专家论丛

复杂中寻求简单

张嗣瀛
青岛大学复杂性科学研究所， 东北大学信息科学与工程学院

1. 复杂系统

什么是复杂系统？就像什么是“生命”，没有统一定义，但可描述这类系统的一些共同特征。

（1）由众多组成成分构成。例如股市中的股民，蚁群中的蚂蚁，计算机网络中的用户，一盘棋局中的棋子，也可以是大系统中的子系统，例如受精卵中有数千个基因小群，卵是众多基因小群构成的系统。

（2）组成成分之间有相互作用。

（3）系统是开放的，受外界影响。如角马群受雨量、水草、狮豹等的影响，受精卵受温度的影响。

（4）在一定外界条件下，系统组成成分之间开始相互作用，并演化发展。例如受精卵在一定温度条件下，某些基因小群开始启动并引起其他基因小群的活动。

（5）演化过程中，系统能自组织，自协调……，并最后发生质变。例如受精卵先开始作用的几个基因小群起开关作用，并按一定规律（自组织）引发其他基因小群作用，引起细胞分裂，逐渐形成肌肉、内脏、骨髓、羽毛等各种细胞，最后形成鸟的胚胎，发生质变。

（6）这种质变称为涌现（emergence），这是复杂系统中的一个重要概念。

自组织是复杂系统的一个重要特性。举两个例子对比，气体在管道中流动，当管道变窄时，流动加快，这时气体分子间可能发生激烈碰撞，甚至使管道变热。车辆在公路上流动，当公路变窄时，车速减慢，这是驾驶员为了避免碰撞。这就是自组织。前者不是复杂系统，研究公路上汽车流动规律，例如要据此设计自动驾驶仪，这属复杂系统。一艘航空母舰，结构极其复杂，但它不是复杂系统。

上述这些特征，也是描述复杂系统的动态演化过程。

2. 研究复杂系统的方法

复杂系统涵盖面极广，涉及生物、社会、经济、环境、生态、工程、军事等多个领域。

研究复杂系统的科学称为复杂性科学。这是 21 世纪一门崭新的科学。

研究这门科学，与 20 世纪以及以前的科学相比，在方法论上需要进行革命。

20 世纪以及近 400 年来的科学研究，研究方法是“还原论（reductionism）”，其思想是：认识整体必先认识局部，从而约简（reduce）到研究个体，例如核物理研究原子核，生物研究细胞，力学研究受力体等。循此途径，几百年来，各门科学取得了重大

深入的进展，建立了许多精确的数学模型，可以推演、论证、分析、定量计算等。

但对复杂系统，这样做不行了。例如研究金融股市不能只研究个别股民，思维过程不能只研究个别神经元，角马群的消长不能只研究个别角马等。

对复杂系统需要对总体进行整合研究，探索系统整体动态演化过程的规律，这就是研究方法的整体论（holism）。

与20世纪以及以前的各门科学相比，复杂性科学的研究可以说是处于开始阶段，而且由于涵盖面极广，不同领域又各有其特性。因此，如何具体进行研究，用什么工具和方法，要从多方面、不同角度、视野去尝试，整体与个体相结合，定性与定量相结合去探索，总之，要千方百计。

关于“系统方法论”更详细的论述，可参看[1]。

3.复杂中寻求简单

科学研究的目的，在于解释，即用简洁的规律解释众多有关现象。因此，科学工作者的首要任务，就是要在多种有关现象中找出简单规律。

20 世纪以及以前的科学研究，已经充分证明了此点，在众多领域中，发现了大量简洁规律。

对于复杂系统，也不例外。在《复杂》[2,3]一书的第五章（[2]p.153,[3]p.209）中有这样一段话：“科学告诉你，几条简单的规律是如何产生世界上变幻无穷的行为表现的（Science showed you how a few simple laws could produce the enormously rich behavior of the world）。”2004年，在Nature上有一篇短文《Keep it simple（遵循简单）》[4] 介绍 John Gribbin 的书：《Deep Simplicity：Complexity and the Emergence of Life（深奥的简单性：复杂性及生命的涌现）》[5]，其中有几句话：“科学的目的是在凌乱的复杂中寻找有意义的简单（the purpose of science is to find meaningful simplicity in the midst of disorderly complexity）”，“隐藏在表面复杂性后面的简单性（simplicity hiding behind surface complexities）”以及“通过简单生长演化动态模型去寻求对复杂现象的解释（seeking the explanation of complex phenomena through simple dynamical models of growth and evaluton）”。

循此思路，下面我们研究两个复杂系统问题。

4.树，树状结构

（1）模型

树，遍布世界各地，由于环境不同，其形状千差万别，但又有共同的基本结构。一提到树，可能就会浮现大体如图4.1那样一个轮廓：

从树种萌芽、生长到老死，是树的生长演化过程。树是生物，树的种子中含有它的基因，正如鸟卵那样，在生长过程中，由基因支配，自组织发展变化。我们能否找到树的生长演化过程的动态规律？用简单形式的规律，去解释说明演化过程的各个方面。

图 4.1

这个问题是很有意义的。首先，树是地球上非常重要的生物，对地球的生态不可或缺，对人类也不可或缺。我们见惯树的生长，从萌芽开始，生长，分叉，再生长，再分叉……，只要不死，这个过程就一直继续，甚至可延续百年，千年。但树的高度又会是有限的。这种不停止的分叉行为会导致什么结果？各种树的分叉距离和分叉数目又不同。例如一般树可以二分叉，三分叉，但灌木是多分叉，分叉数目对树的生长过程有何影响？分叉距离和分叉数目之间又有什么关系？等等。此外，树是一种自相似结构，这

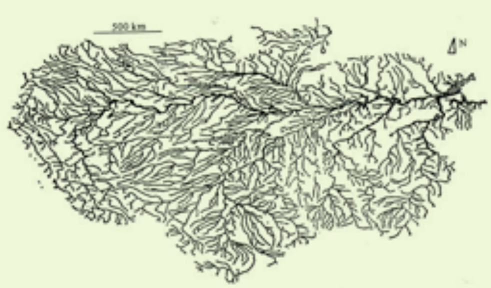

图 4.2 亚马逊河流域

种结构又在各领域广泛分布，如河流系统，（图 4.2 是亚马逊河流域的地图[7]），血管系统，因特网系统，国家组织系统，管理系统等，对树的演化规律的认识也可以帮助我们对树状结构系统的认识。

下面，我们建立一个模型，来分析树的生长动态演化过程。

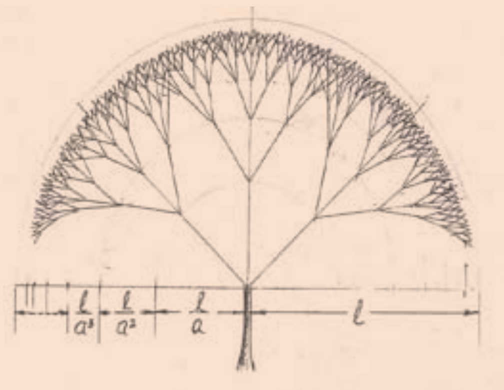

图 4.3

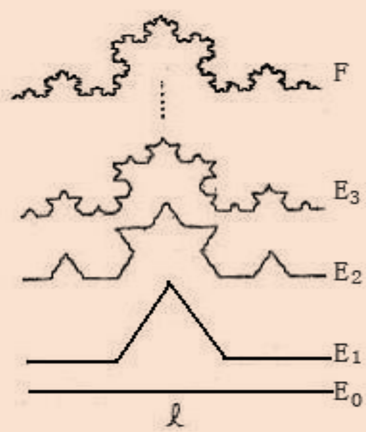

图 4.4

图 4.3 的模型是树的平面示意图。ℓ 是树的半径，表征极限的高度。在现实中，随着生长，其分叉距离越往上越短。设第一次分叉在 $\frac{\ell}{a}$，第二次分叉在 $\frac{\ell}{a^2}$，以后逐次在 $\frac{\ell}{a^3}$，$\frac{\ell}{a^4}$，……处，等等。例如$a=2$，则分叉

将在半径的 $\frac{1}{2}$，$\frac{1}{4}$，$\frac{1}{8}$，……处，等等。a也可以等于 3，或其他的整数。

又，现实中，同一种树的分叉数目大体相同，模型中设为m，图中的$m=3$。m也可以是其他整数。

此模型简单概括了树木生长过程的共性，符合实际，又有表征生长过程的重要的量的设定，从而可进行分析。

（2） 工具、方法、结果

树是一种自相似结构，需要用研究自相似结构的理论——“分形（fractal）”以及其中的有关计算，如 Hausdorff 测度[6,7,8]。初涉复杂系统的读者不一定马上去读这些理论、方法。我们在下面的行文中尽量做到使读者读懂，关于详细的论证，有兴趣的读者可参看[9]。

相似形结构：以分形中的 Koch 曲线（图 4.4）为例[6,7,8]。

图 4.4 的 Koch 曲线，是层层自相似的，E_1层是长度为 $\frac{\ell}{3}$ 的 4 段折线，E_2层是长度为 $\frac{\ell}{3^2}$ 的4^2个折线，因此随着逐层分下去，这些折线的长度分别为

$$4\frac{\ell}{3},\ 4^2\frac{\ell}{3^2},\ \cdots,\ 4^n\frac{\ell}{3^n},\ \cdots$$

将图 4.3 与图 4.4 对比，可看到：第一层的树枝长度是$m\frac{\ell}{a}$，第二层为$m^2\frac{\ell}{a^2}$，……，因此各层树枝的长度为

$$m\frac{\ell}{a},\ m^2\frac{\ell}{a^2},\ \cdots,\ m^n\frac{\ell}{a^n},\ \cdots$$

今分析，Koch 曲线中的折线或树枝所占据的空间。如上述那样分（生长）下去，只要n为有限数，则第n层的折线或树枝所占的空间总是有限的一维空间。

但当$n\to\infty$时，情况就不同了。这也是分形理论研究的问题。

$n\to\infty$时，折线所占据的空间不能再是一维的，而要用 Hausdorff 测度测量。其结果是，它既不是一维，也不是二维，而是介于 1 和 2 之间的一个分数维。例如 Koch 曲线用 Hausdorff 测度所得的结果是：维数为 $d=\frac{\log 4}{\log 3}\approx 1.2618$。

下面，我们用类似求 Koch 曲线维数的方法寻求$n\to\infty$时树枝所占空间的维数。

在第n层时，树枝的覆盖量为$m^n\left(\frac{\ell}{a^n}\right)$，据 Hausdorff 测度，这$m^n$个长度为$\left(\frac{\ell}{a^n}\right)$的树枝，称为集合$F$，可用$m^n$个直径为$\left(\frac{\ell}{a^n}\right)$的球将此集合覆盖。设$d$为一非负数，我们计算 $\lim\limits_{n\to\infty} m^n\left(\frac{\ell}{a^n}\right)^d$，并用测度中的记法，写成

$$\begin{aligned} H^d(F) &= \lim_{\delta\to 0} H^d_\delta(F) \\ &= \lim_{n\to\infty} m^n\left(\frac{\ell}{a^n}\right)^d \\ &= \lim_{n\to\infty}\left[m\left(\frac{1}{a}\right)^d\right]^n \ell^d \end{aligned} \tag{4.1}$$

这里δ表示一小球的直径，在我们的例子里，δ就是$\frac{\ell}{a^n}$，当$n\to\infty$时，$\frac{\ell}{a^n}=\delta\to 0$。

从上式最右端，可知：若对某一d值，

$m\left(\frac{1}{a}\right)^d > 1$，则当$n \to \infty$时，$H^d(F)$趋于$\infty$；若对某一$d$值，$m\left(\frac{1}{a}\right)^d < 1$，则当$n \to \infty$时，$H^d(F)$趋于 0。因此，若存在$d$的一个临界点，使

$$m\left(\frac{1}{a}\right)^d = 1 \tag{4.2}$$

则此d值将使$H^d(F)$从∞跳到 0（或相反），d称为 Hausdorff 维数，记为

$$d = \dim_H F \tag{4.3}$$

(4.2)式可写成幂律形式

$$m = \left(\frac{1}{a}\right)^{-d} \tag{4.4}$$

并求出d：

$$d = \frac{\log m}{\log a} \tag{4.5}$$

此外，在条件(4.2)之下，还得到 Hausdorff 测度

$$H^d(F) = \ell^d \tag{4.6}$$

ℓ是树高，这是对整棵树的树冠覆盖面积的度量。

（3）(4.2)（或(4.4)）的意义

(4.2)（或(4.4)）蕴涵的内容

1）在树的生长演化过程中，树冠的覆盖面积，从一维的折线，演化为分数维的面积，维数发生质变，即涌现。

这是在(4.2)（或(4.4)控制下发生的。如前所述，若$m\left(\frac{1}{a}\right)^d > 1$，则当$n \to \infty$时，$H^d(F) \to \infty$，即树将无限生长；若$m\left(\frac{1}{a}\right)^d < 1$，则当$n \to \infty$时，$H^d(F) \to 0$，树又停止生长，或者说“死亡”。只有在条件(4.2)的支配下，树才能有序生长，发展演化，并最后导致涌现。

因此，(4.2)是基因自组织所导致的临界状态。表征分叉距离a和分叉数目m之间要有一定的关系，是基因控制使树有序生长所呈现出来的外部规律。

2）(4.2)还含有下列信息：

$\frac{m}{a}$ 是“压缩分叉比”，或称“缩分比”，即每一次分m个叉，长度按 $\frac{1}{a}$ 的比例缩小。此比值决定了树的层级结构的自相似性。(4.2)是m与 $\frac{1}{a}$ 所要满足的临界关系。

此外，由（4.2）得到

$$d = \frac{\log m}{\log a}$$

可见，只有

$$m > n \tag{4.7}$$

时才能形成维数大于1(面积)的分形，(4.7)就是使$d > 1$的条件。

3）我们的模型中，取$a = 2$，$m = 3$（$m > a$）。此时，

$$d = \frac{\log 3}{\log 2} = 1.582.$$

1985 年，在 Nature 上有篇文章[10]，用早春时不同树的照片(平面图)以及盒计数(Box counting）法[6,7,8]计算约 10 种如榆，杉，桦，桉等不同树木的分数维，其值在 1.28 到 1.78 之间，且大体平均为 1.5。这和上面用理论分析所得的数值近似。

4）ℓ^d

这是所得到的对整个树冠覆盖面积的定量计算公式，此量表征树的功能，如受阳光照射的面积用以度量光合作用。

与此对比，例如具有树状结构的河水流域，(比如图 4.2 的亚马逊河)，支流密则d大，反之则d小，计算河流的d，不能再用上面的方法，可参看[8]。算出d后，可用河流的ℓ^d的量，衡量其灌溉功能。

5. 复杂系统的功能

（1）整体大于部分之和

当前，有一个广为人知的关系式

$$1+1>2 \tag{5.1}$$

即整体大于部分之和，是说功能的。如果两部分合在一起，它的功能，要大于两部分原来功能之和。

这里的“合”，就是形成为系统，两部分相互作用，使功能有了跃升。例如两个人，每个人能提起 50 斤，但两个人合作（相互作用），可能抬起 150 斤，大于两人功能之和。

什么是功能，又可说出很多。如能力、能量、安全性、吸引性、可信度等等

功能怎么来的？对于系统来说，是组成成分之间相互作用产生的，例如上面两人的“抬”。扩大一些，如人类社会，工、农、商、学、兵……分工合作。蚁群、蜂群的分工合作等等。

(5.1)式表示两部分相合的功能。今考虑更一般的情况。

对于一个复杂系统，随着生长演化，组成成分可不断增多，我们能否找到一个描述整个生长演化动态过程的系统功能变化的表达式？

（2） 自聚集（self-clustering）

为了探索系统的功能，先给出一个概念：自聚集，这是复杂系统中广泛存在的一种自组织形式。

例如人类社会的发展，总是不断地自聚集，从原始社会的配偶，家族、村镇、部落……到国家。

聚集的目的，是形成系统，相互作用，增大功能，例如当聚集成为村镇，就可能出现磨坊、油坊、木匠、瓦匠……等分工，系统功能提升。当聚集成为国家，又有更高层次，更大规模的分工协作，功能又大跃升。

直到现在，人类社会还在不断进行不同形式的聚集。如联合国、世贸组织、欧盟、东盟、上海合作组织……等等。

中国有句名言：“话说天下大势，合久比分，分久必合”，看来自聚集的“合”是发展的主流。

图 5.1

四千年来，中国合为一个 56 个民族的大家庭，世界也越来越小。生物也是这样，如蚁群、兽群、鸟群……等等。图 5.1 是欧洲椋鸟大量聚集飞行的图形，蔚为壮观。

它们的聚集也是为了增大功能如生存、御敌等。

另一类自聚集也广泛存在，例如商品市场。比如冰箱，有各种品牌，但某种或少量几种冰箱顾客集中（聚集）购买。好多商品也是集中购买名牌。再如科学研究的引文网，在某一领域，某篇论文或少数几篇论文被大量作者集中引用。

某商品被大量购买，表示它的高贸易量、吸引力，某论文被大量引用，表示它的高水平、权威性，这些都是功能。

这类自聚集可用复杂网络[11,12]描述，例如不同品牌的冰箱，用网络中的点表示，它们的被购买量，用与此点的连线表示，这样就形成了具有特种结构的网络。少数点连线密集，多数点连线稀疏，这也是复杂网络中著名的、由 Barabasi 和 Albert 提出的无标度网络（scale-free networks）[13]。这种结构的网络在不同领域广泛存在。

可见，这两类自聚集是广泛的、重要的。这两类自聚集都可用同一模型描述。

（3） 模型

复杂网络是研究复杂系统的一种有力工具。我们用下面的网络模型研究系统的功能[14]。

参看图 5.2，复杂系统的组成成分的聚集量用圆周上的节点表示，各成分之间的相互作用用节点之间的连线表示。图 5.2 有 6 个组成成分，随着系统的演化发展，成分将不断增加。

此模型可描述上面两类自聚集。对于第一类，网上的点数就是系统的组成成分聚集的数目，对于第二类，点数是无标度网中购买某一商品的人的数目。

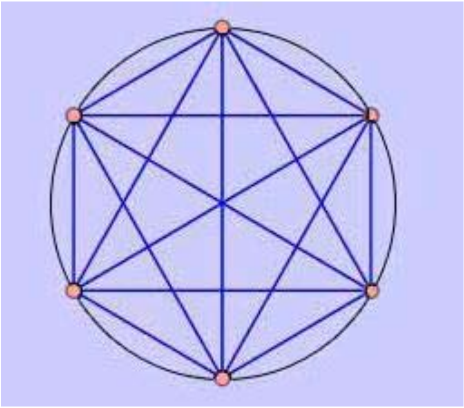

图 5.2

今分析系统的生长演化、涌现过程中功能的变化。功能是相互作用产生的，因此，可把功能与相互作用等同起来，即用图中相互作用连线的数目，表示功能的量的大小。

再讨论此模型的合理性。模型中，其一，每一点与其他各点都有相互作用；其二，都用同样的连线连接，表示各点间的相互作用都是等同的。这样合理吗？

我们设想，研究蚁群的总体功能，就必须考虑蚁群的整体，包括每一只蚂蚁，如果没有群体的觅食，蚁群就不能生存。此外，也分不出哪只蚂蚁作用更大或更小。

再扩大，例如考虑一个国家的综合实力，就必须考虑全国。比如十几亿人口的总体，

正是全国人民分工协力，才形成国家的整体实力，没有全国协力，国家也不存在。

常用一盘棋局说明复杂系统的一些特性[2,3,15,16]，棋盘中占据某一位置的一个棋子，与其他所有棋子都有关系（相互作用）。而且也说不清哪个棋子重要，哪个棋子不重要，也就是什么可能性都有，是不可预测的，这也正是复杂系统的一个重要特性。在[2,3]中有一节标题是“可能性的无限空间（Immense space of possibility）”(见[2]p.151,[3]p.207),其中讲到“可能性空间大得难以想象(the space of possibilities is vast beyond imagining)”。从古至今还没有完全相同的两盘棋，某个棋子走一步，也可能全盘皆输，也可能反败为胜。

在自然界，不一定哪片雪块坠落，就可能引起雪崩，哪个蚁穴漏水，引起堤坝坍塌（千里之堤，毁于蚁穴）。某地一只蝴蝶扇动翅膀，可能引起另一地一场风暴。人类社会也这样，如斯诺登揭秘事件，之前谁也不知道他，想不到他，他的揭秘却掀起一场世界政治风暴。

都有相互作用，而且说不清哪个重要，哪个不重要，不可预测。对此，一种合理的处理办法，就是把这些作用都等同起来。

可见，模型虽然简单，却体现了复杂系统的重要特性：无限的可能性及不可预测性。选此模型也是复杂中寻求简单。

对于第二类聚集，此模型更是精确描述：多人均购买同一商品，亦即采取同一行动，因此都有相互作用，而且作用效果是等同的。

（4）动态演化过程的功能变化

动态过程开始时，模型中的点数$n=1$，随着生长，点数不断增多，当点数为n时，相互作用的连线的数目为

$$f(n)=\frac{1}{2}n(n-1) \qquad (5.2)$$

这就是聚集量为n时，系统功能的表达式。

n是变量，故此式表示系统动态演化过程中的功能变化，此式也是我们所要寻求的。

此式能解释些什么？含有些什么信息？

1）当n为小数时，这对应于演化过程的开始阶段。由（5.2）可知，n越小，n的增减对系统功能增减的影响越大，参看下表：

n	1	2	3	4	5
$f(n)$	0	1	3	6	10

当n从1到2，$f(n)$从0到1，即从无到有，2人形成系统后才有相互作用，才有系统的功能。

$n=3$时，$f(n)$为3，较$n=2$时增加3倍。$n=4$时$f(n)$为6，较$n=3$时增加1倍，等等。

这符合我们的常识，万事开头难，开始阶段，生长初期，创业之始，要精心维护，防止损失，点滴积累。

也适用于相反的情况，如疾病传染是坏功能，要防止它增长、扩大。因此，特别在初期，尽量控制染病的人数，这是关键时期。

2）当n为大数时，对应于演化发展到一定规模。从（5.2）可看到：随着n的增大，

n的增减对系统功能变化的影响越小。

例如大量蚂蚁组成的蚁群，损失少量蚂蚁，对蚁群功能的影响甚微，蚁群、兽群等也是这样。

n越大时，系统的鲁棒性（抗干扰的能力）越强。

3）n的规模：系统的规模涌现

当 n 达到一定规模 N 时，$f(N)=\frac{1}{2}N(N-1)$。由于此时N与$N-1$差别很小，故（5.2）式可写成：

$$f(N)\approx\frac{1}{2}N^2 \tag{5.3}$$

即系统的功能可用 N^2 的尺度度量，$N^2\gg N$，表示功能的跃升量。即此时系统拥有强势功能，并有抗干扰的稳态。

这是规模效应的整体涌现。

例如，蚁群形成后，充分表现出其功能的跃升：在大范围内觅食、御敌、抗灾……，蚁群的生存期又远远大于个体成员的寿命等[15,16]。

对另一类聚集，N表示集中于某一点的聚集量，N^2表示由于N的规模所导致的强大功能。例如商品已成为名牌，具有强大的吸引力。

4）1+1>2 是（5.2）的特例

1+1>2 的意义是整体大于部分之和，即形成系统有功能跃升。这正是（5.2）中的n从 1 到 2 的情况。$n=2$时形成系统相互作用的功能从 0 到 1（从无到有）。

此外，1+1>2 另一意义是：系统的功能，不是其组成部分功能的线性叠加（不是 1+1=2），是非线性的。（5.2）式给出了此非线性的具体形式：$\frac{1}{2}n(n-1)$。

除上述外，（5.2）式还有重要意义。

（5） 正反馈机制

在自动控制系统中，都熟知“反馈”的作用。那里的反馈是“负反馈”，其作用是抑制某种状态的发展。例如机器的运转，当外界负荷加重时转速变慢，这时通过反馈，将转慢的信息传到自动控制装置，增大燃料输入，使转速恢复正常。

正反馈的作用相反，是增强、激励某种状态的扩大与发展。（5.2）式蕴含正反馈机制，分两种情况说明：

1）已形成规模涌现后的正反馈。富者更富。

系统功能由$f(N)\approx\frac{1}{2}N^2$表达，$N^2$表示强势能量的涌现。例如商品已成为名牌，将吸引更多的顾客。学校成为众多高水平科学家聚集的名校，将吸引更多科学家加入，吸引更多更好的生源投考，等等。

这也是使“富者更富(rich get richer)”的机制。

2）演化发展过程中的正反馈。

以第二种聚集为例，考虑两种商品。设在t_1时第一种商品的销量为n_1，第二种产品的销量为n_2，并且$n_1(t_1)>n_2(t_1)$。据（5.2）式，可建立如下的关系：

$$\begin{aligned}&n_1(t_1)>n_2(t_1)\\ \Longrightarrow\ &n_1^2(t_1)\gg n_2^2(t_1)\\ \Longrightarrow\ &n_1(t_2)\gg n_2(t_2)\end{aligned} \tag{5.4}$$

这里$t_2 > t_1$，表示t_1以后的时间，中间一项是来自当n_1，n_2一定大时，$n(n-1)$可近似用n^2表示。

(5.4) 的意义是：如果t_1时$n_1(t_1) > n_2(t_2)$，则据(5.4)，将有$n_1^2(t_1) \gg n_2^2(t_1)$，这就是一种放大、加强，表示在$t_1$时两种商品销量的差距导致两种商品的吸引力有更大的差距，这接着又导致在后来的时间t_2时，两种商品的销量拉开更大的距离。

(5.4)式是一种动态正反馈机制,还可以有重要应用。

（6）无标度网络结构的形成机制

Barabasi 和 Albert 无标度网的研究[13]，是一项重大成果[11.12]，应用广泛，论文也受到广泛引用。它揭示许多不同领域的大尺度网络（如 WWW 网，新陈代谢网等）的网络结构的一个共同特征：度分布服从一种无标度幂律$p(K) \sim K^{-r}$，反映在网络结构上表现为：网中少数点拥有大量连线，而多数点只有少数连线。作者指出：这种结构的形成来自两点：一是生长，即有新点不断进入网络，二是优先连接（preferential attachment),即新点更趋于与拥有连线多的点相连接。

我们进一步问：为什么有优先连接？或说:优先连线怎么来的？这又可用(5.4)式解释：连线多的点较连线少的点有更大的吸引力（$n_1^2(t_1) \gg n_2^2(t_1)$），因此导致新的顾客更愿意买销量更多的商品。

从以上可以看到，用简单形式的规律(5.2)，可以解释我们看到的、感受到的广泛的现象，使我们对这些现象的认识，提高到理性的层次。

6. 结语

下棋，只有几条简单的规则，却能演化出无穷的错综复杂的棋局。反过来，无穷尽的复杂棋局的后面,就是那么几条简单规则。

世间万物，也是多来自少（much coming from little）[1,15,16]，复杂归结为简单（complexity made simple）[1,17.18]。

道生一，一生二，二生三，三生万物（老子《道德经》）[1]，这种思想早已出现在我国先哲的论著中。

向万物问“道”。

参考文献

[1] 许国志，顾基发，车宏安. 系统科学. 上海: 上海科技教育出版社，2000.

[2] M Mitchell Waldrop. Complexity, The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos. Touchstone, 1992.

[3] 米歇尔 · 沃尔德罗普著，陈玲译. 复杂，诞生于秩序与混沌边缘的科学. 生活 · 读书 · 新知三联书店，1997.

[4] Buchman M. Keep it simple. Nature, 2004, 428(8), 604–604.

[5] Gribbin J. Deep simplicity: Chaos, complexity and the emergence of life. Allen Lance, 2004.

[6] 肯尼思 · 法尔科内著，曾文曲，刘世耀等译. 分形几何——数学基础及其应用. 东北工学院出版社，1991.

[7] 高安秀树著，沈步明，常子文译. 分数维. 北京：地震出版社，1989.

[8] 张济忠. 分形. 北京：清华大学出版社，1995.

[9] 张嗣瀛. 复杂系统、复杂网络自相似结构的涌现规律. 复杂系统与复杂性科学，2006，3(4): 42–51.

[10] Morse D R, Lawton J H, Dodson M M, et al. Fractal dimension of vegetation and distribution of arthropod body lengths. Nature，1985，314: 731–733.

[11] 汪小帆，李翔，陈关荣. 复杂网络理论及其应用. 北京：清华大学出版社，2006.

[12] 汪小帆，李翔，陈关荣. 网络科学导论. 北京：高等教育出版社，2012.

[13] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. Science，1999，286: 509–512.

[14] 张嗣瀛. 复杂系统中的自聚集，系统功能与正反馈. 系统科学与数学，2011，31(9): 1045–1051.

[15] Holland J H. Emergence, From Chaos to Order. Oxford University Press, 1998.

[16] 约翰 · H · 霍兰著，陈禹译. 涌现——从混沌到有序. 上海：上海科学技术出版社，2001.

[17] Holland J H. Hidden Order, How Adaption Builds Complexity. Perseus Books, 1995.

[18] 周晓牧，韩晖译. 隐秩序——适应性造就复杂性. 上海：上海科技教育出版社，哲人石丛书，2000.