



海量数据处理正成为电能“吞金兽”，科学家重新思考计算机的完美能效

# 流量时代，如何拦截不堪重负的“能源账单”

宇辰/编译

当今世界已被淹没在数据的海洋中。1984年，互联网刚起步时，全球流量每月只有15G。2014年，这个数字成了每位用户的平均月流量。2019年，这些流量可能只够一个人用上七八天。

即便如此，“流量闸门”丝毫没有关闭的迹象，数据洪流还在以不可阻挡之势奔涌而来。随着数以亿计的新用户上线，以及“万物互联”的到来，预计到2025年，世界上的数据流量将比迄今人类所使用的流量总和多出三四倍。

处理这些海量数据需要庞大的基础设施。这些设施包括智能手机、个人电脑，以及遍布全球的能源消耗大户——数百万个数据中心。它们总共占用了全球电力的6%。预计到2030年，这一数字还将翻番。庞大的能源需求引发了我们对数字设备可持续性发展的担忧。

几十年来，为了满足不断上升的数据流量需求，一些数字化硬件设备变得更小、更快、更节能。但严峻的现实是，数字技术所依赖的硅芯片已开始触及物理极限，这有可能让我们在无力支付的能源账单面前一筹莫展。

## 反思芯片能效

## 浪费的电能到哪儿去了

计算机工作时会产生热量，这是不可避免的。用过手提电脑的人都知道，膝盖可以明显感受到计算机所散发出的热量。而这是由计算机的工作原理所决定的。

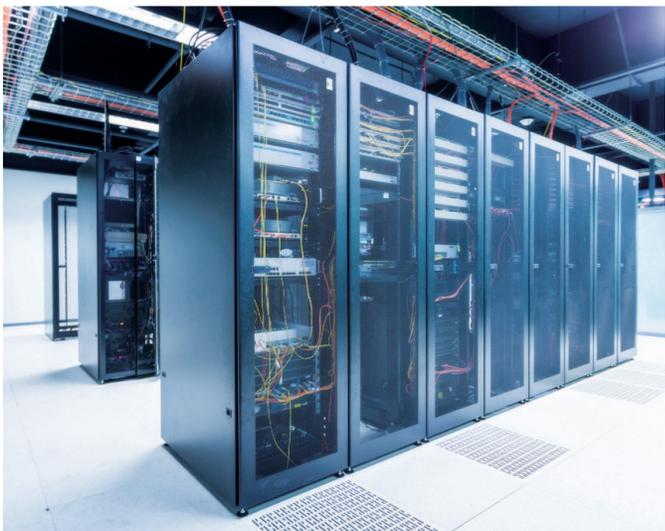
从广义上来说，计算机也是一种机器。计算机以字节的形式储存和处理信息，数据信息的最基本单位是0或1。信息处理过程中，电流因在计算机芯片里受到阻碍，产生能量的消耗，并以热量的形式表现出来。现代计算机芯片有数十亿个晶体管协同工作，故而产生的热量相当可观。

1961年，IBM公司的物理学家罗尔夫·兰道尔曾经计算过一台“完美计算机”的理论效率，这台计算机在对抗阻力方面没有损耗能量。但他知道，即使是这样一台设备，仍然会浪费一些能量，因为和所有其他机器一样，计算机要不断与宇宙中最强大的规则之一——热力学第二定律相对抗。这条定律表明，在任何封闭系统中，无序状态（一种被称为熵的量）总在增加。关于这一点，任何人在整理被孩子弄得一团糟的房间时都深有体会，恢复秩序是需要耗费一定力气的。

兰道尔认为，熵的减少只能靠能量来“购买”。根据他的计算，即使是最简单的计算——删除一个字节——也必定会产生一个不小于 $2.8 \times 10^{-21}$ 焦耳的微小热力学“债务”。按照“完美计算机”的能效来计算，运行世界上最强大的超级计算机Summit只需要几毫瓦的动力。但实际上，它的用电量是13兆瓦，相当于两台海上风力涡轮机的峰值输出。可见，计算机所“浪费”的能量有多么惊人。

但与早期的计算机相比，Summit的能效已得到大幅提升。1975年推出的超级计算机Cray 1耗用的电力虽然只有Summit的1%左右，但计算能力却不足其十亿分之一，这相当于消耗同样电能，计算能力提升了超千万倍。

今天计算机能效的提高，一是源于工业用晶体管的小型化趋势，大约每两年计算机芯片上的晶体管数量将增加一倍，这一趋势被称为摩尔定律；二是因为单个晶体管的功耗与其尺寸缩小成比例下降，意味着在提高芯片能效的同时其计算能力将提高一倍。



然而，这种趋势并非可以永远持续下去。大约15年前，硅晶体管的体积缩小已达极限，想要在物理形态上进一步提高能效几乎不可能。如今，通过更紧密的排列方式，每块芯片上排布的晶体管数量仍在增加，但这同时也对芯片技术提出了更高的要求，因为有多余的外热量需要散发，也更容易由此引起芯片故障。

“日趋小型化的设计遇到了一个难以逾越的瓶颈。”美国布朗大学的埃德斯·巴哈尔说，“我们已经接近所能达到的极限能效”。50年来，被视为计算机技术发展铁律的摩尔定律已在动摇。与此同时，人们对更微型更强设计



## 应对数据洪流

## 需要持续的能效增益

算机的需求还在不断上升。移动数据网从4G升级到5G之后，数据下载速度将是之前的100倍。就北美地区而言，预计平均每月数据流量将从2019年的8.6G字节飙升到2024年的50G。同时，接入互联网的家庭和工业设备，诸如智能冰箱、健身手表，以及智能仪表、工厂监控设备等，所吞吐的数据也正迎来爆炸式增长。2019年，构成庞大物联网的各种设备已跨越了95亿台大关，预计到2025年这些设备将达280亿台。

早在三年前，华为研究员安德斯·安德雷就预测，到2025年，由此引发的海量数据处理将消耗全球20%的电力。而最新预测则为乐观，到2030年，全

球10%以上的电力将用于信息处理。无论如何，数据处理都将成为未来碳排放的一个重要来源，而且还会消耗大量水资源——为防止设备过热，数据中心需要大量冷却水。

但并非所有人都相信如此严重的能源危机即将到来。美国伊利诺伊州西北大学的埃里克·马萨内特和他的同事在最近一项研究中发现，2010年至2018年间，尽管数据中心的工作负荷增加了550%，但其能源消耗仅增加了6%。这既得益于能源管理效率的提高，也得益于硬件上的技术进步，但马萨内特认为，人们还能获得进一步的能效增益。不过，寻找迭代技术的路途变得越来越艰难。

## 新热力学方程

## 为能效提升打开新大门

减少热量散发正是一系列替代技术背后的动机，这些技术希望利用新材料或创新手段来改进数据处理手段，尽管要想彻底解决这一难题还需很多年。研究人员正在重新思考兰道尔的计算结果，并希望找到新方法，加深我们对热力学和计算机技术交互关系的理解。

美国加州大学戴维斯分校的吉姆·克拉奇菲尔德认为，目前人类社会在信息时代遇到的困境，与工业革命时代相类似。在18世纪到19世纪的一百多年间，早在物理学家正式提出热力学理论之前，发动机和水泵问世就已经开始将热能转化为了机械能。如果人类能真正理解这种能量交换，就可能设计出能效提升成千上万倍的新计算机。兰道尔的研究成果已经提示了这种可能性。

美国墨西哥州圣菲研究所的大卫·沃尔珀特表示，兰道尔的研究成果只是一个非常简化的设想，尽管它提出了产生最大效率的可能性，却没有制定达成目标的路线图。部分原因在于当时可用的数学工具十分有限，研究没有涉及能量的输入和输出。而实际上，计算机系统是一个非平衡的系统。

不过，现实世界中几乎没有什么是平衡的，一些早期的计算机先驱早就知道这一点。而且，现实世界里的平衡也

总会被打破。根据热力学定律，平衡系统的内部处于完全的无序状态，具有最大的熵。但在日常生活中显然不是这样，比如一个系统内的熵总是处于不断变动中。

想象一下一罐弹珠倒下楼梯的情景——所有的弹珠最终都会到达底部，但其中有一两颗可能会在滚落途中反弹到楼梯台阶上，这对于总体的影响微不足道，但在小距离和短时间内却是对于无序状态的逆转。

在纳米尺度上，也会表现出类似的动力学现象，这是传统热力学理论无法预测或描述的一种复杂性。直到上世纪90年代末，物理学家克里斯托弗·贾兹恩斯基和化学家加文·克鲁克斯建立了新的方程，让我们能够精确预测这种熵反转发生的时间，以及非平衡过程实际使用的能量——这些发现是开创性的。

近年来，人们越来越认识到这一研究领域对计算机革命的助益。沃尔珀特说，克鲁克斯和贾兹恩斯基建立的新方程“非常强大”，可以更精确计算出出现实情况下一系列信息处理任务所需的能量。尽管这远未达到兰道尔所预测的极限，但却有可能为巨大的能效提升打开一扇新的大门。

## 从理论到工程

## 新理念引领未来变革路

克拉奇菲尔德坦承，在计算领域，一些根本性的转变很难想象，却有着巨大的发展前景。未来的硬件与今天的芯片和电路板可能不会相差太多，但将传统逻辑与利用热力学效应的组件相结合的混合型方法可能会是一个新的起点。他还认为，量子计算机中使用的低温超导电路也很有前途，因为它们可以在非平衡物理占主导地位的条件下工作。

然而，并非所有人都信服这一观点。最显著的一个问题是，迄今为止，大多数研究都只是在理论上，或只停留于处理区区数个字节信息电路的实验阶段。

美国亚利桑那州立大学的斯蒂芬妮·佛利斯特认为，理论上的构想比较容易获得认同，但有时理论会忽略现实

，“理论和工程之间的鸿沟需要大量的工作来填补”。首当其冲的问题就是，一旦扩大规模，在比特级别上的成果很快就会变得棘手。不过，一旦此类技术出现重大进展，也许就在五年左右，这将带来一场巨大的革命性变革。

有迹象表明，人们现在已开始意识到了这一点。例如，已有高科技公司聘请克鲁克斯来研究非平衡热力学的潜在应用。他认为，将这些想法付诸实施存在很大的实际困难，但他没有看到任何根本性的障碍。

“这不仅仅是我们目前所要面对的计算机设备能耗增加的问题。”克鲁克斯说，在一个每天都在产生大量数据的世界里，新理念带来的变革可能正是我们所需要的生命线。

## 奇思妙想 “超越摩尔”

现代计算机都以同样的方式编码信息。计算机中晶体管的工作原理就像二进制开关那样控制电流的流动。让这些部件可靠地区分“开”与“关”这两种状态需要用到一定的电力，并导致产生废热。

正是因为这个原因，在严重过热问题还没能得到解决前，晶体管封装在计算机芯片上的密集度就会受到限制，从而也限制了能效的提高，“摩尔定律”也因此遭遇瓶颈。

解决这个问题的方法之一是改变硬件的物理特性。目前，所有的现代计算机的基础都是硅芯片，硅芯片晶体管有效工作所需的最小功率相对较高。如果代之以某些新材料，如锗、碳纳米管、石墨烯，或者被称为“铁电体”的奇异导电物质，均有助于降低热量的产生。另外，也有人提议利用量子效应来缓解计算机电力需求不断增长的问题。

另一条解决之道是改变计算机信息处理的用电方式。例如，不依赖粒子的电荷来编码信息，转而利用其他特性，比如粒子的一种量子特性——自旋。或许，我们还可以用光电路代替电子器件。但迄今为止，所有这些想法都还没有做好完全代替晶体管的准备。

科学家还在设想一些更为激进的替代方案。例如，量子计算可利用量子物理学的奇异特性开发出全新的信息处理技术，可大大加快计算机编码的速度，不采取二进制编码技术的模拟计算机在人工智能等领域有很大的应用前景。不过，目前这一方案同样尚不具备真正取代现有计算机技术的能力。

# 大自然对电脑的启示

有科学家提出，大自然已经创造了一台超级计算机，它的运行能量只占笔记本电脑使用能量的三分之一，那就是强大的人类大脑。

自然界是如何让我们的大脑达到这种效率的？至今这仍然是一个谜。但生命科学的飞速发展，已为我们提供了许多生物学上超高效信息处理的案例，比如细胞依靠一连串的反应高效处理来自外部世界的化学信号，酶复制DNA的过程也同样高效。

能量浪费可能是生命系统的一个主要缺点，而生物学中的大多数信息

处理似乎是以牺牲准确性或速度等其他属性为代价的，如效率的最大化，但这正是非平衡热力学所预测的那种权衡取舍。例如，大多数计算机都通过中央处理器来控制各个组件部分。这种集中统一管理很强大，但也意味着每一秒都要以难以想象的准确度发出数十亿个指令，其能耗代价之大可想而知。

相比之下，大自然赋予了我们身体中每一个细胞独立执行DNA所包含指令的能力，使它们能够在不需要指挥的情况下协同工作。这意味着，像DNA复制这样的过程能够以更快的速度和可靠性换取更高的效率，大自然的极端效率正是我们想要效仿和借鉴的。

斯波西认为，最令人兴奋的是，生命系统是以我们完全不知道的方式进行计算。

据目前所知，这似乎很有可能。今天的计算机在晶体管的微小尺度上，从过热到制造缺陷等都会导致计算中断。工程师们需要通过设置较大的误差范围和大量冗余，来解决这个问题。但反过来，这又增加了处理每个字节所需的能量。

