



號誌控制對輕軌運輸系統容量之影響

黃筌玕／財團法人中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心 研究員

鍾志成／財團法人中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心 主任

賴勇成／國立臺灣大學土木工程學系 教授

由於軌道運輸系統具有高效率、低污染，較安全，以及對環境衝擊小等優點，在國內推動永續低碳運輸環境上扮演重要的角色，同時為了發展國內鐵道科技產業，未來輕軌運輸系統將是負責都會區軌道運輸需求的主要運具之一^[1]。

國內第一條輕軌運輸系統為高雄輕軌，於 2017 年第一階段通車，全長 8.7 公里，共 14 座車站，待後續第二階段完工後，將可成為環狀路線。第二條通車營運的是 2018 年完工的淡海輕軌綠山線，全長 7.3 公里，共 11 座車站，後續尚有藍海線正在規劃當中。接下來預計通車的為安坑輕軌，即將於 2021 年完工；此外，亦有不少輕軌運輸相關計畫正在推動中，例如基隆輕軌、八里輕軌、深坑輕軌、五股泰山輕軌和新竹環狀輕軌等。

在積極推動輕軌建設之際，為了確保將來系統能提供最符合經濟效益的運輸服務，和其他交通建設一樣，在規劃、興建或營運階段皆需掌握其供給運能。雖然國內鐵道容量手冊對於臺鐵和捷運系統提供了計算運能的準則^[2]，不過輕軌運輸系統不像它們獨立於公路交通之外，因此須先了解輕軌運輸系統的特性，才能準確評估運能。

輕軌運輸系統的特性

根據交通部的輕軌系統建設及車輛技術標準規範^[3]，輕軌運輸系統係指有人駕駛、使用導引、電力驅動之客運運輸系統，其車輛具軸重較輕、車輛界限較小、轉彎能力較佳、爬坡能力較強、制動能力較高之特性，可因地制宜，且同一路線可單獨或混合採用不同路權型式。

輕軌運輸系統與臺鐵或捷運系統最明顯的不同處便是路權型式，根據列車與其他交通工具的隔離程度，路權型式共分為 A、B、C 三種^[3]，如圖 1 所示：

1. A 型路權（專用路權）：列車行駛之路線為輕軌運輸系統的專屬用地，與外界交通完全隔離，可為平面、高架或地下之方式，例如淡海輕軌紅樹林站—淡水行政中心站，以高架的方式與平面道路隔離。

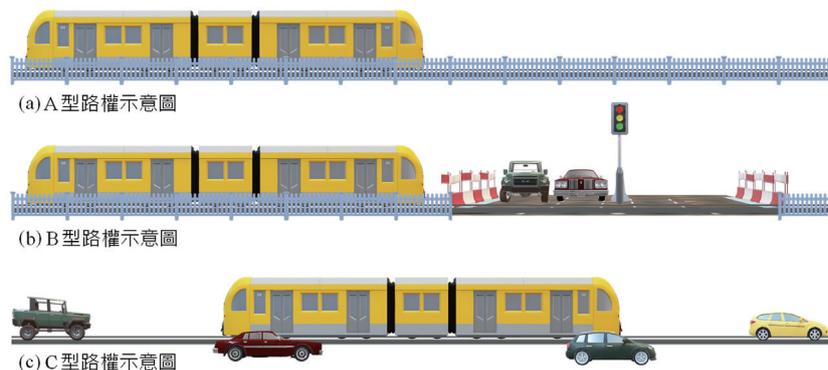


圖 1 輕軌運輸系統的路權形式

2. B 型路權（隔離路權）：列車行駛之路線設有隔離設施，但與平面道路相交時，則設置平面交叉路口，列車行駛至路口時必須根據路口號誌的指示通過，例如淡海輕軌濱海義山站－崁頂站，以及高雄輕軌第一階段皆為 B 型路權。
3. C 型路權（共用路權）：列車行駛之路段與一般道路車輛共用，沒有任何隔離設施，目前國內尚未有採用此種路權的輕軌運輸系統。

輕軌運輸系統專用號誌

當輕軌列車行經交叉路口時，必須和一般道路車輛一樣須遵守紅綠燈的指示通過，雖然在公路端已經於路口設置紅綠燈，但輕軌運輸系統仍設有專用的號誌，其燈號變化與路口紅綠燈聯鎖運作，方便輕軌司機員判斷並遵行。

高雄輕軌的專用號誌包含三種燈號：橫桿、直桿以及三角燈^[4]，皆為白色燈，其燈號組合搭配閃爍可代表不同意義，詳見表 1；至於淡海輕軌，則用了橫桿和直桿兩種燈號，其意義如表 2。

影響輕軌運輸系統容量的因素

容量是用來評估各種軌道系統運輸能力的指標，

輕軌運輸系統也不例外。在計算容量時，並非一列接著一列地將整條路線塞滿列車，而是要讓列車在不受其它列車影響運行的前提下，如圖 2 所示，來計算單位時間內能通過的最大列車數。

輕軌運輸系統的容量受到許多因素影響，例如列車的行駛速率，由於列車運行時須保持一定的安全距離，當一列車通過後，若列車行駛速率愈高，則下一列車可在愈少的時間內通過，理論上容量應該愈高，不過行駛速率愈高同時也代表所需安全距離愈長，因此行駛速率對容量的影響需視情況而定。一般在低速的情況下，隨著行駛速率增加，容量會隨之增加，但速率高於一定程度後，行駛速率增加，便會導致容量降低。

除了行駛速率之外，列車的停站時間也是影響容量的因素之一。如圖 3 所示，在列車進出車站的過程中，為了不讓列車影響彼此的運行，當先行列車停靠於車站時，續行列車與先行列車之間要有足夠的距離，讓續行列車能以原來的速度持續運行，直到先行列車離開車站後，續行列車剛好運行到準備減速進站的位置。由此可知，若列車停站的時間愈長，則兩列車相隔的距離就愈長，使得單位時間內能通過的列車就愈少，容量愈低。

表 1 高雄輕軌於交叉路口專用號誌之意義

燈號	 恆亮	 恆亮 閃爍	 恆亮 恆亮	 恆亮	 閃爍
意義	停止號誌	確認號誌 (優先號誌需求已送出)	預告號誌 (即將轉換為通行號誌)	通行號誌	即將轉為 停止號誌

表 2 淡海輕軌於交叉路口專用號誌之意義

燈號	 恆亮	 閃爍	 恆亮	 閃爍
意義	險阻停車	即將通行	通過進行	即將停車



圖 2 計算容量的條件

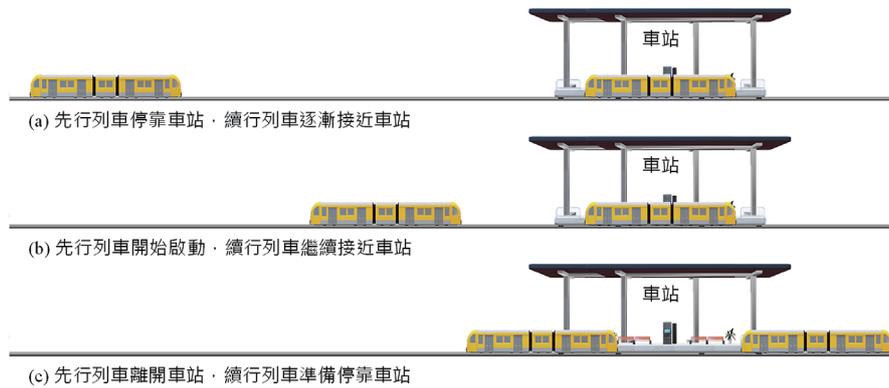


圖 3 兩輕軌列車互不影響運行到達車站的情況

同樣的道理，當輕軌列車通過與一般道路的平面交叉路口時，可能受到路口號誌影響必須停等紅燈，此時兩列車通過路口的行為類似進出車站的過程。如圖 4 所示，當先行列車於路口停等紅燈時，續行列車與先行列車之間有足夠的距離，讓續行列車能維持原來的運行速度接近路口，直到先行列車停等完紅燈通過路口，續行列車都不至於太接近先行列車而被迫減速。因此，若列車停等紅燈的時間愈長，對容量的影響就如同停站時間一樣，導致容量愈低。

當交叉路口處設有車站時，可採取近端設站和遠端設站兩種方式，如圖 5 所示，此時，上述停站時間與路口號誌兩項因素會同時影響輕軌的容量，但列車的停站

時間頂多在 30 秒左右，而路口號誌的紅燈通常都遠大於 30 秒，故路口號誌是影響輕軌容量的主因。至於在設站方式上，其實近端和遠端設站兩者對輕軌容量的影響差別不大，不過若從營運速度和旅客上下車方便性等觀點來看，近端設站會比遠端設站較優，因為近端設站列車可於停等紅燈時順便讓乘客上下車，而遠端設站可能會發生列車停等紅燈，等綠燈通過路口後又必須再次停車讓旅客上下車，而導致運轉時間的增加。

如表 3 所示，各種因素對容量造成的影響不盡相同，但行駛速率和停站時間還算是系統內可控的因素，而路口號誌還要顧及一般道路交通，因此需一套方法來減少路口號誌對輕軌容量的影響。



圖 4 兩輕軌列車互不影響運行通過路口的情况

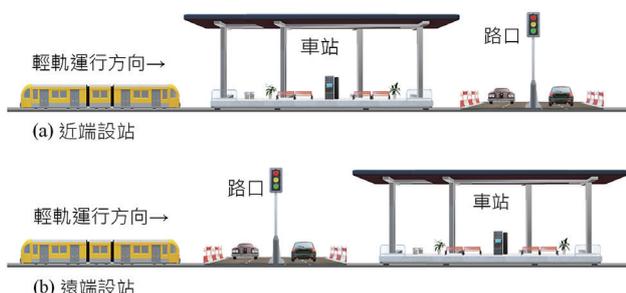


圖 5 近端與遠端設站示意圖

表 3 各項因素對容量之影響

因素	對容量之影響
行駛速率	視情況而定，低速時，行駛速率增加可提升容量；高速時，行駛速率增加會降低容量。
停站時間	停站時間增加會導致容量降低。
路口號誌	列車停等紅燈的時間愈長，容量愈低。
設站方式	設站方式對容量的影響差異不大。

優先號誌對輕軌容量之改善

若列車經常受路口號誌影響而造成額外的停等時間，不僅增加了總旅行時間，也降低了容量，甚至造成瓶頸，如圖 6 所示。為了減少此影響，實務上通常會於輕軌與道路交叉路口處設置優先號誌。

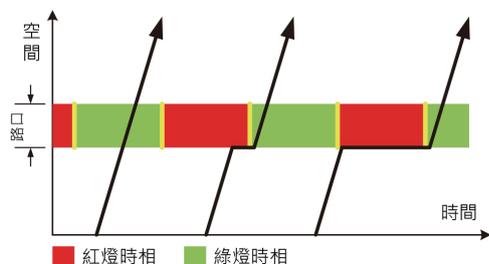


圖 6 沒有使用優先號誌的輕軌列車運行時空圖

優先號誌可分為絕對優先號誌 (Preemption Signal) 和相對優先號誌 (Priority Signal) 兩種，臺鐵所採用的為前者，在列車行經路口時，具有絕對優先通過權；而輕軌所採用的為後者，在滿足橫交道路最短綠燈時間以及最長紅燈時間的限制下，列車有相對優先通過權。

一般常見優先號誌所採取的策略有延長綠燈 (Green Extension)、縮短紅燈 (Red Truncation) 以及插入綠燈 (Phase Insertion) 三種^[5]：

延長綠燈

延長綠燈策略係透過增加綠燈時相的秒數，使其比原定時間還晚結束，如圖 7 所示。當輕軌列車靠近路口，而所剩的綠燈秒數不夠讓其通過路口時，此策略可讓列車不用再停等一整個紅燈時相的時間。

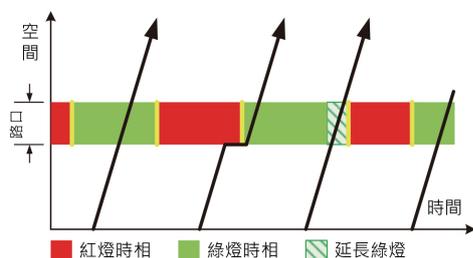


圖 7 使用延長綠燈策略的輕軌列車運行時空圖

縮短紅燈

縮短紅燈策略係透過縮短紅燈時相的秒數，使號誌可更早轉為綠燈時相，如圖 8 所示。當輕軌列車靠近路口，且下個時相即為綠燈時相時，此策略可讓列車順利通過路口，減少停等紅燈的時間。

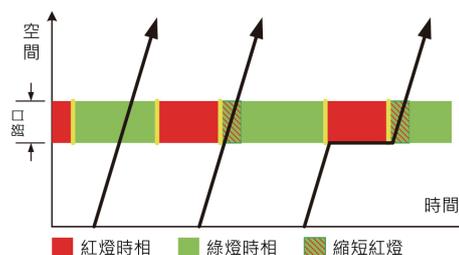


圖 8 使用縮短紅燈策略的輕軌列車運行時空圖

插入綠燈

插入綠燈策略係透過插入一段輕軌綠燈時相讓列車通過路口，通常在路口號誌沒有輕軌週期性的綠燈時相時採用，如圖 9 所示。當輕軌列車靠近路口，且橫交道路已經滿足最短綠燈時間之限制，此策略能讓列車順利通過路口。

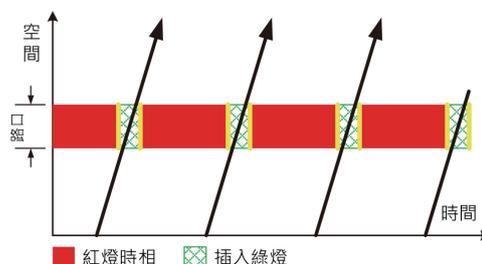


圖 9 使用插入綠燈策略的輕軌列車運行時空圖

各種優先號誌策略的效果不同，如表 4 所示，但無論採取何種優先號誌策略，整體而言都是藉由調整時相，盡量讓列車能順利通過路口，減少停等時間進而提升容量。

表 4 各種優先號誌策略的效果

優先號誌策略	效果
延長綠燈	讓號誌晚點轉為紅燈，使列車能趕在紅燈之前通過路口。
縮短紅燈	讓號誌提早轉為綠燈，使列車能提早通過路口。
插入綠燈	在列車行經路口時，剛好將號誌轉為綠燈讓其通過。

觀察與發現

去年交通部運輸研究所針對輕軌容量進行相關研究^[6]，透過發展數學模式，探討包含路口號誌等各種因素與容量之間的量化關係，最後從國內外的案例分析中發現：

1. 影響輕軌容量的因素包含行駛速率、停站時間和路口號誌等，而路口號誌是決定輕軌容量的主要因素之一。在近端或遠端設站處，針對各項影響因素進行敏感度分析時，路口號誌因素比其他因素更具影響力。

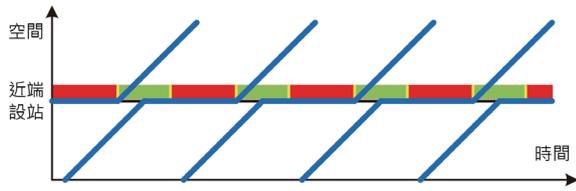


圖 10 近端設站於每個號誌週期內通過一列車之運行時空圖

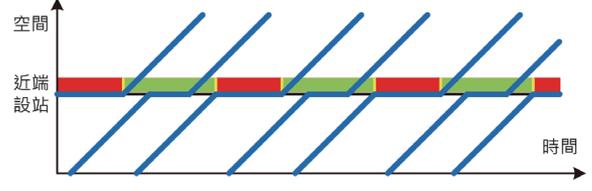


圖 12 近端設站於每個號誌週期內通過兩列車之運行時空圖

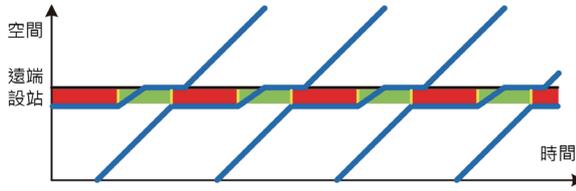


圖 11 遠端設站於每個號誌週期內通過一列車之運行時空圖

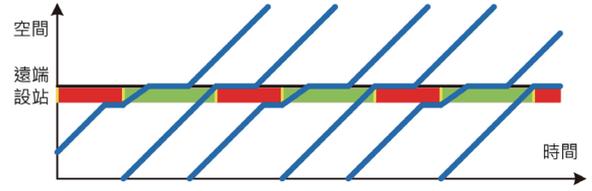


圖 13 遠端設站於每個號誌週期內通過兩列車之運行時空圖

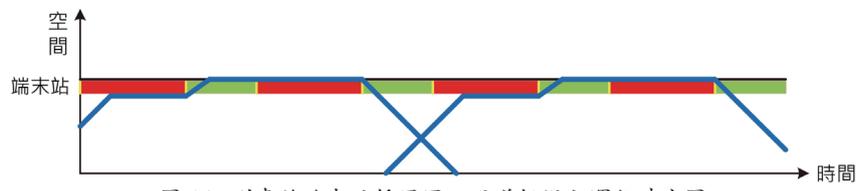


圖 14 列車於端末站採用同一股道折返之運行時空圖

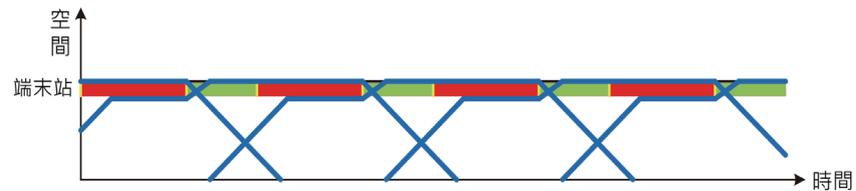


圖 15 列車於端末站交替使用不同股道折返之運行時空圖

2. 優先號誌策略可減少列車於路口的停等時間，進而改善容量。尤其在沒有週期性輕軌綠燈時相的路口，若不採用插入綠燈策略，則列車完全無法通行。
3. 在各種優先號誌策略中，插入綠燈對容量的改善效益最大，而延長綠燈和縮短紅燈的效果，需視能延長或縮短的時間而定，若不夠則對容量提升的幫助有限。例如圖 7 之延長綠燈若不夠長，則列車無法順利通過路口；又如圖 8 之縮短紅燈若不夠短，則列車還是必須停等紅燈。
4. 就營運速度和上下車方便性而言，近端設站優於遠端設站，但就容量而言，兩種設站方式的容量差異不大，約每個號誌週期可通過 1 ~ 2 列車。如圖 10 和圖 11 所示，無論近端還是遠端設站，通常一個號誌週期可通過一列車，若綠燈較長，則能於每個號誌週期內通過兩列車，如圖 12 和圖 13 所示。
5. 除了路口號誌之外，端末站也可能是容量瓶頸所在。若端末站同時又有路口號誌影響，當採用同一股道折返時，約每兩個號誌週期可通過 1 列車，如圖 14 所示；而交替使用不同股道折返時，約每個號誌週期可通過 1 列車，圖 15 所示。

結語

輕軌運輸系統在規劃、興建或營運等階段皆須掌握其容量，才可確保系統能提供足夠的運能，因此了解路口號誌如何影響容量是相當關鍵的一環。值得注意的是，路口號誌同時影響輕軌和道路交通兩者，透過優先號誌來提升輕軌容量，對道路交通卻是帶來負面衝擊，兩者如何權衡是值得探討議題。此外，上述討論都還只侷限於一個路口，若考量輕軌全線，沿途每個號誌皆會影響容量，而號誌之間可能有連鎖機制，這都導致計算輕軌容量成為一個複雜的問題，值得未來深入研究。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所 (2019)，2020 年版運輸政策白皮書。
2. 交通部運輸研究所 (2020)，2019 年臺灣鐵道容量手冊。
3. 交通部 (2018)，交通技術標準規範捷運類車輛設計部：輕軌系統建設及車輛技術標準規範。
4. 簡聖民等 (2017)，輕軌號誌系統及道路交通號誌整合探討，中華技術期刊，第 113 期。
5. Transportation Research Board, 2015, Signal Timing Manual.
6. 交通部運輸研究所 (2019)，「輕軌系統容量分析暨應用研究 (1/2)-A、B 型路權容量模式構建」定案報告。