

文章编号:1007-6735(2011)05-0473-07

复杂系统理论在创新研究中的应用

——兼谈复杂理论视角下创新的起源、结构和演化

董洁林^{1,2,3}

(1. 苏州大学 企业创新和发展研究中心, 苏州 215021; 2. 苏州大学 东吴商学院, 苏州 215021;
3. 清华大学 中国科学技术政策研究中心, 北京 100084)

摘要: 人类的创新过程作为社会活动的一部分具有复杂系统的特征. 在此, 综合介绍了学者们用复杂系统理论对创新活动研究的一些成果, 特别介绍了近期在创新的起源、结构和演化方面的进展. 然而, 这方面大多数的研究都是基于复杂系统理论在生物系统中所建立的模型来诠释创新活动的规律, 而社会系统和生物系统是完全不在一个层次的复杂系统. 因此, 在发现不同层次的复杂系统的通用规律之时, 也需要思考社会系统, 包括创新活动的独特规律. 另外, 创新研究是一个新兴的交叉学科, 由于自然科学家和人文科学家知识结构互补, 如果联合研究, 将使该项研究迈上一个崭新的台阶.

关键词: 创新; 复杂系统; 技术演化

中图分类号: N 94 **文献标志码:** A

Application of the complex system theory in innovation studies

—Overview of the origin, structure and evolution of innovations

DONG Jie-lin^{1,2,3}

(1. Center for Enterprise Innovation and Development, Soochow University, Suzhou 215021, China;
2. Soochow Business School, Soochow University, Suzhou 215021, China;
3. China Institute for Science and Technology Policy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The characteristics of a complex system are presented in the innovation activities of humankind. This paper summarized the recent findings of applying the complex system theory to study the innovation processes, with a special focus on the origin, structure and evolution of innovations. We noticed that many models and concepts used in the study of innovation systems are adopted from the biology systems, yet the social system and the biology system apparently are at very different levels of complexities. Therefore, this paper argues that while trying to explore the general rules that may apply to all complex systems, one should also keep mind open for the unique rules that apply only to the social systems, including the innovation activities. In addition, due to its interdisciplinary nature, it would be more fruitful for scholars from different academic backgrounds to join forces in the study of the innovation process under the complex system paradigm.

Key words: innovation; complex systems; technology evolution

收稿日期: 2011-09-20

作者简介: 董洁林, 女, 教授. 研究方向: 技术创新. E-mail: jielindong@gmail.com

自从发明了石器,人类的经济在经历了逾百万年缓慢蠕行之后,在最近的两百多年出现了爆炸性成长.从公元前100万年到公元1300年之间,世界人均GDP基本上在100元(以1990年国际元为衡量单位,以下相同)上下波动.1300年,文艺复兴在意大利佛罗伦萨悄然启动,随即欧洲人开始了数百年的全球大航海探索,导致1492年哥伦布发现新大陆.1543年,哥白尼“天体运行论”的出版,揭开科学革命序幕.18世纪初期,随着蒸汽机和现代纺织机等关键技术的发明,工业革命在英国蓬勃兴起.从文艺复兴开始到工业革命启动之时的400多年间,世界人均GDP缓慢地攀升,从1300年的人均GDP的89元上升到1750年约178元.之后,人类经济的量子跃迁开始了,世界人均GDP在2000年超过6500元,大约是1750年的37倍(数据来源:Prof. J. Bradford DeLong, Univ. of California, Berkeley).

图1显示了从公元前100万年到公元2000年,世界人均GDP的变化.人类的经济成长在最近的250年几乎是垂直向上的.图2显示了从公元1700年到公元2000年,世界人均GDP的变化.

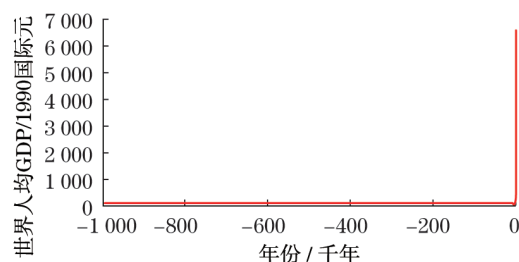


图1 公元前100万年到公元2000年世界人均GDP
Fig.1 Estimated world GDP per capita between 1 million BC to 2000 AC

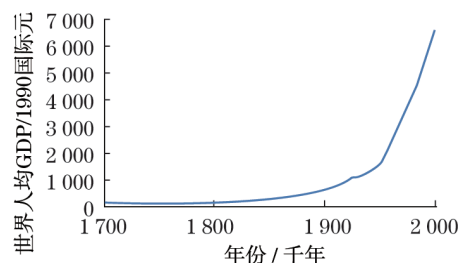


图2 公元1700年到2000年世界人均GDP
Fig.2 Estimated world GDP per capita between 1700 AC to 2000 AC

传统经济学难以解释社会经济近几百年的“爆炸成长”现象,但不少经济学家认为“创新”是其主要的推动力. Schumpeter 将经济爆炸成长归功于“创新”(innovation),特别是“创业者”(entrepreneur)的

创新——“创造性破坏”(gales of creative destruction)^[1]. Solow(1987年诺贝尔经济学奖获得者)认为“技术”是经济爆炸的秘密武器,他于1956年提出了一个量化模型来描述技术如何增加生产效率^[2]. Romer于1990年提出经济成长的秘密基于“知识积累”^[3].投入其他生产要素(如人力、原材料、资本等)其边际回报会越来越小,而对“知识”的投资,是一个正反馈过程,投入越多,回报率越高,到一定程度会导致指数性增长.这些解释和模型都局部地修正和改进了传统经济学,从而对经济的爆炸性成长作出了一些合理解释,但总体来说,传统经济学仍然是漏洞百出.

工业革命导致的经济成长首先让欧洲诸国受惠,后来创新的浪潮传播到美国,于是,后工业革命继续,并触发了信息革命.亚洲诸国参与工业革命大约是二次世界大战前后,之后的几十年,亚洲各国的经济实力得到相继提升.21世纪来临之时,世界各国把彼此竞争的焦点定位于“创新能力”.在中国,“创新”是“十二五”计划的核心目标,各种“创新”活动在中国急剧升温.因此探索创新的源泉、掌握创新的规律,就如同寻找打开财富宝库的钥匙,铸造增强企业、地区和国家竞争力的利器,成为近年来学者们研究的热门领域.

事实上,人们对“创新”的来源和规律的兴趣源远流长.从古代留传下来的神秘传说,到工业革命以来积累的大量案例研究,特别是近五十多年,学者们用较科学的数据收集和分析方法,对许多创新领域进行了实证研究,得到了不少量化的结果和一些经验性规律.由于社会系统的运行和发展,包括创新活动,都带有复杂系统的特征,包括随机性、可突变性、路径相关性、不可逆转性,等等,因此近二十年来,不少学者将复杂系统理论和研究方法应用到创新活动的研究之中.

由于“创新”概念在社会上被广泛滥用,每个人的定义都可能很不一样.这里先提出学界的几种权威定义:

a. 经济学家 Schumpeter 认为“创新是引进新产品、从事新生产方式,发现新市场,获得新的供应渠道,以及创建新的组织和行业结构”.“创造性破坏”是创新的一个显著特征^[1].

b. 研究创新传播的社会学家 Rogers 认为:“创新可以是一个概念、一种操作、或者一个物品,对于某个人或者一个群体,它是一个新的东西”^[4].

c. 企业管理学家 Drucker 认为:“创新是一种变

化,它创造一种新能力 …… 然后将之市场化”^[5].

经济学家 Schumpeter 的创新定义强调的是“创新方式”,社会学家 Rogers 强调的是创新的“相对性”,而企业管理学家 Drucker 则强调的是创新的商业化价值.在人们通常的讨论中,包括以上 3 位著名学者的定义中,可以领悟到创新是一类社会活动,而“科技创新”是“创新”的一个子集.本文的讨论将采纳 Schumpeter 有关“创新”的定义.

1 复杂系统理论在创新研究中的应用

如果把创新研究分为 5 个大块:创新扩散、国家创新、集群创新、企业创新、以及创新起源和演化,那么,表 1 就简要地显示了复杂系统理论在这 5 个方面的应用情况.

表 1 复杂系统理论在各类创新研究中的应用情况简介
Tab.1 Summary of the applications of the complex system theory in innovation research

创新研究领域	创新研究内容
创新扩散	创新渗透和扩散的过程:用过较多模型研究该过程,例如 Random Walk、Bass Model、Agent-Based Model、传染病模型、以及 CAS,等
国家创新	国家创新系统的形成、成长和衰退机制,政策对创新的影响.有少量基于 CAS 的研究
创新集群	创新集群的形成、成长和衰退机制.有部分基于 CAS,NK 等模型的研究成果
企业创新	产品生命周期,新市场预测,战略管理,学习型组织,动态创新,开放创新.有部分基于 CAS,DBM 等模型的研究成果
创新演化	有个别学者采用复杂系统理论模拟技术的演化过程

1.1 创新扩散

学者们对创新扩散的研究从 20 世纪 40 年代就开始了,该研究成果对社会新概念的传播过程和接纳、企业新产品的市场预测、国家新政策的宣传和社会接受等方面,都有巨大的意义.早期研究以案例记录为主,逐渐演化到总结经验性规律和提出相应的模型.这个阶段工作的代表人物有社会学家 Rogers^[4],他的主要工作是案例研究和经验规律的总结,得出了创新扩散 S-曲线和五段论规律.还有 Bass 等^[6-7],他们的主要贡献是提出了一个解释创新扩散的经验数学模型(bass model),该模型比较好地解释了在利用大众媒体做市场宣传外加直接销售的情况下,新产品市场接受率,可以帮助一类企业预测在一定的宣传费用投入和销售布局下的产品的销售结果.这个时期的创新研究虽然数据很多,模型

也不少,但缺乏系统性和全面性.最近 20 年来,创新扩散研究的学者们把目光投向了复杂系统理论所提供的研究视角、数学模型和工具.到目前为止,学者们用现有的复杂系统思路来解释创新扩散过程方面做了很多工作.例如 Valente 的社会网络模型^[8],用以解释一些新事物在社会网络中的扩散;Rogers 等^[9]将他的经典技术扩散模型和 CAS(complex adaptive system)模型相结合,解释一些社会宣传项目(例如 Stop AIDS)的传播过程和效果.中国学者在这个领域也做过一些研究工作,例如 Xu 等^[10]曾运用 NK 模型来模拟技术扩散的过程.

1.2 国家和集群创新

在运用复杂系统理论对国家创新和集群创新的研究方面,学者们的主要成果在创新集群的形成、结构和演化方面.例如 Leydesdorff 和 Etzkowitz^[11]提出的“三链螺旋模型”(triple helix model),比较好地解释了政府、企业和大学这 3 个关键机构在社会创新活动中的动力学机制.一些学者也应用 NK 模型来解释组织结构例如工业行业的创新网络以及创新集群的演变^[12].中国学者在这个方面也有一些研究成果,例如任锦鸾^[13]在其著作“创新机理”中,对“三链螺旋模型”进行了修改,提出了“复合三链螺旋模型”,并且对中国创新系统网络的形成过程进行了计算机模拟.

1.3 企业创新

在企业创新研究方面,复杂系统理论的应用取得了很多方面的研究成果.Janszen^[14]在 2000 年出版的著作《Innovation Age》中,对学者们早期将复杂系统概念应用于企业创新管理的各方面有比较全面的介绍,如商机的变化和创造机制、战略管理与决策、产品的生命周期和新产品开发管理、动态商务模型、学习型组织等方面.近年来,更多研究成果持续出现,例如,Mcelroy^[15-16]在研究企业的知识管理、学习型组织、持续动态创新方面用 CAS 模型构造了一套比较完全的解释系统;Nilsson 和 Darley^[17]用 CAS 模型探讨公司制造和供应链策略的优化问题并用 Agent-Based 模型进行计算机模拟.中国学者 Liu 等^[18]从复杂系统的视角研究了企业间的合作型创新机制.

在对相关文献进行大量阅读后,发现目前用复杂系统理论研究以上几个创新过程的活动有如下共同点:

a. 都是采取复杂系统在其它领域开发出来的概念和模型,来解释创新活动的现象.例如基于生物

系统的CAS模型,因此,一个合理的问题是,创新活动作为社会系统的一部分,为什么会呈现出与生物系统类似的复杂规律,社会经济系统,包括人类的创新活动,是否有它自己独特的行为规律.

b. 就本文作者目前所阅读过的文献来看,人们大都是用复杂系统理论的一个概念解释某个创新过程的一种现象,几乎没有见到比较完整的理论体系,更少有可以预测创新过程走向的指导性理论模型.这种现象表明相关研究还处在比较早期的探索阶段.

c. 在有关理论研究的文献中,来自真实创新过程的数据较少.不管是构建理论还是用现有理论概括性地解释创新过程的某个方面,大多都停留在比较表面的貌似合理,其实既不能证实也不能证伪的层面.

d. 目前用复杂系统理论研究创新的学者,大多数是管理学、社会学、以及经济学背景(很少见到研究经济物理学的学者们在创新科学方面的研究成果).他们选择的研究问题往往比较有趣,但其研究手段和深度比较有限,主要是用相关理论解释一些现象,而很少提出自己独特的模型.

然而在用复杂系统思路研究创新的起源和演化过程方面,虽然相关研究的数量不多,但在理论框架方面,确有一些让人耳目一新的研究成果,下文将总结这个方面的研究进展.

2 从复杂系统理论的视角研究创新的起源、结构和演化

具有理工科背景的经济学家 Arthur 教授首创了“复杂经济学”(complexity economics)这个名词,他在研究技术演化方面成就斐然.他曾经从复杂系统的视角提出了一个理论模型解释历史上为什么会出现“技术锁定”现象(“technology lock-in”),并因此获得国际熊彼得经济学奖.2009年,他出版了著作《The Nature of Technology》^[19],该书获得了美国科学杂志和自然杂志的高度推崇.此书主要回答这些问题:新技术是从哪里来的;什么是技术创新;技术是否也像生物一样进化;如何进化.

Arthur 教授重新给“技术”(technology)做了定义:技术即利用一个(或多个)被发现的自然现象和规律(包括人文和社会规律)来帮人们到达某种目的的方法.它可以是一种程序,也可以是一台仪器,甚

至可以是一个人的“组织”和“规则”;它可以是物质的,也可以是非物质的.在这个定义下,“技术”已经不仅仅是传统意义上的“自然科学的应用”,而是一种比较抽象、广泛的“方法”.因此,“技术创新”已经不是上文所述的“创新”的一个子集,而可以是创新的全部内涵.“技术创新”是“技术起源”和“演化”的过程,也就是“创新”的过程.

Arthur 认为,技术具有共同的抽象化的属性和结构,技术的结构遵循3个基本原理(也就是3个无法从其它更基本的原理而推理的假说)^[20]:

a. 组合原理(combination principle) 每一项技术都是由其他子技术组合而成,就像一个机器有很多零部件,一个程序有很多模块,一个集合有很多子集.

b. 循环原理(recursiveness principle) 技术有层状结构,一层技术下面套了多层技术,而自己也变成上一层技术的一部分,形成一种循环.

c. 自然现象附着原理(natural phenomena base principle) 每一项技术都必须基于一种或者多种自然现象和规律,而这些自然现象和规律由科学研究发现,这些“自然现象和规律”包括人类社会的现象和规律.每一层技术可能基于完全不同的自然现象和规律.

如果将所有技术看作是一个“技术池”,Arthur 教授认为,技术池中具有“域”结构(domain)或者说“集群”(cluster)结构,这种技术“域”的形成和它们的原始来源,也就是技术所依附的自然现象和原理,是相关的.例如光学仪器,其基本原理是光学现象和原理,而电动仪器,其基础原理就是电磁学,人群的组织结构基于人的心理学、行为学,等等.技术“域”之中,还可能有“子域”,各种“域”也可能互相交叉.

那么,技术又是如何发源和演化的,Arthur 教授提出了如下技术“起源”和“演化”原理(假说):

a. 原始技术元素,来源于某一个(或者几个)自然现象(或社会现象)或者自然规律(或社会运行规律).

b. 技术演化依靠在现存的技术池的技术元素中寻找新的组合,从而更好地满足一定的目的.而这些新组合,又变成了技术池中新的技术元素以供其它技术所采用.

c. 技术演化也可以是结构上增加(或减少)技术层次,以更好地满足一定的目的.

因此,“技术创新”既可以是原始技术元素的生成,也可以是在任何层次创建一个新的技术组合,这

一个新组合可以加入新的元素,也可以是同样元素的不同组合方式.它既可以包括创造新的仪器(硬件),也包括创造新的程序(软件),也可以包括组织创新.

基于以上假说,加上一些操作规则和逻辑条件,Arthur 教授的团队设计了一个简单的技术系统进行计算机仿真模拟实验^[21],结果定性地初步证实了技术演化的基本理论设想,例如:

a. 技术可以从低级到高级,从简单到复杂演化;

b. 技术演化过程将淘汰一些“过时”“无用”的技术;

c. 演化过程中会产生一些“使能技术”(“enabling technology”),他们对技术跃迁起着至关重要的作用;

d. 演化过程呈现熊彼得所指出的“创造性破坏”特征.

显然,Arthur 教授的理论只是一个初步的设想,目前还很不完全.它没有考虑一些已经被观察到的技术创新和演化特征,例如 Johnson 和其他学者所观察的创新进步过程中的创业者的推动作用,社会 and 市场需求对技术创新的拉动作用等特征^[22].

在思考和研究这个问题时,Arthur 教授比较了技术演化过程与达尔文的物种进化过程、库恩展现的科学演化和革命的过程. Arthur 教授认为达尔文的生物进化之“物竞天择,适者生存”的过程^[19],和技术演化的过程并不一样.虽然,一个技术系统依靠在现有的技术池中寻找新的组合元素或者在结构上增(减)技术层进行改进和优化的过程,似乎遵循了达尔文进化论的一些特征,但这个过程会让这项技术达到一种性能极限而使进化停滞.重大技术的出现不是靠一步一步很小的积累,靠自然选择进化而成.比较重大的“技术创新”出现,有3个诱因:社会迫切需要解决一个重大问题;偶然产生了一项技术,结果是未曾预料的奇迹;采用与原有技术不同的自然现象和原理(新的“技术域”或“子域”),然后非常聪明地将它们应用于人类的某种需求.

关于技术的演化过程,Fleming 和 Sorenson 也用 CAS 模型从专利引用的数据分析中,得到类似的结论,即技术组合进化的过程和生物进化过程呈现明显不同的规律.他们还用 NK 模型模拟研究了技术组合的过程,发现如果被组合的技术存在高度相互依存性,将导致“复杂性灾难”(“complexity catastrophe”)^[23].

回看库恩的《科学革命的结构》^[24],知道科学革

命的结果往往让人们发现一个崭新自然现象和原理之“矿藏”,这就为一个崭新的“技术域”的出现奠定了基础.如果采取不同的、新的技术“域”来实现一个目的,那么非凡而强大的技术创新就可能出现,而这个技术创新不仅可能实现原有的目的,甚至让我们达到完全新的、未曾预想的目的,这就是“技术革命”出现的基础.技术革命不仅创造新的产品,而且创造崭新的行业 and 新的经济系统,极大地改变人们的生活方式.新的“技术域”产生之后,会进化、产生“子域”,也可能产生异化,最后成熟、退化,也许完全退出社会经济舞台.比较库恩所描述的科学革命和演化的过程和技术发展过程,会发现它们遵循很类似的规律.也许这并不奇怪,因为“科学”和“技术”本来就是同根同源、相辅相成的“近亲”.

然而,技术起源 and 演化的模型还很初级,很多重要演化因素以及其“动力学”机制都没有包括在模型之中;对技术起源 and 演化的过程也还没有数学化演绎模型;理论模型和实证研究所获得的数据也缺少对比、求证,更谈不上预测新的技术创新过程了.关于技术起源 and 演化理论如何与创新扩散理论以及其它创新理论结合互动,这方面研究也很缺少.虽然不少经济学家认为创新是人类最近几百年产生经济跃迁的根源,但目前的创新研究结果无法更详细地提供模型 and 定量的解释.

3 讨论

3.1 创新研究的价值

人类文明在最近两百多年的时间里呈现爆炸性成长,经济学家估计,人类只用了 0.01% 的人类发展总时间(约 250 万年)而创造了 97% 的财富^[25].很多经济学家认为人类的财富创造之谜就是“创新”,而“创新”之谜并没有被解开.因此,无论是从学术上还是其社会效益上来说,这个题目都值得人们投入智慧和资源进行进一步的研究.

3.2 自然科学家在创新研究中的作用

到目前为止,关注经济学和社会系统的自然科学家对创新过程的参与较少,但是作者认为自然科学家的参与是很重要的,原因有二:

a. 自然科学家的知识结构与人文学者是互补的,前者在科学地采集数据、分析数据、建立模型等方面有过严格的训练和高超的技巧,同时具备对自然科学各领域的深切理解;而人文学者在发现和理解社会和经济系统的问题、理解人的行为,以及解释

数据的人文意义等方面,有独到的见解.遗憾的是,目前从事社会系统研究的自然科学家,例如经济物理学家们(econophysicist),似乎主要活跃于一个封闭圈子里,而没有和经济学家、社会学家、历史学家、管理学家等真正地融合起来,以至于其研究的课题偏离了人文科学研究的重大方面,其研究成果也很少进入人文学者的视野和文献渠道.从另一方面来说,不少人文学者由于对数学工具和科学模型化过程比较陌生,而较难在一些重大问题上深入研究下去,不能得出有意义的定量成果.美国学界认识到了这个问题,成立了一些多学科的复杂系统研究中心,例如在多位诺贝尔经济学家和物理学家的倡导下,于1984年成立的Santa Fe Institute.中国也可以成立类似的交叉学科的复杂系统研究机构,让多方面的学者能够充分地交流,共同攻克难题.

b. 到目前为止,自然科学家在社会和经济活动研究方面投入研究较多的是金融领域,而很少参与“创新活动”的研究.这种情况的产生一方面可能是由于人们还未认识到该研究的学术价值和社会意义,另一方面可能是创新领域的数据远远不如金融领域的数据完整和准确,因此给定量模型的构建和检验造成了一定的难度.然而,挑战和机会是并存的,困难的事往往蕴含着丰富的研究内容.

3.3 关于复杂系统理论在创新研究中的应用

迄今为止,用复杂系统视角对创新过程的研究,包括其它社会系统的研究,主要采用的是在生物系统建立的概念和模型.历史上各学科互相借鉴隐喻(metaphor)的做法由来已久,例如传统经济学中的平衡系统理论基础就“不当地”借鉴了物理学的“平衡态”概念.经济学家Beinhocker在他的著作《The Origin of Wealth》之中,对经济系统的复杂性进行了比较全面的阐述,同时对传统经济学的局限性也作了较深刻的批判.他认为基于物理学“平衡态”概念的传统经济学有其与生俱来的违反物理学“熵增加原理”的缺陷,而基于生物系统的模型“复杂自适应系统”(CAS)可以更真实地描述经济活动^[25].虽然目前社会系统的复杂性研究借鉴生物系统的相关概念和理论似乎有很多合理之处,但还是有不少学者在不断反思和批判这种“社会系统”“生物化”做法的局限性.诺贝尔经济学奖获得者Krugman认为这种将社会系统泛生物化的现象是“生物噪音”(“bio-babble”),是“伪经济学”(“pseudo-economics”)^[26].

诺贝尔物理学奖获得者Anderson在1972年美国《Science》杂志上发表的文章More Is Different^[27]

中认为,自然界展现出一种层状结构,每一层都有它自己独特的规律,不能用一层发现的规律简单应用于另一层,例如“心理学不是应用生物学,而生物学也不是应用化学”(“Psychology is not applied biology, nor is biology applied chemistry”).在文章的最后部分,他说:“当然,人类生态学和DNA之间的组织层次显然要比DNA和量子电动力学之间的层次要多,而每一层都会有一个新的概念结构.”(“Surely there are more levels of organization between human ethology and DNA than there are between DNA and quantum electrodynamics, and each level can require a whole new conceptual structure.”).尽管在生物系统中找到的一些规律和概念似乎可以被方便地应用于社会系统,可是我们很难有理由相信,生物系统和社会系统会遵循类似的规律.所以,在用类似的概念和工具研究这两个层次差别很大的系统时,需要不断地提醒自己:人类社会和生物系统的复杂性有什么不一样的规律.当然不能排除有可能存在着一些普遍的、可以解释各个层次的复杂系统的原理.因此需要具有开放的思维,直到既找到了那些能够穿透各层次的通用规律又发现了某层次的特别规律之后,我们的使命才算完成.总而言之,无论基于什么理论范式,用什么研究工具,人们对创新规律的了解都还在很初级的阶段.要对人类的创新活动规律有清晰的认识,并且希望这些研究成果真正变成对社会创新和发展有指导意义的学问,经济学家、社会学家、管理学家、心里学家、物理学家以及其他自然科学家们任重而道远,而这种跨学科的交叉探索对解开人类科技发展和财富创造之谜是必要条件.有人说,“复杂系统理论”是属于21世纪的科学工具.科学和工具的重要性在于它是否能解决重要的问题,然而没有什么“问题”比揭开人类创造其历史积累的97%财富之谜更为重大了.

参考文献:

- [1] SCHUMPETER J. The Theory of Economic Development[M]. New Brunswick: Transaction Publishers, 2011.
- [2] SOLOW R. A contribution to the theory of economic growth[J]. Quarterly Journal of Economics, 1956, 70(1): 65-94.
- [3] ROMER P M. Endogenous technological change[J]. Journal of Political Economy, 1990, 98(5): 71-78.
- [4] ROGERS E M. Diffusion of Innovations[M]. 5th ed. New York: Free Press, 2003.

- [5] DRUCKER P F. Innovation and Entrepreneurship [M]. New York: Harper Collins, 1985.
- [6] BASS F M. A new product growth model for consumer durables [J]. Management Science, 1969, 15 (5): 215 - 227.
- [7] MAHAJAN V, MULLER E, BASS F M. New product diffusion models in marketing: A review and directions for research [J]. Journal of Marketing, 1990, 54 (1): 1 - 26.
- [8] VALENTE T W. Network models and methods for studying the diffusion of innovations [M] // CARRINGTON P J, SCOTT J, WASSERMAN S. Models and Methods in Social Network Analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 98 - 116.
- [9] ROGERS E M, MEDINA U E, RIVERA M A, et al. Complex adaptive systems and the diffusion of innovations [J]. The Innovation Journal: The Public Sector Innovation Journal, 2005, 10 (3): 1 - 26.
- [10] XU Hao-yue, LIU Rui-yu, CHEN Lian-kai. Imitation performance in a diffusion network: A NK model approach [C] // Proceedings of International Conference on E-Business and Information System Security, 2009: 1 - 4.
- [11] LEYDESDORFF L, ETZKOWITZ H. The triple helix as a model for innovation studies [J]. Science & Public Policy, 1998, 25 (3): 195 - 203.
- [12] FRENKEN K. A complexity approach to innovation networks. The case of the aircraft industry (1909 - 1997) [J]. Research Policy, 2000, 29 (2): 257 - 272.
- [13] 任锦鸾. 创新机理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [14] JANSZEN F. The Age of Innovation [M]. London: Financial Times Prentice Hall, 2000.
- [15] MCELROY M W. Integrating complexity theory, knowledge management and organizational learning [J]. Journal of Knowledge Management, 2000, 4 (3): 195 - 203.
- [16] MCELROY M W. The New Knowledge Management—Complexity, Learning, and Sustainable Innovation [M]. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2002.
- [17] NILSSON F, DARLEY V. On complex adaptive systems and agent-based modelling for improving decision-making in manufacturing and logistics settings [J]. International Journal of Operations & Production Management, 2006, 26 (12): 1351 - 1373.
- [18] LIU Li-ping, WU Li-bo. A research on cooperative innovation system of chinese enterprises based on complex system theory [C] // Proceedings of the 16th International Conference on Management Science & Engineering, 2009.
- [19] ARTHUR W B. The Nature of Technology [M]. New York: Free Press, 2009.
- [20] ARTHUR W B. The structure of invention [J]. Research Policy, 2007, 36 (2): 274 - 287.
- [21] ARTHUR W B, POLAK W. The evolution of technology within a simple computer model [J]. Complexity, 2006, 11 (5): 23 - 31.
- [22] JOHNSON S. Where Good Ideas Come From [M]. New York: Riverhead Books, 2010.
- [23] FLEMING L, SORENSON O. Technology as a complex adaptive system: evidence from patent data [J]. Research Policy, 2001, 30 (7): 1019 - 1039.
- [24] KUHN T. The Structure of Scientific Revolution [M]. 3rd ed. Chicago: University of Chicago Press, 1996.
- [25] BEINHOCKER E D. The Origin of Wealth [M]. Boston: Harvard Business School Press, 2006.
- [26] KRUGMAN P. New-Age Market Theory is Bio-Babble: Pseudo-Economics Meets Pseudo Evolution [N]. Ottawa Citizen, 1997 - 11 - 01.
- [27] ANDERSON P W. More is Different [J]. Science, 1972, 177 (4047): 393 - 396.