

熵在自我管理中的启示

张伟伟 东莞理工学院

熵的概念最早由德国物理学家克劳修斯（Rudolf Julius Emanuel Clausius, 1822—1888）于 1850 年代提出,是一个可用于定量描述热力学系统状态变化的量。1896 年,玻尔兹曼(Ludwig Eduard Boltzmann, 1844—1906)将熵视为系统混乱(无序)程度的度量,热力学第二定律认为孤立的热力学系统总是朝着熵增的方向演化,也即热力学系统微观物质的运动总是朝着更加无序的方向演化。然而,社会学家对于系统演化却有截然相反的看法。英国著名的社会学家斯宾塞(Herbert Spencer, 1840—1903)认为宇宙具有从简单到复杂,从未分化的同质性向分化的异质性演变的演化趋势,这种演化趋势会使得宇宙越来越有序。他将这一规律视为一条普遍规律,应用于生物体、人类社会和人类的思想,被认为是社会达尔文主义者(或社会进化论者)。1960 年代末,热力学系统无序演化与社会系统有序演化之间的矛盾最终随着耗散结构理论的建立逐步得到了调和。本文通过对这一历史进程的回顾,对比分析了孤立系统与耗散系统的演化特点,将其应用于探讨个体发展中的自我管理,指出人应该努力使自身成为耗散系统而非与环境之间没有物质能量交换的孤立系统,并分析了系统的非线性演化特征,获得了一些有益于个人发展的启示。

1. 熵与热力学第二定律

1824 年,法国物理学家卡诺(Nicolas Léonard Sadi Carnot, 1796—1832)提出卡诺热机循环理论,该理论认为:热机在一个卡诺循环中,工作物质(例如蒸汽)在循环的末端总是返回到原始状态,热机的工作状态保持不变^[1]。然而,克劳修斯认真检验了卡诺循环的假设^[2]于 1850 年发表了“On the moving force of heat and the laws which may be deduced therefrom”对其进行了阐述:热机在工作中总会发生摩擦生热。依据能量守恒,热机在工作中总会有一部分热量因摩擦而损耗,随着热机的使用,系统温度升高。这是一个不可逆的过程,系统不会在循环末端返回到与原始状态完全相同的状态。

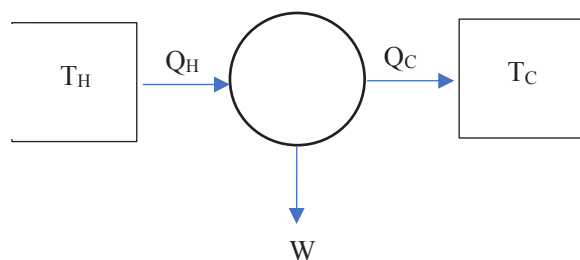


图1 卡诺热机工作原理

如图1所示, 设 T_H 为高温热源的温度, T_C 表示低温热源的温度。根据能量守恒定律, 若工作物质从高温热源吸热 Q_H , 向外界输出功 W , 则同时也向低温热源释放 Q_C 的热量。则有

$$W = Q_H - Q_C \quad (1)$$

由卡诺热机效率公式 $\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$, 可得^[3]

$$W = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) Q_H \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 得

$$\frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_C}{T_C} = 0 \quad \text{或者} \quad \frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_C}{T_C} \quad (3)$$

克劳修斯用 Q/T 作为系统的状态函数, 称为熵 (用 S 表示)。从式(3)可知, 在卡诺循环中, 熵保持不变, 这也是卡诺热机被称为理想热机的原因。而实际上, 热机效率总是低于理想效率, 式(2)将变为一个不等式

$$\eta < \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad \text{即} \quad W < \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) Q_H \quad (4)$$

将式(1)代入不等式(4), 则有

$$\frac{Q_C}{T_C} < \frac{Q_H}{T_H} \quad (5)$$

这表明, 对于热力学系统, 若系统的温度升高, 系统熵也将升高。在物理学中, 通常用熵增量来描述, 记为

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (6)$$

考虑热力学系统的局部熵增 dS_i (i 表示第 i 个局部区域), 则整个系统的熵增量为

$$dS = \sum_i dS_i \quad (7)$$

由于热机在工作中总会发生摩擦生热,致使系统温度升高,所以热机系统总是沿着熵增的方向演化。克劳修斯于1865年正式提出“熵”的概念,并给出了熵增原理(热力学第二定律):“如果没有其他与之相关的变化同时发生,热量永远不会从较冷的物体传递到较温暖的物体。”即,孤立系统或绝热过程中熵总是增加的。在英文中,“熵”为 entropy,来源于希腊语 entropia,是 transformation(变换)的意思,克劳修斯正是为了量化热力学系统状态的改变创造了“熵”这一概念。

在克劳修斯眼中,熵是一个与能量紧密相连的概念。1896年,玻尔兹曼发现孤立系统中熵与系统微观状态的可能性有关(微观状态的发生概率),建立了熵与系统宏观状态所对应的可能的微观态数目 W 的联系^[4]:系统熵 S 与可能的微观态数的对数(即 $\ln W$)成正比。1900年,普朗克(Max Planck, 1858—1933)引入比例系数 k_B ,称为玻尔兹曼常数,则熵可通过微观态的发生概率表示为

$$S = k_B \ln W \quad (6)$$

这里, $k_B = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, W 是德语 Wahrscheinlichkeit 的缩写,意思是可能性、发生概率,被称为热力学概率^[5]。式(6)也被称为玻尔兹曼-普朗克公式。对于密闭容器内的理想气体,其微观状态由气体分子的空间位置及其动量确定,微观状态可以是瞬时的,也可以是由瞬时微观状态的时间进程组成的轨迹。玻尔兹曼将气体分子视为密闭容器内的小球,小球之间不断的相互碰撞发生能量交换,原来有相同速度和相同方向的有序运动在不断的碰撞中变得越来越混乱和无序(可能的微观状态数 W 增加, S 增加)。由此,玻尔兹曼建立起了熵与微观状态有序性之间的关系:系统微观状态越有序,熵值越小,系统微观状态越无序(混乱),熵值越高。

假想一个密闭热力学系统,起初系统内部有一定的温差,气体分子会从高温部分向低温部分有序扩散,当系统内温度处处相等时,气体分子将不再能够产生有序运动。物理学家开尔文(Kelvin, 1862)和克劳修斯将热力学第一和第二定律推广到宇宙,指出宇宙中的温度差是宇宙运行的动力源泉(例如太阳将能量传输到地球,为地球提供了能源),如果有一天宇宙处处温度相同,达到热平衡状态,将不再有热传递,那时宇宙将处于死寂状态。从微观状态看,宇宙原来因能量传递是有序的,达到热平衡后将变得混乱一团,熵将达到最大值。此时的宇宙如同一台燃料耗尽的机械归于死寂,这就是著名的“宇宙热寂说”(图2)。由于这一假说建立在已被验证的物理学定律基础之上,人们一时之间难以接受,造就了19世纪弥漫于整个欧洲的悲观情绪^[6]。

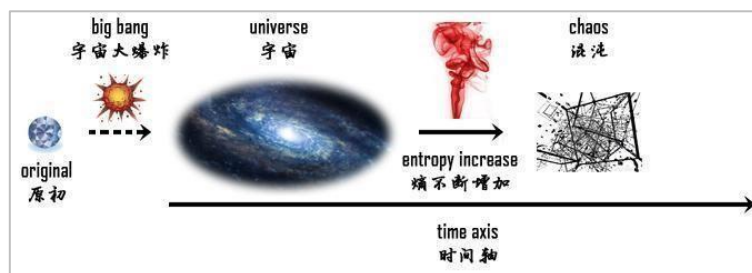


图2 宇宙向热寂演化示意图

2. 耗散结构及其启示

自宇宙热寂说提出以后,为了“拯救”宇宙,许多物理学家尝试改造热力学第二定律。1862年,开尔文小心地说:“宇宙热寂是封闭系统的演化趋势,但构建一个有限的宇宙范围是不可能的,因此科学也将处于永无止境的进步中……”。开尔文的描述强调了封闭(孤立)系统是热力学定律的适用范围。1871年,麦克斯韦(James Clerk Maxwell)设想了一个“麦克斯韦妖”,认为“麦克斯韦妖”可以控制绝热容器左右两格中间的“门”,容器中的空气分子作无规则热运动时会撞上中间的“门”,“门”可以选择性地将速度较快的分子放入一侧,而将较慢的分子放入另一侧,这样,其中的一边的温度越来越高,而另一边则越来越低^[7](图3)。这就推翻了热力学第二定律所认为的“热量不会自发地从低温传向高温”的论断。

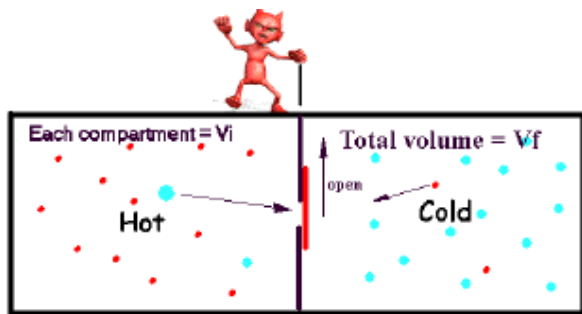


图3 麦克斯韦妖示意图

这里,麦克斯韦妖相对于密闭容器,就相当于引入了系统外的能量,由于不符合热力学第二定律的适用条件,所以得出了违反热力学第二定律的结论。我们看到麦克斯韦实际上是构造了一种不同于热机系统的热力学系统。

在物理学家不断提出各种学说挽救宇宙的同时,社会学界注意到了一种不同于热力学演化规律的现象。例如在人类社会的演化过程中,从原始社会到奴隶社会、资本主义社会、社会主义社会,人类社会的结构越来越趋向于有序,也就是说人类社会的向着热力学系统相反的方向——熵减的方向演化。

斯宾塞就是这种思想的代表。他认为宇宙具有从简单到复杂,从未分化的同质性向分化的异质性演变的趋势,这种演化趋势会使得宇宙越来越有序,他将这一规律视为一条普遍规律,应用于生物体、人类社会和人类的思想,被认为是社会达尔文主义者。英国著名的博物学家罗素(Bertrand Arthur William Russell, 1872—1970)曾在给好友的一封信中写道^[8]:我不知道斯宾塞是否知道热力学第二定律,如果他知道了,他很可能为此而沮丧。因为按照第二定律,宇宙的一切将向着同质性演化(例如宇宙处处温度相同),而一切都将终于统一和僵化。这就是社会进化论与第二定律之间的显著矛盾,换言之,社会进化论认为系统演化的方向是有序(熵减),而第二定律认为系统的演化方向是无序(熵增)。

实际上,斯宾塞也非常关心物理学的研究成果。他与当时多位著名的物理学家均有书信来往,并重点探讨热力学第二定律。在给约翰·廷德尔(John Tyndall, 1820—1893,爱尔兰物理学家,以反磁性、红外辐射、温室效应研究而著名)的信中写道(1858年)^[9]:

“平衡就是死亡？就我的研究所知，平衡是社会的终极和最高状态，平衡不仅是宇宙的终极状态，也是最高状态。您断言宇宙达到平衡时，生命将终止，这使我感到非常震惊。确实，我没有忘记自己的结论，但我记得几天后一直精神不振。此事我仍未解决，并希望有一天与您讨论。”

可见，热力学第二定律也深深困扰着斯宾塞，这也代表了那个时代的困惑。1940年代，美籍奥地利生物学家贝塔朗菲（Ludwig Von Bertalanffy, 1901—1972）从生物系统出发，提出了一般系统论，为解决社会演化的有序性与热力学系统的无序性之间的矛盾打开了思路^[10]。贝塔朗菲强调必须把有机体当作一个整体或系统来研究，发现了系统在不同层次上的组织原理，组织性将会带来系统的有序性。贝塔朗菲指出经典物理学在解释无组织的复杂事物时是非常成功的，但对于有组织的复杂事物可能仍存在许多问题。正是这种组织性致使复杂事物总是向着有序的方向（熵减）演化。贝塔朗菲通过组织性否定了自牛顿以来确立的由严格的机械决定的自然观，例如生命体的基本特征就在于它具有组织性，它促使各个部分相互作用，构成一个密不可分的整体。不过，贝塔朗菲过度强调整体性、有序性和统一性，而完全否定了局部性、无序性和分散性的观点，这也是一般系统论的不足之处^[11]。

1969年，俄裔比利时物理学家、化学家普里高津（Ilya Romanovich Prigogine, 1917—2003）提出了耗散结构理论，调和了贝塔朗菲一般系统论与牛顿机械论之间的矛盾。他指出热力学第二定律所揭示的是孤立系统在平衡态和近平衡态条件下发生的演化规律，但在系统处于开放状态并且远离平衡态时，通过与环境之间的物质和能量交换，一旦某个参量的变化达到一定的阈值，系统就有可能从原来的无序状态自发转变为在时间、空间和功能上的有序状态^[12]。大致可以构建这样一个模型：系统的演化确实是向着熵增的方向演化（或者说趋向于热平衡状态），但是对于耗散系统，由于系统不断从外界吸取能量和物质，当能量和物质的吸入大于系统维持其有序性所消耗的物质与能量时，系统整体仍会表现为向着有序的方向演化（向熵减的方向演化），因此人才能越来越有序。人们把这类能量和物质的输入，形象地称为负熵流，降低了系统本身演化所产生的熵增。负熵流对于个人的成长，也有着极为重要的意义。

首先，人必须保持开放，极力避免自己成为孤立系统。因为孤立系统的最终结局是热寂，只有耗散系统（不断从外界吸取物质和能量）才能维持人的有序性，使生命得以延续。就人的个体来说，吃饭就是人与外界的物质交换，思想交流就是人与外界的能量交换。我们知道人不吃饭会饿死，同样人不与外界交流思想也会走向“热寂”，也会死亡。人在以下三种情况下，极容易走入封闭状态，成为孤立系统，应该警醒：

- 1) 人在遇到困难时，困难实际上就是自身在与外界进行物质与思想交换时的隔阂。当隔阂把人完全包裹之时，人就成了孤立系统。
- 2) 人在极度恐惧和兴奋之时，由于自身所有的注意力都被恐惧和兴奋所吸引，从而忽视了自身与外界的物质与能量交换，人也就成了孤立系统。
- 3) 人在极短的时间内落入某一具体事件的漩涡之中，这件事成为了他的全部，在事件的裹挟中，不断纠缠，使自己成为孤立系统。

一旦成为孤立系统，人的发展就会趋向混乱，生活失去秩序，其终点就必然是“热寂”。人应该想尽一切办法与外界交流，维持自身的“负熵流”，使自身处于有序之中。学习就是人与外界交流的一种绝佳

途径,特别是学习那些经过历史筛选,进入教材的内容。这相当于前人把人类思想最精华的部分,筛选出来,与人互动。如果“负熵流”也有品质的话,教材上的思想就是上品。

其次,人要摄入维持自身处于有序状态的“负熵流”,而不是那些使人混乱的“正熵流”。我们经常提到的社会“正能量”就是一种负熵流,它使得个人和社会趋向于有序,维持着个人与社会的稳定。而“负能量”就是一种耗散,它将个人和社会的有序性打乱,让人与社会处于混乱状态。我们也会有这样的体会,与阳光、向上的人交往,自己也觉得阳光、向上;与沉闷、压抑的人交往,自己也觉得沉闷、压抑。这实际就是自身摄入“负熵流”与“正熵流”的差异。

3. 系统非线性演化及其启示

耗散系统理论在一定范围内调和了社会进化论与热力学第二定律的矛盾,随着非线性系统理论的发展,人们逐步深化了对系统演化特性的认识。美国气象学家爱德华·洛伦茨(Edward Norton Lorenz 1917—2008)在研究长期天气预报的可能性问题上,发现了非线性系统演化的初值敏感性与远期不可预测性。为了说明洛伦茨的工作,先给出式(7)所示的洛伦茨方程^[13],该方程是基于大气热对流方程给出的简化模型。

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma(y-x) \\ \dot{y} &= x(\rho-z)-y \\ \dot{z} &= xy-\beta z\end{aligned}\quad (7)$$

其中, σ, ρ, β 为常数。1963年的一天,洛伦茨进行天气模拟时,希望再查看一次数据,为了节省时间,他输入了中间计算结果,令他惊讶的是,预测结果竟然与之前的预测结果完全不同。洛伦茨将这种差异追溯到了计算机的打印输出上,原来计算机以6位精度计算,但打印输出将变量四舍五入为3位数字,因此像0.506127这样的值打印为0.506。这种差异很小,当时的共识是它应该对预测结果没有实际影响。然而,洛伦茨发现初始条件的微小变化会导致长期结果的巨大变化^[14]。洛伦茨由此推断:天气观测中不可避免地存在不精确和不完全,非常长期的准确天气预报似乎不存在。1972年,他在《预测性:巴西一只蝴蝶拍动翅膀能在得克萨斯产生龙卷风吗?》的报告中形象地用“蝴蝶效应”来描述非线性系统的初值敏感性。受洛伦茨的影响,1975年,美国马里兰大学博士生李天岩和导师J. Yorke联名发表了《周期3蕴含混沌》,首次引入了“混沌”(Chaos)一词并给出了混沌系统的数学特征^[15],成为非线性系统研究的一个重要标志。

混沌是非线性系统特有的现象,表现为由确定的数学方程所表现出来的随机性和远期不可预测性,以及初值敏感性。如式(7)给出的洛伦兹方程,其方程是确定的,但其解却表现出随机性,令 $\sigma=10, \beta=8/3$, 并给定 (x, y, z) 的初值为 $(0.3, 0.3, 0.3)$, 求解系统随参数 ρ 变化时的分岔图,如图4所示。从图中可以看出,随着参数 ρ 的变化,系统将在某些临界点发生混沌相变、倍周期分岔,这预示着系统解的特性随参数 ρ 在不同的区间内有不同的性质,一旦系统到达分岔点,或者是周期向混沌突变的临界点,系统将随参数 ρ 突变为另一种状态。

如果人也是一个非线性系统,也会表现出突变特性,一定的范围内表现为一种状态,一旦条件发生变

化，人将突变为另外一种状态。前一节提到“人的‘负熵流’大于系统演化中的‘熵增’时，系统将保持有序性”的观点，可近似认为是人在一定范围内表现出线性模型。显然，机械地看，人获得的“负熵流”（物质与能量）越多，人就越有序，人的贪婪就是这种线性机械观点的必然结果。然而，对于非线性系统，解的周期态（有序）与混沌（无序）并不会随着某一参数单调变化，而是在积累到一定量的时候，系统将发生突变。同样，当“负熵流”达到某一临界点时，人的有序也可能发生突变成为无序（周期变为混沌）。例如新闻报道中的一些贪腐行为，可以想见，初期的贪腐可以促进他生活和工作的有序，但随着贪腐程度的演化，达到突变临界点，进入混乱就是必然结果。另一方面，无论混沌还是周期，只是系统的一个暂态过程，混沌过后还可以再造秩序。如果生活不如意，一时进入了混沌，失去了秩序，也无需气馁，因为混沌演变到一定的程度，还可以再造秩序。

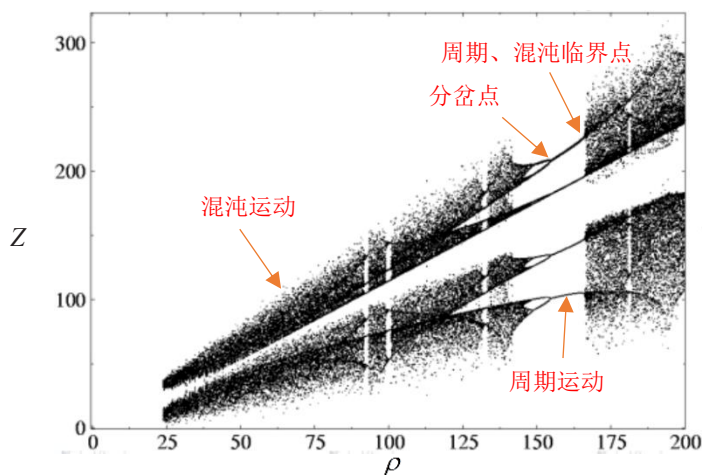


图4 洛伦茨系统分岔图

最后，在洛伦茨的天气模拟中，参数 0.506127 变为 0.506，仅在小数点后第 4 位发生了变化，其模拟结果中就发现了显著变化，这启示我们很小的改变也可能导致结果发生翻天覆地的变化。《三国志·蜀志·先主传》中记载刘备劝勉刘禅，“勉之，勉之！勿以善小而不为，勿以恶小而为之。惟贤惟德，能服於人。”结合非线性系统的初值敏感性可知，小恶小善也有可能让我们在人生道路上走向不同的方向，唯有贤与德才能赋予人生价值与意义。

注：文中图片来源于网络。

参考文献

- [1] Wikipedia. Entropy. <https://en.wikipedia.org/wiki/Entropy>
- [2] Wikipedia. Rudolf Clausius. https://en.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Clausius#cite
- [3] 严子浚. 卡诺热机的最佳效率与功率间的关系[J]. 工程热物理学报, 1985(01):1-6.
- [4] 李鹤龄. 信息熵、玻尔兹曼熵以及克劳修斯熵之间的关系——兼论玻尔兹曼熵和克劳修斯熵是否等价[J]. 大学物理, 2004, 23(12).
- [5] Wikipedia. Boltzmann's entropy formula. https://en.wikipedia.org/wiki/Boltzmann%27s_entropy_formula
- [6] 何维杰, 刘利辉. 热寂说的提出及其影响[J]. 湖南大学学报:社会科学版, 2008, 022(005):108-112.
- [7] 王琦, 刘桂玲. 熵、麦克斯韦妖与生命[J]. 物理与工程, 2004(06):23-25.
- [8] Wikipedia. Herbert Spencer. https://en.wikipedia.org/wiki/Herbert_Spencer
- [9] Ewan Jones. Thermal Science Meets Prosody. <https://www.representations.org/tag/thermodynamics/>
- [10] 魏晓玲. 论达尔文进化论与热力学第二定律的关系[J]. 教育研究(2630-4686), 2019, 002(009):P.101-102.
- [11] 陈一壮. 论贝塔朗菲的“一般系统论”与圣菲研究所的“复杂适应系统理论”的区别[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2007(02):5-8.
- [12] 沈小峰, 胡岗, 姜璐. 耗散结构论[M]. 上海人民出版社. 1987.12.
- [13] 陈立群. 混沌浅释[J]. 系统与amp;控制纵横. 2016, 1: 46-53.
- [14] Wikipedia. Chaos theory. https://en.wikipedia.org/wiki/Chaos_theory
- [15] 吴祥兴, 陈忠等. 混沌学导论[M]. 上海科学技术文献出版社. 2001.



【作者简介】张伟伟, 1978年2月出生, 博士, 教授。现为东莞理工学院机械工程学院力学教师, 主要研究方向为结构损伤检测、力学史与方法论。在研国家自然科学基金和山西省自然科学基金各1项。曾获山西省“三晋英才”荣誉称号, 山西省青年教师讲课比赛三等奖, 山西省教学成果一等奖, 指导学生参加山西省“兴晋挑战杯”大学生课外学术科技作品竞赛获二等奖, 获太原科技大学“2013—2014年度优秀青年教师”等奖励。发表学术论文50篇, SCI/EI收录24篇。