

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

智慧型軌道運輸系統行車控制理論及路線容量之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-032-015-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：淡江大學運輸管理學系

計畫主持人：陶冶中

計畫參與人員：劉嵩瀚

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 12 月 4 日

智慧型軌道運輸系統行車控制原理與路線容量研究之綜述

陶冶中¹ 劉嵩瀚²

1. 淡江大學運輸科學研究所助理教授 cctao@mail.tku.edu.tw
2. 淡江大學運輸科學研究所碩士班研究生 693540063@s93.tku.edu.tw

摘要

智慧型軌道運輸系統(Intelligent Railway Systems, IRS)透過通訊、定位、控制、自動化等先進技術，以安全為首要優先之考量下，提升列車運行效率，達到更準確的控制、更安全的運行、更高之列車容量。通過人工智慧之理論、方法，及技術，充分利用軌道資源，有效地利用各相關之時、空、人力等資源，採取有別於以往之列車運行控制方式，促使軌道運輸智慧化。本文將針對 IRS 中之列車自動安全與控制系統(ATC/ATCS)的 ATCS(列車控制系統)加以探討，綜合整理有關固定自動閉塞系統、準移動閉塞系統，及移動自動閉塞系統之系統特性、重要技術、列車容量、列車安全空間間隔、列車安全時間間隔之決定等議題並進行比較。由初步研究可發現，無論是列車容量提高、抑或是對於列車狀態之準確監測、提高整體路線運行效率、即時雙向資訊傳輸、即時控制等方面，移動自動閉塞系統均遠優於其餘二者。

移動自動閉塞系統(Moving Automatic-block System, MAS)是以現代無線、有線、電腦技術及控制技術、針對列車之間隔進行智慧化控制。目前各國針對此之試驗由於安全上之考量，仍以貨運為主。客運雖然理論上可行，但仍處於研發及實驗階段，缺乏實用性之相關驗證研究。另外軌道容量之研究方法主要是以數學解析法及模擬法來探討，由於解析法之考慮因素相對較少，並且所求之最佳解隱含系統已達穩定狀態，與實際狀況不符，因此未來將採用電腦模擬之事件導向模擬模式進行研究，考慮各相關因素，建構一別於傳統之行車動力方程式，驗證是否確實優於傳統列車行車制。

關鍵詞：智慧型軌道運輸系統、移動自動閉塞、事件導向模擬

一、前言

早期 ITS 之發展重點為公路運輸，隨著日本、歐洲、大陸的鐵路大國先後投入 ITS 與軌道運輸的相關研發工作，促使軌道運輸邁向智慧化的進程，而目前臺灣軌道運輸建設正如火如荼，例如臺鐵捷運化、臺北捷運延伸線、高雄捷運，以及即將通車的高速鐵路。傳統列車行車制度係採用固定自動閉塞系統，除建置維護之成本高昂之外，更浪費許多軌道資源及容量，導致列車行車效率不佳，無法靈活調度，即時反應需求。因此先進國家開始應用智慧型軌道運輸系統(IRS)，結合通訊、定位，自動化之高新科技運用於行車控制技術，以提高軌道容量，增進軌道運輸效率。

本文係針對 IRS 中之列車自動安全與控制系統的 ATCS(列車控制系統)加以探討，對於採用移動自動閉塞區間及固定自動閉塞區間之列車容量進行比較。然後藉由回顧世界先進國家的軌道容量計算方式，並考慮台灣特有之軌道設定及各相關影響因素，而研擬出一符合台灣鐵路現況之軌道容量計算分析模式，針對其自動控制、列車定位、通訊傳輸、號誌等關鍵性課題進行探討。

欲探討採用不同型車制度下列車容量之改變，首先必須針對列車容量之計算方式加以探討，目前之列車容量大多以通過區間之列車數乘以其列車設計容量，而相對於

此，區間通過之列車數又與列車之安全時間間距及空間間隔間距有關。再者，列車運行時刻表對於軌道運輸容量亦扮演相當重要的角色。本文目的係藉由移動自動閉塞區間之引進，鬆解列車運轉能力之部分限制條件，期能縮短列車追蹤間隔，提高路線區間內通過列車數，而達到提升軌道容量之目的。

本文首先針對軌道容量定義、軌道容量分析基本理論、軌道容量影響因素、行車動力學、列車排班模式等議題，進行文獻回顧與彙整；然後就軌道容量分析方法進行詳細探討，比較解析模式、最佳化模式、模擬模式等三種研究方法之特性以及適用情境；結論則為後續將採取電腦模擬模式針對不同設定、不同參變數進行情境分析，俾能提供軌道運輸不同運行方式之參考依據。

二、閉塞區間對軌道容量之影響

軌道運輸首重列車行車安全，在不違反此一前提下，謀求最大之軌道容量或運輸效能則為營運者之優先任務。欲維持列車之行車安全不致發生事故，閉塞區間系統甚為重要，同一區間除不可有對向列車闖入之外，同向運行之列車更應維持某一程度之安全間隔，以防止發生列車碰撞事故。

列車於站間區間之運行可分為空間間隔運行法和時間間隔運行法。時間間隔運行法乃指車站每隔固定時間即向區間內發送一列車，站間區間內不設號誌設施，列車必須完全按照列車運行計劃及列車時刻表之指示運行；列車之運行環環相扣；一旦發生列車故障或事故，後續列車運行將產生骨牌效應，因此美國學者 Cooke 建議應在區間內增設號誌設施以提高安全係數。空間間隔運行法是指車站每隔一定之空間間隔即向區間內發送列車，在區間內，前後列車之追蹤運行也需維持一固定之空間間隔，以保證能夠安全制動而避免碰撞。

目前世界上各軌道大國均有採取移動自動閉塞行車制的趨勢，更凸顯未來軌道運輸行車控制系統之發展方向，以下針對各國目前發展狀況加以敘述：

1. 北美、加拿大 ATCS

採用微處理器裝設於鐵路移動設備上，並通過數據無線電系統與中央控制系統聯結。ATCS 分為四種不同功能級別：10 級、20 級、30 級、40 級，根據不同之路線狀況、列車條件來選用。ATCS 主要組成為：中央調度室、無線電數據傳輸系統、列車及其他移動設備之車載系統、固定之軌旁設施等四部分。ATCS 之主要目的不在於提高軌道運輸之容量，而在於有效地運用列車及最佳化列車控制以降低生產成本，主要應用於貨運車輛，目前著名的例子有柏林頓北方鐵路，其特性為大多數列車之時刻表皆為彈性調整。

2. 歐洲鐵路營運管理系統 ERTMS

利用提高列車運行速度和縮短列車間隔來提高運輸效率，並且取消地面號誌系統及軌道區段空閑檢查設備及與其相應之電纜以節省路線基礎設施之建置。主要目的為提高其競爭力。ERTMS 系統共有分為三種等級(配置方式)，目前已開始第三級之更新，增加對於列車完整性之監視，以確立列車運行是否完整，並且可掌握後行區間之空閑情形，ERTMS 系統中惟有第三級系統始能真正達成移動閉塞系統之實現。

3. 法國 ASTREE 系統

採用無線技術之列車控制系統，連續偵測列車之速度與位置。利用列車無線系統(450Hz)傳送與各列車與地面設施間，並使用都普勒雷達檢測列車之位置與速度，經由車載電腦計算，搭配軌道應答器進行列車絕對位置之修正，以獲得連續之列車位置與速度。此系統係採用相對速度方式，考慮列車之相對速度而非列車之相互位置、列車性能、路線環境參數...等因素，由前後車之速度計算出允許速度。由車載電腦進行列車間隔之計算與控制，在列車前後方皆設防護區間，前方之防護區間長度根據列車相對速度改變，而列車後方之防護區間則是用以向後行追蹤列車開放進路，以保障列車運行之安全。

4. 日本新幹線 CARAT 系統

CARAT 系統採用相對位置方式，藉由前後列車之相對位置關係，得出後行追蹤列車最大運行速度。此系統對於列車間之追蹤可分為站間列車追蹤距離及站內追蹤距離兩種控制方式。站間追蹤間隔是以前行列車車尾作為停車目標，而站內追蹤間隔則是以軌道進路終端為列車停車目標點。CARAT 系統利用車載智慧型位置檢測系統，確認列車所在位置，主要之系統組成為：地面感應器及車載計軸器。地面感應器透過感應線圈或查詢應答器，並且由車載感應裝置讀取列車之絕對位置；至於應答器佈設點之區間列車位置的確認，則透過車載計軸器計算列車車輪轉數，以獲取距離，並且經由每次通過應答器所獲得之絕對位置，兩相加總計算以獲得列車實際之位置。由於轉彎或軌道扭曲之緣故，會造成鋼輪打滑或是空轉的情況發生，對於此一狀況之處理，可採取同時對多個車輪檢測其轉數，並用軟體修正，以達到精確定位的目的。

5. 德國 LZB 與 FZB

LZB 相較於 FZB 系統，係利用鐵路沿線既存之無線移動通訊網路，建立車-地通訊。FZB 無固定之閉塞分區長度，因此可適用於各等級各類型之列車於同一軌道上混合運行，兩者皆可達到提高運行速度及提昇軌道容量之目的。

表 1 及表 2 為三種不同閉塞方式之彙整與比較結果。

表 1 閉塞方式對列車容量之影響彙整表

閉塞方式	列車位置監控	目標煞車位置	軌道容量
固定自動閉塞	僅能確認列車所在之區間，無法精確得到列車位置	前行列車所在閉塞區間+三個閉塞區間長度	小
準移動閉塞	區間長度較短，對列車位置掌握較佳，但仍無法確認列車即時位置	前行列車所在區間搭配數個閉塞區間	中
移動自動閉塞	藉由無線訊息傳輸列車即時位置，可對列車進行精確定位	前行列車尾端+煞車充裕距離	大

資料來源：本文整理

表 2 固定自動閉塞區間與移動自動閉塞區間系統優劣比較表

項目	固定自動閉塞系統 FAS	移動自動閉塞系統 MAS	結論
----	--------------	--------------	----

閉塞分區	固定	隨機	MAS 彈性較大
軌側設施	軌側、進出站信號機	進出站信號機	MAS 成本較低
運行模式	僅適用於同等級列車運行	允許不同等級列車混跑	MAS 靈活性高
制動方式	分區制動，每次制動都有空走時間及冗餘距離，且隨時間距離累積增加	隨機產生之閉塞分區，採用速度聯鎖消除冗餘距離	MAS 行車密度與軌道容量皆提昇
舒適度	減速度過大，制動不穩	採用速度聯鎖控制，減速度較小	MAS 舒適度較高

資料來源：本文整理

表 3 各國移動自動閉塞系統之比較

各國移動自動閉塞	列車定位及測速	訊息傳輸方式
北美、加拿大 ATCS	軌道應答器、無線電數據傳輸系統	900MHz 實現車-地訊息傳輸
歐洲 ERTMS	軌道應答器、無線傳輸系統	GSM-R、無線傳輸系統
法國 ASTREE	都普勒雷達、車載電腦、應答器	450MHz 之空間波
日本新幹線 CARAT	感應線圈、應答器、車載計軸器、電腦軟體計算修正	400MHz 之空間波和 LCX，未來擬採用準微波或毫米波
德國 LZB、FZB	軌間電纜、應答器	軌間電纜、GSM

資料來源：本文整理

欲研究以上軌道容量之課題，對於固定自動移動閉塞之軌道容量計算業已成熟，平行列車運行圖可直接求解，而非平行列車運行圖則可利用平行運行圖之基礎加上扣除係數求得軌道容量。本文擬探討行車控制原理及路線容量計算方式，相關之研究方法主要有數學解析法、最佳化法以及模擬法(如表 3 所示)。

數學解析法、最佳化法以及模擬法各有其優缺點。最佳化法由於隱含穩定之系統狀態，因此較適於相關班表排點問題或時刻表容量問題之求解，但其隱含穩定之系統狀態與現實情況不符。列車實際運轉時將會有相當多之隨機效應影響列車行車，難以達到真正穩定之狀態，與公路運輸相同，當服務頻率接近容量上限時，對於列車之干擾或延滯之情況亦隨之迅速增加，若以各種列車行駛方式之比較及情境分析，以模擬法最為合適，但其程式構建繁雜，並且對於模擬模式之驗證較為困難。本文採用數學解析法說明列車運行原理，作為後續建構模擬模式之理論基礎。

表 4 軌道容量分析方法方法論比較

	數學解析法	最佳化法	模擬法
所需資料量	少	中	多
精確度	低	中	高
模式適用範圍	初步規劃	班表設計	檢討、班表驗證

模式構建成本	低	高	很高
運用之便利性	較易使用	普通	普通
系統相依程度	低	中	高

資料來源：[3]

三、軌道容量計算公式

移動自動閉塞系統之列車間隔十分重要，一般可分為時間上以及空間上之列車間隔，兩者取較大值作為實際移動自動閉塞系統之運行，以確保列車行車安全。由於固定自動閉塞至移動自動閉塞之改變過程中，可利用密集佈設軌道電路即連鎖列車通過信號機達到近似於移動自動閉塞系統之行車方式，但由於其然有固定之軌側信號設施，因此並非完全屬於移動自動閉塞系統，又由於其閉塞方式類似於移動自動閉塞系統，因此將之對於列車安全間隔之探討列於本節中，稱為「準移動閉塞系統」。列車安全時間間隔以及列車安全空間間隔之計算決定方式如下所述。

區間軌道容量之一般式為：

$$C = \frac{86400}{h} \times n_i \dots\dots\dots(1)$$

其中：C=區間的軌道路線容量(TU/day)

86400=一日之時間(sec)

h =列車平均最小運轉時隔(sec)

h n_i=路線軌道數

3.1 列車安全時間間隔

軌道運輸之列車時間間隔乃是以連續兩列車之先行列車車首至後續追蹤列車車首(即前後列車之 headway)決定。由於列車之時間間隔會在車站區域得到相對於路線閉塞區間之較大值，因此基於安全之考量，以車站區域之列車時間間隔作為列車安全時間間隔之設定。

令研究範圍內有 M 個車站，第 i 個車站之列車間隔時間為 t_iⁱ (i = 1, 2, ..., M)，則其列車時間間隔位：

$$T_i = \max\{t_i^1, t_i^2, \dots, t_i^M\} \dots\dots\dots(2)$$

車站列車時間間隔(t_iⁱ)包括以下兩部分：

$$t_i^i = t_w^i + t_H^i \dots\dots\dots(3)$$

- { t_wⁱ : 前行列車與後續追衝列車之安全間隔時間
- { t_Hⁱ : 列車在站內之停車時間，包括列車開關車門、完成上下客之時間

為使問題簡化，作以下與實際情況相去不大之假設，並計算不同閉塞方式之 t_w：

假設一：前後兩列車具有相同之啟動加速度 a ，相同之制動減速度 b ，
區間最大允許速度為 V_{\max} 。

假設二：兩列車車長均為 L_z 。

假設三：軌道電路區段後端均設有安全防護區段 ΔL 。

假設四：兩列車之制動反應時間均為 t_{an} 。

3.1.1 固定自動閉塞列車時間間隔 t_w 之計算：

$$t_w = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{2(L_z + L_s)}{a}} + 2t_{an} + \frac{3V_{\max}}{2b} \dots\dots\dots V_{\max} \geq \sqrt{2a(L_z + L_s)} \\ \frac{2a(L_z + L_s) + V_{\max}^2}{2aV_{\max}} + 2t_{an} + \frac{3V_{\max}}{2b} \dots\dots\dots V_{\max} < \sqrt{2a(L_z + L_s)} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

3.1.2 準移動閉塞列車時間間隔 t_w 之計算：

$$t_w = \left\{ \begin{array}{l} \frac{L_A}{V_{\max}} \left\{ 2 + NT \left[\frac{t_{an} V_{\max} + \frac{V_{\max}^2}{2b}}{L_A} \right] \right\} + \frac{V_{\max}}{2b} + \sqrt{\frac{2(L_z + L_B)}{a}} \dots\dots\dots V_{\max} \geq \sqrt{2a(L_z + L_s)} \\ \frac{L_A}{V_{\max}} \left\{ 2 + NT \left[\frac{t_{an} V_{\max} + \frac{V_{\max}^2}{2b}}{L_A} \right] \right\} + \frac{V_{\max}}{2b} + \frac{2a(L_z + L_s) + V_{\max}^2}{2aV_{\max}} \dots\dots\dots V_{\max} < \sqrt{2a(L_z + L_s)} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

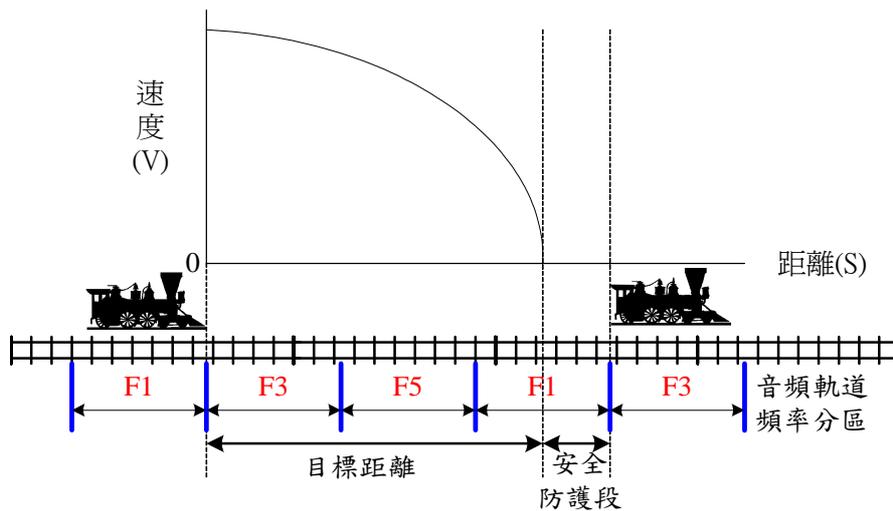


圖 1 準移動閉塞區系統閉塞原理示意圖

3.1.3 移動自動閉塞列車時間間隔 t_w 之計算：

$$tw = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{2(L_Z + L_S)}{a} + t_{an} + \frac{V_{max}}{b}} \dots\dots\dots V_{max} \geq \sqrt{2a(L_Z + L_S)} \\ \frac{2a(L_Z + L_S) + V_{max}^2}{2aV_{max}} + t_{an} + \frac{V_{max}}{b} \dots\dots\dots V_{max} < \sqrt{2a(L_Z + L_S)} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

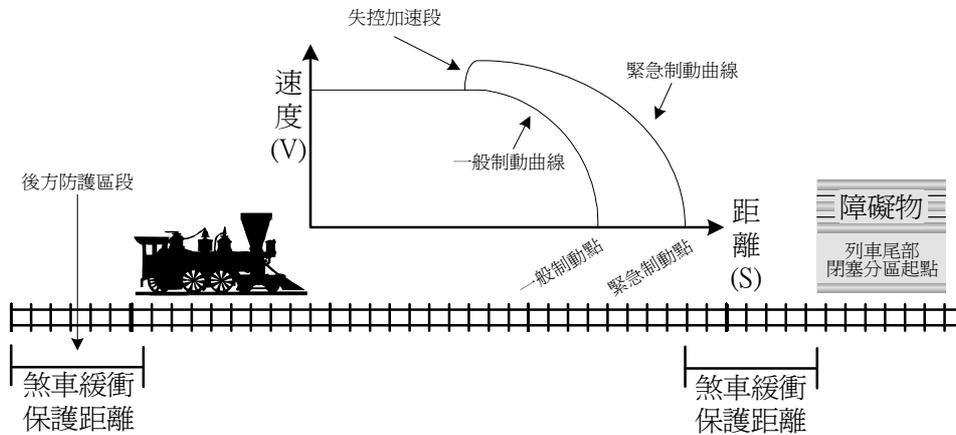


圖 2 移動閉塞區系統閉塞原理示意圖

3.2 列車安全空間間隔

基本列車安全空間間隔之決定方式可結合行車動力學之物理公式而呈現：

$$L = V_2 \left(\frac{V_2}{2\beta_2} + \tau_2 \right) - V_1 \left(\frac{V_2}{2\beta_1} + \tau_1 \right) + \Delta L \dots\dots\dots (7)$$

- L : 先行列車與後續追蹤列車之最小空間間隔
- V_1 、 V_2 : 先行列車與追蹤列車之速度
- β_1 、 β_2 : 先行列車與追蹤列車之減速度
- τ_1 、 τ_2 : 先行列車與追蹤列車之空走時間
- ΔL : 停車充裕間隔

在實務上，列車之安全空間間隔又可依照其分為①考慮先行列車速度之準移動閉塞系統(SMB-V)、②考慮先行列車速度之移動自動閉塞系統(MB-V)、及③不考慮先行列車速度之移動自動閉塞系統(MB-V₀)等三類，由基礎之列車運行間隔計算方式改良而得其列車安全運行間隔。

3.2.1 考慮先行列車速度的準移動閉塞系統(MB-V₀)：

後續追蹤列車 β_2 採一般制動減速度，先行列車 β_1 採緊急制動減速度。

3.2.2 考慮先行列車速度的移動自動閉塞系統(MB-V)：

根據先行列車的速度的位置作為列車間隔控制之考量， β_1 為緊急制動減速度， β_2 為常用制動減速度，使得在後續列車在先行列車採取緊急制動減速度煞車時，得以以一般常用制動減速度安全停車之系統。

3.2.3 不考慮先行列車速度的移動自動閉塞系統(MB-V₀)：

不考慮先行列車速度，僅考慮先行列車位置，即將安全列車空間間隔基礎公式中之 β_1 視為無限大，先行列車空走距離為0，因此 $V_1(\frac{V_2}{2\beta_1} + \tau_1) = 0$ ，將先行列車視為立即停車情況下，後續追蹤列車得以安全完成制動停車於目標停車點外之系統。

四、台鐵軌道容量解析模式之構建

將臺鐵系統影響容量相關之因素進行探討 [1]，包括車站內號誌安全時距、路線坡度及列車加減速性能、運轉方式及前後列車速差、交會待避損失時間、路線利用率。

4.1 車站內號誌安全時距

(1) 同向列車進站號誌安全時距-站內停靠同一軌道：

$$T_{s,A1} = \sqrt{\frac{2(L_i + s_x)}{K_a a_i(G_o)}} + \frac{v_j}{K_b b_j(G_i)} - \frac{v_y^2}{2K_b b_j(G_i)v_j} + \frac{B_1 + B_s - s_x}{v_j} + t_o + t_r + t_{d_i} \dots\dots\dots(8)$$

(2) 同向列車進站號誌安全時距-站內停靠不同軌道：

$$T_{s,A2} = \frac{v_j}{K_b b_j(G_i)} - \sqrt{\frac{2s_e}{K_b b_i(G_i)}} - \frac{v_y^2}{2K_b b_j(G_i)v_j} + \frac{B_2 + B_1 + B_s - s_x}{v_j} + t_p + t_r \dots\dots\dots(9)$$

(3) 同向列車離站號誌安全時距-站內停靠同一軌道：

$$(i) L_i + s_x + B_n > \frac{v_i^2}{2K_a a_i(G_o)}$$

$$T_{s,D1} = \frac{v_i}{2K_a a_i(G_o)} + \frac{v_j}{K_b b_j(G_i)} - \frac{v_y^2}{2K_b b_j(G_i)v_j} + \frac{L_i + s_x + B_n}{v_i} + \frac{B_s - s_x}{v_j} + t_o + t_r + t_{d_j} \dots\dots\dots(10)$$

$$(ii) L_i + s_x + B_n \leq \frac{v_i^2}{2K_a a_i(G_o)}$$

$$T_{s,D1} = \sqrt{\frac{2(L_i + s_x + B_n)}{K_a a_i(G_o)}} + \frac{v_j}{K_b b_j(G_i)} - \frac{v_y^2}{2K_b b_j(G_i)v_j} + \frac{B_s - s_x}{v_j} + t_o + t_r + t_{d_j} \dots\dots\dots(11)$$

(4) 同向列車離站號誌安全時距-站內停靠不同軌道：

$$T_{s,D2} = \frac{v_i}{2K_a a_i(G_o)} + \frac{L_i + s_x + B_n + B_{n-1}}{v_i} + t_o + t_r \dots\dots\dots(12)$$

(5) 反向列車交會之號誌安全時距-站內停靠不同軌道：

$$T_{s,M} = t_p + t_r - \sqrt{\frac{2s_e}{K_b b_i(G_i)}} \dots\dots\dots(13)$$

4.2 運轉方式及前後列車速差

(1) 先行列車速度大於後續追蹤列車

當先行列車速度大於後續追蹤列車速度時，若在出發車站即保持安全距離，則在路段中後續追蹤列車將無法追趕上先行列車，因此將不會發生列車衝突，其出發車站之離站最小號誌時距為：

$$T_s = T_{s,D}^A \dots\dots\dots(14)$$

其中： T_s = 瓶頸之號誌時距(sec)

$T_{s,D}^A$ = 出發車站之離站號誌時距(sec)

(2) 先行列車速度小於後續追蹤列車

當先行列車速度小於後續追蹤列車時，則在區間運轉時，先行列車有可能會被後續追蹤列車追上，因此此處需關注抵達車站之安全時距，則在區間運轉的過程中將不會發生衝突，其瓶頸號誌時距為：

$$T_s = T_{s,A}^B \dots\dots\dots(15)$$

其中： T_s = 瓶頸之號誌時距(sec)

(3) 先行列車速度等於後續追蹤列車

$$T_s = \max(T_{s,D}^A, T_{s,A}^B) \dots\dots\dots(16)$$

4.3 交會待避損失時間

(1) 列車待避延誤之期望損失時間為：

$$t_l = \frac{1}{2} |t_j - t_i| \dots\dots\dots(17)$$

平均運轉時隔為 $T_s + t_l = T_s + (t_j - t_i) / 2$

(2) 列車交會延誤之期望損失時間為：

$$t_l = \frac{1}{2} (t_i + t_j) \dots\dots\dots(18)$$

平均運轉時隔為 $T_s + t_l = T_s + (t_i + t_j) / 2$

4.4 運轉寬裕時間

由於號誌顯示、轉轍器扳轉、停車時間及列車運轉過程皆為動態，未必每次皆可按照原定計畫完成動作，因此必須在列車運行計畫中，加上運轉寬裕時間於列車運轉時隔，以使得列車若因誤點可以趕點之空間，維持列車運行計畫之推進不致被干擾。運轉寬裕時間可由下列兩種方式決定：

(1) 依經驗值決定

- (i) 美國軌道容量手冊經驗值為 20 秒，日本號誌安全時距之寬裕時間設為 10 秒。
- (ii) 依研究對象之最小運轉時隔觀測資料，或利用模擬結果與解析模式之計算值比對，以涵蓋大部分運轉情形之值與解析模式計算結果之差異即為運轉寬裕時間。

(2) 按比例計算

按照比例計算之概念乃來自於號誌安全時距越大，則其產生之變異也越大，因此採用較大之運轉寬裕時間可確保時課表之穩定，亦即

$$t_m = \beta T_s \dots\dots\dots(19)$$

其中： t_m = 運轉寬裕時間(sec)

T_s = 瓶頸號誌時隔(sec)

β = 運轉寬裕時間係數

運轉寬裕時間之設定，影響列車營運計畫之彈性調整空間以及準點性，採取過於樂觀之數值會使得服務水準下降甚或影響列車行車安全，若採取過於悲觀之值則使得軌道容量下降，在 UIC Codes 405 公式中建議使用之 β 值為 0.67，可供國內參考，而文獻[1]中利用變動運轉寬裕時間係數之方式，建議運轉寬裕時間係數 β 值採用 0.35 計算，兩者之間相差甚大，有待進一步之分析。

4.5 平均最小運轉時隔

最小運轉時隔之組成為：

$$h_{ij} = T_s + t_l + t_m \dots\dots\dots(20)$$

其中： h_{ij} = 先行列車 i 與後續追蹤列車 j 之最小運轉時隔(sec)

T_s = 瓶頸號誌安全時距(sec)

t_l = 列車交會待避損失時間(sec)

t_m = 運轉寬裕時間(sec)

(1) 列車交通組成之影響

若一共有 n_c 種列車之速度等級，則先行列車即後續追蹤列車之配對方式有 n_c^2 種組合，包括自身與自身及自身與其他等級列車配對。對於平均最小運轉時隔之計算，若時刻表已知，即根據時刻表列車組合之相對頻率來計算，若時刻表未知，則根據營運列車數的相對頻率來計算。

(i) 時刻表已知

$$h = \sum h_{ij} \times p_{ij} \dots\dots\dots(21)$$

其中： h = 平均最小運轉時隔(sec)

h_{ij} = 列車 j 跟隨列車 i 之最小運轉時隔(sec)

p_{ij} = 列車 j 跟隨列車 i 之相對頻率(可由時刻表統計求得)

(ii) 時刻表未知

$$h = \sum h_{ij} \times p_{ij} = \sum h_{ij} \frac{n_i \cdot n_j}{n^2} = \frac{1}{n^2} \sum h_{ij} \cdot n_i \cdot n_j \dots\dots\dots(22)$$

其中： n_i = 第 i 種列車之營運列車數(TU)

n_j = 第 j 種列車之營運列車數(TU)

$n = \sum_i n_i$ = 總營運列車數(TU)

(2) 單/複線運轉之影響

單一軌道在特定時段內之運用可分為單線運轉(反方向運轉)及複線運轉(同方向運轉)。平均最小運轉時隔之計算如下：

$$h = p_s h_s + p_o h_o \dots\dots\dots(23)$$

其中： h = 平均最小運轉時隔(sec)

h_s = 同方向列車組合之平均最小時隔(sec)

h_o = 反方向列車組合之平均最小時隔(sec)

p_s = 同方向運轉列車組合之占比例

p_o = 反方向運轉列車組合之占比例

五、結論

在軌道運輸容量計算中車站之關鍵課題於列車之交會及待避，路段中則為列車安全空間間隔。但瓶頸處多發生於車站，不論採取何種行車閉塞制度，車站之最小運轉時隔對於軌道容量將產生較大之影響，因此採取較不利之狀況衡量軌道容量，使得列車得以充裕運轉。

針對軌道容量之計算，首先將瓶頸路段找出，依照不同之列車等級及營運速度、營運型態分類，依照不同之閉塞行車制度計算路段之站間運轉時分，依照列車等級、載客率、上下客數量決定列車停站時間，並且依照不同之車站佈設停站方式決定最小號誌時距，設定運轉寬裕時間，便可計算最小之列車運轉時隔，求得平均之列車運轉時隔，即可決定路線之軌道容量。若運轉之期間發生交會或待避之情形，則必須將之期望損失時間一併納入列車運轉時隔計算。

後續工作將以上述之數學解析公式為構建模擬模式之理論基礎，由於數學解析法及最佳化法皆隱含系統達到穩定狀態之意涵，因此有賴模擬模式中之事件掃描模擬(event scan simulation)，當事件發生時才進行擷取資訊的動作，一方面可以增進運算之效率，一方面可以有效地節省系統資源；將各不同情境之參變數輸入進行多次模擬，相互比較並且與現行之列車時刻表對照，可找出在某可接受誤差範圍內，達到某標準(例如 85%~90%)信賴程度之最小運轉時隔，再以之計算軌道容量，將較能反映真實列車運轉情形。

參考文獻

1. 中興顧問工程社，**軌道容量研究-臺鐵系統容量模式之構建分析(一)**，交通部運研所，民國 94 年 4 月。
2. 陳一昌,胡守任，**臺灣地區發展智慧型運輸系統(ITS)綱要計畫**，第 14 屆中華民國運輸學會論文集，民國 88 年 12 月。
3. 交通部運輸研究所，**臺灣地區軌道系統容量研究架構暨臺北捷運系統容量分析**，交通部運輸研究所，民國 93 年 6 月。
4. 李治綱,丁國樑,黃哲旭，**鐵路列車模擬模式之研究**，中華民國運輸學會第 11 屆論文集，民國 85 年 12 月。
5. 鐘志成等，**臺鐵列車運轉時隔之分析模式**，第 15 屆中華民國運輸學會論文集，民國 89 年 12 月，頁 609-618。
6. 陶冶中等，**臺灣地區軌道運輸系統智慧化發展領域與使用者服務之供需分析**，第 16 屆中華民國運輸學會論文集，民國 90 年 11 月。
7. 卓訓榮,蔡肇鵬，**軌道運輸系統智慧化之架構**，第 17 屆中華民國運輸學會論文集，民國 91 年 12 月。
8. 鐘志成等，**軌道容量評估方法之探討**，第 19 屆中華民國運輸學會論文集，民國 93 年 11 月。
9. 張仕龍等，**臺北捷運系統路線容量分析-以 TCQSM 為例**，第 19 屆中華民國運輸學會論文集，民國 93 年 11 月。
10. 交通部台灣鐵路管理局網頁，網址：<http://www.railway.gov.tw>
11. 新十大建設資訊網，網址：<http://210.200.236.10>
12. 嚴余松，**單線區段旅客列車扣除係數計算方法的探討**，鐵道運輸與經濟，vol.4，1996。
13. 嚴余松,杜文，**計算機編制列車運行圖系統運用管理若干設想**，中國鐵路，vol.12，1999。
14. 趙礦英,馮俊杰，**鐵路行車組織與管理**，中國鐵道出版社，2002。
15. Pachtl,J., Railway Operation and Control,VTD RAIL publishing,Terrace,U.S.A.,2002.
16. Ferrovie dello Stato Spa – Divisione Infrastruttura, European Railways Opeimisation Planning Environment – Transportation Railways Integrated Planning,EuROPE-TRIP,2000.
17. Maged M. Dessouky Quan Lu & Rovert C. Leahman , USING SUMULATION MODELING TO ASSESS RAIL TRACK INFRASTRUCTURE , Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference.