行政院國家科學委員會專題研究計畫　成果報告

航空貨運承攬業併裝決策問題之研究

計畫類別：個別型計畫
計畫編號：NSC92-2211-E-009-052-
執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日
執行單位：國立交通大學運輸科技與管理學系

計畫主持人：黃寬丞

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中　華　民　國 93 年 10 月 28 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☑ 成 果 報 告 □期中進度報告

航空貨運承攬業併裝決策問題之研究

計畫類別：☑個別型計畫　　□ 整合型計畫
計畫編號：NSC 92-2211-E-009-052
執行期間：92 年 8 月 1 日至　93 年 7 月 31 日

計畫主持人：黃寬丞

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：國立交通大學運輸科技管理學系

中　華　民　國　93　年　10　月　27　日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

航空貨運承攬業併裝決策問題之研究

The Study of Consolidation Decision Problems for Airfreight Forwarders

計畫編號：NSC 92-2211-E-009-052－
執行期限：92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

主持人：黃寬丞　國立交通大學運輸科技與管理系

一、中文摘要

基於航空貨運計費機制的複雜性，航空貨運承攬業的貨物併裝問題是一個相當困難的凹性極小化（concave minimization）問題。本研究將該問題轉換成集合涵蓋問題，再以拉式鬆弛法（Lagrange relaxation）為基礎，透過併裝組合空間的調整，發展一遞迴性的啟發式演算法。數值測試的結果顯示該演算法求解的品質相當理想，在所有的測試問題中，演算法求解之目標式值與最佳值均相當接近。

關鍵詞：航空貨運、併裝問題、整數規劃、拉式鬆弛演算法

Abstract

The fare system of air cargo is very complex. It considers the weight and volume of the shipment and involves significant quantity discount. To develop a suitable heuristic as the core module of decision support systems, this study transforms the air airfreight forwarders' consolidation problem to well-known set covering problem and use Lagrangean Relaxation, a successful approach for SCP, to develop a recursive heuristic.

Keywords: Air Freight, Air Freight Forwarder, Consolidation Decision Problem, Integer Programming, Lagrangean Relaxation

二、緣由與目的

航空貨運承攬業經營的成效對整個航空貨運業有著關鍵的影響，其中航空貨運的計價方式包含有兩個特性，一是同時考慮重量與體積，一是有數量折扣。航空貨運承攬業必須要能非常有技巧地對所承攬的貨物進行併裝，並向航空公司訂取適當航班的艙位，才能在滿足貨主要求下，降低其支付給航空公司的運價。本研究之目的即是希望利用數學模式，發展具備求解較大規模問題之演算法，做為航空貨運承攬業併裝作業決策輔助系統的核心模組。

三、演算法之發展

(一) 轉換併裝決策問題為集合涵蓋問題

將一個貨物併裝組合視為一個集合，轉換為類似集合涵蓋問題(set covering problems, SCP)的數學規劃模式如下：

i ：貨物之編號，$i = 1 \sim n$ ； I：所有貨物所成的集合。

j ：指派航班之編號，$j = 1 \sim m$ ； J：為所有可指派航班 j 的集合。

k ：併裝組合之編號； $k \in K$ ； K：併裝組合空間(所有併裝組合所成之集合)。

N_j：航班 j 之併裝組合所成的集合。

c_k ：每個併裝組合 k 所對應的成本。

a_{ik}：當貨物 i 包含於併裝組合 k 之內時，a_{ik} =1；否則為 0。

x_k ：0-1 整數變數。當併裝組合 k 被選取時，x_k =1，否則為 0。

目標式：

$$Min \sum_{k \in K} c_k x_k \tag{1}$$

限制式：

$$\sum_{k \in K} a_{ik} x_k \geq 1 \qquad \forall i \in I \tag{2}$$

$$\sum_{k \in N_j} x_k \leq 1 \qquad \forall j \in J \tag{3}$$

$$x_k,\ binary \tag{4}$$

目標式(1)設定極小化總運價之目標，

限制式(2)為所有貨物皆需要被涵蓋的限制式。限制式(2)中所使用的是不等號而非等號，也因此並未限制貨物只可被涵蓋一次。因此當求解發生貨物被涵蓋兩次以上的情形時，便需要進行修正，此即為集合涵蓋與集合分割問題(Set Partitioning Problem - SPP)之差別。限制式(2)使用不等式而非等式是因為一般而言求解 SCP 會較 SPP 容易。而且，即使所求得之解違反貨物僅能被涵蓋一次的限制，仍可於其後輕易藉由刪除併裝組合中重複之貨物，將貨物修正為僅被涵蓋一次。限制式(3)為一般典型之 SCP 所沒有之限制式，其用途為限制每個航班最多僅能有一個併裝組合出現。限制式(4)表示所有 x_k 為 0-1 整數變數。

(二)求解拉式鬆弛問題

上述問題以拉式鬆弛法放鬆限制式(2)後，其模式如下，其中以 u_i 代表拉式乘數，$\boldsymbol{u}$ 代表所有 u_i 所形成之向量。

目標式：

$$L(\boldsymbol{u}) = Min\sum_{k\in K} c_k(\boldsymbol{u})x_k + \sum_{i\in I} u_i \tag{5}$$

限制式：

$$\sum_{k\in N_j} x_k \le 1 \qquad \forall\, j\in J \tag{6}$$

$$x_k\text{ , } binary \tag{7}$$

$$c_k(\boldsymbol{u}) = c_k - \sum_{i\in I_k} u_i \qquad \forall k\in K \tag{8}$$

I_k：針對併裝組合 k，所有被涵蓋貨物所成之集合。(I_k ={ $i\in I$：a_{ik}=1})。

轉化後模式與典型集合涵蓋問題的拉式鬆弛問題相近，僅在於有無限制式(6)之差別。求解上述拉式問題時，若僅考慮目標式(14)與限制式(7)，則當 $c_k(\boldsymbol{u})$<0 則 x_k = 1；反之，$c_k(\boldsymbol{u})$>0 則 x_k = 0；當 $c_k(\boldsymbol{u})$=0 則 x_k = 1 或 0。但考量限制式(6)，若某一航班所屬的併裝組合有多個 $c(\boldsymbol{u})$值小於 0 時，則僅能選擇 $c(\boldsymbol{u})$值最負者，至於實際運算上，則可透過 $c(\boldsymbol{u})$值的排序來完成。

(三)修正拉式解為可行解及拉式乘數更新

因拉式問題為放鬆限制式後再進行求解，所以極可能求出違反限制式(6)(有貨物未被涵蓋)之不可行解。欲求得可行解，一般而言可透過拉式解的修正。然而該修正程序的設計上必須注意，一方面希望造成目標式值增加最少的情況下完成，但是又不宜太複雜，以免大幅增加運算的負荷。本研究之演算法主要係利用 $c(\boldsymbol{u})$值的觀念來進行修正，如前述求解拉式問題時，已求出各併裝組合的 $c(\boldsymbol{u})$值並進行排序，若將拉式解所選擇併裝組合之 $c(\boldsymbol{u})$值與所屬航班排序順位第二之 $c(\boldsymbol{u})$值相減，所得之差值代表將目前拉式解(排名首位)之併裝組合，置換為排序第二的併裝組合後，原目標值與新目標值之差。

因為希望在目標式增加最少的情況下找到可行解，因此在所有航班中應考慮以差值最小者嘗試加以置換。然而，為有利於盡快找到涵蓋全部貨物的可行解，是否進行置換則視以下檢查流程的結果而定。必須在置換後，原不可行解是否所涵蓋之貨物仍繼續被涵蓋，並增加一個以上未被涵蓋之貨物，才進行置換；否則，就放棄該併裝組合，並選取下一順位之併裝組合，對該航班重新計算 $c(\boldsymbol{u})$值之差，再於所有航班中選取 $c(\boldsymbol{u})$差值最小者進行置換檢查程序。重複上述流程，直至所有航班的所有併裝組合皆測試過。(14)

在上述嘗試置換的過程中，併裝組合被選取進行置換檢驗過後即不再被保留做置換選擇，因此整個修正過程執行檢驗的(15)次數大約僅為併裝組合數。上述方式並不保證定會產生可行解，若過程中若仍無法找到可行解時，在本次運算迴圈中，(16) (17) 即逕以目前已發現的最佳可行解予以替換，若發現可行解，則更新目前最佳可行解的紀錄。

前述所求得之拉氏解與可行解之目標值可分別以 $L(\boldsymbol{u})$ 及 UB 來代表。有關拉式鬆弛法遞迴運算過程中，拉式乘數之修正，則可參考(9)、(10)式之運算，式中 t 代表第 t 次遞迴運算，但 UB^t 代表的是目前最佳的上限值。

$$u_i^{t+1} = \max\left\{ u_i^t + \lambda\frac{UB^t - L(\boldsymbol{u}^t)}{\left\| s(\boldsymbol{u}^t)\right\|^2} s_i(\boldsymbol{u}^t),\ \ 0\right\} \forall i\in I \tag{9}$$

$$s_i(\boldsymbol{u}^t) = 1 - \sum_{k\in K_i} x_k(\boldsymbol{u}^t) \qquad \forall i\in I \tag{10}$$

K_i：針對貨物 i，所有涵蓋此項目之集合所成的集合，{ $i\in I$：a_{ik} =1}。

四、併裝組合空間之調整及停止機制

原貨物併裝問題雖然可藉由 SCP 加以

描述，但當問題規模加大時，其併裝組合空間將會極大，因此本研究先產生一個初始併裝組合的空間，配合拉式鬆弛法的遞迴運算，以一個有效合理的方式，將不合適的予以淘汰，並新增具有潛力之併裝組合，以改進現行併裝組合的空間，逐步求得近似最佳解。

(一) 併裝組合之刪減

如前述求解拉式解時，對各航班，係挑選 $c(\boldsymbol{u})$值小於 0 最負的併裝組合。由此可知，當 $c(\boldsymbol{u})$值越負時，代表該併裝組合越值得被挑選，也因此 $c(\boldsymbol{u})$值可以做為一個併裝組合是否應該被保留的指標。然而，在遞迴運算的過程中，隨拉式乘數 $\boldsymbol{u}$ 之更新，各併裝組合的 $c(\boldsymbol{u})$值也持續在變動中，為求得一穩定且較具參考價值的基準，本研究利用一個類似指數平滑法(exponential smoothing)之觀念，在每一次求解迴圈中，將每個併裝組合原分數乘上一個權重值 α，再加上該次的 c($\boldsymbol{u}$)值乘上(1-α)後，做為參考分數。刪選併裝組合的方式，係藉由限制每航班之併裝組合數，來控制總併裝組合的數量。因此，對各個航班所屬的併裝組合，在每次的遞迴運算中，依據參考分數高低，僅保留一特定比例(如每航班 20 個)併裝組合，其餘的則刪除。

(二) 格式併裝組合空間之增加

主要係依據求解拉式解對併裝組合 $c(\boldsymbol{u})$值的排序，配合特定貨物依序針對現有併裝組合進行增刪來產生。有關特定貨物的選取，係參考(10)式之 $s_i(\boldsymbol{u})$值。挑選 $s_i(\boldsymbol{u})$值最大者作為「加項」，挑選 $s_i(\boldsymbol{u})$值最負者作為「減項」，當遇上 $s_i(\boldsymbol{u})$值相同時，則以隨機方式挑選。其中，加項之意義為依 $c(\boldsymbol{u})$值之排序逐一檢視現有併裝組合，若不含有加項，則將加項加入以產生新的併裝組合；反之，減項為針對現有併裝組合中若含有減項，則由併裝組合中剔除以產生新的併裝組合。

依此方式之理由，主要係基於 $s_i(\boldsymbol{u})$值所代表的不僅是貨物涵蓋限制式(6)是否滿足，同時也是拉式乘數 $\boldsymbol{u}$ 依據(9)式修正時的數值。因此依據加項產生新的併裝組合，因為其 $s_i(\boldsymbol{u})$值最大，相對 u_i 的搭配也最大，潛在性地就有可能使得新增加之併裝組合在下一個迴圈依據(8)式計算 $c(\boldsymbol{u})$時，其值越負，因而產生出較好的併裝組合。反之，利用刪除減項所產生的新併裝組合，其 $c(\boldsymbol{u})$值也應該越負。

上述增加併裝組合的方式，對每一航班均設定了一個併裝組合數目的最大值，當達到最大值時即不再增加併裝組合。其理由一方面在於縮短運算的時間；另一方面因為加項減項的調整機制是依 $c(\boldsymbol{u})$的排序來進行，排序較後的併裝組合一般是較差的組合，其透過加項減項而產生好的組合之可能性亦較低。

另外，在集合涵蓋問題之解求解集合分割問題的方式時，針對重複涵蓋的貨物僅保留其在 $c(\boldsymbol{u})$值最負者之併裝組合中，在其他併裝組合中重複之貨物則予以剔除。於其過程中，所產生之新併裝組合亦將之加入於並裝組合空間之中。

(三) 初始併裝組合的空間

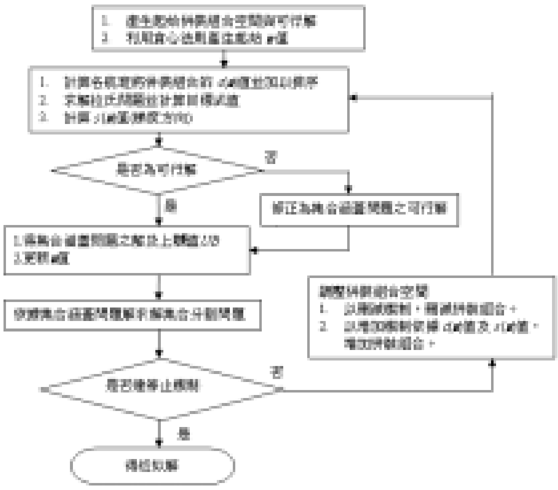
初始併裝組合空間的產生的方式，先對貨物的密度做排序，而後在符合顧客與航班容量限制下，依序平均地分配給各個航班。如此，初始併裝組合空間一定包含一可行解，且原則上密度已考量重貨與拋貨的搭配。此外，為了避免受上述設定之可行解的影響，使得求解容易陷入區域搜尋，初始併裝組合空間另外加入了符合顧客限制及容量限制的最大涵蓋併裝組合(各航班涵蓋之貨物數量最多的情形)，以及最小涵蓋併裝組合(僅含單項貨物)。

(四) 併裝組合空間與停止機制

一般以拉式鬆弛法求解典型之集合涵蓋問題時，是針對以固定的集合空間，因此當上下限值相等或差值在容忍範圍內時，即停止求解。但本演算法採用部分併裝組合空間在遞迴運算的過程中加以調整的方式求解，就上下限值的意義上已經有所不同，因此求解之停止機制也隨之改變。拉式鬆弛問題的目標式值 $L(\boldsymbol{u})$，針對該次迴圈之併裝組合空間，仍是一個有效的下限值，但是因為該併裝組合空間僅包含部份的併裝組合，其並不是原來貨物併裝問題的有效下限值。至於針對 SCP 所得的上限值 UB，因求解併裝組合空間僅包含部份的併裝組合，因此可視為一個區域最佳解。由於最佳解必小於或等於區域最佳解，所以此上限值對於原來貨物併裝問題

來說仍是一個有效的上限值。

由此可知，本研究之演算法無法利用上下限值夾擠得到確切的最佳解所在區間，上下限值 UB 值與 $L(\boldsymbol{u})$值僅能僅做為下次迴圈參數修正之用。所以在停止機制，僅能利用「SCP 的解趨於穩定」，或是「當求解次數達到所設定次數」，來做為停止條件。以後述之數據測試實驗為例，演算法由最初求解至產生近似解的過程，大約需經過 500 次的求解，且隨問題規模的加大，求解次數略有需要增加趨勢。有關整個演算法之流程，如圖一。



圖一 演算法流程圖

五、結果與討論

基於航空貨運計費機制的複雜性，航空貨運的併裝問題是一個相當困難的混合整數規劃問題，處理較大規模的問題時，其求解時間過長並不能符合業界作業的需求。本研究將該問題轉換成類似集合涵蓋問題的形式，再以拉式鬆弛法為基礎，發展一遞迴性的啟發式演算法。尤其，因為就貨物併裝決策問題而言，可能的集合(貨物併裝組合)空間會由於問題規模增加而急劇變大，因此本研究之演算法僅以部分集合空間來求解，並透過集合空間進行調整，善使得解能逐步逼近最佳解。透過數值測試發現，演算法求解之目標式值與利用混盒整數規劃所得之最佳值均相當接近，就不同的問題規模仍具有穩定的求解品質，固然費率折扣程度對求解品質略有影響，但影響程度就實際應用的目的仍屬相當輕微。

六、計畫成果自評

本研究之演算法建構有效可行的演算法架構，其求解品質理想，但對於求解的品質以及運算之時間尚有許多改善之空間。尤其以下三點的改進，應有助於演算法求解能之提升，可做為後續之研究方向。

(一)部分解集空間的調整機制，應再深入探討其他方式，如將一次調整一個貨物，改成調整多個，或是不同的計分基礎來挑選適合的併裝組合作為解集空間。

(二)拉氏鬆弛法中不可行修正為可行解的方式。以更細緻的方式來修正，如參照併裝後的總貨物密度來修改之方式。

(三)演算法各個參數的設定，可透過更多的數值測試嘗試不同的數值，來加快求解，並在穩定求解品質與速度上做權衡。

七、參考文獻

[1] Amiri, A. and H. Pirkul (1997). New formulation and relaxation to solve a concave-cost network flow problem. Journal of the Operational Research Society, 48(3), pp. 278-287.

[2] Irnich, S. (2000). A multi-depot pickup and delivery problem with a single hub and heterogeneous vehicles. European Journal of Operational Research, Vol. 122, pp. 310-328, 2000.

[3] Jaeger, F. (1976). Consolidation strategy for International air freight forwarders - minimum cost routing problem in a directed multi-commodity network. Transportation Research, 10, PP.347-354.

[4] Larsson, T., Migdalas, A., and Ronnqvist, M. (1994). A lagrangean heuristic for the capacitated concave minimum cost network flow problem. European Journal of Operational Research, 78(1), pp. 116-129, 1994.

[5] Monaci, M. (2001). Algorithm for Packing and Scheduling Problems.

[6] Xue, J. and Lai, K.K. (1997). A study on cargo forwarding decisions. Computers and Industrial Engineering, 33, pp.63-66.

[7] 吳思賢，2000年，「航空貨運承攬業決策輔助系統之研究」，國立交通大學，碩士論文。