

以劇變模型分析高速公路實施擁擠收費 之駕駛人路線移轉行為¹

A CATASTROPHE MODEL FOR ANALYZING DRIVER ROUTE SWITCHING BEHAVIOR DUE TO CONGESTION CHARGING ON FREEWAYS

郭奕文 Yi-Wen Kuo²

(99年8月17日收稿，100年1月21日第一次修改，
100年3月4日第二次修改，100年6月4日定稿)

摘 要

未來高速公路全面實施電子計程收費後，在收費技術可行的前提下，為有效落實擁擠管理，可配合推動擁擠收費政策。不同於過去研究採個體選擇模式，本研究應用尖點劇變模型，探究小汽車駕駛人在假設性擁擠通行費率情境下之路線移轉行為，並了解其可能存在的非線性特徵。實證研究針對臺灣西部高速公路小汽車駕駛人進行問卷調查，共蒐集 1,121 份有效樣本。透過定量與定性分析方法，選定路線移轉行為作為狀態變數，單位通行費率與移轉障礙則分別為控制變數中之正則因子與分裂因子，校估出四種擁擠情境下之路線移轉行為模型，並檢定控制空間中六個區域的樣本結構分布比例的差異性，進一步解釋駕駛人路線移轉行為產生之發散性、突變性、滯後性與雙重性等劇變特徵。當駕駛人認知的移轉障礙較高，且在擁擠通行費率每公里訂為 1.2 及 1.5 元時，路線移轉行為為最易發生不連續變化現象。

-
1. 本研究感謝國家科學委員會專題研究計畫補助 (NSC98-2410-H-366-011-SSS)。
 2. 樹德科技大學運籌管理系助理教授 (聯絡地址: 82445 高雄市燕巢區橫山路 59 號樹德科技大學運籌管理系; 電話: 07-6158000 ext.4514; E-mail: shauai.tt91g@nctu.edu.tw)。

關鍵詞：擁擠收費；路線移轉行為；移轉障礙；尖點劇變模型

ABSTRACT

For congestion management purposes, a congestion charging strategy could be implemented to accompany the oncoming implementation of the electronic distance-based charging strategy on freeways. Different from previous studies using discrete choice models to discuss driver route switching behavior, this paper attempted to apply the cusp catastrophe model to discuss driver route switching behavior under various congestion charging scenarios and describe their non-linear characteristics. According to the empirical study, the questionnaire survey was conducted to collect 1,121 valid samples from freeway drivers traveling in western Taiwan. By means of quantitative and qualitative analysis, the proposed behavioral model used "route switching behavior" as the state variable and "switching barrier" and "a unit of charging rate" as control variables. The test of independence was performed to check sample structures for six areas of the control space, and the catastrophe characteristics, such as divergence, catastrophe, hysteresis, and bimodality, of switching behavior were discussed. A higher switching barrier would easily cause discontinuous switching behavior while encountering a unit of charging rates, especially at NT\$1.2/km and NT\$1.5/km.

Key Words: Congestion charging; Route switching behavior; Switching barrier; Cusp catastrophe model

一、緒 論

為實現公平計程收費的目標，交通部國道高速公路局（以下簡稱高公局）擬於民國 101 年底全面實施電子計程收費（electronic distance-based charging），原先許多免付費的短程旅次將增加其旅運成本，可有效減少高速公路於都會區路段過多借道短程旅次產生的壅塞問題。高速公路全線佈設電子收費系統後，未來將可透過先進科技結合應用成電子收費暨交通管理系統（electronic toll & traffic management, ETTM），以有效提昇交通管理績效。其中，為有效改善高速公路於尖峰時段或部分都會區路段擁擠，或者高速公路整體路網不同路線（例如：國道一號與國道三號）之車流量分布落差等交通問題，可配合路段擁擠收費或尖、離峰差別費率的手段，調節高速公路不同時段與路段之承載流量，落實高速公路需求管理策略。根據不同時段、路段或車流量規模，訂定不同之高速公路通行費率，對抑制尖峰及分散短程旅次需求將有明顯效果。

道路擁擠收費概念之濫觴，係為經濟學者 Pigou^[1]於 1920 提出的擁擠稅理論，其目的是讓使用者負擔其所造成之社會邊際成本。將此概念應用於交通管理策略上，即透過以價制量之經濟手段，達到分散尖峰車流量之具體效益，許多國家（如新加坡、美國等）均

已實施多年並具有相當成效，其他國家（如以色列等）亦擬跟進實施課徵擁擠稅。未來臺灣在高速公路全面架設電子收費系統後，將可克服實施道路擁擠定價之收費技術難題，提供用路人行前之即時通行費率收費標準。因此，俟日後高速公路全面實施電子計程收費單一里程費率達一定時間後，在用路人普遍接受使用者付費觀念後，後續將可視高速公路交通管理上之需求，結合電子收費系統實施差別定價之擁擠收費手段。

至於高速公路實施差別通行費率後，能否對調節車流量發揮具體成效，端視駕駛人對不同費率水準之忍受程度，其對路線移轉行為的決策判斷，亦明顯受制於移轉障礙及塞車容受力等負向因子，無論是對旅運調整的成本、資訊取得的風險性、對塞車容受力及慣性駕駛行為等，均使得駕駛人多半維持既有行駛路線^[2-3]。然而，當擁擠車流再加上通行費增加之價格調整因子的影響後，是否會發生乘數效應 (multiplier effect)，將使得駕駛人的改道決策產生極大變數；尤以承受車流品質不佳的駕駛人又需支付額外的擁擠稅，是否會促使其改變路線選擇行為的意願，均有待進一步研究討論，因此激發本研究動機。

目前已有學者認為選擇行為屬於一種非連續、且會產生突然變化的非線性系統，並採用法國數學家 René Thom (1923-2002) 所發展出來的劇變理論 (catastrophe theory, CT)，以分析其非線性的不連續變化現象^[4-6]，劇變理論在消費者選擇行為方面的研究已相當成熟^[7-11]。以往研究路線移轉行為的文獻^[3,12-15]，多半是以個體選擇模式探討影響駕駛人改道行為的因素，並藉以預測其對路線方案選擇的機率。惟因個體選擇模式，主要是以解釋變數預測駕駛人可能產生改道行為的機率，至於在何種擁擠費率情境門檻下，駕駛人會無法容忍繼續使用高速公路，而產生突變的改道行為，可嘗試以劇變理論來解釋及判斷駕駛人的劇變行為特徵。

目前尚未有研究運用劇變理論於解釋駕駛人路線移轉之非線性行為現象，且由於本研究初步判定路線移轉行為應具有劇變模式中突變性 (catastrophe)、雙重性 (bimodality) 與遲滯性 (hysteresis) 等劇變特徵，以劇變模型將可描述駕駛人各種可能的路線移轉行為非線性特徵。尖點劇變模型 (cusp catastrophe model, CCM) 因其簡單便於解釋的優點，是最常被運用的劇變模型^[16]，因此，本研究擬嘗試以尖點劇變模型，分析駕駛人在各種擁擠收費情境下，可能調整的路線移轉行為，判定那些駕駛族群會因擁擠費率的變動改道，或者不受擁擠費率影響仍維持繼續行駛高速公路，抑或是改道決策尚未明確的駕駛族群。

爰此，本研究目的在於透過敘述性假設情境模擬高速公路實施擁擠收費政策時，分析在不同車流擁擠程度所訂定的差別通行費率下，運用尖點劇變模型建構路線移轉行為模型，並了解駕駛人路線移轉可能存在的非線性選擇行為特徵。本研究成果期能供後續交通管理單位研訂擁擠費率之參酌，俾利以價格機制降低區域交通擁擠的效果，落實高速公路需求管理。

二、文獻回顧與研究架構

2.1 文獻回顧

所謂道路擁擠定價，係依據道路擁擠程度對用路者收取額外費用，將車輛使用者所產生的外部成本內部化，其中，外部成本是指擁擠增加對其他行駛中之道路使用者所增加的旅行時間成本^[17]；早期 Pigou^[1]與 Knight^[18]即認為道路過度擁擠主要因用路者僅負擔感受到的平均成本，卻忽略了其所造成道路擁擠增加之外部性社會成本，故提出應對用路者收取邊際外部擁擠成本 (marginal external congestion cost)，以符合使用者付費原則，並可藉由擁擠費的收取，改善交通系統使用狀況。

擁擠收費的研究廣受交通經濟學者的重視，早期國外研究著重於推導擁擠收費模式^[19-23]，隨著車輛到達擁擠路段時間的不同而不斷變動擁擠費率結構，以消除通勤車輛所造成之擁擠現象。國內過去有關道路擁擠定價理論的探討也相當多^[24-29]，亦皆著重以數學解析法推導模式。褚志鵬^[26]探討高速公路主線與匝道收費政策下的擁擠定價，討論不同收費政策對道路流量的影響及福利的變動；賴禎秀與吳志仁^[27]則探討高速公路實施匝道電子收費下之最佳費率與經濟效益。褚志鵬、葉豈陞^[28]提出考慮不同價格彈性用路者之道路定價模型，考量不同道路、時段與用路者間之關係，探討異質用路者於政府採取不同收費政策（不收費政策、最適道路定價政策及次佳道路定價政策）時之費率形式，並進一步模擬分析其道路使用的費率、旅次變化及福利增減情況。

陳敦基等人^[30]曾針對與我國國情相近國家（如日、韓、新、港等）之高速公路通行費費率標準及徵收方式比較，發現我國目前高速公路之通行費，是依民國 80 年更改之徵收費率至今，相較之下我國各車種費率標準均有偏低的現象；並進一步研擬通行費調整方案，針對產、官、學專家進行調查，結果顯示，若實施尖離峰收費方式，「尖離峰費率 1.5 : 1，如小汽車尖峰 60 元、離峰 40 元」之費率方案為最佳；至於民眾大多能接受「里程計費」，亦贊成實施「尖、離峰差別費率」以達交通管理功效，但對費率調高普遍傾向反對意見。周榮昌等人^[31]發現自用車使用者對擁擠定價接受意向多屬於心理層面因素，尤以公平性及對自由侵犯兩因素，為影響擁擠定價成功與否的重要關鍵。

尖峰時段高速公路因路段上交通需求量超過其設計容量，因而造成塞車現象，交通管理者即可採擁擠收費之需求管理策略，分散車輛使用高速公路的需求量。因此，除了擁擠費率結構的討論外，擁擠定價策略對駕駛人旅運決策的影響，亦甚多研究著墨^[14, 32-34]。Adler^[32]研究擁擠收費的實施會造成旅運者改變路線、出發時間、運具及是否放棄此旅次等四種選擇方案，收入及工作型式對費率結構反應較敏感，收入高者因時間價值較高，故尖峰收取較高費用並不會改變旅運行為，工作型式屬學校教職員或政府工作人員亦較不易改變旅運時間。Burris^[33]計算出不同擁擠通行費率對交通流量的彈性範圍介於 -0.076 ~

-0.15 間，且將造成旅行時間減少 8.8% ~ 13.3%；此外，其並計算出在不同的地點實施擁擠定價，旅行時間及通行費率對旅運需求之影響，旅行時間彈性介於 -0.27 ~ -1.33，通行費率彈性則介於 -0.03 ~ -0.36^[34]。

溫傑華、蔡政霖^[14]調查高速公路小客車通勤者在實施電子計程收費及尖、離峰擁擠定價時，於「路線」及「出發時間」的決策行為；該研究以多項羅吉特及巢式羅吉特模式校估，研究發現旅行時間、通行費差額、時程延滯、個人所得、公司是否有簽到規定、行駛里程及使用高速公路作為通勤路線的比例等，為顯著影響旅運選擇行為之項目。在旅運決策的改變方面，「離峰時段使用高速公路但提早出發」的通勤者最多；當尖峰時段通行費率大幅調升時，「尖峰時段使用高速公路且不改變出發時間」的選擇機率會大幅度地減少，使用平行替代道路的機率大增，顯示高速公路通勤者對通行費率相當敏感。

國內高速公路後續若要以電子計程收費的技術基礎推行擁擠收費政策，需衡量多數駕駛人旅運特性及心理因素，不可單方面考量政府方面營收狀況，以避免旅運行為產生過多移轉現象，導致主要道路未被充分使用而替代道路反倒擁擠的問題。因此，高速公路擁擠收費政策的實施，確實需了解在不同擁擠費率結構下之駕駛人路線移轉行為的變化，意即為本研究討論的主要課題。路線移轉行為的影響變數涉及量化與質化因素，亦有諸多研究進行討論^[2,3,12-15]，包括環境特性、旅運特性、社經特性、資訊類型及潛在認知、態度變數等^[3]，均將影響駕駛人的選擇決策判斷。

由於過去有關路線移轉行為的研究係以線性模型（如結構方程模型或各式羅吉特模型等）為主^[2,3,12-15]，至今尚未有研究著重以非線性模型解釋路線移轉行為。然而，有許多研究指出選擇行為本身具有非線性的現象^[9,10]，並認為法國數學家 Thom 在 1970 年代所建構的劇變模型，對非線性行為具有很好的解釋能力，且劇變理論已廣泛應用於不同研究領域^[4-7, 9,10, 35-38]，尤其 Zeeman^[7]是最早將劇變論應用於社會科學領域並大力推廣，至今劇變理論在選擇行為的研究領域應用最為廣泛。如 Chidley、Lewis 與 Walker^[37]選擇品牌價格及消費者的屬性偏好為控制變數，並以尖點劇變模型分析消費者品牌忠誠度的不連續變化行為；Oliva、Oliver 及 MacMillan^[9]則是運用尖點劇變模型探討消費者滿意度的非線性行為，並進一步指出消費者的滿意（不滿意）與不滿意（滿意）行為有不同轉折點；Lange、McDade 及 Oliva^[10]應用劇變模型探討在具有網路效果的情況下，企業選擇應用軟體的決策過程，並說明不同軟體市場市占率的不連續變化；Vikram 與 Ruth^[38]則是以尖點劇變模型來描述消費者資訊使用滿意度的非線性行為。

馮正民、黃昱凱等人^[4]針對臺灣便利商店高度聚集的特性，以尖點劇變模型來分析店配取貨點的選擇行為，除了闡述選擇行為的劇變特徵外，並收集電子商店的實際資料，以定性分析轉移成本與服務品質等因素，研究如何經由不同的物流行銷活動影響消費者的選擇行為。郭奕姝、黃昱凱等人^[5]針對自由行旅客，探討其對旅行社網站的選擇行為，根據劇變理論建構選擇行為模型，以忠誠度指標作為模式中之狀態變數，轉移成本與滿意度則為控制變數，藉此進行模型參數校估及動態分析，並說明選擇行為的發散性、劇變性、遲

滯性與雙重性等劇變特徵在行銷上的意涵，進一步發展相對應的行銷策略以供旅行社業者參酌。

至於尖點劇變模型在運輸領域的研究課題，過去大多集中於車流理論的應用，Navin^[39]認為三度空間的尖點劇變模型，適合用於解釋車流理論三個變數間的關係，車流即類似尖點劇變模型的特徵，兩個控制變數連續的改變，可能導致狀態變數產生突然的劇變，其中，車速即是狀態變數可能產生劇變，而流量與占有率則為控制變數；其提出二階段車流模式，反應駕駛人在高速與低速行駛時之不同駕駛行為，並探討車流從非擁擠狀態進入擁擠狀態時，車速的突然跳動改變，在近似容量下的車流較自由車流易發生不連續劇變現象。雖然 Navin 率先發表應用尖點劇變模型於車流理論的構想，但其並未具體應用車流資料進行模式校估，Hall^[40]則延續其研究構想，並試著運用車流資料進行數學解析與實證研究，利用劇變理論解釋高速公路車流速率在擁擠與非擁擠車流之間所產生的跳躍行為。但高速公路因意外事件引起的瓶頸路段，其附近車流量、車道占有率及平均速率運作情形，難以運用過去傳統車流理論解釋，尤以在意外事件發生的上游路段，車流從自由車流變成擁擠車流之轉變，對此，Persaud 與 Hall^[41]以劇變理論為基礎，分析意外事件發生時之車流模式。

Acha-Daza 和 Hall^[42]歸納出將尖點劇變理論應用於車流模式時，需先經座標轉換及旋轉的步驟方能適用，該研究利用感應線圈所蒐集的 30 秒車流資料進行實證分析，結果顯示依此概念所建構出的尖點劇變車流模式，對高速公路上行駛車流的速率有較佳的適用性與預測能力。Acha-Daza 和 Hall^[43]同樣將座標轉換及旋轉後應用尖點劇變模型於解釋車流理論，以數學式呈現變數間的轉換並校估模式，且輔以圖形說明尖點劇變車流模型中各變數間的關係，中間曲面摺疊處顯示狀態變數不穩定的現象，由於實際上這種不穩定狀態並不存在，因此，狀態變數將會轉而落在上方或下方的曲面上。Pushkar、Hall 與 Acha-Daza^[44]則利用高速公路單一感應線圈所蒐集的交通流量與占有率資料，以尖點劇變模型校估車流速率。

2.2 研究課題

綜合以上相關文獻回顧，初步針對本研究課題作以下四點評述：

1. 無論是擁擠稅理論或國外實施經驗，皆證明利用課徵擁擠稅的方法，對紓解擁擠車流具相當之成效。時值國內高速公路即將全面推動電子計程收費之際，車流資訊的即時提供與收費技術上的克服，均使日後藉由實施擁擠收費以達到分散車流的策略更為可行。惟擁擠收費政策是否能達成實質效益，確實有必要從需求面深入了解高速公路駕駛人對實施擁擠收費之實際看法與其旅運決策的變化，作為提擬擁擠收費政策前置作業之參酌。
2. 高速公路實施擁擠收費政策下之車流擁擠程度與通行費率的差異，均將影響駕駛人是否維持繼續行駛高速公路，因此，擁擠費率模擬情境的設計，均將直接衝擊駕駛人對改道決策的判斷。本研究將透過不同費率情境下駕駛人呈現之敘述性偏好，了解在何種情境

駕駛人易產生劇變的改道行為，俾利協助交通管理單位調整通行費率。

- 過去探討路線移轉行為的研究，多半以個體選擇模式之個人效用最大化的觀點，去預測其改道的機率，目前尚未有研究引用劇變模型探討駕駛人之路線移轉行為，而選擇兩條路線方案的雙重性，符合劇變理論之其一特徵，在擁擠收費的機制介入下，路線移轉行為亦可能存在其他的劇變特徵，如劇變性、遲滯性與發散性等。因此，本研究嘗試運用劇變模型，作為分析駕駛人路線移轉行為之初探，試圖以定量與定性分析方式，解釋不同駕駛人群體在不同擁擠費率情境下之路線選擇決策，所呈現的非線性變化現象。
- 以往運輸領域有關尖點劇變模型的應用，主要著重於車流理論三變數間的討論，說明擁擠與非擁擠車流狀態間不連續的劇變現象，惟尖點劇變模型於車流理論的狀態變數與控制變數（包括車速、流量與占有率）均屬客觀量化變數，可直接測得或計算所得。至於本研究將尖點劇變模型應用於解釋改道行為，則參酌其他社會科學行為研究，選定之狀態變數與控制變數大多屬觀測樣本主觀認知或態度等質化變數（如移轉障礙、移轉意願等），採李克特 (Likert) 尺度衡量，再轉換成量化變數進行模式校估，與過去車流理論選用的變數特性不同。惟兩類研究均試圖透過非線性的劇變模型，討論可能存在的雙重性、劇變性、遲滯性與發散性等重要劇變特徵，可獲致較一般線性模型更多的訊息。

2.3 研究架構

本研究重點在於分析小汽車駕駛人對高速公路實施擁擠收費政策之非線性路線移轉行為，因此，將以敘述性偏好法設計不同的擁擠收費情境，並以問卷調查方式，蒐集駕駛人對假設通行費率情境下路線移轉行為的偏好資料，以及相關的旅運特性（如旅次目的、行駛頻率、行駛里程、移轉障礙認知等）與社經條件（如性別、年齡、教育程度、個人月所得等）。利用劇變模型分別進行定量與定性分析，校估模型參數及分析劇變特徵，以描述駕駛人路線移轉行為之非線性現象。

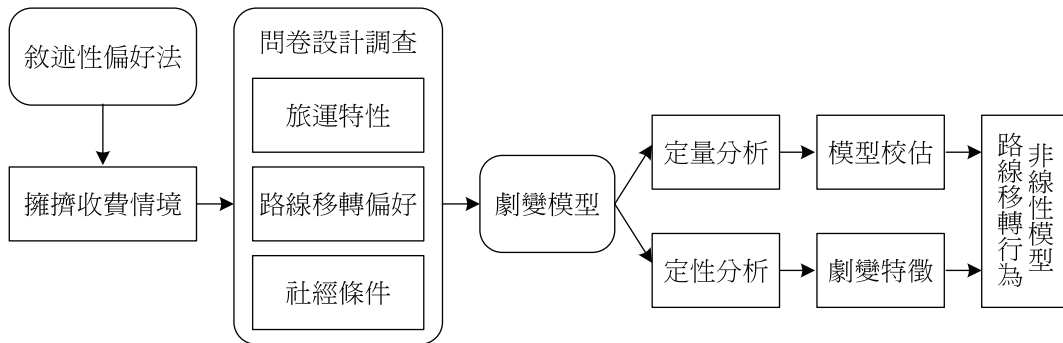


圖 1 研究架構

三、研究方法

3.1 劇變理論

劇變理論 (catastrophe theory) 的數學架構是由法國數學家 Thom 建構，屬於拓樸理論 (topological theory) 的一種，主要探討當系統出現多重穩態 (steady state) 時，系統由某一穩態至另一穩態的過程。當研究的系統具有一個 (或多個) 穩定 (或不穩定) 的平衡點，則可嘗試應用劇變理論分析^[45]。所謂的穩態，係指系統某一狀態的持續出現，穩態系統具有相當程度的抗擾性，系統不會因參數些許改變而偏離此穩定狀態。若一函數的參數在某一範圍內不只有一個極值時，則此時的系統極有可能處於不穩定狀態，劇變模型就是對這樣的分歧現象，提供一個幾何分析的數學基礎^[4,5]。

Thom 根據不同的狀態變數 (state variable) (數量不大於 2) 與控制變數 (control variable) (數量不大於 4) 提出七種劇變模型^[46]，彙整如表 1 所示。由於 Thom 所提出七種劇變模型的特徵均可在尖點劇變模型 (cusp catastrophe model) 中找到，加上尖點劇變模型較為簡單，且已可解釋許多系統的非線性行為，因此該模型是最常被運用的劇變模型^[16]。

3.2 尖點劇變模型

(一) 模型函數

尖點劇變模型 (cusp catastrophe model, CCM) 是由兩個控制變數 u, v 描述系統的狀態變數 x ，其中，控制變數 u 稱為分裂因子 (splitting factor)，控制變數 v 則稱為正則因子 (normal factor)。控制變數 u, v 所組成的參數空間稱為控制空間 (control space)，CCM 的勢函數 (potential function) 可用式(1)³表示：

$$F(u, v, x) = \frac{1}{4}x^4 - \frac{1}{2}ux^2 - vx \quad (1)$$

不同控制參數的數值，會有不同結構的勢函數，對式 (1) 微分，可求得勢函數的穩定解，得到其穩定曲面 M_F (equilibrium surface)：

3. 式(1)中尖點劇變模型的變數符號與表 1 所示符號不同，此因對劇變理論七種模型而言，勢函數的表示方法並無普遍接受的符號，不同研究者會用不同符號表示其勢函數^[4]。

表 1 劇變模型

模型名稱	控制變數 數量	狀態變數 數量	勢函數 ⁴
摺點劇變 Fold Catastrophe Model	1	1	$\frac{1}{3}z^3 - xz$
尖點劇變 Cusp Catastrophe Model	2	1	$\frac{1}{4}z^4 - xz - \frac{1}{2}yz^2$
燕尾劇變 Swallowtail Catastrophe Model	3	1	$\frac{1}{5}z^5 - xz - \frac{1}{2}yz^2 - \frac{1}{2}vz^3$
蝴蝶劇變 Butterfly Catastrophe Model	4	1	$\frac{1}{6}z^6 - xz - \frac{1}{2}yz^2 - \frac{1}{3}vz^3 - \frac{1}{4}uz^4$
雙曲臍點劇變 Hyperbolic Catastrophe Model	3	2	$z^3 + w^3 + xz + yw + vzw$
橢圓臍點劇變 Elliptic Catastrophe Model	3	2	$z^3 - zw^2 + xz + yw + vz^2 + vw^2$
拋物臍點劇變 Parabolic Catastrophe Model	4	2	$z^2w + w^4 + xz + yw + vz^2 + uw^2$

資料來源：Gilmore^[46] (1981)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x} &= x^3 - ux - v = 0 \\ M_F : \{(u, v, x) \mid x^3 - ux - v = 0\} \end{aligned} \quad (2)$$

對式(2)求算赫斯判別式 (Hessian discriminate)，並令其為零，可得到奇異點集 K (singularity set)：

$$3x^2 - u = 0 \quad (3)$$

由式 (2) 及式 (3) 消去狀態變數 x ，可得到分歧點集 B (bifurcation set)，是指當方程式出現多重解之所有控制變數的集合，又稱為 Cardan 判別式 (以 Δ 表示)：

$$\begin{aligned} 4u^3 &= 27v^2 \\ \Delta &= 27v^2 - 4u^3 \end{aligned} \quad (4)$$

4. 各勢函數係以 x, y, z, \dots 等常用之空間向度符號示之。以尖點劇變模型為例， x 與 y 分別表示正則因子與分裂因子等 2 個控制變數， z 則表示狀態變數；其他劇變模型則依各變數數量的多寡，依序以 x, y, v, u 等符號標示控制變數，及以 z, w 等符號標示狀態變數。

(二) 模型特徵

經由不同控制變數的參數組合，可捕捉到尖點劇變模型複雜行為的重要特徵，以圖 2 分述說明如后：

1. 發散性 (divergence)

原先相當接近的兩個狀態變數 a 、 b 兩點，會隨著控制變數 u 的平滑移動，在控制空間上分別由 a 點移動至 c 點、 b 點移動至 d 點；至於控制空間相對應的狀態變數 x ，在曲面 M_F 上會分別沿著路徑 A 與路徑 B 產生分歧現象，最後會停留在兩個完全不同的位置上 (即 c 、 d 兩點)。

2. 突變性 (catastrophe)

當控制變數 $u > 0$ 時，控制變數 v 通過分歧點集 B 時會造成狀態變數 x 不連續變化，由於此時狀態變數 x 正位處於模型轉折的邊緣，控制變數 v 微小的變化致使狀態變數 x 產生突然性且不連續的跳動現象。意即雖然系統中兩控制變數 u 、 v 維持在平滑而連續的變化，但其狀態變數 x 卻從某一種穩定平衡突然跳躍到另一種穩定平衡，呈現不連續性的改變。例如控制空間中的 e 點，固定控制變數 u 後變動正則因子 v ，觀察控制空間的 e 點將經由 f 點、 g' 點移動至 h 點；對照曲面 M_F 上路徑 C (e 點→ f 點→ g' 點→ h 點) 的移動，會產生不連續的突變現象。

3. 滯後性 (hysteresis)

當控制變數 $u > 0$ 時，控制變數 v 平滑的變化會造成狀態變數 x 不連續的變化，這種不連續的變化在控制變數 v 落入分歧點集 B 時會有不對稱發生的現象。例如控制空間中的 e 點，當固定控制變數 u 而變動正則因子 v ，會由 e 點經 f 點移動至 g' 點，此時以狀態變數的勢函數而言，點 g' 會比點 g 更為穩定，因此曲面 M_F 的狀態變數 x 應該以 g' 點的形式出現，但是只要控制變數沒有超過 g' 點，狀態變數 x 仍會以 g 的形式出現，此現象稱為滯後性。

4. 雙重性 (bimodality)

雖然相同的控制空間參數多半只會對應到一組狀態變數，然而當系統的 Cardan 判別式小於 (或等於) 0 的時候，相同的控制空間參數會對應到三組 (或兩組) 的控制空間，即系統可同時具有兩個 (或多個) 不同的穩定狀態，如曲面 M_F 中的 c 點與 c' 點均對應到控制空間中 c 點的現象，此種特性無法根據所收集的橫斷面資料確定系統的狀態。

在分析某一個體 (或群體) 行為時，很難根據某些自然律先行寫下一組描述這些行為的方程式，再用劇變理論分析這組方程式具有那些劇變特徵；相反的，在劇變理論的應用上常是先觀察這些個體 (或群體) 有那些可辨認的劇變特徵，只要觀察到所要研究的系統出現這劇變特徵中的任一個特徵時，即可假設此系統的內在動力機制適用於劇變模型，然後選取適當的控制變數與狀態變數，進而決定一個適當的劇變模型解釋所觀察到的現象 [4,5]。

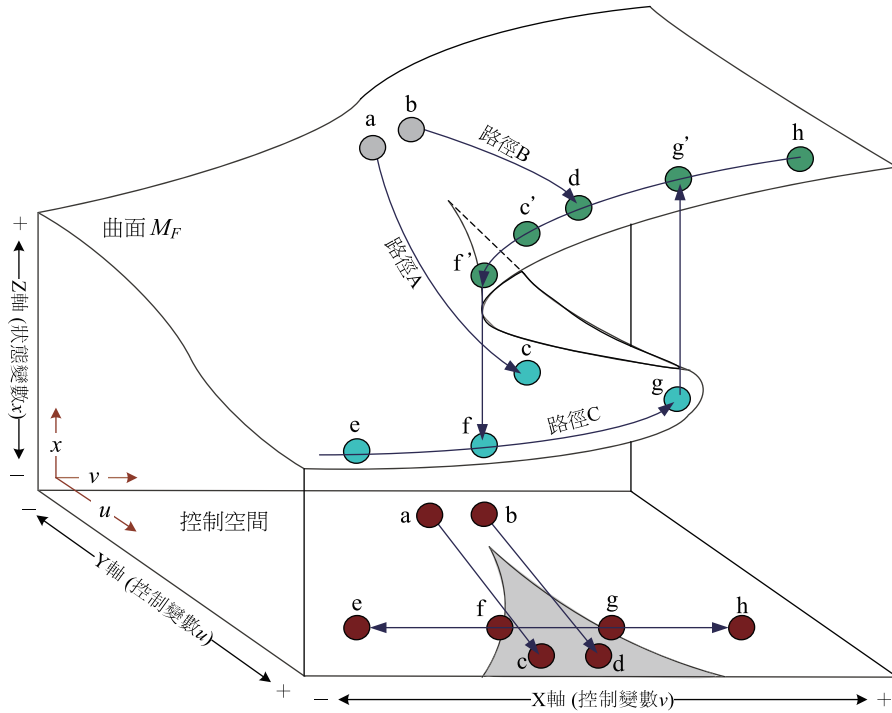


圖 2 尖點劇變模型特徵

(三) 分析步驟

茲將劇變模型的四個分析步驟^[4]說明如下：

1. 步驟一：辨識系統是否具劇變特徵

首先觀察所要研究的系統是否出現劇變模型的特徵，當系統具有任一個劇變特徵時，便可假設系統適合使用劇變模型進行其非線性行為的定性或定量分析。

2. 步驟二：決定適當的劇變模型

選擇一組適當的控制變數與狀態變數，並根據控制變數與狀態變數的數量決定適當的劇變模型分析系統。

3. 步驟三：確認控制變數與狀態變數

決定控制變數中何者為正則因子？何者屬分裂因子？

4. 步驟四：進行劇變模型校估與動態分析

根據所收集得到的資料特性，選擇適合的劇變模型之參數校估方法。若研究時間序列的資料，則適合以 Guastello 迴歸分析法進行校估；若研究橫斷面資料類型，則適合採 Cobb 機率密度函數法或 Oliva 多元變數校估法^[47](即 GEMCAT 演算法)校估參數。由於

GEMCAT (A General Multivariate methodology for estimating CATastrophe models) 演算法允許研究者逕行指定劇變模型中多重變數組成的控制變數與狀態變數，因此本研究將選定 GEMCAT 演算法作為尖點劇變模型的參數校估方法。

(四) 參數校估方法

GEMCAT 的基本想法，係假設狀態變數 x 及控制變數 u 、 v 可由其他變數經線性組合成一個潛在變數^[47]，變數定義如下：

$i = 1 \dots I$ ：狀態變數的個數；

$j = 1 \dots J$ ：分裂因子的個數；

$k = 1 \dots K$ ：正則因子的個數；

$t = 1 \dots T$ ：觀察個數；

x_{it} ：第 t 個觀測項的第 i 種獨立變數；

u_{jt} ：第 t 個觀測項的第 j 種分裂因子；

v_{kt} ：第 t 個觀測項的第 k 種正則因子。

根據上述變數定義，Oliva 等人^[47]重新定義尖點劇變模型中的三種潛在觀察變數：

$$x_t^* = \sum_{i=1}^I \alpha_i x_{it} \quad (5)$$

$$u_t^* = \sum_{j=1}^J \beta_j u_{jt} \quad (6)$$

$$v_t^* = \sum_{k=1}^K \gamma_k v_{kt} \quad (7)$$

式 (5) 中變數 α_i 為狀態變數的校估係數，而式 (6) 及式 (7) 中 β_j 、 γ_k 則分別是分裂因子以及正則因子的校估係數。根據式 (5) ~ 式 (7)，以潛在變數的概念，將尖點劇變模型的勢函數改寫為：

$$f(x_t^*, u_t^*, v_t^*) = \frac{1}{4} x_t^{*4} - v_t^* x_t^* - \frac{1}{2} u_t^* x_t^{*2} \quad (8)$$

Oliva 等人^[47]認為既然尖點劇變模型關心的現象是發生在不同參數組合中，該勢函數穩定解的改變行為，則該以勢函數的一階微分方程組為校估對象，如式 (9)：

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(x_t^*, u_t^*, v_t^*)}{\partial x_t^*} &= 0 \\ &= x_t^{*3} - v_t^* - u_t^* x_t^* \end{aligned} \quad (9)$$

GEMCAT 演算法就是要對於式 (9) 進行求解，並以最小平方方法的概念將求解的目標以式 (10) 來表示：

$$\begin{aligned} \text{Min}_{\alpha_i, \beta_j, \gamma_k} \Phi &= \|e_t\|^2 \\ &= \sum_{t=1}^T \left[x_t^{*3} - v_t^* - u_t^* x_t^* \right]^2 \end{aligned} \quad (10)$$

在此 e_t 表示誤差項，當給定一組資料，並進一步選擇適當的狀態變數以及控制變數，經由 GEMCAT 演算法可以進一步校估出一組適當的參數 ($\alpha_i, \beta_j, \gamma_k$) 讓 Φ 的值最小，Oliva 並建議以一個修正後的 CRS (controlled random search) 搜尋法來處理式 (10) 的問題。

雖然 Oliva 等人^[47]在 1987 年就已經發展出 GEMCAT 演算法，但因使用該演算法進行求解，需要進行相當繁瑣的程式撰寫工作，而此限制亦間接影響其實用性；直到 Lang 與 Oliva 等人，於 1999 年發展出 GEMCAT II 的應用軟體，才讓 GEMCAT 的應用進入更為實用的階段。

3.3 資料蒐集

本研究資料是利用高速公路服務區面訪與網路電子問卷兩種調查方式，假設未來高速公路實施全面電子計程收費後配合實施尖峰時段擁擠收費，針對居住且通勤於臺灣西部高速公路北區（基隆至新竹間）、中區（苗栗至雲林間）及南區（嘉義至屏東間）小汽車駕駛人進行問卷調查，調查時間為民國九十八年十月至十二月間，蒐集平日、假日及各種旅次目的之樣本。

調查問卷內容主要分為三個部分：第一部分在於了解受訪者目前行駛高速公路的現況，包括最常行駛高速公路的旅次目的、行駛頻率、行駛距離、通過的收費站數等，以及了解受訪者對路線選擇決策之認知看法。第二部分則以敘述性偏好法設計擁擠收費情境，調查受訪者在高速公路不同擁擠車流狀況與通行費率下之改道意願。第三部分則是調查受訪者的社會經濟基本資料，俾利了解樣本結構，並可作為不同特性與區域樣本群之差異分析。

由於受訪者的旅運特性，會與未來實施擁擠收費後所需支付的通行費用有極大關聯性，因此，本研究調查受訪者「最常」行駛高速公路的旅次目的、行駛頻率、行駛里程、通過收費站數等，而非單一旅次或尖峰旅次的調查。也因此，實際母體之旅次比例資料確實不易確知，樣本結構亦無法精確推測，加上近來並無類似的調查可供參考，故確實為本研究上的限制。因此，本研究僅能透過區域社經特性的分配比例，調整研究樣本結構，後續再配合不同旅次特性的樣本進行差異性分析，以便了解不同旅次特性樣本對改道行為的差異。

調查問卷設計中有關擁擠收費的情境，共分為兩組旅次型態（如表 2），即高速公路計

次階段免收費的都會區短程旅次 (即情境一與情境二), 以及需通過一個收費站的城際間旅次 (即情境三與情境四); 其中, 依高速公路兩種擁擠車速 (60 公里/小時及 40 公里/小時), 組合成四種不同的道路車況, 情境二與情境四屬較壅塞的情況 (40 公里/小時)。每個情境並對應計程擁擠收費階段之四個不同單位通行費率水準 (1、1.2、1.5 或 1.8 元/公里), 詢問受訪者在情境假設條件下面臨不同通行費率時的路線移轉行為。

問卷中有關認知與態度等問項皆採正向敘述方式, 以李克特五點尺度衡量, 分別為「非常不同意/非常不可能」、「不同意/不可能」、「普通」、「有點同意/有點可能」及「非常同意/非常可能」, 主要詢問受訪者對高速公路實施擁擠收費的看法, 以及在不同擁擠收費情境下, 是否會考慮改為行駛替代道路的行為意向。

表 2 擁擠收費情境設計

情 境	旅次型態	路線	車流狀況		通行費	
			行車速度 (公里/小時)	行車時間 (分鐘)	計次階段 (元/次)	計程擁擠收費階段 (元/公里)
情境一	都會區	高速公路	60	15	0	1、1.2、1.5 或 1.8
		替代道路	40	40	0	0
情境二		高速公路	40	25	0	1、1.2、1.5 或 1.8
		替代道路	40	40	0	0
情境三	城際間	高速公路	60	35	40	1、1.2、1.5 或 1.8
		替代道路	40	60	0	0
情境四		高速公路	40	55	40	1、1.2、1.5 或 1.8
		替代道路	40	60	0	0

四、資料分析與模型校估

4.1 敘述性統計

本研究調查期間共蒐集 1,121 份有效問卷, 樣本結構如表 3 所示, 其中受訪者現居地分布為北區 41.1%、中區 22.8%及南區 36.1%。依受訪者的社會經濟特性分析, 以男性駕駛人居多 (62.3%), 八成以上集中在年齡層 25~54 歲 (82.4%), 大學專科以上學歷者占六成以上 (65.4%), 約六成五的受訪者之個人月所得為 2~8 萬 (64.1%)。至於從受訪者的旅運特性來看, 依駕駛人最常行駛高速公路的旅次目的劃分, 分別為工作旅次 17.6%、商務洽公旅次 19.0%、社交旅次 23.5%及旅遊旅次 33.3%; 依受訪者最常行駛高速公路的里程區分, 短程旅次 (0~100 公里) 占一半以上 (57.2%)、中程旅次 (100~200 公里) 占 29.6%, 長程旅次 (200 公里以上) 則為 13.2%; 至於受訪者最常通過的收費站數, 目前 (計

次收費階段) 毋須繳交通行費者占 4.7%，三成受訪者經常通過 1 個收費站，六成受訪者通過 2 個以上收費站。

表 3 敘述性統計

調查項目		樣本數	百分比 (%)	調查項目		樣本數	百分比 (%)
現居地	北 區	461	41.1	旅 次 的 目 的	工 作	197	17.6
	中 區	256	22.8		商務洽公	213	19.0
	南 區	404	36.0		社 交	263	23.5
性 別	女	423	37.7		旅 遊	374	33.4
	男	698	62.3		其 他	74	6.6
年 齡	24 歲以下	91	8.1	行 駛 率 頻 率	每天 1 次	148	13.2
	25 ~ 34 歲	314	28.0		兩、三天 1 次	179	16.0
	35 ~ 44 歲	367	32.7		一星期 1 次	224	20.0
	45 ~ 54 歲	243	21.7		兩星期 1 次	160	14.3
	55 歲以上	106	9.5		一個月 1 次以上	410	36.5
教 育 程 度	高中職以下	388	34.6	行 駛 程 里 程	0~30 公里	115	10.3
	大學專科	440	39.3		30~100 公里	526	46.9
	研究所以上	293	26.1		100~200 公里	332	29.6
個 人 月 所 得	2 萬元以下	149	13.3		200~300 公里	100	8.9
	2 ~ 4 萬元	370	33.0	通 過 收 費 站 數	300 公里以上	48	4.3
	4 ~ 6 萬元	349	31.1		0 個	53	4.7
	6 ~ 8 萬元	163	14.5		1 個	376	33.5
	8 萬元以上	90	8.0		2 個以上	692	61.7

4.2 尖點劇變模型校估

(一) 變數定義

本研究重點在於探討擁擠收費對駕駛人路線移轉行為的影響，路線選擇決策係針對高速公路及免付費替代道路進行選擇，因此，「路線移轉行為」將作為尖點劇變模型中的狀態變數，並將「單位通行費率」列為影響改道行為的重要變數，另參考相關文獻^[2,3]探知「移轉障礙」對駕駛人路線移轉行為具有高度負相關，故本研究選取「移轉障礙」與「單位通行費率」作為建構尖點劇變模型中的控制變數。至於何者為正則因子？何者為分裂因子，則參考相關文獻^[4,9,38]將轉移成本設定為控制變數中的分裂因子，故本研究亦將變數意涵相仿的「移轉障礙」定義為分裂因子，至於「單位通行費率」則為控制變數中的正則因子。

依尖點劇變模型分析常用的變數符號，將本研究所使用的變數定義如下：

1. 狀態變數 x ：路線移轉行為

在高速公路不同的塞車狀況與擁擠通行費率情境下，駕駛人是否會改走免付費替代道路之可能性程度。

2. 控制變數 (正則因子) v ：單位通行費率

為高速公路與免付費替代道路的相對通行費率，即高速公路四種擁擠情境下設定的單位通行費率 (即 1、1.2、1.5 或 1.8 元／公里) 扣除免付費替代道路的單位通行費率 (即 0 元／公里)；由於比較的替代道路為免付費，亦可直接以高速公路的單位通行費率計算。

3. 控制變數 (分裂因子) u ：移轉障礙

駕駛人內在對行駛路線所認知的移轉障礙，共包括四個衡量問項 $u_1 \sim u_4$ ，分別代表駕駛人認知的行駛慣性、時間價值、資訊搜尋成本、付費意願等意涵。受訪者對此四個衡量問項均需回答，以李克特 (Likert) 五點尺度衡量，分別表達對各問項「非常不同意」、「不同意」、「普通」、「有點同意」或「非常同意」等意見，並計算此四個衡量問項的算術平均數作為「移轉障礙」的數值。

u_1 ：我習慣行駛固定路線，而不傾向改走其他路線

u_2 ：行駛路線時能否節省時間對我而言非常重要

u_3 ：如果要去了解如何行駛其他路線會很麻煩

u_4 ：我願意付較多費用行駛慣用的路線

(二) 模型校估

尖點劇變模型的校估，是以 GEMCAT 演算法針對式 (8) 勢函數進行，利用 GEMCAT II 軟體執行資料校估，所有變數需先經標準化過程，分別改以 Zx_i , Zu_j , Zv_k 代表標準化後的變數，依式 (5)～式 (7) 可將本研究之狀態變數與控制變數的計算式分別以式 (11)～式 (13) 示之，四種擁擠收費情境的各項變數 x^* , u^* , v^* 之校估結果彙整於表 4。

$$x^* = \sum_{i=1}^I \alpha_i \cdot Zx_i = \alpha \cdot Zx \quad (11)$$

$$u^* = \sum_{j=1}^4 \beta_j \cdot Zu_j = \beta_1 \cdot Zu_1 + \beta_2 \cdot Zu_2 + \beta_3 \cdot Zu_3 + \beta_4 \cdot Zu_4 \quad (12)$$

$$v^* = \sum_{k=1}^I \gamma_k \cdot Zv_k = \gamma \cdot Zv \quad (13)$$

以式 (12) 移轉障礙的計算式來看，表 4 中四種情境校估結果顯示影響移轉障礙最大的參數為 β_2 ，顯示對駕駛人而言，路線選擇時的時間價值認知較高，為實施擁擠收費政策後駕駛人不願改道的關鍵顧慮因素；其次為參數 β_3 ，駕駛人選擇行駛路線的原因亦受慣性行為為影響；至於參數 β_4 的係數值呈現負值，可見一般駕駛人對於需付更多的通行費率才能

使用路線是普遍不能接受，此項認知因素會使得駕駛人傾向改走免付費替代道路。

表 4 尖點劇變模型校估結果

變數 定義 情境	狀態變數 (x^*) 路線移轉行為	控制變數	
		正則因子 (v^*)	分裂因子 (u^*)
		單位通行費率	移轉障礙
情境一	$x^* = Zx$	$v^* = 0.3244 \cdot Zv$	$u^* = 0.1638 \cdot Zu_1 + 0.3050 \cdot Zu_2 + 0.1483 \cdot Zu_3 - 0.0416 \cdot Zu_4$
情境二	$x^* = Zx$	$v^* = 0.3858 \cdot Zv$	$u^* = 0.2016 \cdot Zu_1 + 0.3423 \cdot Zu_2 + 0.1092 \cdot Zu_3 - 0.0700 \cdot Zu_4$
情境三	$x^* = Zx$	$v^* = 0.2905 \cdot Zv$	$u^* = 0.2205 \cdot Zu_1 + 0.2812 \cdot Zu_2 + 0.0608 \cdot Zu_3 - 0.1499 \cdot Zu_4$
情境四	$x^* = Zx$	$v^* = 0.2763 \cdot Zv$	$u^* = 0.2371 \cdot Zu_1 + 0.2523 \cdot Zu_2 + 0.0723 \cdot Zu_3 - 0.1399 \cdot Zu_4$

(三) 系統狀態描述

二維控制空間是由標準化後之單位通行費率 (v^*) 與移轉障礙 (u^*) 等兩項控制變數所組成，控制空間內的樣本資料亦為圖 2 中曲面 M_F 之樣本點的投影資料，四種情境之研究樣本於控制空間內的分布情形如圖 3 所示。橫軸表示高速公路與替代道路之相對單位通行費率 (v^*)，經標準化後橫軸尺度範圍大致為 $-1 \sim 1$ ，共有四種通行費率水準，愈往右表示單位通行費率越高，由左至右的樣本資料柱，分別表示駕駛人面臨單位通行費率 (v^*) 為 1、1.2、1.5 及 1.8 元／公里情況；縱軸則表示駕駛人認知的移轉障礙 (u^*)，經標準化後縱軸尺度範圍大致介於 $-1.5 \sim 1.5$ ，越往下數值為正的部分，表示該研究樣本的移轉障礙高於其他樣本，越往上數值為負則表示移轉障礙相對較低。依據移轉障礙高低、單位通行費率的高低與分歧點集 B (Cardan 判別式 Δ) 等指標，將控制空間分割成 A ~ F 六個區域，各區域特性比較與系統狀態說明彙整於表 5。

以落於 A 區的研究樣本為例，該駕駛人的移轉障礙較低 (標準化後數值小於 0)，面臨高速公路收取較低的單位通行費率時 (標準化後數值小於 0，對應樣本資料柱之單位通行費率即為 1 元／公里與 1.2 元／公里)，狀態變數顯示此區域樣本將傾向維持行駛高速公路；至於位於 B 區的研究樣本，則因面臨高速公路擁擠時段收取較高的單位通行費率時 (標準化後數值大於 0，對應樣本資料柱之單位通行費率為 1.5 元／公里及 1.8 元／公里)，且其移轉障礙較低，因此，極有可能改為行駛免付費的替代道路。C 區研究樣本的移轉障礙較高 (標準化後數值大於 0)，加上此時高速公路的單位通行費率較低，因此較不易激發駕駛人改道的動機，狀態變數顯示大部分的樣本將維持行駛高速公路；而 D 區研究樣本的移轉障礙雖然較高，但面臨高速公路的單位通行費率偏高時，駕駛人在無法接受高費率

的情況下，只能改以選擇行駛免付費的替代道路。落入 A ~ D 這四個區域的樣本，是屬於狀態變數較明確者，即傾向維持行駛高速公路或改駛替代道路。

至於 E 區與 F 區表示 Cardan 判別式 $\Delta < 0$ 的區域，研究樣本的移轉障礙較高，此時系統有兩個穩定解，劇變模型說明此時的參數資訊不足以確認駕駛人會選擇那條路線，這個狀況下的駕駛人無論是維持行駛高速公路或改走替代道路，均是其可選擇的方案。此種情況在駕駛人面臨各種單位通行費率時均可能發生，其中又以單位通行費率在 1.5 元／公里與 1.2 元／公里時，最易發生無法判斷駕駛人究竟採取何種路線決策的現象。駕駛人有可能因對高速公路移轉障礙高的顧慮，雖無法接受較高的單位通行費率，但仍維持行駛高速公路；駕駛人亦可能因高速公路之單位通行費率高過其可接受的範圍，即便其移轉障礙高，只能考慮改走免付費替代道路。惟上述兩種情況均可能發生，即無法確知駕駛人究竟會選擇那條路線。

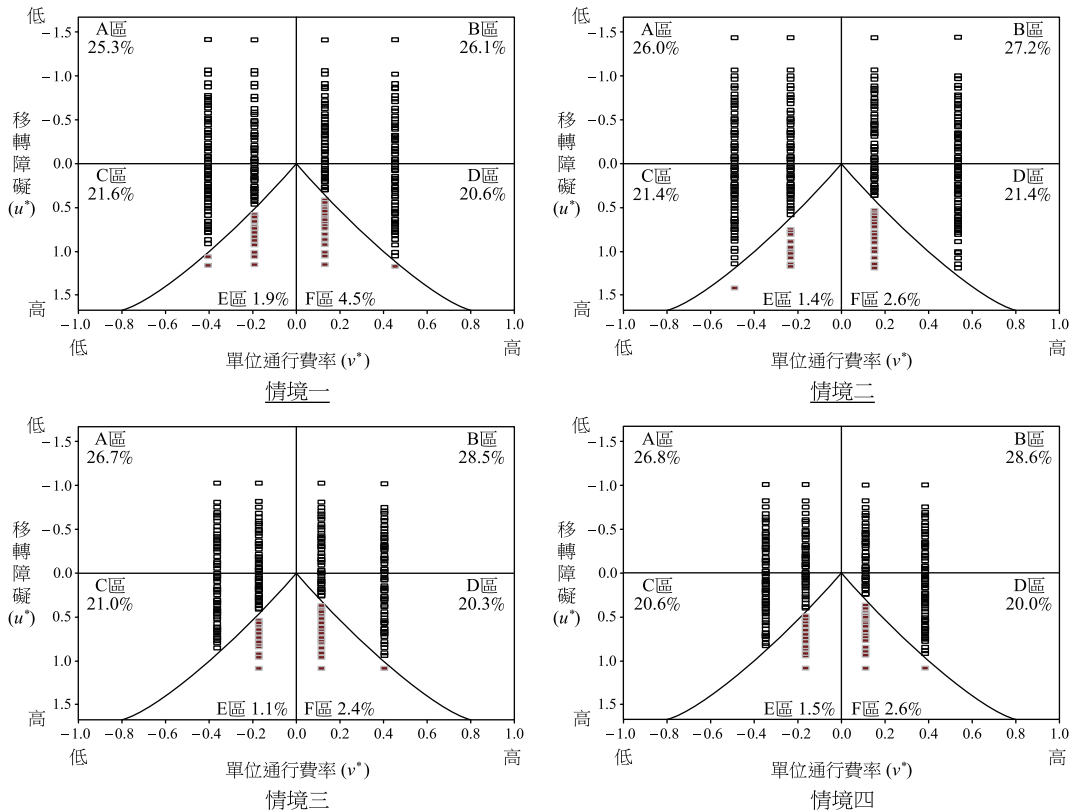


圖 3 控制空間之樣本分布圖

比較四種情境各區占整體樣本的百分比可發現，屬都會區短程旅次（即情境一與情境二）的研究樣本，當駕駛人面臨高速公路擁擠程度增加時（由情境一轉換成情境二），無論

是所認知移轉障礙較低或較高的駕駛人，明確選擇改駛替代道路的比例均會增加 (B 區由 26.1% 增至 27.2%、D 區由 20.6% 增至 21.4%)；同時，不確知選定何種路線 (即 E、F 區) 的現象，會隨著高速公路擁擠程度的提高而稍減 (E 區由 1.9% 降至 1.4%、F 區由 4.5% 降至 2.6%)，顯示擁擠感的認知會促使駕駛人更確認其路線選擇決策。

至於城際間旅次 (即情境三與情境四) 的研究樣本之 B、D 區的分布比例，面臨高速公路擁擠程度增加的改變時 (由情境三變成情境四)，並無明顯變動，顯示當旅行距離較長時，擁擠程度增加的因素，並不會促使更多駕駛人改道；而 E、F 區不確定選擇何種路線的研究樣本比例則略微增加，惟變動不大。

表 5 不同控制空間區域之系統狀態比較

區域	判別式 Δ	單位通行費率 (v^*)	移轉障礙 (u^*)	系統狀態
A	+	-	-	研究樣本的移轉障礙較低，此時高速公路的單位通行費率較低，狀態變數顯示大部分的樣本將維持行駛高速公路。
B	+	+	-	研究樣本的移轉障礙較低，此時高速公路的單位通行費率較高，狀態變數顯示大部分的樣本將選擇改駛替代道路。
C	+	-	+	研究樣本的移轉障礙較高，此時高速公路的單位通行費率較低，狀態變數顯示大部分的樣本將維持行駛高速公路。
D	+	+	+	研究樣本的移轉障礙較高，此時高速公路的單位通行費率較高，狀態變數顯示大部分的樣本將選擇改駛替代道路。
F	-	+	+	研究樣本的移轉障礙較高，此時 Cardan 判別式 $\Delta < 0$ ，表示系統有兩個穩定解，劇變模型
F	-	+	+	說明此時的參數資訊不足以確認研究樣本會選擇那條路線。

(四) 區域樣本結構

為了解圖 3 中 A~F 六個區域之樣本結構分布比例的差異，本研究採交叉分析與卡方檢定進行類別資料分析，以獨立性檢定 (test of independence)^[48]了解各區域與各變數 (即旅運特性與社經條件) 間是否具有關聯性。卡方檢定係透過卡方值的顯著與否，判定各區域的樣本結構分布比例是否具顯著差異，若各區域在某一變數的分布比例相近，則表示此變數與區域間無關聯，反之，若各區域在某一變數的分布比例有差異，則表示兩者間有關聯，茲將四種情境之檢定結果彙整於表 6。比較行駛距離較短的都會區旅次 (情境一與情

境二)之樣本結構分布狀況,兩情境同時於通過收費站數、現居地、年齡、教育程度及個人月所得等五個變數上通過卡方顯著性檢定,表示六個區域在這五個變數上的分布比例是明顯的不一致。此外,較擁擠的情境二,亦反映出各區域在不同旅次目的上分布比例的差異;工作旅次的研究樣本落入 E、F 區的比例高於其他區域,且其移轉障礙略高;反之,商務洽公、社交與旅遊旅次的研究樣本落入 E、F 區的比例則明顯較低,其中,旅遊旅次的移轉障礙較低。

以受訪者最常在計次階段通過的收費站數來看,研究樣本落於 E、F 區之計次階段毋須繳費(即通過 0 個收費站數)的比例略高於其他區域,顯示較不易判斷原先毋須繳費者的路線選擇決策,當高速公路愈擁擠時(情境二)此現象更加明顯;而居住在北區的受訪者,落入 E 區的比例明顯較高,居住於中區與南區的比例則相對較少;年紀輕(24 歲以下)的受訪者,在路線選擇決策上較明確,落入 E、F 區的比例較少,移轉障礙也相對偏低(落入 A、B 區),25~34 歲受訪者的情況則恰與前者相反,較易落入 E、F 區,移轉障礙也相對較高。較不易判斷高中職以下教育程度的受訪者之選擇決策,且其移轉障礙也相對較低;大學以上學歷者,落入 E、F 區的比例較其他區域高,但大學學歷者的移轉障礙較低,研究所以上的移轉障礙則明顯偏高。個人月所得較低者不易落入 E、F 區,反之,所得高的研究樣本則較易落入 E、F 區。

至於行駛距離較長的城際間旅次(情境三與情境四)之樣本結構分布狀況,兩情境同時於旅次目的、行駛頻率、通過收費站數、現居地、教育程度及個人月所得等六個變數上通過卡方顯著性檢定,表示各區域在此六個變數上的分布比例具明顯差異性。相較於都會區旅次(情境一與情境二),城際間旅次反映出的樣本結構,在旅次目的與行駛頻率上的分布比例有明顯的不同。工作旅次的研究樣本落入 E、F 區的比例明顯高於其他區域,且其移轉障礙較高,尤以情境三為甚;至於商務洽公、社交與旅遊等旅次則反之比例較低,旅遊旅次移轉障礙較低的比例明顯較其他旅次多。行駛頻率與旅次目的之情況相似,每天需使用高速公路的通勤者落入 E、F 區的比例明顯增加,其移轉障礙亦較高。至於以通過收費站數來看,原先毋須繳費的受訪者面臨城際間旅次的情境時,更容易落入 E、F 區。其他社經變數如現居地、教育程度與個人月所得的趨勢大致與都會區旅次(情境一與情境二)相似。

4.3 劇變特徵分析

本研究選擇單位通行費率及移轉障礙,建構描述駕駛人路線移轉行為的尖點劇變模型,其中單位通行費率為控制變數中的正則因子 v ,移轉障礙為控制變數中的分裂因子 u ,路線移轉行為則為狀態變數 x ,如圖 4 所示。以下針對尖點劇變模型的四個重要特徵進行定性分析,藉此討論運用劇變理論分析路線移轉行為時,這些劇變模型的特徵在管理上的意涵。

表 6 各區域樣本結構分布比例及卡方檢定結果

變數類別		區域別						情境一						情境二					
								A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
旅次目的	工作 商務洽公 社交 旅遊 其他	15.2	16.5	19.1	19.4	25.0	26.5	14.6	16.6	19.7	19.3	31.4	34.4	19.0	18.7	20.2	19.4	5.8	15.6
		19.0	18.6	19.7	19.5	14.6	17.7	24.8	24.2	24.3	24.3	17.1	9.4	36.2	34.0	30.0	30.8	25.7	28.1
		24.2	24.1	24.7	23.8	22.9	18.6	5.4	6.5	5.8	6.2	20.0	12.5	5.4	6.5	5.8	6.2	20.0	12.5
		36.1	33.9	30.5	31.6	25.0	27.5	11.6	10.8	17.0	16.3	20.0	18.8	15.1	18.3	15.5	14.6	11.4	20.3
		5.5	6.9	6.0	5.7	12.5	9.7	20.2	19.5	18.2	18.7	2.9	20.3	14.6	16.5	13.9	13.5	11.4	10.9
		38.6	35.1	35.9	36.3	43.8	34.5	38.5	34.9	35.4	37.0	54.3	29.7	38.5	34.9	35.4	37.0	54.3	29.7
行駛頻率	每天 1 次 兩、三天 1 次 一星期 1 次 兩星期 1 次 一個月 1 次以上	11.7	10.3	17.1	16.8	14.5	16.8	11.6	10.8	17.0	16.3	20.0	18.8	15.1	18.3	15.5	14.6	11.4	20.3
		15.0	18.1	15.2	15.2	16.7	16.8	20.2	19.5	18.2	18.7	2.9	20.3	14.6	16.5	13.9	13.5	11.4	10.9
		19.6	19.5	18.6	19.0	10.4	18.6	38.6	35.1	35.9	36.3	43.8	34.5	38.5	34.9	35.4	37.0	54.3	29.7
		15.0	17.0	13.2	12.7	14.6	13.3	11.6	10.8	17.0	16.3	20.0	18.8	15.1	18.3	15.5	14.6	11.4	20.3
		38.6	35.1	35.9	36.3	43.8	34.5	38.5	34.9	35.4	37.0	54.3	29.7	38.5	34.9	35.4	37.0	54.3	29.7
		38.6	35.1	35.9	36.3	43.8	34.5	38.5	34.9	35.4	37.0	54.3	29.7	38.5	34.9	35.4	37.0	54.3	29.7
行駛里程	0~30 公里 30~100 公里 100~200 公里 200~300 公里 300 公里以上	9.5	10.0	11.5	13.3	14.6	9.8	8.9	9.4	12.0	13.5	20.0	12.5	46.4	47.9	48.3	45.4	37.2	43.8
		45.9	46.9	48.9	45.4	39.6	50.4	46.4	47.9	48.3	45.4	37.2	43.8	30.5	29.0	27.5	28.2	31.4	28.1
		30.4	29.3	27.5	27.7	33.3	29.2	30.5	29.0	27.5	28.2	31.4	28.1	8.6	9.0	9.6	9.7	11.4	9.4
		8.7	8.9	9.3	10.5	12.5	6.2	8.6	9.0	9.6	9.7	11.4	9.4	5.6	4.7	2.6	3.2	0.0	6.2
		5.5	4.9	2.8	3.1	0.0	4.4	5.6	4.7	2.6	3.2	0.0	6.2	5.6	4.7	2.6	3.2	0.0	6.2
		5.5	4.9	2.8	3.1	0.0	4.4	5.6	4.7	2.6	3.2	0.0	6.2	5.6	4.7	2.6	3.2	0.0	6.2
通費過站收數	0 個 1 個 2 個以上	5.1	5.2	4.5	5.5	8.3	5.3	4.6	4.9	4.9	5.6	11.4	7.8	31.7	32.0	36.7	33.5	25.7	35.9
		31.0	31.1	37.7	35.2	25.0	31.0	31.7	32.0	36.7	33.5	25.7	35.9	63.6	63.1	58.4	60.9	62.9	56.3
		63.9	63.7	57.8	59.3	66.7	63.7	63.6	63.1	58.4	60.9	62.9	56.3	63.6	63.1	58.4	60.9	62.9	56.3
現居地	北區 中區 南區	36.9	36.3	45.7	44.7	58.3	45.2	36.7	36.1	46.2	45.0	62.9	48.4	21.2	24.6	21.0	22.8	14.2	28.2
		21.5	25.4	20.6	21.8	16.7	26.5	21.2	24.6	21.0	22.8	14.2	28.2	42.1	39.3	32.8	32.2	22.9	23.4
		41.6	38.3	33.6	33.5	25.0	28.3	42.1	39.3	32.8	32.2	22.9	23.4	42.1	39.3	32.8	32.2	22.9	23.4
性別	女 男	63.4	65.0	62.1	63.2	43.8	57.5	63.2	64.7	61.8	63.2	45.7	56.2	36.8	35.3	38.2	36.8	54.3	43.8
		36.6	35.0	37.9	36.8	56.2	42.5	36.8	35.3	38.2	36.8	54.3	43.8	36.8	35.3	38.2	36.8	54.3	43.8
年齡	24 歲以下 25~34 歲 35~44 歲 45~54 歲 55 歲以上	9.2	8.9	5.4	5.5	0.0	2.7	8.8	8.5	5.6	5.2	0.0	4.7	22.7	25.2	31.8	33.5	40.0	34.4
		22.8	25.6	31.4	32.4	37.5	34.5	22.7	25.2	31.8	33.5	40.0	34.4	34.7	33.7	33.1	31.2	28.6	28.1
		34.0	33.1	34.0	31.8	29.2	31.0	34.7	33.7	33.1	31.2	28.6	28.1	23.4	23.3	19.7	19.8	25.7	25.0
		23.6	22.9	19.5	20.2	25.0	23.8	23.4	23.3	19.7	19.8	25.7	25.0	10.4	9.3	9.8	10.3	5.7	7.8
		10.4	9.5	9.7	10.1	8.3	8.0	10.4	9.3	9.8	10.3	5.7	7.8	10.4	9.3	9.8	10.3	5.7	7.8
教育程度	高中職以下 大學專科 研究所以上	39.6	41.7	31.4	32.6	12.5	21.3	40.2	42.9	30.2	29.7	8.6	20.3	42.1	38.9	36.9	37.6	45.7	46.9
		42.0	39.3	36.6	36.8	47.9	44.2	42.1	38.9	36.9	37.6	45.7	46.9	17.7	18.2	33.0	32.7	45.7	32.8
		18.4	19.0	32.0	30.6	39.6	34.5	17.7	18.2	33.0	32.7	45.7	32.8	17.7	18.2	33.0	32.7	45.7	32.8
個人月所得	2 萬元以下 2~4 萬元 4~6 萬元 6~8 萬元 8 萬元以上	12.3	12.4	13.0	12.5	2.1	8.8	12.2	12.4	12.9	12.3	2.9	7.8	36.8	40.1	26.6	27.1	34.2	26.6
		37.0	39.7	26.6	28.8	33.2	23.9	36.8	40.1	26.6	27.1	34.2	26.6	30.4	28.1	36.3	34.4	22.9	26.6
		30.5	28.4	35.5	33.3	31.3	31.9	30.4	28.1	36.3	34.4	22.9	26.6	12.5	13.4	15.0	17.8	20.0	18.8
		12.2	13.5	15.4	16.6	16.7	22.1	12.5	13.4	15.0	17.8	20.0	18.8	8.1	6.0	9.2	8.4	20.0	20.2
		8.0	6.0	9.5	8.8	16.7	13.3	8.1	6.0	9.2	8.4	20.0	20.2	8.1	6.0	9.2	8.4	20.0	20.2

註：1. 表格中數值代表任一區域內各變數類別所占百分比。

2. 標示灰色網底表示以 $p=0.05$ 進行卡方檢定達顯著水準，顯示各區域內該變數分布比例具高度相關性，分布比例呈現不一致。

表 6 各區域樣本結構分布比例及卡方檢定結果 (續)

變數類別		區域別						情境三						情境四					
								A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
旅次目的	工作 商務洽公 社交 旅遊 其他		12.6	14.6	21.9	21.7	44.4	40.0						13.3	15.3	21.2	21.0	35.1	36.4
			20.0	18.8	18.7	19.4	7.4	15.0						19.6	18.7	18.7	19.8	16.3	13.6
			24.2	24.7	25.3	23.7	11.2	6.7						23.4	24.0	26.5	24.6	13.5	9.1
			37.5	35.5	28.6	28.9	14.8	25.0						37.9	35.8	28.1	28.4	18.9	27.3
			5.7	6.4	5.5	6.3	22.2	13.3						5.8	6.2	5.5	6.2	16.2	13.6
行駛頻率	每天 1 次 兩、三天 1 次 一星期 1 次 兩星期 1 次 一個月 1 次以上		10.2	10.1	18.5	17.0	29.7	23.4						10.5	10.1	18.4	17.3	24.3	21.2
			14.7	16.4	15.8	17.2	14.8	18.3						15.0	17.0	15.6	16.4	13.5	18.2
			20.1	20.5	17.5	17.4	11.1	20.0						20.2	20.6	17.3	17.2	13.5	19.7
			15.2	16.3	12.8	13.6	18.5	10.0						14.5	15.4	13.6	14.8	16.2	10.6
			39.8	36.7	35.4	34.8	25.9	28.3						39.8	36.9	35.1	34.3	32.4	30.3
行駛里程	0~30 公里 30~100 公里 100~200 公里 200~300 公里 300 公里以上		9.0	10.1	12.0	12.5	22.3	15.0						9.6	10.3	11.3	12.2	18.9	13.6
			45.3	46.6	49.5	47.1	37.0	41.7						44.9	46.6	50.5	47.3	35.1	42.4
			30.9	28.5	26.7	28.9	37.0	28.3						30.8	28.5	26.7	29.1	35.2	27.3
			9.9	10.2	8.4	8.1	3.7	10.0						9.6	9.8	8.4	8.2	10.8	12.2
			4.9	4.6	3.4	3.4	0.0	5.0						5.1	4.8	3.1	3.2	0.0	4.5
通費過站收數	0 個 1 個 2 個以上		4.1	4.8	5.5	5.5	14.8	10.0						4.6	5.0	4.9	5.2	10.8	9.1
			31.2	30.6	37.2	35.2	29.6	38.3						31.2	30.5	37.6	35.7	27.0	36.4
			64.7	64.6	57.3	59.3	55.6	51.7						64.2	64.5	57.5	59.1	62.2	54.5
現居地	北區 中區 南區		36.9	36.1	47.0	45.1	51.9	53.3						37.1	36.4	46.4	44.9	56.8	51.5
			20.9	23.9	21.0	23.9	22.2	26.7						21.0	23.8	21.0	23.6	18.9	28.8
			42.2	40.0	32.0	31.0	25.9	20.0						41.9	39.8	32.6	31.5	24.3	19.7
性別	女 男		61.7	63.1	62.9	65.2	55.6	56.7						61.8	63.3	63.0	64.9	54.1	57.6
			38.3	36.9	37.1	34.8	44.4	43.3						38.2	36.7	37.0	35.1	45.9	42.4
年齡	24 歲以下 25~34 歲 35~44 歲 45~54 歲 55 歲以上		8.6	8.4	5.5	5.1	3.7	5.0						8.5	8.3	5.7	5.4	2.7	4.5
			23.7	27.0	31.2	32.0	33.3	30.0						24.1	27.5	31.0	30.9	29.7	33.3
			34.8	33.4	32.6	31.8	33.4	25.0						35.0	33.4	32.6	32.1	29.7	24.2
			23.1	22.4	20.0	20.4	25.9	30.0						23.1	22.6	19.7	20.0	29.7	28.9
			9.8	8.8	10.7	10.7	3.7	10.0						9.3	8.2	11.0	11.6	8.2	9.1
教程育度	高中職以下 大學專科 研究所以上		39.6	41.5	30.1	31.2	11.1	16.7						39.7	41.5	29.8	31.3	18.9	16.7
			42.4	40.0	36.2	35.8	51.9	48.3						42.3	40.0	36.3	35.7	45.9	48.5
			18.0	18.5	33.7	33.0	37.0	35.0						18.0	18.5	33.9	33.0	35.2	34.8
個人月所得	2 萬元以下 2~4 萬元 4~6 萬元 6~8 萬元 8 萬元以上		12.8	12.2	12.0	12.8	3.7	5.0						12.7	12.1	12.3	13.0	2.7	4.5
			36.8	40.0	26.3	26.3	37.0	26.7						36.8	40.4	26.5	25.5	29.7	28.8
			30.2	28.8	36.6	34.0	22.3	25.0						29.8	28.5	36.5	34.7	35.2	24.2
			12.2	12.8	15.6	18.4	18.5	23.3						12.6	12.8	15.0	18.6	18.9	21.3
			8.0	6.2	9.5	8.5	18.5	20.0						8.1	6.2	9.7	8.2	13.5	21.2

註：1. 表格中數值代表任一區域內各變數類別所占百分比。

2. 標示灰色網底表示以 $p=0.05$ 進行卡方檢定達顯著水準，顯示各區域內該變數分布比例具高度相關性，分布比例呈現不一致。

1. 發散性

- (1) 定性分析：在控制空間中移轉障礙相同，但面對差異不大的單位通行費率之 a、b 兩研究樣本，當單位通行費率不變，但移轉障礙由低轉高時，原先在狀態空間很接近的 a、b 兩點，會隨著分裂因子 u (移轉障礙) 的變化在狀態空間中遠離，最後分別停留在狀態空間中的 c 點與 d 兩點。原先路線選擇意向即已較偏向維持行駛高速公路或改駛免付費替代道路的駕駛人，當其認知的移轉障礙增加時，將更加確認其路線移轉行為，選擇繼續行駛高速公路或改駛替代道路。
- (2) 管理意涵：對原先傾向行駛高速公路駕駛人而言，在面臨相同的擁擠費率時，若其感受到的移轉障礙增加，即便當高速公路擁擠度增加，這群特性的駕駛人仍不易改駛其他免費替代道路，會使得高速公路於尖峰時段實施擁擠收費政策的成效打折扣，致使擁擠時段與路段的車流量仍維持高峰狀態。對此，建議交通管理單位應著重於降低此特性駕駛人之移轉障礙認知，例如提供駕駛人適宜且詳細的改道引導資訊，以提高此特性駕駛人改道意願，並強調高速公路擁擠時段可能造成旅行時間的遽增，或宣導改駛其他道路對旅行時間的節省等相關措施。

2. 突變性

- (1) 定性分析：原先維持行駛高速公路的 e 點研究樣本，其認知的移轉障礙不變，但面臨高速公路單位通行費率的連續調漲變化時，剛開始駕駛人還可能維持行駛高速公路的決策，一旦當單位通行費率超過可容忍的水準時 (如 g 點)，駕駛人會突然移轉至替代道路，產生突變現象。
- (2) 管理意涵：當交通管理單位欲抒解高速公路都會區路段車流壅塞問題時，即便此類具有突變特性駕駛人慣於依賴行駛高速公路，具較高的移轉障礙，但透過於高擁擠時段或路段調高擁擠費率的策略，部分堅持路線決策的駕駛人，將可能在單位通行費率高到一定程度時，轉而改駛替代道路，可分散高速公路擁擠時段部分車流量，高費率政策對此特性駕駛人可明顯奏效。

3. 滯後性

- (1) 定性分析：滯後性的特徵會發生在 Cardan 判別式 $\Delta < 0$ 的區域，由於此時系統有兩個穩定解，無法藉由單位通行費率與移轉障礙等控制變數的組合，預測駕駛人的路線移轉行為。若駕駛人選擇行駛高速公路，隨著高速公路擁擠程度增加，並對應亦收取較高的擁擠費率時，因為駕駛人考慮到其具有較高的移轉障礙，例如顧及對替代道路的不熟悉、行駛高速公路仍較近便等因素，雖然駕駛人需付出較高的通行成本，但駕駛人依然會呈現維持行駛高速公路的滯後行為。即原先維持行駛高速公路的 e 點研究樣本，經 f 點落入分歧點集 B 時，只要尚未超過 g' 點，狀態變數就不會落入另一個路線選擇決策中。
- (2) 管理意涵：此特徵意味當交通管理單位在擁擠時段收取較高的高速公路單位通行費率時，在一定通行費率水準下，少部分高移轉障礙的駕駛人，依舊可能忍受此擁擠

費率，繼續維持行駛高速公路，此時部分車流仍無法藉由擁擠收費手段達到抒解的預期效果。基本上，此特性的駕駛人明顯偏好維持行駛高速公路，因此，即便是調高通行費率的策略，對具滯後特性的駕駛人效果仍有限，除非費率調高至其可忍受範圍以上，方可迫使其產生改道行為。

4. 雙重性

- (1) 定性分析：當研究樣本落入系統 Cardan 判別式 $\Delta < 0$ 的區域時，系統可同時具有兩個穩定狀態，意即落入這個區域的研究樣本，是可同時接受高速公路或替代道路雙重選擇，但無法藉由控制變數組合，辨別這些研究樣本確知的選擇行為。這種情況較常發生在單位通行費率僅微幅調漲時（如 1.2 元/公里及 1.5 元/公里的單位通行費率），駕駛人有可能維持行駛高速公路或改駛免付費替代道路。
- (2) 管理意涵：當交通管理單位實施擁擠收費政策時，若所訂定的單位通行費率不夠高時（即 1.2 元/公里及 1.5 元/公里），對具雙重性的駕駛人而言，常無法確知其所產生分散車流之效果為何。由此可知，若駕駛人已慣於依賴高速公路作為通勤路線，即便日後交通管理單位實施擁擠收費，仍會有部分駕駛人會維持既有路線，尤其是具較高移轉障礙認知的駕駛人，因此，需訂定較高的通行費率標準（如 1.8 元/公里以上），對疏散車流方可有較明顯效果。

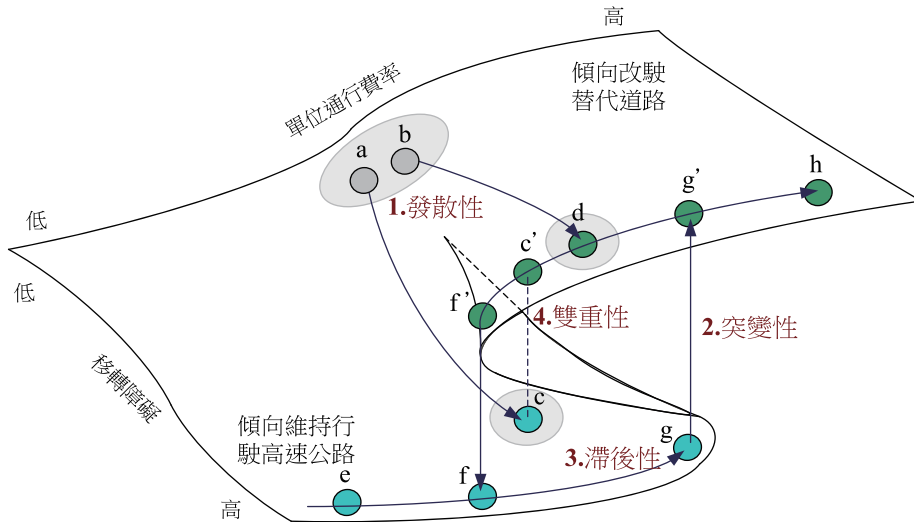


圖 4 路線移轉行為劇變特徵

五、結論與建議

本研究利用尖點劇變模型之定量與定性分析方法，嘗試從非線性觀點，探討高速公路

實施擁擠收費政策假設情境下之駕駛人路線移轉行為。本研究調查蒐集高速公路西部走廊之研究樣本 1,121 份，進行實證模式校估分析，據以建構路線移轉行為之劇變模型，並探討各種擁擠收費情境下，駕駛人路線移轉行為可能產生的劇變特徵。配合未來高速公路電子計程收費政策之實施，分析成果可供後續相關交通管理單位實施道路擁擠收費政策之參酌，具實用價值。本研究於模型校估與分析可獲致以下結論：

1. 本研究選取「路線移轉行為」作為尖點劇變模型中的狀態變數，控制變數則以「移轉障礙」為分裂因子、「單位通行費率」為正則因子，針對都會區與城際間兩組旅次型態，共建構四種擁擠收費情境之路線移轉行為模型，並將控制空間區分為六個不同次區域討論。位於 A、B 區的研究樣本之移轉障礙較低，但分別於不同通行費率水準偏好選擇維持行駛高速公路及改駛替代道路；至於 C、D 兩區則屬移轉障礙較高的研究樣本，較低費率時偏好維持行駛高速公路，較高通行費率時則選擇改道；E、F 區為 Cardan 判別式 $\Delta < 0$ 的區域，研究樣本的移轉障礙較高，但有兩個穩定解，此時無論是維持行駛高速公路或改走替代道路，均是其可選擇的方案；此種情況易發生在單位通行費率在 1.5 元／公里與 1.2 元／公里時。
2. 從控制空間六個區域的樣本結構分布比例來看，都會區旅次（情境一與情境二）之樣本結構分布狀況，六個區域在通過收費站數、現居地、年齡、教育程度及個人月所得等五個變數上的分布比例是明顯的不一致；至於較擁擠的情境二，另亦反映出各區域在不同旅次目的上分布比例的差異；各變數研究樣本落入 E、F 區的比例明顯與其他區域不同。至於城際間旅次（情境三與情境四）之樣本結構分布狀況，於旅次目的、行駛頻率、通過收費站數、現居地、教育程度及個人月所得等六個變數上的分布比例呈現明顯差異性。
3. 當高速公路實施擁擠收費政策時，可發現駕駛人之路線移轉行為存在發散性、突變性、滯後性及雙重性等四種劇變特徵，使得不同移轉障礙認知的駕駛人，在四種單位通行費率的情境下，偏好維持行駛高速公路或改駛替代道路。研究成果顯示，以尖點劇變模型可解釋駕駛人之非線性路線移轉行為，可供相關交通管理後續研擬擁擠費率與了解駕駛人改道行為特性之參酌。

過去有關路線移轉行為之研究多採用線性方法（如結構方程模式與個體選擇模式），本研究嘗試從非線性的思考觀點，運用尖點劇變模型，同時從定量與定性分析，校估行為模型參數與探討駕駛人面對擁擠收費可能產生的劇變特徵。劇變理論可提供一個簡潔的數學模型，協助了解駕駛人在擁擠收費情境下的路線移轉行為，提供更多有別於線性系統的資訊。惟任何理論的運用不應被誇大其功能，尖點劇變模型的運用只是嘗試從非線性的角度去解釋行為特徵，不適合與線性模型比較優劣與否。

本研究為運用劇變模型解釋路線移轉行為之初探，後續可思考採取不同的正則因子與分裂因子，討論不同影響變數對路線移轉行為的影響，抑或可嘗試應用不同的劇變模型進行非線性行為解釋。為避免受訪者於調查時產生題項過多混淆，本研究於通行費情境的模擬僅限採四種費率水準，更多的費率水準值可使得控制變數組合的資料更為完整，有助於

勢函數最佳化的校估，形塑更具體易辨的劇變模型，協助描述其各種劇變特徵。此外，有關問卷調查之樣本結構問題，建議後續從事高速公路相關議題研究時，可透過網路問卷廣發方式，吸引更多高速公路計次階段未收費樣本填寫，或可配合各都會區重要產業園區企業協助，增加通勤旅次樣本比例，盡量提高研究樣本與母體結構的一致性。

參考文獻

1. Pigou, A. C., *The Economic of Welfare*, 1st ed., Macmillan & Co., London, 1920.
2. 馮正民、郭奕姝，「廣播資訊接受度及移轉障礙對高速公路小汽車駕駛人路線移轉行為意向之影響」，**運輸計劃季刊**，第 36 卷，第 1 期，民國 96 年，頁 1-30。
3. 馮正民、郭奕姝，「路線資訊類型對高速公路小汽車駕駛人路線移轉行為之影響」，**運輸計劃季刊**，第 36 卷，第 4 期，民國 96 年，頁 477-508。
4. 馮正民、黃昱凱，「轉移成本與服務品質對店配取貨點選擇行為之影響」，**運輸計劃季刊**，第 35 卷，第 4 期，民國 95 年，頁 391-426。
5. 郭奕姝、黃昱凱、楊敬怡，「以劇變模型發展選擇行為之行銷策略：以選擇旅行社網站為例」，2008 管理評論評論年會暨第一屆前瞻管理學術研討會，財團法人光華管理策進基金會，民國 97 年。
6. Feng, C. M. and Huang, Y. K., "An Analysis on Choice Behavior on the Pick-Up Point for the E-commerce Retailing Delivery Using a Cusp Catastrophe Model", *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 7, 2007, pp. 918-932.
7. Zeeman, E. C., "On the Unstable Behavior of Stock Exchanges", *Journal of Mathematical Economics*, Vol. 1, 1974, pp. 39-49.
8. Zeeman, E. C., *Catastrophe Theory: Selected Papers (1972-1977)*, Addison-Wesley, New York, 1977.
9. Oliva, T. A., Oliver, R. L., and MacMillian, I. C., "A Catastrophe Model for Developing Service Satisfaction Strategies", *Journal of Marketing*, Vol. 56, 1992, pp. 83-95.
10. Lange, L., McDade, S., and Oliva, T. A., "Technological Choice and Network Externalities: A Catastrophe Model Analysis of Firm Software Adoption for Competing Operating Systems", *Structural Change and Economic Dynamics*, Vol. 12, 2001, pp. 9-57.
11. Byrne, D. G., Mazanov, J., and Gregson, R. A. M., "A Cusp Catastrophe Analysis of Changes Adolescent Smoking Behaviour in Response Smoking Prevention Programs", *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, Vol. 5, No. 2, 2001, pp. 115-137.
12. 周榮昌、陳志成、翁美娟，「即時交通資訊對高速公路使用者路線移轉之影響」，**運輸學刊**，第 15 卷，第 1 期，民國 92 年，頁 25-47。
13. 溫傑華、馮乃穎，「高速公路電子計程收費對用路人旅運行為之影響」，中華民國運輸學會第 19 屆學術論文研討會論文集，第 1 冊，中華民國運輸學會，民國 93 年，頁 157-174。

14. 溫傑華、蔡政霖，「高速公路電子計程收費與擁擠定價對用路人旅運行為之影響」，中華民國運輸學會第 19 屆學術論文研討會論文集，第 1 冊，中華民國運輸學會，民國 93 年。
15. Jou, R. C., Lam, S. H., Liu, Y. H., and Chen, K. H., "Route Switching Behavior on Freeways with the Provision of Different Types of Real-Time Traffic Information", *Transportation Research*, Vol. 39A, No. 5, 2005, pp. 445-461.
16. Kauffman, R. G. and Oliva, T. A., "Multivariate Catastrophe Model Estimation: Method and Application", *Academy of Management Journal*, Vol. 37, No. 1, 1994, pp. 206-221.
17. Frankena, M.W., *Urban Transportation Economics*, Butterworth & Canada Ltd, Canada, 1979.
18. Knight, F. H., "Some Fallacies in the Interpretation of Social Cost", *Quarterly Journal of Economics*, Vol.38, 1924, pp. 582-606.
19. Vickrey, W. S., "Congestion Theory and Transport Investment", *American Economic Review*, Vol. 59, 1969, pp. 251-261.
20. Cohen, Y., "Commuter Welfare under Peak-load Congestion Tolls : Who Gains and Who Loses ? ", *International Journal of Transport Economics*, Vol. 14, 1987, pp. 239-266.
21. Braid, R. M., "Uniform Versus Peak-load Pricing of a Bottleneck with Elastic Demand", *Journal of Urban Economics*, Vol. 26, No. 3, 1989, pp. 320-327.
22. Arnott, R. J., de Palma, A., and Lindsey, R., "Economics of a Bottleneck", *Journal of Urban Economics*, Vol. 27, 1990, pp. 111-130.
23. Arnott, R. J., de Palma, A., and Lindsey, R., "Departure Time and Route Choice for the Morning Commute", *Transportation Research*, Vol. 24B, No. 3, 1990, pp. 209-228.
24. 藍武王、張勝雄，「道路擁擠費之設計與分析」，中華民國運輸學會第二屆學術論文研討會，中華民國運輸學會，民國 76 年。
25. 賴禎秀，「階梯式擁擠收費體制下最佳收費階段數之研究」，*運輸計劃季刊*，第 30 卷，第 2 期，民國 90 年，頁 253-274。
26. 褚志鵬，「主線收費及匝道收費政策下之擁擠定價分析」，*運輸計劃季刊*，第 30 卷，第 3 期，民國 90 年，頁 513-538。
27. 賴禎秀、吳志仁，「高速公路實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 31 卷，第 1 期，民國 91 年，頁 37-57。
28. 褚志鵬、葉豈陞，「道路擁擠收費政策在考量異質旅次之靜態分析」，*運輸計劃季刊*，第 30 卷，第 1 期，民國 90 年，頁 33-61。
29. 褚志鵬、葉豈陞，「尖峰延展模型下異質彈性旅次之次佳道路擁擠定價政策」，*東吳經濟商學報*，第 47 期，民國 93 年，頁 33-58。
30. 陳敦基、曾淑玲，「國道高速公路通行費及徵收方式之檢討」，中華民國運輸學會第十七屆學術論文研討會論文集，中華民國運輸學會，民國 91 年，頁 1143-1150。
31. 周榮昌、趙延祥、蕭心怡、吳萍樺、許采蘋，「自用車實用者對道路定價接受意向之探討」，中華民國運輸學會第十七屆學術論文研討會論文集，中華民國運輸學會，民國 91 年，頁

21-33。

32. Adler, T., Ristau, W., and Falzarano, S., "Traveler Reactions to Congestion Pricing Concepts for New York's Tappan Zee Bridge", *Transportation Research Record*, Vol. 1659, 1999, pp. 87-96.
33. Burris, M. W., "Application of Variable Tolls on Congestion Toll Road", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 129, No. 4, 2003, pp. 354-361.
34. Burris, M. W., "The Toll-Price Component of Travel Demand Elasticity", *International of Transport Economics*, Vol. 30, No. 1, 2003, pp. 45-59.
35. Alexander, R. A., Herbert, G. R., Deshon, R. P., and Hanges, P. J., "An Examination of Least Squares Regression Modeling of Catastrophe Theory", *Psychological Bulletin*, Vol. 111, No. 2, 1992, pp. 366-374.
36. Wales, D. J., "A Microscopic Basis for the Global Appearance of Energy Landscapes", *Science*, Vol. 293, 2001, pp. 2067-2070.
37. Chidley, J., Lewis, P., and Walker, P., "The Cusp Catastrophe as a Market Planning AID", *Behavioral Science*, Vol. 23, 1978, pp. 351-359.
38. Vikram, S., and Ruth, C. K., "An Application of the Cusp Catastrophe Model to User Information Satisfaction", *Information & Management*, Vol. 34, 1998, pp. 41-53.
39. Navin, F., "Traffic Congestion Catastrophes", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 11, 1986, pp. 19-25.
40. Hall, F. L., "An Interpretation of Speed-Flow Concentration Relationships Using Catastrophe Theory", *Transportation Research*, Vol. 21A, 1987, pp. 335-344.
41. Persaud, B. N. and Hall, F. L., "Catastrophe Theory and Patterns in 30-Second Freeway Data-Implications for Incident Detection", *Transportation Research*, Vol. 23A, 1989, pp. 103-113.
42. Acha-Daza, J. A. and Hall, F. L., "A Graphical Comparison of the Predictions for Speed Given by Catastrophe Theory and Some Classic Models", *Transportation Research Record*, No. 1457, 1993, pp. 119-124.
43. Acha-Daza, J. A. and Hall, F. L., "The Application of Catastrophe Theory to Traffic Flow Variables", *Transportation Research*, Vol. 28B, 1994, pp. 235-250.
44. Pushkar, A., Hall, F. L., and Acha-Daza, J. A., "Estimation of Speeds from Single-Loop Freeway Flow and Occupancy Data Using Cusp Catastrophe Theory Model", *Transportation Research Record*, No. 1398, 1994, pp. 149-157.
45. Saunders, P. T., *An Introduction to Catastrophe Theory*, Cambridge University Press, Cambridge, 1980.
46. Gilmore, R., *Catastrophe Theory for Science and Engineers*, John Wiley & Sons, New York, 1981.
47. Oliva, T. A., Desarbo, W. S., Day, D. L., and Jedidi, K., "GEMCAT: A GEneral Multivariate Methodology for Estimating CATastrophe Models", *Behavior Science*, Vol. 32, 1987, pp. 121-137.
48. 邱皓政，**量化研究與統計分析**，五南圖書出版股份有限公司，臺北，民國 97 年。