

高速公路收費站延滯模式之研究¹

DELAY MODEL FOR FREEWAY TOLL PLAZA

曾平毅 Pin-Yi Tseng²

林豐博 Feng-Bor Lin³

張瓊文 Chiung-Wen Chang⁴

蘇振維 Cheng-Wei Su⁵

(90年5月30日收稿, 90年9月24日第一次修改, 90年12月24日
第二次修改, 91年10月9日定稿)

摘 要

由於收費站車流到達狀況可能隨時間而顯著變動, 再加上地磅作業、調撥作業等對車流行進之干擾等特性間交互作用複雜, 一般使用模擬模式(simulation model)較能反映收費站複雜之作業狀況, 但簡易的分析性延滯模式(analytical delay model)在公路規劃、設計階段, 能提供便利分析之功能, 有其重要性。因此, 本研究之目的即在於分析台灣高速公路收費站有關服務時間之車流特性, 並構建收費站車流延滯分析模式, 以作為規劃作業之運用。本研究利用交通部運輸研究所依據交通工程學理與本土性收費站車流特性資料, 為台灣高速公路所建立之收費站模擬(Toll Plaza Simulation, TPS)模式, 作為構建車流延滯模式之工具。經驗證發現, 本研究構建之收費站延滯模式, 可以達到合理之可信度, 該模式將有助於公路之規劃作業。本研究最後並以程序性之步驟, 以應用例說明延滯模式之運用。

1. 本文得助於交通部運輸研究所委託合作之研究計畫「擴展市區道路模擬模式及技術服務」之經費支援, 使作者能繼續完成此後續研究, 特此致謝。
2. 中央警察大學交通學系暨交通管理研究所副教授(聯絡地址為 333 桃園縣龜山鄉大崗村樹人路 56 號; 電話: 03-3282321 轉 4619; 傳真: 03-3963022)。
3. 美國克拉森大學(Clarkson University)教授。
4. 交通部運輸研究所運輸計畫組研究員。
5. 交通部運輸研究所運輸計畫組研究員兼副組長。

關鍵詞：電腦模擬；延滯模式；規劃；收費站

ABSTRACT

Time-varying traffic demand, weigh-station operation, and the implementation of reversible lane operation often create complex traffic situations at a toll plaza. Because of this, simulation models are better able to capture the real operating characteristics of a toll plaza than analytical models. To facilitate the planning and design of toll plazas, however, it is useful to have an analytical model that allows planners and designers to screen quickly a large number of alternatives. In light of this need, this paper discusses the operating characteristics of freeway main-line toll plazas and describes the nature and the application of an analytical delay model derived from the output of Toll Plaza Simulation (TPS) model.

Key Words: *Computer simulation; Delay model; Planning; Toll plaza*

一、前 言

目前台灣地區的高速公路收費站皆屬主線傳統式收費站，主要的配置包括減速及停等區、收費亭、加速區、地磅、管理局辦公室及銜接地區之服務道路等。由於主線收費站對於高速公路車流運作之影響相當顯著，因此交通部運輸研究所(以下簡稱運研所)曾於民國 80 年出版之「台灣地區公路容量手冊」^[1] 第二篇第五章討論收費站之容量及服務水準分析方法，惟當時所採用之分析模式，於分析過程中有太多的假設條件，因此無法詳實的描述實際狀況而廣泛應用。收費站之運作受許多因素之影響，這些因素包括需求流率、車種組成、收費方式、收費車道之數目及運用、收費車道之調撥、附近地磅之作業、及需求流率隨時間之變化。因為上述因素之互動關係相當繁雜，電腦模擬較能準確的反映收費站之作業。因此，運研所在民國 86 年發展出以收費站模擬模式(toll plaza simulation model, or TPS model)為基礎之分析方法^[2]。此一早期的 TPS 模式只能分析傳統式收費站，為了將來電子收費在台灣之普遍運用，運研所又在民國 89 年將 TPS 擴展以便模擬傳統及電子收費之作業^[3]。模擬模式雖然用途廣泛，但使用者須閱讀使用者手冊以建立模擬之輸入資料檔，所以模擬模式之使用常常比分析性模式(analytical model)困難。在規劃或初步設計收費站時，不一定需要很準確的估計值。在此情況下，如有一簡單的分析性模式可利用，則可讓規劃或設計人員迅速地排除不合理之方案或設計，以減少資源之浪費。

目前國內外關於高速公路收費站之研究，主要在於探討收費站之容量或作業績效^[4-8]，分析的方法可歸納為分析性的等候理論(queueing theory)模式或流率分析(flow

rate analysis)，以及模擬分析(simulation analysis)模式等兩大類，有關於收費站之規劃設計^[9]或收費站之延滯模式的文獻^[10]則較少。針對收費站規劃設計階段之需要，本研究主要希望利用已本土化之 TPS 模式，構建分析性延滯模式。本研究首先探討收費站運作之特性，其次介紹 TPS 模式之功能，而後說明延滯模式之性質及其校估(calibration)，最後則提供一例題介紹延滯模式之運用。

二、收費站運作之特性分析

2.1 收費站設置及運作概況

收費站區內收費車道之寬度(包括安全島)由內側向外計有 5.2 公尺、5.45 公尺及 5.8 公尺等三種，內側安全島之寬度為 2.2 公尺，較外側之安全島的寬度為 2.7 公尺，故於收費站區內扣除安全島之寬度，有效之車道寬度分別為不找零小型車 3.0 公尺，大型車及找零小型車車道為 3.1 公尺。加減速區之車道漸變率設計標準均為 1：12，但在拓寬或計畫拓寬部分，由於受到路權寬度限制，有時無法維持此標準。加減速區之長度，在汐止收費站，因地形關係，僅長約 270 公尺。泰山收費站規模較大，北端約長 460 公尺，南端約長 650 公尺。其他收費站的加減速區長度約在 330 ~ 360 公尺間。

中山高速公路全線共設 10 處主線欄柵式收費站，北部第二高速公路計設有 2 處主線欄柵式收費站。收費車道數一般是上游主線車道數之 2.5 倍。表 1 即收費站依車輛種類及收費方式之 4 種收費車道分類表，高速公路對於重型車輛行駛內側車道有較多之限制，且大貨車需在通過收費站後進行過磅以防超載，因此各收費站皆按行車方向由外向內設置大貨車、客聯車(大客車及聯結車)、找零小型車、不找零小型車收費車道，民國 80 年 9 月 1 日起配合費率之調整，聯結車單獨使用一類車道，而大貨車及大客車使用同一車道。

目前中山高速公路於臨近都會區之收費站常實施調撥作業，以紓解尖峰時段之擁擠情況。中山高速公路全線 10 個收費站中，除泰山收費站雙向有 20 個收費車道，楊梅收費站有 12 個收費車道外，其餘均只有 10 個收費車道，配合正進行之中山高拓寬計畫，造橋以南之各收費站亦正增設收費車道中。泰山收費站中間 4 個收費車道為調撥車道(單向各 2 個)外，其餘各收費站皆以中間 2 個收費車道為調撥車道。此外，根據高公局長期統計結果顯示每天各時段通過收費站之車輛數大致呈穩定狀態，收費站管理單位基於通行費核帳手續過於繁複之考量，且為避免加重收費員之工作負擔，一般均於固定時段實施調撥。至於機動調撥，因目前並無一定的作業標準可供參考，

通常由各收費站之管理當局視實際需要自行依經驗辦理。以泰山收費站為例，當一方向的車輛較少，而另一方向收費亭前(每車道)之等候車輛超過 10 輛以上時，會實施機動調撥作業。

進行調撥作業時，係以人工方式將一方向車道分隔線上交通錐搬移至另一方向之收費亭前車道分隔線上，通常作業人員只將交通錐移動約 50 公尺，作業時間約需 10 ~ 20 分鐘。

表 1 中山高速公路收費車道分類表

時段	車道別	車輛種類
80 年 9 月 1 日 以前	小型車不找零車道	含小客車、小貨車、小客貨兩用車及小型特種車等。
	小型車找零車道	
	客聯車車道	含大客車、以曳引車拖行之半拖車、全拖車(含平板、貨櫃、罐型、廂型等拖車)及小型拖車等。
	大貨車車道	含大貨車、大客貨兩用車、大貨車兼充代用客車、未拖帶拖車之曳引車及非拖車型之大型特種車等。
80 年 9 月 1 日 以後	小型車不找零車道	同前
	小型車找零車道	
	聯結車車道	含以曳引車拖行之半拖車、全拖車(含平板、貨櫃、罐型、廂型等拖車)及小型拖車等。
	客貨車車道	含大客車、大貨車、大客貨兩用車、大貨車兼充代用客車、未拖帶拖車之曳引車及非拖車型之大型特種車等。

資料來源：[11,12]。

2.2 收費車道容量及服務時間

收費車道容量指在某一車流、收費站幾何設計、收費作業及其他現存或預期狀況下，在不短於 15 分鐘之時段內，經常能從收費車道通過之最高流率。根據此定義，容量並不是一固定值，其值必須從不短於 15 分鐘之時間內的流量以估計。此外，容量並非最高之觀察值，而是一期望值(expected value)。

收費車道服務時間指穿越收費車道之流率等於容量時各車輛之車距(headway)。如平均服務時間為 5 秒，則收費車道之容量為 $3,600/5=720$ 輛/小時。

傳統收費站上之車輛必須停靠或以相當低的速率通過收費亭，所以其收費車道之服務時間等於在有不斷的停等車輛時，一車車尾通過收費亭旁一參考線到下一輛車車

尾通過同一參考線之時間。停等車指停止或與前車距離在一小車車長之內(約 4 ~ 5 公尺)，而且車行緩慢，速率約在 12 公里/小時以下之車輛。量測服務時間用的參考線位於駕駛員抵達收費窗口時車頭的一般位置。如收費站設有電子收費系統，車輛最少可以 8 公里/小時之速率通過收費車道。台灣先前在北二高樹林及龍潭收費站測試的電子收費系統，能讓車輛以 40 公里/小時或更高的速率通過收費站。在這情形下，除非有塞車，則電子收費之車道可能無上述之停等車輛，所以電子收費車道之服務時間須從其容量以估計之。

2.3 收費站服務時間之特性

當收費站之幾何設計不變化時，收費車道之服務時間主要受車種組成及收費方式之影響。車種組成及駕駛員使用不同收費方式之比率，可能隨收費站之位置而有所不同，在沒有詳細資料的情況下，表 2 所列車種組成及收費方式的分布可以作為分析收費站服務水準之依據。表 2 乃是依據中山高速公路及北二高在民國 88 年之車流狀況^[12]及民國 89 年 4 月在泰山收費站之現場資料。

表 2 中山高及北二高車種組成及收費方式之分布

車種	車種比率	各車種收費方式之分布	
		回數票	找零
小型車	80%	87%	13%
聯結車	8%	98%	2%
大貨車	6%	84%	16%
大客車	6%	89%	11%

資料來源：[12]及本研究於民國 89 年 4 月在泰山收費站調查之現場資料。

台灣之電子收費仍在測試階段，目前尚無可靠的資料可估計將來電子收費車道車輛之比率。美國紐約都會區附近收費站電子收費的使用率只達 3.8%^[13]。如假設台灣的電子收費使用率可達 5%，而且電子收費之車輛原屬回數票車輛，則表 3 可以作為分析收費站作業之參考。

表 4 顯示各車種在不同收費方式下之平均服務時間，表中有關回數票及找零之服務時間係依據民國 89 年 4 月在泰山收費站蒐集之資料。這些服務時間乃同一車種穿越收費車道之平均車距。由此表可知，找零的服務時間大約是回數票服務時間的 2 倍，回數票服務時間則大約是電子收費服務時間的 2 倍。台灣電子收費之服務時間尚無現場資料可作為估計之依據。一般電子收費車道的容量隨通過收費車道之速率而變，速

率在 8 公里/小時，容量大約在 1,200 小客車/小時/車道，速率增高而主線速率相當高時，容量可達 1,800 小客車/小時/車道^[14]。

收費站之服務水準不僅受到平均服務時間的影響，也受到個別車輛服務時間變化 (variation) 的影響。圖 1 顯示，如將個別服務時間用其平均時間而標準化(亦即將服務時間轉換成與平均服務時間之比率)，則標準化後之服務時間的機率分布隨收費方式而有顯著的不同，而車種則無影響。由此圖可知，找零的服務時間有很大的變化，最短的找零服務時間只有平均服務時間的 20%，最長的則有 400%。回數票服務時間之變化較小，大約是平均服務時間之 0.5 至 2.5 倍。

表 3 電子收費作業下車種組成及收費方式分布之預測值

車種	車種比率	各車種收費方式之分布		
		回數票	找零	電子收費
小型車	80%	82%	13%	5%
聯結車	8%	93%	2%	5%
大貨車	6%	79%	16%	5%
大客車	6%	84%	11%	5%

資料來源：本研究整理。

表 4 單一車種之平均服務時間(秒/輛)¹

車種及車道型式	收費方式		
	回數票	找零	電子收費 ²
小型車車道	3.81	7.72	2.06
大型車車道			
聯結車	7.00	20.0 ³	3.64
大貨車	5.75	11.2 ³	2.91
大客車	6.70	13.0 ³	2.99

註：1. 本表係經調查各種收費方式下，計算前車與該車為相同車種狀況下之平均服務時間而得。
 2. 有關電子收費之服務時間乃根據電腦模擬之結果，車速 ≥ 40 公里/小時。
 3. 目前大型車車道係混合使用，受限於資料取樣方式，大貨車之樣本數為 27，大客車之樣本數為 17，聯結車之樣本數為 13，未來宜再增加樣本數。

資料來源：本研究整理。

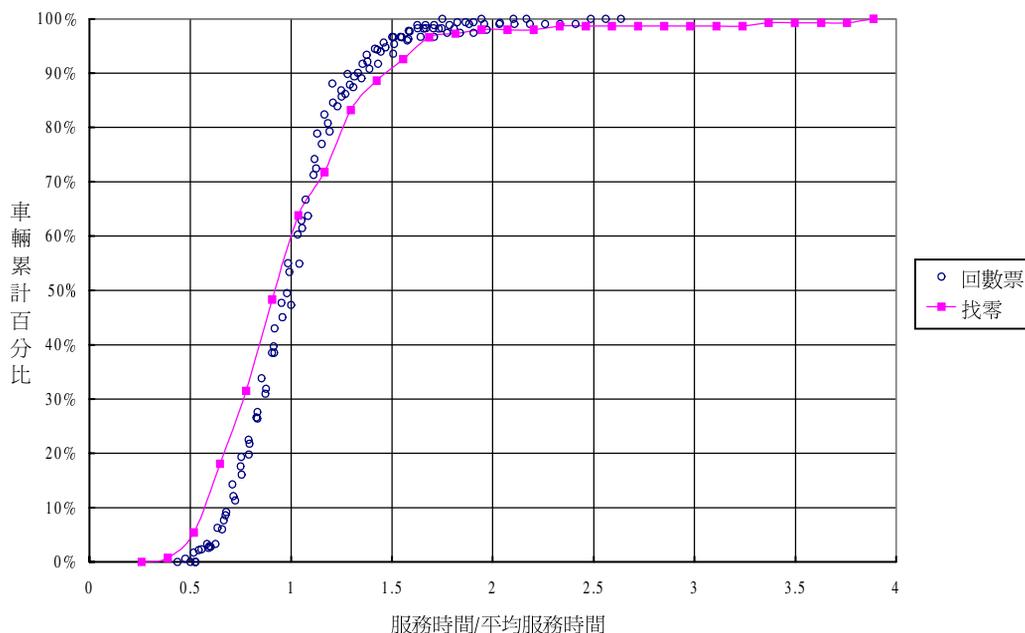


圖 1 收費站標準化服務時間機率圖

傳統收費車道之服務時間受到車輛跟進時間(move-up time)及收費時間(paying time)的影響。跟進時間指從前車付費完畢開始加速離開收費亭到下一停等車輛之駕駛員到達付費窗口所需要的時間。小型車回數票車道上之平均跟進時間大約是 3.2 秒，小型車找零車道上之平均跟進時間大約是 4.2 秒。大型車車道上找零車之平均跟進時間隨車種而變，但多半在 6 秒至 7 秒之間。大型車車道上回數票車之平均跟進時間則在 5.5 秒到 6.0 秒之間。

付費時間指駕駛員抵達付費窗口開始付費到付費完畢開始加速離開所需時間。回數票車輛常以慢速通過收費亭而不停車，所以其付費時間很難準確的估計，但一般遠短於 1 秒。小型車找零車道上之平均付費時間大約在 3.5 秒。大型車車道找零車之平均付費時間隨車種的變化很大，在 4 秒到 11 秒之間。

2.4 收費車道容量之範圍及估計

根據早期在中山高所蒐集之資料^[11]、有關電子收費之資料^[8]及本研究於民國 89 年 4 月在泰山收費站蒐集之資料，在天候良好的情況下，收費站容量之可能範圍如表 5 所示。

表 5 天候良好狀況下收費車道之容量

車道型式	容量(輛/小時/車道)
小型車回數票*	850 ~ 950
小型車找零	350 ~ 550
大型車車道**	420 ~ 530
電子收費車道***	1,800
* 不收現金 ** 混合車種 *** 100%小型車，車速 ≥ 40 公里/小時	

收費車道容量可估計如下：

$$C = \frac{3600}{H} \quad (1)$$

此式中，

C ：車道容量(輛/小時/車道)；

H ：平均服務時間(秒/輛)。

如一大型車收費車道容納不同車種，則平均服務時間可從式(2)估計：

$$H = \sum_i P_i \sum_j F_{ij} S_{ij} \quad (2)$$

此式中，

P_i ：車種 i 之比率(代表值：聯結車 40%，大貨車 30%，大客車 30%)；

F_{ij} ：車種 i 使用收費方式 j 之比率(代表值：見表 2 或表 3)；

S_{ij} ：車種 i 使用收費方式 j 之平均服務時間(秒/輛)(代表值：見表 4)。

例如一傳統大型車收費車道有 40% 聯結車，30% 大貨車及 30% 大客車，而且各車種之收費方式及服務時間如表 2 及表 4 所示，則

$$\begin{aligned} H &= 0.4(0.98 \times 7.0 + 0.02 \times 19.22) + 0.3(0.84 \times 5.75 + 0.16 \times 12.43) \\ &\quad + 0.3(0.89 \times 6.70 + 0.11 \times 12.23) \\ &= 7.13 \text{ 秒/輛} \\ C &= 3600 / 7.13 \\ &= 505 \text{ 輛/小時} \end{aligned}$$

三、收費站模擬模式

3.1 TPS 模式概述

運研所開發的收費站模擬模式(TPS)是一時間推進(time-advanced)之微觀電腦模擬模式，此模式每秒一次更新模擬車輛之速率，位置及加速率或減速率。TPS 模式可用以模擬收費站在不同幾何設計、交通狀況及作業方式時之服務水準及容量。

TPS 模式之模擬系統包括收費站、地磅設施及公路主線或出口匝道之上、下游道路。收費站劃分成減速區、收費亭及加速區。收費亭之總數不能超過 28，其單方向之收費亭不能超過 14 個孔道。收費方式限於五種，第一種收費方式為電子收費，其他四種可包括找零、不找零、回數票及信用卡等之付費方式。模擬車種也劃分為五種，依順序第一至第五車種各為小型車、大客車、大貨車、聯結車及休閒車。每一車道在任何一秒鐘之車輛數不能超過 300 輛，而且單一方向所有模擬之車輛數不能超過 20,000 輛。TPS 模式可讓使用者一次模擬 1 到 800 個不同狀況。每一模擬作業(simulation run)可涉及不同之車輛到達情況、不同之車流率、不同之收費亭數目、不同之收費特性或不同之幾何設計。每一模擬作業之時間包括一熱機時間，熱機時間是用以產生並推進車輛以讓模擬系統內之車輛達到某一程度後才進行模擬資料之蒐集。

在模擬過程中，TPS 模式將模擬時間分割成一秒之間隔。在每秒鐘內，此模式在收費站上游主線車道上產生新到達之車輛，並將已在收費站之車輛往收費亭或收費亭下游之主線推進。每一車輛有一套隨機訂定之屬性，包括車種、車長、停等時欲與前車保持之距離、期望之自由旅行速率、付費方式、及駕駛員在跟車時之敏感性。車輛之推進包括車道之轉換、收費車道之選擇、加速率或減速率之訂定、位置及速率之更新、及付費時間之訂定等。TPS 模式所模擬之車流及收費作業之性質乃根據如前數節所述之現場資料及現有文獻所提供的資料。

TPS 模式之輸出資料包括各方向上、下游區之車流率、平均路段延滯時間、平均車隊延滯時間、平均車隊長度、通過模擬系統之平均速率、經過地磅之車流率、地磅進口路段平均行進延滯時間、收費車道服務水準。

收費站之服務水準依表 6 所示之平均路段延滯時間劃分為六級^[14]。表 6 係引用運研所「2001 年台灣地區公路容量手冊」，表中之平均路段延滯係指減速區之平均路段延滯，減速區涵蓋從上游主線車輛開始減速之地點到收費亭之路段，各車輛在減速區之路段延滯等於該車輛從進入減速區到車尾通過收費亭之旅行時間，減掉該車以自由旅行速率(free-flow speed)通過減速區之預期旅行時間。平均路段延滯等於減速區之長度除以平均旅行時間。

表 6 收費站服務水準評估準則

服務水準	平均路段延滯(秒/輛)
A	0 ~ 10.0
B	10.1 ~ 20.0
C	20.1 ~ 30.0
D	30.1 ~ 40.0
E	40.1 ~ 50.0
F	> 50.0

資料來源：[14]。

3.2 TPS 模式驗證

因現場資料難以取得，一般交通工程上描述車流作業之分析性模式及模擬模式的驗證工作經常很有限。TPS 模式也不例外。為了驗證 TPS 模式，運研所只在民國 86 年時在泰山收費站蒐集數套在不同收費方式及車流狀況下的平均路段延滯及平均車隊長度。每套資料所涵蓋的時間大約為 30 分鐘，在這些期間內抵達收費站之流率以 2 分鐘為單位整理以作為模擬之輸入資料。現場延滯及車隊長度之觀察值與 TPS 模式之估計值如表 7 所示。從此表知，當車流到達收費站之型態已知之狀況下，TPS 模式可提供合理之估計，其誤差在 10% 之內。

表 7 TPS 模式模擬值與現場觀察值之比較

項 目	1	2	3	4	5	6	7	8	9
一、收費方式	A	A	A	B	B	B	B	C	C
二、上游流率(輛/時)	764	720	703	461	403	282	298	405	380
三、容量(輛/時)	825	846	860	434	398	346	355	490	525
四、起始車輛數	6	7	5	16	5	12	4	2	7
五、平均車隊長度(輛)									
1.觀察值	3.0	2.1	2.1	14.9	6.7	3.9	4.1	2.0	1.7
2.模擬值	2.9	2.4	2.1	13.5	6.4	3.8	4.1	1.9	1.7
六、平均車隊延滯(秒/輛)									
1.觀察值	13.9	10.5	11.4	109	58.1	46.3	48.8	17.0	16.5
2.模擬值	14.1	10.8	11.0	110	60.6	46.4	47.8	16.9	15.9
註：A = 小車不找零；B = 小車找零；C = 大客車及聯結車各式收費。									

資料來源：[3]。

四、收費站延滯模式之校估

本節主要提出收費站延滯模式，並進行模式參數之校估。本研究利用已經驗證之 TPS 模擬值，亦即利用不同 V/C 情況下之延滯值，以校估延滯模式之參數值。

4.1 收費站延滯模式

如車輛抵達收費亭之車距為均勻(uniform)，每車的服務時間相同，而且每車皆有同樣的跟進時間，則平均路段延滯等於 $3600/C$ ，其中， C 為車道容量(輛/車道/小時)。但事實上車距不均勻，而且服務時間隨車輛而變，這種變異性會造成額外的延滯。根據早期的研究^[8]，號誌化路口車輛抵達車距及紓解時間為隨機(random)而造成之額外延滯可用下式估計之：

$$D = 900T \left(x - 1 + \sqrt{\frac{\beta x}{CNT} + (x - 1)^2} \right) \quad (3)$$

其中， D ：額外延滯(秒/輛)；

T ：分析時間(或需求流率持續時間)(小時)；

x ：流量與容量比值(即 V/C 比)；

β ：校估調整係數；

C ：車道容量(輛/車道/小時)；

N ：車道數。

收費站與號誌化路口皆為等候系統(queuing system)，在模化(modeling)等候系統之延滯時，皆可將延滯分成兩大項(compounds)，其一為在到達車間距(arrival headway)是均勻(uniform)而且到達率(arrival rate)不超過容量(capacity)時之延滯，另一是因到達車間距不均勻而且有時(短時間內或長時間內)到達率超過容量所造成之額外延滯。一般而言，等候系統的額外延滯可以用式(3)求取近似值(approximation)，該式應用在不同等候系統時，必須利用各等候系統之容量 C ，而且也需訂定適合該系統之 β 值。本研究以式(3)估計在收費車道上之額外延滯。

此外，車距均勻之平均延滯 $3600/C$ 中含有跟進時間，但在需求流率很低時，大部分或全部車輛可能沒有跟進時間，而只有加、減速及付費所造成之延滯。此外， $3600/C$ 沒包含減速期間所造成之延滯，所以延滯模式需利用另一參數以調整估計值。

根據上述之考量，本研究針對下列之延滯模式作校估及測試工作：

$$d = \alpha + \frac{3600}{C} + D \quad (4)$$

其中， d ：平均路段延滯時間(秒/輛)，不包括車尾通過參考線後之加速延滯(acceleration delay)；

α ：校估調整參數；

C ：車道容量(輛/車道/小時)；

D ：額外延滯(秒/輛)，參見式(3)。

4.2 校估資料

要校估式(3)及(4)之最佳 α 及 β 值，必須有大量的調查資料以分析各項影響因素之影響效果，故必須有不同 V/C 值及其平均路段延滯時間作為校估參數之基礎。惟如果要利用在現場觀測收費站於不同收費車道、收費方式、車流率情況下之平均路段延滯，十分不容易。故本研究以已驗證之 TPS 模式為工具，依據下列之模擬狀況，產生大量之模擬資料(包括分析時間、車道數、 V/C 值與平均路段延滯值)，以校估式(3)與式(4)中之 α 與 β 值。

本研究利用 TPS 模式所進行之一系列模擬，模擬狀況之範圍如下：

1. 車道型式包括小型車回數票車道、小型車找零車道、大型車(混合車種)車道及電子收費車道。
2. 電子收費車道在收費亭位置之平均速率為 45 公里/小時。
3. 主線之平均自由旅行速率包括 60、70 及 80 公里/小時。
4. 各型收費車道之車道數為 1、2 或 3。
5. 需求流率與容量之比值在 0.1 至 1.4 之間。
6. 在取樣蒐集資料時間之前的需求流率等於分析時間內之需求流率之 70%。在此狀況下，在取樣起始瞬間的平均停等車輛數為零。

在每一模擬狀況下，本研究利用 TPS 模式以執行 96 到 144 次的模擬作業(估計誤差在 2%之內)。每一模擬作業係根據不同的亂數(random number)以代表車輛之屬性、駕駛員之行為、抵達之車距、付費時間之分布等因素。所以每一模擬作業所得之延滯值代表一樣本。式(4)中之 α 及 β 之值乃利用每一狀況下所有樣本之平均值以訂定。

因為式(4)延滯模式的目的是在於輔助規劃及設計之初步決策，所以只要該模式依不同 V/C 值所計算之估計值與由 TPS 模擬該 V/C 情況下之模擬值之差異大約在 3 秒/輛或模擬值的 10%以下就可接受。

4.3 校估結果

1. α 值

模擬之輸出資料顯示 α 值與自由車流速率(V_f)呈線性關係，但此線性關係隨收費方式而異，如式(5)至式(8)所示。

(1) 小型車回數票車道

$$\alpha = -1.2 + 0.045V_f \quad (5)$$

(2) 小型車找零車道

$$\alpha = -2.0 + 0.050V_f \quad (6)$$

(3) 大型車車道(混合車種)

$$\alpha = -3.0 + 0.075V_f \quad (7)$$

(4) 電子收費車道

$$\alpha = -1 \quad (8)$$

根據泰山及汐止收費站之車流行為，車輛抵達收費站及上游主線車道之交點時，其平均速率大約在 70 公里/小時左右。如假設式(5)、(6)及(7)中之 V_f 值為 70 公里/小時，則傳統收費車道之 α 值在 1.5 到 2.3 秒之間。此值甚小，所以可用 $\alpha = 2$ 秒作為估計值以簡化分析。

2. β 值

(1) 小型車回數票車道： β 值 = 4.2 (9)

(2) 小型車找零車道： β 值 = 3.8 (10)

(3) 大型車車道(混合車種)： β 值 = 3.4 (11)

(4) 電子收費車道： β 值 = 2.2 (12)

圖 2 係分成 1/4 小時及 1 小時兩種分析時間，分別比較在不同 V/C 情況下之回數票與找零兩種收費方式的延滯模式計算值與 TPS 模式模擬值，結果發現校估後之延滯模式能夠在 V/C 比值小於 1.4 的範圍內產生與 TPS 模式估計值很近似的延滯與 V/C 的關係。進一步而言，在 V/C 小於 0.9 時，延滯曲線因收費方式不同分成兩群，而當 V/C 大於 0.9 之後，則受分析時間長度之影響較明顯。但整體而言， V/C 值小於 1.4 之情況，本研究所校估之延滯模式計算值與 TPS 之模擬結果很相近。圖 2 另可展示不同回數票與找零等兩種不同收費方式之差異，也顯示延滯均隨 V/C 值增加趨勢之一致性。

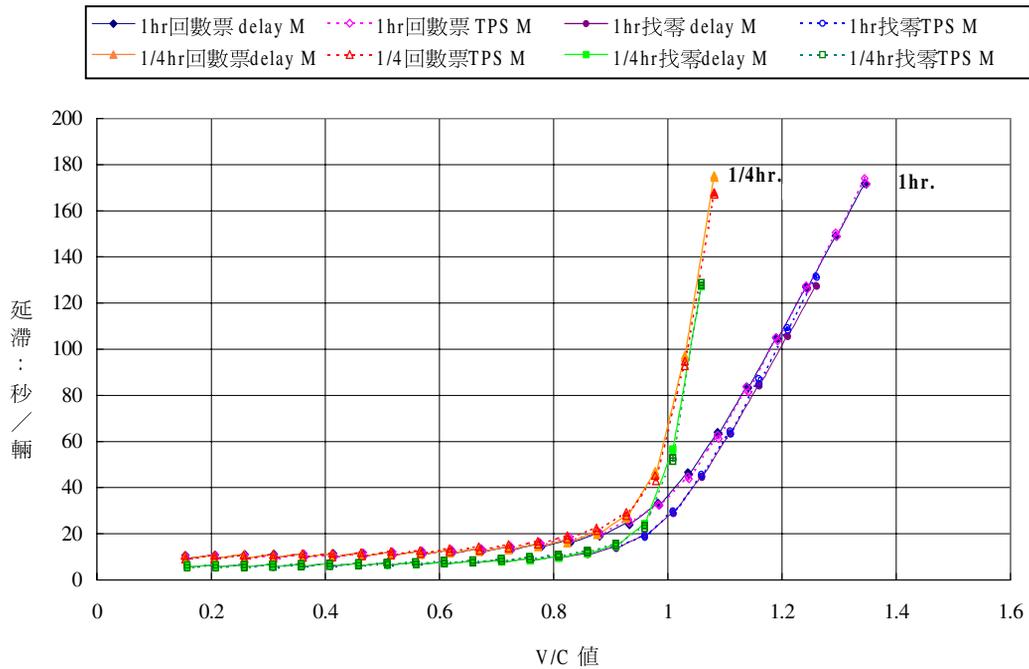


圖 2 二車道小型車找零與回數票車道延滯與 V/C 關係圖

如圖 3 所示， V/C 值在大約 0.95 到 1.1 之間時，延滯模式之估計值有甚大於模擬模式估計值之傾向(圖 3 之正誤差)，在 V/C 值大於 1.3 時，延滯模式則有常低估的現象。延滯模式有來自於“模型設定(model specification)”的系統性誤差存在，該誤差主要係因將式(4)之 β 值設定為固定值，而不隨 V/C 改變所造成。

一般當 V/C 比值小於 0.95 時，絕對誤差在 4 秒/輛以下。圖 4 也顯示，即使絕對誤差大於 4 秒/輛，其相對誤差也很少超過模擬值之 10%。此外，規劃及設計時所涉及之 V/C 值很可能在 0.95 之下。所以式(4)之延滯模式可用於收費站之初步規劃及設計。從圖 3 也可知，如將式(4)之 β 值視為 V/C 比值的函數，則式(4)之估計誤差可進一步減低。例如 V/C 值在 0.65 到 0.95 之間時，式(4)及 β 之校估值有低估延滯之傾向， V/C 值在 0.95 到 1.1 之間時，則有高估之傾向，所以如在不同之 V/C 範圍內利用不同之 β 值，則式(4)可提供更準確的估計值。但所得延滯模式較複雜。

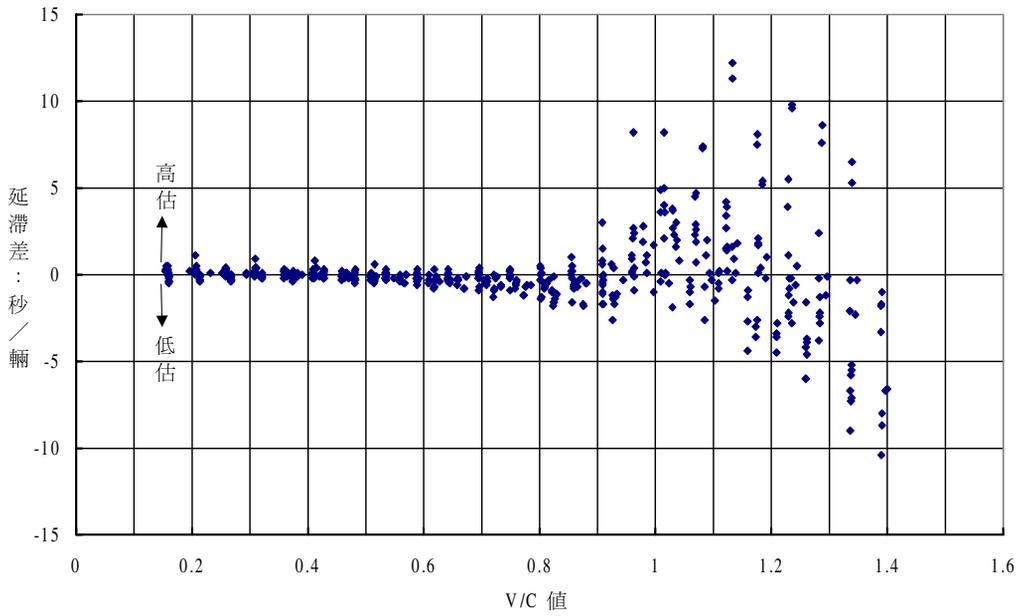


圖 3 延滯模式與 TPS 模式估計之延滯差

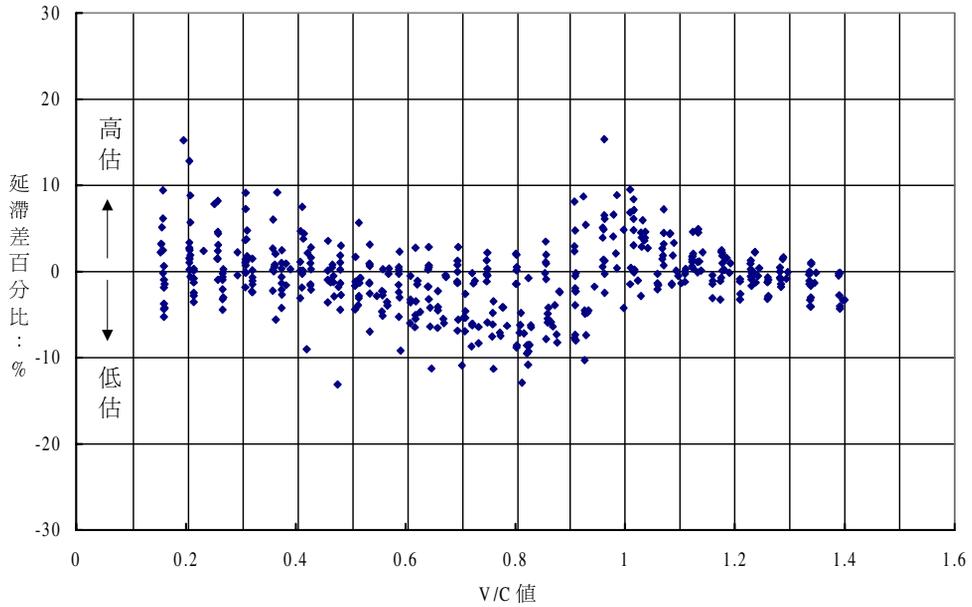


圖 4 延滯模式與 TPS 模式估計之延滯差百分比

五、延滯模式之應用

在規劃或作業分析時，可假設需求流率不隨時間而變，收費亭下游無塞車，無調撥及地磅作業之影響， V/C 值在 1.4 以下，而且同一型式收費車道之使用率均勻。在這些情況下可用校估後之式(4)以估計減速區收費車道之平均路段延滯，決定其服務水準。式(4)也可用以決定欲維持一特定服務水準時所需之收費車道數。以下針對各分析程序說明之。

5.1 分析方法

1. 選擇分析時間 T (建議值： $T = 0.5$ 小時)。
2. 自由旅行速率 V_f (建議值：70 公里/小時)。
3. 將收費車道依車種及收費方式分成 N 型。如一收費站之收費車道分成小型車回數票、小型車找零、大型車回數票及找零、及電子收費等車道，則 $N = 4$ 。
4. 訂定型式 k 車道之車道數 n_k ($k = 1, 2, \dots, N$)。
5. 估計或訂定從上游主線到達之需求流率 Q (輛/小時)及小型車、大客車、大貨車及聯結車各占的比率 P_1 、 P_2 、 P_3 及 P_4 。規劃分析之需求流率應採用預測尖峰 15 分鐘之流率。如無實際資料，則如表 2 所示，可假設： $P_1 = 0.8$ (小型車)、 $P_2 = 0.06$ (大客車)、 $P_3 = 0.06$ (大貨車)，及 $P_4 = 0.08$ (聯結車)。
6. 估計車種 i 使用收費方式 j 之比率 F_{ij} 。如無實際資料，則根據表 2 及表 3， F_{ij} 之值可用表 8 及表 9 之數據以代表之。

表 8 車種 i 收費方式 j 之比率的代表值 (F_{ij}) —— 無電子收費

車種 i	收費方式 j 之比率		
	回數票 ($j = 1$)	找零 ($j = 2$)	電子 ($j = 3$)
小型車 ($i = 1$)	$F_{11} = 0.87$	$F_{12} = 0.13$	$F_{13} = 0.00$
大客車 ($i = 2$)	$F_{21} = 0.89$	$F_{22} = 0.11$	$F_{23} = 0.00$
大貨車 ($i = 3$)	$F_{31} = 0.84$	$F_{32} = 0.16$	$F_{33} = 0.00$
聯結車 ($i = 4$)	$F_{41} = 0.98$	$F_{42} = 0.02$	$F_{43} = 0.00$

表 9 車種 i 收費方式 j 之比率的代表值 (F_{ij}) —— 有電子收費

車種 i	收費方式 j 之比率		
	回數票 ($j=1$)	找零 ($j=2$)	電子 ($j=3$)
小型車 ($i=1$)	$F_{11}=0.82$	$F_{12}=0.13$	$F_{13}=0.05$
大客車 ($i=2$)	$F_{21}=0.84$	$F_{22}=0.11$	$F_{23}=0.05$
大貨車 ($i=3$)	$F_{31}=0.79$	$F_{32}=0.16$	$F_{33}=0.05$
聯結車 ($i=4$)	$F_{41}=0.93$	$F_{42}=0.02$	$F_{43}=0.05$

7. 估計車種 i 使用收費方式 j 之服務時間 S_{ij} 。如無實際資料則根據表 4， S_{ij} 之值可用表 10 之數據以代表之。

表 10 車種 i 收費方式 j 之平均服務時間 S_{ij} (秒/輛)

車種 i	收費方式		
	回數票 ($j=1$)	找零 ($j=2$)	電子 ($j=3$)
小型車 ($i=1$)	$S_{11}=3.81$	$S_{12}=7.72$	$S_{13}=2.00$
大客車 ($i=2$)	$S_{21}=6.70$	$S_{22}=13.0$	$S_{23}=2.99$
大貨車 ($i=3$)	$S_{31}=5.75$	$S_{32}=11.2$	$S_{33}=2.91$
聯結車 ($i=4$)	$S_{41}=7.00$	$S_{42}=20.0$	$S_{43}=3.64$

8. 估計型式 k 車道之平均服務時間 S_k (秒/輛)。平均服務時間可根據車種及收費方式估計如下：

(1) 小型車回數票車道 ($k=1$)

$$S_k = S_{11} \quad (13)$$

(2) 小型車找零車道 ($k=2$)

$$S_k = S_{12} \quad (14)$$

(3) 大型車車道 ($k=3$ ，假設無小車)

$$S_k = \frac{M}{P_2 + P_3 + P_4} \quad (15)$$

此式中，

$$M = P_2(F_{21}S_{21} + F_{22}S_{22} + F_{23}S_{23}) + P_3(F_{31}S_{31} + F_{32}S_{32} + F_{33}S_{33}) + P_4(F_{41}S_{41} + F_{42}S_{42} + F_{43}S_{43})$$

(4) 電子收費車道

$$S_k = P_1S_{13} + P_2S_{23} + P_3S_{33} + P_4S_{43} \quad (16)$$

9. 估計型式 k 車道之容量 C_k (輛/小時/車道)如下：

$$C_k = \frac{3600}{S_k} \quad (17)$$

10. 估計型式 k 車道每車道之平均需求流率 Q_k (輛/小時/車道)如下：

(1) 小型車回數票車道

$$Q_1 = \frac{QP_1F_{11}}{n_1} \quad (18)$$

(2) 小型車找零車道

$$Q_2 = \frac{QP_2F_{12}}{n_2} \quad (19)$$

(3) 電子收費車道

$$Q_4 = \frac{Q(P_1F_{13} + P_2F_{23} + P_3F_{33} + P_4F_{43})}{n_4} \quad (20)$$

(4) 大型車回數票及找零車道

$$Q_3 = Q - Q_1 - Q_2 - Q_4 \quad (21)$$

11. 估計型式 k 車道之流量/容量比 X_k 如下：

$$X_k = \frac{Q_k}{C_k} \quad (22)$$

12. 估計型式 k 車道在減速區之平均路段延滯 d_k (秒/輛)。將各項資料代入式(4)之延滯模式，即可估計 d_k 如下：

$$d_k = \alpha + \frac{3600}{C_k} + 900T \left[(X_k - 1) + \sqrt{(X_k - 1)^2 + \frac{\beta_k X_k}{C_k n_k T}} \right] \quad (23)$$

13. 根據 d_k 及表 6 以訂定各型車道之服務水準。

5.2 應用例題

假設一收費站之單方向有如下之狀況：

1. 自由旅行速率 = 80 公里/小時；
2. 小型車回數票車道數： $n_1 = 3$ ；
3. 小型車找零車道數： $n_2 = 1$ ；
4. 大型車找零及回數票車道數： $n_3 = 2$ ；
5. 電子收費車道數： $n_4 = 0$ ；
6. 大型車車道有少數小車但其影響甚微小而可忽略；
7. 單方向需求流率： $Q = 3,500$ 輛/小時；
8. 車種組成：小型車 $P_1 = 0.8$ ，大客車 $P_2 = 0.06$ ，大貨車 $P_3 = 0.06$ ，聯結車 $P_4 = 0.08$ ；
9. 各車種之收費方式的比率 F_{ij} 如表 8 所示；
10. 各車種收費平均服務時間 S_{ij} 如表 10 所示。

由以上資料，可以估計各型收費車道之容量與平均路段延滯，評估各型車道之服務水準。表 11 歸納各分析步驟所得的結果。由此表可知各型式車道在減速區之平均路段延滯遠短於 40 秒/輛，其中回數票車道及大型車車道之平均路段延滯不到 15 秒/輛，而找零車道之平均路段延滯也只有 24.2 秒/輛。根據平均路段延滯，找零車道之服務水準為 C 級，其他車道之服務水準為 B 級。如增加一小型車找零車道，則服務水準可達 B 級。此外，收費站之設計應布設加、減速區，其長度可設計為減速區長度： $L_1 = 350$ 公尺；加速區長度： $L_2 = 300$ 公尺。

表 11 應用例題分析結果

項 目	小型車車道		大型車車道($k=3$)
	回數票($k=1$)	找零($k=2$)	
車道數 n_k	3	1	2
自由旅行速率 V_f (公里/小時)	80	80	80
服務時間 S_k (秒/輛)	3.81 (式 13)	7.72 (式 14)	7.11 (式 15)
容量 C_k (輛/小時)	945 (式 17)	466 (式 17)	506 (式 17)
需求流率 Q_k (輛/小時)	812 (式 18)	364 (式 19)	350 (式 21)
流量/容量比 X_k	0.86 (式 22)	0.78 (式 22)	0.69 (式 22)
減速區平均路段延滯 d_k (秒/輛)	10.2 (式 23)	24.2 (式 23)	13.5 (式 23)
服務水準(表 6)	B	C	B

六、結論與建議

1. 收費站之容量深受收費方式及車種之影響。在天候良好情況下，小型車回數票車道、小型車找零車道、大型車車道之容量分別為 850 ~ 950、350 ~ 550、420 ~ 530 輛/小時/車道。電子收費車道之容量則在 1,200 ~ 1,800 輛/小時/車道之間。
2. 收費站作業不僅受容量之影響，也受各車輛之間服務時間變異之影響。傳統收費之服務時間包括收費時間及跟進時間。利用平均服務時間而標準化後服務時間之分布只受到收費方式之影響。
3. 根據式(4)所校估後之延滯模式，可提供與 TPS 模式很相近之估計值。在 V/C 比值小於 1.4 之狀況下，其誤差經常在 10% 以下。所以式(4)可替代 TPS 模式用於規劃及初步設計之評估之用。
4. 如欲建立一適用於作業分析之模擬模式，則式(4)可加以改良。改良之重點在於訂定不同 V/C 範圍內最佳之 β 值。固定之 β 值有導致系統誤差之傾向。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所，台灣地區公路容量手冊，民國八十年。
2. 交通部運輸研究所，台灣地區公路容量手冊(第二篇第五章高速公路主線收費站)，民國八十六年。
3. 交通部運輸研究所，TPS 收費站模擬模式使用手冊，民國八十九年五月。
4. 羅孝賢、韓復華，「高速公路收費站作業改進策略之研究—以泰山收費站為例」，運輸計劃季刊，第十八卷第二期，民國七十八年六月，頁 181-199。
5. 郭詩毅，「中山高速公路收費站容量及服務水準界定之研究」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國八十一年六月。
6. 賴炳榮，「電子收費系統收費站服務績效之研究—TTPS 模式之運用」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國八十八年六月。
7. Lin, Feng-Bor and Su, Cheng-Wei, "Level-of-service Analysis of Toll Plazas on Freeway Main Lines", *JTE*, Vol. 120:2, 1994.3-4, p. 246.
8. Pietrzyk, M. C. and Mierzejewski, E. A., "Electronic Toll and Traffic Management (ETTM) Systems", National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 194, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1993.
9. McDonald, David R. and Robe Jr., "Contribution to the Development of Guidelines for Toll Plaza Design", *JTE*, Vol. 127:3, 2001.5-6, p. 215.
10. Lin, Feng-Bor, "A Delay Model for Planning Analysis of Mainline Plaza", Transportation Research Board, 2001 Annual Meeting, 2001.
11. 交通部運輸研究所，高速公路交通特性分析與基本容量訂定，民國八十六年。
12. 國道高速公路局，高速公路年報(中華民國八十八年)，民國八十九年。
13. Monskos, K. C., Niver, E., Pignataro, L. J., Lee, S., Antoniou, N., and Papadopoulos, L., "TRANAMIT System Evaluation", Final Report, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, 1998.
14. 交通部運輸研究所，2001 年台灣地區公路容量手冊，民國九十年三月。

