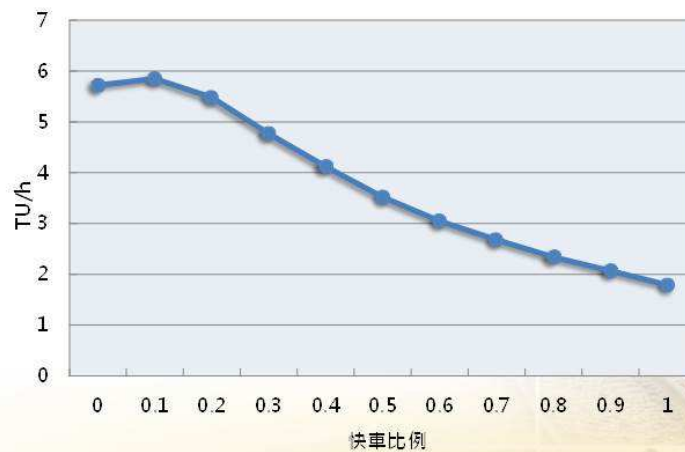
27
財團法人中興工程顧問社



案例分析

- 測試案例

- 進階測試例—交通組成影響



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

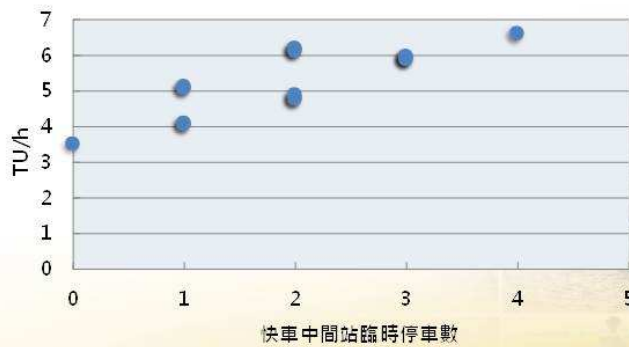
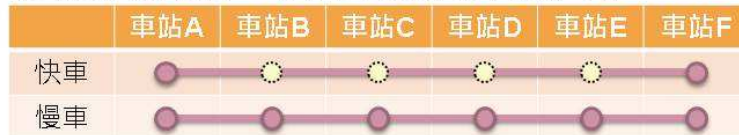
28
財團法人中興工程顧問社



案例分析

測試案例

— 進階測試例—快車臨時停站影響



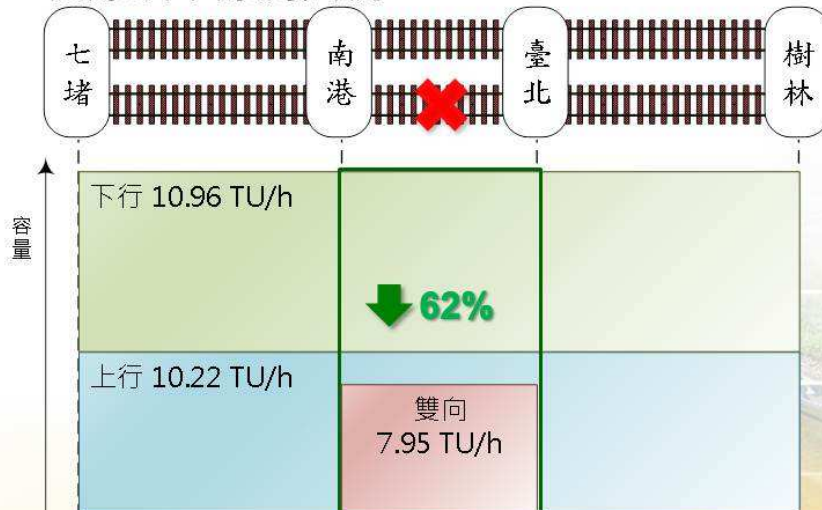
單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



案例分析

測試案例

— 複線改單線測試例

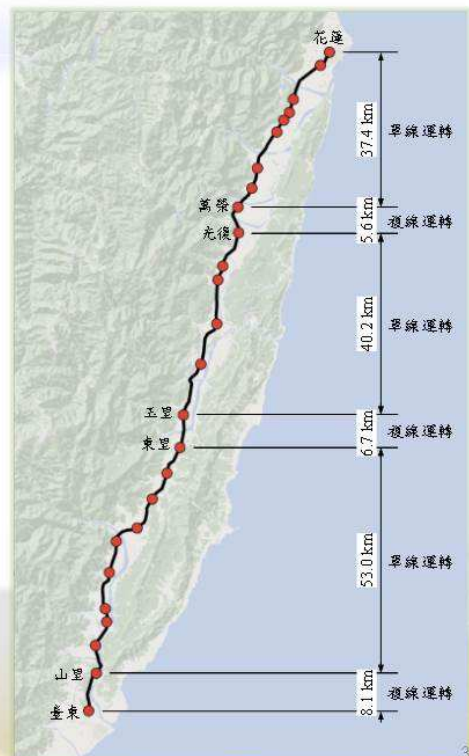


單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



案例分析

- 臺鐵案例
 - 臺東線容量現況
 - 全長約151 公里
 - 26座車站和1座號誌站
 - 單線區間
 - 花蓮—萬榮
 - 光復—玉里
 - 東里—山里



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

財團法人中興工程顧問社

31



案例分析

- 臺鐵案例
 - 臺東線容量現況

區段	平均時隔	尖峰3小時容量			現行列車數
		$\beta=0$	$\beta=0.1$	$\beta=0.2$	
花蓮 - 萬榮	641.71秒	16.83	15.30	14.03	13
光復 - 玉里	743.80秒	14.52	13.20	12.10	13
東里 - 山里	697.67秒	15.48	14.07	12.90	14

單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

財團法人中興工程顧問社

32



案例分析

- 臺鐵案例
 - 臺東線容量現況

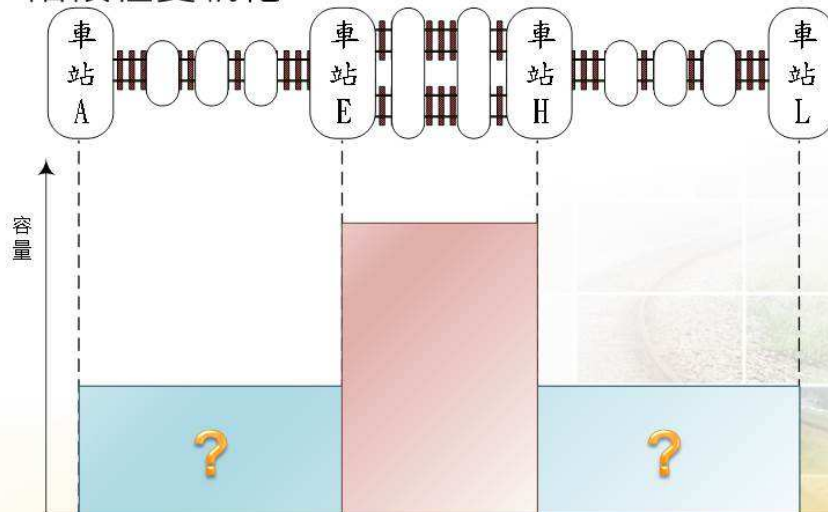
區段	全日容量 (TU/day)	現行列車數	路線利用率
花蓮 - 萬榮	90	60	66.67 %
光復 - 玉里	75	58	77.33 %
東里 - 山里	79	60	75.95 %

單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



案例分析

- 臺鐵案例
 - 階段性雙軌化



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)



案例分析

- 臺鐵案例
－階段性雙軌化



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

改善後之區段	全日容量 (TU/day)
花蓮 - 萬榮	90
光復 - 玉里	75
東里 - 山里	79

財團法人中興工程顧問社

35



案例分析

- 臺鐵案例
－階段性雙軌化



單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

改善後之區段	全日容量 (TU/day)
花蓮 - 壽豐	117 ↑ 30%
南平 - 萬榮	172 ↑ 91%
光復 - 玉里	75
東里 - 山里	79

財團法人中興工程顧問社

36



案例分析

- 臺鐵案例
－ 階段性雙軌化



改善後之區段	全日容量 (TU/day)
花蓮 - 壽豐	117
南平 - 萬榮	172
光復 - 瑞穗	96 ↑ 28%
三民 - 玉里	92 ↑ 23%
東里 - 山里	79

單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

財團法人中興工程顧問社 37



結論與建議

- 結論

單線連續區段容量模式能反映上、下游區段的交互影響，以及列車於中間站進行交會或待避的行為

提供政府部門審議推動臺鐵系統改善計畫及制訂相關軌道系統發展政策之參考與依循

當模擬的列車數夠多（約超過1000列）時，亂數種子所造成的差異極微

單線連續區段軌道容量模式分析
暨整體容量軟體改版研究(1/2)

財團法人中興工程顧問社 38



結論與建議

- 結論

進階測試的結果

- 在單線路線中增加中間站，對路線容量有正面提升的效果
- 快車連續通過的區間長度愈長，對容量的負面影響就愈大
- 增加站內軌道數可提升路線容量，但當站內軌數量多到一個程度後，再增加站內軌道對容量提升的效果有限
- 快車臨時停靠中間車站可提升路線容量，其位置亦會影響提升的效果
- 了解交通組成對單線連續區段容量之影響



結論與建議

- 結論

本模式亦可應用於複線區間因故改採單線運轉的情況

目前臺鐵臺東線的路線容量現況，容量瓶頸發生在光復 - 玉里段，與實務經驗相符

假設目前臺鐵臺東線於尖峰三小時之路線利用率接近100%的前提下，校估反推運轉時間寬裕係數值為0.1



結論與建議

• 結論

雙軌化對其餘單線區間容量改善的效果

- 壽豐 - 南平雙軌化後
 - 花蓮 - 壽豐容量可提升30%
 - 南平 - 萬榮容量可提升91%
- 瑞穗 - 三民雙軌化後
 - 光復—瑞穗容量可提升28%
 - 三民—玉里容量可提升23%



結論與建議

• 建議

- 開發相關的電腦程式，以提高本模式分析效率與實用性
- 「傳統暨區域鐵路系統軌道容量分析軟體」功能擴充與改版
- 本研究使國內軌道容量的分析技術更加完備，未來可將相關的成果編入國內軌道容量手冊之中
- 發展單線連續區段發展列車服務可靠度模式



結論與建議

- 建議



避免列車於單線區間運行時發生死結的技術，有助於發展電腦輔助排點系統，或應用於多列車運轉的模擬上



探討兼具中間站與折返站的車站容量課題



發展高精度的號誌安全時距模擬模式



最大容量以及運轉調度最適化議題

簡報結束 敬請指教



單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體改版研究(1/2)

附錄 H 期末審查意見處理情形

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
交通部 鐵路改 建工程 局規劃 組施副 組長文 雄	分析尖峰 3 小時容量應注意各區間尖峰時段不同，應以反應旅客偏好之觀點檢討特定區段、時段、車種組合之容量。	各區間的尖峰時段確實不同，因此本研究從時刻表中，分別去找尋各區間列車流量最大的連續 3 個小時作為尖峰，並以該時段的車種組合來計算容量。	同意承辦單位之處理意見
	折返站之計算採切割兩段分別求出容量，應考量兩段組合成連續區段之變化，以符本單線連續區段容量之研究。	同意評審意見，由於折返站前後區段的交通組成通常不同，因此需以該站為分界點，分別求取其前後兩段的路線容量，最後再整體考量全線之容量。	同意承辦單位之處理意見
	案例分析應盡可能反映實際需求，建議下期補充加強作為教育訓練使用。	依評審意見辦理。	同意承辦單位之處理意見
台灣高 速鐵路 股份有 限公司 營業處 陳協理 信雄	報告書 P1-2 第二段有關軟體改版之論述不夠具體，建議再修改補充。	依評審意見辦理。	已於定案報告中修正
	本研究流程應為循序漸進，有關報告書圖 1-2 建請修正。	依評審意見辦理。	已於定案報告中修正
	建議再釐清 P4-17 頁之「 β 」與實務上之「運轉寬裕時間係數」是否相同。	依評審意見於報告中補充說明。	已於定案報告中修正
	報告書第 6.2 節建議 1 內容，建請調整陳述方式，以利語意更臻明確。	依評審意見辦理。	已於定案報告中修正
臺鐵局 運務處 綜合調 度所楊 調度員 凱評	本研究針對單線連續區段建立路線容量分析模式，突破過往僅以單一區段進行的限制，更貼近實務運作上列車運行之情形，可更精確計算出路線容量，對於該議題之研究有重大突破，研究成果值得肯定。	感謝評審對本研究的肯定。	--

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
	在臺鐵案例分析中可增加原單一區段、連續區段模式所計算出路線容量的差異。	依評審意見辦理。	已於定案報告中修正
臺鐵局 運務處 綜合調度所楊 調度員 凱評	在臺鐵案例分析中可比較車站增加站內股道對容量的影響，建議可以海端站為例。	依評審意見辦理。	已於定案報告中修正
	報告論述請強化本研究對於軌道界（營運單位、工程單位）之主要貢獻。	依評審意見辦理，於第六章結論中加強論述。	已於定案報告中修正
	建請評估剩餘容量之可用程度，俾利臺鐵在實務排班上，能提供於加開車次情境下，亦兼顧列車可靠度之上限參考。	過去複線的含量模式有對應發展一套可靠度模式，能評估在一定平均延滯水準之下，路線容量的可用程度，但本研究僅發展單線的含量模式，因此於報告 6.2 中建議未來應發展相對應的可靠度模式。	同意承辦單位之處 理意見
成功大 學交通 管理科 學研究 所鄭教 授永祥 （書面 意見）	本研究所發展之單線連續區段軌道容量分析模式，相對於單一區段模式，雖較貼近實務，但能否提供鐵路系統規劃者較詳細之決策資訊？如結論中說明：所發展之模式分析了臺鐵臺東線的路線容量現況，結果顯示目前臺東線的容量瓶頸發生在光復及玉里段，與實務經驗相符，然本模式是否能提供先驗知識以外有用之決策資訊？	本模式能提供先驗知識所無法提供的量化數值，對於決策者來說，便能根據模式分析的結果，進一步擬定改善方案，評估改善效益。	同意承辦單位之處 理意見
	有關運轉寬裕係數，可否說明在何種情境下(如不同路線利用率或是車站股道配置下)其數值之變化？	本模式之運轉寬裕係數為輸入參數，理論上當運轉寬裕愈高，表示系統有較多的餘裕可確保班表穩定度，因此路線利用率可以愈高。	同意承辦單位之處 理意見

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
成功大學交通管理科學研究所鄭教授永祥（書面意見）	當考量車種之不同對單線連續區段軌道容量之影響時，是否亦考量車種相同時，但停站模式不同時所造成之影響？	為了避免不同影響因素互相干擾，在分析交通組成不同的影響時，並沒有同時考慮停站模式不同的影響。至於停站模式不同的影響，與 5.1.2.5 節測試例相似。	同意承辦單位之處 理意見
	運研所已發展多套傳統區域鐵路系統軌道容量分析軟體，建議較詳細說明本次開發之軟體與其他軟體功能上之區分？	本年度之工作項目並未包含軟體開發，至於明年度對先前軟體功能進行改版的內容，簡述於報告第 1.1 節。	同意承辦單位之處 理意見
	本研究分析單線連續區段時是否可以研究部分閉塞區間長度調整時之影響？	調整閉塞區間長度將會影響號誌安全時距大小，進而影響單線連續區段容量變化。	同意承辦單位之處 理意見
本所運計組（書面意見）	本次期末報告內容已呈現模式完整架構及模式測試結果，並初步證實模式已能處理單線連續區段軌道容量之分析，故本次期末報告內容原則應屬完備。	感謝評審對本研究的肯定。	--
	P3-16 有關 Parametric Capacity Model 可透過調整「複線百分比」方式分析單複線混合問題，建議報告中略作補充說明其作法，俾利參考。	依評審意見辦理。	已於定案 報告中修 正
	P4-4 有關本模式之假設條件第 1 項係假設「分析範圍內各車站皆為單線」，惟後續分析案例多為單、複線交錯混雜情形，故有關單、複線交錯情形之處理邏輯，建議可於報告中略作說明。	依評審意見辦理。	已於定案 報告中修 正

單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
本所運 計組 (書面 意見)	P4-4 有關假設條件第 4 項「雙向列車的數量與車種組成皆相同」，惟實務上常有方向之尖峰特性，例如晨峰時間開往臺北之北上班次大於南下班次等情境，故本模式能否處理尖峰雙向車次不同之問題，請補充說明。	一般單線區間的容量分析都是以雙向列車一來一回為前提，但若有方向之尖峰特性，此時可將兩連續同向列車當作是複線運轉，而兩反向列車為單線運轉，再根據複線運轉與單線運轉的比例來計算容量。	同意承辦單位之處 理意見
	P5-1 有關後續測試案例之亂數種子為何皆採用 0，請於報告中補充說明。	後續測試案例之亂數種子並非一定要採用 0，而是採用了相同的數值，以消除亂數種子造成的影響，便於後續的比較，在報告中補充說明。	已於定案 報告中修 正
	P5-16 有關臺東線之階段性雙軌化分析部分，建議增加各單線區段之平均時隔、尖峰 1 小時及 3 小時之容量分析，俾利掌握瓶頸路段狀況，及比較雙軌化前後之容量改善成效。	依評審意見辦理，不過在期末工作會議時已決定尖峰時間以 3 小時為準，因此不再計算尖峰 1 小時之容量。	已於定案 報告中修 正
	有關臺東線之案例測試，建議可結合 5.1 之各類測試，進行各參數之敏感度分析測試，找出改善現有瓶頸路段之各類參數最佳組合，如快車比例、站內軌道數…等，以作為後續各項營運策略改善之參考。	臺東線共有 27 座車站，運行的列車車種有 4 種，其規模較 5.1 節之測試例大上許多，因此無法對每項參數進行敏感度分析，報告中新增 5.2.3 節，針對部分瓶頸改善情境進行分析。然而，若要進一步求取最佳組合，則還要再建構模式求解組合最佳化問題，已超出本研究之範圍。	同意承辦 單位之處 理意見


單位/ 姓名	審查意見	承辦單位處理情形	主辦單位 審查意見
本所運 計組 (書面 意見)	P6-1 由本研究之進階測試分析結果，已能歸納出各參數對單線段容量之影響效果，但因各參數彼此之間之交互影響產生之最終結果難以預測，建議本研究之案例測試能延續第五章案例分析針對多個參數之敏感度測試，並嘗試提出最佳之結論綜合建議，尤其對臺鐵實務案例(如臺東線之單線路段改善)之瓶頸問題解決，以凸顯本研究之實務應用價值。	對實務案例提出最佳之結論綜合建議是非常困難的事情，因為要考量的層面太多，且對於何謂「最佳」尚無客觀定義，因此，本研究僅從路線容量的層面來探討，所提出之結論與建議可供營運或建設單位參考。	同意承辦單位之處 理意見
	有關軌道容量後續研究課題部分，為求本系列研究之完整性，應可於報告中增加臺鐵系統單線可靠度，及包含初始延滯(如事故)及連鎖延滯等相關後續研究之建議，以利與臺鐵局實務班表穩定度之需求相結合。	依評審意見辦理，於 6.2 節中補充相關建議。	已於定案 報告中修 正
主席結 論	簡報中實際分析案例應以整體單複線路線進行，以臺鐵臺東線為例，建議整體探討容量，而非切成三段做比較。	依主席裁示辦理，於定案報告中修正分析結果呈現方式。	已於定案 報告中修 正
	報告書中軟體改版緣由之論述，建請調整並強化補充，俾利語意更臻清楚。	依主席裁示辦理。	已於定案 報告中修 正
	未來有關臺鐵相關建設計畫，例如立體化、支線、改建等，本所將建議於報告書中，納入軌道容量分析與預測，俾與臺鐵系統務實應用之結合，以凸顯本研究之實用價值及應用成效。	依主席裁示辦理，於 6.2 節中補充相關建議。	已於定案 報告中修 正
	有關本會議各與會學者專家及代表所提意見，請規劃單位充分考量納入報告修正及列表回應；至本次期末報告審查通過，請於 12 月 24 日前提送報告書，俾利依合約續辦相關作業。	感謝諸位評審的肯定，將會如期提送定案報告，以辦理驗收暨結案相關作業。	--

「單線連續區段軌道容量模式分析暨整體容量軟體
改版研究(1/2)」


期末報告審查會議紀錄

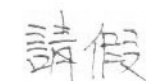
一、時 間：103 年 12 月 8 日(星期一)下午 2 時整


二、地 點：交通部運輸研究所 5 樓會議室


三、主持人：蘇組長振維  記錄：江明益

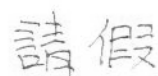
四、出(列)席單位及人員：

成功大學交通管理科學研究所鄭教授永祥 

交通部路政司魏科長瑜 

交通部鐵路改建工程局規劃組施副組長文雄 

交通部臺鐵局運務處綜合調度所楊調度員凱評 

交通部臺鐵局企劃處資訊中心劉副主任昭榮 

台灣高速鐵路股份有限公司營業處陳協理信雄 

財團法人中興工程顧問社 

本所運工組 

運計組 江明益