



南开大学
Nankai University

南 开 大 学

计 算 机 学 院

并行程序设计调研报告

中国超算发展历程与技术演进

姓名：林晖鹏

学号：2312966

专业：计算机科学与技术

指导教师：王刚

2025 年 3 月 20 日

目录

一、 引言 1

 (一) 调研背景与意义 1

 (二) 调研目标与报告结构 1

二、 我国超级计算机发展历史 1

 (一) 早期探索阶段 (1980s-1990s) 1

 (二) 并行计算时代 (2000s) 2

 (三) 进入 E 级超算竞赛 (2010s-至今) 2

 (四) 小结 3

三、 代表性超级计算机并行体系结构分析 3

 (一) 神威·太湖之光架构剖析 4

 (二) 天河三号架构剖析 5

 (三) 小结 5

四、 国际超算架构对比分析 5

 (一) 国际最新超算概述 6

 (二) 超算架构对比 6

 (三) 计算性能与体系结构对比 6

 (四) 能效对比 7

 (五) 小结 7

五、 总结与展望 7

 (一) 总结 7

 (二) 未来展望 8

 (三) 面临的挑战 8

 (四) 结论 8

一、引言

(一) 调研背景与意义

超级计算机(Supercomputer)是现代计算技术的巅峰代表,广泛应用于科学研究、工业模拟、人工智能训练等领域。其计算能力不仅决定了一个国家在科技前沿领域的竞争力,同时也是国家信息化和自主创新能力的重要体现。近年来,随着大数据、深度学习、量子计算等技术的飞速发展,超级计算机的需求愈发旺盛,推动着全球范围内高性能计算(High-Performance Computing, HPC)技术的持续演进。

我国超级计算机的发展始于 20 世纪 80 年代,经过数十年的自主研发和技术积累,已在全球 HPC 领域占据重要地位。尤其是在 Top500 榜单的竞争中,我国的“天河”系列、“神威”系列和“曙光”系列等超级计算机屡次进入世界前列,部分系统甚至达到全球领先水平。我国超算的发展不仅推动了计算机体系结构、并行计算模型、能效优化等多个关键领域的技术进步,也为国家安全、科技创新、工业升级提供了重要支撑。

(二) 调研目标与报告结构

本报告旨在调研我国超级计算机的发展历程,分析其技术演进路径,并重点剖析具有代表性的超级计算机的体系结构,以探究其并行计算模型、处理器架构、存储与互连技术等关键要素。此外,本文还将通过对比国外最新超算(如 Frontier、Aurora、富岳等),分析我国超算在国际竞争中的地位,并展望未来发展趋势。

本报告的结构安排如下:

- 第二章介绍我国超级计算机的发展历史,涵盖从早期的“银河”系列到最新的“天河”“神威”系列的演进过程。
- 第三章深入剖析典型超算系统的并行计算体系结构,包括计算核心设计、互连架构及存储优化方案。
- 第四章通过对比国际最新超算系统,分析我国超算在计算性能、体系结构、能效等方面的优势与不足。
- 第五章总结报告核心内容,并对我国超算的发展提出展望。

二、我国超级计算机发展历史

我国的超级计算机发展始于 20 世纪 80 年代,历经多个发展阶段,从最初的跟随国际技术发展,向苏联学习,到后来的自主创新,再到如今跻身全球超算领先行列。总体来看,我国超算的发展可大致分为以下几个阶段:早期探索阶段(1980s-1990s)、并行计算时代(2000s)以及 E 级超算竞赛(2010s-至今)。

(一) 早期探索阶段(1980s-1990s)

在 20 世纪 80 年代以前,我国在 HPC 领域相对落后,主要依赖进口计算机进行科学计算,甚至在一定程度上受他国监控。然而,随着国家对信息技术自主可控的需求提升,我国开始研制自主的超级计算机,其中最具代表性的是“银河”系列。

1. 银河-I

银河-I [4] (1983 年研制成功) 是我国第一台每秒亿次级运算能力的超级计算机, 由国防科技大学研制, 标志着我国正式进入超级计算时代。该机采用向量处理架构, 包含多个并行计算单元, 主处理器为当时国内研制的 **16 位微处理器**, 主频为 100MHz, 峰值性能达到 1 GFLOPS (10 亿次浮点运算每秒)。尽管该系统与当时国际先进超算 (如美国 Cray-1) 仍存在较大差距, 但其成功研制奠定了我国超算发展的基础。

2. 银河-II

在银河-I 的基础上, 我国继续发展银河-II [5], 进一步提升计算性能, 并在体系结构上引入 **多处理器并行计算模式**。银河-II 是我国第一台采用 **共享存储多处理器架构** 的超算, 标志着我国正式迈向并行计算时代。然而, 受限于当时的工艺水平, 我国超算仍然未能达到国际顶尖水平。

(二) 并行计算时代 (2000s)

进入 21 世纪, 我国超算发展加快, 进入大规模并行计算阶段, 涌现出多个具有里程碑意义的超级计算机, 如“曙光”系列 [3]、“天河”系列和“神威”系列。与此同时, 我国开始尝试引入 **异构计算架构**, 并通过改进并行计算模型, 提高超算系统的整体性能。

1. 曙光系列

曙光系列 [3] 超级计算机由中科院计算所研制, 代表了我国在 **大规模并行计算和国产高性能处理器** 领域的探索。主要机型包括:

- **曙光 1000 (1995 年)**: 我国首台进入 Top500 榜单的超算, 采用 RISC 处理器架构;
- **曙光 2000 (2001 年)**: 采用 Intel Itanium 处理器, 峰值性能突破 1 TFLOPS;
- **曙光 5000A (2008 年)**: 首次突破 10 TFLOPS, 标志着我国超算进入大规模并行计算时代。

2. 天河系列: GPU 加速计算的先驱

天河-1 [6] (2009 年) 是我国第一台采用 **异构计算架构** (CPU+GPU) 的超级计算机, 由国防科技大学研制, 其后续版本天河-1A (2010 年) 的计算峰值性能达 2.57 PFLOPS, 是当时世界最快的超算之一, 曾短暂登顶 Top500 榜首。

3. 神威蓝光: 自研处理器的突破

2011 年, 神威蓝光超级计算机 [1] 问世, 标志着我国首次实现 **完全自主化** 的超算系统。其采用国产申威 SW1600 处理器 (16 核)、**共享存储 + 消息传递混合并行计算模式**, 峰值计算性能达 1.27 PFLOPS, 跻身 Top500 全球前列。这一时期, 我国超算逐步摆脱对国外处理器的依赖, 为未来自主化发展奠定了基础。

(三) 进入 E 级超算竞赛 (2010s-至今)

近年来, 我国超算在国际竞争中表现突出, 先后推出“天河二号”、“神威·太湖之光”等顶尖超算, 并持续推进 **E 级计算** (Exascale Computing, 10^{18} 次浮点运算每秒) 的研发。

2016 年,我国还设立了重点专项,总体目标指向突破 E 级计算机核心技术,依托自主可控技术,研制满足应用需求的 E 级(百亿亿次级)高性能计算机系统,使我国高性能计算机的性能在“十三五”末保持世界领先水平。

1. 天河二号:突破百 P 级计算

天河二号(2013 年)曾两次荣登 Top500 榜首,其采用 **Intel Xeon+Xeon Phi 异构架构**、国产“**银河**”**高性能互连网络**,计算峰值性能达 54.9 PFLOPS,在 2013 年至 2015 年间保持全球第一。

2. 神威·太湖之光:全球首台百 P 级纯国产超算

2016 年,我国发布神威·太湖之光,成为全球首台**纯国产**超级计算机,并在 Top500 榜单上夺得冠军。其采用**申威 26010 处理器**、自主研发的**片上网络**,计算峰值性能达 125 PFLOPS,打破国际封锁,实现高性能计算自主可控。

3. 天河三号原型机:迈向 E 级计算的探索

天河三号原型机是我国在 E 级超算领域的重要探索成果,由国家超级计算天津中心研制,采用**国产自主互连架构**,为未来 E 级超算系统提供了技术验证平台。该原型机在 Green Graph500 排行榜中多次夺冠,展现了其在大规模图计算和高效能计算领域的领先优势,为我国正式迈入 E 级计算时代奠定了基础。

4. 神威 E 级原型机:自主可控的高性能计算

神威 E 级原型机基于**国产申威处理器**和**自主研发的高效互连网络**,其架构针对 E 级计算的高性能需求进行了深度优化。该系统的计算能力远超百 P 级超算,为我国自主掌控 E 级超算核心技术提供了重要支撑,标志着我国在超算自主可控领域的重大突破。

5. 曙光 E 级超算:面向未来的高性能计算平台

曙光 E 级超算采用**国产处理器 + 高性能互连网络**的协同优化架构,致力于支撑国家在人工智能、大数据分析、气候模拟等领域的前沿研究。该系统在 E 级计算能力的研发上取得了关键性进展,为我国未来正式部署完整的 E 级超算系统提供了技术储备。

(四) 小结

我国超级计算机的发展经历了从**引进技术**到**自主研发**,再到**全球领先**的全过程。如今,我国在超算硬件、软件、并行计算架构等多个领域均已取得突破,正积极迈向 E 级计算时代。在未来,我国超算的发展将更加注重**自主化**、**高效能**、**AI 融合**,以持续保持国际竞争力。

三、 代表性超级计算机并行体系结构分析

在我国超算发展过程中,多种体系结构和并行计算模式被应用于不同的超级计算机,以优化计算效率、降低功耗,并提升整体性能。本章将重点分析两种具有代表性的超算架构:**神威·太湖之光**和**天河三号**,探讨它们在计算核心、并行计算模式、互连架构和存储优化等方面的关键技术。



图 1: 神威·太湖之光

(一) 神威·太湖之光架构剖析

神威·太湖之光 (Sunway TaihuLight) 是我国自主研发的高性能计算机, 曾在 2016 年登顶 Top500 榜单, 成为全球首台突破百 P 级 (125 PFLOPS) 的超级计算机。该系统基于**自主申威 (SW26010) 处理器**, 采用**纯 CPU 架构**, 没有依赖 GPU 加速器, 是我国超算自主可控的重要里程碑。

1. 计算核心: 申威 SW26010 处理器

申威 SW26010 是一款 Many-Core (众核) 架构的处理器, 主要特点如下:

- **核心架构:** 每颗 SW26010 处理器包含 260 个**计算核心**, 并划分为**四个核心组 (CG, Core Group)**;
- **计算单元:** 每个核心组 (CG) 包含 64 个**计算核心**, 另有 1 个**管理核心 (MPE, Management Processing Element)** 和 1 个**共享内存控制器**;
- **向量计算能力:** 采用 **SIMD (Single Instruction Multiple Data)** 指令集, 支持 64 位向量运算, 提高数据并行计算能力;
- **片上存储:** 每个 CG 配备独立的**片上高速缓存**, 但不采用全局缓存 (L3), 提高数据本地性。

2. 并行计算模式

神威·太湖之光采用 **MIMD+SIMD 混合并行计算架构**:

- **MIMD (Multiple Instruction Multiple Data):** 多个计算核心可以独立执行不同的计算任务, 提高并行计算效率;
- **SIMD (Single Instruction Multiple Data):** 每个计算核心内部采用向量化计算, 提高单指令多数据流处理能力;
- **三级并行模式:**
 1. 处理器级并行: 由多个 SW26010 处理器组成的计算节点并行执行任务;
 2. 计算核心级并行: SW26010 内部的 260 个核心协同计算;
 3. 线程级并行: 支持 MPI (消息传递接口) 和 OpenMP 混合编程, 提高并行扩展性。

3. 互连架构与存储优化

神威·太湖之光采用高效的**三维 Mesh 互连网络**，其特点包括：

- **网络拓扑结构**：采用**三维网格（3D Mesh）**互连方式，优化节点间通信带宽；
- **高吞吐低延迟**：支持 **RDMA（远程直接存储访问）** 技术，提高数据传输效率；
- **存储架构**：每个计算节点配备本地存储，同时采用**分布式存储系统**，优化海量数据访问性能。

（二） 天河三号架构剖析

天河三号（Tianhe-3）是天河二号的继任者，目标是实现 **E 级计算（Exascale Computing）**，预计于 2025 年前后投入使用。

1. 计算核心

- 采用**国产 ARM 架构处理器**，替代 Intel CPU，增强自主可控能力；
- 可能引入**国产加速器**（如飞腾或昇腾），优化异构计算能力；

2. 并行计算模式

- 继续采用 **MPI+OpenMP** 混合并行模型；
- 可能引入 **AI 计算优化**，支持深度学习任务。

3. 存储与互连

- 采用**国产高速互连网络**，优化数据传输效率；
- 采用**分布式存储系统**，优化高性能数据访问。

（三） 小结

本章剖析了我国代表性超级计算机的并行体系结构。神威·太湖之光采用**纯 CPU 众核架构**，在高性能计算任务上表现优异，而天河三号采用**异构计算架构**，结合 CPU 和加速器提升计算效率。未来，随着天河三号的研发，我国超算将在 **E 级计算、国产自主化、AI 融合** 等方向进一步突破。

四、 国际超算架构对比分析

随着超算技术的飞速发展，全球多个国家和地区推出了先进的超算系统。美国的 **Frontier** 和 **Aurora**、日本的**富岳（Fugaku）** 等超算，代表了国际超算技术的前沿水平。本章将通过对比我国代表性超算与这些国际超算，分析其架构特点、计算性能、能效等方面的异同。

(一) 国际最新超算概述

1. Frontier

Frontier 是美国橡树岭国家实验室 (ORNL) 开发的超算, 凭借 **AMD EPYC 7003 处理器和 Instinct MI250X 加速器**, 成为全球首台登上 top500 的 E 级超算 (参考上一章, 好像我们中国早就有了, 但一直没有提交测试信息), 目前峰值性能达到 2 EFLOPS。该系统基于**异构计算架构**, 优化了大规模并行计算和数据传输效率, 预计将应用于高性能计算、人工智能、大数据分析等领域。

2. Aurora

Aurora 是由阿贡国家实验室 (Argonne National Laboratory) 开发的超算。它基于 **Intel Xeon Max 处理器和 Ponte Vecchio GPU**, 其设计目标是提供 **2 EFLOPS** 的峰值性能, 支持人工智能、量子计算、天气预报、分子模拟等复杂任务。Aurora 采用 **CPU+GPU 异构架构**, 支持大规模并行计算和混合任务处理。

3. 富岳

富岳由日本理化学研究所 (RIKEN) 和富士通共同研发, 曾在 2020 年夺得 Top500 榜单的冠军, 峰值性能为 **537 PFLOPS**。富岳基于 **ARM 架构 A64FX 处理器**, 采用**纯 CPU 架构**, 特别优化了高效能运算和大规模并行任务的处理能力。富岳在气候模拟、药物研发、生命科学等领域有广泛应用。

(二) 超算架构对比

通过以下对比表格, 我们可以更加直观地比较我国超算与国际最新超算的架构设计。

超算	CPU	GPU/加速器	并行体系结构	能效
Frontier	AMD EPYC 7003	AMD Instinct MI250X	CPU+GPU 异构计算架构	52 GF/W
Aurora	Intel Xeon Max	Intel Ponte Vecchio GPU	CPU+GPU 异构计算架构	30+ GF/W
富岳	ARM A64FX	无	纯 CPU 架构 (高效能计算)	14 GF/W
神威·太湖之光	申威 SW26010	无	MIMD+SIMD 混合架构	6 GF/W

表 1: 超算架构对比 [2]

(三) 计算性能与体系结构对比

从计算性能角度来看, Frontier 和 Aurora 代表了全球超算的顶尖水平。Frontier 的峰值性能达到 **2 EFLOPS**, 而 Aurora 也达到了**接近 2 EFLOPS** 的峰值性能。这两台超算均采用 CPU+GPU 异构架构, 通过结合 CPU 的串行处理能力和 GPU 的并行计算优势, 能够在高性能计算和人工智能等领域提供卓越的性能。

与之相比，富岳虽然没有使用 GPU 加速，但其基于 ARM A64FX 处理器的纯 CPU 架构仍然在性能和能效方面表现优秀，尤其在高效能计算和大规模并行任务处理上，富岳具有独特优势。相比之下，我国的神威·太湖之光采用了自主研发的申威 SW26010 处理器，凭借其众核架构在并行计算上具有优势，但其计算能力与国际领先水平仍存在一定差距。

系统	核心数	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	功率 (千瓦)
Frontier	9,066,176	1,353.00	2,055.72	24,607
Aurora	9,264,128	1,012.00	1,980.01	38,698
富岳	7,630,848	442.01	537.21	29,899
神威·太湖之光	10,649,600	93.01	125.44	15,371

表 2: 2024 年 11 月 top500 [2] 数据

(四) 能效对比

能效是衡量超算系统整体性能的重要指标之一，尤其在能源成本逐渐成为瓶颈的今天，超算的能效水平变得愈加重要。从表格中可以看出，Frontier 的能效达到 52 GF/W，是目前世界领先水平的代表。而富岳的能效为 14 GF/W，相比之下有所不及，但仍然处于较为优秀的水平。

我国的神威·太湖之光则展现了较为突出的能效水平，达到 6 GF/W，这表明我国超算在能效优化方面取得了一定的成就。

(五) 小结

本章通过对比分析了我国超算与国际最新超算（如 Frontier、Aurora、富岳等）的架构和性能差异。从计算性能、体系结构、能效等方面看，我国的超算在自主创新方面取得了显著成绩，但与国际领先水平仍有一定差距。

五、 总结与展望

(一) 总结

本报告系统回顾了我国超级计算机的发展历程，分析了代表性超算系统（如神威·太湖之光、天河三号）的并行体系结构，并对比了我国超算与国际最新超算（如 Frontier、Aurora、富岳等）的技术特点。通过研究可以得出以下主要结论：

- **我国超算从追赶到并跑：**从早期的“银河”系列到“天河”和“神威”系列，我国超算已进入全球领先行列，在 Top500 榜单 [2] 上多次位列前茅，表明我国在超算硬件、软件和计算架构方面取得了重要突破。
- **自主化进程持续推进：**我国已成功研制出申威、飞腾等国产处理器，并在超算系统中应用，如神威·太湖之光全面采用国产申威 26010 处理器，天河三号计划基于国产 ARM 架构。未来，技术自主化仍是我国超算发展的核心任务。
- **异构计算成为主流趋势：**国际超算已广泛采用 CPU+GPU 或专用加速器的异构架构（如 Frontier 的 AMD Instinct MI250X 加速器、Aurora 的 Ponte Vecchio GPU），而我国的天河二号、天河三号也在向异构计算方向发展，以提升能效和计算能力。

- **超算能效仍需提升：**尽管我国超算在计算性能上接近国际先进水平，但在能效优化上仍存在一定差距，如 Frontier 的能效高达 52 GF/W，而神威·太湖之光的能效仅为 6 GF/W，未来需要在功耗优化、能效提升方面加强技术创新。

（二） 未来展望

随着全球超算进入 E 级计算时代，我国超算的发展目标已从计算性能的突破转向计算架构创新、能效优化和应用生态构建。未来我国超算的发展将重点关注以下几个方向：

1. 短期目标

- **E 级超算部署：**天河三号预计于 2025 年完成，将标志着我国正式进入 E 级计算时代，支持气候模拟、材料科学、人工智能等高性能计算任务。
- **国产软硬件生态完善：**加强自主高性能处理器（如飞腾、申威、昇腾）和高性能计算加速器的研发，构建完整的国产超算软件生态，减少对国外技术的依赖。
- **超算与人工智能融合：**未来的超算将不仅仅是传统科学计算的工具，还将与人工智能深度融合，推动 AI 模型的训练、推理优化，提高算力利用率。
- **能效优化与绿色计算：**降低超算系统的功耗，提高计算能效（GF/W），优化冷却系统，推动绿色计算技术发展。

2. 长期发展趋势

- **新型计算架构：**后冯·诺依曼架构、存算一体、光计算、量子计算等新技术可能成为未来超算的突破方向。
- **智能化计算系统：**未来超算可能采用自适应计算系统，根据任务需求自动优化资源分配，提高计算效率和灵活性。
- **量子计算融合：**量子计算与经典超算结合，或将在化学模拟、密码学、优化问题等领域提供全新突破。

（三） 面临的挑战

尽管我国超算发展取得了显著成就，但在未来的全球竞争中仍面临以下挑战：

- **核心技术仍部分依赖国外：**我国超算在芯片、系统软件、互连技术等方面仍然面临技术封锁，自主研发的超算系统仍相对较少，关键技术的自主可控仍是长期目标。
- **超算应用软件生态不完善：**我国超算行业发展较快，但高水平并行应用软件较少，生态体系尚未成熟，需要进一步加强超算软件研发和优化。
- **超算基础设施投入与产出平衡：**当前超算中心的建设取得一定成效，但运营成本高，商业化应用不足，仍需优化资源配置，提高超算在工业、医疗等领域的应用价值。

（四） 结论

未来，我国超算将持续推进技术自主化，突破 E 级计算，提升能效，并推动超算与 AI、量子计算的融合。通过持续的技术创新和国际合作，我国有望在全球超算领域占据更重要的地位，为科学研究、经济发展、国家安全提供更强大的计算支撑。

参考文献

- [1] 中国制造首台全部采用国产 cpu 千万亿次计算机. **硅谷**, (21):3, 2011.
- [2] H. Meuer, H. Simon, E. Strohmaier, et al. TOP500 Supercomputer Sites. Online, 2024. Accessed: 2024-03-20.
- [3] 付向核. 曙光高性能计算机的创新历程与启示. **工程研究-跨学科视野中的工程**, 1(03):282–291, 2009.
- [4] 司宏伟 and 冯立昇. 中国第一台亿次巨型计算机“银河-I”研制历程及启示. **自然科学史研究**, 36(04):563–580, 2017.
- [5] 百度百科. 银河 II 型巨型计算机, 2023. Accessed: 2025-03-12.
- [6] 赵阳辉, 陈方舟, and 温运城. 国之重器: “天河” 高性能计算机发展历程. **科学 (上海)**, 68(3):50–53, 1 2016.