

复杂适应系统和社会发展

周光召 中国科学技术协会

一、引言

21世纪科学技术发展趋势

20世纪以来的相对论、量子论和遗传基因的双螺旋结构这三大发现，开辟了人类认识自然的新纪元，奠定了化学、分子生物学、核物理和凝聚态物理学、天体物理学、电子学和光子学的理论基础。并形成了宇宙大爆炸模型、地球板块模型、基本粒子夸克模型、地球圈层共生演化的生态模型等不同层次自然系统的科学图象。

上世纪在技术上的伟大成就，如卫星、微电子芯片、计算机、激光器、隧道扫描显微镜、因特网、转基因、克隆动物和干细胞等关键技术的发明、改进和普及，使人类可以操纵基因和单个原子，创造全新结构和功能的物质，组装单个细胞大小的智能机械，为二十一世纪人类文明的新跃升奠定了技术基础。正在形成之中的新技术体系推进着新的产业革命和社会变革，一个新的文

明形态正初露端倪。

我们正处在科学技术成为第一生产力、科学思想成为重要的精神力量以及高技术产业在世界范围兴起的时代。在新的世纪，网络将把个人、组织、地域、国家和世界连成一体；机械的智能化、生物化和人性化将使人体和机械实现融合；地球的持续发展要求人与自然，人与人的关系由物竞天择向天人合一、协同进化转化。

在新世纪，信息广泛和快速的传输，促使市场全球化，社会各部分都处于非线性的强相互作用之中，处于快速变革和发展之中。一方面智能产品的构成包含多种技术的综合，内部构造和制造过程越来越复杂，另一方面，社会充满多种矛盾，各种势力此起彼伏，呈现错综复杂的局面。复杂性和不稳定已成为普遍的日常现象。

二十一世纪科学技术将继承以往的传统，又具有鲜明的特色。二十一世纪科学最主要的特点

将是研究复杂性，调控复杂系统。以下几方面显示出的复杂性很清楚地说明了这一点。

产品的复杂性

上世纪及以前，科学主流所研究的对象是具有确定运动规律，能够预测未来行为及其行为在随机因素作用下产生的偏差几率的，处于平衡、稳定状态附近的系统。这种系统尽管有时其结构也相当复杂（如大规模集成电路），但它的行为在一定范围内仍是可以预测和控制的。随着技术的发展，一个产品常常是多种技术的综合，数码相机就包含了光学、机械、微电子芯片、软件等等技术部件复杂的组合，是一种行为可控的复杂系统。这种复杂技术组合的产品带来新的消费需求，对经济的发展相当重要，现在还在继续往前发展。

生物复杂性

人类细胞染色体上的基因双螺旋长链DNA的密码字母多达30亿个，结构十分复杂，其排序虽已经完成，对少数基因的功能及其表达和调控的机制也有初步认识，但对大部分基因的作用尚不清楚。DNA上除了蛋白质基因的信息，还有大量未知的密码序列，其作用有待进一步澄清。

人类基因组含有的蛋白质基因约3~4万个，和老鼠基因的数量差不多。但通过RNA转录和翻译，人类可以产生10万种以上的蛋白质，数量和品质都高于其他哺乳动物。

人体有两百多种不同的细胞，都由一个受精卵发育而成，它们具有相同的基因，但是不同的细胞表达的蛋白质则是不同的。人类的复杂性更多体现在蛋白质的表达顺序、结构和功能上。研究蛋白质结构和功能的蛋白质组学是当前研究的重点。

生物体从受精卵开始发育、成长、衰老、死亡的过程是一个复杂系统演化的过程，是多基因

协同调控的产物。单独抽出单个基因或单个蛋白质，研究其功能一般还不能阐明活细胞的工作机制，需要将一组相关的DNA、RNA和蛋白质通过多种相互作用，在不同调控途径、代谢途径上形成的网络单元进行整合，分析不同途径间的耦联，形成整体跨层的相互作用模型，进行模拟，找出规律，才能说明活着的细胞或器官的工作机制，这是新兴的引入复杂性研究的系统生物学的任务。

网络的复杂性

人的智力是大自然进化的最高产物。人的大脑有一千亿个神经元，彼此之间形成一千万亿个联接点，组成复杂的神经网络。神经元联结的样式相当部分是由后天的学习和记忆过程决定的。正是神经网络的复杂性造就了人区别于其他动物的高度发达的智力。今天，唯物论者和大多数神经生物学家相信人的意识、智慧是由神经网络确定的，但并不清楚它的机制，即意识和智慧是如何产生的，这一问题具有非常重要的意义和应用前景，将是二十一世纪最重要的研究方向。

当前因特网已建立上亿个网站，几亿人每天在网上冲浪，获取信息，进行交易，建立组织，实施管理，网络已经成为社会生活的神经系统。要在这样复杂的网络上保证安全；从海量存储中快速获取所需信息，进行分析和处理，将信息上升为知识和决策；实现实时反馈调控，保持系统整体有序、局部协同，是信息科技下一步发展的重点。

大脑每个神经元激发的速率为毫秒级，远慢于现在芯片中晶体管激发的速率，但人识别图象的能力仍优于当前的个人电脑。模仿人脑进行并行处理的方式是电脑发展的方向。

由电脑和传感器共同组成的虚拟现实技术，以网络数据并行、分布处理为基础的网格计算

(grid computing) 将逐步发展成熟和普及, 和智能处理相结合, 能实现多种资源共享, 多维信息传输, 不同网络协同, 多个网点合作, 针对多种需求, 面向多个用户, 将成为重要的发展方向, 为数字地球、数字城市、数字图书馆、电子商务、电子政务、远程教育、远程医疗、灾害预警、科学研究、军事作战等提供有力的应用平台。

信息技术发展的这些新方向, 都要解决其中出现的复杂性问题。网络复杂性的研究也必然成为二十一世纪研究的重点。

社会面临的复杂形势和问题

科技快速而不平衡的发展和信息技术的普及, 促进社会信息化和经济全球化, 加强个人、企业、地区和国家之间长距离的非线性相互作用。

市场竞争空前激烈, 企业业绩涨落幅度加大, 市场不稳定性增加。高速度和不平衡已成为现代社会发展的常规。财富的正反馈效应使得富者越富, 穷者越穷, 南北差距、地区差距和贫富差距进一步扩大。

频繁突发的金融、经济甚至政治的危机说明陷入无序的混沌状态的可能性增加, 如新经济热潮中股市泡沫的破灭, 阿根廷从金融到政治的全面危机等。当前出现的许多现象使人们感到世界正处于混沌状态的边缘, 既提供突显新的有序结构的机遇, 又有陷入危机的混沌状态的可能。

在变动频繁、快速演化的环境中, 挑战和机遇是并存的, 为在观念、体制、人才、发展战略、基础设施、研发创新和应对措施做好准备的企业和国家, 带来新的发展希望。同时, 对那些没有做好准备的企业和国家, 严峻的挑战, 就会迅速发展成为危机。个别的突发事件, 在某些条件下就会引发政治、经济和社会格局的重大变化。

以上的一切说明, 从市场产品、生命科学、

网络应用到社会现象, 复杂性都成为二十一世纪科学技术面临的需要解决的问题, 要求开展对复杂系统和复杂现象的研究, 各国都给与了高度重视。因此, 复杂性的研究将成为二十一世纪科技的主要特色。

探索复杂性: 混沌和分形

从20世纪70年代末开始的关于混沌现象和分形理论的研究, 通过对一些现象的数值模拟, 使人们认识到, 在非线性相互作用下的开放系统, 在特定条件下可能发生其行为不可预测的混沌现象或突变现象。

在混沌出现的区域, 系统对外界环境的偶然因素非常敏感, 可以说是差之毫厘, 谬以千里, 系统长期的运动状态, 成为不可预测的一定程度上无序的状态。同时也发现, 在混沌区的附近, 有可能突然形成(突显)具有自相似时空结构的有序状态(分形), 出现了由无序向有序的转变。

随后发现, 混沌和分形是很普遍的现象, 在生物界、经济和社会生活中到处都可以观察到混沌和分形的出现。这种状态又常常在某些开放系统处于快速演化和结构调整的过程中, 在矛盾激化的对立斗争中发生。

对于复杂系统, 随着系统开放度的增加和系统内各部分之间非线性相互作用的增强, 系统较易出现无序的混沌状态(常常表现为危机)或突显新的有序结构(分形)。了解有关的规律将有助于进行管理和调控, 因此对复杂性, 特别是对处于非稳定和非平衡状态, 进行快速演化和不断调整的复杂系统的研究就成为本世纪科学研究的一个重点。

美国科学家Pagels说, 不惧复杂性和勇于面对矛盾而无需简单性和确定性的能力, 是一个探索者的品质(“The capacity to tolerate complexity and welcome contradiction, not the need for simplicity and

certainty is the attribute of an explorer”)。

对非稳定和非平衡复杂系统的研究刚刚开始不久,还没有成熟的理论,缺少定量分析的工具,但对一些现象的数值模拟,已形成了许多定性的概念。简单和复杂、局部和整体、必然性和偶然性、有序和无序、稳定和发展、量变和突变、竞争和协同、适应和淘汰,遗传(继承)和进化(发展)这些相互矛盾概念的对立和统一在复杂性的研究中都得到了进一步的发展,辩证法已成为研究的有力工具。

下面,我们对处于非稳定和非平衡状态的复杂系统作简单的介绍。由于理论尚不成熟,不同学者的看法也不尽相同,阐述只能是初步的。

二、关于系统的基本概念

系统、子系统和系统层次

“系统”一词在古希腊时代就有组合、整体和有序的含义,在物理科学中太阳系指的是以引力相互作用维系的太阳和九大行星组成的天体系统,在生物学中消化系统、呼吸系统和神经系统等名称描述的是联合执行同种功能之器官的组织学结构。

一个系统内部通常都是结构分明的子系统,它本身又可能是一个更大系统的子系统。

肉眼看不见的分子系统也是结构复杂的系统。分子是由原子组成的,原子是由原子核和电子组成的,原子核是由质子和中子组成的,质子和中子是由夸克组成的,等等。

肉眼看不清的宇观世界是结构层次分明的天体系统,像太阳系、银河系。太阳系内的地球本身又是一个大的系统。

过去较多采用由整体分解为局部的研究方法,今后将更重视由局部整合为整体的研究方法。

物质、能量和信息

所有自然系统都由物质构成。物质不停地运动,运动在时空中进行,是有规律的。有些社会系统则主要是由信息构成,如文学系统,法律系统等。社会系统同样是在自身规律作用下不停地变化和发展。

系统的构成,系统每部分所处的运动状态,相互之间的作用和运动遵守的规律,这些都是可以认识的,是知识性信息。

可以认为,物质、能量(运动)和信息是构成宇宙形形色色,丰富多采现象的三大基本要素。

简单系统与复杂系统

一个完全无序,处于热平衡状态的系统无疑是简单的系统,一个具有高度对称的有序状态的系统,如完美的晶体也会被看作是简单的系统。一般来讲,描述简单系统的状态需要的信息量小,而描述复杂系统的状态所需要的信息量大。因此复杂系统的状态处于完全有序与完全无序之间。

系统的复杂程度

我们可以用一个系统中包含的有效信息量(去掉了错误的和无关的信息)的多少来判断系统的复杂程度。有效信息量大表示系统复杂程度高。由简单到复杂系统的演化反映的是系统内有效信息量的增加。地球的生物系统和社会系统从产生开始就不停地由简单系统向复杂系统演化。

随机性和规律性

任何信息都可由文字、声音和图形来描述,而这些又都可以录制在磁带上,由数字串来代表,像现在电脑用二进制数字串所作的那样。在电脑未发明之前,人们就已经会用电报码这样的数字串来传递文字信息。

一个完全随机的没有任何规律的数字串和一个完全规则的如10101010...的数字串所带的信息量都是很少的。对前者我们只要说它是随机的,

对后者也只要说它是10的重复就够了。

必然性和偶然性

一个既有确定规则，中间又杂以随机数的数字串才带有更多的信息。规则的部分反映的是必然性，而随机的部分则反映的是偶然性。因此由必然性和偶然性结合而产生的系统通常是一个包含信息量大的复杂系统。例如，人类社会的历史就是由社会发展的必然规律和一些偶然的因素，如突发的天灾，一次战争的结局，统治者的错误决策等等这些带有偶然性的因素共同决定的。

物质运动变化的动力

引起物质运动变化的动因是物质之间的相互作用力。

相互作用力有很多种，最基本的是四种物理作用力：万有引力、电磁作用力、弱作用力和强作用力。天体运动和地球上事物的宏观运动由万有引力和电磁作用力推动。在生物和化学层次，分子、原子和电子之间主要起作用的是电磁力。

维系复杂系统的作用力

在系统结构的高级层次，当信息在形成系统结构中起重要作用时，维系系统结构稳定的主要作用力已经不是物理作用力，而是相互传递的信息。例如在生态系统中，生物为吸引异性或驱逐敌人散发特殊气味和声音。社会组织中则除暴力外，有权威、法律、道德、伦理、感情、文化等等作用于个人的力量。

非线性相互作用

若存在作用和作用的效果不按相同比例增长的非线性相互作用力，就会出现某些反映系统性质的参量成指数上涨的情况。非线性相互作用产生的正反馈会造成系统的不稳定，在某些条件下会使系统的长期行为对作用的参数和系统的初始状态及边界条件非常敏感，就像成语所说：差之毫厘，谬以千里。而在另一些条件下，又可能从

混乱中产生秩序，突发形成有序状态。非线性相互作用还会引起运动过程中的突变，如冲击波、雪崩、地震、股市崩溃等。复杂系统中出现的相互作用一般都是非线性的。

三、几个基本规律

在探讨复杂系统的结构和演化时，有几个规律起着基本的作用，它们的内涵不仅有大量实验事实的验证，而且已经成为我们研究复杂系统的基本出发点，所以此处称之为原理或论，它们是：守恒原理、开放论和进化论。

守恒量——变化中的不变量

研究发现，在某些确定的环境下，系统（相互作用着的一组物体）无论发生什么样的运动变化，无论运动变化出的形态多么千差万别，系统内总有这种或那种可测度的量（如物理系统的能量、电荷，化学系统的元素，经济系统的货物和资金等）不断与外界进行交换，在内部的某些区域持续地产生或消灭，但是不会无中生有，不会无端消失。在整个运动变化期间，该量的总和是收支平衡的，这种量就称为守恒量，它们随时随地都满足守恒方程。

在日常生活遇到的系统中，物流、能流和信息流对系统的结构和运动产生决定性的影响。物流和能流都满足守恒方程，货币是广义的物流，也必须满足守恒方程。信息具有完全不同的特性，它有真有假，真实信息可以同时为多人共享而不会消耗，它的运行规律和物流、能流完全不同。它的数量在传输和使用过程中会增加或减少，一般不满足守恒关系。

热运动和热力学第二定律

虽然能量是守恒的，它的形式也可以转化，但不是所有的能量形式都能无条件地做功，为我们所用。其中热运动具有特殊的性质。现在我们知道，热运动实际上是物质内分子和原子作无规

则（无序）运动的能量。无规则运动的能量不是很容易就能转化为规则（有序）运动的能量。

热运动服从热力学第二定律。这个定律说的是：由于存在摩擦、电阻（以后统称耗散）等因素，在和外界没有物质和能量交换的封闭系统中，有序运动最终将通过摩擦、电阻等耗散因子转变为无序的热运动，而热量只能从高温流向低温，最后趋于热平衡，而不能相反，或者说封闭系统内的过程都是不可逆过程。要将热量从低温提向高温，则必须对之做功，像冰箱制冷就必须消耗电能。

热力学第二定律是宏观物理学的基本定律，在我们生活的世界上，由大量原子和分子组成的物理的、化学的、生物的以及更高层次的物质结构和运动都要遵守。

开放——有序态产生的条件

对封闭系统，运动的无序度将不断增大。封闭系统中进行的过程是不可逆的。其中的有序状态会逐渐消失，转为无序的热平衡状态。有序结构和有序运动不能在封闭系统中产生是热力学第二定律的重要结论，也是我们为什么要开放的一个重要原因。

封闭使系统状态走向无序，但是自然界中不断从无序状态中生成有序组织的物质，如晶体、生物、社会组织等等，它们是不是违反热力学第二定律呢？当然不是。因为它们不是从处于热平衡的封闭系统中产生的，而是从远离热平衡的开放系统中产生的。

封闭导致落后，开放带来进步。一个封闭系统的活力在内部摩擦的作用下必然逐渐损耗，发展缓慢，最后停滞，而一个开放系统不断和外部交换物质、能量、信息（资金、人才、知识、装备、货物）而显得生机勃勃。从清代开始的闭关锁国造成了中国的长期落后，改革开放促进了中

国的迅速发展充分证明了这个真理。

系统论

系统论把系统概念一般化为由相互作用着的要素构成的有机整体。在系统论的发展和运用过程中，按照热力学的要求，依其与环境有无物质、能量和信息的交换，将系统区分为封闭系统和开放系统，依其热力学状态的不同将系统的状态区分为平衡态、近平衡态和远离平衡态。

平衡与稳定

在系统结构的每一层次中，都有两种或更多相互制约的作用力起主要的维系系统动态平衡与稳定的作用。当各种相互矛盾的作用力势均力敌，相持不下时，系统的运动处于平衡状态。太阳系的行星轨道是万有引力与行星运动产生的离心力这两个相反作用的力达到平衡的结果。

平衡状态一般不是静止或无序状态。热平衡态是平衡态的一种，通常是最稳定的平衡态。

当系统偏离平衡状态时，若作用力的总和和起负反馈的作用，使系统恢复到平衡状态，这时系统处于稳定状态，否则，处于不稳定状态。处于不稳定状态的系统，在外界偶然的干扰下，就会偏离原有轨道，发生大的、可能是灾难性的变化。处于相对平衡状态的系统保持系统状态渐进的变化是进化或改革，若状态的变化是突发的大变化，就是革命或灾变。

在科学上，我们通常把稳定平衡的状态叫做吸引子。

有序向无序转化——走向混沌

从牛顿力学的观点看来，在相互作用力和状态的初始条件及边界条件给定以后，系统的运动轨迹就完全确定了。如钟摆以每秒为一周期的摆动。在一般情况下，周期运动的运动轨迹按照力学运动的规律是完全决定的。在这种观点影响下，人们曾经认为，一切现象都是按必然的规律

产生的。后来的研究发现，在一定条件下，必然性会转化为偶然性，牛顿力学也会产生混沌的现象。

如果在以位置为横坐标，以动量（质量乘速度）为纵坐标的相图上表示，周期运动的轨迹是一条闭合的曲线。若初始条件稍有偏差，在图上的轨迹也只会有的偏差。

对存在非线性相互作用力的周期运动，在外部边界参数或初始参数改变的开始阶段会出现周期加倍的现象，继续改变，会在更短的改变下周期再加倍，直到某个极限条件以后，运动变为混沌的，不再显示周期现象。一旦运动成为混沌的，其运动轨迹在相图上几乎会跑遍一个特定的但有限的区域。周期运动通过周期加倍而出现混沌是一个相当普遍的现象。

比较两条初始条件只有细微差别的处于混沌状态的运动轨迹，它们开始时彼此靠近，随着时间的推移，彼此之间的差距越来越大，但仍在一个有限的相空间范围之内。由于我们不能无限精确地确定运动的初始和边界条件，因此除了知道运动轨迹不会超过某一有限范围之外，预言运动轨迹的长期发展实际上是不可能的。各种微小外部因素经过一段时间后，都会产生巨大的后果。

影响运动的条件一旦处于导致混沌的区域，运动对外界干扰就非常敏感，偶然性将发挥重要的作用。

大气运动虽然服从牛顿力学的运动规律，但大气的相互作用以及大气与海洋和生物的作用都是非线性的，因此在某些条件下，大气运动呈现混沌现象，在这种时候，大气运动对外界扰动非常敏感，大气界形象地称之为蝴蝶效应。

为保持稳定，不致陷入混沌状态，复杂系统状态的即时反馈、调控和自适应机制是不可缺少的。自然界的生命系统通常都有这种反馈、调控和自适应机制。

前面我们讨论了系统运动状态由有序趋向无序，由规则趋向混沌的现象，下面我们讨论，从无序中形成有序的结构和状态的条件。

无序向有序转化——耗散结构

在远离热平衡的开放系统中，通过和外界不断交换物质、吸收有序的能量和信息，排除经耗散而变得无用的能量和信息，处于某些特定条件下的系统可以通过自组织，从无序状态逐步发展为有确定结构和运动行为的有序状态，并进一步由简单结构向复杂结构进化。这种结构在科学上称之为耗散结构。生物系统就是一种耗散系统，一旦新陈代谢停止，生命活动也就结束了。

在某些自组织系统中，开始存在状态的涨落，其中某种模式的涨落通过非线性反馈作用加以放大，就会形成起主导作用的统治模式，抑制其他模式的作用，迫使内部的子系统臣服，按照统治模式的格式进行相似的自我复制，并按照统一步调行动，形成具有特定时间和空间结构的整体。

很多系统的有序结构发生在系统远离平衡的临界状态附近，那里相互作用成为长程的，内部子系统之间长程相关，使得所产生的有序态具有自相似性，也就是将系统任一局部加以放大，其结构和原来系统相同。用简单的规则可以产生复杂的空间结构，称为分形。

关于进化论，我们结合下面的复杂适应系统阐述。

四、复杂适应系统

许多复杂系统在特定的外部条件下，会通过自组织形成具有特定时空结构的有序状态。这种有序状态在环境的影响下能自组织、自学习和自适应，不断演化其形态而生存、繁衍和发展，当适应能力赶不上环境的变化时，就会衰亡下去，我们称这种复杂系统为复杂适应系统。

生命无疑是一种复杂适应系统。

复杂适应系统的特征

复杂适应系统有以下特征：

第一，它由子系统构成，但它的结构、运动模式和性质具有整体的特点，不是子系统简单叠加之和。部分子系统的变化甚至对整体特点不产生大的影响。

第二，它是处于远离热平衡的开放系统。

第三，内部子系统之间是非线性相互作用。

第四，它具有自组织、自学习、自适应和进化的功能——它的有序状态能在一定的环境条件下自动地形成，并能适应环境的变迁而演化和繁殖，历史的偶然因素会对演化的过程产生重要的影响。

第五，复杂适应系统所处的有序态通常是在某一参数达到混沌区的临界点，以突变的方式形成，其内部会出现逐级向下的自相似结构。进入混沌区后，系统的运动变得不可捉摸，不可能形成有序态，而在临界点前，运动形式过于简单，不可能进行适应性进化。在临界点上，内部相互作用变为长程的，会出现自相似的分形结构。《复杂》一书里有句名言，意思是要在混沌的边缘上，才会有新的思想或者新的结构产生。

无论混沌状态或复杂适应系统的有序状态都只在必需的条件具备时才会发生。对反映这些条件的参量常常十分敏感，少许改变就可能改变其状态。如果对产生的条件有正确的认识，就会给调控这些状态提供可能性。

例如心脏跳动出现二联律，预示跳动周期加倍，发展下去就可能发生心脏颤动，心脏跳动进入混沌区。过去用高电压（2000伏）电击可使心跳恢复正常。采用混沌理论分析，对敏感区进行低电压（5伏）电击，即可恢复。

进化论

按照达尔文学说，地球上现今生存的物种都

是由共同的祖先长期进化而来的产物，而进化是基因变异、遗传和自然选择三种因素综合作用的历史过程，但其中自然选择是进化的主要因素。

即使同一种族的个体之间，由于多种原因，基因也不完全相同，个体的性状和体能会有差异。在相同环境下，有的个体在相互竞争中体能强，有的则采取更好的策略，或伪装或共生，以适应当时的环境，繁殖更多的后代。它们的体能和智力就会遗传下去，在种群中取得优势。

在生长和细胞分裂过程中，基因或受外界作用，或在复制过程中出错，都可能造成偶然的变异。多数基因的变异对生物是有害或无益的，但也有少数变异给生物带来新的有益的性状。带有这种有益的变异基因的个体具有竞争优势，就更多在种族中繁殖后代。逐渐带有这种变异基因的个体在种群中的数量就会大大增加，种群的面貌也就发生可见的变化，甚至形成新种。这就是自然选择带来的进化。

有益基因并无绝对标准，是相对当时的环境而言。一旦环境改变，原来适应的可能不再适应，数量就会减少，原来不适应的可能更为有益，数量又会开始增加，生物种群的分布就会重新发生变化。

基因不断发生变异，经过自然选择，带有适应环境条件基因的个体有机会生产更多的后代，生物就不断地进化。多数基因在环境作用下虽是缓慢地进行改变，经过多年的积累，生物的面貌也会发生根本的变化。人由古猿进化而来，人和黑猩猩的遗传基因（基因密码字母排列序列）只有1.23%的差异。

复杂适应系统举例——生物进化

地球上天天都有各种各样具有耗散结构的复杂系统在产生、发展和消亡，它们在发展的过程中，不断适应环境的变化，不断地积累信息，使

得自身的复杂程度越来越高，以自学习和自组织的方式自发地形成由简单到复杂，由低级到高级组织形式的演化过程。这种演化过程的典范是地球上生物的进化过程和这一过程对地球环境和气候变迁产生的影响。

选择压力和向复杂性进化

在地球的生存史上曾经周期性地出现过冰期，遭受过小行星的撞击，有过大量的地震、火山爆发、洪水泛滥等自然灾害。有些灾害是如此严重，以至当时生物品种的大部分都遭到灭绝。

过去5亿4千万年中出现过五次大的生物灭绝的灾害。最厉害的一次发生在2亿1千万年以前，当时火山爆发、地震不断、气候突变、生物的90%以上都在短短十几万年的时间内死亡了，但也有一部分生物在选择压力下向复杂性进化。

恐龙时代

在2亿1千万年这次灾害过后，地球的气候有过一段非常温暖的时期，为恐龙繁殖和统治世界创造了良好的环境条件。哺乳动物的祖先竞争不过恐龙，没有在同时发展成为大型的、智能较高的动物。只有一些小型的生活在地下的哺乳动物（鼠类）在当时得以生存下来。

在恐龙统治的后期（由1亿2千6百万年到6千5百万年前的白垩纪），地球气候发生变化，几百万年内，气温一直下降，许多热带生物相继绝种。同时陆地变得干燥，内陆形成酷暑和寒冬，植物生长不良，恐龙数量开始减少。

正在恐龙生长环境恶化的时候，6500万年前，另一次著名的灾害发生了。可能一次外来小行星的碰撞造成尘埃和毒气漫天，全球黑暗，温度下降，使得恐龙灭绝，陆上物种减少了88%，海上物种减少了50%。这次灾害终止了爬行动物的统治，使得当时存在的体积较小的哺乳类动物偶然地获得了大发展的机会。

今天生物界的精英都是在恶劣环境中经过千锤百炼而得以生存下来的。同时历史的偶然性作为一种机遇对具体物种以后的繁育也起着重要的作用。

从上面的例子还可以看到，一个复杂适应系统的进化可能由于强大外力的干预而停止，如小行星碰撞造成的环境的恶化促使恐龙灭绝。复杂适应系统的进化也会由于内部出现强大的统治物种而停滞。恐龙的垄断抑制了新生的哺乳动物的进化，使得恐龙没有天敌，发展没有制约，最后消耗了赖以生存的植被而走向衰退。

变异、竞争与选择

一个向越来越复杂的适应系统进化的过程，它实现的条件是：1.个体基因中存在偶然的突变，不断增加可遗传的信息量。2.突变的基因融合于原来的基因之中，可以复制和繁殖。3.适度的环境压力，造成具有不同基因个体之间的竞争，不适应环境的个体被淘汰，适应环境的个体繁衍。

自然生态系统是在进化过程中不断发展的复杂适应系统。在生态系统物流和能流的每一个环节，也就是每一个生态位上都生存着许多物种，在保证生态系统中物流和能流守恒的条件下，充分利用系统的各种资源进行繁衍。在生态系统中，可能通过基因变异或物种迁移，产生或引进新的物种，与原有的物种竞争生存资源和空间。

恶劣的生存环境会造成大量不适应物种的消亡，所空出来的生态位又会迅速为适应环境压力的新物种所填充。相同生态位上的生物相互竞争，不同生态位上的生物在竞争的同时可以发展共生关系，实现相互协同，生态系统必然发展出既竞争又共生的生物多样性，以保证物质和能量得到充分利用，保证生态系统的相对稳定。

从猿到人

距今约400~500万年，在非洲南部已经出现

直立行走的南方古猿。可能在700~800万年前，由于非洲东部地区持续干旱，森林遭到破坏，非洲猴开始沿三路进行演化，其中一路留在森林，抱住树木不放，更加适应森林生活，演化成为大猩猩。第二支开始向森林边沿转移，但不脱离森林，同时到草原上寻找食物，演化为黑猩猩。第三支因无法和其他两支在森林中竞争，被迫走上新的生存道路，开始以双足走路，发展出杂食的习惯，懂得和家人分工合作，分享食物，最后实现向人类祖先古猿的转变。

最近的研究表明，今天的人类和他们血缘最近的祖先——黑猩猩——的基因密码排列顺序，只有1.23%的差别。而由基因突变和自然选择在几百万年中形成的这一小点差别就造成了我们和我们远祖兄弟之间的鸿沟。

为生存竞争所迫的猴子，离开果实累累的森林，到平原上寻求发展，无疑在开始阶段经历了艰苦的考验。艰难的时势却造就万物之灵的人类。人类在其发展进化过程中，也不断以其独有的智慧和勤劳，认识世界，改造世界，在文化和知识开始发展后的短短一万年内将整个地球变得面目全非。

五、高技术和高技术产业发展的规律

高技术产业生态系统——复杂适应系统

和自然生态系统一样，高技术及其产业也是一个复杂适应系统。它在开放条件下，通过复制繁殖（技术扩散）、基因变异（技术和产品创新）、竞争、共生（参股）、选择和适应（通过市场），不断进化和发展。同时在价值链的每个环节会自动形成新的相关产业，包括为产业服务的金融、运输、电信、保险、销售、维修等服务业，通过自学习、自组织、自适应共同形成既竞争又分工协同的产业生态系统。产业聚群是产业生态系统的一种表现形式。

国家目标，特别是国防的需求，是高技术及其产业的催生婆，在发展的初期有不可替代的作用。但高技术及其产业的发展壮大却是一个复杂适应系统通过自组织、自学习、自适应而不断演化壮大的过程。

高技术的创新决定于技术人员活跃的思想和高超的技术水平，由一个新思想带来的技术革新就可能创造一个新的高技术企业。技术的复制、变异或创新不断地进行，新公司和新产品每天都在出现，市场竞争激烈而反应迅速。性能、质量和速度成为市场选择的关键。这些都促使高技术及其产业加快演化。

不同高技术产业之间的正反馈

微电子芯片的进步提高电脑的功能和速度，扩大电脑的市场和应用面，反过来电脑的发展增加芯片的需求量。采用计算机辅助设计又加快芯片研究和开发工作的进度。高技术之间的正反馈作用带动高技术产业高速扩张。在价值链上不同生态位的高技术产业之间结成联盟，能快速推动企业的发展，如Intel-IBM，WinTel联盟大大加速了微电子芯片和电脑的发展。

垄断在一个短时期内能给垄断企业带来高额利润，但会使系统的进化停滞，对整个社会不利。因此在发达国家中都制定了反垄断法。一种高技术的替代方案很快就能产生，高技术企业不可能靠垄断技术而获得持续发展，依靠垄断技术，最后都遭到失败。如苹果公司不愿将其电脑设计公开，使得其他厂商不能生产兼容产品，尽管其技术优异、早占领市场，仍然败给了IBM PC和生产兼容IBM电脑的厂家。这些都说明高技术及其企业只有在开放的环境下才能迅速发展。

高技术企业依靠杰出的人才，争夺、凝聚和激励人才是企业管理的中心环节。但是在开放的环境下，必然形成人员的流动和随着人员流动

带来的技术转移。当某个环节的技术革新思想萌芽，就像在生态系统中出现新的生态位一样，会有技术人员脱离去创办相关的产业，占领这个新的生态位，与原有企业形成新的，常常是效率更高的分工，在整个高技术生态系统中协同发展。

人员流动有个人的原因，但更多是企业的管理模式存在问题，或不支持创新，或决策错误市场前景不好，或待遇过低和市场价值偏离。过频繁的人才流动不利于高技术企业的发展，人才竞争迫使企业更加注重企业文化的塑造，知识产权的保护和对有创造力职工的激励。从整个社会来看，适度规范的人员流动能加快技术的转移，加快淘汰落后的技术和企业，创造更健康的竞争环境和新的就业途径，提高市场运行的效率。

创新和变革，开放和内因

作为生产力的高技术快速发展要求生产关系迅速调整。高技术企业的技术构成、产业结构、管理模式、运行机制和市场战略都要随技术的变迁而不断革新。不停顿的创新和变革是高技术企业发展的常规，凡是跟不上的企业不是被兼并就是经历大的起伏和波折，能获得持续发展的高技术企业只是其中的少数。

在相同的外界条件下，系统发展的速度和动力由系统的开放程度和内因起决定作用。内因中人才群体的整体素质、招募和使用人才的政策起主要作用，而领导层的素质，反映在对发展目标和市场战略的选择，对资源的发掘和集中使用，对人才的识别、培训、激励和量才使用，对研发和质量的重视，对市场开拓的策划，对提高为顾客服务的效率，对工作协调和组织的能力等方面，又在其中起关键的作用。

知识、人才、资金、信息和市场是支撑高技术企业发展的主要因素，要形成良好的企业生态系统，其周围必须有提供知识和人才的大学和科

研机构，有融资来源和风险资金的投入，有良好的基础设施，有市场的强大需求，有为企业服务的信息库、网络和完备的法律体系。

六、结语

封闭系统走向热寂，而开放系统则生机勃勃。非线性相互作用既能在有规律的运动中产生混沌现象，又能在条件具备时，从无序的混沌中演化出有序的结构，在环境不断变动的压力下，通过自学习、自组织、适应新的环境，求得更好的生存和发展，这种不断进化的结构就是复杂适应系统。

我们周围充满了不断产生、不断演化的复杂适应系统，从地球、生物个体到各种社会组织都是。复杂适应系统内部和它与环境之间，都存在非线性相互作用，它们的演化既要遵循共同的必然规律，又都与自身的历史，以及在历史中冻结的偶然因素有关，是共性与个性，偶然性与必然性结合的结果。

复杂适应系统的进化要通过不同模式对有限资源和空间的竞争来实现。而一种好的竞争策略是开辟新的生态位，实现系统内的协同进化。

非线性相互作用，使得某些过程对环境条件非常敏感，自动反馈和调控的机制对增加复杂适应系统的适应性和保持系统结构的相对稳定是非常关键的。不然，将频繁出现突发危机和混沌的局面。

当人类社会的进化由基因突变转向智能创新，自然界物种由天择转向人择，当信息和知识成为社会发展的主要动力，当信息鸿沟、知识鸿沟和两极分化继续扩大，在气候、生态、金融、经济、政治等领域可能发生非线性相互作用引起的危机和灾变，导向混沌的历史时刻，人类对其历史和后代，对宇宙万物的生息担负了空前重要的责任。

自私和愚昧，掠夺和霸权是进化过程遗留给人类的兽性。人要超越生物，就必须战胜自私和愚昧，必须反对掠夺和霸权。当人类战胜自身的弱点，学会和大自然及其同类和谐相处，协同进化，人类就会进入到持续发展的新阶段，就会有光辉灿烂的前景。

编后记：

中国科协前主席、中科院前院长周光召院士于2002年5月在北京科技周科普高峰论坛作了“复杂适应系统与社会发展”的报告（“北京报告”），紧接着6月在大连作了“二十一世纪科学技术发展趋势和特色”的报告（“大连报告”），这两个报告的内容基本相同。车宏安等从北京大学科学传播中心网站上看到“北京报告”的非正式文稿，大连理工大学王众托院士向他们提供了“大连报告”的PowerPoint文件。为了使年会代表了解报告的内容，车宏安基本按照“大连报告”的PowerPoint文件整理成了这份资料。本资料未经周光召院士本人审阅，仅供参考。由于资料不全和理解水平的局限，凡失真和错误之处概由整理人负责，并请谅解。

本文转载于《系统科学进展》，科学出版社，2017



【作者简介】周光召，20世纪50年代周光召主要从事高能物理方面的工作，学术上取得了很大成就，仅在苏联联合原子核研究所工作期间，就在国外杂志上发表了33篇论文，其中有不少文章得到国际上的好评。例如“极化粒子反应的相对理论”及“静质量为零的极化粒子的反应”，在散射理论中，这两篇文章最先提出螺旋态的相对性协变描述；“关于赝矢量流和重介子与介子的轻子衰变”是最早谈论赝矢量流部分守恒（PC AC）定理的文章之一。他所提出的弱相互作用中的部分赝矢流守恒律，这一观念直接促进了流代数理论的建立，是对弱相互作用理论的一个重要推进，得到国际上的承认和很高的评价，其成果达到了当时的世界领先水平，引起国际物理学界的普遍重视。八十年代后，周光召先生指导和带领国内许多中青年理论物理学家对相互作用大统一理论，有效拉氏量理论、超对称性破缺、量子场理论的大范围拓扑性质及其与反常的联系和非平衡态统计的闭路格林函数方法等方面，做了许多很有意义的研究工作。