

# 利用旅客流模擬模式計算捷運系統人流 服務指標之研究<sup>1</sup>

## CALCULATION OF MRT SERVICE PERFORMANCE INDICATORS OF PASSENGER FLOW WITH A SIMULATION MODEL

鍾志成 Jyh-Cherng Jong<sup>2</sup>

林 蓁 Jen Lin<sup>3</sup>

林志偉 Jyh-Wei Lin<sup>4</sup>

林誌銘 Chih-Ming Lin<sup>5</sup>

(101 年 1 月 5 日收稿，101 年 4 月 27 日第一次修改，101 年 6 月 29 日第二次修改，  
101 年 8 月 21 日第三次修改，101 年 9 月 10 日定稿)

### 摘 要

大眾捷運系統 (Mass Rapid Transit, MRT) 提供都會區旅客方便快速的運輸服務，為了維持一定的服務水準，營運機構必須掌握系統的服務績效與旅客人潮的變化。由於捷運系統具有列車停站型態一致且無對號的特性，故旅客的搭乘方式非常自由，使得人潮在系統內的移動路徑與搭乘列車之掌握相當不易。有鑑於此，本研究利用自動收費系統 (Automatic Fare

- 
1. 感謝高雄捷運公司於本研究進行期間，提供研究進行所需的相關資料與寶貴經驗，使本研究的成果能更符合營運單位的實際需要。
  2. 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心資深研究員兼組長 (聯絡地址：105 臺北市南京東路 5 段 171 號中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心；E-mail：jcjong@sinotech.org.tw)。
  3. 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心副研究員 (E-mail：linjen@sinotech.org.tw)。
  4. 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。
  5. 高雄捷運公司人資處處長。

Collection, AFC) 的紀錄，採用旅客實際進入與離開系統之車站與時間，配合列車實際時刻表，以微觀的方式，逐一模擬旅客在捷運系統內的移動路徑並將旅客指派至列車上，並藉由全日旅客之模擬結果，計算列車乘載率、車站人潮變化、旅客候車時間與轉乘時間等各項人流服務指標，提供營運單位做為評估捷運系統目前的服務水準與績效之參考。本研究以高雄捷運系統之實際資料進行案例分析，從分析結果可知，本研究所發展的模式可正確且有效地進行旅客流的模擬，並計算出各項服務指標，有助於營運機構評估目前之營運績效。

**關鍵詞：**捷運系統；旅客流；旅客流模擬

### ABSTRACT

*Mass Rapid Transit (MRT) System provides its passengers with convenient and fast transportation services in the metropolitan area. To maintain a predetermined level of service, MRT operators should monitor service performance and the transition of passenger flow in the system. Since MRT trains typically have the same stopping pattern and no seat assignments, passengers can freely travel within the system. Consequently, recognizing passengers' traveling path and boarding trains becomes crucial. Therefore, this research developed a microscopic model to simulate passenger flow in MRT systems. This model first extracted the timestamps and station information of passengers entering and exiting an MRT system from the Automatic Fare Collection (AFC). With this information and actual timetables, the model then determined passengers' traveling paths and assigned each passenger to an appropriate train. Based on the simulated results of data from an entire day, performance indicators such as train load factor, flow fluctuations at stations, passenger waiting time, and transferring time can be calculated to help MRT operators evaluate their offered level of service. Empirical data from the Kaohsiung Rapid Transit Corporation (KRTC) was also collected for a case study. The results demonstrate that the model could effectively and efficiently simulate passenger flow for MRT systems. These resulting performance indicators could also help operators assess their current level of service.*

**Key Words:** *Mass rapid transit system (MRT); Passenger flow; Passenger flow simulation*

## 一、前言

近年來能源成本高漲及環保意識抬頭，節能減碳成為全世界所追求的風潮，國內亦不斷提倡綠色運輸的概念，也因此「全力發展軌道運輸以減少石化燃料的消耗量及碳排放

量」，遂成為交通運輸發展的政策與目標之一。在都會區中，大眾捷運系統 (mass rapid transit system, MRT) 為城市軌道交通系統的典型代表，其高密度的運輸特性，提供民眾方便、快速、準確且舒適的搭乘環境，因而廣受喜愛與支持。站在營運管理的角度，為確保服務品質符合民眾的期待，必須先了解目前的服務績效，而透過列車乘載率、車站人潮變化、旅客候車時間與轉乘時間等指標，可協助管理者評估系統目前的服務水準。

由於捷運系統的列車停站型態固定且在票務的管理上具有無對號特性，故不似傳統鐵路或高速鐵路的營運者，可透過購票時的劃位來掌握旅客的資訊，因此，捷運系統之營運機構不但無法預知旅客於系統內的移動路徑，對於列車乘載率、車站內的人潮變化等資訊亦難以得知。正因其所能掌握的旅客資訊極為有限，再加上捷運路網越複雜，旅客自起點站至終點站可選擇的搭乘方式則越多，故僅利用有限資訊來估算各項指標，以評估系統服務績效實屬困難。因此，本研究的目的是在於建立一個模擬模式，利用自動收費系統 (automatic fare collection, AFC) 的紀錄，配合列車實際時刻表，以微觀的方式，逐一根據旅客進入與離開捷運系統之時間與車站，重建旅客在系統內之移動行為 (包含移動路徑與搭乘列車)，並藉由全日旅客之模擬結果來計算列車乘載率、站內旅客數、旅客平均轉乘時間、旅客平均停留時間、候車時間，以及列車行駛區間之旅客流量等各項人流服務指標，以達到協助營運單位評估捷運系統服務水準之目的。

本文分為五節，除本節外，第二節陳述與本研究相關之文獻回顧，分為與旅客流分析相關的課題與票證資料的應用兩部分；第三節說明本研究所提出之捷運系統旅客流模擬模式，首先定義旅客於系統內的搭乘路徑，再說明模式的兩個主要演算核心：「決定旅客乘車路徑」與「決定旅客搭乘列車」；第四節以高雄捷運的實際資料進行案例分析；第五節則提出本研究之結論與建議。

## 二、文獻回顧

旅客在捷運系統內之移動主要可分為在車站內與在列車上兩部分；旅客在車站內部大多以步行的方式前往月台候車或進行轉乘，而搭上列車後則是靠列車的運行改變其在系統內的位置，以下第 2.1 節整理與旅客流動相關之文獻。為能精確取得旅客進入與離開系統之資訊，本研究採用 AFC 之歷史紀錄進行分析，與票證資料應用相關之文獻則整理於第 2.2 節中。

### 2.1 旅客流分析相關文獻

在旅客流分析相關文獻中，有不少研究是以車站內的旅客流動為研究主題，例如國內臺北捷運系統就曾利用英國 Halcrow 公司<sup>[1]</sup>發展的 PEDROUTE 與 PAXPORT 旅客流模擬模式來模擬車站內旅客流動問題；Clifford<sup>[2]</sup>則是利用該模式來研究澳洲、英國、香港鐵路路網裡繁忙的銜接點，並分析 2000 年雪梨奧運時，大量的旅客需求對於場站的衝擊，

以便尋找適當的改善方式。此外，亦有針對月台旅客方面的研究，此類研究通常須考量隨列車或由穿堂層進／出月台的旅客流，例如陳耀維等<sup>[3]</sup>的研究建議了月台空間設計的原則；北美 TCQSM 手冊 (2003)<sup>[4]</sup>亦曾經提出旅客可用空間與步行速度的關係；林廉凱<sup>[5]</sup>則分析人流模式中之「流量」、「密度」與「速度」間之關係，並以實際調查、校估臺北捷運旅客流動之速度與密度關係式。整體而言，前述研究是以車站內部以及月台為研究範疇，探討影響旅客流動的因素並分析各項設施的配置數量及方式對旅客流的衝擊，以作為車站內部動線規劃、設施配置的參考。這類型的研究尤其會著重在月台層旅客流的分析，主因為月台層是車站中較危險的部分，當旅客人數接近月台的設計容量時，若旅客又不斷湧入，極可能造成旅客被擠落軌道之虞，此亦是許多捷運系統設置月台門的主要考量因素。

除了車站內之旅客流動行為外，有些研究分析了旅客進出車門所需的時間，例如簡聰裕<sup>[6]</sup>、鍾志成等<sup>[7]</sup>之研究皆曾以現場調查配合迴歸分析求得迴歸式，而鍾志成等<sup>[7]</sup>之研究甚至將旅客在月台上選擇不同車門的不均勻也納入考慮。這類型的研究著重在旅客上下列車的移動行為，其目的在於推估停車時間，作為時刻表制訂的參考，以免因旅客過多而產生列車延滯。而無論是著重在車站內部、月台或上下車的旅客流動特性，其實皆為旅客在捷運系統內移動的片段，故前述研究無法綜觀每一位旅客於系統中完整的移動過程。

而在以整個系統為範疇的旅客流研究方面，很重要的一個議題是旅客乘車路徑的選擇，特別是複雜的捷運路網。Myojo<sup>[8,9]</sup>提出可運用於大都市複雜軌道路網之旅客流模擬模式，該研究利用由 AFC 資料彙整而得之 OD 表作為模式之輸入，利用羅吉特模式 (Logit model) 處理旅客之路徑選擇問題，最後利用管理人員目測之觀察結果驗證模式之正確性。在 Hirai 與 Tomii<sup>[10]</sup>的研究中，也採用與 Myojo 類似的方法，以巨觀的 OD 資料搭配羅吉特模式推估列車上載運的旅客數。而 Nagasaki 等<sup>[11]</sup>則是以求解最短路徑問題之方式處理旅客路徑選擇之課題；該模式除了考慮旅行時間與轉乘因素外，還考慮了擁塞因子 (congestion factors)，並以旅客的觀點來評估列車時刻表，但其模式假設每一位旅客選擇的路徑均為最短路徑，並未考慮到旅客選擇的隨機特性。最近，Zhou<sup>[12]</sup>根據列車實際時刻表，考慮合理的轉乘接續時間，找出旅客於起迄站間所有搭乘路徑之搭乘計畫 (搭乘班次的接續)，並計算每個搭乘計畫的被選擇機率，再決定該旅客採用之搭乘計畫，以完成一個旅客的指派。由於模式對於每一個旅客起迄，必須先找出所有可能路徑與所對應之搭乘計畫，再依機率決定旅客的搭乘計畫，因此運算負荷較高；另一方面，該研究在步行時間的處理上，並無區分穿堂層與月台層等不同步行區域的考量，因此無法根據模擬結果統計各時段內各步行區域之旅客數與變化情形。

此外，在營運單位方面，臺北捷運公司曾以自行開發的 Metro Routing 系統<sup>[13]</sup>，利用悠遊卡紀錄與實際列車到開時間，以模擬旅客搭乘行為的方式，計算出列車乘載率、上下車人數、月台候車人數與轉乘資料等，來進行運行計畫效益評估，但該系統為針對當時的雙十字型路網所設計，而非泛用的模式；高雄捷運公司則是採用巨觀的方式分析，利用每小時的旅客 OD 表，推估每小時系統內各站間的運量，藉以計算每小時內的列車平均乘載率。由此可知，實務上營運機構在面對系統服務績效之課題時，多是利用系統內既有的旅

客與列車資訊，以推測旅客在捷運系統內的流動的方式來處理。

對於捷運營運單位而言，探討整個系統內旅客流的目的在於了解系統的服務績效，就精確性而言，微觀模式較能準確重現旅客在系統內的移動行為，透過模擬的結果，可計算各項與旅客流有關的服務績效指標，包括候車時間、轉乘時間、車站內不同區域內的擁擠情形以及列車的乘載率等，有助於營運單位掌握系統的服務績效。而在旅客乘車路徑的選擇方面，應採機率性模式，以考慮不同旅客選擇的差異性，至於模式的結構則應具備泛用性，以便能夠應用在不同的系統；最後，捷運系統的旅客量大，以微觀模式處理時必須考慮運算效率的問題。由於兼具精確性（微觀）、機率性、泛用性及效率性的模式仍有待發展，因此本研究嘗試建構兼具上述特性的旅客流模擬模式，以協助營運單位正確評估捷運系統的服務水準。

## 2.2 票證資料之應用相關文獻

票證資料最主要的功能是提供帳務清算，但亦可延伸其他應用，其中最重要的應用是旅客需求的統計。一般而言，旅運需求的預測方式包括「市場行銷研究」、「旅運需求預測」與「營運歷史資料」。在市場行銷研究方面，通常會搭配抽樣調查（含問卷或電訪），例如臺北大眾捷運股份有限公司以 12 歲以上且每月搭乘頻率在 5 次以下者為抽樣對象<sup>[14]</sup>，而汪進財與劉得昌<sup>[15]</sup>則是以問卷調查分析高鐵對於航空旅次的衝擊程度以及衝擊對象。而在旅運需求預測方面，Crisalli<sup>[16]</sup>曾以義大利鐵路公司發展的 SASM 系統（system for the analysis and simulation of marketing）分析旅客於威尼斯與杜林之間的選擇行為。利用歷史營運資料進行分析者通常選用自動收費系統紀錄，例如 Barry<sup>[17]</sup>即是利用 AFC 資料推估紐約的旅客 OD，而 2.1 節中的全系統旅客流分析或模擬的研究，亦都採用自動收費的票證資料推估旅客的需求，並進一步利用票證資料分析旅客於捷運系統內的移動行為。

此外，由於 AFC 紀錄由於包含個別旅客之時間空間資訊，故亦有研究利用其分析旅客行為，例如 Zhao 與 Rahbee<sup>[18]</sup>以芝加哥的運輸系統為例進行旅次起迄之重建，該研究較特殊之處除了整合 ADC（automatic data collection）與 AVL（automatic vehicle location）等系統紀錄之外，另一個特點是該 AFC 系統僅在旅客進入系統時（Entry Only）紀錄，故在還原旅次時需結合旅客搭乘公車之收費紀錄資訊推估。除了擷取 AFC 紀錄進行加值分析計算外，陳鵬輝<sup>[19]</sup>亦提出「智慧化」概念，意即是除了滿足平常的結算與帳務之外，近一步導入商業智慧（business intelligence, BI）之概念，藉此提供管銷部門分析決策（例如優惠方案）參考之用。在國內，除了前述的劉家焜與鄭銘興<sup>[13]</sup>外，徐郁雯<sup>[20]</sup>的研究則是把列車到開時間作為未知，以 AFC 資料作為旅客需求之來源，直接在滿足旅客需求的目標下進行列車排班作業。

有鑑於利用有限的歷史資料，來重建旅客於整個系統內的移動行為相當困難，故本研究參考常見的旅客流模擬應用，採用系統 AFC 紀錄與列車實際到開時間紀錄作為模式輸入，再將問題劃分由數個重要模組來處理，並進行演算核心的開發，以期能在短期內建構

系統雛型，並有助於提升國內捷運系統的服務品質與安全。

### 三、模式建構

本研究之目的在於評估捷運系統中各車站及各列車之服務水準，以提供營運單位班表檢核與服務改善之參考，故為能精確計算旅客於系統內之移動路徑與各項指標，本研究是採用模擬模式來進行捷運系統內之旅客流分析。

一般而言，模擬模式若根據系統狀態是否會隨著時間變化來區分，可分為靜態模擬 (static simulation) 與動態模擬 (dynamic simulation)；如以系統是否有隨機效應來分類，則有確定性模擬 (deterministic simulation) 與隨機模擬 (stochastic simulation) 兩類；而模擬的實體單元 (entity)，可為巨觀模擬 (macro simulation) 或微觀模擬 (micro simulation)；至於模擬的方式則有連續模擬 (continuous simulation) 及離散模擬 (discrete event simulation) 兩種方式<sup>[21]</sup>。

本研究所建立的模擬模式在於分析捷運系統內旅客流隨時間的變化情形，因此屬於動態模擬；而模式中對於旅客移動的行為考慮隨機效應，故為隨機模擬；另外，模式在處理旅客搭乘捷運系統的過程，會根據每一位旅客的票證紀錄來推估，因此為微觀模擬。由於捷運系統內旅客流的變化，僅在旅客到站、抵達月台、列車到站、列車離站、旅客抵達穿堂層、旅客離開車站等事件發生後才會產生變化，因此合理的模擬方式是採用離散事件模擬。一般而言，隨機的離散事件模擬模式大多是根據某些機率分配來產生事件，但就本研究所探討的課題而言，某些事件是已知條件，例如旅客的到離站以及列車到離站事件，因此模式在處理事件時，有別於傳統的離散事件模擬模式。此外，在資料的使用上，旅客進出系統之資訊採用自動收費系統之歷史資料，而列車班表之種類雖多 (包含營運時輸入號誌電腦的理想班表、營運時記錄列車運轉的實際班表，或是營運規劃過程中的各式模擬班表)，但由於本研究之目的在於重建一個過去發生過的事實，因此採用實際班表 (或稱「實際時刻表」)。實際時刻表資料多存於號誌系統中，如何取得需視營運單位的號誌電腦功能量身訂做，例如謝興盛<sup>[22]</sup>、劉家焜與鄭銘興<sup>[13]</sup>等，曾發展將臺北捷運號誌電腦之列車停妥訊號 (train berthed)、列車移動訊號 (train motion) 等訊息解譯為列車實際到開資訊的方法，包含缺漏訊息的補足等。

由於都會區內之捷運路線往往是縱橫交錯，集結成網，因此當旅客欲起點站搭乘捷運至終點站時，可能需要經過路線轉乘才能到達。在本研究中，一種由起點站至終點站之搭乘方式，稱為一條乘車路徑，而在捷運路網內，一組起、迄站間可能存在著一條以上的乘車路徑。對旅客而言，乘車路徑之選擇可能在進入捷運系統時即已決定，亦可能在搭乘之過程中，根據列車內或車站內之狀況，而臨時決定變換乘車路徑。此外，旅客是否能搭上某列車，除了旅客到達月台的時間須早於列車的出發時間外，列車容量是否足夠、旅客本身是否覺得列車已過於擁擠而自願等待下一班列車等都是影響的因素。

本研究是利用有限的資訊 (旅客進入／離開系統之車站與時間、列車之實際到開時刻表)，重建旅客在捷運系統內的移動行為，藉以了解該時空下各列車與各車站之乘載率與旅客人數等資訊，進而進行各項服務水準的評估。為簡化實際情況的複雜度並且讓問題能以量化的方式分析，本研究做出以下幾點基本假設：

1. 旅客不搭乘回頭車。所謂搭乘回頭車為由起點站先搭乘與目的方向相反之列車，至其他車站後，再換乘與目的方向相同之列車；或是旅客搭乘列車超過目的車站後，再由其他車站搭乘往終點站方向之列車至目的車站。此二種行為可能單獨或同時發生於同一旅次中，在資訊不足的情況下，本研究假設旅客不搭乘回頭車。
2. 旅客是否搭乘某列車不受列車容量影響。實際上，列車的載客數受乘客的體型與隨身行李之多寡、是否為尖峰時間、列車是否進行容量管制，以及氣候等因素的影響，且由於本研究之目的在於重建一個過去已發生的事實，因此，列車容量參數僅用於相關指標的計算，而不限制旅客否能搭上列車。實際上，如模擬的結果發現乘載率大於 1 的情形，也代表真實世界中，捷運系統有運能不足的現象。

綜合上述，本研究模式之應用架構整理如圖 1 所示，模擬流程如圖 2 所示。以下第 3.1 節首先分析旅客在捷運系統內的搭乘行為，第 3.2 節~第 3.3 節則分別說明本研究在處理旅客流模擬的兩個主要步驟：「決定旅客乘車路徑」與「決定旅客搭乘列車 (即旅客列車指派)」。

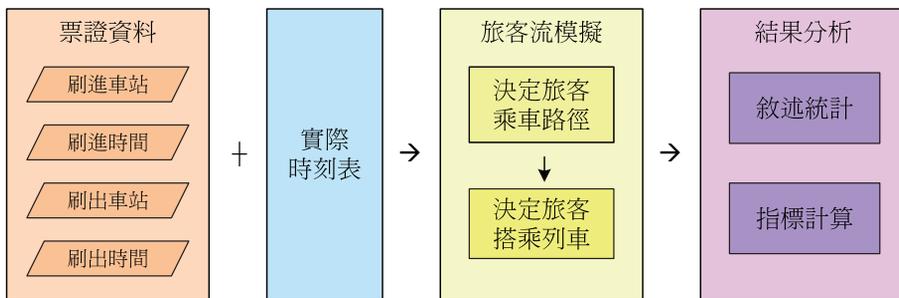


圖 1 旅客流模擬模式架構示意圖

### 3.1 旅客搭乘行為解析

在介紹模式之前，首先說明對旅客自進入系統後，如何在系統內移動，直至於終點站離開系統。本研究將系統內部分為車站的穿堂層、月台步行區、月台等候區，以及列車 4 個主要部分，旅客會各依其目的於系統內的各區域間移動。對於不須轉乘的旅客而言，於起點站刷卡進入系統後即進入穿堂層，經步行後到達月台步行區，再步行到達月台候車區等待列車。當列車進站後，車上的旅客會先下車，接著在候車區等待的旅客上車，列車出發。當列車到達旅客的終點站後，旅客下車直接進入月台之步行區，再步行到達穿堂層，

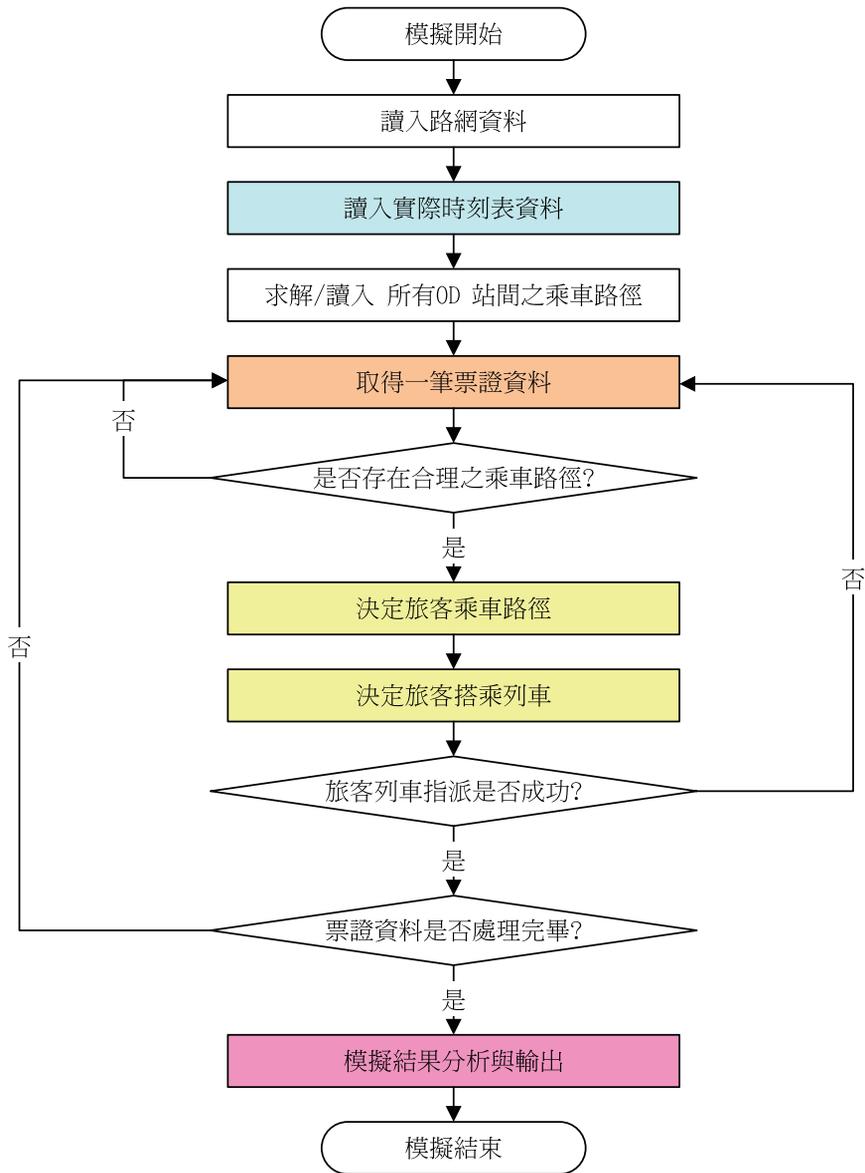


圖 2 旅客流模擬流程圖

最後刷卡離開系統。無轉乘旅客於系統內的動線如圖 3 所示，旅行時間如圖 4 所示。

而對於須經轉乘才能到達目的車站的旅客而言，其動線略較無轉乘旅客複雜。當列車到達旅客的轉乘車站後，旅客下車進入月台之步行區，再步行進入穿堂層，而後步行至轉乘路線之月台步行區，再到達候車區等待列車。有轉成旅客於系統內的動線如圖 5 所示，旅行時間如圖 6 所示。

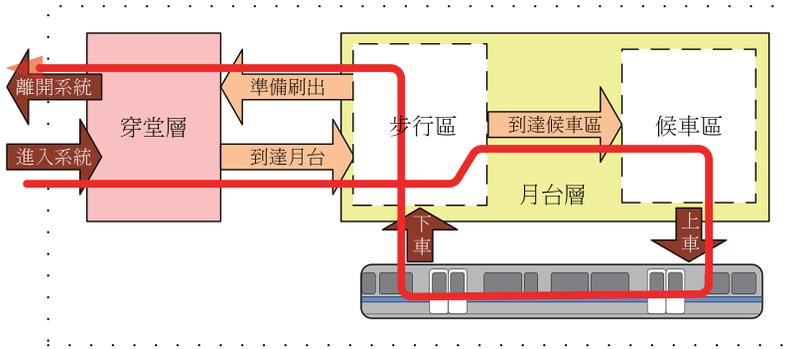


圖 3 無轉乘旅客於系統內之動線示意圖

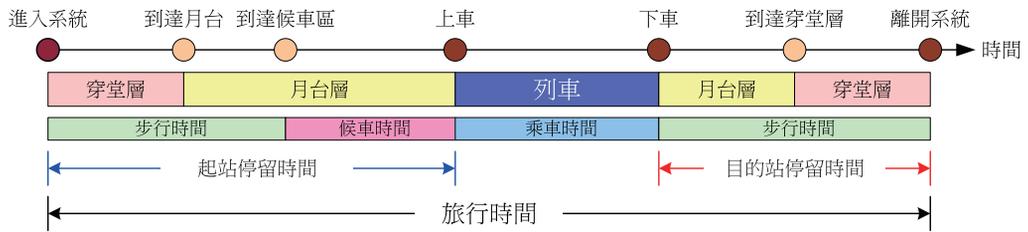


圖 4 無轉乘旅客之旅行時間示意圖

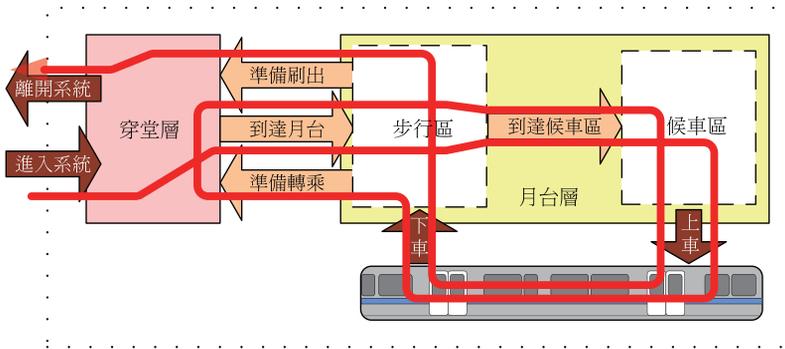


圖 5 有轉乘旅客於系統內之動線示意圖

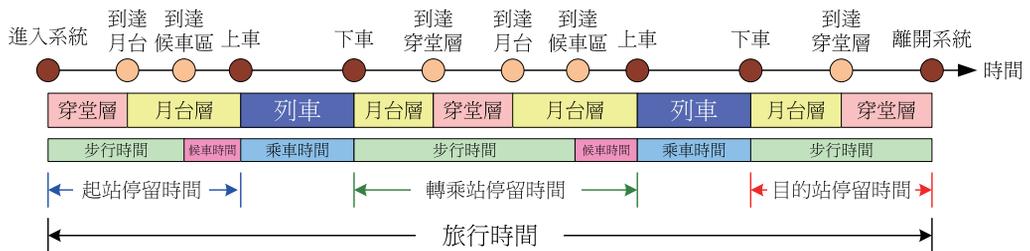


圖 6 有轉乘旅客之旅行時間示意圖

綜合上述，旅客於車站內的步行時間與合理範圍之表示符號彙整如表 1 所示。

表 1 步行時間範圍設定彙整表

車站	步行區域與目的	步行時間		總步行時間範圍
		上限	下限	
起點站	穿堂層 進入系統→到達月台	$a_{ub}$	$a_{lb}$	$w_{ub,O} = a_{ub} + b_{ub}$ $w_{lb,O} = a_{lb} + b_{lb}$
	月台步行區 到達月台→到達候車區	$b_{ub}$	$b_{lb}$	
轉乘站	原路線月台步行區 下車→到達穿堂層	$m_{ub}$	$m_{lb}$	$w_{ub,T} = m_{ub} + n_{ub} + p_{ub}$ $w_{lb,T} = m_{lb} + n_{lb} + p_{lb}$
	穿堂層 到達穿堂層→到達轉乘路線月台	$n_{ub}$	$n_{lb}$	
	轉乘路線月台步行區 到達轉乘路線月台→到達候車區	$p_{ub}$	$p_{lb}$	
終點站	月台步行區 下車→到達穿堂層	$x_{ub}$	$x_{lb}$	$w_{ub,D} = x_{ub} + y_{ub}$ $w_{lb,D} = x_{lb} + y_{lb}$
	穿堂層 到達穿堂層→離開系統	$y_{ub}$	$y_{lb}$	

### 3.2 決定旅客乘車路徑

旅客自起點站進入系統至到達終點站後離開系統的時間，包含了旅客的步行時間、乘車時間與候車時間，若捷運路網內一對起、迄站間有兩條以上的搭乘路徑，配合各路徑的乘車時間與預估步行時間等資料，則可根據旅客停留在系統內之總時間，推算可能的乘車路徑。在本研究的模擬架構中，任兩起迄車站間的候選路徑可由使用者指定再由模式讀入，或由模式於模擬之初先行求解 (如圖 2 所示)。以下第 3.2.1 小節說明由模式求解候選路徑之演算法，第 3.2.2 小節則說明路徑決定的法則。

#### 3.2.1 候選路徑求解

在候選路徑的求解上，本研究以車站為節點、站間為節線、公告的站間行駛時間為節線成本，並採用 Yen<sup>[23]</sup> 提出之 K 最短路徑演算法 (K shortest paths algorithm) 求解。該演算法是以網路中之最短路徑為基礎，逐點進行系統性搜尋，進而求出網路中路徑長度由小至大之 K 條最短路徑，但若一組起迄點於網路中所存在之路徑數量少於 K，則將全數路徑求出後即停止演算。而在最短路徑的求解上，由於節線成本為站間行駛時間皆大於 0，故網路中無負成本節線，沒有負值迴圈的問題，因此，採用求解效率較高之標籤設定法

(label-setting method) 求解。

說明 K 最短路徑演算法之前，首先說明路徑分歧點與重疊子路徑。如圖 7 所示，路徑 1 與路徑 2 皆為由節點 a 至節點 f 之路徑，路徑 1 經過之節點順序為 [a, b, d, f]，路徑 2 所經過之節點順序為 [a, b, e, f]。路徑 1 與路徑 2 自起點 a 開始之重疊部分為 [a, b]，因此，稱節點 b 為兩路徑之分歧點，稱 [a, b] 則為路徑 1 與路徑 2 之重疊子路徑，而 [a, b] 中自起點 a 至任一其他節點之路徑亦稱為重疊子路徑。綜合上述，路徑 1 與路徑 2 之分歧點為節點 b，重疊子路徑為 [a] 與 [a, b]。

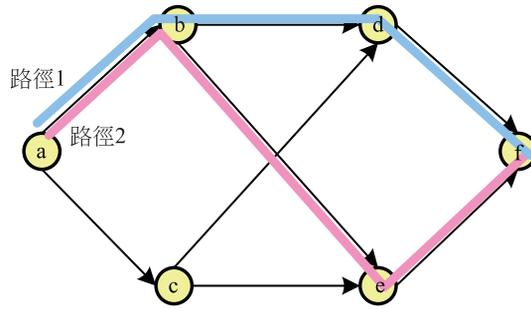


圖 7 路徑分歧點示意圖

若欲求節點  $s$  至節點  $t$  之前  $K$  條最短路徑，令  $\mathbf{C}$  為候選路徑之集合， $\mathbf{P}$  為已求得之路徑之集合，其元素  $P_1$  表示由節點  $s$  至節點  $t$  之最短路徑， $P_2$  表示第二名之最短路徑， $P_k$  則表示第  $k$  名之最短路徑， $Q_k$  表示路徑  $P_k$  所包含之節點數。

- Step 1. 求網路中節點  $s$  至節點  $t$  之最短路徑，若最短路徑存在，則將最短路徑加入  $\mathbf{C}$ ；若否，則結束演算。
- Step 2. 令  $k = 0$ 。
- Step 3. 自  $\mathbf{C}$  取出路徑距離最小之路徑，令  $k = k + 1$ ，將該路徑標記為  $P_k$ ，並加入  $\mathbf{P}$  中。若  $k = K$ ，則結束演算。
- Step 4. 令  $i = 1$ 。
- Step 5. 將沿著路徑  $P_k$  由節點  $s$  到節點  $i$  之子路徑標記為  $R_{k+1}(i)$ ，令  $j = 1$ 。
- Step 6. 若  $P_k$  之前  $i$  個節點與  $P_j$  重疊，則將  $P_j$  之節線  $(i, i + 1)$  之成本  $c(i, i + 1)$  暫時設定為  $\infty$ 。
- Step 7. 若  $j = k$ ，則執行 Step 8，若否，則令  $j = j + 1$ ，執行 Step 6。
- Step 8. 求由節點  $i$  至終點  $t$  之最短路徑，若最短路徑存在，則將其標記為  $S_{k+1}(i)$ 。令路徑  $C_{k+1}(i)$  為子路徑  $R_{k+1}(i)$  與子路徑  $S_{k+1}(i)$  之連結，並將  $C_{k+1}(i)$  加入  $\mathbf{C}$ 。
- Step 9. 將 Step 6 中所有成本被暫時設定為  $\infty$  之節線成本，皆設回原成本。令  $i = i + 1$ ，若  $i = Q_k$ ，執行 Step 10，若否，則執行 Step 5。
- Step 10. 若  $\mathbf{C}$  內已無候選路徑，則結束演算，若否，則執行 Step 3。



### 3.2.2 路徑決定

若路網中由起點站至終點站有兩條以上的乘車路徑，則需根據旅客於系統內的停留時間（離開系統時間與進入系統時間之差）來推測旅客可能的搭乘路徑。本研究在路徑決定上使用「時間合理性原則」，分為「路徑篩選」與「路徑確定」兩個步驟。「路徑篩選」的目的在於快速刪除旅客不可能搭乘的路徑，首先計算各搭乘路徑上各路線列車的最短行駛時間總和，並將大於旅客於系統內停留時間之路徑剔除，如圖 9 所示。而通過「路徑篩選」的搭乘路徑，若仍有兩條以上，則須再進入「路徑確定」的步驟來完成路徑的決定；若僅剩一條，則無論餘裕時間為何，皆選用該路徑為旅客之搭乘路徑；若無任何路徑通過「路徑篩選」，則該筆旅客資料指派失敗。

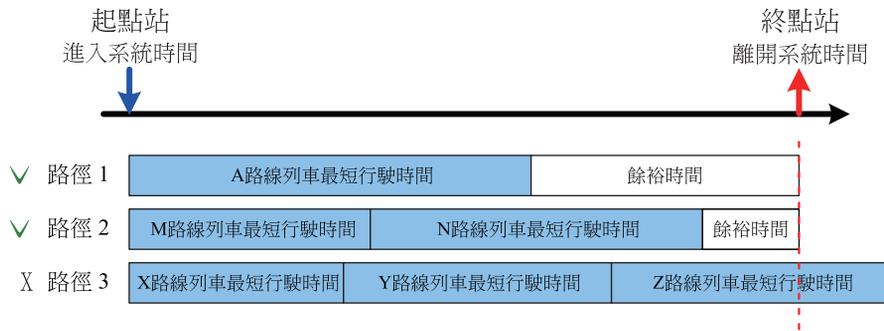


圖 9 路徑篩選示意圖

在進行「路徑確定」時，除路徑上各服務路線最短行駛時間總和  $t_{train}$  外，還需考慮各站總步行時間下限  $w_{lb}$ 、總步行時間上限  $w_{ub}$  與預計候車時間  $t_{wait}$  的設定值，並分別計算各通過篩選路徑的最小旅行時間  $T_{min}$  與最大旅行時間  $T_{max}$ ，如式(1)所示，其中下標  $O$  表示旅客起點站的設定值， $D$  表示終點站的設定值， $T$  則表示轉乘站的設定值，並請參考圖 10。

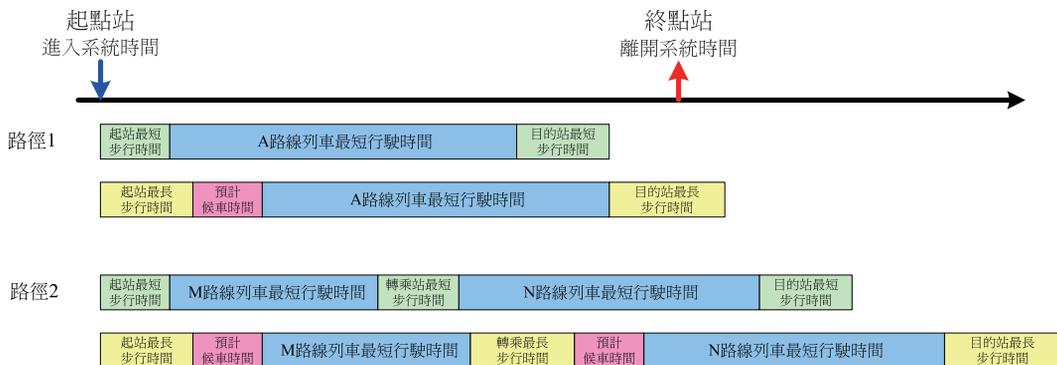


圖 10 旅客搭乘路徑之最大與最小旅行時間示意圖

$$\begin{cases} T_{\min} = t_{train} + w_{lb,O} + \sum w_{lb,T} + w_{lb,D} \\ T_{\max} = t_{train} + w_{ub,O} + t_{wait,O} + \sum (w_{ub,T} + t_{wait,T}) + w_{ub,D} \end{cases} \quad (1)$$

接著，計算旅客在系統內的停留時間  $T$  對應於各路徑之違反率  $r$  (如式(2)所示)，最後，選擇違反率最小的路徑作為旅客的搭乘路徑，若具最小違反率之搭乘路徑有兩條以上，則隨機選擇其一。

$$\begin{cases} r = \frac{T_{\min} - T}{T} & T < T_{\min} \\ r = 0 & T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ r = \frac{T_{\max} - T}{T} & T > T_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

### 3.3 決定旅客搭乘列車

決定旅客搭乘列車亦即將旅客指派至某列車上，在旅客之乘車路徑決定之後，旅客由起點站至終點站之搭乘路線、列車運行方向與轉乘車站即可確定，如此，模式即可根據列車時刻表選擇適當的列車，並將旅客指派至列車上。在本研究中，由於旅客進入與離開系統時間均為已知，故在乘車路徑決定後，於該時間窗內可提供旅客由起點站搭乘至終點站之列車車次 (不須轉乘的路徑) 或不同路線的車次組合 (須轉乘路徑) 均相當有限。當所有可能搭乘的列車車次或不同路線的車次組合皆找出之後，配合簡單的挑選規則，即可完成單一旅客之列車指派。以下各小節分別說明候選列車的選擇、搭乘列車的決定，以及旅客步行時間估算等方法。

#### 3.3.1 候選車次之選擇

對於不須轉乘的路徑，首先根據旅客之進入與離開系統時間，自列車時刻表中挑出列車於旅客起點站之離站時間晚於進入系統時間且於旅客終點站之到站時間早於離開系統時間之車次後，即可列出所有該乘客於進入與離開系統之時間窗內可能搭乘之候選車次，如圖 11 所示。

而對於須轉乘之路徑，則須先自時刻表中，將各段服務路線上旅客可能搭乘的車次挑出後，進行車次串連，以組成旅客可自起點站依序搭乘而到達終點站之車次組合。前述之「可能搭乘車次」之挑選原則為：列車於旅客乘車站之出發時間須晚於旅客進入系統時間加上所有前段路線累積之最短行駛時間，且列車於旅客下車站之到達時間加上所有後段路線累積之最短行駛時間須早於旅客之離開系統時間。前述之「車次串連」之原則為：各轉乘站之轉搭路線之列車離站時間必須晚於原路線之列車到站時間。當所有串連完整的車次

組合皆列出後，即可列出所有該乘客於進入與離開系統之時間窗內可能搭乘之候選車次組合，如圖 12 所示。

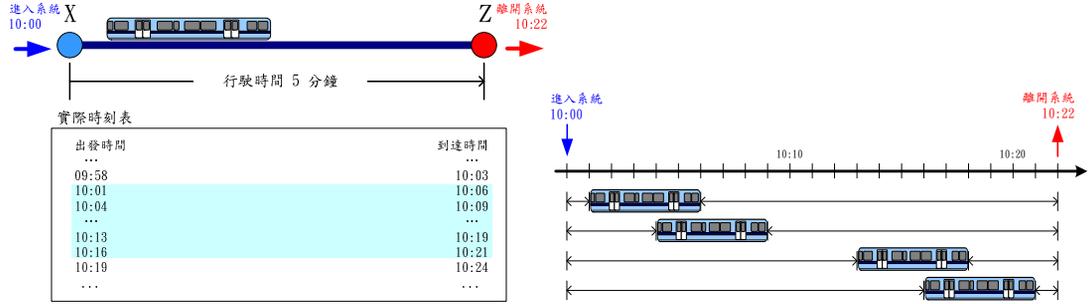


圖 11 無轉乘路徑之候選車次示意圖

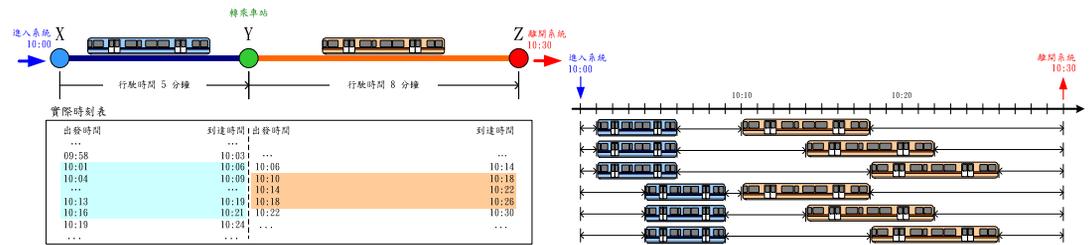


圖 12 有轉乘路徑之候選車次示意圖

### 3.3.2 搭乘車次之決定

由於旅客於起點站之進入系統時間與終點站之離開系統時間為已知，故當所有候選車次或車次組合找出之後，其所對應之旅客停留時間即可確定（請參考圖 4 與圖 6）。由第 3.1 小節的說明可知，旅客於各站的停留時間，包含步行時間與候車時間，而根據不同的車站配置，每個車站因不同目的所需的步行時間合理範圍亦不同，因此，在搭乘車次決定之時，每組候選車次對應之步行時間的合理性亦須列入參考。

旅客於終點站與轉乘站步行的目的在於前往月台等候列車，而於終點站步行的目的在於離開系統，由表 1 可知，各步行時間皆各有不同的合理範圍，因此，對於合理步行時間範圍之外的停留時間，本研究以懲罰的方式增加該車次或車次組合之總旅行時間  $T$ ，讓模式在進行旅客列車指派時，能盡量選擇合理的結果。旅客於起點站、轉乘站與終點站之步行時間懲罰因子通式如式(3)所示，其中  $\delta$  為懲罰因子， $w$  為停留時間， $w_{ub}$  為總步行時間上限， $w_{lb}$  為總步行時間下限。

$$\delta = \begin{cases} -\log\left(\frac{w}{w_{lb}}\right) & w < w_{lb} \\ 0 & w_{lb} \leq w \leq w_{ub} \\ \frac{w - w_{ub}}{2} & w > w_{ub} \end{cases} \quad (3)$$

經修正後的總旅行時間  $T'$  如式(4)所示，其中  $\delta_o$  為旅客於起點站之步行時間懲罰因子， $\delta_T$  為轉乘站之步行時間懲罰因子， $\delta_D$  為終點站之步行時間懲罰因子。本研究將選擇具最小  $T'$  之車次或車次組合，將旅客指派至列車上。若有兩個以上的車次或車次組合具相同之  $T'$ ，則以隨機的方式任意選擇其一，作為旅客搭乘的班次。

$$T' = T + \delta_o + \sum \delta_T + \delta_D \quad (4)$$

### 3.3.3 步行時間估算

在選擇了旅客之搭乘班次或班次組合後，即可計算出旅客於起點站、轉乘站與終點站的停留時間。本研究假設旅客在車站之停留時間皆用於步行移動或是候車，為能進行模擬結果之計算與分析，將旅客於起點站、轉乘站與終點站的停留時間依第 3.1 節定義之旅客動線分配給不同步行區域或候車區，如圖 13 所示。在最長步行時間與最短步行時間為已知的情況下，旅客之停留時間的分配採均勻分配 Rand [LB, UB] 計算，主要是希望能藉由隨機的方式來產生步行時間的差異性，在本模式之演算架構下，亦可採用其它分配，雖會影響旅客於各區域的步行時間（仍會被限制於最長步行時間與最短步行時間之間），但整體而言，並不會影響旅客搭乘列車的指派結果。

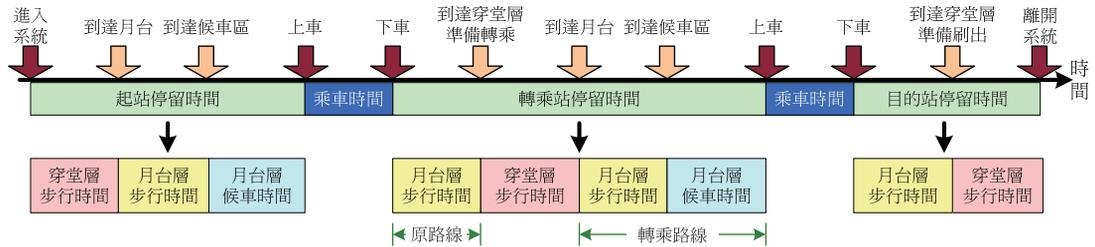


圖 13 旅客停留時間分配示意圖

#### 1. 進站旅客

旅客自進入系統至搭上市車的這段時間可分為在穿堂層之步行時間、在月台層之步行時間與候車時間三段，前兩項之和為旅客於起點站之總步行時間，後兩項之和為總占用月台時間，如圖 14 所示。

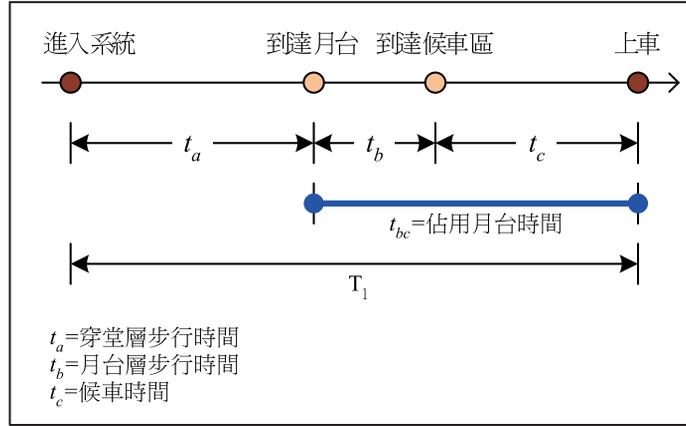


圖 14 進站旅客停留時間分配示意圖

假設一旅客由進入系統至上車之總停留時間為  $T_1$ ，而「穿堂層步行時間」 $t_a$  之範圍為  $[a_{lb}, a_{ub}]$ ，「月台層步行時間」 $t_b$  之範圍為  $[b_{lb}, b_{ub}]$ 。若旅客能順利搭上列車，則  $T_1 \geq (a_{lb} + b_{lb})$ ，旅客占用月台之時間  $t_{bc}$  最多為  $T_1 - a_{lb}$ 。在旅客之進入系統時間與上車時間均為已知下，令步行餘裕時間  $\Delta T_1 = T_1 - (a_{lb} + b_{lb})$ ，則  $\Delta T_1$  可能分配到  $t_a$ 、 $t_b$  與  $t_c$  之中。假設  $\Delta T_1$  分配到  $t_a$  上限的比例為  $r_1$ ，且  $t_a$  不得大於  $a_{ub}$ ， $\Delta T_1$  分配到  $t_b$  上限的比例為  $1 - r_1$ ，且  $t_b$  不得大於  $b_{ub}$ ，則  $t_a$ 、 $t_b$  與  $t_c$  之計算如式(5)所示，式中符號  $\text{Rand}[LB, UB]$  表示自  $LB$  與  $UB$  的範圍之中，隨機取得一值（包含邊界值  $LB$  與  $UB$ ），且  $UB$  必須大於等於  $LB$ 。而若發生旅客進入系統後以快速跑步的方式到達月台，而發生  $T_1$  過短的極端情形，使得步行餘裕時間  $\Delta T_1 < 0$ ，亦即  $T_1 < (a_{lb} + b_{lb})$ ，則  $t_a$ 、 $t_b$  與  $t_c$  採用式(6)計算。

$$\begin{cases} t_a = \text{Rand}[a_{lb}, \min(a_{ub} + r_1 \Delta T_1, a_{ub})] \\ t_b = \text{Rand}[b_{lb}, \min(b_{ub} + (1 - r_1) \Delta T_1, b_{ub})] \\ t_c = T_1 - t_a - t_b \end{cases} \quad 0 \leq r_1 \leq 1 \quad (5)$$

$$\begin{cases} t_a = a_{lb} + r_1 \Delta T \\ t_b = T_1 - t_a \\ t_c = 0 \end{cases} \quad 0 \leq r_1 \leq 1 \quad (6)$$

## 2. 轉乘旅客

轉乘旅客自原路線下車至搭上轉乘路線列車的這段時間可分為在原路線月台層之步行時間、在穿堂層之步行時間、在轉乘路線月台層之步行時間與候車時間四段，前三項之

總和為旅客於轉乘站之總步行時間，第一項為占用原路線月台時間，最後兩項為占用轉乘路線月台時間，如圖 15 所示。

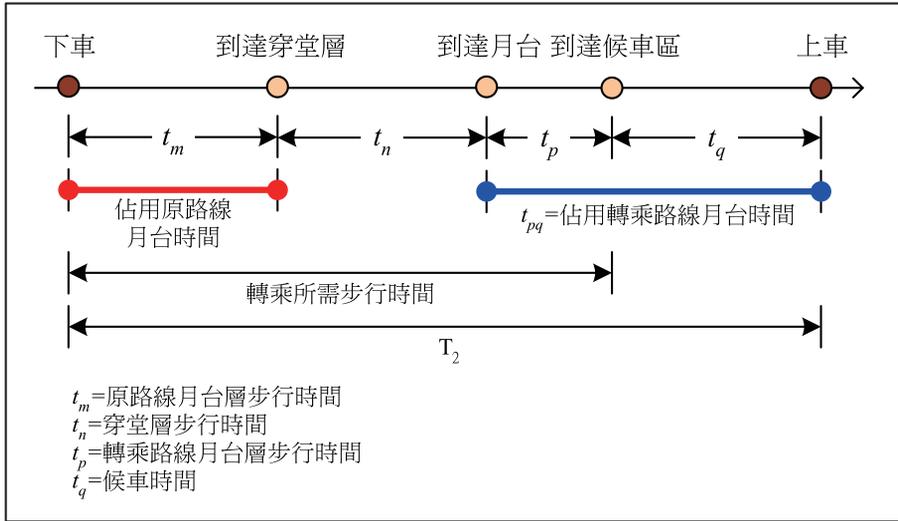


圖 15 轉乘旅客停留時間分配示意圖

假設一旅客自下車至到達轉乘月台後上車之時間為  $T_2$ ，而「原路線月台步行時間」 $t_m$  之範圍為  $[m_{lb}, m_{ub}]$ ，「穿堂層步行時間」 $t_n$  之範圍為  $[n_{lb}, n_{ub}]$ ，「轉乘路線月台步行時間」 $t_p$  之範圍為  $[p_{lb}, p_{ub}]$ 。若旅客能順利搭上轉乘列車，則  $T_2 \geq (m_{lb} + n_{lb} + p_{lb})$ ，旅客占用原路線月台之時間  $t_m$  最多為  $m_{ub}$ ，占用轉乘路線月台之時間  $t_p$  最多為  $T_2 - (m_{lb} + n_{lb})$ 。令步行餘裕時間  $\Delta T_2 = T_2 - (m_{lb} + n_{lb} + p_{lb})$ ，則  $\Delta T_2$  可能分配到  $t_m$ 、 $t_n$ 、 $t_p$  與  $t_q$ 。假設  $\Delta T_2$  分配到  $t_m$ 、 $t_n$  與  $t_p$  的上限比例分別為  $r_{21}$ 、 $r_{22}$  與  $1 - r_{21} - r_{22}$ ，且  $t_m$ 、 $t_n$  與  $t_p$  各不大於其上限值  $m_{ub}$ 、 $n_{ub}$  與  $p_{ub}$ ，則  $t_m$ 、 $t_n$ 、 $t_p$  與  $t_q$  之計算如式(7)所示。而若發生旅客以快速跑步的方式到達轉乘路線月台，而發生  $T_2$  過短的極端情形，使得步行餘裕時間  $\Delta T_2 < 0$ ，亦即  $T_2 < (m_{lb} + n_{lb} + p_{lb})$ ，則  $t_m$ 、 $t_n$ 、 $t_p$  與  $t_q$  採式(8)計算。

$$\begin{cases}
 t_m = \text{Rand} \left[ m_{lb}, \min \left( m_{lb} + r_{21} \Delta T_2, m_{ub} \right) \right] \\
 t_n = \text{Rand} \left[ n_{lb}, \min \left( n_{lb} + r_{22} \Delta T_2, n_{ub} \right) \right] \\
 t_p = \text{Rand} \left[ p_{lb}, \min \left( p_{lb} + (1 - r_{21} - r_{22}) \Delta T_2, p_{ub} \right) \right] \\
 t_q = T_2 - t_m - t_n - t_p
 \end{cases}
 \quad 0 \leq (r_{21} + r_{22}) \leq 1 \quad (7)$$

$$\begin{cases} t_m = m_{lb} + r_{21}\Delta T_2 \\ t_n = n_{lb} + r_{22}\Delta T_2 \\ t_p = p_{lb} + (1 - r_{21} - r_{22})\Delta T_2 \\ t_q = 0 \end{cases} \quad 0 \leq (r_{21} + r_{22}) \leq 1 \quad (8)$$

### 3. 離站旅客

旅客自下車直至離開系統的這段時間可分為在月台層之步行時間與在穿堂層之步行時間兩段，兩項之和為旅客於終點站之總步行時間，而其中第一項為占用月台時間，如圖 16 所示。

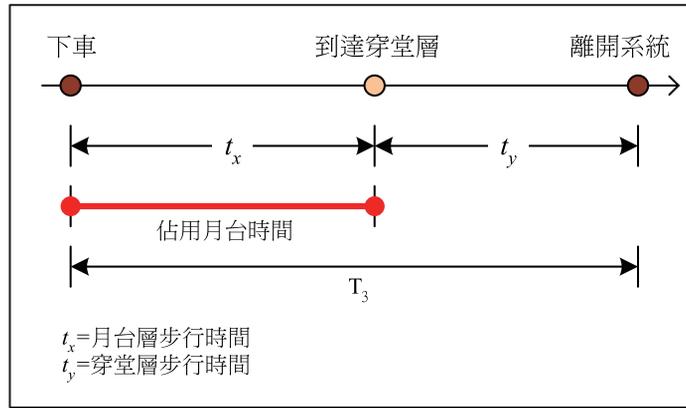


圖 16 離站旅客停留時間分配示意圖

假設一旅客由下車至離開系統之總時間為  $T_3$ ，而「月台層步行時間」 $t_x$  之範圍為  $[x_{lb}, x_{ub}]$ ，「穿堂層步行時間」 $t_y$  之範圍為  $[y_{lb}, y_{ub}]$ 。若旅客以合理的步行速度行走，則  $T_3 \geq (x_{lb} + y_{lb})$ ，旅客占用月台之時間  $t_x$  最多為  $x_{ub}$ 。在旅客之下車時間與離開系統時間均為已知下，令步行餘裕時間  $\Delta T_3 = T_3 - (x_{lb} + y_{lb})$ ，則  $\Delta T_3$  可能分配到  $t_x$  與  $t_y$ 。假設  $\Delta T_3$  分配到  $t_x$  的上限比例分別為  $r_3$ ，且  $t_x$  不得大於  $x_{ub}$ ，則  $t_x$  與  $t_y$  之計算如式(9)所示。而若發生旅客以快速跑步的方式離開系統，而發生  $T_3$  過短的極端情形，使得步行餘裕時間  $\Delta T_3 < 0$ ，亦即  $T_3 < (x_{lb} + y_{lb})$ ，則  $t_x$  與  $t_y$  採式(10)計算。

$$\begin{cases} t_x = \text{Rand} [x_{lb}, \min(x_{lb} + r_3\Delta T_3, x_{ub})] \\ t_y = T_3 - t_x \end{cases} \quad 0 \leq r_3 \leq 1 \quad (9)$$

$$\begin{cases} t_x = x_{lb} + r_3\Delta T_3 \\ t_y = T_3 - t_x \end{cases} \quad 0 \leq r_3 \leq 1 \quad (10)$$

## 四、案例分析

為驗證模擬模式之演算能力與效率，本研究自行以 C#語言開發在 Windows.NET 平台上執行之應用程式進行模擬。本研究開發之演算核心包含「模擬資料管理」、「旅客流模擬」與「模擬結果分析」3 個主模組。「模擬資料管理」模組主要處理模擬參數之編輯與管理，以及營運資料之擷取轉換等作業；「旅客流模擬」模組則是處理所有旅客之路徑選擇與列車指派工作；而「模擬結果分析」模組則是處理指標的計算與圖形之輸出。演算核心之模組架構如圖 17 所示。測試對象為高雄捷運系統，採用其路網資料、票證資料與時刻表資料作為模式的輸入資料，模式之測試環境為個人電腦，彙整如表 2 所示。

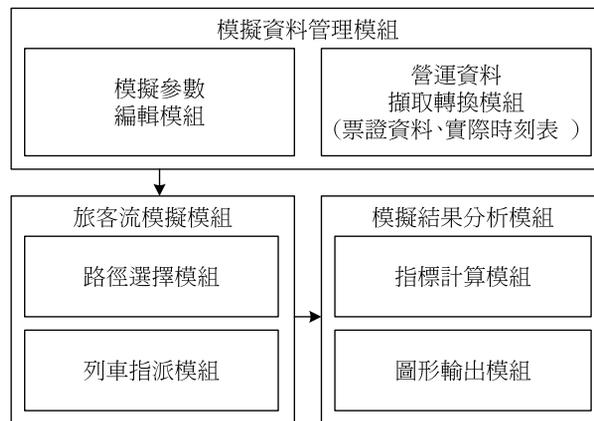


圖 17 模擬模式演算核心模組架構圖

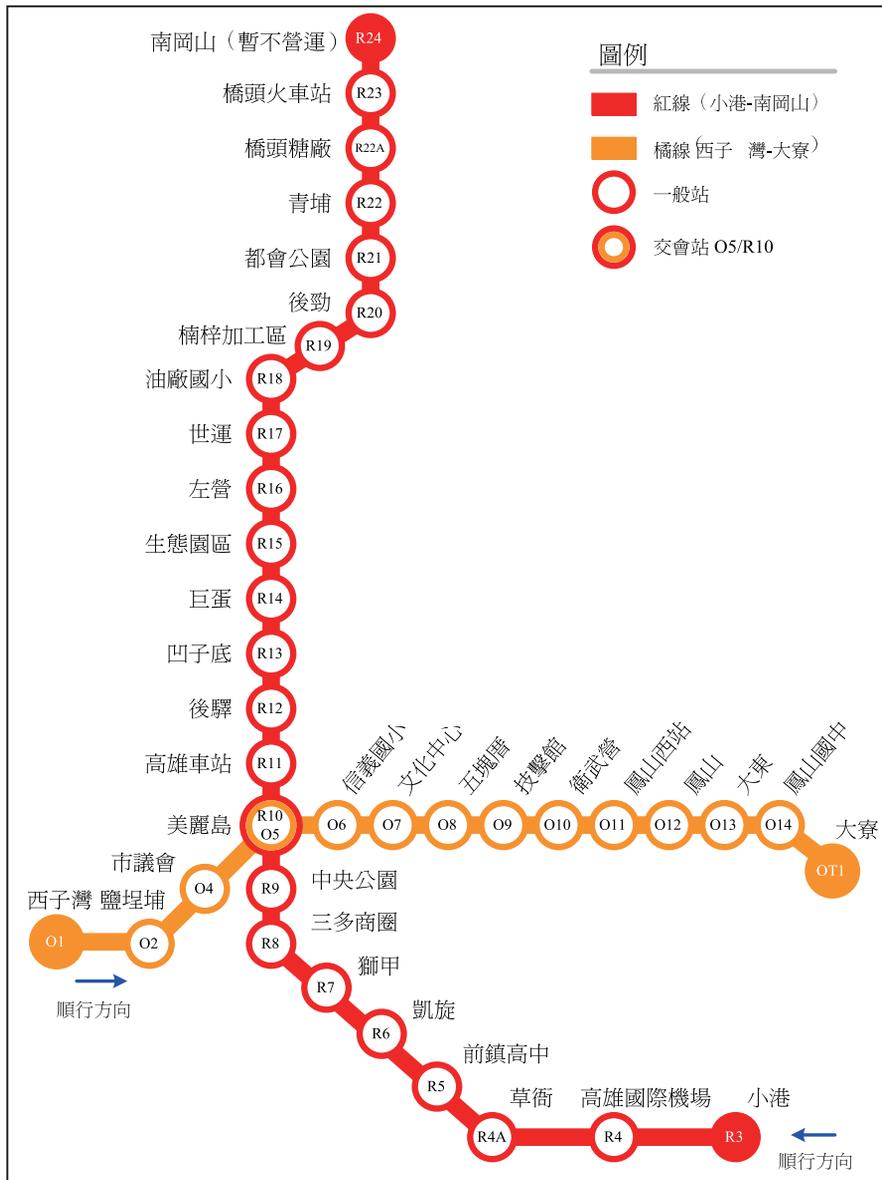
表 2 測試環境彙整表

序號	項目	內容
1	CPU	Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8400 @ 3.00GHz
2	記憶體	1.96GB
3	作業系統	Microsoft Windows XP Professional Version 2002 Service Pack 3
4	資料庫	Microsoft SQL Server 2008

### 4.1 案例說明

本研究以高雄捷運為對象進行案例分析，高雄捷運之路網為十字型路網，由紅線與橘

線組成，交會於美麗島站（車站代號 O5/R10）。紅線為南北向路線，北起橋頭火車站（車站代號 R23），南至小港（車站代號 R3），全長約 26 公里，共停靠 23 個車站；橘線為東西向路線，東起大寮（車站代號 OT1），西至西子灣（車站代號 O1），全長約 13 公里，共停靠 14 個車站<sup>[24]</sup>。高雄捷運路網如圖 18 所示，圖中箭號標示方向為模擬時設定之列車順行方向。



資料來源：參考文獻[24]，本研究繪製。

圖 18 高雄捷運路網圖

### 1. 列車容量

高雄捷運之列車容量紅線與橘線相同，在一般狀況下包含 126 座位與 629 立位，共 755 乘位。

### 2. 步行時間參數

模擬所需之步行時間參數各站皆採用相同的設定值，彙整如表 3 所示，其中，第 5 項設定僅適用於美麗島站。由於本研究所建立的模式為泛用模式，每個車站均可個別設定參數，未來營運單位可根據實際車站配置調查與校估，以調整步行參數設定值，此處僅為案例分析的範例。

表 3 步行時間參數彙整表

序號	項目	步行時間範圍 (秒)	
		上限	下限
1	進入系統→到達月台	30	15
2	月台步行區→月台候車區	10	5
3	(下車後)月台步行區→穿堂層	40	20
4	穿堂層→離開系統	15	5
5	穿堂層→到達轉乘月台	90	45

### 3. 旅客停留時間分配參數

分配旅客於各站之停留時間之比例參數彙整如表 4 所示，其中第 3、4 項設定僅適用於美麗島站。分配參數為式(5)、(7)、(9)中估算各區域步行時間時，進行步行餘裕時間分配。目的在於將旅客於車站內的步行餘裕時間分配到各步行區域中，使該旅客於各步行區域的步行時間能盡量介於最大步行時間與最小步行時間之間。本研究之步行時間計算通式為 (最小步行時間) + (步行餘裕時間之分配量)，並以最大步行時間為上限，故若比例參數設定不當，則會有某區域之步行時間總是達到最大步行時間的情形發生。一般以測試的方式觀察分配效果的好壞來調整比例值。

表 4 旅客停留時間分配比例參數彙整表

序號	參數項目	參數值
1	$r_1$	0.5
2	$r_3$	0.5
3	$r_{21}$	0.33
4	$r_{22}$	0.33

### 4. 票證資料

本研究採用高雄捷運 2009/07/20 之實際票證資料做為模式之輸入，經配對後，共

有 135,460 筆。旅客進入捷運系統之分時段統計如圖 19 所示，而全日之進站旅客數統計如圖 20 所示。



圖 19 高雄捷運 2009/07/20 票證資料時間－旅客數分布圖

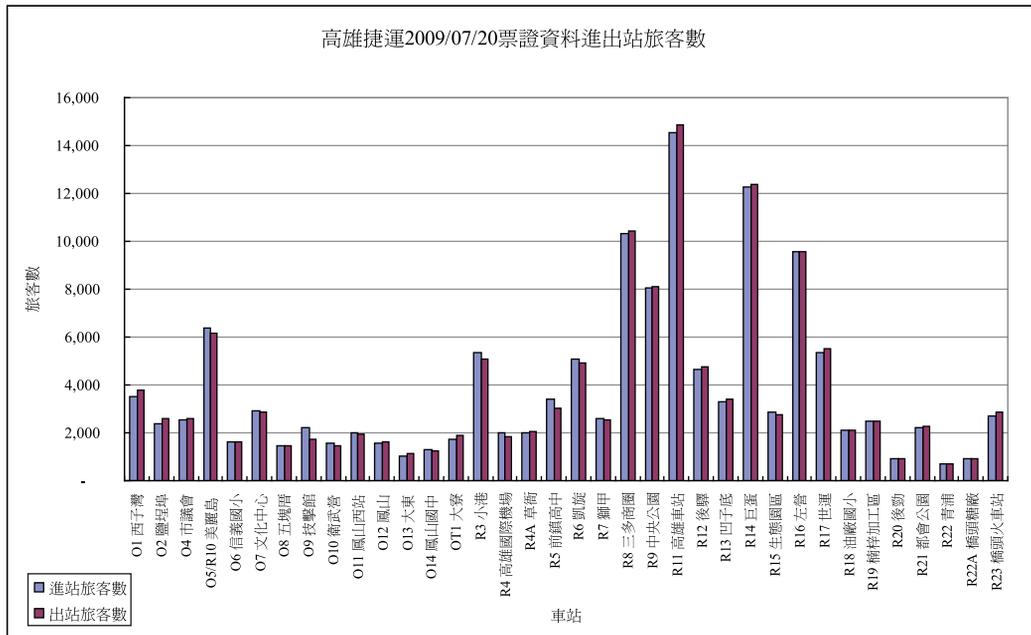


圖 20 高雄捷運 2009/07/20 票證資料車站－旅客數分布圖

### 5. 時刻表資料

由於本研究的目的在於使用有限的資料，重建該時空下捷運系統內的旅客搭乘行為，故時刻表亦選用 2009/07/20 的實際列車到開資料為模式之輸入，服務列車總數為 582 列。高雄捷運系統之尖、離峰時段與班距整理如表 5 所示。

表 5 高雄捷運尖峰時段與列車班距彙整表

營運日	時段	時段說明	列車班距
週一 ~ 週五	尖峰時段	06:30 ~ 08:30 16:30 ~ 18:30	最大 6 分鐘
	離峰時段	尖峰時段以外之時段	最大 10 分鐘
週末與例假日	尖峰時段	—	—
	離峰時段	全日	最大 10 分鐘

## 4.2 結果整理與說明

本研究採用 2009/07/20 之票證資料與列車實際時刻表進行測試，有效旅客數為 135,460 人，列車總數為 582 列，演算時間為 46.56 秒鐘，指派成功之旅客共 135,177 人，指派完成率為 99.79%。完成指派之旅客中有 100,415 人僅有一種搭乘列車或列車組合可選擇，占指派成功旅客數之 74.28%，在票證資料與列車時刻資訊已知的條件之下，旅客可能搭乘的列車以及路徑其實相當有限，再考量了旅客之合理步行時間，故可合理推論模式的模擬結果與實際結果之差異不大。

捷運系統與旅客流有關的服務指標包括列車乘載率、站內旅客數、旅客平均轉乘時間、旅客平均停留時間、候車時間，以及站間旅客流量，以下簡述每項指標的用途以及模擬計算結果：

### 1. 列車乘載分析

列車乘載率可用於呈現列車之擁擠程度，反應乘車的舒適度。乘載率包含全日平均列車乘載率及單一列車平均乘載率。本測試例之全日平均列車乘載率為 11.44%，計算公式如式(11)所示。以紅線 130311 次由橋頭火車站開往小港列車為例，其單一列車之平均乘載率為 19.12%，計算公式如式(21)所示，各區間乘載量如圖 21 所示。

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_k \sum_l p_{k,l} d_{k,l}}{\sum_k C_{tk} L_{nk}} = \frac{\sum_k \sum_l p_{k,l} d_{k,l}}{\sum_k C_{tk} L_{nk}} \quad (11)$$

$$\bar{\alpha}_k = \frac{\sum_l p_{k,l} d_{k,l}}{C_{tk} L_{nk}} = \frac{\sum_i p_{k,i} d_{k,i}}{C_{tk} L_{nk}} \quad (12)$$

式中： $\bar{\alpha}$  = 全日列車平均乘載率

$\bar{\alpha}_k$  = 列車  $k$  之平均乘載率

$p_{k,l}$  = 列車  $k$  於路段  $l$  之旅客量 (prs)

$d_{k,l}$  = 列車  $k$  於路段  $l$  之行駛長度 (km)

$p_{k,i}$  = 列車  $k$  之第  $i$  位旅客

$d_{k,i}$  = 列車  $k$  之第  $i$  位旅客之搭乘距離 (km)

$C_{tk}$  = 列車  $k$  之乘位容量 (sps/TU)

$L_{nk}$  = 列車  $k$  之營運路線長度 (km)

紅線，130311車次，橋頭火車站 小港 各站間旅客數量圖  
列車容量755人，平均乘載率：19.12%

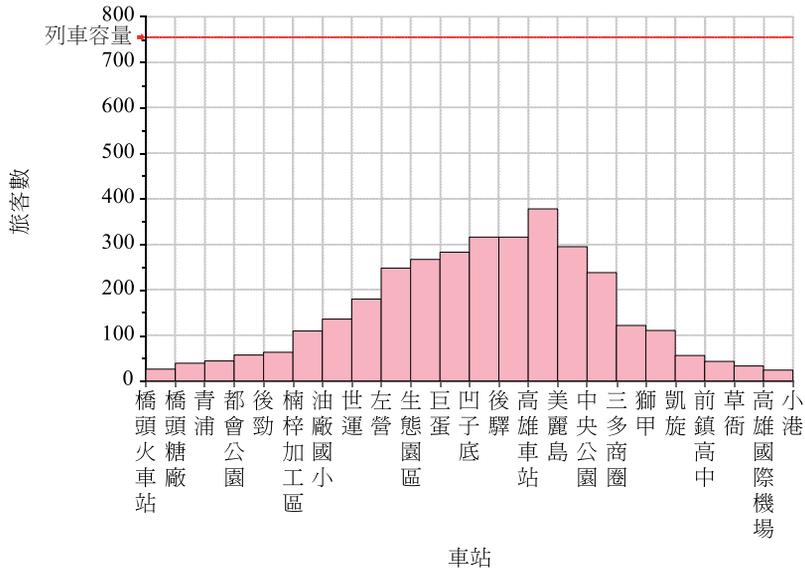
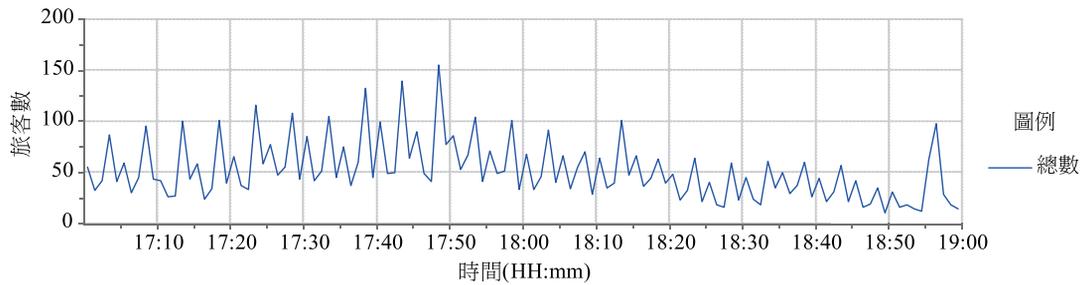


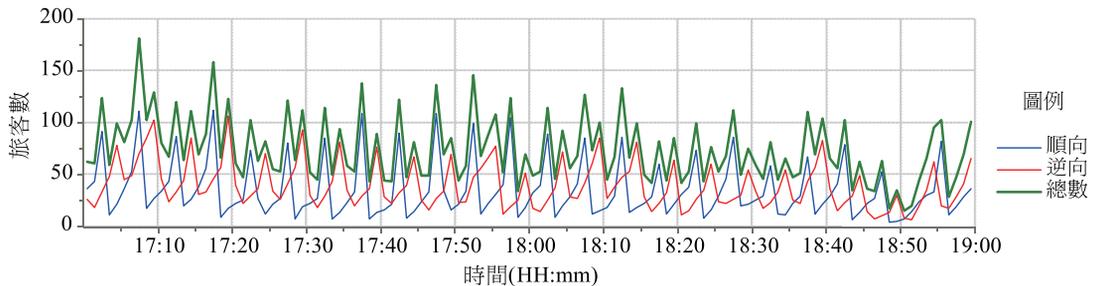
圖 21 單一列車乘載旅客數統計圖

## 2. 車站內旅客數分析

透過車站內各時間點旅客數量之描繪，可得知車站內旅客數量隨時間之變化情形，進而評估車站內各區域旅客的擁擠程度。本研究旅客在車站付費區內各區域之步行時間，是於列車指派完成後，根據使用者所設定的步行時間範圍與時間分配比例計算而得。以高雄車站 17:00~19:00 間為例，穿堂層的旅客數變化與月台層之旅客數變化分別如圖 22(a)與(b)所示。由圖 22 可知，月台層與穿堂層之旅客數量變化皆受到列車到開後旅客上、下車的影響。



(a) 穿堂層旅客數量變化圖



(b) 月台層旅客數量變化圖

圖 22 車站內旅客數分析圖

### 3. 轉乘旅客分析

藉由轉乘旅客之數量與平均轉乘時間，可了解系統內旅客之轉乘需求與所花費的時間，以做為時刻表的安排上之參考。本案例之全日轉乘旅客數共 26,536 人，約占全日指派成功旅客數 (135,177 人) 之 20%，各轉乘方向之旅客數與平均轉乘時間如表所示。轉乘時間表示自原路線下車至轉乘路線上車間的時間，而表中橘線順向表示由西子灣 (O1) 往大寮 (OT1) 之行駛方向，紅線順向表示由小港 (R3) 往橋頭火車站 (R23) 之行駛方向。

表 6 轉乘旅客數與轉乘時間彙整表

轉乘方向	旅客數	平均轉乘時間
橘線順向轉紅線順向	3,151	6 分 38 秒
橘線順向轉紅線逆向	1,526	7 分 35 秒
橘線逆向轉紅線順向	5,684	5 分 37 秒
橘線逆向轉紅線逆向	2,919	6 分 56 秒
紅線順向轉橘線順向	2,810	7 分 34 秒
紅線順向轉橘線逆向	1,531	6 分 31 秒
紅線逆向轉橘線順向	5,487	5 分 34 秒
紅線逆向轉紅線逆向	3,428	6 分 2 秒
總 和	26,536	6 分 18 秒

#### 4. 旅客停留時間分析

旅客於其旅程中各站之各區域之停留時間可做為時刻表安排或調整上之參考。本研究之旅客候車時間同樣是於完成旅客列車指派後，將旅客於各站之停留時間，根據使用者所設定的步行時間範圍與時間分配比例計算而得。旅客自進入系統至離開系統之停留時間分為起點站、轉乘站與終點站 3 部分討論。旅客於車站內的停留時間，可分為步行時間與候車時間兩部分，而步行時間又可細分為於穿堂層、月台層步行區之時間。本案例之全日旅客停留時間彙整如表 7 所示。

表 7 旅客停留時間彙整表

項目		旅客數	平均停留時間
起點站	穿堂層步行時間 進入系統→到達月台步行區	135,177	22 秒
	月台步行區步行時間 到達月台步行區→候車區		7 秒
	候車區候車時間 到達候車區→搭上列車		4 分 39 秒
轉乘站	原路線月台步行區步行時間 原路線下車→到達穿堂層	26,536	29 秒
	穿堂層步行時間 到達穿堂層→到達轉乘路線之月台步行區		1 分 5 秒
	轉乘路線月台步行區步行時間 到達轉乘路線月台步行區→轉乘路線候車區		7 秒
	轉乘路線候車區候車時間 到達候車區→搭上轉乘路線列車		4 分 37 秒
終點站	月台步行區步行時間 下車→到達穿堂層	135,177	28 秒
	穿堂層步行時間 到達穿堂層→離開系統		1 分 53 秒

#### 5. 候車時間分析

候車時間表示旅客到達候車區後須等候多久才能搭上列車，候車時間越短表示系統對旅客提供的服務越好，此項指標亦可做為時刻表安排或調整上之參考。包含平均候車時間與單一車站單一服務路線單一行車方向之平均候車時間兩種。本案例之平均候車時間為 4.64 分鐘，若以高雄車站 17:00~19:00 間為例，其順向列車旅客與逆向列車旅客之平均候車時間分別如圖 23(a)與(b)所示。圖 23 中每個平均候車時間點在列車出發時計算，為 (於該站上車旅客之總候車時間) ÷ (於該站上車之旅客數)。檢視時段 17:00~19:00 約在下午尖峰時段範圍內，而順逆行旅客之候車時間約 3 分鐘左右 (為班距 6 分鐘之半)，此模擬結果為合理。

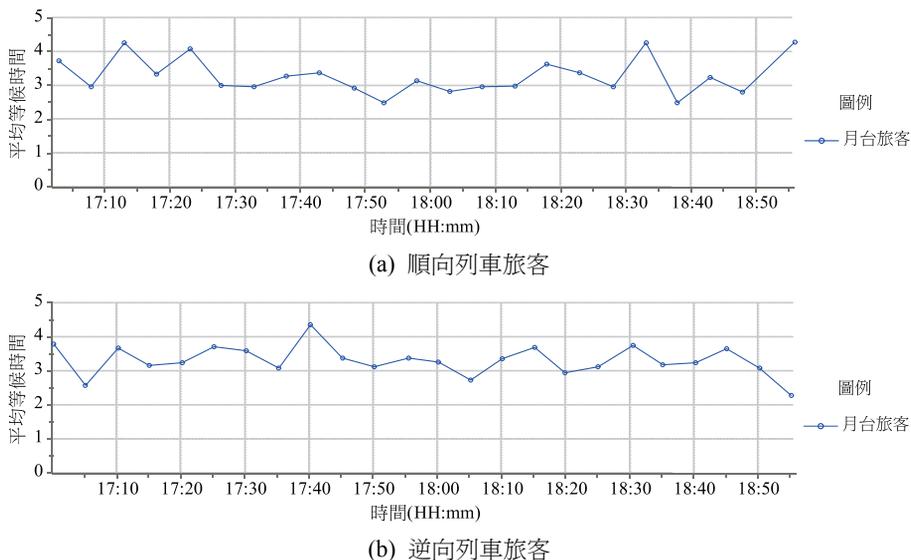


圖 23 車站內旅客平均候車時間變化圖

### 6. 單一區間旅客流量分析

單一區間旅客流量分析可檢視各區間於各時段之流量，有助於找出該區間的尖峰時段。車站間之旅客流量為列車通過該站間之統計結果，而列車通過該站間之時間以列車之出發時間統計。以紅線單一區間「美麗島—高雄車站」為例，於 17:00~19:00 間之旅客流量變化如圖 24 所示，由圖 24 可知在下午尖峰時段，美麗島往高雄車站方向之旅客流量較大，其中又以 17:30~17:45 間為最大。

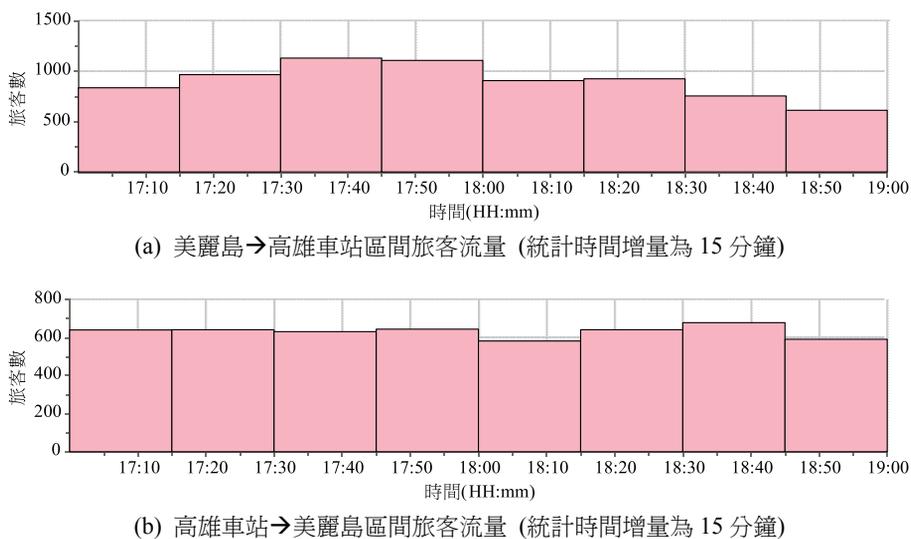
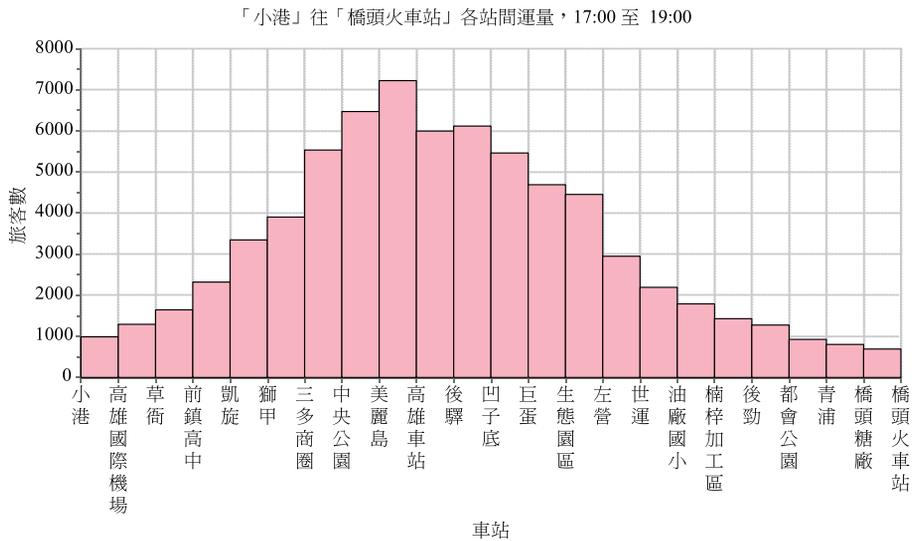


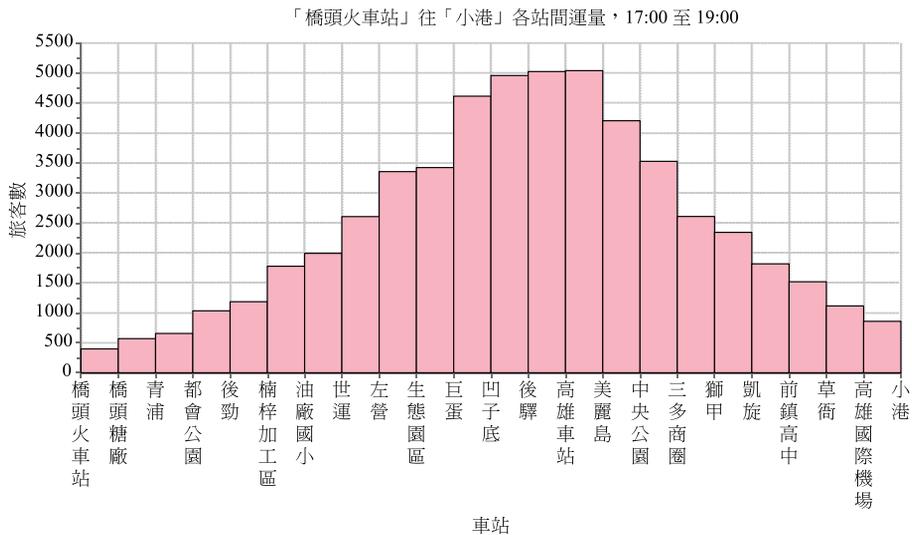
圖 24 單一區間旅客流量分析圖

## 7. 連續區間旅客流量分析

連續區間旅客流量分析可找出某時段路線的最大乘載區間以及各區間的旅客流量。旅客通過各區間之計算同樣以列車之出發時間統計。以紅線「小港－橋頭火車站」區間之 17:00~19:00 間為例，該時段內各區間之累積旅客流量變化如圖 25 所示。由圖 25 可知，於該時段內，以小港往橋頭火車站方向之旅客流量較大，且都以美麗島－高雄車站為最高流量之區間。



(a) 小港→橋頭火車站旅客流量



(b) 橋頭火車站→小港旅客流量

圖 25 連續區間旅客流量分析圖

## 8. 分時段連續區間旅客流量分析

綜合前述第 6 與第 7 點的結果呈現方式，透過分時段連續區間旅客流量分析，可找出流量最大之區間與時段。以紅線連續區間「三多商圈－都會公園」為例，其 17:00~19:00 間隨時間改變之旅客變化 3D 圖如圖 26 所示。

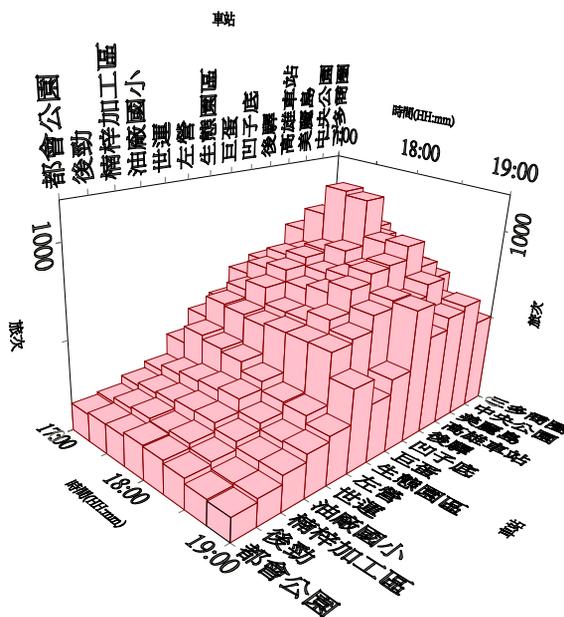


圖 26 車站間旅客流量分析圖

## 五、結論與建議

### 5.1 結論

本研究利用捷運系統自動收費系統 (automatic fare collection, AFC) 的紀錄，配合列車實際時刻表，以微觀的方式，模擬旅客在捷運系統內的移動與搭乘行為，藉以計算各項人流服務指標，以協助營運單位評估捷運系統目前的服務水準與績效，作為服務改善之參考。

本研究在處理旅客於系統內之流動行為上，分為「決定旅客乘車路徑」與「決定旅客搭乘列車」兩個步驟。在「決定旅客乘車路徑」方面，首先以圖形演算法求解出數條旅客可能搭乘的路徑，再配合「時間合理性原則」來決定旅客的乘車路徑；而在「決定旅客搭乘列車」方面，則是以旅客進入與離開系統時間為限制，先利用列車最短行駛時間過濾出候選車次或是車次組合，再考慮步行時間的合理性，來決定旅客搭乘車次。模擬的結果可

計算出列車乘載率、站內旅客數、旅客平均轉乘時間、旅客平均停留時間、候車時間，以及列車行駛區間之旅客流量等各項人流服務指標，經案例分析可知，本研究所提出之模式具有良好的演算效率，確實可協助營運單位了解系統的營運績效。

## 5.2 建議

在捷運系統內，旅客自進入系統至離開系統，除搭乘捷運列車時由列車將其由一車站移動至另一車站外，其餘移動皆需靠旅客本身之步行完成。本研究在車站付費區內穿堂層與月台層所採用之步行時間估計方式，由使用者所設定之步行時間上下限間，以隨機原則分配，而實際上，旅客於付費區內之步行時間，除了與旅客本身的步行能力有關外，亦受到旅客數量之影響，未來可針對步行時間，做更進一步的探討與模擬。

此外，模擬的結果是否具參考價值，和模式之參數設定相關，建議未來在實際應用時，先對模式之各項參數進行校估。使用較為符合現況之參數值進行模擬，才能表現出較為符合實際狀況之旅客搭乘行為，而使模擬之結果具有較高的參考性。

## 參考文獻

1. Halcrow Group, "Who we are", <http://www.halcrow.com/>, 2012.
2. Clifford, P., "The Impact of Passenger Capacity Analysis on Station Design", *Computers in Railways VI*, 1998, pp. 159-165.
3. 陳耀維等，「臺北捷運土建設施之規劃與設計」，2000 捷運工程技術研討會，高雄市政府捷運工程局，民國 89 年。
4. Kittelson & Associates, Inc., *Transit Capacity and Quality of Service Manual*, 2nd Edition, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003.
5. 林廉凱，「捷運車站乘客動線人流模式與干擾量度之研究」，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，民國 91 年。
6. 簡聰裕，「捷運系統運轉整理之研究」，成功大學交通管理學系碩士論文，民國 89 年。
7. 鍾志成等，「軌道容量研究－臺鐵系統容量模式之建構分析（二）」，交通部運輸研究所委託研究，民國 95 年。
8. Myojo, S., "Daily Estimation of Passenger Flow in Large and Complicated Urban Railway Network", *Proceedings of the 7th World Congress on Railway Research, WCRR*, 2006.
9. Myojo, S., "Method to Estimate Passenger Flow Using Stored Ticket Gate Data", *Quarterly Report of RTRI*, Vol. 47, No. 4, 2006, pp.178-181.
10. Hirai, C. and Tomii, N., "An Estimation Method of the Number of On-Board Passengers Applicable to Evaluation of Traffic Rescheduling Plans", *Quarterly Report of RTRI*, Vol. 42, No. 4, 2001, pp.195-200.
11. Nagasaki, Y., Asuka, M., and Koyama, K., "A Fast Method for Estimating Railway Passenger

- Flow”, *Computers in Railways X*, 2006, pp. 179-187.
12. Zhou, F., et al., *Passenger Flow Assignment Model for Urban Rail Transit Based on Entry and Exit Time Constraints*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2012.
  13. 劉家焜、鄭銘興，「臺北捷運運轉計畫模擬系統」，94年軌道工程學會研討會，中華民國軌道工程學會，民國94年。
  14. 中華徵信所企業股份有限公司，「臺北捷運潛在顧客之行銷策略研究案期末報告」，臺北大眾捷運股份有限公司委託研究，民國96年。
  15. 汪進財、劉得昌，「臺灣地區航空市場特性與發展分析」，*運輸計劃季刊*，第28卷，第3期，民國88年，頁451-484。
  16. Crisalli, U., “User's Behaviour Simulation of Intercity Rail Service Choices”, *Simulation Practice and Theory*, Vol. 7, 1999, pp. 233-249.
  17. Barry, J. J., et al., “Origin and Destination Estimation in New York City Using Automated Fare System Data”, Proceedings of the 2001 TRB Planning Applications Conference, Corpus Christi, Texas, 2001.
  18. Zhao, J. and Rahbee, A., “Estimating a Rail Passenger Trip Origin-Destination Matrix Using Automatic Data Collection Systems”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 22, Issue 5, 2007, pp. 376-387.
  19. 陳鵬輝，「城市軌道交通自動售檢票系統的現況與發展趨勢」，*城市軌道交通研究*，第12卷，第5期，民國98年，頁10-12。
  20. 徐郁雯，「反應旅客需求式大眾捷運派車策略」，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國94年。
  21. Law, A. M., *Simulation Modeling & Analysis*, Forth Edition, McFRAW Hill, New York, 2007.
  22. 謝興盛，「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」，國立成功大學交通管理學系博士論文，民國92年。
  23. Yen, J. Y., “Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network”, *Management Science*, Vol. 17, No. 11, 1971, pp. 712-716.
  24. 高雄捷運公司，「乘車指南」，<http://www.krtco.com.tw/>，民國101年。