



浅谈能量退降与熵增的关系^{*}

段娟娟 王祥委 彭朝阳

(云南师范大学物理与电子信息学院 云南 昆明 650500)

(收稿日期:2017-08-12)

摘 要:对焦耳实验、有限温差热传导、理想气体的绝热自由膨胀和电流的热效应 4 个不可逆过程的熵增和“退降”的能量值做定量分析,给出了熵增与“退降”的能量值之间的定量关系,从而为深入理解热力学第二定律以及“在热力学第一定律(能量守恒)的情况下,为何要节能?”这一令人困惑的问题提供了参考。

关键词:熵 能量退降 不可逆 孤立系统

1 引言

在一个孤立的热力学系统中,对一个不可逆过程,根据熵增加原理可知该系统熵值将增加,同时,有一部分能量变得不再可以做功,我们把这部分不再可以做功的能量称作“退降”的能量. 在生活中,很多现象和过程都表明了能量的退降. 比如将一个篮球从高处无初速度释放,当它接触地面后回弹起来,达到一个最高点后再次下落,如此往复,直到最终它静止到地面上. 它每次反弹达到的最大高度是逐渐降低的,是由于篮球与空气之间存在摩擦. 设地面为势能零点,那么距离地面的高度越高,其势能就越大. 当篮球上下运动时,篮球的势能与动能相互转化,但由于存在大气摩擦,其总的机械能却在减少. 而那部分减少的机械能转化成热能扩散到大气中,成为大气的内能,这部分能量做功的能力下降,能量发生了“退降”,生活中像这样发生能量退降的过程很多.

在热力学研究中,熵作为一个重要的参数,在统计学中,它代表着混乱程度. 在一个孤立系统中,系统满足熵增加原理. 熵增加原理表述为:热力学系统从一平衡态绝热地到达另一个平衡态的过程中,它的熵永不减少,若过程是可逆的,则熵不变;若过程是不可逆的,则熵增加^[1].

$$S_B - S_A \geq 0$$

不可逆过程会引起熵增加,与此同时能量将发生退降,两者之间有何关系? 本文对焦耳实验、有限温差热传导、理想气体的绝热自由膨胀和电流的热效应 4 个不可逆过程做定量分析,给出了熵增与“退降”的能量值之间的定量关系.

保护人类赖以生存的环境已成为当今社会可持续发展的重大课题,STS 教育思想已延伸到 STSE 教育,其包括科学(Science)、技术(Technology)、社会(Society)、环境(Environment)教育,并且环境(Environment)教育已经成为公民科学素养教育的重要组成方面. 作为一名物理教师就应该在物理教学中渗透 STSE 教育. 因此,作为一名物理教师就有必要知道以下问题:保护环境和节约能源的理论依据是什么? 能否通过降低能量的退降而达到节约能源的目的? 能量贬值是否与热力学第一定律(能量守恒定律)相违背? 所以,对能量退降进行研究很有必要.

2 不可逆过程中的能量退降与熵变的关系

2.1 焦耳实验

焦耳实验是焦耳用来测量热功当量所做的实验,如图 1 所示. 焦耳实验的原理是利用重物的下落从而带动桨叶旋转而搅动盛在绝热容器中的水,通

^{*} 2017 年度云南省教育厅科学研究研究生项目研究成果,项目编号:2017TYS046

作者简介:段娟娟(1994-),女,在读硕士研究生,研究方向物理学学科教学.

通讯作者:彭朝阳(1971-),男,博士,教授,研究方向物理课程教学和天体物理.

过桨叶的搅动使水温升高. 设重物的质量为 M , 重物下落前水的温度为 T , 重物下落高度为 h , 水温升高 dT , 水的比热容为 c , 质量为 m .

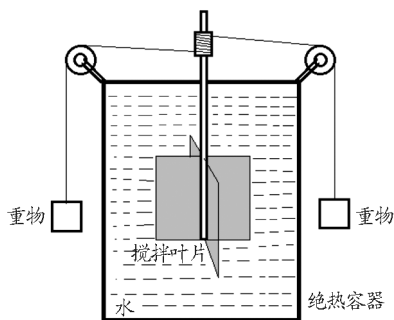


图1 焦耳实验简易装置示意图

若忽略空气阻力和绳子摩擦, 重物减少的重力势能能将全部转化为水的内能. 重物减少的重力势能为 $E_p = Mgh$, 水增加的内能为 $E = cm\Delta T$. 由于能量守恒, $E_p = E$, 故

$$Mgh = cm\Delta T$$

用一个可逆热机吸取水增加的那部分热量用来做功, 设低温热源的温度为 T_0 , 如图2所示.

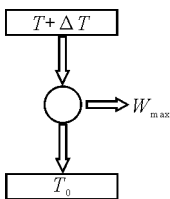


图2 焦耳实验引起的能量退降

根据可逆热机的效率可以计算对外做功的最大值

$$W_{\max} = Mgh\eta_{\text{热}} = Mgh\left(1 - \frac{T_0}{T + \Delta T}\right)$$

由于可逆热机的效率 $\eta_{\text{热}} < 1$, 所以对外做功的最大值一定小于热机所吸收的能量, 而减少的这部分能量就是“退降”的那部分能量, 则退降的这部分能量为

$$\Delta E = Mgh - W_{\max} = Mgh - Mgh\left(1 - \frac{T_0}{T + \Delta T}\right) = Mgh \frac{T_0}{T + \Delta T}$$

由于水升高的温度 ΔT 相对于原温度 T 和低温热源 T_0 相当小, 故“退降”的能量可近似简化为

$$\Delta E \approx Mgh \frac{T_0}{T}$$

在此不可逆过程中, 系统的熵变为^[2]

$$\Delta S = S_B - S_A = cm \ln \frac{T + \Delta T}{T} = cm \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right)$$

由近似 $\ln(1+x) \approx x$, 可得

$$\Delta S \approx cm \frac{\Delta T}{T}$$

所以能量退降的大小与熵增的关系

$$\Delta E = T_0 \Delta S$$

2.2 有限温差热传导

设有两个高温热源, 它们的温度不同, 热源1的温度为 T_1 , 热源2的温度为 T_2 , 且 $T_1 > T_2$.

现利用热机先从高温热源1中吸取 Q 的热量, 然后向温度为 T_0 的低温热源放热, 并对外做功, 如图3(a)所示^[4].

根据热机效率可求得对外做的功的大小为

$$W_1 = Q\eta = Q\left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right)$$

由于热源1的温度比热源2的温度高, 现用热源1给热源2传热, 传递 Q 的热量, 如图3(b)所示, 现用卡诺热机, 从热源2中吸取 Q 的热量, 向低温热源 T_0 放热, 并对外做功. 同理, 可得此次对外做功的大小为

$$W_2 = Q\eta' = Q\left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right)$$

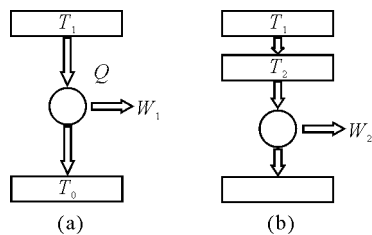


图3 有限温差热传导

因为 $T_1 > T_2$, 所以 $W_1 > W_2$, 故可以计算出“退降”的能量为

$$\Delta E = W_1 - W_2 = Q\left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) - Q\left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) = Q\left(\frac{T_0}{T_2} - \frac{T_0}{T_1}\right)$$

在此过程中系统的熵变为

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = Q\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

有限温差热传导过程引起的能量退降大小与熵增的关系为

$$\Delta E = T_0 \Delta S$$

2.3 理想气体的绝热自由膨胀

如图4(a)所示, 在气缸中装有物质的量为 ν 的理想气体, 初始状态的体积为 V_1 , 温度为 T . 如果用温度为 T 的热源与气缸接触, 使理想气体从热源中

吸取 Q 的热量,使气体做等温自由膨胀,体积变为 V_2 ,并对外做功,做功大小为

$$W_1 = Q - \Delta U = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} - \Delta U$$

由于理想气体的内能是温度的函数,此过程是等温膨胀,所以 $\Delta U = 0$,故对外做的功可以表示为

$$W_1 = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

若利用该理想气体做绝热自由膨胀,如图 4(b) 所示. 气体自由膨胀的特点是:时间短,体积增大,温度不变,是不可逆过程^[3]. 打开阀门后理想气体迅速膨胀. 在这个过程中温度不发生改变,并且来不及与外界进行热量交换,所以系统的内能并未发生改变,即 $\Delta Q = 0, \Delta U = 0$. 因此,系统对外不做功,若要使理想气体对外做功,利用卡诺热机从膨胀后的理想气体中吸取 Q 的热量,并借助温度为 T_0 的低温热源,对外做功,如图 4(c) 所示. 做功的大小为

$$W_2 = Q\eta_{\text{热}} = Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = \nu RT\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \ln \frac{V_2}{V_1}$$

由上两式可知,理想气体发生绝热自由膨胀这个不可逆过程中,对外做功的能力下降了,即 $W_2 < W_1$,而 W_1 与 W_2 的差值就是退降的能量,理想气体绝热自由膨胀的熵变为

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = \frac{1}{T_0} \int dQ = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

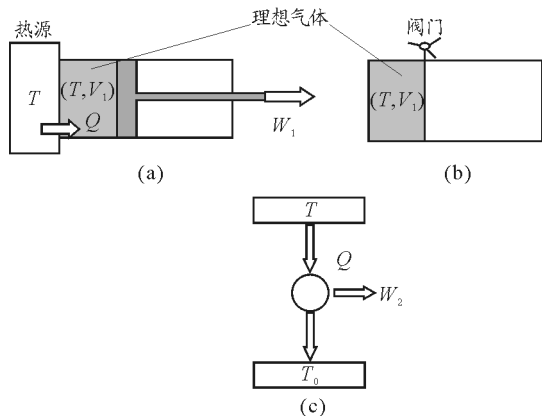


图4 理想气体的绝热自由膨胀

理想气体的绝热自由膨胀过程中退降的能量与熵变的关系为

$$\Delta E = T_0 \Delta S$$

2.4 电流的热效应

如图 5(a) 所示,用一个电源连接一个理想电动机对外做功,如果忽略其产生的热效应,电源输出

W 的电能将全部转化为对外做的功 W_1 ,即

$$W_1 = W = I^2 R t$$

若现在我们将一个电阻连入电路中,如图 5(b) 所示. 同样使电源输出 W 的电,电阻会产生热量,电阻的温度变为 T . 若忽略电源本身的内阻,电源输出的电能 W 将全部转化为电阻的热量 Q ,若要利用这部分热量对外做功,借助卡诺热机,并借助一个温度为 T_0 的低温热源,从电阻中吸收 Q 的热量对外做功,如图 4(c) 所示. 做功大小为

$$W_2 = Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = W\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = I^2 R t\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

从以上两个过程我们可以看出来,经过电流的热效应后,对外做功能力退化了,其中退降的能量为

$$\Delta E = W_1 - W_2 = I^2 R t - I^2 R t\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = I^2 R t \frac{T_0}{T}$$

计算此不可逆过程中的熵变

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = \int \frac{I^2 R dt}{T}$$

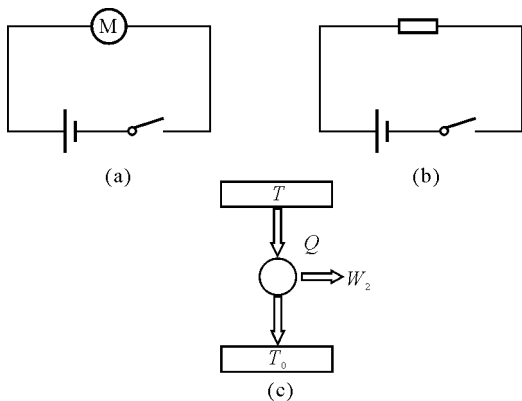


图5 电流的热效应

利用 $Q = cm dT = I^2 R dt$ (其中 c 和 m 分别为电阻的比热容和质量) 得

$$t = \frac{cm}{I^2 R} \Delta T = \frac{cm}{I^2 R} (T - T_1)$$

其中 T_1 为电阻的初始温度,所以

$$dt = d\left[\frac{cm}{I^2 R} (T - T_1)\right] = \frac{cm}{I^2 R} d(T - T_1) = \frac{cm}{I^2 R} dT$$

将上式代入熵变公式中得

$$\Delta S = \int \frac{I^2 R}{T} dt = \int \frac{cm}{T} dT = cm \ln\left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right)$$

根据近似公式 $\ln(1+x) \approx x$,可得

$$\Delta S \approx \frac{cm \Delta T}{T} = \frac{I^2 R t}{T}$$

比较退降的能量和熵变,可得出两者的关系为

$$\Delta E = T_0 \Delta S$$

3 总结

通过以上4个不可逆过程的探讨,可以得出“退降”的能量的大小和不可逆过程所引起的熵的增加成正比,而且其比例系数是热机低温热源的温度。

在没有外界影响的条件下,系统的熵越大,它的状态就越接近于平衡态,它所具有的运动就越不容易转化;当熵达到最大值时,系统处于平衡态,系统整体运动除了微小的涨落之外,不可能作什么转化。熵概念表示着运动丧失转化能力的程度,这个“丧失”是能量退降的量度^[4]。熵增加的越多,退降的能量也越多。热力学第一定律已表明在一个孤立系统中能量不会多出来也不会减少。但是,能量会越来越不中用,也就是说能量的量不变,质变坏了^[5]。但如果想要它不变质,在孤立系统中,只有所经历的一切变化都是可逆过程。因为可逆过程中,系统的熵不会增加,即熵变为零,也就不存在能量的质变。在生活中我们尽量运用可逆过程来降低能量的退降,但是要能量一点也不退降是不可能的。针对热力学第二定律就有关可用的能源和物质问题的说明,物理学家布鲁斯·林赛是这样解释的:每一自然发生的能量转换过程中,为使该过程进行下去,几乎都伴随着有一个可用能量的损耗。如果说在日常生活中热力学第一定律的基本原则是:没有付出就不可能得到,那么,第二定律强调的则是:每当我们得到,我们就将减少一些再得到的机会,直到最终不再有“得到”^[6]。所以说我们不能打着热力学第一定律的幌子永无休止地使用资源,能量的确不会随着我们对资

源的利用而减少,但它会越来越不中用,热力学第二定律给我们提供了有力的证据,也是我们为什么要保护并节约资源的理论依据。

量子力学之父普朗克在他的著作中曾写道:“热力学第二定律现在常常被看做一个‘能量耗散’定律”^[7]。这种观点从由热辐射和传导的不可逆现象出发,将第二定律定义为正在进行中的“能量耗散”,这种观点仅仅是表述了问题的一个方面。他曾说:“我认为热力学第二定律基本含义是自然过程中所有与这个过程有关的个体增熵总和”^[8]。可见,能量退降和熵共同诠释了热力学第二定律,而两者又有一定的联系,使我们对熵了解得更透彻。物质所含的能量既有可做功部分,也有不可做功部分,但两者同样值得我们关注。

参考文献

- 1 秦允豪. 热学(第3版). 北京:高等教育出版社,2011. 258 ~ 302
- 2 张三慧. 热学(大学物理第2册)(第2版). 北京:清华大学出版社,1999. 166 ~ 203
- 3 谭忠明. 热力学系统的能量与熵. 中山大学学报(自然科学版),1999(38):78 ~ 79
- 4 朱世德. 熵与能量退化. 成都气象学院学报,1992(1):70 ~ 71
- 5 严济慈. 热力学第一和第二定律. 上海:人民教育出版社,1966. 101
- 6 R. B. Lindsay. Entropy Consumption and Values in Physical Science. American Scientist,1959. 378 ~ 380
- 7 普朗克. 热力学论述(第3版). Alexander Ogg,译. 纽约:多佛出版公司,1945. 103 ~ 104
- 8 (美)Jack Hokikian. 无序的科学. 王芷,译. 长沙:湖南科学技术出版社,2007. 85
- 8 曾敏,唐闻捷,王贤川. 基于“互联网+”构建新型互动混合教学模式. 教育与职业,2017(5):47 ~ 52
- 9 王祖源,倪忠强,王瑜,等. 从OC到MOOC大学物理课程建设再思考. 中国大学教学,2014(6):53 ~ 56
- 10 门路,王祖源,何博. 大学物理MOOC教学研究与实践. 物理与工程,2015(1):49 ~ 52
- 11 张睿,王祖源,徐小凤. 互联网+环境下混合型教学的教学设计研究. 物理与工程,2016(5):18 ~ 21
- 12 田爱丽. 转变教学模式促进拔尖创新人才培养——基于“慕课学习+翻转课堂”的理性思考. 教育研究,2016(10):106 ~ 112
- 13 钱骏. 高校创新创业教育与专业教育的互动融合模式研究. 教育探索,2016(11):84 ~ 87

(上接第8页)

- 3 邵进. 创新创业教育的两个切入点:创新能力与跨界能力培养——南京大学的思考、探索与实践. 中国大学教学,2016(12):40 ~ 43
- 4 马永斌,柏喆. 大学创新创业教育的实践模式研究与探索. 清华大学教育研究,2015(11):99 ~ 103
- 5 王军. 高校创新创业教育重在精准中突破. 教育与职业,2017(9):67 ~ 70
- 6 陈鸿海,徐材松,朱长久. 合肥工业大学创新创业教育实践与思考. 创新人才教育,2015(12):38 ~ 41
- 7 程正则. 大学物理教学的创新研究:[硕士学位论文]. 武汉:华中师范大学,2005. 27 ~ 28