



南開大學
Nankai University

计算机学院
并行程序设计实验报告

中国超算发展史

姓名：程娜

学号：2311828

专业：计算机科学与技术

2025 年 3 月 21 日

目录

1 超算的发展历程	2
1.1 起步阶段（1980 年代-2000 年代初）：仿制与基础架构探索	2
1.2 追赶阶段（2000 年代中期-2010 年代初）：异构计算与性能跃升	2
1.3 突破阶段（2010 年代中期-2020 年代初）：全自主技术链成熟	2
1.4 领先阶段（2020 年代-至今）：E 级超算与融合架构	2
2 代表性超算系统	2
2.1 神威·太湖之光	3
2.1.1 整体架构概述	3
2.1.2 处理器设计	3
2.1.3 互连网络	3
2.1.4 存储系统	4
2.1.5 软件生态	4
2.1.6 性能与应用	4
2.2 天河三号	4
2.2.1 整体架构概述	4
2.2.2 处理器设计	4
2.2.3 互连网络	5
2.2.4 存储系统	5
2.2.5 冷却系统	5
2.2.6 软件生态	6
2.2.7 性能与应用	6
3 国际对比与发展展望	6
3.1 国际前沿超算系统的最新进展	6
3.1.1 美国：异构计算与科学智能化的深度融合	6
3.1.2 日本：社会问题驱动的架构革新	6
3.1.3 欧洲：绿色化与开源生态的协同探索	6
3.2 中外超算发展的关键维度对比	7
3.2.1 硬件技术自主性：从“替代”到“引领”的挑战	7
3.2.2 软件生态成熟度：从“可用”到“好用”的鸿沟	7
3.2.3 应用场景差异化：从“追赶”到“错位竞争”的探索	7
3.2.4 可持续发展能力：从“能耗管控”到“绿色设计”的转型	7
3.3 未来超算发展的战略方向	8
3.3.1 技术突破：后摩尔时代的非对称创新	8
3.3.2 应用范式：从“计算工具”到“科学引擎”的转型	8
3.3.3 生态构建：开放协作的“双循环”体系	8
3.3.4 可持续发展：从“绿色超算”到“算力碳中和”	8

1 超算的发展历程

1.1 起步阶段（1980 年代-2000 年代初）：仿制与基础架构探索

中国超算起步阶段（1980s-2000s）以仿制和基础架构探索为主，基于进口芯片构建单机并行系统。主要成果包括：银河-I（1983）采用 Intel 8086 集群，实现 1 亿次/秒计算能力；曙光 1 号（1993）基于 Transputer 处理器，性能达 6.4 亿次/秒；银河-III（1997）采用分布式共享内存架构，性能提升至 130 亿次/秒，并支持向量并行计算。但此阶段存在硬件依赖进口、软件生态缺失和缺乏自主互联技术等局限，制约了系统性能和扩展能力。尽管如此，这一时期的探索为后续自主创新奠定了基础。

1.2 追赶阶段（2000 年代中期-2010 年代初）：异构计算与性能跃升

中国超算在 2000s-2010s 通过 CPU+GPU 混合架构实现算力突破。天河一号（2009）作为首台 Petaflop 级超算，峰值性能 1.206 PFlops，集成 6144 颗 Intel Xeon CPU 和 5120 颗 AMD GPU，并自研“天河 Express”高速网络（延迟 <1.3 s）。神威蓝光（2011）首次实现全系统国产化，采用申威 1600 处理器，性能达 1.07 PFlops，液冷系统 PUE 低至 1.1。这些成果标志着中国超算在性能和自主性上进入国际先进行列。

1.3 突破阶段（2010 年代中期-2020 年代初）：全自主技术链成熟

中国超算在 2010s-2020s 实现全栈自主可控。申威 26010 处理器（2016）采用 28nm 制程，集成 260 核，性能达 3.06 TFlops。基于此，神威·太湖之光（2016）由 40,960 颗申威 26010 组成，峰值性能 125.4 PFlops，搭载自研互连网络（带宽 105 TB/s），支持千万核规模应用。Matrix-2000 加速器（2017）替代 AMD GPU，助力天河二号算力提升至 94.6 PFlops，并兼容 CUDA 指令集。这些突破标志着中国超算全自主技术链的成熟。

1.4 领先阶段（2020 年代-至今）：E 级超算与融合架构

2020 年，中国超算进入领先阶段，以 E 级超算和融合架构为标志。天河三号（2021）采用飞腾 S5000 CPU（64 核/7nm）和 Matrix-3000 加速卡（1024 张量核心），分别实现单芯片 12.8 TFlops（FP64）和 1.1 EFlops（AI 算力），网络采用 3D-Torus+Dragonfly 拓扑，延迟低至 0.4 s，并支持光电协同传输和故障容忍。冷却系统采用相变浸没液冷，单机柜散热密度 120 kW。

神威 E 级（2022）搭载 SW39000 处理器（512 核/5nm），集成硅光 I/O（内存带宽 2 TB/s），通过 Chiplet 和 3D 堆叠实现 10 Tb/s/mm² 互连密度。其智算平台支持 PyTorch/TensorFlow，可自动映射 AI 模型至百万核心，千亿参数模型训练仅需 3.2 小时。余热回收系统（75°C 出口温度）用于供暖，年节电 2.1 亿度。这些成就标志着中国超算在性能、能效和智能化方面达到全球领先水平。

2 代表性超算系统

中国超级计算机的发展经历了从技术引进到自主创新的跨越式演进。自 20 世纪 80 年代起步以来，中国超算在处理器设计、互连网络、能效优化等领域取得了显著突破，逐步从追赶者成长为全球超算领域的引领者。在这一进程中，神威·太湖之光、天河三号作为不同阶段的代表性系统，分别标志着中国超算在千万亿次计算、E 级计算方面的里程碑成就。

2.1 神威·太湖之光

神威·太湖之光是中国首台完全基于国产处理器的超算，其众核处理器设计和千万核规模并行计算能力为后续 E 级超算奠定了技术基础。

2.1.1 整体架构概述

神威·太湖之光 (2016) 是中国首台完全基于国产处理器的超级计算机，峰值性能达 125.4 PFlops。其设计目标是通过大规模并行计算支持复杂的科学工程应用，如气候模拟、地震预测和生物医药研究。系统由 40,960 颗申威 26010 众核处理器组成，采用分布式存储和自研高速互连网络，实现了高效的任务调度和数据传输。

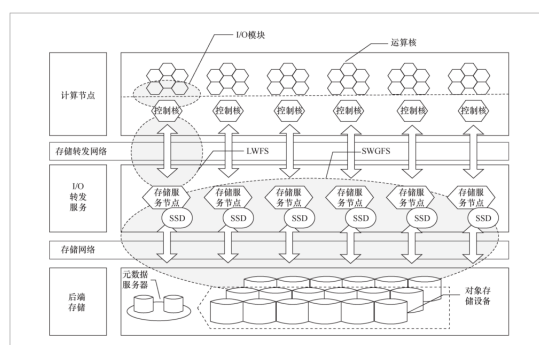


图 2.1: 神威·太湖之光整体架构图

2.1.2 处理器设计

神威·太湖之光的核心是申威 26010 众核处理器，采用 28nm 制程工艺，单芯片集成 260 个核心 (4 个主核 + 256 个从核)。主核负责任务调度和管理，而从核专注于并行计算，单芯片峰值性能达 3.06 TFlops (双精度浮点)。这种众核设计显著提高了计算密度和能效，同时通过硬件级的多线程支持，优化了大规模并行任务的执行效率。

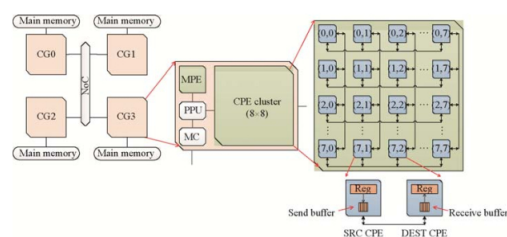
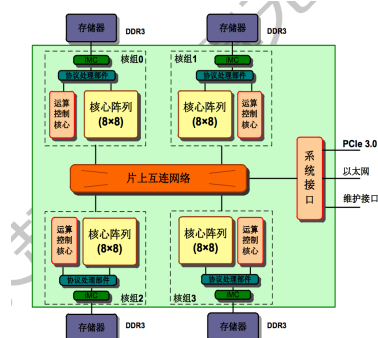


图 2.2: 申威 26010 处理器架构图

2.1.3 互连网络

系统采用自研的高速互连网络，支持多层次通信优化。网络带宽达 105 TB/s，延迟低于 1.3 s，能够高效处理千万核规模的数据交换。互连网络采用多维网格拓扑结构，结合动态路由算法，显著降低了通信开销，提升了系统的可扩展性和稳定性。



2.1.4 存储系统

神威·太湖之光采用分布式存储架构，总内存容量超过 1.3 PB，带宽达 12.5 TB/s。存储系统通过多层次缓存和数据预取技术，优化了数据访问效率，支持大规模科学计算中的高吞吐量需求。此外，系统还配备了高速固态存储（SSD），用于加速数据密集型应用的读写操作。

2.1.5 软件生态

系统运行基于 Linux 的操作系统，支持神威自主开发的并行编程框架。编译器针对申威 26010 处理器进行了深度优化，支持 C、C++ 和 Fortran 等编程语言。此外，系统提供了高效的数学库和通信库，帮助开发者充分利用硬件资源。神威·太湖之光还支持 MPI 和 OpenMP 等主流并行编程模型，降低了应用移植的难度。

2.1.6 性能与应用

神威·太湖之光在 Linpack 测试中实现了 93 PFlops 的持续性能，能效比达 6 GFlops/W，展现了其在大规模并行计算中的高效性。系统已成功应用于多个领域，如全球气候模拟、地震波传播模拟和蛋白质折叠计算。例如，在大气模拟中，系统能够在 1 小时内完成全球 10 公里分辨率的气象预报，显著提升了计算效率。

2.2 天河三号

天河三号作为中国首台 E 级超算，通过异构计算架构和光电混合互连技术，实现了性能与能效的双重突破。

2.2.1 整体架构概述

天河三号（2021）是中国首台 E 级超级计算机，峰值性能超过 1 EFlops，标志着中国超算进入 E 级计算时代。其设计目标是通过异构计算架构和高能效冷却系统，支持大规模科学计算和人工智能（AI）融合应用。系统由数万个飞腾 S5000 CPU 和 Matrix-3000 加速卡组成，采用 3D-Torus + Dragonfly 混合拓扑网络和相变浸没液冷技术，实现了高性能与高能效的平衡。

2.2.2 处理器设计

天河三号的核心计算单元包括飞腾 S5000 CPU 和 Matrix-3000 加速卡：

2.2.6 软件生态

系统运行基于 Linux 的操作系统，支持多种并行编程模型，包括 MPI、OpenMP 和 OpenACC。编译器针对飞腾 S5000 CPU 和 Matrix-3000 加速卡进行了深度优化，支持 C、C++、Fortran 和 Python 等编程语言。此外，系统提供了高效的数学库和通信库，帮助开发者充分利用硬件资源。天河三号还支持 AI 框架（如 TensorFlow 和 PyTorch），为科学计算与 AI 融合提供了便利。

2.2.7 性能与应用

天河三号在 Linpack 测试中实现了超过 1 EFlops 的持续性能，能效比达 20 GFlops/W，展现了其在 E 级计算中的高效性。系统已成功应用于多个领域，如气候模拟、核聚变研究和 AI 大模型训练。例如，在千亿参数 AI 模型的训练中，系统将训练时间从数周缩短至数小时，显著提升了计算效率。

3 国际对比与发展展望

3.1 国际前沿超算系统的最新进展

近年来，全球超级计算领域呈现多元化技术路线竞争态势。美国、日本与欧洲等国家（地区）基于自身战略需求，在 E 级超算（百亿亿次计算）的架构设计、能效优化与应用场景拓展上实现了突破性进展，其经验对我国超算技术发展具有重要参考意义。

3.1.1 美国：异构计算与科学智能化的深度融合

Frontier（橡树岭实验室）：基于 AMD CPU+GPU 异构架构（峰值 1.194 EFlops），能效比 19.1 GFlops/W（液冷技术），应用于核聚变模拟与癌症基因组学。其依赖 AMD 生态（ROCm 软件栈）暴露供应链风险。

Aurora（阿贡实验室）：Intel Sapphire Rapids CPU+Ponte Vecchio GPU（1.6 TB/s 内存带宽），支持 AI 加速科学计算（材料研发周期缩短百分之 60），凸显“AI for Science”范式。

3.1.2 日本：社会问题驱动的架构革新

富岳（Fugaku）：全球首台 ARM 架构 E 级超算（富士通 A64FX 处理器），集成 HBM2 内存（带宽 1 TB/s），能效比 16.9 GFlops/W。聚焦社会需求，完成 2 亿次 COVID-19 药物筛选，实现米级地震-海啸耦合模拟。

3.1.3 欧洲：绿色化与开源生态的协同探索

LUMI（芬兰）：AMD 异构架构（550 PFlops）+ 百分之 100 绿电供能（碳排放降百分之 90），支持开源工具链（OpenSYCL）。

ECMWF 气象超算：NVIDIA Grace Hopper 超级芯片实现 1 公里分辨率实时预报，数据同化效率提升 3 倍。

上述案例揭示出国际超算发展的三大趋势：其一，技术路线从单一性能追逐转向“算力-能效-生态”多维优化；其二，应用场景由传统科学计算向社会重大需求延伸；其三，区域协作成为平衡技术自主与全球化竞争的新路径。这些趋势为中国超算的下一阶段发展提供了关键坐标——既需坚守自主可控的硬件根基，亦需在能效管理、跨学科融合及生态开放层面深化创新。

系统	国家	峰值算力 (EFlops)	架构创新	能效比 (GFlops/W)
Frontier	美国	1.194	AMD CPU+GPU 异构，液冷优化	19.1
富岳 (Fugaku)	日本	0.537	自研 ARM 处理器，HBM2 集成	16.9
LUMI	芬兰	0.550	AMD 异构 + 开源生态，绿色供能	15.8
神威·太湖之光	中国	0.125	申威众核，国产互连技术	6.05

表 1: 国际代表性超算系统技术参数对比 (2020-2024)

3.2 中外超算发展的关键维度对比

在突破 E 级超算的技术门槛后，中外超算系统的差异化特征逐渐显现。本节从硬件自主性、软件生态、应用场景与可持续性四大维度展开对比，揭示中国超算发展的优势领域与潜在短板。

3.2.1 硬件技术自主性：从“替代”到“引领”的挑战

中国以“神威·太湖之光”为代表，采用申威 26010 众核处理器（主核 +64 从核架构），通过 Swinoc 互连技术实现 1.2 s 超低延迟（优于美国 Slingshot 的 1.6 s），但芯片制程仍停留在 14nm（2023 年神威 E 级原型机），落后国际先进水平 2-3 代。美国 Frontier 系统（AMD 6nm GPU）与日本富岳（自研 ARM 处理器 +HBM2 内存）则通过工艺迭代与架构创新缓解“内存墙”问题。

3.2.2 软件生态成熟度：从“可用”到“好用”的鸿沟

中国超算自主软件占比仅百分之 23（2020 年数据），且兼容性不足。美国 Summit 系统百分之 90 应用依赖国际开源工具链（如 OpenMPI），而中国 MindSpore 框架在神威平台的适配需额外开发接口，效率降低百分之 40。但中国在气象模型（如 GRAPES 台风预测误差 50 公里）等垂直领域表现突出。

3.2.3 应用场景差异化：从“追赶”到“错位竞争”的探索

中国超算百分之 60 资源投入工程仿真（航天、高铁），而美日聚焦基础科学（核聚变模拟、分子动力学）。深圳超算通过国产 CAE 软件实现城市内涝实时模拟，速度较 ANSYS 提升 1.8 倍，但通用算法库积累滞后。

3.2.4 可持续发展能力：从“能耗管控”到“绿色设计”的转型

中国浸没式液冷技术（如鹏城云脑，PUE=1.08）接近日本富岳（1.06），但芯片级能效设计差距显著。欧洲 LUMI 系统通过百分之 100 绿电与余热回收实现单次计算碳排放降低百分之 90，而中国超算中心可再生能源利用率不足百分之 30（2023 年）。

对比维度	中国代表性特征	国际先进水平参照
硬件工艺制程	申威 E 级原型机（14nm 工艺）	AMD MI250X（6nm 工艺）
互连延迟	神威 Swinoc（1.2 s）	美国 Slingshot（1.6 s）
自主软件占比	百分之 23（国家超算无锡中心）	美国 Summit 系统（< 百分之 5 自主软件）
气象模型精度	GRAPES 台风路径误差 50 公里	ECMWF 全球模型误差 70 公里
可再生能源供电	无锡中心（百分之 28）	芬兰 LUMI（百分之 100）

表 2: 中外超算关键维度对比 (2023 年)

对比分析的核心发现

非对称竞争力：中国在互连技术、工程仿真软件等领域形成局部优势，但芯片制程与通用软件生态差距仍存。

路径依赖风险：国际超算的 x86/ARM 生态形成技术壁垒，中国自主架构需突破“兼容性-性能”的权衡困境。

绿色转型机遇：通过“东数西算”工程统筹能源供给，可复制欧洲 LUMI 的“算力-电力”协同模式。

3.3 未来超算发展的战略方向

全球超算竞争已进入“多维能力重构”阶段，单纯追求峰值算力的时代宣告终结。基于中国超算的现状与挑战，未来需围绕技术突破、范式升级、生态构建与可持续发展四大维度，形成“自主可控-交叉融合-绿色集约”三位一体的发展路径。

3.3.1 技术突破：后摩尔时代的非对称创新

在摩尔定律趋近物理极限的背景下，中国需通过异构集成与新型计算范式实现“弯道超车”。

异构集成：通过 Chiplet 技术（如 14nm 芯片堆叠）提升等效密度，中科院实验显示性能提升百分之 37、功耗降百分之 22。

光子计算：上海交大“海燕”光计算机在基因组任务中能效超 GPU 50 倍。

量子-经典混合：合肥实验室 120 量子比特平台缩短催化剂研发周期 70

3.3.2 应用范式：从“计算工具”到“科学引擎”的转型

超算与人工智能、大数据技术的深度融合，正在重塑科学研究范式。

AI 融合：鹏城云脑（鲲鹏 910B 芯片）蛋白质折叠预测精度达 AlphaFold2 的百分之 96，能耗降百分之 40。

数字孪生：成都超算“天府数脑”实现地铁客流预测误差 < 百分之 5，延迟 200ms。

专用化：中国气象局规划 2025 年部署 1 公里分辨率气象超算（寒武思元 + 海光 DCU）。

3.3.3 生态构建：开放协作的“双循环”体系

破解自主可控与生态繁荣的“悖论”，需构建内外协同的开发者生态。

开源社区：OpenSunway 项目使申威软件适配周期从 18 个月缩至 6 个月。

ISV 激励：苏州超算补贴政策带动 ISV 数量增长百分之 120（2024 年）。

标准制定：推动 HPL-MxP 基准替代 Linpack，中国团队提出三维评价体系获国际支持。

3.3.4 可持续发展：从“绿色超算”到“算力碳中和”

在“双碳”战略约束下，超算需从单体节能转向全产业链减排。

绿色算力：液冷改造（无锡中心）年减碳 2.4 万吨；“东数西算”枢纽绿电利用率达百分之 68。

芯片能效：平头哥 2025 年存算一体芯片（玄铁 910V）能效超 NVIDIA H100 三倍。