

信息处理的物理极限与量子热力学

Fundamental issues of quantum manipulation inspired by quantum information

根据Landauer和Bennett等人的研究^[1, 2]，信息处理本质上是一个物理过程。Landauer原理指出^[2]，擦出一个比特信息就要消耗能量 $kT\ln 2$ 。它预言了计算过程物理极限的存在。

Landauer 建立信息擦除原理的关键是引入逻辑不可逆(logical irreversibility)的概念。从计算的角度讲，任何普适的计算都必须包括初始化步骤。初始化擦除计算机已存的信息，使得计算机从任意一个可以达到的态 A 回到参考初态 R。由于计算机的每个逻辑状态必须对应于一个物理态，逻辑不可逆在物理上表现为自由度约化的耗散效应，是一种典型的不可逆过程。这就意味着，计算必然要消耗一定的能量，并以热量的形式散发掉。计算的速度越快，产生的热量就越多。当计算机芯片单位面积上集成的元件数目越多，发热的功率就越大。这种不可逆计算的耗热机制大大限制了计算机芯片的尺度，给出其物理极限，从而导致摩尔经验定律的终结。图 1 代表了摩尔定律描绘的计算机发展历史概观图像：计算机 CPU(中心处理器)的运行速度每十八个月就会增加一倍。

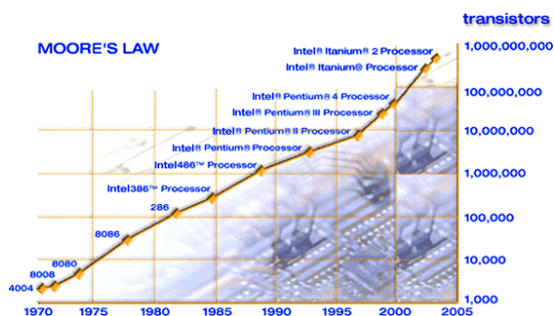


图 1 摩尔经验定律：单位面积集成的晶体管的数目的增长：
纵轴是 CPU 单位面积集成的晶体管的数目，横轴的年代代表了
CPU 运算速度的增长

事实上，在计算机发展的过程中，有各种各样“那么不基本”的物理条件制约计算技术本身。这些制约是从物理技术的层面考虑问题的，而Landauer和Bennett的工作主要强调了计算原理上的物理限制。Bennett进一步证明^[1]：对计算系统进行测量的“麦克斯韦妖”，自身首先必须制备在一个“标准态”上，而测量过程伴随着它的熵转移到环境中去，而环境的熵增加正好补偿这种熵减少。因而，当把“麦克斯韦妖”和系统放在一起，进行整体的考虑，普适计算的循环过程可视之为一个热力学可逆循环。因此，在研究计算过程对应的热力学循环，是普适计算研究的必然要求。

需要指出的是，以上讨论是针对经典系统进行的。由于普适的计算过程可以描述为一个热力学循环过程，因此经典热机理论与经典计算密切相关。而今，量子计算已经成为蓬勃发展的前沿科学领域，促使人们去认真考虑与量子信息相联系的量子热力学循环和量子热机问题^[3]。简单的量子热机模型如图2所示。其循环介质是一个分立的多能级系统，它与一个足够大的热库接触，可以在较短的时间内达到与环境温度相一致的热平衡态。研究表明，通过图2代表的热力学循环，单个量子热机的工作效率与温度无关。虽然它不同于经典热机卡诺循环的效率，但大量粒子的这样微观热力学循环过程总和，可以给出理想的卡诺循环。这个结论可以推广到一般情形。因此，想通过量子系统作为循环介质超越理想经典热机是不可能的。

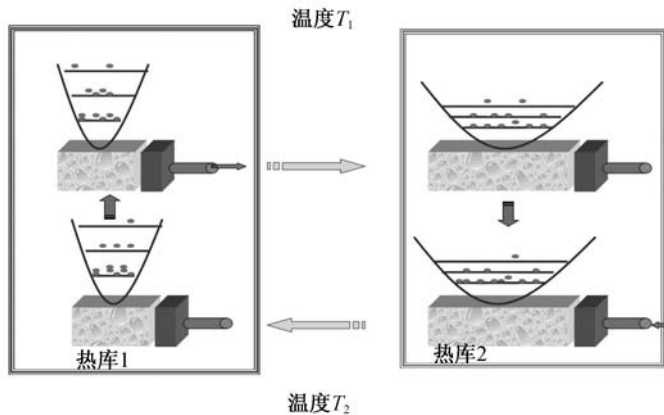


图2 多能级量子热机模型及其热力学循环过程

一个对经典热机效率偏离的可能性是考虑非平衡态情况，即让环境偏离热平衡

态，这样的“热库”事先具有量子相干性，不是处在一个最大混合态上，但必须假设它是对一个温度为 T 的热平衡态的微小偏离，否则温度的概念不能使用。当这样的“量子相干热库”与量子热机介质接触足够长时间后，也会使得热机介质达到一个稳态。这个稳态有一个高于环境的温度的有效温度，描述了热源的量子相干性的效应。基于上述设想，Scully及其合作者设计了一种光子气体热机^[4]。表面上显示了似乎违反了热力学第二定律的结果：热机效率有可能大于卡诺循环的效率。

然而，本质并非如此。其原因有三：① 热库处在非平衡态，原则上没有温度的概念，而且热库本身不是一个闭系统，必须有外界提供能量，以产生量子相干性，Scully 本人也明确地强调了这一点；② 对于一个完整的循环，还应该考虑对原子末态的擦除，而擦除原子末态要消耗能量并未计及在上述效率公式中；③ 在上述的热机模型中假定两基态波函数的相对相角，这本身相当于有一个麦克斯韦妖参与了循环(它的作用是选择两基态波函数的具有相对相角的原子)。但是在给出上述热机效率时也没有计及对这个麦克斯韦妖的记忆体的信息擦除时的能量消耗。

因此，研究量子热机的另外一个目的，是去考察对真正的微观世界麦克斯韦妖的作用如何，热力学第二定律是否仍然成立？现在的问题是，如果在量子领域有麦克斯韦妖的存在，是否会本质上改善量子热机的效率？回答这些问题，我们必须更系统地开展量子热力学的研究^[5]。随其深入，会涉及量子态相干操控更基本的物理问题：能量与信息的关系如何？可否通过信息的提取，改进各种人工系统对外做功的能力？人类对量子态系统测量和操纵的精度原理上是否存在深层次的物理极限？

最后我还需要提及量子热力学研究的另一个重要方面，它与相对论和量子非定域性矛盾有关。大家知道，量子的纠缠观念对时空结构的认识赋予了崭新的内容。弯曲时空背景上，黑洞物质场会表现出十分奇异的量子特性。由于时空奇异性和视界的存在，真空有可能具有内禀的量子纠缠特征，产生霍金辐射等重要物理现象。这些是量子热力学研究的更基本的问题。

参 考 文 献

- [1] Leff H S, Rex A F. Maxwell's demon 2: entropy, classical and quantum information. Computing (Bristol, Institute of Physics, 2003); Plenio M B, Vitelli V. Contemp. Phys, 2001, 42: 25.
- [2] Landauer R, IBM J. Res. Dev. 1961, 5: 183; Bennett C H. Sci. Am. 1987, 257: 108.

- [3] Quan H T, Zhang P, Sun C P. Phys. Rev. E, 2007, 76: 031105.
- [4] Scully M O, Zubairy M S, Agarwal G S, et al. Science, 2003, 299: 862.
- [5] Quan H T, Wang Y D, Liu Yu-xi, et al. Franco Nori, Phys. Rev. Lett. 2006, 97: 180402.

撰稿人：孙昌璞

中国科学院理论物理研究所 北京 100080