

# 捷運系統營運路線組合設計之研究

## DESIGN OF ROUTE SERVICE PATTERN FOR MRT SYSTEM

周義華 Yi-Hwa Chou<sup>1</sup>

黃勵君 Li-Chun Huang<sup>2</sup>

(90年1月16日收稿, 90年5月29日第一次修改, 90年7月24日  
第二次修改, 91年3月25日定稿)

### 摘要

本研究係針對捷運系統興建完成後, 在不以工程改善為前提下, 藉由既有之路網軌道布設及旅運量分布情形, 運用系統化分析之方式, 以啟發式演算法構建捷運營運路線組合之設計程序, 提出基本營運路線及可行營運路線組合之捷運路網設計方法。為使經營者與使用者之權衡能達對系統整體有最佳之效益, 本研究以營運者及使用者兩方面作為評估主軸, 建立路網總評估指標, 包含營運成本、乘客等車與轉車時間成本及轉車代價, 而以系統總成本最小為目標。由設計程序所求解之各營運路線組合方案中, 評選出最適方案, 並透過敏感度分析之方式, 探討影響營運路線組合設計變數間的相互關係, 以提供決策者參考。經由民國八十九年四月間之台北捷運系統營運資料實例分析結果發現, 在相同的控制變數下, 以淡水—新店、石牌—南勢角及龍山寺—市政府站等三條之營運路線組合最佳。

關鍵詞：營運路線組合；啟發式演算法；系統總成本

1. 國立台灣大學土木工程學系(所)教授(聯絡地址為 106 台北市羅斯福路 4 段 1 號台灣大學土木工程學系)。
2. 國立台灣大學土木工程學研究所碩士。

## ABSTRACT

*This paper develops a heuristic method for the design of MRT route service pattern after referring to the MRT track's layout and the passenger OD matrix. Instead of engineering improvements, the MRT route service pattern are designed by logic procedures. Two types of routes are generated: (1) basic operation routes, (2) feasible operation routes.*

*To achieve the optimum alternative, the effects of routes service pattern design on both operators and passengers are traded off by minimizing the sum of operating costs and passengers costs. Through the case studies on April 2000, it is shown that the optimal of route service pattern for TAIPEI MRT Network are consisted with three routes:(1)Tamshui to Hsintian;(2)Shihpei to Nanshih Chiao; (3)Lungshan Temple to Taipei City Hall under the same considerations.*

**Key Words:** *Route service pattern; Heuristic algorithm; System total cost*

## 一、緒 論

一般捷運系統之路線設計，係以未興建前之預測運量分布及實質地理交通環境為基礎，進行「虛擬路網」之設計，且大多以交通分區中心、彎繞度及站距等工程面因素作為主要考量；然而，根據經驗指出，路網興建完成後，隨著經濟及都市的快速發展，旅運量及分布狀況可能與規劃時所預測者有所差異。因此，捷運系統營運路線組合之設計，有必要在軌道設備硬體架構已成形、短期間較難改變之際，就實際的旅運量分布情形重新探討，如此才能符合營運者之經營效率及使用者之需求。

再者，目前國內捷運系統中有關營運路線組合之設計，大多憑規劃人員之經驗判斷而得，所設計之營運路線組合並未同時兼顧使用者及營運者的要求，且缺乏明確的評估準則，以證明所設計之營運路線組合為最適的方案，因此亟需研究一套數量化及適用之設計方法及評估準則。

本研究主要針對影響捷運系統營運路線組合設計之因子加以分析，研擬營運路線之設計準則與評估指標，並經由系統程序、邏輯判斷之方式來設計營運路線組合，透過系統總成本最小之路網總評估指標，選擇最適之方案以供決策者參考。

## 二、文獻回顧

### 2.1 路網設計方法

捷運系統營運路線組合之設計，從國內的捷運系統路網規劃報告及相關文獻<sup>[1]</sup>中可看出，大多偏向於捷運路網尚未興建前之設計，對於路網已興建完成後之營運路線組合設計則較少提及。以台北捷運之營運路線組合設計<sup>[2,3]</sup>為例，係以預測運量為依據，並就參與者本身之專業知識與經驗尋找出數種可能之營運路線組合後，相互比較以選取承載率最大之方案，作為最佳的營運路線組合。因此所評定之路線組合方案係以營運者角度為考量，對於營運路線間之旅客轉車成本並未列入。

根據專家訪談得知，當初台北捷運系統之英國總顧問所策劃之營運路線組合係按每一條營運路線長度較一致，亦即考慮每一位司機員之值勤時間較一致、平均之方式，作為主要考量因素以排定營運路線組合。而營運路線長度與司機員值勤時間，與列車行駛速率有著密切之關係，從先驗知識判斷可知，在其他條件不變之情況下，列車行駛速率愈高，則營運路線長度可設計得愈長，但如何決定最適營運路線長度，則缺少量化之數據以資佐證。而張學孔等人<sup>[4]</sup>在探討捷運營運路線長度時，係以數學規劃方法來構建捷運系統服務路線長度最佳化模式，模式中雖然加入許多假設，使得實際應用上有所限制，但為國內較早針對捷運系統營運後之服務路線長度來構建最佳化模式。然而對於整體捷運路網形成後之營運路線組合設計並未提及。

香港地鐵營運資料年報<sup>[5]</sup>中提出，1982年間所設計之營運路線組合曾因原設計支線(太子站接駁往荃灣)較主線(觀塘—中環)的旅運量高，且二條營運路線僅提供一個轉車站(太子站)，因而產生的轉車站人數過多，使得該轉車站容量無法負荷，亦造成營運的無效率，故而改變原設計之營運路線組合，而以中環至荃灣及觀塘至油麻地之二條新的營運路線組合來服務乘客。從香港的營運經驗可看出，旅運量大的路線宜設計為主要直通路線，而不應該設計成類似支線的轉運路線；且營運路線間應儘可能提供二個以上的轉車站設計來分散轉車旅客量；至於兩直線型路線之間，則可藉由營運路線重疊區段之車站作為轉車站。然而年報中較少提及數量化的營運路線組合之設計方法及評估準則。

周義華、林祥生<sup>[6]</sup>對於公車路網之設計方法，採用啟發式演算法，透過系統程序化之演算作業方式，發展出基本路線、直捷路線及環狀路線等三種設計方法，而周義華、邱榮川<sup>[7]</sup>以上述文獻之設計方法為主，配合捷運系統並將道路容量限制及轉車旅次之處理列入考慮，使得公車服務路線之設計較為完善且符合實用性。本研究為使所

求之解能具實際應用性，因此採以啟發式演算之方式，作為捷運路網營運路線設計之方法。

## 2.2 路線設計之相關服務因子

### 1. 時間價值

林益民<sup>[8]</sup>對於時間成本的計算上，認為社會與旅次需求者對時間的價值考慮層面並不同，就社會角度而言，時間價值設定的考慮因素著重在該旅次花費在旅行時間對社會總生產值的損失，因此時間價值不因不同運具而不同。Small<sup>[9]</sup>整理相關研究後提出，每小時之時間價值約為時薪之半，且車外時間價值為車內時間價值的3倍。黃俐嘉<sup>[10]</sup>在進行公車的路網績效評估研究指出，車內、步行、等車、轉車時間價值比例為1:2:2:6時，最能反映台北都會區之現況。邱奕明<sup>[11]</sup>則以黃俐嘉之研究為基礎，設定等車時間價值為200元/小時。

### 2. 班距與等車時間之關係

Welding<sup>[12]</sup>在研究中指出旅客在均勻到達的狀況下，乘客平均等車時間與班距的期望值及班距變異數之關係如(1)式所示：

$$E(W) = 1/2 \times E(H) + [V(H)/2E(H)] \quad (1)$$

式中， $E(W)$ ：平均等車時間；

$E(H)$ ：班距期望值；

$V(H)$ ：班距變異數。

Jolliffe 與 Hutchinson<sup>[13]</sup>則認為當班距低於一特定門檻值時，旅客到達率可視為均勻分布。而多數研究亦認為當  $V(H) = 0$  之充分條件成立時，即若旅客為均勻到達且班距固定具規則性時，等車時間的期望值約為平均班距的一半<sup>[14]</sup>。

### 3. 轉車成本

轉車成本一般常透過轉車次數來計算。林國顯<sup>[15]</sup>對於轉車成本的處理，係以固定的值再乘以轉車次數而得，因林君認為都市中的旅次長度差異較小，故而採以固定值計算，即轉車成本不因旅次長度的差異而變動。周義華、游政霖<sup>[16]</sup>則認為轉車成本與總旅行時間長度應成一反向變動的關係，因而在城際運輸轉車成本的計算上，修正林君的方法，採兩階段固定值設定法，即依旅行距離的長短，區分兩種不同的轉車成本設定值。

### 三、營運路線之特性分析

#### 3.1 列車折返特性

一般而言，捷運路網之列車折返設施，依其功能大致可分為單一橫渡線、複式橫渡線、剪式橫渡線及袋狀儲車軌等四種型式，如圖 1 所示。

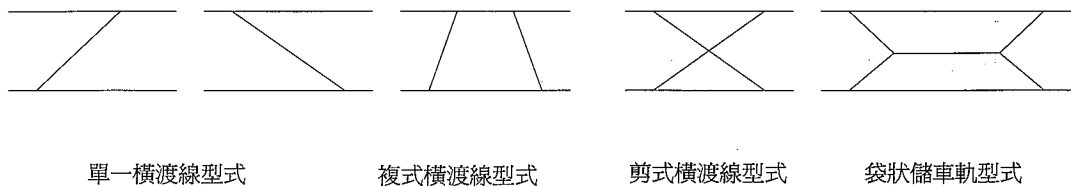


圖 1 捷運系統橫渡線之型式

而列車之折返，可分為於終端站折返與於中間站或交會站之折返。又搭配不同的站台型式(島式、側式及混合式站台)及橫渡線(單一橫渡線、複式橫渡線、剪式橫渡線及袋狀儲車軌)對列車折返之特性亦有所不同，一般可從系統安全性、折返作業之效率性及旅客方便性等三方面來加以說明，分述如下：

就系統安全性而言，中間站或交會站之列車折返，無論是何種型式之站台，由於列車在單一橫渡線、剪式橫渡線及複式橫渡線進行折返時，勢必影響到另一方向列車運行，因此，應以具有儲車功能之袋狀儲車軌作為考量，如圖 2 所示。而終端站因本身具有儲車之功能，故任何型式橫渡線之列車折返均應被考量。

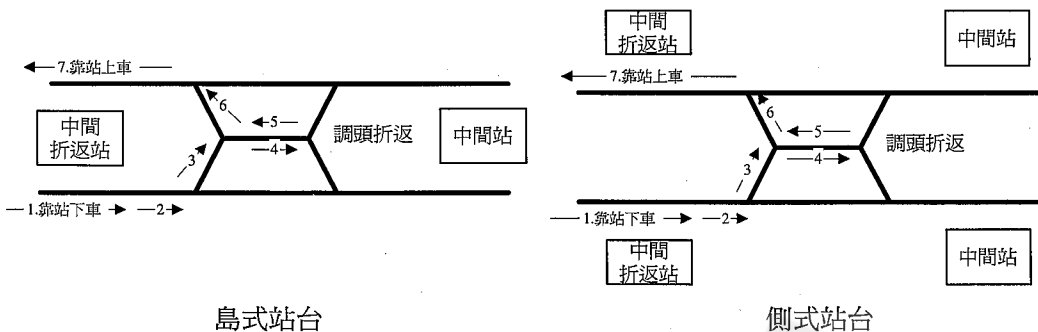


圖 2 中間站或交會站之列車折返運行方式

就折返作業之效率性而言，單一橫渡線由於發生故障時，不能像剪式或複式橫渡

線，可緊急利用另一條橫渡線作列車折返，其調度彈性較低。袋狀儲車軌之折返作業所需時間較長，且設置所需費用亦較高，故除非是有遠期延長捷運路線之構想，一般終端站較少採用此種布設型式。剪式或複式橫渡線則以設置在島式終端站前方較後方為佳，因其列車僅需停靠站台一次，所需折返作業時間較短，且無需執行清車作業，節省清車人力需求，如圖 3 所示。至於側式終端站後方無論搭配任何一種型式之橫渡線，其列車折返均須執行清車作業，且列車至少須停靠站台二次，但可明確區隔旅客上、下車動線等特性，如圖 4 所示。而側式站台所搭配之橫渡線，均未布設於終端站前方之原因，主要係由於此種布設方式將造成旅客搭乘列車之不便，如圖 5 所示。

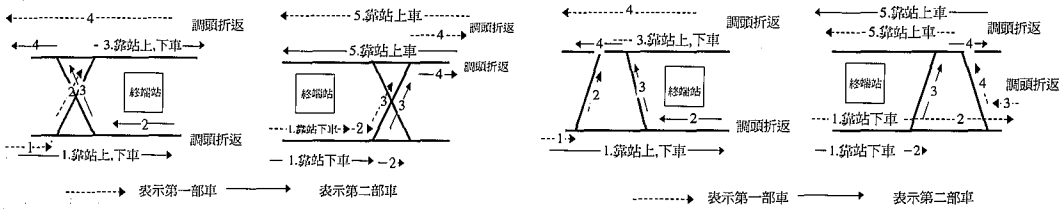


圖 3 剪式或複式橫渡線設置在島式終端站前方較後方為佳之示意

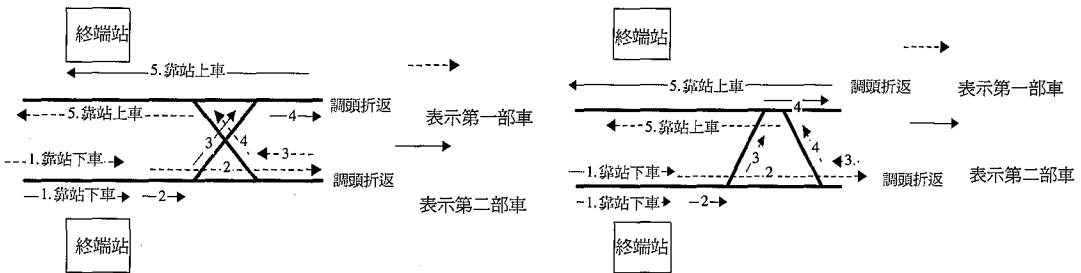


圖 4 側式終端站後方搭配剪式或複式橫渡線之列車折返方式

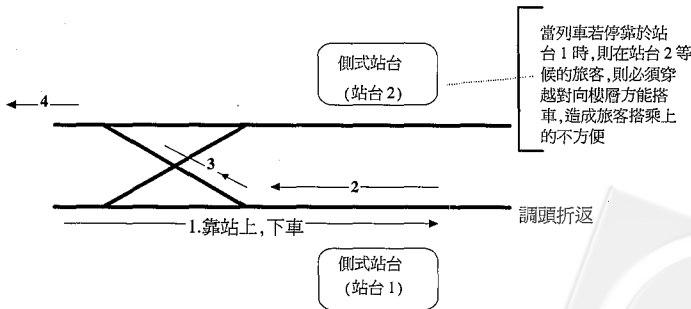


圖 5 橫渡線未布設於側式站台前方之示意圖

就旅客方便性而言，因終端站為島式站台兩側均可讓旅客同時上、下車，故方便性優於側式站台設計。

### 3.2 行車控制特性

由於營運路線設計與營運排班有著密切的關係，而適當的營運排班，有賴精確的行車控制資料，因此有必要對捷運行車控制特性與營運要素資料作一分析探討，分述如下：

#### 1. 全程往返時間

全程往返時間係指列車在一條營運路線上往返一趟所需之時間，可以從各站間行駛時間總和、各站停靠時間與端點站折返時間等資料加總後，精確地獲得營運路線的全程往返時間。然而捷運系統在規劃階段由於尚無實際營運資料，故多以全程距離除以平均營運速率，再加上迴車時間以獲得全程往返時間。本研究係探討捷運系統通車營運後之路線重新設計，故而相關行車控制資料將以實際列車行駛之數據為主。

#### 2. 端點站折返時間

端點站折返時間係指自列車行駛到達端點站後，司機員步行至另一端駕駛室準備發車之時間間隔。端點站折返時間之決定，一般係以最小停留時間為主。而最小停留時間係指當列車到達折返站後，司機員至另一端駕駛室準備發車所需之最短時間。一般又可依司機員之配置分為單人勤務、雙人勤務及雙人輪替三種。

單人勤務指司機員由一駕駛室調頭折返至另一駕駛室繼續開車所需之時間，一般最少為三分鐘；雙人勤務指兩端駕駛室均有一名駕駛員，可節省折返步行時間，但易造成人力浪費；雙人輪替指為節省司機員之折返時間，一司機員於某站上車代替原司機員駕駛，待原司機員完成折返後，再於另一車站下車。在一般行車狀況下，大多以「單人勤務」為主，「雙人勤務」及「雙人輪替」之使用時機，通常係由於列車發生故障或其他原因導致列車延誤，為使誤點之列車趕點發車所安排之權宜措施，因此，本研究將以「單人勤務」之營運模式，作為營運路線設計之主要考量。

此外，列車在實際排班時，為避免端點站折返有可能產生兩列車之衝突，對端點站之發車時間會略作調整(提早發車時間或延後列車到達時間)，使得端點站實際折返時間因而增加或減少。

#### 3. 站間行駛時間

站間行駛時間係指列車離站後到達下一車站所需之時間，主要係由列車運行效能(performance level)與列車滑行(coasting)二個參數決定<sup>[17]</sup>，分述如下：

(1) 列車運行效能：係指列車以其設計速率之某一百分比行駛所產出之效能，以台北

高運量捷運系統之列車行駛為例，可分為 PL1、PL2 與 PL3 三級，PL1 是列車以最大速率 80 KPH 行駛，PL2 及 PL3 之列車速率分別為 PL1 之 90%(72 KPH)與 80%(64 KPH)。一般在進行實際列車排班時，多以 PL2 之功能位階為主，以便於當列車於正線上之到站時間與時刻表排定時間不符時，為維持列車之正常服務水準，可針對誤點之列車作調整功能位階之彈性空間，以符合需求。

(2) 滑行：係指列車離站後到達一設定距離與超越一最低速率後，為節省能源，號誌電腦對列車站間旅行時間作加速與減速之調整。

#### 4. 各站停靠時間

係指列車進站停靠後供旅客上、下車至重新啟動之時間間隔。在端點站之停靠時間因須配合折返時間及發車時刻，故非一定值；而中間站或交會站之停靠時間則可視各站之運量大小，設定一定值之時間。

### 3.3 營運路線之形成

捷運系統內營運路線之形成，應在硬體與軟體兩方面條件均符合要求情況下，才有路線開闢之價值。在硬體方面，首先路線的兩端點必須具有供列車迴轉或折返的橫渡線設施，才能讓列車正常的來回運轉，再者，列車進行折返作業時，必須提供一迴車空間以避免影響正線之列車運行。在軟體方面，則必須要在行車控制條件許可(例如電腦號誌設計之路徑可成立等)及經濟面考量(例如最短營運路線長度等)限制下，所設計之路線才可行，並可確保業者的經營效率。

本研究以台北捷運為例，因此在硬體方面之要求上，為達列車能正常運行且不影響正線運作下，對於端點站之選擇，將採路線一端具有袋狀儲車軌之中間站(或交會站)、能提供安全之迴車空間的混合式站台及終端站作為主要考量。在軟體方面之要求上，除依電腦號誌系統之行車控制規定外，對於最短營運路線長度之限制將參考台北高運量捷運系統行車運轉作業程序<sup>[18]</sup>中之規定，以構成區間營運之路線至少須經過六個車站數為標準，當所開闢該條路線經過車站數低於六個時，為避免列車實際運行於各站服務旅客之時間遠少於頻頻進行折返作業之時間，使開闢此種路線之經濟效用降低，因此應取消此種路線設計。

## 四、營運路線組合之設計準則與數學模式

### 4.1 營運路線組合之設計準則

營運路線組合設計之目的乃為提供捷運系統之營運基礎，適當的營運路線組合能



增加營運者的經營效率及提供符合旅客需求的運輸服務，因此在設計捷運營運路線組合時，必須兼顧乘客與業者之需求。本研究對於營運路線組合之設計準則歸納如下：

1. 須滿足旅客旅運需求

捷運系統之建設主要是為了有效解決都會區的交通擁擠問題，因此對於捷運營運路線的設計，也應以提供足夠且滿足旅客需要的運輸服務為目標。故而在進行營運路線組合設計時，須符合每一車站均有列車到達且旅客能經由各營運路線之間的轉車以到達目的地之要求。

2. 符合經營者降低營運成本之需求

為使捷運系統能正常運作，經營者能永續經營，對於營運路線之設計，應至少能使營運收入足以負擔營運支出。故而對於載運量較低之營運路線，除應考量是否符合路線基本營運量之限制外，應以提供較長之服務班距，來減少經營者之成本，惟不得高於政府所制定之最低服務水準班距。

3. 營運路線長度之限制

過短的營運路線長度將使列車頻頻於端點站折返，導致大部分之列車全程往返時間，虛耗於折返作業而非服務各站旅客，因此在設計營運路線時，必須考量路線長度是否符合經濟效益。

4. 應儘可能滿足旅客之期望

符合大多數旅客之期望路線，才能吸引旅客搭乘，進而提升營運收入，因此在設計營運路線時，應儘量提供直達、少轉車之營運路線，使旅客能儘速到達目的地。系統內轉車次數之限制則可確保旅客能得到直達、少轉車之運輸服務。

5. 需求量大之營運路線應提供較高之服務水準

對於各營運路線班次數之計算，應提供該路線最大承載區間運量所需之列車數，以滿足旅客需求。

6. 路線容量之限制

捷運路線均有其容量之極限，其容量應以該路線所能排定之最小班距，作為衡量之標準。故而在營運路線組合設計時，應考慮在單位時間內同一路線上，能提供最大班次數之限制。

7. 列車運行之順暢

營運路線之設計，應以列車能順暢、正常運行之路線作為選取之條件。若所設計之路線，列車於運行之途中，必須透過折返之方式以到達另一端點站，則此一路線應予刪除。此外，過多的營運路線組合，除可能增加旅客的轉車次數外，且會影響主線列車運行的順暢，因此在路線設計上應予以限制。

## 8. 車隊規模之限制

捷運列車造價昂貴，添購車輛將增加經營者之營運成本，也因此車隊規模不可能無一限制，故而在設計營運路線時，必須考量有限的車隊數目。

## 9. 號誌系統之限制

由於捷運路線交叉點間號誌的變換，有一最短時間之限制，因此，在設計營運路線時，應考量號誌系統轉換對最小班距之限制。

## 4.2 營運路線組合設計之數學模式

### 4.2.1 基本假設

由於設計營運路線組合必須考量之因素甚多，因此為使問題適度簡化，且兼顧設計結果合理可行及滿足設計目標，本研究提出基本假設如下：

1. 旅運量大小及分布不因路線重新設計而轉移。
2. 不考慮以彈性編組列車之方式營運，且營運路線設計僅考慮「每站皆停」之服務策略。
3. 路網興建完成後之各項軌道硬體設施不變，且不考慮單線軌道系統，僅採取雙線分上行和下行兩種方式。

### 4.2.2 數學模式之構建

根據前述之營運路線設計準則及相關之檢核條件，以數學模式表示如下：

#### 1. 目標函數

本研究以乘客總旅行時間成本與營運者成本兩部分所組成之系統總成本作為總評估指標。而其中由於一般捷運的旅次中，對於每位旅客之車內時間成本及以里程計價之票證費用，不會因路線設計的改變而有所增減，因此，本研究不考量此部分成本。

等車時間之計算，由於捷運系統所提供係屬班距小、班次密集且規則之運輸服務，故而對於旅客在捷運車站內之候車時間及轉車等候時間採班距的一半計算。此外，捷運系統內可能有不同的營運路線服務同一區間，其重疊區段之班距之計算公式如下：

$$h_r = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{h_i}} \quad (2)$$

式中， $h_r$ ：重疊區段班距(分)；

$i$ ：通過相同起點與終點之路線代號；

$h_i$ ：路線  $i$  之班距(分)。

轉車不便成本，則採固定值乘以轉車次數計算<sup>[15]</sup>。

經由以上的探討，本研究之營運路線組合設計之目標函數，如(3)式所示：

$$\begin{aligned} \text{Min } TC(L) &= C_1 + C_2 \\ &= \sum_{k=1}^m D_k \times f_k \times C + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n O_{ij} \times [WT_{ij} \times WC + N_{ij} \times TRC_{ij}] \end{aligned} \quad (3)$$

式中，

$L$ ：營運路線組合方案之代號；

$TC(L)$ ：營運路線組合方案  $L$  之尖峰小時系統總成本(元/小時)；

$C_1$ ：營運者成本(元/小時)；

$C_2$ ：使用者成本(元/小時)；

$m$ ：方案之總營運路線數；

$D_k$ ：路線  $k$  之長度(公里)；

$f_k$ ：路線  $k$  之班次數(列車/小時)；

$C$ ：單位營運成本(元/列車公里)；

$n$ ：捷運系統之車站總數；

$O_{ij}$ ： $i$  點至  $j$  點的旅客數(人/小時)；

$WC$ ：等車時間成本(元/分)；

$WT_{ij}$ ： $i$  點至  $j$  點的等車時間(分/人)；

$N_{ij}$ ： $i$  點至  $j$  點的轉車次數(次/人)；

$TRC_{ij}$ ： $i$  點至  $j$  點的轉車不便成本(元/次)。

## 2. 限制式

(1) 最短營運路線長度  $A(1)$  之限制(以涵蓋之車站數表示)

方案中每條營運路線所經過之車站數均需  $\geq A(1)$  之限制，即

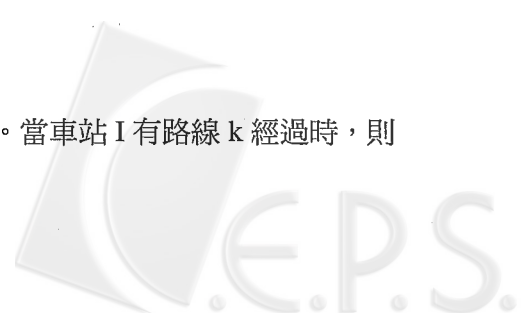
$$N_k = \sum_{i=1}^n X_k^i \geq A(1) \quad k=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

其中，

$N_k$ ：表路線  $k$  所經車站數目；

$X_k^i$ ：捷運系統中車站  $i$  之設定值，為雙元整變數。當車站  $i$  有路線  $k$  經過時，則

$X_k^i = 1$ ，當路線  $k$  未經過時， $X_k^i = 0$



其他符號之意義同(3)式所示。

(2) 最多營運路線組合數目 A(2) 之限制

$$m \leq A(2) \quad (5)$$

(3) 滿足捷運「每站皆停」服務方式 A(3) 之限制

$$\prod_{t=1}^{N_k} X_k^t = \begin{cases} 0, & \text{至少有一車站未停靠} \\ 1, & \text{每一車站皆停靠} \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

其中，

$X_k^t$ ：路線 k 中所經過車站 t 之設定值。當車站有列車停靠時，則車站之設定值為 1，其所有設定值之乘積必為 1c

(4) 路線間相互連通 A(4) 之限制

$$SD_k = \begin{cases} 0, & \text{路線間不相連通} \\ 1, & \text{路線間相互連通} \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

其中，

$SD_k$ ：路線 k 是否與其他路線相互連通之設定值，當路線間相互連通時，路線設定值為 1，否則為 0。

(5) 轉車次數 A(5) 之限制

$$N_{ij} \leq A(5) \quad i \neq j, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中， $j=1, 2, \dots, n$

$N_{ij}$ ：i 點至 j 點的轉車次數。

(6) 提供足夠的運輸服務，且須受政策班距 A(6) 與系統最小班距 A(7) 之限制

$$f_k = \frac{Q_k}{C_\alpha} \quad k=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$A(7) \leq \frac{60}{f_k} \leq A(6) \quad (10)$$

其中，

$f_k$ ：路線 k 之班次數(列車/小時)；

$Q_k$ ：路線 k 之最大站間旅客數(人/小時)；

$C_\alpha$ ：列車最大承載量(人/列車)。



(7)系統總列車數 A(8)之限制

$$Y = \left[ \sum_{k=1}^m (2D_k / v + 2T_k + ST_k) \cdot fk \right] \times (1+R) \leq A(8) \quad (11)$$

其中，

Y：方案之總列車數需求(列車)；

$D_k$ ：路線 k 之長度(公里)；

v：列車平均行駛速率(公里／小時)；

$T_k$ ：路線 k 之列車折返時間(秒)；

$ST_k$ ：路線 k 之總停靠站時間(秒)；

R：列車備用率(%)。

## 五、營運路線組合之設計方法

### 5.1 營運路線組合之設計程序

前述之數學規劃模式難以用數學規劃法方式準確且快速地求解，經確認為 NP 問題後，改採啟發式演算法求解。

本研究依所擬定之設計準則與系統特性要求，以啟發式演算法發展出營運路線組合之設計流程如圖 6 所示，主要設計程序包含四個部分，其內容說明如下：

#### 1. 營運資料之建立與分析

主要包括旅次起迄資料、路網(車站型式、站台型式、軌道型式及其布設位置等)及營運(全程行駛時間、折返時間及列車停靠站時間等)等特性資料之蒐集與分析，以作為後續設計路線之依據。

#### 2. 基本參數與控制變數之設定

基本參數包括系統總列車數、列車最大承載量、單位營運成本、系統最小班距及時間價值當量因子等；控制變數包括最短營運路線長度、最多營運路線組合數目、車站服務因子、路線連通因子、轉車次數限制、系統總列車數、路線最大容量因子、最小班次數等。

此部分除可提供後續營運路線設計之檢核外，決策者亦可依不同的設計要求，輸入不同的基本參數或控制變數，以產生不同設計要求下的營運路線組合方案。

#### 3. 路網設計

主要包括捷運路網之路線組成分類、基本營運路線設計、可行營運路線組合設計

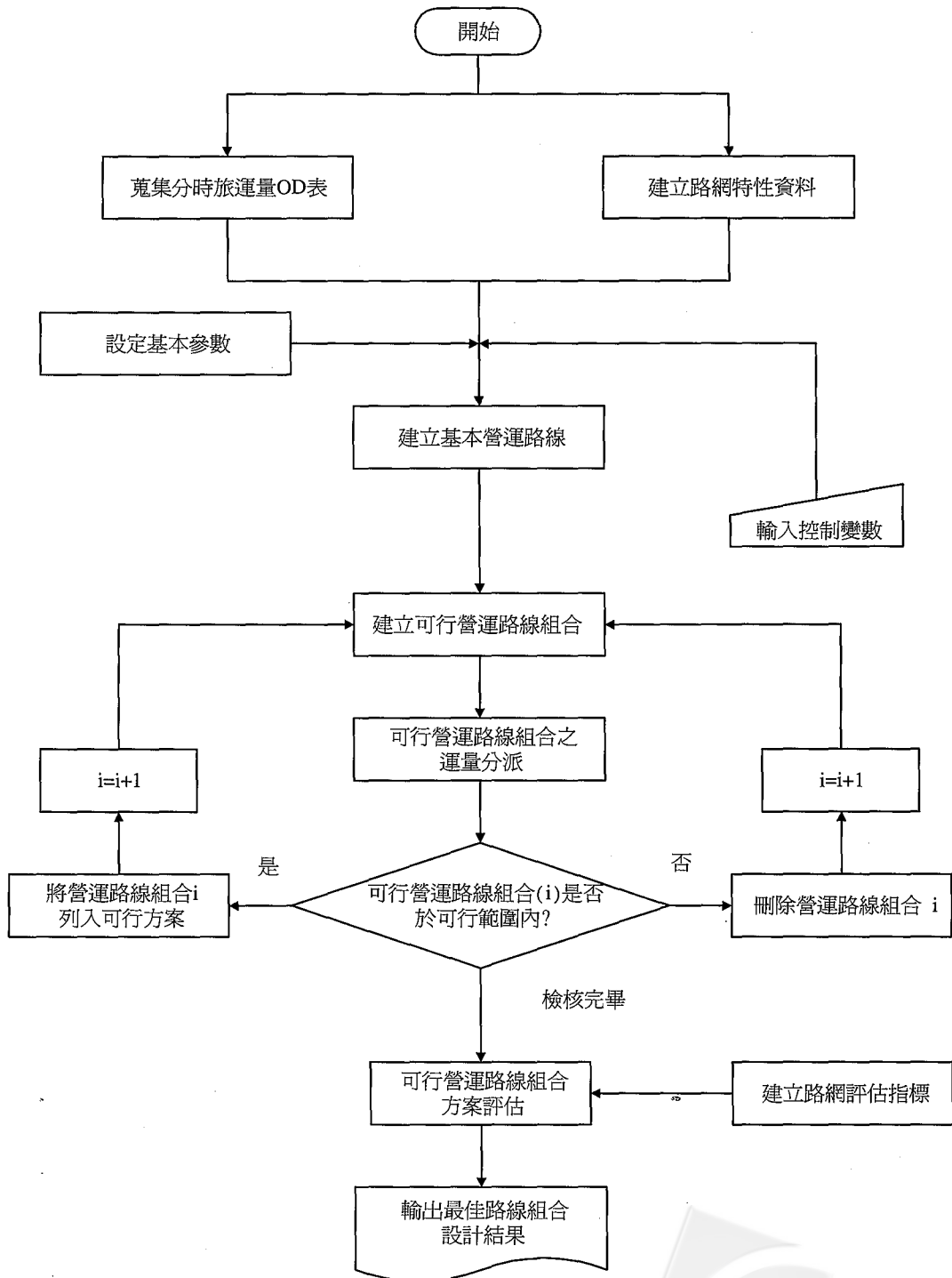


圖 6 捷運路網營運路線組合之設計程序

及運量分派等四個階段，藉由各階段不同的設計要求，以產生可行的營運路線組合方案。

#### 4. 路網評估

將所有的可行的營運路線組合方案透過(3)式之路網總評估指標加以評選，從而選出「最適」之捷運路網營運路線組合。

### 5.2 基本營運路線之設計

由於不同的捷運路網型態及橫渡線布設，影響著基本營運路線之設計，因此，本研究首先針對捷運路網依其型態將實體軌道路線組成進行分類，初步以直形及環狀路線二大類作為營運路線設計之軌道路線分類基礎。

然而，路網之構成係由不同軌道路線間相交會而成，而相交點是否有橫渡線布設，使列車可藉由橫渡線設施之變換，運行於兩軌道路線之間，亦是路線設計可否合併之重點。至於二路線軌道無論是否同在一個軌道層面，若無轉轍器相連通者，即無合併設計之必要，任何一條軌道路線均可獨立設計營運路線。因此在進行直形路線與環狀路線之軌道路線分類前，應先從原二類路線中找出相交點，並檢核是否符合路線合併之要件，若列車可藉由號誌系統之變換，行駛於兩軌道路線者，則該二類路線將可重新合併。有關捷運路網之軌道路線組成分類程序，如圖 7 所示。

當捷運路網之軌道路線組成分類完成後，第二階段即開始分別從直形路線、環狀路線及合併路線中依 3.3 節之營運路線特性分析，找出符合折返條件之車站或橫渡線作為折返點，並從中任選二折返點所構成之路線即為一條營運路線。假設捷運路網中之直形路線共有  $n$  個折返點，則將可構成  ${}_n C_2 = n!/[n!(n-2)!]$  條營運路線；若屬於環狀路線且具有  $R$  個折返點者，則將可構成  $R^2 - R + 1$  條營運路線；若屬於合併路線者，則將路線中所有折返點  $S$  合併後任取二點以構成一條營運路線。

然而任取二折返點所構成的營運路線，雖然可滿足列車運轉的合理性與安全性，但在列車運行的方便性及確保營運者開闢此一路線能獲得最低合理利潤之經濟性考量，並非都能達成。故而，基本營運路線在列車運行的方便性方面，須查核列車運行於交會站是否要透過再折返才能繼續行駛至另一端點站，若是則此一營運路線不符合運行的方便性，故應取消此一路線設計；而在業者合理利潤保障方面，則透過最短營運路線長度  $A(1)$  之限制下，所符合的營運路線則可稱為基本營運路線。此一基本營運路線之產生，可視為捷運路網之基本營運路徑。有關基本營運路線之設計程序，如圖 8 所示。

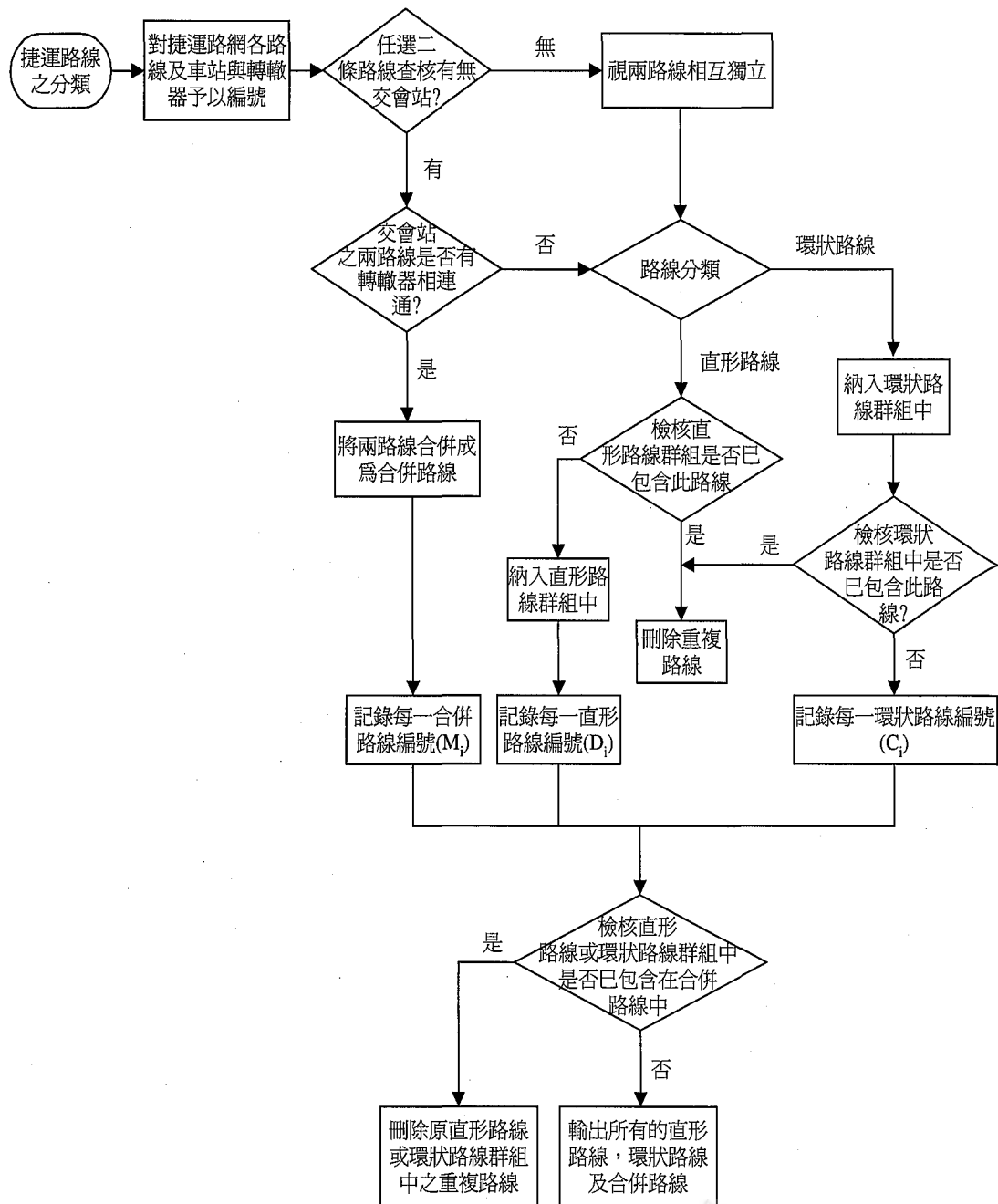


圖 7 捷運路網之軌道路線組成分類



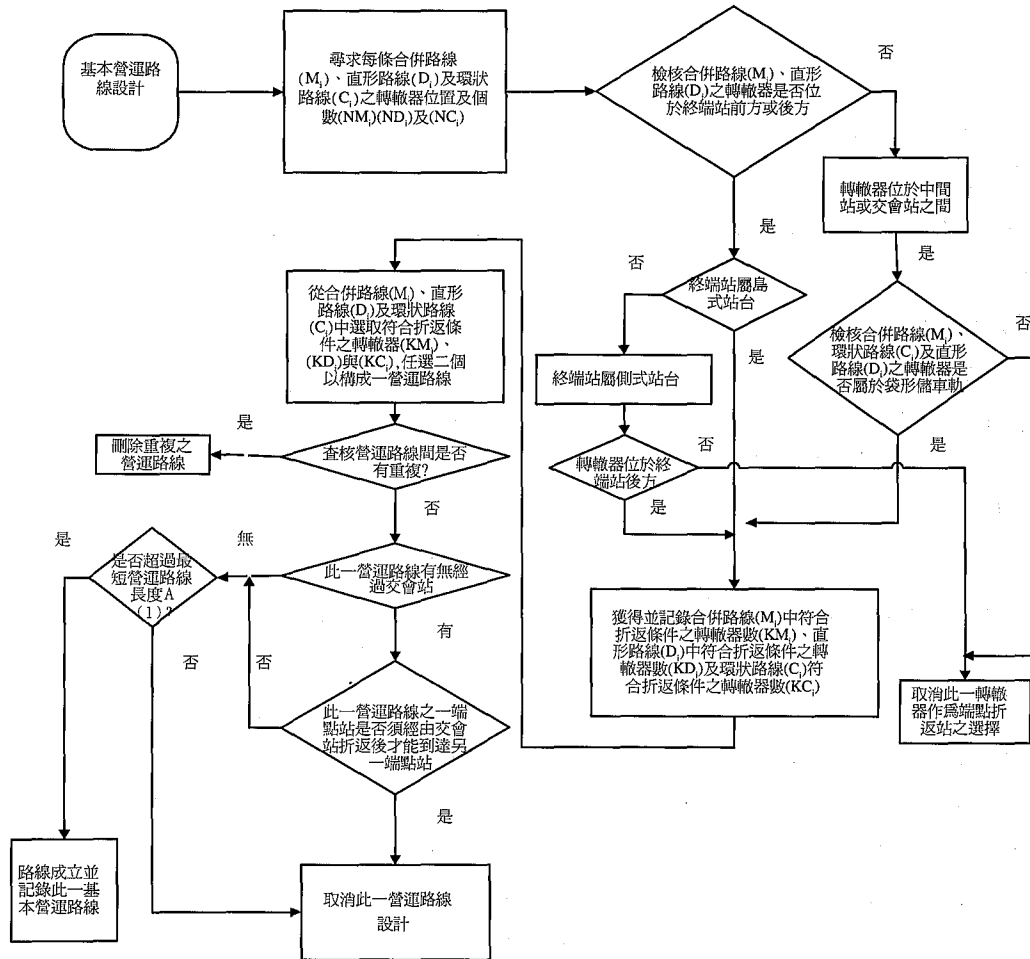


圖 8 基本營運路線之設計程序

### 5.3 可行營運路線組合之設計

可行營運路線組合係指由二條(含)以上之基本營運路線所組成的路網，亦即在滿足路線容量、效率原則及旅客所需運輸服務等條件下之基本營運路線組合。基本營運路線組合即將基本營運路線按組合方式，任選出以 2、3、4...組合方式之集合，若一捷運系統共有 T 條基本營運路線，則將可構成  $T C_2 + T C_3 + T C_4 + \dots + T C_T$  條基本營運路線組合。

然而，為避免所設計之營運路線組合因路線的組成數量過多，有可能會影響主線運行之順暢，並對搭乘之旅客在路線選擇上造成混淆，因此對於所組成之基本營運路

線數目應可依路網的複雜程度，有一定數量的限制，故以 A(2)最多營運路線組合數目 (M 條) 之控制變數加以檢核。因此所構成之基本營運路線組合則為  ${}_T C_2 + {}_T C_3 + {}_T C_4 + \dots + {}_T C_M$  條。

此外，為達成路線設計之目標，本研究提出以下的控制變數加以檢核，進而從基本營運路線組合中，選出符合設計要求的可行營運路線組合方案。

1. 車站服務因子：以 A(3)表示。為滿足捷運「每站皆停」之服務方式，故以此一控制變數檢核之。
2. 路線連通因子：以 A(4)表示。主要係用以檢核路線間的連續性以便利旅客轉車。
3. 轉車次數限制：係指於捷運系統內，從任一車站到達目的站所必須轉車的次數，以 A(5)表示。可依捷運路網的複雜程度給予一數值。
4. 最小班次數：由最大班距換算而得，用以確保旅客最低服務水準，以 A(6)表示。
5. 路線最大容量因子：為各路線及區段之班距與捷運號誌系統最小班距之比值，以 A(7)表示。
6. 系統總列車數：除備用列車以應維修所需外，正線上所能提供最多的列車數量，以 A(8)表示。

有關可行營運路線組合之設計程序，如圖 9 所示，各步驟之作業流程說明如下：

1. 從所成立之基本營運路線中在符合 A(2)最多營運路線組合數目 (M 條) 之控制變數下，任選出以 2、3、4.....M 條組合方式之集合，以構成基本營運路線組合。
2. 查核每一條基本營運路線組合是否符合 A(3)每個車站均被服務到、A(4)基本營運路線之間均能相互連通及 A(5)旅客在此一基本營運路線組合中須轉車之次數限制等條件。若是，則進行下一步驟；否則取消此一基本營運路線組合。
3. 決定列車最大承載量之服務水準後，對每一條基本營運路線組合進行運量的分派工作，刪除不符合運量分派條件的組合後，計算所有符合條件的基本營運路線組合之所需總列車數、路線每一區段之班距及每一條基本營運路線所需之班次數。
4. 查核所有符合上述條件的基本營運路線組合中各條營運路線之班距是否大於最小班次數(政策班距)之限制 A(6)。若否，則直接進行下一步驟；若是，則調整該營運路線班距等於政策班距後，進行下一步驟。
5. 查核路線及每一區段班距是否小於路線最大容量(最小班距)限制 A(7)。若是，則進行下一步驟；若否，則決策者可考量是否應於該區段內增設硬體軌道布設。
6. 查核每一基本營運路線組合中，是否符合系統總列車數 A(8)。若所需之總列車數小於 A(8)者，記錄此一基本營運路線組合並納入可行營運路線組合方案中；若無法符合控制變數 A(8)之條件限制者，決策者可考量是否應增購列車以提升服務水準。

7. 結束可行營運路線組合設計。

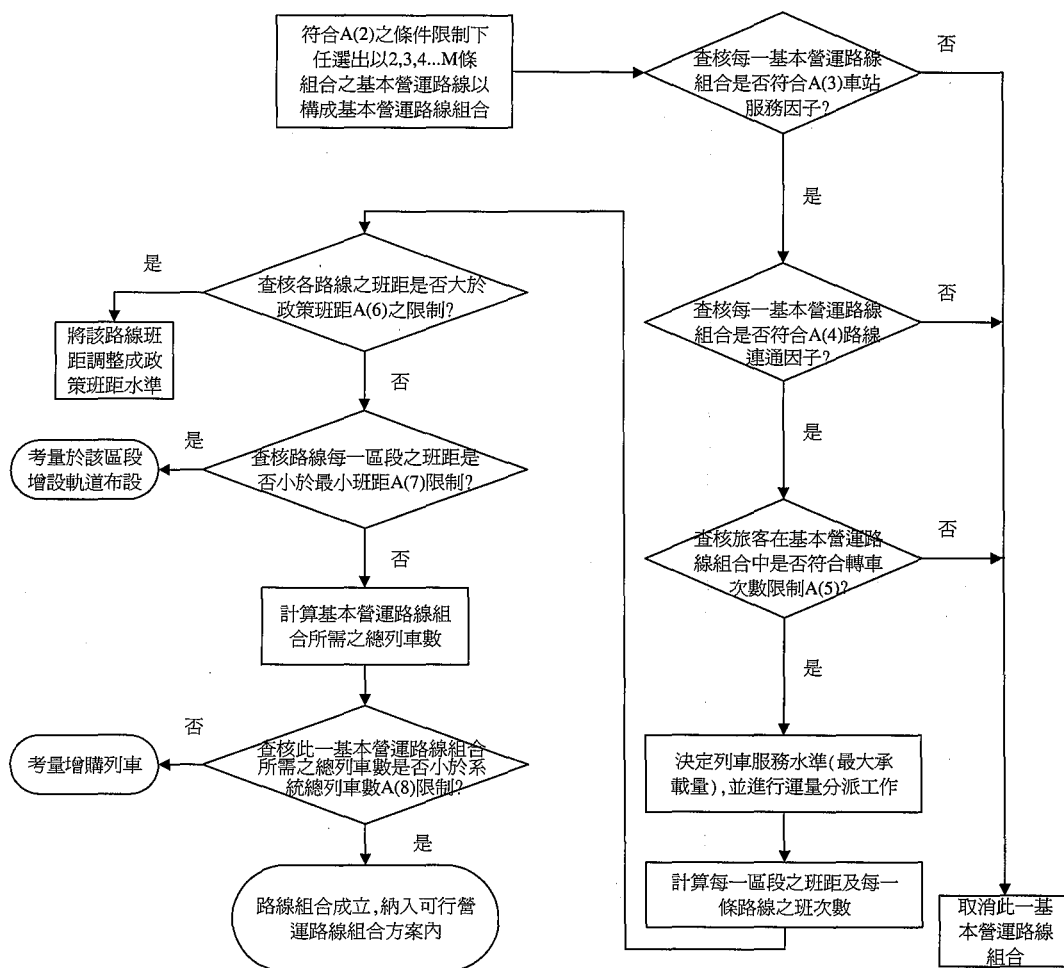


圖 9 可行營運路線組合之設計程序



#### 5.4 可行營運路線組合之運量分派

可行營運路線組合初步設計完成後，為判別所設計之路線組合是否符合營運效率且可行，對各路線進行運量分派則為路線設計之必要檢核項目。

本研究對於可行營運路線組合之運量分派原則，是以滿足路線中之最大承載區間旅運量作為派車之基礎，並以路線組合中最少營運路線數經過車站之路線，作為優先分派之營運路線，其主要理由係由於經過車站之營運路線數愈少，業者所能提供列車服務之選擇機會也愈少。因此，為滿足車站之旅運量需求，本研究採以非重疊區段之營運路線作為優先分派運量之考量。有關運量分派之步驟，如圖 10 所示，各步驟說明如下：

1. 將實際 OD 表轉換成各站站間之運量表，並將各營運路線依路線重疊程度劃分為數個區段，以計算各個區段之最大承載站間運量及所需之列車數。
2. 尋找各個區段中之非重疊區段路線，並以該區段中之單一路線作為優先分派路線。倘非重疊路線有二區段以上者，則先確認各區段之非重疊路線是否為同一條營運路線。若是，則找出區段中之優先分派路線最大承載區間的站間運量(應取上下行兩方向中最大站間運量者)後，進入下一步驟；若非重疊區段之路線為不同的營運路線者，則這些不同的營運路線均可視為優先分派路線，一併分派後進入下一步驟。
3. 求算優先分派路線所需之列車數(即先以最大承載站間運量除以列車最大承載量求算出單位小時所需之班次數及班距，再以該路線之全程往返時間除以班距後即可獲得該路線所需之列車數)。
4. 將已被分派過之旅運量從各站間運量分布表中扣除，並將已被分派之路線剔除後，查核是否尚有運量未分派。若是，則回到步驟 2；若否，則取消此一可行營運路線組合方案。
5. 運量分派直至所有路線均有運量分派後，則停止運量分派工作。
6. 運量分派中若各區段中有超過一條以上之營運路線經過時，則先找出區段中最少重疊路線之區段，其區段內路線均視為優先分派路線。至於區段內有二條以上之優先分派路線應按多少比例之派車方式最為合適，本研究由該區段任選一營運路線作為分派基準，若該區段所需班次數為  $N$  班，則該路線之比例組合先以  $1:(N-1)$  來進行運量分派，俟全數運量分派完畢並求得所需之總班次數後，再將基準路線增加一班次並以  $2:(N-2)$  之比例組合作運量分派，直至  $(N-1):1$  之比例組合均被計算過為止。最後再將各種比例組合所需之總班次數相互比較，以總班次數最小的那一組，作為此一可行營運路線組合之運量分派結果。以圖 11 為例，營運路線甲及丙之比例以  $1:2$  較  $2:1$  方式為佳。

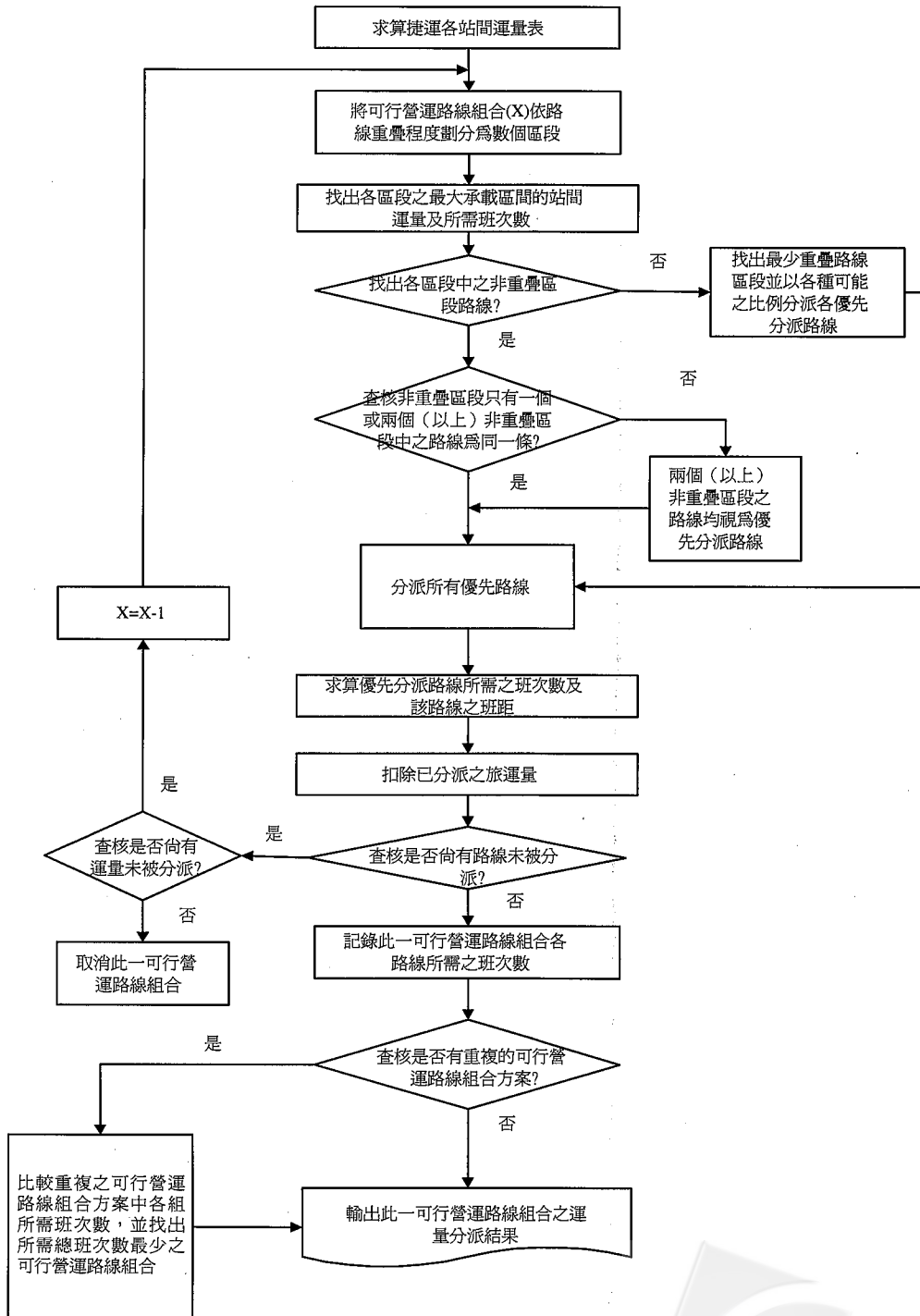
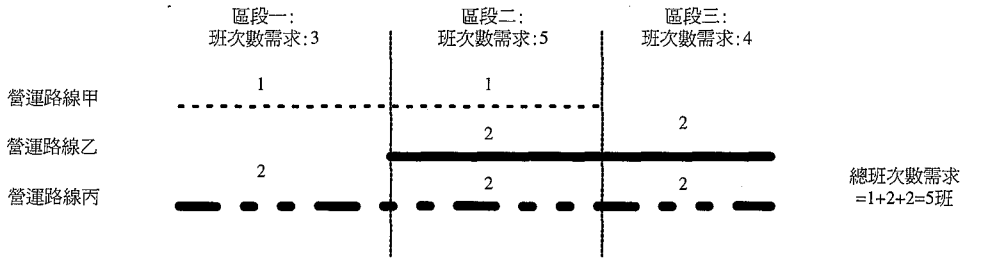
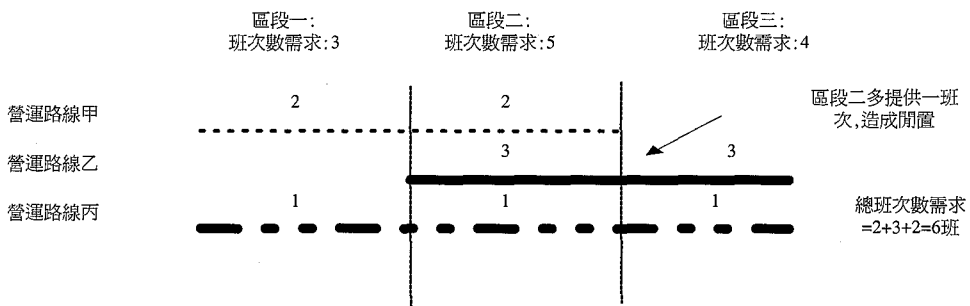


圖 10 可行營運路線組合之運量分派



(a) 區段一以 1:2 比例之運量分派



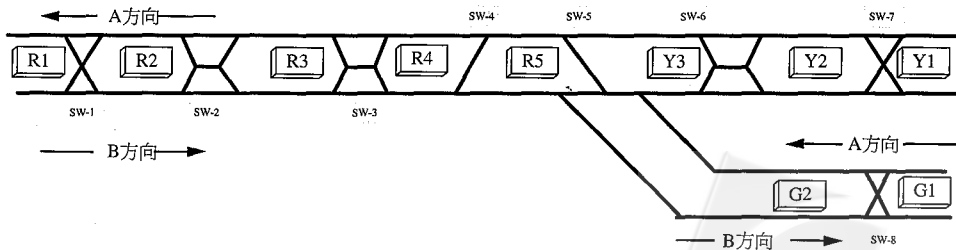
(b) 區段一以 2:1 比例之運量分派

圖 11 重疊區段不同比例之運量分派示意圖

### 5.5 營運路線設計方法之驗證

為說明如何以本研究發展之路線設計方法從事捷運路網營運路線設計的工作，本節將透過簡例之方式，進行設計方法之簡要說明。

簡例說明之路網架構如圖 12 所示，其各站起迄需求量矩陣如表 1 所示，設計過程所需的設計參數值、上下行站間行駛時間、停靠時間及站間運量列表於表 2、表 3 中。



註：「R1、R2、...」代表車站代號，「SW-1、SW-2、...」代表橫渡線代號。

圖 12 捷運路網簡例架構圖

表 1 簡例各站起迄需求量矩陣

O \ D	R1	R2	R3	R4	R5	Y3	Y2	Y1	G2	G1
R1	0	10	12	14	28	20	16	8	4	2
R2	6	0	10	12	15	16	10	5	2	0
R3	12	28	0	14	10	11	17	12	20	10
R4	20	22	30	0	1	5	15	12	8	2
R5	8	20	18	6	0	16	15	33	20	15
Y3	16	24	30	14	10	0	12	23	18	14
Y2	8	5	3	10	8	15	0	12	12	12
Y1	14	12	20	22	12	20	5	0	10	8
G2	6	2	12	15	25	15	3	5	0	6
G1	14	4	15	22	23	22	14	2	8	0

表 2 簡例設計參數值

設計參數	設計值	設計參數	設計值
系統最小班距	2 分鐘	政策最大班距	15 分鐘
系統總列車數	15 列	營運成本	10 元/車公里
列車最大承載量	30 人/列車	轉車不便成本	5 元/次
端點站折返時間	3 分	袋型軌折返時間	5 分
等車時間價值	3 元/分	—	—

本研究在基本營運路線之設計選取，是在滿足所設之折返條件下任取二折返點所構成之路線，並在最短營運路線長度及列車順暢運行條件限制下所組成之路線。而最適可行營運路線組合方案則將所有可能之基本營運路線加以組合，並依所設計之控制變數進行檢核，進而篩選出系統總成本最少之方案。以下針對營運路線設計搜尋的過程與結果，說明如下：

### 1. 捷運路線之分類

從圖 12 中可看出，路線相交會車站(R5)可透過轉轍器 SW-5 之變換使列車行駛於兩路線之間，因此兩路線可視為一組直形合併路線。

### 2. 基本營運路線之建立

表 3 簡例 A、B 方向站間行駛時間、折返時間、停靠站時間及站間運量表

車站別	A 方向 站間距離 (公尺)	A 方向 站間行駛 時間 (秒)	A 方向 停靠站 時間 (秒)	A 方向 折返時 間 (秒)	A 方向 站間運 量(人/ 小時)	B 方向 站間距離 (公尺)	B 方向 站間行駛 時間 (秒)	B 方向 停靠站 時間 (秒)	B 方向 折返時 間 (秒)	B 方向 站間運 量(人/ 小時)
Y1	—	—	N/A	180	—	—	—	N/A	180	—
Y1↔Y2	1055	82	18	—	104	1053	80	N/A	180	114
Y2↔Y3	1619	119	18	300	215	1623	123	18	300	174
Y3↔R5	2138	138	25	—	303	2135	134	18	—	246
R5↔R4	696	65	18	—	320	698	67	25	—	249
R4↔R3	1362	97	18	300	126	1364	98	18	300	272
R3↔R2	1140	88	18	300	73	1137	87	18	300	202
R2↔R1	997	80	N/A	180	123	995	78	18	—	112
G1↔G2	830	71	18	—	199	828	69	N/A	180	163
G2↔R5	2142	136	25	—	124	2146	139	18	—	69
G1	—	—	N/A	180	—	—	—	N/A	180	—

從簡例中找出所有橫渡線位於島式站台之終端站的前、後方或側式站台之終端站後方或位於中間站或交會站間之袋形儲車軌的折返設施個數，計共有 SW-1、SW-2、SW-3、SW-6、SW-7 及 SW-8 等六個橫渡線。因此，直形合併路線共可構成  ${}_{(5+1)}C_2 = {}_6C_2 = 15$  條，即 R1-R2(SW1-2)、R1-R3(SW1-3)、R1-Y3、R1-Y1、R1-G1、R3、R3-Y3、R3-Y1、R3-G1、R4-Y3、R4-Y1、R4-G1、Y2-Y1、Y3-G1、Y1-G1 等，並以最短營運路線長度限制因子  $A(1) = 6$  個車站剔除不合適之營運路線，則符合之營運路線共有 R1-Y3、R1-Y1、R1-G1、R3-Y1 及 Y1-G1 等 5 條。再者，檢查符合之營運路線 Y1-G1，由於必須透過交會站 R5 調頭折返才能到達另一端點站，故刪除此一不可行之營運路線，剩餘之 4 條營運路線即構成基本營運路線。

### 3. 基本營運路線組合之建立

4 條基本營運路線按組合之方式，並在避免過多的路線設計混淆旅客之選擇的情況下，以最多營運路線組合數目  $A(2)=3$  條作為檢核條件，因此可構成有  ${}_4C_2 = {}_4C_3 = 10$  種基本營運路線組合。

### 4. 基本營運路線組合之檢核

10 種基本營運路線組合經控制變數 A(3)車站服務因子、A(4)路線連通因子及 A(5)



轉車次數限制之檢核後，可篩選出五種可行之營運路線組合。其中轉車次數限制 A(5) 假設以一次為限。

### 5. 運量分派

將營運路線組合依路線重疊程度劃分為數個區段，並找出非重疊路線區段，作為優先運量分派之區段路線，例如第一種組合 R1-Y1 及 R1-G1(即 SW1-7 及 SW1-8)可分成三個區段 R1-R5、R5-Y1 及 R5-G1。而非重疊路線區段有區段二及區段三。

各區段中最大承載站間運量分別為 320、272 及 199，而所需之班次數分別為 11、10 及 7。由於非重疊路線區段有二組且各組內係由不同之營運路線所組成，故而兩區段內之營運路線均可視為優先分派路線。本例先以區段二(即 R5-Y1 區段)之營運路線(R1-Y1)作為優先分派運量路線，而尖峰小時所需之班次數為  $10(=272/30)$  班次，班距為 6 分，全程往返時間為 1926 秒，因此該路線所需之列車數為  $1926 \div 60 \div (6) = 6$  列。在 R1-Y1(SW1-7)之營運路線運量分派完成後，扣除已分派之各站站間運量後，可得 R1-G1 路線中之最大承載站間運量為 199，尖峰小時所需之班次數為 7 班次，班距為 60/7 分，全程往返時間為 1629 秒，故此路線所需之列車數為 4 列。合計所需之總列車數為  $6+4=10$  列。

### 6. 可行營運路線組合之檢核

每一種營運路線組合之運量分派完成後，查核是否符合最小班次數 A(6)(政策班距 15 分鐘)之限制。發現第三、四種營運路線組合中之 R1-Y3 路線班距均為 20 分鐘一班次，第五種營運路線組合中之 R1-Y1 路線班距為 60 分鐘，三種營運路線之班距均高於政策班距 15 分鐘之限制，故而將此三種營運路線之班距調整成政策班距水準後，進行下一步驟路線最大容量 A(7)(各區段最短班距 2 分鐘)及系統總列車數 A(8)(15 列)等控制變數之查核，五種營運路線組合均符合路線最大容量、系統總列車數之要求。因此繼續進行下一階段之方案評估。

### 7. 建立等車及轉車時間矩陣表

根據每一組營運路線組合建立一組相對應之等車、轉車時間及次數矩陣表。以第一組為例，其等車(包含轉車等候時間)及轉車次數矩陣表如表 4 及表 5 所示。所求得之矩陣乘上時間價值及轉車不便懲罰值後，以獲得總等車時間成本與轉車不便成本，如表 6 及表 7 所示。

### 8. 可行營運路線組合方案之評估結果

依據(4)式求算每一組可行營運路線組合方案之系統總成本，選取總成本最小之方案即為最適營運路線設計之輸出。從表 8 可行營運路線組合方案之設計程序及結果表，其尖峰小時系統總成本一欄中可看出，第 1 組之總成本(15573 元)最小，因此該組為可行營運路線組合之最適方案。

表 4 等車、轉車時間矩陣

O \ D	R1	R2	R3	R4	R5	Y3	Y2	Y1	G2	G1
R1	0	60/34	60/34	60/34	60/34	3	3	3	60/14	60/14
R2	60/34	0	60/34	60/34	60/34	3	3	3	60/14	60/14
R3	60/34	60/34	0	60/34	60/34	3	3	3	60/14	60/14
R4	60/34	60/34	60/34	0	60/34	3	3	3	60/14	60/14
R5	60/34	60/34	60/34	60/34	0	3	3	3	60/14	60/14
Y3	3	3	3	3	3	0	3	3	51/7	51/7
Y2	3	3	3	3	3	3	0	3	51/7	51/7
Y1	3	3	3	3	3	3	3	0	51/7	51/7
G2	60/14	60/14	60/14	60/14	60/14	51/7	51/7	51/7	0	61/14
G1	60/14	60/14	60/14	60/14	60/14	51/7	51/7	51/7	60/14	0

單位：分。

表 5 轉車次數矩陣

O \ D	R1	R2	R3	R4	R5	Y3	Y2	Y1	G2	G1
R1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Y2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Y1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
G2	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
G1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0

表 6 第一組營運路線組合之總等車及轉車時間成本矩陣

O \ D	R1	R2	R3	R4	R5	Y3	Y2	Y1	G2	G1
R1	0	53	64	74	148	180	144	72	51	26
R2	32	0	53	64	79	144	90	45	26	0
R3	64	148	0	74	53	99	153	108	257	129
R4	106	116	159	0	53	45	135	108	103	26
R5	42	106	95	32	0	144	135	297	257	193
Y3	144	216	270	126	90	0	108	207	393	306
Y2	72	45	27	90	72	135	0	108	262	262
Y1	126	108	180	198	108	180	45	0	219	175
G2	77	26	154	193	321	328	66	109	0	77
G1	180	51	193	283	296	481	306	44	103	0

表 7 第一組營運路線組合之轉車不便成本矩陣

O \ D	R1	R2	R3	R4	R5	Y3	Y2	Y1	G2	G1
R1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y3	0	0	0	0	0	0	0	0	90	70
Y2	0	0	0	0	0	0	0	0	60	60
Y1	0	0	0	0	0	0	0	0	50	40
G2	0	0	0	0	0	75	15	25	0	0
G1	0	0	0	0	0	110	70	10	0	0

表 8 可行營運路線組合方案之設計程序及輸出結果表

方案別	路線組合	優先分派路線	該區之大間量	優先分派路線小時班次數	該線之往返時間(秒)	該線所需之車數(列)	該區之大間量	優先分派路線小時班次數	該線之往返時間(秒)	該線所需之車數(列)	運分派完?	路線各區段之班距(分)	總車數需求(列)	轉車不便成本	總車間成本	總用者成本	各線小時班次數	營運路線全長(公尺)	營運者成本	尖峰小時之系統總成本(元)
1	R1-Y 1	R1-Y 1	272	10	1926	6	R1-G1	199	7	1629	4	R1-R5:60/17 R5-Y1:6 R5-G1:60/7	10	675	1209 3	1276 8	10 7	R1-G1:14335 R1-Y1:18012	280 5	15573
	R1-G																			
2	R1-G 1	R3-Y 1	272	10	1677	5	R1-G1	215	8	1629	4	R1-R3:60/8 R3-R5:60/18 R5-Y1:6 R5-G1:60/8	9	1445	1450 0	1594 5	10 8	R1-G1:14335 R3-Y1:13743	252 1	18467
	R3-Y																			
3	R1-Y 3	R1-Y 1	202	7	1926	4	R1-G1 R1-Y3	19970	7 3 4	1629 1606	4 2	R1-R5:60/17 R5-Y3:6 Y3-Y1:60/7 R5-G1:60/7	10	675	1339 9	1407 4	7 7 4	R1-G1:14335 R1-Y1:18012 R1-Y3:12662	277 1	16845
	R1-Y																			
	R1-G																			
4	R1-Y 3	R3-Y 1	202	7	1677	4	R1-G1 R1-Y3	19970	7 3 4	1629 1606	4 2	R1-R3:60/11 R3-R5:10/3 R5-Y3:60/11 Y3-Y1:60/7 R5-G1:60/7	10	1065	1637 3	1743 8	7 7 4	R1-G1:14335 R1-Y3:12662 R3-Y1:13743	247 1	19910
	R1-G																			
	R3-Y																			
5	R1-Y 1	R1-G 1	199	7	2007	4	R1-Y1 R3-Y1	16256	1 4 9	2286 2139	3 6	R1-R3:60/11 R3-R5:3 R5-Y1:60/13 R5-G1:60/7	13	675	1372 5	1440 0	7 4 9	R1-G1:14335 R1-Y1:18012 R3-Y1:13743	296 1	17361
	R1-G																			
	R3-Y																			

註：圖中「優先分派路線小時班次數」欄中，刪除線係表示因該路線不符合政策班距之要求，因而調整成刪除線下方之班次數以符合班距要求。

## 六、實例分析—以台北捷運系統為例

台北捷運初期路網共包括淡水線、新店線、中和線、板南線及木柵線等五條路線，其中木柵線因屬於中運量系統，技術型式和控制方式與高運量系統有極大的差異性，使得系統無法相容；而新北投支線列車因噪音問題，目前採減速方式接駁行駛。為簡

化研究之範圍，實例分析只考慮高運量系統且不包含新北投支線之營運路線設計。台北捷運路網軌道布設圖，如圖 13 所示。

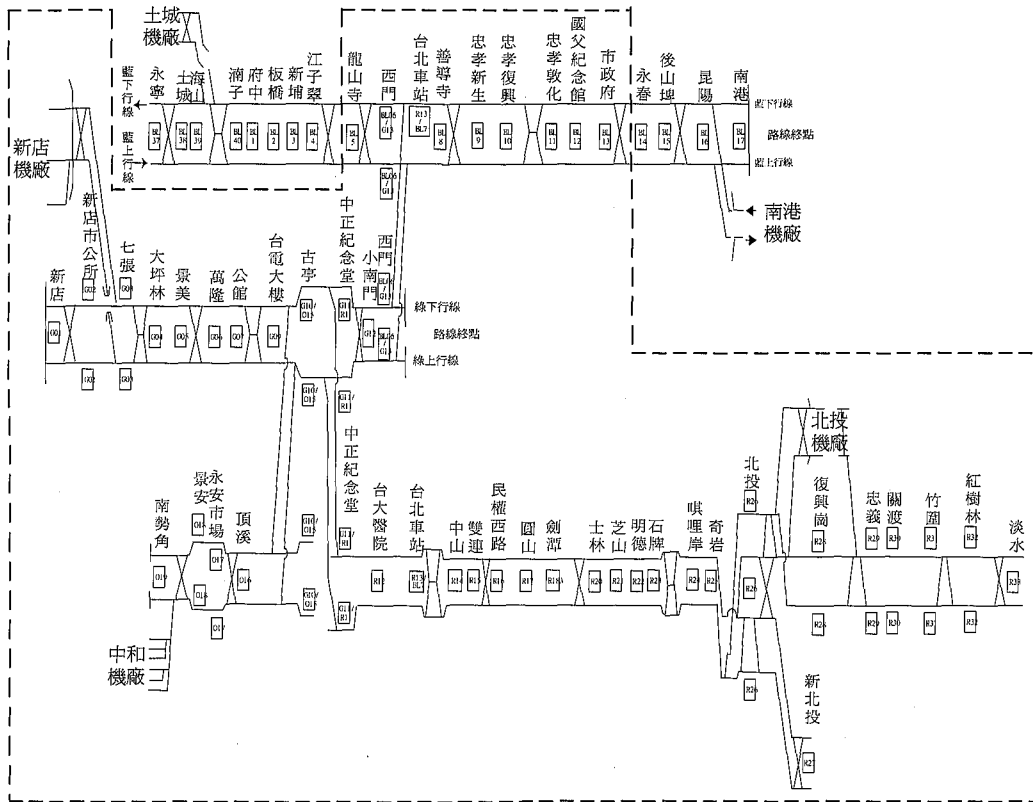


圖 13 台北捷運路網軌道布設圖

### 1. 建立基本資料

本研究以民國 89 年 4 月份台北捷運系統之營運資料作為建立起迄需求矩陣之基礎，合計有 42 個車站已通車營運，因此可建立 42×42 的捷運系統旅次起迄矩陣。

由於本研究之設計方法以尖峰小時的需求資料為設計基礎，因此在尖峰小時站間運量之取得，須將所蒐集之分時進出站運量及全日各站旅運量 OD 表，透過運量指派軟體加以轉換成為各站尖峰小時之站間運量。

### 2. 設定營運參數與控制變數

為後續營運路線設計程序進行之用，本研究參考台北捷運公司年報營運資料輸入營運參數與控制變數，如表 9 及表 10 所示。

表 9 台北捷運系統之營運參數設定值

營運參數	營運成本	列車最大承載量	等車及轉車時間價值	轉車不便成本
設計值	378.8 (元/每延車公里)	1936 (人/每列車)	1.66 (元/分)	6 (元/次)

表 10 台北捷運系統營運路線組合設計之控制變數設計值

控制變數	最短營運路線長度 A(1)	最多營運路線組合數目 A(2)	轉車次數限制 A(5)	系統服務班距指標 A(6)	系統最小班距 A(7)	系統總列車數 A(8)
設計值	捷運 6 個 車站之距離	3 條	2 次	7 分	105 秒	46 列

### 3. 營運路線組合設計之結果

經由上述所建立之基本資料與相關營運參數資料，並利用所撰寫之路線設計電腦程式，可產生一組最適的捷運營運路線組合設計方案。而路線設計之各步驟簡述如下：

- (1) 台北捷運路網透過路線基本分類結果，可分為合併路線(淡水、新店及中和線)及直形路線(板南線)二類。
- (2) 合併路線藉由基本路線設計後，找出符合折返條件之折返點共有八個(含北投站)，因此共可構成  ${}_8C_2 = 28$  條營運路線，而直形路線有三個折返點可選擇，共可構成  ${}_3C_2 = 3$  條營運路線。
- (3) 合併路線所組成之 28 條營運路線中，有 3 條營運路線(南勢角—台電大樓、南勢角—大坪林、南勢角—新店)必須經由交會站作列車調頭折返始能到達另一端點站，故予以刪除，又扣除 4 條不符合最短營運路線長度限制(六個車站)後，共剩下 21 條基本營運路線。直形路線則有一條營運路線(忠孝敦化—市政府)不符合最短營運路線長度限制須刪除。
- (4) 合併路線所組成之基本營運路線，在 A(2)至多 3 條路線組合之方式、A(3)車站服務因子、A(4)路線連通因子、A(5)轉車至多 2 次限制等控制變數檢核下，僅剩下 7 條基本營運路線組合{(R33-O19,R26-G1)、(R33-O19,R23-G1)、(R33-G1,R33-O19)、(R33-G1,R26-O19)、(R33-G1,R23-O19)、(R13-O19,R33-G1)、(R33-O19,R13-G1)}符合要求，而直形路線所組成之基本營運路線，只剩下 2 條{(BL5-BL13)、(BL5-BL13,BL5-BL10)}。
- (5) 合併路線中之各種基本營運路線組合經過運量分派後，發現各路線在目前旅運量水

準下，只需提供 10 到 15 分鐘的班距服務即可符合設定要求；然而因 A(6)政策班距設定為 7 分鐘，均低於上述各路線之班距，故而將各路線班距調整為 7 分鐘後，並進行下一階段 A(7)系統最小班距及 A(8)系統總列車數之查核工作。其設計結果如表 11 及表 12 所示。直形路線中之各種基本營運路線組合經過運量分派後，其設計結果如表 13 及表 14 所示。

(6)從上述輸出結果表可看出，若未將高於政策班距之各方案路線加以調整的情況下，以 { (R33-G1,R33-O19,BL5-B13) } 之營運路線組合方案之尖峰小時系統總成本最低，約為 885,398 元，此時系統內之轉車人次數(639 人)最少。若將高於政策班距之各方案路線予以調整後之結果，則以 { (R33-G1,R23-O19,BL5-B13) } 之營運路線組合方案之尖峰小時系統總成本最低，約為 780,690 元。從各高於政策班距之路線方案調整前後所輸出之結果發現，各方案調整後之系統總成本均較未調整前為低，因此得知各路線班距從 10~15 分鐘調降為 7 分鐘，可使旅客的服務水準提高，亦可使系統總成本降低，故而採調整後之方案三作為最佳的輸出。

再者，本研究所輸出之最適方案 { (R33-G1,R23-O19,BL5-B13) }，較台北捷運公司民國 89 年 6 月間所設計之營運路線方案 { (R33-G1,R26-O19,BL5-B13) } 約可節省尖峰小時 12,767 元之系統總成本；其中營運者成本減少 24,901 元(356,728 元-331,827 元)，但使用者成本增加 12,133 元(332,855 元-344,988 元)。

表 11 營運路線組合方案之電腦程式輸出結果表(合併路線-未調整成政策班距)

方案	路線別	起迄站	站間最大運量	來回長度(公尺)	車站數	行車時間(秒)平均來回 Td	行車週期(秒)Cy	班距(秒)H	列車數 TN	總延車公里 TdL	路線總班次數 F	方案總轉車人次數	方案總等車及轉車時間(分)	營運者總成本(元)	使用者總成本(元)	系統總成本	名次
1	BL6	R33<->G1	8046	65807	30	5294	7112	720	10	329.035	5	639	338230	211543	565293	776836	1
	BL7	R33<->O19	7578	57355	26	4605	6223	900	7	229.42	4						
2	BL6	R33<->G1	8046	65807	30	5294	7112	720	10	329.035	5	1013	366605	183474	614641	798115	3
	BL13	R26<->O19	7578	38830	20	3310	4748	900	6	155.32	4						
3	BL6	R33<->G1	8046	65807	30	5294	7112	720	10	329.035	5	1118	377236	172407	632917	805324	4
	BL18	SW1<->O19	7578	31526	17	2702	4018	900	5	126.104	4						
4	BL6	R33<->G1	15025	65807	30	5294	7112	450	16	526.456	8	4146	319450	223051	555161	778212	2
	BL22	SW2<->O19	7578	15595	8	1346	2296	900	3	62.38	4						
5	BL7	R33<->O19	7578	57355	26	4605	6223	900	7	229.42	4	1203	383291	176456	643480	819936	6
	BL12	R26<->G1	8046	47282	24	3999	5637	720	8	236.41	5						
6	BL7	R33<->O19	7578	57355	26	4605	6223	900	7	229.42	4	1384	400278	162623	672768	835390	7
	BL17	SW1<->G1	8046	39978	21	3391	4907	720	7	199.89	5						
7	BL7	R33<->O19	15025	57355	26	4605	6223	450	14	458.84	8	4795	342666	210245	597599	807844	5
	BL21	SW2<->G1	7473	24047	12	2035	3185	900	4	96.188	4						

註：表內「方案總轉車時間」一欄，包含旅客等車及轉車時間。

表 12 營運路線組合方案之電腦程式輸出結果表(合併路線-調整成政策班距)

方案	平均列車承載量(率)	路線別	起迄站	站間最大運量	來回長度(公尺)	車站數	行車時間(秒)平均來回 Td	行車週期(秒)Cy	班距(秒)H	列車數 TN	延車公里	路線總班次需求 F	方案總轉車人次數	方案總等車及轉車時間(分)	營運者總成本(元)	使用者總成本(元)	系統總成本	名次
1	894*	BL6	R33<->G1	8046	65807	30	5294	7112	420***	18*	592.263*	9*	639	178397	419883*	299970	719854	6
	842*	BL7	R33<->O19	7578	57355	26	4605	6223	420***	16*	516.195*	9*						
2	894*	BL6	R33<->G1	8046	65807	30	5294	7112	420***	18*	592.263*	9*	1013	196854	356728*	332855	689583	3
	842*	BL13	R26<->O19	7578	38830	20	3310	4748	420***	12*	349.47*	9*						
3	894*	BL6	R33<->G1	8046	65807	30	5294	7112	420***	18*	592.263*	9*	1118	203785	331827*	344988	676816	1
	842*	BL18	SW1<->O19	7578	31526	17	2702	4018	420***	11*	283.734*	9*						
4	1669*	BL6	R33<->G1	15025	65807	30	5294	7112	420***	18*	592.263*	9*	4146	250133	277515*	440095	717611	5
	842*	BL22	SW2<->O19	7578	15595	8	1346	2296	420***	6*	140.355*	9*						
5	842*	BL7	R33<->O19	7578	57355	26	4605	6223	420***	16*	516.195*	9*	1203	197520	356728*	335100	691829	4
	894*	BL12	R26<->G1	8046	47282	24	3999	5637	420***	15*	425.538*	9*						
6	842*	BL7	R33<->O19	7578	57355	26	4605	6223	420***	16*	516.195*	9*	1384	204718	331827*	348138	679965	2
	894*	BL17	SW1<->G1	8046	39978	21	3391	4907	420***	13*	359.802*	9*						
7	1669*	BL7	R33<->O19	15025	57355	26	4605	6223	420***	16*	516.195*	9*	4795	252407	277515*	447769	725285	7
	830*	BL21	SW2<->G1	7473	24047	12	2035	3185	420***	8*	216.423*	9*						

表 13 營運路線組合方案之電腦程式輸出結果表(直形路線-未調整成政策班距)

方案	平均列車承載量(率)	路線別	起迄站	站間最大運量	來回長度(公尺)	車站數	行車時間(秒)平均來回 Td	行車週期(秒)Cy	班距(秒)H	列車數 TN	延車公里	路線總班次需求 F	方案總轉車人次數	方案總等車及轉車時間(分)	營運者總成本(元)	使用者總成本(元)	系統總成本	名次
1	1263*	BL2	B5<->B13	11375	15334	9	1266	2216	420***	6*	138	9*	0	31083.1	52276*	51597*	103874*	1
2	765*	BL1	B5<->SW1	6885	11527	6	861	1711	420***	5*	103	9*	0	25508	91574*	42343*	133917*	2
	498*	BL2	B5<->B13	4490	15334	9	1266	2216	420***	6*	138	9*						

表 14 營運路線組合方案之電腦程式輸出結果表(直形路線-調整成政策班距)

方案	路線別	起迄站	站間最大運量	來回長度(公尺)	車站數	行車時間(秒)平均來回 Td	行車週期(秒)Cy	班距(秒)H	列車數 TN	總延車公里 TdL	路線總班次需求 F	方案總轉車人次數	方案總等車及轉車時間(分)	營運者總成本(元)	使用者總成本(元)	系統總成本	名次
1	BL2	B5<->B13	11375	15334	9	1266	2216	600	4	92.004	6	0	44404	34851	73711	108562	1
2	BL1	B5<->SW1	6885	11527	6	861	1711	900	2	46.108	4	0	70605	34891	117204	152095	2
	BL2	B5<->B13	4490	15334	9	1266	2216	1200	2	46.002	3						

註：表中「方案總轉車人次數」一欄，不包括從木柵線到板南線之轉車不便人次數，但包含忠孝復興站轉車等候之總時間成本(亦即將所有從木柵線轉車之旅客，均視為從忠孝復興站開始搭車)。而從板南線經台北車站轉新店線、淡水線或中和線之轉車不便人次數與轉車等候時間，以及從新店線、淡水線或中和線轉往板南線之轉車人次數與轉車等候時間均計數在合併路線【表 11 及表 12 之方案總轉車人次數】內。

#### 4. 敏感度分析

為了解各營運參數及控制變數的改變對營運路線設計之影響，本研究透過敏感度

分析之方式，在現有的旅運量水準下固定其他可能影響因素，僅以變動其中一項因素來探討捷運路網最適營運路線設計及總成本之影響。

當僅變動班距一項因素，則可從分析數據(如表 15 及圖 14 所示)中發現，班距設定值愈小，所需之班次數愈多，雖然旅客等候時間因而減少，但使業者所需提供之列車數相對地增加，造成延車公里數亦大增，故營運成本增加，此一輸出結果與先驗知識相符。再者，若各方案中之營運者成本及所需列車數相同，在不同之設計路線組合方案下，有可能造成轉車人次數不同，使得系統總成本亦不同；從表 15 及圖 15 中可看出，在相同班距 240 秒下，比較方案四與方案七之系統總成本，即可發現方案四優於方案七。由此得知，若未能配合運量分布情形下設計營運路線，將有可能因路線組合不當造成系統總成本大幅增加。

再者，若僅變動列車最大承載量設定值一項因素，則從分析數據(如表 16 所示)中亦可發現，當列車最大承載量設定值愈小，所需之班次數愈多，業者需提供較多的列車數以維持正當營運，使得營運者成本亦因此增加；然而班次數的增加，將使班距降低，使得旅客等候時間因而減少，使用者成本也會因此而減少。

表 15 班距變動下之敏感度分析

班距	方案	列車數	營運者成本	使用者成本	系統總成本	名次
240 秒	1	56	699806*	173053*	872860*	7
	2	50	594547*	192807*	787354*	5
	3	47	553046*	200010*	753056*	3
	4	40	462526*	262143*	724669*	1
	5	50	594547*	194579*	789126*	6
	6	47	553046*	202495*	755541*	4
	7	40	462526*	268199*	730725*	2

班距	方案	列車數	營運者成本	使用者成本	系統總成本	名次
360 秒	1	38	466537*	257665*	724202*	7
	2	34	396364*	286172*	682537*	3
	3	32	368697*	296662*	665359*	1
	4	27	308350*	380777*	689128*	5
	5	34	396364*	288260*	684625*	4
	6	32	368697*	299590*	668288*	2
	7	27	308350*	387913*	696263*	6



表 15 班距變動下之敏感度分析(續)

班距	方案	列車數	營運者成本	使用者成本	系統總成本	名次
480 秒	1	30	373230*	342276*	715506*	5
	2	27	317091*	379538*	696630*	3
	3	25	294957*	393314*	688272*	1
	4	22	246680*	499412*	746093*	6
	5	27	317091*	381941*	699033*	4
	6	25	294957*	396685*	691643*	2
	7	22	246680*	507626*	754307*	7

班距	方案	列車數	營運者成本	使用者成本	系統總成本	名次
600 秒	1	23	279922*	426887*	706810*	1
	2	20	237818*	472903*	710722*	2
	3	19	221218*	489967*	711185*	3
	4	16	185010*	618047*	803057*	6
	5	21	237818*	475622*	713441*	4
	6	20	221218*	493780*	714999*	5
	7	17	185010*	627340*	812350*	7

班距	方案	列車數	營運者成本	使用者成本	系統總成本	名次
極限值 (900/720 秒 或 900/450 秒)	1	23	211543	565293	776836	1
	2	20	183474	614641	798115	3
	3	19	172407	632917	805324	4
	4	16	223051	555161	778212	2
	5	21	176456	643480	819936	6
	6	20	162623	672768	835390	7
	7	17	210245	597599	807844	5

表 16 列車最大承載量變動下之敏感度分析

列車最大承載量設定值	方案	列車數	營運者成本	使用者成本	系統總成本	名次
1408	1	23	279922*	426887*	706810*	1
	2	20	237818*	472903*	710722*	3
	3	19	221218*	489967*	711185*	4
	4	26	309648*	400187*	709836*	2
	5	21	237818*	475622*	713441*	5
	6	20	221218*	493780*	714999*	6
	7	26	293640*	427951*	721592*	7



表 16 列車最大承載量變動下之敏感度分析(續)

列車最大承載量設定值	方案	列車數	營運者成本	使用者成本	系統總成本	名次
1936	1	17	211543	565293	776836	1
	2	16	183474	614641	798115	3
	3	15	172407	632917	805324	4
	4	19	223051	555161	778212	2
	5	15	176456	643480	819936	6
	6	14	162623	672768	835390	7
	7	18	210245	597599	807844	5

列車最大承載量設定值	方案	列車數	營運者成本	使用者成本	系統總成本	名次
2200	1	15	186615*	638415*	825030*	2
	2	14	158545*	706317*	864863*	4
	3	13	147478*	731598*	879077*	6
	4	17	198123*	606769*	804893*	1
	5	14	158545*	709825*	868371*	5
	6	13	147478*	736518*	883997*	7
	7	17	188518*	644877*	833395*	3

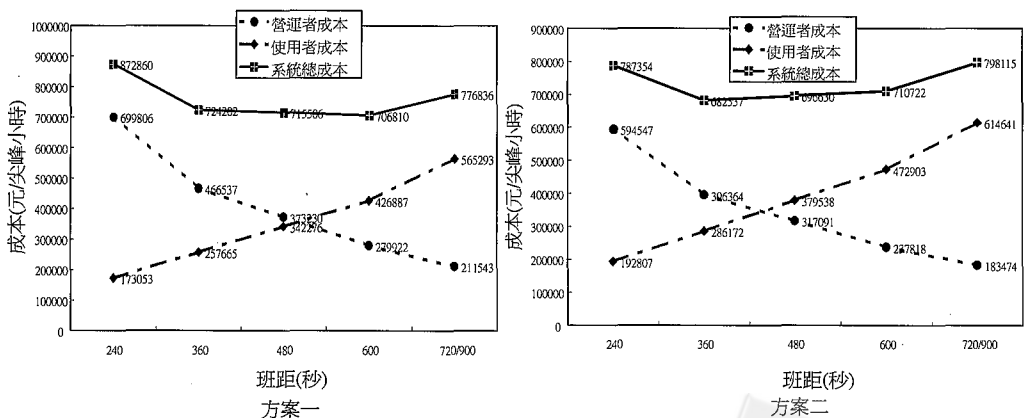


圖 14 同方案內不同班距下之趨勢分析

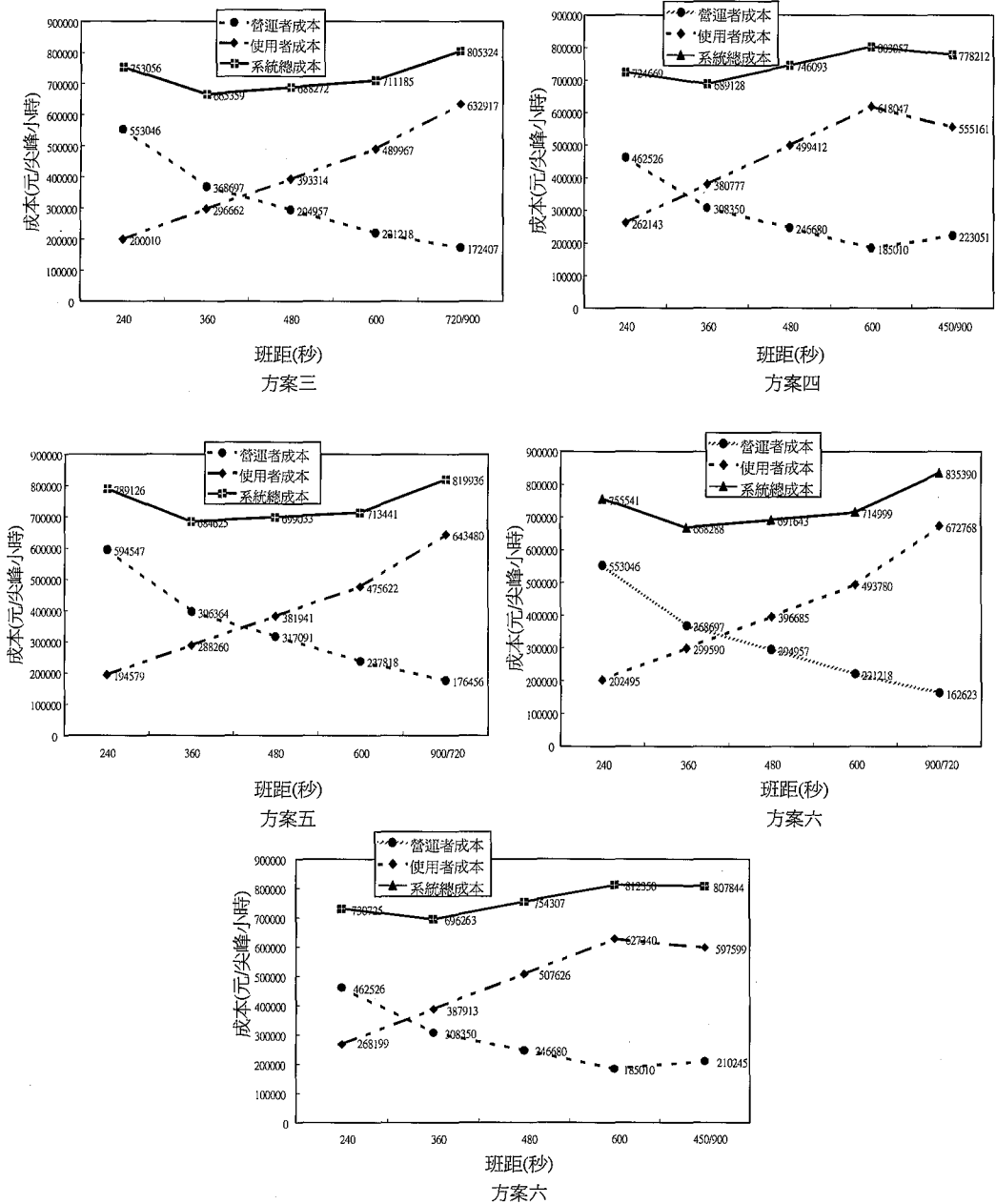


圖 14 同方案內不同班距下之趨勢分析(續)



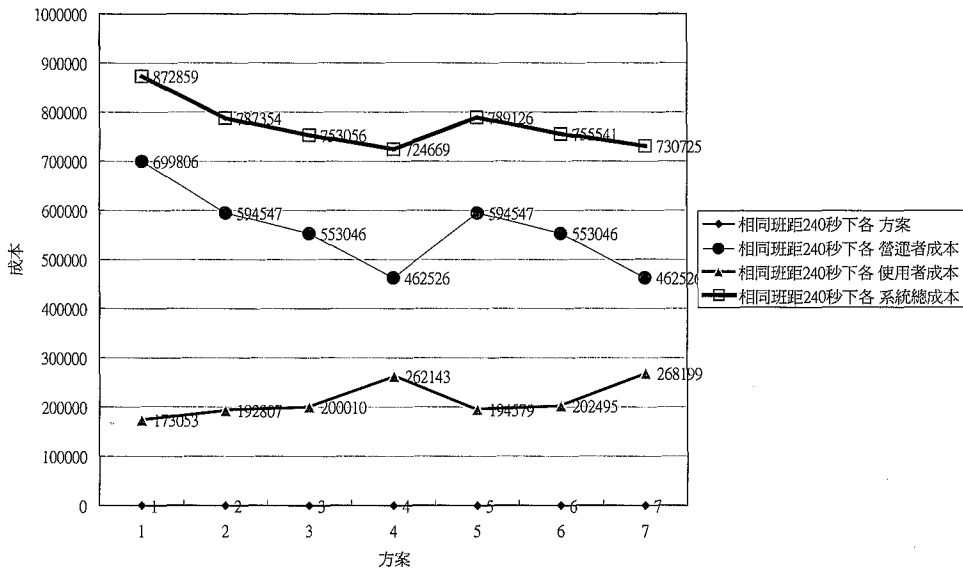


圖 15 相同班距 240 秒下之各方案成本趨勢分析

## 七、結論與建議

### 7.1 結論

1. 本研究分析捷運系統營運之特性，提出捷運營運後之路網設計方法，包含基本營運路線與可行營運路線組合二種路線設計，並以最短營運路線長度、車站服務因子、路線連通因子、轉車次數限制、最小班次數、路線最大容量因子及系統總列車數等控制變數來構建營運路線組合之設計程序。
2. 為兼顧列車折返之安全性及效率性，本研究透過列車運行折返及行車控制等資料之特性分析，歸納出符合列車正常折返點之評選要件。
3. 本研究為兼顧使用者與營運者兩者之間有相互抵換(trade off)之關係，建立以系統總成本作為路網評選之總評估指標，以確保所尋求之營運路線組合方案為最適。
4. 從實例分析中可看出，營運路線組合應考量實際旅運量分布情形，如此才不致因路線組合不當，設計出系統總成本偏高之無效率方案。
5. 由於本研究之營運路線組合設計方法可透過營運參數與控制變數之調整，產生符合不同設計標準之路網方案，例如本研究係以營運單位現階段所擁有之列車數作為營運路線設計之營運參數，倘營運單位欲增加其列車數，則此一參數之設定值，將可

自行調整。因此，顯示此設計方法可依決策者需求改變，具有相當的彈性。

6. 本研究所提出之營運路線設計方法主要係用於捷運系統已營運通車階段，其內容在於提供一系統化方法來找出最佳營運路線組合方案。

## 7.2 建議

1. 由於本研究實例分析所蒐集之旅運量資料係以「整點時段切割」方式計數，然而實際上旅運量尖峰時段未必恰巧發生在整點時段內；再者，旅次起迄的時間點亦並非全然在同一個時段內，建議後續若能調整計數切割時段，將可改善並獲取更精確的運量資料以利分析與決策。
2. 本研究在進行實例分析時，由於小南門維護支線尚未加入營運行列，使得所設計組合之營運路線數較少；再者，新通車路段加入營運之初期，旅運量仍在變化中，因此，後續若能在旅運量成長穩定情況下，針對日趨複雜之捷運路網，參考並利用本研究之設計方法來評選出最適之路線組合方案，將可滿足旅運需求並能提升經營績效。
3. 由於實際營運資料取得不易，故而在實例分析中，參考台北捷運公司年報資料加以簡化計算而得。倘有更詳盡之營運成本資料，應仍可套用於本研究以更精確求解。
4. 本研究在進行可行營運路線組合之運量分派時，係以最大承載量來求算列車班次數，亦即每班車均是假設「滿載」之效率，故不考慮空車率之問題。後續可另行設定尖峰列車服務水準以評選出所需最適之營運路線組合方案。

## 參考文獻

1. 中興工程顧問股份有限公司，「台中都會區捷運路網細部規劃報告－第二冊路網規劃」，民國八十七年七月。
2. 台北捷運工程局，台北都會區大眾捷運系統規劃手冊－第二冊營運及維修規劃，第十二版，民國八十七年十一月。
3. 凌建勳，「營運規劃相關課題－列車服務計畫之探討」，台北捷運局十週年慶研討會，民國八十六年九月十一日，頁 86-119。
4. 張學孔、涂保民、朱珮芸、許平和，「捷運系統服務路線長度之最佳化研究」，中國土木水利工程學刊，六卷四期，民國八十三年，頁 445-455。
5. 「地鐵公司一九九八年度年報」，香港地鐵公司，民國八十八年。
6. 周義華、林祥生，「都市公車路網設計方法之研究」，運輸計劃季刊，第十四卷第四期，民國七十四年十二月，頁 485-529。

7. 周義華、邱榮川，「配合捷運系統公車路網設計方法之研究」，運輸計劃季刊，第十六卷第二期，民國七十六年六月，頁 319-344。
8. 林益民，「大眾捷運系統費率訂定之研究」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國八十六年六月。
9. Small, K. A., *Urban Transportation Economics*, Harwood Academic, 1992.
10. 黃俐嘉，「公車路網績效評估模式之研究」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國八十六年六月。
11. 邱奕明，「公車路線調整準則與評估方法之研究」，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國八十七年六月。
12. Welding, P. I., "The Instability of Close Interval Service", *Operations Research*, Quartely, Vol. 8, 1957, pp. 133-148.
13. Jolliffe, J. K. and Hutchinson, T. P., "A Behavioral Explanation of the Association between Bus and Passenger Arrivals at a Bus Stop", *Transportation Science*, No. 9, 1975, pp. 248-282.
14. Turmquist, M. A., "A Model for Investigating the Effects of Service Frequency and Reliability on Bus Passenger Waiting Times", *Transportation Research Record*, No. 663, 1978, pp. 70-73.
15. 林國顯，「都市公車路網轉車規劃與評估方法之研究」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國七十五年。
16. 周義華、游政霖，「城際客運轉運系統路線設計之研究」，運輸計劃季刊，第二十九卷第一期，民國八十九年三月，頁 143-180。
17. 謝興盛，「自動發車與列車調整」，台北捷運高運量號誌電腦 CTC 技術手冊，民國八十七年十月七日。
18. 「高運量系統行車運轉作業程序」，台北捷運公司，民國八十七年九月一日修訂。