

# 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

## A STUDY ON DEVELOPING A MULTI-TRAIN SIMULATION MODEL WITH FIXED AND MOVING AUTOMATIC-BLOCK SYSTEMS

陶冶中 Chi-Chung Tao<sup>1</sup>

劉嵩瀚 Song-Han Liu<sup>2</sup>

(95 年 10 月 13 日收稿，96 年 8 月 31 日第一次修改，97 年 1 月 16 日第二次修改，  
97 年 4 月 9 日第三次修改，97 年 8 月 22 日定稿)

### 摘 要

近年來歐、美、日等國紛紛應用先進科技用以提升軌道運輸之安全與效率，移動自動閉塞區間系統即為最佳範例。臺鐵係採用固定自動閉塞區間系統來確保列車行車安全，然而當因應特殊或緊急需求而加開列車時，即難以提升運輸能力。因此根本方法之一即改變行車制度，藉由不同行車制而進行多種列車調度以滿足乘客最大的需求。本研究係以臺鐵西正線下行「松山—新竹」段作為研究對象，建構符合臺鐵特性多車種混跑、允許超車、越行之列車運行模擬模式，探討採行「移動自動閉塞區間」行車制下列車運行軌跡之變化。研究結果發現：無論是何種車種組合，因採行「移動自動閉塞區間」行車制，列車全程運行時間節省比率隨著發車間隔的縮短而隨之增加。由列車運行圖亦可看出，臺鐵現行「固定自動閉塞區間」

- 
1. 淡江大學運輸管理學系助理教授 (聯絡地址：25137 臺北縣淡水鎮英專路 151 號淡江大學運輸管理學系；電話：02-26215656 轉 3503；E-mail：cctao@mail.tku.edu.tw)。
  2. 淡江大學運輸科學研究所碩士 (E-mail：firegila@yahoo.com.tw)。

之列車運行確實有餘裕空間，宜依調度需求而靈活使用。

**關鍵詞：**列車運行控制系統；固定自動閉塞區間；移動自動閉塞區間；  
模擬模式

## ABSTRACT

*The Application of high technologies in the field of railways to improve safety and efficiency have become a global trend recently, especially as the Moving Auto-blocked System (MAS) has been promoted in the USA, Europe and Japan. Taiwan Railway Administration (TRA) is often not able to cope with changeable travel demands to increase capacity because it uses the Fixed Auto-blocked System (FAS). It is, therefore, the main purpose of this study to quantify the possible rail traffic flow by comparing MAS and FAS.*

*The “Song Sang-Hsinchu” line section of TRA is chosen as the empirical case study to verify and validate the proposed simulation model considering the characteristics of running and overtaking behaviors with multiple train classes. First, speed-distance diagrams for each train class are identified by using mathematical formulas derived from analytical models. Then the logical flows of train movements from starting station to end station for time-space diagrams with two different train operation systems are transformed into a simulation program by using C++. Verification and validation proceed step by step to ensure the simulation model to be almost realistic with statistical proof. The simulation scenarios of comparing percentages of total travel time savings with six different train class combinations and four different headways between FAS and MAS are also presented. The results have shown that the percentage of total travel time saving increases gradually depending upon decreasing headway with MAS, no matter how the combination sequences of train classes will be provided.*

**Key Words:** Train control system; Fixed auto-blocked system;  
Moving auto-blocked system; Simulation model

## 一、緒 論

近六十年來隨著公路運輸基礎建設的規模擴增，用路人雖享有高度的可及性與機動性，然伴隨而來的卻是交通壅塞、事故頻仍、空氣污染與噪音嚴重等負面效應，因此當前各國在「永續發展」(Sustainable development) 理念的驅動下，其運輸政策皆以推動軌道運輸為優先發展目標。相關文獻<sup>[1,2]</sup>針對現代軌道運輸主客觀條件之優越性論述可歸納為：(1)軌道運輸仍為陸路運輸之主幹；(2)軌道運輸是最節約能源之運輸工具；(3)軌道運輸是解決大型都會區交通問題之利器；(4)高速鐵路是發展城際交通之最佳運輸系統；(5)軌道運輸在整體運輸中所佔比重將愈益增加。

因此，各國為確保軌道運輸行車安全、提高運輸效率與營運管理水準，皆積極投入先進的列車運行控制系統之研發工作，其中又以移動自動閉塞區間系統 (moving automatic-block system, MAS) 的發展潛力最受矚目。從列車運行控制系統發展的歷程來看，其可分為機械裝置控制、電氣控制與電子控制三個階段<sup>[3]</sup>。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 將導致調度指揮不靈活與運輸能力浪費的結果。直到近十幾年，先進國家相繼研發出 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研究發展方向與新興重點。相較於國外在 MAS 相關領域的豐碩成果，國內在 MAS 的研究文獻則明顯不足。

有鑒於此，本研究的目的是在於探討固定與移動自動閉塞區間系統對於多車種的列車運行影響。首先經由國內外相關文獻之回顧，論述移動自動閉塞系統的基本原理及相對於固定自動閉塞系統的優缺點，然後構建固定自動閉塞區間制與移動自動閉塞區間制之多車種列車模擬模式，並選定臺鐵松山站至新竹站區段 (西正線南下) 之客運混合車種為模式驗證對象，在驗證結果達到可接受之信心水準後，藉由情境分析可比較出兩種行車制度對於多車種列車運行之影響。

## 二、閉塞區間系統之文獻回顧

所謂的「閉塞」係一般鐵路號誌的專有名詞，是指列車進入區間後，區間兩端車站皆不准向此一區間發車，以防止列車對撞或追撞，亦即一個區間內在在同一時間只允許一輛列車佔用。若按照有無固定劃分的閉塞分區，則可分為固定閉塞與移動閉塞系統。固定閉塞系統是目前世界上絕大部分仍在使用的列車運行控制方式，其係以軌道電路為基礎，歷經人工閉塞、半自動閉塞與自動閉塞的發展階段。人工閉塞是早期的鐵路區間號誌，如路牌、路簽、電鎖器、電話閉塞等。操作人員按一定規則辦理閉塞作業，以確保在同一方向上只有一列車在運行，僅考慮列車在區間運行的安全，未觸及運行效率課題。所謂半自動閉塞是通過人工與設備的結合，來確保區間行車安全以及運行效率。在車站的入口設置進站號誌機，在每一股道設置出站號誌機，在道岔區段則設置軌道電路。只有當某列車出清此區間進入車站，另一列車始能在出站號誌機指揮下進入此區間。由於兩站之間只允許一部列車運行，因此毋需列車的追蹤運行與間隔控制，運行效率顯然不高。

自動閉塞可分為固定自動閉塞區間 (FAS) 與移動自動閉塞區間 (MAS) 系統。以下即針對此兩種閉塞區間系統的相關研究進行文獻回顧。

## 2.1 固定自動閉塞區間系統

所謂 FAS 是將兩個車站之間的區間分為若干個閉塞分區，如圖 1 所示。在每個閉塞分區的入口設置一個防護號誌機且一個閉塞分區只允許一部列車存在。圖 1 為三顯示固定自動閉塞的示意圖。若要求列車運行在綠燈的條件下，則列車之間至少要間隔兩個區間。如此在兩車站間的同一方向，即可允許兩部以上的列車運行。根據軌道電路的工作原理，隨著前方列車的運行，不斷進入一個閉塞分區，清除一個閉塞分區，即可控制防護閉塞分區的號誌機而顯示不同的燈號，從而指揮後續的列車運行，此即 FAS 的原理。

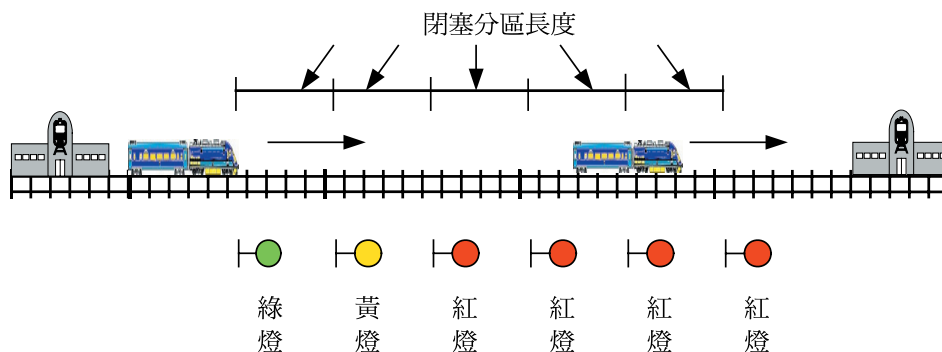


圖 1 固定自動閉塞區間系統之安全列車間隔示意圖

然而 FAS 的閉塞分區長度係根據區段的路線條件、機車的牽引力與制動力等要素的牽引計算結果來決定。對於任一個閉塞分區，其長度一旦設計完成，號誌系統固定，即難以更動。事實上，一個運輸區段很可能存在不同種類的列車(多車種)，列車速度，牽引重量均不同，一旦固定閉塞分區長度，往往造成容量浪費的情形。隨著區間控制系統的演進，三顯示 FAS 已向四顯示甚至多顯示的 FAS 以及連續式速度控制的 FAS 發展。顯示數目增加，FAS 的效率愈高，系統就愈複雜，造價亦愈高。因此，即開始運用其他列車與軌側設備的傳輸方式，如應答器、交叉環線、無線通訊等。

FAS 之每一閉塞分區均有特定速度的限制，當閉塞分區之速限小於列車運行速度時，系統將自動緊急制動，以免冒進前車所在之閉塞分區而導致事故。軌側設備係以一定間隔連續向列車發送速度控制訊息，以導引列車運行。列車速度控制訊息包含兩部分：(1) 列車所在閉塞分區之最高速限；(2) 欲進入分區之速限，亦稱為目標速度。列車根據接收到之訊息，採取速度控制，以保障列車運行間隔。在此情況下訊息傳輸量相對較小，訊息傳輸則屬於點式傳輸。就列車運行的意義而言，FAS 才存在真正的列車的追蹤運行，其運行間隔係以閉塞分區長度為單位。

## 2.2 移動自動閉塞區間系統

MAS 係取消實體閉塞分區的劃分而將路線分為若干路線單元，每單元長度可設定幾公尺至十幾公尺之間，移動閉塞分區則由數個路線單元組成，組成之單元數目將隨列車位置及速度而變化，分區長度即可隨時調整，閉塞分區的防護號誌機因此可取消。前後兩列車之間在任何時間，只要確保有足夠的制動距離，列車即可追蹤運行。顯然，MAS 對控制系統有更高的要求，列車控制的重心將轉移至車載控制系統與軌側控制中心。

MAS 組成要件包括無線通訊系統、車載設備、區域控制器及控制中心等。經由無線通訊方式將列車位置、速度及列車性能等資訊傳送給區域控制器，區域控制器追蹤列車並利用無線通訊對列車發送運行權限，並進行雙向通訊。車載設備則包括無線電台、車載電腦、查詢應答器。列車將蒐集到的訊息或數據經由無線通訊發送給區域控制器，以協助決策，並對接收到的命令進行確認、執行，但當司機員操作不當或因前方視線遮蔽，在離開區間時列車狀態仍處於不被下一個區間所允許之加速行為，則需依「緊急制動曲線」制動，以期能在目標處達至所允許之速限或煞停。如圖 2 所示。

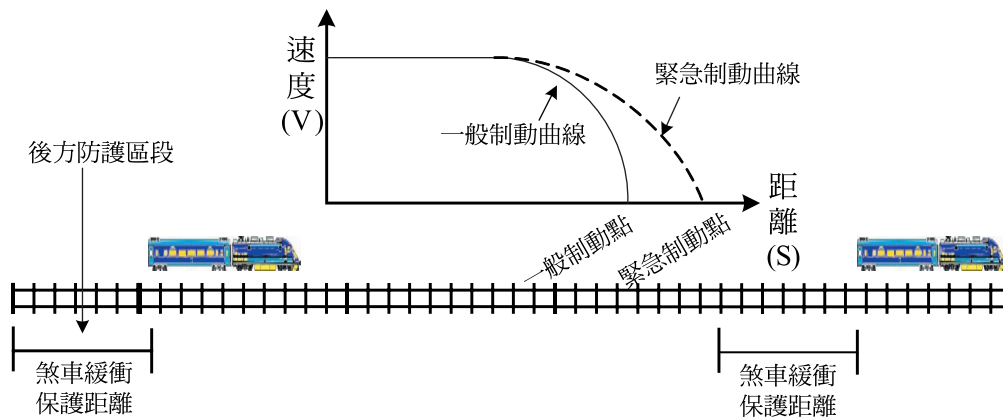


圖 2 移動自動閉塞區間系統之安全列車間隔示意圖

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。表 1 為 FAS 與 MAS 之特性比較。從表中可知，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。

表 1 固定自動閉塞區間與移動自動閉塞區間系統比較表

| 項 目    | 固定自動閉塞區間系統 FAS | 移動自動閉塞區間系統 MAS |
|--------|----------------|----------------|
| 系統結構   | 較複雜            | 簡單             |
| 軌側設施   | 多              | 少              |
| 佔用機房空間 | 大              | 較小             |
| 所需訊息量  | 小              | 大              |
| 能源節省   | 差              | 佳              |
| 旅客舒適度  | 差              | 佳              |
| 列車控制模式 | 分級速度階梯         | 模式曲線           |
| 新舊系統銜接 | 介面複雜           | 介面簡單           |
| 維修工作量  | 較多             | 較少             |
| 備援模式   | 非必要            | 必要             |
| 生命週期成本 | 高              | 低              |
| 技術應用情況 | 成熟             | 尚未成熟           |
| 行車密度   | 低              | 高              |

資料來源：本研究整理。

## 2.3 國內外 MAS 之相關實作案例

目前先進國家對於 MAS 的研發較偏向長程鐵路的無線自動列車運行控制系統，此係因 MAS 早期已成功應用在地鐵與輕軌，對於多車種列車混跑的幹線鐵路則尚未完全商業運轉<sup>[3,4]</sup>。各國具代表性的 MAS 實作案例簡介如下：

### 1. 歐盟 ETCS Level 3

在國際鐵路聯盟的協調下，歐盟自 1991 年起開始制定歐洲鐵路列車控制系統 (European train control system, ETCS) 的技術規範。由於歐洲各國鐵路運輸情況各異，技術設備水準參差不齊，因此在 ETCS 的技術規範中，對列車運行控制系統規定三個等級 (level)，期能使研發的車載設備皆能適應各種等級的情況。ETCS 第三等級即當前的最高級，其主要特點為：

- (1) 連續式列車速度監控，訊息傳輸可採用有線與無線通訊。
- (2) 取消固定閉塞分區、號誌機與區間軌道電路，僅保留車站軌道電路，做為連鎖之用，

實現以目標距離為基礎的列車間隔控制，此即 MAS。

- (3) 列車具有自行定位的功能，地面應答器 EuroBalise 用於列車定位校準。列車所在位置由列車傳至區間的無線閉塞中心 (RBC) 並由 RBC 傳至後續列車。
- (4) 設有完善的數位式機車號誌與運行記錄裝置。
- (5) 設有列車完整檢測 (train integrity check) 裝置。

歐盟已從 ETCS 進階到歐洲鐵路交通管理系統 (European railway traffic management system, ERTMS)，其涵蓋 ETCS、票務、旅客資訊、各國營運操作性等，將列車控制與管理整合為一體。目前有許多的路線正展開 ERTMS 的測試，如西班牙馬德里—塞維拉，德國柏林—萊比錫。

## 2. 德國西門子的 FZB 系統

1993 年德國西門子公司推出無線列車控制系統 FZB (Funkzugbeeinflussung)，其採用 EuroBalise 用於列車定位，以 GSM 取代 LZB (Linienzugbeeinflussung) 的軌間電纜而作為列車與軌側雙向的通訊系統，所傳遞的訊息包括各路線的速限、臨時速限、目標速度、目標距離、路線參數等等。列車收到訊息後，車載電腦將計算當前的最大允許速度，顯示於駕駛台上，並對列車運行速度進行監控。同時對列車重新定位，若列車位置與收到的電碼一致，則予以確認，否則進行修改。回覆訊息將以不同頻率，從機車向 GSM 傳遞。訊息包括列車位置確認及其他列車參數。地面控制中心收到應答器訊息後，重新確定整個控制區段上所有運行列車的精確位置，並提供新的命令訊息。

## 3. 法國 ASTREÉ 系統

法國國營鐵路公司 SNCF 於 1986 年開始研發 ASTREÉ 系統，目標是提高路線容量、提供統一的安全級別、降低營運費用。ASTREÉ 採用車載都卜勒雷達與查詢應答器進行列車定位與測速，其系統概念與 ATCS 類似。ASTREÉ 系統包括四個關鍵部分：(1) 列車位置與速度的連續偵測；(2) 列車與控制中心的雙向通訊；(3) 分散式資料庫：儲存路線上每部運行列車的位置、速度、加速度、長度、重量、牽引能力、制動性能、到達站、出發站、列車運行圖等訊息；(4) 以電腦為基礎的列車控制系統。ASTREÉ 車載設備包括都卜勒雷達、查詢器、里程計、列車完整偵測設備、無線收發裝置、車載電腦。軌側設備包括道岔監控裝置、無線收發站、應答器、列車組成讀取裝置。

## 4. 瑞典 ADTRANZ 公司的 FFB 系統

ADTRANZ 公司研發出一種新型的無線號誌系統，可取消區間沿線的號誌機、軌道電路與列車速度控制設備。連鎖號誌的保障安全任務將改由智慧化的機車與區間控制中心來承擔。無線通訊設備則用於機車與軌側設施 (如道岔)、平交道以及與區間中心間的雙向通訊。

## 5. 北美 ATC 系統

美國與加拿大於 1982 年提出先進列車控制系統 (advanced train control system, ATCS) 和先進鐵路電子系統 (advanced railway electric system, ARES)，後由北美鐵路協會共同開發，基本構想始於 1983 年在加拿大蒙特婁舉行之會議，與會者有加拿大和美國等北美鐵路官員。由於列車控制系統受限於技術運用及發展，因此採用微處理器裝設於鐵路移動設備上，並通過數據無線電系統與中央控制系統聯結，組成針對傳統安全性及效率作提昇之先進列車控制系統。

ATCS 分為四種不同功能級別：10 級、20 級、30 級、40 級，根據不同之路線狀況、列車條件來選用。ATCS 之系統功能包括：確認、定位、檢測、監視、控制通信訊息處理。ATCS 主要組成：中央調度室、無線電數據傳輸系統、列車及其他移動設備之車載系統、固定之軌旁設施四部分。無線電數據傳輸系統是 ATCS 的核心，負責將列車與其他移動設備上之車載系統、軌旁固定設施、中央調度控制室三方面串聯起來，因此，無線電數據傳輸系統之語音及數據基地台的設置十分重要。固定的軌旁設施包括電動道岔、道岔融雪器、軌道應答器等等，其與中央調度控制室聯結，負責列車位置確認以及作為 ATCS 預報系統之基礎。列車車載電腦或其他移動設備上之車載單元可計算處理各種即時訊息，並納入路線特徵、列車編組、前後車性能參數、目標停靠站特徵...等資訊，在必要時發出警告或採取制動，以維護列車行車安全。

## 6. 日本 CARAT 與 ATACS 系統

日本於 1985 年提出電腦及無線支援列車控制系統 (computer and radio aided train control system, CARAT)，主要目的為提高軌道容量，滿足列車高速、高密度之行駛需求及彈性的適應變化，改善鐵路營運之靈活性。目前處於最終性能評估及實用化評估階段，主要之工作仍是集中於列車—地面之控制。CARAT 系統採用相對位置方式，透過對前後列車之相對位置關係，得出後行追蹤列車最大運行速度。CARAT 系統對於列車間之追蹤分為站間列車追蹤距離及站內追蹤距離兩種控制方式。站間追蹤間隔是以前行列車車尾作為停車目標，而站內追蹤間隔則是以軌道進路終端為列車停車目標點。

CARAT 系統利用車載智慧型位置檢測系統，確認列車所在位置。最主要之系統組成有以下兩部分：地面感應器及車載計軸器。地面感應器透過感應線圈或查詢應答器，並且由車載感應裝置讀取列車之絕對位置；至於應答器佈設點之區間列車位置的確認，則透過車載計軸器計算列車車輪轉數，以獲取距離，並且經由每次通過應答器所獲得之絕對位置，兩相加總計算以獲得列車實際之位置。由於轉彎時或者是軌道扭曲之緣故，會有造成鋼輪打滑或者是空轉的情況發生，對於此一狀況之處理，採取同時對多個車輪檢測其轉數，並且用軟體修正，以達到精確定位的目的。CARAT 之主要系統功能包括：管理各站間之訊息交換、列車間隔控制、平交道控制與列車接近警報、車站綜合安全控制、列車進路控制。

在日本鐵道技術研究所發展的 CARAT 基礎上，日本鐵路東日本公司自 1995 年開始研究先進列車管理與通信系統 (ATACS)。ATACS 包括三個部分：地面控制器與無線通訊基地台、車載設備與鐵路交通管理系統。鐵路路線被分成若干個控制區間，每區間內有一個地面控制器與一個無線通訊基地台。地面控制器的功能包括列車追蹤、列車間隔控制、平交道控制與維護工作控制等。無線通訊基地台與車載移動通訊單元交換數據，地面控制器可獲得列車數據，並根據這些數據來控制列車運行。每具地面控制器都與鐵路交通管理系統相連，將列車情況即時傳遞到控制中心，由調度人員統一指揮列車運行。ATACS 成功的關鍵在於無線數位通信系統。該系統於 2000 年 10 月至 2001 年 2 月於仙石線進行實地測試，測試結果證明該系統的列車位置偵測、無線傳輸品質、列車間隔控制皆符合設計要求。

## 7. 中國大陸 CTCS 系統

中國大陸參考歐盟 ETCS/GSM-R 的成功作法，於 2003 年起開始制定中國列車控制系統 (China train control system, CTCS)，其可分為五級：

- (1) CTCS0 級：既有路線的行控模式，即區間軌道電路+站內電碼化+通用機車號誌+列車運行監控裝置。
- (2) CTCS1 級：基於既有設備改造的 ATP 系統，適用於既有路線 160 km/h 以下區段。針對中國主要幹線裝備現況，將既有設備進行改造，在主體化機車號誌的基礎上，建置符合中國國情的點連式 ATP。即主體化機車號誌 (區間、站內軌道電路進行改造+故障安全型機車號誌) +點式設備+安全型監控裝置。
- (3) CTCS2 級：基於軌道電路訊息的 ATP 系統，地面一車載一體化系統設計並與車載設備完全整合。行車速度控制可採大階梯式，亦可採取速度距離模式曲線。地面可採用模擬多訊息軌道電路，亦可採用數位軌道電路並輔以必要的點式設備，組成點連式 ATP。
- (4) CTCS3 級：基於軌道電路與無線通訊 GSM-R 的 ATP 系統。軌道電路對於區間占用與列車完整性偵測具有無可替代的優勢，GSM-R 在滿足中國鐵路移動通信網魯的資訊需求，同時亦要解決超速防護資訊的高速傳輸問題，兩者結合可謂如虎添翼，若再輔以定位校準的點式設備，則可達到與國際接軌的水準。
- (5) CTCS4 級：完全基於無線通訊 GSM-R 的 ATP 系統。該系統具有移動自動閉塞的特性，區間佔用仰賴 GPS 與 GSM-R 即時數據傳輸的解決方案，列車完整性偵測與定位校準分別依賴車載設備與點式設備，期能使軌旁設備減少到最低程度。

## 8. 臺北捷運內湖線 CITYFLO 系統

我國臺北捷運系統內湖線將於 2009 年通車營運，此係我國第一個採用通訊式列車控制系統 (communications based train control system, CBTC) 之軌道運輸系統<sup>[5]</sup>。內湖線全線總長約 14.8 公里，共設有十二座車站，除兩座車站以地下方式建造外，所有車站均以高架

方式建造。內湖與木柵線全線總長約 27 公里，並設有內湖與木柵兩座機廠。為使旅客毋需轉乘，原有木柵線車輛及內湖線車輛均能行駛於木柵及內湖全線，原有木柵線 VAL ATC 系統(含木柵線現有 51 對車之車載 ATC) 將全部更換為 CITYFLO 650 列車自動控制系統(ATC) 系統。CITYFLO 650ATC 按照功能，可分為不同子系統，分別為：

- (1) ATP—自動列車保護系統。ATP 系統負責行車監控系統的安全層面。道旁(CITYFLO 650 系統稱為分區) 與車輛本身，均設有 ATP 系統。分區 ATP 系統的簡寫為 RATP，車用 ATP 系統的簡寫為 VATP。
- (2) ATO—自動列車運作系統。ATO 系統負責行車監控系統的非維生運作。分區與車用系統均設有 ATO 系統。分區 ATO 系統簡寫為 RATO，車用 ATO 系統簡寫為 VATO。
- (3) ATS—自動列車監視系統。ATS 系統負責進行整個系統的監控與顯示工作。

系統架構則以三種分配網路連接，分別是行車監控無線電網路、道旁行車監控網路與中央控制網路：

- (1) 行車監控無線電網路(train radio)—行車監控無線電網路由列車對道旁通訊(TWC)系統設備支援，負責銜接列車與道旁的行車監控子系統。TWC 採無線頻率系統，運用擴散光譜模組技術，分散至整個漏波線路(lossy line) 天線系統。
- (2) 道旁行車監控網路—道旁主要設備有信標點(norming points) 及列車鑑別系統 TRS(train registry system)，信標點是一個被動元件包含位置座標之資訊，站與站間約每隔 100 公尺設置一座，TRS 係由 TRS loop detector 及 TRS intelligent reader 所構成，在每一區域邊界皆有設置，其主要功能為當列車之資料喪失時，可藉由此系統重新定位。道旁通訊系統支援道旁行車監控網路，銜接道旁 ATC 系統內的實體，如分區 ATP、ATO 及行控中心系統。驅動洩波(radiax) 天線的固定式數據無線電(BDR)，銜接至每部分區 ATP 系統。道旁與車載系統，即是運用此連結，交換行車監控資料。
- (3) 中央控制網路—中央控制網路連接 ATS 中央範圍內的實體，如所有行控中心工作站、系統監控顯示器等。

綜合以上文獻可知，影響 MAS 系統運作之最根本要素即在於列車定位及無線通訊系統，其可整理如表 2 所示。

## 2.4 不同閉塞制下列車運行之研究方法

在列車運行控制系統的研究方法中，若僅借助實地測試來進行績效評估，則將耗費可觀的時間與成本。解析模式與最佳化模式由於隱含達到系統之穩定狀態，因此較適於已知或假設之限制情況下問題的求解，且其隱含穩定之系統狀態往往難與現實情況符合。列車實際運轉時將會有相當多之隨機效應影響列車行車，難以達到真正穩定之狀態，這些隨機因素對於列車之干擾或延滯情況亦可能迅速增加。模擬模式則能納入較多符合真實情況之因素，並可將各子系統模組化，並針對各變數進行敏感度分析，確認影響列車運行之主要因素。此亦說明當前世界各國何以採用電腦模擬來建立列車運行實驗平台的原因<sup>[6]</sup>。

表 2 國內外移動自動閉塞系統之比較

| MAS                | 列車定位及測速                 | 訊息傳輸方式                        |
|--------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 北美、加拿大 ATCS        | 軌道應答器、無線電數據傳輸系統         | 900MHz 實現車—地訊息傳輸              |
| 日本新幹線 ARAT 與 ATACS | 感應線圈、應答器、車載計軸器、電腦軟體計算修正 | 400MHz 之空間波和 LCX，未來擬採用準微波或毫米波 |
| 歐洲 ETCS            | 軌道應答器、車載設備、無線通訊系統       | GSM-R                         |
| 法國 ASTREÉ          | 都普勒雷達、車載電腦、應答器          | 450MHz 之空間波                   |
| 德國 FZB             | 軌間電纜、應答器                | 軌間電纜、GSM                      |
| 瑞典 FFB             | 軌道應答器、車載設備、無線通訊系統       | GSM-R                         |
| 中國 CTCS            | 點式設備、車載裝置、無線通訊系統        | GSM-R                         |
| 臺灣 CITYFLO         | 信標點及列車鑑別系統              | 漏波線路、無線電通訊網路                  |

資料來源：本研究整理。

北美鐵路常用的 RAILSIM 與 TPC 模擬系統可依據路線的斷面與列車編組，計算出列車的運行時分，並可評估機車的牽引性能，輸出不同路線條件下的列車運行變化。TrainSTAR 則是一個機車模擬系統，可用來改善機車操作、節省能源消耗、增加安全性能。UTRAS 則是日本交通控制實驗室研發的列車模擬系統，可進行列車運行計算、延誤分析、不同通信號誌的影響分析、列車運行能力及績效評估。VISION 係英國 EAE 鐵路技術公司開發的鐵路模擬軟體，可在 PC 上 Windows、NT 之環境運行，其功能包括：(1) 模擬簡單或複雜路網上列車號誌系統及基礎設施間之相互作用效果；(2) 研究鐵路運輸系統在各種假設條件下的績效；(3) 可快速有效分析列車間隔與路線容量。瑞士 ETH IVT 所發展之 OpenTrack 鐵路模擬系統嘗試根據列車特徵，達成特定路網使用者設定之時刻表<sup>[7]</sup>。該系統採用混合之連續式與離散式模擬程式以確保既定時間內可連續運算所有狀況的連續與間斷過程(車輛與安全系統)，以符合系統之整合派遣規則。連續式模擬係根據牛頓運動法，動態計算列車移動。在每一個時間間隔中，計算機車頭與輪軌間的最大受力(maximum force)，以計算加速力。間斷式模擬程式則為安全性系統之營運模型。模擬參數如閉塞區間數目，號誌轉換時間次數與限制號誌狀態將影響列車運行之績效。該系統可提供 FAS 與 MAS 下列車運行控制系統的績效評估。中國大陸 1980 年起即開始致力於鐵路運輸系統的模擬研究，初期研究主要應用於鐵路編組站及列車運行過程計算。1993 年北方交大推出可用於培訓的鐵路列車運行系統，並於 1997 年完成產品化。1997 年香港理工大學與大陸北交大共同致力於基於列車牽引計算的通用列車運行過程模擬系統並在 1999 年開始應用於軌道交通系統設計工作。國內在鐵路模擬系統相關的文獻，除了各大學的碩博士論文之外<sup>[8-14]</sup>，近年來交通部運輸研究所協同中興工程顧問社致力於臺灣地區軌道運輸系統容量分析之模擬模式堪稱是較具規模且探索深度最高的軌道模擬計畫<sup>[15-18]</sup>。

若將文獻範疇聚焦於 MAS 的研究課題，MAS 概念的提出則已有半個多世紀之久的時間<sup>[19,20]</sup>。國內外學者對此一行車控制系統的研究與探索亦累積可觀的成果。Takeuchi 等<sup>[21]</sup>應用數學分析與模擬方法，對穩定狀態下和擾動交通條件下的 MAS 進行較為全面的研究。Ho 等人<sup>[22,23]</sup>則應用專家系統在 MAS 中減少尖峰能力需求的同時找到重新啟動列車的最佳列車控制策略。Takeuchi<sup>[24]</sup>與 Siu<sup>[25]</sup>開發出物件導向的鐵路網路的相對距離 MAS 模擬器。Gill<sup>[26]</sup>展現了 MAS 佈局設計之自動機模擬的最適化過程。Breusegem<sup>[27]</sup>與 Lockyear<sup>[28]</sup>皆提出 MAS 行車制下捷運行車控制模式。近二十多年來中國大陸在 MAS 的理論研究未曾間斷，且成果豐碩。汪希時等人<sup>[29]</sup>提出了移動自動閉塞系統的總體架構，紀加倫等人<sup>[30]</sup>探討了 MAS 方式下列車運行組織模式及區間通過能力的計算方法，趙明<sup>[31]</sup>設計了 MAS 條件下列車追蹤運行的線性控制系統。除此以外，在 MAS 條件下區間通過能力分析、追蹤行車間隔、列車速度與間隔控制、追蹤列車運行、進路操作最適化與多元軌道運輸系統(鐵路、地鐵、輕軌、高鐵)等方面亦呈現深入且豐富的成果<sup>[32-49]</sup>。國內對於 MAS 的研究則略顯稀少<sup>[50,51]</sup>。

從以上國內外有關軌道模擬模式之文獻回顧結果得知，目前國內對於如臺鐵多車種混跑、容許越行等行為的模擬模式尚屬於起步階段。此係因發展一套功能完整之軌道模擬模式需納入多車種混跑、路網型態、車輛調度及列車排點等要素，此工作量十分龐大，實非一蹴可成。因此較為可行之道係從複線運轉之單一方向中的區段及多車種列車運行著手，並於後續研究逐步擴充其功能。綜合上述，本研究將納入臺鐵錯車行為之考量，將坡度、曲線、前後車位置速度對列車運行的影響等因素納入模式，並經由電腦程式而獲得 FAS 與 MAS 行車制度下列車之運行軌跡，進一步則可模擬不同車種組成與不同發車間隔等各情境下之列車運行結果。

### 三、模擬模式之建立

#### 3.1 模式構建

本模擬模式之構建包括三部分：(1)「行車動力學」，用以控制列車推進與加減速；(2)「站內列車運轉」作為控制站內軌道佔用情形以及錯車邏輯；(3)「站間列車運行」用以確保列車安全空間間距。為簡化前述三部分之列車運行過程，本模式暫不考慮號誌系統之微觀處理，但仍須在安全前提下，相當程度上反映真實列車運行軌跡，以利於 FAS 與 MAS 之情境模擬，以下即分別說明之。

##### 3.1.1 行車動力學

影響軌道列車運行的環境因素甚多，既有靜態亦有動態者，主要包括：

- (1) 路線幾何條件：路線是列車運行的基礎，其涉及如坡度、曲線、橋樑、隧道、車站、

軌道電路、變電所等土木與電氣方面的問題。

- (2) 列車本身條件：列車是行車動力學研究的主要對象之一，其涉及到機車類型（攸關牽引與制動能力）、車輛類型及數量（攸關列車質量、長度與制動性能）。
- (3) 號誌條件：當存在多車種列車時，號誌將影響列車的運行，列車運行特性則又是確定號誌機位置的重要變數。
- (4) 供電參數：包括牽引供電方式、變電所位置及電力牽引環境之相關參數。
- (5) 計算原則：列車運行有許多計算前提條件，如注重運輸成本的節能控制，注重效率的省時控制以及其他注重因素。

列車運行之運動學基本距離公式（以梯形公式轉換）為

$$S_{n+1} = S_n + \frac{1}{2}(V_n + V_{n+1}) \times dt \quad (1)$$

$V$ ：速度；

$a$ ：加(減)速度；

$dt$ ：時間增量；

$S$ ：位移。

由上述公式，可得出距離及時間之公式：

$$S_n = S_{n-1} + \frac{V_{n-1}(V_n - V_{n-1})}{a_n} + \frac{(V_n - V_{n-1})^2}{2a_n} \quad (2)$$

$$t_n = t_{n-1} + \frac{V_n - V_{n-1}}{a_n} \quad (3)$$

當給定特定距離  $S$ ，( $S_n < S < S_{n+1}$ )，可得出當時之列車速度：

$$V = \sqrt{V_n^2 + 2(S - S_n)a_n} \quad (4)$$

影響列車速度計算公式的變數亦多，本研究係基於資料可獲得性 (availability) 之考量，將路線條件之坡度與線形曲線以及列車條件之車輛與相關設備納入模式建構之計算公式中。

## 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，可用以下公式估計：

$$a(G) \approx \frac{M_e a(0) - Mg \frac{G}{1000}}{M_e} = a(0) - \frac{g \times G}{1000\rho} \quad (5)$$

式中， $a(G)$  = 列車在坡度  $G$  ‰ 的加速度 ( $\text{m/s}^2$ )；

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

$\rho$  = 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 ( $\text{m/s}^2$ )， $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ；

$G$  = 路線坡度 (‰)。

等效質量係數  $\rho$  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  $\rho$  及重力加速度  $g$  代入式 (5)，則可以下式趨近：

$$a(G) \approx a(0) - 0.009G \quad (6)$$

若為減速度，由於坡度之阻力相反，則以下式表示：

$$b(G) \approx b(0) + 0.009G \quad (7)$$

## 2. 線形曲線對列車加減速性能之影響

在圖 3 中，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；又因為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；以上原因皆是產生彎道阻力之原因。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也均為造成彎道阻力之主因。

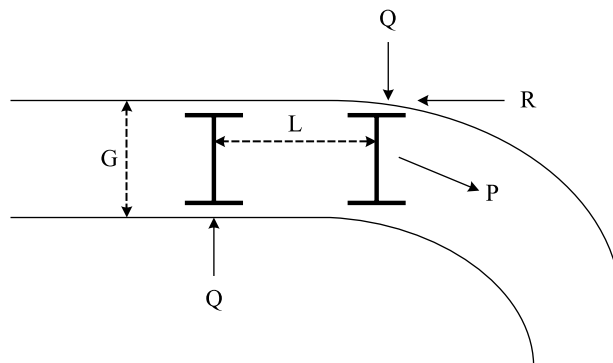


圖 3 彎道阻力示意圖

臺鐵對此之計算主要參考莫里遜氏發表關於彎道阻力公式：

$$T_k(v,r) = \frac{1000\mu(G+L)}{2\gamma} \times W \quad (8)$$

式中， $T_k(v,r)$ ：彎道阻力 (kg/ton)；

$\mu$ ：鋼輪與鋼軌之摩擦係數；

$G$ ：軌距 (m)；

$L$ ：固定軸距 (m)；

$\gamma$ ：彎道半徑 (m)；

$W$ ：列車重量 (ton)。

若將臺鐵列車資料代入，令  $\mu = \frac{1}{4.5}$ ， $G = 1.067$ ， $L = 4.3$ ，可得：

$$T_k(v,r) = \frac{1000 \times \frac{1}{4.5} \times (1.067 + 4.3)}{2\gamma} \times W$$

$$T_k(v,r) = \frac{600}{\gamma} \times W \quad (9)$$

此即一般熟知的彎道阻力計算公式，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。臺鐵對於曲線速限依照其曲線半徑皆有表定值，如表 3 所示。

表 3 臺鐵曲線速限表

| 曲線半徑 (m) | 速限 (Km/h) | 曲線半徑 (m) | 速限 (Km/h) |
|----------|-----------|----------|-----------|
| 900      | 125       | 300      | 70        |
| 800      | 120       | 250      | 65        |
| 700      | 110       | 225      | 60        |
| 600      | 100       | 200      | 55        |
| 500      | 90        | 150      | 50        |
| 450      | 85        | 125      | 45        |
| 400      | 80        | 100 以下   | 40        |

### 3. 車輛與相關設備對列車加減速性能之影響

軌道運輸車輛的移動過程中有兩個顯而易見的指標：能源消耗與旅行時間，亦即代表技術與經濟層面的議題。對於單一種類列車 (如捷運、輕軌與高鐵) 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少的列車運行時分，在確定列車運行圖(時刻表)之後，如何尋求節省能源消耗的控制方式則成為有意義的研究課題。多種類列車的運行(如臺鐵)通常需要不同特性的資料型態，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，因此多種列車運行不同於單種列車運行的方式，前者係注重計算列車的區間運行時分，後者則著眼於各列車間之最小運行間隔。

目前臺鐵列車係以推拉式自強號(P&P車)之130 km/h為最大營運速度，莒光號與復興號則為100 km/h，通勤電車之最大營運速度為110 km/h。未來基於車種簡化原則，將逐步汰換復興號與莒光號。由於通勤電車停站多，站距短，因此其列車加減速度相對於其他車種較大，如表4所示。

表4 臺鐵各車種之服務加減速度

|               | 自強號  | 莒光號  | 通勤電車 |
|---------------|------|------|------|
| 服務加速度(km/h/s) | 1.25 | 0.98 | 1.88 |
| 服務減速度(km/h/s) | 2.00 | 1.50 | 2.50 |

為達到平衡列車數的目的，臺鐵單線區間列車方向比約為1:1。自強號、莒光號、普快列車座位配置為「非字形」，座位數雖增加且舒適度提高，但車門寬度較窄，上下客較為不便；通勤列車座位配置則採「一字形」，座位減少立位增加，但由於通勤列車較為中短程旅客，因此可容許短時間之立位乘車，車門較寬可使得旅客快速疏散。至於不同車種的停站規則，以松山—新竹區間為例，臺鐵提供的資料如表5所示。

表5 臺鐵各車種之停站規則

|    | 松山 | 臺北 | 萬華 | 板橋 | 樹林 | 山佳 | 鶯歌 | 桃園 | 內壢 | 中壢 | 埔心 | 楊梅 | 富岡 | 湖口 | 新豐 | 竹北 | 新竹 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 自強 | ◎  | ◎  |    | ◎  | ◎  |    |    | ◎  |    | ◎  |    |    |    |    |    |    | ◎  |
| 莒光 | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  |    | ◎  |    |    |    | ◎  |    |    | ◎  |
| 復興 | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  |    | ◎  | ◎  |    | ◎  |    | ◎  |    | ◎  |    | ◎  | ◎  |
| 電聯 | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  | ◎  |

資料來源：本研究整理。

### 3.1.2 站內列車運轉

站內列車運轉模式主要包括列車安全進站間距、錯車邏輯設定及最小離站時隔等部份，詳細內容如下所述。

安全進站間距之設定，主要分為一股道同一股道進站、二股道同一股道進站及二股道

不同股道進站等三部分，其控制方式係以同向列車進站號誌安全時距之原理進行操作，故分為同一股道進站與不同股道進站二部分；由於所設定之站內股道數最大值為二，故在此部分另設定同一站內無法同時容納三輛車及三輛車以上之列車，如遇有此情形，則模擬系統會出現錯誤警告 (error)。

由於本研究在軌道路線設定上，係基於僅在車站內有多餘之股道供列車進行錯車之前提條件，因此所有錯車行為皆發生於車站內；而錯車邏輯為當前車之車輛等級較後車為低，前車進站停靠且前後車之距離少於門檻值時，此時即必須進行錯車，使等級較高之列車先行通過。而當錯車行為發生時，即必須進行前後車之資料交換 (SWAP)，以便使系統正常運作；此外，系統亦須重新計算低等級列車之停站再出發時間。而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二部分。

### 1. 進出站號誌安全時距

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。本研究係參考文獻 [18] 中有關 FAS 安全時距的公式，如表 6 所示，用以計算四種列車停靠站方式的安全時距。

表 6 FAS 號誌安全時距計算公式<sup>[18]</sup>

| 運轉方向 | 時隔種類 | 停靠股道 | 其他條件                                      | 號誌安全時距計算公式                                                                                                                                           |
|------|------|------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 同向   | 進站   | 同一   |                                           | $T_{s,A1} = \sqrt{\frac{2(L_i + s_x)}{a_i}} + \frac{v_j}{b_j} - \frac{v_y^2}{2b_j v_j} + \frac{B_1 + B_s - s_x}{v_j} + t_o + t_r + t_{d_i}$          |
|      | 進站   | 不同   |                                           | $T_{s,A2} = \frac{v_j}{b_j} - \sqrt{\frac{2s_e}{b_i}} - \frac{v_y^2}{2b_j v_j} + \frac{B_2 + B_1 + B_s - s_x}{v_j} + t_p + t_r$                      |
|      | 離站   | 同一   | $L_i + s_x + B_n > \frac{v_i^2}{2a_i}$    | $T_{s,D1} = \frac{v_i}{2a_i} + \frac{v_j}{b_j} - \frac{v_y^2}{2b_j v_j} + \frac{L_i + s_x + B_n}{v_i} + \frac{B_s - s_x}{v_j} + t_o + t_r + t_{d_j}$ |
|      |      | 同一   | $L_i + s_x + B_n \leq \frac{v_i^2}{2a_i}$ | $T_{s,D1} = \sqrt{\frac{2(L_i + s_x + B_n)}{a_i}} + \frac{v_j}{b_j} - \frac{v_y^2}{2b_j v_j} + \frac{B_s - s_x}{v_j} + t_o + t_r + t_{d_j}$          |
|      | 離站   | 不同   |                                           | $T_{s,D2} = \frac{v_i}{2a_i} + \frac{L_i + s_x + B_n + B_{n-1}}{v_i} + t_o + t_r$                                                                    |

## 2. 列車錯車邏輯

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，故錯車計畫主要內容為決定列車在系統中錯車之時間及地點；而在錯車計畫中所必須依據之錯車條件，必須為有一股或多股側線使列車能進行超越之指令，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避讓時之速度及停等時間。在實際的臺鐵系統列車運行計畫中，由於車站區位具備較多之側線股道，除非發生行車事故或列車重大延誤等特殊事件，導致列車班表無法順利依照原訂計畫運行，而必須在區段中之側線股道進行錯車行為之外(如圖 4 所示)，列車時刻表所排定之列車錯車行為多屬發生於車站之內(如圖 5 所示)；本研究由於所設定之軌道路線，在區段中只具備單一軌道，並無具備其他側線股道，故列車運轉僅在車站內發生錯車行為。

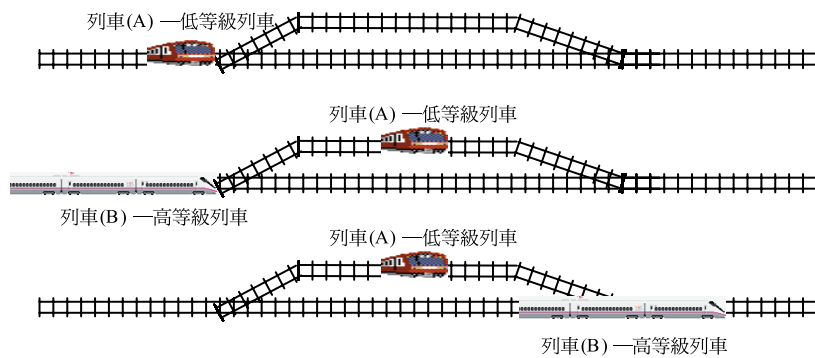


圖 4 區段側線錯車行為

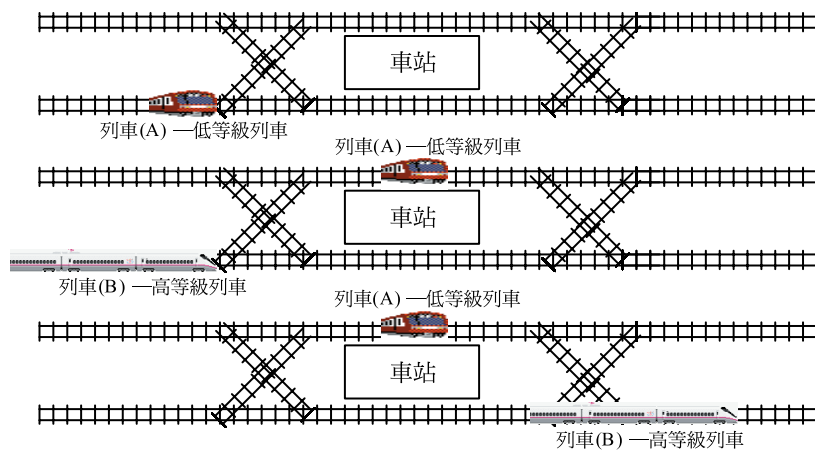


圖 5 車站側線錯車行為

列車錯車有其判斷邏輯，當前行列車抵達車站，並完成停靠任務時，系統會先判斷後行列車之列車等級，如後行列車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(如圖 6 所示)；反之，若後行列車等級較先行列車高時，則滿足錯車行為條件之一。而需要進行錯車的另一個條件，則必須判斷先行與後行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，則滿足錯車行為之所有條件(如圖 7 所示)；反之，則先行列車仍可順利出發。

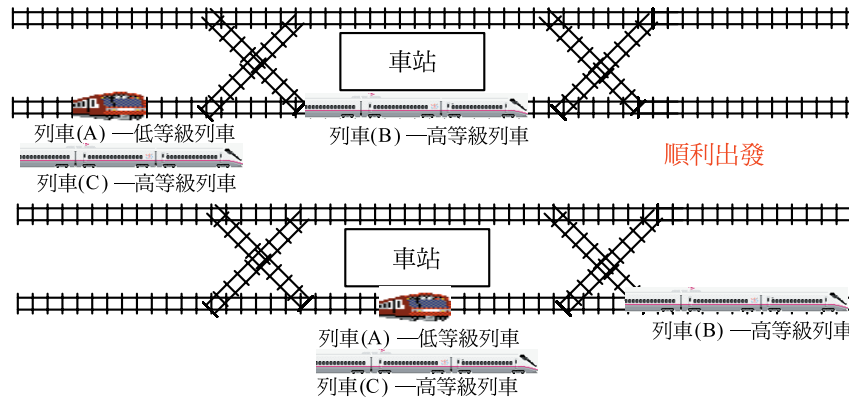


圖 6 無錯車行為之示意圖

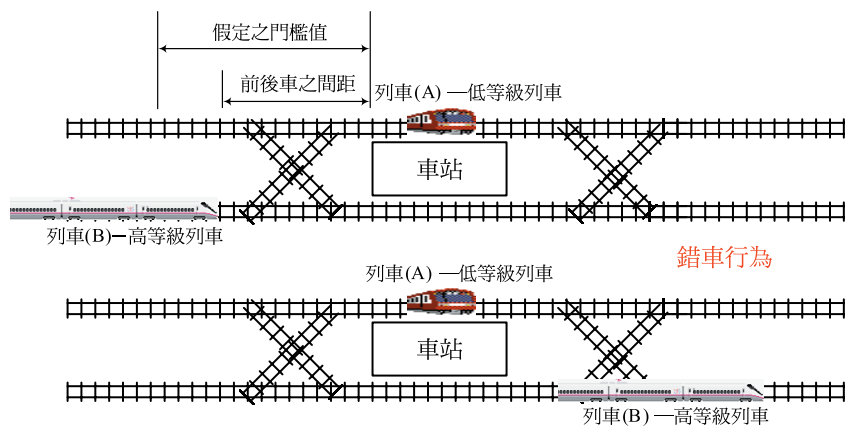


圖 7 滿足錯車條件之示意圖

當先行列車 (A) 已完成錯車行為時，並非後行列車 (B) 通過車站且已達安全間距，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 8 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 9 所示）。本研究對於模擬系統內之錯車行為控制，即是以此邏輯反覆判斷，直到條件皆符合始可順利出發。

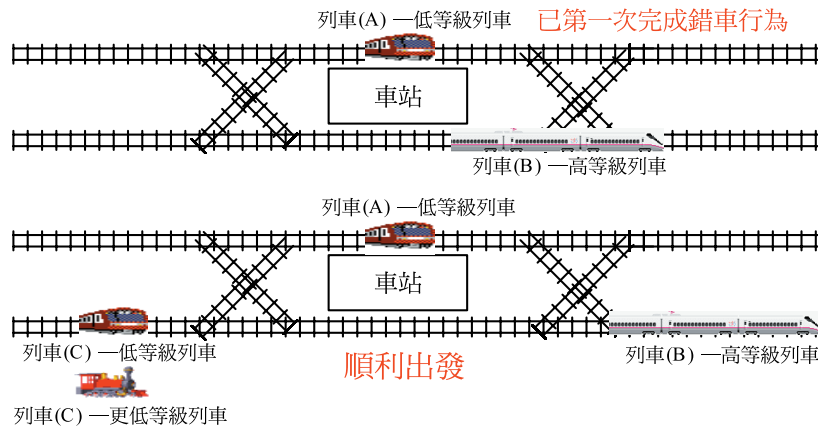


圖 8 第二次錯車行為判斷示意圖

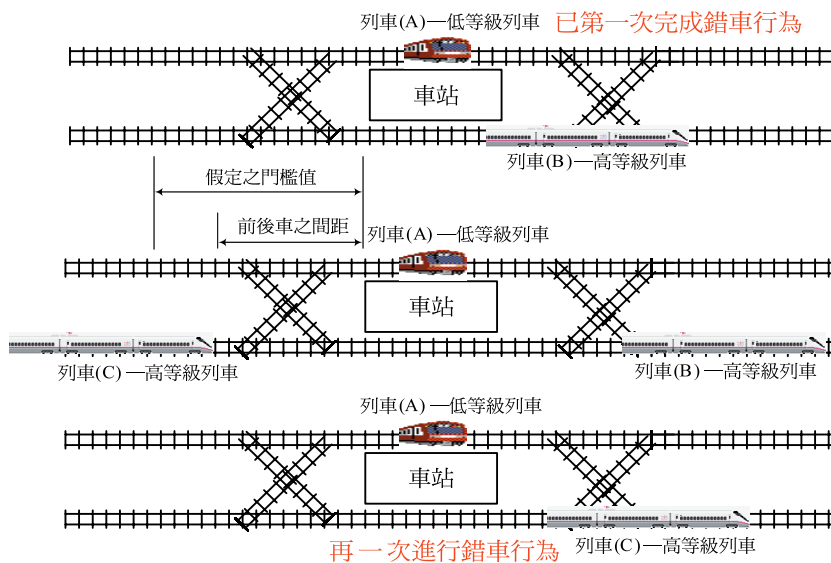


圖 9 進行第二次錯車行為示意圖

本研究係在設定時間之推進方式下進行事件掃描 (event scanning) 之模擬程式設計，故程式內以「前車」、「後車」作為辨認列車先後之方法。當列車於車站內，必須進行錯車

行為時，等級較低之前車 (A) 必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)，因此，如未將前後車之相關資料進行交換，則後車 (B) 將以前車 (A) 之資料繼續行駛，前車 (A) 亦將以後車 (B) 之資料繼續行駛，此時系統內之列車資料必將錯亂而無法辨識，如圖 10 與圖 11 所示。

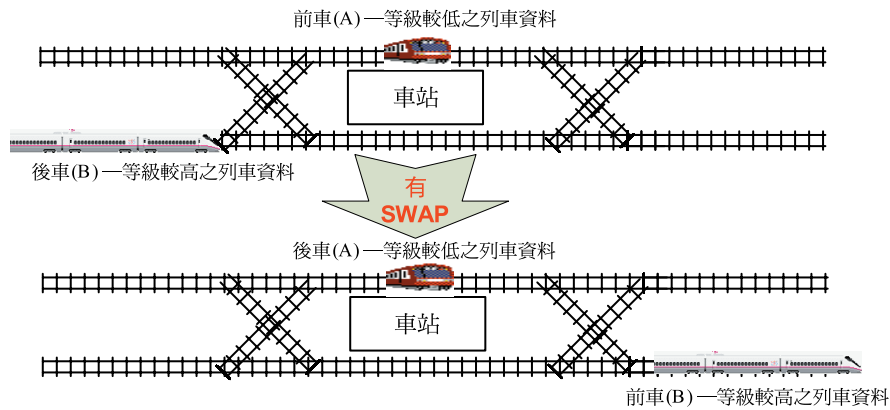


圖 10 有進行資料交換 (SWAP) 之系統示意圖

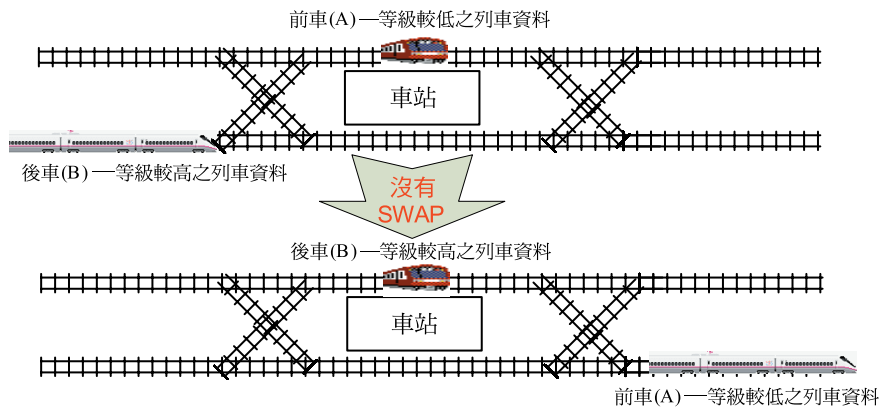


圖 11 沒有進行資料交換 (SWAP) 之系統示意圖

### 3.1.3 站間列車運轉

站間列車運轉主要是藉由門檻值之設定，控制列車運行時保持安全間距，並透過輸入之路段速度限制、速限包絡線等資料，以控制列車之加減速度操作，避免發生列車追撞情

形，其列車運行安全間距之理論如下所述。

雖然 MAS 可將路段上號誌設備拔除，但進出站號誌機，道岔應答器仍保留，作為判斷列車安全進路以及確認列車進入股道。因此本研究雖不考慮號誌於路段中的作用而以列車安全空間間距代替其功能，但進出站號誌安全時距仍需納入模式中考慮。由於 MAS 之閉塞區間係隨著兩車移動而變動，並根據不同情況例如：前後車速度或是地理環境因素如上下坡等，使列車間之閉塞區間長度經由車載設備計算後即隨時改變，以確保行車安全，因此列車運行安全間距即十分重要，換言之，前行列車對於後行列車的速度限制係一個連續函數，如下所示：

$$V_{d, max} = f(d, V_{t, f}) \quad (10)$$

即先行列車對後行列車的限速是前行列車間距  $d$  及前行列車速度  $V_{t, f}$  的函數。前行列車速度愈高，後行列車的速限值則愈大。前後行列車間距愈大，後行列車的限速亦愈大。由此可見，MAS 列車速度限制係決定於前後列車間的距離與速度。從前後列車的速度組合，可分為以下兩種情形：

### 1. 前行列車速度 $V_F$ 不小於後行列車速度 $V_B$

此時前後行列車間的距離原則上會愈來愈大，理論上前行列車對於後行列車應無約束，但從安全角度來看，要確保萬一前行列車發生事故 (如出軌) 或閉塞設備發生故障時，後行列車能及時停車並不至於與前行列車相撞，如圖 12 所示。

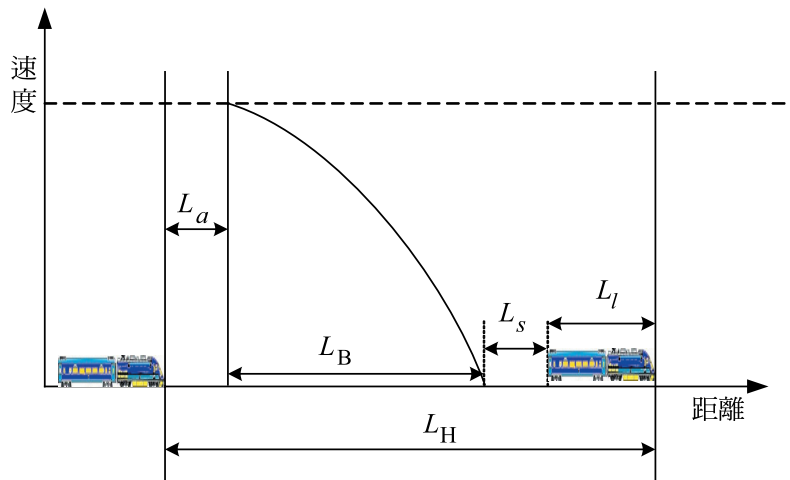


圖 12  $V_F \geq V_B$  時移動自動閉塞列車間距示意圖

換言之，當  $V_F \geq V_B$  時，兩列車間的最小間距  $L_H$  為

$$L_H = L_B + L_a + L_s + L_l \quad (11)$$

式中： $L_B$  = 後行列車之常用制動距離 (m)；

$L_a$  = 緊急情況出現時，司機採取制動所需的反應時間內列車行走的距離 (m)；

$L_s$  = 制動停車後後行列車車頭與前行列車尾部的安全距離 (m)；

$L_l$  = 前行列車長度 (m)。

## 2. 前行列車速度 $V_F$ 小於後行列車速度 $V_B$

當前行列車速度小於後行列車時，兩車的距離將愈來愈近，具體的速度限制變化曲線目前尚未有統一的模式，然而在後行列車前方存在一個常用的制動曲線，是目前大部分 MAS 作為後行列車的速度限制依據，亦即當後行列車在空間上進入此一曲線時，閉塞要求後行列車採用常用制動，以確保行車安全。

由此可見，當前行列車速度不小於後行列車速度時，MAS 係用於控制列車間隔，當後行列車滿足此間隔時，前行列車對後行列車並無影響。當前行列車速度小於後行列車時，為防止列車不必要採用常用制動，MAS 在控制最小間隔的同時還要根據常用制動曲線控制後行列車的速度，即確保後行列車的速度不進入其常用制動曲線。因此，MAS 下的列車間距限制包括兩方面：一是前行列車速度大於等於後行列車時的最小間距要求，在此種情形下後行列車主要受路線速限的限制；二是前行列車速度小於後行列車時由常用制動曲線速限確定的限定值，距離愈近，速限愈低。

雖然理論上只要後行列車速度不大於前行列車，兩車間距可縮至最短，但在實務上由於要確保前行列車在當前點發生意外時，後行列車不至於追撞，一般 MAS 下的列車間距仍應保持一個常用制動距離 (如圖 13)，即要求後行列車在任何時候均能停於前行列車後方安全距離之外，此即要求後行列車不進入由前行列車尾部安全點決定的常用制動曲線範圍。

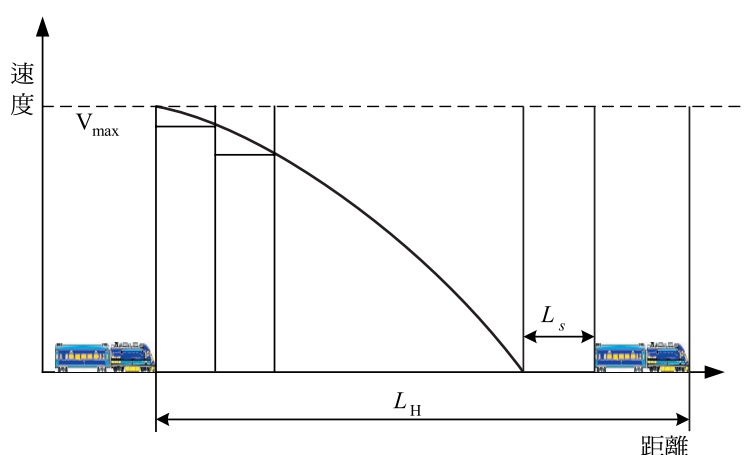


圖 13  $V_F < V_B$  時移動自動閉塞列車間距示意圖

相關 MAS 與 FAS 最大差異在於閉塞區間長度。在 FAS 中，其閉塞區間長度多介於 1.5 ~ 2.5 km 之間。MAS 因採用先進通訊、定位技術，前後車速度、位置，使得在安全的前提下，能有效地縮小列車運行安全空間間距。本研究對於 FAS 與 MAS 在列車運行間距的處理係以列車安全空間間距門檻值為判斷準則，考慮前後車速度、制動性能來追蹤前行列車，目標為前後車制動至停止時，兩車仍保持一個車長之安全間距而作為停車餘裕空間。

### 3.2 模擬程式

將模擬模式轉為可因應不同情境之計算流程，則需藉助電腦化之模擬程式，始能朝向可操作的應用軟體發展。首先必須針對列車營運方式建構若干模組，各模組間隨著模擬時間及事件發生相互作用，進行研究對象之複線運轉區段單方向之列車模擬；其次蒐集各模組所需資訊，包括：班表、列車運轉計畫、列車停站時間、車種、列車性能、速限等，以建立模擬模式所需之資料庫。本研究係使用 C++ 語言進行模擬程式之撰寫，程式可分為三大模組：外部資料輸入、內部模擬處理及模擬結果輸出等模組，如圖 14 所示，各模組內容說明如下：

#### 1. 外部資料輸入模組

常用列車模擬模式的輸入資料包括路線條件、交通條件及控制條件。路線條件包括線型設計、上下坡度、轉彎半徑、路段最大允許速度等等；交通條件可細分為列車性能（加減速度、制動、牽引力）、車廂設計（座位配置、車門設計）、交通特性（列車營運方式、月台停靠）等三類；控制條件則可分為號誌顯示、通訊定位方式、列車控制方式。本研究係引入列車安全間隔概念以取代號誌系統而維持列車間距的功能，但由於進出站號誌機為各種行車制度均不可或缺，因此本研究將進出站號誌時距納入列車間之最小安全間距計算公式中，至於列車定位與通訊方式技術則假設已可成熟使用。

輸入資訊包括：交通組成、列車組成、列車任務、發車時刻、停站時間限制。

#### 2. 內部模擬處理模組

內部模擬處理模組之功能在於掌握列車運行之操作，此模組包括行車包絡線控制、站間站內安全間距控制、錯車判斷、列車速度控制及列車推進等次模組，透過不同次模組之相互操作，來呈現列車運行之實際情形。

- (1) 行車包絡線控制模組：主要為依據不同之路線特性、環境變異等，產生不同之速限包絡線及停站包絡線等，以控制列車於運行時之速度控制。
- (2) 站間站內安全間距控制：臺鐵之實際列車運行主要依靠三位式號誌系統作為站間運轉、列車進站及出站之操作控制，本研究係以「安全間距」概念，運用邏輯控制方式來保持列車正常運行，避免列車冒進或追撞等情形發生。
- (3) 錯車判斷控制模組：此模組主要在控制前行列車是否須進行待避行為之判斷，系統將於

可待避區間，向後掃描列車是否應待避，以確保後行高等級列車優先通行。

(4) 列車速度控制模組：列車於實際運行過程中，因每個區間皆有不同之速度限制，因此，此模組即在控制列車加速、減速及等速前進等運行控制，以因應不同環境之列車速度變化。

(5) 列車推進模組：此模組在操作列車加減速推進，並計算運行里程、速度。

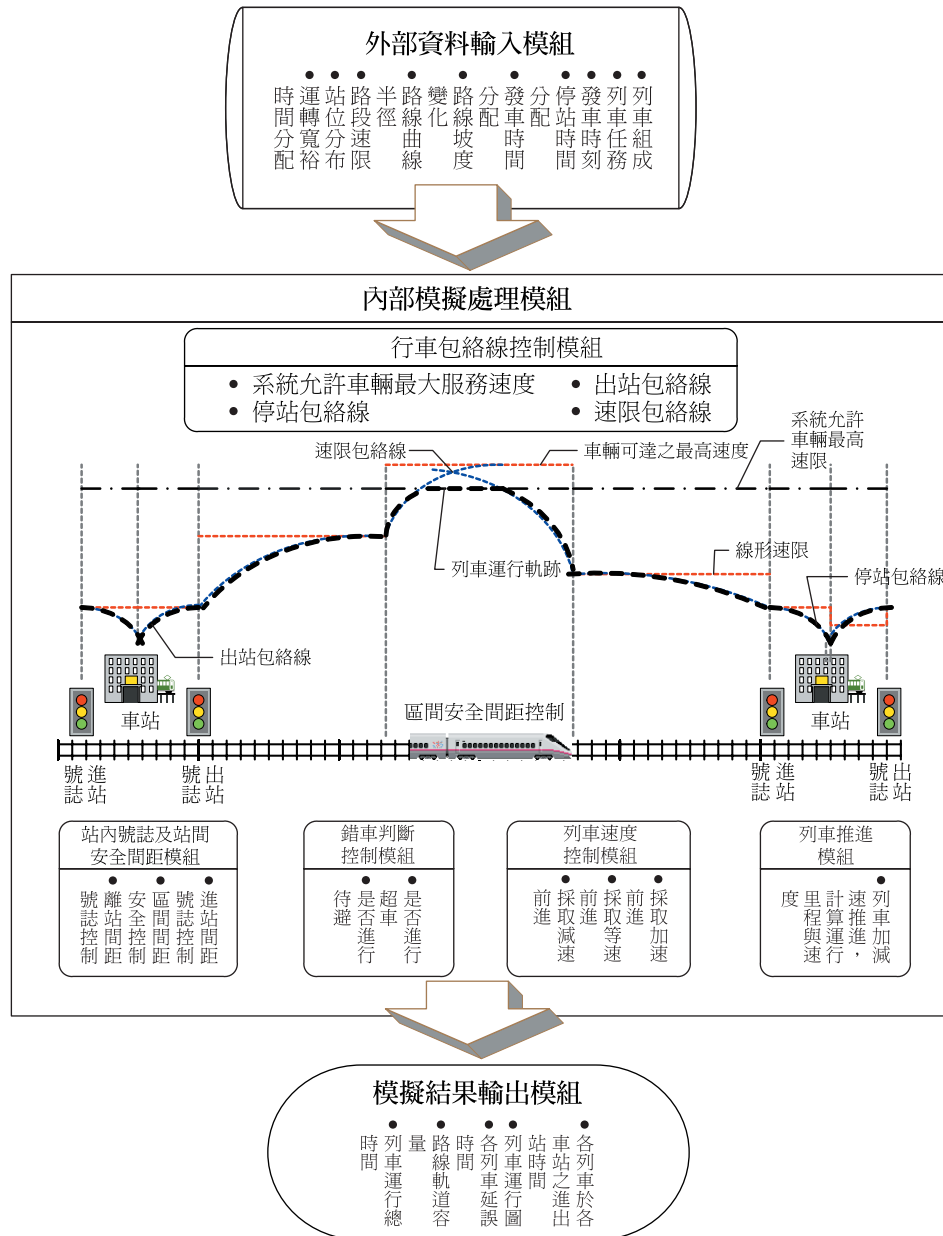


圖 14 程式模組示意圖

### 3. 模擬結果輸出模組

模擬程式運作後，將所需資料予以輸出，以備後續研究使用，其中包括：各列車進出各站時間記錄、停站時間，列車進入及離開時間、各車種組成運行軌跡及列車完成服務所需時間等資訊。

本研究係使用 C++ 語言進行模擬程式之撰寫，程式內容分為相關變數及副程式宣告、主程式開始、副程式開始及資料輸出等四部份，如圖 15 所示。依照前述之模式建構，可將 FAS 與 MAS 列車運行模擬程式流程圖分別繪製成圖 16 與圖 17。以 FAS 程式操作之邏輯流程為例，其步驟如下：

- 步驟一：程式開始即需輸入各站及進站點位置、各級列車停靠位置與時間、各級列車之允許最高速限、線形速限、速度、停車包絡線及列車相關數據等資料，以建構一條虛擬之軌道路線。
- 步驟二：系統開始判斷列車是否到達發車時間，若是，則列車出發；反之，則模擬時間繼續計時。然後當列車開始運行，系統會判斷列車是否到達最終里程，若是，則列車離開系統；反之，則列車繼續運行。如列車尚未離開系統，系統將判斷列車是否到達停站點，若是，則列車將進入車站區域（步驟三）；反之，列車將繼續於區間上運行（步驟六）。
- 步驟三：若列車到達停站點，系統將會判斷該列車是否依照班表必須停靠於該車站內，若是，則列車準備停站（步驟四）；反之，列車則將直接通過車站，繼續於區間路段上運行（步驟六）。
- 步驟四：列車於停站點必須靠站時，系統會先判斷是否已經到站，若是，則列車停止到站，反之，系統將依據速限包絡線與停站包絡線等速度限制來控制列車速度以降低速度停車靠站。當列車已停靠於車站，並經過停站時間之後，系統將會判斷列車是否須進行錯車行為，若後續列車等級較高時，且前後車之間距小於安全門檻值時，則該列車進行錯車行為；反之，系統將返回步驟二，使該列車繼續於區間路段上運行。
- 步驟五：若該列車必須進行錯車行為，且後行列車亦達該車站之時，不管後行列車是否依照班表必須停靠該車站，此時系統都將會轉換前後車之資料（SWAP），使系統能正常運作，防止列車資料錯亂。當後行列車已通過該車站並完成錯車行為與 SWAP 之後，則系統將返回步驟四，繼續判斷停於該車站之列車是否應該再次進行錯車行為；如此反覆進行步驟四與步驟五，直到該列車毋需錯車時，則系統返回步驟二，使該列車繼續於區間運行。
- 步驟六：當該列車於區間運行時，系統會先判斷該列車與前車之空間間距是否小於門檻值，若是，則系統將繼續判斷前後車之車速差異，以控制列車是否該減速慢行；反之，則列車將依照原先指令繼續運行。然後系統將會依據各區段速限與速限包絡線等速度限制，以控制列車之加減速。

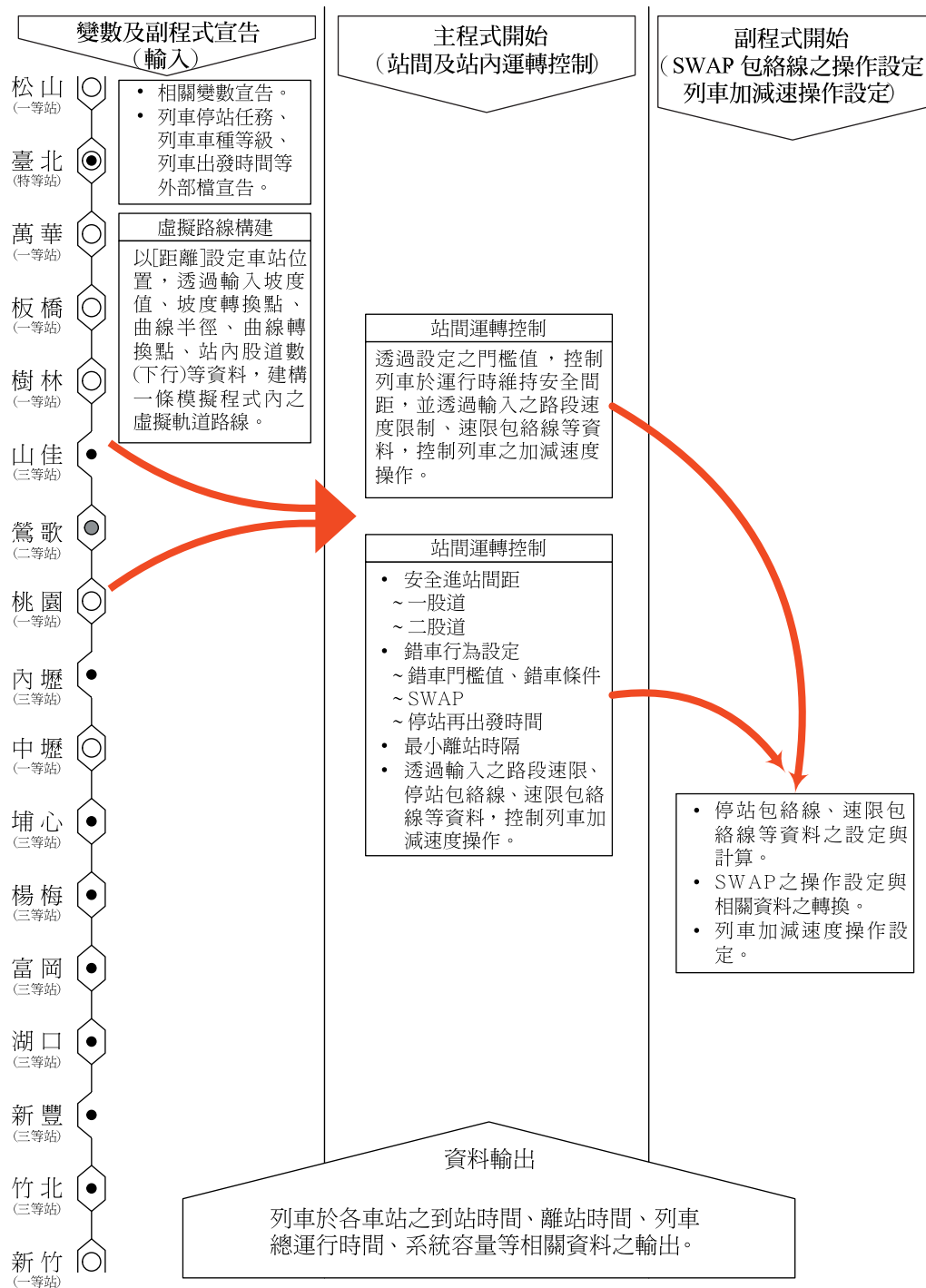


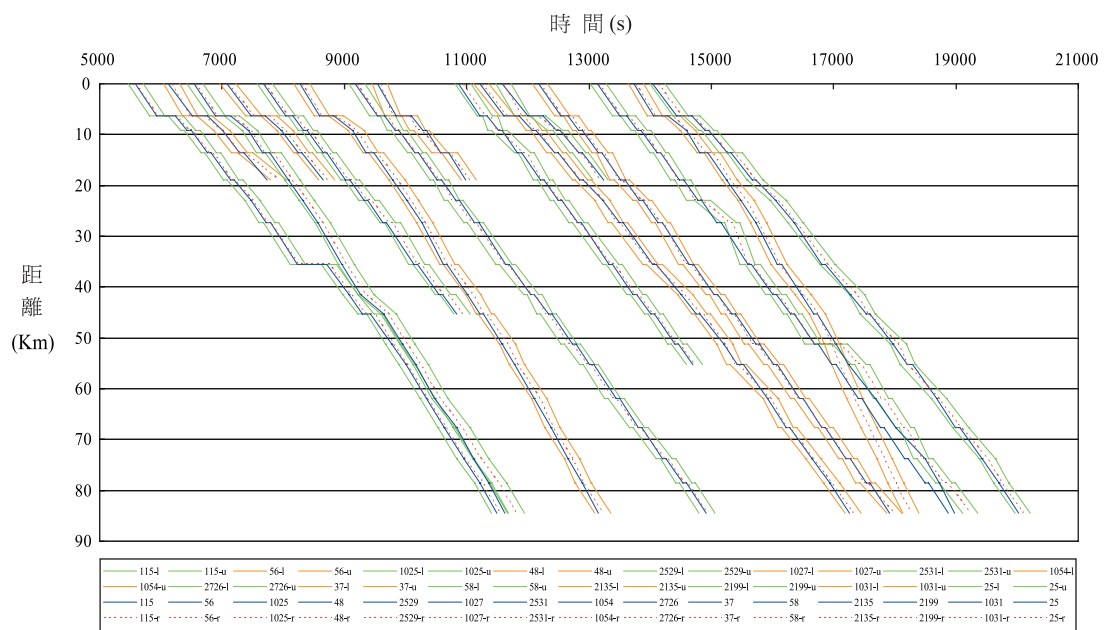
圖 15 程式執行流程示意圖





實際值比較竹北站雖早到 162 秒，新竹站早到 193 秒，但與臺鐵可容忍列車誤點 5 分鐘之標準相比，皆仍在可接受範圍內。

- (3) 由表 9 可看出，2199 車次電聯車之模擬列車運行線大致上趨勢與實際值相仿，惟在鶯歌站早到 191 秒，早發 192 秒，但與臺鐵可容忍列車誤點 5 分鐘之標準相比，皆仍在可接受範圍內。
- (4) 由表 10 可看出，2199 車次電聯車與 1031 自強號之模擬列車運行線從埔心站後開始與實際列車運行線之可接受區間差異漸大。探究其原因為待避對向 1022 北上自強號，亦因模擬中 2199 車並未在埔心站延長停站時間，導致同向後續追蹤列車 1031 自強號無法越行，此兩列車埔心站後之模擬運行線與實際運行線因此有明顯差異。
- (5) 綜合以上分析可知，由於模式並未考慮待避對向列車之行為，大部份列車均呈現早到情形，因此其  $t$  值皆為負值。尤其模擬結果較無法描述 2199 及 1031 車次在埔心站及其後的運行情況。但經由 1.5 小時共 15 個車次的驗證檢定，完全通過檢定共有 11 個車次，於各站細部則總共有 330 個檢核點，僅 29 個檢核點之模擬結果落於信賴區間之外。然而此 29 個檢核點模擬值與實際值相比，僅有 2199 電聯車及 1031 自強號在埔心站後之列車運行模擬無法滿足臺鐵可容忍列車誤點範圍。絕大部分列車運行情形皆可利用本模擬模式真實呈現，因此可判定模擬模式有效。



(圖例說明：115-l 表示實際值之信賴區間下限；115-u 則為上限；115 代表模擬列車運行線；115 [藍色實線] 為模擬之列車運行線；115-r [紅色虛線] 為實際列車運行線)

圖 18 列車運行圖之驗證

表 7 模擬模式驗證 T-value 表 (I-1 組)

| T-Value | 松山      | 臺北      |         | 萬華      |         | 板橋      |         | 樹林      |         | 山佳      |         | 鶯歌      |         | 桃園      |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | 0.0004  | 6.358   |         | 9.191   |         | 13.578  |         | 18.986  |         | 22.867  |         | 27.259  |         | 35.456  |         |
| 車次      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     |
| 115     | -0.1304 | -0.2174 | -0.1956 | -0.3478 | -0.3913 | -0.3913 | -0.6087 | -0.3695 | -0.3695 | -0.4565 | -0.4565 | -0.2391 | -0.2391 | -0.3478 | -0.9347 |
| 56      | -1.3043 | 0.8695  | 0.9999  | 0.4130  | 0.4130  | 0.1304  | -0.6087 | -4.0867 |         |         |         |         |         |         |         |
| 1025    | -0.4348 | -0.6087 | -0.6521 | -0.5652 | -0.5652 | -0.6521 | -1.3043 | -1.4130 | -1.4130 | -1.4999 | -1.4999 | -1.5651 | -1.5651 | -1.7390 | -1.7390 |
| 48      | -0.3261 | -0.9782 | -1.0869 | -1.1521 | -1.1521 | -0.9999 | -0.8043 | -1.1304 |         |         |         |         |         |         |         |
| 2529    | -0.4348 | -0.6956 | -1.2173 | -0.6521 | -0.6956 | -0.5869 | -0.6521 | -0.9565 | -0.9999 | -1.1086 | -1.4782 | -1.6738 | -2.1086 | -0.9130 | -1.1739 |
| 1027    | -0.5655 | -0.7595 | -0.6069 | -1.3213 | -1.3213 | -1.7011 | -0.9992 | -1.6707 | -1.6707 | -1.3199 | -1.3199 | -0.9695 | -0.9695 | -1.3015 | -1.2352 |
| 2531    | -0.5434 | -0.0713 | -1.1609 | 0.0973  | 0.0973  | -0.1304 | -0.1399 | -0.0295 | -0.0295 | 1.3031  | 1.3031  | 1.0547  | 1.0547  | 0.8013  | 0.8013  |
| 1054    | -0.8695 | 1.3912  | 0.6521  | 1.7608  | 1.6086  | 0.3695  | -0.4565 | -1.1956 |         |         |         |         |         |         |         |

表 8 模擬模式驗證 T-value 表 (I-2 組)

| T-Value | 內壢      |         | 中壢      |         | 埔心      |         | 楊梅      |         | 富岡      |         | 湖口      |         | 新豐      |         | 竹北      |         | 新竹      |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | 41.395  |         | 45.345  |         | 51.141  |         | 55.192  |         | 62      |         | 67.682  |         | 73.815  |         | 78.625  |         | 84.475  |
| 車次      | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      |
| 115     | -0.5652 | -0.5652 | -1.0652 | -1.7173 | -0.5000 | -0.5000 | -0.3913 | -0.3913 | -0.5000 | -0.5000 | -0.5217 | -0.5217 | -0.4348 | -0.4348 | -0.9347 | -0.9347 | -0.9999 |
| 56      |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 1025    | -1.8695 | -1.8695 | -1.6303 | -1.6303 | -1.5434 | -1.5434 | -1.6956 | -1.6956 | -1.8260 | -1.8260 | -2.1521 | -2.1521 | -2.4999 | -2.4999 | -3.5216 | -3.5216 | -4.1954 |
| 48      |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 2529    | -1.5651 | -2.0216 | -1.8912 |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 1027    | -2.0431 | -2.0431 | -1.4066 | -1.0016 | -1.7525 | -1.7525 | -0.6619 | -0.6619 | -1.7150 | -1.7150 | -0.6500 | -0.6500 | -1.5156 | -1.5156 | -0.1605 | -0.1605 | -1.6655 |
| 2531    | -0.3193 | -0.3193 | 1.2482  | 1.2482  | 1.0954  | 1.0954  | 1.0218  | 1.0218  | 1.2444  | 1.2444  | 0.6130  | 0.6130  | -0.5749 | -0.5749 | -0.3696 | -0.3696 | -0.4148 |
| 1054    |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |

表 9 模擬模式驗證 T-value 表 (II-1 組)

| T-Value | 松山      | 臺北      |         | 萬華      |         | 板橋      |         | 樹林      |         | 山佳      |         | 鶯歌      |         | 桃園      |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | 0.0003  | 6.358   |         | 9.191   |         | 13.578  |         | 18.986  |         | 22.867  |         | 27.259  |         | 35.456  |         |
| 車次      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     |
| 2726    | -1.7489 | -1.6976 | -1.1056 | 0.9309  | 0.9309  | -1.6883 | -1.6883 | -0.4159 | -0.4159 | 0.1353  | 0.1353  | 0.4598  | 0.4598  | -0.6643 | -0.6643 |
| 37      | -0.4565 | -0.9357 | -1.6099 | -0.4706 | -0.6228 | -0.0324 | -0.0324 | -0.0199 | 0.0888  | -0.0133 | -0.0133 | 1.2755  | 1.1668  | 0.7665  | 0.6579  |
| 58      | -0.4782 | 2.0651  | 1.7608  | 0.4565  | -0.1304 | 0.3043  | 0.5434  | 1.1521  |         |         |         |         |         |         |         |
| 2135    | -0.3478 | -0.5666 | -1.1318 | -0.5036 | -0.2645 | -0.6388 | -0.8562 | 1.1343  | 1.0691  | -0.6868 | -0.5564 | -0.4178 | -0.2656 | 1.2844  | 0.9584  |
| 2199    | -0.3478 | -0.4565 | -0.5434 | -0.6087 | -0.4782 | -0.2826 | -0.1087 | 0.6521  | 0.1739  | 1.1086  | -0.4565 | -4.1520 | -4.1737 | 0.3478  | -0.3043 |
| 1031    | -0.6254 | -0.5506 | -1.4553 | -0.5763 | -0.5763 | -1.6956 | -1.7105 | -1.2578 | -1.2578 | -2.0056 | -2.0056 | -0.9048 | -0.9048 | -0.5375 | 0.7668  |
| 25      | -1.8034 | -1.3497 | -0.1002 | -0.3695 | 0.0217  | 0.0818  | -1.3529 | -0.8701 | 0.4342  | -1.0309 | -1.0309 | -0.5013 | -0.5013 | -1.8657 | -0.5614 |

表 10 模擬模式驗證 T-value 表 (II-2 組)

| T-Value | 內壢      |         | 中壢      |         | 埔心      |         | 楊梅      |         | 富岡      |         | 湖口      |         | 新豐      |         | 竹北      |         | 新竹      |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | 41.395  |         | 45.345  |         | 51.141  |         | 55.192  |         | 62      |         | 67.682  |         | 73.815  |         | 78.625  |         | 84.475  |
| 車次      | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      | out     | in      |
| 2726    | -0.5989 | -0.5989 | -0.4306 | -0.4306 | -0.2436 | -0.2436 | -0.7255 |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 37      | -1.4036 | -1.4036 | -1.0811 | -0.7971 | -0.2515 | -0.2515 | 1.1509  | 1.8030  | -1.1095 | -1.1095 | 0.1538  | 0.1538  | -0.3285 | -0.3285 | -0.6419 | -0.6419 | -1.3114 |
| 58      |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 2135    | 0.1135  | 0.1135  | 1.0047  | 0.7874  | 1.0907  | 0.9385  | 0.4318  | 0.4752  | 0.5149  | 0.4062  | -0.0425 | 0.0662  | -0.0099 | -0.0099 | 0.9481  | 0.8394  | -1.7262 |
| 2199    | -0.3913 | -0.6956 | -0.2174 | -0.1739 | 0.5434  | -7.9344 | -9.4560 | -9.4560 | -8.1083 | -7.9996 | -7.9778 | -7.9344 | -5.8040 | -5.8910 | -6.6736 | -6.6083 | -7.8692 |
| 1031    | -0.6011 | -0.6011 | -1.3030 | 0.0013  | 1.5881  | 1.5881  | 3.3272  | 3.3272  | 7.2400  | 7.2400  | 9.4138  | 9.4138  | 14.3701 | 14.3701 | 15.5439 | 15.5439 | 15.7178 |
| 25      | -2.1730 | -2.1730 | -0.6162 | 0.6881  | -1.7393 | -1.7393 | -0.2091 | 1.7473  | -0.6445 | -0.6445 | -1.7878 | -0.4835 | -2.0317 | -2.0317 | -0.6613 | -0.6613 | -1.4304 |

## 五、情境分析

情境分析係針對 FAS 與 MAS 下模擬不同車種組成、不同發車間隔之列車運行之變化情形。路線係以單線單區間單股道之多車種混合運轉為模擬對象。選定「松山—新竹」段之一般日非尖峰 13:30 至 16:00，並以現行列車任務不變的前提下進行模擬，停站時間係以配適度佳之統計分配亂數產生，各情境均模擬 30 次。本研究以板橋站作為觀測基準站，除去熱機切除時間後，即產生全程列車運行圖及其相關結果。

### 5.1 原定班表下 FAS 與 MAS 之不同車種列車運行模擬

為了解發車間隔不變 (即原定班表) 之條件下 FAS 與 MAS 之不同車種組合的列車運行變化，本研究依序按「自強—莒光—電聯」、「自強—電聯—莒光」、「莒光—自強—電聯」、「莒光—電聯—自強」、「電聯—自強—莒光」與「電聯—莒光—自強」等 6 種情境進行模擬。因限於篇幅，本研究僅以圖 19 與 20 分別展示原班表自強—莒光—電聯車種組合之 FAS 與 MAS 列車運行情形。

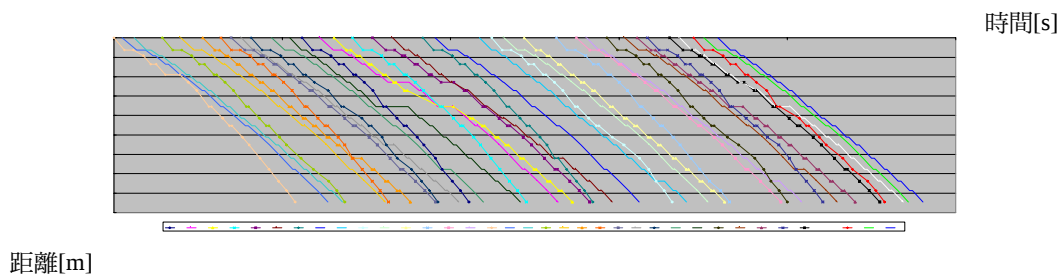


圖 19 FAS 下原定班表之「自強—莒光—電聯」列車運行圖

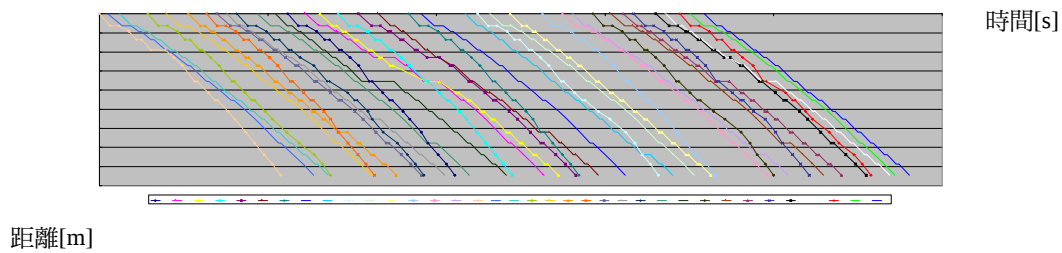


圖 20 MAS 下原定班表之「自強—莒光—電聯」列車運行圖

由 6 種情境之列車運行圖之對照結果可明顯看出，若按原班表發車，無論何種車種組合 MAS 下之列車運行時間均較 FAS 下之列車運行時間為短，此可推論 MAS 行車制在發車班次愈密集的情況下則愈能縮短運行時間而提高運輸能力。

## 5.2 不同發車間隔下 FAS 與 MAS 之不同車種列車運行模擬

此情境係以密集發車間隔來觀察不同車種組合以及不同行車制對於列車運行時間的影響結果。本研究乃是參考臺鐵現行列車運行計畫中松山站一日最密集發車間隔，即 240 秒為發車間隔之起始值，並以每增量 60 秒來進行情境模擬，在不同車種組合下 FAS 與 MAS 之全程列車運行時間之變化可整理成表 11。自表中可明顯發現無論是何種車種組合，隨著發車間隔的縮短，MAS 下的全程運行時間亦隨之減少。若在相同發車間隔下，計算各車種組合跑完全程時 MAS 比 FAS 所節省的時間比率，舉例而言，在發車間隔為 240 秒下，以「電聯—自強—莒光」的車種組合運行，則 MAS 比 FAS 的全程運行時間可節省 6.92%，則不同發車間隔之不同車種組合之 MAS 全程運行時間節省比率結果可整理成表 12 及圖 21。從表 12 可發現無論是何種車種組合，因採行 MAS 行車制，列車全程運行時間節省比率將隨著發車間隔的縮短而隨之增加。從圖 21 中亦可看出，幾乎所有的車種組合若採用 MAS 行車制，在發車間隔為 300 秒時皆能維持平均值為 4.2% 的節省比率

表 11 不同發車間隔下 FAS 與 MAS 之不同車種列車運行模擬結果比較表

| 發車間隔 |          | 240 s   |         | 300 s   |         | 360 s   |         | 原班表 588 s |         |
|------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|
| 行車制  |          | MAS     | FAS     | MAS     | FAS     | MAS     | FAS     | MAS       | FAS     |
| 車種組合 | 自強—莒光—電聯 | 14719 s | 15609 s | 16713 s | 17445 s | 18741 s | 19470 s | 24031 s   | 24755 s |
|      | 自強—電聯—莒光 | 14966 s | 15787 s | 17080 s | 17829 s | 18927 s | 19739 s | 24005 s   | 24779 s |
|      | 莒光—自強—電聯 | 14980 s | 15827 s | 16985 s | 17702 s | 19025 s | 19742 s | 24305 s   | 25022 s |
|      | 莒光—電聯—自強 | 14762 s | 15602 s | 16662 s | 17424 s | 18747 s | 19476 s | 24117 s   | 24812 s |
|      | 電聯—自強—莒光 | 14798 s | 15899 s | 16578 s | 17325 s | 18665 s | 19388 s | 24407 s   | 24728 s |
|      | 電聯—莒光—自強 | 15059 s | 15999 s | 16851 s | 17561 s | 18951 s | 19661 s | 24006 s   | 25333 s |

且彼此間差異不顯著。但在發車間隔為 240 秒時則以「電聯—自強—莒光」的車種組合在此區間的運行時間節省比率為最大。若觀察原班表之發車間隔 588 秒至 240 秒，亦以「電聯—自強—莒光」車種組合之節省比率幅度為最大，達 5.32 倍之多。因此可推論若在此區間採行 MAS 行車制，以「電聯—自強—莒光」車種組合之全程運行時間之節省比率趨勢最為顯著。

表 12 不同發車間隔下 MAS 之不同車種列車全程運行時間節省比率比較表

| 發車間隔 |          | 240 s | 300 s | 360 s | 原定班表 588 s |
|------|----------|-------|-------|-------|------------|
| 車種組合 | 自強—莒光—電聯 | 5.70% | 4.20% | 3.74% | 2.92%      |
|      | 自強—電聯—莒光 | 5.20% | 4.20% | 4.11% | 3.12%      |
|      | 莒光—自強—電聯 | 5.35% | 4.05% | 3.63% | 2.87%      |
|      | 莒光—電聯—自強 | 5.38% | 4.37% | 3.74% | 2.80%      |
|      | 電聯—自強—莒光 | 6.92% | 4.31% | 3.73% | 1.30%      |
|      | 電聯—莒光—自強 | 5.88% | 4.04% | 3.61% | 3.24%      |

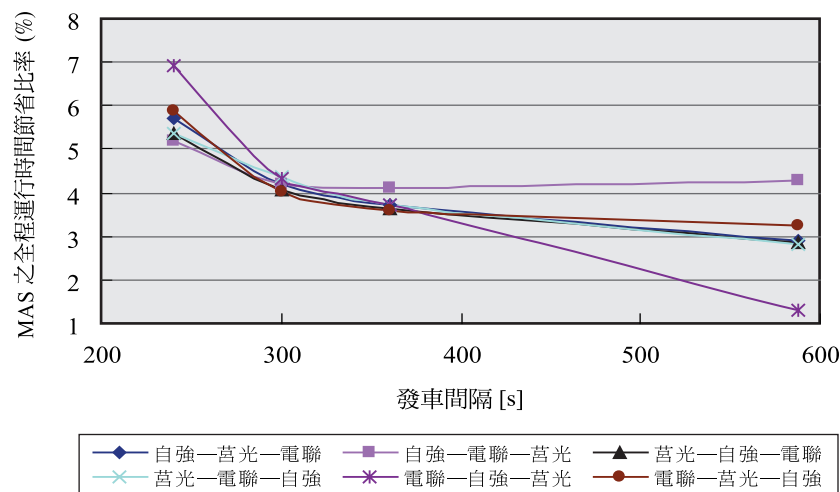


圖 21 不同發車間隔下 MAS 之不同車種列車全程運行時間節省比率趨勢圖

## 六、結論與建議

### 6.1 結論

1. 本研究採用系統模擬法，探討構成軌道流量基本要素之一的運轉條件對於軌道流量之影

響程度，其中又以控制條件中的行車制度為最主要的影響因素。目前絕大多數軌道運輸之行車制度雖採用 FAS 來確保列車行車安全，然而當因應特殊或緊急需求（例如：重大節慶之返鄉人潮或緊急事故救援）而加開列車時，由於大部分班表固定且又有固定閉塞區間長度之限制，使得縮短發車間隔以增加流量之策略難以奏效。因此在保證安全的前提下，為提升軌道運輸流量，許多國家已積極引進 MAS，期能符合未來需求反應（demand responsive）服務之要求。

2. 本模擬模式之構建包括三部分：(1)「行車動力學」，用以控制列車推進與加減速；(2)「站內列車運轉」作為控制站內軌道佔用情形以及錯車邏輯；(3)「站間列車運行」用以確保列車安全空間間距。模擬模式之程式邏輯與輸出結果通過確認（verification）程序。
3. 本模擬模式係針對列車發車間隔、停站時間以及列車運行時間等部份進行驗證。經由 1.5 小時共 15 個車次的模擬結果檢定，完全通過檢定共有 11 個車次，於各站細部則總共有 330 個檢核點，僅 29 個檢核點之模擬結果落於信賴區間之外。然而此 29 個檢核點模擬值與實際值相比，僅有 2199 電聯車及 1031 自強號在埔心站後之列車運行模擬無法滿足臺鐵可容忍列車誤點範圍，此顯示本模式可適切反映絕大部分列車真實運行情形，因此可判定本模擬模式有效。
4. 情境分析係用於驗證 MAS 行車制之列車運行是否優於 FAS 行車制。結果顯示，無論是何種車種組合，隨著發車間隔的縮短，MAS 下的全程運行時間將隨之減少。進一步分析亦發現幾乎所有的車種組合若採用 MAS 行車制，在發車間隔為 300 秒時皆能維持平均值為 4.2% 的全程運行時間節省比率且彼此間差異不顯著。但在發車間隔為 240 秒時以「電聯—自強—莒光」的車種組合在此區間的運行時間節省比率為最大。若觀察原班表之發車間隔 588 秒至 240 秒，亦以「電聯—自強—莒光」車種組合之節省比率幅度為最大，達 5.32 倍之多。因此可推論若在此區間採行 MAS 行車制，以「電聯—自強—莒光」車種組合之全程運行時間之節省比率趨勢最為顯著。足見當前臺鐵採行 FAS 行車制之列車運行仍有空閒餘裕空間，宜依調度需求而靈活使用。
5. 本研究成果在於自行發展一符合國內多車種混跑、容許站內越行及考量不同行車制之軌道列車運行模擬模式，可繼續擴充而應用於列車誤點分析或路線容量分析等課題之探討。

## 6.2 建議

1. 本模擬模式雖是針對臺鐵多車種混跑、單股道單向之列車運行，未考慮對向列車交會，但經由調整修正亦可適於捷運、高鐵等軌道系統之模擬。
2. 本研究未考慮列車實際運行五階段（加速、等速、巡航、制動、停站）中巡航的部分。列車實際運行時，為節省能源，因此設計在某些路段上列車應採行惰行方式運行，未來可修改模式中列車運行方程式，期更能精確進行微觀模擬。
3. 本模擬模式僅針對單股道單向列車運行，尚無法描述對向列車交會、儲車、單線運轉...

等行為，因此若欲使本模式更趨於完善，未來應由此著手，並整合列車排點電腦化之研究，兼顧供應面及需求面。

4. 本研究僅考慮現況複線運轉下單向列車運行，而未考量路網型態，未來可擴建成路網型態之列車運行模式，將支線交互作用納入考慮。尤其在行車動力學方面，應將死帶 (dead band) 的概念納入程式中，使其更能符合列車實際運行情況，同時為求模式簡化亦忽略列車惰行運行，此方面研究應與列車運轉、能源消耗等模擬配合。若再能與列車排點模式整合，更可作為軌道營運單位之最佳決策支援輔助工具。

## 參考文獻

1. Gwilliam, K. M., Shalizi, Z., and Thompson, L. S., "Railways, Energy, and Environment", TWU Discussing Paper for World Bank, Transportation, Water, and Urban Development Department, Washington, D. C., 1994.
2. The World Bank, "Sustainable Transport – Priorities for Policy Reform", Washington, D. C., <http://www.worldbank.org/html/fpd/transport/publicat/twu-22/front.pdf>, 1996.
3. Achakji, G., "A Review of State-of-the-Art Train Control Systems Technology", Final Report, Transportation Development Center Canada, March 1998.
4. 陶冶中，「智慧型軌道運輸系統行車控制理論及路線容量之研究」，國科會研究報告 NSC93-2211-E-032-015，行政院國家科學委員會，臺北，民國九十四年。
5. 陳柏穎、林建仁，「內湖線行車系統控制功能」，*捷運技術半年刊*，第 35 期，民國九十五年，頁 65-76。
6. Ello A. G., *Simulation of Railway Traffic Control*, Elsevier Science Press, 1998.
7. Nash, A. and Huerlimann, D., "Railway Operation Using OpenTrack", *Proceedings of COM-PURAIL 2004*, Dresden, Germany, 2004, pp. 203-218.
8. 黃哲旭，「捷運鐵路列車模擬模式之研究」，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國八十二年。
9. 游俊雄，「捷運列車運行模擬之研究—以臺北市中運量木柵線為例」，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國八十三年。
10. 陳鑑康，「鐵路列車運行模擬模式之研究」，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國八十三年。
11. 宋豐華，「列車運轉曲線之自動規劃與動態模擬研究」，國立臺北科技大學碩士論文，民國八十八年。
12. 陳潔如，「考慮轉車之鐵路列車排點模式」，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國九十年。
13. 陳智淵，「臺北捷運系統列車運行動態模擬」，國立臺北科技大學碩士論文，民國九十年。

14. 游才譽，「臺鐵推拉式列車運動性能之分析與模擬」，國立臺北科技大學碩士論文，民國九十一年。
15. 交通部運輸研究所，臺灣地區軌道系統容量研究架構暨臺北捷運系統容量分析，民國九十三年。
16. 交通部運輸研究所，軌道容量研究—臺鐵系統容量模式之構建分析(一)，民國九十四年。
17. 交通部運輸研究所，軌道容量研究—臺鐵系統容量模式之構建分析(二)，民國九十五年。
18. 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)，民國九十六年。
19. 汪希時，「鐵路區間行車方法的自動調整」，北京鐵道學院學報，第 1 期，1963 年，頁 34-38。
20. Pearson, L. V., "Moving Block Signaling", Ph. D. Dissertation, Loughborough University of Technology, England, 1973.
21. Takeuchi, H., Goodman, C. J., and Sone S., "Moving Block Signaling Dynamics: Performance Measures and Re-starting Queued Electric Trains", *IEE Proceedings of Electronics Power Application*, Vol. 150, No. 4, 2003, pp. 345-356.
22. Ho, T. K., Mao, B. H., and Yang, Z. X., "A Multi-Train Movement Simulator with Moving Block Signaling", WIT Press, 1998, pp. 783-792.
23. Ho, T. K. and Wong, K. K., "Peak Power Demand Reduction under Moving Block Signaling Using an Expert System", *IEE Proceedings of Electrical Power Application*, Vol. 150, No. 4, 2003, pp. 67-79.
24. Takeuchi, H., "Dynamic Response of Moving Block Signaling Systems", Ph.D. Dissertation, University of Birmingham, England, 1997.
25. Siu, L. K., "An Object-Oriented Railway System and Power Network Simulator", Ph.D. Dissertation, University of Birmingham, England, 1995.
26. Gill D. C., and Goodman, C. J., "Computer-Based Optimization Techniques for Mass Transit Railway Signaling Design", *IEE Proceeding B*, Vol. 139, No. 3, 1992, pp. 261-275.
27. Breusegem, V., Campion, G., and Bastin, G., "Traffic Modeling and State Feed back Control for Metro Lines", *IEEE Transaction on Automatic Control*, No. 36, 1998, pp. 770-782.
28. Lockyear, M. J., "Changing Track-Moving-Block Railway Signaling", *IEE Review*, January 1996, pp. 21-26.
29. 汪希時、丁正庭，「論提高區間通過能力的最優化閉塞系統—移動自動閉塞系統」，北京交通大學學報，第 3 期，1989 年，頁 45-49。
30. 紀加倫、楊肇夏，「移動閉塞方式下列車運行組織即區間通過能力計算方法的探討」，鐵道學報，第 14 卷，第 1 期，1992 年，頁 38-46。
31. 趙明，「移動自動閉塞系統基本理論的研究」，北京交通大學博士論文，1996 年。
32. 黃學躍，「關於移動自動閉塞列車間隔控制的研究」，北京交通大學碩士論文，1985 年。
33. 張勇，「新型列控系統—移動自動閉塞條件下線路通過能力的理論分析及計算機仿真」，北京交通大學博士論文，1998 年。

34. 劉英，「移動自動閉塞條件下的能力利用分析」，北京交通大學博士論文，1998 年。
35. 陳志英，「移動閉塞條件下列車運行」，北京交通大學碩士論文，2000 年。
36. 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。
37. 張偉華，「移動閉塞條件下高速列車運行間隔研究」，北京交通大學碩士論文，2006 年。
38. 李金龍，「AIS 與 GIS 在移動自動閉塞系統中的應用」，大連海事大學碩士論文，2006 年。
39. 汪希時等，「京滬線開發應用移動閉塞制度可行性研究」，北京交通大學研究報告，1991 年。
40. 趙明、汪希時，「移動自動閉塞條件下列車追蹤運行控制研究」，**鐵道學報**，第 19 卷，第 3 期，1997 年，頁 62-68。
41. 張濟民、吳汶麒、張樹京，「準移動閉塞列車安全間隔時間的計算」，**鐵道學報**，第 21 卷，第 3 期，1999 年，頁 6-10。
42. 張勇、趙明、汪希時，「基於移動自動閉塞條件的列車運行仿真系統」，**系統仿真學報**，第 11 卷，第 3 期，1999 年，頁 198-204。
43. 劉海東、袁振洲等，「移動自動閉塞仿真系統列車追蹤過程的探討」，**交通與計算機**，第 17 卷，第 1 期，1999 年，頁 46-48。
44. 劉雲、張振江，「MAS 下區間列車追蹤的研究和仿真」，**系統仿真學報**，第 11 卷，第 1 期，1999 年，頁 49-56。
45. 汪希時，「基於通信技術的列車控制技術」，**中國鐵路**，第 8 期，2001 年，頁 11-13。
46. 周潔、陳衡，「移動閉塞的原理、系統結構及功能」，**城市軌道交通研究**，第 1 期，2004 年，頁 1-4。
47. 劉海東、毛保華等，「不同閉塞方式下城軌列車追蹤運行過程及其仿真系統的研究」，**鐵道學報**，第 27 卷，第 2 期，2005 年，頁 120-125。
48. 張偉華、張勇，「高速列車在移動閉塞條件下的運行仿真」，**仿真技術**，第 22 卷，第 1-1 期，2006 年，頁 246-248。
49. 荀徑、寧濱、鄧春海，「列車追蹤運行仿真系統的研究與實現」，**北京交通大學學報**，第 31 卷，第 2 期，2007 年，頁 34-37。
50. 陶冶中，「移動閉塞行車制下大眾捷運系統之列車行車間隔理論分析」，海峽兩岸都市軌道運輸學術研討會，交通大學運輸研究中心，民國九十一年，頁 54-62。
51. 蔡青峰，「捷運固定閉塞區間與移動閉塞區間運能比較之研究」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國九十四年。