

蝴蝶效应及其应用

刘铁驹 宋立平



蝴蝶效应是复杂数学现象的一个细节,这种现象自发现蝴蝶效应后也称为“确定性混沌”。一个可以用确定性混沌来刻画的过程,是由完全确定性系统产生的,但按照标准的时间序列方法又表现为随机性。蝴蝶效应通常用于天气、股市等在一定时段之内,较为难以预测的复杂系统中,被引申为事物发展的结果对初始条件具有极为敏感的依赖性,初始条件的极小偏差将引起结果的极大差异。现在“蝴蝶效应”已经越来越广泛地出现在物理、天文、气象、社会,以及股票研究、概率等诸多领域的文章及报道中。

蝴蝶效应的起源

1963年,蝴蝶效应是美国麻省理工学院气象学家劳伦兹(E. Lorenz)在研究大气对流时,从一个对流模型中发现的,实验装置是一个二维的流体室(两块很大的平板水平放置,之间充满气体),在底部加热、顶部冷却,其中的气体发生对流,采用简化的瑞利-贝纳尔(Rayleigh-Benard)对流模型分析气体的运动状态, x 正比于对流运动的强度、 y 正比于水平方向温度变化、 z 正比于竖直方向温度变化,参数 a 、 b 、 r 都是正的常数,得到的一组方程现在被称为劳伦兹方程: $dx/dt = \rho(x - y)$ 、 $dy/dt = -y - xz$ 、 $dz/dt = xy - bz$ 。

他利用这个模型,原本是想模拟天气的演变,以提高天气预报的准确性,平时只需将温度、湿度、压力等气象数据输入,电脑就会依据3个内建的微分方程式,计算出下一刻可能的气象数据,从而模拟出气象变化图。这一天劳伦兹想更进一步了解某段纪录的后续变化,他把某时刻的气象数据重新输入电脑,让电脑计算出更多的结果。1小时之后结果出来了,令他目瞪口呆——新结果和原结果比较,虽然

初期数据差不多,但是越到后期数据差异就越大。他考虑后认为问题并不出在电脑,而是他输入的数据差了0.000127,正是这细微差异造成了天壤之别。由于天气变化十分复杂,在预测天气时,不可能把所有的影响因素考虑进去,而被忽略的那些因素却可能对计算结果产生重大影响,以致得出错误的结论。因此劳伦兹认定,难以获得长期的天气预报。

他形象地比喻:今天在东京上空的一只蝴蝶扇动翅膀时,某个时刻可能引起澳大利亚的一场暴雨,这种对初始条件的敏感依赖,在气象预报中被称为“蝴蝶效应”。这也是最早发现的混沌现象之一。

蝴蝶效应的特点

一般的动力系统,最终都会趋向于某种稳定态,这种稳定态是由点(某一状态)或点的集合(某种状态序列)表示的。系统的运动只有到达这个点或点集上才能稳定并保持下去,这种点或点集就是“吸引子”,它表示系统的稳定态,是动力系统的最终归宿。如果一个吸引子的点集是有限体积中的一条无限长的线,这就是奇怪吸引子。奇怪吸引子是相空间中无穷多个点的集合,是一类具有无限嵌套层次的自相似几何结构,是一种分形。吸引子具有稳定性(局限于有限的空间区域内)、低维性(在相空间中有一条低维轨道,或称分维轨道)、非周期性(运动轨道永不自我重复、永不自我相交,否则就为周期吸引子)和运动对初始条件的敏感依赖性。动力学系统中典型的例子就是劳伦兹吸引子。

根据劳伦兹方程模拟物体的运动规律,可以得

太阳物理学家们正等着验证这一基于物理学的预测是否准确。他们可能不会等到6年内太阳活动达到峰值时揭晓谜底。所有方法都只能预测太阳黑子的平均数量,不过历史纪录表明,活动剧烈的太阳周期都会早早开始,并迅速达到峰值。这意味着只需三四年,就会出现太阳周期剧烈活动的明显迹象。

迪克帕蒂与研究小组在进一步优化他们的模

型,看其是否能预示一些信息,比如太阳活动周期的开端。无论用什么方法,从航天任务的策划者到气候变化的怀疑论者,都在监测太阳的活动。

(本文译自 *Nature*, 2006年5月25日号,英国斯图亚特·克拉克著,翻译时根据国内读者的阅读习惯对文章做了少许改动;中国科学院高能物理研究所文献信息部 100049)

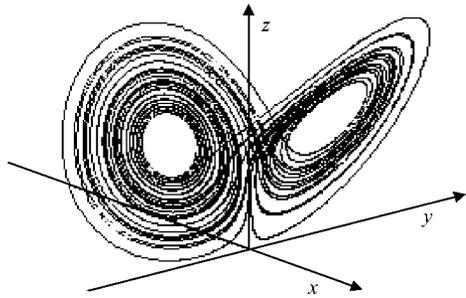


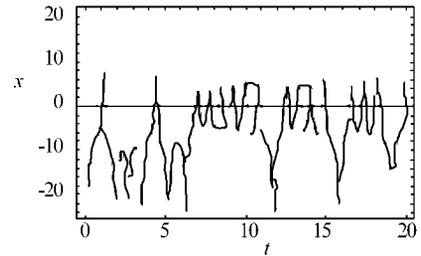
图1 劳伦兹吸引子全貌($\sigma=10, b=3/8, r=28$)

到劳伦兹吸引子,这个吸引子是稳定的,低维的和非周期性的。从图1可以看出,吸引子局限于有限的空间内,系统的轨迹在右侧转几圈后又随机跳到左侧转几圈,无法预测什么时候从这一侧过渡到另外一侧,并且它环绕各自中心的方式和圈数也是一个明显的随机数,形成的形状就像交织起来的一对蝴蝶翅膀,这也是蝴蝶效应的由来。系统的轨迹具有复杂的折叠与伸缩结构,其中的环和螺线有无穷的深度,具有无穷嵌套的复杂结构,例如无论把这个吸引子放大多少倍,每一环都是靠得很紧的无穷多层,每层上都细密地排列着无数螺线,运动轨迹永远不会重复。运动轨迹在这种有限空间中永不自交,正是劳伦兹吸引子的奇妙之处。

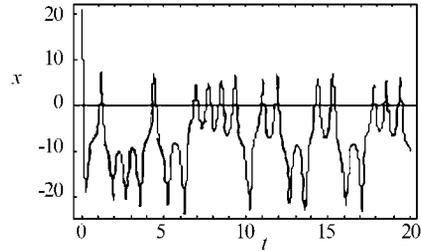
对初始条件的敏感依赖,也可通过数值模拟来观察(如图2)。图2(a)是 $r=28$,初始值 x, y, z 均为21时, x 随时间 t 变化的图像;图2(b)是 $r=28$,初始值 x, y, z 均为21.001时, x 随时间 t 变化的图像;图2(c)则将图2(a)与图2(b)画在同一坐标系中。比较图形可以看出,开始时 $t < 8$ 时,图2(a)与图2(b)几乎完全重合;当 $t \approx 8$ 时,图2(a)与图2(b)逐渐分离;而在 $t > 10$ 以后,轨迹则完全不同。即使初始值相差很小,也会导致结果的大不相同,说明方程的解敏感地依赖于初始值。

三、蝴蝶效应的应用

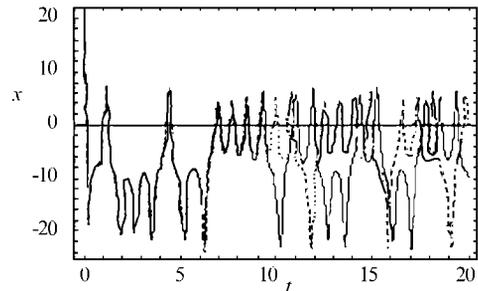
“蝴蝶效应”在天气中 太平洋上出现的“厄尔尼诺”现象就是“蝴蝶效应”在天气中的一种体现。厄尔尼诺是热带大气和海洋相互作用的产物,原是指赤道海面的一种异常增温,现在定义为全球范围内海气相互作用造成的气候异常。厄尔尼诺的重要起因是沃克环流的变化。沃克环流是1969年由英国人沃克最初发现的,它发源于西太平洋赤道地区,陆地部分主要经过印度尼西亚和马来西亚等国。大气环流是支配大气活动的主要动力之一,其变化也是气候变化的主要原因之一。厄尔尼诺的出现与消



(a) 初始值 x, y, z 均为21时, x 随 t 变化的曲线



(b) 初始值 x, y, z 均为21.001时, x 随 t 变化的曲线



(c) 实线是图2(b)中的曲线,虚线是图2(a)中的曲线

图2 劳伦兹方程的解很敏感地依赖于初始值的图像

失就是“沃克环流”变化的结果。气温上升必然导致大气向外膨胀,大气环流的高度也将随之上升。大气平均温度升高 0.1°C 可使大气平均向外膨胀20~30米,赤道附近的大气向外膨胀值要比平均值高数倍。沃克环流的高度上升后可跨越安第斯山继续东进,但由于南美大陆上升气流的阻挡又难以东进。虽然每年冬春季节全球大气出现的强盛西风带推动沃克环流跨越安第斯山得以东进,但是已是强弩之末。沃克环流很快在南美大陆上空下降,下降后重返其发源地时,立即遭遇安第斯山的阻挡,从而全部降落于南美大陆。由于沃克环流带有大量水汽,导致这里经常出现暴雨成灾、狂风大作的反常天气。与此同时,安第斯山西侧的东太平洋海域的冷水区,以及太平洋赤道地区的东南信风也消失了,在西太平洋赤道地区的洋流携带大量热量向东部回流,这就是厄尔尼诺现象。这种现象都始于春季,经过4个月左右,这股洋流进入东太平洋,于是整个太平洋赤道地区的海洋水体温度上升,大气温度也随之上升,进而对该地区的气候产生明显影响,造成灾

害性天气变化,其连锁性的影响甚至波及全球。

“蝴蝶效应”在社会学界 一个微小的事件,会对社会发展产生复杂影响。对于某些微小事件,如果不及时加以引导、调节,会给社会带来巨大危害;如果能加以正确引导、调节,经过一段时间,可能会对社会发展起到巨大的推动作用。例如,1911年3月25日纽约市发生的一场工厂火灾。火灾发生在华盛顿广场附近埃斯克大楼里的三角女式衬衣公司,当时第8层的车间突然窜出火苗,并在几分钟内迅速成为一片火海,火灾只持续半小时就被扑灭了。然而由于电梯失效,步行楼梯又被锁住(为了防止女工偷窃工厂产品,这是那个年代的普遍做法),146条年轻的生命,竟因此在短短的半小时里消逝了。这次火灾引发了美国社会的一系列变革。三角公司火灾惨案的所有不利因素,都成为立法的依据,而且这些立法很快超越防火的范围,扩大到有关劳工权益的立法,美国《劳动法》就是在这一时期通过的。

“蝴蝶效应”在军事和政治领域中 我们可以用在西方流传的一首民谣对此进行形象的说明:丢失一个钉子,坏了一只蹄铁;坏了一只蹄铁,折了一匹战马;折了一匹战马,伤了一位骑士;伤了一位骑士,输了一场战斗;输了一场战斗,亡了一个帝国。请看,马蹄铁上一个钉子是否会丢失,本是初始条件十分微小的变化,但其“长期”效应却是一个帝国或存或亡的根本性差别。

“蝴蝶效应”在经济生活中 1998年亚洲发生的金融危机和美国曾经发生的股市风暴实际上就是经济运作中的“蝴蝶效应”。公元1997年3月至5月,来自美国华尔街的“大蝴蝶”索罗斯突然“扇动翅膀”,骤然掀起泰国、印尼的金融风暴,随即引发整个东南亚以至1997年包括东亚许多国家在内的金融危机。这场危机让人们真正领略了蝴蝶效应在金融界乃至经济领域的巨大影响。最新的一个事例是一只美国“蝴蝶”导致全球手机市场格局骤然改变。2000年3月,美国新墨西哥州阿尔伯克基的一家半导体工厂遭雷击起火,这场只持续10分钟的大火,竟彻底改变了欧洲两大电子公司的力量对比。这家工厂为一些手机生产商提供芯片。由于当时爱立信公司反应迟缓,没有其他的芯片供应商,不得不正式宣布退出手机市场。而诺基亚则因富有远见、反应快速,巩固了其在欧洲电信技术领域的主宰地位。

“蝴蝶效应”在科研中 在过去的20多年里,人

们在研究中发现了隐藏在无规律表象下面的秩序性,并且发现现实世界一些不可预见的现象可通过劳伦兹模型来模拟。现在人们已在天气、对流现象及水轮机、激光器等真实物理系统中发现,劳伦兹模型可以作为现实运动的精确模型。劳伦兹模型有确定的方程,参数 a 、 b 、 r 和初始条件 x_0 、 y_0 、 z_0 不同,结果就会完全不同,即方程对初始状态具有高度敏感性。但方程的解又是决定性的,只要参数和初始条件完全相同,它的解就是唯一确定的。根据这个特性,人们将受控的劳伦兹系统应用于通信系统,将需要发送的信息加密,在接受方采用相同的系统和参数,就能将隐藏在混沌信号中的有用信号恢复出来,以提高保密程度。利用劳伦兹模型特性,现在人们已经在实验室里实现了初步的通信加密,这一技术对于增强信息传输过程中的保密性,潜力巨大。劳伦兹模型还可用于光的混沌控制,混沌控制能使一个处于随机状态的系统趋向于规则运动,例如若一台激光器发出的光处于混沌状态,则激光的各项输出性能(输出功率、单色性、相干性)不会很高,但如果混沌状态得到控制,激光的各项性能指标就会得到大幅度提高,激光的应用价值也就随之增加。

某研究混沌的学者撰写有关蝴蝶效应的论文时说:其实每个人都是那只带有魔力翅膀的蝴蝶,因为每个人的一举一动都可能改变世界。是的,这个世界不能失去你、也不能失去他,我们谁也无法置身世外。

(2005年中国民航学院科研基金项目 05yk30s;刘铁驹,天津市中国民航大学理学院 300300;宋立平,天津工业大学理学院 300160)

封面照片说明

智能机器人系统有限公司研制的机器人柔性加工系统,集工业机器人、执行器、三维测量系统和交互式软件系统平台于一体,既可用于复杂三维工件的批量制造加工,又可作为一个柔性单元灵活嵌入自动化生产线,还可满足大型装备成套系统及复杂加工系统的自动化需求。机器人柔性加工系统被国家发展改革委员会评为“国家高新技术产业示范工程”,获国家科技创新基金赞助,并已通过ISO9001质量认证体系。

(李博文)