

國立陽明交通大學
運輸與物流管理學系碩士班
碩士論文

Department of Transportation and Logistics Management
National Yang Ming Chiao Tung University
Master Thesis

考量跨境措施與政策的跨區域貨運網絡問題
An Inter-regional Freight Transport Network Problem
Considering Cross-Border Investment and Policy

研究生：石采馨 (Shih, Tsai-Hsin)
指導教授：黃寬丞 (Huang, Kuan-Cheng)、
黃家耀 (Wong, Ka-Io)

中華民國一一〇年七月
July 2021

考量跨境措施與政策的跨區域貨運網絡問題

An Inter-regional Freight Transport Network Problem

Considering Cross-Border Investment and Policy

研 究 生：石采馨

Student : Tsai-Hsin Shih

指導教授：黃寬丞 博士、
黃家耀 博士

Advisor : Dr. Kuan-Cheng Huang
Dr. Ka-IO Wong

國立陽明交通大學
運輸與物流管理學系碩士班
碩士論文

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

July 2021
Taiwan, Republic of China
中華民國一一〇年七月

誌謝

轉眼間要畢業了，兩年的時間說長不長、說短也不短，身在其中總時不時就浮現想趕快結束的念頭，但當真的接近了尾聲，回憶起來又覺得一切都好珍貴。

最感謝的是兩位指導教授黃寬丞教授及黃家耀教授，從還在迷茫研究方向，到確立共同指導，而後一起克服了研究領域、研究範圍及研究方法上遇到的各種難關。一路以來真的十分感謝兩位教授，除了悉心的指導與提點外，二位在研究領域與人生道路上的寶貴經驗與判斷能力，讓我學習到許多待人處事的方法與態度。帶著二位的支持鼓勵，也能更勇敢的去面對未來路上的任何挑戰。也要特別感謝鼎漢工程顧問公司的李宗益總經理及李德全副理，因為論文求解方法所需而前往貴公司請求指教的這一段時間，受到了非常多的幫助與照顧，讓我能夠順利補起學術研究與實務求解做法中的落差，且對於交通規劃的實務面向有了更多深刻的理解。另外也十分感謝姚明忠教授與水敬心教授在論文期中審查階段與口試時皆提供了許多寶貴建議，使本研究更臻完備。

當然對身邊夥伴們的感謝也不能少！不論是從碩一開始就相互依靠的成大朋朋們，避風港蕭、安全感葉、貼心鬼洋、共進退玄、梗圖王 Bren、少女心 YD，有你們一起從大學來到碩班打拼，少了很多初入新環境的緊張不安，取而代之的是一起奮鬥成長的革命情感。還有碩班遇見的好夥伴們，默契十足的謝、吵鬧好趴呢 77、安心教練兼神奇旅伴許、以酒會友的敏聞、正能量 Carol、人來瘋士軒、好球友好酒友庭緯、一起丐一尤的阿丁、熱心王威瑜、物流組好夥伴家瑜，還有 9-11 樓的各位。碩二以來「吃飯飲料打球玩耍」陪伴我們走過很多辛苦的時候，與相處起來隨興又自在的人們，一起走跳了台灣東西南北，也一起追運動熱潮、做發財夢，謝謝你們陪我把握了最後一段身為學生的快樂。最最感謝兩位好戰友謝跟洋，很幸運這兩年的伙伴是你們，能夠一路以默契跟幽默扶持彼此走過辛苦奮鬥又歡樂吵鬧的日子，你們絕對是我碩士這兩年最珍惜的收穫。我愛各位！回憶都收藏在手機相簿裡了，但願前路荊棘仍能勇往直前！

最後感謝我的家人及身旁的朋友們，近在新竹及遠在台中、台南的絕對支持，讓我能沒有後顧之憂地向前衝，還有在我壓力大的時候給予的陪伴鼓勵，這一路上都帶給了我很多力量跟精神寄託。這些日子承蒙諸位照顧，才能順利畫下句點。最後的最後，感謝這一路以來的自己，堅持下去也都做到了，辛苦了。

石采馨 謹誌

2021.08 於新竹陽明交大

考量跨境措施與政策的跨區域貨運網絡問題

研究生：石采馨

指導教授：黃寬丞 博士、黃家耀 博士

國立陽明交通大學運輸與物流管理學系碩士班

摘要

多運具網路設計問題常用來評估交通建設投資會對模型區域帶來的效益，而貨運與客運網路因共同使用路網，須一同進行路網模擬。本研究在設計措施時，納入跨境的因素，將交通建設投資措施設立在國家之間的邊境上，討論實施措施組合會對於區域路網與單一國家路網分別帶來的變化，希望透過提升邊境通關上的設施品質來減少路網使用者的旅行時間，進而得到旅行時間節省效益。

本研究以雙層規劃模型建模，上層模型基於背包問題的概念來設計離散搜尋機制，目標是在有限的預算中找到一組可以最大化路網改善效益的措施組合，並以路網措施之間產生的相依效益，來評估各獨立措施的潛在效益；再以下層的運輸規劃軟體模型，針對措施組合進行模擬，計算各種措施組合下可以帶來的效益。期望透過此方法描述路網改善措施之間的相依性，並使用最大單點潛在效益進行搜尋，使能夠變化欲測試的措施組合，找到對路網改善最大化的組合。

本研究將模型應用在 BBIN 地區的實際跨境路網上，透過雙層模型測試找出有效舒緩路網問題的跨境措施點組合，且從單一國家—孟加拉國政府及 BBIN 區域整合組織的角度切入分析與討論。從個案範例中可見對於 BBIN 區域路網與孟加拉國路網，投資 Tamabil 與 Bhomra 的措施組合皆會帶來很不錯的時間節省效益；然而基於該投資組合，再加入了 Sheola 的投資後，對區域路網產生更佳效益的同時，對孟加拉國而言卻因為產生更嚴重的壅塞而帶來相對較低的效益。透過以上雙層模型測試後找出的措施組合，以不同決策者的考量來分析，可提供投資方在決策路網設施投資時不同的評估面向與角度。

關鍵字：雙層規劃、多運具貨物網路、跨境網路、投資決策

An Inter-regional Freight Transport Network Problem

Considering Cross-Border Investment and Policy

Student : Tsai-Hsin, Shih

Advisor : Dr. Kuan-Cheng, Huang
Dr. Ka-Lo, Wong

Department of Transportation and Logistics Management
National Yang Ming Chiao Tung University

Abstract

The multimodal network design problem is often used to evaluate the benefits of transportation investment. Since the freight modelling shared the same network with passenger modelling, the network model formulated with both elements. The research establishes the transportation investment projects on the borders to take the cross-border factor into consideration to discuss how the project combination make changes on both regional and single-country government's perspective. The mentioned benefit is the travel time saving value generated by making improvements on the cross-border facilitations.

The model is formulated with a bi-level programming. The upper-level model is a discrete optimization algorithm designed by the concept of knapsack problem to determine the best combination of investment projects that the network benefit is maximized, whilst the network benefit is calculated by the simulation of the network under implementing the selected projects in the lower-level model.

The model is applied to a large-scale multimodal multi-region network to show that the bi-level mechanism works. In the case example, it generated good benefits in both BBIN region and Bangladesh network when implemented the investment on Tamabil and Bhomra cross-border points, but it performed better with additional project on Sheola in BBIN region than in Bangladesh network since it would bring heavier congestion in Bangladesh. As stated above, the model provides the investors with different evaluation aspects when doing decision-making on cross-border investments.

Keywords: Bi-level programming, Multimodal freight network, Cross-border network, Investment decision-making

目錄

誌謝.....	i
中文摘要.....	ii
英文摘要.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	vii
第一章、緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究內容與範圍.....	4
1.4 研究流程與架構.....	6
第二章、文獻回顧.....	8
2.1 以運輸規畫需求模式分析多運具貨運網路問題.....	8
2.1.1 考量旅次發生、分佈之多運具路網問題.....	9
2.1.2 考量運具分配、交通量指派之多運具路網問題.....	10
2.2 利用雙層規劃建模之路網規劃問題.....	12
2.3 考量跨區域之路網規劃問題.....	13
2.4 文獻回顧總結.....	14
第三章、研究方法.....	16
3.1 數學模型架構.....	16
3.1.1 模型使用之符號及參變數定義.....	17
3.1.2 數學模型說明.....	19
3.2 解法建構.....	22
3.2.1 雙層解法建構.....	23

3.2.2 上層搜尋演算法.....	26
3.2.3 下層路網表現模擬.....	30
第四章、個案驗證.....	34
4.1 個案背景.....	34
4.2 個案分析及假設.....	36
4.2.1 跨境措施點.....	37
4.2.2 個案參數設定.....	42
4.3 個案測試結果.....	44
4.3.1 單點效益表現.....	45
4.3.2 雙層模型測試.....	56
4.3.3 建置電子通關情境.....	63
第五章、結論與建議.....	69
5.1 結論.....	69
5.2 研究限制.....	70
參考文獻.....	71
附錄一.....	75
附錄二.....	78
附錄三.....	79

圖目錄

圖 1.1 傳統運輸規劃四步驟之模型示意圖.....	1
圖 1.2 南亞-BBIN 地區的邊境示意圖.....	4
圖 1.3 研究架構圖.....	7
圖 3.1 上下層關聯圖.....	17
圖 3.2 本研究之雙層解法流程圖.....	24
圖 3.3 上層背包問題搜尋流程圖.....	26
圖 3.4 本研究對搜尋解下各單點措施更新之示意圖.....	28
圖 3.5 下層運輸規劃軟體求解路網表現流程圖.....	30
圖 4.1 CMS 模型的整體路網.....	34
圖 4.2 CMS 模型中南亞 BBIN 地區的鐵路路網.....	35
圖 4.3 CMS 模型中南亞 BBIN 地區的道路路網.....	35
圖 4.4 CMS 模型中納入本研究計算效益的交通分區示意圖.....	36
圖 4.5 孟加拉境內公路路網示意圖.....	37
圖 4.6 南亞區域運輸走廊示意圖.....	38
圖 4.7 BCIM 經濟走廊示意圖.....	38
圖 4.8 跨境決策點在 BBIN 區域上的位置.....	40
圖 4.9 跨境決策點在孟加拉邊境上的位置示意圖.....	40
圖 4.10 路段成本函數示意圖.....	43
圖 4.11 單點效益值散佈圖.....	45
圖 4.12 Braess's paradox 範例示意圖.....	56
圖 4.13 針對 BBIN 地區進行雙層測試下的單點效益值變化圖.....	57
圖 4.14 針對孟加拉國地區進行雙層測試下的單點效益變化圖.....	60

表目錄

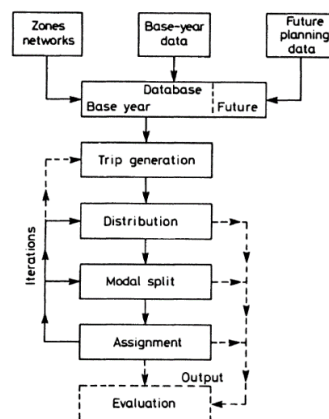
表 3.1 搜尋解下的子解集合示意圖.....	28
表 4.1 本研究之跨境決策點.....	39
表 4.2 在孟加拉-印度的跨境道路路段上的測試路網示意圖	41
表 4.3 在孟加拉-印度的跨境鐵路路段上的測試路網示意圖	41
表 4.4 本研究的跨境點改善措施參數.....	43
表 4.5 本研究使用之時間價值參數.....	44
表 4.6 本研究的跨境點效益情境.....	45
表 4.7 本研究的跨境點效益值.....	46
表 4.8 基礎路網與#16 的四個指派路網比較.....	48
表 4.9 單點測試#16 時對 BBIN 及孟加拉的路網變化	49
表 4.10 基礎路網與#15 的四個指派路網比較.....	51
表 4.11 單點測試#15 時對 BBIN 及孟加拉的路網變化	52
表 4.12 基礎路網與#18 的四個指派路網比較.....	54
表 4.13 單點測試#18 時對 BBIN 及孟加拉的路網變化	55
表 4.14 基礎路網與 15-16-17 的指派路網比較.....	58
表 4.15 15-16-17 組合對 BBIN 與孟加拉的路網變化	59
表 4.16 基礎路網與 13-16-17 的指派路網比較.....	61
表 4.17 13-16-17 組合對 BBIN 與孟加拉的路網變化	62
表 4.18 建置電子通關後的跨境點改善措施參數.....	63
表 4.19 無電子通關下與電子通關下實施 15-16-17 之路網指派比較.....	65
表 4.20 基礎路網與電子通關下實施 15-16-17 之流量與效益.....	66
表 4.21 無電子通關下與電子通關下實施 13-16-17 之路網指派比較.....	67
表 4.22 基礎路網與電子通關下實施 13-16-17 之流量與效益.....	68

第一章、緒論

1.1 研究背景與動機

在許多開發中國家，因歷史上的殖民背景，使未以國家永續發展為前提進行規劃，缺乏系統化的基礎設施，且鄰國之間存在歷史、宗教衝突，而使得彼此之間互相設立貿易、交通壁壘。在這之中，會由多個國家或跨國組織成立跨國際的金融機構，透過達成國家之間的協調與成立國際法規等方法，來協助國家或區域發展組織評估發展項目的急迫性與必要性並提供金融資源，這樣的組織稱為多邊化發展型銀行(Multilateral Development Bank, MDB)，其中包括世界銀行(World Bank)、亞洲開發銀行(Asian Development Bank, 簡稱 ADB)等機構。(ADB, 2018)提出，ADB 於 2017 估計亞洲地區的建設資金缺口約 9.07 兆美元，因此須透過評估找出眾多項目中的關鍵性瓶頸。在短期資金有限，且太多基礎設施需投入資源的情形下，利用運輸規劃方法，來評估投資項目下的影響與改變。

運輸規劃(Transportation Planning)則是為了了解及預測交通問題時，用以模擬及分析交通活動現況的工具，可依預測的年限以及資訊量分為短、中、長期運輸規劃。其分為四步驟：從旅次產生(Trip Generation)、旅次分布(Trip Distribution)，到運具分配(Modal Split)、交通量指派(Traffic Assignment)，透過運輸需求模式的分析，配合區域內或是城際之間的運輸規劃，達到相輔相成的效果。圖 1.1 為傳統運輸規劃四步驟之模型。



引用自：Ortúzar & Willumsen (2011)

圖 1.1 傳統運輸規劃四步驟之模型示意圖

隨著國際貿易的流通越來越盛行，貨運網路的發展從單一區域、單一運具，在成本及效率的考量下，研究範圍漸漸開始往外擴張，發展出跨區域、多運具的貨運路網。最初由 Jensen (1990)分析了各運具在聯運系統的優劣勢與競爭關係，並提出若結合各種運輸方式的服務和成本優勢，可以提高運輸系統的整體效率：由鐵路、內陸水路、海路來執行遠程運輸，可達到規模經濟；而由公路執行短程運輸，作起點與終點等終端的收集和分配。如此一來，既可實現規模經濟，又能達到成本效率。而 Bontekoning et al.(2004)中也提到，自 1990 年起，出現了許多專門研究多式聯運問題的研究，因此該年份被視為多式聯運相關研究大勢興起的時期。而 Beuthe et al.(2001)使用地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)網路方法建模，考慮網路的空間特性，針對多種運具：鐵路、公路及水路，及針對不同的商品類別，做直接和交叉的貨運需求彈性估計。研究指出鐵路及水路在長距離運輸較短距離運輸的彈性較小，且成本較高會降低其競爭力；而鐵路需求雖大於公路與內陸水運，但因需求對成本敏感，因此更直接的影響其短距離運輸。而王慶瑞(2008)中有提到，貨物之運具分配會受到貨物的特性及運輸型態影響，例如貨物種類、性質、裝卸方式等。

同時，良好的規劃與整合，除了能夠提高效率，也能呼應近年高漲的環保意識，因此許多學者開始設想多式聯運在永續運輸觀念下的研究可能。Bergqvist & Behrends (2011)以公路鐵路聯運之成本效率來探討對其運輸前和運輸後 (Pre- and Post-haulage, PPH) 對成本的敏感度，減少聯運系統中較長的車輛的成本，可以提高運輸效率與聯運系統的競爭力。Agamez-Arias et al.(2017)在回顧多式聯運運輸系統的相關文獻時提到，聯運系統的改善措施考量了服務品質與經濟效率等指標，目的多環繞於減少總運輸時間與成本；近年則加入了碳排放量等考慮因素，將綠色運輸視為聯運路網研究的新趨勢。

然而運輸需求之增長與經濟發展是息息相關的，許多經濟發展較早的國家，不僅著重於都市運輸規劃，也較早開始進行跨區域性的運輸規劃，其對於客運、貨運之多式聯運路網的安排與整合，也相對開發中國家來的更成熟與完整。Mathisen & Hanssen (2014)發表關於多式聯運貨運運輸 (Intermodal Freight Transport) 的文獻回顧中提到，各國在此研究領域的文章發表篇數與研究機構所

在地，皆屬美國、歐洲國家為多，且該研究的統計資料前 67% 中僅有日本為亞洲國家，推測此結果與研究發表語言多為英文有關聯。

而當大陸或半島地區的多個國家要推動多運具路網模型時，除了基礎設施的規格整合之外，也要考慮到政治層面的政策配合與聯合運作。在歐洲大陸、美洲等貨運路網系統已發展多年的地區，在對國家交通基礎設施做運輸規劃時，發現設施之影響範圍不僅限於該國家或劃分之地域，也會對鄰近地區產生溢出效應 (Spillover Effects)；若發生在國境邊界，則間接影響了鄰國的跨境融合 (López et al., 2009)。因此也有許多學者就跨境運輸所遇到的問題下手，研究跨境的路網規劃問題 (Cross-border Planning Problem)。

一般以運輸規畫方法來評估投資措施對路網的影響時，會以使用者在路網上所減少的運輸成本做為投資下的效益，而運輸成本估計包含了旅行時間、行車成本與過路收費等；而跨境路網因為受眾單位較多，在評估運輸成本時，會以旅行時間為主，計算在改善路網下的旅行時間節省 (Travel Time Saving) 來作為效益。

當跨境貿易需求上升時，也會導致運輸需求上升。國家之間陸續成立區域整合組織，例如：歐盟 (European Union)、南亞次區域經濟合作計劃 (South Asia Subregional Economic Cooperation, 簡稱 SASEC) 等，欲以區域整體系統發展為目標，以交通、貿易整合帶動經濟成長。因此，本研究欲從區域發展組織與國家政府的角度各自出發，希望能了解在加入跨境決策考量後，區域路網的改善情形。

1.2 研究目的

結合上述各點，跨境貿易、運輸需求上升與區域整合互相牽動，本研究欲以演算法搜尋機制結合運輸規劃模擬路網為方法，設計一個決策跨境點上措施投資組合的演算法機制，再使用跨區域且多運具的貨物運輸流量交通模型 (Freight Flow Transport Model)，模擬投資組合下的路網。期望本研究可透過此措施決策與路網模擬互相配合的機制，以最大化區域效益為目標，找出可有效提升區域路網服務水準的跨境措施組合；並在真實的跨境區域路網上，以區域發展組織與單一國家的角度，分析跨境措施帶來的變化，提供大型跨境貨運路網設計評估方式與模擬決策影響的參考。

1.3 研究內容與範圍

本研究為路網設計問題(Network Design Problem, NDP)的延伸問題，將參考現實中跨區域之邊境路網需要解決的問題來設計決策，透過演算法求解預算限制下的最佳決策組合，再使用多運具之使用者均衡的交通量指派模型對決策進行模擬，使得在預算限制下能取得最大化效益。

本問題欲以雙層規劃設計數學模型，上層為預算限制下的措施組合決策，目標為最大化效益，透過決策影響路網結構；而下層為各跨境措施在改變路網後的多運具貨物路網運具分配—交通量指派模型，將指派完的路網結果轉換成效益傳回上層，以完成上下層之關鍵連結。運具部分考量公路及鐵路；運輸旅次包含客運與貨運，貨運的商品分類則以該研究區域之分類原則為主。

為了使用實際路網案例來深入研究多運具、多區域下並牽涉到區域內跨國交通政策的跨境路網規劃問題，本研究使用南亞地區的區域經濟體—BBIN 作為路網案例，國家成員分別為孟加拉(Bangladesh)、不丹(Bhutan)、印度(India)和尼泊爾(Nepal)。使用此地區路網的原因，除了因亞洲之跨境運輸發展相對較不成熟以外，此地區的國家在歷史上曾因宗教分裂、主權糾紛屢發戰爭，導致存在高度貿易壁壘。圖 1.2 為 BBIN 地區的邊境劃分地圖，可知尼泊爾、不丹與孟加拉位於印度東北邊，且邊境大部分位於印度內。這些國家在過去的邊境貿易通關上彼此為難，如今在區域組織的協調下積極透過交通、貿易協議來促進合作與關係友好。



引用自：<https://yourfreetemplates.com/south-asia-map-free-templates/>

圖 1.2 南亞-BBIN 地區的邊境示意圖

世界銀行曾於 2018 年針對南亞貿易壁壘的研究報告中指出，南亞的主經濟體為印度與孟加拉，而更深入的區域貿易和連通性可能使印度與南亞鄰國的貿易增長三倍以上，且該地區所有國家將從貿易合作中受益(The World Bank, 2018)。然而南亞自由貿易區協定(Agreement on South Asia Free Trade Area, SAFTA)自 2006 年生效後，至 2016 年南亞的平均關稅為 13.6%，是世界平均水平（6.3%）的兩倍以上，仍是世界主要地區中最高的；且 SAFTA 仍無法排除會員國之間因政治關係導致的不對等關稅，在政治關係不甚好的國家雙邊貿易中，SAFTA 仍不存在強制降低貿易壁壘的作用。報復性的貿易關稅與跨境上的為難，也使得南亞為世界上歷史最複雜的地區之一，也是世界上區域整合程度最低的地區之一。

而此擁有高度人口紅利的 BBIN 區域，近年在許多區域整合組織的成立與幫助之下，逐漸重視區域發展，並簽署諸項交通貿易協定。2015 年 6 月，四國交通部長在亞洲發展銀行(Asian Development Bank, ADB)的協調與評估之下，在不丹首都簽署「孟加拉、不丹、尼泊爾和印度機動車協議(BBIN Motor Vehicle Agreement, MVA)」(ADB, 2015)，以推動區域內跨境運輸的效率及順暢度。由 CUTS International 於 2021 年 1 月所發表的 MVA 的會議文章中提到，該協議將允許旅客和貨運車輛越過國家邊境並穿越參與國的主要貿易路線，並促進國家法規的統一性，使得該區域促進客運與貨運所使用的道路品質與完整度；一旦執行，將減少過境人員和貨物的昂貴和費時的轉運。其中項目包括改善現有運輸走廊的路線，以及加強跨境活動的設施，例如通行道路、港口和海關站點等。在運具整合方面，除了公路建設之外，鐵路與內陸水運方面也接連有所行動。BBIN 於 2016 年簽訂區域鐵路協議，藉由擴大跨國鐵路連接程度，以促進印度東北部與其 BBIN 鄰國之間的交通連通性(SASEC, 2016)；而印度與孟加拉也於 2018 年陸續簽署內陸水運與沿海運輸協定，允許孟加拉使用東北邊的 Kolaghat 和 Chilmari 港口做進出口使用(Press Information Bureau-Government of India [PIB], 2020)。接連行動都證明，這個南亞重要的經濟區域正在積極發展區域貿易的整合。因此本研究預計透過雙層規劃模型，應用在 BBIN 區域的實際跨境路網上，以找到目標下最適宜的改善措施組合。

1.4 研究流程與架構

本研究會以以下六部分來進行，其流程與架構如圖 1.3 所示：

(一) 界定研究問題

經了解實際研究區域邊境貿易之情形，參考文獻對於路網改善決策之雙層規劃的建模考量，並加入多運具、多商品且跨區域之研究方法，設計可模擬實際狀況之情境，希望透過求解問題來找到效益最大化的決策組合。

(二) 相關文獻之蒐集與回顧

蒐集與多式聯運、跨境運輸規劃相關之文獻，參考前人之研究考量與研究範圍，整理出對本研究有幫助之相關假設、資訊與模型。

(三) 建立數學模式

此研究之模型採用雙層規劃，分為兩個子模型：

上層模型在預算考量下以演算法搜尋措施組合，目標為最大化效益；下層模型為措施在上層搜尋出的措施組合下之跨區域且多運具之運輸規劃路網模擬。並於此模型中設計上下層模型的連動與遞迴，使得以達成終止條件下的最佳化組合。

(四) 設計求解方法

針對數學模式的兩個子模型各自的求解方法進行連動，架構詳述於 3.2 小節：

上層模型運用背包問題的概念來搜尋解以及設計其解的變動方向；下層模型透過 Bentley CUBE 此運輸規劃軟體，進行大規模地區的交通量指派。而此二子模型透過手動串連的步驟將每一階段的解導入 CUBE 軟體，使軟體可呈現出措施組合下的路網表現，並求得效益值；並將每一階段的子解效益值傳回至上層搜尋的決策列表中，使更新背包問題的項目，達成上下層的連動。

(五) 範例驗證

使用 BBIN 地區之現有路網模型，調整並修改該地區之初始 CUBE 模型，透過手動連動演算法與 CUBE 軟體。針對個別措施進行測試與初步討論後，再依據雙層的架構進行措施組合的搜尋，並針對收斂解的情況加以分析。

(六) 結論與建議

歸納整理本研究之結論，提出未來相關研究可進行或改良之方向，供此領域之研究者參考使用。

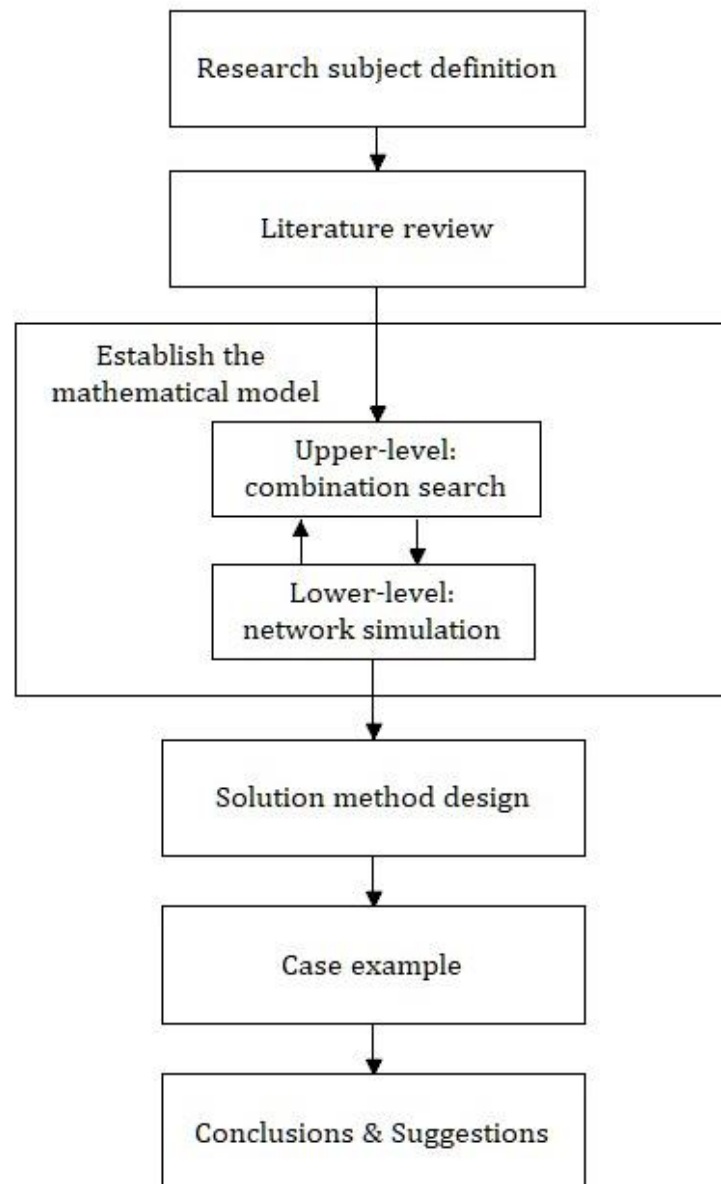


圖 1.3 研究架構圖

第二章、文獻回顧

本章節針對本研究主題進行相關的文獻回顧。首先就多運具貨運路網與傳統運輸需求模式之相關研究主題進行回顧；且本研究欲以雙層規劃來對研究主題建模，因此回顧同為雙層規劃建模之路網規劃問題；最後因研究地區組成包含多個區域，而對跨區域之路網規劃問題進行回顧。

2.1 小節從多運具貨運網路的研究方向出發，再將多運具路網的相關研究依據傳統運輸需求模式四步驟：旅次發生、旅次分佈、運具分配以及交通流量指派，大致分為前半部與後半部進行整理。2.2 小節就路網規劃問題中的雙層規劃模型進行回顧；2.3 小節則回顧考量了跨區域的路網規劃問題；最後於 2.4 小節總結。

2.1 以運輸規畫需求模式分析多運具貨運網路問題

由於建設交通基礎設施有固定成本此特點，因此貨運旅次的運輸規劃中，會就短、中、長期來做不同階段性的考量，或可針對研究問題而歸類為策略性(Strategic)、戰略性(Tactical)與執行性(Operational)規劃。SteadieSeifi et al.(2014)與 Bontekoning et al.(2004)整理貨物多式聯運的文獻，依據其研究問題之動機與特性，將設址問題(Allocation Problem)、樞紐分配問題(Hub-and-Spoke Problem)歸類成策略性規劃；而路網設計問題(Network Design Problem)、流量分配問題(Flow Planning Problem)則為戰略性規劃；最後車隊管理(Fleet Management)、路徑或排程問題(Routing or Scheduling Problem)則歸類成執行性的規劃問題。Arnold et al.(2004)即為一經典的運輸策略性規劃問題，在考量公路與鐵路系統下，採用線性二元規劃，目標為最小化總旅行時間，在不對容量做限制下，求解轉運點的最佳設址問題。

在多運具貨物運輸的研究領域中，會將貨物依轉換運具的方式，加上各運具託運人之間的關係，分為 Multimodal、Intermodal、Co-modal 與 Synchromodal (SteadieSeifi et al., 2014；Agamez-Arias et al., 2017)。雖然中文翻譯都為「多式聯運」，但在每一環節的合作程度上有些許的差異。Multimodal 定義為將貨物以至少兩種以上運具運送，單位為箱、貨櫃、車、船等，通常為地區或國家為規模進行，這也是最普及的一種聯運定義；Intermodal 則強調運具的單位須相同，在轉

換運具過程中以不變換貨物形式(e.g.貨櫃)為條件進行轉運；Co-modal 強調的是資源利用方式，重視不同運具各自及組合後的效率，期望透過網路分配的彈性，在單獨或合作的運具中都能夠最大化效益；而 Synchromodal 則結合了 Intermodal 與 Co-modal 的性質，透過供應鏈中各組織的協調與配合，促進運具組合結構化，以達到聯運系統的同步及效率。同時 Agamez-Arias et al.(2017)也對 Intermodal 及 Multimodal 之間的關係進行探討，提出此兩種模式分別為各自的上層關係的相反觀點。然而不論它們的上下關係為何，在許多文獻的定義中皆能互通有無，因此本研究的參考文獻中並未將此二者分開討論。

Mathisen & Hanssen (2014)就”Intermodal transportation”與”Freight”或”Goods”為搜尋關鍵字整理出了該年度以前的貨物多式聯運網路的研究趨勢。以時間軸而言，越舊的文獻越常提及「鐵路」，而越近的文獻更常將「環境」、「汙染」放入研究考量中。與公路相比，公路以外的運輸系統——如鐵路、海路、空路——帶來的能源消耗與環境外部性更低，但公路運輸卻能帶來更高的效率與可及性，因此就為聯運帶來研究的價值，透過考慮不同的條件、設定不同的目標，建構更符合現實狀況的聯運模式。

當以運輸規劃需求模式應用在多運具路網問題時，會依據研究主題之需要將不同步驟納入考量；當主題包含經濟、需求面向時，會從旅次發生及分佈開始評估；而討論到運輸貨物的運具與評估均衡路網的指派方法時，則納入運具分配與交通量指派步驟；以下分此二部分進行文獻回顧。

2.1.1 考量旅次發生、分佈之多運具路網問題

當運輸規劃需求模式應用在旅客運輸時，第一步驟的旅次發生會透過 O-D 旅次調查進行資料蒐集；若應用到貨物運輸，則須有明確且統一的統計方式，才可將各運具、各商品之運輸旅次做完整的紀載與整理。相較於旅客區域性的 O-D 旅次，貨物運輸的 O-D 旅次範圍更廣且牽涉更多，資料蒐集的過程耗時、費力且牽涉至多個運輸管理單位之合作，大多數研究採用單一國家政府的境內貿易或進出口貿易資料，作為研究數據。第二步驟的旅次分佈，多是由重力模型為基準，再根據研究特性去更改參數跟效用條件。

王慶瑞(2008)提到關於貨物運輸的產生與吸引，可利用成長率法，以現有的貨物運輸資料建立多元線性回歸模型，來預測未來的貨物運量。關於貨運旅次分佈，較常使用的為引力模式(Gravity Model)及線性規劃模式(Linear Programming Model)，前者主要以起點區域的貨運產生量、迄點區域的貨運吸引量及起訖點之間的一般化運輸成本為變數；後者注重運輸成本，希望在滿足供給限制下，使總運輸成本小化，較適用於低價值、高運輸成本的貨物型態。

Fernández et al.(2003)提到貨運旅次的產生，在給定各起訖點的商品價格與供需量的條件下，須依據產品鏈的上下游，產生輸入、輸出限制，即同一產品鏈的產品在各組起訖點須符合輸入—輸出的限制式；對原物料的運輸，要考慮貨物的出口條件，在處理原物料該步驟的輸入—輸出單位可能不同；而季節性商品，則要考慮貨物運輸的需求時間區間，例如原物料集中於幾個月內的產量與該產品的年需求量。而旅次分佈的子模型，考量各 O-D 對在產品、運具及運量的組合下有不同的效用函數，以最大化運輸起點的交易價格及最小化運輸迄點的交易價格為目標進行分佈。該文獻主要以託運人與承運人的角度對需求與供給分開建模，而貨運旅次發生與分佈則歸類於需求模型，下一節會對運具分配與流量指派進行回顧。

2.1.2 考量運具分配、交通量指派之多運具路網問題

在運輸規劃的運具選擇中，多採用一般化成本來建立多項羅吉特(Multinomial Logit)模式。若要對於貨物運輸做運具分類，有的研究會合併旅客與貨物的規劃，將旅客視為其中一種貨物進入考量(Yamada et al., 2009)；也有研究會將運具分類別、分等級做階層性的選擇(Wong et al., 2004)。而交通量指派的部分，方法包括傳統的 Wardrop 均衡原則(Wardrop's Equilibrium Principles)及梯度投影法(Gradient Projection)等。

Wong et al. (2004)為旅客運輸的路網規劃，其在運具分配之子模型考量多運具、多等級用戶等條件，將運具分類成組，用戶則依時間價值(Value of time, VOT)分為不同等級，而用戶可階層性選擇運具：第一層選組合，第二層再從組合中選擇特定運具。如此一來，可知特定用戶之族群在 O-D 組合間，選擇使用運具組

合與其中特定運具的比例。交通量指派的部分，則由 Wardrop 提出之均衡原則作為指派原則。透過將部分線性化方法(Partial Linearization Approach)加入演算法，把成本與流量分配到路網後，再檢查收斂進度是否到達可接受範圍，來決定是否要進入下一個迭代。

Uddin & Huynh (2015)以雙層規劃來描述託運人與承運人之決策：上層由託運人來選擇承運人，下層則以最小化運輸時間來求得承運人之決策，而該研究僅就下層問題進行建模，考慮多運具但不考慮商品種類，目標為最小化轉運成本，成本則以旅行時間為計算單位。運具部分分為僅公路、僅鐵路及公鐵路混和，假設鐵路容量皆為滿載，而公路會因壅塞而降低容量，以 BPR 函數反映壅塞成本，同時也考慮轉換運具所造成的延遲時間。該研究使用基於路徑的指派方法(Path-based Assignment Algorithm)，又稱梯度投影法，亦有使用傳統 Frank-Wolfe 演算法測試相同例題與之比較，證實梯度投射法能更有效率的解決大規模路網問題。

連同上一小節的旅次發生與分佈，Fernández et al. (2003)將運具分配與前二步驟建立於需求模型，由託運人透過雙層規劃建立需求決策的子模型，決定貨物的 O-D、運具模式與轉運組合；再由承運人依據 Wardrop 均衡原則，做第四步驟的交通量指派，決定多運具、多商品且多用戶之路網分配。透過將供給、需求分開建模，可同時考量託運人與承運人之偏好及決策資訊。

Yamada et al. (2009)亦使用雙層規劃，但不同的是該文獻不將承運人與託運人分開建模，也不考慮其行為偏好及相互作用。上層利用演算法求解措施組合，下層問題為多運具、多等級用戶的使用者均衡流量分配模型。用戶部分考慮旅客運輸與貨物運輸，將旅客視為其中一種商品加入考量；且利用變分不等式(variability inequality)來描述使用者均衡條件下的不對稱的雅可比矩陣(Jacobian matrix)成本函數，避免均衡指派模型在證明為凹函數時需要使用的唯一性條件(Uniqueness conditions)與二階導函數矩陣(Hessian matrix)。其中雙層規劃之回顧會描述於下一節。

2.2 利用雙層規劃建模之路網規劃問題

一般使用雙層規劃對離散路網設計問題建模時會使用領導者與追隨者之賽局(Leader-follower Game)的概念來描述，以交通規劃部門為領導者，而自由決定路徑的路網使用者為追隨者，領導者可以透過決策的制訂來影響追隨者，但不能控制其行為。變數方面，上層之主要決策變數為道路措施決策組合，而下層之主要決策變數為道路流量，透過決策組合影響道路流量產生變化，來計算各路網欲評估之改善水準。

Gao et al. (2005)提出，離散路網設計問題為在給定的起訖對需求之下，考慮路網用戶之路徑選擇行為時，做出最佳的路網改善決策以最大程度地減少總旅行成本。其整理出離散與連續地路網設計問題之差別在於，離散指的是在現有路網上新增路段的最佳決策；而連續則為在現有路段上擴增的最適道路容量。但以雙層規劃來描述投資決策與路網表現時，即使是簡單的線性雙層規劃問題都容易成為 NP-hard 問題；其中最困難地為找出流量在方案下的關聯與變化，再以下層的流量函數被替換為方案函數進入上層求解。因此該研究使用廣義 Benders 分解法來描述上下層變數之關聯。

Loureiro et al.(1996)提出的多商品、多運具路網設計模型(Multicommodity Multimodal Network Design Model, MCMND)，在非線性之雙層規劃中加入預算限制，希望在最小化運輸成本及最小化環境影響之雙目標下，決策最佳的貨運路網投資組合。其假設運輸需求固定，考慮運具間的競爭，但不考慮人旅次需求及個別託運人之決策。上層使用混和整數規劃建模；下層結合運具分配與流量指派，使用基於路徑的隨機使用者均衡指派方法(Path-based Stochastic User Equilibrium Assignment Algorithm)。在求解方法上，該研究使用 TransCAD 此運輸模擬軟體求解道路流量，透過兩階段的演算法，並設計介面來連結演算法與流量模擬軟體。而該文獻提到，該模型以小規模之多式聯運路網測試時，可有效取得路網措施之最佳解；但應用於大型路網時，因流量模擬軟體之資料量極大，僅能推得其在可接受範圍內之最優解。

而 Yamada et al.(2009)的雙層規劃問題將研究主軸放在上層尋找措施組合的演算法求解效率，利用基因本地搜尋法(Genetic Local Search)來求解行為組合，

目標為最大化實施組合的效益成本比(Benefit-Cost Ratio, BCR)。但因考量的道路措施包含設施改善、道路拓寬與建置新公路、鐵路等，成本差異過大，當上層目標是效益成本比時易導致最佳行為組合趨向於選擇設施改善、道路拓寬等成本較低之措施。該研究針對兩個地區的路網進行測試，當在菲律賓等多式聯運發展較成熟之區域，模型可有效找出壅塞問題更嚴重之路段或更需要被改善之設施；但若研究區域的多式聯運網路不夠成熟，在需求有壅塞路段改善與基礎設施擴建時，模型的結果會更傾向於成本較低之改善措施，難以促進多式聯運的發展。

2.3 考量跨區域之路網規劃問題

由於本研究會基於跨境規劃提出行為措施，因此對跨區域(Interregional)、跨境(Cross-border)之路網規劃問題做了相關的文獻回顧。一般而言，跨區域不設限於國家之間，更常被使用於描述州與州、縣與縣等同一國家的行政區域之間；而跨境則以描述大陸地區之國家邊境為主。本小節整理了與此二者相關之路網規劃問題的文獻進行回顧，但回顧內容不局限於多式聯運的貨運路網。

Peña (2007)談的是美國—墨西哥邊境規劃的制度，提出了邊境規劃的政府角度與立場，不論是政治面、法律面或操作面，統一的協調機關在跨境規劃其中就扮演了很重要的角色，且擁有很高的決定權。Kundu & Sheu(2019)則描述了跨境貨運的流量受跨政府互動的影響，以兩階段建立決策模型。第一階段為跨政府的互動，以囚犯困境(Prisoner's Dilemma)的概念來表示政府之間合作與不合作的利益關係，而政策的決定是動態且隨機的；第二階段則假設政府間在供需點上取得合作的情形之下，以空間相互作用方法(Spatial Interaction Approach)考量路徑流量、成本及政府的干預程度，來評估供給、運輸、需求的節點流量，且判定擁有最大流量的即為最佳路徑。

Andersen & Christiansen (2009)則以歐洲的大型路網“Polcorridor Logchain 研究”為例，透過串連各國既有鐵路運輸能力，對歐洲北部與東南部，在長廊的終點站結合內陸水運、海運、公路與鐵路支線來創造多式聯運走廊。該研究提出一個服務網路設計模型(Service Network Design Model)，考量了成本效益與服務品

質，在需求由商品類別及 O-D 定義的情況下，對網路容量和可及車輛做限制，期望滿足所有需求的同時最大化營運者的利潤。

Ham et al.(2005)以美國各州之間的貨運為例，在考量了多運具、多商品等條件下，代入過去的商品 O-D 流量統計，以區域間的商品運輸模型(Interregional Commodity Shipment Model)來預測商品在各區域、區域間和區域內的運輸量，以及這些運輸量所產生的路網流量，目標為最小運送距離。其考慮的運具分為公路與鐵路，假設鐵路無容量限制，即沒有壅塞成本；而運具分配時以運送價值加上運送距離來定義其效用。而該模型以 A.G Wilson(1970)之迭代平衡法(Iterative Balancing Method)來求解區域間的商品運輸量，在用全有全無指派(All-or-Nothing Assignment)將運輸量指派到路網成流量。

2.4 文獻回顧總結

依第一小節的歸類方法，本研究應為策略性規劃與戰略性規劃的結合問題，透過選擇運具模式做流量分配後，再決定行為組合的決策；且本研究並無強調貨物資料以同一貨櫃進行運輸，因此採用 Multimodal 之多式聯運定義。本研究參考的文獻大多包含運具選擇與交通量指派的綜合模型，過去在多運具、多商品的考量下建立模型的研究蠻多的，但每一篇的假設都有些微不同。多運具的部分，有依據公路、鐵路、海路等純運具的分法(Ham et al., 2005)，也有分為純運具與組合運具的方式(Fernández et al., 2003；Uddin & Huynh, 2015)，後者須考量轉運點的選擇加入路網指派中。而多商品的部分，則依據不同研究地區之商品分類方法，比較特別的是 Yamada et al.(2009)合併旅客與貨物的規劃，將旅客視為其中一種貨物，以用戶類別來進行到路的流量分配。

第二小節之雙層規劃建模，上層在聯運路網下透過不同道路措施，影響下層用路人的運具與路段之選擇。由於雙層規劃因其求解複雜性易形成 NP-hard 問題，因此該節參考之文獻透過數學模式轉換及演算法連結流量模擬軟體等方法，嘗試找出可接受範圍下之可行解。

由於本研究牽涉至跨區域之邊境問題，在措施的實施上會受多個國家之間的政治互動與利益關係所影響，經由文獻回顧，得知跨境/跨區域之路網規劃問題在

過去研究中的狀況。現有許多區域經濟體整合的組織，例如南亞次區域經濟合作計劃(SASEC)，在組織成員中即扮演統一協調的角色，來推動區域經濟發展。如歐盟的多式聯運長廊的例子，跨境多式聯運的需求也隨著經濟發展而提升。

由上述總結，本研究之貢獻為在結合跨區域且多運具之貨運網路規劃中，加入跨境之因素來設計決策運輸措施組合的方法，並透過軟體求解來證實此模型之可行性，以提供區域經濟體一個能有效選擇運輸措施的模型。

第三章、研究方法

本研究使用雙層規劃來模擬演算法搜尋出的措施組合下的路網；上層設計基於背包問題概念的演算法來搜尋邊境上的交通措施投資組合，而下層則反映出不同措施組合下的路網流量表現，回傳路網改善目標值至上層以影響搜尋的變化。此章節將介紹本研究的研究方法，分別針對數學模型跟求解方法說明，3.1 小節明述問題與數學模型之架構；3.2 小節針對解法的架構，交代數學模型到解法建構上的轉換，以及演算法與求解軟體之連動關係。

3.1 數學模型架構

本研究使用雙層規劃模型，欲在有限的預算上，透過上層的搜尋來決定投資項目，以交通建設的投資來影響用路人與貨運人在下層的運具及路線選擇；建模方法參考了 Yamada et al.(2009)及 Loureiro et al.(1996)中上層的不同變化影響下層的流量分配與指派結果。

上層利用背包問題之概念設計離散搜尋的演算法，然而在典型的背包問題中，各項目的價值相互獨立，但本研究放入搜尋中的項目為路網改善措施，而措施之間並非獨立存在，使得在投資措施組合為單點與多點的路網效益並非線性相加的關係。因此在本研究的措施集合中定義單點措施(Project)與措施組合(Combination)的集合，措施組合可能包含單個或多個措施，透過下層模擬措施來計算路網效益，並參考 Huang & Kuo(2013)及 Zhong & Yang(2010)中使用背包問題描述交通建設投資時的決策相依性，設計限制式來描述措施之間的相依性，並避免上層的組合搜尋受其影響。下層為投資措施後之多運具、多商品且跨區域的使用者均衡流量分配模型，以限制式描述使用者均衡的模型，並將路網結果傳回上層，以路網效益表現路網改變下的流量變化。

本研究之模型假設為以下：

1. 在社會經濟資料取得下，人流與貨物各自透過旅次產生與旅次分布，生成區域之起訖對需求，且旅次產生完的需求不因措施之設置而改變。

2. 因客運與貨運同時透過道路進行流量指派，因此將運具分配完的小客車、巴士等客運流量及貨運中的卡車流量，透過道路容量當量轉換成小客車當量，同時進入路網進行流量指派。
3. 路網中之運具路段不重疊，即使使用同組起訖節點，也會依據運具屬性建立不同路段；若是使用相同路網的不同運具，如小客車、巴士、卡車等，在指派時會針對各種流量項目進行個別紀錄。
4. 不考慮商品在運輸過程中，以多種運具組合做同一組商品之路徑。

3.1.1 模型使用之符號及參變數定義

為建立路網模型，令 I 為獨立的投資措施集合，而 J 為投資措施組合的集合，每一個措施組合 J 可包含一個或多個獨立措施 I ；並用 N_j 表示組合 J 中包含的措施組合集合；其中路網有 W 對 O-D 起訖對，而路段集合為 A ，在不同運具使用同一對起訖對時也會有不同的路段；在模擬路網指派後，路段上會有 K 種流量項目，分別記錄其流量、單位旅行時間及時間價值。

由於路網的措施之間並非獨立存在，在投資單一措施與投資組合措施上的效益並非線性相加，因此在本研究的措施集合中定義獨立與組合的措施集合，透過下層模擬實施單獨或組合的措施來計算其效益。而上下層透過參數、變數的轉換，達成數學模型之間的連動。上層利用背包問題選出措施組合為投資項目，透過措施投資與否的變數(u_i 、 v_j)，轉換成路段上措施實施與否的變數(z_a)，來改變路段成本函數($t_a^k(x_{ak}, z_a)$)，進而影響路段阻抗變數(c_k^w)，傳送到下層作為參數，進行運具分配；而下層計算完路網的時間節省效益後，將措施組合的效益變數(b_j)，傳回上層作為參數計算目標值，如圖 3.1 所示。

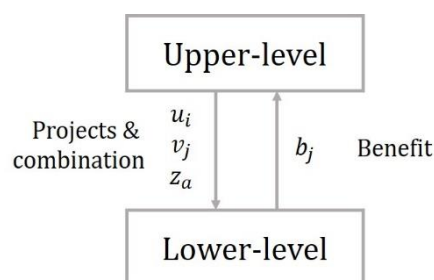


圖 3.1 上下層關聯圖

集合

I ：投資措施， $\forall i \in I$

J ：投資措施組合， $\forall j \in J$

N_j ：組合決策 j 內的措施組合集合， $\forall j \in J$

W ：O－D 起訖對， $\forall w \in W$

K ：流量項目，例如：小客車當量、鐵路貨運噸數等， $\forall k \in K$

A ：路段， $\forall a \in A$

參數

b_j ：措施組合 j 的效益， $\forall j \in J$

d_i ：措施 i 的實施成本， $\forall i \in I$

B ：預算限制

$$\varepsilon_{ai} = \begin{cases} 1, & \text{若路段 } a \text{ 為措施 } i \text{ 會影響到的路段} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \forall a \in A, \forall i \in I$$

t_a^0 ：路段 a 上的自由旅行時間， $\forall a \in A$

α_a 、 β_a ：BPR 模型的校正參數， $\forall a \in A$

r_a^0 ：路段現有容量， $\forall a \in A$

r_a ：路段實施措施後增加的道路容量， $\forall a \in A$

τ_a^0 ：路段 a 原本的通關時間， $\forall a \in A$

τ_a ：路段 a 經措施改善會被降低的通關時間， $\forall a \in A$

ρ_k ：流量項目 k 的單位時間價值， $\forall k \in K$

θ ：Logsum 係數

q_k^w ：流量項目 k 在O－D起訖對 w 上的需求， $\forall k \in K, \forall w \in W$

f_{ak}^{0w} ：未進行措施時，流量項目 k 在O－D起訖對 w 上走路段 a 的流量， $\forall w \in W, \forall a \in A, \forall k \in K$

x_{ak}^0 ：未進行措施時，流量項目 k 在路段 a 上的均衡流量， $\forall a \in A, \forall k \in K$

$t_a^k(x_{ak}^0)$ ：未進行措施時，流量項目 k 在路段 a 上的旅行時間， $\forall a \in A, \forall k \in K$

變數

$$u_i = \begin{cases} 1, \text{如果措施} i \text{被實施} \\ 0, \text{其他} \end{cases}, \quad \forall i \in I$$

$$v_j = \begin{cases} 1, \text{如果措施組合} j \text{被實施} \\ 0, \text{其他} \end{cases}, \quad \forall j \in J$$

$$z_a = \begin{cases} 1, \text{如果路段} a \text{的措施有實施} \\ 0, \text{其他} \end{cases}, \quad \forall a \in A$$

$t_a^k(x_{ak}, z_a)$: 流量項目 k 在路段 a 上運輸的旅行時間, $\forall a \in A, k \in K$

$$\delta_{ak}^w = \begin{cases} 1, \text{若流量項目} k \text{在} O-D \text{起訖對} w \text{上走路段} a \\ 0, \text{其他} \end{cases}, \quad \forall w \in W, \forall a \in A, \forall k \in K$$

c_k^w : 流量項目 k 在 $O-D$ 起訖對 w 上的阻抗(Impedance), $\forall k \in K, \forall w \in W$

f_{ak}^w : 流量項目 k 在 $O-D$ 起訖對 w 上走路段 a 的流量, $\forall w \in W, \forall a \in A, \forall k \in K$

x_{ak} : 流量項目 k 在路段 a 上的均衡流量, $\forall a \in A, \forall k \in K$

3.1.2 數學模型說明

上層模型：以背包問題搜尋措施組合

$$\max \sum_{j \in J} b_j v_j \tag{1}$$

s.t.

$$\sum_{j \in J} v_j = 1 \tag{2}$$

$$|N_j| v_j \leq \sum_{i \in N_j} u_i, \quad \forall j \in J \tag{3}$$

$$\sum_{i \in I} d_i u_i \leq B \tag{4}$$

$$z_a = \sum_{i \in I} \varepsilon_{ai} u_i, \quad \forall a \in A \quad (5)$$

$$t_a^k(x_{ak}, z_a) = t_a^0 \left[1 + \alpha_a \left(\frac{x_{ak}}{r_a^0 + r_a z_a} \right)^{\beta_a} \right] + \tau_a^0 - \tau_a z_a, \quad \forall a \in A, \forall k \in K \quad (6)$$

$$b_j = \sum_{k \in K} \sum_{a \in A} x_{ak}^0 t_a^k(x_{ak}^0) \rho_k - \sum_{k \in K} \sum_{a \in A} x_{ak} t_a^k(x_{ak}, z_a) \rho_k, \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$c_k^w = \sum_{a \in A} \delta_{ak}^w t_a^k(x_{ak}, z_a), \quad \forall k \in K, \forall w \in W \quad (8)$$

$$u_i, v_j, z_a \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall a \in A \quad (9)$$

下層：運具分配與交通量指派的整合模型

$$\min Z = \sum_{k \in K} \sum_{a \in A} \int_0^{x_{ak}} t_a^k(\omega) d\omega \quad (10)$$

s.t.

$$f_{ak}^w = q_k^w \left(\frac{\exp(-\theta c_k^w)}{\sum_{w \in W} \exp(-\theta c_k^w)} \right), \quad \forall w \in W, \forall a \in A, \forall k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{a \in A} f_{ak}^w = q_k^w, \quad \forall k \in K, \forall w \in W \quad (12)$$

$$\sum_{w \in W} f_{ak}^w \delta_{ak}^w = x_{ak}, \quad \forall a \in A, \forall k \in K \quad (13)$$

$$f_{ak}^w, x_{ak} \geq 0, \quad \forall w \in W, \forall a \in A, \forall k \in K \quad (14)$$

在上層模型中，式(1)為上層模型之目標式，目標為最大化實施投資措施組合的總效益，效益定義為因措施實施後所節省的路網總旅行時間節省效益；旅行時間定義為延流量小時，而旅行時間節省是由路段上各項目的流量乘以路段上運輸

流量的單位旅行時間來計算，再針對不同項目的時間價值作加權，計算旅行時間節省的效益值。式(2)到式(9)為上層的限制式，其中式(2)到式(4)描述搜尋上的做法及其限制；式(5)將搜尋出的措施組合轉換成路段上的措施有無被實施；式(6)到式(8)表示路網因實施措施而產生的影響，以及效益的計算方法；式(9)為變數型態的宣告。

式(2)限制每一迴圈的搜尋只能選擇一個組合 j ，不論上該組合包含一個或多個投資措施 i ；式(3)限制選到組合 j 後，將 v_j 透過 N_j 轉換成 u_i ，以方便透過式(5)轉換成路段上的措施；式(4)則限制總實施措施成本的預算。式(5)透過表示路段與投資措施之間關係的零壹參數 ε_{ai} ，將該迴圈下選取到的投資措施 i ，轉換成 z_a 表示路段是否會實施措施；進而影響到式(6)的路段成本函數，以 BPR 函數反映路段的壅塞效應(US BPR, 1964)，路段旅行時間會受措施實施與否而變化，以 z_a 項來控制措施路段的容量上升以及通關時間下降，其中 BPR 模型的校正參數 α_a 、 β_a 則會因為運具型態而有不同。式(7)為效益值的計算，針對該投資措施組合下的均衡路網，計算措施實施前後的總旅行時間價值差，作為實施該措施組合的效益；其中未實施措施時各流量項目的路段均衡流量與單位旅行時間視為參數，作為措施實施後的路網效益比較基準。式(8)將路段旅行時間轉換到下層變為阻抗參數，為上層傳至下層的主要連結；式(9)宣告獨立及組合措施的選取與否以及路段措施的實施與否為零壹變數。

而在下層模型中，式(10)為目標式，描述在使用者均衡的指派中，目標為最小化總運輸成本；然而本研究未考慮旅行時間以外的運輸成本，因此目標即為最小化總路段旅行時間，而旅行時間的變動來自上層的措施實施與否，由式(6)改變路段旅行時間後而得。式(11)到式(14)為下層模型之限制式，描述運具分配與流量指派下需求與流量的關係。式(11)為運具選擇的離散羅吉特模型，計算措施實施後，需求固定下的運具分配比例；式(12)表路段流量之總和應為流量項目 k 在 O-D 起訖對 w 上之需求；式(13)則計算流量項目 k 在路段 a 上指派到的流量，確保遵守流量守恒。式(14)定義路段流量為非負變數。當上層選擇不同組合而改變各措施的實施與否時，會改變各 O-D 對的阻抗，使得下層重新執行旅次分布，進而去作運具選擇與流量指派。

3.2 解法建構

本研究之數學模式使用雙層規劃模型來描述搜尋機制下，模擬在跨境路網中實施措施後導致流量變化的情形，利用回饋路網表現至上層搜尋的方式來取得收歛時的最佳解。由於跨境路網的規模較大，且跨境上的措施點多，使得求解的複雜度大幅增加，因此在求解方法上，透過演算法配合求解軟體的方式，來搜尋投資組合下的較優解。

而下層部分來使用 Bentley CUBE software 此運輸規劃模擬軟體，來模擬投資後的路網表現，軟體來源：<https://www.bentley.com/en/products/brands/cube>。其為一功能強大，多用於模擬大區域路網的運輸規劃軟體，可處理運輸需求模式以及需求預測。除了透過路網建設來模擬實際交通路網流量的表現外，CUBE 也可導入 GIS 的視覺化功能，利於呈現路網表現。使用此軟體來模擬下層模型的原因除了其強大的功能外，本研究亦取得亞洲開發銀行透過 CUBE 所建立的 CMS 路網模型的研究資料作為案例資料來源，節省了前期準備大型區域路網的社會經濟資料的蒐集及整理的繁複過程，使可將有限的研究時間致力於建立並修改軟體模型架構與設定使符合本研究之需求，案例背景與細節詳見第四章。

本研究的上層使用一個離散搜尋方法，在資金有限的情形下，選擇一個能滿足最大效益的路網措施投資組合，以達到組合最佳化(Combinatorial Optimization)，因此參數上需要各措施的建置成本與效益。在眾多的可投資措施下，以評估措施組合為一個獨立措施的效益，作為搜尋的初始值，利用演算法求得當前最佳組合，稱為搜尋解(Knapsack-based Solution)；針對每個搜尋解會產生子解集合(Scenario Evaluation Set)，將搜尋解傳入下層路網改變路段參數，以測試該子解集合下各子解的路網效益，並以子解中效益成本比最高的措施組合來重新校估其他措施組合為單點時的獨立效益。

然而因路網上的措施之間不獨立，措施組合產生的路網效益不同於背包問題所求出之組合效益，因此需透過將變數組合代入下層路網進行重新模擬，方能透過輸出措施改變下之路網，計算措施實施後的路網效益。因此，本研究透過上層背包問題所搜尋出的階段解套至 CUBE 軟體中改變路網結構，進行運輸規劃步

驟，改變到旅次分布、運具分配與流量指派的結果後，利用得出的階段結果計算目標值效益，再依比例更新該組合下個別措施的效益，重複執行直到收斂。以下分為三個部分說明：首先是背包問題配合 CUBE 軟體求解的雙層解法建構，再以上層與下層的模型依流程圖步驟說明。

3.2.1 雙層解法建構

在 3.1.2 小節中，上層限制式(2)描述所有措施組合集合 J 中僅能選取一個組合 j ，然而在本解法中因下層模擬時間長，造成難以針對所有組合進行大規模組合模擬，進而得知他們的效益 b_j 與組成該組合的單獨措施成本 d_i ，因此在解法中增設一個集合 M_j ，將與組合 j 中重複至少一個單獨措施的組合納入 M_j ； M_j 與 N_j 之主要差異為 N_j 中的所有組合皆為 j 中所有單獨措施的組合，而 M_j 中的組合可包含不在組合 j 中的單獨措施。在增設 M_j 後，轉換限制式(2)成限制式(15)、(16)，來描述選擇 v_j 與 M_j 之間的關係。

$$\sum_{k \in M_j} v_k \leq (1 - v_j), \quad \forall j \in J \quad (15)$$

$$v_k + v'_k \leq 1, \forall j, k, k' \in J, N_k \subseteq N_j, N'_k = N_j - N_k \quad (16)$$

式(15)限制當選取到 v_j 時，要避免選取到與 M_j 內的其他組合；而式(16)則描述當把兩個子集合可組合成 N_j 時，無法同時選擇該兩個組合。由以上這兩式的拆分方法，分別針對 M_j 與 N_j 兩個集合來補充限制式(3)的選取組合唯一性。

在產生初始且不受變動的區域間需求後，透過將上層演算法所搜尋到的措施組合，產生 N_j 並將其中各解代入 CUBE 中改變路網結構；而在再將措施執行下得到的新路網與初始路網(Base network)相比較，計算效益值並更新當前最佳解與效益。然而針對組合 j 中未包含到的單點措施 i ，會使用前一接段中已測試但未達預算之最高成本效益比的組合，加入這些單點措施來進行測試；相同地，將新路網與初始路網相比較來計算投資措施下的效益值，透過不斷調整各單點措施的潛在效益，試圖去影響每一迴圈的搜尋方向，直到達到終止條件。其中上層與下層的詳細執行細節會於 3.2.2 與 3.2.3 小節分別介紹。

圖 3.2 為雙層解法建構的總流程圖，其中粗體並用虛線框起來的部分為下層運輸規劃模擬軟體中執行的步驟，而組合搜尋與效益值的更新則是在上層執行。

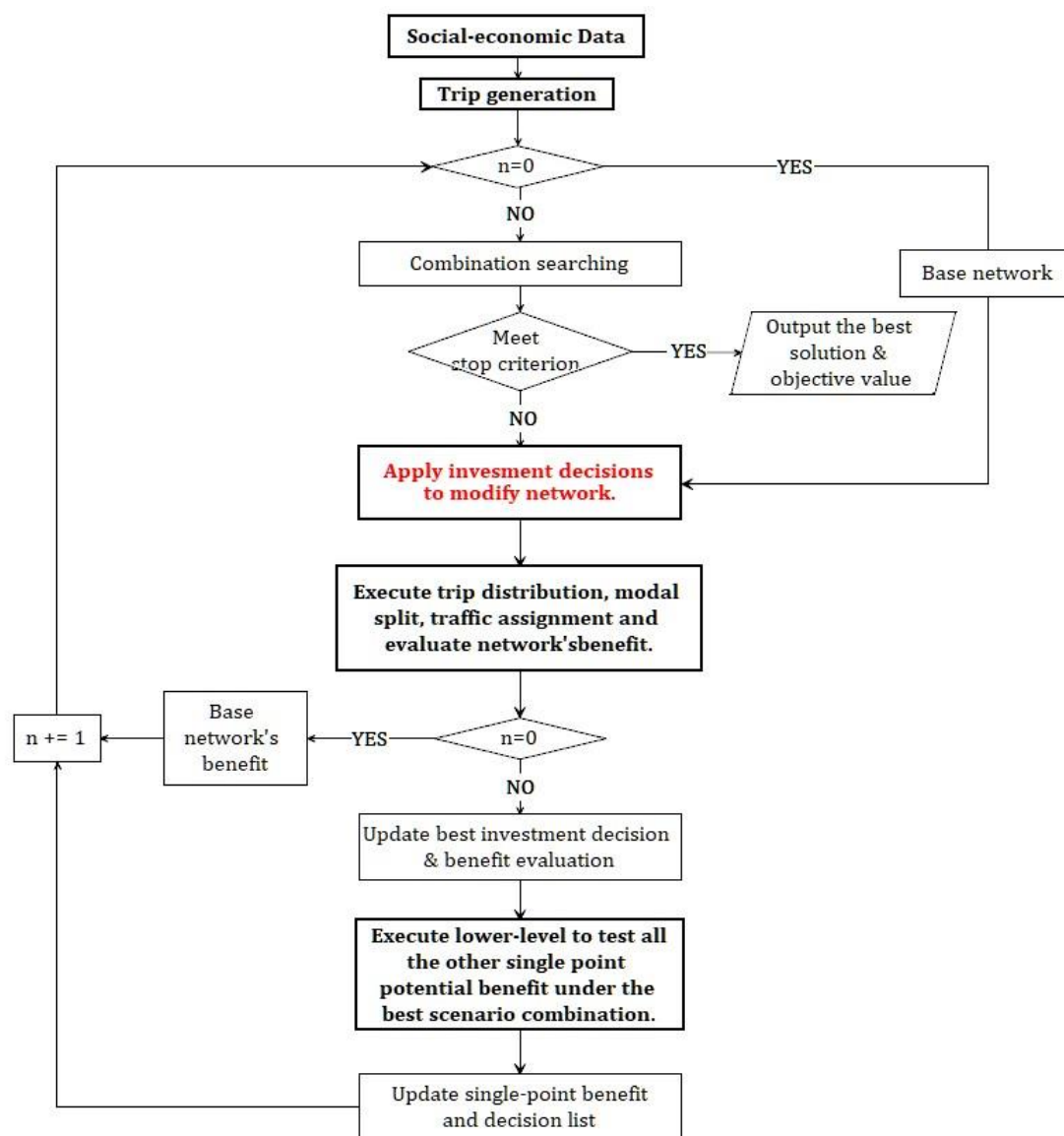


圖 3.2 本研究之雙層解法流程圖

步驟 0：導入社會經濟資料做旅次產生

本步驟在 CUBE 軟體中執行，導入研究地區的社會經濟資料，包含各區域的人口數、GDP 等，利用該資料分別對客運與貨運，進行旅次產生；且此步驟產生的交通分區之間的需求，不會因為實施措施導致路網改變而有影響。

步驟 1：建立初始路網

以尚未實施任何措施的路網作為初始路網(Base network)，即迴圈數 $n=0$ 時，使用初始資料建立初始路網，作為後續任何實施過改善措施的路網的比較基準，用以計算改善後的路網可減少的旅行時間節省作為該組措施的效益。

步驟 2：上層搜尋投資措施組合

若 $n \neq 0$ 時進行組合搜尋，如 3.2.2 上層演算法中的步驟 1 到 4。用當前的效益與成本參數，在預算下找出能夠容納最多措施且帶來最大效益的組合；並以措施之間的相依性對搜尋解進行校正，同時產生該搜尋解下的子解集合。在 $n=1$ 時，對該子解集合中的各組子解，透過限制式(5)，將要執行的措施轉換成要改善的路段，套入下層模擬路網；而若 $n \neq 1$ ，則進行步驟 5，判斷終止條件。

步驟 3：將上層組合代入下層改變路網，並進行下層路網模擬

當 $n=0$ ，產生初始路網表現；當 $n \neq 0$ ，對每一組子解進行 3.2.3 的下層路網模擬，在固定的交通分區需求下，完成旅次分布、運具分配與流量指派步驟，並與初始路網比較並計算旅行時間節省效益。

步驟 4：評估各組合效益成本比，並重新估計僅包含單點措施的組合效益值

本步驟相當於 3.2.2 上層演算法中的步驟 7 到步驟 11，比較該圈子解集合中的各組解之效益，更新當前最佳解；而針對未存在於該解的單點措施，也會使用搜尋組合中已測試但未達預算之最高成本效益比的組合，納入這些單點措施來進行下層測試，以重新評估僅包含單點措施的組合的最大潛在效益值；在測試過均衡路網並計算出效益後，將這些組合納入決策列表，已進行下一圈的搜尋。

步驟 5：判斷終止條件

在 $n > 1$ 時略過此步，進入步驟 4；當迴圈數 $n < 1$ ，判斷是否達到終止條件：當此圈搜尋出的組合與上一圈相同時，表示所有可執行下層的組合皆與上一圈相同，因此輸出當前決策列表中擁有最高效益值之組合，作為最佳解與最佳效益值。

3.2.2 上層搜尋演算法

圖 3.3 為上層演算法的流程圖，為圖 3.2 中在 CUBE 執行以外的步驟，且詳細描述搜尋時的限制與校正過程。以下依步驟說明。

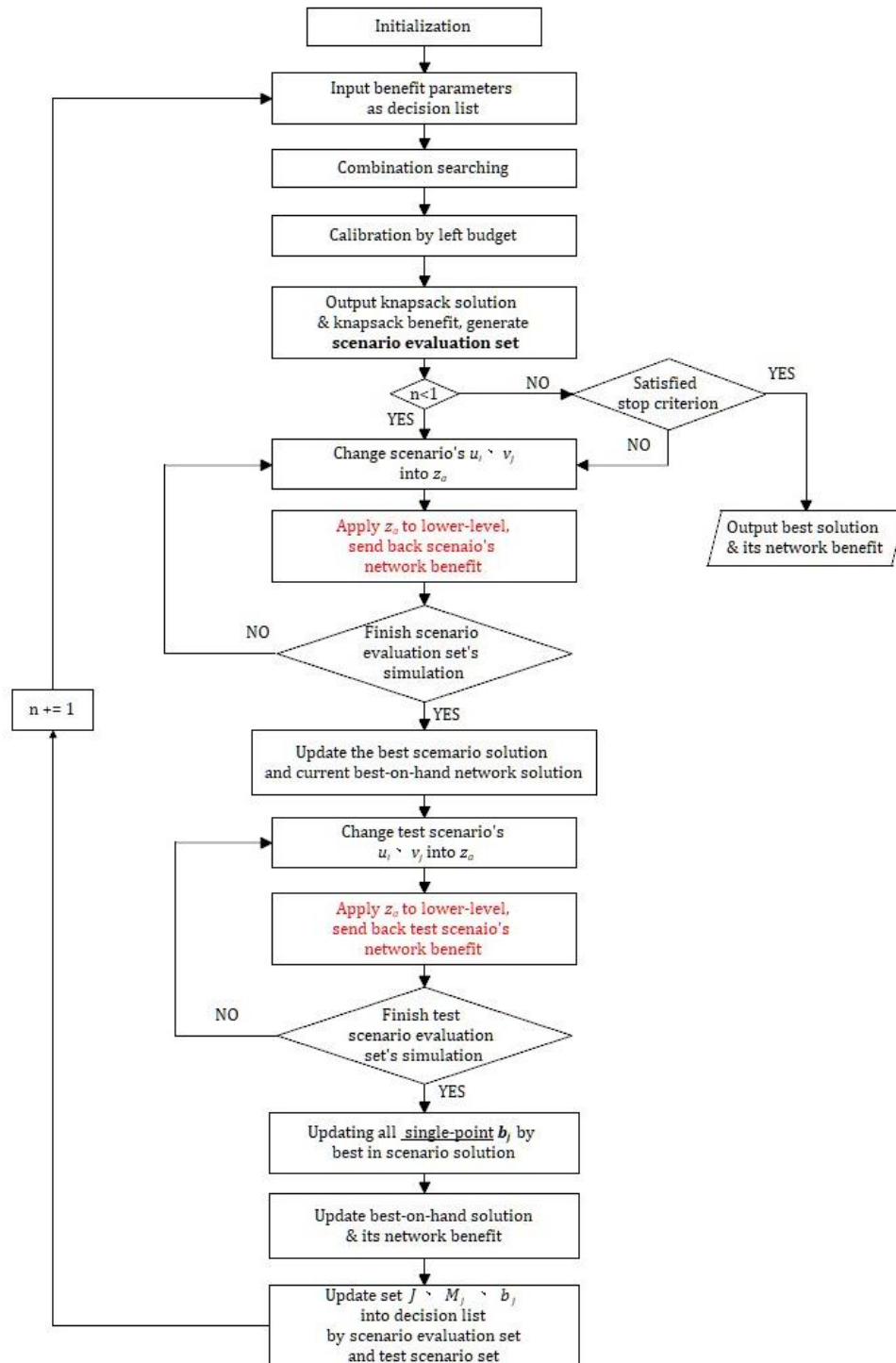


圖 3.3 上層背包問題搜尋流程圖

步驟 0：初始化

先針對各個僅包含一個單獨措施的組合進行測試，而僅包含該措施點的組合效益則視為該措施點的初始效益值，每次測試時透過改變會影響到的路段的容量與通關時間，進行下層路網模擬；再以措施實施後的路網與初始路網做比較，透過不同流量項目的時間價值加權計算後，得到各組合的初始效益 b_j ，與各點的建置成本 d_i 一同紀錄於決策列表(Decision list)中。

步驟 1：輸入決策列表

本步驟在 $n=0$ 時，決策列表的項目個數即為措施點的個數。以僅包含一個單獨措施的組合 j 、初始效益值 b_j 與執行 i 點的成本 d_i ，作為決策列表及其參數；而後會依每一圈的搜尋解與子解集合更新決策列表，其中每個組合的執行成本則由其中包含的多個單獨措施 i 的 d_i 加總而成，以進行下一圈的組合搜尋。

步驟 2：組合搜尋

本演算法的概念是從背包問題出發，本身為一個零一規劃問題，決定每個組合變數只能選或不選，且每一者都有其效益 b_j ，以及每個組合由其中包含的單獨措施的 d_i 加總而成的執行成本，來求解預算限制 B 下可以得到最大總效益；其中搜尋時因納入限制式(15)及(16)，避免了措施組合之間有相依性的問題。而在當前決策列表中所求的解稱為搜尋解(Knapsack-based solution)，並計算此解中各項措施的效益加總為目標值(Knapsack-based benefit)；而第二圈之後，決策列表會將所有進行過下層模擬的措施組合 j 及其效益、成本納入，增加組合進行搜尋。然而本研究的搜尋解總效益與搜尋解下的路網總效益(Network benefit)並不相等，因此透過下層來模擬搜尋解下的措施改善後的路網，並計算其路網總效益。

步驟 3：以剩餘預算校正搜尋解

因傳統背包問題僅能接受物品的價值為正時納入選擇，但本研究所計算的路網效益值為負時，僅能表示該組合中的點被執行時，會使得路網總旅行時間價值較基礎路網增加，並不表示這些措施點與其他措施共同執行時一定會有比較差的表現，若僅以正效益值的單點組合納入搜尋範圍，容易卡在區域解；因此在搜尋解產生後仍有剩餘預算時，選擇將最小負效益值的單點措施組合加入該解。

步驟 4：輸出搜尋解與產生子解集合

當 $n < 1$ ，依各搜尋解產生子解集合(Scenario evaluation set)，以該搜尋解的組合下依次取出某點，作為一個子解，如表 3.1 所示；並對每一個子解進行下層路網模擬。若 $n > 1$ ，需先進入步驟 13，判斷是否已達終止條件，未達則進入步驟 5。

表 3.1 搜尋解下的子解集合示意圖

Knapsack Solution	Scenario Evaluation Set
(A, B, C)	(A, B, C) (B, C)、(A, C)、(A, B)

步驟 5：將搜尋解的措施轉變成路段

因演算法搜尋時依措施來形成組合，而路網是透過改變路段參數達成模擬，因此針對該迴圈每一個子解，透過上層限制式(3)將 v_j 轉換成 u_i ，再透過限制式(5)轉換措施 u_i 與其相關的路段 z_a 。

步驟 6：執行下層路網模擬

針對每一個子解，改變其相關的路段成本函數後，進入下層進行路網模擬，詳細步驟會於 3.2.3 說明；輸出合併路網後，比較基礎路網計算其效益值並輸出。

步驟 7：測試並更新搜尋解下單獨措施組合之效益值

在每組搜尋解的子解集合皆完成下層模擬且輸出路網效益後，用搜尋解與子解來更新單點效益值。以圖 3.4 為例，以搜尋解共同執行之效益，比較排除掉該措施之子解執行後之效益的差，作為該措施的潛在效益值；並記錄該單獨措施曾測試出的最大效益值，做為決策列表中該單獨措施組合之效益值。

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{pmatrix} b_{ABC} \\ b_{ABC} \\ b_{ABC} \end{pmatrix} & \begin{matrix} - \\ - \\ - \end{matrix} & \begin{pmatrix} b_{BC} \\ b_{AC} \\ b_{AB} \end{pmatrix} & \begin{matrix} = \\ = \\ = \end{matrix} & \begin{pmatrix} b'_A \\ b'_B \\ b'_C \end{pmatrix} \\
 & & b''_A = \max\{b_A, b'_A\}
 \end{array}$$

圖 3.4 本研究對搜尋解下各單點措施更新之示意圖

步驟 8：產生子解集合中最佳子解並對其餘單獨措施進行測試

而對未包含於當前搜尋解之單獨措施，會搭配搜尋解中移除掉效益成本比最低之單點措施的組合，加入其餘單獨措施成為新組合，進入下層測試。

步驟 9：執行下層路網模擬

對步驟 8 產生出的新組合們進行路網模擬，並產生各組合之效益值。

步驟 10：更新各單獨措施組合之效益值

新的單獨措施組合效益的評估方法同樣如圖 3.4，在計算出該組合下該單獨措施的潛在效益後，使用所有潛在效益中的最大值來更新決策列表的單獨措施組合效益。

步驟 11：更新當前最佳解

在所有子解集合中，若某解的路網效益值大於當前的最大路網效益值，則更新當前最佳解與當前最大路網效益值；若無則維持原最佳解及其效益值。

步驟 12：更新決策列表

將每一迴圈中產生子解集合及步驟 8 產生的新測試組合都視為新的決策，將他們及其路網效益加入決策列表中，即更新措施集合 J 、 M_j 、 b_j ，而其成本為組成的單點措施 d_i 的成本加總；使允許下一圈之後的組合搜尋時，可接受已執行過下層路網模擬的組合措施 j 一同於步驟 2 搜尋。

步驟 13：判斷終止條件

在 $n>1$ 時，在步驟 4 產生完搜尋解後，判斷該圈搜尋解與之前產生的搜尋解是否相同；若搜尋解重複則表示無法再產生新的測試組合，即可從當前的決策列表輸出擁有當前最大路網效益值的組合，而其效益值則為最佳目標值。

3.2.3 下層路網表現模擬

本小節相當於雙層解法中的步驟 3，在上層選擇出措施組合後，下層以實施組合中之路段措施來模擬此組合下的路網表現，以運輸規劃的四步驟來描述，分別就客運與貨運的部分分別執行旅次產生、旅次分布、運具分配與流量指派，最後輸出合併路網以計算效益值，流程如圖 3.5。由於本研究之 CUBE 路網模擬設定參考自 ADB(2020)，本小節會描述下層模型的步驟，其中運輸規劃模型中各步驟採用的建模公式如附錄一。

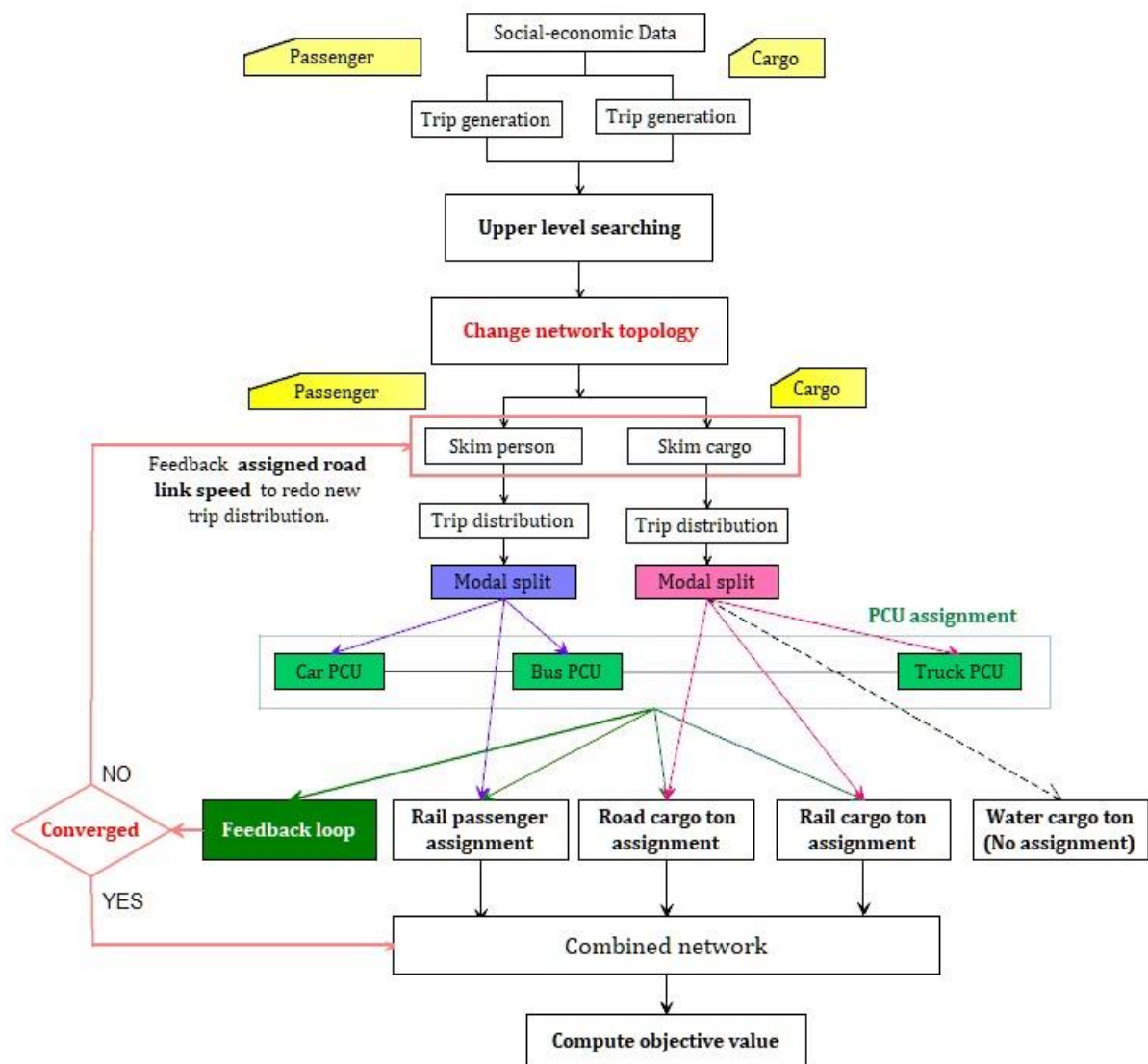


圖 3.5 下層運輸規劃軟體求解路網表現流程圖

步驟 0：旅次產生後，完成上層搜尋

本步驟等同於雙層解法中的步驟 0 至步驟 2。對客運與貨運分別產生 O-D 需求後，固定需求使其不會受路網改變之影響；其中客運旅次依 GDP 區分為三種經濟層級，而貨運旅次則依商品區分為七類。針對該迴圈搜尋解的每一個子解，改變路網結構以進行下層模擬。

步驟 1：改變路網結構

本步驟為上層措施導入下層路網的主要關聯：透過上層限制式(5)轉換措施組合 u_i 、 v_j 成與措施相關的路段 z_a 後，進而依上層限制式(6)改變路段成本函數，與式(9)改變不同流量項目下各 O-D 起訖對的阻抗，使產生不同的阻抗 (Impedance)，影響旅次分布有不同的結果。

步驟 2：阻抗計算

本步驟為流程圖中的 Skim person 及 Skim freight 步驟，依據客運及貨運中的不同流量項目，計算其不同的阻抗。一般而言，一般化成本會依據不同的運具與運送物，納入旅行距離、旅行時間與旅行成本等阻抗項目；而交通分區之間的阻抗矩陣則稱為 Skim 矩陣。且在進行完運輸規劃四步驟的流量指派後，會將第一階段指派完的結果傳回此步驟，改變路段的速率及自由旅行時間 t_a^0 ，計算新的一般化成本，使產生不同的旅次分布結果。

步驟 3：旅次分布

在客運的旅次分布中，使用重力模型(Gravity Model)來描述交通分區下的旅次產生與吸引(Production & Attraction, 簡稱 PA)，其中納入的參數就是由距離阻抗、時間阻抗及旅行成本阻抗所計算出的一般化成本。

但因貨物旅次即使被分配到特定運具，如鐵路、水路等，仍須依靠道路做運具轉乘的短程運輸，且物流上下游的供應鏈中有不同的運輸型態，因此在旅次分布前，導入物流系統模型(Logistic System Model)，利用物流節點來區分貨運旅次的屬性，分為長途旅次(Long-haul Cargo Trips)及短途旅次(Short-haul Cargo Trips)；長途旅次會納入下一層去做運具分配，而短途旅次則直接假設選擇道路運輸。而後使用含嚇阻函數(Deterrence Function)的重力模型進行旅次分佈，校正重力模型中距離越遠會使得旅次數越少的現象。本研究所採用之客運、貨運旅次分布公式請參照附錄一。

步驟 4：運具分配

運具分配即為將旅次分配在不同的運具之下，且在模型中的各運具會有不同的流量項目與單位旅行時間。在客運的旅次分配中，將旅行時間及旅客票價納入考量，使用羅吉特模型(Logit Model)以各運具效用函數來計算選擇各運具的機率；而不同經濟層級對於旅行時間及旅行成本會有不同的敏感度，因此效用函數的參數不相同。

而貨運旅次的運具分配式針對旅次分佈後的長途旅次進行，會依據不同貨物型態，依簡單多項式羅吉特模型(Simple Multinomial Logit Model)，產生每一類貨物選擇各運具的比例；其中納入計算成本函數的變數包括：旅行時間、旅行距離與旅行成本，而變數之間互相獨立。而本研究所採用之客運、貨運運具分配羅吉特模型請參照附錄一。

運具分配後被分配到道路上的旅次，由於單位為噸數，須將噸數轉換為車輛數方能進行指派，因此依據長短途旅次以及貨物特性的不同，使用車輛模型(Vehicle Model)，將旅次分配到為不同的貨車型態：長途重型貨車、短途輕型貨車及短途重型貨車；再依道路當量轉換，將三種貨車轉換為卡車 PCU。

於本研究的模型中，運具分配完的客運流量項目為小客車 PCU、巴士 PCU 及鐵路(人)；而貨運在產生完道路、鐵路、水路的噸數旅次後，道路上的旅次再轉化為卡車 PCU，在流量指派時會與小客車 PCU、巴士 PCU 一同在道路路網上進行 PCU 當量指派。

步驟 5：流量指派

由運具分配結果可知，現路網上有道路、鐵路與水路中不同單位的流量，而流量單位可分為 PCU 與噸數兩種。而本研究因缺乏水路指派建模上所需的參數，例如：距離、運輸速度以及運量上限等，且水路在運具分配時的比例極低，因此在本研究的模型指派中尚未針對水路建模；未來若有更完整的建模資料，可將該指派建模完成使整體區域路網更完整。而在拿掉水路流量後，在目前的模型指派中會使用到的流量項目為：小客車 PCU、巴士 PCU、卡車 PCU、鐵路客運旅次、道路貨物旅次及鐵路貨物旅次。

本研究將路網分為兩個階段進行指派，由於鐵路上的客貨運指派與道路上的貨運噸數指派皆會受到道路流量所影響，因此將道路車輛指派於第一階段時進行。將小客車、巴士與卡車的流量，透過道路當量轉換轉成小客車當量數，在道路上

做當量指派；指派完的路網流量視為背景值，基於此指派完的路網進行第二階段指派。第二階段再基於此路網，對三個部份分別進行指派：道路貨運噸數指派、鐵路貨運噸數指派及鐵路客運人流量指派。第二階段中，將道路與鐵路分配完的噸數比例，依序指派到路網上；且使用相同方法，將鐵路的客運旅次流量也指派到路網上。

步驟 6：遞迴路網背景值並判斷收斂

在步驟 5 中第一階段的指派完成後，設置一個回傳流量的機制，以背景流量下的道路路段速率來更新阻抗產生時的道路速率；並判斷每一迴圈所回傳的路網均衡是否已收斂。若收斂則進入步驟 7；若尚未收斂則回傳流量到步驟 2，重新進行步驟 2 到步驟 6。

步驟 7：整併路網流量

當路網均衡已達收斂，整併三個指派完的路網的結果：分別為道路貨運噸數指派、鐵路貨運噸數指派及鐵路客運人流量指派；然而因三個指派皆基於 PCU 指派結果作為基礎進行平行操作，因此不考慮三者路網之間的壅塞情形。

因每組結果指派完的流量項目都不同，為道路貨物流量(噸)、鐵路貨物流量(噸)及鐵路客運流量(人)，但鐵路客運或貨運的旅次皆可能透過道路路段轉乘，使得部分道路路段上會出現鐵路貨運或客運旅次指派的流量，因此透過此步驟將指派到道路路段上的鐵路旅次整併至道路旅次。而在道路的貨運整合上，道路貨運指派在路段上的噸數應於卡車 PCU 可容納的範疇下運送，且允許卡車空車回程(Empty backloading)，因此透過此方法整併道路路段上的流量與貨運噸數，並輸出合併路網。

步驟 8：計算路網效益值

針對各流量項目的路段流量及其單位旅行時間，計算延流量小時，並根據時間價值取權重加總，計算出該遞迴中路網的效益。此效益值回傳至上層，作為該措施組合下的路網效益。

以上步驟 1 到步驟 8 的下層模型步驟，為一組上層搜尋出的措施組合子解模擬路網表現的過程，實行於本研究的模擬軟體 CUBE 中，會於第四章進行範例驗證與案例說明。

第四章、個案驗證

本章節將上一章提出的研究方法，利用 BBIN 地區的跨境路網資料進行模型驗證。4.1 小節說明 CMS 模型的範例背景；4.2 小節針對範例進行的步驟做詳細說明；4.3 小節說明範例測試結果，並以不同情境來測試。本研究以 python 語言撰寫上層搜尋演算法，並於 Anaconda Jupyter 上編譯；下層使用 Bentley Cube 6.5.0 模擬下層路網，環境為 Inter(R) Core™ i5-8265U CPU @ 1.60 GHz 的筆記型電腦。

4.1 個案背景

本研究使用之 CUBE 模型來自亞洲開發銀行針對區域連結性提升的研究計畫(ADB, 2020)。該模型針對中亞(Central Asia Regional Economic Cooperation, CAREC)、大湄公河地區(Greater Mekong Subregion, GMS)與南亞地區(South Asia Sub-regional Economic Cooperation, SASEC)，利用 2018 年度研究地區的社會經濟資料，建立區域整合模型，而此模型簡稱為 CMS 模型。該模型由 6,169 個節點及 15,099 條節線組成，圖 4.1 為 CMS 模型的整體路網，其中黃色部分為中亞地區、綠色部分為南亞地區、橘色部分為大湄公河地區，而白色區域為納入該模型建模需求資料的境外區域；路網上的深綠色線段為道路路網，而粉紅色線段為鐵路路網。

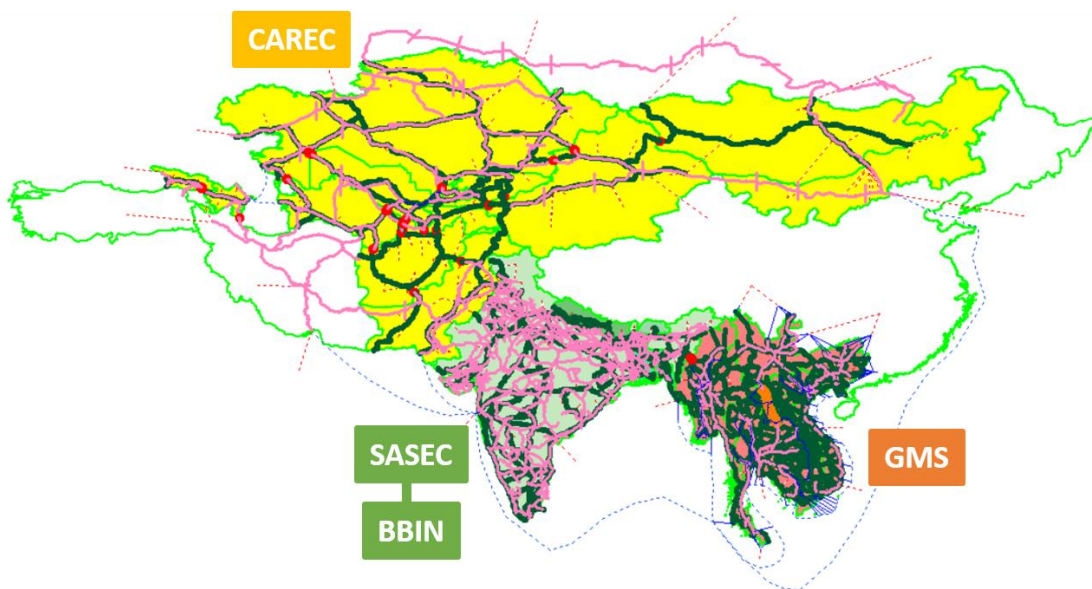


圖 4.1 CMS 模型的整體路網

本研究擷取 CMS 模型之中南亞的部分，以孟加拉與印度邊境上的跨境點作為欲決策的措施，以此模型的架構來測試不同決策組合下，計算路網的路段延人小時效益變化，來評估路網改善的情形。圖 4.2 與 4.3 為 CMS 模型中南亞 BBIN 地區的道路及鐵路路網。



圖 4.2 CMS 模型中南亞 BBIN 地區的鐵路路網



圖 4.3 CMS 模型中南亞 BBIN 地區的道路路網

因本研究之建模區域與效益考量區域不同，在下層模型中需進行全區的路段均衡，然而在考量效益時，僅將孟加拉、尼泊爾、不丹，及印度與三個國家相鄰的部分交通分區納入計算 BBIN 區域的效益值，因此增設一個路段集合 $A_R \in A$ ，改變限制式(7)之路段範圍，不論是針對 BBIN 區域或孟加拉國計算效益時，都可調整 A_R 使符合其考量範圍。

$$b_j = \sum_{k \in K} \sum_{a \in A_R} x_{ak}^0 t_a^k(x_{ak}^0) \rho_k - \sum_{k \in K} \sum_{a \in A_R} x_{ak} t_a^k(x_{ak}, z_a) \rho_k, \quad \forall j \in J \quad (7)$$

本研究域納入計算 BBIN 區域效益的交通分區，以原模型的大交通分區作為依據，整理於圖 4.4。其中孟加拉為 45~51 分區，共 7 個分區；不丹為 52 分區；尼泊爾為 76 分區；而印度則列入與三個國家相鄰的 7 個分區，為 54~55、63、68、71 及 74~75 分區，總共為 16 個大交通分區。

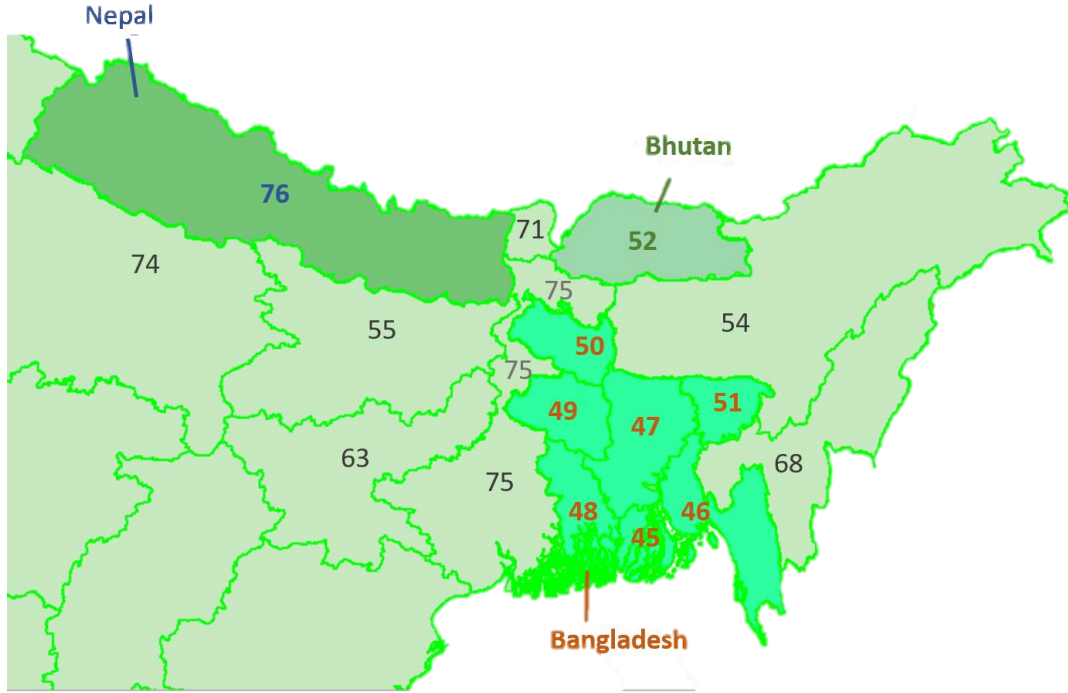


圖 4.4 CMS 模型中納入本研究計算效益的交通分區示意圖

4.2 個案分析及假設

本小節說明本研究利用 CMS 模型進行範例分析的假設與步驟過程，第一部分說明跨境措施點的設置及測試模型的建立；第二部分說明選取決策的過程與不同預算下的最佳決策及其變化情形。

4.2.1 跨境措施點

南亞地區及相關區域整合組織近年積極針對區域連結性進行研究與建設，在現有的公路、道路體系上，推動運輸走廊(Transport Corridors)，並希望藉由其發展帶動經濟走廊的產生。圖 4.5 為孟加拉交通部公路局 2016 年的公路現況報告，圖 4.6 出自 SASEC 發布之南亞區域運輸走廊示意圖；由二圖可知，跨境運輸走廊與孟加拉現有公路系統的發展十分相關。其中一條貫穿孟加拉加爾各答-達卡-錫爾赫特(Kolkata-Dhaka-Sylhet)的運輸走廊，近年發展成連接至緬甸、中國的 BCIM 經濟走廊(Bangladesh, China, India and Myanmar Economic Corridor)，如圖 4.7。不僅是區域經濟體尋求整合，區域經濟體之間也欲透過交通達成更大範圍的合作與交流。



(圖片來源：孟加拉國交通部公路局)

圖 4.5 孟加拉境內公路路網示意圖



(圖片來源：SASEC)

圖 4.6 南亞區域運輸走廊示意圖



(圖片來源：InsightSias)

圖 4.7 BCIM 經濟走廊示意圖

本研究經了解研究區域之鄰國關係及近年因區域整合促進之交通貿易協議後，發現許多跨區域、跨運具之長途運輸路線皆透過穿越孟加拉來達成，因此在孟加拉及印度的邊境上，針對陸運及鐵路貨運，並考量下層模擬軟體對水路模型建置上的限制，整理出以下 19 個跨境點，如表 4.1，而圖 4.8 及圖 4.9 為表 4.1 之跨境點在南亞地區以及孟加拉國邊境上的位置示意圖，地圖編輯來源為 <https://yourfreetemplates.com/south-asia-map-free-templates/>。

表 4.1 本研究之跨境決策點

#	India side	Bangladesh side	Mode	Established in test network
1	Gede	Darshana	Railway	No
2	Singhabad	Rohanpur	Railway	No
3	Mahadipur	Sonamasjid	Road	Yes
4	Petrapole	Benapole	Railway	No
5	Petrapole	Benapole	Road	Yes
6	Radhikapur	Birol	Railway	No
7	Haldibari	Chilihati	Railway	No
8	Agartala	Akhaura	Railway	Yes
9	Agartala	Akhaura	Road	Yes
10	Changrabandha	Burimari	Railway	No
11	Changrabandha	Burimari	Road	Yes
12	Mahishasan	Shahbazpur	Railway	No
13	Srimantpur (Tripura)	Bibirbazar	Road	Yes
14	Sabroom	Ramgarh	Road	Yes
15	Sutarkandi	Sheola	Road	Yes
16	Dawki	Tamabil	Road	Yes
17	Ghojadanga	Bhomra	Road	Yes
18	Fulbari	Banglabandha	Road	Yes
19	Balurghat	Hili	Road	Yes



圖 4.8 跨境決策點在 BBIN 區域上的位置

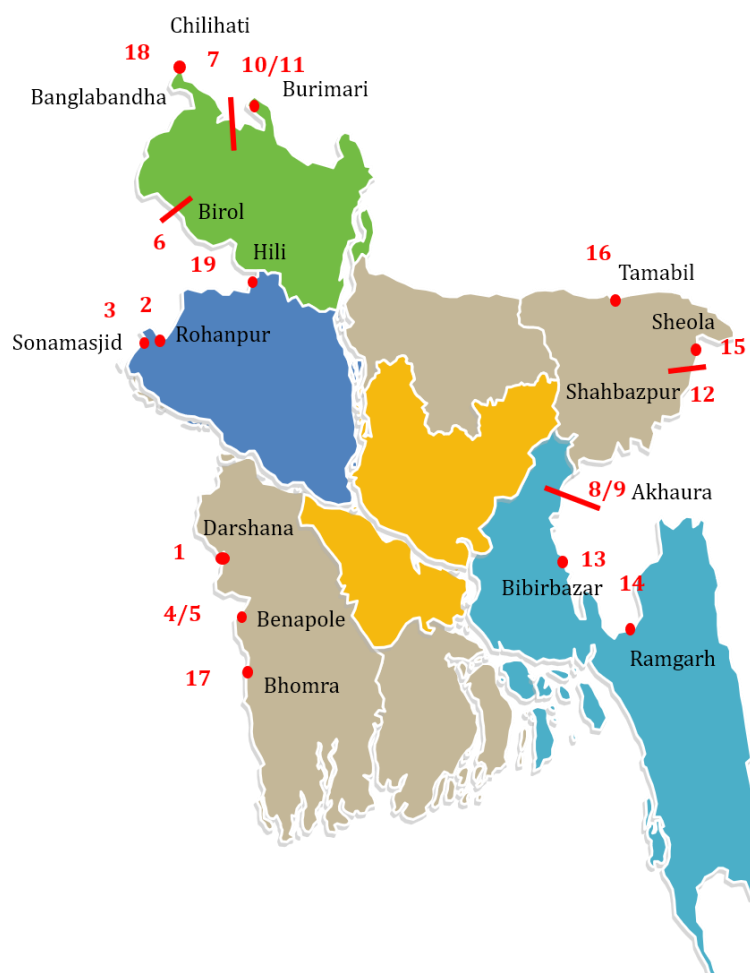


圖 4.9 跨境決策點在孟加拉邊境上的位置示意圖

因 CMS 模型中包含的國家規模較大，在路網設定上僅針對各國的主要道路 (Primary road link) 建立模擬的路網，而本研究之跨境點中有部份二級道路路段 (Secondary road link)，為 2018 年後於交通貿易協定中欲積極發展開通的，因此當時尚未被建立在模型中，在表 4.1 中對各跨境點以欄位說明出是否為本研究於測試模型中新增的路段或過境點。本研究基於原 CMS 模型，對跨境點建立 12 個節點與 48 條路段資料，完成本研究的測試路網。表 4.2 及表 4.3 為跨境點在孟加拉的道路及鐵路路段上將聯通路段補齊前後的情形，左邊是原本的 CMS 模型路網，右邊是本研究測試路網的示意圖。

表 4.2 在孟加拉-印度的跨境道路路段上的測試路網示意圖

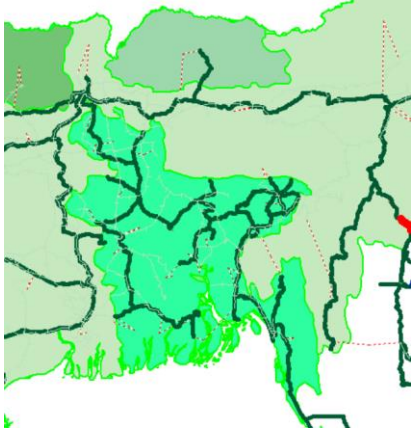
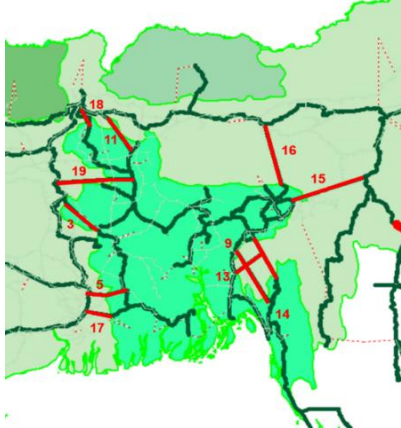
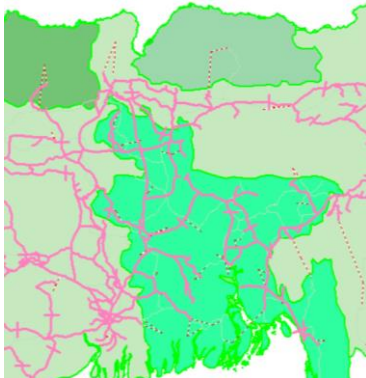
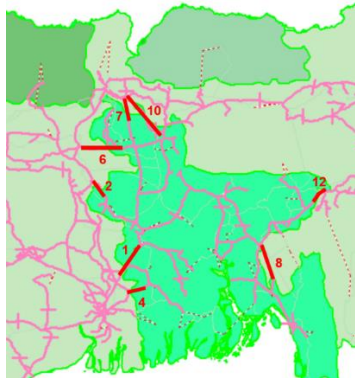
	Network in CMS model	Test Network in this research
Road network		

表 4.3 在孟加拉-印度的跨境鐵路路段上的測試路網示意圖

	Network in CMS model	Test Network in this research
Rail network		

4.2.2 個案參數設定

本研究之下層模型透過措施來改變路網上的道路參數，而下層對於每措施組合下輸出的路網各流量項目，以不同時間價值做加權計算，因此本小節就措施內容及改善情形，以及時間價值設定測試參數。

(1) 跨境點上的改善措施

在促進跨境運輸的措施上，可分為兩個層級：設置電子通關與否以及執行各點的貨運改善設施與否。由於在考量設置電子通關時，通常以國家整體一起考量，除了實際的設置成本外，立法成本、電子系統建置與人員訓練成本等隱藏成本龐大且難以估計，使得電子通關的情境難以使用現況來估計。因此本研究以「未設置電子通關」且「未作路段改善措施」的路網作為基礎路網，將各跨境點的投資視為一個單獨措施，且假設各措施點的實行成本相同；而在得到最後的措施組合後，假設當這些跨境點同時實施電子通關與貨運改善措施時，檢視路網有無更顯著的變化與效益。

在道路跨境點上的措施包含改善通關設施(Customs facilities)、陸港(Land port)及連通道路(Access road)，會影響增加路段容量及降低貨物通過跨境點的通關時間；而鐵路跨境點上的措施則包含改善通關設施及鐵路貨運設施(Railway cargo facilities)等，僅會影響降低貨物的通關時間。以 3.1.1 小節中的上層限制式(6)來說明路段成本函數，由路段措施實施與否的變數 z_a 來改變路段的旅行時間，進而影響整體路網表現。以式(6)說明， r_a 為措施下透過拓寬道路所增加的路段容量， τ_a 為路段在措施下減少的通關時間，方能以上述假設來描述措施改善前後的情形。

$$t_a^k(x_{ak}, z_a) = t_a^0 \left[1 + \alpha_a \left(\frac{x_{ak}}{r_a^0 + r_a z_a} \right)^{\beta_a} \right] + \tau_a^0 - \tau_a z_a, \forall a \in A, \forall k \in K \quad (6)$$

本研究以日流量做為指派的時間單位。假設措施實施前，道路路段為兩車道，容量為 28000 車當量/日；且因大量紙本作業、通關審核與裝卸貨的排隊、停等等因素，道路與鐵路路段皆須 18 個小時始能通關。而在不設置電子通關的情形下，因實施路段改善措施，使道路路段拓寬為四車道，路段容量提升成 60000 車當量/日，此數據假設來自 CMS 模型中的路段容量設定；且改善通關設施及拓寬連通道路後，可降低路段壅塞與停等時間，使通關時間減少 10 小時。

表 4.4 本研究的跨境點改善措施參數

	Base	After implementing improvement facility
Road/Rail border point's customs passing time	18 hrs	8 hrs
Road capacity	2-lanes 28000 PCU/day	4-lanes 60000 PCU/day

以圖 4.10 來表示路段成本函數的改變趨勢，其中綠色為措施實施前的路段成本函數，而紅色為措施實施後的。由圖可見，在措施實施前，路段旅行時間對流量的敏感度較高，使得成本的成長幅度較陡，也較易造成壅塞；然而措施實施後，路段旅行時間對於流量的敏感度下降，使可在更低的單位旅行時間下負荷更多流量。

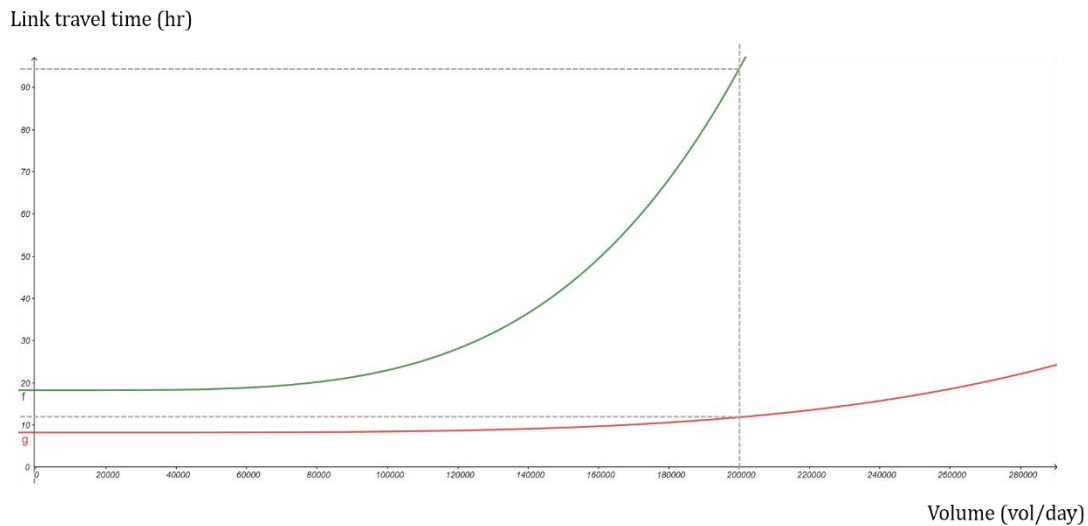


圖 4.10 路段成本函數示意圖

(2) 時間價值參數設定

一般在進行交通建設計畫改善後，可從兩個方面獲取效益：會因促使旅運者的旅行時間縮短，產生旅行時間節省(Travel Time Saving, TTS)；也會因促使車輛行駛里程或行車時間縮短，而使得與之相關的成本減少，例如：燃油成本，使產生行車成本節省(Vehicle Operating Cost, VOC)(運研所，民 108 年)。由於本研究將路網改善的效益著重於在原 CMS 資料模型中，無計入能源消耗、燃油等成本考量，因此本研究之範例在計算效益時僅計入旅行時間價值節省效益。

模型中主要有客運與貨運的流量，其中客運的流量單位需轉換為人來計算，其中小客車及巴士的時間價值，會以時間價值對乘載率及容量當量轉換；而貨運的主要流量單位為噸，因運具而有不同的時間價值。本研究參考了交通部運輸研究所(民國 108 年)中的時間價值計算方法，並參考 ADB(2015)及 NZ Transport Agency(2020)中對於客運及貨運單位流量在公路、鐵路運輸上的單位時間價值參數，以文獻中所研究國家該年之 GDP 與本研究數值測試國家—印度之 2018 年度 GDP 進行校正後，整理於表 4.5。

表 4.5 本研究使用之時間價值參數

	Time value per unit	USD\$ per hr
Passenger	Per Passenger	2.38
	Per Car	6.19
	Per Bus	59.53
Cargo	Road cargo (ton)	3.12
	Rail cargo (ton)	1.21

本研究在計算效益時，針對 BBIN 的部分區域路段，計算節省的延流量小時效益，討論在經濟區域體的角度來評估措施組合實施下，會對於整體區域與單一孟加拉國路網的變化情形，以及對兩個區域各自產生多少效益。

4.3 個案測試結果

本研究經 CUBE 軟體測試後得知，該運輸規劃軟體難以以外部程式控制軟體中的路網屬性變化，需手動控制欲改善的措施點的參數，進行措施組合下的路網表現模擬；而下層模擬軟體每對一個組合進行測試會因均衡收斂迴圈數不同，約 15~20 分鐘不等。因此本研究先針對各措施點進行個別測試，以未建置電子通關且未進行任何改善措施的路網作為比較的基礎，對措施點個別進行的路網計算旅行時間節省效益；此效益值作為輸入上層搜尋的效益初始值，並在每一圈搜尋完之後針對組合中的各點更新效益參數，以更新完的效益值進行下一圈的組合搜尋，直到達收斂條件。且因各措施點在實際建置成本的估計資料上難以蒐集且不易準確，因此假設各點的建置成本相同，來進行預算限制下的組合搜尋。

本小節分為三個部分，首先討論各措施點分別執行單點測試時，對 BBIN 區域及孟加拉國產生的效益；再來討論使用本研究雙層架構模型所求解出的最佳解，

其在演算法中的收斂過程以及最佳解路網的表現；最後將求解出的路網組合以同時建置電子通關與改善路段設施的假設，測試有無得到更好的表現。

4.3.1 單點效益表現

在未建置電子通關的基礎路網下，分別實施各個措施點，並針對圖 4.4 中 BBIN 區域的 16 個大交通分區及孟加拉單一國家，分別計算每日的旅行時間節省效益值，分為正效益、效益不變與負效益三種，整理如表 4.6 及表 4.7，並將兩個效益視為座標軸畫出的散佈圖如圖 4.11。因各措施點對於孟加拉國路網與區域路網產生的效益情境有三種，因此本小節針對各種情境取其中一個措施為例，分析單點措施執行下該點的表現。

表 4.6 本研究的跨境點效益情境

Single-point Combination Network Benefit		BBIN Travel Time Saving Value (TTSV)		
		Positive (+)	Constant (=)	Negative (-)
Bangladesh Travel Time Saving Value (TTSV)	Positive (+)	RD : 13、16、17	-	-
	Constant (=)		RL : 1、2、4、6、 7、8、10、12 RD : 9、14	
	Negative (-)	RD : 15	-	RD : 3、5、11、18、19



圖 4.11 單點效益值散佈圖

表 4.7 本研究的跨境點效益值

Cross-border points	BBIN TTSV (USD\$)	Bangladesh TTSV (USD\$)
#1 (Rail)	0	0
#2 (Rail)	0	0
#3 (Road)	-0.46 million	-1.09 million
#4 (Rail)	0	0
#5 (Road)	-2.20 million	-2.11 million
#6 (Rail)	0	0
#7 (Rail)	0	0
#8 (Rail)	0	0
#9 (Road)	0	0
#10 (Rail)	0	0
#11 (Road)	-0.70 million	-4.63 million
#12 (Rail)	0	0
#13 (Road)	104.88	3.13
#14 (Road)	0	0
#15 (Road)	6.94 million	-0.48 million
#16 (Road)	8.38 million	0.93 million
#17 (Road)	2.41 million	2.30 million
#18 (Road)	-2.05 million	-2.32 million
#19 (Road)	-0.43 million	-1.16 million

就表 4.6 及表 4.7 可知，鐵路路段在改善措施使通關時間 18 小時降為 8 小時後，仍難以改變路網阻抗，進而影響流量分配、指派等。除了因為鐵路之模擬設置不受容量變化所影響外，也可視為在此參數設計下，鐵路部分路段的改善對於整體路網的影響不顯著。然而本研究區域之鐵路路網本身具有區域連結性低且各國鐵軌軌距不相容之情形，僅改善鐵路的通關作業時間仍無法解決該區域鐵路路網的問題。而對道路路網而言，少數路段對於此改善措施不敏感，然而其餘跨境點的措施影響差異極大。

由圖 4.11 可將措施影響分為三種情境，以措施對 BBIN 區域與孟加拉分別產生的效益與路網改變來分析。每一情境以單點措施執行下，以流量在四次指派上的表現比較表，與措施實施後路網流量變化與效益計算等內容，來呈現措施導致的變化。在呈現流量變化表時，分為流量、延流量時間與延流量公里等項目；

其中因為本研究效益採計節省的延流量時間，因此延流量時間以負值表示增加，而流量與延流量公里則以負值表示減少。

(1)情境一：當區域產生正效益，且孟加拉國產生正效益時

在所有跨境措施點的單點措施組合測試中，有#13(Srimantpur-Bibirbazar)、#16(Dawki-Tamabil)及#17(Ghojadanga-Bhomra)三點對於區域與單計孟加拉國時皆產生正面效益。表 4.8 為於此單點措施執行下，流量在四次指派上的表現與基礎路網流量指派的比較，其中實施單點措施測試路網中的黃色星號為該跨境點所在的位置。對照圖 4.9 之措施點位置可知，Bibirbazar 位在孟加拉東南方邊境上，與#9(Agartala-Akhaura)同為規劃為轉運來自吉大港的貨物的跨境點；除了陸地港口外，近年也在簽訂了內陸水運沿海協議下，預計透過內陸水運來發展更完整的多式聯運系統。Bhomra 位於 Benapole 南方，在公路等級上僅為區域公路，然而其在孟加拉端也有轉運場、倉庫等貨運設施，可知為分散西側來自印度流量的過境點之一；而 Tamabil 落在亞洲公路二號(AH2)於孟加拉東側出境的點上，且為 BCIM 經濟走廊通過 Sylhet 出境孟加拉邊境的過境點，為區域運輸連通上較重要的地理位置，因此本情境以 Tamabil 來分析。

表 4.9 為計算效益值時的各流量項目在區域與孟加拉路段上的流量、延流量旅行時間及延流量公里的總變化，若以各項目的延流量公里乘上該項目的時間價值後加總可得總旅行時間節省效益值。由於流量變化為計算效益的區域路段的流量增減總而來，因此流量的下降可能為流量指派集中於特定路段，而使多處路段的流量減少所導致；因此以流量與延流量公里交互判斷變化的情形。

因 Tamabil 重要的戰略位置，其連接了 BBIN 區域中最壅塞的運輸長廊，透過此點的改善措施，將原本通過跨境點#15(Sutarkandi-Sheola)的貨運流量吸引至該點通過，對孟加拉的路段而言增加了許多卡車 PCU 的流量；貨物流量的部分，縮短了延流量公里，進而造成延流量小時的節省。而鐵路流量指派中，貨運的部分在孟加拉內陸東側的路段流量些微下降，造成減少的延流量公里與延流量時間；而鐵路客運流量在表 4.8 的圖表雖無明顯變化，但其微幅變動的流量也為區域路網跟孟加拉路網帶來一些時間節省效益。整體而言，該措施點對於貨運流量的時間節省有一定的幫助，不論是區域路網或是以孟加拉政府的判斷角度而言，都是可以投資以獲得交通改善的措施點之一。

表 4.8 基礎路網與#16 的四個指派路網比較

	Base Network	#16 Implemented
Road PCU assignment (PCU)		
Volume/Capacity > 0.2 Volume/Capacity > 0.6 Volume/Capacity > 1 Volume/Capacity > 1.2		
Road cargo assignment (Ton)		
Rail cargo assignment (Ton)		
Rail passenger assignment (Person)		
Volume > 10000 Volume > 50000 Volume > 100000 Volume > 200000		

表 4.9 單點測試#16 時對 BBIN 及孟加拉的路網變化

	#16	BBIN	BAN
Car	PCU	-8,496	-4,790
	PCU-hour	10,593	1,141
	Vehicle-kilometer	-305,664	-102,070
Bus	PCU	17,846	5,917
	PCU-hour	1,422	-1,483
	Vehicle-kilometer	468,804	97,720
Truck	PCU	-42,089	37,117
	PCU-hour	133,554	-72,586
	Vehicle-kilometer	1,255,391	2,361,853
Road cargo	Volume(ton)	-1,298,035	-74,104
	Volume-hour	2,616,788	279,003
	Ton-kilometer	-37,138,202	-14,339,215
Rail cargo	Volume (ton)	-164,082	-109,500
	Volume-hour	70,671	57,655
	Ton-kilometer	-3,533,542	-2,882,748
Rail passenger	Volume	-29,849	-25,288
	Passenger-hour	14,454	9,871
	Passenger-kilometer	-722,692	-493,552
Travel time saving value(\$)		8.38 million	0.16 million
Total PCU-kilometer		1.42 million	2.36 million
Total ton-kilometer		-40.67 million	-3.38 million
Time saving for passenger(%)		0.23%	-0.05%
Time saving for ton(%)		2.26%	10.52%
Time saving for PCU(%)		1.37%	-6.47%

(2)情境二：當區域產生正效益，但孟加拉國產生負效益時

在所有跨境點的單點測試中，僅有#15(Sutarkandi-Sheola)一點會產生區域正效益，但孟加拉國負效益的情形。以圖 4.9 可知，該點 Sheola 落在孟加拉的東北側，在 BCIM 經濟長廊上，由孟加拉 Sylhet 進入印度 Assam，且有兩條印度國道通過此處，為國際貿易一個很重要的跨境點，近年許多的交通貿易協議都有對此處投資以改善通關設施；其對於貨運與客運而言都是十分重要的過境點，除了已高度使用的道路外，該區也有鐵路建設、水路建設的計畫在進行中。然而目前投資仍以不同融資單位對分別項目進行，尚未到整體完善的地步。

以表 4.11 對照表 4.9 來看，Sheola 與 Tamabil 同為連通 BBIN 區域最壅塞長廊的跨境點，對 Sheola 的投資改善所造成的 PCU 指派變化較投資 Tamabil 的變化更小；但其在卡車 PCU 的指派變化上，Sheola 的措施在增加了延流量公里的同時也減少了延流量小時，表示卡車的指派上雖產生了繞路的情形，但尚能成功分散流量的旅行時間造成節省。而在貨運流量的指派上，該點雖節省了區域的延流量時間，但對於孟加拉而言，卻造成了延流量公里與延流量時間皆上升的情形。在鐵路指派上，貨運的延流量時間皆有下降的情形，但客運流量的增加造成了延流量時間有一定程度的上升。總地而言，在區域路網上大部分流量項目的延流量時間節省造成了整體的正面效益，但孟加拉則因道路貨運指派上的延流量時間增加而導致負面效益。

因此此改善措施的測試，對孟加拉而言造成雖造成負面時間節省效益，但可能帶來更多跨境貿易機會，對區域路網而言也是不錯的改善選項；若欲執行，在投資方面可考慮由區域共同負擔投資成本，以達成區域的改善效益。

表 4.10 基礎路網與#15 的四個指派路網比較

	Base Network	#15 Implemented
Road PCU assignment (PCU)		
Volume/Capacity > 0.2 Volume/Capacity > 0.6 Volume/Capacity > 1 Volume/Capacity > 1.2		
Road cargo assignment (Ton)		
Rail cargo assignment (Ton)		
Rail passenger assignment (Person)		
Volume > 10000 Volume > 50000 Volume > 100000 Volume > 200000		

表 4.11 單點測試#15 時對 BBIN 及孟加拉的路網變化

	#15	BBIN	BAN
Car	PCU	-1,030	299
	PCU-hour	2,616	1,264
	Vehicle-kilometer	5,269	23,233
Bus	PCU	-2,616	-658
	PCU-hour	10,447	1,410
	Vehicle-kilometer	-262,641	-27,300
Truck	PCU	-31,861	17,440
	PCU-hour	144,804	37,812
	Vehicle-kilometer	997,280	1,692,040
Road cargo	Volume(ton)	-916,033	29,485
	Volume-hour	2,095,964	-183,551
	Ton-kilometer	-16,252,750	15,365,743
Rail cargo	Volume (ton)	-212,739	-140,467
	Volume-hour	91,922	74,683
	Ton-kilometer	-4,596,124	-3,734,136
Rail passenger	Volume	18,599	24,080
	Passenger-hour	-12,626	-18,880
	Passenger-kilometer	631,325	944,002
Travel time saving value(\$)		6.94 million	-0.48 million
Total PCU-kilometer		0.74 million	1.69 million
Total ton-kilometer		-20.85 million	11.63 million
Time saving for passenger(%)		0.48%	0.02%
Time saving for ton(%)		1.84%	-3.40%
Time saving for PCU(%)		1.49%	3.59%

(3)情境三：當區域產生負效益，且孟加拉國產生負效益時

有許多投資措施在單獨測試時會產生本情境：#3(Mahadipur- Sonamasjid)、#5(Petrapole- Benapole)、#11(Changrabandha-Burimari)、#18(Fulbari-Banglabandha)與#19(Balurghat- Hili)。從地理位置來看，Sonamasjid、Benapole 跟 Burimari 這三處皆為西側連通印度與孟加拉西側的主要過境點；其中 Benapole 位於 Kolkata-Dhaka 走廊上，為加爾各答進入孟加拉境內的過境點，且為孟加拉西側最壅塞的陸港之一。而 Banglabandha 與 Burimari 位於孟加拉的西北側，相隔尼泊爾與不丹一條狹長型的印度領土—西利古里長廊(Siliguri Corridor)，也因其狹窄特性被俗稱為雞脖子(Chicken' neck)。Burimari 位於亞洲公路 48 號(AH48)，除了道路港口外，也為重要的鐵路過境處，連接孟加拉與尼泊爾的流量需求；且此點分散了西利古里長廊的壅塞，為重要的孟加拉北側過境點。而 Banglabandha 一處為距該長廊最近的孟加拉邊境，且為亞洲二號公路(AH2)的西側出境點。然而此處因最接近鄰國之重要戰略位置，對於跨境貨運協議十分嚴格，客運的部分也利用間隔巴士站與旅客過境處將流量分隔開。因 Banglabandha 特殊的戰略位置，因此本情境選擇該點進行分析。

一般而言，在考量投資時的直覺角度為將更多資金投注在更壅塞的路段與過境點；然而本情境證實，對於壅塞處的投資有機會造成更大程度的路網壅塞。從道路貨運指派可知，針對 Banglabandha 的措施點相關路段拓增道路容量、減少通關時間後，是非常大的流量吸引力，使得更多流量都希望經連接西利古里長廊的此跨境點進入孟加拉，導致孟加拉西側的所有跨境點流量大幅下降；整體區域的延流量公里大幅上升，且因路段壅塞嚴重也造成延流量時間大幅上升，使成為負效益。單就孟加拉而言，流量不經西側反而從北側入境，造成更多的延流量公里；且流量集中某些路段也造成相當大的壅塞，對延流量時間而言也造成孟加拉路網的負效益。

表 4.12 基礎路網與#18 的四個指派路網比較

	Base Network	#18 Implemented
Road PCU assignment (PCU)		
Volume/Capacity > 0.2 Volume/Capacity > 0.6 Volume/Capacity > 1 Volume/Capacity > 1.2		
Road cargo assignment (Ton)		
Rail cargo assignment (Ton)		
Rail passenger assignment (Person)		
Volume > 10000 Volume > 50000 Volume > 100000 Volume > 200000		

表 4.13 單點測試#18 時對 BBIN 及孟加拉的路網變化

	#18	BBIN	BAN
Car	PCU	-97	-267
	PCU-hour	229	29
	Vehicle-kilometer	-459	-3,624
Bus	PCU	289	11
	PCU-hour	191	-39
	Vehicle-kilometer	4,788	257
Truck	PCU	-1,719	3,739
	PCU-hour	4,743	-3,063
	Vehicle-kilometer	40,273	116,219
Road cargo	Volume(ton)	5,024,195	5,152,881
	Volume-hour	-661,265	-744,949
	Ton-kilometer	55,443,004	51,768,681
Rail cargo	Volume (ton)	-6	-2
	Volume-hour	2	1
	Ton-kilometer	-121	-30
Rail passenger	Volume	-3,306	-2,205
	Passenger-hour	1,085	719
	Passenger-kilometer	-54,240	-35,967
Travel time saving value(\$)		-2.05 million	-2.32 million
Total PCU-kilometer		0.04 million	0.11 million
Total ton-kilometer		55.44million	51.77million
Time saving for passenger(%)		0.02%	0.00%
Time saving for ton(%)		-0.56%	-23.28%
Time saving for PCU(%)		0.05%	-0.27%

對本情境之區域路段改變而言，措施帶來的路網改變類似於布雷斯悖論 (Braess's paradox)：當在既有路網上增設捷徑，或是針對某路段改善使旅行時間或旅行成本降低時，反而造成整體路網的總旅行時間上升，服務水準下降。如圖 4.12 的例子所示：在增設道路前，使用者均衡下會使得指派的路徑有高路段成本與低路段成本；然而在增設捷徑或使用成本極低的路段後，由於用路人皆獨立決策使用的路徑，使傾向於選擇使用成本較低者，而造成單一路段壅塞，整體路網服務水準下降。

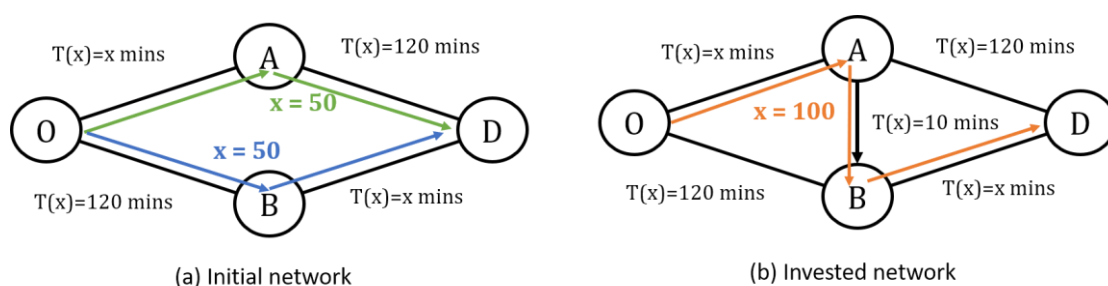


圖 4.12 Braess's paradox 範例示意圖

基於以上單點測試後的情境分析，驗證無法以各點的單點效益值去估計組合後的措施會使得路網如何變化，因此本研究基於此單點測試結果作為各點初始效益，試著以組合形式更新各點效益，使更接近各措施點的實際實施價值。

4.3.2 雙層模型測試

本小節中，基於各單點措施組合的測試結果作為初始效益：設置預算為三個措施點，以本研究的上層搜尋方法來搜尋組合，並將組合以表 4.4 的參數設定下層路網中欲執行的改善路段，回傳組合下的路網效益，並對所有單點措施組合進行效益值的更新。由於本研究是由每一圈的搜尋解來產生子解集合與進階的組合測試，因此若某一圈之搜尋解與先前的搜尋解重複，則判定搜尋已收斂，輸出當前的最佳路網效益值與其組合。

本小節會就 BBIN 地區與孟加拉國地區，分別以單點效益進行雙層測試，分析兩者的結果並於下一節進行電子通關實施與否的比較。

(1) 針對 BBIN 地區的雙層測試

在本研究的個案範例中，搜尋在第二圈即停止，圖 4.13 為針對 BBIN 地區進行雙層測試下的單點效益值變化折線圖。上層搜尋從初始最高單點組合 15-16-17，產生子解集合並測試後，將搜尋解剔除掉效益成本比最低的#17 一點後，以組合 15-16 來測試其餘不在搜尋解中的措施，並計算組合中各點的價值作為他們的潛在效益，其中組合測試之數值紀錄於附錄二，而各點的效益評估值紀錄於附錄三。

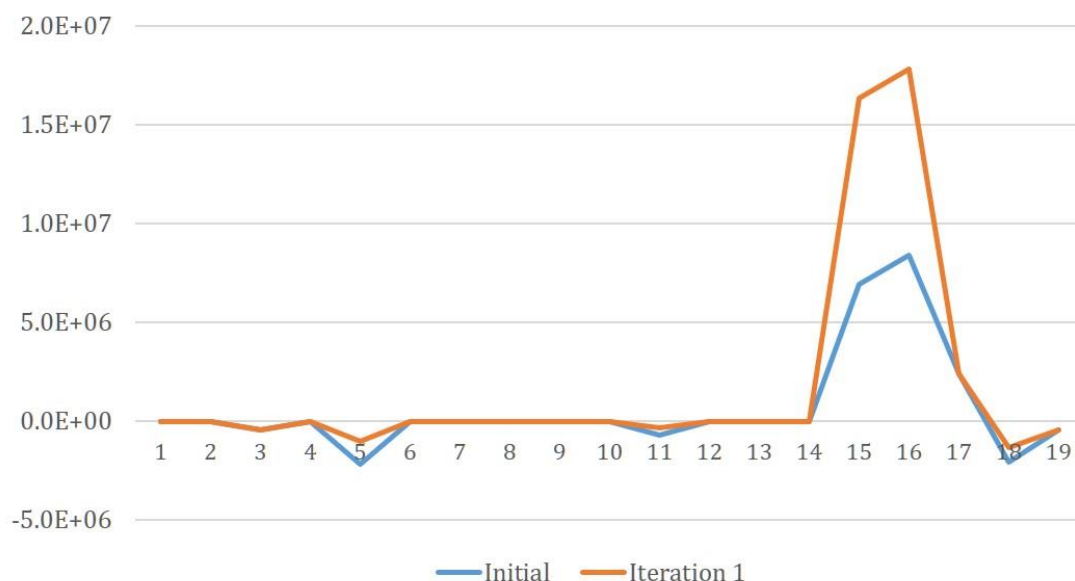


圖 4.13 針對 BBIN 地區進行雙層測試下的單點效益值變化圖

在 BBIN 區域的雙層測試收斂到的最佳解為 15-16-17，分別為單點測試時對區域與孟加拉國皆產生正效益的#16(Dawki-Tamabil)、#17(Ghojadanga-Bhomra)，及對區域正效益而孟加拉負效益的#15(Sutarkandi-Sheola)。以地理位置而言，為孟加拉西側一個點與東側兩個點。在改善 Tamabil 跨境點措施後會趨使流量經西利古里長廊橫越孟加拉至該點入境，然而同時投入 Sheola 與 Tamabil 時可分散孟加拉東側的流量，使東側流量不致壅塞，且左側投資 Bhomra 也使得孟加拉西側流量經由該點通過，分散了會跨越到東側才入境的流量。以這樣的組合在路網取得均衡後，由表 4.15 知可大幅降低 BBIN 區域路網的延流量公里，然而同時卻增加時間節省效益，表示此組合造成的效益對區域路網而言相當理想。對孟加拉路網而言，整體也為延流量公里下降且時間節省效益增加的狀況，但卡車的延 PCU 公里上升許多，使得在車輛行駛的時間上微幅增加約 5.6%；而貨物(噸)的總旅行時間節省有 25%之多，表示在此投資措施下，可為孟加拉在運輸貨物上帶來更多效益。

表 4.14 基礎路網與 15-16-17 的指派路網比較

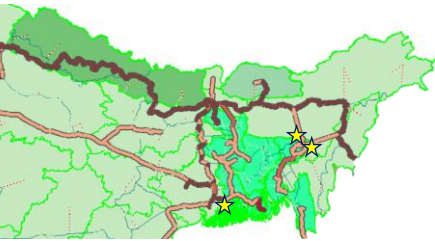
	Base Network	#15-16-17 Implemented
Road PCU assignment (PCU)		
Volume/Capacity > 0.2 Volume/Capacity > 0.6 Volume/Capacity > 1 Volume/Capacity > 1.2		
Road cargo assignment (Ton)		
Rail cargo assignment (Ton)		
Rail passenger assignment (Person)		
Volume > 10000 Volume > 50000 Volume > 100000 Volume > 200000		

表 4.15 15-16-17 組合對 BBIN 與孟加拉的路網變化

	#15-16-17	BBIN	BAN
Car	PCU	-8,288	-4,354
	PCU-hour	15,230	2,723
	Vehicle-kilometer	-285,502	-71,747
Bus	PCU	16,796	6,175
	PCU-hour	17,407	-641
	Vehicle-kilometer	445,100	108,879
Truck	PCU	-139,357	117,250
	PCU-hour	446,916	-65,193
	Vehicle-kilometer	4,173,904	7,761,846
Road cargo	Volume(ton)	-6,289,594	-2,597,198
	Volume-hour	8,463,110	749,455
	Ton-kilometer	-144,461,307	-41,726,043
Rail cargo	Volume (ton)	-212,588	-140,427
	Volume-hour	91,853	74,669
	Ton-kilometer	-4,592,638	-3,733,460
Rail passenger	Volume	-29,419	-24,144
	Passenger-hour	13,563	10,090
	Passenger-kilometer	-678,167	-504,528
Travel time saving value(\$)		27.13 million	2.45 million
Total PCU-kilometer		4.33 million	7.80 million
Total ton-kilometer		-149.05 million	-45.46 million
Time saving for passenger(%)		1.04%	0.08%
Time saving for ton(%)		7.20%	25.76%
Time saving for PCU(%)		4.52%	-5.60%

(2) 針對孟加拉國地區的雙層測試

而用孟加拉國的單點措施組合效益作為初始值來進行測試時，同樣也在第二圈結束搜尋。初始搜尋解為 13-16-17，然而組合 16-17 與組合 13-16-17 可得的路網時間節省效益近乎相同；後續使用組合 16-17 來測試其餘單點措施，以更新所有單點措施組合的效益，其中各組合的效益值與各單點措施組合的效益值變化如附錄二及附錄三。相較於對 BBIN 區域效益值的測試，孟加拉國路網中各單點措施的效益評估更準確，因此在圖 4.14 中各措施點的評估價值在第一圈後所得之單點組合潛在效益值幾乎相同。

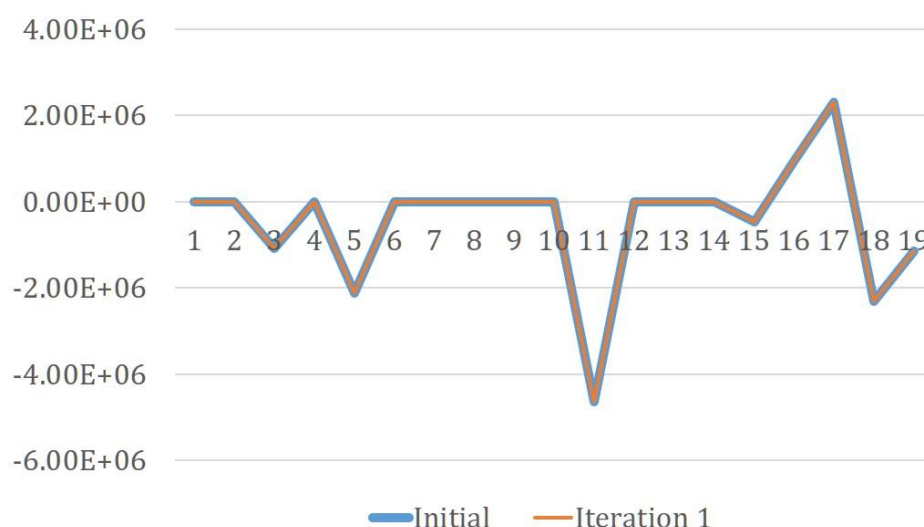


圖 4.14 針對孟加拉國地區進行雙層測試下的單點效益變化圖

而在孟加拉國路網中的雙層測試所收斂到的最佳解為#13(Srimantpur-Bibirbazar)、#16(Dawki-Tamabil)及#17(Ghojadanga-Bhomra)，三者都是在單點測試時對於區域路網或孟加拉國路網皆為正效益的措施；而 Tamabil(#16)及 Bhomra(#17)這兩個措施也在 BBIN 區域路網雙層測試所收斂出的最佳解中。以表 4.16 對照表 4.14 且以表 4.17 對照表 4.15 來看路網指派的變化，只改善 Tamabil(#16)而不改善 Sheola(#15)時，就會出現孟加拉東側貨運流量集中從 Tamabil 運輸的情形；而從客運面來說，16-17 的均衡路網有巴士 PCU 流量大幅上升且鐵路人流量大幅減少的情形，可判斷為這個改善措施組合下，會改變到客運流量的運具選擇，減少的鐵路客運人旅次轉換成增加的巴士客運流量。以投資組合 13-16-17 相較於投資組合 15-16-17，雖對區域路網而言的時間節省效益大幅降低，但孟加拉國境內路段的貨運運輸時間大幅下降，進而對單一國家帶來更多時間節省效益。

表 4.16 基礎路網與 13-16-17 的指派路網比較

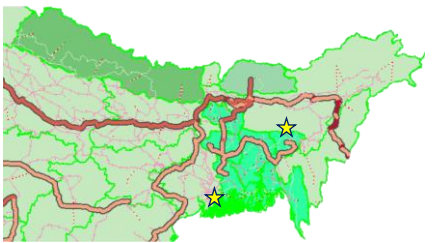
	Base Network	#13-16-17 Implemented
Road PCU assignment (PCU)		
Volume/Capacity > 0.2 Volume/Capacity > 0.6 Volume/Capacity > 1 Volume/Capacity > 1.2		
Road cargo assignment (Ton)		
Rail cargo assignment (Ton)		
Rail passenger assignment (Person)		
Volume > 10000 Volume > 50000 Volume > 100000 Volume > 200000		

表 4.17 13-16-17 組合對 BBIN 與孟加拉的路網變化

	#13-16-17	BBIN	BAN
Car	PCU	-8,495	-4,789
	PCU-hour	10,592	1,141
	Vehicle-kilometer	-305,645	-102,064
Bus	PCU	17,847	5,917
	PCU-hour	1,424	-1,483
	Vehicle-kilometer	468,812	97,719
Truck	PCU	-42,089	37,114
	PCU-hour	133,555	-72,586
	Vehicle-kilometer	1,255,412	2,361,834
Road cargo	Volume(ton)	-3,559,760	-2,695,255
	Volume-hour	3,390,643	1,017,517
	Ton-kilometer	-81,983,442	-58,357,703
Rail cargo	Volume (ton)	-164,082	-109,500
	Volume-hour	70,671	57,655
	Ton-kilometer	-3,533,542	-2,882,748
Rail passenger	Volume	-29,828	-25,276
	Passenger-hour	14,447	9,866
	Passenger-kilometer	-722,347	-493,320
Travel time saving value(\$)		10.80 million	3.23 million
Total PCU-kilometer		1.42 million	2.36 million
Total ton-kilometer		-85.52 million	-61.24 million
Time saving for passenger(%)		0.23%	-0.05%
Time saving for ton(%)		2.91%	33.60%
Time saving for PCU(%)		1.37%	-6.47%

在進行完兩個區域角度的測試後，可知 Tamabil(#16)及 Bhomra(#17)對於兩個區域角度都是可以達到良好時間節省效益的投資。若以孟加拉國政府的角度來評估，可以只加強建設這兩處；但若放寬到 BBIN 區域，則可擴增預算再投資 Sheola(#15)，創造更高的效益。

4.3.3 建置電子通關情境

由於建置電子通關的成本難以評估，且難以估計全面建置電子通關後，跨境措施點應進行何種措施改善較合理；因此將電子通關與路段設施改善視為兩個不同層級的改善措施，除了電子通關建置以外，該措施也可納入機動車協議與跨境貿易協議等一併考量。雖機動車協議已於 2016 年簽訂，跨境貿易協議也陸續開放數種貨物品項允許於特定跨境點通過，然而協議實際的執行內容尚未明朗，使國家之間仍存在很高程度的貿易壁壘。

因此本情境之假設為，在策略考量及預算限制下，無法全面普及電子通關設置及貿易、機動車等協議時，在選定的跨境點組合上除了改善路段設施外，也增設電子通關及全面性的貿易與車輛開放政策，來測試對跨境點組合有無更顯著的效益。參數設計如表 4.18，在電子通關非全面普及的狀態，針對選到的跨境點組合，增設電子通關使得紙本作業取消及通關流程簡化，因此對跨境點的措施包含基本的路段與設施改善，且跨境時間大幅下降為 0.5 小時。

表 4.18 建置電子通關後的跨境點改善措施參數

	Base	After implementing improvement facility	After implementing improvement & E-customs facilities
Road/Rail border point's customs passing time	18 hrs	8 hrs	0.5 hrs
Road capacity	2-lanes 28000 PCU/day	4-lanes 60000 PCU/day	4-lanes 60000/PCU/day

本小節會分別就 BBIN 區域的收斂最佳解 15-16-17 及孟加拉國路網的收斂最佳解 13-16-17，分別以表 4.18 的參數來進行測試，觀察均衡路網後的變化情形。

(1) 測試 BBIN 區域最佳投資措施組合 15-16-17 的電子通關表現

表 4.19 為基於在有無增設電子通關下路網的表現比較，表 4.20 比較了增設電子通關後相較於初始路網的流量變化。從指派路網表現來看，增設電子通關的參數設定不會影響到道路路網容量承受流量的占比，但對於道路上的貨運指派有更集中壅塞的情形，在 Bhomra(#17)上將通關時間降低到接近不存在，大大轉移了所有印度跟孟加拉西側之間的流量。以表 4.20 跟表 4.15 來比較增設電子通關後的流量變化，僅在道路貨運指派上有不同的表現。在區域路網中，因增加的流量導致總延噸公里大幅上升，造成一定程度的延流量時間節省下降；然而對孟加拉路網而言，增加流量跟延噸公里的幅度更大，甚至造成了負面效益，影響此投資對該國路網產生負的時間節省效益。

(2) 測試孟加拉國最佳投資措施組合 13-16-17 的電子通關表現

大致而言，對組合 13-16-17 實施電子通關下的改善投資，其變化的方向與組合 15-16-17 大致相同。以表 4.22 對照表 4.17 可知，其中最大差別在於道路上貨運流量的變動，從貨運流量(噸)的變化可判斷對組合 13-16-17 增設電子通關後，會影響流量的運具分配，轉移更多至道路上；且集中從 Tamabil(#16)及 Bhomra(#17)通過會轉移流量的運輸路徑，使增加非常大幅度的延噸公里，進而使孟加拉國的旅行時間效益轉為負值。從數值測試來看，Bibirbazar(#13)對於電子通關表現下的影響與未實行電子通關時相同，對於組合所造成的影響並不顯著。

在開發中國家建立與改善基礎設施時，容易因為投資方與利益方的考量不全面，而僅考慮短期效益或單點效益評估投資區域已，使得國家中的設施水準越發不平均，資源容易集中於當前貿易最頻繁所以使得壅塞、停滯等問題最嚴重的地方。本小節的結果也可證明，在不提升整體路網設施水準的情形下，單就路網可以舒緩壅塞的癥結節點進行更多的投資，難以獲得更高的效益，甚至可能因集中壅塞導致相較於不增設更多措施的路網而帶來更低的效益。

表 4.19 無電子通關下與電子通關下實施 15-16-17 之路網指派比較

	15-16-17 Implemented <u>without</u> E-customs	15-16-17 Implemented <u>with</u> E-customs
Road PCU assignment (PCU)		
Volume/Capacity > 0.2 Volume/Capacity > 0.6 Volume/Capacity > 1 Volume/Capacity > 1.2		
Road cargo assignment (Ton)		
Rail cargo assignment (Ton)		
Rail passenger assignment (Person)		
Volume > 10000 Volume > 50000 Volume > 100000 Volume > 200000		

表 4.20 基礎路網與電子通關下實施 15-16-17 之流量與效益

	E #15-16-17	BBIN	BAN
Car	PCU	-8,288	-4,354
	PCU-hour	15,230	2,723
	Vehicle-kilometer	-285,502	-71,747
Bus	PCU	16,796	6,175
	PCU-hour	17,407	-641
	Vehicle-kilometer	445,100	108,879
Truck	PCU	-139,357	117,250
	PCU-hour	446,916	-65,193
	Vehicle-kilometer	4,173,904	7,761,846
Road cargo	Volume(ton)	2,090,083	4,493,482
	Volume-hour	7,063,499	-514,294
	Ton-kilometer	-53,214,829	39,573,099
Rail cargo	Volume (ton)	-212,594	-140,431
	Volume-hour	91,855	74,671
	Ton-kilometer	-4,592,773	-3,733,569
Rail passenger	Volume	-29,419	-24,144
	Passenger-hour	13,563	10,090
	Passenger-kilometer	-678,167	-504,528
Travel time saving value(\$)		22.77 million	-1.49 million
Total PCU-kilometer		4.33 million	7.80 million
Total ton-kilometer		-57.81 million	35.84 million
Time saving for passenger(%)		1.04%	0.08%
Time saving for ton(%)		6.02%	-13.74%
Time saving for PCU(%)		4.52%	-5.60%

表 4.21 無電子通關下與電子通關下實施 13-16-17 之路網指派比較

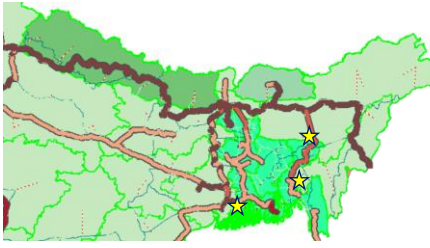
	13-16-17 Implemented <u>without</u> E-customs	13-16-17 Implemented <u>with</u> E-customs
Road PCU assignment (PCU)		
 Volume/Capacity > 0.2 Volume/Capacity > 0.6 Volume/Capacity > 1 Volume/Capacity > 1.2		
Road cargo assignment (Ton)		
Rail cargo assignment (Ton)		
Rail passenger assignment (Person)		
 Volume > 10000 Volume > 50000 Volume > 100000 Volume > 200000		

表 4.22 基礎路網與電子通關下實施 13-16-17 之流量與效益

	E #13-16-17	BBIN	BAN
Car	PCU	-8,495	-4,789
	PCU-hour	10,592	1,141
	Vehicle-kilometer	-305,645	-102,064
Bus	PCU	17,847	5,917
	PCU-hour	1,424	-1,483
	Vehicle-kilometer	468,812	97,719
Truck	PCU	-42,089	37,114
	PCU-hour	133,555	-72,586
	Vehicle-kilometer	1,255,412	2,361,834
Road cargo	Volume(ton)	4,824,097	4,398,796
	Volume-hour	1,985,611	-247,434
	Ton-kilometer	9,638,702	23,021,030
Rail cargo	Volume (ton)	-212,744	-140,471
	Volume-hour	91,924	74,685
	Ton-kilometer	-4,596,221	-3,734,249
Rail passenger	Volume	-29,828	-25,276
	Passenger-hour	14,447	9,866
	Passenger-kilometer	-722,347	-493,320
Travel time saving value(\$)		6.44 million	-0.69 million
Total PCU-kilometer		1.42 million	2.36 million
Total ton-kilometer		5.04 million	19.29 million
Time saving for passenger(%)		0.23%	-0.05%
Time saving for ton(%)		1.75%	-5.40%
Time saving for PCU(%)		1.37%	-6.47%

第五章、結論與建議

5.1 結論

許多路網設計問題在討論於預算限制下選取措施點組合時，以研究國家或縣市為單位，單就該區域來評估路網的改善結果；而本研究納入跨境的因素，把措施設計在國家與國家的邊境上，討論實施措施組合會對於單一國家路網與區域路網分別帶來的變化。以雙層規劃模型建模，上層針對眾多需要改善的跨境點，評估獨立的措施組合下的效益，基於背包問題概念來設計離散搜尋機制；再以下層的運輸規劃軟體模型模擬每個組合及子解集合的效益，用各點在組合中可帶來的價值來更新措施的潛在效益。期望透過此方法描述路網改善措施之間的相依性，並使用最大單點潛在效益進行搜尋，使能夠找到對路網改善最大化的組合。

在範例驗證中，針對開發中地區 BBIN 的區域路網，及措施影響最直接的孟加拉國路網，進行測試與分析。從結果而言，在孟加拉-印度邊境上極高的過境點通關時間與較窄的路段容量下，進行鐵路過境的通關時間改善，以及道路過境的通關時間與路段容量改善，會因為過境點在區域路網上的地理位置、連通路段的可及性與路網中的平行路段替代性，而有不同的效益表現。在分析中也可知，針對當前最壅塞的節點進行改善，如北側的 Banglabandha，可能會產生布雷斯悖論，使壅塞更集中於該處，反而得到更大負面效益的狀況；也發現同為連通西利古里長廊延伸公路的 Tamabil 跟 Sheola 在各自實施改善措施時，對於區域路網與孟加拉國路網會產生不一樣的變化。再把規模放大到措施組合，藉由不同地理位置及路網的連通，創造可舒緩壅塞的最大效益。由上層搜尋機制可有效找出不錯的措施組合，使能合理解釋組合下對區域路網及單一國家路網所造成的影響。且在找出組合後，針對組合點投放更多資源以建設電子通關，發現在不提升整體路網設施水準的情形下，單就特定節點進行更多的投資，也難以獲得更高的路網效益。

本研究從最佳化搜尋結合模擬路網模型出發，應用在實際跨境路網問題上，並透過範例驗證中證明可找出有效舒緩路網問題的跨境措施點組合，且從單一國家政府及區域整合組織的不同角度切入分析與討論，提供投資方在決策路網設施投資時一個評估的方法參考與不同的考量角度。

5.2 研究限制

本研究雖建構出能連接上層演算法搜尋與下層路網模擬的模型架構，但依然存在一些研究限制與考量不足之處，以下提出數個建議項目與未來研究的發展方向作為參考：

1. 由於建立路網模型時的參數缺失，如：建構水路運輸路網的模型參數、真實路段收費、實務中各跨境點不同的通關時間預估等，因研究範圍龐大且難以蒐集與整理，本研究以假設跨境點的通關時間及不將水路運輸模型、路段收費列入考量等方式，避免研究中對下層路網的模擬造成瓶頸。建議未來的研究能針對以上數點納入考量，建立更完整且更符合實務的路網模型，使區域路網的投資預估模擬更有價值。
2. 因雙層模型在上下層的連動中，因 CUBE 軟體限制而無法完成雙層的自動化連動，使得本研究之範例驗證僅能於有限的時間中做最有效的措施組合搜尋機制與收斂機制，使得以完整驗證該雙層模型之架構有效。若能使用不同的流量模擬方法，可針對上下層的自動化連動有更多著墨，且能發展更縝密的搜尋機制使能更優化措施的組合。
3. 在進行演算法搜尋時，因各跨境點上措施的成本難以估計，且成本會直接相關於預算限制下的組合搜尋，因此本研究假設各措施的成本相同，來避免成本權重影響組合選擇的可能，進而提出一個比較廣義可應用的方法。未來的研究在評估措施時，可針對各措施收集足夠的資料以給予不同的成本參數，方能使用組合搜尋找到更符合預算限制下的最佳解。
4. 本研究以旅行時間節省效益作為效益值的評估，然而跨境的大型路網之設施改善不僅能節省用路人的旅行時間，也會對於區域貿易、經濟整合等有所提升與幫助。若能設計納入提升區域貿易與吸引旅次量等項目的效益評估方法，可更優化投資項目的動機與目的，已達成區域整合的更大目標。

參考文獻

- Asian Development Bank. (2015, April). Connecting South Asia and Southeast Asia. Retrieved June 25, 2021, from <https://think-asia.org/handle/11540/4374>
- Asian Development Bank. (2020). TA-9420: Implementation of Sustainable Transport for All-Multi-region Comprehensive Connectivity and Demand Profile in Asia: Inception Report
- Asian Development Bank. (2018). Closing the Financing Gap in Asian Infrastructure. Retrieved July 11, 2021, from <https://dx.doi.org/10.22617/WPS189402-2>
- Asian Development Bank. (2015, June 15). Opening Remarks at the Meeting of the Ministers of Transport of Bangladesh, Bhutan, India, and Nepal on Regional Road Transport Connectivity . Retrieved September 23, 2020, from <https://www.adb.org/news/speeches/opening-remarks-meeting-ministers-transport-bbin-road-transport-connectivity-wzhang>
- Agamez-Arias, A. del M., & Moyano-Fuentes, J. (2017). Intermodal transport in freight distribution: a literature review. *Transport Reviews*, 37(6), 782–807. <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1297868>
- Andersen, J., & Christiansen, M. (2009). Designing new European rail freight services. *Journal of the Operational Research Society*, 60(3), 348–360. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602559>
- Arnold, P., Peeters, D., & Thomas, I. (2004). Modelling a rail/road intermodal transportation system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 40(3), 255–270. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2003.08.005>
- Bergqvist, R., & Behrends, S. (2011). Assessing the effects of longer vehicles: The case of pre- and post-haulage in intermodal transport chains. *Transport Reviews*, 31(5), 591–602. <https://doi.org/10.1080/01441647.2011.584980>
- Beuthe, M., Jourquin, B., Geerts, J. F., & Koul À Ndjang’Ha, C. (2001). Freight transportation demand elasticities: A geographic multimodal transportation network analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37(4), 253–266. [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(00\)00022-3](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(00)00022-3)
- Bontekoning, Y. M., Macharis, C., & Trip, J. J. (2004). Is a new applied transportation research field emerging? - A review of intermodal rail-truck freight transport

- literature. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* Vol. 38.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.06.001>
- CUTS International. (2021). BBIN Motor Vehicles Agreements Discussion Paper: Scope for developing integrated logistics and transport infrastructure and other related services. Retrieved February 8, 2021, from <https://cuts-citee.org/pdf/discussion-paper-bbin-motor-vehicles-agreement.pdf>
- Loureiro, C. F. G., & Ralston, B. (1996). Investment Selection Model for Multicommodity Multimodal Transportation Networks. *Transportation Research Record*, 1522(1), 38–46. <https://doi.org/10.1177/0361198196152200105>
- Feo-Valero, M., García-Menéndez, L., & Garrido-Hidalgo, R. (2011). Valuing freight transport time using transport demand modelling: a bibliographical review. *Transport Reviews*, 31(5), 625-651.
<https://doi.org/10.1080/01441647.2011.564330>
- Fernández L., J. E. L., deCea, J. C., & Soto, A. O. (2003). A multi-modal supply-demand equilibrium model for predicting intercity freight flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(7), 615–640.
[https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(02\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(02)00042-5)
- Gao, Z., Wu, J., & Sun, H. (2005). Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(6), 479–495. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2004.06.004>
- Ham, H., Kim, T. J., & Boyce, D. (2005). Implementation and estimation of a combined model of interregional, multimodal commodity shipments and transportation network flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(1), 65–79. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2004.02.005>
- Huang, K., & Kuo, Y. M. (2013). A transportation programming model considering project interdependency and regional balance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 395-405. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.06.017>
- Jensen A. (1990). Combined Transport: Systems, Economics and Strategies-Swedish Transport Res Board. *Journal Of Transport Economics And Policy*.
- Kundu, T., & Sheu, J. B. (2019). Analysing the effect of government policy intervention on cross-border freight transportation flows: the Belt and Road

- perspective. *Transportmetrica A: Transport Science*, 15(2), 1360-1381.
<https://doi.org/10.1080/23249935.2019.1594448>
- López, E., Monzón, A., Ortega, E., & Quintana, S. M. (2009). Assessment of cross-border spillover effects of national transport infrastructure plans: An accessibility approach. *Transport Reviews*, 29(4), 515–536.
<https://doi.org/10.1080/01441640802627974>
- Mathisen, T. A., & Hanssen, T. E. S. (2014). The academic literature on intermodal freight transport. *Transportation Research Procedia*, 3(2352), 611–620.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.040>
- NZ Transport Agency. (2020, June). Research Report 665: Valuing freight transport time and reliability. Retrieved June 26, 2021, from
<https://www.nzta.govt.nz/resources/research/reports/665/>
- Ortúzar Juan de Dios, & Willumsen, Luis G. (2011). *Modelling Transport*, 4th Edition. John Wiley & Sons.
- Peña, S. (2007). Cross-border planning at the U.S.-Mexico border: An institutional approach. *Journal of Borderlands Studies*, 22(1), 1–18.
<https://doi.org/10.1080/08865655.2007.9695666>
- Press Information Bureau-Government of India. (2020). Second Addendum on Protocol on Inland Water Transit and Trade between India and Bangladesh, 2020. Retrieved February 8, 2021, from
<https://pib.gov.in/PressReleaseDetailm.aspx?PRID=1625342>
- South Asia Subregional Economic Cooperation. (2016, April 25). Bangladesh, Bhutan, India, Nepal Railway Agreement Proposed to Boost Multimodal Connectivity. Retrieved September 23, 2020, from
<https://www.sasec.asia/index.php?page=news&nid=415&url=bbin-railway-agreement-proposed>
- Stedieseifi, M., Dellaert, N. P., Nuijten, W., VanWoensel, T., & Raoufi, R. (2014). Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 233(1), 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.055>
- The World Bank. (2018, September 24). South Asia Should Remove Trade Barriers for Mutual Economic Gains: New World Bank Report. Retrieved December 15,

2020, from <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2018/09/24/south-asia-remove-trade-barriers-mutual-economic-gains-report>

Uddin, M. M., &Huynh, N. (2015). Freight traffic assignment methodology for large-scale road-rail intermodal networks. *Transportation Research Record*, 2477, 50–57. <https://doi.org/10.3141/2477-06>

United States. Bureau of Public Roads. (1964). Traffic assignment manual for application with a large, high speed computer (Vol. 37). US Department of Commerce, Bureau of Public Roads, Office of Planning, Urban Planning Division.

Wong, K. I., Wong, S. C., Wu, J. H., Yang, H., &Lam, W. H. K. (2004). A combined distribution, hierarchical mode choice, and assignment network model with multiple user and mode classes. *Urban and Regional Transportation Modeling: Essays in Honor of David Boyce*, (852), 25–42. <https://doi.org/10.4337/9781845420536.00008>

Yamada, T., Russ, B. F., Castro, J., &Taniguchi, E. (2009). Designing multimodal freight transport networks: A heuristic approach and applications. *Transportation Science*, 43(2), 129–143. <https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0250>

Zhong, T., &Young, R. (2010). Multiple Choice Knapsack Problem: Example of planning choice in transportation. *Evaluation and program planning*, 33(2), 128–137. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014971890900041X#aep-section-id10>

王慶瑞(2008)。《運輸系統規劃》亞聯工程顧問公司。

交通部台灣國道高速公路局 &交通部公路總局(民100年)。《國道3號與台27線交會處周邊整體交通改善可行性研究》
https://www.freeway.gov.tw/Upload/research/201111/D01_1_002166.pdf

交通部運輸研究所(民108年)。《108年交通建設計畫經濟效益評估手冊》
<https://www.iot.gov.tw/cp-78-200001-575fd-1.html>

附錄一

本附錄說明運輸規劃模擬軟體Cube中各步驟的執行與預測模型，分為：旅次產生、旅次分布、運具選擇跟流量指派；其中模型設計參考ADB(2020)，並引用其各模型之公式。。

1. 旅次產生

客運旅次產生是以交通分區之間的人口、GDP 等經濟資料來做需求預測，取該資料年份為預測模型之基準年，其公式如下：

$$G_i = a_c P_c + b_c \pi_c \quad (15)$$

式中：

G_i ：分區 i 產生的旅次

P_c ：國家 C 基準年人口數

π_c ：國家 C 基準年 GDP

a_c 、 b_c ：參數，會依據國家 C 而不同

而貨運旅次是預測大交通分區之間各貨物種類的生產與消費的噸數，以歷史資料與人口數、GDP 等社會經濟資料預測。

2. 旅次分布

客運旅次分布的重力模型以數學式表示如下：

$$T_{ij} = P_i \frac{A_j f(c_{ij}) K_{ij}}{\sum A_j f(c_{ij}) K_{ij}} \quad (16)$$

$$f(c_{ij}) = c_{ij} X_1 * e^{c_{ij} X_2} \quad (17)$$

式中：

T_{ij} ：交通分區 i 與 j 之間的旅次數

P_i ：交通分區 i 的總旅次產生

A_j ：交通分區 j 的總旅次吸引

K_{ij} ：描述交通分區 i 與 j 之間的關係參數

$f(c_{ij})$ ：交通分區 i 至 j 的一般化成本函數，本研究採用 Gamma 函數來計算，其中 X_1 、 X_2 分別為參數，會依據不同模型評估區域而有所不同。

貨物旅次分布中含嚇阻函數的重力模型數學式表現如式(18)：

$$\Phi_c(G_c) = e^{-P_c(1+\frac{\Gamma_c}{100})^y G_c} \quad (18)$$

式中：

c ：貨物類別

G_c ：貨物 c 的一般化成本，為運具分配中的綜合成本(Composite cost)

$\Phi_c(G_c)$ ：貨物 c 對一般化成本的嚇阻函數， $\forall c$

P_c ：貨物 c 的校正參數(Calibration parameter)

Γ_c ：貨物 c 的校正參數成長因子(growth factor)

y ：與模型基礎年的年份差

3. 運具選擇

客運旅次的運具選擇使用之羅吉特模型如下：

$$P_i = \frac{\exp(V_i)}{\sum \exp(V_i)} \quad (19)$$

$$V_i = \alpha \ln(\rho t) + \beta \ln(c) + \varepsilon \quad (20)$$

式中：

P_i ：選擇運具 i 的機率

V_i ：運具 i 的效用函數

α 、 β ：不同經濟層級下，對旅行時間與旅行成本的敏感係數

ρ ：時間價值參數

t ：旅行時間

c ：旅行成本

ε ：模型誤差項

貨運旅次的運具分配依簡單多項式羅吉特模型，產生每一類貨物選擇各運具的比例；其中納入計算成本函數的變數包括：旅行時間、旅行距離與旅行成本，而變數之間互相獨立；多項羅吉特模型如下：

$$\xi_{cm}(d, \tau, x) = \frac{e^{-\Gamma_{cm}(d, \tau, x)}}{\sum_m e^{-\Gamma_{cm}(d, \tau, x)}} \quad (21)$$

$$\Gamma_{cm}(d, \tau, x) = \kappa_{0cm} + \kappa_{1cm}d + \kappa_{2cm}\tau + \kappa_{3cm}x \quad (22)$$

式中：

$\xi_{cm}(d, \tau, x)$ ：貨物 c 會選擇使用運具 m 的運輸的噸數比例

$\Gamma_{cm}(d, \tau, x)$ ：貨物一般化成本函數

c ：貨物種類

m ：運具

d ：旅行距離

τ ：旅行時間

x ：旅行成本，如營運成本、關稅、通行費、裝卸、倉儲等費用

κ_0 、 κ_1 、 κ_2 、 κ_3 ：模型參數，會依據貨物而不同

附錄二

BBIN Bi-level Test		Bangladesh	
Combination	TTSV (USD\$)	Combination	TTSV (USD\$)
15-16-17	27,134,702.29	13-16-17	3,227,812.26
16-17	10,796,305.55	16-17	3,227,812.02
15-17	9,326,817.45	13-17	2,299,324.34
15-16	24,721,525.65	13-16	925,950.21
1-15-16	24,721,525.54	1-16-17	3,227,812.02
2-15-16	24,721,525.57	2-16-17	3,227,812.02
3-15-16	24,256,348.01	3-16-17	-179,828.47
4-15-16	24,721,525.65	4-16-17	3,227,811.96
5-15-16	23,681,748.39	5-16-17	3,227,812.02
6-15-16	24,721,525.56	6-16-17	3,227,812.02
7-15-16	24,721,525.56	7-16-17	3,227,812.02
8-15-16	24,721,525.67	8-16-17	3,227,811.96
9-15-16	24,721,527.09	9-16-17	3,227,812.02
10-15-16	24,721,525.67	10-16-17	3,227,811.97
11-15-16	24,400,703.18	11-16-17	-3,697,897.83
12-15-16	24,721,525.58	12-16-17	3,227,811.96
13-15-16	24,721,529.54	14-16-17	3,227,812.02
14-15-16	24,721,525.58	15-16-17	2,448,298.61
18-15-16	23,365,184.45	18-16-17	-1,388,380.45
19-15-16	24,275,739.59	19-16-17	-244,064.60

附錄三

Cross-border points	BBIN TTSV (USD\$)		Bangladesh TTSV(USD\$)	
	Initial	Iteration 1	Initial	Iteration 1
#1 (Rail)	0	0	0	0
#2 (Rail)	0	0	0	0
#3 (Road)	-458,455.79	-458,455.79	-1,091,895.71	-1,091,895.71
#4 (Rail)	0	0	0	0
#5 (Road)	-2,201,619.24	-1,039,777.26	-2,113,250.31	-2,113,250.31
#6 (Rail)	0	0	0	0
#7 (Rail)	0	0	0	0
#8 (Rail)	0	0.02	0	0
#9 (Road)	0	1.44	0	0
#10 (Rail)	0	0.02	0	0
#11 (Road)	-702,158.47	-320,822.47	-4,631,880.66	-4,631,880.66
#12 (Rail)	0	0	0	0
#13 (Road)	104.88	104.88	3.13	3.13
#14 (Road)	0	0	0	0
#15 (Road)	6.941,399.85	16,338,396.73	-476,736.02	-476,736.02
#16 (Road)	8,384,249.45	17,807,884.84	925,950.28	928,487.92
#17 (Road)	2,408,796.79	2,413,176.64	2,299,324.29	2,301,862.05
#18 (Road)	-2,051,393.70	-1,356,341.20	-2,321,189.34	-2,321,189.34
#19 (Road)	-431,851.41	-431,851.41	-1,155,095.51	-1,155,095.51