

通勤交通車路線問題模式與巨集啟發式 解法¹

IP FORMULATION AND METAHEURISTICS FOR THE COMMUTER BUS ROUTING PROBLEM

韓復華 Anthony F. Han²
朱政威 Alonzo C. Chu³

(98年8月11日收稿，98年12月3日第一次修改，99年1月28日第二次修改，
99年2月24日第三次修改，99年6月9日定稿)

摘 要

對員工提供上下班通勤之交通車服務，在許多大型的公司企業，都是很普遍的現象。良好的通勤交通車路線規劃可替公司減少營運成本，亦可減短員工搭乘時間。員工通勤交通車路線問題 (commuter bus routing problem, CBRP) 屬學校交通車路線問題 (school bus routing problem, SBRP) 之延伸。相較於 SBRP，CBRP 需同時考慮多車種和多迄點的特性，亦歸屬於問題複雜度為 NP-hard 的開放式車輛路線問題 (open vehicle routing problem, OVRP) 型態。本文針對 CBRP 深入探討，首先以總營運成本最小為目標，對 CBRP 構建整數規劃 (integer programming, IP) 模式，並提出一套基於門檻接受法 (threshold accepting, TA) 的四階段巨集啟發式解法。本研究亦設計不同型態的中小型題庫 28 題，以驗證 CBRP 模式列式的正確

-
1. 本研究承蒙行政院國家科學委員會專題研究補助 (計畫編號：NSC 95-2211-E-009-318)，特此致謝。
 2. 國立交通大學運輸科技與管理學系(所)教授 (聯絡地址：300 新竹市大學路 1001 號 交通大學運輸科技與管理學系；電話：03-5731680；E-mail：afhan@mail.nctu.edu.tw)。
 3. 國立交通大學運輸科技與管理學系博士候選人 (E-mail：zucw.tem93g@nctu.edu.tw)。

性，並測試巨集啟發式解法之求解績效。結果發現，本研究之巨集啟發式解法，對題庫最佳解的誤差幾乎都在 1% 之內；個案應用結果方面，約可替個案公司減少年成本 29%。

關鍵詞：通勤交通車路線問題；整數規劃；門檻接受法；巨集啟發式解法

ABSTRACT

The Commuter Bus Routing Problem (CBRP) is a complicated problem faced by many big companies in their daily operations. A well-planned CBRP can reduce the operational cost, and the employee's commuting time. The CBRP can be considered as an extension of the conventional School Bus Routing Problem (SBRP). However, the CBRP in general considers a more complicated OD pattern and vehicle fleet mix than the SBRP. In this paper, we proposed an IP formulation for CBRP, and validated our proposed model with a set of test instances. We also designed heuristic solution methods based on a four-stage approach: (1) the farthest neighbor-based method for the solution construction stage; (2) node exchange based on surplus capacity for the fleet improvement stage; (3) inter-route and intra-route exchange for the neighborhood search stage; (4) Threshold Accepting (TA) metaheuristics for the intensification and diversification search stage. Computational results of the proposed metaheuristics on test instances showed that the percentage deviation of the exact solution is within 1%. For real-world applications, our proposed metaheuristics can save up to 29% of the annual cost for the case company.

Key Words: *Commuter bus routing problem; Integer programming; Threshold accepting; Metaheuristics*

一、前言

近年來許多公司體認到員工福利的重要性，因此國內許多企業皆已替員工提供通勤交通車往返各廠區及宿舍之運輸服務，並將其視為一不可或缺之勞工福利。尤其對於 24 小時全年無休之高科技產業更為重要，因為其作業員上班型態屬於晝夜輪班制度，基於勞基法之規定必須提供適當的交通車服務，以確保員工安全。而路線規劃之良窳，實為影響通勤交通車服務的重要關鍵，若路線規劃妥當，則可降低成本及減短員工搭乘之時間。此外，員工搭乘的需求，隨著新進與離職人員常有變動，通勤交通車之路線經常需要進行部分更改，傳統人工方式規劃既費時又費力，若可構建數學模式並利用電腦求解與更新，則可節省投入之人力與時間成本。然而通勤交通車路線問題 (commuter bus routing problem, CBRP) 在學術文獻上的探討甚少，亦尚未發展出可供實務應用之方法。故本研究針對 CBRP 進行深入研究。

在我國以及其他開發中國家，公司提供其員工上下班通勤之交通車服務，都是很普通

的現象。單以新竹科學園區某科技大廠為例，為維持其 24 小時生產線之連續作業，每天皆要提供早晚兩班交通車服務，每班人數均至 2000 人以上，約有 550 個停靠站，使用大巴、中巴與小巴 3 種不同車型的路線超過 40 條以上。其通勤交通車的服務為：每個員工於公司訂定好之停靠站上車，所屬之工作廠區下車；通勤交通車必須於上班前，將員工從停靠站運送至工作廠區。此與傳統學校交通車路線問題 (school bus routing problem, SBRP) 在一學區內之各級學校，於每個時段內，指派校車至所屬停靠站牌搭載學童在該時段內上學或放學的校車服務類似，但 CBRP 除了需增加考量多車種的因素外，CBRP 亦有多迄點(廠區) 之特性，故 CBRP 可視為 SBRP 之延伸。

SBRP 之相關研究始於 1970 年代初期 (Angel 等人^[1]、Bennett 與 Gazis^[2] 和 Bodin 與 Berman^[3])，與傳統車輛路線問題 (vehicle routing problem, VRP) 相較，SBRP 的研究顯然不及 VRP 的普遍與受到重視，亦無標竿題庫的設立。事實上，SBRP 可視為 VRP 問題的變型 (variant)，Fu 等人^[4]即在 2005 年提出 SBRP 是屬於開放式車輛路線問題 (open vehicle routing problem, OVRP) 的問題型態，因為校車「接」或「送」學生上學或放學的路線是一個開放的路線，並非是封閉的迴圈。由於通勤交通車的上下班路線與校車上下學的路線相同，均是開放路線的型態，故通勤交通車路線的 CBRP，基本上如同校車的 SBRP，也是屬於 OVRP 問題型態。CBRP 再加上多車種與多迄點的考慮，故可視為 OVRP 的變型問題，就解題複雜度而言，是屬 NP-hard 問題。

CBRP 多迄點的特性與多場站車輛路線問題 (multi-depot VRP, MDVRP) 不同。傳統的 MDVRP，每部車輛的路線對應一個特定的場站。但在 CBRP 中，代表不同場站的上下班地點 (廠址) 如果相距不遠，則單獨一條通勤交通車路線可同時連接多個廠址，以提供更有效率的服務，如圖 1 所示。由於 CBRP 不具備 MDVRP 車輛路線與場站有一對一的性質，CBRP 之求解方法無法延用傳統 MDVRP 的相關方法。除此之外，許多公司亦會利用不同車容量之車輛進行交通車服務，使每條路線依據乘載人數選擇適當規模之車輛，以減少成本浪費，故 CBRP 也同時擁有「多車種」的特性，使得問題更加複雜。

有鑑於此，本研究著重在多迄點 (廠區) 及多車種之通勤交通車路線設計，以總營運成本最小為目標，利用整數規劃法 (integer programming, IP) 建構通勤交通車路線問題數學模式；且設計小型測試例題求取最佳解 (exact solution) 來驗證 IP 模式之正確性。另外，本研究亦根據通勤交通車之特性，以門檻接受法 (threshold accepting, TA) 為基礎的巨集啟發式解法來構建求解方法，亦設計中型例題測試其求解績效，並對照 IP 模式在中型例題之求解結果進行比較分析，以作為本研究巨集啟發式解法之客觀評量指標。最後並以一實例研究對象，來測試巨集啟發式解法對於大規模問題之成效。

本文之架構，第二節進行相關文獻回顧與評析；第三節針對通勤交通車路線問題特性構建整數規劃 (IP) 模式，並設計小型測試例題作數學模式正確性之驗證；第四節進行巨集啟發式解法之構建和測試；第五節以一實際個案公司為例，進行巨集啟發式解法之實例應用；第六節提出結論與建議。

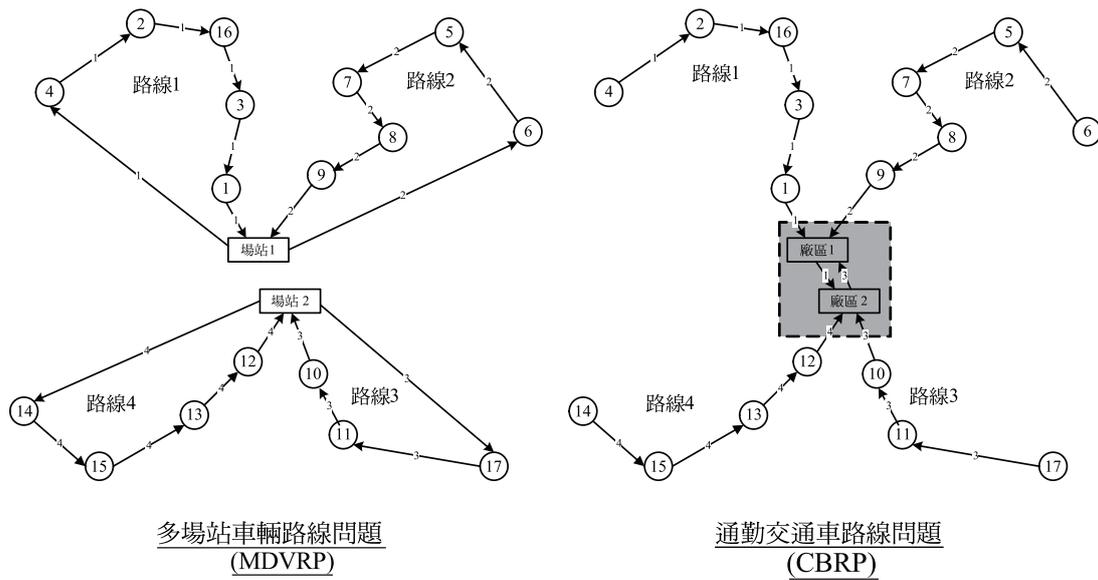


圖 1 MDVRP 與 CBRP 示意圖

二、文獻回顧

通勤交通車路線問題 (CBRP) 為傳統校車路線問題 (SBRP) 之延伸，目前似無針對 CBRP 的相關研究，本節先回顧 SBRP 的相關文獻，其次回顧開放式車輛路線問題 (OVRP) 的相關研究，最後再針對門檻接受法 (threshold accepting, TA) 進行介紹。

2.1 校車路線問題 (SBRP)

國外文獻關於 SBRP 之研究，源自 1970 年代初期^[1-3]。其問題背景為：在一學區內之各級學校，其上學與放學之時間是固定的，且皆有一組所屬站牌供學童上下車；校車服務為政府所提供與統籌管理，於每個時段內指派校車至該時段內上學或放學之學校；故 SBRP 即是針對學區之行駛路線進行規劃，以確保學童在規定時間內上學與放學，並期望營運成本、旅行時間最小化或路線長度與乘載量平衡等目標。

在 SBRP 的相關文獻中，學者大多針對單迄點（一所學校）及單車種之校車路線問題進行研究。Bodin 與 Berman^[3]以巴士總旅行時間最小為目標，採用先設計路線再分群的方法，利用 3-Opt 節線交換法，針對研究區域內之學校，先找到一條經過所有站牌之路線，再將此路線依據容量及時間限制條件，分割成數條可行之路線。Bowerman 等人^[5]考量多目標之市區校車路線問題，並構建一個 IP 模式。將此問題分成三個子問題：校車停靠站位置之決定、指派學生到停靠站之問題，以及路線產生問題。他們用 allocation- routing-location

(ARL) 策略來求解這三個子問題，這個策略主要是先將學生分派到每個群組，使得每個群組可以被一條校車路線服務；接著停靠站之位置被選定且產生經過這些停靠站的校車路線。其求解方法結合集合涵蓋演算法及插入法選定停靠站位置和產生路線。Li 與 Fu^[6] 於 2002 年建構了多目標之數學模式，其考量目標之優先順序為最小化總車輛數、最小化所有學生所花的總旅行時間、最小化車輛總旅行時間、平衡車輛間的裝載量和旅行時間。其解法共分五個步驟進行，第一個步驟先找到滿足第一個目標（服務所有停靠點所需的最小車輛數）之最佳解；第二步驟利用第 K 條最短路徑演算法建構起始解；第三步驟改善起始解；第四步驟確認所有路線為最短路徑；最後用 Hungarian 演算法進行車輛指派，以最小化車輛空載的旅行時間。Corberán 等人^[7] 則是以西班牙的中小學為實例研究對象，採用分散搜尋法 (scatter search, SS) 之架構求解一所學校、多目標的校車路線問題，但執行上無法非常有效率。2007 年 Bektaş 與 Elmastaş^[8] 利用整數規劃法來構建數學模式，並利用將 514 個學童的實際個案劃分為 29 個子區域（即問題規模可縮減至 29 個節點的 SBRP），每個子區域皆可由一台車輛的車容量來服務完成的方式（且假設每個子區域內的學童皆至該區中心點集合，以簡化子區域內的車輛路線問題）來進行求解，結果顯示可節省 28.6% 的旅行成本。國內學者部分，陳文瑞^[9] 對交通車的網路設計進行研究，其以臺大之交通車作為實例研究，根據地理區位分成三群組，每個群組利用 VRP 問題模式，以 LINDO 套裝程式求解各群組最佳路線組合。陳建都^[10] 於 1996 年對校車路線指派問題進行研究，以中部某職業學校作為案例，利用修正之掃描法建構路線起始解，再以路線間節點交換來改善，且利用四個例題對掃描法和節省法進行比較，結果顯示平行掃描法與循序掃描法，在執行績效上均較循序節省法佳。張容瑄^[11] 於 2001 年利用模擬鍛鍊法規劃一個校車指派系統，其問題定義為軟性時間窗車輛路線問題 (VRPSTW)，每個需求點都有其時窗限制，提早到達或超過最晚到達時間都加上懲罰項，讓問題與實務上的情況相符，使業者在最適合的運送路線下，總運送距離最小，並達到準時的要求。林志鴻等人^[12] 以南部某私立學校為實例研究對象，探討校車委託他人經營之校車路線規劃問題；依其營運特性建構一數學模式，且利用 location based heuristic (LBH) 方法發展一啟發式解法；實例經啟發式解法之測試，路線比現況減少 2 條、營運成本減少 10%。

另外，也有少部分學者針對多迄點(多所學校)及單車種的 SBRP 進行探討。Braca 等人^[13] 發展一套電腦計算系統 CATS (computer assisted transportation system) 來進行校車的路線規劃，主要使用 LBH 方法同時處理行駛路線的規劃與班次之設計；Spada 等人^[14] 於 2005 年利用模擬鍛鍊法 (simulated annealing, SA) 和禁制搜尋法 (Tabu search, TS) 發展 3 個啟發式解法，來求解一個有 1000 個站點、9171 個學生、367 個學校的大規模問題，且發展一決策支援系統；後續則有 Pacheco 與 Martí^[15] 於 2006 年針對 Corberán 等人^[7] 的 SBRP 個案，改以 TS 進行求解，改善效果良好。最新的 SBRP 文獻則為 2009 年 Park 與 Kim^[16] 針對 SBRP 問題的特性及解題方法作一完整的回顧。

2.2 開放式車輛路線問題 (OVRP)

OVRP 與 VRP 唯一的不同即是路線型態，其餘車容量、路線時間限制和需求不允許分割的特性，則與 VRP 相同。OVRP 的車輛從場站出發，終止於顧客，車輛並不會返回場站 (delivery only)；或車輛從載送第一位顧客開始，最後載送至場站結束 (pickup only)。此種路線型態為 Hamiltonian path 狀的車輛路線問題，即為 OVRP。

OVRP 在 1980 年代初期即有研究文獻，但並未受到與 VRP 相同的重視。Schrage^[17] 為首篇定義 OVRP 的文獻；之後 Bodin 等人^[18] 將 OVRP 應用在美國 FedEx 公司的配送問題上，並用節省法來求解。之後間隔了將近 20 年，才有 Sariklis 與 Powell^[19] 於 2000 年提出以最小擴張樹為基礎的兩階段啟發式解法來進行研究。

隨著巨集啟發式解法 (metaheuristics) 的興起，Brandão^[20] 和 Fu 等人^[4] 以 TS 來進行 OVRP 的求解；Tarantilis 等人^[21] 以 list-based threshold-accepting (LBTA) 來求解 OVRP；Pisinger 與 Ropke^[22] 以適應性的大規模鄰域搜尋 (adaptive large neighborhood search, ALNS) 啟發式解法來求解 OVRP；Li 等人^[23] 則以 record-to-record Travel (RRT) 演算法求解 OVRP，並建立 200 ~ 480 個點的標竿題庫及其演算法的應用結果；Fleszar 等人^[24] 則以變動鄰域搜尋法 (variable neighborhood search, VNS) 進行 OVRP 的求解，效果良好。

在 OVRP 的相關衍生問題方面，Tarantilis 與 Kiranoudis^[25] 以 LBTA 來求解多場站的開放式車輛路線問題 (open multi-depot vehicle routing problem, OMDVRP)，並應用於生鮮肉品的配送問題上。Repoussis 等人^[26] 則進一步考量具時間窗限制的開放式車輛路線問題 (open vehicle routing problem with time windows, OVRPTW)，並以 greedy look-ahead 的路線構建啟發式解法來進行求解。

2.3 門檻接受法 (Threshold Accepting, TA)

由於傳統的啟發式解法在執行上容易落入局部的最佳解，為了克服此缺點，後續的趨勢逐漸發展以高階策略作為指引，以擺脫局部最佳解束縛的巨集啟發式解法。Osman 與 Laporte^[27] 針對各種巨集啟發式解法及其應用的問題和參考文獻，作詳細的介紹，其中有提到的巨集啟發式解法有：限制邏輯規劃 (constraint logic programming, CLP)、貪心隨機調適搜尋程序 (greedy random adaptive search procedure, GRASP)、自然演化運算 (natural evolutionary computation)、類神經網路 (neural network, NN)、空間平滑法 (space-search method)、禁制搜尋法 (tabu search, TS)、螞蟻演算法 (ant colony optimization, ACO)、模擬鍛鍊法 (simulated annealing, SA)、門檻接受法 (TA) 以及混合式 (hybrid) 的巨集啟發式解法等方法。

本研究採取的巨集啟發式解法為門檻接受法 (TA)，係由 Dueck 與 Scheuer^[28] 於 1990 年所提出，其控制參數包括起始門檻值 (T_0) 及門檻數列長度 (K)。起始門檻值 (T_0) 指的是起始解成本的百分比；門檻數列長度 (K) 則是門檻數列中門檻值的個數。為避免 TA 發生

無法收斂的情形，門檻值數列通常為遞減型態。圖 2 顯示三種傳統常見的門檻數列遞減型態：直線遞減（即等差數列）、梯形遞減、等比遞減（即等比數列）。門檻數列長度 (K) 與起始門檻 (T_0) 的設定，和數列遞減型態的設定有關，數列長度的設定也會影響計算時間和求解之精確度。一般而言，起始門檻設定比率越高，門檻數列長度也會設定較高，使其計算時能逐漸降低成本。

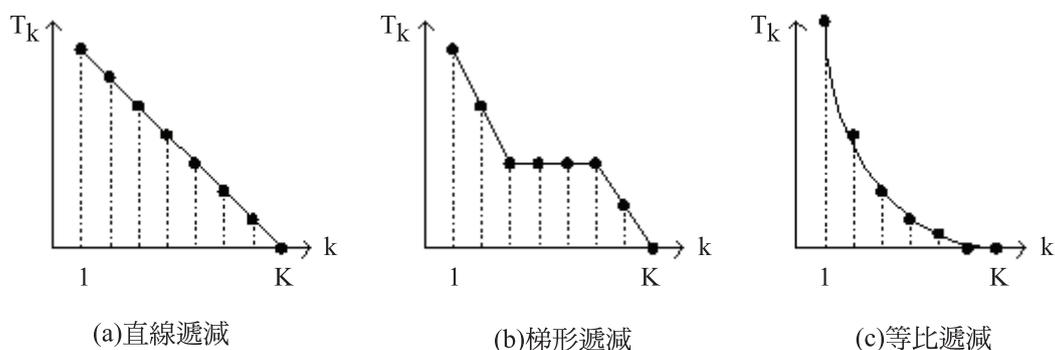


圖 2 三種傳統的門檻數列遞減型態

TA 的相關研究方面，由許多文獻 (Dueck 與 Scheuer^[28]; Han 與 Cho^[29]; 楊智凱^[30]; 韓復華等人^[31,32]; 韓復華與卓裕仁^[33,34]) 的執行測試發現：TA 有執行容易、速度快、參數敏感度低等優點，故本研究以 TA 當作巨集啟發式解法之架構，來設計整個啟發式解法。

2.4 小結

綜合歸納上述文獻回顧可發現：(1) SBRP 之相關研究大多探討一所學校及單車種的校車路線為主；其中僅有 5 篇文獻^[5,6,8,12,14] 有針對 SBRP 構建明確數學規劃 (MP) 模式列式，但似乎沒有文獻同時考量多迄點 (廠區) 和多車種的因素構建數學模式列式。(2) SBRP 在方法論與結果績效的評鑑方面，相關文獻均以啟發式解法為主要求解工具。由於缺乏有關 SBRP 標竿測試題庫 (benchmark problems) 的對照基礎，這些啟發式解法的好壞，並無客觀的評量指標。(3) SBRP 在 2002 年之前的研究，主要求解方法均以傳統啟發式解法為主；2002 年後，才有相關研究^[11,14,15] 以巨集啟發式解法來求解 SBRP。(4) OVRP 在 2000 年以前的研究，主要求解方法亦以傳統啟發式解法為主^[18,19]；2004 年後，才陸續有學者^[4,20-24] 以巨集啟發式解法來求解 OVRP。

如前節所述，員工通勤交通車通常是多車種的服務，再加上公司經常會在一個區域範圍內擁有多個工作廠區，故擁有「多迄點 (廠區)」和「多車種」的特性，故傳統 VRP 或 SBRP 的方法，皆無法適用求解 CBRP。本研究即針對多迄點及多車種的通勤交通車路線問題 (CBRP)，構建 CBRP 數學模式，並設計小型測試例題求取最佳解，驗證數學模式正確性；並根據 CBRP 的特性，應用門檻接受法 (TA) 的架構，發展適合的巨集啟發式解法，

以中小型例題進行測試與分析；最後，以一實際個案作實例應用。

三、CBRP 問題定式與驗證

本節主要根據通勤交通車路線問題 (CBRP) 之特性，建立通勤交通車路線問題模式。首先對 CBRP 進行問題描述和說明相關假設，並於 3.2 小節構建 CBRP 整數規劃 (IP) 模式；最後，於 3.3 小節設計小型測試例題，來進行模式正確性驗證。茲將內容分述如下。

3.1 問題描述

通勤交通車路線問題 (CBRP)，以上班為例，是在已知員工上車的停靠站 (起點)、上班的工作廠區 (迄點) 和不同車容量的車型，在路線長度 (時間) 的限制下，求總營運成本最小的通勤交通車路線組合。本研究 CBRP 的相關假設如下：

1. 通勤交通車路線問題，其上下班屬對稱型態，本研究 CBRP 以上班的問題進行探討。
2. 每位員工上班旅次有唯一的起點和迄點；迄點即為該員工之工作廠區。
3. 工作廠區 (上班時) 僅為工作旅次的迄點，不是任何員工的起點。
4. 各起迄對間的需求不可分割。
5. 本研究之各車型車輛的單位變動成本為 (\$/車公里)，僅與車型和距離有關，與乘載量無關。
6. 每條路線只以一輛車服務，但可連接多個廠區。
7. 每種車型的車輛數為未知，亦無數量限制。
8. 最大路線數 (R) 為已知， R 可設為 $\sum_m \left\lceil \frac{q_m (\text{起迄對需求量})}{Q_1 (\text{小車容量})} \right\rceil$ 。(請參閱下節相關符號)

3.2 數學模式

CBRP 之整數規劃模式的相關符號、決策變數、目標式、限制式敘述如下：

1. 相關符號

- N ：表所有節點之集合； $N = \{1, 2, \dots, N\}$ ，其中 N 表節點數；
- R ：表所有路線之集合； $R = \{1, 2, \dots, R\}$ ，其中 R 表路線數；
- V ：表車輛型態之集合； $V = \{1, 2, \dots, V\}$ ，其中 V 表車輛型態數；
- M ：表起迄對之集合； $M = \{1, 2, \dots, M\}$ ，其中 M 表起迄對之數量；
- q_m ：表第 m 個起迄對之需求量，其中 $m \in M$ ；
- s_m ：表第 m 個起迄對之起點，其中 $m \in M$ ；
- t_m ：表第 m 個起迄對之迄點，其中 $m \in M$ ；

- f^v : 表 v 型車輛之固定成本 ;
 d_{ij} : 車輛經過節線 ij 的行駛距離 ;
 m_v : 表 v 型車輛之距離成本係數 ;
 c_{ij}^v : 表 v 型車輛經過節線 ij 的路線變動成本 (即 $c_{ij}^v = m_v \cdot d_{ij}$) ;
 Q_v : 表 v 型車輛之車容量 ;
 t_{ij} : 為節線 ij 的旅行時間和 i 點的服務時間之總和 ;
 T_u : 表每條路線所允許之車輛最大旅行時間 ;
 B : 表一個很大的數值 ;
 $g_{i,m}$: 表起點標示參數, 即節點 i 為起迄對 m 之起點 ($i = s_m$) 時, $g_{i,m} = 1$; 否則 $g_{i,m} = 0$;
 $h_{i,m}$: 表迄點標示參數, 即節點 i 為起迄對 m 之迄點 ($i = t_m$) 時, $h_{i,m} = 1$; 否則 $h_{i,m} = 0$ 。

2. 決策變數

決策變數有 6 類, 分述如下所示 :

- y_m^k : 表起迄對需求指派變數, 為 0-1 變數。若指派 q_m 至路線 k , 則 $y_m^k = 1$; 否則 $y_m^k = 0$ 。
 δ_{kv} : 表車型指派變數, 為 0-1 變數。若路線 k 使用 v 型車輛, 則 $\delta_{kv} = 1$; 否則 $\delta_{kv} = 0$ 。
 z_k : 表路線啟動變數, 為 0-1 變數。若路線 k 有使用, 則 $z_k = 1$; 否則 $z_k = 0$ 。
 p_{ij}^k : 表路線指派變數, 為 0-1 變數。若路線 k 經過節線 ij , 則 $p_{ij}^k = 1$; 否則 $p_{ij}^k = 0$ 。
 x_{ij}^{km} : 為路線流量變數, 代表指派至路線 k 之起迄對 m 所經過節線 ij 的流量。
 η_{ij}^{kv} : $\eta_{ij}^{kv} = p_{ij}^k \cdot \delta_{kv}$, 即以 η_{ij}^{kv} 來替代 $p_{ij}^k \cdot \delta_{kv}$ 之非線性轉線性的 0-1 變數。若 $\eta_{ij}^{kv} = 1$, 則路線 k 經過節線 ij (即 $p_{ij}^k = 1$) 且路線 k 使用 v 型車輛 (即 $\delta_{kv} = 1$); 否則 $\eta_{ij}^{kv} = 0$ 。

依據上述之數學符號, CBRP 可定義為如下之整數規劃模式 :

$$\text{Min} \quad \sum_{k \in R} \sum_{v \in V} f^v \cdot \delta_{kv} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in R} \sum_{v \in V} c_{ij}^v \cdot \eta_{ij}^{kv} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N} p_{j0}^k = z_k, \quad \forall k \in R \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} p_{0j}^k = z_k, \quad \forall k \in R \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} p_{ij}^k = \sum_{j \in N} p_{ji}^k \leq z_k, \quad \forall i \in N, \quad \forall k \in R \quad (4)$$

$$\sum_{k \in R} y_m^k = 1, \quad \forall m \in M \quad (5)$$

$$y_m^k \leq z_k, \quad \forall k \in R, \quad \forall m \in M \quad (6)$$

$$y_m^k \leq \sum_{j \in N} p_{s_m j}^k, \quad \forall k \in R, \quad \forall m \in M \quad (7)$$

$$y_m^k \leq \sum_{i \in N} p_{i t_m}^k, \quad \forall k \in R, \quad \forall m \in M \quad (8)$$

$$z_k = \sum_{v \in V} \delta_{kv}, \quad \forall k \in R \quad (9)$$

$$\sum_{m \in M} q_m \cdot y_m^k \leq \sum_{v \in V} Q_v \cdot \delta_{kv}, \quad \forall k \in R \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} p_{ij}^k \cdot t_{ij} \leq T_u, \quad \forall k \in R \quad (11)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ji}^{km} + g_{i,m} \cdot q_m \cdot y_m^k = \sum_{j \in N} x_{ij}^{km} + h_{i,m} \cdot q_m \cdot y_m^k \quad (12)$$

$$\forall i \in N, \forall k \in R, \forall m \in M$$

$$\sum_{m \in M} x_{ij}^{km} \leq B \cdot p_{ij}^k, \quad \forall i, j \in N, \forall k \in R \quad (13)$$

$$\eta_{ij}^{kv} \leq p_{ij}^k, \quad \forall i, j \in N, \forall k \in R, \forall v \in V \quad (14)$$

$$\eta_{ij}^{kv} \leq \delta_{kv}, \quad \forall i, j \in N, \forall k \in R, \forall v \in V \quad (15)$$

$$p_{ij}^k + \delta_{kv} - 1 \leq \eta_{ij}^{kv}, \quad \forall i, j \in N, \forall k \in R, \forall v \in V \quad (16)$$

$$y_m^k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in R, \forall m \in M \quad (17)$$

$$\delta_{kv} \in \{0,1\}, \quad \forall k \in R, \forall v \in V \quad (18)$$

$$z_k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in R \quad (19)$$

$$p_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in R, \forall i, j \in N \quad (20)$$

$$\eta_{ij}^{kv} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in N, \forall k \in R, \forall v \in V \quad (21)$$

$$x_{ij}^{km} \geq 0, \text{ and integer}, \quad \forall i, j \in N, \forall k \in R, \forall m \in M \quad (22)$$

(1) 式為目標式，追求總營運成本（車輛固定成本+路線變動成本）最小；(2) 與 (3) 式表當有實際發車的路線時，路線啟動變數 $z_k = 1$ ，式中的 0 表車輛的場站；(4) 式為確保每一路線上進出各點次數一致，且小於或等於 z_k ；(5) 式表示每個起迄對之需求量只能指派給一條路線，即需求不可分割；(6) 式表示若將起迄量 q_m 指派給路線 k 時，則路線 k 一定存在；(7) 式表示若將 q_m 起迄量指派給路線 k 時，則起迄對 m 的起點一定指派給路線 k ；(8) 式表示若將 q_m 起迄量指派給路線 k 時，則起迄對 m 的迄點一定指派給路線 k ；(9) 式表示每一路線只能使用一種車輛，且路線若未啟動則無車輛指派；(10) 式為車容量限制；(11) 式為路線時間限制；(12) 式為流量守恆；(13) 式表示若 x_{ij}^{km} 存在，則 p_{ij}^k 一定存在，其中 B 為一個很大的數值；(14)、(15) 和 (16) 式代表非線性轉線性所需增加的邏輯限制式^[35]，其轉換邏輯說明如下：因為 $\eta_{ij}^{kv} = p_{ij}^k \cdot \delta_{kv}$ ，因此當 $\eta_{ij}^{kv} = 1$ 時，表示 $p_{ij}^k = 1$ 且 $\delta_{kv} = 1$ 。而為了確保 η_{ij}^{kv} 等於 1 時， p_{ij}^k 與 δ_{kv} 皆等於 1，故必須加入 (14)、(15) 式，反之，當 $\eta_{ij}^{kv} = 0$ 時， p_{ij}^k 與 δ_{kv} 兩變數之至少有一個必須為 0，故需有 (16) 式；(17) 至 (21) 式為 0-1 整數變數；(22) 式為非負整數變數。

根據上述數學模式，本研究 IP 模式之問題規模，整理如表 1 所示。由表 1 變數和限制式個數，若有 10 個起點、2 個迄點、3 種車型和最大路線數 3 條的問題，數學模式就會產生 10,440 個變數和 5,291 條限制式。問題規模變大，將難以求解其最佳解 (exact solution)，

故在 3.3 節設計小型測試例題驗證本研究 IP 模式正確性。

表 1 通勤交通車問題 IP 模式之問題規模表

	數 目
變 數	$R(VN^2 + MN^2 + M + V + N^2 + 1)$
限制式	$3RVN^2 + RMN + 3RM + NR + RN^2 + 5R + M$

3.3 模式驗證

由於 CBRP 屬於 NP-hard 問題，大規模問題無法有效率求解，因此本小節設計小型例題加以測試，求取最佳解來驗證本研究數學模式之正確性。除確認本研究 IP 模式正確性外，這些測試例題與結果，亦可建立 CBRP 的標竿題庫，提供後續啟發式解法求解結果評估比較之基礎。3.3.1 小節說明中小型測試例題之設計，3.3.2 小節則針對測試例題進行求解，並分析求解結果。

3.3.1 小型測試例題設計

由於實務上的路網大多屬於非完全性路網，但又考量非完全性路網節點相連情形可能限制路線之節點交換，而顯現不出節點交換改善之效果，所以多增加完全性路網的考慮。故本研究設計的小型測試例題以網路節點的連接情形分成兩類：(1)「完全性路網」：即所有點對點間都有路徑相連；(2)「非完全性路網」：即非所有點對點間都有路徑相連。此外，例題設計亦依據需求點的分佈情況，考慮「走廊形」及「非走廊形」二種需求型態。綜合上述考慮因素，本研究設計完全性路網走廊形 (CC)、完全性路網非走廊形 (CR)、非完全性路網走廊形 (IC)、非完全性路網非走廊形 (IR) 四組路網型態共 24 題小型測試例題；其中，完全性路網走廊形之測試例題有 CC1 至 CC8 共 8 題，完全性路網非走廊形之測試例題有 CR1 至 CR6 共 6 題；非完全性路網走廊形之測試例題有 IC1 至 IC7 共 7 題，非完全性路網非走廊形之測試例題有 IR1 至 IR3 共 3 題。

在本研究之問題中，路線時間限制亦為一重要參數。不同之路線時間限制可能會產生不同之結果，故設定不同路線時間限制即屬於不同之例題。本研究各例題路線旅行時間限制之設定為： $T_u = \lceil L_0 \cdot \alpha \rceil$ ；其中， T_u 表路線旅行時間限制； L_0 為起點與迄點間最大之旅行時間； α 則為放大倍數。在本研究之測試例題中， α 值之範圍介於 1.1 ~ 2 之間。此外，各測試例題皆有小巴 (9 個座位)、中巴 (20 個座位) 和大巴 (43 個座位) 三種車型，各車型車輛數無設定上限。三種車型之成本結構如表 2 所示。其中車輛固定成本 f^v 為一定值，表示使用該車型車輛需付出之車輛基本成本；路線變動成本 c_{ij}^v 為第 v 種車型車輛每行駛 d_{ij} 距離所需之成本。

表 2 測試例題各車型之成本結構表

車型	車輛固定成本 (f^v)	路線變動成本 (c_{ij}^v)
小巴 ($v=1$)	$f^1 = 300$	$c_{ij}^1 = 3 \cdot d_{ij}$
中巴 ($v=2$)	$f^2 = 500$	$c_{ij}^2 = 5 \cdot d_{ij}$
大巴 ($v=3$)	$f^3 = 700$	$c_{ij}^3 = 12 \cdot d_{ij}$

至於測試例題的規模方面，前述 CC 型與 CR 型的 14 個題目設定為 8 個起點、2 個迄點；非完全性路網的 IC 型與 IR 型的 10 個題目則設為 12 個起點、2 個迄點。本研究小型測試例題之路網型態、參數設定和編號彙整如表 3 所示。

3.3.2 測試例題求解結果

本研究利用 ILOG CPLEX 9.0 最佳化軟體，以分枝定限法 (branch and bound method) 在 Pentium IV 2.8GHz CPU 及 1GHz RAM 之個人電腦作業平台進行求解測試。求解結果以 CR6 例題為例，如圖 3 所示；此測試例題有 8 個起點，2 個迄點 A 與 B，起迄需求量如表 4 所示。每條路線最大之旅行時間為 60 分鐘；車輛行駛速率為 40 (km/hr)；各點間之距離為各點直線距離。其最佳解結果如下：最小總營運成本為 1772.4 元，路線 1 使用中巴，共乘載 10 人；路線 2 使用小巴，共乘載 8 人；路線 3 使用中巴，共乘載 15 人。24 題小型測試例題的最佳解 (exact solution) 結果如表 5 所示。其他小型例題求解結果請參閱運輸網路實驗室網頁^[36]。

藉由小型例題測試結果可發現，本研究所構建之 CBRP 數學模式皆可求得最佳解，驗證了模式之正確性，且可當作下一節發展巨集啟發式解法之客觀比較基礎。此外，觀察表 5 小型測試例題求解結果可發現：一般而言，走廊型的測試例題比非走廊型例題較易求解；尤其是非完全性路網的 IC 型測試例題比 IR 型測試例題，其求解時間顯著較快。

四、巨集啟發式解法設計

本研究以門檻接受法 (TA) 為基礎架構，建立一個四階段巨集啟發式解法的求解架構。本研究第一階段先以搜尋種子點及最遠鄰點法構建起始路線；第二階段再考量路線剩餘容量，來進行車型的改善；接著第三階段以路線內和路線間的路線交換法為基礎，來進行鄰域搜尋改善；最後第四階段再將此鄰域搜尋改善後的解投入 TA，以找尋更佳的解。整個巨集啟發式解法的執行架構如圖 4 所示。

表 3 小型測試例題

路網型態		L_0 (起點與迄點間的 最大旅行時間)	α (放大倍數)	T_u (路線時間限制， 即 $T_u = \lceil L_0 \cdot \alpha \rceil$)	例題標號
完全性路網 (8 個起點 2 個迄點)	走廊型 (CC)	65.9	1.3	86	CC1
			1.5	99	CC2
			1.6	106	CC3
			1.7	113	CC4
		55.2	1.2	67	CC5
			1.5	83	CC6
		114.3	1.1	126	CC7
			1.2	138	CC8
	非走廊型 (CR)	38.9	1.7	67	CR1
			1.8	71	CR2
		40.5	1.5	61	CR3
			1.6	65	CR4
		37	1.5	56	CR5
			1.6	60	CR6
非完全性路網 (12 個起點 2 個迄點)	走廊型 (IC)	31.18	1.3	41	IC1
			1.5	47	IC2
			1.8	57	IC3
			2	63	IC4
		30.12	1.5	46	IC5
			1.8	55	IC6
			2	61	IC7
	非走廊型 (IR)	26.42	1.5	40	IR1
			1.8	48	IR2
			2	53	IR3

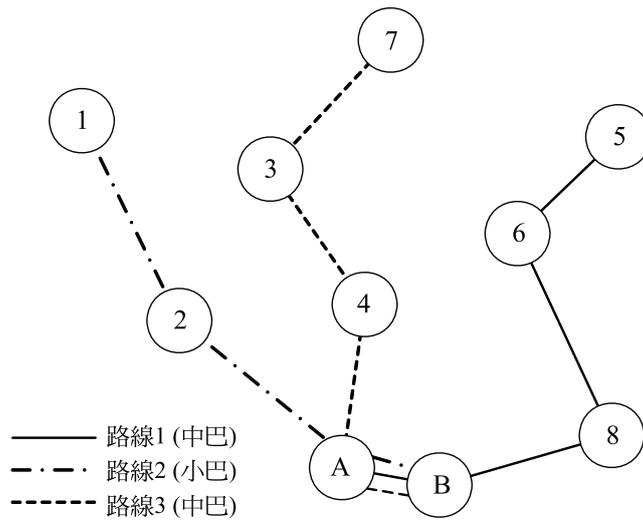


圖 3 例題 CR6 測試結果路徑圖

表 4 例題 CR6 起迄需求量

起點 \ 迄點	1	2	3	4	5	6	7	8
A	4	2	3	4	1	3	2	1
B	1	1	0	2	1	1	4	3

4.1 第一階段：起始解構建

起始解構建模組分為二部分，第一部分進行起始路線構建，先搜尋種子點，並以最遠鄰點法為基礎，將各節點插入路線中；第二部分則針對各路線實際乘載人數進行車型調整(縮小)，使得各路線都能利用最適合其乘載人數之車種型態進行服務，避免成本浪費。

本研究係以總營運成本最小為目標，而影響營運成本最重要之關鍵為車輛之固定成本，每增加使用一輛車，營運成本就必須增加一固定成本，因此，在滿足車容量限制與路線時間限制下，若使用愈少之車輛，則總營運成本會愈小。故本研究先以最大車型之車容量作為車容量限制，儘量降低車輛數，然後再進行車輛型態之調整。整個起始解構建模組主要為「起始路線構建」和「車型調整」兩部分，分述如下：

表 5 小型測試例題最佳解結果

路網型態		例題標號	目標值	求解時間
完全性路網 (變數: 6,060 個 限制式: 3,685 條)	走廊型 (CC)	CC1	1752.7	1 小時 14 分 15 秒
		CC2	1752.7	2 小時 23 分 16 秒
		CC3	1524.5	6 分 26 秒
		CC4	1524.5	7 分 49 秒
		CC5	1705.4	3 分 1 秒
		CC6	1705.4	6 小時 3 分 59 秒
		CC7	2328.2	2 天 18 小時 6 分 25 秒
		CC8	1791	21 分 53 秒
	非走廊型 (CR)	CR1	1683.7	2 小時 15 分 39 秒
		CR2	1683.7	6 小時 13 分 6 秒
		CR3	1599.8	21 小時 28 分 33 秒
		CR4	1355	44 分 09 秒
		CR5	1772.4	19 分 54 秒
		CR6	1772.4	10 小時 28 分 08 秒
非完全性路網 (變數: 16,548 個 限制式: 7,135 條)	走廊型 (IC)	IC1	1677.45	15 分
		IC2	1677.45	6 分 26 秒
		IC3	1617.47	11 分 57 秒
		IC4	1617.47	16 分 38 秒
		IC5	1959.32	17 分 19 秒
		IC6	1870.33	18 分 14 秒
		IC7	1870.33	29 分 37 秒
	非走廊型 (IR)	IR1	1682.05	10 分 5 秒
		IR2	1586.19	1 小時 11 分 42 秒
		IR3	1586.19	41 分 27 秒

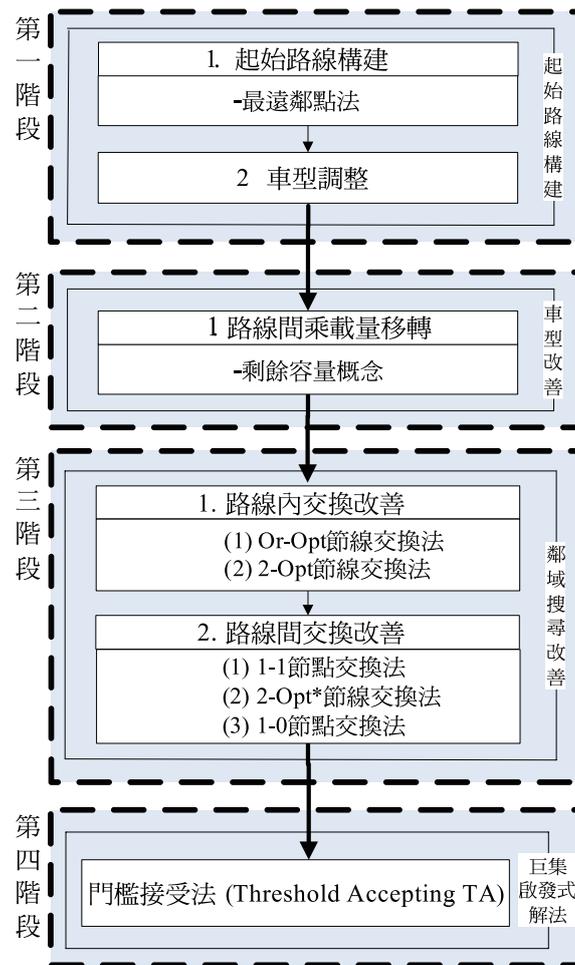


圖 4 CBRP 巨集啟發式解法架構

1. 起始路線構建

如本文前述 CBRP 之特性 (圖 1 所示), 每條單一路線均有可能同時連接多個工作廠區 (即工作旅次之迄點)。故本研究先以各旅次起點的需求總量 (即該起點至各個迄點的需求總和) 為基礎, 進行 CBRP 起始路線之構建。亦因考慮各路線均可連接多迄點, 故對路線時間限制 T_u 也作適當之調整為 T_u' , 即 $T_u' = T_u - S$, 其中 S 為連接所有迄點所需之最短時間。

起始路線之構建程序, 基本上以旅次起迄點相距最遠之點對的起點為路線之種子點, 再依最近鄰點法, 依序納入其他起點至超過最大車型車容量或路線時間限制 T_u' 時, 對該路線旅次之迄點作適當的延伸, 完成後再另起一新路線, 如此重覆至所有需求點均指派完成為止。綜合上述, 本研究起始路線構建的執行步驟說明如下:

- 步驟一： $k=1$ 開始，選擇起點與迄點之間距離最長之起點和迄點來作為路線 k 的起點和迄點 d 。即 $D_{st} = \max \{D_{ij} / i \in I, j \in J\}$ ，其中 s 表路線 k 的起點，亦為路線 k 的種子點； t 表路線 k 的迄點 d ； I 為起點的集合； J 為迄點的集合。
- 步驟二：以種子點 s 開始依序作最近鄰點法。搜尋離種子點 s 最近且滿足路線時間限制 T_u' 與最大車型車容量限制之未指派起點 s' ，依序將 s' 納入至路線 k 中並將 s' 更新成種子點 s ，重覆此步驟直至超過最大車型車容量或路線時間限制 T_u' 為止。
- 步驟三：作迄點 d 的延伸。將其他迄點，以插入後距離增加最小之位置加入至路線中，起始路線 k 構建完成。
- 步驟四：檢查是否有未指派的節點。若是，則 $k = k + 1$ ，並回到步驟一；若否，起始路線構建完成。

上述起始路線之解法，雖以旅次起點的需求總量為指派基礎，但在後續鄰域搜尋的改善過程中，仍可依不同起迄對作交換改善。

2. 車型調整 (縮小)

起始路線構建時，各路線車容量限制皆以最大車型之車容量作為限制，故所有路線皆使用最大車型。由於本研究之 CBRP 有考量多車種的特性，不同車型有不同之車容量，故此階段主要之目的，是依據起始解構建出來的各路線乘載人數，調整 (縮小) 成最適合之車型。

4.2 第二階段：車型改善

由於本研究係探討多車種之通勤交通車路線問題，不同車型有不同之固定成本及變動成本係數，故路線使用的車型對總營運成本最小之目標影響甚大。若能在路線數固定情況下，使各路線儘量使用較小車型，則能有效降低成本。故車型改善 (第二階段) 最主要之目的，是不改變其他路線車型的原則下，透過路線間乘載量移轉，將部分乘載量移轉至其他路線，使該路線可使用較小車型，進而減少固定成本。

本階段主要針對路線「剩餘容量」的考量進行乘載量之移轉，而使部分路線可從大型車種改變成中／小型車種。首先說明剩餘容量 SC (surplus capacity) 與可移轉量 SL (shiftable load) 之意義。假設某路線目前使用的車型為 v ，令 Q_v 代表該車型的車容量， AL_v 代表該車型的實際乘載量 (actual load)， $AL_v \leq Q_v$ ；則該路線之剩餘容量 SC 為 $SC_v = Q_v - AL_v$ 。再定義該路線之可移轉量 SL 為 $SL_v = AL_v - Q_{v-1}$ ，即表示該路線所使用車型 v 的實際乘載量和次大型車容量之差 (請參見圖 5 所示)。若我們可以把 SL_v 移轉到其他具有足夠 SC_{v-1} (即 $SC_{v-1} > SL_v$) 的路線，則便可以把該路線由 v 車型縮小至 $(v-1)$ 車型。以圖 5 之示意圖為例，若某大型車路線之 SL_3 可移轉至某中型車路線之 SC_2 ，則該路線即可使用較節省之中型車輛；如此重複上述概念的演算步驟，亦可減少車輛數目。

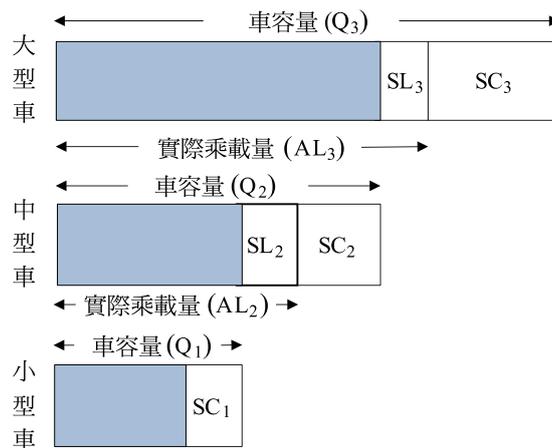


圖 5 路線剩餘容量 (SC) 與可移轉量 (SL) 示意圖

第二階段車型改善之執行步驟說明如下：

- 步驟一：計算起始解中每條路線之剩餘車容量 SC 、可移轉量 SL 與剩餘路線時間 ST 。
- 步驟二：計算各路線將其 SL 移轉至其他路線所能減少之車輛固定成本 Δf ，選擇 $\Delta f / SL$ 最大之路線 k 開始。
- 步驟三：檢查路線 k 的可移轉量 SL 是否小於其他路線之剩餘車容量總和。若是，則進行下一步驟；若否，則跳至步驟七。
- 步驟四：選擇路線 k 中，離迄點（若有兩個以上的迄點，則以第 1 個迄點，即是與路線中最後一個起點有連接的迄點為考量）最近之未指派起點 j ，進行下列節點移轉的相關步驟。檢查是否有找到未指派起點 j 。若是，進行下一步驟；若否，則 $k = k + 1$ ，並回到步驟二。
- 步驟五：選擇路線（不含路線 k ）供起點 j 進行移轉（插入）。搜尋將起點 j 插入後距離增加最短的路線 l 且檢查是否有足夠車容量（ $SC_l > q_j$ ）與路線時間（ $ST_l > \Delta T_l$ ）供起點 j 進行移轉。檢查是否有找到符合車容量與路線時間限制的路線 l ，若是，則將起點 j 以時間增加最少之位置插入至路線 l ，並更新路線 l 和路線 k 之 SC 、 ST 與 SL ；若否，則 $j = j + 1$ ，回到步驟四選擇另一個起點。
- 步驟六：檢查路線 k 是否還可進行節點移轉。檢查路線 k 之可移轉量 SL 是否小於或等於 0。若是，路線 k 的節點移轉結束，則將路線 k 之使用車輛變更為較小車型之車輛；若否，則 $j = j + 1$ ，並回到步驟四選擇另一個未指派的起點，路線 k 繼續進行節點移轉的相關步驟。
- 步驟七：所有路線是否皆檢查完畢。若是，車型改善完成；若否，則 $k = k + 1$ ，並回到步驟二。

4.3 第三階段：鄰域搜尋改善

起始解構建及車型改善完成後，接著進入本研究啟發式解法第三階段的鄰域搜尋改善模組。本研究採用的鄰域搜尋改善模組包含下列 5 種交換法：路線間的 (1-0) 節點交換法^[37]、(1-1) 節點交換法^[37] 和 (2-Opt*) 節線交換法^[38]；以及路線內的 (Or-Opt) 節線交換法^[39]和 (2-Opt)節線交換法^[40]。本研究此階段的執行細節，值得注意的有 3 點：(1) 上述 5 種路線交換改善法的執行順序，是以測試完 5 種交換改善法之所有排列組合後的最佳結果來決定，其執行順序為：(Or-Opt) → (2-Opt) → (1-1) → (2-Opt*) → (1-0)。(2) 由於 CBRP 具有多迄點的特性，故本研究鄰域搜尋改善模組的 5 種路線交換改善法，在鄰域搜尋可接受交換的新解時，皆須在節點／節線作交換時，判斷其新解中要交換的節點是否會經過要插入路線的迄點；若有，才接受交換；若否，則不接受交換；且搜尋改善的過程中，皆需遵守車容量及路線時間等限制。(3) 此階段增加考量不同起迄對的交換改善，即旅次起點的需求總量若符合相關限制，就優先進行交換；否則，同該起點至不同迄點的其中一個起迄對需求若可符合相關限制，亦可接受交換，希望藉此達到更好的改善效果。

此外，在進行鄰域搜尋改善時，決定與鄰解進行交換的選擇策略有 3 種：(1) 最佳改善 (best improvement, BI)、(2) 首先改善 (first improvement, FI)，和 (3) 半最佳改善 (semi-best improvement, SI)。最佳改善 (BI) 意指檢查所有可能的交換後，選擇接受具有最多改善的交換；首先改善 (FI) 是在找到可行的交換後即接受；半最佳改善 (SI) 則針對特定一點所能找到的鄰解中，選擇具有鄰解改善最多的進行交換。由於最佳改善 (BI) 策略的執行時間較長，故本研究在鄰域搜尋模組中所採用的策略均為半最佳改善 (SI) 策略。

4.4 第四階段：門檻接受法 (TA)

本研究巨集啟發式解法的第四階段為門檻接受法 (TA)，其執行流程如圖 6 所示。其主要執行步驟說明如下：

- 步驟一：輸入起始解。係承續第三階段鄰域搜尋改善模組的最終結果，來當作第四階段 (TA) 的起始解 X_0 ，然後再針對該起始解進行改善。
- 步驟二：設定 TA 相關參數。設定起始門檻比率值 T_0 、門檻數列長度 K 、門檻數列指標 i 以及門檻下降比率值 r 。除設定上述參數外，本研究採用「等比遞減型」的門檻數列，其門檻值的計算公式為 $T_n = T_c \cdot r$ ，其中 T_n 為下一個門檻值， T_c 為現有門檻值。開始執行 TA 時， $T_c = T_0 \cdot C(X_0)$ ，其中 $C(X_0)$ 為起始解成本，門檻數列指標 $i=1$ 開始。
- 步驟三：TA 準則的鄰域搜尋 (核心搜尋交換)。此步驟乃根據 TA 接受法則來進行鄰域搜尋，即接受劣於現解的鄰解，以便能跳脫目前局部最佳解的束縛而繼續搜尋下去。其接受法則為：首先搜尋一個暫存的鄰解 X' ，若其成本 $C(X')$ 與現有解成本 $C(X_c)$ 之差值小於現有門檻值 T_c ，則接受交換；若 $C(X_c)$ 小於暫時最佳解成本 $C(X_b)$ ，亦進行更新。本研究 TA 準則的鄰域搜尋方法，採用

路線間的 (1-0)節點交換和路線內的 (2-Opt) 節線交換兩種方法 (採取循序執行的方式和 SI 策略)。以 (1-0) 節點交換和 (2-Opt) 節線交換當作 TA 核心搜尋交換的理由在於，上述兩種方法分別為本研究路線間和路線內的交換法中，執行結果最佳的交換法，故希望僅採用 5 種交換法中的 (1-0) 節點交換和 (2-Opt) 節線交換，就能以較少的執行時間來達到好的改善效果。

步驟四：鄰域搜尋改善。進行完 TA 準則的鄰域搜尋後，再一次依序執行鄰域搜尋改善模組 (即第三階段的 5 種交換法；採嚴格的接受法則，只接受有改善的鄰解)。

步驟五：降低門檻值。執行步驟三和四後，則降低門檻值，且更新門檻數列指標 ($i=i+1$)。若門檻數列指標 i 未達到門檻數列長度 K ，則繼續執行步驟三和四；若已達到門檻數列長度 K ，即達停止條件 (門檻數列指標 $i >$ 門檻數列長度 K)，則停止 TA。

4.5 啟發式解法之測試與分析

4.5.1 門檻接受法 (TA) 的參數設定

門檻接受法 (TA) 主要的控制參數為起始門檻比率值 (T_0) 和門檻數列長度 (K)。根據有關 TA 應用的相關文獻^[28-34]，起始門檻比率值 (T_0) 其合理範圍約在 0.5% ~ 10% 起始解值之間；門檻數列長度 (K) 的合理範圍約在 30 ~ 240 之間。故本研究針對下列參數的設定來進行測試：起始門檻值 (T_0) 設定 8 種參數值，分別為 0.5%、0.75%、1%、2%、3%、4%、5% 和 6%；門檻數列長度 (K) 亦設定 8 種參數值，分別為 30、60、90、120、150、180、210 和 240。

4.5.2 中型測試例題設計

在中型例題之問題規模增加的情況下，由於完全性路網的中型例題之求解時間過長 (小型例題中，完全性路網例題的平均求解時間約為非完全性路網例題的 21.2 倍)，故本研究設計非完全性路網的 MIC 及 MIR 兩類中型問題來測試巨集啟發式解法。目前 SBRP 文獻^[8]中，IP 模式最佳解 (exact solution) 的最大規模為 29 點，故本研究設計兩組分別是 27 點和 32 點的中型例題來進行測試，並利用本研究 IP 模式所求得中型例題的最佳解或下限 (lower bound) 解 (即整數限制鬆弛下之下限解的目標值)，與本研究巨集啟發式解法的求解結果進行比較分析，以作為本研究巨集啟發式解法之客觀評量指標。中型測試例題的設計原則，與前述 3.3.1 節的小型測試例題相同，茲將本研究 4 題中型測試例題之路網型態、參數設定和編號彙整如表 6 所示。

4.5.3 測試結果與分析

本研究使用 C++ 語言撰寫程式，測試環境為 Windows XP 作業系統、Pentium IV 2.8GHz CPU 及 1GB RAM 的個人電腦。針對前述 24 題小型例題，以及前一小節設計的 4

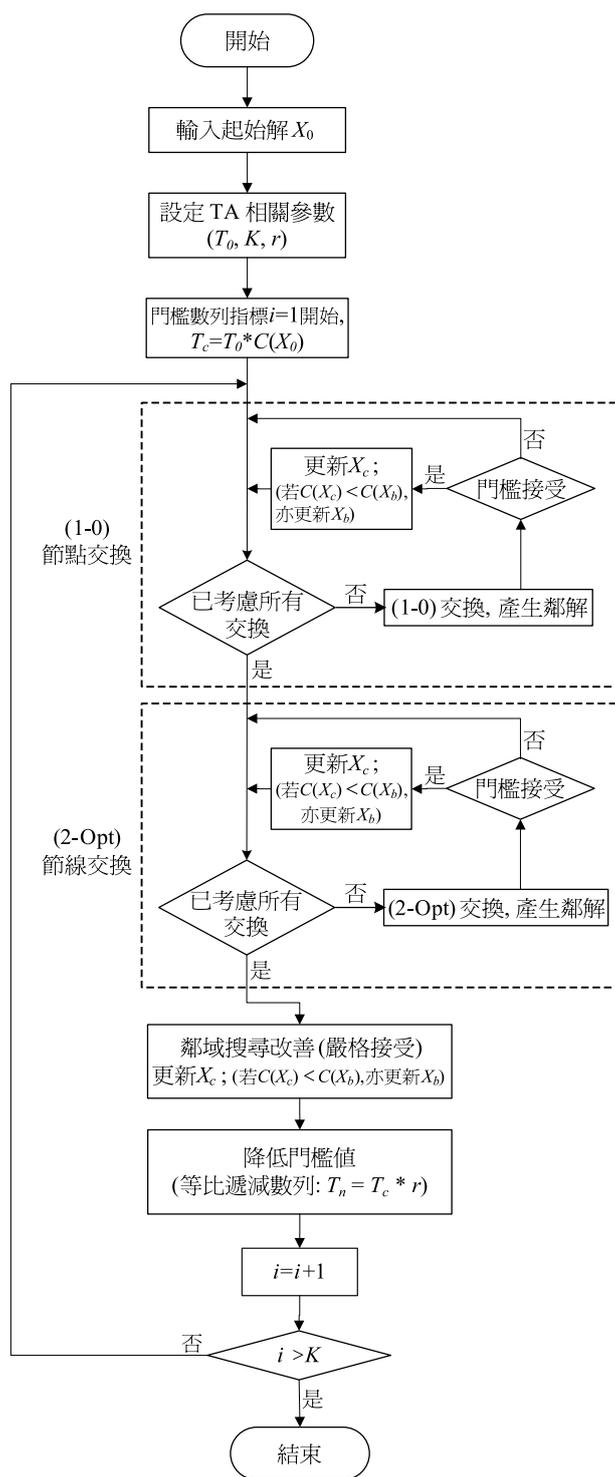


圖 6 第四階段 (TA) 執行流程圖

題中型例題，茲將本研究巨集啟發式解法的測試結果彙整如表 7 所示。表 7 中，TA 求解出中型例題 MIC1 和 MIR1 最佳結果的控制參數為：起始門檻值 (T_0)為 0.05，門檻數列長度 (K)為 60，門檻值下降比率值 r 為 0.99。另外，求解出 MIC2 和 MIR2 最佳結果的控制參數為：起始門檻值 (T_0)為 0.05，門檻數列長度 (K)為 90，門檻值下降比率值 r 為 0.99。

表 6 中型測試例題

路網型態 (非完全性路網)		L_0 (起點與迄點間的 最大旅行時間)	α (放大倍數)	T_u (路線時間限制， 即 $T_u = \lceil L_0 \cdot \alpha \rceil$)	例題標號
N=27 (25 個起點；2 個迄點) (變數: 197,110 個 限制式: 44,160 條)	走廊型	58.7	1.1	65	MIC1
	非走廊型	32.1	2	65	MIR1
N=32 (30 個起點；2 個迄點) (變數: 262,400 個 限制式: 48,544 條)	走廊型	54.2	1.2	65	MIC2
	非走廊型	43.3	1.5	65	MIR2

表 7 本研究巨集啟發式解法與 IP 模式在中小型測試例題之結果比較

例題標號	目標值		求解時間		
	IP 模式 (Exact Solution)*	巨集啟發式解法	IP 模式 (ILOG CPLEX 9.0)	巨集啟發式解法	
小 型 例 題	CC1	1752.7	1752.7	1 小時 14 分 15 秒	0.16 秒
	CC2	1752.7	1752.7	2 小時 23 分 16 秒	0.14 秒
	CC3	1524.5	1524.5	6 分 26 秒	0.14 秒
	CC4	1524.5	1524.5	7 分 49 秒	0.14 秒
	CC5	1705.4	1705.4	3 分 1 秒	0.1 秒
	CC6	1705.4	1705.4	6 小時 3 分 59 秒	0.15 秒
	CC7	2328.2	2328.2	2 天 18 小時 6 分 25 秒	0.15 秒
	CC8	1791	1791	21 分 53 秒	0.17 秒
	CR1	1683.7	1683.7	2 小時 15 分 39 秒	0.15 秒
	CR2	1683.7	1683.7	6 小時 13 分 6 秒	0.17 秒

表 7 本研究巨集啟發式解法與 IP 模式在中小型測試例題之結果比較 (續)

例題標號	目標值		求解時間		
	IP 模式 (Exact Solution)*	巨集啟發式解法	IP 模式 (ILOG CPLEX 9.0)	巨集啟發式解法	
小型 例題	CR3	1599.8	1599.8	21 小時 28 分 33 秒	0.11 秒
	CR4	1355	1355	44 分 09 秒	0.12 秒
	CR5	1772.4	1772.4	19 分 54 秒	0.1 秒
	CR6	1772.4	1772.4	10 小時 28 分 08 秒	0.12 秒
	IC1	1677.45	1677.45	15 分	0.21 秒
	IC2	1677.45	1677.45	6 分 26 秒	0.29 秒
	IC3	1617.47	1617.47	11 分 57 秒	0.29 秒
	IC4	1617.47	1617.47	16 分 38 秒	0.21 秒
	IC5	1959.32	1959.32	17 分 19 秒	0.37 秒
	IC6	1870.33	1870.33	18 分 14 秒	0.33 秒
	IC7	1870.33	1870.33	29 分 37 秒	0.31 秒
	IR1	1682.05	1682.05	10 分 5 秒	0.21 秒
	IR2	1586.19	1586.19	1 小時 11 分 42 秒	0.23 秒
	IR3	1586.19	1586.19	41 分 27 秒	0.31 秒
24 題小型例題之平均求解時間：			15,879 (4 小時 24 分 39 秒)	0.21 秒	
中型 例題	MIC1	4760.39	4760.39	9 天 21 小時 48 分 6 秒	10.91 秒
	MIR1	2295.59	2295.59	12 天 5 小時 38 分 25 秒	13.09 秒
	MIC2	1849.18 [†]	1853.78 (0.249%) [‡]	15 天	12.45 秒
	MIR2	2025.08 [†]	2046.13 (1.04%) [‡]	15 天	15.07 秒
4 題中型例題之平均求解時間：			1,126,297 (13 天 51 分 38 秒)	12.88 秒	

註：* 表最佳解 (exact solution) 的目標值。

† 表整數限制鬆弛下之下限 (lower bound) 解目標值。

‡ 表本研究巨集啟發式解法與整數限制鬆弛下之下限解的百分比誤差。

粗斜體的數字 表本研究巨集啟發式解法的結果與最佳解相同。

觀察表 7 所有 28 題測試例題，本研究提出的巨集啟發式解法，對所有 24 題小型例題和兩題 27 點的中型問題 (MIC1 和 MIR1)，皆可求出該問題的絕對最佳解。此外，若再分階段細看本研究巨集啟發式解法的程式執行結果發現，僅用到本研究巨集啟發式解法的前兩階段，就可求出 24 題小型例題的最佳解，顯示起始解構建和車型改善即頗具成效。再觀察問題規模增加至 32 個點 (30 個起點/2 個迄點) 的中型例題 (MIC2 和 MIR2 兩題) 時，由於 CBRP 屬 NP-hard，IP 模式在求解時間達 15 天時，仍未求解出一個整數最佳解，故本研究將求解時間達 15 天時，整數限制鬆弛下的下限 (lower bound) 解目標值 (以下以 *LB* 表示之) 記錄下來，與本研究巨集啟發式解法的求解結果進行比較。結果顯示：本研究巨集啟發式解法的求解結果，與 MIC2 例題 *LB* 的誤差只有 0.249%；與 MIR2 例題 *LB* 的誤差亦只有 1.04%。

在求解時間方面，本研究四階段的巨集啟發式解法在 24 題小型例題的平均求解時間約為 0.21 秒，IP 模式之平均求解時間則為 4 小時 24 分 39 秒；4 題中型例題的平均求解時間約為 12.88 秒，IP 模式之平均求解時間則為 13 天 51 分 38 秒。由此可見，問題規模越大，IP 模式之求解效率越低，故對於大規模問題，勢必要設計啟發式解法來加以求解。

綜上所述，本研究巨集啟發式解法對於通勤交通車問題可有效率地求解，成效良好。

五、實例研究

為測試巨集啟發式解法對於大規模問題之成效，本研究以新竹科學園區內某科技大廠 (以下簡稱個案公司) 為研究對象，進行實例研究。另一方面，由於並無針對通勤交通車路線問題作探討的相關文獻，所以無法直接與其他文獻作比較。基於上述理由，本研究之實例應用部分，是與目前個案公司人工作業之結果進行比較分析。茲將個案公司簡介與巨集啟發式解法應用結果，分述如以下內容。

5.1 個案公司簡介

本研究實例應用之個案公司，為新竹科學園區內 24 時全年無休的科技大廠，共有 5 個工作廠區，皆位於新竹科學園區內，且 5 個工廠集中於二區域，故本研究將 5 個工廠依據分佈之位置劃分成 2 個部分，並將每一個部分內之工廠視為一個迄點。通勤交通車之服務範圍涵蓋了桃園、新竹、苗栗 3 個地區，總里程數約 1,435 公里，停靠站有 529 個，搭乘通勤交通車的作業員工共有 2,653 個。作業員工的上班方式屬於四班二輪制，所以會產生 DA、DB、NA、NB 共 4 個班別之路線 40 條 (A 與 B 表示每兩天換一次的班別，D 與 N 表示早班跟晚班)。採用 43 人座大巴、20 人座中巴和 9 人座小巴 3 種車型來服務。

實例研究的應用範圍，本研究選擇桃園與新竹地區作為研究範圍，並以 DB 之班別作為研究對象。其相關資料如下：

1. 地理區位相關資料

本研究之實例研究，其個案範圍之南北長約 45 公里，東西長約 30 公里，總面積約 1,350 平方公里；共包含了 14 條路線，總里程數約 525 公里；有 109 個停靠站（起點）與 2 個工作廠區（迄點）；服務人數共 244 人。實例研究個案公司員工通勤旅次起迄點分佈情況如圖 7 所示。圖 7 中方形圖案表示起點，三角形圖案表示迄點。

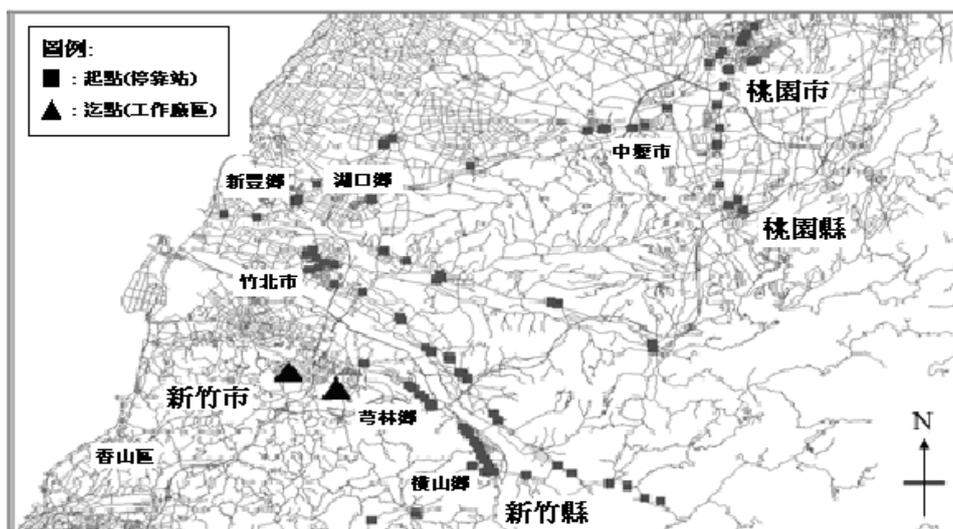


圖 7 個案公司員工通勤旅次起迄點分佈圖

2. 車型成本結構資料

個案公司的通勤交通車有小巴（9 個座位）、中巴（20 個座位）和大巴（43 個座位）3 種車型，與其合作的遊覽車公司皆可提供各車型的需求。另外，本研究以總成本最小為目標，故各車型之成本結構更顯重要。透過實際訪查，將個案公司所有通勤交通車路線之車型、里程與單價利用迴歸分析找出路線之成本結構，茲將結果整理如表 8 所示。

表 8 各車型及路線成本結構

車型	車輛固定成本 (f^v)	路線變動成本 (c_{ij}^v)
小巴 ($v=1$)	$f^1 = 507.85$	$c_{ij}^1 = 5.7402 \cdot d_{ij}$
中巴 ($v=2$)	$f^2 = 551.23$	$c_{ij}^2 = 10.855 \cdot d_{ij}$
大巴 ($v=3$)	$f^3 = 706.97$	$c_{ij}^3 = 12.871 \cdot d_{ij}$

從表 8 中可觀察出大巴之固定成本與變動成本之係數皆最高，小巴則最低；但若以每個座位之邊際成本（成本／座位數）來看，大巴反而最低，小巴則最高。故以本研究所考量之最小總成本目標而言，使用愈大車型則愈符合經濟效益。

3. 相關參數設定

每個作業員工的服務時間（上／下車）皆假設為 10 秒。路網相關資料方面，依實際道路之路網，透過地理資訊系統依道路等級作不同速度之設定（高速公路為 90 km/hr；快速道路為 80 km/hr；省道為 40 km/hr；縣道為 35 km/hr；鄉道為 30 km/hr；其他為 20 km/hr），以最短時間之準則求得距離與時間矩陣。路線時間限制則為 65 分鐘。

4. 實例研究應用範圍的問題規模

以實例研究的應用範圍，109 個起點、2 個迄點、3 種車型的大規模問題，本研究通勤交通車路線問題之 IP 模式就會產生 38,296,776 個變數和 2,247,204 條限制式，極難有效率地求解，故以啟發式解法求解。

5.2 個案應用結果分析

根據上述界定之實際個案應用範圍，本研究巨集啟發式解法的求解時間為 14 秒，執行結果彙整如表 9 所示。表 9 中，TA 求解實例個案最佳結果的控制參數為：起始門檻值 (T_0) 為 0.02；門檻數列長度 (K) 為 150；門檻值下降比率值 r 為 0.99。

表 9 巨集啟發式解法執行結果

路線編號	使用車型	路線距離(公里)	路線時間(分鐘)	路線節點順序
1	小巴	43.535	64.906	3→20→7→110→111
2	小巴	44.498	63.382	16→17→22→19→110→111
3	中巴	43.504	64.622	1→2→13→21→46→110→111
4	大巴	41.238	64.976	4→5→12→6→8→9→10→11→110→111
5	中巴	43.627	64.386	18→49→42→43→44→50→45→51→110→111
6	中巴	40.259	64.96	15→14→23→24→25→30→29→54→41→110→111
7	大巴	32.136	61.426	26→31→27→28→32→33→52→53→38→39→34→40→35→36→37→110→111
8	中巴	28.366	59.648	92→104→93→94→95→105→96→67→68→91→69→72→73→74→103→58→111→110
9	大巴	24.447	61.536	89→75→76→77→78→79→80→81→85→86→60→62→63→64→66→65→70→71→111→110
10	大巴	38.473	62.168	82→83→84→90→87→88→59→61→97→106→98→99→100→107→101→108→102→109→57→56→55→48→47→111→110

註：編號 110 表廠區 1；編號 111 表廠區 2。

針對上述巨集啟發式解法執行結果，本研究從路線數與車輛使用情形和成本兩方面，與個案公司人工作業之結果進行比較，結果分述如下：

1. 路線數與車輛使用情形

路線數方面，個案公司現況有 14 條路線，而本研究經巨集啟發式解法執行結果只需 10 條路線，路線數減少 4 條 (可減少使用 4 輛車)，其路線總長度約可減少 145 公里。表 10 彙整個案公司現況與本研究執行結果之路線數與車輛使用情形。

表 10 個案公司現況 (改善前) 與啟發式解法結果 (改善後) 之路線數與車輛使用情形

	總路線數 (里程數)	大巴 (里程數)	中巴 (里程數)	小巴 (里程數)
改善前	14 (524.4)	8 (338.4)	5 (158)	1 (28)
改善後	10 (380.08)	4 (136.29)	4 (155.76)	2 (88.03)

2. 成本

本研究以最小化總營運成本為目標進行路線之規劃，故成本為一重要之評估指標。以本文實例應用之研究對象 DB 班別來說，每 4 天有 2 天需要通勤交通車服務，一個月中有 15 天需要通勤交通車服務；因下班與上班屬於對稱之問題，下班時交通車服務之營運成本與上班相同。因此，以 DB 班別而言，一個月需要通勤交通車服務 30 趟。從表 11 可發現，巨集啟發式解法的執行結果，可使單趟成本減少 \$4,131 元，約可減少年成本 29%，由個案研究範圍所需之年成本約 500 萬元換算，約 149 萬元。

表 11 個案公司現況 (改善前) 與啟發式解法結果 (改善後) 之成本分析

	成本 (元/趟)	節省成本 (元/趟)	節省成本 (元/月)	節省成本 (元/年)	節省成本 百分比
改善前	14,130	-	-	-	-
改善後	9,999	4,131	123,930	1,487,160	29%

六、結論與建議

6.1 結論

通勤交通車路線問題 (CBRP)，在近年來能源危機和環境保護的意識抬頭下，已日益成為大型公司企業重視的課題。然而 CBRP 在學術文獻上的探討甚少，且由於 CBRP 多迄點 (廠區) 和多車種的特性，無法延用傳統 VRP 或 SBRP 的方法來求解，故本文針對 CBRP

進行深入研究，完成之重要結果與具體貢獻分述如下：

1. 本研究針對通勤交通車問題，以整數規劃法構建出一個明確的數學模式，可供後續研究之參考。此模式並可求解出中小型測試例題最佳解，驗證了本研究數學模式之正確性。
2. 本研究亦設計完全性路網走廊型 (CC)、完全性路網非走廊型 (CR)、非完全性路網走廊型 (IC)、非完全性路網非走廊型 (IR) 4 類共 28 個中小型測試例題，可作為往後通勤交通車路線問題之標竿測試題庫；並分別以整數規劃法及啟發式解法進行求解，其測試結果可作為後續研究參考比較之基準。
3. 本研究以門檻接受法 (TA) 為基礎所建立的四階段巨集啟發式解法，乃針對多迄點、多車種之通勤交通車路線問題特性構建而成，可求解出 24 題小型測試例題和 2 題中型測試例題之最佳解，其求解效率高，結果良好。
4. 在實例應用方面，以新竹科學園區內某科技大廠為研究對象，進行實例研究。求解結果顯示，本研究之巨集啟發式解法亦可有效率地求解，求解時間約為 14 秒；且可替個案公司減少路線數 4 條，其路線總長度約可減少 145 公里；並可減少年成本 29%，約 149 萬元。

6.2 建議

除上述結論外，本研究對於後續相關研究的方向，提出下列幾點建議：

1. 本研究係以總營運成本最小化為目標，服務品質方面只以路線時間限制來確保員工搭乘之旅行時間不會過長，建議未來研究可考慮以服務品質為目標，例如：以所有搭乘員工總搭乘時間最小化或各路線時間公平為目標。或者可考量多重目標，將營運成本與服務品質同時納入目標式一併考量。
2. 本文為首篇針對多迄點及多車種特性之通勤交通車路線問題提出明確數學模式的研究，未來應可發展更好（更精簡）的數學定式 (model formulation)，但對大規模問題，仍需依賴有效率的啟發式方法。
3. 未來研究可朝延伸 OVRP 的相關問題上，進行深入探討。

參考文獻

1. Angel, R. D., Caudle, W. L., Noonan, R., and Whinston, A., "Computer-Assisted School Bus Scheduling", *Management Science*, Vol. 18, No. 6, 1972, pp. 279-288.
2. Bennett, B. T. and Gazis, D. C., "School Bus Routing by Computer", *Transportation Research*, Vol. 6, 1972, pp. 317-326.
3. Bodin, L. D. and Berman, L., "Routing and Scheduling of School Buses by Computer", *Transportation Science*, Vol. 13, No. 2, 1979, pp. 113-129.

4. Fu, Z., Eglese, R., and Li, LYO, "A New Tabu Search Heuristic for the Open Vehicle Routing Problem", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 56, No. 3, 2005, pp. 267-274.
5. Bowerman, R., Hall, B., and Calamai, P., "A Multi-Objective Optimization Approach to Urban School Bus Routing: Formulation and Solution Method", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 29A, No. 2, 1995, pp. 107-123.
6. Li, L. and Fu, Z., "The School Bus Routing Problem: A Case Study", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, No. 5, 2002, pp. 552-558.
7. Corberán, A., Fernández, E., Laguna, M., and Martí, R., "Heuristic Solutions to the Problem of Routing School Buses with Multiple Objectives", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, No. 4, 2002, pp. 427-435.
8. Bektaş, T. and Elmastaş, S., "Solving School Bus Routing Problems through Integer Programming", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 58, No. 12, 2007, pp. 1599-1604.
9. 陳文瑞, 「交通車之網路設計」, 國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文, 民國 78 年。
10. 陳建都, 「校車路線指派問題之研究」, 大葉工學院事業經營研究所碩士論文, 民國 85 年。
11. 張容瑄, 「模擬退火法在校車路線問題上的應用」, 國立中正大學數學研究所碩士論文, 民國 90 年。
12. 林志鴻、陳春益、林育俐、曾智強, 「委外校車路線規劃問題之研究」, *運輸計劃季刊*, 第 31 卷, 第 2 期, 民國 91 年, 頁 391-428。
13. Braca, J., Bramel, J., Posner, B., and Simchi-Levi, D., "A Computerized Approach to the New York City School Bus Routing Problem", *IIE Transactions*, Vol. 29, 1997, pp. 693-702.
14. Spada, M., Bierlaire, M., and Liebling, Th. M., "Decision-Aiding Methodology for the School Bus Routing and Scheduling Problem", *Transportation Science*, Vol. 39, No. 4, 2005, pp. 477-490.
15. Pacheco, J. and Martí, R., "Tabu Search for a Multi-Objective Routing Problem", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 57, No. 1, 2006, pp. 29-37.
16. Park, J. and Kim, B. I., "The School Bus Routing Problem: A Review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 202, No. 2, 2009, pp. 311-319.
17. Schrage, L., "Formulation and Structure of More Complex/Realistic Routing and Scheduling Problems", *Networks*, Vol. 11, No. 2, 1981, pp. 229-232.
18. Bodin, L., Golden, B., Assad, A., and Ball, M., "Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: The State of the Art", *Computers and Operations Research*, Vol. 10, No. 2, 1983, pp. 63-211.
19. Sariklis, D. and Powell, S., "A Heuristic Method for the Open Vehicle Routing Problem", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, No. 5, 2000, pp. 564-573.
20. Brandão, J., "A Tabu Search Heuristic Algorithm for Open Vehicle Routing Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 157, No. 3, 2004, pp. 552-564.
21. Tarantilis, C. D., Ioannou, G., Kiranoudis, C. T., and Prastacos, G. P., "Solving the Open Vehicle Routing Problem via a Single Parameter Metaheuristic Algorithm", *Journal of the Operational*

- Research Society*, Vol. 56, No. 5, 2005, pp. 588-596.
22. Pisinger, D. and Ropke, S., "A General Heuristic for Vehicle Routing Problems", *Computers and Operations Research*, Vol. 34, No. 8, 2007, pp. 2403-2435.
 23. Li, F., Golden, B., and Wasil, E., "The Open Vehicle Routing Problem: Algorithms, Large-Scale Test Problems, and Computational Results", *Computers and Operations Research*, Vol. 34, No. 10, 2007, pp. 2918-2930.
 24. Fleszar, K., Osman, I. H., and Hindi, K. S., "A Variable Neighborhood Search Algorithm for the Open Vehicle Routing Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 195, No. 3, 2009, pp. 803-809.
 25. Tarantilis, C. D. and Kiranoudis, C. T., "Distribution of Fresh Meat", *Journal of Food Engineering*, Vol. 51, No. 1, 2002, pp. 85-91.
 26. Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D., and Ioannou, G., "The Open Vehicle Routing Problem with Time Windows", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 58, No. 3, 2007, pp. 355-367.
 27. Osman, I. H. and Laporte, G., "Metaheuristics: A Bibliography", *Annals of Operations Research*, Vol. 63, 1996, pp. 513-623.
 28. Dueck, G. and Scheuer, T., "Threshold Accepting: A General Purpose Optimization Algorithm Appearing Superior to Simulated Annealing", *Journal of Computational Physics*, Vol. 90, No. 1, 1990, pp. 161-175.
 29. Han, A. F. and Cho, Y. J., "A New Meta-Heuristic Approach to the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem", *Journal of the Eastern Asia Society of Transportation Studies*, Vol. 3, No. 3, 1999, pp. 255-269.
 30. 楊智凱, 「以門檻接受法改善 TSP 與 VRP 路網成本之研究」, 國立交通大學土木研究所運工管組碩士論文, 民國 84 年。
 31. 韓復華、楊智凱、卓裕仁, 「應用門檻接受法求解車輛路線問題之研究」, *運輸計劃季刊*, 第 26 卷, 第 2 期, 民國 86 年, 頁 253-280。
 32. 韓復華、卓裕仁、陳國清, 「五種巨集啟發式方法在 VRP 問題上的應用與比較」, 中華民國第四屆運輸網路研討會論文集, 中華民國運輸學會, 民國 88 年, 頁 72-82。
 33. 韓復華、卓裕仁, 「門檻接受法、噪音擾動法與搜尋空間平滑法在車輛路線問題之應用研究與比較分析」, *運輸學刊*, 第 9 卷, 第 3 期, 民國 87 年, 頁 113-144。
 34. 韓復華、卓裕仁, 「巨集啟發式方法在 TSP 與 VRP 上之應用: 參數設定與執行機制之探討」, 中華民國第五屆運輸網路研討會論文集, 中華民國運輸學會, 民國 89 年, 頁 72-82。
 35. Williams, H. P., *Model Building in Mathematical Programming*, 4th edition, John Wiley and Sons, New York, 1999.
 36. 國立交通大學運輸科技與管理系(所), 運輸網路實驗室網頁, 「CBRP」, <http://140.113.119.114/network/>, 民國 98 年。
 37. Christofides, N. and Eilon, S., "An Algorithm for Vehicle Dispatching Problem", *Operational Research Quarterly*, Vol. 20, 1969, pp. 309-318.

38. Potvin, J. Y. and Rousseau, J. M., “An Exchange Heuristic for Routing Problem with Time Windows”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 46, No. 12, 1995, pp. 1433-1446.
39. Or, I., “Traveling Sales-type Combinational Problems and Their Relation to the Logistics of Regional Blood Banking”, Ph.D. Dissertation, Northwestern University, Evanston, IL., 1976.
40. Lin, S., “Computer Solution of the Traveling Salesman Problem”, *Bell System Technical Journal*, Vol. 44, 1965, pp. 2245-2269.

