

复杂网络研究及其意义*

吴彤

近年来,学界关于复杂网络的研究正方兴未艾。特别是,国际上有两项开创性工作掀起了一股不小的研究复杂网络的热潮。一是1998年Watts和Strogatz在Nature杂志上发表文章,引入了小世界(Small-World)网络模型,以描述从完全规则网络到完全随机网络的转变。小世界网络既具有与规则网络类似的聚类特性,又具有与随机网络类似的较小的平均路径长度。(Watts & Strogatz, p. 440-442)二是1999年Barabasi和Albert在Science上发表文章指出,许多实际的复杂网络的连接度分布具有幂律形式。由于幂律分布没有明显的特征长度,该类网络又被称为无标度(Scale-Free)网络。(Barabasi & Albert, p. 509-512)而后科学家们又研究了各种复杂网络的各种特性。(Strogatz, p. 268-276)国内学界也已经注意到了这种趋势,并且也开始展开研究。(吴金闪、狄增如,第18-46页)加入复杂网络研究的学者主要来自图论、统计物理学、计算机网络研究、生态学、社会学以及经济学等领域,研究所涉及的网络主要有:生命科学领域的各种网络(如细胞网络、蛋白质-蛋白质作用网络、蛋白质折叠网络、神经网络、生态网络)、Internet/WWW网络、社会网络,包括流行性疾病的传播网络、科学家合作网络、人类性关系网络、语言学网络,等等;所使用的主要方法是数学上的图论、物理学中的统计物理学方法和社会网络分析方法。本文首先介绍这一研究的发展,并在此基础上论述这类研究的重要的科学和哲学意义。

一、复杂网络研究:小世界、无标度和幂律现象

在当前的复杂网络研究中,研究者提出的最主要概念就是“网络”(networks)。实际上早在1922年,社会学家斯梅尔(G. Simmel)就曾不经意地创造了该词汇,未曾料想到这个词汇会在社会学领域中使用极为频繁,并且成为社会网络分析方法的主导词汇;更没有想到的是,在今天的自然科学中,网络研究也成为重要课题;今天的社会已经成为网络社会。

抽象地说,元素及其元素之间的关系作为一个整体就是网络。在数学和自然科学领域,网络被抽象成为一些顶点和顶点之间的连线即边。例如在统计物理学和网络分析中,科学家把个体与相互作用直接抽象为顶点与边的系统称为网络。目前已经得到研究的网络在结构上主要包

*本文写成后,参加了在北京大学举办的复杂性理论及其应用讨论会。会议中,姜璐、陈禹和狄增如教授关于复杂网络的介绍以及车宏安教授提供的复杂网络研究资料都给了作者进一步修改观点的帮助。特此致谢。括:规则(regular)网络、随机(random)网络和无标度网络等。在图论中,所谓规则网络如一维链、二维晶格即具有平移对称性的网络。20世纪50年代以后无明确设计原理的、具有随意连接关系的大规模网络,首先被匈牙利数学家Paul Erdős和Alfréd Rényi描述为随机网络。这是最简单的也是被大多数人认识的复杂网络。在图论中,由N个顶点构成的图中,可以存在 C_2^N 条边,我们从中随机连接M条边所构成的网络就叫随机网络。

(吴金闪、狄增如)

另一类网络是同时具有高集聚程度、小最短路径的网络,称为小世界网络。Watts和Strogatz发现,对于 $0 < p < 1$ 的情况,存在一个很大的p的区域,同时拥有较大的集聚程度和较小的最短距离。一个典型的小世界网络见图1中间的示意图,其几何性质如图2所示。

图1Small-World网络模型(左图为规则网络,右图为随机网络)图2Small-World网络的几何性质。同时有大集聚程度而小最短距离Small-World网络的重要特征,而且此性质在p略大于0到小于1的很大范围内存在

(引自Watts & Strogatz, p. 440-442)

目前,复杂网络研究的内容主要包括:网络的几何性质,网络的形成机制,网络演化的统计规律,网络上的模型性质,以及网络的结构稳定性,网络的演化动力学机制等问题。其中在自然科学领域,网络研究的基本测度包括:度(degree)及其分布特征,度的相关性,集聚程度及其分布特征,最短距离及其分布特征,介数(betweenness)及其分布特征,连通集团的规模分布。通过这些研究,三种概念在当代对复杂网络的思考中占有重要地位。

第一,小世界的概念。它以简单的措辞描述了大多数网络尽管规模很大但是任意两个节(顶)点间却有一条相当短的路径的事实。以日常语言看,它反映的是相互关系的数目可以很小但却能够连接世界的事实,例如,在社会网络中,人与人相互认识的关系很少,但是却可以找到很远的无关系的其他人。正如麦克卢汉所说,地球变得越来越小,变成一个地球村,也就是说,变成一个小世界。

第二,集群即集聚程度(clustering coefficient)的概念。例如,社会网络中总是存在熟人圈或朋友圈,其中每个成员都认识其他成员。集聚程度的意义是网络集团化的程度;这是一种网络的内聚倾向。连通集团概念反映的是一个大网络中各集聚的小网络分布和相互联系的情况。例如,它可以反映这个朋友圈与另一个朋友圈的相互关系。

第三,幂律(power law)的度分布概念。度指的是网络中顶(节)点(相当于一个个体)与顶点关系(用网络中的边表达)的数

量；度的相关性指顶点之间关系的联系紧密性；介数是一个重要的全局几何量。介数u的介数含义为网络中所有最短路径之中，经过u的数量。它反映了顶点u（即网络中有关联的个体）的影响力。无标度网络的特征主要集中反映了集聚的集中性。

科学家发现绝大多数实际的复杂网络都具有如下几个基本特征（方锦清、汪小帆、刘曾荣，第9-12、64页）：

(1) 网络行为的统计性：网络节点数可以有成百上千万，甚至更多，从而使得大规模性的网络行为具有统计特性。(2) 节点动力学行为的复杂性：各个节点本身可以是各非线性系统具有分岔和混沌等非线性动力学行为。(3) 网络连接的稀疏性：一个N个节点的具有全局耦合结构的网络的连接数目为 $O(N^2)$ ，而实际大型网络的连接数目通常为 $O(N)$ 。(4) 连接结构的复杂性：网络连接结构既非完全规则也非完全随机。(5) 网络的时空演化复杂性：复杂网络具有空间和时间的演化复杂性，展示出丰富的复杂行为，特别是网络节点之间的不同类型的同步化运动（包括出现周期、非周期[混沌]和阵发行为等运动）。

以上5种特征，反映了实际网络的复杂性特征。一方面，它具有无序演化的特征，另一方面，它也具有增加有序程度的演化特征。它具有分形和混沌的特征，具有自组织演化的特征，也具有形成序参量的特征。因此，复杂网络的研究可能会综合以往的各种自组织理论、非线性和复杂性理论研究的成果，从而形成新的复杂性研究机制的理论。

在社会科学领域，社会网络分析方法也通过引入数学图论和计算机技术为手段而日臻成熟，甚至带来“社会学的新古典革命”。有学者认为，网络分析对社会学发展的突出贡献表现在以下几个方面：第一，提出了一系列指导着社会网络研究的概念、命题、基本原理及其相关的理论，使社会学对于社会结构的研究面目一新。社会网络分析形成了受到大规模的经验研究支持的一套首尾一致的特征和原理。网络分析者在社会关系的层次上将微观社会网和宏观的社会结构连结起来。第二，在研究方法上，通过创造一系列更好地理解结构和关系的测量手段、资料收集方法和资料分析技术，摆脱了范畴或属性分析的个人主义方法论、还原主义解释和循环论证的困境。第三，网络分析涵盖甚至超出了社会学研究的传统领域。经过近40年的发展，社会网络分析已经从初期的小群体研究扩展到社区、社会阶层、社会流动、社会变迁、社会整合与分化、城市社会学、经济社会学、政治社会学、组织社会学、社会工作、科学社会学、人类生态学以及一些边缘性学科如精神健康学、老年学等领域，甚至一些经济学家和心理学家也自觉运用社会网络分析的有关概念和方法研究经济与社会的关系和人与人之间的关系。（肖鸿，第1-11页）

二、复杂网络研究的意义：人和世界即网络

复杂网络的研究，为我们提供了一种复杂性研究的新视角、新方法，并且提供了一种比较的视野。可以在复杂网络研究的旗帜下，对各种复杂网络进行比较、研究和综合概括。

首先，网络的现象涵盖极其广泛，因此，对网络的研究极具意义。例如，科学家发现大多数实际的系统都是复杂网络，从细菌、细胞和蛋白质系统，到人类性关系，甚至到科学家之间的合作，论文之间的引证联系，大型的Internet和WWW网络等，它们都构成某种网络系统，也构成某种复杂网络系统。因此，如若发现一种概括它们的共同特性的观点和方法，则能够抓取这类网络的关键，形成深入的认识。而复杂网络研究恰恰在这点上发现了它们同时都具有的3个主要特征：小世界、无标度性和高集团度。

以往人们常常强调自然与人工创造物之间的差异，强调技术作为人的存在的异化特征，但是在复杂网络的研究中，却强烈表明，只要是复杂网络，就具有共同特征。这种人工自然与天然自然的同一性在复杂网络系统中的体现，既让我们感到安心，因为我们和自然在共同演化（在演化中技术这种冷冰冰的东西似乎愈益具有人性的特征了，而人也愈益具有自然的特征了，老子的道法自然的思想似乎正在向我们走来）；又使得我们担心：是否技术这种人工创造物终归有一天会变得具有了真正意义上的生命特征？人类在文学、科幻小说和电影中表达出来的担心也许真的有一些道理。

人是什么？在亚里士多德看来，人是政治动物；在卡西尔看来，人是符号的文化动物；在复杂网络的观点看来，人是复杂网络动物。人从远古走来，一开始，人就构造出林中路，并且把路构造成为网路；在农业社会，人又构造出各种大型的“水利网络”；通过航海的网络，资本主义才遍布世界；在工业社会，普通的小路被公路、铁路网络所替代，休闲散步的路被高速公路所淹没，人的世界成为公路和铁路之网；在今天的信息时代，各个国家致力于建设自己的信息高速公路，即新型的信息网络，如今，Internet/WWW网络已经基本涵盖整个世界。人类就生活于其中。人类的演化就是在给自己增加着的各种网络的演化。人的存在方式就是技术的存在，人的“此在”就是“已在”的叠加、取代和更新，就是复杂网络未来存在到演化的展开。人把自己生存的世界变成了网络，人也就成了网络动物；网络越有效、越发达，世界就越小，人的社会性就越得到强化。

其次，复杂网络的研究，在大量网络现象的基础上抽象出两种复杂网络：一种即小世界网络，另一种即无标度网络。这两种网络都同时具有两个基本特征：高平均集聚程度、小的最短路径，而无标度网络的度分布又具有幂律分布特征。因此无标度网络的复杂性程度还高于小世界网络的复杂性程度。高平均集聚程度反映了事物在小世界的境况下自发走向有序的态势；小的最短路径特征反映了演化速度快的特征。系统的低层次的因素之间的局部交互作用会更密集，作用会更频繁，在系统层次会涌现出更多的性质。Watts和Strogatz文章研究的传染病模型中，其接触传染率为1，感染的顶点（可能是个体的人）在一个单位时间以后退出系统。对于任何网络，这样的传染病都将在整个网络扩散；研究其扩散时间，发现对于从规则网络到随机网络的所有 $p \in (0, 1)$ 网络，其扩散时间刚好与最短路径一致。也就是说，在规则网络上传播所需时间长，但是只要 p 略大于0，传染病就会得到迅速传播。这很好地说明了最短路径这一几何量的作用（例如，SARS传播的控制就不仅仅是提高治疗的医学问题，而且是一个如何切断网络的问题）。在这个传染病模型上，任何一个顶点都同时向其所有近邻传播，如果集聚程度高，传播会更广泛。科学家发现在小世界网络上同时具有驰豫时间短、共振性好的特征，而这些特征就分别来源于网络的小最短路径和高集聚程度。这都说明高集聚程度和小最短路径是小世界网络上复杂性增加的两个特性。

在复杂网络研究中，科学家所采用的方法是在规则网络的基础上，断开其中某些顶点的链接，然后导入随机链接其中若干顶点的方法，结果构造出来的网络立刻就具有了小世界的特性。在无标度网络的构造中，科学家引入两个规则：其一，节（顶）点按照一定速率增长；其二，新增加的节（顶）点与原来网络节点的连接是按照原来连接概率高的偏好择优连接的方式进行。这两个简单规则立刻就引起了网络的复杂性增长。这种方法的实质涵义实际上是在本体的规则性中引入了随机性和吸引子。构造后出现的复杂性含义是极其丰富的，也许世界的复杂性增长就是通过一定的随机性开始的，正如耗散结构理论的创始人普里戈金所说，“涨落导致有序”。随机性是导致无序的观点在这里被颠覆了。小的随机性的渗入就导致了更高的平均集聚程度，导致有序的产生。这正是法国思想家莫兰的思想。（莫兰，第156-159页）不过在莫兰那里，它是一种睿智，而在复杂网络的研究者这里，它在一定程度上已经得到科学的解释。

在混沌的研究中，我们同样发现，混沌是一种确定性中的类随机性。在规则性中引入随机性，在复杂网络中具有异曲同工之妙。规则的东西看似有序，实际上只是一种平庸的有序。世界需要规则，同样需要随机；世界需要有序，同样需要无序。这种辩证法并不是说说而已的语言游戏，而是真实地在发生作用的演化动力学机制：无序与有序展开的矛盾。

另外，复杂网络的基本测度性概念也反映了网络内某些个体对其他个体的影响，以及其他个体对这些个体的影响，这种双向的影响是网络分析的重点。如一个顶点的度的概念，一个顶点的度是指与此顶点连接的边的数量。边是什么？边是相互作用的数量反映。那么，一个顶点的度就反映了与这个顶点（个体）相互作用的多寡，关注的重心是相互作用。

图3随机网络中5节点（较大）与其他节点（灰点）

联系只占全部节点联系的27%图4无标度网络中5节点（较大）与其他节点（灰点）

联系占到全部节点联系的60%（引自Nature, p. 379）在复杂网络研究中，不仅研究者非常客观地关注系统内某个体与其他个体之间的相互作用，而且还在整体的角度注视到系统的整体相互作用。表达这种整体相互作用的概念如“介数”这个非常典型的概念，其英文表达为“betweenness”，它是一个重要的全局几何量（统计性质）。它反映了顶点u 的影响力。通过复杂网络研究，我们看到关于相互作用的认识已经在一定程度上有了量化研究的成果出现，这反映了在相互作用研究上的进步。事实上，在牛顿力学里，第三定律描述了力学的相互作用；万有引力定律描述了引力相互作用；在物理学领域，四种相互作用的认识，让人们认识到了强、弱、电磁和引力相互作用的性质、作用范围等；在化学层次，化学反应也是某种相互作用；生物学层次，捕食者与被捕食者的关系也同样是某种相互作用；我们似乎发现，复杂性层次越高，相互作用越不好描述。把相互作用分解成为A对B的作用和B对A的作用似乎比较平庸，但是，继续分析这种作用的直接性、间接性和作用的程度，分析一对多和多对一的作用，并且进一步把这种作用细致化为集聚程度、最短路径，把作用与历史因素、敏感性条件联系起来，则是自复杂性研究以来的功绩，特别是复杂网络研究的功绩。

相互作用研究在复杂网络中，还有一个很有意义的地方，这就是当随机性被引入复杂网络之后，相互作用的形式和程度都会有所改变，由此形成了相互作用演化的境况。并由此形成了对这种境况的研究。这就意味着，我们将可能获得更多的关于相互作用的认识。在恩格斯的时代，我们只能认识到相互作用为止。当代的复杂网络研究已经推进了关于相互作用的认识。三、结语：在网络上

复杂网络研究尽管已经显示出极强的生命力，而且更令人兴奋的是找到了合适的描述方法，但是，这并不意味着一切问题都已经解决，我们仍然在复杂性的丛林中。如何找寻或者开辟出一条林中路，仍然是探究者的艰巨任务。抽象出规律和共同特性是非常必要的，这具有基础性意义。但是，复杂网络研究不能完全集中在研究关系的形式上，而是要针对经验过程和系统进行解释。整体网络研究发展出更精巧的数学技术、数理模型和图表符号，描述假设成分越来越多的网络结构也是必要的。虽然这种倾向有助于精确地定义各种结构包括社会结构，但事先的经验判断和观点的基点也是同样重要的，因为这决定了研究者要采取哪种网络。例如，对一个书店网络关系的认识就至少存在管理学视野和社会学视野的两种网络，这就需要研究者事先决定采取何种观点和策略，然后才是复杂网络分析的任务（如图5所示）。

当然，人文学者、哲学家和社会科学家也不能因此而拒绝研究的科学化，只是需要注意

图5 复杂网络案例：左图为管理学观点，右图为社会学观点。两个观点不同，

随之建立的复杂网络分析也不同（引自Probst & Gomez, p. 91-108）

科学化并不能完全解决所有问题，保持一个人文社会科学学者在两种文化之间的足够张力即可。因为这恰如波普尔所言，“……要紧的不是方法或者技巧，而是对问题的敏感性和对问题的一贯热情，或者，如希腊人说的，是惊奇的本性”。（波普尔，第100页）

参考文献

波普尔，1986年，《猜想与反驳——科学知识的增长》，上海译文出版社。

方锦清、汪小帆、刘曾荣，2004年：《略论复杂性问题和非线性复杂网络系统的研究》，载《科技导报》第2期。

莫兰，埃德加，2001年：《复杂思想：自觉的科学》，北京大学出版社。

吴金闪、狄增如，2004年：《从统计物理学看复杂网络研究》，载《物理学进展》第1期。

肖鸿，1999年：《试析当代社会网研究的若干进展》，载《社会学研究》第3期。

Barabasi, A-L .& Albert, R. , 1999, “Emergence of scaling in random networks”, Science, 286.

Nature, 2000, vol. 406.

Probst, Gilbert J.B. & Gomez, Peter, 1992, “Thinking in Networks to Avoid Pitfalls of Managerial Thinking”, Context and Complexity, Cultivating Contextual Understanding, edit by Magoroh Maruyama, New York: Springer Verlag.

Strogatz S.H., 2001, “Exploring complex networks”, Nature, 410.

Watts, D .J.& Strogatz, S.H. , 1998, “Collective dynamics of ‘small-world’ networks”, Nature, 393.

(作者单位：清华大学人文社会科学学院科技与社会研究所)

责任编辑：朱葆伟·应用伦理学·（《哲学研究》2004年第8期）

（《哲学研究》2004年第8期）