

# 定期貨櫃船舶航線規劃模式與求解 演算法之研究<sup>1</sup>

## A MODEL AND SOLUTION ALGORITHM FOR CONTAINER LINER SHIP ROUTING

顏上堯 Shangyao Yan<sup>2</sup>

藍世宗 S. T. Lan<sup>3</sup>

(90 年 10 月 25 日收稿，91 年 1 月 22 日第一次修改，91 年 3 月 7 日  
第二次修改，91 年 12 月 19 日定稿)

### 摘 要

航線規劃對航運業者而言甚為重要，影響業者的成本支出與攬貨績效，但隨著經營規模的擴大，以往國內業者使用的人工經驗規劃方式，將難以有效規劃出最佳利潤的航線。本研究從航運業者立場，在不預設船舶容量及數量下，依據已知或預測的市場櫃流量，同時考量週班及最低服務水準之限制，構建一數學規劃模式。由於此模式為一 NP-Hard 性質之非線性混合整數規劃問題，故本研究綜合 Clarke 和 Wright 的節省法、節點增減及交換方法、門檻值接受法及大洪水法等，發展二啟發式解法，求取近似最佳解。最後本研究以一國內海運業者之規劃案為例，測試模式與演算法的績效。

**關鍵詞：**航線規劃；櫃流量；節省法；門檻值接受法；大洪水法

- 
1. 本研究承國科會專題部分補助，謹此致謝。作者感謝二位審查委員寶貴的修正意見，使本文更為嚴謹。
  2. 國立中央大學土木工程學系教授兼系主任 (E-mail: t320002@cc.ncu.edu.tw)。
  3. 國立中央大學土木工程學系碩士。

## ABSTRACT

*Ship routing is essential to a liner carrier's operation. In the past, carriers in Taiwan usually plan their routing manually, which was inefficient to their operations. This research attempts to develop a model and solution algorithm that could help liner carriers in container ship routing so that their operations can be improved. The model, on the basis of carrier's perspective considering planning practices without capacity constraint, is formulated as an integer linear program that is characterized as an NP-Hard problem. Two heuristic methods, based on the Clarke-Wright Savings method, the node exchanging technique, the threshold accepting algorithm and the great deluge algorithm, are developed to solve for near-optimal solutions. In order to evaluate the model and solution algorithm in practice, a case study concerning the operation of a major Taiwan liner carrier is performed.*

**Key Words:** *Vessel routing; Container flow; Savings; Threshold accepting algorithm; Great deluge algorithm*

## 一、緒 論

海洋貨物運輸可簡單區分為定期船、不定期船、及專用船等三種業務，依運送貨品性質的不同其使用的運輸工具也不同。其中定期船業務乃指具有固定航線、船期、及靠港，對客戶提供海洋運輸業務，所使用的船舶又以散裝船及貨櫃船兩種居多。

定期船業務中，貨櫃船運輸扮演著相當重要的角色。對於定期貨櫃船舶運送業者而言，良好的航線設計、行銷策略與營運管理影響運輸業者之成敗，其中航線規劃之優劣更是影響其營運績效之關鍵所在。因此如何設計出符合市場需求的航線以提高市場競爭力，進而獲取更高利潤，莫不為定期貨櫃船舶運送業者一致的方向。

定期貨櫃船舶運送業者在擬定營運路線時，實際考慮的因素甚為複雜，其影響因素包括起迄貨物需求量及其分布、港口使用費用、船舶營運成本、碼頭船席、船舶航行速度、港口與港口間航行時間、船隊規模等等。其中營運成本可分為固定成本（如船舶購置或租賃費用、櫃架車機等）、半變動成本（燃油、港埠、及運河等費用）及變動成本（如裝卸、理貨、集貨船及其他管理費用等）。此外，船舶取得方式可為自行建購或租賃，租賃又區分為光船租賃、論時傭船、論程傭船等方式。

目前國內業者在航線規劃上仍採用人工經驗，並偏重以船舶配置的角度規劃航線，即先預設使用船舶的大小及數量，再依據市場需求以人工經驗草擬航線，之後再針對相關限制作一調整，以為最後營運航線。由於人工規劃方式缺乏系統性最佳化分析，其效率將隨著問題的複雜度增加而大幅降低，無從得知所規劃的路線是否為最適的航線，且若以船舶配置的角度規劃，則必須反覆針對不同船舶大小及數量多次試算航線的成本與利潤，最後才能從中找出一較佳的解，以為船舶配置的依據。此法不但非常費時，其效果亦不佳，因

此在日趨競爭的市場上，此人工做法極待改善。

為改善以往實務規劃的做法，本研究從航運業者立場，在不預設船舶容量及數量下，依據預測的需求量及各項實務運作，利用數學規劃的方法，發展一數學規劃模式及求解演算法，以幫助航運業求解最佳的營運路線，並據以求算所需要的艙位數，以為其營運與否及派船之依據，輔助業者提高其營運績效及利潤。本研究與實務人工規劃方法及國內外相關研究之最大不同處在於導入車輛排程常用的 TSP 與 VRP 部分觀念發展演算法，且航線規劃前不先對使用的船舶大小及數量預設立場，而純粹以市場需求決定營運路線及所需要的艙位數。此舉可先了解營運後的利潤再決定是否派船營運，可避免遷就船舶容量及數量而灣靠利潤不大的港口，或漏過具利潤之港口，而導致規劃利潤不佳的航線。例如本研究模式與解法可為租賃船舶（論時傭船、論程傭船或光船出租）航線規劃之決策參考，以決定最佳的租賃船型或航線。又如，在自有船舶容量大於市場需求的前提下，本研究模式與解法可為自有船舶航線規劃之決策參考，以決定最佳的航線。本研究之應用可由業者依其需要與符合模式假設條件下，適當的輸入模式所需的參數值，再以求解。

本文其餘結構如下：首先回顧相關文獻，接著參考實務考量因素，發展一數學規劃模式，再針對此數學規劃模式設計適當的求解演算法，並進行求解，之後以一國內海運業者之營運資料及航線規劃案為例，作一範例測試與分析，最後提出結論與建議。

## 二、文獻回顧

排程規劃問題，因使用的運具不同，而有車輛、船舶、飛機等三種排程研究，但其規劃方法與原理通常有某種程度的類似，因此本研究除針對國內外船舶航線規劃研究作一回顧外，亦針對較類似的車輛排程規劃作一回顧。此外，本研究構建的模式可定式 (formulate) 為一組合最佳化問題，我們將利用新近發展且效果頗佳之巨集演算法，以進行求解演算法之設計，故在此節中亦針對此等巨集演算法作一回顧。

### 2.1 船舶排程規劃

在船舶排程文獻中，依船舶經營業務型態又可簡單分為定期船、不定期船兩種。所謂定期船一般多指依據固定航線、靠港及船期提供客貨載運的服務，例如一般的貨櫃船、定期客輪等。不定期船通常依據租傭契約，在約定期限內及指定港口間以散裝船、油輪運送雜貨、油品等大宗散裝貨載。另外還有比較特別的產業專用船，依產業特性不同，亦以自有或租賃特定型態船舶運送其原料或產品，例如汽車運輸船、液化船等，此類專用船在經營上配合該公司運送貨品的需要，航線也分定期與不定期兩種。此外，船舶主要之研究課題可區分為航線規劃、船隊部署規劃、與船期安排等三大類。若依規劃次序來區分，通常可將航線規劃視為前期規劃，船隊部署為中期規劃，而船期安排則屬於後期規劃，但實務上可依需要調整次序或兩者同時考量。

例如 Lane 等人<sup>[1]</sup>在已知起迄點需求量之下，為求取最少船數的船隊部署，發展了三段式求解。第一階段列出可行的船舶以供選擇，第二階段以啟發式求解法求解船舶排程，第三階段則以分割模式指派以確保每對起迄點運送只會被運送一次，並利用整數規劃技巧，發展出最小成本化模式。

Rana 和 Vickson<sup>[2]</sup>考量需求量大於現有的艙位供給之下是否該額外再租備船舶營運以滿足需求，並建立混合整數規劃模式求取利潤最大化。他們也在 1991 年另一文獻中將上篇文獻由考慮單船租備模式，擴大為多船模式研究，以一區域內多艘船舶的航線規劃來求取利潤最大化，對於利潤不高的貨載可以考慮不予運載，並結合收受與運抵 (pick-up and delivery) 的特性，建立非線性整數規劃模式，並利用拉氏鬆弛法與流量分解法求解。其規劃考慮因素與本研究模式所考慮因素較為相近，但其將航線規劃分為去回兩段分別考量，去程的終點為回程的起點，而本研究係為一不考慮去回程問題的蛙跳模式，故在航線模式設計上有所不同。

Perakis 和 Jaramillo<sup>[3]</sup>考量各項實際發生成本，使用線性規劃將既有船舶編排到各航線上以求取成本最小化。Ronen<sup>[4]</sup>對於當時近十年內的相關船舶排程研究作一整理，發現早期的研究以油輪居多，甚或有軍艦、化學船、漁船等，對貨櫃船研究較少，尤其航線規劃相關研究則又更少，而利潤最大化的模式亦在 1988 年開始應用在貨櫃船的研究上。

Cho 和 Perakis<sup>[5]</sup>分別針對船隊確定及不確定狀況下，構建航線選擇模式。但此兩模式均無應用實例及求解過程，僅建議可以最佳化軟體求解或以拉氏鬆弛法求解大規模之問題。Powell 和 Perakis<sup>[6]</sup>發展出兩模式，第一個模式乃參考 Rana 和 Vickson<sup>[7]</sup>之最大利潤模式，並將其改為線性規劃模式，以求解混合船隊中各船最佳路線。第二個模式則將其改為含有 0-1 變數的混合整數規劃模式，除可求得各船舶灣靠港口順序外，亦可提供航商是否擴充既有船隊規模。此二模式的求解上，係利用 AMPL 及 OSL 軟體求解整數規劃問題。

在國內貨櫃船的相關研究文獻上，如彭信坤<sup>[8]</sup>利用航商經營船舶特性及經濟學之區位理論，建立航商對於靠泊港與裝卸量選擇之最大化利潤模式，航商可藉此模式在選擇靠港時獲得最大利潤。

董孝行<sup>[9]</sup>針對航商灣靠基隆港與高雄港提出單靠或雙靠的利益評估模式，先分析內陸轉運成本再配合其自建的非線性迴歸最小成本數學模式，分析船型及費率等因素，導出各項因素在各船型下的經濟損益平衡點。此模式可提供航商在航行區域內有效選擇靠港方式。

黃望修<sup>[10]</sup>針對財務問題考量，提出航線經營型態，以灣靠少數重要港口，並透過成本選擇模式，在市場占有率、服務頻率、裝載限制等限制條件下，建立最大經濟利益的目標函數，再進行個案研究。其研究發現選擇性灣靠港口較逐港灣靠為佳。

張永昌與陳春益<sup>[11]</sup>考量成本最小化，建立一 0-1 混合整數規劃問題，並以 LINDO 求解分析較有利的靠港並組合成一航線。其研究將航線切成去回兩段，並假設去回程所灣靠港口均相同，故在規劃時屬單向規劃。

許志成<sup>[12]</sup> 針對業者現有船舶下，以時空網路輔助定期貨櫃船排程，在最小成本目標下，考量可用船舶及航次節線限制，建立一模式，並以拉氏鬆弛暨次梯度法，連同網路單體法及流量推擠法求解模式，再利用流量分解法求得各船舶航行路線。

陳弘輝<sup>[13]</sup> 針對航商面對特定市場的最佳船隊組合，求解最佳船舶型態與船舶數量，並以最大利潤為準則，比較環繞模式、直去直回、蛙跳模式等三種繞航模式的優劣。劉中平<sup>[14]</sup> 亦針對船隊部署問題設計數學模式並作一探討。盧華安與徐育彰<sup>[15]</sup> 針對定期貨櫃航線選擇與船隊部署構建數學模式，考量船數、週期、配艙及若干服務品質限制，以求取航線規劃之最大總利潤。其問題性質、限制與本研究之航線規劃不同。

郭塗城與朱經武<sup>[16]</sup> 利用定期船靠港選擇因素及實際狀況構建一靠港選擇之模式，並以 LINDO 軟體針對五種不同裝載限量及週期組合下之單向運送，求解航線最大利潤。其在航線設計上為一直去直回模式，與張永昌與陳春益<sup>[11]</sup> 規劃方式類似。盧華安<sup>[17]</sup> 探討實務航線設計之內容與流程以構建數學模式，除考量船數、週期外，亦將配艙概念納入考慮，以求取航線規劃之最小總成本。

## 2.2 車輛排程規劃

除了船舶排程規劃外，國內外對於排程著墨最多的研究莫過於車輛排程，尤其是知名的 TSP (traveling salesman problem) 及 VRP (vehicle routing problem) 問題。路線排程規劃中重要的研究對象為市區公車、校車、及貨車的路線排程規劃，且因實務特性不同而衍生出許多類型的問題，這些特性例如車種、車輛多寡、容量、時窗限制、需求量等。其衍生出的車輛路線排程問題包括多場站車輛路線問題、結合收受及運抵車輛路線問題、時窗限制的車輛路線問題、多車輛不同路線同時規劃的車輛路線問題等。對於不同型態的問題也有各種不同的限制條件及不同的求解方法，例如節省法、插入法、改善法、交換法、正確解法等<sup>[18]</sup>。值得一提的是，晚近車輛排程問題有探討即時（或線上）車輛（或車隊）指派（或排程）問題，此等問題與本研究路線規劃問題的性質不同。

車輛路線排程規劃文獻頗多，例如 Gillett 和 Johnson<sup>[19]</sup> 在總最小運送距離目標下，考量裝載限制，以多場站多車輛方式，服務區域內的需求點，利用啟發式解法求解多場站車輛派送的近似解。

Bodin 和 Golden<sup>[20]</sup> 將過去車輛排程研究依問題特性及求解方法作一整理。從其文獻得知當時對於車輛排程已有相當多的研究，但利用數學規劃求解的研究仍處於初期階段。Golden 和 Ball<sup>[18]</sup> 針對車輛排程問題作一探討，將車輛排程問題歸納為七大類，並針對特性、模式、求解方法等作一介紹。

Fisher 和 Jaikumar<sup>[21]</sup> 在一區域範圍內以中央集散站及一批車隊對各需求點配送貨物，在固定容量下，以自行設計的啟發解求解最低總配送成本，並對多種啟發式解法作一測試與分析比較。

Bott 和 Ballau<sup>[22]</sup> 彙總車輛排程的研究作一分類，並針對 Savings 及交換改善 (exchange

improvement) 作一探討，最後對於 VRP 所可能衍生的實務問題列舉說明。隨後，Bodin<sup>[23]</sup> 亦針對過去的排程研究依其特性及求解方法作一探討，文中亦提及 80 年代排程問題已發展由電腦與地理資訊系統加以輔助的求解方式。Savelsbergh<sup>[24]</sup> 針對一般收受與運抵的路線規劃問題建立一模式，並分別探討靜態及動態單一及多車輛的求解。

至於國內在車輛排程的研究上亦頗多，例如李育欣<sup>[25]</sup> 曾對完全性路網 TSP 問題發展啟發式解法，並與類神經網路方法作一比較。韓復華等<sup>[26]</sup> 將門檻值接受法 (threshold accepting, TA) 方法應用於 TSP 問題求解上，之後韓復華等<sup>[27]</sup> 又應用 TA 求解 VRP 問題，結果皆發現 TA 法可有效的求解 TSP 及 VRP 問題。

陳春益<sup>[28]</sup> 等人針對國內大型貨運公司的排程問題作一實例研究，並利用地理資訊系統建立使用者介面。林正章<sup>[29]</sup> 等人針對貨運公司欲改變貨運路線結構作一研究，在考慮區位與規模的決策因素下，同時考慮貨運業內部營運網路與服務網路，以設計最佳路網結構。張淳智與王文貞<sup>[30]</sup> 針對一圖書業收受與運抵的車輛排程問題，以最小成本為目標，構建一模式，並利用禁忌搜尋法 (tabu search, TS) 發展一求解演算法。

## 2.3 巨集演算法

傳統鄰近搜尋法的求解可分成起始解產生與起始解改善兩方面。一般起始解係以一啟發解 (如貪婪法) 產生，至於起始解改善在早期主要採區域搜尋法 (local search)，然區域搜尋法雖可逐漸改良求解，但在搜尋上卻經常易陷入局部最佳解 (local optimum)，而致無法求得好的近似解。為克服傳統啟發式解法的缺點，1980 年代開始，新的巨集啟發式解題概念逐漸形成，並造成一股新興的研究風潮。所謂巨集啟發式解法乃是以傳統啟發解法為核心架構，結合高階的搜尋策略 (meta-strategies)，以指導其跳脫局部最佳解的束縛而找到更好的解。此高階搜尋策略大多取材自物理化學、生物自然、人類思考之行為或邏輯，如禁忌搜尋法 (tabu search, TS)、模擬退火法 (simulated annealing, SA)、門檻值接受法 (threshold accepting, TA)、噪音擾動法 (noising method, NM)、大洪水法 (great deluge algorithm, GDA)、記錄更新法 (record-to-record travel, RRT)、搜尋空間平滑法 (search space smoothing, SSS)、兩極跳躍法 (flip-flop method, FF)、類神經網路 (neural network, NN)、基因演算法 (genetic algorithm, GA) 等。

此等方法中與本研究方法較相關的，如模擬退火法為一機率式尋優法，由 Kirkpatrick<sup>[31]</sup> 等學者提出，其在鄰近點搜尋時，對於目標函數有正向改善時一定接受，而為避免落入區域最佳解，當新目標進展非為正向改善時，仍以一機率接受之。至於機率值與目標值差及設定溫度相關，一般先設一起始溫度，之後，逐漸調降溫度，至最後設定收斂的溫度而止。Robuste<sup>[32]</sup> 等學者利用 SA 求解 TSP 和 VRP 問題，並且認為對一般

NP-Hard (non-deterministic polynomial-hard)<sup>[33]</sup> 問題<sup>4</sup>可收斂於全域最佳點，但收斂時間呈指數成長。

門檻值接受法最早由 Deuck and Scheuer<sup>[34]</sup> 發表，為一明確型求解方法，許多研究證實當應用於 TSP 時，結果優於 SA。TA 與 SA 類似，即當新的鄰近解有正向改善時則予以接受，當無正向改善但新舊解的差異小於門檻值時亦予以接受，但不同的是 TA 為一固定值而 SA 為一機率值。與 SA 類似，TA 開始亦設定起始門檻值，之後，逐漸降低門檻值，直到設定收斂的門檻值（一般設為 0）而止。

大洪水法由 Deuck<sup>[35]</sup> 發表，為一明確型求解方法，類似 TA。GDA 與 TA 最大不同處在於 TA 考慮的是與前一解的差異幅度是否落在門檻之內，以作為判斷接受與否的依據。而 GDA 在考慮新鄰近解接受與否時並不考慮前項解，而是與其所設定的標準（水面）作一比較，只要在此標準之下，不管其正負向改善幅度，均予以接受。與 TA 類似，GDA 開始亦設定起始水面值，之後，逐漸降低水面值，直到設定收斂的水面值而止。

在應用的研究中，如韓復華與楊智凱<sup>[26]</sup> 及韓復華等人<sup>[27]</sup> 的研究中，將門檻值接受法應用在 TSP 及 VRP 問題上，發現效果良好。韓復華與林修竹<sup>[36]</sup> 針對 TA 與 GDA 在 VRPTW 問題上之應用作一探討，其測試結果發現 GDA 的解題精度較 TA 來得佳，但所費時間亦較長。

## 2.4 結語

從以往國內外海運排程研究中知道，早期許多文獻多利用經濟、統計及財務等觀點與方法來求解航線規劃。1980 年後許多研究逐漸將數學規劃方法運用於海運研究上，這些研究中，有針對同一港口允許多次進出並分去、回程分別作路徑規劃，亦有同一港口僅能進出一次，且不分去、回程規劃航線。由於各航商面臨的市場、經營的方式、本身的策略、船舶是否擁有等皆可能不同，因此考量的目標、限制條件可能異。本研究利用數學規劃方法，以利潤最大化為目標，允許同一港口可以多次進出或不進出，不將去、回程分開規劃，並考量業者面臨的各實務限制，發展一新的航線規劃模式。求解上，本研究參考以往車輛排程的解法及新近門檻接受法及大洪水法，發展求解演算法，以期有效求解實際問題。

## 三、模式構建

本節首先介紹本研究的問題，接著說明模式的相關假設及符號，之後利用數學規劃的方法，構建一數學規劃模式。

---

4. 此等問題在目前尚未有發展出多項式時間演算法 (polynomial time algorithm) 以求得最佳解。所謂多項式時間演算法，係指此演算法的求解時間與問題參數係呈多項式的關係。

### 3.1 問題描述

對航運業者而言，航線設計好壞除了攸關成本支出外，最直接的影響莫過於攬貨的績效。好的航線規劃能夠節省成本、符合市場需求、縮短運送時間，進而為業者帶來最大利潤。近年來，在快速且大型船舶相繼問世之後，世界各大航運業者所面對的競爭也愈趨激烈，除了船速上、運送時間及單位成本的競爭外，最重要的競爭也是最基本的課題就是如何依據市場需求，規劃一最佳化的航線為業者帶來最大利潤。

在航線規劃實務上，一般航運業者通常透過其海外子公司或代理行所提供的預估貨載量，加以彙總分析後，先選定其所需的特定航段，再依這些航段及貨載量草擬設計航線。接著再檢視該草擬航線是否能配合預定使用的船舶數量及航行天數，若不能配合則予以增加或刪減部分航段，以求滿足預定使用船舶數及航行天數，最後再視有無其他特別需求或限制（如兩岸直航限制等）作為草擬航線之修正依據。在這過程中，所採用的方法只是簡單分析與人工經驗，不但費時無效率，也無從得知所規劃的航線是否能為業者帶來最大利潤。

在一般排程或路線規劃的研究文獻上，幾乎都有容量及船隊數量的限制，並在此限制下尋求最佳解，但此種規劃方法易受限於船舶大小及數量，對於一些航線規劃上（如租賃船舶航線規劃或自有船舶容量大於市場需求之船舶航線規劃等），難以真正求得最佳利潤航線。因此本研究不同以往做法，將容量限制適當鬆弛，改用市場需求量先規劃航線，待規劃完成後再依據結果決定所需船舶大小及數量，以達航線利潤最大化。圖 1 顯示有無容量限制在規劃航線時的流程差異。

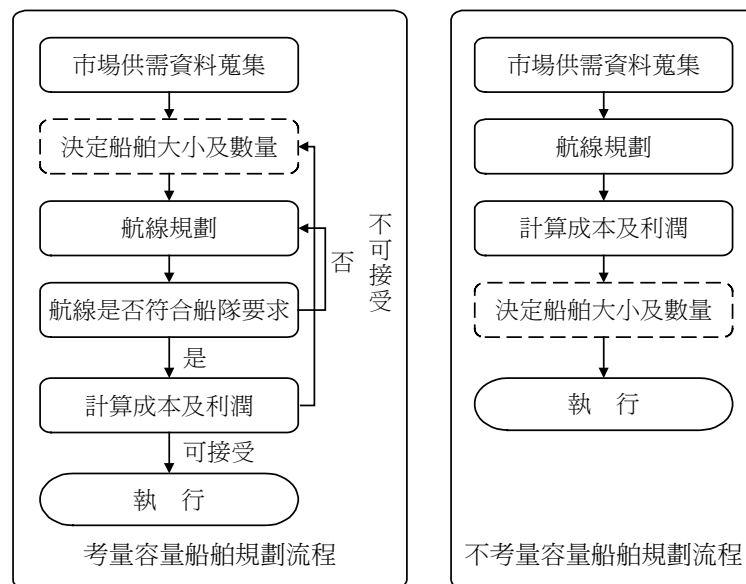


圖 1 航線規劃流程比較圖



在圖 1 中，左圖為有容量限制之規劃航線做法，為目前一般實務界及理論的作法。首先調查市場需求，接著決定使用船舶的大小及數量，之後在預設船舶大小及數量限制下規劃航線。若利潤不佳，則將預設船舶大小及數量作一修正後重新規劃。最後，從各評估中擇一最佳的方案。右圖為本研究之規劃方法，即無容量限制之規劃航線做法。首先調查市場需求後，暫不考量船舶因素，直接依據市場需求規劃最大利潤航線，然後再求算所需要之船舶大小及數量。

本研究從定期航運業者立場考量，以不考量船舶容量限制，針對所有選定的港口，依據預估貨載需求量、航行時間及航段利潤，在固定週班及滿足最低服務水準下，以數學規劃的方法設計最大利潤的航線規劃模式。本研究假設船舶沒有容量限制的問題，所有可及航段均可能有需求，規劃後依照航線所需的艙位數多寡，再決定以自有或租用適當的船舶營運。

綜合上述，本研究所求解的具體問題為：給定一群港口，且已知各港口對間的運送成本及貨櫃運送需求、各港口靠港費用、規劃一迴圈運送此航線上的可允許的需求量，以求得最大利潤。此迴圈，可包含全部或部分港口，亦即各港口不一定須納入航線內。另外，各港口在迴圈上不僅限通過一次，亦即有些港口可通過二次以上。至於此迴圈的港口對之可運送的貨載需求，須滿足運送之時間服務水準下始能服務。航線的週期長度亦應配合一週七天的倍數。由此可知，本研究的航線規劃問題與一般 TSP 或 VRP 觀念類似但不盡相同，主要在各點不一定須納入路線內，各點在路線中可出現一次以上。另外，可行運送的需求須滿足運送時間的服務水準限制、及路線的全長需配合一週七天的倍數等，亦頗為特殊。

## 3.2 模式假設

為便於模式之構建並確立模式使用的限制，本研究模式的假設說明如下：

### 3.2.1 研究區域假設

本研究假設為航運業者欲在一區域內營運前的規劃。研究區域指所有選定港口所涵蓋的範圍，在決定港口起迄對的櫃流量時僅考慮此區域內所有二點間可能的需求量。

### 3.2.2 航線假設

在航海實務上，所謂一航次 (voyage) 即為船舶依所規劃之航線行駛一次，當完成該航線之航行時即為完成一航次。一航次中又依其行駛方向分為單向 (如東、西或南、北向) 或往返航次 (round trip voyage)。其中，往返航次指當船舶由起點啟航後，依序航行預定之港口，當抵達起點為其最終港口之航次。圖 2 顯示數種往返航次，而本研究規劃之航線為往返航次。航線乃由許多或數個航段 (segment) 予以組合而成，所謂的航段是指船舶從一港口行駛到下一港口。例如在航線 1-2-3-4-1 中，1-2、2-3、3-4、4-1 這四對即為航段。另外，本研究使用的可及航段 (reachable segment) 指的是當貨櫃可經由此航線從一港口被

運送到另一港口，例如在航線 1-2-3-4-1 中，貨櫃可經由此航線，從 1 港運送至 2、3、4 港，而 1-2、1-3、1-4 便稱為可及航段。因此，可及航段可能包含一個或數個不等的航段，可及航段一般針對貨櫃或貨物運送而言。

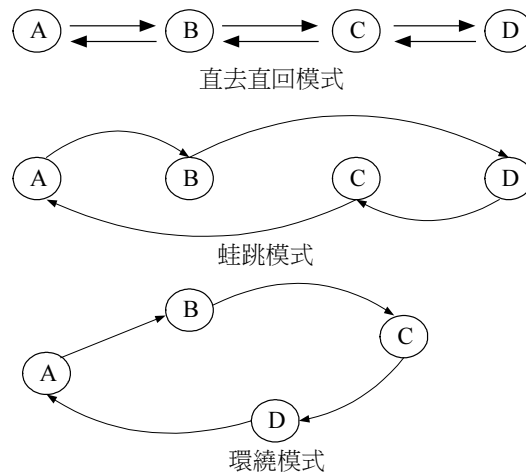


圖 2 往返航線

在實務上，對於一條航線的所有可及航段，航商並非都規劃艙位提供運送其需求量，其主要原因乃航商考慮此可及航段的運送時間是否為客戶所接受，或考量其本身利潤等是否適合運送此可及航段的需求。因此，雖然某港口有灣靠，但不見得能攬到預期的貨載。舉例來說，假設某航線靠港次序為 a-b-c-d-e-f-g-a，理論上 a 點到 g 點的貨載可經由此航線運送，但因運送時間過久，在實務上，除非 a 點到 g 點在市場上已無其他航線可運送，否則一般客戶會另選其他航線運送，而導致此航線無法承攬到此航段貨載。此外，就業者角度而言，除非艙位利用率非常差，否則其亦不會願意將 a 到 g 的貨載利用此航線運送，因為不但會占用艙位而妨礙其他可及航段的貨載運送，也會增加船舶載重與航行成本。為求更接近實務現況，本研究納入可及航段運送時間的考量，並假設兩點間單向的實際運送時間若超過單向直接運送時間的數倍，則此航線將無法承攬到該兩點間的單向貨載。

### 3.2.3 船舶容量假設

本研究不探討船舶船型、設計航速、新舊、天候風向及更深入的航行實務，並假設所有可及航段在服務水準下可選擇有配置艙位，且不預先設定船舶的容量。在實務上，若求解所得的運送量大於最大船舶的容量或可允許的載運量時，則可設最大的容量再求解（此時模式及演算法須進一步修正），或利用兩艘以上船舶同時營運該航線。

### 3.2.4 櫃流假設

在實務中，貨櫃運送可分成重櫃 (full container) 與空櫃 (empty container) 兩類，所謂

重櫃即為裝有貨物的貨櫃，此類貨櫃的運送收入為航運業者利潤的來源。而所謂空櫃則可視為業者的設備之一，空櫃的運送不但無法為業者帶來收益還會增加業者成本。就櫃子長度又可簡單分成 20 呎櫃、40 呎櫃，就其種類可分成一般櫃 (dry container)、冷凍櫃 (reefer container)、及其他特殊櫃等。在本研究中所討論的櫃流全部以有收益的重櫃為主且不分種類、大小，為簡化問題，全部轉化成以 TEU (twenty-feet equivalent unit) 為貨櫃計算單位，並假設所有港口起迄對的櫃流需求為已知的固定常數。

### 3.2.5 港口靠泊假設

港口靠泊費用包含港口捐 (port due)、引水 (pilotage)、拖船 (tug boat)、檢疫費等近二、三十項費用，許多港口亦有夜間及假日加成的費用，為簡化計算，本模式以一總和值代替。此外，對於港口水深、船舶載重、吃水及碼頭的大小、時窗限制、機具設備等港口及其後勤支援相關之技術面問題將暫不考慮。在港口灣靠次數方面，本研究容許在研究區域內的港口可不必全部灣靠、亦不限制每個港口只能灣靠一次，但每一航段僅能航行一次，以滿足運送經濟性。在灣靠時間上，可以實際灣靠港所需的時間設計之。

### 3.2.6 週期假設

實務上，大多數航運公司的主力航線均採用固定週班的營運方式，但在規劃的天數上，很難將航線剛好規劃為 7 天的倍數。因此，實務上常以增減航速或增減滯港時間來調整航線總航行時間至 7 天的倍數，故規劃上通常會給予 1 至 2 天的誤差。本模式假設規劃週期的允許誤差為正負 1 天，亦即航線全程的週期長為 7 天的倍數，再加上正負 1 天的容忍誤差。

## 3.3 符號說明

以下為本研究模式中所使用的變數與參數，說明如下：

變數：

$X_{ij}$  : 1, 船舶有航行航段  $(i, j)$ ; 0, 沒有;

$Y_{rs}$  : 1, 可及航段  $(r, s)$  之貨櫃需求被運送; 0, 沒有;

$Z_i$  : 1, 船舶有灣靠港口  $i$ ; 0, 沒有;

$Tr_{rs}$  : 可及航段  $(r, s)$  在該航行路線下實際的運送時間;

$u_k^{rs}$  : 1, 可及航段  $(r, s)$  的貨櫃需求以第  $k$  個 walk 運送; 0, 沒有。注意，一個 walk 類似一條路徑，但中間任一個點可允許經過一次以上;

$w$  : 週期數。

參數：

$N, A$  : 所有節點、節線的集合;

$D$  : 所有可能的可及航段的集合;

$M$ ：一極大的正數值；

$h_{rs}$ ：運送可及航段  $(r, s)$  的貨櫃需求所能容忍的最大直線時間倍數；

$C_{ij}, T_{ij}$ ：航段  $(i, j)$  的平均直達航行成本、平均直達航行時間。注意，理論上  $C_{ij}$  應與船舶載運量及容量相關，然而若欲納入此相關性於後述模式中，將造成模式極為複雜，故為簡化模式，本研究類似於實務的做法，先以平均的成本設定之，再透過後最佳化 (post optimization) 的微調，以得真正的成本值；

$Q_{rs}, R_{rs}$ ：可及航段  $(r, s)$  的櫃流需求量、淨收入；

$P_i, Tb_i$ ：港口  $i$  灣靠成本、靠泊時間；

$\delta_{ij,k}^{rs}$ ：1，可及航段  $(r, s)$  中的第  $k$  個 walk 通過節線  $(i, j)$ ；0，沒有；

$P_k^{rs}$ ：可及航段  $(r, s)$  中的第  $k$  個 walk 所經過的節線集合；

$P^{rs}$ ：可及航段  $(r, s)$  中所有 walk 的集合；

$n$ ：港口總數。

### 3.4 模式建立

本研究不預設船舶容量，根據市場需求量，以業者利潤最大化為目標，配合週班限制及服務水準限制構建一數學規劃模式。

#### 3.4.1 目標式

目標式如(1)式所示，為收入減去靠港成本與航行成本之利潤最大化。其中收入計算方式為各可及航段總貨載量 (TEU) 乘上該可及航段每 TEU 收入，再乘上該可及航段是否運送值，然後予以全部加總。靠港成本計算為各港口灣靠次數乘上該港口灣靠一次所需的費用，然後予以全部加總。航行成本計算為各航段航行所需燃料費及船舶成本乘上某航段與否航行值，然後予以全部加總。

$$\text{Max} \quad \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n R_{rs} Q_{rs} Y_{rs} - \sum_{i=1}^n P_i \sum_{j=1}^n X_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

#### 3.4.2 限制式

1. 船流守恆：確保船舶進入一港口後也一定會從該港口出來，以避免造成船舶累積於某港口之不合理的情況。如式(2)所示，進入  $j$  港口的所有航次加總必須等於離開  $j$  港口的所有航次加總。

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} - \sum_{g=1}^n X_{jg} = 0, \quad \forall j \in N \quad (2)$$

2. 避免子迴路限制：確保在灣靠港口集合中，不至於另外產生一條與主航線無關的次航

線。如式(3)所示，由灣靠港所形成的所有航段必須為主航線之組合，不可為單獨或其他次航線之航段。注意，(3)式右端  $\sum_{i \in S} \sum_{j \in N-S} X_{ij} \geq 1$  一項，與傳統 TSP 或 VRP 中避免子迴路限制表示一樣。至於(3)式左端  $(\sum_{i \in S} Z_i)(\sum_{j \in N-S} Z_j) \geq 1$  一項則表示，集合  $N$  分成  $S$  及  $N-S$  二群，各群中至少有一港口在航線上。否則，可能有一群無任何港口被灣靠，如此，子迴路限制將不被滿足。值得一提的是，此邏輯限制，可透過邏輯學及整數變數設計技巧 (例如可參考<sup>[37]</sup>)，修正為一般線性限制，但此將增加甚多的變數與限制式。

$$(\sum_{i \in S} Z_i)(\sum_{j \in N-S} Z_j) \geq 1 \Rightarrow \sum_{i \in S} \sum_{j \in N-S} X_{ij} \geq 1, \quad S \subset N, \quad S \neq N \text{ or } \phi \quad (3)$$

3. 港口灣靠限制：確保被灣靠港口在規劃的航線中。如式(4)所示，若港口  $i$  被灣靠，即  $Z_i = 1$ ，代表著與第  $i$  港相連的航段中，至少有一航段屬於規劃的航線。

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} + \sum_{g=1}^n X_{jg} \leq M Z_j, \quad \forall j \in N \quad (4)$$

4. 可及航段運送限制一：確保各可及航段存在於規劃的航線內。如式(5)所示，若可及航段  $(r, s)$  存在航線內，即  $Y_{rs} = 1$ ，則代表港口  $r$  及  $s$  皆需被灣靠。反之，若港口  $r$  或  $s$  未被灣靠，則可及航段  $(r, s)$  不存在航線內。

$$Z_r + Z_s \geq 2Y_{rs}, \quad \forall r \neq s \quad (5)$$

5. 可及航段運送限制二 (服務水準限制)：確保各可及航段的貨櫃需求被運送的時間在容許時間內。如式(6)所示，若可及航段  $(r, s)$  的需求被運送，即  $Y_{rs} = 1$ ，則代表從港口  $r$  運送到港口  $s$  的時間，不多於從港口  $r$  直接運送到港口  $s$  的  $h_{rs}$  倍，亦即  $Tr_{rs} \leq h_{rs}T_{rs}$ 。反之，若  $Tr_{rs} > h_{rs}T_{rs}$ ，則表示此貨載將不被運送，亦即  $Y_{rs} = 0$ 。

$$Tr_{rs} - h_{rs}T_{rs} - M(1 - Y_{rs}) \leq 0, \quad \forall rs \in D \quad (6)$$

6. 可及航段運送時間限制：確保可及航段的運送時間的計算與規劃航段相關之合理性，如式(7)、(8)及(9)所示。其中，式(7)表示  $Tr_{rs}$  是經由可及航段  $(r, s)$  中之一 walk 的運送時間。值得注意的是，為簡化貨櫃運送旅行時間之計算，茲假設貨櫃裝載與卸貨時間均為灣靠港口時間之一半，如此貨櫃在二港口間的旅行時間，等於二港口間的直達時間加上二灣靠港口時間之一半。式(8)表示可及航段  $(r, s)$  中第  $k$  個 walk 被選擇的必要條件，係基於此 walk 上所有節線皆包含於航線內，亦即其值為 1。式(9)表示航段  $(r, s)$  中最多一個 walk 被選擇運送其貨櫃需求。

$$Tr_{rs} = \sum_{k \in P^{rs}} \sum_{ij \in P_k^{rs}} (T_{ij} + \frac{Tb_i}{2} + \frac{Tb_j}{2}) \delta_{ij,k}^{rs} u_k^{rs}, \quad \forall rs \in A \quad (7)$$

$$u_k^{rs} \leq \prod_{ij \in P_k^{rs}} X_{ij}, \quad \forall k \in P^{rs}, \quad \forall rs \in A \quad (8)$$

$$Y_{rs} \leq \sum_{k \in P^{rs}} u_k^{rs} \leq 1, \quad \forall rs \in A \quad (9)$$

7. 週班限制：確保航線總航行時間加上總靠港時間必須為 7 天的整數倍數增減一天。如式 (10)及(11)所示，航線總航行時間加上總靠港時間 (即  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^n Tb_i \sum_{j=1}^n X_{ij}$ ) 需介於 7 天的整數倍數減一天 ( $7w-1$ ) 與 ( $7w+1$ ) 間。

$$7w-1 \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^n Tb_i \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^n Tb_i \sum_{j=1}^n X_{ij} \leq 7w+1 \quad (11)$$

8. 變數限制：

$$X_{ij} \in \{1, 0\}, \quad \forall ij \in A \quad (12)$$

$$Y_{rs} \in \{1, 0\}, \quad \forall rs \in D \quad (13)$$

$$Z_i \in \{1, 0\}, \quad \forall i \in N \quad (14)$$

$$Tr_{rs} \in R, \quad \forall rs \in D \quad (15)$$

$$w \in N \quad (16)$$

$$u_k^{rs} \in \{1, 0\}, \quad \forall k \in P^{rs}, \quad \forall rs \in D \quad (17)$$

綜合上述，本研究之數學規劃模式為一非線性混合整數規劃問題，在最佳化求解上，具 NP-Hard 特性。其複雜度 (包括變數量、限制條件數及限制式型態) 遠比一般 TSP 與 VRP 大，若以正確解法求解，例如窮舉法、切面法、分枝界限法、動態規劃法等<sup>[37]</sup>，則當問題規模變大時，求解時間可能呈指數型態快速增加，難以在有限的時間內求解大型問題。即使對小型問題，因含邏輯及複雜的非線性限制，如式(3)與式(8)，故仍難以一般數學規劃軟體求解。因此，在下一節我們將發展啟發解法，以期能有效的求解實際問題。

## 四、模式求解

類似以往許多求解 TSP 及 VRP 的方法，本研究採用綜合式啟發解法求解，包含起始解產生及起始解改善兩個階段。首先採用 Clarke 和 Wright<sup>[38]</sup> 的 savings 方法設計起始解法，再以 TA 與 GDA 為架構配合節點增刪、一對一節點交換法，發展尋優改善法，以求得近似最佳解。求解後，以 pick-up and delivery 的裝載觀念求算所需要的艙位數，再進行人工微調，調整參數以配合實務的運送。

### 4.1 起始解

在以往路線規劃問題上，由於限制式的增加使得求解變得複雜與困難，故許多方法因此孕育而生，其中 Clarke 和 Wright<sup>[38]</sup> 的 savings 方法（一般稱節省法）由於可彈性、快速處理複雜限制的問題，加上在小規模問題上求的解常接近最佳解，因此本研究採用 savings 觀念，配合問題特性，以求得可行解。本研究起始解法分成兩步驟，步驟一為節省值計算，步驟二以節省值為基礎將各航段連結成一航線。

#### 步驟一：節省值計算

Savings 的方法首先假設有一中心點（母港）及若干收受點（港口），而所有的收受點均只與中心點連結，並由中心點個別對所有收受點來回運送貨載。而計算節省值的目的乃希望藉由路徑的改變來減少由中心點到收受點個別往返的成本。如式(18)所示， $i$ 、 $j$  兩港連接的節省值為收受點  $i$  到中心點與中心點到  $j$  的成本加總，減去  $i$  到  $j$  的成本。

$$S_{i,j} = C_{i,0} + C_{0,j} - C_{i,j} \quad (18)$$

其中： $S_{i,j}$  表示  $i$ 、 $j$  兩港連接的節省值；

$C_{i,0}$  表示第 0 港到第  $i$  港的航行成本；

$C_{0,j}$  表示第 0 港到第  $j$  港的航行成本；

$C_{i,j}$  表示第  $i$  港到第  $j$  港間的航行成本。

值得注意的是，由於本研究並無實際中心點，故可隨機選取一點為中心點，或取實務上較重要的港口為中心點，或取不同港口為中心點測試，再選取最好的解。另外，由於起始解法旨在提供一初始解，因此本研究僅以航行成本計算節省值。至於如兩點間可能的利潤或其他指標，亦可為節省值計算之參考。

#### 步驟二：航段連結

當計算完所有任兩點間的節省值後，接著依據這些節省值將所有的航段予以連結成一航線。首先將擁有最大節省值的兩港口納入航線中，如 0-1-2-0，接著由港口 1, 2 為起點或迄點在未被納入的港口中尋找具有較大節省值的航段，並將該港口納入航線中，如

0-3-1-2-0，並反覆此尋找方式，直到所有港口均被納入。最後，再檢查航線是否滿足週班限制，若否，則調換最後二相鄰港口的順序，若仍未滿足，則持續往前調換二相鄰港口的順序，直到滿足週班限制。若已調換完卻仍未求得可行解，則從最後港口逐一剔除，直到滿足週班限制。此做法在下一節的測試上，皆可得到一可行的起始解。值得注意的是，此起始解法未考量灣靠港成本及可及航段利潤，有可能造成初始解的利潤值不佳，然此起始解法的主要目的在有效率的產生一初始解，以為之後的改善解法之基礎，其整體演算法之效果仍有賴後續的改善解設計（已經考量所有利潤與成本），以求得近似最佳解。

## 4.2 改善解法

本研究參考 Dueck 和 Scheuer<sup>[34]</sup>、Dueck<sup>[35]</sup>、韓復華與楊智凱<sup>[26]</sup>、韓復華等人<sup>[27]</sup>、Yan 和 Luo<sup>[39]</sup>、韓復華與林修竹<sup>[36]</sup> 等發展 TA 與 GDA 等改善解法。

對於 TA 之起始門檻值的給定方式，根據 Yan 和 Luo<sup>[39]</sup> 的研究比較後，本研究以起始目標值乘上一固定百分比以為起始門檻值，而此固定百分比可由測試決定之。至於 GDA 的起始水位設計，亦類似此方式。在 TA 之門檻值調降方法上，係以百分比等差遞減再乘上最新的目標值之方式，並設定收斂的門檻值為 0。至於 GDA 水位增加的方式，則亦以等差方式遞加，其增加幅度，則經測試決定。在 TA 中判斷門檻值內是否達到均衡的方式上，或判斷 GDA 在一水位內是否達到均衡的方式上，則參考 Dueck 和 Scheuer<sup>[34]</sup> 及 Yan 和 Luo<sup>[39]</sup> 的做法，採用固定回合數並配合上次改善後至目前未有改善的進展次數，來判斷是否達到門檻值或水位內均衡。最後在系統均衡（或演算法收斂）的標準設定上，TA 是以門檻使用完為基準，GDA 則以一連續未改善的水位數為基準，至於此次數則經測試決定。

在鄰近解核心搜尋策略上，本研究採用隨機選取方法，並分成三步驟，其交換方法如圖 3 所示。

步驟一：隨機決定刪除或增加一節點。

步驟二：隨機選取欲刪除或增加的節點，得到一組新的解。

步驟三：將上述新的解再以隨機方式對航線組合中的節點進行一對一節點交換，反覆進行  $N$  次，並從  $N$  次解中選取最佳鄰近解進行門檻值或水位測試，而  $N$  值由測試決定之。

其中一對一節點的交換方式，乃隨機選取航線中任兩節點並在可行解的前提之下進行交換，例如航線 1-2-3-4 中，節點 2 與 3 交換後，航線則變成 1-3-2-4。交換後，同時檢查其是否符合限制式，若不符合，則丟棄此組解，並重新進行交換。

值得一提的是，在核心交換方法中，韓復華等人<sup>[27]</sup> 採用三種基本模組，包含路線內 2-exchange 節線交換法、路線間一對一節點交換法、路線間一對二節點交換法。張淳智與王文貞<sup>[30]</sup> 亦併用插入法、路線間節點交換、路線內節點交換等三種基本模組。而在本研



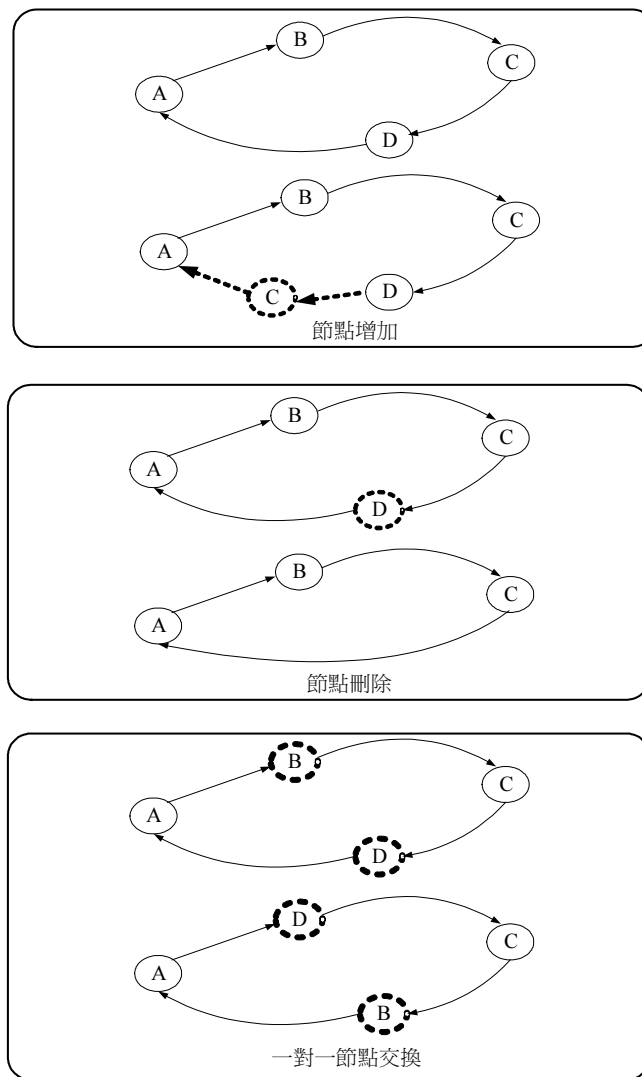


圖 3 核心求解圖

究中，由於沒有容量限制、也沒有中心點的設計，因此只會有一條路線。另外，當運算次數達到相當規模後，路線內節線交換與路線內節點交換往往會出現重複的結果，故本研究只採用路線內一對一節點交換，配合節點增刪法以為核心交換方法，而不考慮路線內節線交換法。至於，一對二節點或二對一節點或以上的交換方式，可在未來進一步研究與測試。

綜合上述，本研究發展的 TA 與 GDA 二方法如下：

#### (1) TA

步驟 1：給定起始條件，如計算次數 count 等，並計算起始目標值。

步驟 2：系統性隨機選取最佳的鄰近解進行交換。

2.1：以隨機方式決定增加或刪除一隨機節點，並隨機選取任兩節點予以交換  $N$  次，並在  $N$  次交換中選出目標值最佳的解以為最佳鄰近解。

2.2：計算最佳鄰近解之目標值。

步驟 3：計算新的進展，若在門檻值內，則接受新的鄰近解。

3.1：計算新舊目標值的差距，若為正值則接受，若為負值但差距在門檻值接受範圍內亦接受，否則則拒絕。

3.2：若接受新的進展，則更新目標值與目前最佳解。

步驟 4：若達到系統均衡，則降低門檻值，並令  $\text{count} = 0$ ；否則令  $\text{count} = \text{count} + 1$ ，並回到步驟 1。

步驟 5：若所有門檻值皆已測試，則結束運算；否則回到步驟 1 繼續求解。

## (2) GDA

步驟 1：給定起始條件，如水位調漲幅度  $D$  等，並計算起始目標值。

步驟 2：系統性隨機選取最佳的鄰近解進行交換。

2.1：以隨機方式決定增加或刪除一隨機節點，並隨機選取任兩節點予以交換  $N$  次，並在  $N$  次交換中選出目標值最佳的解以為最佳鄰近解。

2.2：計算最佳鄰近解之目標值。

步驟 3：檢視新的進展，若在水面之上（本研究為最大化問題），則接受新的鄰近解。

3.1：若接受新的進展，則更新目標值與目前最佳解。

步驟 4：若達到系統均衡，則調漲水面，並令  $\text{count} = 0$ ；否則令  $\text{count} = \text{count} + 1$ ，並回到步驟 1。

步驟 5：若系統已達收斂標準，則結束運算；否則回到步驟 1 繼續求解。

## 4.3 人工微調

在已知船舶容量之規劃上，實務上航行成本及靠港費用可依照該船舶大小以平均值輸入，但在本研究模式中，由於在本研究在模式中未考量船舶容量，因此在模式中成本的輸入無法有一確定值。在使用模式時，可先估算規劃航線的大約裝載量後，取一平均成本作為輸入，例如預估約載有 600TEU 到 800TEU 的貨物，則可以 700TEU 船舶的各項相關成本輸入。

在求得目標值後，本研究再依照 pick-up and delivery 問題中裝貨及卸貨的計算觀念，依靠港次序逐一計算各港的離港量（進港時裝載量－該港總卸貨量＋該港總裝貨量），並擇

一最大值以為船舶所需最大容量。在模式求解完後，其船舶的容量可能不合原先初始的成本輸入值，例如原以 700TEU 為成本輸入，但最後求得航線所需之容量為 800TEU，則此時成本可能低估。為解決此問題，本模式利用人工微調方式將成本調整到相對運送 800TEU 的成本值，將總目標值扣除額外多用的艙位成本，以得真正的利潤值。值得注意的是，使用上，本研究模式可重複修正成本並執行，直到成本合於規劃航線，最後再做適當的微調。另外，在理論上，此船舶容量與成本的關係函數亦可代入模式內一起求解。然而，此函數可能為一非線性函數，且欲納入各航段船舶裝載量之變數以求船舶容量的關係式，將可能使本模式變成一複雜的非線性規劃問題，其求解的困難度預期將大幅增加，應可為未來繼續研究的方向。

## 五、範例測試

為了測試本研究所建立的航線規劃模式與演算法，本研究以國內 A 海運公司的亞洲區間航線規劃資料為例，進行測試與分析。

### 5.1 資料分析

由於業務機密緣故，本研究無法取得所有模式所需之詳細數據，因此對資料遺漏部分依實務運作予以合理的假設與推估，以為本研究輸入之資料。此測試中所使用的資料包括航線、成本、起迄貨載量及收入、時間等資料，以下分別說明之。

#### 5.1.1 航線資料

本研究比較採用之航線為 A 公司當時在規劃過程中之初步航線，其做法如實務上常採用之人工經驗法，此航線靠港依序為：上海—釜山—寧波—香港—新加坡—巴生港—杜拜—克拉蚩—可倫坡—檳城—巴生港—新加坡—香港—上海，共十三個靠港，其中三個港口灣靠兩次。此航線使用七艘船舶、49 天航行時間以維持週班服務。值得一提的是，此航線係 A 海運公司在原航線規劃上，係以自有船舶方式規劃，故可與本研究模式與解法初步比較。本研究範例將依據 A 公司的規劃案例，設計相同情境，作一研究分析。

#### 5.1.2 成本資料

本模式根據各港口間櫃流量，預計將有 700TEU 的貨載量，主要成本項目有航行成本及靠港成本，此兩成本均以 700TEU 估算。航行成本即為船舶航行於各航段的單位成本乘上航行時間單位，而單位成本含單位時間船租、營業管理費用及單位時間所需燃料費用。靠港成本為灣靠港口所需的費用，實務上各港口的灣靠成本均依照船舶大小噸位、拖船使用數量、時間、及進出港口時間等因素收取不同的費用。另外本研究額外艙租成本以每 TEU USD450 元估算。值得注意的是，此等成本的設計與 A 海運公司的成本設計方式相同。此

等成本的數值如表 1、表 2 所示。

表 1 各港口灣靠費用

單位：美元

港口	上海	釜山	寧波	香港	新加坡	巴生港	杜拜	克拉蚩	可倫坡	檳城
費用	5940	3188	4187	2767	2717	1166	1497	11197	2361	1166

表 2 各航段航行成本（含船舶、業管、燃油費用）

單位：美元

起／迄	上海	釜山	寧波	香港	新加坡	巴生港	杜拜	克拉蚩	可倫坡	檳城
上 海		24684	6171	30855	86394	92565	160446	148104	123420	98736
釜 山	24684		30855	55539	111078	117249	185130	172788	148104	123420
寧 波	6171	30855		24684	80223	86394	154275	141933	117249	92565
香 港	30855	55539	24684		55539	61710	129591	117249	92565	67881
新加坡	86394	111078	80223	55539		6171	74052	61710	37026	12342
巴生港	92565	117249	86394	61710	6171		67881	55539	30855	6171
杜 拜	123420	148104	117249	92565	37026	30855		12342	37026	61710
克拉蚩	148104	172788	141933	117249	61710	55539	12342		24684	49368
可倫坡	123420	148104	117249	92565	37026	30855	37026	24684		24684
檳 城	98736	123420	92565	67881	12342	6171	61710	49368	24684	

### 5.1.3 起迄貨載量及收入資料

本研究對於起迄點貨載量資料比照該規劃案之數據以為模式輸入資料，對於未能取得的部分航段貨載量，本研究依照該航段實際發生的數量或參考該公司其他航線的貨載量作一估算。至於各起迄點（可及航段）之實際收入為該段的貨載收入減去裝卸費用及給付代理行的佣金支出。各可及航段之起迄需求與淨收入資料如表 3、表 4 所示。

### 5.1.4 時間資料

航行時間因受氣候、靠泊船席、船速影響而會有些差異，很難正確估算每一航段的實際航行時間，因此本研究對於船舶航行時間的估算係以 12 小時為一航行時間單位，並將點對點實際航行時間以四捨五入方式簡單推算為本模式的時間單位。各航段航行時間如表 5 所示。另外，為簡化模式測試，本研究假設各可及航段的運送時間皆須在單向直接運送時間的 2 倍內。

實際靠港時間則依據裝卸貨載多寡及起重機的數量而定，若裝卸的貨載多，則靠泊的時間自然得增加，同理，若碼頭公司能提供兩、三部起重機，則裝卸時間將縮短為一半甚至三分之一。但各航次實際裝載量無法在規劃時事先預知，因此實務上對於靠港時間的安

表 3 各可及航段預估貨載量

單位：TEU/per week

起／迄	上海	釜山	寧波	香港	新加坡	巴生港	杜拜	克拉蚩	可倫坡	檳城
上 海		20	0	94	55	18	95	25	15	0
釜 山	60		25	63	52	120	25	25	0	0
寧 波	0	10		69	24	15	55	15	51	0
香 港	88	30	51		55	80	70	40	20	5
新加坡	61	23	45	39		20	60	100	20	30
巴生港	1	34	2	19	35		50	20	0	0
杜 拜	16	33	0	7	2	36		61	21	33
克拉蚩	2	33	2	63	43	38	0		82	10
可倫坡	20	0	2	65	12	28	0	31		23
檳 城	20	10	2	50	25	1	0	0	0	

表 4 各可及航段每 TEU 淨收入 (=運費－裝卸－佣金費用)

單位：美元

起／迄	上海	釜山	寧波	香港	新加坡	巴生港	杜拜	克拉蚩	可倫坡	檳城
上 海		80	0	213	288	379	608	612	612	0
釜 山	80		80	150	200	200	727	644	0	0
寧 波	0	80		224	346	579	647	817	817	0
香 港	69	150	146		434	409	642	621	621	409
新加坡	101	200	242	434		250	595	357	357	250
巴生港	248	200	283	409	85		473	436	0	0
杜 拜	216	119	0	642	139	111		102	21	159
克拉蚩	131	109	156	203	68	159	0		60	146
可倫坡	116	0	153	232	356	101	0	60		104
檳 城	355	200	93	250	13	6	0	0	0	

表 5 各航段航行時間

單位：12 小時

起／迄	上海	釜山	寧波	香港	新加坡	巴生港	杜拜	克拉蚩	可倫坡	檳城
上 海		4	1	5	14	15	26	24	20	16
釜 山	4		5	9	18	19	30	28	24	20
寧 波	1	5		4	13	14	25	23	19	15
香 港	5	9	4		9	10	21	19	15	11
新加坡	14	18	13	9		1	12	10	6	2
巴生港	15	19	14	10	1		11	9	5	1
杜 拜	20	24	19	15	6	5		2	6	10
克拉蚩	24	28	23	19	10	9	2		4	8
可倫坡	20	24	19	15	6	5	6	4		4
檳 城	16	20	15	11	2	1	10	8	4	

排也是採取大概的時間估算，在實際營運時，若靠港時間不足，則可以在裝卸後加快航速以及時趕至下一港口，反之，則在裝卸離港後，以減速或在下一靠港的外港停留，等待時間到再進港，實務運作上相當彈性。而本研究為簡化實務的複雜狀況，係以 12 小時（即為一航行時間單位）為每港口的靠泊時間，航行、靠泊時間資料如表 6 所示。

表 6 各港口靠泊時間

單位：12 小時

港口	上海	釜山	寧波	香港	新加坡	巴生港	杜拜	克拉蚩	可倫坡	檳城
港泊時間	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

## 5.2 模式測試與結果分析

本研究以 C 程式語言撰寫演算法，利用個人電腦 (PIII 500MHz, 128MB RAM) 執行運算。在本節中的測試分為二部分，第一部分針對 A 海運公司中東航線評估案例之資料作一航線規劃之測試分析，並與 A 海運公司原規劃之亞洲航線作一初步比較；第二部分則進一步以較大的網路，測試演算法的運算績效。

### 5.2.1 模式測試與初步評估

在原始參數設定上，經過個別單一敏感度測試與交叉測試後，本系統選定較佳的參數值以為測試之參數值（可參考 [40]）。其中，TA 的參數值：(1) 門檻值比例 40%，並以 1% 逐次遞減直到 0 為止，(2) 門檻內均衡次數為 200 次，(3) 鄰近最佳解搜尋次數 (N 值) 為 80 次。GDA 的參數值：(1) 起始水面 5000，逐次水位調漲 10000，(2) 水位內均衡次數為 500 次，(3) 鄰近最佳解搜尋次數為 80 次，(4) 系統均衡（收斂）條件：連續未改善的水位次數為 10 次。表 7、表 8 分別為 TA 及 GDA 的求解結果，其中發現 GDA 的求解時間雖較 TA 長，但目標值亦較 TA 為佳，而 GDA 的灣靠的港口數亦較 TA 多一個。

表 7 TA 求解結果表

運算時間	運算回合	灣靠港口	目標值	航行天數	船舶容量	船舶數
13 秒	137 次	10 港口	271,970	28 天	699TEU	4
航線路徑						
寧波—上海—香港—新加坡—巴生港—可倫坡—克拉蚩—杜拜—新加坡—香港						

表 8 GDA 求解結果表

運算時間	運算回合	灣靠港口	目標值	航行天數	船舶容量	船舶數
31 秒	334 次	11 港口	292,402	28.5 天	764TEU	4
航線路徑						
克拉蚩—杜拜—巴生港—新加坡—香港—上海—寧波—香港—新加坡—巴生港—可倫坡						

首先以 A 海運公司的航線套用本研究之貨量、成本、收入等數值，計算 A 海運公司的航線利潤為 USD287,971、所需容量為 835TEU。由於本研究的成本輸入以 700 TEU 艙位成本為基準，故此航線的艙位數超出輸入成本之容量，故依據 4.3 節之微調方式，即超過 700TEU 部分，以每 TEU USD450 元攤提成本，重新調整後，A 海運公司的航線利潤為 USD227,221。

TA 及 GDA 求算結果如表 9 及表 10 所示。其中，TA 演算法之最大利潤為 USD271,970、船舶容量為 699TEU，因求解所得之所需艙位數接近輸入成本之容量，故不須作微調。而 GDA 演算法之最大利潤為 USD292,402，因其艙位超過 700TEU，故微調後其利潤為 USD263,602，略低於以 TA 所求得的利潤。

本研究TA演算法所得的利潤為USD271,970，較A海運公司內部規劃評估之USD227,221每航次多出USD44,749，改善幅度高達16.69%。GDA演算法所得利潤為USD263,602，改善幅度亦高達15.77%。在航程上，TA演算法所求出的航線在總航行天數為28天、灣靠港口數為10個；GDA演算法求解之航線航行時間28.5天、灣靠港口為11個，均遠少於該公司所規劃航線之49天與13個靠港，顯示該公司規劃的航線存在部分不具經濟效益的航段。其中，釜山與檳城兩港因為若加入將導致利潤下降，故在本研究規劃的航線中被剔除，至於其他港口，則除了靠港順序略有不同外，大致上差不多。此外，本研究模式只需四艘船即可營運，而該規劃案所需船舶數為七艘，在經營管理上也較為複雜與不便。

表 9 規劃結果比較表

方法別	灣靠港口數	淨利潤	航行天數	船舶容量	船舶數
TA	10 港	USD271,970	28 天	699TEU	4
GDA	11 港	USD263,602	28.5 天	764TEU	4
A 海運	13 港	USD227,221	49 天	835TEU	7

表 10 航線路徑比較表

方法別	航線路徑
TA	寧波－上海－香港－新加坡－巴生港－可倫坡－克拉蚩－杜拜－新加坡－香港
GDA	克拉蚩－杜拜－巴生港－新加坡－香港－上海－寧波－香港－新加坡－巴生港－可倫坡
A 海運	上海－釜山－寧波－香港－新加坡－巴生港－杜拜－克拉蚩－可倫坡－檳城－巴生港－新加坡－香港

本研究模式與演算法可提供為一有效的參考工具，以幫助航商規劃本身最佳之航線，以獲取更大的利潤等參考用。從此測試亦發現本研究之數學模式與方法論較實務的人工規劃為佳，應具實際應用之潛力。

### 5.2.2 較大型網路測試

為進一步評估二演算法的績效，本節針對較大的路網測試。本研究以隨機方式，產生  $15 \times 15$  及  $20 \times 20$  兩組路網，並與上節之  $10 \times 10$  路網作一比較，結果如表 11 所示。從表 11 中發現，對各路網的求解，二演算法的求解時間皆可在合理的時間內完成，顯然較人工運算方式有效。其中，GDA 演算法的求解時間較 TA 長，在求解的目標值上，對  $10 \times 10$  及  $15 \times 15$  兩組路網的求解目標值上，GDA 優於 TA，然而在  $20 \times 20$  路網的求解上，GDA 則較 TA 差。由此初步測試，針對本研究的問題，難以判斷 GDA 與 TA 間的求解績效優劣。雖然此等比較可在未來進一步的測試，但在實務的應用上，使用者可同時利用此二演算法(或包括其他演算法)同時求解，並選擇較佳的結果，以為決策之參考。

表 11 不同路網規模測試比較表

路 網	演算法	計算時間	運算回合	灣靠港口	目標值
$10 \times 10$	TA	13 秒	137 次	10	271,970
	GDA	31 秒	334 次	11	292,402
$15 \times 15$	TA	806 秒	2173 次	49	513,103
	GDA	1304 秒	4704 次	84	528,756
$20 \times 20$	TA	791 秒	3528 次	57	528,149
	GDA	1624 秒	7765 次	50	481,496

最後，值得一提的是，上述測試僅為初步測試本研究模式與解法的績效，雖效果頗佳，然而在未來的使用上，業者仍應進行多次測試，以了解模式的特性與使用限制。

## 六、結論與建議

為輔助航商在競爭市場之下規劃航線，本研究以不預設船舶容量之航線規劃為探討主題，考量實務限制，在預測需求量及已知各項成本下，以航商獲利最大為目標，建立最適航線規劃之數學模式。並綜合 savings 起始解法、節點增減及交換方法、門檻值接受法及大洪水法的演算架構，發展二啟發解法，以求解模式，供航商在規劃航線時的參考依據。

本研究以國內 A 航商之規劃評估案例作一實例分析，初步測試模式及二演算法的實用績效，發現求解所需時間約為 15 秒至 60 秒左右，若將部分參數放大，亦能在 120 秒內完成，與現況人工經驗規劃的方法與結果上，初步效果甚佳，值得為學術界與實務界之參考。另外，在較大型問題的求解績效上，GDA 較 TA 費時，但在求解精確度上，二者互有優劣，難以判斷何者較佳，此仍待進一步測試，以比較二者之實用績效。

最後，本研究係假設無船舶容量之限制。然而，若對高需求的航線，則有可能發生貨載量比船舶容量還大，無船可用的窘境。在本研究中雖假設可同時以兩艘船舶運送，但更



好的作法則建議修正本研究模式，考慮同時規劃兩條航線，此等模式修正可為未來研究的方向。另外，考量運送成本與運送量的非線性關係並代入模式內，可能將形成一複雜的非線性規劃問題，亦可為未來繼續研究的方向。最後，本研究模式及演算法在實用前，宜經多次測試或進行敏感度分析，以了解模式與演算法的特性及使用的限制，而此等測試均可為未來研究的方向。

## 參考文獻

1. Lane, D. E., Heaver, T. D., and Uyeno, D., "Planning and Scheduling for Efficiency in Liner Shipping", *Maritime Policy and Management*, Vol. 14, 1987, pp. 109-125.
2. Rana, K. and Vickson, R. G., "A Model and Solution Algorithm for Optimal Routing of a Time-chartered Containership", *Transportation Science*, Vol. 22, 1988, pp. 83-95.
3. Perakis, A. N. and Jaramillo, D. I., "Fleet Deployment Optimization for Liner Shipping, Part 1: Background, Problem Formulation and Solution Approaches", *Maritime Policy and Management*, Vol. 18, 1991, pp. 83-200.
4. Ronen, D., "Ship Scheduling: The Last Decade", *European Journal of Operational Research*, Vol. 71, 1993, pp. 325-333.
5. Cho, S. C. and Perakis, A. N., "Optimal Liner Fleet Routing Strategies", *Maritime Policy and Management*, Vol. 23, 1996, pp. 249-259.
6. Powell, B. and Perakis, A. N., "Fleet Deployment Optimization for Liner Shipping: An Integer Programming Model", *Maritime Policy and Management*, Vol. 24, 1997, pp. 183-192.
7. Rana, K. and Vickson, R. G., "Routing Container Ships Using Lagrangian Relaxation and Decomposition", *Transportation Science*, Vol. 25, 1991, pp. 201-214.
8. 彭信坤，「貨櫃船隊船型配置及航線選擇方案之研究」，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國七十一年。
9. 董孝行，「貨櫃船最適船型之研究」，*運輸計劃季刊*，第十五卷第三期，民國七十五年，頁 435-459。
10. 黃望修，「貨櫃運輸船隊長程航次逐港灣靠與穿梭地區中心灣靠營運方式之財務效益比較分析」，國立交通大學管理科學研究所碩士論文，民國七十九年。
11. 張永昌、陳春益，「選擇定期貨櫃航線泊靠港之探討」，中華民國運輸學會第九屆論文研討會，民國八十三年，頁 309-316。
12. 許志成，「定期貨櫃船舶排程計劃研究」，國立中央大學土木研究所碩士論文，民國八十七年。
13. 陳弘輝，「定期貨櫃船繞航模式之比較」，國立海洋大學航運管理研究所碩士論文，民國八十八年。
14. 劉中平，「定期貨櫃船之船隊部署」，國立海洋大學航運技術研究所碩士論文，民國八十

八年。

15. 盧華安、徐育彰，「定期貨櫃航線選擇與船隊部署之研究」，**運輸計劃季刊**，第三十卷第三期，民國九十年，頁 577-602。
16. 郭塗城、朱經武，「定期船停靠港口模式之探討」，中華民國第五屆運輸網路研討會，民國八十九年，頁 317-326。
17. 盧華安，「定期貨櫃航線設計之研究」，中華民國第五屆運輸網路研討會，民國八十九年，頁 327-335。
18. Golden, B. L. and Ball, M., "Routing and Scheduling of Vehicle and Crew: The State of Art", *Computer and Operations Research*, Vol. 10, 1983, pp. 63-211.
19. Gillett, E. B. and Johnson, G. J., "Multi-terminal Vehicle-dispatch Algorithm", *OMEGA*, Vol. 4, 1976, pp. 711-718.
20. Bodin, L. D. and Golden, B., "Classification in Vehicle Routing and Scheduling", *Networks*, Vol. 11, 1981, pp. 97-108.
21. Fisher, M. L. and Jaikumar, R., "A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing", *Networks*, Vol. 11, 1981, pp. 109-124.
22. Bott, K. and Ballou, R. H., "Research Perspectives in Vehicle Routing and Scheduling", *Transportation Research*, Vol. 20, 1986, pp. 239-243.
23. Bodin, L. D., "Twenty Years of Routing and Scheduling", *Operations Research*, Vol. 38, 1990, pp. 571-579.
24. Savelsbergh, M. W. P., "The General Pickup and Delivery Problem", *Transportation Science*, Vol. 29, 1995, pp. 17-29.
25. 李育欣，「完全性路網 TSP 問題啟發式解法之研究—兼論類神經網路解法之應用」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國七十九年。
26. 韓復華、楊智凱，「門檻接受法在 TSP 問題上之應用」，**運輸計劃季刊**，第二十五卷第二期，民國八十五年，頁 163-188。
27. 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**，第二十六卷第二期，民國八十六年，頁 253-280。
28. 陳春益、林正章、高玉明，「路線貨運業貨物排程模式之研究」，**運輸計劃季刊**，第二十六卷第二期，民國八十六年，頁 327-352。
29. 林正章、劉志遠，「路線貨運業貨物整體運輸網路設計之研究」，**運輸計劃季刊**，第二十八卷第四期，民國八十八年，頁 535-564。
30. 張淳智、王文貞，「圖書配送車輛排程問題之研究」，中華民國運輸學會第十屆論文研討會，民國八十七年，頁 975-984。
31. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., and Vecchi, M. P., "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, Vol. 220, 1983, pp. 671-680.
32. Robuste, F., Daganzo, C. F., and Souleyrette, R., "Implementing Vehicle Routing Models",

- Transportation Science*, Vol. 24, 1990, pp. 263-286.
33. Garey, M. R. and Johnson, D. S., *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-completeness*, W.H. Freeman & Company, San Francisco, 1979.
  34. Dueck, G. and Scheuer, T., "Threshold Accepting: A General Purpose Optimization Algorithm Appearing Superior to Simulated Annealing", *Journal of Computational Physics*, Vol. 90, 1990, pp. 161-175.
  35. Dueck, G., "New Optimization Heuristics: The Great Deluge Algorithm and the Record-to-Record Travel", *Journal of Computational Physics*, Vol. 104, 1993, pp. 86-92.
  36. 韓復華、林修竹，「TA 與 GDA 巨集啟發式法在 VRPTW 問題上之應用」，中華民國第四屆運輸網路研討會，民國八十八年，頁 83-92。
  37. Bradley, S. P., Hax, A. C., and Magnanti, T. L., *Applied Mathematical Programming*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1977.
  38. Clarke, G. and Wright, J. W., "Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points", *Operations Research*, Vol. 11, 1964, pp. 568-581.
  39. Yan, S. and Luo, S. C., "Probabilistic Local Search for Concave Cost Transportation Network Problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 117, 1998, pp. 511-521.
  40. 藍世宗，「定期貨櫃船舶航線規劃之研究」，國立中央大學土木工程學系碩士論文，民國九十年。

