

現代科學中的非中心化思維

• 李建會

當我們看到一個形狀規整的蜂窩時，自然地會認為蜂窩是蜂王領導工蜂建設的結果；當我們看到螞蟻整齊地排成一隊搬運食物的時候，我們會說一定有某個或多個螞蟻頭領指導着眾螞蟻的工作；當我們看到一群鳥在飛翔，通常會將最前面的鳥視為領頭鳥，其他的鳥都在聽牠的指揮；當我們看到現代城市的物質供應非常有序地進行，就會認為這一定是城市管理者制定了周密的物質供應計劃的結果。這種把在自然或社會系統中表現出來的功能或秩序歸結為某個或多個控制者控制或領導的結果的思維方式，可以稱之為中心化思維。然而，問題是：自然和人類社會中的許多有秩序的行為或活動，真的必須有某個或多個控制者控制或指揮才能達致的嗎？

一 傳統的中心化思維方式的表現和根源

中心化思維方式的產生可以說是自然的。世界上的很多現象本身事實上就是由一個控制者控制的。我們的社會本身就是一個類似於金字塔式的等級結構，一級指揮着另外一級。所有這一切導致我們認為任何事物都存在一個中心、一個明顯的源頭。這種解釋問題的方式不僅在解釋社會現象時屢見不鮮，就是在解釋自然現象時，我們也不由自主地受到這種思維模式制約。

自原始時代起，人們就在進行着這種思維。當原始人看到風雲雨電等難以理解的自然現象時，就把這些現象設想成是某個神靈手中的武器或工具；看到動植物都有複雜的結構時，就認為牠們都是某個或多個神靈設計和創造的結果。

其實，並不僅僅是神話或神學在解釋自然時採取中心控制的思維範式，科學產生以來，一些頗有建樹的科學家也擺脫不了這種思維方式的影響。就連大科學家牛頓在思考太陽系為甚麼會產生時，也免不了提出「上帝的第一推動」的

假設。到了十八世紀，博物學家發現不同的地層中有不同的生物化石，也很自然地認為這是某種外在力量作用的結果，甚至還假設上帝曾經連續多次地毀滅和創造世界。佩利 (William Paley) 還這樣說道：當你在沙灘上發現一隻手錶，你一定認為它是一個創造者製造出來的；同樣，當你看到更加複雜的動植物的身體結構時，難道你能否認牠們也有一個創造者嗎？

但即使在科學完全擺脫了神學束縛之後，同樣可以看到這種思維方式的廣泛存在。直到今天，每當我們發現宇宙、生命或自然界其他一些令人驚異的現象或規律時，我們都會情不自禁地感嘆，彷彿整個宇宙都是某個設計者設計的結果。物理學家戴森 (Freeman Dyson) 在1979年所著的《打擾宇宙》(*Disturbing the Universe*) 一書中寫道：「當我們研究宇宙時，發現物理學與天文學上有許多對人類有利的巧合，這簡直就讓人覺得，宇宙好像預先就知道我們人類要出現似的。」數學物理學家戴維斯 (Paul Davies) 在1999年推出的《第五大奇迹》(*The Fifth Miracle*) 一書中，對宇宙的「巧合性」作了如下評述：「如果生命是遵循必然的因果鏈條從原始湯中發展出來的，那麼自然法則就編碼了一種隱含的意義，即宇宙意志，它命令自然法則：『創造生命』然後通過生命創造其副產物，包括精神、知識、認識力等等。」甚至連無神論者霍金 (Stephen W. Hawking) 也這樣感嘆過：

宇宙幾乎是位於再次坍縮與無限膨脹的分界點上，為甚麼這麼巧呢？在大爆炸之後一秒鐘，如果宇宙的膨脹速率減小了 10^{10} 分之一，那麼宇宙僅過幾百萬年就會坍縮。但如果宇宙那時的膨脹速率增大了 10^{10} 分之一，那麼宇宙幾百萬年之後實際上將已是虛空。無論是哪種情況，宇宙的壽命都不會長得讓生命有機會演化出來。因此，我們要麼不得不信服人擇原理，要麼就必須找到一種合理的物理解釋來闡釋宇宙何以會如此。

對於科學家來說，他們可能不會真的相信「設計者」的存在，但卻為宗教家門提供了口實。坦普爾頓基金會 (John Templeton Foundation) 甚至為這類「進展」頒發獎金。戴森就曾獲得了94.5萬美元的獎金^①。

不過即使不設想「設計者」的存在，科學家也喜歡把有秩序的自然過程看作是某個或某些「中心化」因素控制或指導的結果。黏液菌研究史上一些科學家的看法為這種思維方式提供了很好的例子。在黏液菌生命週期的一定階段，黏液菌細胞會聚集成團。多年以來，科學家認為這種聚集的過程是由一種特化的黏液菌細胞指導的結果，這種細胞被稱之為「奠基者」或「引導者」。根據這種理論，每一種引導者細胞發出一種化學信號，告訴其他黏液菌細胞聚集到它的周圍，結果產生了黏液菌團。1970年，凱勒 (Evelyn Keller) 和西格爾 (Lee Segel) 提出新的解釋，表明黏液菌不需要任何中心控制的力量就可以聚集成團。但其後幾十年，很多研究者仍然認為需要某種引導者來促成黏液菌的聚集。直到二十世紀80年代，科恩 (M. Cohen) 和黑根 (P. Hagan) 作了更進一步的研

究之後，人們才逐步接受同質的黏液菌細胞不需要引導者也可以聚集成團的觀念^②。

中心控制的思維方式有多種表現形式。人們在自然或社會中觀察到模式或結構的時候，總是傾向於假設這種模式或結構是由某個指導者或某種預先存在的模式創造出來的。也就是說，他們假定模式或結構是在指導者的控制下形成的，或者假定模式或結構是由某種預先存在的種子產生的。

正如前面所說，中心控制的思維方式的產生有其現實根據。但問題是，人們在一些問題上過去幾乎完全依賴於中心控制的思維策略，非中心化的思維方式被忽視，甚至被排斥。社會是一個有着層層等級的系統，人們很容易把社會領域的一切秩序都看作是自上而下控制和計劃的結果。計劃經濟可以說是這種思維方式的典型表現，但實際上自發的市場經濟同樣可以體現出秩序。

二 現代科學新革命與非中心化思維

在二十世紀中葉以前，由於科學研究手段的限制，中心化的思維方式一直佔領着許多人的思維；從二十世紀中葉，特別是80年代以後，計算機的誕生及其在科學上的應用，使科學研究方法發生了一場新的革命，這場革命的結果誕生了許多新興學科，像混沌學、分形學、人工生命等。這些學科的一些研究結果，不僅給予以往的很多問題以全新的解答，而且使我們的思維方式發生了很多重大變化，其中之一就是非中心化思維方式的形成。

我們知道，十七世紀伽利略創建了受控實驗的科學方法，這種方法是近代科學產生和發展的主要動力。然而，現代科學的許多研究已經愈來愈涉及到複雜的系統，這些系統又涉及許多活動的主體 (agents)，它們以多種方式不斷改變自身的行為，這些行為很難用科學的舊規範進行測量和預測。幸運的是，自二十世紀中葉，特別是80年代以來，電子計算機的飛速發展，使我們擁有了一種新的工具，通過它，我們可以構造這些複雜的真實世界的矽替身。然後，我們可以利用這些矽替身，進行多種受控實驗，以建構複雜的物理、生物、認知和社會系統的新理論。因此，從二十世紀80年代開始，我們又一次「處在與伽利略時代的科學家們相近的位置上……借助於剛剛得到的可以在計算機中創建各種情形下世界的新能力，我們可以與真實的複雜系統展開大量的『假定—推測』型遊戲，再不必將系統劃分為簡單的子系統，也不必因為實驗耗資過大、過於不現實，或者過於危險而乾脆放棄實驗」^③。

一些美國科學家率先認識到計算機對科學研究的這種革命性意義，他們在新墨西哥州的聖菲建立了一個利用計算機探索複雜性問題的研究中心：聖菲研究所 (Santa Fe Institute)。聖菲研究所是一個跨學科的研究中心，自1984年成立開始，就致力於以計算機為工具研究各種複雜的自適應系統，包括一些複雜的社會系統、生物系統和行為系統等。

聖菲研究所成立的時間雖然不長，但許多新興的交叉學科都是在這裏孕育誕生的。這些學科的一系列結果使我們看到，傳統的中心化思維方式在我們認識自然和社會時並不一定總是符合實際的。

1、鳥群的群集行為需要領頭鳥嗎？

我們可能都看到過大雁南飛的情景，整齊的鳥群令我們嘆為觀止。為甚麼大雁或其他鳥類會那麼整齊地飛行呢？一般人們想到的答案是：存在一隻領頭鳥，在牠的帶領或指揮下，鳥兒集結成群。真是這樣嗎？二十世紀80年代，美國計算機專家雷諾茲 (Craig Reynolds) 通過計算機仿真實驗，得出了完全不同的結論，即我們不需要一隻領頭鳥，也能使鳥聚集成群。

簡單地說，雷諾茲的思想是這樣的：將自動的類似鳥的作用主體“Biods”植入到處是障礙物和牆的屏幕環境中，每一個Biods都遵循三個簡單的行為規則：(1) 分隔規則：盡力與其他客體，包括其他Biods保持最小的距離；(2) 匹配

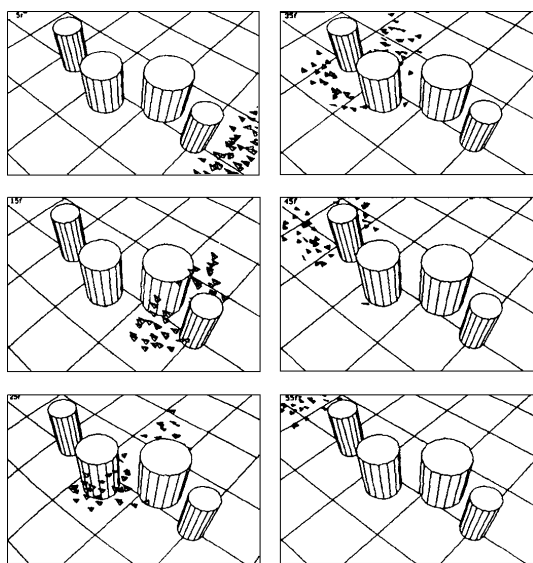


圖1 Biods根據簡單的局部規則就可以聚集成群並越過障礙物。

規則：盡力與其他相鄰的Biods保持相同速度；(3) 聚集規則：盡力朝相鄰Biods的群的中心移動。這些規則組成Biods系統的泛基因型。這些規則中沒有一條說到「聚集成群」，它們完全是局域性的，只是針對每一個單獨的Biod所能做的和從其鄰居所能見的發出指令。但在每一次模擬實驗中，它們確實使Biods產生聚集成群的現象。雷諾茲在開始這個模擬實驗時，先將Biods隨意散置在計算機屏幕上各處，然後它們會自發地聚集成群，以一種流動的、非常自然的形式成群飛翔。有時鳥群甚至能夠分成更小的群體，從障礙物兩旁繞過，又在障礙物的另一端重新聚集成群，就好像是Biods一直有意聚集成群一樣(網上有許多Biods的Java演示，感興趣的讀者可以到網上瀏覽)。

雷諾茲的結果表明，鳥的群集這樣的複雜行為完全可以從簡單的局部規則中體現出來。儘管沒有一條規則以及其他計算機編碼明確告訴任何一個特定的Biod應該怎樣聚集成群，但它們不但能夠聚集成群，而且可以繞過障礙物，重新聚集成群。

2、白蟻清理蟻巢的行為需要蟻王指揮嗎？

動物行為學家在研究白蟻群體的行為時，發現有一種白蟻能夠將蟻巢周圍的死白蟻堆成小堆。如果人們第一天在白蟻巢周圍隨機放置許多死白蟻，第二天就會發現，死白蟻被堆成許多小堆。第三天，死白蟻被堆成幾個大堆。最後，所有死白蟻被堆成一個大堆。甚麼原因使白蟻把死白蟻堆成小堆的呢？白

蟻的行為是有意識還是無意識的？有沒有領頭的白蟻指揮其他白蟻來堆堆？1990年，德納堡 (Jean-Louis Deneubourg) 通過計算機仿真得出如下的結論：白蟻只要遵循簡單的兩條規則就可以把死白蟻堆在一起，根本不需要蟻王或領頭白蟻的指揮。這兩條規則是：如果白蟻碰上一隻死白蟻，就將牠背起來；如果牠再碰到一個死白蟻，就將所背的死白蟻放下來。

德納堡的計算機仿真實驗是在細胞自動機上進行的。在二維的細胞自動機上，每隻死白蟻佔一個方格。白蟻在每個離散的時間步只能向周圍的八個方向中的任一方向移動一格。白蟻只能感知自己當前所佔據的方格是否有死白蟻。如果所在位置有死的白蟻，就將死白蟻背起來，運到任何一個沒有死白蟻的位置放下來。當然，在搬的時候，同樣每個離散的時間步只能移動一格。仿真的最終要求是白蟻將所有的死白蟻堆在一起。

在細胞自動機的仿真環境中，我們可以將白蟻遵循的兩條基本規則進一步細化。每隻白蟻的工作流程是：(1) 一個背上沒背東西的白蟻所在的方格如果有死白蟻，那就把死白蟻背起來，然後隨機選擇一個方向移動一個方格。(2) 如果背着死白蟻的白蟻所在的方格有另一隻死白蟻，那麼就隨機選擇一個方向移動一個方格；如果該格沒有死白蟻，就把這隻死白蟻放下來；否則繼續隨機選擇一個方向移動一個方格，直到發現一個沒有死白蟻的方格而將背上的死白蟻放下來，然後隨機選擇一個方向移動一個方格。(3) 一隻白蟻如果背上沒背死白蟻，而所在的方格又沒有死白蟻，那麼，這隻白蟻就隨機選擇一個方向移動一個方格④。

在計算機仿真系統運行過程中，我們可以捕捉到一系列的圖像，從這些圖像中可以看出，開始時隨機分布的死白蟻先被堆成許許多多的小堆。慢慢地，堆變大，堆的數目變少。接下來，變成三堆、兩堆，乃至一堆。這些規則沒有直接讓白蟻把死白蟻堆成一堆，這些白蟻只是按規則和局部的情況背上或放下死白蟻，但令人驚異的整體行為最後顯現了出來。

3、螞蟻覓食行為需要領頭螞蟻嗎？

螞蟻覓食行為是動物行為學家非常感興趣的現象。動物行為學家發現，在存在多個食物源時，螞蟻總是很快集中到離蟻巢較近的食物源，然後又集中到次近的食物源，而不是平均分散到各個食物源。螞蟻的行為很有規律，彷彿真有一個蟻王或其他螞蟻的頭領在指揮着這一切。然而，人工生命的研究者通過自下而上的計算機仿真，得出了完全不同的解釋。剛開始時，每隻螞蟻只是隨

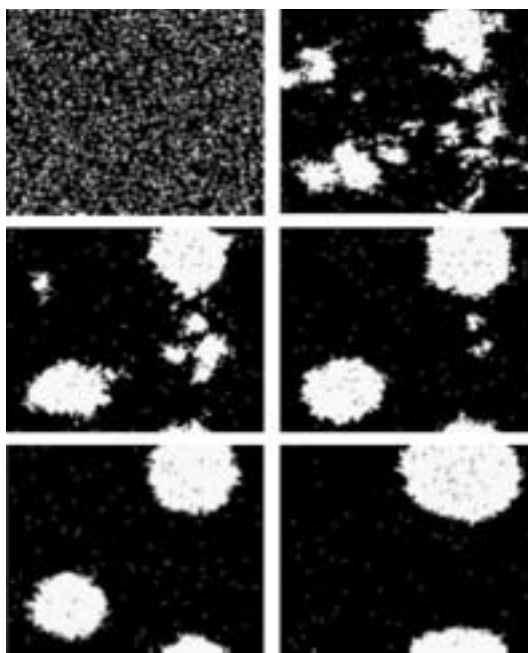


圖2 白蟻根據簡單的局部規則就可以把雜亂的死白蟻堆積成堆(由StarLogo軟件仿真)。

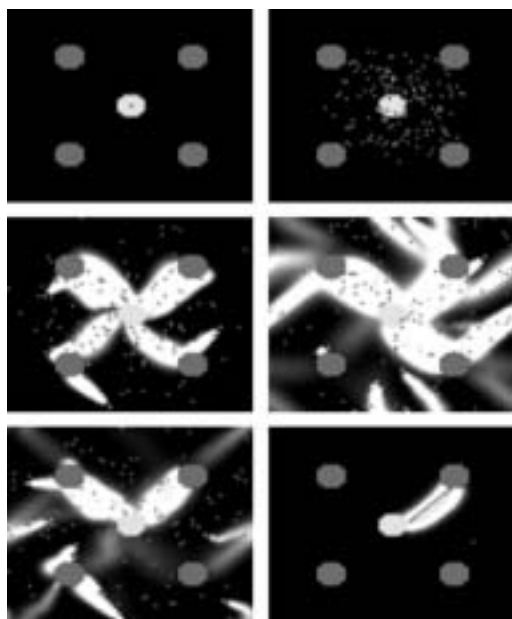


圖3 螞蟻覓食行為仿真快照。螞蟻根據簡單的局部規則集中在單一的食物源。

機地移動。一旦螞蟻發現食物，就將食物搬起，並在回巢的路上撒下激素。如果沒有發現食物，就向激素濃度比較高的方向移動。如果沒有發現食物，同時周圍激素的濃度又低於某一閾值，螞蟻就在那裏隨機游走。

採用有限狀態自動機能更方便地闡述螞蟻的行為。這個有限狀態機包含四個狀態：吸引狀態、搜索狀態、跟蹤狀態與搬運狀態。狀態轉換規則如下：

(1) 所有螞蟻的初始狀態均是搜索狀態。如果所處的位置有食物，轉入搬運狀態；如果所處位置的激素量高於低閾值，轉入吸引狀態；否則隨機游走。

(2) 對於處於吸引狀態的螞蟻，如果所處位置的激素量低於低閾值，轉入搜索狀態；如果所處位置的激素量高於高閾值，轉入跟蹤狀態；否則沿着激素量最高的方向移動。

(3) 對於處於跟蹤狀態的螞蟻，如果所處位置的激素量低於低閾值，轉入搜索狀態；如果所在位置有食物，轉入搬運狀態；否則沿着以前的方向移動。

(4) 對於處於搬運狀態的螞蟻，螞蟻將依據周圍蟻巢激素的分布回巢，然後轉入搜索狀態。

計算機仿真的結果是：開始時，所有螞蟻均處於蟻巢，接着，螞蟻只是隨機游走。一旦發現食物，它們就開始釋放激素。在仿真的初始階段，各食物源處的螞蟻都差不多。慢慢地，有些食物源沒有螞蟻光顧。接下來，螞蟻幾乎都集中到其中的兩堆食物上。最後，所有螞蟻都去搬運某一堆食物了。仿真結果與動物學家的觀察相符。這表明每隻螞蟻僅僅通過局部環境自行決定游動的方向，就可以使所有螞蟻集中到一個食物源，而不需要一個全局的引導。

三 非中心化思維的特點和意義

我們從上述研究成果可以看出，鳥的群體飛行並不是有一隻領頭鳥帶領其他鳥的結果，實際上只需每隻鳥遵循幾條簡單的規則即可。飛在最前面的鳥不過是碰巧處在那個位置。就是說，去掉這隻鳥，鳥群也不會被打散。任何單個的鳥都不知道甚麼是群集行為，群集行為只存在於我們觀察者的眼中。蜜蜂能建造出形狀規整的蜂窩，不是蜂王精心規劃的結果，也不是蜜蜂頭腦中存在一幅蜂窩的藍圖，任何單個的蜜蜂都不知到自己最終會造出甚麼樣的蜂窩，蜂窩的結構是單個蜜蜂個體行為集中在一起所呈現的結果。這種認為個體與個體之間的局部相互作用可以突現出全局的規則模式的思維方式，就是我們所說的非中心化思維方式。

非中心化思維方式主要有以下幾個明顯特點：

第一，非中心化思維方式強調的是自下而上的綜合或合成的研究策略，而不是傳統分析方法的自上而下的分析策略。

其次，非中心化思維方式的出發點是局部的個體與個體之間通過簡單規則發生相互作用，而不是一開始就把研究的重心放在整體上。也就是說，非中心化思維認為，系統整體上的複雜行為實際上是簡單的、由下而上的規則所導致的結果。

第三，非中心化思維強調，整體的行為是局部個體同時行動產生的結果，或者說，非中心化思維認為，局部的、簡單的、並行的相互作用，可以產生複雜的結構。

第四，非中心化思維方式把整體的行為看作是自下而上生成的，而不是自上而下構成的。

第五，非中心化思維認為，整體的行為是局部個體之間相互作用突現的結果。

由於非中心化思維強調局部性、簡單性、並行性，沒有中心的控制和數據，因此，這樣的系統更具有魯棒性 (robustness)，不會由於某一個或者某幾個個體的故障而影響整個問題的求解。因為具有這些優點，非中心化思維成為現代科學中一個重要的思維方式。

參考文獻

1. Mitchel Resnick, "Learning About Life", in *Artificial Life: An Overview*, ed. Christopher G. Langton (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1995).
2. 周登勇：〈用複雜性科學來理解和設計智能〉(中國科學院自動化研究所博士論文，2000)。
3. 沃爾德羅普 (Mitchell M. Waldrop) 著，陳玲譯：《複雜：誕生於秩序和混沌邊緣的科學》(北京：三聯書店，1997)，頁462。
4. 金吾倫：《生成哲學》(保定：河北大學出版社，2000)。
5. Margaret A. Boden, ed., *The Philosophy of Artificial Life* (New York: Oxford University Press, 1996).

註釋

- ① Michael Shermer, "Digits and Fidgets: Is the Universe Fine-tuned for Life?", *Scientific American* (January 2003).
- ② Mitchel Resnick, "Learning about Life", in *Artificial Life: An Overview*, ed. Christopher G. Langton (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1995).
- ③ 卡斯蒂 (J. L. Casti) 著，王千祥、權利寧譯：《虛實世界：計算機仿真如何改變科學的疆域》(上海：上海科技教育出版社，1998)，「序」。
- ④ 周登勇：〈用複雜性科學來理解和設計智能〉(中國科學院自動化研究所博士論文，2000)。