

交通與物理

黃定維、黃偉能
中原大學物理系

E-mail: dwhuang@phys.cycu.edu.tw

E-mail: wnhuang@phys.cycu.edu.tw

摘要

本文簡介近年來以物理觀點探討交通現象的趨勢，並以建立模型、分析模型、與應用模型做為此一物理研究的特點，俾使有興趣的物理學者得以一同加入此新興領域。

關鍵字：交通現象、交通流量、擁塞現象

在現代都會生活中，交通的便捷與順暢，無疑佔有相當重要的地位，對交通現象的深入研究，因而也必然成為現代化科技進展中的一大課題；然而，以基礎物理的觀點來看，交通現象所反映的似乎是諸多人為因素，而甚少有自然現象，其中又不涉及物質基本組成、基本交互作用等，因而交通現象似乎也常被摒除在基礎物理的研究之外。近年來有許多研究學者開始以物理學的角度來重新探究交通現象^[1,2]，相關的研究成果也在物理期刊中逐年增加，顯然基礎物理的

探討與應用工程略有不同，本文試就近年來以物理學研究交通現象的特點做一簡要的整理與介紹。

建立模型

如果物理學的範疇僅限於探討自然界的現象，則都會生活中的交通現象顯然不屬此一範圍；但若將物理研究定位在探討複雜現象背後的簡單規律性，則交通現象也就成為其中的有趣課題之

一。交通現象雖然因各國風土民情而有所差異，各地的道路狀況有所不同，交通規則的制定也不同，駕駛習慣的差別更是顯著，但在這許多差異的背後，有沒有一些共同的特徵？這便是物理學者想要積極去發掘找尋的。就像是在其他領域的物理研究，一旦掌握了現象背後的規律性，第一步便是建立可靠的模型，利用清晰的數學方式來表達並整理複雜現象背後的簡單規律性。在現階段的研究，在物理文獻中常被討論的交通模型至少有以下三類：流體模型(Hydrodynamic Model)、跟車模型(Car-following Model)、與電腦規則模型(Cellular Automaton)。以下將以高速公路上單一車道的塞車模式為例，簡介此三種模型。

第一、流體力學模型^[3]。若問交通現象可比擬為自然界的那一現象？許多人的直覺反應都會指向河道中的水流現象，日常生活中也常用川流不息來形容道路上的車流，因而此一類模型的歷史也最為悠久。在將交通現象與流體現象做一對比後，選擇以道路上隨時間變化的車輛密度 (x,t) 與速度

$v(x,t)$ 來描述交通現象，並寫下此二函數所遵循的偏微分方程式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot v) = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{\rho}{\tau} [V(\rho) - v] - c_0^2 \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

第一個方程式是流體中的連續方程式，用來表明道路上的車輛數目為一守恒量，不能隨意增減，即車輛不會憑空冒出或消失。若是要探討車輛從交流道進出的影響，則等號右邊應適加修正。第二個方程式則為流體中的 Navier-Stokes 方程式，用來表達動量守恒的概念，等號右邊的三項分別源於外力、壓力與黏滯力的對應，可以想見的是，在交通研究中，這些力的作用僅屬於現象學的範疇，而非基本交互作用。而等號右邊的函數 $V(\rho)$ 則是一關鍵性的現象學參數，用來表明在某一車輛密度 ρ 之下，駕駛人應能適切地保持某一對應速度 $V(\rho)$ ，若車速低於此一速率，則傾向加速；若高於此速率，則傾向減速。由於塞車現象是研究交通問題的一大課題，因而所對應的流體是一可劇烈壓縮的流體，在道路上的車輛密度可以表現出顯著的不同。在此一模型中，僅用幾個簡單的參數($V(\rho)$ ， c_0 ， μ)就能相當貼切地描述道路上的車流變化。當道路上的車輛總數高於某一定值時，均勻分佈的車輛密度不再是上述方程式的穩定解，當不均勻分佈的車輛密度成為系統的唯一穩定解時，所對應的現象就是塞車形成的必然性。

第二、跟車模型^[4]。除了上述的巨觀流體模型，也有相當多學者嘗試建立微觀的力學模型，跟車模型即是其中之一。畢竟單一車輛才是交通現象

中的基本單位，而試圖建立此基本單位的運動模式也是可以想見的。以牛頓力學為起點，所寫下的全微分方程式如下：

$$\frac{d^2}{dt^2} x_n = a \left[V(x_{n+1} - x_n) - \frac{d}{dt} x_n \right]$$

其中下標 n 用來循序標定道路上的每一輛車，而其運動模式則由軌跡 $X_n(t)$ 來描述。函數 $V(x)$ 則用來表明在跟車距離 x 時所能保持的理想速度，若車速過高，則傾向減速，反之則加速；而參數 a 則表明在此過程中速度變化的靈敏度。整體的交通現象則由一組聯立的全微分方程式來主導，塞車現象同樣可以理解為系統的不穩定性，而必然造成的車輛分佈不均勻。

第三、電腦規則模型^[5]。除了上述以微分方程式為主導所建立的模型之外，也有許多以差分方程式或是其他數學形式所建立的模型，近年來，更由於電腦計算的發達，促使一些研究學者放棄方程式的模式，改以類似電腦運算的規則來建立模型，亦即現象的背後不再是以方程式為主導，而是一組規則的運作。對於交通問題來說，此一觀點似乎更具說服力，畢竟個別的駕駛行為很難想像是以某一方程式來掌控，但卻可以容易地化約成一組有效的規則。高速公路上的車流行為就可視為下列四項規則的循序運作：

規則 1 加速： $v \rightarrow v + 1$ if $v < v_{\max}$

規則 2 減速： $v \rightarrow x$ if $v > x$

規則 3 隨機： $v \rightarrow v - 1$

(with probability p) if $v > 0$

規則 4 移動： $x \rightarrow x + v$

上述規則的概念很簡容易理解，若車速低於道路的

最高速限 v_{\max} ，則加速 規則 1；若與前車距離過近，則減速 規則 2。再加入各車輛間的隨機差異 規則 3，就決定了該車輛在某一時刻所能前進的距離 規則 4。在選擇適當的道路速限 v_{\max} 和隨機參數 p 之後，簡單的四項規則竟也能貼切地反應出道路上許多複雜的車流行為。值得注意的是，由於各規則運作時的彼此互動效應並不常是顯而易見的，即便是同樣的規則，不同的運作次序或模式常會導致截然不同的結果。而這也是此類模型引人注目的特點，簡單的規則，卻又能產生出變化多端的現象，棋類遊戲所帶給人的無窮樂趣，也可算是此類模型的啟發。

分析模型

一旦建立了適切的模型，下一階段的工作就是對模型進行深入的分析。此二階段的區隔有時並不明顯，若要勉強做一區分，在建立模型中所強調的是以簡單明確的數學模式對真實而複雜的交通現象做一貼切的重現，而在分析模型中則更強調以既有的物理觀念來對比詮釋所觀察到的現象。就領域來說，與交通現象有最明顯關聯的便是統計力學與非線性動力學。若以統計物理的角度來解釋交通現象，很自然地便會將塞車現象理解為一相變，而試圖建立起塞車與相變的詳細對比，若是此一對應能被明確建立，統計物理歷來對相變所累積的知識也就能轉移成為對塞車現象的瞭解，當然這其中尚有許多爭議待釐清，例如：溫度的義涵、相變的階數、序參數的定義等，更有趣的是，道路上的車流行為基本上屬於一維空間的運動模式，其中有效的交互作用也僅限於鄰近的車輛，而已知一維空間的平衡系統內不應有相變發生，對照之下，塞車所呈現的

相變應屬一維空間非平衡系統特有的現象，且邊界效應佔有相當重要的影響，如此一來，交通現象不僅可以成為統計力學的應用之一，更可能成為非平衡統計物理的一個重要實例，故而能吸引許多物理學者投入研究。

除了統計物理的一般題材，甚至連近來頗為熱門的玻色凝聚現象 (Bose-Einstein Condensation)，也有學者能在塞車現象中找到對應^[6]。至於非線性動力學中的許多觀念，也可被用來詮釋模型中參數的定位，有學者就以渾沌的觀點來解釋交流道附近所特有的塞車模式^[7]。

現階段交通模型的一大特色是，同一現象可以由截然不同的數學模式來重現，各個模型所據以建立的觀點大不相同，但卻又能以不同的方式呈現出相當類似的現象，因而各模型之間觀念的互通，各參數的關聯，甚至數學方程式的彼此推演也成為進一步分析模型的重點之一。舉例來說，巨觀的流體模型與微觀的跟車模型之間，就存有類似於巨觀熱力學與微觀統計力學的關聯，氣體動力論的架構就可能成為兩者之間的橋樑，若是此一關聯性能更明確地建立，不僅能夠從跟車模型中的全微分方程式推導出流體模型中的偏微分方程式，更能將兩模型中的參數一一對應，對交通現象的瞭解將能向前更邁進一步^[8]。

在以運算規則為主導的模型中，因為沒有方程式，所以易於以電腦模擬來探討其所呈現出的特性，但唯有透過類似平均場的計算，才能讓人對其特性有更深入的瞭解。其中對於速度與密度的基本關係，更是解析計算的重點之一^[9]，在流體模型與跟車模型中，此一關係式是由參數給定，即出現於微分方程式中的 $V(\rho)$ 或 $V(x)$ ，而在運算規則

模型中，此一關係式則是規則運作的結果，現階段的正確解析計算仍然只能局限在相當特定的參數範圍，與其他模型的關聯性更有待建立。唯有透過深入的分析比較，各個不同模型間的整合才有可能達成，畢竟，物理研究絕不會滿足於以不同的模型來解釋同一現象，卻又不能釐清彼此的關係。

應用模型

除了建立模型與分析模型，由於交通研究的實用性，也促使許多研究學者著眼於模型的各項應用，現階段最顯著的焦點集中在交通路況的即時預報系統^[10]。當交通資訊成為日常生活不可或缺的一環時，預報系統的需求也就因應而生，有效的交通預報不僅只是交通資訊的收集與傳播，更重要的是正確的解讀與預測。試想若天氣預報僅止於氣象資訊的收集與記錄，而無法準確地預測往後一週的天氣，其實用性必然受限，而可靠的預測有賴於精準掌握現象背後的動力學因素，前所建立的模型正是對此掌握的具體成果。此外，整體的交通現象基本上是由於個別駕駛行為的互動所造成的結果，因而各樣的管制措施或資訊分享都會促成駕駛行為的改變，而即時反映在交通現象的變化，如此也更增加了即時預報的困難度。以現階段的研究，一個小時的即時預測是許多學者努力的目標。

另外，模型的應用也可用來彌補交通實驗的不易執行。基本上，道路設施不可能一再擴建，唯有靠著有效的控管機制來提升道路的使用效率，以紓解交通困境，但由於交通的影響層面愈來愈大，各項交通控制措施的制定也就因愈發謹慎而顯得困難，任何不當的措施都要付出相當大的社會成本。而交通研究的另一特點是不易建立真實的實驗

室，因而可靠的模型也就成為一虛擬實驗室，可以在其中嘗試各樣的控制措施，等有了具體把握後，再行評估施行於真實道路。舉凡匝道管制^[11]、交通號誌^[12]、甚至車禍發生的評估^[13]，現階段都可成為物理研究的題材。

總結來說，交通現象不僅可以是基礎物理的研究對象，更成為物理研究的挑戰之一。由於交通現象所牽涉的層面廣擴，隨著道路週邊設施的不斷更新，汽車操控性能的不斷提昇，甚至駕駛行為的不斷改變，都會一再牽動交通現象的風貌，因而在這急劇的變革中，是否隨時都能提供適切的物理模型便成為對研究學者的一大挑戰。

參考文獻

- [1] D. Helbing, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 1067 (2001).
- [2] D. Chowdhury, L. Santen, and A. Schadschneider, *Phys. Rep.* **329**, 199 (2000).
- [3] B. S. Kerner and P. Konhäuser, *Phys. Rev. E* **48**, R2335 (1993).
- [4] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama, *Phys. Rev. E* **51**, 1035 (1995).
- [5] M. Schreckenberg, A. Schadschneider, K. Nagel, and N. Ito, *Phys. Rev. E* **51**, 2939 (1995).
- [6] M. R. Evans, *Europhys. Lett.* **36**, 13 (1996).
- [7] H. Y. Lee, H. W. Lee, and D. Kim, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1130 (1998).
- [8] H. Y. Lee, H. W. Lee, and D. Kim, *Phys. Rev. E* **64**, 056126 (2001).
- [9] A. Schadschneider, *Eur. Phys. J. B* **10**, 573 (1999).
- [10] J. Wahle, A. L. C. Bazzan, F. Klügl, and M. Schreckenberg, *Physica A* **287**, 669 (2000).
- [11] D. W. Huang, *Phys. Rev. E* **65**, 046103 (2002).
- [12] E. Brockfeld, R. Barlovic, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, *Phys. Rev. E* **64**, 056132 (2001).
- [13] D. W. Huang and Y. P. Wu, *Phys. Rev. E* **63**,

022301 (2001).