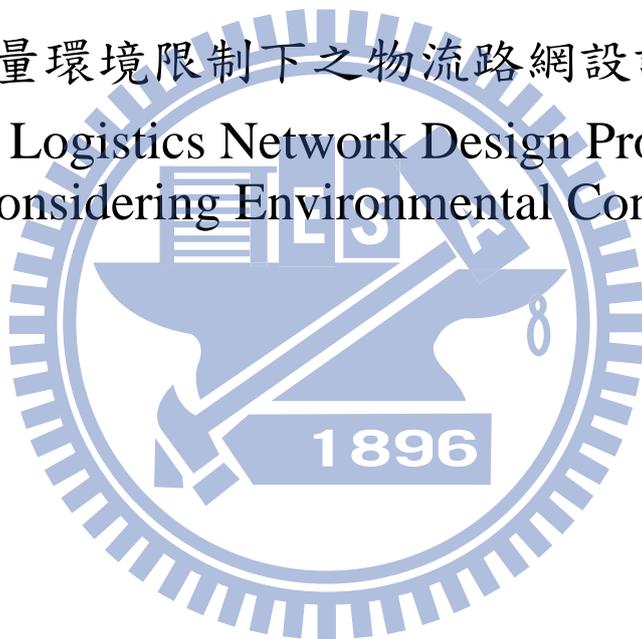


國立交通大學
運輸與物流管理學系碩士班

碩士論文

考量環境限制下之物流路網設計問題

A Logistics Network Design Problem
Considering Environmental Concerns



研究生：劉穎文

指導教授：黃家耀

中華民國一零三年六月

考量環境限制下之物流路網設計問題

A Logistics Network Design Problem Considering Environmental Concerns

研究生：劉穎文

Student：Ying-Wen Liu

指導教授：黃家耀

Advisor：Ka-Io Wong

國立交通大學
運輸與物流管理學系
碩士論文



A Thesis
Submitted to Department of Transportation and Logistics Management
College of Management
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in
Logistics Management

June 2014

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 103 年 6 月

考量環境限制下之物流路網設計問題

學生：劉穎文

指導教授：黃家耀 副教授

國立交通大學運輸與物流管理學系碩士班

摘要

永續發展及環境保護的議題逐漸被各國各界重視，從最初溫室效應、聖嬰現象開始，到近幾年的極端氣候，使各界警覺到人類對大自然產生的破壞已逐漸衍生為對人類生活的迫害。極端事件的發生與大氣中二氧化碳濃度逐年升高有關，為減緩極端事件的現象，世界各地皆有制定不同的因應政策，以減少溫室氣體或汙染物質的排放，因此許多相關研究也因此應運而生，如相關環境政策之評析、綠色運輸之績效評估與指標建立、減排策略之擬訂，以及減排技術及運具之研發等。本研究則提出一個降低路網碳排放量之減排模式供政府決策單位參考，當政府有特定的減排目標時，可以此模式檢視能否以改善政策達成之及其可達成程度，並在擬定相關改善政策的同時，兼顧下層承攬業者對政策的反應，使路網發展方向符合減排目標。

本研究以雙層規劃方法(bi-level programming)建構物流路網設計問題之減排模式，上層問題為減碳政策模式，下層問題為運輸路網指派模式。上層政府決策者期望透過改善政策降低路網碳排放量，改善政策包含投資港口處理容量之投資政策、補貼業者使用特定港口之補貼政策及外部成本內部化政策，而下層物流業者則在成本最小化的前提下完成運送服務。上層政府決策者在做決策時會參考下層物流業者對改善政策的反應，而下層業者也會將其對政策的反應回饋給上層決策者，兩者間之關係為主從賽局。

下層模式為線性問題，故可以單行法求解；上層模式起初以 Sensitivity Analysis-based algorithm (SAB 法) 求解，但此法只在下層均衡解對上層變數之敏感度為連續且可微分的情況下可行，而本研究之下層均衡解對補貼變數之敏感度為連續但不可微分之函數，故發展 Branch-SAB 法來處理此問題。Branch-SAB 法是先以求解離散型路網設計問題之方式處理補貼變數後，再以求解連續型路網設計問題之 SAB 法求解其餘決策變數。

最後以一範例說明求解過程及結果並進行數值分析，結果顯示改善政策可降低一部份的碳排放量，但有其上限。而在不同減排目標下，改善政策內容亦有所不同。整體而言，當減排目標越嚴苛，上層目標值呈現增加的趨勢，路網碳排放量、環境成本、運輸成本及下層目標值則呈現下降的趨勢。

關鍵詞：物流路網設計問題、雙層規劃方法、減排模式、貨物運輸

A Logistics Network Design Problem Considering Environmental Concerns

Student: Ying-Wen Liu

Advisor: Ka-Io Wong

Department of Transportation and Logistics Management
National Chiao Tung University

Abstract

It is believed that global warming and extreme weathers is a result of the increasing amount of emissions and greenhouse gases. With the rising environmental concerns in the recent years, it is important to take the related emissions into account when designing the freight transportation network. Policy issues for carbon emissions reduction are widely studied, such as, the evaluation of environmental policies, the strategies and techniques for reducing emissions. How to lower the emissions to meet a mandatory cap is also an issue for freight network design problem.

This study proposes a bi-level programming formulation to model the policies of emission reduction for freight transport, whereas the lower-level problem is a transportation network assignment problem modeling the network flows, and the upper-level problem determines the most optimal improvement policies for minimizing the improvement costs. Three improvement policies are considered, including enhancing port capacity, subsidy for using a port, and internalization of external cost. Under the bi-level framework, the leader at the upper-level would consider the reaction function of the follower at the lower-level, and the follower would give its feedback to the leader as well, under the Stackelberg equilibrium.

A Branch Sensitivity Analysis-Based (Branch-SAB) algorithm is proposed to solve the upper-level problem, in which the sensitivity of the lower-level equilibrium solution respect to the upper-level decision variables is continuous but non-differentiable at certain points, whereas the lower-level model is a linear programming problem and can be solved by the Simplex Method.

Numerical example with a hypothetical network is used to demonstrate the performance of the model, and the results show that the improvement policies can reduce the network emissions, subject to a reduction upper bound. A higher improvement cost is needed for a stricter reduction target, but the corresponding network emissions, environmental cost, as well as transportation cost would be decreased.

Keywords: Network Design Problem, Bi-level Programming, Emissions Reduction Model, Freight Transport

誌謝

研究所這兩年，首先要感謝指導教授黃家耀老師，開放的教學方式給我很寬廣的思考空間，嚴謹的處事方法與態度也是我學習的榜樣，謝謝老師細心與耐心的指導，以及平時的關心與照顧。同時也十分感謝兩位口試委員，黃明居老師及黃寬丞老師，仔細審閱論文並給予許多寶貴的建議，使論文更臻完整。另外，也非常感謝蕭傑諭老師從大學以來的指導與照顧。

謝謝 KI Lab 的大家，用溫暖與笑鬧聲填滿我的生活。謝謝阿哲包山包海的為我們打理一切，時時關心我們、餵食我們。謝謝小 c、小傑、朱哥、周律伶，碩一這年深受你們的照顧，真的很幸運有那麼棒的學長姊。謝謝一起奮鬥兩年的兩薇、安安、之馨、品綺等人，一起討論研究，一起熬夜看日出，一起聊天玩耍運動。謝謝碩二這年加入的 Jessica、峻庭、胖子、李威，大家都很有趣，為 lab 帶來許多歡笑。還有旭昇和即將加入 KI Lab 的學妹們，很開心認識你們。

感謝玩耍好 partners 岑安和伊諾，時時不遠千里來鼓舞我、鞭策我繼續前進，以後還要一起探索世界到處玩耍。感謝胖希、嘉嘉、二如、乃翎、vivi、小咩、筍乾、巧哥為我加油打氣，分享彼此的喜怒哀樂。還有好多好多要感謝的人，可愛的女籃女孩們、一起長大的 913、熱情又難約的五屆、逗趣的武陵人們，黑白的研究生生活因你們而繽紛。

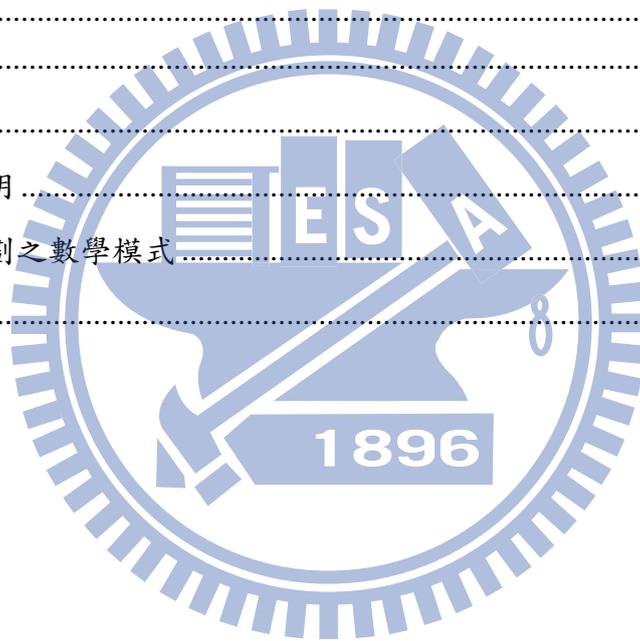
最後，感謝親愛的家人，因為有你們的支持與付出，讓我能無後顧之憂的完成學業。在新竹的六年大學及研究所求學生涯充滿各種形形色色的回憶，真的要感謝很多人，謝謝大家。

劉穎文 謹誌
2014 年 7 月

目錄

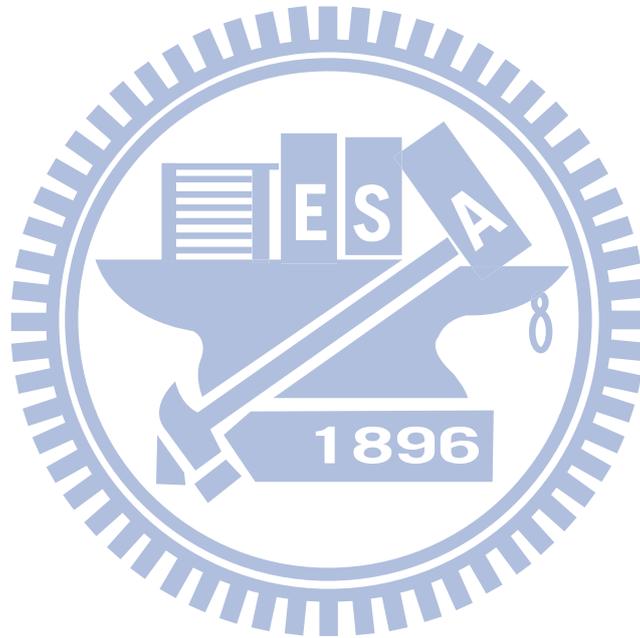
摘要	i
Abstract.....	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vii
一、緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的與範圍	1
1.3 研究方法與流程	2
二、文獻回顧	4
2.1 運輸的外部成本	4
2.1.1 外部成本之全球性影響	4
2.1.2 外部成本之地方性影響	5
2.1.3 環境成本之計算	6
2.2 物流路網設計問題	8
2.2.1 路網設計問題之定義	8
2.2.2 物流路網設計問題相關文獻	9
2.3 複合運輸	15
2.4 小結	16
三、研究方法	18
3.1 情境說明與假設	18
3.2 研究架構	19
3.3 模式建構	20
3.3.1 雙層規劃模式之下層模式——運輸路網指派模式	20
3.3.2 雙層規劃模式之上層模式——減碳政策模式	24
3.3.3 環境限制式	25
3.4 求解演算法	26
3.4.1 下層模式之演算法	26
3.4.2 上層模式之演算法	28
3.4.2.1 演算法 1：SAB 法	28
3.4.2.2 演算法 2：Branch-SAB 法	34

3.5 小結	38
四、數值分析	39
4.1 問題描述	39
4.2 求解過程與結果	41
4.2.1 求解過程	41
4.2.2 結果說明	43
4.3 減排目標之相關分析	45
4.3.1 減排目標 α 與運輸成本及環境成本之關係	45
4.3.2 減排目標 α 與上下層目標值間之關係	46
4.4 小結	49
五、結論與建議	50
5.1 結論	50
5.2 建議	51
參考文獻	52
附錄一：符號說明	54
附錄二：雙層規劃之數學模式	56
附錄三：BS 法	59



表目錄

表 2.2-1 運輸與物流路網設計問題之比較.....	9
表 2.2-2 物流路網設計問題相關文獻整理.....	13
表 2.3-1 複合運輸之型態及載運方式.....	15
表 3.4-1 SAB 法求解過程無法收斂之範例.....	31
表 4.2-1 候選改善政策之求解過程與結果.....	42
表 4.2-2 改善政策實施前後對照表.....	43
表 4.3-1 減排目標 α 所對應之結果.....	47



圖目錄

圖 3.4-1 下層演算法流程圖	26
圖 3.4-2 SAB 法流程圖	30
圖 3.4-3 下層目標值對上層變數 z_j 之敏感度	32
圖 3.4-5 列舉結果說明圖	35
圖 3.4-6 Branch-SAB 法流程圖	37
圖 4.1-1 物流路網示意圖	39
圖 4.2-1 範例列舉結果	41
圖 4.3-1 α 對運輸成本及環境成本之影響	45
圖 4.3-2 α 對上層目標值及下層目標值之影響	46
圖 A.3-1 BS 法之流程圖	61



一、緒論

1.1 研究背景與動機

永續發展及環境保護的議題逐漸被各國各界重視，從最初溫室效應、聖嬰現象開始，到近幾年的極端氣候，使各界警覺到人類對大自然產生的破壞已逐漸衍生為對人類生活的迫害。美國海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)於2012年公布之報告書(*State of the climate in 2011*)中指出，2011年全球發生許多極端氣候事件，例如歐洲、墨西哥與東非的旱災、中美洲加勒比地區的反聖嬰現象等。這些現象顯示極端氣候並非偶然，氣候變遷對世界各地帶來的威脅正逐漸擴散。

報告書中亦指出，極端事件的發生與大氣中二氧化碳濃度逐年升高有關。為減緩極端事件的現象，世界各地皆有制定不同的因應政策，以減少溫室氣體或汙染物質的排放，例如美國清潔能源安全法案(The American Clean Energy and Security Act)、澳洲碳汙染減量計劃(Carbon Pollution Reduction Scheme)及歐盟碳交易機制(European Union Emission Trading Scheme, EU ETS)等，其目的無非是希望能減少因人為因素對自然環境造成的影響。許多相關研究也因此應運而生，如相關環境政策之評析、綠色運輸之績效評估與指標建立、減排策略之擬訂，以及減排技術及運具之研發等。

在全球經貿合作活動日漸增加的年代，各地貨物的流動也越來越頻繁，航運需求日益增加，隨之產生的外部成本也益趨提高。因此，如何在符合環境法規的限制及時代的趨勢之下，發展有效率的物流路網並兼顧環境保護即為當前重要的課題。舉例來說，近年來有許多國家政府開始鼓勵發展綠色港埠，若在綠色港口發展時，推動相關政策，例如補貼航運業者使用綠色港口是否可提高綠色港口的使用率，或者實施外部成本內部化政策可否促使業者選擇較為環保的港口或航線，以及在投資改善港口處理能力的同時，搭配兩種政策組合使用能否提升運輸效率並改善環境問題等議題。由經濟與永續的角度出發，願能以有效且可行的方法在發展經濟與環境保護間取得平衡。

1.2 研究目的與範圍

提出一個降低路網碳排放量之減排模式供政府決策單位參考，當政府有特定的減排目標時，可以此模式檢視能否以改善政策達成之及其可達成程度，並在擬定相關改善政策的同時，兼顧下層承攬業者對政策的反應，使路網發展方向符合減排目標。

本研究之研究範圍以物流運輸路網為主，此路網是假設以某一國家之港口的貨櫃進出口情形為研究基礎，探討國外港口至國內港口以及國內地區之貨櫃流動。研究對象為政府決策者及貨運承攬業者，探討政府決策者如何以改善政策降低路網碳排放量，而改善政策之介紹將於第三章說明。環境限制的部分主要是以二氧化碳排放量做為探討依據，檢視改善政策能否使物流路網之二氧化碳排放量符合減排目標。

1.3 研究方法與流程

本研究以雙層規劃方法(bi-level programming)來建立物流路網設計問題之模式，並將環境限制納入其中。上層是以政府決策單位的角度進行整體物流路網改善成本最小化之研究，下層則是以承攬業者之立場來探討路網使用者對改善政策的反應，為一總成本最小化問題。上層改善政策為是指投資港口處理容量之投資政策、補貼業者使用特定港口之補貼政策及外部成本內部化政策，因此改善成本包含港口投資成本、補貼成本，再扣除外部成本內部化之收入；下層總成本包含運輸成本、外部成本內部化所徵收之環境成本。環境限制則是以二氧化碳的排放量來推估是否達到減少二氧化碳排放量的目標，即是否能使整體碳排放量降低至國際規定之標準或政府自訂之減排目標。整體而言，是以此模式用於分析在環境限制下的各種政策方案組合對路網發展之影響，由此歸納出最適政策方案，達成減少路網碳排放量的目標。

確立研究方向及議題後之研究流程首先是著手回顧相關文獻並統整之。其次，蒐集外部成本之相關資料以設定研究情境與假設，再以雙層規劃為架構建立物流路網設計問題之模式，並將環境限制因素納入其中。接著設計演算法及測試範例，再以測試結果進行數值分析。最後，依分析結果提出相關結論及建議。

研究流程如下圖 1.3-1 所示：



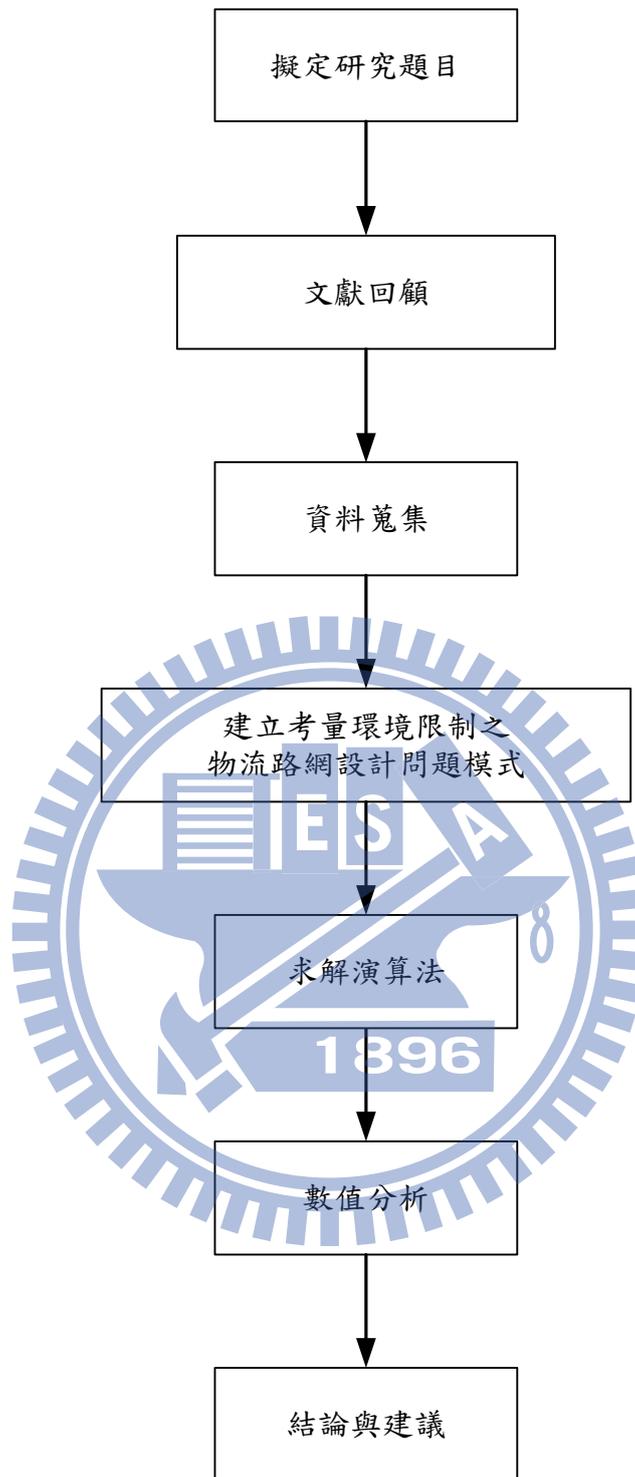


圖 1.3-1 研究流程圖

二、文獻回顧

本研究欲探討納入環境限制式之物流路網設計問題，研擬改善整體路網之最適政策，達成降低路網碳排放量之目標。故在本章節先回顧與外部成本之影響及其計算方式，用以建立環境限制式；接著再回顧物流路網設計問題之相關文獻，了解目前物流路網設計問題之發展現況、研究方法及求解演算法等，做為未來建立模式及演算法之基礎。

2.1 運輸的外部成本

近年來隨著全球化的發展，國際貿易日漸蓬勃，貨物流動運量逐年增加，卻也使得外部成本隨之提升。根據 Ozbay et al. (2007)，以公路運輸的一個旅次而言，其總成本可分為內部成本與外部成本，內部成本指本旅次中會直接影響總成本的成本，亦可稱為直接成本或私人成本，如車輛營運成本、時間成本、停車費等；而外部成本指在本旅次中不會直接影響總成本的成本，亦可稱為間接成本或社會成本，如環境成本、擁擠成本及事故成本。本研究主要探討其中的環境成本，影響環境成本的因素有空氣汙染、噪音汙染等因素，本研究僅考慮空氣汙染的部分，並依其影響範圍分成全球性影響與地方性影響來做說明。

2.1.1 外部成本之全球性影響

溫室氣體是指會吸收或釋放紅外線輻射並存在於大氣中的氣體，其影響範圍擴及全球。於京都議定書(Kyoto Protocol)中規範之6種溫室氣體包括：二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)、全氟碳化物(PFCs)、氫氟碳化物(HFCs)，以及六氟化硫(SF₆)。過度排放溫室氣體對全球環境產生負面影響，如溫室效應、極端氣候等，不僅對人類生活帶來衝擊，亦影響全球動植物生態系統的平衡。Blunden(2012)指出，2011年大氣中二氧化碳濃度首次超過390 ppm，創歷史新高，其他溫室氣體濃度也不斷增加，使得輻射驅動力(Radiative Forcing)比起1990年的基準還高出30%，反映出溫室氣體可能是造成氣候異常的原因之一。

為了減少溫室氣體排放，京都議定書中提供三項減排方式，分別是共同減量(Joint Implementation)、清潔發展機制(Clean Development Mechanism)及排放交易(Emissions Trading)。三者之中，排放交易的執行範圍最為廣泛，如歐盟碳交易機制(EU Emissions Trading System, EU ETS)、美國芝加哥氣候交易所(CCX)及澳洲氣候交易所(ACX)等，其規範的溫室氣體通常以二氧化碳為主，因為二氧化碳在所有溫室氣體中所占比例最高，而其他溫室氣體未來也可能納入機制中。排放交易機制一詞由京都議定書中第17條而來，其規範為：「一個附件一國家可將其超額完成減排義務的多餘排放量，以貿易的方式轉讓給另外一個未能完成減排義務的附件一國家，並同時從轉讓方的允許排放限額上扣減相應的轉讓額度，是一種市場導向的環境政策工具，其意義在於納入制度的公司企業須履行減排之義務，每年擁有一個額度之排放量，年底核算時，超出之排放量須向其

他會員購買，剩餘的排放量則可在市場上出售給其他會員公司，藉此來達到共同減排的目的」，是一種「總量管制」手法，限制排放上限，使二氧化碳排放權透過市場供需來決定價格。目前全球最大的排放交易制度屬歐盟排放交易機制，其規範範圍涵蓋能源業、礦業、航空業等溫室氣體排放量較大的產業，而海運業則還在規劃、協商的階段。

Chin et al. (2012) 表示，2009年時，國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)考慮以排放交易機制規範海運業，但仍有兩項議題有待解決。其一是IMO主張將所有船隻納入排放交易機制，但此舉有違聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC)「共同但有差異的責任」(Common but Differentiated Responsibilities)的指導原則，因此還有待雙方協商。另一項議題則是遵從率(compliance rate)低，因排放交易機制未與海運業的一些固有特色整合，如船旗國(flag state)、沿海國(coastal state)和船級協會(Classification Societies)之間的法律責任歸屬等。因此，若要對海運業實施排放交易機制仍待各方商討與協調。

儘管海運業尚未受排放交易機制的限制，仍有學者依其概念研究排放交易機制對航運可產生的影響。如 Kim et al. (2012) 分析韓國國際貨櫃之複合運輸路網，調整原來的線性模式外，將影響環境的外部因素納入考量，改良原有模式，探討排放交易機制、碳稅及外部成本內部化三項政策分別對減排效果及託運人在運具分配上造成何種影響。研究結果指出，若依現行市場上的二氧化碳價格來看，排放交易機制對運具分配及減排效果的影響不甚顯著，但倘若可提高二氧化碳在市場上的價格，排放交易機制才可能是個有效的減排政策，但在運具分配上的影響仍不明顯，僅使小部分使用拖船及貨車的比例轉為使用火車，使火車使用比例略微提升。

2.1.2 外部成本之地方性影響

除了影響全球的溫室氣體外，也有些污染物質影響範圍僅限當地，造成地方環境污染、生態失衡，並危害人體健康及生活品質。此類污染可分為空氣污染、噪音污染、水質污染及能源消耗，而本研究以探討空氣污染為主。

空氣污染源有一氧化碳(CO)、碳氫化合物(HC)、揮發性有機物(Volatile organic compounds, VOCs)、氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)、懸浮微粒等，其中CO與HC皆對人體有害，HC甚至可能導致癌症病發；VOCs吸入過量亦可能致癌，也能導致土壤與地下水的污染；而NO_x及SO_x遇雨水結合則形成酸雨，NO₂還可形成光煙霧，降低能見度且傷害人體。這些污染源產生的原因主要是燃燒燃料，例如工業生產製造或以燃料驅動的交通運具等，這些在地行為所產生的影響也僅屬地方性。

因各地發展及活動情形有所不同，可能產生的影響也不盡相同，因此在污染的防治上也要因地制宜，研擬適合當地的規範，目前較廣為討論的防治方式有課徵污染排放稅費及外部成本內部化兩種。世界各地皆有不同空氣污染防制費徵收方式，例如美國部分地區及日本的實際排放量徵收及歐洲部分國家依使用燃料及用量而異的隨油徵收等。而外部成本內部化是指將可能對環境或社會產生之負面影響，依外部成本內部化課稅比例(internalization ratio of the external cost)，以特定比例向外部成本製造者收取之政策措施。

Piecky and McKinnon (2007)指出，英國之外部成本內部化課稅比例為 88%，是歐洲國家中課稅比例最高者，而在波蘭、希臘與盧森堡則約為 30%。英國將外部成本內部化的方式是將每公升硫化物的柴油收取 50.35 便士(pence)以及零售價 17.5%的增值稅；此外，亦向每輛車課徵特定高速公路、橋樑與隧道的通行費，所以在英國並沒有收取直接的基礎設施費用。因此根據歐洲環境署 2002 年的估計，向大型貨車(heavy goods vehicles, HGVs)收取 88%的外部成本，包括了基礎設施成本、環境成本以及擁擠成本。

Kim et al.(2012) 提到，碳稅是一種以因燃料消耗而產生的二氧化碳排放量為收費基準的環境稅，以「以價制量」的概念控制二氧化碳的價格，達到減少二氧化碳排放量的目的。研究結果發現，課徵碳稅會使火車使用的比例上升，公路及拖船的使用比例下降，亦可減少二氧化碳排放量。另外，當外部成本內部化的比例超過 20%後，公路運輸的比例會明顯下降，轉而選擇使用火車或拖船，大幅減少外部成本的產生。

2.1.3 環境成本之計算

若要探討上述溫室氣體及汙染物質對環境造成的影響，可以使用科學的方式將其量化來做評估。參考 Lee et al. (2010)，將計算方式分別整理如下：

1. 貨櫃車運輸

貨櫃車的引擎為柴油內燃機，消耗燃料後主要的排放物為 CO₂, NO_x, SO₂ 和 VOC，因此計算外部成本可分為溫室氣體(CO₂)與空氣汙染排放物質，由於本研究僅探討二氧化碳產生之影響，故僅列出溫室氣體之計算公式如下：

$$C'_{CO_2} = E'_{CO_2} \times AC'_{CO_2} \quad (2.1)$$

$$E'_{CO_2} = \frac{(T \times L)}{F} \times k_{CO_2} \quad (2.2)$$

其中

C'_{CO_2} ：溫室氣體 CO₂ 之外部成本

E'_{CO_2} ：溫室氣體 CO₂ 之排放量

AC'_{CO_2} ：溫室氣體 CO₂ 之避免成本

T ：貨櫃運輸量

L ：旅次長度

F ：貨櫃車裝載係數

k_{CO_2} ：溫室氣體 CO₂ 之排放因子

2. 航運運輸

航運運輸可能產生的的空氣汙染排放物有PM, NO_x, SO₂, VOC以及溫室氣體CO₂。首先依貨櫃運輸量、旅次長度及各種排放物每TEU-公里之消耗量求出所有排放物之總消耗量，接著將各種排放物之消耗量與其所對應之排放因子相乘，得到所有排放物之總排放量，最後將排放物之總排放量與其所對應之環境成本相乘，即可得到短程航運之總環境成本，算式條列如下：

$$B_i = T^S \times L^S \times fc_i^S \quad (2.3)$$

$$E_j^S = \sum_j B_i k_{ij}^S \quad (2.4)$$

$$C^S = \sum_j E_j^S \times C_j^S \quad (2.5)$$

其中

- T^S : 貨櫃運輸量
- L^S : 旅次長度
- fc_i^S : 燃料 i 每 TEU-公里之消耗量
- E_j^S : 排放物 j 之總排放量
- B_i : 燃料 i 之總消耗量
- k_{ij}^S : 使用燃料 i 所產生之排放物 j 之排放因子
- C^S : 短程航運之總環境成本
- C_j^S : 排放物 j 之環境成本

以上為航行產生之碳排放量及環境成本的計算，除此之外，使用港口亦會產生碳排放量及環境成本，引自 Starcrest Consulting Group, LLC.於 2013 年發表的兩份報告書 *Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions 2012. The Port of Los Angeles* 以及 *Port of Los Beach Inventory of Air Emissions 2012. The Port of Los Beach*。空氣汙染排放清冊(Air emissions inventory)主要目的是統計當年度港埠營運所造成的環境破壞與污染氣體的排放量，這些造成環境破壞與汙染的氣體包括溫室氣體與空氣汙染物。依據港口活動將港埠引起空氣汙染的項目區分為五大類，分別為遠洋船舶(Ocean-Going Vessels, OGV)、港勤船舶(Harbor Craft, HC)、貨物裝卸機具(Cargo Handling Equipment, CHE)、鐵路機車頭(railroad locomotives)、重型柴油貨車(Heavy-Duty Vehicles, HDV)。

2.2 物流路網設計問題

本節首先介紹路網設計問題之定義，接著回顧相關文獻，藉此瞭解物流路網設計問題之型態及特性。路網設計問題可分為運輸路網設計問題及物流路網設計問題，前者是由道路路網設計問題發跡，故以此為基礎說明之；後者可分為整體供應鏈型態及供應鏈末端運輸配送的型態，兩者之相關文獻皆於本節中回顧，但本研究主要探討貨運型態的物流路網設計問題。

2.2.1 路網設計問題之定義

路網設計問題可分為以人、車為主的運輸路網設計問題，以及以貨物為主的物流路網設計問題，兩者概念相似卻也有些許相異之處。首先介紹運輸路網設計問題，其決策變數以道路或節線為主，Abdulaal and Leblanc (1979)將道路路網設計問題定義為選擇改善特定路段或新增路段至路網之中，以減緩交通擁塞之情形、能源消耗及汙染或其他特定目標之問題。Yang and Bell (1998)彙整當時的道路路網設計問題模式及演算法，文中提到路網設計問題分為三種，一種為是否於路網現有新增或改善特定路段之離散型路網設計問題 (Discrete network design problem, DNDP)，即瓶頸路段或相關路段之改善方案執行與否；另一種為於現有路段中決定特定路段的最適改善容量之連續型路網設計問題 (Continuous network design problem, CNDP)，即如何改善瓶頸路段及相關路段，增加多少道路容量可紓緩擁塞；以及結合 CNDP 及 DNDP 的混合型路網設計問題 (Mixed network design problem, MNDP)。過去通常假設路網需求已知且固定，而用路人是基於使用者均衡 (User Equilibrium, UE) 的特性來選擇路徑，後來也有學者提出隨機使用者均衡指派 (Stochastic User Equilibrium assignment, SUE) 應用於路網設計問題。此問題目標式通常為系統績效最佳化問題，如需求固定下之旅行時間最小化或備用容量 (reserve capacity) 最大化、需求彈性下之消費者剩餘最大化，及多目標最佳化等。演算法則有求解 DNDP 的分支定界法及求解 CNDP 的啟發式解法，如 Iterative-Optimization-Assignment (IOA) algorithm、Link Usage Proportion-based (LUPB) algorithm 及 Sensitivity Analysis-based algorithm 等。

Szeto et al. (2012) 的研究中整理出許多與道路路網設計問題相關的文獻，其中提到考量環境因素之雙層規劃運輸問題有許多型態，如路網擴建問題、稅費設計問題等；而將環境因素納入考量主要有三種方式，分別為將環境因素納入目標式、將環境因素納入限制式，以及建立環境衝擊評估之模式。前兩種考量方式較為使用，許多學者將外部成本最小化納入目標式；而將環境因素納入限制式主要有三種型態，分別是環境容量限制 (environmental capacity constraints)、環境公平限制 (environmental equity constraints) 及排放許可與交易 (marketable pollution permits)，最廣為使用的是環境容量限制，其意義為排放量不超過排放上限。

物流路網設計的運輸對象為貨物，運送範圍較大，複合運輸也較普遍。Simchi-Leviet al. (2000) 將物流網路定義為由供應商、製造商、倉儲中心、通路商、零售商組成，使原物料、成品及半成品在其間流通之網路。而物流路網設計則是指在一定的條件下，有

系統的整合物流網路，使整體物流網路達到目標最佳化，通常指倉庫和工廠區位、數量或規模之選定以及工廠到倉儲中心和倉儲中心到顧客據點之分配。亦如運輸路網設計問題之概念，在特定目標下尋找最適方案以解決物流路網之問題，如區位選擇、配送路線之選擇等。運輸路網設計問題與物流路網設計問題之差異整理如下表 2.2-1：

表 2.2-1 運輸與物流路網設計問題之比較

	運輸路網設計問題	物流路網設計問題
運送對象	人、車	貨物
決策變數	節線之容量或成本 <ul style="list-style-type: none"> • DNDP：補貼使用特定道路與否 • CNDP：道路增加多少容量 	節點之容量或成本 <ul style="list-style-type: none"> • DNDP：倉儲中心建置與否 • CNDP：港口增加多少處理容量
運具選擇	運具選擇模型	複合運輸
流量分配方式	使用者均衡 (UE) 隨機使用者均衡指派 (SUE)	系統最佳化 (SO)

目前文獻大多探討以人、車為對象的運輸路網設計問題，較少探討以貨運為主的物流路網設計問題，故本研究將針對以貨物為探討對象之物流路網設計問題進行研究。

2.2.2 物流路網設計問題相關文獻

物流路網設計問題可依研究範圍區分，有些研究探討整體供應鏈，有些研究探討製造商前後端或倉儲前後端，包含製造工廠或倉儲中心的大小及區位選擇，也有部分研究僅探討供應鏈末段的貨運配送問題，在此稱之為貨運型態之物流路網設計問題。

Ghiani (2004) 提出單一階層單一貨物(Single-Echelon Single-Commodity, SESC)區位模式，目標是使工廠運輸成本及營運成本最小化，目標式及限制式如下：

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} C_{ij}(s_{ij}) + \sum_{i \in V_1} F_i(u_i) \quad (2.6)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{j \in V_2} s_{ij} = u_i, \quad i \in V_1 \quad (2.7)$$

$$\sum_{i \in V_1} s_{ij} = d_j, \quad j \in V_2 \quad (2.8)$$

$$u_i \leq q_i, \quad i \in V_1, \quad (2.9)$$

$$s_{ij} \geq 0, \quad i \in V_1, j \in V_2, \quad (2.10)$$

$$u_i \geq 0, \quad i \in V_1 \quad (2.11)$$

其中

- V_1 工廠之集合
- V_2 顧客之集合
- C_{ij} 由工廠 i 到顧客 j 每單位之運輸成本
- s_{ij} 由工廠 i 到顧客 j 之貨物運量
- F_i 工廠 i 之營運成本
- u_i 工廠 i 之產量
- d_j 顧客 j 之需求量
- q_i 工廠 i 之產能限制

上述模式探討如何在滿足顧客需求之情況下使運輸成本及營運成本最小化，其決策變數為 s_{ij} 及 u_i ，即以成本最小化為前提，各工廠該生產多少商品、該如何運送至顧客端之問題。限制式(2.7)和(2.8)為流量守恆限制式，分別表示由工廠 i 送到所有顧客端的量等於該工廠 i 所生產的量，以及由所有工廠輸出至顧客 j 的量等於該顧客 j 之需求量，以確保所有顧客 j 之需求皆被滿足。限制式(2.9)為產能限制式，亦即工廠 i 生產的量不能超過工廠 i 之產能限制。限制式(2.10)及(2.11)則為非負限制式，分別表示貨物運輸量及工廠產量不能小於零。

一般而言，物流路網設計問題指物流路網中之場站設置與否、決定場站容量大小及數量，或是供給與需求在系統中的分配情形，以及如何達到整體系統成本最小化的流量分布之最佳化問題，如前述模式所示。近期研究則將傳統路網設計問題做些變化，如 Cordeau et al. (2006)提出一個於單期間、一國內考慮多商品、多場站之靜態路網模式，此模式整合工廠及倉庫的區位及容量問題、配送運具之選擇以及物料或商品流通等。目標式為固定成本及變動成本最小化，其中變動成本包含運輸成本、採購成本、生產成本及倉儲成本；決策變數為起點之區位選擇、起訖點間之物料或商品流通數量及起訖點間之運具選擇，其中起點為供應商、工廠或倉儲，迄點為工廠、倉儲或顧客端。此研究使用以單形為基礎之分支定界法 (simplex-based branch-and-bound) 與班德斯分解法 (Benders decomposition) 進行求解，結果顯示後者運算能力較佳。

上述問題亦可延伸為多期或需求不確定性之型態，如 Thanh et al. (2008)即為需求確定性下之多期、多商品、多場站之動態路網問題，探討場站之開關或擴建、供應商的選擇以及路網間的貨品流通。此研究以一公司該如何擴展以因應顧客需求增加為案例，測試此混合整數線性規劃問題 (MILP)。Thanh et al. (2010)以線性鬆弛之啟發式解法求解此 MILP，演算法主要貢獻在於能在可接受的運算時間內提供良好的可行解。

而需求不確定性之型態如 Unnikrishnan and Waller (2009)以獨立亂數及共同亂數兩種方法來呈現需求不確定性，此法可產生一近似最適解及最適區間的邊界。此研究中目標式為路網中各起訖對之需求被滿足的比例最大化，限制式為貨運路網之容量限制。同時，此研究亦探討容量不確定性對目標值 (需求處理量) 之影響，結果顯示若不考慮容量的不確定性可能高估系統需求處理量約40%。

Li (2013)研究一整合型物流路網問題，設計一個在需求不確定下可決定最適供應場站位置、指派貨物置倉儲場站、快速運送配置以及存貨管理之系統成本最小化模式，以拉氏鬆弛法求解，並以數值範例推論各主要參數值對最佳設計結果之影響。Creazza et al. (2012)則將整合型物流路網設計最佳化問題結合一多層、多節點、多商品之實際案例做分析，求解此混合整數線性規畫問題，結果顯示此模式在三種不同服務水準方案下可節省成本開支。

另外也有研究以前述之區位模式為基礎，並結合環境限制進行研究，例如 Elhedhli and Merrick (2012)將碳排放成本納入模式中，探討在能滿足顧客需求的情況下，如何將營運成本、運輸成本及碳排放成本最小化。此研究以拉氏鬆弛法(Lagrangian relaxation)求解不同方案組合，各方案的差異為營運成本、運輸成本及碳排放成本所佔之比例等，結果發現將碳排放成本納入模式後會影響原先的路網情形。像是為了減少碳排放成本，整體運送距離會跟著減少，因為距離也是計算碳排放的參數之一。此研究建議若減少的碳排放成本及運輸成本下降幅度大於開設新的配送中心時，可增加配送中心數量，以因應減少之運送距離，因為配送中心將可使貨車往返路程減少，同時降低運輸成本及碳排放成本。

前述文獻主要探討供應鏈型態之物流路網設計問題，以選擇工廠或倉儲的區位或容量為主；而貨運型態之物流路網設計問題則以港口的區位選擇或容量擴建、道路的興建或容量擴充為主要設計對象，探討不同決策下，貨物在路網中之流動情形。

將區位選擇問題應用至運輸方面，有如 Zheng et al. (2012) 以二階段數學規劃法分析沿海航行權對航線的軸輻路網設計帶來之影響，第一階段為決定港口位置及集貨船之分配，以混合整數線性規劃模式求解；第二階段以收送貨車輛路徑問題(vehicle routing problem with pickup and delivery, VRPPD)及拉氏鬆弛法(Lagrangian relaxation)求解在有限的運送時間限制下之航線設計問題。研究結果發現，沿海航行權對當地集散港有直接的影響，亦帶來新的研究議題，例如如何設計蝴蝶貨運路徑(butterfly shipping service route)，或是如何合併鄰近的集散船之航線，以達到規模經濟、創造利益，並減少船隻每周服務的頻率，提高船隻使用效能。

前述文獻皆為單層的路網設計問題，另外也有學者將物流路網設計問題轉化為更加複雜的雙層規劃問題。如 Chiou (2009)針對雙層連續型物流路網設計問題建構模式，其模式上層為改善成本最小化，決策變數為節線擴充容量；下層則是以系統最佳化(SO)取代交通路網設計問題中的使用者均衡(UE)來建構模式。此外，作者提出一套新的演算法，以目標函數的次梯度(subgradient)來發展新的投影演算法，數值測試結果顯示此演算法可有效求解物流路網設計問題。

Yamada et al. (2009) 以雙層規劃方法為基礎，建構一個模式，求解離散路網設計問題，即在起訖點之間的需求為已知的前提下，使用者在路網中之路徑選擇的問題，整體而言可視為「主從賽局(Leader-follower Game)」。其中，下層問題探討是複合運輸與多使用者在運輸路網上的流量平衡，利用運具分配指派模式來呈現問題；而上層問題屬於一種組合最佳化問題，期望在效益成本比最大化的前提下，投資或開發複合貨運運輸路網，

例如改善原有路網中之路段或是增加新的建設，以提高複合運輸路網之效率等。接著以一種結合基因演算法與區域搜尋法而成的基因區域搜尋法(Genetic Local Search, GLS)來模擬大型跨區域之複合運輸路網。此研究以菲律賓路網為例，模擬群島國家發展複合運輸之最適方案，由結果可知，下層所的模式大致可呈現實際貨運流量情形，而在上層的部分，拓寬運輸量較大的道路及改善港口比闢建新的道路或鐵路更能提升複合運輸路網效率。

上述文獻回顧了供應鏈型態及交通路網型態的物流路網設計問題，若將此問題加入路網使用者的反應來做決策調整，即由單層規劃模式轉化為雙層規劃模式，本研究及一照此方式建構下一章節之模式。在本章節最後將上述文獻整理如下表 2.2-2，以彙整問題在其他領域之研究成果。



表 2.2-2 物流路網設計問題相關文獻整理

作者(年份)	變數	模式說明	研究方法	求解演算法
Cordeau et al. (2006)	C、F、L、TM	需求確定性下，單期、多商品之靜態路網成本最小化問題，限制式為場站及各運具之容量限制等。	LP、MIP	Simplex-based branch-and-bound Benders decomposition
Thanh et al. (2008)	C、L	需求確定性下，多期、多商品之動態路網成本最小化問題，限制式為場站之容量限制等。	MILP	Branch-and-bound (分支定界法)
Thanh et al. (2010)	L、C、F	需求確定性下，多期、多商品之成本最小化問題，決定場站的開關或擴建與否、供應商的選擇及貨品流量。限制式為場站之容量限制等。	MILP	Heuristic approach based on the linear relaxation
Unnikrishnan and Waller (2009)	F、TM	需求或容量隨機性下，路網中各起訖對之需求被滿足的比例最大化，限制式為運具數量在節線上之上限、場站之容量限制及時間限制等。	LP (MAXCAP)、 Two-stage linear stochastic programming with recourse	Monte Carlo sampling methods (蒙地卡羅法)
Li (2013)	L、提供一般服務或快遞服務與否	需求不確定下，單期、單商品之靜態路網成本最小化問題。決定最適供應場站位置、指派貨物置倉儲場站、快速運送配置以及存貨管理，限制式為場站之容量限制等。	IP (with high-order nonlinearity)	Lagrangian relaxation (拉氏鬆弛法) Sub-gradient search approach (次梯度搜尋法)
Creazza et al. (2012)	L	在特定服務水準下，多階層、多節點、多商品之整合型物流路網設計成本最小化問題。	MILP	Not mention. (Case study)
Elhedhli and Merrick (2012)	L、F	將碳排放成本納入目標式之成本最小化問題，限制式為配送中心之容量限制等。	MIP	Lagrangian relaxation (拉氏鬆弛法)

Zheng et al. (2012)	L、F	首先決定港口位置及集貨船之分配，接著於有限的運送時間限制下之航線設計成本最小化問題。	Two-phase mathematical programming model (二階段數學規劃法) 第一階段：MILP 第二階段：VRPPD	Lagrangian relaxation (拉氏鬆弛法)
Yamada et al. (2009)	UL：L、C LL：F	在預算限制下，上層為改善原有路網之效益成本比最大化問題，下層為多重運具交通路網指派問題。	Bi-level programming	Genetic Local Search (基因區域搜尋法)
Chiou (2009)	UL：C LL：F	上層為改善成本最小化問題，決策變數為節線改善與否之二元變數；下層則是系統最佳化(System-optimized)問題，用以取代交通路網設計問題中的使用者均衡(User equilibrium)。	Bi-level programming	Sub-gradient projection method (次梯度投影法)

註：C：容量 (Capacity)

F：流量(Flow)

L：區位問題 (Location)，如場站建置與否

TM：運具選擇 (Transportation Modes)

UL：雙層規劃中的上層問題 (Upper level)

LL：雙層規劃中的下層問題 (Lower level)

LP：線性規劃 (Linear Programming)

IP：整數規劃 (Integer programming)

MIP：混合整數規劃 (Mixed integer programming)

MILP：混合整數線性規劃 (Mixed integer linear programming)

VRPPD：收送貨之車輛途程問題(Vehicle routing problems with pickups and deliveries)

2.3 複合運輸

張有恆(2005)於現代運輸學一書中表示，複合運輸系統是指兩種或兩種以上之運輸工具，在兩地之間，對於託運人所託運的貨物，採用單一費率或聯合計費，並且共同負擔運送責任之服務，亦可稱之聯合運輸系統。幾種不同的複合運輸型態及其在運方式整理如下表：

表 2.3-1 複合運輸之型態及載運方式

複合運輸型態	載運方式
鐵路與公路 (背載運輸) (Rail-Truck)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 平車載運拖車，將卡車駛於火車平台上，藉由火車運至某處後，再經公路運輸送達目的地的。 2. 平車載運貨櫃，貨櫃置於火車平台上，藉由火車運至某處後，再經公路運輸送達目的地的。
鐵路與水道 (車船運輸) (Rail-Water)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 駛進駛出(RO-RO)，即在陸地上採行鐵路運輸，若遇到無法跨越的天然水域，則在碼頭上將火車直接駛入特別建造的船艙內，到達目的地港後，火車亦直接駛出船艙，繼續駛往內陸目的地。 2. 陸橋作業(Land Bridge Service)，貨櫃船在港口卸下貨櫃後，藉由鐵路橫越大陸，將貨櫃運至對岸港口，再交由另一貨櫃船運至目的地。
公路與水運 (船背運輸) (Truck-Water)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 駛進駛出，在陸地上採貨卡運輸，若遇到無法跨越的天然水域，則利用碼頭上所架設的踏板將公路運具直接駛入船艙，越過江海後，公路運具亦利用踏板直接駛出船艙。 2. 吊上吊下(LO-LO)，「吊上吊下貨櫃船」又稱「艙格式貨櫃船」在碼頭上利用起重機將拖車上的貨櫃吊入船艙，到達目的地港卸貨時，用碼頭上的起重機將船艙內的貨櫃吊出，置於在一旁等待的拖車上，利用公路運輸送達目的地。

資料來源：張有恆(2005)

除了這些複合運輸外，尚有一種與其相關的運輸方式，即短程航運運輸(Short Sea Shipping)。Paixao et al. (2002)表示，短程航運運輸是一種另類的海運運輸服務，在歐洲，其連接不同航道，使用五種不同類型的船運輸，使單位一體與非單位一體的貨物在某個地區界線內分別送至歐洲國家、歐洲以北的國家、歐洲以南的國家，以提升貿易機會、擴大市場，如此一來便能使用不同種類與大小的船隻提供貨主多樣的服務。此運輸方式的推廣是希望能取代較遠程的公路運輸，不僅能降低成本、保護環境，亦可能紓緩台灣高速公路擁擠的問題。

推廣複合運輸的使用有許多好處，例如促進地方及國家的經濟發展、減少長程公路運輸的使用以減少壅塞成本或意外成本的產生，且有助於減緩對環境造成的負面影響。Gu et al. (2012) 表示使用複合運輸整合物流服務，可將貨運服務品質推向更高水平，達

到「及戶」的層次，並在提高服務水準及競爭力的同時，兼顧環境永續發展，因為鐵道及內陸拖船的碳排放量較貨車低。文中提到，現今的貨運服務已由傳統的港到港(port-to-port)進步到戶到戶(door-to-door)，因此貨物於海運及路運的複合運輸路網問題也日漸受到重視，此外，因環保意識高漲，故在規畫運輸路網的同時亦將碳足跡納入考量。因此，此研究以基因演算法求解貨櫃複合運輸在不同碳足跡限制方案下之運輸成本及運送時間最小化的雙目標模式(Bi-objective Model)問題，研究結果顯示，貨車所需的運送時間最短，但碳排放量最多，除非運送時間是首要考量因素，否則長程運輸不會選擇使用貨車運送，因此建議使用拖船或鐵路之複合運輸，此舉不僅能降低貨車在整段運送路程中被使用的比例，且能提高收益，亦保護環境。另外，若在離海岸較遠的地方，建無水港會比鐵路貨櫃運輸更有利潤可言，且若一地有內陸水道，拖船的成本及碳排放量均較低。最後，研究結果亦顯示，若碳排放法規越嚴格，將越偏向於使用複合運輸。

Lam and Gu (2013)彙整50篇含數學模式之複合運輸貨櫃流量最佳化之文獻，歸納出未來研究之趨勢為全球複合運輸之貨櫃流量最佳化問題，且將綠色議題納入考量並對港口實施政策以整合全球複合運輸路網，而在考慮此類型問題適合以雙目標或多目標最佳化方法構建此類問題之模式。其中，考量環境衝擊之研究有顯著的增加但仍嫌不足，而文中也提到，考量環境限制有多種方式，例如在符合碳排放量上限的限制下達到成本最佳化之最適複合運具指派，也可以以敏感度分析來探討碳排放限制對運送成本及時間的影響。為了在規畫複合運輸發展的同時監測其對環境的衝擊，可建構建設容量擴充及貨櫃量增加對運輸路網上的碳排放量變化之相關模式。目前已發表的期刊文獻中還沒有此主題之研究，未來研究可朝向補足此研究缺口邁進，以解決多種港口與腹地發展之挑戰。

2.4 小結

環境議題越來越受到重視，因此有越來越多環境限制政策應運而生。針對運輸產業所產生的外部成本可分為環境成本、擁擠成本、事故成本，本研究主要以環境成本做為探討主軸。而外部成本對環境的影響又可分為全球性及在地性，造成全球性影響的主因是溫室氣體的排放，過量的溫室氣體又造成溫室效應或極端氣候，為抑制環境惡化，便促成幾項全面性的環境限制法規，如歐盟碳交易機制；另外，造成在地性影響的主因是汙染物質的排放，其汙染可分為空氣汙染、噪音汙染、水質汙染及能源消耗，而本研究以探討空氣汙染為主，為防範生活環境之惡化，各地皆以不同的環境限制因應，如課徵汙染稅費或使外部成本內部化等。針對外部成本的量化已有學者提出計算方式，本研究參考 Lee et al. (2010)整理出貨櫃車運輸的溫室氣體和空氣汙染物排放量及其排放成本，以及短程航運運輸之汙染排放量及總環境成本，以此做為未來設計環境限制式之基礎。

路網設計問題之概念為在特定目標下尋找最適方案以解決路網之問題，例如在成本最小的情況下解決道路擁塞之問題，或是在成本最小的情況下尋求最適場站區位、容量及配送路線等之問題。在此概念下又可將問題分為物流路網設計問題與運輸路網設計問題，兩者最大的差異在於前者探討對象是針對貨品，且通常欲使貨物在系統最佳化(SO)的情況下達成目標限制，決策變數常以節點為主；而後者則是以道路使用者(人、車)

做為探討對象，使其在使用者均衡(UE)的情況下達成目標限制，決策變數常以節線為主。本研究將探討在環境限制下之物流路網問題，例如是否有需要提高特定港口之處理容量以提高路網服務水準，或是如何調整外部成本內部化之課稅比例以降低路網碳排放量等。以此概念為基礎，綜合探討政府施政方針與複合運輸的物流路網間相互影響之議題。

由本章節文獻可知，有許多研究方法可應用於物流路網設計問題，如整數規劃、混合整數規劃、兩階段數學規劃法、雙層規劃方法等。本研究將運用雙層規劃方法來探討上層領導者之政策制定及下層追隨者之物流路網設計問題，並將外部成本及環境限制納入決策範疇。因上層領導者所制定之政策將影響下層物流業者之決策，且物流業者之反應亦是上層領導者制定政策需考慮之資訊，兩者決策相互影響。該如何權衡，以達到最適合整體系統發展之政策，可透過建構雙層規劃模式進行研究。

綜觀以上文獻可看出將複合運輸應用於物流路網不僅能提高效率，若使用得當還能減緩運輸對環境的衝擊；此外，將外部成本納入考量會對原有的運送路線或方式產生影響，使運輸過程產生的外部效果降低，因此關於物流路網效率與永續發展的相關議題亦愈發受到重視。本研究擬以雙層規劃方法探討環境限制下之物流路網設計問題，期望能提出有效率且兼顧環境之運輸發展策略方向。



三、研究方法

本研究以雙層規劃方法來建構物流路網設計問題之模式，並加入環境限制式，最後針對此模式設計求解演算法。3.1節將介紹研究情境與假設，3.2節闡述研究架構，3.3節說明模式，3.4節解釋求解演算法。如何以雙層規劃方法建立模式，以及設計求解演算法的過程將在此章節說明。

3.1 情境說明與假設

3.1.1 情境說明

本研究主要以雙層規劃方法探討環境限制下的物流路網設計問題，換言之，即政府如何在成本最小的情況下降低路網碳排放量以符合減排目標。在雙層規劃方法之架構下，上層決策者在做決策時會參考下層業者之反應，而下層業者也會讓上層決策者知道其對政策之反應，使上層決策者在決策過程中考慮下層承攬業者的反應而調整政策內容，在顧及下層業者反應的情況下達成上層政府之目標，得到一項適切的路網改善政策，即為政府與業者雙方皆可接受之均衡解，以下分為上層政府及下層業者來做說明。

舉例來說，上層政府決策者有多項改善運輸問題的政策方案，例如改善港口處理容量(handling capacity)或是補貼特定港口的使用及外部成本內部化等。這些方案如何搭配能使政府投資港口及補貼使用特定港口之成本最小化、外部成本內部化之收益最大化即為上層目標，且在此方案組合下，整體路網碳排放量亦不超出排放上限，上述情形可視為上層決策者的問題。而下層的承攬業者的部分為路網指派問題，當政府實施不同的改善政策時，業者將會如何改變其原有的運輸服務，例如政府如何補貼業者使用綠色港口才可使貨櫃轉向使用綠色港口，或投資綠色港口之處理容量能否降低路網之碳排放量等。當政府實施改善政策，下層業者如何在成本最小的前提下完成運輸服務即為下層問題。

3.1.2 情境假設

本研究之情境假設條列如下：

1. 運送單一貨物，以20呎貨櫃(TEU) 為一單位
2. 供給量與需求量皆固定且已知
3. 進口貨櫃由國外港口以貨櫃船運至國內港口，再由國內港口以貨車運至國內縣市；出口貨櫃則反之
4. 國內港口（轉運港）不考慮貨櫃囤積
5. 在此假設各家貨運公司之資訊為流通且互享，因此下層業者間為不具競爭關係
6. 假設投資港口處理能力之成本為常數，而非規模經濟函數
7. 就路網特性而言，運輸成本較低的港口或複合運輸路線其環境成本可能較高；反之亦然

3.2 研究架構

本研究參考前述文獻進行模式建構，上層模式為政府領導者，其目的為在能符合環境限制的情況下，找到最小的路網改善成本，目標值為政府支出之港口投資成本及補貼成本及外部成本內部化之收入，決策變數為港口擴充之容量及港口補貼之金額，以及外部成本內部化之課稅比例，環境限制式則以 Sezto et al. (2012)提到的「環境容量限制」為基礎，設定整體路網之碳排放量上限；而下層模式則參考 Kim et al. (2008)來建構，為一承攬業者總運輸成本最小化之轉運問題，其目標值為運輸成本及外部成本內部化之環境成本，決策變數為貨櫃流量。此雙層規劃模式是以政府觀點來看，欲尋找在符合環境限制下之最小路網改善成本，即港口改善及補貼成本最小化，徵收之環境成本最大化；不同的投資、補貼或環境政策會使下層貨櫃流量產生變化，進而影響整體路網之碳排放量。此外，上層政府領導者在做決策時會參考下層使用者的反應來調整政策之擬定，期望能得到一組雙方的均衡解，即最適改善政策，使整體路網碳排放量低於規定的排放上限。研究架構圖如下圖 3.2-1 所示：



圖 3.2-1 研究架構圖

3.3 模式建構

上層模式為路網減排模式，而下層模式引自 Kim et al. (2008)，此文獻主要探討貨櫃在路網中的流動情形與運具選擇，例如火車與貨櫃車的選擇，但本研究主要探討上層政府實施之改善政策對下層貨櫃流動情形之影響，而非運具之轉移，且鐵路運輸在台灣已逐漸式微，故在此不討論複合運具選擇，將 Kim et al. (2008)之模式化簡為僅探討路網貨櫃流量之模式，作為本研究之下層模式。另外，下層模式為長期性的規劃模式，故不考慮承攬業者與航商間的互動，在此統稱下層業者或承攬業者。

3.3.1 雙層規劃模式之下層模式——運輸路網指派模式

運輸路網指派模式之符號說明如下：

集合

- I 國外港口
- J 國內港口
- K 國內縣市
- M 運輸運具， $m=\{1,2\}$ ，1 為貨車，2 為船

參數

- sf_i 由國外港口 i 送出的進口貨櫃量
- sd_k 由國內縣市 k 送出的出口貨櫃量
- df_i 由國外港口 i 接收的出口貨櫃量
- dd_k 由國內縣市 k 接收的進口貨櫃量
- b_j 國內港口 j 之港口容量
- c_{ij} 由節點 i 至節點 j 之運輸成本
- thc_j 國內港口 j 之場站處理費用 (NT\$/TEU)
- h 每單位時間內的存貨成本
- t_{ij} 由節點 i 至節點 j 之運送時間
- p_{ij} 由節點 i 至節點 j 之運送成本(NT\$/TEU-km)
- ec_{ij} 由節點 i 至節點 j 之環境成本
- l_{ij} 由節點 i 至節點 j 之運送距離 (km)
- a_p 二氧化碳之避免成本
- k_p 二氧化碳之排放係數
- u_f 燃料 f 之消耗量
- pe_j 使用港口 j 產生的碳排放量
- n^m 運具 m 的載貨容量
- v_{ij}^m 運輸運具 m 從 i 到 j 的運具數量

決策變數

SI_{ij} 由國外港口 i 到國內港口 j 的進口貨櫃量

SE_{ji} 從國內港口 j 到國外港口 i 的出口貨櫃量

DI_{jk} 由國內港口 j 到國內縣市 k 的進口貨櫃量

DE_{kj} 從國內縣市 k 到國內港口 j 的出口貨櫃量

VI_{jk}^m 運具 m 從國內港口 j 運送進口貨櫃量到國內縣市 k 的運具數量

VE_{kj}^m 運具 m 從國內縣市 k 運送出口貨櫃量到國內港口 j 的運具數量

由前述之研究架構建立雙層規劃模式之下層模式（運輸路網指派模式）如下：

$$\text{Min } L\text{Obj}(SI_{ij}, DE_{kj}, DI_{jk}, SE_{ji}) = TC(SI_{ij}, DE_{kj}, DI_{jk}, SE_{ji}) + EC(SI_{ij}, DE_{kj}, DI_{jk}, SE_{ji}) \quad (3.1)$$

s.t.

進口及出口貨櫃量限制式， Ω_1 ：

$$\sum_{j \in J} SI_{ij} = sf_i \quad \forall i \in I \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in J} DE_{kj} = sd_k \quad \forall k \in K \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in J} DI_{jk} = dd_k \quad \forall k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in J'} SE_{ji} = df_i \quad \forall i \in I \quad (3.5)$$

流量守恆限制式， Ω_2 ：

$$\sum_{i \in I} SI_{ij} = \sum_{k \in K} DI_{jk} \quad \forall j \in J \quad (3.6)$$

$$\sum_{k \in K} DE_{kj} = \sum_{i \in I} SE_{ji} \quad \forall j \in J \quad (3.7)$$

港口容量限制式， Ω_3 ：

$$\sum_{i \in I} (SI_{ij} + SE_{ji}) \leq b_j^0 \quad \forall j \in J \quad (3.8)$$

運具數量限制式， Ω_4 ：

$$DI_{jk} \leq n_1 \cdot VI_{jk}^1 \quad \forall j \in J, k \in K \quad (3.9)$$

$$DE_{kj} \leq n_1 \cdot VE_{kj}^1 \quad \forall j \in J, k \in K \quad (3.10)$$

$$SI_{ij} \leq n_2 \cdot VI_{ij}^2 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.11)$$

$$SE_{ji} \leq n_2 \cdot VI_{ji}^2 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.12)$$

$$VI_{jk}^1 \leq v_{jk}^1 \quad \forall j \in J, k \in K \quad (3.13)$$

$$VE_{kj}^1 \leq v_{kj}^1 \quad \forall j \in J, k \in K \quad (3.14)$$

$$VI_{ij}^2 \leq v_{ij}^2 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.15)$$

$$VE_{ji}^2 \leq v_{ji}^2 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.16)$$

非負限制式， Ω_5 ：

$$SI_{ij}, DE_{kj}, DI_{jk}, SE_{ji} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \text{ and } k \in K \quad (3.17)$$

$$VI_{jk}^1, VE_{kj}^1 \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K \quad (3.18)$$

$$VI_{ij}^2, VE_{ji}^2 \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.19)$$

運輸路網指派模式為一轉運問題(Transshipment problem)，其目標式為承攬業者之整體貨物運輸成本及外部成本內部化之環境成本最小化，如式(3.1)，其參數為各航線或路段之運輸成本，決策變數為經過各航線或路段之貨櫃流量。而總運輸成本 TC 之數學式如下式(3.20)所示，為各航線或路段之運輸成本乘以經過各航線或路段之貨櫃流量之總和。其中航運部分（由 i 至 j ）之各航線貨物運輸成本為場站處理費用、存貨成本、運送成本之總和，其數學式如下式(3.21)所示；而陸運部分（由 j 至 k ）則為存貨成本與運送成本之總和，由下式(3.22)所示。場站處理費用以每 TEU 為單位，不同港口收取不同的場站費用；存貨成本為每單位時間內的存貨成本乘以轉運時間，但因其所占比例較小，在此暫不考慮；而運送成本則為該路段上運送 1 TEU 所需之成本，計算方式為每 TEU-公里之運送成本 p_{ij} 乘以運送距離 l_{ij} 。

$$TC = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \cdot SI_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk} \cdot DI_{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_{ji} \cdot SE_{ji} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} c_{kj} \cdot DE_{kj} \quad (3.20)$$

$$c_{ij} = thc_j + h \cdot t_{ij} + l_{ij} \cdot p_{ij} \quad (3.21)$$

$$c_{jk} = h \cdot t_{ij} + l_{ij} \cdot p_{ij} \quad (3.22)$$

而環境成本之計算則由下式(3.23)所示，為各路段環境成本與該路段之貨櫃流量相乘之總和。路段環境成本是使用避免成本來計算，計算方式參考 Lee et al. (2010)及空氣汙染排放清冊(Air emissions inventory)，如下式(3.24)及式(3.25)所示。式(3.24)為航運船隻之環境成本，其中包含航行產生的環境成本及使用港口所產生的環境成本，計算方式是先將所有燃料 f 之使用量 u_f 與其產生之二氧化碳排放因子 k_{fp} 相乘後加總，再乘上兩點之距離 l_{ij} ，再加上使用港口 j 產生的碳排放量 pe_j ，得路段碳排放量，最後再乘以二氧化

碳避免成本 a_p 而得 ec_{ij} ；式(3.25)為陸運貨車之環境成本，計算方式是將兩點間之距離 l_{jk} 乘以二氧化碳的避免成本 a_p 及二氧化碳之排放係數 k_p 。

$$EC = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} ec_{ij} \cdot SI_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} ec_{jk} \cdot DI_{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} ec_{ji} \cdot SE_{ji} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} ec_{kj} \cdot DE_{kj} \quad (3.23)$$

$$[vessel+port] \quad ec_{ij} = a_p \cdot (l_{ij} \cdot (\sum_f u_f k_{fp}) + pe_j) \quad (3.24)$$

$$[truck] \quad ec_{jk} = a_p \cdot l_{jk} \cdot k_p \quad (3.25)$$

在限制式的部分可分為五類：進出口貨櫃量限制式 (Ω_1)、流量守恆限制式 (Ω_2)、港口容量限制式 (Ω_3)、運具數量限制式 (Ω_4)，及非負限制式 (Ω_5)。式(3.2)至式(3.5)屬 Ω_1 ，進口貨櫃量限制式表示所有由國外港口 i 到國內港口 j 的進口貨櫃量之總和等於國外港口供給的貨櫃總量，以及所有由國內港口 j 運送到國內縣市 k 之貨櫃量等於國內縣市需求之貨櫃總量；反之則為出口貨櫃量限制式。式(3.6)及式(3.7)為流量守恆限制式，式(3.6)表示所有由國外港口 i 運送到港口 j 的貨櫃量等於所有由國內港口 j 運送至國內縣市 k 之貨櫃量，用以確保所有由國外港口流入國內之貨櫃均送至需求之國內縣市，不滯留於國內港口，以符合轉運問題，由國內縣市 k 運送到港口 j 再送到國外港口 i 之式(3.7)亦然。式(3.8)為各國內港口之容量限制，使所有進出國內港口 j 之貨櫃量皆小於等於港口之服務容量水準，此服務容量將受上層變數影響。式(3.9)至式(3.16)為運具數量限制式，其中，式(3.9)至式(3.12)表示運送貨櫃所需的運具數量，此數量不超過式(3.13)至式(3.16)之運具數量上限。最後，式(3.17)至式(3.19)為非負限制式，確保所有路徑上之貨櫃流量均不會出現負值。

3.3.2 雙層規劃模式之上層模式——減碳政策模式

減碳政策模式之符號延用部分下層符號，新增之符號說明如下：

參數

$G_j(y_j)$	投資提高港口 j 之處理能力之投資成本 (NT\$/TEU)
e_{ij}	由節點 i 至節點 j 之碳排放量
cap	整體路網之碳排放量上限

決策變數

y_j	投資政策：投資港口 j 所增加之處理容量 (TEU)
z_j	補貼政策：使用港口 j 之補貼金額 (NT\$/TEU)
w	外部成本內部化之課稅比例

減碳政策模式建構及說明如下：

$$\text{Min } ULobj(y_j, z_j, w) = \sum_{j \in J} G_j(y_j) + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} SI_{ij} \cdot z_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} SE_{ji} \cdot z_j - w \cdot EC \quad (3.26)$$

s.t.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} e_{ij} \cdot SI_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} e_{jk} \cdot DI_{jk} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} e_{kj} \cdot DE_{kj} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} e_{ji} \cdot SE_{ji} \leq cap \quad (3.27)$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (3.28)$$

$$z_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (3.29)$$

$$0 \leq w \leq 1 \quad (3.30)$$

減碳政策模式主要探討如何改善路網現況，以使改善後之路網符合環境限制式。改善方式有三種，分別為投資擴充港口處理容量 y_j 、對特定港口實施補貼政策 z_j 以及調整外部成本內部化之課稅比例 w ，以使貨櫃流量轉移至適當的港口。政府如何在符合環境排放量限制的前提下投資改善港口處理容量或補貼使用特定港口，並使其成本最小化，及外部成本內部化之收入最大化即為上層問題。目標式為投資改善港口處理容量或補貼使用特定港口之成本最小化問題及外部成本內部化之收入最大化，如式(3.26)所示，計算方式為各港口投資成本及補貼成本之總和再扣除外部成本內部化之收入，其變數分別為 y_j 、 z_j 及 w ，表示投資港口 j 之處理容量使其可處理容量增加 y_j TEU，補貼使用港口 j 使送至港口 j 之貨櫃皆可補貼 z_j 元，以及將外部成本內部化之比例 w 。

限制式的部分，式(3.27)為整體路網之碳排放量上限，即為本研究之環境限制式。其中 cap 是由尚未實施任何改善政策時之整體路網排放量乘以政府預設欲降低之百分比而得，例如政府希望能減少整體路網碳排放量至原來路網碳排放量的 97%，將現況之路網排放量乘以 97% 即得排放量上限 cap 。式(3.28)及式(3.29)則為非負限制式，因 y_j 為港

口擴充之處理容量，因此需大於等於 0； z_j 為補貼之金額，因此亦大於等於 0。最後，外部成本內部化之課稅比例 w 在諸多文獻中均顯示其值介於 0 到 1 之間，故有式(3.30)。

因上層模式會導入其決策變數 y_j 、 z_j 及 w 至下層模式，對下層模式而言， y_j 、 z_j 及 w 為外生變數(exogenous variable)，下層變數 SI_{ij} 、 DE_{kj} 、 DI_{jk} 、 SE_{ji} 之均衡解將受外生變數影響，因 y_j 、 z_j 及 w 值之不同，可能產生不同 SI_{ij} 、 DE_{kj} 、 DI_{jk} 、 SE_{ji} 均衡解。下層模式中，受上層決策變數導入之影響的下層方程式為式(3.1)、式(3.8)及式(3.20)，分別由式(3.31)、式(3.32)及式(3.33)取代，完整的雙層規劃模式之數學模式如附錄二所示。

$$\begin{aligned} \text{Min } & L\text{Obj}(SI_{ij}(w, y_j, z_j), DE_{kj}(w, y_j, z_j), DI_{jk}(w, y_j, z_j), SE_{ji}(w, y_j, z_j)) \\ & = TC(SI_{ij}, DE_{kj}, DI_{jk}, SE_{ji}, z_j) + w \cdot EC(SI_{ij}, DE_{kj}, DI_{jk}, SE_{ji}) \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\sum_{i \in I} (SI_{ij} + SE_{ji}) \leq b_j^0 + y_j \quad \forall j \in J \quad (3.32)$$

$$TC = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (c_{ij} - z_j) \cdot SI_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk} \cdot DI_{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} (c_{ji} - z_j) \cdot SE_{ji} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} c_{kj} \cdot DE_{kj} \quad (3.33)$$

3.3.3 環境限制式

目前全球執行的環保機制有碳稅(Carbon tax)及碳排放交易(Cap-and-trade)，或是國家政府或國際公約所制定的排放上限等，目的無非是希望能減少溫室氣體或汙染物質的排放。因此本研究將以「限制碳排放量」做為環境限制式，設定一排放量上限為標準，在改善政策執行後可使整體路網之碳排放量低於此標準。環境限制式將以此形式納入雙層規劃模式之中，如前述上層之式(3.27)所示，整體路網的平均碳排放量為各路段之碳排放量(e_{ij} 、 e_{jk} 、 e_{ji} 及 e_{kj})乘以該路段之貨櫃量(SI_{ij} 、 DI_{jk} 、 SE_{ji} 及 DE_{kj})之總和；而上限基準 cap 通常由政府或國際公約制定，整體路網碳排放量上限在此以未實施任何改善政策前之總體碳排放量乘以一個目標百分比，例如政府希望能因實施改善政策減少整體路網碳排放量的 97%，因此將現況之路網排放量乘以 97%，得排放量上限 cap 。

3.4 求解演算法

本研究之雙層規劃問題屬於 Stackelberg 賽局，因此上層的決策者在研擬改善政策時，會參考下層業者的反應來修正上層變數，上層變數及下層變數間之關聯將以一反應函數表示。當上層給定一組政策時，會先求得反應函數，再以反應函數替換上層模式中的下層變數，接著進行求解，得到新的上層變數後再依前述方式繼續進行求解，直到上層變數符合收斂條件為止。本研究的下層模式為轉運問題，是線性規劃問題，故可以單行法 (Simplex Method) 進行求解；上層則欲以以敏感度為基礎之演算法 (Sensitivity Analysis-based algorithm, SAB) 尋找一收斂解，但因 SAB 法無法處理下層均衡解對上層變數之敏感度，因其為連續且不可微分函數，故針對此特性設計 Branch-SAB 法求解此模式，上下層模式之求解方式將在本節做更詳細的說明。

3.4.1 下層模式之演算法

下層模式為一系統最佳化之轉運問題，屬於線性規劃問題，有很多求解演算法可使用。本研究擬以單行法 (Simplex Method) 求解，其演算法流程圖如下：

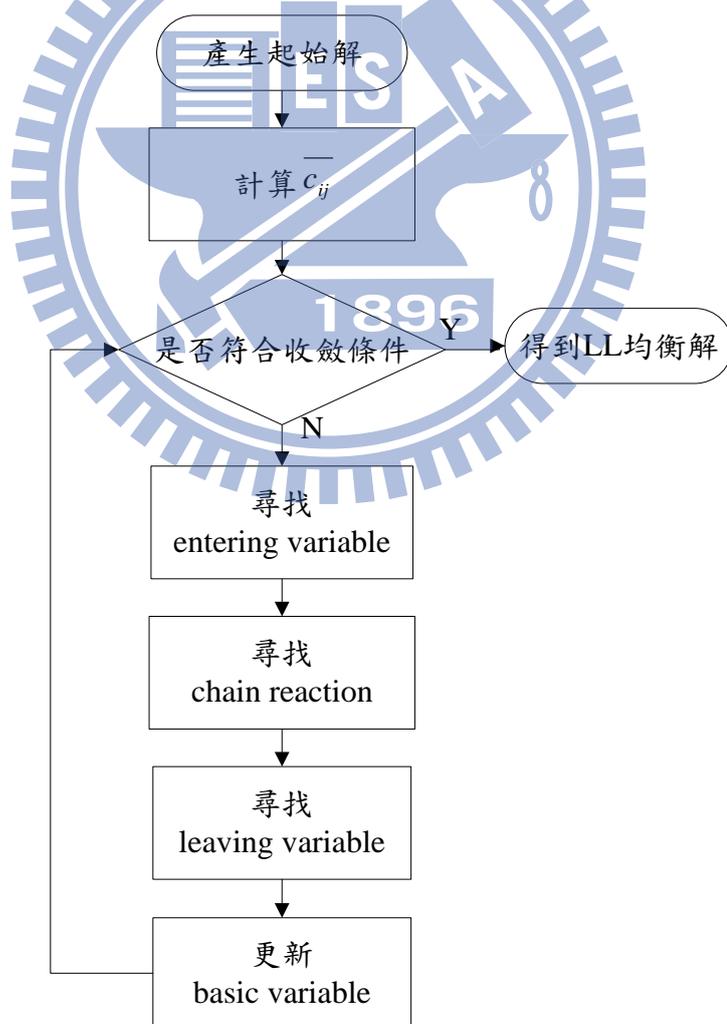


圖 3.4-1 下層演算法流程圖

下層求解過程依其流程圖運算，詳細步驟說明如下：

Step 1. 產生起始解

本研究以西北角法(Northwest Corner Rule)求得起始基變數(Basic variables)。

Step 2. 判斷是否符合停止條件

停止條件為 \bar{c}_{ij} 皆大於等於0。 \bar{c}_{ij} 為一路段上每增加1 TEU的貨櫃可減少之總成本，其計算方式為 $\bar{c}_{ij} = c_{ij} - y_i - y_j$ 。其中基變數的 $\bar{c}_{ij} = 0$ ，因此可計算出所有 y 值，最後再由 y 值求出非基變數(Non-basic variables)之 \bar{c}_{ij} 。當非基變數之 \bar{c}_{ij} 均大於等於0時，代表目前解為最佳解，因為不論加入哪一個非基變數至目前的基變數解中，皆無法使目標值更好。因此目前解是否已為最佳解由 \bar{c}_{ij} 之值來做判斷，若其值均大於等於0即為最佳解，若否則進入步驟3。

Step 3. 尋找進入基變數之非基變數

在 $\bar{c}_{ij} < 0$ 之非基變數中，選擇最小的進入基變數，因為它可以使總運輸成本下降最多。

Step 4. 尋找連鎖反應(Chain reaction)之迴圈

當新的基變數加入後，會產生一個連鎖反應，使反應鏈中之決策變數(流量)產生變化。

Step 5. 尋找離開基變數之基變數

在產生連鎖反應之反應鏈中，決策變數值(流量)最先降為0者即為離開基變數，成為非基變數。

Step 6. 更新基變數

因上述步驟3至步驟5產生一組新的基變數，因此更新基變數及決策變數值，接著再回到步驟2。

3.4.2 上層模式之演算法

首先以 Yang and Bell (1998) 所提出之 Sensitivity Analysis-based algorithm 求解上層問題，發現此法只在下層均衡解對上層變數之敏感度為連續且可微分之情況下可行，但本研究之下層均衡解對補貼變數之敏感度為連續但不可微分之函數，故無法使用。因此發展出一套混合型路網設計問題之求解演算法，稱之為 Branch-SAB 法。此法先以離散形式列舉補貼政策，再以 SAB 法求解 w 及 y_j 。以下先介紹 Sensitivity Analysis-based algorithm，接著說明 Branch-SAB 法之發展過程與步驟及流程。

3.4.2.1 演算法 1：SAB 法

本研究上層問題為政府如何在符合環境限制之前提下，得到一組改善成本最小化之改善政策。本研究先嘗試使用 SAB 法 (Sensitivity Analysis-based algorithm)，此方法是由 Yang and Bell (1998) 所提出，用以求解雙層規劃之模式。當上層實施不同改善政策時，下層將有不同反應，因本問題為 Stackelberg 賽局，因此上層在做決策時，會將下層的反應納入考量，兩者間的關係可透過敏感度分析而得，兩者間的反應函數 (Reaction function)，表示如下式 (3.34)。

$$\psi^n(\varphi) = \psi^n + \sum_{j \in J} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \varphi_j} \cdot (\varphi_j^{n+1} - \varphi_j^n) \right) \quad (3.34)$$

其中 ψ 代表下層變數之集合，表示下層模式中各節線的貨櫃流量； φ 代表上層變數之集合，表示上層決策者實施的一組改善政策，包含投資政策 y_j 、補貼政策 z_j 及外部成本內部化政策 w 。

$$\varphi = \{y_j, z_j, w, \forall j \in J\}$$

$$\psi = \{SI_{ij}^n, DI_{jk}^n, SE_{ji}^n, DE_{kj}^n, \forall i \in I, j \in J, k \in K\}$$

因為上層變數會影響下層變數的均衡解，所以下層變數的均衡解會對上層變數存在敏感度關係。在求解上層問題時，透過反應函數取代出現在上層模式中的下層均衡解 (SI_{ij} 、 DI_{jk} 及 SE_{ji} 、 DE_{kj})，此舉將使上層問題之目標式轉為非線性問題。因反應函數中已包含上下層變數間之敏感度，因此在求解上層問題的過程中，變動各上層變數對下層的影響亦已在考慮範圍之內。

求解得到新的上層變數後，判斷是否已達收斂條件，即此迴圈求得之上層目標值與前一迴圈求得之上層目標值差異是否小於 0.01，在若是則停止，得到一收斂解；若否，則將新的上層變數投入下層模式中求解下層變數，再依前述方式進行運算，直至達到收斂條件為止。

以 SAB 法求解之步驟如下，流程圖則如圖 3.4-2 所示：

Step 1. $n=0$ ，給定 $\varphi^0 = 0$ ， $\varphi = \{y_j, z_j, w, \forall j \in J\}$ 。

Step 2. 設定起始解 φ^n 。

Step 3. 以上層變數 φ^n 更新下層參數 b_j^n 、 TC^n 及 w^n ，如式(3.31)、式(3.32)及式(3.33)。

Step 4. 求解下層模式，如式(3.1)到式(3.19)，得 ψ^n ，

$$\psi = \{SI_{ij}^n, DI_{jk}^n, SE_{ji}^n, DE_{kj}^n, \forall i \in I, j \in J, k \in K\}。$$

Step 5. 計算上層變數與下層變數間的反應函數(Reaction function)，如上式(3.34)。

Step 6. 以反應函數替換上層問題中的下層變數，並求解上層問題，如式(3.26)到式(3.30)，得 φ^{n+1} 。

Step 7. 檢查是否已達收斂條件， $\varepsilon = 0.01$ ，若 $|ULobj^{n+1} - ULobj^n| \leq \varepsilon$ 則符合收斂條件，得到一組收斂解；若否，則使 $n \leftarrow n+1$ ，並回到 Step 3。



SAB 法之流程圖如下：

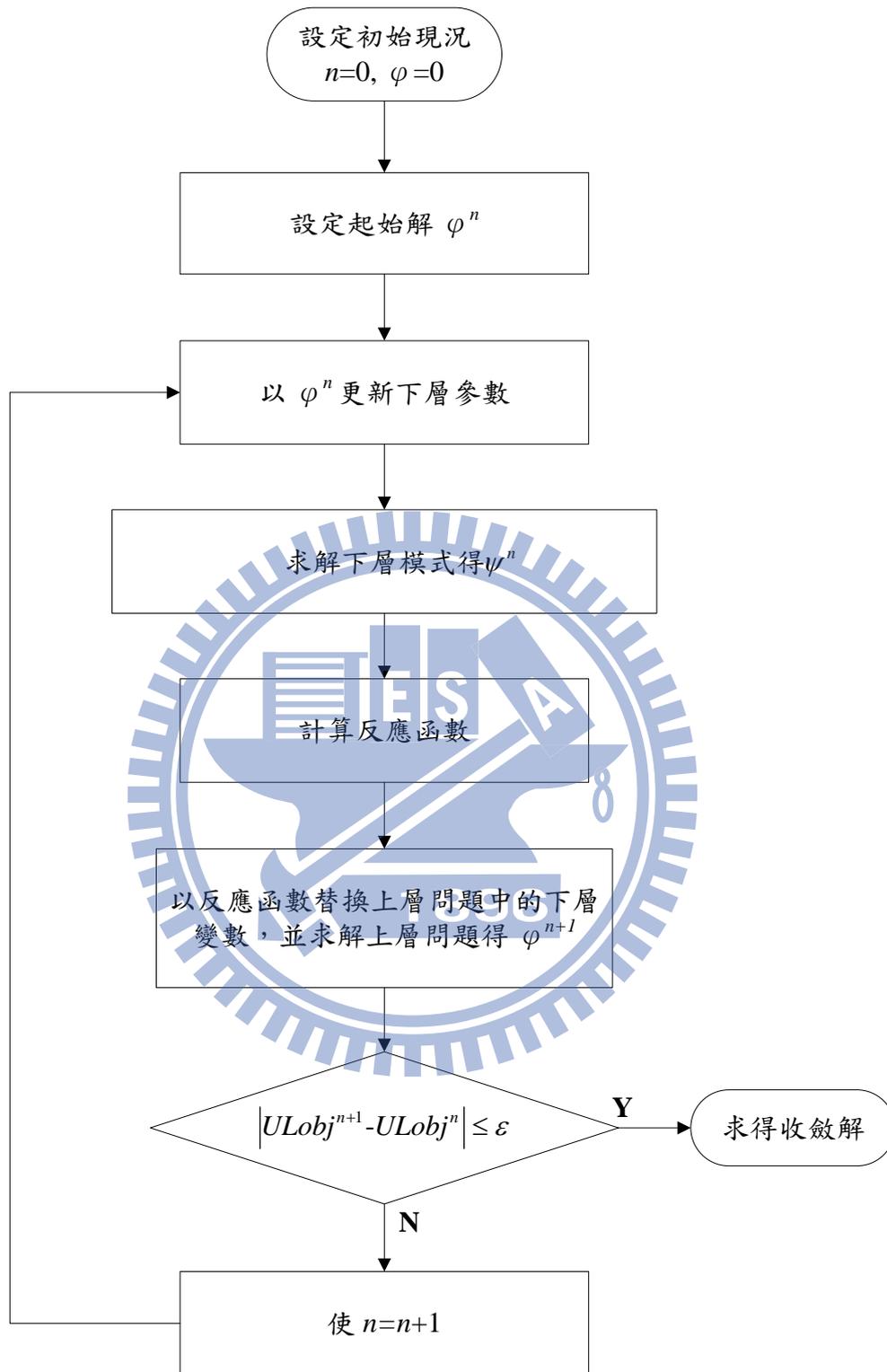


圖 3.4-2 SAB 法流程圖

然而，經測試後發現，SAB 法是設計於求解下層均衡解對上層變數之敏感度為連續且可微分之函數，而本研究的下層均衡解對補貼變數之敏感度為連續但不可微分之函數，導致 SAB 法於求解過程中無法收斂。

若政策方案涉及補貼，則無法以 SAB 法進行求解。起初以補貼特定港口為可行起始解去計算，此迴圈得到的結果顯示並不會繼續補貼該港口，而下個迴圈卻又顯示補貼該港口，再下一個迴圈又顯示不補貼該港口，以此規律交互變換，無法順利收斂，由下表 3.4-1 以 5 個迴圈展示之。

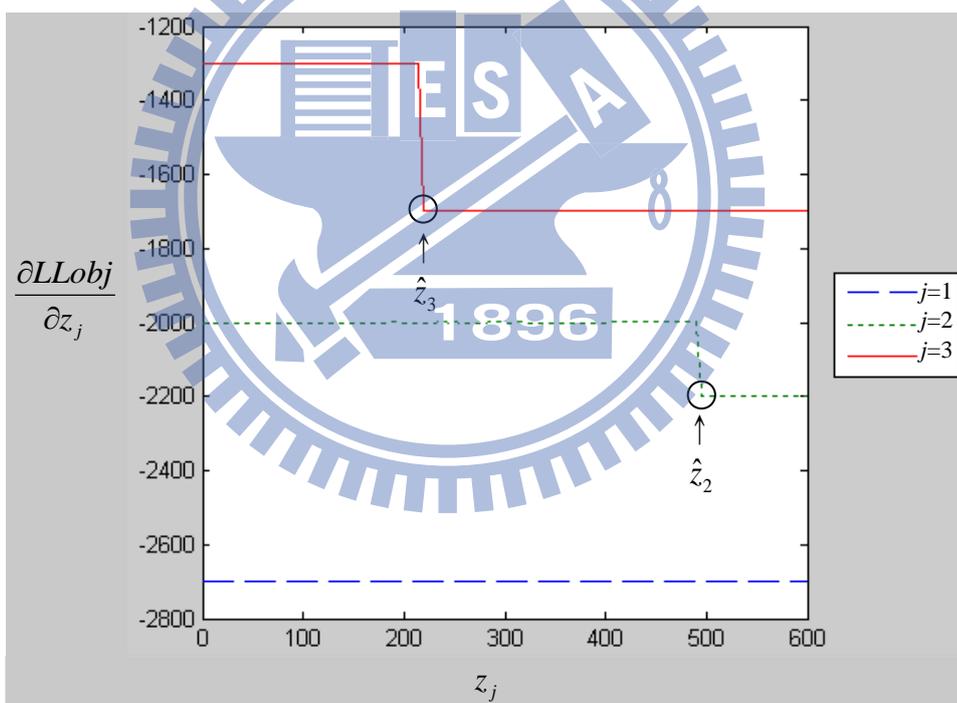
表 3.4-1 SAB 法求解過程無法收斂之範例

<i>n</i>	<i>y</i> ₁	<i>y</i> ₂	<i>y</i> ₃	<i>z</i> ₁	<i>z</i> ₂	<i>z</i> ₃	<i>w</i>	<i>L</i> Obj	<i>U</i> Obj	<i>emissions</i>
1	0	0	0	0	0	300	1	39418464.50	12535.50	637774999.99
2	0	0	0	0	0	0.00	1	39928024.34	-499024.32	639775000.00
3	0	0	0	0	0	51.77	1	39840447.00	-409447.00	637775000.00
4	0	0	0	0	0	0.00	1	39928024.49	-499024.49	639775000.00
5	0	0	0	0	0	51.78	1	39840447.00	-409447.00	637775000.00

會出現此無法收斂之情形主要是因為下層均衡解對上層之補貼變數 z_j 的敏感度為連續但不可微分之非平滑函數，以圖 3.4-3 來說明，橫軸為上層變數 z_j ，縱軸為下層目標值對上層變數 z_j 之敏感度。當圖中線段呈水平處，則表示下層均衡解對上層變數的敏感度為 0，代表上層變數的變化不會影響下層均衡解；線段中，產生階梯狀落差之處即代表下層目標值因補貼 z_j 而產生變化，因為下層貨櫃流量轉移至受補貼之港口，該處下層均衡解對上層變數的敏感度則不為 0，代表上層變數的改變將使下層均衡解產生變化。

由圖 3.4-3 可知，已達飽和之港口其線段將恆呈一水平線，未達飽和之港口才會出現階梯狀之圖形。此外，除非 z_j 剛好落在階梯狀處，否則下層均衡解對上層變數之敏感度皆為 0。若下層均衡解對上層變數的敏感度為 0，將在求解上層問題的過程中忽略補貼之效果，因而無法求得正確且收斂的結果，因此無法以傳統的 SAB 法處理補貼政策，需要修正演算法以求解本研究之問題。舉例來說，當補貼金額足以使貨櫃流量產生變化時，受補貼之港口將因成本較低而達到飽和，以至於在下一個迴圈顯示投資此港口而非補貼此港口，因而忽略前一迴圈補貼的作用，因此需修正演算法以確保補貼的效果不會被忽略。

由前述可知，最適補貼金額落在階梯狀處，令此處之 z_j 值為 \hat{z}_j 。當 $z_j < \hat{z}_j$ 時，貨櫃流量與原始狀況相同，無法降低路網碳排放量，亦不符合環境限制式；當 $z_j = \hat{z}_j$ 時，下層貨櫃流量恰好因特定港口受補貼而產生變化，可使路網碳排放量降低；當 $z_j > \hat{z}_j$ 時，下層貨櫃流量與 $z_j = \hat{z}_j$ 時相同，補貼金額越多則政府改善路網所需之成本越高，但效益相同，因此只要補貼 \hat{z}_j 即可以最低的成本促使貨櫃流量與原始情況不同，使路網碳排放量降低。換言之，要使下層貨櫃流量與原始情況不同，才可能使整體路網碳排放量產生變化以符合環境限制式。若要使貨櫃流量產生變化，則需補貼航商使用綠色港口，使航商由原先使用成本較低但碳排放量較高之港口轉而使用碳排放量較低之港口，因此須找到會使貨櫃流量產生變化之補貼金額 \hat{z}_j 。



註：橫軸為上層變數 z_j

縱軸為下層目標值對上層變數 z_j 之敏感度

單位：NT\$

圖 3.4-3 下層目標值對上層變數 z_j 之敏感度

不同 z_j 下之港口貨櫃通過量變化以 z_3 為例說明，下圖 3.4-4 之橫軸為 z_3 ，縱軸為各港口貨櫃通過量 pf_j ，此圖說明條列如下：

1. $0 \leq z_3 < \hat{z}_3$

$pf_1 = 2700, pf_2 = 2000, pf_3 = 1300$ ；

港口貨櫃通過量無變化，即代表下層均衡解不受 z_3 變化影響，維持不變，故下層均衡解對 z_3 之敏感度為 0。

2. $z_3 = \hat{z}_3 = 219$

$pf_1 = 2700, pf_2 = 1600, pf_3 = 1700$ ；

港口貨櫃通過量起變化，即代表下層均衡解受 z_3 影響，故當 z_3 在 \hat{z}_3 處，下層均衡解對 z_3 之敏感度不為 0。

3. $z_3 > \hat{z}_3$

pf_j 與 $z_3 = \hat{z}_3 = 219$ 時相同， $pf_1 = 2700, pf_2 = 1600, pf_3 = 1700$ ；

港口貨櫃通過量無變化，即代表下層均衡解不受 z_3 變化影響，維持不變，故下層均衡解對 z_3 之敏感度為 0。

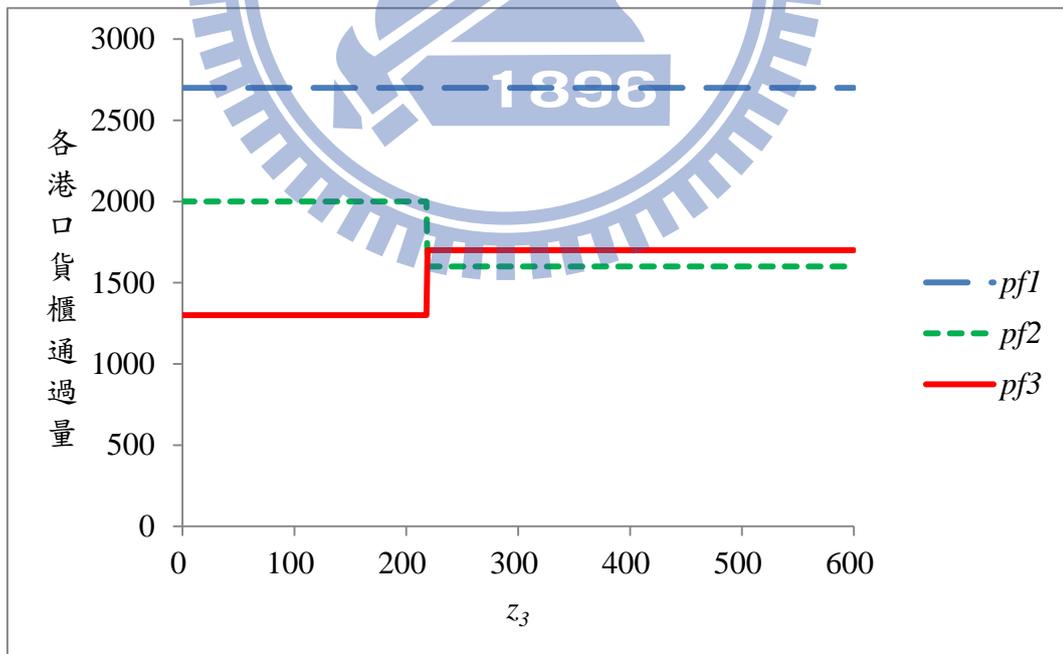


圖 3.4-4 上層變數 z_3 所對應之各港口貨櫃通過量

3.4.2.2 演算法 2：Branch-SAB 法

由前段可知，修正演算法的第一步為找到 \hat{z}_j 。因為下層均衡解對 \hat{z}_j 之函數為連續函數，可以漸進搜尋法(Incremental search method)求得 \hat{z}_j ，但漸進搜尋法收斂速度較慢，故本研究以二分法(Bisection Method)的概念來設計尋求 \hat{z}_j 之方法，稱之為 BS 法，因為此法為一項標準法，為避免變數太多造成混淆，故將 BS 法之說明及流程記於附錄三。若可求得 \hat{z}_j ，即可列舉出多項可使路網貨櫃流量產生變化之補貼政策 z_j ，再由這些補貼政策搭配投資政策 y_j 及 w ，組成最適路網改善政策。

因 SAB 法無法處理下層均衡解對補貼變數之敏感度為連續但不可微分之函數，故將求解方式由求解連續型路網設計問題的形態改為求解混合型路網設計問題之形態，設計合用的求解演算法，在此稱此演算法為 Branch-SAB 法。其與 SAB 法最大的差異在於，Branch-SAB 法是先以離散型之方式處理補貼政策 z_j ，再以求解連續型路網設計問題之 SAB 法求解投資政策 y_j ，而非皆以 SAB 法進行求解。因為補貼政策會影響貨櫃流量，整體路網之碳排放量亦受其影響，因此先決定補貼政策後，再規劃投資港口之處理容量。

由前述已知當 $z_j = \hat{z}_j$ 時，下層貨櫃流量將隨補貼政策產生變化，可能使路網碳排放量符合環境限制式，因此設法列舉出所有可使貨櫃流量產生變化之港口補貼政策，而受補貼之港口即為原始情況下未達飽和之港口，補貼金額則為 \hat{z}_j ，可由前述之 BS 法求得。列舉出多項補貼政策後，分別以這些補貼政策做為 SAB 法中 Step 2 之可行起始解，並以 SAB 法求解最適港口投資容量 y_j ，過程中須新增限制式 $z_j^n = z_j^1, \forall j \in J$ ，以維持補貼的效果，符合 SAB 法之收斂條件後判斷收斂解是否可行，若是，則將上下層模式之目標值及變數記錄下來；若否則將收斂解刪除。最後，在所有收斂且可行的結果中選擇路網改善成本（上層目標值）最低者做為最適改善政策，結束演算法。

列舉的方式為排列(permutation)，列舉出的補貼政策數量可以排列組合的方式計算，共有 $B = \sum_{r=0}^R P_r^R = \frac{R!}{(R-r)!}$ 個，其中 R 為原始情況下未達飽和之港口數量， r 為原始情況下未達飽和但目前已受補貼之港口數量。

列舉各種補貼政策之方法首先由原始情況開始，記錄下未達飽和之港口，各別以 BS 法尋找可使該港口達到飽和之補貼金額 \hat{z}_j ，以組成新的補貼政策。在這些新的補貼政策中，若有原始情況下未達飽和的港口其補貼金額仍為 0 者，則再度各別以 BS 法尋找可使該港口達到飽和之補貼金額 \hat{z}_j ，以組成新的補貼政策，直到所有原始情況下未達飽和的港口皆已受補貼為止。

以下舉例說明列舉出可使貨櫃流量產生變化之港口的過程。假設原始情況下未達飽和之港口有三個 (J1、J2 及 J3)，Branch-SAB 法產生的各方案組合可以樹狀圖表示如下圖 3.4-5。由原始情況起，依「原始情況未達飽和且補貼金額仍為 0 之港口」為分支基準，分別以 BS 法尋找這三個港口的補貼金額 \hat{z}_j ，組成三種補貼政策 (補貼政策 2 到補貼政策 4)；接著分別檢視這三種補貼政策是否還可分枝，發現各方案皆還有兩個港口符合分支基準，因此分別以這三種補貼政策為主，以 BS 法尋找符合分支基準之港口的補貼金額 \hat{z}_j ，總共可組成六種新的補貼政策 (補貼政策 5 到補貼政策 10)；再來會發現這六種補貼政策皆只剩一個港口符合分支基準，因此分別以這六種補貼政策為主，以 BS 法尋找符合分支基準之港口的補貼金額 \hat{z}_j ，總共又可組成六種新的補貼政策 (補貼政策 11 到補貼政策 16)；最後，因這六種補貼政策中，原始情況未達飽和之港口皆已受補貼，因此完成列舉。

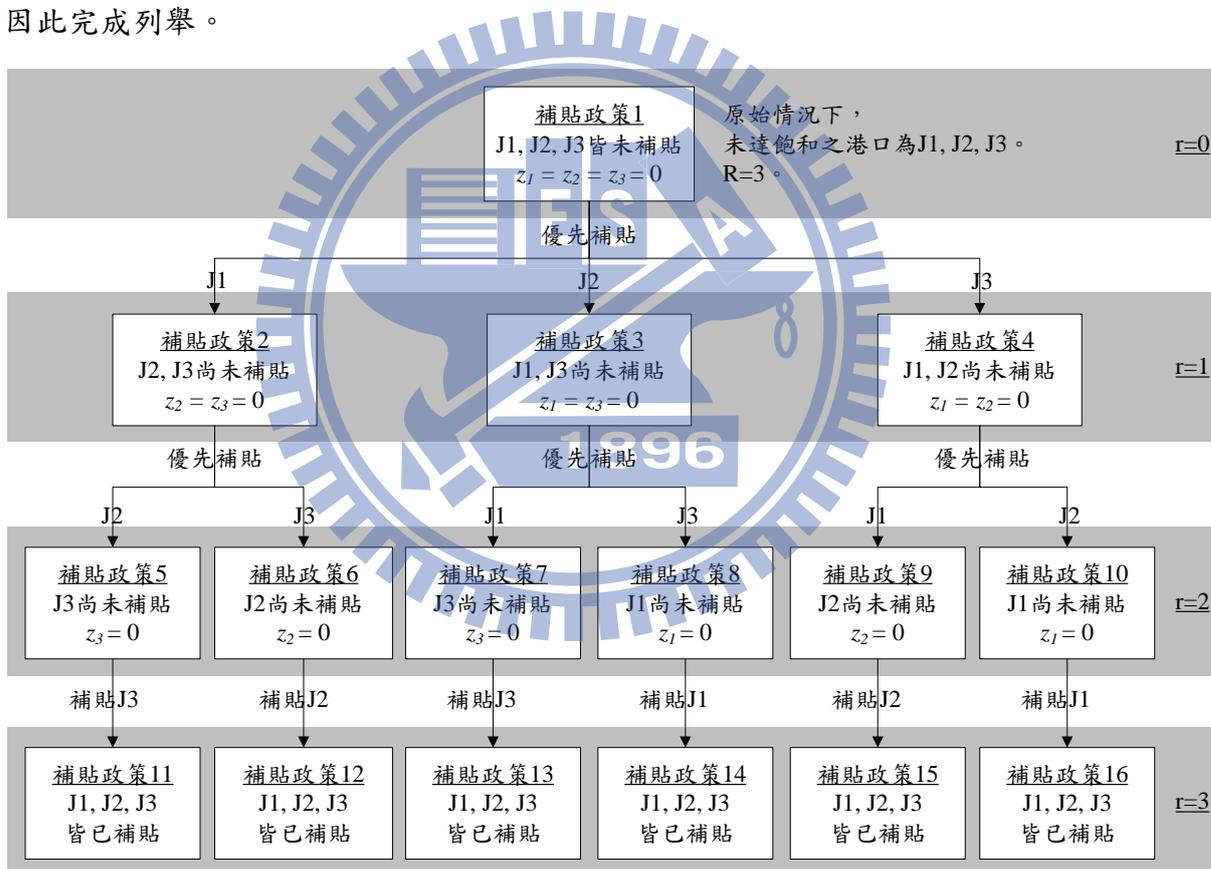


圖 3.4-5 列舉結果說明圖

前面說明 Branch-SAB 法之流程，其步驟條列如下：

Step 1. 計算原始路網情形

尚未實施任何改善政策，即上層變數皆為 0 時，求解運輸路網指派模式(下層問題)，可得到下層貨櫃流量情形，並計算各港口貨櫃通過量，記錄下未達飽和之港口。接著計算原始路網碳排放量 *emissions*，並制定減排目標 α ，將兩者相乘得路網碳排放量上限 *cap*。

Step 2. 列舉出可使貨櫃流量產生變化之港口補貼政策

Step 2.1. 計算原始情況下未達飽和之港口數量為 R 。一項補貼政策中，原始情況下未達飽和之港口中目前已受補貼之港口數量為 r 。此時 $r=0$ ，即不補貼任何原始情況下未達飽和之港口，也是一種補貼政策。

Step 2.2. 判斷目前得到的 P_r^R 項補貼政策中，原始情況下未達飽和之港口是否皆已受補貼，即 r 是否為 R ？若是，擇進入 *Step 3*；若否，則進入 *Step 2.3*。

Step 2.3. 使 $r=r+1$ ，並分別以 BS 法求出其補貼金額，各別組成新的 P_r^R 項補貼政策，再回到 *Step 2.2*。

Step 3. 求解連續型路網設計問題

分別將前一步驟得到的 B 項補貼政策做為 SAB 法中 *Step 2* 的起始解 φ^n ，依 SAB 法之步驟求解最適投資變數 y_j 及外部成本內部化之比例 w 。但在 SAB 法的 *Step 6* 中，需增設限制式 $z_j^n = z_j^1$ ，用來固定補貼金額及效果。達收斂條件後判斷此解是否為可行解？若是，則將結果記錄於候選改善政策集合 C ；若否，則將此結果刪除。依此規則運算，直到所有補貼政策皆經運算為止。

Step 4. 得到最適方案

從候選改善政策集合 C 中，選擇改善成本（上層目標值）最小者做為最適政策，即得到最適之路網改善政策，結束求解演算法。若 C 為空集合，則無解。

若以圖解的方式說明，則可將 *Step 2* 解釋為列出下層模式之角點 (corner point) 的補貼政策，而 *Step 3* 則表示將各補貼政策與投資政策結合成改善政策後，加入上層環境限制式，限縮可行解區域，而落在此區域內之下層模式角點即為可符合環境限制式之貨櫃流動情形，而可使貨櫃流量符合環境限制式之改善政策即為候選路網改善政策。

下層模式為線性規劃問題，以單行法求解可順利收斂；上層模式是否收斂則以此次遞迴所得之上層目標值與前一次遞迴所得之目標值之差是否小於特定誤差值 ε 來判定。

Branch-SAB 法之流程圖如下：

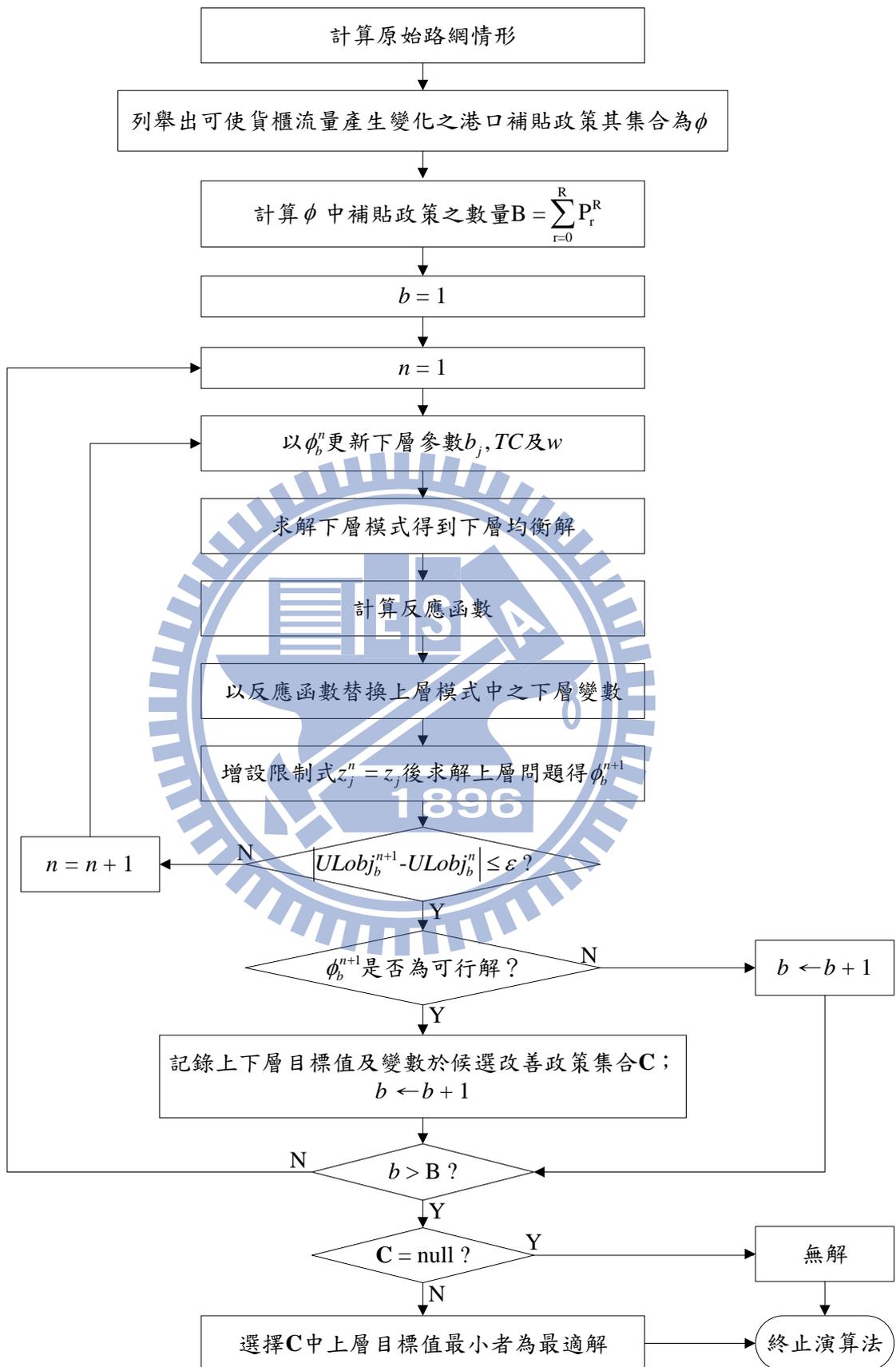


圖 3.4-6 Branch-SAB 法流程圖

3.5 小結

本研究以雙層規劃方法建構物流路網設計問題之模式，上層問題為減碳政策模式，下層問題為運輸路網指派模式。上層政府決策者期望透過改善政策降低路網碳排放量，下層物流承攬業者則在成本最小化的前提下完成運送服務。上層政府決策者在做決策時會參考下層物流業者對改善政策的反應，而下層業者也會將其對政策的反應回饋給上層決策者，兩者間之關係為主從賽局。

上層減碳政策模式之目標式為路網改善成本最小化，限制式則為整體路網碳排放量限制式、外部成本內部化之課稅比例不大於 1 及非負限制式，決策變數為改善政策：投資提高港口 j 之處理容量 y_j 、補貼使用港口 j 之補貼金額 z_j 、外部成本內部化之課稅比例 w ；下層運輸路網指派模式擇參考 Kim et al. (2008)，目標式為總運輸成本及外部成本內部化之環境成本最小化，限制式為進出口貨櫃量限制式、流量守恆限制式、港口容量限制式、運具數量限制式、非負限制式，變數為各節點間之貨櫃流量。

本研究先以 Yang and Bell (1998) 所提出之 Sensitivity Analysis-based algorithm 求解上層問題，此法可以敏感度的方式將下層均衡解對上層政策的反應回饋至上層，因此在求解上層問題時即包含考量下層的反應，透過數次遞迴得到上層及下層之均衡解。然而此法只在下層均衡解對上層變數之敏感度為連續且可微分之情況下可行，但本研究之下層均衡解對補貼變數 z_j 之敏感度為連續但不可微分之函數，故發展 Branch-SAB 法來處理此問題。

Branch-SAB 法是先求解以離散型式列舉出各種補貼政策後，才由 SAB 法的 Step 2 開始求解連續型之投資政策變數 y_j 。列舉主要是針對原始情況下未達飽和之港口，由皆不補貼這些港口開始做樹狀分支，以「原始情況未達飽和且仍未受補貼之港口」為分支基準，一次補貼一個港口形成新的補貼政策，再判斷這些新的補貼政策是否符合分支基準，直到所有最新的政策皆不符合分支基準為止。列舉過程中求解各港口之最適補貼金額 \hat{z}_j ，則是採用附錄三所示之 BS 法。列舉完成後分別以列舉出的補貼政策做為 SAB 法之起始解求解 w 及 y_j ，過程中需將補貼金額固定為其開始求解投資政策變數 y_j 時的狀態 ($z_j^n = z_j^1$)，以維持補貼之效果。當所有列舉出的補貼政策皆已運算、收斂後，選擇可行且目標值最小者做為最適改善政策，結束演算法。

四、數值分析

本章節將說明測試範例及分析結果。首先以一範例進行測試，求解流程如前一章節之說明，求解演算法建立於 MATLAB 的運算平台上（使用版本 7.14）。接著調整減排目標，測試不同情境下之結果，用以推論模式特性。

4.1 問題描述

此範例路網由兩個國外港口（ I_1 、 I_2 ）、三個國內港口（ J_1 、 J_2 及 J_3 ）及四個國內縣市（ K_1 、 K_2 、 K_3 及 K_4 ）組成，貨櫃由 I 經 J 至 K 或由 K 經 J 至 I，物流路網如下圖 4.1-1。其中，國內港口 J 皆為轉運港，即貨櫃不滯留於此，而國內港口 J 之使用成本由高至低排序為 J_1 至 J_3 ，使用港口所產生之碳排放量由高至低排序則為 J_3 至 J_1 。相關參數設定如下所示，符號可參閱附錄一。

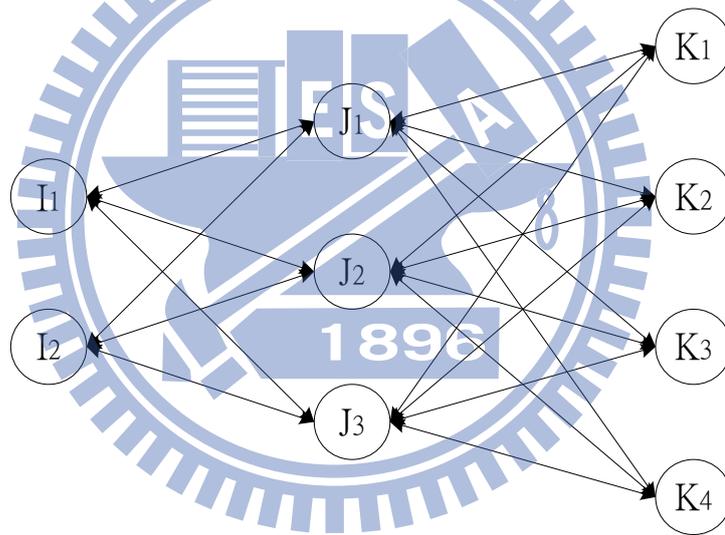


圖 4.1-1 物流路網示意圖

路網範例之參數如下：

$$i \in I, I = \{1, 2\}; \quad j \in J, J = \{1, 2, 3\}; \quad k \in K, K = \{1, 2, 3, 4\};$$

$$sf_i = \{1000, 2000\}; \quad (TEU)$$

$$dd_k = \{700, 900, 800, 600\}; \quad (TEU)$$

$$df_i = \{2000, 1000\} \quad (TEU)$$

$$sd_k = \{600, 800, 900, 700\} \quad (TEU)$$

$$b_j = \{2700, 2200, 1700\}; \quad (TEU)$$

$$thc_j = \{5, 10, 15\}; \quad (NT\$/TEU)$$

$$p_{ij} = 25; \quad (NT\$/TEU\text{-}km)$$

$$l_{ij} = \begin{bmatrix} 50 & 100 & 150 \\ 180 & 150 & 120 \end{bmatrix}, l_{ji} = l_{ij} \quad \forall i, j \quad (km)$$

$$l_{jk} = \begin{bmatrix} 100 & 120 & 190 & 270 \\ 140 & 90 & 170 & 200 \\ 180 & 140 & 210 & 170 \end{bmatrix}, l_{kj} = l_{jk} \quad \forall j, k \quad (km)$$

$$c_{ij} = \begin{bmatrix} 1255 & 2510 & 3765 \\ 4505 & 3760 & 3015 \end{bmatrix}, c_{ji} = c_{ij} \quad \forall i, j \quad (NT\$/TEU)$$

$$c_{jk} = \begin{bmatrix} 2500 & 3000 & 4750 & 6750 \\ 3500 & 2250 & 4250 & 5000 \\ 4500 & 3500 & 5250 & 4250 \end{bmatrix}, c_{kj} = c_{jk} \quad \forall j, k \quad (NT\$/TEU)$$

$$a_p = 0.00078; \quad (NT\$/g)$$

$$k_p = 277; \quad (g/TEU\text{-}km)$$

$$e_{ij} = \begin{bmatrix} 83850 & 77700 & 42050 \\ 119860 & 91550 & 33740 \end{bmatrix}, e_{ji} = e_{ij} \quad \forall i, j \quad (g/TEU)$$

$$e_{jk} = \begin{bmatrix} 27700 & 33240 & 52630 & 74790 \\ 38780 & 24930 & 47090 & 55400 \\ 49860 & 38780 & 58170 & 47090 \end{bmatrix}, e_{kj} = e_{jk} \quad \forall j, k \quad (g/TEU)$$

$$ec_{ij} = \begin{bmatrix} 65.40 & 60.61 & 32.80 \\ 93.49 & 71.41 & 26.32 \end{bmatrix}, ec_{ji} = ec_{ij} \quad \forall i, j \quad (NT\$/TEU)$$

$$ec_{jk} = \begin{bmatrix} 21.61 & 25.93 & 41.05 & 58.34 \\ 30.25 & 19.45 & 36.73 & 43.21 \\ 38.89 & 30.25 & 45.37 & 36.73 \end{bmatrix}, ec_{kj} = ec_{jk} \quad \forall j, k \quad (NT\$/TEU)$$

$$G_j(y_j) = \{5000y_1, 10000y_2, 15000y_3\}; \quad (NT\$/TEU)$$

$$\alpha = 0.97;$$

$$cap = 656857810.01 \quad (g)$$

$$\varepsilon = 0.01;$$

4.2 求解過程與結果

4.2.1 求解過程

Step 1. 計算原始路網情形

當 $\varphi^0 = 0$ ，港口貨櫃通過量 $pf_j = \{2700, 2000, 1300\}$ ， $b_j = \{2700, 2200, 1700\}$ ，

港口 J1 已達飽和，未達飽和之港口為 J2 及 J3。

路網碳排放量 $emissions = 677173000.06$ ，減排目標 $\alpha = 0.97$ ， $cap = 656857810.01$ 。

Step 2. 列舉出可使貨櫃流量產生變化之港口補貼政策

Step 2.1. J1 已達飽和，未達飽和之港口為 J2 及 J3，因此 $R=2$ 。未補貼 J2 及 J3 為補貼政策 1，故 $r=0$ 。

Step 2.2. 補貼政策 1 之 $r=0$ ，因此進入 Step 2.3

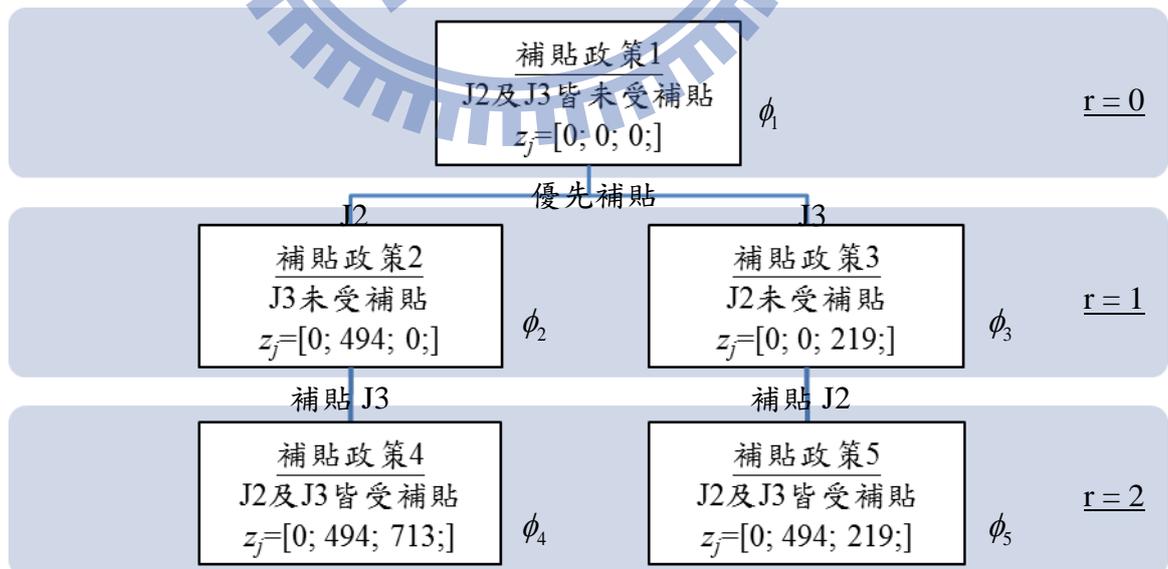
Step 2.3. $r=1$ ，以 BS 法求出 $\hat{z}_2 = 494$ 而 $\hat{z}_3 = 219$ ，分別組成 $P_r^R = 2$ 項補貼政策，令其為補貼政策 2 及補貼政策 3，再回到 Step 2.2。

Step 2.2. 補貼政策 2 及補貼政策 3 之 $r=1$ ，因此進入 Step 2.3

Step 2.3. $r=2$ ，以 BS 法求出 $\hat{z}_3 = 713$ 而 $\hat{z}_2 = 494$ ，分別組成 $P_r^R = 2$ 項補貼政策，令其為補貼政策 4 及補貼政策 5，再回到 Step 2.2。

Step 2.2. 補貼政策 4 及補貼政策 5 之 $r=2 = R$ ，因此進入 Step 3。

完成 Step 2 之過程與結果可以下圖呈現：



各補貼政策之說明條列如下：

- 補貼政策 1 ϕ_1 ：不補貼 J2 及 J3。
 - ◆ 補貼政策 2 ϕ_2 ：繼 ϕ_1 之後，優先補貼 J2。以 BS 法求得 $\hat{z}_2 = 494$
 - 補貼政策 4 ϕ_4 ：繼 ϕ_2 之後，補貼 J3。以 BS 法求得 $\hat{z}_3 = 713$
 - ◆ 補貼政策 3 ϕ_3 ：繼 ϕ_1 之後，優先補貼 J3。以 BS 法求得 $\hat{z}_3 = 219$
 - 補貼政策 5 ϕ_5 ：繼 ϕ_3 之後，補貼 J2。以 BS 法求得 $\hat{z}_2 = 494$

Step 3. 求解連續型路網設計問題

由前步驟得 $B = \sum_{r=0}^{R-2} P_r^R = 5$ 種補貼政策 ϕ_b ，其組成之起始改善政策 $\phi_b^{n=1}$ 如下：

1. $\phi_1^1 = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$
2. $\phi_2^1 = \{0, 0, 0, 0, 494, 0, 0\}$
3. $\phi_3^1 = \{0, 0, 0, 0, 0, 219, 0\}$
4. $\phi_4^1 = \{0, 0, 0, 0, 494, 713, 0\}$
5. $\phi_5^1 = \{0, 0, 0, 0, 494, 219, 0\}$

分別以 ϕ_1^1 至 ϕ_5^1 做為 SAB 法中 Step 2 的 ϕ^n 求解最適改善政策，將收斂但不可行者 ϕ_1^1 、 ϕ_2^1 及 ϕ_5^1 刪除；收斂且可行者之求解過程與結果如下表 4.2-1。其中只有 ϕ_3^1 及 ϕ_4^1 為可符合上層限制式之結果，將其放入候選改善政策集合 C 中。

表 4.2-1 候選改善政策之求解過程與結果

b	n	y ₁	y ₂	y ₃	z ₁	z ₂	z ₃	w	LL_TC	LL_wEC	LLobj	emissions	ULobj
1	0	0	0.00	0	0	219	0	0	34743300	0	34743300	677173000	284700.00
2	0	0	0.00	0	0	219	1	0	34757700	513615	35271315	658481000	-141314.62
3	3	0	34.74	0	0	219	1	0	34758950	512349	35271300	656857811	388590.17
4	0	0	34.74	0	0	219	1	0	34758950	512349	35271299	656857810	388591.10
5	0	0	34.74	0	0	219	1	0	34758950	512349	35271299	656857810	388591.10
4	1	0	0	0	494	713	0	0	33113100	0	33113100	677172999	1914900.01
	2	0	0	0	494	713	1	0	33129700	511359	33641059	655589000	1914900.01

Step 4. 得到最適改善政策

從 C 中選擇改善成本（上層目標值）最小者做為最適政策。由上表可看出，以 ϕ_3 為起始解所得到的 ULobj 最小，如上表中之粗體所示，因此選 $\phi_3^{n=5} = \{0, 0, 34.74, 0, 0, 219, 1\}$ 做為最適改善政策，終止演算法。換句話說，此範例結果顯示，若欲使路網碳排放量降低至原來的 97%，除需實施外部成本內部化之外，亦需補貼使用港口 J3 之貨櫃 NT\$219/TEU，並投資港口 J3 之處理容量 34.74 TEU。

將原始情況與實施最適政策後的情況整理如表 4.2-2，由此表可知，改善政策為投資港口 J3 之處理容量 34.74TEU、使用港口 J3 之貨櫃 NT\$ 219/TEU 並實施外部成本內部化 $w=1$ 。實施改善政策後，上層目標值會提高，下層目標值及路網碳排放量降低，改善政策實施前後之對照表如下：

表 4.2-2 改善政策實施前後對照表

	原始情況	實施改善政策後之情況
UL	$y_j = \{0, 0, 0\}$ $z_j = \{0, 0, 0\}$ $w = 0$ $ULobj = 0$	$y_j = \{0, 0, 34.74\}$ $z_j = \{0, 0, 219\}$ $w = 1$ $ULobj = 388591.10$
LL	$pf_j = \{2700, 2000, 1300\}$ $b_j = \{2700, 2200, 1700\}$ $LLobj = 35556195$ $emissions = 677173000$	$pf_j = \{2700, 1562.26, 1734.74\}$ $b_j = \{2700, 2200, 1734.74\}$ $LLobj = 35271299$ $emissions = 656857810$

4.2.2 結果說明

原始尚未實施任何改善政策時，整體路網所產生之碳排放量為 677.173 公噸，排放上限為原始路網碳排放量的 97%，因此排放上限 cap 為 656.858 公噸。原始情況下，港口 J1 之容量達到飽和，因 J1 之使用成本較低，反之亦較不為環保；而港口 J2 及 J3 未達飽和，因其使用成本相對較高，但卻較為環保。

為使整體路網碳排放量降低，政府須鼓勵業者使用較環保的港口，因此列舉出五種補貼港口 J2 及 J3 的補貼政策，期望透過補貼政策使原先使用較不環保的港口的貨櫃轉移至綠色港口，以達成減排目標。

將這五種改善政策做為 SAB 法之起始解進行求解，得到收斂且可行的結果只有改善政策 3 $\phi_3^{n=5} = \{0, 0, 34.74, 0, 0, 219, 1\}$ 及改善政策 4 $\phi_4^{n=2} = \{0, 0, 0, 0, 494, 713, 1\}$ ，其中最適改善政策為 $\phi_3^{n=5} = \{0, 0, 34.74, 0, 0, 219, 1\}$ ，因其可以較低的改善成本達成減排目標。

實施改善政策 3 即表示政府扣掉外部成本內部化的收入，須支出約 388591 元，補貼業者使用港口 J3 之貨櫃 NT\$219/TEU，並投資港口 J3，增加其處理容量約 34.74 TEU，此舉將使原先使用港口 J2 之貨櫃轉而使用較為環保的港口 J3，恰可使碳排放量降至 656.858 公噸；而下層的環境成本也將因碳排放量的減少而下降，運輸成本則因受政府補貼而降低，不僅可使路網碳排放量符合減排目標，亦可使下層業者因此受惠。實施改善政策 4 則表示政府扣掉外部成本內部化的收入，須支出約 1914900 元，補貼業者使用港口 J2 之貨櫃 NT\$ 494/TEU，以及補貼使用港口 J3 之貨櫃 NT\$ 713/TEU，貨櫃因此分別由港口 J1 及 J2 轉移 200 TEU 至港口 J3，使路網碳排放量降至 655.589 公噸；而下層的環境成本也將因碳排放量的減少而下降，運輸成本則因受政府補貼而降低，雖然可使

路網碳排放量低於減排目標，但所需的改善成本高於改善政策 3，故選擇改善政策 3 做為最適改善政策。

對上層政府而言，因收取外部成本可增加收入，用以實施其他路網改善政策，如補貼及投資港口 J3；但對下層業者而言，因為外部成本所佔比例較低，路段間的競爭力並不會因為收取外部成本而產生變化，因此收取外部成本不會影響下層貨櫃流量。使貨櫃流量產生變化之主因為補貼港口 J3，此舉使得部分原先使用港口 J2 之貨櫃轉而使用碳排放量較低的港口 J3，整體路網碳排放量因而降低。補貼港口 J3 後，欲轉移至 J3 之貨櫃數量超出其容量上限，且降低之碳排放量仍未達成減排目標，因此須投資其處理容量，使更多貨櫃能使用港口 J3，以符合環境限制式。



4.3 減排目標之相關分析

本節主要探討不同的參數設定對結果之影響，首先是上層政府所制定的減排目標 α 對下層運輸成本及環境成本之影響，再來為政府制定減排目標 α 對上層目標值及下層目標值之影響。若政府設定不同減排目標 α ，所產生之改善政策結果亦有所不同，可參見表4.3-1。

4.3.1 減排目標 α 與運輸成本及環境成本之關係

以改善政策可達成的最大減碳目標為原路網碳排放量之0.9612，即當 $\alpha < 0.9612$ 則無法以改善政策達成減排目標。當減碳目標 α 介於0.9612到1之間，其與運輸成本 TC 及環境成本 EC 間的關係如下圖4.3-1，橫軸為政府設定之減排目標 α ，主縱軸為下層路網完成運輸服務所需之運輸成本，副縱軸為下層路網完成運輸服務所產生之環境成本。

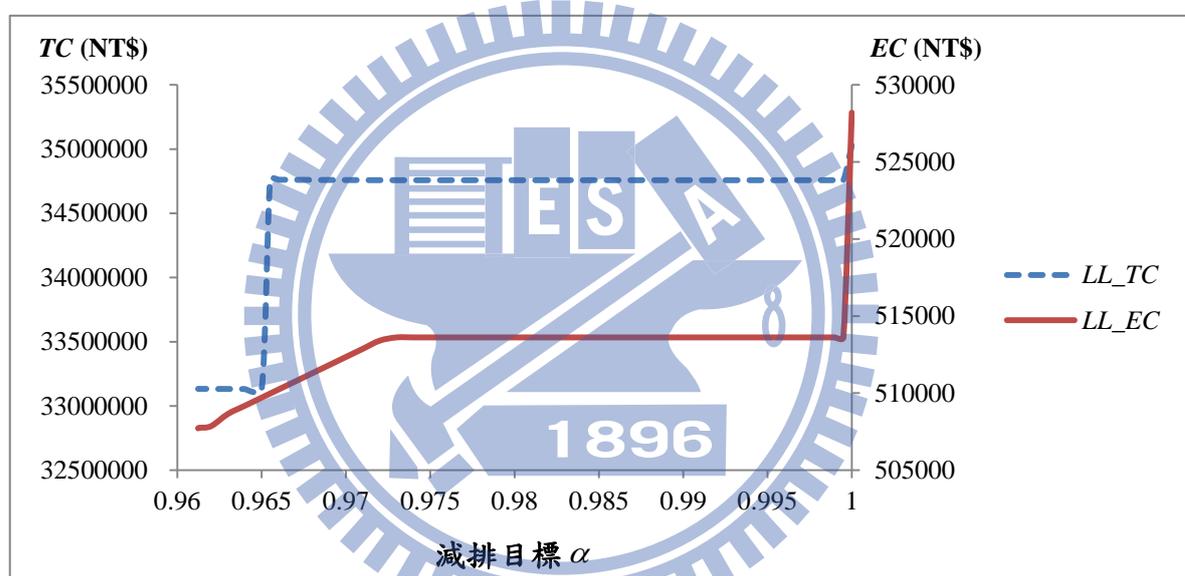


圖 4.3-1 α 對運輸成本及環境成本之影響

路網碳排放量上限 cap 隨著減排目標 α 遞減，環境成本 EC 理當亦隨之遞減，但在本範例中，當 α 大於0.973時，只要補貼港口J3即可符合環境限制式，且對政府而言，此舉為成本最低之改善政策，其他改善政策不是無法達成減排目標就是成本高於此最適政策。因此，當 α 介於1與0.973之間時，環境成本維持不變而非遞減，而運輸成本則因僅補貼港口J3的情況下，貨櫃在路網流動的情形相同，因此這段範圍內的 TC 不變。

當 α 小於0.973時，只補貼港口J3已無法滿足環境限制，需要實施投資政策使綠色港口的處理能力提高才能符合環境限制，因此整體路網所產生的環境成本開始隨著 α 逐漸遞減，但 TC 則因港口J3的使用成本較高而略為提高。當 α 小於0.965時，補貼政策會由原先僅補貼港口J3，轉變成補貼港口J2及港口J3，因此該處之運輸成本大幅下降。當 $0.9612 \leq \alpha \leq 0.965$ 時， TC 因港口J3的使用成本仍略高而微幅增加，但其增加幅度小於 EC 減少之幅度。

4.3.2 減排目標 α 與上下層目標值間之關係

政府須以不同政策來達成減排目標，隨著政策內容的改變，改善路網所需之成本亦有所不同；同時，下層業者也會因應政府政策來調整港口及航線的選擇，以完成運輸服務，因此下層目標值也將隨之改變。當減碳目標 α 介於0.9612到1之間，其與上層目標值 $ULobj$ 及下層目標值 $LLobj$ 間的關係如下圖4.3-2，橫軸為政府設定之減排目標 α ，主縱軸為上層目標值 $ULobj$ ，副縱軸為下層目標值 $LLobj$ 。

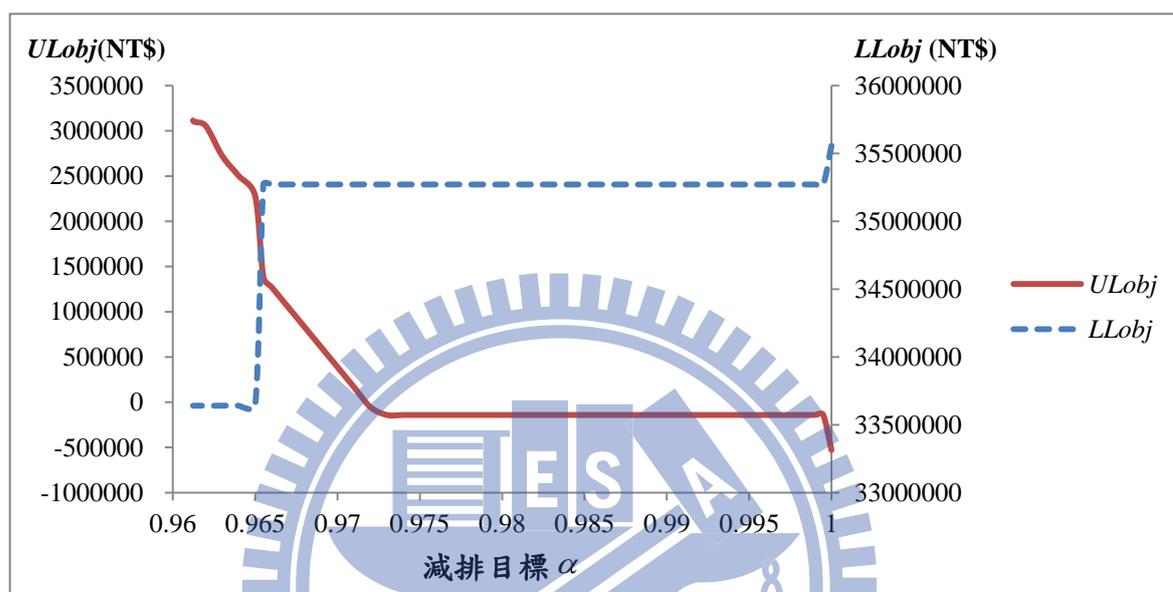


圖 4.3-2 α 對上層目標值及下層目標值之影響

起初 α 等於1時，政府只實施外部成本內部化，可使上層政府有收入而無支出。當 α 介於1與0.973之間時，政府實施補貼政策因而產生支出，故上層目標值增加，但仍不至於使政府支出大於收入，因此仍為負值，將外部成本內部化之收入減去實施補貼政策的支出還剩約141310元。當 α 小於0.973時，只補貼港口J3已無法滿足環境限制，於是政府開始投資綠色港口之處理能力，使得支出再度攀升，且支出已超出收取外部成本內部化的收入，因此上層目標值轉為正值，爾後支出便隨投資政策逐漸提高。最後，當 α 小於0.965時，政府由原先僅補貼港口J3，轉成補貼港口J2及港口J3，因此增加支出，使上層目標值明顯提高，爾後便隨投資港口J3漸漸攀升。

下層模式的部分，當 $0.9612 \leq \alpha \leq 1$ ，政府共實施三種不同的補貼政策，分界點分別為 $\alpha=1$ 及 $\alpha=0.965$ ，因此下層目標值將因政府實施的三種改善政策而有三種明顯變化。當 $\alpha=1$ 時，港口J1為飽和港口，其於兩者皆未達飽和。當 $0.9655 \leq \alpha < 1$ 時，政府補貼港口J3，部分原先使用港口J2之貨櫃轉而使用港口J3，使港口J1及J3皆為飽和港口，僅J2未達飽和；其中，當 $0.9655 \leq \alpha < 0.973$ 時，政府將投資港口J3之處理能力，使下層貨櫃隨投資容量有微幅變動，目標值也隨之降低。當 $\alpha \leq 0.965$ 時，政府同時補貼港口J2及J3，使部分原先使用港口J1及J2之貨櫃轉至港口J3，使港口J3達到飽和，但港口J1及J2皆未達飽和；此外，政府亦投資港口J3，使下層貨櫃流量及目標值隨投資容量微幅變動。

表 4.3-1 減排目標 α 所對應之結果

α	y_1	y_2	y_3	z_1	z_2	z_3	w	LL_TC	LL_wEC	$LLobj$	$ULobj$	$emissions$	cap	pf_1	pf_2	pf_3
1	0	0	0.00	0	0	0	1	35028000	528194	35556195	-528194.94	677173000	677173000	2700	2000.00	1300.00
0.99	0	0	0.00	0	0	219	1	34757699	513616	35271315	-141310.83	658481000	670401270	2700	1600.00	1700.00
0.98	0	0	0.00	0	0	219	1	34757699	513615	35271314	-141310.59	658481000	663629540	2700	1600.00	1700.00
0.975	0	0	0.00	0	0	219	1	34757699	513615	35271314	-141310.60	658481000	660243675	2700	1600.00	1700.00
0.974	0	0	0.00	0	0	219	1	34757699	513615	35271314	-141310.44	658481000	659566502	2700	1600.00	1700.00
0.973	0	0	0.00	0	0	219	1	34757699	513615	35271314	-141310.29	658481000	658889329	2700	1600.00	1700.00
0.972	0	0	5.75	0	0	219	1	34757906	513405	35271312	-53547.90	658212155	658212156	2700	1594.25	1705.75
0.971	0	0	20.24	0	0	219	1	34758428	512877	35271305	167521.59	657534982	657534983	2700	1579.76	1720.24
0.970	0	0	34.74	0	0	219	1	34758950	512348	35271299	388591.10	656857809	656857810	2700	1565.26	1734.74
0.969	0	0	49.23	0	0	219	1	34759471	511820	35271292	609672.87	656180636	656180637	2700	1550.77	1749.23
0.968	0	0	63.72	0	0	219	1	34759993	511292	35271286	830736.77	655503463	655503464	2700	1536.28	1763.72
0.967	0	0	78.21	0	0	219	1	34760515	510764	35271279	1051813.42	654826290	654826291	2700	1521.79	1778.21
0.966	0	0	92.70	0	0	219	1	34761037	510236	35271273	1272882.66	654149117	654149118	2700	1507.30	1792.70
0.9655	0	0	99.95	0	0	219	1	34761298	509972	35271270	1383405.13	653810531	653810531	2700	1500.05	1799.95
0.965	0	0	45.30	0	494	713	1	33131330	509708	33641038	2281073.65	653471944	653471945	2500	1754.70	1745.30
0.964	0	0	59.80	0	494	713	1	33131852	509179	33641032	2502143.17	652794771	652794772	2500	1740.20	1759.80
0.963	0	0	74.29	0	494	713	1	33132374	508651	33641025	2723212.68	652117598	652117599	2500	1725.71	1774.29
0.962	0	0	96.02	0	494	713	1	33133156	507859	33641016	3054816.95	651101839	651440426	2500	1703.98	1796.02
0.9613	0	0	98.92	0	494	713	1	33133261	507753	33641014	3099030.86	650966404	650966404	2500	1701.08	1798.92
0.9612	0	0	99.94	0	494	713	1	33133297	507716	33641014	3114505.77	650919002	650919002	2500	1700.06	1799.94

此情境下，透過改善政策最多可降低約 3.88% 的路網碳排放量，不同減排目標 α 所對應的結果可參見上表 4.3-1，說明如下：

1. $\alpha=1$

此時無具體減排目標，與原始情況相同，故政府無須實施任何改善政策即可達成減排目標。

2. $0.973 \leq \alpha < 1$

在此範圍內，政府只要實施外部成本內部化並補貼港口 J3 即可符合環境限制式，但因實施補貼政策而產生支出，故上層目標值增加，但仍不至於使政府支出大於收入，因此仍為負值。下層目標值則因政府實施補貼政策而比 $\alpha=1$ 時低，但當 α 在此範圍內，貨櫃流量及補貼金額皆同，因此運輸成本與環境成本皆維持不變而非遞減，下層目標值在此範圍內也相同。

3. $0.9655 \leq \alpha < 0.973$

在此範圍內，政府若只實施外部成本內部化並補貼港口 J3 已無法達成減排目標，需要實施投資政策使港口 J3 的處理能力提高才能達成減排目標，因此政府支出又再度提高，當支出已超出收取外部成本內部化的收入時，上層目標值轉為正值。下層貨櫃流量則隨政府投資港口 J3 之處理能力而轉移至該港口，但因 J3 之使用成本仍比 J2 較高，因此運輸成本略為提升，但使用 J3 較為環保，故整體路網所產生的環境成本隨著 α 逐漸遞減，下層目標值則因 EC 降幅大於 TC 而略微降低。

4. $0.9612 \leq \alpha \leq 0.965$

在此範圍內，政府除了實施外部成本內部化之外，改善政策會由補貼並投資港口 J3，轉變成補貼港口 J2 及 J3 並投資港口 J3，使支出再度攀升，上層目標值提高。此時 TC 及 $LLobj$ 因政府投入較多補貼金額而使明顯比 $\alpha \geq 0.9655$ 時低，但當 α 在此範圍內，部分原先使用港口 J1 及 J2 之貨櫃因改善政策的實施而轉移至港口 J3，使整體 TC 略為提高但 EC 降低，故下層目標值在此範圍內並無明顯變化。

5. $\alpha < 0.9612$

無法以改善政策達成減排目標。

4.4 小結

本章節以一範例做說明求解過程及結果，此路網是由兩個國外港口 (I_1 、 I_2)、三個國內港口 (J_1 、 J_2 及 J_3) 及四個國內縣市 (K_1 、 K_2 、 K_3 及 K_4) 組成的複合運輸路網。結果顯示，在此情況下以 Branch-SAB 法求解可知，若欲使路網碳排放量降低至原來的 97%，除需實施外部成本內部化 ($w=1$) 之外，亦需補貼使用港口 J_3 之貨櫃 NT\$ 219/TEU，並投資港口 J_3 之處理容量 34.74 TEU。

但單憑這些改善政策至多使路網碳排放量降低至原來的 96.12%，改善的成果有限。不同減排目標 α 下，會實施不同的改善政策，而上層目標值、路網碳排放量、下層目標值、環境成本、運輸成本亦受其影響。在此範例下，可將減排目標 α 所對應之改善政策切割成五個區間，不同區間下有不同的因應政策，當減排目標越嚴苛，政府所需執行的政策就越複雜，直到最後無法以改善政策達成減排目標。整體而言，當 α 值越小，上層目標值呈現增加的趨勢，路網碳排放量、環境成本、運輸成本及下層目標值則呈現下降的趨勢。



五、結論與建議

5.1 結論

根據以上研究成果歸納出以下結論：

1. 本研究提出可使路網排放量降低至特定基準值之模式供政府決策單位參考，而此模式是以雙層規劃方法建構，因此當政府擬定相關環境政策的同時，會兼顧下層承攬業者反應，尋求符合雙方目標之均衡解。上層模式為減碳政策模式，目標式為路網改善成本最小化，限制式為整體路網碳排放量限制式、外部成本內部化之課稅比例限制式及非負限制式，決策變數為改善政策：投資提高港口 j 之處理容量 y_j 、補貼使用港口 j 之補貼金額 z_j 、外部成本內部化之課稅比例 w ；下層模式則為運輸路網指派模式。上層決策變數為下層均衡解之外生變數，下層則透過由下層均衡解對上層變數之敏感度所組成的反應函數，將其反應回饋至上層。
2. 原以 SAB 求解上層問題，但此法只在下層均衡解對上層變數之敏感度為連續且可微分之情況下可行，而本研究下層均衡解對補貼變數之敏感度為連續但不可微分之函數，故發展 Branch-SAB 法求解減碳政策模式。首先須列舉出可使貨櫃流量產生變化之補貼政策，因為實施補貼政策能有效影響貨櫃流量，使下層業者因成本的變動轉而選擇使用碳排放量較低之港口。完成列舉後再以這些補貼政策做為 SAB 法之起始解求解投資變數及外部成本內部化之課稅比例，從收斂且可行的結果中選出改善成本最小的改善政策做為最適改善政策。
3. Branch-SAB 法可求解本研究之模式，但若探討大型路網，港口數目眾多，運算效率較差，可以其他啟發式演算法進行求解，如基因演算法(Genetic Algorithm)、基因區域搜尋法(Genetic Local Search Algorithm)等。
4. 須降低之路網碳排放量越大(減排目標 α 值越小)，政府須支出的改善成本則越高。而業者則受惠於政府的改善政策，例如政府補貼業者使用綠色港口，業者將因綠色港口的使用成本降低，轉而透過綠色港口完成運輸服務，所需的運輸成本及環境成本皆將因補貼而降低，完成運輸服務所需之成本也隨之下降。另外，政策實施得當確實可使路網碳排放量降低，但可降低的量有限，未必任何減排目標皆可達成，若政府預設之排放量上限過低，僅憑投資政策、補貼政策及外部成本內部化政策恐無法達成之。
5. 此模式可使政府在改善成本最小的前提下降低路網碳排放量，也可評估路網是否可透過這些改善政策達成減排目標。若以這些改善政策可達成減排目標則為之；若無法達成減排目標，政府決策者則應考慮其他政策方向，避免施政錯誤、浪費資源。

5.2 建議

根據上述結論對政府政策規劃者及決策者提出下列建議：

1. 港口設備新舊、技術優劣有別，產生的碳排放量也因而不同。由前述知，在改善政策可達成的減排目標內，政府可補貼或投資綠色港口，並實施外部成本內部化，以達成減排目標。
2. 透過本研究所提出之改善政策能降低的碳排放量有限，若綠色運輸或環境限制為未來運輸發展的趨勢，發展綠色港口將為未來港口發展之目標。因此建議可汰換港口設備或研發新技術，以因應未來港口發展趨勢。

對物流業者之建議如下：

1. 發展經濟的同時兼顧環境永續為未來趨勢，若政府受國際公約之壓力，須降低路網碳排放量時，將可能實施外部成本內部化政策，因此建議業者將因政府補貼而受惠的金錢用於發展綠色運輸，例如汰換運具、研發替代能源等，以因應未來可能發生之情況。

對未來研究者之建議與延伸議題如下：

1. 因 SAB 法無法處理下層均衡解對上層變數之敏感度為非平滑之函數，如本研究之補貼政策，故問題中若有此特性者，建議可預先將其設定為多組方案，以其他方法（如：基因演算法）求解最適方案組合，如同求解離散型路網設計問題。
2. 本研究投資港口之成本為常數，但實際情況並非如此。投資成本有規模經濟的特性，即投資容量增加而每單位之投資成本卻呈遞減，未來可將此特性納入考量。
3. 本研究為靜態問題，供給及需求皆為固定且已知，但近年來國際貨櫃運量逐年成長，為因應需求之變動，建議可將研究轉為動態問題，加入時階考量，以因應長期貨櫃流量之變化，擬定不同的因應政策。
4. 近年來各國政府開始投入綠色港埠之投資政策，因此可將投資港口處理能力與降低汙染排放一同納入考量，例如投資改善港口可使每單位的貨櫃使用該港口之碳排放量下降，促使整體路網碳排放量降低。
5. 政府目標不應以成本最小化為主，因此建議未來可收集相關資料，以計算政策執行之效益成本比最大化為目標進行研究。

參考文獻

- 張有恆，現代運輸學，華泰文化，民國九十四年，頁 23-28。
- Abdulaal, M., Leblanc, L. J., 1979. Continuous Equilibrium Network Design Models. *Transportation Research Part B-Methodological*, 13, 19-32.
- Blunden, J., Arndtm, D. S. (Eds.), 2012. *State of the Climate in 2011*. Bulletin of the American Meteorological Society, **93** (7), S1-S264.
- Chin, A. T. H., Chua, T. H., 2012. Emission Trading Scheme in the Maritime Industry: An Experimental Analysis. Proceedings in *International Association of Maritime Economists*, Taipei, Taiwan, 5-8 September.
- Chiou, S. W., 2009. A bi-level programming for logistics network design with system-optimized flows. *Information Sciences*, 179, 2434-2441.
- Cordeau, J. F., Pasin, F., Solomon, M. M., 2006. An integrated model for logistics network design. *Annals of Operations Research*, 144, 59-82.
- Creazza, A., Dallari, F., Rossi, T., 2012. Applying an integrated logistics network design and optimisation model: the Pirelli Tyre case. *International Journal of Production Research*, 50, 3021-3038.
- Elhedhli, S., Merrick, R., 2012. Green supply chain network design to reduce carbon emissions. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 17, 370-379.
- Ghiani, G., Laporte, G., Musmanno, R., 2004. *Introduction to logistics systems planning and control*, John Wiley & Sons, Inc.
- Gu, Y., Lam, J. S. L., Zhang, A., 2012. Bi-Objective Optimisation for Sea-and-Land Intermodal Container Flows With Environmental Concerns. Proceedings in *International Association of Maritime Economists*, Taipei, Taiwan, 5-8 September.
- Kim, H.-J., Chang, Y.-T., 2012. Analysis of an Intermodal Transportation Network in Korea From an Environmental Perspective. Proceedings in *International Association of Maritime Economists*, Taipei, Taiwan, 5-8 September.
- Kim, H.-J., Chang, Y.-T., Lee, P. T.-W., Shin, S.-H., Kim, M.-J., 2008. Optimizing the transportation of international container cargoes in Korea. *Maritime Policy & Management*, 35, 103-122.
- Lam, J. S. L., Gu, Y. M., 2013. Port hinterland intermodal container flow optimisation with green concerns: a literature review and research agenda. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 5, 257-281.
- Lee, P. T.-W., Hu, K.-C., Chen, T., 2010. External Costs of Domestic Container Transportation: Short-Sea Shipping versus Trucking in Taiwan. *Transport Reviews*, 30, 315-335.

- Li, X. P., 2013. An integrated modeling framework for design of logistics networks with expedited shipment services. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 56, 46-63.
- Ozbay, K., Bartin, B., Yanmaz-Tuzel, O., Berechman, J., 2007. Alternative methods for estimating full marginal costs of highway transportation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41, 768-786.
- Paixao, A. C., Marlow, P. B., 2002. Strengths and weaknesses of short sea shipping. *Marine Policy*, 26, 167-178.
- Piecnyk, M. and McKinnon, C.M. (2007) Internalising the external costs of road freight transport in the UK. Technical Report, Heriot-Watt University.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E., 2000. *Designing & Managing The Supply Chain Concepts, Strategies and Cases, 3rd edition*, McGraw-Hill Book Company.
- Szeto, W. Y., Jaber, X., Wong, S. C., 2012. Road Network Equilibrium Approaches to Environmental Sustainability. *Transport Reviews*, 32, 491-518.
- Thanh, P. N., Bostel, N., Peton, O., 2008. A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. *International Journal of Production Economics*, 113, 678-693.
- Thanh, P. N., Peton, O., Bostel, N., 2010. A linear relaxation-based heuristic approach for logistics network design. *Computers & Industrial Engineering*, 59, 964-975.
- Unnikrishnan, A., Waller, S. T., 2009. Freight Transportation Network Design Problem for Maximizing Throughput Under Uncertainty. *Transportation Research Record*, 105-114.
- Yamada, T., Russ, B. F., Castro, J., Taniguchi, E., 2009. Designing Multimodal Freight Transport Networks: A Heuristic Approach and Applications. *Transportation Science*, 43, 129-143.
- Yang, H., Bell, M. G. H., 1998. Models and algorithms for road network design: a review and some new developments. *Transport Reviews*, 18, 257-278.
- Zheng, J. F., Meng, Q., Sun, Z., 2012. Impact Analysis of Maritime Cabotage Legislations on Liner Hub-and-Spoke Shipping Network Design. Proceedings in *International Association of Maritime Economists*, Taipei, Taiwan, 5-8 September.

附錄一：符號說明

文中符號整理如下表：

集合

I	國外港口
J	國內港口
K	國內縣市
M	運輸運具， $m=\{1,2\}$ ，1 為貨車，2 為船
φ	上層變數集合， $\varphi=\{y_j, z_j, w, \forall j \in J\}$
ψ	下層變數集合， $\psi=\{SI_{ij}^n, DI_{jk}^n, SE_{ji}^n, DE_{kj}^n, \forall i \in I, j \in J, k \in K\}$
ϕ	可是貨櫃流量與原始情況不同之補貼政策集合
C	收斂且可行之候選改善政策集合

參數

sf_i	由國外港口 i 送出的進口貨櫃量
sd_k	由國內縣市 k 送出的出口貨櫃量
df_i	由國外港口 i 接收的出口貨櫃量
dd_k	由國內縣市 k 接收的進口貨櫃量
b_j	國內港口 j 之港口容量
c_{ij}	由節點 i 至節點 j 之運輸成本
thc_j	國內港口 j 之場站處理費用 (NT\$/TEU)
h	每單位時間內的存貨成本
t_{ij}	由節點 i 至節點 j 之運送時間
p_{ij}	由節點 i 至節點 j 之運送成本(Transit cost) (NT\$/TEU-km)
ec_{ij}	由節點 i 至節點 j 之環境成本
l_{ij}	由節點 i 至節點 j 之運送距離 (km)
a_p	二氧化碳之避免成本
k_p	二氧化碳之排放係數
u_f	燃料 f 之消耗量
pe_j	使用港口 j 產生的碳排放量
n^m	運具 m 的載貨容量
v_{ij}^m	運輸運具 m 從 i 到 j 的運具數量
$G_j(y_j)$	投資港口 j 之處理能力之投資成本 (NT\$/TEU)
e_{ij}	由節點 i 至節點 j 之碳排放量
cap	整體路網之碳排放量上限

決策變數

SI_{ij}	由國外港口 i 到國內港口 j 的進口貨櫃量
SE_{ji}	從國內港口 j 到國務港口 i 的出口貨櫃量
DI_{jk}	由國內港口 j 到國內縣市 k 的進口貨櫃量
DE_{kj}	從國內縣市 k 到國內港口 j 的出口貨櫃量
VI_{jk}^m	運具 m 從國內港口 j 運送進口貨櫃量到國內縣市 k 的運具數量
VE_{kj}^m	運具 m 從國內縣市 k 運送出口貨櫃量到國內港口 j 的運具數量
y_j	投資政策：投資港口 j 所增加之處理容量 (TEU)
z_j	補貼政策：使用港口 j 之補貼金額 (NT\$/TEU)
w	外部成本內部化之課稅比例

其他符號

\hat{z}_j	補貼使用港口 j ，洽可使貨櫃流量產生變化之補貼金額
<i>emissions</i>	整體路網碳排放量
α	減排目標
n	SAB 法之迴圈數，
ε	SAB 法之收斂誤差， $\varepsilon = 0.01$
R	原始情況下未達飽和之港口數量
r	原始情況下未達飽和但目前已受補貼之港口數量
B	補貼政策數量， $B = \sum_{r=0}^R P_r^R = \sum_{r=0}^R \frac{R!}{(R-r)!}$
b	B 個補貼政策中，第 b 個補貼政策
ϕ_b^n	以第 b 個補貼政策為起始解，經 SAB 法運算 n 個迴圈後之結果
LL_TC	下層之運輸成本
LL_wEC	下層實施外部成本內部化後所需收取之環境成本
$LLobj$	下層目標值
$ULobj$	上層目標值
pf_j	港口 j 之流量

附錄二：雙層規劃之數學模式

第 3.3 節分別描述雙層規劃法所建構的下層模式及上層模式，將兩者整合後之結果收錄於附錄二中，說明如下：

1. 下層模式——運輸路網指派模式

$$\begin{aligned} \text{Min } & L\text{Lobj}(SI_{ij}(w, y_j, z_j), DE_{kj}(w, y_j, z_j), DI_{jk}(w, y_j, z_j), SE_{ji}(w, y_j, z_j)) \\ & = TC(SI_{ij}, DE_{kj}, DI_{jk}, SE_{ji}, z_j) + w \cdot EC(SI_{ij}, DE_{kj}, DI_{jk}, SE_{ji}) \end{aligned} \quad (\text{a.1})$$

s.t.

進口及出口貨櫃量限制式， Ω_1 ：

$$\sum_{j \in J} SI_{ij} = sf_i \quad \forall i \in I \quad (\text{a.2})$$

$$\sum_{j \in J} DE_{kj} = sd_k \quad \forall k \in K \quad (\text{a.3})$$

$$\sum_{j \in J} DI_{jk} = dd_k \quad \forall k \in K \quad (\text{a.4})$$

$$\sum_{j \in J'} SE_{ji} = df_i \quad \forall i \in I \quad (\text{a.5})$$

流量守恆限制式， Ω_2 ：

$$\sum_{i \in I} SI_{ij} = \sum_{k \in K} DI_{jk} \quad \forall j \in J \quad (\text{a.6})$$

$$\sum_{k \in K} DE_{kj} = \sum_{i \in I} SE_{ji} \quad \forall j \in J \quad (\text{a.7})$$

港口容量限制式， Ω_3 ：

$$\sum_{i \in I} (SI_{ij} + SE_{ji}) \leq b_j^0 + y_j \quad \forall j \in J \quad (\text{a.8})$$

運具數量限制式， Ω_4 ：

$$DI_{jk} \leq n_1 \cdot VI_{jk}^1 \quad \forall j \in J, k \in K \quad (\text{a.9})$$

$$DE_{kj} \leq n_1 \cdot VE_{kj}^1 \quad \forall j \in J, k \in K \quad (\text{a.10})$$

$$SI_{ij} \leq n_2 \cdot VI_{ij}^2 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (\text{a.11})$$

$$SE_{ji} \leq n_2 \cdot VI_{ji}^2 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (\text{a.12})$$

$$VI_{jk}^1 \leq v_{jk}^1 \quad \forall j \in J, k \in K \quad (\text{a.13})$$

$$VE_{kj}^1 \leq v_{kj}^1 \quad \forall j \in J, k \in K \quad (\text{a.14})$$

$$VI_{ij}^2 \leq v_{ij}^2 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (\text{a.15})$$

$$VE_{ji}^2 \leq v_{ji}^2 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (\text{a.16})$$

非負與整數限制式， Ω_5 ：

$$SI_{ij}, DE_{kj}, DI_{jk}, SE_{ji} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \text{ and } k \in K \quad (\text{a.17})$$

$$VI_{jk}^1, VE_{kj}^1 \geq 0 \quad \text{and integers } \forall j \in J \text{ and } \forall k \in K \quad (\text{a.18})$$

$$VI_{ij}^2, VE_{ji}^2 \geq 0 \quad \text{and integers } \forall i \in I \text{ and } \forall j \in J \quad (\text{a.19})$$

目標式中，運輸成本及環境成本計算方式如下：

$$TC = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (c_{ij} - z_j) \cdot SI_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk} \cdot DI_{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} (c_{ji} - z_j) \cdot SE_{ji} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} c_{kj} \cdot DE_{kj} \quad (\text{a.20})$$

$$c_{ij} = thc_j + h \cdot t_{ij} + l_{ij} \cdot p_{ij} \quad (\text{a.21})$$

$$c_{jk} = h \cdot t_{ij} + l_{ij} \cdot p_{ij} \quad (\text{a.22})$$

$$EC = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} ec_{ij} \cdot SI_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} ec_{jk} \cdot DI_{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} ec_{ji} \cdot SE_{ji} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} ec_{kj} \cdot DE_{kj} \quad (\text{a.23})$$

$$[\text{vessel+port}] \quad ec_{ij} = a_p \cdot (l_{ij} \cdot (\sum_f u_f k_{fp}) + pe_j) \quad (\text{a.24})$$

$$[\text{truck}] \quad ec_{jk} = a_p \cdot l_{jk} \cdot k_p \quad (\text{a.25})$$

與第 3.3 節中不同的是式(a.1)、式(a.8)及式(a.20)。式(a.1)中，政府收取的環境成本 EC 受外部成本內部化課稅比例 w 影響，當 $w = 0$ ，代表政府不收取環境成本；當 $w > 0$ ，政府要收取外部成本，則收取 $w \cdot EC$ 元。式(3.8)為各國內港口之容量限制，使所有進出國內港口 j 之貨櫃量皆小於等於港口之服務容量水準，此服務容量將受上層變數 y_j 影響，

若政府投資港口 j 之處理容量 y_j ，則會使港口 j 之服務容量提高為 $b_j^0 + y_j$ 。式(a.20)為運輸成本的計算方式，各節線之運輸成本乘以經過各節線之貨櫃流量之總和，而政府補貼使用港口 j 之金額 z_j 可使有使用港口 j 之節線的運輸成本下降。

2. 上層模式——減碳政策模式

$$\text{Min } ULobj(y, z, w) = \sum_{j \in J} G_j(y_j) + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} SI_{ij} \cdot z_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} SE_{ji} \cdot z_j - w \cdot EC \quad (\text{a.26})$$

s.t.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} e_{ij} \cdot SI_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} e_{jk} \cdot DI_{jk} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} e_{kj} \cdot DE_{kj} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} e_{ji} \cdot SE_{ji} \leq cap \quad (\text{a.27})$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (\text{a.28})$$

$$z_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (\text{a.29})$$

$$0 \leq w \leq 1 \quad (\text{a.30})$$

上層模式與第三章所述相同，在此便不贅述。



附錄三：BS 法

在第 3.4 節中需以 BS 法求得會使貨櫃流量產生變化之補貼金額 \hat{z}_j ，因補貼金額對港口通過量的函數為連續函數，故可以漸進法求得 \hat{z}_j ，但漸進法收斂速度較慢，故本研究以二分法 (Bisection Method) 的概念來設計尋求 \hat{z}_j 之方法，稱之為 BS 法。與二分法相同的是，此法也是用區間上下界的平均值來逼近目標；不同的是，此法並非以區間上下界的平均值之斜率來判斷該更新區間之上界還下界，而是以目前區間上下界的平均值來計算下層港口貨櫃通過量。若港口貨櫃通過量和以區間上界計算出來的港口貨櫃通過量相同，則更新上界；若與區間下界計算出來的港口貨櫃通過量相同，則更新下界；若皆不同，則表示該港口的補貼值有一個以上階梯狀處，此上下界的平均值為新的候選 \hat{z}_j ，此候選 \hat{z}_j 將與原區間之上下界分別組成新的兩個區間。一個區間計算到符合收斂條件後，需判斷受補貼之港口是否為飽和，若是，則為欲求之 \hat{z}_j ；若否，則不是。



以下先說明後續會出現的符號及集合，再條列步驟，如下：

- IS 可能出現 \hat{z}_j 之區間的集合
- p_j 可能出現 \hat{z}_j 之區間中較小的值
- q_j 可能出現 \hat{z}_j 之區間中較大的值
- ubz_j 補貼金額之上限
- ε_b 可能出現 \hat{z}_j 之區間的差距
- pf_j 港口貨櫃通過量 $pf_j^n = \sum_{i \in I} (SI_{ij}^n + SE_{ji}^n), \forall j \in J$
- $newz_j$ 新出現的候選 \hat{z}_j

Step 1. 以 0 及港口 j 的補貼上限 ubz_j 做為起始區間，並將此區間放入集合 IS 中。

Step 2. 計算區間之差距 $\varepsilon_b = p_j - q_j$ ，並將這組區間從集合 IS 中刪除。

Step 3. 若 ε_b 大於 1 則進入 *Step 4*。若 ε_b 小於等於 1，則判斷當 $z_j = \hat{z}_j$ 時之 pf_j 是否等於港口容量上限 b_j ，若是則得到 \hat{z}_j ，停止演算法；若否，則進入 *Step 7*。

Step 4. 計算 $\hat{z}_j = \frac{p_j + q_j}{2}$ ，並計算當 $z_j = \hat{z}_j$ 時之 pf_j 。判斷此 pf_j 是否等於當 $z_j = p_j$ 時之 pf_j ，若是，則更新 $p_j = \hat{z}_j$ ，並計算 ε_b ，再回到 *Step 3*；若否，則繼續。

Step 5. 判斷此 pf_j 是否等於當 $z_j = q_j$ 時之 pf_j ，若是，則更新 $q_j = \hat{z}_j$ ，並計算 ε_b ，再回到 *Step 3*；若否，則出現新的候選 \hat{z}_j ，令其為 $newz_j$ 。

Step 6. 將 $newz_j$ 分別與 p_j 及 q_j 組成新的區間，並放入集合 IS 中。

Step 7. 將 IS 中的第一組區間取出後回到 *Step 2*。

BS 法之求解流程圖如下圖：

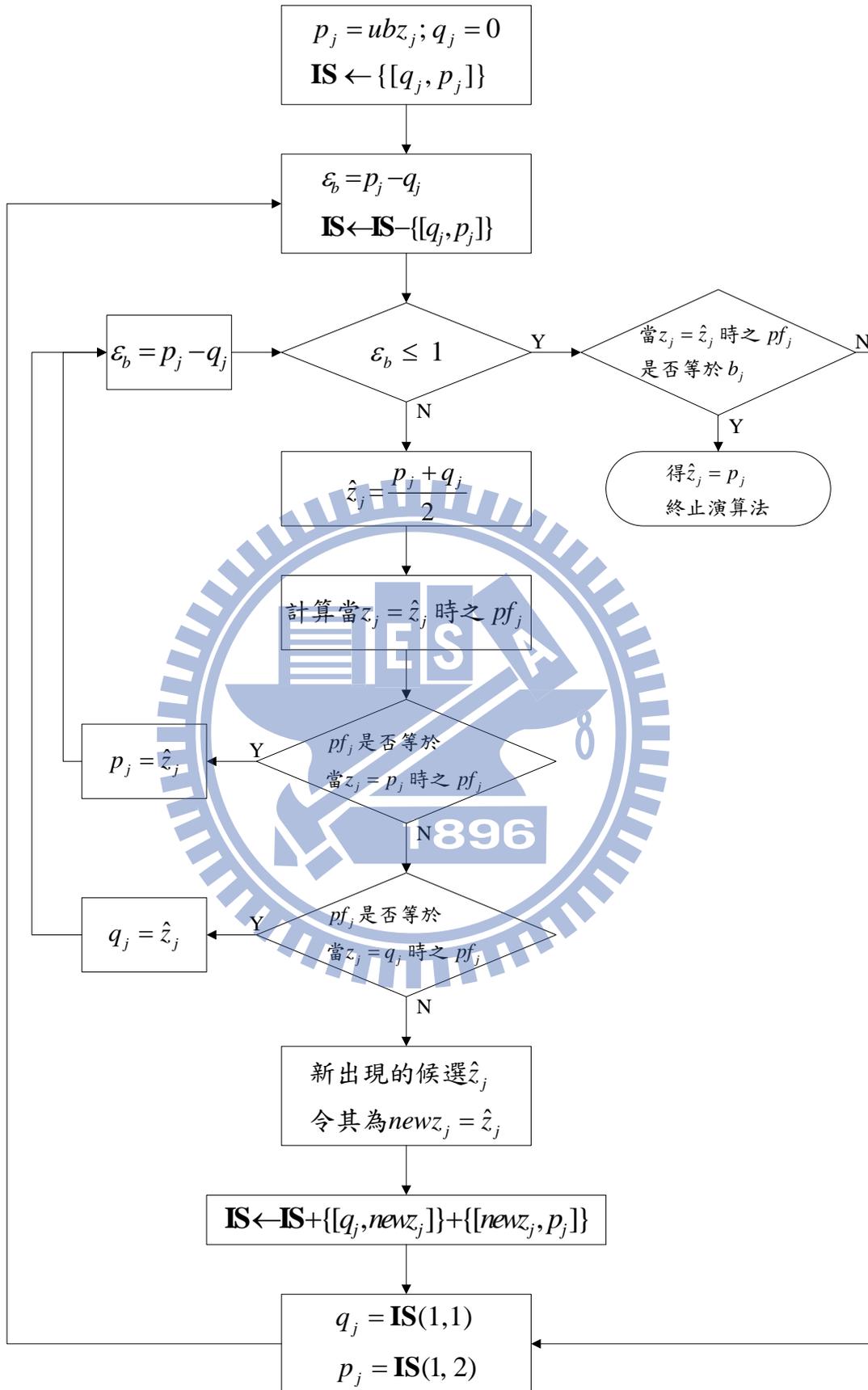


圖 A.3-1 BS 法之流程圖