

本文章已註冊DOI數位物件識別碼

▶ 捷運系統列車折返號誌時隔分析模式

An Analytical Model of Signal Headway at Turn-back Station for Mass Rapid Transit System

doi:10.6383/JCIT.201209.0331

運輸學刊, 24(3), 2012

Journal of the Chinese Institute of Transportation, 24(3), 2012

作者/Author : 鍾志成(Jyh-Cherng Jong);張恩輔(En-Fu Chang);林國顯(Kuo-Shian Lin);劉昭榮(Jau-Rong Liou)

頁數/Page : 331-352

出版日期/Publication Date :2012/09

引用本篇文獻時，請提供DOI資訊，並透過DOI永久網址取得最正確的書目資訊。

To cite this Article, please include the DOI name in your reference data.

請使用本篇文獻DOI永久網址進行連結:

To link to this Article:

<http://dx.doi.org/10.6383/JCIT.201209.0331>



DOI Enhanced

DOI是數位物件識別碼 (Digital Object Identifier, DOI) 的簡稱，是這篇文章在網路上的唯一識別碼，用於永久連結及引用該篇文章。

若想得知更多DOI使用資訊，

請參考 <http://doi.airiti.com>

For more information,

Please see: <http://doi.airiti.com>

請往下捲動至下一頁，開始閱讀本篇文獻

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE



捷運系統列車折返號誌時隔分析模式

An Analytical Model of Signal Headway at Turn-back Station for Mass Rapid Transit System

鍾志成 Jyh-Cherng Jong¹

張恩輔 En-Fu Chang²

林國顯 Kuo-Shian Lin³

劉昭榮 Jau-Rong Liou⁴

摘要

大眾捷運系統具有班次密集、便捷、環保等特性，在全世界節能減碳的風潮趨勢下，捷運系統將是紓緩都會區交通問題的重要運輸工具之一。然而捷運系統班次密集程度並非沒有限度，主因在於捷運列車運轉過程中為避免發生追撞或對撞，列車之間必須保持一定的安全間距，故號誌時隔影響列車密度甚鉅，國內外號誌時隔的研究甚多，但大多以路線中的一般通過車站作為分析對象，但實際上列車於末端站折返時亦有可能造成班次密度瓶頸，特別是配置司機員的系統。故本研究針對國內高運量捷運系統最常見的折返方式建立號誌時隔分析公式，同時以臺北捷運南港站做案例分析，經分析發現南港站折返號誌時隔約為 113 秒；此外由敏感度分析發現，影響折返時隔較敏感的因素包括停站時間、列車減速度、煞車有效因子、間隔安全係數與巡航速度。本研究所提出的號誌安全時距公式與敏感度分析結果，可作為未來分析列車折返效率與提升路線容量的參考。

關鍵詞：大眾捷運系統、號誌時隔、軌道容量

¹ 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心高級研究員兼組長 (聯絡地址：10570 臺北市松山區南京東路五段 171 號；電話 02-27652131 轉 20998；E-mail: jcjong@sinotech.org.tw)。

² 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心研究員。

³ 交通部路政司副司長。

⁴ 交通部運輸研究所運輸計畫組副研究員。

Abstract

A Mass Rapid Transit (MRT) is an electric railway system in an urban area with frequent, convenient, and green services. Under the trend of energy saving and carbon reduction, MRT has become an important transportation system in urban areas to relieve traffic congestion. However, the capacity of an MRT line is not unlimited. To avoid traffic collisions, two adjacent trains must be separated by appropriate signal headways. Consequently, signal headway becomes a key element that controls rail capacity. Most previous studies on signal headway assume that the busiest intermediate station is the bottleneck of an MRT line. However, sometimes the turn-back stations may become the bottleneck, especially for those systems with train drivers. Thus, this paper proposes an analytical model to estimate signal close-in time for common turn-back movements of MRT in Taiwan. Real parameters of Nan-gang station in the Taipei Rapid Transit System are selected for the case study. The result shows that the signal close-in time at Nan-gang station is about 113 seconds. In addition, the sensitivity analysis demonstrates that signal close-in time is highly sensitive to the station dwell time, train deceleration rate, train separation factor and cruising speed. The proposed model and the results of this study can be used to analyze the efficiency of turn-backs and to evaluate the needs of capacity improvements.

Keywords: Mass rapid transit system, Signal close-in time, Rail capacity

一、前言

大眾捷運系統 (Mass Rapid Transit System, MRT) 乃服務都會區的一種大量、便捷的運輸系統，通常都具有路線固定、班次密集、大量運輸、快速、舒適且準確等特性。國內最早營運的捷運系統為 1996 年起始營運的臺北都會區捷運系統，由於該系統廣受民眾的喜愛與支持，因此國內各都市均持續推動捷運建設計畫，包括臺北捷運工程局持續規劃、建設新路線；高雄捷運亦於 2008 年 3 月通車營運；此外亦有許多都會區正在進行捷運路線規劃與建設。加上近幾年原油成本高漲及環保意識抬頭，在全世界均追求節能減碳的風潮下，國內對於捷運系統的需求將更殷切。

雖然捷運系統將是解決都會區交通問題的重要運輸工具之一。然而捷運系統班次密集程度並非沒有限度，主因在於為避免列車追撞或對撞，先行與續行列車或對向列車之間必須保持一定的安全間距，即所謂的號誌時隔，由於單位時間內通過的列車數與安全時距成反比關係，故號誌時隔影響捷運系統容量甚鉅，如何規劃、設計出符合預期班距需求的軌道系統，號誌時隔的設計與控制為重要關鍵。

過去國內外有關捷運號誌時隔的研究已經相當多，其中以美國運輸研究委員會 (Transportation Research Board, TRB) 在 1995~2003 年間開發的「大眾運輸容量暨服務品質手冊」(Transit Capacity and Quality of Service

Manual, TCQSM) 最具代表性 (Kittelsohn & Associates, Inc., 1999; 2003; Tom Parkinson Transport Consulting Limited, 1996), 因為該研究對捷運系統容量分析做了完整的文獻回顧, 同時也推導出一系列號誌時隔公式, 張仕龍等人 (2004) 曾以 TCQSM 的號誌時隔公式計算臺北捷運系統之容量, 但文中亦明言在套用美國研究成果進行國內系統容量分析時, 有部分參數 (例如列車安全分隔因子、超速控制時間和尖峰小時因素等) 國內系統未能提供設定值, 僅能使用美國的經驗值, 此將可能影響分析結果之品質, 故應發展本土化之分析方法與參數設定。

另外, 許多捷運號誌時隔研究均僅將路線上的通過站視為瓶頸點進行分析, 例如蔡青峰 (2005) 分別針對固定式閉塞區間號誌系統 (Fixed Block Signaling System, FBS) 與移動式閉塞區間號誌系統 (Moving Block Signaling System, MBS) 撰寫模擬模式, 隨後以臺北捷運高運量圓山至劍潭路段作為案例分析, 此研究即不考慮折返站之號誌時隔。雖然美國軌道容量手冊 TCQSM 指出捷運路線瓶頸的確以一般通過性車站占大宗 (約 79%), 但亦有 15% 的瓶頸發生於折返點, 故折返站的號誌時隔亦可能限制捷運系統運能, 有深入探討研析之必要。

若將焦點集中到折返站的相關研究, 李英 (2003)、張國寶等人 (2005)、蘭增良 (2002) 探討了各式不同折返方式的優缺點, 同時構建評估方法, 其評估方式雖也考慮折返效率, 但李英 (2003) 與張國寶等人 (2005) 文章中均直接列出運轉時隔, 並沒有推導號誌時隔公式。

至於真正進行折返號誌時距計算的相關研究, Gill (2000) 曾探討折返點的容量問題, 提出影響折返點容量上限的因素包括軌道佈設方式、號誌系統差異、停站時間三大類。Gill 討論捷運系統中常見的三種折返點軌道佈設方式, 並介紹西屋號誌公司 (Westinghouse Signals Limited) 發展之模擬模式, 該模式考慮了軌道幾何佈設、列車性能、號誌佈設、ATC 機制、FBS/MBS、聯鎖與路徑選擇回應時間等問題。此模擬工具雖然相當強大, 但偏屬商業化的軟體, 模式細節外人較難窺其堂奧。

相對於模擬模式的複雜與封閉, 解析模式則較為簡單明瞭, 例如凌松濤等人 (2000) 曾依站前折返與站後折返分別提出號誌時隔公式, 國內鍾志成 (2007) 則以類似概念搭配臺北捷運的實務運作方式將凌松濤 (2000) 的模式再細分為單股道折返與雙股道折返兩類, 但是凌松濤等人 (2000) 與鍾志成 (2007) 之模式均只將時隔切分為若干子項目, 對於每一個子項目並沒有提出計算公式。而 TCQSM 提出的折返站公式就無此缺點, 該模式將列車性能與路線配置等參數納入, 但 TCQSM 提出的模式只考慮島式月台使用雙股道折返之情境, 此點不如鍾志成 (2007) 詳細。因此本研究將擷取以上研究的優點來構建號誌時隔模式。

除了發展模式推估號誌時隔之外，國內亦有部分研究是以分析號誌電腦記錄來檢視號誌時隔，例如臺北捷運行控中心主任洪育銘等人 (2010) 曾以號誌電腦記錄裡的數據分析計算最小班距，該文章除分析臺北捷運藍線的臺北車站外，亦針對折返站南港進行分析，該研究將最小班距切為四項組成，最後計算求得最小班距為 2 分 0 秒。此外，謝興盛 (2003) 列舉了從號誌電腦擷取出來的端點站最小開通時間作為其運轉整理模式的輸入，該研究稱之為「終點站行車最小開通時間」(minimum terminal station clearance time)，該數值由於不考慮停站時間多寡，僅判斷是否足以到/離站，其數值均在 60 秒內。由於洪育銘等人 (2010) 與謝興盛 (2003) 的分析方法是透過實務系統的觀察檢視而得，雖然具有高度的正確性，但恐無法應用於新系統的規劃設計，因為尚未營運之系統沒有號誌電腦的資料可供擷取，但若待系統建置完成後才檢討號誌時隔是不妥的。Gill (2000) 認為已完工的系統要更新或改良並不容易，Gill 強調要增加折返站的效率必須於規劃設計階段時考量，故國內仍有發展折返站號誌時隔分析模式之必要。

從過去的文獻中發現，捷運號誌時隔公式與號誌系統的運作方式高度相關，例如蔡青峰 (2005) 就是分別針對 FBS 與 MBS 兩種閉塞方式構建模式；鍾志成 (2006) 與鍾志成等人 (2005) 則是針對臺鐵三位式量身制定號誌時隔公式；Kittelson & Associates, Inc. (1999; 2003) 更是除了區分 FBS 與 MBS 兩類之外，對於 FBS 還進一步區分為「車廂號誌系統」與「三時相號誌系統」兩種，同時也把 MBS 分為固定安全距離 (Fixed Safety-separation Distance, FSD) 與變動安全距離 (Variable Safety Distance, VSD) 兩種型式分別制定公式，上述這些作法將使得模式與號誌系統運作邏輯彼此間相依度過高，在實際應用上恐有困擾；因為機電系統特性在捷運系統規劃階段通常尚未明朗，且若有新的號誌系統問世，也會使的模式需重新開發。事實上，根據鍾志成 (2010) 的整理，捷運系統通常採取多位式 (multi-aspect) 號誌系統，列車間相隔的閉塞區間數量與對應的速度碼 (速限) 各系統差異很大，甚至有些系統不採速度碼限制，而改採距離碼 (distance-to-go ATP system) 方式來確保列車間隔，例如高雄捷運即是一個例子。有鑑於捷運號誌系統的多樣性，因此本研究擬發展泛用的都會捷運系統分析模式，惟實際應用時，需依據個別系統的特性，以適當的參數代入模式進行分析。

二、模式構建

捷運系統的常見折返方式可整理如圖 1，目前國內除了臺北捷運文湖線採取圖 1 (b) 的站後折返；板南線亞東醫院站採取圖 1 (c) 的中央避車線折返之外，其餘臺北、高雄兩城市的所有折返站均採用圖 1 (a) 的站前折返方式，因此本研究將針對站前折返進行深入的探討。

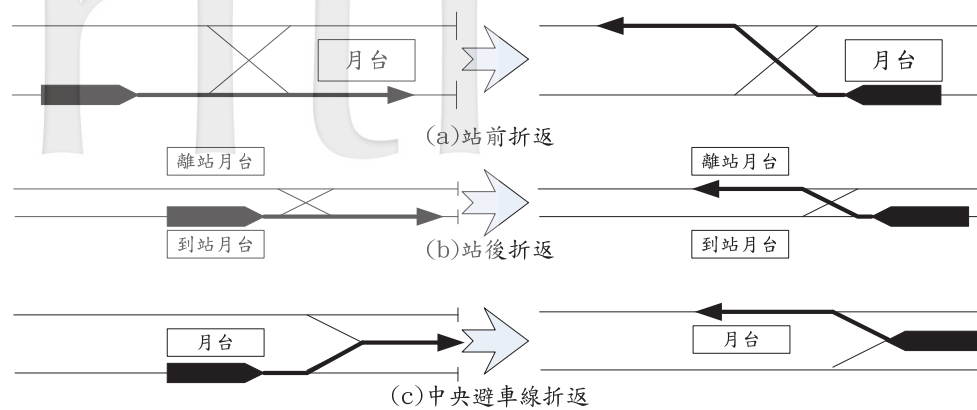


圖1 捷運系統常見的三種折返方式示意圖

站前折返的方式可依列車停靠同一股道與否分為兩種情境，使用同一股道的情境相對單純如圖 2，列車可停靠月台上方或下方股道，但整體而言，不管使用哪一股道，折返過程中的「減速進站」與「加速離站」勢必有一種經過轉轍器，另一種則不經轉轍器。由於捷運系統的列車加/減速的絕對值皆在 1 公尺/秒平方左右，因此本研究擬以停靠月台下方股道的情境進行車站內停靠同一股道之模式構建。

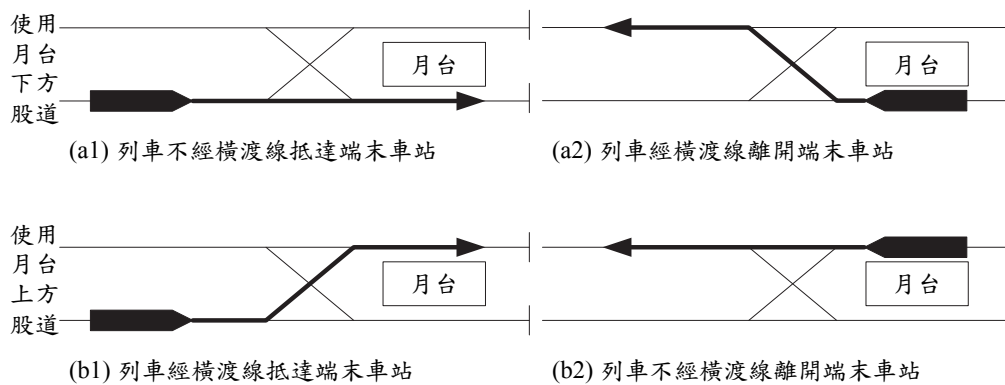


圖2 列車於末端車站利用一股道折返之過程示意圖

若考慮列車交替使用不同股道進行折返，其程序如圖 3，假設一開始月台上沒有列車，而第一列車駛入末端車站下方的月台面如圖 3 (a)，因此第二列車必須經橫渡線駛入上方的月台面如圖 3 (b)，如此反覆進行，則圖 3 中的 (c)、(d)、(e)、(f) 會不斷交替重複。若以末端站為參考點觀察列車進站時隔，又可細分兩種情境，第一種是圖 3 中第二列車進站 (b) 至第三列車進站的時隔 (d)；第二種則是圖 3 中第三列車進站 (d) 至第四列車

進站 (f) 之時隔。兩種情境的差異仍舊是進/離站列車必有其一需行經轉轍器，由於捷運系統的列車加/減速的絕對值皆在 1 公尺/秒平方左右，故本研究擬以前述的第一種情境作為車站內停靠不同股道之模式構建基礎，意即第一列車離站時需經過轉轍器，第三列車進站時則不需經過轉轍器。

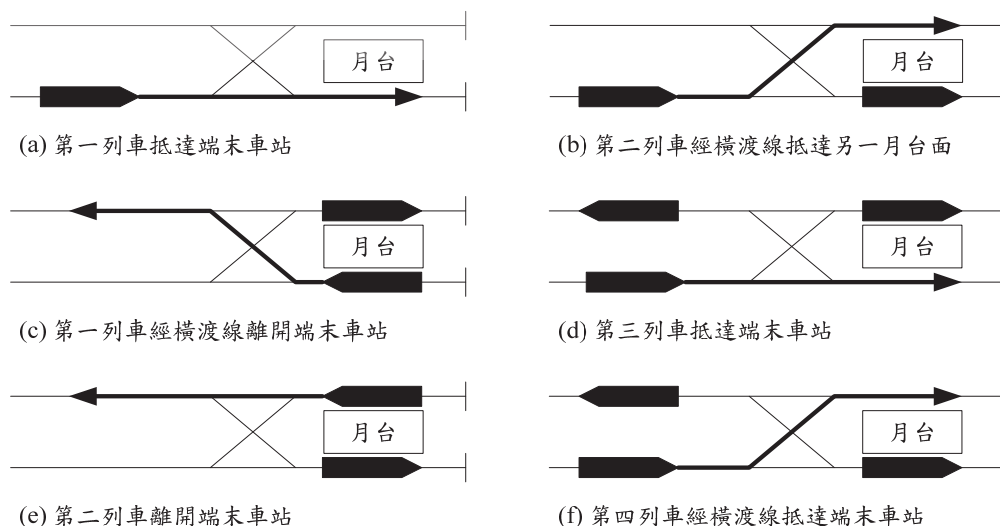


圖3 列車於末端車站利用兩股道折返之過程示意圖

以下將分節介紹「站內停靠同一股道」與「站內停靠不同股道」之號誌時隔公式，推導過程中會大量使用時間、距離、速度 (含速限)、加減速度四項變量，本研究對這四個變量的單位統一採秒 (s)、公尺 (m)、公尺 / 秒 (m/s)、公尺 / 秒平方 (m/s^2) 呈現，後續章節不再逐一說明變量單位。

2.1 站內停靠同一股道

當橫渡線設置在折返站前方，且列車在站內停靠同一股道，則續行列車可以允許進站的必要條件是先行列車已經離開車站並通過橫渡線區，且聯鎖區間完成路徑的重設之後，號誌系統才會授權續行列車進站。以圖 4 為例，假設列車在末端車站僅利用月台下方的軌道折返，亦即橫渡線 $1 \leftarrow \rightarrow 4$ 不使用，僅使用 $2 \leftarrow \rightarrow 3$ 的橫渡線。若一開始有一列車停靠在月台下方的軌道且橫渡線鎖定在 $2 \rightarrow 3$ 的路徑，列車從靜止開始加速離開車站，車尾通過 3 之後，經過一段轉轍及號誌聯鎖的時間，橫渡線重新設定在 $4 \rightarrow 2$ 的路徑，此時進站列車恰好運行至允許進入橫渡線的最接近位置，則兩列車的運轉時間間隔可以達到最小。

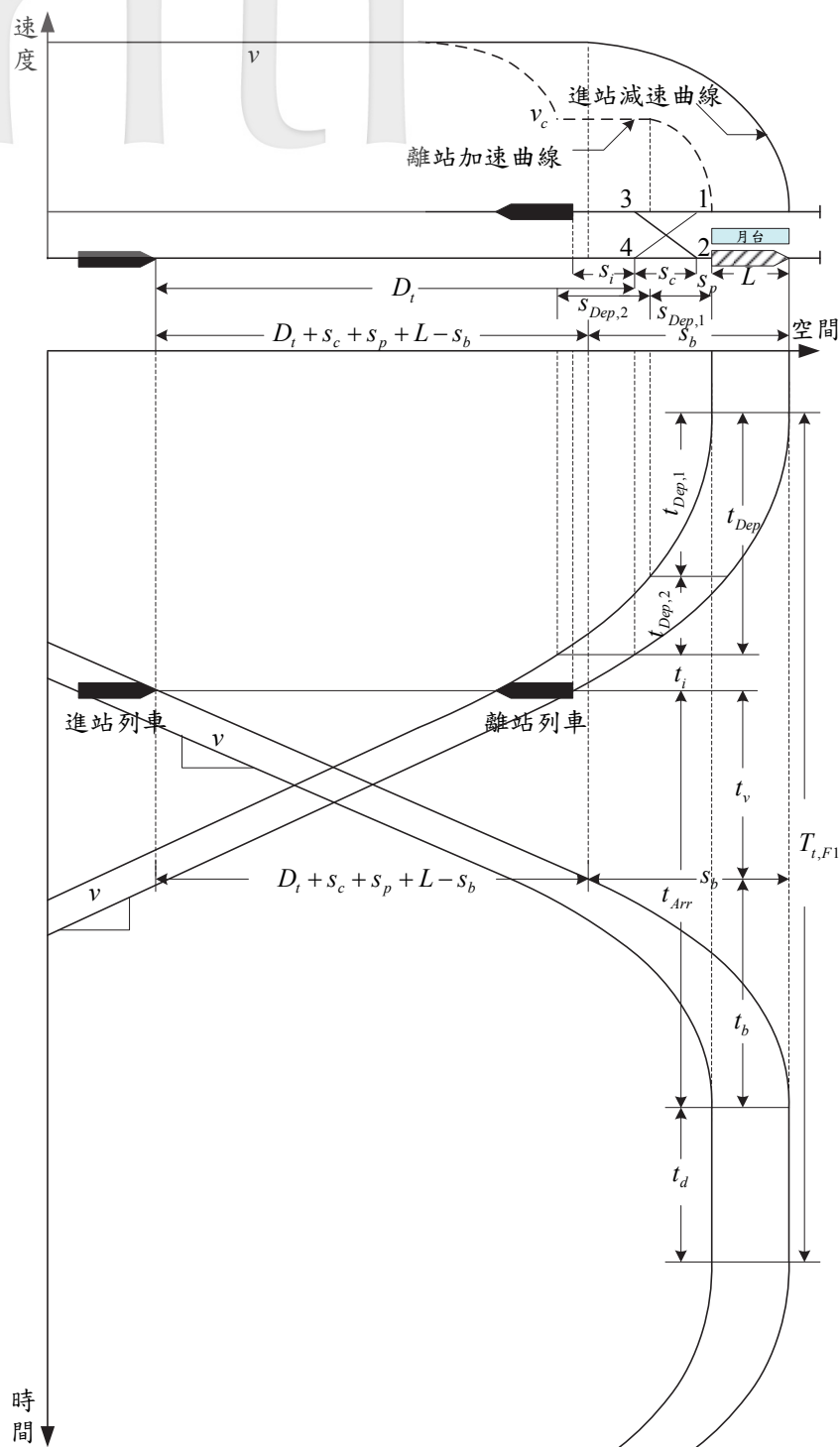


圖4 站內停靠同一股道之號誌安全時距

列車在末端站折返的號誌安全時距為先行列車離開末端車站直到續行列車離開末端車站的時間間隔，可依式 (1) 來計算，其中 $T_{t,Fl}$ 為列車在末端站停靠同一股道折返 (站前折返) 的號誌安全時隔； t_{Dep} 為列車從末端車站經由橫渡線駛入站間正線直到車尾完全通過橫渡線區的運轉時間； t_i 為解除進路、道岔轉轍、鎖定進路等之道岔及號誌聯鎖時間， S_i 則為其對應行走的距離； t_{Arr} 為列車在正線上允許進入橫渡線的最接近位置至列車完全停止在末端車站的運轉時間； t_d 為列車在末端站折返停靠的時間。

$$T_{t,Fl} = t_{Dep} + t_i + t_{Arr} + t_d \quad (1)$$

列車經由橫渡線運轉時，其速度不得大於道岔的限速。由於列車從靜止開始加速直到車尾離開橫渡線區的運轉距離如式 (2)，包括列車編組的長度 L 、橫渡線至月台端點的距離 s_p ，以及橫渡線區的長度 s_c 。

$$L + s_p + s_c \quad (2)$$

式 (2) 的距離通常會大於列車從靜止加速至橫渡線道岔限速的運轉距離，因此列車離開車站直到車尾通過橫渡線區的過程包括兩種運轉行為如式 (3)，即是加速運轉至道岔速限的時間 $t_{Dep,1}$ ，以及以道岔速限進行等速運轉時間 $t_{Dep,2}$ 。

$$t_{Dep} = t_{Dep,1} + t_{Dep,2} \quad (3)$$

列車從靜止加速到橫渡線的道岔速限所需的運轉距離如式 (4)，所需的運轉時間則如式 (5)，其中 v_c 為橫渡線的道岔限速， a 則為列車加速度。

$$s_{Dep,1} = \frac{v_c^2}{2a} \quad (4)$$

$$t_{Dep,1} = \frac{v_c}{a} \quad (5)$$

而列車維持道岔速限等速運轉的距離及時間則分別如式 (6) 與式 (7)：

$$s_{Dep,2} = L + s_p + s_c - s_{Dep,1} \quad (6)$$

$$t_{Dep,2} = \frac{s_{Dep,2}}{v_c} = \frac{L + s_p + s_c - s_{Dep,1}}{v_c} = \frac{L + s_p + s_c}{v_c} - \frac{v_c}{2a} \quad (7)$$

將式 (5)、式 (7) 代入式 (3) 可得列車從靜止加速經橫渡線離開車站直到車尾經過橫渡線區的運轉時間如式 (8)。

$$t_{Dep} = \frac{v_c}{a} + \frac{L + s_p + s_c}{v_c} - \frac{v_c}{2a} = \frac{L + s_p + s_c}{v_c} + \frac{v_c}{2a} \quad (8)$$

道岔及號誌聯鎖時間 t_i ，與軌道電路、號誌及轉轍器等聯鎖設備的設計有關，此數值可用廠商提供的保守設計值，或利用觀測值統計後求出。一般而言，現代化的捷運系統，轉轍器及號誌應可在 10 秒內完成路徑的解除及重設作業。

在轉轍器及號誌尚未完成聯鎖設定列車的進站路徑之前，列車不得進入聯鎖區，因此續行列車距離橫渡線至少在一安全煞車距離 s_{sb} 以外，此限制可利用式 (9) 描述。式中 D_t 為續行進站列車與末端站前橫渡線區的最接近距離； Q_t 為列車進入末端站前橫渡線區的間隔安全係數； v 為列車的站間巡航速度； K_b 為煞車有效因子； b 為列車服務減速度。

$$D_t = Q_t s_{sb} = \frac{Q_t v^2}{2K_b b}, Q_t \geq 1 \quad (9)$$

式 (9) 中 Q_t 的數值可根據 ATP 的運作邏輯，以及閉塞區間與軌道電路的配置來計算，若無實際的方案時，則可參考類似的系統來推估。

一旦號誌完成聯鎖且將路徑設定為 4→2，續行列車即得到進站的授權。列車從橫渡線的最接近位置至列車停妥在車站內的運轉過程，包括以巡航速度等速運轉以及最後 ATO 以服務減速度將列車安全停妥在車站內兩種行為如式 (10)，其中 t_v 為進站列車以巡航速度接近末端車站的運轉時間； t_b 為進站列車從巡航速度減速停車所需的時間。

$$t_{Arr} = t_v + t_b \quad (10)$$

進站列車在最後階段的煞車距離為式 (11)，煞車時間則為式 (12)， b 為列車減速度。

$$s_b = \frac{v^2}{2b} \quad (11)$$

$$t_b = \frac{v}{b} \quad (12)$$

因此列車以巡航速度等速運轉的時間如式 (13)。

$$t_v = \frac{D_t + s_c + s_p + L - s_b}{v} = \frac{v}{2b} \left(\frac{Q_t}{K_b} - 1 \right) + \frac{s_c + s_p + L}{v} \quad (13)$$

將式 (12) 及式 (13) 代入式 (10) 可得式 (14)

$$t_{Arr} = \frac{v}{2b} \left(\frac{Q_t}{K_b} - 1 \right) + \frac{s_c + s_p + L}{v} + \frac{v}{b} \quad (14)$$

列車在末端車站的停車時間 t_d 之影響因素包括旅客上下車時間、司機員折返更換駕駛艙、必要的檢查或簡單的整備，以及橫渡線的道岔重設路徑的時間，其中最大者將決定列車在末端車站的停靠時間。一般而言，有司機員的列車折返停靠時間最少需要 2.5 ~ 3 分鐘，若為全自動駕駛的列車，則瓶頸為旅客上下車的時間。

將式 (8) 及式 (14) 代入式 (1) 可求得橫渡線設在末端站前方，且列車在末端站停靠同一股道折返的號誌安全時隔如式 (15)。

$$T_{t,F1} = \frac{L + s_p + s_c}{v_c} + \frac{v_c}{2a} + \frac{v}{2b} \left(\frac{Q_t}{K_b} - 1 \right) + \frac{s_c + s_p + L}{v} + \frac{v}{b} + t_i + t_d \quad (15)$$

2.2 站內停靠不同股道

當橫渡線設置在末端站前方，且列車折返時在站內停靠不同股道，則列車可以交替使用月台面，因此號誌時隔比較不會受到停站時間的影響。例如圖 5 中，假設有一列車停靠在月台下方的軌道，當第二列車抵達時，可將橫渡線鎖定在 4 → 1 的進路，讓列車進站。在列車車尾通過 1 之後，將橫渡線重新設定在 2 → 3 的路徑，則原先停靠在月台下方的第一列車即可離開車站。而列車車尾通過 3 之後，再設定為 4 → 2 的進路，則第三列車即可進入車站。

由前述分析可知，第三列車進入車站的時間受制於第一列車的離站時間，而第一列車的離站時間又與第二列車通過橫渡線的時間有關。計算號誌時隔時係以列車在末端車站的時間為基準，而第三列車與第二列車到達車站的時間間隔，即為列車在末端站交替使用不同股道折返的號誌安全時距。從圖 5 可知，其計算方式如式 (16)，其中 $T_{t,F2}$ 為列車在末端站停靠不同股道折返 (站前折返) 的號誌安全時隔； t_{Dep} 為列車從末端車站經由橫渡線駛入站間正線直到車尾完全通過橫渡線區的運轉時間； t_i 為解除進路、道岔轉轍、鎖定進路等之道岔及號誌聯鎖時間 (假設道岔解除及鎖定不同進路的時間皆相同)， S_i 則為其對應行走的距離； t_{Arr} 為列車在正線上允許進入橫渡線的最接近位置至列車完全停止在末端車站的運轉時間； $t_{b,s}$ 為列車車尾經過橫渡線至列車完全停妥的運轉時間。

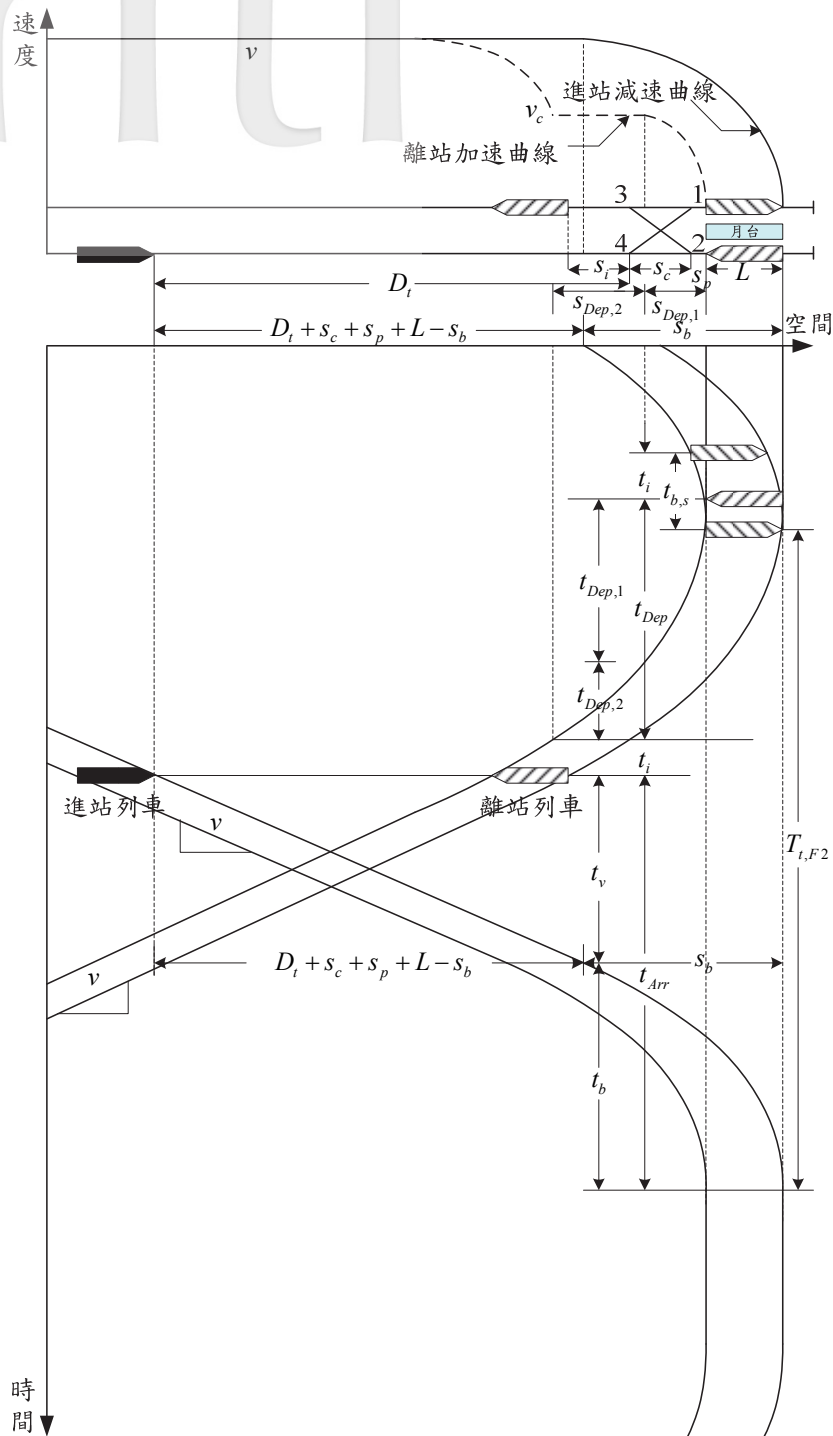


圖5 站內停靠不同股道之號誌安全時距

$$T_{t,F2} = t_{Dep} + 2t_i + t_{Arr} - t_{b,s} \quad (16)$$

式 (16) 中第二列車車尾通過橫渡線至列車完全停妥的運轉距離為橫渡線至月台端點的距離 s_p ，此段過程中列車均處於減速階段，故可得式 (17)。

$$t_{b,s} = \sqrt{\frac{2s_p}{b}} \quad (17)$$

將式 (8)、式 (14) 及式 (17) 代入式 (16) 可得式 (18)。

$$T_{t,F2} = \frac{L + s_p + s_c}{v_c} + \frac{v_c}{2a} + \frac{v}{2b} \left(\frac{Q_t}{K_b} - 1 \right) + \frac{s_c + s_p + L}{v} + \frac{v}{b} + 2t_i - \sqrt{\frac{2s_p}{b}} \quad (18)$$

若將式 (1) 與式 (16) 相減可得式 (19)。

$$T_{t,F1} - T_{t,F2} = t_d + t_{b,s} - t_i \quad \text{或} \quad T_{t,F2} = T_{t,F1} - t_d - t_{b,s} + t_i \quad (19)$$

通常列車在末端車站的停靠時間會遠大於轉轍及號誌聯鎖時間亦即 $t_d > t_i$ ，因此 $T_{t,F1} - T_{t,F2} > 0$ ，表示列車在末端站交替使用軌道折返的號誌安全時距，會小於僅使用一股道折返的時隔。

值得注意的是，前述有關列車使用兩股道折返之號誌安全時距公式的推導，係假設第二列車車尾通過橫渡線之後，第一列車即可離開車站，但若是第一列車的停車時間很長時，控制的因素就不再是第二列車通過橫渡線的時間，而是第一列車離開車站的時間。在交替使用月台折返的情況下，第二列車與第一列車之間的號誌時距為 $T_{t,F2}$ ，而第三列車與第二列車的號誌時距亦為 $T_{t,F2}$ ，因此第三列車與第一列車的最小時隔為 $2T_{t,F2}$ ，由於第三列車與第一列車在末端車站是利用同一股道折返，故兩者的運轉時隔亦須滿足同一股道折返的號誌時隔 $T_{t,F1}$ ，因此，若是 $T_{t,F1} < 2T_{t,F2}$ ，表示第三列車抵達末端車站時，第一列車停靠的軌道已經淨空，故列車可以順利進站；倘若 $T_{t,F1} > 2T_{t,F2}$ ，則表示第三列車抵達末端站時，第一列車占用的軌道尚未完全淨空，因此第三列車無法順利靠站，故此時列車交替使用月台折返的號誌安全時距必須修正為 $T_{t,F1}/2$ (第一列車與第三列車間隔 $T_{t,F1}$ ，故需除以 2)，彙整前述分析可得如下之結論：

1. 若 $T_{t,F1} \leq 2(T_{t,F1} - t_d - t_{s,b} + t_i)$ 或 $T_{t,F1} \geq 2(t_d + t_{s,b} - t_i)$ ，則

$$T_{t,F2} = \frac{L + s_p + s_c}{v_c} + \frac{v_c}{2a} + \frac{v}{2b} \left(\frac{Q_t}{K_b} - 1 \right) + \frac{s_c + s_p + L}{v} + \frac{v}{b} + 2t_i - \sqrt{\frac{2s_p}{b}} \quad (20)$$

2. 若 $T_{t,F1} > 2(T_{t,F1} - t_d - t_{s,b} + t_i)$ 或 $T_{t,F1} < 2(t_d + t_{s,b} - t_i)$ ，則

$$T_{t,F2} = \frac{L + s_p + s_c}{2v_c} + \frac{v_c}{4a} + \frac{v}{4b} \left(\frac{Q_t}{K_b} - 1 \right) + \frac{s_c + s_p + L}{2v} + \frac{v}{2b} + \frac{t_i + t_d}{2} \quad (21)$$

一般而言，配備司機員的捷運系統，列車在末端車站的停車時間通常由司機員掉頭更換駕駛艙及簡易清潔整備的時間所控制，故列車停站的時間較長，比較可能屬於第二種情形，此時若欲提升軌道容量，則必須設法降低列車在折返站的停靠時間。

有關停靠時間的縮短方式，臺北市政府捷運工程局 (2004) 提及可利用輪替乘務 (stepping back) 來縮短停站時間。另臺北大眾捷運股份有限公司 (1997) 則提及可利用雙人乘務 (double-ending) 來縮短停站時間。張恩輔 (2002) 曾比較兩種雙人勤務的優劣，但無論使用何種雙人勤務，最佳情況下均可將停站時間由 3 分鐘降低到 30 秒。

至於全自動駕駛的捷運系統，停站時間則是由旅客上下車的時間所控制，時間略短，因此比較可能屬於第一種情形，但若旅客量很大時，也可能屬於第二種情形。

若觀察式 (1) 及圖 4 可知， $T_{t,F1}$ 大致可包括兩個部分，第一部分為先行列車離開車站直到續行列車進入車站的最小號誌時隔 $t_{Dep} + t_i + t_v + t_b$ ，而第二部分則為末端站的停站時間 t_d 。為便於分析起見，令 $t_s = t_{Dep} + t_i + t_v + t_b$ 為列車離開及到達末端車站的最小號誌時隔，則 $T_{t,F1} = t_s + t_d$ 。其次觀察式 (16) 及圖 5，由於 $t_{s,b}$ 及 t_i 的值均不大，且其符號相反，故列車交替使用軌道折返的最小號誌時距亦略等於 t_s (即 $T_{t,F2} \approx t_s$)。

換言之，使用單一軌道折返的號誌安全時距為比交替使用軌道折返的時距多出停站時間 t_d ，故若是停站時間小於或等於列車開到的時隔，亦即 $t_d \leq t_s$ ，則列車交替使用月台的號誌安全時距為 t_s ，且實際的停車時間亦拉長至 t_s (參閱圖 6)。倘若停站時間大於列車開到的時隔，亦即 $t_d > t_s$ ，則列車交替使用月台折返的號誌安全時距必須延長至 $(t_d + t_s)/2$ ，而停車時間則維持 t_d (詳圖 7)。

另外，假設實際的營運班距為 h ，倘若列車在末端車站僅使用一股道折返時，則 $h \geq t_s + t_d$ ，因此 $t_d \leq h - t_s$ ；如果列車在末端車站使用兩股道折返，則 $h \geq (t_s + t_d)/2$ ，因此 $t_d \leq 2h - t_s$ 。綜合前述分析可知，列車在末端車站的停車時間上限可由式 (22) 計算而得，式中： n_t = 列車在末端車站折返可使用的軌道數。

$$t_d \leq n_t h - t_s \quad (22)$$

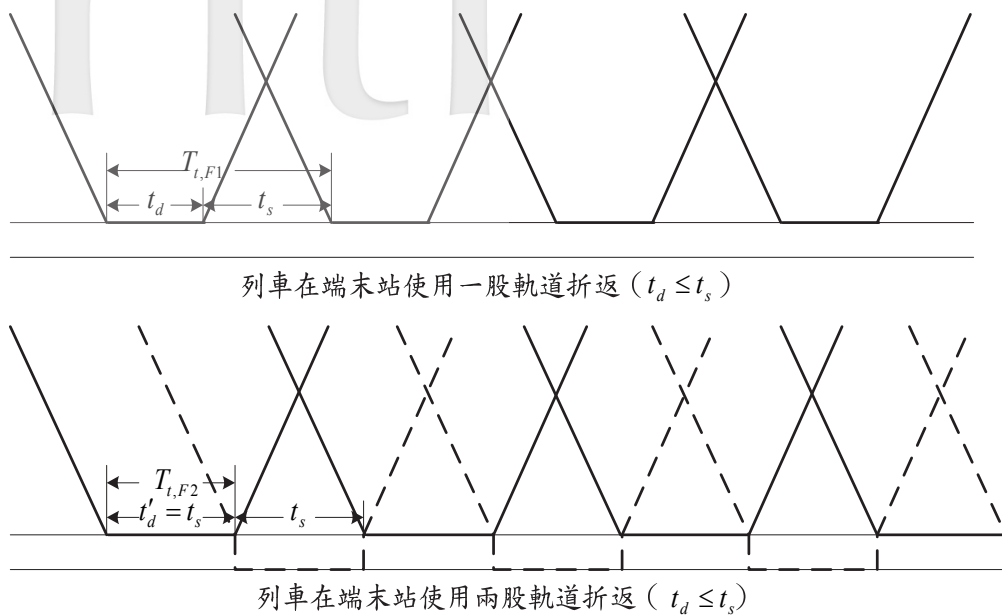


圖6 停車時間小於列車開到時隔的列車折返示意圖

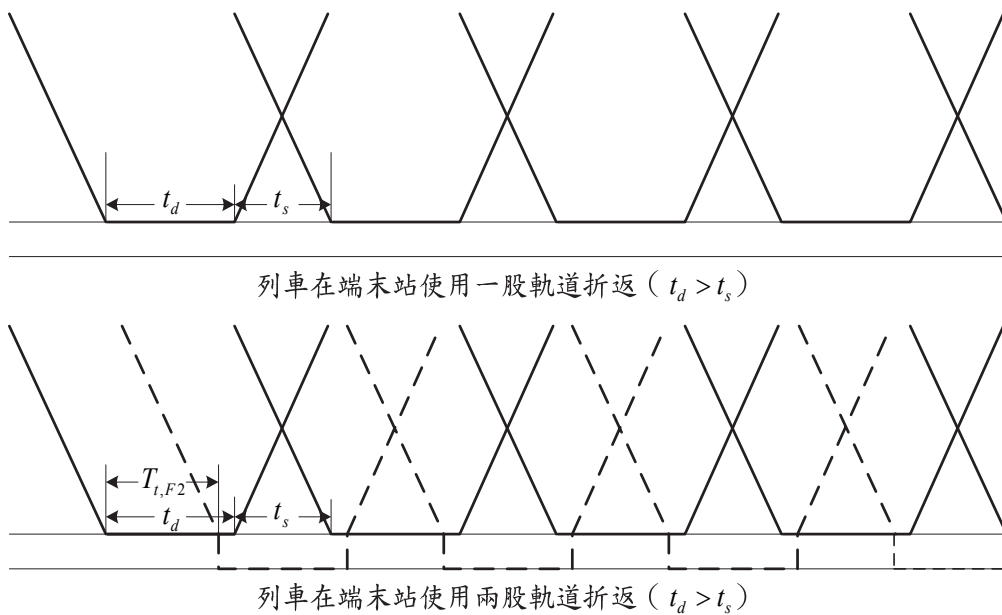


圖7 停車時間大於列車開到時隔的列車折返示意圖

2.3 路線坡度對號誌安全時距的影響

路線坡度會影響列車的加減速性能，當列車行駛在 $G\%$ 的坡度上時，加速度可由式 (23) 估計：

$$a(G) \approx \frac{M_e a(0) - Mg \frac{G}{1000}}{M_e} = a(0) - \frac{g \cdot G}{1000\rho} \quad (23)$$

式中：

- $a(G)$: 列車在坡度 $G\%$ 的加速度 (公尺/秒平方)；
- M_e : ρM 為列車的等效質量 (equivalent mass)；
- ρ : 等效質量係數，用以表示列車運動過程中，轉動零件 (例如車輪、車軸) 吸收的能量之等價質量；
- M : 列車編組質量 (公斤)；
- g : 重力加速度 (公尺/秒平方)， $g = 9.81$ 公尺/秒平方；
- G : 路線坡度 (%)。

等效質量係數 ρ 一般係介於 1.04 ~ 1.10 之間，如果將等效質量係數 ρ 以及重力加速度 g 的數值代入上式並四捨五入，可以式 (24) 來近似

$$a(G) \approx a(0) - 0.009G \quad (24)$$

若是減速度，由於坡度阻力的方向相反，故可由式 (25) 計算：

$$b(G) \approx b(0) + 0.009G \quad (25)$$

如果考量坡度對加減速性能的影響效應，則前述推導的號誌安全時距公式可依式 (24) 與式 (25) 調整為如式 (26) ~ 式 (28)。其中式 (26) 為站內停靠同一股道之號誌時隔，式 (27) 與式 (28) 則為停靠不同股道之時隔。

$$T_{t,F1} = \frac{L + s_p + s_c}{v_c} + \frac{v_c}{2a(-G_f)} + \frac{v}{2b(G_f)} \left(\frac{Q_t}{K_b} - 1 \right) + \frac{s_c + s_p + L}{v} + \frac{v}{b(G_f)} + t_i + t_d \quad (26)$$

$$T_{t,F2} = \frac{L + s_p + s_c}{v_c} + \frac{v_c}{2a(-G_f)} + \frac{v}{2b(G_f)} \left(\frac{Q_t}{K_b} - 1 \right) + \frac{s_c + s_p + L}{v} + \frac{v}{b(G_f)} + 2t_i - \sqrt{\frac{2s_p}{b(G_f)}} \quad (27)$$

$$T_{t,F2} = \frac{L + s_p + s_c}{2v_c} + \frac{v_c}{4a(-G_f)} + \frac{v}{4b(G_f)} \left(\frac{Q_t}{K_b} - 1 \right) + \frac{s_c + s_p + L}{2v} + \frac{v}{2b(G_f)} + \frac{t_i + t_d}{2} \quad (28)$$

三、案例分析

國內目前已營運的捷運路線裡，臺北捷運之藍線（即南港/板橋/土城線）為現階段最為繁忙的路線，在本研究進行資料蒐集階段，臺北捷運藍線上計有兩種營運模式，即南港 ↔ 亞東醫院與南港 ↔ 永寧，由於兩種營運模式均於南港站折返，故本研究以南港站作為案例分析之對象。但自民國 100 年 2 月 27 日南港展覽館站通車之後，上述兩種營運模式之折返站已由南港站移至南港展覽館站。

3.1 分析結果

根據本研究蒐集之資料，臺北捷運相對於本模式中的 t_i 值（解除進路、道岔轉轍、鎖定進路等之道岔及號誌聯鎖時間）為 10 秒； t_r 值（號誌系統及列車控制的反應時間）則為 1 秒，最小停站時間則設為 120 秒，至於高運量電聯車的性能相關特性則如表 1。

表1 臺北捷運高運量列車參數

參數名稱	數值	單位	相對於本模式之代號
列車車身長度	141	公尺	L
列車加速率	1	公尺/秒平方	a
列車減速率	1	公尺/秒平方	b
煞車有效因子	0.75	%	K_b

至於模式中所需的「巡航速度」及「間隔安全係數」無法由已知的參數直接代入，需透過數個基本參數推算，以下分別說明之。

1. 巡航速度

巡航速度可利用解析模式來分析列車的站間運轉曲線，再配合永久速限的位置以及列車的速碼（速碼系統）或期望煞車曲線（距離碼系統）來決定列車的巡航速度。假設 S 為站間距離， a 、 b 分別為列車的加減速度， v_{\max} 為列車的最大的營運速度，則

(1) 若 $S \geq \frac{v_{\max}^2}{2a} + \frac{v_{\max}^2}{2b}$ ，表示列車可以加速至最大營運速度，此時列車的站間

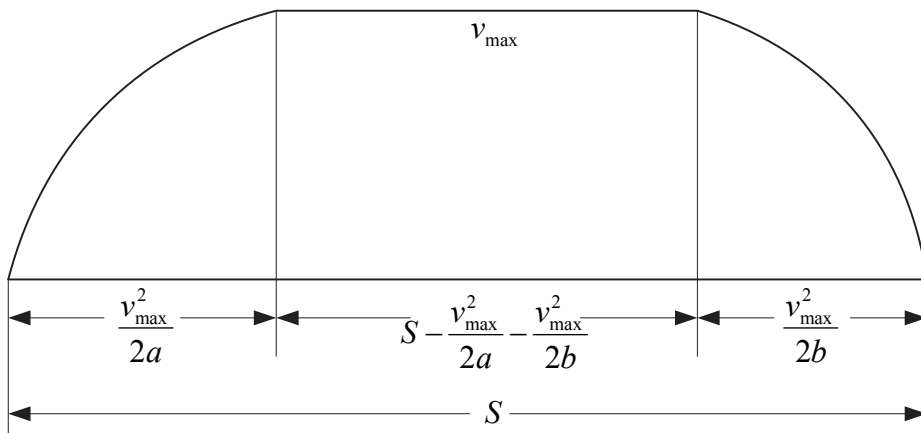
運轉曲線如圖 8 (a) 所示，而巡航速度 v 會小於或等於最大列車速度 v_{\max} 、永久速限 v_r 以及列車的速碼 v_s ，意即由式 (29) 決定：

$$v \leq \min(v_{\max}, v_r, v_s) \quad (29)$$

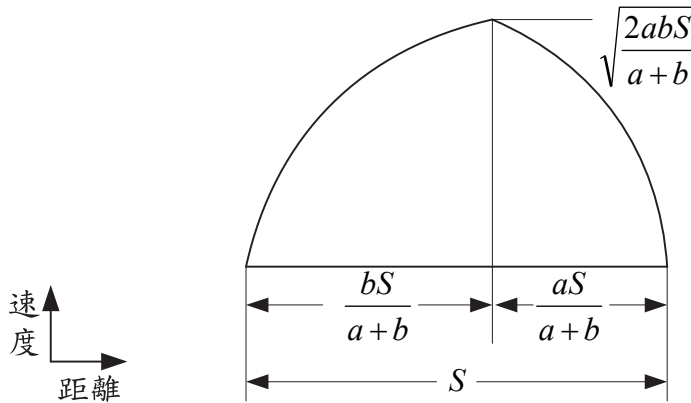
(2) 若 $S < \frac{v_{\max}^2}{2a} + \frac{v_{\max}^2}{2b}$ ，表示列車無法加速至最大列車速度，此時列車的站間運轉曲線如圖 8 (b) 所示，而列車的巡航速度由式 (30) 決定。

$$v \leq \min(\sqrt{2abS/(a+b)}, v_r, v_s) \quad (30)$$

在本案例中，由於南港與昆陽兩站相隔 1,500 公尺， $v_{\max} = 22.222$ 公尺 / 秒，故屬於上述的第一種條件，雖然 v_r 亦為 22.222 公尺 / 秒，但由於該地點列車的的速度碼 v_s 為 18.0556 公尺 / 秒，故巡航速度 v 為經換算後為 65 公里 / 小時。



(a) 列車可加速至最大速度



(b) 列車無法加速至最大速度

圖8 列車站間運轉曲線示意圖

2. 間隔安全係數

將先前推導的式 (9) 經移項可得間隔安全係數 Q_t 如式 (31)，式 (31) 中的巡航速度 v 已透過式 (29) 求得， D_t 值在本案例為 653.7 公尺，其餘參數可參考表 1，經式 (31) 計算 Q_t 為 3.01。

$$Q_t = \frac{2K_b b D_t}{v^2} \quad (31)$$

透過前述之參數設定可分別計算折返號誌時隔 T_s 如表 2 中第 1 欄位，站內停靠不同軌道的號誌時隔為 113 秒，與洪育銘等人 (2010) 透過實務系統觀察的 120 秒相當接近。若欲進一步分析路線容量，則可利用式 (32) 進行計算，依鍾志成 (2010) 對運轉寬裕值 β 建議以 0.1 計算時，設計班距與路線容量結果亦整理如表 2 中第 2、3 欄位。

表2 南港站號誌安全時距分析結果表

情境	號誌時隔	設計班距	路線容量
站內停靠同一股道	226秒	249秒	14列/小時
站內停靠不同股道	113秒	124秒	28列/小時

$$C_t = \frac{3600}{h} = \frac{3600}{(1 + \beta)T_s} \quad (32)$$

式中， β = 運轉寬裕係數。

3.2 敏感度分析

3.1 節雖已計算出南港站現行條件下的列車折返號誌時距，但僅能用來了解目前南港站的列車折返運能，為了進一步了解各種折返站號誌時隔影響因素對時隔的影響，本研究進一步以 3.1 節的參數為基礎進行敏感度分析。

本研究構建的式 (26)~ 式 (28) 號誌時隔公式中的變數相當多，但就已經營運的系統而言，大概僅有停站時間參數是最有調整彈性的，其他諸如列車性能、橫渡線區長度、進站坡度等變數之改善均非一朝一夕或少許成本可完成，這也呼應了 Gill (2000) 認為已完工的系統要增加折返效率並不容易之看法，因此本研究將對停站時間進行較深入探討，至於其他變數僅針對其影響號誌時隔的趨勢與相對大小進行比較。

圖 9 分別彙整停站時間由 0.5 分鐘至 5 分鐘時，列車使用單一月台及交互使用月台的折返號誌時隔數值，從圖中可明顯發現無論停站時間多寡，交替使用月台之折返號誌時隔均較低，值得注意的是當列車交替使用月台的情境下，當停站時間由高變低到一定程度時，號誌時隔公式將由式 (21) 轉為式 (20)，到達此臨界值後，縮短停站時間將無法再縮短號誌時隔。就南港站案例而言，臨界值約出現在停站時間為 115 秒時，對應的號誌時隔為 111 秒，此數值為不改變線型配置與機電系統前提下，南港站的折返能力極限。此外，若依臺北都會區大眾捷運系統規劃手冊 (臺北市政府捷運工程局，2004) 的迴車時間建議值 180 秒，於圖 9 對應的時隔分別為 286 秒與 143 秒，意即若欲提供比 143 秒更小的列車班距服務，必須以雙人乘務或輪替乘務來執行之。

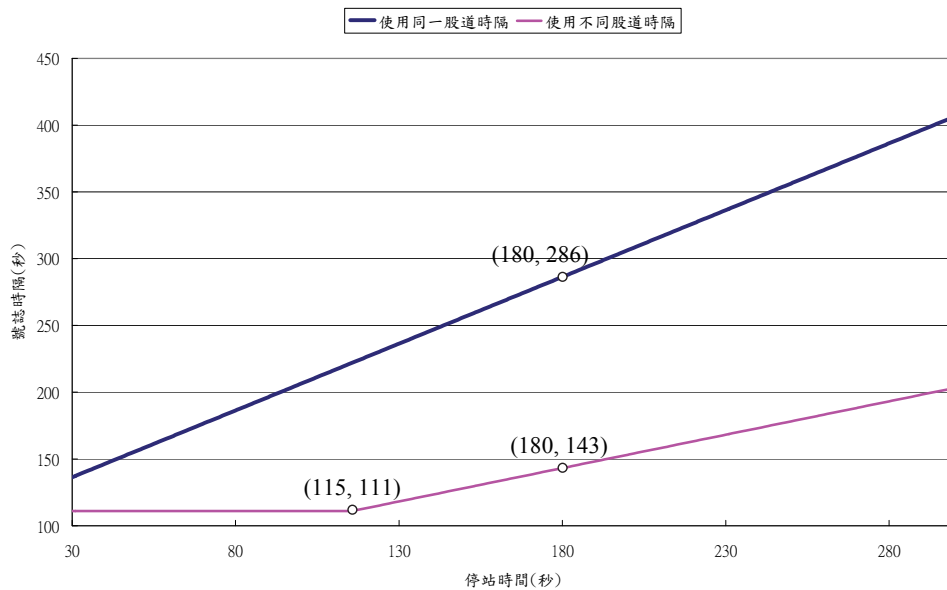


圖9 停站時間與號誌安全時距之關係圖

至於各種影響因素的綜合比較，考量列車交替使用月台時有較短的折返時隔，故以列車交替使用月台為基礎進行分析，惟各種影響因素的單位不同，故本研究引用經濟學中彈性 (elasticity) 的觀念進行標準化，將彈性定義為 $\varepsilon = \frac{\Delta y / y}{\Delta x / x}$ ，表示自變數變動 10% (即 $\Delta x / x = 0.1$) 時，因變數對應變動百分比。如此將可利用 ε 值比較各影響因子對於折返運轉時隔之影響如圖 10，從圖中可看出橫渡線區長、列車長度、停站時間、巡航速度與間隔安全係數等變數對折返號誌時隔的影響為正；道岔速限、列車加減速等對折返號誌時隔的影響為負，影響程度大小前五名依序為停站時間、列車減速度、煞車有效因子、間隔安全係數與巡航速度。



圖10 折返號誌時隔影響因子敏感度比較圖

四、結論與建議

過去捷運系統號誌時隔研究常僅考慮路線中間通過性車站作為空間參考點進行分析，同時模式常依不同號誌系統運作特性量身制定，本研究則針對末端站之列車折返構建解一個泛用的解析模式，意即不針對特定的號誌系統（如速度碼系統、距離碼系統或移動區間閉塞等）進行模式構建，而是由分析者設定適當的巡航速度與列車間隔安全係數來完成分析，此模式將能得到最佳的泛用性，可同時兼顧捷運系統在規劃、設計、營運等任何階段的號誌時隔分析需求。

在案例分析中，本研究挑選目前國內最繁忙之捷運路線的折返站—南港站進行分析。分析結果顯示列車於南港站折返的時隔約為 113 秒，與臺北捷運公司的實務量測結果相當接近。在敏感度分析的結果部分，本研究挑選已營運系統最有調整彈性的變數—停站時間進行分析，發現縮短停靠時間的確有助於縮短號誌時隔，唯需注意的是當列車使用不同股道時，縮短停靠時間所帶來的效果有其極限，當停靠時間低到 $T_{t,F1} \leq 2(T_{t,F1} - t_d - t_{b,s} + t_i)$ 條件成立時，號誌時隔無法再降低，就南港站案例而言，臨界值約出現在停站時間為 115 秒時，對應的號誌時隔為 111 秒，但無論停站時間多寡，交替使用末端站月台均較使用單一月台有較短的折返時隔。此外從敏感度分析中亦發現，影響折返時隔的前五名變數分別為停站時間、列車減速度、煞車有效因子、間隔安全係數與巡航速度。

受限於篇幅限制，本研究僅介紹列車在末端站前透過橫渡線折返之情境建立號誌時隔公式，但若就捷運系統的容量分析工作而言，尚需考慮其他可能成為瓶頸之空間參考點，例如一般通過站或中央避車線折返處等，方能提供完整的捷運系統容量評估工具。由於寬裕時間的決定會影響到列車服務的可靠度，亦是一個值得深入研究的課題。此外，本研究在敏感度分析中雖客觀比較了所有變數影響時隔的趨勢與程度，但實務上由於每一種變數變動 10% 的成本可能差異極大，故實際研擬容量提升計畫時，需考量更多成本效率因素。最後，本研究所提出的號誌時隔公式以及敏感度分析結果可作為未來國內捷運系統規劃、設計、營運等階段進行軌道容量分析時參考。

參考文獻

- 李英 (2003)，「城市軌道交通折返線相關問題研究」，*城市軌道交通研究*，第六卷第一期，頁 28-32。
- 洪育銘、何宜彰、陳榮吉 (2010)，「臺北捷運高運量系統最小班距運轉之簡介」，*軌道行車控制交流會論文集*，頁 1-15。
- 凌松濤、陳展華、梁東升、李晉 (2000)，「線路折返能力的計算」，*電氣化鐵道*，第四期，頁 12-14。
- 張仕龍、張恩輔、鍾志成、李治綱、林國顯、呂蕙美 (2004)，「臺北捷運系統路線容量分析—以 TCQSM 為例」，*第十九屆中華民國運輸學會論文集*，頁 1,441-1,464。
- 張恩輔 (2002)，*捷運系統運轉整理之模擬分析*，成功大學交通管理科學系碩士論文。
- 張國寶、劉明姝、徐瑞華 (2005)，「城市軌道列車在中間站折返時的通過能力適應性分析」，*城市軌道交通研究*，第八卷第六期，頁 31-35。
- 臺北大眾捷運股份有限公司 (1997)，*臺北捷運公司高運量系統車務作業手冊*。
- 臺北市政府捷運工程局 (2004)，*臺北都會區大眾捷運系統規劃手冊*。
- 蔡青峰 (2005)，*捷運固定閉塞區間與移動閉塞區間運能比較之研究*，交通大學交通運輸研究所碩士論文。

謝興盛 (2003), 捷運列車延誤時班距調整模式之模擬分析—以臺北捷運中、高運量系統為例, 成功大學交通管理科學系博士論文。

鍾志成 (2006), 軌道容量研究—臺鐵系統容量模式之構建分析 (二), 交通部運輸研究所委託研究計畫。

鍾志成 (2007), 軌道運輸之機廠位置及末端車站佈置對列車運轉調度的影響研究, 交通部高速鐵路工程局委託研究計畫。

鍾志成 (2010), 運輸系統容量分析暨應用研究—軌道系統 (4/4), 交通部運輸研究所委託研究計畫。

鍾志成、李治綱、張仕龍、張恩輔、林國顯、劉昭榮 (2005), 「臺鐵三位式號誌系統安全時距公式之構建與分析」, 第二十屆中華民國運輸學會論文集, 頁 1,441-1,464。

蘭增良 (2002), 「終點站兩種折返方式的利弊分析及折返能力計算」, 都市快軌交通, 第四期, 頁 32-33。

Gill, D. C. (2000), Assessment of Mass Transit Turn-back Capacity Using Dynamic Simulation Models, In Allan, J. *et al.* (Eds.), *Computers in Railways VII*, Southampton: WIT Press, pp. 1,077-1,086.

Kittelson & Associates, Inc. (1999), Transit Capacity and Quality of Service Manual, Project A - 15A, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

Kittelson & Associates, Inc. (2003), Transit Capacity and Quality of Service Manual 2nd Edition, Project A - 15B, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

Tom Parkinson Transport Consulting Limited (1996), Rail Transit Capacity, TCRP Report No. 13, Transportation Research Board, National Research Council, D.C.

(收稿 2010/12/9, 第一次修改 2011/5/10, 定稿 2011/6/29)