運輸計劃季刊
第五十二卷 第二期
民國一一二年六月
頁 129～頁 160

Transportation Planning Journal
Vo1. 52 No. 2
June 2023
PP. 129～160

臺鐵推擠延滯改善策略之研究

STRATEGIES FOR ALLEVIATING SECONDARY TRAIN DELAYS IN TAIWAN RAILWAY SYSTEMS

鄭永祥 Yung-Hsiang Cheng [1]
蔡昆穆 Kun-Mu Tsai [2]

(109 年 3 月 4 日收稿，109 年 11 月 11 日第一次修正稿，110 年 3 月 24 日第二次修正稿，111 年 3 月 25 日第三次修正稿，111 年 3 月 30 日接受)

摘　要

臺鐵同時提供城際運輸與區域運輸服務，然這兩種運輸服務停站模式與服務乘客屬性有所不同。而在路線容量的限制下，可能會產生不同的衝突類型，進而產生不同之調度策略。臺鐵因運轉餘裕低，當列車營運一旦遇隨機之擾動，延滯因此遞延至後續列車，是謂推擠延滯。為有效改善臺鐵營運之推擠延滯，本研究首先瞭解臺鐵調度專家目前對於擾動考量之調度規則與策略，並利用派翠網路分析法進行情境模擬，模擬結果發現縮短閉塞區間對臺鐵區間列車待避城際列車的推擠延滯有極顯著之助益，惟需注意是否有合適待避線或通過線，以避免降低縮短閉塞區間長度效益。後續研究也建議未來臺鐵將旅客轉乘之需求與經轉轍器耗時對於推擠延滯的影響加以分析，以作為後續調度改善策略與設備建置之考量。

關鍵詞：列車調度；軌道容量；鐵路號誌；待避；派翠網路

ABSTRACT

Taiwan Railway Administration (TRA) provides both intercity

1. 國立成功大學交通管理科學系教授 (聯絡地址：701 臺南市東區大學路 1 號 成功大學交通管理學系，電話：06-2757575 Ext.53227，E-mail：yhcheng@mail.ncku.edu.tw)。
2. 國立中山大學應用數學系學士。

transportation and regional transportation services. However, these two transportation service stopping patterns and passenger service attributes are different. Under the limitation of line capacity, different types of conflicts may occur, resulting in different corresponding rescheduling strategies. Due to the low operating margin, once the train operation encounters disturbances, the delay could be spread to the subsequent trains, which is called secondary delay. In order to reduce the secondary delay, this study firstly understands the dispatching rules and strategies of the dispatching experts for the disturbance, and uses the Petri Nets method to simulate the various scenarios. Petri Nets simulations show that shortening the block interval is of great help to the secondary delay improvement. It is essential to reserve suitable lines to avoid or pass through, so as to avoid reducing the benefit of shortening the length of the block interval. Future research suggests that TRA can analyze the impact of passenger transfer demand and time-consuming of switch on secondary delay for subsequent rescheduling improvement strategies.

Key Words： *Train dispatch, Railway capacity, Railway signal, Overtaking, Petri Nets.*

一、緒　論

軌道運輸業者因應旅客需求，利用增加班次來提高服務水準。為評估鐵道運輸系統能力，可利用軌道容量的概念，評估設備相關建置是否合宜 [1]。在軌道容量定義下，有兩項重要的指標為：(1)最大容量 (Maximal capacity)：代表系統的極限，定義為單位時間內通過路線上某一點的最大客體數。列車運行會受到前車的阻礙，遇到平安以外的號誌，列車需降速行駛，此情況稱為路線阻塞 (以下簡稱路塞)。(2)實用容量 (Practical capacity)：則是指正常營運條件下，單位時間通過路線上某一定點之最大客體數。列車不會受到前車阻礙，即不會路塞，在此情形下的最大運輸能力。

一般而言，列車排點可分為靜態排點與動態排點 [2]，前者係指營運前所排時刻表，後者為營運時遇擾動採取調度策略，使列車運行不再更加混亂。對於靜態排點所使用的軌道容量，會因為不同鐵道營運業者，而有不同的情況：(1)靜態排點僅限實用容量：這是多數軌道營運業者採用的情況 [3-5]。(2)靜態排點超過實用容量：又可再分為路塞排點 [6,7] 與壓線排點 [7,8]。路塞排點係指排時刻表時，允許列車路塞，典型的情況如：讓城際列車降速行駛，避免區間列車待避城際列車，即平行的運行圖，以開行更多班次滿足尖峰需求，如日本部分軌道營運業者 [6,7]；另一種情況為：排定列車待避時，區間列車待城際列車通過後，出發號誌機由險阻轉為注意號誌，續行列車即可出發，可降低待避時間，此為臺鐵的情況。壓線排點則是排時刻表時，允許時刻表帶有列車衝突，實際執行時刻表時交由值班調度員，執行運轉整理。典型的情況如：針對部分日期開行的加班車，定期列車不另外安排待避時間，避免加班車未開行的日期，列車於車站待避時，引發旅客抱怨，此為臺鐵的

情況 [3,7,8]。與路塞排點不同的是，壓線排點帶有列車衝突，實際營運時，即便是列車未受擾動，壓線排點的列車仍然會延滯。

當列車排點僅使用實用容量時，列車遇擾動後，可利用最大容量執行運轉整理；當列車排點超過實用容量時，列車遇擾動後，少有餘裕供運轉整理用，對於軌道營運業者便是一大考驗，延滯常傳播至很大的範圍 [9]。因旅客無法忍受較長的待避時間，使得臺鐵靜態排點超過實用容量，因運轉餘裕較低，在這樣的前提下，比起討論調度策略來說，討論如何提升最大容量更為重要。從上述分析可以得知，其中待避的部分是臺鐵的重要議題，可嘗試利用改善設備的方式縮短時距，進而降低待避時間，例如升級號誌系統，以降低閉塞區間長度。對於待避的部分，可以根據城際列車停靠或通過的方式加以區分衝突類型 [6]：(1)緩急分離：區間列車待避通過城際列車。(2)緩急接續：區間列車待避停靠城際列車，此項會衍生旅客轉乘問題。

綜上所述，因臺鐵同時提供城際運輸與區域運輸服務，然緩急分離與緩急接續這兩種運輸服務停站模式與服務的乘客屬性有所不同，在路線容量的限制下，可能會產生不同的衝突類型，因此本研究議題是探究臺鐵針對緩急分離與緩急接續兩種情境的調度方式有何差異？其對推擠延滯的影響？在臺鐵調度策略下，升級號誌設備對於上述兩種情境的延滯傳播情況的改善是否會有何影響？

二、文獻回顧

列車延滯可分為初始延滯 (primary delays) 與推擠延滯 (secondary delays) [10]：初始延滯是因為外在事故導致延滯；推擠延滯則是列車營運遇到延滯擾動後，因受到軌道容量的限制及列車營運交互作用之影響，會將此延滯擾動擴散。為改善推擠延滯，可考慮各種不同的調度策略並加以評估 [11-17]，但當列車排班時使用超過實用容量的營運業者而言，其首要之務便是如何改善設備增加最大容量，這是因可供運轉整理的剩餘軌道容量少，也就是運轉餘裕較低。

軌道容量可以分為運轉條件、時間單位、空間參考點、客體單位，對於運轉條件又可細分為路線分布 (如軌道數目、運轉方式)、交通條件 (如車種組成) 與控制條件 (如閉塞方式、列車控制) [1]，根據日本經驗，提升軌道容量方式，以升級號誌系統的投資報酬率較高 [18]，對於升級號誌系統，可改善列車班距 [19]、減少列車全程運行時間 [20]、增開更多列車 [21]。

過往文獻有關建置設備所提升之軌道容量分析，多集中在排班問題 [19-21]，也就是實用容量，但是卻很少考慮設備建置後所提升的最大容量。建置相關設備後，對於提升實用容量與最大容量的效益可能不同，舉例而言，更新列車自動保護系統 (Automatic Train Protection，ATP) 的感應器設置位置或傳輸方式，對於實用容量幾乎沒有影響，但是卻會影響最大容量。然升級號誌對於提升最大容量與實用容量是否有差異，需要去進一步探討

升級號誌對推擠延滯的影響。

當列車延滯時，須採取調度策略使行車狀況得以改善 [2]，即排除列車衝突。為解決列車衝突，調度員會考量相關因素，採取調度方案，包含：變更運轉順序、折回行駛、特開、停駛、合併運轉 [12]。列車運行時可能會遇到擾動 (disturbance) 與中斷 (disruption)，遇到擾動時只須修改時刻表，變更運轉順序即可；當遇到中斷時，則必須修改編組運用與人力運用 [5]。在雙線區間，變更運轉順序常採行的方案有待避 (overtake) [11-13,16] 或雙單線運轉 (switchable scheduling rule；SSR) [14,15,17]，兩者皆是利用剩餘軌道容量。不同的是，前者使用車站內之待避線，後者使用未被占用的對向軌道 (reverse track)。對於待避，通常設定不會讓續行城際列車路塞 [11-13,16]。對於雙單線運轉，觀察其在處理列車衝突時僅考量兩列車衝突之短期調度策略 [14]，稍不謹慎處理可能會導致對向列車大亂，後續研究者考量三列車衝突 [15]，或是利用最佳化的方式求取最佳解 [17]，以改善此現象，但過往研究 [11-17] 較少考慮旅客轉乘需求與經轉轍器反位之耗時。

過去研究對於排解列車衝突時，會利用 IF-THEN 規則，甚至是利用 IF-AND-ONLY-IF 規則 (即雙向的 IF-THEN 規則) [12,14-16,22]，但仍有幾個值得討論之處：(1)多數規則只考量兩列車衝突為短期的調度策略，然從調度邏輯來說，對於高密度系統，只考量兩列車是不夠的，少有局部的調度策略 (僅考量三列車衝突) [15]。(2)調度員在複雜路線上的專業考量判斷 [23]，過去較少被探討 [4,5]。(3)有時不容易釐清這些 IF-THEN 規則的前後關係，雖然可以利用流程圖，但是流程圖並沒有辦法表達同時或平行的事件。因此，應考量建立模型來表達這些「流程圖」關係。(4)單純 IF-THEN 規則並不利於設計、測試、修改、擴充與維護 [22]，可透過數學建模工具來呈現這些 IF-THEN 規則。

另一方面，結合最佳化與經驗法則可更加合適發展電腦化調度作業 [22]，然對於最佳化來說：最佳化需要較長時間求解 [13]，也帶有複雜之限制條件 [12]。因運轉整理時間緊迫，必須尋找更快速的解法 [2]。而對於雙單線運轉方式，因容許列車於站間行駛不同軌道，其求解時間會變長 [17]，使得上述之問題更加嚴重，加上臺鐵的複雜特性，需要更多時間。一旦有新的擾動，整個最佳化版本就得重新計算 [13]，不過調度邏輯只考慮當前的衝突，即使是受到新的擾動，並不需要全部重新計算。因此比起模擬調度員的調度方式，利用電腦最佳化較不容易被營運業者所接受 [13]。

從上述之文獻回顧可以發現，派翠網路可作為鐵路運轉整理建模工具 [11,12,22-25]，派翠網路優點為；可描述事件與條件的關係 [11]，這使得更容易利用專家系統建立模型。過去使用派翠網路進行運轉策略整理的論文中，並沒有針對鐵路公司之推擠延滯改善策略進行分析與研究，然臺鐵同時提供城際運輸與區域運輸服務，在路線容量的限制下，可能會產生不同的衝突類型，進而產生不同之調度策略，這也是本研究與過去相關研究有何不同之處。此外，派翠網路其可視覺化，呈現流程圖[12]。並適用於電腦化與自動控制，其中包括：平行 (parallelism) [11,12]、並行 (concurrency) [11,12]、同步 (synchronization) [11] 與異步 (asynchronization) [12]。本研究為避免最佳化求解時間過長及限制條件複雜之缺點，也避免使用 IF-THEN 規則僅能考量較小規模調度決策之缺點，因此嘗試根據調度員之經驗法則，

利用派翠網路來做為模擬調度員決策之建模工具，以建立一個較實用之列車調度員決策支援系統。

三、衝突類型

列車營運受擾動後，當兩列車須同時占用同一閉塞區間時，即產生衝突。但調度員僅能選擇一列車，而將擾動傳播給其他列車，即推擠延遲。本研究考量在同方向軌道上，先行列車為區間列車，續行列車為城際列車，若要解決股道運用衝突，其可能方案如下：

1. 使區間列車待避城際列車，讓區間列車停靠在車站第二主正線或副正線[3]，以下簡稱待避線 (waiting track)，使城際列車從第一主正線通過[11,13,16]。
2. 利用雙單線運轉，使其中一列車利用車站橫渡線，轉換至對向軌道行駛，待城際列車追越區間列車後，再轉換回原本軌道[14,15,17]。
3. 讓城際列車路塞，即不使用待避或雙單線運轉策略來解決衝突，使續行城際列車因號誌而降速行駛，以減少區間列車延滯或安排旅客轉乘。

在運轉整理時，以減少列車延滯為目標，但當衝突類型為緩急接續時，則需考量旅客轉乘之需求。因列車延滯造成旅客無法轉乘時，會引發旅客抱怨[26]。針對以上所述，以下舉例說明。

3.1 緩急分離

假設區間列車 i、城際列車 j、對向區間列車 k，與 A、B、C、D、E 五座車站，如圖 1 所示，區間列車停靠這五座車站、城際列車通過這五座車站，因營運受到擾動，列車 i 與 j 會在 D 車站與 E 車站之間發生衝突，列車運行圖如圖 2(a)所示。

為了解決衝突，調度員有以下方案：

1. 找 A 車站使區間列車 i 待避城際列車 j，列車運行圖如圖 2(b)所示。
2. 利用雙單線運轉，使區間列車 i 行駛對向軌道，並於 C 站交會對向列車 k，如圖 3。
3. 讓城際列車 j 路塞，並使區間列車 i 於 E 站待避城際列車 j，如圖 4。

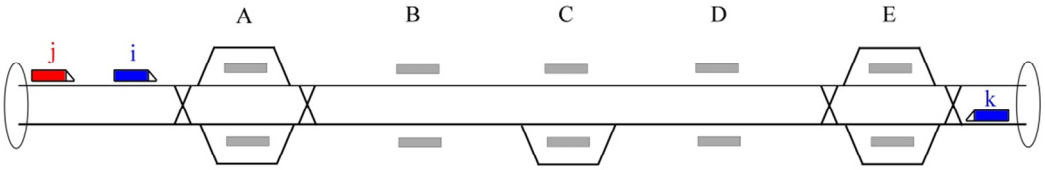

圖 1　範例：五座車站軌道配置圖

3. 在其他軌道營運業者有的會稱之為側線 (siding)，但對臺鐵而言，副正線 (subsidiary main track) 與側線為不同種類之股道。

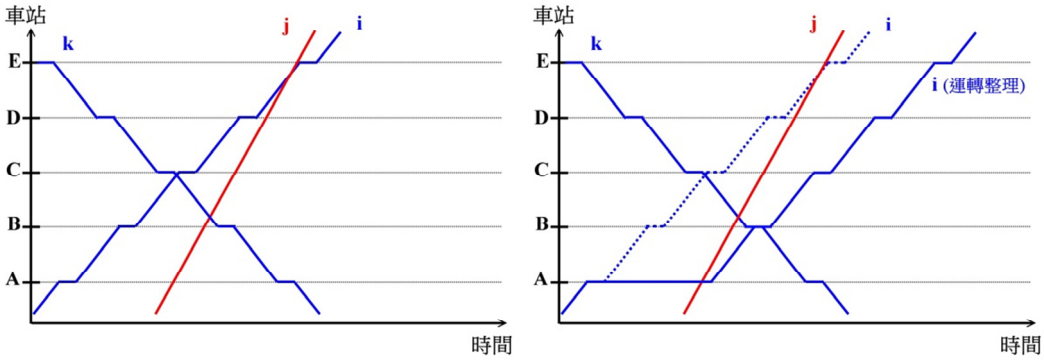

圖 2　(a) 列車營運受到擾動產生衝突 (b) 區間列車 i 於 A 站待避城際列車 j

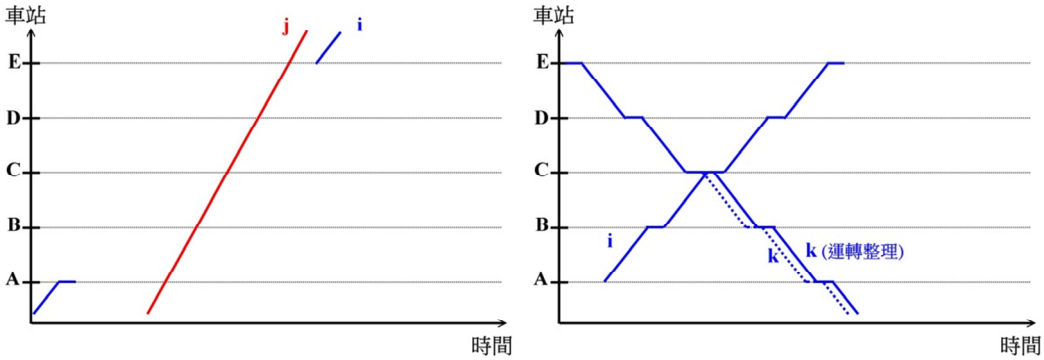

圖 3　(雙單線運轉) (a) 原本軌道運行圖 (b) 對向軌道運行圖

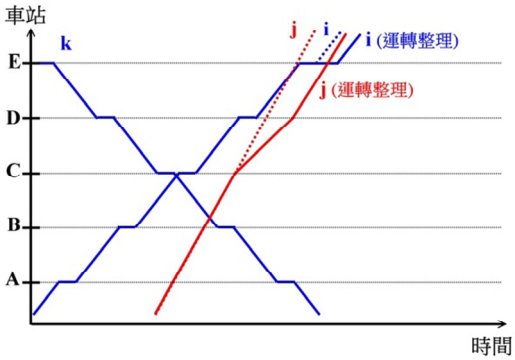

圖 4　城際列車 j 路塞，且區間列車 i 於 E 站待避城際列車 j

3.2 緩急接續

假設區間列車 i、城際列車 j，與 A、B、C、D、E 五座車站，如圖 5 所示，區間列車

停靠這五座車站、城際列車停靠 B 與 D 車站，因營運受到擾動，列車 i 與 j 會在 A 車站與 B 車站之間發生衝突，列車運行圖如圖 6(a)所示。

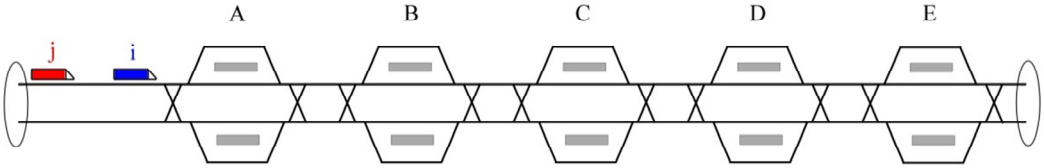

圖 5　範例 2：五座車站軌道配置圖

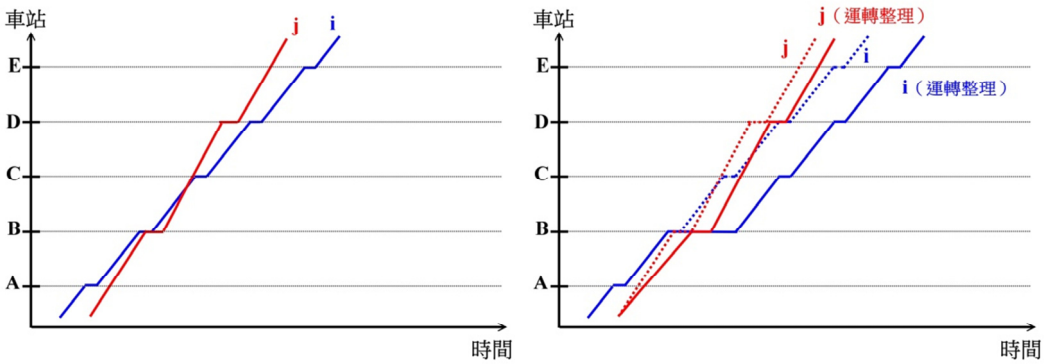

圖 6　(a)列車營運受到擾動產生衝突 (b) 區間列車 i 於 B 站待避城際列車 j

調度員可以選擇在 B 站 (圖 6(b)) 或 D 站 (圖 7(a)) 讓區間列車 i 待避城際列車 j，使區間或城際列車旅客，可轉乘城際或區間列車。然表定區間列車的到站時間，需比城際列車離站時間還要早，才需考量旅客轉乘問題。此外列車不能提早發車，區間列車需等到開車時刻才能出發。因此，運轉整理時列車需在何站待避，會跟時刻表排定的待避車站有所相關。倘若上述範例表定待避車站為 B 站，調度員通常會選擇在 B 站待避城際列車。

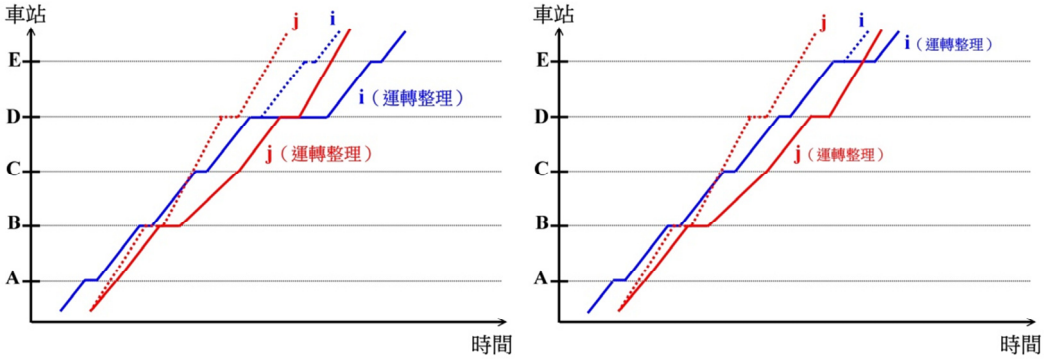

圖 7　(a) 區間列車 i 於 D 站待避城際列車 j (b) 區間列車 i 於 E 站待避城際列車 j

3.3 緩急分離與緩急接續

當一軌道營運業者僅考慮區間列車旅客轉乘城際列車，但沒考慮城際列車旅客轉乘區間列車時，基於最短待避時間會與續行列車通過或停靠該車站有關，待避通過列車所需時間較少，且城際列車停靠車站之待避線可能被其他列車占用，使上述範例選擇更加多元，可以讓區間列車在城際列車停靠站之後車站待避。亦即是讓區間列車 i 於 C 站待避城際列車 j (或在 B 站之後利用雙單線運轉)、或是使區間列車 i 於 E 站待避城際列車 j (如圖 7(b)) (或在 D 站之後利用雙單線運轉)。同理，選擇 B 站到 E 站之間何站待避會跟原始時刻表有關，但當表定待避車站在 D 站之後，選擇在 C 站待避之方案時，可能發生 A 站上車旅客認為可在 D 站轉乘，導致 A 站旅客也無法轉乘城際列車 j，因此採取此方案時必須讓旅客提早知道要搭乘城際列車需在 B 站轉乘。由上述可知，緩急分離與緩急接續不一定是獨立的事件，另一範例為，當區間列車 i 表定於 E 站待避通過的城際列車 j，但是當區間列車延滯時，從表定緩急分離變成運轉整理緩急接續。

無論調度員採取哪一方案皆有缺點：待避會使延滯擴散給區間列車 [15]，雙單線運轉會使延滯傳播給對向列車 [17] 或使旅客轉乘不方便，路塞會使延滯傳播給續行城際列車，因此必須視情況選擇採取何種調度策略。此外，當特定列車因調度員考量旅客轉乘造成延滯後，該特定列車會引發另一轉乘問題 [26]，日本新幹線以設定轉乘延滯等待門檻方式，來處理此類轉乘延滯問題 [27]。不論是在緩急分離或緩急接續的情況，運轉整理延滯取決於號誌安全時距 (以下簡稱時距)，即受限於號誌系統的列車最小運轉時間間隔，而號誌系統目的為維持列車營運安全，避免追撞或相撞。

四、派翠網路與經驗法則

本章利用派翠網路建立調度員的經驗法則，解析調度員如何處理列車衝突，進而降低推擠延滯。

4.1 研究假設

本研究模式之假設說明如下：

1. 列車營運僅受到擾動影響，因此不須考量編組與人力運用的改變。
2. 站間軌道為雙股，且所有軌道為雙向皆可行駛，即為雙單線系統。
3. 列車遵守時刻表排定之停靠站與時刻行駛，即不得有過站不停或提早出發之情形。
4. 列車行經轉轍器反位須減速，可能會增加行駛時間，進而造成延滯。
5. 時刻表有可吸收列車延滯的餘裕，當列車延滯時可利用這些運轉餘裕趕點。

4.2 派翠網路

派翠網路描述事件與條件的關係，其中轉移節點 (transition，以粗直線或方框表示) 表示事件；位置節點 (places，以圓圈表示) 表示條件；其關係以弧 (arc，即連有向結線) 表示；以標記 (marking，以點狀表示) 註記事件，相關定義可參閱文獻 [28]。

從初始標記開始，藉由標記在節點與節點之間不斷轉移的過程直到最終位置節點，則完成整個派翠網路。

4.3 調度員之經驗法則

在緩急分離的情況下，運轉整理的首要目標是盡可能使列車減少延滯。而臺鐵調度員會考量路塞策略，因為採取路塞策略可避免區間列車有過多延滯。臺鐵會因(1)非都會區或都會區離峰時段、(2)都會區通勤尖峰時段而有不同的決策，都會區如基隆至桃園、臺南至屏東，尖峰時段為上午六點到九點，與下午四點到七點：

1. 非都會區或都會區離峰時段：調度員會考量 (a)讓區間列車延滯增加、城際列車趕點 (b)讓區間列車趕點、城際列車延滯增加，看何者有利。當城際列車後續經過單線區間時，調度員不會輕易採用路塞策略，避免單線區間運轉整理之困擾，例如：北迴線之雙線區間下行城際列車延滯增加後，該城際列車進入臺東線單線區間後，會擴大影響其他列車。
2. 都會區通勤尖峰時段：通勤旅客對旅行時間較為敏感，因此臺鐵會讓列車依序行駛，盡量不要讓區間列車辦理待避，藉此以各次列車分攤延滯，避免區間列車有過多延滯。然當區間列車繼續行駛，區間列車與城際列車會有更多延滯時，區間列車即應辦理待避。舉例而言，以圖 2(a)的情況，區間列車在 E 站必須待避，若區間列車在 E 站不待避繼續行駛，區間列車與城際列車會有更多延滯。

在緩急接續的情況下，運轉整理首要是考量旅客轉乘問題，但也必須顧及列車延滯情況，此時也仍會考量都會區尖峰時段或是離峰時段的特性：

1. 離峰時段：除非待避線被其他列車占用，區間列車延滯 6 分鐘內會維持原表定待避車站，此時續行城際列車會延滯約 5 分鐘，臺鐵對於列車準點的定義為延滯 5 分鐘以內，因此城際列車仍維持準點。與緩急分離的情況不同的是，緩急接續情況下不考量城際列車後續是否經過單線區間的情形。
2. 都會區尖峰時段：因此時旅客趕著通勤，因此放寬到區間列車延滯 10 分鐘內會維持原表定待避車站。但當城際列車終點站仍遙遠時，仍維持 6 分鐘為門檻。

當城際列車延滯時，則不需考量旅客轉乘問題，區間列車可行駛至下一站；當城際列車與區間列車皆延滯時，則考量其延滯時間差異，例如：區間列車與城際列車分別延滯 13 分鐘與 10 分鐘，除非會影響其他列車，否則視同區間車延滯 3 分，城際列車無延滯的狀況。

由上述可知，臺鐵調度員的考量與過去文獻最大的不同之處在於：採取路塞策略，讓

區間列車在前一站待避，會增加區間列車延滯與待避等待時間，甚至造成旅客無法轉乘，對於城際列車延滯可利用車站停靠時間，與接續後續運用整備時間趕點。

但對於車站若只有一待避線的情況，為上下行共有。當上下行都有列車皆有待避需求時，調度員會考量整體情況，決定要讓何種列車使用待避線。過去研究常假設待避線為其中一方向所有 [17]。臺鐵在高密度列車運行狀態時，其班距仍會大於 3 分鐘，此 3 分鐘餘裕可供處理對向列車之平面交叉問題，臺鐵於高密度列車情況下待避線仍不為其中一方向所有。

當沒有旅客轉乘需求時，可以考慮使用雙單線運轉的方式。但當開行雙單線運轉可能會影響對向列車，為避免延遲擴大，需評估受影響之對向列車，是否會把延遲傳播給更多之列車。當影響對向列車後延滯不會擴大到其他列車，可考慮雙單線運轉。因此雙單線運轉通常不影響對向城際列車，僅影響對向區間列車，這也是與過去文獻不同之處，部分學者利用犧牲對向列車的方式 [14,15]，但不考慮其後續影響範圍，可能導致對向列車大亂。

當開行雙單線運轉臺鐵多讓區間列車經轉轍器反位使用對向軌道，而非文獻所提以城際列車行駛對向軌道 [14,15,17]，這是因為臺鐵城際列車每經一次轉轍器反位會增加延滯約 1 至 2 分鐘，對城際列車來說並不有利。此外，雙單線運轉並不利於旅客轉乘。

綜上所述，當列車遇到衝突時，需先判斷是否是都會區尖峰時段與考量旅客轉乘需求，若沒有旅客轉乘需求時，尖峰時段盡可能不讓區間列車待避，離峰時段考量是否可以開行雙單線運轉，或是使用待避或路塞策略，各情況考量重點與流程如表 1 與圖 8 所示。以上所述為通則，然實際上仍會有特殊案例 [4]，舉例而言，在高雄地下化之站距較短區間的離峰時段，旅客通常會直接到新左營、高雄或鳳山站搭乘城際列車，因此在高雄地下化區間旅客轉乘，並非離峰時段調度首要考量。

4.4 派翠網路建立

根據文獻回顧，派翠網路可模擬調度員決策，或是模擬軌道進路設定，與本研究分成兩部分探討：模擬調度員決策來進行衝突檢查與解決，以及進路設定。

4.4.1 衝突檢查與解決

臺鐵的車站大致可分類 [1]：

表 1　各種情境調度考量重點

	離峰時段	都會區尖峰時段
緩急分離	視區間與城際列車情況決定使用待避、雙單線運轉或路塞策略	盡量不要讓區間列車待避，以各次列車分攤延滯
緩急接續	區間列車延滯 6 分鐘內維持表定待避車站待避	區間列車延滯 10 分鐘內維持表定待避車站待避（城際列車終點站遙遠為 6 分鐘）

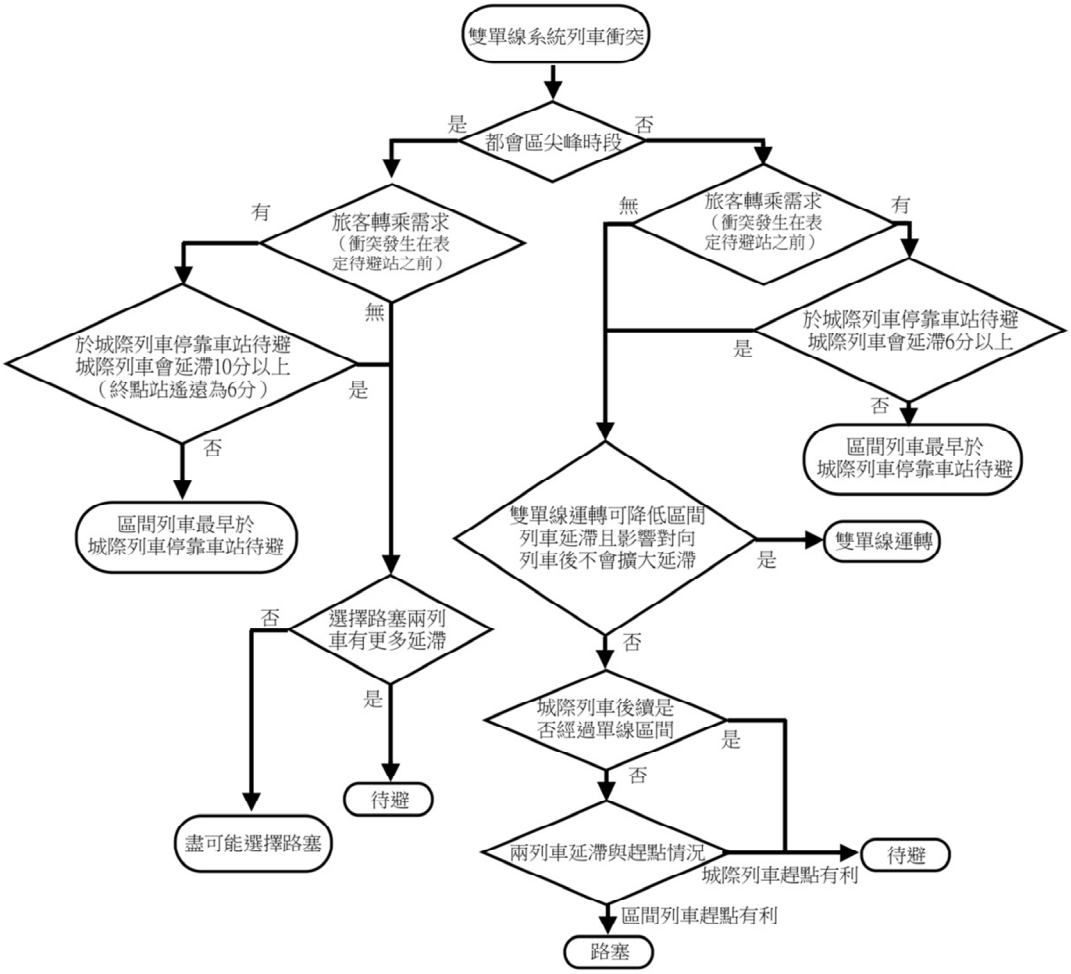

圖 8　本研究整理之經驗調度流程圖

1. 兩島四股道 (第 I 類車站)。
2. 一島一側無平面交叉三股道 (第 II 類車站)。
3. 一島一側有平面交叉三股道 (第 III 類車站)。
4. 兩側兩股道或一島兩股道 (第 IV 類車站)。

其中，只有一待避股道的情況，對於臺鐵而言，為上下行共用，特別是第 III 類車站，有其中一方向辦理待避時，須跨過對向軌道，使用對向軌道待避，與雙單線運轉無關，即便 Xu 等人 [17] 認為是不完全雙單線運轉 (incomplete switchable scheduling rule；In-SSR)，此為站內股道難以定義方向，如第 II 類車站之待避線。對於雙單線運轉，是指在站間使用對向軌道，即 Co-SSR (complete switchable scheduling rule；Co-SSR) [17]。臺鐵對於兩者考量點有所不同，待避為考量上下行整體狀況，雙單線運轉則是為控制對向列車的後續影

響。故本研究之待避就是 In-SSR，雙單線運轉為 Co-SSR，本研究不討論 No-SSR (no switchable scheduling rule；No-SSR) [17] 之簡化情況，也就是假設待避線屬於其中一方向所有。

考量到第Ⅳ類車站無可供待避之軌道，顯然不需考慮第Ⅳ類車站是否需要待避；第Ⅱ、Ⅲ類車站僅供一方向待避，當不同方向之列車皆需要使用待避線時，會導致其中一方向之列車無法待避；因為第Ⅰ類車站之軌道配置可供雙方向之列車待避，因此選擇第Ⅰ類車站，作為是否判定待避之分界點。換句話說，當一列車進入一第Ⅰ類車站，判斷行駛至下一另外第Ⅰ類車站之間是否會發生衝突。因為臺鐵較具規模的車站為兩島四股的形式，因此本研究模型假定城際列車只會停靠第Ⅰ類車站，也就是說，只有在第Ⅰ類車站才會發生旅客轉乘的問題。

根據上一節所述，我們考量是緩急分離還是緩急接續的情況，因為本研究假定城際列車只會停靠第Ⅰ類車站，可以利用下一第Ⅰ類車站的區間列車與城際列車時段，判斷區間列車的待避車站，藉此考量是否有轉乘需求，並同時考量是離峰時段或是都會區尖峰時段：

1. 緩急接續且為離峰時段：區間列車選擇城際列車停靠車站 (或之後車站) 待避，續行列車會延滯 5 分鐘內，則選擇路塞策略，若會超過 5 分鐘，則依緩急分離情況選擇調度策略。
2. 緩急接續且為都會區尖峰時段：與上者不同的地方為續行列車會延滯 5 分鐘內的門檻改為 10 分鐘。
3. 緩急分離且為離峰時段：考量是否可以開行雙單線運轉，須滿足：比待避所需時間還低，且影響對向列車之後不可擴大影響其他列車。若不能開行雙單線運轉，則考慮城際列車與區間列車情況選擇路塞策略或待避車站。
4. 緩急分離且為都會區尖峰時段：除非城際列車與區間列車會有更多延滯，否則選擇路塞策略。

因為路塞策略通常會搭配待避策略，因此我們藉由選擇待避車站的方式達到選擇路塞策略的效果，因此，本研究模型的待避車站選擇包含路塞的情況，這是與其他過往研究模型選擇待避車站的最大不同之處。

也就是說，當會發生衝突時依序考量：

1. 是否繼續行駛至下一個另外的第Ⅰ類車站 (即另一分界點)。
2. 是否可以開行雙單線運轉之方式，來降低區間列車因待避所增加的延滯。
3. 是否有第Ⅱ、Ⅲ類車站可供待避，以降低區間列車在第Ⅰ類車站待避所增加的延滯，若以上皆否，則選擇在此站待避。

當選擇雙單線運轉時，需考量影像對向列車後是否會擴大影響其他車次，且雙單線運轉延滯會比待避低，過往研究者皆假設每一轉轍 (OS) 區間 [4] 皆有橫渡線可轉換至對向軌

4. 站端軌道電路區間或稱轉轍區間，station end track circuit section（OS section）：由出發號誌機起至進站號誌機止之軌道電路區間。[29]

道，但因臺鐵複雜軌道配置，需要尋找是否有可用的橫渡線，倘若有找到可用的橫渡線，則標記兩組橫渡線，第一組用來轉換至對向軌道，第二組用來轉換回原本軌道。

總之，欲進入第Ⅰ類車站時，判斷繼續行駛至下一第Ⅰ類車站是否會與續行列車產生衝突，若選擇讓續行列車路塞 (繼續行駛至下一第Ⅰ類車站) 不利、無法開行雙單線運轉，也無法利用第Ⅱ、Ⅲ類車站待避，則選擇讓區間列車在此站待避。綜合以上所述，有圖 9 說明衝突之解決方案。

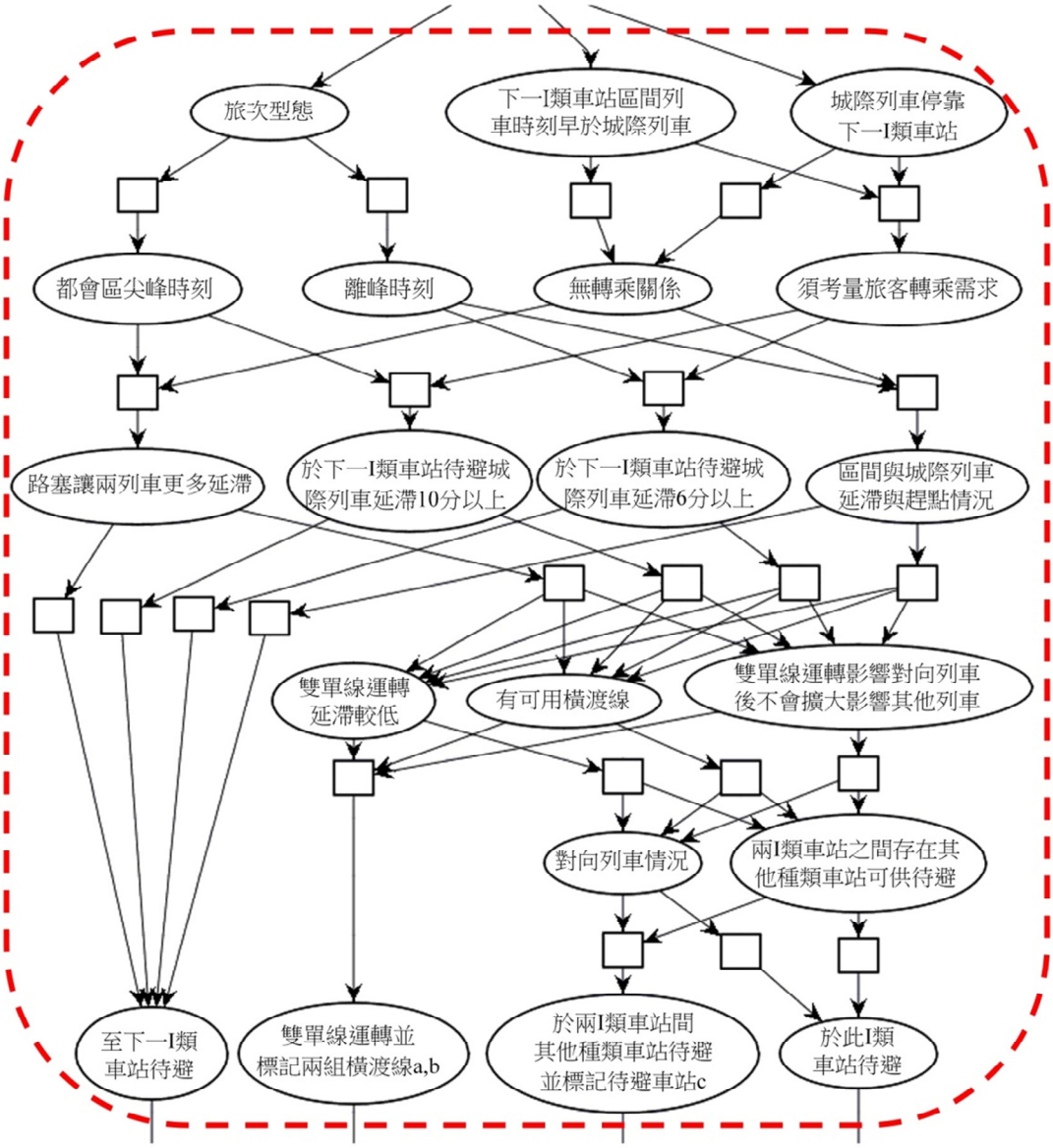

圖 9　運轉整理之派翠網路 (第一部分：選擇衝突解決方案)

4.4.2 進路設定

前述一節為衝突檢查與解決，即判斷待避門檻與選擇調度策略。此節將利用上節之調度邏輯，設定列車進路。

當列車接近車站進入第 2 閉塞區間時，即準備開通車站進路，避免列車遇到注意或險阻號誌降速行駛。控制前方三個號誌進路 [29]，可選擇列車在更早的地方開通進路，給予營運人員或旅客更多準備時間，如列車預定停靠的月臺。因為臺鐵目前是三時相號誌，因此為三個號誌進路，例如開通進站號誌的時機為列車欲進入第 2 閉塞區間內，避免未開通進站號誌，列車欲進入第 1 閉塞區間內時，第 1 閉塞為注意號誌。

對於列車進路設定，地點可分為進站與出發，對於進站之部分，列車在站間軌道可分為原本軌道與對向軌道。

在站間原本軌道欲進站，倘若該站為第 I 類車站，則啟動待避判斷之門檻，解決衝突的方式可如前一節所述，倘若需待避或第一主正線有其他列車占用，則開通待避線進路。若為第 II 、III 類車站，需檢查是否有前一節所述解決衝突之標記，包含待避標記、轉換至對向軌道標記，前者表示需開通待避線進路，後者表示開行雙單線運轉。至於第 IV 類車站，因為沒有待避線可供待避，檢查是否有橫渡線標記即可，選擇開通第一主正線或對向軌道進路。在站間對向軌道欲進站，表示為開行雙單線運轉之情況，因此僅需檢查是否有橫渡線標記，轉換回原本軌道。

對於出發之部分，列車在站內軌道可分為 (原本軌道) 第一主正線、待避線與對向軌道。在站內第一主正線表示不需待避續行列車，僅需檢查是否交會對向列車或是否有橫渡線標記進行雙單線運轉，否則即可出發；對於在站內待避線情況，表示該列車可能有待避的情況，列車通過後，需再檢查待避門檻；在站間對向軌道欲出發，表示為開行雙單線運轉之情況，因此僅需檢查是否有橫渡線標記，轉換回原本軌道，或是等待交會對向列車。跟據以上三者不同情況加以判斷，選擇開通站間原本軌道或是對向軌道。

我們首先檢查衝突並選擇解決方案：待避、路塞、雙單線運轉，藉此利用控制轉轍器與進站出發號誌機來設定列車進路，圖 10 為運轉整理之派翠網路，後續研究可補充其他功能，如跨越數個第 I 類車站雙單線運轉、何謂使續行城際列車路塞之有利或不利情況、考量整體情況選擇讓哪一方向列車使用第 II 、III 類車站待避。

五、改善策略

對於臺鐵未來營運方向，應考量提供更密集之發車以降低班距 [30] 達到其捷運化政策的目標。考量旅客轉乘，應降低未來運用到雙單線運轉的機會，調度員會以待避或路塞策略為主，城際列車常會緊跟在區間列車後面行駛。若考慮改善待避所需要的時間，則可利用進站與出發時距之調整。

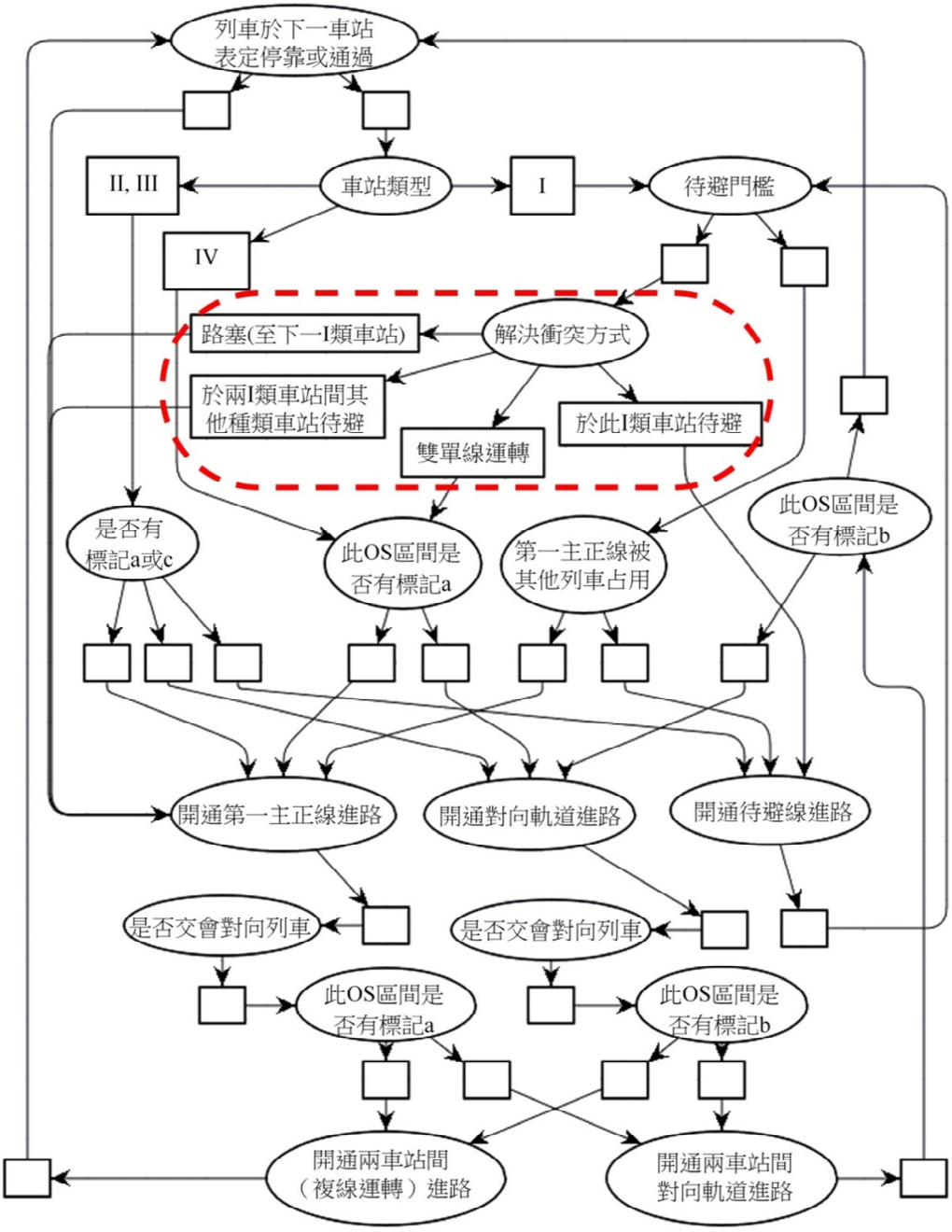

圖 10　運轉整理之派翠網路 (第二部分：設定列車進路)

最小號誌安全時距會發生在起始或抵達車站，因此須考慮股道進站、離站時距 [1]。而本研究發現，臺鐵調度員會選擇讓續行城際列車路塞，直到讓區間列車辦理待避為止，亦透過進站時距來加以調整。而降低進站時距，可減少續行城際列車的延滯增加，也減少了

待避的區間列車延滯增加，因而降低待避時間，即降低待避損失時間。

5.1 現行閉塞區間設計

臺鐵現有號誌系統為三時相號誌，閉塞區間長度約 1.5 公里至 2.5 公里 [1]：

1. 自動閉塞係民國 44 年起陸續建置 [31]，遷就當時列車性能。
2. 站間閉塞區間採用近似等距離分割 [32]，可能降低運行效率。又車站前後 1、2 個閉塞區間對進站出發時距有關鍵性的影響，利用等距離分割方式對進站出發時距較為不利。
3. 多數車站僅有一個進站號誌機：待避時列車需在進站號誌機之前就減速至轉轍器容許速限，如圖 11 所示。且同(2)所述，車站前後有較長的閉塞區間 (特別是 OS 區間)，對進站時距較為不利。同理，多數車站僅有一個出發號誌機，對出發時距較為不利。
4. 因為閉塞區間較長，待避時列車需在第 1 閉塞號誌機前降速到注意容許速限，即 60 公里每小時 [1]，如圖 11 所示。
5. 部分車站因前方有平交道，為避免列車進站平交道即開始作用，造成用路人等候過久的情形，出發號誌機會與平交道連鎖，待列車出發再開通號誌，出發險阻時 (開通第一主正線進路) 進站號誌為注意 [29]，列車進站需在進站號誌機前降速至注意號誌速限，如圖 12 所示。

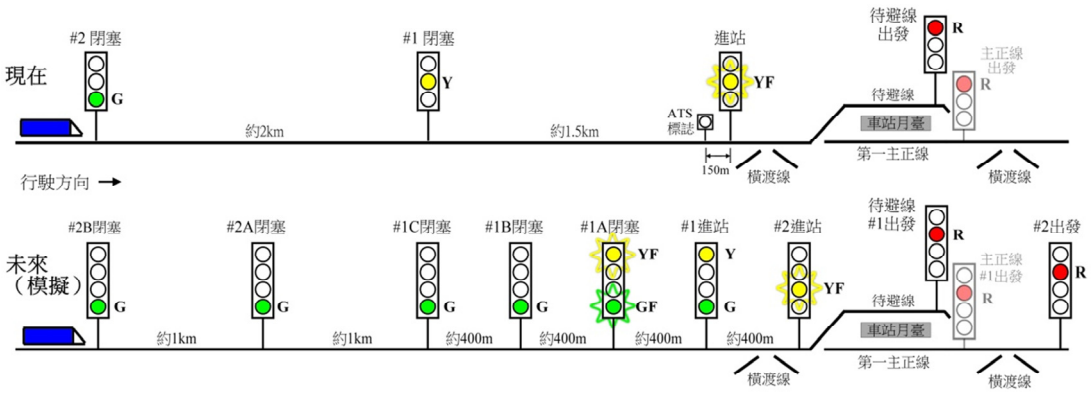

圖 11　縮短瓶頸路段閉塞區間示意圖，以區間列車進入待避線辦理待避為例

5.2 縮短閉塞區間長度

對於臺鐵閉塞區間相關議題，過往研究多集中在改為移動閉塞 [20,21]，少有探討臺鐵號誌時相升級的相關研究，將號誌升級為移動式閉塞可以達到最大效果，不過：

1. 從四時相 (固定式閉塞) 升級到移動式閉塞所增加的容量，比起從三時相升級到四時相所提升之容量減少許多 [33]。
2. 以三時相顯示為主體，僅在需要設置更短閉塞區間的地方，追加多時相的顯示方式 [34]，

即混合時相設計，可降低號誌機相關費用。

3. 不少營運業者將固定式閉塞作為移動式閉塞的備援系統，當有這些備援系統，會減少採用車載號誌節省的號誌維護費用效益 [35]。

由上述可知，多時相固定式閉塞區間提供另外一個升級號誌選項。而過往研究較少針對車站內閉塞區間分割作探討 (如 OS 區間) [20,21]，但這些閉塞區間分割方式對於時距會有關鍵性影響，如日本中央快速線，有時一個車站就有四個道旁進站號誌機 [36]。

臺鐵列車目前的最大安全煞車距離約 850 公尺至 1100 公尺 [29]，加上 100 公尺安全緩衝距離 [32]，約為 950 至 1200 公尺，採用四時相號誌，單一閉塞區間最短長度約為 475 至 600 公尺，採用五時相號誌，單一閉塞區間最短長度約為 320 至 400 公尺，考慮電車線換線區間與橫渡線區間長度，五時相較為合適。也就是說，須採用五時相號誌 (但離車站較遠的閉塞區間採用四時相之混和時相設計)，以新增第二個進站號誌，藉此分割 OS 區間，進而縮短進站時距。

因此，我們嘗試以臺鐵號誌從現有的三時相號誌升級成為五時相號誌為例。觀察其他鐵路機構之五時相號誌，如京濱急行電鐵 [37]，分別為：平安 (G)、抑速 (YF/GF)、減速 (YG)、注意 (Y)、險阻 (R)，可增加抑速號誌 (limited speed) 與減速號誌 (reduced speed) 至臺鐵現有的系統：

1. 因為號誌時相從三時相改為五時相，閉塞區間最小距離可約為 320 至 400 公尺。
2. 站間採用不等距離分割，越接近車站的閉塞區間距離約略等於最小安全煞車距離，可將較長的閉塞區間設置在離車站較遠的地方，維持運轉效率 [38]，如圖 11 所示，對於站間距離較短之區間也可比照辦理。在沒有待避線的車站且兩車站間距離較短時，可以評估兩種建置號誌方案，如圖 13 所示，當出發離站的閉塞區間較長時 (方案 B)，倘若前面車站有列車尚未離站，比起站間閉塞區間等分時 (方案 A)，列車以較高速號誌行駛的距離較長，如圖 13(a)所示；續行列車於站間時，此時先行列車離開車站，方案 B 有較大的可能性可以即時更新號誌，如圖 13(b)所示。對於雙單線運轉的情況，另一方向的號誌機設置會是相反的，即兩方向號誌機不會在同一地點。
3. 車站設置多個進站號誌機：對於臺鐵而言，可加以改良新增第二個進站號誌機，置於橫渡線與連接待避線轉轍器中間，除可降低進站時距，待避時列車僅需在要轉換至待避線之轉轍器之前減速即可，不需在橫渡線之前就減速，如圖 11 所示。同理，也可設置第二出發號誌機。
4. 設置第 2 進站號誌機後，為維持閉塞區間長度，可能需要將第 1 進站號誌機向站外略為移動；此外，因臺鐵已將 Automatic Train Stop (ATS，自動列車停止裝置) 升級為 Automatic Train Protection (ATP，列車自動保護系統)，但考量斷電封鎖需求仍保留 ATS 標誌，我們利用第 1 進站號誌機取代原本 ATS 標誌。換句話說，第 1 進站號誌機防護區間為電車線換線區間與橫渡線，第 2 進站號誌機防護區間為站內股道與連接站內股道之轉轍器，藉此降低閉塞區間長度。此時，待避時列車在第 1 進站號誌機前降速到注意或減速號誌容許速限即可，大幅縮短區間列車站間運行時間，如圖 11 所示。

5. 縮短閉塞區間後，增設第 2 出發號誌機，當車站前方平交道距離車站有一定距離時 (如不在 OS 區間內)，可將第 2 出發號誌機與平交道連鎖，列車可以較高速進站，如圖 12 所示。

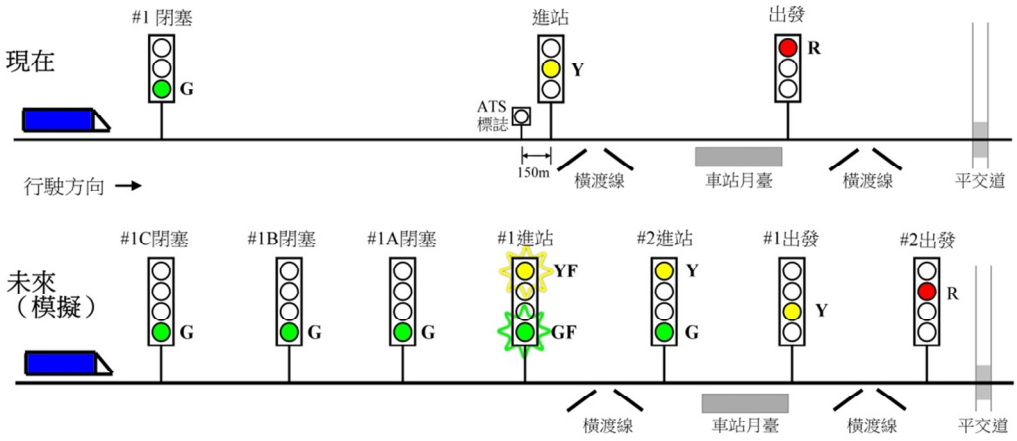

圖 12　對於前方有平交道之車站，停靠列車進站時相關號誌顯示情況

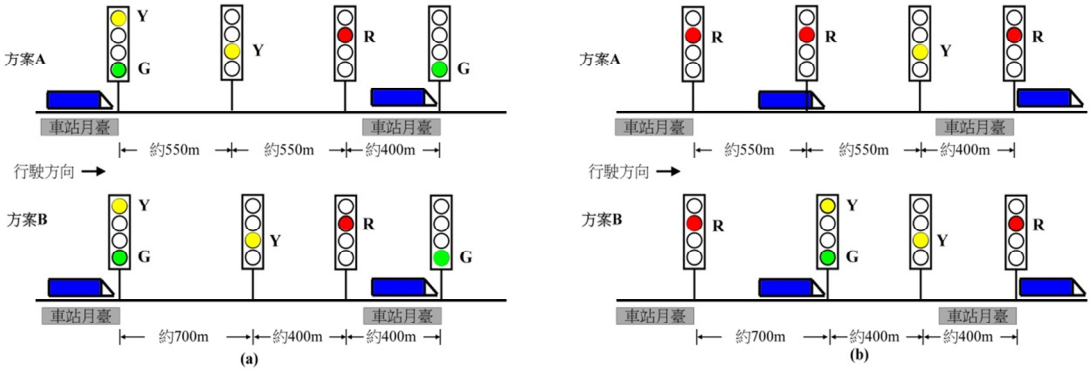

圖 13 縮短站間距離較短路段閉塞區間示意圖 (a) 續行列車欲出發但先行列車仍停靠前方車站 (b) 續行列車行駛於站間時先行列車離開前方車站 (圖中僅顯示其中一方向號誌機)

除此之外，抑速或減速號誌可配合高號數轉轍器之速限，以利引進高號數轉轍器，使軌道配置更加靈活。過去因工程用地與經費因素，無法興建兩島四股道之車站，但有待避需求時，可考慮採用三股道之設置，旁邊兩股道之東西正線臨月臺，但在東西兩正線中間之股道設計為採用高號數轉轍器不臨月臺之主正線，供城際列車追越或是貨物列車待避使用，如圖 14(a)所示；或是為避免折返列車產生平面交叉時，且兼顧列車待避需求以避免折

返列車占用股道導致無法待避，其軌道配置如圖 14(b)所示，(供列車通過) 主正線採用高號數轉轍器，中間 2 股道為折返線。

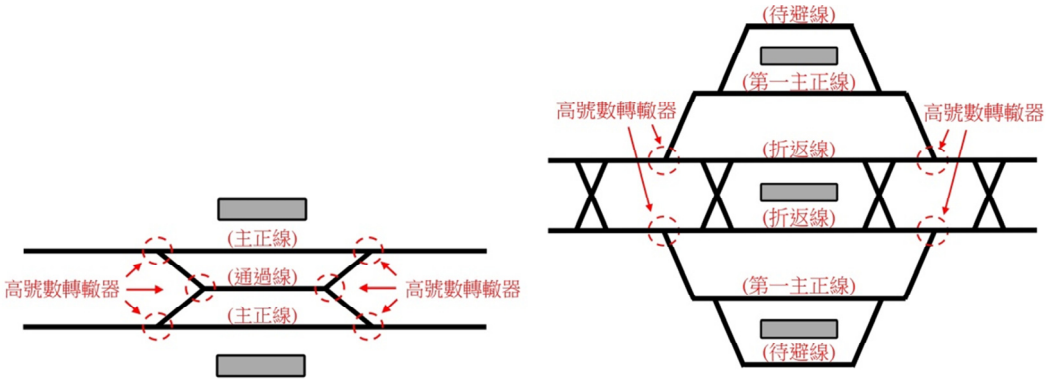

圖 14　(a)帶有一股 (不臨月臺) 通過線車站 (b) 六股道車站 (含折返與待避線)

綜上所述，為了縮短進站與出發時距，將臺鐵現有三時相號誌改為五時相號誌 (進行、抑速、減速、注意、險阻)，特別是縮短車站前後閉塞區間之長度，以提升軌道最大容量，降低進站與出發時距，降低進站經轉轍器反位延滯，與提高前方有平交道車站之停靠列車進站速率。

六、情境模擬

為比較臺鐵縮短閉塞區間前後之差異，並利用數值分析進行模擬。本研究的模擬範圍為臺南到屏東，軌道配置繪出第一主正線與待避線，其軌道配置如圖 15 所示。

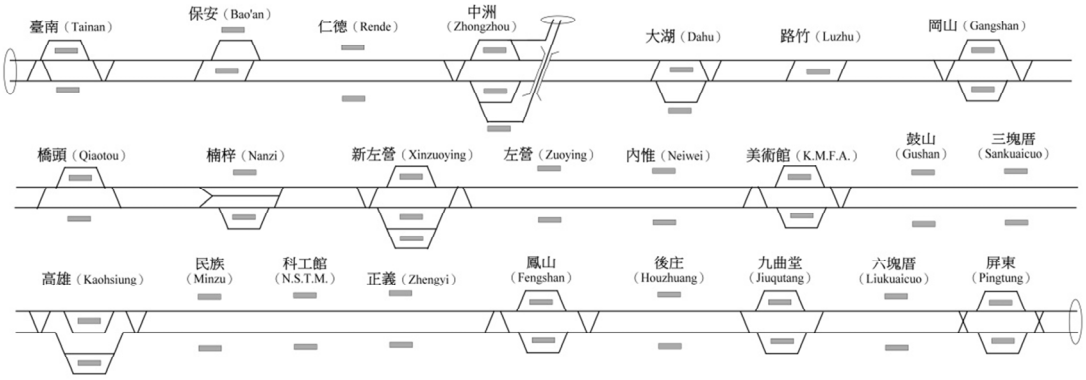

圖 15　臺南到屏東軌道配置

本研究設定城際列車於高雄站需停靠至少 1 分 30 秒，於新左營站需停靠至少 1 分鐘，其餘車站須停滿 30 秒方可出發；區間列車於高雄、新左營兩站列車需停靠至少 1 分鐘，其餘車站須停滿 30 秒方可出發。

進站出發時距 (最小待避時間) 會與續行城際列車通過或停靠該站有關，為保留排時刻表的彈性，計算軌道容量時以城際列車停靠車站計算 [1]，但本研究討論的是運轉整理問題，因此需要分開計算，即時距會隨著城際列車通過或停靠該站而有所不同。

針對站內停靠不同軌道之同向列車進站號誌安全時距，可分成兩種情況：

1. 前方區間列車開通待避線進路，後方城際列車開通第一主正線進路，此為區間列車待避城際列車之情況。
2. 前方區間列車開通第一主正線進路，後方城際列車開通待避線進路，此為選擇讓城際列車路塞之情況。

需注意的是，以上情況兩列車進站時距不同，因列車經轉轍器反位需要更多時間，本研究所稱進站時距為前者，後者以「進站時距」加上「經轉轍器反位延滯」來計算。在沒有路塞情況下，經轉轍器反位延滯會增加運轉時間，但時距不會增加運轉時間，兩者有所不同。

雖然停靠同一軌道會比停靠不同軌道之同向列車進站號誌安全時距還要長，因此過往文獻採取交互使用月臺的方式[1]。但是考慮經轉轍器反位的延滯，對於停靠時間短與通過列車，採取交互使用月臺方式並不有利，因此，對於通過列車，即便是路塞狀況，在本研究中並不會使用待避線，僅會開通第一主正線進路。

針對站內停靠不同軌道之同向列車進站號誌安全時距，以沒有路塞情況時來估計，雖然路塞時其時距可能縮短，但遇到 ATP 無法更新號誌 (受限於感應器位置) 的情況，反而可能較沒有路塞情況有更長時距。列車出發時距則是城際列車通過或出發後，待避之區間列車出發號誌由險阻轉為注意的時間，此時距已考量 (城際) 列車出發時，為顧及旅客舒適度與安全顧慮，列車不會以最高加速率啟動的現象 [39]。

參考臺鐵未來營運方向設計列車快慢比 [30]，針對臺鐵不同時刻表訂定的方式，本研究設計六種情境：

1. 班距為 10 分鐘 (列車快慢比為 1:2)，一小時內有 6 班列車。
2. 班距為 7 分 30 秒 (列車快慢比為 1:3)，一小時內有 8 班列車。
3. 班距為 6 分鐘 (列車快慢比為 2:3)，一小時內有 10 班列車。
4. 距為 5 分鐘 (列車快慢比為 1:2)，一小時內有 12 班列車。
5. 臺鐵的城際列車運行模式會有不同運轉模式 [2]，包含停靠車站，前述情境 (一到四) 之城際列車停靠臺南、岡山、新左營、高雄、鳳山、九曲堂、屏東，但部分列車僅停靠臺南、新左營、高雄、鳳山、屏東。此外，亦減少站內停靠時間 (如高雄車站停靠 4 分鐘減少為 2 分鐘)，以反映區間列車與城際列車行駛時間差距更大的情況，如圖 16 所示。

6. 臺鐵之城際列車不僅有推拉式自強號 (牽引種別：pp 速[5])，也包含普悠瑪或太魯閣自強號 (牽引種別：temu 速[6])，觀察改變城際列車牽引種別的結果。此外，此情境之城際列車僅停靠臺南、高雄、屏東。

因臺鐵調度員於列車在高密度狀態下 (如都會區通勤尖峰時段) 時，鮮少考慮雙單線運轉策略，因此本研究情境模擬的情境二到四不考慮雙單線運轉策略。

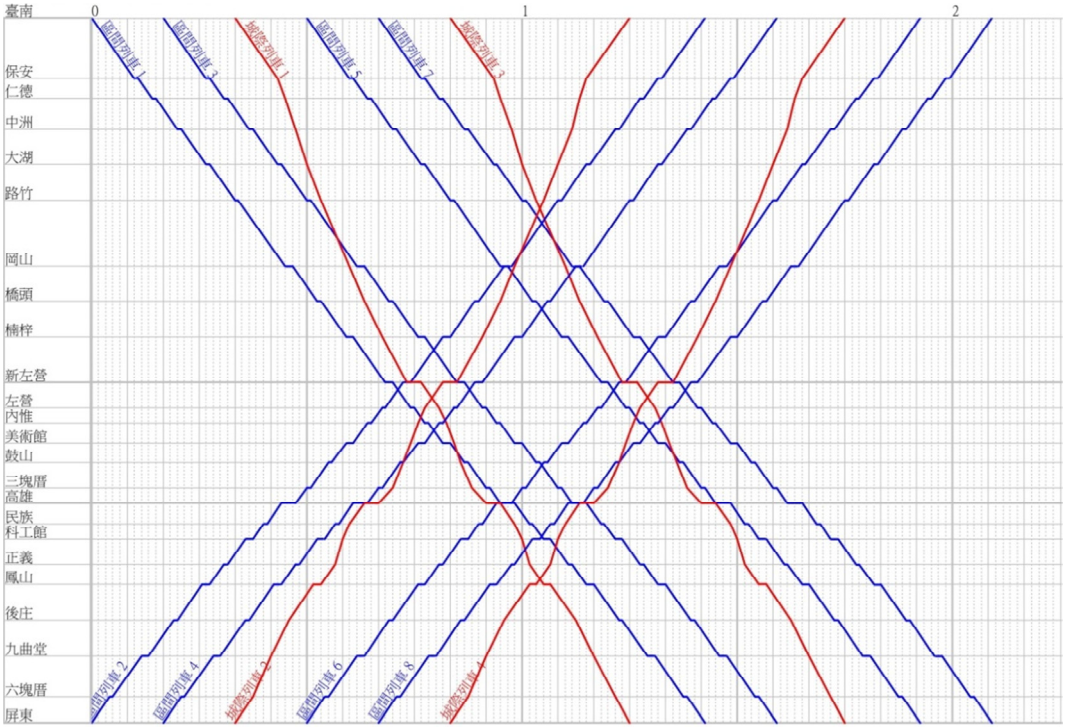

圖 16　原始 (帶有衝突之雙向軌道) 列車運行圖 (繪圖軟體：Oudia 並經修改)

6.1 現行閉塞區間設計

在改善閉塞區間之前的營運條件如下：

1. 進站時距為3分鐘。
2. 通過列車出發時距為1分30秒，停靠列車出發時距為2分30秒。
3. 列車進站若停靠臨待避線之月臺，其經轉轍器反位會有1分30秒延滯 (車站出發號誌未與平交道連鎖) 或1分鐘 (車站出發號誌與平交道連鎖)。這是因為現行臺鐵號誌系統，在開通轉轍器反位的前一個閉塞區間，列車需降速行駛，因此進站經轉轍器反位會有較多

5. Push–pull.
6. Tilting Electric Multiple Unit.

延滯。

4. 停靠列車出站經轉轍器會有 1 分鐘延滯 [7]。
5. 僅考慮站內趕點，不考慮站間趕點。主要是因為列車老舊性能不如預期、司機駕駛習慣、路線施工需要速限慢行，導致實際站間趕點效果可能不佳。

情境五模擬運行圖結果如圖 17 與圖 18 所示，六種不同模擬情境的延滯結果比較如表 2 所示，包含列車到達終點站延滯總和 (可因餘裕站內趕點)，與單一列車因衝突所導致站間最大延滯 (包含餘裕與多次衝突) ；不同衝突類型 (緩急接續、緩急分離) 所造成的延滯如表 3 所示，僅考慮單一列車在單一衝突下延滯 (不包含後續趕點)。

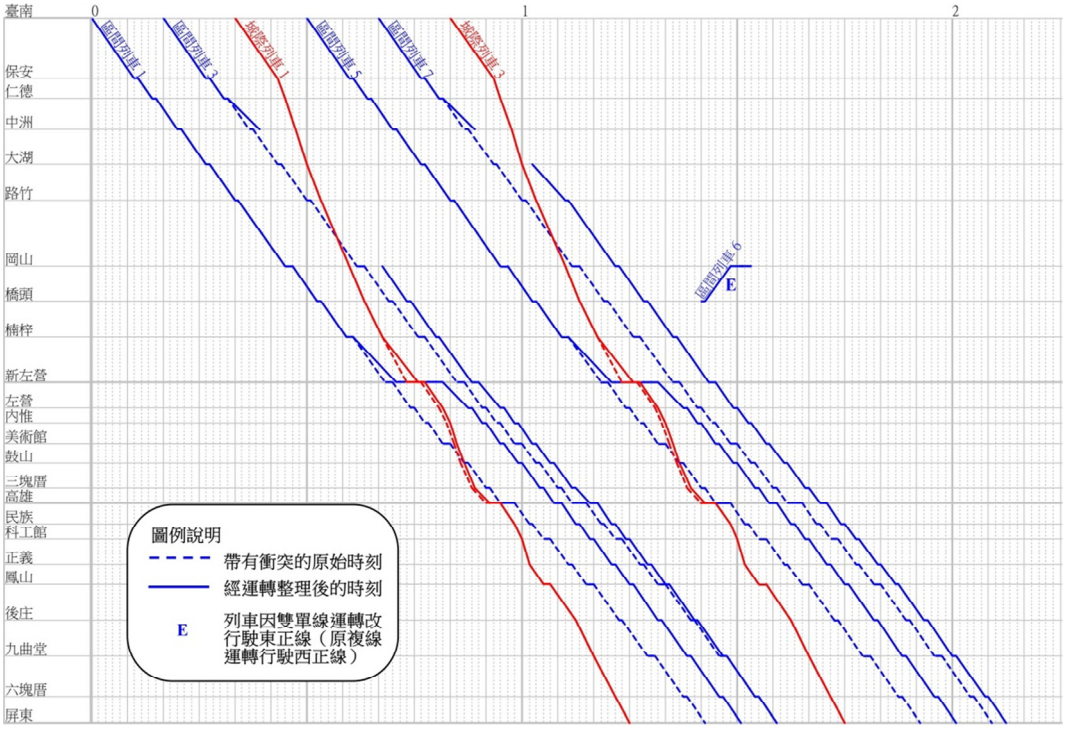

圖 17　現行閉塞區間設計之東正線列車運行圖 (複線運轉供南下列車使用)

6.2 縮短閉塞區間長度

當縮短閉塞區間長度後，如第 5 節所述改善策略之方式：

1. 進站時距為 1 分 30 秒。

7. 依調度經驗，列車出發經轉轍器反位，#12 號轉轍器 (緩速) 會使列車延滯 1 分鐘；#16 號轉轍器 (中速) 列車未有明顯延滯，因臺南到屏東待避線之轉轍器大部分為#12 號轉轍器，因此列車延滯以 1 分鐘來計算。

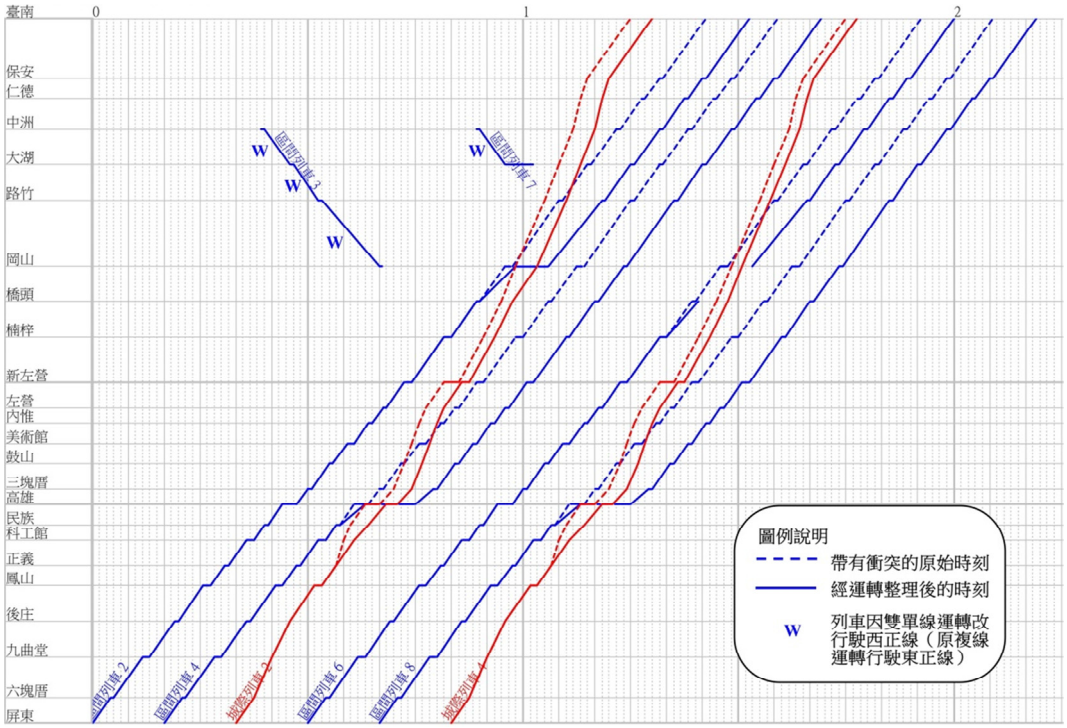

圖 18　現行閉塞區間設計之西正線列車運行圖 (複線運轉供北上列車使用)

2. 通過列車出發時距為 1 分鐘，停靠列車出發時距為 1 分 30 秒。
3. 列車進站若停靠臨待避線之月臺 (不使用橫渡線情況)，其經轉轍器反位會有 30 秒 (車站出發號誌未與平交道連鎖) 或本研究忽略不計此少許延滯 (車站出發號誌與平交道連鎖)。這是因為比起現行閉塞區間設計，需降速之前一閉塞區間距離大幅降低。
4. 列車進站若使用橫渡線轉換至對向軌道，其經轉轍器反位會有 1 分鐘 (車站出發號誌未與平交道連鎖) 或 30 秒延滯 (車站出發號誌與平交道連鎖)。這是因列車需在第 1 進站號誌機前，降速至轉轍器速限。
5. 停靠列車出站經轉轍器會有 1 分鐘延滯，因司機會以較低的加速率啟動列車，因此其出發延滯與閉塞區間長度關係較不明顯，與轉轍器號數較為明顯。
6. 站間趕點僅考慮提高前方有平交道車站之停靠列車進站速率，可趕點 30 秒 (第 2 出發號誌機與平交道連鎖) 或忽略不計 (第 1 出發號誌機與平交道連鎖，如平交道位於第 1 與第 2 出發號誌機之間)。

其他則與現行閉塞區間設計相同，情境五模擬運行圖結果如圖 19 與圖 20 所示，六種不同模擬情境的延滯結果比較如表 2 所示，包含列車到達終點站延滯總和 (可因餘裕趕點)，與單一列車因衝突所導致站間最大延滯 (包含餘裕與多次衝突) ；不同衝突類型 (緩急接續、緩急分離) 所造成的延滯如表 3 所示，僅考慮單一列車在單一衝突下延滯 (不包含後續趕點)。

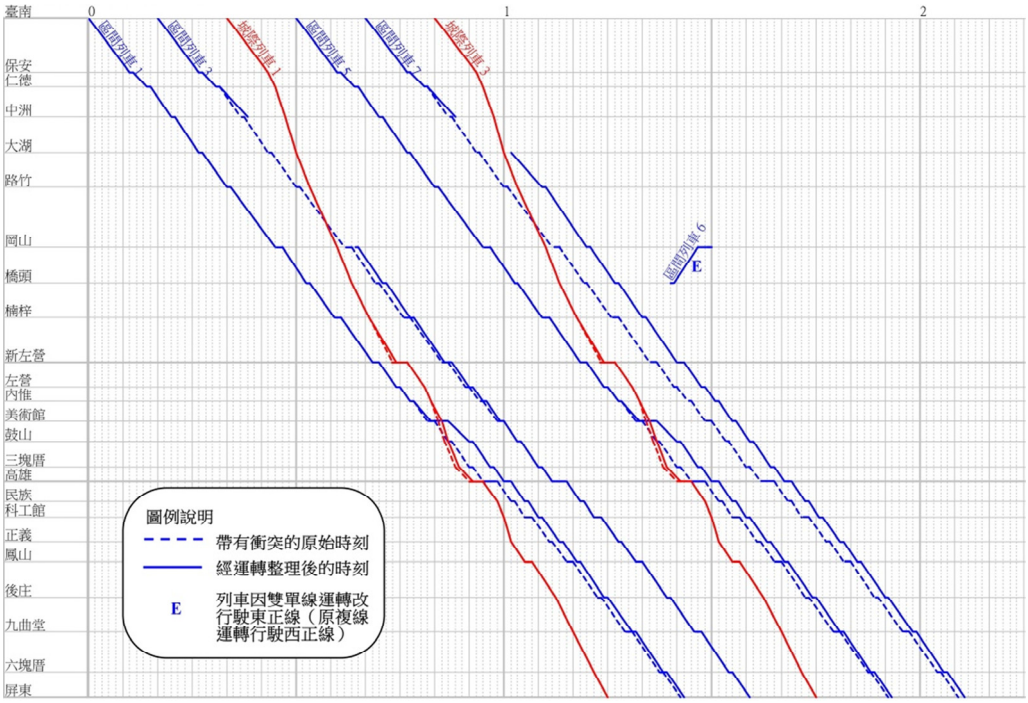

圖 19　縮短閉塞區間長度之東正線列車運行圖 (複線運轉供南下列車使用)

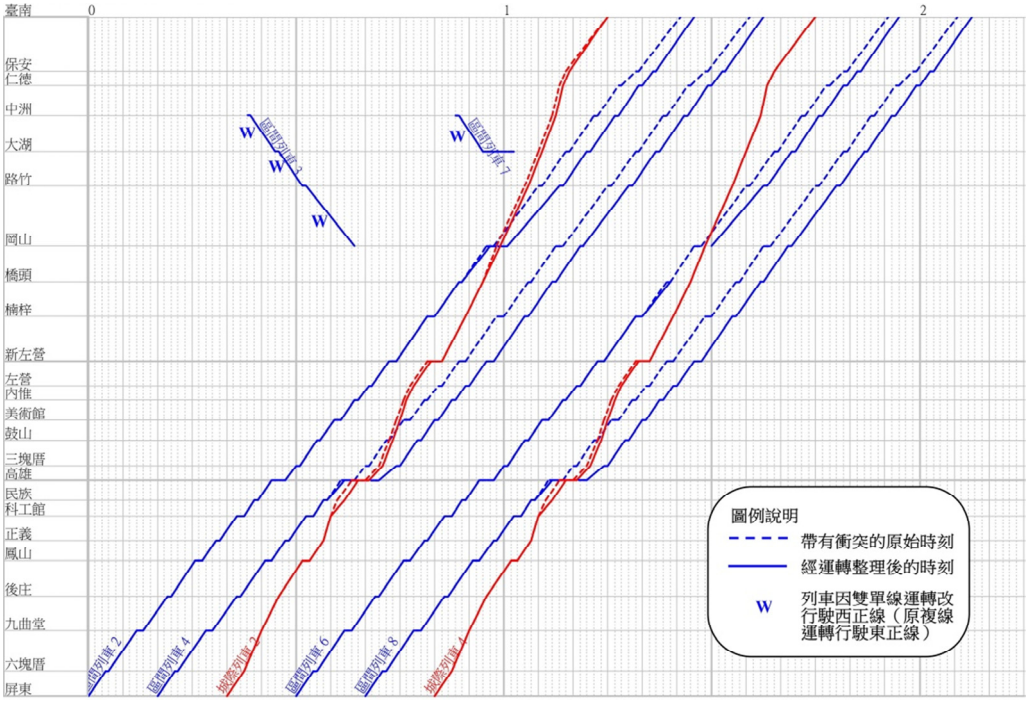

圖 20　縮短閉塞區間長度之西正線列車運行圖 (複線運轉供北上列車使用)

表 2　模擬分析縮短閉塞區間長度列車延滯比較

	所有區間列車到終點站延滯	所有城際列車到終點站延滯	單一區間列車站間最大延滯	單一城際列車站間最大延滯
情境一				
現行閉塞區間設計	25 分鐘	14 分鐘	7 分 30 秒	5 分鐘
縮短閉塞區間長度	7 分鐘	2 分鐘	3 分 30 秒	2 分 30 秒
情境二				
現行閉塞區間設計	38 分鐘	8 分鐘	8 分鐘	2 分 30 秒
縮短閉塞區間長度	10 分鐘	2 分鐘	5 分 30 秒	2 分 30 秒
情境三				
現行閉塞區間設計	1 小時 32 分鐘	20 分鐘	14 分鐘	8 分 30 秒
縮短閉塞區間長度	27 分鐘	4 分鐘	5 分 30 秒	3 分鐘
情境四				
現行閉塞區間設計	1 小時 47 分 30 秒	23 分鐘	13 分鐘	7 分鐘
縮短閉塞區間長度	14 分鐘	10 分鐘	4 分鐘	2 分 30 秒
情境五				
現行閉塞區間設計	34 分 30 秒	4 分 30 秒	8 分鐘	3 分鐘
縮短閉塞區間長度	9 分 30 秒	無延滯	5 分 30 秒	1 分 30 秒
情境六				
現行閉塞區間設計	28 分鐘	無延滯	7 分 30 秒	30 秒
縮短閉塞區間長度	5 分 30 秒	3 分鐘	7 分鐘	2 分鐘
情境一至六總結				
現行閉塞區間設計	5 小時 25 分鐘	1 小時 9 分 30 秒	14 分鐘	8 分 30 秒
縮短閉塞區間長度	1 小時 13 分鐘	21 分鐘	7 分鐘	3 分鐘
縮短閉塞區間改善幅度百分比	76.2%		50.0%	

從模擬結果來看，縮短閉塞區間可降低列車推擠延滯 (表 2)，其中又以改善緩急接續類型衝突較緩急分離類型衝突之推擠延滯明顯 (表 3)。

6.3 討論

在緩急分離的情況下，如模擬情境六，因為中洲到岡山站之間沒有待避線，又因城際列車不停靠這區間內之車站，使得區間列車與城際列車行駛時間差異極大，調度員難以選

表 3　模擬分析縮短閉塞區間長度列車不同類型衝突延滯比較

	緩急分離類型衝突		緩急接續類型衝突	
	單一區間列車因某一衝突增加最大之延滯	單一城際列車因某一衝突增加最大之延滯	單一區間列車因某一衝突增加最大之延滯	單一城際列車因某一衝突增加最大之延滯
情境一				
現行閉塞區間設計	1 分鐘	3 分 30 秒	7 分 30 秒	5 分鐘
縮短閉塞區間長度	1 分鐘	1 分鐘	4 分鐘	2 分 30 秒
情境二				
現行閉塞區間設計	6 分 30 秒	2 分 30 秒	8 分鐘	2 分 30 秒
縮短閉塞區間長度	5 分 30 秒	1 分 30 秒	-	-
情境三				
現行閉塞區間設計	6 分 30 秒	2 分鐘	8 分鐘	8 分 30 秒
縮短閉塞區間長度	4 分鐘	1 分鐘	5 分鐘	3 分鐘
情境四				
現行閉塞區間設計	7 分鐘	30 秒	8 分鐘	7 分鐘
縮短閉塞區間長度	3 分 30 秒	1 分 30 秒	4 分鐘	2 分 30 秒
情境五				
現行閉塞區間設計	6 分鐘	1 分 30 秒	8 分鐘	3 分鐘
縮短閉塞區間長度	5 分 30 秒	30 秒	5 分鐘	1 分鐘
情境六				
現行閉塞區間設計	7 分 30 秒	30 秒	-	-
縮短閉塞區間長度	7 分鐘	2 分鐘	-	-
情境一至六總結				
現行閉塞區間設計	7 分 30 秒	3 分 30 秒	8 分鐘	8 分 30 秒
縮短閉塞區間長度	7 分鐘	2 分鐘	5 分鐘	3 分鐘
縮短閉塞區間改善幅度百分比	6.7%	42.9%	37.5%	64.7%

擇路塞策略，在沒有合適待避線情況下縮短閉塞區間長度效果有限，當有合適待避線或通過線可提升縮短閉塞區間長度效益。此外，部份情況下縮短閉塞區間後，調度員可適時採取路塞策略，使區間列車行駛至較前方車站待避，雖會微幅增加城際列車延滯，但可降低區間列車延滯。

在緩急接續的情況下，方便旅客從區間列車轉乘城際列車，當衝突點在此站之前時，

調度員便會考慮讓城際列車路塞。其待避等待時間至少為進站時距、城際列車停靠時間、出發時距之總合約 6 至 7 分鐘，較緩急分離所需待避時間 (約 4 分鐘) 長；當縮短閉塞區間長度後，緩急接續區間列車待避時間可降低至 4 分鐘，改善效益顯著。在城際列車停靠車站已為兩島四股的情況下，除非城際列車停靠車站待避線被占用 (如折返列車整備)，增設待避線對緩急接續的情況效益較低，需利用縮短閉塞區間長度的方式才能有所效益，因為調度員會盡量讓區間列車在城際列車停靠之車站待避，讓旅客得以轉乘。

綜合以上所述，縮短閉塞區間長度對緩急接續會有極大幫助，對於緩急分離需車站有配置待避線或搭配增設待避線方能有較大之效益，但增設待避線對緩急接續情況效益較低。換句話說，當增設待避線時，應優先考慮城際列車不停靠之車站 (緩急分離) 區間；另一方面，難以設置待避線的區間，可考慮採用路塞排點，抑或是降低區間列車行駛時間，藉此降低城際列車與區間列車速差，以利調度員選擇路塞策略。對於不同衝突類型改善建議，如表 4 所示。

表 4　對於不同衝突類型改善建議

	緩急接續	緩急分離
改善方案建議	縮短閉塞區間、城際列車降速	縮短閉塞區間、增設待避線

七、結論與建議

因旅客對於待避之等待時間忍受程度有限，臺鐵靜態排點會超過實用容量，雖然可以降低待避時間，卻因為運轉餘裕較低，因此付出延滯容易擴散的代價。本研究根據列車衝突加以分類考量：緩急分離 (區間列車待避通過城際列車) 與緩急接續 (區間列車待避停靠城際列車)，而緩急接續會衍生出旅客轉乘需求。我們分析臺鐵對於此兩種衝突的調度考量與決策，接著分析縮短閉塞區間，對於上述兩種衝突的延滯傳播情況的改善，與其他改善設備項目的關聯性。

7.1 結論

在緩急分離的情況下，運轉整理時，過去文獻辦理待避的原則是不讓續行城際列車降速。但對臺鐵而言：(a)都會區尖峰時段盡量不要讓區間列車待避，讓各列車分攤延滯，(b)非都會區或離峰時段考量區間列車與城際列車趕點與增加延滯的情況，選擇待避車站，皆可能造成續行列車路塞。經本研究模擬結果顯示，在緩急分離的情況下，需注意是否有合適待避線或通過線，以避免降低縮短閉塞區間長度效益。

過去文獻較少考慮緩急接續的情況，在緩急接續的情況下，運轉整理因需要考量旅客轉乘需求，調度員需適時選擇讓城際列車路塞。經本研究模擬結果顯示，在緩急接續的情

況下，縮短閉塞區間所改善推擠延滯的情況，會較緩急分離情境有更顯著的改善。

因此，建議臺鐵升級號誌，如將三時相改為五時相，或將固定式閉塞區間改為移動式閉塞區間，以縮短閉塞區間。縮短閉塞區間可降低進站經轉轍器反位延滯、進站時距、出發時距，與提高前方有平交道車站之停靠列車進站速率。

7.2 建議

根據調度員紀錄的城際列車延滯原因，以旅客為主因 [40]，但根據列車司機紀錄的城際列車延滯原因，卻是以路塞為主因 [41]，加上本研究相關內容，推測實際原因如下兩者：第一，調度員會因區間列車旅客轉乘需求選擇讓城際列車路塞，因此後續研究可考慮納入旅客感受與轉乘需求。第二，避免列車經轉轍器反位增延，未待避列車應停靠第一主正線，導致旅客集中在同一月臺側候車；或是調度員選擇交互使用月台，續行列車經轉轍器反位而有較多延滯。綜上所述，旅客轉乘需求、與經轉轍器反位耗時皆可能為臺鐵延滯風險較高之因子。

此外亦可以探討列車加減速、司機駕駛習慣 [8] 對於列車在路塞時的時距之影響。本研究對於未來鐵路營運者可以改善之議題建議如下：

1. 研議改進 ATP 感應器佈設位置或傳輸媒介 (如日本阪急電鐵利用軌道電路將道旁號誌資訊傳送給車上 ATS [42])，避免列車路塞時，因車載 ATP 未能及時更新號誌而增加延滯。
2. 可於列車進路建立前 30 秒提示運轉人員號誌即將建立，運轉人員可鈴響並關門，待號誌建立後列車可立即出發，降低區間列車待避時間。
3. 在稍具規模車站可增設月臺監視系統，並即時傳輸給調度所，使值班調度員可掌握城際列車上下車人潮，確實預估列車停靠時間。
4. 傳達即時之轉乘資訊給旅客，並研擬旅客錯失轉乘之補償機制。
5. 目前臺鐵調度所現有電腦自動進路設定無法實現路塞策略 [29]，未來相關單位也可加以優化。
6. 除升級號誌，釐清列車經緩速轉轍器反位耗時原因 (如司機以較低加速度啟動)，可評估待避線是否更換號數較大的轉轍器 (如中速)，避免列車經轉轍器反位有過多延滯。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所，**2019 年臺灣鐵道容量手冊**，民國 109 年。
2. 交通部運輸研究所，**臺鐵車輛排程最適化之研究**，民國 95 年。
3. 交通部運輸研究所，**鐵路列車自動化排點系統功能擴充與推廣應用**，民國 104 年。
4. Borndörfer R, Klug T, Lamorgese L, et al., “Recent Success Stories on Integrated

Optimization of Railway Systems", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.74, 2017, pp.196-211.

5. Cacchiani V, Huisman D, Kidd M, et al., "An Overview of Recovery Models and Algorithms for Real-Time Railway Rescheduling", *Transportation Research Part B: Methodological,* Vol.63, 2014, pp.15-37.
6. 古川敦、高木淳、與家田仁，「列車ダイヤパターンと利用者便益との関連性に関する分析」，**土木計画学研究・論文集**，第 7 卷，民國 78 年，頁 131-138。
7. 吳榮欽、李紹亮、李季祐、葉宇倩、葉宗翰，**赴日本關東地區鐵道公司交流行車計畫**，公務出國報告，民國 104 年。
8. 李宇欣，**鐵路排點之壓點策略建模與影響評估**，科技部補助專題研究計畫成果期末報告，民國 109 年。
9. Ochiai Y, Tomii N, "Punctuality Analysis Using a Microscopic Simulation in which Drivers' Behaviour is Considered", *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Vol.5, No.3, 2015, pp.128-145.
10. Olsson NO, Haugland H, "Influencing Factors on Train Punctuality—Results from Some Norwegian Studies", *Transport policy*, Vol.11, No.4, 2004, pp.387-397.
11. 陶治中、洪敏琛，「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」，**運輸計劃季刊**，民國 104 年，第 44 卷，第 4 期，頁 333-371。
12. Cheng Y-H, Yang L-A, "A Fuzzy Petri Nets Approach for Railway Traffic Control in Case of Abnormality: Evidence from Taiwan Railway System", *Expert Systems with Applications*, Vol.36, No.4, 2009, pp.8040-8048.
13. Dorfman M, Medanic J, "Scheduling Trains on a Railway Network Using a Discrete Event Model of Railway Traffic", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.38, No.1, 2004, pp.81-98.
14. Mu S, Dessouky M, "Efficient Dispatching Rules on Double Tracks with Heterogeneous Train Traffic", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.51, 2013, pp.45-64.
15. Xu X, Li K, Yang L, "Scheduling Heterogeneous Train Traffic on Double Tracks with Efficient Dispatching Rules", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.78, 2015, pp.364-384.
16. Xu X, Li K, Yang L, et al., "Balanced Train Timetabling on a Single-Line Railway with Optimized Velocity", *Applied Mathematical Modelling*, Vol.38, 2014, No.3, pp.894-909.
17. Xu Y, Jia B, Ghiasi A, et al., "Train Routing and Timetabling Problem for Heterogeneous Train Traffic with Switchable Scheduling rules", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.84, 2017, pp.196-218.
18. 江口弘，「都市鉄道の混雑緩和と速達性向上のための 3 線運行手法の提案」，**運輸政策研究**，第 13 卷，第 4 期，民國 100 年，頁 002-009。
19. 黃台生、蔡青峰，「捷運之固定閉塞區間與移動閉塞區間控制方式對運能關係影響之研究」，**都市交通半年刊**，民國 96 年，第 22 卷，第 2 期，頁 38-62。

20. 陶治中、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**，民國 97 年，第 37 卷，第 3 期，頁 293-330。

21. 廖崑亮、楊振忠、張建祥、黃郁文、莊世棠、楊宗平，「實現車上號誌、移動閉塞功能—臺鐵號誌系統升級之探討」，**中華技術**，民國 102 年，第 99 卷，頁 178-193。

22. Fay A, "A Fuzzy knowledge-Based System for Railway Traffic Control", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.13, Iss.6, 2000, pp.719-729.

23. Hirai C, Kunimatsu T, Tomii N, et al., "A Train stop Deployment Planning Algorithm Using a Petri-Net-Based Modelling Approach", *Quarterly Report of RTRI*, 2009, Vol.50, No.1, pp.8-13.

24. Goverde RM, "A Delay Propagation Algorithm for Large-Scale Railway Traffic Networks", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.18, 2010, No.3, pp.269-287.

25. Wang P, Ma L, Goverde RM, et al., "Rescheduling Trains Using Petri Nets and Heuristic search", *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, Vol.17, No.3, 2015, pp.726-735.

26. Kanai S, Shiina K, Harada S, et al., "An Optimal Delay Management Algorithm from Passengers' Viewpoints Considering the Whole Railway Network", *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Vol.1, No.1, 2011, pp.25-37.

27. Tomii N, "How the Punctuality of the Shinkansen has been Achieved", *WIT Trans Built Environ*, Vol.114, 2010, pp.111-120.

28. David R, Alla H, *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*, Vol.1, Springer, 2010.

29. 交通部臺灣鐵路管理局電務處，**號誌設備概要**，民國 97 年。

30. 行政院，**臺鐵總體檢報告**，民國 108 年。

31. 交通部臺灣鐵路管理局，「臺灣鐵路電訊，https://www.railway.gov.tw/tra-tip-web/adr/about-1-6，民國 109 年。

32. 交通部臺灣鐵路管理局，**軌道配置之原理與實務**，民國 100 年。

33. Dick CT, Mussanov D, Evans LE, et al., "Relative Capacity and Performance of Fixed-and Moving-Block Control Systems on North American Freight Railway Lines and Shared Passenger Corridors", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.2673, No.5, 2019, pp.250-261.

34. Kumazawa K, Kitano, T., Sakaguchi, T., Tanaka, S., & Kato, S, "Development of the Signal Arrangement Evaluation System", 17th International Conference on Railway Engineering Design & Operation 2020, pp.29-41.

35. Pages RTW. Automatic Train Control 2021. Available from: http://www.railway-technical.com/signalling/automatic-train-control.html

36. Taroten Jo，中央線快速電車の閉そく信号設置位置 (C8 面：鉄道趣味，初稿 2005.2.17, 訂補 2020.2.17)，http://turase.eco.coocan.jp/opi_j119.html，民國 109 年。

37. 石川修，成田スカイアクセスに導入された信号現示，*Railway Research Review*，第 68 卷，第 7 期，民國 100 年，頁 36。

38. Wang J, *Safety Theory and Control Technology of High-Speed Train Operation*, Academic Press, 2017.
39. 交通部臺灣鐵路管理局電務處，**臺鐵電化路線電力供應概要**，民國 98 年。
40. 交通部運輸研究所，**軌道系統容量與可靠度分析研究(1/3)**，民國 100 年。
41. 林育民，「列車延誤原因之探討－以臺鐵傾斜式列車為例」，國立宜蘭大學應用經濟與管理學系經營管理碩士班學位論文，民國 104 年。
42. 阪急阪神ホールディングス株式会社，安全性向上対策－阪急電鉄，https://www.hankyu.co.jp/pdf/approach/anzen2010/3-2.pdf，民國 100 年。

行政院消費者保護處宣導資訊