

國立交通大學
運輸科技與管理學系

博士論文

應用基因演算法於捷運列車運行計畫之研究
Mass Transit Operational Route Design Using Genetic Algorithm



研究生：林誌銘

指導教授：王晉元 博士

中華民國九十八年六月

應用基因演算法於捷運列車運行計畫之研究

Mass Transit Operational Route Design Using Genetic Algorithm

研究生：林誌銘
指導教授：王晉元

Student：Chih-Ming Lin
Advisor：Dr. Jin-Yuan Wang

國立交通大學
運輸科技與管理學系
博士論文

A Thesis

Submitted to Department of Transportation Technology and Management

College of Management

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

DOCTOR OF PHILOSOPHY

in

Transportation Technology and Management

June 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年六月

應用基因演算法於捷運列車運行計畫之研究

學生：林誌銘

指導教授：王晉元 博士

國立交通大學運輸科技與管理學系博士論文

摘 要

捷運公司為兼顧服務水準與營運成本，重要營運策略之一是規劃良好的列車運行計畫，其主要目的在於規劃最適的營運模式及班距，以滿足系統特性、列車數限制及服務指標規範，並求營運成本最小；但旅客依據列車運行計畫進行路徑選擇的結果，會影響原來預估的服務水準，因此捷運公司須重複修正列車運行計畫，形成了一個組合最佳化問題。

由於列車運行計畫具有問題規模大、限制式多、不可行解空間區域大等特性，依問題特性所構建的模式屬 NP-hard 性質，難以保證可求得最佳解，故本研究應用可全域搜尋、容易增加限制式的基因演算法來求解，提出了適合列車運行計畫的網路構建方式、二個快速的可行啟始解產生法、三個交配運算子及一個突變運算子；在敏感度分析後採用適合的交配率及突變率組合，及比較執行結果後找出適合的啟始解產生法與交配運算子的組合，並藉由基因修補機制、特殊的適合度函數及檢測重複機制來加速尋優過程，使得演算法能兼顧求解品質及速度。

最後，藉由臺北捷運公司高運量系統路網的實例驗證，探討如何進行營運模式及班距決策，驗證結果顯示本演算法具有穩定性、實用性及良好求解品質，可作為捷運公司之參考。

Mass Transit Operational Route Design Using Genetic Algorithm

Student: Chih-Ming Lin

Advisor: Dr. Jin-Yuan Wang

Department of Transportation Technology and Management

National Chiao Tung University

ABSTRACT

The mass transit operational route design problem (MTORDP) is a NP-hard problem and difficult to solve for a global optimum solution. This thesis proposes a genetic algorithm for solving the MTORDP. In the proposed algorithm, two smart algorithms are designed to generate initial feasible solution rapidly. An adequate network model, a gene repairing strategy and a redundancy checking mechanism were developed to minimize the computation time. Improved fitness function was embedded with the passenger assignment model and utilized to improve the quality of the solution. The proper combination of crossover operators and mutation operators was decided for the MTORDP.

The proposed algorithm was tested with the current MRT network in Taipei as a specimen. Results indicate that the proposed algorithm is effective in solving real-world problems.

誌 謝

論文得以順利完成，進而取得博士學位，首先要感謝我的指導教授王晉元老師，老師自我大學時代起即給我寶貴的人生方向指引，歷經研究生期間在學術領域的更上層樓、參與研究計畫的專案管理培養、從軍期間的聯繫及鼓勵、退伍後幫助進入捷運專業領域，及至攻讀博士學位期間的指導及督促，老師給我的幫助、教導與提攜，使學生受益良多，師恩浩蕩，在此謹致上最深的敬意與謝意。

感謝論文口試暨審查委員中央大學顏上堯教授、成功大學魏健宏教授、本校劉復華教授、韓復華教授、卓訓榮教授，於口試與審查期間撥冗細審，並給予寶貴意見與殷切指正，使本論文更臻完備，在此致上學生由衷的感謝。

在這一段研究日子裡，感謝同學啟瑞、永祥、宇平、學弟至康、宗成、小松在研究探討、經驗交流、互相打氣、資料收集、英文潤稿、程式功力上的協助；學弟思文及實驗室學弟妹們在口試期間的幫忙，都讓我在這一條漫長道路上不覺得寂寞。

感謝台北捷運公司提供路網資訊及運量資料，讓研究能有一個良好驗證的環境，在我任職台北捷運公司六年裡，陳董事長椿亮、蔡總經理輝昇及各處室各級長官及眾多同事，啟蒙及豐富了我在捷運專業領域上的廣度及深度，衷心期望本研究所得能有所回饋。

在捷運專業進一步提升及職場照顧上，感謝高雄捷運公司顏總經理邦傑、張副總辰秋的指导、提攜及鼓勵學術發展，以及在我們運務處業務上有問題時，給予充分的信任與支持。此外，也感謝一起走過高雄捷運營運準備階段的錢處長台珩、吳處長俊龍、施經理世平、營運規劃處夥伴們、香港地鐵連顧問鴻福、謝顧問傳威、其他專業顧問，及所有運務處同仁，讓我即使是最繁忙、壓力最大時，也能兼顧工作與學業的均衡發展，也期望研究所得能對公司營運管理有所幫助。

最後感謝我摯愛的祖父、父母、家族長輩、弟、妹，由於您們的支持與鼓勵，才使本論文得以順利產生，並且完成博士學位；可愛的女兒-宜萱、亭妍，童言童語，歡笑不斷，她們的可愛與貼心在論文最緊張時提供了最好的調劑；給我最親愛的老婆-富美多年來的鼓勵、配合與辛苦持家，「執子之手，與子偕老」，我們相信接下來將是苦盡甘來的日子。

林誌銘 謹誌

2009年6月於新竹交大

目 錄

	頁次
中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌 謝.....	iii
表目錄.....	vii
圖目錄.....	vii
符號說明.....	viii
一、 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	4
1.3 研究範圍與對象.....	4
1.4 研究方法與流程.....	5
二、 文獻回顧.....	6
2.1 列車運行計畫問題探討.....	6
2.1.1 營運模式的意義與組成要素.....	6
2.1.2 複合班距計算公式.....	8
2.1.3 系統運能與班距關係.....	9
2.1.4 營運班距與電聯車需求數關係.....	9
2.1.5 營運模式及班距規劃原則.....	9
2.2 列車運行計畫與運量需求關係之探討.....	9
2.3 列車運行計畫模式特性.....	10
2.4 MTORDP 求解方法之探討.....	12
2.5 基因演算法概述.....	13
2.5.1 GA 架構說明.....	14
2.5.2 GA 特性.....	17
2.6 小結.....	18
三、 MTORDP 數學模式構建.....	19
3.1 MTORDP 網路模型之構建.....	19
3.2 非線性混合整數數學規劃模式.....	22
3.3 MTORDP 問題規模之探討.....	25
3.4 相關假設條件與重要參數.....	27

3.5	小結	32
四、	MTORDP 基因演算法	33
4.1	基因編碼	34
4.2	產生可行啟始解	34
4.3	建立網路模型	35
4.4	運量指派	36
4.5	基因之修補	36
4.6	加速收斂的適合度函數	36
4.7	終止條件的設定	37
4.8	三種排除不可行解的交配法	37
4.9	排除不可行解的突變法	38
4.10	重複性檢核	39
4.11	小結	39
五、	實例驗證	41
5.1	例題說明	41
5.2	交配率與突變率敏感度分析	44
5.3	啟始解產生方式之績效比較	45
5.4	交配法之效率探討	46
5.5	突變法之效率探討	47
5.6	三種交配法之績效比較	47
5.7	最小車數法及雙點交配法之求解品質探討	48
5.8	最佳解特性分析	51
5.9	第二最佳解特性分析	52
5.10	小結	53
六、	結論與建議	54
6.1	結論	54
6.2	建議	54
	參考文獻	56
	簡歷	59

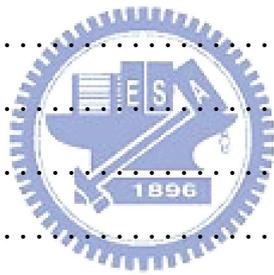


表目錄

表 1 各類節線特性說明	22
表 2 TRTC 高運量系統路網參數值	25
表 3 變數數量統計表	26
表 4 限制式數量統計表	26
表 5 行人交通設施服務水準等級表-水平步道/通勤區	30
表 6 各國捷運系統車站月台設計準則之比較	31
表 7 營運模式彙整表	42
表 8 TRTC 高運量系統平常日尖峰小時列車使用情形彙整表	43
表 9 本模式相關參數彙整表	44
表 10 交配率與突變率組合敏感度分析表	45
表 11 不同啟始解產生法之求解結果比較表	46
表 12 交配法效率比較表	47
表 13 突變法效率比較表	47
表 14 不同交配法對同一啟始解之求解結果比較表	49
表 15 最小車數法加雙點交配法多次執行結果彙整表	50
表 16 最佳解列車使用情形彙整表	51
表 17 第二最佳解列車使用情形彙整表	53

圖目錄

圖 1	台北捷運公司高運量系統列車服務計畫作業流程圖	2
圖 2	列車運行計畫架構圖	3
圖 3	研究流程圖	5
圖 4	營運模式示意圖	7
圖 5	營運班距與電聯車需求數關係圖	9
圖 6	基因演算法架構圖	14
圖 7	二元編碼範例	15
圖 8	輪盤法示意圖	16
圖 9	單點交配示意圖	17
圖 10	MTORDP 網路模型示意圖	20
圖 11	基因演算法示意圖	33
圖 12	基因編碼範例	34
圖 13	單點交配法	37
圖 14	單點突變交配法	38
圖 15	雙點交配法	38
圖 16	研究路網圖	42
圖 17	TRTC 現行高運量主線路網班距分佈圖	43
圖 18	最佳解之班距分佈圖	52
圖 19	第二最佳解之班距分佈圖	53



符號說明

f_k^{rs} ：整數決策變數，虛擬路網中從起站 r 到迄站 s 的第 k 條替選路徑上被指派的旅客數，人／小時；

f_i^{\max} ：營運模式 i 所有路段中最大站間流量；

F_i ：實數決策變數，原始路網中營運模式 i 的頻率（frequency，即班距的倒數），車次數／小時； $i=1 \sim n$ ；

i ：整數常數，營運模式編號；

n ：整數常數，營運模式總數；

n_a ：a 類節線的個數；

n_b ：b 類節線的個數；

n_c ：c 類節線的個數；

n_d ：d 類節線的個數；

n_e ：e 類節線的個數；

OT ：實數常數，節線上最小班距限制，小時／車；

PT ：實數常數，節線上政策班距限制，小時／車；

RL_i ：實數常數，營運模式 i 的來回行駛距離，公里；

RT_i ：實數常數，營運模式 i 的總行駛時間，小時；

r ：整數常數，起站代號；

s ：整數常數，迄站代號；

s_i ：二元決策變數，原始路網中營運模式 i 被選擇時為 1，不被選擇時為 0；

T_{rs} ：整數常數，從起站 r 到迄站 s 的旅客數，人／小時；

TR_c ：整數常數，一列車容量，人／車；

TR_i ：整數變數，營運模式 i 所使用列車數，車；

TR_i^{\max} ：營運模式 i 配車數上限，車；

TR_i^{\min} ：營運模式 i 配車數下限，車；

TRC ：整數常數，可上線列車數，車；

x_a ：整數因變數，虛擬路網中代表進站動作節線之 a 類節線的旅客數，人／小時；
 $a=1 \sim n_a$ ；

x_b ：整數因變數，虛擬路網中代表月台候車及上車動作之 b 類節線上的旅客數，人／小時；
 $b=1 \sim n_b$ ；

x_c ：整數因變數，虛擬路網中代表乘車動作之 c 類節線上的旅客數，人／小時； $c=1\sim n_c$ ；

x_d ：整數因變數，虛擬路網中代表下車動作之 d 類節線上的旅客數，人／小時； $d=1\sim n_d$ ；

x_e ：整數因變數，虛擬路網中代表出站動作之 e 類節線上的旅客數，人／小時； $e=1\sim n_e$ ；

α ：實數常數，每列車公里成本，元／車·公里；

β ：實數常數，每小時列車折舊成本，元／車·小時；

γ ：實數常數，旅客車內時間價值成本，元／小時；

λ ：實數常數，決策者所使用之權重；

θ_{ij} ：二元參數，原始路網中的 j 路段若被營運模式 i 服務時為 1，否則為 0；

δ_{ak}^{rs} ：二元參數，若 a 類節線包含於從起站 r 到迄站 s 之第 k 條替選路徑中為 1，否則為 0；

δ_{bk}^{rs} ：二元參數，若 b 類節線包含於從起站 r 到迄站 s 之第 k 條替選路徑中為 1，否則為 0；

δ_{ck}^{rs} ：二元參數，若 c 類節線包含於從起站 r 到迄站 s 之第 k 條替選路徑中為 1，否則為 0；

δ_{dk}^{rs} ：二元參數，若 d 類節線包含於從起站 r 到迄站 s 之第 k 條替選路徑中為 1，否則為 0；

δ_{ek}^{rs} ：二元參數，若 e 類節線包含於從起站 r 到迄站 s 之第 k 條替選路徑中為 1，否則為 0；

v_a ： a 類節線的容量，人；

v_b ： b 類節線的容量，人；

v_c ： c 類節線的容量，人；

v_d ： d 類節線的容量，人；

v_e ： e 類節線的容量，人；

Z_a ：二元變數，若 a 類節線上的流量 x_a 大於其容量 v_a 則為 1，否則為 0；

Z_b ：二元變數，若 b 類節線上的流量 x_b 大於其容量 v_b 則為 1，否則為 0；

Z_c ：二元變數，若 c 類節線上的流量 x_c 大於其容量 v_c 則為 1，否則為 0；

Z_d ：二元變數，若 d 類節線上的流量 x_d 大於其容量 v_d 則為 1，否則為 0；及

Z_e ：二元變數，若 e 類節線上的流量 x_e 大於其容量 v_e 則為 1，否則為 0。



1.1 研究動機

隨著經濟活動快速發展，人們對於交通需求與日俱增，私人運具隨之蓬勃發展的結果，造成都市道路交通擁擠，並產生市容、環保、安全等相關社會問題，故各大都市均積極規劃新建或擴建捷運系統路網，期望藉由提供快速、安全、舒適的大眾運輸系統，與私人運具競爭，達到紓緩道路交通擁擠、降低環境汙染及提高交通安全等目的。

捷運公司在都市大眾運輸分工中，雖肩負著短時間內輸運大量旅次、提供良好搭乘環境的責任，但同時亦必須達成永續經營的企業目標，故需規劃良好的營運策略，以兼顧營收及成本；其中，妥為規劃列車運行計畫(Operational Route Design)即是重要的營運策略之一[1]，圖 1 說明了在捷運公司服務計畫中，列車運行計畫規劃結果良好與否，除了影響到主管機關在服務水準方面對捷運公司的監督結果以外，也直接影響列車時刻表及司機員排班作業規劃之結果及成本多寡，可知該計畫在捷運公司營運管理策略上扮演了極其重要的角色。

捷運列車運行計畫規劃架構如圖 2 所示，捷運公司為遵守捷運相關法規規定，必須在市政府的核備下研擬列車運行計畫及系統服務指標，其中系統服務指標規範了最少應達到的服務水準（例如班距、速率、承載率等），而列車運行計畫則代表提供的服務內容，例如營運模式、尖離峰時段、班距等，其中又以營運模式及班距為影響成本的主要決策變數。

捷運公司為樽節營運成本，會在系統資源限制（如可用列車數、軌道限制等）、服務指標規範（主要為班距、承載率等）下妥善規劃營運模式及班距，以求儘量降低司機員數、營運列車數及列車公里數等變動成本，如此提供的運能條件會影響旅客的路徑選擇行為；在固定的旅客起迄分佈下，所有旅客同時選擇自己旅行時間成本最小的路徑後，可能會使部分車站間的列車上或車站候車區內產生擁擠情形，以致部分服務指標值（主要是車廂內的承載率）不符規定，導致捷運公司在市政府監督下，必須重新規劃列車運行計畫來滿足旅客需求。

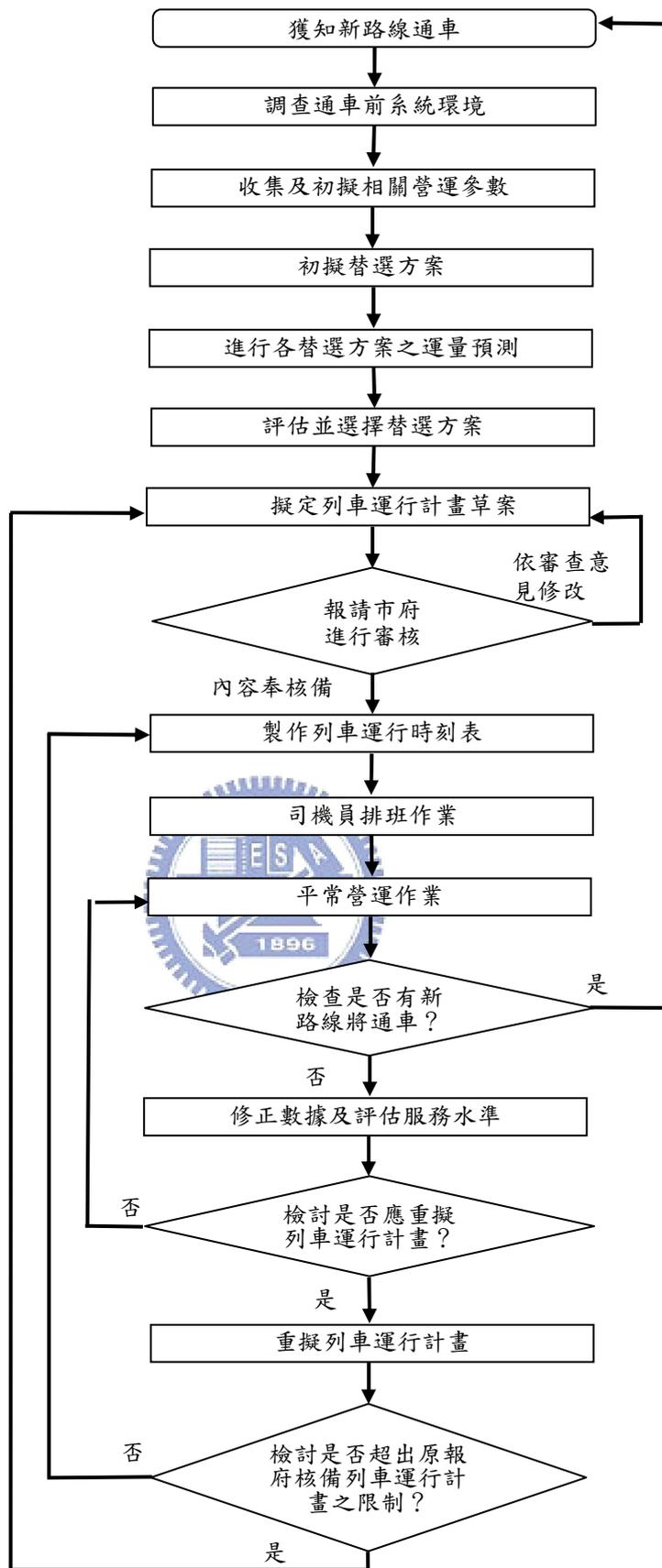


圖 1 台北捷運公司高運量系統列車服務計畫作業流程圖

資料來源：陳強等[1]

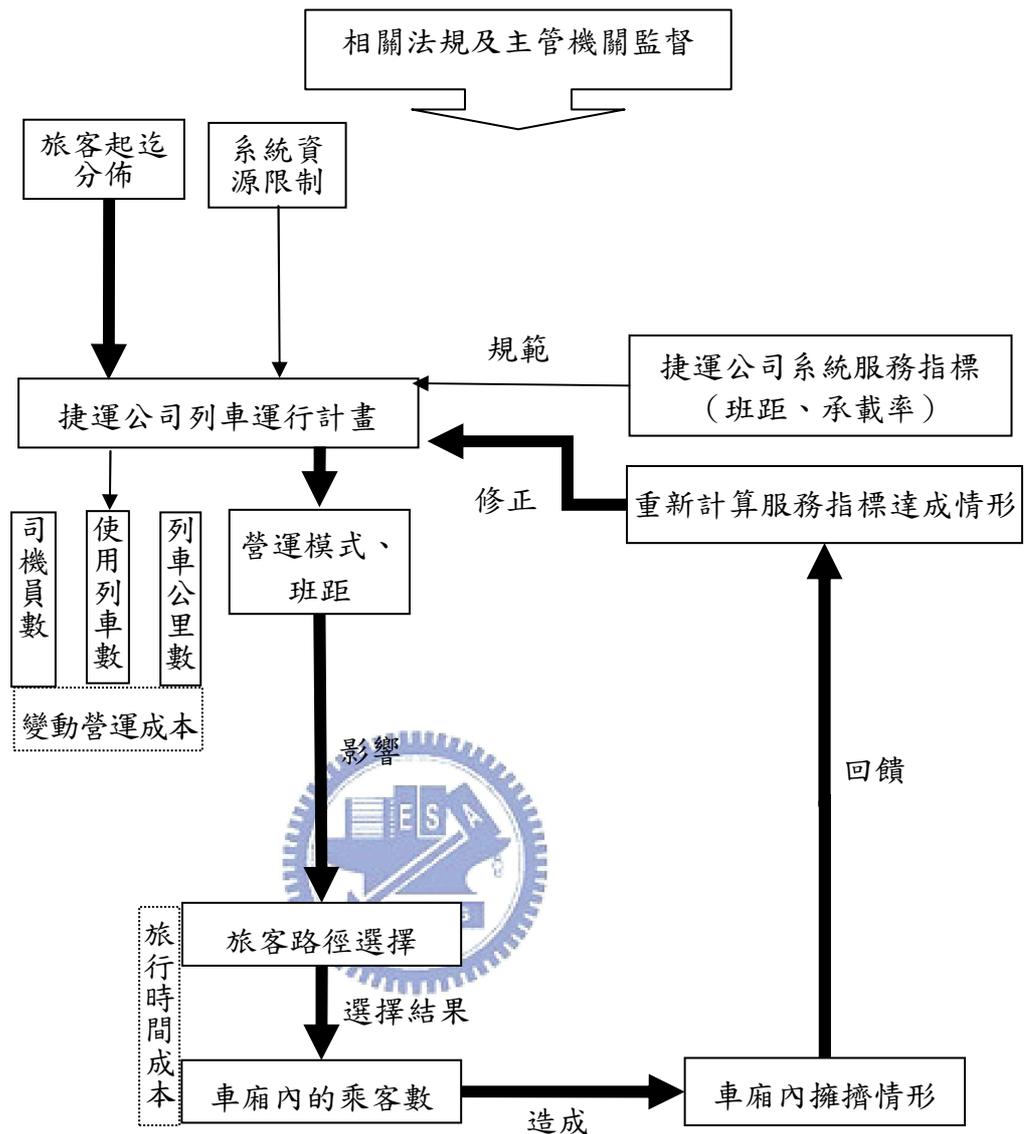


圖 2 列車運行計畫架構圖

前述修正過程若過於頻繁，將造成旅客搭乘不便、影響捷運公司形象及增加相關營運成本等問題。此外，大部分營運機關如台北捷運公司(以下簡稱 TRTC)現況，是以人工方式調整該計畫，有經驗傳承不易及規劃結果難以驗證的問題，因此在國內各界正積極發展軌道產業的當下，如何有效解決捷運列車運行計畫規劃問題成為都市交通規劃及捷運營運管理的重要課題。

就模式角度來看，由圖 2 之粗黑線軌跡可知，捷運公司為政策規劃者，由於無法事先控制旅客的路徑選擇行為，故第一次規劃時，會基於經驗法則決定了初期的營運模式及班距；其後，旅客在其所面對的路網特性及時間成本下選

擇營運模式，選擇結果將產生實際的車廂內乘載量，這些乘載量可能超過捷運列車的設計容量，所產生的車內擁擠情形將使列車服務水準低於法規規定的標準，以致捷運公司基於法規規定必須重訂定新的列車運行計畫來提供服務；當列車運行計畫修正後，旅客又重新選擇適合他的營運模式，產生新的車廂內擁擠情形。這個過程將持續進行至捷運公司找到一個同時符合營運成本最小、旅客成本小及滿足服務指標要求的列車運行計畫為止，因而形成了一個組合最佳化問題。

這一個組合最佳化問題屬於 NP-Hard 問題，即使是簡單的網路問題亦無法以最佳化模式求解，因很難確定是否找到的解是局部最佳解還是全域最佳解 [2]。此外，捷運列車運行計畫在實務上必須符合許多限制式，且問題規模會隨著路網的擴建而益形複雜；因此，如何構建一快速、有效的模式，來協助捷運公司解決列車運行計畫中營運模式及班距之決策問題，成為本研究欲解決的研究課題。

1.2 研究目的

基於上述分析，本研究之研究目的可歸納如下：

1. 釐清列車運行計畫之問題特性；
2. 建立列車運行計畫適用的網路模型；
3. 構建列車運行計畫數學規劃模式，確認問題規模及複雜度；
4. 回顧常用求解方法，選擇適用本問題的求解策略及方向；
5. 構建能合理時間內求解列車運行計畫問題的方法；
6. 以 TRTC 現行高運量系統路網作實例驗證；及
7. 針對模式的應用及後續發展作結論與建議。

1.3 研究範圍與對象

綜上所述，在捷運系統長期規劃中，列車運行計畫是從捷運路網的候選營運模式中決定一組合適的營運模式及班距，以滿足運量需求並最小化營運成本及旅客時間成本的問題。

由於捷運系統肩負短時間內輸運大量旅客的任務，在尖峰時段會以能提供足夠運能的班距服務旅客，但基於運輸服務的不可儲存性，以及捷運系統高營運成本特性，若離峰時段仍提供高運能服務，則將造成營運不效率，甚至導致

虧損，有違營運公司永續經營的目標，故離峰時段大部分以政策班距來行駛列車，對於最適化班距的需求不高。

有鑑於此，本研究之研究範圍界定為：針對一個運量甚高、尖峰時段運量需求極大的捷運公司，以成本最小為目標，規劃出最適合尖峰時段實施的營運模式及班距組合；而本研究之研究對象則考量以資料取得便利、路網具備相當規模為主要考量因素，來選擇適當的捷運公司，並解決其列車運行計畫規劃問題。

1.4 研究方法與流程

本研究的研究方法，首先係建立捷運列車運行計畫數學規劃模式後，探討其問題規模及目前解法；其次就問題特性及捷運公司實務需要，考量捷運列車運行計畫特性，以總成本最小為目標，構建出能有效求解該問題的演算法，此外，為求加速執行速度，也會探討加速執行效率的策略，期能有效減少求解時間，加速問題求解之效率。

本研究流程如圖 3 所示，首先界定捷運列車運行計畫問題之範圍，繼而蒐集及回顧國內外相關文獻後，構建一般性的數學規劃模式，並發展合適的求解演算法。而後，以台北捷運公司高運量系統做為實例測試對象，根據測試之結果，提出結論與建議。

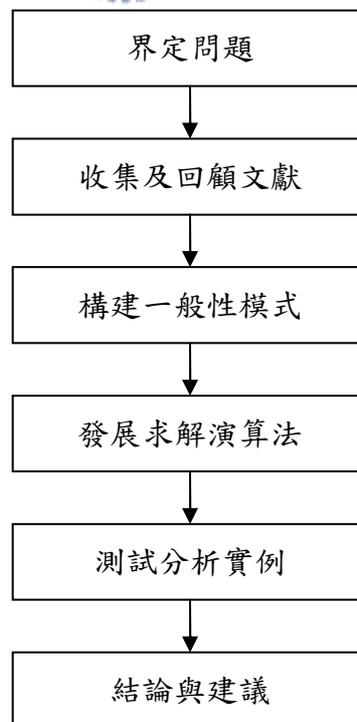


圖 3 研究流程圖

二、 文獻回顧

在本章中將藉由相關法令、捷運公司文件及學術文獻之回顧，釐清列車運行計畫問題特性及目前研究成果，首先在 2.1 節中分別探討列車運行計畫問題本質、營運模式意義及組成要素、班距意義及計算方式、班距與列車需求數關係及營運模式與班距規劃原則，以詳細說明捷運公司在規劃本問題時所考慮的各項供給面重要因素；其次，針對捷運系統規劃的供給面與需求面之關係，於 2.2 節中探討列車運行計畫與運量需求關係；在模式特性的探討上，則於 2.3 節中說明列車運行計畫問題與傳統大眾運輸路網設計與班距規劃問題相同及相異之處，以釐清本研究課題之獨特性與重要性。

在了解列車運行計畫問題本質及模式特性後，於 2.4 節中藉由相關文獻回顧，探討列車運行計畫問題目前的求解方法及成果，最後歸納出適合本問題的求解方法－基因演算法，並於 2.5 節中概述基因演算法的架構及特性，以利後續構建適合本研究問題的演算法。

2.1 列車運行計畫問題探討

依交通部頒「大眾捷運系統經營維護與安全監督實施辦法」規定，捷運公司於新路線通車前或營運穩定後發現運能供給不敷需求時，需研擬列車運行計畫報請地方主管機關核備後方得實施；且在實務上，必須確認該計畫被核備後，方能接續製作列車運行時刻表及司機員排班等作業，依 TRTC 逐年通車經驗，這些程序週而復始且頻率極高，故列車運行計畫制訂良好與否，成為捷運公司營運管理績效的主要影響因素之一。

列車運行計畫之輸入資料包含運量、可用列車數、列車行駛時間、折返時間、停靠站時間、軌道佈設等，決策內容則為營運模式、尖離峰班距、營運日型、尖離峰時段、服務時間、轉運列車、緊急應變運轉模式及執行方法等項目 [3]，其中又以營運模式（Operational Route，捷運路線上，列車在固定兩車站間之上下行軌來回行駛之運行方式）及班距（Headway，系統某一定點上，相鄰兩列車抵達的時間間隔）為主要決定項目，除需能滿足尖離峰運量需求外，亦直接影響到列車使用數、司機員人力、行車用電等成本項目，故需妥為規劃以兼顧營運成本與效益。

2.1.1 營運模式的意義與組成要素

有關營運模式之說明如圖 4 所示，圖 4 是一個有五個車站、二條營運模式

的簡化路網。其中，實線線段為鋼軌及轉轍器組成的軌道系統，虛線線段為營運模式，列車即依照規定的營運模式及班距在軌道上行駛。營運模式 1 來回行駛於車站 1 及車站 3 之間，車站 1 及車站 3 為端點站，車站 2 為中間站，選擇搭乘營運模式 1 的旅客，其面臨的班距為 H_1 ；營運模式 2 來回行駛於車站 1 及車站 5 之間，車站 2、3、4 為中間站，選擇搭乘營運模式 2 的旅客，其面臨的班距為 H_2 。

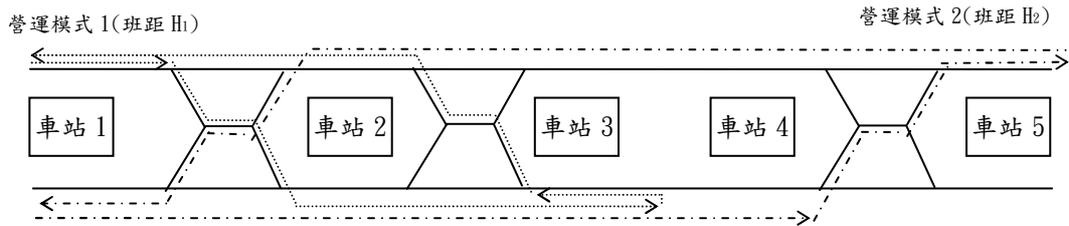


圖 4 營運模式示意圖

一條營運模式除了折返站以外，還有幾個重要項目構成基本特性：

1. 總行駛時間(Round Trip Time)

即列車從某一端點站出發開始、行駛各個車站站間軌道、停靠各中間站及在另一端點站折返，直到其回到原出發車站且完成出發前準備的總花費時間。總行駛時間代表了列車週轉率，對於一條營運模式而言，給定一個班距值，則越少的總行駛時間意謂著需要的列車數較少。而總行駛時間的組成要素依照前述過程包含了停靠站時間、站間行駛時間及折返時間。

2. 停靠站時間(Dwelling Time)

即列車停靠在每一個中間站，以利旅客上下車的時間。每一個車站的停靠站時間可以不同，且必須依據上下車運量妥為計算，若過短會有車上旅客無法下車，或月台旅客未全部上車的情形；過長則會導致總行駛時間增加，可能會使列車需求數增加而影響營運成本。

3. 站間行駛時間(Running Time)

即列車從某一車站出發時刻起算，直至該列車在下一車站停妥的時間間隔。在一固定的相鄰車站站間。越短的行駛時間代表越高的行駛速率及較多的能源損耗，故捷運公司通常會在不違反服務指標中行駛速率的前提下(例如 TRTC 為不低於 34KPH，高雄捷運為不低於 35KPH)，計算出一個節約能源的行駛速率後(例如，TRTC 為功能位階二、滑行；高雄捷運為 13% Runtime Reserve)，將站間行駛時間固定下來後輸入時刻表中，作為列車運

行的標準。

捷運系統營運時，若遇到瞬間月台人潮過多使得停靠站時間配合增加，或因大雨、濃霧等氣候因素，使得部份站間行駛時間多於時刻表的規定時，系統亦會在安全前提下，儘可能採縮短其他車站停靠站時間，或加速部分站間行駛速率的方式來維持到達端點站的時刻，否則可能會違反服務指標中的「準點率」及「延滯時間」等規範；故常態而言，每列車的總行駛時間是很接近原規劃值的。

4. 折返時間(Turnover Time)

即列車到達某一端點站停妥後，司機員依規定進行相關勤務後，使得該列車可再次往原來方向調頭出發的總花費時間。一般而言，包含單一司機員在原來的駕駛室位置完成開關切換、步行回另一車頭駕駛室後，完成發車前準備作業的時間，稱之為「單人勤務」。若「單人勤務」時間過多，導致不符時刻表規定時，捷運公司亦可調度額外的司機員協助，此時稱之為「雙人勤務」。「雙人勤務」雖有助於縮短折返時間，但卻會增加司機員人力成本，故通常會避免之。



2.1.2 複合班距計算公式

對於同時被營運模式 1 及營運模式 2 服務的車站而言，如欲從車站 1 前往車站 3 的旅客，他可以選擇搭乘營運模式 1 或營運模式 2，且在車站 1 候車時，

其面臨的班距為二個營運模式的班距倒數總和之倒數，即 $H_3 = \frac{1}{\frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2}}$ ；若

相同旅次起迄需求下有 n 條營運模式可供選擇，則該旅客所面臨的班距一般性的公式為 $H = \frac{1}{\sum_{i=1 \sim n} \frac{1}{H_i}}$ 。

有關班距的限制，以 TRTC 服務指標為例，為主線尖峰班距介於五分鐘至七分鐘，離峰介於七分鐘至十分鐘之間；一般而言，尖峰班距係 TRTC 依據尖峰時段之 OD 運量需求，以總成本最小為目標來推算而得，但最低不低於號誌系統所能提供的下限；離峰時段班距則因運量需求較低，而採政策班距及服務指標規定的上限來行駛。

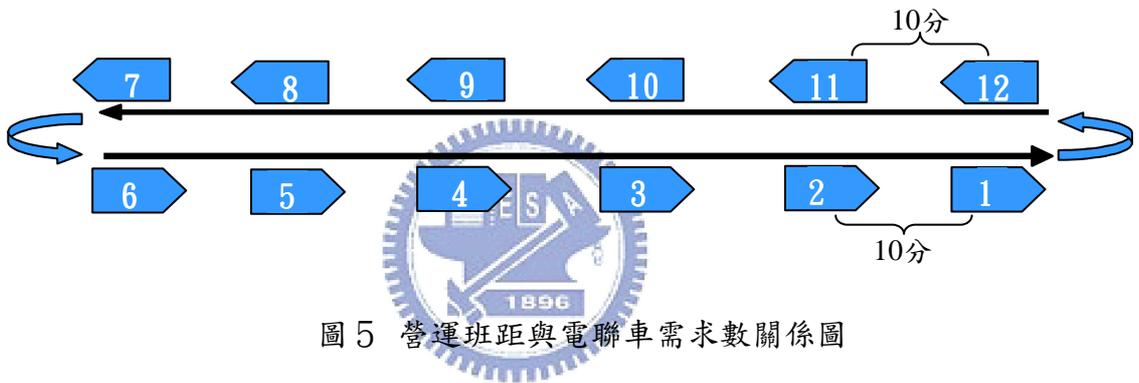
2.1.3 系統運能與班距關係

系統運能係指系統於設備正常使用狀況下，單方向每小時所能載運的旅客數量，若依 TRTC 服務指標承載率規定，尖峰時段每平方公尺站立六人計算，

每列車可承載 1936 人，則系統運能為 $\frac{1936 * 3600}{\text{班距(秒)}}$ 人/時。

2.1.4 營運班距與電聯車需求數關係

有關總行駛時間、營運班距及電聯車需求數之關係為「總行駛時間÷營運班距＝電聯車需求數」，因總行駛時間固定，故班距和電聯車需求數成反比關係。以圖 5 為例，假設某營運模式總行駛時間為 120 分鐘，且以 10 分班距運行，則電聯車需求數為 120 分÷10 分＝12 列。



2.1.5 營運模式及班距規劃原則

捷運公司對於營運模式及班距的規劃原則如下：

1. 規劃目標在求營運成本及(或)旅客綜合成本最少；
2. 營運模式之規劃必須符合軌道及號誌限制，並能滿足大部分旅客的旅次分佈型態；
3. 各路段班距需符合系統服務指標之規定以及運量的需求；
4. 尖、離峰時段的營運模式相同，以避免旅客搭乘習慣的混淆；及
5. 使用列車數總和必須低於可用列車數。

2.2 列車運行計畫與運量需求關係之探討

以 TRTC 為例，探討列車運行計畫對旅客的影響後發現，由於惡劣氣候、月台人潮擁擠等因素通常會造成不準點，故 TRTC 為避免誤導旅客，並不公佈列車時刻表(Time Table)，而是公佈尖離峰時段、尖離峰班距及營運模式等資訊。

一般而言，這些資訊內容的變動，會使捷運系統內各種起迄對(O-D Pair) 旅客的候車及轉車時間有所增減，進而影響了他們的運具選擇（選擇改搭或放棄捷運）、抵達捷運站時間（原來搭捷運者改變出門時間）、捷運內路徑選擇（選擇更節省時間的路徑）等行為。但由於列車數限制使得各營運模式的班距必須互相折衝(Trade-Off)，旅客候車時間也因此而互有消長，且營運模式的變更也導致不同旅客轉車時間的互有增減，所以有些旅客總旅行時間增加了，有些旅客的卻減少了，故整體而言，捷運旅客數增減應不大，

綜上，可推論除非 TRTC 大量地增加或減少使用列車數，使得整個捷運系統的平均旅行時間大幅變動，否則列車運行計畫變更所造成的外部效果並不顯著，亦即 TRTC 僅需考慮原來的旅客起迄對在系統內重新進行路徑選擇的影響，作為對列車運行計畫的回饋即可。

2.3 列車運行計畫模式特性

由於捷運路網逐漸綿密，前述規劃原則及考量旅客路徑選擇的回饋使得列車運行計畫問題規模大且限制式多。而目前國內列車運行計畫規劃作業係採人工方式進行，先以嘗試錯誤法規劃營運模式，其次計算各營運模式之班距、營運列車數及系統運能對照關係，再依專家經驗將總可用列車數分配至各營運模式，最後再依運量分佈情形規劃營運日型、尖離峰時段等其他項目。作業方式因係以人工調整，故有規劃時間長、較難確保品質、規劃結果因人而異、無法考量旅客路徑選擇的影響、無法提供更多決策參考資訊等問題，故亟需一套穩健、周延的模式協助規劃，以收事半功倍之效[1]。

以問題類別來看，捷運列車運行計畫問題可稱之為 MTORDP(The Mass Transit Operational Route Design Problem，以下均以 MTORDP 稱之)，屬於大眾運輸網路設計及班距規劃問題(Transit Network Design and Frequencies Setting Problem, TNDFSP)的一種特殊題型，TNDFSP 是由路網設計問題及班距規劃問題組成，針對 TNDFSP 有很多不同的模式及解法，如 Wirasinghe[4], Ceder [5], Fan and Machemehl[6] 及 Guihaire and Hao[7]的近期研究中均有完整的回顧；但是，絕大部分的研究都是針對都市公車系統，針對 MTORDP 求解的極為少數[2]。

MTORDP 有別於傳統 TNDFSP 模式的地方，在於 MTORDP 需要滿足更多的捷運營運特殊問題特性，且捷運系統基於這些因素，因此特別需要一個穩

健的、能反映這些實際問題的 MTORDP 模式，茲分述如下：

1. 出入口、月台容量限制

捷運系統因係 A 型路權，旅客進入系統後與外界道路環境有所隔絕，也造成了出入口、大廳區、月台區等區域均有固定的面積，而在緊急逃生的法規標準要求下(例如，依捷運消防規定，通道容量必須允許尖峰時段的運量需求時，旅客不論在任何地點均能在六分鐘內疏散到安全通道)，這些區域均有其安全設計容量，如果營運時旅客量超過此安全設計容量，將被視為不安全而須重新檢討，故營運時必須確認旅客數低於此安全設計容量。一般大眾運輸系統如公車、輕軌等，則因屬 B 或 C 型路權，發生事故時旅客可快速離開站牌區或車輛上而無此問題。

2. 特別重視擁擠成本

公車系統因容量小(每輛車約承載 45 人)，一般均採承載量(每車最多承載人數)為不可違反的硬限制式。捷運系統則因容量大(以 TRTC 為例，依服務指標規定，每平方公尺站立最多站立六人，屆時每列車可承載 1936 人；原安全設計容量則為每平方公尺站立七人，即每列車可承載 2200 人)，故捷運公司可依其規劃策略考量要依服務指標規定，還是選擇一個對旅客較為舒適的承載率(如每平方公尺站立四人)，故承載率的設定是有彈性、可採軟限制式來衡量的。

捷運系統基於以上原因，較不採用承載率限制而改考量擁擠成本，實際營運時，在不違反安全設計容量情形下，允許其承載率在部分時段高於服務指標規定，並以擁擠成本來代表旅客的不舒適程度，若旅客不舒適程度過高時，方考量增加運輸容量來舒緩之。

3. 所有站間路段、車站旅次均需被服務

捷運系統對於旅客的承諾之一，包含旅客進站後，即可到達他要去的車站，亦即 OD 表中的任一旅次均須予以滿足。此亦代表在列車運行計畫規劃上，必須確認每一站間路段及車站均需被營運模式的組合所服務到。

對於公車路線設計而言，因為開闢一條公車路線代表著後續不斷的服務成本，故對於運量較少的 OD 將在考量成本的前提下予以忽略，而只考量服務大運量的 OD。

4. 嚴格的可用列車數限制

捷運系統電聯車造價昂貴，故在規劃階段即依預測運量妥為估算，力求貼近運量需求，以便樽節營運成本；在營運階段，面對實際的運量需求，大部分會產生扣除維修用車後，可用列車數略有不足情形，此情形在面臨營運一段時間後的電聯車大修階段時則益形嚴重，公車系統則因公車造價相對低廉而無此問題。

2.4 MTORDP 求解方法之探討

文獻上求解 MTORDP 的文獻並不多見[2]，本研究推測係由於 A 型路權造成捷運系統規劃列車運行計畫時較不需考量其他道路交通系統，形成了其自身的封閉性，及捷運公司對於其自身列車運行計畫規劃業務較少對外開放及尋求外界解決之故。

國內文獻部分，如凌建勳[8]係採專家經驗法則及試誤法，以運量分佈為基礎，綜合考量運能供給、運量需求、營運效能等因子，由規劃者依本身專業知識及經驗，在每一路段之運能供給均能滿足運量需求的前提下，研選數個候選組合，再互相比較出運能最大的組合即為所求。此類方法主要依靠專家經驗進行決策，故無法穩健地確保決策品質及每次進行的花費時間，專家經驗亦不能確保可以有效傳承給其他人員。

周義華、黃勵君[9]以二階段方式的啟發式解法來解決本問題；首先，在不考慮班距情形下求算營運成本及使用者成本總和最小的營運模式組合，其次再進行 OD 表運量的指派作業，然後進行各種列車數、總行駛時間、承載量及班距組合的敏感度分析後，提供給決策者參考。此類方式無法舉證是否考量到所有的組合，二階段的決策方式亦無法驗證是否找到最佳解，而且尚需要進行大量人工操作、耗費大量時間以及避免人為失誤是主要問題。

王晉元、林誌銘 [10]採基因演算法求解，並且同時將班距及營運模式納入考量，但由於求解過程中發生不可解比例甚大，故執行時間較長，需要更有效率的尋優策略來改善求解速度問題。

國外文獻部份中，與 MTORDP 問題特色較為接近的文獻，則有 Constantin and Florian[11]針對營運模式的最適班距問題，構建非線性非凸混合整數規劃問題並轉化為 Min-Min 問題後，採 Projected Gradient Algorithm 法求解，但所求仍為局部最佳解。

Zhao and Zeng [12][13]同時應用基因演算法(Genetic Algorithm)及模擬退

火法(Simulated Annealing Method)來求解大規模的大眾運輸路網及班距規劃問題。其中與捷運系統有關的部分，則是將捷運路線視為一條快速巴士路線，捷運車站視為站牌後，與其他大眾運輸工具一起納入路網中求解。故無法完全解決前述的捷運列車運行計畫問題。

Guan, *et al.* [2]是特別針對 MTORDP 求解的文獻，其建立一個在兼顧營運成本、旅客轉乘次數及旅行距離目的下，能同時求解路網問題及旅客運量指派的模式，這個模式考量 OD 表需求，在最大及最小營運模式長度、路段運能及最高轉乘次數等限制式下，設計成一個二元整數規劃問題，並轉換成兩個最小擴張樹問題(Minimum Spanning Tree Network)，然後用傳統的分枝定限法(Branch and Bound Method)求解；雖然針對目標式中總營運模式長度、營運模式總數、旅客總旅行長度等三個項目相對應的轉換參數進行完整的敏感度分析，但所採用例題僅將香港地鐵網路簡化成九個節點、十條節線的路網來求解，尚未嘗試以實際的大型路網來測試。故作者建議後續研究應發展更效率的啟發式解法來求解大型網路問題

由前述回顧知列車運行計畫屬於 NP-hard 問題，通常僅能求得局部最佳解，故一般均採啟發式法來求解；可應用在列車運行計畫問題的啟發式解法甚多，本研究基於基因演算法具有全域搜尋、方便加入目標式、限制式及變動路網結構等特性，在大眾運輸路網及班距規劃問題中亦有被廣泛應用的趨勢及備有相當成果[14][15][16][17][18][19][20][21]，亦應適合運用在列車運行計畫問題之求解，故以下將運用基因演算法來求解列車運行計畫問題。

2.5 基因演算法概述

基因演算法(Genetic Algorithm. GA)是一種求解最佳化的演算工具，其理論基礎乃源自於 1859 年達爾文的『物種演化』(On the Origin of Species by Means of Nature Selection)書中的「物競天擇，適者生存」的演化及淘汰觀念，模擬生物之間的生存競爭，幸存者得以繁衍至下一代，如此一代一代演化下去，最後會演變進而產生一完全適應環境的族群，達到「適者生存」的概念。1975 年 Holland 提出應用在求解研究問題上，經過各領域相關研究上的應用，及至 1989 年 Goldberg 運用於求解實務問題後，GA 方引起廣泛討論及擴大應用[22]。

GA 之主要觀念係透過不同親代(Parents)之染色體(Chromosome)上的基因

(Genetic)進行交換產生子代(Offspring)，並遵守適者生存的自然法則以獲得優良子代，運算邏輯包含了選擇(Selection)、交配(Crossover)、突變(Mutation)等演算機制，進而達到改善啟始解的目的，GA 架構如圖 6 所示，以下分別說明其中各重要步驟運作方式。

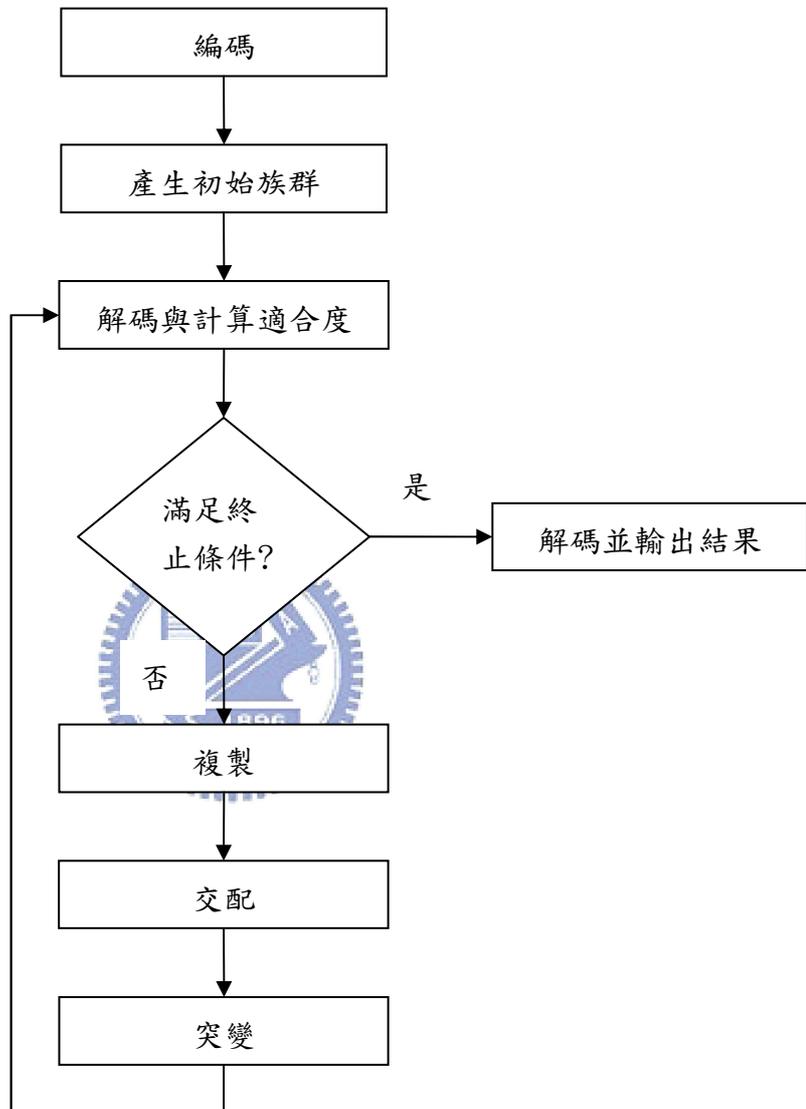


圖 6 基因演算法架構圖

2.5.1 GA 架構說明

1. 編碼(Encoding)

首先需將求解問題中的搜尋變數轉換為染色體，以代入適當方程式中求解適合函數值，這也是 GA 的基礎；編碼方式會影響演算邏輯，故須針對問題特性設計適用的編碼方式，一般常見的編碼方式包含二元(Binary)、字串(String)、實數(Real-number)及一般資料結構(General Data Structure)等四

種。

以二元編碼為例，圖 7 說明了一條以六個位元(基因)組成的染色體，每個基因有 0 或 1 二種狀態，以 40 而言可編碼為 101000，13 則可編碼為 001101。

$$40 = 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 \Rightarrow 101000$$

$$13 = 0 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 \Rightarrow 001101$$

圖 7 二元編碼範例

編碼長度是 GA 的重要參數之一，代表了變數的精度，長度越長則精度越高，但演化過程中會因解碼及編碼動作頻繁而較耗費運算資源；但編碼長度過短則不易找到整體最佳解，因此必須妥為規劃編碼內容。

2. 產生初始族群

初始族群是在演算法一開始時，以隨機的方式產生相同數目的染色體，先令其為族群第零代，作為演算開始時的初始值。

族群大小影響演化搜尋範圍，族群較大者運算時間較久，但較有機會找到最佳解；族群小者，則運算時間較短，但較容易陷入區域最佳解中。

3. 解碼(Encoding) 及適合度函數(Fitness Function)

解碼方式和編碼相反，以圖 7 的二元編碼為例，101000 將解碼成 40，001101 則解碼為 13。

適合度(Fitness)乃是在基因解碼後，根據定義的適合度函數所算出的函數值。適合度函數式的訂定，對求解結果具有相當大影響，在定義時必須針對問題特性多加考慮，越周密的考慮所得結果會越符合理想，此也是 GA 最後能否得到一較佳解的關鍵。常見的適合度函數有目標函數(Objective Function)、成本函數(Cost Function)、性能指標(Performance of Index)等。

GA 會依照每一條染色體依適合度函數所計算出的適合度大小，決定該染色體被複製到下一代的機率，適合度越高將有較高的機率被複製成為下一代的染色體；反之，適合度越低的染色體，遭到被淘汰的機會便會越大。如此將留下好的個體，淘汰差的個體，進而符合進化的原則。

4. 終止條件檢查

GA 是在不斷比較過程中產生新一代更佳的族群，一般的終止條件有

三：1)指定演化世代數，2)適合度在演化過程中已無法再有效改進，例如相臨兩世代的適合度差值除以適合度後低於某一門檻值(如千分之三)，3)適合度已達預設需求值。演算過程中，若符合終止條件時，GA 將終止運算，並輸出計算結果。

5. 複製 (Reproduction)

GA 演化過程中是以親代染色體的複製來進行，而非採親代本身的染色體，複製是指選擇適當的親代加以複製，複製方式影響 GA 的效率，好的複製方式收斂速度較快，且會得到較佳的解；複製方式不好時則相反。

常用的複製方法有下列：輪盤法(Roulette wheel)、隨機複製替換法 (Stochastic Sampling with Replacement)、殘數隨機複製替換法 (Remainder Stochastic Sampling with Replacement)、殘數隨機複製持續法 (Remainder Stochastic Sampling without Replacement)、整體隨機複製法 (Stochastic Universal Sampling) 這五種方法。

以輪盤法為例，如圖 8 所示，是將族群中所有染色體(編號 1~4)的適合度加總後，依照每一條染色體適合度佔該加總數的比例放在輪盤上，最後依機率於輪盤上決定一點，該點落入哪一條染色體的面積中，則該染色體即被選擇。因為適合度越高的染色體面積相對較大(如圖中的編號 1 染色體)，故較容易被選上。

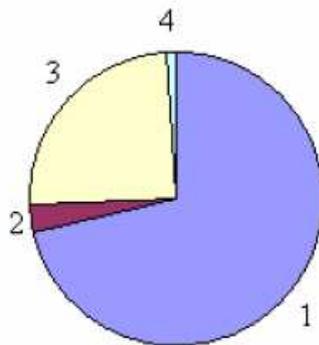


圖 8 輪盤法示意圖

6. 交配 (Crossover)

複製過程完成後，被複製的染色體將被放置到交配池中，以隨機的方式在交配池中選取兩條染色體進行交配的動作，此二染色體會交換彼此的基因，產生兩條新的染色體，以作為下一代。

五種較常用交配方法，分別為單點交配(One-point Crossover)、雙點交

配(Two-point Crossover)、多點交配(Multi-point Crossover)、字罩交配(Mask Crossover)及機率均等式交配(Uniform Crossover)。

以單點交配為例，如圖 9 所示，是隨機決定一個交配位置，然後針對二條被選擇到的親代候選染色體，將他們在這交配位置的上基因互換，而得到二個新的子代。

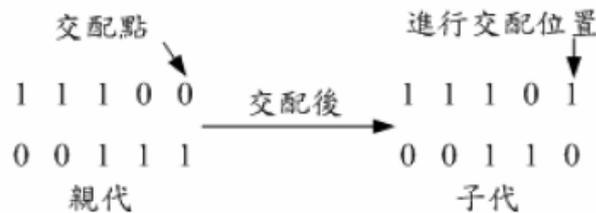


圖 9 單點交配示意圖

7. 突變 (Mutation)

突變是基因演算法中每一代演算的最後一個步驟，在一個設定的突變率下，針對所有產生的子代染色體，隨機給定一個 0~1 的值，當其值小於預先設定的突變率時才發生突變。

以二元編碼為例，當發生突變時，被指定的基因會產生 0 和 1 交換的形式，即 0 變成 1、1 變成 0。突變的機率不能設定太高，否則容易影響到優良的個體。

2.5.2 GA 特性

GA 的優缺點可彙整如下[23][24][25]：

1. 演算過程皆以參數之編碼進行，只要將參數作適當編碼即可應用 GA 求解，即使原問題因故而修改，GA 演算法亦可輕易配合調整內容，不需要重新構建整個演算法；
2. GA 演算法求解過程為隨機搜尋，因此適用於不同類型的最佳化問題，包含連續型參數與離散型參數問題均可適用；
3. 可同時考慮搜尋空間(Search Space)上的多個點，因此可以快速獲得整體最佳解(Global Optimum)，並且可以避免落入區域最佳解(Local Optimum)；
4. 演算過程中只需要適合度函數的資訊，而不需要其他複雜的數學運算，而且適合度函數可以自由定義，因此求解問題可以是非線性問題(Non-Linearity Problem)；
5. 可應用於平行處理(Parallel Operation)能力的電腦，以加速求解速度與擴大求

解規模；

6. 編碼方式與適合度函數設計良好與否影響求解品質，但目前並無相關證明任何問題通用的良好編碼方式及適合度函數，故必須針對問題特性妥為規劃；及
7. 演算法所得結果不一定是最佳解，除非演化過程中能提供最佳解參考值。

2.6 小結

經由前述各節之探討，可知捷運列車運行計畫規劃問題主要決定項目為營運模式及班距，這兩項目之決定因素，除了被受系統特性(軌道佈設、號誌設計)及系統服務指標(尖、離峰班距營運目標值)所限制外，捷運公司另依據已知的運量需求，在複合班距計算公式及班距與電聯車需求計算公式下，綜合考量各類限制條件來求得總成本最小的規劃結果。

在模式類型之探討方面，捷運系統基於「出入口與月台容量限制」、「特別重視擁擠成本」、「所有站間路段及車站旅次均需要被服務」及「嚴格的可用列車數限制」等特性，在問題求解重點上與傳統大眾運輸路網設計與班距規劃問題不同；且本研究推測該問題基於「捷運系統自身的封閉性」及「捷運公司較少對外尋求解決」的原因，以致目前較少相關文獻探討，故本研究課題值得深入探討。

本研究於 2.4 節之相關文獻回顧中，探討列車運行計畫問題目前的求解方法及成果，歸納出啟發式解法較適合本問題的求解，且基於基因演算法具有全域搜尋、方便加入目標式、限制式及變動路網結構等特性，在大眾運輸路網及班距規劃問題中亦有被廣泛應用的趨勢及相當成果，亦應適合用來求解列車運行計畫問題，故以下將運用基因演算法來求解列車運行計畫問題。

三、 MTORDP 數學模式構建

本章主要內容在構建列車運行計畫數學模式，以作為探討問題規模及建立求解演算法之參考；首先於 3.1 節中，基於前所探討的列車運行計畫問題特性，建立適合求解本問題的網路模型，其次於 3.2 節中構建數學規劃模式，並詳細說明目標式及各項限制式所代表之意義。3.3 節中，則就前所構建的數學規劃模式，以台北捷運實例為例，估計問題規模，以了解求解該問題之難度；最後則於 3.4 節中，說明本研究之假設條件與重要參數，以利於第四章中建立基因演算法，及於第五章中設立合理的參數。

3.1 MTORDP 網路模型之構建

本研究基於前述假設及推論，先將 MTORDP 轉換為網路模型，以構建數學規劃式來說明問題特性；該網路模型中，以不同類別的節線分別代表旅客的進站步行、月台候車及上車、搭車、月台下車及出站步行等動作，各類節線的原始時間成本、指派運量及舒適設計容量構成了成本函數，而節點由於僅代表各搭乘動作間的轉接點（如出入口、車站、月台等），故並無相關時間成本。

網路模型轉換方式以範例說明如圖 10 所示，步驟如下：

1. 捷運實體路網如圖 10-a（以下簡稱原始路網）所示，代表實際的軌道佈設情形，其中①~⑨代表車站，車站間的雙向節線為軌道，捷運路網因為轉轆器及號誌的作用，可以讓不同營運模式的列車在同一軌道上安全的運行，來滿足旅客的起迄需求。
2. 假設共有 5 個候選營運模式構建成為旅客進站後的路徑選擇路網，如圖 10-b 所示，分別是營運模式(1)（車站序列為①-④-⑦-⑧）、營運模式(2)（車站序列為①-④-⑦-⑨）、營運模式(3)（車站序列為⑧-⑦-⑨）、營運模式(4)（車站序列為②-③-④-⑤-⑥）及營運模式(5)（車站序列為③-④-⑤）；將所有的候選營運模式納入考量，再以其他變數來決定這些營運模式是否被選擇，此時各節線仍為雙向節線。
3. 網路模型構建方式如圖 10-c（以下簡稱虛擬路網），首先將原始路網的每一個車站視為一個節點，意義上為車站的出入口，亦是旅次產生、吸引點；其次新增另一個節點代表月台，二者之間新增二條方向相反的單向節線，其中出入口往月台的動線稱為 a 類節線，代表進站動作；月台往出入口的動線稱為 e 類節線，為出站動作，這些節線的原始時間成本為步行時間，容量

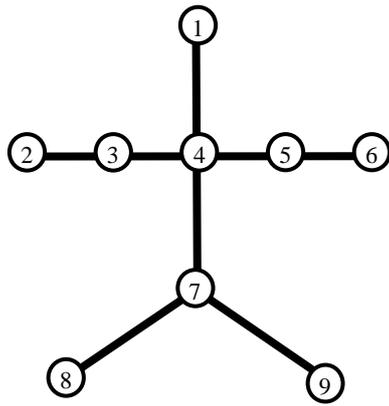


圖 10-a

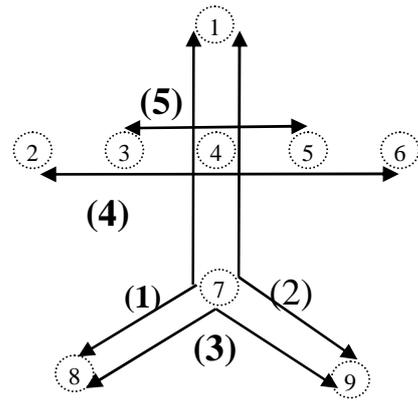


圖 10-b

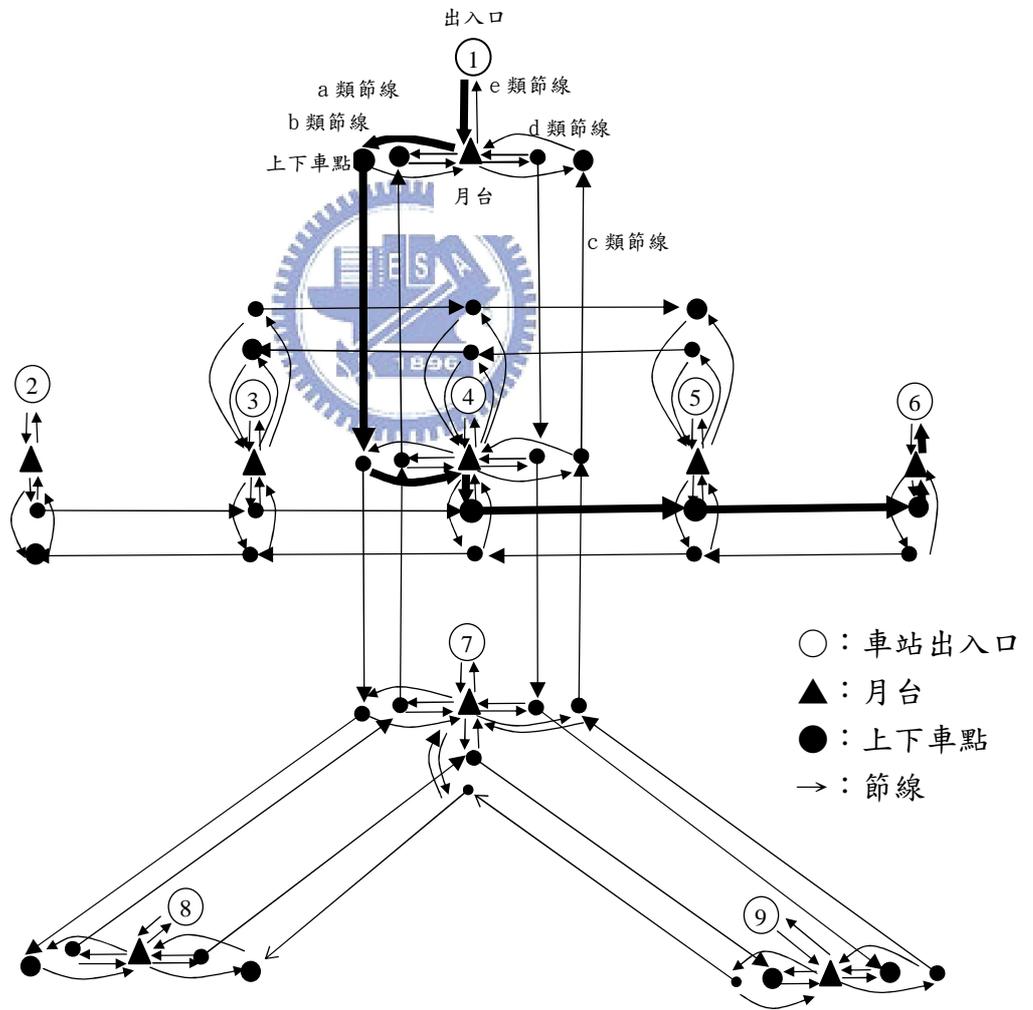


圖 10-c

圖 10 MTORDP 網路模型示意圖

則為前曾討論的舒適設計容量； a 、 e 類節線一般是應用在規劃遠期路網時探討出入口及車站容量問題上，若所探討的是現有路網的規劃問題，則因原先規劃階段即設計為在尖峰最密班距時亦可滿足緊急疏散需求的安全設計容量，且出入口與車站容量變動可能性很低，故可省略不予考量，以簡化路網複雜度。

4. 針對各營運模式中的每一站間路段，新增二個單向節線分別代表旅客搭乘該營運模式的上、下行乘車動作，稱為 c 類節線，兩端的節點代表上、下列車的地點，節線原始時間成本為列車時刻表所規劃的行駛時間，容量則為該營運模式的班距與列車承載量的函數，即 2.1.3 節所述內容。
5. c 類節線的節點與月台節點間，新增二條方向相反的單向節線，其中離開月台的節線稱為 b 類節線，代表候車動作及上車動作，原始時間成本為該營運模式班距的一半，代表候車時間；前往月台的節線稱為 d 類節線，代表下車動作，原始時間成本為平均旅客下車時間。這些節線的容量則將所屬車站的月台舒適設計容量，依月台型態（島式月台、側式月台）分配而得。
6. 由於轉車即為由某一營運模式 A 換搭另一營運模式 B 的動作，故可由下車（某一營運模式的 d 類節線）、候車及上車（另一營運模式的 b 類節線）等連續動作來代表。

就捷運公司而言，營運模式的選取結果直接影響了營運成本，以營運模式(1)為例(為利於識別，令 $i=a$)，是指列車行駛①-④-⑦-⑧-⑦-④-①這一段路徑(Path)，列車會在端點站(①、⑧)折返、在中間站(④、⑦)停靠以及在任兩個相鄰車站間行駛，這段過程所花費的時間總和就是 RT_a ，行駛距離的總和就是 RL_a ，若營運模式 a 被選取($s_a=1$)，且頻率為 F_a ，則營運模式 a 的配車數 TR_a 計算如下：

$$TR_a = [s_a \times RT_a \times F_a] \quad (1)$$

在傳統的數學規劃式中，必須將所有的營運模式都納入考量，再以 0-1 變數 s_i 來決定這些營運模式是否被選擇，以及決定 F_i 後依照式(1)來計算配車數，所有營運模式配車數的總和不應高於車隊規模 TRC ，即：

$$\sum_{i=1-n} TR_i \leq TRC \quad (2)$$

另，以一個旅客觀點說明其如何在該虛擬路網中進行路徑選擇，茲以

圖 10-c 中之粗實線代表旅客要從車站①到車站⑥，則他要先在車站①進站、走到月台、候車及上車、搭乘營運模式(1)列車、在交會站④的月台下車後，他有二個選擇，第一個是搭乘營運模式(4)直達車站⑥；第二個選擇是搭乘營運模式(5)到車站⑤月台下車後，再轉搭營運模式(4)到車站⑥，兩個營運模式間的轉車成本可以從轉車過程中額外的下車、候車及上車成本來表示。從這個例子中，我們可以知道，藉由 $a \sim e$ 類節線的設計，可以充分代表旅客在路網中的搭乘動作並有效簡化數學規劃模式。

表 1 各類節線特性說明

節線類別	旅客動作	原始時間成本	容量
a	進站後步行到月台	不擁擠時的步行時間	通道設計容量
b	在月台候車及上車	候車時間	月台設計容量
c	搭車	站間行駛時間	虛擬路段容量
d	在月台下車	不擁擠時的下車時間	月台設計容量
e	從月台步行出站	不擁擠時的步行時間	通道設計容量

表 1 中， a 、 b 、 c 、 d 、 e 類節線的原始時間成本，是旅客在不擁擠時走路的步行時間， b 類節線的原始時間成本是旅客在月台的候車時間，在旅客隨機到達的假設下，候車時間為列車班距的一半[26]。 c 類節線的容量為虛擬路段容量，也就是經過的列車數承載量總合， b 、 d 類節線容量則是將月台設計容量平均分配而得， a 、 e 類節線的容量是通道設計容量，在捷運系統興建階段已經規劃好。各類節線會因實際流量高於容量而產生額外的擁擠成本。

3.2 非線性混合整數數學規劃模式

本研究所構建的非線性混合整數數學規劃模式如下所示：

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & \alpha \times \sum_{i=1}^n RL_i \times F_i \times s_i + \beta \times \sum_{i=1}^n RT_i \times F_i \times s_i + \lambda \times \gamma \times [2 \sum_{a=1}^{n_a} (TC(x_a) \times x_a) + \\
 & 2 \sum_{b=1}^{n_b} (TC(x_b) \times x_b) + \sum_{c=1}^{n_c} (TC(x_c) \times x_c) + 2 \sum_{d=1}^{n_d} (TC(x_d) \times x_d) + \\
 & 2 \sum_{e=1}^{n_e} (TC(x_e) \times x_e)] \tag{3}
 \end{aligned}$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n [RT_i \times F_i \times s_i] \leq TRC \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \theta_{ij} \times s_i \geq 1, \text{ for all line segment } j \quad (5)$$

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^n \theta_{ij} \times F_i \times s_i} \geq OT, \text{ for all line segment } j \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^n \theta_{ij} \times F_i \times s_i} \leq PT, \text{ for all line segment } j \quad (7)$$

$$F_i \geq 0 \quad (8)$$

$$s_i \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$\sum_k f_k^{rs} = T_{rs}, \text{ for all O-D pairs } (r, s) \quad (10)$$

$$x_a = \sum_k f_k^{rs} \times \delta_{ak}^{rs}, \quad a = 1 \sim n_a \quad (11)$$

$$x_b = \sum_k f_k^{rs} \times \delta_{bk}^{rs}, \quad b = 1 \sim n_b \quad (12)$$

$$x_c = \sum_k f_k^{rs} \times \delta_{ck}^{rs}, \quad c = 1 \sim n_c \quad (13)$$

$$x_d = \sum_k f_k^{rs} \times \delta_{dk}^{rs}, \quad d = 1 \sim n_d \quad (14)$$

$$x_e = \sum_k f_k^{rs} \times \delta_{ek}^{rs}, \quad e = 1 \sim n_e \quad (15)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad (16)$$

$$x_a, x_b, x_c, x_d, x_e \geq 0 \quad (17)$$

式(3)係以金錢價值為衡量的一般化綜合成本，共分為三部分的成本項目，其中： α 是每列車公里之單位營運成本， $\alpha \times \sum_{i=1}^n RL_i \times F_i \times s_i$ 代表總變動營運成本； β 為每列車小時的單位折舊成本， $\beta \times \sum_{i=1}^n RT_i \times F_i \times s_i$ 代表總折舊成本； γ 代表平均一位旅客每小時的車內時間價值， $\gamma \times [2 \sum_{a=1}^{n_a} (TC(x_a) \times x_a) + 2 \sum_{b=1}^{n_b} (TC(x_b) \times x_b) + \sum_{c=1}^{n_c} (TC(x_c) \times x_c) + 2 \sum_{d=1}^{n_d} (TC(x_d) \times x_d) + 2 \sum_{e=1}^{n_e} (TC(x_e) \times x_e)]$ 代表將所有旅客時間價值總合轉換成

金錢成本後的數值； λ 則是一個規劃者自行決定的權重參數，藉以調整捷運公司營運成本與旅客時間成本的比例，代表了捷運公司重視營運成本及旅客需求的相對程度。

由於旅客票價僅與站間最短路徑距離相關，不因列車運行計畫而異，故目標式可不考量旅客票價成本，僅需考量旅客總旅行時間成本。以上這些成本項目，均已轉化為以元為單位的金錢成本。

式(3)代表總社會成本的目標式，規劃者亦可以針對各成本項目設定不同係數來表現營運策略；例如，同時令 β 、 γ 為0時，即代表規劃者追求的是變動營運成本最小問題。

式(4)表各營運模式總使用列車數必須低於總可用列車數，由於列車造價高，捷運系統在規劃階段的購車數通常已很接近運量所需，所以本限制式使得列車運行計畫不可行解的空間甚大；式(5)用以確保原始路網中的每一條路段至少被服務一次，以避免捷運系統在正常營運狀況下發生局部營運的不合理情形，這也是 MTORDP 與傳統 TNDP 不一樣的地方之一。

式(6)、(7)針對原始網路中的各路段，就其被拆分出的虛擬路網節線營運班距，總合計算出該路段的營運班距，並分別確保不會發生低於最小班距(即系統限制的班距)及高於政策班距的不合理情形。

式(10)~(17)系統最佳化指派問題的流量守恆限制式，其中， f_k^{rs} 為正整數決策變數，代表虛擬路網中從起站 r 到迄站 s 的第 k 條替選路徑上被指派的旅客數，單位為人/小時， x_a 、 x_b 、 x_c 、 x_d 、 x_e 為整數因變數，是在決定一組 f_k^{rs} 後，依據(11)~(17)計算而得，代表虛擬路網中各類動作節線上的旅客數，單位為人/小時。

由於捷運系統尖峰時段的營運情形，偶會發生旅客為了節省時間，雖然進站列車已經呈現擁擠，但能盡力擠進列車的情形，故本模式並不將捷運列車列車承載率限制視為不可違背條件而置於限制式中；而改為強調旅客在各類節線中行進時，會受到這些節線中流量之相對大小的影響，若流量大於容量時則額外產生代表旅客不舒適程度的擁擠成本，並將這些成本置於目標式中，藉以符合 2.3 節所說明的 MTORDP 問題特性。

綜上可知，在給一特定值的營運模式(s_i)及頻率(F_i)組合後，除了會決定

捷運公司的營運成本以外，將 x_a 、 x_b 、 x_c 、 x_d 及 x_e 等節線流量因變數的解，帶入目標式中 $TC(x_a)$ 、 $TC(x_b)$ 、 $TC(x_c)$ 、 $TC(x_d)$ 、 $TC(x_e)$ 等成本函數後，亦會求得旅客的旅行時間成本，本模式所求的最佳解將可兼顧捷運公司營運成本及旅客時間成本。

3.3 MTORDP 問題規模之探討

依 3.2 節所述的非線性混合整數數學規劃模式，以目前 TRTC 高運量系統 (54 個車站、22 條候選營運模式，不考慮 a 、 e 類節線) 來建立網路模型，將產生一個 816 個節點、2,242 條節線的虛擬路網，以及共 34,012,268 個變數及 34,026,395 條限制式的數學規劃問題 (推估方式詳表 2、表 3 及表 4)。

前述的問題規模，若以目前常用的求解軟體工具如 CPLEX，將極難在可接受的時間內求得解，故可知 MTORDP 需要一個有效率的模式來求解。

表 2 TRTC 高運量系統路網參數值

參數	數值	說明
n	22	候選營運模式數
$n_b + n_c + n_d$	2,242	虛擬路網節線數
n_r	54	總起站數
n_s	54	總迄站數
n_k	11,664	總路徑數 ($4 \times n_r \times n_s$) (假設針對任一起迄對 (r,s)，最多 4 條替選路徑)
θ_{ij}	49,324	$n \times (n_b + n_c + n_d)$
$\delta_{ak}^{rs}, \delta_{bk}^{rs}, \delta_{ck}^{rs}, \delta_{dk}^{rs}, \delta_{ek}^{rs}$	76,255,406,208	$n_k \times n_r \times n_s \times (n_b + n_c + n_d)$

表 3 變數數量統計表

變數	變數個數	說明
f_k^{rs}	34,012,224	$n_k \times n_r \times n_s$
F_i	22	等於候選營運模式數
s_i	22	等於候選營運模式數
總計	34,012,268	

表 4 限制式數量統計表

限制式編號	限制式個數	說明
(4)	1	
(5)	2,242	等於虛擬路網節線數
(6)	2,242	等於虛擬路網節線數
(7)	2,242	等於虛擬路網節線數
(8)	22	等於候選營運模式數
(9)	22	等於候選營運模式數
(10)	2,916	$n_r \times n_s$
(11)~(15)	2,242	等於虛擬路網節線數
(16)	34,012,224	$n_k \times n_r \times n_s$
(17)	2,242	等於虛擬路網節線數
總計	34,026,395	

3.4 相關假設條件與重要參數

本研究所探討的 MTORDP，其研究範圍、假設條件、相關推論及重要參數說明如下：

1. 研究範圍僅考量同一種系統的主線路網；以 TRTC 為例，僅考量高運量系統主線，如淡水、新店、中和、南港、板橋及小南門等線，而支線（小碧潭、新北投）、中運量系統（木柵線）之轉車運量則轉換分配到轉車站（七張站、北投站、忠孝復興站）上。
2. 由 2.2 節中對 TRTC 列車運行計畫內容與旅客旅次行為兩者之間互為影響關係的推論，可假設在都市整體運輸規劃的結果中，分配至捷運系統的運量及起迄分佈情形不因列車運行計畫不同而異，故每一個列車運行計畫方案均面臨相同的運量需求，互有不同的是營運成本、旅客進行路徑選擇後的流量分佈及總旅行時間。
3. 捷運票價以起迄站間最短路徑距離為計算基礎，不因營運模式不同而改變，因此在運量需求不變的假設條件下，捷運公司票箱收入將不會因列車運行計畫不同而異，故本問題可不考慮收入問題，僅需探討如何規劃使得營運變動成本最小。
4. 由於捷運系統尖峰特性甚強，及運輸投資成本的沉沒性，捷運公司營運變動成本與尖峰營運方式關聯甚大，故本研究僅針對尖峰時段進行營運模式及班距規劃；離峰時段營運模式則與尖峰時段相同，以避免旅客搭乘習慣上的不便，且因運量需求較少，故採政策班距運行，以符合主管機關對於服務水準之規範；例如，以 TRTC 高運量系統主線而言，尖、離峰班距上限分別為七、十分鐘。
5. 各營運模式均採雙線、單一方向循環運行、每站皆停、停靠站時間固定（25 秒）且端點站折返時間固定（300 秒），故每一營運模式的總行駛時間為固定值。
6. 捷運系統軌道轉轍器位置及號誌路徑設定等特性決定了可能的候選營運模式，列車運行計畫規劃工作即是妥為分配可上線列車至各營運模式中（若某一營運模式分配數為 0 即表示不予採用），各營運模式總行駛時間除以所分配列車數即為其班距。
7. 因號誌系統最小月台開通時間的限制，捷運班距具有下限；以 TRTC 高運

量系統而言約為 2 分鐘。

8. 列車為固定編組，且捷運公司為求安全、舒適及提升承載率，已在尖峰時段透過相關營運管理手段（例如人潮管制計畫）儘量讓旅客均勻分佈在各車廂內，故每一輛列車的承載量相同，且須符合捷運系統服務指標對於承載率之規範；以 TRTC 高運量系統為例，每列車乘載量為座位數 352 人+尖峰承載率站立 $6 \text{ 人}/\text{m}^2 \times \text{車廂地板面積 } 264\text{m}^2 = 1936 \text{ 人}$ 。

9. 有關目標式的探討

- (1) 規劃目標若欲同時求營運變動成本及購車數最小（如規劃遠期路網時為節省購車預算，或營運期間逢列車大修以致須減少上線列車數），則除營運變動成本外，尚需將上線列車數置於目標式中，亦即需考量其折舊成本。

- (2) 規劃目標若欲對現有路網求營運變動成本最小，則因已購置的列車數為固定，即使不上線運行亦須依會計原則負擔固定的折舊成本，故推知上線列車數多寡不影響折舊成本，且因維修策略之需要可能須保留部份列車在廠維修，可上線列車數須列為限制式。

- (3) 規劃目標若欲求社會成本最小，則目標式將是捷運公司營運變動成本(司機員、用電、折舊等成本)與旅客變動成本(時間成本)之總和。

- (4) 綜上所述，捷運公司營運變動成本項目包含行車成本（含行車用電成本及司機員人力成本）及列車折舊成本，旅客變動成本則是在票價以外所付出的時間成本。

10. 運量指派問題相關探討

- (1) 有關車流在道路上的指派問題，以及行人流在人行道上的指派問題，因為小汽車及行人之間可以儘量接近，故為連續的問題。但捷運列車在軌道上行駛時，因為在安全設計上有軌道電路避免碰撞的保護，二列電聯車之間不會緊密接近，故本質上原本是屬於不連續的問題，但在列車班距密到相當規模時，以巨觀而言，仍可視為連續的問題。本研究即採連續觀念，將 OD 表中選擇各營運模式的運量指派到虛擬路段上，各虛擬路段的容量則是所有經過電聯車之容量總和，故可採一般的運量指派模式求解。

- (2) 捷運系統尖峰時段旅客大多為通勤族，具備完全資訊、理性行為且時間

價值相同，他們知道各起迄站之間的最短路徑，而且會依最短路徑旅行，故採用系統最佳化的交通量指派法。

- (3)由於旅客票價僅與站間最短路徑距離相關，不因列車運行計畫而異，故目標式可不考量旅客票價成本，僅需考量旅客總旅行時間成本。
- (4)旅行時間成本依旅客在捷運系統內的活動，包含進站步行時間、月台候車時間、車上時間、下車時間及出站步行時間，若有轉車行為，則尚須增加轉車站步行時間。這些時間成本項目除原先在不擁擠情形下所必須花費的時間外，另分別會因車站進站動線、月台、列車、出站動線或轉車站容量不足導致的擁擠情形，而產生額外的不舒適成本，故均非固定值，須以成本函數方式來代表受運量影響而產生的時間成本變化。
- (5)有關前述各項時間成本函數，本研究係參考李治綱[27]評量高速鐵路乘客乘坐列車舒適度的方式，參酌美國公路局(Bureau of Public Road)所制定的擁擠函數，擬訂時間成本函數如下：

$$TC(x) = t_0 \times \left[1 + a \times \left(\frac{x}{v_c} \right)^b \right] \quad (18)$$

其中， TC 是旅客的時間成本， t_0 為不擁擠時的原始時間成本， x 為運量指派後之旅客數， v_c 為車站步行動線、月台或列車的容量；由公式內容可知，當旅客數 x 達到設計容量 v_c 時，時間成本 TC 將等於原始時間成本 t_0 之 $1+a$ 倍，亦即不舒適程度若換算成時間成本時係增加了 a 倍；且當 x 超過 v_c 時， TC 會呈 b 次方的非線性型態快速成長。

該類型擁擠函數在計算交通擁擠成本上甚為普遍，本研究謹參考李治綱[27]之研究，使用 $a=0.15$, $b=4$ 的參數組合來應用在捷運上，進一步的最適參數校估則留待後續研究；故此，該擁擠函數在捷運的適用性分析，僅需探討所選用設計容量 v_c 是否能合理地代表旅客舒適程度。

11. 一般而言，捷運系統設施的設計容量可概分為安全設計容量及舒適設計容量，本研究主要採後者做為 v_c 之依據，以下就旅客在捷運系統內「車站內步行」、「月台候車」及「搭乘列車」等三個搭乘步驟分別討論，可知如此選擇尚稱合理：

- (1)車站內步行

車站內步行的動線包含出入口、通道及穿堂，一般而言，先設計最小淨寬度的基本規格（如通道之設計流量為單向 85 人/分鐘/公尺、雙向 70 人/分鐘/公尺）[28]再進行緊急疏散模擬後調整為安全設計容量，故知在正常營運時，車站內旅客數將低於安全設計容量；至於舒適設計容量，本研究則建議參考台灣地區公路容量手冊[29]對於行人交通設施服務水準等級之通勤區 D 級（行人感受為正常的步行速率受到限制，穿越或超越他人的可能性低，改變方向困難）最高值（66 人/分鐘/公尺）採為基礎(如表 5 所示)，配合各車站的實際空間規劃換算而得，換言之，當旅客數高於車站內步行空間的舒適設計容量時，將產生額外的不舒適成本。

表 5 行人交通設施服務水準等級表-水平步道/通勤區

分項 類目	行人平均 佔有面積 (平方公尺/人)	流率 (人/分·公尺)	平均密度 (人/平方公尺)	平均速率 (公尺/分)
A	≥ 3.13	≤ 23	≤ 0.32	> 72
B	2.08-3.12	24-33	0.33-0.48	69-72
C	1.28-2.07	34-49	0.49-0.78	63-69
D	0.85-1.27	50-66	0.79-1.18	56-63
E	0.48-0.84	67-80	1.19-2.10	38-56
F	< 0.48	< 80	> 2.10	< 38

資料來源：交通部運輸研究所[29]

(2)月台候車

依捷運車站月台寬度設計準則，在安全設計容量規劃上係依尖峰時段列車班距及承載量換算為安全疏散所需之月台容量[30]；在旅客候車時舒適度的考量，則另以候車空間為衡量基礎，各系統依國情不同採 B 級（ $1\text{m}^2/\text{人}$ ，如新加坡）至 D 級（ $0.5\text{m}^2/\text{人}$ ，如香港）不等[28]，本研究因將以 TRTC 為實例驗證對象，故採用 C 級（ $0.8\text{m}^2/\text{人}$ ）為月台候車時 v_c 的計算基礎，以合理估算旅客在月台候車時的舒適程度。

表 6 各國捷運系統車站月台設計準則之比較

城市	候車空間 (平方公尺/人)	服務等級	最小淨寬 (平方公尺)
東京	0.8	C	1500
倫敦	0.8	C	2000
洛杉磯	0.69~0.9	C	2000
多倫多	0.8	C	2500
新加坡	1	B	3000
香港	0.5	D	3000
曼谷	1	B	3250
台北	0.8	C	3000

資料來源：鄭意勳[28]

(3) 搭乘列車

台北捷運系統購置列車時，安全設計容量為每平方公尺站立七人，營運時為符合法規對於服務指標中舒適度的要求，則以尖峰時段每平方公尺站立六人以下為可接受範圍，亦即超過此門檻即造成旅客不舒適的感覺，故本研究係採每平方公尺站立六人為列車容量之計算依據。

12. 旅客車內及車外時間時間價值，本研究係參考張學孔，郭瑜堅[31]所採方式，依據台北市政府捷運工程局的台北都會區整體運輸需求預測模式[32]中，民國 80 年大眾運輸之車內時間價值每分鐘 0.79 元、車外平均時間價每分鐘 1.58 元（後者為前者的二倍），以平均年物價上漲率 0.025，將上述值調整為民國 97 年之車內平均時間價值每分鐘 1.23 元，車外平均時間價值約每分鐘 2.46 元，由於是針對台北地區的旅次成本研究，且本研究實例驗證時亦採用 TRTC 營運路網及運量資料，因二者背景環境相同，故具有一致的基礎。
13. 假設旅客隨機到達車站，故旅客在月台的平均候車時間成本為其所搭乘營運模式班距的一半[26]。

3.5 小結

經由前述各節之探討，可知本研究所建立的網路模型，可以充分代表旅客在路網中的各類搭乘動作並有效簡化數學規劃模式；而 3.2 節中所構建數學規劃模式，及所探討的目標式及各項限制式所代表之意義，有助於釐清模式特性及了解構建演算法之注意要項。由 3.3 節中所估計的問題規模，可知若以目前常用的求解軟體工具，將極難在可接受的時間內求得解，故需要一個有效率的模式來求解。

最後於 3.4 節對假設條件與重要參數之探討所得，可合理作為第四章及第五章之參數設定依據。



四、 MTORDP 基因演算法

由於 MTORDP 具有路網結構複雜、限制式多、不易求得最佳解等特性，且此類問題適合用基因演算法來求解[2]，故本研究針對該問題特性構建基因演算法模式，並設計有效率的啟始解產生法、交配法、修補法及尋優策略，以求快速求解符合該問題的需要。

本研究構建的 MTORDP 基因演算法（以下簡稱本模式），架構如圖 11 所示。

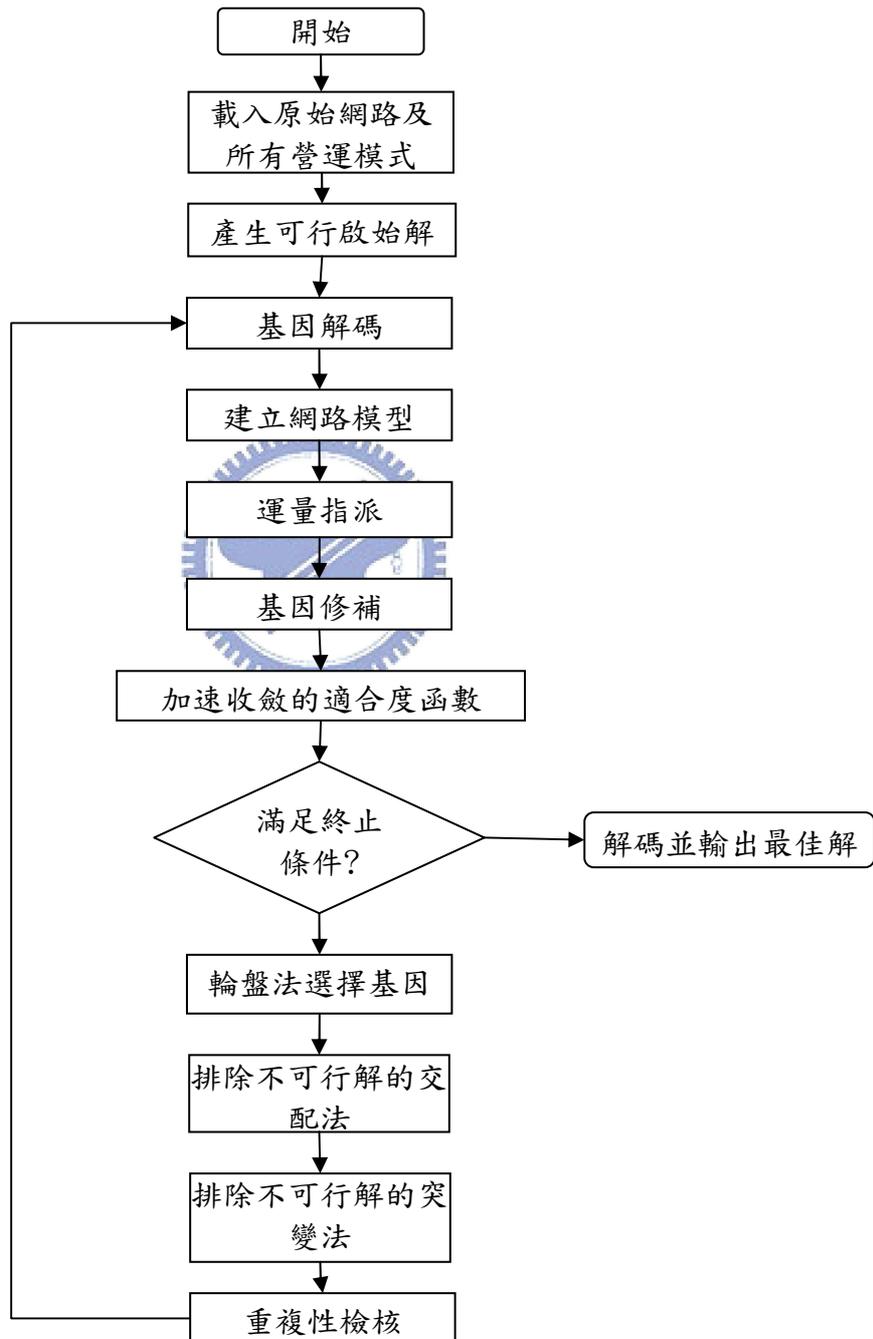


圖 11 基因演算法示意圖

圖 11 主要概念係先產生可行的啟始解（內容為營運模式組合及列車數）並計算相關營運成本，其次應用 3.1 節觀念針對該啟始解（並非傳統模式的全路網範圍都要構建成網路模型）構建網路模型後，求解運量指派問題並算得旅客時間成本，最後再依適合度函數計算綜合成本後，進行基因交配及突變等動作以尋找其他優良的解。

雖然本模式基於基因演算法全域搜尋的特性，有機會搜尋到最佳解，但 MTORDP 基於限制式多的特性，隨機產生基因方式將產生許多不可行解，以及運量指派程序需要大量運算時間等問題，均影響本模式之應用成效，故本研究在求解過程中加入 MTORDP 特有的尋優策略以有效、快速地求解問題，以下各小節將說明圖 11 各重要步驟的內容。

4.1 基因編碼

以一個基因代表一組解，編碼方式是將所有的營運模式依序排列後，針對每一營運模式以正整數代表配車數，若配車數為 0 則表示該營運模式未被選取；如圖 12 所示即為一個共有 n 個營運模式的基因，其中營運模式 1 的配車數為 10、營運模式 2 的配車數為 3、營運模式 3 則因配車數為 0 表示沒有被選取……，依此類推。在這個基因中，所有營運模式配車數之總和即為這一個解的使用列車數，必須受到不高於車隊規模的限制。

營運模式編號	1	2	3	n-1	n
基因編碼	10	3	0	4	2

圖 12 基因編碼範例

本模式在一開始雖然必須先輸入所有可能的候選路線，以利擇優選取，但基於捷運系統的號誌及軌道特性，這些候選路線事實上在設計階段即已固定，不須加入人為經驗判斷，故仍可避免傳統採專家經驗求解時可能發生的人為失誤問題。

4.2 產生可行啟始解

依前述編碼原則，以隨機方式產生啟始解，且必須排除違反式(4)~式(7)這些硬限制式(Hard Constrains)的不可行解；本研究發現若僅隨機地產生啟始解，再個別檢查是否違反硬限制式，會因為路網規模大、限制式多而花費過多時間，故設計了二個可快速、有效產生可行解的方法：一車法及最小車數法，其原理是先決定每一個營運模式配車數的最大值與最小值(一車法時最小值為 1)，若某營運模式被決定選取，則在這個區間內隨機決定配車數，再檢查是否

違反式(4)~式(7)，若全部通過，則產生一個可行啟始解。

以下說明這兩個方法的流程：

1. 依式(1)計算每一個營運模式 i 在其頻率 $F_i = 15$ (即班距為四分鐘) 時的配車數 TR_i^{\max} ，極為其最大配車數。

2. 決定各營運模式的最小列車數 TR_i^{\min} ：

(1) 若為一車法，則 $TR_i^{\min} = 1$ ；

(2) 若為最小車數法，則將所有的營運模式放入網路模型中，取消式(4)~式(7)的限制後進行運量指派，得到各營運模式的最高路段流量 f_i^{\max} 後，以式(19)倒推每個營運模式的最小列車數 TR_i^{\min} ，其中， TR_c 為列車容量。

$$TR_i^{\min} = \frac{f_i^{\max}}{TR_c} \quad (19)$$

3. 進行以下步驟至產生足夠的可行解組數為止：

(1) 針對一個基因，隨機決定每一個營運模式 i 是否被選取，即決定 $s_i = 0$ 或 $s_i = 1$ 。

(2) 若 $s_i = 1$ ，則在 TR_i^{\max} 及 TR_i^{\min} 間隨機決定配車數 TR_i ；否則 $TR_i = 0$ 。

(3) 進行式(4)~式(7)之限制式檢驗；若全部通過，則新增一個可行啟始解；否則放棄這一個解。

TR_i^{\max} 以 $F_i = 15$ 計算是基於經驗法則的判斷， TR_i^{\min} 的大小是決定啟始解搜尋空間的大小，由於合理的限定營運模式配車數，所以在本階段就可以產生不錯的啟始解。

本階段決定各個啟始解的營運模式及配車數後，即可依照式(3)計算出每一個解的營運成本及列車折舊成本。

4.3 建立網路模型

針對每一個可行解，將配車數不為 0 的營運模式依 3.1 節觀念構建網路模型以便進行運量指派，由於本步驟並非以所有的候選營運模式來構建虛擬網路，故所求解的運量指派問題路網規模將比 3.2 的數學規劃模式中採全路網求解的規模小，有助於縮小問題規模及加速求解的時間。

4.4 運量指派

採用確定性均衡指派模式來進行運量指派，主要是以 Floyd's 最短路徑演算法為主的全有全無指派法(All-or-Nothing Assignment Method)進行運量指派，每次指派後依新流量及式(18)更新各類節線時間成本，並以 Frank-Wolfe 法求得均衡的收斂解，運量指派結果將可求得各節線的流量，代入式(3)中的旅客總旅行時間成本公式以計算適合度。

4.5 基因之修補

部分營運模式由於配車數過少、班距太大以致候車成本較高，若同時有可替代且容量充足的路徑供旅客選擇，則此類營運模式在運量指派後可能流量為 0，因而變成無效的染色體，若能在不違反式(4)~式(7)的前提下，將該營運模式從候選組合中刪除，將可在不影響旅客時間成本的情形下降低營運成本，進而使該基因適合度更小，達到深度搜尋的效果。

本模式建立了一個修補機制，在運量指派後會檢查各營運模式上的所有節線流量，如果發現有某一個營運模式上的所有節線上均無流量，即表示該營運模式因成本相對較高(例如班距過大導致候車時間過長)而未被任何旅客選擇，該營運模式即屬於無效染色體，若將之刪除後仍能滿足式(4)~式(7)等限制式，則將其配車數改為 0，重新計算適合度後再加入評比之列。

就式(3)而言，由於被刪除的營運模式上的節線原本就無運量，故旅客成本原本即為 0；刪除其配車數後，營運成本隨即下降，故可確知本基因修補動作是在不變動旅客成本下直接降低營運成本，得到新的解品質將比原來的更優良。

4.6 加速收斂的適合度函數

由於列車造價昂貴，故捷運系統車隊規模是以恰可滿足運量需求的方式來購置，使得在求解過程中，各類節線上流量超過容量的情形甚為普遍，產生了劣解，雖然仍屬可行解，但是並非我們最想求取的結果；如果僅使用式(18)的擁擠函數來提高適合度，將無法凸顯這些劣解的存在，進而影響求解的速度及品質。

本模式在適合度函數式中加上此類擁擠節線發生時的懲罰成本來解決上述問題，計算方式如式(20)所示。其中， M 是一個足夠大的正數，每次運量指

派後將統計流量超過容量的節線數，將之乘以 M 後加入適合度中，使得尋優過程中，雖可暫時接受這些劣解但會因為適合度大幅提高而優先排除之，因此加速了求解的速度及品質。

$$\text{適合度} = \text{式(3)計算所得之總成本} + \text{擁擠節線數} * M \quad (20)$$

其中，M 是一個極大值，擁擠節線數計算方式詳式(21)。

$$\text{擁擠節線數} = \left(\sum_{a=1}^{n_a} Z_a + \sum_{b=1}^{n_b} Z_b + \sum_{c=1}^{n_c} Z_c + \sum_{d=1}^{n_d} Z_d + \sum_{e=1}^{n_e} Z_e \right) \quad (21)$$

$$\text{其中，} Z_a = \begin{cases} 1, & \text{if } x_a > v_a; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad Z_b = \begin{cases} 1, & \text{if } x_b > v_b; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad Z_c = \begin{cases} 1, & \text{if } x_c > v_c; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad Z_d = \begin{cases} 1, & \text{if } x_d > v_d; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad Z_e = \begin{cases} 1, & \text{if } x_e > v_e; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad \circ$$

4.7 終止條件的設定

終止條件之設定方式甚多，通常可為演算迭代數大於所設定的最大次數時，或採目標函數無法改進時的停滯時間限制（Stall Time Limit）等；本模式為觀察非劣解或及最佳解出現的世代數，以了解收斂過程的情形，係採前者為終止條件。

4.8 三種排除不可行解的交配法

由於交配過程中子代違反硬限制式的機率很大，若採較複雜的交配方式，將使此問題更形嚴重，故本模式採單點交配法、單點突變交配法及雙點交配法三種突變法，並在個案分析時探討哪一種交配法較適合本問題。

三種交配法過程如下：

1. 輪盤法隨機選出一個父代。
2. 輪盤法隨機選出一個有別於父代的母代。
3. 隨機定義交配點後，進行這三種交配法產生子代：

(1)若為單點交配法，交配方式如圖 13 所示，交配點位置是在二個染色體之間，子代一及子代二是將父代與母代互換而得。

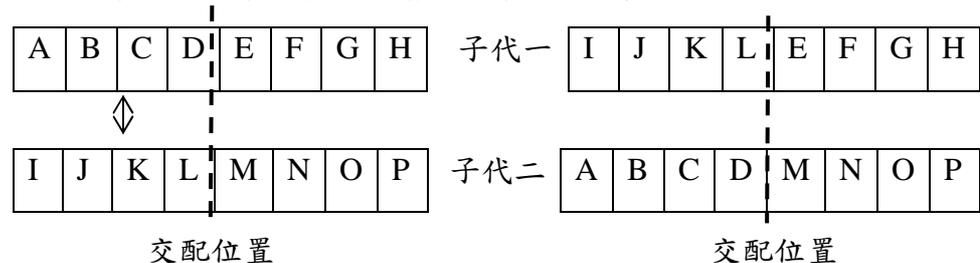


圖 13 單點交配法

(2)若為單點突變交配法，交配方式如圖 14 所示，交配點位置是在某一個染色體 Z 上，交換方式與單點交配法相似，其中，子代一的 X 基因是 0 與 $(TRC - \sum_{i=1 \sim n, i \neq z} TR_i)$ 之間的隨機整數，子代二的 Y 基因是 0 與 $(TRC - \sum_{j=1 \sim n, j \neq z} TR_j)$ 的隨機整數，這樣的設計可以確保產生的 X、Y 基因值滿足車隊規模的限制，以先行滿足式(4)。

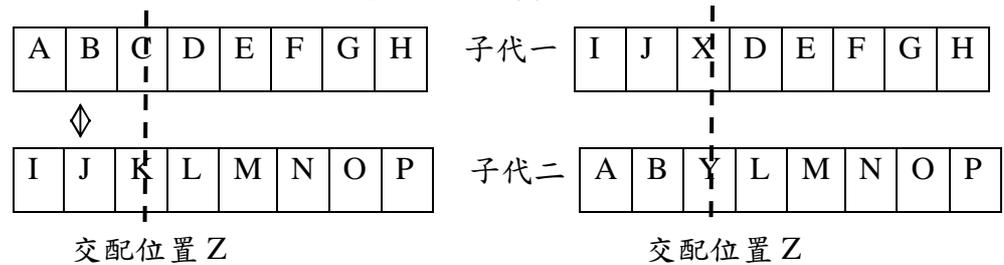


圖 14 單點突變交配法

(3)若為雙點交配法，交配方式如圖 15 所示，選取二個交配點，再把父代與母代的中間段互相交換而產生二個子代。

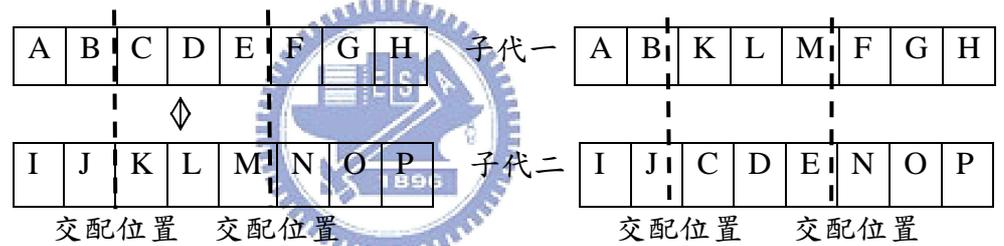


圖 15 雙點交配法

4. 檢查是否違反式(4)~式(7)，若有子代不違反任一限制式，則新增到族群中。
5. 重複以上步驟至產生足夠的子代為止。

4.9 排除不可行解的突變法

同樣地，本模式考量複雜的突變方式會產生大量違反硬限制式的子代，故採簡單的單點突變法；設計理念是針對每一子代，在事先設定的突變率下，若經隨機方式確定應進行突變，則先分別以隨機方式選取突變點及該突變點的列車數後，進行式(4)~式(7)的檢驗程序，若違反限制式，則在預擬的次數限制下先嘗試以變更突變點方式重新檢驗，若在次數內仍無法求得可行解則放棄對該子代進行突變，如此將可確保突變後產生的解都是可行的。

前述原理之過程如下：

1. 令 $\Lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n]$ 為需突變的染色體，且以 i 點為突變位置，決

定一個常數 T ，代表該染色體突變的試行次數上限。

2. 隨機決定 i ， i 介於 1 與 n 之間。
3. 依式(22)計算 λ_i ，式(22)將可確認新的染色體滿足限制式(4)

$$\lambda_i = \text{random}\left(0, TRC - \sum_{j=1}^n \lambda_j + \lambda_i\right) \quad (22)$$

4. 檢查新的染色體是否同時滿足式(5)~(7)，如果全部滿足，則該染色體是一個可行解；否則，若突變試行次數小於等於 T ，則回到步驟 2，若突變試行次數大於 T ，則放棄突變該染色體。

從突變公式的執行次數來看，本模式採用的突變法因為比傳統突變法執行次數多，可能會有效率上的疑慮，但由於 MTORDP 具有可行解求解空間小的特性，若採用傳統突變法，即「隨意取得一條染色體，突變後若產生不可行解則丟棄不取」，則會產生很多不可行解，甚至整個子代都沒有突變的情形發生，如此就失去了基因演算法能進行廣域搜尋的優點。

故本模式採用 T 這個參數來有限度的增加突變次數，由於每一條染色體是否需要突變已被突變率所控制，而每一條獲選的染色體至多只有 T 次突變的機會，故突變所耗費的時間成本是可被控制的，當 T 值設為 1 時，則可視為傳統的單點突變法，將完全沒有效率的疑慮，但也有可能整個子代都沒有一條染色體突變成功；當 T 值越大，突變成功的染色體數目會增加，使用者可以依他的經驗及需求去決定 T 值，以同時兼顧效率及廣域搜尋的需求。

4.10 重複性檢核

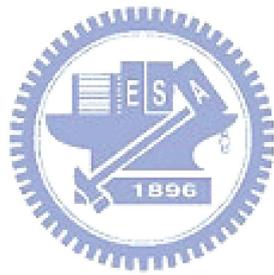
運量指派過程中，由於求解 Floyd's 最短路徑的複雜度為 $O(N^3)$ ，故求解時間將隨著路網規模擴大而大幅增加，因此如何避免重複性的運量指派動作，是加速求解的重要方法之一。

本模式為避免對相同的解重複作運量指派，建立了一個記憶機制，即設定一個陣列儲存曾產生過的染色體以及其相關適合度，針對交配或突變後的子代染色體內容予以比對，若經檢查發現已重複，將不進行運量指派而直接抄錄原適合度到子代中，以節省後續不必要的運算時間。

4.11 小結

本章中針對 MTORDP 特性，基於基因演算法的架構，構建適當的基因編碼方法、研提二個啟始解產生法、三個交配運算子及一個突變運算子；並為求

加速尋優過程，使得演算法能兼顧求解品質及速度，另研提基因修補機制、加速收斂的適合度函數及檢測重複等機制。後續將於第五章中以台北捷運實例來驗證適當的運算子組合及交配率與突變率參數組合，以及這些設計是否可達預期的效果。



五、 實例驗證

本章以 TRTC 提供之高運量主線（即淡水線、新店線、中和線、南港線、板橋線及小南門線）2008 年路網及運量資料作為個案研究，來探討本模式在 MTORDP 的應用特性。首先在 5.1 節中說明例題來源及特性，並說明演算法所採用的各項參數來源依據。

其次，在演算法特性分析上，5.2 節~5.7 節所探討的內容包含「藉由敏感度分析探討合理的交配率與突變率組合」、「比較二個啟始解產生法績效以利挑選適當的產生法」、「探討交配法與突變法之效率以釐清是否會因額外運算而造成效率低問題」及「比較三種交配法績效以利挑選適當的交配法」，最後挑選出適合本問題之啟始解產生法及交配法組合。

在求解結果的探討上，於 5.8 節及 5.9 節分別探討最佳解及第二最佳解，分別探討適合度、營運模式、班距分佈、使用列車數、旅客總旅行時間、列車調度便利性、司機員折返時間合理性等項目之特性，並針對台北捷運公司之營運規劃管理之應用程度作一說明。

5.1 例題說明



前述研究範圍路網詳圖 16，共 54 個車站、22 個營運模式（詳表 7），平常日尖峰小時運量約 12.2 萬人，列車運行計畫如表 8 及圖 17 所示，扣除維修中的列車後，總可用列車數為 58 列，其中以 53 列車納入列車時刻表中運行，因為運量需求高，有三個路段以及轉車站 BL7/R13 的月台產生擁擠情形(如圖 17 中的粗箭頭線段所標示)，故 TRTC 另外使用 5 列備用車，採用人工調度的方式以區間車插車方式服務重點區間，來疏緩這個擁擠問題。

由於新購列車尚未到位之前，擁擠問題將隨著運量成長而益形嚴重，且在強調自動化發車的捷運系統中以人工調度列車還是存在風險，故恰可運用本模式來探討是否可藉由修正列車運行計畫，以妥為安排適當營運模式及有效利用目前可用列車，達到全系統均能自動發車且紓緩擁擠情形的目的。

相關成本、系統特性及基因演算法參數彙整如表 9，式(3)中的 α 、 β 、 γ 及 λ ，依照實際營運成本分別設為 378.8 元、1522 元、73.8 元及 0.00027，其中， λ 係依專家經驗設計 TRTC 成本與旅客成本比為 3600:1；班距上限、下限依系統特性及主管機關規定分別設為 7 分鐘、2 分鐘。而親代數、子代數及世代數依經驗分別設為 50、100 及 200，藉以分析不同的啟始解產生法與不同的

交配法下的求解特性；有關適合本例題的交配率與突變率組合，則於下一小節以敏感度分析方式決定，全路網規模則如 3.3 節所探討的內容。

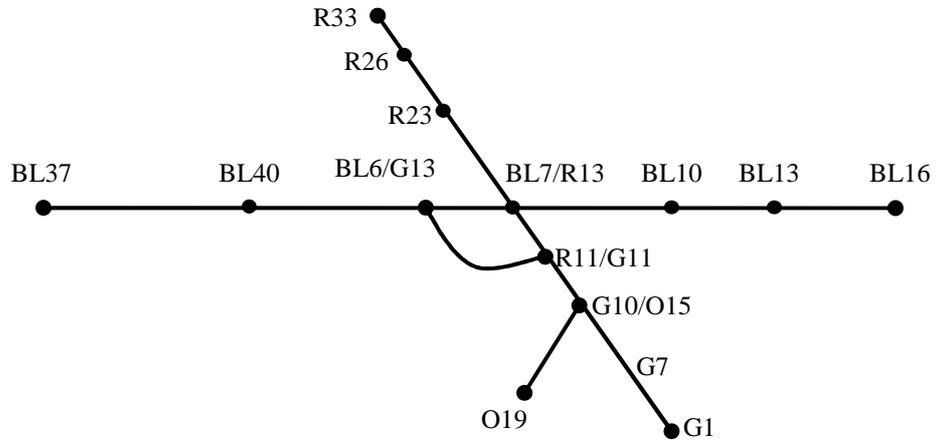


圖 16 研究路網圖
資料來源：TRTC

表 7 營運模式彙整表

編號	車站數	起迄車站	行駛週期 (分鐘)	往返距離 (公里)
1	30	R33-G1	121.75	63.66
2	24	R26-G1	92.15	43.52
3	21	R23-G1	81.17	37.83
4	23	R33-G7	94.82	48.59
5	17	R26-G7	65.22	28.45
6	14	R23-G7	54.23	22.76
7	20	BL37-BL16	84.78	44.44
8	17	BL37-BL13	73.9	38.11
9	14	BL37-BL10	64.65	33.63
10	17	BL40-BL16	65.6	35.99
11	14	BL40-BL13	54.72	29.65
12	11	BL40-BL10	45.47	25.18
13	26	R33-O19	110.18	57.36
14	20	R26-O19	80.58	37.22
15	17	R23-O19	69.6	31.53
16	22	BL16-G1	87.22	40.85
17	19	BL13-G1	76.33	34.51
18	16	BL10-G1	67.08	30.04
19	15	BL16-G7	60.28	25.78
20	12	BL13-G7	49.4	19.45
21	9	BL10-G7	40.15	14.97
22	3	R11/G11-BL6/G13	9.33	3.18

資料來源：TRTC

表 8 TRTC 高運量系統平常日尖峰小時列車使用情形彙整表

編號	營運模式	列車數(列)	班距(分)	列車公里	列車小時
1	R33-G1	18	6.76	564.70	18
7	BL37-BL16	12	7.07	377.41	12
10	BL40-BL16	11	5.96	362.09	11
14	R26-O19	11	7.33	304.85	11
22	R11/G11-BL6/G13	1	9.33	20.45	1
小計		53		1629.5	53
適合度		10620.3 千元	總旅行時間	86097.6 小時	

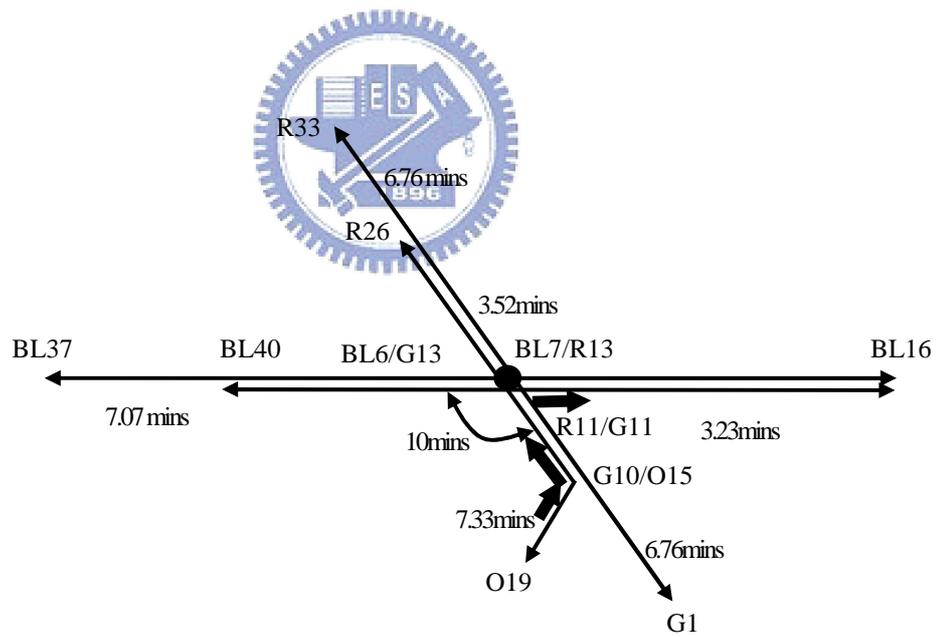


圖 17 TRTC 現行高運量主線路網班距分佈圖

表 9 本模式相關參數彙整表

分類	參數	數值	備註
成本 相關 參數	每列車公里成本(α)	378.8 元	周義華, 黃勵君[9]
	每小時每列車折舊成本(β)	1522 元	每列車造價四億元, 依 30 年直線攤銷法計算
	旅客車內時間價值(γ)	73.8 元/小時	依據台北都會區整體運輸需求預測模式[32], 民國 80 年大眾運輸車內時間價值每分鐘 0.79 元, 以平均年物價上漲率 0.025 調整為民國 97 年之每分鐘 1.23 元, 即每小時 73.8 元
系統 相關 參數	端點站折返時間	300 秒	台北捷運公司[3]
	停靠站時間	25 秒	
	班距最小限制	2 分鐘	
	尖峰班距上限	7 分鐘	
	每列車承載量	1936 人	
	設計容量	規劃手冊	台北捷運工程局[30]
基因 演算 法參 數	親代數	50	本研究設定
	子代數	100	
	世代數	200	
	運量指派最大迭代次數	20 次	
	運量指派收斂之差距	10 人	
	M	2000000	

5.2 交配率與突變率敏感度分析

為求得適合本例題的交配率與突變率組合, 以下以交配率分別為 0.85、0.9、0.95, 及突變率分別為 0.1、0.2、0.3、0.4, 總共 12 種組合, 每種組合均執行 4 次後計算各次的最佳解適合度、最佳解產生世代及總執行時間, 以及前述資料平均值彙整如表 10 所示。

由表 10 知, 在這 12 種(交配率、突變率)組合中, 共有(0.85, 0.2)、(0.9, 0.2)、(0.9, 0.3)、(0.9, 0.4)、(0.95, 0.2)及(0.95, 0.4)等六組, 在執行四次後, 每次均能求得最低的適合度(即 611.03 千元), 其中則以交配率為 0.95、突變率為 0.2 之組合, 演化 200 世代的總執行時間最低。

因為組合(0.95, 0.2)與其他組合相比較下, 除了適合度同樣為最低外, 所花費的總執行時間最少, 故本研究在以下各小節之計算中, 採用(0.95, 0.2)為交配率與突變率組合。

表 10 交配率與突變率組合敏感度分析表

執行次數 結果 參數		第一次			第二次			第三次			第四次			平均值		
交配率	突變率	最佳解 適合度 (千元)	最佳解 產生世代	總執行 時間 (秒)												
0.85	0.1	20579.0	60	4851	611.0	114	3779	611.0	9	1993	611.0	36	3143	5603.0	54.8	3442
0.85	0.2	611.0	58	4164	611.0	102	5340	611.0	145	6373	611.0	17	3265	611.0	80.5	4786
0.85	0.3	611.0	56	5819	613.5	2	2101	611.0	94	6390	611.0	31	4294	611.6	45.8	4651
0.85	0.4	611.0	51	6550	613.5	2	2366	613.5	9	3107	611.0	8	3632	612.3	17.5	3914
0.9	0.1	611.0	81	3936	611.0	108	4072	20579.0	66	5396	611.0	147	5320	5603.0	100.5	4681
0.9	0.2	611.0	32	3931	611.0	103	5944	611.0	115	5349	611.0	69	4471	611.0	79.8	4924
0.9	0.3	611.0	15	3548	611.0	41	4409	611.0	136	7355	611.0	38	4929	611.0	57.5	5060
0.9	0.4	611.0	30	5313	611.0	39	5660	611.0	61	7819	611.0	35	5669	611.0	41.3	6115
0.95	0.1	611.0	23	2517	20579.0	40	4999	20586.8	137	5383	611.0	92	3481	10597.0	73.0	4095
0.95	0.2	611.0	53	5074	611.0	110	5033	611.0	48	4072	611.0	21	3160	611.0	58.0	4335
0.95	0.3	611.0	58	5572	611.0	22	4060	611.0	89	6213	613.5	3	2110	611.6	43.0	4489
0.95	0.4	611.0	3	2545	611.0	27	4823	611.0	56	6557	611.0	19	4789	611.0	26.3	4679

5.3 啟始解產生方式之績效比較

為比較一車法及最小車數法所產生的啟始解是集中還是分散的，以及為了解這二種啟始解產生法對於求解時間及品質的影響，本研究分別以三種交配方法及二種啟始解產生法所產生的六種組合，每種組合各執行 10 次，並以式(23)來計算任意二個啟始解 x 和 y 之間的相對關係，前述計算結果之統計如表 11。

$$Rel_{x,y} = \sum_{i=1 \sim n} (TR_i^x - TR_i^y)^2 \quad (23)$$

由表 11 可歸納出以下幾點發現：

1. 由第三欄知，二種啟始解產生法得到足夠族群啟始解的平均產生時間都在可接受範圍內，其中以一車法的 109.2 秒，快於最小車數法的 255.7 秒。
2. 第四欄在探討二種啟始解產生法所產生啟始解的集中度 Rel ， Rel 數值越高表示越分散，因為一車法及最小車數法的 Rel 的變異係數平均值分別為 61.0、61.1，故他們的啟始解分佈是分散的，亦可推知本模式計算的最佳解是透過尋優過程而得。
3. 第五欄說明最小車數法執行時間低於一車法。
4. 第六欄以適合度最大值探討收斂速度，因最小車數法 3036.4 小於一車法的 4568.4，表示產生第一代子代後，由最小車數法產生的啟始解，比較接近較低適合度的空間，顯示最小車數法收斂速度快於一車法。
5. 第七欄說明第一個非劣解的適合度，雖然一車法適合度較低，但二者之間的差距甚小 $\{(656.1-652.5)/656.1=0.6\}$ ；且變異係數分別是 2.4% 及 1.7%，表示二者所產生的啟始解，個別以三種交配法運算所得的第一個非劣解適合度平均值是接近且穩定的。此外，由第八欄第一個非劣解出現的世代知，

最小車數法低於一車法，顯示最小車數法在較少的世代內即可獲得可接受的解。

6. 第九及第十欄說明第一個最佳解的適合度及其出現世代，以了解何種產生法能在較少世代內得到最佳解；結果知二者所產生的啟始解，個別以三種交配法運算所得的最佳解適合度平均值是接近且穩定的。且因最小車數法的第一個最佳解出現的世代低於一車法，顯示最小車數法在較少的世代內即可獲得最佳解。
7. 綜上，由於二者在花費時間及最佳解品質均很接近，而最小車數法能快速產生非劣解及最佳解，較能符合本研究欲兼顧品質及時效之目標，故本研究後續將採最小車數法來求解 TRTC MTORDP 問題。

表 11 不同啟始解產生法之求解結果比較表

啟始解產生法	一車法			最小車數法		
	平均值	標準差	變異係數	平均值	標準差	變異係數
產生啟始解時間(秒)	109.2	68.6	62.8%	255.7	30.0	11.7%
Rel 之變異係數(%)	61.0	2.0	3.3%	61.1	1.2	1.9%
計算時間(秒)	13099.7	8103.4	61.9%	12287.5	8178.6	66.6%
最大適合度	4568.4	2125.3	46.5%	3036.4	1416.1	46.6%
第一個非劣解的適合度(千)	652.5	15.9	2.4%	656.1	11.2	1.7%
第一個非劣解出現的世代	19	18.8	99.5%	14	14.1	101.5%
最佳解的適合度(千)	623.6	8.7	1.4%	624.8	8.5	1.4%
最佳解第一次出現的世代數	71	46.8	66.3%	60	51.2	84.9%

5.4 交配法之效率探討

由於三種交配法的原理之一是捨棄不可行解直至產生足夠的子代為止，故其執行效率亦是一探討課題。故此，本研究以每一個交配法，針對相同的一組啟始解執行十次，每次獲得 100 個子代並計算不可行解數佔總交配次數的比率(如表 12 所示)。

由表 12 知，不可行解比率介於 40.2% 與 48.5%，且從執行過程中知每次花費不超過一秒時間即可得到如此可接受的產生率，故三種交配法產生足夠可行解的效率是可被接受的。

表 12 交配法效率比較表

交配法	統計值	不可行解數 (A)	總執行次數 (B)	不可行解比率 (A/B)
單點交配法	平均值	67.1	167.1	40.2%
	標準差	8.8	8.8	
	變異係數	13.1%	5.2%	
單點突變交配法	平均值	87.9	187.9	46.8%
	標準差	21.8	21.8	
	變異係數	24.8%	11.6%	
雙點交配法	平均值	94.0	194.0	48.5%
	標準差	14.8	14.8	
	變異係數	15.7%	7.6%	

5.5 突變法之效率探討

由於突變法亦會捨棄不可行解，故本研究亦以每一個交配法，針對相同的一組啟始解執行十次，每次各獲得 100 個子代後，在 0.2 交配率下進行突變，並計算每次不可行解數佔總突變次數的比率(如表 13 所示)。

由表 13 知，不可行解比率介於 14.9%與 17.4%，且從執行過程中知每次花費不超過一秒時間即可得到如此可接受的產生率，故突變法產生足夠可行解的效率是可被接受的。

表 13 突變法效率比較表

交配法	統計值	不可行解數 (A)	總執行次數 (B)	不可行解比率 (A/B)
單點交配法	平均值	3.3	22.1	14.9%
	標準差	1.6	3.1	
	變異係數	47%	14%	
單點突變交配法	平均值	3.6	22.6	15.9%
	標準差	2.4	3.2	
	變異係數	0.66	0.14	
雙點交配法	平均值	4.7	27.0	17.4%
	標準差	3.4	7.3	
	變異係數	72%	27%	

5.6 三種交配法之績效比較

為比較三種交配法的求解績效，針對以最小車數法產生的同一組啟始解，以三種交配法分別執行 10 次，每次均演化至 200 世代方終止，結果如表 14 所

示，特性分析如下：

1. 第三欄顯示，以單點突變交配法平均花費時間最多，單點交配法及雙點交配法較低且二者甚為接近，約為前者的三分之一倍。
2. 第四欄顯示，單點交配法所求的最大適合度平均值最低，表示使用該交配法，有助於在一開始就找到較低適合度的空間，其收斂速度較其他方法快速。
3. 第五欄顯示，雙點交配法所得的第一個非劣解適合度平均值最低，且變異係數平均值 1.6%，顯示雙點交配法可穩定地找到較低的可接受解。
4. 第六欄顯示，單點突變交配法第一個非劣解產生世代最低，約為其他二者的二分之一，但計算時間則約為其他二者的三倍，推知雙點交配法及單點交配法較單點突變交配法能在較短時間獲得可接受解。
5. 第七欄顯示，三者所求得的最佳解平均值分別為 665.4、669.7 及 641.9，求解品質相近；其中又以雙點交配法最低，且變異係數 2.9%，表示求解品質較好且穩定。
6. 第八欄顯示，最佳解出現之平均世代數的平均值，以雙點突變交配法之 95 代最低。
7. 綜上，由於雙點交配法的第一個非劣解及最佳解適合度較低，且最佳解出現世代平均值均較小，表示能在短時間內找到不錯的解，故比較適合 TRTC MTORDP 的問題特性。

5.7 最小車數法及雙點交配法之求解品質探討

由前述分析知最小車數法及雙點交配法適合 TRTC MTORDP 問題特性，故以下就最小車數法與雙點交配法的求解品質特性進行分析，執行 30 次的結果詳表 15，特性分析如下：

1. 由於這 30 個最佳解中，均沒有使用到 M，可知都沒有產生擁擠的情形，也不需要加發班車來因應，顯示本模式可以解決人工發車及擁擠的問題。
2. 最佳解適合度的變異係數為 2.1%，表示所求得的最佳解穩定且接近；其中有 18 次均求得最低的最佳解(適合度 611.0)，占總次數的 60%，可知本模式在多次執行時，均可求得穩定的最佳解。

表 14 不同交配法對同一啟始解之求解結果比較表

交配法	單點交配法			單點突變交配法			雙點交配法		
	平均值	標準差	變異係數	平均值	標準差	變異係數	平均值	標準差	變異係數
計算時間(秒)	8760.9	1153.2	13.2%	30199.3	3593.7	11.9%	8892.7	1769.0	19.9%
最大適合度	2440.0	621.6	25.5%	2444.3	623.0	25.5%	2634.9	5.5	0.2%
第一個非劣解的適合度(千)	665.4	8.8	1.3%	669.7	4.0	0.6%	663.9	10.9	1.6%
第一個非劣解出現的世代	8	4.8	57.7%	5	4.5	88.9%	9	6.8	72.2%
最佳解的適合度(千)	645.1	18.7	2.9%	648.3	14.1	2.2%	641.9	18.4	2.9%
最佳解第一次出現的世代數	109	72.2	66.3%	105	59.6	56.6%	95	68.7	72.7%

3. 適合度最二低(613.5)的最佳解，數目為 6 個，占總執行次數的 20%，若與適合度最低的最佳解次數合併計算，則達 80%，表示本模式多次執行結果均可找到不錯品質的解。
4. 觀察第一個非劣解出現之世代數，最大值為第 27 代、最小值為第 1 代，平均在第 4 代就可找到第一個非劣解，表示本模式將極大值 M 應用於適合度公式中有快速收斂的效果。
5. 觀察最佳解出現之世代數，平均在 60 世代即可找到最佳解，故實務上若有規劃時間的壓力時，則可將最高世代數設定在 100 代以內，應可求得相當程度的可接受解。
6. 就最佳解的使用列車數而言，最多為 56 列，最低為 53 列，平均為 54 列，顯示本模式可在符合各種限制下求得較低使用列車數的解，除節省成本外，剩餘的列車可作為維修等其他用途。
7. 綜上可知，本模式可以在很少的世代下求得不錯的解，可合理的應用在實際課題上。

表 15 最小車數法加雙點交配法多次執行結果彙整表

執行次數	第一個非劣解		最佳解		
	適合度	出現之世代數	適合度	出現之世代數	使用列車數
1	654.9	2	611.0	8	53
2	625.4	3	613.5	36	53
3	667.9	7	611.0	23	53
4	622.9	8	611.0	11	53
5	670.8	3	613.5	110	53
6	661.3	4	613.5	33	53
7	635.2	7	633.6	145	55
8	662.5	3	611.0	78	53
9	662.5	2	650.6	106	56
10	657.6	3	613.5	45	53
11	622.9	1	611.0	7	53
12	622.9	1	611.0	22	53
13	674.5	8	611.0	38	53
14	650.6	2	611.0	91	53
15	625.4	1	613.5	20	53
16	654.2	2	611.0	52	53
17	613.5	1	613.5	1	53
18	664.4	9	611.0	31	53
19	646.6	14	611.0	31	53
20	671.2	1	613.5	96	53
21	671.9	2	644.4	77	56
22	650.3	2	611.0	18	53
23	646.6	10	611.0	28	53
24	654.9	27	611.0	90	53
25	642.5	1	618.8	36	54
26	633.6	2	633.6	2	55
27	645.4	17	611.0	70	53
28	630.6	2	611.0	41	53
29	644.2	1	611.0	154	53
30	621.7	4	611.0	52	53
最大值	674.5	27	650.6	154	56
最小值	613.5	1	611.0	1	53
平均值	652.09	4	618.2	60	54
標準差	17.61	2.25	13.3	47.34	1.08
變異係數	2.7%	53.6%	2.1%	79.6%	2.0%

5.8 最佳解特性分析

將本模式自前述 30 次試行中所求最佳解(即適合度 611.0 千元者)的列車使用情形及班距分佈分別以表 16、圖 18 表示，歸納其特性如下：

1. 在行車調度自動化需求上，由於沒有路段產生擁擠現象，故不需加開備用車，可以自動化調度及節省司機人力成本。
2. 營運列車數為 53 列，和 TRTC 列車時刻表所使用的相同，故仍能保留足夠的備用車作為緊急應變之用。
3. 營運模式只有三種，便利旅客記憶，且在市中心區域班距最密集，符合一般的情形。
4. 三種營運模式中，最低的班距為 4.31 分鐘，司機員在月台折返時不需要額外人力來協助加速折返時間，可以節省人力成本。
5. 就轉車問題而言，G1 站往 R33 方向旅客，可以在 G11、G12 站的同一個月台換搭乘營運模式 13 的列車，平均而言只需多等 2.5 分，不至於花費過多的轉車時間。但起迄點分別在 BL37-BL3/G13 與 BL10-BL16 之間的旅客無法直達必須轉車，將有所不方便，故可知這種營運模式設計雖會節省 TRTC 營運成本，但不利部分旅客轉乘。
6. 就路線容量來探討，BL10-BL6/G13 間為容量最高的區段，班距為 2.41 分鐘，仍在號誌系統容許的 2 分鐘班距限制內，未來尚有多餘列車數可投入時可再提升運能。

表 16 最佳解列車使用情形彙整表

編號	營運模式	列車數(列)	班距(分)	列車公里	列車小時
9	BL37-BL10	15	4.31	468.17	15
13	R33-O19	22	5.01	687.20	22
16	BL16-G1	16	5.45	449.62	16
小計		53		1604.99	53
適合度		611.0 千元	總旅行時間	84418.7 小時	

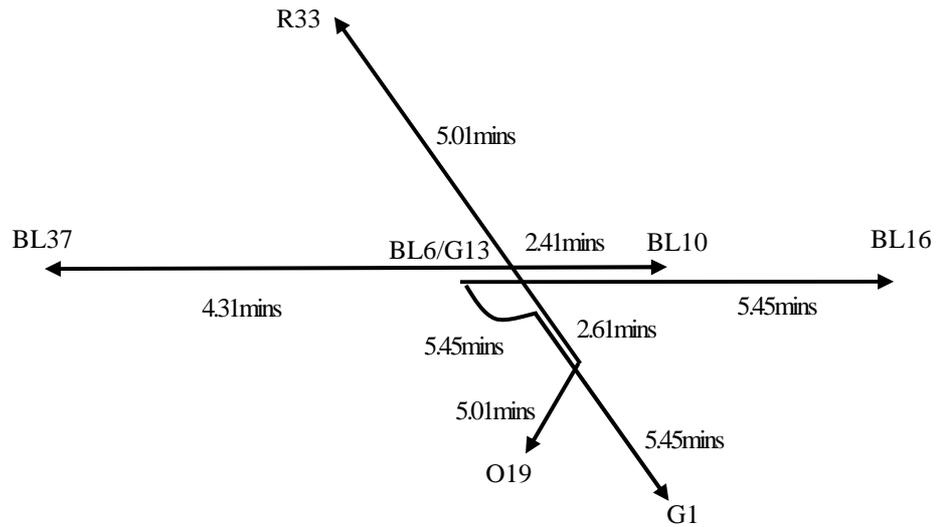


圖 18 最佳解之班距分佈圖

5.9 第二最佳解特性分析

此外，由於第二最佳解(即適合度 613.5 千元者)的成本、品質及營運模式組合亦佳，亦值得納入考量，其特性分析如下：

1. 在行車調度自動化需求上，由於沒有路段產生擁擠現象，故不需加開備用車，可以自動化調度及節省司機人力成本。
2. 營運列車數為 53 列，和 TRTC 列車時刻表所使用的相同，故仍能保留足夠的備用車作為緊急應變之用。
3. 營運模式只有三種，便利旅客記憶，且在市中心區域班距最密集，符合一般的情形。
4. 三種營運模式中，最低的班距為 4.46 分鐘，司機員在月台折返時不需要額外人力來協助加速折返時間，可以節省人力成本。
5. 轉車問題而言，G1 站往 R33 方向旅客，可以在 G11、G12 站的同一個月台換搭乘營運模式 13 的列車，平均而言只需多等 2.5 分，不至於花費過多的轉車時間。BL37-BL16 間上下車旅客均不需轉車，節省旅客轉乘時間，此特性可從所有旅客的總旅行時間 83008.2 小時，低於最佳解的 84418.7 小時觀察得知。
6. 就路線容量來探討，BL10—BL6/G13 間為容量最高的區段，班距為 2.58 分鐘，仍在號誌系統容許的 2 分鐘班距限制內，未來尚有多餘列車數可投入時可再提升運能。

表 17 第二最佳解列車使用情形彙整表

編號	營運模式	列車數(列)	班距(分)	列車公里	列車小時
7	BL37-BL16	19	4.46	597.57	19
13	R33-O19	23	4.79	718.43	23
18	BL10-G1	11	6.10	295.56	11
小計		53		1611.56	53
適合度		613.05 千元	總旅行時間	83008.2 小時	

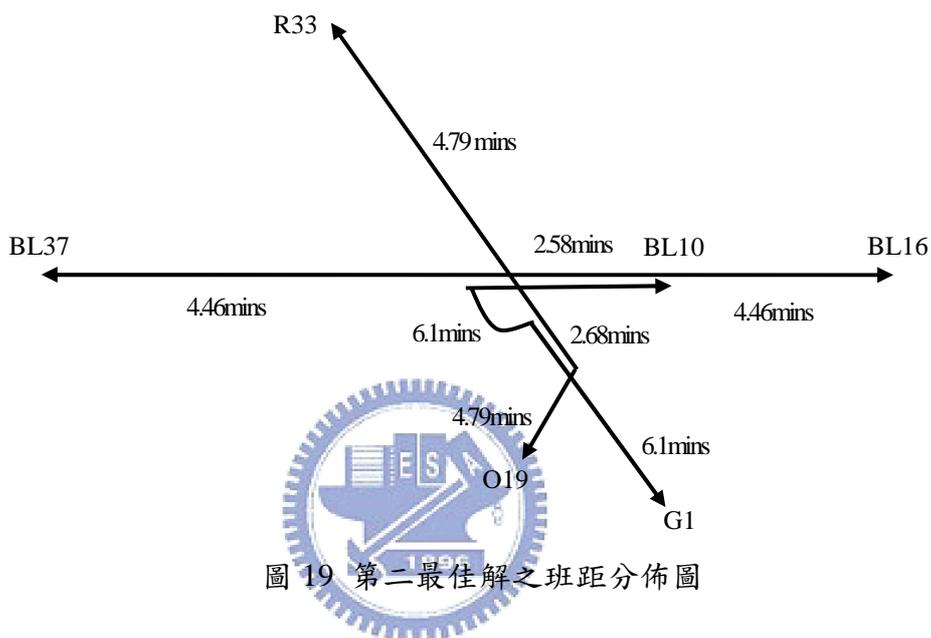


圖 19 第二最佳解之班距分佈圖

5.10 小結

本章中，針對 TRTC 實例的進行各項運算及統計，俾驗證本演算法之效果，首先藉由敏感度分析採用(0.95, 0.2)為交配率及突變率組合，在比較二種啟始解產生法之特性後，採用最小車數法為本實例的啟始解產生法；另驗證了交配法和突變法不會增加過多的運算時間，而在比較計算時間、適合度、最佳解及世代數等項目後，採雙點交配法為適合本實例的交配法。

依據藉由以上驗證所得適合本實例的參數、啟始解產生法及交配法，進行多次運算後歸納知本演算法可以在很少的世代內求得不錯的解；最後，藉由分析最佳解及第二最佳解之特性，本研究提供捷運公司列車運行計畫之參考意見。

六、 結論與建議

6.1 結論

本研究結論分述如下：

1. 本研究透過數學規劃模式之構建，探討 MTORDP 問題特性，並應用基因演算法架構輔以特殊的啟始解產生、修補、偵測重複、交配、突變法來避免產生不可行解，以加速求解時間及提升解的品質，經由 TRTC 實例驗證可說明本模式的穩定性及實用性。
2. 實例驗證結果發現，就 TRTC 現行高運量主線路網而言，為求社會成本最小，以雙 Y 路網方式營運為較佳的營運方式，若可比照現有經驗解決控制員席位協調安排、通訊系統整合、號誌路徑.....等問題，建議 TRTC 可考量朝此方向規劃。
3. 另基於本模式容易加入限制式的特性，若 TRTC 考量營運模式數目應低於某數值以簡化運轉難度及便利旅客搭乘，亦可將此類限制式加入模式中求解。
4. TRTC 目前仍在擴充路網規模中，若能取得預測運量資料及遠期路網相關參入，將可應用本模式來求解，甚或可以節省購置列車數，達到樽節成本的目的。

6.2 建議

本模式在列車運行計畫實務問題的求解上尚有改善的空間，謹說明如下：

1. 目前僅針對尖峰時段的營運模式及班距求解，若離峰時段運量需求超過政策班距之規範，可針對營運時間內不同時段的運量需求（如次尖峰、離峰時段）進行整合規劃，以求捷運公司全日營運成本最小。
2. 本研究假設列車係固定編組、每一列車承載量固定，實務上有一些捷運系統如高雄捷運即規劃有同時運行三車組及六車組之功能，故後續可求解混合編組問題，使本模式應用範圍更廣泛。
3. 由於捷運系統旅運需求尖峰性甚強，捷運公司常需利用備用車，在適當的時間行駛在最需要的區段，此類加班車的策略規劃可利用本模式產生的解透過適當的交換法來求得最適的加班車策略。

4. 理論上，本模式可以進行全域搜尋求得最佳解，但因運量指派須花費大量時間，故較難滿足實務上即時性的規劃需求，若能歸納出簡單的邏輯規則，將可有助於捷運公司臨時規劃列車運行方式之參考；由於本模式在執行過程中，已經計算出不同情境下的適合度、列車公里、旅行時間、擁擠情形等資料，故建議後續可利用這些既有資料進行推論分析（如資料採礦、模糊推論等），找出簡單有效的規則供即時決策參考，使得本模式的應用更加廣泛。
5. 本研究所採用的基因修補機制，雖然可以優化較差的基因，但仍不能稱之為完整的深度搜尋，建議後續可再深入探討如何加上精英搜尋策略來滿足深度搜尋方面的需求。
6. 本研究對於捷運旅客運量之指派問題以連續方式來處理具有相當的假設性，雖然有部分文獻仍以此方式進行，但為求更接近 MTORDP 問題特性(尤其是班距甚大的時候)，建議後續可再研究如何構建出更適合捷運旅客運量指派的模式。



參考文獻

- [1] 陳強，沈志藏，魏瑜，林誌銘，「台北捷運公司列車服務計畫現況說明與研究課題探討」，新世紀軌道運輸國際學術研討會，民國 89 年 10 月。
- [2] Guan, J. F., Yang, H., and Wirasinghe, S. C., “Simultaneous Optimization of Transit Line Configuration and Passenger Line Assignment,” *Transportation Research Part B*, Vol. 40, Issue 10, pp. 885-902, 2006.
- [3] 台北捷運公司，列車運行計畫，民國九十四年。
- [4] Wirasinghe, S. C., Initial Planning for Urban Transit Systems, *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*, Lam, W., Bell, M. (Eds.), Chapter 1, pp. 1–29, Pergamon, 2003.
- [5] Ceder, A., , “Designing Public Transport Networks and Routes,” *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*, Lam, W., Bell, M. (Eds.), Chapter 3, pp. 59–91, Oxford, UK 2003.
- [6] Fan, W., and Machemehl, R., “Optimal Transit Route Network Design Problem: Algorithms, Implementations, and Numerical Results,” *Technical Report SWUTC/04/167244-1*, Center for Transportation Research, University of Texas, USA, 2004.
- [7] Guihaire, V., and Hao, J. K., “Transit Network Design and Scheduling: A Global Review,” *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Issue 10, pp. 1251-1273, 2008.
- [8] 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論文集，86-119 頁，民國 86 年。
- [9] 周義華，黃勵君，「捷運系統最適營運路線設計之研究」，中華民國運輸學會第十五屆研討會論文集，民國 89 年 12 月。
- [10] 王晉元，林誌銘，「捷運系統營運模式及班距規劃模式之建立—以台北捷運遠期路網為例」，中華民國運輸學會第十七屆研討會論文集，民國 91 年。
- [11] Constantin, I., and Florian, M., “Optimizing Headway in a Transit Network: a Nonlinear Bi-Level Programming Approach,” *International Transactions in Operational Research*, Vol. 2, No. 2, pp. 149-164, 1995.
- [12] Zhao, F., and Zeng, X., “Optimization of Transit Network Layout and Headway with a Combined Genetic Algorithm and Simulated Annealing Method,” *Engineering Optimization*, Vol. 38, No. 6, pp. 701-722, 2006.

- [13] Zhao, F., and Zeng, X., “Simulated Annealing—Genetic Algorithm for Transit Network Optimization,” *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 20, No. 1, pp. 57-68, 2006a.
- [14] Gao, Z., Sun H., and Shan, L. L., “A Continuous Equilibrium Network Design Model and Algorithm for Transit Systems,” *Transportation Research Part B*, Vol. 38, No. 3, pp. 235-250, 2004.
- [15] David, E. G., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, NY, USA, 1989.
- [16] Baaj, M. H., and Mahmassani, H. S., “Hybrid Route Generation Heuristic Algorithm for the Design of Transit Networks”, *Transportation Research*, Vol. 3C, No. 1, pp. 31-50, 1995.
- [17] Yin, Y., “Genetic-Algorithm-Based Approach for Bilevel Programming Models,” *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, No. 2, pp. 115-120, 2000.
- [18] Tom, V. M., and Mohan, S., “Transit Route Network Design Using Frequency Coded Genetic Algorithm,” *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 129, No. 2, pp. 186-195, 2003.
- [19] Agrawal, J., and Tom, V. M., “Transit Route Network Design Using Parallel Genetic Algorithm,” *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 248-256, 2004.
- [20] Ceylan, H., and Bell, M. G. H., “Traffic Signal Timing Optimization Based on Genetic Algorithm Approach, including Drivers Routing”, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, pp. 329-342, 2004.
- [21] Ceylan, H., and Bell, M. G. H., “Genetic Algorithm Solution for the Stochastic Equilibrium Transportation Networks under Congestion”, *Transportation Research Part B*, Vol. 39, pp. 169-185, 2005.
- [22] Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimisation, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Boston, MA, USA, 1989.
- [23] 周鵬程，遺傳演算法原理與應用，全華科技圖書股份有限公司，民國九十一年。
- [24] 蘇木春、張孝德，機器學習：類神經網路、模糊系統以及基因演算法則，全華科技圖書股份有限公司，民國九十二年。
- [25] Reeves, C. R., “Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems,” John Wiley and Sons, pp. 151-196, NY, USA 1993.

- [26] Turmquist, M. A., "A Model for Investigating the Effects of Service Headway and Reliability on Bus Passenger Waiting times", *Transportation Research Record* 663, pp. 70-73, 1978.
- [27] 李治綱，謝汶進，「應用雙層次規劃於高速鐵路列車服務設計之研究」，運輸計劃季刊，第三十一卷第一期，95-120 頁，民國 91 年 3 月。
- [28] 鄭意勳，「捷運車站主要設施配置之研究」，國立交通大學，碩士論文，民國 88 年 6 月。
- [29] 交通部運輸研究所，2001 年台灣地區公路容量手冊，民國九十年。
- [30] 台北市政府捷運工程局，捷運系統規劃手冊，民國七十八年。
- [31] 張學孔，郭瑜堅，「都市旅次總成本模式構建之研究」，運輸計劃季刊，第三十六卷第二期，147~182 頁，96 年 6 月。
- [32] 台北市政府捷運工程局，台北都會區整體運輸需求預測模式(TRTSIII)校估報告，民國八十三年。



簡 歷



姓 名：林誌銘

出 生 地：屏東縣

出 生 日 期：民國 58 年 10 月 11 日

聯 絡 地 址：高雄市左營區蔡公里文守路 137 巷 56 弄 2 號

學 歷：

民國 98 年 6 月 國立交通大學運輸科技與管理學系博士

民國 83 年 6 月 國立交通大學土木工程研究所碩士

民國 81 年 6 月 國立交通大學運輸工程與管理學系學士

電 子 郵 遞：iambell@so-net.net.tw