



南開大學  
Nankai University

计算机学院  
并行体系结构调研

超算——中国之光

姓名：郭允轩  
学号：2311833  
专业：计算机科学与技术

2025 年 3 月 13 日

# 目录

<b>1 我国超算概述</b>	<b>2</b>
<b>2 我国超算发展历史及并行体系结构</b>	<b>2</b>
2.1 银河一号 . . . . .	2
2.1.1 历史 . . . . .	2
2.1.2 并行体系结构 . . . . .	3
2.2 天河一号 . . . . .	4
2.2.1 历史 . . . . .	4
2.2.2 并行体系结构 . . . . .	4
2.3 天河二号 . . . . .	4
2.3.1 历史 . . . . .	4
2.3.2 并行体系结构 . . . . .	4
2.4 神威·太湖之光 . . . . .	5
2.4.1 历史 . . . . .	5
2.4.2 并行体系结构 . . . . .	5
<b>3 国外最新超算分析对比</b>	<b>6</b>
3.1 Frontier . . . . .	6
3.2 Aurora . . . . .	6
<b>4 中国超算的未来发展方向</b>	<b>7</b>
4.1 加强硬件自主创新 . . . . .	7
4.2 搭建国内软件生态 . . . . .	7
4.3 其他 . . . . .	7

## 1 我国超算概述

超级计算机（又称巨型机、高性能计算机），是指能够执行一般个人电脑无法处理的大量资料与高速运算的电脑，相对于大型计算机而言运算速度更高、存储容量更大、功能更完善。超级计算机在密集计算、海量数据处理等领域发挥着重要的作用。超级计算机作为高技术产品，往往能够直接或者间接反映出一个国家的科技水平和计算机发展水平。所以中国在现代化的过程中，必须要研制超级计算机。邓小平在 1978 年 3 月的全国科学技术大会上一句“中国要搞四个现代化，不能没有巨型机”，开启了自研超级计算机的历史进程。

中国超算自此的发展道路，经历了从无到有、从弱到强的历程，逐步跻身世界超算强国之列。40 年间，国防科技大学的“银河”与“天河”系列，中科曙光的“曙光”系列，联想的“深腾”系列，以及无锡江南计算技术研究所的“神威”系列陆续登场，让中国超级计算机事业从一片荒芜走向与世界前列。

1983 年，中国成功研制出第一台超级计算机“银河-I”：中国第一台每秒钟运算一亿次以上的“银河”巨型计算机，由国防科技大学计算机研究所在长沙研制成功，标志着中国进入了超算领域，摆脱了美日的技术封锁的尴尬困境。进入 21 世纪，中国超算技术迎来了快速发展期。2004 年 11 月，国家“863”计划研制成果——曙光 4000A 超级计算机落户上海超级计算中心。曙光 4000A 的峰值运算速度达到 10.2TFlops，在 2004 年 6 月公布的全球超级计算机 TOP500 排行榜中，位列全球第十。这是国产超级计算机首次进入全球排名前十，也标志着中国成为继美、日之后第三个跨越了 10 万亿次超级计算机研发和应用的国家。2005 年 8 月 18 日，上海超级计算中心挂牌“中国国家网格主节点”，曙光 4000A 超级计算机因此成为中国国家网格的最强算力。2009 年，“天河一号”问世，以每秒 2.57 千万亿次的运算速度在全球超级计算机 500 强榜单中排名第一。2013 年，“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连续多次夺得全球超算 500 强榜首，标志着中国超算技术达到了世界领先水平。2016 年，“神威·太湖之光”横空出世，采用自主研发的 SW26010 众核处理器，是世界首台峰值运算能力超过每秒 10 亿亿次、拥有千万核的超级计算机，并实现了全部核心部件的国产化。近年来，“曙光”系列超级计算机也值得关注。

下面，我们将就中国几个重要超算的研发历史和各超算的并行体系结构进行调研。

## 2 我国超算发展历史及并行体系结构

### 2.1 银河一号

#### 2.1.1 历史

我国超算历史进程起源于 1978 年三月的全国科学技术大会：“中国要搞四个现代化，不能没有巨型机。”邓小平同志将研制亿次巨型计算机的任务郑重交给国防科技大学。时任该校计算机研究所所长慈云桂教授听到这个消息，当即向上级立下军令状：每秒 1 亿次一次不少，6 年时间一天不拖，预算经费一分不超。“就算是豁出这条老命，也要把中国的巨型机搞出来！”为什么要这么重视巨型机？上个世纪 80 年代的西方国家正对中国进行高技术封锁，其中就包括超级计算机。美国虽然卖了超级计算机给中国，但是性能有所下调，而且严加监视以防核心技术泄密，因此就有了“玻璃房”的故事：计算机在玻璃房中，由美国人监视，在他们允许的情况下才能使用，并且仅限于某些限定的用途。而且，最后操作日志还要上交美方。

1983 年 12 月 22 日，中国第一台每秒钟运算一亿次以上的“银河”巨型计算机，由国防科技大学计算机研究所在长沙研制成功，填补了国内巨型计算机的空白。

### 2.1.2 并行体系结构

“我国自行设计和研制的第一台“银河”计算机是一台具有多功能部件、双向量阵列可实现多重向量链接、全流水线化的分布式系统；采用素数模块，可进行无冲突地成组访问；有多对快速传输通道，具有庞大的内、外存容量。因此，它适于向量运算和并行处理。” [2] 慈云桂教授说。如下图 2.1 所示

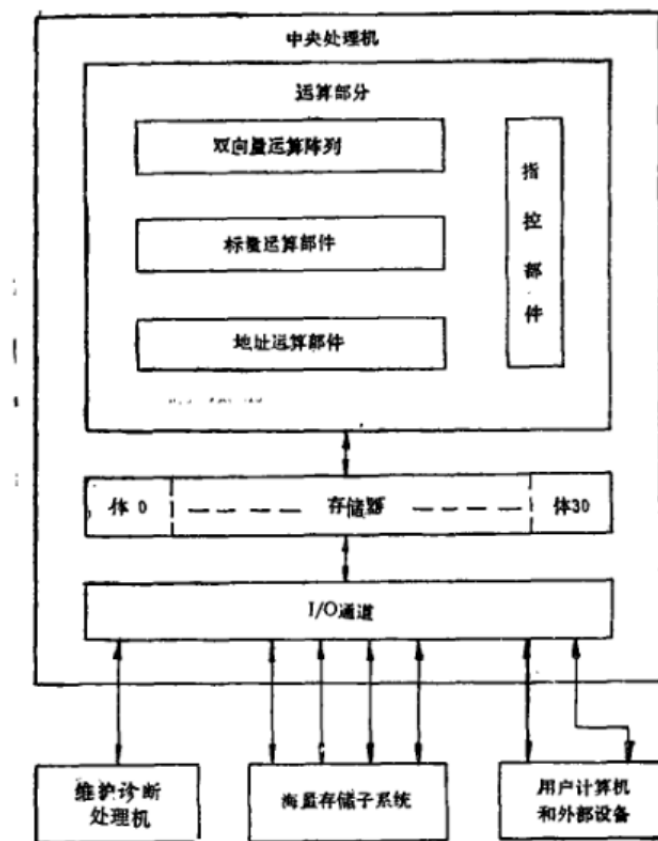


图 1.1 YH-1 计算机系统总框图

图 2.1: 计算机系统总框图

银河计算机采用的并行算法是并行循环奇偶约化法，“在循环奇偶约化法中，每一循环仅对偶数（或奇数）方程消去奇（或偶）下标变量得到的是偶（奇）变量方程，它自身又形成一个封闭的方程组，然后对新的方程组作同样类推，每次得到的方程组总是前一次方程组的一半，当  $N = 2^m - 1$  时，最后剩下一个方程，求解  $x$  过程是回代过程。” [2] 慈云桂教授在几个解方程组的实例中，阐述了这种方法的具体操作过程。

此外，在原文中慈云桂教授也指出并行算法设计是依赖于计算机的。并行算法的效率密切依赖于执行并行算法的计算机结构、计算机的寄存器和处理器间相互联结的适应性和计算机存储数据安排、调度的适应性等。所以，一个高效的并行架构除了要有高效的算法支持，还要适应于该机器的特殊性。所以，对于不同架构的超算，往往拥有独属于该巨型机的并行算法。

## 2.2 天河一号

### 2.2.1 历史

“天河一号”是中国首台千万亿次超级计算机。“天河一号”超级计算机从 2008 年开始研制，按两期工程实施：一期系统（TH-1）于 2009 年 9 月研制成功；二期系统（TH-1A）于 2010 年 8 月在国家超级计算天津中心升级完成。2010 年 11 月 14 日，国际 TOP500 组织在网站上公布了最新全球超级计算机前 500 强排行榜，中国首台千万亿次超级计算机系统“天河一号”排名全球第一。该超级计算机峰值性能速度能达到每秒 1206 兆次双精度浮点数，而 LINPACK 实测性能速度达到每秒 563.1 兆次。它有四个特点：高性能、低能耗、高安全、易使用。

### 2.2.2 并行体系结构

天河一号采用了多阵列、可配置、协同并行体系结构，将全系统分为计算阵列、加速阵列、服务阵列，通过实现“CPU（通用微处理器）+ GPU（图形加速处理器）”的异构协同计算，融合多种计算资源并对其灵活配置，最大限度提高计算效能。它采用混合语言编程技术，通过自适应动态任务划分、流式数据存取、软件流水及亲和调度等技术，实现了计算核心异构协同、系统资源有效配置，一举将 GPU 的计算效率从国际上通常优化前的百分之 20 提高到百分之 70，系统运算速度得到大幅提升。<sup>[5]</sup>“该系统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，系统峰值性能达每秒 1206 万亿次双精度浮点运算，内存总容量 98TB，点点通信带宽每秒 40Gb，共享磁盘容量为 1PB，具有高性能、高能效、高安全和易使用等显著特点，综合技术水平进入世界前列。”<sup>[1]</sup>

## 2.3 天河二号

### 2.3.1 历史

“天河二号”是由国防科学技术大学研制的超级计算机系统，以峰值计算速度每  $5.49 \times 10^{16}$  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位居榜首，成为 2013 年全球最快超级计算机。

上文介绍的“天河一号”曾在全球 TOP500 超级大型计算机排行榜中排名第一，但在 2011 年时被日本最新研发的超级计算机“京”超越了。到了 2012 年，美国的“泰坦”又超越了日本的“京”。“天河二号”由 280 人历时两年多研制完成，耗资约 1 亿美元。研发耗资约 1 亿美元，由国家科技部、广东省人民政府、广州市人民政府共同出资建设。从 2010 年天河一号排名世界第一到 2013 年天河二号再登世界超算之巅，从天河一号 4.7 千兆次到天河二号  $5.49 \times 10^{16}$  次，国防科技大学天河团队再次创造“中国速度”。

2015 年 5 月，由北京师范大学、国防科技大学、加拿大理论天体物理研究所、北京大学、中科院高能物理研究所联合组成的宇宙中微子数值模拟团队，经过一系列技术攻关，在“天河二号”上成功进行了 3 万亿粒子数中微子和暗物质的宇宙学数值模拟，揭示了宇宙大爆炸 1600 万年之后约 137 亿年的漫长演化进程。<sup>[4]</sup>

### 2.3.2 并行体系结构

天河二号采用了自主创的新型异构多态体系结构。在强化科学与工程计算的同时，可高效支持大数据处理、高吞吐率和高安全信息服务等多类应用需求，设计了微异构计算阵列和新型并行编程模型及

框架，提升了应用软件的兼容性、适用性和易用性。天河二号服务阵列采用了国家核高基重大专项支持、该校研制的新一代“FT-1500” CPU，这是当前国内主频最高的自主高性能通用 CPU。天河二号还在高速互连、新型层次式加速存储架构、容错设计与故障管理、综合化能效控制、高密度高精度结构工艺等方面取得了一系列创新和突破。

## 2.4 神威·太湖之光

### 2.4.1 历史

神威·太湖之光超级计算机是世界首台峰值运算能力超过每秒 10 亿亿次、拥有千万核的超级计算机，由国家并行计算机工程技术研究中心研制，安装在国家超级计算无锡中心，主要服务于中国国产大飞机 C919 精细数值模拟、天宫一号陨落路径预测计算等国家重大科技项目，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。

2012 年“神威·太湖之光”项目开始进行调研论证，2016 年神威·太湖之光超级计算机在无锡诞生，2020 年 7 月，中国科大在“神威·太湖之光”上首次实现千万核心并行第一性原理计算模拟。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。它使用的是中国自主知识产权的芯片，由 40 个运算机柜和 8 个网络机柜组成；安装 40960 个中国自主研发的申威 26010 众核处理器。

神威·太湖之光既是“十二五”期间 863 计划在信息技术领域的重要部署，也是国家长期支持、技术积累的成果。2016 年-2018 年，连续三年 6 个项目入围被誉为“超级计算应用领域诺贝尔奖”的“戈登·贝尔奖”。2017 年 11 月 20 日，英国广播公司（BBC）报道，神威·太湖之光夺得冠军。2022 年，名列全球超级计算机 500 强第六名。

### 2.4.2 并行体系结构

神威太湖之光超级计算机的并行体系结构基于国产众核处理器 SW26010（申威 26010 众核处理器），每个 SW26010 处理器包含 260 个计算核心，分为 4 个计算处理单元（CPE），每个 CPE 有 64 个核心和一个管理处理单元（MPE）。MPE 负责任务调度和通信，CPE 专注于并行计算。通过 MPE 和 CPE 协作，实现节点内的任务分配和并行计算，接着再通过自主研发的高速互连网络连接多个节点，支持大规模并行计算。

此外，神威的并行存储系统也值得关注。“神威·太湖之光”并行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、控制以及缓存管理由服务层完成，提高了访问性能，缩短了由 I/O 访问路径增长带来的时延。具体地，首先，针对异构众核场景，“神威·太湖之光”应用轻量级文件系统（LWFS），引入缓存设计并设计协同机制，实现了高效、低资源占用，减少了对计算节点资源的占用开销。然后，针对 I/O 转发服务，系统采用动态转发资源分配机制，避免了 I/O 转发资源利用不足以及受其他作业的 I/O 干扰等情况。在真实系统中部署该机制后，一些应用程序的 I/O 性能提高了 18.9 倍，服务的可用性得到了明显提高。最后，针对后端数据存储服务，“神威·太湖之光”部署了神威全局文件系统（SWGFS），并进行了一系列改进，从而提升了对大数据应用的支持，优化了数据冗余方式，保证了元数据的高速访问和一致性。

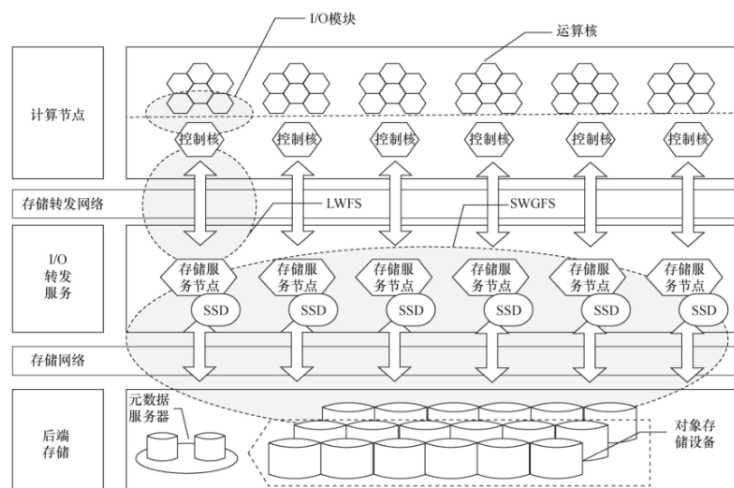


图 2.2: 神威并行存储系统架构

### 3 国外最新超算分析对比

#### 3.1 Frontier

Frontier 是美国第一个性能超过 1Exaflop/s 的系统，位于美国田纳西州橡树岭国家实验 (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。（具体信息见官方网站：[Frontier 官网](#)）2022 年 5 月 30 日，Frontier 击败日本基于 Arm 的富岳超级计算机，登顶最新的超级计算机 Top500 榜单，正式成为全球最快超级计算机。为了更高效的并行计算，Frontier 计算系统安装在 74 个独立的机柜中，包括 9400 个 CPU（标准计算机处理器）和 37000 个 GPU，这些 GPU 可用于呈现 3D 图形，也可用于其他一系列任务。该机器共有 8730112 个内核，能够执行并行计算任务。Frontier 提供针对 AMD 架构优化的编译器工具链（如 GCC、Clang 或 AMD ROCm Compiler），确保源代码能够生成高效、针对性强的目标代码，最大限度发挥硬件潜力。

#### 3.2 Aurora

作为一台超算，Aurora 采用了先进的硬件组合，包括高性能的中央处理单元 (CPU) 和图形处理单元 (GPU)，这使其在处理复杂计算任务时展现出无与伦比的能力。具体来说，Aurora 配备了 63,744 个 GPU，这些 GPU 由英特尔的 Max 系列提供，旨在实现高效的数据处理和并行计算。与传统 CPU 相比，GPU 在处理大规模数据和复杂算法时表现出色，尤其是在深度学习和人工智能领域。[Aurora 官网](#)

Aurora 的 CPU 部分同样不可忽视。它使用的高性能处理器能够支持复杂的科学计算，尤其是在需要大量运算和数据传输的任务中。为了确保数据在各个处理单元之间的高效传输，Aurora 采用了 Slingshot 11 网络架构，这是一种专为高带宽和低延迟设计的互连技术。这种网络架构不仅提升了数据传输速度，还有效减少了计算过程中的瓶颈，使得 Aurora 能够在处理海量数据时保持高效。

在性能指标方面，Aurora 的计算能力超过了一个艾克斯级的标准，能够每秒执行超过一亿亿次的计算。这一性能使得 Aurora 在科学模拟和数据分析中具有极大的优势，尤其是在处理大规模数据集



时，能够提供更快的结果和更高的精度。Aurora 的性能虽然在 TOP500 排名中略逊于 Frontier，但其在 AI 训练和科学模拟中的应用潜力却是毋庸置疑的。紧随微软、谷歌、Meta 之后，英特尔亦于日前，在德国汉堡举行的国际超级计算大会高性能会议上，官宣“与阿贡国家实验室携手，用 Aurora 超级计算机开发生成式 AI 模型 Aurora genAI，参数量将多达 1 万亿”。[3]

## 4 中国超算的未来发展方向

### 4.1 加强硬件自主创新

继续加强硬件、处理器的可控化和国产化，确保核心科技在自己手中；目前国内在 CPU 和 GPU 的设计与制造上已取得显著进展，例如申威处理器和飞腾处理器。然而，与国外领先的超算硬件（如 Intel、AMD、NVIDIA 等）相比，国内硬件在能效比、计算密度和通用性方面仍有提升空间。而且中国仍需继续努力探索新型架构，比如量子计算、类脑计算等。

### 4.2 搭建国内软件生态

在软件这一方面，国外已经有了完整成熟的软件生态环境，而国内的软件生态仍有很大进步空间，需要继续努力搭建平台，发展软件，包括操作系统、编译器、应用程序等。

### 4.3 其他

加强与国外的交流合作，学习高新的技术；人才是超算发展的核心驱动力，未来，中国需要加强超算领域的高端人才培养，吸引全球顶尖人才；同时，拓宽超算的应用场景，普及计算机知识，营造欣欣向荣的超算研究环境。

## 参考文献

- [1] 中国科学院. 我国首台千万亿次超级计算机系统天河一号研制成功打破美国在千万亿次超级计算机系统垄断. 人民网, 2009.
- [2] 李晓梅慈云桂. 银河计算机与并行算法. 计算机学报, 1987.
- [3] 澎湃新闻. 英特尔 Aurora genAI 模型以万亿参数入局大模型领域. 澎湃, 2024.
- [4] 观察者. 中国“天河二号”完成宇宙暗物质数值模拟可推演 137 亿年宇宙历史. 新华网, 2015.
- [5] 王握文陈明. 国防科大“天河一号”研制纪实：自主创新攀登世界科技高峰. 科学时报, 2009.