

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



軌道系統營運穩定度與效率最佳平衡研析

The Optimal Balance between Operational Stability and
Efficiency for Rail Transportation

吳軒宇

Wu, Hsuan-Yu

指導教授：賴勇成教授

Advisor: Lai, Yung-Cheng

中華民國 102 年 6 月

Jun. 2013

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書



軌道系統營運穩定度與效率平衡點研析

The Optimal Balance between Operational Stability
and Efficiency for Rail Transportation

本論文係吳軒宇君（學號 R00521523）在國立臺灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 102 年 6 月 28 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

賴勇成

（指導教授）

李治綱

鍾志成

賴勇成

李治綱

鍾志成

系主任

呂良正

呂良正

（簽名）



致謝

感謝我的父母生我、養育我成人即便不贊同我念交通組，仍然尊重我的決定。

感謝賴老師與周老師，因為大學修兩位老師的課程讓我對交通產生了興趣。

感謝交通組的口試委員們在推甄時讓我經歷兩次面試再把我刷掉，讓我知道自己的愚昧與不足、讓我重新思考人生的方向、讓我更堅定念交通組的志向。

感謝賴老師的兩年多來對我不論在研究、課業中的指導、磨練與砥礪。

感謝交通組的所有老師在交通領域裡對我所傳授的知識。

感謝小賴家安全組的學長姐們，你們的研究是這篇論文的基石。

感謝志生與冠廷學長，是你們引領我進入穩定度與效率分析這塊研究領域，永遠難以忘懷那段一起咪挺趕點的時光。

感謝國著學長在研究上及生活中給予我的協助，也是你的歌聲與叫聲讓我知道研究室的夜晚並不孤單。

感謝柏文學長與姿雅學姊在容量課題所給予的指導。

感謝道中和我一路相互扶持度過這段在小賴家的歲月，你是我最重要的戰友。

感謝毛哥對我在研究上的針砭砥礪以及一起在生活哲理上的思辨探討。

感謝明軒除了在我遇到 GAMS 問題時給予協助外更解決了晚餐吃哪裡的難題。

感謝佾儒接下且勝任了小秘書的工作，讓我在為論文衝刺時無須再為雜事煩惱。

感謝威任不但一起承擔了 IV&V 這項艱難工作，接下來還要承接這個研究課題。

感謝泓宇，你獨特的思維和無厘頭的想法確實是苦悶研究生活的樂趣之一。

感謝劭暉，你對事情的堅持確實是我所缺乏的態度。

感謝信宏在研究中給予我的建議，你淵博的學識是當之無愧的交通組一號。

感謝翔捷用你堅強的研究實力與我一起完成運經報告。

感謝耘禎雖然只有一年，但也難忘和我們在小賴家共同努力時光。

感謝傑理、承晏、鴻軒、弈辰、沛婕、諭嫻、巧筠一起在 312 研究室趕研究以及共同出遊的時光。

感謝交通組 R00 的同學們，能和你們在這裡當同學是我的榮幸。

感謝校隊沈瑞婉教練您對我在球技上的指導，包容我因為研究而降低的練球出席率，也我自己更相信我的實力。

感謝在校隊的隊友們尤其是猴子與暴犯陪我度過六年的球隊時光，這會是我學生生涯最棒的回憶。

感謝李治綱老師與鍾志成博士兩位委員對於這篇研究不吝於提出建議與指正。

感謝研究的路上所有給予過協助的師長、同學與學弟妹，因為有你們的協助我才能完成這篇論文。



吳軒宇 2013.8 於土木系舊館 312

摘要



隨著軌道使用需求之上升，如何在系統使用效率與穩定度之間權衡以提供適當之服務是一項重要課題。高的使用效率將使系統穩定度下降；而過低的使用效率不但降低服務品質並造成系統資源浪費。有鑑於此本研究探討兩者之權衡關係並提出最佳平衡點之概念以尋找最佳服務計畫，並嘗試將容量使用風險納入服務計畫最佳化分析模式中。本研究先透過穩定度與效率評估流程分析兩者之關係，再由此關係進行後續最佳化模式建構以尋找該系統中穩定度與效率之最佳平衡點。於評估流程中，事故與營運本身對穩定度所產生之影響皆會納入考量，前者由歷史事故資料以風險概念進行分析，後者因缺乏實際資料則輔以模擬方式進行分析。並以回復時間內所產生之延滯量化分析干擾事件對系統穩定度產生之影響。最佳化分析模式中將使用者與營運者成本同時納入模式中考量。其中穩定度分析成果將轉換為旅客所受之延滯時間，而容量效率將以旅客等候時間進行考量。經由最佳化模式分析後可以得到系統穩定度與效率之最佳平衡點，以及所對應之服務計畫與最佳使用效率。以分析結果與實務運用之情況比較，其中臺鐵案例與捷運系統案例上行中實際使用量皆較高，顯示其現行營運狀況中為提供更多服務而傾向使用高使用率導致系統穩定度大幅下降。而捷運系統下行分析結果則與實際使用量相近，顯示其現行服務計畫接近系統穩定度與效率最佳平衡點。此分析結果可以做為各系統服務計畫參考與改善之建議。

關鍵字：營運穩定度、容量使用、服務計畫、風險分析、最佳平衡點

Abstract



Reducing service headway is the common procedure in response to the increase in traffic demand; however, shorter service headway may lead to higher possibility in system disruptions so as to reduce the system stability. Therefore, service plan should be carefully design with consideration of the tradeoff between service efficiency and stability. On top of that, there is an optimal balance for every railway system according to its specific system characteristics on capacity, stability, and utilization. This research aims to develop a complete framework to identify the optimal balance for a railway system. This research starts by establishing the analytical models to evaluate railway service efficiency and stability. All necessary data for evaluating service stability and efficiency, including historical service plan, accident data, and parameters for computing capacity will be collected and analyzed. Results are used to depict the clear relationship (and tradeoff) between service efficiency and stability. With a clear understanding in the tradeoff, this research then develops an optimization model to determine the optimal balance between efficiency and stability for railway systems as well as the optimal service plan. Two case studies are analyzed in this research: the regional railway system and the metro system. From the comparison of the analysis result with actual operation, operator can review and check the stability and efficiency and adjust their service planning to provide better operation performance.

Keywords: Stability, Capacity Utilization, Balance Point, Efficiency, Risk

目錄



致謝	I
摘要	III
Abstract.....	IV
目錄	V
圖目錄	IX
表目錄	XI
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	3
1.3 研究範疇與限制	3
1.4 研究方法	4
1.5 研究流程與架構	4
第二章 文獻回顧	7
2.1 軌道容量分析	7
2.1.1 臺鐵容量分析模式	8
2.1.2 捷運系統容量分析模式	14
2.2 軌道系統營運穩定度分析	16
2.2.1 解析模式	17
2.2.2 模擬模式	18
2.3 穩定度與容量使用效率關係	24

2.4 服務計畫設計	26
2.5 文獻回顧小結	30
第三章 穩定度與效率最佳平衡點分析模式	31
3.1 穩定度與效率分析模式	32
3.1.1 可靠度分析模組	34
3.1.2 實用容量與事故容量分析模組	36
3.1.3 效率分析模組	45
3.1.4 穩定度分析模組	46
3.2 服務計畫最佳化模式	58
3.2.1 服務計畫最佳化模式假設與架構	58
3.2.2 基本模式建立	60
3.2.3 服務計畫最佳化線性模式	65
3.3 小結	71
第四章 案例分析	73
4.1 區域鐵路系統案例分析	73
4.1.1 分析範疇與假設	74
4.1.2 實用容量與事故容量資料	75
4.1.3 可靠度分析結果	77
4.1.4 平衡點與最佳服務計畫分析成果	80
4.1.5 區域鐵路案例分析小結	86
4.2 捷運系統案例分析	89
4.2.1 分析範疇與假設	89
4.2.2 實用容量與事故容量分析結果	90
4.2.3 可靠度分析結果	94

4.2.4 平衡點與最佳服務計畫分析成果	95
4.2.5 捷運系統案例分析小結	100
4.3 最佳化模式求解	102
4.4 敏感度分析	103
4.4.1 營運成本敏感度分析	103
4.4.2 旅客時間價值敏感度分析	106
4.4.3 系統穩定度敏感度分析	109
4.5 綜合比較與討論	111
第五章 結論與建議	119
5.1 結論	119
5.2 建議	120
參考資料	123

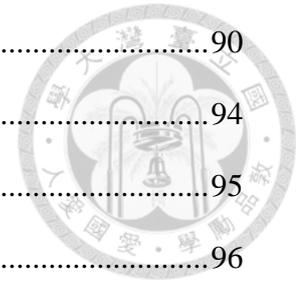


圖目錄



圖 1.1 研究流程圖	5
圖 2.1 臺鐵容量模式容量分析基本單元	8
圖 2.2 臺鐵容量模式計算流程	8
圖 2.3 穩定度與營運複雜度關係圖	24
圖 2.4 Goossens 等人(2006)所提出之分析流程	27
圖 2.5 線狀路網中營運計畫分析流程	28
圖 3.1 穩定度與效率最佳平衡點完整分析架構圖	32
圖 3.2 穩定度與效率分析流程	33
圖 3.3 可靠度分析架構	34
圖 3.4 捷運系統事故分析單元示意圖	41
圖 3.5 橫渡線與車站相對位置示意圖(路線分析).....	43
圖 3.6 捷運系統車站事故分析示意圖	45
圖 3.7 事故嚴重度分析流程	48
圖 3.8 回復時間概念示意圖	48
圖 3.9 回復時間與延滯關係推導符號示意圖(時間連續).....	52
圖 3.10 回復時間與延滯關係推導符號示意圖(時段).....	54
圖 3.11 列車服務可靠度分析模擬模式流程圖	56
圖 3.12 等候時間計算示意圖	63
圖 3.13 列車流量與平均延滯關係圖	64
圖 3.14 等候時間增加之影響旅客數量示意圖	68
圖 4.1 臺鐵調車場位置變遷示意圖	74
圖 4.2 營運延滯可靠度分析圖(樹林至板橋上行路段).....	80
圖 4.3 使用率分析結果比較	84

圖 4.4 捷運系統案例分析路線配置圖	90
圖 4.5 單線運轉運行模式示意圖	94
圖 4.6 捷運案例分析營運延滯模擬流程圖	95
圖 4.7 各路段旅客數輛圖	96
圖 4.8 服務起訖模式示意圖	98
圖 4.9 捷運營運成本敏感度分析結果	106
圖 4.10 總旅行時間與使用通勤列車數關係圖(下行 8~9 時).....	107
圖 4.11 旅客時間價值敏感度分析結果(捷運案例).....	109



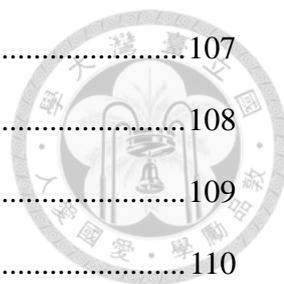
表目錄



表 2.1 六種列車進出站方式之號誌安全時距	9
表 2.2 臺鐵車站股道配置型式及對應平均號誌安全時距公式	10
表 2.3 瓶頸號誌安全時距公式	11
表 2.4 穩定度分析文獻整理表	22
表 2.4 穩定度分析文獻整理表(續).....	23
表 2.5 容量使用率建議	25
表 3.1 曝光量計算說明	35
表 3.2 事故發生地點統整表	37
表 3.3 事故發生地點整理範例	38
表 3.4 事故月台型式	38
表 3.5 各事故類型之號誌安全時距	40
表 3.6 捷運路線事故號誌時距計算公式整理	44
表 4.1 車站原股道配置與事故後股道情形	76
表 4.2 實用容量分析結果	76
表 4.3 各路段事故容量	77
表 4.4 可靠度分析成果	78
表 4.5 事故資料 K-S 檢定結果	79
表 4.6 旅次起訖矩陣(等候時間計算).....	81
表 4.7 分析路段中所有旅次起訖矩陣(延滯時間計算).....	81
表 4.8 各路段尖峰小時對號列車使用量(列車).....	82
表 4.9 不同非對號列車使用數下之旅客總期望延滯時間	82
表 4.10 各路段各時段最佳使用量(列車/小時).....	83
表 4.11 容量使用效率	84

表 4.12 各路段各時段最佳使用量(列車/小時).....	85
表 4.13 臺鐵案例最佳解總成本組成分析(萬元).....	86
表 4.14 實際容量使用率(臺鐵).....	87
表 4.15 最佳平衡點與實務運用非對號列車使用量之比較	87
表 4.16 臺鐵現行營運狀況與最佳解穩定度(總延滯)比較	88
表 4.17 最佳解與實際運用情況之總成本比較	88
表 4.18 系統與列車參數	91
表 4.19 實用容量分析結果(單位：列車/小時).....	92
表 4.20 捷運系統事故容量分析結果(單位：列車/小時).....	93
表 4.21 事故發生地點統計	94
表 4.22 可靠度分析結果整理	95
表 4.23 上下行各路段尖峰小時旅客數(人).....	96
表 4.24 路段使用量與延滯時間(分鐘).....	97
表 4.25 最佳解中各服務起訖模式發車頻率(列車/小時).....	98
表 4.26 最佳解中各服務起訖模式發車頻率(列車/小時).....	99
表 4.27 最佳解中各路段間使用量(列車/小時).....	99
表 4.28 分析結果與實際路段使用量比較	100
表 4.29 分析結果與實際路段使用率比較	101
表 4.30 實際營運與最佳服務計畫系統穩定度(捷運).....	101
表 4.31 實際營運與最佳服務計畫成本比較(捷運).....	102
表 4.32 窮舉法與最佳化模式運算時間比較(捷運系統案例).....	103
表 4.33 臺鐵營運成本敏感度分析	103
表 4.34 捷運系統營運成本敏感度分析(上行).....	104
表 4.35 捷運系統營運成本敏感度分析(下行).....	105
表 4.36 最佳服務計畫下營運成本佔總成本比例(捷運系統).....	105

表 4.37 旅客旅行時間價值敏感度分析(臺鐵).....	107
表 4.38 旅客旅行時間價值敏感度分析(捷運上行).....	108
表 4.39 旅客旅行時間價值敏感度分析(捷運下行).....	109
表 4.40 穩定度敏感度分析結果(臺鐵).....	110
表 4.41 穩定度敏感度分析結果(捷運上行).....	110
表 4.42 營運延滯敏感度分析結果(捷運下行).....	111
表 4.43 臺鐵與捷運總成本組成數值比較(萬元).....	112
表 4.44 目標式組成分析結果比較(臺鐵).....	115
表 4.45 目標式組成分析結果比較(捷運上行).....	116
表 4.46 目標式組成分析結果比較(捷運下行).....	116





第一章 緒論



1.1 研究背景與動機

近年來為了解決道路交通壅塞的問題以及伴隨綠色運輸與永續的概念興起，政府鼓勵民眾使用大眾運輸工具，期許民眾能減少私人運具的使用而轉移至大眾運輸工具。軌道系統為大眾運輸系統中重要之一環，自然扮演其中重要角色。然而軌道運輸是一項投資成本龐大且耗時之建設，當軌道系統建置完成後系統之容量雖會受到車輛使用之影響，但大體將為持在一定範圍內。因此公共運輸使用率的上升意味著在現有系統不改變的情況下旅客需求增加，以中短期規劃而言，如何在既有的軌道系統設施容量下提供更有效率的服務是一重要的課題。

軌道系統容量的使用率提升通常為提升發車頻率之結果，對於旅客而言代表其花費於車站內等候列車的時分將下降，列車搭乘與轉乘之彈性與乘車舒適度將上升，尤其是以搭乘通勤系統與捷運系統這類不需依賴時刻表的旅客影響最為明顯。然而盡可能的提升軌道系統容量使用率對旅客而言並非最佳之服務方式。系統使用量上升伴隨而來系統中發生事故之機率與其嚴重度也都會上升，當系統容量使用過高時此一結果導致系統之可靠度甚至整體系統之服務品質會因此大幅下降。事實上，安全(Safety)、準時(Punctuality)與可靠度(Reliability)皆是軌道系統中服務品質的相當重要的服務指標。事故發生機率的上升與嚴重性增加，除了安全性下降外對準時與可靠度亦會有所影響。而準時或稱準點多半是指軌道運輸系統列車通過某些參考點時是否有延誤，以臺鐵為例，列車準點指的是列車到達終點站延誤 5 分鐘以內者，則可稱之為列車準點；而可靠度則乃是軌道系統因為事故或其他因素的發生導致系統中斷或失效(Failure)的情形。此兩項指標皆與系統的穩定度(Stability)有關，較低的系統穩定度即較低的可靠度和準點率對乘客直



接的影響便是總旅行時間的增加以及造成旅客對系統的不信任感。由上述所提之情境可知。系統之穩定度與效率間存在權衡關係。對於軌道系統而言，除了使用的旅客外還包含系統之營運者，因此在進行穩定度與效率平衡點分析時，本研究將探討單純探討旅客觀點之系統穩定度與效率最佳平衡點，以及同時考量旅客與營運者觀點之系統最佳平衡點。由營運者的觀點而言，透過提升發車頻率來增加系統使用量將增加營運業者的成本負擔，因此過多而不必要的使用是系統營運業者所不樂見的。同時考量旅客與營運者之觀點可知，軌道容量使用的最佳情況絕非愈高愈好但也不能是僅僅剛好滿足旅客需求，而是介於兩者之間某一使用情形。

總結來說，對於服務計畫分析之探討，過往的研究中雖已有專家學者探討旅客與營運者之間效益的權衡，然而將考量容量使用之風險對旅客之影響並將其納入服務計畫分析中則在過往研究中並無此分析方式，此為本研究所提出之特殊分析方式。回到單純探討穩定度與效率分析之部分，對於系統穩定度與容量使用之權衡關係，李宗晏(2010)提出了針對臺鐵系統以風險分析的方式進行時刻表穩定度與效率評估的分法。陳冠廷(2012)基於此一風險分析概念，進一步研發與建立軌道運輸系統時刻表穩定度評估系統。在上述研究中皆以風險分析的概念來探討時刻表的穩定度與效率，並透過所提出的「回復時間」概念加以分析，考量事故發生之隨機性，探討不同路段上在不同時間點下發生事故之機率與其期望回復時間，最後分析得知一天營運下之總回復時間。研究分析的結果可將同系統中不同時刻表運用加以比較，然而在上述研究中僅能進行相對比較，若欲探究穩定度與效率之間的最佳平衡點為何，則並無法得知。因此在本研究中將延續採用其風險分析之概念，並將營運者與使用者之關係納入考量，建立最佳化模式尋找穩定度與效率權衡關係中之平衡點以及最佳服務計畫。



1.2 研究目的

本研究預期於考量軌道系統容量使用效率與風險的觀點下，找尋兩者之最佳平衡點並提出最佳服務計畫。在本研究中除了接續前人研究持續深入探討容量使用效率與系統穩定度的權衡關係外，更進一步研究兩者間最佳平衡點。並透過最佳化模式建構，嘗試將系統營運者與使用者所受之影響同時納入考量，期望得出最佳之服務計畫。研究之目的可歸納如下；

- (1) 建立軌道系統容量使用效率與系統穩定度平衡點分析流程與模式。
- (2) 決定不同軌道系統中之穩定度與效率平衡點
- (3) 以「回復時間」的角度進行穩定度分析，並建立「回復時間」與「延滯時間」關係進行轉換，供實務人員參考運用。
- (4) 分析容量使用風險，並將其不確定性納入服務計畫建構考量中。
- (5) 透過穩定度與效率之平衡點，結合系統營運者與使用者成本建構最佳服務計畫。

1.3 研究範疇與限制

本研究主要分析對象為以通勤為主的區域鐵路或捷運系統，分析系統容量使用效率與風險，進行系統穩定度與效率最佳平衡點探討以決定其服務計畫。其中穩定度之部分會受到來自軌道營運中行車事故、天然災害、交會待避等干擾之影響。本研究將系統所受干擾因素依其發生原因分為事故干擾與非事故干擾，前者透過歷史資料蒐集與整理後進行統計分析以評估其影響；後者則藉由模擬之方式探討其發生與容量使用關係。在回顧過往軌道容量分析相關研究中可以發現，分析所採用之空間參考點多半是將複雜的路網或較長的路線切割成數段以利進行分析，本研究亦根據容量分析需求區隔成數個路段，並忽略事故發生時各相鄰路段間的交互影響。

服務計畫所包含的項目較為廣泛且並無一致之規定，在本研究中則假設為在給定的數個服務起訖模式中，加以選擇並決定其服務之頻率。而最佳化模式所求得之平衡點以及最佳服務計畫皆為某單一系統之分析結果。不同系統間考量其路線、營運特性、系統穩定度、旅次分布…等因素皆不盡相同，其分析結果亦不相同。

1.4 研究方法

本研究為分析軌道容量使用風險與效率之平衡點，並決定其最佳服務模式。首先探討不同軌道容量使用情況下對於系統穩定度之影響。穩定度分析中包含事故影響與非事故影響兩部分，兩者皆須考量容量使用之情況並將其不確定性納入分析過程中。其中事故所產生之影響將透過風險的概念加以量化分析，該風險之組成為事故發生機率與嚴重性之乘積，前者由可靠度工程之概念分析其機率函數；後者則以系統發生事故至回復正常的時間內所產生之延滯進行分析。非事故之部分則藉由模擬之方式進行探討。然而僅有容量使用效率與穩定度關係並不足以決定其平衡點與最佳服務計畫，本研究乃以最小旅行成本建構最佳化模式，將在不同容量使用量下，使用者的總旅行時間成本與系統營運者所需負擔的營運成本同時置於模式中進行分析，其分析結果為最佳服務計畫亦代表該情況下系統容量使用效率與穩定度之最佳平衡點。

1.5 研究流程與架構

本研究之研究流程如圖 1-1 所示，於研究主題確定後，蒐集相關文獻進行回顧藉以了解前人研究之方向與近況。確立研究之方向與方法後進行資料蒐集，以供後續模式建立與分析時使用。接著建立穩定度與效率平衡點分析模組，此一模組分穩定度與效率分析模式以及服務計畫最佳化模式兩部分。前者沿用且修正既有之容量與事故容量分析方式，並建立回復時間與延滯之關係式進行轉換以供後

續最佳化模式使用；後者則根據所蒐集之資料與穩定度與效率分析之成果進行最佳化模式建構。案例分析之部分，將以通勤鐵路為主區分為兩部分，分別探討區域鐵路系統與捷運系統兩者各自的穩定度與效率最佳平衡點以及其相對應之最佳服務計畫。最後依據案例分析與敏感度分析之結果，整理且詳細探討後提出具體結論以及未來研究方向。

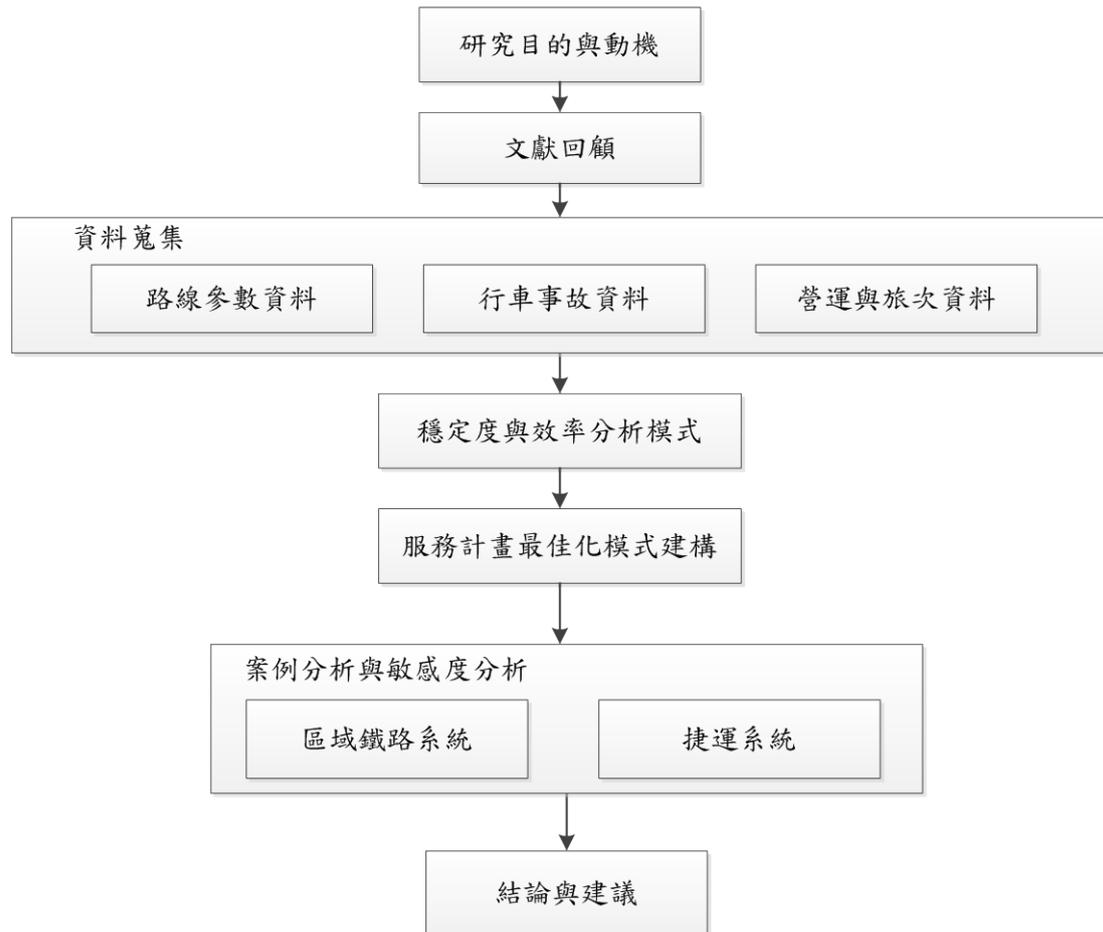


圖 1.1 研究流程圖



第二章 文獻回顧



依據本研究之分析架構，將先進行系統穩定度與效率之評估，再建立最佳化模式探討兩者之平衡點並分析系統之最佳服務計畫。故本章首先於 2.1 節回顧容量分析模式，事實上關於容量分析之研究與分析方法相當多，在此本研究主要針對交通部運研所所提出軌道容量分析模式進行回顧與說明。於 2.2 節則針對穩定度分析相關研究方法與分析因子詳加說明。此兩者將作為本研究進行穩定度與效率分析之基礎。為進行後續穩定度與效率關係探討與最佳化模式建立，2.3 節中將針對穩定度與容量使用效率兩者關係之相關研究進行說明。而最佳化分析之最佳平衡點所代表含意即為系統之最佳服務計畫，而關於服務計畫之相關研究將於 2.4 節中回顧。最後 2.5 節為文獻回顧小節。

2.1 軌道容量分析

本研究中軌道系統的容量分析為一重要的工作，後續各項分析其基礎皆建立在對系統容量已知的情況下，探討不同容量使用率下對於系統之影響，並決定最佳之使用效率。事實上對於軌道系統容量分析的研究相當多，而其分析之方法也不盡相同，比較常見的兩類為解析模式與模擬模式。前者將軌道基礎設施與營運環境利用數學式與代數的方式建立模式並求出理論的容量值，使用所需的資料較少分析過程相對於模擬模式而言較為簡單，部分解析模式因其使用最佳化方式決定容量，有時會被另外歸納為最佳化分析模式。模擬模式則建立與實際路線系統之營運環境盡可能貼近實務營運之狀況之模式，透過模擬整體路網下實際列車運行之情況來分析路線之容量，所需之資料模式建構較為複雜，但其成果也愈接近實際營運情境。本研究主要將使用解析模式進行容量分析與評估以供後續最佳化模式分析需求，因此本研究將回顧交通部運研所針對運輸系統容量分析研究(2008)中傳統鐵路容量分析模式，此即針對臺鐵系統進行容量分析模式建立。另

一方面亦回顧運研所(2010)針對都會捷運系統容量分析模式之研究，此一分析方式亦將應用於後續捷運系統案例分析。兩個模式其基本分析概念相近，但因兩系統間之差異，而對分析公式有所影響。



2.1.1 臺鐵容量分析模式

臺鐵容量分析模式所採用之空間參考點為相鄰兩個車站與其所夾之路段，且此兩車站皆須能夠提供交會代之功能，如圖 2.1 所示，分析時車站 A 與車站 B 與所夾路段為一分析單元，分別計算三者之容量後取最小值。而下一個分析單元則為車站 B 與車站 C 與其所夾路段，其中車站 B 在兩個分析單元中皆須備考量。另外若車站 B 無法提供交會待避，則必須將其合併使得車站 A 至車站 C 之間單一個分析單元。

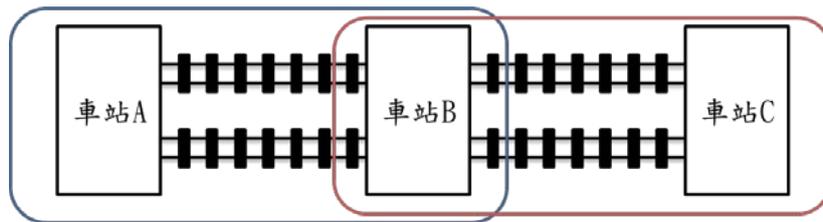


圖 2.1 臺鐵容量模式容量分析基本單元

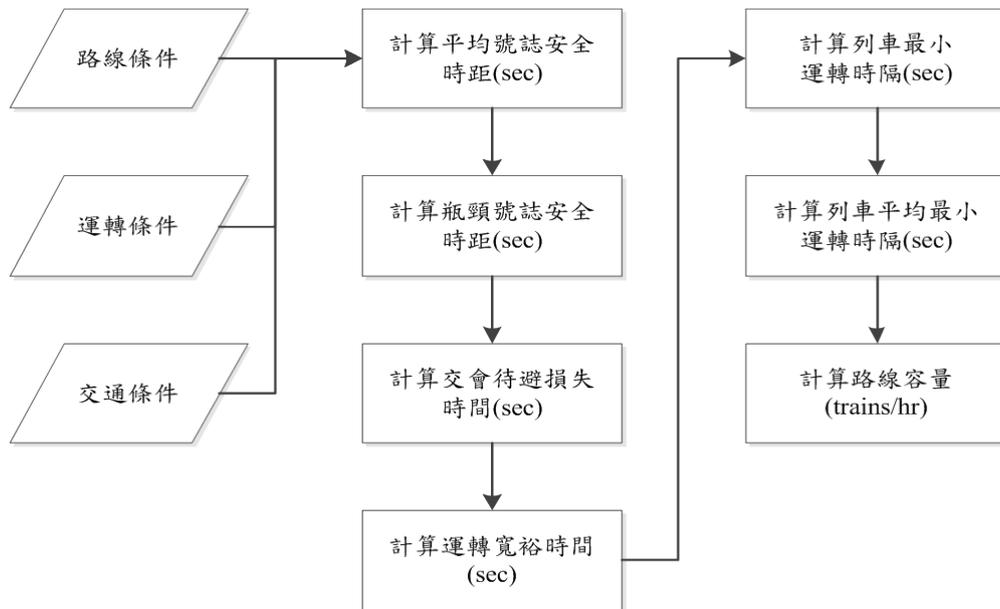


圖 2.2 臺鐵容量模式計算流程

資料來源：Lai et al. (2010)



圖 2.2 則為容量計算的完整分析流程，其所需之輸入資訊為路線條件、交通條件以及控制條件。分析計算步驟簡述如下：

步驟一：根據列車特性(包含加減速性能、車輛長度等)與營運型態(停站模式)將列車進行分組以利後續進行時隔計算。

步驟二：決定各組列車於各路段上之運行時間以及其在各路段上之巡航速度。運行時間通常來自表定營運時間營運抑或現行之時刻表。

步驟三：決定各組列車於各站之列車停站時間。可由旅客上下車數量進行預估或採用時刻表之停站時間。

步驟四：計算平均號誌時距。平均號誌時距與號誌系統以及車站佈設具有高度相關，計算時將號誌時距將車站內再細分為進站、出站、交會與交叉四種情境進行考慮。其中進出站再加以考量前後車是否使用同一股道。

表 2.1 為歸納整理後之六種情境與號誌安全時距計算方式，此六種情境可以運用於分析臺鐵各種車站佈設上。其詳細公式推導可參閱運研所(2008)之報告。

表 2.1 六種列車進出站方式之號誌安全時距

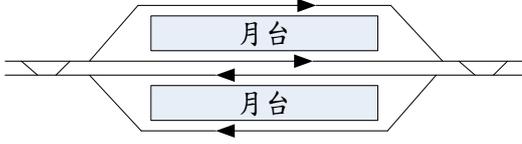
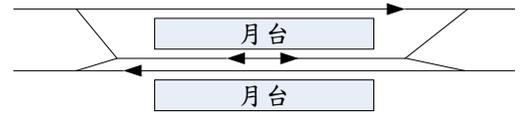
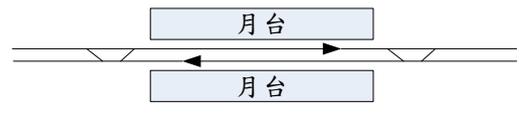
運轉方向	時隔種類	停靠股道	號誌安全時距
同向	進站	同一股道	$T_{s,A1}$
		不同股道	$T_{s,A2}$
	離站	同一股道	$T_{s,D1}$
		不同股道	$T_{s,D2}$
反向	交會	不同股道	$T_{s,M}$
	交叉	不同股道	$T_{s,X}$

資料來源：運研所(2008)與陳冠廷(2012)整理

表 2.2 之四型車站則為臺鐵車站月台配置型式之結果。而其所對應之安全號誌時距計算方法透過實務運用推算而出並詳列於後。舉例而言，如第一型月台，因上下行各自使用兩股道，由正線來之車輛交替停用於兩股道，故進出站皆使用不同停靠股道之時距。反之以第二型為例，

其中一股道供上下行共用，故對同方向之進站之列車而言，前後車有時使用同一股道(該方向專用股道)，有時使用不同股道(兩方向共用股道)。因此同股道與不同股道之時距皆須使用，其係數即反映實務運用時股道實際分配情況。若車站形式不屬於下述四種，亦可透過此一方式進行分析號誌安全時距。

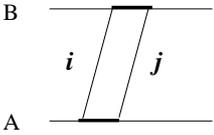
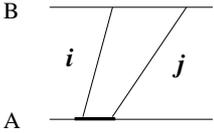
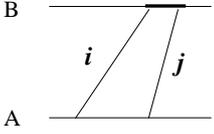
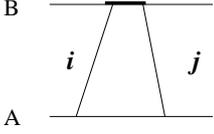
表 2.2 臺鐵車站股道配置型式及對應平均號誌安全時距公式

車站月台軌道配置	進出站方式	平均號誌安全時距
	進站	$T_{s,A2}$
	離站	$T_{s,D2}$
	進站	$\frac{1}{3}T_{s,A1} + \frac{2}{3}T_{s,A2}$
	離站	$\frac{1}{3}T_{s,D1} + \frac{2}{3}T_{s,D2}$
	進站	$0.75T_{s,A1} + 0.25T_{s,A2}$
	離站	$0.75T_{s,D1} + 0.25T_{s,D2}$
	進站	$T_{s,A1}$
	離站	$T_{s,D1}$

資料來源：運研所(2008)

步驟五：計算瓶頸號誌安全時距。因為車站本身形式與車種組成之關係，相鄰兩站間之號誌安全時時距亦不相同，因此必須取得在這分析單元內中之各個空間參考點上平均號誌安全時距之最大值稱之為瓶頸號誌安全時距，此一最大值發生地點即為分析單元中之容量瓶頸。表 2.3 即為考量不同車轉組成情境下之瓶頸號誌安全時距計算公式。

表 2.3 瓶頸號誌安全時距公式

交通條件	瓶頸車站位置	瓶頸號誌安全時距
$t_i = t_j$		$T_s = \max(T_{s,D}^A, T_{s,A}^B)$
$t_i < t_j$		$T_s = \max(T_{s,D}^A, T_{s,A}^B - (t_j - t_i))$
$t_i > t_j$		$T_s = \max(T_{s,D}^A - (t_j - t_i), T_{s,A}^B)$
反向交會		$T_s = \max(T_{s,M}^B, T_{s,min})$

註： $T_{s,min}$ 為排點時列車最短交會號誌時距，臺鐵建議值為 25 秒

資料來源：運研所(2008)

步驟六：計算交會待避損失時間，2.1 式以期望值的概念計算兩列車因待避所損失時間，2.2 式則為交會損失時間計算：

$$t_l = \frac{1}{2} |t_i - t_j| \quad (2.1)$$

$$t_l = \frac{1}{2} (t_i - t_j) \quad (2.2)$$

其中， t_i = 先行列車站間運轉時間 (秒)

t_j = 續行列車站間運轉時間(秒)

t_l = 損失時間 (秒)

步驟七：計算運轉寬裕時間。可透過經驗進行估算，亦可透過號誌安全時距與損失時間之和取一定比例，如 2.3 式：

$$t_m = \beta(T_s - t_l) \quad (2.3)$$

其中， t_m = 運轉寬裕時間(秒)

B = 運轉寬裕時間係數，在臺鐵容量模式中採用 0.35 來計算

步驟八：計算列車最小運轉時隔。其組成包含步驟五至七所求出之瓶頸號誌安全時距、交會待避損失時間以及運轉寬裕時間組成，可以 2.4 式表示：

$$h_{i,j} = T_s + t_l + t_m \quad (2.4)$$

步驟九：計算平均最小運轉時隔。考量路線上不同列車之特性與其車種組成比例，因此以平均值代表實際營運情況，其作法是給予各種列車組成的最小運轉時隔一權重，2.5 式乃是在時刻表已知情況下分析方式，而 2.6 式則用於時刻表未知之境：

$$\bar{h} = \sum_{i,j} h_{ij} \cdot p_{ij} \quad (2.5)$$

$$\bar{h} = \sum_{i,j} h_{ij} \cdot \frac{n_i \cdot n_j}{n^2} = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j} h_{ij} \cdot n_i \cdot n_j \quad (2.6)$$

式中： \bar{h} = 平均最小運轉時隔 (秒)

$\overline{h_{ij}}$ = 為續行列車 j 跟隨先行列車 i 的最小運轉時隔 (秒)

p_{ij} = 先行列車 i 與續行列車 j 的相對頻率(根據時刻表統計)

n_i = i 種列車之列車數

n_j = j 種列車之列車數

步驟十：計算路線容量。對於每一路線區段軌道容量而言，以其定義可由 2.7 式計算而得：

$$C_l = \frac{3600}{h} \quad (2.7)$$

其中， C_l = 路線容量 (列車/小時)

上述容量分析十步驟即可分析出路線上各段之容量，此一容量為以列車為單位之分析成果，本研究於穩定度與效率評估時僅需使用列車單位之容量即可。然而後續最佳化進行平衡點決策時則必須使用旅客為客體分析單位，因此需計算可服務之旅客數量，而必須再進行以下步驟計算。

步驟十一：列車容量計算。考量車廂差異、坐位數量(n_s)、立位空間(A_v)、乘載水準(D_s)與乘載變異係數計算公式如下：

$$c_v = n_s + (D_s \cdot A_v) \quad (2.8)$$

$$c_t = \sum_{i=1}^{n_v} c_{v_i} \quad (2.9)$$

其中， c_t = 列車容量 (旅客/列車)

c_{v_i} = 列車中第 i 節客車車廂容量 (旅客/車廂)

步驟十二：可達成容量計算。因整體列車間乘載變異，故可達成容量並非列車之最大容量，而應小於其最大容量。

$$C_u = \rho_d C_o = C_l \sum_i c_{t_i} r_i \rho_{d_i} \quad (2.10)$$

其中， C_u = 最大使用容量或可達成容量 (旅客/小時)

ρ_d = 整體乘載變異因子

ρ_{d_i} = i 列車乘載變異因子

C_o = 最大供給量 (旅客/小時)

C_l = 列車最大服務頻率 (列車/小時)

c_{t_i} = i 車種列車容量 (旅客/列車)

r_i = 單位時間內 i 車種所佔比例 (%)

2.1.2 捷運系統容量分析模式

捷運系統容量分析在 TCRP(2003)已有被提出，其研究之分析方式透過計算可能的容量瓶頸路段上之最小時距來決定，最小運轉時隔包含列車間的最小安全時距、停站時間與運轉寬裕時間如 2.11 式，而容量計算方式則如 2.12 式。此外該研究中指出百分之七十九的捷運系統路線瓶頸是在路線上最為繁忙之車站，百分之十五則發生在末端車站，而剩餘之百分之五則可能出現於銜接點(junction)上。該研究分析針對中間站、折返站與銜接點三部份分析其列車最小安全時距，其中間站部分亦探討系統採用不同號誌系統下之分析方式。詳細公式可參考 TCRP(2003)以及葉志生(2012)之整理。

$$h_{gs} = t_{cs} + t_d + t_{om} \quad (2.11)$$

$$T = \frac{3600}{h_{gs}} \quad (2.12)$$

其中， h_{gs} = 瓶頸路段最小運轉時隔 (秒)

t_{cs} = 列車間最小安全時距 (秒)

t_d = 停站時間 (秒)

t_{om} = 運轉寬裕時間 (秒)

交通部運研所(2012)研發之都會捷運系統容量分析模式，亦參考 TCRP(2003)之分析方式針對國內捷運系統建立模式並進行分析。其最小運轉時隔計算概念同 2.11 式僅符號運用有些微差異。對於計算號誌安全時距之空間參考點分析亦涵蓋中間站、折返站與銜接點，此模式中間站分析部分直接運用國內之捷運系統所採用之號誌系統，然對於折返站有著近一步詳細分析，該研究將折返形式分為以下數種：

- 折返站，利用站前橫渡線進行折返，並於站內停靠同一股道。
- 折返站，利用站前橫渡線進行折返，並於站內停靠不同股道。



- 折返站，利用站後橫渡線進行折返，並於站內停靠同一股道。
- 折返站，利用站後橫渡線進行折返，並於站內停靠不同股道。
- 折返點，利用站中央避車線進行折返。

理論上路線每一空間參考點都有其號誌安全時距，瓶頸號誌安全時距則為所有地點之號誌安全時距最大者，在此研究中則直接以可能出現之瓶頸的部分進行分析，如 2.13 式所示，詳細各種情境下之計算公式可以參照運研所(2010)研究。

$$T_s = \max(T_m, T_t, T_j) \quad (2.13)$$

其中， T_s = 系統最小號誌安全時距 (秒)

T_m = 最繁忙中間站之號誌時距 (秒)

T_t = 折返站之號誌安全時距 (秒)

T_j = 銜接點之號誌安全時距 (秒)

對於運轉寬裕時間計算之部分，TCRP(2003)建議使用 20 至 25 秒，然而運研所(2010) 研究則認為運轉寬裕時間不應為固定值，其理由為當號誌時距愈大時所產生之變異也愈大，應依比例使用較大的運轉寬裕時間可確保時刻表的穩定度，因此以最小安全時距取一定比例計算之如 2.14 式。因停站時間於計算列車號誌安全時距時便已納入考量，故兩連續列車之最小運轉時隔計算公式則如 2.15 式：

$$t_m = \beta \cdot T_s \quad (2.14)$$

$$h = T_s + t_m = (1 + \beta)T_s \quad (2.15)$$

其中， β = 運轉寬裕時間係數

如前所述，捷運系統之容量主要受到瓶頸路段之號誌時距之影響，故經分析求出之兩連續列車之最小運轉時隔後，代入 2.12 式便可得到路線上之容量。但此容量乃是以列車為客體分析單位，故若欲分析可服務之旅客數量則須再進行轉換。計算以旅客為客體單位之容量方式如同其一小節之計算方式，單一系列車容量

之計算方式同 2.8 式，唯一差異在於捷運系統車輛組成較為單純，因此無須考量車種間之差異，故可達成容量計算公式如 2.16 式：

$$C_u = \rho_d \cdot C_o = \rho_d \cdot C_l \cdot c_i \quad (2.16)$$

其中， C_u = 最大使用容量或可達容量 (旅客/小時)

ρ_d = 乘載變異因子

C_o = 最大供給量 (旅客/小時)

C_l = 列車最大服務頻率 (列車/小時)

c_i = 列車容量 (旅客/列車)

本研究中捷運系統分析之方式，因所分析之系統與運研所(2010)研究中特性相近，且考量其模式可以針對捷運系統以不同形式折返之容量分析，此一特性亦有助於本研究分析所需，故本研究在後續捷運系統容量分析皆引用該研究之方法。

2.2 軌道系統營運穩定度分析

對於軌道系統營運穩定度之分析在過往的研究中主要可分為解析法與模擬法。兩種分析方式各有其優缺點，對於兩種分析模式之相關研究將在後續章節詳細說明。除此之外系統穩定度通常將探討列車於實際運行時可能會受到其他干擾因素之影響，導致列車旅行時間或停站時間的改變，對於此一干擾因素之分析方式亦隨各研究之分析方式與資料取得有所差異，舉例而言，除了本研究所採用之歷史資料分析方式外，部分研究中以列車行駛時間之變化作為系統之干擾來源；另有研究則考量列車之路徑衝突所產生之影響，而亦有少數研究直接給定系統干擾之影響數值僅作相對性之穩定度比較。而上述之干擾因素或旅行時間改變之分析考量又可以分為隨機模式(Stochastic Model)與確定性模式(Deterministic Model)。以下將會針對所回顧之模式進行說明。

2.2.1 解析模式

解析模式是透過數學方程式來連結系統穩定度與其他參數如列車性能、路線特性與運轉特性等。並透過數學規劃模式以進行分析求解。首先是以延滯漫延進行穩定度分析與衡量之研究，Carey (1994)提出當班距愈短時，所產生之期望延滯(expected knock-on delay)將會愈大，亦表示續行列車之期望旅行時間愈高。該研究利用近似方程式建立模式用以估計各種不同班距下旅行時間分布，由此旅行時間分布可分析各列車之延滯。Higgins 等人 (1995) 提出解析模式在考量路線、車輛與時刻表等因子下用以量化分析延滯風險。另外其後續研究，Higgins 等人 (1998)同樣建立解析模式以量化分析客運列車所受之直接與次要延滯並透過迭代細化法(iterative refinement algorithm)進行分析求解。Huisman 等人 (2002) 以排隊理論(Queuing Theory)建立分析模式，可對沒有時刻表之新系統進行分析並計算其延滯。Briggs 和 Beck (2007) 利用 q 指數方程式分析延滯發生機率分布並應用於英國鐵路路網之上。Yuan 等人 (2007) 考量列車於車站內占用時間之隨機性，建立解析模式探討車站內列車因路徑衝突所產生之延滯漫延。該研究亦提及容量使用效率與列車穩定度之權衡關係。Delorme 等人 (2009) 之研究主要目的為發展一套決策支援評估軌道基礎設施，利用最短路徑問題分析方法來探討當時刻表受到一既定之初始延滯後，每列車因延滯漫延所受之延滯以進行時刻表穩定度評估。Cacchiani (2012) 之研究探討時刻表之強健性，且該研究亦提及时刻表之使用效率與穩定度之關係。

除了對延滯漫延進行統計分析之外，部分研究利用時刻表中之緩衝時間(Buffer Time)或餘裕時間(Slack Time)作為系統穩定度評估因子。Carey 等人 (1995) 建立一考量隨機特性之模式予以預測分析當時刻表中之餘裕時間改變對穩定度影響因子之影響。另一方面 Cary (1998)則以行為反應之觀點來探討增加額外表定旅行時間所產生之期望成本，並用以決定時刻表中完成各事件之最佳允許時間。Salido 等人 (2008) 根據其對路線基礎設施與緩衝時間之研究分析，建立兩種解

析方法以分析時刻表之強健性 (Robustness) 。Khan 等人 (2008) 則建構一最佳化模式探討餘裕時間於時刻表中之分配問題，該研究中以最小化旅行時間為目標，將列車受到延滯而導致旅客旅行時間影響納入考量。而 Cicerone(2009)透過 PoR(Price of robustness)因子來分析系統之穩定度。該因子用以分析有無給予時刻表餘裕時間之兩種情境下之旅客成本比例。Goverde 等人 (2007) 利用 Max-Plus 代數分析法探討週期性時刻表之穩定度，該研究定義穩定度為時刻表中餘裕時間之大小。此一確定性 Max-Plus 代數法在其後續研究中，Goverde 等人 (2009)發展出以隨機性 Max-Plus 代數法以進行穩定度分析。該分析方式乃是將列車停站與站間運轉時間用特定機率分布取代原有之確定數值。

事實上許多模式並不僅只包含一種穩定度評估方式，在 Hansen (2000)之研究便同時包含排隊理論與 Max-Plus 代數分析法，探討車站中因列車路徑衝突所導致的停等時間，以進行餘裕時間之分析評估。Soto y Koelemeijer 等人 (2000) 建立一分析工具軟體 PETER(Performance Evaluation Toolbox for Event graph in railway system)，該分析軟體提供各項之計算，其中包含穩定度分析以及以 Max-Plus 代數分析法為基礎計算延滯。此外 Schittenhelm 與 Landex (2013) 透過關鍵影響因子(KPI)分析丹麥鐵路時刻表之強健性，該研究分析時亦探討不同容量使用下 KPI 因子所分析之結果以探討容量使用對時刻表之影響。

有別於上述所提及之分析方式，李宗晏(2010)提出以回復時間取代延滯進行分析，因使用延滯進行分析可能會高估或低估其嚴重性，故該研究定義回復時間為系統受到干擾後系統回復至正常所需時間。並以回復時間探討時刻表之穩定度。葉志生(2012)則同樣延續此一分析概念，改以無時刻表之捷運系統為分析對象探討系統之穩定度。

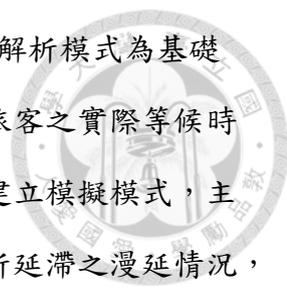
2.2.2 模擬模式

模擬模式乃是運用電腦建立一個貼近實際營運之環境的模式，在模擬模式中可以根據既有之模擬軟體進行分析或由解析模式轉變而來。在模擬模式中便會預

先將列車運轉特性與邏輯寫入模式之中，而模擬之過程可將相關參數進行改變以探討其對於穩定度分析之影響。以下將對相關之文獻進行回顧。

Hooghiemstra 等人 (1998) 透過 DONS 模擬丹麥路網上之營運列車受到微小干擾時所受之影響，此干擾乃由過往營運資料所得，以初始延滯數值反映於模擬模式中，藉以分析系統之穩定度。Carey 和 Carville (2000) 則模擬列車於車站中受到不同情境之初始延滯，以分析次要延滯之機率分布，分析之結果可用於評估其系統之穩定度在不同營運策略或不同時刻表下之變化，可供決策分析時參考。

另外 SIMONE 為其中一種鐵路營運模擬軟體，設計之時主要以荷蘭鐵路系統作為對象，其主要用於比較不同時刻表之穩定度並作為營運規劃之決策參考輔助工具。在該模擬軟體中可以針對隨機性或確定性之干擾因素進行探討，分析並量化可能產生之延滯時間以及其可能原因。其中 Middelkoop 與 Bouwman(2002) 便是利用此分析軟體分析時刻表中之餘裕時間、列車延誤等因素以評估時刻表穩定度。同樣 Vromans 等人(2006) 亦使用 SIMONS，該研究探討異質性 (Heterogeneity)對時刻表穩定度之影響，該研究透過評估異質性時刻表以及同質性時刻表在受到隨機性的干擾下所產生之延滯用以分析系統穩定度。期望透過減少延滯的擴散及影響，提高軌道系統的穩定度。Demitz 等人 (2004) 的研究中提及系統穩定度與時刻表強健性對旅客轉乘之影響與重要性，該研究則以 RailSys 模擬軟體作為分析工具，該軟體對隨機性與確定性之營運干擾皆可進行分析。研究中透過調整時刻表中列車運行與停站時間，並在確認其強健性不受影響下進行系統穩定度評估。Salido 等人 (2012) 之研究中分建立解析與模擬模式用以探討時靠表知其強健性，解析模式中透過系統基礎設施與餘裕時間分配來進行分析；模擬模式則針對給定之時刻表加以分析。Franke 等人 (2013) 則利用 On-Time 模擬軟體分析路網中時刻表之穩定度，該研究中另外以解析方式計算延滯漫延並將考量延滯產生之隨機特性。利用該模擬軟體搭配其所提出之模式不但可以針對時刻表進行改善亦可進行時刻表設計。



Engelhardt-Funke and Kolonko (2004) 之模擬模式乃是以一解析模式為基礎搭配排隊理論所建立而成的，該研究透過模擬列車延滯轉換為旅客之實際等候時間用以衡量系統之穩定度。而劉昭榮(2011)以台鐵為分析對象建立模擬模式，主要用以探討連鎖延滯之影響。模式中首先依給定之初始延滯分析延滯之漫延情況，接著將站間運轉時間與停站時間兩因素進行隨機特性分析，再將其納入模式中進行推估。陳冠廷(2012)以蒙地卡羅模擬方式，探討臺鐵系統在受到事故干擾影響時對系統穩定度之影響，該研究可針對不同時刻表加以衡量並分析比較。且由其分析結果可知當路段上連續使用高容量時，因剩餘容量之不足會導致系統穩定度下降。

穩定度分析之相關文獻整理如表 2.4，其中穩定度分析之部分由文獻回顧中歸納後依其特性分為時刻表強健性、延滯漫延分析、餘裕時間分析、路徑衝突與其他項目。時刻表強健性之研究為分析在可接受的干擾下，對於時刻表產生的影響，以及其受影響後回復至正常之能力或時間。延滯漫延相關研究探討系統受干擾影響後所產生的初始延滯與延滯漫延的情形。於多數時刻表強健性研究中會透過分析系統之延滯漫延情形來加以衡量其時刻表強健性，故其於表 2.4 中會同時包含此兩項。對於系統受到擾動後的強健性評估，除了延滯外亦研究探討時刻表之恢復能力，如當受到一初始延滯發生影響後時刻表會回復至正常營運所需之時間。進行穩定度分析時另一分析要點為如何考量系統干擾之因素，在過往之分析研究中，雖然在許多研究中探討干擾因素來源時會提及事故發生，然多僅為敘述性說明，並未實際使用該部分資料進行分析，故未放置於此亦分析類中。由於部分研究直接給定其初始延滯進行分析故將此類分析模式列於未說明之項目中。

隨機性考量之部分主要探討模式中系統干擾之決定，多數研究使用隨機性模式或以機率分布之概念進行分析，在隨機性模式中會使用隨機變數來決定系統干擾之發生，此一隨機變數通常會依據實際資料或自行假設之機率分布來最為系統干擾發生之分析基礎。另外亦有部分研究雖然未使用隨機變數進行分析，但其同

樣透過機率分布以機率或期望值之形式來決定系統干擾發生機率或事故嚴重性，此兩種型式之研究皆有將系統干擾發生之特性納入考量。然而亦有少數模式並未考量此一項目直接給定特定之系統干擾影響進行相對性之比較。於表 2.4 中將其區分為兩類顯示。





表 2.4 穩定度分析文獻整理表

作者	穩定度分析						系統干擾原因				隨機特性考量 (隨機性或機率分布)	分析 模式
	時刻表 強健性	延滯 漫延	餘裕時 間分析	延滯 風險	路徑 衝突	其他	作業 時間	事故 發生	其他 原因	未說 明		
Carey (1994)		V					V				V	解析
Higgins et al. (1995)		V		V						V	V	解析
Carey et al. (1995)			V				V				V	解析
Higgins et al (1998)		V							V		V	解析
Carey (1998)		V	V						V		V	解析
Hooghiemstra et al (1998)		V					V					模擬
Carey et al (2000)		V							V		V	模擬
Hansen (2000)					V				V			解析
Huisman et al. (2002)		V								V	V	解析
Middelkoop et al. (2002)	V	V					V					模擬
Demitz (2004)	V	V					V				V	模擬
Engelhardt-Funke (2004)		V	V				V				V	模擬
Odijska (2006)	V	V								V	V	解析
Vromans (2006)	V					V				V		模擬
Goverde (2007)	V	V	V							V		解析
Yuan (2007)		V			V		V		V		V	解析
Khan (2008)		V	V				V				V	解析



表 2.4 穩定度分析文獻整理表(續)

作者	穩定度分析						系統干擾原因				隨機特性考量 (隨機性或機率分布)	分析 模式
	時刻表 強健性	延滯 漫延	餘裕時 間分析	延滯 風險	路徑 衝突	其他	作業 時間	事故 發生	其他 原因	未說 明		
Salido et al. (2008)	V	V	V							V		解析
Cicerone et al. (2009)	V		V							V		解析
Delorme et al. (2009)		V								V		解析
Goverde et al. (2009)	V	V	V							V	V	解析
Liebchen et al. (2010)	V					V	V				V	解析
李宗晏(2010)		V				V		V			V	解析
Goverde et al. (2011)	V		V							V	V	解析
劉昭榮(2011)		V					V				V	模擬
Cacchian et al. (2012)	V	V	V						V		V	解析
Salido et al. (2012)	V	V	V							V	V	模擬
陳冠廷 (2012)		V				V		V			V	模擬
葉志生 (2012)		V				V		V			V	解析
Franke et al. (2013)		V					V				V	模擬
Schittenhelm et al (2013)	V		V		V				V		V	解析



2.3 穩定度與容量使用效率關係

表 2.4 之回顧中，多數之研究僅侷限於穩定分析之部分，僅少數涉及容量議題，而其中探討容量議題之文獻亦僅能作相對性之評估比較，而本研究欲進一步找尋系統穩定度與容量使用效率之權衡關係與最佳平衡點。

穩定度與效率之關係探討相關文獻中，Landex(2008)研究中所提出穩定度與系統營運之關係，如圖 2.3 所示，系統之穩定度將會隨營運之複雜性下降，在該研究中營運複雜度是指當列車數目增加而導致路線上可能產生之衝突上升。因此該研究中提到即便路線上理論上可以再運行更多列車，然而若因增加列車使營運之複雜度上升，而會導致穩定度下降至亦可接受限制之下。此時該研究認為該路線已經達使用容量之上限，而這些剩餘之容量被認為是保留以維持營運穩定。此即說明容量使用與穩定度之關係，本研究亦延伸其所提及之穩定度目標或穩定度限制之概念以探討穩定度與效率之平衡點。

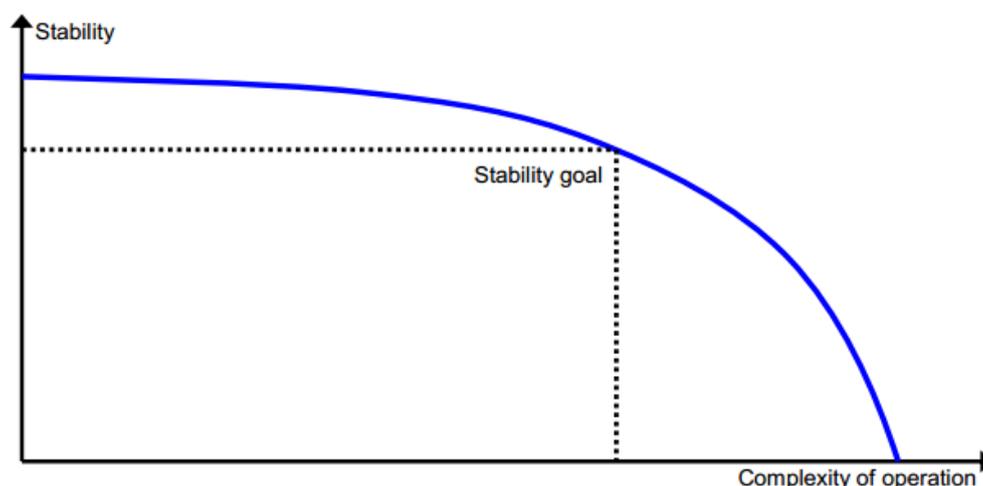


圖 2.3 穩定度與營運複雜度關係圖

資料來源：Landex (2008)

另一分面由容量分析角度出發，過往研究中探討軌道容量分析與容量使用計算之研究相當的多。但進一步探討容量使用效率則較少。在容量使用效率之相關文獻中，UIC(2004)之建議系統之容量使用效率如下表 2.5 整理。該研究中主要

研究內容為軌道系統容量分析與計算之方式。在容量分析完成後，該研究亦提出系統容量使用率建議值，然而該數值乃是依據歐洲鐵路系統營運經驗而得，並無數值分析之依據。



表 2.5 容量使用率建議

路線種類	尖峰小時	整日	備註
Suburban passenger traffic	85%	70%	
High-speed line	75%	60%	
Mixed-traffic lines	75%	60%	當系統異質性低時 可以採用較高值

資料來源：UIC406 與本研究整理

而 Melody 等人(2012)之研究針對歐洲鐵路系統探討其容量使用情形，其中便包含容量使用效率之分析。該研究中所提之容量使用效率乃是採相對概念，也就是針對歐洲所有國家之鐵路系統使用效率進行相對之比較。

事實上，探討容量使用效率的文獻中，僅有少數將系統穩定度與容量使用效率連結探討其權衡關係。除了 2.2.1 節中所述 Yaun (2007)針對車站分析時所提及之穩定度與容量使用效率權衡關係外。Stok (2008) 之研究分析使用量與風險之間的關係，透過蒙地卡羅模擬迭代 (Monte Carlo Iteration) 之方式模擬兩站間，兩連續列車之間距小於臨界距離 (Critical Distance) 的機率，透過反覆迭代求出該使用量下之風險發生機率。圖 2.4 為該研究分析之風險與班距關係圖，由圖中可知當列車間的班距越小，表示使用量或使用率越高，而其風險也越高。

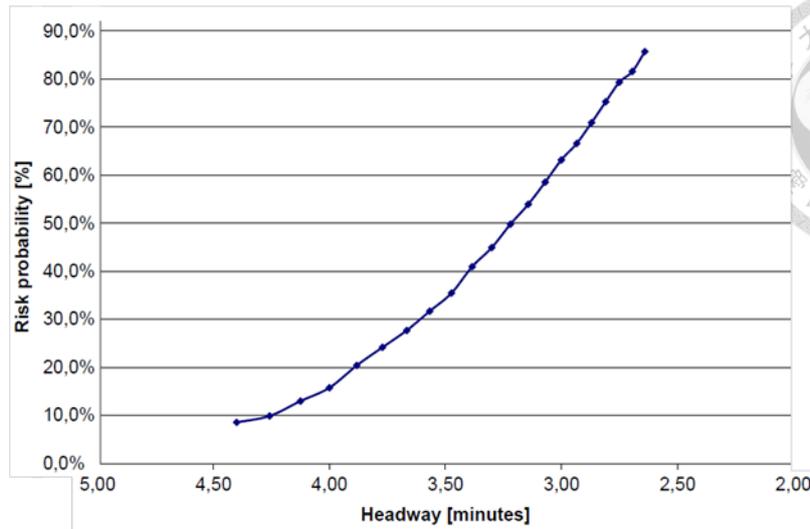


圖 2.4 班距與風險之關係

資料來源：Stok(2008)

李宗晏(2010)與陳冠廷(2012)研究中探討時刻表穩定度與容量使用效率之權衡關係，說明當使用率上升時會造時刻表的穩定度下降，反之則穩定度會上升。因此在研究中建立了效率分析之模式以進行分析。本研究中亦探討容量使用效率對系統穩定度之影響，但並不侷限於特定時刻表，而乃是分析各種使用率下所對應之系統穩定度。且於本研究中將建立最佳化分析模式，以探討穩定度與效率之最佳平衡。由最佳平衡點分析之成果可以得知該於平衡點情境下之系統最佳容量使用效率。

2.4 服務計畫設計

在完成穩定度於與效率分析後，本研究將建立最佳化分析模式探討兩者平衡點，而此亦平衡點即代表系統之最佳服務計畫。本研究將由不同服務起訖模式之組合與使用頻率提供不同之服務計畫供最佳化模式進行分析，因此本研究在此亦針對服務設計相關文獻進行回顧。

服務計畫是軌道系統完整營運計畫(Operation Planning)中重要的一環，事實上由於軌道系統營運計畫所包含項目複雜且龐大，因此在過往研究中通常會將其

分為數個步驟或子計畫進行分析。然而對於不同特性之鐵路系統而言，其規劃流程中之子計畫或分析步驟與著重項目亦會有所不同。較明顯之差異來源在於路網特性，對於網狀路網之分析通常著重於列車路徑之選擇與其服務頻率。而對於線狀路網而言，有效率之停站模式與相對應之服務頻率是主要著重之課題。以下將先對服務計畫在營運計畫中所扮演之角色進行回顧。之後再針對服務計畫相關研究進行回顧與說明。

對於營運計畫之分析方式，Assad(1980)根據 Anthony(1965)之研究提出將軌道系統營運計畫分為策略性(Strategic)、戰術性(Tactical)與營運決策三部分，此三部分之決策主要與規劃時間長短有所關聯。策略性決策之部分為長期之規劃，主要包含路網之規劃使用、調車場與主要設施設置位置等，此為長期性之服務規劃。戰術性規劃主要針對中期之決策，有效的利用現有資源以滿足主要需求是這個部分的重點。該部分中會探討列車行駛路徑、可滿足需求之服務頻率、列車於調車場之拆解與組裝與人員運用等。此一部份為鐵路營運規劃之核心部分。最後，營運決策部分則是以短期甚至是每日的決策為主。包含時刻表、車輛指派與列車運行調度等。在 Assad (1980)文獻中亦有詳細回顧各項目之研究。此分析架構雖主要針對貨運且為網狀路網所提出，但其三部分決策概念仍可延伸至其他類型之路線上。另外 Goossens 等人(2006)則針對客運路線提出一個包含七個步驟之營運計畫分析流程如圖 2.4 所示。其中七步驟包含需求預測、路線規劃、時刻表規劃、交通量計畫、車輛指派、人員運用以及到度與維修計畫。

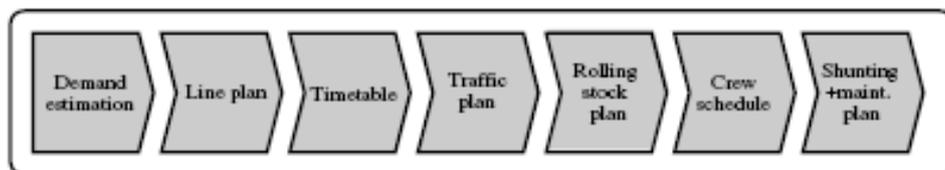


圖 2.4 Goossens 等人(2006)所提出之分析流程

上述所提及之規劃流程仍多偏向網狀鐵路系統。而 Jong 等人(2012)研究中針對線性路網所提及之營運計畫決策分析流程如下圖示，因為為線狀路網，故無須

針對列車行駛路徑進行規劃。該研究中詳細說明各步驟所需之輸入資料以及分析後之成果，而該研究中服務計畫主要是在停站模式決定後，將停站模式結合路線上之旅客需求分析成果以及路線參數以進行分析。該分析之成果為各停站模式之服務頻率。經服務計畫分析而得之服務頻率可供後續進行時刻表排點之使用。雖然該研究主要分析對象為系統較為單純之高速鐵路系統，但其營運分析流程可以廣泛使用於線狀路網之中。

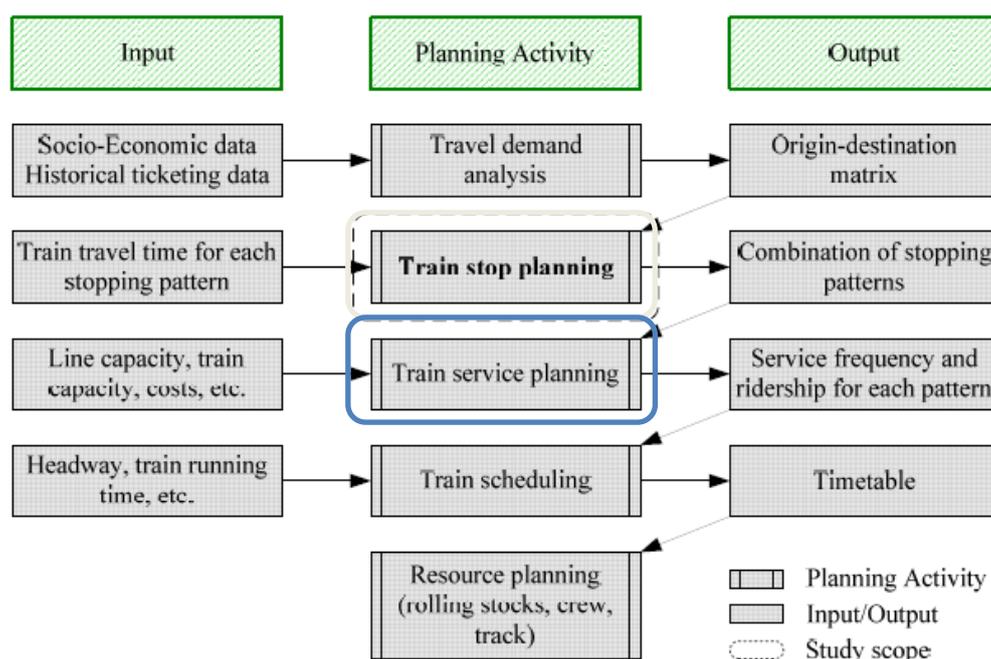


圖 2.5 線狀路網中營運計畫分析流程

資料來源：Jong 等人(2012)研究

在本研究中所分析之對象不論是區域鐵路系統或是捷運系統，皆以線狀路網為主，因此所進行之服務計畫分析於整體營運規劃中所扮演之角色類似於圖 2.4 之分析流程。事實上，單純討論列車服務頻率決策之文獻較少，多數研究將列車服務頻率與停站模式決策或時刻表建立結合以進行分析。以下將針對過往探討線狀路網中之服務計畫文獻進行說明。

藍武王(1981)之研究中便提出以時間價值加上社會成本來建立數學模式以進行捷運系統之營運模式分析。張有恆等人(1995)則透過電腦模擬模式來分析台北捷運系統之營運模式，該模式中依旅客需求量以決定列車服務之頻率，再依列

車服務頻率建立時刻表。Chang 等人 (2000)提出利用模糊數學規劃法建立多目標規劃模式以進行高速鐵路之服務設計，該研究中同時求解列車停站方式、班次數、各個停站方式所承運之站間旅客數及系統營運所需列車數。Lee 等人(2001)之研究中，發展出一規劃流程，其中包含需求估計模式、服務設計模式以及時刻表建立模式。而其服務設計模式即是在預估的需求下決定停站模式與發車頻率。該研究以雙層規劃法進行分析。

林文雅(2003)則利用二階段規劃方法探討捷運系統最適班距。該模式第一階段建構多目標規劃模式，用以滿足最大服務水準及最小營運風險，其模式產生各種班距(替選方案)；第二階段則應用模糊方法對第一階段所產生之替選方案進行分析，透過排序找出最佳方案。徐郁雯(2005)亦同樣使用多目標規劃法將旅客時間成本與營運成本同時納入量以分析捷運系統之派車策略，該研究所指之派車策略即為針對不同旅客需求下調整服務頻率。

有別於上述研究，蘇霜吉(2006)則考量列車服務設計與票價之影響。在旅客需求變動的情況下建構列車服務與定價整合模式，分析最佳列車營運班表以及票價結構。該模式利用雙層次數學規劃之概念。上層為列車服務與票價決策，下層模式為旅客需求指派問題。另外王晉元等人(2007)則透過基因演算法取代過往使用雙層次數學規劃法進行分析，以最小營運成本為目標進行求解，其研究可進行營運模式與班距之決策。

Jong 等人(2008)將軌道營運規劃分為兩大部分即列車停站計畫決定與列車頻率決策。該研究中考量旅客旅行時間並以最大化營運者營收角度出發，建構模式以進行最佳停站計畫與其相對應發車頻率決策。並透過 CPLEX 最佳化模組以電腦程式輔助分析。而於後續研究中，Jong 等人(2012)將服務設計之定義為在輸入停站模式後找出最佳的停站服務組合及列車頻率，該模式以旅客最小會車內時間為前提進行停站模式之選擇，以整數規劃和基因演算法進行求解，然此研究之重點主要著重於停站模式之選擇。

由上述文獻回顧可以發現，服務計畫在整體的鐵路營運規劃中多屬於中期之規劃，其主要著重於將既有資源做適當之分配運用。服務計畫之內容並無硬性之規定，大致上為停站模式與發車頻率之決定，部分研究會更深入進行列車排點或時刻表建立之分析工作。過往研究中所建立之分析模式所考量之項目皆不盡相同，不論單純從營運者、旅客或從總體角度出發建立模式，在文獻中皆有探討過。而本研究之特點在於將容量使用以風險分析之方式納入系統穩定度衡量，並將其納入服務計畫設計之中，此一分析方式於過往研究中並無發現。此外本研究分析時將同時考量旅客與營運者之成本，所建立之模式可以在給定之數種起訖點不同之停站模式下進行選擇，並決定各模式之發車頻率。

2.5 文獻回顧小結

由上述文獻回顧分析結果可以發現，過往探討穩定度之文獻無論解析模式或模擬模式其數量繁多，其中所採用之分析方式與分析因子亦不盡相同，然而其中對於事故所產生之干擾影響之分析則不多，本研究將同時考量營運干擾與事故干擾，前者所產生之影響類似過往研究中探討作業時間變化之相關文獻，而後者則由歷史事故資料進行分析探討其對系統穩定度之影響。本研究除了對於系統穩定度與效率之關係持續進行探討外，亦建立最佳化分析模式找尋兩者之最佳平衡點，最佳平衡點所對應之系統使用容量使用效率即為最佳使用效率，此分析結果將可以做為系統使用率之建議值，此一建議值有別於過往文獻不再是以經驗或相對性比較為基礎，而是具有完整之數學分析架構下之分析成果。另一方面，過往文獻中對於系統服務計畫分析所包含之範圍並無固定，本研究中透過最佳平衡點分析模式進行分系之過程即可在有限之數種服務起訖模式中進行選擇並決定其服務頻率。詳細之分析方式與最佳化模式建構將於第三章說明。

第三章 穩定度與效率最佳平衡點分析模式

本章中將說明穩定度與效率最佳平衡點分析模式之建構，圖 3.1 為完整之分析模式架構圖，此一模式又可分為兩個主要部分，分別是穩定度與效率分析模式與服務計畫最佳化模式。穩定度與效率分析模式又可分為數個模組，包含可靠度分析模組、容量分析模組、事故容量分析模組、效率分析模組及穩定度分析模組。可靠度分析模組透歷史事故資料分析系統之可靠度以得知系統失效機率與其分布函數。容量與事故容量分析模組則探討系統在正常營運及受到干擾之情況下之系統容量。效率分析模組則將系統之不同使用量轉換為其所對應之使用效率。根據上述分析結果進行穩定度分析。其結果為在各種容量使用量下所對應之系統穩定度。除此之外，在此分析流程中，本研究雖引用李宗晏(2010)所提出回復時間概念以降低直接使用延滯資料所帶來之缺點。然而此分析方式較適合用於相對性比較，本研究為進行後續最佳化分析所需，推導建立回復時間與延滯之轉換關係式，以事故中斷與回復時間內所產生之延滯作為穩定度衡量之指標。由於案例分析中本研究將分別探討區域鐵路系統與捷運系統之平衡點。此兩種在各模組中雖分析概念相同，但因其系統特性之差異，在部分模組中其分析方式有所不同，故再將其細分為區域鐵路與捷運系統兩種，在後續章節中亦會針對此部分詳細說明。

穩定度與效率分析之成果將做為後續最佳化模式建立所需之基礎。最佳服務計畫模式乃是根據資料蒐集與穩定度與效率分析模式之成果建立最佳化模式。在此最佳化模式中將系統之穩定度與效率轉換為對旅客旅行時間之影響納入考量。結合旅客時間成本與營運者成本，以最小化總成本做為目標求解，以尋找系統穩定度與效率之最佳平衡點以及此平衡點所對應之最佳服務計畫。

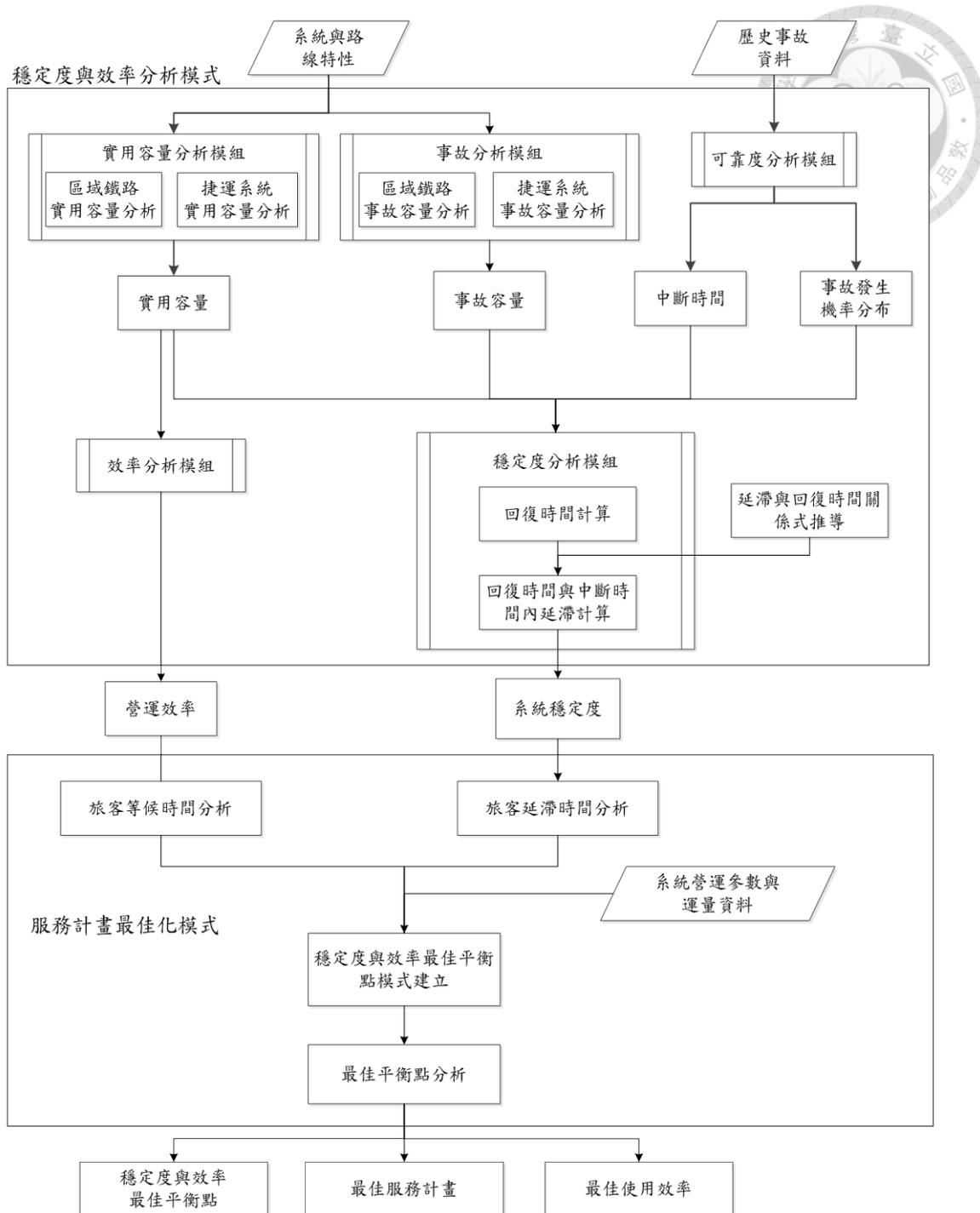


圖 3.1 穩定度與效率最佳平衡點完整分析架構圖

3.1 穩定度與效率分析模式

穩定度與效率分析模式主要乃是透過對系統特性、路線特性與歷史事故資料進行分析以取得穩定度與效率之對應關係，過往研究中雖有針對臺鐵或捷運系統

穩定度與效率之相關研究，但其主要針對特定時刻表進行評估與衡量。在本研究之中，穩定度與效率模式並非針對特定時刻表或服務模式進行分析，而是分析某特定系統中各空間參考點在不同容量使用情況下所對應之系統穩定度。基於上述原因，本研究中參考該分析模式並依分析之需求建立所需之穩定度與效率分析流程與分析模式。圖 3.2 為本研究之穩定度與效率分析流程，首先根據路線與系統特性進行容量與事故容量分析，藉以得知該系統中之實用容量以及遭遇事故干擾時之事故容量。另一方面透過所蒐集的事故資料進行可靠度分析，以了解系統各種事故發生之機率分布以及其對系統所產生之影響，中斷時間為事故影響之初步分析結果。而穩定度與效率模組，則將上述所分析之成果作為輸入資料進行分析，在此模組中除了延續使用回復時間概念於穩定度分析之外，對於系統穩定度分析之部分，除了既有的事故影響之外本研究亦分析非事故因素對系統穩定度之影響。此外為連結實務運用以及後續最佳化分析，本研究亦推導回復時間與延滯之關係將分析成果轉換為實際對旅客所產生之延滯。

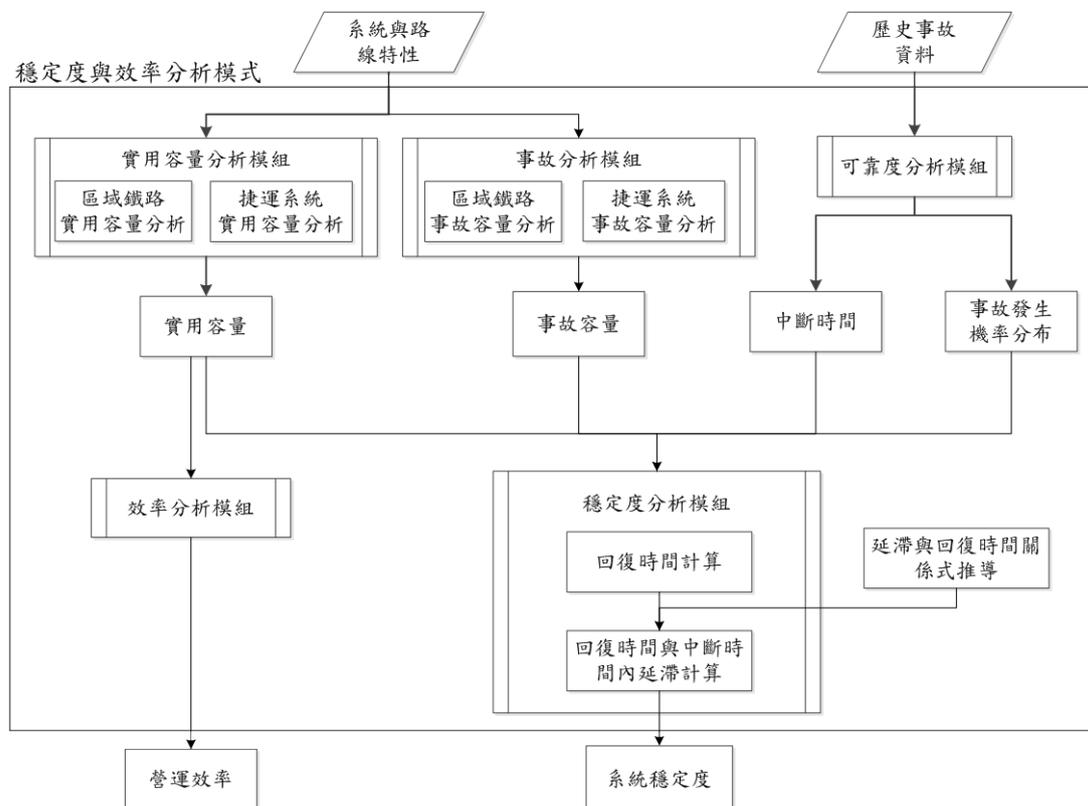


圖 3.2 穩定度與效率分析流程

3.1.1 可靠度分析模組

進行可靠度分析之目的乃是為了分析各類事故發生之機率，此一機率將在後續穩定度分析的容量使用風險評估中所需。圖 3.3 為可靠度分析之主要流程。



圖 3.3 可靠度分析架構

在取得軌道系統實際事故資料之後，先依其原有事故之特性進行質性的分類如發生原因、影響對象或特定設施失效等加以分類，此一分類通常參考該軌道系統之原有分類方式進行。然而即便是同一類型的事務也可能造成不同的影響。以臺鐵為例，同樣是列車的機車頭故障發生於車站內與發生於路線上，兩者所造成之影響將截然不同。於車站內僅該股道該列車受影響，因延滯的傳遞所造成的二次延滯較少，但若發生於路線上，該股道中斷則另一主線必須以單線運轉方式運行，相對之下對於其他列車所造成之延滯將大幅上升。除了發生地點外，同一種類事故其造成系統中斷之時間長短亦可能大不相同。故可透過集群分析(Cluster Analysis)之方式來進一步處理事務資料。集群分析的使用可以將同一分類之事故再分成數個等級，細分成數個等級後之各項分類中會具有較高之同質性。經集群分析後之事故類別將再依發生機率分配適合模組求得事故發生機率。

在過往相關研究之中，事故機率分析通常以列車或動力車行駛公里作為曝光量分析之單位，發生頻率則以次/列車公里等進行分析，然而考量列車在不同參

考點及不同營運狀況下皆可能發生事故，故在本研究中將以時間作為曝光量之單位，此外由於事故發生頻率可能會呈現非線性成長，故採用可靠度分析的概念以事故發生機率分布來估算不同時段下的事故發生機率而非僅採用平均值，並假設行車事故發生間隔符合指數分布，藉此估計行車事故的發生機率。

對於曝光量之計算方式為加總某一區段上所有營運列車其營運時間總和。先將各列車在該時段內於該區段上之營運時間先換算成小時，再加總時段內各列車之於區段內之營運時間。舉例說明如下表 3.1，分析時段八點至九點間於某路段上有兩種列車各兩列，則將其進出分析路段之時間列車，計算各列車於該路段間之營運時間如表最右邊一欄，最後將其加總則可得知為該使用量下之曝光量。

表 3.1 曝光量計算說明

列車	進入分析路段時間	離開分析路段時間	營運時間(小時)
A	8:10	8:16	0.10
B	8:23	8:32	0.15
C	8:37	8:46	0.15
D	8:52	8:58	0.10

由於在本研究中將針對不同使用量下進行分析，因此將歸納整理各車種於各路段所需之運行時間，再依不同使用情境(列車組成比例與實際數量)加以運算。此外分析時段之大小並不影響列車小時之計算方式，系統相同使用情況下一天總列車小時亦不會改變。本研究為配合後續最佳化模式進行尖峰小時分析與決策，在此皆採用一小時為分析時段。

本研究中假定各事故分類之系統失效率為一常數，而事故發生間隔(列車小時)符合指數分佈，其機率密度函數如 3.1 式而累積分布函數則如 3.2 式，其代表涵義為在 T 時間內，事故所發生的機率為 P 。

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, 0 < t < \infty, \lambda > 0 \quad (3.1)$$

$$F(t) = P(t < T) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3.2)$$

其中， λ = 系統失效率

t = 事故發生時間間隔

3.2 式中須對 λ 值進行估計，本研究中以機率繪圖紙法進行參數估計，再搭配 K-S 檢定(Kolmogorov-Smirnov Test)進行適合度分析檢定(Goodness of Fit Test)用以驗證理論分布的正確性。在事故發生間隔符合指數分佈的情況下，因為指數分佈之無記憶性，則假設各區段之事故發生機率僅與該時段下之營運列車有關可以成立，其與前後時段內之營運情況並無關聯性而不受影響，故可以表現各區段下不同列車小時始使用量下之事故發生機率特性。

3.1.2 實用容量與事故容量分析模組

本研究軌道實用容量分析採用交通部運輸研究所(2008)建立之軌道系統容量評估模式進行容量分析，分析模式概念與方法於前文 2.1 節中已有詳細說明。本小節將著重於事故容量分析之說明。

實用容量為系統於正常營運狀態下之容量，然而當系統受到事故干擾時，可能會對系統營運造成影響，導致部分股道或路線被中斷而無法使用。系統之容量隨事故產生之影響而下降，因事故而導致容量下降後之容量稱之為事故容量。事故容量分析模式由李宗晏(2010)提出，乃是基於交通部運研所(2008)所提出之軌道容量分析模式，採用相同之分析單元與分析方式。事故容量分析方式與實用容量分析之差異僅在當事故發生之後，路線或車站間可能有產生股道中斷之情況。對於不同事故而言，其所造成對容量之影響也不盡相同。另一方面，隨著軌道系統之車站與路線配置型態差異，車站與路線佈設在受事故影響之後不僅與原有容量分析結果不相同，其各空間參考點間之事故發生後可供營運使用之股道佈設情況亦不相同。

本研究對於事故之發生地點乃是利用機率進行分析，系統中各個空間參考點皆有可能發生事故，基於前段所描述之特性，對於事故容量之分析必須依其發生

地點與事故干擾所造成之股道佈設形式加以歸納分類，並依其特性分別進行事故容量分析。本研究中分析對象包含通勤鐵路系統與捷運系統，對於事故容量分析概念而言兩種系統並無差異。但實際進行分析時所採用之公式，則因兩系統間之路線特性差異而會有所不同。故以下將分為兩個小節分別說明。



3.1.2.1 通勤鐵路事故容量分析

於本研究中通勤鐵路系統將以臺鐵作為分析對象。事實上不論是臺鐵或捷運系統，就事故可能發生地點而言，兩系統都可劃分為「車站事故」與「路線事故」，表 3.2 為李宗晏(2010)對於台鐵事故分類整理之結果。

表 3.2 事故發生地點統整表

發生於站間路段之事故	發生於車站之事故
衝撞、傾覆、火災、列車出軌、車輛出軌、列車分離、進入錯線、機車故障、電車故障、機動車故障、客車故障、貨車故障、電車線設備故障、路線故障、列車障礙、列車妨礙、平車或電搖車障礙、車輛衝擊、閉塞裝置故障、號誌故障、號誌機外停車、列車延誤、死傷、其他。	衝撞、傾覆、火災、列車出軌、車輛出軌、列車邊撞、車輛邊撞、列車分離、進入錯線、機車故障、電車故障、機動車故障、客車故障、貨車故障、路線故障、車輛溜逸、止衝檔衝擊、路牌錯誤、列車妨礙、車輛遺留、轉轍器擠壞、車輛衝擊、無閉塞行車、辦理閉塞違章、號誌故障、列車延誤、死傷、其他。

資料來源：李宗晏(2010)

本研究將以此分析概念，整理並分析所取得之事故資料，表 3.3 為本研究重新整理事故發生地點之分類表範例，考量後續分析需求，將車站事故再細分為單股道與雙股道事故。

表 3.3 事故發生地點整理範例

事故名稱	路段事故	車站事故	
		單股道事故	雙股道事故
列車妨礙	V	V	V
列車延誤	V	V	-
...			

如同容量分析之方式，在進行事故容量分析時同樣需要計算最小運轉時隔。如 2.1 節容量分析文獻回顧中所述，最小運轉時隔包含瓶頸號誌安全時距、交會待避損失時間以及運轉寬裕時間。由於後兩項分析方式於事故容量分析中並不改變故在此不再贅述，僅瓶頸號誌安全時距的分析將受到影響而需重新探討。對於路線事故而言，由於站間之路線上通常僅有兩股道進行複線運轉，因此當事故發生於車站之間時，會導致某一方向股道被中斷，使得該路線上必須採用單線運轉。本研究中將以交通部運研所(2008)中分析臺鐵單線運轉之方式進行分析。

表 3.4 事故月台型式

事故月臺	圖示
第 V 型月臺	
第 VI 型月臺	
第 VII 型月臺	

資料來源：李宗晏(2010)

另一方面，若事故發生於車站中，誠如之前所述車站內事故容量分析與站內

股道配置有關，為進行分析所需，李宗晏(2010)研究中整理臺鐵原始股道配置類型並提出三種事故月台類型搭配原有四種共七種月台類型進行分析。新增之月台型式如表 3.4 所示。該月台型式可涵蓋單線與雙線事故中斷之情形，表格中之虛線表示因事故中斷而無法提供服務之股道，實線則為中斷後之站內股道運用情況。第五、六、七型分別為站內剩下 2、1、0 股道可供使用，第五型月台因剩餘軌道數量為兩股，平均分配給雙向使用，故雙向各使用一股道停靠列車，由事故中斷之軌道位置應為相鄰股道，表 3.4 所示為較可能發生之情境，此時可採用原有同向進出站號誌時距($T_{S,A1}$ 、 $T_{S,D1}$)搭配反向列車平面交叉號誌時距($T_{S,X}$)進行分析。第六型車站則表示事故發生後車站內僅剩一股道可供使用，由於雙向需共用同一股道來停車，此時必須上下行交替使用，表 3.5 中所使用之號誌時距為同方向兩列車所間隔之時距，此時分析情況類似單線運轉之情境，兩連續同向列車間尚有一反向列車夾於其中。若為第七型月台之情況，因站內已無可供使用之股道，因此事故容量為零。以第一型月台為例(參考 2.1 節表 2.2)，當路線上發生事故導致車站中兩股道中斷時，其將會變成第五型之情況；而若是發生單股道事故則會呈現第三型之型式。臺鐵分析公式與 2.1 節之容量分析中所述相同。其月台型式與分析公式詳細之歸納與整理結果如表 3.5。

將路線上與車站內之事故容量進行分析後，再以實際事故發生於路段上與車站之比例做為權重便可計算該分析單元中之事故容量。

表 3.5 各事故類型之號誌安全時距

事故類型	車站類型		號誌安全時距	
	事故發生前	事故發生後	進站	離站
單股道事故	第一型車站	第三型車站	$0.75T_{s,A1} + 0.25T_{s,A2}$	$0.75T_{s,D1} + 0.25T_{s,D2}$
	第二型車站	第四型車站	$T_{s,A1}$	$T_{s,D1}$
	第三型車站	第四型車站	$T_{s,A1}$	$T_{s,D1}$
	第三型車站	第五型車站	$\max(T_{s,A1}, T_{s,X} + t_d)$	$\max(T_{s,D1}, T_{s,X} + t_d)$
	第四型車站	第六型車站	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$
雙股道事故	第一型車站	第五型車站	$\max(T_{s,A1}, T_{s,X} + t_d)$	$\max(T_{s,D1}, T_{s,X} + t_d)$
	第二型車站	第六型車站	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$
	第三型車站	第六型車站	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$
	第四型車站	第七型車站	事故容量為零	事故容量為零

資料來源：李宗晏(2010)

3.1.2.2 捷運系統事故容量分析

對於捷運系統事故容量分析而言，其分析概念亦與通勤鐵路系統相似。本研究將依營運者原有之事故分類方式加以整理分析並區分車站事故與路事故以利後續進行分析。然而對於捷運系統而言，其多為第四型月台且路線上之橫渡線較少，事故發生後多數車站無法提供交會待避之功能，因此必須將無法待避之車站加以合併作為一分析單元。葉志生(2012)之研究中即提出對於捷運系統事故容量分析方式，本研究引用該研究之模式並對於橫渡線考量之部分加以調整。

在進行路線事故容量分析時，考量捷運系統橫渡線不足之情況，事故容量分析不再以兩相鄰可提供交會代避之車站為一區間，而是以橫渡線為分析單元劃分依據，將兩相鄰橫渡線間視為一個分析單元，事故中斷時運行情況如圖 3.4 所示。

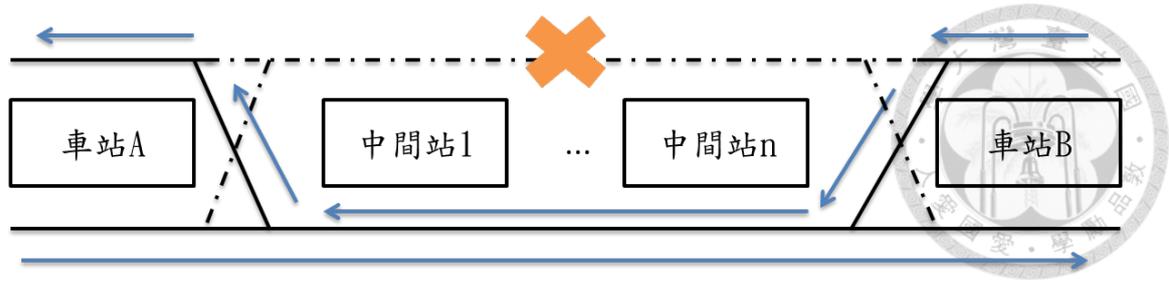


圖 3.4 捷運系統事故分析單元示意圖

葉志生(2012)研究路線事故安全時距計算公式如 3.3、3.4 式所示。3.3 式表示單線運轉下之安全時距包含兩方向之運行時間、總停站時間與號誌連鎖時間，然因號誌連鎖時間長度涵蓋 A、B 兩站之進站減速時間故需減去。3.4 式則用於探討列車於車站 A 之通過橫渡線後減速進站所需時間，若橫渡線長度加上橫渡線至列車停站位置長度($s_{p,A} + s_{c,A}$)大於剎車距離，則表示列車先以巡航速度於橫渡線上運行一定距離後，才進行剎車；反之該長度小於列車煞車距離，則列車進入橫渡線後保持剎車狀態直至進於車站內。車站 B 之情況亦然，其公式與 3.4 式相同，僅需將 A 車站之參數換為 B 即可。

$$T'_l = 2(t_T + 2\sum_{i=1}^n t_{d,i}) + 2t_r - t_{b,A} - t_{b,B} \quad (3.3)$$

$$t_{b,A} = \begin{cases} \frac{s_{p,A} + s_{c,A}}{v_A} + \frac{v_A}{2b} & \text{if } s_{p,A} + s_{c,A} \geq \frac{v_A^2}{2b} \\ \sqrt{\frac{2(s_{p,A} + s_{c,A})}{b}} & \text{if } s_{p,A} + s_{c,A} < \frac{v_A^2}{2b} \end{cases} \quad (3.4)$$

其中， T'_l = 路線上最小安全號誌時距(秒)

t_T = 車站 A 至車站 B 之旅行時間 (秒)

$t_{d,i}$ = 中間站 i 停站時間 (秒)

t_r = 系統連鎖與反應時間 (秒)

$t_{b,A}$ = 於車站 A 之減速進站時間 (秒)



$t_{b,B}$ = 於車站 B 之減速進站時間 (秒)

$S_{p,A}$ = 橫渡線之列車於車站 A 停車位置 (公尺)

$S_{c,A}$ = 車站 A 橫渡線長度 (公尺)

v_A = 車站 A 進站前巡航速度 (公尺/秒)

以上述公式進行容量分析時，隱含假設橫渡線上速限與正線上之速限相同且橫渡線皆為剪式橫渡線，使單線運轉時不會因橫渡線之方向性而造成利用某一股道進行單線運轉時會受到影響。根據本研究進行資料蒐集所取得分析路線上多數橫渡線使用剪式橫渡線，但其速限皆小於正線上之速限。因此本研究特別針對此一現象調整並修改分析公式。

橫渡線速限差異應會對 t_T 造成影響，因為相對於運行於正線上，通過橫渡線必須減速且以較慢速度通過而造成運行時間增加，然而實際情況仍需視其所在地點與相鄰車站相對位置行調整。以橫渡線緊鄰車站而言，列車加減速進站時會因必須通過橫渡線而會受到其影響，若列車進入橫渡線前已經開始減速，即煞車距離大於橫渡線長度加上列車停站位置至橫渡線距離，則橫渡線速限將不會對其造成影響。反之若制車距離小於橫渡線長度加上列車停站位置至橫渡線距離則列車進入橫渡線時必須進行減速，並以橫渡線速限運行至其必須再次減速(停站)之距離，此一運行時間增加公式調整後如 3.5、3.6 式，另外本研究中亦參考交通部運研所(2008)之分析方式將坡度影響因素納入加減速度運算如式 3.7 與 3.8 式。

$$T'_l = 2(t_T + 2\sum_{i=1}^n t_{d,i}) + 2t_r - t_{b,A} - t_{b,B} + t_{p,A} + t_{p,B} \quad (3.5)$$

$$t_{p,A} = \begin{cases} (s_{p,c} + s_{p,A} - \sqrt{\frac{2(s_{p,c} + s_{c,A})}{b(G)}}) \left(\frac{1}{v_c} - \frac{1}{v_a} \right) & \text{if } s_{p,A} + s_{c,A} \geq \frac{v_A^2}{2b(G)} \\ 0 & \text{if } s_{p,A} + s_{c,A} < \frac{v_A^2}{2b(G)} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$a(G) \approx a(0) - 0.009G \quad (3.7)$$

$$b(G) \approx b(0) + 0.009G \quad (3.8)$$

其中， $t_{p,A}$ = 列車經於車站 A 橫渡線運行所需增加運行時間 (秒)

$t_{p,B}$ = 列車經於車站 B 橫渡線運行後所需增加運行時間 (秒)

$a(G)$ = 列車在路線坡度 G (1/1000) 的加速度 (m/s^2)

$b(G)$ = 列車在路線坡度 G (1/1000) 的減速度 (m/s^2)

事實上不論事故發生於哪一股道，皆會造成通過兩個橫渡線時，一個為加速離站與減速進站，因此 $t_{p,A}$ 與 $t_{p,B}$ 兩者公式相同但一個需用加速度進行分析另一個需用減速度分析。此外橫渡線所在位置與車站之相對關係也會對分析產生影響如下圖所示：

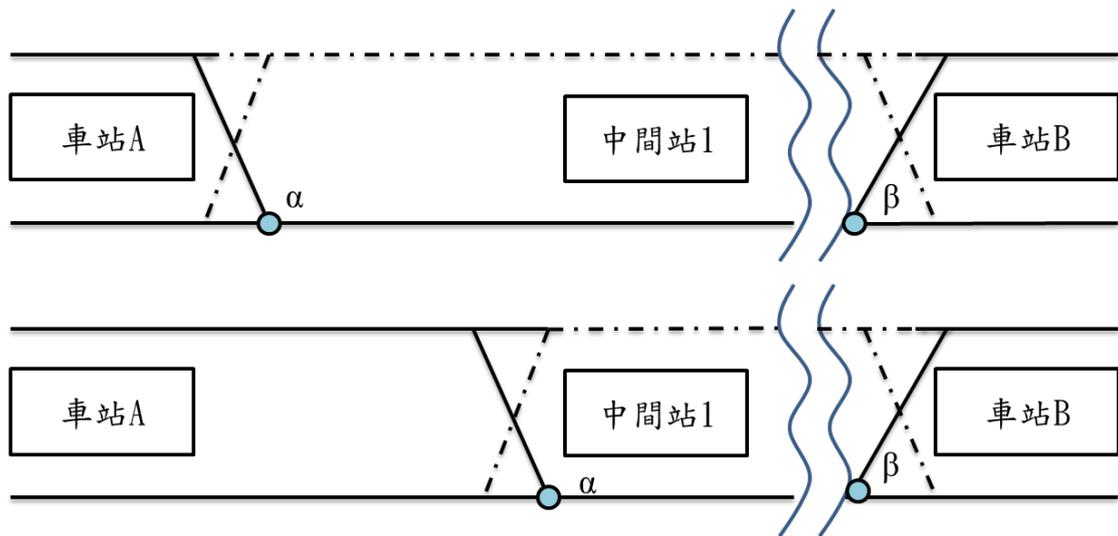


圖 3.5 橫渡線與車站相對位置示意圖(路線分析)

圖 3.5 中之橫渡線位置會影響事故號誌安全時距之計算，其主要之差異在於當駛向車站 A 列車車尾通過 α 點後，經轉轍器轉轍時間後，反方向列車才能通過該點。橫渡線接近車站 A 之情境下可符合葉志生(2012)所提出之計算方式，然而若橫渡線離車站 A 較遠甚至貼近中間站 1 之情況下，則應調整該計算公式如 3.9 與 3.10 式。

$$T'_l = 2(t_T + 2 \sum_{i=1}^n t_{d,i}) + 2t_r - t_{a,\alpha} - t_{b,\beta} + t_{p,A} + t_{p,B} \quad (3.9)$$



$$t_{a,\alpha} = \begin{cases} \frac{s_{p,A} + s_{c,A}}{v_A} + \frac{v_A}{2a(G)} & \text{if } s_{p,A} + s_{c,A} \geq \frac{v_A^2}{2a(G)} \\ \sqrt{\frac{2(s_{p,A} + s_{c,A})}{a(G)}} & \text{if } s_{p,A} + s_{c,A} < \frac{v_A^2}{2a(G)} \end{cases} \quad (3.10)$$

其中， $t_{a,\alpha}$ = 列車正常營運下由車站 A 運行至 α 點所需時間

上式表示當列車 α 點後經過系統連鎖與反應時間 t_r 後，反向列車便可通過，故應將反向列車由車站 A 運行至 α 點之時間扣除，其使用之公式不變，僅將原本之減速度，改為加速度。同理在 B 站也是採用相同方式，若 β 較靠近中間站 n 時，則以 $t_{a,\beta}$ 取代 $t_{b,B}$ 。四種組合情境如下表 3.6。

表 3.6 捷運路線事故號誌時距計算公式整理

α 橫渡線位置	β 橫渡線位置	計算公式
靠近車站 A	靠近車站 B	$T'_l = 2(t_r + 2\sum_{i=1}^n t_{d,i}) + 2t_r - t_{b,A} - t_{b,B} + t_{p,A} + t_{p,B}$
	靠近中間站 n	$T'_l = 2(t_r + 2\sum_{i=1}^n t_{d,i}) + 2t_r - t_{b,A} - t_{a,\beta} + t_{p,A} + t_{p,B}$
靠近中間站 1	靠近車站 B	$T'_l = 2(t_r + 2\sum_{i=1}^n t_{d,i}) + 2t_r - t_{a,\alpha} - t_{b,B} + t_{p,A} + t_{p,B}$
	靠近中間站 n	$T'_l = 2(t_r + 2\sum_{i=1}^n t_{d,i}) + 2t_r - t_{a,\alpha} - t_{a,\beta} + t_{p,A} + t_{p,B}$

另一方面針對捷運系統之車站事故而言，由於捷運系統中多為第四型月台，事故發生後之月台型式依單股道與雙股道事故之差異而呈現第六型與第七型月台(表 3.5)。計算公式則同樣以葉志生(2012)所提出之方式加以調整。

對於捷運車站事故號誌安全時距之修正與前面路線部分相似，然而橫渡線相對位置在原有公式已可以涵蓋，故僅需增加橫渡線速限之影響，圖 3.6 為其示意圖。修改後之公式如 3.12 式。3.13~3.16 為各參數原有之計算公式，搭配 3.6 式便可進行分析運算。

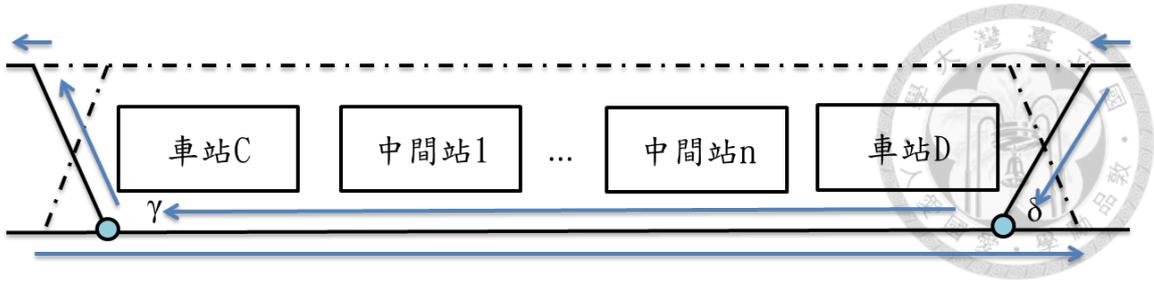


圖 3.6 捷運系統車站事故分析示意圖

$$T'_s = 2(t_T + \sum_{i=1}^n t_{d,i} + t_{d,C} + t_{d,D}) + t_{c,C} + t_{b,C} + t_{c,D} + t_{b,D} + t_{p,A} + t_{p,B} \quad (3.12)$$

$$t_{b,c} = \frac{v_c}{2b(G)} \left(\frac{Q_{t,c}}{K_b} - 1 \right) + \frac{s_{p,c} + L}{v_c} + \frac{v_c}{b(G)} \quad (3.13)$$

$$t_{b,D} = \frac{v_D}{2b(G)} \left(\frac{Q_{t,D}}{K_b} - 1 \right) + \frac{s_{p,D} + L}{v_D} + \frac{v_D}{b(G)} \quad (3.14)$$

$$t_{c,C} = \begin{cases} \frac{L + s_{p,C} + \frac{v_{c,C}}{2a}}{v_{c,C}} & \text{if } s_{p,C} + L \geq \frac{v_{c,C}^2}{2a(G)} \\ \sqrt{\frac{2(s_{p,C} + L)}{a(G)}} & \text{if } s_{p,C} + L < \frac{v_{c,C}^2}{2a(G)} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$t_{c,D} = \begin{cases} \frac{L + s_{p,D} + \frac{v_{c,D}}{2a}}{v_{c,D}} & \text{if } s_{p,D} + L \geq \frac{v_{c,D}^2}{2a(G)} \\ \sqrt{\frac{2(s_{p,D} + L)}{a(G)}} & \text{if } s_{p,D} + L < \frac{v_{c,D}^2}{2a(G)} \end{cases} \quad (3.16)$$

其中， T'_s = 車站最小安全號誌時距 (秒)

$t_{a,C}$ 、 $t_{a,D}$ = 車站 C、D 停站時間 (秒)

$t_{c,C}$ 、 $t_{c,D}$ = 車站 C、D 月台淨空時間 (秒)

$t_{b,C}$ 、 $t_{b,D}$ = 車站 C、D 減速進站時間 (秒)

$Q_{t,C}$ 、 $Q_{t,D}$ = 車站 C、D 間隔安全係數

$v_{c,C}$ 、 $v_{c,D}$ = 車站 C、D 進站前巡航速度 (公尺/秒)

3.1.3 效率分析模組

對於軌道系統而言，因為興建成本的龐大與增加或擴建系統的不易，對於現

有系統的使用應避免不必要之浪費，故探討系統營運之效率。在本研究中，系統營運效率以容量的使用率來進行衡量，如 3.17 式

$$\eta = \frac{u}{C_i} \times 100\% \quad (3.17)$$

其中， η = 營運效率或稱為容量使用率 (%)

u = 路段使用容量 (列車/小時)

C_i = 路段容量 (列車/小時)

由上述內容可知當路線上的容量使用愈高時，其使用效率愈高。利用此關係式可知道系統在不同使用量下所對應之使用效率，這可做為後續進行服務模式最佳化時衡量各服務模式使用效率之依據。

3.1.4 穩定度分析模組

系統穩定度所探討的乃是不同干擾或事故影響對系統本身造成的影響。事實上，使用效率會對系統穩定度產生極大的影響，當系統使用效率極高時，依據前一小節可靠度分析之概念，路線上的曝光量會大幅上升，事故發生之機率亦會上升，除此之外，因為事故受到影響之列車也會增加，此影響稱之為事故嚴重度，事故嚴重度衡量為穩定度分析之重點，此一部份會在後續段落詳細說明。由上述情境可知穩定度與效率之間存在有其權衡之關係，良好的軌道系統應在穩定度與效率之間取得一平衡點。在本研究中對於穩定度之部分將再分為兩類，其一為事故所產生對系統穩定度之影響，此一部份會先進行回復時間分析後，透過推到而得之延滯與回復時間轉換關係式轉換為延滯。另一部份則是營運時所產生之非事故延滯，本研究透過模擬方式分析此一部份所產生之延滯。兩者分析結果最後將加總作為後續最佳化分析模式之輸入參數。

3.1.4.1 事故嚴重度分析

於第二章文獻回顧中提到過往探討系統穩定度之研究多採用延滯觀點來進行分析。實務上所取得之資料大多以延滯紀錄事故影響，然而若直接使用延滯進



行分析，可能會高估或低估事故影響，因為每一系統對延滯之定義皆不相同。另一方面，因為事故資料量的關係通常無法將其再細分為不同時段或路段下單獨進行分析，如此情況下所分析出之事故影響通常無法反映特定路段之容量使用情形與路段特性之關聯性。因此李宗晏(2010)提出以「回復時間」概念進行分析。該研究將回復時間定義為當系統發生事故排除後系統從受到干擾至系統回復至正常營運所需時間。用以分析系統特定時刻表或者營運情況下受事故干擾之回復能力。此一分析確實可以解決上述以延滯進行分析之問題。然而回復時間分析之結果難以直接反應於實務營運上，僅能作相對性之比較。因此本研究推導回復時間與延滯指轉換關係式，所轉換之延滯數值代表之涵義為在中斷時間與回復時間內所有列車所受之總延滯，由此可得知每一事故對旅客所產生之影響，利於後續進行最佳化分析所需。轉換後之延滯與直接使用事故資料延滯之最大差異在於透過回復時間與轉換關係式可以針對各路段與其當下之使用特性進行分析，其分析之結果也愈貼近實際營運狀況。圖 3.7 為事故嚴重度分析之流程。其中前三部分為回復時間分析，求得回復時間後再將其轉換為延滯，透過搭配可靠度分析所得之事故機率分佈以風險概念顯示其嚴重性，期望延滯時間即為將風險量化之數值。以下將針對回復時間分析、延滯與回復時間轉換關係式與風險分析詳加說明。

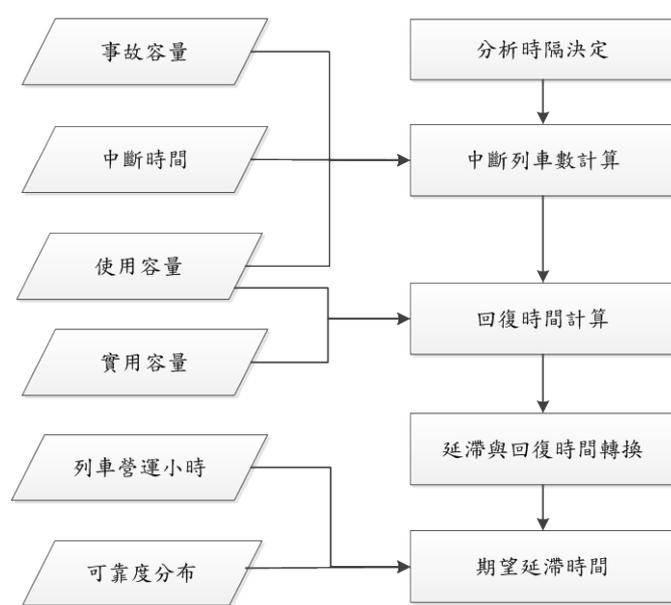


圖 3.7 事故嚴重度分析流程

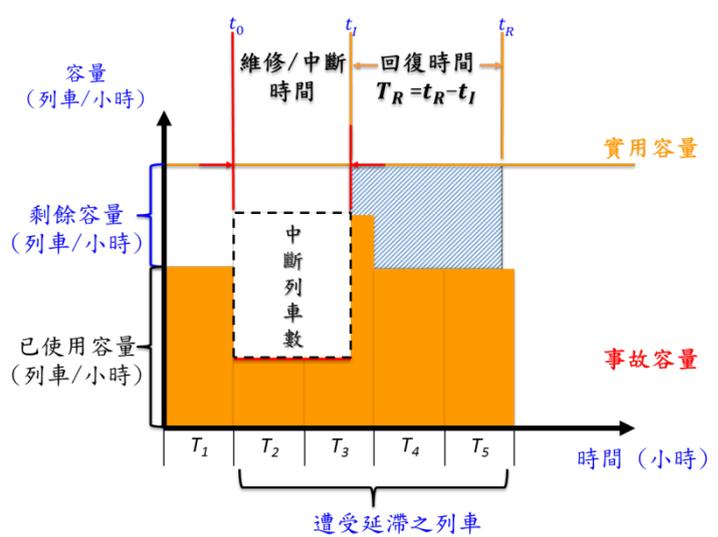


圖 3.8 回復時間概念示意圖

回復時間分析

回復時間之概念可參考圖 3.8 所示，回復時間分析方式乃是考量系統受到事故干擾會產生中斷使可使用之容量下降，此下降後之容量稱為事故容量，部分列車因為事故而無法運行被迫中斷並稱之為中斷列車，中斷列車如圖 3.8 中虛線方框所示，而事故發生直至事故被排除之時間稱之為中斷時間。但此時系統因事故所產生之影響尚未結束，中斷時間內所產生之列車必須在接下來的時間內透過系

統剩餘之容量消化完(圖中斜線區域)，這段消化中斷列車所需之時間及稱為回復時間(T_R)。然而進行回復時間分析時假設忽略列車運轉調度之影響，且在某些文獻或實務運用上，當中斷時間過長時會取消部分營運列車。而在回復時間分析中則假定所有列車都必須被發出，如此假設則後續列車之運用與營運路徑接續則不會受到事故影響，且可滿足某些系統中必須滿足最小發車頻率之要求。回復時間計算流程整理如下所述：

步驟一：決定分析時段(T)長度。

時段長短將對於後續分析有所影響，對於時段分析長度在容量分析中亦有此一問題考量。此外在回復時間分析中，假設一個分析時段內僅會有一件事務發生，故時段不可過長。本研究中採用以 1 小時為時段長度，除了包含先前所提之原因外，亦考量系統服務頻率之變化情形。且檢視過往事故資料中同一小時內發生第二起事故之機率極低。

步驟二：計算單一事故發生時在中斷時間內所產生之中斷列車數。

計算公式如 3.18、3.19 與 3.20 式，此計算方式中假設事故發生時間點為時段開始時，由於本研究中針對尖峰小時分析，相對於假設事故發生於時段中其他時間點，計算事故發生於時段開始時所得回復時間值將為最大值，呈現較保守之風險分析情況。

$$n = \left\lfloor \frac{T_D}{T} \right\rfloor \quad (3.18)$$

$$N_{T_i} = \begin{cases} u_i - a_i & \text{if } u_i - a_i \geq 0 \\ 0 & \text{if } u_i - a_i = 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

$$N_T = \begin{cases} \sum_{i=1}^n N_{T_i} + N_{T_{i+1}} \frac{\text{mod}(\frac{T_D}{T})}{T} & \text{if } n > 0 \\ (N_{T_1}) \frac{T_D}{T} & \text{if } n = 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

其中， n = 中斷時間包含完整時段數



- T_D = 中斷時間 (分鐘)
 T = 時段長度 (分鐘)
 N_T = 中斷列車數 (列車)
 N_{T_i} = 第 i 時段中斷列車數 (列車)
 u_i = 時段 i 路線使用容量 (列車/小時)
 a_i = 時段 i 路線事故容量 (列車/小時)

3.18 式用於計算中斷時間所涵蓋之完整時段數，此完整時段涵蓋數量將影響 3.20 式計算中斷列車數量之方式。3.19 式表示當使用之路線容量高於事故容量時才會有中斷列車產生。3.20 式中當涵蓋超過一個時段時必須加總各時段中斷列車數，此外若中斷時間結束時並非剛好於時段結束時間點 ($\text{mod}(T_D/T)$ 不等於零)，則需以比例計算下一個時段 ($n+1$) 之中斷列車數。若中斷時間並未涵蓋超過一個時段時，則直接依比例計算事故發後第一個時段內之中斷列車數即可。

步驟三：計算單一事故發生後，系統回復正常營運所需時間(T_R)。

計算時必須從中段時間結束該時段進行考量，3.21 式表示中斷時間結束下一個時段是否仍有中斷列車須待消化。若無則表示於前一時段已消化完畢，故 3.23 式中，直接計算中斷列車數在該時段中剩餘容量所占比例，經化簡後如 3.23 中所示。若有則再以 3.22 式分析，當不等式成立時表示所剩餘之列車皆都在 k 時段被消化完，取不等式成立時之最小 k 值即為系統回復至正常營運之時段，再透過 3.23 式計算出回復時間值。

$$R_T = \begin{cases} N_T - \frac{[1 - \text{mod}(\frac{T_D}{T})]}{T} (C_l - u_{n+1}) & \text{if } N_T \geq \frac{[1 - \text{mod}(\frac{T_D}{T})]}{T} (C_l - u_{n+1}) \\ 0 & \text{if } N_T < \frac{[1 - \text{mod}(\frac{T_D}{T})]}{T} (C_l - u_{n+1}) \end{cases} \quad (3.21)$$

$$\sum_{m=1}^k (C_l - u_{n+1+m}) - R_T \geq 0 \quad (3.22)$$

$$T_R = \begin{cases} \frac{N_T T}{(C_l - u_{n+1})} & \text{if } R_T = 0 \\ T[1 - \text{mod}(\frac{T_D}{T}) + \frac{R_T}{C_l - u_{n+2}}] & \text{if } R_T \neq 0 \text{ and } k = 1 \\ T[1 - \text{mod}(\frac{T_D}{T}) + (k-1) + \frac{R_T - \sum_{m=2}^k (C_l - u_{n+m})}{C_l - u_{n+1+k}}] & \text{if } R_T \neq 0 \text{ and } k \geq 2 \end{cases} \quad (3.22)$$

其中， R_T = 事故發生後第 $n+2$ 時段時剩餘之中斷列車數 (列車)

C_l = 路線容量 (列車小時)

T_R = 回復時間 (分鐘)

依據上述分析方式即可分析不同路段中不同使用量下所對應之回復時間，在後續進行服務計畫最佳化時，即可針對各種服務計畫下各路段之使用量與其所對應之回復時間進行分析。

延滯與回復時間關係式建立

分析計算各路段與時段之回復時間後，為進行後續分析，須將中斷時間與回復時間轉換為延滯，因此本研究推導並建立回復時關係式。公式推導時分為兩部分，首先是事故發生後至中斷時間結束內所產生之延滯，另一部分則是回復時間內所產生之延滯。因為時間本身是連續的，在進行公式推導時先以連續之時間函數進行分析。然而本研究中因分析所需，將連續之時間切割為不連續之時段，故所推導之公式亦轉換為不連續分析時可用時段進行運算之公式。

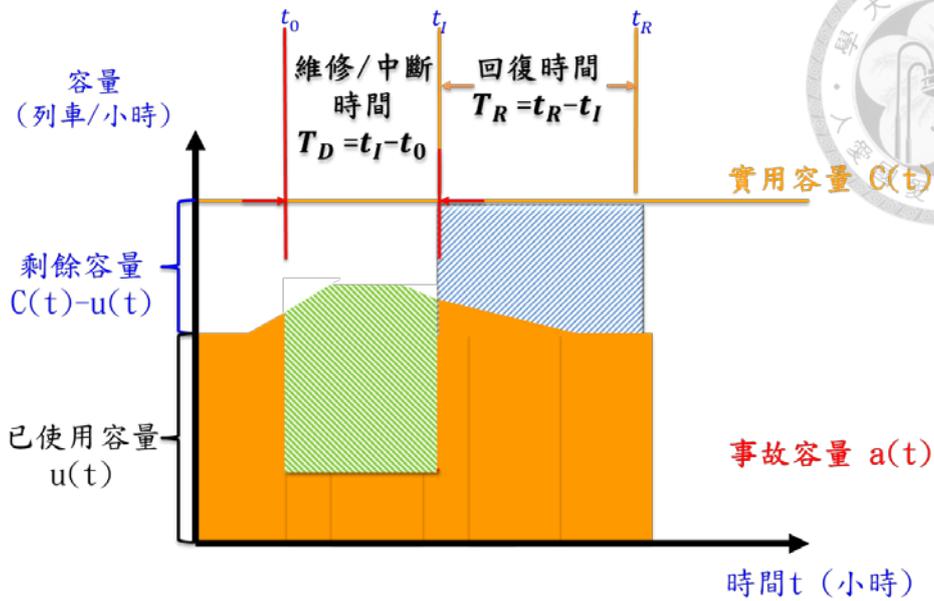


圖 3.9 回復時間與延滯關係推導符號示意圖(時間連續)

首先，中斷時間內所產生的延滯即因中斷列車(圖 3.9 綠色區塊中)無法正常發車所產生的延滯，每列中斷列車所受延滯為其表定發車之時間至中斷時間結束之時間差。對於各列車而言因其發車時間不同所受延滯亦不相同，表定越早發車者則所受延滯愈大。3.23 式利用使用量與事故容量之差值計算 t 時間點產生中斷列車數，但若使用量小於事故容量則不會有中斷列車產生。這些列車在中斷時間內所產生之延滯，即為中斷時間結束(t_1)與 t 之差值。因此考量參數為連續性之函數，3.24 式利用積分之方式計算中段時間內每個時間點 t 所產生之延滯，此一延滯即為各時間點產生之中斷列車數乘上該列車之至中段時間結束時所產生之延滯。

$$N(t) = \begin{cases} u(t) - a(t) & \text{if } u(t) \geq a(t) \\ 0 & \text{if } u(t) < a(t) \end{cases} \quad (3.23)$$

$$D_I = \int_{t_0}^{t_1} N(t)(t_1 - t) dt \quad (3.24)$$

其中， $N(t)$ = 時間點 t 因容量不足所產生之中斷列車數 (列車)

$u(t)$ = 時間點 t 之使用容量 (列車/小時)



$a(t)$ = 時間點 t 之事故容量 (列車/小時)

D_I = 中斷時間內所產生之總延滯時間 (小時)

t_0 = 事故發生時間點

t_I = 中斷時間結束時間點

另一方面，上述所提及之中斷列車會於回復時間內進行消化，回復時間的產生即表示不可能在中斷時間結束後所有中斷列車馬上同時消化完畢，其消化過程中亦會產生延滯，此一延滯計算概念與中斷時間內延滯計算概念相似，僅剩餘容量必定不為負值，故可直接以 3.25 式進行運算。對於 t 時間點而言，所消化之中斷列車其在回復時間內所受之延滯為 t 時間點與中段時間結束時間點之差值。所以在 3.25 式中以積分之方式將回復時間內所有列車所受之延滯加總時間。而 3.26 式乃是將 3.24 式與 3.25 式加總，如此即可得到該事故發生後所產生之總延滯時間。

$$D_R = \int_{t_I}^{t_R} [C(t) - u(t)](t - t_I) dt \quad (3.25)$$

$$D_T = \int_{t_0}^{t_I} N(t)(t_I - t) dt + \int_{t_I}^{t_R} [C(t) - u(t)](t - t_I) dt \quad (3.26)$$

其中， D_R = 回復時間內所產生之總延滯時間 (小時)

D_T = 總延滯時間 (小時)

$C(t)$ = 時間點 t 之實用容量 (列車/小時)

t_R = 回復時間結束時間點

如前所述，本研究因分析之需求將連續之時間分割為不連續之時段，因此 3.26 式必須再做調整，其推導之概念仍為相同。圖 3.10 中表示將時間切割為時段進行分析，在此推導過程中對於事故發生時間點(t_0)、中斷時間結束時間點(t_I)與回復時間結束時間點(t_R)接不受時段起始或結束時間點所限制，如圖 3.9 即表示上述時間點皆發生於分析時段之中。

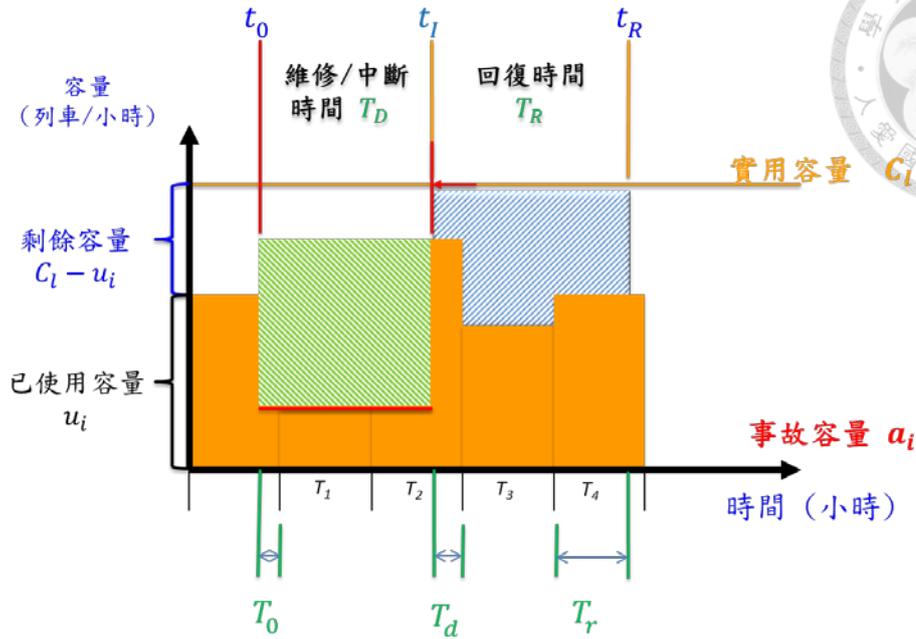


圖 3.10 回復時間與延滯關係推導符號示意圖(時段)

所轉換之公式如 3.28 式。3.27 式為各時段內中斷列車數之計算，因中斷時間起始與結束可能未包含完整時段，因此須依比例進行分析。3.29 與 3.30 式分別計算中斷時間與回復時間所包之完整時段，3.30 式中為簡化計算，無論是否結束時間點為何，接當作一個時段，其在 3.28 式中以所佔時間比例處理。3.28 式之計算方式即為時段乘上其與中斷時間結束時間點之時間差，並加總各時段之延滯時間。為中斷時間結束時間點所在之時段須另外進行處理。

$$N_i = \begin{cases} (u_i - a_i) \frac{T_i}{T} & \text{if } u_i \geq a_i \\ 0 & \text{if } u_i < a_i \end{cases} \quad (3.27)$$

$$D_T = \sum_{i=0}^n (N_i) \left[\frac{T_i}{2} + (n-i+1)T - T_d \right] + (u_d - a_d) \frac{(T - T_d)^2}{2T} + \sum_{j=1}^m (C_l - u_{j+n+1}) \frac{T_{j+n+1}}{T} \left(\frac{T_{j+n+1}}{2} + j \cdot T - T_d \right) + (C_l - u_d) \frac{T_d^2}{2T} \quad (3.28)$$

$$n = \left\lfloor \frac{T_D - T_0}{T} \right\rfloor \quad (3.29)$$

$$m = \left\lfloor \frac{T_R - T_d}{T} \right\rfloor \quad (3.30)$$

其中， N_i = 時段 i 因容量不足所產生之中斷列車數 (列車)



u_i = 時段 i 之使用容量 (列車/小時)

a_i = 時段 i 之事故容量 (列車/小時)

u_d = 中斷時間結束時段之使用容量 (列車/小時)

a_d = 中斷時間結束時段之事故容量 (列車/小時)

風險分析(期望延滯計算)

根據回復時間計算方式以及轉換關係式，可以分析在不同使用容量下，各種事故發生於各路段時段下所會產生之延滯。分析結果即為該種事故發生之嚴重性。本研究以風險之概念來量化事故發生對系統產生之影響。風險的定義為發生機率與嚴重性之乘積，在此則為事故發生機率與事故嚴重性之乘積，如 3.31 式所示。

$$Risk = \sum_{i,j,k} Risk_{i,j}^t = \sum_{i,j,k} probability_{i,j}^t \cdot Delay_{i,j}^t \quad (3.31)$$

其中， t = 第 t 類事故

i = 第 i 個路段

j = 第 j 個路段

在本研究中，為分析不同服務計畫之穩定度，將分別對不同服務計畫，依照其服務計畫容量使用情形，依上述分析流程進行分析。所求得之數值稱之為期望延滯時間，代表在該服務計畫下各類事故發生一次後回復至正常營運狀態下所造成之延滯時間，其中亦隱含各類事故發生為互斥事件之假設，另一方面必須注意的是，此時所探討之延滯，皆為受事故影響當下於該路段所造成，列車於後續路段進行趕點或其他營運調整，並不納入分析考量。如此分析方式乃是單純計算事故之影響，使其不受運轉調度方式或調度人員能力之影響。就分析之結果而言，當期望延滯時間愈高表示該服務計畫在發生事故後所產生之延滯愈長，代表其穩定性愈低；反之當期望延滯時間愈短則代表其穩定性愈高。

3.1.4.2 非事故產生之延滯分析

在軌道系統營運中，除了事故所產生之延滯外，事實上沒有事故的發生亦可

能產生延滯，例如列車進行交會待避所增加之運行時間或是因為旅客過多而導致停站時間的增加等。此部分之分析若可取得詳細之資料，例如在無事故發生之情況下分析路段在不同使用量下之實際列車運行情況與表定時刻表之差異。若具有上述相關資料則可採用如 3.1.1 節中所述處理歷史事故料之方式，對過往資料進行統計分析，再輔以機率分布之方式探討其發生機率與嚴重後在同樣以風險之概念納入考量，如此便可透過解析法之方式進行分析。然而本研究中因此一部分之延滯時間資料難以取得，故僅能透過模擬之方式進行分析探討。本研究中將參考運研所(2009)研究中所建立之臺鐵列車服務可靠度模擬模式，探討列車流量與其平均延滯之關係，該研究建立之模擬流程如 3.11 圖所示，分析過程中考量各項影響因素包含列車流量、站間運轉時間、號誌時距以及車種的組成…等，以模擬方式計算列車的延滯時間。此模式另一優點為不須給定時刻表，在本研究中所探討之最佳服務計畫僅包含列車停站模式與其發車頻率，並無進行時刻表排點之工作。因此可適用於此模式。

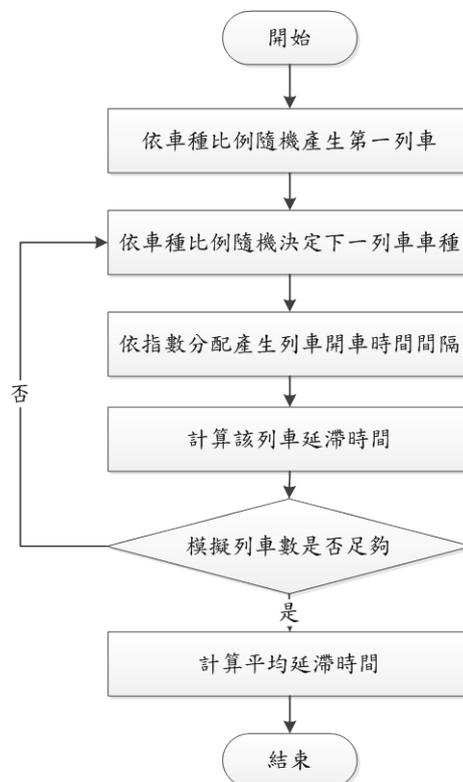


圖 3.11 列車服務可靠度分析模擬模式流程圖



該研究所建立之模擬分析流程各步驟說明如下：

1. 根據車種比例隨機決定第一列車車種，各車種出現以機率表示，如下式：

$$P_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \quad (3.32)$$

其中， P_i = 第 i 車種出現機率

n_i = 車種組成中 i 車種數或所佔比例

2. 決定續行列車車種(同 1 之方法)
3. 依據期望列車流量，產生兩列車間隔，此間隔須符合指數分配，其產生方式如下式：

$$t_x = \frac{-1}{f_e} \ln(1-R) \quad (3.33)$$

其中， t_x = 列車距離前一列車開車時間的時間間距 (秒)

f_e = 期望列車流量 (列車)

R = 0~1 間均勻分配的隨機亂數

4. 將間隔與號誌時距進行比較，計算續行列車之延滯時間，此一延滯時間需考量各項因素，詳細公式與推導請參考運研所(2010)之研究報告。
5. 重複步驟 2~4 繼續模擬下一列車直至模擬列車數足夠。
6. 計算列車平均延滯時間。

在後續進行案例分析時臺鐵之部分將會直接使用該研究中所開發之電腦軟體進行可靠度分析；而捷運系統之部分則會依據該模擬模式之流程自行調整後進行分析，詳細內容於案例分析時會再進行說明。而此部分分析結果代表非事故所產生對系統穩定度的影響，如 3.34 式所示分析所得之營運延滯將與風險分析而得之期望延滯加總作為系統穩定度之指標。而其中 3.35 為期望延滯之計算方式，該分析方式依 3.31 式調整修正而來。

$$D_{ij}^n = E_{ij}^n + O_{ij}^n \quad (3.34)$$

$$E_{ij}^n = \sum_{i,j,t} Risk_{i,j}^{n,t} = \sum_{i,j,t} probability_{i,j}^{n,t} \cdot Delay_{i,j}^{m,t} \quad (3.35)$$

其中， D_{ij}^n = 路段 (i, j) 上列車使用量為 n 時所產生之延滯 (分鐘)

E_{ij}^n = 路段 (i, j) 上列車使用量為 n 時之期望延滯時間 (分鐘)

O_{ij}^n = 路段 (i, j) 上列車使用量為 n 時之營運延滯時間 (分鐘)



3.2 服務計畫最佳化模式

在前一小節中說明系統穩定度與效率之分析與計算方式後可以得知在某一路段與某一時段下，各種不同容量使用量所對應之系統穩定度與效率。然而對於穩定度與效率之間的平衡點仍無法得知。因此在這一小節中，將建立最佳化模式以探討穩定度與效率之平衡點，此平衡點會對應出一組系統穩定度與容量使用效率值，該容量使用情形所相對應之服務計畫即為最佳服務計畫，故在本研究中尋找系統穩定度與效率平衡點最佳化模式亦稱之為服務計畫最佳化模式。

3.2.1 服務計畫最佳化模式假設與架構

如第二章文獻回顧所述，過往研究對服務計畫所包含之項目與內容不盡相同。在本研究中則是假設在給定的數種停站模式中分析其穩定度與效率，用以決定各停站模式使用與否與其發車頻率，若其分析結果中發車頻率為零則表示該停站模式不被使用。此最佳化模式之目標為最小總成本，這裡指的總成本包含旅客與營運者兩部分。旅客之部分將以旅行時間成本進行分析，詳細內容如下段說明；營運者則探討其不同服務計畫下之營運成本，包含運輸成本與人事成本。

本研究中旅客成本的部分探討總旅行時間成本，總旅行時間包含以下數個部分：旅客於月台之候車時間、時刻表表定運行時間、可能之延滯時間與各站之停站時間。其中時刻表表定運行時間與各站停站時間在本研究中假設僅依不同車種有所差異，但同一車種為一定值且不受系統使用量影響。亦即各種服務計畫下時

刻表表定時間與停站時間皆不改變。車種間之差異會影響其於各路段上之曝光量，進而對於事故發生機率產生影響。

對於等候時間而言，其受到列車班距之影響，班距與服務頻率則呈倒數關係。服務頻率之高低即代表系統容量使用效率。有鑑於此，當系統容量使用效率愈高時，所對應之服務頻率愈高，而旅客所需等候之時間則將降低。在本研究分析中，以通勤旅客為分析對象，對於班距與等車時間之關係參考 Welding (1957)之研究中所提出在與旅客以均勻到達的狀況下，乘客平均等車時間與班距之關係如 3.36 式，整理後可以線呈現與期望值與變異數關係如 3.37 式所示：

$$E(W) = \frac{\sum h^2}{2\sum h} \quad (3.36)$$

$$E(W) = \frac{1}{2}E(h) + \frac{V(h)}{2E(h)} \quad (3.37)$$

其中， $E(W)$ = 平均等車時間(分鐘)

h = 班距(分鐘)

$E(h)$ = 班距期望值(分鐘)

$V(h)$ = 班距變異數(分鐘)

對於旅客均勻到達之假設，過往研究認為當其班距低於一定數值後，即可視為均勻分布。由 3.37 式可知若班距之變異數趨近於零時，則等車時間的期望值為平均班距之一半。在本研究中假設班距變異數為零，即發車班距固定，故等候時間皆以班距之一半進行計算。另外對於各路段而言，可能有不止一種停站模式之列車使用該路段，故路段上班距之計算應如 3.36 式，由於最佳化模式中將以服務頻率做為決策變數，故 3.38 式中路段上之班距亦可以表示為各種停站模式加總結果。

$$h_{ij} = \frac{1}{\sum_k \frac{1}{h_{ij}^k} R_{ij}^k} = \frac{60}{\sum_k f_{ij}^k R_{ij}^k} = \frac{60}{f_{ij}} \quad (3.38)$$

其中， h_{ij} = 路段(i, j)上的班距 (分鐘)

h_{ij}^k = 停站模式 k 於路段 (i, j) 上的班距 (分鐘)

f_{ij}^k = 停站模式 k 於路段 (i, j) 上的服務頻率 (列車/小時)

R_{ij}^k = 停站模式 k 是否於路段 (i, j) 上有提供服務，有提供服務等於 1：

反之沒有提供服務等於 0。

由上述內容可知等候時間於最佳化模式中所反映的為其系統容量使用效率。另一方面，系統穩定度則透過延滯時間加以呈現，根據先前所引用與提出之穩定度分析方式，加總各路段上在不同服務計畫下之期望延滯時間與營運延滯時間。上述時間在各路段上以實際旅客數量進行加總，以探討總旅客的旅行時間。

如前所述，本研究在進行最佳化模式建構時同時考量旅客與營運者之觀點。事實上亦可單獨以旅客或營運者之觀點進行探討系統之穩定度與效率。若單獨以旅客觀點視之，則將最佳化模式中營運者成本移除，僅有旅客成本之部分，即旅客於月台之候車時間、時刻表表定運行時間、可能之延滯時間與各站之停站時間。在上述項目中僅等候時間與可能之延滯時間會隨不同服務計畫或使用量而改變。因此，此時最佳化模式即為上述兩項之權衡，分析之結果可視旅客觀點下之穩定度與效率之平衡點。另一方面，若僅單獨考量營運者之成本，此時模式中僅剩服務需求之限制，因此所求出之最佳解即為滿足最低旅客需求限制之服務計畫。

3.2.2 基本模式建立

模式之概念呈上所述，基本模式之建構如下，決策變數為各種停站模式於各路段上之發車頻率(f_{ij}^k)。其中 3.39 式為目標式，目標式分為兩大部分即旅客成本與營運者成本，前者為旅客總旅行時間與時間價值相乘，後者則是以營運里程作為衡量，將其乘上發車頻率與營運成本。總旅行時間之部分又將延滯時間與其他分開探討論，第一項為表定行車時間與等候時間之加總，計算方式為各旅次乘上其所對應之表定行車時間與等候時間和。第二項為旅客所受之總延滯時間，考



量不同路段之使用量以及路段上之旅客數，相乘後即可得知其延滯時間。

$$\text{Min} \left[\sum_{l \in N} \sum_{m \in N} (w_{lm} + T_{lm}) Q_{lm} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{n \in N_i} D_{ij}^n x_{ij}^n P_{ij} \right] V + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k L_{ij}) C \quad (3.39)$$

$$\text{St. } w_{lm} \geq \frac{1}{2 \sum_k f_{ij}^k B_{ijlm}} \quad \forall (i,j) \in A, l, m \in N \quad (3.40)$$

$$\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) = \sum_n (T^n x_{ij}^n) \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.41)$$

$$\sum_n x_{ij}^n = 1 \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.42)$$

$$\sum_{(i,j) \in A^-(j)} f_{ij}^k - \sum_{(j,l) \in A^+(j)} f_{jl}^k = \begin{cases} -f^k & j \in N_S \\ f^k & j \in N_D \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall k \in K \quad (3.43)$$

$$\sum_k f_{ij}^k \leq U_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.44)$$

$$\sum_k f_{ij}^k G \geq P_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.45)$$

$$\sum_k f_{ij}^k \geq Z \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.46)$$

$$f_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, k \in K \quad (3.47)$$

其中， f_{ij}^k = 服務起訖模式 k 於路段 (i,j) 上的服務頻率 (列車/小時)

w_{lm} = 由車站 l 至車站 m 旅次等候時間 (分鐘)

x_{ij}^n = 二元變數，若路段 (i,j) 上列車使用量為 n 則為 1，否則為 0

Q_{lm} = 由車站 l 至車站 m 旅次數 (人/小時)

T_{lm} = 由車站 l 至車站 m 表定運行時間 (分鐘)

D_{ij}^n = 路段 (i,j) 上列車使用量為 n 時所產生之延滯 (分鐘)

P_{ij} = 路段 (i,j) 上之旅客數 (人/小時)

R_{ij}^k = 停站模式 k 於路段 (i,j) 上是否有提供服務，有提供服務時為 1，



無提供服務時為 0

L_{ij} = 路段 (i, j) 長度 (公尺)

V = 旅客時間價值 (元/分鐘)

C = 營運成本 (元/公尺)

B_{ijlm} = 由車站 l 至車站 m 是否有經過路段，若有經過為 1，若無經過為 0

T^n = 列車使用數量轉換參數

f^k = 服務起訖模式 k 發車頻率 (列車/小時)

U_{ij} = 路段 (i, j) 上列車使用上限 (列車/小時)

Z = 系統最低服務頻率限制 (列車/小時)

G = 最大服務供給量 (旅客/列車)

A = 所相鄰兩車站之集合

$A(j)^-$ = 離開 j 車站之路段集合， $A(j)^- \in A$

$A(j)^+$ = 進入 j 車站之路段集合， $A(j)^+ \in A$

N = 車站集合

N_s = 路線上起點站之集合， $N_s \in N$

N_d = 路線上終點站之集合， $N_d \in N$

K = 服務起訖模式集合

3.40 式為等候時間計算方式，該式沿用前一小節敘述之等候時間計算方式，再搭配 B_{ijlm} 參數決定在旅次 (l, m) 中是否通過路段 (i, j) ，並以 0 表示未通過，1 表示通過該路段。因本模式為最小化，故透過大於等於可以選擇路段上最長之等候時間。選擇最長等候時間之原因以圖 3.12 為例說明，若對於由 B 站至 D 站的旅次為例，雖然其於 B 站可有三種模式之列車可供搭乘，但僅其中兩種可以到達。即便其使用服務起訖模式 2 至 C 站換車，其換車後仍須等候 1 或 3 之列車

到達，總等候時間仍相同。故需選擇列車服務頻率較小之路段所對應之等候時間，因服務頻率愈小等候時間愈大，故在限制式中選擇等候時間最大者。

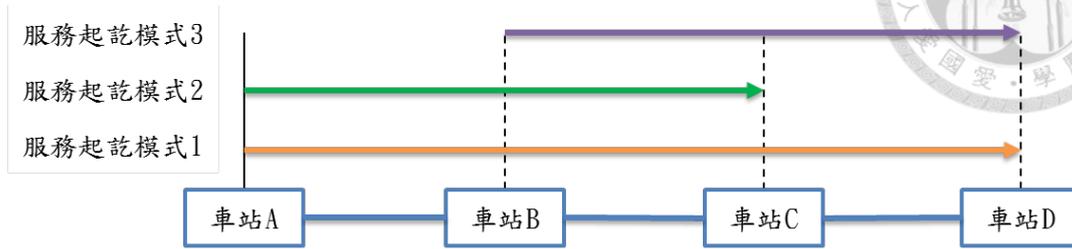


圖 3.12 等候時間計算示意圖

經由 3.1 節所建立之分析模式進行分析之結果，可以得知不同使用量與延滯之對應關係。而在最佳化模式中以 D_{ij}^n 參數表示對於 (i, j) 路段在不同列車使用量 (n) 下對應所產生之延滯。事實上各路段列車使用量於本模式中為決策變數，由於在本研究所使用之最佳化求解軟體中無法直接將 D_{ij}^n 之上標 n 以

$\sum (f_{ij}^k R_{ij}^k) = n$ 來表示。故需用利用 3.41 式與 3.42 式搭配來將路段上使用列車數量對應至 n 值。3.41 式中其中 T^n 為轉換所需之對應參數且 T^n 之數值即為 n 。由於 x_{ij}^n 為 0 或 1 之變數，故 3.42 式可確保每個路段之使用列車數量僅會對應至一個 n 值，因此為同時滿足 3.41 式與 3.42 式，僅有當路段 (i, j) 上列車服務頻率為 n 時， x_{ij}^n 才會等於 1。

3.43 式為各車站之流量守恆方程式，透過此限制式以確保同一停站模式之列車於各路段間使用量相同，故當所分析之車站不為路線之起點或終點站時，進入該車站之列車與離開該車站之列車數量應相同。而對於起、終站而言，由於各停站模式之列車數量為模式欲決策之變數，故令進出該車站之列車數差值為變數 (f^k) ，以避免對模式求解本身產生影響。3.44 式表示各路段之使用量不可高於可提供之服務列車數量限制。3.45 式則要求各路段 (i, j) 上所提供之旅客服務大於路段上之旅客需求，即供給需大於需求之限制，此為一般分析模式中常見之限制

式，然而本研究考量通過其系統特性與模式彈性，於後續章節中將會對此限制式進行調整。而 3.46 式則表示系統最低服務頻率限制，在部分系統中受限於規範要求其必須提供一定之服務，此一狀況常出現於捷運系統中。若系統無此規範則 Z 值可直接訂為零，最後 3.47 式為列車發車頻率之非負限制。

除此之外，本研究中所建構之最佳化模式並不直接限制各路段容量使用上限，而是利用延滯時間來加以制衡。如圖 3.13 所示，經容量分析之結果為時刻表容量，代表列車於運行時不可看見黃燈。然而實際上路線運轉時在特殊情況下仍可以使用至最大容量。故在前面小節談及列車營運延滯或稱之為非事故延滯，本研究分析所採用之值皆為圖中最大容量分析曲線之數值，且於最佳化模式亦不對容量進行限制，乃是透過列車使用量到達一定程度列車延滯會大幅上升來加以制衡。最佳化模式中雖然看似會傾向使用較高使用容量，但實際上當提高容量使用之效益不足以彌補列車延滯增加時，便不會再選擇更高之使用容量。

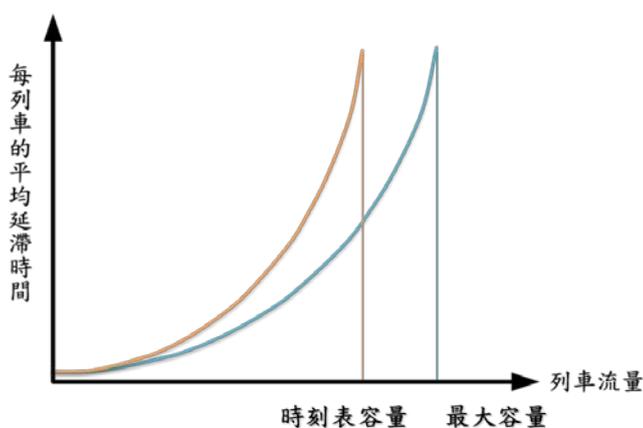


圖 3.13 列車流量與平均延滯關係圖

資料來源:運研所(2005)

在此基本模式中，所採用之分析觀點為同時考量營運者與旅客成本。事實上如前面模式概念說明中所提及，對於考量不同觀點之分析模式以可利用此基本分析模式進行修改。若單以旅客觀點進行分析，則目標式(3.39 式)中僅須包含中括弧中旅客成本之部分，其他限制式之內容則無需變動。反之若以營運者角度進行

分析，此模式之目標式則僅需最一項營運成本計算之部分，限制式中僅需保留流量守恆限制式(3.43 式)、最大使用列車數量限制式(3.44 式)、服務需求限制式(3.45 式)(3.46 式)及決策變數非負限制式(3.47 式)，對旅客影響部分之限制式則予以刪除。

3.2.3 服務計畫最佳化線性模式

其一小節所述之基本模式已經可以進行求解，然而該模式中於 3.40 式為非線性之限制式，此一結果可能無法保證求出最佳解，因此本研究將近一步以線性化改寫上述限制式。另一方面，在過往研究中多半直接要求服務頻率必須要至少滿足所有旅客需求如基本模式中之 3.45 式，即以旅客為客體計算之使用容量需大於或等於路段上之旅客數量。然而考量於尖峰小時中旅客數量極高，但此部分旅可能僅會集中於部分路段，且在尖峰小時過後即會大幅下降，若單純提高服務頻率可能導致系統整體穩定度下降而其使路段的旅客受到影響，再加上其營運成本之增加，此一限制所產生之效益(旅客等候時間縮短)可能小於成本之增加。因此本研究將此限制移除。但當此限制移除後在部分路段所提供之服務可能無法滿足旅客之需求。此時部分旅客無法在一個班距的等候時間內搭上列車，相反的必須至少多等上一個班距的時間。有鑒於此，故本研究於將基本模式中 3.44 式移除之同時，亦針對等候時間計算之部分加以修正改寫，以較具彈性之等候時間修正限制式替代，詳細之修改過程於後續內容將會再加以說明，而經模式線性化與等候時間增加之限制式修改後完整模式如下。

$$\text{Min} \left[\sum_{l \in N} \sum_{m \in N} (w_{lm} + T_{lm}) Q_{lm} + \sum_{(i,j) \in A} (w'_{ij} + \sum_n D_{ij}^n x_{ij}^n P_{ij}) \right] V + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k L_{ij}) C \quad (3.48)$$

$$\text{St. } w_{lm} \geq s_{ij} B_{ijlm} \quad \forall (i, j) \in A, l, m \in N \quad (3.49)$$

$$\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) = \sum_n (T^n x_{ij}^n) \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.50)$$

$$\sum_n x_{ij}^n = 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.51)$$

$$s_{ij} = \sum_n (H^n x_{ij}^n) \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.52)$$

$$\sum_{(i,j) \in A^-(j)} f_{ij}^k - \sum_{(j,l) \in A^+(j)} f_{jl}^k = \begin{cases} -f^k & j \in N_S \\ f^k & j \in N_D \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall k \in K \quad (3.53)$$

$$\sum_k f_{ij}^k \leq U_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.54)$$

$$\sum_k f_{ij}^k \geq Z \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.55)$$

$$w'_{ij} \geq \frac{1}{2} [T \cdot P_{ij} + 2s_{ij} P_{ij} - T \cdot G (\sum_{k \in K} f_{ij}^k R_{ij}^k - 1)] \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.56)$$

$$f_{ij}^k \geq 0, w'_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (3.57)$$

其中， w'_{ij} = 路段 (i, j) 上等候時間增加時間 (分鐘)

s_{ij} = 相依變數，路段 (i, j) 上之等候時間 (分鐘)

H^n = 等候時間轉換參數

於上述模式中，目標式中加入等候時間增加時間(w'_{ij})。限制式中 3.50 式與 3.51 式保留不變，3.49 式與 3.52 式則為線性化所需而增加之限制式。另外 3.51 式、3.53 式~3.55 式與原本基本模式並無差別，3.56 式則為等候時間增加限制式。關於線性化與等候時間增加限制式則於後續段落詳細說明。

模式線性化

於基本分析模式中，3.40 中因變數位於分母之位置故會造成模式呈現非線性。於 3.49 式中將原本於 3.40 式中分母之發車頻率改以該路段 (i, j) 之等候時間(s_{ij})此一變數替代。由於等候時間為班距之一半，而班距又與發車頻率存在倒數關係，透過此一關係轉換可以解決變數存在於限制式分母所造成之非線性問題。上述之轉換關係配合原有之限制式列車數量轉換之限制式(3.50 與 3.51 式)可得知路段上

之列車發車頻率並反映於 x_{ij}^n 中。於 3.52 式中將路段上之列車發車頻率轉換為其相對應等候時間， H^n 為一轉換用之參數如下表。其數值極為使用量為 n 時之等候時間。舉例而言，當列車使用量為每小時 2 列車時，其等候時間應為班距(30 分鐘)的一半即 15 分鐘，故 H^2 所對應之數值為 15(分鐘)。



表 3.17 等候時間(H^n)與列車數(T^n)轉換參數表

n 值	H^n 值(分鐘)	T^n
1	30	1
2	15	2
3	10	3
⋮	⋮	⋮

等候時間增加限制式

3.56 為等候時間增加之限制式，探討發車頻率是否滿足需求時需用原有之 3.46 式進行分析，當原本限制式滿足時即表示服務滿足需求，若不滿足則須分析等候時間之增加之旅客數量。在本研究分析中假設旅客之到達率在該時段內為均勻分布，且各列車所提供之旅客服務數量最大值相同。圖 3.14 為等候時間增加之影響旅客數量示意圖。由左邊之圖可知在一分析時段中，若提供之服務數量低於系統之提供時，則兩者間之差距對於旅客等候時間影響之來源。事實上，於 3.14 左圖中無法真正說明受影響之旅客數量，因為受影之旅客數量會隨時間累加，此一累加情形則如圖 3.14 中之右圖，其橫坐標表示從該時段開始每一列車中無法上車而必須等候下一列車之旅客數量。

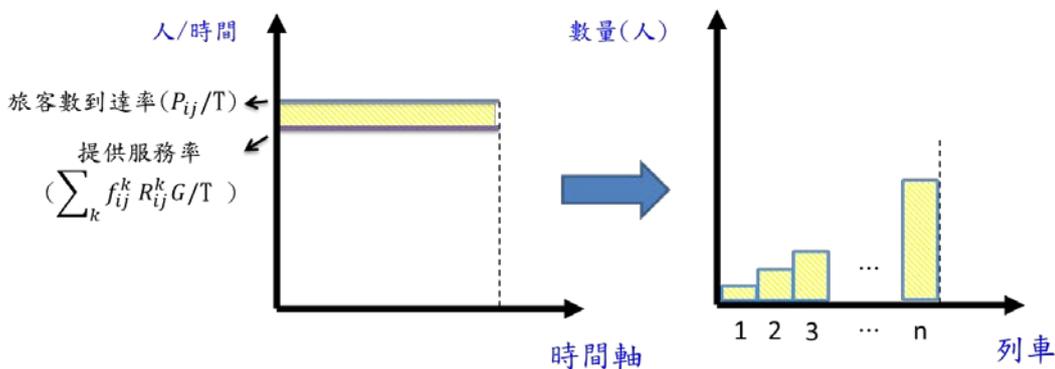


圖 3.14 等候時間增加之影響旅客數量示意圖

根據上圖之說明，無法搭上第一列車的旅客數計算方式如 3.58 式，將尖峰小時內總旅客數減去總服務旅客數即為圖 3.13 中左圖中黃色之部分，由於該小

時內會有 n 列車，故對於第一台列車而言，將兩者相除後即可得知無法搭上第一列車之旅客數。而對於第二台列車而言，除了該時段內本身超過該列車服務之旅客數外，亦須考量前一列車未能上車所累加之部分，故其未能上車之旅客為第一列車之兩倍，以此類推知該時段最後一列車時無法上車之旅客數則如 3.59 式。

故可得知該時段內各列車無法上車之旅客數為一等差級數，可利用梯形公式進行計算，其中 n 表示列車數量，因此可以以 $\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)$ 進行代換與化簡如 3.60 式。

$$N_1 = \frac{P_{ij} - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)G}{\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)} \quad (3.58)$$

$$N_n = n \cdot N_1 = n \left(\frac{P_{ij} - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)G}{\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)} \right) \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} \sum_n N_n &= (1+2+3+\dots+n) \left[\frac{P_{ij} - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)G}{\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)} \right] = \frac{n(n+1)}{2} \left[\frac{P_{ij} - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)G}{\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)} \right] \\ &= \frac{\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) \left[\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) + 1 \right]}{2} \left[\frac{P_{ij} - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)G}{\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)} \right] \\ &= \frac{\left[\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) + 1 \right] \left[P_{ij} - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k)G \right]}{2} \quad (3.60) \end{aligned}$$

其中， N_1 = 未能於第一列車上車之旅客數

N_n = 未能於第 n 列車上車之旅客數

在加總各列車未能上車之旅客數後，實際上這些旅客應該可以搭上在其下一列車，故等候時間之增加時間應為該旅客數成上班距，表示因其必須多等一班車所增加之時間。班距計算方式如 3.38 式，如搭配線性化之模式參數則可寫如 3.61 式。等候時間之增加計算如 3.62 式。其中當旅客數量大於所提供之服務時才需要進行計算，反之則為零。

$$h_{ij} = \frac{T}{\sum_k f_{ij}^k R_{ij}^k} = 2s_{ij} \quad (3.61)$$

$$w'_{ij} = \begin{cases} \frac{\left[\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) + 1 \right] \left[P_{ij} - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) G \right]}{2} \left(\frac{T}{\sum_k f_{ij}^k R_{ij}^k} \right) & \text{if } P_{ij} > \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) G \\ 0 & \text{if } P_{ij} \leq \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) G \end{cases} \quad (3.62)$$

考量 3.62 式中仍有非線性之問題，本研究將其進行化簡，其過程如 3.63 式，此外將 (w'_{ij}) 設定為非負數，如先前模式中 3.57 式所示，而此一關係式便可改用大於等於進行改寫，因為目標式為最小化，改寫後若 3.63 式右邊為負值則 w'_{ij} 將自動為零，若其不等式右邊為正值， w'_{ij} 便會等於其值，此即為線性化模式中 3.56 式限制式。

$$\begin{aligned} w'_{ij} &\geq \frac{\left[\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) + 1 \right] \left[P_{ij} - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) G \right]}{2} \left(\frac{T}{\sum_k f_{ij}^k R_{ij}^k} \right) \\ &= \frac{\left[\sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) + 1 \right] \left[P_{ij} - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) G \right]}{\sum_k f_{ij}^k R_{ij}^k} \frac{T}{2} \\ &= \left(1 + \frac{1}{\sum_k f_{ij}^k R_{ij}^k} \right) \left[P_{ij} - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) G \right] \frac{T}{2} = \left(\frac{T}{2} + s_{ij} \right) \left[P_{ij} - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) G \right] \\ &= \frac{T \cdot P_{ij}}{2} + s_{ij} P_{ij} - \frac{T}{2} \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) G - \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) G \cdot s_{ij} \\ &= \frac{T \cdot P_{ij}}{2} + s_{ij} P_{ij} - \frac{T}{2} \sum_{k \in K} (f_{ij}^k R_{ij}^k) G - \frac{T}{2} G \\ &= \frac{1}{2} \left[T \cdot P_{ij} + 2s_{ij} P_{ij} - T \cdot G \left(\sum_{k \in K} f_{ij}^k R_{ij}^k - 1 \right) \right] \quad (3.63) \end{aligned}$$



3.3 小結

本研究主要之目的在於建立一完整軌道系統營運效率與穩定度最佳平衡分析方式並探尋不同系統之最佳平衡點。本研究所建立之分析模式，分為兩大部分。首先針對過往軌道系統進行穩定度與效率評估之方法加以整合並修改，建立一穩定度與效率分析模式如 3.1 節所述。無論傳統鐵路與捷運系統皆可採用此分析模式進行分析探討其系統穩定度與效率。此外對於穩定度分析方式本研究亦建立回復時間與延滯之關係式，透過此一關係式除了可將前人採用不同分析方式之研究加以整合外，亦可解決回復時間與延滯兩種分析方式各自之缺點。由此穩定與效率分析之結果作為輸入資料，本研究建立最佳化模式分析兩者之最佳平衡點如 3.2 節中所述，該最佳化模式中同時考量旅客與營運者觀點，於模式建構時本研究亦探討若以不同觀點進行最佳化模式建立之模式架構。為使分析模式具有較大之彈性，模式中不對容量使用上限設限，而是由延滯大小來制衡其不會過度使用；亦不由旅客需求限制其使用下限，乃是由等候時間來與其增加限制式來加以制衡。分析可得其最佳平衡點與所對應之最佳服務計畫。

對於本章節中所提出之分析方模式中將利用 Excel 撰寫 VBA 以進行穩定度與效率分析，而其中分析營運延滯時將會採用運研所(2009)研究中所建立之分析軟體進行分析。最佳化模式之部分，則透過最佳化軟體 GAMS 建立模式並以 CPLEX 進行求解。



第四章 案例分析



本研究在第三章中已完整說明穩定度與效率分析流程和服務計畫最佳化模式之建立，在此將以實際營運之系統進行案例分析。本研究中案例分析主要分為兩大部分，其一是以區域鐵路進行分析，探討對於通勤旅次穩定度與效率平衡點以及其所對應之最佳服務計畫，此一部份將以臺鐵作為分析對象，詳細分析內容如 4.1 節中所述。第二部分將針對捷運系統進行案例分析，此系統為行之有年且世界知名之捷運營運系統，本研究將針對其路網中最为繁忙之路線，即尖峰時間旅客數量最大之路線進行研究與分析，詳細案例分析內容於 4.2 節中加以說明。

4.1 區域鐵路系統案例分析

本研究中區域鐵路系統以臺鐵作為分析對象。臺鐵在臺灣軌道系統中同時扮演著城際運輸鐵路與區域通勤鐵路之雙重腳色。然而隨著高速鐵路的通車影響，以及部分縣市希望建設軌道運輸系統但卻無法負擔興建捷運系統之高昂費用。臺鐵捷運化一直是被熱烈討論的議題。對於捷運化最基本的要求就是必須提供較高的服務頻率，尤其是對於主要負責短程通勤旅客之區間車，其發車頻率應該有所提高。然而，對於現有的系統而言，如前面章節所述，在基礎設施、車輛與號誌系統不進行較大改變的情況下，一味提升路線之使用率並非正確之作法，其可能造成系統穩定度大幅下降而造成反效果。在本研究中，將挑選臺鐵最為繁忙之路段，進行案例分析，探討其容量使用效率與系統穩定度之平衡點，以及其所對應之最佳服務計畫。4.1.1 節中會說明此案例分析之研究範圍與假設。另外因為過往研究中，臺鐵系統實用容量與事故容量分析已有探討，故 4.1.2 節將引用其分析結作為後續最佳化分析之輸入資料。4.1.3 節中則說明可靠度分析之結果。4.1.4 節則為最佳化模式求解與平衡點分析之成果，在此分析結果中又將分為兩種情境，其一為單純考量使用者觀點之分析結果，另一部分則為同時考量使用者與營運者

觀點隻完整分析結果。最後對於區域鐵路系統案例分析成果做小結。



4.1.1 分析範疇與假設

本研究以臺鐵七堵至樹林段進行分析，此區段為為臺鐵系統中最为繁忙之區段，除了幾個明顯容量較低之瓶頸點外，此一區段亦為東部幹線與西部幹線重疊交織之區段。鍾志成等人(2012)整理之台鐵在台北地區調車場位置變遷如下圖 4.1 所示。隨著台北地區的都會發展，從原本的華山調車場往事具外面遷移，此一遷移之結果導致東西部幹線列車起終點不同，依目前現行營運狀況而言，西部幹線之起終點七堵調車場，而東部幹線為樹林調車場。此一情況導致兩者在七堵與樹林間造成重疊區段之現象。然而為滿足其他路段之需求，勢必無法減少其發車數量，此一後果導致七堵之樹林間必須使用極高之路線使用率。因而對系統之穩定度產生極大影響。

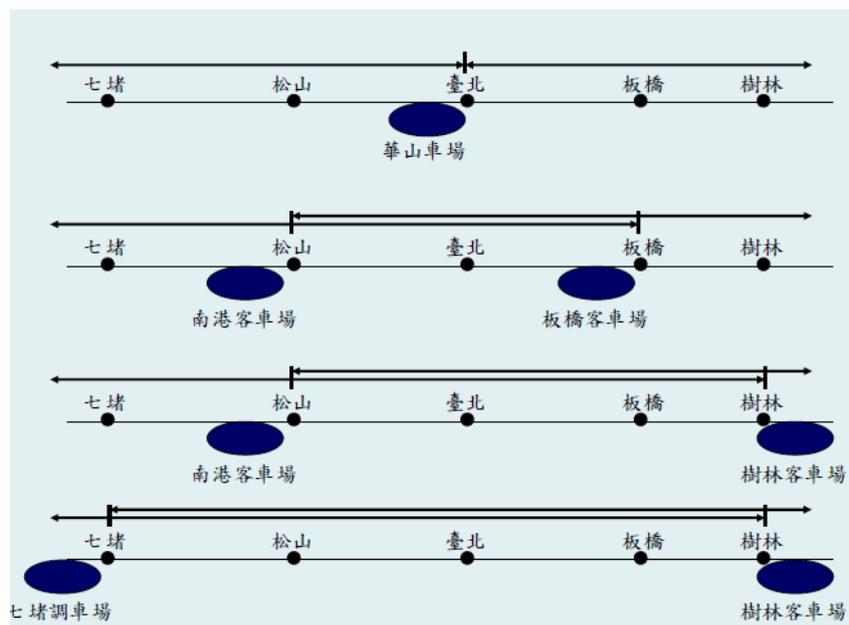


圖 4.1 臺鐵調車場位置變遷示意圖

資料來源：鍾志成(2012)

事實上根據陳冠廷(2012)之分析，七堵至汐止段之使用容量在尖峰小時甚至超過百分之百，意即超出時刻表容量，而列車在運行時必須減速或運行途中會出現黃燈之境。故本研究將針對此一瓶頸路段進行分析，探討其使用效率與系統



穩定度之平衡點以及其所對應之服務計畫。臺鐵營運路線七堵至樹林間共有七堵(6.0)、百福(8.7)、五堵(11.7)、汐止(13.1)、汐科(14.6)、南港(19.1)、松山(21.9)、台北(28.3)、萬華(31.1)、板橋(35.5)、浮洲(38.0)與樹林(40.9)，共計 12 站，其中括弧內數字為各站自基隆站算起之營運里程。然而本研究主要分析之時間範圍為民國 97 年 1 月至民國 99 年 12 月。分析所採用之事故資料為即此一時間範圍之實際事故資料。使用之旅次起訖資料亦為民國 99 年 4 月份上班日之資料。事實上在上述 12 站中，浮洲站為民國 100 年九月通車之捷運化車站，因其與本研究分析之年度並不相符故於以去除，後續將以剩餘 11 座車站與其所包含之路段進行分析。

由於分析之主要對象為通勤旅客，因此本研究在臺鐵案例分析中僅針對區間車進行決策，考量對號列車使用量固定之情境下，探討系統穩定度與效率平衡點，以決定區間車之最佳服務計畫。此外根據臺鐵區間車營運特性故案例分析中皆採用站站停之模式且在固定對號列車使用情況下區間車使用之變化不大。由於此區段為重疊區間對於東西部列車不同起訖之停站模式而言並無差異，是故於此案例分析中僅考量一種停站模式，而多種停站模式則在捷運系統案例分析時再加以深入探討。對於尖峰小時而言，旅客於晨峰相對於昏峰集中且明顯，故本研究主要分析晨峰之營運狀況，並將其分為七點至八點以及八點至九點兩種情況加以分析。

4.1.2 實用容量與事故容量資料

實用容量與事故容量資料，陳冠廷(2012)對臺鐵之容量分析成果。該研究中詳細分析臺鐵基隆至新竹段實用容量與事故容量分析之成果。本研究將七堵之樹林段依台鐵容量模式合併後共為七個容量分析單元：七堵~汐止、汐止~南港、南港~松山、松山~台北、台北~萬華、萬華~板橋、板橋~樹林。整理各站內股道配置與各類事故中斷後情形如表 4.1，由於此路段發生事故後，上下行股道配置相同，故不在加以細分。實用容量分析結果如下表 4.2。其中上行與下行股道路線

參數略有差異，因即便為同路段，上下行容量值並不相同。由表中分析結果可見此一路段不論上下行，其容量之瓶頸皆為七堵至汐止段。上行容量僅為 7.92(列車/小時)與其他路段之差異較大。

表 4.1 車站原股道配置與事故後股道情形

車站	月台型式	單股道事故	雙股道事故
七堵	第一型	第三型	第五型
汐止	第三型	第四型或第五型	第六型
南港	第一型	第三型	第五型
松山	第一型	第三型	第五型
臺北	第一型	第三型	第五型
萬華	第二型	第四型	第六型
板橋	第一型	第三型	第五型
樹林	第一型	第三型	第五型

表 4.2 實用容量分析結果

上行		下行	
路段	容量 (列車/小時)	路段	容量 (列車/小時)
樹林-板橋	13.01	七堵-汐止	9.53
板橋-萬華	10.66	汐止-南港	10.51
萬華-臺北	13.26	南港-松山	16.28
臺北-松山	12.71	松山-臺北	13.15
松山-南港	15.77	臺北-萬華	14.55
南港-汐止	10.64	萬華-板橋	13.27
汐止-七堵	7.92	板橋-樹林	15.34

資料來源：陳冠廷(2012)與本研究整理

此外上下行路段事故容量亦整理如表 4.3，其中汐止站為第三型月台，當單股道事故發生後，依其發生地點可能為第四型或第五型之月台型式，故於下表中以*表示為第五性月台型式。表中數字單位皆為列車/小時。

表 4.3 各路段事故容量

上行					下行				
路段	單股道事故		雙股道事故		路段	單股道事故		雙股道事故	
	起站	終站	起站	終站		起站	終站	起站	終站
樹林-板橋	11.22	10.49	9.21	8.10	七堵-汐止	9.53	6.10 *9.03	6.63	4.84
板橋-萬華	8.53	8.56	7.94	4.46	汐止-南港	8.28 *9.11	10.69	5.02	10.14
萬華-臺北	11.64	7.42	4.43	5.46	南港-松山	13.87	11.67	10.78	9.33
臺北-松山	7.25	11.33	5.59	9.68	松山-臺北	10.50	7.32	9.72	5.59
松山-南港	11.51	10.58	9.49	8.61	臺北-萬華	6.91	10.89	5.64	4.51
南港-汐止	10.30	8.00 *10.44	8.92	5.11	萬華-板橋	9.08	11.21	4.45	7.97
汐止-七堵	5.69 *7.88	7.92	4.97	7.92	板橋-樹林	11.96	12.44	8.31	8.46

資料來源：陳冠廷(2012)與本研究整理

4.1.3 可靠度分析結果

本研究依據事故紀錄與資料整理後，將原有 13 事故與 CTC 和 ATP 故障資料先以集群分析法重新分類，再進行可靠度分析，其成果如表 4.4。依據可靠度分析之成果，一方面計算各路段不同使用量下之期望延滯。另一方面透過臺鐵列車服務可靠度模擬模式模擬進行非事故產生之營運延滯分析。圖 4.2 為透過容量分析軟體進行可靠度模擬之舉例，圖中之分析路段為樹林至板橋上行路段。對於各路段各車種組成下皆須進行可靠度分析，下圖即為車輛組成為 6:6:1(區間車：自強號：莒光號)。利用分析結果中之實際延至作為本研究後續最佳化求解之輸入參數。此外本研究亦利用統計分析軟體 SPSS 針對分群後之事故資料進行 K-S 檢定驗證其事故發生間隔是否符合指數分配，其中 H_0 為假設事故發生間隔符合指數分配，而 H_1 則表示不符合，其檢定結果如表 4.5 所示，其分析結果發現統計分析計算所得之數值皆小於以 α 為 0.05 時之臨界值。故根據此一分析結果可接受 H_0 假設，並得到分析資料之事故發生間隔符合指數分配。

表 4.4 可靠度分析成果



事故種類	件數	平均中斷 時間(分鐘)	系統失效率
列車妨礙等級一	101	12.88	0.000065
列車妨礙等級二	55	46.11	0.000035
列車延誤等級一	98	21.83	0.000062
列車延誤等級二	35	78.17	0.000023
列車障礙等級一	80	30.45	0.000052
列車障礙等級二	38	103.74	0.000024
死傷等級一	116	38.85	0.000073
死傷等級二	94	76.47	0.000060
客車故障	57	29.42	0.000037
號誌設備故障等級一	202	34.31	0.000138
號誌設備故障等級二	109	84.83	0.000073
號誌設備故障等級三	80	197.83	0.000054
ATP 故障	1,122	7.42	0.000710
路線故障	77	149.00	0.000050
電車故障等級一	253	13.81	0.000162
電車故障等級二	123	33.56	0.000078
電車故障等級三	38	68.13	0.000024
電車線故障	82	76.67	0.000051
機車故障等級一	239	17.54	0.000151
機車故障等級二	147	42.16	0.000093
機車故障等級三	90	89.79	0.000058
機動車故障	52	25.44	0.000033
進入錯線	7	26.50	0.000003
車輛出軌	21	328.35	0.000013
車輛衝撞	11	206.70	0.000007
其他等級一	157	12.92	0.000103
其他等級二	68	127.99	0.000044

表 4.5 事故資料 K-S 檢定結果

事故分類	間隔樣本數	檢定統計量	臨界值	檢定結果
列車妨礙等級一	100	0.116	0.136	不拒絕假設
列車妨礙等級二	54	0.095	0.185	不拒絕假設
列車延誤等級一	97	0.067	0.138	不拒絕假設
列車延誤等級二	34	0.207	0.233	不拒絕假設
列車障礙等級一	79	0.046	0.153	不拒絕假設
列車障礙等級二	37	0.120	0.224	不拒絕假設
死傷等級一	113	0.041	0.128	不拒絕假設
死傷等級二	93	0.055	0.141	不拒絕假設
客車故障	56	0.106	0.182	不拒絕假設
號誌設備故障等級一	199	0.081	0.096	不拒絕假設
號誌設備故障等級二	108	0.129	0.131	不拒絕假設
號誌設備故障等級三	78	0.093	0.154	不拒絕假設
路線故障	76	0.064	0.156	不拒絕假設
電車故障等級一	252	0.044	0.086	不拒絕假設
電車故障等級二	120	0.074	0.124	不拒絕假設
電車故障等級三	37	0.102	0.224	不拒絕假設
電車線故障	80	0.119	0.152	不拒絕假設
機車故障等級一	238	0.046	0.088	不拒絕假設
機車故障等級二	146	0.107	0.113	不拒絕假設
機車故障等級三	88	0.077	0.145	不拒絕假設
機動車故障	50	0.066	0.192	不拒絕假設
進入錯線	5	0.280	0.608	不拒絕假設
車輛出軌	19	0.161	0.312	不拒絕假設
車輛衝撞	9	0.192	0.453	不拒絕假設
其他等級一	153	0.091	0.110	不拒絕假設
其他等級二	67	0.107	0.166	不拒絕假設

註：由於 ATP 故障取得之資料中無法得知確切發生時間故無法進行此項分析。

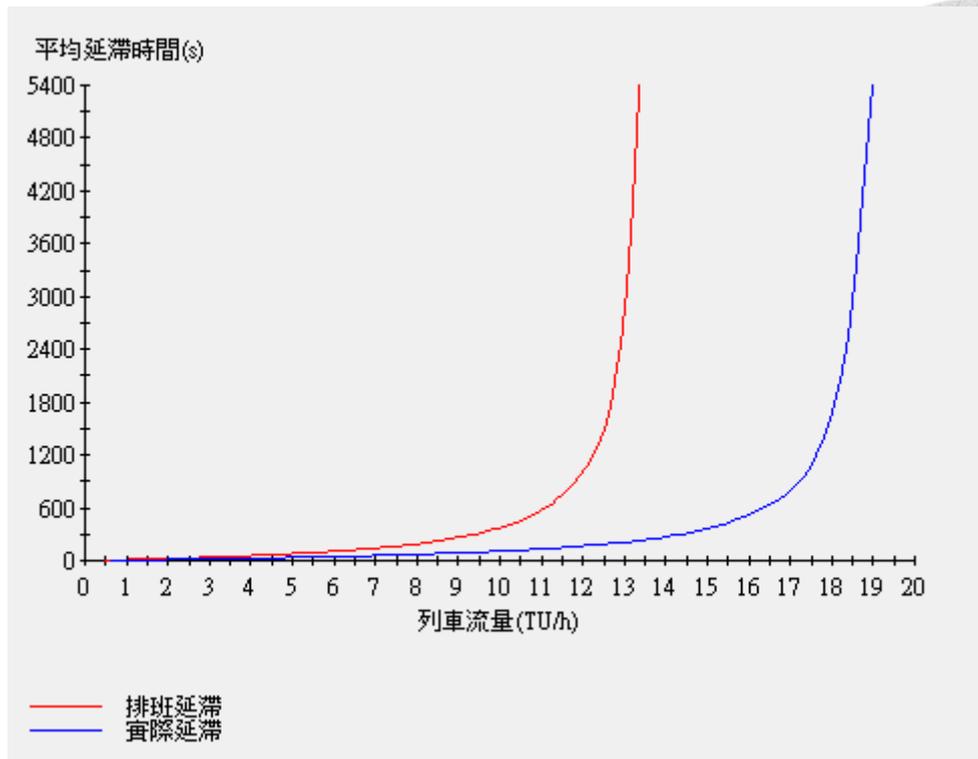


圖 4.2 營運延滯可靠度分析圖(樹林至板橋上行路段)

4.1.4 平衡點與最佳服務計畫分析成果

於本節中將分析成果再分為兩種情境，4.1.4.1 即單獨考量使用者觀點之最佳平衡點分析結果。而 4.1.4.2 之分析情境為同時考量使用者與營運者之分析結果。此兩種不同觀點之分析情境將在後續分別說明。

然而無論採用何種分析觀點，在進行最佳化求解前必須先整理所有輸入參數，除了前述的實用容量分析成果、事故容量分析成果以及營運延滯外，另外也需要旅次起訖矩陣、對號車使用量、期望延滯時間等資料。旅客起訖矩陣使用的是民國 99 年 4 月分某上班日尖峰小時資料。由於，此分析案例為台鐵路網其中一段，故在處理旅次資料部分相對較捷運案例分析複雜。在此將旅次依對號與非對號列車分為兩部分，並將非對號列車之旅次歸屬於通勤旅次，其分析範圍為基隆至新竹段及樹林至蘇澳新站路段，此兩部份分別代表東西部之非對號車服務範圍。在這些旅次中僅分析有通過七堵至樹林段之旅次，考量其於該路段間所受之延滯時間。至於等車時間之部分僅考量於七堵至樹林間上車之非對號列車旅客。另一方

面於路段上仍有許多搭乘非對號列車之旅次，此一部份皆視為非勤勤旅旅次。僅考量其在此分析路段所受之延滯時間。下表 4.6 與表 4.7 為旅次起訖矩陣。表 4.6 為所有須考量其等候時間之旅次，為七堵至樹林間上車之非對號列車旅客，若該旅次迄點於路段外則會加以合併。舉例而言，若為由樹林至基隆之旅次，則會在下表中合併入樹林至七堵之旅次中，以利後續進行分析運算。另一方面，表 4.7 為所有需要考量其延滯時間之旅次，簡而言之為，通過該路段上之所有旅次數量，故包含表 4.6 之旅次。此外即便該旅次起訖點皆不在分析路段中，但其旅次通過該分析路段，則同樣合併至表 4.7 之旅次矩陣中，舉例而言，若為基隆至台中之旅次，因為其跨越完整之分析路段，故將其計算入七堵至樹林之旅次數中。其他情況依此類推。

表 4.6 旅次起訖矩陣(等候時間計算)

OD	七堵	汐止	南港	松山	臺北	萬華	板橋	樹林
七堵		50	66	130	234	11	32	24
汐止	153		20	171	480	25	65	58
南港	172	15		5	126	16	22	70
松山	215	163	3		198	21	73	273
臺北	521	500	106	190		7	50	2,465
萬華	35	30	20	23	5		5	195
板橋	93	70	23	72	48	3		794
樹林	31	19	22	73	537	53	132	

表 4.7 分析路段中所有旅次起訖矩陣(延滯時間計算)

OD	七堵	汐止	南港	松山	臺北	萬華	板橋	樹林
七堵		189	208	379	1,366	43	209	215
汐止	200		20	172	484	25	66	58
南港	254	16		6	126	16	22	70
松山	543	164	3		207	22	77	274
臺北	3,125	503	106	202		7	58	2,473
萬華	204	30	20	24	5		6	196
板橋	932	70	23	77	53	3		798
樹林	277	19	22	75	547	54	134	

此外在此案例分析中，假定對號列車使用量為固定來進行非對號列車服務計畫之最佳化。下表為根據臺灣鐵路局所公布之時刻表進行整理後之各路段對號列車數量。



表 4.8 各路段尖峰小時對號列車使用量(列車)

		上行				下行				
時段		7		8		時段		8		
車種		莒光	自強	自強	莒光	車種	莒光	自強	自強	莒光
板橋-樹林	0	5	1	6	七堵-汐止	0	7	2	4	
萬華-板橋	1	4	0	5	汐止-南港	1	6	2	4	
臺北-萬華	1	4	0	5	南港-松山	1	5	2	4	
松山-臺北	1	3	0	6	松山-臺北	1	5	1	4	
南港-松山	2	3	0	6	臺北-萬華	1	3	1	5	
汐止-南港	2	3	0	5	萬華-板橋	1	3	1	5	
七堵-汐止	2	3	0	5	板橋-樹林	1	3	0	6	

根據 3.1.3 小節中所述之期望延滯計算方式，再搭配路段上之旅次，可以求出各路段上在不同非對號列車使用量下，旅客所受之總期望延滯時間，分析整理結果如下表 4.9。

表 4.9 不同非對號列車使用數下之旅客總期望延滯時間

車輛數\時段	上行		下行	
	7	8	7	8
6	34,587	37,895	32,437	26,255
5	25,325	30,481	25,486	19,524
4	18,933	19,633	19,056	14,804
3	14,018	14,417	13,136	11,764
2	10,548	11,218	10,335	9,325
1	7,535	8,751	7,882	6,989

4.1.4.1 情境一：單純以使用者觀點分析結果

對於單純以使用者觀點進行分析之分析模式於第三章中已有探討，對於穩定度與效率分析模式而言，不同情境分析方式並無差異。而於最佳化分析模式則須有所修正，其修正方式乃是將 3.2.3 節中服務計畫最佳化線性模式中之目標式

(3.48 式)中關於營運者成本之部分移除，此外由於此時僅考量使用者之部分，故旅客成本之項目可以直接以時間為單位進行分析，無須再轉換為旅行時間價值，其修改之目標式如 4.1 式所示。而其餘限制式(3.49 式~3.57 式)之部分則維持不變。分析結果如表 4.10 所示。

$$Min \left[\sum_{l \in N} \sum_{m \in N} (w_{lm} + T_{im}) Q_{lm} + \sum_{(i,j) \in A} (w'_{ij} + \sum_n D_{ij}^n x_{ij}^n P_{ij}) \right] \quad (4.1)$$

非對號列車數為經最佳化分析後之最佳服務頻率，加總該時段上對號列車數(表 4.8)即可得知該路段上總使用列車數量，由表中分析結果，可以發現上下行分析結果相近，皆介於 3~4 列車。

表 4.10 各路段各時段最佳使用量(列車/小時)

路段	上行				下行			
	七點~八點		八點~九點		七點~八點		八點~九點	
	非對號 車數	總列 車數	非對號 車數	總列 車數	非對號 車數	總列 車數	非對號 車數	總列 車數
七堵-汐止	3	8	3	8	4	11	4	10
汐止-南港	3	8	3	8	4	11	4	10
南港-松山	3	8	3	9	4	10	4	10
松山-臺北	3	7	3	9	4	10	4	9
臺北-萬華	3	8	3	8	4	8	4	10
萬華-板橋	3	8	3	8	4	8	4	10
板橋-樹林	3	8	3	10	4	8	4	10

根據上表分析結果與 4.1.1 小節中所知之路線上實用容量可以計算路線上之容量使用效率，其分析結果如表 4.11 與圖 4.3。由表與圖之分析結果可以發現，四組分析結果使用效率維持在 0.68~0.78 間，此一分析結果平均數值與過往文獻依經驗所建議之數值相近。若仔細探討各路段使用率可以發現七堵至汐止段為明顯之瓶頸，該路段及便於最佳解中之使用率仍超過百分之百。若能提升此路段之

容量，則可以提供更高之服務頻率。



表 4.11 容量使用效率

路段	上行		下行	
	七點~八點	八點~九點	七點~八點	八點~九點
七堵-汐止	1.01	1.01	1.15	1.05
汐止-南港	0.75	0.75	0.99	0.90
南港-松山	0.51	0.57	0.59	0.59
松山-臺北	0.55	0.71	0.77	0.70
臺北-萬華	0.60	0.60	0.60	0.75
萬華-板橋	0.75	0.75	0.62	0.77
板橋-樹林	0.61	0.77	0.54	0.68
平均	0.68	0.74	0.75	0.78

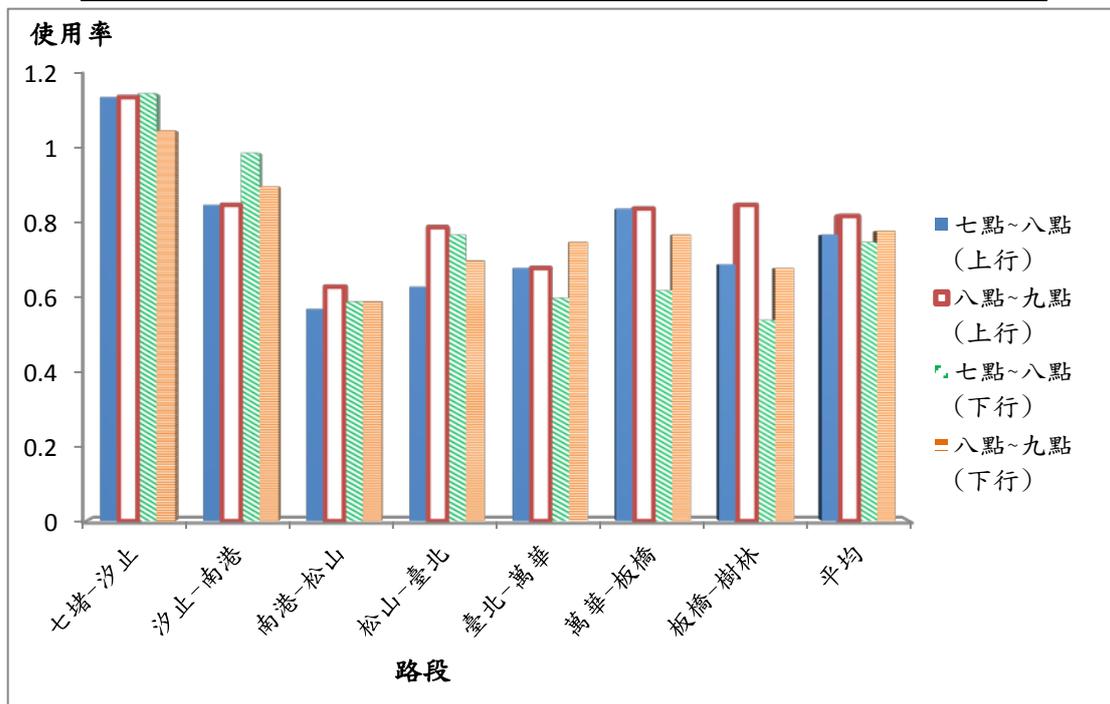


圖 4.3 使用率分析結果比較

4.1.4.2 情境二：同時考量使用者與營運者觀點分析結果

由於在本節將同時探討兩種使用者觀點，因此須將旅行時間成本經時間價值

轉換為以金錢為單位進行衡量，以利模式中將營運成本與使用者成本同時進行考量。關於乘客旅行時間價值部分，本研究引用交通部運研所(2011)交通建設計畫經濟效益評估手冊之建議時間價值，其中建議城際時間價值為 2.95 元/每人每分鐘，都會時間價值為 1.97 元/每人每分鐘。該研究中所計算之時間價值為 2009 年幣值。故與本研究之分析時段相符。營運成本因無法取得細項之成本資料，故本研究乃用該營運業者所公布之運輸成本除以里程作為單位里程之運輸成本。根據該臺鐵統計資料中，99 年度營運成本為 252 億 7,862 萬元，總里程數為 4,420 萬 1,104 延車公里，故根據計算其營運成本為 572 元/延車公里。利用上述資料進行最佳化求解，所得之各路段各時段分析結果如表 4.12 所示。

表 4.12 各路段各時段最佳使用量(列車/小時)

路段	上行				下行			
	七點~八點		八點~九點		七點~八點		八點~九點	
	非對號 車數	總列 車數	非對號 車數	總列 車數	非對號 車數	總列 車數	非對號 車數	總列 車數
七堵-汐止	3	8	3	8	4	11	4	10
汐止-南港	3	8	3	8	4	11	4	10
南港-松山	3	8	3	9	4	10	4	10
松山-臺北	3	7	3	9	4	10	4	9
臺北-萬華	3	8	3	8	4	8	4	10
萬華-板橋	3	8	3	8	4	8	4	10
板橋-樹林	3	8	3	10	4	8	4	10

將上表之分析結果其與情境一之相比進行比較，發現兩者最佳解相同。故此情境之最佳使用效率亦與表 4.11 相同。為探究其原因，本研究亦對最佳解所分析之結果進行更深入之探討。表 4.13 為最佳解之總成本組成分析並於表中以百分比呈現。表中前四項：表定旅行時間成本、期望延滯成本、營運延滯成本、等候時間成本皆為為旅客成本。由分析結果可以發現表定旅行成本之部分並無太大

差異，而對於營運者成本之部分亦差距不大。僅因上下行列車使用情境不同故於期望延滯時間與營運延滯兩者差異較大。若單以旅行者成本與營運者成本區分可以發現在各案例中其營運者成本所佔比例極低，故在此案例中營運者成本對系統最佳平衡點影響較小，因此在臺鐵案例中無論是否考量營運者成本成果相同，關於營運成本對最佳平衡點之影響相關內容亦會於敏感度分析進行探討。

表 4.13 臺鐵案例最佳解總成本組成分析(萬元)

成本項目	上行		下行	
	七點~八點	八點~九點	七點~八點	八點~九點
表定旅行時間成本	15.85 (40%)	15.85 (39%)	16.61 (38%)	16.61 (38%)
期望延滯時間成本	2.76 (7%)	2.84 (7%)	4.67 (11%)	6.34 (15%)
營運延滯時間成本	8.02 (20%)	9.36 (23%)	6.30 (14%)	3.87 (10%)
等候時間成本	6.55 (17%)	6.88 (17%)	8.42 (19%)	8.42 (19%)
營運者成本	5.99 (16%)	5.99 (15%)	7.99 (18%)	7.99 (18%)

4.1.5 區域鐵路案例分析小結

根據上述分析結果，可以得知當系統穩定度與效率平衡時之最佳使用量，以下將分析結果與實務營運狀進行比較。目前系統之使用效率如表 4.14 所示。由現行使用情形可知在上午尖峰時段，路線上之容量使用率約在百分之九十左右，且於容量瓶頸之七堵至汐止段，其使用效率皆高於百分之百，而於汐止至南港段亦在某些情境下實際使用量超出實用容量。若與表 4.10 之分析結果相比，可以發現實際使用量皆高於最佳使用量。由於本研究分析臺鐵案例時所採用之方式為固定對號列車，以最佳化模式求解非對號列車使用量。故表中實際運用與最佳解之差異主要來自於路段上使用非對號列車數量之差異。

表 4.14 實際容量使用率(臺鐵)

	上行		下行	
	七點~八點	八點~九點	七點~八點	八點~九點
七堵-汐止	1.26	1.26	1.26	1.26
汐止-南港	0.94	0.94	1.18	1.05
南港-松山	0.63	0.76	0.65	0.71
松山-臺北	0.79	0.94	0.85	0.85
臺北-萬華	0.83	0.75	0.67	0.89
萬華-板橋	1.03	0.94	0.69	0.93
板橋-樹林	0.85	1.08	0.61	0.81
路線平均	0.90	0.95	0.84	0.93

表 4.15 為深入探討兩者對非對號列車使用量之比較表。由表中之分析結果可以發現，實際運用與最佳解之差距約為 2 至 3 列車，依路段與時段差異略有不同。然而穩定度與效率間存在權衡關係，因此本研究將再對穩定度進行比較與探討。

表 4.15 最佳平衡點與實務運用非對號列車使用量之比較

路段	上行				下行			
	七點~八點		八點~九點		七點~八點		八點~九點	
	最佳解	實際	最佳解	實際	最佳解	實際	最佳解	實際
七堵-汐止	3	6	3	6	4	5	4	6
汐止-南港	3	6	3	5	4	6	4	5
南港-松山	3	6	3	5	4	5	4	6
松山-臺北	3	6	3	6	4	5	4	6
臺北-萬華	3	5	3	6	4	5	4	6
萬華-板橋	3	5	3	6	4	5	4	6
板橋-樹林	3	5	3	6	4	5	4	6

採用較高之使用效率所帶來之後果可能會造成系統穩定度之下降。表 4.16 為實際營運下與最佳解情境下之系統穩定度之比較。表中所示之數值為使用本研究分析方法所計算於該分析時段中之所有旅客期望延滯與營運延滯之總和，亦可作為該情境下系統穩定度之指標。

表 4.16 臺鐵現行營運狀況與最佳解穩定度(總延滯)比較

	上行		下行	
	七點~八點	八點~九點	七點~八點	八點~九點
模式最佳解	54,714	61,950	55,658	51,933
實際營運狀況	114,228	135,498	106,943	78,393

表中所使用之數值單位為分鐘

由上表中之結果可以發現實際運用情況之穩定度皆比最佳解之結果差，大部分情境下實際狀況之總延滯時間皆比最佳解約高出一倍。此結果即為容量使用效率上升所帶來之後果。然而單就穩定度與效率分析結果(表 4.13 與表 4.15)並無法說明最佳解為何較實際運用好，此亦為本研究建立最佳化模式進行分析之主要目的與貢獻。最佳化分析模式中之目標式為最小化總旅行成本，表 4.17 即為最佳解與實際運用情況之總成本比較。

表 4.17 最佳解與實際運用情況之總成本比較

	上行		下行	
	七點~八點	八點~九點	七點~八點	八點~九點
模式最佳解	470,344 元	409,250 元	439,800 元	426,912 元
實際營運狀況	551,247 元	572,633 元	537,514 元	444,820 元

事實上由於最佳使用列車數量明顯低於實際使用數量，本研究亦檢核最佳解之使用量與各路段旅客數量關係，發現在大部分路段皆可提供足夠之服務，僅在板橋至樹林路段會出現略低於旅客數量之情況。此時雖會造成旅客等候時間增加，但此增加之成本極低，因此幾乎不會對最佳平衡點有所影響。若以台鐵捷運化之角度而言，此一分析結果可見最佳服務計畫所提供之發車頻率無法滿足此一需求，

若勉強提高使用量則會造成系統穩定度下降。而於後續章節中進行敏感度分析。藉以探討各項參數或可靠度提升對於系統之影響。



4.2 捷運系統案例分析

在捷運系統案例分析之中路線上的車輛組成較為單純，此外路線上之車站型式差異不大且多為第四型之車站，因為其通常無交會代避之需求，路線上之橫渡線亦有限。其停站模式多採站站停之型式，但若路線長度較長時，同一路線上亦有可能包含不同起訖點之停站模式，本研究中稱其為不同之服務起訖模式。以本研究之案例分析對象為例，其中下行於上午尖峰小時中會有三種起訖點不同之服務起訖模式，包含一種停靠路線上所有車站之模式，以及兩種短程僅在旅客數量較為密集區域運行之列車。故在此案例分析中本研究將會考量多種服務起訖模式之分析。因後續將以臺鐵與捷運系統分析結果進行比較，所以同樣採用晨峰為分析時段，並依該系統本身之認定以上午八點至九點為其尖峰小時。4.2.1 節將對其路線及系統特性做詳細介紹。4.2.2 節為實用容量與事故容量分析之結果。4.2.3 節為該系統可靠度分析之結果。4.2.4 節則為最佳化模式求解與平衡點分析之成果，其中與臺鐵案例分析相同在此同樣分為兩種情境進行分析，即單純討論旅客觀點與營運觀點兩種。最後 4.2.5 節對於捷運系統案例分析成果做一小結。

4.2.1 分析範疇與假設

本研究所分析之捷運路線為一捷運路網中之單一線路，路線全長為 23.58 公里上，共計 21 站，其車站與橫渡線配置型式如圖 4.4 所示，共有七個剪式橫渡線與兩個袋狀儲車軌，此外於路線之兩端亦包含兩個機廠。其中車站 11、車站 13 與車站 14 為與其他捷運路線轉乘站，但其他路線另有其專用路線與股道，故路線上無不同路線銜接點之問題。該系統中之列車由兩個三車組(3- Car Unit)所組成，固定以六節車廂為一列車提供服務，其分析所需之列車參數於實用容量分析時會加以列舉。此外該捷運系統採用之號誌系統是用固定式閉塞號誌系統，列

車設置有自動列車控制系統 (Automatic Train Control, ATC)，該系統中包含自動列車保護 (Automatic Train Protection, ATP)、自動列車駕駛 (Automatic Train Operation, ATO)，以及自動列車監督 (Automatic Train Supervision, ATS) 等三個子系統。並且於車上配備速度碼式的自動列車保護系統。

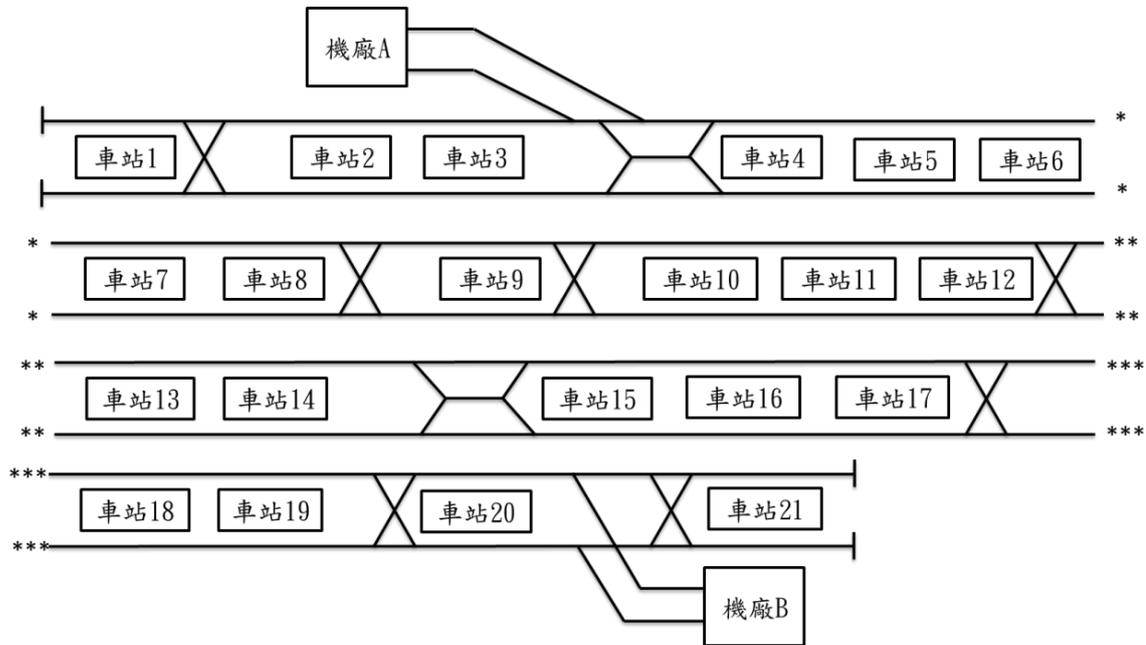


圖 4.4 捷運系統案例分析路線配置圖

4.2.2 實用容量與事故容量分析結果

實用容量分析時所採用之列車與系統之參數如表 4.18，依據表中參數與第二章文獻回顧所提及之分析方式可計算出每列車最大服務旅客數為 1,548.8 人。根據上述列車與系統參數，本研究亦蒐集路線坡度、速限與各區間長度以利進行實用容量與事故容量分析。分析方式乃是先計算各中間站車站之實用容量，其中兩端末車站(車站 1 與車站 21)則需額外考量其折返之容量，此外由於部分服務起訖模式須以車站 4 進行折返，故亦須進行計算其作為折返站時之容量。完成各車站容量分析後，在實用容量中將以兩相鄰車站為一分析單元，探討各路段之實用容量。

表 4.18 系統與列車參數

參數名稱	數值
解除進路、道岔轉轍、鎖定進路等之道岔及號誌聯鎖時間	5 (秒)
號誌系統及列車控制的反應時間	2 (秒)
列車間乘載變異因子	0.8
運轉寬裕時間係數	0.1
列車於中央避車線(或尾軌)折返停靠時間	60 (秒)
列車車身長	141 (公尺)
列車加速度	1 (公尺/秒 ²)
列車減速度	1 (公尺/秒 ²)
煞車有效因子	0.75
座位數	352
立位面積	264 (公尺 ²)
乘載水準	6 (人/公尺)

實用容量分析結果如表 4.19，由分析結果可以看系統中容量之瓶頸出現於「車站 12-車站 13」與「車站 13-車站 14」此乃因車站 13、14 為轉乘站，雖然路線並無相連，然而因為轉乘站之旅客上下列車數量較高，該系統中列車於各轉乘站之平均停站時間為 45 秒，約為其他車站之 2 倍左右。故對容量產生影響，此一現象與文獻中推測路線上可能之瓶頸點相符合。另外，折返站在本研究分析中雖非容量瓶頸點，但相對於一般車站其實用容量也確實較低。

表 4.19 實用容量分析結果(單位：列車/小時)

路段	上行	下行	路段	上行	下行
車站 1- 車站 2	35.26	35.26	車站 11-車站 12	31.85	31.85
車站 2- 車站 3	42.08	38.32	車站 12-車站 13	29.64	29.64
車站 3- 車站 4	42.08	38.32	車站 13-車站 14	29.64	29.64
車站 4- 車站 5	42.09	38.32	車站 14-車站 15	31.85	31.85
車站 5- 車站 6	42.09	38.32	車站 15-車站 16	42.08	42.08
車站 6- 車站 7	42.08	42.08	車站 16-車站 17	42.08	42.08
車站 7- 車站 8	42.08	38.32	車站 17-車站 18	38.32	38.32
車站 8- 車站 9	38.32	38.32	車站 18-車站 19	38.32	38.32
車站 9-車站 10	38.32	38.32	車站 19-車站 20	38.10	41.82
車站 10-車站 11	31.85	31.85	車站 20-車站 21	33.76	33.76

事故容量分析部分，因為該捷運系統中皆為第四型之車站，若事故發生於車站，單股道事故會導致車站配置變成第六型月台，而雙股道事故則會成為第七型月台，此時事故容量為零。表 4.20 為事故容量分析之結果。有鑑於捷運路線特性與臺鐵之不同，當事故發生後，受到橫渡線位置與數量之影響，必須相鄰之橫渡線間接視為一個分析單元，故在本研究中，依據橫渡線所在位置將車站與其路線加以分組，在各組內其相同事故所造成之事故容量相同。而需要特別注意的乃是路線兩端至末端車站，因兩車站皆為站前折返及橫渡線在車站前，故當事故發生於兩車站內時，其將各自獨立為一分析單元，此一方式分組後如表 4.20 所示共可分為 10 組。

另一方面本研究對捷運系統事故發生後單線運轉營運方式進行探討如圖 4.5 所示。分析上下行以各一列車輪流交替發車之情境(a)，以及上下行同樣輪流發車但是每方向連續發兩列車之情境(b)。事實上，該系統實務在發生事故時多採用(b)之營運方式，大多情況下其平均班距較低，而可使事故容量較高，可以快速消化事故當下累積於月台之旅客，但實務上仍會視月台上受影響旅客數量而定。不過此發車方式於折返站則不一定成立，由分析結果可以發現其容量不會較高，在此案例分析中，因為折返站為站前折返之型式，故當車站內發生事故時，將由原本的站內利用不同股到折返之情境改為使用同一股道折返。此時根本無法容納連續

兩班同方向列車，因為站內於僅有一股道可供折返，故表 4.20 中其事故容量顯示為零。本研究後續分析時除兩折返站外，各路段皆會採用(b)之營運模式所得之事故容量進行分析。

表 4.20 捷運系統事故容量分析結果(單位：列車/小時)

組別	路段	事故容量 (1-1)		事故容量 (2-2)	
		上行中斷	下行中斷	上行中斷	下行中斷
1	車站 1-車站 2	6.14	6.27	9.41	9.55
	車站 2-車站 3	6.14	6.27	9.41	9.55
	車站 3-車站 4	6.14	6.27	9.41	9.55
2	車站 4-車站 5	3.62	3.59	6.14	6.09
	車站 5-車站 6	3.62	3.59	6.14	6.09
	車站 6-車站 7	3.62	3.59	6.14	6.09
	車站 7-車站 8	3.62	3.59	6.14	6.09
3	車站 8-車站 9	8.30	8.11	11.58	11.40
4	車站 9-車站 10	4.91	4.86	7.51	7.45
	車站 10-車站 11	4.91	4.86	7.51	7.45
	車站 11-車站 12	4.91	4.86	7.51	7.45
5	車站 12-車站 13	6.63	5.91	9.16	8.45
	車站 13-車站 14	6.63	5.91	9.16	8.45
	車站 14-車站 15	6.63	5.91	9.16	8.45
6	車站 15-車站 16	6.81	6.90	10.29	10.40
	車站 16-車站 17	6.81	6.90	10.29	10.40
7	車站 17-車站 18	7.10	7.07	10.37	10.33
	車站 18-車站 19	7.10	7.07	10.37	10.33
	車站 19-車站 20	7.10	7.07	10.37	10.33
8	車站 20-車站 21	12.42	12.44	15.31	15.32
9	車站 1	29.64	23.70	0.00	0.00
10	車站 21	17.01	17.83	0.00	0.00

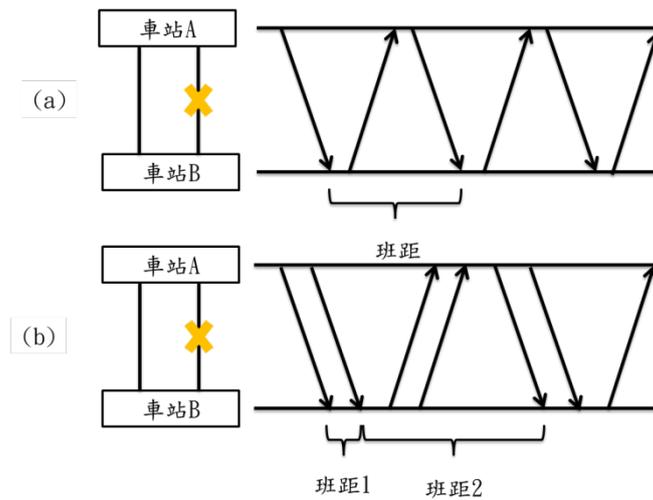


圖 4.5 單線運轉運行模式示意圖

4.2.3 可靠度分析結果

相對於臺鐵而言，捷運系統之可靠度明顯較高，本研究統計並整理民國 97 年 1 月至民國 99 年 12 月該系統之事故資料，根據該系統營運者定義，當列車延滯超過五分鐘時才紀錄為事故延滯，符合條件所紀錄之發生件數共 34 筆。其事故發生地點統計如表 4.21。其所占比例將做為後續加總所需之權重。

表 4.21 事故發生地點統計

發生地點	次數	比例
車站	31	91%
路線	2	6%
車站+路線	1	3%
總計	34	100%

跟據過往資料，該系統中共有 10 類事故，本研究將性質相似項目合併，再依集群分析法之方式，整理並進行可靠度分析後結果如表 4.22。表中可知該系統最常發生之事故原因乃是旅客跳軌自殺，依其中斷後之影響分為兩個等級。分析其特性，該事故僅會發生於車站中。而其他事故項目則不論於車站或路線上皆有可能發生。

表 4.22 可靠度分析結果整理

故障原因分類	發生次數	中斷時間(分鐘)	MTBF(分鐘)	λ	車站事故	路線事故
旅客跳軌自殺一	10	10	164,620	6.07E-06	V	X
旅客跳軌自殺二	6	20	153,539	6.51E-06	V	X
電聯車故障	9	8	175,029	5.71E-06	V	V
號誌故障	2	10	857,713	1.17E-06	V	V
電纜火災	1	15	1226,235	8.16E-07	V	V
其他	6	8	271,589	3.68E-06	V	V

另一方面，非因事故所產生之營運延滯，在本案例分析中因無既有之分析軟體可供使用。本研究參考第三章中圖 3.11 之模擬流程，進行修改後於 Excel 中撰寫 VBA 進行分析。由於此捷運系統中僅有一種列車，固可省略原有步驟一、二之決定列車車種部分，可以直接模擬列車間隔，計算列車平均延滯。其修改後之流程如下圖所示。本研究中設定模擬列車數為 5000，並且每模擬 10 列車後更換亂數種子。搭配路段之容量其分析結果可得到各使用量下之列車延滯。

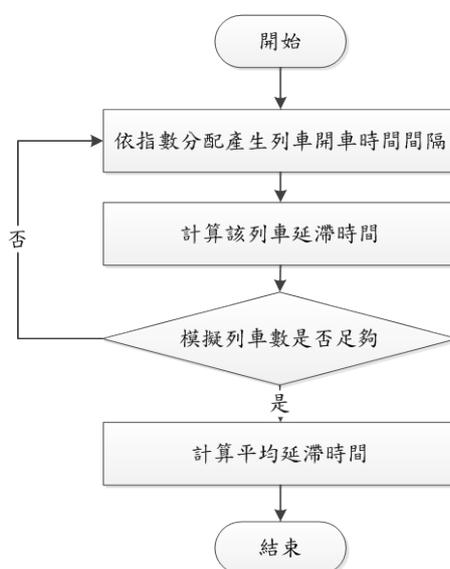


圖 4.6 捷運案例分析營運延滯模擬流程圖

4.2.4 平衡點與最佳服務計畫分析成果

不論是否考量營運者成本，在進行平衡點計算前皆須先將各項輸入參數準備完成。包含各路段上使用量所對應之期望延滯時間與營運延滯時間、上下行旅次

起訖矩陣、各路段旅客數量、停站模式組合…等。表 4.23 與圖 4.7 為上下行各路段旅客數，該旅客數經由旅次起訖矩陣推算而來。本案例分析中所採用之旅客資料乃是根據民國 99 年該系統中 9 月份上班日平均尖峰小時旅次資料。另外，各路段不同使用量下之上行期望延滯時間與營運時間之加總如表 4.24。本研究計算使用量 1 列車至 42 列車所對應之延滯時間，由於表格過於龐大，表 4.24 僅列舉上行部份內容。

表 4.23 上下行各路段尖峰小時旅客數(人)

路段	上行	下行	路段	上行	下行
車站 1- 車站 2	1,197	2,575	車站 11-車站 12	11,638	38,847
車站 2- 車站 3	1,410	3,629	車站 12-車站 13	12,715	36,331
車站 3- 車站 4	1,674	7,072	車站 13-車站 14	13,223	33,225
車站 4- 車站 5	2,364	9,845	車站 14-車站 15	10,342	23,280
車站 5- 車站 6	2,894	14,116	車站 15-車站 16	10,375	18,266
車站 6- 車站 7	4,170	17,519	車站 16-車站 17	9,895	14,598
車站 7- 車站 8	5,011	25,147	車站 17-車站 18	8,867	6,155
車站 8- 車站 9	5,584	28,718	車站 18-車站 19	6,775	4,765
車站 9-車站 10	5,997	31,351	車站 19-車站 20	4,646	3,924
車站 10-車站 11	9,395	31,489	車站 20-車站 21	2,085	1,046

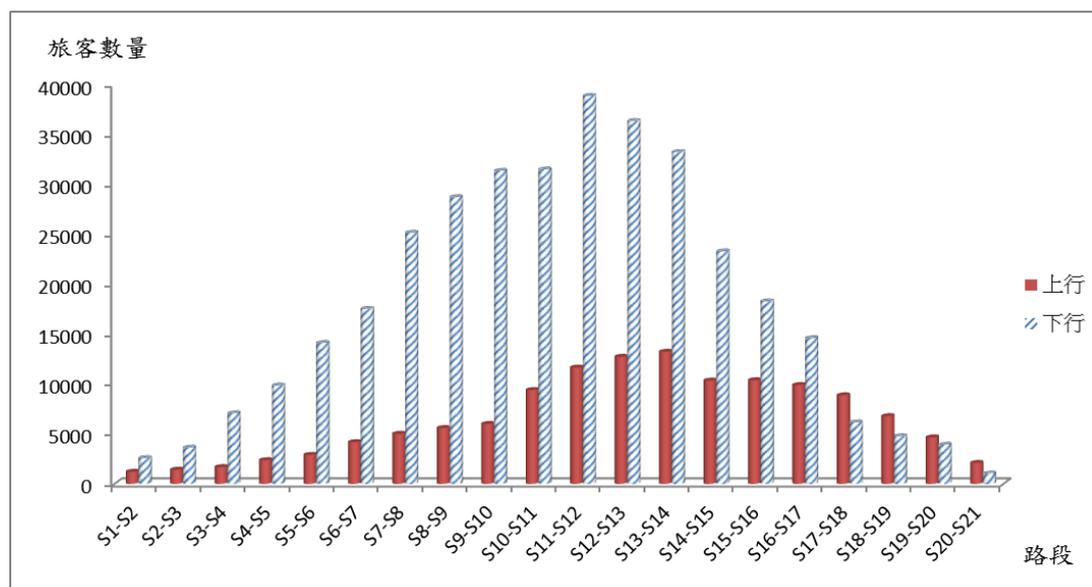


圖 4.7 各路段旅客數軸圖

由上表與圖可以發現該系統在晨峰時有極為明顯之方向性，下行之旅客數為

56,584 人，而上行旅客數僅 25,373 人。下行旅客數為上行旅客數之兩倍多。此外無論為上行或下行，對於轉乘站所夾之路段(車站 11~車站 14 間)旅客數明顯高於其他路段。於最佳化模式中上下行將分開求解，有鑑於旅客分布特性以及系統實際營運狀況，兩方向各自包含三組服務起訖模式皆為車站 1 至車站 21、車站 4 至車站 21 與車站 11 至 21，各模式皆為站站停，僅起訖點不同，如下圖 4.8 所示。

表 4.24 路段使用量與延滯時間(分鐘)

路段	使用量							
	1	2	...	13	14	...	41	42
車站 1-車站 2	0.0000	0.0001	...	0.0031	0.0036	...	0.3540	0.4539
車站 2-車站 3	0.0001	0.0001	...	0.0035	0.0040	...	0.5031	0.8713
車站 3-車站 4	0.0001	0.0003	...	0.0050	0.0060	...	1.7641	2.0415
車站 4-車站 5	0.0001	0.0002	...	0.0040	0.0045	...	1.4265	1.5501
車站 5-車站 6	0.0002	0.0004	...	0.0054	0.0061	...	0.2934	0.5905
車站 6-車站 7	0.0001	0.0002	...	0.0038	0.0045	...	0.1450	0.2226
車站 7-車站 8	0.0002	0.0004	...	0.0063	0.0075	...	6.5324	6.8465
車站 8-車站 9	0.0002	0.0004	...	0.0061	0.0074	...	6.8735	7.0710
車站 9-車站 10	0.0002	0.0005	...	0.0078	0.0102	...	7.8400	8.4962
車站 10-車站 11	0.0002	0.0005	...	0.0073	0.0086	...	5.8044	6.2693
車站 11-車站 12	0.0002	0.0005	...	0.0071	0.0081	...	7.2345	7.2404
車站 12-車站 13	0.0001	0.0003	...	0.0061	0.0072	...	2.8249	3.1329
車站 13-車站 14	0.0001	0.0002	...	0.0042	0.0049	...	0.6044	0.8647
車站 14-車站 15	0.0002	0.0004	...	0.0077	0.0091	...	0.1696	0.3772
車站 15-車站 16	0.0001	0.0003	...	0.0044	0.0047	...	0.1128	0.2763
車站 16-車站 17	0.0001	0.0002	...	0.0044	0.0051	...	0.0717	0.1812
車站 17-車站 18	0.0002	0.0004	...	0.0053	0.0063	...	0.1887	0.5536
車站 18-車站 19	0.0036	0.0039	...	0.0054	0.0065	...	0.2042	0.4642
車站 19-車站 20	0.0042	0.0050	...	0.0070	0.0076	...	0.2935	0.7078
車站 20-車站 21	0.0034	0.0039	...	0.0055	0.0064	...	2.7093	2.9878

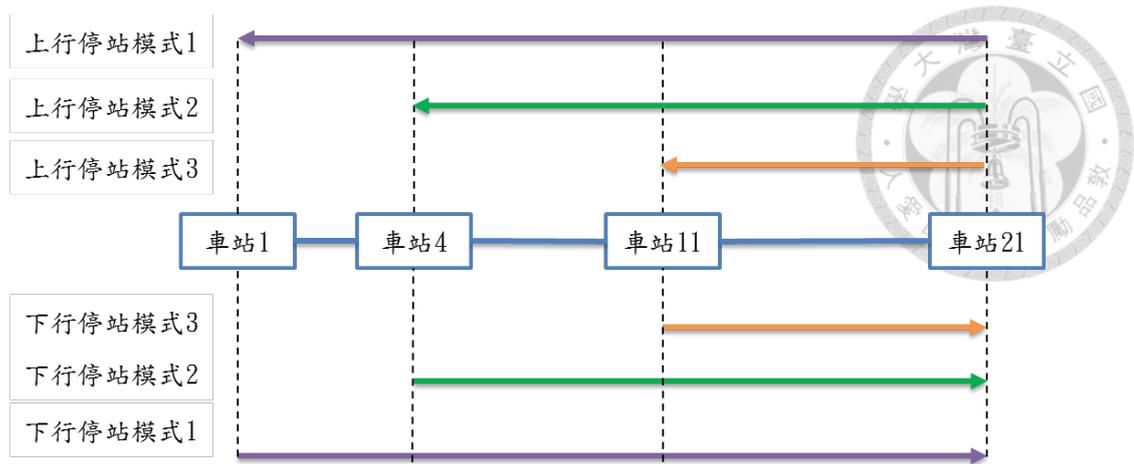


圖 4.8 服務起訖模式示意圖

4.2.4.1 情境一：單純以使用者觀點之分析結果

此一情境分析如同臺鐵案例中所提到，將服務計畫線性化模式之目標式做修改如 4.1 式，模式中其他部分則不做更動。而分析結果則如表 4.25 所示，在最佳化服務計畫中無論上下行其最佳解分析結果皆選用服務起訖模式 1，此服務起訖模式為站站停且停靠路線所有車站，而在此種使用量下所對應之系統容量使用效率為 88%。

表 4.25 最佳解中各服務起訖模式發車頻率(列車/小時)

	服務起訖模式 1 車站 1 ↔ 車站 21	服務起訖模式 2 車站 4 ↔ 車站 21	服務起訖模式 3 車站 11 ↔ 車站 21
上行	26	0	0
下行	26	0	0

由上述之分析結果，本研究認為其可能之原因為在系統穩定度極高的情況下，提高容量使用效率對系統之穩定度影響並不顯著，此情況直到容量使用率接近九成與系統實用容量極為相近時才會受到影響。

4.2.4.2 情境二：同時考量使用者與營運者觀點之結果

為同時考量營運者與使用者觀點，在此同樣必須探討旅客時間價值用以轉換

為時間成本之衡量單位轉換為金錢。關於時間價值部分，本研究同樣如臺鐵案例分析引用交通部運研所(2011)交通建設計畫經濟效益評估手冊之建議時間價值，其中建議城際時間價值為 2.95 元/每人每分鐘，都會時間價值為 1.97 元/每人每分鐘。營運同樣採用該營運業者所公布之運輸成本除以里程作為單位里程之運輸成本。根據該捷運公司 2010 年報該年度營運成本為 984 億 6,172 萬元，總里程數為 1,579 萬 6,781 延車公里，據此計算其平均營運成本為 623.3 元/延車公里。

將上述資料代入最佳化分析求解中。表 4.26 為整理後之分析結果，其中上行最佳解各服務起訖模式發車頻率分別為 6、4、2(列車/小時)。而下行各服務起訖模式發車頻率為 11、10、5(列車/小時)。各路段之實際使用量與其相對應之使用效率如表 4.27。

表 4.26 最佳解中各服務起訖模式發車頻率(列車/小時)

	服務起訖模式 1 車站 1 ↔ 車站 21	服務起訖模式 2 車站 4 ↔ 車站 21	服務起訖模式 3 車站 11 ↔ 車站 21
上行	6	4	2
下行	13	8	5

表 4.27 最佳解中各路段間使用量(列車/小時)

		路段			
		1 ↔ 4	4 ↔ 11	11 ↔ 21	平均
上行	使用量	6	10	12	
	使用率	20%	34%	40%	34%
下行	使用量	13	21	26	
	使用率	44%	71%	88%	74%

由最佳平衡點分析結果可以發現，情境二之分析結果與情境一有極大之差異，首先不論上下行在情境二中三種停站模式都有被使用到，此一結果反映不同路段上旅客數差異性，在考量營運者成本的前提下，營運者應會避免不必要之浪費而將服務模式一(停靠所有車站)之列車數減少，然後在旅客數量較高之區域增加短

程服務起訖模式之列車發車頻率。另外對比上下行之最佳服務計畫，兩者之最佳使用量差異極大，此乃兩方向旅次差異量極大所造成，當將營運成本納入考量後此時即便使用效率上升不會使系統穩定度幅度下降，但由於模式中有考量營運者之成本，故當需求量較小時，為避免不必要之運能浪費，分析所得之結果自然會傾向減少發車數量，此時分析之結果不再僅受到穩定度與容量使用效率影響，對於系統營運者所提供之運能使用效益也會對最佳平衡點產生影響。

4.2.5 捷運系統案例分析小結

由於在實際營運上營運者應會考量其服務計畫對其自身之影響，因此情境二所分析之狀況應與實際情況較為符合。故以下以情境二中之分析結果與實際狀況進行相對比較，表 4.28 為各路段上本研究分析之最佳解與實際使用之使用量。將兩者進行實際比較可以發現，於下行路段該捷運系統實際運用效率與分析之結果相近。而上行路段則差異較大。

表 4.28 分析結果與實際路段使用量比較

方向		路段		
		1 \longleftrightarrow 4	4 \longleftrightarrow 11	11 \longleftrightarrow 21
上行	最佳解	6	10	12
	實際使用	10	20	20
下行	最佳解	13	21	26
	實際使用	10	20	26.67

與臺鐵案例分析相同，本研究在此同樣探討兩者使用效率與穩定度之差異其中表 4.29 為使用率之比較。其結果與 4.28 呈現之情況相近，上行部分差異較大，在部分路段實際使用為接近最佳解之兩倍，而下行部分雖在整體使用量率相近，但在部分路段仍有些許差異存在。

表 4.29 分析結果與實際路段使用率比較

方向		路段			平均
		1 \longleftrightarrow 4	4 \longleftrightarrow 11	11 \longleftrightarrow 21	
上行	最佳解	20%	34%	40%	34%
	實際使用	34%	67%	67%	59%
下行	最佳解	44%	71%	88%	74%
	實際使用	37%	67%	90%	70%

另一方面，若以系統穩定度之觀點而言，路線上實際使用狀況與最佳解之穩定度比較如表 4.30。表中之數值同樣為期望延滯時間與營運延滯時間之加總，由表中之分析結果可以現，上行時由於其實際使用量遠高於最佳解，故其總延滯時間亦較最佳服務計畫下高，顯示其穩定度較低。而下行實際與最佳解容量使用情境相近，且最佳解之容量使用效率略高。所以於穩定度分析結果中兩種情境之穩定度相近，而實際之系統穩定度則略優於最佳解。

表 4.30 實際營運與最佳服務計畫系統穩定度(捷運)

		穩定度(總延滯時間)
上行	最佳服務計畫	594 (分鐘)
	實際使用	1,712 (分鐘)
下行	最佳服務計畫	8,065 (分鐘)
	實際使用	8,011 (分鐘)

然而僅就穩定度與效率分析結果無法說明為何模式所分析出結果為最佳解，於是本研究進一步對總成本進行分析比較如表 4.31。表中之最佳服務計畫總成本皆低於實際使用之情況，且分析結果上行差異較大，而下行之數值則相近，此與表 4.28 中容量使用量之分析結果相似。另一方面，對於上行路段分析之最佳服務計畫與實際使用差異較大。其可能原因有以下數點。首先，實務運用上需要考量兩方向發車平衡之問題，若單一方向列車發車數較另一方向高出許多，則列車將集中於某一端點處，若以本研究之系統為例，在尖峰時間時大量列車由車站 1 開往車站 21，但卻僅有少部分列車往反方向開。如此營運模式，在經過一段時

間後，列車會集中於車站 21 區域，則下個時段要從車站 1 往車站 21 發車時可能會面臨無車可發之困境。另一方面，該捷運系統可能有其最低服務頻率之要求，若採用最佳化分析之結果，上行方向班距最密處為 5 分鐘一班車，但在部分區間為 10 分鐘一班車之班距。上述發車平衡與最低服務班距限制並未量化或限制於最佳化模式中，故該營運系統中採用之服務計畫，其使用量會高於最佳平衡點。但不論如何，由分析結果可知，若同時考量營運者與使用者之成本時，系統中最佳服務計畫會受旅客數量之影響而有顯著之差異。

表 4.31 實際營運與最佳服務計畫成本比較(捷運)

		總成本(元)
上行	最佳服務計畫	290,847
	實際使用	316,002
下行	最佳服務計畫	504,336
	實際使用	559,294

4.3 最佳化模式求解

本研究利用 CPLEX 求解最佳化模式。為了驗證最佳化模式正確性，本研究同樣利用 Excel 撰寫 VBA 透過窮舉法列舉所有可能組合進行運算後，再尋找各種組合中之最小值。透過兩種方法進行分析求解後可求得相同之最佳服務計畫。此外本研究亦分析求解不同種停站模式比較兩者運算時間與求解結果。運算時間節模式之求解效率如下表 4.32。由表中結果可見利用窮舉法進行分析時，當服起訖模式組數越多時，因其組合數成指數成長故所需分析時間上升極快，若採用最佳化模式利用 CPLEX 求解，在 1~3 組服務起訖模式下時間皆差異不大且皆低於數秒鐘，因此若後續應用需考量更多停站模式或組合數量更複雜時，利用 CPLEX 求解最佳化模式為較快速且有效率之求解方式。

表 4.32 窮舉法與最佳化模式運算時間比較(捷運系統案例)

服務起訖模式	組合數	窮舉法(VBA)	最佳化模式(CPLEX)
1 組	42	數秒鐘	小於 0.1 秒
2 組	1,764	約 1 分鐘	小於 0.1 秒
3 組	74,088	約 10 分鐘	小於 1 秒

4.4 敏感度分析

本研究之敏感度分析將分別探討模式中不同參數對最佳平衡點與服務計畫之影響，在此主要以完整模式及各案例情境二之分析結果進行探討。4.4.1 節中為營運成本對最佳化平衡點之影響。4.4.2 節為旅行時間價值敏感度分析。4.4.3 節穩定度敏感度分析。

4.4.1 營運成本敏感度分析

本研究為分析營運成本對於最佳平衡點之影響，故進行營運成本分析。以下將分為數種情境進行探討。表 4.33 為臺鐵營運成本敏感度分析結果。

表 4.33 臺鐵營運成本敏感度分析

營運成本		572 元	0 元	500 元	1000 元	2000 元	5000 元	10000 元
每延車公里								
上	7~8	3	3	3	3	3	3	2
行	8~9	3	3	3	3	3	3	2
下	7~8	4	4	4	4	4	4	3
行	8~9	4	4	4	4	4	4	3

表中數值為通勤列車最佳使用量(列車/小時)

其中 0 元所代表之特別涵義為不考量營運者成本之最佳平衡點，此即 4.1.4.1 小節中所分析之情境，其分析結果與情境二最佳平衡點相同。而在臺鐵營運成本

敏感度分析中發現，調整營運成本最佳解幾乎無影響。重新檢視分析結果發現當營運成本上升時，其總成本亦會隨之上升，但最佳平衡點仍維持相同使用量。本研究中亦分析營運成本於總成本中所佔之百分比，如先前表 4.13 所示於現行實際狀況中各時段路段之最佳解其營運成本佔總成本約百分之 15 至 20 間，除此之外每增加或減少一列車之使用量對總成本之影響約僅有百分之 2 至 5 的影響。根據本研究檢視敏感度分析結果發現當營運成本在接近每延車公里 10000 元時，此平衡點才會有所下降，這時最佳平衡點之營運成本則接近 50%，增減一列車對總成本影響約有百分之 10 至 20。由此分析結果推測其營運成本對最佳平衡點之影響不大之原因可能為其佔成本之比例過小，列車數量增減對其總成本之影響也較小。當營運成本接近 10000 元時，才会有明顯之影響，然而此一數值與實際相差過大，故在此案例中，營運成本對最佳平衡點之影響極小甚至可視為無影響。另一方面捷運系統之分析如下表 4.34 與表 4.35。表格中數值代表使用量，其單位為列車/小時，而括弧中之數值為其所對應之實用容量使用率。

表 4.34 捷運系統營運成本敏感度分析(上行)

營運成本 (元/列車公里)	1↔4	4↔11	11↔21	平均使用率
623	6 (20%)	10 (34%)	12 (40%)	34%
0	26 (88%)	26 (88%)	26 (88%)	88%
200	11 (37%)	17 (57%)	19 (64%)	57%
400	8 (27%)	12 (40%)	14 (47%)	41%
600	6 (20%)	10 (34%)	12 (40%)	34%
800	6 (20%)	9 (30%)	10 (34%)	30%
1,000	5 (17%)	8 (27%)	9 (30%)	27%
1,200	5 (17%)	7 (24%)	9 (30%)	26%
1,400	4 (13%)	7 (24%)	9 (30%)	25%

表 4.35 捷運系統營運成本敏感度分析(下行)

營運成本 (元/列車公里)	1↔4	4↔11	11↔21	平均使用率
623	13 (44%)	21 (71%)	26 (88%)	74%
0	26 (88%)	26 (88%)	26 (88%)	88%
200	22 (74%)	26(88%)	26 (88%)	85%
400	16 (54%)	21 (71%)	26 (88%)	76%
600	13 (44%)	21 (71%)	26 (88%)	74%
800	11 (37%)	21 (71%)	26 (88%)	73%
1,000	10 (34%)	21 (71%)	26 (88%)	72%
1,200	9 (30%)	21 (71%)	25 (84%)	70%
1,400	8 (27%)	21 (71%)	25 (84%)	69%

根據上表之分析結果可以發現，隨著營運成本上升，最佳使用率會隨之下降，此一趨勢符合本研究之概念。另一方面，在營運成本為零時，表示此時不考量營運者之影響，如先前 4.2 節中所述會發現獲得一致的上下行分析所得之結果，由於不考量營運者之影響，因此會盡量使用路段上之容量，然而也不可能使用到百分之一百，因為當使用量接近實用容量時延滯亦會大幅上升。

表 4.36 最佳服務計畫下營運成本佔總成本比例(捷運系統)

營運成本 (元/延車公里)	上行	下行
623	50%	64%
200	47%	44%
400	48%	55%
600	50%	63%
800	50%	69%
1,000	50%	71%
1,200	52%	74%
1,400	54%	76%

如同臺鐵案例在此亦分析其營運成本所佔總成之比例如表 4.36 所示。由表中可以發現其營運成本所佔比例相對臺鐵系統之案例而言皆高出許多，捷運系統

中營運成本所佔比例接近 50% 部分情境甚至達 70% 之上，故其分析結果有較明顯之影響。而圖 4.9 中顯示於捷運系統案例中各營運成本條件下之最佳使用效率。隨營運成本上升，使用效率會下降，且下降幅度會逐漸趨緩。本研究分析其變化趨於緩和時所提供之最大旅客服務數量，發現該最大旅客服務數量在部分路段已經接近各路段之旅客數量，故此時即便營運成本所佔比例極高，但每減少一列車，會時開始出現部分旅客必須多等候一個班距的時間之情況，故旅客成本增加幅度大幅上升，降低了營運成本上升所帶來之影響。

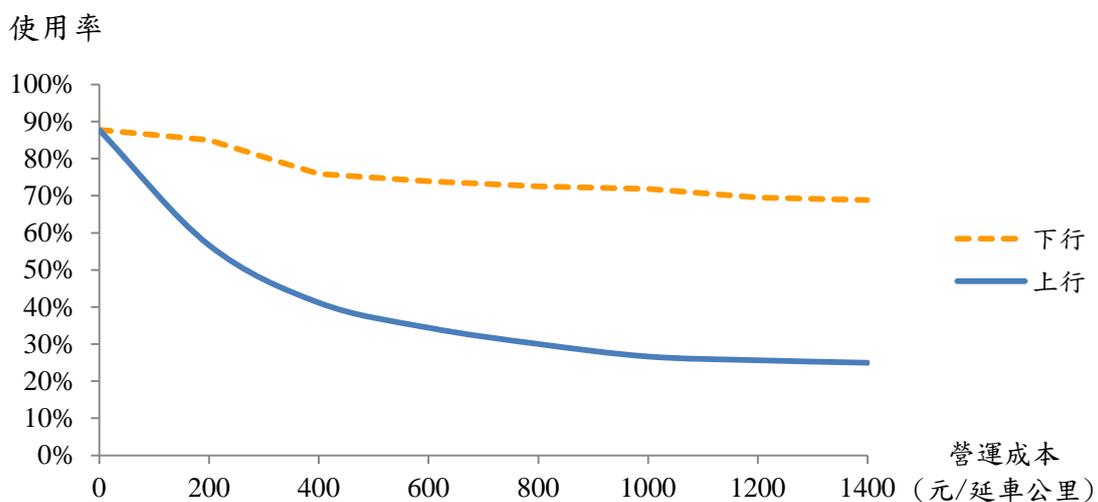


圖 4.9 捷運營運成本敏感度分析結果

4.4.2 旅客時間價值敏感度分析

如案例分析中所述，本研究所採用之旅客時間價值為 1.97 元/分鐘，以下將針對此一時間價值進行敏感度分析。表 4.37 為臺鐵之分析結果。由結果可以發現，旅客時間價值對分析結果亦無太大影響。事實上根據本研究計算，當時間價值小於 0.1 時才會改變其平衡點。

表 4.37 旅客旅行時間價值敏感度分析(臺鐵)

營運成本 每延車公里		1.97 元	0.1 元	0.5 元	1.0 元	1.5 元	2.0 元	2.5 元	3.0 元
上	7~8	3	2	3	3	3	3	3	3
行	8~9	3	2	3	3	3	3	3	3
下	7~8	4	2	4	4	4	4	4	4
行	8~9	4	2	4	4	4	4	4	4

表中數值為通勤列車最佳使用量(列車/小時)

對於旅客旅行時間不敏感之原因以下圖來進行說明，圖 4.10 為以下行八至九時為例，繪製旅客旅行時間與使用非對號車數量之關係圖。事實上，由圖中可以說明即便不考量營運者成本，旅客總旅行時間本身就為延滯時間與等候時間權衡之結果，可以看到圖中之曲線在列車使用數量接近四列車時有最小值。此一結果與最佳平衡點相同，原因如前小節所述，在此案例中由於營運成本所佔比例較小，營運成本幾乎對原本延滯時間與等候時間之平衡點無影響，故營運者與旅客所考量之最佳平衡點與單就旅客觀點即旅客時間考量之平衡點相同。故增加旅行時間價值並不影響其最佳平衡點。然而若降低旅行時間價值，當其下降幅度較大時，此時營運者成本所佔比例到達一定程度後便會度對最佳平衡點產生影響，而導致最佳使用量下降。

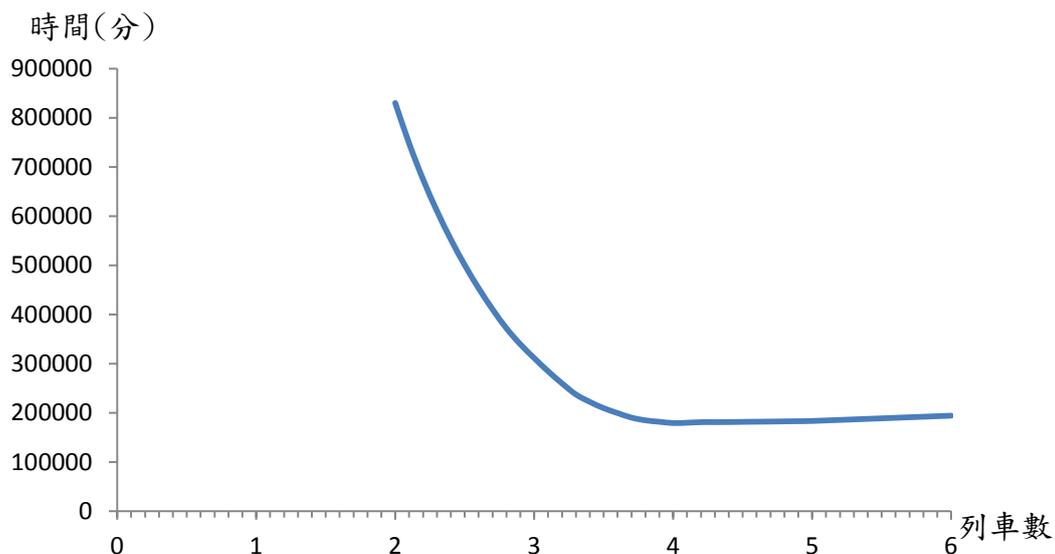


圖 4.10 總旅行時間與使用通勤列車數關係圖(下行 8~9 時)

另一方面，表 4.38 與表 4.39 為捷運之分析結果，不同於台鐵案例分析結果隨旅行時間價值上升，不論是上行或是下行路段，其平均使用率皆會上升，在圖 4.11 中可以看到兩者上升幅度顯不同，其中上行幅度較大，下行則較小。本研究認為其可能原因為下行之使用率較高，表示其較接近容量使用上限，故其變動幅度較小。若將上行分析結果所繪製之曲線延伸，當其接近容量上限時，其上升幅度亦會趨緩。

同樣根據表 4.36 之成本比例分析結果可知，在捷運案例中營運成本所佔比例較高，因此最佳平衡點分析之結果受其影響與單純以旅客觀點分析總旅行時間之平衡點並不相同，故隨時間價值增減，分析之最佳平衡點亦會隨之改變。而對於時間價值之上升，當其上升之一定程度後，營運者成本所佔比例逐間下降，此時所分析之結果也將趨近於單純探討旅客總旅行時間之平衡點。

表 4.38 旅客旅行時間價值敏感度分析(捷運上行)

營運成本 (元/列車公里)	1←→4	4←→11	11←→21	平均使用率
1.97	6 (20%)	10 (34%)	12 (40%)	33%
0.50	3 (10%)	6 (20%)	9 (30%)	23%
1.00	4 (13%)	7 (24%)	9 (30%)	25%
1.50	5 (17%)	9 (30%)	10 (34%)	29%
2.00	6 (20%)	10 (34%)	12 (40%)	34%
2.50	7 (24%)	11 (37%)	13 (44%)	38%
3.00	8 (27%)	12 (40%)	14 (47%)	41%
3.50	8 (27%)	13 (44%)	15 (51%)	44%
4.00	9 (30%)	14 (47%)	16 (54%)	47%
4.50	9 (30%)	15 (51%)	17 (57%)	50%
5.00	10 (34%)	15 (51%)	18 (61%)	52%

表 4.39 旅客旅行時間價值敏感度分析(捷運下行)

營運成本 (元/列車公里)	1↔4	4↔11	11↔21	平均使用率
1.97	13 (44%)	21 (71%)	26 (88%)	72%
0.50	6 (20%)	21 (71%)	25 (84%)	67%
1.00	9 (30%)	21 (71%)	25 (84%)	70%
1.50	11 (37%)	21 (71%)	26 (88%)	73%
2.00	13 (44%)	21 (71%)	26 (88%)	74%
2.50	14 (47%)	21 (71%)	26 (88%)	75%
3.00	16 (54%)	21 (71%)	26 (88%)	76%
3.50	17 (57%)	21 (71%)	26 (88%)	77%
4.00	18 (61%)	21 (71%)	26 (88%)	79%
4.50	19 (64%)	23 (78%)	26 (88%)	80%
5.00	20 (67%)	24 (81%)	26 (88%)	82%

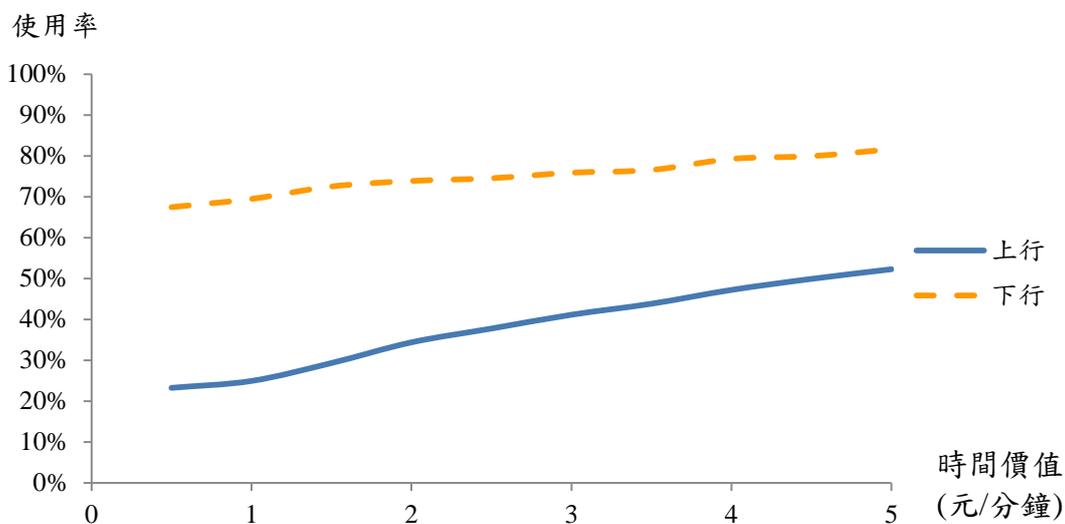


圖 4.11 旅客時間價值敏感度分析結果(捷運案例)

4.4.3 系統穩定度敏感度分析

在本節中將針對系統穩定度進行敏感度分析，以下將分別探討不同營運穩定度之最佳服務計畫，穩定度組成中包含期望延滯與營運延滯部分。而在此本研究中之分析之方式則以原有穩定度計算結果之不同倍數來進行分析。其中倍數小於

1 時表示系統穩定度上升之情況，而大於 1 之倍數則表示穩定度下降之情況。由表 4.38 分析結果可發現營運穩定度對該系統之影響，當穩定度減少至原本 0.25 倍時系統之最佳使用量才會略微上升。

表 4.40 穩定度敏感度分析結果(臺鐵)

	上行		下行	
	7~8	8~9	7~8	8~9
原案例分析	3	3	4	4
0.25 倍	4	3	4	4
0.50 倍	3	3	4	4
0.75 倍	3	3	4	4
1.50 倍	3	3	4	4
1.50 倍	3	3	4	4

表中數值為通勤列車最佳使用量(列車/小時)

另一方面捷運系統之部分，由於其系統中之穩定度已經極低，即便大幅降低其事故延滯時間亦無法改變其最佳使用率，但換由另一層面加以分析，若系統穩定度降低(延滯上升)時會發現其使用效率會因此而下降，此一下降幅度相對於其他因素之影響緩和。

表 4.41 穩定度敏感度分析結果(捷運上行)

穩定度	1 \longleftrightarrow 4	4 \longleftrightarrow 11	11 \longleftrightarrow 21	平均使用率
原案例分析	6 (20%)	10 (34%)	12 (40%)	34%
0.25 倍	6 (20%)	10 (34%)	12 (40%)	34%
0.50 倍	6 (20%)	10 (34%)	12 (40%)	34%
1.50 倍	6 (20%)	10 (34%)	11 (37%)	33%
2.00 倍	6 (20%)	10 (34%)	11 (37%)	33%
3.00 倍	6 (20%)	10 (34%)	11 (37%)	33%
5.00 倍	6 (20%)	9 (30%)	11 (37%)	32%

表 4.42 營運延滯敏感度分析結果(捷運下行)

穩定度	1 \longleftrightarrow 4	4 \longleftrightarrow 11	11 \longleftrightarrow 21	平均使用率
原案例分析	13 (44%)	21 (71%)	26 (88%)	74%
0.25 倍	13 (44%)	21 (71%)	26 (88%)	74%
0.50 倍	13 (44%)	21 (71%)	26 (88%)	74%
1.50 倍	13 (44%)	21 (71%)	26 (88%)	74%
2.00 倍	13 (44%)	21 (71%)	26 (88%)	74%
3.00 倍	12 (40%)	21 (81%)	25 (74%)	72%
5.00 倍	12 (40%)	21 (81%)	25 (74%)	72%

4.5 綜合比較與討論

在本章節中，除了針對不同鐵路系統(區域鐵路與捷運系統)進行分析外，亦透過兩種情境探討在不同觀點下之分析結果。期望透過不同系統與情境間之分析結果進行比較以對系統穩定度與效率之最佳平衡點有更深入之了解。

單就臺鐵案例分析結果而言，其穩定度與效率之平衡點在兩種情境下不論是否考量營運者成本皆無差異，其最佳使用效率介於 68% 至 78% 間。進一步探究其成本所佔比例發現，在同時考量營運成本與旅客成本之情境下，其營運成本所佔比例約介於 15% 至 20%，此一比例相對較低，因而導致即便考量營運者成本其最佳平衡點與單獨考量使用者成本之結果相同。捷運系統案例分析之成果則與臺鐵案例呈現不同之狀況，對於是否考量營運成本之部分於捷運案例分析之成果相差極大，在僅考量使用者觀點之分析結果中可以發現其上下行皆僅選擇單一停站模式且其最佳使用率高達 88%。但若將營運者成本納入考量可以發現分析結果有明顯差異，於上行路段最佳使用效率降至 34% 而下行部分則略降至 74%。單就上下行差異而言，其原因應為受到旅客數量差異之影響，由於該系統中晨峰具有極強之方向性，下行旅客數量遠高於上行，在受營運者觀點之影響下，當旅客數量較少時如上行狀況，即便提高使用量對於穩定度不會有太大之上升，其最佳

平衡點亦不會如同單純考量使用者觀點時來的高。主要原因在於此情況下還會受到營運者所提供運能之效益影響，即當旅客數量較少時，傾向使用較低之效率降低不必要之浪費。本研究亦檢視其營運成本所佔比例，結果顯示捷運系統營運成本所佔比例較臺鐵案例高，是故當營運成本納入考量時，此時系統之最佳平衡點將受其影響而降低。表 4.43 即為臺鐵與捷運系統之成本組成比較，明顯可以見到兩種系統旅客營運成本所佔比例之差異，捷運系統雖然營運里程(約 19 公里)不如臺鐵分析路段長度(約 35 公里)但其最佳平衡點之使用量遠高於臺鐵，此外對於旅行時間而言，分析時於臺鐵案例中仍須考量對號車之旅客影響，是故兩系統營運成本與旅客時間成本所佔比例會有明顯差異。

表 4.43 臺鐵與捷運總成本組成數值比較(萬元)

	上行		下行	
	臺鐵	捷運	臺鐵	捷運
旅客時間成本	34.93 (85%)	14.37 (49%)	35.24 (82%)	17.61 (35%)
營運成本	5.99 (15%)	14.71 (51%)	7.99 (18%)	32.83 (65%)

由另一個角度進行探討，若將不同系統之相同情境加以比較可以發現，在情境依單純考量使用者成本的情況下，臺鐵最佳使用效率(68%~78%)明顯低於捷運系統之最佳使用效率(88%)，由於單純考量使用者成本之情況中僅為等候時間與延滯時間之權衡。本研究認為此分析結果乃是因為捷運系統之穩定度遠高於傳統鐵路系統，故若單就使用者觀點進行權衡時會發現捷運系統所分析之最佳使用效率會高於臺鐵 10% 至 20%。然而若針對情境二加以比較，則可發現旅客數量對分析結果影響極大，在臺鐵案例以及捷運系統下行中由於旅客數量較高，故其使用效率較高，臺鐵案例最佳使用效率介於 68%~78% 間，而捷運下行之最佳使用效率為 74%。對於旅客數量較低捷運下行案例其最佳使用效率僅有 34%，此時也代表在分析模式中營運者所提供運能之效益會對最佳平衡點產生影響，當旅客數量較高時此時營運者所提供之服務才具有效益，否則提供過多之服務反而造成浪費。



除了上述的不同情境分析外，於案例分析中亦以情境二同時考營運者與使用者觀點之分析成果，探討其最佳解與實際運用狀況之差異。於臺鐵案例中，不論上下行於各尖峰小時時段實際使用量皆大於最佳解，顯示其為追求服務容量之上升而犧牲系統之穩定度，進一步分析其總成本顯示此種營運狀況之總成本大於最佳服務計畫。而捷運系統案例則呈現不同之結果，與實際營運計畫比較可以發現，實際營運之服務計畫於上行路段容量使用遠大於最佳解，於下行路段則相近。同樣分析其實際營運狀況之穩定度、效率與總成本，於上行路段因實際營運狀況容量使用率較高，故穩定度較差，而於其總成本亦高於最佳服務計畫。對於下行路段由於其實際使用率略低於最佳服務計畫，故其穩定度則略優於最佳服務計畫，然而探究其總成本仍高於最佳服務計畫。

除了對於分析結果進行探討並與實際營運狀況進行比較外，本研究亦進行敏感度分析探討各參數度最佳化模式求解之影響。其中台鐵案例分析之部分，由於最佳解中營運成本所佔比例較低，故其對最佳化模式求解幾乎無影響，此一結果使模式之最佳解與單純權衡旅客等候時間與延滯時間之結果相近，因此對於旅客時間價值而言，其數值增長對於最佳解亦無影響，因其最佳平衡點與單純考量旅客觀點結果以幾乎相同，而時間價值下降至則會使營運成本佔總成本之比例上升，故當時間價值下降至一定數值時其最佳平衡點亦會改變。而對於捷運系統而言，營運成本、旅客時間價值與系統穩定度皆會對最佳平衡點之分析有較明顯之影響。因為上下行本身運量之差異，上下行之分析結果又有差異。對於營運成本而言，當其上升時分析之最佳服務計畫之使用效率將會下降，其中在相同營運成本變化下，上行最佳使用效率變化量較下行為大。對於旅客時間價值而言，其分依結果顯示最使用效率同樣會因旅客時間成本上升而上升，且由於下行之最佳計畫使用量較高，故其上升幅度亦較上行分析結果低。至於系統穩定度最佳解之影響在捷運系統案例中，由於其系統本身可靠度極高，故穩定度之提升對系統最佳解並無影響，而穩定度之降低則亦會使系統最佳服務計畫之容量使用率下降。



如同第三章中所述，本研究所建立之服務計畫最佳化模式中於目標式的部分包含數項：旅客表定旅行時間、旅客延滯時間、旅客等候時間與營運成本，其中旅客延滯時間又可分為期望延滯時間與營運延滯時間。而在此本研究為進一步了解目標式組成對分析所造成之影響，將以不同目標式組成項目進行分析以進行比較。表 4.44、表 4.45 與表 4.46 為分析結果之整理。表 4.44 中為臺鐵之分析比較，表中數值為各情境下之非對號列車最佳使用數量，括弧中之數值則為其所對應之容量使用效率。由分析之結果可以發現，對於情境一而言，當僅考量期望延滯時間時(不考量營運延滯)分析之結果不論在和路段與時段最佳使用率皆會上升。然而若僅考量營運延滯時間時(不考量期望延滯時間)，僅下行之分析結果會有所上升，上行之部分則維持不變，此一分析結果可以搭配表 4.13 進行探討。表 4.13 中說明臺鐵案例分析最佳解中各項成本組成數值與其所占比例，雖然所分析之情境不同但仍可對兩種延滯成本進行比較，由表 4.13 中顯示，於上行案例中期望延滯成本不但皆小於營運延滯成本且約僅占其三分之一；下行案例則兩者數值相近，由此便可說明為何僅考量營運延滯成本時，僅有下行分析結果與原分析結果有所差異。另一方面對於情境二之部分則無論考量何種情境皆對最佳使用效率並無影響。結合前述之案例分析與敏感度分析結果，在此一情境中因受營運成本之影響所提供之運能效益亦須納入考量，導致即便考量不同穩定度分析項目(期望延滯時間與營運延滯時間)對分析之結果並無影響，影響系統最佳平衡點之主要因素反而為旅客數量與分佈，此一數量與分佈將直接影響營運者所提供運能之服務效益。

表 4.44 目標式組成分析結果比較(臺鐵)

目標式組成	上行		下行		
	7~8	8~9	7~8	8~9	
情境一	(1)(2)(4)(5)	3 (68%)	3 (74%)	4 (75%)	4 (78%)
	(1)(2)(4)	4 (77%)	4 (82%)	5 (83%)	5 (86%)
	(1)(2)(5)	3 (68%)	3 (74%)	5 (83%)	5 (86%)
情境二	(1)(2)(3)(4)(5)	3 (68%)	3 (74%)	4 (75%)	4 (78%)
	(1)(2)(3)(5)	3 (68%)	3 (74%)	4 (75%)	4 (78%)
	(1)(2)(3)(4)	3 (68%)	3 (74%)	4 (75%)	4 (78%)
	(1)(2)(3)	3 (68%)	3 (74%)	4 (75%)	4 (78%)
	(1)(2)(3)	3 (68%)	3 (74%)	4 (75%)	4 (78%)

註：(1)表定旅行時間、(2)等候時間、(3)營運成本、(4)期望延滯時間、(5)營運延滯時間。

對於捷運系統案例分析而言，表 4.45 與表 4.46 為其分析之結果，分析結果中，上下行狀況相同。情境一分析結果中顯示，當穩定度分析部分僅考量期望事故延滯時間而不將營運延滯納入分析時，由於該捷運系統因事故所產生之期望延滯時間相當低，其系統之穩定度影響來源在於營運延滯之部分。因此分析結果會達到路段上最大可供使用之車輛數(及第三章模式中 3.46 式中所使用之 Z 值)，此一數值將使系統之最佳使用率遠超過百分之一百。同樣以情境一的觀點，在僅考量營運延滯而不考量事故延滯時，可以發現無論是上下行的分析案例其最佳使用量皆會上升，此時乃是因為系統穩定度些微上升，使系統之最佳使用量亦隨之上升。然而情境二的分析結果則顯示當穩定度分析項目改變時，最佳平衡點並不會改變，搭配敏感度分析結果可知由於捷運系統穩定度遠高於區域鐵路系統，且在情境二的分析下須同時考量營運成本之影響，故雖然系統穩定度提升但對整體最

佳平衡點分析幾乎沒有影響。相反地在 4.4 節中敏感度分析結果表示當捷運系統穩定度下降時，才會對最佳平衡點分析產生較為顯著之影響。



表 4.45 目標式組成分析結果比較(捷運上行)

目標式組成	上行				
	1↔4	4↔11	11↔21	平均使用率	
情境一	(1)(2)(4)(5)	26	26	26	88%
	(1)(2)(4)	Z	Z	Z	
	(1)(2)(5)	26	26	29	93%
情境二	(1)(2)(3)(4)(5)	12	10	6	34%
	(1)(2)(3)(5)	12	10	6	34%
	(1)(2)(3)(4)	12	10	6	34%
	(1)(2)(3)	12	10	6	34%

註：Z 值表示路段上最大可供使用之車輛數

註：(1)表定旅行時間、(2)等候時間、(3)營運成本、(4)期望延滯時間、(5)營運延滯時間。

表 4.46 目標式組成分析結果比較(捷運下行)

目標式組成	下行				
	1↔4	4↔11	11↔21	平均使用率	
情境一	(1)(2)(4)(5)	26	26	26	88%
	(1)(2)(4)	Z	Z	Z	
	(1)(2)(5)	26	26	29	93%
情境二	(1)(2)(3)(4)(5)	13	21	26	74%
	(1)(2)(3)(5)	13	21	26	74%
	(1)(2)(3)(4)	13	21	26	74%
	(1)(2)(3)	13	21	26	74%

註：Z 值表示路段上最大可供使用之車輛數

註：(1)表定旅行時間、(2)等候時間、(3)營運成本、(4)期望延滯時間、(5)營運延滯時間。

由案例分析之結果可以說明本研究所建立之分析模式可以運用於不同通勤鐵路系統進行分析。透過不同情境之交叉分析比較，亦可看出系統穩定度即營運

者提供運能之效益對最佳平衡點之影響。且在案例分析過程中，亦可以顯示該最佳化分析模式之重要性，如無最佳化模式轉換穩定度與效率兩者對於旅客與營運者之影響，僅單純就穩定度與效率評估，亦無法說明何種服務計畫或營運模式調整對於系統之效益較佳。在最佳化模式中以總成本進行比較不但可以求解最佳之服務計畫，亦可對不同之服務計畫間予以比較分析。



第五章 結論與建議



5.1 結論

本研究同時考量營運者與旅客之觀點探討軌道系統營運穩定度與效率之最佳平衡點，分析過程包含系統穩定度與效率之估算以及最佳平衡點之決定，而此最佳平衡點反映於實務運用上為一最佳服務計畫。本研究之分析可以針對通勤特性之不同系統進行分析。分析所獲得之結論整理如下：

1. 本研究考量營運者與旅客之觀點，將系統穩定度與效率轉換為時間影響以建立穩定度與效率最佳平衡點分析模式探討通勤鐵路系統之最佳服務計畫。透過此一分析過程探討營運效率與穩定度之交互關係與其平衡點。
2. 由穩定度與效率平衡點分析過程中可以得知各系統中容量分析之瓶頸路段，以及各路段上容量使用效率與其穩定度之關係。由分析之結果顯示在區域鐵路案例分析中，其容量瓶頸為七堵至汐止段；捷運系統案例分析中之瓶頸點則為車站 12-車站 13 與車站 13-車站 14 路段。
3. 本研究建立回復時間與延滯之關係式，使過往以回復時間進行軌道系統穩定度與效率分析之相關研究，可以結合其分析成果於實務之運用情形。在本研究中將回復時間轉換為該時段內之列車延滯以進行後續最佳化分析。
4. 本研究所建立之分析模式並未限制容量上限，乃是透過不同容量使用所產生延滯加以制衡。如此可以探討在尖峰時間瓶頸路段使用量超過時刻表容量之情況，此一分析方式對於最佳平衡點分析具有較佳之彈性。
5. 本研究進行最佳平衡點分析時，不僅如過往研究計算受影響列車數，更詳細探討對於旅客之影響。透過旅客資料之收集實際分析各種情境下旅客所受之影響。此一分析方式可以更吻合實際營運之情境。
6. 根據本研究分析結果發現臺鐵為了捷運化及其他因素，於七堵至樹林段使

用極高之容量，此實際使用量不論上下行皆比最佳平衡點所對應之使用量高。由此分析結果表示，現行的服務計畫雖然可以減低旅客之等候時間，但會造成系統穩定性之下降，兩相權衡所產生之成本將大於最佳使用量之情況。

7. 對於捷運系統案例而言，下行之分析與實際使用情境相近，表示其現行營運模式已極為接近最佳平衡點之服務計畫。另一方面上行與現行差異較大，探究其可能原因為發車均衡之問題或是最低服務頻率之限制。
8. 本研究分析所求得之最佳服務計畫即可反應系統穩定度與效率之平衡點，而此時之服務計畫所使用容量與其使用效率，則可稱為最佳使用效率。根據案例分析之成果可知在區域鐵路系統分析結果中介於 68% 至 78% 之間；捷運案例分析之成果則依旅客數量有所差異分別為 34% 與 74%。其中因上行方向旅客數量較少而最佳使用率較低，若考量尖峰時間旅客擁擠之狀況(下行)可以發現，其數值與傳統鐵路分析結果相近。而本研究所建立之穩定度與效率分析模式可以針對不同通勤鐵路系統加以分析。
9. 本研究於案例分析中透過不同情境分析，可以顯示各項因素於不同系統中所產生之影響。於單純考量旅客觀點之情境而言，由分析結果顯示捷運系統因為具有較佳之系統穩定度，故其最佳容量使用率高於臺鐵。而同時考量營運者與旅客觀點之分析結果則如前項所述，此時分析結果受系統旅客數量影響而呈現差異。
10. 本研究所建立之最佳化分析模式可以求解最佳服務計畫，除了可比較服務計畫與最佳解之差異外，亦可針對探討不同服務計畫間之穩定度、效率與總成本間之差異。

5.2 建議

1. 本研究之案例分析結果中對兩種通勤鐵路營運系統進行分析，除了可以提

供該系統營運上服務計畫改善之參考與建議外。本研究所建立之分析模式亦可運用於其他通勤鐵路性質之系統進行分析作為服務計畫改善之參考與建議。

2. 本研究主要針對通勤鐵路系統分析其穩定度與效率之平衡點，進行尖峰小時之服務計畫決定。後續研究可以對離峰或甚至整日之營運穩定度與效率平衡點進行分析，分析時可依其分析時段之不同調整平衡點模式與分析參數。透過不同時段之分析搭配本研究，可使整體分析趨於完整。
3. 本研究於最佳化模式分析中不需要時刻表做為輸入資料，然而於穩定度與效率分析時，為探討不同使用量下對於系統之影響，仍需要由時刻表或自行假設得知分析時段之後的使用情況。後續研究中建議可以透過求解整天之方式求解各時段之最佳使用效率，此一方式於完整分析過程中便不須再受時刻表或自行假設之影響。
4. 本研究分析營運(非事故)所產生之延滯乃是透過模擬列車運行方式進行分析，求得一可靠度分析結果後進行後續分析。若能取得實務營運之各站實際到開時間，將之與時刻表加以比較來求得實際營運延滯，再依此方式所求得之數值來分析各路段之營運可靠度，將更能反映各路段之特性，其分析結果亦較為貼近實際狀況。
5. 本研究中假定服務頻率對於旅客需求並不會產生影響，後續研究亦可深入探討發車頻率對於旅客需求量之影響並將其納入分析模式之中。
6. 本研究於臺鐵案例分析時將對號列車固定，僅針對非對號列車進行分析。對於對號列車之旅客僅分析其所受之延滯時間，且所分析之對象為所有通過該路段之旅客。後續研究可以針對此一部份，將對號列車之營運特性與旅客特性加以分析和探討其所受之影響。
7. 本研究於捷運案例分析時，對上下行系統分開求解其最佳使用效率。此一分析方式可以求得其各方向最佳平衡點。然而於實務營運中，可能須考量

發車平衡之要求。故可將最佳化模式進行修改，限制上下行使用差異可容許之範圍，並將上下行同時求解。此外對於捷運系統而言，通常會由數條路線組成路網。本研究所建立之分析模式可針對不同路線分別探討。但若欲決定整體系統之使用情形，則應再將轉乘因素納入考量修改模式，以進行整體系統穩定度與效率之平衡點決定。

8. 實務上事故發生時通常會使用最大容量進行回復，然因目前仍缺乏適當之最大容量解析分析方式，若後續最大容量分析模式發展成熟，本研究亦可運用最大容量進行事故容量分析，此分析結果亦與實際情況較為相近。
9. 本研究模式主要針對站站停之停站模式進行服務起訖模式選擇與分析，建議後續研究可針對跳站停靠之停站模式修正模式以利於進行更完整之分析。
10. 由本研究分析之結果可以得知系統最佳服務計畫，其中即包含各服務起訖模式之發車頻率，此一分析結果亦可作為相關時刻表建立研究之輸入參數或分析基礎。

參考資料



1. 李宗晏(2010),「臺鐵時刻表穩定度與效率評估」,國立台灣大學土木工程學系交通工程組碩士論文。
2. 劉牧阡(2010),「臺鐵行車營運風險分析系統之研究」,國立台灣大學土木工程學系交通工程組碩士論文。
3. 劉昭榮(2011),「鐵路列車連鎖延滯之模擬模式建構與應用」,國立交通大學交通運輸研究所博士論文。
4. 林文雅(2003),「捷運列車排班計畫之模糊多目標決策分析」,國立海洋大學學河海工程學系碩士論文。
5. 藍武王(1981),「都市捷運鐵路最佳班次模式之建立」,運輸計劃季刊,第十一卷,第一期,頁 41-56。
6. 交通部運輸研究所(2008),「運輸系統容量分析暨應用研究—軌道系統(2/4)」,交通部運研所,研究報告。
7. 交通部運輸研究所(2009),「運輸系統容量分析暨應用研究—軌道系統(3/4)」,交通部運研所,研究報告。
8. 交通部運輸研究所(2010),「運輸系統容量分析暨應用研究—軌道系統(4/4)」,交通部運研所,研究報告。
9. 交通部運輸研究所(2011),「交通建設計畫經濟效益評估手冊」,交通部運研所,研究報告。
10. 蘇霜吉(2006),「列車服務與票價決策之整合模式-以台灣高鐵為例」,國立成功大學交通運輸管理學系碩士論文。
11. 張有恆、游俊雄(1995),「捷運列車管理之研究—以台北市木柵線為例」,運輸學刊,第二十八期,頁 1-18。
12. 陳冠廷(2012),「軌道運輸系統時刻表績效評估系統之研發與建立」,國立台

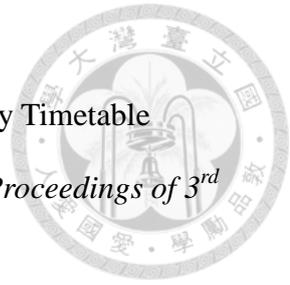
灣大學土木工程學系交通工程組碩士論文。



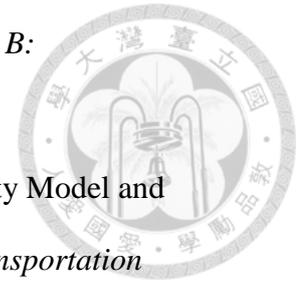
13. 葉志生(2012), 「Development of the Operational Stability and Efficiency Evaluation Model for Metro System」, 國立台灣大學土木工程學系交通工程組碩士論文。
14. 王晉元、林誌銘(2007), 「應用基因演算法於捷運列車運行計畫之研究」, 運輸計劃季刊, 第三十六卷第一期, 頁 115-145。
15. Anthony, R. N. (1965), *Planning and Control Systems: A Framework for Analysis*. Harvard Graduate School of Business Administration, Boston
16. Assad, A. A. (1980), Modeling of rail networks: Toward a routing/makeup model, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 14, Issues 1–2, March–June, pp. 101-114.
17. Assad, A. A. (1980), Models for Rail Transportation, *Transportation Research Part A: General*, Vol. 14, Issue 3, pp. 205-220.
18. Briggs, K. and Beck, C. (2007), “Modelling train delays with Q-exponential functions”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Application*, Vol. 378, pp.498-504.
19. Carey, M., and Carville, S. (2000), “Testing Schedule Performance and Reliability for Train Stations”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, pp. 666-682.
20. Carey, M., and Kwiecinski, A. (1994), “Stochastic Approximation to the Effects of Headways on Knock-on Delays of Trains”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 28(B), No. 4, pp. 251-267.
21. Carey, M., and Kwiecinski, A. (1995), “Properties of Expected Costs and Performance Measures in Stochastic Models of Scheduled Transport”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 83, pp. 182–199.

- 
22. Cacchiani, V. (2012), “Nominal and robust timetabling problems”, *European Journal of Operational Research*, pp. 727-737.
23. Chang, Y.H., Yeh, C.H., and Shen, C.C., (2000), “A Multi-objective Model for Passenger Train Services Planning: Application to Taiwan's High-speed Rail Line”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 34, Issue 2, pp. 91-106.
24. Cicerone, S., et al. (2009), “Recoverable Robust Timetabling for Single Delay: Complexity and Polynomial Algorithms for Special Cases”, *Journal of Combinatorial Optimization*, Vol. 18, pp.229-257.
25. Delorme, X., Gandibleux, X., and Rodriguez, J. (2009), “Stability evaluation of a railway timetable at station level”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 195, pp. 780-790.
26. Demitz, J., Hubschen, C., and Albrecht, C. (2004), “Timetable stability – Using simulation to ensure quality in a regular interval timetable”, *Advances in Transport*, vol. 15, pp. 549-562.
27. Engelhardt-Funke, O. and Kolonko, M. (2004), “Analysing Stability and Investments in Railway Networks Using Advanced Evolutionary Algorithms”, *International Transportations in Operational Research*. Vol. 11, pp. 381-394.
28. Franke, B., Seybold, B., Büker, T., Graffagnino, T., and Labermeier, H. (2013) “OnTime – Network-wide Analysis of Timetable Stability”, IAROR Rail Copenhagen 2013 Proceedings.
29. Goossens, J. W., Hoesela, S., and Kroonb, L.(2006) On Solving Multi-type Railway Line Planning Problems, *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, Issue 2, pp. 403–424.
30. Goverde, R.M.P. (2007), “Railway Timetable Stability Analysis Using Max-Plus System Theory”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 41, pp.

- 179-201.
31. Goverde, R.M.P., Heidergott, B. and Marlet, G. (2009), “Railway Timetable Stability Analysis Using Stochastic Max-Plus Linear System”, *Proceedings of 3rd ISROR*, pp. 19.
32. Hansen, I.A. (2000), “Station Capacity and Stability of Train Operations”, *Computers in Railways VII, WIT Press*, pp.809-816.
33. Higgins, A., and Kozan, E. (1998), “Modeling Train Delays in Urban Networks”, *Transportation Science*, Vol. 32, pp. 346-357.
34. Higgins, A., Ferreira, L. and Kozan, E. (1995), “Modeling Delay Risks Associated with Train Schedules”, *Transportation Planning and Technology*, Vol. 19, pp. 89-108.
35. Hooghiemstra, J.S., and Teunisse, M.I.G. (1998), “The use of Simulation in the Planning of the Dutch Railway Service”, *Proceeding of the 1998 Winter Simulation Conference*, pp.1139-1145.
36. Huisman, T., Boucherie, R.J., and Van Dijk, N.M. (2002), “A Solvable Queuing Network Model for Railway Networks and Its Validation and Application for Netherlands, *European Journal of Operational Research*, Vol. 142, pp. 30-51.
37. International Union of Railways (UIC), (2004). “UIC Code 406 Capacity.” *UIC*, Paris, France.
38. Jong, J.C., Suen, C.S., and C, S. K., (2012), “Decision Support System to Optimize Railway Stopping Patterns: Application to Taiwan High-Speed Rail.” *TRB 91st Annual Meeting Compendium of Papers*.
39. Jong, J.C., and Suen, C.S., THSRC (2008), “Optimizing Train Service Plan for Intercity”, *The 8th World Congress on Railway Research (WCRR)*.
40. Khan, M.B. and Zhou, X. (2008), “Slack Time Allocation in Robust Double-Track



Train Timetabling Applications”, *Transportation Research Part B: Methodological*, pp. 321-340.



41. Lai, Y. C., Shih, M. C., and Jong, J. C. (2010), "Railway Capacity Model and Decision Support Process for Strategic Capacity Planning", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2197, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., pp. 19-28.
42. Landex, A. (2008), "Methods to estimate railway capacity and passenger delays", PhD thesis.
43. Lee, C.K., and Hsieh, W.J., (2001), "A Demand Oriented Service Planning Process", Proceedings of the World Congress on Railway Research.
44. Middelkoop, D., and Bouwman, M. (2002), "Testing the Stability of the Rail Network", *Computers in Railways VIII*, pp.995-1002.
45. Melody, K.S., and Landex, A. (2012), "Capacity Utilization in European Railways: Who is the fairest of them all?", Transportation Research Board Annual Meeting 2013.
46. Vromans, M. J., Dkker, R., and Kroon, L. G. (2006), "Reliability and heterogeneity of railway services", *European Journal of Operational Research*, Vol. 172, pp. 647-665.
47. Salido, M.A., Barber, F., and Ingolotti, L. (2008), "Robust in Railway Transportation Scheduling", *Intelligent Control and Automation, WCICA 2008, 7th World Congress on Publication*, pp. 2880-2885.
48. Salido, M.A., Barber, F., and Ingolotti, L. (2012), "Robiustness for A Single Railway Line: Analytical and Simulation Methods", *Expert Sytems with Applications 39*, pp. 13305-13327.

- 
49. Schittenhelm, B., and Landex, A. (2013), “Development and Application of Danish Key Performance Indicators for Railway Timetables”, IAROR Rail Copenhagen 2013.
50. Stok, R. (2008), “Estimation of Railway Capacity Consumption Using Stochastic Differential Equations”, PhD Dissertation, University of Trieste.
51. Transit Cooperative Research Program (TCRP) (2003), “Transit capacity and Quality of Service Manual. 2nd Edition.” *Transportation Research Board*. 2003, part 5.
52. Vromans, M. J., Dkker, R., Kroon, L. G. (2006), “Reliability and heterogeneity of railway services”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 172, pp. 647-665.
53. Welding, P. I. (1957), “The Instability of a Close-Interval Service”, *Operation Research, Quarterly*, Vol. 8, pp. 133-148.
54. Yuan, J. and Hansen, I.A. (2007), “Optimizing Capacity Utilization of Stations by Estimating Knock-on Train Delays”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 41, Issues 2, pp. 202-217.