

系统复杂性及度量*

段晓君,尹伊敏,顾孔静
(国防科技大学文理学院,湖南长沙 410073)

摘要:复杂性是科学技术面临的挑战之一,研究系统复杂性有着重要意义。综述系统复杂性基本语义研究背景,分析国内外历史上对复杂性的界定及不同定义;针对复杂性的分类,以本体论和认识论分类为基本框架,吸纳最新的复杂性分类定义成果,重新对复杂性进行归类。在此基础上,对复杂性的度量指标进行分类阐述,对相应的数学工具进行归类说明。设计案例说明了复杂性概念分类及度量的有效性。

关键词:系统科学;复杂性;度量;数学工具

中图分类号:C94 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)01-191-08

Definition and measurement of system complexity

DUAN Xiaojun, YIN Yimin, GU Kongjing
(College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Comprehension of complexity is one of the key challenges in science and technology. Complexity is a very important conception in interdisciplinary systems science, and is significant to researchers. The basic semantic background on system complexity was presented and the various definitions of complexity domestically and overseas were analyzed. On the basis of the classification of ontology and epistemology, a taxonomy of complexity was described on the basis of the state-of-the-art works on complexity definition. Meanwhile, a category of complexity measurements and the corresponding mathematical tools were proposed. Examples were given for the efficiency of complexity classification and measures.

Keywords: systems science; complexity; measurement; mathematical tools

1 复杂性语义简析

Hawking 认为“21 世纪是复杂性科学的世纪”^[1]。复和杂两字的本意分别包含了有序和无序含义,由此显示出其复杂性^[2]。对应复合度的英语 Complicated 意味着很难解开,复合度高的系统通常指互相牵连,难以展开成更简单的系统,即复合物、混合体;而复杂性对应的 Complexity 意味着很难分析,复杂系统则是指相互依赖,每个组件的行为依赖于其他组件的行为,减少部分或者分解后不能运转的系统。从词义分析可知高复合度的系统未必有相对应的高复杂性,从而避免仅用还原论思想解释复杂性。

2 复杂性的界定

复杂性科学是关于复杂系统的微观联系及宏观功能时空演化、预测及控制规律的科学^[3]。至今复杂性并没有统一的定义,因为复杂性概念是

语境依赖的,因此不同语境下存在不同的复杂性语义和测度^[2]。经统计,现对复杂性的定义已有 45 种之多;相应地,复杂系统也有十大特征^[2,4]。

信息论创始人之一 Wavell^[5]将复杂性界定为有组织和无组织两类。Lorentz 认为复杂性即对初始条件的敏感依赖性^[2]。Simon 给出了层级复杂性的概念,他将复杂性与系统的层次结构联系起来,认为进化着的复杂性往往表现为层级结构并且层次系统比规模相当的非层次系统进化速度快很多^[6]。Prigogine 等^[7]的“探索复杂性”主要是指系统的自组织。美国人工生命之父 Langton 把复杂性理解为混沌的边缘,即复杂性最可能处在有序和无序状态之间^[2]。Buck^[8]认为可把复杂性理解为自组织临界性。Holland^[9]认为复杂性是“隐秩序”,适应性造就复杂性。法国的 Morelan 认为“复杂性是辩证法的统一”,可视复杂性为有序和无序的对立统一^[2]。

20 世纪三四十年代, Godel、Turing 等数理学

* 收稿日期:2016-12-05
基金项目:新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0893)
作者简介:段晓君(1976—),女,江西九江人,教授,博士,博士生导师,E-mail:xj_duan@163.com

家在研究数学问题的可解性时提出了计算问题,而后到 60 年代逐渐发展成计算复杂性理论^[2];之后 Kolmogorov 等^[10-11]提出了算法复杂性,即用描述符号序列的最短程序长度来度量该序列的复杂度,但具体应用时难以计算且具有一定的主观性。Cramer^[12]将复杂性定义为系统可能状态数目的对数,此定义具有一定的主观性。他还以算法复杂性为基础定义了亚临界复杂性、临界复杂性和根本复杂性。随之又有了代数复杂性的概念^[2],用求解问题所需的计算次数来度量复杂度。算法复杂性及引申都是利用随机性度量复杂性,而 Gellmann 利用对系统规律性的简述长度来衡量有效复杂性^[2,13]。有效复杂性处在有序和无序的中间地带。文献[9]用无序函数(图 1)来定义系统的复杂性,对于非平衡态,利用系统的无序函数及与平衡态的距离度量系统的复杂性;如果系统到达平衡态(即最混乱状态),或者完全有序(即距平衡态最远),则系统的复杂性消失^[14]。

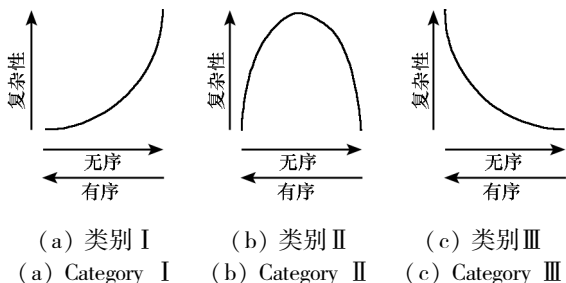


图 1 用无序函数刻画复杂性的三个类别^[14]

Fig. 1 Three categories of complexity as a function of disorder^[14]

构成系统不同的元素也会影响自身复杂性, Dodder 和 Dare 将复杂性特点概括为:静态复杂性、动态复杂性、信息复杂性^[15]。Manson^[16]把复杂性研究分为算法复杂性、确定性复杂性和集成复杂性。Wade 和 Heydari^[1]从三个角度给出了复杂性的定义。①行为复杂性:将系统看成是一个黑箱,复杂性可基于系统输出的规律性和随机性来度量,用 Shannon 信息熵来定量描述系统的复杂性。②结构复杂性:基于系统的结构进行复杂性的测量和定义。一般而言,组成系统的单元数量越大、种类越多、构成系统的子系统结构层次越多、互相牵制,则系统结构越复杂。③建构复杂性:系统预测输出的难度决定了系统的复杂性。另外,系统设计与控制有关的复杂性,可分为结构复杂性、动力系统复杂性、构造复杂性^[17]。

钱学森等^[18-19]以系统再分类为基础,认为系统的复杂性包括系统间的通信方式、子系统的

定性模型、不同内容表达及获取相应知识、结构的改变等。颜泽贤等^[2,20]认为复杂性是超越层级间的不能直接还原的关系。苗东升^[2,21]对汉语中“复杂”一词从分形的角度进行了解读,并且探讨了十三类复杂性根源。文献[22]中提到圣菲研究所的科学家们对复杂性的理解概括为:复杂性科学是研究复杂系统在一些规则下怎样产生有组织性的行为。成思危^[23]将复杂性分为物理复杂性、生物复杂性和经济社会复杂性三个方面。郝柏林^[24]指出复杂性介于不确定和有序之间。吴彤^[25]提出的客观复杂性包括:结构复杂性、边界复杂性和运动复杂性。杨永福^[26]对复杂性概念和进化机制进行分析后,将复杂性分为结构复杂性、功能复杂性和组织复杂性三类。宋学峰^[27]将复杂性科学研究按系统复杂性的客观性和相对性分为自然科学和组织行为科学两大学派,前一学派认为复杂性存在于客观系统中,而后者则认为复杂性源自于人的大脑。文献[28]梳理了钱学森形成独到的复杂性研究思路和方法论的历程,总结以钱学森的观点,复杂性实际上是开放式的复杂巨系统的动力学,是巨正则复杂系统的特征。金菊良等^[29]认为,系统复杂性主要是指系统与子系统之间、子系统与子系统之间、要素与系统之间、要素与要素之间的关系呈现的各种不确定性,以及系统与外部环境之间的关系呈现出的各种不确定性。文献[30]提到不确定性是导致结构问题转化为非结构化问题或演变成复杂问题的主要因素。以复杂性命名的系统理论有复杂网络理论^[31]、复杂适应系统等。

20 世纪 80 年代中期, Larry Tesler 在一段采访中,对复杂性守恒定律(也称泰斯勒定律)进行了讨论:根据复杂性守恒定律,每个计算机应用程序都有其内在复杂度。这一观点主要应用在交互设计领域,复杂性在设计者和使用者两者之间进行分配,也反映出复杂度守恒定律的普适性。

3 复杂性的分类

美国匹兹堡大学 Rescher^[2,32]以本体论和认识论为框架,将复杂性概念分为组分复杂性(构成复杂性和分类复杂性)、结构复杂性(组织复杂性和层级复杂性)、功能复杂性(操作复杂性和通用复杂性)以及形式复杂性(描述复杂性、生成复杂性和计算复杂性),然而此分类中并没有考虑系统的规模、演化过程、行为预测、功能保持与控制等。郭雷^[3]创造性地将复杂性与平衡概念关联,并从功能角度对复杂性进行分类。根据

Rescher^[32]的基本分类框架、郭雷^[3]的从功能角度对复杂性的分类以及国内外对复杂性定义的分析,本文重新总结系统复杂性的概念分类见表 1。

表 1 复杂性概念的分类

Tab. 1 Taxonomy of complexity conception		
层面	复杂性的分类	
本体论模型	组分复杂性	构成复杂性
		分类复杂性
		规模复杂性
	结构复杂性	组织复杂性
		层次复杂性
		过程复杂性
	功能复杂性	预测复杂性
		保持复杂性
		调控复杂性
认识论模型	描述复杂性	计算复杂性
		算法复杂性
		有效复杂性

第一,组分复杂性:复杂系统拥有数目繁多的组分,组分间有着多样且复杂的相互作用,要素与要素之间的关系呈现出各种不确定性。个体的适应性以及之间非线性的相互作用是决定系统复杂性的重要因素^[33]。其一,构成复杂性:系统演化过程中,构成系统的不同因素会影响其自身复杂性。其二,分类复杂性:组分个体要素之间的变异以及其在空间分布上的不规则性,且由于异质导致组分的种类姿态万千而引起的系统复杂性。其三,规模复杂性:单元数量越大,单元类型越多,系统则因自身规模的增大而更复杂。

第二,结构复杂性:复杂性会随着关联结构从属性和多样性的提高以及联结数量和强度的提高而增加,整合生成结构复杂性^[34]。其一,组织复杂性:组织形态复杂度的提高带来了组织结构的多样性和复杂性,开放系统在演化过程中结构状态的横向、纵向和空间分布的差异越大,系统复杂性越高。其二,层次复杂性:系统不同层级间的作用差别很大,构成系统的子系统结构层次越多,系统结构越复杂。其三,过程复杂性:在复杂系统进化和演化过程中,系统内部的组成要素间相互作用的复杂关系、系统与环境边界交互作用及系统与外部环境间的复杂作用都会产生复杂性。系统通过自组织、耗散行为和自组织临界,不断变革内

部结构以及外部环境的关系,可能会出现分岔、混沌等现象,因而会在演化过程中产生复杂性^[34]。系统的结构组合方式越复杂、层次越多、组分越多,系统也会越复杂。

第三,功能复杂性:针对系统中要素(属性)的平衡性与系统整体(结构)功能之间的关系来定义^[3]。其一,预测复杂性:当预测系统状态演化时,复杂性可定义为系统状态或行为的不可预测性^[3]。系统的预测复杂性与观测者能力、系统自身、概念、表象以及环境等因素有很大的关系。就某一个系统而言,观测者对系统关键的要素如安全性、能达性、可行性和自适应等定义的不同理解以及环境的作用等,对系统模型的建立和预测有着重要的影响。文献[35]从不确定性的角度分析了预测复杂性。其二,保持复杂性:当希望保持系统功能时,复杂性可定义为系统的功能关于系统要素平衡程度的灵敏性(脆弱性或非鲁棒性)^[3]。其三,调控复杂性^[3]:当改变系统功能时,复杂性可定义为如何实现系统新功能或所需功能的难度。如何根据功能对系统的要素进行合理分配,将会直接影响到系统功能的复杂性。如果从控制理论的角度看,系统的复杂性与系统的能控性、可观性或能达性均密切相关,系统设计必须平衡系统性能与复杂性之间的关系。随着系统结构、功能和规模的增加,系统中各部分之间的直接耦合与间接耦合以及系统对于自身运行结果的反馈使得系统越来越复杂,通过合理定义和量化系统复杂性,可以采取有效措施降低系统复杂性以追求更优的设计与控制效果^[17]。

第四,描述复杂性:从描述系统状态的工作量、信息量及存储量角度出发定义系统的复杂性。其一,计算复杂性:解决一个问题所耗费的时间以及该过程中需要的计算机存储量带来的时间长度、操作及代价消耗等引起的复杂性。其二,算法复杂性:问题解决过程中涉及的描述、步骤、方法以及仿真程序等的无规则及随机性带来的复杂性。其三,有效复杂性:对系统规律性认识的表述长度来衡量系统的复杂性。描述复杂性是以数学的复杂性理论和信息理论为形式表现出来的,认为系统的复杂性就是描述系统特征的复杂性^[20]。

在三维空间中,该分类可以看作是以基元、功能维、结构维为基准,以描述复杂性为手段体现具体表示过程来定义系统的复杂性,如图 2 所示。

在上述分类中,除学科角度复杂性分类^[23]外,主要的复杂性定义和类型基本可以纳入到此复杂性概念分类体系之中。

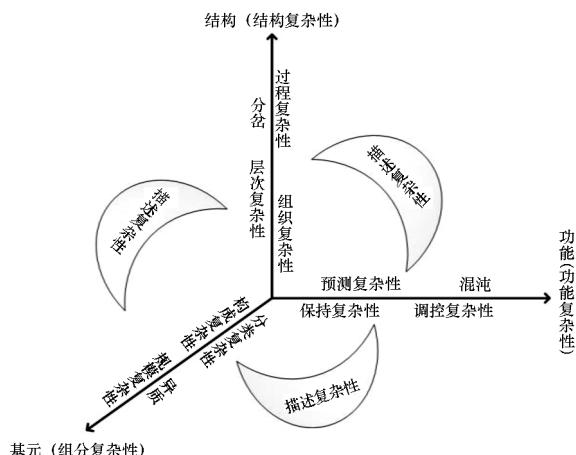


图 2 复杂性分类及哲学层面的关联图

Fig. 2 Category of complexity and the figure in the view of philosophy

4 复杂性的度量

除了系统复杂性的定义之外,更具挑战性的就是如何衡量系统的复杂性。系统复杂性的定性、定量的分析和计算方法、度量工具等方面均会面临相应的困难,以下做一简述。

第一,针对组分复杂性,主要分析系统的构成因素以及相互间作用结果的排列组合方式。Wolfram^[36]以形式语言理论为基础,用元胞自动机状态的个数来度量动力系统的复杂性。广义自由度^[37]是一种分形的维度,可以通过它来刻画组分复杂性。

第二,针对结构复杂性,尹建东等^[38]指出拓扑熵、混沌和一些拓扑传递属性可用来刻画一个动力系统的复杂性;另外,基于动力学的非线性和物理学的非平衡态,可用不稳定性、多定态、分岔、对称破缺、长程秩序等概念描述系统的复杂性^[21];文献[39]基于信息熵理论,从结构、功能分配和过程控制逻辑复杂性等方面对系统复杂性进行度量,利用正交投影方法解决了结构复杂性的多维度度量问题;而文献[27]运用五种指数方法对系统结构复杂性进行了度量,这些指数都是按照组织行为学派的观点,从心理学角度提出的,是对复杂性的一种定性刻画,定量化程度不太高;文献[17]从系统结构角度,将信息系统进行结构层次划分,然后针对层内及层间的基本单元和相互关系进行复杂性测量,主要利用 Petri 网、熵等方法。随着复杂网络理论的发展,复杂拓扑结构图、网络也运用于描述软件系统的复杂性。进化的复杂性往往表现为层级结构,在动态演化过程中具有近可分解性这一性质,可简化对复杂系统

的描述,在寻求对复杂系统的理解时,可利用两种主要描述类型——状态描述和过程描述,二者也可互相转化^[6]。

第三,针对功能复杂性,分类进行说明。就预测复杂性而言,针对获知组成要素之间的相互作用和行为的困难,可以通过约简系统状态空间、均化系统元素等来降低预测系统未来行为的困难度^[1]。对于保持复杂性,信息熵是刻画系统信息量的一个度量,主要用于度量信息的不确定性,适用于分析系统在信息传输、转化过程中存在不确定性的问题。针对调控复杂性,可从功能实现和功能分配两个方面对系统功能复杂性进行度量。利用系统复杂性实现系统控制及设计主要应从系统结构的角度(系统大小、模块耦合性和划分)对系统进行研究,特别值得注意的是系统中的间接耦合、反馈循环及涌现性和突变性等^[17]。

第四,针对描述复杂性,可以从信息科学和计算科学的角度给以量化^[20]。关于计算复杂性、算法复杂性、有效复杂性^[40-42],前文已经进行了相关描述。乔姆斯基把串行语言分成从简单到复杂的四类,就有了对形式语言的复杂性测度,基于此即有语法复杂性定义^[2]。Crutchfield 和 Young^[43-44]提出了基于统计力学的统计复杂性,在此基础上,将随机因素引入自动机,构造随机自动机 ε 机,以 ε 机的计算能力度量动力系统的复杂程度,不过构造 ε 机的建模过程计算量大;Shiner 等^[45]基于有序度与无序度,给出一种系统通用的复杂性度量方法,方法简单但偏笼统,难以反映系统的内在特征;还有比较经典的结构化程序复杂性度量方法^[17]如 Halstead 复杂性度量;McCabe 度量法等。另有基于数据复杂性的度量工具^[46]。

特别值得一提的是熵,该度量工具应用较广,在以上四类复杂性中均可应用。它可以忽略层次结构直接度量系统体系结构的复杂性。系统的熵值影响因素包括系统中元素数量、类型以及元素间关系的复杂程度,所以常用信息熵来衡量系统的复杂性。就模型的复杂性而言,可以用参数个数、曲率、信息准则等来刻画参数模型的复杂性,用广义自由度、熵等刻画非参数模型的复杂性,不过广义自由度是一种经验性的研究工具。另外,通过算法信息容量^[15](Algorithmic Information Content, AIC)来衡量系统的复杂性也有广泛的应用,可用最少的信息量描述算法的复杂性,最短的计算程序来表示被度量的系统。

5 数学工具及例子

系统复杂性的度量需要通过数学模型来进行稳定性和定量研究。在描述和解决复杂性问题的过程中,将会涉及有序性和无序性、离散性和连续性、结构确定性和内在随机性、结构稳定性和机理多变性、初值敏感性和结果规律性等具有对立统一性的数学范畴。这一研究所涉及的工具至少包括代数学、数论、群论、图论、拓扑学、模糊数学、突变论、复杂网络、微分动力系统、微积分学、矩阵计算、张量、最优化理论、数值分析、博弈论、变分学、凸分析、概率论与数理统计、数据分析、科学计算、随机过程、遍历论、不确定性量化、动态规划、微分对策等数学工具,以及信息论、控制论和决策论、运筹学、最优控制理论、大系统理论等其他相关理论^[3]。

在统计学中,统计模型的复杂度其实就是赋范空间的复杂度,大致可认为是与样本无关的复杂度及与样本相关的复杂度。在不考虑样本的情况下,可以通过度量熵、VC 维^[47]、广义链^[48]和极值不等式^[49]等来刻画模型的复杂性;而与样本有关的复杂度,从复杂性角度给出非参数估计的基础,即经验过程与概率集中不等式,可以通过经验过程、Rademacher 过程^[50]和对称不等式^[49]来度量模型的复杂度,当然,在此过程中,可由与样本无关的复杂度所控制。结合有限信息系统的辨识过程,可比较辨识算法的收敛性、最优性及空间复杂性^[51],可基于此进一步理解有限信息系统的复杂度。显然,在考虑统计模型的复杂度时,可从模型的分类复杂性、过程复杂性、调控复杂性、算法复杂性、计算复杂性以及有效复杂性角度出发来衡量它的复杂度。

接下来以案例形式不加证明地给出一个函数熵的上界,由此来度量系统模型的复杂性。

例 1 (Holder 球): 设 $\chi \subset \mathbf{R}^d$ 是有界、非空凸集内部, Holder 球^[49] $C_{\alpha}^{\chi}(\chi)$ 定义为连续函数 $f: \chi \rightarrow \mathbf{R}$, $\|f\|_{\alpha} \leq M$ 所组成的集合, α 为实数, $\|f\|_{\alpha} = \max_{k, \alpha \leq \underline{\alpha}} \sup_x |D^k f(x)| + \max_{k, \alpha = \underline{\alpha}} \sup_{x, y} \frac{|D^k f(x) - D^k f(y)|}{\|x - y\|^{\alpha - \underline{\alpha}}}$, $D^k = \frac{\partial \sum k_i}{\partial x_1^{k_1} \cdots \partial x_d^{k_d}}$, $\underline{\alpha} = [\alpha]$ (取整), $k = (k_1, k_2, \cdots, k_d)$, $k_{\cdot} = k_1 + \cdots + k_d$, 此时对任意的 $\varepsilon > 0$, 有

$$\lg N(\varepsilon, C_1^{\alpha}(x), \|\cdot\|) \leq K_{\alpha, d, \chi} \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{\frac{d}{\alpha}}$$

其中, K 是仅与 α, d, χ 相关的常数, $\lg N(\varepsilon, C_1^{\alpha}(x), \|\cdot\|)$ 为覆盖熵, 由此可知, 在分析该类函

数模型时, 维数 d 越大, 熵越大; 衡量函数光滑性的参数 α 越大, 熵越小。此即, 规模 (组分复杂性) 越大, 系统越复杂; 结构 (结构复杂性) 越稳定, 系统越简单。同时, 可通过 d, α 的大小来预测系统的复杂性, 亦可通过函数熵上界的几种定义^[49]来判断函数的复杂性。

以下从概率分布的角度来分析从简单到复杂的涌现性。

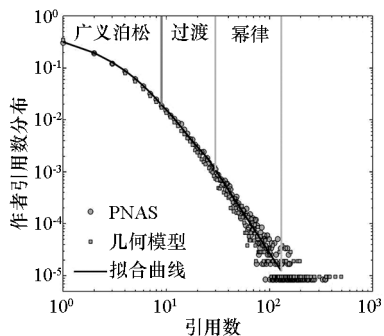
例 2 (简单到复杂的涌现性——从泊松到幂律): 复杂网络的研究方法一般是将复杂系统简化为节点及连接节点的边的集合^[52]。网络的无标度性质通常是指度或入度服从幂律分布。Matthew 效应或偏好依附机制常被认为是无标度性质的原因。早在 1965 年, Price 发现了引文网络中的 Matthew 效应 (称之为累积效应), 并建立了相应的数学模型, 预测了引文网络入度分布尾端的幂律性质^[53]。Price 模型中, 节点获得新引用的概率与已获得的引用加上某一常数成正比, 与 BA 模型^[54]类似。

Price 模型与 BA 模型均为全局自组织网络, 连边基于节点对网络节点度信息全面掌控, 这与大多数真实网络演化行为不符。引文与合作^[55-57]等网络中的节点行为大部分是基于局部信息, 这些模型生成同等节点规模网络的度分布和真实网络差距很大。如部分论文与作者引用次数等指标只有非常少的部分服从幂律, 而绝大部分服从广义泊松分布, 并且两个分布之间有一个过渡过程。何种机理能生成这个过程? 运用假设检验方法可以验证通过一系列泊松分布叠加可生成幂律分布^[55-57]。这是一个从简单到复杂的涌现过程 (如图 3 所示)。

由上述可知, 随着模型的不同 (组分复杂性), 系统的复杂性也会改变; 由泊松分布到幂律分布 (结构复杂性), 这是系统从简单到复杂的涌现过程; 此过程又存在着系统节点连接能力的多样性 (功能复杂性) 和表述的多样性 (描述复杂性)。

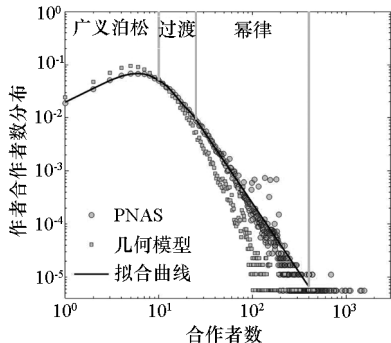
6 结论

从复杂性语义出发, 总结了国内外学者对复杂性的部分定义, 并在前人的分类基础上, 重新综合了复杂性的概念分类, 且结合算例说明了复杂性的度量方式。由于复杂性是语境依赖的, 系统复杂性暂无统一的定义。复杂性的描述方式和度量工具亦并不唯一。如: 可以将复杂系统表述为一个包含异质节点、异质边和多层子图结构的超



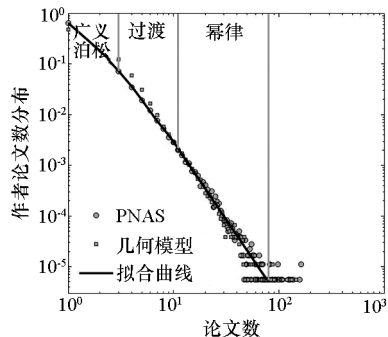
(a) 作者引用数分布

(a) Distribution of the number of citations per author



(b) 合作者数量分布

(b) Distribution of the number of coauthors per author



(c) 论文数量分布

(c) Distribution of the number of papers per author

图 3 社会网络中局部自组织的几何图模型通过系列泊松分布叠加为幂律分布

Fig.3 The geometric model of local self-organization in social network generates power-law by summing a range of Poisson distributions with various expected values

图,系统可看作更大系统的子图,环境可看作其补图;也可以从系统的规模、结构、非线性、开放性以及时间与控制层面上定义复杂性等;或可以借助其代理模型进行分析,比如基于仿真的方法、基于机理与应用的方法等。不同的研究目的及环境下,复杂性将会被赋予更丰富的含义。

参考文献 (References)

[1] Wade J, Heydari J. Complexity: definition and reduction techniques; some simple thoughts on complex systems [J].

Complex Systems Design and Management, 2014, 1234 (18): 213 - 226.

[2] 黄欣荣. 复杂性科学的方法论研究 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006.

HUANG Xinrong. The research methods of complexity science [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2006. (in Chinese)

[3] 郭雷. 系统学是什么 [J]. 系统科学与数学, 2016, 36 (3): 291 - 301.

GUO Lei. What is phylogeny [J]. Journal of Systems Science and Mathematics, 2016, 36 (3): 291 - 301. (in Chinese)

[4] 谭璐, 姜璐. 系统科学导论 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2013.

TAN Lu, JIANG Lu. The introduction of sciences system [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2013. (in Chinese)

[5] Wavell W. Science and complexity [M]. USA: American Scientist, 1948: 536 - 544.

[6] 司马贺. 人工科学——复杂性的构造: 层级结构 [J]. 美国哲学学会会议, 1962, 106: 467 - 482.

Simon H A. Artificial science—the construction of complexity: hierarchy [J]. The Conference of American Philosophical Society, 1962, 106: 467 - 482. (in Chinese)

[7] 尼科里斯, 普利高津. 探索复杂性 [M]. 罗久里, 陈奎宁, 译. 成都: 四川教育出版社, 1986.

Nikolis G, Prigogine I. Explored complexity [M]. Translated by LUO Jiuli, CHEN Kuining. Chengdu: Sichuan Education Press, 1986. (in Chinese)

[8] 巴克·帕. 大自然如何工作 [M]. 李炜, 蔡勖, 译. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.

Buck P. How nature works [M]. Translated by LI Wei, CAI Xu. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001. (in Chinese)

[9] 霍兰·约翰. 涌现——从混沌到有序 [M]. 陈禹, 等, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2001.

Holland J. Emergence: from chaos to order [M]. Translated by CHEN Yu, et al. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Press, 2001. (in Chinese)

[10] Kolmogorov A. Three approaches to the quantitative definition of information [J]. Problems of Information Transmission, 1965 (1): 3 - 11.

[11] Li M, Vitányi P M B. An introduction to Kolmogorov complexity and its applications [M]. 3rd ed. USA: Springer, 2008.

[12] Cramer F. Chaos and order; the complex structure of living systems [M]. USA: VCH Publish, 1993: 340 - 345.

[13] 欧阳莹之. 复杂系统理论基础 [M]. 田宝国, 周亚, 樊瑛, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2002.

OUYANG Yingzhi. The theoretical foundation of complex system [M]. Translated by TIAN Baoguo, ZHOU Ya, FAN Ying. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Press, 2002. (in Chinese)

[14] Shiner J S, Davison M, Landsberg P T. Simple measure for complexity [J]. Physical Review E: Covering Statistical, Nonlinear, Biological, and Soft Matter Physics, 1999, 59 (2): 1459 - 1464.

[15] Dodder R, Dare R. Complex adaptive systems and complexity theory: inter-related knowledge domains: ESD. 83 [R]. USA: Research Seminar in Engineering Systems, MIT, 2000.

[16] Manson S M. Simplifying complexity: a review of complexity

theory[J]. Geoforum, 2001, 32(3): 405–414.

[17] Fischl J, Nilchiani R, Wade J. Dynamic complexity measures for use in complexity-based system design[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 4(11): 2018–2027.

[18] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, 13(1): 3–10.

QIAN Xuesen, YU Jingyuan, DAI Ruwei. A new field of science—opened complicated huge system and its methodology[J]. Chinese Journal of Nature, 1990, 13(1): 3–10. (in Chinese)

[19] 卢明森. 钱学森思维科学思想[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

LU Mingsen. The scientific thought of QIAN Xuesen[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)

[20] 颜泽贤. 复杂系统演化论[M]. 北京: 人民出版社, 1993.

YAN Zexian. The evolution theory of systems[M]. Beijing: People Press, 1993. (in Chinese)

[21] 苗东升. 系统科学大学讲稿[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2007.

MIAO Dongsheng. The university lecture of systems science[M]. Beijing: People's University of China Press, 2007. (in Chinese)

[22] 戴汝为, 沙飞. 复杂性问题研究综述: 概念及研究方法[J]. 自然杂志, 1995, 17(2): 73–77.

DAI Ruwei, SHA Fei. The summarize of study of complexity problem: concept and research methodology[J]. Chinese Journal of Nature, 1995, 17(2): 73–77. (in Chinese)

[23] 成思危. 复杂性科学探索[M]. 北京: 民主与建设出版社, 1999.

CHENG Siwei. The explorer of complexity science[M]. Beijing: Democracy and Construction Press, 1999. (in Chinese)

[24] 郝柏林. 复杂性的刻画和“复杂性科学”[J]. 物理, 2001, 30(8): 466–471.

HAO Bolin. Characterization of complexity and “the science of complexity”[J]. Physics, 2001, 30(8): 466–471. (in Chinese)

[25] 吴彤. 科学哲学视野中的客观复杂性[J]. 系统辩证学学报, 2001, 9(4): 44–47.

WU Tong. Objective complexity in the view of philosophy of science[J]. Journal of Systemic Dialectics, 2001, 9(4): 44–47. (in Chinese)

[26] 杨永福. 复杂性的起源与增长[C]//复杂性科学学术会议, 2001.

YANG Yongfu. The origin of complexity and its increasing[C]//Proceedings of Academic Conference of Complexity Science, 2001. (in Chinese)

[27] 宋学峰. 系统复杂性的度量方法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(1): 9–15, 25.

SONG Xuefeng. The measurement of system complexity[J]. System Engineering Theory and Practice, 2002, 22(1): 9–15, 25. (in Chinese)

[28] 苗东升. 钱学森复杂性研究评述[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2004, 24(4): 67–71.

MIAO Dongsheng. Review on the study of complexity by QIAN Xuesen[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2004, 24(4): 67–71. (in Chinese)

[29] 金菊良, 魏一鸣. 复杂系统广义智能评价方法与应

用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

JIN Juliang, WEI Yiming. The generalized intelligent evaluation methodology and its application[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

[30] 顾基发, 唐锡晋. 系统集成系统建模[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(2): 32–42.

GU Jifa, TANG Xijin. Meta-synthetic system modeling[J]. Complex System and Complexity Science, 2004, 1(2): 32–42. (in Chinese)

[31] 郭雷, 徐晓鸥. 复杂网络[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2006.

GUO Lei, XU Xiaou. Complex network[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Press, 2006. (in Chinese)

[32] Rescher N. Complexity: a philosophy overview[M]. USA: Transaction Publishers, 1998.

[33] 狄增如. 系统科学视角下的复杂网络研究[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(2): 111–116.

DI Zengru. Research of complex networks from the view of systems science[J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2011, 33(2): 111–116. (in Chinese)

[34] 李士勇. 非线性科学与复杂性科学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.

LI Shiyong. Nonlinear science and complexity science[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)

[35] 波拉克·N. 亨利. 不确定的科学与不确定的世界[M]. 李萍萍, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2005.

Polack N H. Uncertainty science and word[M]. Translated by LI Pingping. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Press, 2005. (in Chinese)

[36] Wolfram S. Computation theory of cellular automata[J]. Communications in Mathematical Physics, 1984, 96(1): 15–57.

[37] Ryan J T, Taylor J. Degrees of freedom in LASSO problems[J]. The Annals of Statistics, 2012, 40(2): 1198–1232.

[38] 尹建东, 周作岭. 熵极小动力系统的复杂性[J]. 数学物理学报, 2015, 35(1): 29–35.

YIN Jiandong, ZHOU Zuoling. The complexity of entropy-minimal dynamical systems[M]. Journal of Mathematical Physics, 2015, 35(1): 29–35. (in Chinese)

[39] 崔鹏亮, 王海峰. 基于信息熵的列控系统复杂性度量方法[J]. 铁道学报, 2015, 37(9): 53–61.

CUI Pengliang, WANG Haifeng. Information entropy-based method for complexity measurement of train control system[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(9): 53–61. (in Chinese)

[40] 吕埃勒·大卫. 机遇与混沌[M]. 刘式达, 梁爽, 李滇林, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2005.

Ruelle D. Opportunity and chaos[M]. Translated by LIU Shida, LIANG Shuang, LI Dianlin. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Press, 2005. (in Chinese)

[41] 盖尔曼·M. 夸克与美洲豹——简单性和复杂性的奇遇[M]. 杨建邺, 等, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1998.

Gell-Mann M. Quark and leopard—the encounter of simpleness and complexity[M]. Translated by YANG Jianye, et al. Changsha: Hunan Scientific and Technological Press,

1998. (in Chinese)
- [42] 维纳·N. 控制论[M]. 郝季仁, 译. 北京: 京华出版社, 2000.
- Vina N. Cybernetics[M]. Translated by HAO Jiren. Beijing: JINGWAH Press, 2000. (in Chinese)
- [43] Crutchfield J P. The calculi of emergence: computation, dynamics, and induction [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1994, 75(1/2/3): 11–54.
- [44] Crutchfield J P, Young K. Inferring statistical complexity [J]. Physical Review Letters, 1989, 63(2): 105–108.
- [45] Shiner J S, Davison M, Landsberg P T. Simple measure for complexity [J]. Physical Review E, 1999, 59(2): 1459–1464.
- [46] 刘伟, 葛世伦, 王念新, 等. 基于数据复杂性的信息复杂度测量[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(12): 3198–3208.
- LIU Wei, GE Shilun, WANG Nianxin, et al. Measuring the complexity of information system based on the data complexity[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(12): 3198–3208. (in Chinese)
- [47] Vapnik V N. 统计学习理论的本质[M]. 张学工, 译. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- Vapnik V N. The essence of statistics study theory [M]. Translated by ZHANG Xuegong. Beijing: Tsinghua Press, 2000. (in Chinese)
- [48] Talagrand M. The generic chaining [M]. USA: Springer, 2005.
- [49] van der Vaart A, Wellner J A. Weak convergence and empirical processes with applications to statistics [M]. USA: Springer, 1996.
- [50] Bartlett B L, Bousquet O, Mendelson S. Local Rademacher complexities [J]. The Annals of Statistics, 2005, 33(4): 1497–1537.
- [51] 赵延龙, 张纪峰, 王乐一, 等. 有限信息系统辨识综述[C]//中国自动化大会暨两化融合高峰会议, 2009.
- ZHAO Yanlong, ZHANG Jifeng, WANG Leyi, et al. Review of limited-information system identification [C]//Proceedings of the Chinese Automation of Congress, 2009. (in Chinese)
- [52] 汪秉宏, 周涛, 王文旭, 等. 当前复杂系统研究的几个方向[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(4): 21–28.
- WANG Binghong, ZHOU Tao, WANG Wenxu, et al. Several direction in complex system research [J]. Complex System and Complexity Science, 2008, 5(4): 21–28. (in Chinese)
- [53] de Solla Price D J. Networks of scientific papers [J]. Science, 1965, 149(3683): 510–515.
- [54] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286: 509–512.
- [55] Xie Z, Xie Z L, Li J P, et al. Modeling the coevolution between citations and coauthorships of scientific papers [J]. Scientometrics, 2017, 112: 483–507.
- [56] Xie Z, Ouyang Z Z, Li J P. A geometric graph model for coauthorship networks [J]. Journal of Informetrics, 2016, 10(1): 299–311.
- [57] Xie Z, Ouyang Z Z, Li J P, et al. Modelling transition phenomena of scientific coauthorship networks [J]. Journal of the Association for Information Science and Technology, 2018, 69(2): 305–317.