

永續城際運輸之雙層規劃模式

學生：張凱羚

指導教授：藍武王 教授

邱裕鈞 博士

國立交通大學交通運輸研究所

摘 要

本研究以追求永續運輸為目標，構建兩個雙層規劃模式--營運型模式與規劃型模式。營運型模式之上層係決定最適營運費率，下層則決定運輸業者之最適發車班次及旅客數；規劃型模式上層係同時決定運輸系統的最適興建年期與最適費率，而下層則與營運型模式相同。主要之理論基礎係基於政府、運輸業者及旅客所追求的目標並不同，不能合併於同一層模型中。其中，政府以達到永續運輸為目標，考量了安全、能源消耗、空氣污染及旅行時間等因素；運輸業者則決定最適發車班次以達到利潤最大化；旅客則追求運具選擇的效用最大化。假設政府(領導者)與運輸業者(跟隨者)間存在Stackelberg均衡的關係，不同的運輸業者間存在Nash均衡的關係，旅客(跟隨者)與運輸業者(領導者)也隱含著Stackelberg均衡的關係。由於雙層規劃模式的解法複雜，本研究發展出遺傳演算法加以求解。

為檢驗雙層規劃模式及求解方法的可操作性，本研究以一個城際運輸走廊、四種運具（航空、鐵路、公路客運與小客車）可供選擇為例，假設總旅次需求已知，航空及鐵路的旅行時間固定，公路客運及小客車之旅行時間則依BPR公式計算。經分析測試於每日50,000旅次需求下，營運型模式求解結果顯示最適鐵路、航空、公路客運及小客車之費率（用）應分別為794元，1,508元，794元及3,000元，其搭乘比例分別為33%，23.09%，32.97%及10.94%。期初僅有一公路系統存在於此運輸走廊情況下，規劃型模式求解結果為第一年即應興建鐵路，第四年興建航空站及第七年再興建另一鐵路。

關鍵字：永續運輸、雙層規劃、Stackelberg 均衡、Nash 均衡

Bi-level Programming Models for Sustainable Intercity Transportation

Student: Kai-Lin Chang

Advisors: Prof. Lawrence W. Lan
Dr. Yu-Chiun Chiou

Institute of Traffic and Transportation
National Chiao Tung University

Abstract

This study proposes two bi-level programming models -- operational model and planning model to achieve the goals for sustainable transportation along an intercity corridor. In the operational model, the upper level is to determine the optimal fare (toll) rates, while the lower level is to determine the optimal operating frequencies of transport carriers and patronage of passengers. In the planning model, the upper level is to simultaneously determine the optimal construction horizons and fare rates of transport systems, while the lower level is the same as that of the operational model. The underlying theories are basing on various objectives viewed by the government, transport carriers and passengers, which cannot be incorporated into a single-level programming model. The goal of government is to achieve sustainable transportation in terms of safety, energy consumption, air pollution, and travel time. The goal for transport carriers is to maximize their profits in determining the operating frequencies. The goal for passengers (road users) is to choose transport modes to maximize their utilities. It is assumed that Stackelberg equilibrium exists between the government (leader) and the transport carriers (followers); Nash equilibrium exists among the transport carriers in the lower level while competing the quantity (frequencies); and Stackelberg equilibrium also exists between transport carriers (leaders) and passengers (followers). Due to the complexity of the proposed bi-level programming models, this study develops a solution algorithm based on genetic algorithms (GAs).

To investigate the operationability of the proposed models and solution algorithm, this study tests an exemplified case of intercity corridor with four modes including air, rail, bus and private vehicles. Assume that the annual travel demand and its growth rate are given, the travel times of air and rail are constant, and the travel times of buses and private vehicles follow a BPR function. Under the demand of 50,000 trips per day, the results of operational model show that the optimal regulated fares (tolls) are NT\$ 794, 1,508, 794, and 3,000, respectively, for rail, air, bus and private vehicle in association with the corresponding market shares 33%, 23.09%, 32.97% and 10.94%. If only a freeway system exists in this corridor at the beginning, the results of planning model show that the three transportation systems should be introduced on the horizon of first

year (railway), fourth year (airports) and seventh year (another railway).

Keywords: sustainable transportation, bi-level programming, Stackelberg equilibrium, Nash equilibrium.

致 謝

致謝的開頭，謝謝我的主，祢是起頭，也是末了。

研究所這段時間，謝謝藍武王老師的教導。您做學問的態度，深深的影響我。您總是嚴謹的處理每個細節，我想這個部分會成為我一生的幫助，您是個身教與言教皆是絕佳典範的長輩。真的，謝謝您！邱裕鈞邱老師您從我大三開始指導我，一直到研究所結束，一直以來，您總是不厭其煩教導我，一次又一次，一次又一次，這些的一次一次，累積了太多我對您的感謝。並您在學問上的認真，尤其待人處世的態度，皆成為我銘記在心的部分。謝謝您，希望您懂得我對於您的感謝已經是溢於言表。

在論文審查的過程，感謝馮正民老師以及林楨家老師的細心審查以及所提出的問題與建議，你們所提供不同方向的思考讓這篇論文更近於完善。也感謝所上的所有老師們，在交研所的這些日子裡，感謝你們教授在交通這個領域的專長。也謝謝洪姐與柳姐這段時間的照顧，你們對待學生就真的像在對待自己的孩子，謝謝你們！

再來，會所中的弟兄姊妹們，在高雄的蕾、方哥方姐、雅博阿弟、祐和才揚；在台北的天元弟兄、怡帆、阿寶家、朱旭弟兄家以及 14 會所的弟兄姊妹們，二會所的弟兄姊妹們，這兩年來你們的照顧與愛中的代禱，是扶持我到現在的動力。特別感謝禧年，你在論文緊迫之際，仍不厭其煩的教我程式，這個部分對我幫助非常大。在遠方的葉爸爸葉媽媽和 Ester、兩個奶奶、點點與吱吱，這六年來的關心與鼓勵，謝謝你們！阿桂，你一直是我生活中的重心，無論我們是否住一起，我會記得你在生活中的點滴，你扶持的，是最深入最細節的部分。

謝謝在逢甲的佩珊，程式的問題，每次你都熱心的幫助我；論文撰寫過程中，特別特別感謝阿店與阿肥，阿店時常關心我的情緒部分，開心的，低潮的，你不只是個好聽眾，更給我許多的建議，我們之間擁有絕佳的默契，阿店，你是我一生中重要的朋友；阿肥幫助我論文的部分，許多寫論文的過程中會碰到的問題，你都幫助我解決一個一個的問題。

接下來就是可愛的 ITT 了。罵的，你是個在學問上讓我佩服的人，小從作業大到論文，你在學問上皆是我望塵莫及的；文君，你是個樂觀的人，這個態度常常影響我在面對許多的事情時，也嘗試改變自己的態度；珮蓁，你是個特別的朋友，謝謝你陪我一起走過碩二這一年；靜宜，個性很直爽也很有衝勁，謝謝你幫我做第一次的校稿；笛箏，你是個有想法並會付諸行動的人，祝福你，在感情以及每件事上！薰論，這段時間與你有幾次的深談，你是個堅強的人，你所面對的一些波折，讓我佩服你的勇敢；宇函，你是我在北交最熟的女生，我會記得與你一同打工的日子，也會記得我們曾經一起請伯伯打開郵筒的糗事；博彥，你是第一個在北交看到我掉淚的人喔！謝謝你的安慰，寫論文的這幾個月，因為你每天

向 LAB 報到，激勵我不可以偷懶；webber，你這個朋友太太太讚了，從平常的聊天，一直到耗體力的搬家，你一向對朋友義不容辭，你一向都是做多於說，我喜歡這樣個性的人；A 中，我們是很慢熟但說話感覺超搭，謝謝你這段時間的鼓勵，你是個很棒的朋友，無論是在傾聽或是說廢話的事上；大頭，刀子嘴豆腐心是你的最佳寫照，你常常一直嘟囔，但卻也是最常去幫助人，記得你的七又八分之七；一起吃熱炒，而且害我玩很丟臉的虎客船長的阿朋、書婷、金將、阿秋、EJ 和紅豆；同 LAB 的大冠兒和姿慧。ITT 的大家，愛你們，開心與這樣優秀的你們同班兩年。

最後，我摯愛的家人，你們每一個人，無可取代！親愛的爸媽，你們對我的愛與包容，幾乎是沒有盡頭，從出生到現在，無時無刻，你們一直將我放在心上。你們所教育並栽培我的，使我在未來的路能走的更有把握。你們，是主給我的最大最大的禮物。張曉，你在我的生命中，無可取代！我珍惜每個與你同住的日子，也珍惜每個與你分開卻能通電話的日子。你很特別，你有個你專有的搞笑，但細膩與博學也同時存在你身上。身為你的妹妹，是我一輩子的驕傲。感謝二姨一家在這段時間的照顧，謝謝奶奶並我所有的親人。謝謝你 D，六年來你陪我走過每一天，我們從不熟悉彼此，直到現在我們懂得彼此之間相處的默契。若是未來有機會，我們還會一直走下去。

Kai
深夜 LAB

目 錄

摘 要	I
Abstract.....	I
致 謝	III
目 錄	V
表目錄	VII
圖目錄	VIII
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究內容	2
1.3 研究目的與流程	3
1.3.1 研究目的	3
1.3.2 研究流程	4
1.4 研究架構	5
第二章 文獻回顧	6
2.1 永續運輸相關文獻	6
2.2 雙層數學規劃之應用	14
2.2.1 交通領域之應用方面	14
2.2.2 求解演算法	19
2.3 文獻整理評析	23
第三章 模式構建	24
3.1 模式描述	24
3.1.1 模式特性	24
3.1.2 模式求解	25
3.2 永續運輸之雙層數學規劃模型	25
3.2.1 營運型模式概念圖	25
3.2.2 規劃型模式概念圖	27
3.2.3 模式假設	27
3.2.4 符號說明	28
3.2.5 營運型模式數學定式	29
3.2.6 規劃型模式數學定式	32
第四章 求解演算法	35
4.1 雙層數學規劃求解法	35
4.2 遺傳演算法	35
4.2.1 重要名詞解釋	35
4.2.2 三法則運作方式	38
4.2.3 重要特性	41
4.2.4 操作步驟	41

4.3	永續運輸之營運型雙層數學模型求解演算法.....	43
4.3.1	營運型模式上層求解方法	43
4.3.2	營運型模式下層求解方法	44
4.4	永續運輸之規劃型雙層數學模式求解演算法.....	45
4.4.1	規劃型模式上層求解方法	45
第五章	簡例分析	47
5.1	營運型模式簡例設計.....	47
5.1.1	目標式參數說明	47
5.1.2	限制式參數說明	49
5.1.3	研究方法參數說明	51
5.2	規劃型模式簡例設計.....	54
5.2.1	目標式參數說明	54
5.2.2	限制式參數說明	55
5.2.3	研究方法參數說明	55
5.3	營運型模式結果分析.....	57
5.4	規劃型模式結果分析.....	59
第六章	敏感度分析	61
6.1	營運模型敏感度分析.....	61
6.1.1	不同遺傳演算法參數	61
6.1.2	不同旅次需求總數	61
6.1.3	不同鐵路發車班次	65
6.2	規劃模型敏感度分析.....	71
6.2.1	不同旅次需求總數	71
6.3	求解結果與敏感度分析之政策意涵.....	72
6.3.1	營運型模式求解結果與敏感度分析之政策意涵	72
6.3.2	規劃型模式求解結果與敏感度分析之政策意涵	72
第七章	結論與建議.....	73
7.1	結論.....	73
7.2	建議.....	74
參考文獻	76

表目錄

表 2.1 永續運輸文獻彙整.....	11
表 2.1 永續運輸文獻彙整（續）.....	12
表 2.1 永續運輸文獻彙整（續）.....	13
表 2.2 雙層數學規劃應用於交通領域之文獻彙整表.....	17
表 2.2 雙層數學規劃應用於交通領域之文獻彙整表（續）.....	18
表 2.2 雙層數學規劃應用於交通領域之文獻彙整表（續）.....	19
表 2.3 雙層數學規劃之求解方法相關文獻彙整.....	22
表 4.1 二元編碼的染色體型式.....	37
表 4.2 排列編碼的染色體型式.....	38
表 4.3 實數編碼的染色體型式.....	38
表 5.1 各道路類別參數值.....	48
表 5.2 營運型模式參數符號彙整表.....	50
表 5.3 營運型各運具模式參數符號彙整表.....	51
表 5.4 規劃型模式研究方法參數彙整表.....	53
表 5.5 規劃型模式各運輸系統參數符號彙整表.....	56
表 5.6 規劃型模式研究方法參數彙整表.....	56
表 5.7 營運模型上層之求解結果.....	57
表 5.8 營運模型下層之求解結果.....	57
表 5.9 營運模型之各運具搭乘比例.....	57
表 5.10 營運模型上層修正後之求解結果.....	58
表 5.11 營運模型下層修正後之求解結果.....	58
表 5.12 營運型模式修正後之各運具搭乘比例.....	58
表 5.13 營運型模式修正票價上限各運具使用率影響.....	59
表 5.14 規劃型模式求解結果.....	59
表 6.1 遺傳演算法參數敏感度分析表.....	61
表 6.2 規劃型模式之不同旅次需求敏感度分析表.....	71

圖目錄

圖 1.1 研究流程圖.....	4
圖 1.2 研究架構圖.....	5
圖 3.1 雙層營運型模式概念圖.....	25
圖 3.2 雙層規劃型模式概念圖.....	27
圖 4.1 原始問題與GAs的關係.....	37
圖 4.2 蒙地卡羅轉盤選擇示意圖.....	39
圖 4.3 三種交配方式示意圖.....	40
圖 4.4 二元變數兩種突變方式示意圖.....	41
圖 4.5 遺傳演算法之流程圖.....	43
圖 4.6 下層求解方式.....	45
圖 5.1 旅次產生型態均一流量.....	49
圖 5.2 模式之運具票價染色體說明.....	52
圖 5.3 整數編碼突變方式.....	52
圖 5.4 模式之各運輸系統興建年期染色體說明.....	55
圖 5.5 模式之運具票價染色體說明.....	56
圖 5.6 規劃型模式評估年間各運具所佔百分比.....	60
圖 6.1 營運型模式之不同旅次需求下各運具票價分析圖.....	62
圖 6.2 營運型模式之不同旅次需求下各運具班次分析圖.....	63
圖 6.3 營運型模式之不同旅次需求下各運具使用百分比分析圖.....	63
圖 6.4 營運型模式之不同旅次需求下各運具業者收益分析圖.....	64
圖 6.5 營運型模式之不同旅次需求下各運具污染成本分析圖.....	64
圖 6.6 營運型模式之不同旅次需求下各運具肇事成本分析圖.....	65
圖 6.7 營運型模式之不同旅次需求下各運具能源消耗成本分析圖.....	65
圖 6.8 營運型模式之不同鐵路發車班次下鐵路承載率分析圖.....	66
圖 6.9 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運具票價分析圖.....	67
圖 6.10 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運具班次分析圖.....	67
圖 6.11 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運輸業者收益分析圖.....	68
圖 6.12 營運型模式之不同鐵路發車班次下上層績效值分析圖.....	68
圖 6.13 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運具污染成本分析圖.....	69
圖 6.14 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運具肇事成本分析圖.....	69
圖 6.15 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運具能源消耗成本分析圖.....	70

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

運輸需求係人類文明發展中各類社會經濟需求的衍生需求，運輸需求本身是一種手段而不是目的。在發展迅速的現代社會，運輸問題除了表現為尖峰時間的交通擁擠外，汽機車所帶來的噪音及空氣污染無疑也是運輸問題的主要內容。交通擁擠不僅造成時間的浪費，也造成不可再生資源(例如化石能源)的耗損；空氣污染不僅造成呼吸道的疾病，也造成酸雨的威脅，而汽車冷媒所使用的氟氯碳化物不僅是造成臭氧層破洞的元凶，也是溫室效應氣體之一，其對環境與生態所造成的衝擊已成為全球亟需解決的問題。所以在資源的短缺以及環境快速被破壞的今天，政府及社會大眾開始重視永續發展的問題。

經濟合作與發展組織(OECD)於 1996 年在加拿大舉辦的永續會議中定義「環境的永續運輸」(Environmentally Sustainable Transport, EST)：「運輸在滿足行的需求時，不應該損害民眾的健康與生態系統，其發展應符合(1)使用再生資源的比率低於資源再生的比率。(2)使用不可再生資源須低於可再生替代資源的比率。」而與會的代表一致認為目前的運輸系統並非處於永續性的方向。為了達到個人高度機動化的移動，結果已造成環境、社會與經濟可觀的成本。

1987 年的世界環境與發展委員會(WCED)中對永續發展為定義：既滿足當代人的各種需要，同時又不損害後代人滿足其需要的能力。而永續發展的範圍，包含了環境保護、經濟發展以及社會公平等三大方面。Black(1996)定義永續運輸為「滿足現代運輸及機動性之需要，不致對後代人滿足這些需要構成傷害的發展」，並且說明現代運輸系統不永續之主要原因包括原油有限、消耗石油燃料所排放廢氣對空氣品質造成負面影響、小汽車所造成的過多傷害及死亡、交通擁擠(包括停車問題)及都市擴張。在國內，交通部運輸研究所(2002)亦定義永續運輸為「社會、經濟、環境永續發展所需要且能支撐之運輸系統」。惟有關永續運輸之相關研究，大多為政策上之探討或永續指標之研擬與計算，較缺乏明確之數理模式加以進行最佳化規劃。

當然，具有高乘載運輸能量之大眾運輸系統，相對於私人運具，確能在符合社會經濟活動需要之前提下，有效減少污染及能源消耗。政府為達永續運輸目標，是否能確實有效地減少私人運具之持有與使用，仍需視大眾運輸業者所提供之服務水準及旅客之運具選擇行為而定。一般而言，大眾運輸業者之營運目標與旅客之運具選擇目標，未必能與永續運輸目標一致。就政府的角度而言，在積極追求永續運輸的目標下，以長期來說，可考慮運輸系統的興建年期，以改善旅客運具選擇之習慣；以短期為考量，最有效並最直接的方法便是制定最適的大眾運輸費率。目前大眾運輸費率的制定，大多是採用成本加價法(Cost-plus method)或

是報酬率法(Rate-of-returns method)，意即為費率的主要決定因素是根據於成本面的考量，但永續運輸這方面，目前是極少被考慮到的。而政府所制定之票價，與大眾運輸業者所提供之班次等，和旅客的運具選擇行為等，在假設需求不改變的狀況下，確會左右大眾運輸以及私人運具的比例分配，進而影響政府期望能達到永續運輸目標之成效。因此，政府在規劃永續運輸系統之票價制定時，必須兼顧運輸業者及乘客之行為。

因此，在有限的環境資源下，為滿足不斷增加的運輸需求，實有必要調整運輸政策的重點方向，研擬永續運輸政策，以順應永續發展的世界潮流，發展成為省能源、低污染及智慧化的運輸系統，期能確實提高運輸服務水準及提昇生活品質，達到運輸之永續性。基此，政府如何規劃運輸系統的興建年期以及票價，業者該提供多少的發車班次，並兼顧旅客之目標與行為，以達到永續運輸之目標，實為一重要課題。

1.2 研究內容

1. 研究的背景動機

因目前的運輸系統並非處於永續性的方向。為了達到個人高度機動化的移動，結果已造成環境、社會與經濟可觀的成本。所以本研究認為，以達到永續運輸為目標之下，如何規劃運輸系統的興建年期、票價以及提供的班次，實為一重要課題。

2. 確立研究目的與範圍

本研究利用雙層數學規劃為基礎，建立二個永續運輸之雙層數學模型。一為永續運輸營運之雙層數學模型；二為永續運輸規劃之雙層數學規劃模型。並以本研究所研擬之求解演算法，設計二簡例，蒐集相關參數進行實例驗證，並進行敏感度分析。

3. 回顧相關文獻

本研究擬蒐集有關永續運輸及雙層數學規劃等兩方面之相關文獻。在第一部份的文獻回顧部分，主要是用來了解永續運輸在國內以及國外的相關定義，以及應用在交通領域的方面；在第二部份的文獻回顧部份，主要是用來瞭解雙層數學規劃的使用時機與求解方法。

4. 建立模式

根據於文獻回顧之整理，研擬二個雙層的數學模型。一為永續運輸營運之雙層數學模型，上層以永續運輸為目標，下層則分別為運輸業者利潤最大化模型，二為永續運輸規劃之雙層數學模型，上層以運輸系統建設成本、營運成本最小化、永續運輸成本最小化為目標；下層則分別為運輸業者利潤最大化模型。

5. 簡例分析

各設計一運輸走廊為簡例，蒐集簡例之相關參數，以驗證本研究建構模式之應用與可行性，藉此了解模式之適用程度及欠缺部份，以作為模式修改之參考依據。

6. 敏感度分析

作簡例之敏感度分析，觀察各項重要參數變動時，對於整個模式的目標式結果改變量之多寡。

7. 結論與建議

根據前述的分析結果提出本研究的結論，並對於往後相關研究與發展提出建議，以期獲得更完備的永續運輸架構。

1.3 研究目的與流程

1.3.1 研究目的

永續運輸的相關文獻中，大多基於政府角度探討永續運輸的推動或規劃，較少同時考量大眾運輸營運者以及運具使用者之行為。因此，本研究嘗試構建二個雙層數學規劃模式(Bi-level programming)，據以規劃永續運輸系統之興建年期與票價制定，俾以提供決策者之參考。具體研究目的如下：

1. 了解國內外永續運輸相關發展之研究，並研擬代表性指標，以作為模式之規劃目標。
2. 以政府角度，兼顧業者及乘客選擇行為之永續運輸系統最佳票價制定之雙層數學規劃模式。營運型模式上層目標為永續運輸之代表性指標貨幣化成本最小，下層目標為運輸業者之利潤及旅客運具選擇之效用；規劃型模式上層目標為運輸系統之興建成本、運輸系統之營運成本，以及永續運輸之代表性指標，下層目標為運輸業者之利潤及旅客運具選擇之效用。
3. 透過簡例設計及應用，用以探討兩個模式之應用性。
4. 利用敏感度分析檢驗模式各項參數之敏感程度，俾以了解其重要性。

1.3.2 研究流程

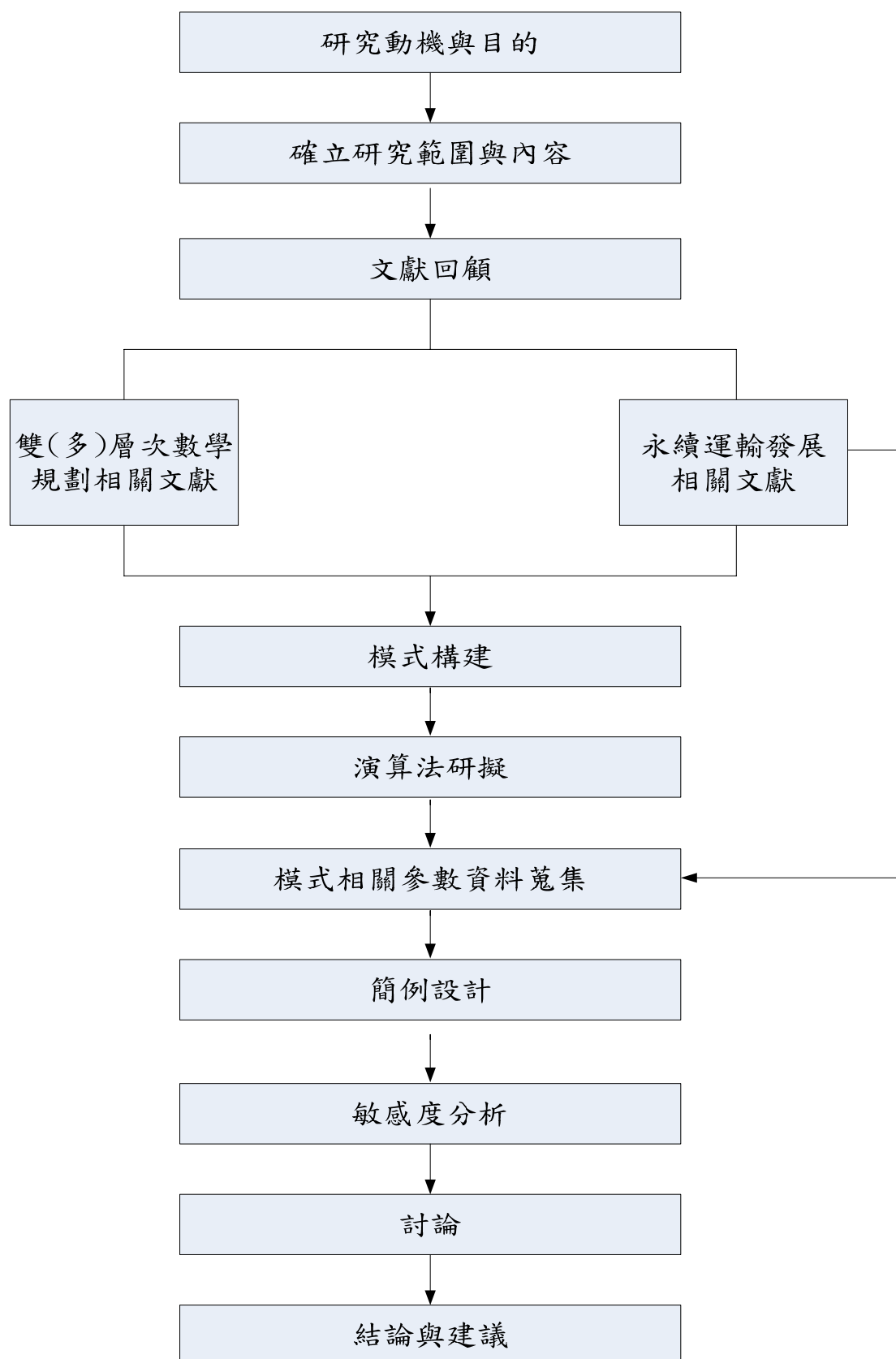


圖 1.1 研究流程圖

1.4 研究架構

本研究建立二個雙層數學規劃模式，一為營運型模式，求解各類型運輸系統(鐵路、公路及航空)之最適票價。上層以永續指標為目標式，包括空氣污染、肇事次數、能源消耗及旅行時間；二為規劃型模式，求解各類型運輸系統(鐵路、公路及航空)之最適興建年期與最佳票價。上層以永續指標為目標式，包括空氣污染、肇事次數、能源消耗及旅行時間，運輸系統之興建成本、營運成本最小化，決策變數為各運輸系統興建年期，與各類運輸系統之票價。下層皆為運輸業者利潤最大化模型，決策變數為營運班次，以及旅客運具選擇之效用最大化模型(羅吉特模式)，其決策變數為運具選擇。限制式為各期旅次需求限制及既存運輸系統限制等。

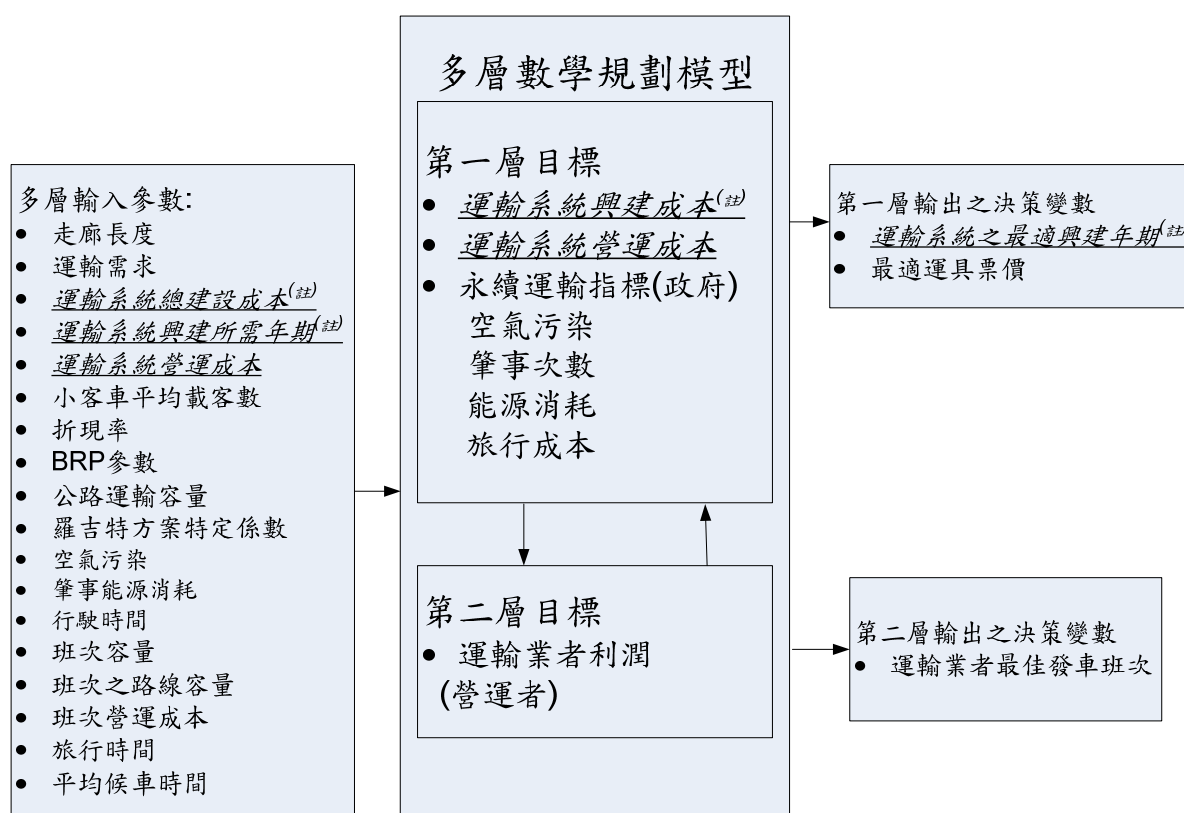


圖 1.2 研究架構圖

註：斜體底線部分為規劃型模式與營運型模式差異之處。

第二章 文獻回顧

本章節回顧永續運輸的相關文獻，以研擬模式中之代表性指標；回顧雙層數學規劃之相關文獻，以了解其應用範圍以及求解方法。

2.1 永續運輸相關文獻

交通部運輸研究所(2002)永續運輸之量化指標研究。在此研究中定義永續運輸為「社會、經濟、環境永續發展所需要且能支撐之運輸系統」。由這個定義可知，永續運輸應該包含兩部分，一為永續發展的運輸需求，另一為永續發展的運輸供給。前者係指滿足「社會、經濟、環境永續發展之所需要」的基本運輸需求(最低需求)，此一運輸需求受人口特性、土地使用、經濟、政策、技術水準及運輸系統之服務水準等所影響。而此一運輸實體系統之運作應為「社會、經濟、環境永續發展所能支撐」。而永續運輸的三方面目的是：

1. 社會面：永續運輸應尋求適當的土地使用型態而使運輸需求最小化。運輸系統除了應滿足個人和社會基本的可及需求外，尚須考慮偏遠地區、老人、殘障以及弱勢族群的可及性問題，使之社會達到公平。
2. 經濟面：永續運輸應充分利用價格的經濟手段來進行需求管理，運輸系統應能促進經濟的發展，使資源的使用效率最大化，資源的使用數量最小化，而各種社會、經濟與環境外部成本尤其應該充分反應於使用者應付之成本。
3. 環境面：永續運輸系統對生態環境、土地資源的消耗最小化，且其廢棄物可被地球吸收分解，形成一可循環的生態系統，維持最適承載力。

許卜仁(2003)在研究裡評估臺北市運輸系統，其運輸系統大體朝向永續運輸發展，原因為捷運系統陸續完成，搭乘大眾運輸人次增多，接駁公車、腳踏車、徒步等旅次增加，小客車成長趨緩，進而使貨物運輸效率、行車速率大幅提升，使整體運輸系統效率提高，民眾主觀感受亦大幅提升，透過接駁公車的規劃，使大眾運輸路網更加綿密，進而達到弱勢團體的可及性需求被滿足。故促進大眾運輸系統發展極具永續性。而在文中使用的排序方法有TOPSIS以及VIKOR，VIKOR在進行排優的過程是追求「群體效益」的最大化，以及「反對意見的個別遺憾」之最小化，而TOPSIS則是同時尋求與理想解最接近與負理想解最遠的方案，故結果些略不同。

馮正民(1999)永續運輸的建設與發展要求資源的使用不論在使用的數量與速率上，都不可以無約束的任意使用，且應追求替代的資源，其目的就是希望這一代的資源不應該被這一代的人們所耗盡，而應該能夠延續到下一代，甚至永久世代使用。而除了尋找替代能源外，發展大眾運輸應是替代汽機車運具的優良方

案。在文中比較軌道運輸及自用客車，自用客車所造成的空氣污染、土地佔用、交通事故、能源消耗以及噪音污染，皆為軌道運輸的三到廿倍不等。所以推廣大眾運輸實為政府該努力之方向。

林國顯(2005)在我國運輸部門的發展上，過去較著重於經濟面永續之考量，但現階段在財政資源有限及環保保護意識抬頭的情況下，交通建設必須在環保及財政資源可行的必要條件下，追求經濟發展並滿足社會公平，以達到社會永續發展的目標。文中說明為使運輸計畫的長期發展滿足永續發展的目標，應先檢視既有之作業方式，並了解造成目前問題的原因，建議整體運輸發展的相關單位人員應有全面的共識，政府應加強永續發展理念與認知的共同宣導；在上位者應積極進行國土規劃；且需建立永續運輸政策之計畫形成和決策機制，使整體運輸發展方向可以符合國家整體永續發展目標。

李治綱(2002)依據世界環境與發展委員會(World Commission on Environment and Development)定義永續發展為：「在不犧牲下一代滿足其生活與需求之能力的條件下，追求現在人們生活與需求之滿足」。我們對於「可再生資源」之使用要考量其再生速度，對於「不可再生資源」之使用要考量替代性資源之發展速度。台灣目前 90% 的空氣污染來自於汽機車，相較於世界上許多其他國家，其私用車持有率比我們高、所得比我們高，但大眾運輸的使用率卻也比我們高，原因在於政府在早期就有完整的運輸及土地規劃，以及大眾運輸的服務可及程度(Service availability)高和服務可達的品質(Quality of service)佳。在安全、效率以及環保的考量下，公路運輸環境之外部成本為鐵路的 90 倍之多。所以政府對於運輸需求、大眾運輸、道路交通管理，以及運輸系統建設等，應綜合考量並徹底執行。

Lan *et al.* (2006) 分析臺灣因為經濟起飛，所得提高，故導致小汽車持有率提高，進而減少大眾運輸的搭乘，但小汽車的持有與使用增加，會造成許多的擁擠以及空氣品質的惡化；另一方面，大眾運輸因為搭乘量減少，所以路線以及班次也相對減少。台灣目前處於這樣惡性循環的情形下，是亟不永續的狀況。我們應該要採納大眾運輸導向發展之觀念(Transit-oriented development, TOD)。所以專家建議政府，應該多鼓勵民眾使用綠色大眾運輸工具(Green public transport modes)，以減少能源的消耗和廢棄物的排放。

Black(1996)現在的運輸呈不永續的原因是因為石油的資源是有限的，並且廢棄物的排放對全球以及各城市都是有害的；機動車輛也造成許多的意外，且更加速破壞臭氧層。所以文中提出了幾項解決要點：石油的節約使用，新出產的車子，都有省油的效能；在美國，他們把較高的石油使用稅加在燃料效能較低的新車上，以達到提高石油使用的稅及費用的目標；尋找可替代的燃料，早期所找到較適合的替代燃料為氫，但這類的運具仍需要電力作為備用的能量來源；增加大眾運輸的資金；土地使用的改善以及技術上的進步等。

Loo and Chow (2006)分成社會、環境以及財務方面來探討都市永續運輸的觀

念、政策以及方法論。在社會方面，探討在都市居住的居民所得高低，是否影響都市運輸的政策；在環境方面，探討高密精巧都市(Compact city)的發展，是否對於能源的節省有幫助，並研究若在政策上調整都市與子都市的土地使用，進而調整為高密精巧都市，是否有效的減低能源的消耗，並改變旅次的型態。

Black *et al.* (2002) 提出高層政策目標與永續運輸的關聯，以及低層的執行面，測量屬性和績效指標。並在文章中介紹五種分析方法—描述性的統計方式，包含各種的圖例說明，例如利用點狀圖說明人口密度分布與延人公里之關係，用折線圖說明與市中心的距離長短和總旅行長度之間的關係等；可以用空間地圖顯示研究範圍的上班旅次分布；而空間統計利用一自我相關係數(Moran's *I*)，其計算方式如下：

$$I = \frac{\sum \sum w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(x_i - \bar{x})^2} \quad (2.1.1)$$

其中 \bar{x} ：觀察樣本的平均值， w_{ij} ：旅次 i 和 j 比率；旅行績效函數則是介紹線性規劃的方式來解決運輸問題；以及利用運輸工程和計畫預測旅次的產生，並評估運輸設施的效果做迴歸分析等。

許添本(2002)提到，目前我國交通系統不符合永續發展的現象有：私人運具持有率過高，並造成安全、污染、環境破壞；大眾運輸不符合現代化需求，除台北都會區以外，台灣目前其他都市公車的準點率低、空間設計不良等。若要走向綠色交通之導向，應「發展大眾運輸，抑制私人運具」、「鼓勵非機動運輸方式（包括步行及腳踏車運輸）」，並有「大眾運輸的鼓勵制度」，這包含了：大眾運輸營運及票證整合、大眾運輸長短程不同運具接運、大眾運輸營運補貼及大眾運輸企業民營化等。

馮正民等人(2002, A)研究針對大眾運輸以及鐵路運輸評估，以AHP方法決定指標權重，並利用模糊綜合評判方法設計指標整合方法，結果顯示：對於公路大眾運輸的污染指標明顯越來越差，且遠高於鐵路運輸，政府應該朝向更低污染的大眾運輸發展；而公路客運的營運效果指標有明顯越來越差的趨勢，政府應該要多鼓勵民眾搭乘公路大眾運輸，但同時需加強轉運的服務功能，才能提高可及性與使用意願。相對於鐵路運輸，雖然其運輸效能明顯遠高於公路大眾運輸，但是因為近年來有下降的趨勢，所以應該要注意對老舊運具的汰舊和定期維修等。

馮正民等人(2002, B)要建立永續運輸社會公平面的指標，而評估的指標係由議題架構產生，經過功能重複性，意即將功能具有重複性的指標予以刪除；AHP調查權重，即將重要性較低的指標予以刪除；以及資料可得性，意即將無法取得

資料的指標予以刪除等方式篩選，並應用模糊推論方法進行指標整合，以提供大眾有用且易懂的綜合評估結果。研究結果顯示，台灣地區城際運輸在社會公平面整體的永續發展程度為「中等」，其中以不同群體間的公平性最差；東部與西部地區間的公平性雖然良好，但在公路運輸部分需加強，而最需注意的仍是公路私人運具使用者未擔負應該支付成本的情況較為嚴重。

張學孔等人(2002)文中探討永續發展的理念，並提倡以永續發展觀點出發之大眾運輸導向都市發展(Transit-oriented development)理念，提倡回復混合土地使用(Mixed Land-Use)以鼓勵大眾運輸的使用、並提高行人搭乘旅次。文中並建議新開發的地區應以大眾運輸發展規劃思考為基礎，並輔以相關法規做適當的修正。

Yedla and Shrestha (2003)利用層級分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)求解在印度德里，三種供選擇的運具，包含四行程兩輪運具、天然壓縮氣汽車以及天然壓縮氣公車，有六種評估的準則，包含能源節約、環境保護、營運成本(以上為量化指標)、技術提升、適應性和電力改良(以上為質化指標)等。而質化與量化指標，以及質、量化指標結合的評估結果不同，但其中以四行程兩輪運具的績效結果最好，最能達到環境永續運輸的標準。

劉欽瑜(2001)此研究中提到永續發展漸成為重視的課題，而根據文獻回顧發現運具分配比例不但可反映私人運具使用比例，亦可反映運輸可能帶來的負面影響(空氣污染、噪音、能源消耗及交通肇事等)提供各都市間簡易的比較，因此先確認運具分配與永續運輸之關聯，進而嘗試建構都會區永續運輸目標下最適運具分配模式，以求解在追求永續發展下之最適運具分配比例。模式構建內容為以社會總成本最小為目標；決策變數為旅次的長度，分為四類；限制式包含了廢氣的排放限制以及旅次長度之旅次需求的限制。目標方程式的參數部分可分為旅行時間及旅行時間價值、行車成本、空氣污染成本、噪音成本、肇事成本及擁擠成本等，這些參數包含了永續發展的三大方面考量：環境永續、社會公平以及經濟發展。

Greene and Wegener (1997)認為，目前世界上的運輸系統，都往不永續的方向發展，許多過去的推斷認為，在技術、營運、設計以及財務上做根本的改變是必要的。這篇文章研究了三個主題：(1)為達永續運輸的實施技術：而研究結果顯示，以電池電力以及燃料電池為電力來源的運具，在北美以及歐洲是具有市場潛力的；(2)永續運輸的票價及財務：不該將燃油或是車輛的稅替代排氣稅，因為這樣並不會鼓勵民眾去利用觸媒轉化器而減少廢氣排放污染；(3)為追求永續運輸而整合運輸與土地使用：在美國的一個新地區使用這樣的計畫，將運輸與土地使用進行結合，結果證明並不會造成負面的影響。

Goldman and Gorham (2006)在研究中定義四個永續都市運輸的創新方向：

1. 新流動性(New Mobility)：

該項方式主要是在提高車輛的移動速率，提供旅客更方便的旅行選擇。可將旅次的資訊發布在網路上，便利旅行者可以從任何設備上取得資訊；收費的整合讓一卡有多種用途等。考量的項目有：旅次分布資訊(Distributed travel information)、收費整合(Fare integration)、汽車共用(Carsharing)、腳踏車共用(Bikesharing)以及新服務範例(New service paradigms)。

2. 都市物流(City Logistics)：

都市貨物運輸的需求量增長迅速。電子商務促進了小型包裹需求的快速成長。隨著貨物運送需求的增加，貨車的數量也隨之增加。而永續的貨物運輸所追求的，是減少運送貨物的貨車在都市或是擁擠的市區裡的運送時間。所以考量的項目有鄰戶放置點(Neighborhood drop-off points)、都市分布集中化與物流中心(Centralized urban distribution and logistics centers)、環保區(Environmental zones)。

3. 智慧型系統管理(Intelligent System management)：

許多城市利用新的訂價方式以及新的系統管理技術，大幅度的改善環境以及提高經濟效率。這包含了擁塞收費(Congestion charging)、綜合公車系統管理(Comprehensive bus system management)以及自動化交通執法(Automated traffic enforcement)。

4. 可居住性(Livability)：

可居住性的探討範疇包含了可及性、公共空間的配置與設計、社交活動和休閒的機會，以及整體居民的健康與經濟福利等。包含了步行範圍(Pedestrian realms)、打破駕駛慣例(Breaking the driving routine)、公車捷運(Bus rapid transit)以及共享空間(Shared space)。

表 2.1 永續運輸文獻彙整

作者	指標	研究方法及模式	應用
Black W. R.(1996)	<ul style="list-style-type: none"> ● 石油資源 ● 廢棄物排放 ● 機動車輛數 	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 新產汽車省油裝置 ● 尋找替代燃料，降低廢棄物排放
Greene and Wegener (1997)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 實施技術 ● 票價及財務 ● 整合運輸與土地使用
馮正民 (1999)	<ul style="list-style-type: none"> ● 追求替代資源 ● 發展大眾運輸 	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 發展軌道運輸
許添本，劉欽瑜(2001)	<ul style="list-style-type: none"> ● 環境永續 ● 社會公平 ● 經濟發展 	<ul style="list-style-type: none"> ● 目標式：社會總成本最小 ● 決策變數：旅次長度 ● 限制式：廢棄物排放限制、旅次長度之旅次需求限制 	-
交通部運輸研究所 (2002)	<ul style="list-style-type: none"> ● 社會面 ● 經濟面 ● 環境面 	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 適當的土地使用型態 ● 利用價格的經濟手段來進行需求管理 ● 對生態環境、土地資源消耗最小
李治綱 (2002)	<ul style="list-style-type: none"> ● 安全 ● 效率 ● 環保 	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 完整的運輸以及土地規劃 ● 大眾運輸的服務可及性
Black J. A.(2002)	<ul style="list-style-type: none"> ● 第一層指標：廣泛性的測量，例如本益比等 ● 第二層指標：量化的測量 ● 第三層指標：質化的測量 	<ul style="list-style-type: none"> ● 圖例說明 ● 空間地圖 ● 空間統計 ● 旅次績效函數 ● 迴歸分析 	-

表 2.1 永續運輸文獻彙整（續）

馮正民，林禎家，蔡琮宇(2002)	<ul style="list-style-type: none"> ● 大眾運輸污染指數 ● 大眾運輸營運績效 ● 大眾運輸效能 	<ul style="list-style-type: none"> ● AHP決定指標權重 ● 模糊綜合評判 	<ul style="list-style-type: none"> ● 加強大眾運輸轉運功能 ● 鼓勵民眾搭乘大眾運輸 ● 注意老舊運具維修
馮正民，林禎家，陳正杰(2002)	<ul style="list-style-type: none"> ● 群體間公平 ● 地區間公平 	<ul style="list-style-type: none"> ● 議題產生架構 ● 功能重複性 ● AHP調查權重 ● 模糊推論方法 	<ul style="list-style-type: none"> ● 注意老人、殘障者、偏遠地區民眾等的公平性 ● 注意東部地區公路大眾運輸
張學孔，杜雲龍，何承諭(2002)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 大眾運輸導向(TOD) ● 混合土地使用
許添本(2002)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 發展大眾運輸，抑制私人運具 ● 鼓勵非機動運輸方式 ● 大眾運輸的鼓勵制度
Yedla and Shrestha(2003)	<ul style="list-style-type: none"> ● 能源節約 ● 環境保護 ● 營運成本 ● 技術提升 ● 適應性 ● 電力改良 	<ul style="list-style-type: none"> ● AHP 	-
曾國雄，許卜仁(2003)	<ul style="list-style-type: none"> ● 經濟效率面 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 大眾運輸營運效率 ➢ 交通肇事率 ● 環境生態面 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 能源使用 ● 社會公平面 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 大眾運輸每日服務人次 	<ul style="list-style-type: none"> ● AHP ● TOPSIS ● VIKOR 	<ul style="list-style-type: none"> ● 促進大眾運輸發展 ● 加強運輸管理、促進交通運輸安全與順暢

表 2.1 永續運輸文獻彙整（續）

林國顯 (2005)	<ul style="list-style-type: none"> ● 經濟發展 ● 社會公平 ● 環境保護 	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 為使運輸計畫能長期朝永續發展，應先檢視既有之作業 ● 永續運輸發展相關人員有全面性的共識 ● 國土計畫
Lan <i>et al.</i> (2006)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 推動大眾運輸導向發展觀念 ● 鼓勵民眾使用綠色大眾運輸工具
Goldman and Gorham (2006)	<ul style="list-style-type: none"> ● 新流動性 ● 都市物流 ● 智慧型系統管理 ● 可居住性 		<ul style="list-style-type: none"> ● 旅次分布資訊 收費整合 汽車共用 腳踏車共用 新服務範例 ● 鄰戶放置點 都市集中與物流中心 環保區 ● 自動化交通執法 公車管理 擁塞收費 ● 步行範圍 駕駛慣例 公車捷運 共享空間

資料來源：本研究整理

2.2 雙層數學規劃之應用

所謂雙層數學規劃係由上層決策者制定一個方案 x ，然後下層的決策者再藉由眾多的方案 x 集合中，來決定其決策方案 y 。其特性如下(Bials and Karwan, 1984; Wen and Hsu, 1991)：

1. 互相影響的決策者具有顯著的層級結構(Hierarchical structure)。
2. 由上層決策者制定一決策方案，而後下層決策者再決定其決策。下層決策者係獲知上層之決策之後才制定其決策的。
3. 各層次決策單位各自獨立追求其本身之目標函數最佳化，但其所制定之決策方案會影響到其他層決策單位之決策。
4. 各層次決策問題的外部效應(External effect)會重新影響其目標函數與可行解空間。

黃安德(1987)提出，雙層線性規劃很明顯的特徵，就是高階層者在該階層有其確定的目標，且其中有些變數並非其本身所能控制，其控制權掌握在低階層中，但高階層的控制指令能影響低階層的政策，來增加其本身的目標利益。

2.2.1 交通領域之應用方面

雙層數學規劃應用於交通領域的許多方面，例如盧華安(2002)利用雙層數學規劃模型，研究定期航商共同派船聯營航線之規劃。而上層之目標式為 A 航商與 B 航商之收益最大化；下層目標式為 A 航商利潤最大化。所使用的求解方法為以敏感度分析為基礎之演算法(Sensitivity Analysis Based, SAB)。

馮正民(1997)提出大眾運輸補貼制度，將大眾運輸營運路線分為服務路線和一般路線，進行虧損補貼和績效補貼。上層為中央政府追求各地方的補貼效益差異最小，下層的目標則為地方政府追求各地方補貼效益最大，其限制式皆為補貼款的預算。再經由敏感度分析證實：公式補貼款補貼業者比例、地方配合款等的改變，都會影響計畫的選取以及補貼款的分配。

林楨家(2001)提出一個能提綱挈領地處理土地使用與運輸路網整合設計問題的非線性多目標數學規劃模式。都市計劃草圖替選方案分析模式(Sketch layout model, SLM)經過 SLM-I, SLM-II, SLM-III 的演進，已可以同時處理土地、路網與設施之配置，但在路網配置上，未能分析旅運行為，故此模式則是將 SLM-III 列為上層問題，目的在決定土地使用、運輸路網以及公共設施之配置；下層問題為旅次分布與路網指派整合模式。目的在依據上層問題配置內容分析旅次分布與路網指派等旅運行為，所決定之旅行時間再放回上層來分析問題。使用的求解方法為屬遺傳演算法之一的 CGAC(Cumulative genetic algorithm with constraints)啟發式演算法，其具平行尋優能力，適合處理局部最佳化特性問題。

鄭力寬(2003)研究將營運者與旅客的需求分為上下兩層的數學規劃形式，並利用雙層數學規劃方法以及敏感度分析資訊來進行測試，其中上層是為營運者的最適訂價問題，其中票價變動的範圍與發車班次的限制為上層問題的限制式，下層為旅客的選擇問題，並利用敏感度分析資訊將下層問題視為上層問題的限制式來進行求解。

張亦寬(2004)在此論文中要建構出高鐵的票價制訂。需追求營運者的收益最大，也需滿足旅客的旅行成本最小，雙方不同的目標但又互相影響，所以以雙層數學的概念來規劃。旅客需求模式為下層問題，列車服務之容量就為下層問題的限制式。營運者之里程訂價模式為上層問題，以高鐵所提供的不同的列車服務來做差別訂價。

Chen(2004)利用雙層數學規劃的觀念，構建一動態號誌控制系統，上層為系統總旅行時間最小化，下層為變分不等式的用路人均衡模型。在求解過程中，若直接採用目標函數對號誌變數偏微作為尋優方向，則依據連鎖率，路段流入率必須對號誌變數偏微，但由於此函數不具封閉性型式，因此無法直接求出其導函數。此一問題可藉由敏感度分析加以克服。而變分不等式敏感度分析理論，必須滿足均衡解為局部唯一解之假設，但用路人均衡問題無法滿足這個假設，因此在這篇研究裡利用廣義反矩陣，針對Tobin and Friesz所提出演算法進行修正，以連鎖率獲得路段流入率函數對號誌變數偏微資訊。

陳敬文(2006)在此研究係根據Nagurney *et al.*(2005)所提出之逆供應鏈網路均衡，將逆供應鏈網路問題建構為雙層規劃模型。上層為系統最佳化問題，在預算的限制下，以逆供應鏈網路總成本最小為目標；下層為符合Wardrop第二原則的逆供應鏈網路流量均衡問題。

Cao and Chen(2006)文中利用雙層數學規劃構建一個區位選擇的數學模型，包含了區位選擇和生產兩部份，而這兩部分是屬於不同的決策層級，主公司是屬於上層的決策單位，目標式為最小化場站開啟成本和開啟場站中未使用容量的機會成本，而下層為決定的場站本身，目標式為最小化場站營運成本。

池昆霖(2006)文中論述區位途程與易腐性商品排程的問題。將生產排程、車輛途程兩種問題加以整合，為一雙層混合整數規劃模型。上層追求的目標是最小化開啟場站成本與車輛途程成本，而下層目標式為製造廠利潤最大化。此研究亦同時研提一啟發式求解演算法：上層部分先暫時固定場站位置，再求解下層問題，下層部分利用分解(Decomposition)的概念將問題分解成生產排程問題與車輛途程問題；生產排程部份採用Nelder-Mead 演算法來求解，至於配送部份利用修正後的插入法(Insert method)來建構初始解。

李治綱(2002)應用雙層數學規劃來建構鐵路列車服務模式。對高速鐵路營運者而言，服務設計的過程需要了解旅客對於其服務方式之可能反應，希望能選取

對營運績效最好的服務計畫；對旅行者而言，通常只在現行之鐵路運輸服務中做選擇，並不思考其行為對鐵路營運者之影響。所以此研究以雙層數學規劃來反映營運者與旅客的不同觀點。在這個雙層數學規劃中，營運者之列車服務選擇為上層問題，旅客選擇之列車需求模式為列車服務設計模式之下層問題。下層問題中，旅行成本受到上層問題中列車服務變數影響，上層問題中營運績效受到下層問題中服務選擇的影響。而此研究使用以敏感度分析為基礎之求解演算法來求解問題。

Brotcoren *et al.* (2000)將雙層數學規劃應用於貨物的費率設定問題。該問題的上層包含了一群互相競爭的貨物運送人，而下層的對象是單一的貨物託運人。在上層，領導者的利潤來自於總徵收費，然後下層的託運人則是追求運送成本的最小化。

Huang等人(2006)則是利用遺傳演算法以及地理資訊系統來求解多目標的旅行銷售員(Traveling salesman problem, TSP)路徑規畫問題。在過去關於TSP的問題研究，多僅考慮最小化運輸成本、旅行距離或是旅行時間。這篇研究則是應用旅行觀光的路線規劃，而路線則是由四個旅行業者在選定的區域做規劃。而路線設計規劃考慮四項準則，包含了旅行時間、車輛操作成本、安全以及行經路線風景品質等。這樣多目標的觀光路線可作為TSP問題的延伸。上層的問題為確定各準則的權重為何，而下層決定最佳的觀光路線時，是基於上層所給的各權重。這四個準則用GIS的空間分析來量化，以及推估每一段的成本。因為不同的標準在路線選擇過程扮演不同的角色，以及需要從多點中決定出最佳順序，所以則使用了雙層遺傳演算法。

表 2.2 雙層數學規劃應用於交通領域之文獻彙整表

作者	問題論述	模式	求解方法
溫于平，黃安德 (1987)	二階線性規劃 的求解探討	-	運用狹域最佳解的方法找到 最佳解後，運用一切平面切 除部分限制域，再檢視該切 平面的所有端點以判定開狹 域解的廣域性
馮正民，林佳宜 (1997)	大眾運輸補貼 分配制度與模 式	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層目標式： 中央政府追求 各地方補貼效 益最大 ● 下層目標式： 地方政府追求 各地方補貼效 益最大 	-
Brotcoren(2000)	國際貨物運送	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層目標式： 貨運公司運送 貨物收益最大 ● 下層目標式： 託運人運輸成 本最小 	● 啟發式解法
林楨家，馮正民 (2000)	土地使用與運 輸路網整合設 計	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層目標式： <ul style="list-style-type: none"> ➤ 使最差環 境水準極 佳化 ➤ 每單位公 共投資產 生利益極 大化 ➤ 涵蓋在設 施服務範 圍內之服 務對象總 數極大化 ● 下層目標式： 旅次分布與路 網指派整合模 式 	● 遺傳演算法

表 2.2 雙層數學規劃應用於交通領域之文獻彙整表（續）

盧華安，李永苓 (2002)	定期航商共同 派船聯營航線 之規劃	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層目標式： A航商與B航 商之收益最大 化 ● 下層目標式： A航商利潤最 大化 	<ul style="list-style-type: none"> ● 分支界線法
李治綱，謝汶進 (2002)	高速鐵路列車 服務設計	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層目標式： 營運者之列車 服務選擇 ● 下層目標式： 旅客選擇之列 車需求模式 	<ul style="list-style-type: none"> ● 敏感度分析為基礎之演 算法
李治綱，鄭力寬 (2003)	鐵路訂價問題 之研究	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層目標式： 營運者最適訂 價 ● 下層目標式： 旅客選擇問題 	<ul style="list-style-type: none"> ● 以敏感度分析為基礎之 演算法(Sensitivity Analysis Based, SAB) ● Bell's Iterative Balancing
Chen H. K.(2004)	動態號誌控制 系統	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層目標式： 系統總旅行時 間最小 ● 下層目標式： 變分不等式的 用路人均衡模 型 	<ul style="list-style-type: none"> ● 變分不等式敏感度分析 ● 廣義反矩陣
李治綱，張亦寬 (2004)	高鐵票價制定	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層目標式： 營運者收益最 大 ● 下層目標式： 旅客旅行成本 最小 	<ul style="list-style-type: none"> ● 以敏感度分析為基礎之 演算法(Sensitivity Analysis Based, SAB)
陳惠國，池昆霖 (2006)	區位途程與易 腐性商品排程 之研究	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層目標式： 最小化開啟場 站成本與車輛 途程成本 ● 下層目標式： 製造廠利潤最 大化 	<ul style="list-style-type: none"> ● 啟發式解法

表 2.2 雙層數學規劃應用於交通領域之文獻彙整表（續）

Cao and Chen(2006)	區位選擇	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層目標式：最小化場站開啟成本和開啟場站中使用容量的機會成本 ● 下層目標式：最小化場站營運成本 	<ul style="list-style-type: none"> ● 將雙層數學規劃變為單層，再將非線性問題轉化成線性問題求解
陳惠國，陳敬文(2006)	逆供應鏈網路	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層目標式：逆供應鏈網路總成本最小 ● 符合Wardrop第二原則的逆供應鏈網路流量均衡問題 	<ul style="list-style-type: none"> ● 巢式對角化法
Huang <i>et al.</i> (2006)	多目標的旅行銷售員路徑規劃	<ul style="list-style-type: none"> ● 上層：確定各準則的權重 ● 下層決定最佳的觀光路線 	<ul style="list-style-type: none"> ● 遺傳演算法 ● 地理資訊系統

資料來源：本研究整理

2.2.2 求解演算法

Bard(1998)，提出數個雙層數學規劃的求解方法，若求解問題為線性，則可以有Kth-Best法、KKT法、互補法、變數淘汰法等方法可以應用解題；若不為線性題目，則解題方法則可以採用分支界線法、雙層懲罰函數法等方式解題。

Colosn(2005)，提到過許多雙層的求解演算法，歸納如下：

1. 頂點解(Extreme-point)近似解

此方法是用在目標式和限制式皆為線性的情形下，其解集合必須是一個多面體(Polyhedron)，而頂點即為所要求的解，其可行解區域可以表示如下：

$$\Omega = \{(x, y) : x \in X, G(x, y) \leq 0, \text{ and } g(x, y) \leq 0\} \quad (2.2.1)$$

其中 $G(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 為上下層之限制式； x 為上層之變數。

2. 分枝界線法(Branch and bound)

在下層問題為凸型(Convex)且規律(Regular)的形況下，可以用一階近似條件(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)來取代，將問題表示如下：

$$\min_{x \in X, y, \lambda} F(x, y) \leq 0 \quad (2.2.2a)$$

$$\text{s.t} \quad G(x, y) \leq 0 \quad (2.2.2b)$$

$$g(x, y) \leq 0 \quad (2.2.2c)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, m_2 \quad (2.2.2d)$$

$$\lambda_i g_i(x, y) = 0 \quad i = 1, \dots, m_2 \quad (2.2.2e)$$

$$\nabla_y L(x, y, \lambda) = 0 \quad (2.2.2f)$$

$$\text{其中，} L(x, y, \lambda) = f(x, y) + \sum_{i=1}^{m_2} \lambda_i g_i(x, y)$$

此方法先將下層的目標是以拉式函數的方式轉換成上層的限制式再進行求解，其中 $L(x, y, \lambda)$ 為拉式函數， λ_i 為對偶變數。

3. 參數互補轉換法(Parametric Complementary Pivot, PCP)

主要是基於分枝界線法的模型來求解，在每一回合當中針對原來問題求解出一可行的解，使得上層目標式至少等於某一個參數 α ，此參數每回合都會更新一次，因此目標值也是每回合都會更新，直到找不到可行的解為止，但是此方法並不一定收斂在最佳解。

4. 坡降法(Descent methods)

此方法主要在尋找可行解的方向，剛開始先給定一可行解 x ，然後透過 $x + \alpha d (\alpha > 0)$ 公式尋求下一點，而主要的問題在於求解上層目標值的梯度(Gradient)可以利用下面公式求得：

$$\nabla_x F(x, y(x)) = \nabla_x F(x, y) + \nabla_y F(x, y) \nabla_x y(x) \quad (2.2.3)$$

其中 $\nabla_x F(x, y(x))$ 表示上層目標式的梯度

5. 懲罰函數法(Penalty Function Method)

此方法可以用來求解非線性的雙層規劃問題，其方法是將下層問題以懲罰函數取代之

$$\min_y p(x, y, r) = f(x, y) + r\phi(g(x, y)) \quad (2.2.4)$$

其中 r 是一個正數， ϕ 為連續懲罰函數。

6. 信賴區域法(Trust-Region Method)

此為一種反覆求解的方法，利用近似原問題的模型來求解，用限制式將目標式定義在一可行解區域內，假設原本的問題為沒有限制式的最小化問題

$$\min_x f(x) \quad (2.2.5)$$

在第 k 回合中給定起始的 x_k 解，以 x_k 為中心點， Δ_k 為半徑，將此區域定義為一球體(Ball)， m_k 為用來近似原問題的目標式，然後求解子問題

$$\min_s m_k(x_k + s) \quad (2.2.6a)$$

$$\text{s.t. } \|s\| \leq \Delta_k \quad (2.2.6b)$$

之後再計算出原問題與近似問題的比率，利用以下公式

$$\rho_k = \frac{f(x_k) - f(x_k + s_k)}{m_k(x_k) - m_k(x_k + s_k)} \quad (2.2.6c)$$

如果 $\rho_k > \eta_2$ (其中 $0 < \eta_2 < 1$)，則採用此點然後進入下一回合 $x_{k+1} = x_k + s_k$ ，而 ρ_k

的值可能也會過小，因此就必須修正子問題的半徑 Δ_k ，修正的原則如下：

$$\Delta_{k+1} \in \begin{cases} [\Delta_k, \infty] & \text{if } \rho_k \geq \eta_2 \\ [\gamma_2 \Delta_k, \Delta_k] & \text{if } \rho_k \geq \eta_1 \\ [\gamma_1 \Delta_k, \gamma_2 \Delta_k] & \text{if } \rho_k < \eta_1 \end{cases} \quad (2.2.6d)$$

其中， $0 < \gamma_1 < \gamma_2 < 1$ 為已知參數。

資料整理：陳惠國，池昆霖(2006)

Hejazia *et al.* (2002)在文中說明線性雙層規劃之決策者是分開的，包含了上下層有各自的目標，其上層為領導者，下層為跟隨者。而雙層規劃之問題，已被證實為NP-hard的問題。有許多雙層規劃的解題方法已被提出來，但在此研究裡，用遺傳演算法來發展出一個有效率解決雙層規劃的方法。其過程是將第二階層(Second level)用一階進似條件(Kuhu-Tucker)而成為第一階層的限制式，而雙層規劃則轉化成為單層的問題。在本研中也探討巨集演算法之一的禁忌搜尋法(Hybrid tabu-ascent algorithm, HTA)，此演算法的基本觀念是利用懲罰函數的概念去找出初始解，並且改進現有的解。

Oduguwa and Roy (2002)認為雙層數學規劃是一個用來解決現實生活中，有等級制度之政策問題的一項技術。在已過許多的研究裡，已有許多求解的方法被提出來，但有的方法並不能全然的解決雙層數學規劃的問題。在這篇文獻裡，他們提出了雙層遺傳演算法(Bi-level genetic algorithm, BiGA)。而研究結果證明，雙層遺傳演算法用於解決傳統的雙層數學規劃問題，以及解決現實生活中相關問題，是個相當優良的方法。

表 2.3 雙層數學規劃之求解方法相關文獻彙整

作者	問題論述	模式	求解方法
Jonathan F. Bard (1998)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 線性問題 Kth-Best法 KKT法 互補法 變數淘汰法 ● 一般問題 分支界線法 雙層懲罰函數法
B aoding Liu(1998)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 遺傳演算法
Hejazia <i>et al.</i> (2002)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 遺傳演算法 ● HTA
Oduguwa and Roy (2002)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 雙層遺傳演算法
Coloson(2005)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 頂點解 ● 分支界線法 ● 參數互補轉換法 ● 坡降法 ● 信賴區間法

資料來源：本研究整理

2.3 文獻整理評析

綜合以上文獻整理，可得以下結論：

1. 永續運輸的確為目前該執行的政策方向。在先前相關的研究裡，非常著重於：
 - (1) 能源的消耗問題。主因源於地球的資源是有限的，若不調整目前運具消耗能源的情況，而以目前的能源消耗速度計算，我們將於西元 2032 年消耗完這個地球的能源。而減少能源的消耗的解決辦法，則可考慮替代燃料、鼓勵搭乘大眾運輸、抑制私人運具發展等方式；
 - (2) 空氣污染問題。在永續運輸的議題裡，環境保護的考量也一直是所重視的問題。廢棄物的排放限制、尋找低污染的替代燃料等，而目前的現況最可直接改善的，即為鼓勵民眾多搭乘大眾運輸工具；
 - (3) 安全問題。交通運輸工具最著重的就是安全考量，曝光量的增高，相對的也增加肇事的機會。選擇大眾運輸工具，也是一有效降低肇事機會的方式；
 - (4) 經濟發展。在顧及永續運輸的同時，不能僅一昧的降低所有旅次發生的可能，這樣會導致經濟的發展衰退。所以為達到永續運輸，並兼顧乘客願意使用運具，所需要顧及的即為選擇運具的旅行時間。
 - (5) 關於永續運輸需有許多考量的指標，牽涉的範圍甚廣。本研究所選用的指標，屬現行已具有運輸系統之情形下，政府為追求永續運輸該考量的代表性指標。
 - (6) 若政府從規劃的角度考量，則可考慮興建運輸系統，以導向永續運輸的方向。雖建設一運輸系統之經費龐大，但永續的發展實為需要追求的目標，以長期考量，若政府能適當的興建運輸系統，則能有效的將民眾選用運具之習慣改變。
2. 雙層數學規劃應用於交通領域方面，研究已非常的廣泛。
 - (1) 多層或是雙層數學規劃適用於當決策者位於不同階層時候，由上層決策者制定一個方案 x ，然後下層的決策者再藉由眾多的方案 x 集合中，來決定其決策方案 y 。決策者之間具有顯著的層級結構。本研究所構建的模式，即為求解政府(上層)管制運具的票價，而運輸業者(下層)則在政府所決策出的票價中，決定出該運具的發車班次；而旅客將會由政府以及運輸業者所提供的票價以及發車班次，選擇欲使用的運具。
 - (2) 目前已有許多的方法被證實，可以用來求解雙層亦或是多層的數學規劃。本研究於相關文獻發現，啟發式解法對於求解雙層或是多層的數學規劃，是一相當優良的方法，並有許多的研究採用遺傳演算法來進行求解。

第三章 模式構建

本章節說明模式的構建。先描述模式的特性以及求解方法，並詳細說明本研究所構建的兩個雙層數學規劃模式：包含模式假設，模式符號說明，營運型模式以及規劃型模式之數學定式。

3.1 模式描述

雙層數學規劃主要的精神在於決策者位於不同的階層。在目前現代的社會當中，有許多應用的例子，例如：貨物的運送、不同運輸業的票價制定、號誌的控制、資源配置、土地使用配置等等。在這些問題中，常需要考慮不同層級的決策者。例如：大眾運輸的補貼政策，分成中央政府以及地方政府不同的考慮階層。政府必須追求各地方的補貼差異最小，以達公平性，而地方政府在獲得的補貼金額內，需考量如何讓補貼的效益最大。鑑於以上所列舉的各方面，證明雙層數學規劃常被使用於現實生活中。

3.1.1 模式特性

雙層數學規劃，顧名思義即為有雙層的數學關係式。上、下層皆有各自所追求的目標式。雙層的目標式皆可追求最大化或是最小化，意即上下層可同時為最大化以及最大化問題、最大化以及最小化問題、最小化以及最大化問題和最小化以及最小化問題。以下以雙層數學規劃之一般定式介紹：

$$\max_{x \in X} F(x, y) \quad (3.1.1)$$

$$s.t. \quad G(x, y) \leq 0 \quad (3.1.2)$$

$$\min_{y \in Y} f(x, y) \quad (3.1.3)$$

$$s.t. \quad g(x, y) \leq 0 \quad (3.1.4)$$

由以上之雙層數學規劃定式可以得知，有兩個不同的目標式(3.1.1) 和(3.1.3)，分別代表了不同的決策者或是決策層級；而(3.1.2)和(3.1.4)則是代表了限制式。上層決策(3.1.1)代表這雙層數學規劃的領導者(Leader)，下層決策(3.1.3)代表跟隨者(Follower)。而下層目標式亦為上層的限制式。兩者在追求各自最佳化的時候，均須考慮到對方的決策。上層的決策變數為 x ，其控制上層目標式追求最大化；下層的決策在上層的可行解範圍內，使 y 控制其目標式最小化。而上層的決策變數 x 亦可為下層的某一參數；下層的決策變數 y 也可為上層的某一參數。

3.1.2 模式求解

雙層數學規劃的求解演算法有許多種，也比單層數學規劃複雜。Colosn(2005)曾提出許多演算法，例如分枝界線法(Branch and bound)，則是將下層的目標是以拉式函數的方式轉換成上層的限制式再進行求解；信賴區域法(Trust-Region method)，為一種反覆求解的方法，用限制式將目標式定義在一可行解區域內，假設原本的問題為沒有限制式的最小化問題。

在過去相關的文獻當中也有學者提出用巨集演算法來求解，例如 Liu(1998)曾提出，用遺傳演算法(Genetic algorithms, GAs)求解雙層（即單一下層）或多層以上（即多個下層）之數學規劃。

3.2 永續運輸之雙層數學規劃模型

本研究構建兩個模式，一為以追求永續運輸之雙層規劃型模式，另一為以追求永續運輸之雙層營運型模式。規劃型模式為評估年期為一長時間，評估在該地區何時該興建運輸系統，以及最適的票價與發車班次，以追求永續運輸的發展；營運型模式為假設該地區已存在基本的運輸系統，以現有的運輸系統求解得營運時最適的票價以及發車班次。圖 3.1 為雙層營運型模式概念圖；圖 3.2 雙規劃型模式概念圖。

3.2.1 營運型模式概念圖

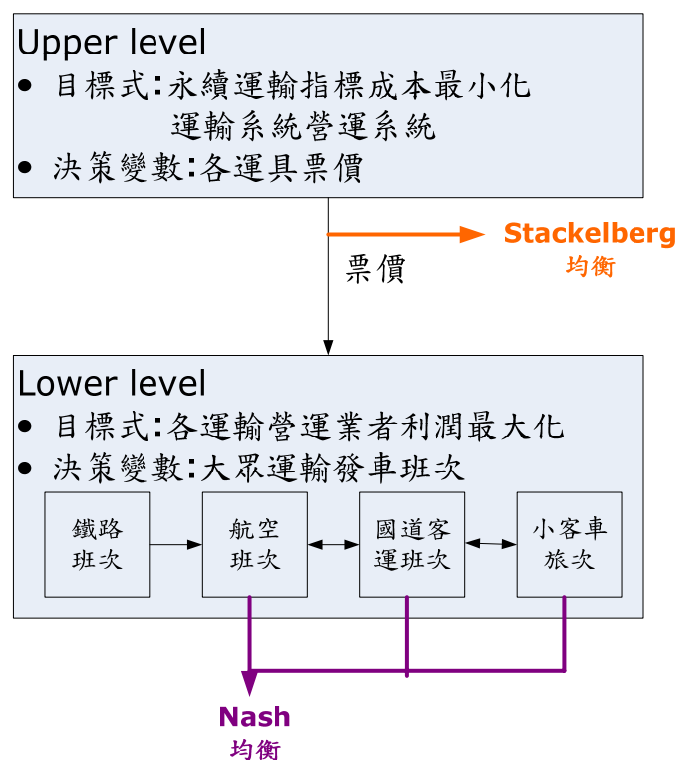


圖 3.1 雙層營運型模式概念圖

圖 3.1 模式概念圖說明雙層營運型模式求解方式、各階層之間關係以及在下層運具間關係。

上層的目標式為永續運輸指標成本最小化，決策變數為各運具的票價，上層利用遺傳演算法求解出各運具的票價。

再將上層輸出的票價輸入下層，下層的目標式為各運輸營運業者的利潤最大化，決策變數為各大眾運輸的發車班次，在模式中假設鐵路的發車班次為政府管制，所以為外生變數，而航空班次與公路客運班次則是利用反覆求解的方式，取得兩大眾運輸的最適班次，而他們彼此之間存在著 Nash 均衡(Nash equilibrium)的關係。所謂的 Nash 均衡是指：在一般現實生活的決策行為中，經常發生兩難的狀況，意即並非所有的情形都能達到優勢策略均衡(Dominant strategy equilibrium)，此時 Nash 均衡是次一級的替選方案，即雙方都以對手的現行策略，做出最佳的因應策略，進而每一位參賽者皆無獨立偏離現行均衡狀況的意願。

再將上層以及下層所輸出的票價與班次，以及外生變數旅行時間輸入旅客運具選擇效用，以羅吉特模式(Logit Model)計算出選擇客運具的使用量，並將所求出之各運具使用量輸入回上層以及下層，以計算出上層以及下層之績效值。

此雙層模式存在著 Stackelberg 均衡(Stackelberg equilibrium)的關係。所謂的 Stackelberg 均衡為：Stackelberg 領袖模型認為兩方當中，一為領袖(Leader)，而另一方為跟隨者(Followers)，領袖一方會根據跟隨者的反應函數決定其最適行為。意即為領袖一方充分瞭解跟隨者的反應函數，因此領袖一方會利用此一優勢，在跟隨者的反應函數上選擇最適的行為。

3.2.2 規劃型模式概念圖

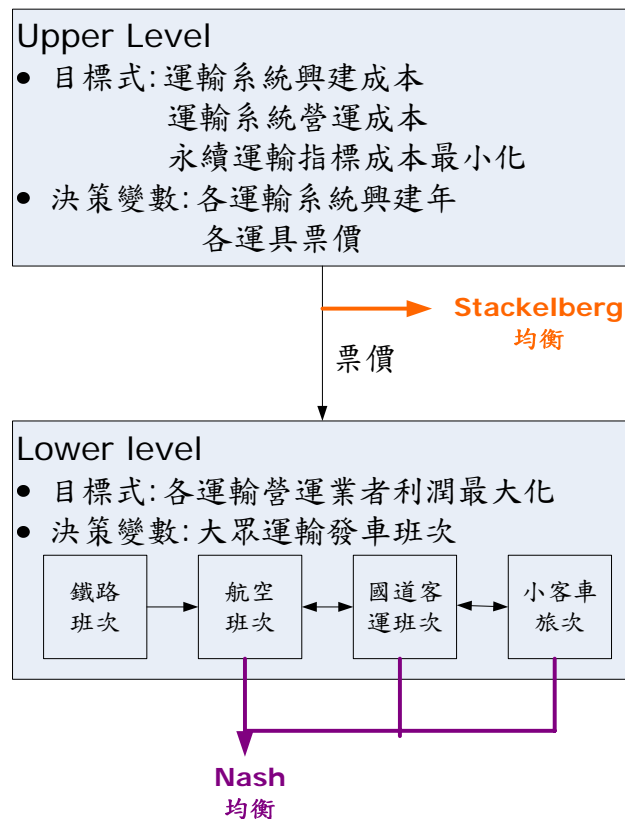


圖 3.2 雙層規劃型模式概念圖

圖 3.2 模式概念圖說明雙層規劃型模式求解方式、各階層之間關係以及在下層運具間關係。

上層的目標式為運輸系統興建成本最小、營運成本最小，並永續運輸指標成本最小化，決策變數為各系統興建年期與各運具的票價，上層利用遺傳演算法求解出各系統興建年期與各運具的票價。

其餘各階層中之關係與求解方式，皆與營運型模式相同，故不多進行解釋。

3.2.3 模式假設

本研究之模式假設說明如下：

1. 本研究假設為一運輸走廊，僅兩個起迄點，即為單一起點、單一迄點。並假設的旅次為該運輸走廊之單方向旅次。
2. 本研究營運型模式假設現有的運輸系統有：鐵路、航空以及公路。規劃型模式假設現有運輸系統在評估起始年僅有一條公路，並評估年期假設為 30 年，計畫於評估年間建設運輸系統，可建設之運輸系統包含：鐵路、航空以及公路。

3. 上層之票價，為一政府管制之市場。即票價的改變並非由運輸業者決定而可以隨之改變。
4. 本研究的假設時段為一日 24 小時，分為兩部分計算：晚上十點至凌晨三點無車流，凌晨四點至晚上九點為均一車流，即為僅 18 個小時有車流。
5. 本研究之下階層討論對象為各運輸營運業者，並假設各運輸業為獨佔市場，各運輸業皆僅一家業者，各自追求其利潤最大化。討論的運具包括鐵路、航空以及公路客運。

營運型模式係假設一固定長度之運輸走廊，並旅次需求已知。政府可決定在追求運輸系統永續運輸指標成本貨幣化最小化等之原則下，規劃運輸系統之最適票價，包括航空、鐵路及公路等三大類。其中，航空及軌道運輸為開放給運輸業者，以利潤最大化為原則進行營運。而公路除開放公路客運業者以利潤最大化為原則進行營運外，當然也同時提供私人運具使用。旅客則依據其運輸選擇效用函數，選擇效用最大之運具，完成其旅次行為。

規劃型模式與營運型模式類似。其不同之處在政府可決定追求運輸系統興建成本最小化、運輸系統營運成本最小化，以及永續運輸指標成本貨幣化最小化等。

3.2.4 符號說明

● 營運型模式

i ：第 i 種運輸系統。 $i=1$ 表鐵路運輸系統、 $i=2$ 表航空運輸系統、 $i=3$ 表公路客運運輸系統、 $i=4$ 則代表私人運輸系統。

x ：第 i 種大眾運輸系統票價（元/旅次）， $i=1,2,3$ 。

y_i ：第 i 種大眾運輸系統的營運班次（班/日）， $i=1,2,3$ 。

op_i ：第 i 種運輸系統之營運成本（元）。

L ：運輸走廊長度（公里）。

D ：每日旅次需求總數（旅次/日）。

f_p ：小客車之平均乘載人數（人/輛）。

b_{1i} ：第 i 種運輸系統每延車公里所排放之污染量（元/延車公里）。

b_{2i} ：第 i 種運輸系統每延車公里之肇事率（元/延車公里）。

b_{3i} ：第 i 種運輸系統每延車公里之能源消耗量（元/延車公里）。

w_{it} ：每單位旅行時間貨幣化價值（元/日）。

r ：折現率。

t_i ：第*i*種大眾運輸系統行駛本運輸走廊一趟所需時間（日）。

CA_i ：第*i*種運輸系統之每班次容量（人/班次）。

F_i ：第*i*種運輸系統之每日班次之路線容量（班次/日）。

t_0 ：為自由車流下小客車行駛本運輸走廊所需時間（日）。

α, β ：參數值

C ：為公路運輸系統之容量。

V_h ：第*h*小時之小客車交通流量，係依據一假設之一日旅次產生型態（Daily trips patterns），將第*j*年每日小客車旅次需求量（ $D \times Pr_p$ ）加以分攤估算。

c_i ：第*i*種大眾運輸系統之每班次營運成本（元/班）。

a_i ：方案特定係數。 a_1 、 a_2 、 a_3 ：皆為負數。

β_{ij} ：第*i*種運輸系統之平均候車時間， $i=1, 2, 3, 4$ 。又 $\beta_i = \frac{1}{2y_i}$ ， $\beta_4=0$ 。

op_i ：第*i*種運輸系統之營運成本（元/年）。

U_i ：第*i*種運輸系統之使用者效用。

● 規劃型模式

以下符號為規劃型模式增加之符號說明：

j ：第*j*個規劃年期。 J 為評估期間之終止年（年）。

e_i ：第*i*種運輸系統之總建設成本（元）。

k_i ：第*i*種運輸系統之興建起始年（年）。

m_i ：第*i*種運輸系統之興建所需年期（年）。

3.2.5 營運型模式數學定式

營運型模式之上層目標函數為永續運輸指標成本最小化。而永續指標又包括空氣污染，肇事，燃料以及旅行時間等四項成本之總和，其決策變數為各類運輸系統之票價。至於下層則以運輸業者營運利潤最大為目標，其決策變數為各該運輸系統各年之營運班次。其數學模型如下：

[Upper level]

$$\underset{x_i}{Min} \quad SC \quad (3.2.1)$$

[Lower level]

$$\underset{y_i}{Max} \quad x_i \times D \times Pr_i - y_i \times c_i \quad (3.2.2)$$

$$\text{又} \quad Pr_i = \frac{e^{a_1 t_i + \frac{a_2}{2y_i} + a_3 x_i}}{\sum_{i=1}^4 e^{a_1 t_i + \frac{a_2}{2y_i} + a_3 x_i}} \quad (3.2.3)$$

s.t.

$$CA_i \times y_i \geq D \times Pr_i, \text{ for all } i \quad (3.2.4)$$

$$y_i \leq F_i, \text{ for all } i \quad (3.2.5)$$

$$x_i \geq 0 \quad (3.2.6)$$

$$y_i \geq 0 \quad (3.2.7)$$

其中 SC 代表永續運輸指標之相關成本總和，計算函數如下：

$$SC = AP + AC + EC + TC \quad (3.2.8)$$

SC 代表永續運輸指標之相關成本總和，包括空氣污染成本 (AP)、能源消耗成本 (EC)，肇事成本 (AC)，以及旅行時間成本，前三項成本之計算函數分述如下：

$$AP = \sum_{i=1}^3 (b_{1i} \times y_i \times L) + b_{14} \frac{(D \times Pr_p)}{f_p} \times L \quad (3.2.9)$$

$$AC = \sum_{i=1}^3 (b_{2i} \times y_i \times L) + b_{24} \frac{(D \times Pr_p)}{f_p} \times L \quad (3.2.10)$$

$$EC = \sum_{i=1}^3 (b_{3i} \times y_i \times L) + b_{34} \frac{(D \times Pr_p)}{f_p} \times L \quad (3.2.11)$$

由上述三式知，本文係假設空污、油耗及肇事均與延車公里（曝光量）成線性正比關係。其中，大眾運輸總延車公里長度為： $\sum_{i=1}^I (L \times y_i)$ ，私人運具總延車公里則

為： $\frac{D \times Pr_p}{f_p} \times l$ 。因此，前三項永續運輸目標函數可整合成為：

$$SC_I = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 b_{ki} \times (L \times y_i) + \sum_{k=1}^3 b_{kp} \times \frac{(D \times Pr_p)}{f_p} \times L \quad (3.2.12)$$

而 TC 代表旅行時間成本，其計算公式如下：

$$TC = \left[\sum_{i=1}^2 (D \times Pr_i) \times \left(\frac{1}{2y_i} + t_i \right) \times w_{it} \right] + \left\{ \left[\frac{1}{2y_3} + t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{D \times Pr_3}{C} \right)^\beta \right) \right] \times w_{3t} \right\} \quad (3.2.13)$$

$$+ \sum_{h=1}^{24} \left[t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{V_h}{C} \right)^\beta \right) \times V_h \times f_p \times w_{4t} \right]$$

其中，公路客運以及小客車旅行時間之計算則依據美國公路局(U.S Bureau of Public Roads; BPR)所建立的公式，加以估算。其中公路部分的運具：公路客運以及自用小客車的旅行時間，會隨著公路的壅塞情形而有變化。

1. 上階層目標式說明

上階層目標式(3.2.1)為永續運輸指標成本貨幣化。

式(3.2.1)為永續運輸指標成本最小化，決策變數 x_j 為大眾運輸系統的票價；其中第一部分為永續運輸的指標相關成本，第二部份是旅行時間成本，第一部分的函數因形式類似，所以可整合為永續運輸成本函數(3.2.12)，並加上旅行時間成本函數(3.2.13)。

永續運輸成本函數的計算又分為兩大部份：第一部分是污染成本、肇事成本以及能源消耗成本的計算；第二部份是旅行時間的計算。

而第一部份之計算有分為兩小部分：第一小部份是大眾運輸的計算，第二小部份是自用小客車的計算。第一小部分的計算，以污染指標為例， b_{li} 為單位污染成本，當 $i=1$ 的時候，即代表為鐵路的單位污染成本(元/延車公里)，再以一日的發車班次乘上運輸走廊的長度，而求得總延車公里數，再與單位污染成本計算，可得總污染成本。第二小部份的計算過程為，自用小客車則以當日總旅次需求，乘上選擇該運具的比例，並除以小客車承載量，可以求得選擇小客車的總旅次，再乘上運輸走廊長度與 b_{14} ，即為小客車的單位污染成本，就可算出小客車的總污染成本。因肇事成本以及能源消耗成本之計算過程與污染成本類似，故不多加說明。

上層旅行時間的計算方式也分為兩個部份，第一部分為鐵路以及航空運輸的旅行時間，第二部份為公路客運以及使用自用小客車的旅行時間。

第一部分鐵路以及航空的旅行時間計算方式為：總旅次乘上選擇該運具機率，求出選擇該運具的旅次，並因為若是選擇大眾運輸，旅行時間包含了等候時間以及車上旅行時間，故兩者需相加以求得總旅行時間，把選擇該運具的旅次乘上計算出的總旅行時間，即可得知選擇該運具之所花費的總旅行時間，再將總旅行時間乘上單位時間價值，可求得旅行時間的貨幣化成本；而公路客運以及小客車旅行時間的計算方式為，以美國公路局(U.S Bureau of Public Roads; BPR)所建立的公式，稱為BPR公式來計算，因選擇自用小客車只需求得車上旅行時間，等待時間為零，故小客車的旅行時間則用 $t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{V}{C} \right)^\beta \right)$ 表示之，並小客車的旅行時間乘上選擇小客車的總人數，可以求得使用小客車之所有旅客的總旅行時間，再將總旅行時間乘上單位時間價值，可求得旅行時間的貨幣化成本。公路部分的公路

客運與自用小客車的計算方式如下說明：因公路客運與自用小客車行駛於公路時，旅行時間會隨著道路所提供的服務水準有所改變。BPR公式中，當 V/C 的值為零，即為道路所提供的服務水準為A級時，旅行時間則為 t_0 ，為自由流下的旅行時間；當 V/C 值大於零時，其旅行時間就會開始增加，其增加的計算方式為 $\alpha(\frac{V}{C})^\beta$ 。

2. 下層目標式說明

下層目標式(3.2.2)為各運具營運業者利潤最大化，決策變數 y_j 為大眾運輸系統的營運班次。運輸業者之利潤計算方式分為兩個部份為：第一個部份為計算營運收入：以每個人旅次之票價，乘上每日選擇該運具的人旅次，可得知營運收入的部份；第二部份為計算營運成本：營運該運具一班次所需的成本乘上每日所營運的班次，求得成本部分。兩個部份相減即可得運輸業者之利潤。

3. 旅客效用說明

旅客的運具選擇機率(3.2.3)是使用羅吉特模式，並以 Pr_i 表示，因 Pr_i 為機率值，故值域會介於0-1之間。其中考慮會影響旅客選擇的因素包含：

(1) 該運具的旅行時間，以 t_i 表示之；

(2) 該運具的等候時間，與發車班次成反比關係，以 $\frac{1}{2y_i}$ 表示之，其中，因小客車沒有等候時間，所以該項值為零；

(3) 該運具的票價，以 x_i 表示之。

4. 限制式說明

上層與下層之共通限制式有四個：

(1) 為運輸系統供給必須大於運輸需求(3.2.4)，意即為該運具單一班次所能提供的座位數，乘上單日發車班次，此為求得該運輸系統單日的供給量，而需求求得的方式為，當日的總旅次，乘上依羅吉特模式而選擇該運具之乘客的結果。意即為若依羅吉特模式算出的選擇該運具的旅次，大於單日的供給量，在模式運的運算上將以供給量作為選擇該運具的旅次數，而溢出部分則增加至選擇小客車的旅次數中，以保持模式計算中假設的每日旅次需求總數。

(2) 發車班次必須小於班次之路線容量(3.2.5)，即為以政府所制定之該運具一日的路線容量，為發車班次的上限值；

(3) 決策變數票價的非負限制式(3.2.6)；

(4) 決策變數與發車班次為非負整數限制式(3.2.7)。

3.2.6 規劃型模式數學定式

而規劃型模式與營運型模式類似。不同之處在於上層目標函數係包括：運輸

系統興建成本、運輸系統營運成本，以及永續運輸指標成本，皆以追求最小化為目標。其數學模型如下：

[Upper level]

$$\underset{k_i, x_i}{Min} \quad BC + OC + SC \quad (3.2.14)$$

[Lower level]

$$\underset{y_i}{Max} \quad x_i \times D \times Pr_i - y_i \times c_i \quad (3.2.15)$$

$$\text{又 } Pr_i = \frac{e^{a_1 t_i + \frac{a_2}{2y_i} + a_3 x_i}}{\sum_{i=1}^4 e^{a_1 t_i + \frac{a_2}{2y_i} + a_3 x_i}} \quad (3.2.16)$$

s.t.

$$CA_i \times y_i \geq D \times Pr_i, \text{ for all } i \quad (3.2.17)$$

$$y_i \leq F_i, \text{ for all } i \quad (3.2.18)$$

$$x_i \geq 0 \quad (3.2.19)$$

$$y_i \geq 0 \quad (3.2.20)$$

其中， BC 代表大眾運輸興建成本，計算函數如下：

$$BC = \sum_{i=1}^I \sum_{j=k_i}^{k_i+m_i} \left(\frac{e_i}{m_i (1+r)^{j-1}} \right) \quad (3.2.21)$$

並 OC 代表大眾運輸營運成本，計算函數如下：

$$OC = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\frac{op_i * 365}{(1+r)^{j-1}} \right) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=k_i+m_i}^J \left(\frac{op_i * 365}{(1+r)^{j-1}} \right) \quad (3.2.22)$$

而 SC 代表永續運輸指標之相關成本總和，計算函數如下：

$$SC = \sum_{j=1}^J \frac{365}{(1+r)^{j-1}} (AP + AC + EC + TC) \quad (3.2.23)$$

而永續指標的計算方式，如 3.2.4 節所描述的，故在此不在詳細說明，唯不同之處在規劃模型之永續指標績效(3.2.23)，是以「年」為計算單位，在營運模型裡則是以「天」為計算單位。

以下為規劃模型之各式說明，因規劃模型與營運模型類似，故以下僅對與營運模型不同之處進行說明。

1. 上層目標式說明

上層目標式(3.2.14)分為三項：運輸系統興建成本，運輸系統營運成本，以及永續運輸指標成本貨幣化。

(1) 運輸系統興建成本

式(3.2.21)表示運輸系統興建成本，而興建之起始年為求解之決策變數，其計算方式為：將運輸系統之總建設成本分攤至該運輸系統的興建所需年期，再經過折現之計算，則可計算出該運輸系統的興建成本。最後再將所有考慮之運輸系統的興建成本加總，即可計算出總運輸興建成本。

(2) 運輸系統營運成本

式(3.2.22)表示運輸系統之營運成本。營運成本分為兩個部份計算：第一部分為，若原已有運輸系統，則該部分之營運成本則從評估年間之第一年計算至評估終止年為止。若原沒有運輸系統，則該系統成本為零，並經過折現之計算，得該部份之營運成本；第二部份為新建之運輸系統，若求解出有新建之運輸系統，其營運成本從新建之運輸系統的興建完成後開始計算至評估終止年。而總營運成本之計算方式為將考慮之運輸系統所得之營運成本加總，可得總營運成本。規劃型模式之其餘各階層中的模式定義，皆與營運型模式相同，故不多進行解釋。

第四章 求解演算法

本章節介紹求解本研究所構建之模式的求解演算法，即遺傳演算法。介紹此演算法的重要名詞，運作方式，重要特性，操作的方法以及於本模式的求解方法。

4.1 雙層數學規劃求解法

在本研究第二章雙層數學規劃求解演算法的文獻回顧中，提及過去有許多學者提出不同求解雙層數學規劃的演算法。而近幾年的研究，也證實了遺傳演算法在求解雙層數學規劃是一有效率的方法。

Liu(1998)曾提出，用遺傳演算法(Genetic algorithms, GAs)求解雙層（即單一下層）或雙層以上（即多個下層）之數學規劃；Hejazia等人(2002)係利用遺傳演算法來求解線性雙層數學規劃問題，並與HTA (Hybrid tabu-ascent algorithm)相互比較；Huang等人(2006)則是利用遺傳演算法以及地理資訊系統來求解多目標的旅行銷售員 (Traveling salesman problem, TSP)路徑規劃問題；Oduguwa and Roy(2001)則是利用雙層遺傳演算法來求解雙層數學規劃的最佳化問題；林楨家與馮正民(2000)則是利用遺傳演算法之一的CGAC，求解SLM-III與旅次分布和路網指派整合的雙層數學規劃模式。故本研究沿用過去研究所提出的遺傳演算法，求解永續運輸雙層數學規劃之問題。

4.2 遺傳演算法

遺傳演算法(Genetic Algorithms, GAs)最早是由 Holland 於 1975 年提出，係基於「物競天擇」及「遺傳法則」構建而成的尋優理論。所謂「尋優理論」是指 GAs 會在尋優的過程中去蕪存菁，剔除較差的成員，保留較優良的成員。而「物競天擇」的操作方法則是摹仿遺傳學選擇、交配及突變等三大原則，故稱之為遺傳演算法。

4.2.1 重要名詞解釋

GAs 有幾個重要名詞解釋如下：

1. 基因(Gene)

代表問題的決策變數，其值稱為基因值(Allele)。一般係以一個基因代表一個決策變數，基因值即代表決策變數。也可視問題需要，以連續數個基因代表一個變數。

2. 染色體(Chromosome)

染色體由基因所組成，代表問題的一組可行解。染色體的基因數量(即為染色體長度，Length of chromosome)視問題決策變數的多寡及多少個基因代表一個決策變數而定。一般而言，所有染色體的長度均相同。

3. 族群(Population)

族群由一群染色體所組成。族群內的染色體數量稱為族群規模(Population size)，此數量為主觀設定值，通常以 50 個或 100 個作為設定數值。如果族群規模大，一次蒐尋的可行解個數較多，達到收斂所需的世代數較少，但每次搜尋的可行解較少，所需時間較短，但達到收斂所需的世代數較多。

4. 適合度(Fitness)

適合度用來判斷染色體適應環境的程度，亦即該染色體所代表可行解的目標函數，通常以 $f(m_i)$ 表示， m_i 為第 i 個染色體。適合度值(Fitness value)係用來代表該染色體在演化過程中，被選中進行交配的機率高低。因此，適合度越高的染色體越有機會在世代演化中被選中產生子代，以保留其優良基因特質。因此，如果是最大化的問題，則適合度值可直接以目標函數值表示，但如果是最小化問題，則適合度可以目標函數值的倒數代表，或以合理大數減去目標函數值代表之。

5. 母代(Parents)與子代(Offsprings)

GAs 的演化過程係重複由現有族群中挑選特定數量的成對染色體進行遺傳法則的運作，產生新的染色體，再由新染色體形成的族群，產生下一個族群。因此，由現有族群中挑選出來，用以產生新染色體的，稱為母代，所產生的新染色體則稱為子代。

6. 遺傳法則(Genetic principle)

GAs 與一般啟發式解法不同，尋優過程不需要原始問題的輔助資訊，而完全仰賴遺傳法則進行「物競天擇」及「優勝劣敗」的演化尋優。而遺傳法則主要有選擇(Selection)、交配(Crossover)及突變(Mutation)等三大法則。其中，選擇法則主要係從現有族群隨機挑選母代以產生子代；交配法則主要是令成對母代的基因組合部分互換，以產生子帶；突變法則主要是令子代的一基因進行突變，以避免現有族群所形成的基因池(Gene pool)過於僵化。

7. 編碼(Encoding)、解碼(Decoding)

GAs 係利用基因代表原始問題的決策變數，因此將決策變數轉換為 GAs 的基因，稱為編碼，將基因轉換；反之，將基因換回決策變數值則稱為解碼。由此可知，編碼與解碼是 GAs 與原始問題的溝通橋樑。

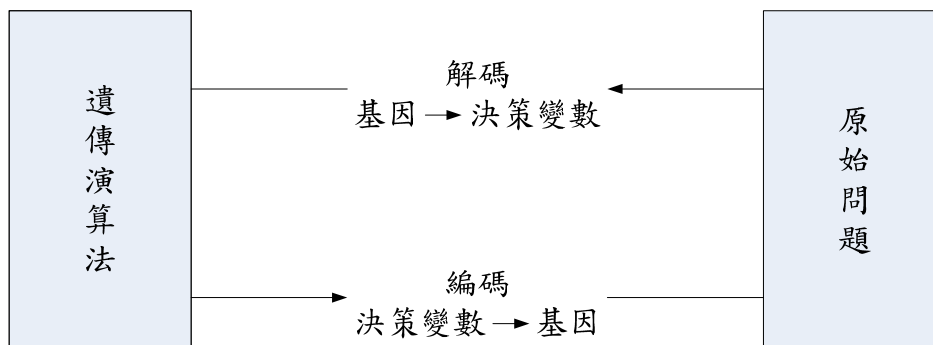


圖 4.1 原始問題與 GAs 的關係

原始問題決策變數的基因編碼方式一旦決定，每一基因值的型態及染色體長度便已確定，可進行遺傳演算法則的運算。但計算每一染色體適合度值時，仍必須將染色體的基因再解碼回決策變數，帶入目標函數，方可獲得目標函數值。

常見的標碼方式有三種：

(1) 二元編碼(Binary coding)

二元編碼的基因值為 0 或 1，適合區位選擇 0-1 整數規劃問題，此中編碼方式的蒐尋空間為 2^L (L 為染色體長度)。

表 4.1 二元編碼的染色體型式

染色體	基因值	搜尋空間
A	01010111101010111000101010100101110	2^L
B	11110100010101000101110101010010100	2^L

(2) 排列編碼(Permutation coding)

排列編碼的基因值代表排列順序，適合 TSP、VRP 等順序問題，其搜尋空間為 $L!$ 。例如某貨物運送公司今日送貨預計配送五個地點，所追求的是最低成本的路線安排，則基因值所代表的就是運送貨物的順序。如表 4.2 染色體 A 所表示，代表當日的貨物運送順序為：3→1→4→5→2，而因此問題特性為貨物運送點不重複，所以搜尋空間為 $5!$ 。

表 4.2 排列編碼的染色體型式

染色體	基因值	搜尋空間
A	3 1 4 5 2	5!
B	8 3 5 1 6 7 2 4 9	9!

(3) 實數編碼(Value coding)

實數編碼的基因值可能是實數(Real number)、整數(Integer)、自然數(Natural number)或指示動作代號,這樣的編碼適用於一般的數學規劃問題以及整數規劃問題。搜尋空間視各類而定。也可以連續數個基因代表一決策變數,例如決策變數值域介於 0 至 999 之間,則可以連續三個基因值代表一決策變數。以表 4.3 染色體A為例,決策變數為 $x_1=732$ 、 $x_2=147$ 、 $x_3=394$ 以及 $x_4=501$;染色體B是以基因值代表實數變數;染色體C是以基因值代表文字變數;染色體D是以基因值代表指令動作。

表 4.3 實數編碼的染色體型式

染色體	基因值
A	7 4 3 2 1 4 7 3 9 4 5 0 1
B	32.11 680.2 4.21 65.123 26.8 209.21
C	K L M D F M A S F O V D C
D	向前 向後 向左 向右

4.2.2 三法則運作方式

選擇、交配與突變為 GAs 之三大法則,為求解結果之精確程度與效率高低之決定因素。以下就 Goldgerg (1989)所提出之簡單 GAs(simple GAs; SGAs)為例,簡單說明此三法則之運作方式:

1. 選擇 (Selection)

選擇是依據每一個染色體(Chromosome)之適合度(Fitness)高低,決定其繁衍

子代多寡的一種運算過程，適應度高的物種在下一子代中將被大量複製；適應度低的物種在下一子代中則被淘汰，其中適應程度的量測是運用適應函數(Fitness function)來決定，其中處理方式多以蒙地卡羅轉盤(Monte Carlo wheel)之概念加以篩選，即每一染色體被選中進行繁衍後代之機率為該染色體之適合度值佔每一染色體之適合度值總合之比例，如圖4.2所示：

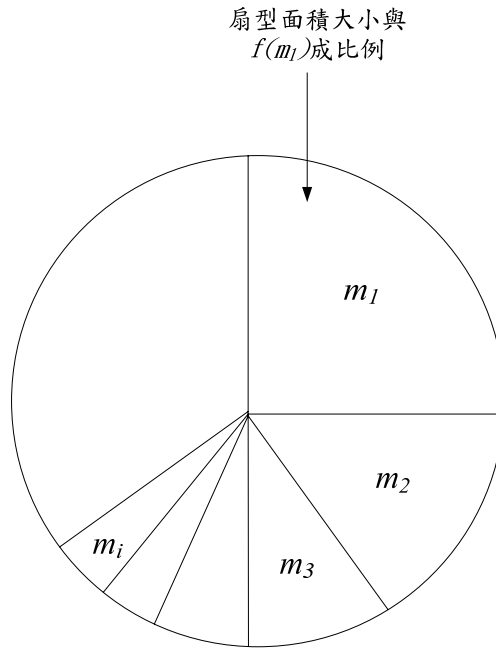


圖 4.2 蒙地卡羅轉盤選擇示意圖

$$P(m_j) = \frac{f(m_j)}{\sum_{i=1}^n f(m_i)} \quad (4.2.1)$$

其中， m_j 表第 j 個染色體， $P(m_j)$ 表第 j 個染色體被選中之機率， $f(m_i)$ 表第 i 個染色體之適合度值， n 為族群數。

因此，適合度高之染色體被選中，用以產生下一代之機率亦較高，使得較「優良」之遺傳因子得以流傳與繼承。

2. 交配(crossover)

交配乃是將經過複製過程篩選出之成對染色體以一定機率(交配率)決定是否進行配對，再經由彼此間所進行之基因交換行為產生子代。以隨機方式產生的0-1均勻分配(Uniform distribution)亂數值若低於交配率，則進行交配，以新的子代取代母代。反之，則被挑選的母代不進行交配，直接置入新的族群中。藉由交配機制，子代可同時具有母代雙方的優良基因，而組成更具適應能力之染色體。其處理方式主要有兩步驟：(1)進行篩選後族群之隨機配對；(2)隨機產生成對染色體之配對點，再依配對點之位置，進行基因互換。交配的方法亦有數種，較常採用的

方法有三：單點交配(One-point crossover)、雙點交配(Two-point crossover)以及均勻交配(Uniform crossover)。

交配率的高低會影響母代能否繼續生存於下一世代的機率。交配率愈高，母代會被強迫以子代取代。交配率愈低，則產生子代的比率則會較低。一般交配率設定為0.8-0.9間。但如果交配的機制是由兩個母代產生兩個子代時，不一定以子代取代母代，而是挑選適合度值較高的兩個置回族群，另外兩個加以剔除，則不必另設交配率。

- One-Point Crossover



- Two-Point Crossover



- Uniform Crossover



圖 4.3 三種交配方式示意圖

3. 突變(Mutation)

突變乃是針對子代之遺傳基因以一定機率(通常很低)，更動某一基因值(0→1或1→0)，以防止染色體於複製及交配過程中，遺漏重要訊息或落入局部最佳解，亦即預防族群內各染色體之僵化。以隨機方式產生的0-1均勻分配亂數值若低於突變率，則該子代進行突變。反之，則子代不進行突變，可保留其交配結果的基因組合。一般而言，突變的處理方式有二：(1)基因突變(Gene mutation)，即當產生之亂數低於設定之突變率時，即隨機更動某一基因值；(2)移轉突變(Shift mutation)，即變動同一染色體內各基因之位置，而不改變其值。突變率之設定影響尋優甚鉅，該值過小，將無法發揮突變之功能，可能發生族群僵化現象，反之將破壞子代繼承母代之優良基因。一般建議設定突變率等於族群數之倒數，或設定為0.01-0.03間。

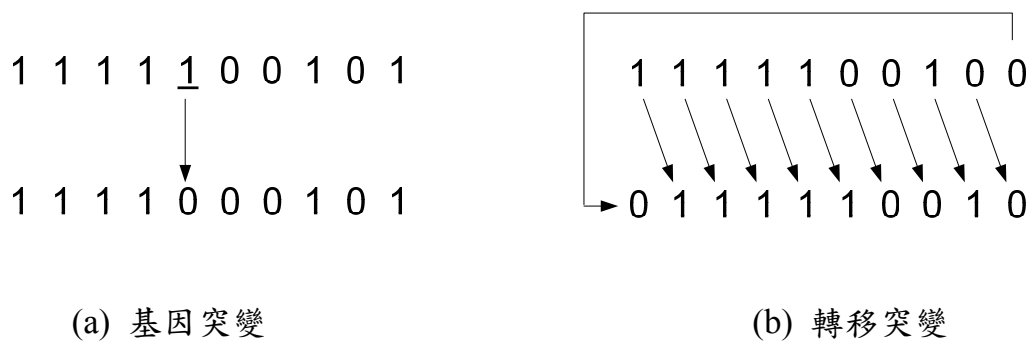


圖 4.4 二元變數兩種突變方式示意圖

4.2.3 重要特性

基因演算法與一般傳統之尋優方法最主要有四個不同的特性

1. 機率隨機尋優法（Stochastic search），即以機率作為遺傳法則搜尋與運作之依據，因此較能符合不同類型之最佳化問題，至於傳統則以決定性（deterministic）的方式來產生。
2. 多點尋優法（Multipoint search），即一次對於整個族群進行運算，而不是對於單一個體進行運算，亦即同時由多個起始點開始搜尋，最後收斂為一點，如此可避免且減少落入局部最佳解的機率，此項特點是與傳統演算法最大的相異點。
3. 直接尋優法（Direct search），直接以適合度作為研判染色體之優劣與否之評估指標，而並不需要其他輔助資訊（如梯度），因此較能避免傳統繁複的數學運算。
4. 平行尋優法（Parallel search），即各染色體於遺傳法則下之運作係平行且獨立地進行。

因此，採用GAs求解最佳解時，某些特殊型態之遺傳因子，因較適合環境(適合度較高者)而得以交配與繁衍，藉以產生更接近最佳解之染色體(即一組可行解)，並以突變方式，減少尋得局部最佳解之可能性。

4.2.4 操作步驟

操作GAs前必須先設計下列操作方式與參數：

1. 設定編碼、解碼方式。編解碼確定時，同時也會確定染色體的長度。
2. 設定族群數。
3. 設定選擇、交配及突變方式。
4. 設定交配率及突變率。

5. 設定停止條件。停止條件的設定方式有三：

(1) 執行設定的世代數。例如，設定為 $k \leq 1,000$ 時停止。 k 表示第 k 個世代。

(2) 前後世代的最佳值差異低於一設定的極小值。例如

$$f(m_{best}^{k+1}) - f(m_{best}^k) \leq 10^{-6} \text{ 時停止。}$$

(3) 成熟率大於設定值。例如，設定 $\eta \geq 80\%$ 時停止。 η 為成熟率。此方式較為常用。

GAs的操作步驟如下：

- A. 產生起始族群：利用亂數產生器隨機產生起始族群，以作為演化的基礎。族群必須事先設定，以 n 表之。如果已有不錯的起始群，也可以加以編碼成一染色體置入起始群中。
- B. 評估：計算現有族群中每一條染色體的適合度值(Fitness value)。如果該染色體是不可行解(Infeasible solution)，通常會降低其適合度作為懲罰。
- C. 選擇：自現有族群中，以選後放回方式(Selection without replacement)重複隨機選擇成對染色體，如符合交配率則進行交配，產生子代，否則將母代至回族群。
- D. 交配：將兩母代利用交配方式以隨機產生的交配點進行交配產生子代。計算子代的適合度後，置回族群。
- E. 突變：隨機改變子代某一基因之值，以避免落入局部解。計算突變後子代的適合度。
- F. 測試停止條件：測試是否符合停止條件。若是則停止，完成尋優，若否則回至步驟三。

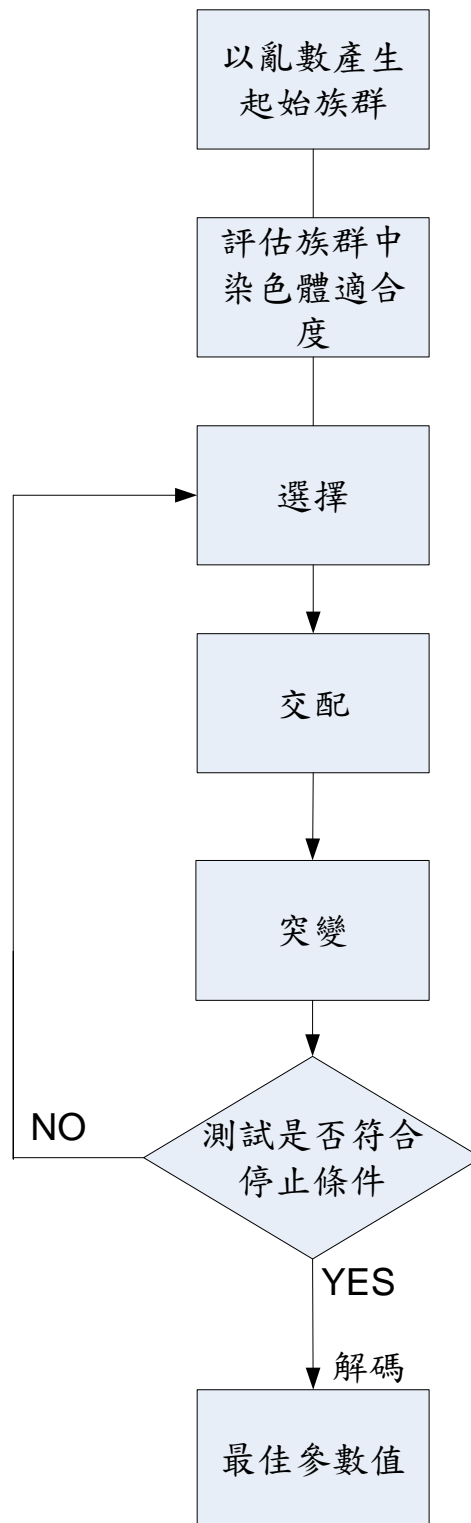


圖 4.5 遺傳演算法之流程圖

4.3 永續運輸之營運型雙層數學模型求解演算法

4.3.1 營運型模式上層求解方法

本節係說明營運模型上層模式的求解方法。

上層的模式為永續運輸指標成本最小化為目標。上層的求解方式係利用 Baoding Liu 所提出的方法，上層利用遺傳演算法來求解多階層並多數下層 (Followers) 雙層的數學規劃問題。

上層的目標式為追求興建成本、運輸系統營運成本，以及永續運輸指標等之成本最小化。決策變數為 x_i ，意為第 i 種大眾運輸系統票價（元/旅次）， $i=1,2,3,4$ 。

$$\underset{k_i, x_i}{Min} \quad SC \quad (4.3.1)$$

首先先確定本模式的編碼方式。因上層的決策變數是要求解各運具的票價，皆可視為一個整數數學規劃問題，所以利用前列編碼方式中的實數編碼，假設決策變數的值域介於 0 至 999 之間，則可以以連續三個基因代表一決策變數，例如染色體之基因值為 810589286339，代表決策變數依序為 $x_1=810$ 、 $x_2=589$ 、 $x_3=286$ 、 $x_4=339$ 。本模式於編碼中所考慮項目為模式中所探討的運具有四種：鐵路、航空、公路客運以及自用小客車，假設決策變數值域介於 0 至 9999 之間，所以以連續四個基因代表一決策變數，故染色體的長度為 16 個基因。並設定族群數為 100。選擇的方式為選擇以較多研究使用的蒙地卡羅(Monte Carlo wheel)的概念每一個染色體佔總適合度值的比例為何，比例較高的為適合度較高，則被選中來產生下一代的機率較高；交配的方式選擇較常使用的雙點交配(Two-Point Crossover)；突變的方式採用基因突變，即當產生之亂數低於設定之突變率時，即隨機更動某一基因值。而停止的條件設定為當成熟率大於設定值時，則停止測試，此成熟率設定為 80%。

4.3.2 營運型模式下層求解方法

本節係說明下層模式的求解方法。

下層的模式為大眾運輸業者的利潤最大化。下層的求解方式也係利用 Baoding Liu 所提出的方法，下層因為多個決策單位，固彼此之間有互相影響的關係，係利用 Stackelberg-Nash Equilibrium 來進行求解。

下層的目標式為追求各運輸業者的利潤最大化。

$$\underset{y_i}{Max} \quad x_i \times D \times Pr_i - y_i \times c_i \quad (4.3.2)$$

下層的決策變數為 y_j ，意即第 i 種大眾運輸系統的營運班次（班/日）， $i=1,2,3$ 。

下層因有多數的決策者，以本模式為例，下層的決策者包含了鐵路之營運者、航空之營運者以及公路客運之營運者。其追求的應為各自的利潤最大化，但在追求各自的利潤最大化時，會受到自己的發車班次，以及其他運具發車班次之影響，故各運具之間有互相影響的關係。求解的方式為：假設鐵路目前為政府所經營，所以發車班次為固定，再先假設公路客運的班次，為起始的運算值，計算

出在鐵路以及公路客運班次固定的情形，並以追求航空利潤最大的目標下，求出航空的最佳班次；再以計算出航空的最佳班次值，求出以公路客運的利潤最大的目標下，最佳的公路客運班次；再以此值重複計算航空的最佳班次，以此方法反覆計算，直到求出的航空最佳班次與公路客運最佳班次達到一平衡不再改變的狀態為止。此求解方式及存在著 Nash 均衡的關係。

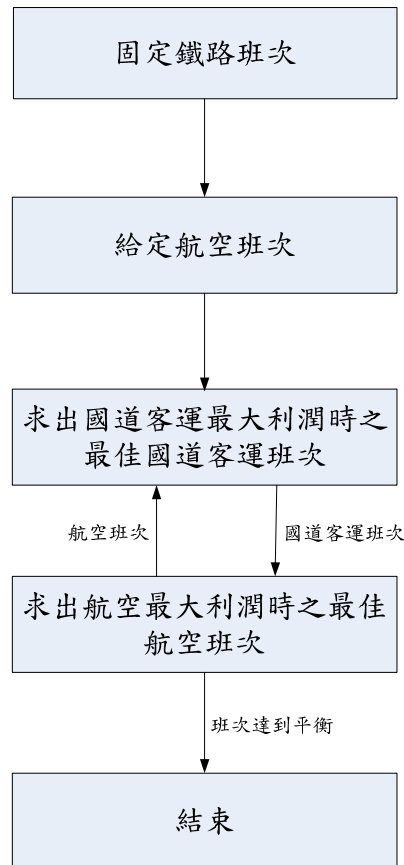


圖 4.6 下層求解方式

4.4 永續運輸之規劃型雙層數學模式求解演算法

4.4.1 規劃型模式上層求解方法

本節係說明規劃模型上層模式的求解方法。

上層的模式為運輸系統興建成本、運輸系統營運成本，以及永續運輸指標成本，皆以追求最小化為目標。

上層的目標式為追求興建成本、運輸系統營運成本，以及永續運輸指標等之成本最小化。

$$\underset{k_i, x_i}{Min} \quad BC + OC + SC \quad (4.3.3)$$

上層之決策變數有二，第一為 k_i ，意為第 i 種之運輸系統興建起始年， $i=1,2,3$ ；第二為 x_i ，意為第 i 種大眾運輸系統票價（元/旅次）， $i=1,2,3,4$ 。

因上層的決策變數是要求解各運輸系統的興建年期，以及各運具的票價，皆可視為一個整數數學規劃問題，所以利用前列編碼方式中的實數編碼，本模式於編碼中所考慮項目包括：大眾運輸於評估年期之興建年期，此部分的編碼方式為0至9的整數編碼，「0」為該年不興建任何運輸系統，「1」、「2」以及「3」為興建第一種運輸系統，「4」、「5」以及「6」為興建第二種運輸系統，「7」、「8」以及「9」為興建第三種運輸系統，評估年期為30年，故此部份之染色體長度為30個基因。而模式中探討的運具有四種：鐵路、航空、公路客運以及自用小客車，假設決策變數值域介於0至9999之間，所以以連續四個基因代表一決策變數，故這部份之染色體的長度為16個基因。故將兩部份之染色體共同編於一條染色體上，一條染色體長度為46個基因，第1個基因到第30個基因為運輸系統的興建年期，第31個基因到第46個為四種運具之票價，並設定族群數為100。並選擇方式、交配方式、突變方式以及停止條件皆與營運型模式相同。

而規劃型模式之下層求解方法，皆與營運型模式相同，故不多做解釋。

第五章 簡例分析

本章節設計二個簡例，分別為營運型模式以及規劃型模式之簡例。對模式之目標式，限制式以及研究方法之參數說明，並說明求解結果。

5.1 營運型模式簡例設計

本節將依據第三章所提出的模式，將模式中所提出之參數分別做說明。

5.1.1 目標式參數說明

目標式的參數為永續運輸指標，包含了：空氣污染的成本、肇事成本、能源消耗成本以及旅行時間成本等。

1. 永續運輸指標成本

本簡例設計有四種城際運輸工具，以 i 表示之。 $i=1$ 表鐵路運輸系統、 $i=2$ 表航空運輸系統、 $i=3$ 表公路客運運輸系統、 $i=4$ 則代表私人運輸系統。

本簡例假設為一運輸走廊，長約 400 公里，並所考慮之運具皆為城際運輸運具。在每日的運輸需求，假設旅次需求為每日 50,000 旅次並假設目前的折現率為 10%。

而通路運輸系統的容量係依據美國公路容量手冊(1985)所提出的數據，高速公路運輸容量為每小時 2200pcu(Passenger car unit，小客車當量數)。根據交通部運輸研究所(2000)，公路車輛行車成本調查報告結果，自用小客車 1800cc 以下載客人數為 1.8 人/車，1801cc-2400cc 載客人數為 2.0 人/車，2401cc 以上載客人數為 2.3 人/車，平均值為 2.03 人/車。

根據交通部民國 95 年 11 月份的月報資料，各運具的的承載率如下：鐵路之承載率為 67.91%，國內航空之承載率為 77.39%，公路客運之承載率為 83.99%，而自用小客車則以平均載客人數為 2.03，並滿載為五人計算，承載率為 40.6%。

各類運輸系統的空氣污染貨幣化成本、肇事成本以及能源消耗成本等，其假設數據根據於鄭義(2004)所提出之研究數據，並依交通部運輸研究所(1998)「公路汽車客運運價準則之研究檢討」以及鐵路局的研究資料，經單位換算後得：鐵路之空氣污染成本為 80.114 元/延車公里，國內航空之空氣污染成本為 236.1174 元/延車公里，公路客運之空氣污染成本為 353.7704 元/延車公里，小客車之空氣污染成本為 283.99 元/延車公里；鐵路之肇事成本為 10.0335 元/延車公里，航空之肇事成本為 60.5151 元/延車公里，公路客運之肇事成本為 10.5087 元/延車公里，小客車之肇事成本為 0.1291 元/延車公里；鐵路之能源消耗成本為 83.7141 元/延車公里，航空之能源消耗成本為 334.8564 元/延車公里，公路客運之能源消耗成本為 209.2853 元/延車公里，小客車之能源消耗成本為 167.4282 元/延車公里。

各類運輸系統的單次營運成本，其假設鐵路的單位營運成本為 100(元/延車公里)，在假設案例為延車 400 公里，故營運成本為 40000(元/班次)；國內航空的單位營運成本為 500(元/延車公里)，在假設案例為延車 400 公里，故營運成本為 200000(元/班次)；公路客運的單位營運成本為 30(元/延車公里)，在假設案例為延車 400 公里，故班次營運成本為 12000(元/班次)。

2. 旅行時間成本

旅行時間的考量包括了車行時間(Running time)及因路口停等與行車中其他車流的影響而增加之時間延滯(Intersection delay)。在路網交通量的指派的實務上，最常用簡化的數學公式計算，其中最被廣泛使用的是美國公路局(U.S Bureau of Public Roads; BPR)建立的公式，稱為 BPR 公式。

表 5.1 各道路類別參數值

道路類別	參數	參數值	參數值
多車道	高速公路	α	0.390
		β	1.331
	一般道路	α	0.777
		β	1.897
兩車道	高速公路	α	0.515
		β	1.569
	一般道路	α	1.287
		β	1.891

資料來源：日本道路公團(1985)，「設計要領第三集-隧道」

因本研究在估算小客車，在一假設多車道的高速公路運輸走廊的旅行時間，所以於表 5.1 中採用之參數值 α 值為 0.390， β 值為 1.331。並本研究所假設的運輸走廊為 400 公里，在自由車流下假設小客車能行駛的速率為 100 公里，所以得知在自由車流下小客車行駛運輸走廊的時間為四小時。

第 h 小時之小客車交通流量，係依據一假設之一日旅次產生型態 (Daily trips patterns)，將第 j 年每日小客車旅次需求量 ($D \times Pr_p$) 加以分攤估算。在此先假設為均一流量，如圖 5.1：

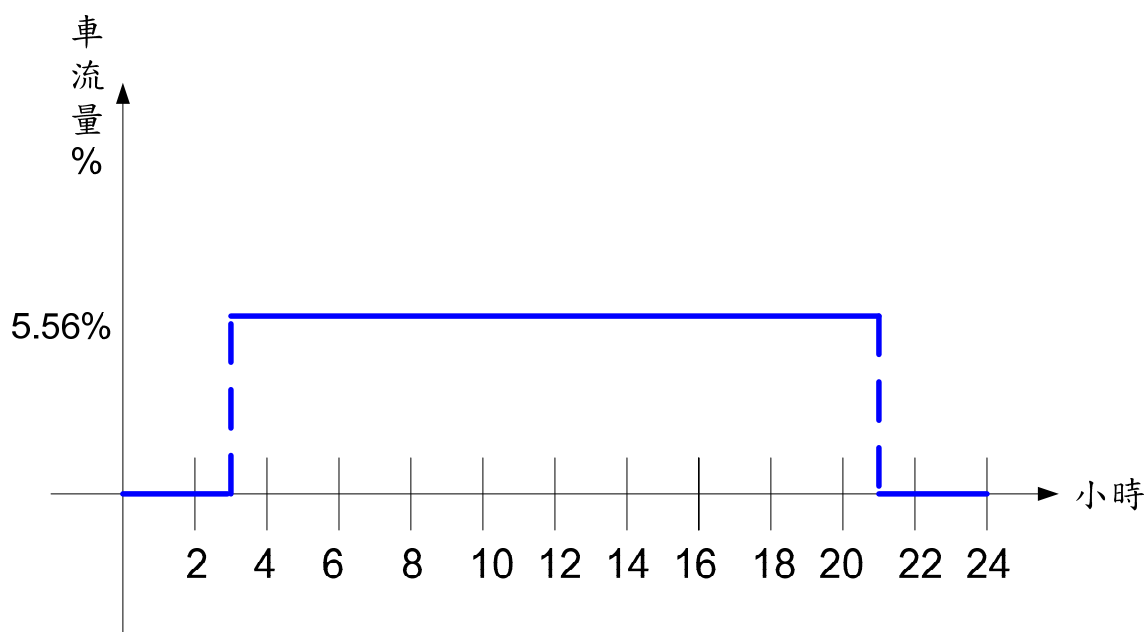


圖 5.1 旅次產生型態均一流量

運具的旅行時間價值，則參考台北都會區整體運輸需求預測模式。民國80年機車及汽車等私人運具之車內平均時間價值為每分鐘0.98元，而大眾運輸之時間價值較私人運具時間價值低，車內時間價值為0.79元，本研究利用平均年物價上漲率0.03，將上述值調整為民國96年私人運具車內時間每分鐘1.57元，大眾運輸之車內平均時間價值為每分鐘1.27元。

5.1.2 限制式參數說明

1. 供給與需求限制式

第 i 種大眾運輸工具之供給量，須大於第 i 種大眾運輸工具之需求量。

航空業每班次的容量，根據航空業某四家業者所提供的機位數資料，A 航空公司飛行約 400 公里航線的機位數平均為 171.5 個座位，B 航空公司平均為 156 個座位；C 航空公司平均為 161 個座位；D 航空公司平均為 108.5 個座位，所以平均班機每班次能提供的容量平均為 149.25 個座位，以 150 個座位為計算。

公路客運業也以四間客運業所提供之座位數作為參考，座位數分別為 21 個座位數、28 個座位數、19 個座位數以及 16 個座位數，所以平均公路客運業每班次所提供的座位數為 21 個。

鐵路部分因考慮此設計為城際運輸，所以僅計算承載城際距離的列車座位數，估計每節車廂所提供之座位數為 52 個座位，每班次所開出之車輛數為 12 節車廂，所以所能提供之座位數為 624 個座位。

2. 運輸路線容量限制式

第 i 種大眾運輸的每日營運班次，需小於每日班次之路線容量。根據飛航管制程序ATP-88規定，在起飛與落地航空器間、連續兩架起飛航空器間、連續兩架落地航空器間、前後通過同一點的兩架航空器間要運用前後隔離，其前後隔離的隔離標準單位通常為時間(分鐘)，依照兩航空器間的空速快慢差異、航空器產生機尾亂流等級差異、兩航空器飛行航道的角度差異，訂定不同的標準。例如：依情況不同有一分鐘、二分鐘、三分鐘、五分鐘、十分鐘等隔離。若以三分鐘做為計算，並此航線佔國內航線每次總班次的約四成為估計，運輸走廊的航空每日班次之路線容量為60個班次。

在「台鐵城際運輸及通勤狀況之探討」報告裡，說明台鐵運輸系統的發車班距，最短可達6分鐘一班。估計此路線的班次約佔總班次的40%，並以營運時間加以計算，可得知運輸走廊的鐵路每日班次之路線容量為78個班次。

在公路客運業方面，估計此路線約佔總經營路線的三成。若大客車的當量數以2.0，每日經營時間為全日24小時來計算，可得知運輸走廊的公路客運每日班次之路線容量為31680個班次。

3. 非負限制式

本研究中的決策變數為 x 表大眾運輸系統票價，以及 y 表大眾運輸系統的營運班次。兩者均受限於結果必須為非負值。

表 5.2 營運型模式參數符號彙整表

類型	參數符號	數值
運輸走廊長度(公里)	l	400
每日運輸需求(人旅次)	D	50,000
小客車平均載客數(人/車)	f_p	2.03
折現率	r	10%
BRP 參數	α	0.390
BRP 參數	β	1.331
公路運輸容量(每車道每小時)	C	2000
羅吉特方案特定係數	a_1	-0.0012
羅吉特方案特定係數	a_2	-0.01
羅吉特方案特定係數	a_3	-0.0005

表 5.3 營運型各運具模式參數符號彙整表

類型	參數 符號	鐵路	航空	公路	
				公車	小客車
空氣污染 (元/延車公里)	b_{1i}	80.114	236.1174	353.7704	283.99
肇事 (元/延車公里)	b_{2i}	10.0335	60.5151	10.5087	0.1291
能源消耗 (元/延車公里)	b_{3i}	83.7141	334.8564	209.2853	167.4282
行駛時間 (日)	t_i	5/24	1/24	依 BRP 公 式計算. $t_0=4/24$	依 BRP 公 式計算. $t_0=4/24$
班次容量(人/車)	K_i	624	150	21	5
班次之路線容量 (班/日)	F_i	78	60	31680	63360
業者之班次營運 成本	c_i	40000	200000	11600	0
旅行時間 (日)	t_i	5/24	1/24	依 BRP 公 式計算. $t_0=4/24$	依 BRP 公 式計算. $t_0=4/24$
平均候車時間 (日)	β_{ij}	1/(2*40)	1/(2 y_{2j})	1/(2 y_{3j})	0

5.1.3 研究方法參數說明

1. 基因

基因意即代表決策變數，本模式中有 16 個決策變數，為各運具的票價。各運具的票價依序分別為鐵路運具的票價，航空運具的票價，公路客運的票價以及小客車的通行費。本模式並以連續四個基因為一個決策變數。

2. 染色體

本模式假設一條染色體之長度為 16 個基因：

連續四個基因代表一個決策變數。如下圖 5.2 所示，如求解出染色體為 0821241508266591，則第一到第四個基因值「0821」代表第一個決策變數，即為第一種運具的票價 821 元，在本模式中為鐵路票價；第五到第八個基因值「2415」代第二個決策變數，即為第二種運具的票價 2415 元，在本模式中代表為航空票價；第九到第十二個基因值「0826」代表第三個決策變數，即為第三種運具的票價 826 元，在本模式中代表為公路客運的票價；第十三到第十六個基因值「6591」

代表第四個決策變數，即為第四種運具的票價 6591 元，在本模式中代表為自用小客車通行費。

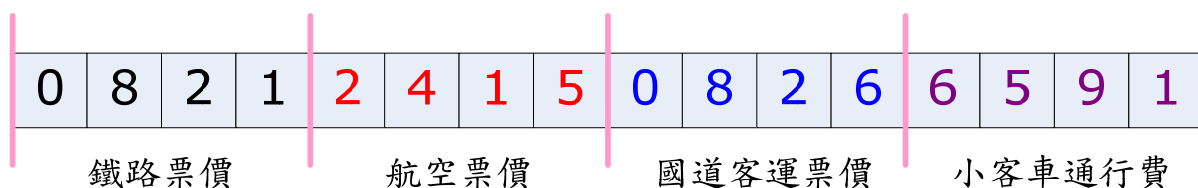


圖 5.2 模式之運具票價染色體說明

3. 族群：

族群由一群染色體所組成。族群內的染色體數量稱為族群規模(Population size)，此數量為主觀設定值，通常以 50 個或 100 個作為設定數值。在本模式中，設定族群規模為 100 條染色體。

4. 交配方式：

依過去相關文獻統計，雙點交配的績效最好，故本模式所使用的交配方式為雙點交配。

5. 交配率：

一般而言，交配率通常設定為 0.7-0.9。本模式所採用的交配率設定為 0.9，此值為主觀設定。並於章節 5.3 會分別討論交配率於 0.7 至 0.9 不同情況之變化情形。

6. 突變方式：

本模式所採用的突變方式為基因突變。基因突變即當產生之亂數低於設定之突變率時，即隨機更動某一基因值。以整數編碼舉例，如圖 5.3 所示，若隨機更動為第六個基因，第六個基因為 8，則突變方式為將隨機選到之基因值，以最大數 9 減去，所以突變後之第六個基因值為 1。

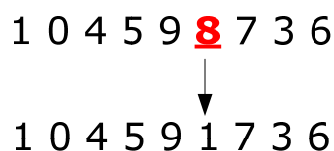


圖 5.3 整數編碼突變方式

7. 突變率

一般而言，突變率通常為族群數之倒數，或是設定為 0.01-0.03。本模式所採

用的突變率設定為 0.01，此值為主觀設定。並於章節 5.3 會分別討論突變率於 0.01 至 0.03 不同情況之變化情形。

8. 停止條件

當成熟率高於 80% 即停止。成熟率為族群中有多少比例的染色體具有相同的基因，GAs 也常以演化過程是否達到設定的成熟率，來判斷尋優過程是否要結束。當成熟率高達某一水準，因無法產生差異較大的子代，故考慮停止。

表 5.4 規劃型模式研究方法參數彙整表

研究方法使用參數	數值	說明
基因	4 個決策變數	1. 鐵路票價 2. 航空票價 3. 公路客運票價 4. 小客車通行費
染色體	16 個基因/一條染色體	1. 連續四個基因代表一個決策變數，所以為 4*4 有 16 個基因為一條染色體長度
族群	100 條/一個族群	
編碼方式	整數編碼	
交配方式	雙點交配	
交配率	主觀設計為 0.9	
突變方式	基因突變	當產生之亂數低於設定之突變率時，即隨機更動某一基因值
突變率	主觀設計為 0.01	
停止條件	成熟率高於 80%	成熟率為族群中有多少比例的染色體具有相同的基因。當成熟率高達某一水準，因無法產生差異較大的子代，故考慮停止。

5.2 規劃型模式簡例設計

5.2.1 目標式參數說明

目標式的參數包含了運輸系統之興建成本、運輸系統之營運成本，以及永續運輸指標，包含了：空氣污染的成本、肇事成本、能源消耗成本以及旅行時間成本等。

1. 運輸系統興建成本

在本簡例設計中之運輸系統有三個：鐵路，航空以及公路。第一種運輸系統為鐵路，假設其興建成本為三千七百億台幣；第二種運輸系統為航空，假設其興建成本為兩千億台幣；第三種運輸系統為公路，假設其興建成本為兩千五百億台幣。各運輸系統興建所需年長皆假設為 5 年。將興建成本分攤至興建所需年期間，再將各年所分攤之成本經過折現，即算出各運輸系統折現後之興建成本。最後將各運輸系統折現後之興建成本相加，得總運輸系統興建成本。

例如求解出在評估 30 年間第七年需興建第一種運輸系統，則將鐵路之興建成本分攤至第 7 年至第 11 年間，經過折現至第一年之計算後，可求得該運輸系統之興建成本。

2. 運輸系統營運成本

如上所述，本簡例設計中之運輸系統有三個：鐵路，航空以及公路。第一種運輸系統為鐵路，假設其營運成本為二十萬台幣；第二種運輸系統為航空，假設其營運成本為二十五萬台幣；第三種運輸系統為公路，假設其營運成本為十萬台幣。

營運成本之計算如第三章所述，營運成本分為兩個部份計算：第一部分為，若原已有運輸系統，則該部份之營運成本則從評估年間之第一年計算至評估終止年為止，並經過折現之計算，得該部份之營運成本；第二部份為新建之運輸系統，若求解出有新建之運輸系統，其營運成本從新建之運輸系統之興建完成後開始計算至評估終止年。本模式假設本三種運輸系統皆存在，所以第一部分的營運成本計算則從評估年期間第一年起算，計算至評估年第 30 年為止。

而第二部份新建之運輸系統的營運成本計算方式為：假設求解結果為在評估年期 30 年中，求解出第 13 年要開始興建第二種運輸系統，該運輸系統於第 18 年興建完成後，就於第 18 年開始計算新的運輸系統營運成本，計算至評估年終止年第 30 年止。並假設每日總需求旅次為 150,000 人旅次。

5.2.2 限制式參數說明

而規劃型模式之限制式參數大多與營運型模式相同，故僅對新增之處解釋。

1. 興建年期非負限制式

規劃型模式中的決策變數運輸系統興建年期，需受限於結果必須為非負值。

5.2.3 研究方法參數說明

1. 基因

基因意即代表決策變數，本模式中有卅四個決策變數，為各運輸系統之興建年期，與各運具的票價。運輸系統之興建年期因評估年期為 30 年，故連續 30 個基因代表評估年間每一年是否興建運輸系統，以及當需要興建運輸系統時，開始興建何種運輸系統；而各運具的票價依序分別為鐵路運具的票價，航空運具的票價，公路客運的票價以及小客車的通行費。本模式並以連續四個基因為一個決策變數。

2. 染色體

本模式假設一條染色體之長度為 46 個基因，分為兩個部份：

第一個部份為：第 1 個基因至第 30 個基因為每一年之興建年期，評估年期為 30 年，此部分的編碼方式為 0 至 9 的整數編碼，「0」為該年不興建任何運輸系統，「1」、「2」以及「3」為興建第一種運輸系統，「4」、「5」以及「6」為興建第二種運輸系統，「7」、「8」以及「9」為興建第三種運輸系統。如圖 5.4 所示：

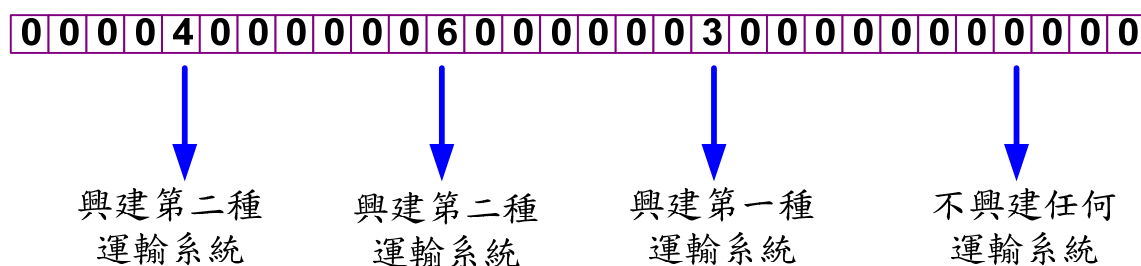


圖 5.4 模式之各運輸系統興建年期染色體說明

第二個部份為：第 31 個基因到第 46 個基因為四個運具之票價，將連續四個基因代表一個決策變數。如下圖 5.5 所示，如求解出染色體為 0821241508266591，則第一到第四個基因值「0821」代表第一個決策變數，即為第一種運具的票價 821 元，在本模式中為鐵路票價；第五到第八個基因值「2415」代表第二個決策變數，即為第二種運具的票價 2415 元，在本模式中代表為航空票價；第九到第十二個基因值「0826」代表第三個決策變數，即為第三種運具的票價 826 元，在本模式中代表為公路客運的票價；第十三到第十六個基因值「6591」代表第四個決策變

數，即為第四種運具的票價 6591 元，在本模式中代表為自用小客車通行費。

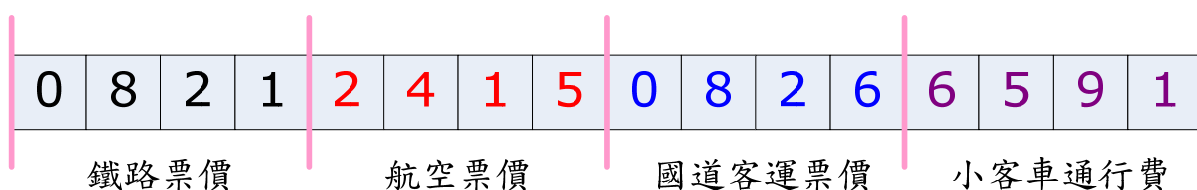


圖 5.5 模式之運具票價染色體說明

其族群數之設定、交配方式、交配率、突變方式、突變率以及停止條件皆與營運模式相同，故不多做說明。

表 5.5 規劃型模式各運輸系統參數符號彙整表

類型	參數符號	鐵路	航空	公路
興建成本	e_i	3700(億元)	2000(億元)	2500(億元)
系統營運成本	op_i	20 (萬元)	25 (萬元)	10 (萬元)
興建年期長	m_i	五年	五年	五年

表 5.6 規劃型模式研究方法參數彙整表

研究方法使用參數	數值	說明
基因	34 個決策變數	<ol style="list-style-type: none"> 1. 大眾運輸系統之興建年期 2. 鐵路票價 3. 航空票價 4. 公路客運票價 5. 小客車通行費
染色體	46 個基因/一條染色體	<ol style="list-style-type: none"> 1. 大眾運輸系統之興建年期，評估年期為 30 年，每一年為一個基因 2. 連續四個基因代表一個決策變數，所以為 4*4 有 16 個基因為一條染色體長度

5.3 營運型模式結果分析

本章節說明以追求永續運輸之環境下，大眾運輸的票價管制，小客車之通行費以及發車班次之測試結果。

表 5.7 營運模型上層之求解結果

每日總需求 旅次	鐵路票價 (元)	航空票價 (元)	公路客運票價 (元)	小客車通行費 (元)	目標值 (億元)
50,000	945	2460	2493	7060	2.68

表 5.8 營運模型下層之求解結果

每日總需求旅次	鐵路班次 (班/日)	航空班次 (班/日)	公路客運班次 (班/日)
50,000	40	78	577

表 5.9 營運模型之各運具搭乘比例

運具	鐵路	航空	公路客運	自用小客車
搭乘比例	49.92%	23.4%	23.23%	2.45%

假設每日的總需求旅次為 50,000，若鐵路班次固定為 40 班/日，則求解出航空的最適班次為 78 班/日，最適公路客運班次為 577 班/日；而最適的鐵路票價為 945 元，最適的航空票價為 2460 元，最適的公路客運票價為 2493 元，最適的小客車通行費為 7060 元。在此票價以及提供的發車班次下，使用各運具的比例是：鐵路為 49.92%；航空為 23.4%；公路客運為 23.23%；以及小客車為 2.45%。

但根據以上所求解的結果發現，求解出的小客車通行費與現行的成本加價法所執行的通行費差距甚大，雖此結果為追求永續運輸下該調整的方向，但仍須顧及結果是否為可行。故對於求解結果增加限制條件，假設以該運輸走廊之長度，旅客願意接受之最高票價為 3000 元，經求解後得以下結果：

表 5.10 營運模型上層修正後之求解結果

每日總需求 旅次	鐵路票價 (元)	航空票價 (元)	公路客運票價 (元)	小客車通行費 (元)	目標值 (億元)
50,000	794	1508	794	3000	6.93

表 5.11 營運模型下層修正後之求解結果

每日總需求旅次	鐵路班次 (班/日)	航空班次 (班/日)	公路客運班次 (班/日)
50,000	40	77	785

表 5.12 營運型模式修正後之各運具搭乘比例

運具	鐵路	航空	公路客運	自用小客車
搭乘比例	33%	23.09%	32.97%	10.94%

修正後的營運型模式求解結果為，假設每日的總需求旅次為 50,000，若鐵路班次固定為 40 班/日，則求解出航空的最適班次為 77 班/日，最適公路客運班次為 785 班/日；而最適的鐵路票價為 794 元，最適的航空票價為 1508 元，最適的公路客運票價為 794 元，最適的小客車通行費為 3000 元。在此票價以及提供的發車班次下，使用各運具的比例是：鐵路為 33%；航空為 23.09%；公路客運為 32.97%；以及小客車為 10.94%。

將營運型模式之修正前後結果相比較，有下列差異：修正前求解之績效值為 2.68，修正後績效值為 6.93，有明顯的增加，原因在於自用小客車的使用比例有大幅度的增加。而自用小客車的使用比例會大幅增加的原因為受到票價上限的限制，所以修正後之小客車通行費為 3000 元，在旅客考慮運具選擇上，相對來說選擇小客車的旅次定會提昇，因小客車個載客量低，造成的汙染、能源消耗等也高，進而造成績效值也增高。

表 5.13 營運型模式修正票價上限各運具使用率影響

運具	鐵路	航空	公路客運	自用小客車
票價無上限考量	49.92%	23.4%	23.23%	2.45%
票價上限考量	33%	23.09%	32.97%	10.94%
影響幅度	減少 33.89%	減少 1.32%	增加 41.93%	增加 346.5%

表 5.13 顯示當加上票價上限之前後對於選擇各運具使用率影響。選擇自用小客車的比例因受到上限限制影響而大幅增加，增加的比例約三成。而這些旅客多是由原先鐵路之旅次所吸引。

5.4 規劃型模式結果分析

本章節說明以追求永續運輸之環境下，運輸系統之興建年期與大眾運輸的票價管制，小客車之通行費以及發車班次之測試結果。

表 5.14 規劃型模式求解結果

	系統興建年期之求解結果	起始年票價求解結果
基因值	第 1 年至第 10 年： 1 0 4 0 0 0 2 0 0 0 第 11 年至第 20 年： 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 第 21 年至第 30 年： 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0767 1612 0827 3000
結果說明	鐵路興建起始年 第 1 年；第 7 年	鐵路起始年票價 767 元
	航空站興建起始年 第 3 年	航空起始年票價 1612 元
	公路興建起始年 無（不興建）	國道客運起始年票價 827 元
		自用小客車起始年通行費 3000 元

本模式假設在評估年期起始前，僅有一條公路為現有運輸系統，故於評估年期起始前，僅有公路客運以及自用小客車兩種運具可以選擇。在每日旅次需求量为 150,000 時，政府為改善大量旅次皆選擇小客車，於評估年第一年開始興建第一條鐵路，並於評估年第五年完成，開始分散旅次；於評估年第三年興建航空站，於評估年第七年完成，開始分散旅次；再於第七年興建第二條鐵路，並於評估年

第 11 年興建完成。因興建運輸系統之成本高昂，故在評估年間，在同時追求運輸系統興建成本最小，但又要同時追求永續運輸指標，所以僅興建三個運輸系統。故在評估年期結束時，共有二鐵路系統，一座航空站與一公路系統。

而在評估年間，旅客的分布量約如圖 5.6：

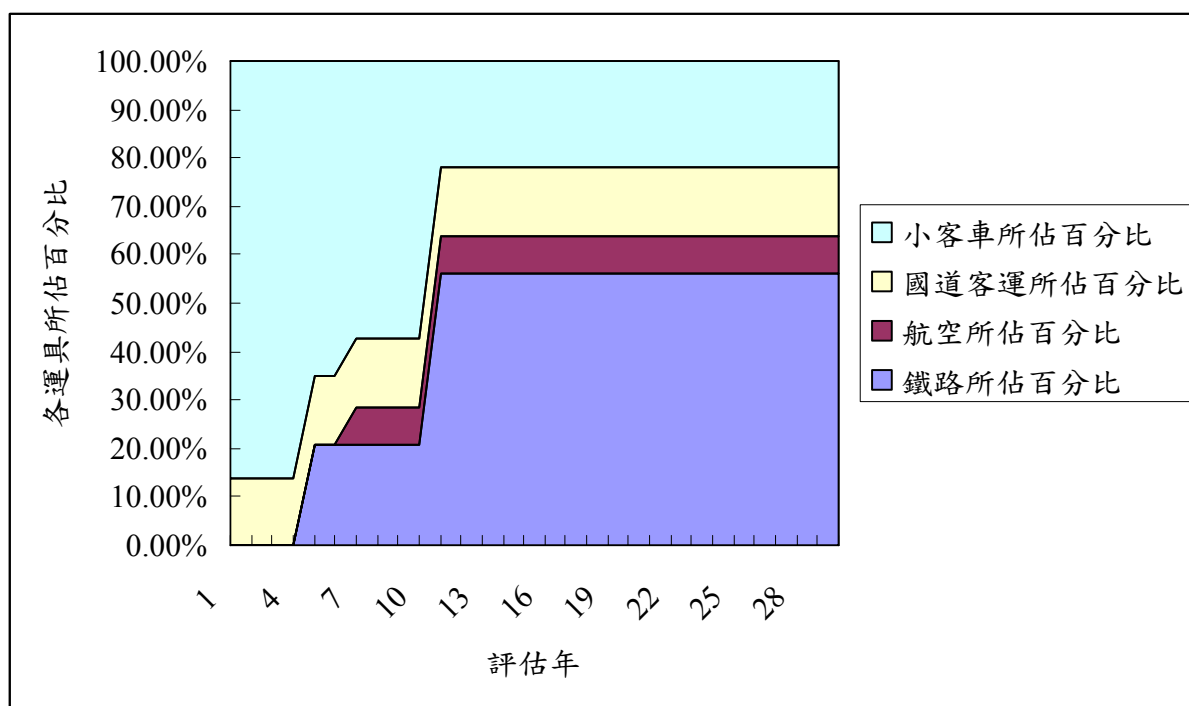


圖 5.6 規劃型模式評估年間各運具所佔百分比

如圖 5.6 所示，在評估年期之開始時，因僅有公路系統，所以旅客能選擇之運具有公路客運與自用小客車。在第四年第一條鐵路興建完成後加入營運，該系統開始分散旅客；第七年航空站完成後也加入營運；第 11 年第二條鐵路完成。評估結果為這些運輸系統可以朝向永續運輸發展。所求解出之各運具票價為評估起始年之票價，以物價調整每兩年上調 5%作為計算值。而運具之發車班次會隨著該運具之運輸系統興建而增加。

第六章 敏感度分析

本章節對營運型模式以及規劃型模式進行敏感度分析。並說明其求解結果與敏感度分析結果之政策意涵。

6.1 營運模型敏感度分析

本章節將針對不同的演算法參數、不同的旅次需求，以及不同的鐵路發車班次進行敏感度分析，以了解在不同的旅次需求以及鐵路發車班次狀況下，票價的改變以及其他運具發車班次所受的影響等。

6.1.1 不同遺傳演算法參數

表 6.1 遺傳演算法參數敏感度分析表

交配率	突變率	績效值(億元)
0.7	0.01	6.94
	0.02	6.939
	0.03	6.939
0.8	0.01	6.939
	0.02	6.939
	0.03	6.939
0.9	0.01	6.939
	0.02	6.939
	0.03	6.939

由表 6.1 可知遺傳演算法之交配率與突變率之改變，對於求解結果並無太大影響，僅在交配率為 0.7，並突變率為 0.01 時，所求解出績效值較高，但差異並不大，且其餘結果皆相同。

6.1.2 不同旅次需求總數

如圖 6.1 所示，小客車的通行費求解結果一直在給定的上限值居高不下，原因在於此運具是導致城際運輸系統朝向不永續發展的主要因素。小客車屬於低運量、高污染並高耗能的運具，載客量低所以相對曝光率提高，易增加危險性，所以求解的結果會使其通行費提高，以降低旅客選擇該運具的意願；鐵路因具有高運量低污染，並安全性較高的運具，故票價偏低，鼓勵旅客多選擇該運具。

在每日的總需求旅次提高的狀況下，因鐵路發車班次固定，所以許多旅客會選擇搭乘航空以及公路客運，如圖 6.2 所示，航空以及公路客運班次會隨著旅次需求成長而增加。但因為選擇搭乘航空以及公路客運的旅客增多，發車班次因而增加，也導致如圖 6.5、6.6 以及圖 6.7 所顯示的結果，其所造成的空氣污染、肇事成本以及能源消耗量也都漸升高。此問題的解決方法，可以為當旅次的需求提

升的時候，鐵路的發車班次也應視需求適當的增加，因鐵路載客量高，造成的污染、肇事以及能源消耗也相對較少。

如圖 6.3 所表達的意義為，在追求永續運輸的目標下，所求解出來的票價以及班次，影響旅客選擇運具的結果為，大眾運輸的搭乘比例皆比使用自用小客車的比例來的高，小客車的使用比例大約維持在 10%。這樣的結果雖比修正前的營運型模式結果，小客車的使用比率約在 2% 左右，會造成更多的永續成本，但因政府在制定相關政策時，須顧及政策推行的可行性，故在修正後的模式求解，也的確能符合朝向永續運輸發展的方向。圖 6.4 所示，各運具的收益會因為搭乘的旅客增多，當然收益也會隨之增加。

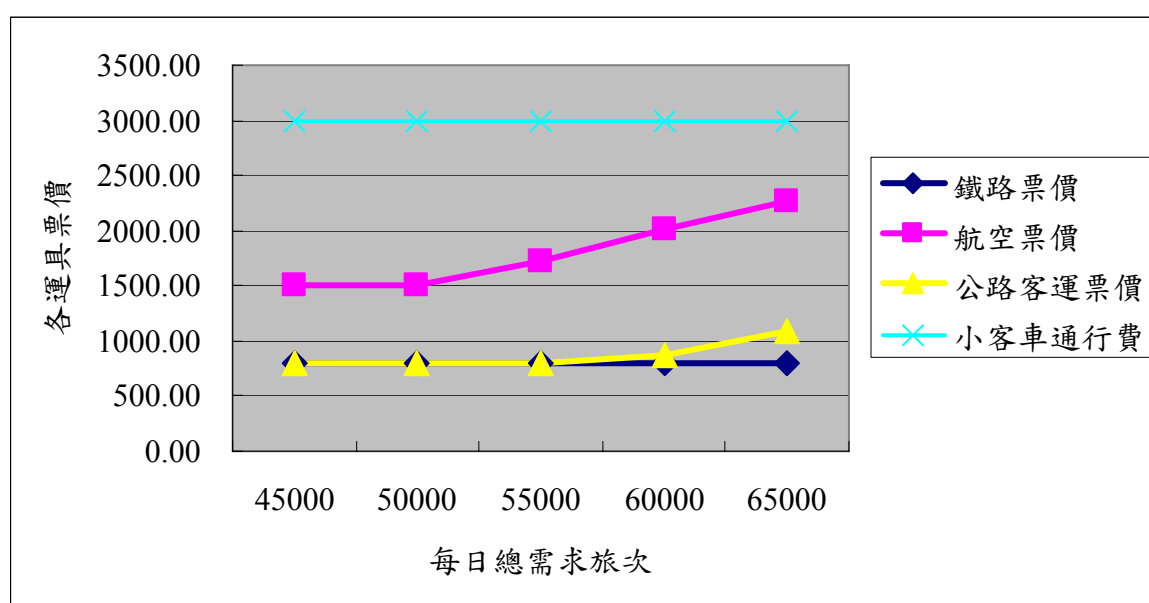


圖 6.1 營運型模式之不同旅次需求下各運具票價分析圖

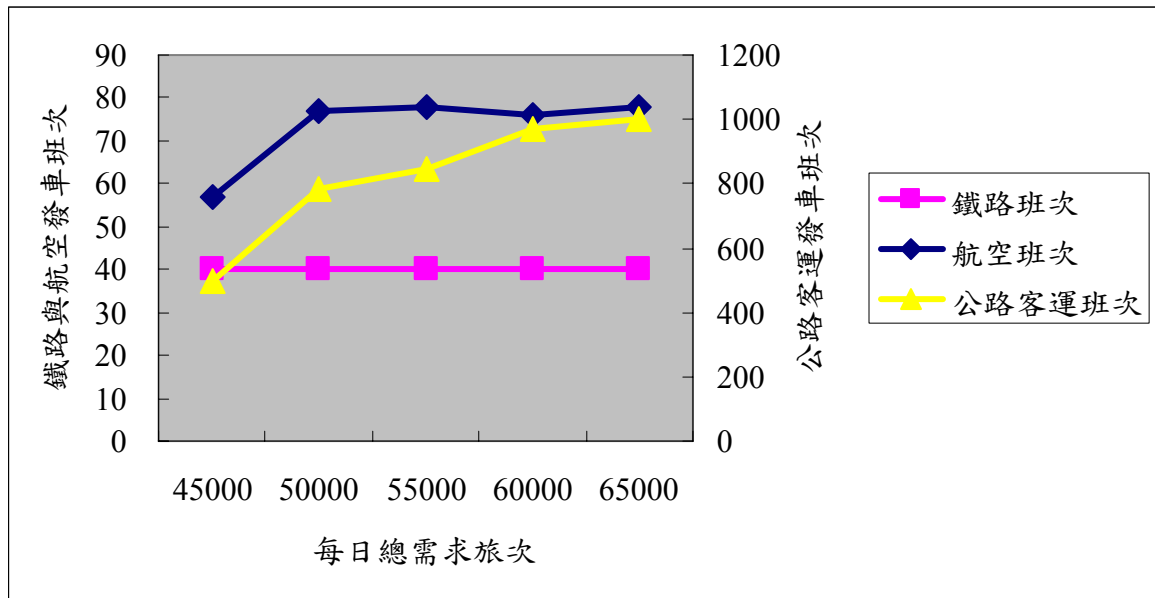


圖 6.2 營運型模式之不同旅次需求下各運具班次分析圖

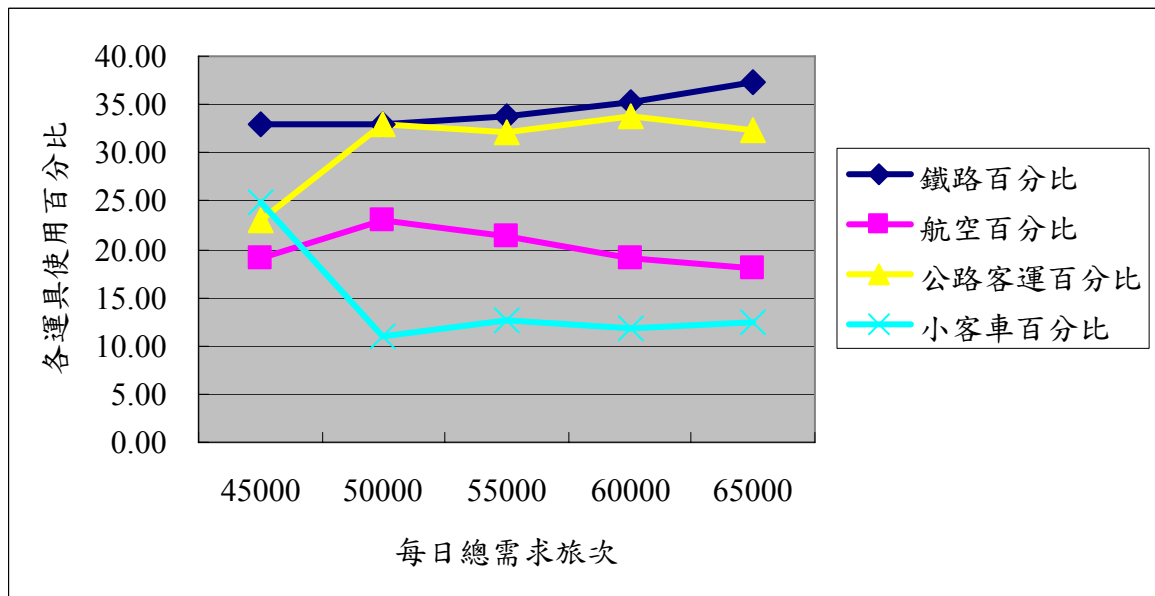


圖 6.3 營運型模式之不同旅次需求下各運具使用百分比分析圖

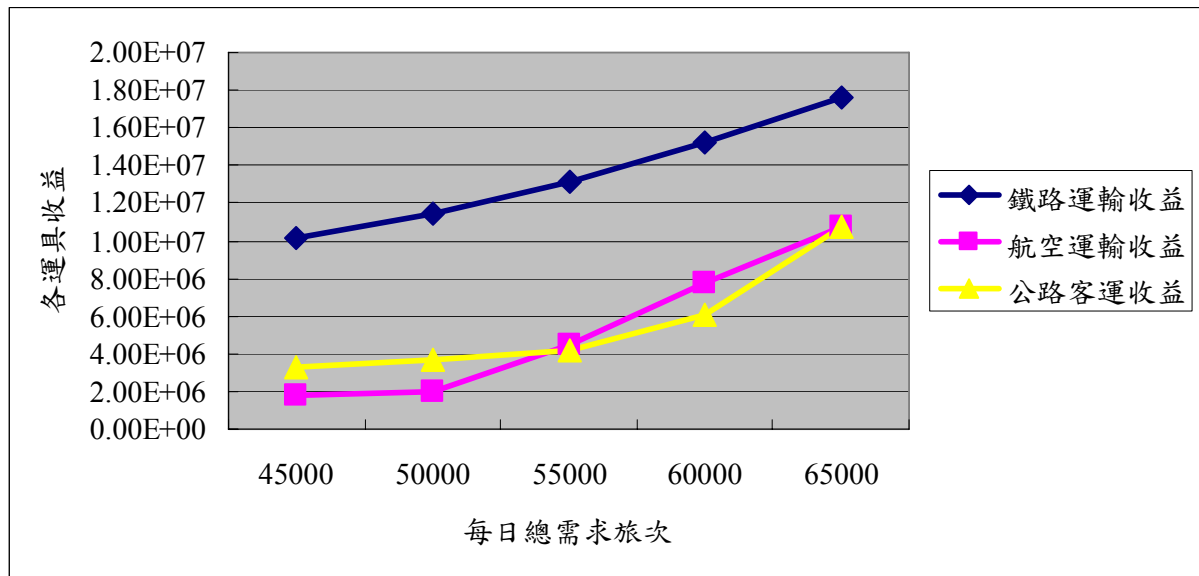


圖 6.4 營運型模式之不同旅次需求下各運具業者收益分析圖

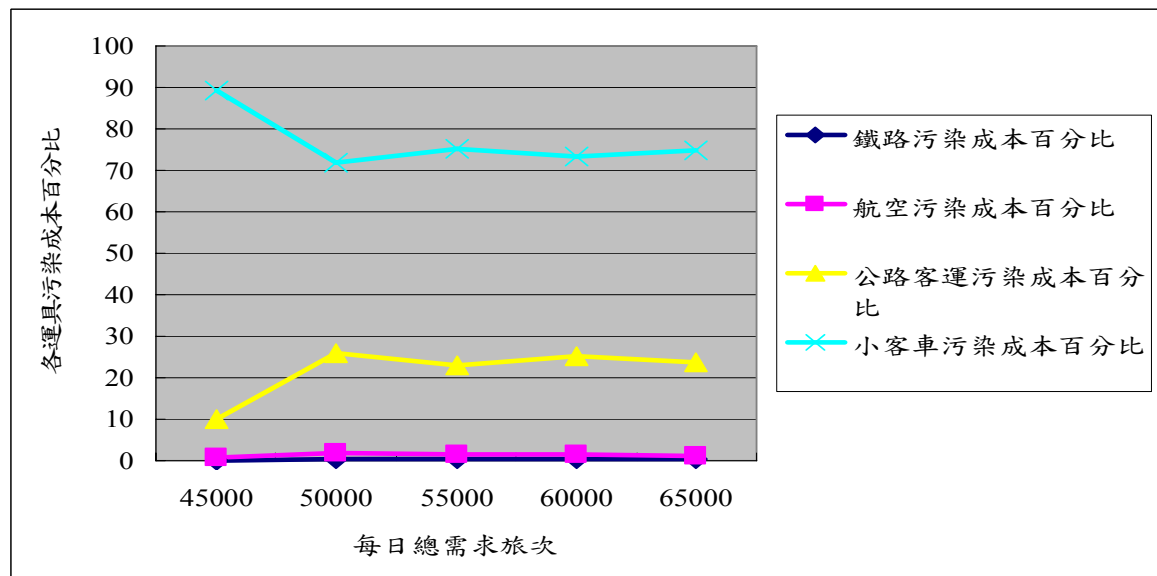


圖 6.5 營運型模式之不同旅次需求下各運具污染成本分析圖

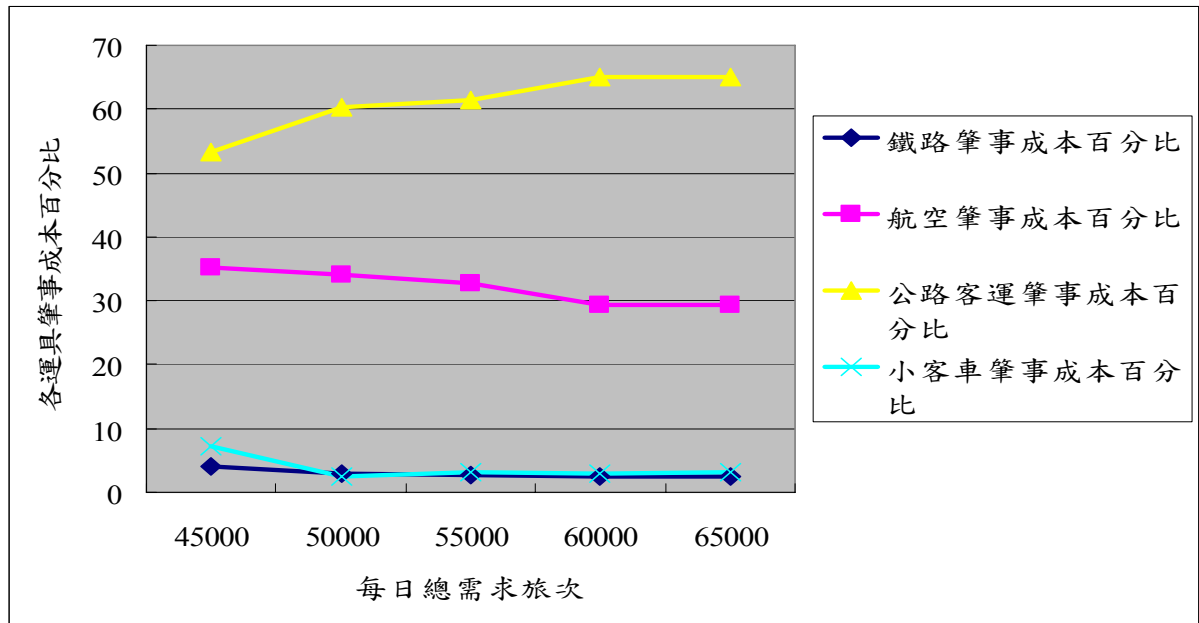


圖 6.6 營運型模式之不同旅次需求下各運具肇事成本分析圖

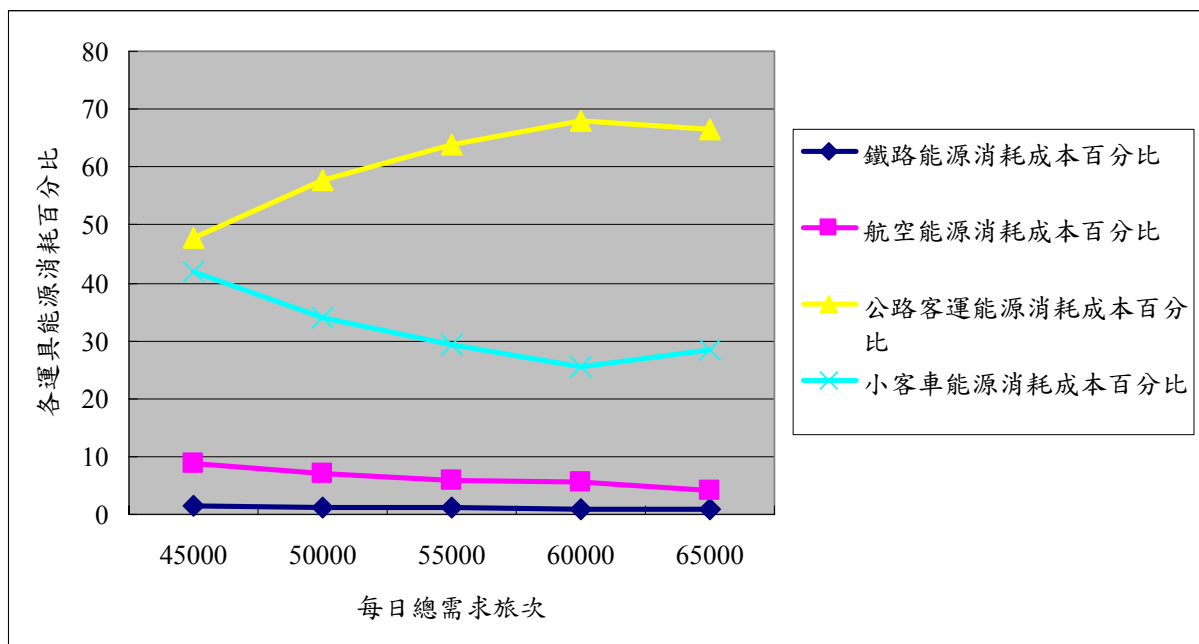


圖 6.7 營運型模式之不同旅次需求下各運具能源消耗成本分析圖

6.1.3 不同鐵路發車班次

本節所要探討的是不同的鐵路發車班次，對於航空、公路客運以及自用小客車各方面的影響為何。

當鐵路的發車班次提高時，在旅次需求量維持不變的狀況下，當然其餘的大眾運輸發車班次都會下降，如圖 6.10 所示，尤以公路客運最為明顯。如圖 6.9 所示，自用小客車的求解結果仍為限制上限值，鐵路之票價會隨著發車班次的增加

而下降，其餘運具求解結果皆改變不大。

並在研究中發現，鐵路的發車班次應須考量旅次的需求量，在旅次需求量都假設為 50,000 人旅次的情形下，若鐵路的發車班次一直增加，會造成該運具的承載率降低，如圖 6.8 所示，鐵路的承載率從 100%，下滑至八成、六成、五成，最後至只有四成四的承載率，而增加不需要班次又會造成更多的汙染、油耗以及曝光率。圖 6.12 說明當鐵路的發車班次增加，使更多的旅客可以選擇該運具，的確可以明顯降低永續運輸的成本，但若能配合考慮旅次的需求量，則可再降低成本，所以適當的調整鐵路的發車班次是重要的。

圖 6.11 所示，鐵路的收益並未因為班次的增加而持續有上揚的趨勢，原因如圖 6.8 所示，因旅客需求量維持不變，但鐵路班次一直增加，所以鐵路的收益在承載率下降的情形下也有下降的趨勢。這樣的趨勢可提供決策者，再增開運具發車班次時應考慮旅客需求量。

圖 6.13 與 6.15 說明小客車因單位承載量低，所以相對所造成的汙染以及能源消耗成本，就會比大眾運輸高許多；而肇事成本的部份，因公路客運之曝光量大，並承載的旅客較小客車多，故肇事成本較高，如圖 6.14 所示。

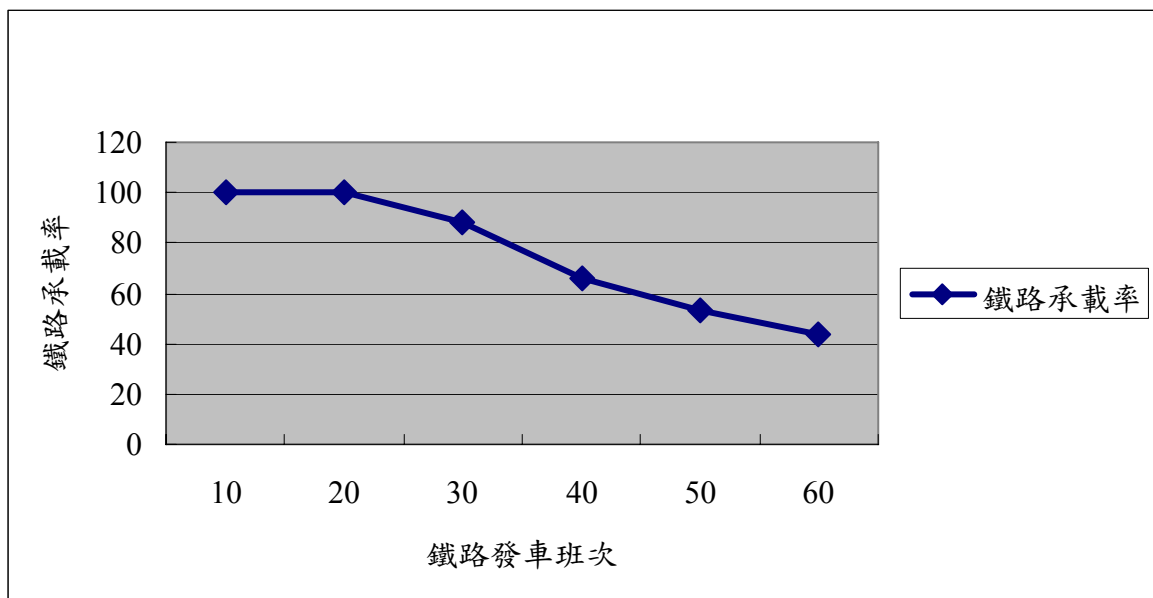


圖 6.8 營運型模式之不同鐵路發車班次下鐵路承載率分析圖

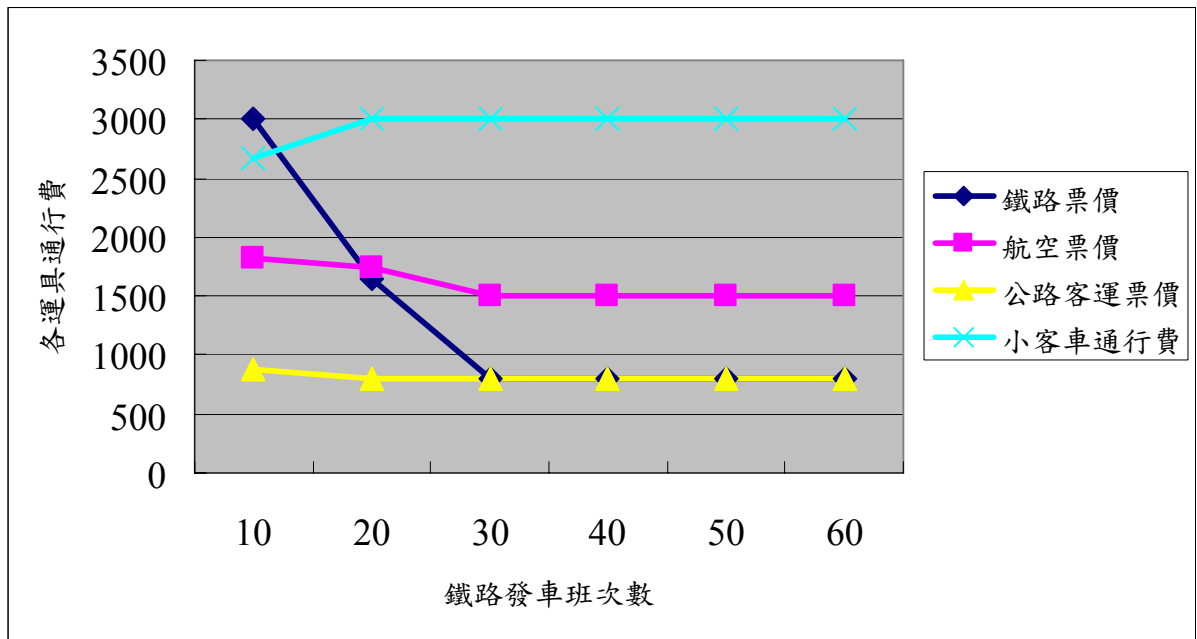


圖 6.9 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運具票價分析圖

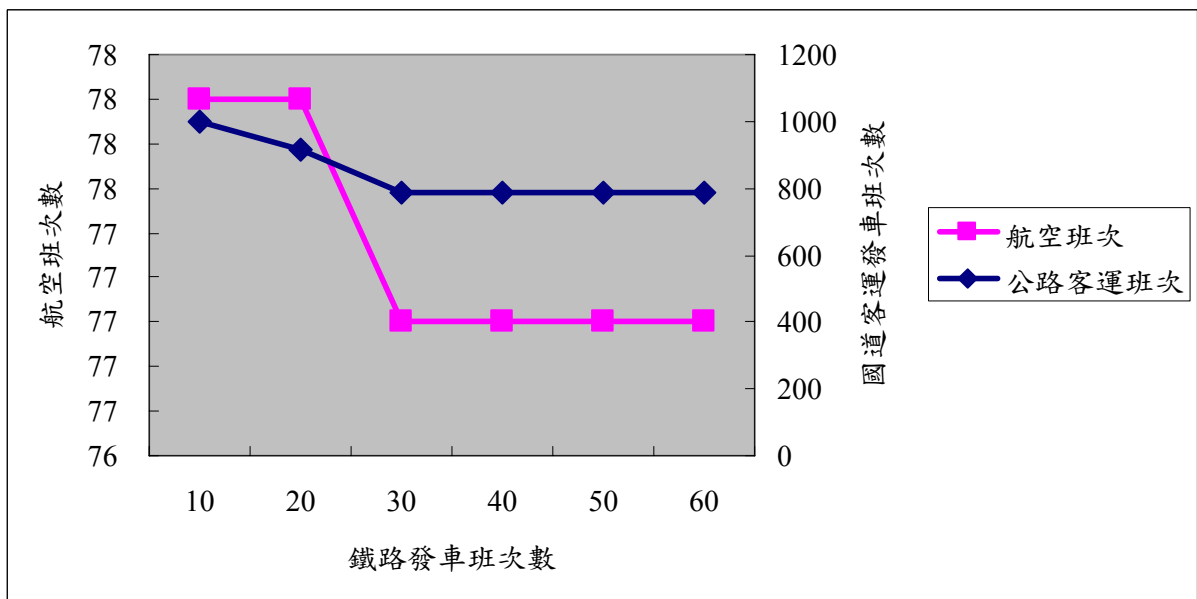


圖 6.10 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運具班次分析圖

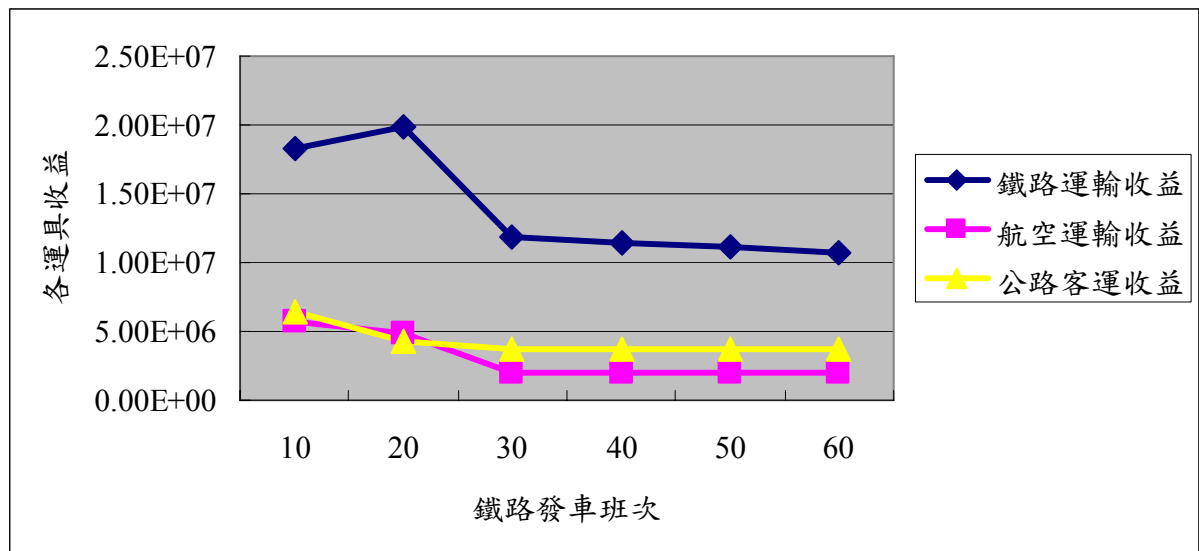


圖 6.11 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運輸業者收益分析圖

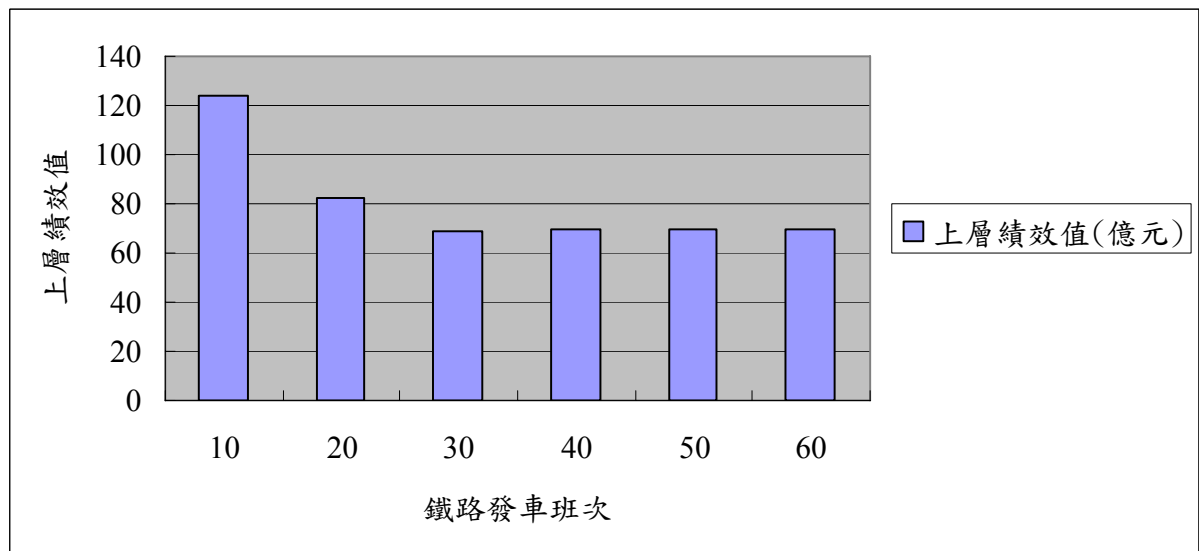


圖 6.12 營運型模式之不同鐵路發車班次下上層績效值分析圖

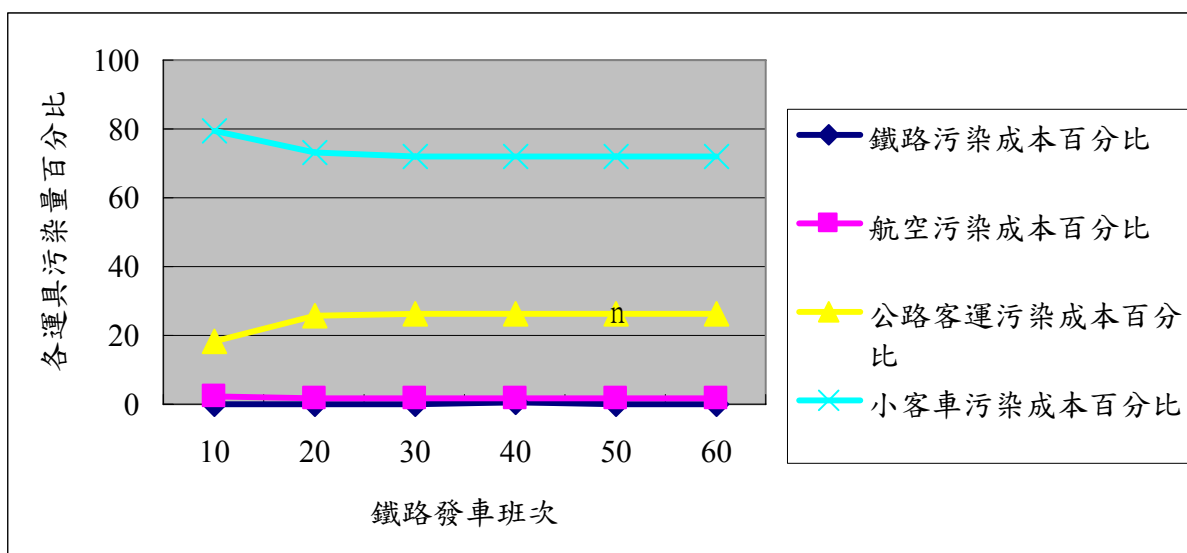


圖 6.13 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運具污染成本分析圖

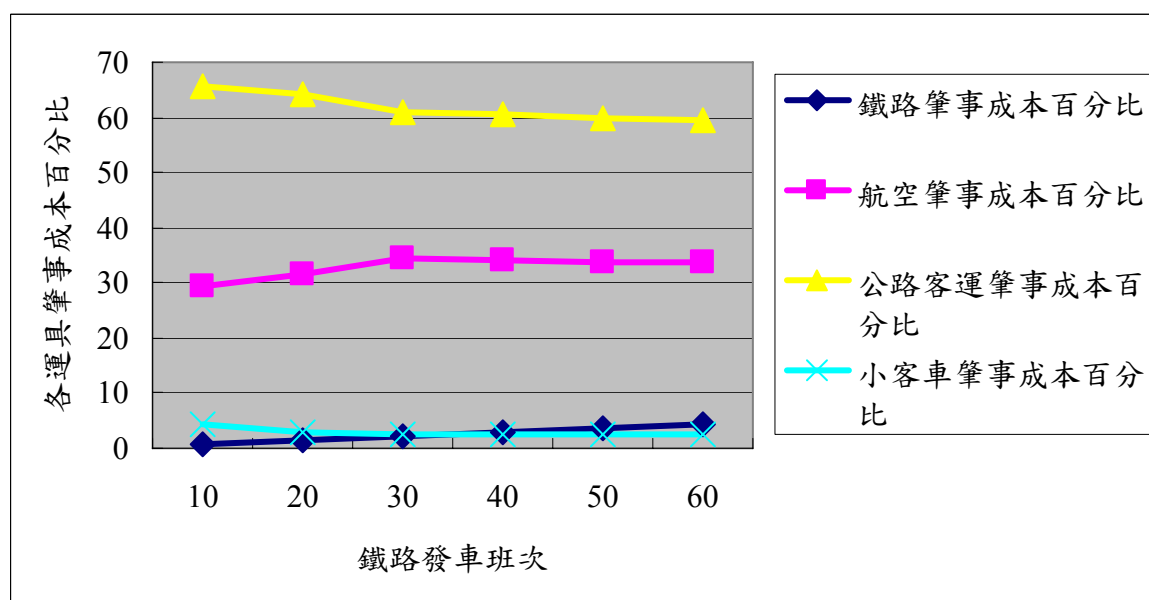


圖 6.14 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運具肇事成本分析圖

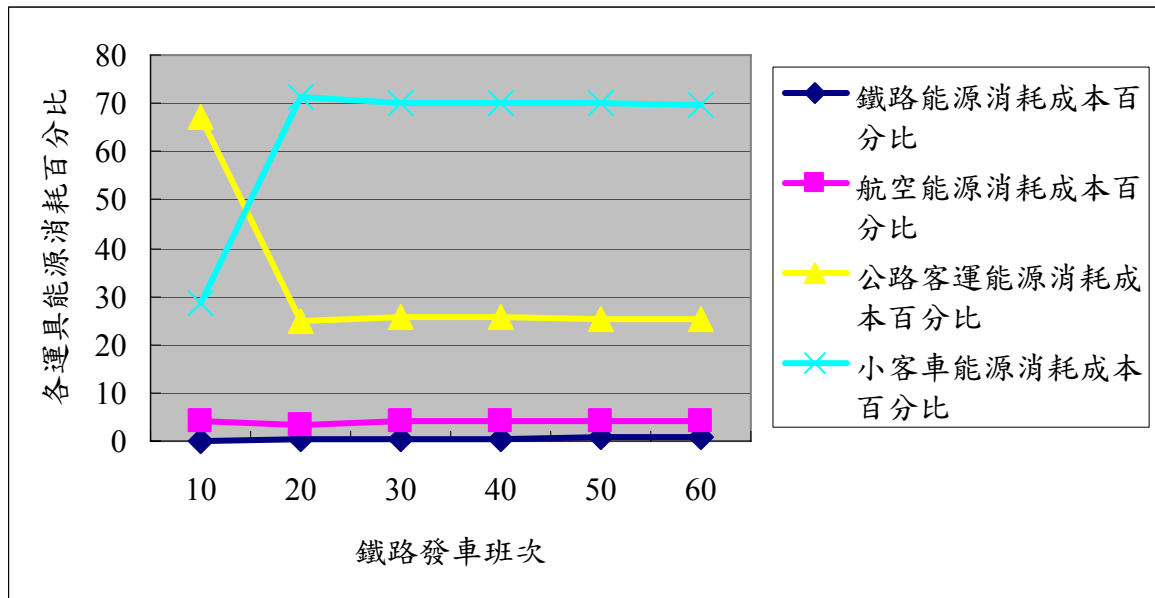


圖 6.15 營運型模式之不同鐵路發車班次下各運具能源消耗成本分析圖

6.2.1 不同旅次需求總數

表 6.2 規劃型模式之不同旅次需求敏感度分析表

說明 旅次需求	染色體
100,000	1 4 0
	鐵路興建起始年：第一年
	航空站興建起始年：第二年
	公路興建起始年：無
150,000	1 0 4 0 0 0 2 0
	鐵路興建起始年：第一年；第七年
	航空站興建起始年：第三年
	公路興建起始年：無
200,000	1 1 1 2 4 0
	鐵路興建起始年：第一年；第二年；第三年；第四年
	航空站興建起始年：第五年
	公路興建起始年：無
250,000	1 3 2 5 1 0
	鐵路興建起始年：第一年；第二年；第三年；第五年
	航空站興建起始年：第四年
	公路興建起始年：無
300,000	1 4 1 1 1 0 1 0
	鐵路興建起始年：第一年；第三年；第四年；第五年；第七年
	航空站興建起始年：第二年
	公路興建起始年：無
350,000	1 1 1 4 1 0 1 0
	鐵路興建起始年：第一年；第二年；第三年；第五年；第七年
	航空站興建起始年：第四年
	公路興建起始年：無

由表 6.2 可知，當旅客的需求量提昇的時候，因原僅有一公路可供旅客選擇使用，旅客僅能選擇搭乘公路客運，或是使用自用小客車來完成旅次，這樣不但會造成因擁塞而造成的旅行時間大量延長，且小客車之大量使用，是極不永續之發展，故當旅客需求量增多時，政府若以追求永續運輸為目標，當興建運輸系統來舒緩旅次。從敏感度分析結果顯示，以興建鐵路為興建運輸系統之首要選擇，因鐵路為為低污染並高承載之運輸系統，興建完成後可以大量疏解旅次。而航空

站的興建也是必要的，因為此運具為旅行時間最短，可提供旅客選擇。

6.3 求解結果與敏感度分析之政策意涵

6.3.1 營運型模式求解結果與敏感度分析之政策意涵

營運型模式針對現有之運輸系統考慮。模式中所探討的運具包含：鐵路、航空、公路客運以及自用小客車。其中鐵路的特徵為高運量低污染，並相對來說為較安全的運具。求解的結果以及敏感度分析結果顯示：當政府管制票價時，對該運具的定價應相對優惠，以票價的優勢鼓勵旅客選擇鐵路。當旅次需求增加時，各項運具的發車班次勢必也會提高，所造成的各項永續運輸成本也會隨之增加，但若增加之旅次的大部分可選擇鐵路運具，所增加的污染、能源消耗與肇事成本等則不會成等比增加。

自用小客車之通行費相對於其他運具應較高。以永續運輸的角度考量，自用小客車為高污染並低運量的運具。目前自用小客車的通行費相較於其他運具之票價為偏低，再加上其便利性皆優於大眾運輸，無等候時間，故許多旅客使用該運具完成旅次。若政府管制其價格，應調高其通行費，大幅降低旅客選擇其運具之意願，以達到永續運輸的目標。而求解出來的結果也顯示小客車的旅次應僅有佔10%左右之旅次，才能朝向永續運輸的發展。

因在本研究裡，鐵路的發車班次為政府所管制，敏感度分析的結果發現，鐵路的發車班次應視旅客的需求量而有適度的調整。若旅客的需求量較少，但鐵路的發車班次很多，會造成雙層浪費，一為鐵路的承載率會下降，造成座位數的浪費；二為多增開一個班次，就會造成各項成本的增加。所以鐵路的發車班次應視需求增加而適當的增加。

6.3.2 規劃型模式求解結果與敏感度分析之政策意涵

規劃型模式求解結果與敏感步分析結果皆顯示：當旅客的需求量大的時候，政府會傾向於平年起始年就開始興建鐵路運輸系統，原因為鐵路為低污染並高承載之運輸系統，於興建完成後可以立即大量疏解旅次，以盡速降低原僅有一公路系統時，小客車造成大量的永續運輸成本。結果也顯示於評估年止時，較多的旅客仍選擇鐵路運輸系統，以達永續運輸的目標。

結果顯示政府於評估年間傾向於前幾年就興建運輸系統原因為：興建運輸系統後，可大量減少旅客的旅行時間。結果也顯示政府於評估年期第八年後，傾向不興建運輸系統。原因為於評估年第一到第七年間所興建的系統，已足夠疏解旅客的需求數量；並因為興建一運輸系統所需經費龐大，故政府評估已能疏解旅客數量之後，即停止興建運輸系統。

第七章 結論與建議

本章節對於本研究提出結論與建議。說明其研究結果與建議後續之研究方向。

7.1 結論

1. 本研究旨在建立以追求永續運輸目標下，雙層之數學規劃模型。分為營運型模式與規劃型模式。
 - (1) 營運型模式：模型中考量之運具有鐵路、航空、公路客運以及自用小客車。以整合型的永續運輸指標成本最小化為上層的目標，其中指標包含了能源的消耗量、空氣的汙染量以及肇事數等，其決策變數為政府管制的各運具之票價；下層的目標為各運輸業者的利潤最大化，其決策變數為各運輸業者所提供的發車班次，並將上層以及下層所求出的票價與班次，以羅吉特模式計算出選擇各運具的旅次，並將選擇各運具之旅次輸入上層以及下層以求出各層績效值。並在於政府(領導者)與運輸業者(跟隨者)，以及運輸業者(領導者)和旅客(跟隨者)之間存在著 Stackelberg 均衡關係；在下層大眾運輸業者存在著發車數量的競爭，這則是 Nash 均衡的關係。
 - (2) 規劃型模式：模型中考量運輸系統興建成本、系統營運成本，以及整合型的永續運輸指標成本為上層的目標，其決策變數為各運輸系統興建年期與各運具之票價；下層的目標為各運輸業者的利潤最大化，其決策變數為各運輸業者所提供的發車班次。
2. 營運型模式與規劃型模式求解出之結果為：
 - (1) 營運型模式求解結果：修正後的營運型模式求解結果為，假設每日的總需求旅次為 50,000，若鐵路班次固定為 40 班/日，則求解出航空的最適班次為 77 班/日，最適公路客運班次為 785 班/日；而最適的鐵路票價為 794 元，最適的航空票價為 1508 元，最適的公路客運票價為 794 元，最適的小客車通行費為 3000 元。在此票價以及提供的發車班次下，使用各運具的比例是：鐵路為 33%；航空為 23.09%；公路客運為 32.97%；以及小客車為 10.94%。此結果顯示在追求永續運輸的目標下，小客車的使用比例應大幅的降低，搭乘大眾運輸的之比例應提高，尤以鐵路為最佳運具。
 - (2) 規劃型模式求解結果：在每日旅次需求量為 150,000 時，政府為改善大量旅次皆選擇小客車，於評估年第一年開始興建第一條鐵路，並於評估年第五年完成，開始分散旅次；於評估年第三年興建航空站，於評估年第七年完成，開始分散旅次；再於第七年興建第二條鐵路，並於評估年第 11 年興建完成。因興建運輸系統之成本高昂，故在評估年間，在同時追求運輸系統興建成本

最小，但又要同時追求永續運輸指標，所以僅興建三個運輸系統。故在評估年期結束時，共有二鐵路系統，一座航空站與一公路系統。結果顯示在追求永續運輸的目標下，因鐵路為低污染高承載的運具，故在選擇興建運輸系統時，仍為興建時為首要考量。

3. 營運型模式與規劃型模式敏感度分析結果顯示：

- (1) 在旅次需求的改變下，因鐵路發車班次固定，並航空的班次受到路線容量的限制，所以許多旅客會選擇搭乘公路客運，但因為選擇搭乘公路客運的旅客增多，發車班次因而增加，其所造成的空氣污染、肇事成本以及能源消耗量也都急速升高。此問題的解決方法，可以為當旅次的需求提升的時候，鐵路的發車班次也應視需求適當的增加，因鐵路載客量高，造成的汙染、肇事以及能源消耗也相對較少；鐵路發車班次的提高，受到最大影響的運具為公路客運以及自用小客車，適當的提高鐵路的發車班次可以降低永續運輸的成本，但若供給已遠過於需求時，則會造成浪費。
- (2) 規劃型模式敏感度分析結果：當旅客的需求量提昇的時候，因原僅有一公路可供旅客選擇使用，旅客僅能選擇搭乘公路客運，或是使用自用小客車來完成旅次，這樣不但會造成因擁塞而造成的旅行時間大量延長，且小客車之大量使用，是極不永續之發展，故當旅客需求量增多時，政府若以追求永續運輸為目標，當興建運輸系統來舒緩旅次。從敏感度分析結果顯示，以興建鐵路為興建運輸系統之首要選擇，因鐵路為低污染並高承載之運輸系統，興建完成後可以大量疏解旅次。

由上述之二模式簡例分析結果可得知，本研究所建立：

- (1) 營運型模式以追求永續運輸為目標之費率管制模式對於改善目前運輸系統不永續發展的情形，以提高自用小客車的通行費，降低旅客選擇小客車的機會；
- (2) 規劃型模式在追求永續運輸的目標下，因鐵路為低污染高承載的運具，故在選擇興建運輸系統時，仍為興建時為首要考量。此結果可供政府決策單位參考，以盡速改善當前不永續發展之情形。惟本研究尚有研究不足之處，建議後續於此一領域之研究方向如下所述：

7.2 建議

1. 本研究僅假設運輸範圍為一運輸走廊，僅單一起迄點。建議後續的研究可擴大研究範圍，討論多點起迄之運輸走廊，亦可研究路網型態的運輸範圍。
2. 本研究對於城際運具的考量，僅探討鐵路、航空、公路客運以及自用小客車四種運具，未將其他之城際運輸運具列入考量，未來研究者可將其他城際運輸運具納入模式中，並供旅客選擇，使模式能更符合實際狀況。

3. 本研究在考量影響旅客選擇運具的因素僅考慮運具之票價、搭乘運具之等候時間以及車內旅行時間，但尚有其他影響因素未列入模式內，例如該運具之及門性等，建議未來研究者可加入更多影響因素，以其更符合旅客選擇行為。
4. 本研究的上層編碼方式，是將大眾運輸系統之興建年期與政府管制之各運具票價共同編於同一染色體。建議後續研究可將其分開編碼，使其運用更為靈活。

參考文獻

1. 日本道路公團(1985)，「設計要領第三集-隧道」
2. 黃安德(1987)，二階線性規劃的求解探討，國立清華大學工業工程研究所作業研究組碩士論文。
3. 台北市政府捷運工程局(1994)，「台北都會區整體運輸需求預測模式（TRTSⅢ）」。
4. 交通部運輸研究所(1998)，「公路汽車客運運價準則之研究檢討」。
5. 張仲杰(1998)，以成對組合羅吉特模式探討城際間運具選擇行為之研究，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文。
6. 馮正民(1999)，「邁向永續運輸」，看守台灣，第一卷，第二期，頁17-23。
7. 飛航管制程序ATP-88(1999)，交通部民用航空局/空軍總司令部頒佈。
8. 交通部運輸研究所(2000)，公路車輛行車成本調查。
9. 劉欽瑜(2001)，永續運輸目標下都會區最適運具比例研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
10. 交通部運輸研究所(2001)，公路容量手冊。
11. 林楨家，馮正民(2001)，「土地使用與運輸路網整合設計之二階規劃模式」，運輸計劃季刊，第卅卷，第四期，頁733-762。
12. 馮正民，林佳宜(2001)，「大眾運輸補貼分配制度與模式之研究」，運輸計劃季刊，第廿七卷，第一期，頁51-75。
13. 鄭義(2001)，交通運輸設施之全成本研究—以台灣高速鐵路為例，國立台北大學資源管理研究所碩士論文。
14. 李治綱，謝汶進(2002)，「應用雙層數學規劃於高速鐵路列車服務設計之研究」，運輸計劃季刊，第卅一卷，第一期，頁95-119。
15. 李治綱(2002)，「永續發展與鐵路系統發展」，捷運技術半年刊，第廿七期，頁1-16。
16. 交通部運輸研究所(2002)，「永續運輸之量化指標研究」，交通部運輸研究所研究計畫。
17. 盧華安，李永苓(2002)，「定期航商共同派船聯營航線規劃之初探」，海運學報，第十一期，頁41-55。
18. 馮正民，林楨家，陳正杰(2002)，「建立城際運輸永續發展指標系統—社會

- 公平面」，中華民國運輸學會第17屆論文研討會，頁719-728。
19. 張學孔，杜雲龍，何承諭(2002)，「捷運內湖線沿線地區永續運輸發展策略」，海峽兩岸都市軌道運輸研討會，頁70-88。
 20. 馮正民，林楨家，蔡琮宇(2002)，「城際運輸永續發展經濟效率面評估指標建立」，中華民國運輸學會第17屆論文研討會，頁1-10。
 21. 許添本(2002)，「綠色交通發展策略規劃—台灣永續美好家園的交通發展方式」，中國土木水利工程學會論文集，頁51-94。
 22. 鄭力寬(2003)，應用雙層數學規劃於鐵路訂價問題之研究，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文。
 23. 許卜仁(2003)，永續運輸指標與策略的整合模式，交大交通運輸研究所碩士論文。
 24. 台鐵會計處(2003)，「台鐵城際運輸及通勤狀況之探討」。
 25. 張亦寬(2004)，以雙層數學規劃建構旅客需求導向之票價模式—以台灣高鐵為例，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文。
 26. 馮正民、邱裕鈞(2004)，研究分析方法，新竹市，建都文化事業股份有限公司發行。
 27. 林國顯(2005)，「台灣運輸系統永續發展之重要議題」，International Conference on Intercity High Speed Ground Transport，頁專題33-專題42。
 28. 鄧瑞軒(2005)，「Nash均衡及Stackelberg均衡運用研析—以中學學生之輔導時間配置為例」，新竹，2005 決策分析研討會。
 29. 池昆霖(2006)，區位途程與易腐性商品排程之研究，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
 30. 陳敬文(2006)，逆供應鏈網路雙層規劃模型，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
 31. Bard, J.F.(1998), Practical bi-level optimization: Algorithms and applications, Kluwer Academic Publishers, London.
 32. Black, J.A., Paez, A., and Suthanaya, P.A. (2002), "Sustainable urban transportation: performance indicators and some analytical approaches," *Journal of Urban Planning and Development*, Vol.128, No.4, pp.184-209.
 33. Black, W.R. (1996), "Sustainable transportation: a US perspective," *Journal of Transport Geography*, Vol.4, No.3, pp.151-159.
 34. Brotcoren, L., Labbe, M., Marcotte, P., and Savard, G., (2000), "A bi-level model

- pand solution algorithm for a freight tariff-setting Problem,” *Transportation Science*, Vol. 34, pp. 289-302.
35. Cao, D., and Chen, M., (2006), “Capacitated plant selection in a decentralized manufacturing environment: a bi-level optimization approach,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 169, pp.97-110.
 36. Chen, H.K., Chou, C.Y. and Tai, C.T. (2004), “A bi-level dynamic signal timing optimization problem,” 2004 IEEE. *International Conference on Networking Sensing and Control*, pp.856-861.
 37. Colson B., Marcotte, P., and Savard, G. (2005), “Bi-level programming: a survey,” *A Quarterly Journal of Operations Research*, Vol. 3, pp.87-107.
 38. Goldman, T. and Gorham, R. (2006), “Sustainable urban transport: Four innovative directions,” *Technology in Society*, Vol. 28, pp.261-273.
 39. Greene, D.L. and Wegener, M. (1997), “Sustainable transport,” *Journal of Transport Geography*, Vol. 5, No. 3, pp. 177-190.
 40. Hejazia, S.R., Memariania, A., Jahanshahloob, G., and Sepehria, M.M. (2002), “Linear bilevel programming solution by genetic algorithm,” *Computers & Operations Research*, Vol. 29, pp. 1913-1925.
 41. Huang, B., Yao, L. and Raguraman, K. (2006), “Bi-level GA and GIS for multi-objective TSP route planning,” *Transportation Planning and Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 105-124
 42. Lan, L. W., Wang, M.T. and Kuo, A.Y. (2006), “Development and deployment of public transport policy and planning in Taiwan,” *Transportation*, Vol. 33, pp. 153-170.
 43. Liu, B. (1998), “Stackelberg-Nash equilibrium for multilevel programming with multiple followers using genetic algorithms,” *Computers Math. Applic*, Vol. 36, No. 7, pp.79-89.
 44. Loo, B.P.Y. and Chow, S.Y. (2006), “Sustainable urban transportation: concepts, policies, and methodologies,” *Journal of Urban Planning and Development*, Vol.132, No.2, pp.76-79.
 45. Oduguwa, V. and Roy, R. (2002), 「Bi-level optimization using genetic algorithm」, IEEE International Conference on Artificial Intelligence Systems , pp. 322-327.

46. Yedla, S. and Shrestha, R.M. (2003), “Multi-criteria approach for the selection of alternative option for environmentally sustainable transport system in Delhi,” *Transportation Research Part A*, Vol.37, pp.717-729.