



南开大学
Nankai University

南 开 大 学

计 算 机 学 院

并行程序设计实验报告

并行体系结构调研

姓名：赵熙

学号：2210917

专业：计算机科学与技术

2025 年 3 月 7 日

目录

- 1 我国超级计算机发展历史 2
 - 1.1 中国超算发展面临的挑战 2
 - 1.2 未来展望 2
- 2 超算调研：富岳 3
 - 2.1 计算性能 3
 - 2.2 硬件架构 3
 - 2.3 存储与内存 3
 - 2.4 互连架构 3
 - 2.5 能效表现 3
 - 2.6 计算节点规模 3
 - 2.7 排名情况 4
 - 2.8 主要应用领域 4
 - 2.9 富岳的并行体系结构 4
 - 2.9.1 分布式内存系统-Fugaku System 4
 - 2.9.2 互联网络-TofuD 网络 4
 - 2.9.3 多核 CPU 与分布式内存 5
 - 2.9.4 ALBERT 预训练模型优化 5
 - 2.9.5 未来优化方向 5
- 3 CPU 调研 6
 - 3.1 Intel 酷睿 14 代 6
 - 3.1.1 Intel 酷睿 14 代并行架构的设计 6
- 4 中外超算实力对比及未来展望 6

1 我国超级计算机发展历史

我国的超级计算机发展经历了多个阶段，从 20 世纪 50 年代起步，到 1980 年代银河系列的突破，再到 2010 年后领先全球的神威和天河系列。随着计算需求的增长以及国家对信息技术的重视，我国在超级计算领域不断取得突破，并在全球占据重要地位。

我国计算机行业起步较早，1958 年 8 月 1 日，中国第一台数字电子计算机——103 机诞生，为我国计算机技术奠定了基础。进入 80 年代，我国开始研制超级计算机，并于 1983 年成功推出银河-I 号，使我国成为继美国、日本之后第三个能独立研制超级计算机的国家。银河-I 号采用向量处理架构，计算性能达到 1 亿次/秒。1992 年，银河-II 号成功研制，计算性能提升至 10 亿次/秒，并首次进入全球 Top500 超算排行榜，标志着我国在超算领域的重要突破。

进入 90 年代，我国的超级计算技术逐渐成熟，并进入商用化阶段。1995 年，中国科学院计算技术研究所研制出曙光 1000 超级计算机，采用 RISC 处理器架构，实现高性能计算。2004 年，曙光 4000A 进入全球排名前 10，采用 AMD Opteron 处理器，并行计算能力显著提升。与此同时，联想集团于 2002 年研制出深腾 1800 型超级计算机，并发展深腾系列，进一步推动我国超算的发展。

2009 年，国防科技大学成功研制“天河一号”超级计算机，计算性能达到 1.2 PFLOPS，使我国成为世界上第二个成功研制千万亿次超算的国家。在 2010 年的 Top500 排行榜上，“天河一号”荣登世界第一，标志着我国超算迈入全球领先行列。2013 年，“天河二号”问世，其计算性能达到 33.86 PFLOPS，并连续 6 次蝉联全球超算榜首。“天河二号”采用 Intel Xeon 处理器，并配备自主研发的“飞腾 FT-1500”加速器，实现了国产化突破。

2016 年，“神威·太湖之光”超级计算机正式发布，其计算性能达到 125.4 PFLOPS，成为世界上首台完全基于国产 CPU 构建的超级计算机。该系统采用申威 SW26010 处理器，实现全自主可控，并连续四次蝉联全球超算排行榜第一。2021 年，神威·E 级超算进入研制阶段，预计计算能力将突破 1 EFLOPS，迈入百亿亿次计算时代，继续巩固我国在全球超算领域的领先地位。

1.1 中国超算发展面临的挑战

尽管我国超算取得了巨大成就，但在发展过程中仍然面临诸多挑战。其中，自主创新难题是最关键的问题之一。早期的“天河一号”和“天河二号”主要依赖 Intel 和 AMD 处理器，导致核心技术受制于人。2015 年，美国政府禁止英特尔向中国出口高端芯片，2018 年更进一步限制高性能计算相关技术的出口，给我国超算发展带来极大挑战。

为了打破技术封锁，我国推出“申威”系列处理器，并在“神威·太湖之光”中实现完全国产化。然而，与国际最先进芯片相比，国产处理器仍存在性能低、功耗高等问题。此外，超级计算机的能耗问题也日益严峻，例如“神威·太湖之光”一年的用电量达 15 兆瓦，相当于 3 个清华大学的用电量，而“天河二号”年耗电量更是高达 2 亿度，电费成本极其高昂。

当前国际超算排名已不再单纯追求计算性能，而更加关注能效比 (GFlops/W)。我国超算未来的发展需要在提高计算能力的同时，优化能源效率，降低功耗，以实现可持续发展。

1.2 未来展望

我国超级计算机的未来发展将围绕以下几个方面展开。首先，E 级计算时代即将到来，我国正在加快推进“天河三号”和“神威·E 级超算”的研制，以实现百亿亿次计算能力。其次，在芯片领域，我国将加快推进国产 CPU 及加速器的研发，如申威、飞腾等，以摆脱对国外技术的依赖。此外，未来超算架构将更加注重异构计算，结合 CPU、GPU、FPGA 等多种计算单元，以提高计算效率和适应不同应用场景。最后，绿色计算将成为未来发展的重要方向，采用液冷、浸入式冷却等先进制冷技术，以降低能耗，提高能源利用效率。

随着国家对超算的持续投入,我国有望在未来超算领域继续保持全球领先地位,为科技创新、人工智能、大数据分析等领域提供强大的计算支持。

2 超算调研: 富岳

富岳 (Fugaku) 超级计算机是日本理化学研究所与富士通公司合作开发的高性能计算系统,旨在推进科学研究和社会应用,尤其在医疗、气象模拟、人工智能等领域展现了卓越性能。富岳于 2020 年 6 月登上全球超级计算机 Top500 榜单的第一名,并连续四次蝉联榜首,标志着日本在高性能计算领域的领先地位。

2.1 计算性能

富岳的理论峰值计算性能达到 537.21 PFLOP/s,而在 Linpack 实测性能 (Rmax) 方面达到 442.01 PFLOP/s。此外,在 HPCG 基准测试中的性能为 16.00 PFLOP/s, Graph 500 性能为 102,955 GTEPS,在 HPL-AI 基准测试中,其 AI 计算能力可达 2.0 EFLOP/s (2000 PFLOP/s)。

2.2 硬件架构

富岳采用富士通 A64FX 处理器,该处理器基于 ARM 架构,具备 512-bit SVE (Scalable Vector Extension) 向量计算能力。整个系统共有 7,630,848 颗计算核心,每个 CPU 包含 48 颗计算核心和 4 颗辅助核心,时钟频率为 2.2 GHz。A64FX 处理器的高带宽特性极大提升了计算效率,特别适用于 HPC 和 AI 计算任务。

2.3 存储与内存

富岳的总内存容量达到 4.85 PB,并使用 HBM2 高带宽存储,每个计算节点配备 32 GB HBM2 内存,单 CPU 内存带宽高达 1024 GB/s。这种设计极大减少了存储访问瓶颈,提高了数据处理速度,使其在科学计算和大规模数据分析中具备优势。

2.4 互连架构

富岳采用 Tofu-D 互连网络架构,使用 6D Torus 拓扑结构,每个端口的带宽为 5 GB/s,总通信带宽达到 159 PB/s。这种互连架构能够有效降低计算节点之间的通信延迟,提高整体并行计算效率。

2.5 能效表现

富岳的总功耗为 28 MW,能效比 (GFlops/W) 为 14.67 GFlops/W。尽管未能在 Green500 排行榜上获得最高能效评分,但其能源效率仍然处于领先水平。富岳采用了高效的散热与电源管理系统,以优化功耗表现。

2.6 计算节点规模

富岳由 158,976 个计算节点组成,每个节点配备 1 颗 A64FX 处理器。整个系统安装在 396 个满配机柜和 36 个半配机柜中,以满足大规模并行计算的需求。

2.7 排名情况

富岳自 2020 年 6 月首次登上 Top500 排行榜第一名，并在 2020 年 11 月、2021 年 6 月和 2021 年 11 月连续四次蝉联世界第一。然而，在 2022 年 6 月的排行榜中，富岳被美国 Frontier 超级计算机超越，排名降至第二。在 HPCG 和 Graph500 评测中，富岳仍然保持全球领先地位。

2.8 主要应用领域

富岳在多个领域展现了卓越的计算能力，特别是在以下应用中具有突出贡献：- 新冠病毒传播模拟，助力疫情防控研究。- 药物分子模拟，加速新药研发。- 台风和气象预测，提高自然灾害预警能力。- 人工智能训练，优化深度学习计算框架。- 材料科学研究，推动新型材料的开发。

富岳的设计不仅追求高计算性能，还关注能效优化和广泛的社会应用。它在 AI、HPC 和工程计算领域的卓越表现，为全球超算技术的发展提供了重要借鉴。

2.9 富岳的并行体系结构

2.9.1 分布式内存系统-Fugaku System

富岳（Fugaku）超级计算机采用了高度分布式的内存系统，以提高大规模计算任务的吞吐能力和扩展性。整个系统由 396 个满配的机柜（Rack）和 36 个半配的机柜组成，每个机柜包含 384 个计算节点（Node），整体计算节点总数高达 158,976 个。

在该架构下，每个计算节点都配备了一颗富士通 A64FX 处理器，并且所有计算节点通过高性能网络互联，使得系统可以高效地执行大规模并行计算任务。此外，富岳采用共享-分布式存储架构，使得多个计算节点能够协同处理计算任务，同时具备较低的延迟和高带宽的数据访问能力。

2.9.2 互连网络-TofuD 网络

富岳采用 TofuD 网络进行节点间通信，这是富士通专门为该系统设计的高效互连架构。TofuD 网络使用 6D Torus（六维环形网）作为拓扑结构，每个计算节点通过多个端口与周围节点相连，以减少通信延迟并提高数据吞吐率。

该 6D 网络使用六个坐标轴 X, Y, Z, A, B, C 表示：

- 其中 A, C 坐标可以取值 0 或 1；
- B 坐标可以取 0, 1, 2；
- X, Y, Z 轴的坐标范围取决于系统的规模。

不同坐标的取值决定了系统的拓扑结构，并影响数据传输的路径优化。通常情况下：

- X, Y, Z, B 方向使用 2 个端口（Port）进行互连；
- A, C 方向使用 1 个端口（Port）进行互连；
- 每个端口的最大数据吞吐率可达 5GB/s，使得整个网络的理论峰值带宽达到 159 PB/s [?].

与传统的 Fat Tree 或 Dragonfly 互连拓扑相比，6D Torus 结构具有较低的通信开销，同时允许计算节点通过更短的路径进行数据交换，提升了全系统的可扩展性和效率。

2.9.3 多核 CPU 与分布式内存

富岳采用富士通 A64FX 处理器，这是全球首款基于 ARM 架构设计的高性能超算 CPU。A64FX 采用 7nm 制程，具备 48 个计算核心和 4 个辅助核心，可用于任务调度和系统管理。

处理器架构：每颗 A64FX 处理器包含：四个 HBM2 堆叠（High Bandwidth Memory 2），用于片上高带宽存储；IO 接口位于芯片顶部，减少信号传输延迟；48 个计算核心，大部分核心用于计算，同时有 4 个核心负责系统管理；单个计算核心包含 512-bit 向量计算单元（SVE），支持 ARM v8.2 指令集；基础时钟频率 2.0 GHz，睿频可达 2.2 GHz；单核 FP64 浮点计算能力：32 FLOPs/周期。

高带宽存储：每个 A64FX 处理器的 HBM2 内存：4 个 8GB 堆栈，总容量 32GB；单颗 CPU 内存带宽高达 1024GB/s，远超传统 DDR4 内存 [?]

计算性能：单颗 A64FX 处理器的理论峰值计算能力

$$48 \text{ 核} \times 2.2 \text{ GHz} \times 32 \text{ FLOPs} = 3.36 \text{ TFLOPS}$$

整个富岳超级计算机的理论峰值计算能力：

$$152,064 \text{ 处理器} \times 3.36 \text{ TFLOPS} = 514 \text{ PFLOPS}$$

其中，在基础频率 2.0 GHz 时，该系统的峰值计算能力为 488 PFLOPS，在睿频 2.2 GHz 时达到 537 PFLOPS

2.9.4 ALBERT 预训练模型优化

富岳的计算能力不仅体现在传统 HPC（高性能计算）任务上，还在 AI 训练和深度学习方面展现了强大的计算优势。特别是在 ALBERT（A Lite BERT）预训练任务中，富岳利用高带宽内存和 ARM SVE 向量加速技术，提高了 AI 任务的训练速度和计算效率。ALBERT 是 BERT 的轻量级版本，具有更少的参数，训练时间更短，适用于大规模 NLP 任务。

实验表明：

- 富岳相比 GPU 加速的 AI 计算，具有更好的浮点计算效率；
- 利用 SVE 指令集优化 Transformer 计算，提高矩阵运算速度；
- 在 BERT 预训练任务中，富岳的计算吞吐量比 V100 GPU 方案高 1.5 倍 [?].

2.9.5 未来优化方向

尽管富岳在高性能计算方面取得了卓越的成就，但仍然存在一些优化空间：

- 能效优化：目前富岳的总功耗为 28MW，仍然较高，未来可能会采用更先进的能效优化技术，如液冷系统和动态功耗管理。
- 存储架构改进：虽然 HBM2 提供了高带宽，但存储容量受限，未来可能会结合 DDR5+HBM3 技术，以优化存储层次结构。
- 网络优化：TofuD 网络已经提供了极高的通信带宽，但仍然可以通过更智能的路由算法减少数据传输延迟，提高整体吞吐率。

综上所述，富岳超级计算机通过高性能 ARM 处理器、6D 网络拓扑、HBM2 存储以及向量加速计算，实现了极高的计算性能，并在 HPC、AI 和科学计算领域展现出巨大潜力。其并行体系结构的优化，使其在 Top500 排行榜上连续四次获得全球第一的荣誉，并在 AI 计算领域具有广阔的应用前景。

3 CPU 调研

3.1 Intel 酷睿 14 代

英特尔酷睿第 14 代处理器采用 10nm 制程工艺, 相较于前代产品, 晶体管密度更高, 频率提升的同时功耗降低。在多核计算和单核性能方面均有显著改进, 使得该处理器在多任务处理时更加高效, 同时在单线程任务上也能提供更优的响应速度。

此外, 该处理器针对人工智能和深度学习领域进行了优化。随着数据量的激增, 计算需求不断上升, 酷睿 14 代通过优化架构并增强 AI 指令集, 提高了数据处理能力和并行计算效率, 为数据科学家和 AI 研究人员提供了强有力的支持。

在能效优化方面, 英特尔采用全新架构, 使得酷睿 14 代处理器在提升性能的同时降低功耗, 优化散热设计, 即使长时间高负载运行, 也能保持较好的稳定性和能效比。这种优化使得该处理器在高性能计算和日常应用场景中均具备良好的功耗管理能力。

3.1.1 Intel 酷睿 14 代并行架构的设计

酷睿 14 代处理器沿用了 12 代开始的混合异构架构, 集成了性能核 (P 核) 和能效核 (E 核), 通过智能调度机制优化任务分配, 从而在性能和能耗之间取得平衡。这种并行计算架构使得 CPU 在指令执行过程中更高效, 提高了整体计算能力。

14 代酷睿在多线程处理方面进行了优化, 相较于前代产品, 多线程性能提升 18%。在游戏计算方面, 英特尔改进了 CPU 线程管理和指令调度机制, 使游戏运行时的 CPU 依赖任务执行更加高效, 并降低延迟。此外, 酷睿 14 代还具备 AI 计算能力, 并提供 AI Assist 超频助手, 支持自动优化超频设置, 以提升计算性能。

酷睿 14 代采用的 Raptor Cover Refresh 微架构集成了 Raptor Cache Refresh 技术, 该技术优化了缓存性能, 并提高了数据一致性。该架构的主要特点包括:

1. **增量刷新**: 相比传统的全局缓存刷新, 增量刷新仅更新修改过的缓存行, 从而减少刷新操作带来的性能损失。
2. **并行刷新**: 支持多个缓存行同时刷新, 充分利用并行计算能力, 提高整体刷新效率。
3. **动态调整刷新速率**: 能够根据系统负载调整刷新频率, 在低负载时降低刷新速率以节省能耗, 在高负载时提高刷新速率以保证计算一致性。
4. **错误检测与容错**: 集成错误检测与恢复机制, 提高缓存系统的可靠性, 防止数据损坏导致的系统异常。

整体而言, 英特尔酷睿 14 代处理器在计算能力、能效管理、AI 任务处理和并行架构设计方面均进行了优化, 使其在高性能计算和日常应用中均具备出色表现。

4 中外超算实力对比及未来展望

近年来, 随着全球科技竞争加剧, 中国的超级计算机在取得突破性进展的同时, 也面临来自西方国家的限制。特别是在 2015 年, 美国商务部发布公告, 禁止向中国的 4 家国家超算中心出售至强 (Xeon) 芯片, 这一禁令使得“天河二号”的升级受到严重阻碍。这一事件反映出超级计算机在国家竞争中的战略重要性。

中国的超级计算机从 2010 年代快速崛起, 连续多年在全球 Top500 排行榜中占据主导地位, 特别是在 2016 年“神威·太湖之光”问世后, 中国实现了完全依赖国产芯片的高性能计算。然而, 由于西方国家对我国高科技企业的封锁, 中国在关键技术领域仍然面临挑战。近年来, 随着美国不断收紧对中国高端芯片出口的限制, 中国在超算领域的发展速度相较于 2010 年代有所放缓。

尽管如此,我国的超级计算仍然保持世界前三的地位,且正在逐步克服技术封锁带来的影响。目前,中国正在推进 E 级超算 (ExaFLOPS 级别) 研发,例如“天河三号”和“神威·E 级超算”,这些系统预计在计算能力、能效管理和架构创新方面实现新的突破。

未来,我国超级计算的发展方向主要包括以下几个方面:

1. **国产化自主可控**: 持续推动国产 CPU、GPU 和 AI 计算芯片的研发,减少对西方技术的依赖,实现计算架构的自主可控。
2. **E 级超算的突破**: 加快研制百亿亿次级超级计算机,以满足科学研究、人工智能和大规模数据处理的需求。
3. **能效优化**: 通过改进芯片架构、采用液冷技术和智能电源管理,提高超算系统的能效比,降低能耗成本。
4. **异构计算架构**: 结合 CPU、GPU、FPGA 等多种计算单元,优化计算任务的分配,提高整体计算效率。

在国际竞争日益激烈的背景下,中国超算的发展不仅要在计算性能上保持领先,还需在技术自主可控、能效优化和计算架构创新方面持续发力,以确保在未来全球科技竞争中占据有利地位。