

隨機派翠網路應用於臺鐵捷運化之 運行調度模擬模式建構與分析

SIMULATION MODELLING AND ANALYSIS OF TAIWAN RAILWAY ADMINISTRATION'S MRT-TYPE OPERATIONS BY USING STOCHASTIC PETRI NETS

陶冶中 Chi-Chung Tao¹
洪敏琛 Min-Ching Hung²

(103 年 7 月 3 日收稿, 104 年 3 月 13 日第 1 次修改, 104 年 4 月 29 日第 2 次修改,
104 年 7 月 8 日第 3 次修改, 104 年 12 月 16 日定稿)

摘 要

近年來臺灣鐵路管理局鐵推動「臺鐵捷運化」政策, 其目的在於將臺鐵運輸系統轉變為具有近似「大眾捷運系統」的特性。本研究採用可提供具可視化描述功能與系統動態活動描述功能的隨機派翠網路(stochastic Petri nets) 為基礎之資訊系統開發方法組合(set of information system development method, SISDM), 作為軌道運輸運行調度模擬模式建構與分析之開發方法。首先, 蒐集與彙整臺鐵路提供之相關資料與自行調查之分析結果, 然後建構以隨機派翠網路為基礎之臺鐵捷運化列車運行調度模擬模式, 並以基隆—中壢段為模擬模式之驗證案例, 再藉由發車間距、列車組成與調度等情境分析, 研析臺鐵捷運化之運行調度策略。經由模擬分析結果顯示, 臺鐵捷運化後之列車發車間距, 在系統車輛數允許之情況下, 以間距 240 秒最能發揮整體運輸效率。在列車組成部分, 當慢車與快車之列

-
1. 淡江大學運輸管理學系副教授 (聯絡地址: 25137 新北市淡水區英專路 151 號 淡江大學運輸管理學系; 電話: (02) 26215656 Ext. 2983; E-mail: cctao@mail.tku.edu.tw)。
 2. 淡江大學運輸科學研究所碩士。

車組成比例為 1:1 且為交錯組成時，較適合發車間距較長之列車運轉；當慢車與快車組成比例為 2:1 時，無論發車間距多寡，皆能發揮最佳之整體運輸效率；當慢車與快車組成比例達 3:1 時，則較適合發車間距較密集之列車運轉。在調度策略部分，採用特開列車策略對於因延誤發生而受影響之列車運行時間雖無明顯改善，但卻能有效回復受影響之發車間距，減少延誤所產生之影響。

關鍵詞：臺鐵捷運化；隨機派翠網路；資訊系統開發方法組合

ABSTRACT

To transform the railway transportation system into the system with MRT's characteristics, Taiwan Railways Administration(TRA) has promoted a policy called "Transformation of the Taiwan Railway into a MRT-type railroad" for the past few years. This study presents the SISDM based on Stochastic Petri Nets (SPN) describing visualized functions and system dynamic activity functions which can be regarded as a toolkit of railway operations simulation modeling and analysis. First, related data provided by TRA and results of own surveys are collected and summarized. Then, a simulation model based on the SPN is developed to analyze TRA's train operations and dispatching strategies similar to MRT-type operations. By taking Keelung-Chungli southbound line as the empirical study, numerous simulations are performed with various scenarios including different headways, train types, timetable delays. Having implemented transformation of the Taiwan Railway into a MRT-type railroad policy, the simulation results indicate the total system efficiency will be optimal with the average headway 240 s if train cars are assumed to be available. Longer headway operations are suitable when the proportional combination between slow and express train types is 1 to 1. No matter how long or short the headway is, the total system efficiency will be optimal when the proportional combination is 2 to 1. Nevertheless, shorter headway operations are preferred when the proportional combination is 3 to 1. Although the strategy of increasing special frequency to reduce timetable delay is not significant to eliminate propagation impacts of timetable, it is still very effective to maintain regular headways.

Key Words: Transformation of the Taiwan Railway into a MRT-type railroad; Stochastic Petri nets; Set of information system development method

一、前言

早期國內無論城際、區域的軌道運輸服務提供者僅依賴臺鐵，自民國 96 年高鐵通車營運後，即明顯提高城際軌道運輸旅次的比重，另一方面，民國 93 年以來軌道運輸次類

別之預算首度超越公路，迄今仍居高不墜，且隨著臺北與高雄都會區大眾捷運系統相繼通車營運，加上臺中都會區大眾捷運系統與高雄、淡海、安坑輕軌等各類軌道計畫的規劃與興建，預計未來數年軌道運輸的投資金額將更為龐大，此一趨勢顯示我國已邁入以軌道運輸為主的運輸新世代。

不同的軌道運輸系統，在路網、服務屬性、設備、場站月台、行車制度、列車組成等特性皆有差異，因此應有各自的系統功能定位與市場分工。依據交通部運輸研究所「軌道運輸系統總體規劃-我國軌道運輸系統發展政策之研究」^[1]指出，軌道運輸系統的基本功能可定位為：由高鐵主司城際長程運輸（150 公里以上），城際中程運輸（50-150 公里）以臺鐵為主並與高鐵合作分工，都會區域內部中短程（30-50 公里與 30 公里以下）則以臺鐵、捷運以及輕軌系統為主，如表 1 所示。

近年來臺灣鐵路管理局積極推動「臺鐵捷運化」政策，嘗試轉變以中短程運輸旅次為主，將原本西部幹線劃分幾個主要都會區段，在原本的車站之間，尋找適當地點，增設簡易型車站，以停靠短程列車，並藉由增加班次與停靠站，以近似於捷運的車站密集、班次密集、票種單純營運方式，來提昇臺鐵的中短程客運量。根據 2012 年臺灣鐵路統計年報^[2]指出，臺鐵客運人數結構之運輸距離以短程運距臺北至楊梅最多占 72.2%，多數為短程距離，其中自強號列車多為中長程旅客所搭乘，占 54%，莒光號多為中程旅客利用，復興號及區間車則多為短程旅客，顯示臺鐵漸逐步邁向捷運化。

表 1 我國軌道運輸市場發展定位

運輸型態		旅次類型	旅行距離(公里)	適用軌道運具	運輸市場定位
城際		長程	150-500	高鐵、臺鐵	高鐵
		中程	50-150	臺鐵、高鐵	臺鐵、高鐵
都會區	市郊及郊區	中程	30-50	臺鐵、(捷運)	臺鐵
	核心區	短程	30 以下	臺鐵、捷運／輕軌	臺鐵、捷運／輕軌

資料來源：交通部運研所^[1]。

雖然臺鐵捷運化在班次、站距、車種、運行方式等仍與「大眾捷運系統」不盡相同，但若善加整合都會區內「大眾捷運系統」或輕軌與「市區－郊區－市區」之臺鐵，再整合中長距離城際運輸之高鐵，而形成一無縫的 (seamless) 軌道運輸系統，則更能提供民眾最完整之軌道運輸服務。過去國內對於臺鐵捷運化之相關研究，多偏重市場定位、票價訂定與國內軌道運輸系統之整合發展相關課題^[3-5]，對於臺鐵捷運化後之列車運行、運轉整理、延誤調度等課題之研究，尚需更多的投入，因此本研究擬針對後者提出理論與實務兼具之研究成果，期能成為此研究領域重要參考案例之一；再者，考量模擬模式相較於解析模式及最佳化模式，具有可進行號誌閉塞系統、列車性能及路線條件等複雜因素交互作用之分析功能，分析結果亦較有高精確性。

鑒於常見的模擬系統開發方法各有優缺點，本研究經由相關文獻彙整結果，擬採用可提供具可視化 (visualized) 描述功能與系統動態活動描述功能的隨機派翠網路 (stochastic Petri nets, SPN) 為基礎之資訊系統開發方法組合 (set of information system development method, SISDM)，作為軌道運輸運行調度模擬系統開發方法。首先，本研究將蒐集與彙整臺鐵管理局提供之相關資料與自行調查之分析結果，然後建構以隨機派翠網路為基礎之臺鐵捷運化列車運行調度模擬模式，並以基隆－中壢段為模擬模式之驗證案例，最後藉由發車間距、列車組成與調度等情境分析，提出臺鐵捷運化之運行調度策略。

二、文獻回顧

2.1 軌道運輸列車運行控制系統

從列車運行控制系統發展的歷程來看，可分為機械裝置控制、電氣控制與電子控制 3 個階段。以地面號誌為基礎的固定自動閉塞區間系統 (fixed automatic-block system, FAS) 係當前應用最為廣泛的閉塞系統。然而隨著列車運行速度與密度不斷提高，傳統的三顯示固定閉塞已無法因應需求的變化，部分國家已採用四顯示固定閉塞制以縮短行車間隔或者裝設列車自動停車 (ATS)、列車自動防護 (ATP) 與列車自動運行 (ATO) 等系統。從 FAS 的運作原理可看出，其閉塞分區長度與列車追蹤間隔並非依照最適化條件而設計，是一種較為保守的列車運行控制方法，特別是針對多車種 (客貨車、快速與慢速) 混合的軌道運輸系統而言，FAS 往往導致列車調度不靈活與運輸能力易浪費的結果。直到近十幾年，先進國家相繼研發出移動自動閉塞區間系統 (moving automatic-block system, MAS) 且成功應用在都市捷運與輕軌，MAS 才成為現代列車運行控制系統的發展方向與新興重點。

FAS 與 MAS 之根本差異在於閉塞分區之形成方式。FAS 之區間劃分係考慮區間內之列車運行參數、牽引類型、制動能力、區間坡道、彎道等因素，再根據列車號誌顯示方式 (例如二顯示、三顯示、多顯示) 來決定閉塞分區長度，並使用與軌道電路連鎖之通過號誌機作為區間分隔標誌。區間一經劃分，便無法任意更動，因此即便提升列車性能而增加列車運行速度，FAS 之固定閉塞分區長度仍將限制發車間隔而無法有效提升運行效率。MAS 因取消軌側號誌機及其他軌側設施，依照自身列車與前方列車之即時運行速度、列車位置、車輛載重、列車節數、車廂長度、牽引能力、制動性能、坡度、彎道、天候…等列車及路線之特性與參數而透過車載設備決定閉塞區間長度，並可由本身列車車頭至前行列車之車尾或進站號誌機決定，因此除了無固定之閉塞分區劃分外，車站區間內之閉塞區間數亦非一固定值。MAS 具有相當的優越性，不僅可取消軌道電路，號誌系統的造價因而降低，亦可提高行車密度與區間容量。

在相關文獻^[6,7]可一窺國內外先進的軌道運輸列車運行控制系統，例如：歐盟 ETCS 系統、德國 LZB 系統、法國 TVM 系統、日本新幹線 ATC 系統、中國大陸 CTCS 系統、臺北捷運文湖線 CITYFLO650 系統等。

2.2 列車運行模式、調度策略與建構方法

回顧當前軌道列車運行相關文獻^[8-10]可知，欲建構列車運行模式之前，宜先確認研究對象採用何種閉塞系統，然後再以行車動力學為基礎，依據不同閉塞系統加入列車牽引力、運行阻力、制動力等縱向力的計算特點及其對列車運行過程的限制式。所謂的行車限制式即是在 FAS 或 MAS 閉塞系統下建立前行與後行列車在站間與站內之最小安全時距或間距公式，以避免列車發生追撞。

由於軌道運輸列車運行與調度流程具有等候理論 (queuing theory) 與隨機過程 (stochastic process) 特性，在計算前述列車間之最小安全間距或時距時，皆需應用導以數學為基礎的形式化規範方法 (formal normative method)。近年來隨著人工智慧 (artificial intelligence, AI) 方法之日新月異，軌道運輸系統 (鐵路、地鐵、輕軌、高鐵) 應用細胞自動機 (cellular automaton, CA)、遺傳演算法、派翠網路 (Petri nets)、類神經網路等方法於區間通過能力分析、追蹤行車間隔、列車速度與間隔控制、追蹤列車運行、列車調度最適化等課題，已成為軌道運輸研究之重要方向。其中又以細胞自動機與派翠網路兩種方法的應用最為廣泛，茲列舉若干文獻如下：Tomoeda 等人^[11]應用細胞自動機建構東京地鐵路網之旅客需求起迄模式，在發生重大事件之情境下，運用以多重代理人為基礎之即時列車模擬系統，因應不同旅客需求量而重新指派列車到站時刻，以避免車站發生旅客嚴重擁擠的情形。Zhang 與 Chen^[12]應用細胞自動機建構 MAS 閉塞系統下之列車運行追蹤模擬模式，並在列車故障或失效的情境下，測試全部列車提高速度與某一區段列車提高速度之兩種改善策略的績效，模擬結果顯示兩種策略之組合最能疏解軌道交通擁擠狀況。

中國大陸的相關文獻亦與時俱增^[13-19]，例如周華亮^[14]根據軌道交通的特點建立固定閉塞及各種移動閉塞模式的細胞自動機 (CA) 模擬模式，並在此基礎上進行各種移動閉塞模式下列車運行延誤之傳播規律及影響延誤傳播因素之比較。付印平^[15]應用一維 NaSch 細胞自動機建構北京地鐵 2 號線之列車追蹤模式，並結合遺傳演算法進行列車節能最適化之研究。蔡晶^[18]則根據細胞自動機原理建立固定閉塞、準移動閉塞與移動閉塞系統之列車運行模式，並進行列車發車間隔、發車策略、混合列車比例、混合發車次序對不同閉塞系統下列車延誤影響研究，同時亦針對多股道車站的列車運行行為建構出車站細胞自動機模式。相對而言，國內在此領域之細胞自動機相關文獻仍為鳳毛麟角。

傳統的派翠網路雖曾廣泛應用於軌道運輸安全、車站容量、列車通訊與列車調度等課題，但其已不足以呈現真實環境下複雜系統的動態、不確定、隨機、多樣化等特性。因此近年來許多學者發展出衍生特性的高階派翠網路 (high level Petri nets)，如時間派翠網路 (timed Petri nets, TPN)、模糊派翠網路 (fuzzy Petri nets, FPN)、彩色派翠網路 (colored Petri nets, CPN)、隨機派翠網路 (stochastic Petri nets, SPN) 等，研究課題還可依據所屬特性而結合不同之高階派翠網路而成為混合派翠網路 (hybrid Petri nets, HPN)。因此近 20 年來應用高階派翠網路於軌道運輸相關課題的國內外文獻數量亦漸漸增多。

Van Der Aalst 與 Odijk^[19]針對鐵路車站內列車延誤時間之上下限，提出彩色時間之派

翠網路模式。Fay^[20] 利用模糊派翠網路建立視覺傳達的鐵路運輸控制系統，並利用 IF-THEN 的形式呈現專家處理鐵路運輸調度的知識，IF-THEN 形式係呈現模糊的知識和履行不確定性的情況，例如利用歸屬函數（membership function）可呈現列車延誤程度、列車間距、列車運行距離及旅客流量。Burkolter^[21] 發展出可衡量鐵路車站容量的隨機派翠網路模式，首先依據班表建構初階列車路線與班次順序，然後再依據高階的營運策略進行符合車站容量的列車班表最適化。Fanti 等人^[22] 針對鐵路車站內列車營運作業流程，提出包括軌道設備（號誌、道岔、股道）、列車設備（鳴笛、煞車器）、列車運行（進站、離站、錯車）與決策（增班、趕點）之彩色派翠網路模式。Daamen 等人^[23] 針對鐵路路線區段內列車衝突狀態與瓶頸區段延誤之衡量，發展出一套彩色派翠網路分析工具。Milinković 等人^[24] 則針對鐵路路線交會站產生之列車延誤與車站容量等課題，提出一模糊派翠網路模擬模式，並以貝爾格勒車站為驗證案例，確認該模式之有效性。

關於此領域的中國大陸相關文獻數量甚多^[25-33]，例如杜彥華與劉春煌^[25] 為有效解決鐵路車站通過能力中各項時間指標問題，以擴展模糊時間派翠網路為基礎，提出層次擴展模糊時間派翠網路（hierarchical extended fuzzy timing Petri net, HEFTPN）的模式，然後以某一鐵路車站為例，進行模式建構並採用模擬工具 CPN Tools 進行模擬分析並驗證其有效性。李曉艷^[29] 應用彩色派翠網路建構出在通信列車運行控制（communication based train control, CBTC）系統下都市軌道列車運行系統模式。該模式不僅可模擬正常情況下列車運行，對於列車故障情況亦可真實反映列車運行過程。通過對模型進行仿真可以在已知當前列車運行狀況的條件下對未來一段時間內列車的運行情況進行預測，為提早制定調整策略提供參考依據。梁楠^[30] 則針對中國高鐵 CTCS-3 級列車控制系統得運作機制，以無線電閉塞中心（radio block center, RBC）為分析對象，應用隨機派翠網路之分層技術，分別建立 RBC 系統週期性訊息與非週期性訊息之隨機派翠網路模式，可在不同系統週期參數與列車交互數量參數下得出 RBC 系統平均延時時間曲線。

國內在此領域的研究仍處於起步階段。楊立安^[34] 於「臺灣鐵路運轉整理之研究」中，利用派翠網路具備平行、分散、及不確定性處理的能力，以 IF-THEN 的形式規則建構列車調度流程與知識規則，建構出列車運轉整理調度的模型與 7 種不同事故的類別，最後藉由矩陣方程式與可達樹驗證列車運轉整理調度模式的可行性。鄭永祥^[35] 於「軌道系統列車延誤、乘客處理與營運應變模式之研究」中，認為為排除誤點或事故所造成列車延誤，調度員必須進行列車的運轉整理調度，但臺鐵並未利用一套有系統的知識來解決大規模且複雜的營運調度問題，因此，該研究藉由派翠網路具備平行處理和圖形化呈現其類似流程圖的特性，建構出鐵路運轉整理調度模式。林琮欽^[36] 於「移動閉塞區間制下混合派翠網路應用於捷運列車運轉整理策略之模擬研究」中，將模糊跟車規則之推論過程以模糊派翠網路進行呈現，再以時間派翠網路架構車站內旅客之上下車行為，並將二者混合以描述列車運行與停站時旅客行為之切換。同時營運者可分別透過改變模糊派翠網路之模糊指標及時間派翠網路之時間區間影響列車與旅客行為。

另外在列車調度策略方面，一般採用站內趕點、站間趕點、縮短發車班距與加派備用

車上線等策略來抑制延滯擴散。Li 等人^[37]在總延滯時間為最小之目標下，以調整列車離站的時間與順序為策略，借助基因演算法模仿生物演化的過程，以全域搜尋演算法進行求解。李治綱等人^[38]則以站間趕點、月台趕點、調整前車（後車）間距、刪除列車等策略進行情境模擬。D'Ariano 等人^[39]提出一套電腦化的列車調度系統 ROMA (railway traffic optimization by means of alternative graphs) 的架構，該系統首先使用分支限定法計算列車的運行順序，再經由禁忌搜尋法選擇所有運行序列的解集中延滯最小的方案。為分析比較不同調度策略對連鎖延滯之改善程度，黃承傳與劉昭榮^[40]則針對臺鐵提出站間趕點與站內趕點之 4 種組合情境，經模擬模式產生共計 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 2 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。

2.3 文獻評析與小結

回顧前述相關文獻可知，軌道列車運行研究方法大致可分為兩大類，一為數學規劃法，二為電腦模擬法，前者如基因搜尋法、分支限定法、禁忌搜尋法等；後者則以電腦強大的計算功能來處理，目前較常見的軌道列車模擬軟體有^[41]：RAILSIM、RAILSYS、OPENTRACK、DYNAMIS...等。

然而，開發軌道運輸運行調度模擬系統是一個複雜的技術過程，須針對不同的問題提供不同的解決方法與手段。目前常見的模擬系統開發方法有結構化分析與設計方法、快速原型方法、物件導向 (object-oriented) 方法與電腦輔助軟體工程方法等四種，各個方法皆有優缺點。根據相關文獻研究結果顯示^[42-44]，資訊系統開發方法組合 (SISDM) 是一種在系統論思維下，運用各種系統工程方法，集合多種開發工具為一體的綜合性系統開發方法。SISDM 與前述 4 種方法最大的不同在於引進了通用圖論 (generalized graph theory) 中的模式建構與分析工具，建立以派翠網路為基礎之資訊系統資源配置模式。SISDM 有別於現存資訊系統開發方法如 SA/SD 法、ISD 法及 O-O 法，其優勢在於以隨機派翠網路為理論基礎的通用圖論工具，可針對資訊系統模型的系統結構（靜態）特性與系統行為（動態）特性進行分析與評估。靜態特性分析包括：(1) 結構複雜性分析；(2) 節點特性與系統可擴展性分析；(3) 核心層網路與系統可靠性分析。動態行為分析則包括：(1) 建構資訊系統的隨機派翠網路模型；(2) 建立與該隨機派翠網路模型的馬可夫隨機過程；(3) 以馬可夫隨機過程的穩定狀態機率對系統行為特性進行分析，如圖 1 所示。

如前所述，傳統的派翠網路已不足以呈現真實環境下軌道運輸複雜系統的動態、不確定、隨機、多樣化等特性，因此近年來許多學者發展出衍生特性的高階派翠網路，如 TPN、FPN、CPN、SPN 與 HPN 等。TPN 可用來描述具有固定執行時間的系統，依據每一個轉移節點 (transition) 延遲時間的不同，為系統排程規劃的工具。SPN 具有隨機的觀點：待發 (enable) 的轉移節點可依據統計分配來決定其延遲時間。CPN 則排除傳統標記 (token) 的 0 與 1 之區別而賦予標記不同的顏色，將可應付日趨複雜的系統。FPN 則是於節點上加入模糊歸屬函數值來決定標記取得與否，此一判斷機制的加入，使派翠網路能更合理的推

論系統並行、同步、衝突時的狀態轉移，提供最佳轉移路徑與推論邏輯。每個軌道運輸研究課題亦可依據所屬類型結合兩種以上之高階派翠網路而成為混合派翠網路。經由相關文獻^[21-24]得知，車站內列車進出站與旅客流動、平交道區域內動態行為或路線某瓶頸區間列車運行等模式建構，皆可採用通用圖論之派翠網路系列為建模工具。

以往列車運行公式中的加減速常簡化為定值，並未考量列車司機在站間與站內進出的隨機操作行為，因此本研究選擇能求解馬可夫隨機過程的隨機派翠網路，藉由實際資料來建立列車運行加減速之隨機觸發機率，以呈現實際列車運行時之不同加減速操作行為。另一方面，目前國內應用高階派翠網路於軌道運輸運行調度方面的研究亦不多見，若能拋磚引玉，先建立具有可視化與系統動態活動描述功能之隨機派翠網路為基礎的軌道運輸運行調度模擬模式原型 (prototype)，再視其他研究課題屬性，逐漸引進 TPN、CPN、FPN 或 HPN 等求解工具，將更能呈現真實環境下軌道運輸複雜系統的動態、不確定、隨機、多樣化等特性。此為本研究何以採用隨機派翠網路為基礎之系統開發方法的緣由。

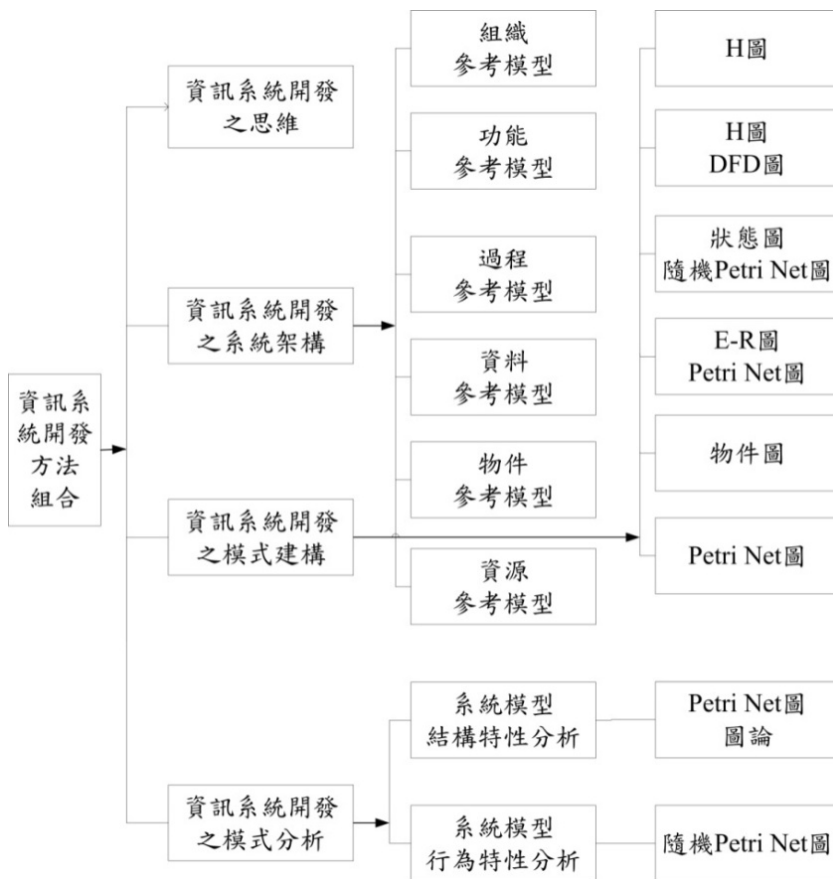


圖 1 以隨機派翠網路為基礎之資訊系統開發方法組合 (SISDM) 系統架構

本研究模擬程式之 SISDM 設計與開發係運用包含列車、車站、路線等資料庫來描述整個列車運行之各種狀態，同時針對列車運行過程所對應的隨機狀態變化，藉由不斷更新電腦記憶體中的變數來完成系統模擬之任務，最後則輸出重要變數結果，以利後續的績效評估。程式設計係採物件導向設計中的類別 (class) 設計，並以事件 (event) 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 3 種事件；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。SISDM 之系統設計係基於可支援微軟 NET Framework 類別庫的 C++ 作業環境。

三、研究方法

3.1 派翠網路

派翠網路是由德國數學家 Carl Adam Petri 博士於西元 1962 年在其博士論文中所提出，為一種兼具堅強數學基礎、狀態導向 (state-oriented) 與圖形化 (diagrammatic) 的模型化系統分析與發展工具，用以描述平行系統的動態行為。除了可用來定義描述事件與條件存在關係的圖形表示及表達同步與共時的系統行為之外，亦可用於分析系統的績效。

3.1.1 基本元素與建置

基本派翠網路圖中是以一些簡單的圖形符號去描述系統中之程序的邏輯關係，表現物件存在及其關聯有兩種基本的元件，一是節點，另一個是連結線。不同的節點由連結線相連結，以表現節點間的關聯性。一個網路圖中又包含兩種節點分別稱為位置節點 (places) 及轉移節點 (transitions)，其以有方向性的線段 (arc) 連接位置節點到轉移節點及轉移節點到位置節點的流向關連。派翠網路中以標記 (token) 作為事件之註記，其中位置節點內可含有或不含有標記，且限制每個位置節點內所含的標記數目最多為 1 個。典型的派翠網路圖基本元素包括：(1) 位置節點 (place)，通常以圓圈來表示之。(2) 轉移節點 (transition)，通常以粗直線 (或是矩形) 來表示之。(3) 連結線 (arc)，通常以單方向之箭頭表示之。(4) 標記 (token)，以點狀表示之。

若系統以派翠網路進行建構時，位置節點表示系統中關於程序或資源的狀態，轉移節點表示在系統中的事件或活動。一個轉移節點會有數個不等的輸入位置節點和輸出位置節點，代表此事件的事前條件及事後條件。派翠網路的規則只有一個轉移節點的致能與激發，當一個轉移節點的所有輸入位置節點均含有標記時，轉移節點具備致能的條件。藉由標記不斷的向前傳遞，當標記傳遞至代表最終目標之位置節點時，即完成派翠網路整個推論過程。

在派翠網路圖形中，主要有 5 種基本型態，藉由此 5 種型態間之交叉連結，即可建構某一系統之派翠網路圖，如圖 2 所示。此 5 種基本型態說明如下：

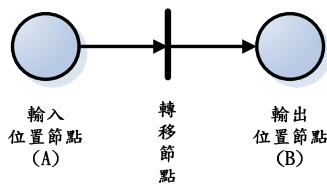
型態 a：若 A 則 B 。當左側的 A 條件滿足並取得標記時，轉移節點被致能激發之後，標記向前傳遞，亦即此時系統狀態由左側的 A 改變至右側的 B ，同程式設計中「If...Then...」之概念。

型態 b：若 A_1 且 A_2 且... A_n ，則 B 。當左側的 $A_1 \sim A_n$ 條件滿足並均取得標記時，轉移節點被致能激發之後，標記向前傳遞，亦即此時系統狀態改變至右側的 B ，同程式設計「If...and...Then...」之概念。

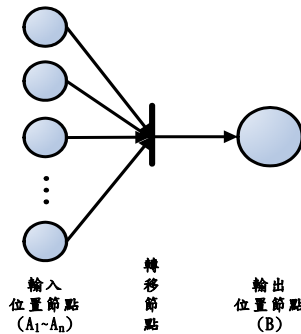
型態 c：若 A 則 B_1 且 B_2 且... B_n 。當左側的 A 條件滿足並取得標記時，轉移節點被致能激發之後，標記向前傳遞至 $B_1 \sim B_n$ ，亦即此時系統狀態改變至右側的 B_1 及 B_2 及... B_n ，同程式設計「If...Then...and...」之概念。

型態 d：若 A_1 或 A_2 或... A_n ，則 B 。當左側的 $A_1 \sim A_n$ 其中只要有一個條件滿足並取得標記時，轉移節點被致能激發之後，標記向前傳遞，亦即此時系統狀態改變至右側的 B ，同程式設計「If...or...Then...」之概念。

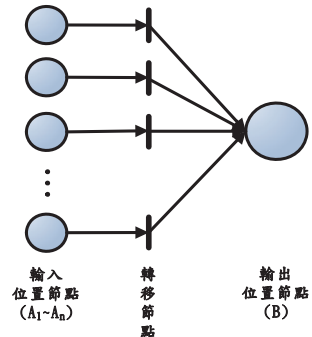
型態 e：若 A 則 B_1 或 B_2 或... B_n 。當左側的 A 條件滿足並取得標記時，轉移節點被致能激發之後，標記向前傳遞至 $B_1 \sim B_n$ 其中一個，端視各轉移節點的守衛函數 (guard function) 而定，同程式設計「If...Then...or...」之概念。



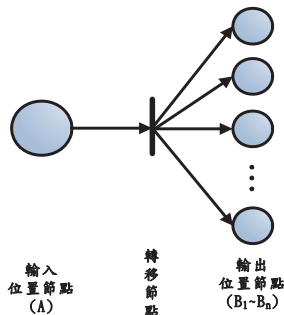
派翠網路圖形型態 a



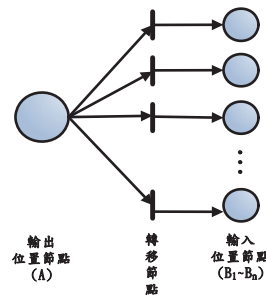
派翠網路圖形型態 b



派翠網路圖形型態 c



派翠網路圖形型態 d



派翠網路圖形型態 e

圖 2 派翠網路圖形 5 種型態

3.1.2 派翠網路之數學特性

一個典型的派翠網路是由 7 個元素所構成的集合，即 $PN = (P, T, I, O, A, M, W)$ ，其正式定義分析如下：

1. $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m\}$ 為一個有限位置節點所構成的集合， m 表示在派翠網路中位置節點的個數， $m \geq 1$ 。
2. $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$ 為一個有限轉移節點所構成的集合， n 表示在派翠網路中轉移節點的個數， $n \geq 1$ 。且 P 和 T 為互斥，亦即 $P \cap T = \emptyset$ ，且 $P \cup T \neq \emptyset$ 。
3. A 代表 $(P \times T) \cup (T \times P)$ 為方向性線段所成的集合，即代表派翠網路的流向關連。
4. I 為輸入位置節點所形成的集合。
5. O 為輸出位置節點所形成的集合。
6. $M: P \rightarrow N$ 為標記集合，從位置節點映射至非負整數。 $M(P)$ 表示在位置節點 P 中在標記 M 情形時的數量， M_0 表示初始標記。
7. $W: A \rightarrow N^+$ 為指定給每一個方向性線段的權重值， N^+ 為正自然數所構成的集合。

3.2 隨機派翠網路

隨機派翠網路 (SPN) 是由 Florin 及 Natkin 在 198 年提出，此方法可接受由上往下 (top-down) 或是由下往上 (bottom-up) 的模組圖形化複雜系統介面^[45]。與基本派翠網路的差異在於加入了「機率概念」，因為不同的轉移節點會有不同的反應速率，轉移節點內的標記要進入觸發階段時，必須要等待一段時間，且通常為非固定時間 (隨機時間) 長度。隨機派翠網路比基本派翠網路與時間派翠網路更符合現實運作時所可能發生的狀況。隨機派翠網路由 $SPN = (P, T, A, M, \lambda)$ 表示，其中 (P, T, A, M) 與基本派翠網路的定義相同，而 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ 是定義每個轉移節點激發的時間是隨著隨機的方式進行，如圖 3 所示。

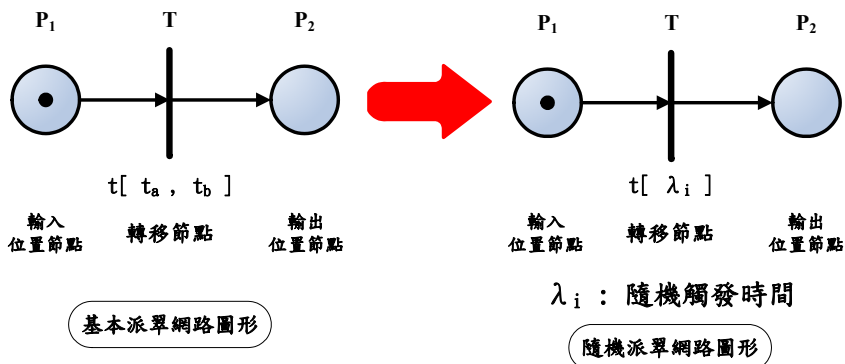


圖 3 隨機派翠網路示意圖

隨機派翠網路一開始被應用在轉移節點上之隨機觸發時間，但後有學者又將其應用在隨機觸發機率上。學者認為基本派翠網路型態「If... Then...or...」之路網結構，輸入節點之標記經由每個轉移節點觸發至不同輸出節點之情況，標記選擇不同觸發路徑之選擇機率皆不相同，因此，其在轉移節點上加入每個不同觸發路徑之隨機觸發機率，期望表達出系統於真實狀況下之隨機路徑選擇，如圖 4 所示。每個不同觸發路徑之觸發機率可由歷史資料分析得出，於系統建置時加入路徑之觸發機率，以控制標記在選擇觸發路徑之機率大小 [46]。

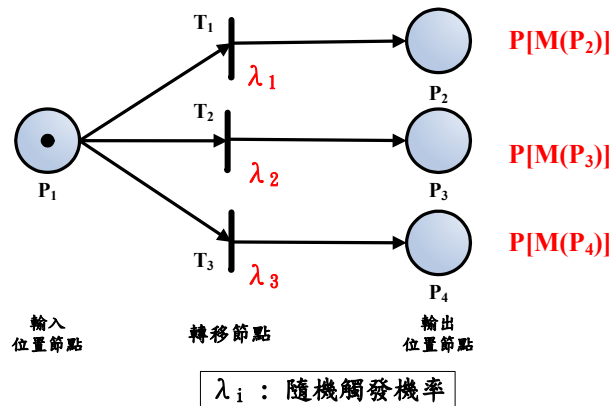


圖 4 隨機觸發機率之派翠網路示意圖

本研究係藉由隨機派翠網路之觸發機率，來設定列車運行過程中可能之動態運行行為，其中以列車運行加減速度最為常見，亦即以隨機派翠網路之觸發機率表示列車運行過程中在號誌燈號不同時之可能速度變化而改善以往列車模擬模式僅以單一速度值代入行車動力學公式的問題。

3.3 模擬模式之模組化

經由前述相關文獻歸納得知，軌道運輸列車運行調度之研究方法大致可分為數學解析法與電腦模擬法，數學解析法主要用數學模式建立分析架構以進行列車運行調度問題求解，而模擬法則是以模擬程式來進行分析，然而無論是採用數學解析法或電腦模擬法，列車運行過程之分析架構皆極為相似。

若進行列車運行延誤、列車班表最適化、軌道路線容量或運行調度策略等相關課題研究，皆以列車運轉時隔為關鍵變數，因列車運轉時隔之多寡將影響列車發車間距，進而影響軌道運輸之整體容量與列車排班調度，故列車運行過程分析之首要目標在於確認列車運轉時隔。影響列車運轉時隔之因素有很多，在此分為五個層面，包括車輛性能、路線特性、運行特性、運行控制與旅客特性等，各層面之說明如下：

1. 車輛性能：列車之車輛性能主要為列車牽引能力、列車制動能力、列車加速度、列車最

大運行速度、列車阻力等，車輛性能之優劣直接影響列車之運行，性能越好則越能縮短整體運行時間，反之則會加長運行時間。

2. 路線特性：路線特性主要為路權型態、車站位置、站間軌道數、月台股道配置、列車折返點、調度場位置、平交道位置、待避軌位置等，路線特性不僅影響列車之運行時間與調度外，同時亦影響車輛性能之發揮。
3. 運行特性：運行特性主要為列車組成、列車種類、編組、運行方向及停站方式等，不同之運行特性可能會影響列車運行調度策略，進而會影響整體的系統運行時間。
4. 運行控制：運行控制主要為列車運行加減速控制、閉塞區間控制、站間號誌控制及進出站號誌控制等，不同的列車運行控制會影響整體之列車運行時間。
5. 旅客特性：旅客特性主要為各站之運輸需求量、旅客到站時間分布、運輸需求特性等，不同之旅客特性不僅影響整體之列車調度與排定，亦影響了列車之停站時間與運行時間。

列車運行之相關研究，通常會考慮上述之各項影響因素，因為每項影響因素之差異，都有可能在排班、調度與運行上無法發揮出最佳運輸服務，故進行模式建構時，必須先針對每個環節進行細部分析，以了解整體系統之運作。

為使模擬模式轉換為可因應不同情境之運算流程，需藉助電腦化之模擬程式，使其能朝向可操作的應用軟體而發展。本研究係以模組化概念進行模擬程式設計，模擬程式分為三大模組，包括資料輸入、內部處理及結果輸出等，亦即經由外部資料輸入，經由內部處理之路線限制、列車控制、車站月台與調度運轉等模組之內部處理與分析，最後輸出各列車之相關資料，如圖 5 所示。

3.3.1 資料輸入模組

資料輸入包括「車站」、「路線」及「車輛」等。內容如下：

1. 車站

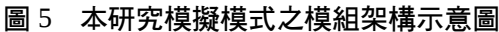
即研究範圍內之所有車站之位置分佈，本研究將以「距離」來建構一條虛擬路線，供虛擬列車運行。研究範圍內的車站則包括舊有路線上車站之外，還包括臺鐵捷運化後新建完成之簡易通勤站，如百福、三坑、浮洲與汐科車站等。

2. 路線

臺鐵具有環島路線特性，路線之線形變化包括水平彎曲度變化與垂直坡度變化，此亦導致臺鐵列車運行速度受限的條件之一。因此，本研究將在列車運行模式中納入路線變化之影響因素，不同路線線形變化將會影響列車之最大速度、加速度與制動能力等。

3. 車輛

臺鐵為服務長、中及短程等不同旅次特性之旅客，在車種等級上依性能可分為自強號、莒光號、復興號與區間車等 4 種，各車種之列車最大速度、列車加速度、列車減速度將納入車輛之基本輸入資料。



由於路線線形變化有很多因素，包括水平曲度變化、車站位置、運行股道數或垂直坡度變化，任何因素皆可能影響列車之運行，本研究將藉由此模組，納入上述影響因素而在模擬路線上產出各路段之速限包絡線及停站包絡線，以控制列車運行之速度限制。本研究基於資料可獲得性之考量，僅將路線坡度與曲線、號誌系統以及車輛與相關設備等因素納

入計算公式。其中，路線坡度與曲度影響分析如下：

1. 路線坡度對列車加減速性能之影響

軌道運輸之坡度通常是以 ‰ 為單位，坡度將會影響列車之加減速性能，可用公式 (1) 估計：

$$a(G) \approx \frac{M_e a(0) - Mg \frac{G}{1000}}{M_e} = a(0) - \frac{g \times G}{1000\rho} \quad (1)$$

式中， $a(G)$ = 列車在坡度 $G‰$ 的加速度 (m/s^2)；

$M_e = \rho M$ 即列車之等效質量 (equivalent mass)；

$a(0)$ = 列車在坡度等於 0 之條件下加速度 (m/s^2)；

ρ = 等效質量係數，表示列車運動過程中，轉動零件如車輪、車軸吸收的能量之等效質量；

M = 列車編組質量 (kg)；

g = 重力加速度 (m/s^2)， $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ；

G = 路線坡度 ($‰$)。

等效質量係數 ρ 一般介於 1.04 ~ 1.10 之間。臺鐵機車牽引之列車採用 1.06，電聯車採用 1.088。若將等效質量係數 ρ 及重力加速度 g 代入式(1)，則可以公(2)式趨近之：

$$a(G) \approx a(0) - 0.009G \quad (2)$$

若為減速度，由於坡度之阻力相反，則以公式 (3) 表示：

$$b(G) \approx b(0) + 0.009G \quad (3)$$

臺鐵對於列車在下坡路段有表訂之速限值，如表 2 所示。

表 2 臺鐵下坡坡度－速限對照表

下坡路段坡度值	速限(km/h)
坡度 ‰ 5 以下	120
坡度 ‰ 10 以下	115
坡度 ‰ 15 以下	110
坡度 ‰ 20 以下	105
坡度 ‰ 25 以下	100

2. 線形曲線對列車加減速性能之影響

當列車行駛於彎道時，由於鋼軌為剛性物體，因此在彎道因內外軌長度不同，產生鋼輪縱向及橫向之滑動、摩擦；又因列車行駛於彎道時離心力產生作用，使得外側鋼輪與外側鋼軌會產生運轉摩擦。另外鋼軌長期磨損，曲線變形、軌距不正確、軌道保養不良等原因亦均為造成彎道阻力之主因。臺鐵對彎道阻力計算公式之計算如公式 (4) 所示。若非精密計算或半徑較小之彎道處，通常均會忽略彎道之阻力。本研究之資料輸入模組包括彎道半徑資料，若面臨彎道半徑小於 100 公尺以下情形，則不計彎道阻力。臺鐵局對於列車運行中路線線形曲度變化之速度限制依照其曲線半徑有其固定之速線表定值，如表 3 所示。

$$T_k(v, r) = \frac{600}{\gamma} \times W \quad (4)$$

$T_k(v, r)$ ：彎道阻力 (kg/ton)；

γ ：彎道半徑 (m)；

W ：列車重量 (ton)。

表 3 臺鐵曲線半徑－速限對照表

曲線半徑(m)	速限(km/h)
>800	125
800~700	120
700~600	110
600~500	100
500~450	90
450~400	85
400~350	80
350~300	75
300~250	70
250~225	65
225~200	60
200~150	55
150~125	50
125~100	45
100 以下	40

3. 車輛與相關設備對列車加減速性能之影響

軌道列車有兩個較常見的績效指標，分別為能源消耗與旅行時間。對於單一車種之軌道運輸系統（如捷運、輕軌）而言，由於列車性能相同，運行速度可保持一致，在牽引計

算上係尋求最短之列車運行時分。在確定列車時刻表之後，如何尋求節省能源消耗的控制方式即為列車控制的重點。然而對於像臺鐵具有多車種的運輸系統而言，則需考量不同列車的特性，包括機車牽引、列車重量、長度、號誌條件、停站原則、電力供應…等，因此重點在於各列車間之最小運行間隔。目前臺鐵列車種係以自強號與區間車為主，莒光號、復興號與區間快車則作為離峰時刻輔助之用，由於復興號將面臨汰換，且其在尖峰時刻並未提供服務，因此不列入本研究範圍。在列車性能設定上，自強號以推拉式自強號 (PP 車) 為主，其最大營運速度為 130 km/h，加減速度為 1.008 m/s^2 ；莒光號最大營運速度為 100 km/h，加減速度為 0.2744 m/s^2 與 0.42 m/s^2 ；區間車則以 EMU600 型為設定對象，其最大營運速度為 110 km/h，加減速度為 0.8064 m/s^2 ，如表 4 所示。區間快車所採用之的車型與區間車相同，兩者的差異在於停靠方式的不同，區間車係每站皆停，區間快車則屬於跳蛙式停靠，因此在列車車種設定上與區間車一致。

表 4 臺鐵各車種列車運行性能

車種	自強號 (E1000)	莒光號	區間車 (EMU600)
最大營運速度 (km/h)	130	100	110
服務加速度	1.008 m/s^2	0.2744 m/s^2	0.8064 m/s^2
服務減速度	1.008 m/s^2	0.42 m/s^2	0.8064 m/s^2

3.3.3 列車控制模組

臺鐵列車運行係採「固定閉塞區間制」(FAS)，FAS 控制方式是將列車運行路線劃分為數個閉塞區間，每個區間皆有固定位置，不因列車運行而變動，並以號誌控制列車進出車站內外，防止列車追撞及對撞。目前臺鐵使用三位式號誌系統，主要作為站間運轉、列車進站及出站操作控制之用。另外，臺鐵列車運行因不同車種等級而產生追越情形，因此錯車控制即用於設定列車間之待避或追越行為，藉由判斷邏輯來控制錯車流程。

1. 站間運轉控制

臺鐵列車運行間隔係以閉塞分區長度為單位，各閉塞區間長度約為 1~3 公里不等。臺鐵列車運行以三位式閉塞號誌機為主，在正常運行情況下，列車受制於綠燈 (通行)、黃燈 (慢行) 與紅燈 (停止)，如有維修、事故等事件發生時，則搭配閃黃 (緩行)、全紅閃黃 (低速) 及全紅全黃 (警戒) 燈號控制。本研究則採用「紅、黃、綠」之號誌控制，作為站間列車運行控制操作之用。

2. 站內運轉控制

站內運轉控制係探討安全進站間距、錯車控制與最小離站時隔，說明如下：安全進站間距之設定，可分為一股道同一股道進站、二股道同一股道進站及二股道不同股道進站等 3 部分，其控制方式係基於同向列車進站號誌安全時距之原理，故分為同一股道進站與不

同股道進站 2 部分。由於本研究設定之站內股道數最大值為 2，因此同一站內無法同時容納 3 輛車及 3 輛車以上之列車，若發生此一情形，則系統會出現錯誤警告。

由於只有在車站內有多餘之股道供列車進行錯車，因此本研究設定錯車行為皆發生於車站內。錯車之判斷邏輯為當前列車之等級較後車為低，且前車進站停靠時，若前後車之距離少於門檻值，則必須進行錯車，令等級較高之列車優先通行，同時亦進行前後車資料交換的程序，重新計算等級較低列車之停站再出發時間。

離站時隔之設定與安全進站間距之設定類似，主要亦以同向列車離站號誌安全時距之原理進行操作，故亦分為同一股道出站與不同股道出站 2 部分。號誌安全時距乃指受制於號誌系統所得之列車最小運轉時間間隔。若以臺鐵三位式號誌系統為例，停站等待後行列車通過之列車通常等級較後行列車為低，速度亦較慢。本研究係引用文獻^[47]中有關 FAS 安全時距的公式，分別計算列車進／出站與停靠同一／不同軌道之號誌安全時距，如公式(5)至公式(9)所示，惟本研究將針對站間與站內不同狀況，運用隨機派翠網路之觸發機率而自行導出不同車種列車之加減速度以及錯車控制邏輯，茲說明如下：

(1) 同向列車進站號誌安全時距－站內停靠同一軌道

車站內僅有一軌道，後行列車必須等待前行列車淨空月台並離站方能進入，以避免發生事故。若是在前行列車離開車站通過出發號誌機後，經過解除閉塞及清除號誌時間，進站號誌機由於車站區間清空，因此進站號誌由黃燈注意轉為綠燈可通行時，後行列車正好以原巡航速度到達距離進站號誌機一個號誌視距的長度時，由於並未因號誌而減速，因此前後兩列車之運轉時隔可達到最小。

$$T_{s,A1} = \sqrt{\frac{2(L_i + s_x)}{a_i}} + \frac{v_j}{b_j} - \frac{v_y^2}{2b_j v_j} + \frac{B_1 + B_s - s_x}{v_j} + t_o + t_r + t_{d_i} \quad (5)$$

式中，

$T_{s,A1}$ ：同一股道進站之號誌安全時距 (sec)；

t_{d_i} ：前行列車之停車時間 (m/s)；

t_r ：車站離站出發號誌顯示綠燈後，關閉列車車門以及列車司機員確認出發號誌的反應時間 (sec)；

t_o ：前行列車車尾通過出發號誌機後，解除閉塞及清除號誌的時間 (sec)；

s_x ：列車於車站停車時車頭與出發號誌機之距離 (m)；

B_1 ：車站前第一閉塞區間之長度 (m)；

B_s ：列車所在之閉塞區間長度 (m)；

v_j ：後行列車之巡航速度 (m/s)；

v_y ：注意號誌的容許速度，臺鐵規定為 16.67 (m/s)；

b_j ：後行列車之服務減速度 (m/s^2)；

a_i ：前行列車之加速度 (m/s^2)；

L_i = 前行列車列車長度 (m)。

(2) 同向列車進站號誌安全時距－站內停靠不同軌道

車站內有兩股以上之軌道供列車停靠，使前行列車及後行列車可於站內停靠不同軌道，只要轉轍器及號誌設定完成，後行列車即可進站。當前行列車停於車站後，車站之進站號誌機會隨著轉轍器之扳轉而由紅燈不可進入區間燈號轉為閃黃燈注意燈號，進站號誌機前一個號誌將會隨之轉為綠燈可通行燈號。號誌安全時距需以道岔完成前行列車服務後扳至正確股道開始計算，但列車進站時隔是以列車停車後之時間來計算，其公式如下：

$$T_{s,A2} = \frac{v_j}{b_j} - \sqrt{\frac{2s_e}{b_i} - \frac{v_y^2}{2b_j v_j}} + \frac{B_2 + B_1 + B_s - s_x}{v_j} + t_p + t_r \quad (6)$$

式中，

$T_{s,A2}$ ：不同股道進站之號誌安全時距 (sec)；

t_p ：前行列車通過道岔後，解除第一股道進路、扳轉轉轍器、鎖定第二股道進路，以及號誌變換的整體作業時間 (sec)；

s_e ：先行列車停車後車尾與道岔之距離 (m)；

B_2 ：車站前第二閉塞區間之長度 (m)；

b_i ：前行列車之服務減速度 (m/s^2)。

(3) 同向列車離站號誌安全時距－站內停靠同一軌道

當後行列車欲停靠車站，與前行列車停靠同一軌道時，須待前行列車車尾通過離站號誌機，並且經過解除閉塞即清除號誌的時間。當進站號誌機顯示為綠色可通過時，後行列車方得以進入車站停靠。當後行列車司機員以巡航速度行駛至進站號誌前一個號誌視距之位置時恰好與進站號誌轉為綠燈同時，則可使前後兩列車之運轉時隔達最小。綜合整理可得以下兩種情況之列車最小運轉時隔計算公式：

$$L_i + s_x + B_n > \frac{v_i^2}{2a_i}$$

$$T_{s,D1} = \frac{v_i}{2a_i} + \frac{v_j}{b_j} - \frac{v_y^2}{2b_j v_j} + \frac{L_i + s_x + B_n}{v_i} + \frac{B_s - s_x}{v_j} + t_o + t_r + t_{d_j} \quad (7)$$

$$L_i + s_x + B_n \leq \frac{v_i^2}{2a_i}$$

$$T_{s,D1} = \sqrt{\frac{2(L_i + s_x + B_n)}{a_i}} + \frac{v_j}{b_j} - \frac{v_y^2}{2b_j v_j} + \frac{B_s - s_x}{v_j} + t_o + t_r + t_{d_j} \quad (8)$$

式中，

$T_{s,D1}$ ：同一股道離站之號誌安全時距 (sec)；

t_{d_j} ：後行列車之停車時間 (m/s)；

B_n ：車站前第 n 個閉塞區間之長度 (m)；

v_i ：前行列車之巡航速度 (m/s)。

(4) 同向列車離站號誌安全時距－站內停靠不同軌道

當同向之列車於站內停靠不同軌道時，只要前行列車離站後，列車車尾通過出發號誌機的下兩個號誌機，則車站之出發號誌機將會由黃燈轉為綠燈（由於臺鐵為三位式顯示號誌機），此時後行列車方能離站進入下個閉塞區間。與前述同向列車停靠站內同一軌道之最大不同在於後續追蹤列車不必等候前行列車離站後才可進入車站內停靠，因此可縮短運轉時隔。綜合整理可得以下公式：

$$T_{s,D2} = \frac{v_i}{2a_i} + \frac{L_i + s_x + B_n + B_{n-1}}{v_i} + t_o + t_r \quad (9)$$

式中，

$T_{s,D2}$ ：不同股道離站之號誌安全時距 (sec)；

B_{n-1} ：車站前第 $n-1$ 個閉塞區間之長度 (m)。

3. 錯車控制

錯車行為為一列列車在軌道上超越另一輛同向列車之列車運行行為，故錯車判斷主要內容為決定列車在系統中錯車之時間及地點；而在錯車判斷中所必須依據之錯車條件，必須為有一股或多股側線始列車能進行追越之指令，因此錯車行為大多發生於車站中或於特定擁有側線或袋型軌之路段，而側線之佈設位置、側線長度以及側線數量將直接影響到列車待避時之速度及停等時間。

發生列車錯車行為有其須遵照之錯車判斷準則，當前行列車抵達車站，並完成停靠任務時，會先判斷後行列車之列車等級，如後行列車等級較先行列車等級為低，亦或是與先行列車等級相同時，先行列車即毋需錯車，可順利出發；反之，若後行列車等級較先行列車高時，則達到發生錯車行為之條件之一。而需要進行錯車行為的另一個條件，則必須判斷先行列車與後形列車之間距與錯車門檻值之關係，若前後車之間距小於門檻值時，則達到進行錯車行為之所有條件；反之，則先行列車仍可順利出發。

當先行列車 (A) 已完成錯車行為時，並非後行列車 (B) 通過車站且以達安全間距，先行列車 (A) 即可順利出發，其必須再次向後方列車進行錯車判斷，如當後方列車 (C) 之等級較先行列車 (A) 為低，亦或是與先行列車 (A) 等級相同時，先行列車則可順利出發，如圖 6 所示；反之，後方列車 (C) 等級較先行列車高時，則必須再次判斷門檻值與前後車間距之關係，如前後車之間距仍小於錯車門檻值時，則必須再次進行錯車行為，如圖 7 所示。本研究對於模擬系統內之錯車行為控制，即是以如此反覆地準則判斷，直到條件皆符合才可以順利出發。

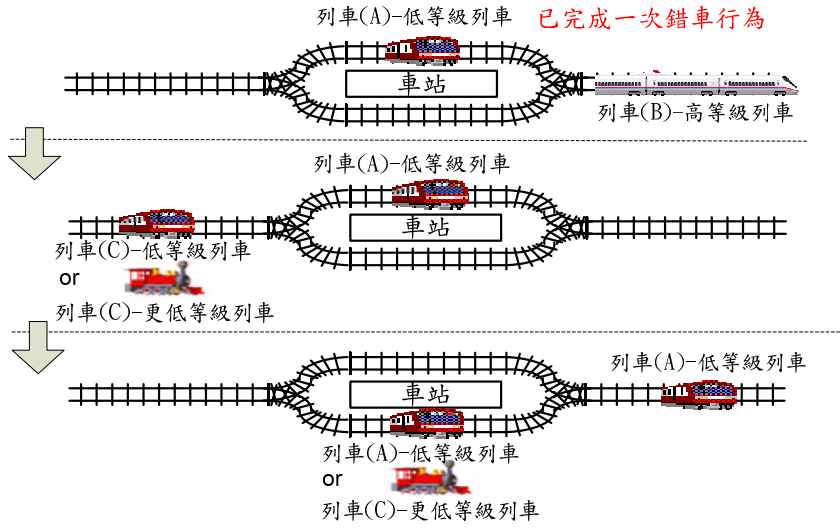


圖 6 第二次錯車行為之判斷程序示意圖

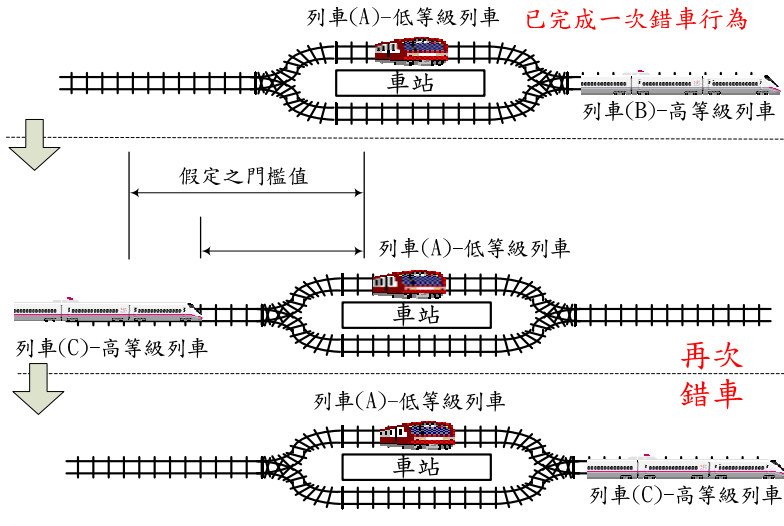


圖 7 執行第二次錯車程序示意圖

本研究對於前述錯車程序之處理係在撰寫模擬程式時，加入一個列車序轉換的副程式，主要在設定程式中較細微部分，包括錯車行為發生後，前後車資料類別 (class) 以及該列車所屬站間與站內資料類別如何轉換；列車運行中之停站包絡線、速限包絡線等限制如何產生；列車於站間與站內運行時，如何加速、減速或是等速前進之設定。本研究係以

時間推進的方式撰寫模擬程式，程式內即須分辨「前車、後車」的先後次序。當列車於車站內，必須進行錯車行為之時，等級較低之前車 (A) 必定須在車站內讓等級較高之後車 (B) 先行通過，而後再行出發；故此時之前車 (A) 已因錯車行為轉變為後車 (A)，後車 (B) 亦轉變為前車 (B)。

3.3.4 車站月台模組

此模組係用於控制月台之駐站股道數配置。月台駐站股道數之多寡可決定該車站是否可執行列車之待避追越調度。若駐站股道數僅有一軌時，後行列車並無法追越；若駐站股道數為二軌時，當站內僅有一列列車停靠，則可追越，若二軌皆有列車停靠，列車則無法追越；同理，當駐站軌道數為三軌時，若一軌有車或二軌有車則可追越，反之，三軌皆有車則無法追越。不同車站之月台配置會影響各車站之駐站股道數，在本研究範圍內之各車站月台股道配置數大致為 1 ~ 3 股道，因此可根據各車站之駐站股道數來決定列車是否可追越。

再者，每列列車因等級不同而在不同車站之停靠時間亦有所差異，故本研究決定針對各車種列車於各停靠車站之停靠時間進行實際調查，以統計配適度綜整出各車種於各車站之停站時間隨機分配函數，進行列車運行模擬時係以該隨機分配函數產出亂數來表示該列車於該站之停靠時間。

3.3.5 調度運轉模組

列車運行過程中，往往因停站時間、待避追越、設備損壞、天災或事故等因素而導致延誤，當延誤發生時，為回復原排定班表，將採用調度策略進行修正，以維持服務品質。一般常見適用於臺鐵之調度策略包括列車趕點、縮短停站時間、變更到發股道、變更行車順序、特開列車、待避追越等。

3.3.6 結果輸出模組

各項外部資料輸入，經由內部處理模組，可得出列車運行之相關輸出結果，包括列車於各車站之停靠時間、總運行時間、系統績效等，而後可依情境設定參數，產生相對應之輸出結果。

3.3.7 隨機派翠網路為基礎之模式建構

如前所述，隨機派翠網路可為系統行為之動態特性分析與評估，提供具有可視化與系統動態活動之描述功能。以列車進站為例，以往模擬模式係無論何種狀況均採相同的加減速度，但因各車站之月台駐站股道數不同且司機員之反應行為亦有所差異，因此本研究納入隨機派翠網路，可針對不同進站情況，執行不同列車加減速度操作方式。因限於篇幅，本研究乃以站內運轉控制為例，針對下列站內 9 種狀況而設定不同車種列車之加減速度：(1) 站內三股道無停車；(2) 站內三股道停一列車；(3) 站內三股道停二列車；(4) 站內三股

道停三列車；(5) 站內二股道無停車；(6) 站內二股道停一列車；(7) 站內二股道停二列車；(8) 站內一股道無停車；(9) 站內一股道停一列車。

本研究將各等級列車之減速度分為 4 種不同比例，包括 80%、60%、40%與 20%等，如圖 8 所示。圖 9 為七堵站月台三駐車軌狀況下各不同減速度之觸發機率。

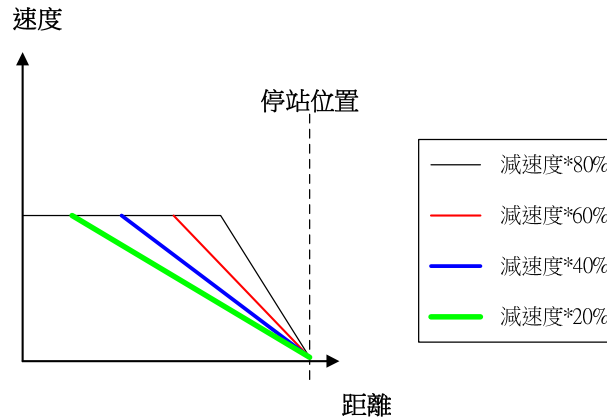


圖 8 臺鐵各等級列車減速度之差異比例圖

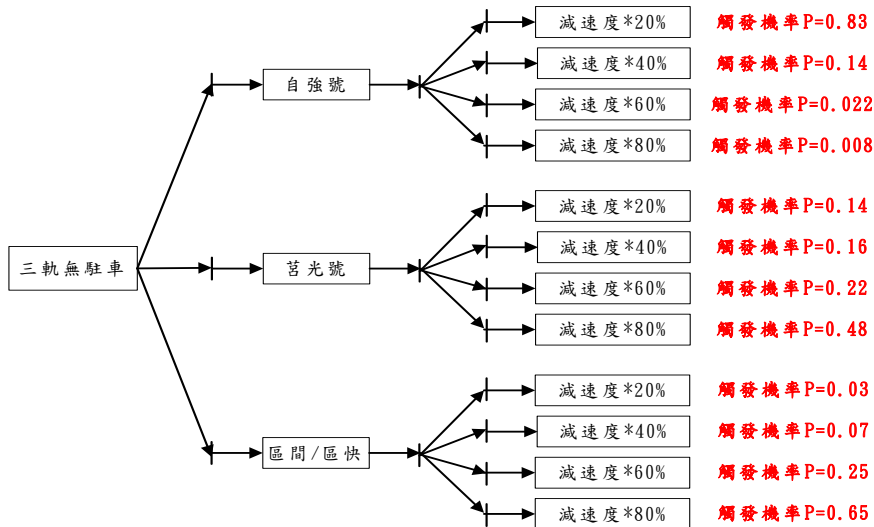


圖 9 七堵站月台三駐車軌狀況下各不同減速度之觸發機率示意圖

綜合上述，以隨機派翠網路建構之站內運轉控制處理流程可如圖 10 所示。其他如站間待避控制與站間運轉控制亦參照圖 10 以隨機派翠網路建構其處理流程，並依據其觸發機率而產生列車加減速度行為，此將更能表現列車運行之實際特性。本研究係使用 C++語

言進行模擬程式之撰寫，程式結構是由相關變數及副程式宣告、主程式、副程式及資料輸出等所組成，如圖 11 所示。首先對於程式內之變數與副程式進行宣告，然後應用各分析模式與控制理論建立主程式與副程式之處理流程，最後再將所需之分析資料完成輸出存檔。

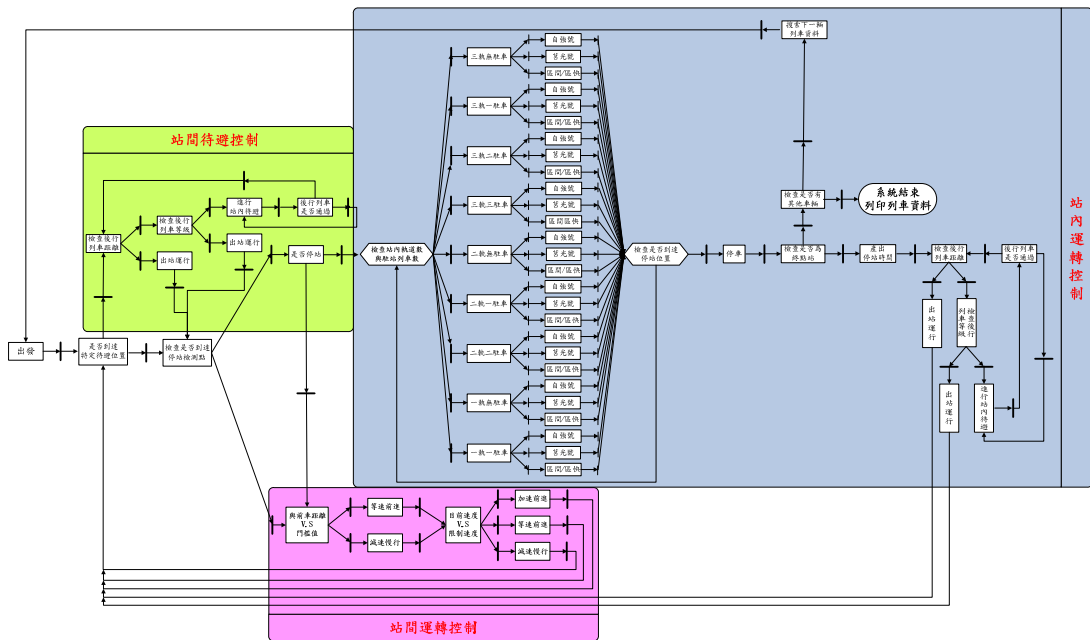


圖 10 以隨機派翠網路建構之站內運轉控制處理流程

四、實證分析

4.1 案例說明

本研究之實證分析對象為臺鐵基隆站至中壢站南方向之捷運化路線，除了臺鐵管理局提供車站位置、車種與實際列車運行資料之外，為取得本研究模擬模式所需之輸入資料，本研究尚於 2013 年 5 月 1 日至 31 日，選擇星期一至星期四早上 06:00 ~ 10:00 之尖峰通勤時段進行實際調查。經由調查，共取得 25 列列車之實際運行資料，包括 17 列區間車、7 列自強號列車與 1 列莒光號列車。另外，本研究亦針對各車種列車於各站之停靠時間進行調查，藉由統計配適度 (goodness of fit) 得出各車種於各車站之停站時間隨機分配函數，如表 5 所示。

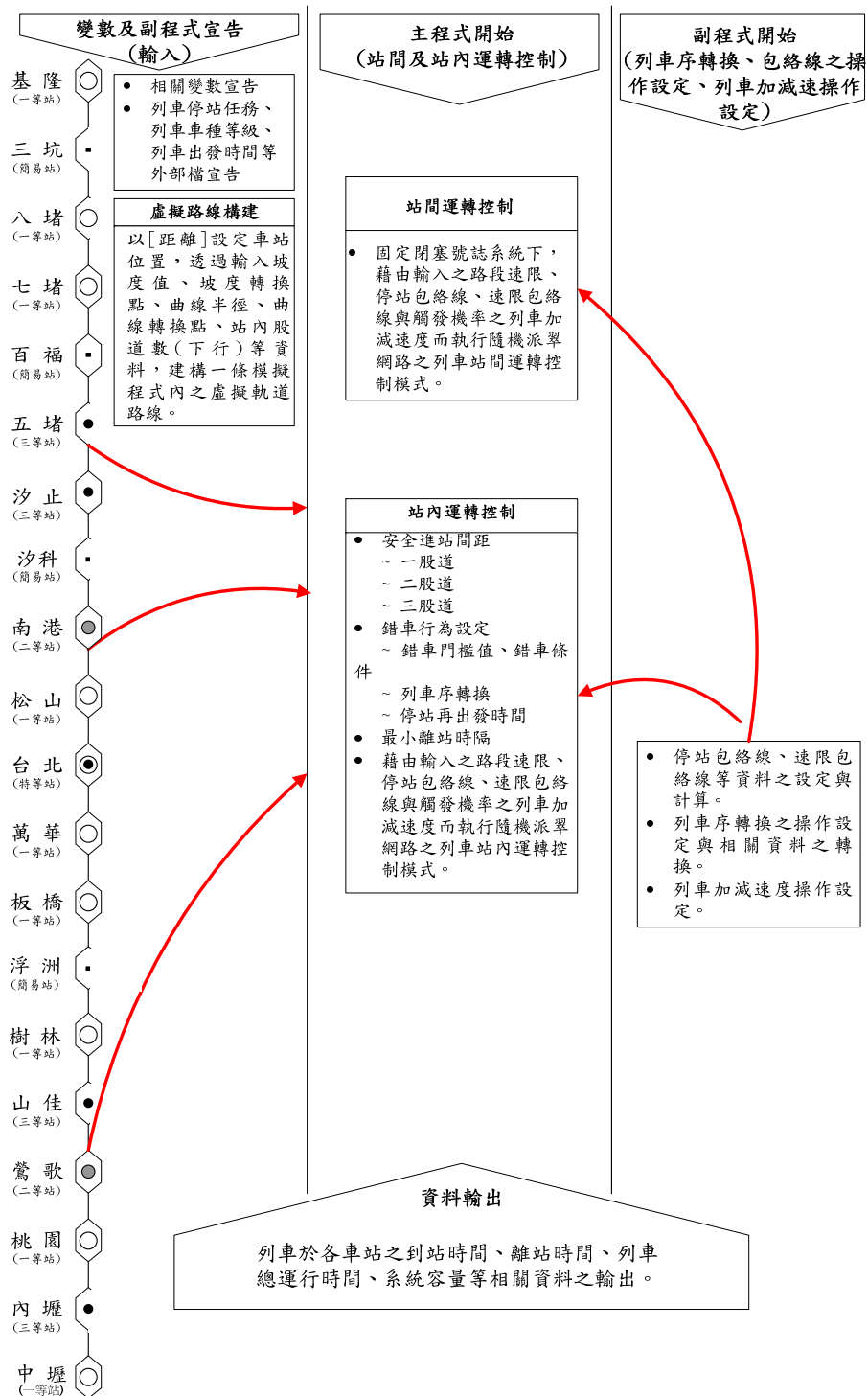


圖 11 以隨機派翠網路建構之模擬程式結構圖

表 5 各車種於臺鐵基隆站至中壢站之停站時間隨機分配函數

站名	基隆	三坑	八堵	七堵	百福	五堵	汐止	汐科	南港	松山
自強號	韋伯分配	—	—	—	—	—	—	—	—	常態分配
莒光號	韋伯分配	—	常態分配	常態分配	—	—	韋伯分配	—	常態分配	韋伯分配
區間車	常態分配	常態分配	常態分配	常態分配	常態分配	常態分配	常態分配	常態分配	常態分配	常態分配
站名	臺北	萬華	板橋	浮洲	樹林	山佳	鶯歌	桃園	內壢	中壢
自強號	常態分配	—	常態分配	—	—	—	—	常態分配	—	韋伯分配
莒光號	韋伯分配	常態分配	韋伯分配	—	韋伯分配	—	常態分配	韋伯分配	—	韋伯分配
區間車	常態分配	常態分配	常態分配	韋伯分配	常態分配	常態分配	常態分配	常態分配	常態分配	常態分配

註：部分車站的停站時間分配係與停站列車數之多寡有關，區間電聯車列車數最多，其次為自強號，莒光號最少，因此在此停站時間分配之配適度檢定上呈現韋伯 (Weibull) 分配。

4.2 模式驗證

模式驗證 (validation) 之目的即是確認各參數校正後之模擬模式輸出值是否與內含隨機狀況之實際值盡可能符合，如驗證通過，則代表模擬模式可描述真實狀態，反之，則須重新校正若干參數，直到驗證通過為止。本研究係採用 95%信心水準雙尾 t 檢定，驗證模擬模式之平均值與實際列車運行平均值是否存在顯著差異，選擇之檢驗點為列車於停靠站之進站時間 (列車完全停止於月台股道上之時刻，亦即速度為 0 時) 與離站時間 (列車完成停靠任務後，列車啟動之時刻，亦即速度大於 0 時)。經由實際調查，可得知各車種列車皆可於 5,200 秒之時間內完成運行。本研究為擷取模擬系統達穩定狀態下之輸出結果，因此選定 5,200 秒作為系統熱機切除時間而得出 11 列車輛之運行資料。各列車運行之模擬平均值與實際平均值之比較如圖 12 所示，圖中「2712 平」代表實際運行之平均值，「2712 上」代表實際運行平均值上限，「2712 下」代表實際運行平均值下限，「2712 模」代表模擬運行之平均值。

再經由 95%信心水準雙尾 t 檢定檢驗此 11 輛列車模擬值與實際值之停靠站進站時間與離站時間，總計有 258 個檢驗點，檢定結果顯示，共有 29 個檢驗點與實際值存在顯著差異，其餘 229 個檢驗點則無顯著差異，此係歸因於實際調查時有兩班列車發生平均 5~15 分鐘之延誤，導致有 29 個檢驗點之模擬值超出實際平均值上下限。然而大部分列車之模擬平均值仍位於臺鐵容許延誤誤差範圍 5 分鐘之內，且模擬模式之總體信賴度達 88.76%，因此仍可推定本研究之模擬模式具有擬真性。

4.3 情境分析

本研究之情境分析係考量臺鐵捷運化之發車間距與車種組成等重要影響因素，期能針對各情境之模擬分析結果，提出最適之運行調度策略。

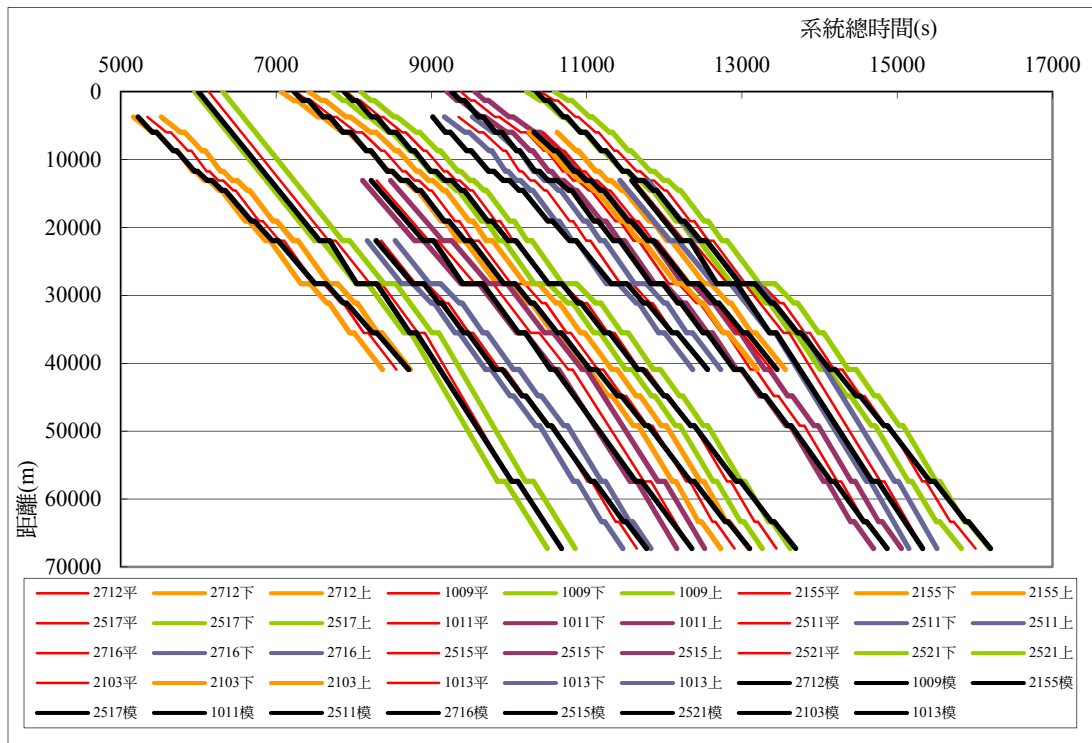


圖 12 臺鐵基隆站至中壢站南下方向捷運化路線之模擬模式驗證圖

4.3.1 不同發車間距之情境

臺鐵捷運化之目的即在於強化尖峰時刻臺鐵短程通勤之區間運輸，因此發車間距 (headway) 之長短將決定臺鐵捷運化之服務品質。然而發車間距並非愈密集，服務品質即愈佳，若發車間距之密集程度超過系統容量，反而會影響系統整體運行時間。此情境係在車種組成、排班方式與停靠方式等變數固定條件下，僅針對自 180 秒至 480 秒之發車間距增量，觀察不同發車間距之系統總旅行時間變化。經過模擬結果發現，當發車間距為 180 秒時，系統會發出錯誤警訊，此係在臺北車站之進站控制模組已無法處理 180 秒之發車間距，因此針對發車間距 200 秒、220 秒、240 秒、300 秒、360 秒、420 秒及 480 秒分別進行情境模擬分析。

由表 6 與圖 13 可看出，當發車間距從 480 秒逐漸縮短時，系統總運行時間亦會逐漸減少，尤其發車間距為 240 秒時，系統總運行時間為最短，應可達到最佳之運輸狀態；但當發車間距繼續縮短至 220 秒與 200 秒時，系統總運行時間反而增加，因此可推定臺鐵基隆站至中壢站南下方向捷運化路線之最適發車間距宜為 240 秒，此與臺北捷運系統於尖峰時段的發車間距 4 ~ 6 分鐘相近，顯示具有捷運系統的營運特性。

表 6 臺鐵基隆站至中壢站南方向捷運化路線在不同發車間距下之系統總運行時間比較表

發車間距 (秒)	200	220	240	300	360	420	480
所有列車完成之系統總運行時間 (秒)	12,348	11,848	11,532	12,373	14,268	15,708	17,148

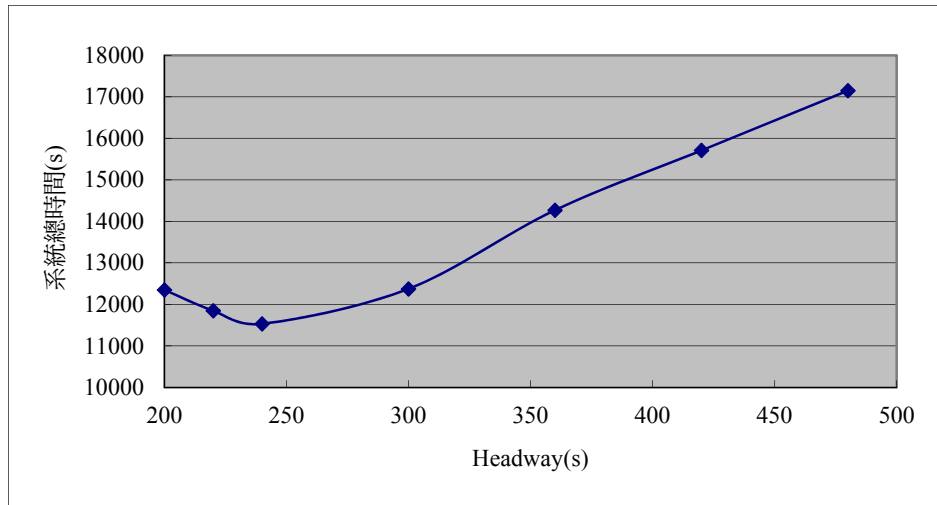


圖 13 臺鐵基隆站至中壢站南方向捷運化路線在不同發車間距下之系統總運行時間趨勢圖

4.3.2 不同車種組成之情境

臺鐵捷運化系統，除加長通勤列車搭載車廂數、加建通勤車站以及加長月台長度之外，還要簡化車種，亦即將自強號、莒光號、復興號、區間車、區間快車五種列車車種，短期內簡化為自強號、區間車、區間快車為主且莒光號為輔之列車組成，中長期則將簡化為以自強號、區間車為主，且區間快車為輔之列車組成。因此，本研究在排班方式與停靠方式等條件下，定義自強號、區間快車為快車車種，區間車則為慢車車種，並針對下列三種快慢車組成於不同發車間距（自 240 秒至 480 秒）之情境，觀察各情境之系統總旅行時間變化：

1. 列車組成 1 (快慢車比 1 : 1)：自強號－區間車－區間快車－區間車－自強號。
2. 列車組成 2 (快慢車比 1 : 2)：自強號－區間車－區間車－區間快車－區間車－區間車－自強號。
3. 列車組成 3 (快慢車比 1 : 3)：自強號－區間車－區間車－區間車－區間快車－區間車－區間車－區間車－自強號。

由表 7 與圖 14 得知，列車組成 2 之組合策略（自強號－區間車－區間車－區間快車－

區間車－區間車－自強號) 不論在何種發車間距下，系統總運行時間皆為最短，故可推斷列車組成 2 (自強號－區間車－區間車－區間快車－區間車－區間車－自強號) 為最適之列車組成方式。此外，從圖表中亦可看出，列車組成 1 較適合較長之發車間距，而列車組成 3 則相反，較適合較密集之發車間距，但整體而言，列車組成 2 (快慢車比 1：2) 仍是最佳之列車組成方式。

表 7 臺鐵基隆站至中壢站南下方向捷運化路線在不同車種組成與發車間距下之結果分析表

發車間距(秒)	240	300	360	420	480
列車組成 1	11,527 (+409)	12,761 (+338)	13,921 (+232)	15,227 (+180)	16,593 (+108)
列車組成 2	11,118	12,423	13,689	15,047	16,487
列車組成 3	11,584 (+466)	12,924 (+501)	14,364 (+675)	15,804 (+757)	17,344 (+857)

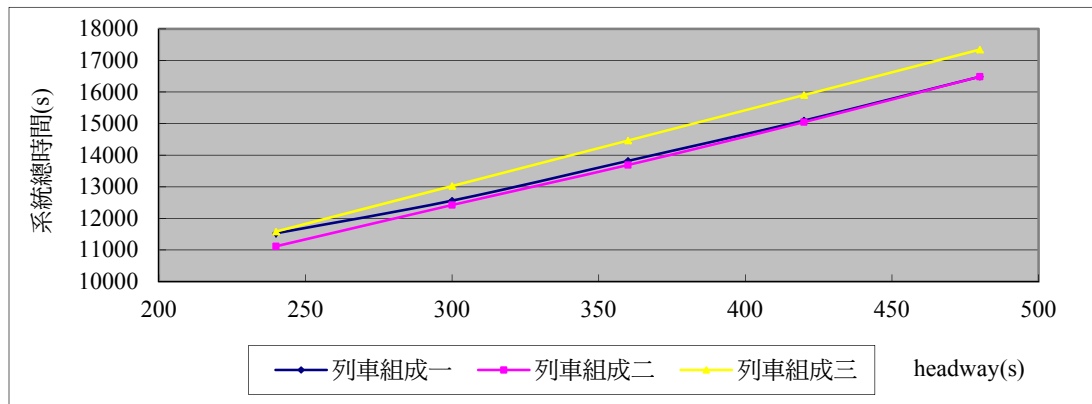


圖 14 臺鐵基隆站至中壢站南下方向捷運化路線在不同車種組成與發車間距下之系統總運行時間趨勢圖

綜合言之，經由模擬分析結果顯示，臺鐵捷運化之列車組成部分，當慢車與快車之列車組成比例為 1：1 且為交錯組成時，較適合發車間距較長之列車運轉，當慢車與快車之列車組成比例為 2：1 時，無論發車間距多寡，皆能發揮最佳之整體運輸效率；當慢車與快車之列車組成比例達 3：1 時，則較適合發車間距較密集之列車運轉。此一結果顯示臺鐵捷運化之快慢車組成與城際及區域通勤鐵路之旅運需求有關，城際旅運多為中長程旅客所搭乘的自強號與中程旅客所搭乘的莒光號，區域通勤旅運多為短程旅客所搭乘的復興號及區間電聯車。

4.3.3 延誤發生時運行調度策略之情境

本研究在進行實際調查時，發現臺鐵西部幹線下行路段較易發生延誤之車站為八堵站，平均延誤時間為 10 ~ 15 分鐘。探究其原因，八堵站位於臺鐵西部幹線與宜蘭線之交會處，由基隆站發車之列車與宜蘭線匯入西部幹線之列車皆停靠此站，又因八堵站與基隆站之間僅隔三坑站，且基隆站與三坑站之運輸量較不易導致在尖峰時刻於八堵站發生列車延誤情形，但宜蘭線匯入之列車，在前經車站已因運輸量較大而導致在八堵站發生延誤，因此本研究將以八堵站為對象，進行延誤發生時運行調度策略之情境分析。

在臺鐵運轉整理規章中，明定延誤 60 分鐘以上為重大延誤事件發生時，需對旅客賠償，本研究遂以 60 分鐘設定為重大延誤門檻值，並將延誤區分為 10、15、30、45、60 分鐘等 5 種等級，進行各等級延誤發生後之情境模擬分析。目前臺鐵常用之運行調度策略包括變更運轉時刻、變更到發股道、變更行車順序、變更運轉軌道、變更待避交會車站、臨時停車、趕點、變更停站時間與加發列車等，當延誤事件發生時，行控中心即運用上述各種策略之交互組合，以減少延誤而盡快回復原訂班表。一般捷運在列車調度策略上有「特開列車」與「停駛列車」2 種，但臺鐵為了顧及旅客權益，除非列車發生故障導致列車無法運行之外，不會實施「停駛列車」之策略，因此，本研究將針對「特開列車」之調度策略，進行延誤發生時運行調度策略之情境分析。

1. 特開列車之車站

特開列車調度策略係發生延誤時，在不影響原定班表情況下，額外增派其他列車提供疏運。八堵站附近有基隆調車廠與七堵調車廠，若有延誤發生，影響範圍則涵蓋八堵站下行之路段車站，八堵站至基隆站之路段並不受影響，因此選擇特開列車之車站為七堵站。

2. 特開列車策略之實施準則

因列車由八堵站至七堵站平均運行時間為 200 秒，當八堵站發生延誤情形達 5 分鐘時，模擬系統將檢視八堵站前 200 秒是否有列車離站，當前 200 秒並無列車離站，即於七堵站特開第 1 班列車，爾後每隔 480 秒檢視八堵站延誤是否終結，如是，則停止實施特開列車策略，若否，則特開第 2 班列車，然後重複上述操作直到延誤終結為止。若前 200 秒有列車離開，則會追蹤此列車，當此列車離開七堵站後 240 秒，再檢視八堵站延誤是否終結，若是，則停止實施特開列車策略，若否，則特開第 1 班列車；爾後每隔 480 秒檢視八堵站延誤是否終結，如是，則停止實施特開列車策略，若否，則特開第 2 班列車，然後重複上述操作直到延誤終結為止。

3. 特開列車策略之績效評估

本研究選定前述之最適列車組成與發車間距來進行情境模擬分析，即「自強號－區間車－區間車－區間快車－區間車－區間車－自強號」之列車組成與「240 秒」之發車間距。為了解較長時間之延誤對系統整體運行時間之影響，總列車數將增為 50 列。特開列車策略之績效評估係針對發生不同等級延誤後，進行無調度、趕點與特開列車等 3 種策略之結果比較，包括：所有列車總運行時間、特開列車數、系統延誤回復率與臺北站平均發車間

距等。

系統延誤回復率則定義為：當有調度策略運用時可回復多少延誤時間。其計算式為：
 (無調度策略下之系統總延誤時間－有調度策略下之系統總延誤時間)／無調度策略下之系統總延誤時間。臺北站之平均發車間距係以發生延誤前一列車於臺北站之離站時間至延誤終結之後一列車於臺北站之離站時間內之平均發車間距。若發車間距愈短，則愈能疏運尖峰時刻之通勤旅客。

若以特開列車策略為例，當系統發生不同延誤等級時，在不影響原定班表情況下，各情境之列車運行結果如圖 15 至圖 19 所示：

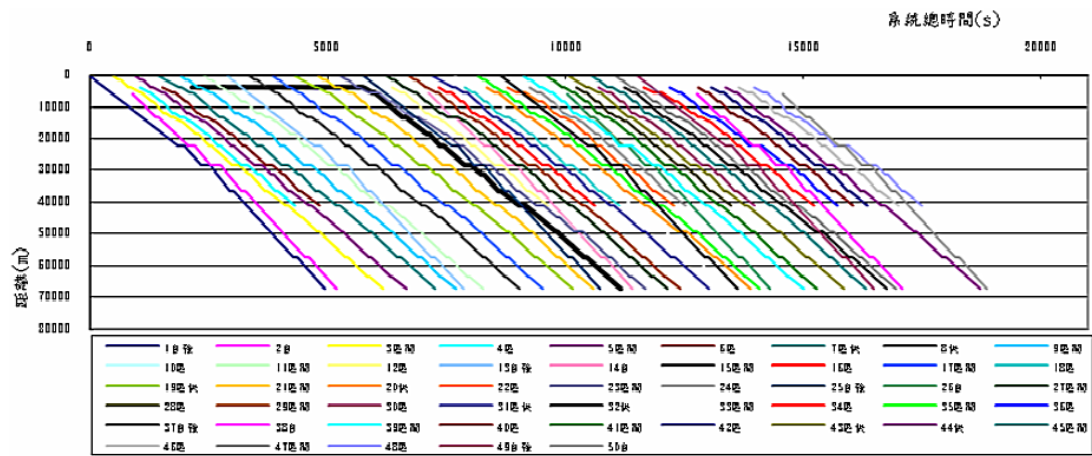


圖 15 延誤等級為 10 分鐘下實施特開列車策略之列車運行圖

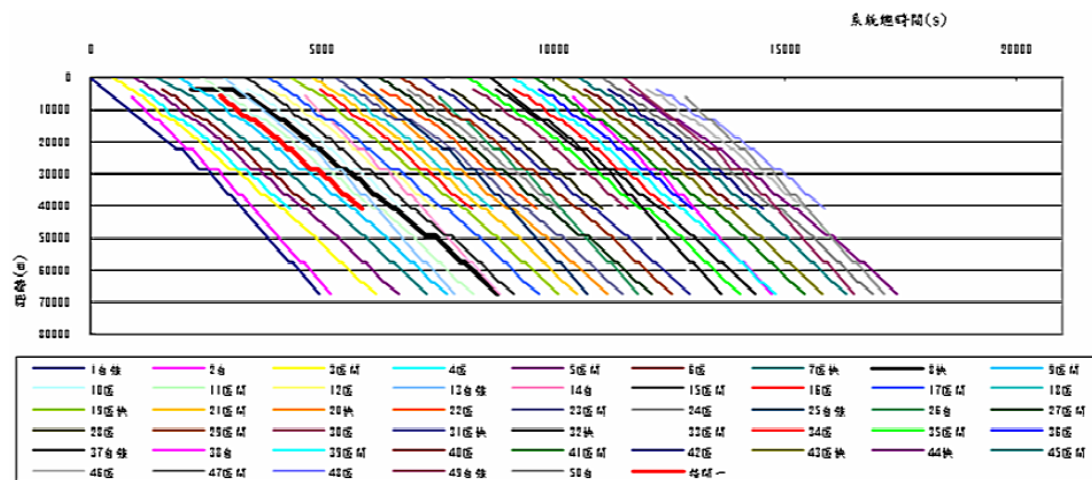


圖 16 延誤等級為 15 分鐘下實施特開列車策略之列車運行圖

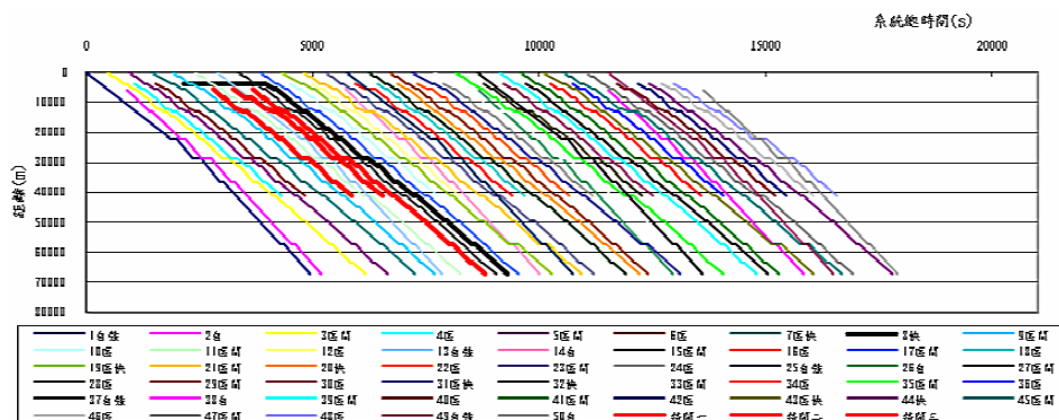


圖 17 延誤等級為 30 分鐘下實施特開列車策略之列車運行圖

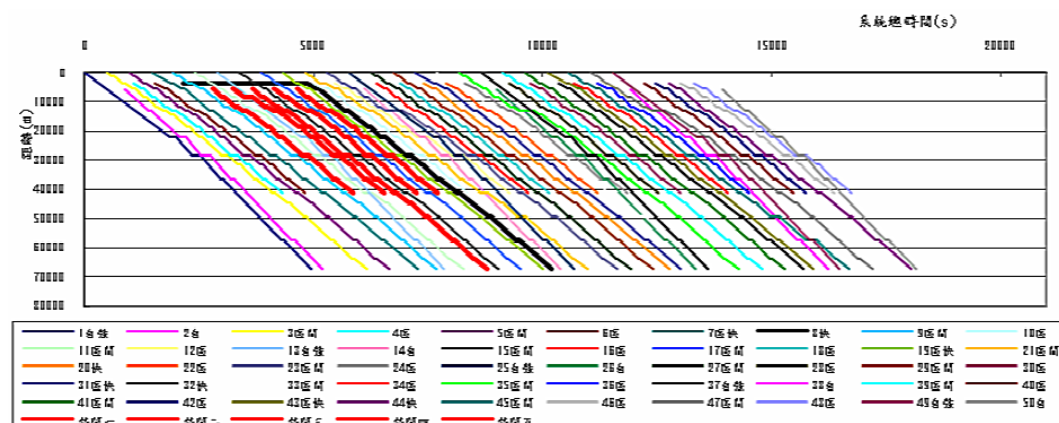


圖 18 延誤等級為 45 分鐘下實施特開列車策略之列車運行圖

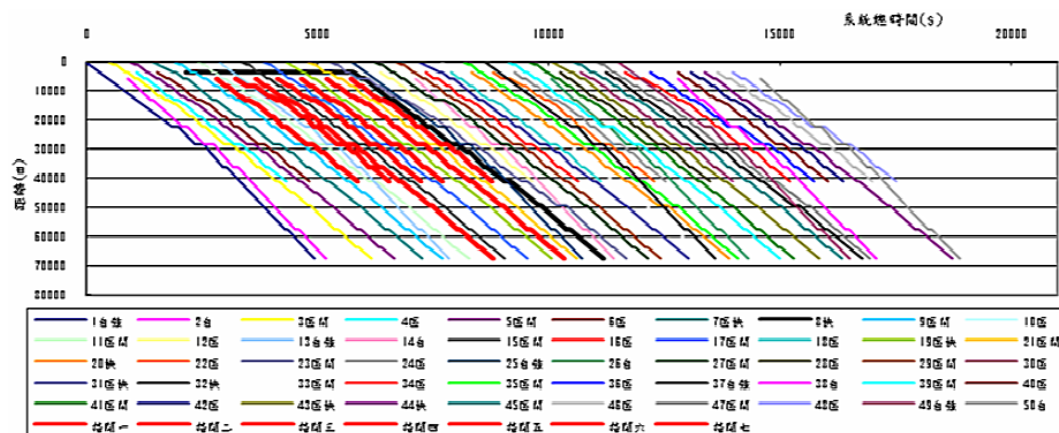


圖 19 延誤等級為 60 分鐘下實施特開列車策略之列車運行圖

上述 3 項策略之模擬結果可整理成圖 20、圖 21 與表 8。從圖表中可知，特開列車策略在「系統總運行時間」方面，延誤發生前後之總運行時間並無太大差異，亦即特開列車策略對於系統延誤回復率雖無助益，但從「平均發車間距」來看，特開列車策略實施後，確實可縮短目前因延誤發生所產生之平均發車間距。

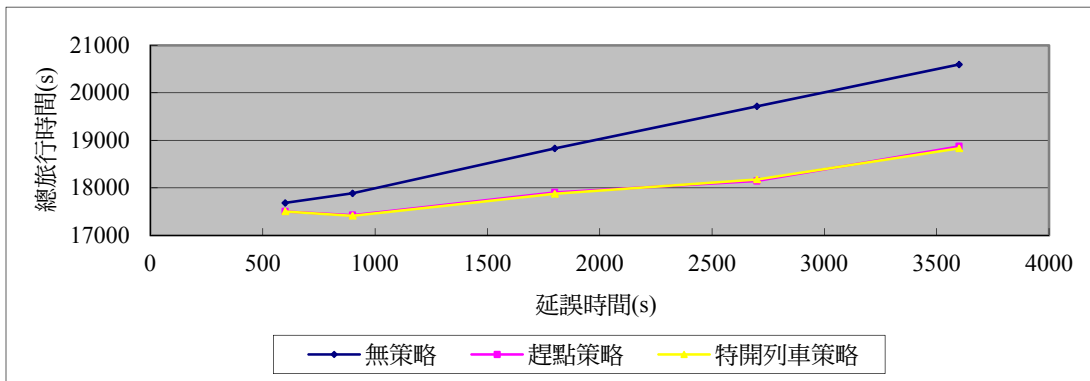


圖 20 3 種策略下之總運行時間比較圖

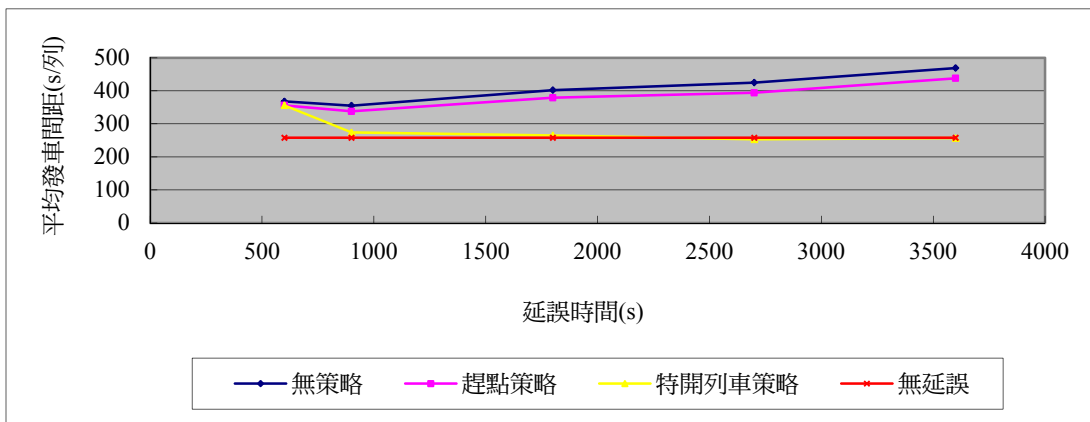


圖 21 3 種策略下之平均發車間距比較圖

五、結論與建議

本研究旨在應用隨機派翠網路以建構軌道運輸運行調度之模擬模式，特別之處在於採用集合多種開發工具為一體的綜合性系統開發方法-資訊系統開發方法組合 SISDM 並以具有多車種、月臺多股道之臺鐵捷運化路線基隆－中壢段為實證分析對象。

表 8 不同延誤等級發生時之 3 種策略實施結果比較表

延誤等級	10 分鐘	15 分鐘	30 分鐘	45 分鐘	60 分鐘
無策略					
總旅行時間 (秒)	17,682	17,884	18,830	19,716	20,598
臺北站平均發車時間 (秒/列)	368	355	402	425	469
趕點策略					
總旅行時間 (秒)	17,502	17,424	17,903	18,143	18,873
延誤回復率	28.57%	55.29%	52.14%	59.05%	48.65%
臺北站平均發車時間 (秒/列)	356	338	379	394	438
特開列車策略					
總運行時間 (秒)	17,502	17,411	17,874	18,175	18,832
延誤回復率	28.57%	56.85%	53.77%	57.85%	49.80%
特開列車數 (列)	0	1	3	5	7
臺北站平均發車時間 (秒/列)	356	274	265	253	257

註：無延誤時總運行時間：17,052 秒，平均發車時間：258 秒。

5.1 結論

- 回顧國內外軌道運輸研究之相關文獻，可發現以細胞自動機與派翠網路兩種方法應用於區間通過能力分析、追蹤行車間隔、列車速度與間隔控制、追蹤列車運行、列車調度最適化等課題，最為廣泛。SISDM 是一種在系統論思維下，引進了通用圖論中的模式建構與分析工具，建立以派翠網路為基礎之資訊系統資源配置模式。再回顧以往軌道列車運行公式得知，列車運行公式中的加減速常簡化為定值，並未考量列車司機在站間與站內進出的隨機操作行為，因此本研究選擇能求解馬可夫隨機過程的隨機派翠網路，藉由實際資料來建立列車運行加減速之隨機觸發機率，以呈現實際列車運行時之不同加減速操作行為。另一方面，目前國內應用高階派翠網路於軌道運輸運行調度方面的研究亦不多見，若能建立具有可視化與系統動態活動描述功能之隨機派翠網路為基礎的軌道運輸運行調度模擬模式原型，再視其他研究課題屬性，逐漸引進 TPN、CPN、FPN 或 HPN 等求解工具，將更能呈現真實環境下軌道運輸複雜系統的動態、不確定、隨機、多樣化等特性。此為本研究何以採用隨機派翠網路為基礎之系統開發方法的緣由。
- 本研究之實證分析對象為臺鐵基隆站至中壢站南方向之捷運化路線，經由實際平均值與模擬平均值之相互驗證後，模式信賴度達 88.76%，且超出範圍之檢驗點與實際班表比對下，仍然在臺鐵容許延誤 5 分鐘範圍內，因此可推定本研究之模擬模式能描述列車實

際運行狀況。

3. 在不同發車間距之情境下，經由模擬分析結果發現，在目前路網與系統設備條件下，臺鐵列車於上午尖峰時段南方向之捷運化路線，其發車間距若縮短至 240 秒，則可達到最佳之系統總旅行時間。此與臺北捷運系統於尖峰時段的發車間距 4 ~ 6 分鐘相近，顯示具有捷運系統的營運特性。
4. 在不同列車組成之情境下，經由模擬分析結果得知，「自強號－區間車－區間快車－區間車－自強號」之組成方式，較適合發車間距較長之列車運轉；「自強號－區間車－區間快車－區間車－區間快車－區間車－自強號」之組成方式，在發車間距 240 秒至 480 秒之情況下，系統總旅行時間皆為最佳；「自強號－區間車－區間車－區間車－區間快車－區間車－區間車－自強號」之組成方式，則較適合發車間距較密集之列車運轉。此一結果顯示臺鐵捷運化之快慢車組成與城際及區域通勤鐵路之旅運需求有關，城際旅運多為中長程旅客所搭乘的自強號與中程旅客所搭乘的莒光號，區域通勤旅運多為短程旅客所搭乘的復興號及區間電聯車。
5. 針對發生延誤時之調度策略情境分析，本研究將延誤區分為 10、15、30、45、60 分鐘等 5 種等級，選定「自強號－區間車－區間車－區間快車－區間車－區間車－自強號」之列車組成與「240 秒」之發車間距組合，並採用「無調度」、「趕點」與「特開列車」等 3 種策略，進行各等級延誤發生後之情境模擬分析。結果發現，特開列車策略雖可縮短目前因延誤發生所產生之平均發車間距。但對於延誤發生前後之總運行時間並無太大差異，亦即特開列車策略對於系統延誤回復率並無助益。此亦符合文獻^[35,38,40]有關調度方案之研究結果：以「變更運轉順序 (趕點、交會)」為優先考慮的調度方案，其次為實際列車運轉整理調度方案，「增開列車」則為排序最後的調度方案。
6. 針對發生延誤時之調度策略情境分析，本研究將延誤區分為 10、15、30、45、60 分鐘等 5 種等級，選定「自強號－區間車－區間車－區間快車－區間車－區間車－自強號」之列車組成與「240 秒」之發車間距組合，並採用「無調度」、「趕點」與「特開列車」等 3 種策略，進行各等級延誤發生後之情境模擬分析。結果發現，特開列車策略雖可縮短目前因延誤發生所產生之平均發車間距。但對於延誤發生前後之總運行時間並無太大差異，亦即特開列車策略對於系統延誤回復率並無助益。此亦符合文獻^[35,38,40]有關調度方案之研究結果：以「變更運轉順序」為優先考慮的調度方案，其次為實際列車運轉整理調度方案，「增開列車」則為排序最後的調度方案。
7. 在學術研究貢獻方面，過去國內相關臺鐵運行調度主要以模擬模式為主，但對於列車司機在站間與站內進出的隨機操作行為則尚未有文獻進行探討，本研究選擇能求解馬可夫隨機過程的隨機派翠網路，藉由實際資料來建立列車運行加減速之隨機觸發機率，以呈現實際列車運行時之不同加減速操作行為。在實務貢獻方面，臺鐵捷運化之後的列車延誤均仰賴專業人員的處理經驗，較缺乏一套操作便利的模擬系統來解決複雜的調度問題，本研究提出的隨機派翠網路為基礎的列車運行調度模擬系統，可藉由不同發車間距、不同列車組成與不同延誤等級的情境分析，產生臺鐵捷運化營運調度之較佳方案，

期能作為臺鐵綜合調度所與營運單位相關調度人員參考之用。

5.2 建議

1. 本研究因限於行車保安因素而無法取得臺鐵局完整之閉塞區間號誌控制系統資料，故無法將各閉塞號誌機所在位置納入列車站間運行之模擬模式，未來若能取得實際號誌系統資料而納入模擬模式，則更能描述實際列車運行情形。
2. 本研究僅考慮下行單一方向之列車運行，然而正常情況下之列車運行，大部分皆採上下行分軌，影響層面雖較小，但若同時考慮上下行之列車運行，並考慮整體月台配置之影響，在列車延誤調度上應可更真實與多樣化。
3. 本研究在進行實際調查時發現，基隆站至中壢站路線段，同時包含由基隆站、七堵站、汐止站、松山站及臺北站等發車起始站，再加上由八堵站匯入之宜蘭線列車，即有 6 個不同之發車起始站，此將嚴重干擾整體列車運行效率，建議未來應簡化發車起始站，減少排班之干擾因素。
4. 本研究因囿於經費人力，僅選取基隆－中壢段為臺鐵捷運化之實證案例並針對不同發車間距、不同列車組成模擬對於臺鐵捷運化該區段系統總旅行時間之影響，同時採用「無調度」、「趕點」與「特開列車」等 3 種策略，模擬其對於各等級延誤之影響分析，此一影響分析係屬於微觀、局部的概念。若欲針對臺鐵捷運化所帶來之巨觀、全面影響，則建議於日後增加實證範圍與擴充模擬模式功能，例如：針對車站或路線容量、列車延誤與控制策略等專門課題，應鼓勵國內學者參考文獻^[19,20,22-26,29]嘗試以典型的派翠網路為基礎，衍生使用彩色派翠網路、模糊派翠網路、時間派翠網路或混合派翠網路，以強化較佳之列車運行調度模式，增加模擬系統之深度與廣度。此亦呼應了鄭永祥^[35]之研究結論：「過去國內相關鐵路運轉整理調度主要以模擬為主，對於利用派翠網路或其他衍生高階派翠網路建構鐵路調度員執行運轉整理調度的流程，目前還甚為罕見。」。以本研究不同延誤等級（如：15、30、45、60 分鐘）為例，採用「無調度」、「趕點」與「特開列車」等 3 種策略係處理各延誤等級之決策方式，未來若針對不同調度員建立長期的歷史資料庫，則可應用隨機派翠網路建構各延誤等級之調度策略觸發機率，亦即不同調度員在選擇前述 3 種策略時，可表現出不同的決策行為。
5. 期望藉由以隨機派翠網路為基礎之資訊系統開發方法組合 (SISDM) 系統架構，可逐漸發展成描述具有多車種、月臺多股道之臺鐵營運特性的模擬系統，建議未來可導入使用者介面友善 (user interface friendly) 之整體流暢設計，以提升目前模擬程式中個別模組相互操作之無縫化與自動化程度。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所，**軌道運輸系統總體規劃(2/2)－我國軌道運輸系統發展政策之研究**，民國 101 年。
2. 臺灣鐵路管理局，**臺鐵統計年報**，民國 101 年。
3. 楊濃代，「臺鐵捷運化營運分析探討」，成功大學土木工程學研究所碩士論文，民國 92 年。
4. 李忠遠，「高速鐵路通車後臺鐵客運最適定價之研究」，東華大學企業管理研究所碩士論文，民國 94 年。
5. 張桂林、馮輝昇，「建構臺灣都會區域整合性通勤鐵路之芻議」，**都市及住宅發展處空間規畫研究所彙編**，民國 97 年，頁 135~165。
6. 陶冶中、劉嵩瀚，「固定與移動自動閉塞區間制下多車種列車運行之模擬模式研究」，**運輸計劃季刊**，第 37 卷，第 3 期，民國 97 年，頁 293-330。
7. 魏曉東，**城市軌道交通自動化系統與技術**，第 2 版，電子工業出版社，北京，2011 年。
8. 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。
9. 交通部運輸研究所，**軌道容量研究－臺鐵系統容量模式之建構分析(二)**，民國 95 年。
10. 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。
11. Tomoeda, A., Komatsu, M., Il Yun Yoo., Uchida, M., Takayama, R., Rui Jiang. and Nishinari, K., "Real-time Railway Network Simulation and Alleviating Congestion of Crowded Trains", ICROS-SICE International Joint Conference, Fukuoka International Congress Center, Japan, 2009, pp. 4932-4936.
12. Zhang, S. T. and Chen, Y. C., "Simulation for Influence of Train Failure on Railway Traffic Flow and Research on Train Operation Adjusting Strategies Using Cellular Automata", *Physica A*, Vol. 390, No. 21-22, 2011, pp. 3710-3718.
13. 寧濱，「軌道交通系統中的列車運行追蹤模型及交通流特性研究」，北京交通大學博士論文，2005 年。
14. 周華亮，「軌道交通列車運行的元胞自動機模型及交通流特性研究」，北京交通大學碩士論文，2006 年。
15. 付印平，「列車追蹤運行與節能優化建模及模擬研究」，北京交通大學博士論文，2009 年。
16. 張三同，「基于元胞自動機的城市軌道交通流特性研究」，北京交通大學碩士論文，2010 年。
17. 寧濱，「基于元胞自動機的軌道交通建模及其仿真研究」，蘭州交通大學碩士論文，2012 年。
18. 蔡晶，「基于列車運行仿真的調度研究」，北京交通大學碩士論文，2013 年。
19. Van Der Aalst, W. M. P. and Odijk, M. A., "Analysis of Railway Stations by Means of Interval Timed Colored Petri Nets", *Real-Time Systems*, Vol. 9, No. 3, 1995, pp. 241-263.

20. Fay, A., "Fuzzy Knowledge-Based System for Railway Traffic Control", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 13, No. 6, 2000, pp. 719-729.
21. Burkolter, D. M., "Capacity of Railways in Station Areas using Petri Nets", Ph.D Dissertation, ETH, Zurich, 2005.
22. Fanti, M. P., Giua, A., and Seatzu, C., "Monitor Design for Colored Petri Nets : An Application to Deadlock Prevention in Railway Networks", *Control Engineering Practice*, Vol. 14, No. 10, 2006, pp. 1231-1247.
23. Daamen, W., Goverde, R. M. P., and Hansen, I. A., "Non-Discriminatory Automatic Registration of Knock-on Train Delays", *Networks and Spatial Economics*, Vol. 9, No. 1, 2009, pp. 47-61.
24. Milinković, S., Veskovic, S., Markovic, M., Ivic, M., and Pavlovic, N., "Simulation Model of a Railway Junction Based on Petri Nets and Fuzzy Logic", 12th WCTR, Lisbon, Portugal, 2010.
25. 杜彥華、劉春煌，「層次擴展模糊時間 Petri 網及車站通過能力評定」，*系統仿真學報*，第 17 期，2005 年，頁 178-183。
26. 劉皓瑋，「行車指揮系統的 Petri 網建模與列車運行調整的遺傳優化的研究」，北京交通大學博士論文，2000 年。
27. 程磊，「基于 Petri 網模型的鐵路智能調度問題研究」，華中科技大學碩士論文，2002 年。
28. 鐘文燕，「鐵路信號系統的 Petri 網建模與分析研究」，西南交通大學碩士論文，2005 年。
29. 李曉艷，「基于 Petri 網模型的城市軌道交通列車運行調整方法研究」，北京交通大學碩士論文，2009 年。
30. 梁楠，「基於隨機 Petri 網的 CTCS-3 級 RBC 系統控車流程建模與分析」，北京交通大學碩士論文，2010 年。
31. 周青，「基于混合 Petri 網的列車運行系統中時間推理問題的研究」，鄭州大學碩士論文，2010 年。
32. 田釗，「基于一類混合 Petri 網的列車運行系統中衝突因素的分析」，鄭州大學碩士論文，2011 年。
33. 劉建昆，「基于 Petri 網的列控系統的一些關鍵問題的研究」，西華大學碩士論文，2013 年。
34. 楊立安，「臺灣鐵路運轉整理之研究」，國立高雄第一科技大學運籌管理所碩士論文，民國 96 年。
35. 鄭永祥，「軌道系統列車延誤、乘客處理與營運應變模式之研究」，成功大學交通管理科學系新進老師學術研究計劃成果報告，民國 98 年。
36. 林琮欽，「移動閉塞區間制下混合派翠網路應用於捷運列車運轉整理策略之模擬研究」，淡江大學運輸管理學系碩士論文，民國 98 年。
37. Li, P., Nie, A., Jia, L., and Wang, F., "Study on Intelligent Train Dispatching", *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001, pp. 949-953.

38. 李治綱、陳朝輝、簡聰裕，「捷運鐵路列車延滯事件發生後行車調度策略之模擬分析」，**運輸計劃季刊**，第 31 卷，第 2 期，民國 91 年，頁 299-321。
39. D'Ariano, A., Corman, F., and Hansen, I. A., "Evaluating the Performance of an Advanced Train Dispatching System", *Infrastructure Systems and Services : Building Networks for a Brighter Future (INFRA)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, pp.1-6.
40. 黃承傳、劉昭榮，「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」，**運輸計劃季刊**，第 40 卷，第 1 期，民國 100 年，頁 63-98。
41. GOV.UK, "Modelling and Simulation in Rail-Targeted Call for Knowledge Transfer Partnerships", <https://www.innovateuk.org/-/modelling-and-simulation-in-rail>, 2014.
42. Winter, M. C., Brown, D. H., and Checkland, D. B., "A Role for Soft Systems Methodology in Information Systems Development", *European Journal Information Systems*, No. 4, 1995, pp. 130-142.
43. Van Slooten, C. and Schoonhoven, B., "Contingent Information Systems Development", *Journal of Systems Software*, Vol. 33, No. 2, 1996, pp. 153-161.
44. Brinkkemper, S., "Method Engineering : Engineering of Information Systems Development Methods and Tools", *Information and Software Technology*, No. 38, 1996, pp. 275-280.
45. Goos, G., Hartmanis, J., and Van Leeuwen, J., *Lectures on Formal Methods and Performance Analysis : An Introduction to Stochastic Petri Nets*, Springer Verlag, Berlin, 2000.
46. 林闢，**隨機 Petri 網和系統性能評價**，第 2 版，清華大學出版社，北京，2005 年。
47. 鍾志成、李治綱、張仕龍、張恩輔、林國顯、劉昭榮，「臺鐵三位式號誌系統安全時距公式之建構與分析」，**運輸學刊**，第 18 卷，第 2 期，民國 95 年，頁 186-208。

