

浅谈热力学熵与现代科学

刘恒异 冯杰

(上海师范大学数理学院 上海 200234)

(收稿日期:2018-04-06)

摘要:熵概念的提出是物理学上一个重要的里程碑,其意义已超越了物理学科的范围,渗透到生物学、社会学等各个领域,它不仅推动了现代科学技术的发展,还对人们的世界观产生了极其深刻的影响.以热力学熵为出发点,简述了熵与信息科学、生物科学、生态文明之间的联系及现实意义.

关键词:热力学熵 信息熵 负熵 耗散结构 生态系统

熵最早定义为热力学系统的状态函数,起初严格应用于系统的热运动.随着“信息熵理论”的提出,人们对于熵概念的理解不断深入,逐渐从物理学科延伸到各个学科领域.例如将熵理论引入生命科学领域,把物理规律和生物发展的规律初步统一起来;将熵理论引入社会科学领域,把物理规律应用到生态经济学领域.除此之外,还产生了地理熵、气象熵、思维熵等许多新的概念.诺贝尔物理学奖获得者、天体物理学家爱丁顿在《物理世界的本性》一书中写道:“从科学的哲学观点来看,与熵相联系的概念应被列为本世纪对科学思想的巨大贡献.”那么,热力学熵与众多科学领域有着怎样的联系?熵对于现代科技的发展有哪些现实意义?本文将对这些问题作简要概述.

1 熵与热力学定律

热力学第一定律是物质能量转换的守恒定律,然而,服从热力学第一定律的过程并不一定发生,例如,当一个高温物体与一个低温物体接触,热量总是从高温物体传递给低温物体,反之则不可能发生;又例如,滴入水中的墨水会自动散开,但反之被染色后的水不能自动凝聚为墨水滴.对于此类现象,克劳修斯于1865年在前人经验的基础上提出了熵的概念,用来描述系统的混乱程度.克劳修斯指出,在孤立系统中,系统的熵只能增加或保持不变而不能减少,即“熵增原理”,这也是热力学第二定律的又一种表述形式.1877年,奥地利物理学家玻尔兹曼根据统计学的原理从微观的角度论述了热力学的熵增原理,

计算公式为

$$S = k \ln W$$

其中 S 为熵, k 为玻尔兹曼常数, W 为热力学几率.该式揭示了熵的统计意义:热力学几率 W 越大,即某一宏观态所对应的微观态数目越多,系统内的分子热运动的无序性就越大,熵值越大.

综合克劳修斯和玻尔兹曼的理论,在孤立系统中发生的任何不可逆过程都将导致熵增加,而在孤立系统中发生的一切可逆过程,其熵不变.即 $\Delta S \geq 0$.但是,值得注意的是,孤立系统只是一个理想的模型,在日常生活中我们面对的绝大多数都是开放系统,而在开放系统中熵并不总是无限增大的,那么,开放系统中熵的变化又满足怎样的规律呢?

2 麦克斯韦妖与信息熵

在研究热力学第二定律的时候,麦克斯韦提出了一个反例,即著名的物理学届“四大神兽”之一麦克斯韦妖.如图1所示,把装满气体的盒子分为两部分,在中间的隔板处开启一个小孔,假设此处有一个可以分辨分子运动速率的小妖精,当 A 中有速率快的分子飞过来时,就打开小孔让它飞往 B ,当速率慢的分子飞过来时则关闭小孔不让分子通过.经过一段时间后,将导致 A 中的分子运动速率慢,平均动能减少,而 B 中分子的平均动能将增加.由于温度是分子平均动能的标志,所以将导致 A, B 两部分出现温差.这样就会出现违背热力学第二定律的情况,即热量从低温自发流向了高温,而除了这个小妖精在作怪以外,系统并没有做功.

如何解释这一现象呢?最有说服力的是“信息论”的解释,信息论指出,小妖精要想辨别出高速分子和低速分子,需要“识别”分子的信息,而识别的过程必然会经历信息的处理.虽然麦克斯韦妖能使热量从低温传向高温,但接收分子信息、发送指令的过程却是一个熵增加的过程,研究表明,这两个过程总体上来说熵还是增加的,因此不违背热力学第二定律.

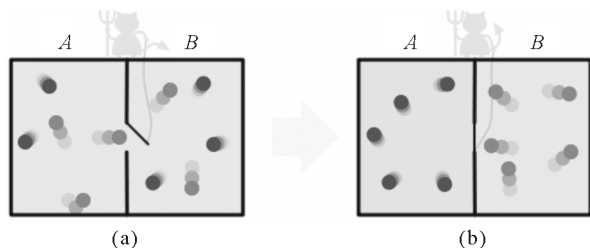


图1 麦克斯韦妖示意图

对麦克斯韦妖的研究揭示了一个重要的问题:信息可能与熵有关.对此,美国麻省理工学院数学家申农首次提出了“信息熵”的概念,并于1948年定义信息熵为

$$S = -K \sum_i P_i \ln P_i$$

式中 K 为比例系数, P 为每个结果出现的概率.如果各种结果的概率相同,则上式可以化简为

$$S = -K \ln P = K \ln W$$

W 为可能出现的结果的总和.上式在形式上与玻尔兹曼熵的表达式完全相同.信息熵理论指出,一个人收到信息后,事情的不确定度会发生改变,在信息论中把不确定度的改变定义为接受信息的信息量,用 I 表示,研究表明,信息量等于信息熵的减少,即 $I = -\Delta S$.信息是用来减少随机的不定性的东西,或者还可以表述为:信息是确定性的增加.申农把热力学熵的概念应用到信息理论当中,使得熵的概念得到扩展.至此人们认识到,熵不一定仅仅与热力学过程相联系,也不一定与微观分子运动相联系,而是利用熵的概念对物质系统的“状态”给出了科学的计量方法,这个“状态”可以是热学的,也可以不是热学的,可以是微观的,也可以是宏观的,使得熵这个概念从热力学最初用来描述微观分子运动状态这个群体的混乱程度发展成信息论中用来描述一个系统信息量的丰富程度.总的来说,相对不同的场合,熵都是描述事物状态的丰富程度.根据以上的思路,可以把熵的概念拓展到一切物质系统内部有差异的地方,应用到各个现代科学领域.

3 熵与生物科学

柏格森把时间看成是单一方向的,认为“生物进化”与“社会进化”是一致的.在生物与社会的进化中,我们看到的是从无序到有序,从简单到复杂的演进,这些现象表面上来看似乎与热力学第二定律恰好相反,第二定律告诉我们随着时间的流逝,熵是在不断增加的,系统是从有序走向无序、从复杂向简单演变的过程.针对这一表面上的矛盾,柏格森的学生普里高津继承了老师的思想,注意到热力学第二定律指出的熵增加原理针对的是孤立系统或绝热系统,即不与外界发生热量交换的系统.但在研究生物体的生命机能的时候,应该注意到生物体、社会系统都是开放的系统,与外界有熵的交换.普里高津以此为出发点,提出了“耗散结构”的概念.

耗散结构又称为非平衡系统的自组织结构,是指一种远离平衡态的开放系统自发形成的有组织的情况.这种结构内的物质粒子处于较大范围的活动,它们不断地流入和流出这个体系,物质与能量不断在消耗,只有不断与外界发生物质交换,才能维持这种结构的存在,这种物质粒子的活动规律正是人体的生命活动规律.人体的生命活动无时无刻不与外界发生着物质间的交换,人体通过能量的植入不断从外界吸入低熵物质,通过机体内部的生理活动把高熵的物质排出体外,总的结果相当于从外界吸入了“负熵”,而“负熵”的输入基本抵消了由于生物体内部机能自发增加的那部分熵,使得系统的基本状态维持大致不变,即基本保持系统的相对稳定.例如,人的内部新陈代谢就是一个不可逆的过程,不断有熵的产生,如果任由熵不断地增加而不减少,生命将很快走向死亡.所以为了维持生命体的基本运行,人要吃食物,排出粪便.据研究指出,食物中的分子排列相对有序,混乱程度小,是低熵的物质;排出的粪便中分子的排列相对无序,混乱程度很大,是高熵的物质.所以,对于人来说,吃进低熵物质,排出高熵物质,就相当于吸进了“负熵”.这些负熵起到了抵消人体内部新陈代谢增加的那部分熵的作用,从而维持人体的熵大体不变,因而保持了人体的相对稳定.人体本身就是一个耗散结构,是一个不断从外界吸入“负熵”的开放系统.据此,普里高津提出了著名的生物熵变公式

$$dS = d_e S + d_i S$$

式中 $d_e S$ 来自生物体与外界的交流,是与流入能量有关的负熵流,即维持生物体的正常运行的能量。 $d_i S$ 是生物体内部的化学反应,是不可逆过程中的无序熵,它降低了生物序和信息流。而系统的总熵变 S 总是大于或等于零的,这正好符合热力学第二定律。因此,若要维持和发展生命就必需不断加强负熵流 $d_e S$,以保证熵变的相对稳定。

从熵的角度分析生物体的生命系统,其实质就是游离于热力学第二定律之外的“负熵系统”,是一个能记载、表达、积累和传递信息的信息系统。生物体要想维持正常的生命活动,健康地生存和发展,就要尽可能地使熵变接近零,但是生命体总体的熵始终是增大的,所以,要尽可能地增大负熵以维持生命体的基本稳定。反之,如果把生物体孤立起来不与外界发生联系,即热力学当中的“孤立系统”,此时“负熵流”没有来源,熵的产生越积越多,生物体最终达到熵极大的平衡态,即最无序的状态,按照达尔文的进化论,这就是生命的终止。虽然尽可能地引入负熵可以维持人体机能的相对稳定,但是人体从胚胎到生长、衰老、死亡,始终是一个熵增的过程,增加的熵总是大于植入的“负熵”,这是自然界的必然规律,热力学第二定律的原理应用于生物学当中,很合理的诠释了“人固有一死”的必然性。

4 熵与生态文明

生态系统与生物体系统一样属于开放的热力学系统,系统内部的发展变化过程要受制于热力学第二定律,遵从熵增原理,因此它是一个可以应用熵理论描述和研究的系统。人类的生存和发展需要不断从周围环境摄取能量和物质,同时也无时无刻地向周围环境排出能量和物质,即引入熵和排出熵的过程。地球的生态相对于生物体来说是一个十分稳定的系统,本身具有一定的净化能力,能分解、处理有机体排出的正熵,使系统的熵增减缓,保持生态系统的平衡。即大自然能够向人类提供所需的负熵,同时又能分解处理人类排出的高熵物质。例如,植物可以在阳光的照射下进行光合作用,土壤经过长时间的霉变、腐化可以降解物质,人类的生存环境处于某种稳定的状态之中。但是,生态系统分解熵的限度是有限的,如果超过了这个限度,将导致生态系统的破坏与失衡,甚至带来不可逆转的灾难性后果。

大自然引入负熵的途径主要来自于太阳,太阳辐射到地球的能量是主要的负熵来源。其次,地球上

庞大的植被会吸收太阳光进行光合作用,光合作用消耗二氧化碳和释放氧气也是放出负熵的过程。第二次工业革命之后,人类进入到工业时代,随着工业社会的发展,使用矿物燃料逐渐增多,以及大面积破坏森林,致使大气中的二氧化碳排放量过大,由于人类的活动而排入自然生态系统的熵过多,系统本身分解、处理熵的能力远小于流入的熵,从而导致全球生态系统失去平衡,生态环境恶化,如水土流失、土地荒漠、风沙尘暴、温室效应等已成为全球性问题。

熵增原理想戒人类,自然界有其自身的发展界限,不能为人类提供取之不尽、用之不竭的资源 and 生存空间。联合国环境计划组织联合发表的《2000年地球生态报告》中所指出的:“人类若依照目前的速度继续消耗地球资源,地球上所有的自然资源会在2075年前耗光”。我们面临的情况主要有两个方面,一方面是自然资源和生存空间是有限的,不能随意任用;另一方面是人类社会和科学技术发展导致熵的快速增长的问题。

面对此种情况,必须应用熵理论建立一个对人类和自然界都合理、合适的最佳生存模式,即“负熵社会”,以便能以尽可能少的能源消耗换取社会生产力的发展,达到有效地降低或抑制熵的快速增长问题。如合理开发、综合利用新能源,如风能、水能、潮汐能等;开发废物再利用技术,使得废物资源化,实现清洁生产,为人类的子孙后代造福。

5 总结

熵,这个回荡在科学殿堂里的“幽灵”,21世纪正逐步由热力学的概念移植到各个学科领域,熵在编织现代科学之网的过程中将起纽结的作用,必将成为引导人类生活的科学准则,应用于越来越多的科学领域,助力现代科学技术的飞速发展。

参考文献

- 1 冯杰. 大学物理专题研究. 北京: 北京大学出版社, 2011. 152 ~ 156
- 2 赵峥. 物理学与人类文明十六讲. 北京: 高等教育出版社, 2008. 76 ~ 81
- 3 司德平. 熵的物理意义及其延伸. 物理教学, 2009, 31(07): 16 ~ 17
- 4 陈文强. 熵、信息与生命本质的探讨. 汉中师范学院学报(自然科学), 2002(03): 84 ~ 87
- 5 杨庆贤. 简论熵和负熵与地球生态问题. 林业经济问题, 2001(01): 62 ~ 64
- 6 贺会玲. 熵与生态环境. 生物学通报, 2005(07): 22 ~ 24