

國立交通大學

交通運輸研究所

碩士論文

高速公路電子收費即時費率與

駕駛者行為影響之研究

The Study of the Fee of the Electric Toll Collection on Freeway and
Influence of drivers' behavior

研究生：王耀駿

指導教授：許鉅秉 教授

中華民國九十四年六月

高速公路電子收費即時費率與駕駛者行為影響之研究

The Study of the Fee of the Electric Toll Collection on Freeway and
Influence of drivers' behavior

研究生：王耀駿

Student : Yao-Chun Wang

指導教授：許鉅秉

Advisor : Jauh-Biing Sheu

國立交通大學
交通運輸研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Traffic & Transportation
College of Management

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Traffic & Transportation

June 2005

Taipei, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年六月

高速公路電子收費即時費率與駕駛者行為影響之研究

學生:王耀駿

指導教授:許鉅秉

國立交通大學交通運輸研究所碩士班

摘 要

高速公路收費站區域一直是交通瓶頸所在，而電子收費系統——利用電子、電腦、通訊等先進技術，使用路者能迅速自動付費通行，以提升收費作業效率的一種道路收費方式，就是為了改善上述現象所發展出的系統。電子收費系統除了能夠提高車輛運行效率外，還能夠運用「道路定價」的原理，根據道路的即時狀況來訂定費率，以改變駕駛者的行為，並藉此改善高速公路尖峰時間的壅塞問題。由於駕駛者行為與費率之間會彼此互相影響，因此本研究利用雙層數學規劃法來進行模式構建。其中，有關駕駛者行為模式是屬於下層問題，而費率訂定模式則是屬於上層問題，模式構建完畢後接著而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，在求解演算法則是利用拉布蘭尋優演算法來求解下層問題，並將下層所求得之解代入上層問題來求解雙層模式。另外，本研究則針對土城至三鶯交流道及其平面替代道路進行個案分析，分別利用高需求量、中需求量、低需求量之狀況來進行情境分析，以了解不同情境下的最佳費率及駕駛者路徑選擇行為。

關鍵字：電子收費、雙層數學規劃、費率、駕駛者行為



A Study of the Fee of the Electric Toll Collection on Freeway and Influence of drivers' behavior

student : Yao-Chun Wang

Advisors : Dr. Jiuh-Biing Sheu

Institute of Traffic and Transportation
National Chiao Tung University

Absert

The toll areas of freeway have being the traffic bottlenecks. Electronic Toll Collection, however, which used artificial intelligence automatic toll collection of modern communicating and information technology, is just the right system to improve the situation. ETC can not only increase the efficiency of driving, but make use of the theory of road pricing, which makes the fee due to live situation of roads, to change drivers' behavior and improve the traffic congestion in peak time. As a result, drivers' behavior and fee will influent each other, so the study is used to proceed constructing model by Bi-level programming approach. Insides, the drivers' behavior model belongs to lower level, then making fee model belongs upper level. After constructing model done, use sensitivity analysis information to treat as lower level for constraints of upper level to solve. The heuristic algorithms is based on LeBlanc's to solve lower level and brings lower solution into upper level to solve Bi-level programming. In addition, the study focus on Tucheng and Sanying interchanges substitute roads and proceeds single analysis according to high-demand, meddle-demand and low-demand of origin-destination proceeding scenario analysis in order to realize which the best fee and drivers' behavior of route choices in the three situations.

Key words: ETC 、 Bi-level programming approach 、 fee 、 drivers' behavior

誌謝

終於到了論文的最後一個步驟了，其實對我來，撰寫誌謝可能比寫論文本文還要困難吧，千頭萬緒的，不知道要從哪裡開始寫起。二年的研究所生活經歷過太多大大小小的事情，不論是學業或是生活上，受到太多人的幫助了。

其實自己本身在大學時期並不是一位很注重課業的學生，因此上了研究所之後，常常深怕自己趕不上其他人的進度，但是在所有老師精闢的教導之下，使我真的學習到非常多的專業知識，由其是指導老師許鉅秉老師規定的原文 paper，讓我英文閱讀的能力倍增。在論文口試期間，感謝我的大學導師胡大瀛老師，真是太有緣了，沒想經過了數年之後，居然是由您來口試我的論文；另外也要感謝張美香老師，雖然您把我釘得滿頭包，但是也讓我的論文更加的完整。所辦的洪小姐跟柳小姐，妳們真的是大好人，學校的各項規定真是辛苦你們了。計中的楊小姐，這四個學期都在計中討生活，實在是麻煩你太多事情了，再次感謝妳。

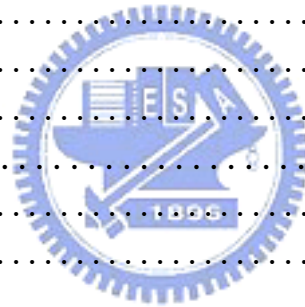
在研究所兩年的時光，感謝各位同學帶給我美好的回憶，首先是許家班的各位，萬事通的小章，你不要再眯眯眼了；喜歡偷笑的詠仔，你真是跟表護士有明星臉啊；XD 哪裡的偉成，鬍子刮一下吧；跳跳人孟釗，不要再去錢櫃賺清潔費了啦；假泰勞蘇剛，有寫到你了，記得幫我印論文。此外北交高高踢、乾弟弟建仁、狐狸眼的大姐、OL 的卡妹加、正直的孟慧、雙胞胎姐妹花維方、北交最酷的男人阿拉豪、肌肉男呱呱，還有一些其他人等，沒寫到的就是單純的懶得寫，不是沒有想到你們喔！

最近相認的表弟小遙，還有你的那一些死黨，巫秋、小威、八百跟黃杰，跟你們認識的時間雖然不長，但是感謝你們這一群壞蛋陪我鬼混，讓我見識到了台北的另外一面。陽明高中的球友林叔叔、林育生、A 龍跟怪獸們，感謝你們陪我打球紓解課業上的壓力。國中的死黨黃志璋，雖然你每天跑來找我去漫畫王看漫畫，讓我的論文進度嚴重落後，但是還是感謝你啦，畢竟最新的漫畫都有跟上進度囉。跟我住在一起的室友們，以報效國軍的親弟弟王小拓為首，他的牽手豬頭陳昀秀、好媽媽型的林玉華、帥帥帥的蕭翔俊、史上第一呆的文馨跟你們生活真的很愉快；還有五年感情的家麟，雖然我們之間有問題存在，但是還是感謝你陪我走過這段日子。

特別感謝我的父母親大人，謝謝你們這二十幾年來無怨無悔的付出和養育，讓我在生活和經濟上均無後顧之憂，得以專心完成學業。最後，謹將此篇論文獻給我的父母、家人、師長、朋友、同學和許許多多幫助過我的人。

目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌 謝.....	iii
目 錄.....	iv
圖目錄	v
表目錄	vi
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 研究範圍與限制.....	2
1.3 研究內容與方法.....	3
1.4 研究步驟與流程.....	5
第二章 文獻回顧.....	7
2.1 道路定價模式.....	7
2.2 交通指派模式.....	12
2.3 雙層數學規劃.....	21
2.4 小結.....	22
第三章 模式構建.....	23
3.1 研究模式構建.....	23
3.2 上層訂價模式構建.....	26
3.3 下層問題.....	27
3.4 雙層數學模式求解演算.....	32
3.5 小結.....	33
第四章 案例分析.....	34
4.1 案例說明分析.....	34
4.2 情境分析.....	45
4.3 費率與流量關係.....	52
4.4 小結.....	57
第五章 結論與建議.....	58
5.1 結論.....	58
5.2 建議.....	59
參考文獻.....	61



圖目錄

圖 1.1 高速公路路況與駕駛者行為關係	4
圖 1.2 雙層數學規劃法之結構	4
圖 1.3 研究流程	6
圖 2.1 最佳道路定價之價格	8
圖 2.2 典型的旅運成本—流量曲線	15
圖 2.3 拉氏(LAGRANGE)函數與旅次量之關係	18
圖 2.4 均衡指派法之作業流程(王慶瑞, 運輸系統規劃)	20
圖 4.2 土城至三鶯交流道路網簡圖	37
圖 4.3 一般道路旅行時間與流量關係	38
圖 4.4 平坦路段在基本狀況下速率與流量關係圖	39
圖 4.5 平面道路速率與流量之關係	39
圖 4.6 路段流量示意圖一	47
圖 4.7 路段流量示意圖二	49
圖 4.8 路段流量示意圖三	52
圖 4.9 情境一費率與流量關係圖	53
圖 4.10 情境一費率與目標函數關係圖	53
圖 4.11 情境二費率與流量關係圖	54
圖 4.12 情境二費率與目標函數關係圖	55
圖 4.13 情境三費率與流量關係圖	56
圖 4.14 情境三費率與目標函數關係圖	56

表目錄

表 4.1 替代路徑.....	35
表 4.2 各路段行駛距離.....	35
表 4.3 各路段自由流旅行時間及容量.....	40
表 4.4 國道交通量統計表(資料來源：國道高速公路局).....	41
表 4.5 起迄對需求量一	46
表 4.6 情境一敏感度分析資訊表	46
表 4.7 情境一之最佳費率及各路段均衡流量表	46
表 4.7 起迄對需求量二	48
表 4.8 情境二敏感度分析資訊表	48
表 4.9 情境二之最佳費率及各路段均衡流量表	49
表 4.9 起迄對需求量三	50
表 4.10 情境三敏感度分析資訊表	50
表 4.11 情境三之最佳費率及各路段均衡流量表	51



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

近年來由於國內車輛快速成長，高速公路的容量早已不敷使用，拓寬車道或新闢道路的做法無法有效減緩路況惡化的速度。有鑑於此，利用先進的通訊及資訊技術，達到交通管理的目的，已經成為世界各改善交通的普遍做法。

收費站區域一直是高速公路的瓶頸所在，由於傳統的人工收費方式(找零、回數票、投幣)無法紓解尖峰時間的車流量，因此常常造成收費站前車輛大排長龍的現象，而過了收費站後，大量車輛併回車道所造成的車流交織行為，亦是造成壅塞與事故的潛在危險地區。利用先進通訊及資訊技術的電子收費系統(Electronic Toll Collection, ETC)，就是為了改善上述現象所發展出的系統，傳統人工收費方式每個車道容量由每小時通過 600 輛(找零車道)至 900 輛小型車(回數票車道)，實施電子收費之後，每車道容量可達 1450 輛至 2200 輛小型車，容量可提高一倍以上，能夠大幅縮短車輛等候時間及減少收費孔道，對於提昇收費站運行效率有很大的貢獻。

電子收費系統除了能夠提高車輛運行效率外，還能夠運用「道路定價」(Road Pricing)的原理，以改善高速公路尖峰時間的壅塞問題。道路定價將車輛使用者所產生的外部成本內部化，如車輛產生之空氣污染、噪音，以及車輛過多道路壅塞時所造成之擁擠成本，對於這些成本加以收費，讓車輛使用者承擔這些成本。由於電子收費系統對於收費費率的改變有很大的彈性，且收費對於車流運行的影響程度低，因此使道路定價的實施變得較為可行。

以國內高速公路系統來說，未來能夠利用道路定價原理，實施尖離峰差別費率，如上下班時間及年節連續假日，實施高費率，其他離峰時間，實施低費率或甚至免費，以調節尖離峰的車流量，避免尖峰時段過度擁擠。此外，目前各大都會區內均缺少收費站，許多短程旅次均免費使用高速公路，道成都會區尖峰時間壅塞情況嚴重，未來可在都會區內加設電子收費站，由於電子收費對於車流運行

的影響程度低，因此不會造成負面影響，如此達到使用付費的原則，都會區的壅塞情況應能獲得改善。

1.2 研究範圍與限制

本研究以匝道電子收費系統為研究對象，即依駕駛者所行駛之距離來加以徵收相關道路使用費用，並預期發展出能夠反映旅客對於不同行車費率的選擇行為之模式。本研究的研究範圍與限制如下：

1. 首先本研究假設已知電子收費系統、收費方式、道路狀況以及各個起訖點的旅運需求，並且針對旅客掌握了完全資訊與否；假使旅客掌握了完全的資訊，那麼旅客會選擇效用最大的旅次路線，其選擇為確定性(Deterministic)；如果旅客所掌握的資訊並不完全，那麼旅客的選擇行為則具有隨機性(Stochastic)，而本研究將探討旅客選擇是具有確定性(Deterministic)的選擇行為。
2. 道路收費依據國外的實務經驗顯示主要是為兩種目的：一種是為回收興建道路所投入的工程成本，是基於財務上的目的，兼具使用者付費之色彩；另一種則是以降低社會成本為目的，藉由徵收「擁擠費」的方式來改變擁擠地區車輛的交通行為，以舒緩交通擁擠為目標。因此模式建構上便包含滿足營運需求及社會成本最小之限制。
3. 在現實中可以發現當費率改變時，旅客之「出發時間(Departure time)」以及「路徑選擇(Route choice)」將會隨之改變，但一般而言，若旅客已經出發則僅只會改變選擇之路徑。而本研究即針對已出發之旅客來做分析探討，以了解即時費率資訊對於行駛中之旅客所產生的影響。

1.3 研究內容與方法

本研究主要的內容是要建立一套能夠反映高速公路即時變動費率影響行駛中之駕駛者之行為模式，其中道路收費價格與駕駛者行為之關係如圖 1.1 所示，由於費率變動與駕駛者行為其中存在著領導者及跟隨者的關係 (Leader-follower)，因此可以利用雙層數學規劃法 (Bi-level Programming Approach) 來進行模式構建。其中，有關駕駛者行為模式是屬於下層問題 (Lower Level)，而費率定訂模式則是屬於上層問題 (Upper Level)，其研究方法則簡述如下：

1. 道路定價模式

傳統的道路定價模式是藉由運輸經濟學的觀念，將外部成本 (External Cost) 內部化，使駕駛者承擔原本已轉移到非旅次產生者身上的社會成本以及強加在其他道路使用者身上的成本 (例如交通之延誤或擁擠)。但是由於在模式建構時須假設需求曲線 (Demand Curve) 及邊際成本曲線 (Marginal Cost Curve)，在實務上操作不易，因此本研究希望建構有別於傳統利用經濟學觀念之道路定價模式，而是利用營運者本身益本比最大化原則來予以構建。

2. 反映駕駛者行為模式

在反映駕駛者行為的模式方面，本研究預期利用均衡指派法 (Equilibrium assignment) 來進行，並將上層道路定價模式所求解之道路通行費率 (Road Toll Pattern) 變數代入下層駕駛者行為模式，以進一步求解行進間駕駛者之駕駛行為，並將此一行為變數回饋至上層道路定價模式之中重覆運算求解。

雙層數學規劃法之結構型式則如圖 1.2 所示：

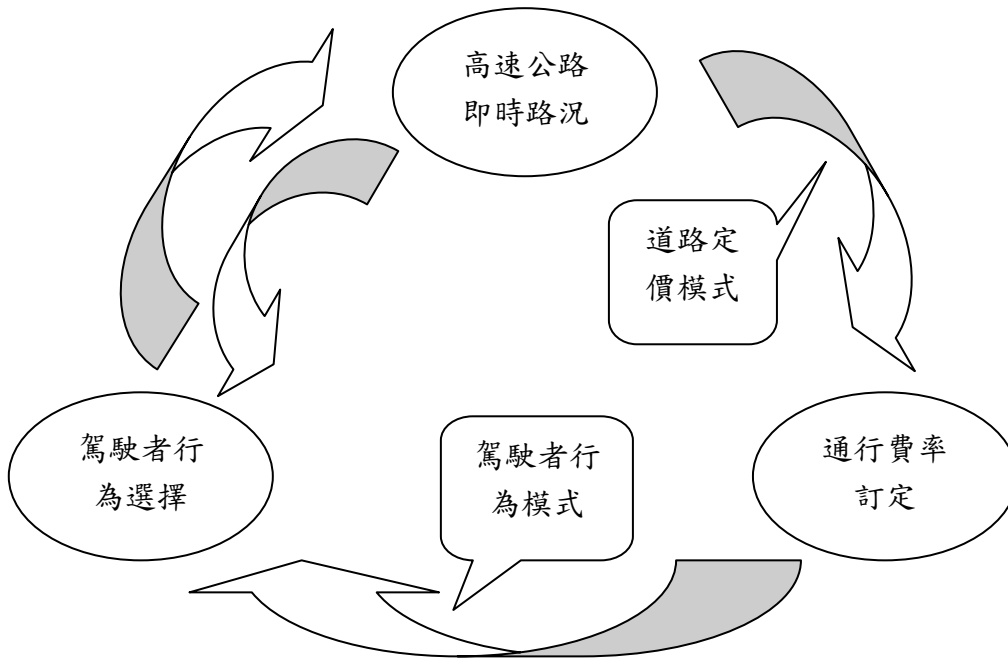


圖 1.1 高速公路路況與駕駛者行為關係

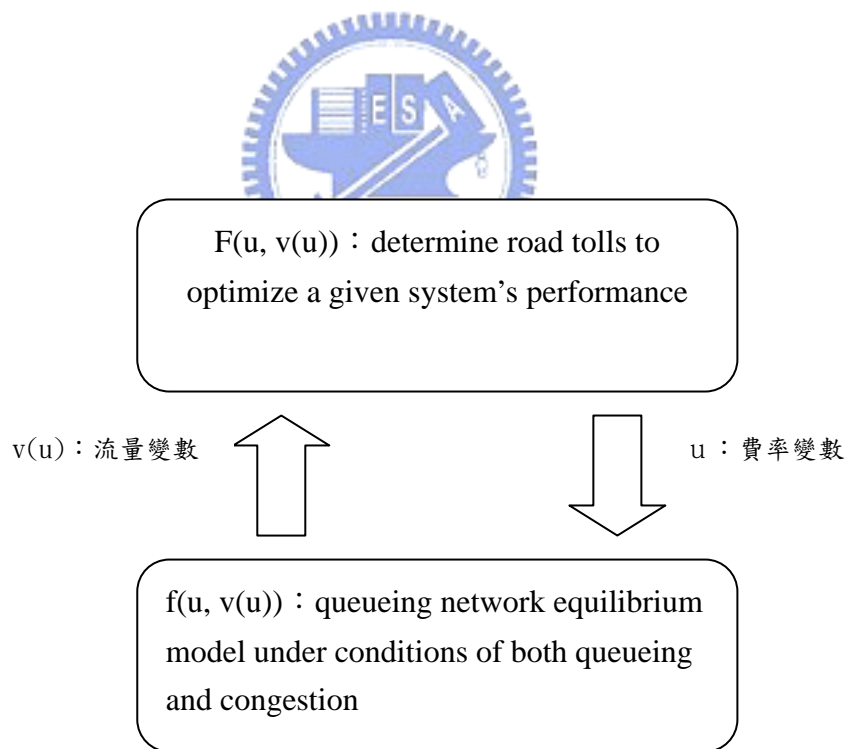


圖 1.2 雙層數學規劃法之結構

1.4 研究步驟與流程

本研究的研究步驟簡述如下：

1. 訂定研究主題

依序說明本研究之研究緣起與目的、研究範圍與限制、研究內容、研究方法等。

2. 相關文獻回顧

回顧有關道路定價理論(The Theory of Road Pricing)之相關文獻，以及有關路線選擇行為(Route Choice Behavior)分析與雙層次數學規劃法(Bi-level Programming)的國內外之期刊、論文。

3. 模式構建

建立雙層次數學規劃(Bi-level Programming)的模式，其中上層(Upper Level)問題為求取即時路況最適道路定價模式，下層(Lower Level)問題則為反映即時費率變動之駕駛行為之模式。

4. 個案分析

構建三鶯至土城交流道之雙層數學規劃模式，同時收集相關的報告資料進行分析，並測試模式與演算法之適用性，在模擬時針對高、中、低流量進行流量及費率分析。

5. 費率及流量敏感度分析

將車流量對費率進行敏感度分析，求得不同費率下之相對應流量，以得知費率與流量之關係。

6. 結論與建議

整理研究心得，並提出具體的結論與建議。

本研究之研究流程如圖 1.3 所示：

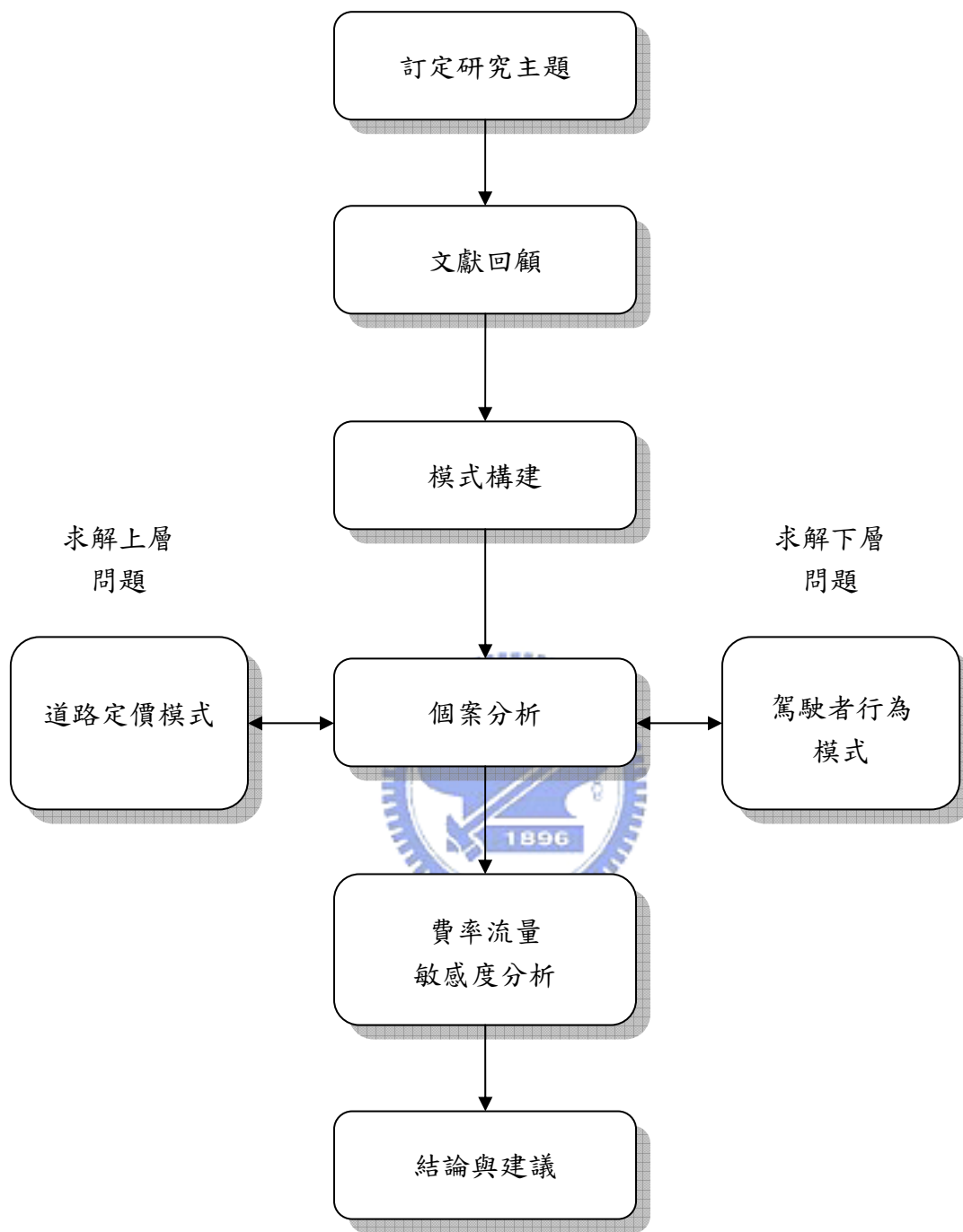


圖 1.3 研究流程

第二章 文獻回顧

本章節將對一些有關雙層數學規劃、道路定價模式以及交通指派之相關國內外文獻進行回顧及整理。

2.1 道路定價模式

道路定價(Road Pricing)是為針對特定的道路，對使用者徵收通行費用，主要有兩個目的，一為減輕「道路擁擠」狀況，所謂「道路擁擠」，是指同一時間內，每當一新增加的旅次進入一條道路致使原本已在此條道路上之用路者其車速下降，旅行時間增加，進而旅行成本增加；另一方面則是為回收興建道路所投入的工程成本，是基於財務上的目的，兼具使用者付費之色彩。

道路定價的理論基礎乃源於福利經濟學，藉著經濟學上均衡理論來促使道路達到最佳流量，提高能源使用效率及降低空氣污染的程度。著名經濟學者Pigou於1920年的著作「Economics of Welfare」中首先提出擁擠稅的理論概念，他以兩條交通狀況不同的替代性道路為例子，說明若有一條道路無擁擠現象，而另一條道路有擁擠現象，則若對於已擁擠之道路收取擁擠稅則可以降低交通需求並同時降低社會成本；而後Knight(1924)、Walters(1961)等學者沿續其精神，即認為用路者在決定其旅行行為時，並不知道(或無法知道)其對他人所造成的某些外部成本，故其亦未將其所造成的此種成本納入考量，而擁擠費的收取即是將此種外部成本內部化。廣義而言，所謂的外部成本可分成二類：首先是使用者對「非使用者」所產生之空氣污染、噪音、震動、危險等負面影響，這些成本是由駕車者對非旅次產生者所加諸其身的；其次為使用者對「使用者」的成本(如交通延誤或擁擠)，也就是每一個駕駛者對其它駕車者的影響作用。每種機動車輛旅次對這兩種成本都會產生某種程度的貢獻，但是駕車者在作旅運決策時並未考慮。一般而言，他們皆只考慮到實際上所承擔的一般化成本(Generalized Cost)，如汽油成本、車輛損耗和旅行時間成本等。因此駕駛人在預估旅次成本時，便同易

造成低估。

依圖 2.1 所示，假設目前道路只有一條，且最初道路上並無交通量，現在車輛以同樣的時間間隔進入道路，且車流為單一車種(以 PCU 表示)，當低流量時車子皆以自由速度(Free Speed)行駛。這些旅次的成本是以一般化成本來表示。如圖 2.1 所示，當交通量在 Q_1 前，尚未有擁擠發生，表示成本仍呈常數(Constant)狀態，一旦路上交通量超過臨界流量 Q_1 時，則車輛間彼此會開始互相影響，而使得車流速度減緩，並產生所謂的社會邊際成本(Marginal Social Cost, MSC)。因為在低速下將需要較多的時間與成本，且駕駛者以低速前進，往往產生頻繁的起動、停車及加減速來通

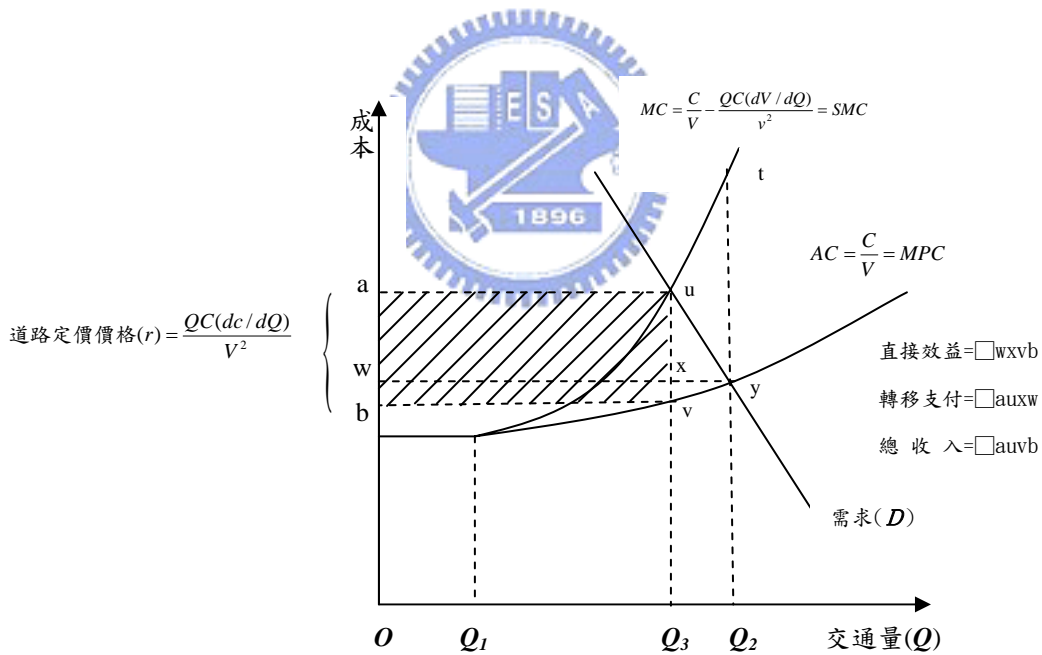


圖 2.1 最佳道路定價之價格

過擁擠道路，因此旅次之產生乃由駕車者依照旅次所產生的利益(由需求曲線反映)和造成的成本來決定是否值得從事此一旅次。圖 2.1 中之平均成本曲線(AC)

是反映道路上每一潛在使用者的私人邊際成本(Marginal Private Cost, MPC)，AC 曲線在開始發生擁擠時上揚，使交通量緩和。當駕駛者在需求 $D > AC$ 時，仍將繼續產生旅次，一直到 Q_2 的交通量為止；但在超過此點(Q_2)之後，旅次產生者之一化成本將超過其所獲得的利益，因此額外的交通量將無法產生，因此均衡交通量為 Q_2 。

然而點 Q_2 並非是最佳的交通量與成本組合，原因是 AC 曲線並未將邊際駕車者對其他道路使用者所造成的擁擠成本計算在平均支付成本之內。即每個開車者皆只考慮道路上的實際擁擠水準，並未對自己加入車流所產生的額外社會成本計算在內。

此外，如圖 2.1 所示，在 Q_2 時，道路使用者之社會邊際成本超過其所獲得的效益，亦即 $MC > D$ ；而在流量 Q_3 時，道路使用之需求(D)正好等於道路的邊際成本(MC)，因此要使道路使用者認其所造成的擁擠成本便需透過道路訂價的方式。而道路定價的價格則設在 MC 和 AC 之差距的地方，如圖 2.1 所示。若對道路使用者收取” r ” 的費用，則擁擠程度將會降低，同時可獲致道路之最適流量 Q_3 。假設在道路上有 Q 部車，其平均行駛距離為 L ，行車速率為 V ，而其每小時旅行成本(包括行車成本和時間成本)為 C ，則其旅行總成本(TC)為：

$$TC = \frac{QCL}{V} \quad (2.1)$$

若令 $L = 1$

$$\text{則 } TC = \frac{QC}{V} \quad (2.2)$$

至於平均成本(AC)則為：

$$AC = \frac{TC}{Q} = \frac{C}{V} \quad (2.3)$$

而邊際成本(MC)則為：

$$MC = \frac{dTC}{dQ} = \frac{C}{V} - \frac{QC}{V^2} \frac{dV}{dQ}$$

$$= \frac{VC - QC(dV/dQ)}{V^2}$$
(2.4)

由於一般道路使用者僅感受到平均成本(或稱為私人邊際成本) C/V ，因之道路定價之價格(Road Price, r)，或應課徵之擁擠稅，可定義為：

$$r = MC - AC = -\frac{QC}{V^2} \frac{dV}{dQ} = \frac{\partial AC}{\partial Q} \times Q \geq 0$$
(2.5)

如在圖 2.1 所示，若任由道路使用者一直加入車流，直至其平均成本等於需求(即旅次之效益)，則此時會有過多的流量，但卻有 Q_3uyQ_2 面積的效益及 Q_3utQ_2 的成本，如此會產生社會福利的損失(ΔW)或稱無謂損失(Deadweight Loss)，如圖 2.1 所示：

$$\Delta W = Q_3utQ_2 - Q_3uyQ_2 = uty$$
(2.6)



若我們採用道路定價，且令 $MC=D$ ，而使車流限制在 Q_3 之數量，則反而可獲得上述之社會福利(ΔW)。因此，課徵擁擠稅不但可減少擁擠程度，同時可增加社會福利。

從 Pigou 提出擁擠稅的概念之後，其後的研究均從最適道路定價政策著手，即邊際成本定價法，但邊際成本定價法對路網上所有道路均依其擁擠程度加以課取費用，而此費用即為邊際成本與私人平均成本之差，而事實上欲對所有道路課徵擁擠稅是難以實行且亦為不可能的，因而基於最適定價法施行上的困難及政治因素的考量等因素，Marchand(1968)首先利用一般均衡模式進行次佳(second-best)定價法的分析。此後 McDonald (1995)與 Verhoef(1995)以及後來

之研究，如 Yang and Lam(1996)、Yang and Bell (1997)及 Liu and McDonald(1999)均改以次佳定價法為發展主軸。

之後理論的發展尚有從不同之角度去看待擁擠定價的問題，如之研究均只從空間維向(space-dimension)去研究，即只考慮用路者之路徑(path)選擇，而未考量時間維向(time-dimension)，即考慮用路者對出發時間(departure time)的選擇，但於 1999 年 Liu 及 McDonald 便以一簡單之二道路及二時段的模式將空間維向及時間維向二者合併考慮，並同時設定三種收費體制：次佳道路定價政策(second-best congestion pricing model)、最適道路定價政策(first-best congestion pricing model)、不收費政策。


國內於一般路網之道路擁擠費率定價方面的發展並不多見，但在有關於瓶頸路段擁擠收費之研究方面有藍武王、張勝雄及賴禎秀等學者，其研究方向與 Arnott, Andre 及 Robin(1994)等相容，並且已有不錯之成果。

鍾淑華(民國 69 年)運用訂價方式減輕過度的道路需求，並以定價方法提高道路空間的效率利用與緩和道路擁擠程度。其希望利用估計出的結果並參考目前交通擁擠的程度以決定一最適的擁擠稅率水準，做為道路管理當局調整道路使用費時的參考。其結論指出準公共財與純公共財的最大區別在於前者具有消費上的外部性，即邊際使用者的加入會影響原來消費者，而其影響的方式是降低公共財服務的品質。其中擁擠成本即是公共財品質降低的表現型態。本篇研究並非求取均衡解，亦即其並無將需求函數考慮進去，僅考慮成本函數而已。

顏上晴(民國 83 年)利用經濟學上使用者付費的觀念對擁擠情形加以打定其所應負擔的費用，藉以提高高速公路的空間利用效率和緩和其擁擠的程度。此篇研究之模型乃為「均衡短期」，考慮成本函數、需求函數。行車成本分行駛成本

與時間成本(時間價值/行車速度)，以效用函數來做消費者之運具選擇。其結論顯示在短期內運輸系統供給面無法擴充的情形下，以低成本的運輸管理策略來改善道路擁擠問題是應採行的，而擁擠稅的課徵即是此管理策略的最佳方法。但此篇研究並為考慮替代道路存在的情形，且其需求函數乃為運具選擇模式，並非不同彈性用路者之需求函數。

溫惠美(民國 81 年)以實施地區通行證為例進行道路定價策略分析，據以研擬在多個目標考慮下：道路使用者的旅行成本最小化、管制區內各種污染物排放總量最小、道路系統的服務水準最大化及維持管制區內大眾運輸系統服務水準(為管制費率的上限指標)等互有取捨的不同通行費標準。結論顯示管制費率對整體環境之影響是正面的，而低管制費與高管制費所代表的政策意義不同，可由決策者視其政策目的而定。



鄭淑穎(民國 85 年)研究討論多組起迄目的之用路者，分析比較不同擁擠稅的課徵策略對被課稅的道路及其平行道路的車流造成的影響以及兩路上全體用路者之社會福利變化情形。乙篇研究同時考慮三個政策：不收費政策、最佳道路定價政策及次佳道路定價政策。其結論顯示，擁擠稅不但受本身起迄車流量之影響外，亦受使用同一道路區間的其他起迄車流量以及其替代道路(省道)的起迄車流量之影響。本篇研究同時考慮了兩條道路及不同起迄目的之用路者，但其模型研究及結果討論部份對不同彈性之用路者並無深入擬探討，且其所選用之成本函數是無線性，較不符實際現象。

2.2 交通指派模式

交通指派是將兩交通區間的交流旅次分配到運輸系統的路網上的作業程序，主要的交通指派方式有轉移曲線指派法(Diversion Curve Assignment)、全數指派法(All-or-Nothing Assignment)、容量限制指派法(Capacity Restraint

Assignment)、多路徑指派法(Multipath Assignment)及均衡指派法(Equilibrium Assignment)。以下就本研究會運用到之全數指派法及均衡指派法加以回顧。

2.2.1 全數指派法

全數指派法的基本假設是駕駛者都選擇其起迄點間之最小阻抗路線行駛，代表旅運阻抗的因素包括旅運距離、時間、成本，甚至包括舒適等，或這些因素的組合，其中以旅運時間最常使用，即以最短時間路徑代表最小阻抗係數。

全數指派法的作業程序是先將運輸系統路網編碼後存入電腦中，然後計算各交通區至其他交通區的最短路徑，再將兩交通區間的交流旅次數全部指派在其最短路徑上，最後將各連線的分派旅次數累積加總而得該路段的估計交通量。

全數指派法之作業方式是將兩交通區間的交流旅次全部分派在該兩交區間的最短路徑上，而不考慮各路段的容量問題，因此又稱無容量限制指派法。無容量限制之全數指派法雖然簡單，容易瞭解使用，但在一般路網指派的使用結果，往往與實際情形有很大差距，主要的原因是全數指派法沒有考慮路線的交通狀況將隨著交通量的增加而逐漸擁擠，造成指派的交通量可能超過路段容量的不合理情形。此外，在起迄兩交通區間，如果不同的路線的旅運時間只有些微差異時，全數指派法仍將全部交通量分派在最短時徑上，但實際情況是駕駛者可能很難去確認那一條路線的旅運阻抗最小，所以差異不大的路線都會有駕駛者選用。另外一個事實是長距離的旅次往往較偏愛高速公路，但全數指派法只考慮最短路徑，忽略這種實際的交通行為特性。

由於全數分派法不能反應實際交通行為的缺點，在運輸規劃程序中，很少直接使用於路網交通量預測，但在特殊使用上，無容量限制指派法可用來探討瓶頸路段，決定主要運輸走廊區位，以做為路網改善方案研擬之依據。

2.2.2 均衡指派法

傳統的全數指派法是以最短路徑做為交通分派的準則，但事實上兩條旅運時間幾近相等的路線，其交通狀況並不會遵循最短時徑原則。而均衡指派法系根據歐佐普(Wardrop)所提出的使用者最適化指派原則，假設交通擁擠函數為交通流量的嚴格遞增函數，後經拉布蘭(LeBlanc)證明，將其轉換成非線性數學規劃問題，再利用電腦技術獲得均衡解。此種方法在都市運輸規劃上，已證實較其他交通指派法能獲得較佳結果，而不必增加電腦使用時間。

交通指派之方法，一般係根據 1952 年歐佐普所提出的兩個分派原則；即使用者最適化分派原則與系統最適化分派原則，分別說明如下：

1. 使用者均衡原則

根據歐佐普理論，滿足使用者最適化的均衡條件有二：

- (1) 任何一對起迄點當完成分派後，若有兩條或兩條以上的路線為使用者所選用時，則該兩條或兩條以上的路線，其旅運時間(成本)均相等。
- (2) 任何一對起迄點，當完成指派後，凡未被使用者選用之路線，其旅運成本必大於被使用者選用路線之旅運成本。

由上述之均衡條件，可知路線的指派係依使用者個人認為最少旅運成本，將兩交通區間之運輸需求分派於路網中。

2. 系統均衡原則

歐佐普的第二個均衡原則，乃基於系統整體的觀點，即假定「當路網達到均衡狀況時，其平均旅運時間(或成本)為最低」。

由於此一原則，可使路網的總旅運成本最低，因此將是社會上最有效率的運輸型態，然這是一個理想狀態，非經使用者彼此合作或政府機構運用影響力來安排使用者的旅行路線將無法達成此一結果，而實際上，使用者路線選擇行為，多係出自於個人利益最大的立場。然而，在實際路網分析時，仍以使用者最適化原則進行交通指派，較為大眾所認同。

均衡指派法之使用者均衡原則，若以數學式表示如下：

$$C_{pij} \begin{cases} = C_{ij}^*, \forall T_{pij}^* > 0 \\ \geq C_{ij}^*, \forall T_{pij}^* = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

其中，

C_{pij} ：由 i 區到 j 區使用路徑 p 的旅運成本

C_{ij}^* ：由 i 區到 j 區最小旅運成本

T_{pij}^* ：由 i 區到 j 區使用路徑 p 的交通量

由於路線上的旅運時間(成本)係交通流量之函數，如圖 2.2，復基於追求使用者平均旅運成本總和最小化的觀點，上式(2.7)可以另一非線性數學規劃模式表示如下，式中目標函數為所有交通流量在各路段的旅運成本之總和(圖 2.2 斜線部份區域)，當目標函數為最小時，即可謂之路網達成使用者均衡，而兩個限制式則代表不固定之交通流量矩陣及流量非負值的限制。

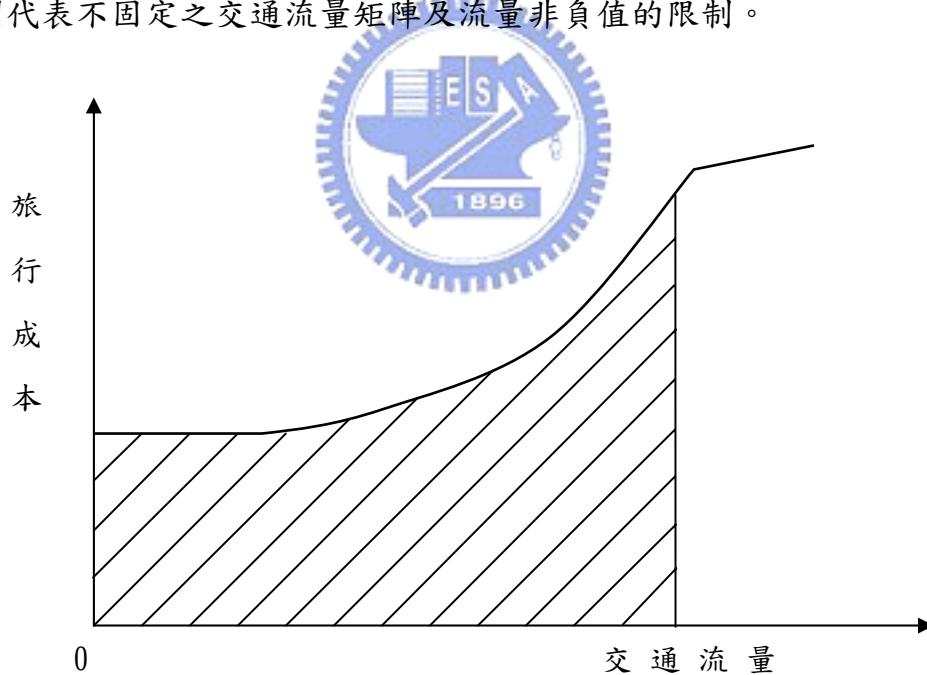


圖 2.2 典型的旅運成本—流量曲線

$$\min Z = \sum_a \int_0^{V_a} C_a(V) dV \quad (2.8)$$

$$s.t. \sum_p T_{pij} = T_{ij}$$

$$T_{pij} \geq 0$$

其中，

V_a ：為路段 a 之交通流量

$C_a(V)$ ：路段 a 交通流量為 V 時，相對的旅運成本

為證實(2.8)模式，足以代表使用者均衡情形，茲證明如下；首先，依先前定義可知：

$$V_a = \sum_p \sum_i \sum_j \delta_{pij}^a T_{pij} \quad (2.9)$$

$$C_{pij} = \sum_a \delta_{pij}^a C_a(V) \quad (2.10)$$

上式中，

$\delta_{pij}^a = 1$ ，當路段 a 在 i 至 j 的路徑 p 上時

$\delta_{pij}^a = 0$ ，其他

同時，假定路段 a 的旅運成本隨其交通流量之增加而增加，亦即：

$$\frac{dC_a(V)}{dV_a} \geq 0 \quad (2.11)$$

則目標函數 Z 對 T_{pij} 求解一階偏微分如下：

$$\frac{\partial Z}{\partial T_{pij}} = \frac{\partial}{\partial T_{pij}} \left[\sum_a \int_0^{V_a} C_a(V) dV \right]$$

$$= \sum_a \left[\frac{d}{dV_a} \left(\int_0^{V_a} C_a(V) dV \right) \right] \frac{\partial V_a}{\partial T_{pij}}$$

Z 為交通量 $\{V_a\}$ 之函數，亦即為一路徑流量 $\left\{ \frac{\partial V_a}{\partial T_{pij}} \right\}$ 之函數，

∴ 由(2.12)式可知：

$$\frac{\partial V_a}{\partial T_{pij}} = \delta_{pij}^a$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dV_a} \int_0^{V_a} C_a(V) dV &= C_a(V_a) \\ \therefore \frac{\partial Z}{\partial T_{pij}} &= \sum_a C_a(V_a) \delta_{pij}^a = C_{pij} \end{aligned} \quad (2.12)$$

再將目標函數對 T_{pij} 求解二階微分如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 Z}{\partial T_{pij}^2} &= \sum_a \frac{\partial C_a(V_a)}{\partial T_{pij}} \delta_{pij}^a \\ &= \sum_a \frac{dC_a(V_a)}{dV_a} \frac{\partial V_a}{\partial T_{pij}} \delta_{pij}^a \\ &= \sum_a \frac{dC_a(V_a)}{dV_a} \delta_{pij}^a \delta_{pij}^a \end{aligned}$$

由(2.11)式與對 δ_{pij}^a 之定義，可知：

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial T_{pij}^2} \geq 0 \quad (2.13)$$

顯示目標數 Z 為 $\{T_{pij}\}$ 的凸函數(Convex Function)，且其斜率(一階導數)等於其路徑 p 的旅運成本。

利用 Lagrange 乘數可將(2.8)換式，寫成下列形式，

$$\min L(T_{pij}, \lambda_{ij}) = Z(T_{pij}) + \sum_i \sum_j \lambda_{ij} \left(T_{ij} - \sum_p T_{pij} \right) \quad (2.14)$$

則函數 L 的最小值為：

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{ij}} = T_{ij} - \sum_p T_{pij} = 0 \quad (2.15)$$

假定函數 L 最小值時之交通流量為 T_{pij}^* ，因 $T_{pij} \geq 0$ ，故最小值應發生在 $T_{pij}^* = 0$

或 $T_{pij}^* > 0$ 兩種情形下，如圖 2.3 所示：

在圖 2.3(A)中，因最小值發生在 $T_{pij}^* = 0$ ；

$$\therefore \frac{\partial L}{\partial T_{pij}} \geq 0 \quad (2.16)$$

而在圖 2.3(B)中，最小值發生在 $T_{pij}^* > 0$ ；

$$\therefore \frac{\partial L}{\partial T_{pij}} = 0 \quad (2.17)$$

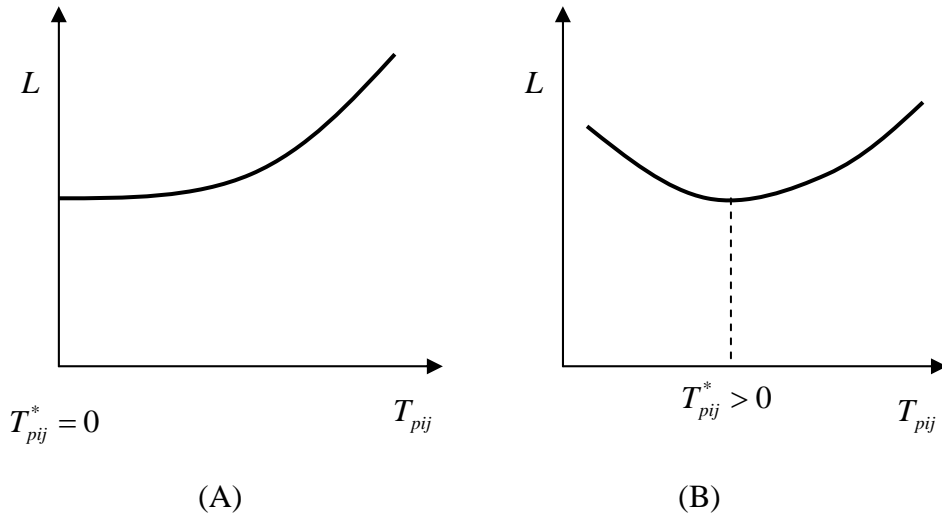


圖 2.3 拉氏(Lagrange)函數與旅次量之關係

此外，由(2.14)式，亦知

$$\frac{\partial L}{\partial T_{pij}} = \frac{\partial Z}{\partial T_{pij}} - \lambda_{ij} = C_{pij} - \lambda_{ij} \quad (2.18)$$

因此，Lagrange 乘數 λ_{ij}^* ，在函數 L 最小值時必須滿足：

- (1) $\lambda_{ij}^* \leq C_{pij}$ ，當 $T_{pij}^* = 0$ 時，對所有 pij 而言，
- (2) $\lambda_{ij}^* = C_{pij}$ ，當 $T_{pij}^* > 0$ 時，對所有 pij 而言，

換言之， λ_{ij}^* 在路段上有流量時， λ_{ij}^* 必須等於其路段旅運成本，而在路段上無流量時， λ_{ij}^* 則必小於或等於其路段旅運成本，因此， λ_{ij}^* 必等於其最小旅運成本，即：

$$\lambda_{ij}^* = C_{ij}^*$$

故在 L 函數為最小時，其路徑交通量 $\{T_{pij}^*\}$ 具有下列特性：

(1) $C_{pij} \geq C_{ij}^*$ ，對所有 $T_{pij}^* = 0$ ，

(2) $C_{pij} = C_{ij}^*$ ，對所有 $T_{pij}^* > 0$ ，

滿足(2.7)式歐佐普均衡條件，且 L 函數最小值，亦即目標函數 Z 最小值，因此，模式(2.8)證實足以代表使用者最適化之均衡模式。

在求解演算法上，上述已證明使用者均衡可以非線性數學規劃模式表示，但因非線性數學規劃模式求解困難，用於複雜的路網將受限於電腦容量的限制，顯得無能為力。以往應用使用者均衡理論的各種交通指派方法，因受到計算、分析能力之限制所衍生出的許多簡化求解方法，效果均不理想。

此一問題直到拉布蘭(LeBlanc, 1975)提出一套有效率求解非線性規劃的方法才解決。此法可節省大量的運算時間，並可處理較複雜的路網，使均衡指派具有可行性。簡言之，拉布蘭尋優解法係透過不斷地以全數指派法及借助黃金分割法(Golden-Section Search)進行單向度尋求，以逼近最佳解，而在反覆運算過程中，判斷收斂的指標可以前後兩次指派的結果變化的百分比，均小於一設定之收斂水準來衡量。或用目標函數的變動，是否低於既定的收斂水準而判定收斂與否。有關其求解流程，如圖 2.4。

在上述的流程圖中，路網中各路段流量調整方程式如下：

$$V_a^n = (1 - \lambda)V_a^{n-1} + \lambda U_a^n \quad (2.19)$$

其中：

V_a^n ：第 n 次覆算結果之路段 a 流量

V_a^{n-1} ：第 $n-1$ 次覆算結果之路段 a 流量(即前一次均衡指派於此路段之流量)

U_a^n ：依第 n 次覆算全數指派之路段 a 流量

λ ：模擬使路網成本極小化之參數，其值介於(0~1)之間

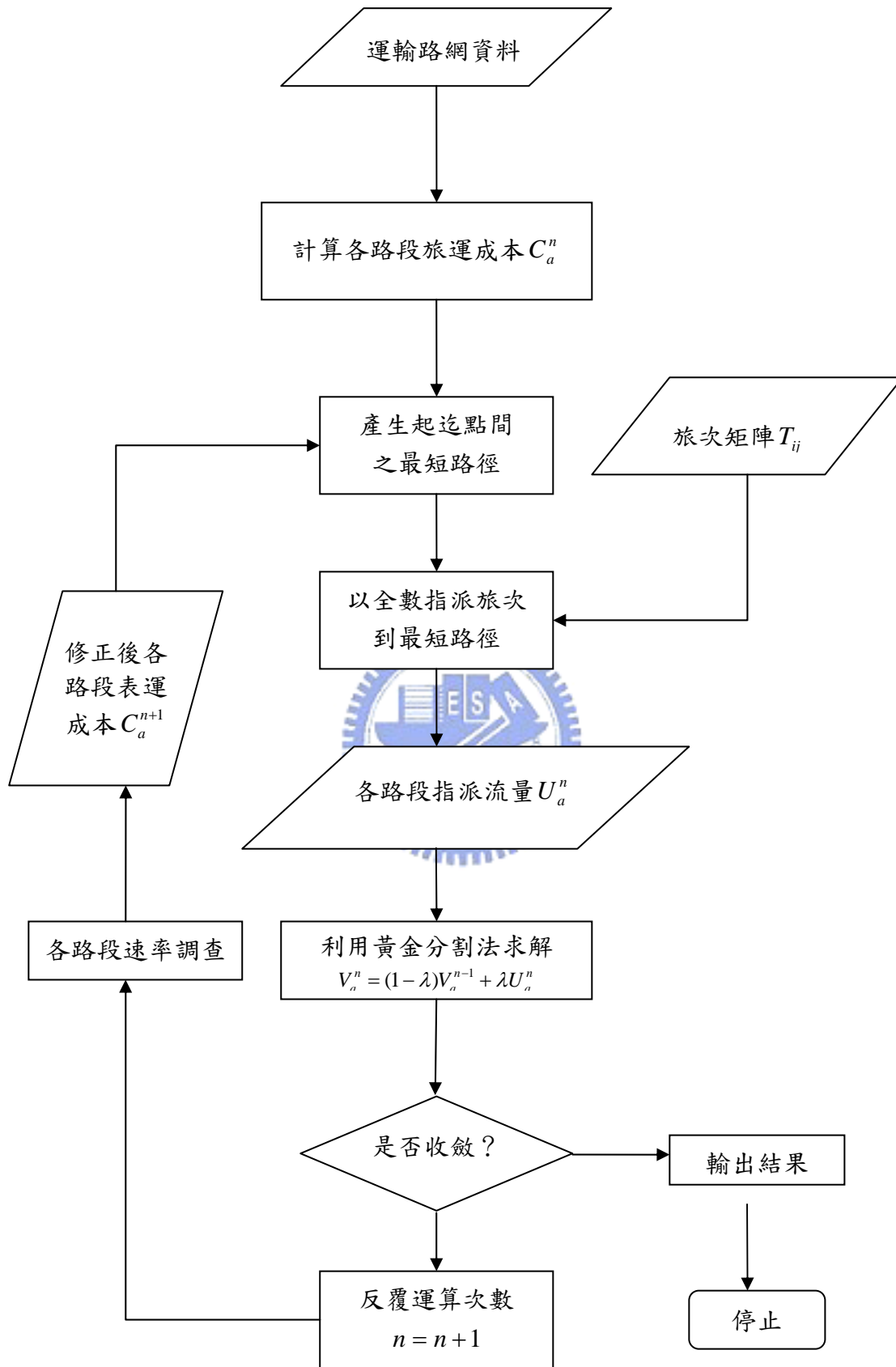


圖 2.4 均衡指派法之作業流程(王慶瑞，運輸系統規劃)

2.3 雙層數學規劃

本研究主要的目的是探討反映道路價格改變對駕駛者行為之影響，也就是運輸系統的價格與旅運行為之間經過交互作用的影響。因此上述的問題可以應用雙層次數學規劃法(Bi-level Programming Approach)來演算。其中上層問題(Upper Level)為道路定價問題，下層問題(Lower Level)為交通指派問題，而雙層次數學規劃的問題將介紹如下。

雙層次數學規劃問題(Bi-level Programming)，考慮了兩個決策者，其目標函數有兩個，分別為 $F(x, y)$ 與 $f(x, y)$ ，其中 x 為上層決策者的決策變數， y 為下層決策者的決策變數，則此雙層次數學規劃問題可以表示如下：

$$(UP) \quad \max_x F(x, y) \quad (2.26)$$

$$s.t. \quad x \in X \quad (2.27)$$

其中 y 可由下層(LP)規劃問題求得

$$(LP) \quad \min_y f(x, y) \quad (2.28)$$

$$s.t. \quad y \in Y \quad (2.29)$$

大體而言，雙層次數學規劃一般是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 。一般來說方案 x 集合並非只有一個，因此上層的決策者可以依據下層決策者所制定的各種方案做進一步的調整，因此上述的雙層次數學規劃問題，是考慮了上層決策者具備下層決策者制定其決策的相關完整資訊，制定最佳的決策方案 x ，已使得其目標函數 $F(x, y)$ 最大化。

雙層次數學規劃的特性如下：(Bials and Karwan, 1984; Wen and Hsu, 1991)

1. 互相影響的決策者具有顯著的階級式結構(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。下層決策者是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。

在雙層數學規劃求解方面，當上層定價問題包含非線性(Non-linear)限制式時，Yang and Yagar(1994)使用了敏感度分析基礎 (Sensitivity Analysis Based, SAB)演算法來求解上層定價問題；但在某些情況下，上層問題並無包含非線性限制式時，則可利用 Suwansirikul(1987)及 Friesz(1990)所提出的均衡分解最佳 (Equilibrium Decomposition Optimization, EDO)演算法來求解。

2.4 小結

本研究將以雙層數學規劃的概念，構建一個能反映流量變動的費率設計模式，其中上層問題是以營運者的觀點，構建一益本比最大化之費率模式，而下層問題則為一路網均衡指派模式，藉高速公路主線當時之費率來指派路網流量，並利用敏感度分析的資訊來進行整個研究模式之求解。並利用敏感度分析以找出費率及主線流量之相互關係，最後再分別針對高、中、低流量來進行案例分析

第三章 模式構建

本研究考慮到當價格決策者(decision-maker)決定高速公路通行費率之後，道路之使用者便會依照所訂定的費率來決定是否選擇使用高速公路，因此其中存在著領導者與跟隨者(Leader-flower)的關係，故在模式構建的時候利用雙層數學規劃法來將兩者做一連結的動作。其次，以往的研究中，道路使用者的行為模式分為空間維度(space dimension)及時間維度(time dimension)來考量，即路徑選擇及出發時間的不同來構建模式，而本研究之研究對象為行進間之駕駛者，故不考慮時間維度。

3.1 研究模式構建

在開始構建模式之前，必須先確認問題的型態，以了解整個模式的架構，同時根據各項限制條件，對問題先做一基本假設，並對模式中相關數學符號加以定義，相關說明如下。



3.1.1 基本假設

為簡化交通路網系統，使本研究之模型建構能更為簡單、合理，因此設定相關假設，並說明如下：

1. 道路使用者除了高速公路之外，尚有另一條距離相似之平行替代路徑以供駕駛者選擇。
2. 假設此兩條道路為完全替代，而行車品質則以高速公路較佳。
3. 高速公路收費方式為按照行駛距離而徵收相對應通行費的方式。
4. 駕駛者可以完全接收到正確的資訊。
5. 駕駛者會選擇對他本身來說效用最大的路徑，且為確定性而不為隨機性的。
6. 假設短期之內，道路的容量皆固定不變，即容量為已知且為常數。
7. 因模式中僅考慮到空間維度，故假設每一時階之需求量为已知常數，即需求為

固定需求而不為彈性需求。

8. 假設已經出發之駕駛者在得知價格之相關資訊之後，僅為改變行走的路徑，而不會延遲上匝道的時間(即模式中僅考慮空間維度而不考慮時間維度)。
9. 模式中考慮「次佳道路定價策略」，即只有高速公路徵收通行費用，而替代道路則不徵收。
10. 行車品質以高速公路為佳，即對道路使用者而言擁有較高的效用值。

3.1.2 符號說明

在構建模式之前，為了方便理解，先對模式中所出現的數學符號先加以定義：

u_a^N ：在 N 時階時，路線 a 所徵收之費率

v_a^N ：在 N 時階時，路線 a 上所有的車流量

h_a ：路線 a 之路徑長度

A ：所有路線之集合

A^* ：收費路線之集合

C_a ：路線 a 之道路容量

u_{\min} ：為維持基本營運所需徵收之基本費率

u_{\max} ：費率最大值

E ：維持基本營運所須之成本

M ：收費道路之總延車公里

K_a^N ：在 N 時階時，行駛於路線 a 之旅行成本

α ：旅行時間參數

β ：旅行距離參數

D^N ：在 N 時階時之總需求量



T_{ija}^N : 在 N 時階時，從起點 i 到迄點 j 經由路線 a 之旅次量

T_{ij}^N : 在 N 時階時，從起點 i 到迄點 j 之旅次量

K : 所有路段成本向量

V : 所有路段流量向量

P : 所有起迄點需求量向量

G : 路徑與路段投影矩陣

B : 起迄點與路徑投影矩陣

C : 路段容量上限

λ, τ, γ : 拉氏乘數

3.1.3 最適訂價問題架構

在高速公路最適費率的問題方面，本研究最主要目的是要求出能夠符合使社會成本最小化之費率，因此上層問題的決策變數便是高速公路的里程費率 u ；而我們所考慮到的限制式則為費率所能改變的幅度，所以營運者的模式架構如下：

最大化 營運者的目標 (u)

限制式 費率幅度的限制

在下層模式方面，在高速公路費率 u 已知的情形之下，駕駛者會選擇最適合之旅行路徑，也就是駕駛者以總旅行成本最小化為目標，而決策變數為即時費率 u 下之各路徑流量 v ，限制式則為流量守恆限制式，其架構如下：

最大化 營運者的目標 (u)

限制式 費率幅度的限制

由上述可知，對於費率訂定者而言，必須要知道駕駛者對於費率改變之可能反應，又有可能達到決策者的目標，因此在研究上層問題的同時，必須要將下層的問題視為上層問題的限制式，才能反映出費率改變路徑選擇行為，所以在雙方會互相影響之下，可利用雙層數學規劃模式來求解，以下為雙層數學規劃的架構：

最大化 營運者的目標 (u)
 限制式 費率幅度的限制
 最大化 營運者的目標 (u)
 限制式 費率幅度的限制

3.2 上層訂價模式構建

在雙層數學規劃法解最佳定價問題時，首先考慮上層(upper-level)結構模式。在本研究中所考慮到的上層問題為道路的定價問題。一般而言，道路定價問題之目標可分為社會福成本最小以及財政收入最多兩種，本研究則同時針對社會成本最小及財政收入最多之目標來構建模式。

首先考慮高速公路實施電子收費之後，主線上的車輛數為系統所能即時收集到的資料；其次與社會福利有關之參數為道路之服務水準，可藉由道路的容量加以計算求得，故目標函數應包含主線車輛數量及道路的容量變數：

目標函數：

$$\begin{aligned}
 \max F(u, v) &= \frac{F_1^N}{F_2^N} \\
 F_1^N &= \sum_{a \in A^*} u_a^N v_a^N h_a \\
 F_2^N &= \sum_{a \in A} v_a^N t_a^N(v_a^N)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

上式中， F_1^N 為營運總收益，由於所徵收之費率是隨行駛里程來徵收，所以模式最後一項乘上路線的旅行里程； F_2^N 為社會成本，即在 v_a^N 的流量之下的總旅行時間，因此利用益本比最大化原則，將兩目標連結起來成為上層模式的目標式。

s.t.

$$u_a^N \geq u_{\min} \quad (3.2)$$

$$u_a^N \leq u_{\max} \quad (3.3)$$

$$u_{\min} = \frac{E}{M} \quad (3.4)$$

$$u_a^N \geq 0 \quad (3.5)$$

第(3.2)式為維持正常營運之下，所應徵收之費率最小值；(3.3)式則為合理的費率則大值；第(3.4)式表示，高速公路按里程收費之內容中，所徵收之費用最少應是足以維持高速路上良好路面品質，以及確保有關行車安全考量上各種軟體設備皆能正常運作的基本使用費以高速公路足以支付整修、養護工程及營運之總支出費用來作為每部車輛行駛高速公路每一公里所應收取基本使用費，其中 u_{\min} 為每車每公里徵收之費用， E 為高速公路營運基本費用及養護工程費， M 則為主線上總延車公里數；(3.5)式為非負限制式。

3.3 下層問題

下層問題為路徑指派問題，即為在上層問題決定之費率下，駕駛者會如何選擇其旅行路徑，因此在目標函數方面必須考慮到包含費率之成本項。相關模式構建如下述。

3.3.1 下層路網均衡模式構建

本研究之下層模式為路網均衡模式。下層模式之行為決策者為道路之使用

者，依前述之假設，所有道路使用者皆能完全得到正確的價格資訊，此時系統會根據上層模式所訂定之通行費率進而達到均衡的狀態。本研究所考慮之均衡狀態為駕駛者之總旅行成本為最小：

目標函數：

$$\min f^N = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a^N} K_a^N(v_a^N) dv \quad (3.6)$$

$$K_a^N(v_a^N) = \alpha v_a^N + \beta h_a + u_a^N h_a$$

s.t.

$$\sum_a T_{ija}^N = T_{ij}^N \quad (3.7)$$

$$\sum_{ij} T_{ija}^N = v_a^N \quad (3.8)$$

$$T_{ija}^N \geq 0 \quad (3.9)$$

$$v_a^N \leq C_a \quad (3.10)$$



其中(3.7)、(3.8)式為流量守恆限制式，(3.9)式為非負限制式，(3.10)式為容量限制式，也就是路線流量不可以超過容量上限。

在構建完此非線性規劃數學模式後，我們接著探討如何推導出最佳解。模式的最佳解必定符合 KKT(Karush-Kuhn-Tucker conditions)的條件限制，也就是 KKT 條件為非線性數學規劃問題之最佳解的必要條件。

欲推導出模式之最佳解之前，必須先證明此一模式為凸型函數，當目標函數為凸型函數時，此模式必有一最佳解存在，凸型函數之推導過程如下：

已知：

$$\sum_i \sum_j T_{ija}^N = v_a^N$$

$$\Rightarrow \frac{\partial v_a^N}{\partial T_{ija}^N} = 1$$

假設駕駛者的旅行成本會隨著流量的增加而跟著增加，則：

$$\frac{dK_a^N(v)}{dv_a^N} \geq 0$$

則目標函數 f^N 對 T_{ija}^N 求解一階偏微分如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial f^N}{\partial T_{ija}^N} &= \frac{\partial}{\partial T_{ija}^N} \left(\sum_a \int_0^{v_a^N} K_a^N(v) dv \right) \\ &= \sum_a \left(\frac{d}{dv_a^N} \int_0^{v_a^N} K_a^N(v) dv \right) \frac{\partial v_a^N}{\partial T_{ija}^N} \end{aligned}$$

f^N 為交通流量 v_a^N 之函數，亦即為一路徑流量 $\frac{\partial v_a^N}{\partial T_{ija}^N}$ 的函數，

$$\Rightarrow \frac{d}{dv_a^N} \int_0^{v_a^N} K_a^N(v) dv = K_a^N(v_a^N)$$

$$\therefore \frac{\partial v_a^N}{\partial T_{ija}^N} = 1$$

$$\therefore \frac{\partial f^N}{\partial T_{ija}^N} = \sum_a K_a^N(v_a^N)$$

再將目標函數對 T_{ija}^N 求解二階微分如下：

$$\frac{\partial^2 f^N}{\partial T_{ija}^N{}^2} = \sum_a \frac{\partial K_a^N(v_a^N)}{\partial T_{ija}^N} = \sum_a \frac{dK_a^N(v_a^N)}{dv_a^N} \times \frac{\partial v_a^N}{\partial T_{ija}^N} \geq 0$$

顯示目標函數 f^N 為 T_{ija}^N 之函數，即此一非線性規劃有最佳解，且其斜率等於其路徑 a 的旅行成本。

在進行完模式為凸型函數證明之後，接著將此一非線性模式改寫成拉氏函數 (Lagrange Function)，並列出其 KKT 條件，同時為了方便推導，將模式改寫成矩陣型式，推導過程如下：

假設旅行成本會隨著交通流量的增加而增加，則：

目標函數：

$$\min f(v) = \sum_a \int_0^{v_a} K_a(v) dv = \sum_a K_a v_a = K^T V \quad (3.11)$$

限制式：

$$V = GT \quad (3.12)$$

$$P = BT \quad (3.13)$$

$$T \geq 0 \quad (3.14)$$

$$C \geq V \quad (3.15)$$

將(3.12)式代入目標函數可得到新的目標函數與限制式如下：

目標函數

$$\min T^T (G^T K) \quad (3.16)$$

限制式

$$P = BT \quad (3.17)$$

$$T \geq 0 \quad (3.18)$$

$$C \geq V \quad (3.19)$$

其拉氏函數如下：

$$L(T, \lambda, \tau, \gamma) = T^T (G^T K) + \lambda^T (P - BT) - \tau^T (C - GT) - \gamma^T T \quad (3.20)$$

其中 λ, τ, γ 為拉氏乘數，其 KKT (Karush-Kuhn-Tucker conditions) 條件如下：

$$\nabla_T L = G^T K - B^T \lambda^* + G^T \tau^* - \gamma^* = 0 \quad (3.21)$$

$$\gamma^{*T} T = 0 \quad (3.22)$$

$$\tau^{*T}(C - GT^*) = 0 \quad (3.23)$$

$$T \geq 0 \quad (3.24)$$

$$C - GT^* \geq 0 \quad (3.25)$$

$$P - BT = 0 \quad (3.26)$$

$$\gamma^* \geq 0 \quad (3.27)$$

$$\tau^* \geq 0 \quad (3.28)$$

由(3.21)式我們可以得到：

$$\Delta g^* = B_\tau^T \Delta z - G^T \Delta \tau \quad (3.29)$$

其中 $g = G^T K$

由(3.26)式可得：

$$\Delta P = B \Delta T \quad (3.30)$$



再由(3.29)、(3.30)兩式可得敏感度分析如下：

$$\begin{bmatrix} \Delta g^* \\ \Delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla^2 f(T^*)_\tau & B_\tau^T \\ B_\tau & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_\tau \\ \Delta z \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta T_\tau^* \\ \Delta z^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta g \\ \Delta P \end{bmatrix}$$

其中

$$J_{11} = (\nabla^2 f(T^*)_\tau)^{-1} \left(I - B_\tau^T \left(B_\tau (\nabla^2 f(T^*)_\tau)^{-1} B_\tau^T \right)^{-1} B_\tau (\nabla^2 f(T^*)_\tau)^{-1} \right)$$

$$J_{12} = (\nabla^2 f(T^*)_\tau)^{-1} B_\tau^T \left(B_\tau (\nabla^2 f(T^*)_\tau)^{-1} B_\tau^T \right)^{-1}$$

$$J_{21} = \left(B_\tau (\nabla^2 f(T^*)_\tau)^{-1} B_\tau^T \right)^{-1} B_\tau (\nabla^2 f(T^*)_\tau)^{-1}$$

$$J_{22} = -\left(B_{\tau}(\nabla^2 f(T^*))^{-1} B_{\tau}^T\right)^{-1}$$

3.3.2 下層模式求解

在前一小節中已證明出下層模式必有最佳解之存在，但由於目標函數為一非線性規劃模式，在求解時較為困難，且受限於電腦容量的限制，即使求出一最佳解，但勢必會花上大量的時間，使得所求出來的最佳解並不符合實際上動態的需求，因此在求解下層模式時，利用上述拉布蘭所提出來之啟發式解法來進行求解。

拉布蘭尋優解法之步驟如下：

Step0. 設定起始流量 $v_a^{N_0}$ ，令 $n = 0$ 。

Step1. 利用路段流量 $v_a^{N_n}$ 進行各路段速率調查，並計算各速率之下之各路段

旅行成本 $K_a^{N_{n+1}}$ 。

Step2. 根據各路段旅行成本 $K_a^{N_{n+1}}$ ，利用全數指派法指派原旅次矩陣得出各路

段指派流量 $Q_a^{N_{n+1}}$ 。

Step3. 利用黃金分割法令 $v_a^{N_{n+1}} = (1 - \delta) \times v_a^{N_n} + \delta Q_a^{N_{n+1}}$ 。

Step4. 計算是否 $|v_a^{N_{n+1}} - v_a^{N_n}| \leq \varepsilon$ ，假如是的話，則達成收斂並停止演算，得出

各路段流量 $v_a^{N_n}$ ，否則的話則令 $n = n + 1$ ，回到 Step1。

3.4 雙層數學模式求解演算

在求解雙層數學規劃之問題上面，本研究所使用的方法為以敏感度分析方法來求解演算，以敏感度分析為基礎的演算為以敏感度的資訊來反映上層問題決策變數所產生變動時對下層問題的影響，由於最大益本比訂價模式必須要了解旅客對於票價的反應，所以本研究將以敏感度分析為基礎來進行求解。當上層問題決

定了某一個可行費率時，即對應下層問題之駕駛者可能選擇的路徑結果，但是我們無法求得費率與流量的函數型態，因此以敏感度分析方法來求解，其演算法步驟如下：

Step0. 決定高速公路主線起始費率 U^0 ，令 $n=0$ 。

Step1. 在已知 U^n 的狀況下求解下層問題來決定各路段流量 V^n 。

Step2. 計算敏感度分析資訊 $\frac{\partial V^n}{\partial U}$ ，也就是不同費率對流量的影響。

Step3. 構建上層目標式的局部線性近似式 $(v(u) \approx v(u_0) + \frac{\partial v}{\partial u}(u - u_0))$ 及限制式來求解上層線性規劃問題，以得到一輔助解 y 。

Step4. 令 $U^{n+1} = U^n + \pi(y - U^n)$ 。

Step5. 計算 $|U^{n+1} - U^n| \leq \varepsilon$ ，若滿足收斂條件則停止演算，否則令 $n = n + 1$ ，回到 Step1。



3.5 小結

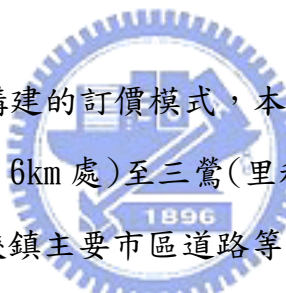
本章節主要是在構建上層最適訂價模式以及下層旅次行為選擇模式，其中上層模式是利用益本比最大原則為目標來進行營運者最佳即時費率定價問題；而下層模式則為一均衡指派法模式，藉由上層營運者所制定的費率來指派旅客的路徑選擇行為，並利用敏感度分析的資訊來進行雙層數學規劃的求解。

然而影響上層決策目標函數為各路段的流量，而決定各路段流量則是下層依據上層所給予的費率來做決定的，因此形成了上層的決策影響著下層的決策，而下層問題的結果也會影響上層問題的決策，在這樣交互關係的影響之下，我們便利用敏感度分析的資訊來進行求解，而下面的章節將會以土城至三鶯交流道的案例來進行雙層數學規劃的求解與敏感度分析的應用。

第四章 案例分析

在前一章中，我們詳細地分析電子收費費率設計的問題架構，並應用雙層數學規劃的概念來建立反映路徑指派的費率訂價設計模式，最後提出以敏感度分析為基礎的演算法來求解。故本研究利用土城至三鶯交流道之實際路網來建立個案，求解演算法則是以程式語言 Visual C++來進行撰寫。而運算所得到的資料除了反映模式所呈現出來的結果為何，也能分析本研究使用的演算法之適用性，進而分析反映旅運需求變化之費率訂價模式之相關課題。個案輸入的資料和求解的結果茲分別說明如下：

4.1 案例說明分析



為了測試前面章節所構建的訂價模式，本研究以國道三號樹林收費站(里程 50.6km 處)及土城(里程 42.6km 處)至三鶯(里程 50.6km 處)交流道、省道台三線土城市主要市區道路、三峽鎮主要市區道路等道路相關範圍為測試案例，相關地理位置如圖 4.1 所示，圖中路網之起點為土城交流道，路網之迄點為三鶯交流道，除了高速公路為收費路段之外，另外尚有兩條主要的替代道路，一為使用縣道 114 線，另一條替代道為則為省道台三線，兩者皆為不收費路段，其高速公路主線路徑長約 8 公里，若以速率 90 公里/小時行駛約需 5 分鐘，縣道 114 線替代道路之路徑全長約為 15 公里，若以速率 60 公里/小時行駛約需 15 分鐘，而省道台三線替代道路之路徑全長則約為 9.6 公里，若以行駛速率 60 公里/小時行駛，則約 10 分鐘，因此若高速公路主線費率較高的情況之下，駕駛者是有可能因節省的費率之效用大於所增加旅行時間之效用而選擇平面替代道路而不選擇高速公路的；此外在需求量輸入資料中，測試高需求量、中需求量及低需求量等不同情境之下之費率決定及駕駛者行為，同時進行敏感度分析，以了解不同需求量之下費率對駕駛者行為影響之關係，以下將分別說明。

為了便於做案例分析而將其轉換成簡單示意圖如圖 4.2 所示，圖中考慮到 8 個節點(node)，11 條路段(link)，收費路段則為路段 9、路段 10 及路段 11，由於對於起迄對 AH、BG 及 BH 而言，不論費率徵收與否，皆不改變其路段選擇行為，故將路段 9 及路段 11 的通行費用省略，只剩路段 10 為徵收通行費路段。另外我們假設有四個起迄對(O-D pairs，即為 A→G、A→H、B→G 及 B→H)，且在每一情境下的需求量是固定的，且共有 9 組路徑(path)如表 4.1 所示，而每一路段的距離則整理在表 4.2。

表 4.1 替代路徑

起迄對	路徑	所經節點	所經路段
A→G	1	A→G	1
	2	A→C→E→G	2→3→4
	3	A→C→D→F→E→G	2→5→10→8→4
A→H	4	A→C→E→F→H	2→3→7→11
	5	A→C→D→F→H	2→5→10→11
B→G	6	B→D→C→E→G	9→6→3→4
	7	B→D→F→E→G	9→10→8→4
B→H	8	B→D→C→E→F→H	9→6→3→7→11
	9	B→D→F→H	9→10→11

表 4.2 各路段行駛距離

路段	行駛距離
1	15
2	3
3	9.6
4	3
5	1
6	1
7	1
8	1
9	5
10	8
11	5

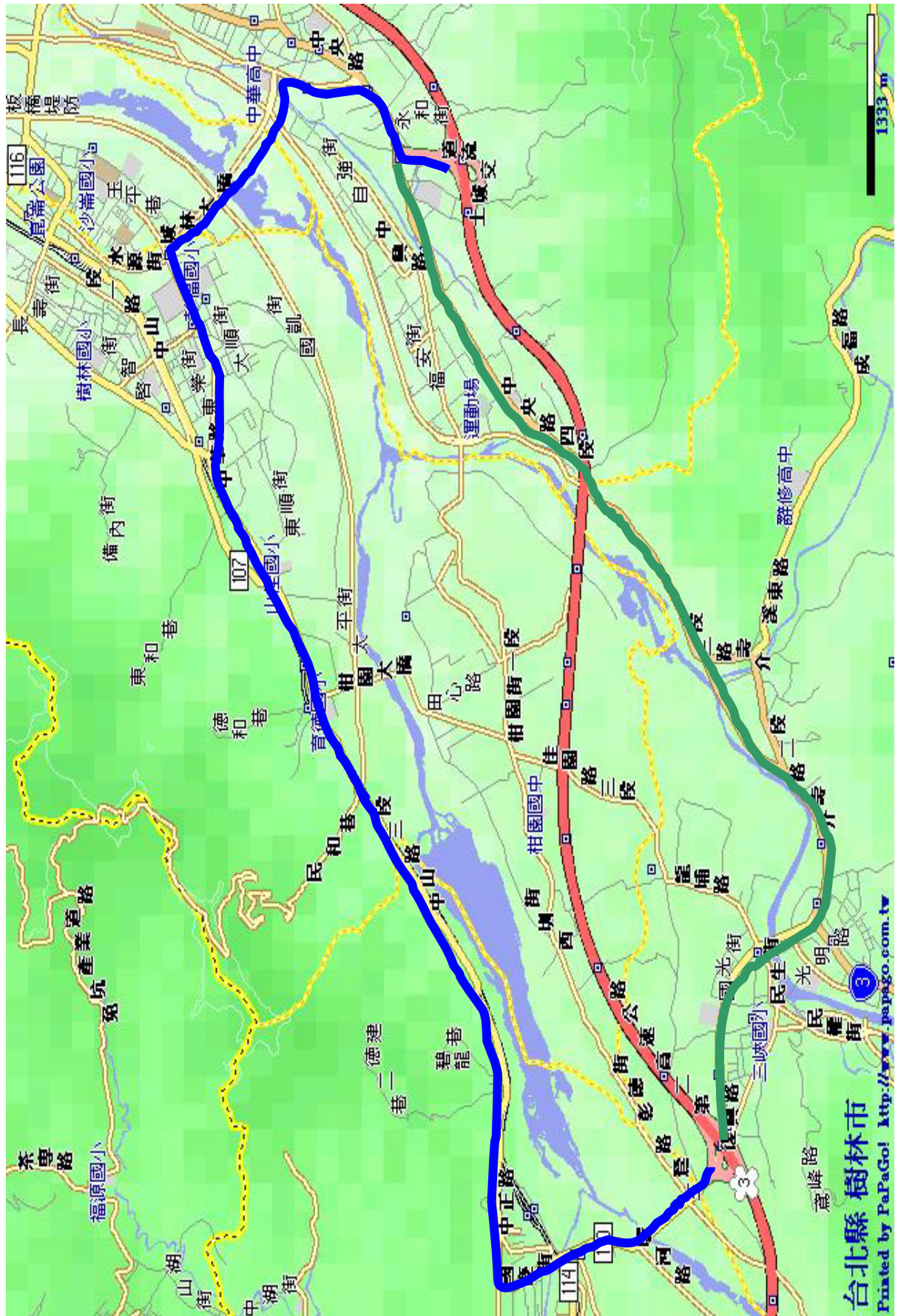


圖 4.1 研究範圍示意圖

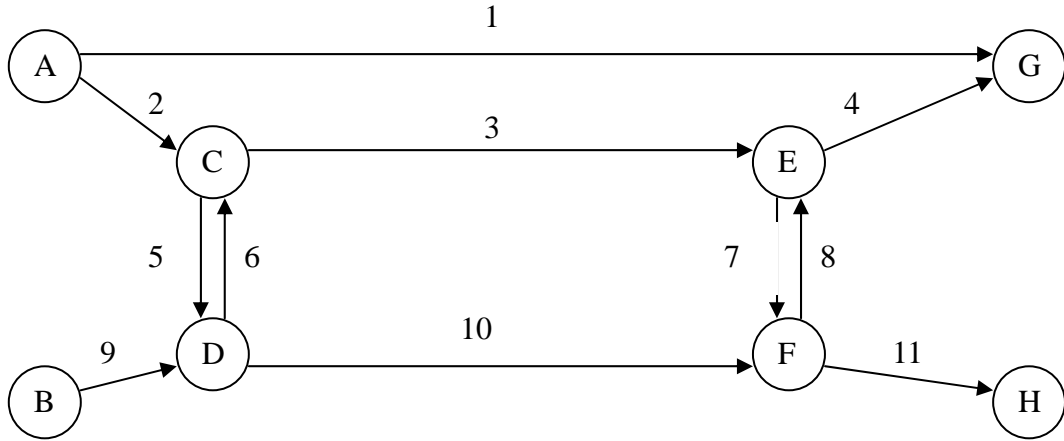


圖 4.2 土城至三鶯交流道路網簡圖

4.1.1 上層模式輸入參數說明

在第三章時，我們定義了上層費率訂定模式，其目標函數可由第(3.1)式來表達：

$$\begin{aligned} \max F(u, v) &= \frac{F_1^N}{F_2^N} \\ F_1^N &= \sum_{a \in A^*} u_a^N v_a^N h_a \\ F_2^N &= \sum_{a \in A} v_a^N t_a^N(v_a^N) \end{aligned} \quad (3.1)$$



其中 u_a^N 為上層問題之變數費率， v_a^N 為下層問題之變數流量， h_a 為高速公路主線及平面替代道路的行駛里程， $t_a^N(v_a^N)$ 則為反映兩路徑流量之旅之旅行時間；由於車輛旅行速率是隨著道路交通流量而改變，而旅運時間與速率又是一體兩面，因此，路段交通流量越大，其速率越低，平均旅運時間越長，反之，交通流量越低，其速率越高，平均旅運時間越短。有關旅運時間與交通流量間之關係，可將速率與流量關係曲線(Speed-flow Curve)簡化成直線型，如圖 4.3 所示。則可將流量與旅行時間設為一直線函數：

$$t_a^N(v_a^N) = \sigma_a \times v_a^N + \omega_a \quad (4.1)$$

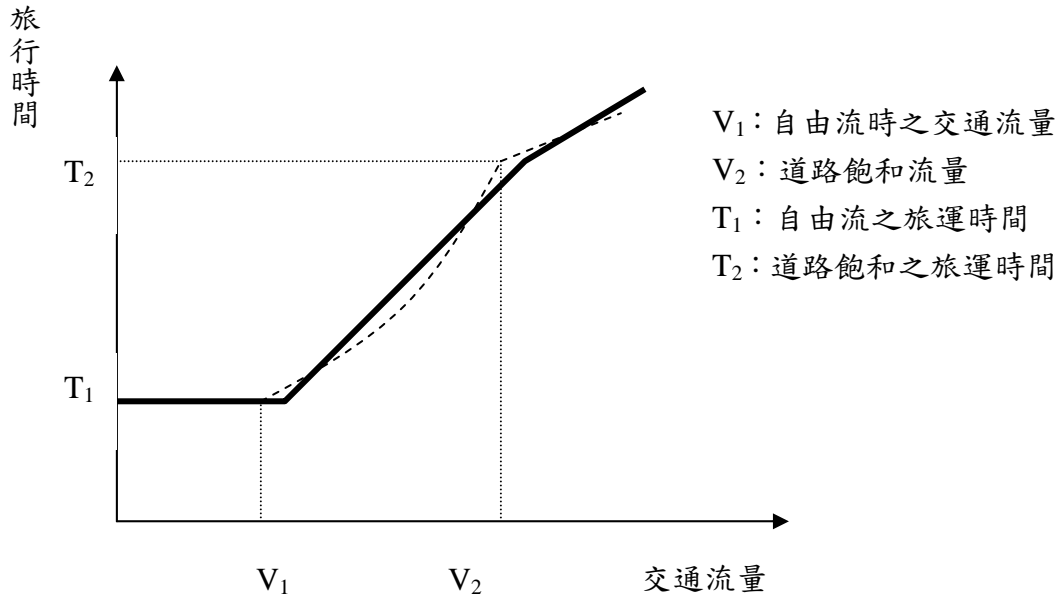


圖 4.3 一般道路旅行時間與流量關係

台灣地區速限為 100 公里/小時之高速公路基本路段，其內車道之平均自由速率大約為 104 公里/小時；若在速限為 90 公里/小時之路段，則自由速率約為 97 公里/小時。當平均速率等於自由速率時，內車道每車道之流率可高達 1,200 小客車/小時，此時佔有率約為 7.5%。這現象意謂在穩定車流狀況下，只要流率不超過 1,200 小客車/小時/車道，或平均車距(headway)不超過 3 秒，或佔有率不超過 7.5%時，則內車道之駕駛人，不會覺得行車有受到限制的感覺，此時平均速率等於自由速率。車距小於 3 秒時，平均速率開始下降。當流率等於容量時，佔有率會逼近 23%，此時內車道之平均速率仍可維持在 80 公里/小時。圖 4.4 為在平坦基本狀況下速率與流量之關係圖，圖中顯示，在自由流狀態下速率約為 100 公里/小時，此時的流量為 1200 小客車/小時/車道，而當流量趨近於飽和狀態即約為容量 2300 小客車/小時/車道時，行駛速率則約為 80 公里/小時，因此若假設旅行時間與流量呈一線性關係時，且土城至三鶯交流道為雙向四車道，則高速公路主線旅行時間函數為：

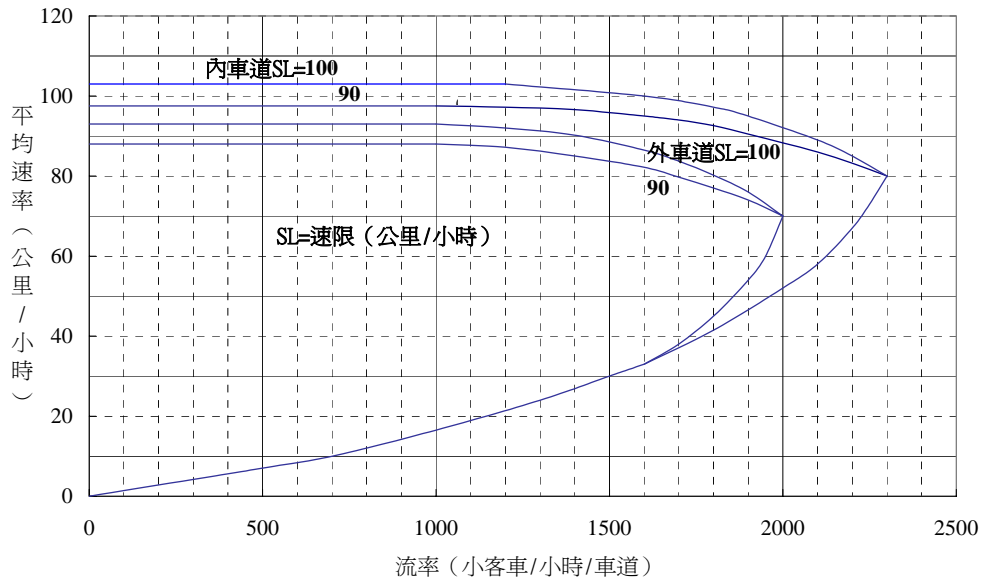


圖 4.4 平坦路段在基本狀況下速率與流量關係圖
(資料來源：2001 年台灣地區公路容量手冊)

$$t_1^N(v_1^N) = 0.00055v_1^N + 3.5$$

(4.2)

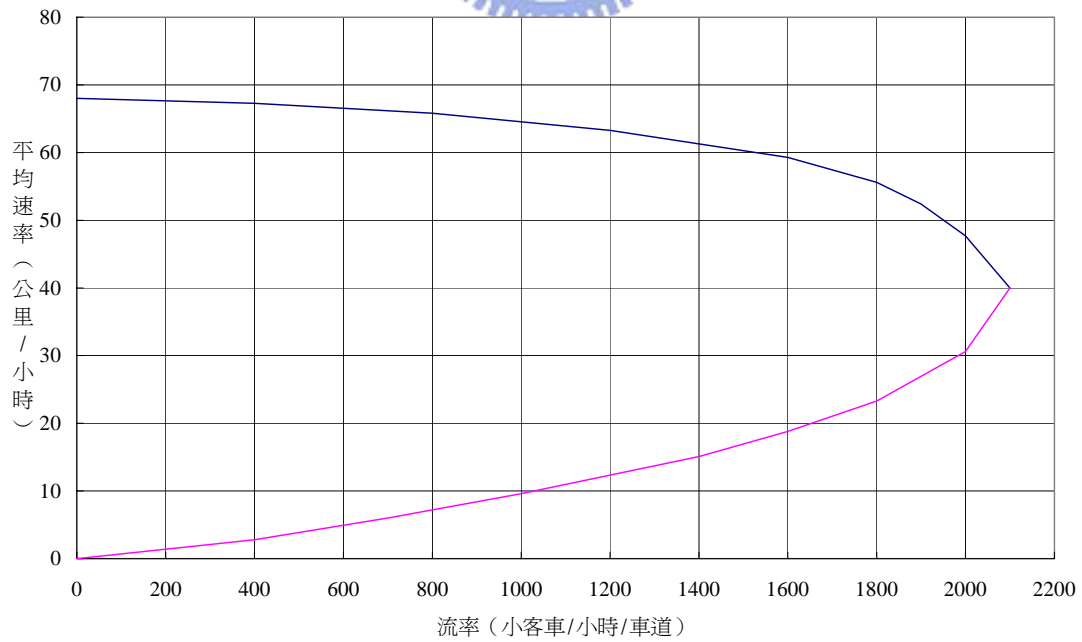


圖 4.5 平面道路速率與流量之關係
(資料來源：2001 年台灣地區公路容量手冊)

其中， t_1^N 為高速公路旅行時間， v_1^N 為高速公路流量。

在平面替代道路方面，由於其範圍內之道路寬度尚未依照都市計劃拓寬，且遭攤商佔用情況嚴重，車輛通行條件不佳，道路平時僅能提供雙向二車道的服務，在一般基本狀況之下，車道容量建議值為 2,100 小客車/小時/車道，其速率與流量關係則為圖 4.5 所示，圖中顯示，當車流量在自由流，約為 800 小客車/小時/車道的狀況下，其行駛速率約為 65 公里/小時，而車流量增加到飽和狀態，即為 2,100 小客車/小時/車道時，其行駛速率則降到約 40 公里/小時；若假設其旅行時間與流量呈一直線函數關係，且行駛里程為 9.6 公里、服務車道為雙向兩車道的狀況之下，則平面替代道路之流量與旅行時間函數為：

$$t_0^N(v_0^N) = 0.0042 \times v_0^N + 5.5 \quad (4.3)$$

其中 t_0^N 為平面道路旅行時間， v_0^N 為平面道路流量。

可是由於(4.2)及(4.3)式並未考慮到容量的限制關係，因此為了能反映旅行時間受到容量的限制，因此利用 HAI YAN and WILLIAM H. K. LAM (1995)的旅行時間與流量關係式：

$$t_a^N(v_a^N) = t_a^{N0} \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_a^N}{C_a} \right)^4 \right\} \quad (4.4)$$

其中 t_a^{N0} 為自由流之下的旅行時間，因此將各路段的自由流旅行時間及容量整理如表 4.3 所示：

表 4.3 各路段自由流旅行時間及容量

路段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t_a^{N0}	15	3	10	3	1	1	1	1	2	5	2
C_a	2100	2100	2100	2100	800	800	800	800	4600	4600	4600

在上層問題的限制式方面，可由(3.2)、(3.3)、(3.4)及(3.5)式來表達：

$$u_a^N \geq u_{\min} \quad (3.2)$$

$$u_a^N \leq u_{\max} \quad (3.3)$$

$$u_{\min} = \frac{E}{M} \quad (3.4)$$

$$u_a^N \geq 0 \quad (3.5)$$

其中 u_{\min} 為維持正常營運之下，所應徵收之最低費率， E 為高速公路營運基本費用及養護工程費，全年平均維護成本約為每公里 250 萬元左右，且自 93 年起，國道的養護路段總長約為 927 公里； M 則為主線上總延車公里數如表 4.4 所示，為方便計算，我們取小客車每年約 20,000 百萬延車公里，因此我們可以得出費率之最小值應為 0.1 元/公里。

表 4.4 國道交通量統計表(資料來源：國道高速公路局)

年份	小型車	客貨車	聯結車	合計	成長率	百萬車公里
民國 89 年	365,321,033	54,289,832	34,200,214	453,811,079	4.57%	19,973.37
民國 90 年	375,777,088	55,336,086	33,588,677	464,701,851	2.40%	20,278.63
民國 91 年	395,709,620	55,804,880	34,382,771	485,897,271	4.56%	20,297.11
民國 92 年	435,347,628	54,094,912	34,940,332	524,382,872	7.92%	19,855.07

因此，我們可以將上層問題改寫成以下型式：
目標函數：

$$\begin{aligned}
 \max F^N(u, v) = & \frac{8 \times u_{10}^N \times v_{10}^N}{v_1^N \times 15 \times \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_1^N}{2100} \right)^4 \right\} + v_2^N \times 3 \times \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_2^N}{2100} \right)^4 \right\} +} \\
 & \frac{v_3^N \times 10 \times \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_3^N}{2100} \right)^4 \right\} + v_4^N \times 1 \times \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_4^N}{2100} \right)^4 \right\} +} \\
 & \frac{v_5^N \times 1 \times \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_5^N}{800} \right)^4 \right\} + v_6^N \times 1 \times \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_6^N}{800} \right)^4 \right\} +} \\
 & \frac{v_7^N \times 1 \times \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_7^N}{800} \right)^4 \right\} + v_8^N \times 1 \times \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_8^N}{800} \right)^4 \right\} +} \\
 & \frac{v_9^N \times 2 \times \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_9^N}{4600} \right)^4 \right\} + v_{10}^N \times 5 \times \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_{10}^N}{4600} \right)^4 \right\} +} \\
 & v_9^N \times 2 \times \left\{ 1.0 + 0.15 \left(\frac{v_{11}^N}{4600} \right)^4 \right\}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

限制式：

$$u_a^N \geq 0.1 \tag{4.6}$$

$$u_a^N \leq u_{\max} \tag{4.7}$$

$$u_{\min} = \frac{2375000000}{20000000000} \cong 0.1 \tag{4.8}$$

$$u_a^N \geq 0 \tag{4.9}$$

4.1.2 下層模式輸入參數說明

下層模式為均衡指派法的路徑選擇模式，本研究只選定南下方向來進行案例分析，運用在此實例上即為在若干費率之下，駕駛者從土城交流道方向之起點(A、B)，往三鶯交流道之迄點(G、H)，會如何選擇其行駛路徑(路徑1~9)。第三章的下層問題目標式(3.6)式如下：

$$\min f^N = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a^N} K_a^N(v_a^N) dv \quad (3.6)$$
$$K_a^N(v_a^N) = \alpha t_a^N(v_a^N) + \beta h_a + u_a^N h_a$$

下層目標函數中的旅行時間相關公式已在前面文章中已敘述，其他尚未定義之參數還有時間價值參數及行駛距離成本參數。交通部運輸研究所委託調查之「公路車輛行車成本調查報告」中以問卷方式為主，記帳方式為輔，調查實施期間自民國87年10月至88年4月，研究範圍為台北縣市、台中縣市、高雄縣市及花蓮縣等四個地區，調查對象包括機車、自用小客車、營業小客車、小貨車、自用大貨車、營業大貨車、聯結車。但本研究以小汽車駕駛者為研究對象，故僅以自用小客車之資料數據為參考對象。此篇統計資料是以車輛之燃油費、維修費、保險費及折舊等相關行車成本為主要考量，而本研究採用之行車成本取1801~2400cc之自用小客車所作之調查結果約為每小時24.8元，即每分鐘約0.41元。至於旅行距離成本方面，一公升的汽油大約可跑10公里，若受到號誌及平面道路影響可能只能跑8公里，若以一公升20元的油價計算，行駛一公里的路程成本大概2至2.5元。

因此利用此篇研究中所整理之時間價值及油耗成本分別為時間價值為每分鐘0.41元，而油耗成本則為每公里2.0元。我們可以將下層目標式改寫如下：

$$\begin{aligned}
\min f^N(u, v) = & \int_0^{v_1^N} \left\{ 0.41 \times 15 \times \left[1.0 + 0.15 \left(\frac{v_1^N}{2100} \right) \right] + 2.0 \times 15 \right\} dv + \\
& \int_0^{v_2^N} \left\{ 0.41 \times 3 \times \left[1.0 + 0.15 \left(\frac{v_1^N}{2100} \right) \right] + 2.0 \times 3 \right\} dv + \\
& \int_0^{v_3^N} \left\{ 0.41 \times 10 \times \left[1.0 + 0.15 \left(\frac{v_3^N}{2100} \right) \right] + 2.0 \times 9.6 \right\} dv + \\
& \int_0^{v_4^N} \left\{ 0.41 \times 3 \times \left[1.0 + 0.15 \left(\frac{v_1^N}{2100} \right) \right] + 2.0 \times 3 \right\} dv + \\
& \int_0^{v_5^N} \left\{ 0.41 \times 1 \times \left[1.0 + 0.15 \left(\frac{v_5^N}{800} \right) \right] + 2.0 \times 1 \right\} dv + \\
& \int_0^{v_6^N} \left\{ 0.41 \times 1 \times \left[1.0 + 0.15 \left(\frac{v_6^N}{800} \right) \right] + 2.0 \times 1 \right\} dv + \\
& \int_0^{v_7^N} \left\{ 0.41 \times 1 \times \left[1.0 + 0.15 \left(\frac{v_7^N}{800} \right) \right] + 2.0 \times 1 \right\} dv + \\
& \int_0^{v_8^N} \left\{ 0.41 \times 1 \times \left[1.0 + 0.15 \left(\frac{v_8^N}{800} \right) \right] + 2.0 \times 1 \right\} dv + \\
& \int_0^{v_9^N} \left\{ 0.41 \times 2 \times \left[1.0 + 0.15 \left(\frac{v_8^N}{4600} \right) \right] + 2.0 \times 5 \right\} dv + \\
& \int_0^{v_{10}^N} \left\{ 0.41 \times 5 \times \left[1.0 + 0.15 \left(\frac{v_{10}^N}{4600} \right) \right] + 2.0 \times 8 + u_{10}^N \times 8 \right\} dv + \\
& \int_0^{v_{11}^N} \left\{ 0.41 \times 2 \times \left[1.0 + 0.15 \left(\frac{v_8^N}{4600} \right) \right] + 2.0 \times 5 \right\} dv
\end{aligned} \tag{4.10}$$

在下層限制式方面，可根據本研究之實例改寫為：

$$v_a^N = \sum_p \sum_i \sum_j \delta_{pij}^a T_{pij} \quad i \in A, B \quad j \in G, H \quad p = 1, 2, \dots, 8 \tag{4.11}$$

$$T_{ij}^N = \sum_{p \in P^*} T_{pij}^N \tag{4.12}$$

$$v_a^N \leq C_a \quad a = 1, 2, \dots, 11 \tag{4.13}$$

$$v_a^N \geq 0 \tag{4.14}$$

上式中， v_a^N 為路段 a 之流量， i 、 j 為起迄對， T_{pij}^N 為由 i 到 j 且使用路徑 p 的旅次量， P^* 為路徑 p 屬於表 4.1 中之起迄對的集合， δ_{pij}^a 則當路段 a 在 i 至 j 的路徑 p 上時等於 1，其他狀況則等於 0。

我們得到下層問題的目標函數之後，由於目標函數屬於非線性規劃函數，求解相當固難，因此在求解下層均衡指派問題時，我們便利用前述之拉布蘭尋優演算法來求局部較佳解，而下層所求得之局部解再與上層訂價問題進行連結，利用敏感度分析演算法，計算最佳費率。

4.2 情境分析

在個案分析中，由於假設駕駛者行為改變僅為空間維度，而不考慮時間維度，即假設各 OD 起迄需求量是估定不變的，因此路段 9 及路段 11 的成本不論如何增減，其路段上的流量皆不會因此而改變，所以為了程式撰寫之方便而將此四條路段之成本皆假設為一固定值 10.0；此外路段 5、路段 6、路段 7 及路段 8 為高速公路與平面替代道路銜接之匝道，其壅擠程度對於駕駛者行為選擇影響不大，並且由於一般大多數的道路使用者有直接前往目的地而減少繞行的習慣，因此我們假設匝道路段的成本亦為固定值，且為了反映減少繞行的行為，而把此四條路段的成本訂的稍高，皆為 15.0。

4.2.1 低需求量分析

首先情境一模擬在低需求量之情況下之最佳費率及對應之車流情形，如表 4.5 所示；並針對此一需求量進行敏感度分析，其敏感度資訊如表 4.6 所示，同時利用此一敏感度資訊來進行第三章所述之敏感度分析資訊演算法來求解情境一之均衡流量，而我們可以將敏感度資訊帶入下面流量及費率的近似線性關係式：

$$v(u) \approx v(u_0) + \frac{\partial v}{\partial u}(u - u_0) \quad (4.15)$$

表 4.5 起迄對需求量一

O-D path	A→G	A→H	B→G	B→H
需求量	250.0	250.0	250.0	250.0

表 4.6 情境一敏感度分析資訊表

<i>a</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\frac{\partial v_a}{\partial u}$	-0.12207	0.1221	49.9634	0.1221	-25.2563	24.58498	24.58498	-25.2563	0	-49.8413	0

演算時，上層及下層切割參數均為 0.5，而停止演算條件則為費率變化小於 1，流量變化亦小於 1。演算結果則如表 4.7 所示，我們可以知道當達到均衡狀態時，系統之最佳費率應為 9.99429 元，且此時選擇使用高速公路主線之流量為 749.919vph，顯示當系統需求量較小時，使用高速公路可以使系統達到最佳化的目標，此時除了 AG 旅次約有 250vph 使用路段 1 之外，其餘 AH、BG、BH 之旅次皆大部分利用路段 10，因此高速公路主線的流量約為 750vph，BH 旅次繞道使用平面僅只有 0.488281vph，由此可知原本使用高速公路之駕駛者有不改變其路徑的傾向，而平面道路之駕駛者會有一部分會利用服務水準較高的高速公路。

表 4.7 情境一之最佳費率及各路段均衡流量表

$\delta = 0.5$, $\pi = 0.5$, $\varepsilon_{up} = 1$, $\varepsilon_{low} = 1$			
u^*	9.99429	v_6	0.488281
v_1	249.186	v_7	0.488281
v_2	250.814	v_8	250.407
v_3	0.895182	v_9	500
v_4	250.814	v_{10}	749.919
v_5	250.407	v_{11}	500

圖 4.6 為情境一之各路段之均衡流量示意圖，圖中顯示最佳費率為 10 元，平面道路路段 1 之流量為 249.186vph，路段 3 之流量為 0.895182vph，而高速公路路段 10 之流量亦等於 749.919vph。

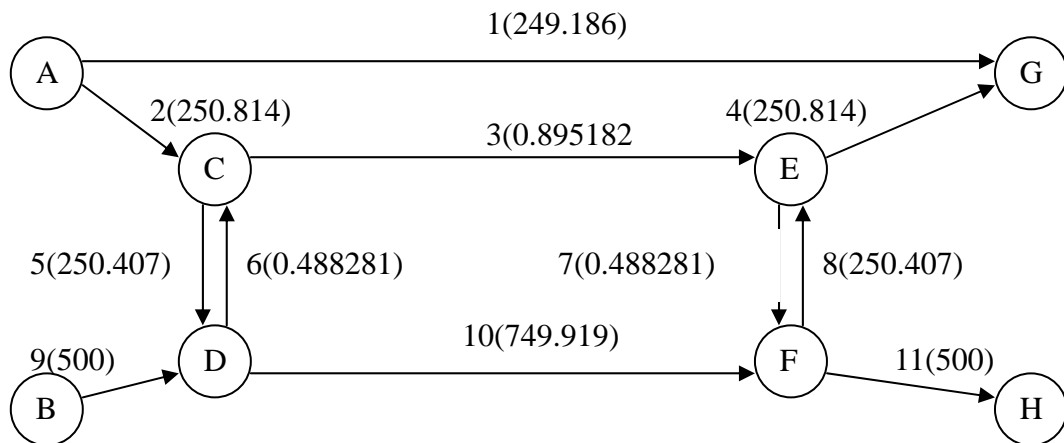


圖 4.6 路段流量示意圖一

- 1、由於情境一為低需求量的情況，因此當起點為 A 迄點為 H 之旅次其費率由 1 元逐次遞增時，駕駛者因選擇高速公路所需之旅行成本較使用平面道路之旅行成本為小，故大部分的駕駛者會使用高線公路主線，且由於低需求量時，車流對於旅行時間影響不大，因此駕駛者路徑選擇主要是考慮費率因素，故當費率上升後，駕駛者開始感受到高速公路的旅行成本較平面道路為高，因此 AH 及 BG 則開始選擇使用平面替代道路，而當費率再繼續上升後，BH 旅次亦選擇繞道而行。
- 2、由於下層均衡指派模式之輔助解為全數指派法所得之流量，全數指派法的特性是將所有旅次指派到替代路徑中成本最小的路徑，即使各個替代路徑中之成本差距極小，亦會將所有旅次指派至最小成本路徑；此外，由於本研究選擇之個案為二擇一之路網，因此利用全數指派法進行補助解求解時，即使高速公路與平面替代道路之旅行成本差距甚小，仍會將所有旅次指派到成本較小之路徑，因此會造成在通行費率增加 1 元時，高速公路主

線的流量會急劇減少。

- 3、 在此一模式之基本假設之下，本研究將費率由 10 元遞增至 20 元，並將所對應之流量進行敏感度分析，換句話說，在情境一低需求量的情況之下，高速公路即時費率與駕駛者行為關係如表 4.6 所示。

4.2.2 中需求量分析

情境二模擬在中需求量之情況下之最佳費率及對應之車流情形，如表 4.7 所示；接著針對此一需求量進行敏感度分析，其敏感度資訊如表 4.8 所示，同時利用此一敏感度資訊來進行第三章所述之敏感度分析資訊演算法來求解情境二之均衡流量。

表 4.7 起迄對需求量二

O-D path	A→G	A→H	B→G	B→H
需求量	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0

表 4.8 情境二敏感度分析資訊表

a	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\frac{\partial v_a}{\partial u}$	-0.12207	0.122	199.9631	0.122	-100.257	99.58498	99.58498	-100.257	0	-199.841	0

演算時，上層及下層切割參數均為 0.5，而停止演算條件則為費率變化小於 1，流量變化亦小於 1。演算結果則如表 4.9 所示，我們可以知道當達到均衡狀態時，系統之最佳費率應為 9.9996 元，且此時選擇使用高速公路主線之流量為 2999.43vph，顯示當系統需求量較小時，使用高速公路可以使系統達到最佳化的目標，此時除了 AG 旅次約有 1000vph 使用路段 1 之外，其餘 AH、BG、BH 之旅次皆大部分利用路段 10，因此高速公路主線的流量約為 3000vph，BH 旅次繞道使用平面僅只有 0.488281vph，由此可知原本使用高速公路之駕駛者有不改變其路徑

的傾向，而平面道路之駕駛者會有一部分會利用服務水準較高的高速公路。

表 4.9 情境二之最佳費率及各路段均衡流量表

$\delta = 0.5$, $\pi = 0.5$, $\varepsilon_{up} = 1$, $\varepsilon_{low} = 1$			
u^*	9.9996	v_6	0.488281
v_1	999.674	v_7	0.488281
v_2	1000.33	v_8	999.919
v_3	0.895182	v_9	2000
v_4	1000.33	v_{10}	2999.43
v_5	999.919	v_{11}	2000

圖 4.6 為情境二之各路段之均衡流量示意圖，圖中顯示最佳費率約為 10 元，平面道路路段 1 之流量為 999.674vph，路段 3 之流量為 0.895182vph，而高速公路路段 10 之流量亦等於 2999.43vph。

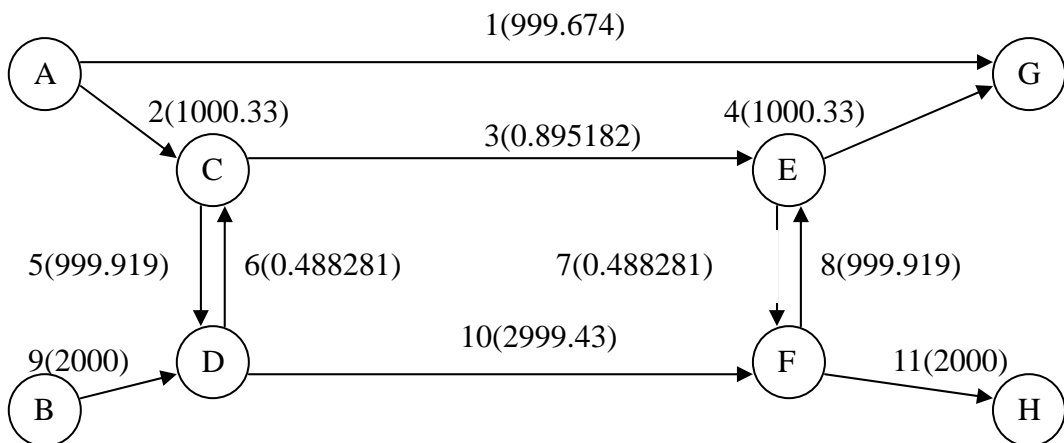


圖 4.7 路段流量示意圖二

- 1、 當中需求量通行費率逐漸變動到某一範圍時，由於車流量逐漸接近道路容量，因而車流量對旅行時間的影響程度增加，導致在此範圍內費率增加但車流量卻呈現上下振盪的現象，當費率又繼續增加之後，平面道路因車流增加而增加的旅行時間成本小於高速公路所徵收之費率，因而車流量又回復穩定狀態。
- 2、 情境二與情境一之最佳費率皆為 10 元，主要是因為情境一與情境二之各起迄對需求量之間差距不大，在各起迄點的需求相差不多之情況下，為維持系統之最佳化所應訂定之費率大致應相同。
- 3、 此一情境之下的變動費率與道路使用者路徑選擇行為關係則如表 4.8 所示。

4.2.3 高需求量分析

情境二模擬在中需求量之情況下之最佳費率及對應之車流情形，如表 4.9 所示；接著針對此一需求量進行敏感度分析，其敏感度資訊如表 4.10 所示，同時利用此一敏感度資訊來進行第三章所述之敏感度分析資訊演算法來求解情境三之均衡流量。

表 4.9 起迄對需求量三

O-D path	A→G	A→H	B→G	B→H
需求量	2000.0	2000.0	2000.0	2000.0

表 4.10 情境三敏感度分析資訊表

a	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\frac{\partial v_a}{\partial u}$	0.12207	-0.122	199.8902	-0.122	-199.646	0.366211	0.366211	-199.646	0	-200.012	0

演算時，上層及下層切割參數均為 0.5，而停止演算條件則為費率變化小於 1，流量變化亦小於 1。演算結果則如表 4.11 所示，我們可以知道當達到均衡狀態時，系統之最佳費率應為 28.5677 元，且此時選擇使用高速公路主線之流量為 5999.43vph，顯示當系統需求量較小時，使用高速公路可以使系統達到最佳化的目標，此時除了 AG 旅次約有 2000vph 使用路段 1 之外，其餘 AH、BG、BH 之旅次皆大部分利用路段 10，因此高速公路主線的流量約為 5999.43vph，BH 旅次繞道使用平面僅只有 0.488281vph，由此可知原本使用高速公路之駕駛者有不改變其路徑的傾向，而平面道路之駕駛者會有一部分會利用服務水準較高的高速公路。

表 4.11 情境三之最佳費率及各路段均衡流量表

$\delta = 0.5$, $\pi = 0.5$, $\varepsilon_{up} = 1$, $\varepsilon_{low} = 1$			
u^*	28.5677	v_6	857.143
v_1	2000	v_7	857.143
v_2	2000	v_8	1142.86
v_3	1714.29	v_9	4000
v_4	2000	v_{10}	4285.71
v_5	1142.86	v_{11}	4000

圖 4.8 為情境三之各路段之均衡流量示意圖，圖中顯示最佳費率約為 29 元，平面道路路段 1 之流量為 2000vph，路段 3 之流量為 1714.29vph，而高速公路路段 10 之流量亦等於 4285.71vph。

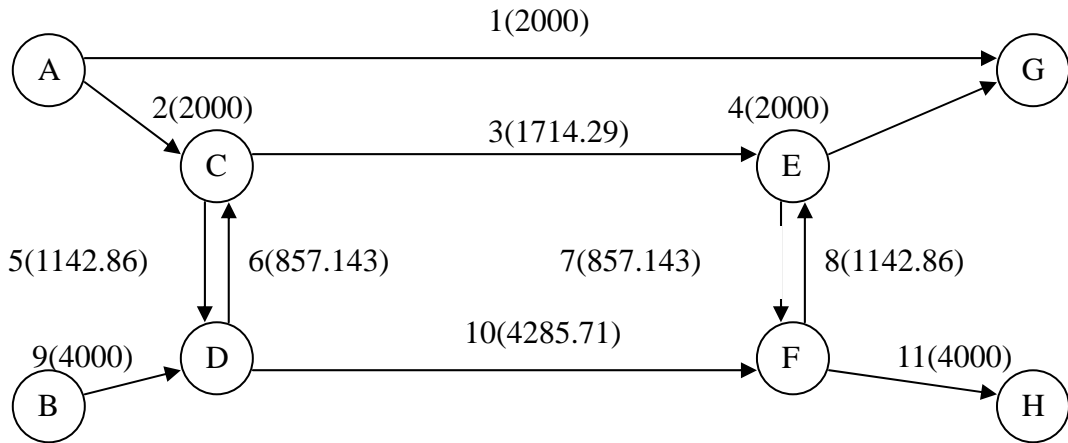


圖 4.8 路段流量示意圖三

- 1、 當高需求量通行費率在某一範圍內變動時，由於車流量幾乎等於道路容量，因而車流量對旅行時間的影響程度相當劇烈，導致在此範圍內費率增加但車流量卻呈現上下大幅振盪的現象，而費率再逐漸增加之後，平面道路因車流增加而增加的旅行時間成本小於高速公路所徵收之費率，因而車流量又回復穩定狀態。
- 2、 情境三之最佳費率為 29 元，與情境一及情境二相差較大，顯示當各起迄點需求量增加時，為追求系統最佳化目標，高速公路主線費率有增加趨勢。
- 3、 此一情境之下的變動費率與道路使用者路徑選擇行為之敏感度資訊則如表 4.10 所示。

4.3 費率與流量關係

在尋求費率與流量關係中，我們將高速公路主線所徵收的費率從 1.0 元逐次遞增，並將所對應之流量一一記錄下來，以得知高速公路上之費率與流量之關係。

4.3.1 情境一

情境一為低需求量之狀況下駕駛者之行為選擇，其各起迄對之需求量如表 4.5 所示，圖 4.9 則為此一情境下之函數圖形，圖中顯示，當高速公路主線費率

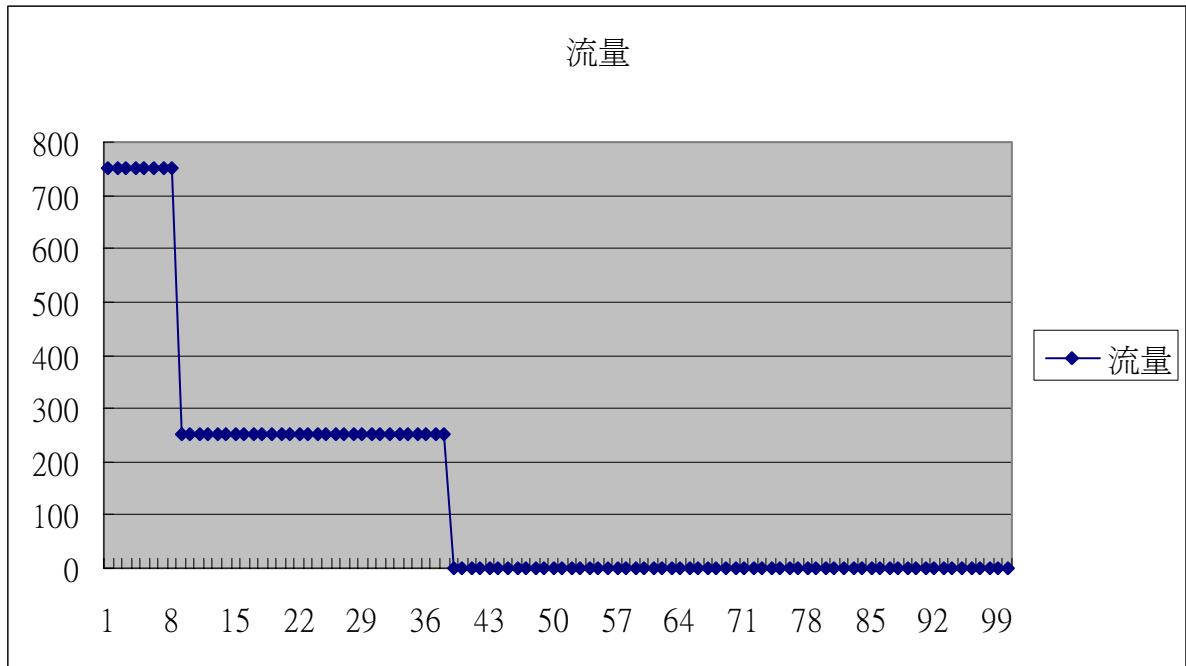


圖 4.9 情境一費率與流量關係圖

在 8 元以下時，AH 旅次大部分皆使用高速公路，此時主線的流量約為 750vph，而當費率增加為 8~40 元左右時，AH 旅次開始利用平面道路，因此主線流量降至 250vph，其後則因駕駛者感受到因費率所增加的旅行成本過高，因此 BH 旅次便轉而利用平面替代道路。

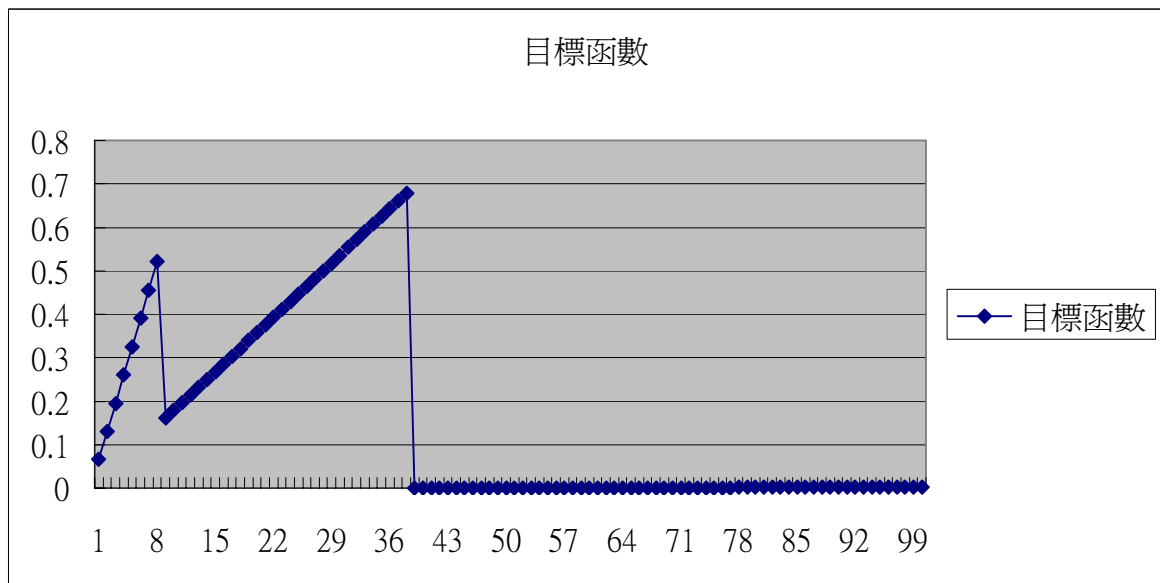


圖 4.10 情境一費率與目標函數關係圖

圖 4.10 為情境一之費率與目標函數之關係圖，圖中顯示當費率逐漸增加時，目標函數跟著增加，但由於費率到某一程度之後，會使主線車流轉而利用平面替代道路，因此會造成目標函數突然下降的情形發生。此外由於此時車流量較小，因此目標函數的圖型為單純的直線狀態。

4.3.2 情境二

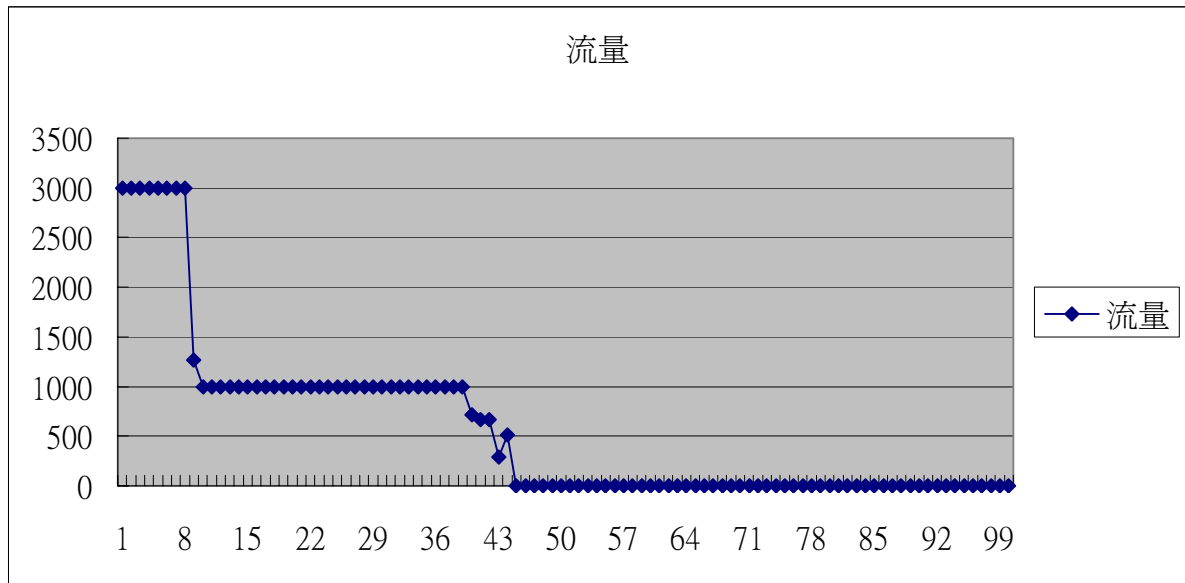


圖 4.11 情境二費率與流量關係圖

情境二為中需求量之狀況下駕駛者之行為選擇，其各起迄對之需求量如表 4.7 所示，圖 4.10 則為此一情境下之函數圖形，圖中顯示，當高速公路主線費率在 8 元以下時，AH 旅次大部分皆使用高速公路，此時主線的流量約為 3000vph，而當費率增加為 8~40 元左右時，AH 旅次開始利用平面道路，因此主線流量降至 1000vph，但 40~45 元左右時，因此時高速公路主線之旅行成本與平面替代道路相差無幾，故會造成流量呈現上下振動的情況發生，其後則因駕駛者感受到因費率所增加的旅行成本過高，因此 BH 旅次便轉而利用平面替代道路。

圖 4.12 則為中需求量之狀況下，費率逐漸增加時所相對應之目標函數值，此一情境與情境一類似，但是在第二次目標函數值下降時，由於平面替代道路接近飽和狀態，因此目標函數值會稍有振動情形發生。

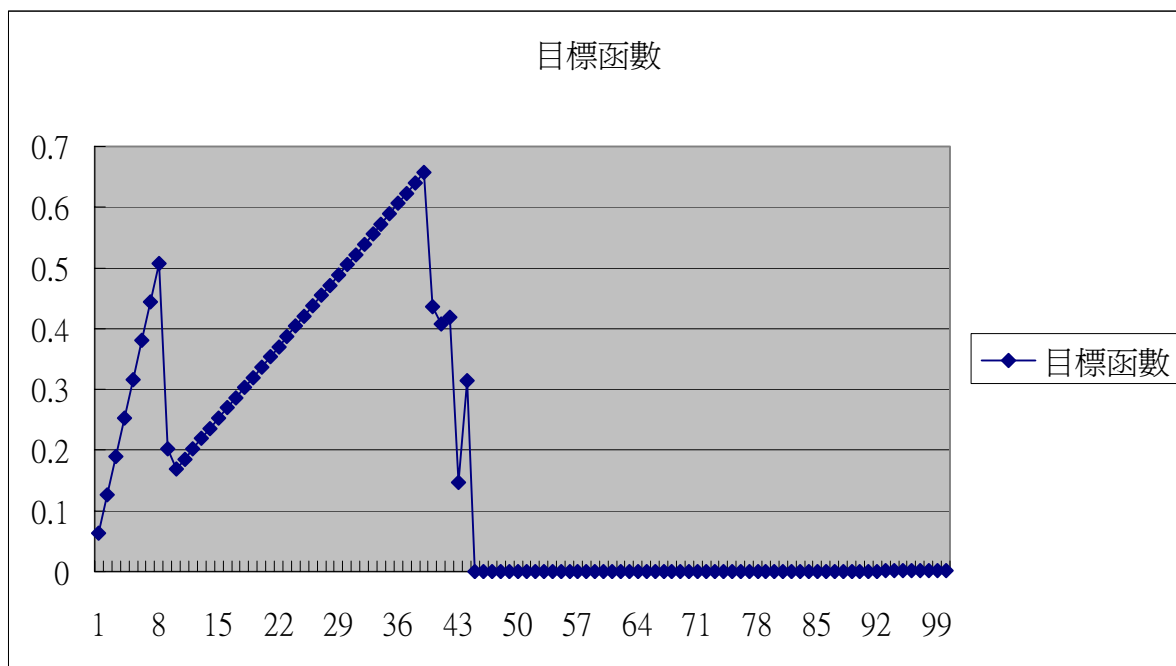


圖 4.12 情境二費率與目標函數關係圖

4.3.3 情境三

情境三為高需求量之狀況下駕駛者之行為選擇，其各起迄對之需求量如表 4.9 所示，由於高需求量會造成道路過飽和的現象發生，費率與流量之關係會呈現一不穩定之狀態，如圖 4.11 所示，在費率小於 8 元之前，主線之旅行成本較平面道路為小，因此依舊有大量車流使用高速公路，但在 8~30 元左右時，費率增加會使車流轉而利用平面道路，但平面道路亦呈現過飽和狀態，因此圖形便上下振動，而費率再增加至 30~55 元左右後又回到一穩定的狀態，55~80 元左右則又出現一波不穩定的狀態，一直到 85 元之後才又回穩。

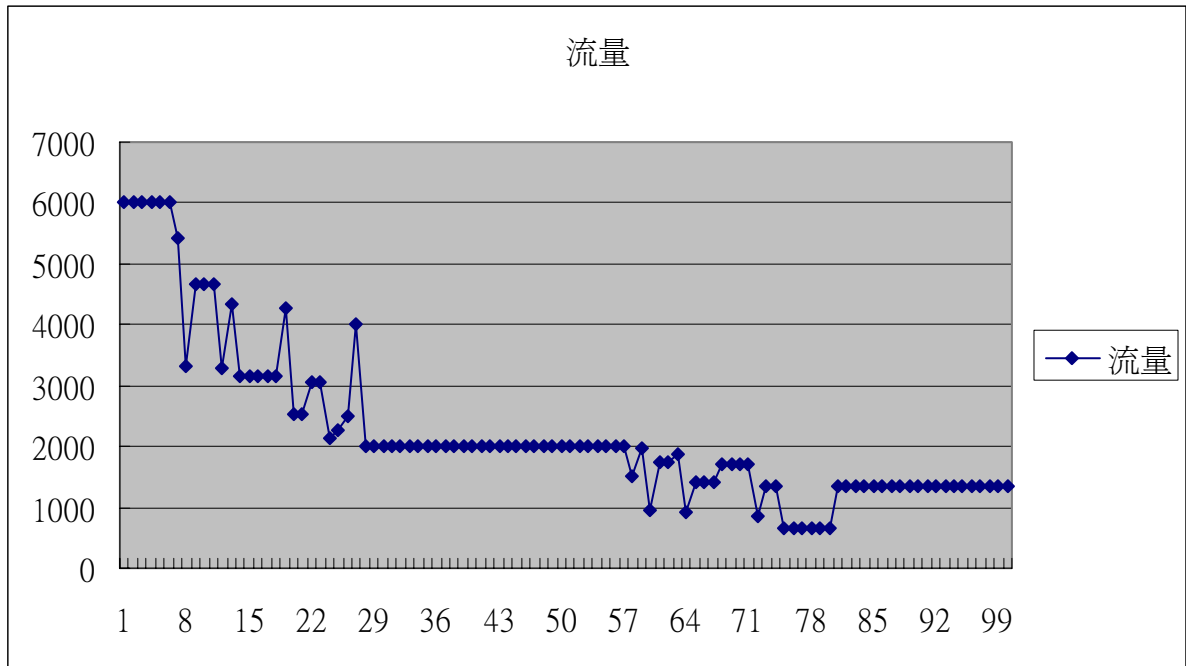


圖 4.13 情境三費率與流量關係圖

圖 4.14 為情境三費率與目標函數值的關係圖，圖中呈現兩波劇烈振動的情形發生，這是由於在高需求之下，各路段皆已達到過飽和狀態，因此目標函數便會呈現不穩定的情況。

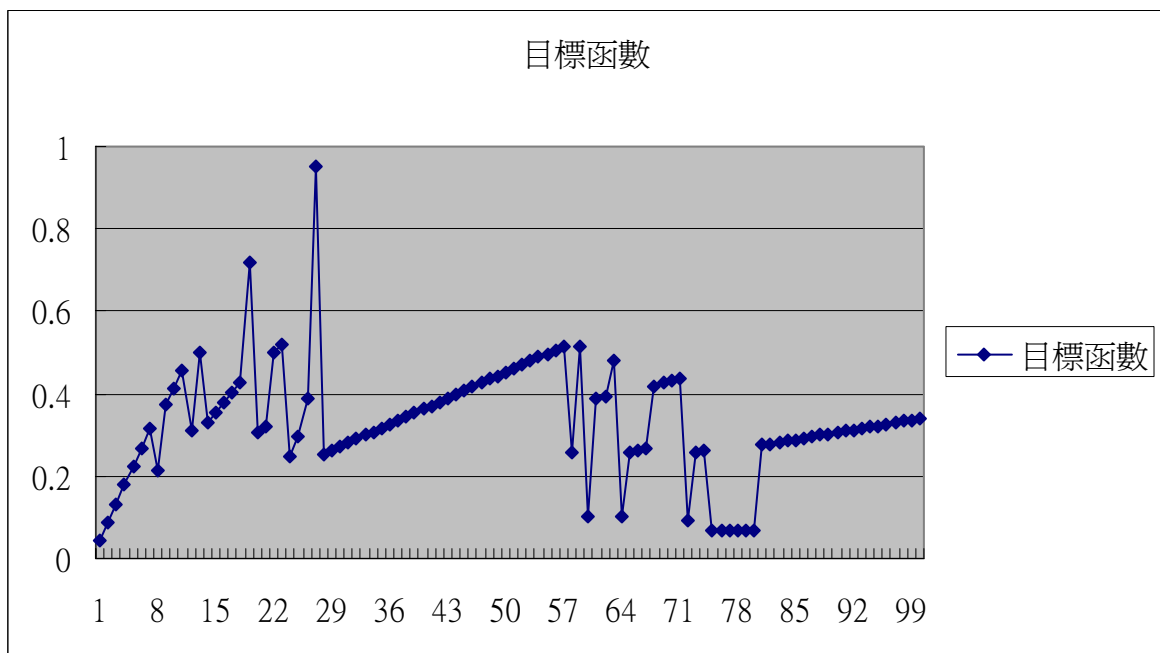


圖 4.14 情境三費率與目標函數關係圖

4.4 小結

上述各種情境之流量變動情形皆由原本很穩定之狀態，突然出現劇烈振盪情況，之後才又回到穩定狀態，會造成此一現象的原因為：

- 1、 本研究所選定土城至三鶯交流道之間之路網為二項型(Binomial)的路網，駕駛者僅能從兩替選方案來做選擇，當其中一條路徑之旅行成本明顯大於另一條路徑時，駕駛者便僅會選擇旅行成本較少之路徑。
- 2、 下層均衡指派模式所使用之演算法，其輔助解為全數指派法時，所指派之流量，因此會造成即使旅行成本相差不多，但是仍將所有旅次指派至成本較小路段。
- 3、 基本假設中，本研究假設所有道路使用者皆能獲得完全的資訊，因此在駕駛者能得到完全正確的道路旅行成本資訊時，便會選擇成本最小之路徑。



第五章 結論與建議

高速公路收費站區域往往是交通瓶頸之所在，而電子收費系統可以有效減輕因停車收費而造成的交通壅擠狀況，除此之外，電子收費系統的費率可變動特性可以根據當時的交通狀況而制定相對應的費率，來進行以價制量的策略以達到營運者所設定的目標，而駕駛者之路徑選擇行為亦與費率息息相關，因此費率的訂定勢必須考慮到駕駛者的預期選擇行為。由於上述原因，本研究構建一雙層數學規劃模式，上層模式為站在營運者的角度來進行費率的制定，下層模式則為道路使用者的選擇行為，並將上下層串聯起來以反映兩者之間相互關係。綜合各章節之探討與分析，可以得到以下的結論：

5.1 結論

1. 在第三章一開始先對整體模式架構作一基本假設，由於電子收費系統尚未興建完成及營運，因此模式本身假設為未來之所有使用者皆對於道路上各種狀況如費率及旅行時間等完全了解，並且由空間維度進行探討，即駕駛者僅改變路徑選擇行為，而不改變出發時間，換句話說，在某時階內的需求為固定需求。
2. 其次，針對上層問題以營運者的觀點來進行模式之構建，而營運者的目標則同時考慮到社會成本及其本身的通行費率的收益情況，故上層目標式便利用益本比最大化原則(通行費率收入/系統總旅行時間)來構建。
3. 下層問題則是藉由道路使用者的角度來進行交通量指派的工作，在指派的方法上則是運用均衡指派法來進行模式之構建，模式中的成本項考慮的元素有隨流量而變動的旅行時間、道路行駛里程以及通行費率等。由於模式求解不易，因此求解方面利用拉布蘭演算法來求取局部較佳解。
4. 為了解營運者所制定的票價對下層使用者的影響程度，而將所有費率加以演算求出兩者之間的關係，並將此關係代回費率訂價模式做為限制式之一，確保在求得的最佳票價因子後，相對應的路段流量是滿足交通指派模式的限制。

5. 在第四章個案分析時，以土城至三鶯交流道及其平面替代道路的實際路網資料做為範例，說明所建立的模式之結果與求解演算法之適用性。由測試個案顯示，由演算法所求得之局部最佳解是滿足所有限制條件的，並得到不同情境之下，各路徑的流量為何；此外，由本研究演算流程可進一步探討當費率產生變化時，對其各路徑流量所產生的影響。

5.2 建議

本研究對於高速公路電子收費系統中，雖可利用雙層數學規劃模式可依據當時之起迄點需求量來推得所應訂定的費率，並預測出相對應的流量，但在上下層模式及實際施行中仍有許多課題有待繼續努力，茲說明如下：

1. 模式中僅考慮小汽車駕駛者為研究目標，因此費率亦僅考慮小汽車所應徵收之通行費用而不考慮到高速公路尚有其他大型車輛或其他特殊車輛之使用，因此模式無法制定大客車、大貨車、聯結車或其他特殊車輛的通行費率，此一限制與實際狀況不符。未來研究可將不同車種納入模式中，以求得不同車種之通行費率。
2. 上層模式所考慮之社會成本僅有系統之旅行時間，其他例如系統總停等長度、系統總延滯或空氣噪音污染等外部成本並無考慮在內，造成上層目標式無法完全反映至社會福利最佳的情況。因此可針對上層模式中的成本項目加以細分，盡可能達到系統最佳化的目標。
3. 本研究假設的駕駛者均具有同質性，即對於下層模式中每個駕駛者對於時間價值所感受的程度是相同的，然而每個人對於時間的感受不同，並且也須依照用路者的時間緊迫性而不同，對於路徑熟悉程度，因而產生不同的路徑選擇行為。建議模式中應考慮到用路者對行駛路線熟悉的程度、旅次目的或不同的社會經特性來對使用者加以分類，然後再探討不同種類下的駕駛者其選擇行為上的差異。

4. 本研究的模式所求得的駕駛者行為僅在於預測的階段，即預測在營運者訂定的某種費率價格之下，使用者所反映的駕駛行為，但無法做到控制階段，換句話說，所制定的費率只能「希望」駕駛者能依照預期的行為來選擇，而不能「要求」駕駛者依營運者的期望來選擇路徑。因此未來可探討何種控制手段可使駕駛者達到上層營運所預期的目標。
5. 本研究的路網中，假設平面道路為一封閉路線，即無其他車流進入此一系統之中，然而實際情形中，平面替代道路沿途尚有許多與之交叉之路口，每一路口皆有號誌及其他進入系統中之車輛造成平面道路旅行時間之干擾，造成模式中低估旅行時間或無考慮到延滯的狀況。未來相關研究則可針對此一問題加以改善，將路網精細化，以滿足實際情形。



參考文獻

- 1、 陳建智，「高速公路收費車道差別取價之研究」，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國八十五年六月。
- 2、 溫惠美，「道路定價策略之研究-以實施地區通行證為例」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國八十一年六月。
- 3、 鄭淑穎，「高速公路擁擠稅之分析」，東吳大學經濟學研究所碩士論文，民國八十五年七月。
- 4、 彭一民，「運輸走廊路段擁擠收費與擬運補貼之研究」，國立交通大學運輸科技與管理學研究所碩士論文，民國九十二年六月。
- 5、 鄭力寬，「應用雙層次數學規劃於鐵路定價問題之研究」，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國九十二年七月。
- 6、 張亦寬，「以雙層次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，民國九十三年六月。
- 7、 廖珉鋒，「動態起迄旅次矩陣推估模型之研究」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，民國八十九年七月。
- 8、 葉豈陞，「異質旅次之道路擁擠定價研究」，國立東華大學國際經濟研究所碩士論文，民國八十九年六月。
- 9、 黃燦煌，「即時資訊狀況下駕駛人路線選擇行為之分析」，國立交通大學交通運輸研究所博士論文，民國八十九年六月。
- 10、 賴禎秀、吳志仁，「高速公路實施施匝道電子收費下最佳費率與經濟效益評估之研究」，運輸計劃季刊，第三十一卷，第一期，pp. 37-58。
- 11、 賴禎秀、楊培俊、曾俊琳、白俊英，「開車通勤者時間價值之模式研究」，運輸計劃季刊，第三十二卷第三期，pp. 479-492。
- 12、 陳一昌、林禎家，「台灣地區高速公路電子自動收費方式芻議」，中華道路，第三十九卷第三期，pp. 4-12，民國八十九年七月。
- 13、 張有恆，「運輸經濟學」二版，華泰書局出版，民國八十八年七月。
- 14、 王慶瑞，「運輸系統規劃」，正揚出版社，民國八十五年八月。
- 15、 A. d. May, D. S. Milne, “Effects of alternative road pricing systems on network performance” , Transportation Research Part A 34(2000) 407-436.
- 16、 Arnott R., de Palma A. and Lindsey R., 1990b, “Departure Time and Route Choice for the Morning Commute” , Transportation Research Part A 24 pp. 209-228.
- 17、 Campbell J. F., 1992, “Selecting routes to Minimize Urban Travel Time” Transportation Research Part B 26 pp. 261-274.
- 18、 Daganzo C. F., 1995, “A Pareto Optimum Congestion Reduction Scheme” , Transportation Research Part B 29 pp. 139-154.

- 19、Daganzo C.F. and Garcia R., 2000, “A pareto Improving Strategy for the Time-Dependent Morning commuter Problem” , Transportation Science Vol. 34 pp. 303-311.
- 20、Huang H. J. and Yang H., 1996, “Optimal Varying Road-use Pricing on A Congested Network of Parallel Routes with Elastic Demand” , Transportation and Traffic Theory, ed. Lesort, J.B. pp.479-500, Pergamon, Oxford.
- 21、Hung H. J., 2002, “Pricing and Logit-Based Mode Choice Models of a Transit and Highway System with Elastic Demand” , European Journal of Operation Research, Vol. 140 pp. 562-579.
- 22、Wie B. W., Tobin R.L. and Friesz T.L., 1989, “Dynamic Network Traffic Assignment Considered as A Continuous Time Optimal Control Problem” , Operations Research, Vol. 37 pp. 893-901.
- 23、Wie B. W., Tobin R. L. and Friesz T. L., 1994, “The Augmented Lagrangian Method for Solving Dynamic Network Traffic Assignment Model in Discrete Time” , Transportation Science, Vol. 28, pp. 204-220.
- 24、Yang, H. and Huang, H. J. (1997), “Analysis of the Time-Varying Pricing of a Bottleneck With Elastic Demand Using Optimal control Theory” , Transportation Research Part B 31 pp. 425-440.
- 25、Thomas F. Golob, 2001, “Joint models of attitudes and behavior in evaluation of the San Diego I-15 congestion pricing project” , Transportation Research Part A pp. 495-514.
- 26、Murat Yuksel, Shivvkumar Kalyanaraman and Anuj Goel, 2003, “Congestion Pricing Overlaid on Edge-to-Edge Congestion Control” , IEEE.
- 27、Yang H. and Huang H. J., 1999, “Carpooling and congestion pricing in a multilane highway with high-occupancy-vehicle lanes” , Transportation Research Part A 33, pp. 139-155.
- 28、Winston Harington, Alan J. Krupnick, Anna Alberini, 2001, “Overcoming public aversion to congestion pricing” , Transportation Research Part A 35, pp. 87-105.
- 29、Yang H. and Huang H. J., 1998, “Principle of marginal-cost pricing: How does it work in a general road network?” , Transportation Research Part A 32, pp. 45-54.
- 30、Katsuhiko Nakamura, Kara Maria Kockelman, 2002, “Congestion pricing and roadspace rationing: an application to the San Francisco Bay Bridge corridor” , Transportation Research Part A 36, pp. 403-417.
- 31、May A.D. and Milne D.S., 2000, “Effects of alternative road pricing

systems on network performance” , Transportation Reserch Part A 34, pp. 407-436.

- 32、Hai Yan, and William H.K. Lam, 1996, “Optimal road tolls under conditions of queueing and congestion” , Transportation Research Part A 30, pp. 319-332.



全文完

簡 歷



姓名：王耀駿

籍貫：台灣省嘉義市

生日：1977.07.21

學歷：私立逢甲大學 交通工程與管理學系

國立交通大學 交通運輸研究所

E-mail：jor0721.tt92g@nctu.edu.tw

