

经济复杂性及一些相关的问题

方福康

(北京师范大学非平衡系统研究所, 教授、博士生导师 北京 100875)

〔摘要〕 在经济复杂系统的后面,存在着基本的运行机制,通过整合基本的运行模式,能给出经济复杂现象的实际解释。文章提出了 J 过程,是一种典型的非均衡增长模式,实际的增长可以通过其与索洛增长、突变式增长等模式的整合予以实现。借鉴经济复杂性研究的思路 and 所获得的对复杂系统基本规律的了解,文章初步讨论了几个密切联系着的领域:生态经济、知识管理和学习过程的自组织机制,简要介绍了这些领域的现状和复杂性研究方法的应用。

〔关键词〕 复杂性 经济增长 生态经济 知识管理 自组织 [中图分类号] F2 O4

〔文献标识码〕 A

[文章编号] 1000-7857(2004)08-0007-05

ECONOMIC COMPLEXITY AND ITS RELEVANT PROBLEMS

FANG Fu-kang

(Institute of Non-equilibrium Systems, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In the economic complex system, there exists basic rules and mechanism. The complex economic phenomena could be actually explained with integration of some basic evolutionary modes. J process, a typical mode of non-equilibrium growth, is studied by us. By integrating J process, Solow's growth model, Jump growth model and et al, the real growth could be explained. Referring to the approach to economic complexity and our investigation on the basic rules in complex system, several relevant fields are discussed, including ecological economics, knowledge management and the self-organization mechanism of learning process. In this paper, the newest research in these fields and the application of complexity approaches are briefly introduced.

$$\begin{cases} x(t+1)=x(t)+v(t) \\ v(t+1)=\sum_{i=1}^N A_p^i(t)G^i(t)+(I+D_p^{-1}(t))(A_p(t)+I)v(t) \end{cases} \quad (6.1)$$

这里,位置的聚集和速度的同步都依赖于局部邻接图。

基于单个主体的控制是一种解决复杂系统控制的合理途径,它提出了一种新的系统描述与控制设计,目前,它在交通、电网、飞行器编队及机器人合作中得到重视和初步的应用,并受到研究者的关注。

复杂系统特别是对群集行为的研究,经历了 3 个阶段:首先是生物学家做了大量研究,发现了许多群集特有的动态行为;第二阶段是实验物理学家和计算机专家做了许多实验和仿真,证明这种现象可由个体的简单行为规律获得;目前,利用数学严格建模及分析的第三阶段已经开始。复杂系统及复杂性行为的建模是复杂系统研究走向理性及量化的关键步骤,数学描述与分析是将我们从社会化昆虫学到的知识运用到复杂系统控制与设计的一座桥梁。

参考文献 (Reference)

- [1] R C Arkin. Behavior-based Robotics [M]. Massachusetts, USA: MIT Press, 1998
- [2] E Boabeau, M Dorigo, G Theraulaz. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems[M]. Oxford, UK: Oxford Univ. Press, 1999
- [3] D Cheng, X Hu, C Martin. On the smallest enclosing balls. preprint, submitted, 2004
- [4] Tianguang Chu, Long Wang, Tongwen Chen. Self-organized motion in anisotropic swarms [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2003,1:77~81
- [5] A K Das, R Fierro, V Kumar, J P Ostrowski, J Spletzer, C J

- Taylor. A vision-based formation control framework [J]. IEEE Trans. Robot. Aut. 2002,18(5):813~825
- [6] G Flierl, D Grunbaum, S Levin, D Olson. From individuals to aggregations; the interplay between behavior and physics [J]. J. Theoret. Biol., 1999,196: 397~454
- [7] V Gazi, K M Passino. Stability analysis of swarms [J]. IEEE Trans. Aut. Contr., 2003,48(4):692~697
- [8] V Gazi, K M Passino. A class of attraction/repulsion functions for stable swarm aggregations. Preprint, 2004
- [9] A Jadbabaie, J Lin, A S Morse. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules [J]. IEEE Trans. Aut. Contr., 2003, 48(6): 988~1 001
- [10] Y Liu, K M Passino, M M Polycarpou. Stability analysis of \$M\$-dimensional asynchronous swarms with a fixed communication topology[J]. IEEE Trans. Aut. Contr., 2003,48(1):76~95
- [11] T D Michener. The Social Behavior of the Bees [M]. Cambridge, MA: Harvard Univ. Press, 1974
- [12] P Ognen, M Egerstedt, X Hu. A control Lyapunov function approach to multiagent coordination [J]. IEEE Trans. Robot. Aut., 2002,18(5):847~851
- [13] K Passino. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control [J]. IEEE Control Syst. Mag., 2002,22: 52~67
- [14] C Reynolds. Flocks, herds and schools, a distributed behavioral model[J]. Comp. Graph., 1987,21(4):25~34
- [15] T D Seeley, R A Morse, P K Visscher. The natural history of the flight of honey bee swarms[J]. Psyche., 1979,86:103~113

(责任编辑 苏 青)

Key Words: complexity, economic growth, ecological economics, knowledge management, self-organization

CLC Number: F2 04

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2004)08-0007-05

1 经济复杂性

经济复杂性的提出是在 20 世纪 80 年代。针对当时经济理论中的主流学派,即一般均衡理论(General Equilibrium Theory),一批经济学家、物理学家及数学家指出这个理论的局限,认为它不能揭示复杂经济系统多层次、强耦合、非线性、开放性、不确定性、动态性等诸多丰富的现象和特点,并提出“将经济看作一个演化的复杂系统”来代替原来的一般均衡的论断。提出这个命题的代表人物有 K. J. Arrow^[1], P. Anderson, I. Prigogine 和 S. Smale。从经济事实上支持这种论断的有规模效益递增、途径依赖、多重均衡、金融涨落等等。目前,“经济是一个复杂的演化系统”已得到广泛的承认,出现了许多学术流派和不同的研究方法,如在美国流行用建立在多个体(Multi-agent)基础上的自适应系统的讨论,欧洲一些国家如荷兰、比利时、法国、西班牙、德国的学者则专注经济演化的动力学机制,同时,有关经济复杂性探讨在中国和日本也有很大进展。

我们对经济复杂性的探索考虑了两个问题,其一,在复杂的经济系统背后,是否隐藏着某些基本的运行机制;其二,能否在这些基本机制的基础上,通过整合,给出对经济复杂现象的某些实际解释。这二者都得到正面的结果。以经济增长为例,我们找到了一种普遍存在的演化过程,即 J 过程,表现为某个指标先下降后上升最终稳定到新高度的时间行为;我们分析了其产生机制和几何性质,并联系经济增长进行实证^[2]。

在经济增长的理论分析中,研究表明,技术是经济增长的重要源泉,一个国家乃至世界范围内的技术水平的提高,一般都是源自研究开发(R&D)活动。新技术的获得往往具有以下特点:都需要投入大量的人力物力;都需要经过多次尝试;新技术一旦产生并应用于生产就会强劲地促进生产力的发展。我们从动态演化的角度,分析一个代表性厂商的行为,可以将这种伴随着技术创新的演化过程大致分为 3 个阶段。(1)研究与发展阶段:对新产品、新方法、新制度的可行性和市场前景进行小规模的尝试性实验和评估分析,投入不是很大,产出有平缓下降的趋势。(2)大规模的开发和宣传阶段:新产品进入市场,或新方法、新制度开始全面实行,需要有一个市场接受过程,需要大量资本投入予以支持,并有很大的不确定性,投资风险极大,产出加速下滑;若抉择出现战略性失误,经济有可能持续下滑,甚至导致危机出现。(3)推广、普及、应用阶段:创新的产品或新方法、新制度被市场接受,获得极大的回报,经济出现新的起飞;经过一段快速增长期,最终平稳到达更高台阶的新均衡。

这个过程可以形象地用 J 曲线描述出来。如果不考虑厂商的差异或者假设一个国家有较多的厂商同时进行技术创新活动时,这条曲线也会表现在宏观上,描述一个国家的总产值变化,反映出经济增长中资本和劳动力与产出不是简单的投入产出的因果关系,而是互为因果的互动关系,是非线性相互作用。

结合索洛增长和上述讨论,我们把影响增长的因素和机制做一分解,那么经济增长表现出的演化轨迹可大致划分为一些基本模式,我们归纳为以下 3 种(图 1)。(1)渐进

式:索洛新古典增长理论所展示的那种外延式扩张。(2)突变式或阶跃式:除了可见的投入会直接带来产出的增加外,系统中政策参数、环境参数乃至结构的变化也会对经济增长做出贡献,并且这种变化是冲击性的,导致产出出现相应的阶跃变化。(3)J 模式:一种内涵式的增长途径。经济是一个演化的复杂系统,经济增长的道路是非常复杂的。经济增长的 3 种划分仅是一种理论上的分解,经济系统具有众多子系统,各个子系统可能按自己的方式增长,实际观察到的往往是这 3 种基本形式的叠加,甚至还有其它不确定因素的影响和耦合作用,在统计上看到的是一种无规则的增长波动的图像。图 2 就是对中国实际 GDP 增长的实证,将增长过程分解成为一系列渐进式和 J 形式增长曲线的叠加。

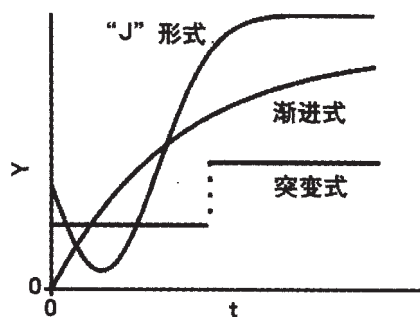


图 1 经济增长的 3 种基本模式

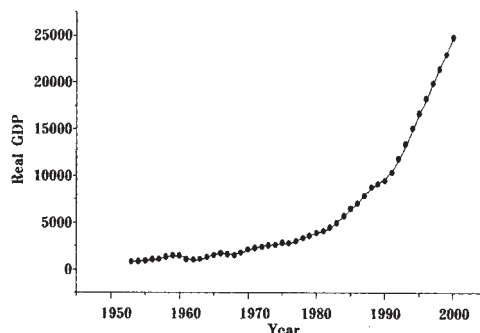


图 2 中国实际 GDP 增长和拟合曲线

J 过程具有很大的普遍性,如国际贸易、税制改革、生产资源的优化配置、经济体制转型、社会保障体系改革、经济管理、教育经济、移居者文化冲击等。其产生可理解为某种因素或几种因素的相互作用的相对滞后性,这一解释的理论基础可以追溯到熊彼特的创新理论 (Innovation Theory)。创新过程是伴随着旧产品、旧技术和旧制度的消亡过程。这种新旧转换必然要付出一定的代价或转化成本,是“创造性毁灭”(Creative Destruction)。我们从理论上对 J 过程的性质和机制进行了讨论,提出 3 个基本几何参数:宽度、深度、高度,证明只有在二维以上的动力系统才能产生 J 过程,并给出一些典型系统。

如果我们不仅仅限于经济系统的讨论,从系统状态函数演化的观点来看 J,那么这将是一个非常典型的统计物理问题。该问题曾由 Kramers 于 1940 年提出,讨论的是核裂变时由一个重核分解为两碎片的过程,其本质是系统从一个定态如何越过势垒到达另一个定态。这是一个典型的非平衡相变问题,物理学家形象地称之为“爬驼峰”。该问题经长

时间的讨论未能有很满意的结果,还遗留着很多待讨论的问题。J过程也是属于非平衡态转移这样一个带普遍性的基本问题。这里涉及到宏观层次如何确定终态的位置和与状态密切相关的特征参量,如转移时间、势垒深度等。在非平衡统计中,这个问题至今还是开放的。利用非平衡统计物理的背景展开对经济系统有关经济增长中J曲线的研究,将有助于这类非平衡系统机制的理解,同时,经济理论和数据的分析也有助于深化对这个基本理论问题的认识。

但我们在这里提出的J过程并不是一个简单的物理过程,它实际上也反映经济系统中一种信息参与的演化过程,是一种信息参与的相变,不同于一般的物理和化学过程。Von Neumann^[3]曾提出并讨论过这种信息参与的相变,他将这种相变与生命系统联系起来看,认为这是复杂度增加的相变,是生命系统中存在的特殊相变。如何更加深入地研究这种非平衡相变?这种有信息参与的非平衡到底具有什么特征?为解决这些问题,可尝试运用动力系统分析、多个体计算、随机过程、数学规划等方法,通过一类具体的有信息参与演化的相变过程如经济增长中的J过程来进行讨论。这种尝试将有助于我们进一步探讨复杂系统中有信息参与的非平衡相变的基本特点,有助于对经济系统、生命系统、生态系统、认知过程的了解。若要最终实现揭示这类相变机制的目标,我们的工作仅仅是开始,有待于深入探求。

演化经济学是现代西方经济学创新的一个重要理论分支。它借鉴生物进化的思想方法和自然科学多领域的研究成果,以动态、演化的理论来分析和理解经济系统的运行和发展,研究经济现象和行为的演变规律,已形成老制度学派、“新熊彼特”学派、奥地利学派、“调节”学派、布鲁塞尔学派等。2004年3月,“第一次中德演化经济学学术讨论会”召开。与会学者讨论了制度演化和技术革新等若干基本问题,交流了经济系统演化的规律及其在经济学相关领域的应用,提炼处理演化系统的数学方法,包括模型分析与模拟计算,也探索经济演化系统与其它学科的交叉,特别是与生命科学的相互联系。会议的讨论也涉及到一些复杂性问题,如多系统协同演化和经济演化中的临界性分析等。

2 生态经济系统及知识管理系统的复杂性

作为人类活动和经济发展的基础,生态环境问题正变得越加突出。生态系统自身演化发展及其与经济系统的关系引起了学者们的关注,通过一些工作得到了一些初步结果,为我们全面理解生态经济系统基本特征和规律提供了参考。但是,对于生态经济系统的复杂性仍然缺乏深入的研究,一个有说服力的、系统的理论尚未形成。

从复杂系统分析的角度来看,生态经济系统也是一个典型的复杂系统,其复杂性大致体现在以下几个方面。首先,生态系统的演化过程中存在着大量的非线性因素,使得生态经济耦合系统的动力学过程可能突然变得不连续,生态经济系统表现出复杂的演化特征,多重均衡、弹性、突变、不可逆性和阈值效应等复杂性概念正逐渐受到人们的重视。其次,生态经济系统的非线性导致其演化具有高度不确定性,这使得对经济行为后果的预期变得非常困难。在不确定性条件下确保生态经济可持续性是一个核心问题,这就要求突破确定性的理论框架,发展处理不确定性问题的研究方法。再者,生态经济相互作用涉及多种时空尺度,在不

同的层次和尺度上,人们所关心的问题不同,系统的运行方式和机制也存在着很大的差异。因此,对各层次结果进行综合分析是非常重要的。另外,生态经济系统中的时空耦合是其重要特征,发展显含空间的生态经济系统整合模型是未来几年有望迅速发展的一个领域。

生态经济系统复杂性研究才刚刚开始,尚处于探索阶段。目前,以下几个方面的研究取得了一定成果,具有一定的代表性。

2.1 生态经济复杂系统的共同演化。主要代表人物为 R. L. Costanza^[4],他认为,生态经济系统是复杂的、适应性的生命系统,应该作为一个整合的、共同演化的系统进行研究,并对全球生态系统服务总价值进行了估算。Boulman 等则对全球生态经济系统的演化进行了模拟。这类以自然资本概念为核心的工作在一定程度上整合了生态经济系统的耦合关系。此外,20世纪90年代兴起的内生经济增长理论^[5]也积极地考虑了生态环境因素对经济系统演化的影响,环境库兹涅茨曲线(Environment Kuznets Curve)假设更是明确指出经济增长与环境污染之间可能存在的一般规律,即产出水平与污染指标之间的倒“U”型关系。

2.2 生态系统的多重定态和灾变(Catastrophic Shift)。近期的重要成果是发现了一批存在多重定态的实际生态系统,如湖泊、珊瑚礁、海洋、森林和干旱区,并且定态跃迁常常是不可逆转的。生态系统灾变(定态跃迁)对人类社会产生了重要影响,并造成巨大破坏和损失,应引起人们的高度重视。Scheffer 等在分析生态系统灾变案例时强调,生态系统弹性的损失是导致定态跃迁的重要前提,所以,生态系统管理的目标之一应该是保持生态系统的弹性。

2.3 生态系统的复杂性与稳定性。20世纪70年代以前,复杂性越高稳定性越强的观点被生态学家广泛接受,而后来的研究表明,简单系统比复杂系统更可能趋于稳定。目前,两种学说之间还存在许多争议,研究还在不断深入。

生态经济系统复杂性是复杂性科学研究的一个组成部分。在复杂系统中所涉及的一些基本特征,如非线性、非平衡、突变、分岔、混沌、路径依赖等等,有其非常强的普适性,即在某一特定研究对象上所获得的某些概念和规律,常常可以在一些其它的研究领域中再次实现。所以,借鉴复杂性研究和分析在其它领域的成功经验,可以扩展生态经济复杂系统的研究思路。例如,借鉴非线性经济动力学的研究方法,可以相应地提炼生态经济系统复杂性的基本概念;确定生态经济系统的关键变量;描述生态经济系统关键变量的动力学核心规律,等等。我们相信,这方面的探索将是非常有意义的。

当今社会已发展到知识经济时代,现代经济中所拥有的特征有知识的作用、技术进步、金融介入、风险产生与人力资源的使用。这样背景的社会经济对相适应的管理模式提出要求,近20年来兴起的知识管理^[6,7]正是一种崭新的管理理念与实践,创造了企业(组织)的一种新型管理模式,使得企业中的每个人都能充分地发挥自己的知识才能和创造性,最迅速地将知识传播到最需要的地方,形成企业(组织)最强的创新能力、竞争能力、抗风险能力,最终取得成就。

知识管理从其理论兴起以及实践探索的短短十几年来,已经形成了令人瞩目的突破性的成果,在企业(组织)知识创新、传播与整合中发挥了巨大作用。有以下事例可以证

明。(1)美国的 Sandia 实验室,是一个十分著名的核武器研究所,其目标是研制威力最强大的武器系统,同时也通过其知识整合,运用其武器制造中的 Monte Carlo 方法,建立了世界上很有影响的宏观经济模型——ASPEN 模型。Sandia 实验室的成功业绩,离不了其行之有效的知识管理系统,其要点是将知识管理视为“一种系统的方法,以促使信息和知识在正确的时间以合适的形式和成本传递到正确的人手中”,并将知识管理系统分为对知识的采集(Collect)、组织(Organize)、分享(Share)和使用(Use)4部分。(2)世界银行每年以大量的资金援助、政策咨询和技术援助对世界各国提供支持,特别是在帮助发展中国家减少贫困、持续发展、抵御金融风险方面取得了举世瞩目的成绩。这也要归功于他们的知识管理系统——从获取(Acquire)、管理(Manage)、传播(Disseminate)3个环节对商业信息、政府沟通、人力资源等不同子系统的信息和知识进行分享和管理,形成完整的知识链,并以 Lotus Notes、Domino 先进软件作为技术辅助,极大地提高了工作效率。(3)电子政务,已成为属于政府部门的知识管理工程。此外,在其它推行知识管理的生产企业中所取得的成果也是前所未有的,并且已经发展了一些专业的知识管理软件,如 NOVO Solutions、Synergy 等。

知识管理从 20 世纪 80 年代起兴起,目前已逐步形成了技术学派、行为学派和综合学派等几个不同的流派,其宗旨都围绕着知识、信息、自适应与增强创造能力这些基本主题,这些主题背后的基础理论问题是知识的作用、知识的创造、知识的传播和知识的整合等 4 个基本内容。我们可以从对经济系统、管理系统的复杂性来考察和分析问题。

知识管理中要研究的理论问题是:(1)对知识管理的理论基础,即知识在现代经济中的作用进行探讨,是否像 UNDP 所归纳的那样,存在着智力资本(Intelligent Capital)的概念?这涉及到知识的分类、知识的价值、知识的转化、新的生产能力的形成、知识在现代企业中的作用等实质性问题;(2)知识形成过程的机制,即知识的产生、获取和传播的基本规律。这个问题的难点是新知识的产生机制,可设想是一种认知过程的飞跃和突变,需要用非线性动力系统进行刻画,而知识的获取与传播也是一种动力学过程。应在个体知识研究的基础上,进一步探讨个体知识与组织知识的相互转化的机制,或知识在企业(组织)内的整合。基本上有两个理论问题:一个是个体知识如何通过组织内各个体间的自组织相互作用,在企业(组织)这个层次上涌现出带有整体性质的新知识,也可以称之为组织动力学;另一个是企业(组织)内各种知识的复杂联系的结构与关联,也可称为知识管理网络的研究。应在理论分析的基础上,对知识管理系统的模型化、量化的一些要点予以探讨,在技术层次上处理知识的分类、度量、生成、组织、储存与传播,形成模型,形成软件,以便实施应用。

在解决如上知识管理的基础科学问题时,有两个有力的工具,即自组织理论与复杂网络理论,它们都是复杂性理论的重要内容。新知识的涌现,诸多个体新知识在组织内的整合,新知识产生后转化为技术以形成新的生产力,都是各种类型的自组织跃迁,其突变的奇点和参数都是不同的,但都可以用非线性动力系统予以刻画。复杂网络理论近年来有很大进展,在 Scale Free, Small World, Regular 及 Random 网络的研究上有了突破,这对于我们理解诸多个体知识的

传播、组织知识的复杂性及其拓扑结构有很大帮助。我们可以充分利用这些复杂性理论已取得的进展,并结合其它的理论工具,如扩散方程、多个体模拟、数据挖掘等分析手段,来揭示知识管理系统的基本运行机制,并进一步仿真建模,编制相应的软件。

3 学习过程的自组织机制

我们是从经济系统进入学习过程的讨论中的。学习过程有一个普适机制,已进入到脑认知的领域,这是一个十分基本而又复杂的研究对象。在我们的认识上,对经济系统学习过程的了解,有助于学习过程自组织机制的理解。学习机制研究的国际前沿是学习过程的自组织理论,适于用复杂性理论来讨论学习中所出现的识别、顿悟、涌现、联想、记忆等现象,用自组织的观点探讨学习过程的认知飞跃和突变机制。这些研究在揭示学习机制方面获得了突破,并被广泛应用于神经网络、自动控制等领域。其中,具有代表性的如 T. Kohonen 提出的自组织映射(Self organizing Map)^[9,10]和 Berger 的有关神经回路的讨论^[9,10]。

T. Kohonen 用映射的方法,将复杂、多维的大脑微观构造约化为二维的平面结构,构造出自组织特征映射模型(图 3),可以达到数据的自动聚类功能。

定义输入向量 $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 输出层上每一个神经元的附属向量 $m_i=(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in})^T$, 对于每次输入,都能在输出层上找到一个最优匹配 m_c , 满足 $\|x - m_c\| = \min_i \{\|x - m_i\|\}$, 调整输出层上神经元对应的附属向量 $m_i(t+1)=m_i(t)+h_{c(i)}(t)[x(t)-m_i(t)]$, 其中 $h_{c(i)}(t)$ 为领域函数,与元素和最优匹配 m_c 的欧氏距离有关,一般的结果是所有向量朝向与输入向量一致的方向调整,距离最优匹配神经元越近,调整程度越大。

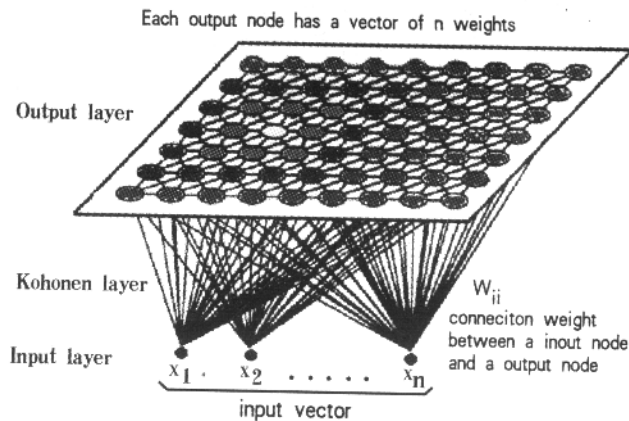


图 3 Kohonen 自组织映射模型

图 4 是我们做的一个例子,左图是输出层神经元的初始情况(颜色就表示该神经元的附属向量),右图是反复按顺序输入一些颜色样本(输入向量)后得到的结果,聚类效果比较明显。

Berger 等人在研究大脑芯片时,提出了“动力学突触(dynamic synapse)”的模型,这是关于神经回路的讨论。在神经元传递信号的过程中,首先是动作电位沿轴突传递到突触前端,形成突触前电位(Presynaptic Potential),引起递质释放,递质到达突触后膜,产生突触后电位,继而完成一次信号传递。一般的神经元信号传递理论模型都是将神经元的动

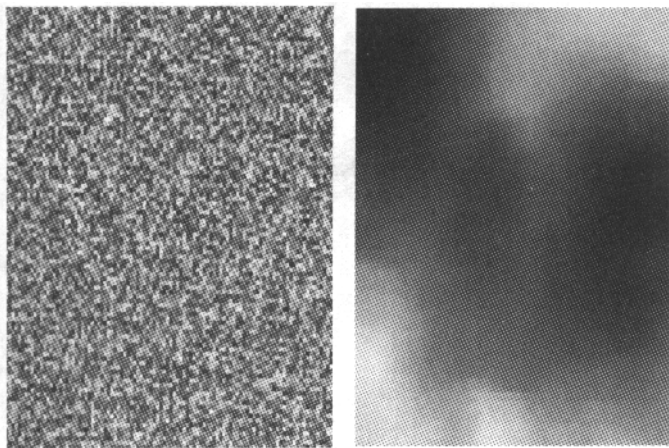


图4 一个颜色聚类的例子

作电位加上一定的权重形成突触前电位，然而实际上神经元的很多特性会直接影响到信号在轴突中的传递，直到轴突末梢上的反应才是其最终的引起递质释放的信号，所以由细胞体到突触前端的过程是一个动力学过程。其模型和动力学方程如下：

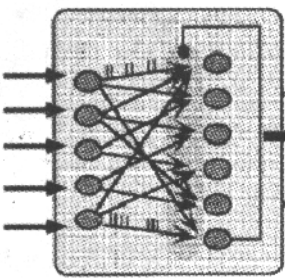


图5 11个神经元的动力学突触模型

在大脑芯片的研制中，最基本的声音识别模型是让两个 speaker 读同一个单词(如“Hot”)，由于两个人发声的不同，得到的声波相关程度很低(图6, 上图)。而经过一个由5+6个神经元组成的网络(图5)，输出的信号相关程度则较高。说明这样一个网络传递声音信号时，能提取出描述该信号的某些最本质的特征，从而识别出不同人说同一个单词的信号(图6, 下图)。

(上接第14页)

[8]夏禹龙等编著. 科学学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1983.5

[9]普利高津. 探索复杂性[M]. 罗久里等译. 成都: 四川教育出版社, 1986. 序言

[10]B Edmonds. Syntactic Measures of Complexity [D]. Doctoral Thesis, University of Manchester, UK, 1999. 参见: <http://citeseer.nj.nec.com/edmonds99syntactic.html>, 2003-12-20

[11] 吴彤. “复杂性”研究的若干哲学问题 [J]. 自然辩证法研究, 2000(1): 6-10

[12]郝柏林. 复杂性的刻画与“复杂性科学”[J]. 物理, 2001(8): 466-471

[13]S A Kauffman. The Origins of Order[M]. Oxford University Press, 1993

[14]W Weaver. Science and Complexity[J]. American Scientist, 1948, 36: 536-544

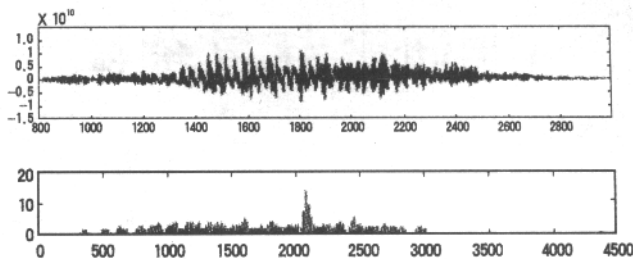


图6 经过神经网络的处理前后, 两个不同人读同一个单词后声波的相关性分析

参考文献 (Reference)

- [1] Anderson P, Arrow K J & Pines D. The Economy as an Evolving Complex System [M]. Addison-Wesley, 1988
- [2] Fang Fukang, Chen Qinghua. The J structure in economic evolving process [J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2003, 16(3): 327-338
- [3] Von Neumann J. The General and Logical Theory of Automata (1948) [A]. In: A. H. Taub, Ed., John von Neumann, Collected Works, Vol. 5: Design of Computers, Theory of Automata and Numerical Analysis[M]. Oxford University Press, 1963. 288-328
- [4] Costanza R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(15): 253-260
- [5] Aghion P, Howitt P. Endogenous Growth Theory [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1998
- [6] Macintosh Ann, Filby Ian, Kingston John. Knowledge management techniques: teaching and dissemination concepts [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 1999, 51(3): 549-566
- [7] Tyndale Peter. A taxonomy of knowledge management software tools: origins and applications [J]. Evaluation and Program Planning, 2002, 25(2): 183-190
- [8] Kohonen T. Self-organizing maps, 2ed edition[M]. Springer, New York, 1997
- [9] Liaw Jim-Shih, Berger Theodore W. Dynamic synapse: a new concept of neural representation and computation [J]. Hippocampus, 1996, 6: 591
- [10] Liaw Jim-Shih, Berger Theodore W. Dynamic synapse: harnessing the computing power of synaptic dynamics [J]. Neurocomputing, 1999, 26: 199

(责任编辑 苏青)

[15]H A Simon. The Sciences of the Artificial [M]. 3rd edition. The MIT Press, Cambridge, 1996

[16]姜椿芳, 梅益. 自然辩证法百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1994

[17]R Merton. The Normative Structure of Science [A]. The Sociology of Science [C]. Chicago: The University of Chicago Press, 1973. 267-278

[18]P Thagard. Computational Philosophy of Science[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 1988

[19]S E Phelan. What Is Complexity Science, Really? [J]. Emergence, 3(1): 120-136

[20]J Horgan. From Complexity to Perplexity [J]. Scientific American, 1995, 272(6): 74-79

[21]N Thrift. The Place of Complexity [J]. Theory, Culture & Society, 1999, 16(3): 31-69

(责任编辑 王宏章)