



南開大學  
Nankai University

计算机学院  
并行程序报告

## 并行体系结构调研

姓名：高景珩  
学号：2310648  
专业：计算机科学与技术

2025 年 3 月 8 日

# 目录

<b>1 引言</b>	<b>2</b>
<b>2 我国超算发展情况</b>	<b>2</b>
2.1 发展历史	2
2.2 现状	3
<b>3 技术发展过程</b>	<b>3</b>
3.1 技术发展史	3
3.1.1 银河	3
3.1.2 天河	3
3.1.3 神威	3
3.1.4 曙光	4
3.2 代表构架解读	4
3.2.1 天河一号	4
3.2.2 神威·太湖之光	5
<b>4 国际前沿与未来展望</b>	<b>7</b>
4.1 国际超算发展	7
4.1.1 概况	7
4.1.2 Frontier	7
4.2 国内外超算对比与未来展望	8
4.2.1 国内外超算对比	8
4.2.2 未来展望	8
<b>5 总结</b>	<b>9</b>

## 1 引言

自上世纪 70 年代以来，超级计算机（超算）作为计算机技术的巅峰代表，在科学计算、工程仿真、人工智能等领域发挥着至关重要的作用。我国的超算发展经历了从起步、追赶到部分领域领跑的历程，依托国家重大科技专项和自主创新战略，涌现出如“天河”“神威”“曙光”等一系列具有全球影响力的超级计算机系统。

本调研将回顾我国超算发展历史，分析核心技术演进过程，并重点剖析代表性超算系统的并行体系结构，如 \*\* “神威·太湖之光” \*\* 的众核架构与 \*\* “天河二号” \*\* 的异构并行架构。同时，我们将对比国外最新的超算架构，例如 \*\* 美国的“Frontier” \*\* 及 \*\* 日本的“富岳” \*\*，探讨我国超算在体系结构、算力效率、能耗控制等方面的优势与挑战。最后，结合当前人工智能、大数据计算、量子计算等新兴领域的需求，展望我国超算未来的发展方向。

## 2 我国超算发展情况

### 2.1 发展历史

我国在超级计算机领域起步不算晚。早在 1958 年，中国的第一台数字电子计算机——103 机诞生。在 70 年代左右，我国对超级计算机的需求显著提升，尤其是中长期天气预报、模拟风洞实验、三维地震数据处理、以至于新武器的开发和航天事业等领域都对算力提出新的需求。

基于当时的状况，我国开始了对超算的研发，并与 1983 年 12 月 4 日由军方主导成功研制银河一号超级计算机。并继续成功研发“银河”系列的银河二号、银河三号、银河四号超级计算机。基于银河系列计算机的算力，使得中国成为世界上少数几个能发布 5 至 7 天中期数值天气预报的国家之一。



图 2.1: 神威·太湖之光

1992 年，我国研制成功曙光一号超级计算机。在发展银河和曙光系列同时发现由于向量型计算机自身的缺陷很难继续发展，因此需要发展并行型计算机，于是中国开始研发神威超级计算机，并在神威超级计算机基础上研制了神威蓝光超级计算机。2015 年神威·太湖之光采用全国产 CPU 达成了世界第一速度的成就，并于软件设计方面于隔年获得戈登贝尔奖，此前 30 年该奖都由美日两国获得，首次有第三国打破此规则。<sup>[1]</sup>

## 2.2 现状

近十年来,我国超级计算机领域实现了跨越式发展,不仅在硬件性能上取得了突破,而且在体系结构、软件平台和应用服务方面不断创新,为国家重大科技项目和产业转型提供了坚实支撑。例如,“神威·太湖之光”超算系统的理论浮点运算性能高达约 125,435.9 TFLOPS,而在 LINPACK 测试中实际达到 93,014.6 TFLOPS,计算效率约为 74%,并且其每瓦能输出 6 GFLOPS,整机功耗仅 15.3 兆瓦。与此同时,“天河二号”超算在 2013 年 6 月的测试中,峰值性能为 54,902.4 TFLOPS,持续性能达到 33,862.7 TFLOPS,展示了我国在异构并行计算平台上的领先水平。

此外,根据最新统计数据,截至目前,我国在全球 TOP500 超算系统中的上榜数量已达到 202 部,占全球浮点计算力的 35.4%,而美国仅为 29.6%。在新一代技术探索方面,我国自主研发的量子计算原型机“祖冲之号”已实现 62 个超导量子比特,并于 2024 年陆续推出更新版本;而神威 E 级原型机则实现了峰值运算能力 3.13 PFLOPS 和持续性能 2.556 PFLOPS,功耗仅 290KW,进一步验证了我国向 E 级超算迈进的技术路线。与此同时,我国正积极推进“超算互联网”建设,通过高速网络将全国各大超算中心互联,力争到 2025 年底构建一个技术先进、模式创新、服务优质、生态完善的统一算力平台,从而实现资源共享和统一调度,进一步降低超算应用门槛,推动算力服务普惠化发展。

总体而言,这些具体数据充分反映了我国超级计算机领域从单一硬件追求到系统化、平台化和应用多元化转型的显著成就,也为我国在全球高性能计算领域奠定了坚实的基础。

## 3 技术发展过程

### 3.1 技术发展史

我国超算技术的发展历程可大致分为“银河”、“天河”、“神威”和“曙光”四大系列,每一系列都代表了不同时期的技术探索和创新突破。

#### 3.1.1 银河

早期的“银河”系列标志着我国超算起步阶段的探索与摸索,那个时期主要通过引进国外先进技术、模仿和消化再创新,初步构建了分布式和并行处理系统的基本架构,为后续自主研发奠定了基础。

#### 3.1.2 天河

进入 21 世纪,“天河”系列成为我国超算领域的里程碑,天河一号(2009 年)以采用 Intel Xeon 处理器为主,展示了多节点并行计算的初步能力;随后,天河二号(2013 年)在异构架构上实现突破,通过将 Xeon CPU 与 Xeon Phi 协处理器结合,使其理论峰值性能达到约 54,900 TFLOPS, LINPACK 测试持续性能约 33,860 TFLOPS,从而大幅提升了系统的计算效率和应用水平。

#### 3.1.3 神威

与此同时,国家加大了自主研发力度,“神威”系列的超算系统应运而生,其中“神威·太湖之光”完全依托国产申威 26010 处理器,单芯片拥有 260 个核心,其理论浮点运算性能超过 125,000 TFLOPS, LINPACK 实测性能约 93,000 TFLOPS,每瓦输出能达到 6 GFLOPS,充分展示了我国在芯片架构、并行计算和能效优化等关键技术领域的自主创新能力。

### 3.1.4 曙光

“曙光”系列由国产超算企业曙光信息主导，采用模块化、集群式设计和自主研发的软件平台，基于 Linux 操作系统构建起高性能计算系统，其设计理念侧重于系统集成和分布式资源调度，既满足科研模拟、工程计算等传统超算需求，也逐步向工业应用和大数据处理等新领域拓展，体现了我国在超算系统集成和应用推广上的不断进步。

总体而言，从“银河”时代的起步探索，到“天河”系列的异构并行突破，再到“神威”系列的全自主芯片创新和“曙光”系列的系统集成发展，我国超算技术实现了从模仿到自主研发、从单机性能提升到系统整体效能优化的跨越式进展，为我国在全球高性能计算领域奠定了坚实基础。

## 3.2 代表构架解读

### 3.2.1 天河一号

在 2010 年 11 月 16 日，“天河一号”超级计算机获得世界超级计算机 500 强排名第一。在此之中，更是有三大科技创新点：CPU+GPU 异构融合体系结构、64 位多核多线程自主飞腾 1000 CPU、自主高速互连通信技术。下面是有关天河一号的具体配置信息：

主机	TH-1A
性能	峰值性能4700TFlops (LINPACK实测值 2566TFlops)
存储	4PB
近线存储	1.3PB
计算节点	共7168个CPU+GPU异构节点 节点配置：双路12核，2*Intel Xeon X5670 @ 2.93GHz + Tesla M2050，内存24GB/48GB
登陆节点	5个登陆节点，其中2个专用于数据传输
网络系统	天河自主高速互连
操作系统	REHT
文件系统	Lustre
作业调度系统	SLURM

图 3.2: TH-1A 配置

天河一号分两期搭建完成，内分三个系统 A、B、C 用于对不同人群开放计算服务。采用的 CPU+GPU 设计使每个节点由两个 GPU 连接到两个 Xeon 处理器。

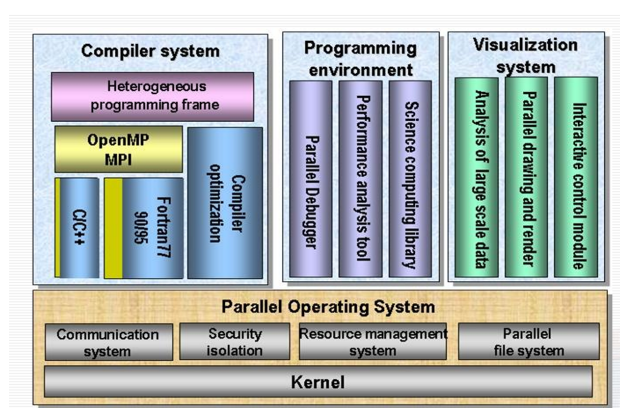


图 3.3: TH-1A 结构

编译器系统负责将多种编程语言（如 C/C++、Fortran 77/90/95）编写的代码，借助异构编程框架、OpenMP 和 MPI 等模型进行编译优化，转化为机器可执行指令。编程环境提供并行调试器、性能分析工具以及科学计算库，辅助开发者提升程序开发与优化效率。可视化系统可对大规模数据进行分析，通过并行绘图渲染，结合交互式控制模块，便于直观呈现和操作数据。并行操作系统作为底层基

石，依靠内核管理通信、安全、资源及文件系统，确保整个系统的稳定运行和资源高效调配。该架构各部分协同运作，为实现高效的并行计算提供了完整解决方案。

### 3.2.2 神威·太湖之光

神威·太湖之光 (Sunway TaihuLight) 是由中国国家并行计算机工程技术研究中心研制的超级计算机，2016 年 6 月 20 日在 LINPACK 性能测试中以 93 PFLOPS 的测试结果超越同为中国组建的天河二号 (LINPACK 成绩约为 34 PFLOPS)，成为当时世界上最快的超级计算机，直到 2018 年 6 月 8 日被美国的超级计算机高峰 (Summit) 超越。

神威·太湖之光也是中国大陆首度自行设计不使用英特尔等美国公司的核心产品而登上 TOP500 第一名宝座的超级计算机。该机组在天河二号被禁之后，也被认为是中国政府面对美国政府限制英特尔、英伟达等厂商对华出售运算设备的正面回应，在中国大陆的媒体报导中，也多强调该机组的组件均由中国自主设计并于中国生产。[2]

考虑到面向的应用的复杂性，“神威·太湖之光”计算机系统体系结构引入了融合体系架构，架构的一部分是面向传统高性能计算的高速计算系统，另一部分是面向大数据等新型应用的辅助计算系统，两部分通过高速计算互联网络进行内部和相互之间的高速互联。系统总体架构如图所示。

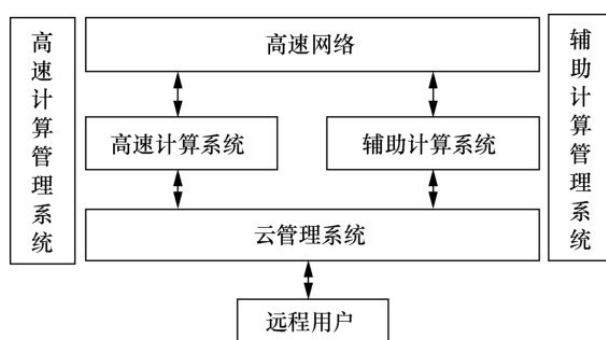


图 3.4: “神威·太湖之光”系统总体架构

系统高速计算部分,峰值运算和实测 LINPACK 性能分别达到了 125.436 PFlops 和 93.015 PFlops, LINPACK 系统效率达到了 74.153%, 系统采用了 40 960 个 64 位自主神威指令集的 SW26010 处理器。SW26010 处理器采用异构众核体系结构, 即片上计算阵列集群和并行共享存储相结合的架构, 全芯片 260 核心, 芯片标准工作频率为 1.5 GHz, 峰值运算速度为 3.168 TFlops。SW26010 处理器的架构如图所示。

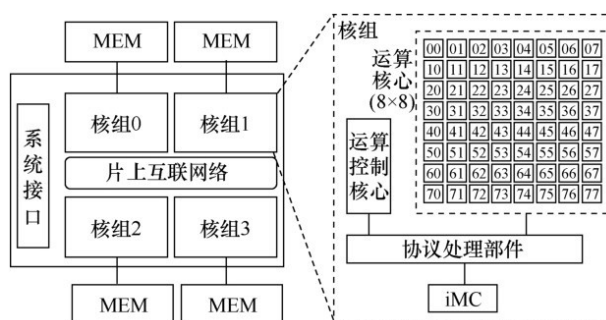


图 3.5: SW26010 处理器的架构

存储系统由在线存储系统和近线存储系统组成。在线存储系统由 288 台带高速固态驱动器 (solid



state drive, SSD) 的存储服务节点、144 台高性能双控制器光纤串行 SCSI (serial attached SCSI, SAS) 盘阵、8 台元数据服务节点组成, 负责提供高速可靠的在线数据存储访问服务, I/O 聚合带宽达 341 GB/s。近线存储系统由 6 个元数据服务节点、112 个存储服务节点和两台大容量光纤存储区域网络 (storage area network, SAN) 盘阵组成, 提供面向云和用户业务的存储服务。

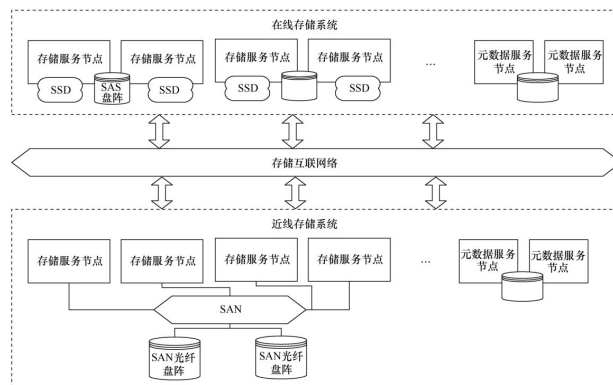


图 3.6: 存储系统组成

在“神威·太湖之光”系统中, 由于计算规模极其庞大, 如果任由计算节点发出 I/O 请求而不加以控制, 有可能导致上百万的 I/O 请求同时访问或操作同一数据块, 这是不能容忍的情况。为了应对如此大规模的 I/O 访问、保证访问的有序性和高效性, 存储系统采用分层架构, 在计算节点和后端存储间引入 I/O 转发服务层, I/O 访问的分发和控制由服务层完成, 并辅助以存储缓存管理, 提高访问性能, 缩短由 I/O 访问路径增长带来的时延。

在存储软件上, 计算节点应用轻量级文件系统 (light weight file system, LWFS) 实现高效、低资源占用, 以减少对计算节点资源的占用开销。在计算节点上, 运算核与控制核间通过紧耦合的 I/O 模块以内存映射的方式实现数据的高效传输和共享。整体软硬件系统如图所示。

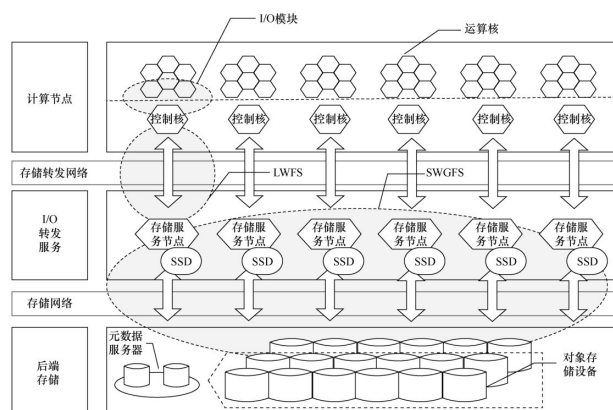


图 3.7: 神威整体软硬件系统架构

其中, I/O 模块运行在控制核心的内核模块, 负责在控制核心的 LWFS 上增加数据映射通路, 支持运算核通过控制核访问后端存储系统。LWFS 部署在计算节点和存储服务节点上, 负责计算大规模运算节点的数据存储请求, 支持控制核访问后端存储系统上的全局文件系统——神威全局文件系统 (SWGFS)。SWGFS 部署在存储服务节点上, 通过虚拟化整合异构的网络存储设备, 将其抽象为对象存储设备, 并构建基于对象的分布式并行文件系统, 提供全局统一视图和全局共享的数据存储服务。<sup>[3]</sup>

## 4 国际前沿与未来展望

### 4.1 国际超算发展

#### 4.1.1 概况

近年来，美国在超算领域持续投入巨额资金和先进技术，实现了前所未有的突破。以 Frontier 为例，它在 2022 年正式问世，突破了 1.1 exaFLOPS 的运算能力，成为全球首台真正达到“E 级超算”标准的系统。紧随其后的是 Aurora 和 El Capitan，它们分别在不同应用场景（如 AI 训练、国家安全和材料研究）中展现了极强的算力和能效优势。这些系统不仅在浮点运算能力上处于世界领先水平，还通过全新的互连技术（如 HPE Cray Slingshot 网络架构）和先进的冷却系统大幅提升了整体能效。

US Department of Energy Supercomputers			
	Frontier	Aurora	Summit
CPU Architecture	AMD EPYC (Future Zen)	Intel Xeon Scalable	IBM POWER9
GPU Architecture	Radeon Instinct	Intel Xe	NVIDIA Volta
Performance (RPEAK)	1.5 EFLOPS	1 EFLOPS	200 PFLOPS
Power Consumption	~30MW	N/A	13MW
Nodes	100 Cabinets	N/A	3,400
Laboratory	Oak Ridge	Argonne	Oak Ridge
Vendor	Cray	Intel	IBM
Year	2021	2021	2018

图 4.8: 美国能源部超算

除此之外超算领域还和多领域深度融合。在气候和宇宙模拟领域，借助超算对海量数据进行高精度模拟，提高气候预测和宇宙模型的准确性。针对人工智能与大数据方面，新一代超算系统开始融合 AI 算法，加速大规模数据处理，推动从药物研发到新材料设计的各类前沿研究。除此之外在国防与能源领域，高性能计算为国防、核能及能源材料研究提供了坚实的技术支持

#### 4.1.2 Frontier

Frontier 是美国第一个性能超过 1 Exaflop/s 的系统,位于美国田纳西州橡树岭国家实验室(ORNL),它使用了 8,699,904 个核心,目前实现了 1.194 Exaflop/s 的性能。

它基于 HPE Cray EX 架构,结合了第三代 AMD EPYC CPU (针对 HPC 和 AI 优化)、AMD Instinct 250X 加速器以及 Slingshot-11 互连。Frontier 机器在 74 个机柜中总共包含 9408 个节点。73 个机柜, 128 个节点, 一个部分满的机柜, 64 个节点。

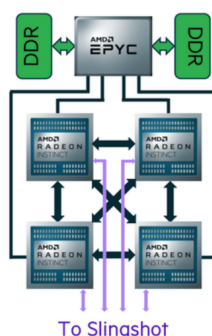


图 4.9: Frontier 的一个节点



Frontier 节点被称为 HPE Cray EX235a，包含一个定制的第三代 AMD EPYC 处理器和 4 个 AMD Instinct MI250X GPU 加速器。每个节点的内存量为 1024 GB。4 个 GPU 和 1 个 CPU 完全连接，即每个 GPU 都有一个到其他 GPU 的 XGMI (AMD Infinity Fabric) 链接和一个到 CPU 的链接。

AMD EPYC CPU 为 Frontier 定制了两种方式。首先，添加了 XGMI 链路，以允许 Frontier 节点上 CPU 和 GPU 之间的一致共享内存。ORNL 之前的超级计算机 Summit 在整个节点上具有一致的共享内存，要求该功能也在 Frontier 上。其次，需要额外的 PCIe 通道，以便在每个 Frontier 节点上允许 4 TB 的节点上非易失性存储器 (NVM)。这种本地存储为 Frontier 的 AI 和 ML 提供了令人印象深刻的 110 亿 IOPS 速率，并提供了 66 TB/s 读取和 62 TB/s 写入的节点本地 IO 性能。

Frontier 的 Slingshot11 网络提供自适应路由、拥塞管理和服务质量。Frontier 配置为三跳飞龙拓扑结构，但 Slingshot 支持任何数量的拓扑结构，例如扁平蝴蝶和胖树。采用飞龙拓扑结构主要是出于成本考虑。它通过减少长距离全局通道来实现这一点。长光缆越少，系统成本就越低。HPE 称，系统中多达 90% 的电缆是价格低廉的铜缆，只有 10% 是光缆。该互连提供 540 TB/s 的带宽。每个计算节点有四个 Cassini 网卡，每个网卡提供 200 Gb/s (25 GB/s) 的带宽，总输出注入带宽为 800 Gb/s (100 GB/s)。该互连连接所有计算和存储机柜，即计算节点、I/O 节点和前端节点。Slingshot 与之前的互连不同之处在于它将以太网作为基础互连。Slingshot 交换机首先使用标准以太网协议运行，但如果连接的设备支持，则会尝试协商高级的“HPC 以太网”功能。这里的意图是让高级 HPC 以太网功能在支持它的设备网络（例如，其他 Slingshot 交换机）中正常工作，同时又能与不支持该功能的以太网设备完全互操作。<sup>[4]</sup>

## 4.2 国内外超算对比与未来展望

### 4.2.1 国内外超算对比

国际超算系统如 Frontier、Aurora 和 El Capitan 代表了全球高性能计算领域的前沿水平。以 Frontier 为例，其运算能力已突破 1 exaFLOPS，采用了 HPE Cray Slingshot 网络互连技术以及高效的水冷散热系统，从而在保证高峰值计算能力的同时，实现了卓越的能效比。这些国际超算不仅在传统的科学计算和气候模拟、宇宙演化模拟等领域发挥着重要作用，还在人工智能训练、材料科学以及国防安全等多样化应用中展现出极高的性能和灵活性。Aurora 和 El Capitan 等系统则各有侧重：Aurora 在 AI 和复杂模拟方面具备强大优势，而 El Capitan 则在整体系统集成和特定国家安全任务中占据一席之地。

与此形成鲜明对比的是，我国超算产业虽然在超算系统数量上连续多年位居全球首位，拥有天河系列、神威·太湖之光、神威 E 级原型机等代表性系统，但在顶级超算系统的峰值性能、自主研发芯片以及整体软硬件生态构建上仍存在一定差距。我国的超算系统应用领域已取得显著成就，如在气象预报、石油勘探、工业仿真和生物医药等方面提供了强有力的计算支持，但在一些关键技术（例如高性能互连、能效优化以及软件生态适配）上，相较于国际顶尖系统，仍需进一步突破。此外，我国在超算领域正加快布局国家级工程，如“东数西算”工程和超算互联网试点，这些举措不仅在硬件设施上提升了整体水平，还为超算算力资源的统一管理和共享创造了条件，从而推动了应用普及和产业生态的逐步完善。

### 4.2.2 未来展望

展望未来，超算的发展趋势将呈现多维融合和协同优化的特征。首先，超算不再仅仅追求单纯的峰值算力，而是将与人工智能、大数据、物联网等前沿技术深度融合，形成集成多领域应用的综合性平台。这意味着，未来的超算系统在支持复杂科学模拟的同时，还将通过加速 AI 模型训练、优化算法

和数据处理，实现更高水平的跨学科协作。其次，异构计算架构将成为主流——未来的超算系统将广泛采用 CPU、GPU、FPGA 以及 ASIC 等多种计算单元协同工作的模式，以充分发挥各自的优势，提升整体计算效率和能耗表现。同时，量子计算和神经形态计算等新兴技术的发展，有望在一定程度上打破传统计算瓶颈，为超算性能带来革命性提升。

此外，绿色低碳和自主可控也是未来超算发展的重要方向。在全球环保压力和国际技术封锁的背景下，如何在保证高性能的前提下降低能源消耗、减少碳排放，将成为设计和运营超算系统的关键。我国将继续加大在核心技术研发和自主芯片、存储设备及软件生态构建上的投入，逐步形成自主可控的全栈体系。最后，超算服务模式也将迎来转变，云端超算和超算互联网平台的建设将使得算力资源实现跨地域共享和按需调度，进一步降低使用门槛，推动超算在科研、工业和国防等各个领域的普及应用。

## 5 总结

本文回顾了我国超算的发展历程，从早期“银河”系统的探索，到“天河”、“神威”及“曙光”系列的逐步突破，展示了我国在高性能计算领域从起步到追赶并在部分应用领域实现领先的过程。尽管我国超算系统在数量和基础设施建设上保持全球领先，但在顶级系统的峰值性能、自主研发芯片及软硬件生态体系构建方面，与国际先进系统（如美国的 Frontier、Aurora 和 El Capitan）仍存在一定差距。国际超算系统依托先进互连技术、异构计算架构及高能效冷却方案，不仅在科学模拟、气候预测、国防安全等领域展现出强大算力，也在 AI 训练和大数据处理等新兴应用中发挥着关键作用。展望未来，超算的发展趋势将更加注重与人工智能、大数据、物联网及量子计算等前沿技术的深度融合，通过推广异构计算和绿色低碳技术，实现从单一追求峰值算力向多领域协同优化和服务模式转变；同时，通过云端超算和统一的超算互联网平台，加速资源共享和按需调度，从而推动我国超算产业由数量优势向质量优势转变，更好地服务于国家科技创新和经济社会发展。

## 参考文献

- [1] 维基百科. 中国超级计算机 — 维基百科, 自由的百科全书, 2025. [Online; accessed 2025].
- [2] 维基百科. 神威 · 太湖之光 — 维基百科, 自由的百科全书, 2024. [Online; accessed 2024].
- [3] 何晓斌蒋金虎. 面向大数据异构系统的神威并行存储系统. 大数据, 6(4):10, 2020.
- [4] J Dongarra and A Geist. Report on the oak ridge national laboratory' s frontier system. *Univ. of Tennessee, Knoxville, Tech. Rep. Tech Report No. ICL-UT-22-05*, 2022.