

永动机与热力学定律

张锡娟

(扬州大学理学院物理系)

朱海星

(扬州教育学院 225002)

关于永动机,已被热力学第二定律所否认。但是对于中学生,刚学完初、高中物理,又自己看了一些读物,略知热力学第二定律、熵等名词,仍有可能向热力学第二定律发起挑战。究其原因是由于高中物理教材在这一方面没有充分展开讨论,阅读材料也较少。本文在下述几个方面的回顾,有助于避免学生的错误理解。

1. 不可逆过程的概念

什么叫“不可逆”?学生可能对这一概念产生疑惑:我们不是可以把自由膨胀了的气体压缩回去吗?冰箱不是可以把热量从低温抽回高温吗?在一定的条件下我们不是可使氧化反应逆向进行吗?

但上述过程并不是可逆过程。因为它们的原过程是自发进行的,而逆过程却需要外界付出代价,压缩气体需要外界做功,冰箱需要耗电,强制的逆向化学反应需要能源,电离需要提供能量。系统的逆过程对外界产生了不能消除的影响:外界的状态发生了变化,不能自发地复原。物理学中关于可逆和不可逆的定义是:一个系统由某一状态出发,经过某一过程达到另一状态,如果存在另一过程,它能使系统和外界完全复原(即系统回到原来的状态,同时消除了系统对外界引起的一切影响),则原来的过程称为可逆过程;反之,如果用任何方法都不可能使系统和外界完全复原,则原来的过程称为不可逆过程。

2. 热力学第二定律的完整概念

上述不可逆的论述已表明,自然界的进程是有方向性的,沿某些方向可以自发地进行,反过来则不行,虽然二者都不违反能量守恒定律。热力学第二定律正是用来概括自然界的这一规律的。定律的两种表述分别为:不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化(克劳修斯表述);不可能从单一热源吸取热量,使之完全变化为有用功而不产生其他影响(开尔文表述)。

热力学第二定律否决了第二类永动机。但是单

从两种表述上看,似乎并没有排除某种可能性,这就导致许多人试图对科学上的新发现如三极管放大效应、计算机的神奇效能进行永动机的新探索。这实际上是没有正确掌握第二定律的结果。两种表述中,有普遍意义的表述是:“不引起其他变化”和“不产生其他影响”。你的永动机设想是否违反了这一定律,重要的一点是看是否对环境与外界产生了其他影响,是否要吸取外界的能量。

对热力学第二定律的另一种通俗的理解是,没有一种热机的效率达到100%,没有一种热机能将吸收的热量全部变为机械功。这是因为内能和机械能有着本质的区别,前者是无规则分子运动的能量,而后者是有序分子运动。由于我们不能控制各个分子的运动,就不可能使无规则运动完全再转换为有序运动,可是能够转换它的一部分。如果将转换的这一部分当成了全部,就有可能得出错误的结论。

3. 熵和熵增加原理

在对永动机的设想中,首先对熵增加原理进行挑战是许多学生的共同点。

这其中的一个原因是,熵的概念比较抽象,初次接触很难懂得透彻。事实上在人类认识自然规律的长河中,熵和熵增加规律的认识就充满了曲折坎坷,对熵增加原理提出的疑问层出不穷。

卡诺在他的热机研究中曾认为,在一个循环里热机从高温热源汲取的热质 Q_1 与释放给低温热源的热质 Q_2 相等,与此同时系统对外做功 A' 。克劳修斯修正了这一错误,他发现在卡诺热机里从高温热源传到低温热源时的不变量是热温比: $Q_2/T_2 = Q_1/T_1$,由此得出了著名的克劳修斯等式:对于任何物质,热温比沿任何可逆循环的积分为0。由这一积分定义的态函数就是熵,它在两状态之间的差值定义为:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

对于不可逆循环,克劳修斯等式转化为不等式:热温比的循环积分小于0。循环积分小于0,却可以证明熵增加原理:当热力学系统从一平衡态经绝热过程到达另一平衡态时,它的熵水不减少;如果过程可逆,则熵不变,如果过程不可逆,则熵增加。数学表达式为:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq 0$$

根据熵增加原理可以做出判断:不可逆绝热过程总是向着熵增加的方向进行的,而可逆绝热过程则总是沿着等熵线进行的。

熵增加原理表明,熵是一个在绝热过程中永不减少的态函数,它指明了宏观过程自发进行的方向。熵的微观本质由玻耳兹曼熵描述: $S = k \ln \Omega$ 。 Ω 是微观量子态的数目,即宏观态出现的概率。自然界自发的倾向总是从宏观概率小的状态向宏观概率大的状态过渡。

熵增加原理中所述的热力学系统是绝热密闭系统,包括你要研究的对象和它所处的所有环境和接触的物体。如果割裂周围环境,就有可能得出相反的结果。如果你研究的某个现象在经过某个绝热过程后熵减少了,很可能它的环境熵增加了,二者总和还是增加。

4. 熵增加原理的应用

不少学生尤其是自学的学生,可能在阅读普通物理教材时,对熵增加原理的证明还是能大致看懂的,但遇到新的问题,新的科技成果,普通物理教材没有直接讨论其熵的变化,不得不自己分析时,就可能得出相反的结果。本文通过下述几例分析熵的变化,以期对读者有所启发。

4.1 信息熵

信息的获得意味着各种可能性中概率分布的集中。信息越多,确定某事件的概率越大。从两种可能性中做出判断所需的信息量叫做1比特(bit),从4种可能性中做出判断需要2bit的信息量(最小信息量),从8种可能性中做出判断需要3bit的信息量,一般地说从N种可能性中做出判断所需的比特数为 $n = \log_2 N$,换成自然对数,则有 $n = K \ln N$,式中 $K = 1/\ln 2$ 。如果用概率来表达,在对N种可能性完全无知的情况下,我们可假定它们的概率都是 $1/N$, $\ln P = -\ln N$,即这时为作出完全的判断所缺的信息量为 $S = -K \ln P$ 。

对于概率不相等的情况,信息论中给信息熵的定义是:

$$S = -K \sum_{a=1}^N P_a \ln P_a,$$

此式的意思是说,如果有 $a = 1, 2, 3, \dots, N$ 种可能性,各种可能性的概率是 P_a ,则信息熵等于各种情况的信息熵 $K \ln P_a$ 按概率 P_a 的加权平均。

信息熵与信息量的关系,可由教材中的一个计算实例看出。

天气预报员说,明天有雨,这句话给了我们1bit的信息量。如果她说有80%的概率下雨,可令 $a = 1$ 和 $a = 2$ 分别代表下雨和不下雨的情况,则 $P_1 = 0.80, P_2 = 0.20$,代入上式信息熵的定义, $S = 0.722$,即比全部所需信息(1bit)还缺少0.722bit,信息量只有 $1 - 0.722 = 0.278$ bit。如果预报员的话改为90%的概率下雨,则可算出信息熵为 $S = 0.469$,信息量 $I = 1 - S = 0.531$ bit。可见,信息熵的减少意味着信息量I的增加,即在一个过程中, $\Delta I = -\Delta S$,信息量相当于负熵。

信息量相当于负熵,是否意味着信息获得的过程违反热力学第二定律呢?

信息量增加信息熵减少,只能以环境熵增加为代价。例如计算机在温度T下处理每个bit,至少消耗能量 $kT \ln 2$ 焦耳, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K,为玻耳兹曼常数。这一结果是将玻耳兹曼熵公式与信息熵公式比较后得出的。

谈到信息熵,“麦克斯韦妖”被戳穿的艰难历程能很好地说明热力学第二定律被人们接受的不易。麦克斯韦设想有一个能观察到所有分子的轨迹和速度的小精灵把守着一个容器内隔板上的小孔上的闸门,让高速和低速的分子分到两边,使一边越来越热,一边越来越冷,小闸门无摩擦,小精灵无需做功。这样一来,系统的熵降低了。到了1929年,才被匈牙利物理学家西拉德所戳穿。麦克斯韦妖有获得和储存分子运动信息的能力,信息是负熵,将负熵输入给系统,降低了系统的熵。而麦克斯韦妖要获得所需的信息,必须有一个温度与环境不同的微型光源去照亮分子,这就需要耗费一定的能量,产生额外的熵,补偿了系统熵的减少。因此麦克斯韦妖并不能动摇热力学第二定律。

信息量的获得意味着信息熵的减少,出现负熵,还可以使我们联想晶体三极管或集成电路的放大效应。信号的放大似乎是小能量控制大能量,从无序变为有序,获得负熵,但对无线电有所了解的人都知道,无线电消耗的能量是很大的,虽然集成电路比电

子管要省电得多,能量的利用率也不是 100%,还是有发热等浪费,电视、电脑都要有很好的散热条件。

4.2 耗散结构与熵的关系

不可逆热力学过程就是耗散过程,而在非热平衡态下产生的有序结构称为耗散结构。均匀态具有最大的混乱度,熵是最高的,有序结构的出现意味着熵的降低。从而耗散结构曾被认为与热力学原理冲突。

这一矛盾被比利时科学家普里高津解决。其理论的关键是系统必须开放,要靠外界不断地供应能量或物质,同时,产生耗散结构的开放系统必须有负熵流。

一个系统熵的变化有两部分组成:

$$dS = d_{外}S + d_{内}S$$

$d_{外}S$ 是由系统表面流入的熵, $d_{内}S$ 是系统内耗散过程引起的熵增加。要想使系统的熵减少, $dS < 0$, 必须有 $d_{外}S < 0$, 且 $|d_{外}S| > d_{内}S$, 也即存在负熵流。

耗散结构的例子,如螺旋波和图灵斑图这里不再重述。但要强调的一点是,耗散结构给我们的启发是,在许多现象中,遇到了负熵,不能轻易下结论说违反了热力学第二定律。

4.3 生命的热力学基础

生命的活动是耗散过程。在耗散过程中熵不断增加,高熵意味着混乱,熵达到最大值表明热平衡态的到来,对于生命来说,热平衡态就是死亡。所以,要活着,有机体必须使自己的身体保持低熵的状态。热力学第二定律要求一个封闭系统的熵只增加,不减少。从而有机体必须是开放的系统,它一面不断地向体外排熵,一面从外界汲取低熵的物质,如碳水化合物、净液态的水,排出的是高熵物质如二氧化碳、水汽、尿、汗和其他排泄物。

除了生命要汲取负熵物质外,地球要维持其生命,也要汲取负熵流,如果人类食物需要的负熵流超过了地球上光合作用提供的负熵流,地球的生命生存就会面临严峻挑战。

这一系列的例证表明,负熵的出现并不能使我们惊慌失措,并不意味着热力学的原理就会动摇。我们应努力更新知识,全面系统地学习基础理论,在遇到新的问题时,能用前人的成果解决新问题。

5. 等离子体的基本知识

下面来讨论一名中学生提出的等离子体的熵变化是否与热力学定律矛盾的问题。

当气体处在高度电离状态,但是其中正离子和

负离子形成的空间电荷大致相等,使得整个气体呈电中性,就称为等离子体。要分析等离子体的熵变化,首先要分析等离子体的产生过程。这里举几例如下。

5.1 气体的被激导电

在通常情况下,气体中的自由电荷很少,是良好的绝缘体。但是由于某些原因气体中的分子发生了电离,它便可以导电,称为气体导电或气体放电。气体导电可分为被激导电和自激导电。

被激导电是用电离剂的手段使气体电离,再利用外加电场形成定向电流。例如用紫外线、X射线或各种放射线照射,或者用火焰将气体加热。

如果我们将电离剂撤除,气体中的离子很快消失,电流也就中止了。

5.2 气体的自激导电

当被激导电的气体外加的电压增加到某一数值后,气体中的电流急剧增加,这时即使撤去电离剂,导电过程仍能维持,这种情形称为气体的自激导电,也就是气体被击穿。在气体的自激导电的同时,往往有声、光等现象发生,例如辉光放电、弧光放电、火花放电、电晕放电等。

在自激放电时,虽然已经撤去电离剂,但仍会有相当多的带电粒子参与导电过程,其来源可以有 3 种途径:

一是正负离子在电场中已获得相当大的动能,致使它们的各种碰撞足以产生新的离子。这里主要的过程首先是电子与中性分子的碰撞,由于气体中电子的自由程较长,受场力作功而获得的动能较大,当它们与中性分子碰撞时使后者电离。这样的过程连锁式地发展下去,形成簇射。

二是获得较大动能的正离子轰击阴极,发生了二次电子发射。

三是气体中电流密度很大时,会使阴极温度升高而产生热电子发射。因此,气体中的正负离子和电子的数目急剧增长,气体导电便过渡到自激阶段。

5.3 热核反应下的等离子体

等离子体远不是放电管中特有的,它广泛地存在于自然界的其他领域。火焰、雷电、核武器爆炸中都会形成等离子体,地球大气上层的电离层也是等离子体。至于地球以外的宇宙中,等离子体更是物质存在的主要形式,按质量计算,90%以上的物质是等离子体态。对我们人类关系密切的太阳,就是一个大等离子体球。

她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿, 欢迎订阅

2003年的《现代物理知识》,继续设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯共8个栏目。欢迎大家向这些栏目踊跃投稿。恳请大家注意如下几点:稿件请用方格稿纸誊写,用微机打印的则请单面打印并留1.5倍的行距;外国人名地名,请译成中文,有必要保留外文名称时则在文中首次出现时将外文用括号括在中译名后面,图表中的外文也尽可能地译成中文;文稿中的插图最好单独成页,并在文稿中的相应位置标上插图的编号;文稿无需附“摘要”和“关键词”等,一般也无需附“参考文献”,只需附上英文题目和作者的英文姓名;请注意语言规范,例如,“其它”一律改为“其他”,“公里”改为“千米”,“公斤”改为“千克”,数字和百分数尽量采用阿拉伯数字,除了书刊名称用书名号外,一般文章的题目则用引号。

《现代物理知识》的读者对象颇为广泛,有科学工作者、教育工作者、科学管理干部、大学生、中学生和其他物理学爱好者。欢迎各界人士继续订阅!

在邮局漏订或需要过去杂志的读者,请按下列价格汇款到《现代物理知识》编辑部(100039,北京918信箱现编部)补订。1992年合订本,18元;1993年合订本,18元;1994年合订本,22元;1995年合订本,22元;1996年合订本26元;1993年增刊,8元;1994年增刊,8元;1996年增刊,15元;1997年合订本,30元;1998年合订本,32元;1999年合订本已售完,尚有1、4、5、6期单行本,每本3元;2000年附加增刊合订本,38元;2000年增刊,10元;2001年合订本,48元;2002年合订本,48元;2003年每期7元,全年42元;《微观绝唱:量子物理学》(《诺贝尔奖百年鉴》丛书之一,上海科技教育出版社2001年出版),10元;《奇异之美——盖尔曼传》,32元;《反物质——世界的终极镜像》,18元(上海科技教育出版社“哲人石”丛书最近出版的两本)。以上所列,均含邮资或免邮资。

等离子体与常态下的气体相比有一系列的独特的性质:它是电和热的良导体,具有比普通气体大几百倍的比热,在其中可以发生各种波段的辐射等等。等离子体中的带电粒子间的相互作用是长程的库仑力,使它们在无规则的热运动之外能够产生某些类型的集体运动。

目前对等离子体物理学的发展起关键作用的是受控热核反应问题。在热核反应的高温下,物质处于等离子体态。实现热核反应的人工控制的最大困难,是如何把一定密度的等离子体加热到如此高温,并维持足够长的时间。

上面的例子都说明,产生和维持等离子体状态,需要外界的能量。气体的被激导电需电离剂,如同麦克斯韦妖中的精灵需光照亮分子;气体自激导电,需要足够高的电压;热核反应的等离子体需要核反应产生很高的温度。如果我们能在等离子体中形成

熵减少的过程,那一定是以牺牲环境熵为代价的,如

4.1 信息熵的分析。

事实上,等离子体一旦撤除外界的维持条件,带异种电荷的离子就会在库仑力的作用下中和。中和放出的能量,远远小于电离能。以氢原子为例,处于基态的氢原子,电离能至少需要13.6eV的能量,如要使电离的电子有很大的动能,电离能量就要很大。而中和则只要在库仑力的作用下就可形成。

如果我们还想让所有的离子一起结合,就需要外界为从无序的热运动变为有序的碰撞付出更大的代价。

关于小能量控制大能量的问题,也是学生容易混淆的。核爆炸,仅用普通炸弹就使铀达到临界状态,产生了巨大的能量,但这是核裂变本身的能量释放过程,不是普通炸弹在控制核反应。等离子体放电、太阳的巨大能量,都不是小能量控制了大能量。