

# 混沌——一门方兴未艾的科学

王 逗

混沌是20世纪90年代科学界最引人注目的研究热点之一。在物理学方面掀起了继相对论和量子力学以来基础科学的第三次大革命,从而在对世界的看法方面,改变了牛顿决定论的宇宙观,确定了偶然性在宇宙学、天体物理学、地质学、遗传学及社会学各不相同领域的重要地位。科学研究发展的结果表明:现实世界不仅是由适应于特殊初始条件的自然规律所决定,而且因一连串历史偶然事件而定型创造出来。正是这些在最深层次上使现实改变形态和产生混乱的事件,包括某些情节,规律及奥秘在内,导致了人类所处的自然界和人类社会呈现出五颜六色、复杂多变、色彩夺目的局面。作为一门科学,混沌研究的正是这些分步规律到整体规律过程的潜在规律。科学意义上的混沌概念,完全不同于一般概念中的混乱,而是一门确信混乱存在、研究混乱规律、探索抑制混乱的科学。

## 混沌及科学概念中的混沌

上世纪70年代中期,混沌作为一个专用术语,首次出现在科学文献中。混沌一词,顾名思义,浊而不清,无法言明其全貌。辞典中的解释为“无序,全面混乱”。在古典文学及日常用语的场合多取此意,大有和科学的严谨相悖之嫌。然而,科学所赋予混沌的内涵,则恰好相反:留其形以彰通俗、优美之需要;添其意使之丰满、和谐。确切地说,混沌一词,作为现代科学的重要概念,其中已蕴藏着极其丰富的崭新内容。

作为科学研究中的专用术语,混沌被用来描述某一特定系统的表征。人们可以讲这个系统是混沌的,那个系统不是混沌的。从这个意义上说,科学对混沌的定义,就是科学对混沌系统的界定。早期的科学家们对混沌系统的界定是和随机系统相联系的。他们把那些变化貌似随机而并非真实随机的动力系统称之为混沌系统。这一定义核心在于强调混沌系统的变化。表面上看是随机的,而实际上系统的变化是由某一精确的法则来决定的。随着混沌科学的发展及混沌理论体系的不断完善,混沌及混沌系统才有了真正科学上的精确定义:“混沌系统是指敏感地依赖于初始条件的内在变化系统”。而“对于外来变化的敏感性本身并不意味着混沌”。这种以系统状态和初始条件的关系来定义,使得理论研究过程中混沌系统的甄别有

了数学上“量”的概念。在这里,混沌系统的数学模型相对复杂。各参数的变化随时间的变化呈非线性关系,方程组中的方程数多于两个以上。状态轨迹的图形具有明显的分形性。简言之,非线性、复杂性、分形性,是混沌系统数学模型的基本特征。对于敏感性的理解是这样的:即对初始条件的敏感性并不仅仅意味着两个状态之差异随时间简单地增大。举例说明,有些确定的动力系统中,两状态间一个单位的初始差异,会发展成100个单位;百分之一甚至百万分之一一个单位的初始差异同样也会发展成100个单位,只是需要更长的时间罢了。而在另一些系统中,初始一个单位的差异会发展成为100个单位;初始百分之一一个单位的差异则仅能发展到一个单位。前面那种系统被视为混沌的,而后面那种则并不认为能构成混沌,尽管它们具有部分混沌的性质。这种定性,定量的限定,就是科学中混沌概念的全部。

自然,混沌理论研究的对象只能是混沌系统。从混沌的一般定义看,具有混沌特征的系统十分普遍,有的很简单,有的则很复杂。简单的一类包括:诸如徐徐上升的一缕炊烟、随意下落的一片树叶、迎风飘扬的旗帜、城市道路上的车辆没完没了的堵塞,以及水滴从关不紧的龙头中连续、非连续地流出;复杂的一类则包括:诸如地球表面气候的变化、动植物的生命过程,以及宇宙中的天体运动。林林总总,数不胜数。由于混沌科学的诞生,使得日常生活中的小事和宇宙天体中的大事同登大雅之堂,成了科学研究的对象。如果可以这样想像地说,牛顿对苹果落向地球而不飞向天空的研究,成功地解释了行星的运动,则人们对树叶的飘落研究,也许能成功地解释整个天体的运动。

谈及混沌,不得不谈及混沌系统的研究方法问题。混沌的研究范围,严格讲应属于物理学、数学研究的范畴。其研究方法完全趋从于物理学及数学的研究方法。首先是根据已知运动规律建立研究对象的数学模型,其次是解方程组,最后分析方程组中各个解的结果。从目前已确定为混沌系统,且科学家们正在研究的数学模型来看,不仅非线性十分明显,方程组的复杂性主要表现为,各个方程组中的方程均以微分方程的形式出现。例如:吸引子为蝴蝶图样的混沌模型

就是一组三元一次微分方程组 ( $dx/dt = -\sigma x + \sigma y$ ,  $dy/dt = -xz + \gamma x - y$ ,  $dz/dt = xy - bz$ )。解这样的方程组,人工是不可能的。特别是结果的分析,没有计算机是根本不可能办到的。因此说,计算机是开展混沌研究的重要工具,正如同显微镜用于微生物,加速器用于开拓亚原子世界,望远镜用于探测深层空间都需要计算机帮助一样。20世纪70年代末,由于电子计算机的应用,混沌科学才有了真正意义上的飞跃发展。今后,计算机技术的发展水平将和混沌科学息息相关。

混沌研究的目的和其他科学研究一样,就是要解决自然社会中的某些问题。具体地讲,混沌科学研究的目的,就是要揭示隐藏在混沌系统后面那些看不见、摸不着、看似不规则、实则规则的简单运动规律,从而找到一大类复杂问题解决的方法,乃至宇宙的开始与终结问题。

混沌的概念还与不可预见性和不能长期预见两个概念相联系。混沌系统的变化状态是不可预见的,即未来不可预见,过去将永远过去。

另外,一个重要的概念是,混沌的存在,含有理念的因素。与人类的认识水平有关联。由于人类认识不仅受自然界的功能限制,而且也受到人们揭示其奥秘所使用的计算工具的制约。计算机由于不能存储无穷无尽的数字,也就没有无限记忆。

人和机器都存在数字化的“错误”。当计算过程的错误放大到一定程度,理念中的混沌就来了。如同圆周率的存在,用“ $\pi$ ”表示是准确的,而用任何数字表示则是不准确的一样。前者是客观的,而后者则是理念的,任何人在数轴上也不能点出“ $\pi$ ”的位置。

#### 混沌理论的创立及发展

混沌的研究起源很早,由于当时认识水平及社会需要等各方面的原因,长期以来只有个别地研究。但是仍然有一些伟大的先驱者,其代表人物就是18世纪的法国数学家H. 庞加莱(1854~1912)和当代的美国著名动力气象学家E. N. 洛仑兹。他们先后在混沌科学的创立及发展过程中建立了不朽的功勋。

庞加莱对混沌的发现,并不是从日常生活中简单的混沌现象出发,而是从解决三体问题的数学模型出发。众所周知,17世纪以后,牛顿的运动三定律及万有引力定律成功地解释了地球及其他行星绕太阳运行的轨道及运动规律。但对月亮的轨道及运行规律则不能同等满意地解释。用牛顿定律计算的月

球位置 and 实际观察位置相差甚远,并且明显地无法用计算及观察误差来加以说明。据此,众多的科学家们参与了这方面的工作。这其中包括了瑞士的欧拉,法国的拉格朗日及拉普拉斯等人。他们都是当时世界顶级的著名数学家。庞加莱是当时最年轻的数学家之一。他把太阳、地球、月球不是单独两两考虑,然后简单相加,而是三者作为一个共同体来研究。在解方程组的过程中,引入了相空间的概念,引入了截平面(称庞加莱平面)的概念,发现了月球的轨道是混沌的。他指出,在三体中,由于引力彼此相互作用,牛顿方程组不仅含有规则性和预见性,而且也隐含着不规则和不可预见性。月球不屈从于计算,因为在其运动状态中已有一部分不可预见性。证明了牛顿方程组在起始时就包含着混沌。从而成功地回答了这一世界难题。

庞加莱对科学及混沌科学的贡献还在于他对牛顿-拉普拉斯决定论信条的科学批判。牛顿-拉普拉斯决定论信条的说法是“宇宙的最大物体和最轻原子两者共同的运动公式中蕴含着精深的道理,就此道理而言,任何事物将不是不确定的,将来与过去呈现在眼前。”而他在1908年发表的《科学与方法》一书中这样写到,“一个被我们遗漏的很小原因决定着我们不能看到的相当大的结果,此时我们可以说,这个结果应属意外。如果我们精通各种自然定律并确知宇宙初始时刻的情况,那我们就能准确地预言这同一宇宙在以后时刻的情况。但是,就在这自然定律对我们而言再没有奥秘。我们只能近似地知晓初始情况。如果这使我们有可能用同样的近似方法预见以后的情况,则一切使我们犯错误,我们会说我们预见了这一现象,而这现象是由各种定律决定的;但是,这现象并非总是如此,它可以发生这样的情况,即初始条件中小的差错会在最终现象中造成很大的差错;最初的小错误会产生最后的巨大错误。预言变得毫无意义”。这段精辟的论述,一方面,把决定论的片面论观点驳得体无完肤,另一方面就其关于初始条件的认识,初始条件和因果的关系,以及符合牛顿定律而用牛顿定律又不可预见的论述,不正是当今混沌理论的核心思想吗?

同时,庞加莱在数学方面的相空间概念,及用庞加莱平面来讨论多维相空间中曲线的方法,至今还是研究混沌现象的重要方法。物理学家们所谓的“奇特的吸引曲线”就是庞加莱面上的曲线。尽管庞

## 混沌研究的重大成果

加莱未能就混沌概念作系统的阐述,甚至未曾使用混沌这一术语,但这丝毫不会动摇他作为混沌科学最伟大的先驱者的地位。他的混沌思想奠定了当今混沌理论的基础。

作为混沌理论研究的重要人物, E. N. 洛仑兹, 他的最大贡献在于, 他不仅发现了混沌, 而且把它作为一门独立的专门科学来研究, 并取得理论上的重大突破。他在《混沌的本质》一文中, 科学地、准确地定义了混沌的概念及研究对象, 使科学的混沌理论体系化。他从动力气象学中的混沌出发, 首次从理论上肯定了动力气象学在天气预报中的重要地位。

洛仑兹作为著名的动力气象学家, 成功地简化了气象的数学模型。他率先使用计算机模拟全球大气环流系统。正是计算机的应用, 使他发现了混沌。1961年冬季的一天, 洛仑兹需要验证未来5个月内天气预报表的准确性, 为了节省时间, 他从中途开始而未从起点开始输入数据进行计算。偶然的偷懒原因, 他把0.145237四舍五入, 保留3位小数输入计算机, 大约一小时后, 计算机的模拟输出和原样输出曲线发生了较大变化。结果显示, 两条曲线在开头相随得很好, 但在持续2个月后分离得很快, 以致本应一条曲线的表象消失。已有的混沌思想和科学家敏锐的洞察力使他认识到, 他所模拟的大气环流是一种混沌。重复多次操作, 证明了他的看法。0.145237和0.145相差不到千分之一, 却引起系统状态差之千里的变化。意外使洛仑兹发现了混沌。大气的混沌表征使他得出了采用动力气象学的方法不可能对天气做出长期预报的科学结论。他形象地描述大气的混沌为“蝴蝶效应”。

关于“蝴蝶效应”, 洛仑兹是这样表述的, “在巴西的蝴蝶拍打翅膀会引发得克萨斯州的一场龙卷风吗?” 他的回答是有可能的, 完全有可能的。然而他又指出“如果一次拍打翅膀就能引发一场本来不会发生的龙卷风, 那它同样也能抑制一场本来应发生的龙卷风”。试问, 可谁又能确切地知道有多少蝴蝶? 而此刻这些蝴蝶又在哪里? 在那里的蝴蝶又有多少只正在拍打它们的翅膀? 细品这个道理, 才能明白洛仑兹所讲的“蝴蝶效应”的真正含义。“蝴蝶效应”喻之于混沌, 真是独具匠心、寓意深刻、耐人寻味。因此我们也可以说某个系统具有“蝴蝶效应”。

不难看出, 洛仑兹作为混沌理论的创始人, 当之无愧地被科学界誉为“混沌之父”。

混沌的发现起源于月球运行轨道的计算和地球上的气象预报。但是, 自上个世纪70年代末, 混沌研究的热潮到来之后, 很快从这两个尝试领域拓展到其他领域。对于混沌的认识很快就从数学、天文学和地球物理学, 渗透到生理学、生物学、生态学、经济学及人类社会学, 并取得了丰硕的成果。

在天体学方面, 研究数字行星轨道的科学家们, 在计算机上已把太阳系送到了未来的2亿年以后, 结论是太阳系是混沌的。对以往人们的各种预测, 从理论上产生怀疑。地球是不是永远绕太阳转下去有待进一步研究。随着混沌理论研究的深入, 人们将会更准确了解宇宙的起源和终结。

在人口动力学领域, 科学家们已经成功地建立了一个单变量的差分方程组, 通过在计算机上的模拟计算, 发现地球上人口的数量呈混沌的涨落。当把增长的因子加入模型中, 就可以看出人口在经过几个人口过剩期后, 人口数量会相应下降。随着下降期的增长, 人口数量将迅速趋于平衡。人口数量近似地停留在一个常数或作有规划的周期性起伏。进一步的计算表明, 当人口的增长率在1‰~3‰之间时, 人口数量是稳定的。当增长率大于3‰时, 平衡被破坏, 人口数量成周期性动荡。当增长率大于3.5‰时, 人口的数量变化完全混沌。

在经济学方面, 大多数经济学家过去都认为经济具有绝对的平衡态, 并确认经济最终会稳定在这个平衡态上。然而, 根据新近建立的经济动力学系统模型, 计算的结果表明, 经济作为一个动力系统是混沌的, 不规则间歇的经济周期不可避免。对经济的干预相当于系统的外干扰, 可能压制这种周期, 而不能产生这种周期。但更可能的是缩短了某一经济的衰退而延长了另一经济的衰退, 这一点对政治家们及经济学家们制定政策非常重要。

综上所述, 混沌研究在生理学、生物学、生态学和经济学等领域取得了丰硕成果。但是, 在这些领域里, 混沌的定量研究水平, 远达不到在天体物理学、流体力学和气象学等领域的研究水平, 发展极不平衡。今后这一方面的研究工作量还很大, 另一方面, 混沌科学作为一门综合性的科学, 其自身的完善和发展, 完全依赖于各个科学领域内混沌研究的新成果出现, 因此说, 混沌作为新兴科学, 方兴未艾、大有作为。 (西安市西北大学物理学 710069)