

不同車輛到達類型之黃燈需時研究

A STUDY ON AMBER-LIGHT DURATIONS UNDER VARIOUS VEHICLE ARRIVAL TYPES

許書耕 Shu-Keng Hsu¹
藍武王 Lawrence W. Lan²

(94 年 6 月 14 日收稿，95 年 6 月 27 日第一次修正，95 年 10 月 24 日第二次修正，
95 年 12 月 7 日第三次修正，96 年 5 月 10 日定稿)

摘 要

本文比較累積機率法與總體停車或率法在設計黃燈需時的異同，經進行不同車輛到達類型下黃燈需時之簡例分析發現，累積機率法適用於一車到達狀況，對多車到達狀況會高估其黃燈需時，而總體停車或率法則可適用於各種車輛到達狀況。復經臺北市一處路口之實地驗證發現，於不同車輛到達類型下，累積機率法的黃燈需時累積機率曲線會出現明顯的差異，而總體停車或率法則相當一致。實地觀察發現黃燈結束後多車到達狀況闖紅燈比例高於一車到達狀況，基於此，本研究建議變換時段宜採固定的黃燈長度與變動的全紅（視路口寬度、車速及車輛到達狀況加以調整）來設計。

關鍵詞：黃燈需時、變換時段、號誌路口、停車或率函數

ABSTRACT

This paper aims to compare the amber-light durations determined by two approaches: the cumulated stopping probability (CSP) approach proposed by Lin et al (1987, 1988) and the aggregated stopping possibility (ASP) approach

-
1. 中原大學土木系兼任副教授，交通部運輸研究所簡任研究員（聯絡地址：10548 臺北市敦化北路 240 號 9 樓；電話：(02)2349-6820；E-mail：keng@iot.gov.tw）。
 2. 明道大學教授兼管理學院院長，交通大學榮譽退休教授（E-mail：lawrencelan@mail.nctu.edu.tw）。

proposed by Hsu and Lan (2003). We demonstrated with an example and discovered that the CSP approach worked well under single-vehicle arrival condition, but it overestimated the desired amber duration under multi-vehicle arrival condition; in contrast, the ASP approach worked well for both circumstances. We further conducted a field case study in Taipei. The results show that, under various types of vehicle arrivals, the CSP approach leads to diversified cumulative stopping probability curves of desired amber durations, however the ASP approach comes out with rather consistent results. From the field study, more red light runners (violators) are observed at the end of the amber light cycle under multi-vehicle arrival condition than single-vehicle arrival condition. Therefore, this study proposes a design of fixed length of the amber light and varied length of the red light that can be adjusted according to such factors as intersection width, approaching speed and vehicle arrival types at the light change.

Key Words: *Amber-light duration; Change interval; Signalized intersection; Stopping possibility function.*

一、前言

行車管制號誌之變換時段 (change interval) 通常包含黃燈 (amber) 與全紅 (all-red)。其中有關黃燈長度的設計, 一般侷限在 3~6 秒間, 但此 3 秒差異卻攸關路口之交通安全 (太短易產生事故) 及運轉效率 (太長會增長號誌的損失時間)。國內外對此一課題的研究, 從 1929 年 Matson 提出簡單的變換時段設計公式迄今雖已達 70 餘年, 惟或因理論方法不周延、或現場觀測取樣方法不一致、或缺少統一合理的績效量度指標, 致目前仍未完全定論。

既有的變換時段設計方法可分成規範性 (供給導向法) 與敘述性 (需求導向法) 二類。供給導向法係站在管理者角度, 以定性公式來估算並設定合理長度, 一般以 Gazis 等人^[1]的最短變換時段公式 ($T_{min} = t_s + V/2a + (W + L)/V$) 為代表。國際運輸工程師協會 (ITE^[2]) 在其 1985 年公布之黃燈長度修正公式採 Gazis 公式右側前兩項, 並以第 85 百分位臨近路口車速作為設計速率。需求導向法則站在駕駛人角度, 透過現場調查來建立駕駛停行模式, 藉以估算「滿足駕駛者需要的黃燈長度」(本文簡稱黃燈需時)。此種方法早期有 Olson 與 Rothery^[3]及 May^[4]等之停車機率函數 (stopping probability function), Lin 等人^[5,6]的黃燈需時累積機率法及許書耕、藍武王^[7]的總體停車或率法等。其中, 停車機率函數只是黃燈問題的一個內部單元(反映駕駛行為), 而 Lin 等人^[5,6]則係以黃燈問題的輸出單元 (黃燈需長) 來分析者。

衡量黃燈設計良窳的績效指標尚無一致的看法。例如, ITE^[2]在提出定性公式時只以但書建議「可以黃燈結束後仍進入路口的車輛百分比當作衡量指標, 當此一指標值超過地方標準 (許多地區採 1% ~ 3%) 時, 即需延長黃燈時間」; Lin 等人^[5,6]則以「車輛不會在紅燈顯示後仍進入路口的變換時段百分比」為指標。值得注意者, ITE^[2]的定性公式本質

上屬供給導向法，但卻建議一個屬需求導向的績效量度指標；Lin 等人^[5,6]的經驗公式本質上屬需求導向法，且其衡量指標係修改自 ITE 的建議指標，但其指標的量度單位卻由需求面的「車」改為管理面的「變換時段」。

國外相關研究曾針對兩個可能影響黃燈長短的因素進行驗證，一係臨近路口車速，另一則為黃燈顯亮後的車輛到達類型。在臨近路口車速方面，如採 Gazis 等人^[1]或 ITE^[2]供給導向公式，則其 t_s 、 a 兩參數一旦設定，必獲致「臨近路口車速愈高，所需黃燈愈長」的結果，此與 Chang 等人^[8]、Wortman 與 Fox^[9]及 Lin 等人^[5,6]等的實證研究，發現「黃燈長短與臨近路口車速無關」之結論大異其趣。國內亦曾進行相關實證研究，例如許書耕與藍武王^[10]蒐集臺灣北中南三地區 15 個路口的變換時段車行軌跡資料，亦獲得「黃燈長短與車速無關」相同之實證結論。

在黃燈顯亮後的車輛到達類型方面，Lin 等人^[5,6]發現，黃燈顯亮後「距停止線旅行時間 5 秒內的車輛數（簡稱車輛供給）」係影響所需黃燈長度最主要的因素，車輛供給愈多，黃燈需時愈長。Lin 等人^[5,6]係第一個提出黃燈需時與車輛到達類型（供給）有關者，惟其逕採現場觀測統計之經驗公式，並未建立黃燈長度與車輛到達類型間的理論關係。許書耕與藍武王^[7]則係第一個提出完整的黃燈設計方法論者，其總體停車或率模式經數學證明確能充分反映各種車輛到達類型對黃燈需時的影響，惟尚未進行藉由現場觀測調查檢驗黃燈需時與車輛到達類型關係的實證。

本文主要目的有二，一係分析比較 Lin 等人^[5,6]的黃燈需時累積機率法和許書耕與藍武王^[7]的總體停車或率法二者的異同；其次透過現場觀測，以實際資料檢驗黃燈需時與車輛到達類型的關係。值得說明者，美國的公路容量手冊（HCM,2000）將號誌路口車輛到達類型（arrival types）分成六型，這些車輛到達類型在燈號由綠轉黃瞬間會呈現不同的空間分布狀態。本文沿用 HCM「車輛到達類型」一詞，以概括 Lin 等人^[5,6]「車輛供給」及許書耕與藍武王^[7]「車密度」的意涵，用以表示黃燈顯亮瞬間停止線上游的車輛分布狀態。

二、黃燈需時設計方法之比較

本節針對 Lin 等人^[5,6]的累積機率法及許書耕、藍武王^[7]的總體停車或率法進行重點回顧，並比較二者的異同。

2.1 累積機率法（Lin 等人^[5,6]）

Lin 等人^[5]以「最後一輛進入路口車輛由黃燈顯亮瞬間至駛達停止線的耗時」代表黃燈需時，進而將之作成累積機率，再以「車輛不會在紅燈顯示後仍進入路口的狀況在所有變換時段中達 85% 或 95%」為準則，決定黃燈的設計長度。經其調查紐約州五個號誌路口的六個直行與兩個左轉流動發現，臨近路口車速並不影響黃燈需時，黃燈顯亮後距停止線旅行時間 5 秒內的車輛到達狀況才是造成黃燈需時變異的主要來源，惟該累積機率法並無

理論基礎可定義黃燈需時與車輛到達類型的因果關係，而係以簡單的經驗公式來決定黃燈長度 (第 95 百分位) 如下：

$$Y_{95th} = 4.0 + C \quad (1)$$

C 界於 -1.0 與 1.0 ，依下列狀況判定之：

$C = +0.5 \sim +1.0$	$C = -0.5 \sim -1.0$
(1) 到達路口常排隊，下個週期方疏解。	(1) 到達流量低，為觸動式號誌。
(2) 變換時段一結束，迅速形成車隊。	(2) 號誌連鎖，到達路口之流量較低。
(3) 超過 70% 變換時段會被使用。	(3) 小於 30% 的變換時段會被使用。

Lin 與 Vijayakumar^[6]延續上述研究，在紐約州另作補充調查，計蒐集直行且觀測時數至少 3 小時的 28 條臨近路口黃燈需時資料。其每一樣本的臨近路口車速係量測綠燈結束或黃燈顯亮時的速率，每一變換時段黃燈需時的量測方法與前述研究同，且同樣係直接將所得樣本作成累積機率曲線。惟該研究將「黃燈顯亮後距停止線 5 秒旅行時間內的車輛數或車輛出現頻率」定義為「黃燈顯亮時的車輛供給 (vehicle supply at the yellow onset)」，並界定影響車輛供給的因素有號誌連鎖、到達路口交通量，以及路口號誌控制方式 (例如定時控制或觸動式控制)。研究結果亦發現臨近路口車速並不影響黃燈需時，而基於新的補充調查資料，將經驗公式 (1) 修正為如下二經驗公式：

$$Y_{85th} = 3.6 + C, \quad C = -0.6 \sim +0.5 \quad (2)$$

$$Y_{95th} = 4.3 + C, \quad C = -0.7 \sim +0.9 \quad (3)$$

Lin 與 Vijayakumar^[6]說明， C 因子與黃燈顯亮時的車輛供給呈正相關，但仍未建立其間的理論關係式。對大部分路口言，需要修正的 C 因子值變異不大，例如 Y_{85th} 採用等長的 4.1 秒即能滿足大部分路口 85 百分位的黃燈需求，因此即便 C 因子與車輛供給間的理論關係式不明，經驗公式 (2) (3) 尚符合實際設計所需。

2.2 總體停車或率法 (許書耕與藍武王^[7])

許書耕與藍武王^[7]指出，如固定某點觀測變換時段到達路口之車輛，以 {停車、穿越} 二元選擇集合為定義域時，則不論停車或穿越，其比率均為機率 (停、行機率和為 1)；但如僅針對停車部分，將各觀測點的停車機率 (stopping probability) 對應分布於某變數 (如距停止線之距離) 時，則此一分布就不再是停車機率，將其定義為停車或率 (stopping possibility)。基於此，該研究將過去相關研究以自由選擇者 (變換時段所有穿越車輛及第一輛停車車輛) 樣本構建的「停車機率函數」，重新命名為「個體停車或率函數 (disaggregated possibility function)」，並定義該函數為：「在相同車流狀況下，黃燈顯亮瞬間位於停止線上游某定點之個別車輛，在不受限制下依其意願的展現而採停車的頻率」，進而另定義「總

體停車或率函數 (aggregated possibility function)」為：「在相同車流狀況下，黃燈顯亮瞬間位於停止線上游某定點之車輛，不論是受前車的限制或出於本身意願，最終是停車之頻率」，並提出總體停車或率函數之定義式如下：

$$FS_i(L_i) = \sum_{j=1}^i P_j(L_j) \prod_{m=1}^{j-1} [1 - P_m(L_m)] \quad (4)$$

其中：

$$L_i = L_0 + (i - 1)/K \quad (5)$$

i = 由停止線起算連續到達車輛之編號；

P_i = 個體停車或率函數 $\sim [0,1]$ ；

FS_i = 總體停車或率函數；

L_i = 第 i 車在黃燈顯亮瞬間距停止線之距離；

L_0 = 第一輛車在黃燈顯亮瞬間，距停止線的殘餘車間程， $L_0 \sim [0, 1/K]$ ，依隨機原理，此事件（指第一輛車發生在 $[0, 1/K]$ 區間之每一位置）之機率均相同；

K = 臨近路口之車流密度， $1/K$ 表平均車間程 (spacing)。

許書耕與藍武王^[7]以數學證明上述總體停車或率函數具備下列特性：

特性一：總體停車或率函數之值域，與個體停車或率同，均為 $[0,1]$ 。

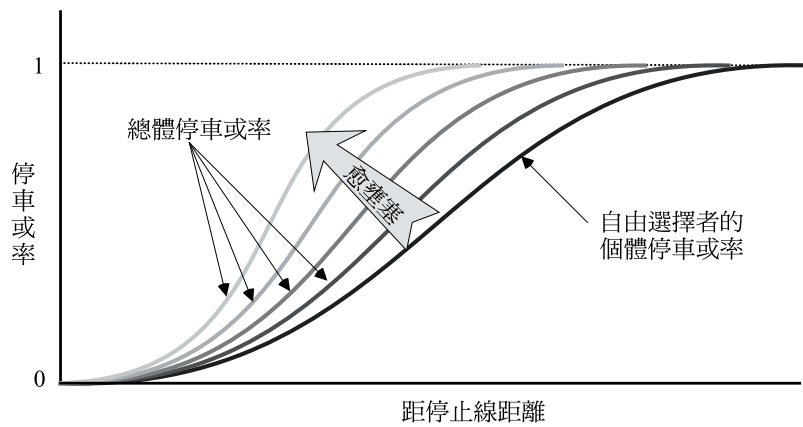
特性二：如個體停車或率函數呈階梯狀，則總體停車或率函數亦呈階梯狀，且階梯之門檻點與個體停車或率者同。

特性三：如個體停車或率函數在距離上具準單調遞增特性，則任一位置的總體停車或率值必大於或等於個體停車或率值，且只有最接近停止線車輛或只有一輛車到達之自由流車況，等式方成立。

特性四：如個體停車或率函數為準單調遞增函數，則到達車流密度愈大，其總體停車或率函數曲線會愈向停止線偏移，如圖 1 所示。

特性五：已知到達車況下，停止線上游某處之總體停車或率函數值，等於黃燈顯亮瞬間位於該處車輛最終係停車之比率。

上述特性二與特性三說明，不論是 Gazis 等人^[1]之定性公式或是個體停車或率函數均為總體停車或率函數之特例，亦即總體停車或率函數具通案性 (general form)，更指出定性公式不但對個別車輛適用，亦適用總體車流，但個體停車或率函數只適用於自由流車況，在非自由流車況下，取自可自由決定停行的部分車輛樣本建立的個體停車或率函數不適用於總體車流；特性四則說明總體停車或率可以反映變換時段不同車輛到達類型對總體車流停行決策的影響。



資料來源：許書耕與藍武王^[7]

圖 1 不同車輛到達類型影響總體停車或率示意圖

特性五結合特性一，可用以建立個體與總體停車或率之調查統計方式。令 M 表變換時段有車到達的總號誌週期數， m_i 表相同車輛到達類型下，黃燈顯亮瞬間由停止線起算第 i 輛車所在位置發生第一輛停車事件的次數，則許書耕與藍武王^[7]以數學證明第 i 輛車所在位置之個體與總體停車或率函數值分別為：

$$P_i = \frac{m_i}{M - \sum_{j=1}^{i-1} m_j} \quad (6)$$

$$FS_i = \frac{\sum_{j=1}^i m_j}{M} \quad (7)$$

任何車輛到達類型下，透過 (7) 式可得其總體停車或率函數，透過 (6) 式可得在該車輛到達類型下的個體停車或率函數。值得說明者，個體停車或率函數 P 代表個別駕駛的停車意願，此一意願可能因車輛到達類型而不同。例如同一路口即便是臨近車速、黃燈顯亮瞬間在停止線前的位置等均相同，同一駕駛人的停車意願在前方無車（自由流）或有多輛車（非自由流）的情形下亦可能不同，而其實際特性，只能透過現場調查分析方能瞭解。

由於總體停車或率函數在以距停止線距離為定義域時是一或率而非機率，須將其轉換成機率方能應用於變換時段的設計，故許書耕與藍武王^[7]假設「黃燈顯亮瞬間到達車輛落在停止線上游路段任一處的頻率呈均勻分配」，令 x 為上游路段某處至停止線之距離，將總體停車或率轉換成穿越車輛累積機率（accumulated probability of crossing）：

$$Cross(x) = \frac{\int_{y=0}^{y=x} [1 - FS(y)] dy}{\int_{y=0}^{y=\infty} [1 - FS(y)] dy} \quad (8)$$

式 (8) 中的 $Cross(x)$ 為：「黃燈顯亮瞬間落在停止線至上游 x 處的所有車輛中，選擇穿越者占總穿越車數之比例」。假設黃燈顯亮瞬間至穿越停止線期間，穿越車輛係維持等速 (V) 前進，則 $Cross(x)$ 可進一步轉換成以時間為定義域的機率式如下：

$$Cross(t) = Cross(x/V) \quad (9)$$

式中， t 為黃燈顯亮瞬間至車輛到達停止線的耗時。

應用時，可令 $\alpha\%$ 代表在黃燈內「合法」穿越停止線車輛占總穿越停止線車輛的比例 (百分位)，建立車速為 V 的總體停車或率函數後，由式 (8) 即可界定出滿足此一要求之距停止線決策距離 L_α ，進而設定出該車速條件下，穿越車輛最多只有 $1-\alpha\%$ 為「違規」(黃燈結束後仍進入路口) 的黃燈長度 $Y_\alpha = L_\alpha/V$ ；應用式 (9) 則將更為直接。

2.3 兩種方法比較

Lin 等人^[5,6]的黃燈需時累積機率法及許書耕與藍武王^[7]之總體停車或率法有相似之處，但亦有明顯的不同，比較說明如下：

(一) 相似處

1. 兩種方法均屬需求導向法，對「黃燈需時」均定義為車輛從黃燈顯亮瞬間至駛達停止線的耗時。
2. 兩種方法均宣稱適用各種車輛到達類型。Lin 等人^[5,6]係每一變換時段僅取最後一輛進入路口車輛，並宣稱此種取樣方式對自由流 (只有一輛車到達) 或非自由流 (有多輛車到達) 均適用 (註：本研究將說明 Lin 等人^[5,6]之方法只適用自由流車輛到達類型，對非自由流的車輛到達類型會高估黃燈需時)；許書耕與藍武王^[7]則係以嚴謹的數學證明其方法足以反映不同車輛到達類型的特性，故亦宣稱對各種車輛到達類型均適用 (本研究之目的之一即是進行此一論點之實證)。
3. Lin 等人^[5,6]的黃燈需時累積機率法可視為許書耕與藍武王^[7]之總體停車或率法的特例 (special case)。在自由流車輛到達類型下 (變換時段只有一輛車到達)，許書耕與藍武王^[7]之總體停車或率會自動退化成與個體停車或率同，此時其穿越車輛累積機率之意義等於「黃燈顯亮瞬間，最後 (亦是最先) 穿越者落在停止線至其上游 x 處之車數，占最後穿越者總車數之比例」，依式 (9) 轉換即與 Lin 等人^[5,6]定義之黃燈需時累積機率完全相同。

(二) 相異處

1. 兩種方法的應用程序繁簡不一。Lin 等人^[5,6]係直接量測實際需時，將之作成累積機率後，即可據以決定黃燈長度，應用程序簡單易行，但無法藉之進行與駕駛停行決策行為有關的理論分析；許書耕與藍武王^[7]則將黃燈需時問題切割成駕駛決策行為（總體停車或率）與號誌控制環境（黃燈顯亮瞬間到達路口車輛在停止線上游各處的分布）兩單元，另需透過臨近路口車速依式 (9) 將距離轉換成到達停止線耗時，雖可針對每一單元進行細部的分析，但應用程序似乎較為複雜（以下之簡例分析即在尋求簡單易行的應用方式）。
2. 兩種方法的取樣方式不同。Lin 等人^[5,6]係極值樣本取樣，每一變換時段僅取最後進入路口的車輛；許書耕與藍武王^[7]由理論的推演得知，係全樣本取樣，每一變換時段所有進入路口的車輛均取，不論在建立總體停車或率時或穿越車輛累積機率時皆如此。
3. 兩種方法的評估指標不同。Lin 等人^[5,6]受限於特殊的取樣方式，使其評估指標須設為「在黃燈結束後仍有車輛進入路口的變換時段百分比」，其指標的計量單位為「變換時段」；許書耕與藍武王^[7]的評估指標則逕採 ITE^[2]建議之「在黃燈結束後仍進入路口的車輛百分比」，其指標的計量單位為「車」。
4. 兩種方法處理黃燈顯亮瞬間到達路口車輛在停止線上游各處分布的方式不同。Lin 等人^[5,6]僅考慮系統的最終產出（到達停止線耗時），黃燈顯亮瞬間車輛在空間的分布係隱含在黃燈需時的統計中；許書耕與藍武王^[7]則將此種分布以顯現的方式表現，並以隨機性考量將之設定為適當分配，例如式 (8) 適用於均勻分配，當呈現非均勻分配時（令為 $T(x)$ ），只要調查出 $T(x)$ ，並將式 (8) 改寫成下式即可充分反映實際狀況：

$$Cross(x) = \frac{\int_{y=0}^x T(y) \times [1 - FS(y)] dy}{\int_{y=0}^{\infty} T(y) \times [1 - FS(y)] dy} \quad (10)$$

三、簡例分析

由前節分析知，Lin 等人^[5,6]及許書耕與藍武王^[7]各提出可用以設計黃燈長度的方法：Lin 等人的方法屬經驗法則，應用程序簡單易行；許書耕與藍武王的方法建立在嚴謹之理論基礎上，如能進一步尋求簡單易行的應用方式，對變換時段的設計將有莫大的助益。基於此，本節利用簡例分析，以確定 Lin 等人方法背後隱含的特性，並尋求許書耕與藍武王方法的簡易應用方式。

3.1 條件設定

為利比較，本簡例分析的條件設定如下：

1. 座標：橫軸為距離（公尺）或時間（秒），以停止線（黃燈顯亮瞬間）為原點，停止線上

游為正；縱軸為介於 [0,1] 的比率值，以 0 為原點，以 1 為最大值。

2. 臨近路口車速：假設車輛接近路口，不論是一輛車或一車隊，各車的車速均為 40kph。因為車速相同，因此距離可以直接對映轉換成時間，例如 50 公尺（距停止線距離）對映 4.5 秒鐘（行駛時間）。
3. 車輛到達狀況：假設變換時段的車輛係以高密度到達，其車間程（spacing）假設均為 10 公尺。
4. 個體停車或率曲線：代表在高密度車流狀況下，個別車輛停行決策的自由選擇意願。為簡化，假設該曲線呈直線型，令 x 為距離， m 為斜率，其公式為：

$$P = \begin{cases} mx & mx \leq 1 \\ 1 & mx > 1 \end{cases} \quad (11)$$

並設定 $m = 1/50$ ，即黃燈顯亮瞬間位於停止線上游 50 公尺及更遠處的車輛均會停車。如黃燈長度設為 4.5 秒鐘，依上示公式將沒有任何車輛會闖紅燈穿越停止線。本曲線如係以樣本來統計建立，則逕依式 (6) 估算。

5. 總體停車或率曲線：將式 (11) 代入式 (4) 可得理論曲線；如係以樣本來統計建立，則逕依式 (7) 估算。
6. 黃燈顯亮瞬間臨近路口車輛在停止線上游的空間分配：為簡化，假設呈均勻分配，其意涵指在每一變換時段對停止線上游路段空中照相，點出接近路口各輛車黃燈顯亮瞬間的位置（不論最終是停或行），重覆相當多次後，其車輛樣本係均勻分布在整個路段上。
7. 空間取樣間隔與樣本數設定：為使各種估算均達一定精度，空間取樣間隔設為 0.1 公尺（對應的時間取樣間隔相當於 0.009 秒）。因為係簡例分析，故樣本可以為全母體，亦即可對接近無限多次的變換時段作取樣。

3.2 理論值計算

本文所謂理論值指以式 (4) 及式 (8) 直接求算的結果。上述高密度流（車間程為 10 公尺）依公式計算的個體、總體停車或率及穿越車輛累積機率理論曲線如圖 2 與所示。

因連續車流中的某車採停車，其後續各車均會被迫停車，故可將到達車輛由停止線向上游依序編號，再以發生最先停車者的序號代表變換時段的車輛停行狀況（例如狀況一表序號 1 的車輛是最先停車者）。而在車間程為 10 公尺的高密度流車輛到達類型下，依前述個體停車或率函數的設定，距停止線上游 50 公尺及更遠處的車輛均會停車（停車或率 = 1），因此每一變換時段值得抽樣者最多只有最靠近停止線的前六輛車，亦即最多只有六種停行狀況，如圖 3 所示。

上述各狀況發生的機率可由理論公式精確估算，如表 1 所示，茲分述如下：

1. 每次取樣（每個變換時段）係同時取得 6 輛車樣本，每個車樣本的屬性包括黃燈顯亮瞬間的位置、車速，以及最終的停行決策結果（穿越或停車）。各車在黃燈顯亮瞬間的位

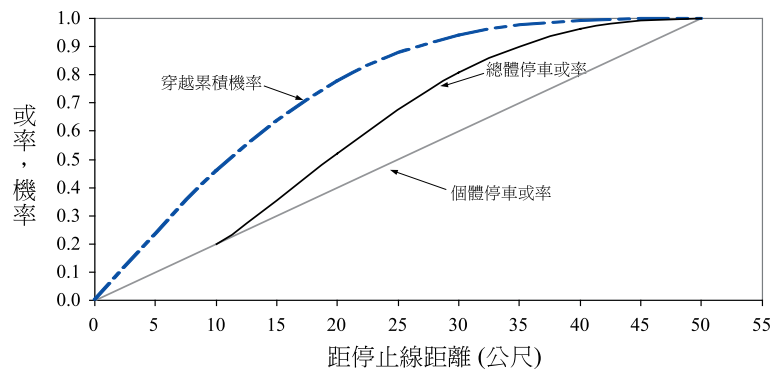


圖 2 高密度車輛到達類型的停車或率與穿越累積機率理論曲線

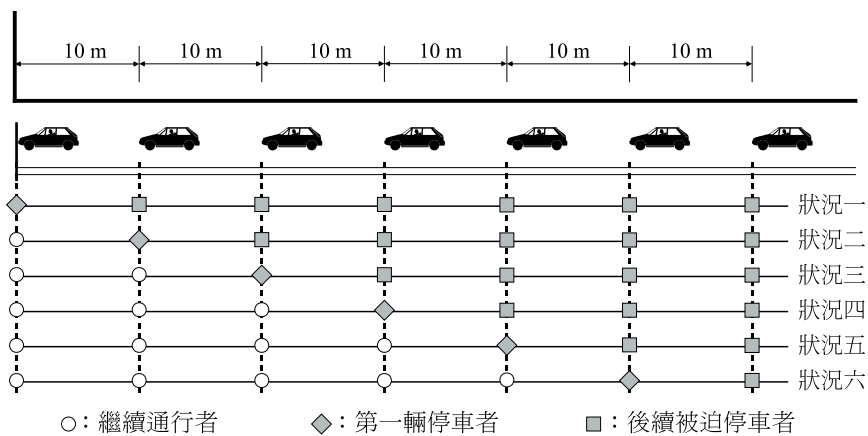


圖 3 高密度車輛到達類型的各種停行決策狀況

置，因車間程均為 10 公尺，故只要頭車（距停止線最近者）位置確定，後續各車即全部確定。而頭車可能落在 0~10 公尺區間內任一點上，依前述均勻分配的假設，可令各點發生的機率相等。

- 每組樣本（6 輛車）必發生六種停行狀況中的某一種，惟每種狀況發生的機率均不同，欲得無偏誤的抽樣結果，可令各狀況發生的機率等於母體機率（依總體停車或率公式計算），例如狀況三係第一、二輛車穿越，第三輛車係首先停車者，其發生的機率，依式 (4) 為 $(1 - P(x_1)) \times (1 - P(x_2)) \times P(x_3)$ ，等於前二輛車均穿越與第三輛車會停車的聯合機率（第四、五輛等後續被迫停車者停車的機率均為 1）。由於係一組樣本（六輛車）發生的機率，故其所屬各車雖然停行結果不同，但發生的機率均相同。此外，發生六種停行狀況的機率和必為 1，表示每個變換時段恰有一種狀況會發生。
- 因為是抽樣，便需對停止線上游路段作切割，切割愈細，抽樣結果會愈精確，但樣本就需愈大。利用簡例分析的好處是可假設樣本接近無限大，故可基於精度要求作無限切割

(表 1 係切割成 0.1 公尺)。現以 0 或 1 代表最終係穿越或停車的決策變數，各位置各狀況發生的機率均以理論公式計算 (如表 1 之狀況發生機率欄)，即可構成無偏誤的樣本集。

4. 以頭車位在 0 公尺為例，因間距均為 10 公尺，故其後續各車會落在 10、20、30、40、50 公尺處。各位置係第一輛停車的機率依公式計算得 0.000、0.200、0.320、0.288、0.153、0.038 (機率和為 1)，此一機率亦係各位置六種停行狀況的機率。在均勻分配的假設下，令各位置總抽樣數相同，各位置某種停行決策無偏誤的抽樣數即為各狀況發生的機率乘以總抽樣數。例如各位置均抽 1000 輛車，則 0、10、20、30、40、50 公尺處的停車樣本數分別為 0、200、521、809、962、1000 輛。以 30 公尺處為例，其 809 個停車樣本中，有 521 輛係因前車停車而被迫停車，另 288 輛則係依自行意願選擇停車。

表 1 六種停行決策狀況及發生機率

瞬間位置 x	停行決策狀況						發生機率						
	一	二	三	四	五	六	一	二	三	四	五	六	合計
0.0	1	0	0	0	0	0	0.0000	0.2000	0.32100	0.2880	0.1536	0.0384	1.00
0.1	1	0	0	0	0	0	0.0020	0.2016	0.3202	0.2867	0.1520	0.0375	1.00
•	1	0	0	0	0	0	•	•	•	•	•	•	•
10.0	1	1	0	0	0	0	0.0000	0.2000	0.3210	0.2880	0.1536	0.0384	1.00
10.1	1	1	0	0	0	0	0.0020	0.2016	0.3202	0.2867	0.1520	0.0375	1.00
•	1	1	0	0	0	0	•	•	•	•	•	•	•
20.0	1	1	1	0	0	0	0.0000	0.2000	0.3210	0.2880	0.1536	0.0384	1.00
20.1	1	1	1	0	0	0	0.0020	0.2016	0.3202	0.2867	0.1520	0.0375	1.00
•	1	1	1	0	0	0	•	•	•	•	•	•	•
30.0	1	1	1	1	0	0	0.0000	0.2000	0.32100	0.2880	0.1536	0.0384	1.00
30.1	1	1	1	1	0	0	0.0020	0.2016	0.3202	0.2867	0.1520	0.0375	1.00
•	1	1	1	1	0	0	•	•	•	•	•	•	•
40.0	1	1	1	1	1	0	0.0000	0.2000	0.3210	0.2880	0.1536	0.0384	1.00
40.1	1	1	1	1	1	0	0.0020	0.2016	0.3202	0.2867	0.1520	0.0375	1.00
•	1	1	1	1	1	0	•	•	•	•	•	•	•
50.0	1	1	1	1	1	1	0.0000	0.2000	0.3210	0.2880	0.1536	0.0384	1.00
50.1	1	1	1	1	1	1	0.0020	0.2016	0.3202	0.2867	0.1520	0.0375	1.00
•	1	1	1	1	1	1	•	•	•	•	•	•	•

註：1. 瞬間位置指黃燈顯亮瞬間接近路口車輛距停止線的距離，單位：公尺。

2. 停行決策狀況欄中之 0,1 分表該瞬間位於 x 車輛在變換時段最終係穿越 (0) 或停車 (1)。

3.3 兩種方法取樣方式之比較

黃燈需時累積機率的取樣係以停止線為參考點，黃燈顯亮瞬間為計時起算點，蒐集每一穿越車輛到達停止線的耗時（即黃燈需時）。由第二節的回顧知，Lin 等人^[5,6]及許書耕與藍武王^[7]在建立黃燈需時累積機率時各有不同的取樣方式，Lin 等人^[5,6]的樣本僅限變換時段最後穿越停止線的車輛，本研究稱之為「極值樣本」，其在黃燈時段中所有先前穿越停止線的車輛均不予取樣；許書耕與藍武王^[7]的樣本為變換時段所有穿越停止線的車輛，本研究稱之為「全樣本」。許書耕與藍武王^[7]之穿越車輛累積機率的定義域需由原本的距離透過車速的轉換變為時間，為利比較，並消除不必要的變異干擾，本研究假設所有到達車輛均以相同車速（40 kph）接近路口，透過速率轉換即可將定義域由距離一對一改成時間。

極值樣本與全樣本兩種取樣方式在自由流狀況下（變換時段中只有一輛車到達路口）並無差異，但在非自由流狀況下（多車到達）便有明顯不同，如表 2 所示。表 2 係將表 1

表 2 兩種方法取樣方式之比較

時間 (秒)	距離 (公尺)	全樣本取樣						極值樣本取樣					
		一	二	三	四	五	六	一	二	三	四	五	六
0.000	0.0		0	0	0	0	0		0				
0.009	0.1		0	0	0	0	0		0				
•	•		0	0	0	0	0		0				
0.900	10.0			0	0	0	0			0			
0.909	10.1			0	0	0	0			0			
•	•			0	0	0	0			0			
1.800	20.0				0	0	0				0		
1.809	20.1				0	0	0				0		
•	•				0	0	0				0		
2.700	30.0					0	0					0	
2.709	30.1					0	0					0	
•	•					0	0					0	
3.600	40.0						0						0
3.609	40.1						0						0
•	•						0						0
4.500	50.0												
4.509	50.1												
•	•												

註：表中之「0」表在黃燈顯亮瞬間位在停止線上游某處車輛最終係穿越，且被取樣。

左欄中所有選擇停車的樣本剔除，再依兩種不同取樣方式篩出穿越車輛的最後結果，各位

置各狀況發生的機率仍維持與表 1 同，依此無偏誤的樣本集，即可建立無誤差的黃燈需時累積機率。

圖 4 係以高密度流理論值為基準，比較上述兩種取樣方式的黃燈需時累積機率結果。由圖知，許書耕與藍武王^[7]的全樣本（所有穿越車輛）黃燈需時累積機率曲線與理論曲線完全相符，Lin 等人^[5,6]的極值樣本（最後穿越車輛）黃燈需時累積機率曲線則會結構性偏離理論曲線，致在相同的累積機率下，必然高估黃燈需時。

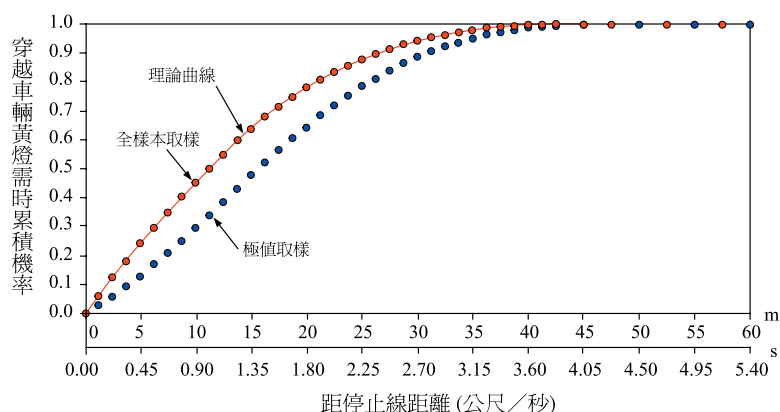


圖 4 極值樣本取樣造成穿越累積機率曲線結構性偏離現象

由以上的簡例分析知，如只是決定黃燈長度（不探討駕駛行為）時，許書耕與藍武王^[7]的總體停車或率法亦有簡單的應用程序，方法係蒐集變換時段所有穿越路口車輛的黃燈耗時，建立全樣本穿越累積機率曲線，再以預設的累積機率值 α (百分位) 決定黃燈長度。此種程序應用上相當簡易，且有嚴謹的理論基礎，能適用各種車輛到達類型，而其決定的黃燈長度亦有明確的意義，即「可提供 α 比率的車輛合法穿越停止線」。Lin 等人^[5,6]採用的極值取樣在變換時段只有一輛車到達路口的狀況下不致產生問題，但在多車到達下會造成結構性的偏誤，致在相同的累積機率下，必然高估黃燈需時。

四、實例研究

4.1 調查資料

交通部運輸研究所^[11]曾針對臺北市忠孝東路與光復南路口之忠孝東路西往東路段，在無員警現場指揮的時段進行變換時段車行軌跡之調查，調查日期為 92 年 5 月 23 日至 6 月 24 日，總計調查時間 20 餘小時。調查地點及範圍如圖 5 所示，其臨近路口方向之路口寬 34.5 公尺，臨近路段總長 151 公尺，速限 50kph，調查車道為 2 直行快車道，車道寬 3.6

公尺；另有直行及直行兼右轉車道各 1 的慢車道。調查方向的變換時段為黃燈 3 秒、全紅 3 秒。

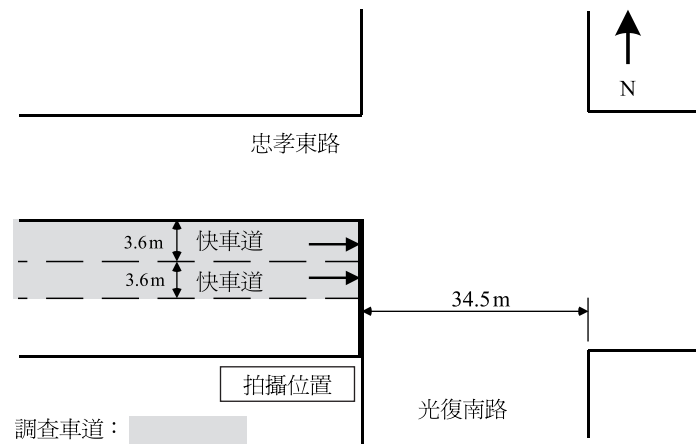


圖 5 調查路口示意圖

該調查係藉路口旁光復大樓樓頂（大約 13 層樓高）以兩部攝影機同步拍攝，一部拍攝車流影像，另一部拍攝紅綠燈影像，如圖 6 所示。為達到同步效果，拍攝前先將兩攝影機內部時鐘對時，每拍攝完一卷影帶（約一小時）再對時一次。完成現場錄影後，再以影像處理技術辨識車種並取得各車道之車行軌跡資料（時間、空間座標值），如圖 7 所示。其中，變換時段中臨近路口車輛出現變換車道之狀況者，整組樣本均予剔除。



圖 6 由大樓樓頂拍攝之影像實況

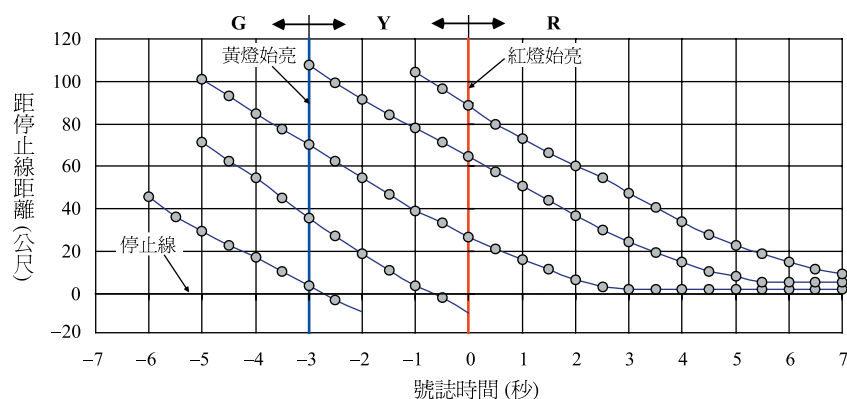


圖 7 各車道車行軌跡資料範例

4.2 不同取樣方式之黃燈需時比較

本研究選採用交通部運輸研究所^[11]之調查資料進行實證分析，針對每一變換時段，以黃燈顯亮瞬間為取樣時點，並以停止線為起點向上游每 5 公尺劃設取樣間距，從上述車行軌跡資料（如圖 7）中取樣。每一車樣本均有黃燈顯亮瞬間之車速、最終停行決策、穿越車輛實際黃燈耗時（黃燈顯亮瞬間至實際穿越停止線之時間）等之屬性，再依變換時段各種車輛到達類型分成多車到達與一車到達兩群，取樣範例如表 3 所示。其中，各車樣本在黃燈顯亮瞬間之車速介於 30~70 kph，較 30 kph 低或較 70 kph 高之樣本因數量極少且不穩定，故予剔除。

由前節的說明知，在建立黃燈需時累積機率時，Lin 等人^[5,6]係採「極值樣本（表 3 中之 Max t）」，許書耕與藍武王^[7]係採「全樣本（表 3 中之 t1~t3）」。由於此二種取樣方式只在多車到達時方有差異，故本研究對多車到達樣本群再分別以極值樣本與全樣本取樣，與一車到達樣本共得三樣本集合。

由於 Lin 等人^[5,6]及許書耕與藍武王^[10]之研究均證實臨近路口車速不影響黃燈需時，故本研究在實證分析時係將所有車速樣本混合，各樣本之車速平均值與標準差如表 4 所示。由表知，各樣本集合的平均車速雖有差異（一車到達者略高），惟車速標準差相當接近。

表 4 與圖 8 為各樣本集合所建立的黃燈需時累積機率，分析如下：

1. 比較一車到達與多車到達之全樣本（分屬不同的樣本群），二者的黃燈需時在累積機率 0~85% 區間均相當接近（85% 時多車到達者僅長 0.1 秒）。累積機率較高時，多車到達的黃燈需時方略長於一車到達者。例如累積機率為 95% 時，一車到達、多車到達全樣本之黃燈需時分別為 3.18、3.57 秒，多車到達全樣本約長 0.4 秒。
2. 比較一車到達與多車到達之極值樣本（分屬不同的樣本群），二者之黃燈需時累積機率曲線有非常明顯差異，多車到達極值樣本的黃燈需時均長於一車到達者。例如累積機率為 85% 時，多車到達極值樣本較長 0.4 秒，95% 時更長 0.8 秒，此種結果符合 Lin 等人^[5,6]

表 3 變換時段車行軌跡調查資料取樣範例

分 群	樣 本	黃燈顯亮瞬間各車位置											黃燈顯亮瞬間各車車速 (kph)					各車到達停止線耗時 (sec)			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Avg v	v1	v2	v3	v4	t1	t2	t3	Max t
多 車 到 達	1			0							1		30.4	24.8	36.0			2.17			2.17
	2			0		0						1	31.2	27.0	33.5	33.1		2.00	2.69		2.69
	3			0		0		0					31.2	30.6	32.0	31.0		1.18	2.25	3.49	3.49
	4	0	0					0			1		31.6	32.0	34.9	28.4	31.0	0.56	1.03	4.43	4.43
	5							1				1	31.9	34.2	29.5						

一 車 到 達	1				0								59.4	59.4				1.21			1.21
	2						0						31.0	31.0				3.49			3.49
	3									1			39.0	39.0							
	4									1			52.0	52.0							
	5			1									36.0	36.0							

註：1.黃燈顯亮瞬間各車位置以取樣區間編號表示，取樣區間寬 5 公尺，由停止線向上游依序編號。取樣區間有 0,1 者表有車，0 表該車在變換時段中穿越，1 表停車。

2.v1~v4 係以停止線為基準，由近至遠各車之車速，t1~t3 係各車由黃燈顯亮瞬間至到達停止線之實際耗時；Avg v 為平均車速；Max t 為最後穿越停止線車輛之耗時。

「黃燈顯亮後的車輛供給愈多，黃燈需時愈長」的研究結論。惟比較多車到達的全樣本與極值樣本（屬同一樣本群）可發現，不論累積機率值為何，極值樣本的黃燈需時明顯較全樣本者長，此實證結果與前節簡例分析結果一致。簡言之，Lin 等人^[5,6]的「黃燈顯亮後的車輛供給愈多，黃燈需時愈長」在採全樣本是對的，但在採極值取樣則會高估黃燈需時。

3. 本研究取得之多車到達樣本群實際上混有各種車輛到達類型（即 Lin 等人^[5,6]稱之黃燈顯亮後的車輛供給），其變換時段同一車道到達停止線的車數為 2、3、4 輛者之實際樣本數分別為 76、24、5，亦即大部分屬低密度狀況，即便如此，極值樣本的黃燈需時已明顯高於全樣本，如能取得更多高密度車流資料作分析，其間的差異應會更為顯著。
4. 圖 8 另顯示，到達路口車密度較高時（多車到達），黃燈顯亮瞬間距停止線較遠之車輛會停車的比率確較一車到達者略低。例如黃燈設定為 3.5 秒時，車輛在黃燈結束後才穿越之比例，多車到達（全樣本）與一車到達各有 5.5% 與 0.7%。此反映駕駛人到達路口遭遇黃燈時的停車意願並非一成不變，而係視當時路口的車輛到達類型而定，車愈多（密度愈高），到達路口車輛之停車意願愈低。

表 4 不同取樣方式之黃燈需時累積機率調查結果
(臺北市忠孝東路與光復南路口實證資料)

耗時 (秒)	一車到達樣本		多車到達全樣本		多車到達極值樣本	
	樣本數	累積機率	樣本數	累積機率	樣本數	累積機率
0.00	0	0.000	0	0.000	0	0.000
0.25	6	0.039	18	0.098	2	0.021
0.50	11	0.112	10	0.153	1	0.031
0.75	15	0.211	9	0.202	2	0.052
1.00	10	0.276	13	0.273	5	0.103
1.25	11	0.349	18	0.372	6	0.165
1.50	9	0.408	15	0.454	9	0.258
1.75	16	0.513	15	0.536	8	0.340
2.00	14	0.605	10	0.590	5	0.392
2.25	13	0.691	15	0.672	8	0.474
2.50	11	0.763	8	0.716	7	0.546
2.75	10	0.829	12	0.781	10	0.649
3.00	10	0.895	14	0.858	9	0.742
3.25	12	0.974	11	0.918	10	0.845
3.50	3	0.993	5	0.945	5	0.897
3.75	0	0.993	3	0.962	3	0.928
4.00	0	0.993	2	0.973	2	0.948
4.25	1	1.000	4	0.995	4	0.990
4.50	0	1.000	1	1.000	1	1.000
4.75	0	1.000	0	1.000	0	1.000
5.00	0	1.000	0	1.000	0	1.000
5.25	0	1.000	0	1.000	0	1.000
樣本數	152		183		97	
平均車速 (kph)	53.0		46.2		47.0	
車速標準差 (kph)	9.1		9.9		10.0	
85 百分位耗時 (秒)	2.86		2.97		3.27	
90 百分位耗時 (秒)	3.02		3.18		3.53	
95 百分位耗時 (秒)	3.18		3.57		4.01	

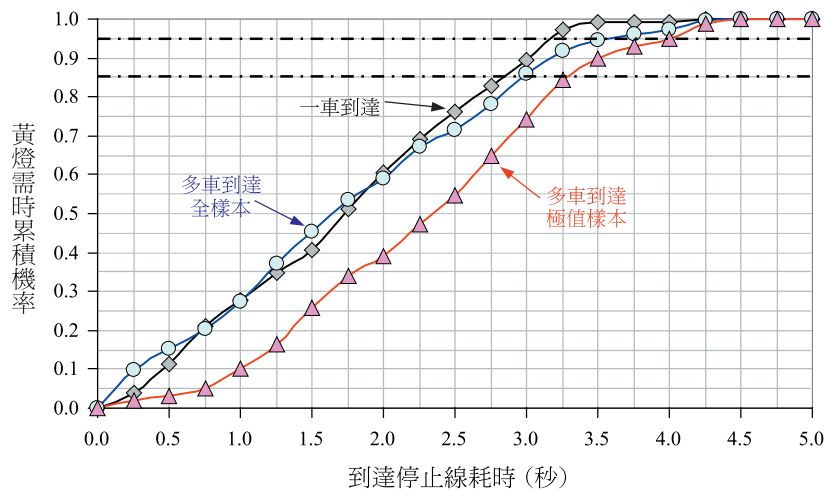


圖 8 不同取樣方式之黃燈需時累積機率曲線 (臺北市忠孝東路與光復南路口實證結果)

前節簡例分析發現 Lin 等人^[5,6]的極值取樣方式會結構性高估黃燈需時，本節實證分析除再度證實確會高估外，亦發現極值取樣方式尚存有下列兩問題：

1. 取樣原則不一致：採極值取樣方式，有的車輛能作為反映黃燈需時的代表樣本，有的卻會被剔除。例如到達停止線黃燈耗時同為 1 秒，或黃燈顯亮瞬間距停止線只有 10 公尺的車輛樣本，如係一車到達者會被選取，如係多車到達，只要不是最後一輛通過停止線者就會被剔除。
2. 設計指標只能間接反映駕駛者需求：採極值取樣方式，其評估黃燈設計良窳的指標須將 ITE^[2]之黃燈結束後仍進入路口的「車輛百分比」改為黃燈結束後仍有車進入路口的「變換時段百分比」。此種「變換時段百分比」指標充其量只能間接反映駕駛者需求，與直接反映駕駛者需求之「車輛百分比」指標間並無一定之關係。

4.3 不同車輛到達類型之車輛停行特性分析

依 Gazis 等人^[1]估算最短變換時段的方式，令黃燈長度 (Y) 等於到達路口車輛以等速 (V) 通過安全煞停距離 (S) 所需的時間，即可消除尷尬區 (dilemma zone)，亦即令 $Y = S/V$ ，其中， $S = Vt + V^2/2a$ ， t 為反應時間，約 0.66 ~ 1 秒， a 為安全減速率，一般取 3 ~ 4.6 公尺/秒² (Jourdain^[12])。

本研究設定 $t = 1$ 秒， $a = 3.05$ 公尺/秒² ($= 10$ 英尺/秒²)，並依各樣本車輛在黃燈顯亮瞬間實際的車速來估算安全煞停距離，再與其在該瞬間距停止線距離作比較，如圖 9 所示。圖中，因安全煞停距離的兩個參數固定，故縱軸可以反映各樣本車輛在黃燈瞬間的車速，橫軸則反映各樣本車輛所在位置。樣本車輛以耗時 3 秒 (忠孝東路與光復南路口的黃燈長度) 為界分成穿越與停車兩類，停車樣本則僅取第一輛停車者。樣本落在對角線左上

方者，表示安全煞停所需距離大於其在黃燈顯亮瞬間距停止線之實際距離（亦即無法安全煞停），落在右下方者則表示可以安全煞停。

由圖 9 知：

1. 不論是一車或多車到達，無法安全煞停的樣本大多選擇穿越，且黃燈耗時多在 3 秒以內。可以安全煞停的樣本，一車到達者比多車到達者有較多比例會選擇停車。
2. 多車到達樣本中，可以安全煞停但卻選擇穿越者，其耗時超過 3 秒（三角型樣本）的比例明顯較一車到達者多。換言之，其在黃燈結束後仍有較多車輛進入路口的主要原因不在於無法安全煞停，而是多車到達時，後方駕駛者停車意願較低，有追隨前方合法穿越車輛的傾向，而於黃燈結束後仍執意違規穿越。

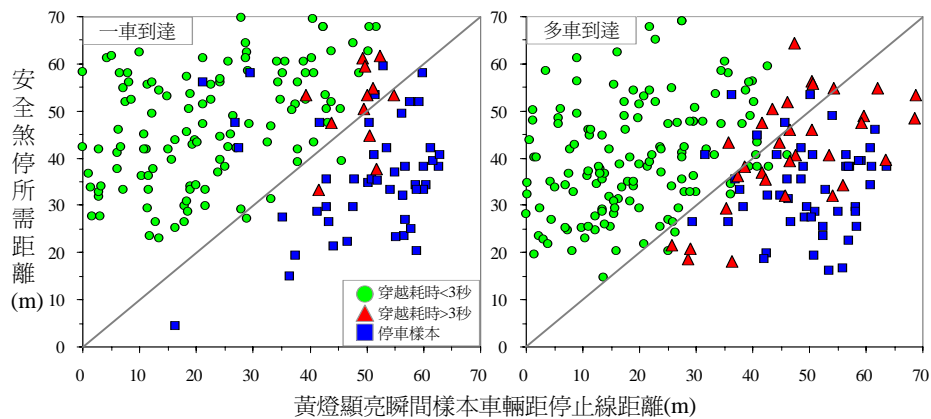


圖 9 不同車輛到達類型之黃燈時段車輛停行特性實證比較

經觀察一般路口變換時段的駕駛行為，可發現上述多車到達而停車意願較低的原因可能有二：

1. 車流量較大的路口，號誌週期一般較長，車輛較不願意在黃燈時停車而多等一週期。
2. 高密度車流在黃燈時段常以成串車隊通過路口，產生類似「列車」的效果，因其行動連貫、清楚，容易被橫向停等車輛注意，降低闖紅燈時與橫向起動車輛發生直角碰撞的危險，相對的，若在黃燈時段採煞停反而有被後車追撞的危險，故變換時段中處於高密度車流的多車到達車輛會有較高的意願追隨前車加入「列車」尾部而穿越路口。

五、結論與建議

5.1 結論

本研究透過簡例分析與實例調查分析檢視累積機率法與總體停車或率法訂定黃燈長

度之異同，獲得以下結論：

1. Lin 等人^[5,6]的黃燈需時累積機率法屬經驗公式，欠缺理論基礎。雖嘗試以滿足駕駛者需要來設計黃燈，惟因其特殊的取樣方式（僅取最後穿越的一輛車），致須以「車輛不會在紅燈顯示後仍進入路口的變換時段百分比」為衡量指標，未能直接反映實際的駕駛者需求；而同樣作出停行決策之樣本中，只有部分車輛能作為反映黃燈需時的代表樣本，部分樣本會被剔除，取樣原則明顯不一致，難以理論加以詮釋；經本研究以簡例分析與實證分析均確認，於多車到達的狀況，該方法必會結構性高估黃燈需時。嚴格言之，Lin 等人^[5,6]的黃燈需時累積機率法只適用於變換時段一車到達的狀況。
2. 許書耕與藍武王^[7]的總體停車或率法業經數學證明具備良好特性，其衡量指標與 ITE 建議者同，能直接反映駕駛者需求，其決定的黃燈長度亦有明確的交通管制意義。而經本研究理論推演及以簡例分析說明知，如僅為決定黃燈長度，該法的應用程序亦相當簡單，只要蒐集變換時段所有穿越路口車輛的黃燈耗時，據以建立全樣本累積機率曲線，再以預設的 α (百分位) 即可決定黃燈長度。
3. Lin 等人^[5,6]提出「變換時段車輛供給愈大，黃燈需時愈長」的論點。惟經本研究實證分析發現，在全樣本取樣下，變換時段不論是一車到達或多車到達，其黃燈需時在累積機率 0~85% 區間均相當接近 (85% 時僅差約 0.1 秒)；多車到達黃燈顯亮瞬間距停止線較遠之車輛會停車的比率方較一車到達者略低。換言之，在正確的全樣本取樣下，Lin 等人^[5,6]的論點是對的，但效果不像極值取樣般誇大。
4. 經本研究觀察發現，變換時段車輛供給愈大，黃燈需時會愈長的原因，除擁擠路口號誌週期一般較長，車輛較不願意停車等候外，可能係成串車隊通過路口會形成類似「列車」的效果所致，經進一步分析證實，多車到達狀況在黃燈結束後仍進入路口的違規車輛，其實大部分均可以安全煞停，只是其停車意願較低而已。

5.2 建議

1. 依現行「道路交通標誌標線號誌設置規則」，大部分都市街道交岔路口（速限為 50 kph）之黃燈長度通常採 3 秒鐘設計，但非都市街道交岔路口則未必。本研究認為等長的黃燈可有效降低駕駛者在不同地區行經不同交岔路口決定停行時的猶豫空間，進而減少因號誌變換而發生潛在事故的機率。依本研究之分析發現，在黃燈結束後仍有較多車輛進入路口的主要原因不在於無法安全煞停，而是多車到達時，後方駕駛者停車意願較低，有跟隨前方合法穿越車輛的傾向，故於黃燈結束後仍執意違規穿越。解決之道除加強執法以改正違規行為外，建議變換時段的設計，黃燈可維持等長（全國一致），全紅長度則視穿越路口寬度、臨近路口車速及車輛到達類型加以調整（例如尖峰時間常發生高密度車輛到達，其全紅可酌以延長）。
2. 本研究主要目的係作累積機率法與總體停車或率法兩種黃燈需時設計方法的比較，為排除其他影響變因的干擾，僅調查一處路口進行比較分析，後續研究可增加其他路口案例

作更廣泛之比較分析。

3. 完整的變換時段總需時包含黃燈與全紅。有關本研究建議「固定黃燈長度，變動全紅長度」實務上可行的操作方式如下：在路口上游停止線處及路口下游車輛清除處各設一觀測點，依本文的全樣本取樣方式即可同時取得「黃燈需時」與「變換時段總需時（黃燈加全紅）」資料，經設定滿足駕駛人需要的比例 α 、 β 後，再依序以 α 比例決定黃燈需時，以 β 比例決定變換時段總需時（ α 、 β 可不相同，例如 $\alpha = 90\%$ ， $\beta = 99\%$ ），最後再以變換時段總需時減黃燈需時決定全紅長度。此方法看似複雜，但因變換時段兩單元在時間上係連續的，上述每次取樣的二個需時資料亦屬同一駕駛之連續行為的結果，故二者完全一致，可真實反映實際路口狀況，仍值得參考採用。

參考文獻

1. Gazis, D., Herman, R., and Marududin, A., "The Problem of the Amber Signal Light in Traffic Flow", *Operations Research*, 8(1), 1960, pp. 112-132.
2. ITE Technical Committee 4A-16, "Determining Vehicle Signal Change Intervals", *ITE Journal*, 1985, pp. 61-64.
3. Olson, P. and Rothery, R. W., "Driver's Response to the Amber Phase of Traffic Signals", *Traffic Engineering*, 1962, pp. 17-29.
4. May, A. D., "A Study of Clearance Interval at Traffic Signals", *ITTE Special Report*, University of California, Berkeley, 1967.
5. Lin, F. B., Cooke, D., and Vijayakumar, S., "Utilization and Timing of Signal Change Interval", *Transportation Research Record* 1114, 1987, pp. 86-95.
6. Lin, F. B. and Vijayakumar, S., "Timing Design of Signal Change Interval", *Transportation Engineering and Control*, 29(10), 1988, pp. 531-536.
7. 許書耕、藍武王，「號誌變換時段之時制設計新方法：總體停車或率函數」，**中國土木工程學刊**，第 15 卷，第 4 期，民國 92 年，頁 841-850。
8. Chang, M. S., Messer, C. J., and Santiago, A. J., "Timing Traffic Signal Change Intervals Based on Driver Behavior", *Transportation Research Record* 1027, 1985, pp. 20-30.
9. Worthman, R. H. and Fox, T. C., "Reassessment of the Traffic Signal Change Interval", *Transportation Research Record* 1069, 1986, pp. 62-68.
10. 許書耕、藍武王，「不同臨近車速之黃燈需時比較—臺灣地區之實證」，**中國土木工程學刊**，第 16 卷，第 3 期，民國 93 年，頁 543-551。
11. 梁恩輝、張勝雄，**研發資料採礦技術萃取車行軌跡資料重要資訊之研究**，交通部運輸研究所委託研究報告，民國 93 年。
12. Jourdain, S., "Intergreen Timing", *Traffic Engineering and Control*, 27(4), 1986, pp. 179-182.

