

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

軌道運輸乃當今重要之交通運輸系統，其營運、安全與行車控制及號誌系統關係密切。行車控制影響列車行進安全、列車加減速、運量、列車調度與發派等，一般軌道運輸系統之行車控制分為：目視配合手動控制、號誌系統配合手動控制、自動列車運轉（ATO）三種控制方式。基於營運需求、增加營運效益及安全考量等因素，現今大多數軌道運輸系統係採用號誌系統配合手動控制或是採用自動列車運轉等控制方式。

一般軌道運輸在列車營運時，為確保列車維持適當之車距以利系統正常運作，並提供安全之煞車距離，軌道通常會被分割為數個區間，稱為固定式閉塞區間（Fixed Block）。以號誌控制列車行止之系統，即固定式閉塞區間號誌系統。固定式閉塞區間號誌系統（Fixed Block Signaling System, 以下簡稱 FBS）廣泛運用於各種軌道運輸系統已經百年以上，近年來由於軌道系統技術提升，並因應業者經濟、快速、安全以及輸運大量旅客之需求，移動式閉塞區間號誌系統（Moving Block Signaling System, 以下簡稱 MBS）技術逐漸發展成熟並受到重視，MBS 且已開始運用於少數都會區捷運系統中。

MBS 被認為能縮短班距，適合應用於短時間內需提供密集班次以輸運大量旅客之系統，有鑑於都會區捷運系統具有班距短、短時間內需要輸運大量旅客之特性，運能為其控制之重要成果，本研究將探討 FBS 與 MBS 控制方式對捷運系統運能關係之影響。

1.2 研究目的與課題

(一) 本研究目的可歸納如下：

1. 探討 FBS 與 MBS 之控制方式與運作原理。
2. 比較分析 FBS 與 MBS 控制方式對捷運系統班距及運能之影響關係。

(二) 本研究將進行之研究課題包含下列六項：

1. FBS 之控制方式及運作原理。
2. MBS 之控制方式及運作原理。
3. 影響 FBS 最小班距相關因素模擬實驗與結果。
4. 影響 MBS 最小班距相關因素模擬實驗與結果。
5. FBS 與 MBS 運能之比較分析。
6. FBS 與 MBS 班距及運能之迴歸分析。



1.3 研究範圍與限制

本研究範圍與限制界定如下：

1. 本研究對象僅為都會區之大眾捷運系統，並不包含高速鐵路、一般城際或傳統鐵路、輕軌鐵路等。
2. 本研究之捷運系統係採用複線運行，所有上行、下行列車分別行駛於兩條車道上，每條車道僅允許同方向列車運行，所有列車每站皆停靠，具有相同之運行方式，且所有列車皆保持跟車行為，並不包含超越或待避機制。
3. 本研究並不考慮進出站坡度、軌道線型、列車運行阻力與電

壓降等影響因素。

4. 本研究所探討之運能 (Line Capacity) 為路線所容許之最大運能，主要由最小班距 (Minimum Headway) 所決定，並不考慮營運寬裕時間。
5. 本研究僅探討正常情況下列車之運轉行為，並不考慮列車緊急煞車機制。

1.4 研究架構

本研究之研究架構如圖 1-1 所示，其說明如下：

運能 (Line Capacity) 主要由最小班距 (Minimum headway) 決定，然而在實際營運時一般會考慮營運寬裕時間，使各列車運轉時具有一定的時間彈性，因此實務上之運能乃由營運班距所決定。本研究為了解不同號誌系統控制方式下對其路線最大運能之影響，並不考慮營運寬裕時間，因此運能由最小班距決定，而最小班距主要受號誌系統影響，號誌系統主要包括 FBS 與 MBS。FBS 乃將軌道分割成數個區間，藉由聯鎖線上之號誌系統，以了解各區間之開通、佔用、清除與未佔用等情形，對線上各列車進行適當之速率管控，甚至停等控制。當閉塞區間被前車 (Leading Train) 佔據時，區間分界之道旁號誌會顯示險阻，後方列車 (Following Train) 會於先前之區間透過道旁號誌及車載號誌設備開始減速，並於此險阻號誌前停車，以防止追撞前車；為盡量使線上各列車不受前車影響，維持運轉順暢，因此 FBS 受系統控制方式、閉塞區間長度、列車最高運轉速限、列車警戒

運轉速限、路線彎道之曲率半徑及停站時間等相關因素影響。MBS 之概念乃將閉塞區間長度縮短，甚至為零區間長度，透過列車上之車載號誌設備與道旁號誌設備之雙向通訊，每間隔數秒接收前車位置、車間距離、車速等相關資訊，經過車載資料庫電腦計算及解碼後，提供列車加速、減速、停車等指令，使列車與前車之間能維持一個最小安全距離，進而有效縮短班距。MBS 受系統控制方式、列車最高運轉速限、路線彎道之曲率半徑、位置信標間隔及停站時間等相關因素影響。

經探討 FBS 與 MBS 之控制方式後，進而探討在此兩種閉塞區間號誌系統控制方式下各個相關因素對最小班距之影響，並比較其運能差異，隨後建立影響因素對運能之迴歸方程式，以了解各因素對運能之影響關係。

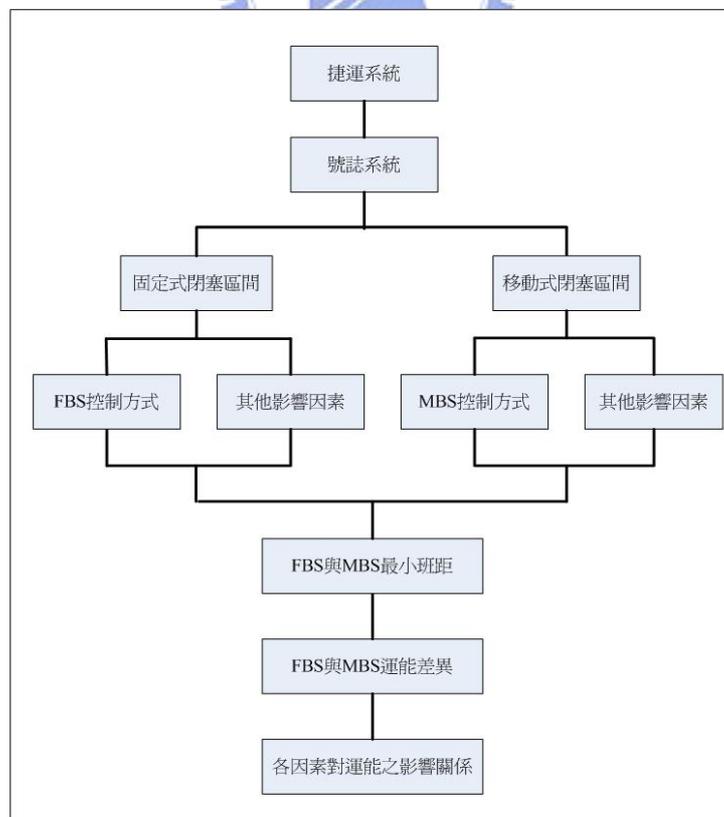


圖 1-1 研究架構圖

1.5 研究方法與流程

本研究所採用之研究方法分別敘述如下：

(一) 運能 (Line Capacity, C):

為每單位小時除以最小班距，其計算公式為：
$$C = \frac{3600}{H_{Min}}$$

(二) 最小班距 (Minimum Headway, H_{Min}):

透過本研究所開發之 FBS 模擬模式及 MBS 模擬模式以試誤 (trial and error) 方式求得，最小班距為前後車到站間隔與發車間隔相差 0.5 秒內之正常運轉班距。

(三) FBS 控制方式：

本研究將蒐集臺北市都會區捷運系統與國外捷運系統，有關 FBS、軌道行車控制 (Train Control) 之文獻，透過文獻之整理與回顧，了解 FBS 之控制方式與運作原理。

(四) MBS 控制方式：

本研究將蒐集國外捷運系統，有關 MBS、無線電自動列車控制 (Radio ATC)、通訊式列車控制 (CBTC) 之技術文獻，透過文獻之整理與回顧，了解 MBS 之控制方式與運作原理。

(五) 相關影響因素：

本研究將分別探討於 FBS 與 MBS 兩種不同號誌系統控制方式下，區間長度、列車最高運轉速限、列車警戒速限、路線彎道之曲率半徑、停站時間及其他可能影響運能之相關因素。本研究將蒐集臺北市都會區捷運系統與國外捷運系統，有關列車性能與捷運系統營運方面之資料，以了解捷運系統電聯車之性能諸元與營運特性。

(六) FBS 與 MBS 運能之差異：

本研究將以 Java Script 程式語言分別構建 FBS 與 MBS 運能之模擬模式 (Simulation Model)，並以臺北市都會區高運量捷運系統之相關參數進行模式驗證與檢核。模擬模式可分別模擬計算 FBS 與 MBS 之最小班距，以探討各相關影響因素在兩種不同號誌系統控制方式下最小班距之差異。進而再將最小班距轉換為最大運能，進行 FBS 與 MBS 運能之比較分析。

(七) 各因素對運能之影響關係：

本研究將透過統計分析軟體進行 FBS 與 MBS 運能之迴歸 (Regression) 分析，以了解各個因素對 FBS 與 MBS 運能之影響關係。



本研究之研究流程圖如圖 1-2 所示，其步驟說明如下：

1. 界定研究問題與研究範圍。
2. 蒐集國內外與軌道號誌系統、軌道行車控制、FBS 控制方式等相關文獻與資料，透過文獻回顧與資料整理，了解 FBS 之控制方式與運作原理。蒐集國外與 MBS、無線電自動列車控制等相關文獻，透過文獻之整理與回顧，了解 MBS 之控制方式與運作原理。另外蒐集國內外與捷運系統電聯車性能及運作相關之資料，透過資料之整理，了解一般捷運系統電聯車之性能諸元與營運特性。
3. 分別建立 FBS 與 MBS 之模擬模式，利用所建立之模擬模式分別模擬計算 FBS 與 MBS 之最小班距。

4. 分別探討各個因素對 FBS 與 MBS 最小班距之影響。
5. 將最小班距轉換為最大運能，比較分析 FBS 與 MBS 運能之差異。
6. 進行 FBS 與 MBS 運能之迴歸分析，以了解各個因素對 FBS 與 MBS 運能之影響程度，並建立 FBS 與 MBS 最小班距及最大運能之迴歸方程式。
7. 提出結論與建議。



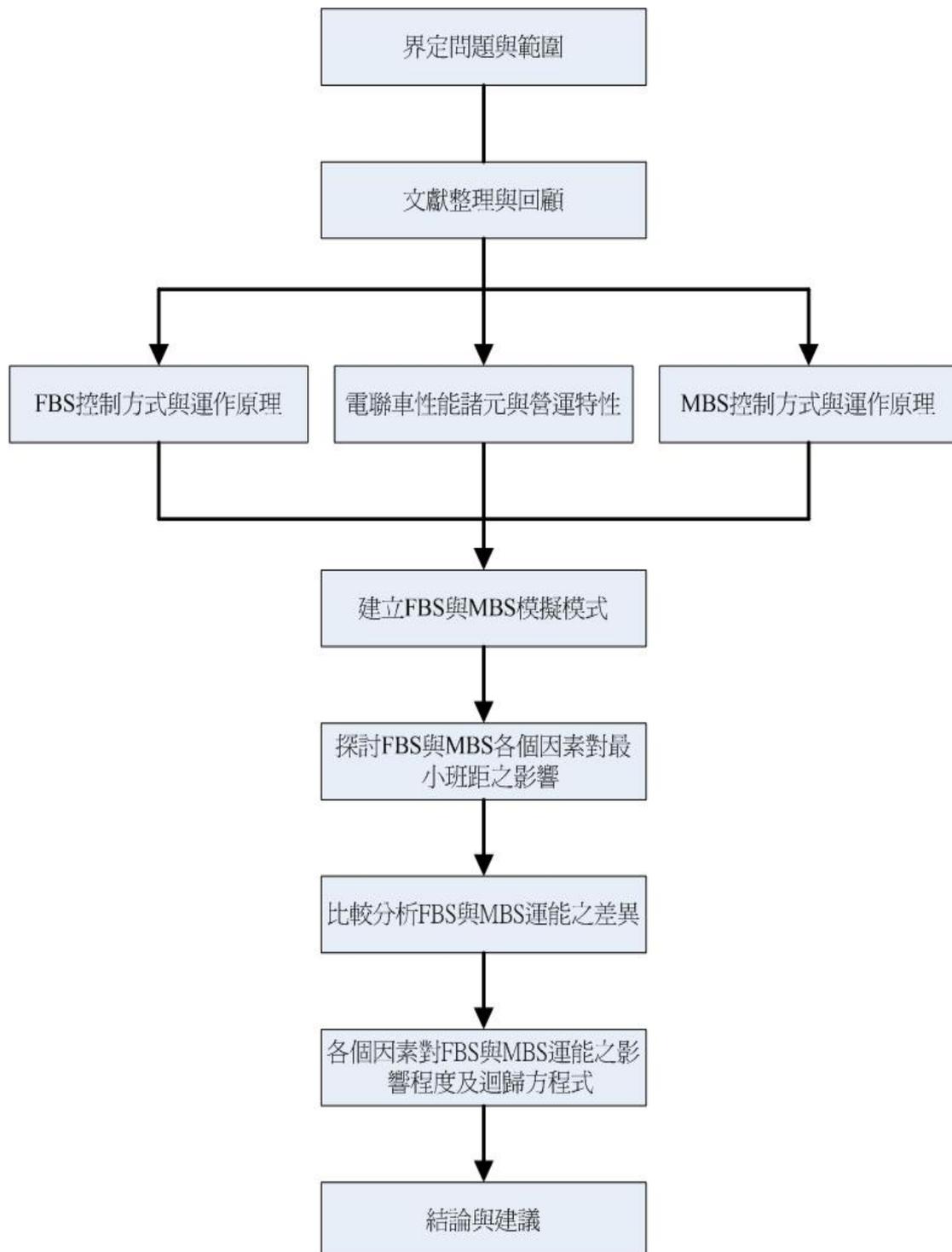


圖 1-2 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本研究主要係探討捷運系統 FBS 及 MBS 控制方式對運能關係之影響。本章首先回顧號誌系統技術發展相關文獻，以明白 FBS 與 MBS 之技術發展與控制方式；接著整理 FBS 與 MBS 班距之文獻，以瞭解此兩種號誌系統控制方式下相關因素對班距之影響關係；最後再探討捷運系統運能分析方法之文獻，以瞭解捷運系統運能相關分析方法與考量。

2.1 FBS 與 MBS 之技術發展

2.1.1 FBS 之技術發展



張有恆、蘇昭旭（民國 91 年）於鐵路的行車制度【5】，說明行車制度的分類一般可分為隔時法（Time Interval）與隔地法（Space Interval）。絕大部分的鐵路都不會只用隔時法，一定會併用通信方式或隔地法等技術，以確認列車所在位置及是否準點，所以今日隔時法已經成為一種輔助的方法。隔地法係將路線分割成許多閉塞區間（Block），一次僅容許一列車佔用區間者稱為絕對閉塞制（Absolute Block System）；若前方有列車佔用區間，允許後方列車一度停車後慢行進入該區間，並隨時依前方列車狀況停車者稱為容許閉塞制（Permissive Block System）。目前全球不論是人工或自動化的閉塞制度，除特殊路段或狀況外，皆以絕對閉塞制居多。

各種隔地法之閉塞制度，早期為人工閉塞制，由人員以通訊或嚮導的方式辦理，接著逐漸演變為憑證式，以電器路牌或牌卷之方式辦

理。後來經過改良，以電器聯動之方式辦理，增加安全性。隨著軌道科技日益進步，自動閉塞制為當今全世界最流行也最有效的行車控制方式，利用軌道電路，使號誌能自動顯示，無須人力操作。後來更藉由中央行車控制中心（CTC）進行號誌控制與行車調度，使鐵路運轉發揮最大效果。

Joern Pachl（2002）於軌道行車與控制【22】中，說明固定閉塞區間系統係利用道旁號誌或車載號誌以達到區間防護之一種區間系統，列車進入每個固定閉塞區間必須滿足下列條件：

- （一）前方列車必須已經清除（Clear）此區間。
- （二）前方列車必須已經清除下一個號誌後方之重疊區（僅適用於區間有設置重疊區之路線）。
- （三）前方列車藉由險阻號誌之保護以避免後方列車冒進。
- （四）列車運行之相反方向其號誌為險阻。

翁穎鈞（民國 90 年）於木柵線號誌系統介紹【10】，指營運主線依行駛路線長短適當分割為數個道旁控制區段（Section），每個區段再劃分為數個固定閉塞區間（Fixed Block），閉塞區間設計原理如下：

- （一）各固定閉塞區間於任何時刻只允許一列車行駛。
- （二）主線道旁控制單元監控列車以避免進入已佔用之閉塞區間。
- （三）閉塞區間長短劃分之原理係基於列車之安全停車距離，並儘量縮短列車班距（Headway）。
- （四）若下游閉塞區間已被佔用，列車必須減速並且停止於目前所在

閉塞區間之末端前方，以避免追撞下游列車。

駱仁宇（民國 90 年）於木柵線中運量捷運 VAL 系統簡介【9】，說明道旁控制設備利用固定區間（Fixed Block）的方式達到防止前後兩列車追撞，當前面一個區間被道旁控制設備宣告為佔用（Occupied）時，列車則減速而停止於此一區間前，無法進入前一個被佔用的區間。列車之停止乃因道旁控制設備傳送停車模式（Stopping Mode）命令列車遵循停車速度指令（Stopping Speed Program）；而於正常情況，前面區間為空間（Free）狀態時，道旁控制設備傳送一般模式（Normal Mode）命令列車遵循一般速度指令（Normal Speed Program）。每個區間之長短並非固定，停車速度指令為非連續並於區間邊界前降為零速，但在車站區間（Station Block）內並無停車速度指令；一般速度指令為連續並於車站前降為零速。由於道旁控制設備以區間的方式偵測列車，道旁控制設備僅知此一區間為一列車所佔有，但其在區間內之確實位置並無法得知。

2.1.2 MBS 之技術發展

Japan Railway & Transport Review 16（1998）關於溫哥華 Sky Train 系統【29】之文章，指加拿大溫哥華的 Sky Train 全自動無人駕駛系統，採用 SELTRAC 技術之 MBS，SELTRAC 以軟體為基礎，透過與所有列車及道旁設備間之資料傳輸，以移動閉塞區間原理來達到維持列車間之安全車距。自動列車控制（ATC）硬體分為車載控制單元（VOBC）與車輛控制中心（VCC）兩部分，其中車輛控制中心（VCC）

至少每秒與列車通訊一次，且具有控制 125 列車之能力，如果車載控制單元與車輛控制中心之通訊遺失、中斷或混淆超過 3 秒，車載控制單元之失效偏向安全 (Fail- to-Safe) 機制便會啟動，使列車緊急煞車停止。

林廣傑 (民國 92 年) 就 MBS 之發展、通訊式列車控制系統、通訊式列車控制設計概念與列車速度曲線等方面進行移動式閉塞區間與通訊式列車控制系統之技術發展【3】之研究。

早期 MBS 發展，乃將音頻軌道電路之固定閉塞區間縮短，後來改為短距離定點偵測列車，1980 年代至 1990 年代移動式軌道電路以軌道內側所佈設之電感迴路連續偵測列車位置。

通訊式列車控制系統是將列車自動控制系統之資料傳輸以無線電通訊 (Radio Communication) 方式傳送，並透過信標 (Beacon) 比對確認列車位置，由列車傳送列車資料與列車位置資訊至道旁區域基地台 (Wayside Station)，經每一區域基地台與該區域行駛列車之車載控制系統通訊，透過每列車內部之兩套智慧型列車資料庫—列車參數資料庫與列車共用資料庫決定列車本身與其他列車的距離、速度曲線、安全煞車距離、臨時速限、煞車率等資料條件，以決定列車本身之最佳的安全煞車距離，其資料庫隨列車行進列車不斷收集資料庫內所需之參數資料以進行列車速度曲線更新，使列車隨時保持動態控制並更新下一步速度指令，並以正常速度曲線之預測值執行列車控制。

CBTC 列車運轉時，當列車愈接近前方列車時速度會愈慢，但不會立即停車，直到列車自道旁無線電基地台所得前方列車位置一直不

變，且其速度碼為零，列車本身會依據正常煞車曲線於最後目標位置停車。前方列車因故障而停車時，後方列車在未到達運轉速度曲線之停車目標預定點時，仍會持續減速行駛，並保持電腦預測速度值，到達目標位置後即以安全距離位置自動停止運轉，速度碼降為零。倘若前方列車在啟動或維持動態運轉，且速度加快前進，後方列車會收到前方列車位置變動，會重新修正運轉速度曲線，在列車尚未到達目標位置時，列車速度曲線會持續更新，使列車提高可行駛之速度，列車隨後開始加速，並與前方列車自動保持安全行車間距。

列車速度碼由原來 10、25、40、55、65、80KPH 等階段式速限控制，改變成由 0~80KPH 之模糊控制，速度碼以每 1KPH 為單位之快速反應速度曲線，直接由電腦計算安全煞車距離，利用更圓滑之列車煞車曲線，提供較彈性之安全煞車距離，兩列車間之安全距離相對縮短，可縮短列車班距。



Y. Zou, W. Oghanna, K. Hoffman (1999) 於高效率自動列車控制模擬模型【27】之研究，藉由構建純移動閉塞區間演算法 (Pure Moving Block Algorithm) 與動態控制演算法 (Dynamic Control Algorithm) 之模擬模型，比較純移動閉塞區間系統與動態控制系統之差異。MBS 目前已有有效的運用於少數高速鐵路及都會區捷運系統上，其列車之運行分為靜態控制與動態控制兩種型態。

在捷運系統尖峰時段，任何微小的運行干擾，會導致列車間之相互影響甚至造成路線交通擁擠，使列車由原本的靜態控制變成動態控制。動態控制演算法考慮列車間之潛在相互影響，能塑造出列車之運

轉曲線，如此能減少列車間因相互影響而加減速時所產生之波動，進而使列車順暢運轉，提高營運服務水準。通訊式移動閉塞區間系統可提供列車間或列車與控制中心間足夠的資訊，以控制路線上所有列車，並減少列車間不必要的相互影響與速度波動。

2.2 FBS 與 MBS 之班距

John Harrison 等人 (1993) 於避免列車追撞之號誌方法【32】，說明固定閉塞區間與移動閉塞區間對班距之影響。固定閉塞區間之軌道電路一般僅能以區間偵測列車，這個缺點限制了固定閉塞區間軌道系統之最小班距。以亞特蘭大都會捷運系統為例，該系統可達到之最小班距為 90 秒，90 秒班距主要由列車最大速度降為零速之煞車時間，加上列車通過區間的額外時間，且最大的停車時間約為 50 秒至 60 秒，列車最大速度一般為 110KPH 至 130KPH。

當列車速度增加時，列車之最大煞車距離與煞車時間增加，在這樣的情況下，較短的區間長度對班距的影響不大。移動閉塞區間主要利用信標與車載號誌設備運作，以信標偵測列車位置，透過車載號誌設備計算與前車之距離，藉由移動閉塞區間的原理來減少班距時間。

Yuqing Ding, Steven I-Jy Chien, (2001) 於改善大眾運輸服務品質與即時控制系統下之班距規則【24】之研究，指路線上游較小的運行干擾，其影響可能會對路線下游持續放大，增加旅客等候時間並減少運能，因此以線性規劃構建即時控制模型 (Real-Time Control

Model) 來維持設計班距，以達到列車行經所有車站之總班距變異最小化。經美國新紐澤西州 Newark 地鐵之模擬測試結果，證明該即時控制模型能有效控制班距並減少旅客之等待時間。

R. John Hill, Louisa J Bond (1995) 以離散事件導向模擬構建移動式閉塞區間號誌系統【30】之研究中，描述 FBS 與 MBS 量化之原理，及道旁設備與列車間資料傳送之形式，並以離散事件導向模擬實際區間號誌系統之行車控制。實例以德國慕尼黑市區地鐵 LZB510 (U-Bahn) 系統模擬高效率之固定閉塞區間 (High Performance Fixed Block) 號誌系統，及加拿大 Sky-Train 之 SELTRAC 系統模擬 MBS。於列車運行模式中，作者說明先行列車 (leading train) 準時離站，而續行列車 (following train) 依照其正常煞車曲線進站的情況下，移動式閉塞區間兩列車間之最小班距為：

$$h_{\min} = T_r + \frac{V_b}{b} + T_d + \sqrt{\left[\frac{2(L_d + L_t)}{a} \right]} \quad (1)$$

於號誌系統中，作者引用 K. H. Kraft (1988)【33】在列車運行未受干擾情況下，FBS 所能提供之最小班距為：

$$h_{\min} = \frac{L_a}{V_b} \left[2 + INT \left(\frac{(T_r V_b + V_b^2 / 2b)}{L_a} \right) \right] + \frac{V_b}{2b} + T_d + \sqrt{\left[\frac{2(L_d + L_t)}{a} \right]} \quad (2)$$

其中， L_a 為區間長度， L_d 為前車已經離站所行駛之距離， L_t 為列車長度， a 為列車加速度， V_b 為列車最高時速， b 為煞車率， T_d 為車站停車時間， T_r 為駕駛與列車之反應時間。

如果列車資訊僅藉由區間邊界 (block boundaries) 傳送，FBS 之最小班距通常會被限制在 90 秒至 100 秒之間，實務上因考慮到營運寬裕時間，通常班距會設定大約為 120 秒。若藉由可連續傳送資訊給列車之軌道電路 (Track Circuits) 或線圈 (Conductor loops)，利用速度碼及車載號誌通訊設備等傳送方式，在未考慮營運寬裕時間的條件下，最小班距可縮短為 75 秒至 80 秒。若為 MBS，公式 (2) 中之區間長度 L_a 將為零，公式 (2) 將簡化成公式 (1)，理論上可縮短最小班距至 60 秒以下。

作者經離散事件導向模擬，探討 FBS 與 MBS 之列車最高營運速度與最小班距關係，經設定固定閉塞區間模擬模型與移動閉塞區間模擬模型之各屬性，透過 SIMSCRIPT 模擬程式模擬後，顯示 MBS 確實比高效率 FBS 可提供較小之最小班距。

Karl Heinz Kraft and Thomas Müller (2000) 於捷運控制系統之績效【25】，透過列車控制功能的分析顯示：區間長度決定正常營運情況與營運受干擾情況下列車的運轉行為。由 Kraft (1988) 的研究結果、Hill and Yates (1992)、Rosenkranz (1997) 關於理論基礎的研究，顯示如何決定兩車站間每個區間的長度，至於列車因延誤造成的運轉行為，可由電腦模擬來進行，可得出列車位置與時間的關係。區間長度為自動列車控制系統中最重要的部份，並且對正常營運情況下及營運受干擾情況下的列車運轉有明顯的影響。鄰近車站的閉塞區間長度可以由公式決定，主線上其他的閉塞區間長度，透過營運受干擾情況下的電腦模擬，必須考慮列車控制系統的功能與列車速度曲線。鄰近車

站各閉塞區間在考慮營運受干擾之列車運轉行為的情況下，其車站附近各區間長度之相關理論公式如下：

$$\tau_{\min} = \frac{L_1}{v_0} + \frac{v_0}{b} + T_S + \sqrt{2 \cdot \frac{L_0 + L_T}{a}}$$

$$L_1 = L_0 = \frac{v_0^2}{a} - v_0 \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{v_0}{a}\right)^2 + \frac{2}{a} \left[L_T + v_0 \cdot \left(\tau_{\min} - T_S - \frac{v_0}{b} \right) \right]} - \left(\tau_{\min} - T_S - \frac{v_0}{b} \right) \right]$$

$$L_T > L_1, L_2 < v_0 \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \frac{L_0 + L_T}{a}} - \sqrt{2 \cdot \frac{L_T}{a}} \right), L_2 + L_3 < v_0 \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \frac{L_0 + L_T}{a}} - \sqrt{2 \cdot \frac{L_T - L_1}{a}} \right)$$

其中： L_T 為列車長度， L_i 為車站附近各閉塞區間長度 $i=0,1,2,\dots$ ； a 為列車加速度， b 為煞車率， v_0 為運轉速度； τ_{\min} 為最小營運班距， τ_0 為列車營運（時刻表）班距， T_S 為列車靠站時間， T_R 為系統反應時間（趨近於零）， T_d 為列車延誤時間 $T_{d2} = T_{d1} - (\tau_0 - \tau_{\min})$ 。

李文才、林廣傑（民國 91 年）於移動式軌道電路設計與發展【4】之研究中，指 MBS 中，標識設計（Beacon）是目前最新的設計方式，以每 6.25m 或其他如每 5m 至 10m 等不同距離安裝一固定位置，列車採用微波天線發射，標識接到微波訊號後會反射它的位置給列車天線。此種設計方式是以搭配無線電控制列車運轉而設計，因標識設計之距離短，又有快速反應時間，因此這種方式的列車設計班距約可達 35 秒至 45 秒左右。

W.T. Lee, Y.T. Hsiao and K.C. Lin（2002）於移動式閉塞區間設計發展【21】，指目前臺北捷運高運量系統音頻軌道電路可提供之最

小班距為 105 秒至 165 秒；而一般 MBS 可提供之最小班距為 30 秒至 70 秒，如果 MBS 應用於目前臺北捷運高運量系統上，理論上可以增加兩倍的運量。基於移動閉塞區間原理之應用與通訊式列車控制系統之快速發展，移動閉塞區間之控制方式也即將修改，但是由於系統技術之不同，於實務上仍需克服電磁干擾、道旁無線通訊台之雜訊干擾、雜散電流、通訊品質、系統穩定與系統可靠度等問題。

2.3 捷運系統運能分析方法

交通部運研所與中興工程顧問社（民國 93 年）於國內軌道容量分析進行先期研究【2】，透過國內外軌道容量分析文獻整理與回顧，及國內臺北捷運系統軌道容量分析案例，建立國內軌道容量本土化研究之基礎。文中提到世界各國軌道容量分析之評估方法有三種模式結構：解析模式（Analytical Model）、模擬模式及最佳化模式（Optimisation Model）。然而該文獻屬於先期研究，因此尚未開發相關之應用程式，且模擬模式或最佳化模式多被包裝於套裝軟體中，其內容不易得知，因此以較為簡單、普遍之解析模式為主，該研究中之臺北捷運系統軌道容量分析案例亦以解析模式為主，並以敏感度分析檢視各影響因素對運能之影響趨勢及敏感度之相對大小。

陳智淵（民國 91 年）於台北捷運列車運行動態模擬【6】之研究，說明就列車運轉模擬中，通常採用等時間或距離間隔的方式進行模擬，時間或距離間隔愈小，可得到越精確的模擬結果；反之，較大的

時間或距離間隔，其模擬結果將存在較大的誤差。

美國大眾運輸容量暨服務品質手冊二版（2003）於第五篇軌道運輸容量【20】，對於軌道路線容量計算方式提供基礎背景、計算程序、計算方式與相關計算公式，其計算步驟如下：

- （一）決定最繁忙之車站
- （二）決定號誌安全時距

FBS 所需之最小號誌安全時距之公式如下：

$$t_{cs} = \sqrt{\frac{2(L_t + d_{eb})}{a(1 - 0.1G_o)}} + \frac{L_t}{v_a} + \left(\frac{100}{f_{br}} + b\right) \left(\frac{v_a}{2d}\right) + \frac{a(1 - 0.1G_i)l_v^2 t_{os}^2}{20,000v_a} \left(1 - \frac{v_a}{v_{max}}\right) + t_{os} + t_{jl} + t_{br}$$

MBS(固定安全區間)所需之最小號誌安全時距之公式如下：

$$t_{cs} = \frac{L + S_{mb}}{v_a} + \frac{100}{f_{br}} \left(\frac{v_a}{2d}\right) + t_{jl} + t_{br}$$

具有較高效益之 MBS（可變安全區間）所需之最小號誌安全時距之公式如下：

$$t_{cs} = \frac{L_t + P_e}{v_a} + \left(\frac{100}{f_{br}} + b\right) \left(\frac{v_a}{2d}\right) + \frac{a\left(1 - \frac{a_g}{100}G_i\right)l_v^2 t_{os}^2}{20,000v_a} \left(1 - \frac{v_a}{v_{max}}\right) + t_{os} + t_{jl} + t_{br}$$

其中，各參數符號定義如下表所示：

參數符號	定義	單位
L_t	最長列車之長度	m
d_{eb}	停站列車之前端至離站後第一個閉塞區間之距離	m
v_a	進站速度	m/s

v_{\max}	最大列車速度	m/s
f_{br}	列車安全因子	%
b	列車安全分隔因子	-
t_{os}	超速控制時間	s
t_{jl}	列車急衝限制寬裕時間	s
t_{br}	列車煞車系統反應時間	s
a	起始服務加速度	m/s^2
d	服務減速度	m/s^2
a_g	列車重力加速度	m/s^2
G_i	進站坡度	%
G_o	出站坡度	%
l_v	電壓降	%
P_e	列車位置誤差 (移動式閉塞區間)	m
S_{mb}	區間安全距離 (移動式閉塞區間)	m
h_{\min}	最小班距	s
t_{cs}	號誌安全時距	s
t_d	列車停站時間	s
t_{om}	運轉寬裕時間	s

(三) 決定列車停站時間

停站時間對於最小班距影響甚鉅，影響停站時間之因素包括：旅客流時間、列車車門開啟與關閉時間、列車停妥等候開門時間及車門關閉等候發車時間等。根據該手冊所述，一般主

要車站之停站時間為 30 至 45 秒，而停站時間亦可指定合理數值、使用既有停站資料、使用同系統內其他站停站時間或由尖峰小時旅客流計算等方式求出。

(四) 決定運轉寬裕時間

運轉寬裕時間主要為列車運行中如有不預期之情況發生時，避免列車因延誤影響下一列車之運作，所保留之營運寬裕時間。雖運轉寬裕時間並非一定，但該手冊建議：系統若在最大容量且可允許之運轉寬裕時間較少時的情下營運時，則運轉寬裕時間可為 20 至 25 秒；一般情況建議可設為 25 秒，但若有更多服務需求時，可降至 20 秒或 15 秒；未知或不確定系統長期需求時，可設為 25 秒。

(五) 決定乘客承載水準

該手冊以單位列車長度的旅客數表示。

(六) 決定尖峰小時因素

該手冊建議採用尖峰 15 分鐘尖峰小時因素值為：重軌系統 0.80、輕軌系統 0.75、以電聯車營運之通勤系統 0.60，其公式定義如下：

$$PHF = \frac{P_h}{4P_{15}}$$

(七) 整體運算

將上述各項分別計算後得到最小班距如下：

$$h_{\min} = t_{cs} + t_d + t_{om}$$

其中， t_{cs} 為號誌安全時距， t_d 為停站時間， t_{om} 為營運寬裕時間。

$$\text{則路線最大運能為： } C = \frac{3600}{h_{\min}}$$

Alex Landex and Anders H. Kaas (2005) 於高密度鐵路路線最適行車速率規劃【14】之研究，利用高密度鐵路路線最適行車速率計算的新方法，使擁擠的軌道路線上盡可能的達到最高運能。而此方法所計算之最適行車速率，主要以煞車距離及聯鎖系統的資訊為基礎，煞車距離為計算最適行車速率之關鍵參數，經一連串之公式推導與計算，由煞車距離可以計算最小班距，當取得列車發車頻率以後，進一步可決定緩衝時間，因此營運班距為最小班距加上營運寬裕時間。營運寬裕時間是路線上容量的餘裕，路線上的寬裕時間愈多，列車的準點率愈高，且可多增加列車的可能性亦愈高。以哥本哈根為例，在哥本哈根市中心路線最高時速降低 6% 可增加 11% 的運能，而所增加的運能，可以改善哥本哈根市中心路線列車的準點性，即使部分增加的運能被用來提供更多列車進行營運。

第三章 FBS 與 MBS 之控制方式與運作原理

本章先分別對 FBS 與 MBS 之控制方式與運作原理進行探討，最後再對此兩種號誌系統之控制方式進行比較，以為後續章節分析之基礎。

3.1 FBS 之控制方式與運作原理

3.1.1 FBS 之佈設配置與設備

FBS 乃將路線劃分成許多閉塞區間，每個區間長度長短不一，區間與區間交界為區間界線，每個區間界線旁設置號誌設備，利用道旁之色燈號誌顯示不同燈色以告知列車駕駛前方區間之狀況，以作為列車駕駛操控列車之依據；或以道旁號誌設備透過軌道電路傳輸號誌訊號至列車上之車載號誌系統，以作為列車自動控制系統控制列車之依據。

捷運系統因班次密集及站距較短，為有效控制及監督各列車，以提高列車之行車效率與安全性，捷運系統皆採用車載號誌。因此，為配合車載號誌運作，固定式閉塞區間之區間界線處皆設置道旁號誌設備，並透過軌道電路傳輸號誌訊號至列車上之車載號誌設備。

捷運固定式閉塞區間之佈設原則與硬體設備說明如下：

一、 固定式閉塞區間之佈設配置

(一) 區間長度需大於列車長度

都會捷運車站之站距一般為 800m 至 1000m 不等，為有效偵測列車是否佔用區間，各閉塞區間之長度需大於列

車長度。以目前臺北捷運高運量系統為例，固定編組之 6 節車廂電聯車，其列車長度為 141 m，固定閉塞區間長度自 170m 至 460m 不等。並規定每一閉塞區間同時僅容許一列車進入，以確保各列車受閉塞區間之保護。

(二) 區間長度依佈設路線位置有所不同

固定閉塞區間係考慮路線條件、軌道線型、列車煞車距離等劃分其長度，因此路線位置不同，區間長度有所不同。行駛速率較低之區間及車站區間其區間長度較短，為 15m (轉轍區) 至 171m (車站區間) 不等；行駛速率較高之路段區間，因所需煞車距離較長，故其區間長度較長，一般為 170m 至 460m 不等。

(三) 區間界線配置號誌設備

捷運系統以阻抗搭接器 (Impedance Bond) 界定區間界線，由於每一閉塞區間同時僅容許一列車進入，因此每一區間界線處配置道旁號誌設備，以控管列車是否能進入下一個閉塞區間，同時並提醒列車前方區間之狀況，以控制列車之加速、減速或停車。

二、 FBS 之設備

固定閉塞區間之硬體設備可分為車載設備、道旁設備、號誌設備室與行控中心。

(一) 車載設備

車載設備主要包含自動列車控制 (ATC) 之車載控制單元、傳送接收線圈及天線。自動列車控制系統包含三個

子系統：自動列車操作系統（ATO）、自動列車防護系統（ATP）與自動列車監督系統（ATS）。車載 ATC 控制單元，主要執行 ATO、ATP 及 ATS 三個子系統之功能，透過 TWC 傳送線圈傳送列車訊號至道旁設備，並透過 TWC/ATP 接收線圈接收來自於道旁設備之訊號與 ATP 速限給列車，進站時以定位天線進行列車停靠之定位較準。

（二）道旁設備

固定閉塞區間界線以阻抗搭接器分隔，兩相鄰的阻抗搭接器構成一個閉塞區間。透過阻抗搭接器接收由列車傳至道旁 TWC 之訊號，並傳至號誌設備室；阻抗搭接器接收亦來自號誌設備室之 ATP 速限及道旁至列車 WTC 訊號，並透過音頻軌道電路傳至列車之車載號誌單元。此外，藉由兩相鄰之阻抗搭接器發送與接收偵測訊號，阻抗搭接器亦進行列車偵測。列車偵測方式將在 3.1.2 小節中說明。

（三）號誌設備室

號誌設備室接收來自阻抗搭接器之訊號，除判定區間是否被列車佔用，並持續發出 ATP 速限等功能外，也會將所接收到的 TWC 訊號透過資訊傳輸系統傳回行控中心。同時號誌設備室也執行來自行控中心的控制指令，並將控制指令傳至阻抗搭接器。

（四）行控中心

行控中心為主線上列車監控管理之指揮調度中心。在列車控制方面，行控中心能依照系統內所設之時刻表自動

發派列車，並依照主線上實際狀況，對列車速度、列車班距或停車時間等設定值做調整。在路線方面，行控中心可控制主線上轉轍器之正位或反位，並設定各列車運行之路徑。在監督管理方面，行控中心可以監視列車、路線、車站之狀況，並在突發狀況發生時緊急處理。

3.1.2 FBS 之控制方式

FBS 係利用車載號誌設備、道旁設備、號誌設備室及行控中心等，對列車進行全面的監督與控制，對於整個 FBS 之控制方式說明如下。

一、 列車偵測



兩相鄰之阻抗搭接器所構成之閉塞區間，下游區間界線阻抗搭接器之發送器持續將偵測訊號饋入行車軌，當閉塞區間無列車時，軌道電路為通路，則上游區間界線阻抗搭接器之接收器便能接收到偵測訊號，使繼電器激磁，號誌系統顯示該閉塞區間為安全，如圖 3-1 所示。當列車進入閉塞區間時，軌道電路因車輪、車軸之進入與兩行車軌形成分流，因此，上游區間界線阻抗搭接器之接收器便無法接收到來自下游阻抗搭接器之發射器所發送之偵測訊號，進而使繼電器失去激磁，號誌系統顯示該閉塞區間遭列車佔據，如圖 3-2 所示。由於閉塞區間為連續，因此每一區間界線之阻抗搭接器，除為上游訊號之發射器，亦為下游訊號之接收器。

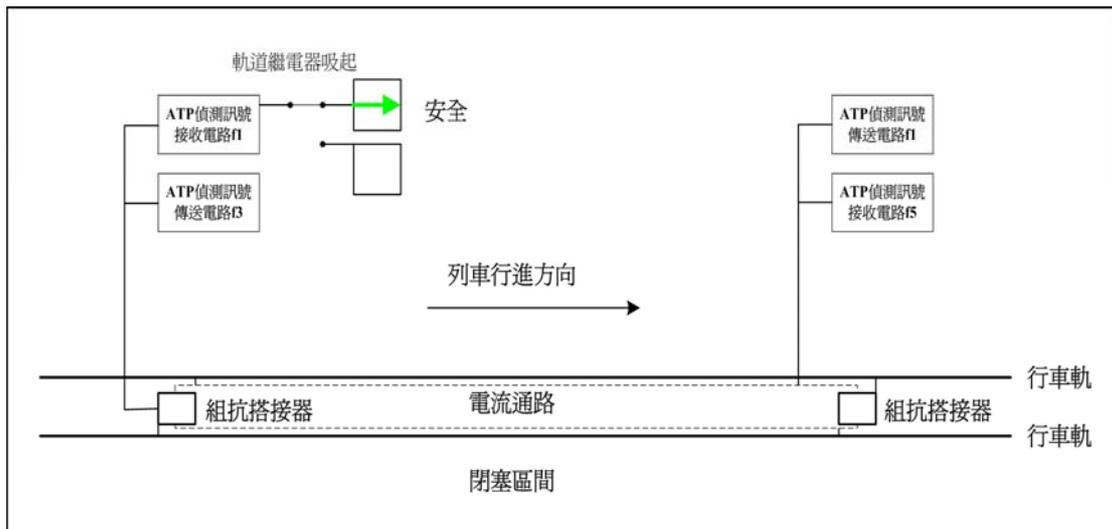


圖 3-1 列車未佔據閉塞區間之示意圖

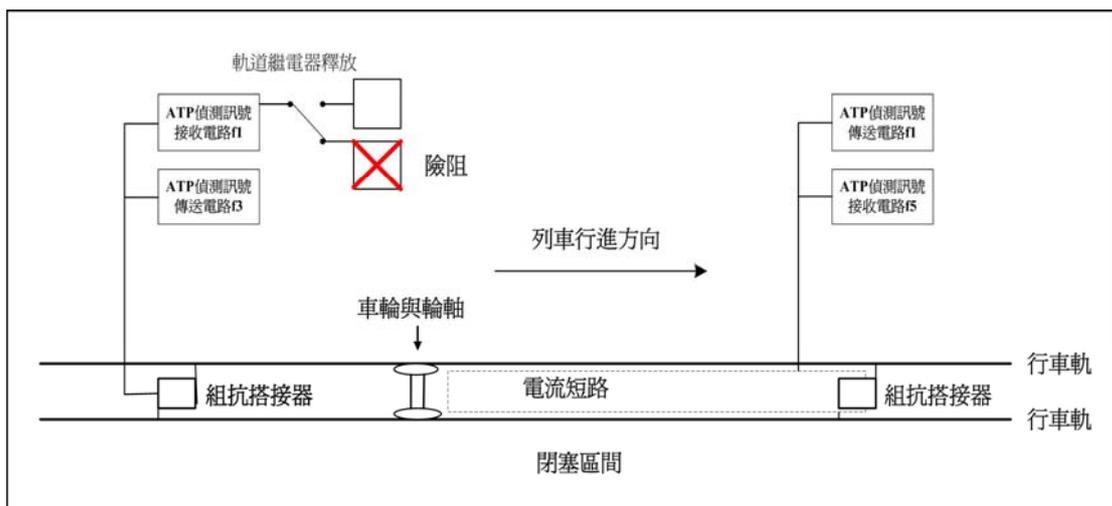


圖 3-2 列車佔據閉塞區間之示意圖

二、速度碼

速度碼為自動列車控制系統控制列車之依據，其接收方式、種類與作用，及列車運轉時速度之功能位階，說明如下。

(一) 速度碼之接收

當列車進入閉塞區間，經號誌設備偵測列車佔用區間後，號誌設備室便會持續傳送 ATP 速度指令至阻抗搭接器，再由阻抗搭接器饋入行車軌後，由列車底部轉向架前

方之 ATP 接收線圈接收 ATP 速度指令至列車車載控制單元，經調變解碼後，即可得到列車速度碼，以作為自動列車控制系統操控列車之依據，如圖 3-3 所示。

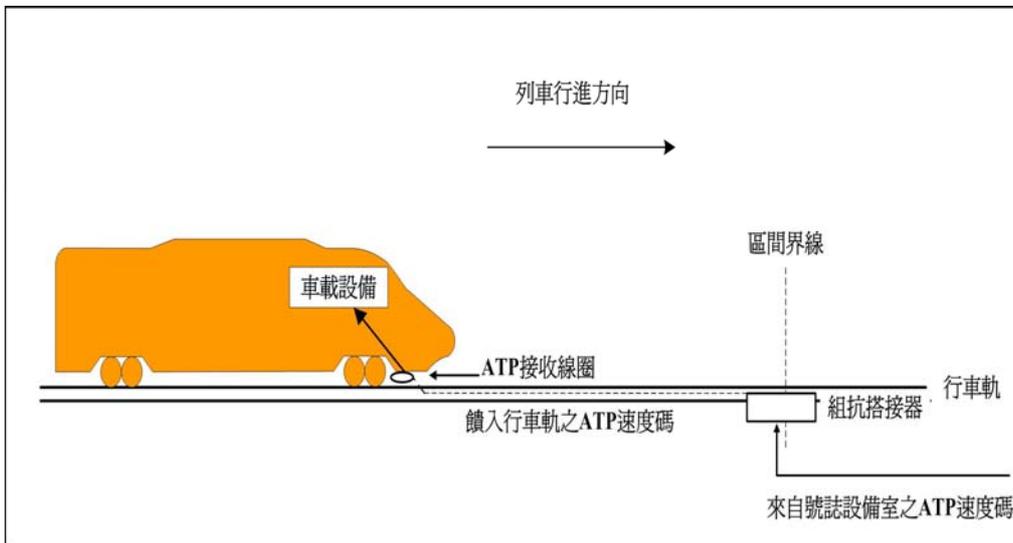


圖 3-3 列車接收 ATP 速度碼示意圖

(二) 速度碼之種類與作用

捷運系統 FBS 根據路線軌道線型、列車性能、列車運轉機制、列車安全煞車距離等條件，於號誌設備室設定各閉塞區間不同之 ATP 速限，列車依各閉塞區間所接收之 ATP 速限行駛。以臺北捷運高運量系統為例，ATP 速度碼有：0KPH、10KPH、25KPH、40KPH、55KPH、65KPH、80KPH。各速度碼之作用，說明如下：

1. 速度碼 0KPH

當閉塞區間遭列車佔據時，該閉塞區間之號誌系統即顯示列車佔據，此時，其後方第一個閉塞區間之速度碼為 0KPH，任何進入佔據區間後方第一個閉塞區間之列車將會接收到零速指令，則列車減速並停止

於此佔據區間前，以避免列車闖入佔據區間。

2. 速度碼 10KPH

當列車行駛至終端站時，如臺北捷運高運量系統之淡水站、南勢角站等，為防止列車衝出軌道終點或撞擊止衝檔，進站時列車會接收到 10KPH 之速度碼，以低速緩慢進站，同時自動進程式化靠站停車，以策安全。

3. 速度碼 25KPH

當閉塞區間遭列車佔據時，該閉塞區間之號誌系統即顯示列車佔據，此時，其後方第一個閉塞區間之速度碼為 0KPH，其後方第二個閉塞區間之速度碼為 25KPH。意即，當列車接收到警戒速度碼 25KPH 時，代表列車前方第二個閉塞區間有列車佔據，為了安全起見，列車必須減速並以 25KPH 之慢速持續前進。

4. 速度碼 40KPH

如前點所示，速度碼 40KPH 之作用與速度碼 25KPH 之作用相同，但因目前列車本身所佔據區間的下一個閉塞區間長度較長，有足夠安全煞車距離時，其警戒速度碼將收到 40KPH。

另外，當路線前方有特殊軌道線型之安全考量時，列車會接收到 40KPH 之速度碼。以臺北捷運高運量系統為例，北投站往奇岩站之下行方向，北投站出站後，列車高架爬坡並下坡至奇岩站，列車持續接

收到 40KPH 之速度碼；圓山站往民權西路站之下行方向，列車因下坡轉彎進入民權西路站，準備進站前亦會接收到 40KPH 之速度碼。

5. 速度碼 55KPH

如前點所示，速度碼 55KPH 之作用與速度碼 40KPH 之作用相同，唯當路線前方特殊軌道線型之變化較小時，速度碼為 55KPH。

6. 速度碼 65KPH

當路線前方軌道線型變化不大時，速度碼為 65KPH，為一般正常行駛之速度碼，較為常見。

7. 速度碼 80KPH

當路線前方趨近於直線段，且前方第三個閉塞區間無列車佔據時速度碼為 80KPH，為一般正常行駛之速度碼。

(三) 功能位階

列車自道旁號誌設備所接收到的 ATP 速限為列車當時所能行駛的最大速限，然而列車實際運轉時，會納入所謂的功能位階，藉由功能位階的調整，以達到調整車速的目的。功能位階可分為：

1. 功能位階 1 (PL1)

列車實際運轉速限等於 100% 的 ATP 速限。

2. 功能位階 2 (PL2)

列車實際運轉速限等於 90% 的 ATP 速限。

3. 功能位階 3 (PL3)

列車實際運轉速限等於 80% 的 ATP 速限。

正常情況下，列車設定之功能位階為 PL2；若列車誤點時，則功能位階調整為 PL1 以進行趕點；若列車比表定時刻提前時，則功能位階調整為 PL3 以維持列車準點。

三、 程式化車站停車

程式化車站停車提供列車到站自動停車，該程式化車站停車曲線已設定於車載號誌之 ATO 內，在列車接近車站前會將速度曲線切換至程式化車站停車曲線，因此列車之速度來源有下列兩種：

1. 列車接收之 ATP 速限經功能位階調整後之實際運轉速限。
2. 程式化車站停車曲線速限。

ATO 以上述兩者中速度較低者為列車實際運轉車速，接近車站時，經與軌道上之車站外部信標線圈（距離停止位置 350m 處）感應後，列車將速度曲線切換至程式化車站停車曲線，開始執行自動車站停車功能，配合軌道上定點之信標線圈（距離停止位置 150m、25m 及 8m 處）及月台端牆附近之定位線圈互相感應，使列車能平穩的煞車進站，並對準正確位置自動停妥。

四、 控制方式

FBS 之控制方式，主要透過車載號誌設備、道旁設備及號誌設備室之訊號相互傳遞與運作，先對列車進行偵測動作，確認閉塞區間遭列車佔據後，由號誌設備室持續發送 ATP 速限，同時行控中心對列車進行監控，必要時下達適當控制指令，使線上各列車能有效運轉於主線上，以達到號誌系統控制之目的。

各列車運轉時會在各閉塞區間持續接收 ATP 速限，號誌設備室依各閉塞區間速度碼預設值或前方區間遭列車佔據情況下，持續發送 ATP 速限，經由阻抗搭接器透過音頻軌道電路，由列車 ATP 接收線圈接收，並傳送至列車上之車載自動列車控制單元，以作為列車控制之依據。值得注意的是，捷運系統之 FBS，當列車佔用閉塞區間時，列車本身後方至該閉塞區間後方區間界線的範圍內，並不會有任何速度碼產生，這也提供了列車行駛安全上更多一層的保護。捷運系統 FBS 之運作原理與速度曲線圖，本研究將在下節詳細說明。

3.1.3 FBS 之運作原理

FBS 控制方式下，列車以各閉塞區間之 ATP 速限運轉，在正常情況下，列車以一般速度指令行駛，直到車站進行程式化自動停車；在前方區間遭列車佔據，列車本身與前車距離接近時，列車本身接收到警戒 ATP 速限，先減速至警戒速度行駛，號誌設備室將依路線前方列車佔據區間之狀況，在下一個區間界線發送適當之速度碼，以有效控制列車之運作，提高運轉效率。

一、 正常情況之運作原理與速度曲線

在正常情況下，號誌設備室依各閉塞區間速度碼預設值發送 ATP 速限，列車會在各閉塞區間持續接收一般速度指令，以較高之 ATP 速度碼（80KPH 或 65KPH）為依據持續行車。當列車準備進站時，車載控制單元將一般速度曲線切換至程式化車站停車曲線，由於列車之程式化車站停車曲線之速限較列車所接收到之 ATP 速限為低，因此列車將依照程式化車站停車曲線，進行自動靠站停車。當列車離站

出發時，列車又將依照 ATP 速限行駛，其列車速度曲線，如圖 3-4 所示。

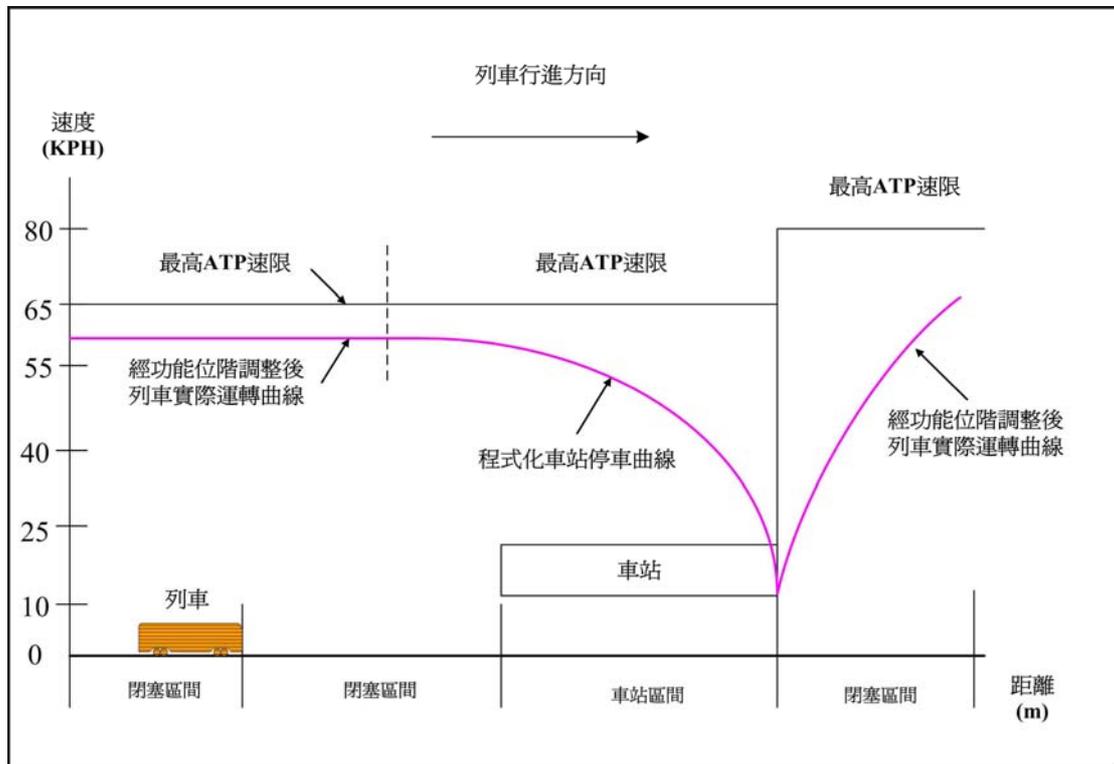


圖 3-4 FBS 列車正常情況下運轉速度曲線圖

二、 前方區間遭佔據時之運作原理與速度曲線

當列車本身進入的閉塞區間，其前方第二個閉塞區間有其他列車佔據時，代表列車本身與前車距離已經接近，為防止列車車速過快，煞車不及有追撞前車之虞，列車本身在進入此閉塞區間時將接收到警戒 ATP 速限，此時列車必須減速至警戒速限（台北捷運為 25KPH 或 40KPH）並以此速限持續前進，如圖 3-5 所示。

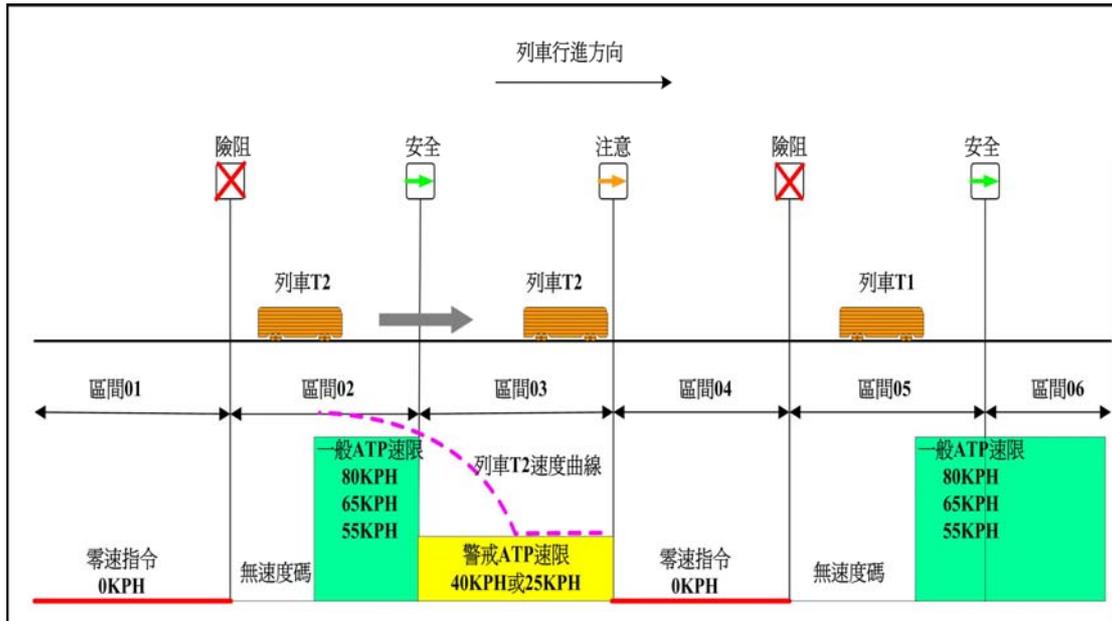


圖 3-5 列車本身與前車距離接近速度曲線圖

當列車本身以警戒 ATP 速限 25KPH 或 40KPH 繼續前進至下一個閉塞區間時，此時所接收到的速度碼有三種可能：

1. 當列車本身所在區間前方第一個閉塞區間仍被前方列車佔據時，此時列車本身會收到零速指令，速度碼為 0KPH，列車本身會依據自動列車控制單元之停車速度曲線煞車停車於此閉塞區間末端前方，以避免列車本身闖入前方被佔據之閉塞區間，直到列車本身接收到新的速度碼列車始可加速前進，其列車運作與速度曲線，如圖 3-6 所示。若列車無法順利減速並於此閉塞區間末端前停車，而有進入已被佔據區間之虞時，列車自動防護系統（ATP）便會自動啟動緊急煞車機制強迫列車緊急煞車至停車。

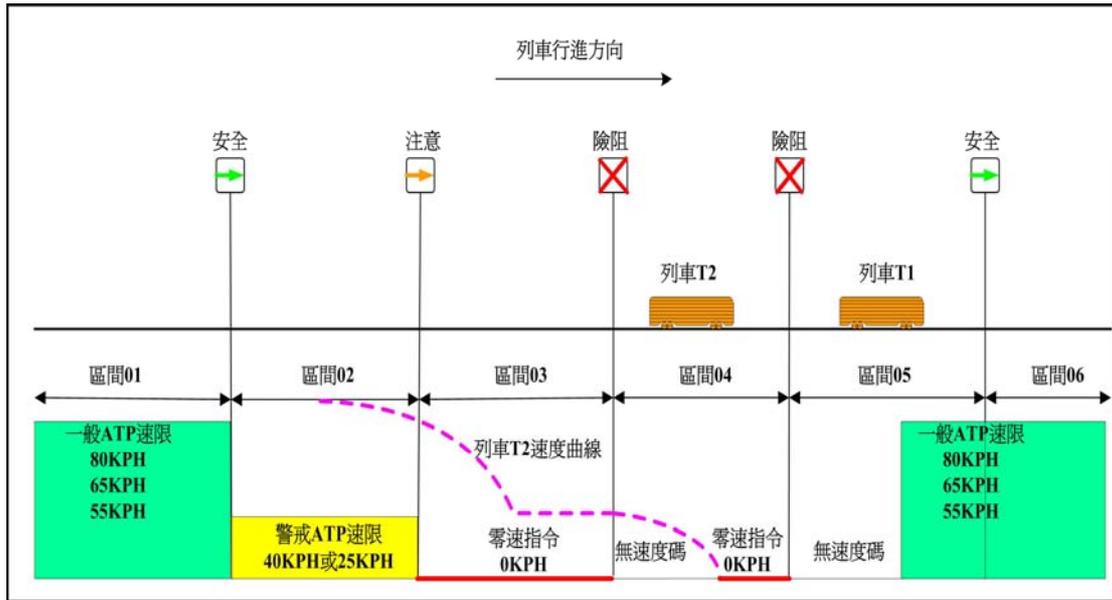


圖 3-6 列車本身前方第一個閉塞區間遭佔據時速度曲線圖

- 當列車本身所在閉塞區間前方第一個閉塞區間無列車佔據，而前方第二個閉塞區間有列車佔據時，此時列車本身依舊收到警戒 ATP 速限 25KPH 或 40KPH，持續以慢速前進，其列車運作與速度曲線，如圖 3-7 所示。

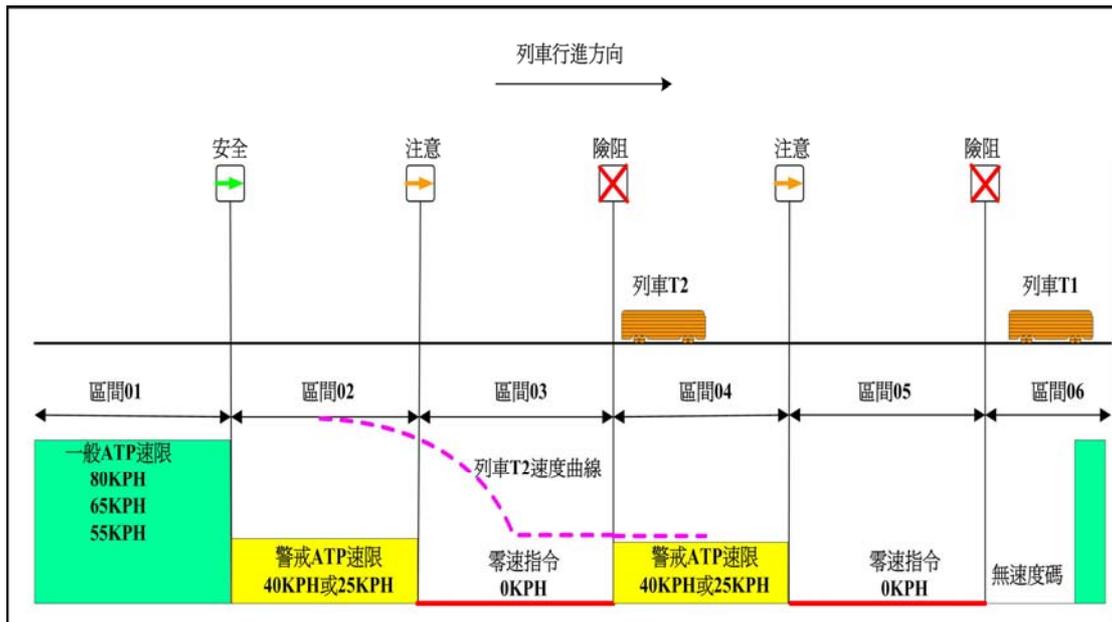


圖 3-7 列車本身前方第二個閉塞區間遭佔據時速度曲線圖

3. 當列車本身所在區間前方第一個閉塞區間及第二個閉塞區間皆無列車佔據時，代表列車本身前方閉塞區間狀況正常，列車將接收到一般速度指令，以較高之 ATP 速限（80KPH 或 65KPH）行駛，此時列車開始加速前進，其列車運作與速度曲線，如圖 3-8 所示。

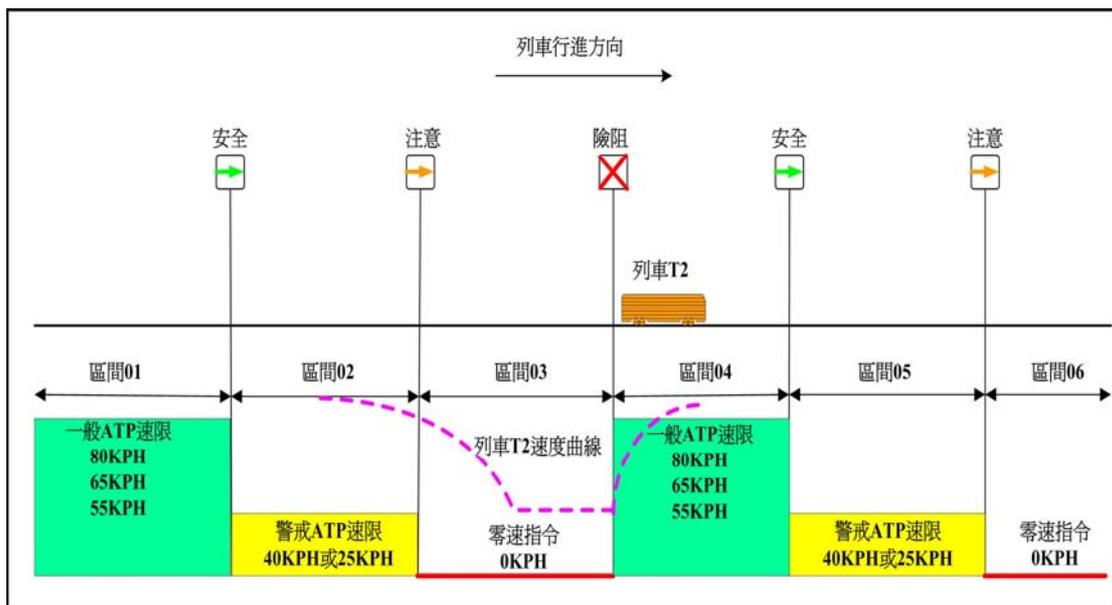


圖 3-8 列車本身前方閉塞區間狀況恢復正常時速度曲線圖

值得注意的是：當列車本身前方第二個閉塞區間遭其他列車佔據，且列車本身前方第一個閉塞區間其區間長度較長足以讓列車本身以 40KPH 煞車至停止時，列車所接收到之警戒 ATP 速限可為 40KPH；當列車本身前方第二個閉塞區間遭其他列車佔據，但列車本身前方第一個閉塞區間其區間長度較短時，列車所接收到之警戒 ATP 速限為 25KPH，以便列車需要煞車至停止時，列車能以較安全及較保守之警戒 ATP 速限減速煞車至停止。

3.2 MBS 之控制方式與運作原理

3.2.1 MBS 之原理、設計型式與設備

MBS 技術逐漸發展成熟並受到重視，已開始運用於少數都會區捷運系統中。移動式閉塞區間原理、移動式閉塞區間之設計型式及相關之硬體設備說明如下。

一、 移動式閉塞區間原理

移動式閉塞區間可視為許多非常小的固定閉塞區間，且區間長度趨近於零，列車與前車之間除維持正常煞車距離外，並額外加上安全距離，以作為最壞狀況下列車緊急煞車之保障距離。移動式閉塞區間係將路線劃分成許多區域，列車本身每數秒和道旁區域基地台的通訊，得到前車位置、前車目前速度、前方路線條件等參數，經由列車車載資料庫電腦計算列車本身運轉之速度曲線並隨時更新，以作為車載號誌控制單元控制列車加速或減速之依據，使列車能順利運轉至目標位置點，同時能與前車保持適當之安全距離。

二、 MBS 之設計型式

MBS 最早由固定閉塞區間音頻軌道電路改良而來，後來以迴路式軌道電路較為常見。隨著技術發展，新一代的 MBS 以信標偵測設計為主。分別說明如下：

(一) 固定閉塞區間改良型

最早之移動式閉塞區間概念其實來自傳統固定閉塞區間之音頻軌道電路，係將固定閉塞區間長度縮短，且每一閉塞區間長度相同，並配合系統軟體之改良與硬體設備之增加，以縮短列車間之安全距離。然而，因需要大量的號

誌設備，且縮短班距之效果有限，因此已被淘汰。

(二) 迴路式軌道電路型

早期 MBS 以迴路式軌道電路型較普遍，其迴路長度較常見的為 25m，下坡路段則採用較長之迴路長度如 50m 或 100m。迴路式軌道電路係將電感迴路佈設在軌道內側以連續偵測列車位置，並透過列車與道旁號誌設備及道旁號誌設備與列車控制中心間之連續雙向訊號傳輸，將前車所在位置、速度、路線條件等資料傳送至列車之車載號誌控制單元，以作為控制列車加速、減速與停車等依據。其訊號傳輸係將軌道內側所佈設之電感迴路以磁場感應方式傳至鐵軌，再經由鐵軌以磁場感應方式將訊號傳至列車之車載號誌控制單元，如圖 3-9 所示。

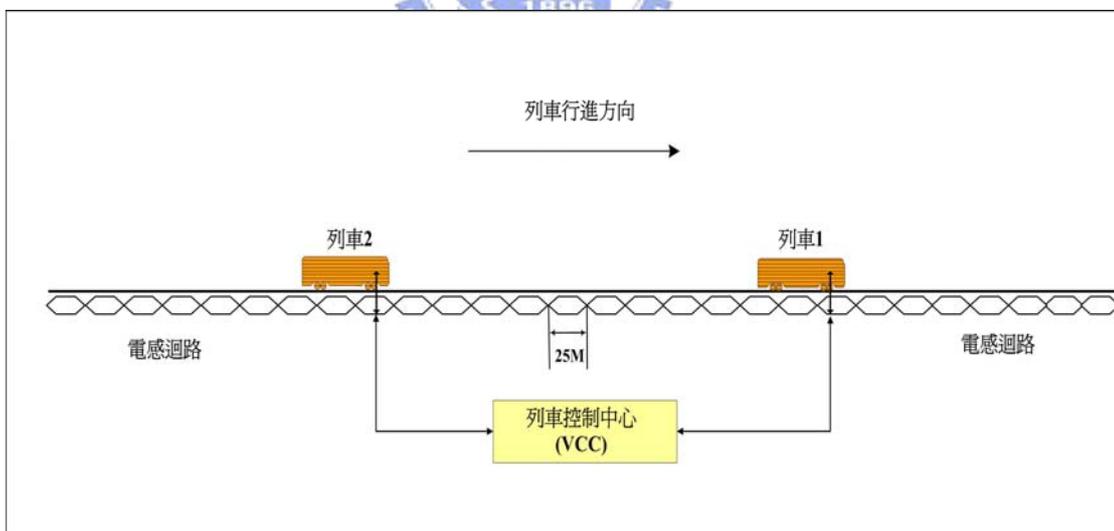


圖 3-9 迴路式 MBS

(三) 信標偵測型

新一代之 MBS 主要採用通訊式列車控制系統，為配合通訊式列車控制系統之運作，其軌道電路採用信標偵測設

計。該型式係依軌道線型及路線條件在軌道中央以每 5m 至 25m 間不等之距離設置一個信標，當列車經過時會發射訊號，信標感應後會將位置資訊反射給車載資料庫，列車會將車載資料庫內各項資料傳至道旁區域基地台。道旁區域基地台接收區域內各列車之資料後，會將前車位置、前車目前速度與前方路線條件傳回至列車本身，以作為車載資料庫電腦運算及車載無線電自動列車控制單元控制列車之依據，如圖 3-10 所示。

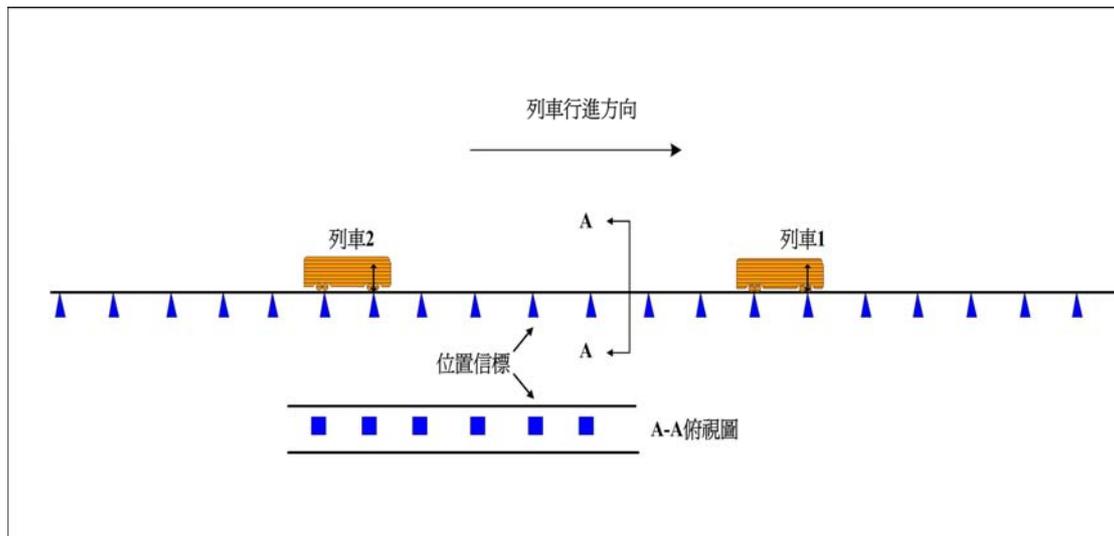


圖 3-10 信標偵測式 MBS

三、 MBS 之設備

(一) 車載設備

車載設備主要包含智慧型無線電自動列車控制系統 (Radio ATC) 模組、列車通訊設備及車載資料庫等。智慧型無線電自動列車控制系統主要利用列車上之無線電通訊設備與軌道控制元件及道旁區域基地台進行雙向通訊，以執行 ATO、ATP 及 ATS 三個子系統之功能。車載資料庫主

要有列車參數資料庫與列車共用資料庫，列車參數資料庫主要提供列車本身運轉速度、加速度與減速度、緊急煞車率與服務煞車率、前方列車位置、前方列車長度、前方列車速度等等參數；列車共用資料庫主要提供軌道線型、路線狀況、車站停車位置點、信標位置、無線電頻率等等相關參數。列車依據此兩套資料庫決定列車本身與其他列車間的距離、速度曲線、安全煞車距離、煞車率等資料條件以決定列車本身最佳的安全煞車距離，且車載資料庫隨列車行進每隔數秒會接收來自道旁區域基地台的資訊以進行列車運轉曲線更新。

(二) 位置信標



位置信標提供信標編號及絕對參考座標給車載資料庫，為被動感應電子元件，依軌道線型與路線條件不同對其安裝距離做適當調整，一般以每 5m 至 25m 間不等之距離安裝一個位置信標於軌道中央。當列車經過時會發射訊號給位置信標，位置信標感應後會將信標編號、絕對參考座標等位置資訊反射給車載資料庫。列車會將車載資料庫內各項資料傳至道旁區域基地台，道旁區域基地台接收區域內各列車之資料後，會將前車位置、前車目前速度與前方路線條件傳回至列車本身，以作為車載資料庫電腦運算及車載無線電自動列車控制單元控制列車之依據。

(三) 道旁區域基地台

道旁區域基地台為列車與列車控制中心間資訊接收與

傳送之道旁設備，路線上每區域皆設置一個道旁區域基地台，每個道旁區域基地台可以同時控制之列車數為 10 至 40 列不等。道旁區域基地台負責接收區域內各列車之無線電訊號資料，並將各列車之資料傳回區域內各列車之車載無線電自動列車控制單元上，作為車載資料庫之資料來源，藉此達到車載資料庫更新之目的。

每一道旁區域基地台涵蓋範圍邊緣與鄰近之道旁區域基地台之涵蓋範圍邊緣互相重疊，並以傳輸纜線連接各區域基地台，使各列車行經不同道旁區域基地台涵蓋範圍時，能藉由重疊區與傳輸纜線之設置，維持無線電通訊之連續並達到資料換手傳遞的目的，如圖 3-11 所示。

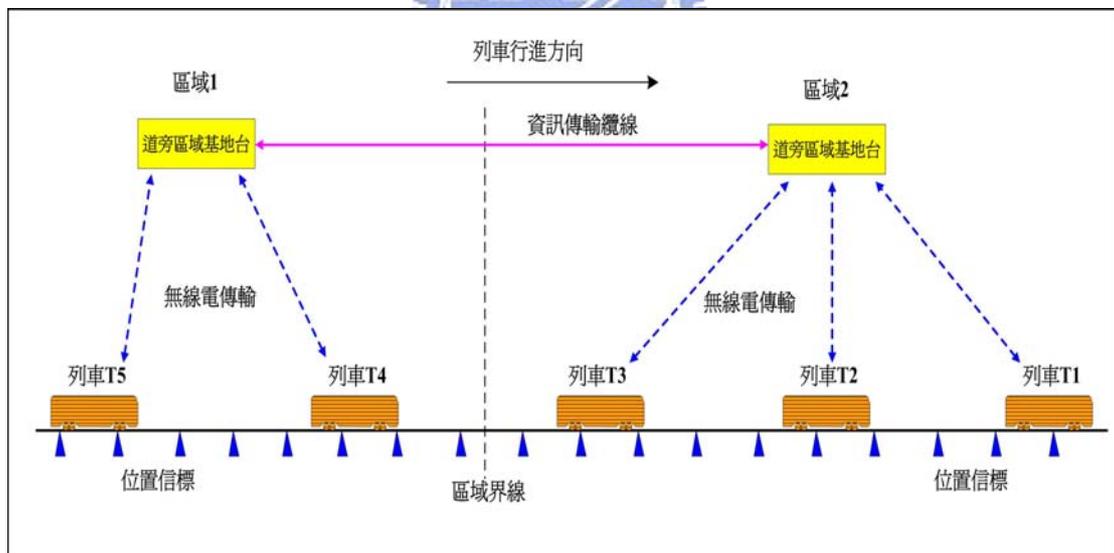


圖 3-11 道旁區域基地台與列車通訊示意圖

(四) 列車控制中心

列車控制中心負責統整各列車之運轉資料與監控各列車之運轉情形，並視情況傳送適當之控制指令至道旁區域基地台，再由道旁區域基地台發送到區域內各列車之車載

號誌控制單元上。

3.2.2 MBS 之控制方式

新一代之 MBS，係以移動式閉塞區間原理為軟體架構，並配合通訊式列車控制（Communication-Based Train Control, CBTC）技術來達到系統控制之目的。所有列車搭配車載無線電自動列車控制（Radio Auto Train Control, Radio ATC）系統，以無線電訊號傳輸方式，進行列車與道旁區域基地台之雙向通訊。當列車於主線上行進時，各列車透過位置信標反射訊號不斷更新列車本身所在之絕對位置，車載無線電自動列車控制單元並將列車位置、列車長度、運轉速率、加減速率、列車運轉狀況等資料以無線電訊號傳輸至道旁區域基地台。道旁區域基地台接收區域內各列車相關資料後，將相關資料與來自列車控制中心之行車指令傳回給各列車。各列車將所接收到有關前車位置、前車車長、前車目前速率、前車加速率、前車減速率、前方路線狀況、前方軌道速限等資訊與車載資料庫之資料進行比較，經車載資料庫計算與修正後，列車將自動調整車速，並適時的加速或減速，以維持列車最高運轉效率，並與前車保持最佳的安全煞車距離。

MBS 依前述方式進行列車控制，其速度曲線以模糊理論為控制邏輯，其速度碼由原來 10KPH、25KPH、40KPH、55KPH、65KPH、80KPH 等階段式速限控制，改變成以 0KPH 至 80KPH 為範圍且速度以每 1KPH 為單位的反應速度曲線。當列車本身與前車距離愈接近時，列車本身速度會愈慢，並維持一定安全距離；當前車因停止、故障、訊號錯誤等情況發生時，列車本身將不斷接收到來自道旁區域基

地台之前車位置一直不變且速度為零之資訊，列車本身會依據車載資料庫所計算出來的正常煞車曲線進行煞車減速，並停車於目標位置點，以避免追撞前車。MBS 提供最佳的安全煞車距離，兩列車間之安全距離相對縮短，可縮短列車班距，其運作原理與速度曲線圖，本研究將在下節詳細說明。

3.2.3 MBS 之運作原理

MBS 係車載無線電 ATC 單元不斷與道旁區域基地台通訊，同時藉由位置信標連續偵測得到列車位置，並與車載資料庫進行比較，經車載資料庫計算與修正後，列車依據更新後之速度曲線運轉。

一、 正常情況之運作原理與速度曲線

正常情況下，列車於主線上以正常運轉曲線行駛。列車出站後，列車直接加速至正常運轉曲線所提供之最高速限行駛。由於路線條件與軌道線型的不同，路段行駛速限有所不同，因此列車繼續行進時，車載資料庫每隔數秒便接收來自道旁區域基地台的資訊以對正常運轉曲線進行更新，列車藉由不斷更新的正常運轉曲線自動調整車速，使列車能平滑穩定的持續前進。直到列車接近車站前，列車便將正常運轉曲線切換至正常煞車曲線，並依照程式化車站停車進行列車自動靠站停車，並停止於目標停車位置點上，其速度曲線圖如圖 3-12 所示。

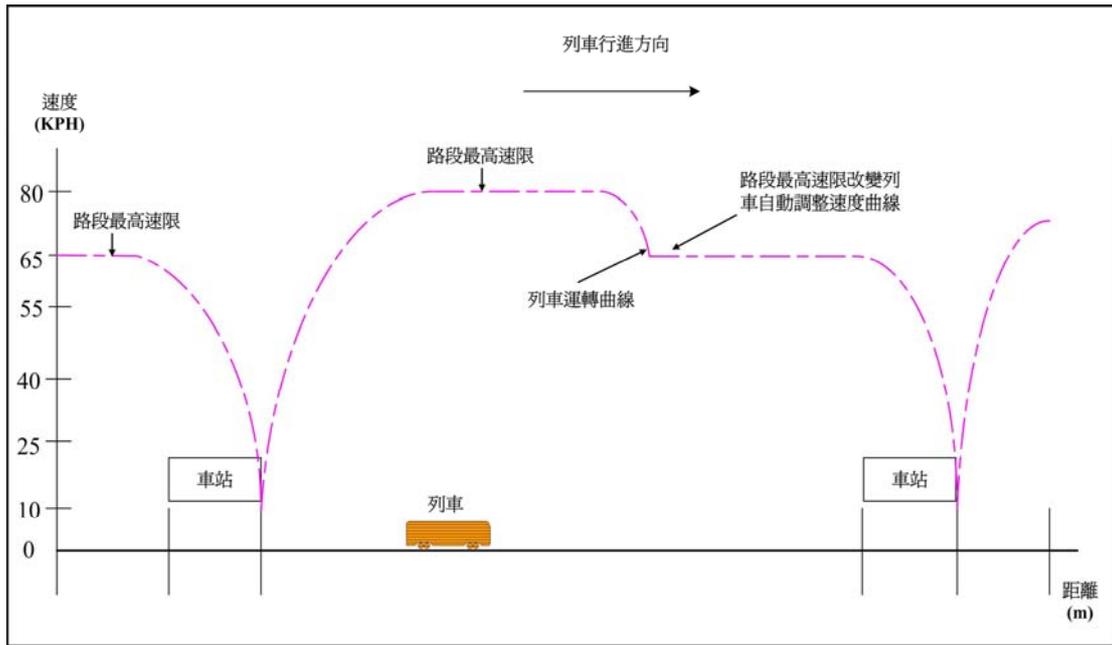


圖 3-12 MBS 列車正常情況下運轉速度曲線圖

二、 列車接近前車時之運作原理與速度曲線

列車運轉時一般以正常運轉曲線為主；而列車準備停車時係以煞車曲線為主，煞車曲線以正常煞車曲線（Normal Braking Curve）為主要，以警告煞車曲線（Warning Braking Curve）為次要，並輔以緊急煞車曲線（Emergency Braking Curve）。前車因故障或突發事件而停止時，後方列車依據正常煞車曲線逐漸減速運轉，最後停止於目標停車位置點，並與前車保持安全距離。在此情況下，若後方列車煞車速度超出正常煞車曲線時，後方列車會自動修正煞車曲線改以警告煞車曲線進行煞車並調整煞車率或減速率，進行適當之車速調節，以確保列車安全煞車。若後方列車煞車速度超出警告煞車曲線時，後方列車便會將煞車曲線切換至緊急煞車曲線並啟動緊急煞車機制強迫列車在最短時間內停止，以確保後方列車追撞至前車前，能完成緊急煞車動作並停止於緊急停車位置點，同時維持兩列車間 25m 之額外最小安全距離，其速度曲線圖如圖 3-13 所示。

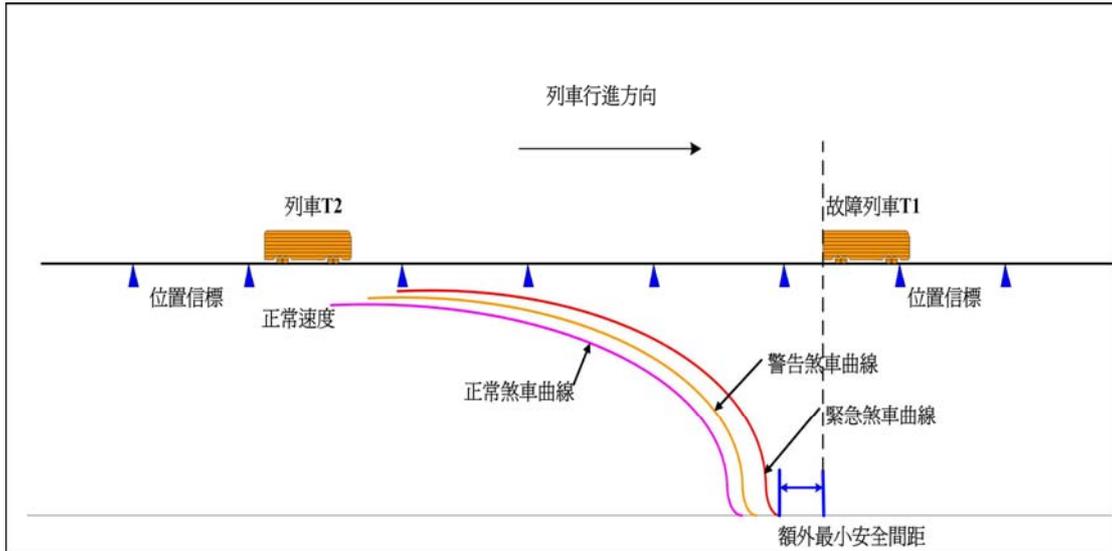


圖 3-13 MBS 列車煞車曲線示意圖

前車因故障或突發事件而停止時，後方列車依據正常煞車曲線逐漸減速運轉。在後方列車尚未到達目標停止位置點時，倘若前車故障或事件排除，前車開始前進並持續運轉，後方列車將接收到來自道旁區域基地台提供有關前車位置變動、速度增加、持續前進等資訊，後方列車便會重新修正並持續更新運轉曲線，因此後方列車便開始逐漸加速，並自動與前車維持適當之安全距離，其速度曲線圖如圖 3-14 所示。

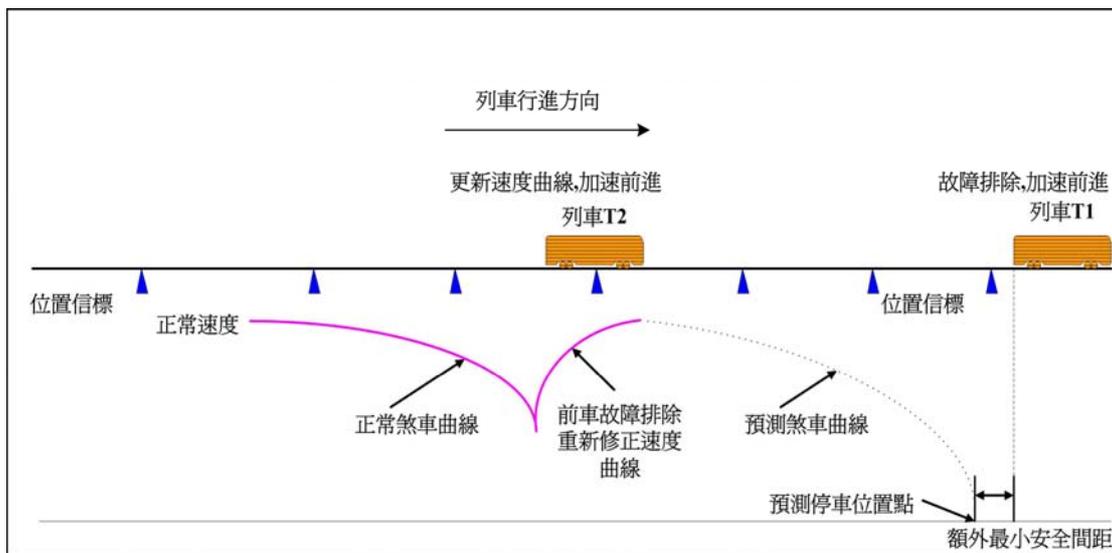


圖 3-14 前車故障排除後車修正速度曲線示意圖

3.3 FBS 與 MBS 之運作差異

FBS 與 MBS 除軟體功能與硬體設備不同外，在此兩種號誌系統控制下，其運作方式明顯不同，本小節將探討此兩種閉塞區間號誌系統之運作差異。

一、 正常情況下此兩種閉塞區間號誌系統之運作差異

在 FBS 之運作下，依軌道線型與路線條件不同閉塞區間長度有所不同，為維持列車與前車保持安全距離並以正常速度運轉，正常情況下列車與前車之間須保持至少兩個閉塞區間距離，並以 90% 之 ATP 速限行駛。然而列車於閉塞區間中之實際位置無法確切得知，列車所在位置之解析度相對較差，其確實的位置只能解析至閉塞區間長度，而每個固定式閉塞區間長度為 170m 至 460m 不等，加上列車與前車間須保持至少兩個閉塞區間距離，因此兩列車間之安全距離較長，則最小班距較長。

在 MBS 之運作下，列車所在位置之解析度目前已經縮小至 0.25m 到 6.25m 不等，又移動式閉塞區間之區間長度為零，正常情況下列車與前車之間保持一適當之安全距離，並依照車載資料庫電腦所提供之正常運轉曲線行駛，兩列車間之安全距離可相對縮短，最小班距相對縮短。

二、 受運行干擾下此兩種閉塞區間號誌系統之運作差異

捷運系統之班距可分為未考慮營運寬裕時間的最小班距與考慮營運寬裕時間的營運班距。若考慮因誤點或突發狀況等運行干擾發生時之運轉餘裕，則最小班距會額外加上營運寬裕時間，以避免某列車因延誤而影響後續列車的運行，並藉由運轉餘裕提供列車進行趕點，

以維持各列車到站之準點性。在 FBS 之運作下，列車平常以 90% 之 ATP 速限行駛，當列車延誤時，列車本身會自動調整其功能位階以 100% 之 ATP 速限進行趕點。若前車發生故障或突然停止時，列車本身會在距離前車兩個閉塞區間時減速行駛（詳如 3.1.3 節所述），並在距離前車一個閉塞區間時停車，待狀況排除後，受影響之各列車以 100% 之 ATP 速限進行趕點。在受運行干擾之影響範圍內，離故障列車距離愈遠之列車，其前方受影響而停止或減慢之列車愈多，因此受影響之各列車其所受之運行干擾大小與故障列車之距離成正比，且所需之運轉餘裕與運行干擾大小成正比，加上 FBS 列車間之安全距離較長，因此 FBS 所需之營運寬裕時間較多。

在 MBS 之運作下，列車依車載資料庫電腦所計算之正常運轉曲線行駛，列車本身之速度與前車距離成正比，當列車本身與前車距離愈接近時，列車本身速度會愈慢，但不會停止；若前車發生故障或突然停止時，列車本身會切換至煞車曲線進行停車，在最壞的狀況下，列車本身停止後會與前車保持 25m 之額外最小安全距離。在這樣的情況下，因 MBS 提供較彈性與靈活的運作方式，使列車本身與前車之安全距離縮小，對上游各列車之運行干擾相對縮小，因此 MBS 所需之營運寬裕時間亦相對縮小。

經探討 FBS 與 MBS 之運作差異發現，FBS 在正常情況下其最小班距較長，若考慮所謂的營運寬裕時間，則營運班距亦較長；MBS 在正常情況下其最小班距較短，若考慮營運寬裕時間，則營運班距相對亦較短。

為深入了解在 FBS 與 MBS 控制方式下路線所能達到之最大運

能，在不考慮營運寬裕時間之情況下，本研究將於第四章分別構建 FBS 與 MBS 之模擬模型，同時開發 FBS 與 MBS 之模擬模式，以為後續章節分析之工具程式。



第四章 FBS 與 MBS 模擬模式之構建

本章節首先構建 FBS 模擬模型，對其模擬系統進行設定，並訂定系統運作規則，進而透過程式語言所撰寫之模擬模式將模型程式化，以建立 FBS 之模擬模式，並對該模擬模式進行驗證，以確認模式之適用性。最後構建 MBS 模擬模型，並透過程式語言發展出 MBS 模擬模式，最終再對該模式進行檢核。

4.1 FBS 模型構建

4.1.1 模擬系統設定

本研究以臺北市都會區高運量捷運系統圓山站至劍潭站路段為模擬系統基礎，其預設之各閉塞區間長度及 ATP 速限係參考臺北市都會區高運量捷運系統圓山至劍潭段原先規劃之閉塞區間長度及 ATP 速限，如圖 4-1 與表 4-1 所示。模擬路線總長度共 1515m，圓山站列車停止位置位於路線 0m 處，劍潭站列車停止位置位於路線 1515m 處，圓山站與劍潭站之間預設有 5 個閉塞區間，加上劍潭站之車站區間，路線共劃分成 6 個固定閉塞區間。由模擬起點產生列車 T1 與列車 T2 兩列車進行模擬，列車皆以車載號誌系統配合 4.1.2 節所訂定之 FBS 運作規則全自動運轉，並在車站自動靠站停車，直至列車 T2 靠站停車後結束模擬。依照目前臺北捷運現況，停站時間 T_D 為 25s、列車長度 L_T 為 141m (台北捷運高運量標準列車編組)、列車加速度 a 為 1.0m/s^2 、列車減速度 b 為 1.0m/s^2 、列車煞車系統反應時間 T_R 為 1.5s。

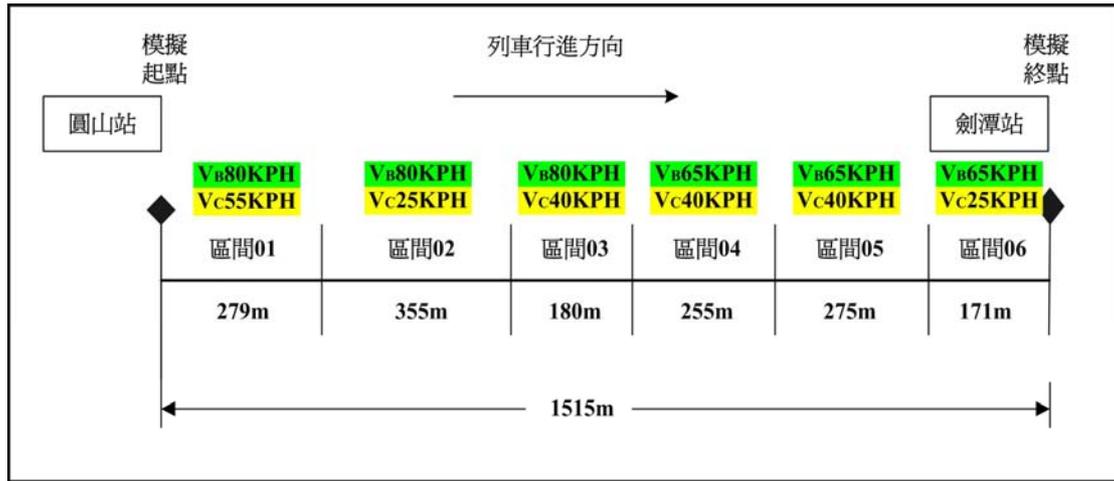


圖 4-1 台北捷運高運量圓山至劍潭站路線佈設現況圖

表 4-1 各閉塞區間預設之最高 ATP 速限與區間長度

區間編號	區間預設 最高 ATP 速限	前方第二個區間 遭佔據之警戒速限	區間長度	備註
-	-	-	-	圓山站
01	80KPH	55KPH	279m	
02	80KPH	25KPH	355m	
03	80KPH	40KPH	180m	
04	65KPH	40KPH	255m	
05	65KPH	40KPH	275m	
06	65KPH	25KPH	171m	劍潭站

由表 4-1 中，各閉塞區間依所在位置提供不同之區間最高 ATP 速限，列車離開圓山站後，區間 01 至區間 03 列車可以最大 ATP 速限 80KPH 運轉，接近劍潭站前，區間 04 至區間 06 列車最高 ATP 速限降為 65KPH，並於劍潭站列車停止位置速限降為 0KPH。基於安全考

量，依據第三章 FBS 控制方式與運作原理，當列車本身前方第二個閉塞區間遭到佔據時，代表列車本身與前方列車距離接近，列車本身必須以警戒 ATP 速限 25KPH 或 40KPH 行駛，使列車如果需要在下一個閉塞區間煞車停車時，有適當且足夠之安全煞車距離，而如此階段式的煞車亦可避免乘客乘坐感到不適，維持一定之舒適度。值得注意的是，當列車本身前方第二個閉塞區間遭到佔據時，區間 01 之警戒 ATP 速限為 55KPH，乃因為區間 02 之閉塞區間長度為 355m，若前車因故障而使列車本身必須於區間 02 停車時，列車本身從 55KPH 以最壞狀況減速度 0.7m/s^2 煞車至停車所需煞車距離約為 182m，因此區間 01 警戒 ATP 速限可以為 55KPH。

4.1.2 系統運作規則訂定

一、單車運轉



如圖 4-2 所示，FBS 受限於各閉塞區間之最高 ATP 速限 V_{Bi} ，在正常情況下，列車以功能位階 2 運轉，因此列車以最高 ATP 速限之 90% 速度 V_i 運轉。由表 4-1 之各區間速限得知，列車從車站離站所接收到之最大 ATP 速限為 80KPH，經功能位階 2 調整後列車所能運轉之最高 ATP 速限為 72KPH，因此列車離站後以等加速度 a 加速至 72KPH，隨後以 72KPH 等速度運轉，至區間 04 時列車接收到最大 ATP 速限 65KPH，經功能位階 2 調整後所能運轉之最高速限為 58.5KPH。因此列車從 72KPH 減速至 58.5KPH 後以等速度持續運轉，直至車站區間以等減速度 b 煞車至定位點停止。FBS 單一系列車從圓山站行駛至劍潭站之

運行時間如式 4-1 所示。

$$\text{運行時間} = \frac{V_{Max}}{a} + \frac{\sum_{i=1}^3 L_{Bi} - \frac{V_{Max}^2}{2a}}{V_{Max}} + \frac{V_3 - V_4}{b} + \frac{\sum_{i=4}^5 L_{Bi} - \frac{V_{Max}^2 - V_4^2}{2b}}{V_5} + \frac{V_6}{b} \quad (4-1)$$

其中 L_{Bi} 為各閉塞區間長度、 a 為加速度、 b 為減速度、 V_{Max} 為最高速度。

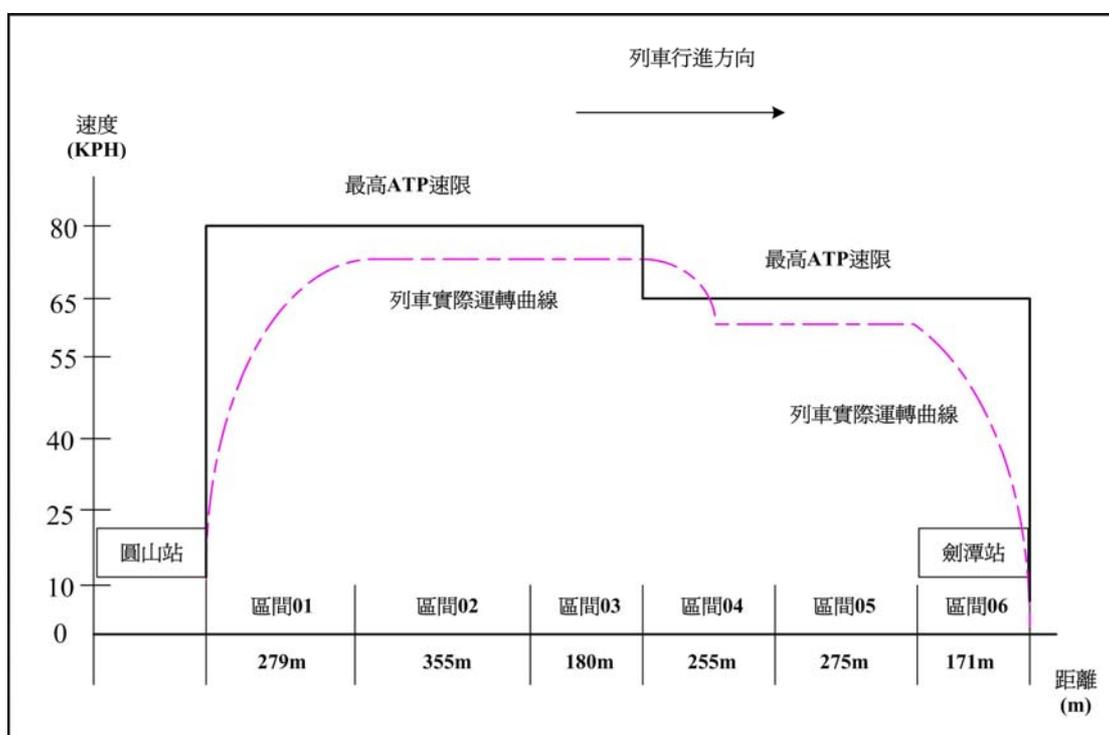


圖 4-2 FBS 單一系列車於圓山至劍潭站之距離-速度關係圖

二、跟車模式

於 FBS 控制方式下，同方向兩列車 T1 與列車 T2，後方列車 T2 與前車 T1 保持跟車行為，在正常運轉情況下，兩列車間必須保持兩個閉塞區間以上之距離，由於路線上影響班距較明顯之瓶頸點為車站地區，因此列車 T2 與前車 T1 間之最小班距關係圖如圖 4-3。

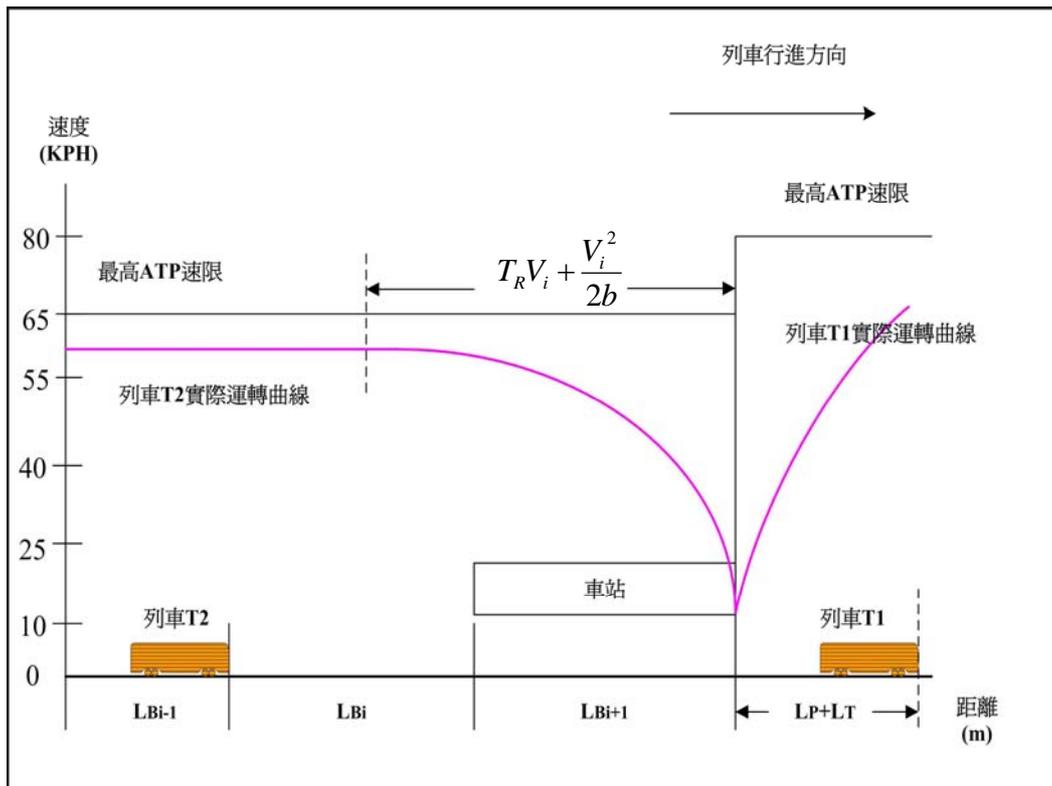


圖 4-3 FBS 兩列車間之最小班距關係圖

根據固定閉塞區間號誌統控制規則，在正常運轉情況下，兩列車間必須保持兩個閉塞區間以上之距離，由圖 4-3，因後方列車 T2 目前位於區間 Bi-1，與前車 T1 所需維持之兩個閉塞區間長度為 $L_{Bi}+L_{Bi+1}$ ，再加上前車 T1 已經離站所行駛的距離 L_p+L_r ，可得到正常情況下前後兩列車間所需維持之安全距離 S_s 如式 4-2，其中 L_p 為列車 T2 即將進入區間 Bi 時前車 T1 已經離站所行駛之距離（由車站停車位置點計算至列車尾部）， L_r 為前車列車長度。由圖 4-3，前車 T1 離站後已行駛之時間如式 4-3。而兩列車間之最小班距 H_{Min} 如式 4-4 所示，為列車 T2 於區間 Bi 前段所行駛之時間、列車煞車系統反應時間 T_R 、列車煞車至停止之時間、停站時間 T_D 及前車 T1 離站已行駛之時間等五項時間值之總和。

$$S_S = \sum_i^{i+1} L_{Bi} + (L_P + L_T) \quad (4-2)$$

$$\text{前車 T1 離站已行駛之時間} = \sqrt{\frac{2(L_P + L_T)}{a}} \quad (4-3)$$

$$H_{Min} = \frac{\sum_i^{i+1} L_{Bi} - \left(T_R V_i + \frac{V_i^2}{2b} \right)}{V_i} + T_R + \frac{V_i}{b} + T_D + \sqrt{\frac{2(L_P + L_T)}{a}} \quad (4-4)$$

三、系統運作規則

1. 前車 T1 發車後，需經過發車間隔時間 H_D 後，列車 T2 始可發車。
2. 列車 T1 與列車 T2 依照各閉塞區間預設之最高 ATP 速限經功能位階調整後，以功能位階調整後之實際速度運轉，並於車站自動停車。
3. 當列車離站後，列車以等加速度 a 加速至最高 ATP 速限。
4. 當列車目前車速小於區間 ATP 速限時，則持續加速。
5. 當列車目前車速等於區間 ATP 速限時，則維持等速。
6. 當列車目前車速大於區間 ATP 速限時，則持續減速。
7. 當列車進入車站區間準備停車時，執行程式化自動停車程序，列車以程式化自動靠站停車曲線減速至 0KPH。
8. 當列車靠站時，列車自動停止於區間 06 末端，因此路線 1515m 處之速度為 0KPH。
9. 當列車靠站停妥後，需經過停站時間 T_D 後才可加速離站。

10. 正常情況下，列車 T2 與前車 T1 間至少必須保持之安全距離為間隔兩個閉塞區間長度。
11. 當列車前方第二個閉塞區間遭佔用時，列車改以警戒 ATP 速限 V_{Ci} 運轉。
12. 最小班距 H_{Min} 為前後車到站間隔與發車間隔 H_D 相差 0.5 秒內之正常運轉班距。

4.2 FBS 模擬模式

4.2.1 程式開發

本研究以 Java Script 程式語言撰寫捷運系統 FBS 模擬模式(Metro Fixed Block Signaling System Simulation Model, 以下簡稱 Metro-FBSSM)，藉此將 4.1 節所構建之模型模式化，以為本研究第五章進行分析工作之工具程式之一。Metro-FBSSM 開發過程考慮模擬輸出結果繪圖之精確性，因此 Metro-FBSSM 的模擬距離間隔預設值為 1 公尺，以降低誤差來源使模擬結果更加精確。Metro-FBSSM 以 Windows 為作業平台，並以中文化網頁視窗為其操作介面，該程式依照各項輸入之參數，經程式計算後輸出列車位置、對應速率、運行時間等詳細資料，同時顯示列車在各區間是否因前車影響而產生運行干擾，以為後續分析之參考依據。Metro-FBSSM 資料輸出具有指定資料詳細度與變更輸出資料類型等兩大特性，後續小節將詳細介紹 Metro-FBSSM 及模擬流程。

4.2.2 FBS 模擬模式

捷運 FBS 模擬模式 (Metro-FBSSM) 其操作介面分為參數輸入介面與結果輸出頁面，如圖 4-4 與圖 4-5 所示。



圖 4-4 Metro-FBSSM 程式參數輸入介面

參數輸入介面分為四大欄，分別為各閉塞區間之最高 ATP 速限 V_{Bi} (KPH)、各閉塞區間之警戒 ATP 速限 V_{Ci} (KPH)、各閉塞區間長度 L_{Bi} (m) 及列車營運特性參數等。其中，列車營運特性參數包括列車加速度 a (m/s^2)、列車減速度 b (m/s^2)、列車長度 L_T (m)、列車反應時間 T_R (s)、列車停站時間 T_D (s)、發車間隔 H_D (s)。當各欄位參數輸入完畢後，以滑鼠點擊「執行」鈕後，程式便開始模擬計算程序，並直接將詳細的結果資料輸出在結果輸出頁面。

如圖 4-5，結果輸出頁面詳細列出列車於各區間之運行狀況為正

常或警戒、兩列車之位置、對應速率及累加時間等資料，以作為繪製距離-速率與時間-距離等曲線圖之資料來源。為方便結果輸出資料進行後續之繪圖與分析工作，結果輸出資料頁面具有以下兩種特性：

一、 指定輸出資料之詳細度

Metro-FBSSM 紀錄列車每行進一公尺之狀況，使模擬結果更加精確並降低誤差來源，為方便程式開發過程之測試與模擬輸出結果之觀察，因此在模擬開始前，可指定 Metro-FBSSM 程式最終輸出資料之密集度，調整數據輸出之間距，可得到不同數量之結果資料筆數。Metro-FBSSM 程式預設之數據輸出間距為 1 公尺，由於模擬總長度為 1515 公尺，因此兩列車之資料筆數至少有 3030 筆，以作為後續繪圖與分析工作之資料來源。

二、 變更輸出資料類型

Metro-FBSSM 程式於結果輸出頁面完整呈現各筆資料，並配合文字說明列車於各區間之狀態、列車位置、目前對應速率、運行時間等詳細資料。為使後續繪圖工作方便，在模擬開始前，可變更 Metro-FBSSM 程式於結果輸出時僅單純輸出數據，如圖 4-6 所示。

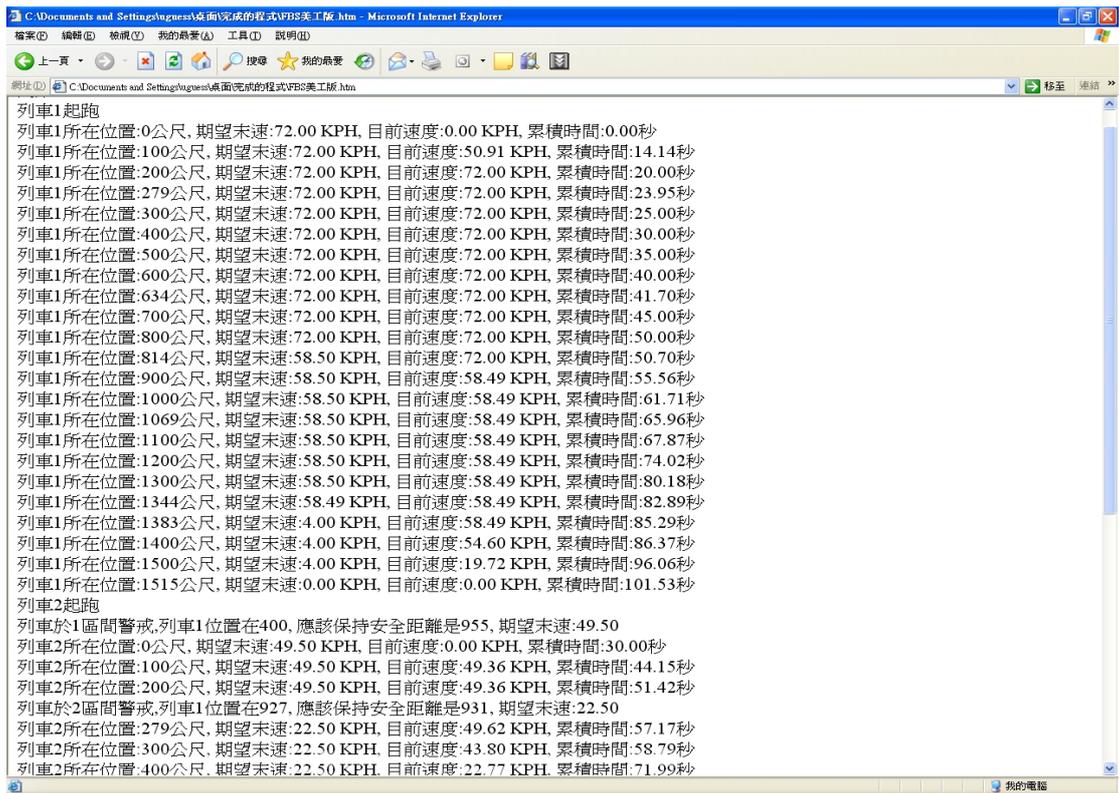


圖 4-5 Metro-FBSSM 結果輸出頁面圖 (文字說明 筆/100 公尺示意)

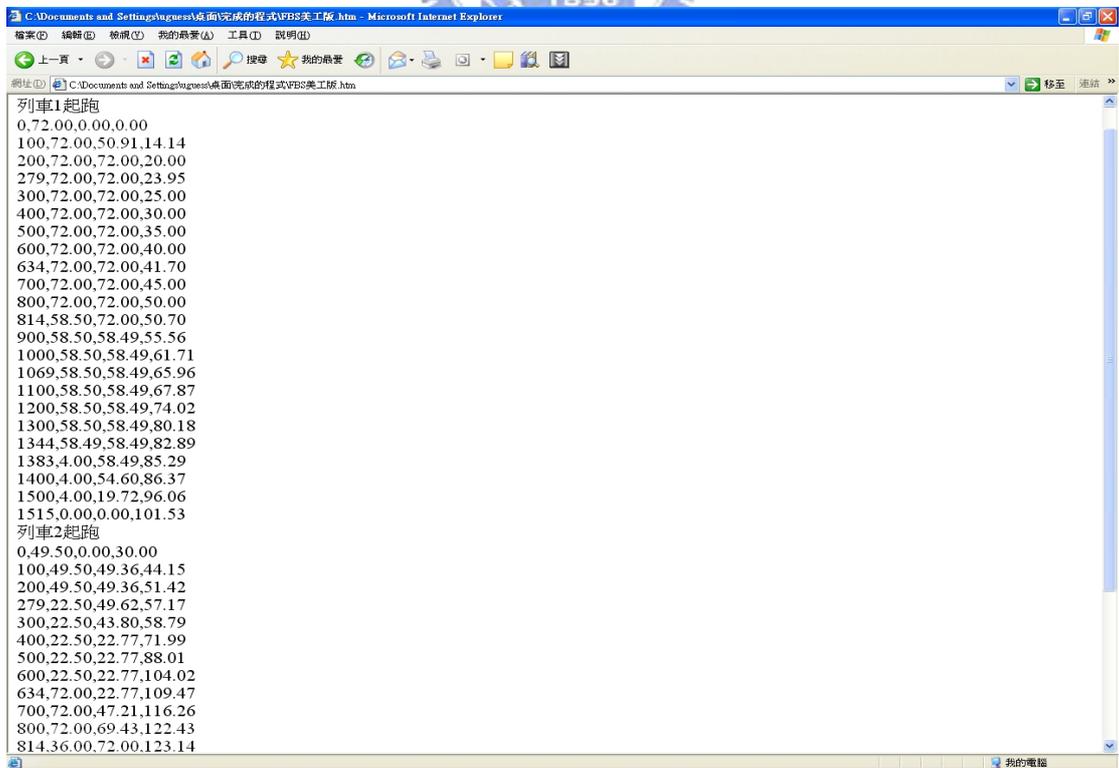


圖 4-6 Metro-FBSSM 結果輸出頁面圖 (單純數據 筆/100 公尺示意)

4.2.3 FBS 模擬流程

Metro-FBSSM 之模擬流程圖如圖 4-7 所示，各步驟依序說明如下：

1. 模擬開始。
2. 讀取所有輸入資料。
3. 設定列車初值：

列車 T1 之模擬起始時間為 0 秒、模擬起始位置為 0m、模擬起始速率為 0KPH；列車 T2 之模擬起始時間為發車間隔 H_D 秒、模擬起始位置為 0m、模擬起始速率為 0KPH。

4. 兩列車分別前進。
5. 判斷前方第二個區間是否遭佔用：

列車前進時會判斷列車本身前方第二個閉塞區間是否遭前車佔用，倘若沒有遭到佔用，則結果輸出時會於畫面顯示「列車於區間 i 正常」，並依照目前所在區間之最高 ATP 速限 V_{Bi} 作為列車加速、減速或等速運轉之依據；若列車前方第二個閉塞區間遭到佔用，則結果輸出時會於畫面顯示「列車於區間 i 進入警戒」，並以目前所在區間之警戒 ATP 速限 V_{Ci} 作為列車加速、減速或等速運轉之依據。

6. 判斷列車是否進入車站區間：

當列車進入下一個區間時，程式會判斷列車是否進入車站區間，若為非車站區間，則程序重回第四步驟列車持續前進；若程式判斷列車進入車站區間時，則程式便執行程式化自動停車程序，此時程式以預設之程式化自動靠站停車曲線進行靠站停車。

7. 記錄列車最後一筆運轉資料：

當列車靠站停妥，列車經過停站時間 T_D 後，程式便自動記錄列車最後一筆有關目前位置、對應速率及累加時間等資料。

8. 模擬結果輸出：

Metro-FBSSM 程式以配合文字說明方式或單純呈現數據方式將紀錄與計算資料輸出至結果輸出頁面。

9. 模擬結束。



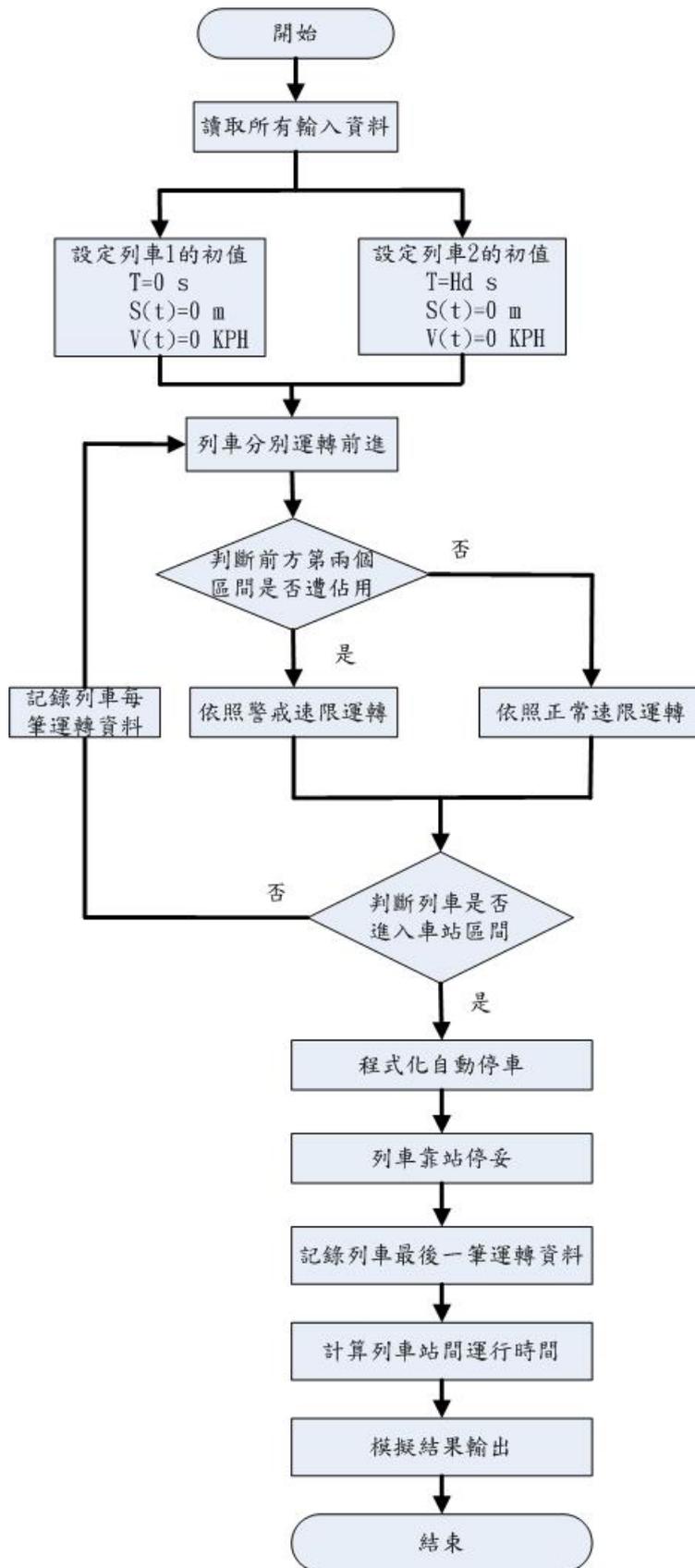


圖 4-7 Metro-FBSSM 模擬流程圖

4.3 FBS 模擬模式之驗證

本節以臺北市都會區高運量捷運系統圓山至劍潭站之實際案例對模式進行驗證，以檢核 Metro-FBSSM 之適用性。本模式驗證所採用之相關參數如表 4-2 所示。最高 ATP 速限、警戒 ATP 速限及區間長度等參數為臺北市都會區高運量捷運系統圓山至劍潭段目前採用之實際數值。列車營運特性參數為目前臺北市都會區高運量捷運系統電聯車之實際性能參數與實際營運狀況參數，其中發車間隔 H_D 本模式驗證採用台北捷運初始最小設計班距 105 秒。

表 4-2 FBS 模式驗證採用之各參數一覽表

最高 ATP 速限	警戒 ATP 速限	區間長度	列車營運特性參數
$V_{B1}=80\text{KPH}$	$V_{C1}=55\text{KPH}$	$L_{B1}=279\text{m}$	加速度 $a=1\text{m/s}^2$
$V_{B2}=80\text{KPH}$	$V_{C2}=25\text{KPH}$	$L_{B2}=355\text{m}$	減速度 $b=1\text{m/s}^2$
$V_{B3}=80\text{KPH}$	$V_{C3}=40\text{KPH}$	$L_{B3}=180\text{m}$	列車長度 $L_T=141\text{m}$
$V_{B4}=65\text{KPH}$	$V_{C4}=40\text{KPH}$	$L_{B4}=255\text{m}$	反應時間 $T_R=1.5\text{s}$
$V_{B5}=65\text{KPH}$	$V_{C5}=40\text{KPH}$	$L_{B5}=275\text{m}$	停站時間 $T_D=25\text{s}$
$V_{B6}=65\text{KPH}$	$V_{C6}=25\text{KPH}$	$L_{B6}=171\text{m}$	發車間隔 $H_D=105\text{s}$
功能位階 $PL=2$ (90%之 ATP 速限)			

經 Metro-FBSSM 模擬計算結果，兩列車在各閉塞區間皆未產生運行干擾，列車 T2 與列車 T1 以功能位階 2 運轉具有相同之站間運行時間為 101.53 秒，而台北捷運圓山至劍潭站以功能位階 2 運轉之實際站間運行時間為 102 秒，誤差僅 0.46%，因此 Metro-FBSSM 程式符合本研究需求。兩列車依據結果輸出資料所繪製而成的距離-速率關係曲線圖如圖 4-8 所示，時間-距離關係曲線圖如圖 4-9 所示。

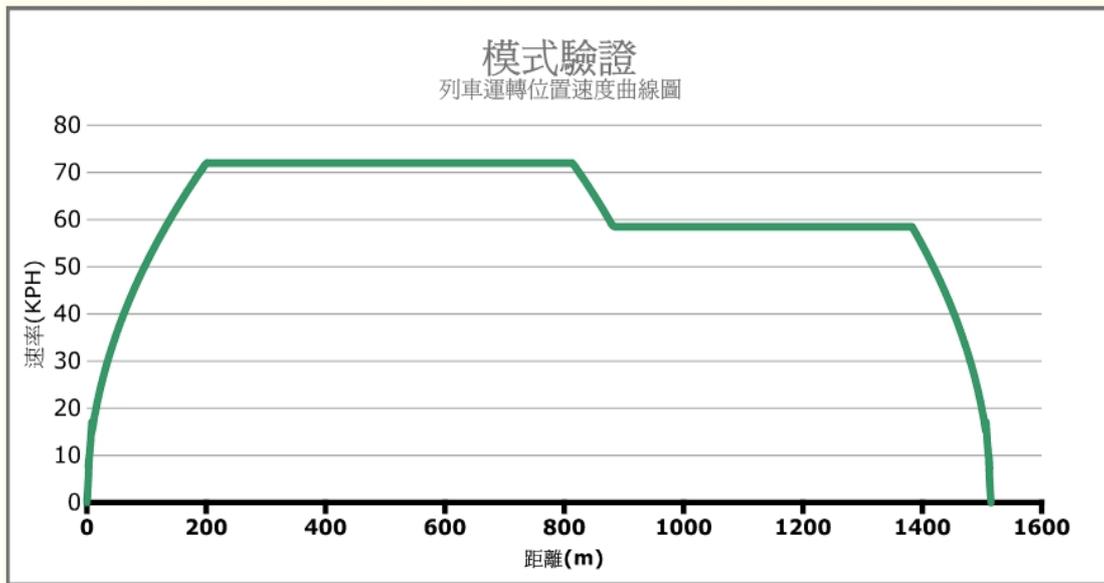


圖 4-8 FBS 模式驗證列車運轉之距離-速率關係圖

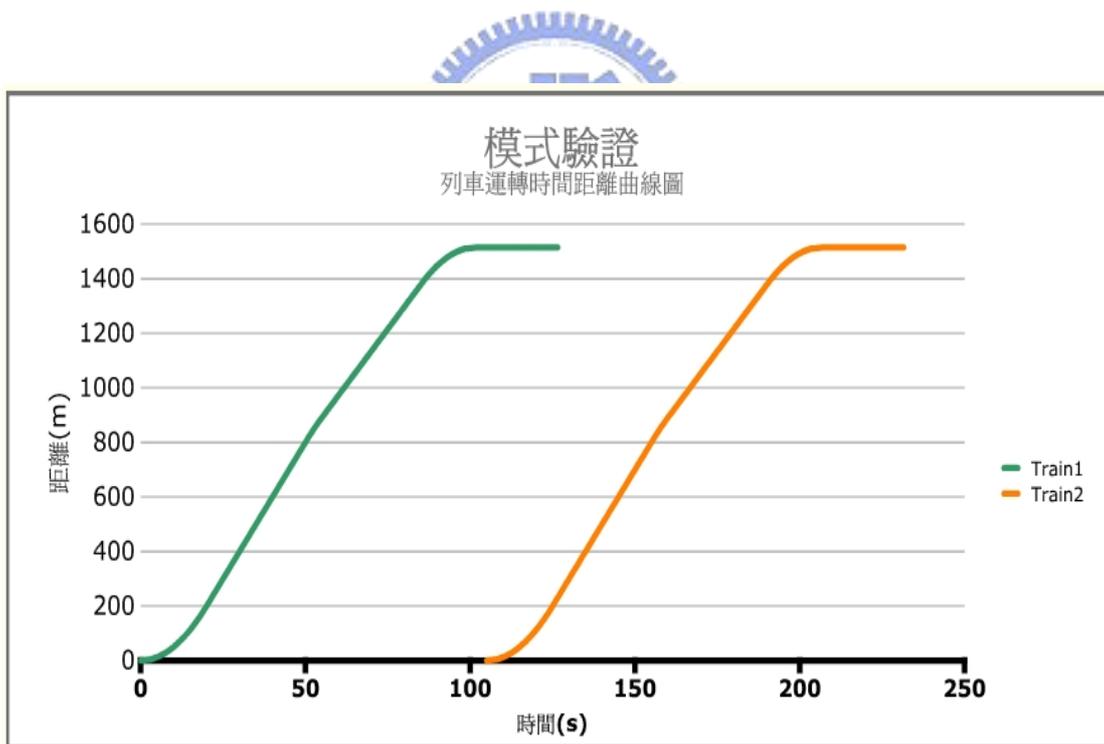


圖 4-9 FBS 模式驗證列車運轉之時間-距離關係圖

為了解 Metro-FBSSM 對於列車受到運行干擾之運轉行為是否符合 FBS 控制方式，本模式亦驗證列車受運行干擾之運轉行為，因此

將發車間隔 H_D 縮短為 75 秒，則驗證所採用之相關參數如表 4-3 所示。

表 4-3 FBS 驗證列車受運行干擾之運轉行為相關參數一覽表

最高 ATP 速限	警戒 ATP 速限	區間長度	列車營運特性參數
$V_{B1}=80\text{KPH}$	$V_{C1}=55\text{KPH}$	$L_{B1}=279\text{m}$	加速度 $a=1\text{m/s}^2$ 減速度 $b=1\text{m/s}^2$ 列車長度 $L_T=141\text{m}$ 反應時間 $T_R=1.5\text{s}$ 停站時間 $T_D=25\text{s}$ 發車間隔 $H_D=75\text{s}$
$V_{B2}=80\text{KPH}$	$V_{C2}=25\text{KPH}$	$L_{B2}=355\text{m}$	
$V_{B3}=80\text{KPH}$	$V_{C3}=40\text{KPH}$	$L_{B3}=180\text{m}$	
$V_{B4}=65\text{KPH}$	$V_{C4}=40\text{KPH}$	$L_{B4}=255\text{m}$	
$V_{B5}=65\text{KPH}$	$V_{C5}=40\text{KPH}$	$L_{B5}=275\text{m}$	
$V_{B6}=65\text{KPH}$	$V_{C6}=25\text{KPH}$	$L_{B6}=171\text{m}$	
功能位階 $PL=2$ (90%之 ATP 速限)			

經 Metro-FBSSM 模擬計算結果，列車 T2 在區間 01、區間 02 及區間 03 前方區間狀況皆正常，分別以最高 ATP 速限 $V_{B1}=80\text{KPH}$ 、 $V_{B2}=80\text{KPH}$ 及 $V_{B3}=80\text{KPH}$ 運轉；列車 T2 於區間 04 因前方第二個區間遭列車 T1 佔用（列車 T1 停車靠站中），改以警戒 ATP 速限 $V_{C4}=40\text{KPH}$ 運轉；列車 T2 於區間 05 因列車 T1 靠站結束已離站，因此恢復正常之最高 ATP 速限 $V_{B5}=65\text{KPH}$ 運轉至車站區間進行程式化自動靠站停車。經由模式驗證，Metro-FBSSM 程式模擬列車受運行干擾之運轉行為亦符合本研究需求。列車 T2 依據結果輸出資料所繪製而成的距離-速率關係曲線圖如圖 4-10 所示，而兩列車之時間-距離關係曲線圖如圖 4-11 所示。

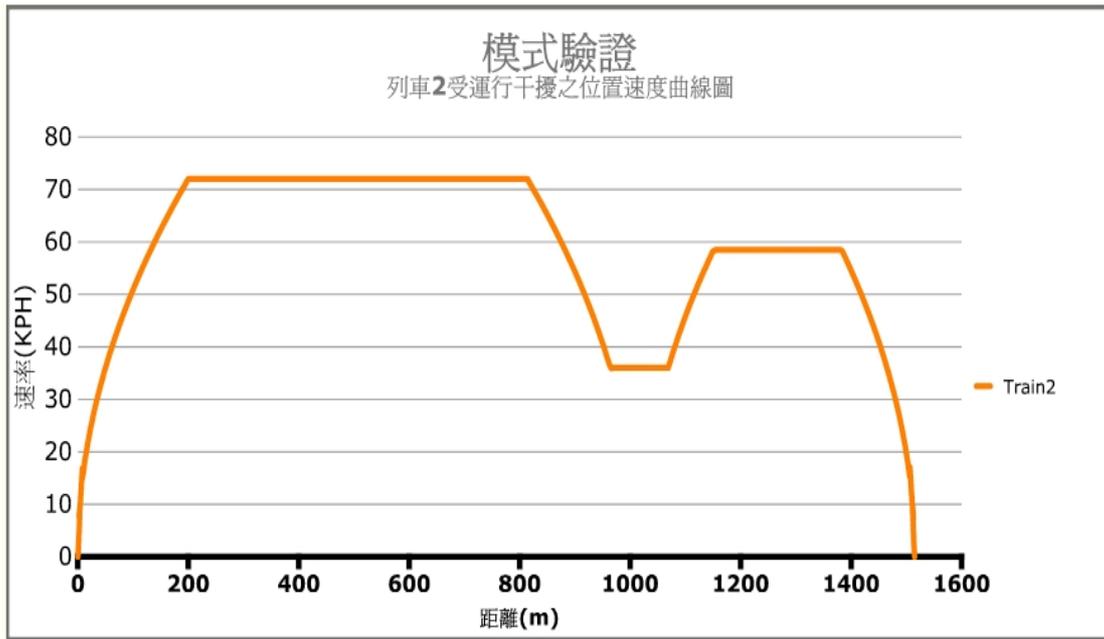


圖 4-10 FBS 模式驗證列車受運行干擾之距離-速率關係圖

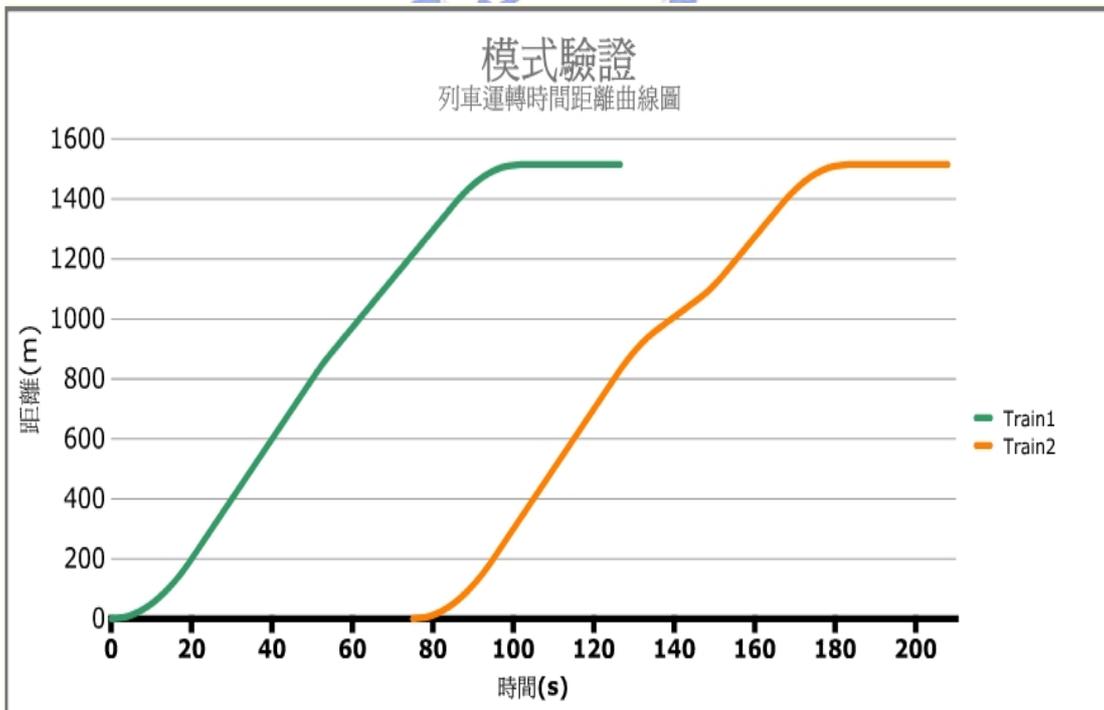


圖 4-11 FBS 模式驗證列車受運行干擾之時間-距離關係圖

4.4 MBS 模型構建

4.4.1 模擬系統設定

MBS 亦以臺北市都會區高運量捷運系統圓山站至劍潭站路段為模擬系統基礎，不同在於 MBS 未劃分閉塞區間，因此閉塞區間長度為 0。模擬路線總長度同樣為 1515m，圓山站列車停止位置位於路線 0m 處，劍潭站列車停止位置位於路線 1515m 處。路線上每隔 L_M （預設 10m）設置一位置信標，如圖 4-12 所示。由模擬起點產生列車 T1 與列車 T2 兩列車進行模擬，列車皆以車載號誌系統配合 4.4.2 節所訂定之 MBS 運作規則全自動運轉，並於車站自動靠站停車，直至列車 T2 靠站停車後結束模擬。停站時間 T_D 為 25s、列車長度 L_T 為 141m（台北捷運高運量標準列車編組）、位置信標間距 L_M 預設為 10m、列車 T2 停車後與前車 T1 必須維持之最小額外安全距離 $S_{E,Min}$ 訂為 25m、列車加速度 a 為 1.0m/s^2 、列車減速度 b 為 1.0m/s^2 、列車煞車系統反應時間 T_R 訂為 0.41s。

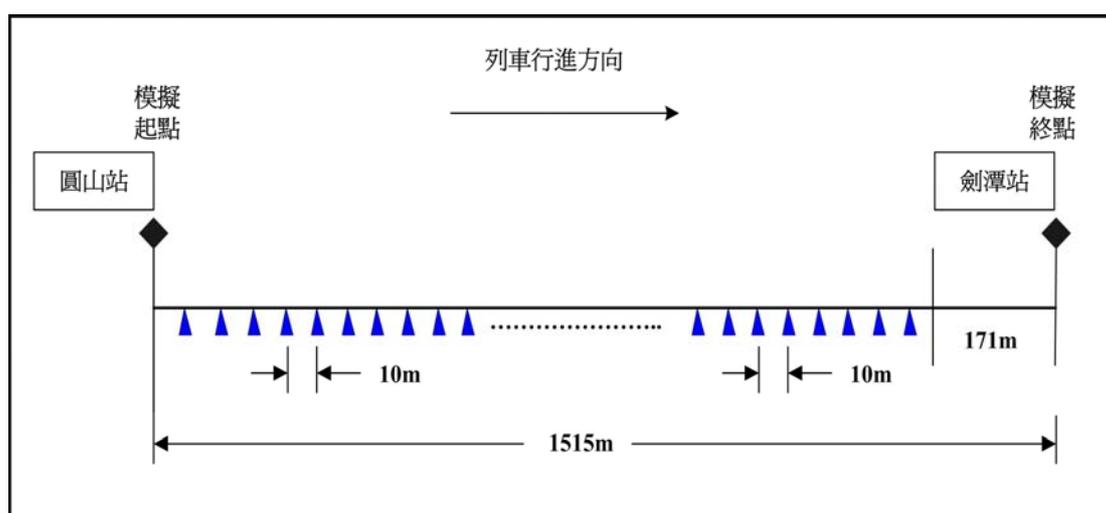


圖 4-12 MBS 模擬系統路線設定圖

4.4.2 系統運作規則訂定

一、單車運轉

如圖 4-13 所示，MBS 提供較為彈性之速度曲線，列車從車站離站後，以等加速度 a 加速至車載資料庫所提供之最高速度 V_{Max} ，隨後依據該路段所能行駛之最高速度 V_{Max} 行駛，直至接近車站前以等減速度 b 煞車至定位點停止。因此 MBS 單一系列車從圓山站行駛至劍潭站之運行時間如式 4-5。

$$\text{運行時間} = \frac{V_{Max}}{a} + \frac{\sum_{i=1}^3 L_{Si} - \frac{V_{Max}^2}{2a}}{V_{Max}} + \frac{V_3 - V_5}{b} + \frac{\sum_{i=4}^5 L_{Si} - \frac{V_{Max}^2 - V_4^2}{2b}}{V_5} + \frac{V_6}{b} \quad (4-5)$$

其中 L_{Si} 為各線型路段長度、 a 為加速度、 b 為減速度、 V_{Max} 為最高速度。

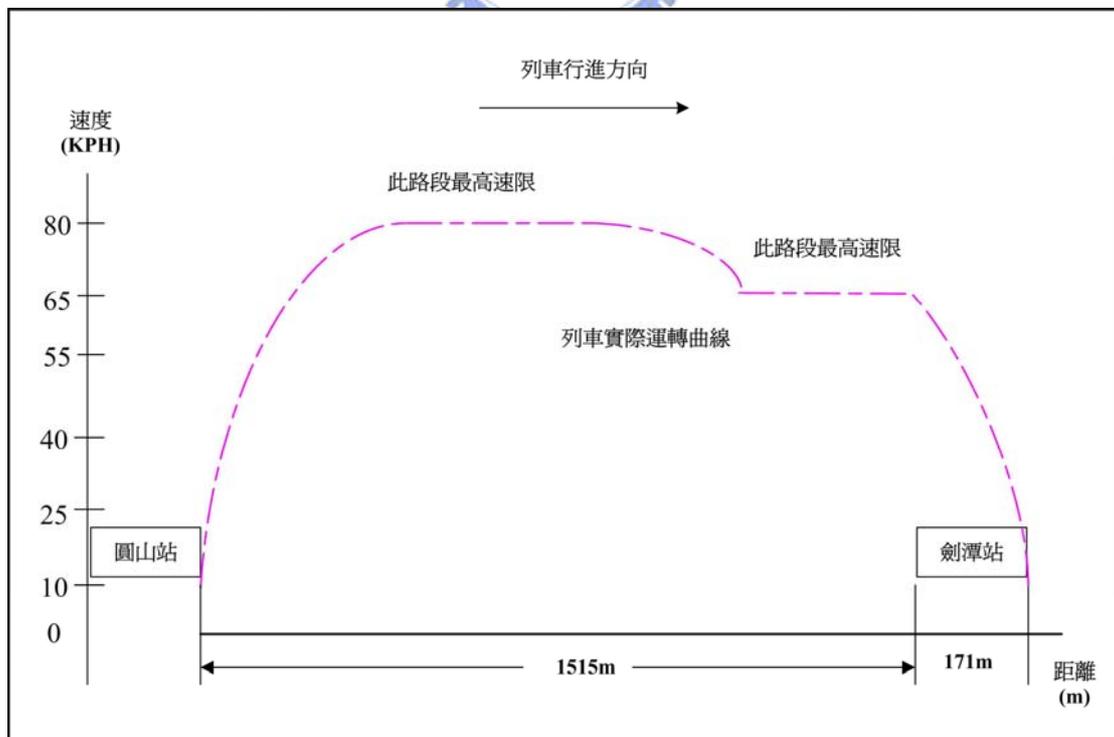


圖 4-13 MBS 單一系列車於站間之距離-速度關係圖

二、跟車模式

於 MBS 運作下，前車 T1 與列車 T2 在一般運轉情況下，兩列車間所維持之安全距離 S_S ，如式 4-6，該安全距離為後方列車 T2 之安全煞車距離加上最小額外安全距離 $S_{E,Min}$ 。由圖 4-14，前車 T1 離站後已行駛之時間如式 4-7。兩列車所需之最小班距 H_{Min} 為列車煞車系統反應時間 T_R 、列車煞車至停止之時間、停站時間 T_D 、前車 T1 離站已行駛之時間等四項時間值之總和，如式 4-8。

$$S_S = \left(T_R V_i + \frac{V_i^2}{2b} \right) + S_{E,Min} \quad (4-6)$$

$$\text{前車 T1 離站已行駛之時間} = \sqrt{\frac{2(S_{E,Min} + L_T)}{a}} \quad (4-7)$$

$$H_{Min} = T_R + \frac{V_{Max}}{b} + T_D + \sqrt{\frac{2(S_{E,Min} + L_T)}{a}} \quad (4-8)$$

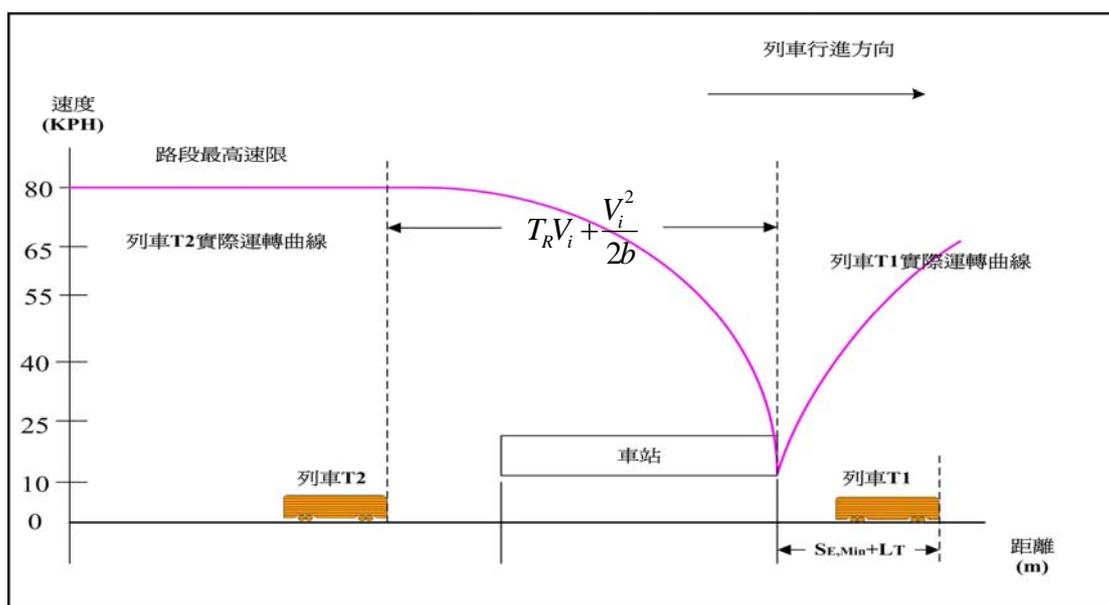


圖 4-14 MBS 兩列車間之最小班距關係圖

三、系統運作規則

1. 前車 T1 發車後，需經過發車間隔時間 H_D 後，列車 T2 始可發車。
2. 正常情況下，列車 T1 與列車 T2 依照其車載資料庫提供之最高速限 V_{Max} 運轉，並於車站自動停車。
3. MBS 無需功能位階調整，因此列車 T1 與列車 T2 皆以 100% 之速限運轉。
4. 當列車離站後，列車以等加速度 a 加速至最高速限 V_{Max} 。
5. 當列車目前車速小於資料庫提供之最高速限時，則持續加速。
6. 當列車目前車速等於資料庫提供之最高速限時，則維持等速。
7. 當列車目前車速大於資料庫提供之最高速限時，則持續減速。
8. 當列車進入車站區間準備停車時，執行程式化自動停車程序，列車以預設之程式化自動靠站停車曲線減速至 0KPH。
9. 當列車靠站時，列車自動停止於區間 06 末端，因此路線 1515m 處之速度為 0KPH。
10. 當列車靠站停妥後，需經過停站時間 T_D 後才可加速離站。
11. 正常情況下，列車 T2 與前車 T1 間至少必須保持之安全距離如下所示：

$$S_S = \left(T_R V_i + \frac{V_i^2}{2b} \right) + S_{E,Min}$$

其中 V_i 為列車目前運轉之速率， T_R 為煞車系統反應時間， b 為減速率， $S_{E,Min}$ 為額外最小安全距離。

12. 當列車本身與前方列車安全距離不足時，列車自動減速調整

車速運轉以維持正常的安全距離。

13. 最小班距 H_{Min} 為前後車到站間隔與發車間隔 H_D 相差 0.5 秒內之正常運轉班距。

4.5 MBS 模擬模式

4.5.1 程式開發

為達成本研究之目的，本節將另外開發捷運系統 MBS 模擬模式 (Metro Moving Block Signaling System Simulation Model, 以下簡稱 Metro-MBSSM)，藉此將 4.4 節所構建之模型模式化，以為本研究第五章進行分析工作之另一套工具程式。Metro-MBSSM 程式同樣以 Java Script 程式語言撰寫，其作業平台、中文化網頁視窗設計、操作介面及結果輸出方式與 4.2 節所開發的 Metro-FBSSM 程式相似，唯獨所輸入之參數與程式規則有所不同，後續小節將分別介紹 Metro-MBSSM 程式與 Metro-MBSSM 之模式檢核。

4.5.2 MBS 模擬模式

捷運 MBS 模擬模式 (Metro-MBSSM) 程式其操作介面之參數輸入介面，如圖 4-15 所示，而結果輸出頁面與 Metro-FBSSM 相似，如圖 4-5 所示。而模擬流程亦與 Metro-FBSSM 類似，如圖 4-7 所示，唯獨第五步驟改為判斷與前車之安全距離是否足夠，若大於安全距離則依照正常速限運轉，若小於等於安全距離則減速運轉。參數輸入介面分為三大欄，分別為各閉塞區間之路段最高速限 V_{Si} (KPH)、各路

段長度 L_{Si} (m) 及列車營運特性參數等，其中，列車營運特性參數包括列車加速度 a (m/s^2)、列車減速度 b (m/s^2)、列車長度 L_T (m)、列車反應時間 T_R (s)、列車停站時間 T_D (s)、發車間隔 H_D (s) 及位置信標間隔 L_M (m)。當各欄位參數輸入完畢後，以滑鼠點擊「執行」鈕後，程式便開始模擬計算程序，並直接將詳細的結果資料輸出在結果輸出頁面。Metro-MBSSM 程式之結果輸出頁面與 Metro-FBSSM 相似，該頁面詳細列出列車於路段中之運行狀況為正常或警戒、兩列車之位置、對應速率及累加時間等資料，以作為繪製距離-速率與時間-距離等曲線圖之資料來源。

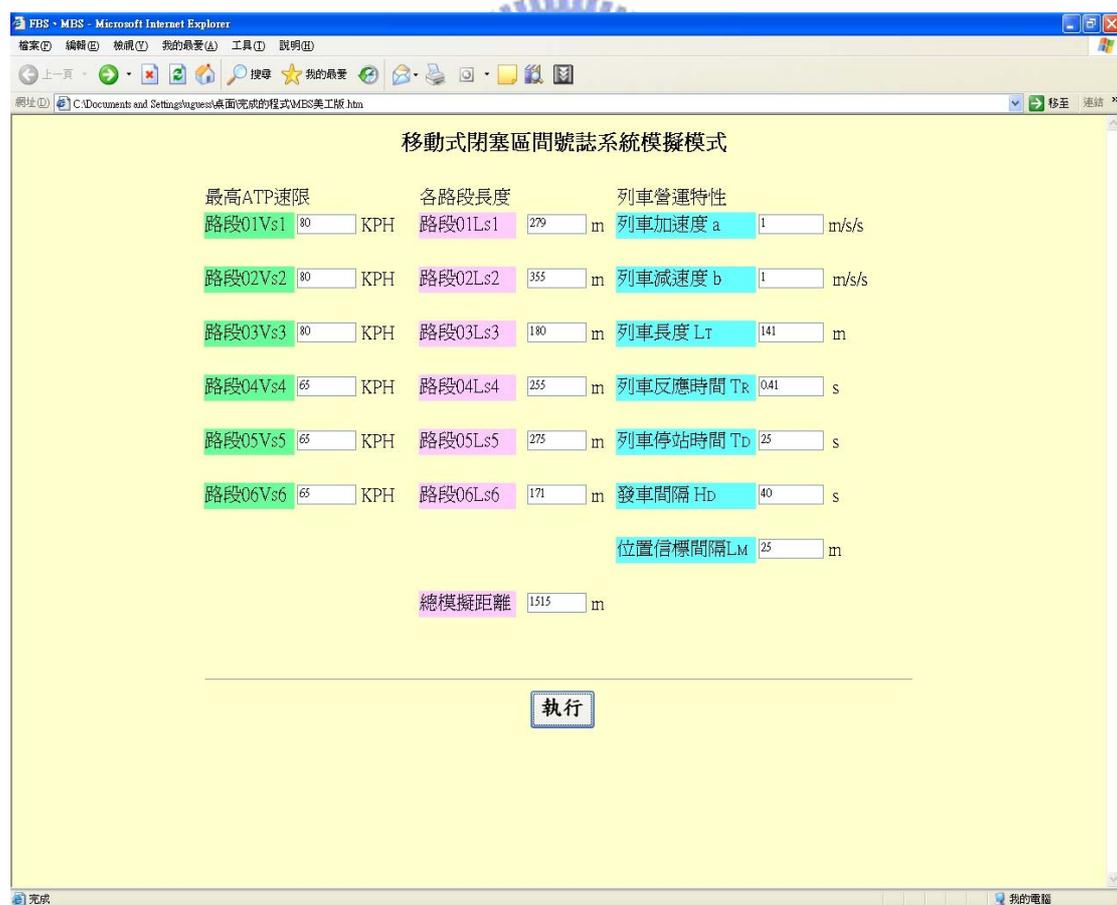


圖 4-15 Metro-MBSSM 程式參數輸入介面

4.5.3 MBS 模擬模式之檢核

由於本研究所開發之 Metro-MBSSM 程式無法以實際案例進行模式驗證，為了解程式設計之正確性，本節仍然以臺北市都會區高運量捷運系統圓山至劍潭站之模擬系統對模式進行檢核，以確認 Metro-MBSSM 之適用性。本模式檢核分為兩部分，分別為列車正常情況下運轉行為之模式檢核與列車受運行干擾情況下運轉行為之模式檢核。首先，列車正常情況下運轉行為之模式檢核所採用之相關參數如表 4-4 所示，其中發車間隔 H_D 本模式檢核同樣採用台北捷運初始最小設計班距 105 秒。

表 4-4 MBS 模式檢核採用之各參數一覽表

路段最高 ATP 速限	各路段長度	列車營運特性參數
$V_{S1-S3}=80\text{KPH}$ (站間路段)	$L_{S1-S5}=1344\text{m}$ (站間路段)	加速度 $a=1\text{m/s}^2$ 減速度 $b=1\text{m/s}^2$ 列車長度 $L_T=141\text{m}$ 反應時間 $T_R=0.41\text{s}$
$V_{S4-S6}=65\text{KPH}$ (站區路段)	$L_{S6}=171\text{m}$ (車站區間)	停站時間 $T_D=25\text{s}$ 發車間隔 $H_D=105\text{s}$ 位置信標 $L_M=10\text{m}$

經 Metro-MBSSM 模擬計算結果，兩列車皆未產生運行干擾，又 MBS 無需功能位階調整，列車 T1 與列車 T2 皆以 100% 之最高 ATP 速限運轉，因此站間運行時間縮短至 95 秒左右。兩列車依據結果輸出資料所繪製而成的距離-速率關係曲線圖如圖 4-16 所示，時間-距離

關係曲線圖如圖 4-17 所示。

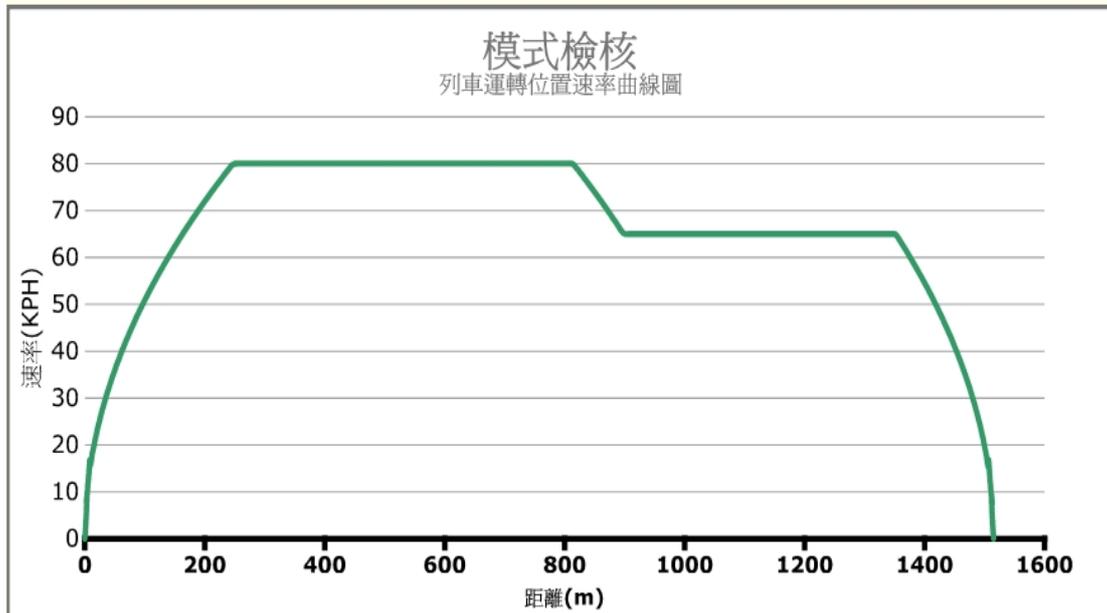


圖 4-16 MBS 模式檢核列車運轉之距離-速率關係圖

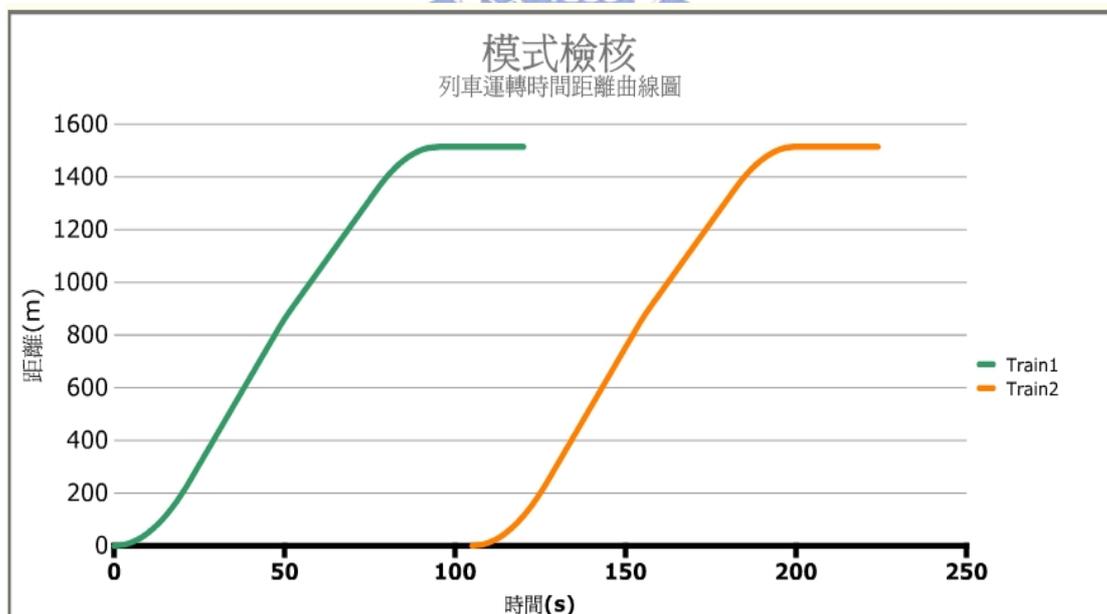


圖 4-17 MBS 模式檢核列車運轉之時間-距離關係圖

為了解 Metro-MBSSM 對於列車受到運行干擾之運轉行為是否符合 MBS 控制方式，本模式亦檢核列車受運行干擾之運轉行為，因此將發車間隔 H_D 縮短為 65 秒，則檢核所採用之相關參數如表 4-5 所示。

表 4-5 檢核列車受運行干擾之運轉行為相關參數一覽表

路段最高 ATP 速限	各路段長度	列車營運特性參數
$V_{S1-S3}=80\text{KPH}$ (站間路段)	$L_{S1-S5}=1344\text{m}$ (站間路段)	加速度 $a=1\text{m/s}^2$ 減速度 $b=1\text{m/s}^2$ 列車長度 $L_T=141\text{m}$ 反應時間 $T_R=0.41\text{s}$
$V_{S4-S6}=65\text{KPH}$ (站區路段)	$L_{S6}=171\text{m}$ (車站區間)	停站時間 $T_D=25\text{s}$ 發車間隔 $H_D=65\text{s}$ 位置信標 $L_M=10\text{m}$

經 Metro-MBSSM 模擬計算結果，列車 T2 運轉至路段 1180m 時，因接近正靠站結束準備離站的列車 T1，此時列車 T2 與前車 T1 之間距開始逐漸小於安全距離，因此列車 T2 自動調整車速減速煞車。當列車 T2 運轉至 1250m 時，列車 T1 已經完全離站，此時列車 T2 恢復加速，直至運轉至車站區間啟動程式化自動靠站停車程序減速停車。經由模式檢核得知，Metro-MBSSM 程式對於 MBS 控制方式下，列車受運行干擾之運轉行為模擬與本研究需求相符。兩列車依據結果輸出資料所繪製而成的距離-速率關係曲線圖如圖 4-18 所示，而兩列車之時間-距離關係曲線圖如圖 4-19 所示。

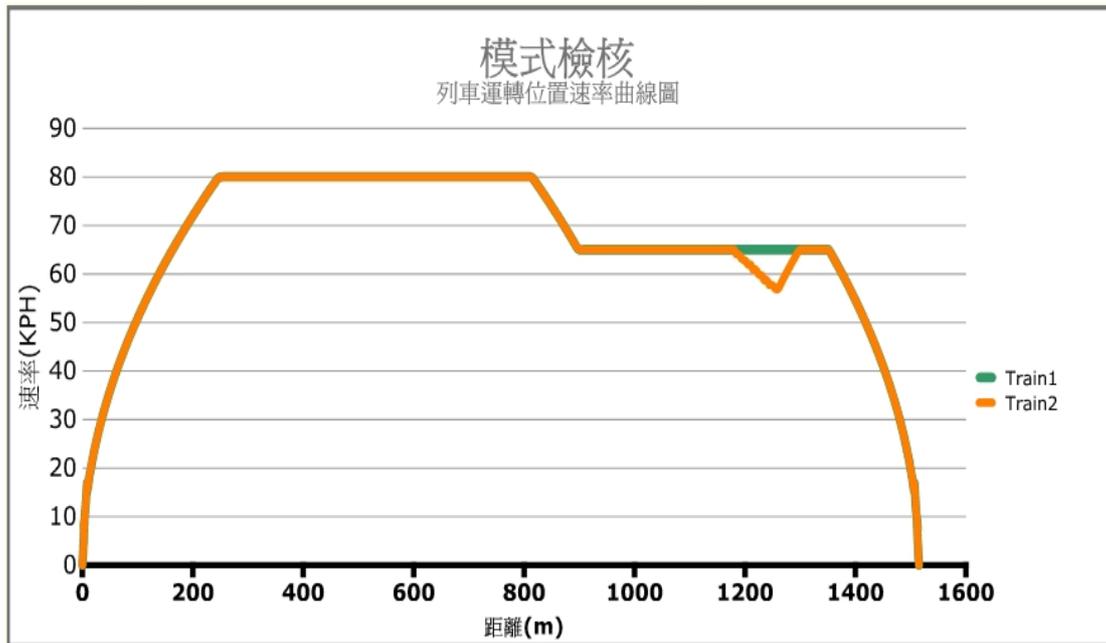


圖 4-18 MBS 模式檢核列車受運行干擾之距離-速率關係圖

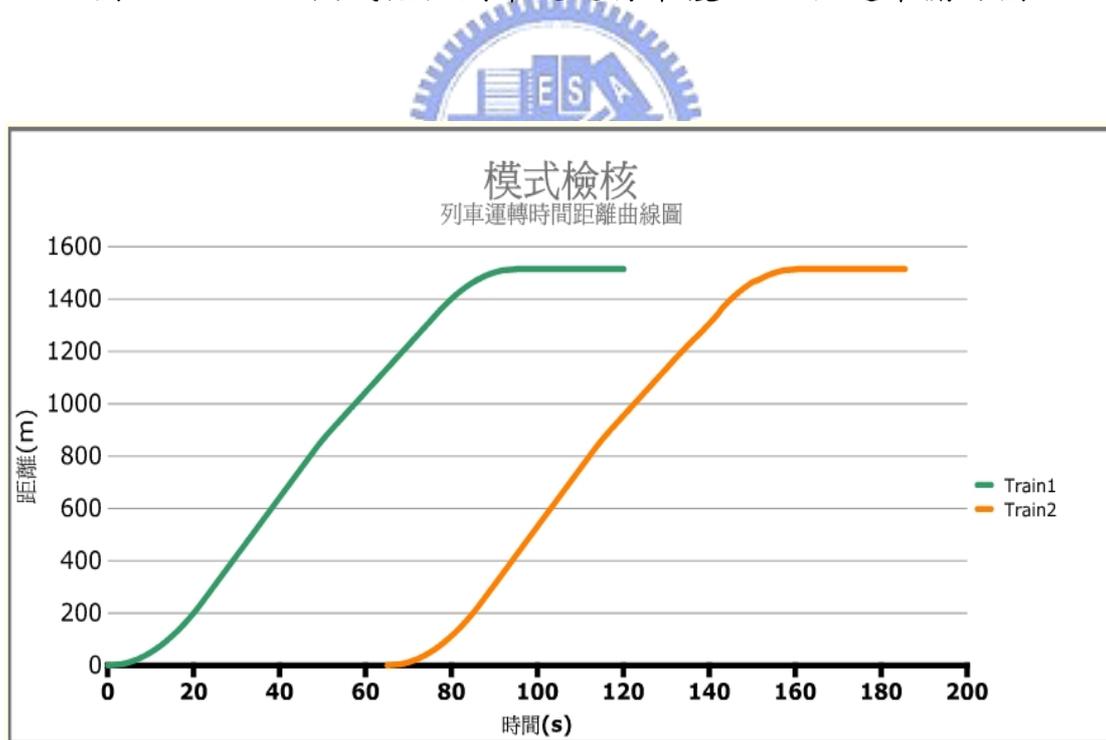


圖 4-19 MBS 模式檢核列車受運行干擾之時間-距離關係圖

第五章 FBS 與 MBS 運能之比較分析

本章首先進行影響 FBS 運能相關因素之實驗設計，並利用第四章所開發之 Metro-FBSSM 程式探討影響 FBS 運能之相關影響因素。接著進行影響 MBS 運能相關因素之實驗設計，亦透過第四章所開發之 Metro-MBSSM 程式探討影響 MBS 運能之相關影響因素。隨後再對此兩種閉塞區間號誌系統進行運能之比較分析，以了解各相關影響因素對 FBS 及 MBS 所造成之運能績效差異，最後進行 FBS 與 MBS 運能之迴歸分析，以建立 FBS 與 MBS 運能之迴歸方程式。

5.1 影響 FBS 運能相關因素之實驗設計

本節將進行影響 FBS 運能相關因素之實驗設計，藉由本小節明確的實驗計畫訂定，使本研究能於 5.2 節配合 Metro-FBSSM 程式探討影響 FBS 運能之相關因素。有鑑於區間長度及運轉速限為影響 FBS 運能之重要因素，因此本研究欲探討在 FBS 控制方式下區間個數與區間長度、最高速限、警戒速限、路線彎道及停站時間對運能之影響關係，以了解相關影響因素對運能之影響程度大小。在此本研究將 Metro-FBSSM 之外生變數區分為控制變數 (Control Variables) 及變動變數 (Variables)，而內生變數為各實驗項目所欲求之最小班距 H_{MIN} 。相關之實驗設計限制條件、實驗基本模型與控制變數、實驗項目與變動變數分別說明如下。

一、實驗設計限制條件

Metro-FBSSM 實驗設計限制條件如表 5-1 所示，分別說明如下：

(一) 模擬路線總長度

為使實驗中所有模擬系統一致，依照第四章模擬模型所設定之模擬路線總長度為 1515m。

(二) 區間總個數變動範圍

區間個數不同區間長度有所不同，由於模擬路線總長度為 1515m，扣除 171m 車站區間之控制變數，剩餘 1344m 可變動其區間個數與區間長度。經本研究詳細計算後，區間總個數小於 5，則運能完全受區間長度限制，與實際狀況不符；而區間總個數大於 10，則造成區間長度小於列車長度，不符合本研究之 FBS 控制方式，因此以 Metro-FBSSM 進行區間個數及區間長度影響實驗時，限制區間總個數變動範圍為 5 個區間至 10 個區間。

(三) 區間長度劃分方式

為符合實際停車程序，車站區間長度 171m 設為控制變數，扣除此項控制變數後剩餘之區間長度為 1344m，為了解區間長度對運能之影響關係，區間長度劃分方式為 $[1344 / (n-1)]$ ，其中 n 為區間總個數。各區間長度經平均劃分後，以無條件捨去法取整數，如有餘數則一概加回第一個區間長度 L_{B1} 。

(四) 最高 ATP 速限變動範圍

最高速限亦為影響運能之重要因素之一，目前世界各國捷運系統最高速限為 90KPH 至 65KPH，因此設定實驗最高 ATP 速限統一變動範圍為 90KPH 至 65KPH。其中，

為符合實際停車程序，站前區間速限 65KPH 與車站區間速限 65KPH 兩項設為控制變數，因此以 Metro-FBSSM 進行最高速限影響實驗時，限制區間 1 至區間 n-2 之各個區間統一變動最高 ATP 速限，其統一變動範圍為 90KPH 至 65KPH，同時為讓列車以實際之速限值進行模擬，功能位階設定為 PL1 (100%ATP 速限)。

(五) 警戒 ATP 速限變動範圍

當列車受運行干擾時，警戒速限亦為影響運能之重要因素之一，目前台北捷運警戒速限為 40KPH 或 25KPH，為探討警戒速限在列車受運行干擾時對運能的影響程度，因此在考慮列車安全煞車距離及舒適度的情況下，限制實驗警戒速限統一變動範圍為 55KPH 至 25KPH。其中，為符合實際停車程序，站前區間警戒速限 25KPH 與車站區間警戒速限 25KPH 兩項設為控制變數，因此以 Metro-FBSSM 進行警戒速限影響實驗時，限制區間 1 至區間 n-2 之各個區間統一變動警戒 ATP 速限，其統一變動範圍為 55KPH 至 25KPH，同時功能位階亦設定為 PL1。

(六) 路線彎道設置處

軌道路線彎道之曲率半徑影響列車於該區間之最高 ATP 速限，為探討曲率半徑對運能之影響關係，因此限制路線彎道設於模擬路線的第三個閉塞區間，以了解列車於高速運轉時，因遇到不同曲率半徑之彎道而減速對運能之影響程度。依台北捷運高運量系統土建設計標準，主線之

最小曲率半徑為 200m，因此在考慮路線標準與實際況狀之情形下，實驗曲率半徑為 200m 至 350m。然而本研究為進一步了解低於 200m 之曲率半徑對運能之影響程度，亦進行曲率半徑 34m 至 200m 之模擬實驗。在以 Metro-FBSSM 進行曲率半徑影響實驗時，本研究將依捷運土建設計標準給予路線第三個區間不同曲率半徑下之最高 ATP 速限 V_{B3} 。

(七) 停站時間變動範圍

當列車本身接近車站，而車站內有前車停靠時，列車本身會受到運行干擾，因此停站時間將影響後方列車接近車站時因前車停靠所造成之運行干擾程度。目前台北捷運靠站時間為 18 或 25 或 40 秒，所以限制實驗停站時間為 18 秒至 40 秒，在以 Metro-FBSSM 進行停站時間影響實驗時，本研究將依據台北捷運現況進行停站時間實驗之變動。

(八) 最小發車間隔

為符合本研究目的以探討各個影響因素對運能之影響關係，因此以 Metro-FBSSM 進行以上各項實驗時，發車間隔值以模擬符合 FBS 控制方式下之最小班距為其目標值。

表 5-1 Metro-FBSSM 實驗設計限制條件一覽表

項目	限制條件	說明
模擬路線總長度	1515 m	模擬系統一致
區間總個數範圍	$n=5 \sim 10$	符合 FBS 控制方式
區間長度劃分方式	1344 m 平均分割	餘數加回 L_{B1}
	171 m 控制變數	車站區間
最高 ATP 速限範圍	$V_{Bi}=90 \sim 65\text{KPH}$	功能位階 $PL=1$ 、 $i=1 \sim n-2$
警戒 ATP 速限範圍	$V_{Ci}=55 \sim 25\text{KPH}$	功能位階 $PL=1$ 、 $i=1 \sim n-2$
路線彎道設置處	$r=350 \sim 34\text{m}$	設於路線第三個區間
停站時間範圍	$T_D=18 \sim 40 \text{ s}$	符合捷運現況
最小發車間隔	內生變數 求符合 FBS 控制方式 之最小班距 H_{MIN}	符合研究目的

二、 實驗基本模型與控制變數

各實驗之基本模型如表 5-2 所示，其區間個數 $n=6$ 個區間，平均區間長度為 268m，功能位階為 PL1（100% ATP 速限）。當以 Metro-FBSSM 進行區間個數及區間長度影響實驗、最高速限影響實驗、警戒速限影響實驗、曲率半徑影響實驗、停站時間影響實驗等各實驗時，除各實驗之變動變數外，其餘各控制變數皆參照表 5-2 之實驗基本模型。

值得注意的是，當總區間個數 n 有所改變時，所增加區間之最高速限 V_B 為 80KPH、警戒速限 V_C 為 25KPH，所增加區間之區間長度以平均分割方式求得。為符合實際停車程序，站前區間之速限為

$V_{Bn-1} = 65 \text{ KPH}$ 、 $V_{Cn-1} = 25 \text{ KPH}$ ，而車站區間之速限與長度為 $V_{Bn} = 65 \text{ KPH}$ 、 $V_{Cn} = 25 \text{ KPH}$ 、 $L_{Bn} = 171 \text{ m}$ 。列車營運特性參數如同表 5-2 所示。而實驗機模型區間個數改變時控制變數如表 5-3 所示。

表 5-2 Metro-FBSSM 實驗基本模型控制變數一覽表

最高 ATP 速限	警戒 ATP 速限	區間長度	列車營運特性參數
$V_{B1} = 80 \text{ KPH}$	$V_{C1} = 25 \text{ KPH}$	$L_{B1} = 272 \text{ m}$	加速度 $a = 1 \text{ m/s}^2$ 減速度 $b = 1 \text{ m/s}^2$ 列車長度 $L_T = 141 \text{ m}$ 反應時間 $T_R = 1.5 \text{ s}$ 停站時間 $T_D = 25 \text{ s}$ 功能位階 $PL = 1$
$V_{B2} = 80 \text{ KPH}$	$V_{C2} = 25 \text{ KPH}$	$L_{B2} = 268 \text{ m}$	
$V_{B3} = 80 \text{ KPH}$	$V_{C3} = 25 \text{ KPH}$	$L_{B3} = 268 \text{ m}$	
$V_{B4} = 80 \text{ KPH}$	$V_{C4} = 25 \text{ KPH}$	$L_{B4} = 268 \text{ m}$	
$V_{B5} = 65 \text{ KPH}$	$V_{C5} = 25 \text{ KPH}$	$L_{B5} = 268 \text{ m}$	
$V_{B6} = 65 \text{ KPH}$	$V_{C6} = 25 \text{ KPH}$	$L_{B6} = 171 \text{ m}$	
功能位階 $PL = 1$ (100%之 ATP 速限)			

表 5-3 Metro-FBSSM 實驗基本模型區間個數改變時控制變數一覽表

項目	控制變數與數值
增加區間之速限與長度	$V_B = 80 \text{ KPH}$ 、 $V_C = 25 \text{ KPH}$ 、 $L_B = \text{平均分割}$
站前區間之速限	$V_{Bn-1} = 65 \text{ KPH}$ 、 $V_{Cn-1} = 25 \text{ KPH}$
車站區間之速限與長度	$V_{Bn} = 65 \text{ KPH}$ 、 $V_{Cn} = 25 \text{ KPH}$ 、 $L_{Bn} = 171 \text{ m}$
列車營運特性參數	$a = 1 \text{ m/s}^2$ 、 $b = 1 \text{ m/s}^2$ 、 $L_T = 141 \text{ m}$ $T_R = 1.5 \text{ s}$ 、 $T_D = 25 \text{ s}$ 、 $PL = 1$

三、實驗項目與變動變數

Metro-FBSSM 之實驗項目與變動變數如表 5-4 所示，在符合前述

之實驗設計限制條件下，各實驗項目及變動變數分別說明如下：

(一) 區間個數及區間長度影響實驗

本實驗之變動變數為區間個數及區間長度，變動變數為區間總個數 $n=5、6、7、8、9、10$ 個區間，區間長度因區間個數不同有所變化，其長度劃分方式以平均分割為原則（詳如實驗設計限制條件之區間長度劃分方式），控制變數為各區間之最高 ATP 速限、警戒 ATP 速限及列車營運特性參數。

(二) 最高速限影響實驗

本實驗之變動變數為統一變動站前區間以前之各區間最高 ATP 速限 $V_{B1} \sim V_{Bn-2} = 90 \text{ KPH}$ 或 80 KPH 或 72 KPH 或 65 KPH ，控制變數為站前區間最高 ATP 速限 $V_{Bn-1} = 65 \text{ KPH}$ 、車站區間最高 ATP 速限 $V_{Bn} = 65 \text{ KPH}$ 、各區間之警戒 ATP 速限、各區間之區間長度及列車營運特性參數。

(三) 警戒速限影響實驗

本實驗之變動變數為統一變動站前區間以前之各區間警戒 ATP 速限 $V_{C1} \sim V_{Cn-2} = 55 \text{ KPH}$ 或 40 KPH 或 25 KPH ，控制變數為站前區間警戒 ATP 速限 $V_{Cn-1} = 25 \text{ KPH}$ 、車站區間警戒 ATP 速限 $V_{Cn} = 25 \text{ KPH}$ 、各區間之最高 ATP 速限、各區間之區間長度及列車營運特性參數。

(四) 曲率半徑影響實驗

本實驗之變動變數僅變動路線第三個區間之最高 ATP 速限 $V_{B3} = 80 \text{ KPH}$ 或 65 KPH 。依據台北捷運高運量系統土

建設標準，以彎道佈設之最大超高 130mm、最大允許超高不足 90mm，且假設現況足以佈設足夠長度的緩和曲線，則速限 80KPH、65KPH、55KPH、40KPH 與 25KPH 之最小曲率半徑分別約為 344m、227m、163m、86m 與 34m。唯台北捷運高運量系統主線的最小曲率半徑為 200m，雖後三組數據不符合現況，但本研究仍納入實驗模擬，以了解各曲率半徑對運能之影響程度。本實驗之控制變數為第三個區間以外之其他區間最高 ATP 速限、各區間之警戒 ATP 速限、各區間之區間長度及列車營運特性參數。

(五) 停站時間影響實驗

本實驗之變動變數只變動停站時間 $T_D = 18s$ 或 $25s$ 或 $40s$ ，係依照台北捷運目前一般車站停站時間為 18 秒或 25 秒，旅客數較多之大站停站時間為 40 秒。實驗之控制變數為各區間之最高 ATP 速限、各區間之警戒 ATP 速限、各區間之區間長度及停站時間以外之其他列車營運特性參數。

表 5-4 Metro-FBSSM 實驗項目與變動變數一覽表

實驗項目	變動變數之數值
區間個數及區間長度影響實驗	$n = 5、6、7、8、9、10$ 個 $L_{B1} \sim L_{Bn-2} = [1344 / (n-1)]$ ，餘數加入 L_{B1}
最高速限影響實驗	$V_{B1} \sim V_{Bn-2} = 90、80、72、65KPH$
警戒速限影響實驗	$V_{C1} \sim V_{Cn-2} = 55、40、25KPH$
曲率半徑影響實驗	$r \geq 344、227、163、86、34m$
停站時間影響實驗	$T_D = 18、25、40s$

5.2 影響 FBS 運能相關因素之模擬實驗與結果

5.2.1 FBS 實驗控制組

為與接下來各實驗之結果進行比較，本小節以表 5-2 之 Metro-FBSSM 實驗基本模型為本實驗控制組。本實驗控制組在區間個數及區間長度影響實驗之區間總個數 $n=6$ 個，區間長度 $L_{B1}=272m$ 、 $L_{B2}=268m$ 、 $L_{B3}=268m$ 、 $L_{B4}=268m$ 、 $L_{B5}=268m$ 、 $L_{B6}=171m$ ；在最高速限影響實驗之最高速限 $V_{B1} \sim V_{B4}=80KPH$ 。在警戒速限影響實驗之警戒速限 $V_{C1} \sim V_{C4}=25KPH$ 。在曲率半徑影響實驗之曲率半徑為 $344m$ ，因此 $V_{B3}=80KPH$ 。在停站時間影響實驗之停站時間為 25 秒。

此外為了解列車受運行干擾對班距造成之影響，本研究自行界定前方列車與後方列車到達下一站之時間間隔（以下簡稱前後車到站間隔）與發車間隔兩者相差大於等於 8 秒以上者為嚴重運行干擾；兩者相差小於 8 秒且大於等於 4 秒以上者為中度運行干擾；兩者相差小於 4 秒且大於等於 0.5 秒以上者為輕微運行干擾；兩者相差小於 0.5 秒以下者為正常，如表 5-5 所示。

表 5-5 本研究之運行干擾定義表

運行干擾定義	定義內容說明
嚴重運行干擾	前後車到站間隔－發車間隔 ≥ 8 秒
中度運行干擾	4 秒 \leq 前後車到站間隔－發車間隔 < 8 秒
輕微運行干擾	0.5 秒 \leq 前後車到站間隔－發車間隔 < 4 秒
正常	前後車到站間隔－發車間隔 < 0.5 秒

本實驗控制組配合 Metro-FBSSM 程式以試誤方式（trial-and-error）求得之最小班距為 87 秒，結果如表 5-6 所示。

表 5-6 FBS 實驗控制組最小班距計算結果

發車間隔	前後車到站間隔	備註
88s	88s	正常
87s	87s	正常
86s	99.65s	嚴重運行干擾

5.2.2 FBS 區間個數及區間長度影響實驗

本小節依據 5.1 節之實驗設計配合 Metro-FBSSM 程式進行區間個數及區間長度影響實驗。實驗首先在改變區間個數後，以平均分割方式求得各區間長度，隨後利用 Metro-FBSSM 程式以試誤方式輸入不同之發車間隔，直至所輸入的發車間隔為列車正常狀況下之最小班距為止，本實驗之結果詳如表 5-7 及圖 5-1 所示。當區間長度 336m 時，最小班距為 94 秒；當區間長度 268m 時，最小班距為 87 秒；當區間長度 224m 時，最小班距為 83 秒；當區間長度 192m 時，最小班距為 80 秒；當區間長度 168m 時，最小班距為 77 秒；當區間長度 149m 時，最小班距為 75 秒，因此由結果得知，當區間個數增加，區間長度縮短，最小班距相對縮短。

由表 5-7，當區間個數為 5 至 7 個時，低於最小班距之發車間隔列車受到嚴重運行干擾；當區間個數為 8 個時，低於最小班距之發車間隔列車受到中度運行干擾；當區間個數為 9 個及 10 個時，低於最小班距之發車間隔列車受到輕微運行干擾。因此列車所受之運行干擾程度隨區間個數增加及區間長度縮短逐漸變小。表 5-7 之結果可繪製成區間個數及區間長度-班距之影響關係圖，如圖 5-1 所示。

表 5-7 FBS 區間個數及區間長度影響實驗結果一覽表

區間 個數	各區間長度	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
5	336m、336m、336m、 336m、171m	95s	95s	正常
		94s	94s	正常
		93s	113.4s	嚴重運行干擾
6	272m、268m、268m、 268m、268m、171m	88s	88s	正常(控制組)
		87s	87s	正常(控制組)
		86s	99.65s	嚴重運行干擾
7	224m、224m、224m、 224m、224m、224m、 171m	84s	84s	正常
		83s	83s	正常
		82s	91.27s	嚴重運行干擾
8	192m、192m、192m、 192m、192m、192m、 192m、171m	81s	81s	正常
		80s	80s	正常
		79s	84.17s	中度運行干擾
9	168m、168m、168m、 168m、168m、168m、 168m、168m、171m	78s	78s	正常
		77s	77s	正常
		76s	79.41s	輕微運行干擾
10	152m、149m、149m、 149m、149m、149m、 149m、149m、149m、 171m	76s	76s	正常
		75s	75s	正常
		74s	76.46s	輕微運行干擾

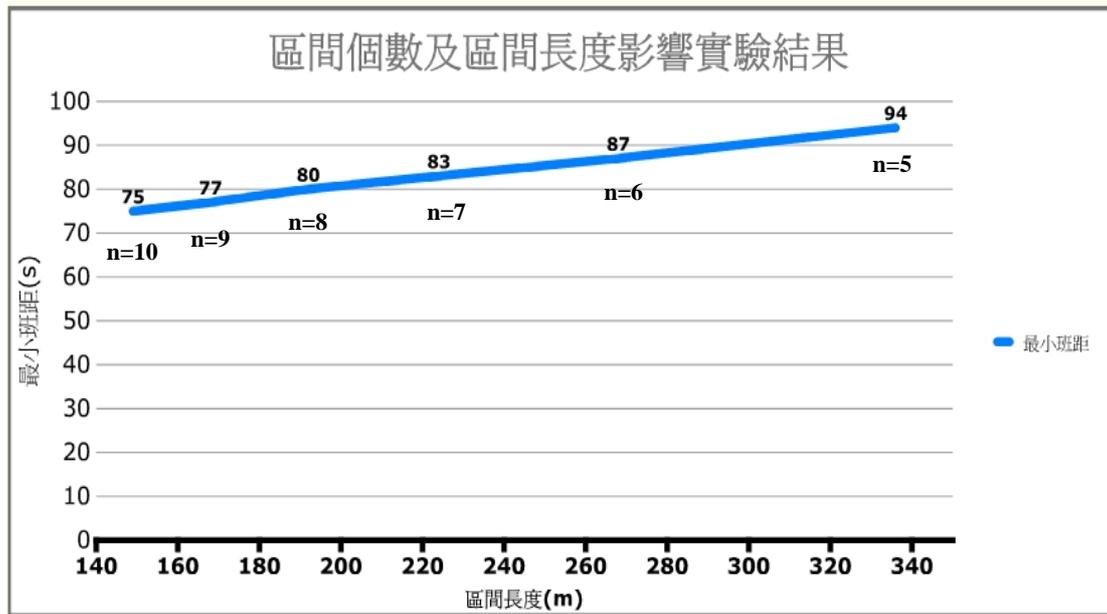


圖 5-1 FBS 區間個數及區間長度-班距影響關係圖

由表 5-7 及圖 5-1 中，當區間個數減少至 5 個，區間長度增加時，明顯看出最小班距較區間個數為 6 個之實驗控制組增加 7 秒；而當區間個數增加，區間長度縮短時，最小班距隨之縮小，且當區間總個數增加到某一程度，即區間長度縮短至趨近列車長度時，此時最小班距之縮短幅度趨於平緩。因此在區間長度大於列車長度之情況下，最小班距隨區間長度縮短而變小。然而於本實驗求解最小班距之過程中，於 Metro-FBSSM 程式之結果輸出頁面顯示，列車所受之運行干擾多發生在車站區間前方兩個區間（區間 04 一個區間或區間 04 及區間 05 兩個區間），主要因為前方列車於車站區間靠站停車所佔用之時間較多的關係，由此可知車站區間為影響最小班距之主要瓶頸區間。因此受限於 FBS 之控制方式及列車靠站停車之影響，於本實驗中最小班距僅可達到 75 秒左右。

5.2.3 FBS 最高速限影響實驗

本小節依據 5.1 節之實驗設計配合 Metro-FBSSM 程式進行區間最高速限影響實驗。實驗首先統一變動前四個區間之區間最高速限後，利用 Metro-FBSSM 程式以試誤方式輸入不同之發車間隔，直至所輸入的發車間隔為列車正常狀況下之最小班距為止，本實驗之結果詳如表 5-8 及圖 5-2 所示。

表 5-8 FBS 最高速限影響實驗結果一覽表

最高速限	各區間最高速限	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
65KPH	65KPH、65KPH、	92s	92s	正常
	65KPH、65KPH、	91s	91s	正常
	65KPH、65KPH	90s	108.34s	嚴重運行干擾
72KPH	72KPH、72KPH、	90s	90s	正常
	72KPH、72KPH、	89s	89s	正常
	65KPH、65KPH	88s	104.48s	嚴重運行干擾
80KPH	80KPH、80KPH、	88s	88s	正常(控制組)
	80KPH、80KPH、	87s	87s	正常(控制組)
	65KPH、65KPH	86s	99.65s	嚴重運行干擾
90KPH	90KPH、90KPH、	86s	86s	正常
	90KPH、90KPH、	85s	85s	正常
	65KPH、65KPH	84s	92.28s	嚴重運行干擾

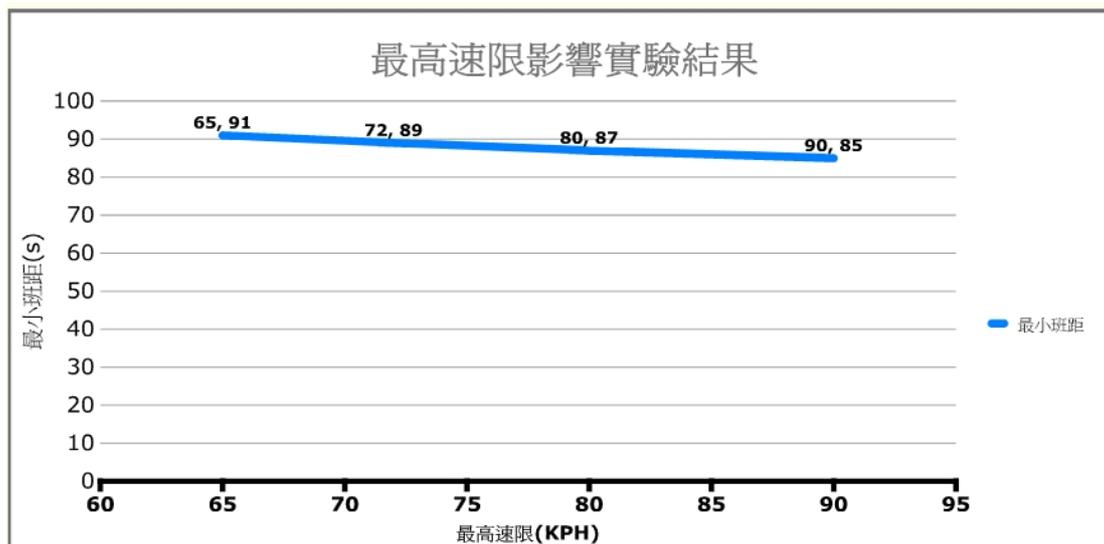


圖 5-2 FBS 最高速限-班距影響關係圖

由表 5-8 及圖 5-2，隨最高速限提高，最小班距略微縮短。與實驗控制組比較，速限提高至 90KPH，最小班距縮短 2 秒為 85 秒；速限降低至 72KPH，最小班距增加 2 秒為 89 秒，當速限降低至 65KPH，最小班距增加 4 秒為 91 秒。因此最小班距隨最高速限增加而略微減少。然而不論提高或降低最高速限，低於最小班距之發車間隔列車皆受到嚴重運行干擾，唯獨最高速限越高，列車受運行干擾所延誤之秒數越少。

5.2.4 FBS 警戒速限影響實驗

本小節依據 5.1 節之實驗設計配合 Metro-FBSSM 程式進行區間警戒速限影響實驗。實驗首先統一變動前四個區間之區間警戒速限後，利用 Metro-FBSSM 程式以試誤方式輸入不同之發車間隔，直至所輸入的發車間隔為列車正常狀況下之最小班距為止，本實驗之結果詳如表 5-9 所示。

表 5-9 FBS 警戒速限影響實驗結果一覽表

警戒速限	各區間警戒速限	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
25KPH	25KPH、25KPH、	88s	88s	正常(控制組)
	25KPH、25KPH、	87s	87s	正常(控制組)
	25KPH、25KPH	86s	99.65s	嚴重運行干擾
40KPH	40KPH、40KPH、	88s	88s	正常
	40KPH、40KPH、	87s	87s	正常
	25KPH、25KPH	86s	94.30s	嚴重運行干擾
55KPH	55KPH、55KPH、	88s	88s	正常
	55KPH、55KPH、	87s	87s	正常
	25KPH、25KPH	86s	90.59s	嚴重運行干擾

由表 5-9，警戒速限對最小班距並無影響關係，因此不論提高或降低警戒速限，所得之最小班距皆與實驗控制組相同為 87 秒。然而警戒速限卻影響列車所受運行干擾之延誤時間大小。當前四個區間之警戒速限提升至 40KPH 時，雖低於最小班距之發車間隔列車受到嚴重運行干擾，但所造成之延誤時間較實驗控制組減少 5.35 秒；當前四個區間之警戒速限提升至 55KPH 時，低於最小班距之發車間隔列車所受到之運行干擾仍為嚴重運行干擾，但所造成之延誤時間較實驗控制組減少約 9 秒左右。因此警戒速限雖對最小班距無影響，但在相同最小班距之條件下，可看出警戒速限對列車受運行干擾時之運轉行為有相當程度之影響，當警戒速限越高，列車受運行干擾所造成之延誤越少。

5.2.5 FBS 曲率半徑影響實驗

本小節依據 5.1 節之實驗設計配合 Metro-FBSSM 程式進行曲率半徑影響實驗。實驗首先依據不同最小曲率半徑所能達到之最高速度，單獨變動路線第三個區間之區間最高速度 V_{B3} 後，利用 Metro-FBSSM 程式以試誤方式輸入不同之發車間隔，直至所輸入的發車間隔為列車正常狀況下之最小班距為止，本實驗之結果詳如表 5-10 及圖 5-3 所示。

以台北捷運高運量系統為例，主線最小之曲率半徑為 200m，因此在本實驗中，路線第三個區間最小曲率 227m 之最小班距比實驗控制組 ($r \geq 344m$) 之最小班距僅增加 1 秒。此外，本研究進一步模擬小於 200m 之曲率半徑影響，路線第三個區間最小曲率半徑 163m、86m 與 34m 之最小班距分別為 88 秒、90 秒與 93 秒。由圖 5-3 可看出路線第三個區間曲率半徑愈小，其最小班距增加之幅度愈明顯。曲率半徑 227m 與 163m 之最小班距相同，僅較實驗控制組增加 1 秒。曲率半徑 86m 之最小班距略微增加，較實驗控制組增加 3 秒。曲率半徑 34m 之最小班距增加較多，較實驗控制組增加 6 秒。

表 5-10 FBS 曲率半徑影響實驗結果一覽表

最小曲率半徑	區間 03 最高速度	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
$r \geq 344m$	$V_{B3}=80KPH$	88s	88s	正常(控制組)
		87s	87s	正常(控制組)
		86s	99.65s	嚴重運行干擾

表 5-10 FBS 曲率半徑影響實驗結果一覽表(續)

最小曲率半徑	區間 03 最高速限	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
$r \geq 227\text{m}$	$V_{B3}=65\text{KPH}$	89s	89s	正常
		88s	88s	正常
		87s	108.21s	嚴重運行干擾
$r \geq 163\text{m}$	$V_{B3}=55\text{KPH}$	89s	89s	正常
		88s	88s	正常
		87s	111.40s	嚴重運行干擾
$r \geq 86\text{m}$	$V_{B3}=40\text{KPH}$	91s	91s	正常
		90s	90s	正常
		89s	115.49s	嚴重運行干擾
$r \geq 34\text{m}$	$V_{B3}=25\text{KPH}$	94s	94s	正常
		93s	93s	正常
		92s	117.27s	嚴重運行干擾

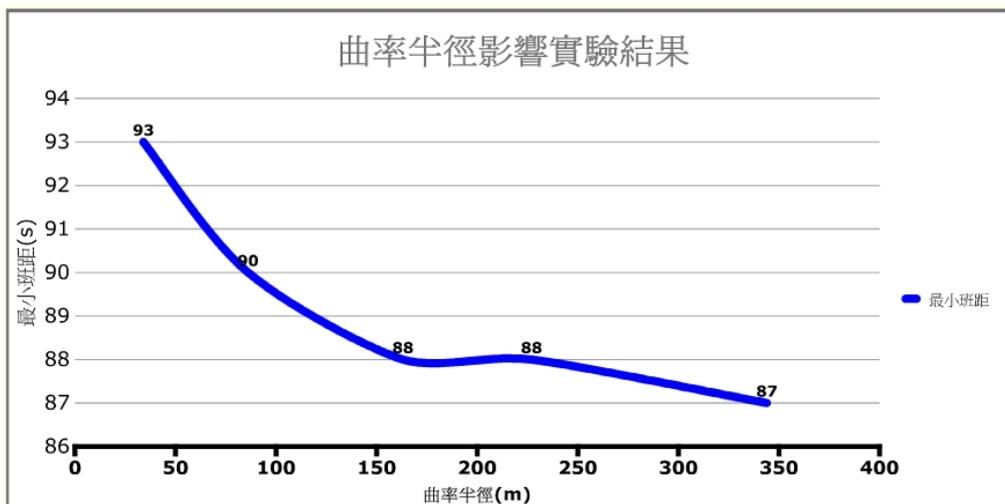


圖 5-3 FBS 曲率半徑-班距影響關係圖

5.2.6 FBS 停站時間影響實驗

本小節依據 5.1 節之實驗設計配合 Metro-FBSSM 程式進行停站時間影響實驗。實驗首先在單純變動列車停站時間後，利用 Metro-FBSSM 程式以試誤方式輸入不同之發車間隔，直至所輸入的發車間隔為列車正常狀況下之最小班距為止，本實驗之結果詳如表 5-11 及圖 5-4 所示。由表 5-11 及圖 5-4，最小班距與停站時間成正比，在 FBS 控制方式下，停站時間愈長，最小班距愈大。於 Metro-FBSSM 程式之結果輸出頁面顯示，因前方列車靠站停車佔用車站區間之關係，後方列車所受之運行干擾皆發生在車站區間前方兩個區間（區間 04 一個區間或區間 04 及區間 05 兩個區間），因此本實驗再次證明了車站區間為影響最小班距之瓶頸區間。

表 5-11 FBS 停站時間影響實驗結果一覽表

停站時間	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
$T_D=40s$	103s	103s	正常
	102s	102s	正常
	101s	114.65s	嚴重運行干擾
$T_D=25s$	88s	88s	正常(控制組)
	87s	87s	正常(控制組)
	86s	99.65s	嚴重運行干擾
$T_D=18s$	81s	81s	正常
	80s	80s	正常
	79s	92.65s	嚴重運行干擾

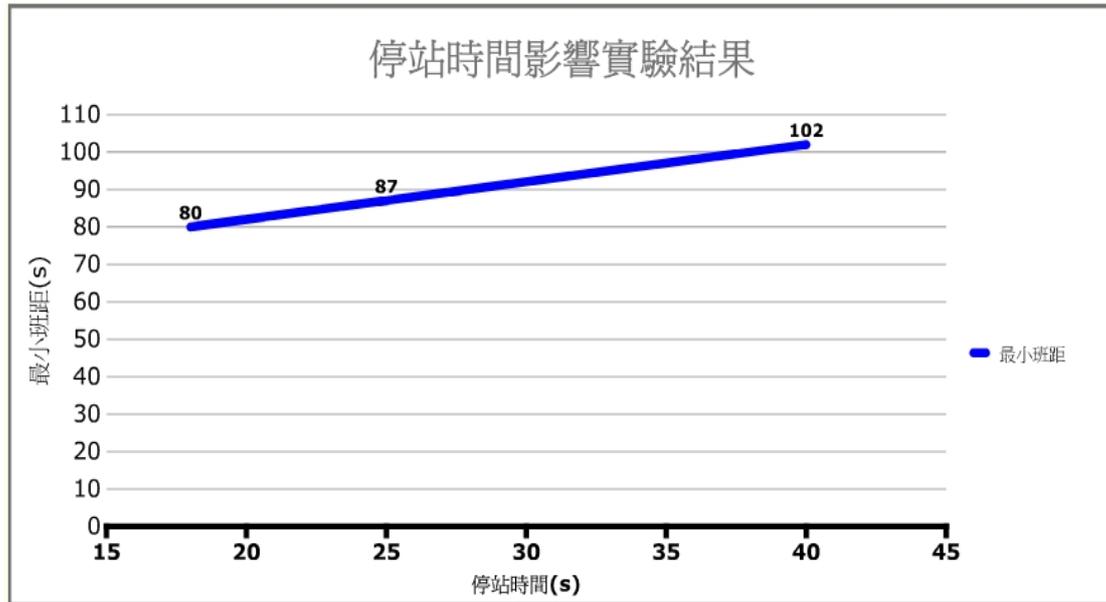


圖 5-4 FBS 停站時間-班距影響關係圖

5.3 影響 MBS 運能相關因素之實驗設計

本節進行影響 MBS 運能相關因素之實驗設計，使本研究能於 5.4 節配合 Metro-MBSSM 程式探討影響 MBS 之相關因素。有鑑於運轉速限及位置信標間隔可能為影響 MBS 運能之重要因素，因此本研究欲探討在 MBS 控制方式下最高速限、路線彎道、位置信標間隔及停站時間對運能之影響關係，以了解相關影響因素對運能之影響程度大小，作為後續比較分析之依據。Metro-MBSSM 之外生變數分為控制變數 (Control Variables) 及變動變數 (Variables)，而內生變數為各實驗項目所欲求之最小班距 H_{MIN} 。Metro-MBSSM 相關之實驗設計限制條件、實驗基本模型與控制變數、實驗項目與變動變數分別說明如下。

一、 實驗設計限制條件

Metro-MBSSM 實驗設計限制條件如表 5-12 所示，分別說明如下：

(一) 模擬路線總長度

為使實驗中所有模擬系統一致，依照第四章模擬模型所設定之模擬路線總長度為 1515m。由於 MBS 區間長度為零，因此將路線分成站間路段為 1344m 及車站區間 171m。

(二) 最高 ATP 速限變動範圍

最高速限為影響 MBS 運能之重要因素之一，因此設定實驗最高 ATP 速限統一變動範圍為 90KPH 至 65KPH。其中，為符合實際停車程序，站前路段速限 65KPH 與車站區間速限 65KPH 兩項設為控制變數，因此以 Metro-MBSSM 進行最高速限影響實驗時，限制路段 01 至路段 04 之各個路段統一變動最高 ATP 速限，其統一變動範圍為 90KPH 至 65KPH，而 MBS 無須功能位階調整列車運轉速限，因此列車皆以 100% ATP 速限運轉。

(三) 路線彎道設置處

與 FBS 實驗設計相同，MBS 實驗限制路線彎道設於模擬路線的第三個路段，實驗同樣模擬曲率半徑 350m 至 34m，因此以 Metro-MBSSM 進行曲率半徑影響實驗時，依照實驗當時所模擬之曲率半徑給予路線第三個路段適當之最高 ATP 速限 V_{S3} 。

(四) 位置信標間隔

位置信標反射列車所在位置之絕對座標資訊給列車，

以更新列車目前位置，同時作為車載資料庫電腦計算與前車安全距離之依據。位置信標間隔佈設係依據 MBS 系統設計要求及各施工廠商而有所不同，目前 MBS 常見的位置信標間隔為 5m 至 25m，因此以 Metro-MBSSM 進行位置信標間隔影響實驗時，限制位置信標間隔範圍為 5m 至 25m。

(五) 停站時間變動範圍

與 FBS 實驗設計相同，MBS 實驗限制停站時間範圍為 18 秒至 40 秒。

(六) 最小發車間隔

為符合本研究目的，以 Metro-MBSSM 進行以上各項實驗時，發車間隔值以模擬符合 MBS 控制方式下之最小班距為其目標值。

表 5-12 Metro-MBSSM 實驗設計限制條件一覽表

項目	限制條件	說明
模擬路線總長度	1515 m	模擬系統一致
最高 ATP 速限範圍	$V_{Si}= 90 \sim 65\text{KPH}$	$i=1\sim 4$
路線彎道設置處	$r=350 \sim 34\text{m}$	設於路線第三個路段
位置信標間隔範圍	$L_M=5 \sim 25 \text{ m}$	符合 MBS 實際情況
停站時間範圍	$T_D=18 \sim 40 \text{ s}$	符合捷運現況
最小發車間隔	內生變數 求符合 MBS 控制方式 之最小班距 H_{MIN}	符合研究目的

二、 實驗基本模型與控制變數

各實驗之基本模型如表 5-13 所示，Metro-MBSSM 將模擬路線劃分成 6 個路段，列車以 100% 之 ATP 速限運轉。當以 Metro-MBSSM 進行最高速限影響實驗、曲率半徑影響實驗、位置信標間隔影響實驗、停站時間影響實驗等各實驗時，除各實驗之變動變數外，其餘各控制變數皆參照表 5-13 之實驗基本模型。

表 5-13 Metro-MBSSM 實驗基本模型控制變數一覽表

最高 ATP 速限	路段長度	列車營運特性參數
$V_{S1-S4}=80\text{KPH}$ (站間路段)	$L_{S1-S5}=1344\text{m}$ (站間路段)	加速度 $a=1\text{m/s}^2$ 減速度 $b=1\text{m/s}^2$ 列車長度 $L_T=141\text{m}$ 反應時間 $T_R=0.41\text{s}$
$V_{S5-S6}=65\text{KPH}$ (車站路段)	$L_{S6}=171\text{m}$ (車站區間)	停站時間 $T_D=25\text{s}$ 信標位置 $L_M=10\text{m}$

三、 實驗項目與變動變數

Metro-MBSSM 之實驗項目與變動變數如表 5-14 所示，在符合前述之實驗設計限制條件下，各實驗項目及變動變數分別說明如下：

(一) 最高速限影響實驗

本實驗之變動變數為統一變動站前路段以前之各路段最高 ATP 速限 $V_{S1} \sim V_{S4} = 90\text{ KPH}$ 或 80 KPH 或 72 KPH 或 65KPH ，控制變數為站前路段最高 ATP 速限 $V_{S5} = 65\text{ KPH}$ 、車站區間最高 ATP 速限 $V_{S6} = 65\text{ KPH}$ 、各路段長度及列車營運特性參數。

(二) 曲率半徑影響實驗

本實驗之變動變數與 FBS 實驗設計相同，只變動路線第三個路段之最高 ATP 速限 $V_{S3} = 80、65、55、40、25\text{KPH}$ 。本實驗之控制變數為第三個路段以外之其他路段最高 ATP 速限、各路段長度及列車營運特性參數。

(三) 位置信標間隔影響實驗

本實驗之變動變數只變動位置信標間隔 $L_M = 5、10、25\text{m}$ 。位置信標佈設間隔影響車載資料庫電腦計算列車目前所在位置及與前車目前所保持之安全距離，依據設計成本、MBS 系統設計要求及施工廠商不同位置信標佈設間隔有所不同，目前 MBS 常見的位置信標間隔為 5m 至 10m 及 25m。本實驗之控制變數為各路段之最高 ATP 速限、各路段長度及位置信標間隔以外之其他列車營運特性參數。

(四) 停站時間影響實驗

本實驗之變動變數與 FBS 實驗設計相同，只變動停站時間 $T_D = 18、25、40\text{s}$ 。實驗控制變數為各路段之最高 ATP 速限、各路段長度及停站時間外之其他列車營運特性參數。

表 5-14 Metro-MBSSM 實驗項目與變動變數一覽表

實驗項目	變動變數之數值
最高速限影響實驗	$V_{S1} \sim V_{S4} = 90、80、72、65\text{KPH}$
曲率半徑影響實驗	$r \geq 344、227、163、86、34\text{m}$
位置信標間隔影響實驗	$L_M = 5、10、25\text{m}$
停站時間影響實驗	$T_D = 18、25、40\text{s}$

5.4 影響 MBS 運能相關因素之模擬實驗與結果

5.4.1 MBS 實驗控制組

為與接下來各實驗之結果進行比較，本小節以表 5-13 之 Metro-MBSSM 實驗基本模型為本實驗控制組。本實驗控制組在最高速限影響實驗之最高速限 $V_{S1} \sim V_{S4}=80\text{KPH}$ 。在曲率半徑影響實驗之曲率半徑為 344m，因此 $V_{S3}=80\text{KPH}$ 。在位置信標間隔影響實驗之位置信標間隔為 10m。在停站時間影響實驗之停站時間為 25 秒。

本實驗控制組配合 Metro-MBSSM 程式以試誤方式求得之最小班距為 67 秒，結果如表 5-15 所示。

表 5-15 MBS 實驗控制組最小班距計算結果

發車間隔	前後車到站間隔	備註
70s	70s	正常
69s	69.08s	正常
68s	68.08s	正常
67s	67.23s	正常
66s	66.57s	輕微運行干擾

表 5-15 中，當發車間隔為 70 秒時，列車完全無運行干擾，從列車發車離站至下一站靠站停車，列車本身與前方列車皆維持在安全距離以上。當發車間隔降低至 67 秒時，後方列車因短暫低於安全距離些微減速，因此前後車到站間隔些微增加 0.23 秒，但仍在本研究定義之正常狀態範圍內（詳如表 5-5），直至發車間隔降低至 66 秒時，因前後車到站間隔超過 0.5 秒為輕微運行干擾，因此本實驗控制組之最小班距為 67 秒。

5.4.2 MBS 最高速限影響實驗

本小節依據 5.3 節之實驗設計配合 Metro-MBSSM 程式進行區間最高速限影響實驗。實驗首先統一變動路線前四個路段之區間最高速限後，利用 Metro-MBSSM 程式以試誤方式輸入不同之發車間隔，直至所輸入的發車間隔為列車正常狀況下之最小班距為止，本實驗之結果詳如表 5-16 及圖 5-5 所示。

表 5-16 及圖 5-5 中，速限 90KPH、80KPH、72KPH 與 65KPH 之最小班距分別為 75 秒、67 秒、67 秒與 67 秒。隨最高速限提高，MBS 之最小班距並未縮小。與實驗控制組比較，速限提高至 90KPH，最小班距卻增加 8 秒，主要乃因最高速限提高後，列車本身之煞車距離增加，車載資料庫所計算列車本身與前車之安全距離值增加，當後方列車於路段 1030m 時，因前方列車正靠站結束離站加速中，後方列車自動調整車速略微減速以維持正常之安全距離，当前方列車離站後，後方列車恢復正常最高速限隨即加速運轉，直至車站區間程式化自動停車。當最高速限降為 72KPH 與 65KPH 時，最小班距與實驗控制組相同為 67 秒，主要因為最高速限降低，車載資料庫所計算列車本身與前車之安全煞車距離值較短，當後方列車於前方列車靠站結束離站加速時，80KPH、72KPH 與 65KPH 實驗之後方列車恰好皆於路段 1180m~1220m 處自動調整車速略微減速，待前方列車離站後，後方列車恢復正常最高速限隨即加速運轉，直至車站區間程式化自動停車。因此最高速限較高時最小班距增加，當最高速限在一定範圍內時，最小班距相同。然而在 MBS 控制方式下，低於最小班距之發車間隔列車皆為輕微運行干擾。

表 5-16 MBS 最高速限影響實驗結果一覽表

最高速限	各路段最高速限	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
90KPH	90KPH、90KPH、	76s	76s	正常
	90KPH、90KPH、	75s	75.26s	正常
	65KPH、65KPH	74s	74.70s	輕微運行干擾
80KPH		70s	70s	正常(控制組)
		69s	69.08s	正常(控制組)
		68s	68.08s	正常(控制組)
		67s	67.23s	正常(控制組)
		66s	66.57s	輕微運行干擾
72KPH	72KPH、72KPH、 72KPH、72KPH、 65KPH、65KPH	70s	70s	正常
		69s	69.07s	正常
		68s	68.07s	正常
		67s	67.22s	正常
		66s	66.56s	輕微運行干擾
65KPH	65KPH、65KPH、 65KPH、65KPH、 65KPH、65KPH	70s	70s	正常
		69s	69.08s	正常
		68s	68.08s	正常
		67s	67.23s	正常
		66s	66.56s	輕微運行干擾

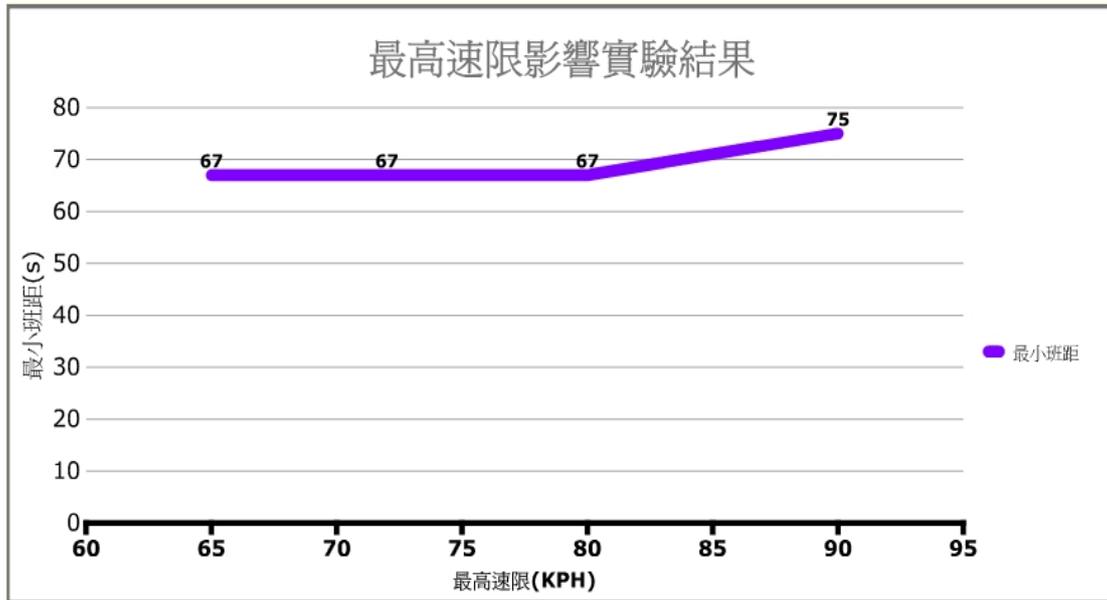


圖 5-5 MBS 最高速限-班距影響關係圖

5.4.3 MBS 曲率半徑影響實驗

本小節依據 5.3 節之實驗設計配合 Metro-MBSSM 程式進行曲率半徑影響實驗。實驗首先依據不同最小曲率半徑所能達到之最高速限，單獨變動路線第三個路段之最高速限 V_{S3} 後，利用 Metro-MBSSM 程式以試誤方式輸入不同之發車間隔，直至所輸入的發車間隔為列車正常狀況下之最小班距為止，本實驗之結果如表 5-17 與圖 5-6 所示。

若主線最小之曲率半徑為 200m，則在本實驗中，路線第三個區間最小曲率 $r \geq 227m$ 之最小班距與實驗控制組 ($r \geq 344m$) 之最小班距相同為 67 秒。此外，本研究進一步模擬小於 200m 之曲率半徑影響，路線第三個區間最小曲率半徑 163m、86m 與 34m 之最小班距相同為 67 秒。圖 5-6 顯示列車在 MBS 靈活且彈性之控制方式下，曲率半徑對 MBS 最小班距並無影響。

表 5-17 MBS 曲率半徑影響實驗結果一覽表

曲率半徑	路段 03 最高速限	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
$r \geq 344\text{m}$	$V_{S3}=80\text{KPH}$	70s	70s	正常(控制組)
		69s	69.08s	正常(控制組)
		68s	68.08s	正常(控制組)
		67s	67.23s	正常(控制組)
		66s	66.57s	輕微運行干擾
$r \geq 227\text{m}$	$V_{S3}=65\text{KPH}$	70s	70s	正常
		69s	69.07s	正常
		68s	68.07s	正常
		67s	67.22s	正常
		66s	66.56s	輕微運行干擾
$r \geq 163\text{m}$	$V_{S3}=55\text{KPH}$	70s	70s	正常
		69s	69.07s	正常
		68s	68.07s	正常
		67s	67.22s	正常
		66s	66.56s	輕微運行干擾
$r \geq 86\text{m}$	$V_{S3}=40\text{KPH}$	70s	70s	正常
		69s	69.07s	正常
		68s	68.07s	正常
		67s	67.22s	正常
		66s	66.57s	輕微運行干擾

表 5-17 MBS 曲率半徑影響實驗結果一覽表(續)

曲率半徑	路段 03 最高速限	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
$r \geq 34m$	$V_{S3}=25KPH$	70s	70s	正常
		69s	69.08s	正常
		68s	68.08s	正常
		67s	67.23s	正常
		66s	66.57s	輕微運行干擾

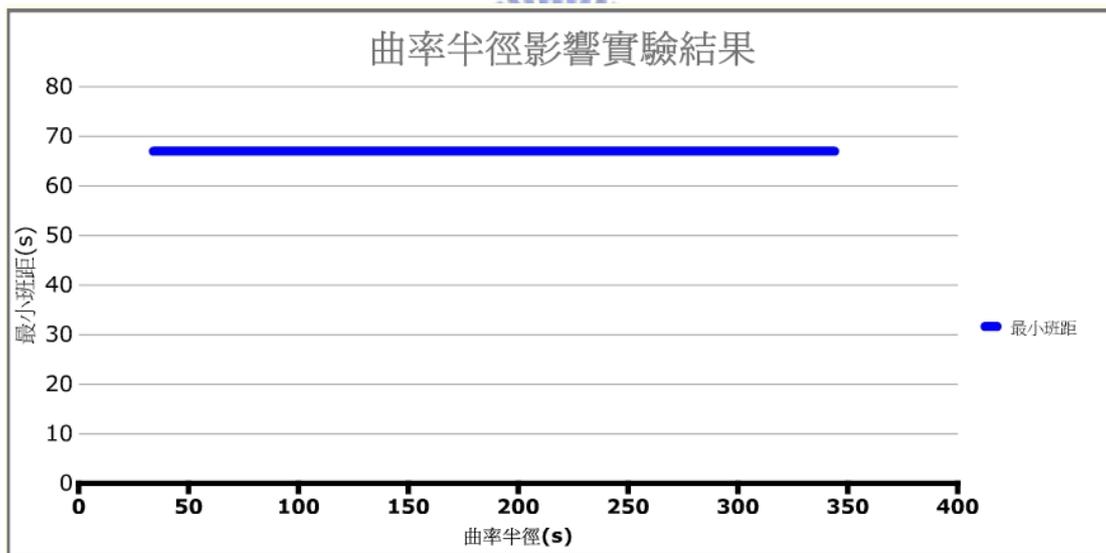


圖 5-6 MBS 曲率半徑-班距影響關係圖

5.4.4 MBS 位置信標間隔影響實驗

本小節依據 5.3 節之實驗設計配合 Metro-MBSSM 程式進行位置信標間隔影響實驗。實驗首先依據不同位置信標間隔，單獨變動位置信標間隔 L_M 後，利用 Metro-MBSSM 程式以試誤方式輸入不同之發

車間隔，直至所輸入的發車間隔為列車正常狀況下之最小班距為止，本實驗之結果詳如表 5-18 及圖 5-7 所示，目前 MBS 常見的位置信標間隔 5m 至 25m 中，當位置信標間隔為 25m 時，最小班距為 68 秒；當位置信標間隔為 10m 與 5m 時，最小班距皆為 67 秒。由於捷運 MBS 設計時，依據成本及系統需求，已將位置信標間隔盡量縮短，在這樣的情形下經本實驗結果顯示，在 25m 之間隔範圍內，隨位置信標間隔愈短，對最小班距之縮短影響不大並且趨於平緩。

表 5-18 MBS 位置信標間隔影響實驗結果一覽表

位置信標間隔	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
$L_M=25m$	69s	69s	正常
	68s	68.12s	正常
	67s	67.51	輕微運行干擾
$L_M=10m$	70s	70s	正常(控制組)
	69s	69.08s	正常(控制組)
	68s	68.08s	正常(控制組)
	67s	67.23s	正常(控制組)
	66s	66.57s	輕微運行干擾
$L_M=5m$	70s	70s	正常
	69s	69.04s	正常
	68s	68.11s	正常
	67s	67.27s	正常
	66s	66.51s	輕微運行干擾

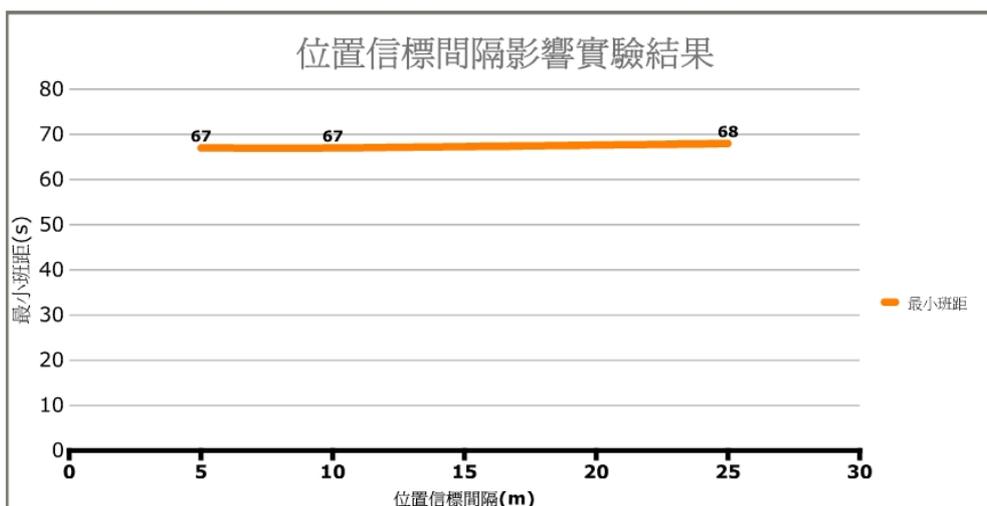


圖 5-7 MBS 位置信標間隔-班距影響關係圖

5.4.5 MBS 停站時間影響實驗

本小節依據 5.3 節之實驗設計配合 Metro-MBSSM 程式進行停站時間影響實驗。實驗首先在單純變動列車停站時間後，利用 Metro-MBSSM 程式以試誤方式輸入不同之發車間隔，直至所輸入的發車間隔為列車正常狀況下之最小班距為止，本實驗之結果詳如表 5-19 及圖 5-8 所示，最小班距與停站時間成正比，停站時間愈長，最小班距愈大。

表 5-19 MBS 停站時間影響實驗結果一覽表

停站時間	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
$T_D=40s$	85s	85s	正常
	84s	84.08s	正常
	83s	83.08s	正常
	82s	82.23s	正常
	81s	81.57s	輕微運行干擾

表 5-19 MBS 停站時間影響實驗結果一覽表 (續)

停站時間	發車間隔	前後車 到站間隔	備註
$T_D=25s$	70s	70s	正常(控制組)
	69s	69.08s	正常(控制組)
	68s	68.08s	正常(控制組)
	67s	67.23s	正常(控制組)
	66s	66.57s	輕微運行干擾
$T_D=18s$	63s	63s	正常
	62s	62.08s	正常
	61s	61.08s	正常
	60s	60.23s	正常
	59s	59.57s	輕微運行干擾

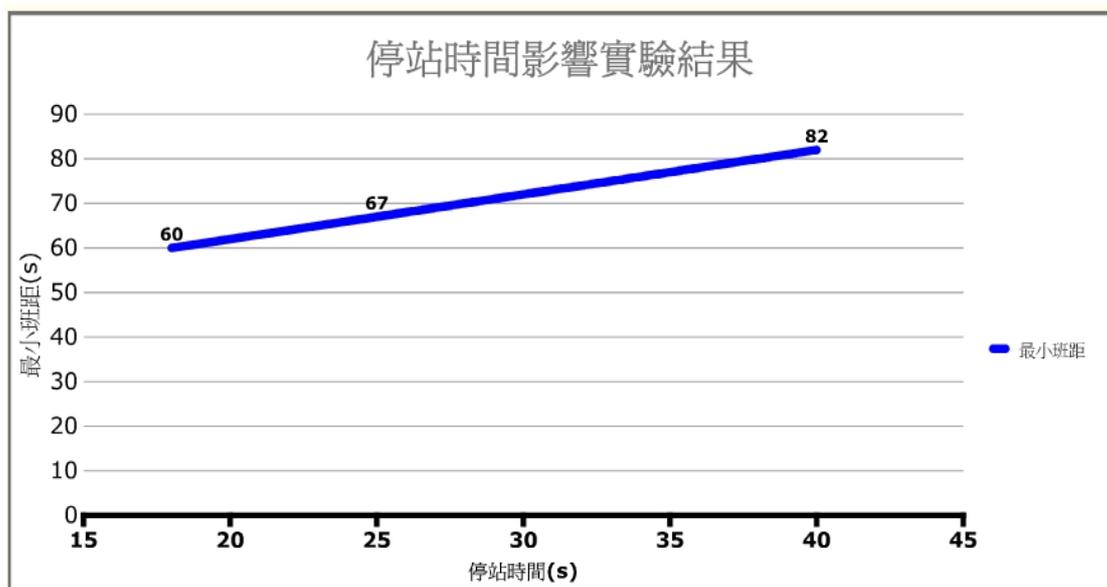


圖 5-8 MBS 停站時間-班距影響關係圖

5.5 FBS 與 MBS 運能之比較分析

理論上，MBS 所得之最小班距與最大運能實為 FBS 區間長度縮短至零之極值，因此當 FBS 區間長度愈短，其最小班距則愈短、最大運能則愈大，兩者並與 MBS 之最小班距及最大運能差距縮小。然而本研究考量目前實務上系統技術、列車控制與運轉安全等方面，因此以平均區間長度 268m 為 FBS 之實驗控制組進行 5.2 節各項 FBS 模擬實驗，同時將以此實驗控制組為基礎比較 MBS 與 FBS 之運能差異。因此本節將依據 5.2 節 FBS 各項實驗結果與 5.4 節 MBS 各項實驗結果進行比較分析，首先就 FBS 與 MBS 控制方式下之運能進行比較分析，隨後分別就 FBS 與 MBS 最高速限影響、FBS 與 MBS 曲率半徑影響及 FBS 與 MBS 停站時間影響下之運能進行比較分析。

5.5.1 FBS 與 MBS 控制方式下運能之比較分析

由表 5-7 FBS 區間個數與區間長度影響實驗結果及表 5-15 MBS 實驗基本控制組最小班距結果所整理之最大運能比較表與比較圖分別如表 5-20 與圖 5-9 所示。本研究之最大運能為每單位小時除以最小班距所得之值，以無條件捨去法取整數位後所得之數值，為每單位小時之列車數 (Train Units, 以下簡稱 TU)。

如表 5-20 所示，MBS 區間長度為零，取其實驗基本模型與 FBS 區間個數與區間長度各實驗項目進行比較。MBS 之最大運能為每單位小時 53TU。FBS 區間長度 149m、168m、192m、224m、268m 與 336m 之最大運能分別為每單位小時 48TU、46TU、45TU、43TU、41TU 與 38TU。而 MBS 之最大運能較 FBS 區間長度 149m、168m、192m、

224m、268m 與 336m 之最大運能分別提升 10.4%、15.2%、17.7%、23.2%、29.2% 與 39.4% 運能。經由表 5-20 及圖 5-9 比較顯示，在符合 FBS 控制方式下，區間長度縮短使後方列車與前方列車所需保持之安全車距縮短，因此 FBS 之最大運能隨之增加，並與 MBS 之最大運能差距縮小。

表 5-20 FBS 與 MBS 控制方式下運能之比較表

系統項目	最小班距	最大運能	MBS-FBS	MBS 增加之運能
FBS 區間個數 10	75s	48 TU	5 TU	10.4%
FBS 區間個數 9	77s	46 TU	7 TU	15.2%
FBS 區間個數 8	80s	45 TU	8 TU	17.7%
FBS 區間個數 7	83s	43 TU	10 TU	23.2%
FBS 區間個數 6	87s	41 TU	12 TU	29.2%
FBS 區間個數 5	94s	38 TU	15 TU	39.4%
MBS 控制方式	67s	53 TU	-	-

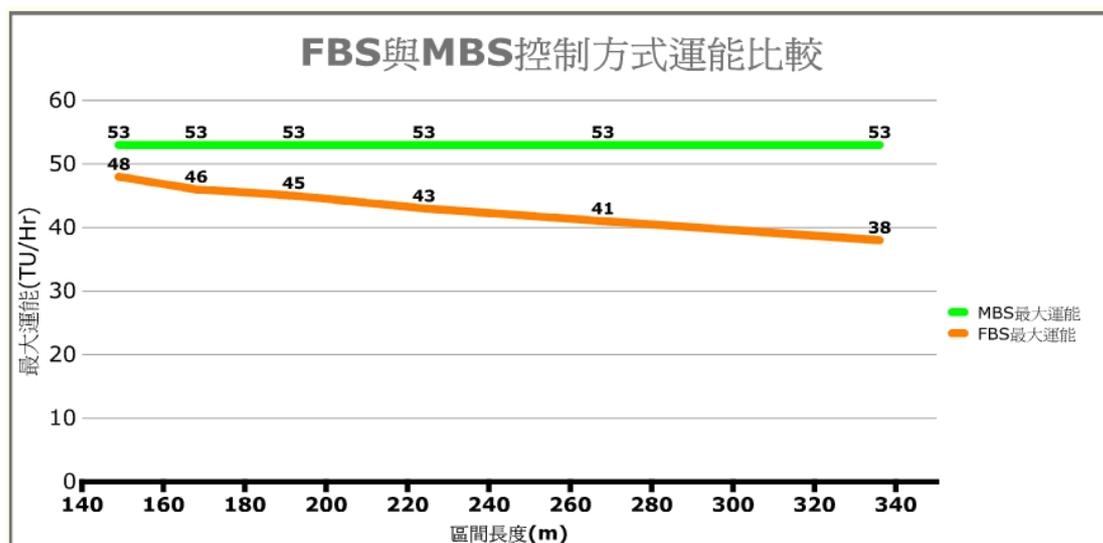


圖 5-9 FBS 與 MBS (區間長度為零) 控制方式下運能之比較圖

5.5.2 FBS 與 MBS 最高速限影響下運能之比較分析

由表 5-8 FBS 最高速限影響實驗結果及表 5-16 MBS 最高速限影響實驗結果所整理之最大運能比較表與比較圖分別如表 5-21 與圖 5-10 所示。

如表 5-21 所示，MBS 最高速限 90KPH、80KPH、72KPH 與 65KPH 之最大運能分別為每單位小時 48 TU、53TU、53TU 與 53TU。顯示 MBS 在速限較高的 90KPH 時，因所需保持之安全煞車距離較長，每單位小時之運能降低至 48TU；而 MBS 速限為 80KPH、72KPH 與 65KPH 時，與前車所需保持之安全煞車距離相對較短，且後方列車皆受前方列車剛靠站結束離站時產生安全距離不足自動調整車速略微減速之位置相近，所得之最大運能恰好相同皆為 53TU。

FBS 在平均區間長度 268m 的最高速限模擬實驗中，最高速限 90KPH、80KPH、72KPH 與 65KPH 之最大運能分別為每單位小時 42 TU、41TU、40TU 與 39TU，而 MBS 最高速限 90KPH、80KPH、72KPH 與 65KPH 之最大運能較 FBS 分別提升 14.2%、29.2%、32.5% 與 35.8% 之運能。經由表 5-21 及圖 5-10 比較顯示最高速限對 FBS 與 MBS 最大運能具有部分程度之影響，在符合 FBS 控制方式下，當最高速限增加 FBS 之最大運能隨之增加，並與 MBS 之最大運能差距縮小。而在符合 MBS 控制方式下，當最高速限增加至 90KPH 時，最大運能降低 5TU；當最高速限範圍在 80KPH 至 65KPH 之間時，MBS 之最大運能並不受影響。

表 5-21 FBS 與 MBS 最高速限影響下運能之比較表

號誌系統及最高速限	最小班距	最大運能	MBS-FBS	MBS 增加之運能
FBS 最高速限 90KPH	85s	42 TU	6 TU	14.2%
MBS 最高速限 90KPH	75s	48 TU		
FBS 最高速限 80KPH	87s	41 TU	12TU	29.2%
MBS 最高速限 80KPH	67s	53 TU		
FBS 最高速限 72KPH	89s	40 TU	13 TU	32.5%
MBS 最高速限 72KPH	67s	53 TU		
FBS 最高速限 65KPH	91s	39 TU	14 TU	35.8%
MBS 最高速限 65KPH	67s	53 TU		

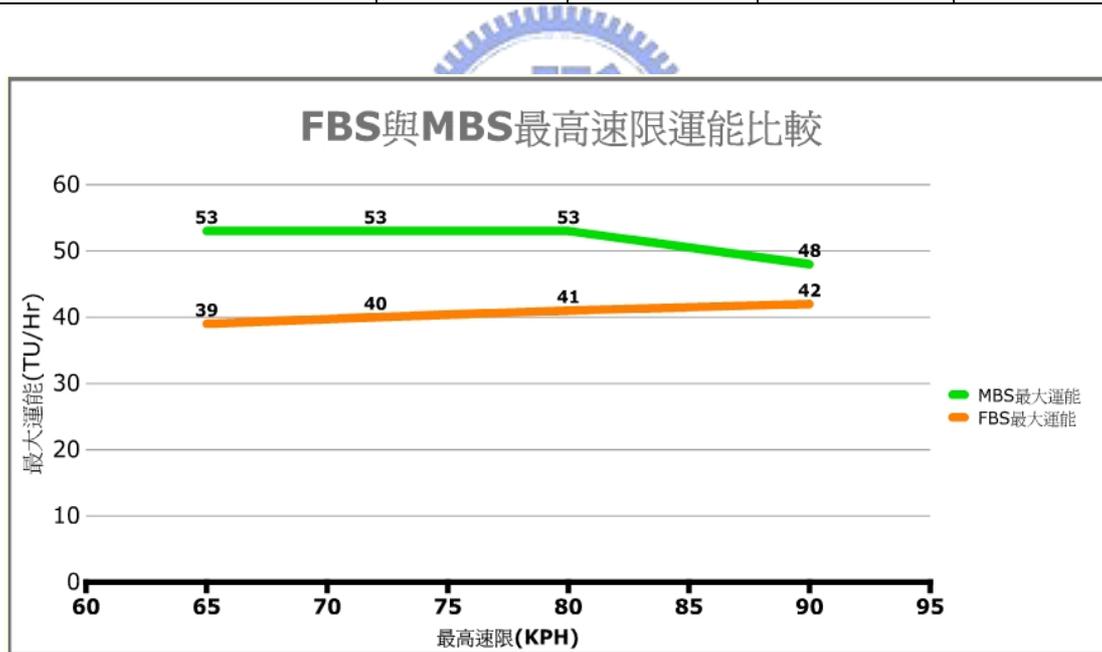


圖 5-10 FBS 與 MBS 最高速限影響下運能之比較圖

5.5.3 FBS 與 MBS 曲率半徑影響下運能之比較分析

由表 5-10 FBS 曲率半徑影響實驗結果及表 5-17 MBS 曲率半徑影響實驗結果所整理之最大運能比較表與比較圖分別如表 5-22 與圖

5-11 所示。

如表 5-22 與圖 5-11，MBS 曲率半徑 $r \geq 344\text{m}$ 與 227m 之最大運能同樣為每單位小時 53TU，顯示 MBS 之曲率半徑對其最大運能並無影響。而 FBS 曲率半徑 $r \geq 344\text{m}$ 、 $r \geq 227\text{m}$ 、 $r \geq 163\text{m}$ 、 $r \geq 86\text{m}$ 與 $r \geq 34\text{m}$ 之最大運能分別為 41TU、40TU、40TU、40TU 與 38TU，顯示 FBS 之曲率半徑在 $r \geq 86\text{m}$ 之情況下，對其最大運能僅有些微影響。MBS 曲率半徑 $r \geq 344\text{m}$ 、 $r \geq 227\text{m}$ 、 $r \geq 163\text{m}$ 、 $r \geq 86\text{m}$ 與 $r \geq 34\text{m}$ 之最大運能可較 FBS 分別提升 29.2%、32.5%、32.5%、32.5% 與 39.4%。

表 5-22 FBS 與 MBS 曲率半徑影響下運能之比較表

系統項目	最小班距	最大運能	MBS-FBS	MBS 增加之運能
FBS 曲率半徑 $r \geq 344\text{m}$	87s	41 TU	12TU	29.2%
MBS 曲率半徑 $r \geq 344\text{m}$	67s	53 TU		
FBS 曲率半徑 $r \geq 227\text{m}$	88s	40 TU	13 TU	32.5%
MBS 曲率半徑 $r \geq 227\text{m}$	67s	53 TU		
FBS 曲率半徑 $r \geq 163\text{m}$	88s	40 TU	13 TU	32.5%
MBS 曲率半徑 $r \geq 163\text{m}$	67s	53 TU		
FBS 曲率半徑 $r \geq 86\text{m}$	90s	40 TU	13 TU	32.5%
MBS 曲率半徑 $r \geq 86\text{m}$	67s	53 TU		
FBS 曲率半徑 $r \geq 34\text{m}$	93s	38TU	15TU	39.4%
MBS 曲率半徑 $r \geq 34\text{m}$	67s	53 TU		

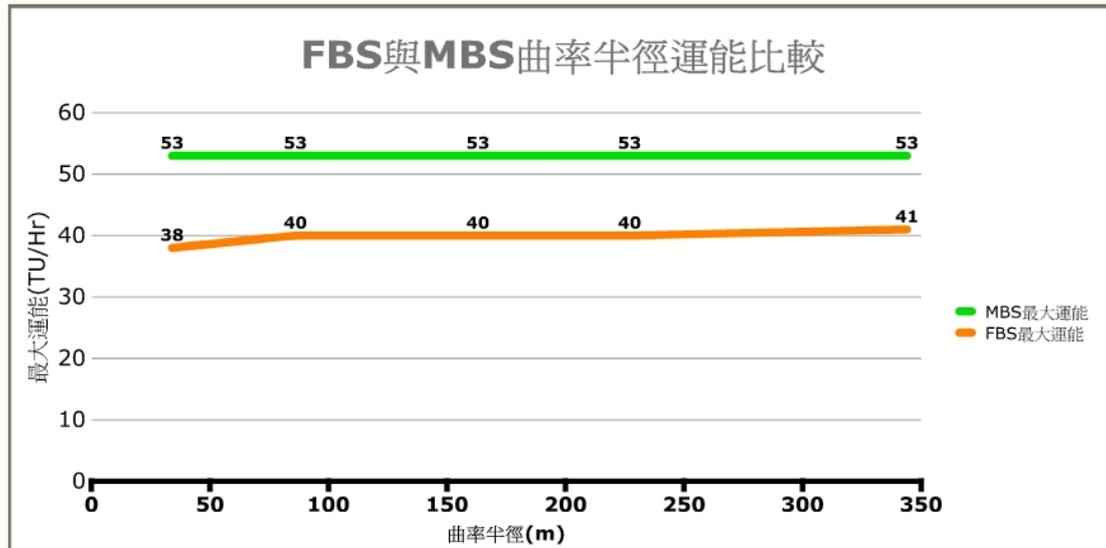


圖 5-11 FBS 與 MBS 曲率半徑影響下運能之比較圖

5.5.4 FBS 與 MBS 停站時間影響下運能之比較分析

由表 5-11 FBS 停站時間影響實驗結果及表 5-19 MBS 停站時間影響實驗結果所整理之最大運能比較表與比較圖分別如表 5-23 與圖 5-12 所示。

如表 5-23 與圖 5-12，MBS 停站時間 40s、25s 與 18s 之最大運能分別為每單位小時 43TU、53TU 與 60TU。FBS 在平均區間長度 268m 的停站時間模擬實驗中，FBS 停站時間 40s、25s 與 18s 之最大運能分別為每單位小時 35TU、41TU 與 45TU。而 MBS 停站時間 40s、25s 與 18s 之最大運能較 FBS 分別提升 22.8%、29.2% 與 33.3% 之運能。顯示不論 MBS 或 FBS 其最小班距皆與停站時間成正比，皆與最大運能成反比。同時隨停站時間愈短，MBS 與 FBS 之運能差距愈大。

表 5-23 FBS 與 MBS 停站時間影響下運能之比較表

號誌系統及停站時間	最小班距	最大運能	MBS-FBS	MBS 增加之運能
FBS 停站時間 40s	102s	35 TU	8 TU	22.8%
MBS 停站時間 40s	82s	43 TU		
FBS 停站時間 25s	87s	41 TU	12 TU	29.2%
MBS 停站時間 25s	67s	53 TU		
FBS 停站時間 18s	80s	45 TU	15 TU	33.3%
MBS 停站時間 18s	60s	60 TU		

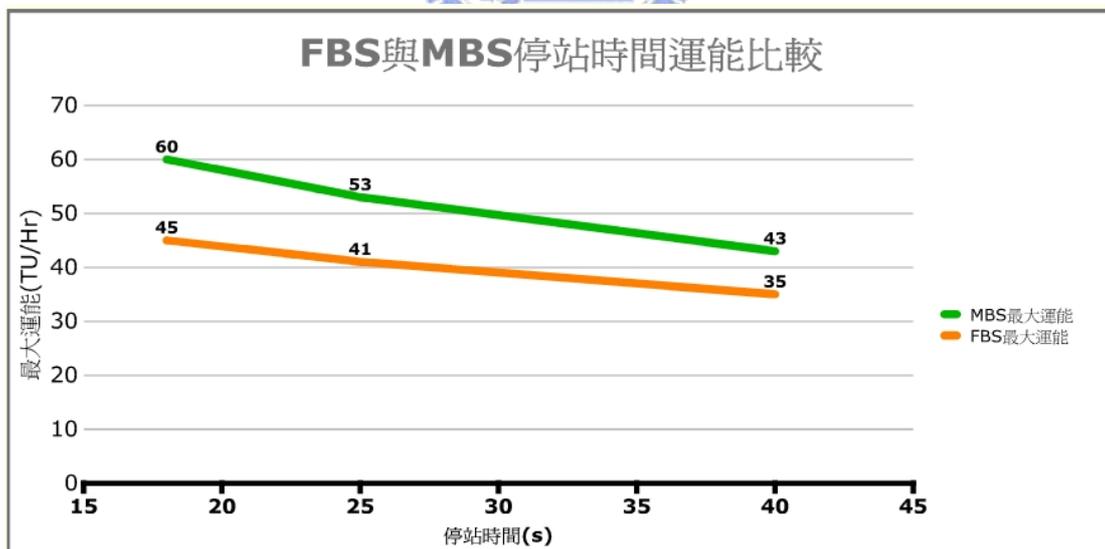


圖 5-10 FBS 與 MBS 停站時間影響下運能之比較圖

5.6 FBS 與 MBS 班距及運能之迴歸分析

為了解各影響因素對最小班距及最大運能之影響程度，本節以 SPSS10.0 統計軟體分別對 FBS 及 MBS 進行最小班距及最大運能之迴歸分析，各分析結果如後續各小節所示，最後再進行結果綜整。

5.6.1 FBS 最小班距迴歸分析

本小節首先就 5.2 節影響 FBS 運能相關因素模擬實驗之結果以 SPSS10.0 進行線性迴歸分析，在了解各影響因素對最小班距之顯著性及排除不相關之影響因素後，本研究再進行一次線性迴歸分析，以得到較精確之迴歸方程式。

FBS 最小班距迴歸分析之相關變數如表 5-24 所示，經線性迴歸分析其結果如表 5-25、表 5-26 及表 5-27 所示。由表 5-25 變異數分析之顯著性=0.000 及表 5-26 判定係數 $R^2=0.990$ 可解釋所得到之迴歸方程式為適當。在 95%的信賴水準下，由表 5-27 迴歸係數中，可看出警戒速限之顯著性為 $0.936 > 0.05$ ，因此警戒速限對最小班距影響不顯著，同時由 5.2 節之表 5-9 可得知警戒速限對 FBS 最小班距並無影響。因此本研究將在排除警戒速限因素後，重新再進行一次 FBS 最小班距迴歸分析。

表 5-24 FBS 最小班距迴歸相關變數-1

變數	項目
因變數	FBS 最小班距
初始自變數	區間長度, 最高速限, 警戒速限, 曲率半徑, 停站時間
模式排除變數	無
模式預測變數	(常數), 區間長度, 最高速限, 警戒速限, 曲率半徑, 停站時間

表 5-25 FBS 最小班距迴歸變異數分析-1

模式	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
FBS_H 迴歸	695.765	5	139.153	228.286	.000(a)
	a 預測變數：(常數), 區間長度, 最高速限, 警戒速限, 曲率半徑, 停站時間				

表 5-26 FBS 最小班距迴歸判定係數 R²-1

模式	R	R 平方	調過後的 R 平方	估計的標準誤差
FBS_H	.995(a)	.990	.986	.7807
	a 預測變數：(常數), 區間長度, 最高速限, 警戒速限, 曲率半徑, 停站時間			

表 5-27 FBS 最小班距迴歸係數-1

模式		未標準化係數		標準化係數	t	顯著性	共線性統計量	
		係數之估計值	標準誤	Beta 分配			容忍度	VIF
FBS_H	(常數)	59.866	3.751		15.959	.000		
	區間長度	9.936E-02	.005	.672	21.964	.000	.926	1.080
	最高速限	-.245	.041	-.180	-6.045	.000	.979	1.022
	警戒速限	-2.103E-03	.026	-.003	-.082	.936	.931	1.074
	曲率半徑	-1.380E-02	.002	-.212	-6.829	.000	.904	1.106
	停站時間	.998	.048	.619	20.898	.000	.988	1.012

為使所得到之迴歸方程式更加精確，經排除不顯著之警戒速限影響因素後，再次進行 FBS 最小班距線性迴歸，則第二次最小班距迴歸分析之相關變數如表 5-28 所示，經線性迴歸分析其結果如表 5-29、表 5-30 及表 5-31 所示。由表 5-29 變異數分析之顯著性=0.000 及表 5-30 判定係數 $R^2=0.990$ 可解釋所得到之迴歸方程式非常適當。表 5-31 之共線性統計量中，容忍度 (Tolerance) 介於 0~1 之間，容忍度越高代表越沒有共線性，容忍度越趨近於 0 代表共線性問題越嚴重，容忍度與膨脹係數 (VIF) 互為倒數。由表 5-31 容忍度皆大於

0.9 以上可知，所構建之迴歸方程式並無共線性問題。另外表 5-31 迴歸係數中，各係數之顯著性皆為顯著，其所得係數常數為 59.852， $B_1=0.09929$ ， $B_2=-0.245$ ， $B_3=-0.01384$ ， $B_4=0.999$ ，故迴歸方程式可寫成：

$$Y_{FH} = 59.852 + 0.09929X_L - 0.245X_V - 0.01384X_R + 0.999X_D$$

其中， Y_{FH} 為最小班距， X_L 為區間長度， X_V 為最高速限， X_R 為曲率半徑， X_D 為停站時間。

表 5-28 FBS 最小班距迴歸相關變數-2

變數	項目
因變數	FBS 最小班距
初始自變數	區間長度，最高速限，警戒速限，曲率半徑，停站時間
模式排除變數	警戒速限
模式預測變數	(常數)，區間長度，最高速限，曲率半徑，停站時間

表 5-29 FBS 最小班距迴歸變異數分析-2

模式	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
FBS_H 迴歸	695.761	4	173.940	311.106	.000(a)
	a 預測變數：(常數)，區間長度，最高速限，曲率半徑，停站時間				

表 5-30 FBS 最小班距迴歸判定係數 R^2 -2

模式	R	R 平方	調過後的 R 平方	估計的標準誤差
FBS_H	.995(a)	.990	.987	.7477
	a 預測變數：(常數)，區間長度，最高速限，曲率半徑，停站時間			

表 5-31 FBS 最小班距迴歸係數-2

模式		未標準化係數		標準化係數	t	顯著性	共線性統計量	
		係數之估計值	標準誤	Beta 分配			容忍度	VIF
FBS_H	(常數)	59.852	3.589		16.677	.000		
	區間長度	9.929E-02	.004	.672	23.280	.000	.955	1.047
	最高速限	-.245	.039	-.180	-6.344	.000	.986	1.014
	曲率半徑	-1.384E-02	.002	-.212	-7.328	.000	.950	1.053
	停站時間	.999	.046	.619	21.873	.000	.992	1.008

5.6.2 FBS 最大運能迴歸分析

本小節就 5.5 節之 FBS 運能以進行線性迴歸分析，由 5.6.1 節結果已知警戒速限對最小班距影響不顯著，故本小節逕行排除警戒速限因素後，直接進行 FBS 最大運能之線性迴歸分析，以得到較精確之迴歸方程式。

FBS 最大運能迴歸分析之相關變數如表 5-32 所示，經線性迴歸分析其結果如表 5-33、表 5-34 及表 5-35 所示。由表 5-33 變異數分析之顯著性=0.000 及表 5-34 判定係數 $R^2=0.981$ 可解釋所得到之迴歸方程式為適當。由表 5-35 迴歸係數中，各係數之顯著性皆為顯著，同時容忍度皆大於 0.9，並沒有共線性的問題，所得係數常數為 52.677， $B_1=-0.05126$ ， $B_2=0.131$ ， $B_3=0.007998$ ， $B_4=-0.437$ ，故迴歸方程式可寫成：

$$Y_{FC} = 52.677 - 0.05126X_L + 0.131X_V + 0.007998 X_R - 0.437X_D$$

其中， Y_{FC} 為最大運能， X_L 為區間長度， X_V 為最高速限， X_R 為曲率半徑， X_D 為停站時間。

表 5-32 FBS 最大運能迴歸相關變數

變數	項目
因變數	FBS 最大運能
初始自變數	區間長度, 最高速限, 警戒速限, 曲率半徑, 停站時間
模式排除變數	警戒速限
模式預測變數	(常數), 區間長度, 最高速限, 曲率半徑, 停站時間

表 5-33 FBS 最大運能迴歸變異數分析

模式	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
FBS_C 迴歸	167.993	4	41.998	125.727	.000(a)
	a 預測變數：(常數), 區間長度, 最高速限, 曲率半徑, 停站時間				

表 5-34 FBS 最大運能迴歸判定係數 R²

模式	R	R 平方	調過後的 R 平方	估計的標準誤差
FBS_C	.990(a)	.981	.973	.58
	a 預測變數：(常數), 區間長度, 最高速限, 曲率半徑, 停站時間			

表 5-35 FBS 最大運能迴歸係數

模式		未標準化係數		標準化係數	t	顯著性	共線性統計量	
		係數之估計值	標準誤	Beta 分配			容忍度	VIF
FBS_C	(常數)	52.677	2.798		18.824	.000		
	區間長度	-5.126E-02	.003	-.696	-15.274	.000	.939	1.065
	最高速限	.131	.030	.194	4.349	.001	.981	1.019
	曲率半徑	7.998E-03	.002	.244	5.328	.000	.932	1.073
	停站時間	-.437	.035	-.548	-12.350	.000	.989	1.011

5.6.3 MBS 最小班距迴歸分析

本小節首先就 5.4 節影響 MBS 運能相關因素模擬實驗之結果以進行線性迴歸分析，在了解各影響因素對最小班距之顯著性及排除不相關之影響因素後，本研究再進行一次線性迴歸分析，以得到較精確之迴歸方程式。

MBS 最小班距迴歸分析之相關變數如表 5-36 所示，經線性迴歸分析其結果如表 5-37、表 5-38 及表 5-39 所示。由表 5-37 變異數分析之顯著性=0.001 及表 5-38 判定係數 $R^2=0.902$ 可解釋所得到之迴歸方程式為適當。在 95% 的信賴水準下，由表 5-39 迴歸係數中，可看出最高速限、曲率半徑與位置信標間隔之顯著性分別為 0.052、0.303 與 0.998，三者皆大於 0.05，因此最高速限、曲率半徑與位置信標間隔對 MBS 最小班距影響不顯著。因此本研究將在排除最高速限、曲率半徑與位置信標間隔影響因素後，重新再進行一次 MBS 最小班距迴歸分析。

表 5-36 MBS 最小班距迴歸相關變數-1

變數	項目
因變數	MBS 最小班距
初始自變數	最高速限, 曲率半徑, 位置信標間隔, 停站時間
模式排除變數	無
模式預測變數	(常數), 最高速限, 曲率半徑, 位置信標間隔, 停站時間

表 5-37 MBS 最小班距迴歸變異數分析-1

模式	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
MBS_H 迴歸	283.962	4	70.991	16.054	.001(a)
	a 預測變數：(常數), 最高速限, 曲率半徑, 位置信標間隔, 停站時間				

表 5-38 MBS 最小班距迴歸判定係數 R²-1

模式	R	R 平方	調過後的 R 平方	估計的標準誤差
MBS_H	.950(a)	.902	.846	2.1029
	a 預測變數：(常數), 最高速限, 曲率半徑, 位置信標間隔, 停站時間			

表 5-39 MBS 最小班距迴歸係數-1

模式		未標準化係數		標準化係數	t	顯著性	共線性統計量	
		係數之估計值	標準誤	Beta 分配			容忍度	VIF
MBS_H	(常數)	21.981	9.457		2.324	.053		
	最高速限	.256	.110	.279	2.333	.052	.980	1.021
	曲率半徑	6.243E-03	.006	.135	1.113	.303	.958	1.043
	位置信標	-2.999E-04	.137	.000	-.002	.998	.981	1.019
	停站時間	.956	.129	.883	7.408	.000	.988	1.012

為使所得到之迴歸方程式更加精確，經排除不顯著之最高速限、曲率半徑與位置信標間隔等三個影響因素後，再次進行 MBS 最小班距線性迴歸，則第二次最小班距迴歸分析之相關變數如表 5-40 所示，經線性迴歸分析其結果如表 5-41、表 5-42 及表 5-43 所示。由表 5-41 變異數分析之顯著性=0.000 及表 5-42 判定係數 R²=0.815 可解釋所得到之迴歸方程式為適當。由表 5-43 迴歸係數中，停站時間係數之顯著性皆為顯著，同時沒有共線性的問題，所得係數常數為 43.323，B₁=0.978，故迴歸方程式可寫成：

$$Y_{MH} = 43.323 + 0.978X_D$$

其中， Y_{MH} 為最小班距， X_D 為停站時間。

表 5-40 MBS 最小班距迴歸相關變數-2

變數	項目
因變數	MBS 最小班距
初始自變數	最高速限, 曲率半徑, 位置信標間隔, 停站時間
模式排除變數	最高速限, 曲率半徑, 位置信標間隔
模式預測變數	(常數), 停站時間

表 5-41 MBS 最小班距迴歸變異數分析-2

模式	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
MBS_H 迴歸	256.801	1	256.801	44.188	.000(a)
a 預測變數：(常數), 停站時間					

表 5-42 MBS 最小班距迴歸判定係數 R^2 -2

模式	R	R 平方	調過後的 R 平方	估計的標準誤差
MBS_H	.903(a)	.815	.797	2.4107
a 預測變數：(常數), 停站時間				

表 5-43 MBS 最小班距迴歸係數-2

模式		未標準化係數		標準化係數	t	顯著性	共線性統計量	
		係數之估計值	標準誤	Beta 分配			容忍度	VIF
MBS_H	(常數)	43.323	3.839		11.286	.000		
	停站時間	.978	.147	.903	6.647	.000	1.000	1.000

5.6.4 MBS 最大運能迴歸分析

本小節就 5.5 節之 MBS 運能以 進行線性迴歸分析，由 5.6.3 節結果已知最高速限、曲率半徑與位置信標間隔等三個影響因素對 MBS 最小班距影響不顯著，故本小節逕行排除最高速限、曲率半徑與位置信標間隔等三個影響因素後，直接進行 MBS 最大運能之線性迴歸分析，以得到較精確之迴歸方程式。

MBS 最大運能迴歸分析之相關變數如表 5-44 所示，經 線性迴歸分析其結果如表 5-45、表 5-46 及表 5-47 所示。由表 5-45 變異數分析之顯著性=0.000 及表 5-46 判定係數 $R^2=0.824$ 可解釋所得到之迴歸方程式為適當。由表 5-47 迴歸係數中，停站時間係數之顯著性為顯著，同時沒有共線性的問題，所得係數常數為 70.688， $B_1=-0.718$ ，故迴歸方程式可寫成：

$$Y_{MC} = 70.688 - 0.718X_D$$

其中， Y_{MC} 為最大運能， X_D 為停站時間。

表 5-44 MBS 最大運能迴歸相關變數

變數	項目
因變數	MBS 最小班距
初始自變數	最高速限，曲率半徑，位置信標間隔，停站時間
模式排除變數	最高速限，曲率半徑，位置信標間隔
模式預測變數	(常數)，停站時間

表 5-45 MBS 最大運能迴歸變異數分析

模式	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
MBS_C 迴歸	138.644	1	138.644	46.830	.000(a)
	a 預測變數：(常數), 停站時間				

表 5-46 MBS 最大運能迴歸判定係數 R²

模式	R	R 平方	調過後的 R 平方	估計的標準誤差
MBS_C	.908(a)	.824	.806	1.72
	a 預測變數：(常數), 停站時間			

表 5-47 MBS 最大運能迴歸係數

模式		未標準化係數		標準化係數	t	顯著性	共線性統計量	
		係數之估計值	標準誤	Beta 分配			容忍度	VIF
MBS_C	(常數)	70.688	2.740		25.801	.000		
	停站時間	-.718	.105	-.908	-6.843	.000	1.000	1.000

5.6.5 FBS 與 MBS 迴歸分析結果綜整與適用範圍

本小節將 5.6.1 節至 5.6.4 小節各迴歸分析結果綜整如表 5-48。為使得到之方程式更加精確，表 5-48 中之各迴歸方程式係採用逐步迴歸分析之方式將無影響或不顯著之影響因素排除後所得之方程式。其中， X_L 為區間長度， X_V 為最高速限， X_R 為曲率半徑， X_D 為停站時間。表 5-48 中各迴歸方程式之相關變數需符合 5.1 節 FBS 實驗設計限制條件與 5.3 節 MBS 實驗設計限制條件，因此區間長度 X_L 需介於 149m ~ 350m 之間，最高速限 X_V 需介於 65KPH ~ 90KPH 之間，曲率半徑 X_R 需介於 34m ~ 350m 之間，停站時間 X_D 需介於 18 秒 ~ 40 秒之間。各變數適用範圍表如表 5-49 所示。

表 5-48 迴歸方程式綜整表

迴歸分析項目	迴歸方程式
FBS 最小班距	$Y_{FH} = 59.852 + 0.09929X_L - 0.245X_V - 0.01384X_R + 0.999X_D$
FBS 最大運能	$Y_{FC} = 52.677 - 0.05126X_L + 0.131X_V + 0.007998 X_R - 0.437X_D$
MBS 最小班距	$Y_{MH} = 43.323 + 0.978X_D$
MBS 最大運能	$Y_{MC} = 70.688 - 0.718X_D$

表 5-49 迴歸方程式各變數適用範圍表

變數	依 5.1 節與 5.3 節實驗設計條件之適用範圍
區間長度 X_L	$X_L = 149\text{m} \sim 350\text{m}$
最高速限 X_V	$X_V = 65\text{KPH} \sim 90\text{KPH}$
曲率半徑 X_R	$X_R = 34\text{m} \sim 350\text{m}$
停站時間 X_D	$X_D = 18 \text{ 秒} \sim 40 \text{ 秒}$

第六章 結論與建議

MBS 技術逐漸發展成熟並受到重視，目前已開始運用於少數都會區捷運系統中。為了解新興的 MBS 與傳統的 FBS 對其運能之影響，本研究主要分析 FBS 與 MBS 控制方式下各因素對捷運系統運能關係之影響，並建立 FBS 與 MBS 運能之迴歸方程式。各因素包括區間個數與區間長度、最高速限、警戒速限（僅 FBS）、曲率半徑、停站時間與位置信標間隔（僅 MBS）。FBS 與 MBS 運能之迴歸方程式包括最小班距與最大運能方程式。

理論上，MBS 所得之最小班距與最大運能實為 FBS 區間長度縮短至零之極值，因此當 FBS 區間長度愈短，其最小班距則愈短、最大運能則愈大，兩者並與 MBS 之最小班距及最大運能差距縮小。然而本研究考量目前實務上系統技術、列車控制與運轉安全等方面，因此以平均區間長度 268m 為 FBS 之實驗控制組進行各項 FBS 模擬實驗，同時以此實驗控制組為基礎比較 MBS 與 FBS 之運能差異，所得之結論與建議整理如下。

6.1 結論

1. FBS 控制方式下，兩列車必須間隔兩個閉塞區間之距離，其控制方式較不靈活，所受之運行干擾較為嚴重，運能亦受到限制。MBS 控制方式下，兩列車僅須保持安全煞車距離加上最小額外安全距離，其靈活與彈性之控制方式，能減少運行干擾，並提升運能。

2. FBS 在以平均分割站間區間長度之狀況下，區間個數愈多，運能愈高呈正相關，但增加之幅度逐漸縮小。區間個數 6 個比區間個數 5 個增加 7.8% 運能；區間個數 10 個比區間個數 9 個增加 4.3% 運能。
3. FBS 最高速限增加，運能呈線性正相關約略增加。最高速限 72KPH 比最高速限 65KPH 增加 2.5% 運能；最高速限 90KPH 比最高速限 80KPH 增加 2.4% 運能。
4. FBS 警戒速限對運能影響不顯著，但警戒速限愈高，列車受運行干擾所造成之延誤愈少。當列車受運行干擾時，警戒速限 40KPH 比 25KPH 所造成之延誤減少 5.35 秒；警戒速限 55KPH 比 40KPH 所造成之延誤減少約 3.5 秒。
5. FBS 曲率半徑 $r \geq 86\text{m}$ 對其運能僅有些微影響。曲率半徑 $r \geq 344\text{m}$ 比曲率半徑 $r \geq 227\text{m}$ 增加 2.5% 運能；曲率半徑 $r \geq 86\text{m}$ 比曲率半徑 $r \geq 34\text{m}$ 增加 5.2% 運能。
6. FBS 停站時間愈少，增加之運能愈多為負相關。停站時間 25 秒比停站時間 40 秒增加 17.1% 運能；停站時間 18 秒比停站時間 25 秒增加 9.7% 運能。
7. MBS 最高速限在 65KPH~80KPH 間運能不受影響，但最高速限 90KPH 因所需之安全距離較長，運能大幅下降。最高速限 65KPH、72KPH 及 80KPH 比最高速限 90KPH 增加 10.4% 運能。
8. 在 MBS 靈活且彈性的控制方式下，曲率半徑對其運能無影響。曲率半徑 $r \geq 34\text{m}$ 至曲率半徑 $r \geq 344\text{m}$ 運能同為 53TU。
9. MBS 位置信標間隔對運能僅有些微影響。MBS 設計時，依據成

本及系統需求，已將位置信標間隔盡量縮短，在 25m 之間隔範圍內，信標間隔 25m、10m 與 5m 之運能分別為 52TU、53TU 與 53TU。

10. MBS 停站時間愈少，增加之運能愈多為負相關。停站時間 25 秒比停站時間 40 秒增加 23.2% 運能；停站時間 18 秒比停站時間 25 秒增加 13.2% 運能。
11. FBS 與 MBS 在相同的路線條件下，MBS 具有較小之最小班距為 67 秒，比 FBS 之最小班距 87 秒縮短 20 秒，同時 MBS 之最大運能 53TU 比 FBS 之最大運能 41TU 每單位小時能提高 12TU，運能增加 29.2%。
12. FBS 與 MBS 在最高速限相同狀況下，最高速限愈高，MBS 提升運能之幅度愈少。最高速限 65KPH 之 MBS 較 FBS 可提升 35.8% 運能；最高速限 90KPH 之 MBS 因所需之安全距離較長與 FBS 相比僅可提升 14.2% 運能。
13. FBS 與 MBS 在曲率半徑相同狀況下，曲率半徑愈高，MBS 提升運能之幅度愈少。曲率半徑 $r \geq 227\text{m}$ 之 MBS 較 FBS 可提升 32.5% 運能；曲率半徑 $r \geq 34\text{m}$ 之 MBS 較 FBS 可提升 39.4% 運能。
14. FBS 與 MBS 在停站時間相同狀況下，停站時間愈少，MBS 提升運能之幅度愈高。停站時間 40 秒之 MBS 較 FBS 可提升 22.8% 運能，停站時間 18 秒之 MBS 較 FBS 可提升 33.3% 運能。
15. 由逐步迴歸分析，FBS 運能之排除變數為警戒速限，僅區間長度、最高速限、曲率半徑及停站時間對 FBS 運能影響較為顯著。MBS 運能之排除變數為最高速限、曲率半徑、位置信標間隔，僅停站時間對 MBS 運能之影響較為顯著。

16. 各迴歸方程式係採用逐步迴歸分析之方式將無影響或不顯著之相關因素排除後所得之方程式，其結果如迴歸方程式綜整表與迴歸方程式各變數適用範圍表所示。

迴歸方程式綜整表(1/2)

迴歸分析項目	迴歸方程式
FBS 最小班距	$Y_{FH} = 59.852 + 0.09929X_L - 0.245X_V - 0.01384X_R + 0.999X_D$
FBS 最大運能	$Y_{FC} = 52.677 - 0.05126X_L + 0.131X_V + 0.007998 X_R - 0.437X_D$
MBS 最小班距	$Y_{MH} = 43.323 + 0.978X_D$
MBS 最大運能	$Y_{MC} = 70.688 - 0.718X_D$

迴歸方程式各變數適用範圍表(2/2)

變數	依 5.1 節與 5.3 節實驗設計條件之適用範圍
區間長度 X_L	$X_L = 149m \sim 350m$
最高速限 X_V	$X_V = 65KPH \sim 90KPH$
曲率半徑 X_R	$X_R = 34m \sim 350m$
停站時間 X_D	$X_D = 18 \text{ 秒} \sim 40 \text{ 秒}$

6.2 建議

1. 本研究僅針對 FBS 與 MBS 控制方式下列車運行模擬做程式設計及撰寫，未來若能納入進出站坡度、軌道線型、列車運行阻力與電壓降因子，程式所能應用之範圍勢必能更加廣闊，結果亦可更為精確。

2. 本研究所探討之最大運能係由最小班距決定，並無考慮營運寬裕時間。一般實務上會將最小班距額外加上營運寬裕時間，以營運班距進行營運，雖營運寬裕時間並非一定，亦沒有一定之標準，若後續相關研究能將營運寬裕時間納入考量，其所得研究結果對於實務上營運寬裕時間之設定將有所助益。
3. 本研究僅探討 FBS 及 MBS 之班距及運能，未就技術成本效益做探討。新系統建設時可考慮採用 MBS，對於其成本節省及運能效益必定有所助益。倘若現有的 FBS 欲變更為 MBS，其投入之拆除、變更及設置成本將過於龐大。未來研究可進一步探討運能提升與 FBS 變更為 MBS 之技術成本效益關係。
4. 本研究僅探討正常情況下列車之運轉行為，不考慮列車緊急煞車。若能採用列車緊急煞車機制，結果對運能之影響可能更大。

