

[研究新領域報導]

統計物理在交通現象的應用

中原大學物理系 黃定維

近年來，隨著統計物理的快速發展，許多所謂的複雜系統也逐一成為物理研究的焦點，舉凡沙丘的形成、微生物的繁衍、甚至股票市場的起伏，都可以看見物理學家涉獵其中，公路上的車流行為則是另一個明顯的例子。研究人員之所以對這些現象感到興趣，不僅是想瞭解現象背後運作的基本原理，也希望能夠結合基礎研究與工程應用，以致能把研究成果更直接地運用於解決日常生活所碰到的實際問題。

在現代化的都會生活中，上下班尖峰時間的交通壅塞幾乎成了無可避免的困擾，一方面政府忙著興建大眾捷運系統、拓寬道路、或是制定限制汽車數量成長的政策，另一方面，科學家與工程師也試著對此課題深入研究。簡單而言，交通壅塞的關鍵在於車多路少，然而問題不可能僅依靠興建更多、更寬廣的道路而獲得解決，所以還是必須試著找出道路使用的最有效方法。研究人員一方面建構數學模型、進行電腦模擬，希望能瞭解壅塞的緣由，同時也試著提出可行的方案。近年來，由於物理學家的參與研究，提出了許多不同於傳統交通工程中所慣用的模型，這些模型在引發爭議的同時，卻也讓我們對壅塞的現象有了更進一步的瞭解。隨著統計物理與電腦科技的進步，即時的交通預報已成為可行的方案，對於下一階段有效地解決壅塞問題，將有莫大的助益。

對於交通現象的研究，已有超過半世紀的歷史。隨著二十世紀中期汽車數量的快速成長，對於車流現象的瞭解與掌控也就成為現代化都市必須面對的課題之一，而其中基礎科學與應用工程的觀點則略有不同。物理學家總希望能找到一個簡單的模型，透過清晰的物理概念與明確的數學方程式，以精簡的方式掌握真實現象中最關鍵的因素。一旦建立模型，後續則以理論分析或電腦模擬對此模型進行更深入的研究，其結果不僅是對抽象模型提供具體的瞭解，同時也對真實現象提供確切的剖析。而工程師的著眼點則在於藉由道路車輛的硬體設計以及號誌控制等軟體工程，致使公路上既有的壅塞現象得以紓解。簡言之，物理研究旨在

瞭解車流壅塞的緣由，而工程應用則更迫切於提供解決之道，此二者之間其實並沒有截然的區別，反倒是攜手並進，相輔相成。

回到研究交通現象的一個基本問題：車流行為是否可能排除諸多人為因素，而單以統計物理的架構來瞭解？如此所建構的模型真的能夠可靠地預測複雜的交通狀況嗎？的確，車流現象顯然是由諸多人為因素所造成，與其說是車輛與車輛之間的交互作用，倒不如說是駕駛人與駕駛人之間的交動關係來得貼切。操控車輛的駕駛人不同於傳統物理所慣常研究的對象，駕駛人的情緒反應和體能狀況也遠超過簡單的數學方程式所能完全掌握，然而近年來許多成功的模型陸續被提出，卻也說明了統計物理的架構的確可以成功地運用於描述車流現象。在現階段研究中，廣為學者所採用的模型可大致分為兩類：巨觀模型與微觀模型。巨觀模型是藉由流體力學的類比，將公路上川流不息的車流視為一可壓縮的流體，其行為由一組偏微分方程式所主導，在巨觀模型中單一車輛的特質完全被忽略，模型中所能描述的僅止於某一路段上的平均車輛密度與平均車輛速度。微觀模型則是以單一車輛為主體，將之視為一小質點，而車流的複雜行為所反應的則是這些質點間的交互作用。隨著採用不同形式的交互作用，微觀模型又可細分為許多小類：有些以氣體動力論的架構出發，將車輛當成互相碰撞的小質點；有些則以牛頓力學出發，寫下決定性的全微分方程式，用以描寫單一車輛的行為；有些模型則放棄微分方程式所隱含的連續性，將公路視為一離散的晶格點，而車輛則是在其上躍動的粒子，遵循一定的行為法則，由於此類模型以離散法則取代連續方程式，因此更容易與電腦模擬相契合，而成為目前研究與應用的新寵。在現階段的研究中，並沒有某一特定模型能充分解釋所有觀測到的現象，各個不同模型在描述真實現象上各有所長，有時也能互相補充，因而各模型之間的關係也就成為現階段的研究重點之一。

以物理學的角度來看，可以將行駛在公路

上的車輛比擬為一非平衡的強關聯系統，而這也是交通現象之所以引人注意的原因。對於一個平衡系統或是弱關聯系統，統計物理已經發展出許多有效的研究方法，如何將之推廣到非平衡的強關聯系統，是許多人有興趣想要探究的，而複雜的車流現象正是一個可以提供檢驗各類研究方法之成效的真實情況。在交通現象中，相圖的分析是否能適用？壅塞現象是否可以瞭解為一相變？一階或高階？序參數為何？溫度的指標是否就是車輛密度？這些都是相當基本的問題，但卻仍未有令人滿意的答案。另外，穩定狀態的車輛分佈如何計算？一個特殊的起始狀態如何隨時間演變成爲特定的穩定狀態？這些都是以基礎科學爲著眼，想要能有所瞭解的問題。甚至回到最原始的問題：最短的路是否就是最快的路？交通流量與車輛密度的關係爲何？而對這些問題的確切掌握，也將能對許多實際應用有所助益，諸如評估高速公路匝道的設計，評估市區路口號誌控制的運作模式，評估道路擴寬或新建道路的影響等。

與其他研究領域相同，一個成功的模型或理論必須仰賴大量精確的實驗數據可供比對；然而基於實際考量，研究交通現象與其他物理研究有一明顯差別，即在於實驗數據的取得。由於交通數據不太容易在實驗室中以可控制的方式取得，僅能倚靠在實際道路上的觀測，而這些數據所反應的不只是車流行爲，更摻雜了無法控制的人爲因素，如駕駛人的情緒、體能等差異，甚至環境因素，如天候、氣象、特殊道路狀況等，如何將這許多因素逐一過濾，以便呈現出單純的車流行爲，仍是一大挑戰與爭議。而從另一個角度來看，隨著道路品質的不斷提升，汽車性能的日益精進，甚至從教育宣導所引致的駕駛行爲改變，都會一再牽動交通現象所呈現出的風貌，而如何在這樣的變遷中展現統計物理的適用性，也將是對研究學者的不斷挑戰與考驗。

然而，近年來由於統計物理的介入，卻也使得我們對交通現象可以有著全然不同以往的詮釋，例如對於眾所周知的壅塞現象，以往總會歸因於道路瓶頸、故障車輛、或是人爲疏失等。簡言之，一定有某些特定原因造成堵車，而若是能設法排除這些原因，也就能紓解交通壅塞。物理學家則提出另一種看法：壅塞現象乃是出於整體系統的不穩定性，未必是由特定原因所造成。有一流行的說法是，在車多的時

候，若是某一駕駛人在跟車過程中不小心將油門（或煞車）踩得重了些，就有可能在稍後造成數公里外的交通壅塞！具體來說，在巨觀模型中，車流行爲可以比擬成流體，而壅塞現象就像是流體在某些過程中會突然凝結成固體而發生的相變，雖然這一類的相變發生在某些局部，但發生的原因卻無法由該局部的特性來解釋，而要歸因於整體系統所處在的不穩定性。只要此種不穩定性仍然存在，壅塞現象就必然會發生，不是這裏堵車，就是那裏堵車，而令人驚訝的是，此種不穩定性的出現卻未必是公路流量已經達到飽和！因而此種不穩定性的排除未必就會導致交通流量的降低，如何能在保持交通流量的同時，卻不讓壅塞出現，正是研究學者目前所想要積極探討的課題。

以物理學的分類來看，此種自發性的相變現象最適合以非線性動力學來加以描述與探討。透過這種研究，公路上的複雜車流行爲可以分類成數個特定的模式，透過分析這些特定模式的特徵，可以成功地描述各類模式隨時間的演變過程，因而可靠地預測其後續發展的趨勢，如此不僅可以提供即時資訊，更有助於控制其發展。此項工作在近年來大有展獲，在傳統的觀點中，公路上的車流現象僅可區分爲兩類：壅塞與自由（無壅塞現象）。如今在此二分現象之外，更觀察到所謂的同步車流現象，亦即在某些情況下，車輛的密度增加，車流的速度變慢了，但彼此的速度差異卻也變小了，因而變換車道的情況銳減，整體交通流量則未見衰減，車陣像是一整塊固體，整齊地移動，而在其中所發生的小規模壅塞現象則似乎總是侷限在公路的入口匝道附近，此發現曾被喻爲交通研究五十年來的重大突破。目前的研究重點則在對此同步車流現象能有更深入的分析與瞭解，並釐清此現象與入口匝道的關聯性。在過去的交通研究中，匝道的影響大多不被考慮，畢竟匝道只佔高速公路的一小部分。然而一旦將壅塞現象理解爲一維空間內非平衡系統中的相變現象，此類相變現象顯然是由邊界效應所引發，而此邊界所對應的就是公路的匝道，匝道對車流現象的影響也就顯而易見，這也促使研究學者重新檢視匝道所扮演的角色，許多學者甚至認爲同步車流現象就是瞭解壅塞現象的最大關鍵。總結來說，此時正是以統計物理來深入探究交通現象的最佳時機，若是能更多投入研究人力與物力，必然會有豐碩的成果。