

改变我们思维方式的新理论——混沌

Chaos——A New Kind of Theory Changing Our Mode of Thinking

连长云

(长春地质学院, 博士 长春 130061)

众所周知,科学的发展离不开理论的指导,而理论的建立又赖于正确思维方式的支撑。牛顿将物体看作一个没有大小与形状,却具有质量的质点,这是一种抽象的思维方式。达尔文在建立进化论之前曾进行了历时五年的环球航行,广泛地搜集证明生物进化的事实材料,回国后又进行了20多年的实验研究,这是一种观察与归纳的思维方式。普里戈金等人在热力学第二定律基础上对不可逆现象进行了深入的理论研究,在理论上得出了非平衡稳态的“最小熵产生原理”,但在试图把这个定理推广到远离平衡态的过程时却遇到了极大的困难。他们得出的最后结论是:“最小熵产生原理”仅仅在非平衡是线性的范围内,即在平衡态的邻域内是有效的。这是一种演绎的思维方式。伽利略看摆的时候,注意的是存在一种可以测量的规律性;而亚里士多德看摆的时候,却思考这样的问题,重锤试图向下落,只是因为它受到绳的约束,从而左右前后摆动,这是思维方式的差异。当然,科学而有效的思维方式多种多样,本文不作有关思维方式的性质、特点、种类及作用等哲学意义上的讨论,仅列举科学研究中的几种传统思维定势及其面临的严重挑战,指出现在已是改变我们思维方式的时候了。在介绍本世纪与相对论、量子力学齐名的混沌理论(Chaotic Theory)的基础上,给出混沌理论提供的有益启示。

一、科学研究中的传统思维定势

1. 受控于确定论的思维定势

确定性和随机性是自然界存在的两类主要现象。自牛顿1687年出版《自然哲学之数学原理》以来,直至本世纪初,确定论一直占据主导地位。18世纪法国数学家兼哲学家拉普拉斯曾说过:“能有这样的智能,它能把宇宙中最大的天体与最小的原子包容于一个公式以内;对于这条公式来说,没有任何不确定的东西。未来与过去一样,它都可以算得一清二楚。”以经典力学中的牛顿方程为例:

$$F = m \cdot \frac{d^2 r}{dt^2}, \text{若以 } t = -t \text{ 代入方程,则方程不变,说}$$

明牛顿运动定律对时间是可逆的。经典动力学中的哈密顿方程和量子力学中的薛定谔方程,尽管它们较牛顿动力学方程显得相当革命,但却和牛顿力学方程一样,表达了一个共同的思想:宇宙是一个静止的宇宙,即一个存在着的确定不变的宇宙,未来与过去完全一样。这种思维定势如此牢固地存留于人们的头脑之中,以至直到现在,多数人仍然认为精确的长期预测从原则上讲是可行的,只是现在还不具备足以得出上述结论的条件。

2. 受控于连续现象数学模型的思维定势

现实世界中存在大量的连续变化现象。为了描述和解释这些现象,人们总是利用一些特定的数学关系来拟合之,诸如代数方程、函数方程、常微分方程和偏微分方程等。这些方程的一个显著特点是,它们或是简单的线性方程,或是可微的微分方程,总之是一个连续函数。300年前牛顿创立的微积分是这方面的杰出贡献。利用微积分的思想和方法,人们已经建立了一系列用于研究连续现象的数学模型,如牛顿的万有引力定律、麦克斯韦的电磁理论、爱因斯坦的相对论和玻尔的量子力学等。实践表明,连续性现象的数学模型能够行之有效地解决科学技术和生产实践中提出的大量问题,成为人们认识和改造现实世界的有力工具。由此人们认为,连续现象的数学模型小到分子原子,大到日月星辰,放之四海而皆准,自然界事物的运动变化是连续的和渐变的,其演化轨迹是一条光滑而平稳的曲线;即使遇到突变现象,也将其视为连续过程中个别阶段的特殊行为。

3. 研究特殊性态的事物或现象的思维定势

自然界的事物和现象是复杂多样的,传统科学研究的对象一般是规则体或特定条件(如处于平衡)下系统或物体的规则行为。如数学中的几何研究点线面体在空间的分布及相关特性,这些几何要素可用方程(组)精确描述;经典热力学主要研究平衡状态和可逆过程的热力学规律,它不涉及时间坐

标,或者说认为过程进展是无限缓慢的。诚然,这种剥去复杂性的办法不失为一种接近真实结论的方式,但它却使人们忽略了极为重要的一点,自然界中不规则是主要的特征,平衡是暂时的稳定现象,不平衡才是自然界的精髓。因此,很少有人去研究云彩的形态和一支香烟上方漂渺烟雾的性状,更很少有人关心瀑布中一个水泡的运动规律。人们容易理解,也比较喜欢平衡条件下物体的性态及相互作用方式,不愿意也不善于处理非平衡条件下,甚至有非线性加入的情况下系统的行为到底如何等问题。

以上简要探讨了科学研究中存在的一些思维方式,这只是传统思维定势的一个小小子集,但它却是影响人们思维活动的基本部分。在科学技术向广度、深度日益发展的今天,这些传统思维方式能否承担起理论先锋的作用是一个不得不严肃正视的问题。

二、传统思维定势面临的严重挑战

应该说,近代科学研究突飞猛进,无论在理论、方法或指导实践方面,都取得了令人惊异的成就,其中离不开科学思维方式的贡献。然而,这些思维方式是如此深刻地灌输于人们的头脑之中,以至面对飞速发展的时代,它留下的仅仅是对事物不变的认知模式——传统思维定势。这些思维定势正面临着严重的挑战:

第一,前已述及,确定论认为,事物之间具有确定的因果关系,根据现在可精确地推知过去并预测未来。但最近的研究表明,即使是最简单的确定性系统也会产生复杂的随机行为。举个例子,请仔细观察游乐场上的秋千,秋千在荡上荡下的过程中,由于机械摩擦和空气阻力的作用,速度不断下降;如果给秋千施加一个规正的推力,则秋千可以保持规正的运动。但秋千也可能忽高忽低,很不规整,表现出奇特的运动方式,绝不处于稳定状态,绝不反复相同。秋千是一个既有阻尼又有驱动的非全约束的确定性系统,而现实世界到处充满了这样的系统。再如著名的三体问题,即使给定精确的初始条件,也无法预测该系统在一段较长时间以后的性态。美国气象学家洛伦兹在 1961 年通过计算机模拟大气规律的基础上得出这样的结论,长期气象预报是注定要失败的,因为大气系统是一个非常复杂的非线性系统,尽管近似描述其行为的是一组非常确定的方程。因此,认为确定性系统必然产生确定性行为的观点已不再适合(实际上是从来也不适合)丰富多采的自然现象。确定性系统可以产生复杂的随机行为,而且具有对初始条件的高度敏感依

赖性,这一点正是难以对充满复杂性的现实世界进行精确长期预测的根本原因。

第二,关于连续现象的数学模型,尽管它是许多经典科学理论的基础,在实践中也已解决了大量问题,但它不能精确地描述那些不连续的突变(灾变)现象,如水的相变、细胞的分裂、雪崩、地震、矿床的分布以及经济崩溃,等等。以微积分为基础的研究连续性态的传统应用数学面临着严重的挑战。解决这一问题的根本出路在于打破传统数学思想方法的模式,创立一种全新的思维方式。在这一背景下,突变(灾变)理论应运而生了。

第三,众所周知,自然界是一个开放的复杂巨系统,非线性、非平衡及混沌是其灵魂。哈雷彗星可预见的周期性出现及加速器中两个粒子碰撞仅仅是确定性动力学方程在某一条条件下的特解。如果将同样的思维方式和理论应用到即使是最一般的问题,也可能出现令人费解的行为或根本无解。例如湍流,就不可能用一组简单的线性方程精确描述其性态,尽管它的行为发展看起来很简单:在一液体层下方加热,液体由于受热从稳定态变成涡流,进一步加热,液体就出现湍流。再如在自然界到处可见的自组织现象。自组织现象或者说是形成耗散结构的现 象,是在非平衡、非线性的条件下产生的。这种宏观的时空有序结构已经证明不能应用玻尔兹曼有序原理来解释。因此,面对自然界大量存在的非线性、非平衡现象,必须以新的理论和方法来加以指导和研究。

综上所述,一些貌似科学、实则守旧,并且现在还在被大多数人遵循去验证那些无需验证的结论的思维方式,已不能担当起复杂现实世界和理论发展所赋予的历史使命。现在已到了改变我们思维方式的时候了。

三、一种新的思维方式——混沌理论及方法

当混沌理论出现的时候,许多数学家、理论物理学家、生物学家、地质学家,乃至社会学家都感到耳目一新。他们感到整个世界仿佛变了样。美国海军部主管科研经费的官员施策辛格说:“15 年前,科学的危机是分工过细。但是,太戏剧化了,因为有了混沌的研究,危险反过来了。”他还说,20 世纪科学将永远被铭记的只有三件事,那就是相对论、量子力学和混沌。第一次世界混沌会议的主持人之一、美国乔治亚工学院教授福特认为,混沌是 20 世纪物理学第三个最大的革命。他曾经这样写道:“相对论消除了关于绝对时间与空间的幻象,即牛顿式的幻象;量子力学则消除了关于可控制量过程的牛顿式的梦,而混沌则消除了拉普拉斯关于决定论式可

预测性的幻想。”而这第三次革命又有些不同，它是直接用于我们所看得见、摸得着的宇宙，在与人类本身尺度大小差不多的对象中发生的过程。这就是混沌给人们的最初感觉。许多科学界的名人感到，在他们的科学生涯中第一次目击了一件惊心动魄的科学观念上的转移与思维方式上的变换。那么，混沌的含义是什么？它是怎么产生的？作为一种理论与方法它又有什么特点？下面将简要阐述。

1. 混沌的含义及混沌理论产生的背景

关于混沌的含义，至今没有统一的认识。中国古有“混(浑)沌”这个词，与英文的“Chaos”意义非常贴切。今日科学之混沌并不是混乱无序，而是指在确定的系统中出现的貌似不规则的有序运动，它代表一种混沌序。

世界上最早给出混沌的第一个严格数学定义的人是华人李天岩。他和其导师约克教授在那篇有名的论文“周期三意味着混沌”中，正式提出混沌一词，并给出了它的定义和一些有趣的性质，在此不作深入讨论。可以把混沌初步理解为，在一个非线性动力系统中，随着非线性的增强，系统出现的一种貌似不规则的有序现象。这些现象可通过蝴蝶效应、奇异吸引子、倍周期分岔及普适性等来表征。

混沌理论是怎么产生的？探讨一下历史背景是不无益处的。当代著名的科学家科恩在其《科学革命的结构》一书中提出一个概念，这就是“范例”(Paradigm)。这个“范例”指的是，在一个时代中科学家总是按照一个或几个范例去看待问题(类似前面所谈的思维定势)。例如，在托勒密天文思想占统治时期有托勒密范例，在哥白尼天文学时期则有哥白尼范例。科恩后来用“科学媒质”(disciplinary matrix)表达这一思想。科恩关于科学家如何工作的概念以及科学如何出现的概念于1962年首次发表。尽管刚一发表就毁誉参半，但其思想至今仍具有现实意义。科恩认为，科学的进步在于知识的积累，新的理论为适应新的事实而产生。科恩强调一种对比：科学家中的大多数人的工作是在合法地、正统地研究各自学科中人人理解的问题；还有一些科学家从事例外的、不正统的、将来或许引发革命性变化的工作。在科恩描写的格式中，正常的科学是由拖把拖地式的工作所组成。许多试验家所进行的试验正是过去作过多次的试验的改头换面；一些理论家在理论之墙上这儿加一块砖，那儿添一片瓦，很难有别的作为，而且很少有人探索最根本的问题，质疑最根本的假设。在此情况下，科学的革命也就是不可避免的了。而在革命的过程中，必然出现一批跨出其专业正常边界的非循规蹈矩的人。混沌理论的产生也正如科恩格式所描绘的，是由许许多多传奇人物的传奇故事所上演的一幕历史剧。

在此剧中，一个重要的角色就是洛伦兹。谈到

混沌理论的产生和发展，不能不涉及洛伦兹及蝴蝶效应。洛伦兹是麻省理工学院的一位气象学家。60年代初，他致力于用计算机模拟气候问题。他使用的是一组确定性方程组，但他发现，小小的数字误差却展示了完全不能的结果。也就是说，初始条件的微小差异会导致气象系统的极大差别，这与确定论论断的小的影响(误差)不会引起泛泛的大效应完全相反。这就是蝴蝶效应，形象地比喻是，北京上空一只蝴蝶的飞翔，可以引起纽约上空的暴风雨。从此，洛伦兹把气候问题丢在一边，专门致力于更简单系统中产生这种复杂行为模式的研究，最终导致洛伦兹奇异吸引子的发现。当然，混沌研究过程中的传奇人物还很多，如费根鲍姆、曼德勃罗、梅等，他们均从不同侧面对混沌理论作出了重大贡献。

2. 混沌理论

现实世界中混沌无处不在。尽管作为一种科学的理论和方法，混沌诞生的历史还很短，混沌理论的研究还处在观察、描述、实验、积累的阶段，坚实的理论大厦尚未形成，其研究方法和手段也在发展之中，但其潜力却是不言自明的。这也正是将众多不同领域的专家学者吸引到它身边的一个重要原因。现在越来越多地意识到混沌强大生命力的人已经应用混沌的思维方式来分析解剖自然界各种复杂的现象和系统，而且不乏成功的和有启示意义的实例。笔者认为，今日混沌科学的理论体系至少应包括以下三部分：

(1)非线性动力学 这是判断混沌能否出现及研究系统动力学行为的基础。包括：

第一，建立系统动力学过程方程(组)，这些方程一般是非线性偏微分方程组。

第二，在此基础上，分析系统的动力学行为。解决这方面问题的主要理论有：稳定性理论、分支理论和奇异摄动理论等。

第三，研究混沌的普适性及通向混沌道路的物理数学机制。

(2)耗散结构理论 耗散结构的概念最早是由普里戈金于1967年在关于“理论物理和生物学”的第一次国际会议上提出来的。普里戈金指出，所谓耗散结构，是指在开放和远离平衡的条件下，在与外界环境交换物质和能量的过程中，通过能量耗散过程和内部的非线性动力学机制来形成和维持的宏观时空有序结构。它包括以下几方面的含义：

第一，系统为一开放系统，而且处于远离平衡的状态。这说明耗散系统涉及的是非线性非平衡态热力学，“最小熵产生原理”不再适合于此类系统。

第二，系统内部必须包含非线性动力学机制，动力学过程中的非线性反馈是形成耗散结构的一个必要条件。

第三,在远离平衡的非线性区,系统状态已不能用热力学函数唯一地表征,必须同时研究动力学的详细行为。

第四,李雅普诺夫稳定性理论是耗散结构理论中重要的研究方法。

当然,耗散结构理论还涉及许多方面,诸如非线性动力学和涨落理论等,在此不作详细讨论。指出耗散结构理论研究的意义是必要的。那就是,有序结构既可能是系统在平衡的条件下由玻尔兹曼有序原理产生,也可能是系统在远离平衡的非线性区由耗散结构有序原理所产生。而后一种情况可能更为普遍。

(3)分形几何理论 分形几何理论是由法国数学家曼德勃罗于1975年提出和创立的。他在《大自然的几何学》一书中的对分形理论作了详尽的阐述。

按照欧几里德几何,“空间”三维,“平面”二维,“线”一维,“点”零维。这些维数都是整数,而分形的维数不是整数而是分数,分数维表示一个对象的不规整程度。分数维所代表的分形集只有应用分形几何才能给以描述。分形集一般具有以下特点:

第一,自相似性,就是跨尺度的对称性,它意味着递归,在一个花样内部还有另一个相似的花样。

第二,精细结构,即在任意小的尺度内都包含整体特征。

第三,通常分形集的分形维数要比它的拓扑维数大。

第四,描述分形的定量参数是分维。

有关分形结构及分形几何理论的详细内容,本文在此不作深入探讨。美国哥伦比亚大学地球物理学家肖尔茨的一段话也许发人深思:“分形几何为你提供了描述与预测的数学工具与几何工具。一旦你学会了它,了解了它的内容要点,你便可以全新的方式开始测量事物,并思考它们。你会用另一种眼光来认识它们,你有了一种新的视觉,它与旧视觉不同,要宽阔得多”。

3. 混沌研究方法

混沌产生于非线性动力系统,因此系统稳定性分析是必不可少的方法;拓扑变换为理解动力系统的混沌性质提供了基础,正如斯梅尔马蹄所显示的那样;计算机是混沌研究的重要助手。因此,有关混沌研究的主要方法一般包括:李雅普诺夫指数,微分拓扑,与混沌研究相应的独特的计算机应用方法与技巧,数值方法,李-约克定理,符号动力学以及软件科学领域的学者常使用的反演方法等。

混沌理论自60年代出现以来,在短短几十年的时间里进展神速,天文地理数理化生,小至粒子,大至宇宙,到处可以看到混沌的影子。如木星巨大红斑的机理,生态系统中个体和群体的演化,太阳系的稳定性问题,湍流以及心脑血管振荡等,这些都是混沌研究大有可为的领域。可以说,混沌研究正方兴未艾,势不可挡。混沌研究之所以“热门”,主要是因为:第一,混沌打破了长期以来在人们头脑中形成的思维模式,拓宽了人们的视野,开创了科学研究的新领域;第二,混沌理论不是局部地观察问题,而是从总体上了解,从全局上看一切可能之变化;第三,混沌研究自然界的本质特征,揭示自然界的本质规律;第四,混沌显示了确定性与随机性,简单性与复杂性,有序和无序之间的辩证关系;第五,计算机为混沌研究插上了双翼。

四、混沌给予的启示

混沌理论给予我们的不仅仅是方法上的更新,更主要的是思维方式的变换。它使我们能够更有效、更切合实际地把握事物发展演化的规律。混沌给予我们的启示是深刻的:

第一,“必须向一般学生讲授混沌”,这是著名生物学家梅的观点。他认为,必须发展学生良好的数学直觉,以使他们面对多姿多彩的非线性世界不至于“手足失措”。

第二,西方国家、日本及前苏联都非常重视混沌理论(非线性科学)的研究。如美国的各个大学基本上都成立了非线性研究中心。在前苏联,非线性研究有着可与西方媲美的传统和实力。在我国,尽管混沌早在《庄子》一书中即被引用,但真正开始混沌科学的研究才是最近几十年的事。近年来,有关这方面的科研项目逐年增多,如国家自然科学基金资助的项目中不少是有关非线性科学方面的。1986年我国第一届分形会议在成都召开,1991年又召开了第二届分形理论及应用学术讨论会。可以预料,混沌研究必将展示辉煌的前景。

第三,混沌先驱洛伦兹成功的背后是计算机。今天我国已拥有大大小小各种型号的计算机数以万计,希望这些资源成为改变人们思维方式的有力工具。

第四,深刻理解下面这句看似平淡的话可能对事物发生、发展、演化及预测产生积极的影响,那就是:“最终相邻相近的两点,可能在最初是相距很远的”。

(责任编辑 蔡德诚)