麦克斯韦妖与信息能

聂本典, 过增元*

清华大学工程力学系, 北京 100084

* 联系人, E-mail: demgzy@tsinghua.edu.cn

2020-07-08 收稿, 2020-09-12 修回, 2020-09-17 接受, 2020-09-18 网络版发表

国家自然科学基金(51621062)资助

摘要 在麦克斯韦妖系统中, 常规能量是守恒的, 所以之前学者只能通过不可逆过程的熵产分析来证明麦克斯韦妖问题并不违反热力学第二定律, 而无法采用能量分析. 鉴于传热过程中热量具有的质量特性, 热质理论提出相对论性质量——热质的概念. 热质在传递过程中具有热质动能, 在热势场中具有热质势能, 这些能量是相对论性能量. 可逆热力学分析表明, 只需输入热质能(相对论性能量)就能把相同数量的热量从低温处转移至高温处, 而不需输入功或热量(常规能量). 在改进的麦克斯韦妖系统中, 利用两个小妖可以实现在筛选阀门两侧分子速度的同时, 满足两侧区域中分子数不变即密度不变的要求, 从而可以在不输入任何功或热量的前提下, 把相同数量的热量从低温区转移至高温区. 由于系统不仅满足常规能量的守恒, 还满足相对论性能量的守恒, 因此输入信息的同时, 也必然伴随着信息熵和信息能的输入. 信息能是另一种相对论性能量. 因此, 通过可逆过程的相对论性能量的守恒分析就可表明麦克斯韦妖问题不违反热力学第二定律.

关键词 麦克斯韦妖, 相对论性能量, 信息能, 热质理论

Maxwell和Pesci^[1]在*Theory of Heat*中提到, 热力学第二定律有局限性, 它只适用于由大量分子组成的宏观系统的分析, 因为我们没有能力感知或处理组成系统的单独分子. 对于图1所示的一个充满气体且温度均匀的容器, 容器中间的一个隔板把它分成A和B两个区域, 隔板上有一个小孔. 设想一个精灵(being)具有特殊功能, 能跟踪每个分子(观察它的速度)并能开关这个小孔, 从而可以让快速分子从A区到达B区, 让慢速分子从B区到达A区. 这样, 不需要消耗功就能升高B区的温度, 降低A区的温度, 这显然与热力学第二定律相矛盾. 这个精灵在1874年被Thomson^[2]称为麦克斯韦妖(Maxwell's demon), 140多年来吸引了不同领域的学者投身其中, 研究并挑战热力学第二定律.

1912年, 波兰物理学家Smoluchowski^[3]认为, 完全自动化的(没有智能的)模型才能够在物理实验中实现.

他希望没有智慧精灵的参与, 也能够利用分子运动的涨落使一个体系的熵减少, 并提出了“单向弹簧门”(trapped door)模型. 这个完全自动化的模型似乎也可以实现麦克斯韦开始设想的效果——把速度快和速度慢的分子分开, 但是布朗运动既为麦克斯韦妖提供了机会, 通过开合阀门使一个体系的熵减少, 也对其操作产生了限制. 这样, 闸门的无规开与关不会导致热力学第二定律失效^[4,5].

图2所示为1929年匈牙利物理学家Szilard^[6]提出的单分子热机示意图. 容器中的分子通过与热库接触吸收热量对真空等温膨胀, 推动外带重物的挡板(活塞)做功(所做最大功为 $kT\ln 2$). Szilard单分子热机相当于一个永动机, 它可以源源不断地从单一热源吸热对外做功. 不过, 他不认为这个模型是一个永动机, 因为某一过程(如测量过程)引起的熵产足够补偿环境因放热引起的

引用格式: 聂本典, 过增元. 麦克斯韦妖与信息能. 科学通报, 2021, 66: 1083–1090

Nie B D, Guo Z Y. Maxwell's demon and information energy (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1083–1090, doi: 10.1360/TB-2020-0847

图1 (网络版彩色)麦克斯韦妖通过筛选穿过小孔的分子速度,使得处于热平衡状态的两个区域产生温差。(a) 初始时刻,隔板两侧系统处于热平衡状态;(b) 麦克斯韦妖根据分子的速度筛选交换隔板两侧的粒子,使隔板两侧出现温度差

Figure 1 (Color online) Maxwell's demon obtains and chooses the speeds of molecules which pass through the gate, establishing the temperature difference between the two regions that are originally in equilibrium. (a) The system is in equilibrium at the beginning; (b) the demon chooses and exchanges the molecules at both sides, resulting in the temperature difference

熵的减少。因此,他认为即使存在麦克斯韦妖,热力学第二定律也不会被违反。Szilard单分子热机做功的关键在于麦克斯韦妖取得分子位置的信息,并有记忆的功能,从而揭示了信息与熵之间存在的紧密关系。虽然热力学第二定律的开尔文表述与克劳修斯表述等价,但由于麦克斯韦妖问题中与外界无热量和功量交换,因此单分子热机与麦克斯韦妖还是有所不同的。例如,由于单分子热机是对外有热和功可逆交换的等温膨胀过程,一个循环后分子的内能和位置都不变,因此,实际上Szilard单分子热机无法考虑输入信息对容器内分子状态的影响,只能通过产生信息的不可逆过程中的熵

产大于环境的熵减来说明其不违反热力学第二定律。文献[5]则认为,麦克斯韦妖对分子位置的判断需要外界提供1 bit信息,最少需要 $kT\ln 2$ 的能量;利用信息使单分子气体膨胀做功,提供的功也是 $kT\ln 2$,两者正好得失相抵。这样的分析是不妥的。首先,此分析没有考虑系统从热库中吸收热量的过程,所以不符合Szilard单分子热机的原意;其次,只有把麦克斯韦妖看作热源,把由其获得的信息看作热量时,单分子气体才能完成等温膨胀做功过程。开尔文的观点与过程是否可逆无关,也就是说,即使过程可逆,单热源的第二类永动机亦不可能存在。因此,文献[5]的分析相当于可以存在单热源的第二类永动机,违反热力学第二定律。

1951年,著名物理学家Brillouin^[7]研究了获取信息(测量)过程的能量消耗及其过程不可逆导致的熵增,认为获取信息的过程一定会有能量的耗散。因而,即使存在这样的精灵,热力学第二定律也不会被违反。他还认为,熵减过程是信息的作用引起的,故信息应视为熵的负项,即信息是负的熵,因此麦克斯韦妖问题不违背热力学第二定律。1961年,Landauer^[8]分析数据处理过程后得到的结论是,完成几乎所有的信息处理过程,比如“读”、“写”和“复制”数据,原则上都是可逆并可以不消耗任何能量的。但是,另外一些数据操作过程,比如信息擦除过程,是不可逆的过程。他还预言了擦除1 bit信息需耗费的最少能量为 $kT\ln 2$ 。这个能量耗费的下限以及过程不可逆导致的熵增保证了即使存在麦克斯韦妖,

图2 (网络版彩色)Szilard单分子热机模型^[4]。(a) 根据麦克斯韦妖获得的分子位置信息,决定是否插入隔板以及隔板运动方向。(b) 由单分子的等温膨胀过程对隔板做功,将重物拉起

Figure 2 (Color online) Szilard's molecule engine model^[4]. (a) According to the molecule locations obtained by the demon, whether to insert the piston or not and the moving directions of the piston are decided. (b) The work from single molecule isothermal expansion lifts the weight, which is attached to the piston

也不违反热力学第二定律. 更多细节可参考文献[9~11].

本文与以往工作中讨论麦克斯韦妖不违反热力学第二定律的不同之处是: (1) 不是通过分子的涨落或单分子热机, 而是通过热力学的宏观量进行分析; (2) 不再讨论系统的熵产, 而是从能量的角度, 以相对论性能量守恒为基点, 讨论了麦克斯韦妖系统对于热力学第二定律的遵循; (3) 认为系统所需的最低能量不是兰道尔极限给出的能量, 而是以信息为载体输入系统的信息能. 信息能是一种相对论性能量, 符合相对论性能量守恒定律.

1 热质能——一种新的能量

Cao和Guo^[12,13]在重新审视热的本质的基础上, 揭示了热量具有“能、质”二象性: 当热量与其他形式的能量进行转换时, 其表现出能量的特性; 当热量在介质中运动时, 它表现出质量的特性. 热量的质量特性可以在图3所示的一维无内热源稳态导热中展示出来, 即输出的热量总是等于输入的热量, 类似于流体力学中流动过程质量连续的概念. 基于爱因斯坦质能关系式, 可定量地引入新物理量——热质 Q/c^2 (过程量)和 Q_{hv}/c^2 (状态量), 其中 Q 是热量, Q_{hv} 是物体具有的热能, c 是光速. 热质是相对论性质量, 因在传递过程中具有热质速度而具有热质动量和热质动能, 在热势场中具有热质势能, 这些能量都是相对论性能量. 基于上述新物理量, 可应用流体力学原理建立热量(热质)在介质中传递的热质连续方程、热质动量守恒方程和热质能量守恒方程.

2 热力学中熵与能量的对应关系

如图4所示, 对温度为 T 的物体, 输入微热量 δQ 的同时, 也输入了微熵量 $\delta Q/T$. 其实, 此时热量是一种载体. 对于同一载体, 理论上可以有多个乘客, 但并不是所有乘客都有应用价值, 这取决于它是否有物理意义, 微熵量就是有物理意义的乘客. 另一个乘客则是微热质能量 $C T \delta Q/c^2$. 可以看到, 在输入热量的同时, 输入的熵量与输入的热质能量相对应, 它们都是以热量为载体的(如果把过程量熵量 $\delta Q/T$ (或 Q/T)直接与温度 T 相乘, 得到的是热量本身 δQ (或 Q), 它是没有意义的).

热力学第二定律的克劳修斯表述告诉我们, 热量不能自发地从低温转移至高温处而不引起其他变化. 以热泵为例, 需要从外界输入功量, 才能把热量从低温转移至高温处, 此时从低温处输出的热量必然小于输

图3 (网络版彩色)一维无内热源稳态导热过程示意图. 相同数量的热量从高温 T_h 处传入, 从低温 T_l 处传出

Figure 3 (Color online) Schematic diagram for one-dimensional steady heat conduction process without internal heat source. The same amount of heat is carried from high temperature region T_h to the low temperature one T_l

图4 (网络版彩色)输入热量的同时输入了熵量和热质能量

Figure 4 (Color online) Entropy and thermomass energy are input into the system with heat transfer

入高温处的热量. 我们设想通过某个可逆的自动化能量转换系统, 把相同数量的热量 Q 从低温 T_l 转移至高温 T_h 处, 如图5所示. 从常规能量角度(热力学第一定律)分析, 当然不需要功输入. 从熵角度分析, 从低温处输出的熵量 Q/T_l 总是大于输入高温处的熵量 Q/T_h , 所以相当于需从外部输入负的熵量 $(Q/T_h - Q/T_l) < 0$. 然而, 从热质能量(相对论性能量)角度分析, 当热源的热容相同时, 从低温处输出的热质能量 $Q T_l C/c^2$ 总是小于输入高温处的热质能量 $Q T_h C/c^2$ (其中 C 是热容), 这样, 相当于从外部输入了正的热质能量 $(Q T_h C/c^2 - Q T_l C/c^2) > 0$. 因此, 再次证实了输入的负熵量所对应的就是输入的正热质能量(相对论性能量), 而不是文献[11]认为的与熵对应的能量是熵与热力学温度的乘积.

不需要外功输入, 将相同数量的热量从低温热源转移到高温热源的过程可以通过联合循环来实现^[14,15]. 图6(a)给出了一个可逆的热机-热泵循环示意图. 简单起见, 设热机循环为卡诺循环, 热泵循环为逆卡诺循环. 图中热量以实线箭头表示, 功量以虚线箭头表示.

图5 通过可逆的自动化装置将相同数量的热量从低温热源转移到高温热源. 其中M代表自动化装置

Figure 5 Reversible automatic machine carries the same amount of heat from low-temperature heat source to high-temperature heat source. M represents the automatic machine

图中分析都是基于熵概念, 即热熵和功熵. 图6(b)是以热质能量表示的可逆的热机-热泵循环示意图. 从恒温热源输入或输出的热质能量(相对论性能量)为

$$E_h = \frac{QCT}{c^2}. \quad (1)$$

一个循环中, 输入工质或从工质输出的功热质能量(相对论性能量)为

$$E_w = \frac{1}{c^2} \int CT\delta W. \quad (2)$$

(文献[14]称 $T\delta Q$ 和 $T\delta W$ 为微热熵量和微功熵量, 熵与热质能存在正相关的一一对应关系). 热质能量和功热质能量分别用实线和虚线箭头表示. 虚线框则表示由无穷多个具有不同压力的功源组成的蓄功器, 通过它能够完成功量的可逆传递. 这一蓄功器可通过具有两端可动活塞的气缸实现. 需要注意的是, 可逆的热机-热泵联合循环与实际热力机械通过同一根轴连接热机和热泵不同, 因为后者在将体积(膨胀)功转换为轴功时引入了时间变量, 不再是可逆的循环了.

热机-热泵联合循环工作时, 热机循环中输出和输入的微功量可逆地与一系列具有不同压力的蓄功器进

行功量的交换, 同时伴随有功热质能量的交换. 然后, 由另外一系列具有不同压力的功源与热泵循环中的工质进行功量和功热质能量的交换. 随着循环的进行, 热机循环不断从高温热源 T_1 吸取热量, 做出净功并输入至蓄功器中, 同时向低温热源 T_2 排出一部分热量. 从蓄功器输出等量的净功, 驱动热泵循环, 使热泵中的工质从低温热源 T_3 吸热, 并输入至高温热源 T_4 . 联合循环整体与环境没有净功量交换, 但有功热质能量交换, 它与热质能量满足相对论性能量的守恒关系. 因为所有过程是可逆的, 所以相对论性能量没有耗散. 此时, 联合循环的总效果如图7所示. 通过联合循环, 不需要从外部输入常规能量, 就可以把7 kJ的热量从350 K处可逆地搬运至用户端450 K处, 但需要付出的代价是来自热源3 kJ的热量从500 K下降至300 K以及2 kJ热量从500 K下降至450 K.

上述热机-热泵联合循环相当于一个温度变换器(类似于电压变换器), 具有如下特点: (1) 无需输入功或热量(常规能量), 在可逆输入与输出系统的相对性能量相等条件下, 通过联合循环可以实现热量数量和热量品位(温度)的相互转换; (2) 无常规能量输入条件下, 热量的数量和品位间的相互转换必须借助膨胀功(机械功)作为中介, 且转换过程满足相对论性能量的守恒定律; (3) 进一步证明了输入的负熵量所对应的就是输入的热质能量(相对论性能量), 系统的熵所对应是系统的热质能, 而不是文献[11]认为的熵与热力学温度的乘积.

3 麦克斯韦妖与信息能

前文已介绍麦克斯韦妖问题, 它是一种假想的自动化分子机器. 一个处于热平衡的气体系统容器中间有一块带阀门的绝热隔板, 将容器分为A和B两个区域. 阀门由一个精灵把守, 它能够挑选不同速度的分子通

图6 (网络版彩色)可逆热机-热泵循环示意图(a)和热质能循环示意图(b)

Figure 6 (Color online) Schematic diagram for reversible heat engine-heat pump cycle (a) and schematic diagram for thermomass energy cycle (b)

图 7 (网络版彩色)联合循环过程中的能量转移示意图
Figure 7 (Color online) Schematic diagram for the energy transfer in the combined cycle

过阀门,从而在不外界对该系统做功的前提下,实现热量从低温区域向高温区域的转移。

考虑如图8所示的改进的麦克斯韦妖系统。容器中存在一块带有两个阀门的隔板,它把充满空气的容器分为两个体积为 1 m^3 的空间,空气的初始状态为温度 273 K 和压力 1 bar 。系统中有两个麦克斯韦妖 α 和 β ,它们能精确观测分子的速度值和数目。其中,麦克斯韦妖 α 专门负责速度为 500 m/s 的分子从A区通过阀门a进入B区,而麦克斯韦妖 β 则专门负责速度为 100 m/s 的分子从B区通过阀门b进入A区。我们设定分子只能一个一个地通过阀门,以保证过程是可逆的,且两个区内的气体分别处于平衡状态;设定有一个分子通过阀门a从A区进入B区的同时,必然有一个分子通过阀门b从B区进入到A区,以此来保证两个区内的气体都是定质量系统,其密度和热容保持不变。此改进的麦克斯韦妖系统在物理本质上与原有麦克斯韦妖系统没有什么不同,所增加的一个阀门和一个麦克斯韦妖是为了让它们各自控制粒子单向穿过阀门,以便于下文热力学参量的定性和定量计算与分析。

先进行定性分析。由于从A区通过阀门a进入B区分子的动能大于从B区通过阀门b进入A区分子的动能,因此净热量从A区转移至B区,导致B区的温度高于A区。这样,在麦克斯韦妖的作用下,热量可以不断地从低温A区转移至高温B区,因而从低温A区输出的熵流必然大于输入B区的熵流,导致气体系统的熵减少了。由于系统(含麦克斯韦妖和气体)中的可逆过程不会引起熵值的变化,与外界又无热量交换,因此是麦克斯韦妖提供的信息导致了系统的熵减。由此得出结论,信息携带的必然是一种负熵。由于从低温A区输出的热量等于输入B区的热量,满足热力学第一定律。然而,热量转移的同时还存在着热质能量的转移,从低温A区输出的

图 8 (网络版彩色)改进的麦克斯韦妖系统。(a) 两个麦克斯韦妖分别负责从左到右和从右到左的分子通行,并且严格把控两侧分子数目相同。初始时刻系统处于热平衡。(b) 经过两个麦克斯韦妖的筛选,左右两侧都是定质量系统并且出现了温差

Figure 8 (Color online) Schematic diagram for the revised Maxwell's demon system. (a) Two demons choose the molecules in the opposite directions and make sure that the total molecule numbers at both sides are the same. At the beginning, the system is in equilibrium. (b) After the demons' operations, the two systems at left and right sides both keep constant density. Meanwhile, temperature difference arises between them

热质能量必然大于输入B区的热质能量,因而气体系统(不含麦克斯韦妖)中的热质能增加了。由于相对论性能量也需要满足守恒定律,故这部分相对论性能量是以信息为载体进入系统的。因此,麦克斯韦妖在提供信息的同时,不仅提供了负熵量,还提供了相对论性能量,这种以信息为载体携带的相对论性能量被称为信息能。

为了对上述改进的麦克斯韦妖系统进行定量分析,考虑如下问题。在标准状况下,体积为 1 m^3 的A、B两个区域内各有分子 2.69×10^{25} 个,假设单个空气分子的摩尔质量为 29 g/mol ,从A区通过阀门a进入B区分子的速度为 $v_1=500\text{ m/s}$,从B区通过阀门b进入A区分子的速度为 $v_2=100\text{ m/s}$,两个区域每交换一对分子产生的能量差值为

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_{\text{gas}} v_1^2 - \frac{1}{2} m_{\text{gas}} v_2^2 = 5.82 \times 10^{-21} \text{ J}. \quad (3)$$

当两个区域交换了 10^{24} 对分子后将阀门关闭,此时从A区输出了 5.82 kJ 净热量。假设空气的比热容为常值 $C=1\text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$,其温度变化为

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{mC} = 4.5 \text{ K}, \quad (4)$$

温度由 $T_{10}=273\text{ K}$ 降至 $T_{11}=268.5\text{ K}$,压力降至 0.98 bar ,伴随着热量输出,还输出了熵量,A区的熵和热质能分别减少

$$\Delta S = mC \ln(T_{10}) - mC \ln(T_{11}) = 214 \text{ J/K}, \quad (5)$$

$$\Delta G = \frac{mC^2 T_{10}^2}{c^2} - \frac{mC^2 T_{11}^2}{c^2} = 3.50 \times 10^{-8} \text{ J}. \quad (6)$$

此时, 5.82 kJ 净热量输入到了B区,温度由 $T_{20}=273\text{ K}$ 升

至 $T_{21}=277.5\text{ K}$, 压力升至 1.016 bar , 伴随着热量输入, 还输入了熵量, B区的熵和热质能分别增加

$$\Delta S = mC \ln(T_{21}) - mC \ln(T_{20}) = 211\text{ J/K}, \quad (7)$$

$$\Delta G = \frac{mC^2 T_{21}^2}{c^2} - \frac{mC^2 T_{20}^2}{c^2} = 3.55 \times 10^{-8}\text{ J}. \quad (8)$$

对于整个系统(含麦克斯韦妖和气体), 系统的熵减是 3 J/K , 热质能增加了 $5 \times 10^{-10}\text{ J}$. 可以看到, A、B两区间并无功交换, 与熵量交换相对应的不是常规能量(即熵与温度 T 相乘), 而是相对论性能量, 即热质能量(熵与 CT^2/c^2 相乘)的交换. 伴随着热量从低温区向高温区的转移, 系统熵值的减少与热质能的增加相对应.

虽然本文尚无计算此时麦克斯韦妖所提供的信息和信息熵的具体数值, 但是由于相对论性能量必须守恒, 输入信息的同时, 也输入了信息熵和信息能, 如图9所示.

整个系统(含麦克斯韦妖和气体)的常规能量保持不变, 但是由于在气体系统中输入了信息熵(负熵)和信息能, 因此气体系统的熵减小、热质能增加. 信息能对应的不是常规能量, 而是相对论性能量. 与此同时, 研究表明, 麦克斯韦妖问题不仅满足常规能量的守恒, 还满足相对论性能量的守恒, 所以通过可逆的相对论性能量的守恒分析就可表明麦克斯韦妖不违反热力学第二定律.

4 结论

在热量传递过程中引入了新的物理量——热质, 它是相对论性质量. 热质在传递过程中具有热质动能, 在热势场中具有热质势能, 这些能量都是相对论性能量, 统称为热质能. 热质能远小于常规形式的能量, 并且在不可逆传热过程中会发生耗散. 作为一种新的能量形式, 热质能(相对论性能量)构建起了传热学与动力

图9 (网络版彩色)在输入信息的同时, 也输入了信息熵(负熵)与信息能

Figure 9 (Color online) Information entropy and information energy are input into the system carried by information

学分析之间的桥梁.

可逆热力学分析表明, 在热量传递过程中, 熵量和热质能量(相对论性能量)都是以热量为载体的乘客, 熵量与相对论性能量对应, 而不是如现有文献中认为的那样(熵量与常规能量相对应). 因此, 通过可逆的联合循环(相当于热变温器), 可以把相同数量的热量从低温处转移至高温处, 只需要输入负熵量或热质能量(相对论性能量), 而不需要输入常规能量. 我们从相对论性能量守恒的角度出发, 分析了一个改进的麦克斯韦妖系统. 结果表明, 两个麦克斯韦妖提供的信息可以把相同数量的热量从低温处转移至高温处, 而不需要从外界输入功量. 此时, 系统的熵减少, 而热质能增加. 这是因为, 输入信息的同时, 也输入了信息熵(负熵)和信息能(相对论性能量). 在麦克斯韦妖系统中, 在可逆条件下实现了信息能与热质能的相对论性能量守恒.

本文没有研究麦克斯韦妖问题中的微观状态分布涨落, 而是进行了热力学宏观量分析; 没有从惯常的熵产分析着眼, 而是从能量角度讨论了可逆的相对论性能量守恒关系, 阐明了信息本身输入的同时, 也输入了相对论性能量——信息能, 所以在热量从低温处传递到高温处的过程中, 引入了信息能而并非未引起其他变换, 从而证明了麦克斯韦妖问题不违反热力学第二定律.

参考文献

- 1 Maxwell J C, Pesic P. Theory of Heat. New York: Dover Publications, 2001
- 2 Thomson W. The kinetic theory of the dissipation of energy. Nature, 1874, 9: 441–444
- 3 Smoluchowski M V. Experimental proof of regular thermodynamic conflicting molecular phenomenons. Phys Zeits, 1912, 13: 1069–1080
- 4 Sun C P, Quan H T. Maxwell's demon and the physical limits on information processing (in Chinese). Physics, 2013, 42: 756–768 [孙昌璞, 全海涛. 麦克斯韦妖与信息处理的物理极限. 物理, 2013, 42: 756–768]
- 5 Feng D, Feng S T. The World of Entropy (in Chinese). Beijing: Science Press, 2005 [冯端, 冯少彤. 溯源探幽: 熵的世界. 北京: 科学出版社, 2005]
- 6 Szilard L. On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings. Syst Res, 1964, 9: 301–310
- 7 Brillouin L. Science and Information Theory. New York: Academic Press, 1956
- 8 Landauer R. Irreversibility and heat generation in the computing process. IBM J Res Dev, 1961, 5: 183–191

- 9 Leff H S, Rex A F. Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing. Bristol: CRC Press, 2003
- 10 Parrondo J M R, Horowitz J M, Sagawa T. Thermodynamics of information. *Nat Phys*, 2015, 11: 131–139
- 11 Rex A. Maxwell's demon—A historical review. *Entropy*, 2017, 19: 240
- 12 Cao B Y, Guo Z Y. Equation of motion of a phonon gas and non-Fourier heat conduction. *J Appl Phys*, 2007, 102: 053503
- 13 Guo Z Y. Energy-mass duality of heat and its applications. *ES Energy Environ*, 2018, 1: 4–15
- 14 Zhao T. Energy and relativity theory in thermodynamics and its application (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2019
[赵甜. 热力学中的能量法与对称性及其应用. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2019]
- 15 Guo Z Y, Zhao T, Xue T W. Entransy analysis of reversible thermodynamic cycles based on the conservation of entransy equation and its application (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 1200–1210 [过增元, 赵甜, 薛提微. 基于熵守恒方程的可逆热力循环熵分析及其应用. 科学通报, 2019, 64: 1200–1210]

Summary for “麦克斯韦妖与信息能”

Maxwell's demon and information energy

Ben-Dian Nie & Zeng-Yuan Guo^{*}*Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*^{*} Corresponding author, E-mail: demgzy@tsinghua.edu.cn

Maxwell's demon challenged the second law of thermodynamics, thereby attracting much research attention for over a century. As this system does not exchange energy with circumstances, the energy is conserved. Consequently, it is useless to analyze this problem from an energy viewpoint. Therefore, numerous studies have been conducted to analyze the entropy change in this process. Further, a conclusion was reached that the irreversibility process of obtaining information necessarily induces the entropy production, so the whole system still satisfies the entropy increase principle in an isolated system. This study demonstrates that Maxwell's demon still follows the second law of thermodynamics from an energy conservation viewpoint in a macroscopic reversible process. Thermomass theory recognizes the mass nature of heat in the transfer process and proposes a new quantity called thermomass, which is the extra mass due to thermal vibration. Additionally, thermomass energy is a kind of relativistic energy that is carried by thermomass, and it is far smaller than that carried by the rest of the mass. To move the same amount of heat from a lower to a higher temperature region, the reversible thermodynamics analyses show that what is supposed to be input into the system can be thermomass energy and not necessarily external work or heat (conventional energy). Moreover, the negative entropy carried by heat corresponds to the positive thermomass energy and not the product of entropy and temperature. Inspired and motivated by these results, this study reconsiders the revised Maxwell's demon system following the viewpoint of thermomass energy and relativistic energy and explains their influences on the system from the introduction of information. There are two Maxwell's demons and two gates, and the chosen molecules can pass the gates one by one. Furthermore, when there is a molecule passing through gate 1 from left to right, another molecule concurrently passes through gate 2 from right to left with a different speed. Thus, the numbers of molecules at both sides remain unchanged. Thus, these two parts have constant density and heat capacity, thereby making quantitative and qualitative analyses easier. Moreover, the whole system is in equilibrium state at the beginning. Then, Maxwell's demons exchange the thermal energy and temperature difference arises between these two sides. The entropy in the gas system decreases, whereas the thermomass energy increases. No work or heat is input into this system, while the same amount of heat is carried from the low-temperature region to the high-temperature one. If the exchange process is slow enough, this process can be considered as a reversible one. Thus, the entropy and thermomass energy are supposed to be conserved, implying that the information obtained by the demons during the operation concurrently carries the negative entropy and positive thermomass energy. Furthermore, the energy carried by the information is called information energy, which is also a kind of relativistic energy. Therefore, it is the information energy that has been reversibly input into the system to promote heat transfer and not the external work or heat. In this way, the reversible energy conservation analyses demonstrate that Maxwell's demon problem still follows the second law of thermodynamics. Moreover, this process reveals that the negative entropy carried by the information corresponds to the positive thermomass energy and not the product of entropy and temperature.

Maxwell's demon, relativistic energy, information theory, thermomass theorydoi: [10.1360/TB-2020-0847](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0847)