

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

多溫共配與指定點接駁之車輛路線排程模式研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-216-014-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：中華大學運輸科技與物流管理學系

計畫主持人：卓裕仁

共同主持人：韓復華

計畫參與人員：許雅雯，張耘翠

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 9 月 18 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

多溫共配與指定點接駁之車輛路線排程模式研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-216-014-

執行期間： 94年 8月 1日至 95年 7月 31日

計畫主持人：卓裕仁

共同主持人：韓復華

計畫參與人員：張耘翠、許雅雯

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：中華大學運輸科技與物流管理系

中 華 民 國 九 十 五 年 九 月 三 日

摘要

近年來國人對低溫（冷藏或冷凍）食品的需求日增，使得低溫物流配送的效率與品質備受重視。由於低溫食品屬於具有時效性的易腐性商品，因此對於配送時間及溫度保持有很高的要求。工研院能資所研發的抽換式蓄冷保溫櫃具有達成多溫共配的效果，是一項頗具應用潛力的新技術。此外，由於都市地區土地價格偏高，大多數的物流與貨運業者皆將其營業據點或場站設置於市郊；此舉可能造成配送距離與次數的增加。為減少車輛往返場站的次數與距離，已有某些業者利用大型卡車來進行中途的接駁。本研究即針對上述低溫物流與時效性商品之配送特性，發展出兩種全新型態的車輛路線模式：「多溫共配車輛路線問題 (Multi-temperature Fleet Vehicle Routing Problem, MFVRP)」與「指定點接駁車輛路線問題 (Linehaul-Feeder Vehicle Routing Problem, LFVRP)」，以期能提升實務應用的效率，降低營運成本。

在多溫共配車輛路線問題(MFVRP)方面：本研究針對：「機械式冷凍車廂區隔(MFVRP1)」與「抽換式蓄冷保溫箱(MFVRP2)」兩種多溫共配系統進行車輛路線模式之構建與例題測試分析。本研究選擇 Solomon 的 VRPTW 以及 Taillard 等人的 VRP 國際標竿題庫為基礎，主要採用其場站座標、顧客點座標、顧客需求等資料，搭配實務車輛資料：車輛成本、車輛容量等，產生四種情境，共 168 個 MFVRP 例題，然後設計啟發式解法以測試兩種多溫共配模式之解題績效，並對其整體配送成本進行比較與分析。經由撰寫 C# 電腦程式執行測試，結果顯示：第一階段測試，起始解經過鄰域搜尋模組改善後，平均改善幅度可達：路線成本 72%、車輛成本 50%。第二階段測試得知，在不同情境的比較下，包括在需求平均分佈(情境一、情境二)或是在需求依比例分布(情境三、情境四)的時候，無論於車輛成本或路線成本方面，MFVRP2 皆明顯優於 MFVRP1，顯示蓄冷保溫箱之應用確實可以降低車輛成本與路線成本。因此整體而言，MFVRP2 應用於全溫層保鮮宅配服務非常具有優勢與潛力

在指定點接駁車輛路線問題(LFVRP)方面：本研究所設計的啟發式解法主要包含三個步驟：首先，利用八種選擇指定點方法從所有顧客點中找出最佳位置做為指定點；然後利用最近鄰點法分別將兩群顧客插入至場站與指定點之間，以形成第一類與第二類的路線；最後，再使用 2-Opt、Or-Opt、路線間節點交換等鄰域搜尋法進行路線改善。本研究共蒐集了 60 個傳統車輛路線問題的國際標竿例題做為 LFVRP 的測試例題，並依其場站所在位置與顧客點分佈型態分成四組，並以 C# 語言撰寫電腦程式進行解題績效分析。經與各標竿例題的文獻已知最佳解相比，結果發現 LFVRP 在場站位置偏遠的兩組例題表現優於另兩組場站位置居中型的例題，顯示接駁式的配送確實較適合於場站位置偏遠的情形；並將所有測試例題與八種選擇指定點方法進行分析，可得知 SF2 這種選擇指定點方法較不適合使用在各類型的測試例題。

關鍵字：多溫共配車輛路線問題、指定點接駁車輛路線問題、啟發式解法、最近鄰點法。

Abstract

Recently, the demand of the cold logistics/chain and the multi-temperature distribution has rapidly grown. Carriers must deliver goods with different temperate, such as hot food (over 60°C), normal temperature good ($18\sim 25^{\circ}\text{C}$), refrigeration food ($-2\sim 7^{\circ}\text{C}$) and frozen food (under -18°C), to customers. How to distribute multi-temperate goods at the same time and with lower cost becomes an interesting research issue. Moreover, because of the high cost of megalopolis land, most of the distribution centers (DC) located at the suburbs area. This far-away location may cause an increase in the number of round-trips and in the traveling distance. In order to reduce the vehicles' round-trip and traveling distance, recently some carriers have developed a new type of operation that dispatches a heavy truck as the movable depot to serve other trucks for the second loading and delivery.

We consider two special operational situations: first, carriers utilize the engine-driven frozen truck divided into three parts to hold different temperate goods, and second, carriers utilize the multi-temperature storage box to hold different temperate goods in a general truck. We transfer the previous situations into two Multi-temperature Fleet Vehicle Routing Problems, MFVRP1 and MFVRP2. Then, we develop a simple heuristic algorithm to solve these MFVRPs. This heuristic algorithm firstly applies a modified Farthest-start Nearest Neighbor (FNN) method to construct an initial solution, and then improves the initial solution by sequentially executing 2_opt, Or_opt, 1_0, and 1_1 neighborhood searches. A bank of 168 instances created by modifying the Solomon's VRPTW benchmark instances, Taillard's VRP benchmark instances and Homberger's VRP benchmark instances is used to compare the performance of MFVRP1 and MFVRP2. Furthermore, real costs and capacities of different size of trucks are set for these test instances. Experimental results present that, in average, MFVRP2 performs well than MFVRP1 in both of fleet size and traveling distance. Such a finding maybe offers an alternative to improve the performance of practical multi-temperate distribution.

After the MFVRPs, we propose another special vehicle routing model, named as the Linehaul-Feeder Vehicle Routing Problem (LFVRP), and also design a simple heuristic to solve the LFVRP. This heuristic includes following three steps: selecting a specific customer as the movable depot, constructing routes to serve customers between DC and the movable depot, and improving routes by neighborhood search heuristics. In the first step, we propose eight rules to select movable depot; in the second step, we utilize the Nearest Neighbor (NN) method to construct the initial routes; in the final step, we used three neighborhood search methods: 2-Opt, Or-Opt and Inter-route node exchange to improve routes' distance. In order to verify the feasibility and suitability of the LFVRP model, we generate a bank of 60 LFVRP instances that are modified from classical VRP benchmark instances, and divided them into four groups according to the position of DC and the geographic distribution of customers. Then, we use the C# computer language to coding the above heuristic method and use the LFVRP instances to test its performance. Through comparing with the best-found solutions, we found that LFVRP seems to be suitable for the instances which DC is located on side and customers are clustered.

Keywords: Multi-temperature Fleet Vehicle Routing Problem, Linehaul-Feeder Vehicle Routing Problem, Heuristics, Nearest Neighbor.

一、研究背景與目的

近年來，隨著民眾對飲食健康性、方便性、經濟性等需求的改變和外出人口的增加，對於鮮食、冷藏（0~5°C）、冷凍（-18~-25°C）等食品的需求量亦大幅提昇；另一方面，知名的連鎖流通體系（便利商店與量販店），如 7-11、全家、萊爾富、大潤發及家樂福等業者，也積極拓展低溫及鮮食市場以搶奪商機。有鑒於低溫物流（Gold Logistics）或稱低溫鏈（Cold Chain）日漸受到重視，所謂的「全溫層保鮮配送服務系統」也因應而生。因此對國內的物流服務業者而言，不僅配送低溫食品的需求量將與日俱增，配送的物品更具備多樣少量且有不同溫層的特性。

目前國內的全溫層保鮮配送服務系統共有四種配送方式：(1) 傳統多車配送，即常溫物品用一般車配送，低溫食品用冷藏車及冷凍車配送，此種配送系統無法將不同溫度的物品共同配送；(2) 機電共用式保冷櫃配送，係將電冰箱式保冷櫃裝載於車上，再利用剩餘空間放置常溫物品達到共同配送；(3) 機械式冷凍車廂區隔配送，係將車廂分割常溫、冷藏、冷凍共三個區域，可以共同配送不同溫度的物品；以及(4) 抽換式蓄冷保溫箱配送，係利用可抽換的蓄冷器放入保溫櫃中，再將此保溫櫃放入常溫配送車輛車廂，以達到不同溫層物品的共同配送。

除此之外，由於低溫物流配送多具有很明顯的時效性，對配送時間的要求特別嚴格。然而物流業者因投入資本有限，往往只有一個配送中心，僅能利用車隊來擴大其服務範圍。雖然此方式可以減少設立配送中心的固定成本，卻可能造成車輛因貨物量的多寡而增加來回配送中心及顧客點的次數，導致時間的浪費以及燃料費用的增加。為了減少車輛來回配送中心的次數，近年來已有某一國際快遞公司利用大型卡車進行接駁的例子。以大型卡車為一中心點，當小貨車與大型卡車從配送中心出發，在小貨車將第一趟顧客點的需求量配送完後，不須再回到配送中心進行補貨，只需至大型卡車指定停放處進行補貨，即可進行配送的服務，如此一來就可以減少來回場站及顧客點的時間。

有鑑於上述低溫物流配送之發展，本研究之目的即分別針對「多溫共配 (Multi-temperature Fleet)」與「指定點接駁 (Linehaul-Feeder)」兩種特殊的物流配送方式進行研究，並提出其車輛路線排程模式，進而發展適當的啟發式求解方法，最後再透過實驗設計與測試例題進行數值分析，以驗證上述兩種新模式的績效與可行性。本計畫所研究的「多溫共配」與「指定點接駁」等車輛路線排程模式，皆屬於國內外文獻未曾探討過的新課題，是一種創新的觀念與配送方式。

本研究主要內容包括：(1) 蒐集並回顧有關 MFVRP 與 LFVRP 相關的文獻，以了解問題之求解特性與關鍵；(2) 與實務業者訪談以取得實際的成本資料；(3) 針對多溫共配與指定點接駁之配送特性進行分析，然後再分別提出「多溫共配車輛路線問題」及「指定點接駁車輛路線問題」之定義與數學模式；(4) 採用國際標準例題與實務訪談所得之資料，產生 MFVRP 與 LFVRP 之測試例題題庫；(5) 啟發式演算法設計：以改良的最近鄰點法 (Nearest Neighbor) 來設計起始解建構模組，再使用交換型改善法 (Exchange-based Heuristics) 來設計鄰域搜尋模組；(6) 以 C# 語言撰寫啟發式解法之電腦程式，並進行例題測試，以瞭解該巨集啟發式方法應用於 MFVRP 與 LFVRP 的解題特性與執行績效。

二、文獻探討

在多溫共配的文獻回顧方面，表 1 彙整了國內外與低溫物流配送相關之文獻與研究。從表 1 中可發現先前的研究者大多針對以低溫食品配送模式為主要研究議題，針對低溫食品有保存期限的問題以及為滿足顧客需求而將低溫食品的配送模式認定是「時窗限制車輛路線問題(VRPTW)」。但是「時窗限制車輛路線問題」中的時窗限制是指車輛到達與離開必須在顧客要求之時間上下界之內。而如何維持低溫食品配送的品質是物流公司本身的責任，而時間窗卻必須遵從顧客要求，兩者並無絕對關係。故在文獻探討中，可以發現在國外學者研究低溫物流配送相關問題時，並無加入「時窗限制」，因而此理論可得證。

表 1、低溫物流配送相關文獻彙整

| 時間 | 作者 | 問題定義 | 限制條件 | 使用方法 |
|------|-------------------------|--------|-----------------------------------|------------|
| 1998 | 曾敏雅 | DVRP | ❖ 車容量限制 ❖ 總時間限制 | ❖ 二分搜尋法 |
| 2000 | 王保元 | VRPTW | ❖ 車容量限制 ❖ 時間窗限制 | ❖ 基因演算法 |
| 2001 | 王耿彬 | VRPTW | ❖ 車容量限制 ❖ 時間窗限制 | ❖ 基因演算法 |
| 2001 | Tarantitis & Kiranoudis | HFFVRP | ❖ 車容量限制 ❖ 車輛數限制 | ❖ BATA 演算法 |
| 2002 | Tarantitis & Kiranoudis | OMDVRP | ❖ 車容量限制 ❖ 車輛數不限 | ❖ LBTA 演算法 |
| 2003 | 洪聖峰 | SVRPTW | ❖ 車容量限制 ❖ 時間窗限制 ❖ 旅行時間的依時特性 | ❖ 最近鄰點法 |
| 2004 | 李長駿 | MSBVRP | ❖ 車容量限制 | ❖ 改良式節省法 |

資料來源：本研究整理

此外，從上述文獻探討中亦可得知，多溫共配車輛路線問題(MFVRP)屬於台灣獨有之研究課題。而在國內研究中除李長駿(2004)將多溫共配車輛路線問題(MFVRP)特定獨立出來定義為 MSBVRP 之外，國內外文獻針對多溫共配車輛路線問題(MFVRP)仍未深入探討。李長駿(2004)以抽換式蓄冷保溫櫃(Multi-temperature Storage Box)應用於全溫層保鮮宅配服務的多溫共配系統為研究對象，假設配送時將物品放入蓄冷保溫櫃，再將保溫櫃負載於車廂內來配送物品，以取代冷凍車在低溫物流配送。其將多溫共配車輛路線問題定義為 Multi-temperature Storage Box Vehicle Routing Problem(MSBVRP)，採用改良式節省法來產生起始解，然後以 2-OPT 節線交換、1-0 節點交換、1-1 節點交換及 2-1 節點交換來改善起始解。

在指定點接駁的相關文獻回顧方面，類似的問題型態有：「接駁式車輛路線問題」與「卡車拖車路線問題(Truck and Trailer Vehicle Routing Problem, TTRP)」兩種，其比較彙整在表 2。接駁式車輛路線問題的基本概念為利用小貨車為一中繼站，停放在某一定點，使其他機車能夠到中繼點補貨。而卡車拖車路線問題則是卡車連結拖車同時由場站出發服務所有顧客；當顧客處於拖車無法順利配送的地方時，將拖車停放在某顧客點，僅使用卡車單獨進行配送，

等到服務完拖車無法順利配送的顧客點，回到拖車停放的顧客點，把拖車聯結好，繼續完成所有顧客點的配送。此外，目前文獻中僅提到 LFVRP 及證明其配送方式是可行的，但並無進行詳細探討；而且也沒有使用到啟發式演算法進行求解。

表 2、接駁式車輛路線問題與卡車拖車路線問題之比較表

| | 接駁式車輛路線問題 | 卡車拖車路線問題 |
|-----|---|---|
| 相同處 | •小貨車或拖車數量一定小於機車或卡車 | |
| 相異處 | <ul style="list-style-type: none"> •單一車種 •避免子迴路 •顧客未進行分類 •為符合時效性而產生的配送方式 •小貨車是靜止不動的 •不考慮裝卸貨時間 •不考慮車輛停放成本 •小貨車停放次數已知 •小貨車停放地點已知 •小貨車停放位置固定 | <ul style="list-style-type: none"> •多車種 •允許子迴路 •顧客有分類 •因地理環境受限而產生之配送方式 •拖車會隨著卡車移動 •考慮裝卸貨時間 •考慮車輛停放成本 •拖車停放次數未知 •拖車停放地點未知 •拖車停放位置可變動 |

資料來源：本研究整理

三、問題定義

多溫共配系統目前在實務上主要有四種，但本研究針對其中兩種，一種為「機械式冷凍車廂區隔」，利用「物流箱」依據溫層之不同，分別置入已隔間好之車輛內，進行配送；另一種是利用「蓄冷保溫箱」取代現行冷凍冷藏車應用的低溫物流系統，在配送時先將物品放入蓄冷保溫箱，再將蓄冷保溫箱負載於「常溫車」內來配送物品。本節針對「機械式冷凍車廂區隔」(簡稱 MFVRP1) 及「抽換式蓄冷保溫箱配送」(簡稱 MFVRP2) 兩種多溫共配系統，提出其車輛路線問題之定義。MFVRP1 與 MFVRP2 之問題定義比較，如表 3 所示。

表 3、MFVRP 問題定義之比較表

| | MFVRP1 | MFVRP2 |
|-----|---|--|
| 相異處 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 溫層隔間之冷凍車 2. 一般物流箱 3. 路線上的每一顧客之各溫層需求分別不得超過被指派車子的溫層隔間容量 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 常溫車 2. 抽換式蓄冷箱 3. 路線上的每一顧客之總需求箱數不得超過被指派之車子的總容量 |
| 相同處 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 顧客需求皆已知、不可分割，以箱為單位，只能被服務一次，且箱子不得和其他顧客合併使用 2. 車隊是由有著不同容量、固定成本之多車種所組成 | |

資料來源：本研究整理

MFVRP 定義如下：「N 位顧客擁有對不同溫層物品需求量，使用多種車種搭配不同的多溫共配系統完成配送服務；所有車輛皆自同一場站出發，在不超過車輛容量與保溫箱或物流箱容量之情況下，依序服務顧客，最後並返回場站；本研究之目標在找到一組成本最小的配

送路線來服務所有的顧客」。

(一) MFVRP1 問題定義

此問題所使用之多溫共配系統為「機械式冷凍車廂區隔」，其示意圖如圖 1。此為利用「物流箱」依據顧客各溫層之需求不同，分別置入已隔間好溫層之冷凍車輛內，進行配送。主要假設與限制如下：

1. 所使用之配送車輛為已將溫層（常溫、冷凍、冷藏）隔間好之冷凍車。
2. 所使用之箱子為單一種形式之傳統物流箱，其容量為固定。
3. 使用有著不同容量、固定成本及變動成本之多種型式車輛供配送使用。
4. 每一種車型之冷凍車之各個溫層隔間，可容納之物流箱數量固定，每車限派車一次。
5. 每一個顧客之不同溫層物品需求都必須由同一輛車服務，即不可由多輛車分批完成服務。
6. 每一個顧客之需求量以「箱」為單位計，未滿一箱仍以一箱計。若顧客對某一溫層物品的需求量超過單一物流箱的容量時，不可以與其他顧客之同溫層需求合併箱子，需另新增一個相同溫度之物流箱，且這些物流箱皆須放在同一輛車上，
7. 目標成本包含車輛的固定成本、物流箱的固定成本與路線行駛之變動成本。

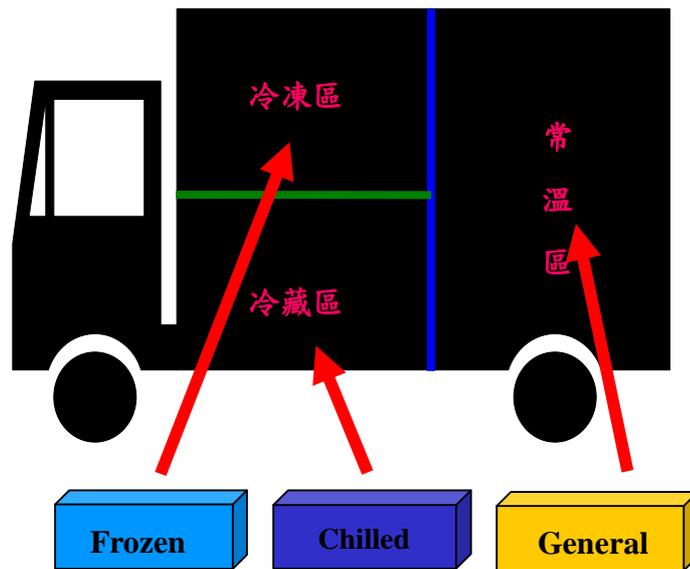


圖 1、機械式冷凍車廂區隔配送(MFVRP1)

(二) MFVRP2 問題定義

此問題所使用之多溫共配系統為「抽換式蓄冷保溫箱配送」，其示意圖如圖 2。此為利用「蓄冷保溫箱」取代現行冷凍冷藏車應用的低溫物流系統，在配送時先將物品放入保溫箱，再將保溫箱負載於「常溫車」內來配送物品。主要假設與限制如下：

1. 所使用之配送車輛為常溫車。
2. 所使用之箱子為單一種形式之抽換式蓄冷箱，其容量為固定。

3. 使用有著不同容量、固定成本及變動成本之多種型式車輛供配送使用。
4. 每一種車型之常溫車可容納之抽換式蓄冷箱數量固定，每車限派車一次。
5. 每一個顧客之不同溫層物品需求都必須由同一輛車服務，即不可由多輛車分批完成服務。
6. 每一個顧客之需求量以「箱」為單位計，未滿一箱仍以一箱計。若顧客的需求量超過單一抽換式蓄冷箱的容量時，不可以與其他顧客之需求合併箱子，需另新增一個抽換式蓄冷箱，且這些抽換式蓄冷箱皆須放在同一輛車上，
7. 目標成本包含車輛的固定成本、抽換式蓄冷箱的固定成本與路線行駛之變動成本。

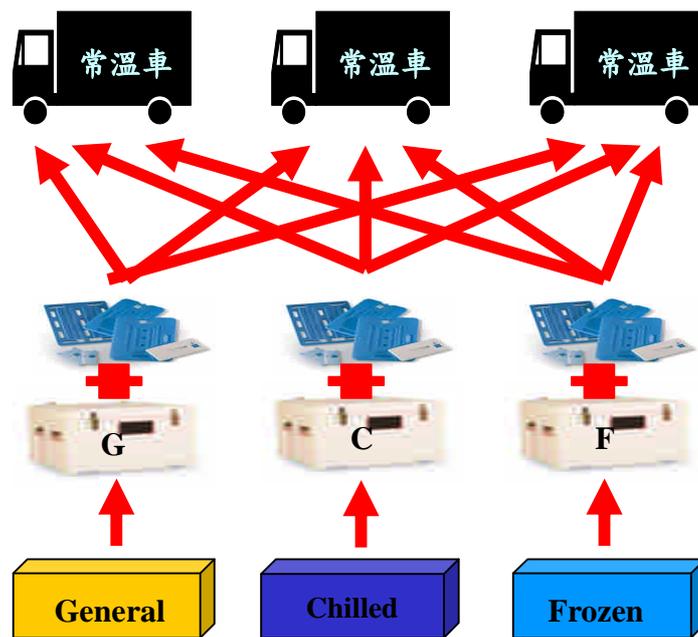


圖 2、抽換式蓄冷保溫箱配送(MFVRP2)

(三) LFVRP 問題定義

相較於傳統車輛路線問題(Vehicle Routing Problem, VRP)僅考慮單一場站，LFVRP 在服務的規劃上不僅要考慮車輛服務的路線，還需要考慮尋找指定點的位置，使得場站和指定點的整體規劃路線能達到最佳效益。圖 3 為指定點接駁配送方式的示意圖；本研究對於 LFVRP 問題假設條件可歸納如下：

- (1) 指定點方面：單一指定點，且小車最多只能到指定點一次。從所有顧客點中選擇一處做為指定點。
- (2) 配送方面：第一類路線之需求量與第二類路線需求量分別不得超過小型車容量限制。小型車數量無限制；大型車數量一輛。

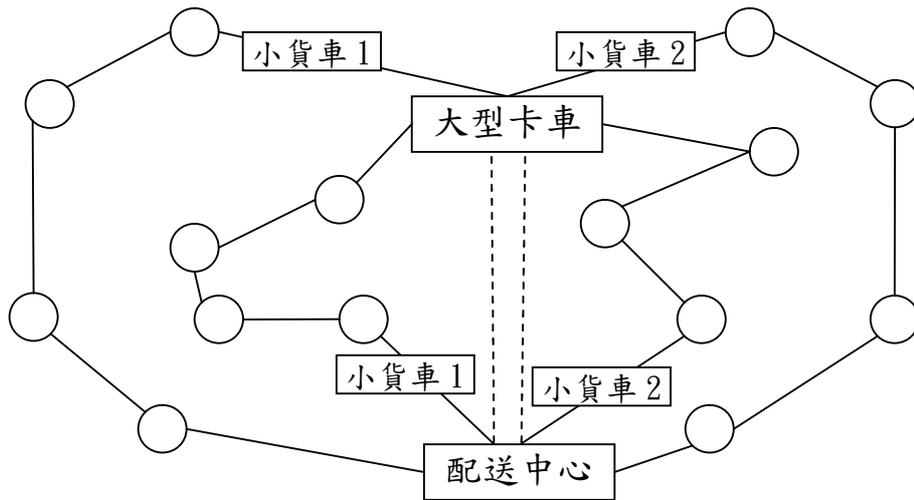


圖 3、指定點接駁配送方式示意圖

LFVRP 與 VRP 的問題特性比較如表 4 所示。經由 LFVRP 與 VRP 之問題特性可以看出，在設施資源方面，LFVRP 雖有二種車種，但其中一種大型車種類似於虛擬場站，僅提供小型車卸貨或補貨用，並不做為配送車輛使用；LFVRP 比 VRP 多了一個中繼站，提供給小型車輛卸貨或補貨用。在最佳化目標方面，LFVRP 與 VRP 不同之處在於 LFVRP 利用大型車輛做為虛擬場站，故 LFVRP 需要計算大型車輛成本與小型車輛成本總和是否為最小。

表 4、LFVRP 與 VRP 之問題特性比較

| 問題特性 | LFVRP | VRP |
|-------|-----------------------------|---------------------------|
| 設施資源 | 單一場站、二種車種、車輛容量限制、單一指定點（中繼站） | 單一場站、單一車種、車輛容量限制 |
| 顧客需求 | 固定需求且已知、不可分割 | 固定需求且已知、不可分割 |
| 節點服務 | 流量守恆、僅考慮送貨／收貨、避免子迴路 | 流量守恆、僅考慮送貨／收貨、避免子迴路 |
| 網路結構 | 無方向性、滿足歐氏（Euclidian）三角不等式 | 無方向性、滿足歐氏（Euclidian）三角不等式 |
| 最佳化目標 | 路線成本、車輛成本總和最小 | 路線成本總和最小 |

資料來源：本研究整理

四、研究方法

(一) 啟發式解法架構

(1) MFVRP 之啟發式解法

MFVRP 啟發式解法之架構主要可分為：起始解構建模組與鄰域搜尋模組。起始解構建模組應用傳統啟發式演算法中的最遠鄰點法，構建一個局部最佳解。鄰域搜尋模組應用 2-OPT 節線交換、Or-OPT 節線交換、1-0 節點交換、1-1 節點交換，鄰域搜尋模組的執行順序可以

變更。

傳統鄰近點法之缺點為最後一個顧客點距離場站過遠，而導致求解績效較差。因此，本研究提出一改良式的方法：最遠起點之鄰近點法 (Farthest Neighbor)，對尚未在路線中的顧客點，先將距離場站最遠之顧客納入為一新路線的第一點。之後的路線即從此點開始尋找其最鄰近點。最後路線若達容量限制則返回場站。依序進行直到所有顧客皆已排入路線當中。

而在本研究中，由於 MFVRP1 與 MFVRP2 之容量限制式不同，故在構建起始解的部分亦有不同。MFVRP1 (機械式冷凍車廂區隔) 受限於冷凍車內各溫層間隔空間已固定，每一溫層空間可裝載之物流箱有限，故在找尋納入路線的下一點時，不只要檢查該點之總需求是否可裝載，還需分開檢查各溫層是否可「同時」裝載進該車，若是，則納入路線；反之，若其中有任一溫層不符合，則不可納入路線。而 MFVRP2 (抽換式蓄冷箱)，依據實務上之應用，顧客需求不可分割，需以「箱」為單位，亦不可與其他顧客之需求混在同一箱中，故若該顧客之需求未滿一箱，仍以一箱計。故在找尋納入路線的下一點時，不只要檢查該點之總需求是否可裝載，還需將顧客之需求換算成以「箱」為單位，若可裝載，則納入路線；反之，若不符合，則不可納入路線。

(2) LFVRP 之啟發式解法

LFVRP 啟發式解法之解題架構可分為二個模組：起始解構建模組與鄰域搜尋改善模組。在起始解構建模組方面，主要是以傳統啟發式演算法「最近鄰點法 (Nearest Neighbor)」為主，進行起始路線的構建。由於 LFVRP 最大的特色在於當小型車車輛容量已滿或已空時，車輛可以到指定的中繼點進行卸貨或補貨後，再繼續第二次配送的路線，不但可以減少車輛回場站的時間及次數外，還可以減少車輛的數量。根據此特性，本研究在起始路線構建方面，以兩個階段來進行，即先在所有顧客點中選擇一點為指定點；接著，分別對於第一類與第二類路線進行構建。第一類的路線是由場站出發，在不違反車輛容量限制之下進行收/送貨，最後抵達指定點；第二類的路線則由指定點出發進行收/送貨，在不違反車輛容量限制之下進行取貨，最後回到場站。

本研究分別設計八種不同指定點選擇的方法 (SF1、SF2、SF3、SF4、SF5、SF6、SF7、SF8)，其細節請參考本報告附件之第四篇論文，在此不再贅述。利用上述八種選擇指定點方法找出指定點後，由場站出發，運用「最近鄰點法」依序構建第一類路線與第二類路線。

鄰域搜尋改善模組方面，主要是以 2-Opt、Or-Opt、S-S、1-0、1-1 進行改善起始路線。本研究所採用的鄰域搜尋改善模組可分為二大類：(1) 路線內交換改善模組，包括 2-Opt 和 Or-Opt；(2) 路線間交換改善模組，包括 S-S、1-0 和 1-1。本研究在各種交換改善模組執行中，全部採用「首先改善」選擇策略。

(二) 測試例題產生與實驗設計

(1) MFVRP 之測試例題產生與實驗設計

由於 MFVRP 為新的車輛路線問題型態，目前在國際上並無相關之標竿例題，故本研究選擇 Solomon (1983) 之 VRPTW 題庫及 Taillard (1993) 之 VRP 題庫為本測試例題的設計基礎，主要採用其場站座標、顧客點座標、顧客需求等資料，其採用之顧客點為 100、200、385、400、600、800、1000。另外，在車輛與箱子之相關資料，則根據實務資料，採用其車輛容量、車輛成本、箱子成本、箱子之最適規格。在本研究所產生的測試例題中，則假設常溫車與冷凍車之容量相同，物流箱與抽換式蓄冷箱之容量亦相同。

本研究設計四種不同情境，分別為：(1) 各需求點的需求量相同，各溫層的需求量相同，共 42 個測試例題；(2) 各需求點的需求量不相同，各溫層的需求量相同，共 42 個測試例題；(3) 各需求點的需求量不相同，各溫層的需求量不相同，常溫小於冷藏加冷凍（按比例分為 20%：80%、30%：70%、40%：60%），共 42 個測試例題；(4) 各需求點的需求量不相同，各溫層的需求量不相同，常溫大於冷藏加冷凍（按比例分為 80%—20%、70%—30%、60%—40%），共 42 個測試例題。全部共產生了 168 個測試例題。

本研究針對 MFVRP 方法與模組之組合方式，進行測試之實驗設計。整個測試過程可分成以下二個階段：(1) 第一階段：測試起始解構建模組與鄰域搜尋模組之適用性與解題績效；(2) 第二階段：四種需求情境與兩種多溫共配系統之組合分析。所得到的最佳結果與起始解進行改善效率比較，其公式如下：

$$\text{平均改善率} = \frac{\text{起始解} - \text{改善後最佳結果}}{\text{起始解}} \times 100\% \quad (1)$$

(2) LFVRP 之測試例題產生與實驗設計

本研究以國際標準例題為主，藉由全球資訊網路（WWW）連線到 The VRP Web (<http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>, 2006) 中搜尋 VRP 例題，並從中下載了 60 題，做為本研究之測試例題。這 60 題測試例題皆為傳統的 VRP 或 VRPTW 的例題。由於顧客點的散佈位置不同，本研究依所有顧客點與場站的散佈位置，將測試例題分成四個類型，圖 4 顯示出本研究所劃分之四種顧客需求點散佈位置類型。其中，圖 4(A) 為均勻隨機-場站居中型 (RM)、圖 4(B) 為均勻隨機-場站居邊型 (RS)、圖 4(C) 為聚落-場站居中型 (CM)、圖 4(D) 為聚落-場站居邊型 (CS)。各類型的測試例題分別為 31 題、16 題、8 題、5 題，題目規模從 25 個顧客到 1000 個顧客，每題例題車輛容量皆不相同。

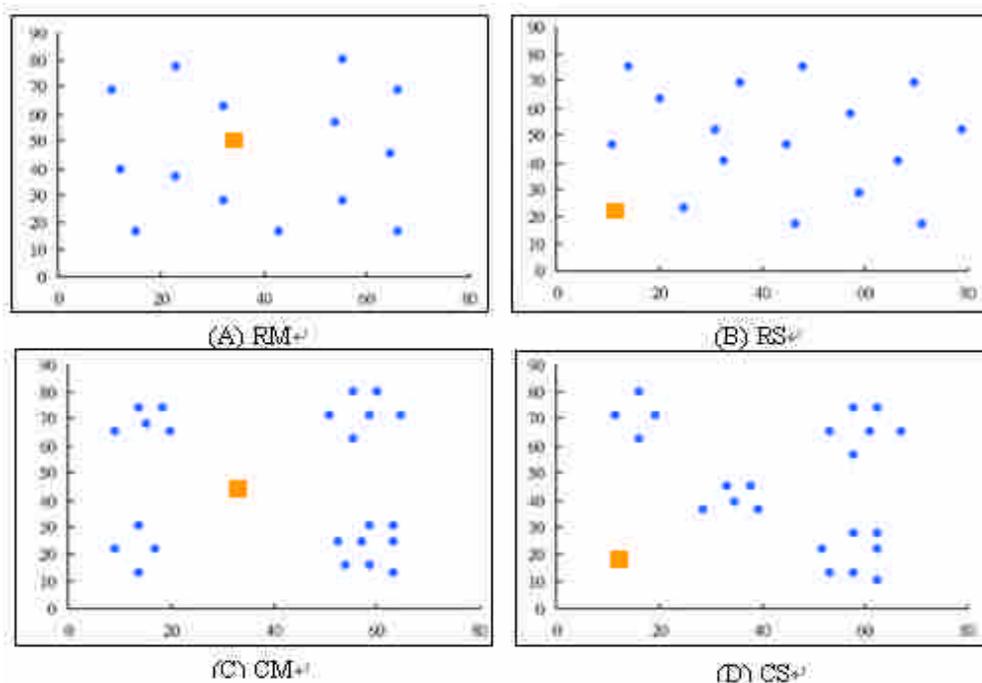


圖 4、顧客需求點分佈位置型態

LFVRP 之測試共包含兩個實驗：(1) 實驗一首先針對八種選擇指定點方法 (SF1、SF2、SF3、SF4、SF5、SF6、SF7、SF8) 進行測試，得到起始解後，以便探討這八種方法之解題

效果。(2) 實驗二是由實驗一所得到的八種起始解進行比較，由於路線內交換改善法不會影響到其他路線，故僅使用鄰域搜尋改善模組內三種路線間交換改善法進行排列組合進行測試，共有 48 種測試組合。測試所得到的最佳結果與起始解進行改善效率比較，其公式同式(1)。

五、結果與討論

(一) 測試結果分析

(1) MFVRP 之測試結果

本研究針對兩種多溫共配系統結合車輛路線問題，分別測試起始解構建模組與鄰域搜尋模組之適用性與解題績效。構建起始解之方法為最遠起點鄰近點法，搭配鄰域搜尋模組，共計 4 種鄰域搜尋方法，包括：路線內 2_OPT 交換模組、路線內 Or_OPT 交換模組、路線間 1_0 節點交換模組及 1_1 節點交換模組，將此四種方法進行排列組合，產生 24 種鄰域搜尋模組，針對最遠起點鄰近點法所產生的起始解進行改善。

執行方式為依序執行，有可能起始解首先用 2_OPT 改善，然後對 2_OPT 改善後的解用 1_0 節點交換法來改善，再用 1_0 改善後的結果用 1_1 交換法改善，最後用 Or_OPT。在此實驗使用之例題測試為：本研究所建立之四種情境中之情境一(顧客需求平均分佈)與情境三(顧客需求按比例分佈)進行測試，並將兩者加以平均，得到改善後之解，即利用此與起始解進行改善效率比較。

起始解經過鄰域搜尋模組改善後，平均改善幅度可達：路線成本 72%、車輛成本 50%，如圖 5 與圖 6 所示。而鄰域搜尋模組之改善效果顯著，但是各種組合之間的差異不大，平均而言，以鄰域搜尋模組組合 N3 與 N4(先進行路線間交換再進行路線內交換)的效果較佳，在 MFVRP1 的部分，以 N3-1(1_0+1_1+Or_OPT+2_OPT)改善績效較好；在 MFVRP2 的部分，以 N3-5(1_0+2_OPT+1_1+Or_OPT)改善績效較好。如圖 7 與圖 8 所示。可能原因為起始路線構建完成後，若先進行路線內的交換，會促成其走向局部最佳區域(各路線求其最佳化)，而失去了達成全體路線成本降低的機會，此結果尤以 MFVRP1 最明顯。因為 MFVRP1 受限於車輛內之隔間限制，在構建起始路線時常會產生一個點或兩個點即產生為一條路線的情況(在情境一與二，顧客需求平均時最為明顯)，而若先使用本研究之「鄰域改善模組」中的「路線間改善模組」(N3 與 N4)，利用其容量間的變化，其改善幅度較先使用「鄰域改善模組」中的「路線內改善模組」(N1 與 N2)來的大。

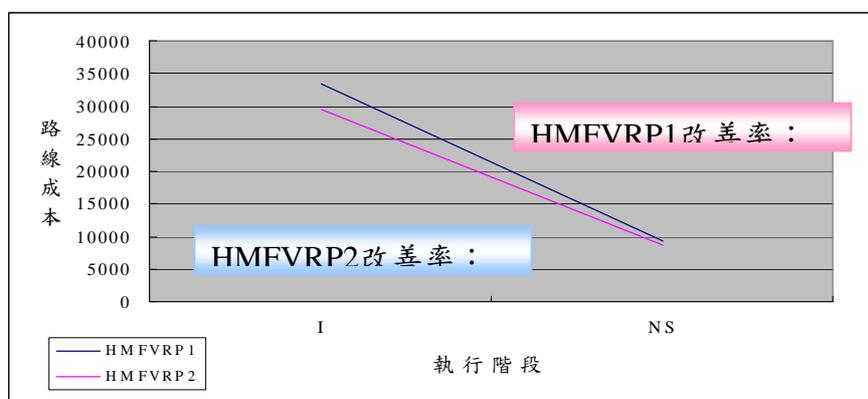


圖 5、MFVRP1 與 MFVRP2 之路線成本改善趨勢圖

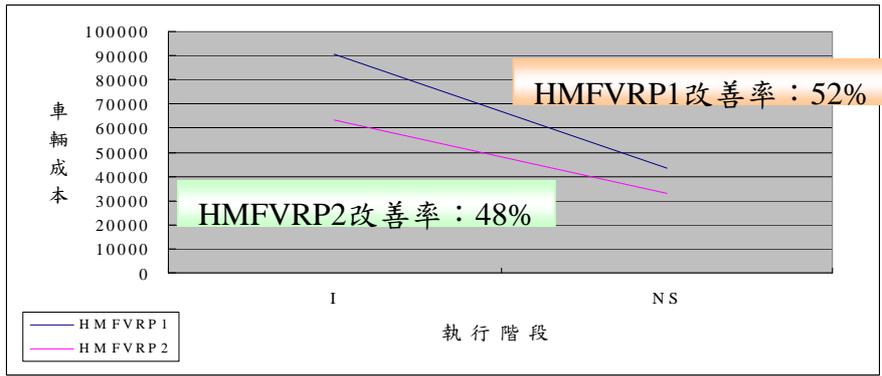


圖 6、MFVRP1 與 MFVRP2 之車輛成本改善趨勢圖

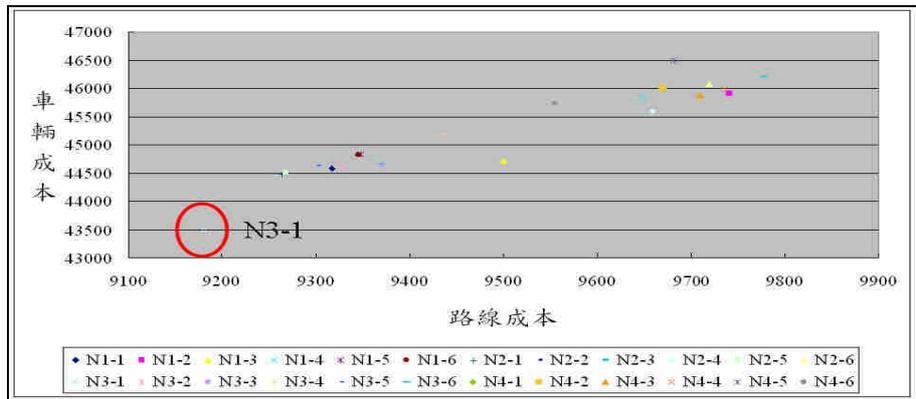


圖 7、MFVRP1 之車輛成本與路線成本之關係圖

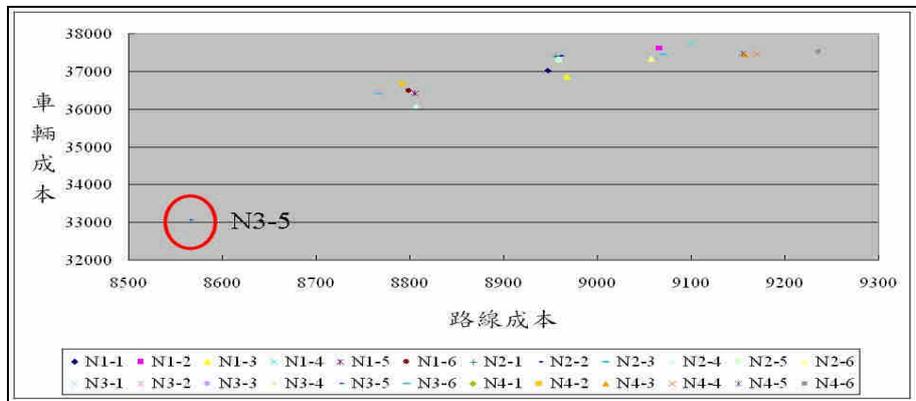


圖 8、MFVRP2 之車輛成本與路線成本之關係圖

第二階段針對前一階段之測試結果，分別與 4 種實務情境搭配，以得知兩種多溫共配系統之適用效果。主要為利用自行修改之測試例題題庫，依據在不同情境下，何種多溫共配系統之配送成本較佳。本研究利用 Z 檢定，令 $\alpha = 0.05$ ，MFVRP1(前者)與 MFVRP2(後者)在四種情境下，進行兩種多溫共配系統的檢定，以得知四種測試例題情境，使用何種多溫共配系統較適用，如表 5~表 8 所示。

在情境一，如表 5 所示，在車輛成本方面， $Z = 0.000000009$ ，在路線成本方面， $Z = 0.00016341$ ，表示 MFVRP2 在此情境表現較好。

表 5、情境一：MFVRP1 與 MFVRP2 比較測試之結果

| (MFVRP1 – MFVRP2) | 車輛成本 | 路線成本 |
|-------------------|-------------|------------|
| 差值平均 | 18166.19 | 1909.77 |
| 標準差 | 20775.30 | 3340.37 |
| Z 檢定 | 0.000000009 | 0.00016341 |

在情境二，如表 6 所示，在車輛成本方面， $Z=0.00000000006$ ，在路線成本方面， $Z=0.000057372$ ，表示 MFVRP2 在此情境表現較好。

表 6、情境二：MFVRP1 與 MFVRP2 比較測試之結果

| (MFVRP1 – MFVRP2) | 車輛成本 | 路線成本 |
|-------------------|---------------|-------------|
| 差值平均 | 15862.86 | 1646.44 |
| 標準差 | 15833.08 | 2679.41 |
| Z 檢定 | 0.00000000006 | 0.000057372 |

在情境三，如表 7 所示，在車輛成本方面， $Z=0.00000000007$ ，在路線成本方面， $Z=0.000006652$ ，表示 MFVRP2 在此情境表現較好。

表 7、情境三：MFVRP1 與 MFVRP2 比較測試之結果

| (MFVRP1 – MFVRP2) | 車輛成本 | 路線成本 |
|-------------------|---------------|-------------|
| 差值平均 | 38758.57 | 5108.98 |
| 標準差 | 38920.57 | 7474.05 |
| Z 檢定 | 0.00000000007 | 0.000006652 |

在情境四，如表 8 所示，在車輛成本方面， $Z=0.000000000008$ ，在路線成本方面， $Z=0.002936641$ ，表示 MFVRP2 在此情境表現較好。

表 8、情境四：MFVRP1 與 MFVRP2 比較測試之結果

| (MFVRP1 – MFVRP2) | 車輛成本 | 路線成本 |
|-------------------|----------------|-------------|
| 差值平均 | 11308.10 | 1295.21 |
| 標準差 | 10787.93 | 2929.93 |
| Z 檢定 | 0.000000000008 | 0.002936641 |

由上述測試可以得知，在不同情境的比較下，包括在需求平均分佈(情境一、情境二)或是在需求依比例分布(情境三、情境四)的時候，無論於車輛成本或路線成本方面，MFVRP2 皆明顯優於 MFVRP1，顯示蓄冷保溫箱之應用確實可以降低車輛成本與路線成本。故就整體而言，MFVRP2 較適用於各個情境下的狀況。

(2) LFVRP 之測試結果

本小節針對 LFVRP 之啟發式解法進行測試。第一階段分別就八種選擇指定點(SF1 ~ SF8)所產生的起始解，對各類型例題(RM、RS、CM、CS)之平均值加以整理分析，並將所得到的平均值加以比較，以路線成本及車輛數最小的平均值為最佳表現，與其他方法進行比較，表 9 顯示整體平均測試結果。

表 9、各類型測試例題之起始解測試結果

| RM | 平均成本 | 成本標準差 | 平均車數 | 車數標準差 | μ_1/σ_1 | μ_2/σ_2 | 與最佳表現差距 | |
|-----|----------|------------|---------|------------|------------------|------------------|---------|--------|
| | μ_1 | σ_1 | μ_2 | σ_2 | | | 成本 | 車數 |
| SF1 | 3931.05 | 4797.45 | 7.55 | 6.8 | 0.82 | 1.11 | 0.036 | 0.13 |
| SF2 | 4332.62 | 5247.92 | 7.32 | 6.17 | 0.83 | 1.19 | 0.142 | 0.096 |
| SF3 | 3934.82 | 4714.98 | 6.74 | 5.16 | 0.83 | 1.31 | 0.037 | 0.009 |
| SF4 | 3818.27 | 4670.06 | 6.68 | 5.08 | 0.82 | 1.31 | 0.006 | 0 |
| SF5 | 3929.29 | 4799.21 | 7.58 | 6.79 | 0.82 | 1.12 | 0.036 | 0.135 |
| SF6 | 3937.45 | 4796.42 | 7.58 | 6.79 | 0.82 | 1.12 | 0.038 | 0.135 |
| SF7 | 3794.15 | 4643.79 | 6.68 | 5.08 | 0.82 | 1.31 | 0 | 0 |
| SF8 | 3801.49 | 4684.82 | 6.68 | 5.08 | 0.81 | 1.31 | 0.002 | 0 |
| RS | 平均成本 | 成本標準差 | 平均車數 | 車數標準差 | μ_1/σ_1 | μ_2/σ_2 | 與最佳表現差距 | |
| | μ_1 | σ_1 | μ_2 | σ_2 | | | 成本 | 車數 |
| SF1 | 5163.06 | 9323.44 | 9.38 | 6.29 | 0.55 | 1.49 | 0.067 | 0.145 |
| SF2 | 6034.11 | 11871.04 | 9.25 | 6.84 | 0.51 | 1.35 | 0.247 | 0.129 |
| SF3 | 5734.85 | 11120.71 | 8.25 | 5.7 | 0.52 | 1.45 | 0.185 | 0.007 |
| SF4 | 5064.24 | 9334.22 | 8.19 | 5.52 | 0.54 | 1.48 | 0.047 | 0 |
| SF5 | 5544.76 | 10839.2 | 9.38 | 6.29 | 0.51 | 1.49 | 0.146 | 0.145 |
| SF6 | 5550.93 | 10837.43 | 9.13 | 6.17 | 0.51 | 1.48 | 0.147 | 0.115 |
| SF7 | 4838.67 | 8538.51 | 8.19 | 5.52 | 0.57 | 1.48 | 0 | 0 |
| SF8 | 4856.19 | 8684 | 8.19 | 5.52 | 0.56 | 1.48 | 0.004 | 0 |
| CM | 平均成本 | 成本標準差 | 平均車數 | 車數標準差 | μ_1/σ_1 | μ_2/σ_2 | 與最佳表現差距 | |
| | μ_1 | σ_1 | μ_2 | σ_2 | | | 成本 | 車數 |
| SF1 | 13910.7 | 17104.72 | 18.75 | 16.69 | 0.81 | 1.12 | 0.101 | 0.02 |
| SF2 | 14150.82 | 16807.91 | 18.88 | 16.52 | 0.84 | 1.14 | 0.12 | 0.027 |
| SF3 | 14447.1 | 17399.96 | 18.38 | 16.27 | 0.83 | 1.13 | 0.143 | 0 |
| SF4 | 13503.94 | 16358.39 | 18.38 | 16.27 | 0.83 | 1.13 | 0.069 | 0 |
| SF5 | 13930.09 | 17088.61 | 19 | 16.43 | 0.82 | 1.16 | 0.102 | 0.034 |
| SF6 | 13927.72 | 17089.45 | 19 | 16.43 | 0.81 | 1.16 | 0.102 | 0.034 |
| SF7 | 12684.86 | 15300.1 | 18.38 | 16.27 | 0.83 | 1.13 | 0.004 | 0 |
| SF8 | 12635.51 | 15265.64 | 18.38 | 16.27 | 0.83 | 1.13 | 0 | 0 |
| CS | 平均成本 | 成本標準差 | 平均車數 | 車數標準差 | μ_1/σ_1 | μ_2/σ_2 | 與最佳表現差距 | |
| | μ_1 | σ_1 | μ_2 | σ_2 | | | 成本 | 車數 |
| SF1 | 1432.44 | 1871.77 | 4 | 2.35 | 0.77 | 1.7 | 0.055 | 0.053 |
| SF2 | 1582.3 | 1960.71 | 3.8 | 2.49 | 0.81 | 1.53 | 0.166 | 0 |
| SF3 | 1482.89 | 1876.78 | 3.8 | 2.49 | 0.79 | 1.53 | 0.092 | 0 |
| SF4 | 1489.04 | 1960.8 | 3.8 | 2.49 | 0.76 | 1.53 | 0.097 | 0 |
| SF5 | 1428.91 | 1896.91 | 4 | 2.35 | 0.75 | 1.7 | 0.053 | 0.053 |
| SF6 | 1430.23 | 1896.07 | 4 | 2.35 | 0.75 | 1.7 | 0.054 | 0.053 |
| SF7 | 1357.41 | 1788.58 | 3.8 | 2.49 | 0.76 | 1.53 | 0 | 0 |
| SF8 | 1424.98 | 1869.41 | 3.8 | 2.49 | 0.76 | 1.53 | 0.05 | 0 |
| 總平均 | 6503.93 | 8961.79 | 9.59 | 7.67 | | | 0.0610 | 0.0334 |

在使用車輛數方面，從表 9 可以明顯的看出 SF4、SF7、SF8 方法在 RM、RS、CM、CS 四種類型表現皆是最好的，同時三種方法所求出的車輛平均標準差在 RM、RS、CM、CS 四

種類型中表現也是最低的，即顯示 SF4、SF7、SF8 此種方法相對於其他五種方法資料的分散程度來的小，較不容易有極端值的出現。在路線成本方面，從表 9 可以看得出來 SF7 方法在 RM、RS、CS 三種類型表現皆是最好的。以 SF7 方法所求出的路線成本平均標準差在 RM、RS、CS 中亦是最低的，即顯示 SF7 此種方法就路線成本來看，相對比其他三種方法資料分散程度來的小，較不容易有極端值出現。由於(平均數/標準差)這一項目亦可看出資料間的穩定程度，而由(平均數/標準差)值看來，RM 和 CM 二種類型例題的值比 RS 和 CS 來得大，顯示其穩定度不如 RS 和 CS 類型的題目。

就路線成本方面與最佳表現的差距來看，在 RM 類型例題中，SF4、SF7 與 SF8 這三種方法在這類型的例題中有不錯的表現，SF2 較不適用於 RM 類型的例題；從 RS 類型例題來看，SF7 與 SF8 在這類型的例題中有不錯的表現，而 SF2 較不適用於 RM 類型的例題；在 CM 類型的例題中，SF8、SF7 在 CM 類型的例題中的表現也不錯；最後在 CS 類型的例題中，SF7、SF1、SF5、SF6、SF8 皆適用於這個類型的例題。

表 10 為八個方法在所有測試例題的平均結果比較，在經過起始解模組的測試之下，從路線成本方面來看，SF7 方法表現較好，而 SF2 的方法則表現較差。從車輛數來看，SF4、SF7、SF8 所使用的車輛數較為相同。圖 9 為八種指定點選擇方法之績效比較(車輛數 v.s.路線成本)。

表 10、各種起始解構建法之測試結果比較

| | 平均路線成本 | 平均車輛數 |
|-----|---------|-------|
| SF1 | 5381.99 | 9.23 |
| SF2 | 5866.25 | 9.08 |
| SF3 | 5612.14 | 8.45 |
| SF4 | 5247.85 | 8.4 |
| SF5 | 5485.16 | 9.28 |
| SF6 | 5490.81 | 9.22 |
| SF7 | 5055.05 | 8.4 |
| SF8 | 5062.57 | 8.4 |
| 總平均 | 5400.23 | 8.81 |

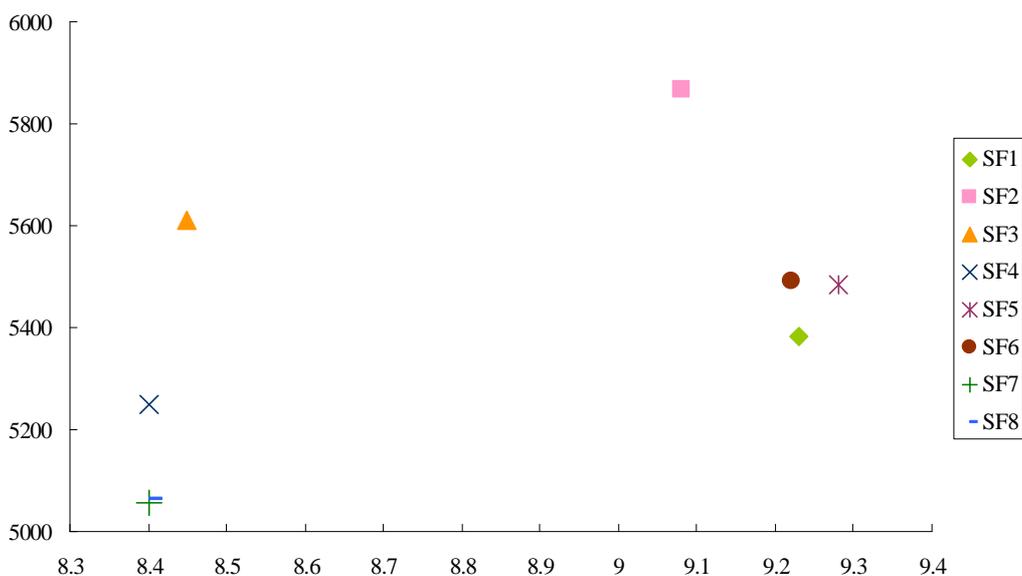


圖 9、八種指定點選擇方法之績效比較(車輛數 v.s.路線成本)

第二階段針對起始解之路線成本與改善後最佳結果之路線成本進行比較。四種類型測試例題(RM、RS、CM、CS)之平均改善率加以整理分析，表 11 則顯示四種不同類型測試例題之平均改善率。由表 11 得知，四種不同測試例題類型改善後最佳結果之平均改善率介於 9.47% 與 13.58% 之間，其中以 CS 及 RS 類型的測試例題之平均改善率較高。由此可見，當場站居邊 (CS、RS) 的例題類型在 LFVRP 模式中，能進行改善的空間較多且較容易。

表 11、四種不同類型測試例題之平均改善率

| | RM | RS | CM | CS |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| SF1 | 12.41% | 13.42% | 10.47% | 13.43% |
| SF2 | 15.12% | 16.01% | 12.20% | 18.85% |
| SF3 | 12.72% | 12.08% | 11.36% | 15.03% |
| SF4 | 9.05% | 7.88% | 4.89% | 12.99% |
| SF5 | 12.32% | 13.43% | 10.65% | 13.47% |
| SF6 | 11.56% | 13.56% | 10.58% | 11.99% |
| SF7 | 9.84% | 9.62% | 7.85% | 11.18% |
| SF8 | 8.66% | 8.98% | 7.80% | 11.70% |
| 總平均 | 11.46% | 11.87% | 9.47% | 13.58% |

(二) 結論與建議

(1) 多溫共配車輛路線問題(MFVRP)之主要研究結果彙整如下：

1. 本研究主要貢獻在於針對應用多溫共配系統後，其車輛路線之排程有別於傳統配送的方式，必須同時考慮保溫箱（物流箱）裝載限制、顧客需求限制等因素，做為研究對象，並發展一套可應用於 MFVRP 之啟發式解法。
2. 本研究發現在不同情境的比較下，包括在需求平均分佈(情境一、情境二)或是在需求依比例分布(情境三、情境四)的時候，無論於車輛成本或路線成本方面，MFVRP2 皆明顯優於 MFVRP1，顯示蓄冷保溫箱之應用確實可以降低車輛成本與路線成本。故就整體而言，MFVRP2 較適用於各個情境下的狀況。
3. 本研究構建的啟發式演算法，能有效求解多溫共配系統車輛路線問題(MFVRP)，而且在路線成本方面，MFVRP2 也明顯低於 MFVRP1，且瞭解 MFVRP 不僅適用於市區的全溫層保鮮宅配服務，亦適合用於需求量較小的偏遠地區。

(2) 指定點接駁車輛路線問題(LFVRP)之主要研究結果彙整如下：

1. 本研究對於 LFVRP 模式進行求解後，由所得之最佳結果與傳統 VRP 已知最佳解比較之後，約有四題測試例題的路線成本優於 VRP 已知最佳解，其中 A63、A79、CE32 這三個測試例題均為場站居邊型，另外在所有例題中所需要使用到的車輛數也比傳統 VRP 之已知最佳解來得少，故 LFVRP 模式是可行的。
2. 根據起始解穩定度及平均改善率來看，則以均勻隨機一場站居邊 (RS) 和聚落一場站居邊 (CS) 二種類型的測試例題較佳，故本研究之 LFVRP 模式比較適用於此二種類型的測試例題。再加上本研究之 LFVRP 模式僅有一個指定點，第一類路線若完成後，必須經過指定點，對於場站居中的測試例題來說，並非每輛車都與指定點為同一邊，第一

類路線的車輛必須行經指定點後，才能進行第二類路線的配送，故可能會造成車輛行駛成本的浪費。

3. 由於 LFVRP 模式利用大型車接駁貨物的方式，來增加每條路線的承載量，每條路線的承載量為二台小型車的容量，故可以減少小型車的車輛數，也可以增加小型車的使用率，使得在小型車可使用年限內，達到最完整的使用，亦可減少小型車的購買成本。
- (3) 本研究僅提出 MFVRP 與 LFVRP 的啟發式演算法，並經由例題測試的方法來證實其效益，仍有許多課題尚未進行深入的研究。後續的研究方向可考慮以下幾點方向：
1. 可使用巨集啟發式方法來提升解題績效。由於本研究只採用啟發式演算法，有可能會陷入局部最佳解，而無法搜尋到最佳的解。所以未來可以考慮增加巨集啟發式方法，例如：門檻接受法(TA)，來避免陷入區域最佳解，進而提升解題之績效。
 2. 可加入其它限制，更貼近實務。以本研究之問題來說，宅配業者常會與顧客約定收送貨時間，此限制即為「時間窗」，或是像 Starbucks 業者為方便理貨，會要求宅配業者將自己的商品裝在同一箱，並於夜間配送，等到隔天凌晨店員再進行理貨，完畢之後箱子可置於一旁等待晚上宅配業者送貨時一併取回，這些在實務上的應用，可在後續研究中加入探討；另外亦可再加入車輛行駛變動成本、服務時間等，可更貼近多車種的特性。
 3. 可針對所裝載之蓄冷箱與物流箱深入研究。本研究只假設有車輛容量限制的狀況，未來可考慮同時裝載不同尺寸的蓄冷櫃。此外，在本研究中，可發現無論在於車輛成本或路線成本方面，MFVRP2 皆明顯優於 MFVRP1，顯示蓄冷保溫箱之應用確實可以降低車輛成本與路線成本，且其在配送空間使用上較為彈性。但是經過實務業者的訪談，卻發現 MFVRP1 在使用上較為普遍，主要利用於需求量較小之偏遠地區，或是高單價之商品。主要原因可歸咎於本研究中並無加入探討之蓄冷箱之成本，其在成本上較高，高於一般物流箱至少十倍以上，購置成本過高導致業者使用意願不高。
 4. 可推廣至多指定點 LFVRP 或連續指定點 LFVRP。由於本研究建立之 LFVRP 模式僅選擇一個指定點。若想要更加符合實際狀況，可將 LFVRP 模式之指定點數量，依照顧客點分佈及場站位置來決定指定點數量。當指定點的數量增加，依照所有顧客點的總需求量，進而決定大型車的數量及路線。
 5. 未來可考慮增加其他限制納入 LFVRP 問題，例如：最大路線時間、同時收送、時間窗等。現今物流業者為提高顧客滿意度，已有發展指定時間到達取貨的服務，故可以在 LFVRP 模式中增加時窗的限制；另外，現在的物流業者幾乎都是同時收貨及送貨。故為了更符合實際狀況，可將 LFVRP 模式增加一些新的限制條件來進行求解。
 6. 實務應用需考量車輛成本之影響。本研究之 LFVRP 模式經過例題測試後，發現此模式可以增加車輛之使用率，進而減少車輛數。但本研究在進行求解 LFVRP 模式，僅計算路線成本，並沒有將車輛成本考慮在內。故在實務應用時，除了要考慮路線成本外，亦要考慮車輛成本，以同樣顧客散佈位置來看，LFVRP 模式之小型車和大型車的車輛成本是否優於目前配送模式之車輛成本。

參考文獻

- 王保元 (2000), 「物流中心冷凍食品配送模式之研究」, 朝陽科技大學工業工程與管理學系碩士論文。
- 王耿彬 (2001), 「應用遺傳演算法於低溫冷凍物流中心之車輛配送排程規劃」, 朝陽科技大學工業工程與管理學系碩士論文。
- 李長駿 (2003), 「多溫共配系統之路線排程問題研究」, 中華大學科技管理研究所碩士論文。
- 卓裕仁、張高文、高崇明 (2002), 「時效性商品配送車隊組成與配送策略之研究」, 中華民國第七屆運輸網路研討會論文集, 中華大學(新竹), 281 至 290 頁。
- 卓裕仁、李長駿 (2004), 「多溫共配系統之車輛路線問題研究」, 第二屆流通與全球運籌論文研討會, 國立台中技術學院, 台中, 運輸網路分析類, G-11 至 G-20 頁(光碟)。
- 林志鴻 (2001), 汽車運送業拖車路線規劃問題之研究, 國立成功大學交通管理科學研究所博士論文。
- 吳志仁 (2003), 「一般化卡車拖車路線問題」, 交通大學運輸科技與管理學系碩士論文。
- 吳芸蕙 (2004), 「國內低溫食品物流市場規模, 機械與車輛產業速報」, 第 128 期, 第 16-18 頁。
- 洪聖峰 (2003), 「低溫物流配送路線問題之研究」, 交通大學運輸科技與管理學系碩士論文。
- 涂紓瑜、賴淑娟、黎燕萍 (2001), 「時間限制 VRP 之應用研究—以網路訂購便當之配送車隊排程為例」, 中華大學交通與物流管理學系畢業專題報告。
- 郭儒家 (2002), 「低溫物流中心的系統建構及設備應用」, 物流新世紀:2002 特輯 21st century Logistics, 中華民國物流協會, 第 149-173 頁。
- 郭儒家 (2004), 「全新獨創技術-全溫層保鮮宅配服務系統(上)」, 物流技術與戰略, 第七期, 第 34-43 頁。
- 郭儒家 (2004), 「全新獨創技術-全溫層保鮮宅配服務系統(下)」, 物流技術與戰略, 第八期, 第 90-99 頁。
- 張靖、卓裕仁、黃勇智 (2001), 「時間限制車輛途程模式應用於網路訂購便當車隊途程規劃之探討」, 中國工業工程學會九十年年度年會暨學術研討會論文集(光碟版), 國立成功大學(台南), 論文編號 CIEE2001-0376。
- 曾敏雅 (1998), 「時窗限制下都會區夜間之低溫物流配送路線規劃研究」, 中興大學農產運銷研究所碩士論文。
- 簡世釗 (2001), 時窗與容量限制下車輛途程問題之研究, 國立成功大學工業管理研究所碩士論文。
- 劉建宏 (2005), 「含時窗限制式卡車與拖車途程問題之研究」, 中央大學土木工程學系碩士論文。

- 鐘震麒 (2004), 「低溫物流容器應用發展」, 九十三年度物流及流通應用整合發展計畫成果發表會論文集, 劍潭青年活動中心, 台北。
- 蔡裕峰 (2002), 「軸輻式物流網路區位與途程之啟發式解法」, 高雄第一科技大學運輸與倉儲營運系所碩士論文。
- 韓復華、卓裕仁 (2001), 「網路節點服務 TSP 與 VRP 問題回顧」, 運輸網路分析, 202 至 223 頁。
- Bodin, L., Golden, B.L., Assad, A., and Ball, M.(1983), "Routing and Schedule of Vehicle and Crew: the State of Art," *Computers & Operations Research*, Vol. 10, No. 2, pp.63-211.
- Chao, I.M.(2002), "A Tabu Search Method for the Truck and Trailer Routing Problem," *Computers & Operations Research*, Vol.29, pp.33-51.
- Christofides, N. and Eilon, S.(1969), "An Algorithm for Vehicle Dispatching Problem," *Operational Research Quarterly*, Vol.20, pp.309-318.
- Christofides, N., Mingozzi, A., and Toth, P.(1979), *Combinatorial Optimization*, John Willey & Sons, Inc.
- Díaz, B.(2006), <http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>, Collaboration between AUREN and the Languages and Computation Sciences department of the University of Málaga.
- Gerdessen, J.C.(1996), "Vehicle Routing Problem with Trailers," *European Journal of Operational Research*, Vol.93, pp.135-147.
- Scheuerer, S.(2006), "A Tabu Search Heuristic for the Truck and Trailer Routing Problem," *Computers & Operations Research*, Vol.33, pp.894-909.
- Solomon, M.M.(1983), *Vehicle Routing and Scheduling with Time Window Constraints: Models and Algorithms*, Ph.D. Dissertation, Dept. of Decision Sciences, University of Pennsylvania.
- Taillard, E.(1993), "Parallel Iterative Search Methods for Vehicle Routing Problems," *Networks*, Vol.23, pp.661-673.
- Tarantilis, C.D. and Kiranoudis, C.T.(2001), "A meta-heuristic algorithm for the efficient distribution of perishable food," *Journal of Food Engineering*, Vol.50, pp.1-9.
- Tarantilis, C.D. and Kiranoudis, C.T.(2002), "Distribution of Fresh Meat," *Journal of Food Engineering*, Vol.51, pp.85-91.
- Tarantilis, C.D., Kiranoudis, C.T., and Vassiliadis, V.S.(2003), "A List Based Threshold Accepting Metaheuristic for the Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem," *Journal of the Operational Research Society*, Vol.54, pp.65-71.
- Tarantilis, C.D., Kiranoudis, C.T., and Vassiliadis, V.S.(2004), "A Threshold Accepting Metaheuristic for the Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem," *European Journal of Operation Research*, Vol.152, pp.148-158.

附件：已發表或審查中之論文

1. Cho, Y.J. and Li, C.C., "Application of Multi-temperature Refrigerated Container to Improve the Distribution of Cold Logistics," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.6, pp.2794-2808, 2005.
2. 卓裕仁、黃嘉芬、陳玫君、林思余，「蓄冷保溫箱應用於多溫共配系統之最適規格分析」，中華民國運輸學會第二十屆學術研討會論文集(光碟版)，淡江大學(台北劍潭)，複合運輸與物流類(編號 05-4)，455 至 472 頁，民國 94 年 11 月。
3. 卓裕仁、許雅雯，「多車種多溫共配車輛路線問題之測試與分析」，中華民國運輸學會第二十一屆學術研討會，民國 95 年 12 月（全文審查中）。
4. 卓裕仁、張耘翠，「指定點接駁車輛路線問題之構建與解法設計」，中華民國運輸學會第二十一屆學術研討會，民國 95 年 12 月（全文審查中）。

APPLICATION OF MULTI-TEMPERATURE REFRIGERATED CONTAINER TO IMPROVE THE DISTRIBUTION OF COLD LOGISTICS

Yuh-Jen CHO

Assistant Professor

Department of Transportation Technology
and Logistics Management

Chung Hua University

707, Sec. 2, Wu Fu Rd., Hsin Chu,

300, Taiwan, R.O.C.

Fax: +886-3-5186545

E-mail: yjcho@chu.edu.tw

Chang-Chun LI

Master (In Army)

Institute of Technology Management

Chung Hua University

707, Sec. 2, Wu Fu Rd., Hsin Chu,

300, Taiwan, R.O.C.

Fax: +886-3-5186545

E-mail: m9103065@chu.edu.tw

Abstract: The multi-temperature refrigerated container is a bran-new technique, which can be setup on different temperatures, and preserve goods from losing temperature within almost 24 hours. Consequently, carriers can utilize such a container to hold and deliver different temperature goods to customers in general trucks. This paper formulates the above situation to the Multi-temperature Refrigerated Container Vehicle Routing Problem (MRCVRP), and proposes a two-stage heuristic which consists of modified savings algorithms to construct the initial solution and improve it by sequentially executing four interchange heuristics. To compare the performance of the MRCVRP with that of the classical VRP, a bank of 60 instances, modified from the Solomon's VRPTW benchmark instances, is adopted. Computational results reveal that MRCVRP generates significantly lower routing distance than VRP. Such a finding identifies that the MRCVRP could offer an effective and efficient alternative to improve the performance of multi-temperate fresh-keeping delivery service and cold logistics.

Key Words: cold logistics, multi-temperature Refrigerated Container, heuristic algorithm

1. INTRODUCTION

Reports indicate that the world's demand for perishable goods, such as refrigerated foods, fresh fruits and flowers, rose from 42 million tons in 1987 to 44 million tons in 1990 and is likely to reach 53 million tons by 2000 (Donna, 1992). According to the statistics from the Industrial Economics and Knowledge Center (IEK) under Industrial Technology Research Institute (ITRI), the Taiwan's market share of refrigerated foods varies in retail channels. As shown in Table 1, the total market scale of the refrigerated foods already exceeded 200 billion NT dollars in 2000 (Kuo, 2004a). The fast increasing demand for refrigerated foods means profits for the manufacturers and

marketers of refrigerated transport equipment. Moreover, such an increase motivates the growth of needs for cold logistics distribution.

In order to keeping good quality of refrigerated foods, cold logistics carriers have to adopt optimal temperature control on multi-temperature commodities in the process of supply, storage and delivery. With regard to Taiwan's present-day mechanical engine-driven compressor freezer trucks are concerned, the trucks are frequently forced to idle their engines due to the traffic congestion that is so common in Taiwan, which means that the truck engines are often unable to deliver enough power to maintain freezing temperatures. As a consequence, foods cannot be kept in an appropriate low-temperature state during transport, which affects the foods' quality. In addition, the stores along distribution routes in crowded Taiwan are often excessively close to each other, so that the warm air that enters a freezer truck whenever the door is opened to make a delivery does not have time to cool off before the next delivery.

Table 1. Sales of Refrigerated Food via Retail Channels in Taiwan (million NT dollars)

| Year | Modern Retail Channels | | | | | Restaurants | Total |
|------|------------------------|---------------|--------------------|---------------|--------|-------------|---------|
| | Department Stores | Super-markets | Convenience Stores | Hyper-markets | Others | | |
| 1998 | 2,350 | 21,671 | 29,682 | 32,459 | 12,875 | 42,444 | 141,481 |
| 1999 | 2,563 | 22,716 | 35,393 | 38,801 | 13,262 | 60,704 | 173,441 |
| 2000 | 2,828 | 22,885 | 38,009 | 45,571 | 13,823 | 82,138 | 205,345 |

Source: IEK, ITRI (Kuo, 2004a)

Furthermore, refrigerated transport requires carriers to make high capital investments in equipment. For example, the sale price of a 3.5 tons freezer truck is about 800,000 NT dollars and that of a 3.5 tons general truck is 650,000 NT dollars at most. Additionally, most of the freezer trucks currently in use are equipped to carry only low-temperature foods with the same product temperature, so that different types of low-temperature foods must be distributed in different deliveries, causing reduced vehicle use efficiency, or two or more freezer trucks must be purchased for the transfer of goods with different product temperatures, which increases investment and operating costs. Therefore, how to distribute multi-temperature goods with lower cost raises an important issue in the cold logistics.

Recently, the Energy and Resources Laboratories (ERL) of the ITRI has developed an innovational technology, multi-temperature refrigerated transport system with no-drive refrigeration, which enables to meet the needs of Taiwan's geography, climate, and societal conditions (Kuo, 2003). The purpose of this study is to develop an extended vehicle routing model based on the usage of the multi-temperature refrigerated transport system. We name this model as the Multi-temperature Refrigerated Container Vehicle Routing Problem (MRCVRP). Additionally, a heuristic method is

proposed for solving the MRCVRP and sixty instances of four different scenarios are generated to identify the performance of the MRCVRP and the potential of multi-temperature refrigerated transport system to the cold logistics.

This article is organized as follows. Section 2 surveys the technology of the multi-temperature refrigerated transport system and related researches on cold logistics. Section 3 presents the mathematical formulation of the MRCVRP. Then, Section 4 describes the two-stage heuristic for the MRCVRP. Experimental designs and results are reported in Section 5. Finally, Section 6 concludes our findings and suggests several directions of further research.

2. LITERATURE REVIEW

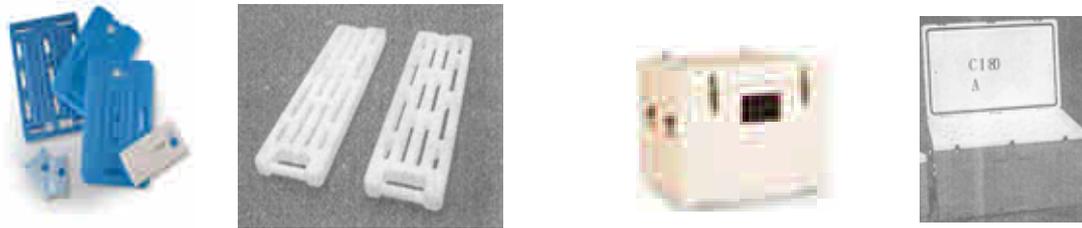
Even though several literatures discussed the R&D of multi-temperature refrigerated transport system (Lai, 2003; Kuo, 2003; Kuo, 2004a; Kuo, 2004b; OLIVO, 2004) and the distribution models of cold logistics (Tseng, 1998; Wang, 2000; Wang, 2001; Hung, 2003; Tarantitis *et al.*, 2004), the study on the fleet routing of the multi-temperature refrigerated transport does not emerge.

2.1 Technologies of Multi-temperature Refrigerated Transport System

Equipment used in refrigerated cargo transport is forever evolving. Lai (2003) studied a multi-temperature logistic system with energy storage materials which can store or release thermal energy and in the mean time change their phase states at different temperatures. The energy storage materials which can release (or absorb) thermal energy during freezing (or melting), can be either phase change single-inorganic component or multi-inorganic component with large specific heat capacity, high heat transfer rate, desired transition temperature and repeatable usage. In this research, the eutectic property and heat capacity of the single- or multi-component inorganic phase change materials with the large latent heat and melting points between $-35^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ were experimentally determined. The best practical design and manufacturing parameters as well as the best operating parameters were studied through the comparison of simulation results with experimental results.

The multi-temperature no refrigeration drive refrigerated transport system (MRTS) developed by the ERL uses multi-temperature cold storage and cold release technology (Kuo, 2003). MRTS possesses an automatic cold augmentation design, a cold energy conversion design, a shipping container accommodation design, a high-efficiency eutectic plate (see Figure 1a), and a multi-temperature refrigerated container structure (see Figure 1b). The eutectic plate is to make use of freezing apparatus for pre-cooling, and the multi-temperature refrigerated container is to offer proper cubage for the placement of articles and eutectic plates. Placed in the top part of container, the eutectic plate releases a constant cooling capacity previously accumulated in the cold room

during the freezing process. Eutectic refrigeration allows the required temperature to be maintained 24 hours and more for chilled products as well as for frozen (OLIVO, 2004).



(a) Eutectic plate

(b) Multi-temperature refrigerated container

Figure 1. Major Components of the MRTS

These MRTS technologies ensure that the new-type refrigerated transport system can be used with standardized refrigerated shipping containers. The ability to carry products with different temperatures not only reduces the number of delivery trips needed, but also keeps delivery costs lower than when ordinary chilled trucks are used. MRTS has been actually used to make deliveries to coffee shop chains like Starbucks and IS coffee shops, as well as low-temperature shipments and home deliveries by Ta Jung Transportation Inc. The only similar system is used in Japan, but the small-scale Japanese system relies on costly and non-reusable dry ice to cool cargo containers during transshipment (Kuo, 2004b).

2.2 Studies and Applications on Cold Logistics

Tseng (1998) transferred the cold delivery to a dynamic vehicle routing problem (DVRP), which considers the varieties of intersection signals and real-time information at night and in the urban area. This research developed an algorithm to determine the optimal vehicle routes. Results indicate that applying this heuristic algorithm to dynamic vehicle routing problems can improve night delivery efficiency and decline logistics costs.

Wang (2000) investigated the planning of vehicle routing of a frozen food distribution center, and built a mathematical model which employs penalty functions to reflect the characteristic of frozen food and time window constraints. Moreover, a two-stage algorithm is proposed to solve the VRPTW. In the first stage, genetic algorithm is used to cluster customers with respect to each vehicle. The second stage finds an optimal routing for each cluster, and the results are fed back to the first stage as a performance measurement of the current clustering.

In Wang (2001), two performance indexes were applied to measure the scheduling operation of a refrigerated food distribution center: (1) the cost of transportation, and (2) the penalty cost due to violating customers' delivery time windows. Both hard time windows and soft time windows were adopted to build the VRPTW model. This resultant model has an embedded structure to decompose

the original problem into a clustering master problem and many mutually independent routing sub-problems. In the solving of the master problem, a genetic algorithm is employed. As for the solving of sub-problems, a heuristic algorithm is formulated.

Hung (2003) presented a Stochastic Vehicle Routing Problem with Time Window (SVRPTW) model for refrigerated food. The objective function of the SVRPTW model aims at minimizing the sum of transportation cost, inventory cost, energy cost and penalty cost as related to violating time windows. This study formulated a time-dependent fresh food deteriorating function, calculated the probability of deterioration occurrences and evaluated how much loss it causes. Furthermore, Hung (2003) developed algorithms to solve two SVRPTW models with and without considering the time-varying travel time. Results of this study reveals that inventory loss and energy cost influence total distribution cost of refrigerated distribution significantly.

Tarantilis *et al.* (2004) discussed on how to efficiently deliver perishable foods, such as milk, fresh fruits and vegetable and meat. A model of Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem (HFFVRP) was proposed to get the minimum transportation cost. In addition, a meta-heuristic approach, Back-tracking Adaptive Threshold Accepting (BATA), is designed to solve the HFFVRP efficiently.

Summarily, most of previous researches considered the distribution of refrigerated goods as the VRPTW. Although that the requirement of time window from customers must be satisfied, it does not guarantee that the temperature of goods is keeping on the proper condition during the delivery. Therefore, effective solutions for cold logistics and transportation are necessary.

3. DEFINITION AND FORMULATION OF THE MRCVRP

As mentioned above, there is no literature which discusses on the fleet routing of multi-temperature refrigerated transport system. In this Section, we propose an extension of Vehicle Routing Problem (VRP), Multi-temperature Refrigerated Container Vehicle Routing Problem (MRCVRP) to generate the optimal routes of MRTS. The traditional VRP considers the capacity constraint of trucks and the demand of a single commodity. The proposed MRCVRP has to simultaneously satisfy the capacity constraints of refrigerated containers and trucks for loading multiple commodities, which are classified by their keeping temperature. In addition, each refrigerated container has to assign a specific temperature for handling relative commodities.

The MRCVRP can be described as follows. Given a set of customers with demands for different temperature goods, the fleet of trucks must depart from the central depot, sequentially deliver (pick up) goods to (from) all customers under the restrictions on capacity of refrigerated containers and

trucks, and finally return to depot. The objective of MRCVRP is to minimize total cost consisting of trucks usage, refrigerated containers usage, and routes traveling. The other assumptions and restrictions are:

1. Demands for goods under different temperatures from a single customer should have to be served by a single truck, that is, partial delivery (pick-up) would not be permitted. This character of undividable demand is always reasonable in practical operation;
2. The capacity of refrigerated containers is identical. Each refrigerated container is able to assign a specific temperature according to the contents in it;
3. Goods could be separated to several refrigerated containers with the same temperature but all in an identical truck while overall demand for goods under a certain temperature exceeds the volume of a single refrigerated container;
4. The number of refrigerated containers that a truck can load is fixed. Each truck is available for just once. In order to obtain feasible solutions, the numbers of available trucks and refrigerated containers are supposed to be unlimited; and
5. The constraint of time windows to serve customers is not considered into the pioneering MRCVRP model.

The MRCVRP can be stated mathematically as follows. Where, $M = \{1, 2, \dots, m\}$, set of the sorts of commodities, each kind of commodity is in a specific temperature level; $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$, set of nodes (0 refers to the depot, and $1 \sim n$ refer to customers); $V = \{1, 2, \dots, v\}$, set of vehicles; c_{ij} = traveling cost (distance or time) of arc (i, j) ; d_{hi} = demand for h kind of commodity of customer i ; f = fixed cost of a vehicle; g = fixed cost of a refrigerated container; p = maximum number of refrigerated containers could be put into a vehicle; q = fixed capacity of a refrigerated container; $x_{ijk} = 1$ if arc (i, j) is traversed by vehicle k , 0 otherwise; y_{hk} = amount of refrigerated containers loading for h kind of commodity in vehicle k ; z_i = variable to avoid sub-tour.

$$\text{Minimize} \quad f \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^v x_{0jk} + g \cdot \sum_{h=1}^m \sum_{k=1}^v y_{hk} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^v c_{ij} \cdot x_{ijk} \quad (1)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{j=1}^n x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in V \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ijk} - \sum_{j=0}^n x_{jik} = 0 \quad \forall i \in N, k \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^v x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(d_{hi} \cdot \sum_{j=0}^n x_{ijk} \right) - q \cdot y_{hk} \leq 0 \quad \forall h \in M, k \in V \quad (5)$$

$$\sum_{h=1}^m y_{hk} \leq p \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$z_i - z_j + n \cdot x_{ijk} \leq n - 1 \quad \forall i \& j \in N \setminus \{0\}, k \in V \quad (7)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ or } 1, y_{hk} \in I^+, z_i \geq 0 \quad \forall h \in M, i \& j \in N, k \in V \quad (8)$$

The objective function (1) states that total cost should be minimized. Constraint set (2) states that each vehicle k could be used once at most. Constraint set (3) is the flow conservation equation requiring that each vehicle k leaves node i if and only if it enters that node. Constraint set (4) states that each customer i must be served by exactly one vehicle. Constraint set (5) indicates that the aggregated demand for h kind of commodity in vehicle k could not exceed the capacity of refrigerated containers assigned to load commodity h . Equation set (6) is the capacity constraint of vehicle k that no vehicle can load more refrigerated containers than its capacity permits. Constraint set (7) guarantees that sub-tour could be breaking. Equation set (8) defines the domain of variables respectively.

4. A TWO-STAGE HEURISTIC FOR THE MRCVRP

The MRCVRP model presents a double restriction of demand loadings, constraint set (5) for the amount of goods in a refrigerated container, and constraint set (6) for the amount of refrigerated container in a vehicle. Such a character makes that the MRCVRP is more difficult to solve than the VRP. Due that VRP is NP-hard, the MRCVRP is believed to be NP-hard, too. In this paper, we propose a two-stage heuristic method for the MRCVRP. The first stage aims to construct an initial feasible solution by using a modified savings-based algorithm. Then, this initial solution is improved by sequential implementations of several interchange-based heuristics.

4.1 Modified Savings Algorithm

The savings algorithm was originally proposed by Clarke and Wright (1964) to solve the VRP. Because of its simplicity and flexibility, savings algorithm has been modified to conquer other vehicle routing related problems, such as the Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) in Solomon (1983) and the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem (FSMVRP) in Golden et al. (1984). Initially, suppose that every customer is served individually by a separate vehicle. The savings algorithm calculates the savings value (s_{ij}) of every pair of nodes i and j according to Equation (9), and orders the savings list decreasingly.

$$s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij} \quad (9)$$

Then, starting at the top of the list, savings algorithm iteratively merges two routes into a larger one by linking node-pair with the maximum savings unless the problem constraints (for example, the capacity constraint) are violated. Note that there are sequential and parallel versions to implement the merge of routes. The sequential savings algorithm constructs a specific route at one time until the capacity constraint of this route is violated, and the next new route is starting to merge. Oppositely, the parallel savings algorithm simultaneously develops several routes while merging.

In order to solve the MRCVRP, we modified the savings algorithm by combining the savings of capacity with original savings value (s_{ij}). Equations (10) and (12) describe the ideas of two new savings values. Equation (10) considers that it will save both the distance of route and the number of refrigerated container after merging two routes. Because of different unit and scale between routing distance and container's number, we multiply an adjusting term, the average arc distance (ac_{ij}) divided by the sorts of temperature level (m), by the savings of refrigerated container (cs_{ij}). Equation (11) works out the reduction of the number of refrigerated containers.

$$s'_{ij} = s_{ij} + \frac{ac_{ij}}{m} \cdot cs_{ij} \quad (10)$$

$$cs_{ij} = \sum_{h=1}^m \left(\left\lceil \frac{d_{hi}}{q} \right\rceil + \left\lceil \frac{d_{hj}}{q} \right\rceil - \left\lceil \frac{d_{hi} + d_{hj}}{q} \right\rceil \right) \quad (11)$$

$$s''_{ij} = s_{ij} - \frac{2 \cdot ac_{ij}}{m \cdot q} \cdot \sum_{h=1}^m \left[\text{mod} \left(\frac{d_{hi} + d_{hj}}{q} \right) \right] \quad (12)$$

The other formula of the modified savings value is presented at Equation (12). The first part of the savings value is still the classical savings of distance, but the second part evaluates the residual capacity of all refrigerated containers in the merged vehicle. The negative sign before the second part means that the minimal residual capacity (i.e., make full use of the space) is wanted. In addition, an adjusted term, double average arc distance divided by the product of temperature levels by capacity of refrigerated container, is introduced to the second part. Algorithms adopt original savings formula, Equation (10) and Equation (12), separately named as SA0, SA1 and SA2.

4.2 Interchange Heuristics for Improvement

As the improvement-purposed modules of stage two, we select four interchange-based heuristics, 2_OPT intra-tour exchange, and (1_0), (1_1) and (2_1) inter-tour interchanges (Christofides and Eilon, 1969). While implementing of these three inter-tour interchanges, the feasibility of loaded goods by exchanging customers between two routes can not be violated. Furthermore, there are two rules to choose a neighbor solution for exchange, best-improvement and first-improvement. Hence,

we adopt the best-improvement rule to execute the four interchange heuristics.

5. EXPERIMENTAL ANALYSIS

In order to identify the potentiality of proposed MRCVRP model in the improvement of the cold logistics, computational experiments on testing the performance of MRCVRP are reported. First, a set of MRCVRP instances are created in Section 5.1; then, a three-phase experiment are designed in Section 5.2 for testing; and finally, the results of the testing are summarized and analyzed in Section 5.3.

5.1 Bank of Testing Instances

As a new type of vehicle routing related problem, MRCVRP is still unavailable with a bank of benchmark instances or with a real-world case of cold logistics in any literature. Therefore, we generated a set of sixty MRCVRP instances based on the classical VRPTW instances. A set of 56 VRPTW instances which were originally generated by Solomon (1983), are classified as three types of geographical scatter of customers, i.e., C for clustering, R for randomizing, and RC for mixture of randomizing and clustering. Figure 2 demonstrates the configurations of these three patterns of customers spread. All of the VRPTW instances comprise 100 customer nodes with corresponding (x, y) coordinates, volume of demand, and lower bound and upper bound of required time window.

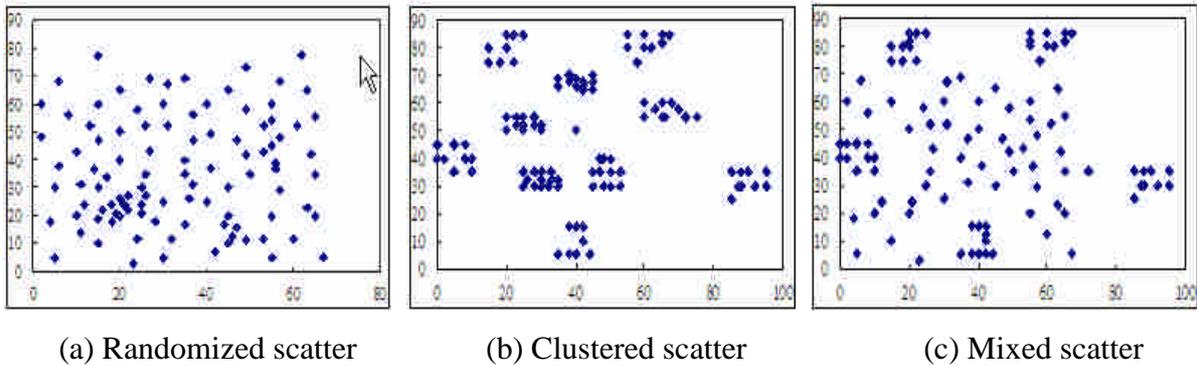


Figure 2. Three Geographical Scatter of Customers for VRPTW Instances

We chose three VRPTW instances, C101 from type C, R101 from type R, and RC101 from type RC, as the bases to generate customer's coordinates and demands for MRCVRP instances. Due to the cold logistics, we set three levels of commodities' temperature, i.e., cold ($0^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$), refrigerant ($-18^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$) and frozen (-30°C below). Moreover, four scenarios were hypothesized for the demands of three-temperature goods as follows.

- Scenario 1: Demands of goods on three temperature levels for all customers are identical.

We established five types of demands for every customer and every temperature level, 10, 20, 30, 40, 50, which adopt the coordinates of customers from C101, R101 or RC101 correspondingly. For example, Instance 1_C-10 means that this instance belongs to scenario 1, the coordinates of customers come from C101, and the demands of goods on three temperature levels for all customers are equal to 10 units. There are total of 15 instances in Scenario 1.

- Scenario 2: Demands of goods for customers are not identical; demands on three temperature levels for some customer are identical.

The coordinates of customers and the demands of goods on every temperature level for customers adopt C101, R101 or RC101 respectively. For example, Instance 2_R-C means that this instance belongs to scenario 2, the coordinates of customers come from R101, the demands of goods for customers come from C101, and the demands of goods on three temperature levels for some customer are identical. There are total of 9 instances in Scenario 2.

- Scenario 3: Demands of goods for customers are not identical; demands on three temperature levels for some customer are different and independent.

The coordinates of customers and the demands of goods on the first temperature level (i.e., cold) for customers adopt C101, R101 or RC101 respectively. To generate independent demands of goods between three temperature levels, we utilize systematic manner to assign three demands of every customer. For example, Instance 3_R-C-11-22 means that this instance belongs to scenario 3, the coordinates of customers come from R101, and the demands of goods for customers on the first temperature level come from C101. In this case, the demand of goods on the second temperature level (i.e., refrigerant) for some customer i is equal to the demand of cold goods for customer $i + 11$. Similarly, the demand of goods on the third temperature level (i.e., frozen) for customer i is equal to the demand of cold goods for customer $i + 22$. We design three systematic lags for refrigerant goods (11, 33 and 66) and frozen goods (22, 55 and 88). Therefore, there are total of 27 instances in Scenario 3.

- Scenario 4: Demands of goods for customers are not identical; demands on three temperature levels for some customer are different and dependent.

Similar to Scenario 3, the coordinates of customers and the demands of goods on the first temperature level for customers adopt C101, R101 or RC101 respectively. In order to generate dependent demands of goods among three temperature levels, we assume that the demands of refrigerant and frozen goods for some customer i are separately equal to reduce and to add the demand of cold goods for customer i by 5 units. For example, Instance 4_R-C means that this instance belongs to scenario 4, the coordinates of customers come from R101, and the demands

of cold goods for customers come from C101. Let the demand of cold goods for some customer be 20 units, therefore the demands of refrigerant and frozen goods for this customer are 15 and 25 respectively. There are total of 9 instances in Scenario 4. Generally, the demands in Scenarios 3 and 4 are considered closer to the real-world cases than that in Scenario 1 and 2.

We suppose that the demand of goods on every temperature level for every customer is dividable to load on different refrigerated containers with the same temperature level in the identical vehicle. Additionally, the capacity of vehicles is equal to 400 units and the number of customers is 100 for all sixty instances. The time windows corresponding to every customer originally set in VRPTW are ignored.

5.2 Design of Experiments

This research designs three phases of experiments to analyze the performance and potential of the proposed MRCVRP model and heuristic. The first experiment aims to decide an efficient size of the refrigerated containers, the second experiment tests the effect of the heuristic method proposed in Section 4, and the third experiment compare the MRCVRP with traditional VRP according to their performance on solving instances. Because that the practical cost of trucks and refrigerated containers are unavailable, all experiments consider the quality of solutions at two criteria, the total distance of routes and the total number of vehicles. The details of three-phase experiments explain as follows.

- Phase I: The size of the refrigerated container means the capacity of the container, q . Due that the capacity of a vehicle is 400 units, which is equal to the product of q by p (the maximal number of refrigerated containers that a vehicle can load), we set four combinations of (p, q) , i.e., (5, 80), (8, 50), (10, 40) and (20, 20). Four combinations are tested on all sixty instances and solved by six savings algorithms, i.e., sequential SA0 (SSA0), sequential SA1 (SSA1), sequential SA2 (SSA2), parallel SA0 (PSA0), parallel SA1 (PSA1) and parallel SA2 (PSA2). Some combination with the best performance is selected for Phase II.
- Phase II: First, six savings algorithms are tested on all instances. The best savings algorithm is chosen as following initial solution construction module. Then, four interchange-based heuristics, i.e., 2_OPT, (1_0), (1_1) and (2_1), are tested respectively. Finally, various combinations of sequential execution these interchange heuristics are tested.
- Phase III: Instances of Scenario 3 and 4 are used to test the MRCVRP and VRP. In order that VRP can not deliver goods on three temperature levels at one time, we must divide every MRCVRP instance into three VRP instances. Among the three VRP instances, the coordinates of customers are identical, but demands of goods are corresponding to those of different

temperature levels. On the other hand, for the consistent purpose, we adopt the SSA0 to construct initial solutions of MRCVRP and VRPs.

5.3 Computational Results

Results of the three-phase experiments are reported and analyzed in this Subsection. As previously mentioned, the total distance of routes (routing distance) and the total number of vehicles (fleet size) are compared respectively.

The results of Phase I testing present that the capacity of refrigerated container greatly influences upon the routing cost and the fleet size. As shown in Table 2, the combination (20, 20) performs well than other combinations. Judging from the averages of the six savings algorithms, the routing distance under the combinations (10, 40) and (20, 20) are smaller than that under combinations (5, 80) and (8, 50) in all four scenarios, and the routing distance under the combination (10, 40) is very close to that under the combination (20, 20) which makes the smallest routing distance, 1530.67. In terms of fleet size, the combination (20, 20) still demands a minimal fleet size of 17.44. It appears that small size of refrigerated container makes full use of the capacity. To simplify the following tests, we only adopt the combination (20, 20) in terms of the refrigerated container's capacity and the maximum number of refrigerated containers packed in each vehicle.

Table 2. Results of Test on the Combination of Parameters p and q

| p | q | Average of Scenario 1 | | Average of Scenario 2 | | Average of Scenario 3 | | Average of Scenario 4 | | Total Average | |
|-----|-----|-----------------------|--------------------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|---------------|-------|
| | | Dist. [†] | Fleet [‡] | Dist. | Fleet | Dist. | Fleet | Dist. | Fleet | Dist. | Fleet |
| 5 | 80 | 2470.53 | 36.50 | 1723.69 | 21.63 | 1459.05 | 16.83 | 1409.90 | 15.65 | 1765.79 | 22.65 |
| 8 | 50 | 2252.01 | 32.83 | 1525.95 | 17.61 | 1382.52 | 14.75 | 1415.11 | 15.59 | 1643.90 | 20.20 |
| 10 | 40 | 1940.88 | 27.03 | 1413.98 | 14.76 | 1397.55 | 14.36 | 1389.28 | 14.74 | 1535.42 | 17.72 |
| 20 | 20 | 1940.95 | 27.03 | 1436.41 | 14.78 | 1391.59 | 13.83 | 1353.74 | 14.11 | 1530.67 | 17.44 |

[†] Dist. denotes the average total distance of routes on six savings algorithms.

[‡] Fleet denotes the average total number of vehicles on six savings algorithms.

For the Phase II testing on the six savings algorithms, as shown in Table 3, among the six algorithms, parallel SA0 generates the shortest average routing distance 1405.89, and sequential SA1 (SSA1) renders the lowest average fleet size 17.43. In terms of routing distance, savings algorithms of parallel version obviously perform well than that of sequential version. The SA0 presents the excellent ability to reduce the routing distance, followed by SA2 and SA1. The possible reason is that SA0 focuses on the saving of distance, and the others do not. Oppositely, savings algorithms of sequential version render smaller fleet size than that of parallel version. Even though SSA1 obtains the smallest fleet size, the differences between six algorithms are insignificant.

Moreover, the total average of SA0 in fleet size is less than that of SA1. These two modified savings formulas do not seem to work as well as expectation. It may be caused by the less variety of the amounts of demands in testing instances that cannot highlight the effect of saving in capacity. Therefore, we adopt only instances of Scenarios 3 and 4 to the following tests.

Table 3. Results of Test on the Savings Algorithms

| Savings Formulas | Sequential (S) | | Parallel (P) | | Total Average | |
|------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|------------|---------------|------------|
| | Avg. Dist. [†] | Avg. Fleet [‡] | Avg. Dist. | Avg. Fleet | Avg. Dist. | Avg. Fleet |
| SA0 | 1504.20 | 17.30 | 1405.89 | 17.52 | 1455.05 | 17.41 |
| SA1 | 1649.16 | 17.29 | 1545.53 | 17.62 | 1597.35 | 17.45 |
| SA2 | 1585.62 | 17.31 | 1493.60 | 17.62 | 1539.61 | 17.46 |
| Total Average | 1579.66 | 17.30 | 1481.68 | 17.59 | 1530.67 | 17.44 |

[†] Avg. Dist. denotes the average total distance of routes on sixty instances.

[‡] Avg. Fleet denotes the average total number of vehicles on sixty instances.

In order to clearly judge the effect of interchange-base heuristics on improving the initial solution, we select the results of SSA1 to be the initial solutions. Table 4 presents the results of testing on four interchange heuristics, 2_OPT, (1_0), (1_1) and (2_1), where the capacity of refrigerated container is 20 units, the initial solution constructed from sequential SA1, and tested on 36 instances. As shown in Table 4, compared with the initial solutions from SSA1, 2_OPT gains the largest improvement in the average routing distance, followed by (1_1), (1_0) and (2_1) sequentially. Unlike the apparent improvement in routing distance, the average fleet size does not reduce by the four interchange heuristics respectively. The following test focuses on the combinations of these interchange heuristics.

Table 4. Results of Test on the Interchange Heuristics

| Interchange Heuristics | Avg. Dist. [†] | Improvement [§] | Avg. Fleet [‡] | Improvement [§] |
|------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Initial Solution: SSA1 | 1576.58 | --- | 13.81 | --- |
| 2_OPT Exchange | 1462.97 | 7.21% | 13.81 | 0.00% |
| (1_0) Interchange | 1550.62 | 1.65% | 13.81 | 0.00% |
| (1_1) Interchange | 1504.98 | 4.54% | 13.81 | 0.00% |
| (2_1) Interchange | 1555.68 | 1.33% | 13.81 | 0.00% |

[†] Avg. Dist. denotes the average total distance of routes on thirty-six instances.

[‡] Avg. Fleet denotes the average total number of vehicles on thirty-six instances.

[§] Improvement denotes the percentage of reduction in routing distance or fleet size.

There are twenty-four combinations of the four interchange are tested on the instances of Scenarios 3 and 4, under the same conditions in the above test. Because that the performances of all combinations are approximate, we only list the best anterior eight combinations in Table 5. As shown in Table 5, the combination (1_1 + 1_0 + 2_OPT + 2_1) generates the best results: the

average routing distance is 1360.49 and the average fleet size is 13.71, where the percentages of improvement are 13.71% and 0.72% separately. Similar to the previous test, the improvement of routing distance is apparent, but insignificant for that of fleet size.

By the way, the sum of improvements in Table 4 by four interchange heuristics is 14.73% which is close to the improvement 13.71% by combination (1_1 + 1_0 + 2_OPT + 2_1). Such a situation reveals that the combined execution of various interchange heuristics is effective and not conflicting.

Table 5. Results of Test on the Combination of Interchange Heuristics

| Combinations | Avg. Dist. [†] | Improvement [§] | Avg. Fleet [‡] | Improvement [§] |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Initial Solution: SSA1 | 1576.58 | --- | 13.81 | --- |
| (1_1)+(1_0)+2_OPT+(2_1) | 1360.49 | 13.71% | 13.71 | 0.72% |
| (1_1)+(1_0)+(2_1)+2_OPT | 1360.55 | 13.70% | 13.71 | 0.72% |
| (1_1)+2_OPT+(1_0)+(2_1) | 1363.14 | 13.54% | 13.72 | 0.65% |
| 2_OPT+(1_1)+(1_0)+(2_1) | 1374.81 | 12.80% | 13.74 | 0.51% |
| (1_1)+(2_1)+(1_0)+2_OPT | 1356.04 | 13.99% | 13.75 | 0.43% |
| (1_1)+(2_1)+2_OPT+(1_0) | 1357.47 | 13.90% | 13.75 | 0.43% |
| (2_1)+(1_1)+2_OPT+(1_0) | 1358.64 | 13.82% | 13.75 | 0.43% |
| (2_1)+(1_1)+(1_0)+2_OPT | 1358.76 | 13.82% | 13.75 | 0.43% |

[†] Dist. denotes the average total distance of routes on sixty instances.

[‡] Fleet denotes the average total number of vehicles on sixty instances.

[§] Improvement denotes the percentage of reduction in routing distance or fleet size.

According to the results of Phases I and II, we propose an efficient and effective implementation of two-stage heuristic for solving the MRCVRP and VRP. In the first stage, we adopt the sequential SA0 (SSA0) to construct the initial solution, then, the combination of (1_1 + 1_0 + 2_OPT + 2_1) is utilized in the second stage. The detail results of testing on instances of Scenarios 3 and 4 are respectively reported in Table 6 and Table 7.

As shown in Table 6, the average routing distance of MRCVRP among twenty-seven instances of Scenario 3 is 1365.7, which is significantly superior to that of VRP (2428.1). Furthermore, the average fleet size of MRCVRP (13.5) is lower than that of VRP (14.0). On the other hand, the standard deviation and coefficient of variance of MRCVRP are smaller than that of VRP. Hence, the MRCVRP performs more steadily than the VRP does.

Additionally, same results can be experienced in Table 7. The average routing distance of MRCVRP among nine instances of Scenario 4 (1294.8) is significantly superior to that of VRP (2474.6), as well as the average fleet size of MRCVRP (13.7) is lower than that of VRP (13.9). Once more, the standard deviation and coefficient of variance of MRCVRP are less than that of VRP.

Judging from the computational results in Phase III, we think that the MRCVRP model has explicit potentiality to lift the performance of cold logistics and distribution. Not only apparently diminish the routing distance, but the MRCVRP also enables to lower the capital investment on refrigerated transport equipments if that the cost of multi-temperature refrigerated containers is less than that of chill trucks. Generally speaking, the chill truck is of much higher purchase cost and maintenance cost than general vehicles. In sum, MRCVRP is preferable to the multi-temperature fresh-keeping delivery service.

Table 6. Comparisons of Results between MRCVRP and VRP on Scenario 3

| Symbols of Instances | Routing Distance | | Fleet Size | |
|--------------------------------------|------------------|--------|------------|-------|
| | MRCVRP | 3-VRP | MRCVRP | 3-VRP |
| 3_C-C-11-22 | 1328.0 | 2082.5 | 14 | 15 |
| 3_C-C-33-55 | 1209.2 | 2073.0 | 15 | 15 |
| 3_C-C-66-88 | 1270.6 | 2084.5 | 14 | 15 |
| 3_C-R-11-22 | 1375.6 | 2551.1 | 14 | 15 |
| 3_C-R-33-55 | 1364.4 | 2570.1 | 15 | 15 |
| 3_C-R-66-88 | 1318.6 | 2533.8 | 14 | 15 |
| 3_C-RC-11-22 | 1556.5 | 2826.7 | 15 | 15 |
| 3_C-RC-33-55 | 1641.4 | 2756.5 | 15 | 15 |
| 3_C-RC-66-88 | 1527.9 | 2696.5 | 14 | 15 |
| 3_R-C-11-22 | 1337.1 | 2154.2 | 14 | 15 |
| 3_R-C-33-55 | 1232.7 | 2105.9 | 14 | 15 |
| 3_R-C-66-88 | 1256.0 | 2107.6 | 14 | 15 |
| 3_R-R-11-22 | 1310.5 | 2528.3 | 14 | 15 |
| 3_R-R-33-55 | 1310.0 | 2490.8 | 14 | 15 |
| 3_R-R-66-88 | 1256.2 | 2540.9 | 14 | 15 |
| 3_R-RC-11-22 | 1660.9 | 2750.4 | 14 | 15 |
| 3_R-RC-33-55 | 1574.5 | 2772.3 | 14 | 15 |
| 3_R-RC-66-88 | 1558.8 | 2747.2 | 14 | 15 |
| 3_RC-C-11-22 | 1110.3 | 2043.2 | 12 | 12 |
| 3_RC-C-33-55 | 1220.6 | 1996.9 | 12 | 12 |
| 3_RC-C-66-88 | 1182.9 | 1933.4 | 12 | 12 |
| 3_RC-R-11-22 | 1324.5 | 2474.1 | 12 | 12 |
| 3_RC-R-33-55 | 1193.8 | 2406.2 | 12 | 12 |
| 3_RC-R-66-88 | 1296.8 | 2456.8 | 12 | 12 |
| 3_RC-RC-11-22 | 1498.7 | 2595.0 | 12 | 12 |
| 3_RC-RC-33-55 | 1463.5 | 2640.8 | 12 | 12 |
| 3_RC-RC-66-88 | 1493.2 | 2639.2 | 12 | 12 |
| Average | 1365.7 | 2428.1 | 13.5 | 14.0 |
| Standard Deviation | 150.9 | 282.9 | 1.1 | 1.4 |
| Coefficient of Variance [†] | 11.0% | 11.7% | 8.1% | 10.0% |

[†] Coefficient of variance is the percentage of standard deviation divided by average value.

Table 7. Comparisons of Results between MRCVRP and VRP on Scenario 4

| Symbols of Instances | Distance of Routes | | Fleet Size | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|------------|-------|
| | MRCVRP | 3-VRP | MRCVRP | 3-VRP |
| 4_C-C | 1237.0 | 2177.1 | 15 | 15 |
| 4_C-R | 1230.4 | 2594.2 | 15 | 15 |
| 4_C-RC | 1476.2 | 2735.0 | 15 | 15 |
| 4_R-C | 1148.8 | 2103.5 | 12 | 12 |
| 4_R-R | 1171.7 | 2450.6 | 12 | 12 |
| 4_R-RC | 1489.6 | 2635.6 | 12 | 12 |
| 4_RC-C | 1248.0 | 2187.5 | 14 | 15 |
| 4_RC-R | 1208.0 | 2594.7 | 14 | 14 |
| 4_RC-RC | 1444.1 | 2792.9 | 14 | 15 |
| Average | 1294.8 | 2474.6 | 13.7 | 13.9 |
| Standard Deviation | 135.5 | 258.1 | 1.3 | 1.5 |
| Coefficient of Variance [†] | 10.5% | 10.4% | 9.5% | 10.8% |

[†] Coefficient of variance is the percentage of standard deviation divided by average value.

6. CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS

6.1 Findings and Conclusions

Multi-temperature fresh-keeping delivery service is gradually popularized in the convenience stores, supermarkets and cold food markets. With the invention of multi-temperature refrigerated container and transport system, it offers a bran-new technology and business solution in cold logistics practice. This article proposes a MRCVRP (Multi-temperature Refrigerated Container Vehicle Routing Problem) model which enables to be applied in multi-temperature fresh-keeping delivery service and to deliver multi-temperature goods in general trucks.

The main contributions of the study are to put forward the mathematical programming formulation of MRCVRP, and design a two-stage heuristic method that combines the modified savings algorithm and four interchange-based heuristics. Moreover, a set of sixty instances modified from Solomon's VRPTW benchmark instances is adopted to verify the feasibility of the MRCVRP model by three phases of experiments.

According to the computational results, we found that: (1) sequential SA1 obtains the smallest average fleet size and parallel SA0 renders the shortest average routing distance; (2) combination of four interchange heuristics is effective in lowering down the routing distance; and (3) among thirty-six instances, the MRCVRP performance apparently well than the traditional VRP. Therefore,

we conclude that MRCVRP presents high potentiality to be applied on the multi-temperature fresh-keeping delivery service in the distribution operation of the cold logistics companies.

6.2 Further Topics and Suggestions

The study only proposes the basic mathematical formulation and a heuristic algorithm for MRCVRP, and proves its benefit by means of experimental tests. There are many subjects still to be discussed. The following issues shall be considered in future researches on MRCVRP:

1. The manners to construct the initial solution are only available with original and modified savings algorithms, which should have been enhanced by proposing more powerful savings formulas. Furthermore, other methods, such as the nearest neighbor algorithm and the insertion-based algorithms, could be considered.
2. This study designs a simple heuristic method applicable to solve the MRCVRP, yet there is something could be improved. For example, introduction of some meta-heuristics, such as the tabu search, ant system and threshold accepting, is possible to promote the performance of problem-solving.
3. This study assumes that the capacity of vehicle and refrigerated container are fixed. Hence, vehicles or refrigerated containers of different sizes can be simultaneously considered in the future.
4. Further consideration of real situation, such as the time-window constraint on serving customers should be emphasized and involved into the MRCVRP model.
5. It is important to collect the actual cost and operating data from some cold logistics companies, such as cold distribution center, and home delivery, which have adopted the multi-temperature refrigerated container to deliver goods. Usage of these data, we can identify the real performance of MRCVRP and maybe reduce the transportation cost of the cold logistics companies.

REFERENCES

Christofides, N. and Eilon S. (1969) An algorithm for vehicle dispatching problem. **Operational Research Quarterly**, Vol. 20, 309-318.

Clarke, G. and Wright J.W. (1964) Scheduling of vehicles from a central depot to a number of

delivery points. **Operations Research**, Vol. 12, No. 4, 568-581.

Donna D.L. (1992) Refrigerated cargo: New technologies service the challenging reefer trade. **Global Trade**, Vol. 112, Issue 6, 16-18.

Golden, B.L., Assad, A., Levy, L. and Gheysens, F.G. (1984) The fleet size and mix vehicle routing problem. **Computers and Operations Research**, Vol. 11, 49-66.

Hung, S.F. (2003) **The Study on Vehicle Routing Problem for Distributing Refrigerated Food**. Master thesis, National Chiao Tung University, R.O.C. (in Chinese)

Kuo R.G. (2003) Developments and applications of the low-temperature logistics containers. Presented at the Conference of Integrated Developments on Logistics and Distribution Applications, Taipei, R.O.C. (in Chinese)

Kuo R.G. (2004a) Innovational technology: Multi-temperature Fresh-keeping home delivery service system (I). **Modern Material Handling and Logistics**, Vol. 7, 34-43. (in Chinese)

Kuo R.G. (2004b) Innovational technology: Multi-temperature Fresh-keeping home delivery service system (II). **Modern Material Handling and Logistics**, Vol. 8, 90-99. (in Chinese)

Lai Y.S. (2003) **A study on the multi-temperature energy storage materials**. Master thesis, Chinese Culture University, R.O.C. (in Chinese)

OLIVO Inc. (2004), <http://en.olivo-logistics.com>.

Solomon, M.M. (1983) **Vehicle routing and scheduling with time window constraints: Models and algorithms**. Ph.D. dissertation, Department of Decision Sciences, University of Pennsylvania.

Tarantilis C.D., Kiranoudis C.T. and Vassiliadis V.S. (2004) A threshold accepting meta-heuristic for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. **European Journal of Operation Research**, Vol. 152, 148-158.

Tseng, M.Y. (1998) **The Study of Time-based Window Vehicle Routing Problems for Cold Delivery at Night in the Urban Area**. Master thesis, National Chung Hsing University, R.O.C. (in Chinese)

Wang, K.P. (2001) **Applying Genetic Algorithm to the Vehicle Routing and Scheduling Problem of a Frozen Foods Distribution Center**. Master thesis, Chaoyang University of Technology, R.O.C.

(in Chinese)

Wang, P.Y. (2000) **Modeling and Solving the Frozen Food Distribution Problem**. Master thesis, Chaoyang University of Technology, R.O.C. (in Chinese)

蓄冷保溫箱應用於多溫共配系統之最適規格分析

Analysis of the Optimal Size of Storage Box for the Multi-temperature Distribution System

卓裕仁 Cho, Yuh-Jen¹

黃嘉芬 Huang, Chia-Fen²

林思余 Lin, Szu-Yu²

陳玫君 Chen, Mei-Chun²

摘要

近年來低溫商品的市場規模逐年擴大，帶動了國內低溫物流配送需求的成長與全溫層保鮮宅配服務的興起。低溫物流配送的物品不僅具備多樣少量的特性外，還有不同溫層。因此如果可將多樣少量且不同溫層的物品一起配送，即可能降低配送成本、提升競爭力。抽換式蓄冷保溫箱(Multi-temperature Storage Box)是一種新興的科技，利用抽換式蓄冷保溫箱搭配常溫車配送，可藉由保溫箱搭配不同蓄冷器來達到多溫共配的功能。本研究透過訪談國內已實際使用蓄冷保溫箱的物流廠商，了解其對蓄冷保溫箱規格的需求，並建立四個數學規劃模式與透過模擬的方式產生多溫層商品的需求情境，藉以分析比較不同蓄冷保溫箱規格與車種的車輛使用成本。

關鍵詞：多溫共配、低溫物流、蓄冷保溫箱、最適規格

Abstract

The market growth of refrigerated and frozen products stimulates the development of multi-temperature distribution and transportation system. Several innovated technologies have been proposed to improve the performance of cold logistics. For example, the multi-temperature storage box (MSB), a high-efficiency eutectic vessel, is able to carry products with different temperatures and to reduce the number of delivery trips needed. Due to the lack of research on the usage of MSB, this paper aims to build an analysis theme to design the optimal size of MSB which meets the practical needs of cold logistics carriers. First, we propose four supply-oriented mathematical programming formulations and execute a comprehensive simulation to analyze the cost of the specific size of MSB under different scenarios of products demand. The simulated results indict that the optimal size of MSB solved from the MP models averagely experiences lower cost than other sizes of MSB.

Keywords: Multi-temperature Distribution, Cold Logistics, Eutectic Storage Box, Optimal Size.

一、前言

近年來，由於外食人口增加，以及國人對飲食經濟性與方便性的重視，造成便利商店家數急遽增加。除了冷凍（-18 ~ -25°C）與冷藏（0 ~ 5°C）食品的需求量大幅成長外，知名的連鎖便利商店體系，如 7-11、全家、萊爾富等，也積極拓展鮮食市場搶奪商機。因此，低溫

¹中華大學運輸科技與物流管理學系助理教授（聯絡地址：新竹市五福路二段 707 號，電話：03-5186597，E-mail: yicho@chu.edu.tw）

²中華大學運輸科技與物流管理學系大學部學生

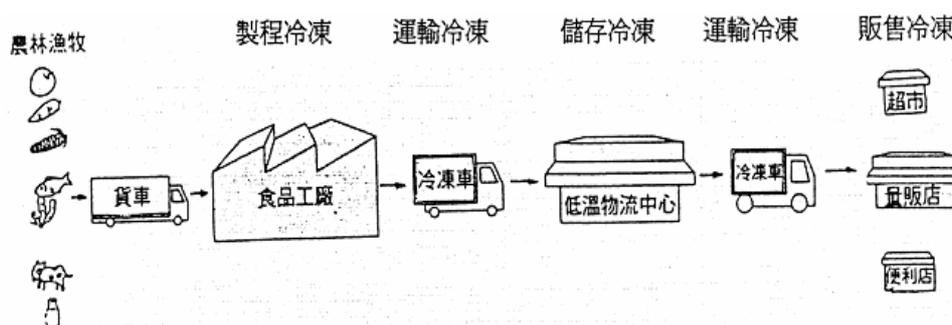
商品市場就在上述因素的帶動下，逐年蓬勃發展，也間接促使低溫物流（Cold Logistics）與全溫層保鮮宅配服務的興起。如表 1 所示，根據工研院經資中心的統計（郭儒家，民 90），西元 2000 年台灣低溫食品的市場營業規模已超過 2000 億元，成長相當快速；其中，現代化零售通路又以量販店與便利商店所佔的比例最高。

表 1、台灣低溫食品在現代化零售通路的銷售情形(單位：佰萬元)

| 年份 | 現代化零售通路 | | | | | 餐飲業務通路 | 合計 |
|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | 百貨公司 | 超級市場 | 便利商店 | 量販店 | 其他 | | |
| 1998 年 | 2,350 | 21,671 | 29,682 | 32,459 | 12,875 | 42,444 | 141,481 |
| 1999 年 | 2,563 | 22,716 | 35,393 | 38,801 | 13,262 | 60,704 | 173,441 |
| 2000 年 | 2,828 | 22,885 | 38,009 | 45,571 | 13,823 | 82,138 | 205,345 |

資料來源：郭儒家（民 90）

廣義的低溫物流（郭儒家，民 92），亦稱之為冷凍鏈（Cold Chain）體系。如圖 1 所示，冷凍鏈包括原材料供應物流，加工工廠內生產物流及販賣物流三大部分。在此冷凍鏈的過程中，必須仰賴一連串合乎放置低溫商品標準的冷凍冷藏設備，使每一環結均能維持食品的最適宜溫度，確保其衛生及品質；而狹義的低溫物流僅指販賣物流。



資料來源：郭儒家(民 92)

圖 1、冷凍鏈體系示意圖

根據工研院的分類（李森峰，民 92），商品的溫層共可分為七類：熱食（60°C 以上）、常溫（一般環境溫度）、鮮食（恆溫 18°C）、冷藏（0°C ~ 7°C）、冰溫（-2°C ~ 2°C）、冷凍/冰品（-18°C ~ -25°C）、超低溫（-30°C 以下）。除上述分類外，亦可將冷藏與冰溫合併，冷凍與超低溫合併，而簡化成五個溫層（熱食、常溫、鮮食、冷藏、冷凍）。所謂全溫層保鮮宅配服務即強調各種溫層的食品從供應端、倉儲、配送到銷售端的所有過程都需施以最佳溫度控制，每個過程都必須確保品質保鮮及安全衛生，以維持食物原來的價值與品質（郭儒家，民 93a）。

目前國內的全溫層保鮮宅配服務系統共有四種配送方式（郭儒家，民 93b）：(1) 傳統多車配送，分別使用冷凍車、冷藏車及常溫車來運送不同溫層的商品，無法進行共同配送。(2) 機械式冷凍車廂區隔配送，利用車輛引擎帶動壓縮機運轉，並以隔板將車廂分隔成不同溫層區間。(3) 機電共用式保冷櫃配送，將電冰箱式保冷櫃裝載於車上，再利用剩餘空間放置常溫物品達到共同配送。(4) 抽換式蓄冷保溫箱配送，利用可抽換的蓄冷器放入保溫箱中，再將保溫箱放入常溫配送車輛車廂，以達到不同溫層物品的共同配送。

表 2 彙整比較上述四種配送系統的特色；由表 2 可知，抽換式蓄冷保溫櫃較其它三種系統具使用上的優勢。以目前實務界大多採用機械式冷凍車廂區隔系統為例，其共配溫層只分為冷藏與冷凍兩種。機械式系統的主要缺點在於：配送時，每次開車廂門卸貨會造成車廂內溫度上升，當店舖相鄰太近時易因開門次數頻繁而導致車廂內溫度無法保持在適當的低溫，

進而影響商品的品質。此外，偏遠地區的需求通常是多樣少量的產品組合，以觀光景點廬山、霧社的 7-11 為例，如果以一日兩配來計算，每天必須派遣常溫車與冷凍車各 2 趟次，非常沒有效率。如果利用抽換式蓄冷保溫箱搭配常溫車配送，即可只派遣 1 部常溫車執行 1 趟車次，藉由蓄冷保溫箱搭配不同蓄冷器來達到共同配送常溫與低溫的物品（郭儒家，民 93b）。

表 2、全溫層保鮮宅配服務系統比較表

| 系統種類 | | 傳統 多車配送 | 機械式 冷凍車廂區隔 | 機電共用式 保冷櫃 | 抽換式 蓄冷保溫箱 |
|------|------|--------------|-----------------|----------------|----------------|
| 系統特色 | | 使用多種溫度車輛各別配送 | 車廂區隔溫域，引擎驅動冷凍機組 | 電冰箱式保冷櫃及機械式冷凍箱 | 抽換式蓄冷保溫箱、無冷凍機組 |
| 車輛配備 | | | 冷凍車+車廂區隔 | 常溫車+機械式冷凍櫃 | 常溫車+蓄冷箱 |
| 系統比較 | 溫域 | 單車單溫 | 多溫 | 多溫 | 多溫 |
| | 共配 | 不可 | 可 | 可 | 可 |
| | 凍結系統 | 個別車用冷凍機 | 個別車用冷凍機 | 個別櫃用冷凍機 | 集中式冷凍機 |
| | 故障率 | 低 | 高 | 高 | 中 |
| | 均溫性 | 低(機械冷凍) | 低(機械冷凍) | 低(機械冷凍) | 高 |
| | 溫度彈性 | 低 | 高(設定溫控) | 高(設定溫控) | 高(抽換蓄冷器) |
| | 空間彈性 | 低 | 中 | 低 | 高 |
| | 操作成本 | 高 | 高 | 中 | 低 |

資料來源：郭儒家（民 93b）與本研究整理

抽換式蓄冷保溫箱（Multi-temperature Storage Box, MSB），以下簡稱蓄冷箱，是由工研院能資所研發的一種新興科技，其構成可分為：可抽換式蓄冷器（Eutectic Plate）及蓄冷保溫箱（Eutectic Cold Refrigerated Container）兩部分。將蓄冷箱與一般配送車輛結合，即成為蓄冷保溫箱式的多溫共配系統（郭儒家，民 93a）。目前工研院能資所研發的蓄冷箱規格只符合搬運時之便利性，並未考慮到物流配送時是否會浪費車廂的裝載空間，而導致無法有效利用車廂空間，進而增加了使用車輛的成本（李長駿，民 93）。

有鑑於此，本研究遂以抽換式蓄冷保溫箱應用於全溫層保鮮宅配服務的多溫共配系統為研究對象，深入探討蓄冷箱規格的課題。本研究透過訪談國內已實際使用蓄冷箱的物流廠商，了解其對蓄冷箱規格的需求，並建立數學規劃模式來求得滿足不同車廂之最小購置成本與最大裝載容積的蓄冷箱最適規格；然後使用模擬的方式產生多溫層商品的需求情境，藉以分析比較不同蓄冷箱規格的使用效益與成本。

本文後續章節安排如下：第二節簡要回顧低溫物流與多溫共配之相關文獻研究；第三節介紹兩種最適規格分析模式，分別從供給面與需求面來考量模式建置；第四節說明各種模擬情境的設計與模擬結果之分析比較；最後於第五節提出結論與未來發展方向。

二、文獻回顧

有關低溫物流與多溫共配方面的文獻並不多見。在低溫物流配送方面，國內外文獻大多認為低溫食品因有保存期限且為滿足顧客需求，而將其配送車輛路線模式構建成車輛路線相關問題來求解；少數的文獻同時考慮了裝載與配送的問題，至於多溫共配之車輛裝載問題則缺乏深入探討。茲簡要整理相關文獻之成果與結論於下：

Tarantilis et al. (2004) 針對如何有效率的配送易腐性食物（例如：牛奶、新鮮蔬果與肉品）問題，提出「多車種車輛路線問題（Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem,

HVRP)」的解決方法，目標為運輸成本最小，並發展「回溯調適式門檻接受法 (Back-tracking adaptive threshold accepting, BATA)」來求解 HVRP 問題。國內文獻方面，曾敏雅 (民 87) 考慮即時資訊與路口號誌變化，進行都會區夜間之低溫物流配送研究。王保元 (民 89) 使用混合型時窗，而且將行駛成本與懲罰成本一併納入目標函數中，以構建「時窗限制車輛路線問題 (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW)」模式，並以基因演算法求解之。王耿彬 (民 90) 延伸王保元之研究，應用基因演算法求解低溫冷凍物流中心之車輛配送排程問題。洪聖峰 (民 92) 對於低溫物流的實際配送情形，假設在運送時間和產品的保存上存有「隨機」的特性，構建「隨機性時窗限制車輛路線問題 (Stochastic Vehicle Routing Problem with Time Windows, SVRPTW)」，並發展啟發式演算法。

江至祥 (民 82) 整合車廂貨品堆疊與配送路線問題並構建數學模式，其目標函數有三項：(1) 尋求裝貨與配送的最小成本；(2) 增加車廂空間的利用率，以減少車輛數；(3) 平均車廂的利用率以避免某部車負荷過重。羅毓文 (民 84) 以江至祥 (民 82) 提出的數學規劃模式為基礎，分別利用最佳解法與設計近似解法求解之；其設計三階段的近似解法包括：貨品堆疊求解模組、旅行推銷員問題求解模組及集合分組求解模組。

簡世釗 (民 90) 認為商品配送車輛需具有同時運送不同物理特性商品的功能 (例如冰品和乾糧)，因此車輛的裝載容量限制不再是指可裝載重量，而是具有多種承載容器的容量限制。該研究建構了「多商品流車輛路線問題 (Multi-Commodity Vehicle Routing Problem, MCVRP)」，並以兩層式的基因演算法求解之。卓裕仁與李長駿 (民 93) 首度探討將抽換式蓄冷保溫箱應用於多溫共配系統的可行性與效益，假設先將不同溫度的物品放入不同溫層的蓄冷箱中，再將蓄冷箱負載於一般貨車車廂內以進行配送，提出了「多溫共配車輛路線問題 (Multi-temperature Storage Box Vehicle Routing Problem, MSBVRP)」之數學規劃模式，以及一個可求解 MSBVRP 的啟發式演算法；該研究並假設四種需求情境，修改 Solomon (1983) 所提出的 VRPTW 標竿例題，產生了 60 個 MSBVRP 例題來進行績效測試。然而，該研究並未蒐集到蓄冷箱的實際成本資料，也未考慮蓄冷箱規格對不同車種的適用性。

在車輛裝載的文獻方面，傳統的處理方式是利用「背包問題 (Knapsack Problem, KP)」或「裝罐問題 (Bin-Packing Problem, BPP)」等模式來求解，後續的研究則注重於細部的堆疊問題上 (George & Robison, 1980; Dowsland & Dowsland, 1992)。張美忠 (民 81) 探討貨車棧板裝載問題，將其視為是二維的裝載問題而發展一整數規劃模式。Liu & Hsiao (1997) 探討相同的棧板裝載問題，將物件視為長方體並將其三個面向分別簡化為二維空間的裝載問題，然後再以數學規劃模式求解之。上述研究皆將物體視為單一規格，至於多種不同規格物體的裝載或堆疊方面，由於問題變得相當複雜，文獻上多發展啟發式方法或巨集啟發式方法來求解，其細節可參見文獻 (Ngoi et al., 1994; Chen et al., 1995; Terno, 2000; Letchford & Amaral, 2001)。

三、最適規格分析模式建立

本節首先從實務應用的角度歸納出低溫物流業者對蓄冷箱規格的特性需求，然後從供給面切入建立蓄冷箱最適規格的數學模式與啟發式求解方法，並根據傳統的裝箱問題 (BPP) 建立多溫共配之蓄冷箱裝載模式，以做為第四節模擬分析之用。

3.1 蓄冷箱規格之特性需求

本研究從訪談國內已實際使用蓄冷箱的物流業者得知，在低溫 (或全溫層) 的物流配送方面：物流中心的入向 (In-bound) 運輸是由供應商以整車運輸的方式將商品送達，大多採用大噸位 (35 噸) 的貨櫃車而且不進行多溫共配；出向 (Out-bound) 運輸則是由物流中心配

送給各零售商或顧客，屬於零擔運輸，採用小噸位的貨車且可進行多溫共配。

因此，本研究即以上述的物流中心出向運輸為應用對象，探討在採用蓄冷箱進行多溫共配之系統下，建置其蓄冷箱最適規格的分析模式。本研究分別從兩種不同的角度來分析蓄冷箱的最適規格：(1) 供給面：從低溫物流業者的立場來看，在無法掌握需求變化的情形下，僅能以配送設備的投資成本與使用效率來規劃其蓄冷箱的規格。(2) 需求面：雖然實際的需求充滿不確定性，但是從需求的歷史資料中亦可歸納出某些特性與型態，然後可藉由模擬的方式來分析蓄冷箱規格在各種需求情境下的使用效率與成本。

根據工研院能資所對 40 家低溫物流應用聯盟成員業者所進行的調查報告（鍾震麒，民 93）可知，業者對應用蓄冷箱之意見大多認為，在設計蓄冷箱規格時應考慮下列重要因素：(1) 與車廂尺寸配合；(2) 尺寸統一，大中小箱齊備；(3) 質輕易於搬移（減少箱體重量，增加可承載貨品重量）。

由於業者早已建置了自有的配送車隊，因此蓄冷箱規格必須配合現有車輛的車廂尺寸；由於配送車隊中通常包含有數種不同規格（車廂尺寸）的貨車，因此最適的蓄冷箱規格必須能最有效利用所有車種的車廂空間。

現代化物流講求配送的效率與安全，最顯著的例子就是貨物載具的單元化與標準化（如，貨櫃與棧板），對具有多樣少量需求的連鎖便利商店體系而言，物流箱的使用大大提升了配送的效率與安全。因此，在導入蓄冷箱於多溫共配系統時，亦須考慮採取統一標準的規格；除此之外，由於配送過程中皆由人工方式進行裝卸，所以箱體不能太大太重，才能利於搬運（符合人因工程設計）。

3.2 蓄冷箱最適規格模式與求解方法

基於上述的蓄冷箱規格特性需求，本小節提出蓄冷箱最適規格的數學模式。本模式具有下列特點：(1) 蓄冷箱具有單一規格（標準化）；(2) 同時考慮多種車廂尺寸之貨車；(3) 考慮「成本」與「效率」兩種目標。茲定義相關參數與決策變數，如下：

L_k ：參數；第 k 種貨車之車廂內部長度， $k = 1 \sim K$ 。

W_k ：參數；第 k 種貨車之車廂內部寬度， $k = 1 \sim K$ 。

H_k ：參數；第 k 種貨車之車廂內部高度， $k = 1 \sim K$ 。

V_k ：第 k 種貨車之車廂內體積（容積）， $k = 1 \sim K$ 。

p_k ：第 k 種貨車可裝載之最大蓄冷箱數量， $k = 1 \sim K$ 。

l ：決策變數；蓄冷箱之外部長度。

w ：決策變數；蓄冷箱之外部寬度。

h ：決策變數；蓄冷箱之外部高度。

v_0 ：蓄冷箱之外體積。

v_l ：蓄冷箱之內體積（容積）。

$\hat{\alpha}$ ：參數；蓄冷箱之固定材料成本。

$\hat{\beta}$ ：參數；蓄冷箱之變動材料成本。

δ ：參數；蓄冷箱之箱板厚度。

$\bar{\lambda}$ 與 $\underline{\lambda}$ ：參數；蓄冷箱箱體長度之上限值與下限值。

$\bar{\omega}$ 與 $\underline{\omega}$ ：參數；蓄冷箱箱體寬度之上限值與下限值。

$\bar{\eta}$ 與 $\underline{\eta}$ ：參數；蓄冷箱箱體高度之上限值與下限值。

在成本方面，本研究考慮「蓄冷箱之購置成本極小化」；根據工研院能資所提供的資料顯示，蓄冷箱的購置成本大致與其箱板體積（材料）成正比並有一固定成本，因此蓄冷箱購置成本極小化之目標函數可表示如式(1)：

$$\text{Minimize: } z_1 = \sum_{k=1}^K p_k \cdot \left[\hat{\alpha} + \hat{\beta}(v_O - v_I) \right] \quad (1)$$

其中， $p_k = \left\lfloor \frac{L_k}{l} \right\rfloor \cdot \left\lfloor \frac{W_k}{w} \right\rfloor \cdot \left\lfloor \frac{H_k}{h} \right\rfloor$ ， $v_O = l \cdot w \cdot h$ ， $v_I = (l - 2\delta)(w - 2\delta)(h - 2\delta)$ 。

在效率方面，本研究考慮「車廂總剩餘空間極小化」與「總載貨容積極大化」兩項目標。車廂總剩餘空間極小化之目的在反映車廂的利用效率，使各種車廂空間能盡量裝滿蓄冷箱；總載貨容積極大化之目的則直接反映出車廂的有效載貨空間。上述兩項目標都是針對車廂空間的使用效率進行評估，具有很高的相關性，可擇一使用。目標函數分別如式(2)與式(3)所示：

$$\text{Minimize: } z_2 = \sum_{k=1}^K (V_k - p_k \cdot v_O) \quad (2)$$

其中， $V_k = L_k \cdot W_k \cdot H_k$ 。

$$\text{Maximize: } z_3 = \sum_{k=1}^K p_k \cdot v_I \quad (3)$$

如前所述，蓄冷箱規格須考慮人因特性，其體積與重量必須有所規範，而重量又與其容積有密切關係，因此蓄冷箱的長度、寬度與高度必須在某一合理範圍內，其值域限制如式(4)。

$$\underline{\lambda} \leq l \leq \bar{\lambda}, \quad \underline{\omega} \leq w \leq \bar{\omega}, \quad \underline{\eta} \leq h \leq \bar{\eta} \quad (4)$$

由上述模式可知，蓄冷箱規格的決策變數雖僅有長度(l)、寬度(w)與高度(h)，然而目標函數中由此三個決策變數所衍生的變數，如： p_k 、 v_O 、 v_I 卻屬於多項式的形式，尤其 p_k 更是不連續之整數函數，難以用最佳化的技巧（如：微分）來求解。因此，本研究即針對上述模式提出一啟發式演算法則，以便於求解。

承前，最適規格模式的求解關鍵在於 p_k 值之計算，分成 $\lfloor L_k/l \rfloor$ 、 $\lfloor W_k/w \rfloor$ 與 $\lfloor H_k/h \rfloor$ 三個部分，式中的 $\lfloor \cdot \rfloor$ 符號係指「取最大下界整數」，亦即對該符號內之數值無條件捨去小數值，例如： $\lfloor 5.01 \rfloor$ 與 $\lfloor 5.99 \rfloor$ 的結果皆為 5。就車廂空間利用率之目標而言，在相同可裝載之最大蓄冷箱數量（即 p_k ）下， $\lfloor \cdot \rfloor$ 符號內的數值愈小，其車廂剩餘空間愈少、車廂利用率愈高。從成本的角度來看，在充分使用車廂空間的前提下， p_k 值愈大，其購置成本愈高、載貨容積愈少；這也支持了 $\lfloor \cdot \rfloor$ 內數值愈小的好處。由於公式中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 內的分子皆為定值，所以 $\lfloor \cdot \rfloor$ 內的分母愈大，表示 $\lfloor \cdot \rfloor$ 內數值愈小。因此，本研究提出的啟發式演算法則如下：

步驟一：計算 p_k 組合的長度、寬度、高度可能範圍（下限整數與上限整數）。

$$\underline{nl}_k = \left\lfloor \frac{L_k}{\underline{\lambda}} \right\rfloor, \quad \overline{nl}_k = \left\lfloor \frac{L_k}{\bar{\lambda}} \right\rfloor \quad (5)$$

$$\underline{nw}_k = \left\lfloor \frac{W_k}{\underline{\omega}} \right\rfloor, \quad \overline{nw}_k = \left\lfloor \frac{W_k}{\bar{\omega}} \right\rfloor \quad (6)$$

$$\underline{nh}_k = \left\lfloor \frac{H_k}{\eta} \right\rfloor, \quad \overline{nh}_k = \left\lceil \frac{H_k}{\eta} \right\rceil \quad (7)$$

步驟二：計算決策變數的候選數值集合 L 、 W 、 H 。

$$L = \left\{ l = \frac{L_k}{nl_k} \mid nl_k = \underline{nl}_k \sim \overline{nl}_k, k = 1 \sim K \right\} \quad (8)$$

$$W = \left\{ w = \frac{W_k}{nw_k} \mid nw_k = \underline{nw}_k \sim \overline{nw}_k, k = 1 \sim K \right\} \quad (9)$$

$$H = \left\{ h = \frac{H_k}{nh_k} \mid nh_k = \underline{nh}_k \sim \overline{nh}_k, k = 1 \sim K \right\} \quad (10)$$

步驟三：列出所有的蓄冷箱候選規格組合，形成集合 S 。

$$S = \{(l, w, h) \mid l \in L, w \in W, h \in H\} \quad (11)$$

步驟四：根據 S 中的規格分別計算其目標函數值，並從中選擇各目標下最佳之規格，形成蓄冷箱候選最適規格集合 S^* 。停止。

$$S^* = \{(l^*, w^*, h^*)\} \quad (12)$$

其中， $z_1(l^*, w^*, h^*) = \underset{(l, w, h) \in S}{\text{Min}} z_1(l, w, h)$ 、 $z_2(l^*, w^*, h^*) = \underset{(l, w, h) \in S}{\text{Min}} z_2(l, w, h)$ 或

$z_3(l^*, w^*, h^*) = \underset{(l, w, h) \in S}{\text{Max}} z_3(l, w, h)$ 。

3.3 蓄冷箱裝載問題之數學規劃模式

如前所述，由於需求的不確定性，本研究採用模擬的方式來分析蓄冷箱規格在各種需求情境下的使用效率與成本。模擬時，必須將不同溫層的商品分別裝入適當溫度的蓄冷箱中，然後再將蓄冷箱裝載至貨車車廂內。所採用的蓄冷箱規格為運用 3.2 小節之啟發式演算法則所求得的候選最適規格。

3.3.1 未考慮個別顧客需求量之裝載問題模式

若僅考慮各溫層商品之總需求量而不區分個別顧客的需求量時，採用蓄冷箱之多溫共配系統裝載問題可以下列數學規劃模式表示之：

$$[\text{MP1}] \quad \text{Minimize :} \quad \sum_{k=1}^K f_k \cdot u_k \quad (13)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{k=1}^K p_k \cdot u_k \geq \sum_{t=1}^T q_t \quad (14)$$

$$u_k \geq 0 \ \& \ \in I \quad \forall k \quad (15)$$

其中， u_k 為決策變數，指第 k 種（車廂尺寸）貨車之使用數量； f_k 為第 k 種貨車之使用成本； q_t 為第 t 種溫層的蓄冷箱需求量， $t = 1 \sim T$ ； p_k 的定義同前。式(13)為目標函數，求總車輛使用成本極小化；式(14)限制總供給量（總使用貨車之裝載容量）必須大於或等於總需求量（所有溫層的蓄冷箱需求量總和）；式(15)為決策變數之非負整數限制式。

另一方面，若採用傳統的多溫多車配送系統（每輛貨車只能裝載一種溫層商品），其裝載

問題之數學規劃模式如下：

$$[\text{MP2}] \quad \text{Minimize :} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T f_{kt} \cdot u_{kt} \quad (16)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{k=1}^K p_k \cdot u_{kt} \geq q_t \quad \forall t \quad (17)$$

$$u_{kt} \geq 0 \ \& \in I \quad \forall k, t \quad (18)$$

其中， u_{kt} 為決策變數，指裝載第 t 種溫層商品之第 k 種貨車使用數量； f_{kt} 為配送第 t 種溫層之第 k 種貨車使用成本； q_t 、 p_k 之定義同前。式(16)為目標函數，求總車輛使用成本極小化；式(17)限制各溫層商品使用之貨車總裝載容量必須大於或等於該溫層的蓄冷箱需求量；式(18)為決策變數之非負整數限制式。

3.3.2 考慮個別顧客需求量之裝載問題模式

若考慮模擬各顧客對各溫層商品之需求的貨車裝載問題，其數學規劃模式將較為複雜。假設各種車廂尺寸的貨車數足夠，每位顧客所需的各種溫層商品必須交由同一輛貨車來配送（需求不可分割性），則蓄冷箱多溫共配裝載問題之數學規劃模式可表示如下：

$$[\text{MP3}] \quad \text{Minimize :} \quad \sum_{k=1}^K f_k \left(\sum_{j=1}^M y_{jk} \right) \quad (19)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K x_{ijk} = 1 \quad \forall i \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ijk} - N \cdot y_{jk} \leq 0 \quad \forall j, k \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^N q_i \cdot x_{ijk} \leq p_k \quad \forall j, k \quad (22)$$

$$x_{ijk}, y_{jk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k \quad (23)$$

其中， y_{jk} 為決策變數， $y_{jk} = 1$ 表示第 k 種貨車之第 j 輛車被使用，否則 $y_{jk} = 0$ ； x_{ijk} 為決策變數， $x_{ijk} = 1$ 表示第 i 位顧客被第 k 種貨車之第 j 輛車配送，否則 $x_{ijk} = 0$ ， $i = 1 \sim N$ ； f_k 與 p_k 的定義同前； q_i 為第 i 位顧客所有溫層的蓄冷箱總需求量。式(19)為目標函數，求總車輛使用成本極小化；式(20)限制每位顧客只能由某一輛貨車配送；式(21)為邏輯限制式，若第 k 種貨車之第 j 輛車被使用，顧客才能交由該車配送；式(22)為容量限制式，第 k 種貨車之第 j 輛車所服務顧客的蓄冷箱需求量總和不得超過該車種的裝載容量；式(23)為決策變數之雙元整數限制式。

最後，若採用傳統的多溫多車配送系統，其考慮各顧客對各溫層商品之需求的貨車裝載問題數學規劃模式為：

$$[\text{MP4}] \quad \text{Minimize :} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T f_{kt} \left(\sum_{j=1}^M y_{jkt} \right) \quad (24)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K x_{ijkt} = 1 \quad \forall i, t \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ijkt} - N \cdot y_{jkt} \leq 0 \quad \forall j, k, t \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{it} \cdot x_{ijkt} \leq p_k \quad \forall j, k, t \quad (27)$$

$$x_{ijkt}, y_{jkt} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, t \quad (28)$$

其中， y_{jkt} 為決策變數， $y_{jkt} = 1$ 表示配送第 t 種溫層商品之第 k 種貨車第 j 輛車被使用，否則 $y_{jkt} = 0$ ； x_{ijkt} 為決策變數， $x_{ijkt} = 1$ 表示第 i 位顧客的第 t 種溫層商品被第 k 種貨車之第 j 輛車配送，否則 $x_{ijkt} = 0$ ； f_{kt} 與 p_k 的定義同前； q_{it} 為第 i 位顧客之第 t 種溫層的蓄冷箱需求量。式(24)為目標函數，求總車輛使用成本極小化；式(25)限制每位顧客的第 t 種溫層商品只能由某一輛貨車配送；式(26)為邏輯限制式，若配送第 t 種溫層商品之第 k 種貨車第 j 輛車被使用，顧客才能交由該車配送；式(27)為容量限制式，配送第 t 種溫層商品之第 k 種貨車第 j 輛車所服務顧客的蓄冷箱需求量總和不得超過該車種的裝載容量；式(28)為決策變數之雙元整數限制式。

四、需求情境設計與模擬結果分析

本研究透過實地訪談國內低溫物流業者蒐集實際資料來進行模擬分析。如第三節所述，蓄冷箱的最適規格分析分為兩個部分：首先，從供給面的角度，藉由 3.2 小節建立之蓄冷箱最適規格啟發式演算法來產生候選最適規格集合。然後，再利用模擬分析的方法，評估候選最適規格在各種不同需求情境下的使用成本與效率，並與傳統的多溫共配系統（如：機械式車廂之冷凍、冷藏車配送）進行購置成本之比較。

4.1 蓄冷箱候選最適規格集合之產生

本研究首先根據工研院能資所的蓄冷箱成本資料進行成本曲線之配適與迴歸分析。假設蓄冷箱的購置成本與其材料多寡有關，一般而言，蓄冷箱的材料用量約等於其箱板體積（即外體積減去內容積， $v_O - v_I$ ）。茲假設蓄冷箱購置成本為一具有截距之線性函數，經帶入表 3 之實際數值並進行曲線配適與參數校估後，求得式(29)之成本估計函數：

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot (v_O - v_I) = 3066 + 0.052(v_O - v_I), R^2 = 0.959385 \quad (29)$$

表 3、固定容積式蓄冷箱之規格資料

| 型 號 | C70A | C90A | C180A |
|--------------|---|-------------|-------------|
| 外觀尺寸 (公分) | 62W×46.5D×48H | 64W×56D×54H | 96W×64D×54H |
| 箱內尺寸 (公分) | 52W×38D×37H | 51W×43D×42H | 83W×51D×42H |
| 最大容量 | 70 公升 | 90 公升 | 180 公升 |
| 建議價格 | \$6,600 元 | \$7,600 元 | \$11,000 元 |
| 箱體特徵 | ABS 成型 PU 發泡箱體，門栓配件內嵌，兩手提把，標籤座 | | |
| 蓄冷能力 | 12 小時（可視需求調整） | | |
| 蓄 冷 器 | 冷凍×2；冷藏×1 | 冷凍×3；冷藏×2 | 冷凍×5；冷藏×3 |
| | 尺寸：54.5L×16.7W×3.5H 公分；定溫蓄冷能力：120kcal/支 | | |

資料來源：工研院能資所。

表 4 彙整三種不同噸位之貨車規格與價格資料。常溫車係指一般的貨車；冷凍、冷藏車則是機械式車廂之貨車，目前並無 10.5 噸與 15 噸之冷凍、冷藏車資料。其他經由訪談蒐集到的相關資料，包括：

- (1) 蓄冷箱之箱板厚度： $\delta = 6$ 公分。
- (2) 蓄冷箱購置成本參數： $\hat{\alpha} = 3066$ ， $\hat{\beta} = 0.052$ 。
- (3) 蓄冷箱箱體長度之上限值與下限值： $\bar{\lambda} = 65$ 公分， $\underline{\lambda} = 55$ 公分。
- (4) 蓄冷箱箱體寬度之上限值與下限值： $\bar{\omega} = 50$ 公分， $\underline{\omega} = 40$ 公分。
- (5) 蓄冷箱箱體高度之上限值與下限值： $\bar{\eta} = 50$ 公分， $\underline{\eta} = 40$ 公分。

表 4、貨車之規格與售價資料

| 貨車噸位 | | 3.49 噸 | 10.5 噸 | 15 噸 |
|------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 常溫車 | 車廂內尺寸(公分) | 307L×169W ×182H | 722L×226W ×249H | 732L×250W ×250H |
| | 建議價格(元) | \$630,000 | \$1,260,000 | \$1,560,000 |
| 冷凍車 | 車廂內尺寸(公分) | 310L×178W ×160H | N/A | N/A |
| | 建議價格(元) | \$780,000 | N/A | N/A |
| 冷藏車 | 車廂內尺寸(公分) | 310L×178W ×160H | N/A | N/A |
| | 建議價格(元) | \$750,000 | N/A | N/A |

資料來源：常溫車為中華三菱公司，冷凍/藏車為邵利公司；N/A 表示無相關資料。

本研究應用 3.2 小節建立的啟發式演算法來產生候選最適規格集合，在帶入表 4 之三種常溫車相關資料進行計算後，結果從 24 組候選規格中分別找出滿足「材料總成本極小化」、「車廂總剩餘空間極小化」與「總載貨容積極大化」之三組候選最適規格，其中「材料總成本」是以 3.49 噸車廂所使用的保溫箱總數之成本，詳如表 5 所示。

表 5、蓄冷箱候選最適規格之結果

| 項目組別 | 長 (cm) | 寬 (cm) | 高 (cm) | 材料總成本 | 車廂總剩餘空間 | 總載貨容積 |
|-------|--------|--------|--------|-------------|----------|--------------|
| 第 1 組 | 65 | 50 | 49 | 4,625,957.0 | 39,529.6 | 66,285,076.5 |
| 第 5 組 | 60 | 50 | 49 | 4,904,398.6 | 2,969.2 | 66,452,390.5 |
| 第 9 組 | 55 | 50 | 49 | 5,086,800.2 | 26,114.2 | 68,035,546.5 |

4.2 蓄冷箱最適規格之模擬分析結果

本小節以表 5 之三組蓄冷箱候選最適規格為基礎，設計多種需求情境來進行模擬分析。在商品方面，共有四種溫層的商品：常溫、冷藏、冷凍及熱食，並假設其需求符合常態分配。本研究考量了四種影響商品需求量的因素：(1) 各溫層商品佔總需求之百分比，(常溫%，冷藏%，冷凍%，熱食%)，共有「均勻」與「差異」兩種情形；(2) 需求量的平均值，共有「高」、「中」與「低」三種水準；(3) 需求量的標準差，共有「高」、「中」與「低」三種水準；以及(4) 顧客家數，共有「多」、「中」與「少」三種水準。

模擬分析又分成兩階段來進行：首先，在不考慮顧客家數之因素下，根據商品百分比、

平均值與標準差等三種因素，共產生四溫層商品需求量之 18 種情境，每種情境又以隨機方式產生 30 筆需求量資料，然後將總共 540 筆的需求量資料分別帶入 3.3 小節所介紹的模式[MP1]與模式[MP2]中求解，以評估三組候選最適規格之車輛使用成本，並從中決定其最適規格。其次，再考慮商品百分比、平均值、標準差與顧客家數等四種因素，共產生四溫層商品需求量之 54 種情境，每種情境又以隨機方式產生 30 筆需求量資料，然後將總共 1620 筆的需求量資料分別帶入 3.3 小節所介紹的模式[MP3]與模式[MP4]中求解，以評估最適規格之車輛使用成本。

表 6 列出第一階段模擬之情境設計內容，其模擬結果則彙整於表 7。表 6 中，產生的需求量單位為立方公分（體積），因此在裝入蓄冷箱時係假設該需求量為連續可分割，並依下式求得各溫層商品所需的蓄冷箱資料：

$$q_t = \left\lceil \frac{\text{第 } t \text{ 種溫層商品之總需求量}}{v_t} \right\rceil \quad (30)$$

此外，模式[MP1]計算時又分為使用單一車種(3.49 噸)及同時使用三種噸位常溫貨車兩種情形，而模式[MP2]計算時則為 3.49 噸的常溫車、冷凍車與冷藏車。根據業者訪談得知，使用冷凍車、冷藏車時為避免貨物滿載阻擋冷氣出風口送風，其裝載高度皆不超過冷氣出風口；因此，冷凍車、冷藏車車廂內的高度必須再減去 15 公分。

表 6、第一階段模擬之情境設計內容

| 商品百分比 (%) | 均勻 | | 差異 | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|--|
| | (25%, 25%, 25%, 25%) | | (60%, 25%, 10%, 5%) | |
| 需求平均值(μ) (立方公分) | 低 | 中 | 高 | |
| | $\mu = 1V_k$ | $\mu = 2V_k$ | $\mu = 4V_k$ | |
| 需求標準差(σ) (立方公分) | 低 | 中 | 高 | |
| | $\sigma = 0.05\mu$ | $\sigma = 0.10\mu$ | $\sigma = 0.15\mu$ | |

由表 7 可知，在[MP1]模式的兩種情形下，三組候選最適規格中，皆以第 1 組（長 65 公分、寬 50 公分、高 49 公分）的平均車輛使用成本與標準差最低，分別為[MP1]單種車 2,741,667 元與[MP1]三種車 1,491,000 元。此外，在考量[MP1]模式兩種情形與[MP2]模式之成本相對比較可發現，使用蓄冷箱進行配送所花費的車輛成本，要比傳統分別使用常溫、冷藏、冷凍三種車的車輛成本低。本研究選定第 1 組為最適規格，繼續進行第二階段的模擬。

表 7、第一階段模擬之車輛使用成本結果彙整（單位：仟元）

| 模式 | [MP1] (3.49 噸) | | | [MP1] (3.49、10.5、15 噸) | | | [MP2] | | |
|------|-------------------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 第 1 組 | 第 5 組 | 第 9 組 | 第 1 組 | 第 5 組 | 第 9 組 | 第 1 組 | 第 5 組 | 第 9 組 |
| 情境 1 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,160 | 2,160 | 2,160 |
| 情境 2 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,160 | 2,160 | 2,160 |
| 情境 3 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,160 | 2,160 | 2,160 |
| 情境 4 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,160 | 2,160 | 2,160 |
| 情境 5 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,181 | 2,181 | 2,181 |

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 情境 6 | 1,260 | 1,260 | 1,302 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,160 | 2,160 | 2,181 |
| 情境 7 | 2,499 | 2,499 | 2,520 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,790 | 2,790 | 2,790 |
| 情境 8 | 2,520 | 2,520 | 2,520 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,790 | 2,790 | 3,570 |
| 情境 9 | 2,394 | 2,415 | 2,478 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,811 | 2,811 | 2,811 |
| 情境 10 | 2,478 | 2,478 | 2,499 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,790 | 2,790 | 2,790 |
| 情境 11 | 2,289 | 2,289 | 2,373 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,837 | 2,811 | 2,857 |
| 情境 12 | 2,520 | 2,520 | 2,583 | 1,260 | 1,260 | 1,260 | 2,790 | 2,816 | 2,816 |
| 情境 13 | 4,389 | 4,410 | 4,431 | 1,848 | 2,520 | 1,890 | 4,788 | 4,758 | 4,800 |
| 情境 14 | 4,620 | 4,809 | 4,914 | 2,307 | 1,260 | 2,520 | 4,950 | 4,950 | 4,950 |
| 情境 15 | 4,326 | 4,389 | 4,494 | 1,806 | 2,520 | 1,932 | 4,704 | 4,695 | 4,737 |
| 情境 16 | 4,725 | 4,788 | 4,893 | 2,205 | 2,520 | 2,310 | 4,950 | 4,950 | 4,971 |
| 情境 17 | 4,368 | 4,389 | 4,515 | 1,806 | 1,260 | 1,911 | 4,746 | 4,716 | 4,716 |
| 情境 18 | 4,662 | 4,725 | 4,851 | 2,016 | 2,520 | 2,205 | 4,904 | 4,929 | 5,787 |
| 平均值 | 2,742 | 2,767 | 2,815 | 1,491 | 1,540 | 1,549 | 3,268 | 3,266 | 3,367 |
| 標準差 | 1,349 | 1,381 | 1,418 | 366 | 524 | 431 | 1,143 | 1,140 | 1,223 |

表 8 列出第二階段模擬之情境設計內容，由於加入了顧客家數，所以各顧客的需求量必須先依式(31)換算出各溫層商品所需的蓄冷箱資料，然後再加總成每位顧客的需求總量。

$$q_{it} = \left\lceil \frac{\text{第}i\text{位顧客對第}t\text{種溫層商品之需求量}}{v_l} \right\rceil \quad (31)$$

表 8、第二階段模擬之情境設計內容

| 商品百分比 (%) | 均勻 | | 差異 | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|--|
| | (25%, 25%, 25%, 25%) | | (60%, 25%, 10%, 5%) | |
| 需求平均值(μ) (立方公分) | 低 | 中 | 高 | |
| | $\mu = 0.05V_k$ | $\mu = 0.10V_k$ | $\mu = 0.20V_k$ | |
| 需求標準差(σ) (立方公分) | 低 | 中 | 高 | |
| | $\sigma = 0.05\mu$ | $\sigma = 0.10\mu$ | $\sigma = 0.15\mu$ | |
| 顧客家數 (家) | 少 | 中 | 多 | |
| | 25 | 50 | 100 | |

此外，模式[MP3]計算時又分為使用單一車種(3.49 噸)及同時使用三種噸位常溫貨車兩種情形，而模式[MP2]計算時則為 3.49 噸的常溫車、冷凍車與冷藏車。其模擬結果則彙整於表 9。

由表 9 可知，第 1 組規格在僅使用 3.49 噸車型的[MP4]模式下所求得平均車輛使用成本略低於[MP3]模式之單種車情形，但是卻高於[MP3]模式之三種車情形。此結果顯示，在單一車型的情形下，使用蓄冷箱似乎無法減少車輛使用成本，但是若同時使用不同容量規模的車輛則較僅使用單一車型車輛有經濟效益。此外，本研究假設四種溫層的商品都必須使用蓄冷箱來裝載，然而實務上對於常溫與熱食的商品，使用一般的物流箱即可滿足其保溫需求，

因此模式[MP3]的結果似乎也高估了車輛使用成本。

五、結論

本研究針對新進發展的抽換式蓄冷保溫箱技術進行其最適規格分析。在考量實務應用之特性需求下，不僅提出了蓄冷箱最適規格的數學模式與啟發式演算法，也建立四個蓄冷箱裝載問題的數學規劃模式。此外，本研究亦產生了多種不同的需求情境資料，利用兩階段的模擬分析來決定出蓄冷箱的最適規格。在透過實地訪談國內低溫物流業者以蒐集相關實際資料下，求得蓄冷箱之最適規格為長度 65 公分、寬度 50 公分、高度 49 公分。雖然第二階段的模擬分析結果顯示，在僅使用單一車型(3.49 噸)的情形下，使用蓄冷箱並無法減少車輛使用成本，但是此階段模擬尚未考量車輛的行駛成本。此外，根據本研究的模擬結果可看出，若同時使用不同容量規模的車輛來進行配送，其經濟效益遠高於僅使用單一車型車輛。因此，後續的研究方向與課題可考慮：

表 9、第二階段模擬之車輛使用成本結果彙整（單位：仟元）

| 模式 | [MP3] (3.49 噸) | | | [MP3] (3.49、10.5、15 噸) | | | [MP4] | | |
|-------|-------------------|--------|--------|---------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|
| | 25 家 | 50 家 | 100 家 | 25 家 | 50 家 | 100 家 | 25 家 | 50 家 | 100 家 |
| 顧客 | 25 家 | 50 家 | 100 家 | 25 家 | 50 家 | 100 家 | 25 家 | 50 家 | 100 家 |
| 情境 1 | 2,520 | 4,410 | 8,190 | 1,218 | 2,360 | 3,654 | 2,790 | 4,650 | 8,279 |
| 情境 2 | 1,890 | 3,780 | 7,560 | 1,218 | 1,837 | 3,625 | 2,181 | 4,333 | 7,299 |
| 情境 3 | 2,142 | 3,990 | 7,728 | 1,218 | 2,149 | 3,654 | 2,769 | 4,607 | 8,031 |
| 情境 4 | 1,890 | 3,780 | 7,560 | 1,218 | 2,097 | 3,650 | 2,433 | 4,719 | 7,509 |
| 情境 5 | 1,911 | 3,801 | 7,602 | 1,218 | 2,117 | 3,654 | 2,769 | 4,632 | 8,073 |
| 情境 6 | 1,890 | 3,780 | 7,560 | 1,218 | 2,128 | 3,654 | 2,706 | 5,034 | 7,866 |
| 情境 7 | 3,864 | 7,287 | 14,448 | 1,827 | 3,335 | 6,090 | 3,999 | 6,437 | 11,837 |
| 情境 8 | 3,738 | 7,203 | 14,133 | 1,827 | 3,375 | 6,100 | 3,600 | 6,951 | 12,827 |
| 情境 9 | 3,276 | 6,363 | 12,621 | 1,816 | 3,324 | 6,048 | 4,149 | 6,463 | 11,846 |
| 情境 10 | 3,570 | 6,741 | 13,251 | 1,816 | 3,405 | 6,090 | 4,341 | 7,257 | 12,858 |
| 情境 11 | 3,192 | 6,342 | 12,621 | 1,728 | 3,324 | 6,084 | 4,149 | 6,488 | 12,111 |
| 情境 12 | 3,759 | 6,930 | 13,503 | 1,827 | 3,495 | 6,090 | 4,404 | 7,320 | 12,900 |
| 情境 13 | 7,434 | 14,868 | 29,421 | 2,706 | 5,162 | 10,243 | 6,117 | 11,085 | 21,572 |
| 情境 14 | 8,190 | 15,750 | 31,500 | 3,006 | 5,742 | 11,072 | 7,131 | 12,858 | 23,535 |
| 情境 15 | 6,783 | 12,978 | 25,809 | 2,616 | 5,072 | 10,084 | 6,159 | 11,064 | 21,252 |
| 情境 16 | 8,106 | 15,729 | 31,395 | 3,016 | 5,812 | 11,042 | 7,004 | 12,682 | 23,451 |
| 情境 17 | 6,174 | 12,264 | 24,759 | 2,566 | 4,992 | 10,088 | 5,986 | 10,971 | 21,153 |
| 情境 18 | 7,770 | 15,435 | 30,681 | 2,923 | 5,862 | 10,972 | 6,885 | 12,644 | 23,367 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 平均值 | 4,339 | 8,413 | 16,686 | 1,943 | 3,644 | 6,772 | 4,421 | 7,789 | 14,209 |
| 標準差 | 2,306 | 4,543 | 9,109 | 664 | 1,391 | 2,884 | 1,658 | 3,076 | 6,116 |

- (1) 利用本研究建立的需求情境，再加上顧客的位置座標產生新的「多溫共配車輛路線問題 (MSBVRP)」測試例題，並將修改 MSBVRP 成為考慮多車種之模式，然後進行測試分析，以便將車輛的行駛成本納入評估。
- (2) 進行大規模的參數測試與敏感度分析，以充分了解蓄冷保溫箱在實務上具有成本效益知識用情境，提供低溫物流業者決策之參考。
- (3) 可增加物流箱與蓄冷箱的購置成本至本研究所建立的四種數學規劃模式之目標函數中，以獲得更完整的成本資訊進行分析與評估。
- (4) 可將生命週期成本 (Life Cycle Cost, LCC) 的觀念與方法導入到蓄冷箱最適規格分析的模式與程序中。

參考文獻

- 王保元(民 89)，物流中心冷凍食品配送模式之研究，朝陽科技大學工業工程與管理學系碩士論文。
- 王耿彬(民 90)，應用遺傳演算法於低溫冷凍物流中心之車輛配送排程規劃，朝陽科技大學工業工程與管理學系碩士論文。
- 江志祥(民 82)，整合車廂貨品堆疊與運送路線數學模式之研究，中原大學工業工程研究所碩士論文。
- 李森峰(民 92)，「低溫物流箱推廣應用輔導案例發表」，九十二年度物流及流通應用整合發展計畫成果發表會，劍潭青年活動中心，台北。
- 李長駿(民 93)，多溫共配系統之路線排程問題研究，中華大學科技管理研究所碩士論文。
- 卓裕仁、李長駿(民 93)，「多溫共配系統之車輛路線問題研究」，第二屆流通與全球運籌論文研討會論文集(光碟)，國立台中技術學院，運輸網路分析類，G-11 至 G-20 頁。
- 洪聖峰(民 92)，低溫物流配送路線問題之研究，交通大學運輸科技與管理學系碩士論文。
- 郭儒家(民 92)，「低溫物流容器應用發展」，經濟部商業司九十三年度物流及流通應用整合發展計畫成果發表會。
- 郭儒家(民 93a)，「全新獨創技術-全溫層保鮮宅配服務系統(上)」，物流技術與戰略，第七期，第 34-43 頁。
- 郭儒家(民 93b)，「全新獨創技術-全溫層保鮮宅配服務系統(下)」，物流技術與戰略，第八期，第 90-99 頁。
- 張美忠(民 81)，貨物運輸棧板裝載問題啟發式解法之應用，交通大學土木工程研究所碩士論文。

- 曾敏雅(民 87)，時窗限制下都會區夜間之低溫物流配送路線規劃研究，中興大學農產運銷研究所碩士論文。
- 簡世釗(民 90)，時窗與容量限制下車輛途程問題之研究，成功大學工業管理研究所碩士論文。
- 鍾震麒(民 93)，「低溫物流容器應用發展」，經濟部商業司九十三年度物流及流通應用整合發展計畫成果發表會。
- 羅毓文(民 84)，考量貨品裝車於配送路線安排上之最佳解法與近似解法，中原大學工業工程研究所碩士論文。
- Chen, C.S., S.M. Lee and Q.S. Shen (1995), "An analytical model for the container loading problem," *European Journal of Operation Research*, Vol.80, pp.68-76.
- Dowland, K.A. and W.B. Dowland (1992), "Packing Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol.56, pp.2-14.
- George, J.A. and D.F. Robinson (1980), "A Heuristic for Packing Boxes into a Container," *Computer and Operations Research*, Vol.7, pp.147-156.
- Letchford, A.N. and A. Amaral (2001), "Analysis of Upper Bounds for the Pallet Loading Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol.132, pp.582-591.
- Liu, F.H. and C.J. Shiao (1997), "A Three-Dimensional Pallet Loading Method for Single-Size Boxes," *Journal of Operational Research Society*, Vol.48, pp.726-735.
- Ngoi, B.K.A., M.L. Tay and E.S. Chua (1994), "Applying Spatial Representation Techniques to the Container Packing Problem," *International Journal of Production Research*, Vol.32, pp.111-123.
- Solomon, M.M. (1983), *Vehicle Routing and Scheduling with Time Window Constraints: Models and Algorithms*, Ph.D. Dissertation, Dept. of Decision Sciences, University of Pennsylvania.
- Tarantilis, C.D., C.T. Kiranoudis and V.S. Vassiliadis (2004), "A Threshold Accepting Meta-heuristic for the Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem," *European Journal of Operation Research*, Vol.152, pp.148-158.
- Terno, J. (2000), "An Efficient Approach for the Multi-Pallet Loading Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol.123, pp.372-381.

多車種多溫共配車輛路線問題之測試與分析

Computational Analysis on Two Heterogeneous Multi-temperature Fleet Vehicle Routing Problems

卓裕仁³

許雅雯⁴

摘要

本研究針對：「機械式冷凍車廂區隔」與「抽換式蓄冷保溫箱」兩種低溫物流之多溫共配系統進行其車輛路線問題之構建與測試分析。上述兩種多溫共配系統的車輛路線排程有別於傳統車輛路線問題 (Vehicle Routing Problem, VRP)，須同時考慮車廂與保溫箱之裝載等因素；再加以實務業者多為多車種之車隊。因此，本研究將其車輛路線問題稱之為「多車種多溫共配車輛路線問題」(Heterogeneous Multi-temperature Fleet Vehicle Routing Problem, HMFVRP)。

為比較這兩種多溫共配系統之配送績效，本研究選擇 Solomon 的 VRPTW 以及 Taillard 等人的 VRP 國際標竿題庫為基礎，採用其場站座標、顧客點座標、顧客需求等資料，再搭配實務車輛資料以產生四種需求情境，共 168 個 HMFVRP 例題，然後設計啟發式解法以測試兩種多溫共配模式之解題績效，並對其整體配送成本進行比較與分析。經由電腦程式執行測試，結果顯示：在不同需求情境下，無論是車輛成本或路線成本方面，抽換式蓄冷保溫箱之多溫共配方式皆明顯優於機械式冷凍車廂區隔之多溫共配方式，顯示蓄冷保溫箱之應用確實可以降低車輛成本與路線成本，具有應用於低溫物流與全溫層保鮮宅配服務之潛力。

關鍵詞：多車種多溫共配車輛路線問題、啟發式解法、低溫物流

Abstract

Recently, the demand of the cold logistics and the multi-temperature distribution has rapidly grown. This paper considers two special operational situations: first, carriers utilize the engine-driven frozen truck divided into three parts to hold different temperate goods, and second, carriers utilize the multi-temperature storage box to hold different temperate goods in a general truck. We transfer the previous situations into two Heterogeneous Multi-temperature Fleet Vehicle Routing Problems, HMFVRP1 and HMFVRP2.

A bank of 168 instances created by modifying the Solomon's VRPTW benchmark instances and Taillard's VRP benchmark instances is used to compare the performance of HMFVRP1 and HMFVRP2. Furthermore, real costs and capacities of different size of trucks are set for these test instances. Then, we also develop a simple heuristic algorithm to solve these HMFVRPs. Computational results present that, in average, HMFVRP2 performs well than HMFVRP1 in both of fleet size and traveling distance. Such a finding maybe offers an alternative to improve the performance of practical multi-temperate distribution for cold logistics.

Keywords: Heterogeneous Multi-temperature Fleet Vehicle Routing Problem (HMFVRP); Heuristic method; Cold Logistics.

³私立中華大學運輸科技與物流管理學系助理教授 (聯絡地址：新竹市東香里 6 鄰五福路二段 707 號，電話：03-5186597，E-mail: yjcho@chu.edu.tw)

⁴私立中華大學運輸科技與物流管理學系碩士

一、結論

近年來，隨著民眾飲食習慣改變，低溫食品的需求量與日俱增。吳芸蕙（民 93）指出，依據經濟部統計處及工研院經資中心(IEK)推估，國內廠商在低溫食品的產值(包括冷藏及冷凍)約為新台幣 1,400 至 1,600 億元左右。此外，工研院經資中心亦調查低溫食品在零售通路所佔之比重各有不同，至 2000 年總計低溫市場營業規模已超過 2000 億元(郭儒家，民 93a)。

當食品保溫範圍不同時，傳統的物流業者係使用不同溫層的車輛分別依據各物品需要的溫度進行配送，或必須加購冷凍車輛，往往造成車輛使用率降低與投資成本增加。目前，國內物流服務業不止面臨到配送物品具備多樣少量的特性。更必須將不同溫度的物品一起配送才更具競爭力，因此全溫層保鮮宅配服務的多溫共配系統因應而生。全溫層保鮮宅配之溫度控制定義為：熱食(60°C 以上)、常溫品(一般環境溫度)、鮮食(恆溫 18°C)、冷藏品(0°C~+7°C)、冰溫品(-2°C~+2°C)、冷凍品及冰品(-18°C 以下保存)、超低溫品(-30°C 以下保存)等七大類。

郭儒家（民 93b）指出：目前國內對於全溫層保鮮宅配服務的運作方式共有四種方式，分別為傳統多車配送、機電共用式保冷櫃配送、機械式冷凍車廂區隔配送、抽換式配送蓄冷保溫櫃。表 1 彙整此四種全溫層保鮮宅配服務的各項系統特性；由表 1 可知，後三種運作方式即屬於多溫共配系統。

全溫層保鮮服務的多溫共配系統主要源自於日本，而台灣除了引進日本所使用之機電共用式保冷櫃共配系統外，亦自行開發了另外兩種多溫共配系統：機械式冷凍車廂區隔共配系統與抽換式蓄冷保溫箱共配系統。機械式冷凍車廂區隔共配系統乃將車廂區隔成三個溫層空間（常溫、冷藏、冷凍），並使用以引擎驅動的機械壓縮式冷凍機組來維持所需的溫度；抽換式蓄冷保溫箱共配系統則是將物品放入不同溫度的保溫箱中，再將保溫箱放入常溫配送車輛進行配送。目前，國內物流業者大多使用機械式冷凍車廂區隔共配系統來進行配送服務，而抽換式蓄冷保溫箱共配系統則是近年來由工研院能資所新研發的一種技術。

除此之外，顧客對多溫配送之需求不一，而實務上的廠家之自有配送車隊多為多車種之車隊，若能搭配全溫層保鮮服務的多溫共配系統，可使此系統能更為廣泛地應用，亦可藉由不同車型的車輛使業者方便調度，更能彈性運用車輛。如此一來，不僅可提高服務品質，增加車輛使用率及降低投資成本，運輸成本亦會跟著降低。

表 1 全溫層保鮮宅配服務系統比較表

| 系統種類 | | 傳統多車配送 | 機電共用式保冷櫃配送 | 機械式冷凍車廂區隔配送 | 抽換式配送蓄冷保溫櫃 |
|------|------|-------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| 系統特色 | | 使用多種溫度車輛各別配送，無法共配 | 使用電冰箱式保冷櫃及機械式冷凍箱 | 車廂區隔多種溫域，車引擎驅動冷凍機組 | 抽換式蓄冷保溫櫃之多溫，無冷凍動力運載 |
| 設備需求 | 集配車 | | 常溫車 機械式冷凍車 | 冷凍車 車廂隔間 | 常溫車 蓄冷箱保溫櫃 |
| | 營業所 | | 冷凍庫 電冰箱保冷櫃 | 冷凍冷藏庫 | 常溫車 蓄冷箱保溫櫃 |
| | 集散轉運 | | 冷凍庫 電冰箱保冷櫃 | 常溫車 冷凍車 | 常溫車 蓄冷箱保溫櫃 |
| | 轉運中心 | | 冷凍庫 電冰箱保冷櫃 | 冷凍冷藏庫 | 凍結機 保溫櫃 |
| 不同溫域 | | 單車單溫 | 多溫 | 多溫 | 多溫 |

| | | | | | |
|------|------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| 系統比較 | 不同溫域 | 單車單溫 | 多溫 | 多溫 | 多溫 |
| | 共配 | 不可 | 可 | 可 | 可 |
| | 冷凍系統 | 個別車用冷凍機 | 個別車用櫃用冷凍機 | 個別車用冷凍機 | 集中式一般用冷凍機 |
| | 故障率 | 高 | 高 | 高 | 低 |
| | 均溫性 | 低 (機械冷凍) | 低 (機械冷凍) | 低 (機械冷凍) | 高 (冷融材料) |
| | 溫度彈性 | 低 | 高 (設定溫控) | 高 (設定溫控) | 高 (抽換多溫蓄冷器) |
| | 空間彈性 | 低 | 中 | 低 | 高 |
| | 操作成本 | 高 | 中 | 高 | 低 |
| 技術來源 | | 日本 | 台灣 | 台灣(工研院) | |

資料來源：郭儒家（民 93b）

有鑑於此，本研究乃針對上述「機械式冷凍車廂區隔」與「抽換式蓄冷保溫箱」兩種多溫共配系統進行其車輛路線問題之構建與測試分析。本研究發現目前學術界用來解決配送路線安排的「車輛路線問題(Vehicle Routing Problem, VRP)」模式並不能直接應用在此多溫共配問題上。因此本研究將其視為一衍生性的車輛路線問題，稱之為「多車種多溫共配車輛路線問題」(Heterogeneous Multi-temperature Fleet Vehicle Routing Problem, HMFVRP)。除了分析上述問題之車輛路線特性外，本研究還發展一套可求解 HMFVRP 之啟發式解法，並設計多種情境之例題來測試 HMFVRP 之適用情形。

本文後續章節安排如下：第二節簡要回顧低溫物流配送與多車種車輛路線問題之相關文獻；第三節提出兩種多溫共配系統之 HMFVRP 問題定義，並說明啟發式解法的設計細節；第四節為實驗設計與例題測試結果之分析；最後於第五節彙整本研究之結論與後續研究建議。

二、文獻回顧

本節分別針對低溫物流配送(Cold Logistics Distribution)與多車種車輛路線問題(Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem, HFVRP)之相關文獻進行簡要回顧問題特性，以做為後續定義問題及研擬啟發式解法的基礎。

2.1 低溫物流配送相關文獻

由於低溫物流之多溫共配系統屬於新型態的研究類型，其相關文獻相當少見，目前只有李長駿（民 93）首度探討將抽換式蓄冷保溫箱應用於多溫共配系統的可行性與效益，其他低溫物流相關的文獻則未說明其使用何者運輸設備，並將其視為易腐品之配送來處理。

曾敏雅（民 87）以生鮮漁貨及低溫產品配送為例，由於配合農產品凌晨買賣之特性，為確保新鮮與時效性，因此多採夜間配送。本文納入即時動態路網資料考量，亦考量由車載容量與配送距離、載重量及耗油成本而得知的配送成本，求解物流中心與多個顧客之間的最佳配送路線。在考慮在即時資訊下，於都會區進行夜間配送加入紅綠燈號誌的變化情況，找出在配送順序已知的情形下，因為行車車速的改變、路口號誌燈變換影響下，最短路徑並非一成不變，必須視交通狀況而有所改變。

王保元（民 89）使用混合型時窗，而且將行駛成本與懲罰成本一併納入目標函數中，可同時考慮車輛配送路線之運輸成本，以及違反客戶要求送達時間所造成的各項顯性與隱性成本，以構建 VRPTW 模式，並以基因演算法求解。

王耿彬(民90)則延伸王保元之研究,亦應用遺傳演算法求解低溫冷凍物流中心之車輛配送排程問題,將問題分解為一個分群主問題及數個巡迴子問題,在求解巡迴子問題利用自行提出的單一配送車輛排程演算法,在效果上面皆比插入法與人工排班好,亦證實採模型分解會對比原始模型直接求解要來的有效率。

洪聖峰(民92)對於低溫物流的實際配送情形在運送時間和產品的保存上存有「隨機」的特性,所以構建隨機性車輛路線問題(Stochastic Vehicle Routing Problem with Time Windows, SVRPTW)為基礎,延伸分析因產品腐敗所造成之存貨成本、冷凍車消耗之能源成本以及車輛固定成本,進一步建構軟性時間窗之成本函數,最後發展演算法求解構建模式,並針對主要參數進行敏感度分析。

Tarantitis & Kiranoudis (2001; 2002) 分別針對易腐性物品(如:新鮮蔬果、牛奶、肉類等)提出如何有效率配送。以新鮮牛奶配送問題為例(Tarantitis & Kiranoudis, 2001),其問題定義為多車種車輛路線問題:Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem (HFFVRP),替某間公司之現有車隊,其配送路線進行改善,以提高服務品質。Tarantitis & Kiranoudis (2002)又以新鮮肉品配送問題為例,以某間公司之原有的兩個配送中心為中心場站,為該公司之原有向他人承租之車隊,對其配送路線進行改善,故該車隊在完成任務後,不需返回原中心場站。作者將該問題定義為開放式多場站車輛路線問題:Open Multi-Depot Vehicle Routing Problem (OMDVRP),以改良式的門檻接受法—The List Base Threshold Accepting (LBTA)演算法求解,結果替該公司之路線成本改善了近17%。

李長駿(民93)以抽換式蓄冷保溫櫃(Multi-temperature Storage Box)應用於全溫層保鮮宅配服務的多溫共配系統為研究對象,假設配送時將物品放入蓄冷保溫櫃,再將保溫櫃負載於車廂內來配送物品,以取代冷凍車在低溫物流配送。其將多溫共配車輛路線問題定義為Multi-temperature Storage Box Vehicle Routing Problem (MSBVRP),並採用改良式節省法來產生起始解,以2-OPT節線交換、1-0節點交換、1-1節點交換及2-1節點交換來改善起始解。

2.2 多車種車輛路線問題之定義與解法回顧

多車種車輛路線問題為車輛路線問題之衍生,其差異在其為多種不同型態的車輛所組成的車隊,每條路線能選擇不同負載容量的車種,其車輛成本隨著車輛型態不同而有所不同,總成本亦會隨著所使用指派車輛的不同而有所增減。由於客戶需求不穩定,目前幾乎為所有的物流業的自有服務車輛不只單一型,故多車種車輛路線問題較傳統車輛路線問題更貼進實務。以下為多車種車輛路線問題之解法回顧:

Ghetsens & Golden (1986) 針對多車種車輛路線問題,將其定義為FSCVRP(The fleet size and composition vehicle routing problem)問題。作者結合下限法(lower bound procedure)提出一個新的兩階段啟發式(two-stage heuristic)的方法求解,將距離場站較遠的點優先指派給容量較大的車輛,但此方法只適用在規模較小的問題。本研究目的為求固定成本(添置車輛所增加的成本)與路線成本最小,並利用例題做測試,結果較優近1%。

Salhi & Rand (1993) 將多車種車量路線問題定義為VFMVRC,即Vehicle Fleet Mix Vehicle Routing Composition Problem。其提出的擾動法(Perturbation Procedures)可算是一種兩階段之鄰域搜尋法;該法先任選單一車種產生VRP路線,再以配對法將VRP路線修正為可行的起始解,然後藉由七種複雜的擾動模組進行車種間與路線間之交換改善。

張祖明(民83)將多車種車輛路線問題定義為FSMVRP,即Fleet Size and Mixed Vehicle Routing Problem。其使用Bruce Golden的(MGT+OrOPT)與Salhi & Rand的擾動法做結合,發展出創新的啟發式解法:MGORSR與MGSORR兩種。主要分為三階段求解,第一階段均以

MGT(巨網切割法)求解起始解，第二與第三階段則分別採用不同之先後順序執行改良後的 OrOPT 交換法與修正後的 Salhi & Rand 擾動法。並與文獻上的測試題庫做比較，此兩種新啟發式方法，分別得到與現有最佳解之平均誤差為 1.04% 與 0.73%。

Gendreau (1999) 採用 Tabu Search 與 GENIUS 法混合求解多車種車輛路線問題，主要是應用在歐基里德平面。先使用 GENIUS 法做為主要求解工具，接著採用有著調適性的記憶結構機制(Adaptive Memory Procedure)及及渴望水準(Aspiration Criterion)的 Tabu Search，避免落入區域最佳解。本研究目的為求總成本最小，並與 Golden 在 1984 年題庫中之 12 個標竿例題做比較，皆獲得較好的解。

卓裕仁(民 90)提出「包容性深廣度搜尋(Generic Intensification and Diversification Search, GIDS)」的巨集演算法以應用在求解 HVRP 問題，其中多起始解構建(MIC)包含「加權起始(Weighted Initialization, WI)」與「鄰域搜尋(Neighborhood Search, NS)」兩個模組，深度包容搜尋(GSI)設計了 G1 與 G2 兩個包容搜尋(Generic Search)模組，廣度擾動搜尋(PSD)則僅有「成本擾動(Cost Perturbation, CP)」模組。

Tarantilis & Kiranoudis (2001) 針對希臘的易腐性食物：新鮮牛奶以及肉類配送問題分別做探討，在新鮮牛奶配送問題方面，將多車種車輛問題其定義為 HFFVRP(Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem)的問題，除了擁有多種車型的車隊外，其各型車輛的數量是固定的。其針對這些問題分別提出改良式的門檻接受法(Threshold Accepting Algorithm; TA)——門檻具有回溯機制的 BATA(Backtracking Adaptive Threshold Accepting Algorithm)求解，目的為求解運輸成本最小。作者亦在之後的文獻(2004)針對此種方法做更進一步的說明，並與其他作者比較，亦有較好的效果。

2.3 小結

從上述文獻探討中得知，多溫共配之車輛路線問題屬於台灣獨有之研究課題。之前研究者大多以低溫食品配送模式為主要研究議題，而在國內之相關研究針對低溫食品有保存期限的問題以及為滿足顧客需求而將低溫食品的配送模式認定是「時窗限制車輛路線問題(VRPTW)」。但是「時窗限制車輛路線問題」中的時窗限制是指車輛到達與離開必須在顧客要求之時間上下界之內。而如何維持低溫食品配送的品質是物流公司本身的責任，時間窗卻必須遵從顧客要求，兩者並無絕對關係。故在文獻探討中，可以發現在國外學者研究低溫物流配送相關問題時，並無加入「時窗限制」。而在國內研究中除李長駿(民 93)將多溫共配車輛路線問題(MFVRP)特定獨立出來定義為 MSBVRP 之外，國內外文獻仍未深入探討多溫共配車輛路線問題。

另外，在多車種車輛路線問題部分，相關的國內外文獻探討越來越多，而在經過實務訪談亦可發現，大部份物流配送業者所使用之車隊是由多種型式車輛所組成的車隊，故無論是在學術研究上，或是實務應用上，皆是一個值得重視的研究大方向。

因此，本研究除了針對工研院所研發出抽換式蓄冷箱之多溫共配系統，另外亦加入機械式冷凍車廂區隔配送之多溫共配系統，將此兩種系統加入多車種限制，並設計一啟發式解法來進行例題測試分析。

三、HMFVRP 之問題定義與啟發式解法設計

本節針對「機械式冷凍車廂區隔」及「抽換式蓄冷保溫箱配送」(本研究簡稱 HMFVRP2)兩種多溫共配系統，提出其車輛路線問題之定義與啟發式解法。

3.1 HMFVRP 問題描述與定義

傳統的車輛路線問題(Vehicle Routing Problem)只考量客戶需求量總和不得超過車輛容量之限制，而多溫共配車輛路線問題也是客戶需求量總和不得超過車輛容量之限制，但應該詳細分為，「蓄冷保溫箱」或是「物流箱」之容量總和不得超過車輛容量之限制與各溫層商品之客戶需求量總和不得超過車輛容量之限制；另外在實務上，還有顧客要求「一次到位」的配送服務，且並不希望與別人共用箱子配送等限制。故本研究範圍為針對實務上所應用之多溫共配系統，加上多車種車輛路線問題，比較在不同的多溫系統上之配送成本高低。而其中之「多車種」，指的是有著「容量不同」車輛所組成的車隊，而不為「用途不同」車輛所組成的車隊。

每位顧客需求對於有幾種溫層與各溫層物品需求量不盡相同，普遍而言，每個需求點皆有對「常溫」、「冷藏」、「冷凍」這三種溫層的需求，因此每個需求點的需求量具有多商品特性。使用多溫共配系統配送多溫層物品，對物流公司而言不需要針對單一溫度的物品指派單一車輛來配送，例如：常溫車配送常溫物品、冷凍車配送冷凍與冷藏物品，藉由此系統，即可單一車輛配送不同溫層物品，以達到共配物品。

目前國內市場上對於多溫層物品，仍有廠家採取多車方式，例如需求點有三種溫層的需求量，分別為常溫、冷藏、冷凍這三種溫層的需求，利用常溫車配送常溫物品，冷藏車配送冷藏物品，冷凍車配送冷凍物品，完成此需求點需要三輛車，此種配送方式面對需求點具有多商品特性時，車輛固定成本勢必增加。然而利用多溫共配系統來執行此需求點的三種溫層需求量，完成此需求點需要一輛車。

然而，針對多溫共配車輛路線問題，由於在國內低溫食品配送，其服務之廠家的車隊不只單一車種。所以為了更貼近實務，另外再加入「多車種」之限制。而在本研究中之「多車種」，指的是有著「容量不同」車輛所組成的車隊，而不為「用途不同」車輛所組成的車隊。本研究茲將「多車種多溫共配車輛路線問題」(Heterogeneous Multi-temperature Fleet Vehicle Routing Problem, HMFVRP)之研究視為衍生自 VRP 之問題型態，其解題複雜度高於 VRP。

HMFVRP 定義如下：「N 位顧客擁有對不同溫層物品需求量，使用多種車種搭配不同的多溫共配系統完成配送服務；所有車輛皆自同一場站出發，在不超過車輛容量與保溫箱或物流箱容量之情況下，依序服務顧客，最後並返回場站；本研究之目標在找到一組成本最小的配送路線來服務所有的顧客」。而本研究之對象：多溫共配系統，主要分為「機械式冷凍車廂區隔」(以下簡稱為 HMFVRP1) 及「抽換式蓄冷保溫箱配送」(以下簡稱為 HMFVRP2)。

3.1.1 HMFVRP1 問題定義

此問題所使用之多溫共配系統為「機械式冷凍車廂區隔」，其示意圖如圖 1。此為利用「物流箱」依據顧客各溫層之需求不同，分別置入已隔間好溫層之冷凍車輛內，進行配送。主要假設與限制如下：

- (1) 所使用之配送車輛為已將溫層（常溫、冷凍、冷藏）隔間好之冷凍車。
- (2) 所使用之箱子為單一形式之傳統物流箱，其容量為固定。
- (3) 使用有著不同容量、固定成本及變動成本之多種型式車輛供配送使用。
- (4) 每一種車型之冷凍車之各個溫層隔間，可容納之物流箱數量固定，每車限派車一次。
- (5) 每一個顧客之不同溫層物品需求都必須由同一輛車服務，即不可由多輛車分批完成服務。

- (6) 每一個顧客之需求量以「箱」為單位計，未滿一箱仍以一箱計。若顧客對某一溫層物品之需求量超過單一物流箱之容量時，不可以與其他顧客之同溫層需求合併箱子，需另新增一個相同溫度之物流箱，且這些物流箱皆須放在同一輛車上，
- (7) 目標成本包含車輛的固定成本與路線行駛之變動成本。

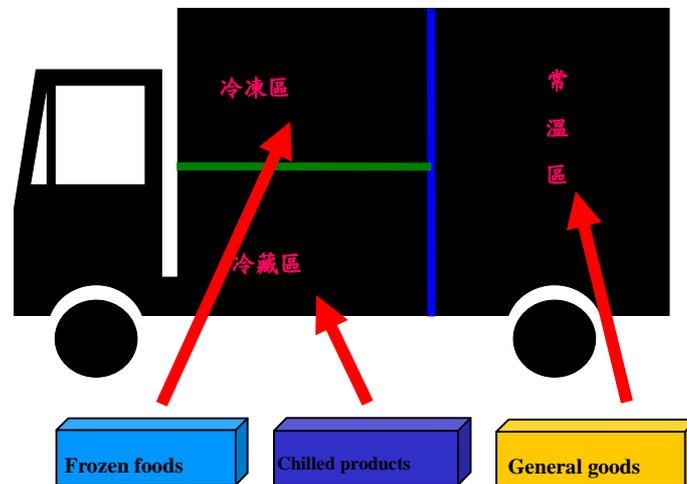


圖 1 機械式冷凍車廂區隔

3.2.2 HMFVRP2 問題定義

此問題所使用之多溫共配系統為「抽換式蓄冷保溫箱配送」，其示意圖如圖 2。此為利用「蓄冷保溫箱」取代現行冷凍冷藏車應用的低溫物流系統，在配送時先將物品放入保溫箱，再將保溫箱負載於「常溫車」內來配送物品。主要假設與限制如下：

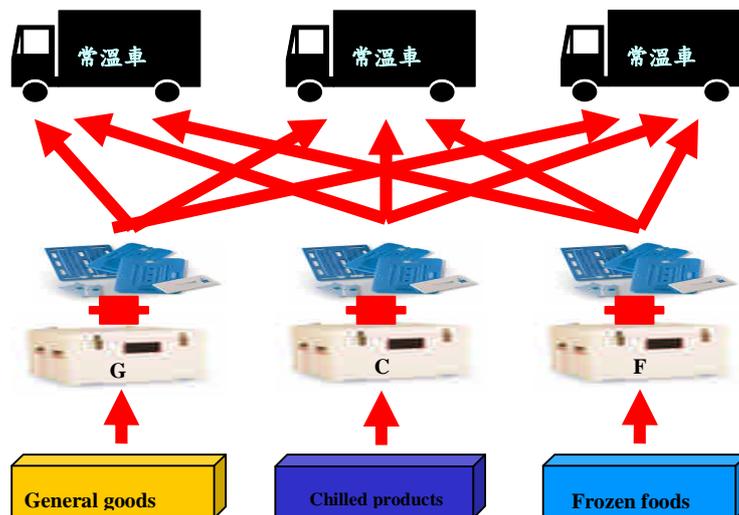


圖 2 抽換式蓄冷保溫箱配送

- (1) 所使用之配送車輛為常溫車。
- (2) 所使用之箱子為單一形式之抽換式蓄冷箱，其容量為固定。
- (3) 使用有著不同容量、固定成本及變動成本之多種型式車輛供配送使用。

- (4) 每一種車型之常溫車可容納之抽換式蓄冷箱數量固定，每車限派車一次。
- (5) 每一個顧客之不同溫層物品需求都必須由同一輛車服務，即不可由多輛車分批完成服務。
- (6) 每一個顧客之需求量以「箱」為單位計，未滿一箱仍以一箱計。若顧客的需求量超過單一抽換式蓄冷箱的容量時，不可以與其他顧客之需求合併箱子，需另新增一個抽換式蓄冷箱，且這些抽換式蓄冷箱皆須放在同一輛車上，
- (7) 目標成本包含車輛的固定成本與路線行駛之變動成本。

本研究之問題定義之比較表，如表 2 所示。

表 2 兩種 HMFVRP 問題定義之比較表

| | HMFVRP1 | HMFVRP2 |
|-----|---|---|
| 相異處 | 溫層隔間之冷凍車 一般物流箱 路線上的每一顧客之各溫層需求分別不得超過被指派車子的溫層隔間容量 | 常溫車 抽換式蓄冷箱 路線上的每一顧客之總需求箱數不得超過被指派之車子的總容量 |
| 相同處 | 顧客需求皆已知、不可分割，以箱為單位，只能被服務一次，且箱子不得和其他顧客合併使用 車隊是由有著不同容量、固定成本之多車種所組成 | |

3.2 HMFVRP 啟發式解法設計

本節將針對多車種多溫共配車輛路線問題，建構啟發式演算法求解起始解，接著利用路線內節線交換(Intra-route arc exchange)與路線間節點交換(Inter-route node exchange)來改善起始解。

大多數 VRP 的解題複雜度屬於 NP-Hard；亦即當問題規模很大時，現有的演算法與電腦運算機制皆無法在有效的多項時間內求得真確最佳解。因此本研究結合最遠鄰點法(Farthest Neighbor)與交換法來設計 HMFVRP 之求解方法。然後針對起始解做改善，執行鄰域搜尋模組：路線內節線交換、路線間節點交換，並且考慮不同的路線內節線交換、路線間節點交換組合的執行順序，以期構建出較佳的啟發式演算法。

解題架構可分為三個步驟如圖 3，第一個步驟為構建起始解，第二個步驟為鄰域搜尋模組。起始解構建應用傳統啟發式演算法中的最遠鄰點法，構建一個局部最佳解。鄰域搜尋模組應用 2-OPT 節線交換、Or-OPT 節線交換、1-0 節點交換、1-1 節點交換，鄰域搜尋模組的執行順序可以變更。

傳統之最近起點之鄰近點法為從尚未在路線中的顧客點，找出距離最近的顧客點，必須在不違反車輛容量限制條下進行連接。然而在此方法會導致路線的最後一點距離場站過遠，反而使得解不夠理想，故本研究使用循序式(Sequential) 最遠起點之鄰近點法 (Farthest Neighbor)，從尚未在路線中的顧客點，先找出離場站距離最遠的顧客點，以距離最遠的顧客點為連接點，找出距離最近的顧客點，必須在不違反車輛容量限制條下進行連接。

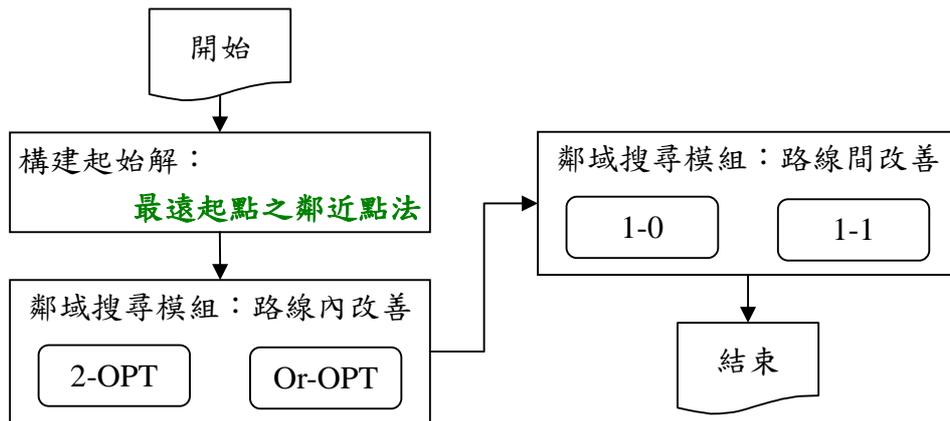


圖 3 求解 HMFVRP 啟發式演算法執行架構

最遠起點之鄰近點法先將距離場站最遠之顧客納入為一新路線的第一點。之後的路線即從此點開始尋找其最鄰近點。最後路線若達容量限制則返回場站。依序進行直到所有顧客皆已排入路線當中，為循序式建構法。此方法可改善傳統最近鄰近點法之缺點：最後一個顧客點距離場站過遠，而導致求解績效較差。

而在本研究中，由於 HMFVRP1 與 HMFVRP2 之容量限制式不同，故在構建起始解的部分亦有不同。HMFVRP1（機械式冷凍車廂區隔）受限於冷凍車內各溫層間隔空間已固定，每一溫層空間可裝載之物流箱有限，故在找尋納入路線的下一點時，不只要檢查該點之總需求是否可裝載，還需分開檢查各溫層是否可「同時」裝載進該車，若是，則納入路線；反之，若其中有任一溫層不符合，則不可納入路線。而 HMFVRP2（抽換式蓄冷箱），依據實務上之應用，顧客需求不可分割，需以「箱」為單位，亦不可與其他顧客之需求混在同一箱中，故若該顧客之需求未滿一箱，仍以一箱計。故在找尋納入路線的下一點時，不只要檢查該點之總需求是否可裝載，還需將顧客之需求換算成以「箱」為單位，若可裝載，則納入路線；反之，若不符合，則不可納入路線。

然而，由於本研究為「多車種」車輛路線問題，故在構建起始解的部分，先以「小型車」之容量當作限制考量，即單一車種，在接下來的進行「鄰域改善模組」中的「路線間改善模組」的時候，利用容量間的變化，先允許可超過小車容量，之後即將該路線則可換成「大型車」，既而減少路線數。

四、實驗設計與例題測試結果分析

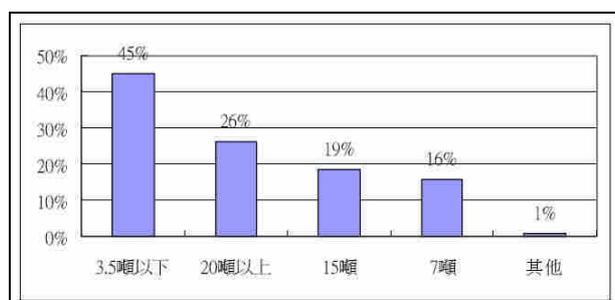
本節首先針對問題特性，產生 HMFVRP 之測試題庫，然後進行測試實驗設計與參數設定，並利用 3.2 節構建之啟發式演算法求解例題。本研究主要測試並比較 HMFVRP1 與 HMFVRP2 兩種多溫共配系統，應用於多車種車輛路線問題，在車輛數與路線成本上的差異。

4.1 測試例題產生

由於 HMFVRP 為新的車輛路線問題型態，目前在國際上並無相關之標竿例題，故本研究選擇 Solomon (1983) 之 VRPTW 題庫及 Taillard (1993) 之 VRP 題庫為本測試例題的設計基礎，主要採用其場站座標、顧客點座標、顧客需求等資料，其採用之顧客點為 100、200、385、

400、600、800、1000。

另外，在車輛與箱子之相關資料，則根據實務資料，採用其車輛容量、車輛成本、箱子成本、箱子之最適規格。工研院 IEK（民 93）報導：國內低溫食品配送車輛的噸數方面，大多使用 3.5 噸下的小型配送車輛，約佔 45%；其次為 20 噸，約佔 26%。其使用比例，如下圖 4 所示。而在本研究所產生的測試例題中，則假設常溫車與冷凍車之容量相同，物流箱與抽換式蓄冷箱之容量亦相同。



資料來源：工研院 IEK（民 93）

圖 4 國內低溫食品營運配送車輛種類與使用比例

本研究設計四種不同情境，分別為：(1) 各需求點的需求量相同，各溫層的需求量相同、(2) 各需求點的需求量不相同，各溫層的需求量相同、(3) 各需求點的需求量不相同，各溫層的需求量不相同，常溫小於冷藏加冷凍（依照比例）、(4) 各需求點的需求量不相同，各溫層的需求量不相同，常溫大於冷藏加冷凍（依照比例）。情境一、二兩種屬於較極端的數值，三、四主要按季節的不同而影響顧客對於不同溫層的需求，產生較符合實務的問題。然後再依據此四種情境各自產生不同的測試例題。

(1) 各需求點的需求量相同，各溫層的需求量相同

設計三種需求量情形，10、20、30，再分別選取所採用題庫的平面座標，共 42 個測試例題。

(2) 各需求點的需求量不相同，各溫層的需求量相同

需求量選取 C 型、R 型與 RC 型，再分別選取所採用題庫的平面座標，共 42 個測試例題。

(3) 各需求點與各溫層的需求量皆不相同，常溫小於冷藏加冷凍

需求量主要按季節的不同而影響顧客對於不同溫層的需求，此情境為常溫之需求量小於冷藏加冷凍之需求量，其主要按比例分為 20%：80%、30%：70%、40%：60%，再分別選取所採用題庫的平面座標，共 42 個測試例題。

(4) 各需求點與各溫層的需求量皆不相同，常溫大於冷藏加冷凍

需求量主要按季節的不同而影響顧客對於不同溫層的需求，此情境為常溫之需求量大於冷藏加冷凍之需求量，其主要按比例分為 80%—20%、70%—30%、60%—40%，再分別選取所採用題庫的平面座標，共 42 個測試例題。

4.2 實驗設計

本研究針對方法與模組之組合方式，進行測試之實驗設計。整個測試過程可分成以下二個階段：

(1) 第一階段：測試起始解構建模組與鄰域搜尋模組之適用性與解題績效。

第一階段針對兩種多溫共配系統進行測試，得到起始解後，分別與 24 種鄰域搜尋模組搭配進行測試，以探討各鄰域搜尋模組的改善績效。最後得到較佳鄰域搜尋執行步驟，根據上述測試構成 HMFVRP 啟發式演算法的起始解與鄰域搜尋執行步驟，並應用於第二階段之測試。

24 種鄰域搜尋模組為上述 4 種交換法（2-OPT 交換法、Or-OPT 交換法、1-0 節點交換法、1-1 節點交換法）進行排列組合，如表 3 所示。

所得到的最佳結果與起始解進行改善效率比較，其公式如下：

$$\text{平均改善率} = \frac{\text{起始解} - \text{改善後最佳結果}}{\text{起始解}} \times 100\%$$

表 3 實驗一之方法組合(24 種)

| | | | |
|-----------------|---------------------|--------------|-----------------------|
| N1： 2_OPT + | N1-1:Or_OPT+1_0+1_1 | N3： 1_0 + | N3-1:1_1+Or_OPT+2_OPT |
| | N1-2:Or_OPT+1_1+1_0 | | N3-2:1_1+2_OPT+Or_OPT |
| | N1-3:1_1+Or_OPT+1_0 | | N3-3:Or_OPT+1_1+2_OPT |
| | N1-4:1_1+1_0+Or_OPT | | N3-4:Or_OPT+2_OPT+1_1 |
| | N1-5:1_0+Or_OPT+1_1 | | N3-5:2_OPT+1_1+Or_OPT |
| | N1-6:1_0+1_1+Or_OPT | | N3-6:2_OPT+Or_OPT+1_1 |
| N2： Or_OPT + | N2-1:1_0+1_1+2_OPT | N4： 1_1 + | N4-1:1_0+Or_OPT+2_OPT |
| | N2-2:1_0+2_OPT+1_1 | | N4-2:1_0+2_OPT+Or_OPT |
| | N2-3:1_1+1_0+2_OPT | | N4-3:Or_OPT+1_0+2_OPT |
| | N2-4:1_1+2_OPT+1_0 | | N4-4:Or_OPT+2_OPT+1_0 |
| | N2-5:2_OPT+1_0+1_1 | | N4-5:2_OPT+1_0+Or_OPT |
| | N2-6:2_OPT+1_1+1_0 | | N4-6:2_OPT+Or_OPT+1_0 |

(2) 第二階段：四種需求情境與兩種多溫共配系統之組合分析。

第二階段針對兩種多溫共配系統進行測試，得到第一階段之測試結果，分別與 4 種實務情境搭配，用以得知兩種多溫共配系統之適用效果。

本研究修改後之測試題庫，其資料來源不同，所使用之成本單位亦不同，故需分開來討論。

在路線成本方面，其採用之場站座標、顧客座標、顧客需求來自於修改國際標竿例題，如：Solomon 之 VRPTW 題庫、Taillard 之 VRP 題庫以及 Homberger 之 VRP 題庫等；

而在車輛之固定成本方面，其資料來自於實務上的資料（卓裕仁等人，民 94），其單位為千元(新台幣)。HMFVRP1 所使用之車輛為各溫層已隔間好之冷凍車，固定成本較高；HMFVRP2 所使用之車輛為一般常溫車，固定成本較低。

4.3 測試結果分析

4.3.1 第一階段測試結果

本研究針對兩種多溫共配系統結合多車種車輛路線問題，分別測試起始解構建模組與鄰域搜尋模組之適用性與解題績效。

構建起始解之方法為最遠起點鄰近點法(先使用單一車種，且為小型車)，搭配 4.3 節的鄰域搜尋模組，共計 4 種鄰域搜尋方法，包括：路線內 2_OPT 交換模組、路線內 Or_OPT 交換模組、路線間 1_0 節點交換模組及 1_1 節點交換模組，將此四種方法進行排列組合，產生 24 種鄰域搜尋模組，針對最遠起點鄰近點法所產生的起始解進行改善。

執行方式為依序執行，有可能起始解首先用 2_OPT 改善，然後對 2_OPT 改善後的解用 1_0 節點交換法來改善，再用 1_0 改善後的結果用 1_1 交換法改善，最後用 Or_OPT。在此實驗使用之例題測試為：本研究所建立之四種情境中之情境一(顧客需求平均分佈)與情境三(顧客需求按比例分佈)進行測試，並將兩者加以平均，得到改善後之解，即利用此與起始解進行改善效率比較。

起始解經過鄰域搜尋模組改善後，平均改善幅度可達：路線成本 72%、車輛成本 50%，如圖 5 與圖 6 所示。而鄰域搜尋模組之改善效果顯著，但是各種組合之間的差異不大，平均而言，以鄰域搜尋模組組合 N3 與 N4(先進行路線間交換在進行路線內交換)的效果較佳，在 HMFVRP1 的部分，以 N3-1(1_0+1_1+Or_OPT+2_OPT)改善績效較好；在 HMFVRP2 的部分，以 N3-5(1_0+2_OPT+1_1+Or_OPT)改善績效較好。如圖 7 與圖 8 所示。

可能原因為起始路線構建完成後，若先進行路線內的交換，會促成其走向局部最佳區域(各路線求其最佳化)，而失去了達成全體路線成本降低的機會。此結果尤以 HMFVRP1 最明顯。因為 HMFVRP1 受限於車輛內之隔間限制，在構建起始路線時常會產生一個點或兩個點即產生為一條路線的情況(在情境一與二，顧客需求平均時最為明顯)，而若先使用本研究之「鄰域改善模組」中的「路線間改善模組」(N3 與 N4)，利用其容量間的變化，先允許可超過小車容量，之後即將該路線換成「大型車」或是「中型車」之方法，其改善幅度較先使用「鄰域改善模組」中的「路線內改善模組」(N1 與 N2)來的大。

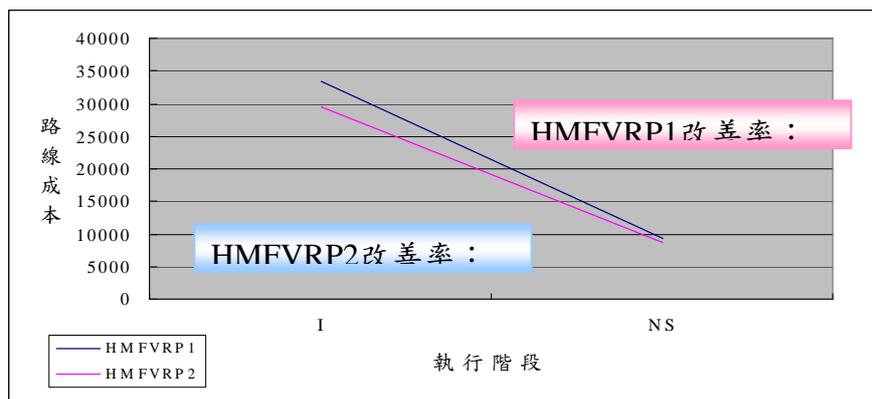


圖 5 HMFVRP1 與 HMFVRP2 之路線成本改善趨勢圖

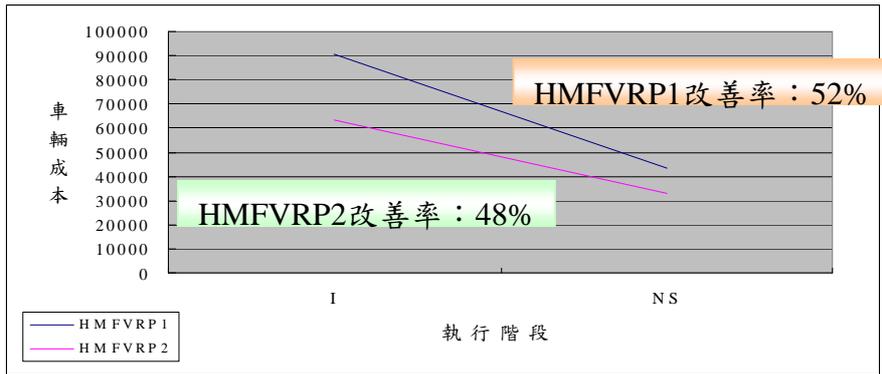


圖 6 HMFVRP1 與 HMFVRP2 之車輛成本改善趨勢圖

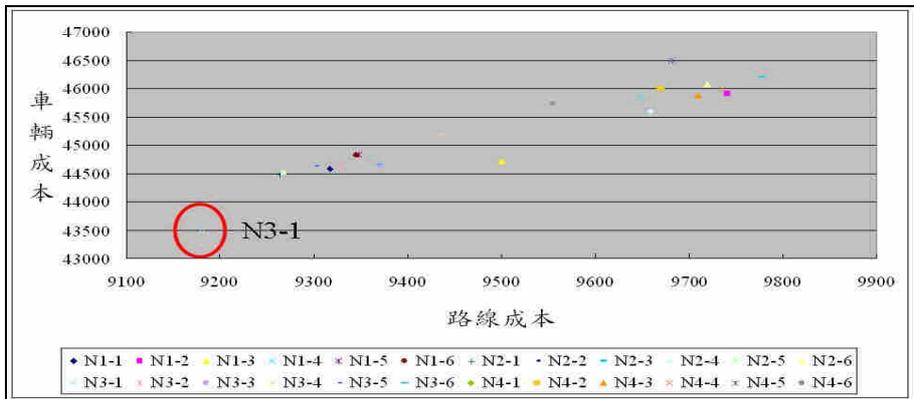


圖 7 HMFVRP1 之車輛成本與路線成本之關係圖

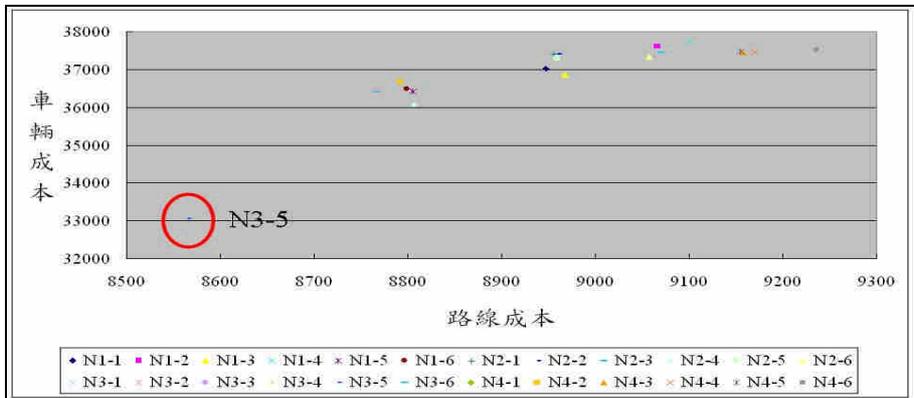


圖 8 HMFVRP2 之車輛成本與路線成本之關係圖

4.3.2 第二階段測試結果

第二階段針對兩種多溫共配系統進行測試，得到第一階段之測試結果，分別與 4 種實務情境搭配，以得知兩種多溫共配系統之適用效果。主要為利用自行修改之測試例題題庫，依據在不同情境下，何種多溫共配系統之配送成本較佳。本研究利用 Z 檢定，令 $\alpha = 0.05$ ，HMFVRP1(前者)與 HMFVRP2(後者)在四種情境下，進行兩種多溫共配系統的檢定，以得知四種測試例題情境，使用何種多溫共配系統較適用，如表 4~表 7 所示。

在情境一，如表 4 所示，在車輛成本方面， $Z = 0.000000009$ ，在路線成本方面， $Z =$

0.00016341，表示 HMFVRP2 在此情境表現較好。

表 4 情境一：HMFVRP1 與 HMFVRP2 比較測試之結果

| (HMFVRP1 – HMFVRP2) | 車輛成本 | 路線成本 |
|---------------------|-------------|------------|
| 差值平均 | 18166.19 | 1909.77 |
| 標準差 | 20775.30 | 3340.37 |
| Z 檢定 | 0.000000009 | 0.00016341 |

在情境二，如表 5 所示，在車輛成本方面， $Z=0.00000000006$ ，在路線成本方面， $Z=0.000057372$ ，表示 HMFVRP2 在此情境表現較好。

表 5 情境二：HMFVRP1 與 HMFVRP2 比較測試之結果

| (HMFVRP1 – HMFVRP2) | 車輛成本 | 路線成本 |
|---------------------|---------------|-------------|
| 差值平均 | 15862.86 | 1646.44 |
| 標準差 | 15833.08 | 2679.41 |
| Z 檢定 | 0.00000000006 | 0.000057372 |

在情境三，如表 6 所示，在車輛成本方面， $Z=0.00000000007$ ，在路線成本方面， $Z=0.000006652$ ，表示 HMFVRP2 在此情境表現較好。

表 6 情境三：HMFVRP1 與 HMFVRP2 比較測試之結果

| (HMFVRP1 – HMFVRP2) | 車輛成本 | 路線成本 |
|---------------------|---------------|-------------|
| 差值平均 | 38758.57 | 5108.98 |
| 標準差 | 38920.57 | 7474.05 |
| Z 檢定 | 0.00000000007 | 0.000006652 |

在情境四，如表 7 所示，在車輛成本方面， $Z=0.000000000008$ ，在路線成本方面， $Z=0.002936641$ ，表示 HMFVRP2 在此情境表現較好。

表 7 情境四：HMFVRP1 與 HMFVRP2 比較測試之結果

| (HMFVRP1 – HMFVRP2) | 車輛成本 | 路線成本 |
|---------------------|----------------|-------------|
| 差值平均 | 11308.10 | 1295.21 |
| 標準差 | 10787.93 | 2929.93 |
| Z 檢定 | 0.000000000008 | 0.002936641 |

由上述測試可以得知，在不同情境的比較下，包括在需求平均分佈(情境一、情境二)或是在需求依比例分布(情境三、情境四)的時候，無論於車輛成本或路線成本方面，HMFVRP2 皆明顯優於 HMFVRP1，顯示蓄冷保溫箱之應用確實可以降低車輛成本與路線成本。故就整

體而言，HMFVRP2 較適用於各個情境下的狀況。

五、結論與建議

5.1 結論

隨著時代變遷，民眾飲食習慣改變，宅配商品往往具有多溫層且少量的特性，商品將不再侷限於常溫，所以保鮮冷藏與冷凍的配送方式將順勢有發展空間。然而多溫共配系統受便利商店、量販店、低溫食品普及、網路與電視購物的來臨，未來市場的成長潛力亦是可以期待的。應用多車種多溫共配系統(Heterogeneous Multi-temperature Fleet Vehicle Routing Problem, HMFVRP)，可以減少車輛使用率，節省燃料及人事成本，且使車輛容積率增加，降低配送車輛數與路線成本。

由於此 HMFVRP 為新的問題型態，本研究針對應用多車種多溫共配系統後，其車輛路線之排程有別於傳統配送的方式，必須同時考慮保溫箱（物流箱）裝載限制、顧客需求限制等因素，做為研究對象，並發展一套可應用於「多車種多溫共配車輛路線問題」之啟發式解法。本研究主要貢獻在於提出 HMFVRP 之啟發式解法，並以 Solomon、Taillard 及 Homberger 等人之題庫為基礎，參考其場站座標、顧客點座標與顧客需求，再加上實務上，實際車輛容量與成本資料，設計四種情境之測試例題，並實際測試 HMFVRP1 與 HMFVRP2 之配送成本。

本研究發現在不同情境的比較下，包括在需求平均分佈(情境一、情境二)或是在需求依比例分布(情境三、情境四)的時候，無論於車輛成本或路線成本方面，HMFVRP2 皆明顯優於 HMFVRP1，顯示蓄冷保溫箱之應用確實可以降低車輛成本與路線成本。故就整體而言，HMFVRP2 較適用於各個情境下的狀況。

另外，就單獨在多車種方面，由於 HMFVRP1 受限於車廂內隔間限制，以及顧客要求配送「一次到位」，顧客需求不得與其他顧客合併，裝載在同一個物流箱中，故起始解的 HMFVRP1，常常產生一個顧客點一條路線，配送較無效率可言，但在經過鄰域搜尋改善之後，改善率很高。

總而言之，本研究構建的啟發式演算法，能有效求解多車種多溫共配系統車輛路線問題(HMFVRP)，而且在路線成本方面，HMFVRP2 也明顯低於 HMFVRP1，且瞭解 HMFVRP 不僅適用於市區的全溫層保鮮宅配服務，亦適合用於需求量較小的偏遠地區。

5.2 建議

本研究僅提出 HMFVRP 的啟發式演算法，並經由例題測試的方法來證實其效益，仍有許多課題尚未進行深入的研究。未來有關 HMFVRP 的研究可考慮以下幾點方向：

一、可使用巨集啟發式方法求解

可加入巨集啟發式方法來提升解題績效。由於本研究只採用啟發式演算法，有可能會陷入局部最佳解，而無法搜尋到最佳的解。

二、可加入其它限制，更貼近實務

以本研究之問題來說，宅配業者常會與顧客約定收送貨時間，此限制即為「時間窗」，或

是像 Starbucks 業者為方便理貨，會要求宅配業者將自己的商品裝在同一箱，並於夜間配送，等到隔天凌晨店員再進行理貨，完畢之後箱子可置於一旁等待晚上宅配業者送貨時一併取回，這些在實務上的應用，可在後續研究中加入探討；另外亦可再加入車輛行駛變動成本、服務時間等，可更貼近多車種的特性。

三、可針對所裝載之蓄冷箱與物流箱深入研究

本研究只假設有車輛容量限制的狀況，未來可考慮同時裝載不同尺寸的蓄冷櫃。

四、蓄冷箱之實用性

在本研究中，可發現無論在於車輛成本或路線成本方面，HMFVRP2 皆明顯優於 HMFVRP1，顯示蓄冷保溫箱之應用確實可以降低車輛成本與路線成本，且其在配送空間使用上較為彈性。但是經過實務業者的訪談，卻發現 HMFVRP1 在使用上較為普遍，主要利用於需求量較小之偏遠地區，或是高單價之商品。主要原因可歸咎於本研究中並無加入探討之蓄冷箱之成本，其在成本上較高，高於一般物流箱至少十倍以上，購置成本過高導致業者使用意願不高。

五、決策支援系統

可設計一個決策支援系統介面，讓之後之決策者可輸入任何資料，提供其決策參考用。

參考文獻

- 工研院 IEK (民 93)，「低溫食品物流南北需求不一」，*物流資訊網*。
- 王保元(民 89)，「物流中心冷凍食品配送模式之研究」，朝陽科技大學工業工程與管理學系碩士論文。
- 王耿彬(民 90)，「應用遺傳演算法於低溫冷凍物流中心之車輛配送排程規劃」，朝陽科技大學工業工程與管理學系碩士論文。
- 李長駿(民 93)，「多溫共配系統之路線排程問題研究」，中華大學科技管理研究所碩士論文。
- 卓裕仁(民 90)，「以巨集啟發式演算法求解多車種與週期性車輛路線問題之研究」，交通大學運輸工程與管理學系博士論文。
- 卓裕仁、黃嘉芬、林思芬、陳政君(民 94)，「蓄冷保溫箱應用於多溫共配系統之最適規格分析」，*中華民國運輸學會第二十屆學術論文研討會論文集*，頁 455-472。
- 洪聖峰(民 92)，「低溫物流配送路線問題之研究」，交通大學運輸科技與管理學系碩士論文。
- 吳芸蕙(民 93)，「國內低溫食品物流市場規模」，*機械與車輛產業速報*，第一百二十八期，第 16-18 頁。
- 郭儒家(民 91)，「低溫物流中心的系統建構及設備應用」，*物流新世紀：2002 特輯 21st century Logistics*，中華民國物流協會，第 149-173 頁。
- 郭儒家(民 93a)，「全新獨創技術-全溫層保鮮宅配服務系統(上)」，*物流技術與戰略*，第七期，第 34-43 頁。

郭儒家(民 93b)，「全新獨創技術-全溫層保鮮宅配服務系統(下)」，*物流技術與戰略*，第八期，第 90-99 頁。

張祖明(民 83)，「多車種車輛路線問題啟發式解法之研究」，交通大學土木工程研究所碩士論文。

Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C., and Taillard, E.D. (1999), "A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem," *Computers & Operations Research*, Vol. 26, pp.1153-1173.

Ghetsens, F., Golden, B., and Assad, A. (1986), "A new heuristic for determining fleet size and composition," *Mathematical Programming Studies*, Vol. 26, pp.233-236.

Salhi, S. and Rand, G. (1993), "Incorporating Vehicle Routing into the Vehicle Fleet Composition Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol. 66, pp.313-330.

Solomon, M. (1983), *Vehicle Routing and Scheduling with Time Window Constraints: Models and Algorithms*, PH.D. Dissertation, Department of Decision Sciences, University of Pennsylvania.

Taillard, E. (1993), "Parallel Iterative Search Methods for Vehicle Routing Problems", *Networks*, Vol.23, pp.661-673.

Tarantilis ,C.D and. Kiranoudis, C.T. (2001), "A meta-heuristic algorithm for the efficient distribution of perishable food," *Journal of Food Engineering*, Vol. 50, pp.1-9.

Tarantilis ,C.D.and Kiranoudis, C.T. (2002), "Dtribution of Fresh Meat," *Journal of food engineering*, Vol. 51, pp.85-91.

Tarantilis , C.D., Kiranoudis , C.T., and V.S. Vassiliadis (2003), "A list based threshold accepting metaheuristic for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem," *Journal of the operational research society*, Vol. 54, pp.65-71.

Tarantilis , C.D., Kiranoudis , C.T., and V.S. Vassiliadis (2004), "A threshold acceptin metaheuristic for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem," *European Journal of Operation Research*, Vol. 152, pp.148-158.

指定點接駁車輛路線問題之構建與解法設計

A Study on the Linehaul-Feeder Vehicle Routing Problem

卓裕仁⁵

張耘翠⁶

摘要

為減少車輛往返場站的次數與距離，近年來已有某些業者利用大型卡車來進行中途的接駁。本研究根據此種中途接駁的營運方式，提出一個新型態的車輛路線問題，稱之為「指定點接駁車輛路線問題 (Linehaul-Feeder Vehicle Routing Problem, LFVRP)」；並針對其問題特性設計啟發式求解方法。本研究所設計的啟發式解法主要包含三個步驟：首先，利用八種選擇指定點方法從所有顧客點中找出最佳位置做為指定點；然後利用最近鄰點法分別將兩群顧客插入至場站與指定點之間，以形成第一類與第二類的路線；最後，再使用 2-Opt、Or-Opt、路線間節點交換等鄰域搜尋法進行路線改善。

為驗證 LFVRP 之可行性與適用性，本研究蒐集了 60 個傳統車輛路線問題的國際標竿例題做為 LFVRP 的測試例題，並依其場站所在位置與顧客點分佈型態分成四組。本研究以 C# 語言撰寫上述啟發式解法之電腦程式，並以 LFVRP 例題進行解題績效分析。經與各標竿例題的文獻已知最佳解相比，結果發現 LFVRP 在場站位置偏遠的兩組例題表現優於另兩組場站位置居中型的例題，顯示接駁式的配送確實較適合於場站位置偏遠的情形。

關鍵詞：車輛路線問題、指定點接駁、啟發式方法

Abstract

In order to reduce the vehicles' round-trip and traveling distance, recently some carriers have developed a new type of operation that dispatches a heavy truck as the movable depot to serve other trucks for the second loading and delivery. The purposes of this research are to transfer above-mentioned operation into a special Vehicle Routing Problem, named as the Linehaul-Feeder Vehicle Routing Problem (LFVRP), and to design a simple heuristic to solve the LFVRP. This heuristic includes three steps: (1) selecting a specific customer as the movable depot, (2) constructing routes to serve customers between DC and the movable depot, and (3) improving routes by neighborhood search heuristics. In the first step, we propose eight rules to select movable depot; in the second step, we utilize the Nearest Neighbor (NN) method to construct the initial routes; in the final step, we used three neighborhood search methods: 2-Opt, Or-Opt and Inter-route node exchange to improve routes' distance.

This research generated a bank of sixty LFVRP instances that are modified from classical VRP benchmark instances, and divided them into four groups according to the position of DC and the geographic distribution of customers. Then, we use the C# computer language to coding the above heuristic method and use the LFVRP instances to test its performance and to verify the feasibility and suitability of the LFVRP. Through comparing with the best-found solutions, we found that LFVRP seems to be suitable for the instances which DC is located on side and customers are clustered.

⁵ 中華大學運輸科技與物流管理學系教授 (聯絡地址：新竹市香山區東香里六鄰五福路 2 段 707 號，電話：03-5186597，E-mail:yjcho@chu.edu.tw)

⁶ 中華大學科技管理研究所碩士

一、前言

由於都市地區土地價格偏高，大多數的物流與貨運業者皆將其營業據點或場站設置於市郊，此舉可能造成配送距離與次數的增加。為減少車輛往返場站的次數與距離，近年來已有某些業者利用大型卡車來進行中途的接駁。亦即，以大型卡車為指定點，當小貨車配送完第一趟的顧客點後，直接至指定點向大型卡車補貨而不需再回到場站，然後進行第二趟的配送服務。利用不同車種互相接駁進行配送作業，使得成本及距離總和最小，圖 1 為此接駁配送方式的示意圖。

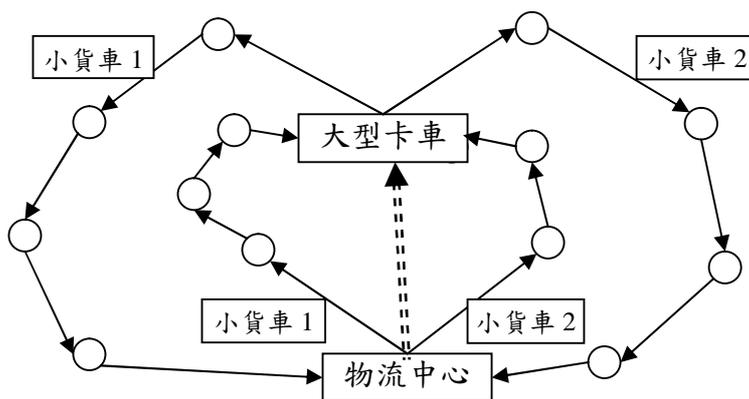


圖 1 指定點接駁配送方式示意圖

由圖 1 可知，當物流中心(場站)所在位置偏於一隅時，利用此指定點接駁的配送方式，將可節省小貨車返回場站補貨的時間，對於顧客服務具有時間緊迫性的情形，更能提升其服務效率並減少車輛的使用。

有鑑於此，本研究即針對上述指定點接駁的配送作業方式進行深入研究，提出一種新型態的車輛路線問題模式，稱之為「指定點接駁車輛路線問題 (Linehaul-Feeder Vehicle Routing Problem, LFVRP)」。由於 LFVRP 屬於國內外文獻未曾探討過的新課題，故本研究根據此問題特性來設計其啟發式求解方法，並藉由建立測試例題來驗證 LFVRP 模式的應用潛力。

本文後續章節安排如下：首先於第二節簡要回顧車輛路線相關問題的文獻；然後於第三節提出 LFVRP 之問題定義及其啟發式求解方法；再於第四節說明實驗設計與例題測試之結果；最後於第五節歸納本研究之重要結論與後續研究課題。

二、文獻回顧

本節文獻回顧包含兩部份：2.1 節探討國內外文獻中與本研究提出之指定點接駁車輛路線問題類似的相關模式；2.2 節則彙整了車輛路線問題之多種啟發式解法。

2.1 接駁式車輛路線問題相關文獻

本研究回顧各種車輛路線問題後發現，目前文獻上曾探討的「卡車拖車路線問題 (Truck and Trailer Vehicle Routing Problem, TTRP)」可算是最類似指定點接駁的車輛路線運作方式。

TTRP 乃是以卡車聯結拖車所組成的車隊進行配送，從場站出發服務所有顧客。當顧客處於拖車無法順利配送的地方時，將拖車停放在某顧客點，僅使用卡車單獨進行配送，等到

服務完拖車無法順利配送的顧客點，回到拖車停放的顧客點，把拖車聯結好，繼續完成所有顧客點的配送；圖 2 為 TTRP 路線型態的示意圖。

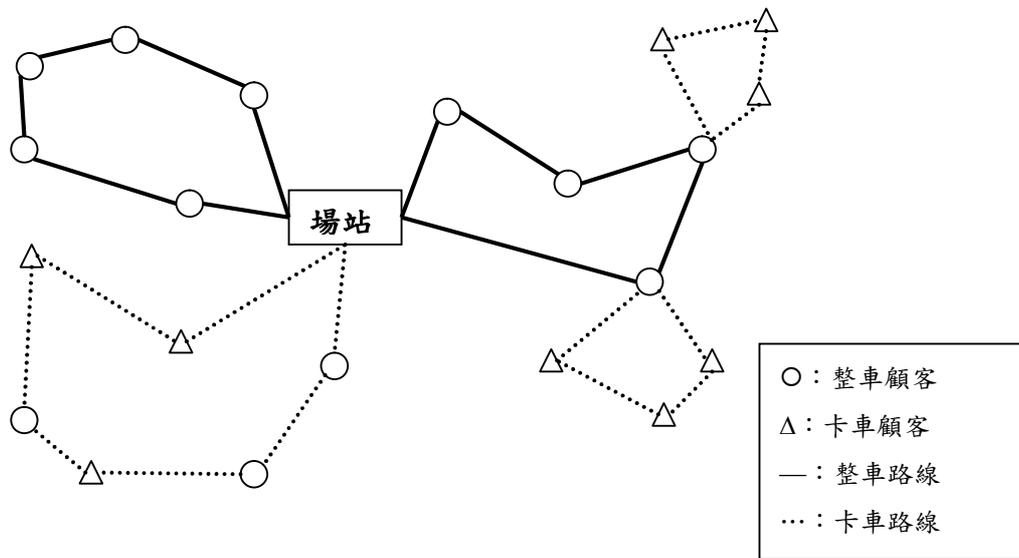


圖 2 TTRP 路線型態示意圖

指定點接駁車輛路線問題的基本概念為利用大貨車為一中繼站，停放在某一定點，使其他小貨車能夠到中繼點補貨。而卡車拖車路線問題則是卡車連結拖車同時由場站出發，在配送的子路線時將拖車停放在某一顧客點，等到子路線完成配送後，再將拖車連接回來。兩種問題之比較彙整在表 1。以下簡要回顧 TTRP 之相關文獻：

表 1 指定點接駁車輛路線問題與卡車拖車路線問題之比較表

| | 指定點接駁車輛路線問題 | 卡車拖車路線問題 |
|-----|---|---|
| 相同處 | •利用兩種車輛進行接駁式配送 | |
| 相異處 | <ul style="list-style-type: none"> •顧客未進行分類 •為符合時效性而產生的配送方式 •大貨車至指定點後不再移動 •不考慮裝卸貨時間 •不考慮車輛停放成本 •大貨車停放次數已知 •大貨車停放地點可任意選擇 •小貨車路線自指定點到場站 | <ul style="list-style-type: none"> •顧客有分類 •因地理環境受限而產生之配送方式 •拖車會隨著卡車移動 •考慮裝卸貨時間 •考慮車輛停放成本 •拖車停放次數未知 •拖車停放地點受限於車型 •卡車路線為環狀並回到拖車 |

資料來源：本研究整理

Gerdessen (1996) 首先提出一個稱為「車輛連結拖車路線問題 (Vehicle Routing Problem with Trailers, VRPT)」，VRPT 中卡車和拖車稱之為「車輛」(Vehicle)，卡車與拖車皆可承載貨，當顧客在擁擠的城市或者行駛路線較小時，可以單獨使用卡車替代車輛來服務顧客，進而避免麻煩的產生及時間的浪費。Gerdessen 亦發展出三套構建 VRPT 路線起始解之啟發式解法。

Chao (2002) 提出的 TTRP 其問題本質與 Gerdessen (1996) 是相同的。Chao 將 TTRP 的路線及顧客點進行分類，其中所謂整車顧客 (Vehicle Customers) 是由卡車和拖車進行服務

的顧客；另一個是卡車顧客 (Truck Customers) 單獨由卡車服務的顧客。Chao 應用禁制搜尋法(Tabu Search)結合確定性退火法(Deterministic Annealing)的偏差觀念來求解 TTRP，並在進行構建初始路線時，將一般指派問題的容量限制放鬆，若車輛超出容量時，給予懲罰值，形成不可行解後，進行改善。

吳志仁(民 92)根據 Gerdessen(1996)及 Chao(2002)對於 TTRP 進行研究，放寬 Gerdessen 及 Chao 的假設及限制，從合理化構建成本與擴充限制條件著手，使其更接近實際配送問題，並將問題稱為「一般化卡車拖車路線問題 (Generalized Truck and Trailer Routing Problem, GTTRP)」。劉建宏(民 94)則又延續 Gerdessen(1996)、Chao(2002)與吳志仁(民 92)等人對於 TTRP 相關問題之研究，並更進一步加入考量顧客的時窗限制，同時對部分的限制條件與成本假設做調整。劉建宏(民 94)僅使用硬時窗，而且只考慮時窗上限，不過使用了測試例題證明該題目的可行性，未來可以調整時間窗的設計，使 TTRPTW 更符合實際狀況。

Scheuerer(2006)延續 Chao(2002)對 TTRP 的研究。Scheuerer 創造出二個新的構建啟發式方法，分別為 T 分群 (T-Cluster) 和 T 掃描 (T-Sweep)。T 分群為利用最省插入法進行分群循序插入，一次構建一條路線；而 T 掃描則是使用傳統的掃描法，以車輛的最大容量限制做為掃描的基礎。經過測試發現，T 分群所構建出的解比 T 掃描來得好。

除了上述之 TRRP 相關研究外，國內學者也曾針對類似的接駁作業進行研究。涂紆瑜等人(民 90)運用「地理資訊系統 (GIS)」軟體構建配送路網，並模擬不同需求，產生應用個案例題，並使用 LINGO 進行求解。涂紆瑜等人之配送模式分為四種：(1)皆為機車；(2)皆為小貨車；(3)機車、小貨車混合使用；(4)機車、小貨車接駁使用。而在測試例題的建立則考慮顧客需求點數、空間分佈、便當總需求量以及求解模式，產生了 72 個測試例題進行求解。經過測試過後，機車、小貨車混合使用的平均成本最小，而機車、小貨車接駁使用的平均成本位居第三。張靖等人(民 90)也運用 LINGO 計算該研究提出了「大小車接駁配送」模式，證明以大車接駁小車之可行性，並建議對「大小車接駁配送」模式提出啟發式演算法來進行求解。

2.2 VRP 解法彙整

Bodin et al.(1983)曾將傳統的啟發式方法的解題架構歸納成路線構建、路線改善、綜合型三種。此外，本研究也根據數篇文獻(Christofides et al., 1979; Bodin et al., 1983; Toth and Vigo, 2002)彙整路線構建及路線改善解法於表 2。

表 2 傳統啟發式解法整理

| 用途 | 啟發式解法 | 概述 |
|------|-----------------|--|
| 建構路線 | 掃描法 (Sweep) | 屬於先分群再排程之方式，利用座標來表示顧客點的位置，任取一需求點為起點，以其角度為零度依順時鐘(或逆時鐘方向)以不違反車輛容量限制條件進行服務區域之分割。 |
| | 節省法 (Saving) | 在實際情形，一些限制條件能夠輕易的加入模式中，因此在實務上最常被應用。假設每個顧客點皆有一條路線由場站至顧客點直接服務，藉由逐步合併路線的方式來構建可行解；路線合併的依據在於合併後所能產生之路線成本節省值，在不違反車輛容量限制下，節省值愈大者將優先考慮合併。依據節省法運作之不同可分成循序節省法和平行節省法。 |

| | | |
|------|------------------------------|--|
| | 最近鄰點法 (Nearest Neighbor) | 從尚未在路線中的顧客點，找出距離最近的顧客點，必須在不違反車輛容量限制條下進行連接。 |
| | 最遠鄰點法 (Farthest Neighbor) | 從尚未在路線中的顧客點，先找出離場站距離最遠的顧客點，以距離最遠的顧客點為連接點，找出距離最近的顧客點，必須在不違反車輛容量限制條下進行連接。 |
| | 插入法 (Insertion) | 從一條簡單的路線開始，逐步加入新的顧客點以產生可行解。插入的準則在於將顧客點插入後，能夠使增加的路線成本愈小愈好，且須滿足車輛容量限制。 |
| 改善路線 | K-opt 交換法 | K 表示每次交換節線數，一般設定為 2 或 3。以任一起始解為現有解，交換同條路線內有 K 條不相鄰的節線，如果交換後的解優於現有解，則更新現有解，不斷重複交換，直到所有節線中可能交換節線都檢查完畢為止。 |
| | Or-opt 交換法 | 一種簡化的 3-Opt 節線交換法，該方法在每次執行鄰域搜尋的迴圈時，連續將某二段節線 (p=3)、一段節線 (p=2) 及一個節點 (p=1) 自路線中抽出，然後將抽出的顧客點插入其他節線之間，檢查插入後的結果是否能維持可行並獲得改善，再決定接受改善效果最好的位置進行插入。 |
| | 路線間節點交換 | 最早由 Christofides & Eilon 所提出，對於任兩條路線相互交換其部分節點，在不違反車輛容量限制下，檢查交換後結果是否優於現有解，若是，則更新現有解。節點交換的形式很多，例如：1-0、1-1 等。 |

資料來源：本研究整理

三、LFVRP 問題定義與啟發式解法設計

3.1 LFVRP 問題定義

相較於傳統車輛路線問題(Vehicle Routing Problem, VRP)僅考慮單一場站，LFVRP 在服務的規劃上不僅要考慮車輛服務的路線，還需要考慮尋找指定點的位置，使得場站和指定點的整體規劃路線能達到最佳效益。本研究對於 LFVRP 問題的前提假設與限制條件說明如下：

一、指定點方面：

1. 單一指定點，且小車最多只能到指定點一次。
2. 從所有顧客點中選擇一處做為指定點。
3. 假設至指定點的大車容量無限大，可滿足所有來補貨的小車需求。

二、配送路線方面：

1. 僅包含兩種類型的路線：第一類路線係自場站出發，沿途服務顧客後到達指定點；第二類路線則自指定點出發，沿途服務顧客後返回場站。
2. 第一類路線與第二類路線承載之需求量分別不得超過小車容量限制。
3. 小車數量無限制；大型車數量一輛。

- 指定點的需求由大車服務，其他顧客點的需求由小車服務；每個顧客點僅能被某一車輛服務一次（即需求之不可分割性）。

三、目標函數方面：

- 目標一：路線行駛成本總和極小化。
- 目標二：小車車隊規模（使用的車輛數）極小化。
- 大車的車輛使用成本與路線行駛成本暫不考慮在目標函數中。

LFVRP 與 VRP 的問題特性比較如表 3 所示。經由 LFVRP 與 VRP 之問題特性可以看出，在設施資源方面，LFVRP 雖有二種車種，但其中一種大型車種類似於虛擬場站，僅提供小型車卸貨或補貨用，並不做為配送車輛使用；LFVRP 比 VRP 多了一個中繼站（即指定點），提供給小型車輛卸貨或補貨用。

表 3 LFVRP 與 VRP 之問題特性比較

| 問題特性 | LFVRP | VRP |
|-------|-----------------------------|---------------------------|
| 設施資源 | 單一場站、兩種車種、車輛容量限制、單一指定點（中繼站） | 單一場站、單一車種、車輛容量限制 |
| 顧客需求 | 固定需求且已知、不可分割 | 固定需求且已知、不可分割 |
| 節點服務 | 流量守恆、僅考慮送貨／收貨、避免子迴路 | 流量守恆、僅考慮送貨／收貨、避免子迴路 |
| 網路結構 | 無方向性、滿足歐氏（Euclidian）三角不等式 | 無方向性、滿足歐氏（Euclidian）三角不等式 |
| 最佳化目標 | 路線成本總和最小 小車車輛數（車隊規模）最小 | 路線成本總和最小 |

資料來源：本研究整理

3.2 起始解構建模組

以下兩小節針對 LFVRP 之啟發式解法提出說明。LFVRP 啟發式解法之解題架構可分為二個模組：起始解構建模組、鄰域搜尋改善模組。本小節首先介紹起始解構建模組之設計細節，下一小節再說明鄰域搜尋改善模組。

在起始解構建模組方面，主要是以傳統啟發式演算法「最近鄰點法（Nearest Neighbor）」為主，進行起始路線的構建。由於 LFVRP 最大的特色在於當小型車車輛容量已滿或已空時，車輛可以到指定的中繼點進行卸貨或補貨後，再繼續第二次配送的路線，不但可以減少車輛回場站的時間及次數外，還可以減少車輛的數量。根據此特性，本研究在起始路線構建方面，以兩個階段來進行，即先在所有顧客點中選擇一點為指定點；接著，分別對於第一類與第二類路線進行構建。第一類的路線是由場站出發，在不違反車輛容量限制之下進行收/送貨，最後抵達指定點；第二類的路線則由指定點出發進行收/送貨，在不違反車輛容量限制之下進行取貨，最後回到場站。

3.2.1 選擇指定點

本研究分別設計八種不同指定點選擇的方法（SF1、SF2、SF3、SF4、SF5、SF6、SF7、SF8），依序介紹如下：

一、SF1 方法

由於 LFVRP 的路線有兩種類型：自場站出發至指定點，自指定點出發回場站。所以若按距離進行分群，使得第一類路線的顧客點比第二類路線的顧客點之距離短，這樣可以確定第一類路線會先選擇到離場站較近的點，而第二類路線也不會與第一類路線差距太遠。因此，SF1 的設計概念係先以距離將所有顧客分成兩群，然後對第二群顧客求解一中位問題，以決定指定點的位置。中位問題乃是求解某節點集合重心位置的方法，其目標在於極小化重心位置到每一個節點之加權距離的總和，而加權值通常為該節點的需求量。以下詳述 SF1 的執行步驟：

- (1) 首先，依照所有顧客點與場站距離的遠近，由小到大進行排序；
- (2) 將排序後的顧客點等分為兩群，第一群為離場站較近的顧客點，第二群為離場站較遠的顧客點；
- (3) 對第二群顧客求解其中位問題，候選的位置為該群顧客節點，加權值為顧客點的需求量，並令該重心位置的顧客點為指定點；圖 3 為 SF1 方法概念之示意圖。

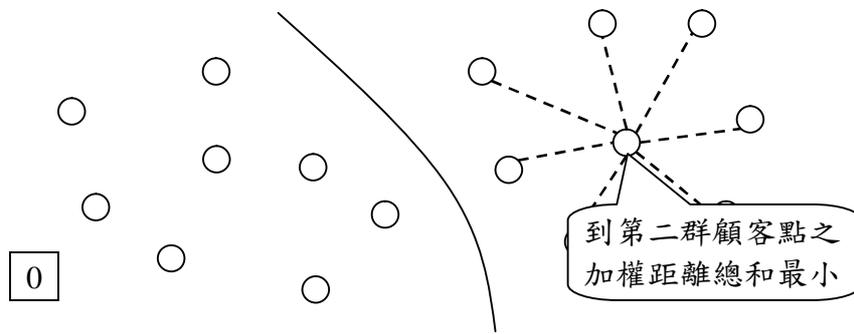


圖 3 SF1 方法概念之示意圖

二、SF2 方法

SF2 的設計概念在於認為指定點的位置並不一定皆遠離場站，而且需求量愈大的顧客點愈適合做為指定點。SF2 方法步驟詳述如下：

- (1) 首先，依照所有顧客點與場站距離的遠近，由小到大進行排序；
- (2) 將排序後的顧客點等分為四群，第一群的顧客點離場站最近，第四群的顧客點離場站最遠；
- (3) 在第二群與第四群的顧客點中尋找需求量最大的顧客點，令其為指定點；圖 4 為 SF2 方法概念之示意圖。

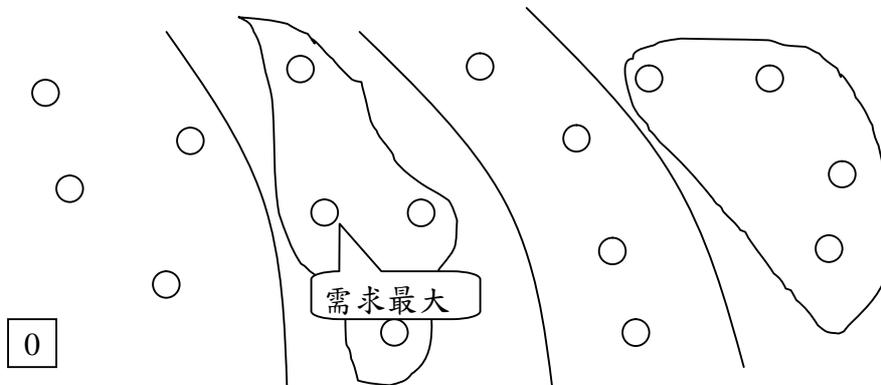


圖 4 SF2 方法概念之示意圖

三、SF3 方法

SF3 的概念與 SF2 類似，但是僅考慮離場站距離較近的顧客點，並利用顧客點需求總和的一半來劃分顧客點，以避免第一類路線所使用之車輛數少於第二類所使用之車輛數。茲詳述 SF3 執行步驟於下：

- (1) 首先，依照所有顧客點與場站距離的遠近，由小到大進行排序，並計算其累積的需求量；
- (2) 自排序後顧客點依序檢查其累積需求量，當某顧客點之累積需求量達到或超過總需求量的一半時，將該顧客點之前(含該顧客點)的顧客點設為第一群，該顧客點之後的顧客點為第二群；
- (3) 自第一群的顧客點中尋找需求量最大的顧客點，令其為指定點；圖 5 為 SF3 方法概念之示意圖。

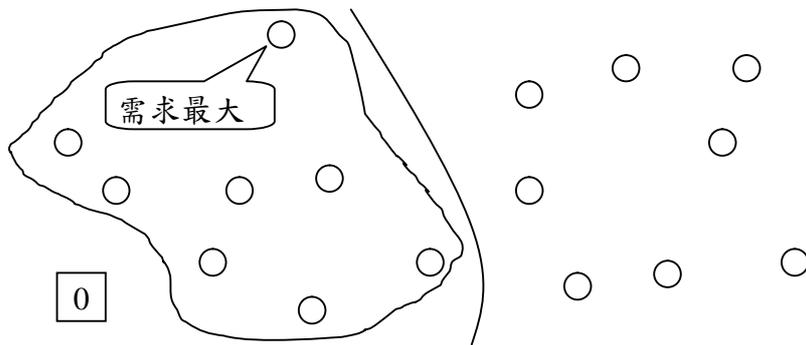


圖 5 SF3 方法概念之示意圖

四、SF4 方法

SF4 的設計概念係以距離中點為基礎，其方法步驟詳述如下：

- (1) 首先，找出離場站距離最遠的顧客點，連接場站與該顧客點，並求取其連線之中點位置；
- (2) 找出距離該中點位置最近的顧客點，令其為指定點；圖 6 為 SF4 方法概念之示意圖。

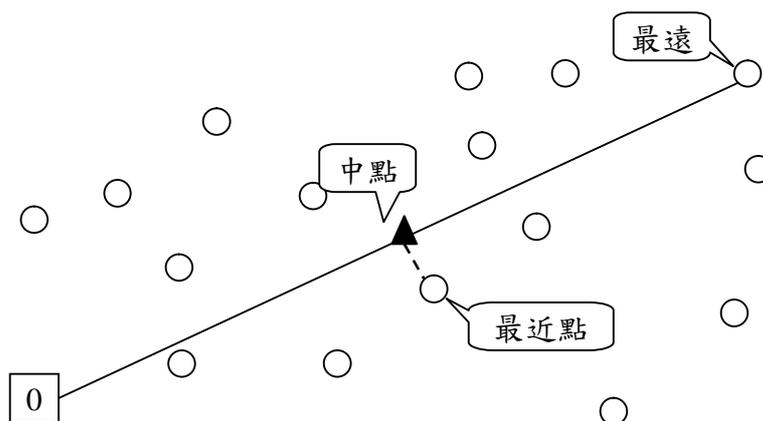


圖 6 SF4 方法概念之示意圖

五、SF5 方法

SF5 的設計概念與 SF1 相似，但將場站之影響加入考慮，以避免指定點與場站之距離過長。以下詳述 SF5 的執行步驟：

- (1) 首先，依照所有顧客點與場站距離的遠近，由小到大進行排序；
- (2) 將排序後的顧客點等分為兩群，第一群為離場站較近的顧客點，第二群為離場站較遠的顧客點；
- (3) 將場站加入第二群顧客，並令其需求量為第一群顧客的需求量總和；
- (4) 對步驟(3)所得之第二群顧客求解其中位問題，候選的位置為該群顧客節點，加權值為顧客點的需求量，並令該重心位置的顧客點為指定點；圖 7 為 SF5 方法概念之示意圖。

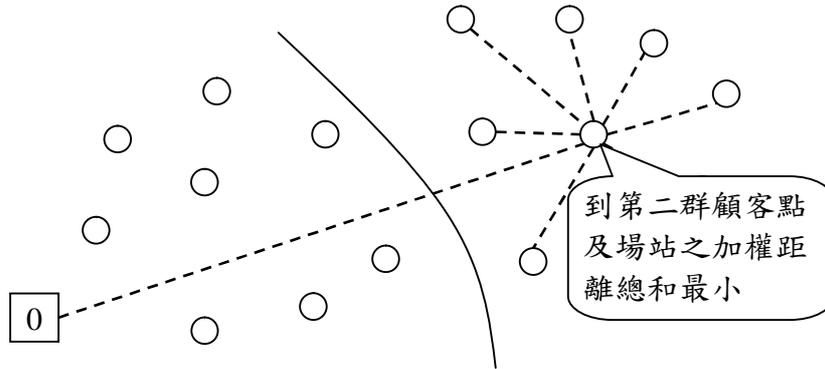


圖 7 SF5 方法概念之示意圖

六、SF6 方法

SF6 的設計概念與 SF5 相同，但僅考慮距離因素而未將需求量做為加權值。茲說明 SF6 方法之步驟如下：

- (1) 首先，依照所有顧客點與場站距離的遠近，由小到大進行排序；
- (2) 將排序後的顧客點等分為兩群，第一群為離場站較近的顧客點，第二群為離場站較遠的顧客點，並將場站加入第二群顧客；
- (3) 對第二群顧客求解其未加權之中位問題，候選的位置為該群顧客節點，並令該重心位置的顧客點為指定點。

七、SF7 方法

SF7 的設計概念在於同時考量各顧客點至場站與至指定點之距離總和，以兼顧場站與指定點之位置影響。以下詳述 SF7 的執行步驟：

- (1) 對每一個顧客點，加總該點至其他顧客點之距離及場站至所有顧客點之距離；
- (2) 找出具有上述距離總和最小的顧客點，令其為指定點；圖 8 為 SF7 方法概念之示意圖。

八、SF8 方法

SF8 的設計概念與 SF7 相同，但是利用需求量來進行加權。SF8 方法步驟詳述如下：

- (1) 對每一個顧客點，加總該點至其他顧客點之加權距離及場站至所有顧客點之加權距離；
- (2) 找出具有上述加權距離總和最小的顧客點，令其為指定點。

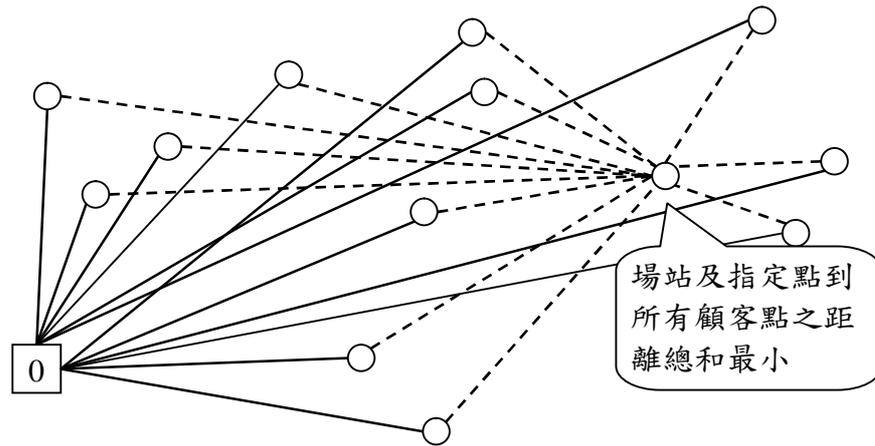


圖 8 SF7 方法概念之示意圖

3.2.2 起始路線構建

利用上述八種選擇指定點方法，找出指定點後，由場站出發，比較各顧客點到場站之距離，挑選離場站距離最小的顧客點，開始建構路線，而此顧客點即為路線中的第一點。接著再由路線的第一點出發找其最鄰近之顧客點。使用此法則直到車輛達容量限制時，將路線的最後一點連接至指定點，完成本條路線的建構。依此循序建構其餘第一類的路線，直到所有分群顧客點已被服務。

在完成第一類的路線構建後，同樣運用「最近鄰點法」進行第二類的路線的構建，由指定點出發，比較各顧客點到指定點之距離，挑選離指定點距離最小的顧客點，開始建構路線，而此顧客點即為第二類的路線中的第一點。接著再由路線中第一點出發找其最鄰近之顧客點。使用此法則直到車輛達容量限制時，將路線的最後一點連接回場站，完成本條路線的建構。依此循序建構其餘路線，直到所有顧客點已被服務。

3.3 鄰域搜尋改善模組

鄰域搜尋改善模組方面，主要是以 2-Opt、Or-Opt、S-S、1-0、1-1 進行改善起始路線。本研究所採用的鄰域搜尋改善模組可分為二大類：(1) 路線內交換改善模組，包括 2-Opt 和 Or-Opt；(2) 路線間交換改善模組，包括 S-S、1-0 和 1-1。

在執行鄰域搜尋改善模組時，決定選擇哪一個鄰近解來進行交換的準則，稱為「選擇策略(selection strategy)」，其策略一般有兩種：(1) 最佳改善策略 (best-improve)，是從所有鄰域搜尋範圍之內的鄰近解，選擇一個改善最多的鄰近解進行交換；及 (2) 首先改善策略 (first-improve)，在所有鄰域搜尋範圍之內，只要有鄰近解可以改善就進行交換。雖然無法證明此兩種選擇策略孰優孰劣，但從執行效率來說，使用「首先改善」選擇策略優於「最佳改善」選擇策略，所以在本研究各種交換改善模組執行中，全部採用「首先改善」選擇策略。

四、實驗設計與例題測試結果分析

4.1 測試例題產生與實驗設計

4.1.1 測試例題產生

本研究以國際標準例題為主，藉由全球資訊網路（WWW）連線到 The VRP Web (<http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>, 2006)中搜尋 VRP 例題，並從中下載了 60 題，做為本研究之測試例題。這 60 題測試例題皆為傳統的 VRP 或 VRPTW 的例題。由於顧客點的散佈位置不同，本研究依所有顧客點與場站的散佈位置，將測試例題分成四個類型，分別為均勻隨機-場站居中型（RM）、均勻隨機-場站居邊型（RS）、聚落-場站居中型（CM）、聚落-場站居邊型（CS）。圖 9 顯示出本研究所劃分之四種顧客需求點散佈位置類型，其中圖 10(A)為 RM，圖 10 (B)為 RS，圖 10 (C)為 CM，圖 10 (D)為 CS。經由分類後，各類型的測試例題分別為 31 題、16 題、8 題、5 題，題目規模從 25 個顧客到 1000 個顧客，每題例題車輛容量皆不相同。

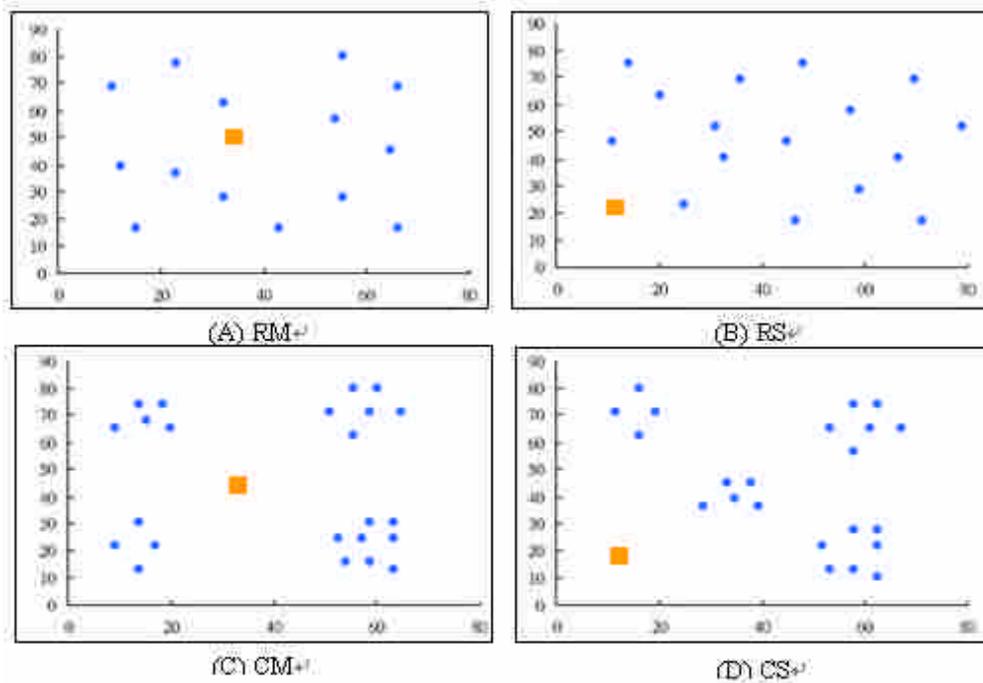


圖 9 顧客需求點分佈位置型態

4.1.2 實驗設計

實驗一首先針對八種選擇指定點方法（SF1、SF2、SF3、SF4、SF5、SF6、SF7、SF8）進行測試，得到起始解後，以便探討這八種方法之解題效果。

實驗二是由實驗一所得到的八種起始解進行比較，由於路線內交換改善法不會影響到其他路線，故僅使用鄰域搜尋改善模組內三種路線間交換改善法進行排列組合進行測試，共有 48 種測試組合整理如表 4 所示。將所得到的最佳結果與起始解進行改善效率比較，其公式如下：

$$\text{平均改善率} = \frac{\text{起始解} - \text{改善後最佳結果}}{\text{起始解}} \times 100\% \quad (1)$$

表 4 實驗二之模組組合方式

| 起始解 | 鄰域搜尋改善模組 | | 代號 |
|-----|----------------|-----------------|----|
| SF1 | 2-Opt + Or-Opt | 1-1 + 1-0 + S-S | N1 |

| | | | |
|----------------------------|--|-----------------|----|
| SF2 | | 1-0 + 1-1 + S-S | N2 |
| SF3 | | S-S + 1-0 + 1-1 | N3 |
| SF4 | | S-S + 1-1 + 1-0 | N4 |
| SF5 | | 1-0 + S-S + 1-1 | N5 |
| SF6 | | 1-1 + S-S + 1-0 | N6 |
| SF7 | | | |
| SF8 | | | |
| $8 \times 1 \times 6 = 48$ | | | |

4.2 測試結果分析

4.2.1 實驗一：起始解之解題績效

本節針對起始解進行初步測試。分別就八種選擇指定點 (SF1 ~ SF8) 所產生的起始解，對各類型例題 (RM、RS、CM、CS) 之平均值加以整理分析，並將所得到的平均值加以比較，以路線成本及車輛數最小的平均值為最佳表現，與其他方法進行比較，表 5 顯示整體平均測試結果。

在使用車輛數方面，從表 5 可以明顯的看出 SF4、SF7、SF8 方法在 RM、RS、CM、CS 四種類型表現皆是最好的，同時三種方法所求出的車輛平均標準差在 RM、RS、CM、CS 四種類型中表現也是最低的，即顯示 SF4、SF7、SF8 此種方法相對於其他五種方法資料的分散程度來的小，較不容易有極端值的出現。在路線成本方面，從表 5 可以看得出來 SF7 方法在 RM、RS、CS 三種類型表現皆是最好的。以 SF7 方法所求出的路線成本平均標準差在 RM、RS、CS 中亦是最低的，即顯示 SF7 此種方法就路線成本來看，相對比其他三種方法資料分散程度來的小，較不容易有極端值出現。由於(平均數/標準差)這一項目亦可看出資料間的穩定程度，而由(平均數/標準差)值看來，RM 和 CM 二種類型例題的值比 RS 和 CS 來得大，顯示其穩定度不如 RS 和 CS 類型的題目。

就路線成本方面與最佳表現的差距來看，在 RM 類型例題中，SF4、SF7 與 SF8 這三種方法在這類型的例題中有不錯的表現，SF2 較不適用於 RM 類型的例題；從 RS 類型例題來看，SF7 與 SF8 在這類型的例題中有不錯的表現，而 SF2 較不適用於 RM 類型的例題；在 CM 類型的例題中，SF8、SF7 在 CM 類型的例題中的表現也不錯；最後在 CS 類型的例題中，SF7、SF1、SF5、SF6、SF8 皆適用於這個類型的例題。

表 5 各類型測試例題之起始解測試結果

| RM | 平均成本 | 成本標準差 | 平均車數 | 車數標準差 | μ_1/σ_1 | μ_2/σ_2 | 與最佳表現差距 | |
|-----|---------|------------|---------|------------|------------------|------------------|---------|-------|
| | μ_1 | σ_1 | μ_2 | σ_2 | | | 成本 | 車數 |
| SF1 | 3931.05 | 4797.45 | 7.55 | 6.8 | 0.82 | 1.11 | 0.036 | 0.13 |
| SF2 | 4332.62 | 5247.92 | 7.32 | 6.17 | 0.83 | 1.19 | 0.142 | 0.096 |
| SF3 | 3934.82 | 4714.98 | 6.74 | 5.16 | 0.83 | 1.31 | 0.037 | 0.009 |
| SF4 | 3818.27 | 4670.06 | 6.68 | 5.08 | 0.82 | 1.31 | 0.006 | 0 |
| SF5 | 3929.29 | 4799.21 | 7.58 | 6.79 | 0.82 | 1.12 | 0.036 | 0.135 |
| SF6 | 3937.45 | 4796.42 | 7.58 | 6.79 | 0.82 | 1.12 | 0.038 | 0.135 |
| SF7 | 3794.15 | 4643.79 | 6.68 | 5.08 | 0.82 | 1.31 | 0 | 0 |
| SF8 | 3801.49 | 4684.82 | 6.68 | 5.08 | 0.81 | 1.31 | 0.002 | 0 |
| RS | 平均成本 | 成本標準差 | 平均車數 | 車數標準差 | μ_1/σ_1 | μ_2/σ_2 | 與最佳表現差距 | |
| | μ_1 | σ_1 | μ_2 | σ_2 | | | 成本 | 車數 |
| SF1 | 5163.06 | 9323.44 | 9.38 | 6.29 | 0.55 | 1.49 | 0.067 | 0.145 |

| | | | | | | | | |
|-----|----------|------------|---------|------------|------------------|------------------|---------|--------|
| SF2 | 6034.11 | 11871.04 | 9.25 | 6.84 | 0.51 | 1.35 | 0.247 | 0.129 |
| SF3 | 5734.85 | 11120.71 | 8.25 | 5.7 | 0.52 | 1.45 | 0.185 | 0.007 |
| SF4 | 5064.24 | 9334.22 | 8.19 | 5.52 | 0.54 | 1.48 | 0.047 | 0 |
| SF5 | 5544.76 | 10839.2 | 9.38 | 6.29 | 0.51 | 1.49 | 0.146 | 0.145 |
| SF6 | 5550.93 | 10837.43 | 9.13 | 6.17 | 0.51 | 1.48 | 0.147 | 0.115 |
| SF7 | 4838.67 | 8538.51 | 8.19 | 5.52 | 0.57 | 1.48 | 0 | 0 |
| SF8 | 4856.19 | 8684 | 8.19 | 5.52 | 0.56 | 1.48 | 0.004 | 0 |
| CM | 平均成本 | 成本標準差 | 平均車數 | 車數標準差 | μ_1/σ_1 | μ_2/σ_2 | 與最佳表現差距 | |
| | μ_1 | σ_1 | μ_2 | σ_2 | | | 成本 | 車數 |
| SF1 | 13910.7 | 17104.72 | 18.75 | 16.69 | 0.81 | 1.12 | 0.101 | 0.02 |
| SF2 | 14150.82 | 16807.91 | 18.88 | 16.52 | 0.84 | 1.14 | 0.12 | 0.027 |
| SF3 | 14447.1 | 17399.96 | 18.38 | 16.27 | 0.83 | 1.13 | 0.143 | 0 |
| SF4 | 13503.94 | 16358.39 | 18.38 | 16.27 | 0.83 | 1.13 | 0.069 | 0 |
| SF5 | 13930.09 | 17088.61 | 19 | 16.43 | 0.82 | 1.16 | 0.102 | 0.034 |
| SF6 | 13927.72 | 17089.45 | 19 | 16.43 | 0.81 | 1.16 | 0.102 | 0.034 |
| SF7 | 12684.86 | 15300.1 | 18.38 | 16.27 | 0.83 | 1.13 | 0.004 | 0 |
| SF8 | 12635.51 | 15265.64 | 18.38 | 16.27 | 0.83 | 1.13 | 0 | 0 |
| CS | 平均成本 | 成本標準差 | 平均車數 | 車數標準差 | μ_1/σ_1 | μ_2/σ_2 | 與最佳表現差距 | |
| | μ_1 | σ_1 | μ_2 | σ_2 | | | 成本 | 車數 |
| SF1 | 1432.44 | 1871.77 | 4 | 2.35 | 0.77 | 1.7 | 0.055 | 0.053 |
| SF2 | 1582.3 | 1960.71 | 3.8 | 2.49 | 0.81 | 1.53 | 0.166 | 0 |
| SF3 | 1482.89 | 1876.78 | 3.8 | 2.49 | 0.79 | 1.53 | 0.092 | 0 |
| SF4 | 1489.04 | 1960.8 | 3.8 | 2.49 | 0.76 | 1.53 | 0.097 | 0 |
| SF5 | 1428.91 | 1896.91 | 4 | 2.35 | 0.75 | 1.7 | 0.053 | 0.053 |
| SF6 | 1430.23 | 1896.07 | 4 | 2.35 | 0.75 | 1.7 | 0.054 | 0.053 |
| SF7 | 1357.41 | 1788.58 | 3.8 | 2.49 | 0.76 | 1.53 | 0 | 0 |
| SF8 | 1424.98 | 1869.41 | 3.8 | 2.49 | 0.76 | 1.53 | 0.05 | 0 |
| 總平均 | 6503.93 | 8961.79 | 9.59 | 7.67 | | | 0.0610 | 0.0334 |

表 6 為八個方法在所有測試例題的平均結果比較，在經過起始解模組的測試之下，從路線成本方面來看，SF7 方法表現較好，而 SF2 的方法則表現較差。從車輛數來看，SF4、SF7、SF8 所使用的車輛數較為相同。圖 10 為八種指定點選擇方法之績效比較(車輛數 v.s. 路線成本)。

表 6 各種起始解構建法之測試結果(2)

| | 平均路線成本 | 平均車輛數 |
|-----|---------|-------|
| SF1 | 5381.99 | 9.23 |
| SF2 | 5866.25 | 9.08 |
| SF3 | 5612.14 | 8.45 |
| SF4 | 5247.85 | 8.4 |
| SF5 | 5485.16 | 9.28 |
| SF6 | 5490.81 | 9.22 |
| SF7 | 5055.05 | 8.4 |
| SF8 | 5062.57 | 8.4 |
| 總平均 | 5400.23 | 8.81 |

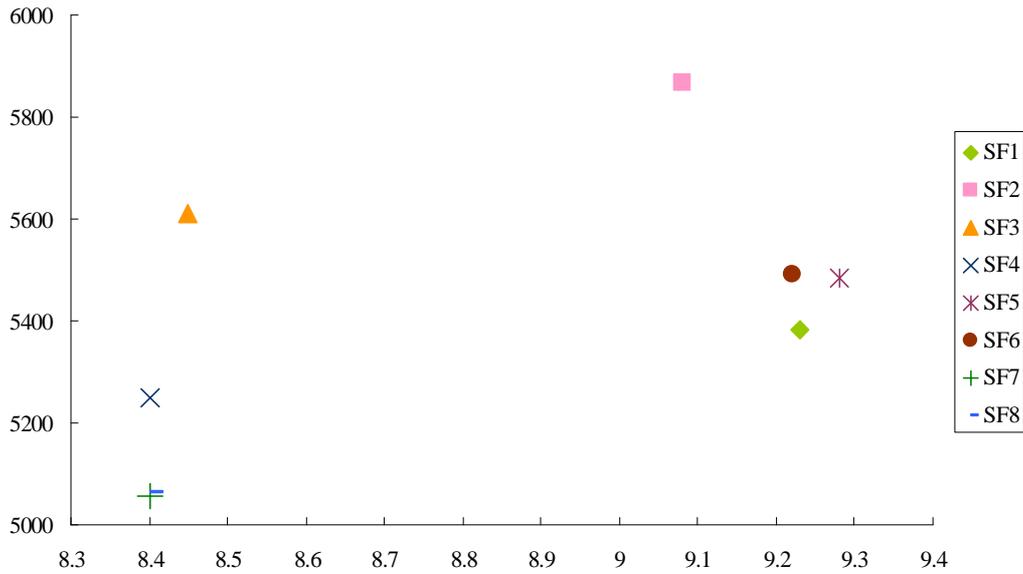


圖 10 八種指定點選擇方法之績效比較(車輛數 v.s.路線成本)

4.2.2 實驗二：起始解與最佳結果之分析

本節針對起始解之路線成本與改善後最佳結果之路線成本進行比較。四種類型測試例題 (RM、RS、CM、CS) 之平均改善率加以整理分析，表 7 則顯示四種不同類型測試例題之平均改善率。

由表 7 得知，四種不同測試例題類型改善後最佳結果之平均改善率介於 9.47% 與 13.58% 之間，其中以 CS 及 RS 類型的測試例題之平均改善率較高。由此可見，當場站居邊 (CS、RS) 的例題類型在 LFVRP 模式中，能進行改善的空間較多且較容易。

表 7 四種不同類型測試例題之平均改善率

| | RM | RS | CM | CS |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| SF1 | 12.41% | 13.42% | 10.47% | 13.43% |
| SF2 | 15.12% | 16.01% | 12.20% | 18.85% |
| SF3 | 12.72% | 12.08% | 11.36% | 15.03% |
| SF4 | 9.05% | 7.88% | 4.89% | 12.99% |
| SF5 | 12.32% | 13.43% | 10.65% | 13.47% |
| SF6 | 11.56% | 13.56% | 10.58% | 11.99% |
| SF7 | 9.84% | 9.62% | 7.85% | 11.18% |
| SF8 | 8.66% | 8.98% | 7.80% | 11.70% |
| 總平均 | 11.46% | 11.87% | 9.47% | 13.58% |

五、結論與建議

5.1 結論

一、證實 LFVRP 模式是可行的

本研究對於 LFVRP 模式進行求解後，由所得之最佳結果與傳統 VRP 已知最佳解比較之後，約有四題測試例題的路線成本優於 VRP 已知最佳解，其中 A63、A79、CE32 這三個測試例題均為場站居邊型，另外在所有例題中所需要使用到的車輛數也比傳統 VRP 之已知最佳解來得少，二者結果之比較表，如表 8 所示，故 LFVRP 模式是可行的。

表 8 LFVRP 優於傳統 VRP 之例題比較表

| 例題 | LFVRP 最佳結果 | VRP 已知最佳解 | 成本誤差 | LFVRP 車輛數 | VRP 已知最佳車輛數 |
|------|------------|-----------|---------|-----------|-------------|
| K440 | 11902.8 | 12250.06 | -2.84% | 5 | 11 |
| A63 | 1345.21 | 1401 | -3.98% | 6 | 9 |
| A79 | 1626.05 | 1763 | -7.77% | 5 | 10 |
| CE32 | 643.61 | 835 | -22.92% | 2 | 4 |

二、適用於場站居邊 (RS、CS) 的測試例題類型

根據起始解穩定度及平均改善率來看，則以均勻隨機一場站居邊 (RS) 和聚落一場站居邊 (CS) 二種類型的測試例題較佳，故本研究之 LFVRP 模式比較適用於此二種類型的測試例題。再加上本研究之 LFVRP 模式僅有一個指定點，第一類路線若完成後，必須經過指定點，對於場站居中的測試例題來說，並非每輛車都與指定點為同一邊，第一類路線的車輛必須行經指定點後，才能進行第二類路線的配送，故可能會造成車輛行駛成本的浪費。

三、LFVRP 模式可提高車輛使用率並減少車輛數

由於 LFVRP 模式利用大型車接駁貨物的方式，來增加每條路線的承載量，每條路線的承載量為二台小型車的容量，故可以減少小型車的車輛數，也可以增加小型車的使用率，使得在小型車可使用年限內，達到最完整的使用，亦可減少小型車的購買成本。

5.2 建議

一、多指定點 LFVRP 或連續指定點 LFVRP

由於本研究建立之 LFVRP 模式僅選擇一個指定點。若想要更加符合實際狀況，可將 LFVRP 模式之指定點數量，依照顧客點分佈及場站位置來決定指定點數量。當指定點的數量增加，依照所有顧客點的總需求量，進而決定大型車的數量及路線。

二、可增加使用巨集啟發式方法

使用啟發式解法有可能會陷於區域最佳解之中，所以未來可以考慮增加巨集啟發式方法 (例如：門檻 TA 等)，來避免陷入區域最佳解，進而提升解題之績效。

三、未來可考慮增加其他限制納入 LFVRP 問題 (例如：最大路線時間、同時收送、時間窗等)

現今物流業者為提高顧客滿意度，已有發展指定時間到達取貨的服務，故可以在 LFVRP 模式中增加時窗的限制；另外，現在的物流業者幾乎都是同時收貨及送貨。故為了更符合實際狀況，可將 LFVRP 模式增加一些新的限制條件來進行求解。

四、實務應用需考量車輛成本之影響

本研究之 LFVRP 模式經過例題測試後，發現此模式可以增加車輛之使用率，進而減少車

輛數。但本研究在進行求解 LFVRP 模式，僅計算路線成本，並沒有將車輛成本考慮在內。故在實務應用時，除了要考慮路線成本外，亦要考慮車輛成本，以同樣顧客散佈位置來看，LFVRP 模式之小型車和大型車的車輛成本是否優於目前配送模式之車輛成本。

參考文獻

- 王生德(民 92),「以巨集啟發式方法求解時窗限制回程取貨車輛路線問題(VRPBTW)之研究」, 中華大學科技管理研究所碩士論文。
- 卓裕仁(民 90),「以巨集啟發式方法求解多車種與週期性車輛路線問題之研究」, 交通大學運輸工程與管理學系所博士論文。
- 卓裕仁、張高文、高崇明(民 91),「時效性商品配送車隊組成與配送策略之研究」, 發表於中華民國第七屆運輸網路研討會。
- 吳志仁(民 92),「一般化卡車拖車路線問題」, 交通大學運輸科技與管理學系碩士論文。
- 涂紓瑜、賴淑娟、黎燕萍(民 90),「時間限制 VRP 之應用研究—以網路訂購便當之配送車隊排程為例」, 中華大學交通與物流管理學系畢業專題報告。
- 高崇明(民 94),「多場站車輛路線問題巨集啟發式方法之研究」, 中華大學科技管理研究所碩士論文。
- 張靖、卓裕仁、黃勇智(民 90),「時間限制車輛途程模式應用於網路訂購便當車隊途程規劃之探討」, 發表於中國工業工程學會九十年年度年會暨學術研討會, 高雄。
- 劉建宏(民 94),「含時窗限制式卡車與拖車途程問題之研究」, 中央大學土木工程學系碩士論文。
- 蔡裕峰(民 91),「軸輻式物流網路區位與途程之啟發式解法」, 高雄第一科技大學運輸與倉儲營運系所碩士論文。
- 韓復華、卓裕仁(民 90),「網路節點服務 TSP 與 VRP 問題回顧」, 運輸網路分析, 頁 202-223
- Bodin, L., Golden, B.L., Assad, A., and Ball, M. (1983), "Routing and Schedule of Vehicle and Crew: the State of Art," Computers & Operations Research, Vol. 10, No. 2, pp.63-211.
- Chao, I. (2002), "A Tabu Search Method for the Truck and Trailer Routing Problem," Computers & Operations Research, Vol.29, pp.33-51.

- Christofides, N. and Eilon, S. (1969), "An Algorithm for Vehicle Dispatching Problem," *Operational Research Quarterly*, Vol.20, pp.309-318.
- Christofides, N., Mingozzi, A., and Toth, P. (1979), *Combinatorial Optimization*, John Wiley & Sons, Inc.
- Gerdessen, J. (1996), "Vehicle Routing Problem with Trailers," *European Journal of Operational Research*, Vol.93, pp.135-147.
- Scheuerer, S. (2006), "A Tabu Search Heuristic for the Truck and Trailer Routing Problem," *Computers & Operations Research*, Vol.33, pp.894-909.
- Solomon, M. (1983), *Vehicle Routing and Scheduling with Time Window Constraints: Models and Algorithms*, Ph.D. Dissertation, Dept. of Decision Sciences, University of Pennsylvania.
- Toth, P. and Vigo, D. (2002), *The Vehicle Routing Problem: Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, SIAM, Philadelphia, PA.
- Díaz, B. (2006), <http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>, Collaboration between AUREN and the Languages and Computation Sciences department of the University of Málaga.

計畫成果自評

一、本計畫之研究內容及項目，皆與原計畫書之內容一致，相符程度達 95%，並能達成預期目標。

| | 原計畫書內容 | 成果報告內容 |
|------|--|---|
| 研究目的 | <p>針對抽換式蓄冷保溫櫃應用於全溫層保鮮配送服務的方式(以下簡稱：多溫共配系統)為研究對象，探討此多溫共配系統之車輛路線排程問題。本研究也針對「指定點接駁 (Linehaul-Feeder)」的配送方式進行探討；藉由建立「多溫共配」與「指定點接駁」的車輛路線排程模式，進而發展適當的啟發式求解方法，並透過實驗設計與測試例題進行數值分析，以驗證上述兩種新模式的績效與可行性。</p> | <p>分別針對「多溫共配 (Multi-temperature Fleet)」與「指定點接駁 (Linehaul-Feeder)」兩種特殊的物流配送方式進行研究，並提出其車輛路線排程模式，進而發展適當的啟發式求解方法，最後再透過實驗設計與測試例題進行數值分析，以驗證上述兩種新模式的績效與可行性。</p> |
| 研究內容 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 文獻蒐集與回顧 2. 實務業者訪談 3. 問題特性分析與定義 4. 測試例題產生 5. 巨集啟發式演算法設計 6. 電腦程式撰寫 7. 例題測試與結果分析 8. 結論與建議 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 文獻蒐集與回顧 2. 實務業者訪談 3. 問題特性分析與定義 4. 測試例題產生 5. 啟發式演算法設計 6. 電腦程式撰寫 7. 例題測試與結果分析 8. 結論與建議 |
| 研究成果 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 完成多溫共配 VRP 與指定點接駁 VRP 之問題特性與解題關鍵因素分析，並建立其數學規劃模式 2. 完成相關文獻之蒐集與回顧，整理出各種巨集啟發式方法所運用到的巨集策略及其適用情形，以強化 GIDS 方法的解題能力，並設計出適合多溫共配 VRP 與指定點接駁 VRP 之巨集策略與求解機制 3. 完成實務廠商之訪談，蒐集到蓄冷保溫箱之成本資料，以助於產生具代表性的測試例題；並藉由多階段的實驗設計與參數設定，有系統地進行各項 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 完成多溫共配 VRP 與指定點接駁 VRP 之問題特性與解題關鍵因素分析，並建立其數學規劃模式 (詳見本報告第三節與附件) 2. 完成相關文獻之蒐集與回顧，整理出與多溫共配及指定點接駁相關之研究文獻 (詳見本報告第二節)，並設計出適合多溫共配 VRP 與指定點接駁 VRP 之啟發式求解機制 (詳見本報告第四節) 3. 完成實務廠商之訪談，蒐集到蓄冷保溫箱之成本資料，以助於產生具代表性的測試例題；並藉由多階段的實驗 |

| | |
|--|---|
| <p>測試，分析解題績效</p> <p>4. 完成期末報告之撰寫，並將研究成果發表於國際或國內學術期刊上</p> | <p>設計與參數設定，有系統地進行各項測試，分析解題績效（詳見本報告第五節）</p> <p>4. 完成期末報告撰寫，並完成四篇相關論文，其中兩篇更已分別發表於國際學術期刊及國內學術研討會上（詳見計畫成果自評第二項）</p> |
|--|---|

二、研究成果之學術或應用價值

本計畫的研究成果將有助於國內從事車輛路線相關問題求解與啟發式演算法之研究人員參考，進而提升相關領域在理論上的解題績效。在實務的應用價值方面，國內的低溫物流業者（例如：統昶、全日、星巴克），宅配業者（大榮宅配、統一速達、TNT），甚至郵局的優鮮配低溫配送業務，皆可應用本研究發展的多溫共配車輛路線問題或指定點接駁車輛路線問題等模式與求解方法，來改善其物流配送作業之效率、降低物流成本。

對於參與本研究之人員與研究生，可建立其在相關領域的專業知識與技能，並藉由研究成果的發表與交流，達到知識分享之目的。如下所列，本計畫相關之成果已完成了四篇學術論文（詳見成果報告附件）；本計畫的經費與研究內容也先後協助了三位研究生完成其碩士論文，以及一組大學部學生的畢業專題。

- (1) Cho, Y.J. and Li, C.C., "Application of Multi-temperature Refrigerated Container to Improve the Distribution of Cold Logistics," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.6, pp.2794-2808, 2005.
- (2) 卓裕仁、黃嘉芬、陳政君、林思余，「蓄冷保溫箱應用於多溫共配系統之最適規格分析」，中華民國運輸學會第二十屆學術研討會論文集(光碟版)，淡江大學(台北劍潭)，複合運輸與物流類(編號 05-4)，455 至 472 頁，民國 94 年 11 月。
- (3) 卓裕仁、許雅雯，「多車種多溫共配車輛路線問題之測試與分析」，中華民國運輸學會第二十一屆學術研討會，民國 95 年 12 月（全文審查中）。
- (4) 卓裕仁、張耘翠，「指定點接駁車輛路線問題之構建與解法設計」，中華民國運輸學會第二十一屆學術研討會，民國 95 年 12 月（全文審查中）。
- (5) 李長駿，多溫共配系統之路線排程問題研究，中華大學科技管理研究所運輸科技與物流管理組碩士論文，民國 93 年 6 月。
- (6) 許雅雯，應用啟發式方法求解多車種多溫共配車輛路線問題，中華大學科技管理研究所運輸科技與物流管理組碩士論文，民國 95 年 7 月。
- (7) 張耘翠，指定點接駁車輛路線問題之構建與解法研究，中華大學運輸科技與物流管理學系暨研究所碩士論文，民國 95 年 7 月。
- (8) 黃嘉芬、陳政君、林思余，蓄冷保溫箱應用於多溫共配系統之最適規格分析，中華大學運輸科技與物流管理學系畢業專題報告，民國 95 年 1 月。

- 三、本計畫的研究成果相當適合在學術期刊上發表，但是因尚未開發完整的電腦輔助決策系統與使用者介面，故不適合申請專利。演算法方面已於學術期刊上發表，屬於個人智慧財產權，歡迎引用。
- 四、本研究發現車輛路線相關問題的種類相當多，而且隨著限制條件的不同，必須設計符合其問題特性的求解方法。以本研究之目的而言，由於考慮了低溫物流配送之多溫層商品共配特性，以及物流中心偏處一隅的地理限制，提出了 MFVRP（多溫共配車輛路線問題）與 LFVRP（指定點接駁車輛路線問題）兩種模式及其啟發式解法，並根據國際標準 VRP 與 VRPTW 例題產生 MFVRP 與 LFVRP 之例題進行測試。由於本研究所提出的這兩種車輛路線模式皆屬於適合台灣物流業者現況的模式，因此後續研究將蒐集更多國內的案例資料來進行實證研究，並加入巨集啟發式解法的設計。
- 五、本研究之成果將能提供學術與實務應用的參考價值，有效改善低溫物流與時效性商品之配送作業效率、降低物流成本。

可供推廣之研發成果資料表

可申請專利

可技術移轉

日期：95年9月3日

| | |
|---------------------------------------|--|
| <p>國科會補助計畫</p> | <p>計畫名稱：多溫共配與指定點接駁之車輛路線排程模式研究 計畫主持人：卓裕仁 計畫編號：NSC-94-2211-E-216-014 學門領域：土木工程(交通)</p> |
| <p>技術/創作名稱</p> | <p>MFVRP 啟發式方法，LFVRP 啟發式方法，FNN 啟發式方法</p> |
| <p>發明人/創作人</p> | <p>卓裕仁</p> |
| <p>技術說明</p> | <p>中文： FNN(最遠起點之最近鄰點法)屬於一種起始解的構建方法，可用於求解一般 VRP 問題之啟發式方法。至於 MFVRP 與 LFVRP 兩套啟發式方法，則是特別針對 MFVRP 與 LFVRP 的問題特性所設計的方法，其求解程序包含：起始解構建(ISC)模組(以 FNN 或 NN 法為主)，以及鄰域搜尋(NS)模組。</p> <p>英文：</p> |
| <p>可利用之產業 及 可開發之產品</p> | <p>1. 可利用之產業：低溫物流、宅配與快遞業者、公路路線貨運業、郵局及其他以配送為主的物流業者。 2. 可開發之產品：物流配送車輛路線派遣之決策支援系統</p> |
| <p>技術特點</p> | <p>採用簡單且有效率的啟發式方法技術，可以在很快的時間內求得精確度不錯的近似解。</p> |
| <p>推廣及運用的價值</p> | <p>針對國內低溫物流與宅配等業者的作業特性與限制來購建模式，有助於提升業者車輛路線派遣之績效，並有效減少運輸成本。</p> |