

Landauer 准则挺过了量子测试

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 Massimiliano Esposito. *Physics*, May 21, 2018)

在一个完全的量子系统中，一个基本极限已经被确认：当一个信息比特被擦除，所产生热量之极限。

擦除信息总是产生热量，即使只擦除一比特的信息。上述对计算机科学和信息技术有影响的预期，可以追溯到 1961 年。那一年 Rolf Landauer 预测，擦除一个经典比特所需的最小热量是 $k_B T \ln 2$ (k_B 是 Boltzmann 常数， T 是比特与之交换热量的热沉的温度)。几年前，Landauer 的经典极限被确认，使用被捕获的微米大小的胶体粒子编码比特。但是在量子计算机时代，人们可能会犹豫：是否会有一条路，绕过 Landauer 准则；毕竟，量子比特和经典比特是根本不同的。根据新的实验，答案是否定的。中国科学院武汉物理与数学研究所冯芒领

导的小组报道了他们的首次实验，即在完全的量子系统中 Landauer 准则挺过了实验验证，其中比特和热沉已经将能量量子化。

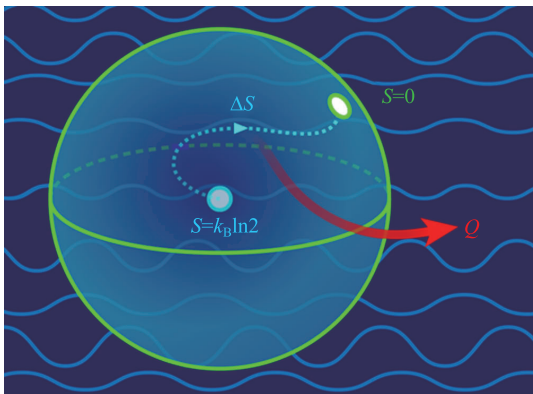
Landauer 的新方法，使用信息理论中的香农熵(Shannon 熵)概念，描述一个经典比特，而香农熵表征信息含量。考虑一个信息比特，它可以是 1 或 0。如果你知道该比特总是 1，那么读取一个 1，不会产生任何信息，因为您已经预料到了这个结果。然而，如果该比特可能是 1 或 0，则你不知道从读数中期望得到什么，所以任何读取都会惊讶。换句话说，如果测量一个比特产生最大的惊讶，那么它的信息就是最大的。对于“最大惊讶”比特，香农熵等于 $k_B \ln 2$ ；对于“无惊讶”比特，它等于 0。

香农熵与物理学之间的联系最初并不清楚。但是由于随机热力学的进步，Landauer 准则现在被理解为热力学第二定律的直接结果。该定律规定熵产出 Σ 永远不会减少。对于与热沉换热的系统， $\Sigma = \Delta S + Q/T$ ，其中 ΔS 是系统在某一过程中熵的变化(末态减初态)， Q 是最终释放的热量。在一个经典比特上擦除信息，对应于香农熵从其最大值($k_B \ln 2$)变为最小值(0)，或者说，

熵变为 $-k_B \ln 2$ 。将其插入第二定律($\Sigma = \Delta S + Q/T \geq 0$)，我们可以预言：释放的热 $Q \geq k_B T \ln 2$ ，正如 Landauer 所预测的。

与经典比特相比，量子比特是一个真正的两能级系统，它可以是一种态的叠加。替代经典的概率分布，量子比特用密度矩阵 ρ 描述；于是，熵变成 von Neumann 熵 [$S = -k_B \text{Tr}(\rho \ln \rho)$ ，其中 Tr 代表取矩阵($\rho \ln \rho$)的迹]。通过这些变化，我们可以导出第二定律的量子版本，进而导出 Landauer 准则的量子版本。这一准则的量子版本与经典理论作了相同的预测：擦除至少释放出 $-T\Delta S$ 的热。对于最大熵量子比特完全被擦除的情况，这个热量是 $k_B T \ln 2$ 。熵的产生也可以表示为热沉偏离平衡，以及系统与热沉之间的关联。

Landauer 准则背后的普遍思想在于，信息热力学在根本上吸引人们的兴趣。同时，它们也有实用价值。例如，可以被用于生物学，评估细胞处理信息的能量成本，因为在化学上它敏感于周围环境，敏感于 DNA 复制，或者细胞结构的检测和修复。同样的想法也允许我们在任何计算中，在能量、速度和准确性之间做出权衡。这一能力是正在发展的绿色计算领域的一个优先课题，该领域旨在缓解信息技术的能源消耗。最终，Landauer 边界可能会完成计算，就像卡诺边界针对热机所作出的：这是一个基本极限，为信息技术实际应用设定一个目标。



冯芒和他的同事使用一个原子比特进行了量子 Landauer 准则的测试，原子比特的状态可以用所谓的 Bloch 球(绿线)上的一点来表示。在实验开始时，原子以相等的几率进入到两个内态中的一个态，它相当于 Bloch 球的中心，并且具有最大熵 $k_B \ln 2$ 。然后，研究人员通过将原子比特与原子的振动运动(作为热沉——蓝色区域)耦合，部分地擦除该比特。为简单起见，这里所示的擦除是完整的：原子量子比特终止于纯量子态(Bloch 球表面上的一个点)，在此它的熵为零