

以內嵌於多位代理人的遺傳演算法求解供應 鏈網路平衡模式

Solving Global Supply Chain Network Equilibrium with Genetic Algorithm Embedded in Multi-agent

蔡坤穆 Kune-muh Tsai

黃浩威 Hao-wei Huang

國立高雄第一科技大學運籌管理系

Department of Logistics, National Kaohsiung First University of Science and
Technology

(Received November 25, 2005; Final Version June 14, 2006)

摘要：本研究以多位代理人來建構 Nagurney *et al.* (2003) 的供應鏈動態網路，該網路包括位於相同或不同國家的製造商、擔任供應鏈中間者角色的零售商、以及位於不同需求市場以不同匯率貨幣購買產品的顧客，所組成的三階層網路。我們以代理人模式建構代表三階層供應鏈網路成員的實體代理人及位於其中的功能性代理人。透過供應鏈網路供需均衡的實踐，可使整體供應鏈的效益達到最高，並由此獲得供應鏈成員對消費市場需求的產銷分配量。為有效求解供應鏈平衡的問題，本研究將基因演算法內嵌於價格數量均衡的功能性代理人(P-Q)，以取代原論文所採用的變分不等式所推導的條件式及尤拉法，並考量限制條件處理技術，以發展能快速求解且兼具最佳化搜尋能力的基因演算法。在與原論文範例比較的結果顯示，本研究內嵌基因演算法的多位代理人模式可用來建構供應鏈網路模式，而基因演算法可快速求解網路均衡的問題。

關鍵詞：多位代理人、基因演算法、網路均衡、全球供應鏈模式

Abstract : We implemented multi-agent for modeling the global supply chain networks studied by Nagurney *et al.* (2003). The networks contain three tiers of supply chain members: manufactures, who may be located in one or multiple countries; retailers, who act as intermediaries in the supply

chains; and consumers at the demand markets who purchase products in different currencies in the countries. The three tiers of supply chain members are modeled as physical agents, while in each physical agent are functional agents. To achieve equilibrium of networks, we used genetic algorithm (GA) embedded in the P-Q functional agent in replace of the original approach of variational inequality formulation and Euler method in solving supply chain network equilibrium. Results showed multi-agent can be a good method in modeling supply chain network optimization problems, and GA performs well in achieving network equilibrium.

Keywords : Multi-agent, Genetic Algorithm, Network Equilibrium, Global Supply Chains

1. 導論

為提昇企業國際競爭力，跨國性企業無不向外尋求更低廉與便利的生產基地，以滿足全球化市場的需求，全球供應鏈管理的模式應運產生。雖然供應鏈因全球化而形成複雜的網路結構，且整體經濟的活動隨之擴張，但各地區及整體供需網路結構仍延續傳統經濟的供需理論，並大致表現出如下的循環：地區性的經濟發展將會導致資金的增加，從而改變其生產結構，進而造成經濟供需結構的改變。供應鏈成員基於追求各別的最大利益選擇其行為，迫使訂單的重新分配至成本更有利或更接近市場的地區，進而影響地區間經濟的變化。台灣的跨國企業，將生產基地由台灣而東南亞而後往中國、東歐、蘇聯移動，即是追求成本效益與接近市場的最佳例證。

然而，在訂單重新分配的過程中，由於無法正確且清楚的預測未來經濟的結構，極可能導致供給與需求發展不均，形成所謂非供需均衡 (non-equilibrium)。此外，供應鏈成員間也會基於追求最大利益的前提來進行訂單分配，但並不表示供需均衡狀態下，訂單也會均勻分佈，反而在大多數的情況下，由於供應鏈成員追求其各別的最大利益，會使得訂單過於集中於某些地區。Nagurney *et al.* (2003) 的研究指出，地區間發展程度的差異是導致訂單重新分配的主要原因，而地區間的發展主要受到決策者的經營方式以及各地區資源條件限制的潛在影響，需求會改變地區間的訂單分配型態，使得整體供應鏈資源重新分配。因此，為使得有限資源發揮最大效用，並維持公平性與效益性，供應鏈成員必須隨時因時因地的訂定合理的決策。

本研究為動態供應鏈網路均衡的研究課題，在系統中，供應鏈成員各自具有明確的資訊，其行為決策著重於整體供應鏈網路的均衡發展，並透過供應鏈成員間各別決策的控制，瞭解各網路成員在訂單分配上，對於整體供應鏈產銷均衡的影響，以改善供需分佈不均衡的問題。同時，為有效求解網路均衡的問題，本研究運用基因演算法之最佳化搜尋的特性，同時考量限制條件處理 (constraint handling) 技術，利用縮小搜尋求解空間 (solution space)，進而發展能快速求得最佳解的演算法。若將供應鏈決策劃分為長期決策(例如目標市場選擇，設施容量決策、位置選擇等決

策)、中期決策 (例如採購、產品定價、製造、運輸、倉儲等決策)、短期決策 (例如生產排程、排班等決策)，本研究提出的模式屬於供應鏈的中期決策，能協助供應鏈成員在國際化及全球化趨勢下，計算出各市場產品價格及供應該市場的產品數量，及各製造廠之生產規劃與配送計劃等決策。

2. 文獻探討

1950 年代開始，靜態網路均衡 (network equilibrium) 開始廣泛的被應用在各種大規模競爭性系統 (large-scale competitive systems) 上，最早提出網路均衡觀念的是 Wardrop (1952)，而 Beckmann (1956) 則是最早將網路問題應用於運輸領域上。1970 年代開始，動態網路均衡模型開始受到重視，並將時間向度的觀念導入靜態模型，不再只是靜態的描述旅次需求在整個網路中的分布情形，並藉由流量傳導 (flow propagation) 限制式，表達路人在路網中路徑選擇與路段中流量遞移的現象。1980 年代，網路均衡已普遍應用於運輸網路均衡問題 (traffic network equilibrium problem)、空間價格均衡問題 (spatial price equilibrium problem)、以及瓦拉價格均衡問題 (Walrasian price equilibrium problem) 等問題中 (周鄭義，民88；王中允，民88)。所謂 Wardrop 原則乃是包括使用者均衡 (user equilibrium)，以及系統最佳化 (system optimal) 兩種原則。在運輸旅運的應用上，使用者均衡原則乃是基於最小化個人旅行時間之使用者行為，假設路徑選擇行為符合使用者均衡原則，當旅次需求固定時，任何一對旅次的起、迄節點的所有被使用到的路徑，其旅行時間必然相等，且小於或等於其他未被使用之路徑旅行時間，任何個人都無法單方面的改變路徑來減少其路徑旅行時間。而系統最佳化原則是基於整個交通路網資源之最佳化使用，追求路網總旅行時間最小，針對任何一對旅次起迄對，所有被使用到的路徑其邊際旅行時間必然相等，且小於或等於其他未被使用路徑之邊際旅行時間 (王中允，民88)。

前述均衡原則陸續衍生出許多旅運選擇模式，其中解析性模型可分為變分不等式 (variational inequality)、非線性互補方程式 (nonlinear complementarity problem) 與固定點理論 (fixed point theorem)。Nagurney (1993) 認為人口遷徙均衡模型如同單一起迄對，且為固定需求之運輸網路均衡問題，假設所有遷徙者都是理性的，人口遷徙的動機即在於追求整體效用增加或成本支出減少，因此在合理的情況下，遷徙行為會一直持續下去直到達成均衡，此時任何單方面的改變都不會增加整體的效用 (減少成本支出)。在此基礎下，可以變分不等式構建靜態人口遷徙均衡模型，並考慮遷徙成本以及社會層級 (class) 改變所導致的人口遷徙行為 (Nagurney, 1993)。其後，Nagurney *et al.* (2002) 以網路均衡為基礎，發展一個競爭性供應鏈的均衡模型，充分展現多個決策者與它們個別的行爲，此模式考量供應鏈中三階 (three-echelons) 成員位於不同國家，分別在利潤最大化的情況下，決策產品生產與配送的計畫，進而達成整體供應鏈的均衡狀態，文中並舉出多個範例說明模式的結果會使整體供需的價格與數量朝向市場均衡點移動。

在空間價格均衡問題、瓦拉價格均衡問題領域上，Perazzo *et al.* (1995) 以代理人 (agent) 的架構，探討一個複雜而高度動態的經濟網路，其目的在於找出所有成員都能接受的產品價格與數量。在此網路內，每個代理人均為一個決策的個體，透過與其他代理人相互傳遞訊息，以本身所既定的決策方式來改變價格與數量，進而達到網路均衡。Weisbuch and Stauffer (2003) 進而探討網路內每位代理人具有議價協調的能力，透過議價的方式來決定整體網路成員均能接受的價格與數量。

網路均衡應用於運輸網路均衡問題、空間價格均衡問題、以及瓦拉價格均衡問題等領域中，其求解方法均假設其為雙層架構 (bi-programming)。依照Wardrop原則，包括上層的使用者均衡，以及下層的系統最佳化，其決策的方式著重於整體網路的均衡發展，並透過使用者個別決策的控制來瞭解各網路成員對於整體網路均衡的影響。Ceylan and Bell (2004) 以基因演算法，利用雙層架構的方式求解地區交通控制問題 (area traffic control problem)，其中設計的變數在雙層架構的上下層之間互相傳遞並以預測的方式來求出每個節點下一個決策所可能的流量，經過不斷的迭代而達到網路均衡，並達到最小化系統時間。其後，Ceylan and Bell (2005) 再將其擴展為隨機模式 (stochastic)，並以一個指標來衡量系統整體的績效。

本文所要求解的網路均衡模式為Nagurney *et al.* (2003) 在 "Dynamics of Global Supply Chain Supernetworks" 所研究的全球供應鏈網路。該網路考慮三階的供應鏈體系：顧客、零售商、製造商，其中在各地消費市場的顧客透過零售商向不同的製造商訂貨，如圖1。在圖1中，共有 L 個國家，在國家 l 中有 I_l 個製造商，但位於不同國家的製造商生產同質性 (homogeneous) 的產品，以 H 種不同的貨幣與各自的生產成本，在市場價格機制下，考量生產成本、交易成本，以及位於供應鏈中間商地位的 J 個零售商各自的購買價格，來決定對製造商本身最佳化的產品生產與配送策略，以將商品配送給各別的 J 個零售商；零售商在接收從製造商的商品後，考量本身交易成本、持有成本後，根據位於 L 個國家的 K 個市場中使用 H 種不同匯率貨幣的顧客所可接受的價格，決定最佳化產品配送策略給顧客，以達到零售商本身的利潤最大化；位於國家 l 的市場 k 使用貨幣 h 的顧客 kh 從零售商接收商品後，根據其各別的數量與價格間的關係 (以函數表示)，來調整及決定商品的市場價格與需求數量。整個供應鏈會經由市場成本結構與供需機制逐漸趨向市場均衡，亦即在各階層之間(製造商對零售商、零售商對顧客)的價格與數量會趨於一致。

Nagurney *et al.* (2003) 透過變分不等式的方式，獲得圖1的三階層供應鏈成員在價格與數量上平衡的條件式，但此等平衡的條件式尚需透過尤拉法 (Euler method) 的迭代運算，才能求得整體網路的平衡生產數量與價格。在該模式中，運用變分不等式的概念所建構的各別供應鏈成員在生產數量與價格間平衡的條件式，對不熟悉變分不等式背景的讀者，相當複雜，且不易由方程式掌握位於不同階層的供應鏈成員，在價格與需求數量平衡前價格與數量的變化。同時，變分不等式只能求解價格與數量的關係式是可微分者，對於無法微分的關係式的問題，如價格與數量的關係式是階梯式或只由數據來表達之間的關係時 (如由統計數據整理而成的關係表)，該方法將

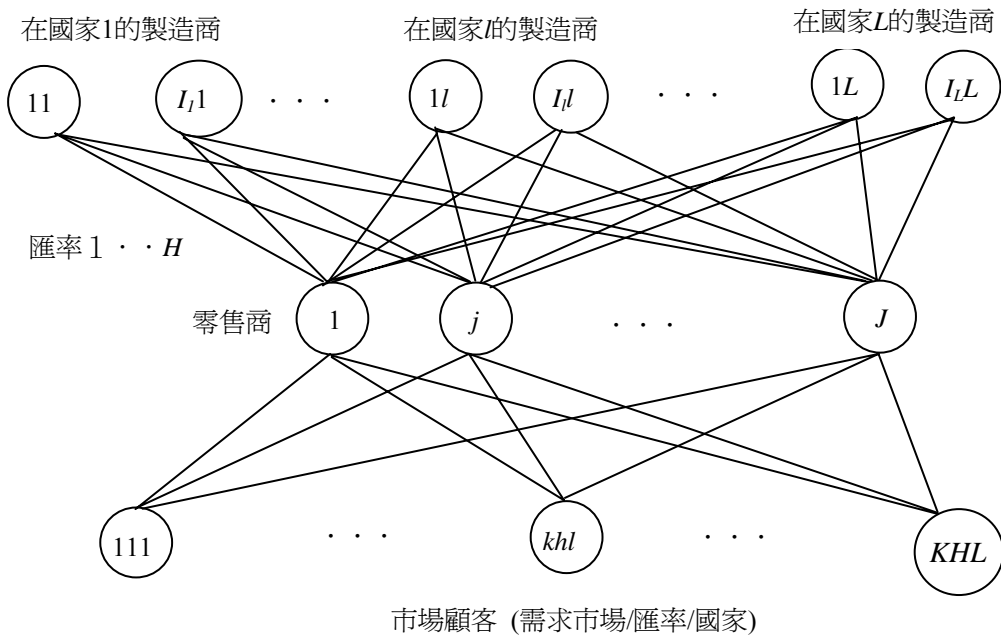


圖1 全球供應鏈網路架構圖

無法進行求解。此外運用尤拉法迭代求解的過程，在變分不等式外，需加上了一些假設的條件式，以使迭代過程得以收斂。本研究以多位代理人模式為架構，參考該網路均衡的利潤模式，建構位於不同階層的供應鏈成員的利潤模式，並在各階層代理人中，加入使產銷與價格平衡的功能性代理人，以便模式得以與圖1的供應鏈網路架構圖互相呼應。而求解最佳化利潤的過程，則捨棄變分不等式所推導而得的平衡的條件式，以及尤拉法迭代過程所假設的方程式，改以基因演算法加上限制條件處理的方式，來求解產銷與價格平衡及最佳化的利潤。

基因演算法的概念是將自然界物種之間，相互競爭求生存的現象，以一種模擬物種進化的人工系統，引用「物競天擇」與「適者生存」的概念作為演算的搜尋法則。在求解的過程中以基因字串來表示可能存在的解答組合形式，在經過選擇 (selection) 與複製 (reproduction)、交配 (crossover)、突變 (mutation) 等世代演化機制，最後找出最適於演化的基因組合，經轉換即為問題所求解的答案。為增快基因演算法求解的速率，本研究採用限制條件處理的基因演算法，主要乃因限制條件處理的問題是由一組有限個數的變數所組成，每一個變數各有其限制條件，而這些限制條件限制著變數可以被指定數值的大小。因此，限制條件處理的主要工作，就是為每一變數定義一個合適的值域，使其符合所有與其相關的限制條件 (Tsang, 1993)，而其主要的工作，就是必須要找到一組解，使其符合所有的限制條件。由於應用此技術於基因演算法中，可使搜尋解的空間縮小，因此可增快求解的效率。

3. 研究方法與模式建構

如圖1的網路架構，本研究構建之供應鏈雙層網路模型是以Nagurney *et al.* (2003) 的動態網路均衡為理論基礎，並遵守該研究有關網路均衡的假設條件，包括：

- (1) 各階層成員之供給、需求乃由供需函數所決定，在利潤最大化目標下，供應鏈各層級成員，包括製造商、零售商、顧客，在非合作模式 (noncooperative fashion) 下競爭，並可自由調整產品的數量、價格，以達到市場供需的納許均衡 (Nash equilibrium)；
- (2) 同一層級間成員間並無聯合機制，亦無壟斷情形發生；
- (3) 製造商不受生產數量限制，所生產之數量可滿足當期所有需求。

模式中符號與變數說明如下：

符號集合

i ：代表製造商 ($i = 1$ to I)

j ：代表零售商 ($j = 1$ to J)

k ：代表配送市場 ($k = 1$ to K)

l ：代表國家 ($l = 1$ to L)

h ：代表貨幣 ($h = 1$ to H)

其中， I, J, K 為模式中製造商、零售商及顧客的總數， L 與 H 為國家數及使用的貨幣數。

決策變數定義

q_{jh}^{il} ：製造商 i 於國家 l 配送到零售商 j 的貨幣 h 下的商品數量；

q_{khl}^j ：零售商 j 配送市場 k 於國家 l 貨幣 h 下的商品數量；

d_{khl} ：市場顧客 k 於國家 l 貨幣 h 下的商品數量；

ρ_{1jh}^{il} ：在第一層級製造商端，製造商 i 於國家 l 配送到零售商 j 貨幣 h 下的商品價格；

ρ_{2khl}^j ：在第二層級零售商端，零售商 j 配送市場 k 於國家 l 貨幣 h 下的商品價格；

ρ_{3khl} ：在第三層級市場顧客端，顧客 k 於國家 l 貨幣 h 下的商品價格；

γ_j ：零售商 j 對市場的基本價格。

e_h ：以本國匯率為基準，可兌換其他貨幣之比率。

O_{jh}^{il} ：零售商 j 於貨幣 h 下，對於國家 l 的製造商 i 發出的訂單數量。

O_{khl}^j ：顧客 k 於國家 l 貨幣 h 下，對零售商 j 發出的訂單數量。

Q^1 ：表示所有 q_{jh}^{il} 的向量集合

Q^2 ：表示所有 q_{khl}^j 的向量集合

成本函數定義

$c_{jh}^{il}(q_{jh}^{il})$ ：製造商 i 於國家 l 使用貨幣 h 對零售商 j 處理 q_{jh}^{il} 數量的交易成本

$f^i(Q^1)$ ：製造商 i 於國家 l 在 Q^1 生產數量時的總生產成本

$c_j(Q^1)$ ：零售商 j 持有 Q^1 數量的持有成本

$\hat{c}_{jh}^{il}(q_{jh}^{il})$: 零售商對製造商*i*於國家*l*使用貨幣*h*處理 q_{jh}^{il} 數量的交易成本

$\hat{c}_{khl}^j(q_{khl}^j)$: 零售商對位於國家*l*使用貨幣*h*的顧客*k*處理 q_{khl}^j 數量的交易成本

$c_{khl}^j(q_{khl}^j)$: 顧客*k*對零售商對位於國家*l*使用貨幣*h*處理 q_{khl}^j 數量的交易成本

在Nagurney *et al.* (2003) 的模式中, 先最佳化製造商、零售商、及顧客的利潤最大化目標式, 其中有加上 ”*” 的變數為均衡條件下變數的數值:

位於國家*l*的製造商*i*的利潤目標式= 所有對零售商的銷售收入-總交易成本-總生產成本

$$\text{Maximize } U^i = \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H (\rho_{1jh}^{i*} + e_h^*) q_{jh}^{il} - \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H c_{jh}^{il}(q_{jh}^{il}) - f^i(Q^1) \quad (1)$$

零售商的利潤目標式= 所有對顧客的銷售收入-總持有/轉換成本-從製造商的進貨成本

$$\begin{aligned} \text{Maximize } U^j = & \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L (\rho_{2khl}^{j*} + e_h^*) q_{khl}^{jl} - c_j(Q^1) - \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \hat{c}_{jh}^{il}(q_{jh}^{il}) \\ & - \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L c_{khl}^j(q_{khl}^j) - \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H (\rho_{1jh}^{i*} + e_h^*) q_{jh}^{il} \end{aligned} \quad (2)$$

在市場資源有限的情況下, 各供應鏈成員因生產量增加使得市場對資源的需求提高, 生產成本將隨著生產數量的增加而遞增。因而, 上式(1)與(2)的成本函數皆假設為向上凹 (convex) 且連續可微分的函數, 因此該兩式成為向下凹 (concave) 且連續可微分的函數。由於上兩式為非線性方程式, 因此以變分不等式, 求出上述非線性目標式最佳化的條件

$$\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \left[\frac{\partial f^i(Q^{1*})}{\partial q_{jh}^{il}} + \frac{\partial c_{jh}^{il}(q_{jh}^{il*})}{\partial q_{jh}^{il}} - \rho_{1jh}^{i*} - e_h^* \right] \times [q_{jh}^{il} - q_{jh}^{il*}] \geq 0, \quad \forall Q^1 \in R_+^{IJHL} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \left[\frac{\partial c_j(Q^{1*})}{\partial q_{jh}^{il}} + \rho_{1jh}^{i*} + e_h^* + \frac{\partial \hat{c}_{jh}^{il}(q_{jh}^{il*})}{\partial q_{jh}^{il}} - \gamma_j^* \right] \times [q_{jh}^{il} - q_{jh}^{il*}] \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L \left[\frac{\partial c_{khl}^j(q_{khl}^{j*})}{\partial q_{khl}^j} - \rho_{2khl}^{j*} - e_h^* + \gamma_j^* \right] \times [q_{khl}^j - q_{khl}^{j*}] \end{aligned} \quad (4)$$

$$+ \sum_{j=1}^J \left[\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H q_{jh}^{il*} - \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L q_{khl}^{j*} \right] \times [\gamma_j - \gamma_j^*] \geq 0, \quad \forall (Q^1, Q^2, \gamma) \in R_+^{IJHL+JKHL+J}$$

但利潤函數式(1)與(2)以及該二式的最佳化條件式(3)與(4), 並無法直接求解出網路均衡下的價格與數量, 因此, Nagurney *et al.* (2003) 再假設:

- (1) 顧客價格調整：顧客的價格變動等於市場的需求與零售商供給數量的差；
- (2) 顧客需求數量調整：零售商配送至顧客數量的變動等於顧客的價格減掉零售商的售價與處理費用；
- (3) 零售商價格調整：零售商售價的變動等於零售商需求的數量與製造商配送給零售商數量的差；
- (4) 零售商需求數量調整：製造商配送給零售商數量的變動等於零售商願易支付的價格減掉製造商的售價與處理費用。

而後以尤拉法 (Euler method) 迭代求出製造商、零售商、市場顧客在價格與需求的均衡為最佳化的價格與需求。

由於Nagurney *et al.* (2003) 的模式複雜，且無法求解不可微分的關係式，同時求解過程中亦做了部份經濟行為上的假設，因此本研究嘗試運用多位代理人建模的方法將上述製造商與零售商的目標式建立於多位代理人模式中，而後在多位代理人模式中，建立一個價格與數量均衡的功能性代理人，取代上述尤拉法及求解過程中的四項經濟行為的假設，並與Nagurney *et al.* (2003) 模式的解比較分析。

3.1 多位代理人模式

本研究以多位代理人建構如圖1的三階全球供應鏈模式，模式分為實體代理人與功能性代理人兩類，其中實體代理人為供應鏈模式中的實體成員，包括製造商、零售商與顧客，而功能性代理人則為實體代理人中具備模組化功能的代理人，如訂單處理、採購、價格數量均衡等，其中位於每個實體代理人中的價格數量均衡的功能性代理人為供應鏈模型中，根據市場價格機能找出均衡價格與數量的功能性代理人。

製造商代理人： $a_{il} \in \{A_{il} | i = 1 \dots I, l = 1 \dots L\}$ 為位於國家 l 的製造商 i 的代理人；

零售商代理人： $a_j \in \{A_j | j = 1 \dots J\}$ 為零售商的代理人；

顧客代理人： $a_{khl} \in \{A_{khl} | k = 1 \dots K, l = 1 \dots L, h = 1 \dots H\}$ 為位於國家 l ，使用貨幣 h 的顧客 k 的代理人。

每個實體代理人中，視功能性不同而擁有不同的功能性代理人，包括：訂單處理代理人 (OrdEnt)、訂單配送代理人 (OrdShp)、價格數量均衡代理人 (P-Q)、採購代理人 (ProcurM)、收貨代理人 (RecvM)，本模式中的實體代理人所擁有的功能性代理人如表1所示。

根據圖1的三階層供應鏈模式，本研究對其中每一個製造商、零售商、顧客所建立的多位代理人模式如圖2。由於實體代理人是由功能性代理人所組成，且代理人的運作模式是在接受到其他代理人的資訊後，產生輸出，因此圖2的步驟並不表示為流程，而是代表實體代理人之間及功

表 1 實體代理人與功能性代理人關係對照表

		功 能 性 代 理 人				
		OrdEnt	OrdShp	P-Q	ProcurM	RecvM
實體代理人	製造商代理人	X	X	X		
	零售商代理人	X	X	X	X	X
	顧客代理人			X	X	X

能性代理人之間的溝通協定的編號。底下以零售商代理人來介紹其間資訊溝通協定如圖2所示，同時，製造商代理人及顧客代理人資訊溝通協定與零售商代理人的相類似，只是輸出入參數及對象不同：[1]接收顧客端訂單資訊 O_{khl}^j 及商品價格 ρ_{3khl} ；[2]將加總的訂單數量 $\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L O_{khl}^j$ 傳給ProcurM代理人轉換成此階層訂單 O_{jh}^i 向製造商訂購；[3]發出訂單數量 O_{jh}^i 與商品基本價格 γ_j 給製造商；[4]傳遞調整後的商品基本價格 γ_j 給ProcurM；[5]由OrdEnt傳遞顧客端的商品價格 ρ_{3khl} 及加總訂單數量 $\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L O_{khl}^j$ 給P-Q以進行市場價格及需求調整；[6]加總從製造商所接收商品數量 $\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L q_{jh}^i$ 及 ρ_{1jh}^i 價格傳給P-Q以調整市場價格與數量；[7]傳遞調整後的商品數量 q_{khl}^j 與價格資訊 ρ_{2khl}^j 給OrdShp；[8]接收從製造商的商品數量 q_{jh}^i 與價格 ρ_{1jh}^i ；[9]將商品數量 q_{khl}^j 與商品價格 ρ_{2khl}^j 傳給顧客；[10]通知OrdShp準備出貨。

功能性代理人代表實體代理人中某一模組的功能，以物件導向的概念來設計其功能，可在不同實體代理人中重覆使用，其功能主要為與其他功能性代理人間的溝通協定(或溝通介面)，以及一些需判斷及計算的方法，如加總訂單的數量等。由圖 2 可知，除 P-Q 代理人在三個實體代理人中皆存在，其他功能性代理人只存在於其中的兩個實體代理人，由於差別只是輸出入參數及對象不同，因此以零售商為例來介紹其各功能性代理人的運作及輸出入參數，其協定編號如圖 2 所示。

- (1) 訂單代理人 (OrdEnt)：[1]接受下游顧客ProcurM代理人的訂單數量資訊 O_{khl}^j 與商品價格 ρ_{3khl} ；[2]將下游顧客訂單數量資訊 O_{khl}^j 傳給ProcurM以加總訂單數量；[5]將商品的價格 ρ_{3khl} 及加總數量 $\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L O_{khl}^j$ 傳遞給P-Q 代理人，以根據交易成本及利潤函數重新計算商品價格($\rho_{3khl} \rightarrow \rho_{2khl}^j$ 及 γ_j)；[10]將訂單數量資訊 O_{khl}^j 傳給OrdShp並等待P-Q代理人傳送銷售給顧客的商品數量 q_{khl}^j 後，出貨給下游顧客；
- (2) 採購代理人 (ProcurM)：[1]接收OrdEnt加總的訂單 $\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L O_{khl}^j$ 後轉換成此階層訂單 O_{jh}^i 向上游廠商訂貨；[3]發出訂單給上游廠商數量 O_{jh}^i 及商品基本價格 γ_j ；[4]接收P-Q 代理人傳送的商品基本價格 γ_j ；

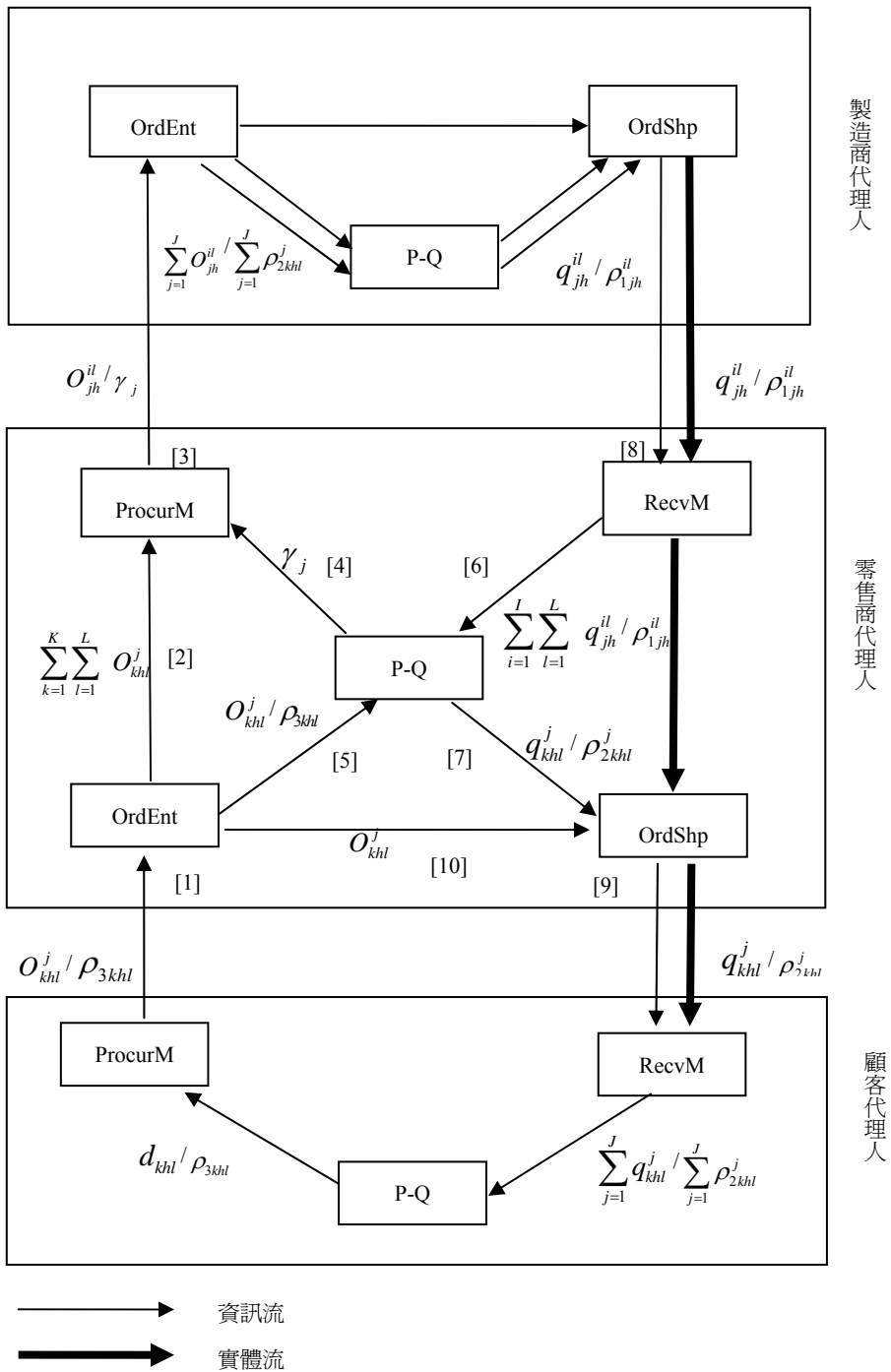


圖 2 由功能性代理人組成之實體代理人結構圖

- (3) 收貨代理人 (RecvM)：[6]加總所接收商品數量 $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J q_{jh}^{il}$ 及商品價格資訊 ρ_{1jh}^{il} 傳給P-Q代理人；[8]接收上游OrdShp的商品數量 q_{jh}^{il} 及價格資訊 ρ_{1jh}^{il} ；
- (4) 訂單配送代理人 (OrdShp)：[7]接收P-Q代理人商品的數量 q_{khl}^j 與價格 ρ_{2khl}^j ；[9]將商品數量 q_{khl}^j 配送給下游並傳遞商品價格資訊 ρ_{2khl}^j 給下游顧客；[10]從OrdEnt接收訂單資訊 O_{khl}^j 並準備相對應的商品數量 q_{khl}^j 給下游顧客；
- (5) 價格數量均衡代理人(P-Q)：[4]傳送改變後的商品基本價格 γ_j 給ProcurM以向上游採購；[5]接收OrdEnt的訂單資訊 $\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L O_{khl}^j$ 與商品價格 ρ_{3khl} 以進行價格與數量變動的調整；[6]接收RecvM的製造商商品數量 $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J q_{jh}^{il}$ 及價格 ρ_{1jh}^{il} 以進行價格與數量變動的調整；[7]傳送改變後的產品數量 q_{khl}^j 及價格 ρ_{2khl}^j 給OrdShp以出貨。

均衡理論即為求出整體供應鏈網路上的均衡價格P*與均衡數量Q*，可視為整體供應鏈成員所能共同接受的價格與數量，此時總供給等於總需求，而價格亦為供需雙方所能夠接受，整個供應鏈達到均衡狀態。由上述圖2及各功能性代理人的介紹可知，除P-Q代理人外，其他功能性代理人只負責根據其溝通協定，將資料經簡單運算即進行轉呈給其他功能性代理人。

由於P-Q代理人需根據其他代理人所傳來的資訊，算出適當的價格與數量，在供需均衡條件下，不同國家製造商所運送出的商品數量，等於各個零售商所接收的數量；同樣地，從零售商所發出的商品數量，正好等於各個顧客所需要的數量。要達到此種平衡關係可由市場價格機制來調整，之後需求會改變並引發價格的變動，價格的改變亦會引發數量的調整。在未達到均衡狀態時，供應鏈各階層成員均可參考市場上存在的資訊（價格、數量、匯率貨幣等），並考量自身的成本與支出，動態地調整流通在市場上的價格與數量，以達到市場均衡，此即價格數量均衡(P-Q)代理人所具備的功能。為了有效求解上述的供應鏈網路產銷均衡模式，本研究將於下一章節運用基因演算法之最佳化搜尋的特性，同時考量限制條件處理技術利用縮小搜尋解空間，進一步發展出能快速求解且兼具有最佳化搜尋能力的網路均衡模式演算法。

3.2 內嵌於價格數量均衡 (P-Q) 代理人之限制條件遺傳演算法

在本研究的三階供應鏈網路中的製造商、零售商、及市場顧客的代理人模式中均有價格數量均衡(P-Q)代理人，如圖2所示，其主要功能是根據供應鏈成員各別需求與價格函數及供給與成本函數而求得各別在數量與價格的平衡。本研究捨變分不等式及求解過程中的假設，而採用基因演算法來求得價格與數量上的均衡。為表現本研究方法的一般性，因此採用基本的基因演算法來求解，再加入限制條件的問題來加快求解的速度，其重點步驟包括：目標問題的基因的編碼及解碼、初始群組的產生方式、適應值函數的訂定、產生子代 (off-springs) 的基因運算子(genetic operators)、及運算子參數的設定 (如母體大小、演算世代、交配率、突變率及演算終止條件等)。

由於基因演算法不具備處理限制條件問題的能力，因此必須加入額外的機制重新產生合法的值以取代非法的基因值，此過程為以限制條件為基礎的基因演算法（constraints-based genetic algorithm）。Gen and Cheng (2000) 指出，基因演算法不具備處理限制條件問題的能力，必須具備額外的機制才能解決限制條件處理問題，這些機制可分成四項策略：拒絕策略（reject strategy）、修正策略（repairing strategy）、改變基因演算策略（modifying genetic operator strategy）、懲罰策略（penalty strategy）。

3.2.1 染色體的表示法

本研究採用實數編碼基因演算法（real-coding genetic algorithm, RGA）的方式，以降低基因編碼的複雜度及長度，並加快收斂的速度。本研究的均衡模式中，市場顧客數量及價格 $[d_{3khl}, \rho_{3khl}]$ 的關係在模式中為已知的函數，而後以基因演算法來求解零售商配送至市場顧客的數量及價格 $[q_{khl}^j, \rho_{2khl}^j]$ ，以及製造商配送至零售商的數量及商品價格 $[q_{jh}^{il}, \rho_{1jh}^{il}]$ 兩組決策變數。在三階供應鏈成員在數量與商品價格的均衡後，其它決策變數可由此三組決策變數之值與相關限制式來獲得，其染色體的表示法如表2所示。

3.2.2 適應性函式定義

為求取供應鏈成員商品價格與數量均衡下利潤的最佳化，因此適應性函式設定為製造商與零售商的利潤函數，如式(1)及(2)，重覆如下：

製造商適應性函數=對零售商的銷售收入-交易成本-生產成本

$$fitness_m_{il} = \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H (\rho_{1jh}^{il*} + e_h^*) q_{jh}^{il} - \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H c_{jh}^{il}(q_{jh}^{il}) - f^{il}(Q^1) \quad (5)$$

零售商適應性函數=對顧客的銷售收入-持有/轉換成本-從製造商的進貨成本

表2 決策變數染色體的編碼

零售商配送至零售商的數量及商品價格的染色體表示法										
基因	q_{111}^1	...	q_{khl}^j	...	q_{KHL}^J	ρ_{2111}^1	...	ρ_{2khl}^j	...	ρ_{2KHL}^J
基因值	W_{1111}	...	W_{jkl}	...	W_{JKHL}	Z_{1111}	...	Z_{jkl}	...	Z_{JKHL}
製造商配送至零售商的數量及商品價格的染色體表示法										
基因	q_{11}^{11}	...	q_{jh}^{il}	...	q_{JH}^{IL}	ρ_{1jh}^{il}	...	ρ_{1jh}^{il}	...	ρ_{1JH}^{IL}
基因值	X_{1111}	...	X_{ijlh}	...	X_{ILJH}	Y_{1111}	...	Y_{ijlh}	...	Y_{ILJH}

$$\begin{aligned}
fitness_r_j = & \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L (\rho_{2khl}^{j*} + e_h^*) q_{jh}^{il} - c_j(Q^1) - \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \hat{c}_{jh}^{il} (q_{jh}^{il}) \\
& - \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L c_{khl}^j (q_{khl}^j) - \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H (\rho_{1jh}^{i*} + e_h^*) q_{jh}^{il}
\end{aligned} \quad (6)$$

3.2.3 基因運算子的設計及演化程序

若基因演算法能符合單純性 (monotone) 的條件，則會具有收斂的能力。單純性是指基因演算法所產生的每一代族群 P^0, P^1, \dots, P^t ，能符合以下條件：

$$\begin{aligned}
\forall t \in N : Min. \{f(a) | a \in P^{t+1}\} & \leq Min. \{f(a) | a \in P^t\} \quad or \\
\forall t \in N : Max. \{f(a) | a \in P^{t+1}\} & \geq Max. \{f(a) | a \in P^t\}
\end{aligned} \quad (7)$$

當問題本身是求最大值，則族群 P^{t+1} 代的最大適應值需大於等於族群 P^t 的最大適應值，此稱為單純遞增 (monotonic increasing)。反之，當問題本身是求最小值，則族群 P^{t+1} 代的最大適應值小於等於族群 P^t 的最大適應值，此稱為單純遞減 (monotonic decreasing)。演算法的單純性將確保演算法在演化的過程能朝可行解的方向搜尋。在基因演算法中，族群內染色體的個數愈多時，適應值較大的染色體被保留至子代的機會愈大。因此，在運算之前，需找出適當的族群數並確保隨機值能代表不同組合的基因，以確保子代族群最佳適應值不比母代族群最佳適應值來得差，達到單調性。在經多次模擬試驗後，本研究設定母體族群數為250，以有足夠的母體組數來演化。

內嵌基因演算法 (Embedded-GA) 程序

本文內嵌於製造商及零售商的價格數量均衡代理人的基因演算法程序 (Embedded-GA)，為一般基因演算法，並將限制條件納入突變、交配與複製運算子的運算程序中，修正成新的且合乎限制條件的基因，以縮小搜尋空間並加快搜尋速度，使整個運作流程能快速收斂，首先如表 2 基因編碼的結構隨機產生初始的 250 組母代基因染色體族群，而後進行下述程序為一次迭代：

- Step1 · 根據適應值進行母代基因染色體族群的排序；
- Step2 · 以機率方式選擇要交配的母代基因染色體；
- Step3 · 進行「均勻交配」的運算程序；
- Step4 · 進行「互換突變」的運算程序；
- Step5 · 修正違反限制條件之基因染色體值；
- Step6 · 計算各染色體基因的適應值；
- Step7 · 進行「排序選擇」的運算程序，以交配、突變後的基因及經過修正違反限制條件運算後

所產生的新染色體來置換母代染色體，並進行適應值的更新與排序，以為選擇基因染色體的依據。

演算步驟中的均勻交配、互換突變、限制條件處理以及排序選擇，如下所述：

(1) 均勻交配

以機率方式選擇一組母代基因，再隨機產生一介於0與1之間的值，並與交配率（設為0.8）比較，當隨機值小於交配率時，則進行交配運算，並將此組基因放入交配區，重覆上述的選擇直到250個染色體都選出為止。在交配區中的每組染色體，一對一進行基因互換的交配 (crossover)，且各基因互換的機率為均勻分佈0.5。

(2) 互換突變

互換突變運算是對已進行「均勻交配」的成對染色體，以隨機選取的方式決定是否交換這對染體上兩個位置上的基因值。首先隨機產生介於0與1之間的值，並與突變率（設為0.05）比較，當隨機值小於突變率時，則該對染色體進行互換突變 (exchange mutation) 運算，反之，則不進行互換突變運算。當染色體被選為進行突變時，則隨機選取不同位置上的基因進行交換。

(3) 限制條件處理運算

經交配與突變後的新染色體需滿足限制條件才算完成交配程與突變的程序，否則需以限制條件重新產生合理的新基因以取代不合理的基因。本研究以Gen and Cheng (2000) 所提方法中的「修正策略」來處理限制條件處理的問題，並將基因演算法所產生違反限制條件的染色體，放入基因修正程序以修正該基因為可行解。

在本研究中，根據問題本身所定義及多位代理人模式所產生的限制，包括 (Nagurney *et al.*, 2003)：

- (a) 零售商的容量限制—即分配給需求市場的商品數量必須小於或等於所有從製造商接收的數量

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L q_{khl}^j \leq \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H q_{jh}^{il} \quad (8)$$

- (b) 製造商與零售商必定追求利潤最大化，因此收益必須大於或等於所付出的成本 — 即(製造商對零售商的銷售收入) \geq (交易成本+生產成本)

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H (\rho_{jh}^{il*} + e_h^*) q_{jh}^{il} \geq \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H c_{jh}^{il} (q_{jh}^{il}) + f^{il} (Q^1) \quad (9)$$

同樣地；(零售商對顧客的銷售收入) \geq (持有/轉換成本+從製造商的進貨成本)

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L (\rho_{2khl}^{j*} + e_h^*) q_{khl}^j &\geq c_j(Q^1) + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \hat{c}_{jh}^{il} (q_{jh}^{il}) + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L c_{khl}^j (q_{khl}^j) \\ &+ \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H (\rho_{1jh}^{i*} + e_h^*) q_{jh}^{il} \end{aligned} \quad (10)$$

為解決上述限制條件問題，本研究以下述運算方式取代非法基因：

- (a) 對於違反零售商容量限制的問題 — 當交配運算子產生子代基因後，進入比對的程序，若子代基因裡零售商銷售給所有顧客的量大於所有從製造商接收的量，即

$$\sum_k \sum_h \sum_l q_{khl}^j > \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H q_{jh}^{il}, \text{ 則修正為} \quad (11)$$

運送到位於國家 l 使用貨幣 h 的市場 $k(khl)$ 的數量 = $\frac{\text{該市場的價格}}{\text{所有市場的價格總和}}$ ，即

$$q_{khl}^j = \frac{\rho_{3khl}}{\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L \rho_{3khl}} \quad (12)$$

本方法即運用市場價格機能來決定產品數量，當任一 khl 市場出價較高時，其分配到的商品數量越大，符合經濟原理「價高者得」，同時亦可滿足零售商最大利潤。

- (b) 對於違反製造商與零售商追求利潤最大化的問題 — 若子代基因的收益小於成本，對製造商而言

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H (\rho_{1jh}^{i*} + e_h^*) q_{jh}^{il} &\leq \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H c_{jh}^{il} (q_{jh}^{il}) + f^{il}(Q^1), \text{ 則修正為} \\ \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H (\rho_{1jh}^{i*} + e_h^*) q_{jh}^{il} &= \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H c_{jh}^{il} (q_{jh}^{il}) + f^{il}(Q^1) \end{aligned} \quad (13)$$

對零售商而言為

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L (\rho_{2khl}^{j*} + e_h^*) q_{khl}^j &\leq c_j(Q^1) + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \hat{c}_{jh}^{il} (q_{jh}^{il}) + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L c_{khl}^j (q_{khl}^j) \\ &+ \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H (\rho_{1jh}^{i*} + e_h^*) q_{jh}^{il}, \text{ 則修正為} \\ \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L (\rho_{2khl}^{j*} + e_h^*) q_{khl}^j &= c_j(Q^1) + \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \hat{c}_{jh}^{il} (q_{jh}^{il}) + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L c_{khl}^j (q_{khl}^j) \end{aligned}$$

$$+ \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H (\rho_{1jh}^{il*} + e_h^*) q_{jh}^{il} \quad (14)$$

其中

$$q_{jh}^{il} = \frac{\rho_{2khl}^j}{\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \rho_{2khl}^j}, \quad \text{同時} \quad q_{khl}^j = \frac{\rho_{3khl}}{\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L \rho_{3khl}} \quad (15)$$

上述式子即利用「價高者得」的經濟原理，當下游通路成員價格較高時，其分配到的商品數量就越多。

(4) 排序選擇

排序選擇 (rank selection) 運算子是將族群中所有染色體依適應值從小至大加以排序。適應值最低的染色體其排序值為1，適應值最高的染色體其排序值等於當時族群的總染色體數，若有重覆則各取其平均值，然後再以排序值做為輪盤法中機率的大小。換句話說，排序選擇運算是以染色體在整個族群中的相對位置為依據，而不以適應值的大小做為選擇母代的依據，且設定其中最好染色體被選中的機率為最壞染色體的100倍。

3.2.4 基因運算子在功能性代理人中的演算步驟

存在於顧客的P-Q代理人，在本研究中，由於需求函數是給定的，因此可根據各別零售商*j*的P-Q代理人所決定的價格 ρ_{2khl}^j 加上交易成本的價格 ρ_{3khl} ，由需求函數來決定各地區需求數量 d_{khl} 。存在於製造商與零售商的P-Q代理人，則需根據其他代理人所傳遞的參數，來調整其價格與數量，其相關參數的定義如3.1節及圖2所示。

表2的染色體分別代表製造商與零售商P-Q代理人中的基因運算子，為求得各別之適應函數，如式(5)及(6)所示，需接受其他代理人所傳遞來的參數進行計算。本研究代理人基因演算的程序為先初始化顧客的商品價格後，根據顧客的需求函數決定需求的數量，再將價格與需求數量依序傳給零售商的P-Q代理人、製造商的P-Q代理人、零售商的P-Q代理人，進行3.2.3節之Embedded-GA演算的迭代，最後再傳回到顧客的P-Q代理人，完成一階段的迭代循環，其步驟如下所示：

Step1· 初始化*khl*顧客的商品價格 ρ_{3khl} 後，透過需求函數來決定 d_{khl} ，而後將 ρ_{3khl} 及 O_{khl}^j 傳遞給零售商的P-Q代理人；

Step2· 零售商的P-Q代理人進行一次Embedded-GA演算的迭代，將決定好的價格 γ_j 與數量 O_{jh}^{il} 傳遞給製造商的P-Q代理人；

- Step3 · 製造商的P-Q代理人進行一次Embedded-GA演算的迭代，將決定好的價格 ρ_{1jh}^{il} 與數量 q_{jh}^{il} 傳遞給零售商的P-Q代理人；
- Step4 · 零售商的P-Q代理人再進行一次Embedded-GA演算的迭代，將決定好的價格 ρ_{2khl}^j 與數量 q_{khl}^j 傳遞給顧客的P-Q代理人；
- Step5 · 顧客的P-Q代理人根據需求函數再度核算顧客的需求量 d_{khl} ，至此，完成一階段的迭代循環；
- Step6 · 若製造商與零售商利潤不再增加後的迭代循環數 <30 ，則至Step2再進行遺傳演算，不然則前進至Step7；
- Step7 · 停止演算，將結果輸出。

上述的代理人模式及內嵌於P-Q代理人的基因演算法 (Embedded-GA)，皆是以SiMPLE++模擬軟體所建構的。SiMPLE++具有物件導向承繼的概念，因此很適合做為多理代理人模擬的軟體平台，以便在多位代理人模式分析完畢後，以幾種方法 (method) 來表達某一個功能性代理人，而後組合成實體代理人。如圖2所示，不同實體代理人有部份功能性代理人是相同的，只是所傳遞的參數與對象不同。因此SiMPLE++的結構是根據不同範例問題中，製造商、零售商、顧客的數量及連結方式來建立各實體代理人，以便能各別接受、處理、傳遞訊息給上下游供應鏈成員，並進行基因演算的迭代。

本研究在分析完各功能性代理人的輸出入參數及與其他代理人間的溝通協定後，以物件方式，先建立圖2中的每一功能性代理人，而後根據圖2的結構將功能性代理人連結以建立成製造商代理人物件、零售商代理人物件及顧客代理人物件。此外，內嵌於製造商及零售商的P-Q代理人中的基因演算法 (Embedded-GA)，可在基因迭代的過程，因其他功能性代理人傳遞的參數數值改變，一步一步進行基因演算法的求解程序直到收斂為止。

4. 數值範例與資料分析之驗證與評估

底下以Nagurney *et al.* (2003) 研究中的五個簡單的範例說明本研究的方法所呈現的結果並與其範例的結果做比較。本文基因演算法參數的設計為：交配率為0.8、突變率為0.05、母代群體染色體數量為250，終止迭代數 (製造商與零售商利潤不再增加後的迭代數) 為30代。由於每次隨機所產生的母代初始基因染色體並不相同，因此實際收斂的迭代數及最佳化的值亦不同，每一範例皆執行10次運算，而後以10次的平均值做為最後的數值，同時，為表達本研究方法的求解品質，將10次演算之變異量加入結果中。

範例一

本範例情境假設供應鏈網路有三階層，包含在同一國家 ($l=1$) 的兩個製造商 ($i=1, 2$)、兩種匯率貨幣 ($h=1, 2$)、兩個需求市場 ($k=1, 2$)、兩個零售商 ($j=1, 2$)，如圖3，其成本結構如下：

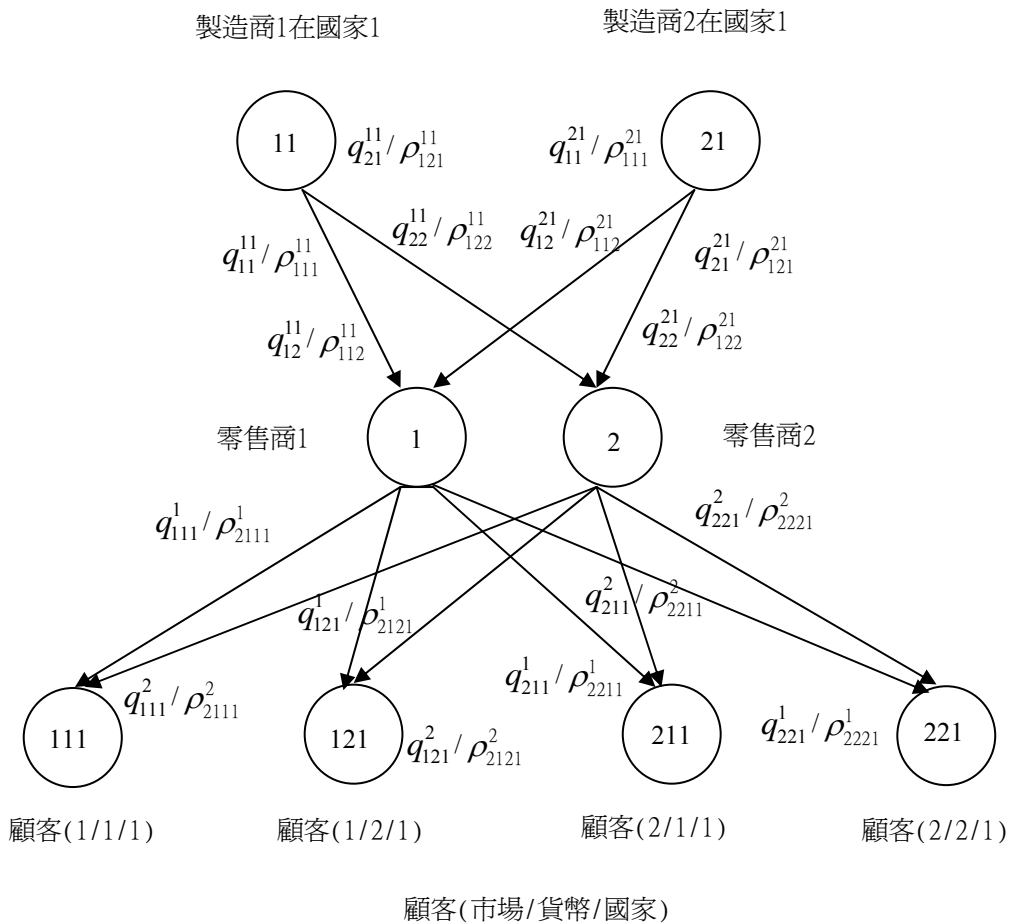


圖3 範例一：一個國家中的兩個製造商以兩種貨幣銷售給兩個零售商及兩個市場中的四個顧客的全球供應鏈網路架構圖及各別銷售量及其價格

製造商

$$\text{生產成本： } f^i(Q^1) = \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{h=1}^2 q_{jh}^i \right)^2 \quad \forall i, l$$

$$\text{對零售商交易成本： } c_{jh}^i(q_{jh}^i) = .5(q_{jh}^i)^2 + 3.5q_{jh}^i \quad \forall i, l, j, h$$

零售商

$$\text{持有成本： } c_j(Q^1) = .5 \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{h=1}^2 q_{jh}^i \right)^2 \quad \forall j$$

$$\text{對製造商交易成本： } \hat{c}_{jh}^i(q_{jh}^i) = 1.5(q_{jh}^i)^2 + 3q_{jh}^i \quad \forall i, l, j, h$$

$$\text{對需求市場交易成本： } \hat{c}_{khl}^j(Q^2) = q_{khl}^j + 5 \quad \forall j, k, h, l$$

市場顧客

$$\begin{aligned}
 d_{111} &= -2\rho_{3111} - 1.5\rho_{3121} + 1000 \\
 \text{需求函數： } d_{121} &= -2\rho_{3121} - 1.5\rho_{3111} + 1000 \\
 d_{211} &= -2\rho_{3211} - 1.5\rho_{3221} + 1000 \\
 d_{221} &= -2\rho_{3221} - 1.5\rho_{3211} + 1000
 \end{aligned}$$

由於各製造商的生產成本結構及各地市場顧客的價格與需求函數相同，且製造商與零售商及零售商與顧客間的交易成本結構亦相同，因此可預期在網路均衡的狀況下，供應給不同零售商及市場顧客的價格與數量會相同，同時不同製造商的生產數量及售價亦會相同，結果如表3所示。其中本文的基因演算法與Nagurney *et al.* (2003) 的結果相近，且加上限制條件的基因演算法迭代次數較低。各參數的意義如圖3所示，其中製造商與零售商之間的線段各有兩種不同匯率的貨幣所產生的兩種不同的參數值。數量 q_{jh}^i 及 q_{khl}^j 代表該均衡網路節點間的流量，而流進任一節點之流量會等於流出者，例如流進去零售商1的流量（數值請參考表3）在本範例為 $q_{11}^1 + q_{12}^1 + q_{11}^2 + q_{12}^2 = 15.772 \times 4 = 63.088$ 會等於流出去的流量為 $q_{111}^1 + q_{121}^1 + q_{211}^1 + q_{221}^1 = 15.772 \times 4 = 63.088$ 。而 ρ_{1jh}^i 、 ρ_{2khl}^j 、 γ_j 及 ρ_{3khl} 為在平衡的流量下的最佳價格，可由上述製造商、零售商及顧客的成本結構及需求函數求出。

表3 範例一的結果與比較

	Nagurney <i>et al.</i> (2003)之 數值結果	10次基因演算 平均(變異量)	10次限制條件基因演算 平均(變異量)
迭代數	N/A	409	368
$q_{11}^1, q_{12}^1, q_{21}^1, q_{22}^1$			
$q_{12}^1, q_{12}^2, q_{22}^1, q_{22}^2$	15.605	15.772 (0.135)	15.935 (0.143)
$q_{111}^1, q_{121}^1, q_{111}^2, q_{121}^2$			
$q_{211}^1, q_{221}^1, q_{211}^2, q_{221}^2$			
$\rho_{111}^1 + e_1, \rho_{111}^2 + e_1$			
$\rho_{121}^1 + e_1, \rho_{121}^2 + e_1$	143.95	143.717 (0.532)	143.792 (0.536)
$\rho_{112}^1 + e_2, \rho_{112}^2 + e_2$			
$\rho_{122}^1 + e_2, \rho_{122}^2 + e_2$			
γ_1, γ_2	256.190	256.665 (0.567)	256.831 (0.512)
$\rho_{3111}, \rho_{3121}, \rho_{3211}, \rho_{3221}$	276.797	277.351 (0.831)	276.439 (0.532)

為顯示本範例以SiMPLE++所建立的模式架構，因此以圖4來代表本範例SiMPLE++的三階層結構展開圖。其中，最上層為該範例的供應鏈結構圖，第一層為根據範例問題所展開的架構圖，第二層為每個實體代理人展開成功能性代理人的架構圖，但該層只顯示零售商代理人的展開，而製造商代理人及顧客代理人的展開，因展開方式類似且可由圖2獲得，所以省略之。

範例二

除需求市場顧客111的需求函數改變為 $d_{111} = -2\rho_{3111} - 1.5\rho_{3121} + 1010$ 外，其餘條件與範例一相同，因此可預期供給市場顧客111的數量會比其他的市場顧客的數量較高，結果如表4所示。

範例三

除假設製造商生產成本 $f^i(Q^1) = 2\left(\sum_{i=1}^2 \sum_{h=1}^2 q_{jh}^i\right)^2$ $\forall i, j$ 為原來的兩倍外，本範例其他情境同範例二，可預期製造商的生產數量會較範例二為低，且價格較高，如表5。而本文的基因演算法所得的結果，因初始值的不同，使得兩種基因演算法的結果亦不盡相同。

範例四

此範例為範例一的雙倍模式，包含兩個製造商($i=1, 2$)在兩個國家($l=1, 2$)、兩個零售商($j=1, 2$)、兩種匯率貨幣($h=1, 2$)、兩個需求市場($k=1, 2$)，其成本結構圖如下所示，結果如表6所示。

製造商

$$\text{生產成本： } f^i(Q^1) = \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{h=1}^2 q_{jh}^i\right)^2 \quad \forall i, l$$

$$\text{對零售商交易成本： } c_{jh}^i(q_{jh}^i) = .5(q_{jh}^i)^2 + 3.5q_{jh}^i \quad \forall i, l, j, h$$

零售商

$$\text{持有成本： } c_j(Q^1) = .5\left(\sum_{i=1}^2 \sum_{h=1}^2 q_{jh}^i\right)^2 \quad \forall j$$

$$\text{對製造商交易成本： } \hat{c}_{jh}^i(q_{jh}^i) = 1.5(q_{jh}^i)^2 + 3q_{jh}^i \quad \forall i, l, j, h$$

$$\text{對需求市場交易成本： } \hat{c}_{khl}^j(Q^2) = q_{khl}^j + 5 \quad \forall j, k, h, l$$

市場顧客：需求函數

$$\begin{aligned} d_{111} &= -2\rho_{3111} - 1.5\rho_{3121} + 1000 & d_{112} &= -2\rho_{3112} - 1.5\rho_{3122} + 1000 \\ d_{121} &= -2\rho_{3121} - 1.5\rho_{3111} + 1000 & d_{122} &= -2\rho_{3122} - 1.5\rho_{3112} + 1000 \\ d_{211} &= -2\rho_{3211} - 1.5\rho_{3221} + 1000 & d_{212} &= -2\rho_{3212} - 1.5\rho_{3222} + 1000 \\ d_{221} &= -2\rho_{3221} - 1.5\rho_{3211} + 1000 & d_{222} &= -2\rho_{3222} - 1.5\rho_{3212} + 1000 \end{aligned}$$

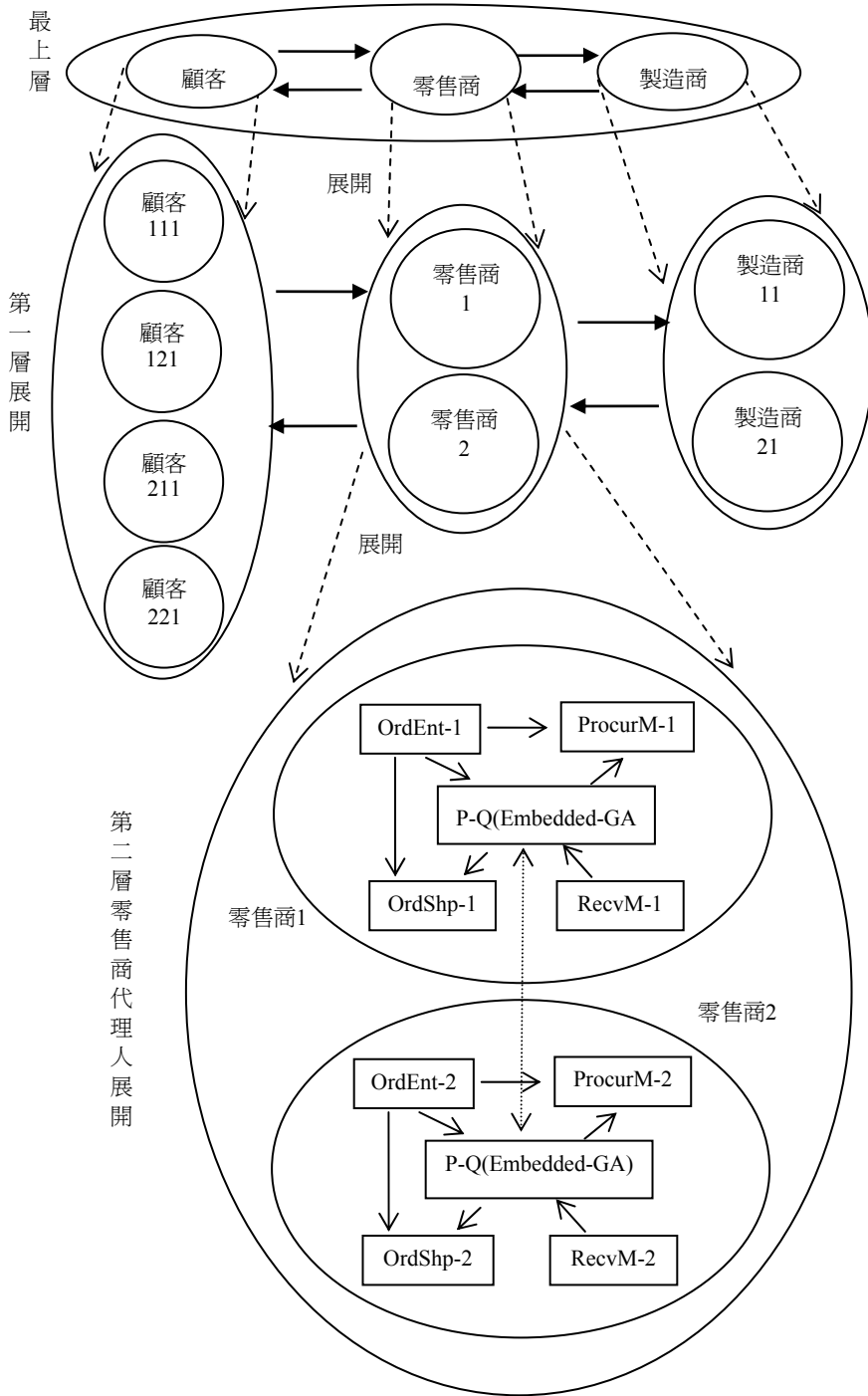


圖4 範例一SIMPLE++模式的三階層代理人結構展開圖

表4 範例二的結果與比較

	Nagurney <i>et al.</i> (2003) 之 數值結果	10次基因演算 平均(變異量)	10次限制條件基因演算 平均(變異量)
迭代數	N/A	427	364
$q_{11}^{11}, q_{11}^{21}, q_{21}^{11}, q_{21}^{21}$	15.643	15.578 (0.235)	15.538 (0.218)
$q_{12}^{11}, q_{12}^{21}, q_{22}^{11}, q_{22}^{21}$			
q_{111}^1, q_{111}^2	18.1	17.494 (0.264)	17.403 (0.286)
q_{121}^1, q_{121}^2	14.1	14.432 (0.253)	14.581 (0.276)
$q_{211}^1, q_{211}^1, q_{221}^2, q_{221}^2$	15.191	15.035 (0.203)	15.131 (0.257)
$\rho_{111}^{11} + e_1, \rho_{111}^{21} + e_1$			
$\rho_{121}^{11} + e_1, \rho_{121}^{21} + e_1$	144.316	144.491 (0.542)	144.331 (0.731)
$\rho_{112}^{11} + e_2, \rho_{112}^{21} + e_2$			
$\rho_{122}^{11} + e_2, \rho_{122}^{21} + e_2$			
r_1, r_2	256.84	256.751 (0.850)	259.266 (3.106)
ρ_{3111}	279.942	279.233 (0.762)	278.551 (1.874)
ρ_{3121}	275.943	276.443 (0.973)	276.021 (2.105)
ρ_{3211}, ρ_{3221}	277.033	276.972 (1.102)	276.853 (2.321)

表5 範例三的結果與比較

	Nagurney <i>et al.</i> (2003) 之 數值結果	10次基因演算 平均(變異量)	10次限制條件基因演算 平均(變異量)
迭代數	N/A	439	346
$q_{11}^{11}, q_{11}^{21}, q_{21}^{11}, q_{21}^{21}$	10.751	10.64 (0.212)	10.966 (0.203)
$q_{12}^{11}, q_{12}^{21}, q_{22}^{11}, q_{22}^{21}$			
q_{111}^1, q_{111}^2	13.206	13.126 (0.243)	13.33 (0.251)
q_{121}^1, q_{121}^2	9.206	9.651 (0.213)	9.96 (0.218)
$q_{211}^1, q_{211}^1, q_{221}^2, q_{221}^2$	10.297	10.212 (0.253)	9.82 (0.236)
$\rho_{111}^{11} + e_1, \rho_{111}^{21} + e_1$			
$\rho_{121}^{11} + e_1, \rho_{121}^{21} + e_1$	186.274	186.463 (0.284)	186.097 (0.302)
$\rho_{112}^{11} + e_2, \rho_{112}^{21} + e_2$			
$\rho_{122}^{11} + e_2, \rho_{122}^{21} + e_2$			
r_1, r_2	264.534	264.915 (0.431)	264.915 (1.527)
ρ_{3111}	282.738	287.428 (0.428)	288.528 (1.132)
ρ_{3121}	279.83	277.935 (0.433)	277.515 (1.184)
ρ_{3211}, ρ_{3221}	279.83	277.935 (0.312)	277.515 (0.276)

表6 範例四結果與比較

	Nagurney <i>et al.</i> (2003) 之 數值結果	10次基因演算 平均 (變異量)	10次限制條件基因演 算平均 (變異量)
迭代數	N/A	452	360
q_{jh}^i, q_{kl}^j	12.712	12.948 (0.218)	12.731 (0.201)
$\rho_{1jh}^i + e_h$	117.908	117.659 (0.306)	117.341 (0.328)
r_j	260.739	260.501 (0.515)	260.183 (0.487)
$\rho_{3111}, \rho_{3121}, \rho_{3211}, \rho_{3221}$	278.45	278.36 (0.429)	278.50 (0.436)
$\rho_{3112}, \rho_{3122}, \rho_{3212}, \rho_{3222}$			

範例五

本範例情節同範例四，如圖5所示，但國家2的需求函數與原範例不同且增加如下：
 $d_{112} = -2\rho_{3112} - 1.5\rho_{3122} + 1010$, $d_{122} = -2\rho_{3122} - 1.5\rho_{3112} + 1020$, $d_{212} = -2\rho_{3212} - 1.5\rho_{3222} + 1030$,
 $d_{222} = -2\rho_{3222} - 1.5\rho_{3212} + 1040$ ，因此可預期供給至國家1市場的數量會較範例四少，但供給至
 國家2的需求會相對增加，結果如表7。以流進零售商1的流量為例，在本範例為 $q_{11}^{11} + q_{12}^{11} + q_{11}^{21}$
 $q_{12}^{21} + q_{12}^{12} + q_{12}^{22} + q_{12}^{22} = 12.765 \times 8 = 102.12$ 會等於流出的流量為 $q_{111}^1 + q_{121}^1 + q_{211}^1 +$
 $q_{221}^1 + q_{112}^1 + q_{122}^1 + q_{212}^1 + q_{222}^1 = 10.568 \times 4 + 11.407 + 15.365 + 14.606 + 18.667 = 102.317$ 。

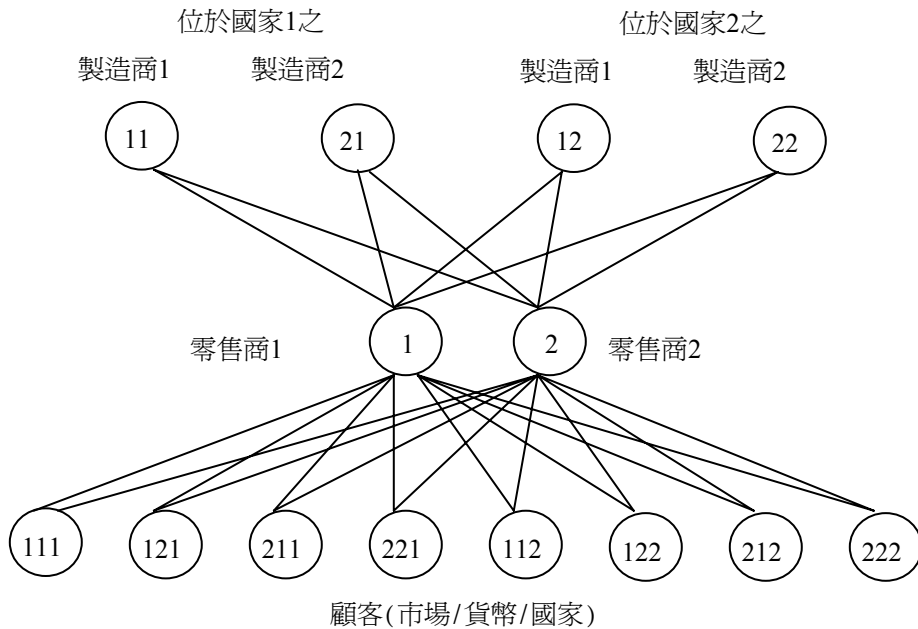


圖5 範例五的全球供應鏈網路架構圖

表7 範例五結果與比較

	Nagurney <i>et al.</i> (2003) 之 數值結果	10次基因演算 平均 (變異量)	10次限制條件基因演 算平均 (變異量)
迭代數	318	478	416
q_{jh}^{il}	12.877	12.692 (0.237)	12.765 (0.312)
$q_{111}^j, q_{121}^j, q_{211}^j, q_{221}^j$	10.605	10.528 (0.103)	10.568 (0.216)
q_{112}^j	11.332	11.364 (0.164)	11.407 (0.218)
q_{122}^j	15.332	15.318 (0.132)	15.365 (0.153)
q_{212}^j	14.968	14.600 (0.157)	14.606 (0.285)
q_{222}^j	18.968	19.074 (0.102)	18.667 (0.217)
$\rho_{1jh}^{il} + e_h$	119.198	119.472 (0.134)	119.478 (0.439)
r_j	264.051	265.607 (1.267)	265.595 (0.873)
$\rho_{3111}, \rho_{3121}, \rho_{3211}, \rho_{3221}$	279.654	279.266 (0.621)	279.745 (3.273)
ρ_{3112}	280.381	281.673 (0.503)	281.215 (1.084)
ρ_{3122}	284.381	284.753 (0.521)	284.288 (1.173)
ρ_{3212}	284.017	284.535 (0.518)	284.124 (1.131)
ρ_{3222}	284.017	284.535 (0.518)	284.124 (1.131)

整體來說，上述數值範例驗證了本研究多位代理人模式能取代利用變分不等式求解網路均衡問題的最佳化的模式，同時內嵌於價格與數量均衡代理人 (P-Q) 的基因演算法能求解供應鏈網路的產銷均衡。此外，表3~表7的結果顯示，本研究所提出的限制條件式基因演算法，在價格與數量的平均值與Nagurney *et al.* (2003) 原文的結果相當接近，同時其變異量的值也不大，因此求解的品質相當良好。

5. 結論

本文提出建構供應鏈產銷均衡數學模式的多位代理人模式，並以限制條件為基礎的遺傳演算法內嵌於功能性代理人P-Q之中，以求得三階供應鏈成員在價格與數量上的均衡，而後與Nagurney *et al.* (2003) 的數值範例做比較，其結果顯示以多位代理人模式加上基因演算法可取代最佳化模式及變分不等式在求解供應鏈產銷均衡的應用。具體而言，本研究可歸納如下：

- (1) 多位代理人的模式可取代供應鏈產銷平衡模式的數學方程式，同時在供應鏈網路趨於複雜、多階層的情況下，可將複雜的利潤方程式的參數，轉換為分散在不同階層的不同代理人的模

式中，可更清楚表達模式與供應鏈網路架構的關係，以使利潤模式與供應鏈結構相結合，同時求解過程中可針對不同供應鏈成員參數的變化做分析，對模式建構的清晰度有相當助益；

- (2) 以內嵌於 P-Q 代理人的限制式基因演算法來求解於供應鏈網路均衡模式，經由數值範例驗證發現其求解品質與速度與原方法相近，同時限制條件的基因演算法更可加快求解的速度；
- (3) 當供應鏈模式價格與數量的關係是不可微分者，如價格與數量的關係因數量上的折扣而呈現階梯狀，或為統計數值表時，本文的方法因使用多位代理人來建構模式，並以基因演算法來求解，因此並不會造成求解上的問題，而採用變分不等式求解時，則因無法微分而無法進行求解程序。

在企業國際化的趨勢下，供應鏈的計畫與管理相當重要，本研究從經濟上價格與需求的關係為基礎來研究跨國性的供應鏈網路，對了解供應鏈產銷結構的變化，相當重要。由於各地區的生產成本、交易成本，以及需求結構會隨著產業的發展、物流效率的提昇、電子商務的應用，以及各需求市場經濟的進展，而產生結構化的變化。透過各地生產成本(反應在生產成本的函數上)、交易成本(反應在交易成本的函數上)，以及各地市場需求與價格的變化(反應在需求的函數上)，可算出供應鏈在均衡情況下，產銷與需求上的變化，對研究國際經濟或供應鏈的學者，以及企業供應鏈的計畫者而言，皆有相當大的助益。

本研究以基因演算法來求解供應鏈的均衡，其結果常會受到初始母體值的影響，因此需經多次運算才可得到接近使用變分不等式求得的解。未來研究的方向可由改善本文的基因演算法著手，在初始值的選擇上，或限制條件的訂定上加以改善，或其他能使基因演算法收斂更快速的方式，如在交配、突變的運算上能根據問題的特性加以設計等，以使數值結果更快速與正確。

參考文獻

- 王中允，「路段容量限制動態用路人旅運選擇模型之研究」，國立中央大學土木工程學系未出版博士論文，民國88年。
- 周鄭義，「動態號制時制最佳化之研究-雙層規劃模型之應用」，國立中央大學土木工程學系未出版碩士論文，民國88年。
- Beckmann, M., McGuire, C. B., and Winston, C. B., *Studies in the Economics of Transportation*, Yale University Press, New Haven, Connecticut, 1956.
- Ceylan, H. and Bell, M. G. H., "Traffic Signal Timing Optimization Based on Genetic Algorithm Approach, Including Drivers' Routing," *Transportation Research Part B*, Vol. 38, 2004, pp. 329-342.
- Ceylan, H. and Bell, M. G. H. "Genetic Algorithm Solution for the Stochastic Equilibrium Transportation Networks under Congestion," *Transportation Research Part B*, Vol. 39, 2005, pp. 169-185.

- Gen, M. and Cheng, R., *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, Addison-Wiley, New York, 2000.
- Nagurney, A., *Network Economics: A Variational Inequality Approach*, Boston, Kulwer Academic Publishers, 1993.
- Nagurney, A., Cruz, J., and Matsypura, D., "Dynamics of Global Supply Chain Supernetworks," *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 37, 2003, pp. 963-983.
- Nagurney, A., Dong, J., and Zhang D., "A Supply Chain Network Equilibrium Model," *Transportation research part E*, Vol. 38, 2002, pp. 281-303.
- Perazzo, R. P. J., Reich, S. L., Schvarzer, J., and Virasoro, M. A., "Inflation and Relaxation to Equilibrium in a Complex Economic System," *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 6, 1995, pp. 455-470.
- Tsang, E., *Foundations of Constraint Satisfaction*, New York, McGraw-Hill, 1993.
- Weisbuch G. and Stauffer D., "Adjustment and Social Choice," *Physica A*, Vol. 323, 2003, pp. 651-662.
- Wardrop, J. G., "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research," *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Part II, 1952, pp. 325-378.