

# 并行体系结构调研

计算机学院      2311887      陈语童

March 16, 2025

## 摘要

本报告回顾中国超级计算机（超算）的发展历程，展现中国超算技术演进过程。通过对 CPU、GPU、并行架构及互联机制等的技术分析，并对典型超算体系结构进行了剖析，深入探讨国产超算发展趋势。此外，报告比较了中国超算与国际领先超算的差距，指出相关问题，并展望了中国超算未来智能绿色的发展方向。

## 1 中国超算发展历程综述

中国超算技术经历了从技术引进到自主研发，再到国际领先的阶段性发展。近于半个世纪的历程，两三代中国科技人已经完成了多次革命性的创新。

### 1.1 破茧而出：“银河一号”打破技术封锁

上世纪 70 年代，我国高性能计算技术尚处于起步阶段，受制于外部技术封锁，主要依赖高价进口中低端计算设备。彼时美国在协商后同意向中国售卖每秒 400 万次运算的超级计算机（以下简称“超算”），而每秒 1 亿次运算的“克雷-1”超算已在美国部署服役。此外，美国还提出条件加以约束——超算运抵中国后，必须在透明的玻璃房中运行，其钥匙须由美方保管；若中方想要通过超算进行运算，须向美方提供资料并由美方技术人员进行操作。<sup>[2]</sup>这些无理要求的提出，无异于让超算成为美国夺取我国核心资料与情报的工具。

“玻璃房”的耻辱迫使我们更加重视自主研发的必要性，并于 1978 年正式启动超算研制。1983 年，中国第一台亿次超级计算机“银河一号”问世，标志我国成为继美、日后第三个掌握超算设计与制造技术的国家，中国超算史也由此开启。

值得注意的是，由慈云桂教授带领的“银河一号”研制团队创造性地提出了“双向量阵列”结构，使自主研发超算的运算力达到了质的飞跃，同时在一定程度上突破了西方技术封锁。



图 1：银河一号

### 1.2 自主新星：“曙光一号”开启国产征程

1986 年，受日本“五代计算机技术开发计划”启发，我国的国家高技术研究发展计划（863 计划）应运而生，“高性能计算机及其核心软件”成为研究课题项目之一。<sup>[3]</sup>1990 年，国家智能计算机研究开发中心（现已改名高性能计算机研究中心，以下简称该中心）成立，成为新一代高性能计算机成长的摇篮。

在该中心，李国杰等与专家组共同制订了以并行处理为基础的发展方向，放弃了追随日本的并行推理机计划，选择“需求牵引、技术推动”的发展路径，并选定了基于对称式多处理器共享存储结构（即 SMP 方案）的“曙光一号”作为首个目标。1991 年，“曙光一号”的总体方案出炉，使用 Motorola M88100 微处理器设计的开放系统架构也随之确立。<sup>[4]</sup>

1993 年，“曙光一号”并行计算机问世，成为我国自行研制的第一台用微处理器芯片（88100 微处理器）构成的 SMP 计算机，也成为我国首台具有自主知识产权的并行计算机。该计算机在对称式体系结构、操作系统核心代码并行化和支持细粒度并行的多线程技术等方面实现了一系列重大突破。<sup>[5]</sup>

彼时，SMP 方案的选择是困难而关键的，其困难在于国内外传统大型机发展思路惯性牵制，以及并行计算机技术初期发展的不确定性等；其关键在于成功掌握该技术将突破国外技术压制的极大可能性，有利的技术难点的转移和对未来高性能计算机的积极影响。“曙光一号”方案选择的正确性和最终成果的成功性，催生了“曙光”系列超算的后续发展，为中国超算事业提供巨大技术经验并开启了高速发展的航程。

## 1.3 夺魁之路：“天河一号”“神威·太湖之光”领先世界超算

### 1.3.1 “天河一号”

“天河一号”是国家 863 计划中又一重大项目。2008 年，国家经济发展与全球科技发展共同促生的对于更高性能计算机的现实需求，启幕了“天河一号”的设计研制。

“天河一号”一期系统于 2009 年 9 月研制成功，二期系统于 2010 年 8 月在国家超级计算天津中心升级完成。它是我国首台千兆次超算，实现了我国自主研制超算能力从百兆次到千兆次的巨大飞跃，突破了多阵列可配置协同并行体系结构、高速率可扩展互连通信、高效异构协同计算、基于隔离的安全控制、虚拟化的网络计算支撑、多层次的大规模系统容错、系统能耗综合控制等一系列关键技术。其中全新的多阵列可配置协同并行体系结构最为重要，是系统性能提升之关键。<sup>[6]</sup>

研发初期，“天河一号”主要依赖进口 CPU 芯片，包括大量的 Intel Xeon 处理器和 NVIDIA Tesla 计算卡等，而在升级过程中逐渐引入国产芯片，如“飞腾”芯片等。这展现了我国在核心电子器件领域已有自主创新能力的萌生，对于国家科技安全、产业发展升级等方面有重大意义。

2010 年，“天河一号”以每秒钟 1206 兆次的峰值速度，和每秒 563.1 兆次运行速度的 Linpack 实测性问鼎国际超算组织 TOP500 榜单榜首；<sup>[6]</sup> 2013 年，新一代“天河二号”以峰值计算速度每秒  $5.49 \times 10^{16}$  次、持续计算速度每秒  $3.39 \times 10^{16}$  次双精度浮点运算的优异性能再次夺冠，<sup>[7]</sup> 并连续三年雄踞榜首。<sup>[1]</sup>



图 2: 天河一号



图 3: 神威·太湖之光

### 1.3.2 “神威·太湖之光”

2012 年 7 月，“神威·太湖之光”开始调研论证，经审批、立项等工作，于 2016 年 6 月在无锡诞生。该超算是世界首台峰值运算能力超过每秒 10 亿亿次、拥有千万核的超算，是中国国内第一台全部采用国产处理器构建的世界第一的超级计算机。其搭配的我国自主知识产权的申威 SW26010 众核处理器，包含 260 个核心，其中包括 4 个管理处理单元（MPE）和 256 个计算处理单元（CPE）。MPE 负责任务调度和管理，而 CPE 专注于高性能计算。<sup>[8]</sup>

2016 年 6 月，“神威·太湖之光”以峰值性能 12.5 亿亿次每秒、持续性能 9.3 亿亿次每秒、性能功耗比 6051MFlops/W 的巨大性能优势再次夺取 TOP500 榜首，延续“天河”辉煌。截止 2023 年 4 月 25 日，依托“神威·太湖之光”，无锡超算中心牵头推行国家“十三五”科技研发计划项目 4 项，参与 20 项国家重点研发计划项目或课题，完成 20 多个应用领域、200 多项百万核心大型问题的求解任务。<sup>[9]</sup> 此外，该超算还在连续取得 TOP 500 榜单世界第一两次后，于 2016 年 11 月荣获“戈登·贝尔”奖，实现了我国高性能计算应用在此项大奖上零的突破，成为我国高性能计算应用发展的一个新的里程碑。

### 1.3.3 发展与延续

此后，以“天河”和“神威”为首的国产超算家族不断发展壮大。至今，“天河二号”和“神威·太湖之光”还在 TOP500 榜单上保持较高的名次。

## 1.4 展望未来：中国超算拥抱新时代浪潮

如今，在全球超算 TOP500 榜单中，我国部署的超算数量达到 226 台，占比超过 45%，稳居世界第一。<sup>[1]</sup> 除“银河”“曙光”“天河”“神威”系列之外，还有众多诸如“鹏城云脑”“极光”“昆仑”等新兴强大超算正在发展之中。超算技术在科学研究、工业设计、气象预测、生物医药、金融商业等领域持续发挥重要作用。例如，国家超级计算广州中心的天河二号在气候模拟、海洋研究中取得重要成果；无锡中心的“神威·太湖之光”在大气科学、材料科学等领域推动了科技进步等。2024 年，我国超算服务市场规模达到 196.6 亿元，预计到 2025 年将突破 466 亿元，年复合增长率达 24.1%，越来越繁荣的超算市场是必然趋势。<sup>[10]</sup>

表 1: “天河二号”和“神威·太湖之光”全球排名表现 (来源: top500.org<sup>[1]</sup>)

当前排名	上期排名	首次排名	最高排名	超算名称	配置
15	13	47	1	Sunway TaihuLight	Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway
24	16	41	1	Tianhe-2A	TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000

随着摩尔定律的放缓,未来超算的计算能力提升与突破将转向依赖异构计算、量子计算等新型计算架构;云计算提供大量的弹性计算资源,使得其与超算的融合也将成为另一重要趋势;此外,当今人工智能、大数据等前沿技术的浪潮也必将推动超算对于数据资源和算力资源进行更加智能化、高效化的分配,在新时代散发新活力。

持续的政策支持是保障超算发展的必要条件。我国政府高度重视超算发展,将其纳入“十四五”规划和“新基建”战略,并积极推动一体化大数据中心体系的建设,以及“东数西算”工程的实施来优化算力资源配置。由此展望,中国超算行业的新飞跃也许就在不久的将来。

## 2 超算技术发展历程分析

由第一部分可以看到,我国超算发展历史并不非常悠久,但三十年来经历坎坷,技术突破颇多。下表从 CPU、GPU、内存、并行与互联架构以及运算性能等方面,采集了我国里程碑式超算的部分参数,综合展示了我国超算技术发展的历程。

表 2: 中国超级计算机技术发展历程

	银河一号 (初代)	曙光一号	天河一号 A	天河二号	神威·太湖之光
研制时间	1983 年	2002 年	2009 年	2013 年	2016 年
研制单位	国防科技大学	中科院计算所	国防科技大学	国家超算广州中心	国家超算无锡中心
CPU	Itanium 2 (单核单线程 @1.3GHz)	16*Motorola M88100 微 处理器 (单 核单线程 @25~40MHz)	14336*Intel Xeon X5670 (6 核 12 线程 @2.93GHz)	32000*Intel Xeon E5-2692 (12 核 24 线程 @2.2GHz)	40960* 申 威 SW26010 [国产] (260 核 1040 线 程 @1.45GHz)
CPU 缓存/内存	/	极小	12MB 三级 缓存/192GB 内存 (总最大 288GB)	30MB 三级 缓存/32GB 内存 (总最大 768GB)	无三级缓存/32GB 内存 (最大 1.31PB)
GPU	/	/	7168*NVIDIA Tesla M2050 (448 核 @575MHz)	48000*Xeon Phi 31S1P (57 核 @1.1GHz)	/
GPU 显存	/	/	3GB	8GB	/

表 2: 中国超级计算机技术发展历程

	银河一号 (初代)	曙光一号	天河一号 A	天河二号	神威·太湖 之光
前端	/	/	2048* 飞腾 1000 CPU	4096* 飞腾 1500 CPU	同后端
总内存	极小	极小	262TB	1.41PB	1.31PB
磁盘	极小	极小	2PB	14.4PB	20PB
并行架构	/	全对称紧耦合共享存储多处理机系统 (SMP)	CPU-GPU 异构	新型异构多态体系架构	分布式共享存储架构
互联	/	VME 总线	Arch 高速互联/TH Express-1 [自研] (单节点 40Gbps)	Arch 高速互联/TH Express-2 [自研] (单节点 57Gbps)	Sunway Network [自研] (单节点 64Gbps)
稳定性能	/	/	2.57PFlop/s	33.86PFlop/s	93PFlop/s
峰值性能	100MFlops	640MFlops	4.7PFlop/s	54.9PFlop/s	125PFlop/s
核心突破	双向量阵列	SMP、自主知识产权	CPU-GPU 协同异构	高性能异构计算	申威众核处理器自主研发

下面,就超算发展中进步显著的几个方面进行具体分析。

## 2.1 CPU (Central Processing Unit)

在超算发展周期中,单个 CPU 的性能进步飞快。核数目变化“1→6→24→260”,呈现指数级增长;而线程数目“1→12→24→1040”的增长,甚至还快于核数目的增长速度。CPU 性能提升如此之迅速,起原因在于:

- 制造工艺:半导体制造工艺持续革新,晶体管尺寸的微缩(从微米级到纳米级)使芯片上可集成的晶体管数量呈指数增长,既提高效率还降低功耗;新材料如 III-V 半导体化合物和硅光子学技术的研究,<sup>[11]</sup>也在进一步突破传统硅材料的物理限制。当前 Intel、Rapidus、TSMC(台积电)等厂商都在研发 2nm 甚至更微级别的芯片。
- 物理构成:多核方案的选择,这是发展过程中十分重要的一步,包括当今已经实现的众核技术,都是提升单个 CPU 性能的重要条件;此外,CPU 与加速器 GPU 的结合(天河一号为首个使用 GPU 加速 CPU 的超算),也大大提升了计算内存和速度。
- 架构优化:CPU 架构和指令集的优化,提升指令吞吐量,减小数据传输阻力,如申威系列从 Alpha 架构转向自主 SW64 指令集,飞腾系列兼容 ARM 指令集,以及新兴 3D 堆叠缓存技术等等,均为旨在降低数据访问延迟、提高运行效率之举。

再从我国超算 CPU 发展维度来看,经历了从完全进口,到进口与国产结合,最后完全自主研发的过程。自从具备国产自主研发能力之后,原先的进口 CPU 配置也逐渐升级转向国产化。如初期采用英特尔 Xeon Phi 加速器的天河二号,后因美国技术限制转向自主研发的 Matrix-2000 加速器,结合飞腾系列 CPU,形成异构计算架构。<sup>[12]</sup>

申威 SW26010(神威·太湖之光搭载)的成功研制是一大壮举,它摒弃了早期基于 Alpha 架构的设计,而使自主研发了申威-64 指令集(SW64),是一项支持 256 位 SIMD 向量运算的高性能优化。<sup>[13]</sup> 28nm 制程下,SW26010 芯片面积超过 500mm<sup>2</sup>,集成 260 个核心,主频稳定在 1.5GHz,领先同时期诸多产品。SW26010 的一大特点是无 L3 级缓存,而依赖软件管理数据局部性和高带宽分布式内存,一方面是对芯片面积、功耗因素的综合考量,另一方面是由于众核共享缓存困难,以及实际运用缓存需求较小而选择放弃。为了补足缓存功能,SW26010 采用的分布式内存架构,以及随之而来的具体的并行架构,将在下一节(3)进一步讨论。



未来,我国自主 CPU 的发展趋势可能是转向 AI 加速和量子模块的加入,以及持续推进纳米级工艺的进步。“曙光”系列已经在使用 AI 加速,新一代“曙光星云”采用海光 Hygon CPU (基于 AMD Zen 架构授权),结合国产 DCU (Deep Computing Unit) 加速卡,支持 AI 训练与推理任务。“CPU+GPU/DCU”架构将成为主流。

## 2.2 GPU (Graphic Processing Unit)

GPU (图形处理单元) 最初用于图像渲染,但由于其高吞吐并行计算能力,逐渐成为高性能计算的关键组件。而已经高度发展的 CPU,硬件软件上的双重限制给其带来提升瓶颈。因而, GPU 与 CPU 协同异构成为必然选择。

“天河一号”是我国首个采用 CPU-GPU 异构架构的超算,也是世界首例。新的架构给超算带来了内存、数据读取速度、运算速度的全面提示,其架构具体构成和实现将在下节进一步讨论 (3) 此后,“天河”系列一直沿用 CPU-GPU 异构,且逐渐转向国产化配置,未来有望 GPU 也完全实现国产自主化。

国产超算来到“神威·太湖之光”时, GPU 又再次被弃用,其原因有:

- 众核 CPU 性能足够高,已经可以替代 GPU 的加速辅助。
- CPU-GPU 架构中 GPU 依赖 CPU 调度才能进行计算,只使用 CPU 省去传输数据的额外延迟消耗,提高效率,也能一定程度上降低能耗;此外这种做法也减少了对全局内存的依赖。
- GPU 尚未完全国产自主化,若持续使用、依赖进口 GPU,无法打破海外技术壁垒。

## 2.3 并行架构

国产超算一直都在尝试创新,自主研发新的并行架构。下一节 (3) 将对具代表性的一些并行体系结构作具体分析。

## 2.4 互联机制

互联架构也是影响超算运行效率的一个重要因素。我国超算的互联架构选用依旧经历了从进口到国产化的过程,早期主要使用 VME 和 Infiniband,后为了突破技术封锁和技术瓶颈,开始自主研发。

“天河 1A”搭载的是自研的 TH Express-1/Arch 架构,采用光纤高速互联,结合多级交换机实现高带宽低延迟通信。其设计思想类似 Infiniband,但优化了众多模块,显著提升了传输效率。而归根结底,此架构仍然有部分依赖于进口组件。“天河二号”使用的 TH Express-2 (仍基于 Arch) 则实现了完全自主化,采用多级拓扑设计和扁平光电混合架构,进一步优化数据流的传输。<sup>[14]</sup> 自此,国产互联技术正式独立于 Infiniband。

2016 年的“神威·太湖之光”,互联技术再翻新,是设计用来适配申威 SW26010 的 Sunway Network。相比于 TH Express, Sunway Network 自主性更上一层,拥有更高的带宽,(通过优化数据路径和路由算法)进一步降低了通信延迟,功耗也更低。它还支持深度学习和智能计算,与未来超算接轨。

# 3 代表性超算并行体系结构剖析

此节对于前面提到的最具代表性的国产超算进行其并行体系结构的剖析,深入探究其核心技术。

## 3.1 “银河一号”——双向量阵列

“银河一号”采用向量处理 (Vector Processing) 架构,并创新性地引入了双向量阵列 (Dual Vector Array) 结构,这是其最大技术突破之一。

### 3.1.1 向量处理

向量处理器系统,是面向向量型并行计算,以流水线结构为主的并行处理计算机系统。采用先行控制和重叠操作技术、运算流水线、交叉访问的并行存储器等并行处理结构,<sup>[16]</sup>本质上是对一组数据作相同运算,达到并行效果,或称其作 SIMD (单指令多数据, Single Instruction Multiple Data) 机制。具体来说,“向量流水线”是并行实现的关键,它使得向量处理器能够在不同阶段同时处理多个向量

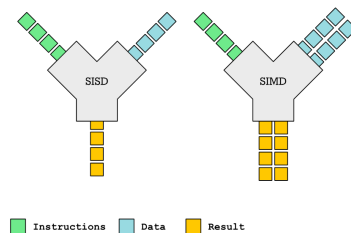


图 4: SISD (单指令单数据) 和 SIMD 比较<sup>[15]</sup>

操作，类似于 CPU 的指令流水线，但专门针对向量运算进行优化。如此处理下，在传统标量计算中只能处理 1 个数据的 1 条命令，可以同时处理 4 个、8 个，或更多数据（每个数据不处于同一处理状态）。

### 3.1.2 双向量阵列

双向量阵列重点在于“双”字。它在向量处理的基础上，采用两个独立的向量处理阵列进行运算，每个阵列都有若干处理单元。

架构主要由控制单元、向量阵列、向量寄存器、向量流水线组成，控制单元接受并分析 SIMD 指令后将数据任务尽量平分给两个阵列（具体内容任意），阵列进入流水线进行并行运算，返回结果后汇总到寄存器，写回内存。由此过程不难推断，理论上双向量架构的效率可以达到传统向量处理系统的 2 倍之高。

## 3.2 “曙光一号”——SMP（对称多处理）

在对称多处理架构中，所有处理器共享相同的物理内存，同样的逻辑地址空间，并且能够对称地访问所有资源，如内存、I/O 等。任务调度动态分配，每个处理器都可以运行系统的任何线程或进程。其内部有一个特殊的“缓存一致性协议”，用于保证多个 CPU 访问同一数据时的一致性（不出现读写冲突）。

“曙光一号”的 SMP 共享内存架构在 2002 年是一个合理选择，适合小规模并行计算。但由于总线瓶颈（VME 带宽有限）和扩展性问题，我国超算后续逐步转向 MPP（分布式并行）架构。

## 3.3 “天河 1A”“天河二号”——CPU-GPU 异构架构

异构计算是指系统同时使用多种处理器或者核心，这些系统通过增加不同的协处理器提高整体的性能或者资源的利用率。

CPU 与 GPU 在构成上的种种差别，决定了其擅长处理的任务也是不一样的。

表 3: CPU 与 GPU 构成比较

	CPU	GPU
核心数目	少	多
核心复杂度	高	低
缓存设计	大容量缓存多级（L1/L2/L3）	小容量缓存高带宽显存
内存延迟	低	高
指令集	复杂	简化

CPU 的组成决定了其更适合做逻辑控制；而 GPU 的组成决定了其更适合做密集数据计算（矩阵运算、向量计算、图像处理等）。而且不像 CPU 能够独立运行，GPU 的运行必须依赖 CPU。CPU-GPU 异构架构应运而生。

“天河一号 A”中，CPU 负责逻辑控制与任务调度，GPU 专注于浮点运算。其采用基于 MPI（消息传递接口）和 CUDA 的异构编程模型，MPI 负责 CPU 之间的通信，而 CUDA 负责在 GPU 上进行并行计算，这种组合能够有效地将计算任务分配给最适合的硬件单元。

“天河二号”架构升级，CPU 与 GPU 仍分别进行控制逻辑任务和大规模计算，其采用 MPI、OpenMP、OpenCL 等多种并行编程框架，以支持 CPU 和 GPU 之间的协同计算。CPU 与 GPU 协同工作更加紧密，能源效率也有显著提升。

一般在 CPU-GPU 异构架构中，两种处理器之间的合作具体表现在：

- **计算任务分配：**CPU 控制并分配任务，将计算量较小、依赖较多的计算交给 CPU，数据准备、计算并行性高的任务交给 GPU。在许多应用中，CPU 首先进行数据预处理、初始化工作，然后将数据传递给 GPU 进行并行计算。例如，深度学习训练中，数据的批处理通常交给 GPU 来处理。
- **数据传输管理：**CPU 通常将数据传输到 GPU 的显存，GPU 再从显存读取数据进行处理。GPU 计算完成后，GPU 将处理结果传回 CPU，进行后处理或汇总分析。两者通过内存共享技术来发生数据交换。而实际上，数据传输速度在很大程度上影响协同的效率。因此，在设计时要尽量减少 CPU 与 GPU 之间的数据交换。
- **API 控制：**应用程序接口（常见如 CUDA，OpenCL，DirectCompute，Vulkan 和 OpenGL 等）提供资源的管理、内存分配和任务调度等功能，可直接管理 GPU 资源，来与 CPU 进行协作。

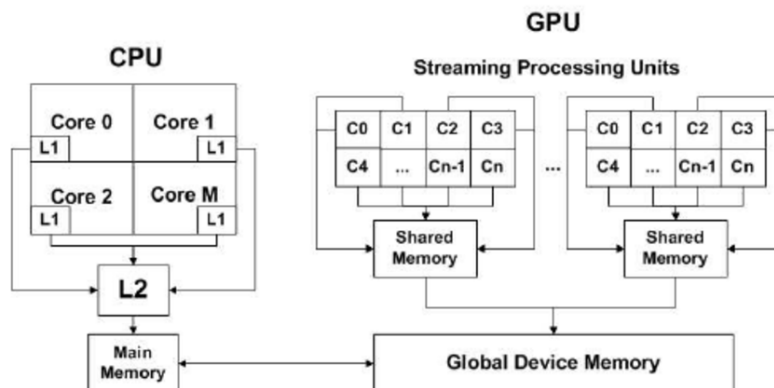


图 5: 一个典型的 CPU-GPU 异构架构

### 3.4 “神威·太湖之光”——众核异构 + 分布式共享存储

#### 3.4.1 众核异构与多级并行

“太湖之光”同样采用了异构架构，但其只配备 CPU。申威 26010 众核处理器由管理核心（MPE）和计算核心（CPE）组成，MPE 负责任务调度、通信控制和系统管理，CPE 专注于浮点运算和密集计算任务，形成与以往 CPU 和 GPU 异构同样机能的异构构架。

其中，每个处理器分为 4 个核心组，每组包含 1 个 MPE 和 64 个 CPE，通过  $8 \times 8$  的 Mesh 互连网络实现核间高效通信。CPE 支持单指令多数据流（SIMD）运算，每个周期可完成 8 次双精度浮点运算，峰值性能达 3.06 TFLOPS/处理器。<sup>[17]</sup>

#### 3.4.2 分布式共享存储

分布式内存布局区别于前面介绍到的 SMP 中的内存布局，每颗 CPU 拥有属于自己的内存空间。每个申威 SW26010 处理器配备 4 个独立的 DDR3 内存控制器，这种设计避免了多核竞争共享内存的瓶颈，适合大规模并行任务的流式数据访问。

同时，申威 SW26010 的设计有一大亮点，即没有 L3 级缓存。取而代之地，它通过软件显式管理数据局部性，依赖高带宽内存和计算核心的本地存储（CPE 的 64KB 本地存储），减少硬件复杂度，提升能效比。

尽管处理器内存物理分布各处，独立所有。但通过操作系统和编译器的协同，可构建逻辑上的统一共享地址空间，支持多计算集群间的数据共享。

## 4 国内外超算对比与展望

在最后一部分，选取 TOP500 上所示近些年新兴占据榜单头部的一些海外超算，将它们与我国目前最强的超算（“神威·太湖之光”）进行各个层面上的对比，探讨未来我国超算的发展方向。

表 4: 国内外超算对比

排名 (2024 Nov.)	名称	核数	稳定性能 (PFlop/s)	峰值性能 (PFlop/s)	功耗 (kW)	处理器	互联
1	El Capitan (US)	11,039,616	1,742.00	2,746.38	29,581	AMD 4th Gen EPYC 24C 1.8GHz	Slingshot-11
2	Frontier (US)	9,066,176	1,353.00	2,055.72	24,607	AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz	Slingshot-11

表 4: 国内外超算对比

排名 (2024 Nov.)	名称	核数	稳定性能 ( $PFlop/s$ )	峰值性能 ( $PFlop/s$ )	功耗 ( $kW$ )	处理器	互联
3	Aurora (US)	9,264,128	1,012.00	1,980.01	38,698	Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz	Slingshot-11
6	Supercomputer Fugaku (JP)	7,630,848	442.01	537.21	29,899	A64FX 48C 2.2GHz	Tofu interconnect D
15	Sunway TaihuLight (CN)	10,649,600	93.01	125.44	15,371	Sunway SW26010 260C 1.45GHz	Sunway

数据来源: top500.org [1]

从 TOP500 发布的数据对比看来,“神威·太湖之光”的总核数量与当今世界最强的几款超算齐平,甚至更多,而“太湖之光”的稳定与峰值性能却可与 Top 级别的超算相差上百倍。这说明 (1) 单核性能不足;(2) 并行计算架构过时,效率不足;(3) 存储与数据吞吐效率不足;(4) 互连网络带宽较低,通信延迟高。这些都是国内超算可能存在的瓶颈,想要突破它们,CPU、并行架构、互联架构更新升级的必要性是不言而喻的。反观功耗,在同性能比例下观察“太湖之光”和当今 Top 级别的超算,可以发现这方面优化并无明显落后,这是应当保持的。

当下,国际超算技术已进入 EFLOPS 时代,我国也在迎头赶上。“天河三号”和“神威·太湖之光”等的 E 级超算项目正在推进当中, [18] 有望通过自主研发加入 E 级超算的行列。如今国产 CPU 行业发展突飞猛进,龙芯已经推出完全自主的 LoongArch 指令集架构,海光已推出采用 7nm 工艺的三号芯片,这都是在为我国超算的未来铺垫基石。

在当今人工智能大趋势下,超算与人工智能的融合也必将成为未来发展趋势。类似于 CPU-GPU 的 CPU-APU 架构已经在研发和部署阶段,这对于超算计算效率的提高将是巨大的。

在提升超算性能的同时,不能遗忘创新发展理念中的“绿色”二字。超算升级过程中,能效比应当作为重要考量因素。未来可能将重点放在光子计算、量子混合架构等更加绿色的创新技术上,建立绿色超算中心,顺应碳中和趋势。

总结来说,我国的超算未来是十分光明的。虽然仍与国际最高水平有较大差距,但超算相关的各个领域都有持续和显著的进步与发展。未来的中国超算将会是更加高效、智能和绿色的。

## 参考文献

- [1] TOP500. TOP500 List. <https://top500.org>.
- [2] 百度百家号. 中国超算发展史. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1742100940559929669>.
- [3] 百度百科. 863 研究项目. <https://baike.baidu.com/item/863%E7%A0%94%E7%A9%B6%E9%A1%B9%E7%9B%AE/12755414>.
- [4] 搜狐科技. 中国超算发展现状分析. [https://www.sohu.com/a/807381663\\_121798711](https://www.sohu.com/a/807381663_121798711).
- [5] 百度百科. 曙光一号超级计算机. <https://baike.baidu.com/item/%E6%9B%99%E5%85%89%E4%B8%80%E5%8F%B7/6627188>.
- [6] 百度百科. 天河一号超级计算机. <https://baike.baidu.com/item/%E5%A4%A9%E6%B2%B3%E4%B8%80%E5%8F%B7/2429139>.
- [7] 百度百科. 天河二号超级计算机. <https://baike.baidu.com/item/%E5%A4%A9%E6%B2%B3%E4%BA%8C%E5%8F%B7%E8%B6%85%E7%BA%A7%E8%AE%A1%E7%AE%97%E6%9C%BA/6349981>.
- [8] 百度百家号. 神威·太湖之光超级计算机. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1610644004704532712>.
- [9] 百度百科. 神威·太湖之光超级计算机. <https://baike.baidu.com/item/%E7%A5%9E%E5%A8%81%C2%B7%E5%A4%AA%E6%B9%96%E4%B9%8B%E5%85%89%E8%B6%85%E7%BA%A7%E8%AE%A1%E7%AE%97%E6%9C%BA/19755876>.
- [10] 搜狐科技. AI 与超算的结合发展. [https://www.sohu.com/a/855805885\\_121273712](https://www.sohu.com/a/855805885_121273712).
- [11] CSDN. 超算架构发展研究. <https://blog.csdn.net/u010233403/article/details/8814403>.
- [12] CSDN. 并行计算与 SIMD 技术. [https://blog.csdn.net/weixin\\_39992462/article/details/118956711](https://blog.csdn.net/weixin_39992462/article/details/118956711).
- [13] CSDN. 超算互连架构分析. [https://blog.csdn.net/weixin\\_42356460/article/details/118844423](https://blog.csdn.net/weixin_42356460/article/details/118844423).
- [14] 百度百科. 天河二号计算架构. <https://baike.baidu.com/item/%E5%A4%A9%E6%B2%B3%E4%BA%8C%E5%8F%B7%E8%B6%85%E7%BA%A7%E8%AE%A1%E7%AE%97%E6%9C%BA/6349981#3>.
- [15] Johnny's SW Lab. Introduction to SIMD Parallelism. <https://johnnysswlab.com/crash-course-introduction-to-parallelism-simd-parallelism>.
- [16] 百度百科. 向量处理器系统. <https://baike.baidu.com/item/%E5%90%91%E9%87%8F%E5%A4%84%E7%90%86%E5%99%A8%E7%B3%BB%E7%BB%9F/22034556>.
- [17] 网易科技. 全球超算发展趋势. <https://www.163.com/digi/article/BS2UD9VN001620UT.html>.
- [18] 微信公众号. 超算新技术探索. [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=Mzg5NTg0NjI3Nw==&mid=2247483880&idx=1&sn=413be9976b72445163b61c585564664b](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=Mzg5NTg0NjI3Nw==&mid=2247483880&idx=1&sn=413be9976b72445163b61c585564664b).