



都市適應性號誌控制原理與發展

胡守任／交通大學運輸與物流管理學系 教授

葉志韋／臺北市政府交通局停車管理工程處 副工程司兼股長

林定憲／臺北市政府交通局運輸管理科 技士

劉瀚聰／交通大學運輸與物流管理學系 博士後研究員

交通控制系統係管理都市交通的主要手段之一，其中，交通號誌控制是主要的方法之一。本文首先針對交通號誌控制的背景進行介紹，包括：定時、反應式、觸動式、適應性號誌控制邏輯的說明。其次，針對號誌控制系統的核心元件，即都市幹道車流模式進行說明，包括：中觀與微觀車流模型的探討。再者，本研究進一步介紹國內、外主要的適應性號誌控制系統的發展背景與運作原理，作為發展不同適應性號誌控制邏輯之參考。最後，本研究以國人自行開發的適應性號誌控制系統 COMDYC-3E 為例，說明結合中觀車流模型與路口轉向比推估模型應用於都市號誌控制與管理的績效表現，同時提出適應性號誌控制系統在都市號誌化路口管理的政策意涵與未來發展的建議。

交通號誌控制背景介紹

交通控制係管理都市交通的主要手段之一。在都市交通控制的範疇中，交通號誌控制是主要的方法之一。建置交通號誌的目的，主要透過時間分配的方式將路權分配給不同方向的車流與人流使用，以保障人車安全與效益。交通號誌控制的優點為不僅可紓解都市中大量的車流，減少多餘的停等時間與次數，亦可提昇都市整體交通系統的運行效率，增加運輸效益，更能達成節能減碳與降低外部成本等目標。常見之交通號誌控制策略可分為定時號誌控制（Pre-Timed Control）、反應式號誌控制（Responsive Control）、觸動式號誌控制（Actuated Control），以及適應性號誌控制（Adaptive Control）等四項控制邏輯。以下將針對各不同號誌策略，進行簡要的說明。

1. 定時號誌控制係經由歷史資料或經驗法則，研擬一天中各別時段的號誌時制計畫（包括：週期長度、綠燈時比與時相順序），適用於交通量穩定或有規律變化之地點，且各路口同步時相之綠燈時間皆保持一定之時差，以達連鎖控制的目的。

2. 反應式號誌控制系統為根據所蒐集的交通流量資料進行時制計畫的更新，亦即指號誌系統接受目前交通狀況之輸入而作反應，進而產生新的時制計畫。反應式號誌控制亦可區分為動態查表控制（Dynamic Table Look-Up or Dynamic Pattern-Matching Traffic Control）與動態計算控制（Dynamic Timing Computation or Dynamic Pattern-Computing Traffic Control）。動態查表控制為利用偵測器蒐集交通資料，透過控制中心資料的彙整及確認，並由預先設計完成之時制計畫表中，選擇最適當之時制計畫。動態計算控制為利用偵測器蒐集交通資料，由控制中心進行流量預測之程序，並即時以時制分析軟體之計算，產生新的時制計畫。
3. 觸動式號誌控制系統可分為全觸動式（Full-Actuated Operation）與半觸動式（Semi-Actuated Operation），其中半觸動式號誌控制系統主要運作邏輯為綠燈燈號全時間開放給主要道路的車流使用，除非次要道路偵測器受到觸動、顯示有車輛呼叫時，才會移轉路口通行權給次要道路，系統運作受主要道路最短綠燈時段與次要道路最長綠燈時段的限制。全觸動

式號誌控制系統則受控制器預設時段的限制，綠燈長度端視偵測器觸動情況而定，且時相順序與時段長度也會隨時變換，以反映實際的交通需求，並以最短、最長綠燈時段，以及偵測器相鄰觸動的最短間距的限制，確保號誌控制之邏輯能有效運作。

4. 適應性號誌控制系統 (Adaptive Traffic Control System, ATCS) 原則上無號誌週期的概念，在預定時制計畫內配合某些特殊需要進行微觀的調整或修改，例如：由車流量高低調整路口綠燈時比或延長綠燈，其目的為加強路口號誌時制調整之彈性，以快速因應交通狀況的變化。其運作流程具有可即時反應交通狀況的能力，並進行號誌時制計畫的即時調整。

相對於其他號控策略，適應性號控運作機制具備較高彈性，也可改善定時 / 反應式號控之缺點，進而提高號誌控制的運作績效，例如：即時反應特殊事件、提高流量預測之準確度，避免時制轉換時間過長等等。本文將以都市適應性號誌控制為主軸，進行相關原理與發展之介紹，並介紹本研究團隊在適應性號控的相關研究成果。

都市幹道車流模式回顧

為了能即時反應交通狀況的變化，適應性號誌控制策略主要依據車流推進狀態與擴散效應進行判定運作，因此需配合車流理論模式進行路口與路段的車流運作情況，據以進行號誌時制之決定與修正。在都市幹道車流模式中，針對車輛觀察的對象與維度不同，由大至小可區分巨觀 (Macroscopic)、中觀 (Mesoscopic) 與微觀 (Microscopic) 等三類不同模式。考量整體路段作為觀察單位之巨觀車流模式，並不適合應用於適應性號誌控制邏輯之車輛推進，以下主要以中觀與微觀車流模型為探討的對象。

中觀車流模式

中觀車流模式以單一車隊作為觀察對象，描述其時空運行之行為與軌跡。中觀車流模式可以利用巨觀車流模式的相關變數 (例如：流量、密度與速率)，描述車輛推進的狀態，同時也可以透過微觀車流變數，據以描述個別車輛對於前方道路狀況的反應情形。在交通模擬上，中觀車流模式兼具巨、微觀車流模式之

優點。中觀車流模式基本理論由氣體動力學理論 (Gas-Kinetic Models) 發展而來，如果將各別車輛視為單一粒子，其車流可被視為由許多相互作用的粒子所構成的氣體。相關研究最早由 Prigogine and Andrews^[1] 以流續車流模式的偏微分方程進行推論空間與速度變化下之時相空間密度 (Phase-space density)，依此探討車輛的個體行為對車流的影響。隨後出現了不同改進的模型，Helbing^[2] 考慮了車輛的加速與相互作用機制，修正粒子分佈函數所遵循的 Boltzmann 方程式，以解釋高速公路自發式壅塞 (Phantom Traffic Jams) 車輛運動狀態。

類似於氣體動力學的概念，Daganzo^[3] 以流體動力學為基礎提出提出格位傳遞模式 (Cell Transmission Model, CTM)，推導單一方向之道路密度變化過程。CTM 其將高速公路路段切分為若干均質細胞格位 (Cell)，並依車流行進方向由道路上游至下游依序編號，該模式以某單位時間內以自由車流速率所行駛之距離作為格位長度，且假設格位內車輛皆順利前往至下一個格位，而車隊在格位間的轉換則依據上個別格位內的車輛數、格位間能通過的最大容量與下個格位尚可容納之容量等因子，計算實際進入下個細胞格位之流量。各細胞格位的特性皆為獨立，預測車輛在格位間的推移過程與格位內密度的變化，如此經過數個 Δt 反覆推移後，可以計算下游路段受前方道路事件或號誌影響，而累積至後方數個細胞格位之等候線長度、車輛延滯或旅行時間等績效，並透過依時性觀測及更新系統狀態之策略以模擬交通系統，據以建構車輛逐步由上游細胞向下游細胞推移之中觀車流理論。

除了以氣體動力學分析中觀車流模式之外，過去研究也分別從車間時距分配模式 (Headway Distribution Model) 與群聚模式 (Cluster Model) 進行相關探討。車間時距分配模式主要假設車流中時間車距 (Time Headway) 符合獨立且有共同分佈 (Independent and Identically Distributed, I.I.D.) 之隨機變數，例如：半卜瓦松模式 (Semi-Poisson Model^[4])、一般性等候模式 (Generalized Queuing Model^[5])，並依此計算相對應的車流量分佈。群聚模式則設定各群組為多車輛組成，其群內的車流具備均質之特性，藉由群聚的累積或消散來分析車流之速度，相關內容可參考^[6]。

微觀車流模式

微觀車流模式以單一車輛為基本單位，追蹤個別車輛的縱向加減速與橫向變換車道的變化，描述在特定時空下個別駕駛者的駕駛行為與車輛的關係。微觀車流模式的基本概念為跟車理論 (Car-Following Theory)，探討前後兩車輛間之車輛間距、相對速度、行為門檻與反應時間等跟車因素，其優點為可精準掌握每輛車的實際運行行為，但缺點為相較於巨觀與中觀車流模式，需要較複雜的計算過程與時間成本。Pipes^[7] 係最早提出微觀車流模式之學者，其基本假設為道路上的車輛均為同種類型之車種，同時隨著一直線前進，跟隨的後車在行進中與前車保持一適當距離，以便突發事件發生時可從容應變，為保持適當的距離，後車的行車速率必須隨著前方引導車進行相關變數之調整。此種模式細膩的描述個別車輛之間的因應關係，並以具體的距離、速度與加速度等車輛特性來表達其所對應的關係，作為模式推演的主要依據。在微觀車流模式中，跟車理論的概念為考慮跟車時應與前車保持最小安全間距，使後車與前車能夠保持一定的安全距離，透過間隔 (Spacing)、加速 (Acceleration)、停止 (Stopping) 與轉彎 (Turning) 四種限制之評估，以判斷跟隨或煞停，避免追撞前車。

基本跟車模式可分為三類：安全與距離模式 (Safe-Distance Model)、刺激與反應模式 (Stimulus-Response Model)，以及心理門檻模式 (Action Point Model)。安全與距離模式最早是由 Pipes^[7] 所提出的，主要是考慮在跟車時應與前車保持一段安全距離，求解其安全距離。刺激與反應模式則探討反應與敏感性和刺激之間的關係。由 Herman 與 GM 研究室 (General Motors Researches Laboratories) 經由現場實驗研究進而發展成 GM 模式^[8]，該模式認為用路人反應與外界刺激程度呈正比關係。GM 模式假設車輛沒有超車與變換車道行為下，測試發現駕駛敏銳度有顯著的差距，故 GM 模式的第二、四、五代，均是針對敏銳度進行模式之調整。整體而言，刺激反應方程式在跟車理論中較有描述跟車影響因素之能力，但該模式有兩項強烈之假設：(1) 無論距離多遠，兩車都會互相影響、(2) 當相對速度不變，跟車反應亦不變。行為門檻模式則由 Wiedemann^[9] 提出，將駕駛者區分為受限制的與非受限

制的，並從中考慮變換車道與超車等行為。行為門檻模式主要設計為改良刺激與反應模式中有不合理的假設，當跟車駕駛者感知到前車與自身之間距及相對速度差異過大時，會加速接近前車以縮短間距，逐漸由不受影響駕駛範圍進入受影響駕駛範圍；當跟車駕駛者感知到過於接近前車不安全時則減速以加大間距；減速後之間距若不符合跟車駕駛者之期望則再加速。若後車與前車距離太大時，後車則完全不受前車之影響。若落入避禍煞車區或撞車危險區，車輛就會緊急煞車引發尾隨車輛煞車的連鎖反應，造成車流落入不穩定的狀態中，透過該模式為基礎的模擬實驗，則可模擬出擁擠的發生過程。

有別於傳統的跟車理論，相關研究根據 Neumann and Burks^[10] 所提出的細胞自動機 (Cellular Automata, CA) 模型應用於微觀車流模型。CA 為離散化模型，模型設定為由特定規則的格位所組成，而單一格位中只能擁有一個細胞與其相對應的特徵或行為。特定時間內只允許單一狀態，各細胞根據所設定的行為或規則隨著時間的變動而改變，且細胞全都依照同一種規則進行演進。CA 組成要素可分為：(1) 細胞格位 (Cells)：CA 的基本組成單元，可為任意的幾何圖形或形狀；(2) 格位狀態 (states)：各格位的狀態由一組有限的狀態來表現，可為二元型態表示，但在任一時階，各格位只呈現這組狀態中的唯一特定值；(3) 鄰近格位狀態 (Neighborhood)：CA 的格位變化會被周圍的鄰近格位的狀態所影響，需以鄰近格位的狀態作演化的依據；(4) 演化規則 (Evolution Rules)：各格位之下一時階狀態為當前的格位狀態與周圍鄰近格位的狀態所組合而成，且其演化與更新不能違背預定的規則。CA 模式運作包含三個特點：(1) 平行計算 (Parallel Computation)：各細胞格位可以同步運作，並由平行處理器來進行運算，亦受到同時同步的改變；(2) 局部性 (Local)：各細胞格位的狀態變化，只會受到周圍的細胞影響，而掌控全體細胞變異主要受限於各細胞格位的設定與運動規則；(3) 同質性 (Homogeneous)：各格位需在同一規則下，進行運動與變化。

藉由將時間與空間維度離散化，CA 探討車流離散化速度之變化，雖其本身架構與機制簡單，但可模擬出複雜系統的現象，在車流微觀模擬上國內、外均有

廣泛的運用，例如：單車道 CA 車流模式^[11-14]、多車道 CA 車流模式^[15,16]、號誌化 CA 車流模式^[5,17]與混合車流 CA 車流模式^[18-21]。

綜上所述，微觀車流模式以探討個別車輛行為與周圍車輛間的互動，而中觀車流模式則是以單一車隊或是同一範圍內之車輛作為觀察單位進行車輛的推進。

適應性號誌控制邏輯

號誌控制邏輯研究起源於 Miller^[22]，而適應性號誌控制邏輯（Adaptive Traffic Control）之名稱則首次出現於 Rosdolsky 研究中^[23]。截至目前為止，國外多個研究團隊已發展出不同適應性號誌控制模型，其中部分系統更已廣泛的應用於實際交通路網的控制中。適應性號誌控制邏輯的主要架構，包括以下四大部分：

車流資料蒐集

透過在都市中大量設置車輛偵測器（例如：迴圈式、超音波、紅外線、影像式偵測器），藉此蒐集重要幹道各路段的交通資訊（例如：各車種之車速、流量與佔有率），以提供用路人即時道路資訊之外，並回饋至交通管理單位與號誌控制系統之應用。配合號誌控制系統之車流蒐集條件與預測需求，相關偵測器設備需考量設置於路段中不同的地點，例如 SCOOT 系統設置於路段上游、SCATS 系統設置於路段下游，COMDYCS-3E 則是根據車流推進預測時序多寡的需要，以決定偵測器設置的位置。

現階段車流推估

針對適應性號誌控制邏輯之現階段車流分布推估，可分為車流推進預測與轉向比推估兩部分。車流推進預測模式為估算車流由偵測器抵達路口之時間或是等候線長度等資訊；轉向比預測模式則可以估計各路段車輛進入路口後行進方向的比例。兩者需進一步推算為路段績效指標，以應用於最佳化時制計畫的求解。然而，兩者均有賴於偵測器之資料蒐集能力與運用先驗資料運算求解之表現，故良好的車流推估與預測模式，對號誌控制決策有相當程度之影響。

未來車流預測

與第二項之現階段車流推估類似，相較於前者是

針對已偵測之車流進行目前時階內之推估，未來車流預測目的在於預測未來的車輛產生與車流推進狀況，判斷車流分布與車流績效，以提供號誌最佳化邏輯演算或決策判斷。由於此模式會在一時階內預測未來多個時階之交通狀況，需要大量運算的資源，相較於前項之現階段車流推估模式，此模式對線上即時運算的要求更高，一般較複雜的車流模式便不適用。

號誌控制最佳化邏輯

根據及時蒐集所得的路口 / 路段交通資料進行車流推估與預測模式之演算，在預設號誌時制最佳化演算邏輯，並配合未來車流預測狀況，以計算最佳號誌時制計畫或時相切換決策判斷。相關決策內容則按照適應性號誌控制邏輯特性差異與應用時空範圍不同，決定下一時階之週期、時差與時比等內容，或決定是否進行燈號切換等決策，透過以上邏輯演算達到預設號誌控制之績效指標最佳化的目標。

適應性控制邏輯依演算差異可區分為二大類，週期性號誌控制邏輯（Cyclic Control Logic）與週期內號誌控制邏輯（Time-Step Control Logic），分別說明如下。

1. 週期性號誌控制邏輯：以調整固定時制為出發點，透過現階段車流資料的蒐集，重新調整原有整體的時制計畫，在當前週期或一固定時間內計算下一階段之號誌週期與時比，以英國的 SCOOT、澳洲的 SCATS、美國的 ACS Lite、德國的 BALANCE、MOTION 等模式為主。
2. 週期內號誌控制邏輯：以即時蒐集所得的車流資訊，在每一個時階（Time Step）中比較各種競爭方案的績效值，據以決定綠燈時間延長或時相切換，故無固定週期或時比，以美國的 OPAC、RHODES、InSync 模式，以及國內開發之 COMDYCS-3E 等模式為主。

由於週期性適應性號誌控制可用於決策的時間較長，故可進行較複雜的邏輯運算與決策模式；而週期內適應性號誌控制則是在短時間內藉由即時車流資料的蒐集與反覆執行決策，可以立即反應當前的交通狀況，然而短時間多次決策運算量大，使用的邏輯架構與模式內容不可太過複雜，以避免單一時階內無法完成決策邏輯之運算。以下逐項介紹國內、外重要的適應性號誌控制相關研究。

國外週期性適應性號誌控制邏輯

SCOOT (Split, Cycle, Offset Optimizer Technique)

SCOOT 全名為「時比、週期與時差最佳化技術」，其設計目標為減少時制間轉換與流量預測的時間^[24]。利用設置於距離路口停止線上游 10 至 20 公尺處車輛偵測器蒐集車流資料，經由模式運算並評估飽和度與延滯，決定最佳時制計畫之時比、週期與時差。SCOOT 有號誌時制計畫變動頻繁之特性，透過少量多次調整參數，使得模式對於特殊事件能夠靈敏反應，進而給予適當的時制計畫加以管制。

SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System)

SCATS 運作為中央式分層交控系統 (Centralized Hierarchical Control System)，該系統分為子系統、分區電腦，以及中央電腦。各子系統管轄一至十個路口，各路口控制器係由各分區電腦分別控制，而各分區電腦則由中央主電腦進行連鎖性控制^[25]。該邏輯之偵測器設置於停止線處，蒐集前一週期流量透過運算決定下一週期的時制計畫，並且利用「綜合式流量」(Synthesized Flow) 的方法修正偵測器所造成的資訊誤差。SCATS 以均衡鄰近衝突路段的飽和度為目標制定時制計畫；先針對路口所組成的子系統群組 (Subsystems)，利用公式求算其共同週期，再由各個路口預設的四套時比計畫中，依據飽和度 (Degree of Saturation) 指標與相關的比較準則進行對應時比的選擇。各群組中又有五組內部時差，同樣地可依據預先擬訂的準則加以選擇。此外，另有五組外部時差可用來合併兩個相鄰群組。

Adaptive Control Software (ACS) Lite

ACS Lite 為改善傳統適應性號誌控制系統 (ATCS) 昂貴的建置與維護成本問題所開發出之低成本且易於管理之系統^[26]，其週期依據預先設定固定週期，無最佳化週期演算法，系統以最小化系統延滯時間與停等比例之作為綜合績效指標。該系統為中央處理之系統架構，適應性控制軟體僅建置於中央伺服器中，僅於每車道停止線設置一組車輛偵測器，回傳各方向流量與佔有率等車流資訊，並透過模式推估空間平均速率與飽和度，平衡兩競爭方向的飽和度以決定時比，每 5 至 10 分鐘更新時比與時差，但仍受最小

與最大綠燈時間限制。時差則以最大續進流量作為指標，設有每週期變動幅度的限制。為提升幹道續進能力，ACS Lite 對飽和度評估時係採幹道加權，以避免幹道發生過度壅塞之現象。

BALANCE & MOTION (Balancing Adaptive Network Control Method, and Method for the Optimisation of Traffic Signals in Online-Controlled Networks)

BALANCE^[27] 與 MOTION^[28] 兩模式之適應性號誌控制架構十分相似，故將其一併討論。號控邏輯皆設置於中央伺服器，向路口下達週期與時差指令，時比則依據路口觸動式號控邏輯，偵測器佈設位置主要位於路口上游約 10 至 50 公尺處，該位置雖利於施行觸動式號誌策略，但此距離不利於計算等候線長度或飽和紓解率，因此兩模式皆建立一套週期基礎之等候線長度預測模式。BALANCE 依據偵測器回傳之資訊，經由車流預測模式推估車流需求，並將路口分為若干群組。每群組之週期長度則由預先設定好的清單中，選擇最適宜之週期時間，再經由基因演算法 (Genetic Algorithm) 於 5 分鐘內求解群組最佳的時比與時差，由通過路口偵測器之需求即時延長綠燈時間或轉換時相。MOTION 可藉由內部預測演算法進行週期、時比與時差之最佳化，以滿足實際流量需求。MOTION 並建置特殊營運模式，藉由事件自動偵測系統或由交控中心發布指令，可針對臨時事件或事故做出適宜的即時號誌控制，若發生偵測器故障或異常情況，會自動改擷取鄰近路口偵測器資訊，以維持系統持續運作。

MOVA (Microprocessor Optimised Vehicle Actuation)

MOVA 核心運作機制來自於改良的 SCOOT^[29]，在單一交叉路口上，藉由偵測器感應各方向的通過車輛狀態，再根據接近路口來車之行車數量，進行調整綠燈秒數。其偵測器通常設置於路口停止線前 5 ~ 8 秒之位置。運作設定含兩種模式，第一種為離峰不壅塞時段，頻繁進行號誌切換，儘量維持綠燈時相給路口各方向來車，以最小化路口延滯為目標。第二種為尖峰壅塞時段，保留綠燈時相給達飽和流率之路段，以最大化道路容量為目標。但 MOVA 系統運作只適用於單一獨立號誌化路口，較無法運用於整體道路路網系統。

國外發展之週期內號誌控制邏輯

OPAC (Optimization Policies for Adaptive Control)

OPAC 全名為「適應性控制之最佳化策略」，其概念是一種利用近似動態規劃的技術為基礎，無固定週期之即時需求感應式的交通號誌計算策略^[30]。其利用週期性流量剖面圖 (Cyclic Flow Profile, CFP) 以估計交通流量型態，並藉過去數個週期之交通流量資料，透過水平推移法預測未來數個週期之流量型態，決策條件為最長綠燈與最短綠燈長度，藉以動態轉換不同方向路段之時相，以路口延滯最小化為績效目標。現今 OPAC 可經由個別控制器來執行最佳化工作，並可透過應用 VFC 原則，使號誌控制邏輯可以隨時間與空間的變化而調整週期長度，並將控制指派與動態交通量指派 (Dynamic Traffic Assignment, DTA) 整合進行改良。

RHODES (Real-Time Hierarchical Optimized Distributed Effective System)

RHODES 以最佳化幹道或路網之路口績效為主要目標^[31]。RHODES 藉由演算法預測下一分鐘之隨機車流到達型態，判斷為單一車輛或為車隊形式，並主動及早調整號誌時制計畫使預期的車流可以順利通過路口。RHODES 並無固定週期、時差之概念，其控制邏輯設置於路口旁，藉由路口間的 P2P 串連分享即時車流資訊，並透過 PREDICT 模式推估上游車輛或車隊到達路口之時間，以最小化總延滯的目標下求解最佳化時比分配，再回饋至路口對號誌控制器下達時相指令。RHODES 之偵測器除佈設於每車道停止線辨識等候線存在與否，並額外設置於中游路段各車道蒐集流量、速度等車流資料，故偵測器需求較其他模式多，但預測結果也更貼近實際情況。

InSync

InSync 屬於影像式適應性號誌控制系統^[32,33]，該系統透過架設於停止線之影像式偵測器監控車流，並透過路口後臺電腦之影像處理軟體取得車流資料，計算等候線長度與佔有率，以規劃車隊通過幹道之時間隧道 (Time Tunnel)，再調整路口號誌時制計畫配合幹道車隊有效續進。該系統以綠燈帶寬最大化為目標，並運用剩餘時間間隔執行幹道左轉保護時相與支道時相。若隧道時間甫結束，則切換為支道綠燈，綠燈時間之長度由模式計算支道等候線長度紓解時間為依據。

SAST (Stepwise Adjustment of Signal Timing)

SAST 全名為號誌時制逐步調整法^[34]，該模式將偵測器設置於路段上下游，取得車流資料以車流模式推估車輛推進狀況，透過四個決策準則判斷是否延長一個時階的綠燈，其準則內容分別為：判斷路口競爭需求、等候線長度比較、延長綠燈長度得失比較，以及延滯極小化，前三者為基本準則分析，第四步驟則為最佳化評估。該研究雖然未經實地驗證，但根據其相關研究模擬實驗結果得知，其績效確實較定時號誌控制與觸動式號誌控制優異。

李月仙^[35]以二維座標法建構微觀汽機車混合車流模擬模式，並針對其動態車長計算公式，改以加速度值決定推進能力，避免因前車產生過高的減速度。該研究將此推進預測模式帶入 SAST 模式中，透過蒐集實地資料，並與固定時制控制以及動態時制控制進行比較，結果顯示 SAST 模式之績效確實優於定時控制邏輯。

國內發展之適應性號誌控制邏輯

國內適應性號誌控制邏輯相關研究可追溯至 1980 年代末期，早期適應性號誌控制稱為「動態計算控制策略」，最早進行相關研究為何志宏教授團隊，相關研究成果陸續在 1988 年以後發表^[36-41]，並逐步發展適用國內道路情境之適應性號誌控制邏輯 COMDYCS 系列，其可適用於小型路網、雙時相、純車流情境。隨著模式架構完善與電腦運算力加強，相關研究也分別開始發展，張堂賢與張智華^[42]發展「兩階段水平推移法」，改善號誌控制績效；吳榮顯^[43]、Chiou and Huang^[44]藉由模糊原理應用於適應性號誌決策邏輯，以基因模糊邏輯控制 (Genetic Fuzzy Logic Controller, GFLC) 與混合格位傳遞模式 (Mixed Traffic Cell Transmission Model, MCTM)，發展混合車流環境下路口號誌連鎖。蔡滌塵^[45]、胡守任與蔡滌塵^[46]分別延續何志宏教授之研究，以 COMDYCS 為基礎，納入線上轉向比估計模式，而葉志章^[47]則再進一步發展混合車流 CTM 車流預測模式，並將左轉保護時相以附加時相的方式加入決策邏輯。是故國內目前在適應性號誌控制邏輯研究上，呈現多路並進的局面。本文將針對主要參考之 COMDYCS 適應性號誌控制邏輯，以及相關研究進行回顧。

COMDYCS-III

何志宏^[38]以 SAST 之架構為基礎所開發「第三代電腦化全動態交通控制系統 COMDYCS-III 模式」，該模式屬於週期內號誌控制邏輯，其透過路段上游與下游兩組偵測器蒐集車流資料，以計算路口各路段之等候線長度與總延滯時間，再依據六級決策判斷是否延長或結束綠燈。該模式即時性決策模式有處理獨立路口號誌時制最佳化的能力，但在處理都市幹道連鎖與路網控制之狀況，仍有改進空間。

李樑堅^[39]延續李月仙^[35]之研究，以二維座標法跟車理論為基礎，加入前車之車種限制與駕駛人冒險因子的特性，在黃燈狀況則是以動態進退兩難區來描述，結合以上情境建構微觀車流模式，代入 COMDYCS-III 決策模式。該研究之混合車流係透過切割快車道外側供純機車行駛，部分冒險機車選擇加入汽車車流跟車前進。經臺南市區幹道實地驗證，該研究所構建之系統確實在路口與幹道連鎖的表現，相較於定時控制、半觸動控制法、SAST 等號誌控制方法，則有較佳之績效。

COMDYCS-3E

林豐福等人^[48,49]、陳一昌等人^[50,51]針對 COMDYCS-III 問題提出改良版本的適應性號誌控制模式，稱之為 COMDYCS-3E 模式。相較於 COMDYCS-III，該模式改變車輛偵測器佈設位置，僅保留路段中游之車輛偵測器；車流推進與預測模式由自由車流修正為多元迴歸模式；以歷史資料估計車流轉向比。計算出車流績效後，沿用原有六級決策判斷延長綠燈或變換時相。該模式透過 Paramics 車流模擬軟體進行模式驗證與績效分析，並於 2003 至 2006 年間逐步將其實務驗證應用於臺南市之單一路口、幹道與口字型路網中。

吳悅慈^[40]改良原有之 COMDYCS-3E 模式，以「個別路口自行運作，並輔以幹道雙向鄰近路口車輛到達資訊續進控制」的決策方式，其幹道群組內各個路口以原 COMDYCS-3E 模式進行決策，並將幹道車流資訊納入模式考量，並進一步納入相鄰路口車流到達之資訊，併入決策路口的車流預測模式中，在車流預估部分則配合路口轉向比與號誌時相之推估，用以增加決策路口的事前資訊，提昇路口延滯運算績效，最佳化相關決策邏輯。且該系統調整六級決策中得失比

判斷，透過幹道方向車輛的旅行延滯加權，使號誌時制決策會較偏向延長幹道方向的綠燈時間，增加幹道車流能夠續進的機會。

然而 COMDYCS-3E 採用多元迴歸分析之車流模式，在應用上需針對不同路口進行參數校估；且該系統僅適用於快車道純車流之環境，未考慮臺灣汽、機車混合車流為主之交通環境；車流轉向比估計採用歷史資料，在實務上會有依時性之誤差，後續研究均以改善以上問題為目標。

COMDYCS 整合中觀 CTM 車流模式與轉向比估計

蔡滌塵^[45]、胡守任與蔡滌塵^[46]參考 COMDYCS-3E 適應性號誌控制邏輯架構，調整原有之車流推進與預測模式，以及六級決策內容，提昇其適應性號誌控制邏輯之績效目標。藉由 CTM 模式作為車流推進模式，簡化系統參數校估之需求。相較於多元迴歸之車流模式，CTM 模式可以更便利提供高準確性之車流推進估計狀態。此外，該研究以流量守恆概念，構建即時轉向比推估模式，更能符合當下交通狀況。參考原有六級決策之架構建立合適之判斷指標，其成果顯示無需依賴歷史資料進行參數驗證，達到完全運用即時交通資料運算車流推進與轉向比，據以進行號誌最佳化演算。儘管如此，相關模式之部分參數有待校估與驗證，且僅適用於純車流的環境，與國內混合車流環境仍有應用上的落差。

COMDYCS 整合中觀 CTM 混合車流模式與轉向比估計

葉志韋^[47]延續蔡滌塵^[45]的研究，納入混合車流特性以改良 CTM 車流推進模式，並透過臺南市區幹道實地調查驗證參數與模型績效。同時，沿用蔡滌塵^[45]所建構之轉向比推估模式，在六級決策加入左轉時相的決策條件。將改良後之適應性號誌控制邏輯與定時號誌控制以及觸動式號誌控制進行績效比較。研究結果顯示，不論是等候線長度、停等次數與平均每車延滯，適應性號誌控制均較其他兩者有明顯的優勢。

COMDYCS 整合微觀 CA 混合車流模式與轉向比估計

在中觀的車流模式中，無法有效描述接近路口 / 路段之車輛加減速現象與變換車道行為，且車種推進順位會影響下游路口之流量估計，進而影響下游號誌控制所需的延滯時間與等候線長度等績效指標之計算，造成適應性號誌控制之績效不佳。從過去研究結果顯示，微觀

車流模式雖有較佳之車流預測績效，但運算量大，較不適合短時間運算需求之週期內適應性號誌控制邏輯。在發展都市幹道車流模式，如何兼顧車流預測的準確性與即時運算之需求，以符合適應性號誌控制邏輯為一重要課題。因 CA 車流模式僅以車速與周圍車輛距離估計跟車與變換車道行為，透過空間離散化可有效減少車流推進在運算上的複雜度。林定憲^[21]延續葉志韋^[47]所設計之修訂版 COMDYC-3E 架構，應用 CA 車流模型建構符合國內都市幹道之汽、機車混合車流推進與預測模式，提高車流預測與輸出績效的準確度，進而發展適用於我國都市車流型態之適應性號誌控制模式，改善號控績效與滿足線上即時運算之需求。

修訂版 COMDYC-3E

本研究團隊以修訂版 COMDYC-3E 為基礎，將左轉保護時相納入原始 COMDYC-3E 之六級決策邏輯中，並加入 CTM 混合車流推進模式與路口轉向比模式。修訂版 COMDYC-3E 設定績效指標優先考量等候線長度，其次為延滯時間。以下為修訂版 COMDYC-3E 之六級決策模式說明。

1. 第零級決策：最小綠燈時間限制

若決策點距綠燈始亮時間，未超過所設定之最小綠燈時間，則延長一個時階 Δt 的綠燈時間。

2. 第零級決策：最大綠燈時間限制

若決策點距綠燈亮起時間，已經超過所設定之最大綠燈時間，則於本時階 Δt 結束後切換時相。

3. 第一級決策：綠燈時相任一方向等候線長度大於門檻值

若綠燈時相之任一方向等候線長度大於門檻值時，表示目前車多必須紓解，故延長一個時階 Δt 的綠燈時間。

4. 第二級決策：競爭時相所有方向等候線長度皆為 0

若競爭時相的所有方向等候線長度皆為 0 時，表示競爭方向尚未有車流到達路口，故延長一個時階 Δt 的綠燈時間。

5. 第三級決策：競爭時相所有方向等候線長度未達門檻值

若競爭時相的所有方向之等候線長度未達門檻值，則表示競爭方向的等候線長度未達紓解需求，故延長一個時階 Δt 的綠燈時間。

6. 第四級決策：延長綠燈績效較現況佳

以 K 個時階為長度，預測在持續延長綠燈時間之情況下，每個時階的車流推進狀況與估算之延滯指標，若有任一時階其延長綠燈時間之績效，較現階段績效佳，則表示延長綠燈預期可以達到較好的績效，故延長一個時階 Δt 的綠燈時間。

7. 第五級決策：綠燈時相方向車輛數多於紅燈時相方向

比較現階段綠燈時相方向與紅燈時相方向的車輛數，若綠燈時相方向的車輛數大於紅燈方向，則表示綠燈時相方向有較大的需求，故延長一個時階 Δt 的綠燈時間。

8. 第六級決策：綠燈時相車隊尚未紓解

若綠燈方向任一等候線長度大於 50 公尺，則為確保等候線內車輛皆能在一個綠燈時相內通過路口，故延長一個時階 Δt 的綠燈時間。

9. 左轉保護時相決策：左轉車輛數

本決策限左轉保護時相使用，若左轉保護時相之行車方向其候車彎或近路口 30 公尺（相當於一個格位長度）處皆無車輛時，表示已無立即的左轉車輛需求，故於本時階 Δt 結束後切換時相。

實證分析

以下將介紹本研究團隊所開發中觀 CTM 混合車流模式結合修訂版 COMDYC-3E 適應性號誌控制邏輯之實證結果^[47]。所建構之適應性號誌控制邏輯，在 VISSIM 建構之模擬情境中進行測試與績效評估，並與定時號誌控制、觸動式號誌控制比較。實證研究的預設情境設計為單 1 個路口連接 4 個路段（兩幹道與兩支道）。各路段為 4 車道（一左轉彎、一快車道、一混合車道、一機車道）。預設轉向比為 60% 直行、20% 左轉、20% 右轉。幹道車流量設定為汽車 800 輛/小時、機車 1,600 輛/小時，而支道車流量為幹道之一半。

CTM 混合車流模擬情境實證分析

根據上述設定之情境內容，在 VISSIM 模擬軟體中進行模擬工作，相關輸出資料視為真值。藉由初始車流資料與參數輸入於 CTM 推進模式模擬程式中，進行推進模式估計值之演算。演算之結果將與模擬情境之真值相互比較，計算各格位推進車輛與格位內車輛

數之均方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE)。若以各車道、各格位逐一分析 CTM 車流推進的績效時，可能出現車輛距路口位置相同，但車道不同，產生偏誤之狀況。故設定將格位車輛數、紓解數皆由同一位置、不同車道之車輛數加總計算，並非逐一車道分別考量，以避免上述問題發生。

該情境設計目的為測試四個方向同時進行演算之線上運算能力，並了解在車輛數有差之主幹道情況下，其預測準確度之表現。在演算能力方面，實際執行時間略高於單一方向之情境，但仍可在數十秒內完成一小時的車流預估模式演算，顯示方向增加並不會造成系統過大的負擔。有關車流預測之結果，如表 1 所示。「推進」表示模擬時間內，預測特定車種、由特定格位離開之 RMSE 值；「數量」表示模擬時間內，預測特定車種、位於特定格位之 RMSE 值。在幹道與支道預測的準確度比較方面，雖然兩者車輛到達率不相等，因格位的紓解時間相近，且紓解後的預測值與真值相近，因此顯示推進之準確度不易受到車流量多寡之影響；在格位內車輛數預測方面，格位內車輛數之期望值，幹道應為支道的 2 倍，故 RMSE 值可能亦會呈現幹道為支道的 2 倍；但實際上幹道的 RMSE 值略低於支道的 RMSE 值，可能原因為幹道擁有較長的綠燈時比，且預測準確度較準的時段為綠燈時相，故若綠燈時比越長，準確預測的樣本數越多，此時整體的 RMSE 就會下降，進而影響模式的整體績效表現。

適應性號誌控制邏輯實證分析

在完成 CTM 混合車流模式之驗證後，可以進一步導入適應性號誌控制邏輯。本研究以一個小時為模擬時間，進行適應性號誌控制系統的實證分析。藉由相同的情境設定，各方向之車道寬度與設計內容，如表 2 所示。

在號控邏輯的比較部分，除了評估本研究開發之適應性號誌控制邏輯之外，亦加入定號誌控制與觸動式號誌控制，做為評估號控邏輯績效優劣之比較基準。各個號誌控制方式之時相長度、週期長度，以及 Synchro plus SimTraffic 7 計算之期望每車延滯時間，整理如表 3。

表 1 各格位數據推估誤差量

		格位一 (上游)	格位二	格位三	格位四	格位五 (下游)
幹道 1	汽車推進	0.51	0.62	0.66	0.68	0.72
	機車推進	1.04	1.38	1.64	1.59	1.6
	汽車數量	0.53	1.02	1.58	1.97	2.53
	機車數量	1.85	3.3	4.63	5.61	6.11
幹道 2	汽車推進	0.52	0.67	0.67	0.64	0.67
	機車推進	1.06	1.38	1.68	1.66	1.61
	汽車數量	0.68	1.24	1.66	1.77	2.47
	機車數量	2.11	3.35	5.19	5.71	6.23
支道 1	汽車推進	0.23	0.31	0.43	0.51	0.51
	機車推進	0.36	0.59	0.88	1.13	1.25
	汽車數量	0.17	0.29	0.84	1.65	2.03
	機車數量	0.27	0.58	2.12	3.48	3.88
支道 2	汽車推進	0.24	0.38	0.46	0.52	0.54
	機車推進	0.36	0.54	0.86	1.12	1.23
	汽車數量	0.18	0.53	1.15	1.69	2.32
	機車數量	0.28	0.53	2.23	4.14	4.89

表 2 各方向車道配置與設計

[行車方向→]	車道寬度	其他
左轉候車彎	3.5 公尺	長度約為 30 公尺
快車道	3.5 公尺	
混合車道	3.5 公尺	設機慢車停等區
機慢車優先道	1.8 公尺	長 5 公尺、寬 5.3 公尺

在績效評估方面，透過 VISSIM 內建之績效評估元件，分析號誌控制績效，包含平均每車延滯、平均每車停等次數、路段等候線長度等三種，以評估三種號誌控制邏輯彼此間之優劣。

表 3 各號誌控制方式之時相長度設計與期望每車延滯

單位：秒

控制方式	時相內容	幹道綠燈時相	幹道左轉保護時相	支道綠燈時相	支道左轉保護時相	週期長度	期望每車延滯
適應性號誌	最小綠燈	10	4	10	4	N/A	N/A
	最大綠燈	53	16	26	10	105	55.78
定時時制	時相長度	36	12	19	8	75	38.17
觸動式號誌	最小綠燈	10	4	10	4	N/A	N/A
	最大綠燈	53	16	26	10	105	55.78

在平均每車延滯方面，可分析車輛在通過路口時，因號誌控制系統等外在因素影響，而增加之旅行時間。

平均每車延滯評估結果，如表 4 所示。根據表 4 的資料顯示，在系統內平均每車延滯時間部分，適應性號誌與定時號誌差距不大，前者僅略高於後者不到 1%；但與觸動式號誌相比，觸動式號誌較適應性號誌多出 10% 之延滯時間。從各轉向來看，適應性號誌與定時號誌對直行車所造成的延滯時間相近，但觸動式號誌對直行車產生之延滯時間較適應性號誌控制高；左轉部分，定時號誌績效普遍優於適應性號誌。觸動式號誌，則普遍較適應性號誌為差；右轉部分，適應性號誌普遍優於其他兩者。從中可看出，修訂版 COMDYC-3E 適應性號誌控制邏輯可以有效減少綠燈時間之浪費，使其績效與定時號誌相近，但觸動式號誌因未考量機車的到達，無法針對機車的數量做出適當的決策，造成整體延滯上升。在轉向部分，在左轉之延滯結果中可以發現，適應性號誌之績效普遍差於兩者，可能原因為左轉候車彎仍有車輛待紓解，但模式預估左轉候車彎內已無車輛，提早結束綠燈時相有關，使得延滯上升。

表 4 各號誌控制邏輯之平均每車延滯時間

單位：秒

行駛方向	適應性	定時式	差距 %	觸動式	差距 %
幹道 1 直行	23.92	24.97	4.38	29.10	21.64
幹道 2 直行	24.72	24.05	-2.71	28.82	16.61
支道 1 直行	41.11	38.68	-5.90	44.26	7.67
支道 2 直行	42.96	41.49	-3.43	43.33	0.85
幹道 1 左轉	52.37	44.10	-15.79	47.39	-9.52
幹道 2 左轉	46.89	62.75	33.82	49.29	5.12
支道 1 左轉	55.95	46.88	-16.21	44.05	-21.26
支道 2 左轉	52.09	42.91	-17.61	49.19	-5.56
幹道 1 右轉	25.74	31.92	23.99	33.81	31.32
幹道 2 右轉	26.37	25.77	-2.27	29.49	11.85
支道 1 右轉	46.09	45.31	-1.69	43.95	-4.65
支道 2 右轉	48.17	52.34	8.66	51.66	7.26
系統平均	32.33	32.14	-0.58	35.54	9.93

在平均每車停等次數方面，可分析車輛在通過路口時，因號誌控制系統等外在因素影響，造成車輛停止之次數。以停等次數來看（如表 5 所示），就系統平均值而言，適應性號誌停等次數優於其他兩者。若單純就直行或其他轉向部分，適應性號誌普遍可以有效減少停等次數。並有效確保車隊之續進功能，進低車隊臨時被號誌阻斷之機會，使其停等次數降低。然而，在左轉部分，因觸動式號誌可有效偵測左轉候車彎之車輛疏解，故停等次數較適應性號誌少。

表 5 各號誌控制邏輯之平均每車停等次數

單位：秒

行駛方向	適應性	定時式	差距 %	觸動式	差距 %
幹道 1 直行	1.16	1.30	12.09	1.52	30.64
幹道 2 直行	1.24	1.25	0.89	1.44	16.21
支道 1 直行	1.25	1.32	5.47	1.32	5.07
支道 2 直行	1.34	1.44	6.79	1.25	-6.89
幹道 1 左轉	1.14	1.03	-9.30	1.01	-11.63
幹道 2 左轉	1.07	1.46	36.61	1.12	4.25
支道 1 左轉	1.13	1.14	1.14	0.96	-14.86
支道 2 左轉	0.94	1.00	6.78	0.90	-3.55
幹道 1 右轉	1.29	1.96	52.02	2.05	59.36
幹道 2 右轉	1.40	1.57	12.07	1.77	26.53
支道 1 右轉	1.77	1.88	6.02	1.88	6.36
支道 2 右轉	1.61	1.71	6.34	1.80	12.18
系統平均	1.27	1.37	7.79	1.48	16.66

透過等候線長度的平均值與最大值的計算，可以了解各方向車輛受號誌影響而產生等候線之長度，等候線愈長，表示該號誌之紅燈時相影響車輛數愈多。表 6 為各號誌控制邏輯之下等候線長度之評估結果，由該表可看出，定時號制之等候線長度普遍低於適應性號誌控制，顯示每個紅燈時相阻隔的車輛數較少；觸動式號誌則是普遍高於適應性號誌，顯示觸動式號誌阻隔較多的車輛。定時號誌因時相長度固定，等候線長度之期望值相近、且變異不大，相較之下，適應性號誌之時相長度雖然不固定，但較固定時制號誌長，且期望值之變異較大，造成該績效項目表現不如定時號誌。觸動式號誌因為僅考量綠燈方向之車輛到達狀況，未考量紅燈方向之車輛數，故有較長之等候線數量產生。

表 6 各號誌控制邏輯之各方向等候線長度

單位：公尺

	行駛方向	適應性	定時式	差距 %	觸動式	差距 %
平均值	幹道 1	18.03	18.54	2.84	23.50	30.29
	幹道 2	20.49	19.70	-3.87	22.91	11.81
	支道 1	17.64	16.53	-6.28	17.88	1.37
	支道 2	17.87	17.40	-2.64	17.68	-1.05
最大值	幹道 1	79.74	75.03	-5.90	94.66	18.72
	幹道 2	91.10	78.81	-13.48	109.15	19.82
	支道 1	67.07	62.93	-6.16	63.76	-4.93
	支道 2	51.93	57.44	10.60	64.28	23.77

原始情境預設幹道與支道為固定到達車流量，本研究另外設計變動到達流量，將原始固定車輛到達率，對四個方向、二個車種，隨機給予正負 10% 之增減，並假設車輛到達分布為 Poisson Distribution，作為

表 7 固定與變動到達率之號誌績效與變動幅度

延滯單位：秒 等候線單位：公尺

績效指標	適應性號誌			定時號誌			觸動式號誌		
	固定到達	變動到達	增幅 (%)	固定到達	變動到達	增幅 (%)	固定到達	變動到達	增幅 (%)
每車延滯	32.33	33.33	3.09	32.14	83.54	159.93	35.54	38.79	9.14
停等次數	1.27	1.38	8.66	1.37	4.54	231.39	1.48	1.78	20.27
最大等候線長度	91.10	92.19	1.20	78.81	316.45	301.54	109.15	138.83	27.19

產生車輛數之依據，以模擬出車流量短時間與長時間之到達率皆出現隨機變動之狀況。根據該車流變動狀態下，測試不同號誌邏輯之績效。表 7 分別比較固定與變動到達率下，不同號誌邏輯的績效指標。從該表中可看出，當車輛到達率為隨機變動時，適應性號誌僅會較原固定到達率，增加不到 10% 的負向績效，顯示其因應變動需求的能力，為三種控制方式中最佳的一種控制方式，而定時號誌所預定的時制計畫無法因應車流隨機變動的情況，造成績效變差。觸動式號誌則與適應性號誌之特性較為接近，因號誌時相決策指標為車頭距，可因應流量變化而給予不一樣的綠燈長度，故績效指標會優於定時號誌管制方式。

本研究以 CTM 混合車流模式為基礎，進行都市幹道車流推進預測與轉向比推估，並應用至適應性號誌控制邏輯，以單一路口測試其績效表現。在模式評估方面，本研究以三種績效指標（即：平均每車延滯、平均每車停等次數，以及路段等候線長度）評估定時號誌、適應性號誌控制與觸動式號誌之優劣。初步模擬實驗結果顯示，混合車流的 CTM 模式結合適應性號誌控制邏輯，可應用於單一路口之號誌控制，具一定的競爭優勢，可適時降低路口車輛停等次數與減少行車延滯。且當車流量出現隨機變化時，其適應能力亦優於定時號誌與觸動式號誌。

結論與建議

適應性號誌控制系統為目前各國積極開發之號誌控制系統，主要的原理係根據即時蒐集取得之交通資訊，透過車流推估、績效評估等方式，提供號誌控制系統進行路口線上車流控制的決策建議。本研究探討之適應性號誌控制系統，係根據蔡滌塵^[45] COMDYCS-3E 適應性號誌控制邏輯新增左轉保護時相，並搭配 CTM 混合車流模式與轉向比估計模式，以因應國內汽、機車混合車流之現象，據以進行都市號誌控制實務之應用。

經由實證分析結果顯示，本研究所開發之解析性 CTM 中觀車流模式，對於都市幹道車流的推進，不僅有相當程度的預測能力，且對系統演算負擔小，具備快速運算等特點。本研究進一步將 CTM 混合車流模式，結合路口轉向比估計模式，與修訂版 COMDYC-3E 號誌控制決策模式，建構出一套完整的適應性號誌控制邏輯。實證研究以單一路口在固定或變動到達率為測試基礎，評估結果顯示，在固定到達率之情況下，適應性號誌控制邏輯與定時號誌控制之績效相近，但在車流量出現變動時，本研究發展的適應性號誌控制邏輯可以適應該變動，使其績效表現優於另外兩項號誌控制系統。

本研究目前僅測試於單一路口情境，尚未將此適應性號誌控制邏輯擴展至幹道與路網。倘若控制範圍增大，則須考慮區域聯控的時空特性，據以規劃適用於都市幹道或路網的適應性號誌控制邏輯之決策模式。

參考文獻

1. Prigogine, I. and Andrews, F.C. (1960). A Boltzmann-Like Approach for Traffic Flow. *Operations Research* 8, 789-797.
2. Helbing, D. (2001). Traffic and Related Self-driven Many-particle Systems. *Reviews of Modern Physics* 73, 1067.
3. Daganzo, C.F. (1994). The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory. *Transportation Research Part B: Methodological* 28, 269-287.
4. Buckley, D.J. (1968). A Semi-Poisson Model of Traffic Flow. *Transportation Science* 2, 107-133.
5. Branston, D. (1976). Models of Single Lane Time Headway Distributions. 10, 125-148.
6. Mahnke, R. and Kühne, R. (2007). *Probabilistic Description of Traffic Breakdown*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 527-536.
7. Pipes, L.A. (1953). An Operational Analysis of Traffic Dynamics. *Journal of Applied Physics* 24, 274-281.
8. Gazis, D.C., Herman, R., and Rothery, R.W. (1961). Nonlinear Follow-The-Leader Models of Traffic Flow. *Operations Research* 9, 545-567.
9. Wiedemann, R. (1974). *Simulation des Strassenverkehrsflusses*. Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
10. Neumann, J.V. and Burks, A.W. (1966). *Theory of Self-Reproducing*

- Automata. University of Illinois Press.
11. Barlovic, R., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M., (1998). Metastable States in Cellular Automata for Traffic Flow. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems* 5, 793-800.
 12. Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M., (2000). Towards a Realistic Microscopic Description of Highway Traffic. *Journal of Physics A: Mathematical and General* 33, 477-485.
 13. Nagel, K., Schreckenberg, M., (1992). A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. *Journal de Physique I* 2, 2221-2229.
 14. Wolfram, S., (1983). Statistical Mechanics of Cellular Automata. *Reviews of Modern Physics* 55, 601-644.
 15. Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A., and Schreckenberg, M. (2002). A Realistic Two-lane Traffic Model for Highway Traffic. *Journal of Physics A: Mathematical and General* 35, 3369-3388.
 16. Rickert, M., Nagel, K., Schreckenberg, M., and Latour, A. (1996). Two Lane Traffic Simulations Using Cellular Automata. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 231, 534-550.
 17. Spyropoulou, I. (2007). Modelling a Signal Controlled Traffic Stream Using Cellular Automata. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 15, 175-190.
 18. 張瓊文 (2004), 「以模糊推論系統與細胞自動機方法探討混合車流環境下機車行進行為」, 交通大學運輸科技與管理學系博士論文。
 19. 張永克 (2010), 「雙車道大小型車車流細胞自動機模式構建與分析」, 中華大學運輸科技與物流管理學系碩士論文。
 20. 邱裕鈞、藍武王、鐘仁傑、許志誠、林日新 (2010), 「兩階段模糊邏輯控制之匝道儀控細胞自動機模擬」, 運輸學刊, 第 22 卷第 2 期, 第 159-184 頁。
 21. 林定憲 (2016), 「應用細胞自動機構建適用於適應性號誌控制邏輯之混合車流模式」, 成功大學交通管理科學系碩士論文。
 22. Miller, A.J. (1963). A Computer Control System for Traffic Networks. University of Birmingham, Graduate School in Highway & Traffic Engineering, Birmingham, England.
 23. Rosdolsky, H.G. (1973). A Method For Adaptive Traffic Control. *Transportation Research* 7, 1-16.
 24. Hunt, P.B., Robertson, D.I., Bretherton, R.D., and Winton, R.I. (1981). SCOOT - A Traffic Responsive Method Of Coordinating Signals. Publication of: Transport and Road Research Laboratory, 41 p.
 25. Sims, A.G. and Dobinson, K.W. (1980). The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) System Philosophy and Benefits. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 29, 130-137.
 26. Luyanda, F., Gettman, D., Head, L., Shelby, S., Bullock, D., and Mirchandani, P. (2003). *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1856, 175-184.
 27. Friedrich, B. (2000). STEUERUNG VON LICHTSIGNALANLAGEN, BALANCE - EIN NEUER ANSATZ.
 28. Busch, F. and Kruse, G. (2001). MOTION for SITRAFFIC - A Modern Approach to Urban Traffic Control, ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585), pp. 61-64.
 29. Vincent, R.A. and Peirce, J.R. (1988). 'MOVA': Traffic Responsive, Self-Optimising Signal Control For Isolated Intersections. Transport and Road Research Laboratory (TRRL) Research Report 170.
 30. Gartner, N.H. (1990). OPAC: Strategy for Demand-responsive Decentralized Traffic Signal Control. *IFAC Proceedings Volumes* 23, 241-244.
 31. Mirchandani, P. and Head, L. (2001). A Real-time Traffic Signal Control System: Architecture, Algorithms, and Analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 9, 415-432.
 32. ChandraJames, R.J., BleyStephen, W., PenrodArthur, S., and Parker, S. (2011). *Adaptive Control Systems and Methods*, US 8050854 B1, Rhythm Engineering, LLC, US.
 33. ChandraJames, R.J., BleyStephen, W., PenrodArthur, S., and Parker, S. (2012). *External Adaptive Control Systems and Methods*, US 8103436 B1, Rhythm Engineering, LLC, US.
 34. Lin, F.B., Wang, N., and Vijayakumar, S. (1987). Development of an Intelligent Adaptive Signal Control Logic, in: Sam Yagar (Ed.), *Engineering Foundation Conference on Management and Control of Urban Traffic*, Henniker, N.H, pp. 257-279.
 35. 李月仙 (1989), 「微觀車流模擬模式與適應性交通控制策略之整合研究」, 成功大學交通管理科學系碩士論文。
 36. 黃泰林 (1988), 「電腦化交通控制系統中流量預測模式之比較及其實證研究」, 成功大學交通管理科學研究所碩士論文。
 37. 黃泰林 (1993), 「構建智慧型適應性網路號誌控制模式之研究」, 國立成功大學交通管理科學研究所博士論文。
 38. 何志宏 (1991), 「最新全動態交通號誌控制技術開發計畫」, 成功大學交通管理科學系。
 39. 李樑堅 (1993), 「建立微觀車流模擬模式以發展交通適應性號誌控制邏輯之研究」, 成功大學交通管理科學系博士論文。
 40. 吳悅慈 (2011), 「幹道群組適應性號誌控制模式之開發研究」, 成功大學交通管理科學系博士論文。
 41. 何志宏、徐國鈞、蔣封文、石家豪、吳悅慈 (2004), 「應用車隊擴散理論於構建巨觀型網路適應性號誌控制模式之研究」, 運輸學刊, 第 16 卷第 4 期, 第 303-332 頁。
 42. 張堂賢、張智華 (2004), 「應用智慧型號誌控制器執行適應性交通控制之研究」, 運輸計劃季刊, 第 33 卷第 1 期, 第 203-226 頁。
 43. 吳榮顯 (2004), 「連續路口之適應性基因模糊邏輯號誌控制系統」, 國立交通大學運輸與物流管理學系碩士論文。
 44. Chiou, Y.-C. and Huang, Y.-F. (2013). Stepwise Genetic Fuzzy Logic Signal Control under Mixed Traffic Conditions. 47, 43-60.
 45. 蔡滌塵 (2013), 「應用格位傳遞模式與轉向比估計於適應性號誌邏輯之構建」, 國立成功大學交通管理科學系碩士論文。
 46. 胡守任、蔡滌塵 (2016), 應用格位傳遞與轉向比估計模式於適應性號誌控制邏輯之構建, 運輸學刊, 第 28 卷第 1 期, 第 35-81 頁。
 47. 葉志韋 (2014), 「以改良格位傳遞模式構建混合車流狀況之適應性號誌控制邏輯」, 成功大學交通管理科學系碩士論文。
 48. 林豐福、張開國、張仲杰、何志宏、丁國樑、黃泰林、顏應明、徐國鈞、魏健宏、林佐鼎、石家豪、蔣封文、吳悅慈、莊捷媚 (2004), 「都市交通號誌全動態控制邏輯模式之研究 (I)」, MOTC-IOT-92-SBB03, 交通部運輸研究所。
 49. 林豐福、張開國、張仲杰、何志宏、石家豪、蔣封文、吳悅慈、莊捷媚 (2005), 「都市交通號誌全動態控制邏輯模式之研究 (II) - 單一路口實例研究」, MOTC-IOT-92-SBB03, 交通部運輸研究所。
 50. 陳一昌、張仲杰、何志宏、邱素文、顏應明、丁國樑、魏健宏、林佐鼎、徐國鈞、石家豪、蔣封文、吳悅慈、莊捷媚 (2006), 「都市交通號誌全動態控制邏輯模式之研究 (III) - 幹道路口實例研究」, MOTC-IOT-94-SDB001, 交通部運輸研究所。
 51. 陳一昌、張開國、張仲杰、何志宏、邱素文、徐國鈞、石家豪、蔣封文、吳悅慈、莊捷媚 (2007), 「都市交通號誌全動態控制邏輯模式之研究 (IV) - 網路路口實例研究」, MOTC-IOT-95-SDB001, 交通部運輸研究所。