

鐵路列車密度與初始延滯以及調度策略 對連鎖延滯之影響分析

THE INFLUENCE OF TRAIN DENSITY, FIRST-DELAY AND TIMETABLE RECOVERY STRATEGIES ON KNOCK-ON DELAY

黃承傳 Cherng-Chwan Hwang¹

劉昭榮 Jau-Rong Liu²

(99 年 11 月 10 日收稿，100 年 2 月 25 日第一次修改，100 年 3 月 22 日定稿)

摘 要

軌道系統容量不足往往是導致列車延滯之主因，尤其在初始延滯 (first delay) 發生後，後續所引發的連鎖延滯 (knock-on delay) 擴散效應對列車正常營運之影響甚大，因此欲確保系統之可靠度及服務品質，快速有效地降低連鎖延滯一直是重要課題。為有效釐清造成連鎖延滯之複雜因素及其交互作用，本研究依據臺鐵系統之運作特性開發一模擬模式作為分析工具，並以臺鐵之七堵—樹林路段為案例分析關鍵因素對於連鎖延滯之影響。本研究主要內容除研析列車密度 (train density)、初始延滯及運轉調度策略 (timetable recovery strategy) 對連鎖延滯之個別影響及其整體交互作用之影響外，更以迴歸分析方法構建列車連鎖延滯與該 3 項因子之間的指數關係函數以作為估算連鎖延滯的簡便工具。研究成果可作為排班規劃、系統可靠度分析以及服務品質改善之參考。

關鍵詞：連鎖延滯；列車密度；初始延滯；運轉調度策略

-
1. 交通大學交通運輸研究所教授 (聯絡地址：100 臺北市忠孝西路一段 118 號 4 樓交通大學交通運輸研究所；電話：02-23494960；E-mail：cch@mail.nctu.edu.tw)。
 2. 交通大學交通運輸研究所博士候選人，交通部運輸研究所研究員。

ABSTRACT

Railway system train delays are affected by many factors, and one of the most important factors is insufficient line capacity, and knock-on delays (delay propagation) caused by the first delays, always interrupt railway operation. How to reduce the knock-on delays quickly is the most important issue to maintain timetable reliability and the high quality of the railway service. In order to clarify the impacts of these complicated factors and their interactions on knock-on delays, this research develops a comprehensive simulation model to deal with the related problems, and a rail section from Cidu to Shulin of the Taiwan railway system is selected for case study. Regression analysis is used to calibrate the relationships of the knock-on delay with the three key factors, which are train density, first delay and timetable recovery strategy based on the simulation results of the case study. The regression models indicate that the relationship between the knock-on delay and these three key factors conforms to an exponential function. It is expected that the results can be helpful to timetable scheduling, system reliability analysis and service quality improvement.

Key Words: *Knock-on delay; Train density; First delay; Timetable recovery strategy*

一、前言

1.1 臺鐵系統延滯問題

軌道運輸系統的可靠度攸關運輸服務的品質，而其中列車服務的可靠度更是受到社會的期望；旅客對列車準點的重視程度，不亞於對搭乘舒適度、服務頻率或旅行時間等因素的要求，尤其在通勤旅客的眼裡，可靠度更是最被重視的因素。由過去許多關於可靠度及列車延滯之文獻顯示，列車延滯為衡量服務可靠度的重要指標之一，亦是影響可靠度之重要因素，故探討臺鐵系統營運服務品質之相關議題，需有效掌握「延滯」課題。Rietveld 等人^[1]曾提出下列幾種指標以作為評估可靠度的準則，包括：(1) 準點率；(2) 列車提早離站的機率；(3) 實際到達時間與表訂到達時間的差異，也就是延滯時間；(4) 當一列車延誤時，其續行列車的平均延誤時間；(5) 當一列車延誤超過某一時間，對續行列車所造成的平均延誤時間；(6) 到達時間的標準差；(7) 總旅客延滯小時／旅次數；(8) 準點旅次數／旅次數；(9) 延滯的列車數等，由上述評估指標亦可顯示「延滯」對軌道系統營運是否正常及服務品質之良窳扮演關鍵重要角色。

列車延滯依其類型可分為「列車排班的交會待避延誤 (waiting time due to scheduled meeting and overtaking)」以及「列車實際運行的延滯 (delay in current operation)」兩類^[2]，前者係列車排班作業過程中，列車因排除衝突所需額外增加的停等時間，亦稱為排班延滯 (scheduled delay)，通常是用來分析時刻表容量；而後者則是列車實際運行過程中所發生的

延滯，亦稱為非排班延滯 (unscheduled delay)，一般列車服務可靠度所討論的延滯通常是指後者。若細究延滯發生的原因，則列車實際運行延滯又可分為初始延滯 (first delay/primary delay/exogenous delay) 和連鎖延滯 (secondary delay/knock-on delay) 兩類^[3]。初始延滯是由於外在因素直接影響列車運行導致的延滯，而連鎖延滯則是由於初始延滯的發生，造成列車間相互影響所導致的延滯，例如列車因旅客量過多導致停站時間過長，或列車車輛故障及事故所導致之列車停等，皆為初始延滯；而因初始延滯導致其續行列車必須機外停車，便是連鎖延滯。一般有關初始延滯問題，有部分文獻係以安全績效觀點^[4]進行分析，但有關連鎖延滯問題，因其可能係容量不足、初始延滯及各項軟硬體設施條件之交互作用等複雜關係所導致之結果，且其影響系統服務品質之程度及營運績效狀況通常最為直接也最嚴重，故若欲探究軌道系統之服務品質改善課題，則應特別針對連鎖延滯之影響因素及其影響程度進行深入分析。

由於列車延滯（尤其連鎖延滯）往往是容量不足所導致，而依據交通部運輸研究所「運輸系統容量分析暨應用研究—軌道系統 (1/4)」^[5]之研究結果顯示，影響軌道容量的因素可歸納成路線條件、交通條件及控制條件三大類如表 1 所示，故不同的列車運轉條件，與列車運轉性能交互影響下，會導致不同的路線容量及運轉時隔，若因路線容量不足而產生路段瓶頸將會產生延滯，甚至發生營運單位最關切之連鎖延滯擴散效應 (delay propagation)，尤其在多車種、複線運轉及多類型月臺型式之傳統臺鐵系統，其交互作用之影響更為錯綜複雜。實務上由於營運單位無法有效精準掌握影響連鎖延滯之關鍵因素，皆於列車排班時以運轉寬裕時間 (operational buffer time)，或於發生營運特殊突發事件時以趕點時間 (recovery time) 來降低延滯之衝擊，故欲釐清連鎖延滯之影響因素及其影響程度，除外生之初始延滯外，若能有效釐清掌握前述影響容量之路線、交通及控制條件之交互作用影響，將更能掌握連鎖延滯之影響程度，及有效掌控其對運轉時隔之衝擊，也能確實估算可利用之路線容量，進而提昇列車營運之可靠度及服務品質。

1.2 研究目的與範圍

有鑑於連鎖延滯擴散效應對於臺鐵系統正常營運之影響至為關鍵，且連鎖延滯牽涉之影響因素又相當錯綜複雜，而過去之相關研究主要著重在以平均延滯角度分析延滯影響因素，或就特定路段（如車站）小範圍作各項延滯影響程度之解析式分析，尚無就整體軌道系統影響連鎖延滯之各項條件因素進行綜合性分析，即使探討連鎖延滯之研究亦僅就單一車站範圍構建解析模式進行影響因素之交互作用分析，實難一窺連鎖延滯議題之全貌並完全反映實際列車運作及延滯之交互影響現象。故本研究除嘗試有效釐清影響連鎖延滯之關鍵因子及其交互作用，更希望透過本研究建構連鎖延滯分析推估之泛用模式 (general model)，以作為後續理論研究與實務應用之參考。

考量模擬模式相較於解析模式及最佳化模式，具有可詳細分析號誌閉塞系統、列車性能及路線條件等複雜因素交互作用之功能，分析結果有較高之精確性，故本研究於前期研

究^[6]首先自行開發出一套可分析推估連鎖延滯之模擬模式(泛用架構如圖 1 所示)。該模式除經過驗證可分析處理影響連鎖延滯各要素條件交互作用關係之外,並以臺鐵系統基隆—新竹路段為案例,進行初始延滯與連鎖延滯之關聯分析,而獲致以下結論:(1)連鎖延滯隨初始延滯增加而呈非線性遞增之趨勢,且連鎖延滯由初始延滯發生地點往下游路段擴散;(2)站間及站內趕點等運轉調度策略對連鎖延滯改善有明顯成效。

表 1 影響路線供給容量的因素

分 類	影 響 因 素
路線條件	• 站間軌道數目與運轉方式 • 站內軌道及月臺佈置方式 • 站間距離 • 路線幾何條件 • 銜接點與折返點的配置 • 基地位置及配線 • 路線供電穩定度 • 路權型態
交通條件	• 列車性能 – 列車牽引性能 – 煞車性能 – 最大速度 – 阻力係數 • 列車密度 • 列車的方向分布與交通組成 • 停站時間與停站型態 • 可用列車數 • 車廂設計 – 車輛的尺寸 – 樓地板面積及高度 – 座位位的比例與安排方式 – 車門大小及配置
控制條件	• 列車運轉調度策略方式 • 閉塞制度的種類 • 辦理閉塞的方式 • 閉塞號誌的配置方式 • 閉塞區間長度 • 路口號誌設計 (B 型或 C 型路權)

資料來源：[5]。

本研究旨在接續前期之研究成果,第一個主要目的即欲進一步探討不同列車密度(train density)對連鎖延滯之影響關係程度,及其與其他路線、交通及控制等條件之交互作

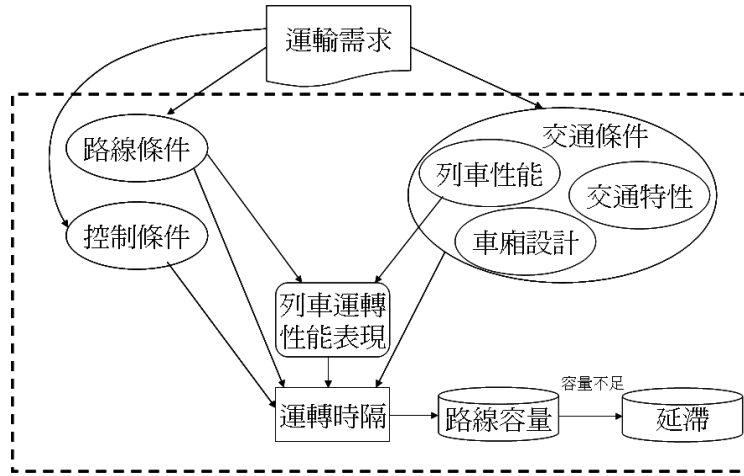


圖 1 軌道路線容量與運行延滯分析之泛用架構

用關係。另為建構連鎖延滯分析推估之泛用模式以作為後續實務應用之參考，本研究第二個主要目的則在建立連鎖延滯與各關鍵影響因素之因果關係函數，其方法係以所建構模擬模式先產生各種情境之延滯模擬資料，據以進行迴歸分析，初步將其函數關係設定如式(1)。

$$\text{連鎖延滯} = f(\text{路線容量}, \text{列車密度}, \text{初始延滯}, \text{運轉調度策略}) \quad (1)$$

有鑑於前述路線、交通及控制條件交互關係甚為複雜，且由於本研究係定位在既定路線條件之營運班表下探討連鎖延滯之影響因素關係，故除選定相關文獻所指出直接影響連鎖延滯之初始延滯外，另就交通及控制條件中分別選出較具代表性之列車密度及運轉調度策略進行分析。

二、文獻回顧

經檢視彙整過去關於延滯議題之相關研究，主要可歸納如下類型：(1) 可靠度評估指標分析；(2) 延滯原因及程度之敘述統計分析；(3) 延滯（主要設定在初始延滯部分）之風險矩陣分析^[7]；(4) 車站、軌道及列車相依等延滯型態相關之解析式延滯預測分析^[8-10]；(5) 單線區間之交會待避或多月台車站特定區位之延滯擾動暨班表可靠度模擬分析^[11]；(6) 延滯影響因素分析、評估指標及相關推論統計分析^[3,6,12]；(7) 單一車站連鎖延滯之隨機解析式分析^[13]。

而軌道運輸系統的運作本質上可視為一個等候系統，抵達率可視為單位時間之「列車流量」，亦即為列車密度（列車數／單位時間），而軌道設施的服務率可視為「軌道容量」，

當列車流量趨近於軌道容量時，延滯亦會趨近於無窮大，因此列車流量與平均延滯時間關係的曲線，於接近軌道容量時會有大幅陡升的現象，而延滯愈大、可靠度亦會愈低，故延滯與可靠度二者存在抵換 (trade-off) 的關係，而欲釐清臺鐵系統延滯 (尤其連鎖延滯) 之各項複雜問題，可就班表可靠度、列車異質性及容量與可靠度的關係等方面之相關文獻進行回顧歸納，茲分述如下：

2.1 班表可靠度問題

在理論研究與實務應用，準點率並非是評估列車服務可靠度的唯一指標，而需依據研究方法和問題特性挑選適用的指標。Middelkoop 與 Bouwman^[14]應用 SIMONE 模擬軟體來比較兩個小型路網及時刻表之穩定度 (stability)，其中對可靠度的評估是採用延滯的列車數、恢復時間，以及初始與最終延滯之比率等三個項目來作為評比的標準，並進行荷蘭 Weesp 車站轉乘等待時間的案例研究，發現增加 6 列貨物列車排入班表後，會造成延滯的程度增加 10%，顯示列車流量的提高會導致可靠度下降，惟其主要內容係強調將 SIMONE 商業模擬軟體，應用於荷蘭鐵路實際案例以進行時刻表穩定度之實驗測試結果，並無探討如何處理類似臺鐵多車種、複線運轉及多類型月臺型式之鐵路系統，及其路線、交通及控制條件交互作用產生複雜延滯擴散影響等問題。而 Briggs 和 Beck^[12]則是發展更複雜的指標：先統計在某一車站的列車實際運行資料，找出一個最能夠代表其延誤時間和發生率關係的 q-exponential 函數 (q-exponential functions)，再透過該函數中的各項係數來評估該車站之可靠度表現。此方法的優點為可分別評估各車站的可靠度，其結果更能反映旅客的感受，但缺點為其過程相當繁雜。Higgins 等人^[8]則考量了每個軌道路段、列車和班表，分別針對車站 (含端點站)、軌道相關以及列車相依等三種型態的延滯建構解析模式，可用於改善班表的可靠度，之後又分別以貨運和客運為對象，以解析方法預估其可能延滯時間^[15]。

除了解析方法，亦有許多研究採用模擬分析，Barter^[16]除介紹 RailPlan 模擬模式之基本概念之外，亦討論了容量與列車服務之間的關係以及可靠度規劃 (planning for reliability) 問題。在 EUROPE-TRIP 計畫³中則是利用 VISION 模式，探討時刻表每多排入不同列車數對整體路線延滯之影響情形，發現排入的列車數與整體的延滯時間，兩者之間存在著抵換 (trade-off) 關係。

2.2 列車異質性相關問題

由於列車在軌道上運行的原理與等候理論 (queuing theory) 相當類似，因此以該理論為基礎，可對列車延滯行為與現象進行探討，Hansen^[17]就利用了等候理論搭配 Max-Plus

3. Ferrovie dello Stato Spa - Divisione Infrastruttura, *European Railways Optimisation Planning Environment - Transportation Railways Integrated Planning*, Final Report, Roma Italy, EuROPE-TRIP, 2000.

代數法 (max-plus algebra)，來推估車站容量與列車服務的可靠度。

2.2.1 班表可靠度與列車異質性問題探討

Vromans 及 Dekker^[18] 分析列車服務頻率與列車平均延滯之關係，並釐清列車服務頻率與延滯及列車異質性間之關係，更以最短班距倒數和 (the sum of shortest headway reciprocals, SSHR) 及抵達班距倒數和 (the sum of arrival headway reciprocals, SAHR) 等二項指標來評估列車之異質性，證實提升列車營運可靠度最佳方法就是降低因列車異質性所導致之連鎖延滯效應。

Huisman 及 Boucherie^[19] 藉由所蒐集之延滯資料構建一隨機模式來描述排班及非排班列車之移動情形，並藉由求解軌道系統之線性不等式可得到每列車之行駛時間 (running time) 分佈，研究亦發現影響行駛時間之關鍵因素包括列車數、列車異質性、初始延滯、列車行駛順序及運轉寬裕時間等。

Carey^[20] 為評估複線列車運行之可靠度 (reliability) 及準點率 (punctuality)，以解析式方法構建連鎖延滯之機率密度函數計算公式，其係為給定班表之列車班距及外生初始延滯機率密度函數之函數關係，並透過該函數計算出連鎖延滯之擴散延滯量；另因為外生初始延滯之機率密度函數不易獲得，其亦應用一些啟發式求解方法進行問題之求解。

2.2.2 列車運行之車站及月臺指派問題

Chakroborty 與 Vikram^[21] 構建一線性混合整數規劃模式求解一多月臺繁忙車站之列車到達型態最佳化問題，該研究假設列車實際到站時間會在原訂班表時間之前 1 小時左右得知，模式主要處理列車運行不如預期排班導致月臺及股道壅塞之列車運行延滯，主要考慮要素包括：(1) 列車運行延滯；(2) 月臺與列車適合度配置 (以印度車站為例)；(3) 列車到站之最後停站月臺重新指派。

Carey 與 Crawford^[22] 針對一個具大量不同列車速度組合、多月臺車站及複雜路線之鐵路路網，研析實務上考量列車運行延滯、避免列車運行衝突之最佳化排班問題；為解決初始班表之列車運行衝突問題，該研究發展一啟發式求解方法，並透過模擬方法獲得無運行衝突之最佳班表，提供實際可運行班表、營運策略、車站配置及隨機延滯等問題之參考。

重新排班 (rescheduling) 之主要任務係在列車實際運轉過程中確認及解決列車衝突，並透過重新排班使列車營運儘速回復至最初班表，Hansen 與 Pachl 於 *Railway Timetable & Traffic*^[23] 一書中即提到重新排班之功能包括：使列車運轉重回無列車衝突之班表、提供列車重新運轉之資訊、偵測列車衝突、自動解決列車衝突、產生無衝突重新指派之新班表及提供列車運轉交通控制所需之資料等。另該書亦指出解決列車衝突重新排班之方法，包括：使用替代路線、延長停站時間、延長站間運轉時間、重新安排不停靠車站、運轉需要之增停車站及取消部分列車等，而此亦即是本研究運轉調度策略 (timetable recovery strategy) 所探討之範疇。另 Chang 與 Chung^[24] 曾建構一列車運轉模式，考慮列車管制彈

性及列車重新排班問題以分析對列車班表制訂之影響，並以基因演算法 (genetic algorithm) 進行較有效率之求解。Corman 等人^[25]亦曾以禁忌搜尋演算法 (tabu search algorithm)，應用於荷蘭鐵路路網列車衝突偵測及延滯排除之重新排班案例求解，並與既有之即時交通管理系統 ROMA (railway traffic optimization by means of alternative graphs) 比較，其結果不僅得到重新排班之最佳解，且求解效率更佳。

2.2.3 容量利用及列車運行連鎖延滯擴散問題

Yuan 及 Hansen^[13]有鑑於鐵路路網容量之有效使用與列車運行可靠度及準點率之提升間具有 trade-off 關係，為有效解決車站月臺之股道路線運行衝突及轉乘旅客上下車所導致之延滯問題，遂建構一車站連鎖延滯之隨機解析模式；該研究考慮複雜的號誌系統、列車運行優先順序保持及股道佔用時間擾動等問題。由於該模式以荷蘭鐵路實際資料成功驗證，故該研究所構建之模式亦被應用於處理車站容量利用最佳化問題，另藉由該模式亦可分析通過平面交叉股道路線且具最大運行連鎖延滯擴散之最大列車班次數。該研究亦發現當表訂運轉寬裕時間 (scheduled buffer time) 減少，則其通過列車之平均列車運行連鎖延滯擴散將呈指數型增加，如圖 2 所示。

Nie 及 Hansen^[26]以系統分析方法分析列車運轉與鐵路網路中車站股道佔用之關聯問題，其係以所蒐集之路網車站、班表及列車到開偵測資料，與推估之閉塞區間時間 (blocking time)、運轉寬裕時間 (buffer time) 及股道佔用 (track occupancies) 等各項資料進行比較及統計分析，並以荷蘭鐵路車站進行實證，結果證實當車站平面交叉路段及進出站之股道被佔用超過 80%時，其列車運行速度及容量將顯著下降；另月台股道亦因列車運行交叉行為而使其旅客上下車時間延長，故若能有效蒐集列車行駛時間 (running time) 及營運延滯資料，進而精確推估閉塞區間時間及運轉寬裕時間，將可有效提升大型轉運車站之表訂列車到、開時間之可靠度，而路線股道交叉點及橫渡線之運轉寬裕時間也正可反映實際列車運轉速度及閉塞區間時間之機率分配關係。

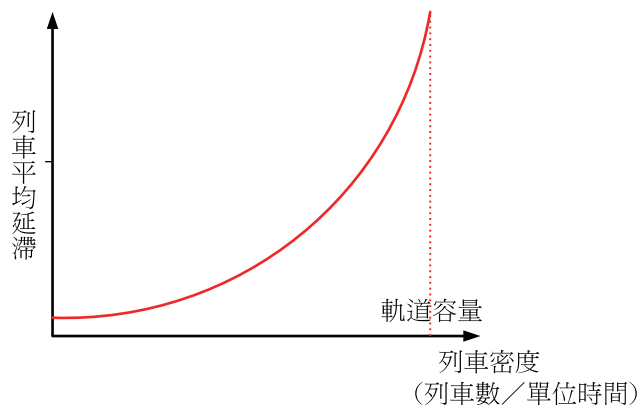


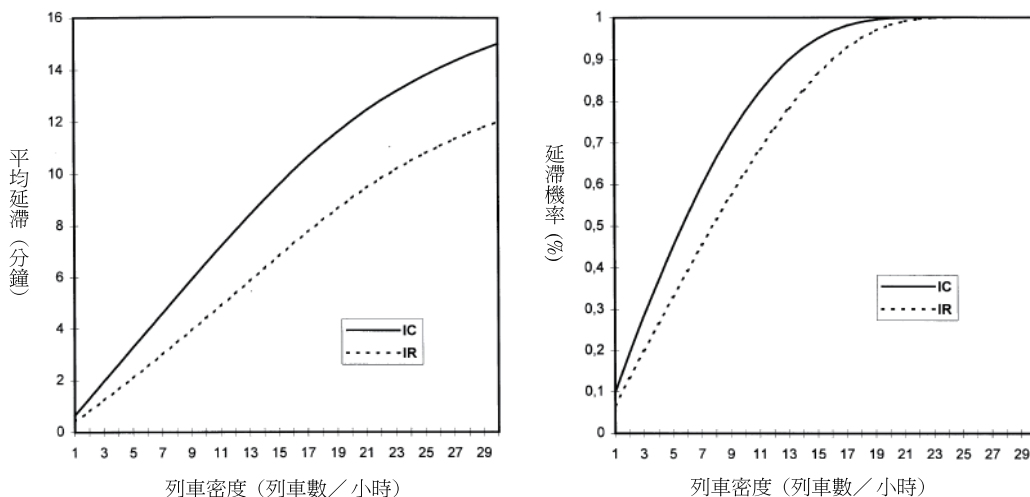
圖 2 列車延滯與列車密度關係示意圖

2.3 容量與可靠度的關係

影響可靠度的因素很多，在 Olsson 等人^[3]對挪威鐵路系統所作的一系列研究中，透過統計方法，以相關係數 (pearson correlation) 來確認影響準點率的因素，其中包含：旅客數、容量利用率、班次取消率、臨時速限、工程施工、平日／週末、到離站準點情形及運轉調度方式等。該研究結果中，雖然容量利用率和準點率的相關性沒有預期中高，但就等候理論的邏輯以及過去許多相關研究結果，在在說明其關聯性：列車流量愈高、路線容量利用率愈高，則可靠度會愈低。若某一班列車發生延滯，其續行列車有可能受到影響而跟著延滯，這是所謂的延滯的連鎖效應 (knock-on effects)。當列車流量愈高時，表示列車之間的距離愈近，因此延滯的連鎖效應影響愈大，使得整體的可靠度降低。

Huisman 和 Boucherie^[19]考量在複線區段且有不同的車種組成，發展了計算運轉時間的統計模式，此模式可應用於分析每小時列車數對平均延滯和延滯發生機率的影響，經以荷蘭阿默斯福特 (Amersfoort) 到茲沃勒 (Zwolle) 路段為例，其研究結果如圖 3，顯示當每小時列車數增加時，除了平均延滯時間會跟著增加外，延滯發生的機率也會同樣提升。

另 Mattsson^[27]指出高列車流量代表著高路線容量利用率，而在實際營運上，容量利用率愈低表示有愈多未使用的容量可作為運轉調度的緩衝，以減少列車延滯造成的衝擊，當有列車發生延滯時，便能迅速恢復回常態運轉，因此可靠度較高。該文中也提到，Wahlborg 利用了 RailSys 模擬模式，研究瑞典韋斯特羅斯 (Västerås) 到斯德哥爾摩 (Stockholm) 路段，在不同的交通量下，從延滯發生到恢復成常態運轉所需的時間，結果如表 2，可看出當有延滯發生時，容量利用率愈高則受影響的列車數愈多，且恢復運轉所需的時間也愈長，意味著系統整體的可靠度愈低。



註：IC 表示城際鐵路 (Intercity)；IR 表示區域鐵路 (Interregional)。

圖 3 每小時列車數對平均延滯和延滯發生機率的影響

表 2 容量利用率和恢復運轉所需時間之關係

列車數	31	35	37
容量利用率 (%)	62	72	76
當發生 15 分鐘延滯時，受到影響的列車數	4.8	7.0	8.0
當發生 15 分鐘延滯時，恢復運轉所需的時間 (min)	41.4	47.9	51.3

三、研究方法

前 1.1 節已提及軌道系統列車運轉之延滯概分為正常營運之排班延滯 (scheduled delay) 及特殊事件之非排班延滯 (unscheduled delay) 二類，本研究係針對第二類型非排班延滯之連鎖延滯 (knock-on delay) 進行分析；由於傳統區域鐵路 (如臺鐵系統) 營運過程中列車彼此間之互動關係非常複雜，要以解析式方法具體分析釐清列車受外在延滯後之連鎖延滯擴散效應甚為困難，因此本研究選擇採用適合分析列車複雜交互作用之模擬方法，來分析評估延滯與列車間及與硬體設施之關係。本研究所建構之模擬模式主要考量列車流量、車種組成、站間運轉時間以及號誌時距等因素，可用以分析釐清不同列車密度對連鎖延滯之影響程度，及其與其他路線、交通及控制等條件之交互作用關係；另本研究亦於案例分析部分依據本模擬模式所產生的大量資料進行迴歸分析，以建立適合臺鐵系統連鎖延滯推估之迴歸模式。

3.1 模擬模式

軌道系統之延滯主要係為路線容量不足所導致，而路線容量又受路線條件、交通條件及控制條件所影響 (如圖 1 所示)，故延滯亦將受上述 3 大類條件之影響。而因列車運行延滯在軌道系統營運階段係扮演列車班距 (train headway) 及列車流量 (traffic flow) 之關鍵決定要素，故本研究所建構之模擬模式主要功能在於連鎖延滯之推估，其估算結果可作為後續營運可靠度分析 (train reliability) 及營運排班調度之參考。

(一) 模式架構

本模式之架構如圖 4 所示，主要輸入資料包括基本條件資料、計畫班表、初始延滯，輸出資料則為模擬之實際班表，並據以計算連鎖延滯。

1. 基本條件資料：包括軌道容量相關的路線條件、交通條件與控制條件如表 3。
2. 計畫班表：包括各車次於每個車站的預定到/開時間、各車次之起迄點、列車順序及停站型態，故本模式可處理多種列車、不同列車等級、不同站間運轉時間、不同起迄站、不同停靠車站、不同停靠時間之情境。
3. 初始延滯：本研究旨在處理連鎖延滯之影響，故模擬模式必須設定一項初始延滯的相關

輸入資訊，初始延滯可設定在軌道路線之任一位置，延滯參數之設定如表 4 所示。

4. 模擬之實際班表：模擬後之班表為模式之最後產出，其呈現列車受延滯影響後之實際到開時間，而模擬班表與計畫班表中各列車到開時間之差距即為連鎖延滯。

(二) 模式假設與限制

本模式之假設與操作限制如下。

1. 車站間均有兩股道同時以複線方式運轉。
2. 臺鐵系統列車於北上、南下之站間股道係獨立運轉，但當產生延滯時則於站內共用股道則可依營運需要彈性調度不同方向之列車順序，故二方向之列車運轉將會產生交互作用。
3. 臺鐵區域鐵路系統之車站配置型態歸納為 5 種型式，如圖 5～圖 9。
4. 由於臺鐵系統號誌設置之限制，各站間允許駐留之列車數有上限限制（例如 2 列車）。
5. 運轉調度之站間趕點時間以站間運轉時間固定的縮減比率設定之（例如 0.9）。

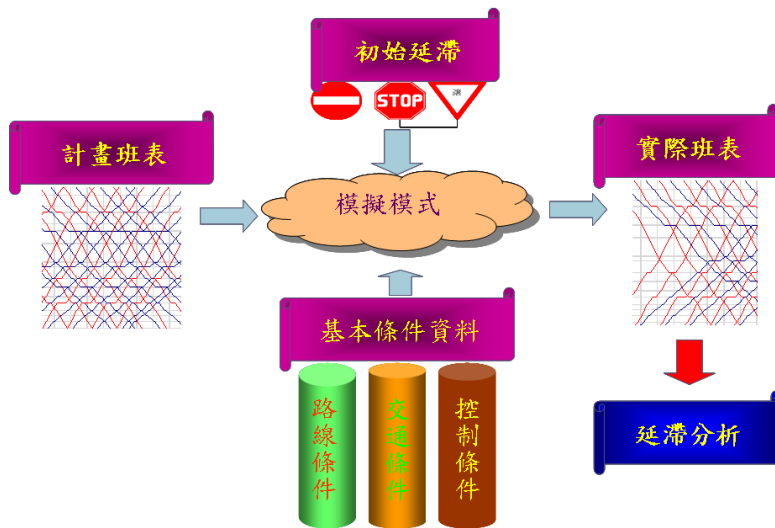


圖 4 模式架構圖

表 3 基本輸入資料表

項目 \ 條件	路線條件	交通條件	控制條件
輸入 參數 內容	- 路線 - 車站列表 - 車站軌道佈設	- 最短停站時分 - 見計畫班表	- 同向時隔 - 反向時隔 - 站間容量 - 趕點能力

表 4 初始延滯之設定參數表

延滯參數	說明
延滯地點	若為站間軌道：需指定方向 若為站內軌道：需進一步指定股道
起始時間	該軌道資源開始無法被使用
解除時間	該軌道資源可再被使用之時間
延滯嚴重程度	將「解除時間」減去「起始時間」即為延滯嚴重程度

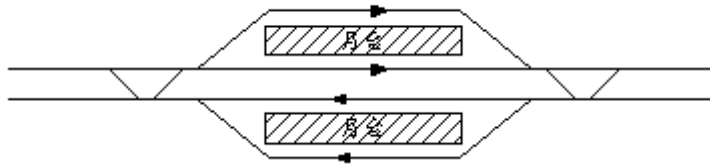


圖 5 型 I 車站軌道佈設

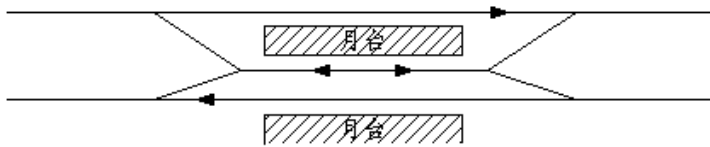


圖 6 型 II 車站軌道佈設

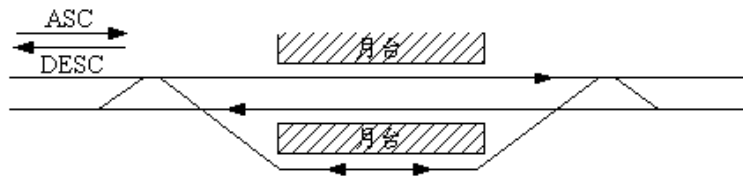


圖 7 型 III_R 車站軌道佈設



圖 8 型 III_L 車站軌道佈設

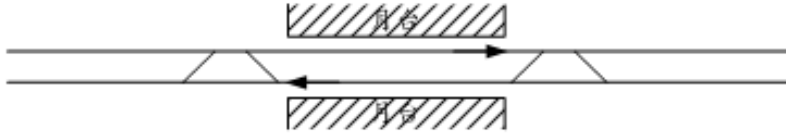
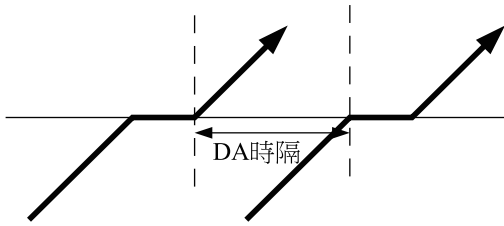


圖 9 型 VI 車站軌道佈設

(三) 模擬機制

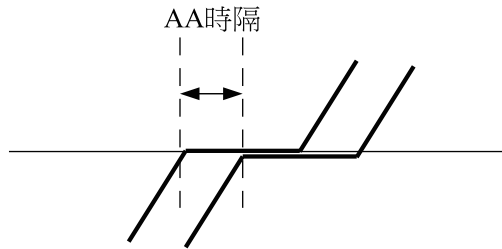
為準確估算連鎖延滯，本模擬模式必須考慮所有影響列車運行之因素，相關因素之處理方式彙整如下：

1. 列車衝突解決：站間軌道之列車運行規則為先進先出，且不允許站間追越；另站間軌道有容量限制，不允許過多的列車滯留同一站間；站內每一股道只允許一列車佔用，而先行列車離開車站後，續行列車進入該股道必須符合離一到時隔限制，如圖 10 所示；二連續列車抵達同一車站之不同股道，必須符合到一到時隔限制，如圖 11 所示；至於二連續列車由同一車站之不同股道離開，則必須符合離一離時隔限制，如圖 12 所示；另假如二列車由不同方向通過平面交叉點，則必須符合平面交叉時隔限制，如圖 13 所示。



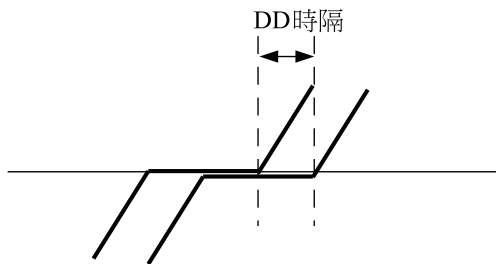
註：DA 時隔 (departure-arrival headway)。

圖 10 同向列車離一到時隔示意圖



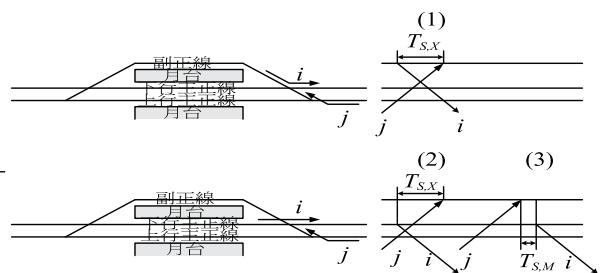
註：AA 時隔 (arrival-arrival headway)。

圖 11 同向列車到一到時隔示意圖



註：DD 時隔 (departure-departure headway)。

圖 12 同向列車離一離時隔示意圖



註： $T_{S,X}$ 為先行與續行列車之號誌安全時距；
 $T_{S,M}$ 為先行進站與續行列車離站之號誌安全時距。

圖 13 型 III 月臺之平面交叉時隔示意圖

2. 列車延滯排除：當模式執行時，若續行列車違反前述之運行規則而無法前進時，即產生延滯及可能之連鎖延滯現象，當模式偵測到此現象時，均統一將該事件的執行時間（系統時間）延後 1 秒執行，此方法可以使列車的運行無限的往後遞延直到前方的事故（延滯）原因排除為止。
3. 運轉調度策略：鐵路營運單位在列車延誤時，通常會啟動運轉調整機制，而本模式所考慮的「運轉調度策略」允許使用單一或多種策略同時搭配使用，包括：
 - (1) 站內趕點：縮短停站時間，但是必須遵守停站時間最短限制，而且需依公開時刻表不可提早開車。
 - (2) 站間趕點：縮短站間運轉時間，但仍需遵守趕點限制。
 - (3) 同時採取站內趕點與站間趕點。

(四) 模擬程式設計

模擬程式之設計與開發，旨在設計一套資料結構來描述整個軌道行車系統之各種狀態，包含列車、車站、軌道等，同時針對列車運轉邏輯設計對應的狀態改變，透過不斷更新電腦記憶體中的變數來達到系統模擬之目的，最後將本研究關注的變數（即列車延滯）匯出，以利後續的績效評析。以下將分別就物件類別、行車系統模擬流程、初始延滯三項設計進行深入說明。

1. 物件類別 (Class) 設計

類別設計為物件導向程式設計中最重要之基礎^[28]，一般而言包括：(1) 邊界類別 (boundary class)、(2) 實體類別 (entity class) 及 (3) 控制類別 (control classes) 三大類，其中第一類是用來處理使用者介面，第二類則是用來處理問題領域的核心資料，最後一類則是用來處理前兩類資料的協調與互動，由於 (1) 與 (3) 類與核心模式較無關連，故以下僅就與模式相關之實體類別部分進行說明。本研究共設計了 9 個類別來描述整個軌道系統，包括 RailSystem、Train、DwellPlan、Station、StationI、StationII、StationIII_R、StationIII_L、Tracks 等。其中 RailSystem 是最上層的類別，除了一些 Global 的變數之外，所有其他的類別物件均包含於其中；而 Station 類別則是其他四個 Station 開頭類別的父類別，父類別用來描述最基本的車站（即圖 9 的捷運化車站），另外四個子類別則分別描述其他四型車站如圖 5～圖 8。Tracks 類別是被 Station 類別所包含，而 Train 與 DwellPlan 則是用來描述「計畫班表」與「實際班表」。另其中 Train 與 Station 都以集合物件的形式和 RailSystem 以合成 (aggregation/composition)^[28] 關係存在，其他諸如 Train 與 DwellPlan、Station 與 Track 均為合成關係。至於 StationI、StationII、StationIII_R、StationIII_L 等四個類別則繼承 (inheritance)^[28] 自 Station 類別，用以實作各種不同形式車站的行車限制。

2. 行車系統模擬流程

本模擬模式估算連鎖延滯之整體流程如圖 14 所示，主要是以事件導向的方式進行，一開始將所有列車的第一個事件加入事件列表，經時間排序後每次依序執行第一個事件，

共計有進站、通過與離站三種事件，若有列車衝突則都在延滯處理時把時間加計一秒後重新加回事件列表，當所有的事件均處理完成後，事件列表沒有任何事件，即完成模擬。至於衝突項目的檢查方式則視事件種類有所差異如表 5 所示。

3. 初始延滯運作

前述模擬流程僅能處理列車的基本運轉以及連鎖推擠效應，但模式仍尚未具有模擬「初始延滯」之功能。由於初始延滯的產生可能在不同時空，且程度不一，故須結合在前述模擬架構 (如圖 14) 從事件驅動引擎中新增兩種事件，包括障礙開始與障礙結束，第一種事件安排於初始延滯發生時執行，觸動時將會鎖定使用者所設定之軌道，使其無法被列車佔用；第二種事件則在第一種事件發生後的若干時間 (使用者指定之延滯程度) 執行，觸動時將會解除鎖定。透過上述方法將可在任意時空產生任意程度的延滯。

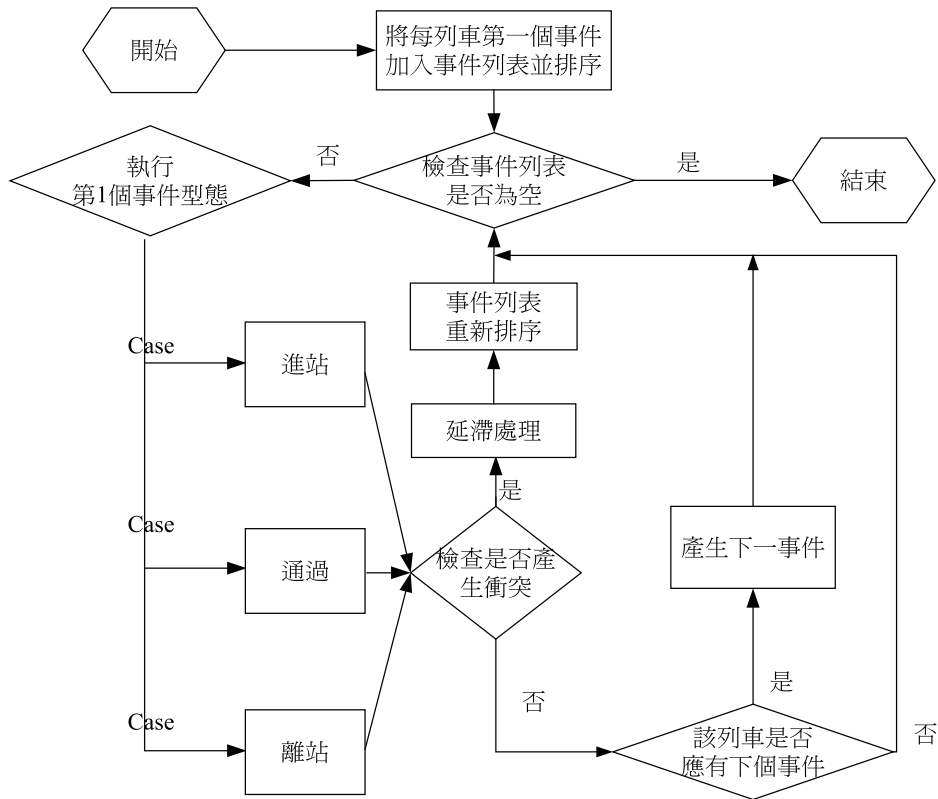


圖 14 連鎖延滯之模擬流程圖

(五) 模擬模式驗證

為測試模擬模式之準確適用性，本模式在前期研究^[6]已選用臺鐵系統交通量最繁忙之七堵—樹林路段，擷取 2009 年 7 月 29 日 (週三) 一般日之中央列車控制 CTC (centralized

表 5 各種不同事件的衝突檢查項目

事件種類	進 站	通 過	離 站
檢查項目清單	是否存在站間追越 站內股道數足夠與否 進站時隔充足與否 反向時隔充足與否	是否存在站間追越 站內股道數足夠與否 進站時隔充足與否 反向時隔充足與否 離站時隔充足與否 股道容量充足與否	離站時隔充足與否 反向時隔充足與否 股道容量充足與否

train control) 資料庫，選定萬華—臺北路段於上午 10:10 北上 42 車次有 18.2 分鐘之初始延滯所產生之實際列車到一開之延滯資料進行驗證分析，結果顯示計有臺北、松山、南港、汐止及七堵等 5 個站共 40 部列車受該初始延滯影響，相關驗證分析討論茲述如下：

1. 模式驗證指標選定

檢視上述 40 筆列車樣本，其實際延滯值不僅頗分散（平均值為 282.6 秒、標準差為 428.8 秒）且延滯值跳動、無如預期向下游擴散之現象，經研判該結果可能係實務上調度員遇事故時常依經驗判斷採行不同列車調度策略所致，且調度策略因時因地因車皆不同；另該延滯結果亦可能是整體系統、前後路段及各項複雜外生事件因素交互作用之結果，故所蒐集之實際延滯資料屬性不易歸納其趨勢傾向，亦不適於進行各項統計檢定分析。另由於其中 13 筆樣本之實際延滯值為 0，若以式 (2) 一般慣用之平均絕對百分比誤差 (mean absolute percentage error, MAPE) 或式 (3) 之均方根誤差 (root mean square error, RMSE) 作為模式推估精確度之驗證指標，將不適用且產生極大偏誤之現象，故在臺鐵實際延滯資料具高度複雜性不易釐清之前提下，鑑於臺鐵營運實務上若列車延滯不超過 5 分鐘則不視為誤點之認定標準，本模式之驗證指標將以受影響列車之模式推估延滯與該列車實際延滯之差異絕對值是否超過 5 分鐘，作為模擬模式之精確度評估指標。

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (3)$$

2. 模式驗證結果分析

應用上述模擬模式之精確度評估指標，經彙整本案例 40 筆受影響列車樣本之模式推估延滯與實際延滯資料，其差異分佈及其差異絕對值之統計分如圖 15 及表 6 所示，結果顯示有 30% 之模擬延滯時間與實際延滯時間幾近相同，有 90% 之列車樣本模擬延滯時間與實際資料差距在 5 分鐘之內，故整體而言顯示本模擬模式估算結果之準確度可被接受。

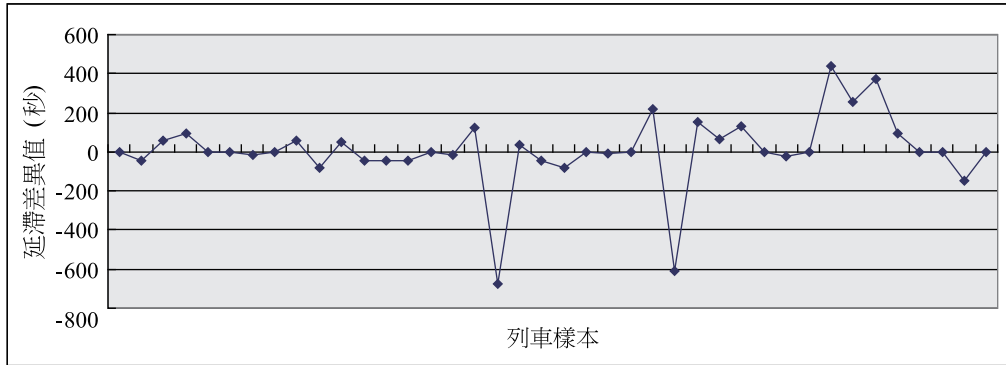


圖 15 受影響列車樣本之模擬延滯與實際延滯差異分佈圖

表 6 受影響列車樣本之模擬延滯與實際延滯差異統計表

延滯差異之絕對值(秒)	列車樣本數	樣本百分比 (%)	累積百分比 (%)
diff.=0	12	30.0%	30.0%
0<diff.<=60	13	32.5%	62.5%
60<diff.<=120	6	15.0%	77.5%
120<diff.<=180	3	7.5%	85.0%
180<diff.<=240	1	2.5%	87.5%
240<diff.<=300	1	2.5%	90.0%
diff.>300	4	10.0%	100.0%
	合計 = 40	100.0%	

3.2 初始延滯、運轉調度策略與連鎖延滯之關聯分析

前期研究經以臺鐵系統之基隆—新竹路段為例，應用上述之模擬模式針對營運之推拉式自強號 (PP) 及通勤電聯車 (EMU) 兩種類型列車共計 184 列，分析初始延滯與連鎖延滯之關係，並加入不同調度策略分析其對連鎖延滯降低改善之程度；其係設定初始延滯事件發生在上午 8 點南下方向之松山—臺北站間，並設定 0 秒至 3,600 秒之不同延滯持續時間情境，以評估不同初始延滯情境下之連鎖延滯影響程度，重要之分析結果摘述如后。

1. 連鎖延滯擴散：若設定初始延滯事件發生在南下方向之松山—臺北站間，則總連鎖延滯模擬結果顯示在松山—新竹路段中任一車站之總連鎖延滯比基隆—松山路段中任一車站之總連鎖延滯都高，顯示連鎖延滯有往下游路段擴散之現象，且連鎖延滯隨初始延滯增加而呈非線性遞增之趨勢。
2. 調度策略降低連鎖延滯之比較：整體而言隨著初始延滯增加，趕點策略對連鎖延滯降低之程度就更明顯；若依所有車站之連鎖延滯減少程度排序，最佳策略為同時採取減少車

站之列車停站時間及減少站間之列車運行時間二種趕點策略，但若僅考慮路段端點站之連鎖延滯，則以減少站間之列車運行時間為最佳策略，因臺鐵之站距較長，站間運行時間亦較長，故採用站間趕點之效果亦可能較好，此結果與先驗知識頗為接近。

3. 趕點策略對連鎖延滯降低之程度：以新竹站為例，相較於未採取任何趕點策略情境，當同時採取上述二種趕點策略且有 3,600 秒之初始延滯時，其連鎖延滯可由 23,989 秒降低為 19,050 秒，延滯時間可降低 4,939 秒（相當約 82 分鐘），改善成效相當顯著。

四、案例分析

由於重建相同軌道營運條件難度甚高，現場調查之成本亦不低，故在現實世界中欲以現場實驗調查方式分析比較在相同軌道營運狀況下，不同排班調度策略對連鎖延滯之恢復效果差異，幾乎是不可能的。故本研究係應用所構建之模擬模式，在前期研究所完成初始延滯、運轉調度策略與連鎖延滯之關聯分析基礎下，接續探討不同列車密度 (train density) 對連鎖延滯之影響關係程度，及尋找建立連鎖延滯與各關鍵影響因素之因果函數關係。本研究以所建構模擬模式產生之各種情境下之延滯資料，進行連鎖延滯之影響及原因分析，以提供營運調度實務應用之參考。

4.1 路段選擇

因七堵—樹林路段為臺鐵系統北部區域主要通勤旅次服務路段，更是臺鐵東部幹線及西部幹線始發行駛重疊路段，無論列車班次密度、停站型態、行駛列車種類等特性皆最為複雜繁忙，該路段最能代表臺鐵複雜之系統特性及各項軟硬體設施之交互作用，故本研究選擇該段作為案例分析路段。

本研究考量前期研究係選用七堵—樹林路段之資料進行模式驗證，基於一致性及為避免假日加班車對正常班表擾動之影響，故引用該路段 2009 年 10 月 20 日一般日（週二）之 CTC 資料進行列車密度、初始延滯與連鎖延滯關係分析。有關本模擬模式所需之輸入資料，包括車站里程、列車特性、班表趕點規則、營運參數、停站類型及股道配置等，以及全域參數（如班距、路段容量及站間趕點率）、車站里程與站內股道配置及班表逐一之設定，詳如圖 16 之模擬程式輸入檔。

4.2 不同列車密度對連鎖延滯之影響分析

由前期研究結果顯示，當系統發生初始延滯而導致軌道系統之路線容量不足時，列車之運行將受路線條件、交通條件及控制條件之交互作用影響而產生連鎖延滯之現象。雖然路線條件（例如站間軌道數目與運轉方式、站內軌道及月臺配置方式等），交通條件（例如列車交通組成、停站時間與停站型態等），以及控制條件（例如辦理閉塞方式、閉塞號誌配

置方式、閉塞區間長度等) 之改善, 皆可能對連鎖延滯產生一定程度之降低效用, 但考量實務上既有硬體設施之改善比較困難, 故本研究係聚焦於探討營運列車密度對班表可靠度及連鎖延滯程度之影響。

INPUT.txt - 記事本

檔案(F) 編輯(E) 格式(O) 檢視(V) 說明(H)

#####全域變數#####

#同向到達-到達時隔(秒)
180

#同向離開-到達時隔(秒)
190

#同向離開-離開時隔(秒)
200

#反向到達-離開時隔(秒)
210

#反向離開-到達時隔(秒)
220

#站間容量
2

#起點時運轉時間:原有時間比例(0.0<x<1.0)
0.900000

#####路線車站#####

#車站數目
9

#名稱	車站里程(m)	車站型式	停靠列車最短停站時間
南港,	18700,	1,	60
松山,	22200,	1,	60
台北,	28600,	1,	90
萬華,	31200,	2,	30
板橋,	36400,	1,	60
樹林,	41000,	1,	60
山佳,	44800,	5,	30
鶯歌,	49300,	1,	30
桃園,	57500,	3,	60

#####車次資料#####

#列車數目
6

#車種	車次	停站計畫
1, 車次A,	松山, 松山, 台北, 台北, 萬華, 萬華, 板橋, 板	38400, 38520, 38940, 39180, 39360, 39360, 39660, 397
1, 車次B,	松山, 松山, 台北, 台北, 萬華, 萬華, 板橋, 板	39600, 39720, 40140, 40380, 40560, 40560, 40860, 409
2, 車次C,	台北, 台北, 萬華, 萬華, 板橋, 板橋, 樹林, 樹	41340, 41580, 41760, 41760, 42060, 42180, 42660, 427

圖 16 模擬程式輸入檔內容

國內外許多相關研究^[2,3,6,19]均已指出連鎖延滯隨列車流量密度增加而呈非線性指數函數遞增之趨勢, 本節假設在硬體路線條件及系統設施不變前提下, 運用本模擬模式逐一測試分析初始延滯與列車流量密度(屬交通條件)對連鎖延滯之影響情形。相關分析步驟如下:

1. 班表製作: 本研究依據七堵—樹林路段 2009 年 10 月 20 日(週二)之 CTC 資料, 採用該日該路段雙向 256 車次作為分析基礎, 另為分析發生初始延滯時每小時不同列車密度對連鎖延滯之影響有何不同, 經以列車離站時間搜尋本路段各站間時空條件, 因松山→臺北南下路段於上午 07:15~08:15 有最高尖峰小時流量密度 11 列次(相關車次清單如表 7 所示), 故本研究選定作為後續不同列車密度模擬分析之基礎。

表 7 松山→臺北路段尖峰小時 11 列次清單

車 次	離站時間	車 次	離站時間
13	07:15:30	1005	07:20:00
2708	07:27:00	3005	07:33:00
2710	07:38:00	3043	07:44:00
1007	07:49:00	2165	08:00:00
2712	08:05:00	3003	08:09:30
1064	08:14:30	—	—

2. 實驗設計：為控制各種條件一致下進行列車密度對連鎖延滯之影響分析，本研究於找出尖峰小時最高列車密度之路段，以其作為設定初始延滯之時間與空間基礎後，依前述之時空條件得到其在無初始延滯情況下之可行班表時空圖如圖 17 所示，若設定松山→臺北路段於上午 07:15 有 60 分鐘之初始延滯則其時空圖如圖 18 所示，下游路段及後續列車之連鎖延滯擴散現象相當明顯。至於不同列車密度之實驗設計，本研究則以該日上午 07:15~08:15 通過松山→臺北路段最高之 11 列次逐步刪減 1 列次作為不同之分析情境，以 11 列次刪減任一列次之每小時 10 列車為例，即共有 11 種情境組合，依此類推；故窮舉各種列車密度所刪減列車之可能情境，經加總所有列車密度之列車組合情境共有 2,048 組，如表 8 所示。

表 8 尖峰小時通過列車數之各種組合情境

列車數／ 每小時	情境組合數	列車數／ 每小時	情境組合數	列車數／ 每小時	情境組合數
11	1	7	330	3	165
10	11	6	462	2	55
9	55	5	462	1	11
8	165	4	330	0	1

3. 連鎖延滯資料：有關列車延滯之相關分析，多以分析路段之最末站（七堵站及樹林站）作為量測基準來計算列車的延滯，故本研究之連鎖延滯分析亦採計最末站之延滯；為利逐步釐清列車密度與初始延滯對連鎖延滯之影響，本研究針對列車密度之 2,048 種情境及初始延滯之 61 種情境（0~60 分鐘每次增加 1 分鐘為一種情境），以模擬模式產生 124,928 筆不同情境之連鎖延滯資料，作為後續分析之基礎。
4. 無調度策略下列車密度、初始延滯與連鎖延滯之關聯分析

為利了解列車密度與初始延滯對連鎖延滯之關聯關係暨其影響程度，以及列車密度或

初始延滯單獨對連鎖延滯之影響關係，本節除針對特定初始延滯情境下列車密度與連鎖延滯，及特定列車密度情境下初始延滯與連鎖延滯等二個面向進行其關聯分析外，亦以 3D 圖同時呈現各情境下三者之關係。

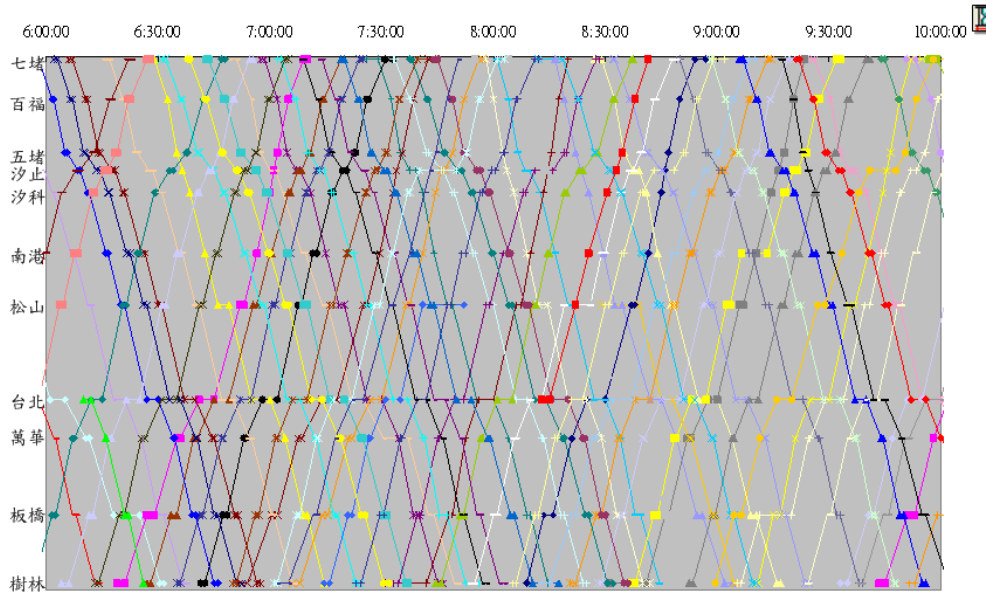


圖 17 七堵—樹林路段無初始延滯之時空圖

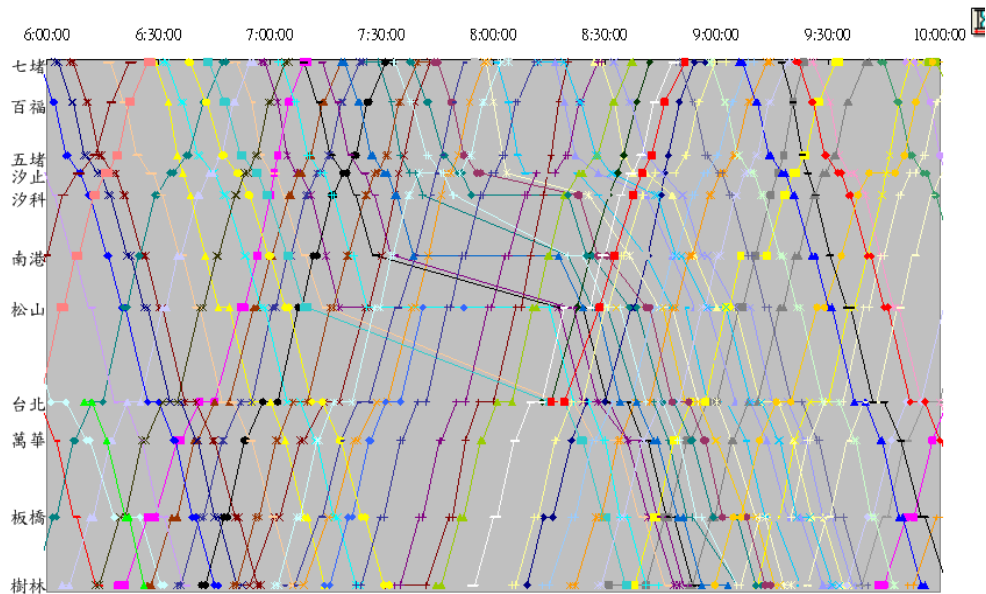


圖 18 七堵—樹林路段於松山→臺北路段有 60 分鐘初始延滯之時空圖

- (1) 列車密度與連鎖延滯之落點分析：選定初始延滯為 60 分鐘下，將 X 軸設定為列車密度 (0~11 列車)，Y 軸設定為每種列車密度之最末站連鎖延滯，則 2,048 個樣本點分佈如圖 19 所示，由分佈情形亦可看出最末站之連鎖延滯隨列車密度增加而遞增之趨勢。
- (2) 列車密度與連鎖延滯之關聯分析：為利比較不同列車密度下之連鎖延滯是否有顯著差異，本研究以圖 19 之特定初始延滯為基礎，擴充設定 11 種初始延滯 (0~60 分鐘每次增加 6 分鐘) 情境，以 X 軸設定為列車密度 (0~11 列車)，Y 軸設定為最末站之連鎖延滯，將各種初始延滯下之 2,048 樣本點依各列車密度下之連鎖延滯加以平均後各畫出列車密度與連鎖延滯關係曲線如圖 20 所示，而由圖中曲線趨勢顯示，因初始延滯愈大其連鎖延滯擴散效應愈明顯，故其連鎖延滯隨列車密度增加而呈非線性陡升之趨勢亦愈明顯。
- (3) 初始延滯與連鎖延滯之落點分析：因列車密度為 6 列車之情境組合樣本數最多(462 個)，故選定列車密度為 6 列車下，將 X 軸設定為初始延滯(0~60 分鐘每次增加 3 分鐘)，Y 軸設定為最末站之連鎖延滯，則每種初始延滯之 462 個情境組合下共計 9,702 個樣本點之落點分佈如圖 21 所示，由分佈情形亦可看出最末站之連鎖延滯隨初始延滯增加而遞增之趨勢。

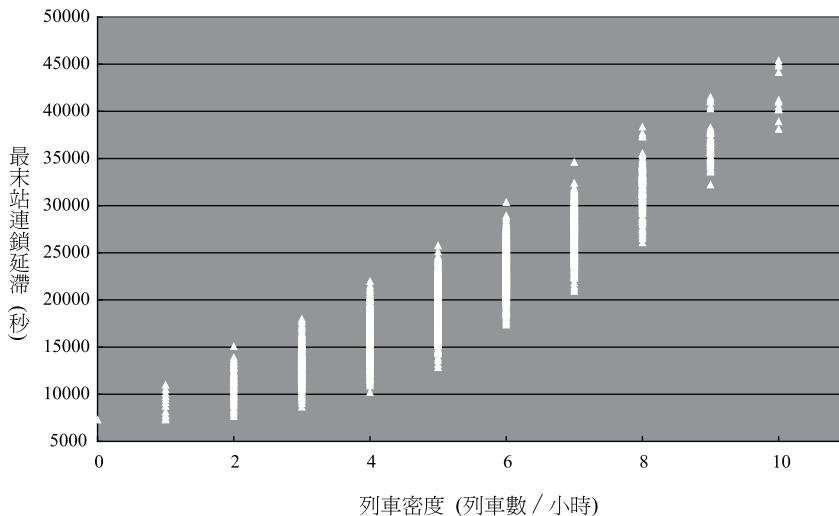


圖 19 初始延滯為 60 分鐘下列車密度與連鎖延滯落點圖 (無調度策略)

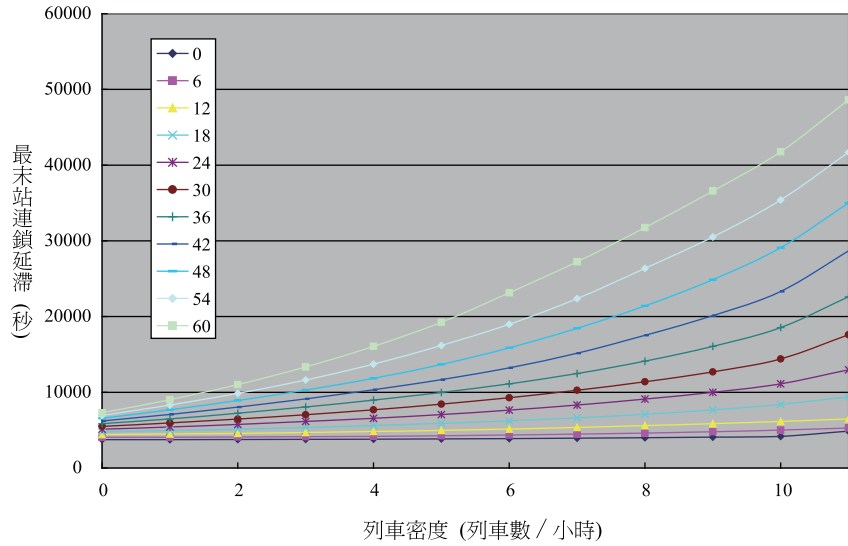


圖 20 各種初始延滯情境下列車密度與連鎖延滯關係圖

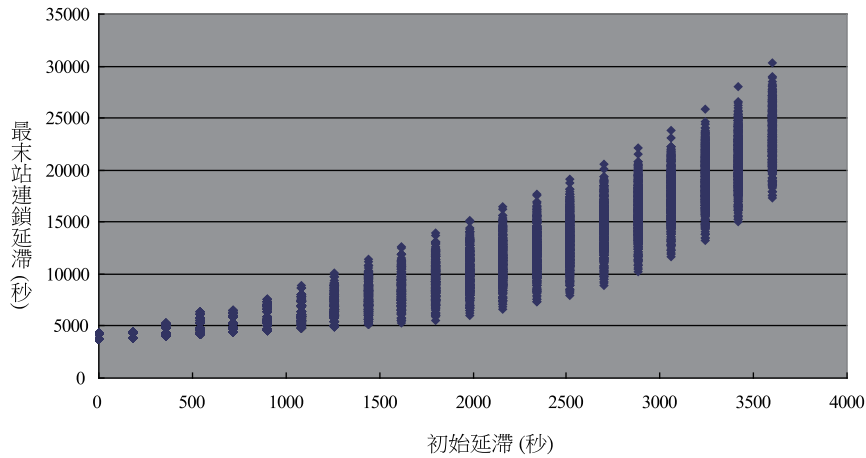


圖 21 列車密度為 6 列車下之初始延滯與連鎖延滯落點圖 (無調度策略)

(4) 初始延滯與連鎖延滯之關聯分析：為利比較不同初始延滯下之連鎖延滯是否有顯著差異，本研究以圖 21 之特定列車密度分析為基礎，擴充設定 12 種列車密度 (0~11 列車) 情境，以 X 軸設定為初始延滯 (0~60 分鐘每次增加 6 分鐘)，Y 軸設定為每種列車密度之最末站連鎖延滯，將每種列車密度情境組合於各種初始延滯下之連鎖延滯取其平均值作為樣本點，畫出各種列車密度下初始延滯與連鎖延滯關係曲線如圖 22 所示，而由圖中曲線趨勢亦顯示，因列車密度愈大其連鎖延滯擴散效應愈明顯，故其連鎖延滯隨初始延滯增加而呈非線性陡升之趨勢亦會愈明顯。

(5) 列車密度／初始延滯／連鎖延滯之 3D 圖分析：為利呈現無任何趕點調度策略下列車密度／初始延滯／連鎖延滯之交互關係分佈情形，以每一種列車密度所對應之連鎖延滯取平均為樣本點，X 軸設定為列車密度 (0~11 列車)，Y 軸設定為初始延滯 (0~60 分鐘每隔 1 分鐘取一樣本點)，Z 軸設定為最末站之連鎖延滯，則其 3D 關係如圖 23 所示，由曲面走向可發現，確存在列車密度／初始延滯愈大則連鎖延滯愈大之現象。

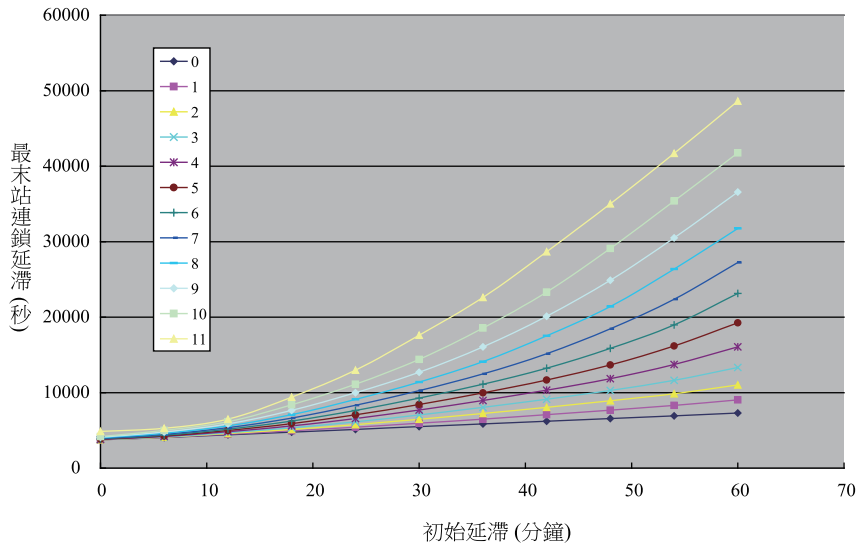


圖 22 各種列車密度情境下初始延滯與連鎖延滯關係圖

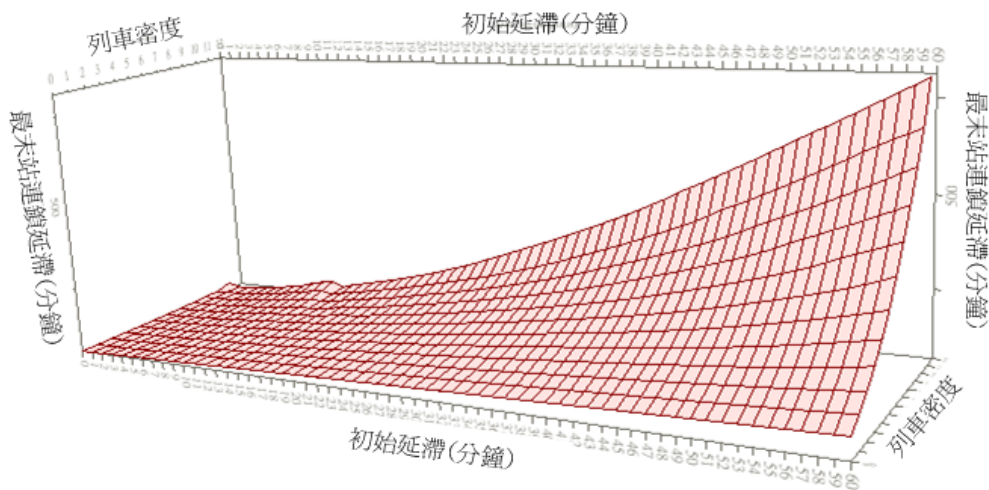


圖 23 列車密度、初始延滯與連鎖延滯之 3D 關係圖

4.3 採取調度策略下列車密度、初始延滯與連鎖延滯之關聯分析

為利比較不同調度策略對連鎖延滯之影響情形，本研究選定初始延滯較大之 60 分鐘情境，比較四種不同調度策略下之結果如圖 24 所示。圖 24 中之策略 A 為站間趕點，策略 B 則為站內趕點，每一種策略組合情境為一條曲線。由圖中曲線可得知，各種策略情境皆呈列車密度愈高則其連鎖延滯陡升之趨勢，且站內趕點（策略 B）之改善效果明顯比站間趕點（策略 A）好，而同時採取該二種趕點策略對連鎖延滯之改善效果更佳；故後續有關採取調度策略下連鎖延滯之關聯分析即以同時採取該二種趕點策略之情境進行分析。

至於加入趕點調度策略情境之列車密度／初始延滯／連鎖延滯分析部分，係以列車密度之 2,048 種情境、初始延滯之 21 種情境（0~60 分鐘每隔 3 分鐘為一種情境）及有無站內趕點或站間趕點策略之 4 種情境，應用模擬模式產生共計 172,032 筆連鎖延滯之資料，作為後續分析之基礎。

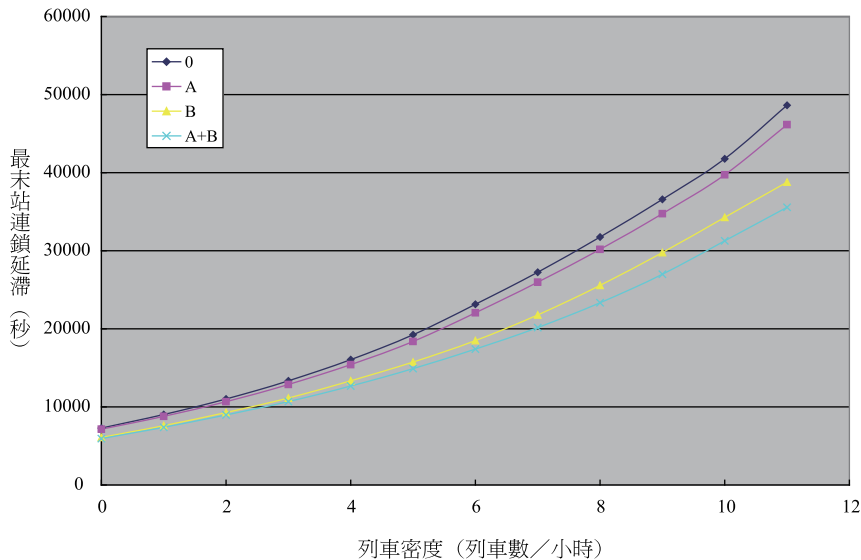


圖 24 不同調度策略組合情境下列車密度與連鎖延滯關係圖

1. 列車密度與連鎖延滯之落點分析：選定初始延滯為 60 分鐘下，將 X 軸設定為列車密度（0~11 列車），Y 軸設定為每種列車密度之最末站連鎖延滯，則 2,048 個樣本點分佈如圖 25 所示，由分佈情形可看出最末站之連鎖延滯隨列車密度增加而遞增之趨勢。而與圖 19 無調度策略下之連鎖延滯相較，除連鎖延滯明顯降低外，其各列車密度樣本點也明顯較為集中。
2. 列車密度與連鎖延滯之關聯分析：為利比較不同列車密度下之連鎖延滯是否有顯著差異，本研究以圖 25 之特定初始延滯為基礎，擴充設定 11 種初始延滯（0~60 分鐘每隔

6 分鐘) 情境, 以 X 軸設定為列車密度 (0~11 列車), Y 軸設定為每種列車密度之最末站連鎖延滯, 將各種初始延滯下之 2,048 樣本點依各列車密度之連鎖延滯取平均後各畫出列車密度與連鎖延滯關係曲線如圖 26 所示, 而由圖中曲線趨勢顯示, 因初始延滯愈大其連鎖延滯擴散效應愈明顯, 故其連鎖延滯隨列車密度增加而呈非線性陡升之趨勢亦愈明顯。與無調度策略之圖 20 相較, 其最明顯差異處在於, 除連鎖延滯明顯降低外, 曲線陡升現象亦趨於平緩, 顯示同時採取二種調度策略可有效降低連鎖延滯, 並增加班次之可靠度。

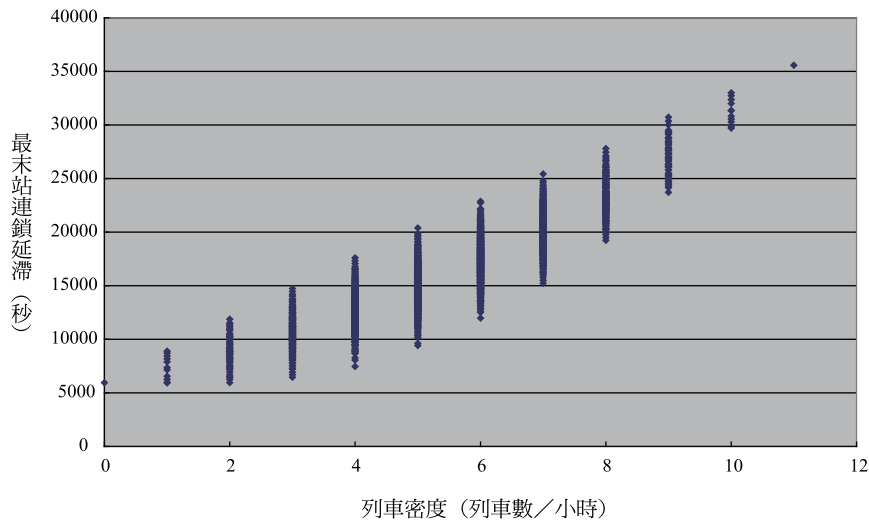


圖 25 初始延滯為 60 分鐘下列車密度與連鎖延滯分佈圖(同時採取二種調度策略)

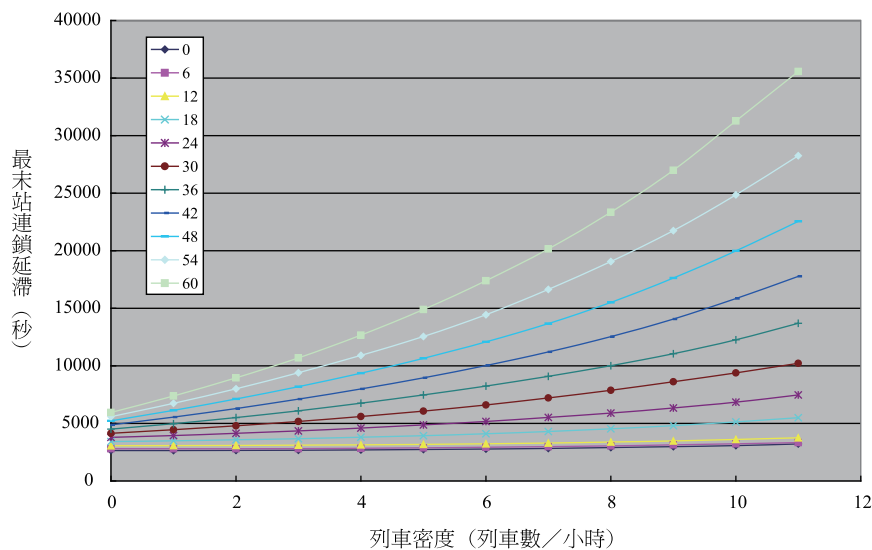


圖 26 各種初始延滯情境下列車密度與連鎖延滯關係圖

3. 初始延滯與連鎖延滯落點分析：因列車密度為 6 列車之列車情境組合樣本數最多 (462 個)，故選定列車密度為 6 列車下，將 X 軸設定為初始延滯 (0 ~ 60 分鐘每隔 3 分鐘)，Y 軸設定為最末站之連鎖延滯，則每種初始延滯有 462 個情境共計 9,702 個樣本點落點分佈如圖 27 所示，由分佈情形亦可看出最末站之連鎖延滯隨列車密度增加而遞增之趨勢。而與圖 21 無調度策略下之連鎖延滯相較，除連鎖延滯明顯降低外，其分佈之型態大致相同。
4. 初始延滯與連鎖延滯分析：為利比較不同初始延滯下之連鎖延滯是否有顯著差異，本研究以圖 27 之特定列車密度分析為基礎，擴充設定 12 種列車密度 (0 ~ 11 列車) 情境，以 X 軸設定為初始延滯 (0 ~ 60 分鐘每隔 6 分鐘)，Y 軸設定為每種列車密度之最末站連鎖延滯，將每種列車密度情境組合於各種初始延滯下之連鎖延滯取平均作為樣本點，畫出各種列車密度下初始延滯與連鎖延滯關係曲線如圖 28 所示，而由圖中曲線趨勢顯示，亦因列車密度愈大其連鎖延滯擴散效應愈明顯，故其連鎖延滯隨初始延滯增加而呈非線性陡升之趨勢亦會愈明顯。而與不考慮調度策略之圖 22 相較，其最明顯差異處在於，除連鎖延滯明顯降低外，曲線陡升之現象趨於平緩，顯示同時採取二種調度策略可有效降低連鎖延滯，並可增加班表之可靠性。
5. 同時採取二種調度策略下列車密度／初始延滯／連鎖延滯之 3D 圖分析：為利呈現同時採用站內趕點及站間趕點二種調度策略下列車密度／初始延滯／連鎖延滯之交互關係分佈情形，以每一種列車密度所對應之連鎖延滯取平均為樣本點，X 軸設定為列車密度 (0 ~ 11 列車)，Y 軸設定為初始延滯 (0 ~ 60 分鐘每隔 1 分鐘取一樣本點)，Z 軸設定為最末站之連鎖延滯，則其 3D 關係如圖 29 所示，由曲面走向可發現，確存在列車密度／初始延滯愈高則連鎖延滯愈高之現象。另若欲瞭解各情境下連鎖延滯之分佈範圍，則依連鎖延滯之最大值 (Max)、最小值 (Min) 及平均值 (Avg) 等範圍值分別繪製，其 3D

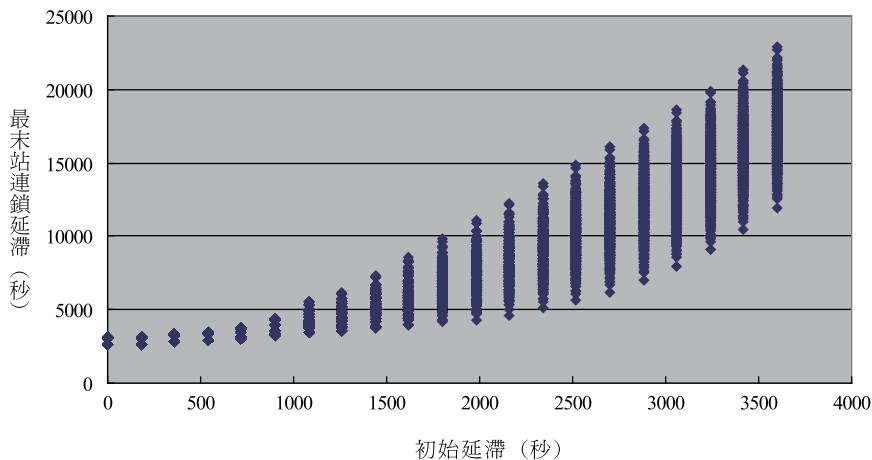


圖 27 列車密度為 6 列車下之初始延滯與連鎖延滯落點圖 (同時採取二種調度策略)

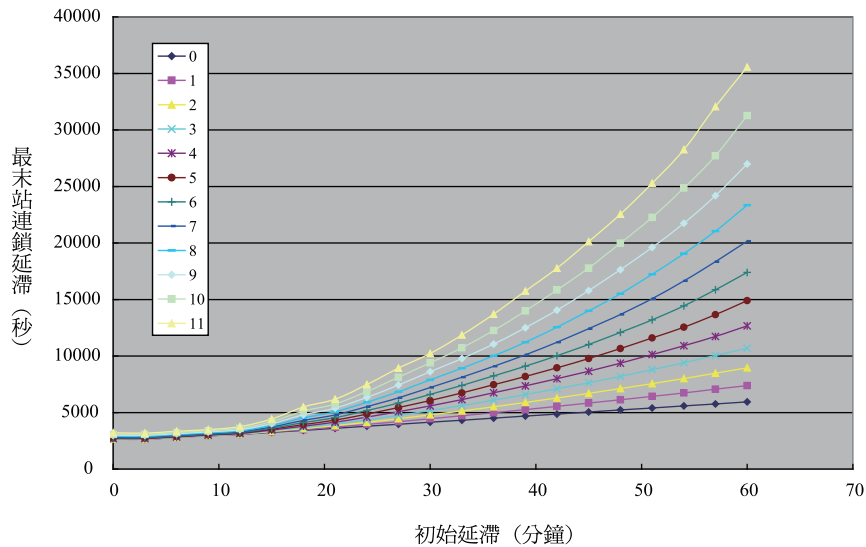


圖 28 各種列車密度情境下初始延滯與連鎖延滯關係圖

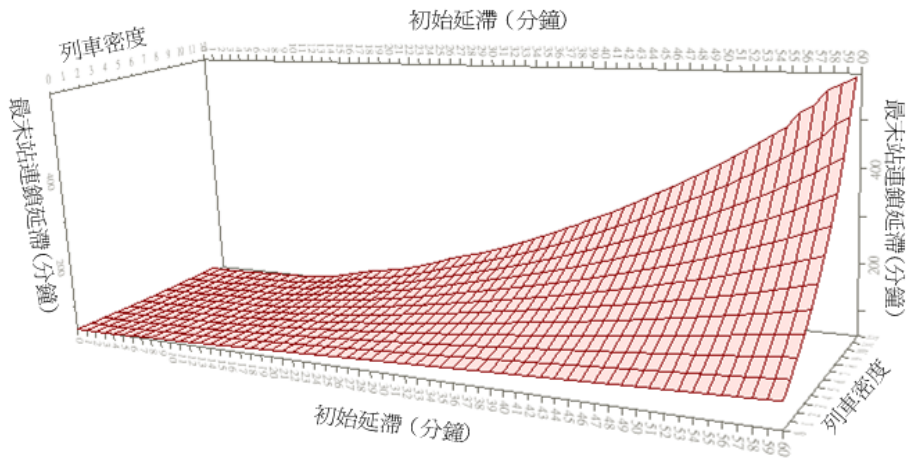


圖 29 同時採取二種調度策略下列車密度／初始延滯／連鎖延滯（平均值）之關係圖

關係如圖 30 所示，而由圖中顯示，隨著列車密度／初始延滯愈增加，連鎖延滯之分佈範圍亦愈大。

- 不同調度策略組合情境下列車密度／初始延滯／連鎖延滯之 3D 圖分析：為利瞭解不同調度策略組下列車密度／初始延滯／連鎖延滯之交互關係分佈，每一種列車密度所對應之連鎖延滯取平均為樣本點，將 X 軸設定為列車密度 (0~11 列車)，Y 軸設定為初始延滯 (0~60 分鐘每隔 1 分鐘取一樣本點)，Z 軸設定為最末站之連鎖延滯，依無任何調度策略、站間趕點 (策略 A)、站內趕點 (策略 B) 及採用二種調度策略 (策略 A+B) 等

四種組合情境分別繪製，則其 3D 關係如圖 31 所示。由曲面走向亦可發現在三度空間之連鎖延滯隨列車密度／初始延滯增加而增高之現象，及各策略組合之差異狀況。

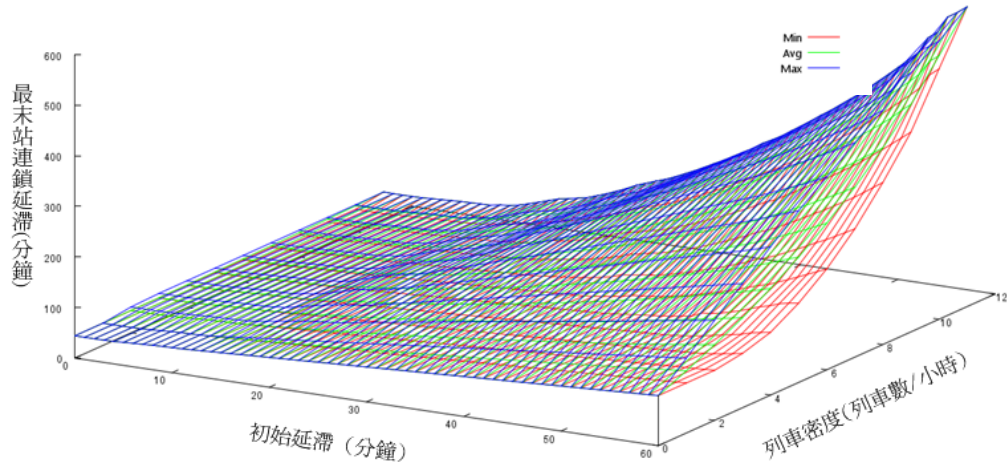


圖 30 同時採取二種調度策略下列車密度／初始延滯／連鎖延滯（範圍值）之關係圖

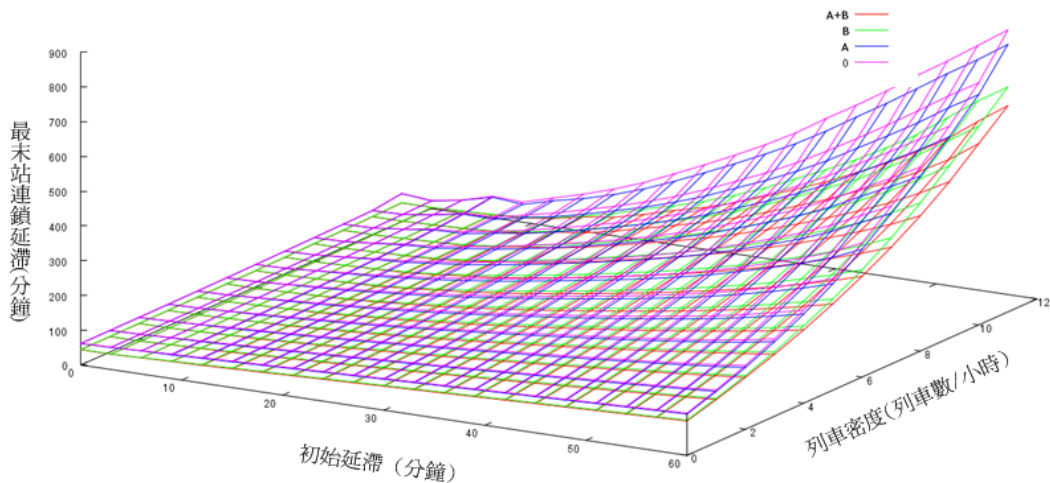


圖 31 不同調度策略組合情境下列車密度／初始延滯／連鎖延滯之關係圖

4.4 迴歸分析

雖然以往已有相關文獻指出（連鎖）延滯與關鍵影響變數間存在非線性之類似指數函數關係，經由本研究上述各變數之關聯分析亦已發現類似之趨勢，惟鑑於過去並未有相關

研究針對臺灣鐵路系統構建其估算模式，本研究乃進一步依據上述之模擬資料應用統計迴歸分析方法嘗試加以構建，以作為直接推估連鎖延滯之用。茲將以列車密度 (2,048 種情境)、初始延滯 (21 種情境) 及調度策略 (4 種情境) 之情境組合所模擬產生之 172,032 組資料，嘗試以不同函數式進行迴歸分析，相關分析過程與結果分述如下：

1. 迴歸函數設定：為利構建適合臺鐵系統之連鎖延滯估算模式，本研究以前述三項關鍵變數為基礎，考量相關文獻已指出 (連鎖) 延滯與關鍵影響變數間之非線性函數關係結論，及前述本研究彙整分析發現之個別變數對連鎖延滯之非線性函數影響關係，經嘗試以非線性之指數函數、乘冪函數 (個別變數及雙重變數乘冪) 及用以對照比較之線性函數等不同模式，如式 (4)~式 (8) 等五種函數式進行迴歸分析，其中因站間趕點及站內趕點等二種調度策略係以虛擬變數之方式設定，故其皆以線性型態於模式中呈現。

2. 迴歸模式分析

(1) 統計量檢定：上述各函數式之迴歸分析結果歸納如表 9 所示，其結果顯示各函數式之參數推估值皆相當顯著，顯示列車密度／初始延滯／調度策略三項自變數皆為因變數連鎖延滯之關鍵影響變數；另由各函數迴歸分析之判定係數 R^2 (coefficient of determination) 及 F 檢定值可得知，各函數式之自變數對因變數連鎖延滯皆具解釋能力，但其中非線性函數之判定係數皆高於線性函數，並以式(4)指數函數之判定係數 0.9265 明顯高於其他函數型式，顯示以指數函數最適合描述該三項自變數與因變數之因果關係，此亦符合相關文獻之結論及本研究模擬結果所呈現之型式。

$$y = \beta_0 e^{\beta_1 x_1} e^{\beta_2 x_2} e^{\beta_3 x_3} e^{\beta_4 x_4} \quad (4)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1^2 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \quad (5)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2^2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \quad (6)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1^2 + \beta_2 x_2^2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \quad (7)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \quad (8)$$

其中： y = 連鎖延滯 (秒)；

x_1 = 列車密度 (列／小時)；

x_2 = 初始延滯 (秒)；

x_3 = 站間趕點虛擬變數 (0 或 1)；

x_4 = 站內趕點虛擬變數 (0 或 1)；

β_n = 待校估之參數， $n \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ 。

表 9 五種迴歸模式之校估結果

迴歸模式 \ 參數	β_0 (t 值)	β_1 (t 值)	β_2 (t 值)	β_3 (t 值)	β_4 (t 值)	R^2 (F 值)
$y = \beta_0 e^{\beta_1 x_1} e^{\beta_2 x_2} e^{\beta_3 x_3} e^{\beta_4 x_4}$	<u>2165.659</u> (4695.43)	<u>0.08685</u> (360.10)	<u>0.00051</u> (1379.29)	<u>-0.047</u> (-58.53)	<u>-0.292</u> (-365.31)	<u>0.9265</u> (542248)
$y = \beta_0 + \beta_1 x_1^2 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4$	-527.014 (-29.73)	91.406 (285.91)	4.329 (792.77)	-453.212 (-38.08)	-2321.202 (-195.02)	<u>0.8134</u> (187426)
$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2^2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4$	-589.956 (-28.50)	1014.979 (316.89)	0.001 (913.84)	-453.212 (-42.66)	-2321.202 (-218.51)	<u>0.8513</u> (246271)
$y = \beta_0 + \beta_1 x_1^2 + \beta_2 x_2^2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4$	1976.018 (138.30)	91.406 (322.41)	0.001 (919.74)	-453.212 (-42.94)	-2321.202 (-219.92)	<u>0.8532</u> (250018)
$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4$	-3092.987 (-126.43)	1014.979 (281.40)	4.329 (788.76)	-453.212 (-37.88)	-2321.201 (-194.03)	<u>0.8115</u> (185103)

註：所有係數值皆為顯著。

(2) 模式應用分析：依據前述之模式檢定結果，式 (4) 之指數函數可直接應用估算臺鐵系統路段末端站之連鎖延滯，而無需以模擬模式估算。整體而言，由該指數函數可發現列車密度與初始延滯等二項變數對於連鎖延滯有正向增加之影響，且以列車密度之影響較大；而站間趕點及站內趕點等二種調度策略則對連鎖延滯有負向降低之影響，此傾向結果甚符先驗知識；另該指數函數亦可透過虛擬變數 (0 或 1) 之設定，進行站間趕點及站內趕點等二種調度策略對連鎖延滯之影響分析，當該虛擬變數設定為 1 則代表採取該變數之調度策略，若二虛擬變數均設定為 1 則代表同時採取二種調度策略。由該函數式之係數值顯示，平均而言，若採取站間趕點調度策略則對連鎖延滯之折減比例約為 95.4%，若採取站內趕點調度策略則對連鎖延滯之折減比例可達約 74.7%，若同時採取二項調度策略則對連鎖延滯之折減比例可達約 71.2%，顯見本臺鐵案例路段之資料顯示站內趕點調度策略對連鎖延滯降低之功效較為明顯。至於迴歸模式 (5)(6)(8) 係本研究用以比較分析之乘幂函數及線性函數，雖其 R^2 值尚高且各變數係數皆顯著，但其截距項為負並不合理，故該三項迴歸模式並不適合應用於連鎖延滯之分析。

(3) 3D 圖分析：為便於將所推導之指數函數迴歸式估計結果與模擬資料相互比較，本研究以所構建之指數函數 $y = 2165.659 \cdot e^{0.08685x_1} \cdot e^{0.00051x_2} \cdot e^{-0.047x_3} \cdot e^{-0.292x_4}$ ，依無任何調度策略、站間趕點、站內趕點及採用二種調度策略等四種運轉調度策略組合分別繪製其三維之指數迴歸式如圖 32 所示，其分佈趨勢與圖 31 極為相近。

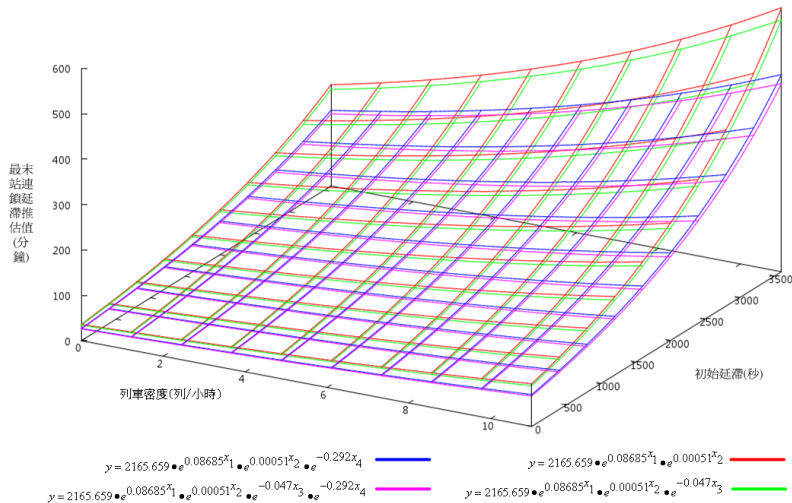


圖 32 指數迴歸模式所求解之列車密度／初始延滯／連鎖延滯關係圖

五、結論與建議

軌道系統容量不足往往是導致列車延滯之主因，尤其在初始延滯 (first delay) 發生後，後續所引發的連鎖延滯 (knock-on delay) 擴散效應對列車正常營運之影響更是鉅大，因此欲確保系統之可靠度及服務品質，如何快速有效地降低連鎖延滯是一項重要的課題。而由於軌道系統之路線條件、交通條件及控制條件與其交互作用是影響路線容量之要素，任一環節出問題即會造成容量不足而導致延滯。本研究以多車種、複線運轉及多類型月臺型式之傳統臺鐵系統為例，針對系統各條件中影響列車連鎖延滯最關鍵之列車密度／初始延滯/調度策略，研析其對連鎖延滯之影響，期能有助於降低連鎖延滯，提昇列車營運之可靠度及服務品質。就實務調度觀點而言，本研究除可具體量化關鍵影響變數對於連鎖延滯之影響程度及其對於降低延滯之改善效果外，所採用之站內趕點及站間趕點二項調度策略分析結果，亦可提供營運者作為選擇實務調度策略之參考。茲將本研究所獲致之主要結論與建議分述如下：

5.1 結論

1. 本研究係以自行開發之模擬模式，作為釐清對連鎖延滯影響因素之核心分析工具；本模擬模式除已經過驗證其估算之準確度可被接受，並可有效分析不同路線條件、交通條件及控制條件之複雜交互作用，及其對連鎖延滯擴散效應與各種運轉調度策略成效之比較之外，亦可應用於本研究所探討的列車密度／初始延滯／調度策略等關鍵因素，對連鎖延滯之影響情形。

- 經由列車密度、初始延滯與連鎖延滯之關聯分析後，本研究釐清了初始延滯之外，列車密度亦是影響連鎖延滯之關鍵因素；而由列車密度與連鎖延滯之關聯分析結果顯示，初始延滯愈大其連鎖延滯擴散效應愈明顯，故其連鎖延滯隨列車密度增加而呈非線性陡升之趨勢亦愈明顯。而由初始延滯與連鎖延滯之關聯分析，亦可得到連鎖延滯會隨初始延滯增加而呈非線性陡升之趨勢。
- 為分析比較不同調度策略對連鎖延滯之改善程度，本研究設定有無站間趕點與站內趕點之四種組合情境，經以模擬模式產生共計 172,032 筆連鎖延滯之資料進行關聯分析，其結果顯示站內趕點之調度策略優於站間趕點，而同時採取該二種趕點策略對連鎖延滯之改善效果又優於採取任何單一調度策略，符合先驗的常識判斷。
- 在同時採用站內趕點與站間趕點二種策略之情境下，由列車密度與連鎖延滯之關聯分析結果顯示，外生初始延滯愈大其連鎖延滯擴散效應愈明顯，故其連鎖延滯隨列車密度增加而呈非線性陡升之趨勢亦愈明顯，另在列車密度為 6 列車情境下，由初始延滯與連鎖延滯之關聯分析結果亦顯示有類似現象。而與無任何調度策略之連鎖延滯相較，其最明顯差異處除連鎖延滯顯著降低外，曲線陡升之現象亦趨於平緩，顯示同時採取二種調度策略可有效降低連鎖延滯，並可增加班表之可靠性。
- 相關文獻曾指出連鎖延滯與關鍵影響變數間通常會呈現類似指數函數之關係，本研究經以七堵—樹林路段之列車密度 (2,048 種情境)、初始延滯 (21 種情境) 及運轉調度策略 (4 種情境) 由模擬模式產生之 172,032 組資料為樣本，分別以五種函數型式進行迴歸分析結果顯示，列車密度/初始延滯/調度策略等三項自變數皆為因變數連鎖延滯之顯著影響變數，且其中以指數函數 $y = 2165.659 \cdot e^{0.08685x_1} \cdot e^{0.00051x_2} \cdot e^{-0.047x_3} \cdot e^{-0.292x_4}$ 之判定係數 0.9265 為最高，顯見指數函數亦為最適合估算本研究案例連鎖延滯之迴歸模式。

5.2 建議

- 路線、交通、控制等三大類條件之交互作用皆會影響整體列車營運之「連鎖延滯」，本研究就錯綜複雜之關係中僅先探討釐清列車密度 (交通條件)、調度策略 (控制條件) 及初始延滯 (外生條件) 對於連鎖延滯之影響，表 1 所列舉的可能影響條件因素中仍有頗多項目值得繼續探討，建議後續研究可應用本模擬模式，篩選較重要之關鍵因素進行分析，以逐步釐清影響連鎖延滯之關鍵因子。例如臺鐵目前為因應高鐵系統加入城際運輸市場，正面臨營運轉型而推動捷運化計畫，如何從工程規劃角度分析站內軌道及月臺佈置方式 (路線條件) 對連鎖延滯之影響，以作為營運單位改善可靠性之參考，亦是值得探討的重要課題。
- 由本研究結果得知，當列車流量密度趨近於軌道容量時，連鎖延滯會隨初始延滯及列車流量密度增加而呈非線性指數函數遞增。本研究雖已嘗試以最常採用之站間趕點及站內趕點等運轉調度策略模擬分析其對連鎖延滯改善之程度，惟鑑於實務單位仍有許多因應延滯影響之運轉整理策略，除趕點策略外舉凡減班、變換列車順序、改變列車交通組成

(列車均質化) 等皆是可行之策略,故後續研究亦可就模擬模式之運轉控制邏輯作必要之修正後,針對上述議題進行進一步之分析。

3. 有關迴歸模式之分析結果,雖可瞭解本研究區間不同列車密度/初始延滯/調度策略對連鎖延滯之影響情形,而在排班規劃時盡量避免讓列車流量過大導致嚴重延滯,或考量是否採取進一步之營運調度策略及硬體設施改善措施。惟本研究所構建的迴歸模式不見得能適用於其它區間之連鎖延滯推估預測,因影響連鎖延滯之路線、交通及控制條件不盡相同,故建議可持續蒐集臺鐵系統之實際延滯資料,並發展出更完整之一般性模式,俾能針對臺鐵系統各種不同條件的區段之延滯問題進行更完整深入之研析。
4. 鑑於臺鐵系統各路段之路線容量不盡相同,若能以列車密度與路段容量的比例(即路線利用率, V/C) 取代列車密度進行分析,似應較能反映路段之營運特性,惟因路段容量之估算係另一複雜問題,故本研究並未將容量估計納入研究範圍,建議後續研究可考慮予以納入分析。

參考文獻

1. Rietveld, P., Bruinsma, F. R., and Van Vuuren, D. J., "Coping with Unreliability in Public Transport Chains: A Case for the Netherlands", *Transportation Research Part A*, Vol. 35, 2001, pp. 539-559.
2. 交通部運輸研究所, 軌道容量研究—臺鐵系統容量模式之建構分析(一), 民國 94 年。
3. Olsson, Nils, O. E., and Haugland, H., "Influencing Factors on Train Punctuality—Results from Some Norwegian Studies", *Transport Policy* 11, 2004, pp. 387-397.
4. 李治綱等人, 「公共運輸之安全績效: 臺灣鐵管理局之個案分析」, 運輸計劃季刊, 第 38 卷, 第 4 期, 民國 98 年, 頁 381~406。
5. 交通部運輸研究所, 運輸系統容量分析暨應用研究—軌道系統(1/4), 民國 96 年。
6. Hwang, C. C. and Liu, J. R., "A Simulation Model for Estimating Knock-on Delay of Taiwan Regional Railway", *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.8, 2010, pp. 1082-1097.
7. Jong, J.C., Lin, T. H., Lee, C. K., and Hu, H. L., "The Analysis on Train Reliability of Taiwan High Speed Rail", Proceedings of 12th COMPRAIL Conference, Wessex Institute of Technology, 2010, pp. 169-180.
8. Higgins, A., Kozan, E., and Ferreira L., "Modeling Delay Risks Associated with Train Schedules", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 19, Issue 2, 1995, pp. 89-108.
9. Goverde, R.M.P., "Railway Timetable Stability Analysis Using Max-Plus System Theory", *Transportation Research Part B*, Vol. 41, 2005, pp. 179-201.
10. 邱戊吉, 「應用 Max-Plus 代數分析鐵路時刻表穩定性」, 國立交通大學交通運輸研究所碩士論文, 民國 99 年。

11. Carey, M. and Carville, S., “Testing Schedule Performance and Reliability for Train Stations”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, 2000, pp. 666-682.
12. Briggs, K. and Beck, C., “Modeling Train Delays with Q-exponential Functions”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 378, Issue 2, 2007, pp. 498-504.
13. Yuan, J. and Hansen, I. A., “Optimizing Capacity Utilization of Stations by Estimating Knock-on Train Delays”, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, 2007, pp. 202-217.
14. Middelkoop, D. and Bouwman, M., “Testing the Stability of the Rail Network”, *Computers in Railways VIII*, 2002, pp. 995-1002.
15. Higgins, A. and Kozan, E., “Modeling Train Delay in Urban Networks”, *Transportation Science*, Vol. 32, No.4, 1998, pp.346-357.
16. Barter, W. M., “Application of Computer Simulation to Rail Capacity Planning”, *Computers in Railways VI*, 1998, pp. 199-211.
17. Hansen, I. A., “Station Capacity and Stability of Train Operations”, *Computers in Railways VII*, 2000, pp. 809-816.
18. Vromans, M. J., Dekker, R., and Kroon, L. G., “Reliability and Heterogeneity of Railway Services”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 172, 2006, pp. 647-665.
19. Huisman, T. and Boucherie, R. J., “Running Times on Railway Sections with Heterogeneous Train Traffic”, *Transportation Research Part B*, Vol. 35, 2001, pp. 271-292.
20. Carey, M., “Ex ante Heuristic Measures of Schedule Reliability”, *Transportation Research Part B*, Vol. 33, 1999, pp. 473-494.
21. Chakroborty, P. and Vikram, D., “Optimum Assignment of Trains to Platforms under Partial Schedule Compliance”, *Transportation Research Part B*, Vol. 42, 2008, pp. 169-184.
22. Carey, M. and Crawford, I., “Scheduling Trains on a Network of Busy Complex Stations”, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, 2007, pp. 159-178.
23. Hansen, I. A. and Pacht, J., *Railway Timetable & Traffic Analysis – Modelling – Simulation*, Railway Gazette, Hamburg Germany, 2008.
24. Chang, S. C. and Chung, Y. C., “From Timetabling to Train Regulation – A New Train Operation Model”, *Information and Software Technology*, Vol. 47, 2005, pp. 575-583.
25. Corman, F., D’Ariano, A., Pacciarelli, D., and Pranzo, M., “A Tabu Search Algorithm for Rerouting Trains during Rail Operations”, *Transportation Research Part B*, Vol. 44, 2010, pp. 175-192.
26. Nie, L. and Hansen, I. A., “System Analysis of Train Operations and Track Occupancy at Railway Stations”, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, Vol. 5, No. 1, 2005, pp. 31-54.
27. Mattsson, L. G., “Train Service Reliability - A Survey of Methods for Deriving Relationships for Train Delays”, Written at the Request of the Swedish Institute for Transport and Communications Analysis, Stockholm Sweden, 2004.
28. 周斯畏，物件導向系統分析與設計使用 UML 與 C++，全華科技圖書股份有限公司，臺北市，民國 91 年。

