

# 複雜系統 沒說你不知道

#複雜系統沒說你不知道  
#ComplexityExplained

---

# 目錄

<b>1</b>	<b>相互作用</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>突現性質</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>動力學</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>自我組織性</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>適應</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>跨領域</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>研究方法</b>	<b>16</b>



# 複雜系統：沒說你不知道

「碳原子中看不見愛情，  
水分子裡沒有颶風的蹤跡，  
一紙美幣刮不起陣陣金融海嘯。」

– Peter Dodds

複雜系統科學旨在研究一個微觀上由局部相互作用的單元構成的集體，如何在缺乏外在干預或中心協調者的情況下，自發地自我組織，並展現出不直覺的整體結構與宏觀行為。即便我們完全了解每個小單元，往往無法保證能理解或預測集體的種種性質。這樣的集體稱為「複雜系統」，為了研究它們，我們需要新的數學框架和科學方法。

這本小冊囊括了你所需要知道的那些複雜系統二三事。



# 相互作用

複雜系統由許多小單元組成，它們用不同的方式或和彼此、或和環境相互作用。

---

「生物學研究的是由系統所構成的系統。」

— Francois Jacob

複雜系統往往可以用許多小單元來描述。這些單元彼此間以多種方式互動，也可能與它們身處的環境相互影響。單元間的互動構成一個網絡，有時候只有一小部分的單元便牽涉了豐富的交互作用。這些交互作用可能併發新的訊息，使我們難以孤立地去理解每個單元的行為並預測他們的未來。除此之外，複雜系統的每個組成單元也可以自成一個系統，形成了介觀上相互影響的系統們構成之集體。

複雜系統科學的挑戰不僅僅是要解析系統的組成與單元間的連結，而且要理解這些交互作用如何構成整體所能蘊含的複雜現象。

例子：

- 人腦裡數以億計且相互作用的神經細胞
- 網際網路裡互通有無的電腦
- 身處於錯綜複雜人際關係中的人們

相關概念：

系統、組成單元、交互作用、網絡、結構、異質性、相互關聯性、相互連結性、相互憑依性、子系統、邊界、環境、開放/封閉系統、系統構成之系統。

參考資料：

Mitchell, Melanie.  
Complexity: A Guided Tour.  
Oxford University Press, 2009.

Capra, Fritjof and Luisi, Pier Luigi.  
The Systems View of Life: A Unifying Vision.  
Cambridge University Press, 2016.



相互作用 1





# 突現性質

從整體看複雜系統的性質，往往能意想不到地發現許多和其組成單元不同的特性。

---

「不需要更多就可以達成更多，  
突現性就是這個意思。」

— Murray Gell-Mann

和複雜系統相比，簡單系統的整體性質可以透過其組成單元的疊加或聚合來理解預測。換句話說，簡單系統的宏觀特徵可以由各個部份的微觀性質推斷。但是在複雜系統裡，整體的特性不能藉由單元的知識來理解和預測，這個現象稱為「突現性」。

突現性牽涉多樣的機制。這些機制讓單元間相互作用，併發出新訊息，並且在更大尺度上展現出不直觀的集體結構和行為。我們常常用一句話來形容這個現象：「整體不單單是部份的集合」。

例子：

- 形成龍捲風的大量空氣與水蒸氣
- 生物體內的多種細胞
- 人腦中產生意識及智慧的千百億個神經元

相關概念：

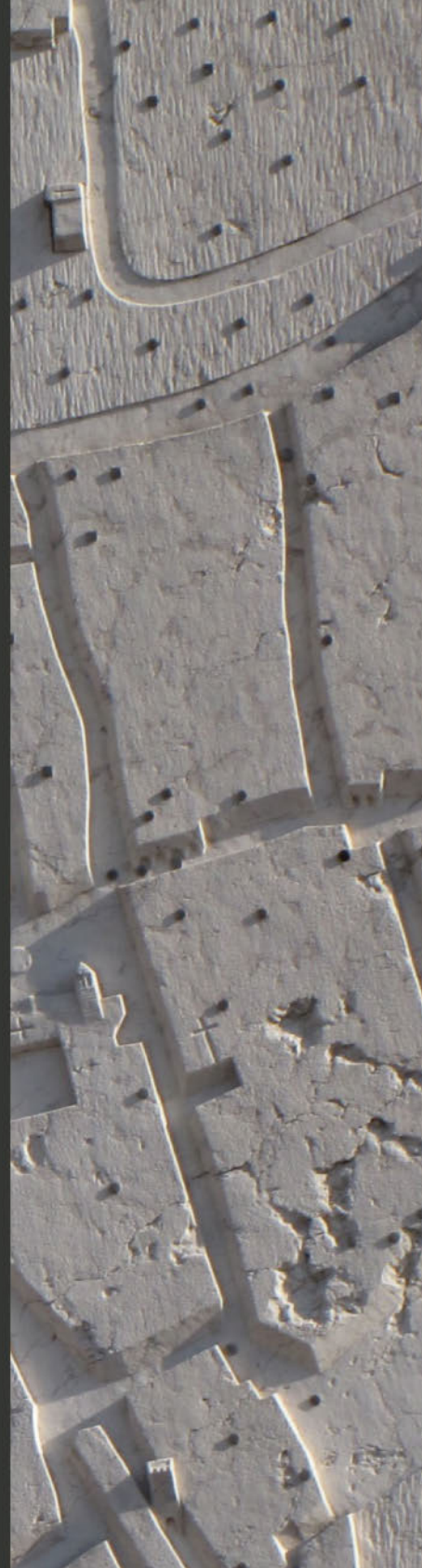
突現性質、尺度、非線性、（由下而上的）  
建構方法、描述、驚喜、間接影響、不直觀  
性、相變、不可化約性、打破傳統線性框  
架、「整體不單單是部份的集合」。

參考資料：

Bar-Yam, Yaneer.  
Dynamics of Complex Systems.  
Addison-Wesley, 1997.

Ball, Philip.  
Critical Mass: How One Thing Leads to Another.  
Macmillan, 2004.

## 突現性質 2



# 動力學

複雜系統的狀態往往不斷變化，展現出難以預測的長期行為。

---

「什麼是混沌？當現在能決定未來，但近似的現在卻無法近似地預測未來。」

– Edward Lorenz

我們可以藉由分析系統的狀態如何隨時間改變來了解它。所謂的狀態是指一組能最佳描述系統的變數。當系統的狀態一次次更迭，其變數的值也會隨之改變。這些變化常常是為了因應系統身處的環境。

如果我們發現系統狀態的變化與時間、系統當下的狀態、或環境的改變成比例，我們稱這個改變是線性的。反之，我們說它為非線性。複雜系統一般是非線性的，隨著狀態和環境的不同，我們將觀察到大小不一的變動。

複雜系統可能擁有穩定態或不穩定態。在穩定態中的系統，即便遭到干擾，都可以維持在原本的狀態；但任何微擾都會使不穩定態崩解。有時候，小小的環境變化將會完全顛覆系統的行為，形成了相變。這時我們說系統通過了「臨界點」。



有些系統甚至是混沌的，它們對微小的干擾極度敏感，而且時間愈長愈難以預測它們的行為，表現出知名的「蝴蝶效應」。

複雜系統也可以具有記憶性，或稱為路徑依賴。換句話說，系統未來的狀態不僅取決於當下的狀態，同時也受到系統過去的影響

例子：

- 變幻莫測的氣象動態
- 股票市場裡的金融波動

相關概念：

動力學、行為、非線性、混沌、非平衡態、敏感性、蝴蝶效應、分歧理論、長期的不可預測性、路徑依賴、非遍歷性。

參考資料：

Strogatz, Steven H.  
Nonlinear Dynamics and Chaos.  
CRC Press, 1994.

Gleick, James.  
Chaos: Making a New Science.  
Open Road Media, 2011.



# 自我組織性

複雜系統可以不需要藍圖的規劃，自我組織並自發地產生不直觀的形態。

---

「用幾種叫做『成形素』的化學物質，讓它們相互反應並且在細胞組織中擴散，就足以解釋動植物形態發生的現象了。」

– Alan Turing

複雜系統組成單元間的交互作用可能會產生整體的形態或行為。由於不需要中心的或外在的操盤者，我們往往描述這種性質為「自我組織」。其實自我組織系統的「控制者」分散在各個單元裡，透過與彼此的交互作用相整合。

自我組織可能產生實質或功能上的結構，例如材料的結晶圖樣及生物體的形態；它也可能造成動態的或與訊息傳遞相關的行為，比方說成群結隊的魚群生態和在動物肌肉中傳導的神經電訊號。隨著時間演進，系統自我組織的過程有機會顯現出全新的相互作用形式，並加劇系統原有的複雜性。

有時候，複雜系統可能會自我組織成臨界狀態，它只有在取得隨機性和規律性微妙的平衡才能存在。從自我組織臨界狀態中衍生出來的種種形態常展現出獨有的特徵，例如圖樣性質有冪次分布和自我相似性。

例子：

- 單一的受精卵細胞不斷分裂並最終自我組織成具有複雜形態的生命體
- 吸引群眾與資本而日漸壯大的城市
- 大量的椋鳥展現出複雜的集群行為

相關概念：

自我組織、集體行為、形態、時間與空間、無序中的有序、臨界性質、自相似性質、突發性、自組織臨界性、冪次定律、形態發生學、去中心化/分散式控制、誘導性自我組織。

參考資料：

Ball, Philip.  
The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature.  
Oxford University Press, 1999.

Camazine, Scott, et al.  
Self-Organization in Biological Systems.  
Princeton University Press, 2003.



## 自我組織性 4



# 適應

複雜系統會適應環境並演化。

---

「不用演化的角度看生命的話，  
生物學根本沒有道理。」

– Theodosius Dobzhansky

複雜系統通常具有應對周遭環境的靈活性，而不僅僅停留在穩定態。兩者間的差別就像是一顆滾落山谷且止於谷底的球，對比於一隻隨著氣流調整雙翼以在天空翱翔的猛禽。這種適應行為反映在多樣的尺度上：舉凡認知上的，由學習和心理發展建立的；也有社會上的，由社會連結分享資訊發生的；甚至是演化上的，藉由基因多樣性和天擇產生的。

當系統裡的單元受損或敗壞，複雜系統常常能夠適應這個變化，並且恢復原本的功能，而且有時候還做得比先前更好。這可能源自系統幾種不同的特質：如穩健性，讓它能忍受微擾；或恢復性，讓系統經過很大的干擾後，能返回原本的狀態；或是適應性，讓系統能改變自身，維持功能並生存。有這些特質的複雜系統稱為「複雜自適應系統」。

例子：

- 與病原體不斷攻防而逐步進化的免疫系統
- 有能力修復受損蟻窩的白蟻群
- 數億年來在各種危機中存活的地球生命

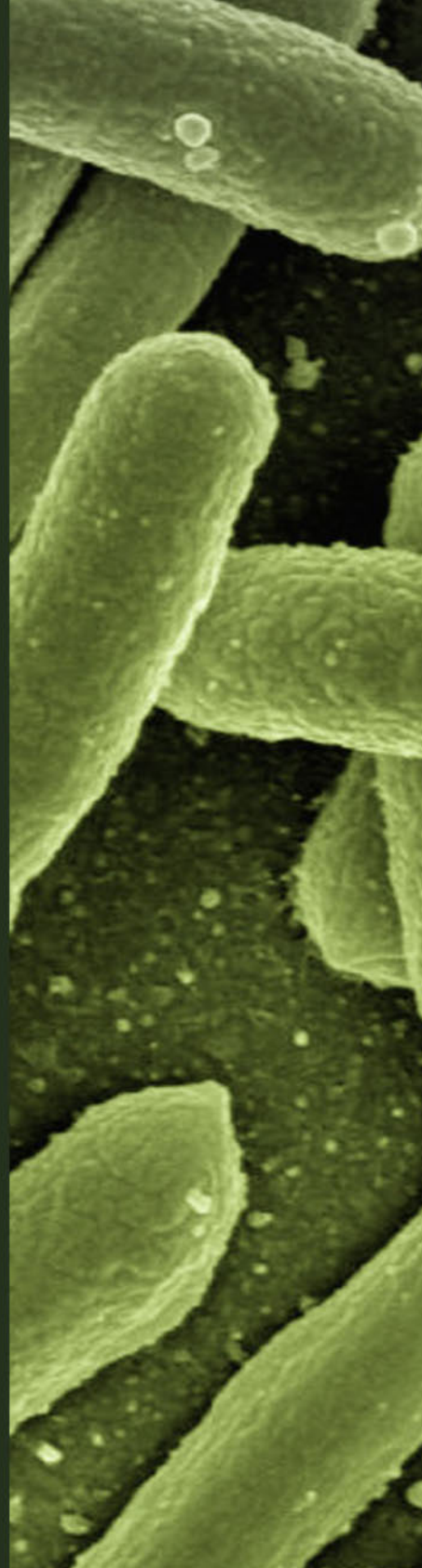
相關概念：

學習、適應、演化、適應度曲面（地貌）、  
穩健性、恢復性、多樣性、複雜自適應系  
統、基因演算法、人工生命、人工智慧、創  
造力、非侷限性。

參考資料：

Holland, John Henry.  
Adaptation in Natural and Artificial Systems.  
MIT press, 1992.

Solé, Ricard and Elena, Santiago F.  
Viruses as Complex Adaptive Systems.  
Princeton University Press, 2018.



適應 5

# 跨領域

複雜系統科學可以用來了解及管理不同領域中形形色色的系統。

「探索各式各樣複雜系統間的共通性質將不會徒勞無功。模控學中關於回饋與訊息處理的概念，提供了我們看待世界萬千的參考框架。」

– Herbert Simon

每個科學和專業領域中皆有複雜系統的身影，舉凡物理、生物、生態、社會科學、金融、商業、管理學、政治、心理、人類學、醫療、工程與資訊科技等等。許多新科技例如社群媒體、行動端技術、自駕車與區塊鏈科技，都打造了具有突現性質的複雜系統。這些突現性質正是了解以及預判如何成就社會福祉的重要關鍵。

複雜系統科學的一個核心概念是「普遍性」，這是指不同領域的系統常展現出相似的現象與特質，並且可以由共通的科學模型描述。普遍性突顯了多元領域間存在共同的數學或計算框架。複雜系統科學提供了一個詳盡的、跨領域的分析途徑，與各個領域中聚焦於特定主題的傳統科學方法相輔相成。

例子：

- 多種訊息處理系統（例如神經系統、網際網路和通訊基礎建設）的共通性質
- 各式傳播過程（包含流行性疾病、時尚潮流與森林大火）中的普遍模式

相關概念：

普遍性、多應用、跨領域性（多元/互連/交叉/連通領域）、模控學、經濟學、社會系統、生態系統、永續性、實際問題的解決、文化體系、日常決策相關。

參考資料：

Thurner, Stefan, Hanel, Rudolf and Klimek, Peter.  
Introduction to the Theory of Complex Systems.  
Oxford University Press, 2018.

Page, Scott E.  
The Model Thinker.  
Hachette UK, 2018.

# 研究方法

數學和電腦計算方法是研究複雜系統的有力工具。

「所有的模型都是錯的，但有些很有用。」

— George Box

描述複雜系統往往需要許多變數並摘要出特殊的模型架構，使其難以透過直覺或紙筆運算來探索。因此，要理解系統如何組成或隨時間改變，數學和電腦計算上前沿的建模、分析和模擬幾乎是必要的。

在計算機的協助下，我們得以檢視一組組假想的規則是否能引發與自然界觀察吻合的行為，因而進一步用這些規則去預測該系統「如果...會如何」的不同情境。計算機也能用於分析來自複雜系統的大量資料，揭露並視覺化人眼無法直接觀察到的隱藏花樣。

電腦計算方法可以帶來新發現，加深我們對自然界的認識與體悟。



例子：

- 針對鳥群的智慧體模型或行為者模擬
- 人腦的數學和電腦建模
- 預測氣候的電腦模型
- 預測行人動態的電腦模型

相關概念：

模型、模擬、資料分析、方法學、行為者模擬/智能體模型、網絡分析、賽局理論、視覺化、規則、理解。

參考資料：

Pagels, Heinz R.

The Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity.  
Bantam Books, 1989.

Sayama, Hiroki.

Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems.  
Open SUNY Textbooks, 2015.



# 「我覺得下一個（21）世紀 會是複雜科學的世紀」 – Stephen Hawking

## 作者群

Manlio De Domenico\*, Chico Camargo, Carlos Gershenson, Daniel Goldsmith, Sabine Jeschonnek, Lorren Kay, Stefano Nichele, José R. Nicolás, Thomas Schmickl, Massimo Stella, Josh Brandoff, Ángel José Martínez Salinas, Hiroki Sayama\*

## \* 通訊作者

mdedomenico[at]fbk.eu  
sayama[at]binghamton.edu

## 特別感謝

美術設計 Serafina Agnello

✉ serafina.agnello[at]gmail.com

in [Serafina.Agnello](#)

## 網站連結

<https://complexityexplained.github.io/>

## 特別感謝提供意見與回饋的以下人士和單位

Hayford Adjavor, Alex Arenas, Yaneer Bar-Yam, Rogelio Basurto Flores, Michele Battle-Fisher, Anton Bernatskiy, Jacob D. Biamonte, Victor Bonilla, Dirk Brockmann, Victor Buendia, Seth Bullock, Simon Carrignon, Xubin Chai, Jon Darkow, Luca Dellanna, David Rushing Dewhurst, Peter Dodds, Alan Dorin, Peter Eerens, Christos Ellinad, Diego Espinosa, Ernesto Estrada, Nelson Fernández, Len Fisher, Erin Gallagher, Riccardo Gallotti, Pier Luigi Gentili, Lasse Gerrits, Nigel Goldenfeld, Sergio Gómez, Héctor Gómez-Escobar, Alfredo González-Espinoza, Marcus Guest, J. W. Helkenberg, Stephan Herminghaus, Enrique Hernández-Zavaleta, Marco A. Javarone, Hang-Hyun Jo, Pedro Jordano, Abbas Karimi, J. Kasmire, Erin Kenzie, Tamer Khraisha, Heetae Kim, Bob Klapetzky, Brennan Klein, Karen Kommerce, Roman Koziol, Roland Kupers, Erika Legara, Carl Lipo, Oliver Lopez-Corona, Yeu Wen Mak, Vivien Marmelat, Steve McCormack, Dan Mønster, Alfredo Morales, Yamir Moreno, Ronald Nicholson, Enzo Nicosia, Sibout Nooteboom, Dragan Okanovic, Charles R Paez, Julia Poncela C., Francisco Rodrigues, Jorge P. Rodríguez, Iza Romanowska, Pier Luigi Sacco, Joaquín Sanz, Samuel Scarpino, Alice Schwarze, Nasser Sharareh, Keith Malcolm Smith, Ricard Sole, Keith Sonnanburg, Cédric Sueur, Ali Sumner, Michael Szell, Ali Tareq, Adam Timlett, Ignacio Toledo, Leo Torres, Paul van der Cingel, Ben van Lier, Jeffrey Ventrella, Alessandro Vespignani, Joe Wasserman, Kristen Weiss, Daehan Won, Phil Wood, Nicky Zachariou, Mengsen Zhang, Arshi, Brewingsense, Complexity Space Consulting, Raoul, Systems Innovation, The NoDE Lab.

繁體中文翻譯

楊嘉鴻、顏子祺



Serafina Agnello

第 1.0 版（英語版：2019 年 5 月 13 日）

繁體中文翻譯版：2019 年 11 月 3 日