

# “麦克斯韦妖”机

(中国科学院物理研究所 厚美瑛 编译自 Zhiyue Lu *et al. Physics Today*, 2014, (8): 60)

一公升普通空气的重量不会超过一美分硬币重量的一半，却含有足够将一个7 kg保龄球抛离地面超过3 m的热能。如果能设计出一个装置，将这些乱撞气体分子的热能转换成做定向运动的有用功，将会是非常有益的。虽然热力学第二定律告诉我们，不可能有任何一种装置能将单一热源的热能只转换为有用的功，但这并没能阻止近150年来人们对将热噪声从随机整流为定向运动可能性的遐思。

这种遐思可追溯到1867年麦克斯韦的假想妖，现今被称为“麦克斯韦妖”。麦克斯韦妖坐在一个分隔两半的容器中间，它能识别并阻挡快分子从右半到左半，慢分子从左半到右半，最终使快速分子积累在右室，慢速分子积累在左室。用麦克斯韦的话来说，“没有外界做功，只靠妖的观察和分类，热边可变得更热，冷边变得更冷。”如此就可能无视热力学第二定律，由这个“妖”建立起的热边与冷边的温差来驱动一

个热机，将热能转换成有用的功。

从1960年代早期的兰道尔，到后来的彭罗斯和班尼特，在对麦克斯韦妖的理解中，出现了以信息为关键因素的概念。一个调整热噪声的实体“妖”必须具备测量和收集信息的能力，将测量的信息保存在一个如磁带的记忆寄存器中。磁带包含一系列间隔相等的比特数列(双态系统)，初始全处于“0”状态。当通过装置时，与装置的相互作用改变其比特状态，从而将信息写入到输出的比特流中。在由0组成的序列转换到由0和1的混合序列过程中，信息熵的增加补偿了由热转换为功所减少的熵。因此，一个空白的记忆寄存器可看作是一个热源：其吸收信息的能力可用来和有用能量做交易。

我们设计了一个能系统地从单一热源提取能量，将信息写入记忆寄存器，并输出提升质量所需机械能的信息发动机。

我们的“妖”由图1中围绕中心轴做无摩擦转动蓝色环上对着中心轴的小刀片构成。连接在中心垂直杆上的绿色叶片一个接一个地通过蓝色环上刀片的平面无摩擦向下移动。每个叶片相对于杆能自由旋转。杆配有平衡配重，使得装置不需借助外力就可维持这种垂直移动。整个装置充满温度恒定的理想气体粒子。每一次刀片或叶

片与气体粒子的碰撞将导致刀片或叶片的转动与粒子平动间的能量交换。

图1中有两条红色的竖杆，拦住绿色叶片的旋转运动。刀片和叶片与红色挡杆的夹角分别为 $\theta_0$ 和 $\theta_b$ 。当 $0 \leq \theta_b < \pi$ 时，比特位取为0；当 $\pi \leq \theta_b < 2\pi$ ，比特位取1。两条红色档杆分别位于 $\theta=0$ 和 $\theta=\pi$ 处，使叶片维持原有状态。只当叶片到达刀片高度时，可通过 $\theta=\pi$ 的挡杆狭缝，改变它的比特位。

通过设计，我们让输入的比特位处于0状态，这样刀片最终将处于逆时针旋转，这是因为如果叶片到达狭缝时 $\theta_b < \theta_0$ ，顺时针旋转的刀片的运动最终将在叶片和 $\theta=0$ 的挡杆共同作用下被阻止；但逆时针旋转的刀片则不会受阻。如果叶片到达狭缝时 $\theta_b > \theta_0$ ，则是逆时针旋转时刀片被阻止。但是由于构建时 $\theta_b$ 处于0和 $\pi$ 之间的零比特态， $\theta_b$ 则可能是0和 $2\pi$ 之间的任意值，因此 $\theta_b < \theta_0$ 比 $\theta_b > \theta_0$ 的情况几率更高，最终使得刀片处于逆时针旋转。

上述论点已经得到解析计算和数值模拟的验证，但我们主要的目的还在于，创建一个简单而透明的模型来说明如何操作这样一个信息引擎。这个设计还可以反向运作。如果输入比特数列由等量混合的0和1组成，那么重力会使质量下落而不是被提升，“妖”由逆时针旋转改为顺时针旋转；我们的装置将擦除信息，利用下落质量的能量来产生输出比特流。该操作模式阐明了兰道尔原则，即信息擦除不可避免带有热力学成本。

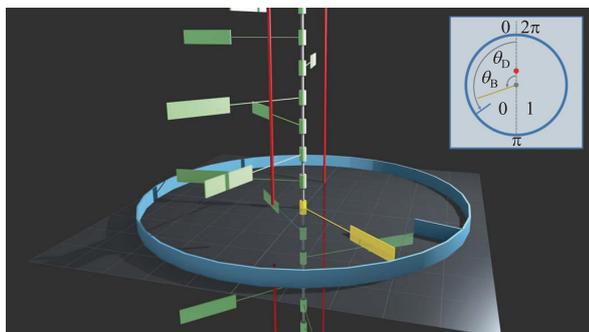


图1 “麦克斯韦妖”机：带有一个刀片的蓝色环做为装置的“妖”。绿色和黄色叶片通过“妖”时给出比特流，图中黄色叶片正要与“妖”作用。两条红色的竖杆拦住比特叶片的运动。其中一支在刀片的高度有一个狭缝(虚线部分)。插图定义刀片和比特叶片与红色挡杆的夹角