

# 高速公路電子收費系統之車道配置 及其成本效益分析

## LANE ALLOCATION AND COST-BENEFIT ANALYSIS OF HIGHWAY ELECTRONIC TOLL COLLECTION SYSTEM

張學孔 Shyue-Koong Chang<sup>1</sup>

賴禎秀 Chen-Hsiu Lai<sup>2</sup>

吳清慈 Ching-Tsyu Wu<sup>3</sup>

(91 年 12 月 6 日收稿，92 年 3 月 28 日修改，92 年 12 月 31 日定稿)

### 摘 要

本研究針對主線門架式高速公路電子收費之用路者車道選擇行為，建立一套成本效益評估的分析架構；並用以輔助決定適當的自動收費車道之配置數量，以及評估系統均衡時使用電子收費車道的車輛數。一般用路者選擇裝置電子收費設備的目的是為了減少通過收費站的延滯時間，而透過本研究之分析發現，當自動收費車道的擁擠增加時，有部分裝置電子收費設備的車輛將選擇由人工收費車道通過，根據本文數值分析之結果顯示，其比率約為 13.95%，顯示電子收費車道必須經由合理規劃以決定適當的車道配置。另外，以 5 車道皆為人工收費的配置方式作為分析基準，在流量、車道、收費等給定相關條件情況下，本研究推導出 4A1M (四組自動收費車道及一組人工收費車道) 是最佳之車道配置方式。

- 
1. 國立台灣大學土木工程學系教授 (聯絡地址：10617 台北市羅斯福路四段 1 號台灣大學土木系；電話：02-23625920；E-mail：skchang@ntu.edu.tw)。
  2. 國立台灣海洋大學商船學系副教授兼系主任 (聯絡地址：202 基隆市北寧路 2 號台灣海洋大學商船學系；電話：02-24622192 轉 3018)。
  3. 國立台灣海洋大學商船學系助教。

**關鍵詞：**電子收費；成本效益；高速公路收費站

## ABSTRACT

*This paper develops an analysis framework, which is based on various road users' choice behaviors, to evaluate cost-benefit on the highway electronic toll collection (ETC) system. The analysis framework also helps to determine the appropriate number of ETC lanes in a toll plaza. In addition, the equilibrium number of vehicles utilizing the ETC lanes can also be investigated. In general, road users choose to use the ETC lanes to shorten the delay time spent getting through the toll plaza. However, based on the numerical example proposed in this paper, approximately 13.95% of the ETC equipped vehicles used the manual charge lanes when the ETC lanes have become crowded. This result implies that analysis on lane arrangement in toll plaza is quite crucial for planning ETC system. Compared to the 5 manual charge lanes, this paper has also found that 4AIM (4 Automatic ETC VI lanes & 1 manual charge lane) is the optimal lane allocation under the condition of the permanent traffic flow, lanes numbers and tools.*

**Key Words :** *Electronic toll collection (ETC); Cost-benefit; Highway toll station*

## 一、前 言

賴禎秀等人<sup>[1]</sup>考慮存在平行替代道路之高速公路實施匝道電子收費方式時所應收取之最佳費率。該費率中除了包含計程之基本使用費外，尚包括對瓶頸路段所應實施之最佳階梯式擁擠收費架構，同時也計算出在該收費架構下所能帶來之排隊擁擠減少效果。高速公路的瓶頸路段除了因為交通事故之發生外，一般均發生在收費站，為提升瓶頸路段（例如高速公路收費站、匝道等）的運輸效率亦可藉由先進技術的引進而達成，但為求社會資源的最佳分配，並考量總投資之預算限制，各項先進技術之應用，必須先有詳實的成本效益分析。

應用「自動車輛辨識」(Automatic Vehicle Identification, AVI) 技術或結合無線通訊與衛星定位技術於公路收費站(Toll Plaza)的自動收費系統，可以增加收費站的服務容量(service capacity)，但並不一定增加單位時間收費站的通過車輛數(throughput)。基本上，單位時間通過收費站之車輛數與電子收費技術的使用率有關，而電子收費使用率與該項技術是否成熟且價格可否為駕駛者所接受有關。因此，在進行該項投資之前，必須了解該項技術的使用率、相關成本、及駕駛者屬性之間的相互關係。

過去許多相關研究（例如 Chang<sup>[2]</sup>、Chang<sup>[3]</sup>、Foote<sup>[4]</sup>、Nielsten<sup>[5]</sup> 及 Kanaan<sup>[6]</sup>）均說明 AVI 或其他電子通訊技術應用在公路收費可以增加收費站的服務容量，綜合上述研究的分析結果顯示，在一般純人工收費方式之收費站，車道服務容量僅約 600 至 850 車／小

時／車道，而使用高速辨識能力之 AVI 技術的收費站每車道服務容量可以提高至 1,400 車／小時／車道。以五車道之收費站為例，若五車道皆為傳統人工收費，服務容量約 3,000 (600×5) 車／小時至 4,250 (850×5) 車／小時；若將收費方式改為二個電子自動收費車道與三個傳統人工收費車道的配置，則總服務容量可以提高至 4,600 (2×1,400+3×600) 車／小時至 5,350 (2×1,400+3×850)，增加約 53% 至 26% 的服務容量。

然而，應用電子自動收費系統雖然可以增加收費站的服務容量，但不一定保證可以增加實際通過收費車道之車輛數，此現象的發生與電子收費車道配置及車上設備 (On Board Equipment, OBE) 之使用率有關，其中可歸納為下列兩種情況：

1. 若電子收費設備之使用率不高，則因一般收費車道數之縮減，使一般車道的延滯大量增加，加上電子收費車道的使用率未提升，因此使得整個系統實際通過的車輛數未必會增加。
2. 若電子收費設備的使用率過高，而在收費車道的配置沒有隨之調整，導致電子收費車道的延滯反而高過人工收費車道；若裝設有電子收費 OBE 的車輛可以選擇改駛人工收費車道時，最後達到一均衡狀態時所增加的通過車輛數亦會較預期為低，因為未充分發揮裝設 AVI 設備的使用功能以增加通過的車輛數。

因此，若欲使 AVI 設備之應用發揮最大的效益，必須同時考慮車道配置與 AVI 設備的使用率，即所提供的電子自動收費車道數，必須能合理滿足使用電子收費設備的車輛使用。基本上，車上電子收費設備的使用率與用路者的設備成本、用路者選擇車道的相關屬性及其收費站整體服務績效有關。不同收費方式的組合，將顯著的影響該收費站的整體服務容量，而且在不同的設備占有率下，所導致的服務績效也有所差異。

假設所有駕駛者均為完全理性的依延滯高低選擇車道，則當具車上電子收費設備的車子在自動收費車道延滯高於人工收費車道時，可以改由一般人工收費車道通行，則此時之均衡狀況為二種車道之平均延滯皆相同，依據 Chang<sup>[3]</sup> 之研究，當考慮車道選擇為確定性 (deterministic) 時，其總平均延滯將會低於不使用電子收費設備的平均延滯，而此時使用率的增加並不會影響均衡狀態。若考慮駕駛者的車道選擇行為具一隨機誤差，則必須引進選擇理論 (Choice Theory)，以同時分析「設備選擇」與「車道選擇」行為。

本研究針對在公路收費站自動電子收費系統的應用建立一成本效益評估的分析架構，以評估公路電子收費系統的成本與效益，並可用以輔助決定自動收費車道適當的設置數量，以及估計系統均衡時使用電子收費車道的車輛數。使用自動電子收費技術的系統淨效益可經由本模式求得，並作為成本效益分析之基礎。此外，本模式並可透過敏感度分析來評估駕駛者屬性對於收費站整體效率之影響，以供經營者訂定公路自動收費系統的運作模式作為參考。本文除了本節背景以及以旅行延滯來說明電子收費設備使用對於收費站服務效率所產生的影響，以下將說明接著建立之評估架構，包括「設備選擇」、「車道選擇」、「交通績效」以及「成本分析」等四個模組；文中並假設一簡化的數值範例說明本模式的應用；最後提出具體結論與建議。

## 二、評估模式

本研究建立之評估架構包含「設備選擇」、「車道選擇」、「交通績效」及「成本分析」等四個模組。

1. 設備選擇模組，用以分析用路者之車上電子收費設備之選擇與用路者屬性、設備成本及服務品質等因素之關係，以決定車上電子收費設備的使用率。
2. 車道選擇模組，則分析用路者的車道選擇行為，考慮因素為平均延滯，其中一般用路者不具備車上電子收費設備，因此僅能使用一般人工收費車道。由於上述二模組具有相關性，根據 Luce<sup>[7]</sup>的個體選擇行為 (Individual Choice Behavior) 理論，實用的隨機效用函數，可以假設由一個非隨機函數及一個機率誤差項之和來表示，因此，當誤差項分配為獨立的標準韋伯分配 (Standard Weibull Distribution) 之假設時，應用巢式羅吉特模式 (Nested Logit Model) 可以簡化誤差項之積分問題來加以分析，若誤差項為常態分布時則可以應用普羅比模式 (Probit Model) 來求解，為使積分問題簡化，可假設機率誤差項為獨立的標準韋伯分配，此模式稱為羅吉特模式 (Logit Model)，普羅比模式與羅吉特模式在形式上並無太大差異，只是前者接近上限值較後者為快<sup>[8]</sup>。在實際模式選用上，後者是一閉函數式，計算較為方便，而前者則由於其自變數為積分之上限，不能以閉函數式表示，必須藉助於數值分析方法，因此在實際應用上較為困難。在 Chang<sup>[3]</sup>之研究中提出，若假設用路者之車道選擇行為誤差項為零時，則車道選擇為確定性，當電子收費車道之延滯小於一般人工收費車道時，不須考慮車道選擇行為，因為必定選擇電子收費車道；若電子收費車道之延滯大於一般人工收費車道時，則有部分裝置 OBE 之車輛改使用人工收費車道，一直到二種收費車道之平均延滯相等為止，也就是形成所謂用路者均衡狀態 (User Equilibrium)，此時任何擁有電子收費設備之車輛並不能由片面改變使用收費車道方式而減少其延滯。
3. 交通績效模組，用以確立收費站相關的服務績效函數，除說明車道配置方式對於服務績效的影響，並建立用路者相關的效用函數。
4. 成本分析模組，則分析應用電子收費設備於收費站自動收費的相關成本項目，並提供不同的決策目標及財務限制下所需的定價策略。

假設已知營運者以及用路者的社經屬性，透過上述四個模式的交互作用，可以求得最後的均衡結果，並進行成本與效益分析；以下逐一說明模式之內涵與架構。

### 2.1 績效模式

「績效函數」在本文中用以分析及量化車輛行駛延滯與車道容量、使用率、及車道配置間的關係。以下列出本文所使用之符號：

$Y$ ：設備選擇， $Y = \{\text{有 ETC 設備 (true)}, \text{無 ETC 設備 (false)}\} = \{t, f\}$ ；

$Z$ ：收費方式， $Z = \{\text{自動收費}, \text{人工收費}\} = \{a, m\}$ ；  
 $y$ ：設備選擇之項目， $y \in Y$ ；  
 $z$ ：收費方式之項目， $z \in Z$ ；  
 $Q_y$ ：有／無 OBE 之車輛數 (車／小時)；  
 $Q_z$ ：使用收費方式  $z$  的車輛數 (車／小時)；  
 $q_z$ ：收費方式  $z$  每車道流量 (車／小時／車道)；  
 $q_z(T)$ ：收費方式  $z$  於時間  $T$  之累積抵達車輛數；  
 $C_z(T)$ ：收費方式  $z$  於時間  $T$  之累積服務車輛數；  
 $L_z$ ：收費方式  $z$  收費車道數；  
 $Q$ ：總車流量 (車／小時)， $Q = Q_t + Q_f = Q_a + Q_m$ ；  
 $d_z$ ：收費方式  $z$  的每車道每車平均延滯時間 (小時／車)；  
 $d_z(T)$ ：收費方式  $z$  於時間  $T$  的每車道每車平均延滯時間 (小時／車)；  
 $D_z$ ：收費方式  $z$  的總延滯時間 (小時)， $D_z = d_z \times Q_z$ ；  
 $D_z(T)$ ：收費方式  $z$  於時間  $T$  的總延滯時間 (小時)；  
 $C_z$ ：收費車道之最大服務率 (車／小時／車道)；  
 $T$ ：時間點。

車道容量、旅行延滯、以及燃油消耗皆為一般常用之評估收費站服務績效的主要因子，Murthy<sup>[9]</sup> 曾對於收費站服務績效進行量化的分析，以下之績效模式分析將引用該研究之模式。收費站的系統平均延滯時間，係定義為通過該收費系統需花費之時間，其包含等候服務時間與接受服務之時間，計算方式如下：

$$\text{車道平均延滯： } d = (d_a \times Q_a + d_m \times Q_m) / Q \quad (1)$$

由(1)式中可知，平均延滯時間為最大服務率與車流量的函數，一般可利用下列公式求算：

(1) 當每車道流量小於每車道最大服務率時，依據 Wayne<sup>[10]</sup> 等候理論公式：

$$\text{每車道平均延滯 } d_z = 1 / (C_z - q_z) \quad (2)$$

$$\text{總延滯 } D_z = d_z \times q_z \times L_z \quad (3)$$

(2) 當每車道流量大於每車道最大服務率時：

$$\text{每車道平均延滯 } d_z(T) = \frac{\int_0^t q_z(T) dT - \int_0^t C_z(T) dT}{q_z(T)} \quad (4)$$

若抵達率與服務率皆為常數  $q_z$  與  $C_z$ ，則：

$$\text{每車道平均延滯 } d_z(T) = \frac{(q_z - C_z) \times T}{2q_z} \quad (5)$$

$$\text{總延滯時間 } D_z(T) = d_z(T) \times q_z \times L_z \quad (6)$$

當系統之車輛抵達率大於最大服務率時，即發生過飽和現象，而若此種現象持續發生時，則系統無法達到穩定均衡狀態，即系統延滯時間並非固定之常數，此將增加分析之複雜性。一般高速公路收費站的車輛抵達率係隨時間變化，往往依尖離峰時間不同而有高於或低於服務容量之現象，利用等候理論即可經由車隊長度而分析其延滯時間。本研究乃根據前述 Chang<sup>[2]</sup>、Chang<sup>[3]</sup>、Foote<sup>[4]</sup>、Nielsten<sup>[5]</sup> 及 Kanaan<sup>[6]</sup> 相關研究之綜合分析，在應用數值案例中將離峰時段 (0-6 及 14-24) 的到達流量假設為 2,800 (車／小時)，而在 6-10 的時段為早上上班的尖峰時段，假設其到達流量隨時間而成線性增加，其餘各時段之到達車流量之假設詳如表 1 及圖 1 所示 (為簡化分析，僅考慮上午尖峰)。

表 1 各時段模擬流量表

時 段	流量 (車／小時)
0-6	2,800
6-10	$2,800 + 800 \times (t - 6)$
10-12	6,000
12-14	5,400
14-24	2,800

資料來源：本研究綜合 [2]、[3]、[4]、[5] 及 [6] 等之分析案例。

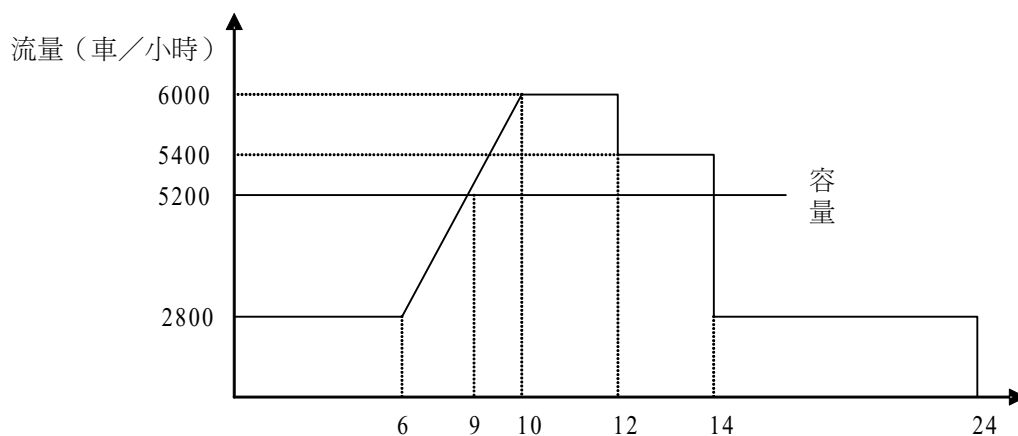


圖 1 各時段流量圖

本模式的架構擬以上述之假設情況，分析需求隨時段變動的情況，並且透過 (4) 式之使用，處理某自動收費車道或人工收費車道抵達率大於服務率之狀況，一般亦可以模擬方法來處理此一不確定且狀態隨時間變動之問題，請參閱 Murthy 等人之研究<sup>[9]</sup>。

## 2.2 成本分析模式

本研究中所考慮的經營者成本包括投資成本、營運成本及維修成本；用路者成本包括時間延滯、燃油消耗、以及裝置成本等因素，至於外部社會成本則是指污染成本。各類別中的成本項目請參考表 2。

表 2 各類別的成本結構

成本分析	成本項目	自動收費	人工收費
經營者	1.投資成本	$Ia$	$Im$
	2.營運成本	$Oa$	$Om$
	3.維修成本	$Ma$	$Mm$
用路者	1.延滯成本	$Da \times Ve$	$Dm \times Ve$
	2.燃油消耗成本	$ea \times Da \times Pl$	$em \times Dm \times Pl$
	3.AVI 裝置成本	$Sa$	$0$
外部社會	污染成本	$Ea$	$Em$

資料來源：本研究整理。

模式中使用之符號定義如下：

$Ia$  or  $Im$ ：投資成本 (元／年／車道)， $a$  = 自動收費車道， $m$  = 人工收費車道；

$Oa$  or  $Om$ ：營運成本 (元／年／車道)；

$Ma$  or  $Mm$ ：維修成本 (元／年／車道)；

$Da$ ：每車使用自動收費車道之延滯時間 (小時)；

$Dm$ ：每車使用人工收費車道之延滯時間 (小時)；

$Ve$ ：時間價值 (元／小時)；

$ea$ ：使用自動收費車道之耗油率 (公升／車小時)；

$em$ ：使用人工收費車道之耗油率 (公升／車小時)；

$Pl$ ：燃油成本 (元／公升)；

$Sa$ ：AVI 裝置成本 (元)；

$Ea$ ：使用自動收費車道之外部污染成本 (元／年／車)；

$Em$ ：使用人工收費車道之外部污染成本 (元／年／車)。

## 2.3 設備與車道選擇

關於自動收費車道的設置，用路者面臨兩個層次的選擇問題：

- (1) 是否配置 OBE 設備？
- (2) 一旦配置了 OBE 設備之後，是否選擇由電子收費車道通過？

上述選擇行為可以應用效用理論進行分析。由於該二項方案選擇之間具有共同的影響因素（例如：延滯），模式架構如圖 2 所示。

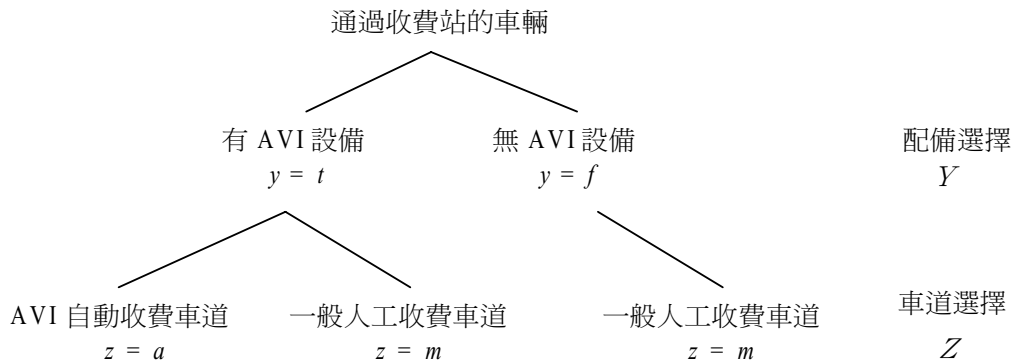


圖 2 ETC 技術與車道選擇模式

影響用路者是否裝配 AVI 設備的配備選擇因素，在本研究的分析模式中係考慮其中的收費服務時間、安裝成本、駕駛者所得與費率折扣等主要屬性。至於影響車道選擇的主要因素，在分析模式則考慮其中收費服務時間、費率折扣、車道數、與旅行時間。此外，對於模式之形式，為簡化誤差項之積分問題，本研究假設效用函數誤差項滿足獨立的標準韋伯分配，因而採用巢式羅吉特機率選擇模式。以下說明使用之選擇模式，首先定義模式中使用的符號：

- $S_y$ ：選擇設備方案  $y$  之駕駛者須負擔之 OBE 使用費（仟元）；
- $C_y$ ：選擇設備方案  $y$  之駕駛者年所得（萬元／年）；
- $T_z$ ：選擇收費方式  $z$  之駕駛者基本旅行時間（分）；
- $L_z$ ：選擇收費方式  $z$  之收費車道數（車道數）；
- $D_z$ ：選擇方案組合之收費車道服務時間（小時）＝總延滯時間（小時）；
- $F_{zy}$ ：選擇方案組合之費率折扣（%）；
- $Z_y$ ：使用設備  $y$  者所能使用之收費方式  $Z_t = \{a, m\}$ ， $Z_f = \{m\}$ ；
- $Y_z$ ：使用收費方式  $z$  者可能擁有之設備種類  $Y_a = \{t\}$ ， $Y_m = \{t, f\}$ 。

今有關設備選擇之效用函數期望值為  $V_y$ ，車道選擇之效用期望值為  $V_z$ ，二者共通的效用期望值為  $V_{yz}$ ，上述三項之誤差項分別為  $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$ 、及  $\varepsilon_{yz}$ ，假設  $\varepsilon_y$  與  $\varepsilon_{yz}$  為統計獨立，



且  $\varepsilon_z$  與  $\varepsilon_{yz}$  為統計獨立，因此根據相關文獻 Ben-Akiva 等人<sup>[8]</sup>的推導可得效用函數  $U_{yz}$  為：

$$U_{yz} = V_y + V_z + V_{yz} + \varepsilon_y + \varepsilon_z + \varepsilon_{yz} \quad (7)$$

其中  $V_y = K_{10} + K_2 S_y + K_3 C_y$  (8)

$$V_z = K_{20} + K_4 TR_z + K_5 L_z \quad (9)$$

$$V_{yz} = V_{zy} = K_6 D_z + K_7 F_{zy} \quad (10)$$

前述(8)、(9)以及(10)式中之  $K_2 \sim K_7$  為各變數之參數，而常數  $K_{10}$  代表裝置車上電子設備之其他效益或成本之彙總，所謂效益包含可使用自動轉帳或信用卡等方式先行付費 (prepaid) 而不需在通過收費站另外再行收費、表示個人之地位與時髦之象徵等，而成本部分包含個人隱私之損失、遺失掛失之不便等因素。 $K_{20}$  代表使用 AVI 車道收費之其他效益或成本之彙總，所謂效益包含通過收費站之便利與快速，而成本部分包含使用人工收費方式時之車輛停等、車輛之耗損與空氣污染等因素。鑑於國內現今並未實際實施電子收費系統，因此各參數值乃引用 Chang<sup>[3]</sup>的合理校估結果假設如表 3 所示。其中因  $y \in Y = \{t, f\}$  且  $z \in Z = \{a, m\}$ ，因此必須先求解出個別的  $V_{yt}$ 、 $V_{yf}$ 、 $V_{za}$ 、 $V_{zm}$  及  $V_{zayt}$ 、 $V_{zmyf}$ 、 $V_{zayf}$ 、 $V_{zmyf}$  等值。

表 3 假設參數值

屬性變數	變數	參數	參數校估值
AVI 設備常數	—	$K_{10}$	0.800
AVI 安裝成本	$S_y$	$K_2$	-2.000 設備選擇
駕駛者所得	$C_y$	$K_3$	0.100
設備應用偏好	—	$K_{20}$	2.000
基本旅行時間	$TR_z$	$K_4$	-0.200 車道選擇
各收費方式車道數	$L_z$	$K_5$	0.500
收費服務時間 (延滯)	$D_z$	$K_6$	-15.000 上述二者之共通屬性
費率折扣	$F_{zy}$	$K_7$	0.300
模式參數	—	$\mu^z = 0.40$	$\mu^y = 0.40$

資料來源：本研究參酌 Chang 等人之研究<sup>[3]</sup>修正而得。

若假設  $\text{var}(\varepsilon_z) = 0$ ，則可以推導得到：

$$P(y) = \frac{e^{(V_y + V'_{y'})\mu^y}}{\sum_{y' \in Y} e^{(V_y + V'_{y'})\mu^y}} \quad (11)$$

$$V'_y = \frac{1}{\mu^z} \ln \sum_{z \in Z_y} e^{(V_z + V'_{zy})\mu^z} \quad (12)$$

其中(11)式之  $P(y)$  為機率值，表示配備選擇使用率之機率值，可求得有裝電子收費設備的使用率  $P_{yt}$  及未裝設備的使用率  $P_{yf}$ ，而在模式中加入  $v'_y$ ，由於該二項方案選擇之間具有共同的影響因素（例如：延滯），因此在考慮選擇設備時，也同時考慮其共同影響因素  $v_{zy}$ ，式中  $v'_y$  是由(8)、(9)以及(10)式的數值分別代入(12)式中，可分別求算出有裝電子收費設備的效用函數值  $V'_{yt}$  及未裝 AVI 設備的效用函數值  $V'_{yf}$ 。

同樣的，若假設  $\text{Var}(\varepsilon_y) = 0$ ，則可以推導得到

$$P(z) = \frac{e^{(V_z + V'_z)\mu^z}}{\sum_{z \in Z} e^{(V_z + V'_z)\mu^z}} \quad (13)$$

$$V'_z = \frac{1}{\mu^y} \ln \sum_{y \in Y_z} e^{(V_y + V'_{yz})\mu^y} \quad (14)$$

其計算過程相同如前所述，(13)式之  $P(z)$  為機率值，表示車道選擇使用率之機率值，可求得自動收費車道使用機率  $P_{za}$  及人工收費車道使用機率  $P_{zm}$ ，而在模式中加入  $v'_z$ ，由於該二項方案選擇之間具有共同的影響因素（例如：延滯），因此在考慮選擇設備時，也同時考慮其共同影響因素  $V_{zy}$ ，式中  $v'_z$  是由(8)、(9)以及(10)式的數值分別代入(14)式中，可分別求算出自動收費車道的效用函數值  $V'_{za}$  及人工收費車道的效用函數值  $V'_{zm}$ 。前述兩式中之  $\mu^y$  與  $\mu^z$  為 Weibull 分配之參數，可由效用函數之校估程序中求得。

由(11)式及(13)式可以推導得到有裝設 AVI 設備  $y$  之車輛其使用不同收費方式  $z$  之機率如下：

$$P_{zayt} = P(za|yt) = \frac{p_{za} \times P(yt|za)}{P_{yt}} = \frac{p_{za}}{P_{yt}} \quad (15)$$

本研究假設無特殊情形發生，即必須有裝置 AVI 設備之車輛始能通過自動收費車道，所以  $P(yt|za) = 1$ ，可以得到(15)式之結果。

$$p_{zmyt} = 1 - p_{zayt} = 1 - \left( \frac{p_{za}}{P_{yt}} \right) = \frac{P_{yt} - p_{za}}{P_{yt}} = \frac{(1 - p_{yf}) - (1 - p_{zm})}{P_{yt}} = \frac{(p_{zm} - p_{yf})}{P_{yt}} \quad (16)$$

式中  $p_{zayt}$  表示裝有 AVI 設備之車輛使用自動收費車道的機率，而  $p_{zmyt}$  表示裝有 AVI 設備之車輛使用人工收費車道的機率。

基於以上的分析，使用自動收費車道之平均每車道車流量 ( $q_a$ ) 以及使用一般人工收

費車道之平均每車道車流量 ( $q_m$ ) 分別為

$$q_a = \frac{Q \times P_{za}}{L_a} \quad (17)$$

$$q_m = \frac{Q \times P_{zm}}{L_m} \quad (18)$$

至於安裝與不安裝車上電子設備之車輛數則分別為：

$$Q_t = Q \times P_{yt} \quad (19)$$

$$Q_f = Q \times P_{yf} \quad (20)$$

其中安裝車上電子設備但又使用一般人工收費車道的車輛數有：

$$Q_{m|t} = Q \times P_{zmyt} \quad (21)$$

### 三、數值演算說明

本節應用合理假設之參數與屬性變數值，說明均衡分析之結果，並針對重要的各項參數及屬性變數值，進行敏感性分析，以說明自動收費技術之供需特性。本研究乃一理論性之探討，根據前述 Chang<sup>[2]</sup>、Chang<sup>[3]</sup>、Foote<sup>[4]</sup>、Nielsten<sup>[5]</sup> 及 Kanaan<sup>[6]</sup> 相關研究之綜合分析，假設各屬性變數的平均值如表 4 所示。

表 4 假設變數值

屬性變數	AVI 設備、自動收費車道	無 AVI、人工收費車道	單位
AVI 安裝使用費	$S_t = 2,000$	$S_f = 0$	仟元
駕駛者所得	$C_t = 60$	$C_f = 45$	萬元／年
基本旅行時間	$T_{Ra} = 45$	$T_{Rm} = 45$	分鐘
各收費方式車道數	$L_a = 2$	$L_m = 3$	車道
費率折扣	$F_{ta} = F_{tm} = 5.0$	$F_{fa} = F_{fm} = 0.0$	%
收費車道服務容量	$C_a = 1,400$	$C_m = 800$	車／小時／車道
總流量	$Q = 3,000$	$Q = 3,000$	車／小時

資料來源：本研究自相關研究如 [2]、[3]、[4]、[5] 及 [6] 等之分析案例綜合整理而得。

由於上述模式之演算過程相當複雜繁瑣，特以二個自動收費、三個人工收費（簡稱為 2A3M）及表 5 之 0-6 時段之數值作說明：

以(11)式之  $P_{yt}$  做為例子，由於  $z' \in Z = \{a, m\}$ ，所以求  $P_{yt}$  之分母僅包含二項，

$$P_{yt} = \frac{e^{(V_{yt} + V'_{yt})\mu^y}}{e^{(V_{yt} + V'_{yt})\mu^y} + e^{(V_{yf} + V'_{yf})\mu^y}} \quad (22)$$

由(12)式得知，因為  $Z_t = \{a, m\}$ ， $Z_f = \{m\}$ ，可求得：

$$V'_{yt} = \frac{1}{\mu^z} \ln[e^{(V_{za} + V_{zayt})\mu^z} + e^{(V_{zm} + V_{zmyt})\mu^z}] \quad (23)$$

$$V'_{yf} = \frac{1}{\mu^z} \ln[e^{(V_{zm} + V_{zmyt})\mu^z}] \quad (24)$$

將表 3、表 4 之資料代入(8)式，可求得：

$$\begin{aligned} V_{yt} &= K_{10} + K_2 \times S_t + K_3 \times C_t \\ &= 0.8 + (-2.0) \times 2,000 + (0.1) \times 600,000 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} V_{yf} &= K_{10} + K_2 \times S_f + K_3 \times C_f \\ &= 0.8 + (-2.0) \times 0 + (0.1) \times 450,000 \end{aligned} \quad (26)$$

從(25)、(26)式可了解，安裝使用費 ( $S$ ) 愈高時，使用者愈不喜歡安裝車上電子設備 (負比率關係)；另外，駕駛者所得愈高者，愈偏向喜歡安裝 (正比率關係)，此與先驗知識是相符的，所以經由此效用函數模式便可得知駕駛者對於是否安裝車上電子設備之偏好程度。

同樣的將表 3 與表 4 資料代入(9)式，可求得：

$$\begin{aligned} V_{za} &= K_{20} + K_4 \times TR_a + K_5 \times L_a \\ &= 2 + (-0.2) \times (45/60) + (0.5) \times 2 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} V_{zm} &= K_{20} + K_4 \times TR_m + K_5 \times L_m \\ &= 2 + (-0.2) \times (45/60) + (0.5) \times 3 \end{aligned} \quad (28)$$

從(27)、(28)式可了解，當旅行時間愈長，愈不喜歡使用該收費方式之車道 (負比率關係)；另外，當該種收費方式的車道數愈多時，愈偏向喜歡使用該收費方式之車道 (正比率關係)，與先驗知識也是符合的。因此，經由此效用函數模式便可得知駕駛者將選擇何種收費方式之車道通過。

同樣的經由(10)式，可求得：

$$\begin{aligned} V_{zayt} &= K_6 \times D_a + K_7 \times F_{ta} \\ &= (-15.0) \times (0.0015) + (0.3) \times (0.05) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} V_{zmyf} &= K_6 \times D_m + K_7 \times F_{fm} \\ &= (-15.0) \times (0.0027) + (0.3) \times 0 \end{aligned} \quad (30)$$

從(29)、(30)式可了解，當收費服務時間（延滯）愈長時，愈不喜歡裝置車上電子設備及使用該收費方式之車道（負比率關係）；另外，亦考慮到費率折扣之問題，當折扣費率愈高，其使用偏好也愈高（正比率關係），與先驗知識比較也是合理的，因此，經由此效用函數模式便可得知使用者其採用方式之偏好程度。

將(27)、(28)、(29)及(30)式分別代入(23)、(24)式，可求得  $V'_{yt}$  及  $V'_{yf}$ ，再將(25)、(26)式代入(22)式，即可求得  $P_{yt}$  之值。

## 四、案例分析

本節進一步將一完整數值案例進行解析，並用以說明所建立模式在成本效益分析之應用分析結果。以下首先說明均衡狀態之求解流程，其次說明過飽和狀態的延滯分析方法，接著以敏感度分析探討各重要參數的影響，最後則是成本效益分析之結果。

### 4.1 均衡狀態求解

前述已說明各分析模式，假設總需求量固定，則設備和車道選擇模式兩者均與服務績效有互動關係，亦即服務績效影響設備與車道之選擇，而設備與車道選擇又將影響各收費車道的車輛數，進而影響車道服務績效，設備和車道選擇模式兩者有權衡取捨 (tradeoff) 的現象發生，因此可求得一均衡狀態。以下扼要說明應用前述各式的求解方式，使系統達到均衡狀態的收斂情形，其流程如圖 3 所示。

步驟 0：假設使用電子收費車道的流量為  $Qa^0$ ，則平均延滯為  $da^0$ ；而使用人工收費車道之車輛數為  $Qm^0 = Q - Qa^0$ ，則平均延滯為  $dm^0$ ，此時使用電子收費車道之車輛數為  $Q_a^l = Q \times P_{za}$  車／小時，而使用人工收費車道之流量為  $Q_m^l = Q - Q_a^l$  車／小時。

第  $K$  次運算之運算過程如下：

步驟 1：由使用 AVI 自動收費車道流量為  $Q_a^{k-l}$ ，求得使用自動收費車道的平均延滯為  $d_a^{k-l}$ ；同理，可求得使用人工收費車道之平均延滯為  $dm^{k-l}$ 。

步驟 2：由各收費車道之延滯值  $d_a^{k-l}$  與  $dm^{k-l}$ ，求得設備與車道選擇機率，此時使用電子收費車道之車輛數為  $Q_a^k = Q \times P_{za}$  車／小時，而使用人工收費車道之流量為  $Q_m^k = Q - Q_a^k$  車／小時。

步驟 3：若  $|Q_a^k - Q_a^{k-1}| < \lambda$ ，設定之收斂條件 ( $\lambda \leq 0.0001$ )，則達到均衡狀態，否則重複步驟 1 至步驟 3。

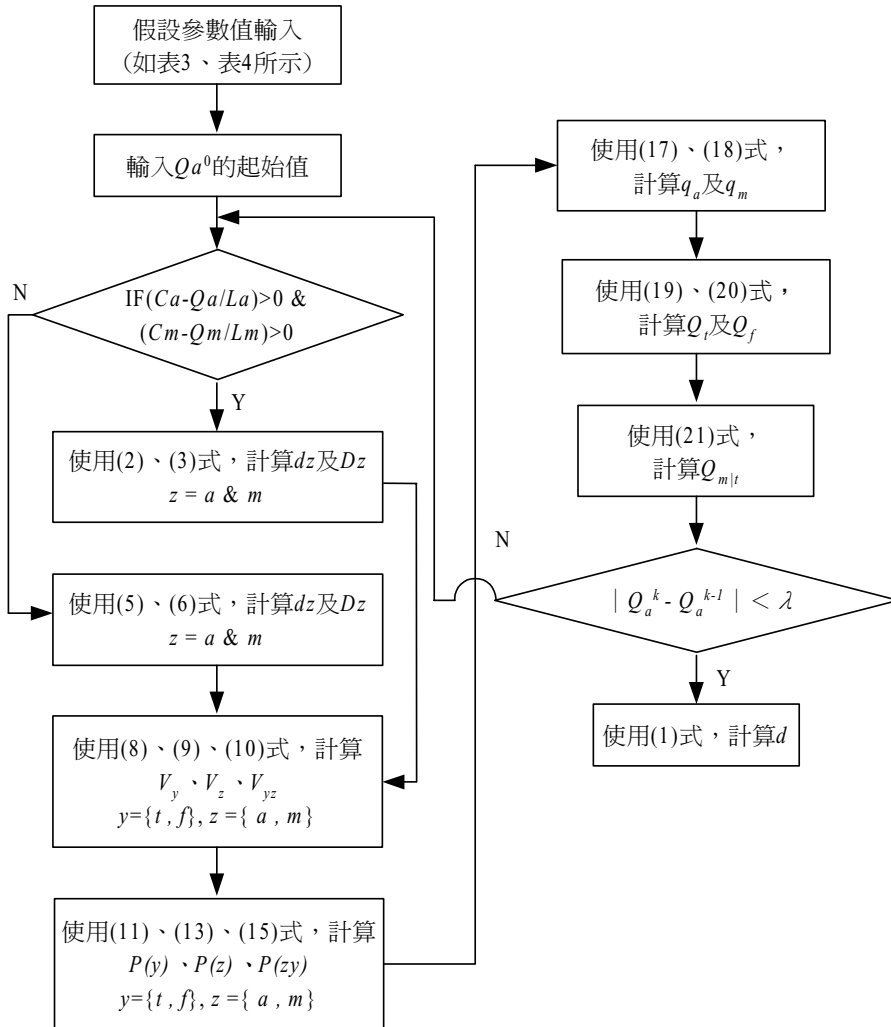


圖 3 求解均衡狀態之流程

上述的均衡狀態分析過程，在流程圖的第三個步驟，加入判斷式，以判斷電子自動收費車道的流量是否超過車道容量，作組合性之判斷，以決定採用何種模式計算延滯時間。

## 4.2 等候狀態求解

本研究嘗試以表 1 之情況進行均衡分析時發現，當抵達率之流量以動態情形發生時，如範例中的 6-10 時；若其系統車流量大於最大服務率時，如 9-10 時，因為此時段之車流

是以動態線性方式抵達，且在 10-15 時之時段，系統發生過飽和現象，所以在 9-15 時的時段，必須以等候理論來分析其延滯時間。

針對圖 1 的流量變化情況，其延滯時間及等候車輛數之分析求解過程如下：

1. 先分析何時開始發生等候現象，本範例之車道配置為二個自動收費、三個人工收費（簡稱為 2A3M），所以其最大服務率 =  $2 \times 1,400 + 3 \times 800 = 5,200$

因為  $2,800 + 8,00 \times (T-6) = 5,200$ ，可求得  $T = 9$ ，因此，上午 9 時開始發生等候現象。

2. 求解 9-10 時的等候線，

$$L1 = \int (2,800 + 800 \times (T - 6) - 5,200) dT = 400T^2 - 7,200T + k$$

$$L1(T=9) = 400(9^2) - 7,200(9) + k = 0 \Rightarrow k = 32,400$$

$$\rightarrow L1(T=10) = 400(10^2) - 7,200(10) + 32,400 = 400$$

因此，上午 10 時，所累積的車輛數 = 400 輛。

3. 求解 10-12 時的等候線，

$$L2 = \int (6,000 - 5,200) dT = 800T \rightarrow L2 = 800(T - 10) + 400$$

$$L2(T=12) = 800(12 - 10) + 400 = 2,000$$

因此，中午 12 時，所累積的車輛數 = 2,000 輛。

4. 求解 12-14 時的等候線，

$$L3 = \int (5,400 - 5,200) dT = 200T \rightarrow L3 = 200(T - 12) + 2,000$$

$$L3(T=14) = 200(14 - 12) + 2,000 = 2,400$$

因此，14 時，所累積的車輛數 = 2,400 輛。

5. 在 14 時，所累積的車輛數達最高峰，以後便開始進行紓解，其紓解時間：

$2,400 / (5,200 - 2,800) = 1$  (小時)，因此在下午 3 時，完全紓解，恢復正常車流。

上述分析結果如圖 4 所示。

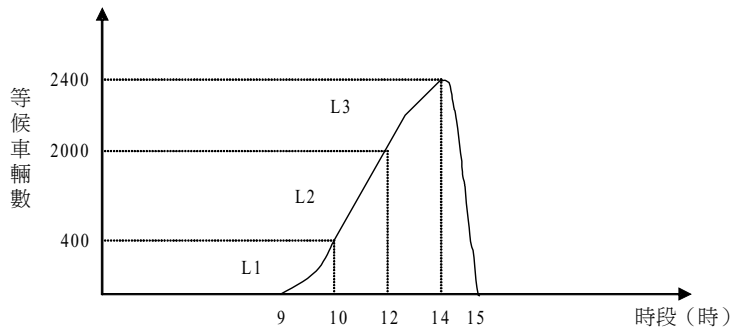


圖 4 等候車輛數分析

### 4.3 數值演算分析

#### 4.3.1 均衡狀態分析

經由均衡分析，在二個自動收費、三個人工收費（簡稱為 2A3M）車道配置情況下，求得各時段之變數值如表 5 所示。

表 5 各時段之變數值

變數 \ 時段	0-6	7	8	9-10	10-12	12-14	14-15	15-24
$d$	0.0021	0.0031	0.0062	0.0238	0.2	0.407	0.4286	0.0021
$D_a$	<b>0.0015</b>	0.0023	0.0047	none	none	none	none	0.0015
$D_m$	<b>0.0027</b>	0.0041	0.0081	none	none	none	none	0.0027
$P_{za}$	0.5355	0.5364	0.5389	none	none	none	none	0.5355
$P_{zm}$	0.4645	0.4636	0.4611	none	none	none	none	0.4645
$P_{yt}$	<b>0.6223</b>	0.6227	0.6235	none	none	none	none	0.6223
$Q_t$	1,058	1,358	1,656	none	none	none	none	1,058
$Q_f$	1,742	2,242	2,744	none	none	none	none	1,742
$P_{ytza}$	0.8605	0.8615	0.8642	none	none	none	none	0.8605
$P_{ytzm}$	<b>0.1395</b>	0.1385	0.1358	none	none	none	none	0.1395

註：none 表示無數值。

在表 5 中我們舉 0-6 時之例來作說明。由於在這時段，車流量是以固定的方式抵達，每小時 2,800 輛，且未發生等候現象，因此系統會達均衡狀態，可依前述的均衡狀態求解，算出每輛車通過收費站所花費之時間約為 0.0021 小時，而在供需均衡狀況下車上電子設備的使用率約為 62.23%。由於本研究考慮用路者的社會經濟因素，因此有相當多的人選擇裝置車上電子設備，導致自動收費車道之平均延滯 (0.0015) 與人工收費之平均延滯 (0.0027) 差異不大，形成用路者均衡。由此案例亦顯示，由於自動收費車道的擁擠增加，所以有部分裝有電子設備的車輛在選擇車道時，選擇由人工收費車道通過，由此一實例分析結果顯示，具有車上電子設備之車輛而使用人工收費車道之比率約為 13.95%，此一現象間接說明 ETC 車道的配置必須妥善規劃的重要性，若自動收費車道不夠多時，便會有部分裝有車上電子設備的車輛轉移至人工收費車道。就整體車道使用而言，使用自動收費車道的車輛比率約為 53.55%。

在 6-10 時，此時段之流量由於以動態線性方式遞增，且在 6-9 時之間並未發生等候現象（未達到系統容量），所以在 6-9 時之時段，系統會達到均衡狀態，因此在表 5 中可以發



現， $P_{za}$ 、 $P_{zm}$  及  $P_{yt}$  並無明顯改變，僅些微變化；在 7 時，通過自動收費車道的延滯時間 (0.0023 小時) 僅增加少許，而通過人工收費車道的延滯時間 (0.0041 小時)，增加的幅度較大，尤其在 8 時，增加至 0.0081 小時，足足比 0-6 時的時段增加超過 3 倍；而此時段通過自動收費車道的延滯時間，也顯著的增為 0.0047 小時，也比 0-6 時的時段增加 3 倍，顯示此時的車道配置有必要作調撥性的調整，以減少系統的延滯。

### 4.3.2 等候狀態分析

在 9-10 時的時段，由於車流量是動態線性遞增，且產生等候現象，因此，在此時段系統為過飽和的狀態 (超過系統容量)，無法使系統達到均衡狀態，並不適合作均衡狀態分析，所以此時段可應用等候理論的方式進行分析其等候時間，其分析方式係採用(4)式來分析其每車道每車平均延滯，

$$d_{9-10} = \frac{\int_9^{10} (400T^2 - 7,200T + 32,400) dT}{\int_9^{10} \{(2,800 + 800(T - 6))\} dT} = \frac{133.333}{5,600} = 0.0238$$

$$d_{10-12} = \frac{\int_{10}^{12} (800 - 7,600) dT}{\int_{10}^{12} 6,000 dT} = \frac{2,400}{12,000} = 0.2$$

$$d_{12-14} = \frac{\int_{12}^{14} (200T - 400) dT}{\int_{12}^{14} 5,400 dT} = \frac{4,400}{10,800} = 0.407$$

$$d_{14-15} = \frac{2,400/2}{\int_{14}^{15} 2,800 dT} = \frac{1,200}{2,800} = 0.4286$$

從上述計算結果發現，在 9-10 時的時段中，車道平均延滯為 0.0238 小時，比起先前的各時段，均顯著的增加其延滯，在 10-12 時段中，每小時抵達的車流量為 6,000 輛，為一般時段的兩倍之多，所以系統的延滯也增加至 0.2 小時；在 12-14 時段中，因為在 14 時，等候線長度累積至 2,400 輛之高峰，因此延滯的現象更為嚴重，達到 0.407 小時；在 14 時以後，便開始進行紓解，必須紓解所累積的 2,400 輛之車輛，其所需紓解時間：2,400 / (5,200 - 2,800) = 1 (小時)，使其車道平均延滯情形達到最尖峰，高達 0.4286 小時。

在 10-12 時及 12-14 時兩時段的抵達率為常數，本研究嘗試著以(5)式分析當車流量大於最大服務率時，來求算車道平均延滯，但此兩時段因為均超過系統 (2A3M) 最大容量 (5,200 輛／小時)，整個系統呈現過飽和現象，經過本研究之模式的模擬，測出系統不可能達到均衡狀態，但此時若適當地調整車道配置，如改為 3A2M 的情形，便可改善車輛擁擠等候的現象。因此，在此兩時段，必須運用上述的分析方式，來求解各時段的平均延滯。

由於本研究的系統均衡狀態，是要求得自動收費車道與人工收費車道的延滯時間趨於某種程度的收斂，此時的車道選擇，不會因為車上電子設備市場使用率的高低而有所改變；因此，本研究另外嘗試使用此種收斂方式與前述之使用  $Q_a$  收斂方式作比較，經過測試之後，所產生之結果相同。

### 4.3.3 敏感度分析

在上述分析中，車流量、車道配置、安裝使用費、費率優惠、服務容量以及各屬性變數的相關參數，都會影響分析結果；以下逐一說明這些參數值的影響，並分析不同車上電子設備使用率下的系統平均延滯情形，進而討論推行自動收費系統應可採行之策略。

#### (1) 流量變動

本研究首先假設流量由 1,000 (車/小時) 開始，而每隔 500 (車/小時) 逐漸增加，變動至 4,500 (車/小時)，所得之分析結果如圖 5 與圖 6 所示，分析結果顯示，其車上電子設備使用率由 0.6221 開始，於流量 4,000 (車/小時) 達最高點 0.6230，其延滯增加之幅度相當小，此乃由於自動收費設備的效率相當穩定，因此，當流量越高時，吸引更多自動收費設備的用路者。但當流量達到接近飽和程度時，由於自動收費車道吸引過多用路者，導致延滯相對升高，因此車上電子設備的使用率於流量 4,500 (車/小時) 稍微降低至 0.6229。從圖 5 中可看出，其增加之幅度 (斜率) 隨著車流量呈曲線遞增。

從圖 6 顯示，當車流量增加時，裝置車上電子設備的車輛選擇自動收費車道的不轉移比率也逐漸增加，由 0.8596 增加至 0.8625 的最頂點，再下降至 0.8621，因此若車道配置不隨流量之成長作有效調整，則將迫使裝置車上電子設備的車輛再轉移到一般人工收費車道。相對地，裝置車上電子設備的車輛選擇人工收費車道的轉移比率將因流量之增加而逐漸減少。

各種收費車道的使用比率與車流量之關係 (如圖 7 所示)，使用自動收費車道的比率，也隨著車流量之增加而遞增，使用率由 0.5348 增至 0.5375 的巔峰，相同地，當流量過高時自動收費車道的使用率隨流量增加而有減緩趨勢，微降至 0.5369。相反地，使用人工收費車道的比率，隨著流量之增加而有下降的關係產生。

由以上分析可知，不管設備選擇使用率、轉移比率及車道選擇使用率，均隨著車流量而遞增，但增加幅度不大；另外，自動收費設備的配置數量在流量到達飽和時，若不隨流量而作調整，則該設施的使用率會有下降的趨勢。

#### (2) 變動車道配置

若維持總車道為五車道，變動自動與人工收費車道的配置組合方式，可以得到如圖 8 與圖 9 的分析結果。如前所述，圖 8 說明自動收費車道數增加 (由 1A 增至 4A)，則裝置電子收費設備的車輛選擇使用人工收費車道的轉移比率 (由 0.3639 降至 0.0392) 大幅降低，但其降低幅度的比率逐漸縮減，以減少設施閒置浪費的情形。

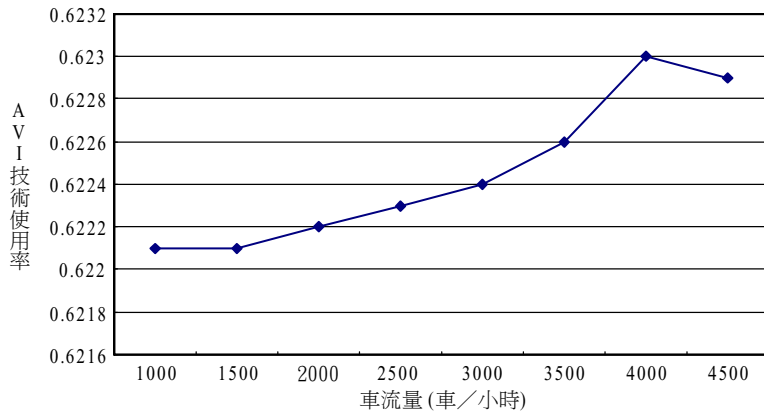


圖 5 車上電子設備使用率與車流量之關係 (2A3M)

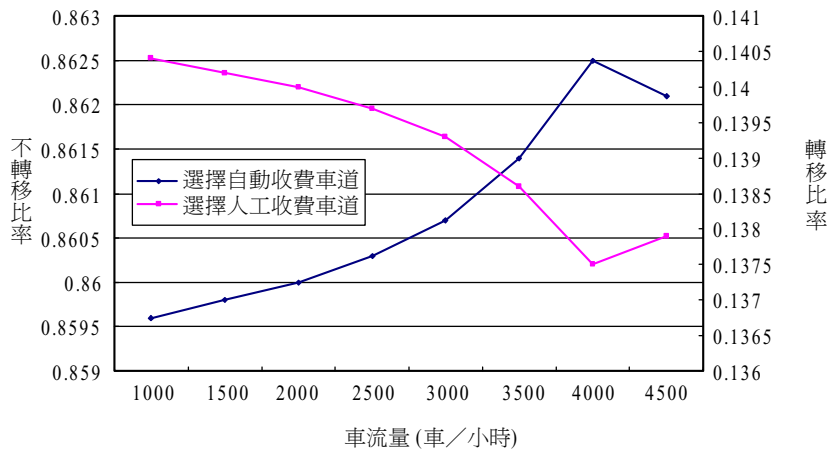


圖 6 裝置電子設備車輛之轉移比率與車流量之關係 (2A3M)

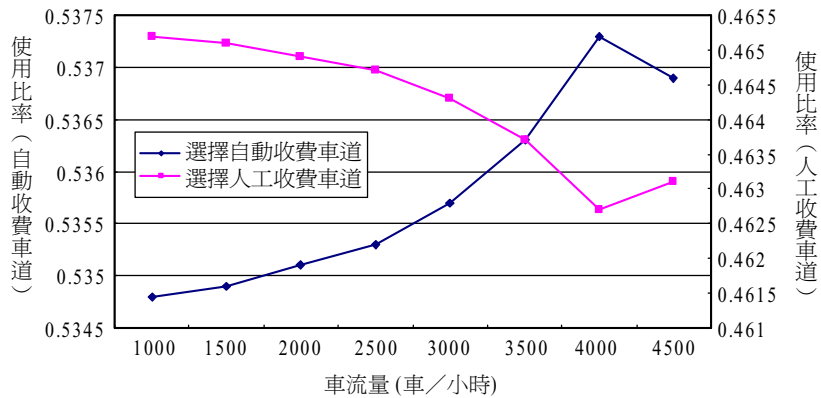


圖 7 收費車道使用率與車流量之關係 (2A3M)

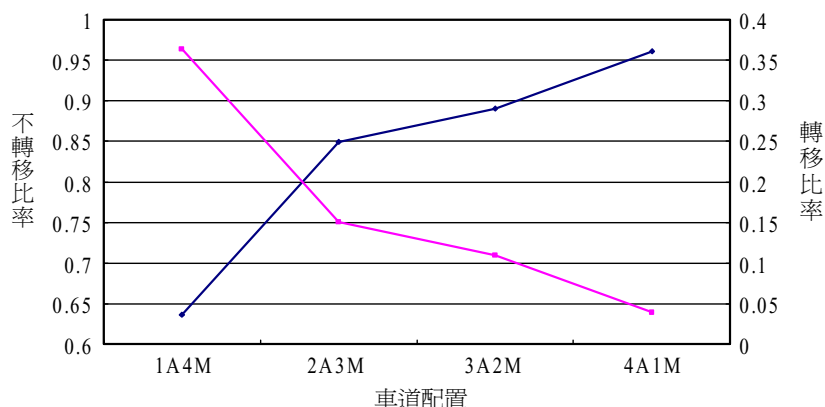


圖 8 裝置 AVI 設備車輛轉移比率與車道配置之關係 ( $K5 = 0.5$ , 2A3M)

圖 9 說明在流量固定狀況下，如果增加自動收費車道的數量，則車上電子設備的使用率有增加的情形（幾乎呈直線增加），圖中也顯示車道數之參數  $K5$  的變動對於車上電子設備的使用率影響不大。另外，電子收費市場使用率在車道配置的自動收費車道數在兩車道以下時，隨著參數  $K5$  的增加而微幅降低。但自動收費車道數在三車道以上時，電子收費市場使用率卻隨著參數  $K5$  的增加而微幅增加。

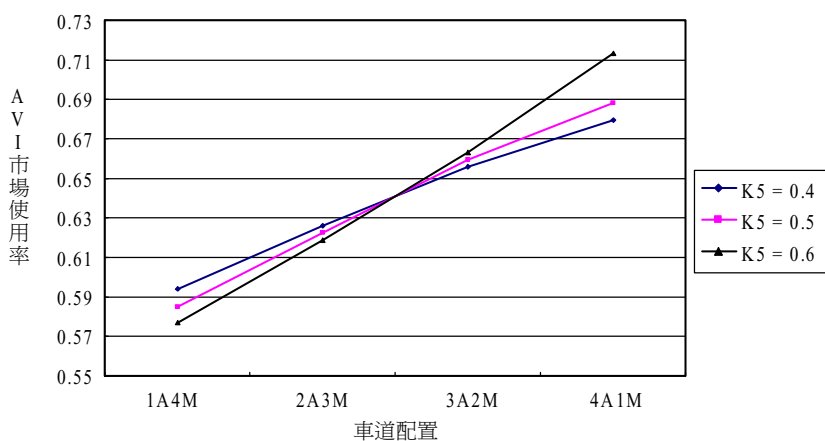


圖 9 電子收費市場使用率與車道配置之關係

### (3) 變動安裝使用費

安裝使用費主要為識別器、讀卡機、智慧卡、轉帳、預支利息、及資料處理等相關費用，如使用信用卡轉帳則此項費用為信用卡的年費加上少許跨行轉帳費用。本研究將安裝使用費由 250 元增加到 4,000 元（依新加坡的經驗，折合成台幣也是在 3,000 ~ 4,000），並變動其參數值，分析結果如圖 10 所示。以  $K2 = -1.0$  及  $K2 = -3.0$  說明，圖中顯示若安裝

使用費為 250 元的使用率分別是 77.82% ( $K2 = -1.0$ ) 及 76.02% ( $K2 = -3.0$ )，當使用費增加至 4,000 元，其使用率增為 62.24% ( $K2 = -1.0$ ) 及 24.85% ( $K2 = -3.0$ )；換言之，當安裝使用費增加由 250 元增加到 4,000 元時，會使電子收費的使用率降低，而且若安裝使用費增加至 4,000 元，用路者對該費用的重視程度 ( $K2$ ) 增加 ( $K2 = -1.0 \rightarrow K2 = -3.0$ )，則電子收費使用率的降低幅度相當可觀 (由 62.24% 降為 24.85%)。

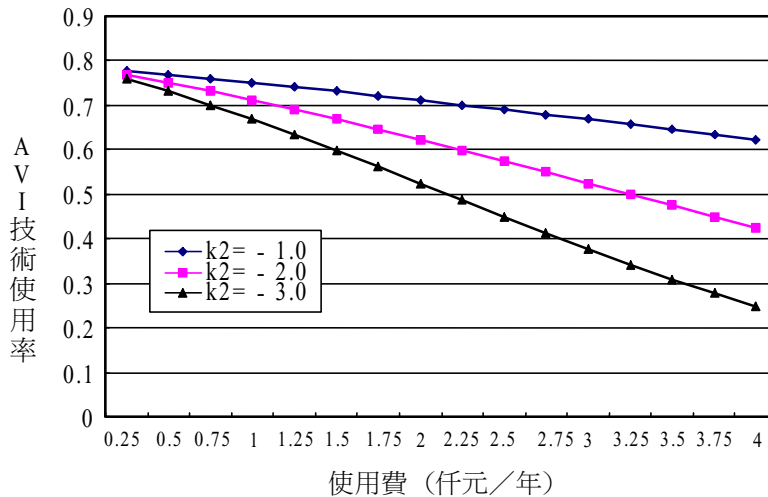


圖 10 使用費對車上電子設備使用之影響 (2A3M)

#### (4) 變動優惠費率

優惠的費率折扣會吸引更多的用路者，考慮裝置車上電子設備，也可作為政府主管機關或經營業者，為鼓勵使用自動收費車道來減少系統延滯及增加系統作業效率的一種補貼手段。

經由圖 11 的分析結果顯示，以  $K7 = 0.1$  及  $K7 = 0.5$  說明，當無費率折扣時，車上電子設備使用率均為 54.94%，當費率折扣增加至 15% 時，車上電子設備使用率分別增為 62.24% ( $K7 = 0.1$ ) 及 84.69% ( $K7 = 0.5$ )，因此若優惠費率增加時，則車上電子設備的使用率將會增加，並隨用路者的重視程度 ( $K7$ ) 的增加而增加。但是費率優惠的增加幅度如過大，則將吸引過多的車上電子設備用路者，可能會造成整體系統延滯增加，因而必須調整 ETC 車道的配置。

如圖 12 中所示，當  $K7 = 0.1$  時，其費率折扣增加，對系統的平均延滯變化幅度並不明顯，但是當  $K7 = 0.5$  時，在無費率折扣的情況，其平均延滯為 0.1318 (分鐘/車)，一旦費率折扣高達 15% 時，其系統平均延滯激增為 0.3050 (分鐘/車)，則系統平均延滯將大幅增加，因此該項補貼的費率折扣不宜過高，否則反而造成反效果，無法達到補貼應有的效益。

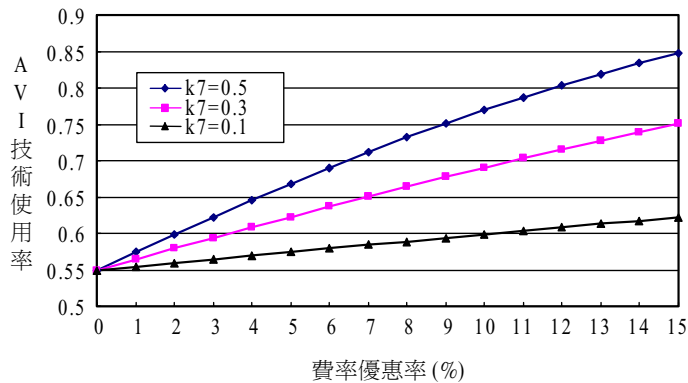


圖 11 費率優惠與車上電子設備使用率之關係 (2A3M)

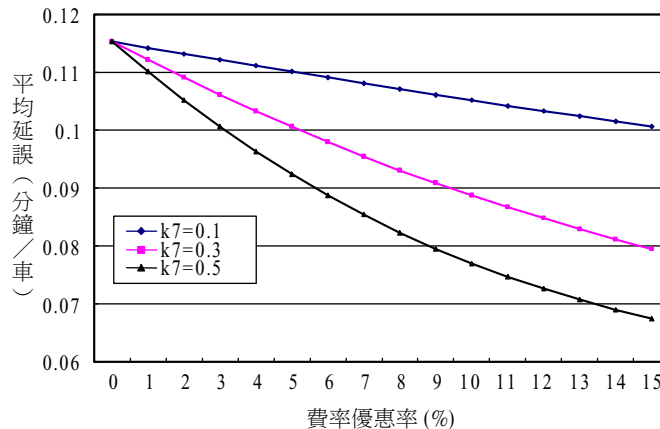


圖 12 費率優惠率與平均延滯之關係 (2A3M)

#### (5) 變動電子收費技術設備水準

本研究並未深入探討比較不同電子收費技術，僅是由技術績效分析其在收費在應用對於通過率及容量之影響。事實上，ETC 技術範圍由車牌辨識、短距通訊 (Dedicated Short Range Communication, DSRC) 技術之系統、乃至於結合無線通訊及車輛自動定位技術之 VPS (Vehicle Positioning System) 技術之應用<sup>[11]</sup>，本文著重在以車道為主體的 ETC 系統；然而，無論應用何種技術，這些不同技術之應用在建置與營運成本上均有差異，而其總體績效亦將受到影響。

當公路系統擁有高技術水準的 ETC 設備時，便容許車輛以較高的速率通過收費站，因此可以提升自動收費車道的服務容量。基於上述之原因，本研究若變動自動收費車道的服務容量，便可視為 ETC 設備水準的提升，分析結果如圖 13 與圖 14 所示。

圖 13 中，以  $K6 = -18$  來說明，自動收費車道的服務容量由 1,000 車／小時增至 1800

車／小時，增幅為 80%，但其電子收費設備使用率僅由 62.05% 增加至 62.30%，僅提升 0.8%，此意義代表雖投資大筆資金於電子收費設備的技術水準而提升收費車道的服務容量，但對於設備使用率並未相對的大幅提升，此現象呈現了本研究之重點之一，凸顯用路者對於系統延滯時間的重視，即使車輛裝置了昂貴的電子收費設備，仍有可能部分的用路者會考慮當時系統時間的延滯，而轉移至延滯時間較少的人工收費車道，導致設備使用率僅微幅提升；另外，本研究也考慮到用路者對延滯時間的重視 ( $K6 = -12 \sim -18$ )，當  $K6 = -12$  時，其設備使用率由 62.08% 增加至 62.25%，增加 0.17，但當  $K6 = -18$  時，其設備使用率由 62.05% 增加至 62.30%，增加了 0.25%， $K6$  之值負的愈大 (如  $K6 = -18$ ) 是表示系統的延滯情形愈嚴重，上述現象說明了當系統延滯情況愈嚴重時，用路者仍是會選擇自動收費車道，因此使用率增加幅度會些微增加 (0.17%→0.25%)，表示用路者仍信賴使用電子收費設備會減少延滯，但某些裝置車上電子收費設備的用路者會考慮當時延滯情況而作調整，使得增加幅度並不明顯。

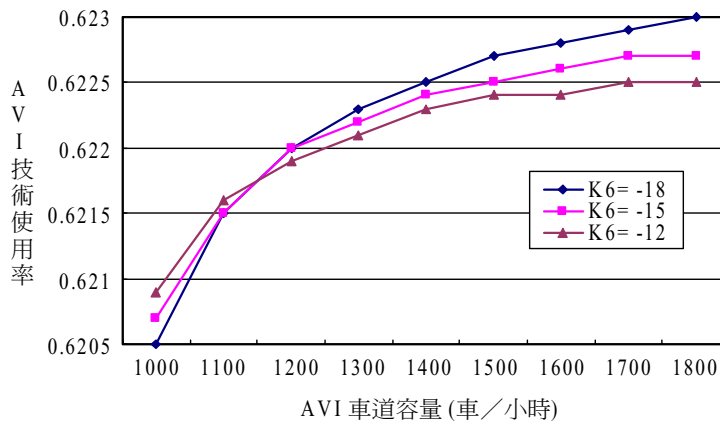


圖 13 AVI 車道容量與 AVI 設備使用率之關係

圖 14 中說明自動收費車道服務容量的增加，將使整體收費站的延滯降低，其中以自動收費車道的平均延滯降低幅度較高 (呈曲線)，而人工收費車道的變動較為平緩 (幾乎呈直線)，不過皆呈邊際遞減的變化關係。因此，未來電子收費設備的改良與使用，將對於此項設備的推廣有正面的效果，並可以降低系統延滯；而對於電子收費設備投資與技術提升之相關決策，亦可權衡其所需成本效益以及其他潛在功能與應用做一整體考量。

#### 4.4 成本效益分析之應用

由前述的分析可以決定供需均衡條件，但設施的投資應以社會資源的最佳利用為依據，亦即同時考慮經營者、用路者、與外部社會的成本與效益。本研究舉一簡例說明成本效益分析結果。考慮的成本項目如表 2 所示，參酌相關文獻<sup>[6,11,12]</sup>並考量通貨膨脹將其數值略作調整，假設之數值如表 6 所示。

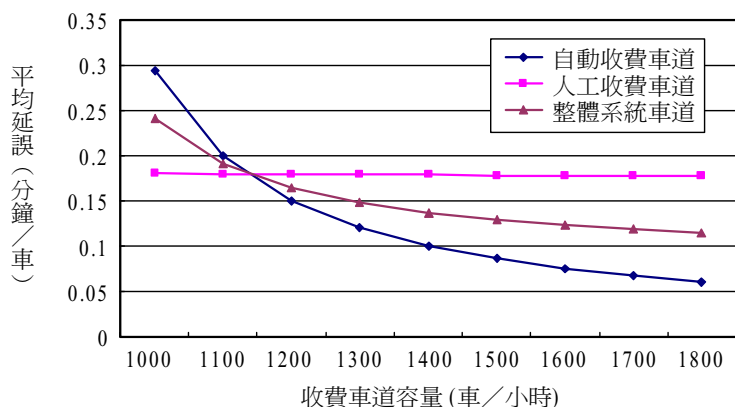


圖 14 車道容量與平均延滯之關係 (2A3M)

表 6 各項成本假設值

成本項目	自動收費車道	人工收費車道	單位
經營者投資成本	$Ia = 990,000$	$Im = 270,000$	元/年/車道
營運成本	$Oa = 195,000$	$Om = 105,000$	元/年/車道
維修成本	$Ma = 1,824,000$	$Mm = 300,000$	元/年/車道
用路者時間價值	$Vt = 240$		元/小時
燃油消耗率	$ea = 3.0$	$em = 5.0$	公升/車小時
油價	$Pl = 19.2$		元/公升
裝置使用費	$Sa = 1,200$		元/年/車
外部社會污染成本	$Ea = 2,400$	$Em = 4,800$	元/年/車

資料來源：本研究整理。

## 1. 成本分析

成本分析中係以系統總成本 (C) 及成本增量 (CK)，應用(31)~(35)式對於營運者與用路者進行分析：

$$Cao = (Ia + Oa + Ma) \times La \quad (31)$$

$$Cmo = (Im + Om + Mm) \times Lm \quad (32)$$

$$Catu = Sa \times Qt \quad (33)$$

$$C = Cao + Cmo + Catu \quad (34)$$

$$CK = C - ((Im + Om + Mm) \times (La + Lm)) \quad (35)$$

式中各變數參數之定義依營運者與使用者予以定義說明如下：



(1) 營運者部分：

a. 自動收費車道

$Cao$ ：設置自動收費車道之成本；

$La$ ：設置之自動收費車道數。

b. 人工收費車道

$Cmo$ ：設置人工收費車道之成本；

$Lm$ ：設置之自動收費車道數。

(2) 用路者部分：

$Catu$ ：裝置 AVI 設備之總車輛成本；

$Qt$ ：裝置 AVI 設備之車輛數。

其餘變數請參考表 2 所示。

2. 效益分析

效益分析中係以系統總效益 ( $Bt$ )，應用(36)~(42)式對於用路者與外部效益進行分析：

$$Cau = (Da \times Vt + ea \times Da \times Pl) \times Qa \quad (36)$$

$$Cmu = (Dm \times Vt + em \times Dm \times Pl) \times Qm \quad (37)$$

$$Btu = (D0 \times Vt + em \times D0 \times Pl) \times Q_{hr} - (Cau + Cmu) \quad (38)$$

$$Cas = Ea \times Qa \quad (39)$$

$$Cms = Em \times Qm \quad (40)$$

$$Bts = (Q_{hr} \times Em) - (Cas + Cms) \quad (41)$$

$$Bt = (Btu + Bts) \times 24 \times 365 \quad (42)$$

式中各變數參數之定義依使用者與社會外部效益予以定義說明如下：

(1) 用路者部分：

a. 自動收費車道

$Cau$ ：用路者選擇自動收費車道之成本；

$Da$ ：使用自動收費車道之延滯時間；

$Qa$ ：選擇自動收費車道的車輛數。

b. 人工收費車道

$Cmu$ ：用路者選擇人工收費車道之成本；

$Dm$ ：使用人工收費車道之延滯時間；

$Qm$ ：選擇人工收費車道的車輛數；

$Btu$ ：用路者之總效益；

$D0$ ：系統全部使用人工收費車道之延滯時間；

$Q_{hr}$ ：每小時抵達系統的車輛數。

## (2) 外部社會部分：

$Cas$ ：使用自動收費車道之車輛產生的外部污染成本；

$Cms$ ：使用人工收費車道之車輛產生的外部污染成本；

$Bts$ ：外部社會之總效益。

使用前述範例的 0-6 時，車流量為 2,800 車／小時的情況，以 5 車道皆為人工收費的設施配置方式作為比較基準，在流量、車道、稅費等相關條件不發生變化的情況下，可以求得各種車道配置的效益增量（ $B$ ）與成本增量（ $C$ ），如表 7 所示。

表 7 各種車道配置的成本與效益分析

車道配置	效益增量 $\Delta B$ (百萬元)	成本增量 $\Delta C$ (百萬元)
1A4M*	254.38	173.62
2A3M	315.78	183.91
3A2M	374.72	194.77
4A1M	431.18	207.79

\*A 表示自動收費車道、M 表示人工收費車道。

其各車道配置之成本效益分析方式如下：

(1) 首先將各方案之成本由小而大，依序排列，計算最前面兩方案之增量  $B/C$  值

$$\frac{\Delta B_2 - \Delta B_1}{\Delta C_2 - \Delta C_1} = \frac{315.78 - 254.38}{183.91 - 173.62} = 5.9669 > 1$$

因為  $B/C$  值  $> 1$ ，選擇成本較大之方案。

故  $\frac{\Delta B_2}{\Delta C_2}$  優於  $\frac{\Delta B_1}{\Delta C_1}$ ，因此不考慮 1A4M 的設置方式。

## (2) 將所選擇之方案，再與下一方案比較，其方法同步驟(1)

$$\frac{\Delta B_3 - \Delta B_2}{\Delta C_3 - \Delta C_2} = \frac{374.72 - 315.78}{194.77 - 183.91} = 5.4272 > 1$$

故  $\frac{\Delta B_3}{\Delta C_3}$  優於  $\frac{\Delta B_2}{\Delta C_2}$ ，因此不考慮 2A3M 的設置方式。

## (3) 重複上述步驟

$$\frac{\Delta B_4 - \Delta B_3}{\Delta C_4 - \Delta C_3} = \frac{431.18 - 374.72}{207.79 - 194.77} = 4.3364 > 1$$

故  $\frac{\Delta B_4}{\Delta C_4}$  優於  $\frac{\Delta B_3}{\Delta C_3}$ ，因此不考慮 3A2M 的設置方式。

- (4) 最後獲得經濟上最佳方案為 4A1M，此乃因為此方案的設置會使得外部社會污染成本大幅的較低，考慮社會資源的最佳運用。

經由上述分析可以獲知車道配置 4A1M 為該流量水準下的較佳方式，而其效益的大小可以透過市場策略的運作，改變使用率來更進一步提升。

## 五、結論與建議

本研究建立一套高速公路自動收費系統的分析模式，以評估應用自動收費設備之成本效益，並可輔助決定收費站自動收費車道設置數量。文中以數值例說明其操作方式，並分析各項系統供需因素對於自動收費系統績效的影響，以提供規劃者與經營業者評估策略績效，使其採取有效的電子收費設備方式、車道配置方式、以及市場經營管理策略。以下總括本研究得到之結論與建議。

### 5.1 結論

1. 一般用路者選擇裝置電子收費設備的目的是為了減少通過收費站的延滯時間，但透過本研究之分析發現，當自動收費車道的擁擠增加時，有部分裝置車上電子設備的車輛在選擇車道時，選擇由人工收費車道通過，分析結果顯示，具有車上電子設備之車輛而使用人工收費車道之比率約為 13.95%，此一現象說明電子收費車道的配置必須妥善規劃的重要性。
2. 本研究的系統均衡狀態，是要求得自動收費車道與人工收費車道的延滯時間趨於某種程度的收斂，此時的車道選擇，不會因為電子收費市場使用率的高低而有所改變。本研究另外嘗試使用此種收斂方式與本研究所採用之分析方式作比較，經過測試之後，所產生之結果相同。
3. 在本研究之敏感度分析中，包括車流量、車道配置、安裝使用費、費率優惠、服務容量，以及各屬性變數的相關參數，都會影響分析結果，其中較值得歸納的分析結果包括：
  - a. 車流量之變動：由本研究分析可知，不管設備選擇使用率、轉移比率及車道選擇使用率，均隨著車流量而呈曲線遞增，但增加幅度不大；另外，自動收費設備的配置數量在流量到達飽和時，若不隨流量而有所調整，則該設施的使用率會有微幅下降的趨勢。
  - b. 車道配置變動：自動收費車道數增加 (由 1A 增至 4A)，則裝置電子收費設備的車輛選擇使用人工收費車道的轉移比率大幅降低，但其降低幅度的比率逐漸縮減。
  - c. 安裝費用變動：當安裝使用費增加時，會降低電子收費技術的使用率，而且若用路

者對該費用的重視程度 (K2) 增加，若其安裝費由 250 元增至 4,000 元，則電子收費使用率的降低幅度相當可觀，由 76.02% 降至 24.85%。

- d. 設備水準變動：自動收費車道服務容量的增加，將使整體收費站的延滯降低，其中以自動收費車道的平均延滯降低幅度較高（呈曲線），而人工收費車道的變動較為平緩（幾乎呈直線），不過皆呈邊際遞減的變化關係。因此，未來電子收費技術的改良與使用，將對於此項設備的推廣有正面的效果，並可以降低系統延滯；而對於電子收費設備改良之相關決策，亦可權衡其所需成本效益以及潛在的其他應用功能做一整體考量。
4. 在本研究之成本效益分析中，以 5 車道皆為人工收費的設施配置方式作為比較基準，在流量、車道、稅費等相關條件不發生變化的情況下，求得各種車道配置的效益增量與成本增量之比值，獲知車道配置 4A1M（四組自動收費車道及一組人工收費車道）為該流量水準下的較佳方式，而其效益的大小可以透過市場策略的運作，改變使用率來更進一步提升。
5. 在本研究之數值分析當中，曾嘗試若合理改變表 4 中之假設變數之數值時，發現曲線之改變趨勢並無明顯之變化，可資證明本研究對於高速公路電子收費之車道配置與成本效益分析之穩定性，可做為決策者之參考準則與依據。

## 5.2 建議

1. 本研究所建立的分析方法，可以應用至需求隨時段變動的情況，未來則須調查分析使用者的屬性資料，以期能實際評估系統績效。
2. 由於用路者面對不同的系統績效，其旅行路徑出發時刻也將有所變動，因此未來可將模式結合 Chang 與 Cheng<sup>[13]</sup> 之研究，擴展為考慮出發時間及路徑選擇行為的動態均衡模式，如此當更能正確提供系統績效，提高模式之應用能力。
3. 依據系統特性分析可知，若干系統的服務特性與電子收費自動收費系統類似，例如高乘載車道設置 (High Occupancy Vehicle Facilities)、公車專用道設置、及各項收費站系統等，均可以利用本模式的架構與方法進行績效的評估。
4. 高速公路電子收費在技術發展具多樣性，在應用功能上可以進一步思考其在整體智慧型運輸系統的角色，而此一應用範圍的擴大，將影響整體成本效益分析的結果，是值得進一步研究的課題。

## 參考文獻

1. 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*，第三十一卷，第一期，民國九十一年三月。
2. Chang, E. C., "Assessment of AVI Toll Collection Technology", *Transportation Planning*

- Journal*, Vol. 20, No. 3, 1991, pp. 313-340.
3. Chang, S. K. and Chang, H., "Cost-Benefit Analysis on Application of AVI Technologies to Toll Services", Pacific Rim Transtech Conference and the ASCE Conference of Application of Advanced Technologies in Transportation Engineering, July 25-28, Seattle, U.S.A., 1992.
  4. Foote, R. S., "Projects for Non-Stop Toll Collection Using Automatic Vehicle Identification", *Traffic Quarterly*, Vol. 35, No. 3, 1981, pp. 44-50.
  5. Nielsten, G. V., "ETTM: Effects on Capacity and Throughput", *ETTM Forum*, Vol. 1, No. 1, 1992.
  6. Kanaan, A. Y., "The Economic Effects of Implementing Electronic Toll Collection and Traffic Management Systems", Presented at the 72nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1993.
  7. Luce, R. Duncan., *Individual Choice Behavior: A Theoretical Analysis*, New York, Wiley, 1959.
  8. Ben-Akiva, M. and Lerman, S. R., "Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand", MIT Press, 1985.
  9. Murthy, A. S. N., *et al.*, "A Case Study of Champlain Toll Station", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 6, 1987, pp. 732-738.
  10. Wayne, L. Winston, *Operations Research: Applications and Algorithms*, Duxbury Press, Boston, 1987, pp. 884-887.
  11. 張學孔、陳淵博等人，「高速公路電子收費系統營運策略之研究」，中華顧問工程司委託台大慶齡工業研究中心辦理專題研究報告，民國八十九年八月。
  12. Center for Urban Transportation Research, "Analysis of Automatic Vehicle Identification Technology and Its Potential Application on the Florida Turnpike", Technical Report, University of South Florida, College of Engineering, Tampa, Florida, 1990.
  13. Chang, S. K. and Cheng, C. C., "A Time-Varying Congestion Pricing Model for Optimization of Transportation Corridor", Proceedings of the 82nd Annual Meeting of Transportation Research Board, January 12~16, 2003.

