

活性行走*

——图样形成、自组织、复杂系统

林 磊[#]

(美国加州圣何塞州立大学物理系)

摘要 活性行走是描述复杂(或简单)系统的图样形成和自组织的一个范式(paradigm)。一个活性行走者的每一步都改变地形,其如何选择下一步受改变后地形的影响。活性行走模型已经成功地应用于很多生物、物理与社会科学系统中,其中包括视网膜神经细胞和液体薄层表面反应的图样形成、玻璃中离子的异常传输、蚂蚁群的觅食、高科技经济学中产品的市场竞争,等等。

关键词 活性行走,复杂系统,图样形成,自组织,生物物理,经济学

ACTIVE WALKS

—PATTERN FORMATION, SELF-ORGANIZATION, COMPLEX SYSTEMS

LAM Lui[#]

(Physics Department, San Jose State University, California 95192-0106, USA)

Abstract Active walk is a paradigm for pattern formation and self-organization in complex systems. An active walker changes the landscape as it walks, and is influenced by the changed landscape in choosing its next step. Active walk models have been applied successfully to various biological, physical and economic systems, including retinal neuron patterns and surface reaction patterns in thin cells of liquids, anomalous ion transport in glasses, food collection by ant swarms, market competition of high-tech products in economics, etc.

Key words active walk, complex system, pattern formation, self-organization, biological physics, economics

1 引言

人类在寻求认识其赖以生存的宇宙(universe)和人类社会本身的长期过程中,重点总是放在其性质或行为的普遍性(universal)方面。正如薛定谔所指出的那样^[1],从人们把最高学习机构——大学——称为 university 这一点上,可以明显地看出这一事实。我们还可注意到,大学颁发的最高学位是哲学博士学位(Doctor of Philosophy, Ph.D.),无论您学的是什么专业^[2],而“哲学”是希腊语,意思是“追求智慧”。

有趣的是,当我们追溯历史时,发现希腊学者亚里士多德(Aristotle,公元前384—322年)并不只专注于一个或两个知识的分支,而实际上,他对生物学、心理学、物理学、文学理论等都作出了重要贡献,他甚至发明了形式逻辑学,并且是动物学的先驱。把

学习和对学问的追求分裂成一个个不同的学科(如物理学、化学、经济学等等)只是最近几个世纪才出现的现象。

本世纪以来,有人想恢复研究学问的统一性,找到自然界和人类社会系统的共同的规律。这一尝试可分为三个阶段:第一阶段是40—60年代风行一时的控制论或普遍系统理论;第二阶段是70年代,Prigogine的耗散结构和Haken的协同论;第三个阶段是80年代到现在对复杂系统的研究^[3]。

我们认为,一个好的能描述所有复杂系统的普遍定律应具有以下两个特点:(1)形式简单,能用一两个相当短的句子表述;(2)与我们的日常经验相符。因为如果一个定律具有普遍性,那么它应该能广泛地用于描述众多的复杂系统,这就要求它的表述

* 2000-01-20收到

E-mail: luilam@netscape.net

必须简明;其次,我们每个人事实上都是一个复杂系统,所以,这个普遍定律应该与我们的日常经验符合(比如,热力学第二定律就能很好地满足以上两个要求.该定律说:“不可能把热从低温物体传到高温物体而不引起其他的变化.”).

这样一个简单的能解释所有复杂系统的普遍性定律还没有找到,但目前存在4个能解释很多复杂系统的统一描述:(1)分形^[4];(2)混沌^[5];(3)自组织临界性^[6];(4)活性行走^[7].本文将在以下部分着重介绍活性行走.

2 复杂系统

什么是复杂系统呢?一个复杂系统可以是一个系统,它由很多数目的简单的或有“智慧”的单元构成,单元和单元之间相互作用,并且与周围环境相互作用,这些单元也可能随时间而演化(变化).整个复杂系统的行为不能用还原论(reduction method)来研究.但是,以上的定义也不是没有问题的.比如,当我们对一个系统尚不了解时,它看起来是很复杂的,而当我们对它了解了之后,它就变为简单系统了.此外,一个系统是否是复杂系统,还可能依赖于我们对其哪方面感兴趣.比如,当我们想知道一块石头的内部结构或形成机理时,它就可能是一个复杂系统;但如果我们只想知道踢它一脚后它将如何运动,这只需应用牛顿力学就够了,那么这时,石头就是简单系统了.所以,复杂系统的一个精确的定义大概是很难写出来的,但这并不妨碍人们对复杂系统的研究.实际上,一个大学的每一个系研究的系统或课题都可以算是复杂系统的范畴,除了物理系,化学系和工程系的绝大部分课程内容.复杂系统研究的题目很广,包括语言、生命起源、基因与信息、生物进化与自旋玻璃、组织管理、交通、经济系统、心理学、环境学、免疫学、非平衡系统的自组织、元胞自动机、蚂蚁群、地震,等等.换言之,复杂系统是研究真实世界的.

复杂(或简单)系统都有自组织的倾向.例如,在一液体层下面加热,当被加热面温度达到足够高时,原本处于静止状态的液体会自组织起来,形成有规律的对流圈,这一现象称为热对流.热对流圈形成一定的图样.又如,一群蚂蚁出巢觅食时,其路径开始时是杂乱无章、没有组织的,而蚂蚁将食物搬回巢的路径却形成一定的图样.在这过程中并没有统一指挥,是自组织的结果.

3 活性行走

用行走来模拟物理及其他现象已有很长的历史了,最著名的就是“无规行走”.无规行走用于模拟一个喝得烂醉的人的行走,在液体中悬浮粒子的布朗运动或者金融市场股票的涨落等.在无规行走中的行走者(walker)并不改变其周围的环境,所以无规行走被称为“消极行走”(passive walk).相反,一个活性行走者(active walker)的每一步都会改变其周围的环境,而改变后的环境又将影响行走者的下一步(见图1)^[2,8].

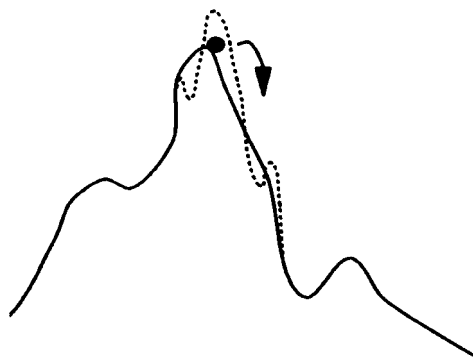


图1 活性行走示意图

[行走者(图中的实心圆点)改变了它周围的地形(从实线变为虚线)]

活性行走的描述包括两个相互作用的部分:行走者在时间 t 位置 $\mathbf{R}(t)$ 和可变地形 $V(\mathbf{r}, t)$, 其中 \mathbf{r} 是空间坐标.活性行走的动力学是由三条规律决定的:(1)改变地形规律(landscaping rule),它决定行走者在行走时如何改变地形(landscape);(2)行走规律(stepping rule),它告诉行走者怎样选择下一步;(3)地形自我演变规律,说明地形由于受到行走者以外的因素引起的变化(如扩散和外来影响).这三条定律的详细内容是由所研究的具体系统决定的.行走者行走的轨迹形成线条状图样,地形在行走一段时间后形成粗糙的表面,这一表面是一个分形表面.

地形可分为两类:第一类是真实存在的,第二类是抽象的.第一类地形可用以下例子进行说明:(1)一个人在沙丘上行走,沙丘即为地形,而沙丘的高度分布即为可变地形函数 $V(\mathbf{r}, t)$.(2)软物中的渗流现象.当水流过一个可变形的多通道物质时,会改变通道的几何形状和分布,通道形状即为地形.(3)蚂蚁的走动^[8,9].蚂蚁每走一步都要释放出一些化学物质,而且它总是朝化学物质浓度高的地方走,在这种情况下,每只蚂蚁都是一个活性行走者,而化学物

质浓度即为地形。(4) 细菌的运动. 细菌总是往营养物质多的地方运动聚集, 而且不断的吃掉营养物质, 那么营养物质的分布即为地形^[10]. 第二类地形有以下一些例子: (1) 城市的发展. 描述城市发展的一种方法是, 城市建立之初, 每块地都给一个标价, 根据地的好坏, 标价高低不一, 而每一块地被开发的可能性的大小正比于地的好坏, 也即正比于标价的高低. 若一块地被开发, 建了一栋房, 那这将影响该块地及其附近地的身价. 在这种描述中, 地的标价即为地形. 我们认为, 活性行走的模型可以很好地描述一个城市的发展^[8]. (2) 生物的进化^[8]. 描述生物进化是用基因变异表示的. 每一种基因都有其相应的基因品质(fitness), 以基因种类为横坐标, 基因品质为纵坐标, 物种的演化由一质点在这个基因品质曲面的移动来表示. 物种进化对应于该质点向高处移动. 世界由各种物种共同组成, 当物种 A 的品质提高时, 别的物种品质也要因此而改变, 而这一改变又反过来影响物种 A 所处的基因品质高度. 换言之, A 所处的高品质位置就变得不是一个高位了, 因而为了生存竞争, A 就要再移动. 也就是说, 一个物种在曲面上每走一步, 由于其他物种的竞争影响, A 的基因品质都会改变, 在这种描述中, 物种为活性行走者, 基因品质分布即为可变地形.

活性行走模型的连续性描述有两个方法:

(1) Langevin 方程

$$m \frac{d^2 \mathbf{R}}{dt^2} = -\eta \frac{d\mathbf{R}}{dt} - \int d\mathbf{r} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{R}) \cdot \nabla V(\mathbf{r}, t) + \mathbf{F}(t),$$

$$\frac{\partial V(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = D \nabla^2 V(\mathbf{r}, t) + t_0^{-1} W[\mathbf{r} - \mathbf{R}(t)],$$

式中 W 为地形改变函数, 由地形改变规律决定, 表示行走者如何改变地形. m, η, D 和 t_0 均为常数.

(2) Fokker-Planck 方程

$$\frac{\partial p(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla [p(\mathbf{r}, t) \nabla V(\mathbf{r}, t)] + D_w \nabla^2 p(\mathbf{r}, t),$$

$$\frac{\partial V(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = D \nabla^2 V(\mathbf{r}, t) + t_0^{-1} \int d\mathbf{r}' W(\mathbf{r} - \mathbf{r}') p(\mathbf{r}', t),$$

式中 $p(\mathbf{r}, t)$ 为在位置 \mathbf{r} 和时间 t 找到活性行走者的概率密度, D_w 为活性行走者的扩散常数.

这两个方程描述的系统是在数学物理上尚没有仔细研究过的系统, 比如, 在关于 Fokker-Planck 方

程的书^[11], 只是谈到粒子在与时间无关的势中的运动.

上述两个方程都是随机方程, 它们只能给出行走者的轨迹或地形的统计性质, 而不能给出它们个别的几何图形. 然而, 在应用到图样形成中, 感兴趣的正是几何图形. 所以, 我们需要利用计算机做活性行走模拟.

一个具有代表性的模拟结果见图 2. 值得提出的是, 图中活性行走的模拟结果与不同的实验结果都符合很好. 事实上, 在我们做出这个活性行走模拟结果时, 没有注意到已有实验结果的存在, 有的实验结果尚未出现, 即我们是“预言”了这些实验图样的存在. 活性行走显然是自然界中图样形成的一个主要机理.

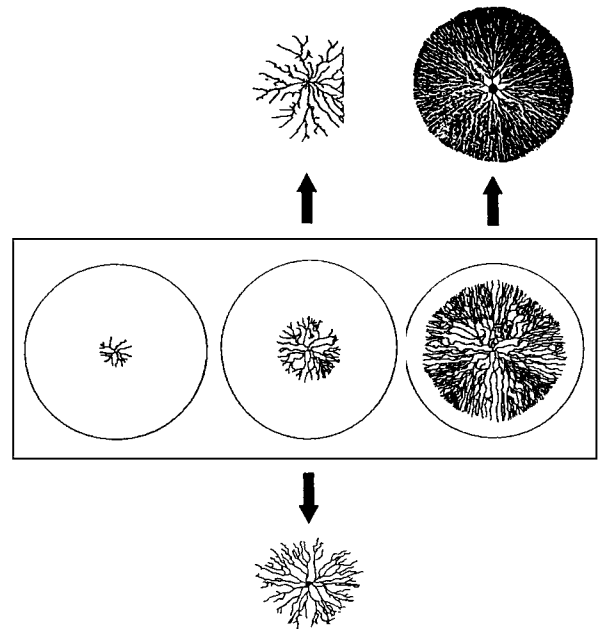


图 2 活性行走的一个模拟结果与实验的比较^[8]

[中部: 活性行走随时间演化系列的模拟结果(时间从左到右增加); 左上部: 电击穿引起的表面化学反应的实验图样(流体为油); 右上部: 电沉积的实验图样; 底部: 视网膜神经细胞(真实图样)]

4 三个例子

4.1 电击穿引起的表面化学反应图样

在两片相距很近的玻璃之间充满某一种流体(空气、油或液晶), 玻璃内表面镀了一层透明的导电材料(ITO), 在上下内表面加一直流电压后, 层内形成一个均匀的垂直电场. 当电场强度从零增加到某个阈值时, 流体中就会发生电击穿. 在这一瞬间, 可

观察到闪光现象,内表面留下一些线条状的图样^[12] [见图 3 (a)]. 根据我们的分析,电击穿首先是在内表面的某一点发生的(这一点可能聚集了足够的电子),并引起 ITO 的化学反应,随后,在这一点附近一连串的电击穿接连发生,电击穿发生位置(也即为化学反应发生的位置)的轨迹形成所观察到的图样. 这其中的机理很复杂,涉及到电击穿物理、化学反应和流体力学中的热传导等.

目前,电击穿引起的表面化学反应图样的形成机理尚不很清楚,但我们可以先做简单的计算机模拟. 很显然,化学反应发生时将改变附近区域的温度、材料的浓度分布等,所以可以将线条状轨迹看作为活性行走者的行走轨迹,这样,就可以构造出一个活性行走模型^[13],模拟的结果之一见图 3 (b).

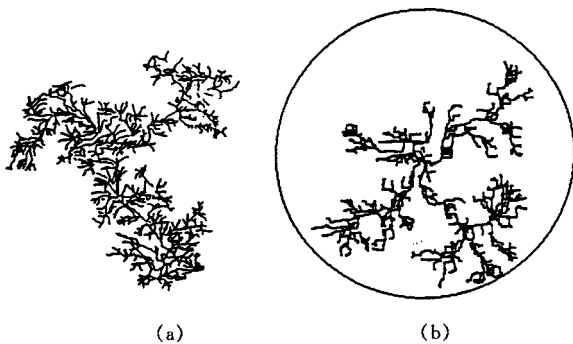


图 3 活性行走模拟结果与实验结果的比较^[13]

(a) 电击穿引起的表面化学反应图样(流体为向列相液晶);
(b) 活性行走模型计算机模拟结果

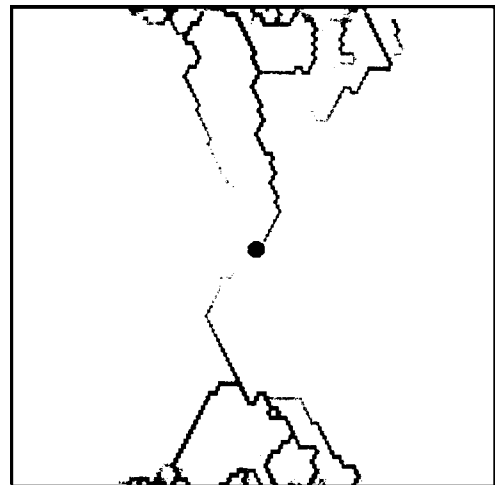
4.2 蚂蚁觅食

在德国,有人用活性行走模型来模拟蚂蚁觅食,他们做了两个模拟^[9]. 第一个模拟见图 4 (a),食物随机放在上下两条线上,蚂蚁从图中心的圆点出发,每走一步都释放出化学物质 A,其行走是活性行走. 当它找到食物后往回搬时,基本上是沿着化学物质 A 的分布行走,并在途中释放化学物质 B,那么,这里的地形有两个, A 和 B. 当这只蚂蚁回到中心后,新的蚂蚁将沿地形 B 进行活性行走,搬回食物. 图 4 (a) 即为经过一段时间后,蚂蚁行走轨迹的图样. 在图样中,轨迹很自然地分叉,与真实蚂蚁的行走轨迹[图 4 (b)] 很像.

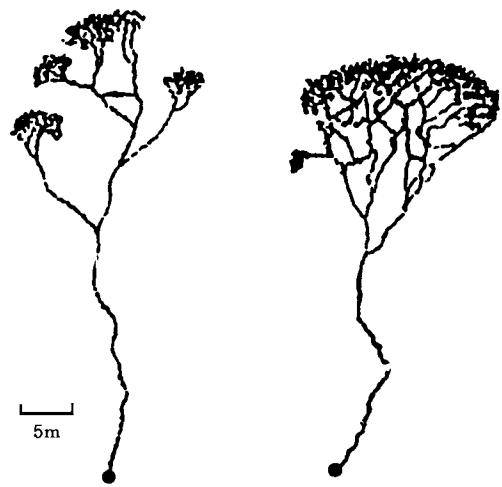
在第二个模拟中,他们把 5 堆食物随机放置,蚂蚁还是从中心出发,结果是蚂蚁采用“各个击破”的办法,集中力量搬完一堆后再搬另一堆,如此逐一搬完. 这一结果与真实蚂蚁的行为也相符合.

4.3 玻璃中的离子传输(混合碱离子效应)

在玻璃中掺入碱离子,可以改变玻璃的物理性



(a)



(b)

图 4 蚂蚁觅食轨迹的活性行走模拟与实际轨迹的比较^[9]

(a) 活性行走模型模拟结果;(b) 实际轨迹

质. 当掺入两种碱离子时,玻璃导电率有异常行为,这就是我们通常所说的混合碱离子效应,这一效应的发现已经有 100 多年了. 最近,有人应用活性行走模型对该效应进行了解释^[2,14].

比如,在组成为 $x\text{Na}_2\text{O}(1-x)\text{Li}_2\text{O}-3\text{B}_2\text{O}_3$ 的玻璃中(x 为 Na^+ 与 Li^+ 含量之比),测量其电导率 $\sigma(x)$. 结果表明,当 x 略大于 0 (即 Na^+ 含量与 Li^+ 相比极少)时, σ 随着 x 的增大而降低[见图 5 (a)]; 当 $x \cong 0.5$ 时, σ 达到极小值. 这一结果可以这样解释:玻璃结构松散,存在一定数目的空位,在电场作用下,金属离子 Li^+ 发生运动,从一个空位跳入另一个空位,并改变空位性质,使其只适合其他 Li^+ 而不是 Na^+ 进入,反之亦然(在这个过程中,每个金属离子都是活性行走者). 也就是说,在电传导过程中,两种离子的运动是“相互妨碍”的. 所以,当一小部分 Li^+ 被 Na^+ 取代后, σ 下降;同样,当 x 略小于 1,即

一小部分 Na^+ 被 Li^+ 取代后,也将导致 σ 下降,从而出现图 5 (a) 所示的曲线.根据活性行走模型模拟的结果[图 5 (b)],与上述实验能很好地符合.

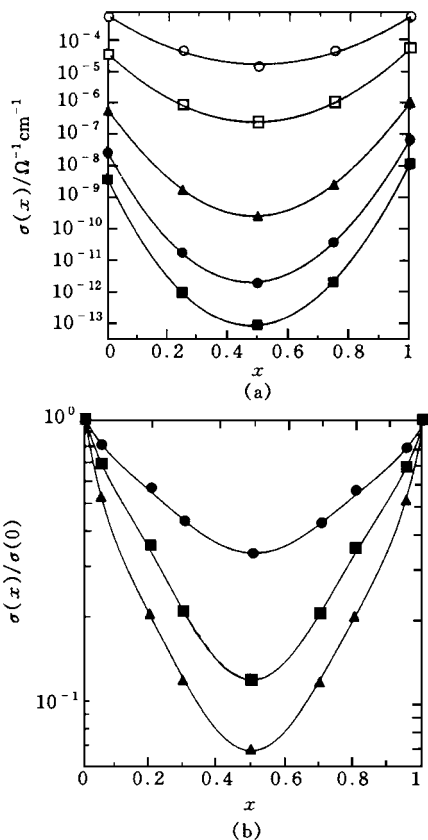


图 5 玻璃的电导率与 x 和温度的关系^[14]
 (a) 实验结果(直流电,曲线温度从下到上为 25—300℃);
 (b) 活性行走模拟结果(条件与上相似)

5 结论

前面举了一些活性行走模型成功运用的例子,此外,我们^[8]也用活性行走模型成功地解释了在高科技经济学中,两个商品在市场上互相竞争的情况,这其实是高科技经济学中正反馈(increasing return)的一个例子.我们也用活性行走模型研究了在生物和人类社会演化的历史中,偶然性与必然性之间的关系^[8].我们发现,与一些人说的不一样^[15],如果生命可以重来的话,历史是有可能基本重复的.也有人把活性行走模型用于石油开发(cold production of heavy oil)^[16];也有人用活性行走模型描述经济学中的“人口游戏”(population games)^[17];也有人用活性行走模型研究有适应性的竞争(adaptive competition)和市场效率(market efficiency)^[18];还有人用活性行走模型模拟“肿瘤”的生成^[19].还有很多领域可以运用活性行走模型^[2,8].

目前,活性行走这一概念与名词已逐渐被人们所接受^[20].总之,活性行走提供了自然科学和社会科学中许多复杂系统的一个统一的描述.

致谢 作者感谢中国科学院物理研究所古丽亚同志对本文的翻译、整理工作.

参 考 文 献

- [1] Schrödinger E. What is Life. Cambridge: Cambridge University Press, 1967, Preface
- [2] Lam L ed. Introduction to Nonlinear Physics. New York: Springer, 1997
- [3] Lam L, Naroditsky eds. Modeling Complex Phenomena. New York: Springer, 1992; Cowan G A, Pines D, Meltzer D eds. Complexity. Menlo Park: Addison Wesley, 1994
- [4] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. New York: Freeman, 1982
- [5] Feigenbaum M. J. Stat. Phys., 1978, 19: 25
- [6] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Phys. Rev. Lett., 1987, 59: 381
- [7] Lam L. In: Lectures on Thermodynamics and Statistical Mechanics. Costas M, Rodriguez R, Benavides A L eds. Singapore: World Scientific, 1994
- [8] Lam L. Nonlinear Physics for Beginners. Singapore: World Scientific, 1998
- [9] Schweitzer F, Lao K, Family F. BioSystems, 1997, 41: 153
- [10] Kessler D A, Levine H. Phys. Rev. E, 1993, 48: 4801; Ben-Jacob E *et al.* Nature, 1994, 368: 46
- [11] Risken H. The Fokker-Planck Equation. New York: Springer, 1996
- [12] Lam L, Freimuth R D, Lakkaraju H S. Mol. Cryst. Liq. Cryst., 1991, 199: 249
- [13] Lam L *et al.* In: Pattern Formation in Complex Dissipative Systems. Kai S ed. Singapore: World Scientific, 1992
- [14] Maass P, Bunde A, Ingram M D. Phys. Rev. Lett., 1992, 68: 3064
- [15] Gould S J. Wonderful Life. New York: Norton, 1989
- [16] Yuan J Y, Tremblay B, Babchin A. A Wormhole Network Model of Cold Production in Heavy Oil. In: SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Bakersfield, California, March 1999 (paper number SPE54097)
- [17] Friedman D, Yellin J. Evolving Landscape for Population Games. (preprint)
- [18] Savit R, Manuca R, Riolo R. Phys. Rev. Lett., 1999, 82: 2203
- [19] Thomas Deisboeck, Harvard Medical School (private communication, 1998)
- [20] Helbing D *et al.* Phys. Rev. E, 1997, 56: 2527; Sheu C-R, Cheng C-Y, Pan R-P. Phys. Rev. E, 1999, 59: 1540