



南開大學  
Nankai University

计算机学院

并行程序设计：体系结构调研

超算的发展与前景

姓名：田翔宇

学号：2011748

专业：计算机科学与技术

2023 年 3 月 12 日

# 目录

<b>1</b>	<b>超算的发展历程</b>	<b>2</b>
1.1	何为超算? . . . . .	2
1.2	超算的发展历程 . . . . .	2
<b>2</b>	<b>超算并行体系结构的分析</b>	<b>3</b>
2.1	架构分析 . . . . .	3
2.2	性能分析 . . . . .	3
2.3	功耗分析 . . . . .	4
<b>3</b>	<b>新旧超算的比较</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>总结与展望</b>	<b>6</b>

# 1 超算的发展历程

## 1.1 何为超算？

超算，即超级计算机，拥有能够处理普通的个人计算机无法处理的资料与高速运算。

超算主要有两个特点：**极大的数据存储容量**以及**极快速的数据处理速度**。它的信息处理能力比个人计算机快一到两个数量级以上的计算机，它在密集计算、海量数据处理等领域发挥着举足轻重的作用。

根据处理器的不同，可以把超级计算机分为两类，采用**专用处理器**或者采用**标准兼容处理器**。前者可以高效地处理同一类型问题，而后者则可一机多用，使用范围比较灵活、广泛。专一用途计算机多见于天体物理学、密码破译等领域。国际“深蓝”、日本的“地球模拟器”都属于这样的超级计算机，很多超级计算机是非专用系统，服务于军事、医药、气象、金融、能源、环境和制造业等众多领域。

超算的发展水平是现代国家综合国力的重要体现，是当今国家创新体系的重要组成部分，已成为世界各国特别是发达国家竞相争夺的战略制高点。发展超算不但可以带动计算技术本身向更高水平发展，更重要的是可以解决在经济建设、社会发展、科技创新、产业升级、国家安全等方面的一系列挑战性问题。

## 1.2 超算的发展历程

从真正意义上来说，首位研制出符合超级计算机定义产品的人应是西蒙·克雷(S.Cray)博士，此人后来被西方称为“巨型机之父”。1963年，他研制出世界上第一台巨型机 CDC6600，该共安装了 35 万个晶体管，运算速度为 1MFLOPS。

在这以后，巨型机走过了五代，即**单芯片系统**、**向量处理系统**、**大规模并行处理(MPP)体系**、**共享内存结构和机群系统 (CLUSTER)**。

	结构	典型代表
第一代	单芯片系统	CDC7600, IBM360
第二代	向量处理系统	Cray XMP,Cray YNP,NEC SX2 和我国的银河一号、银河二号
第三代	大规模并行 (MPP) 处理体系	IBM SP2,Intel Paragon 和我国的曙光 2000、3000
第四代	共享内存结构	SUN 10000/15000,SGN Origin 2000/3000 和我国的银河三号、 神威一号
第五代	机群系统	ASCI Blue Mountain, 曙光 4000, 巨星 10000

## 2 超算并行体系结构的分析

富岳 (Fugaku), 是由日本理化学研究所和制造商富士通共同推进开发的超级计算机, 由约 400 台计算机组成。

下列分析将以日本“富岳”超级计算机为例。



图 2.1: A64FX

### 2.1 架构分析

富岳是全球首度夺冠的 ARM 架构超级电脑, 采用富士通 48 核心 A64FXSoC, 与过往超级计算机大多采用的 Intel 或 AMD 的 x86、x64 主流平台不同, 可以支持广泛的软件, 还可以实现超并行、超低功耗以及主机架级的高可靠性。

x86、x64 架构在性能方面一直有着 ARM 架构难以超越的优势, 故过往超算有相当一部分采用 Intel 或 AMD 的 x86、x64 主流平台。而 Fujitsu A64FX 处理器的出现动摇了其在超算的统治地位。ARM 的强项在于其相较于 x86 架构更具省电效益的潜力, 此特性对于实际上不太容易为想要打造的超大规模系统提供大量电力的超级电脑来说颇具助益。

Fujitsu 早在 2018 年就公开过 A64FX 的技术细节, 称其本质算是「电脑的语言」指令集架构从 SPARC-v9 转换成 ARM-v8.2-A 的 SPARC64fx 处理器, 因衍生于高端服务器专用的 SPARC64, 也继承了诸多类似特色, 如大型主机等级的数据可用性。

### 2.2 性能分析

富岳拥有 7,630,848 个内核, 在 HPL 标准下算力为 442Pflop/s, 这样的性能表现超过了排名第二的美国 Summit 超级计算机的 3 倍。

Fujitsu A64FX 作为「针对超级电脑量身订做的 ARM 指令集系统单芯片 SoC」, 拥有 52 个核心, 其中两端各有一排 10 个、中间部位有两排各 12 个、其他位置还分散着 8 个, 同时还能有多处的缓存设计。同时 Fujitsu A64FX 基于 ARMv8.2-A 指令集, 支持 SVE 512 位宽度 SIMD, 峰值性能 2.7TFlops。互连总线采用 6D/Torus Tofu, 双链路、10 个端

口、带宽 28Gbps。输入输出支持 16 条 PCIe 3.0。外部搭配四组共 32GB HBM2 内存，峰值读写带宽 1TB/s。

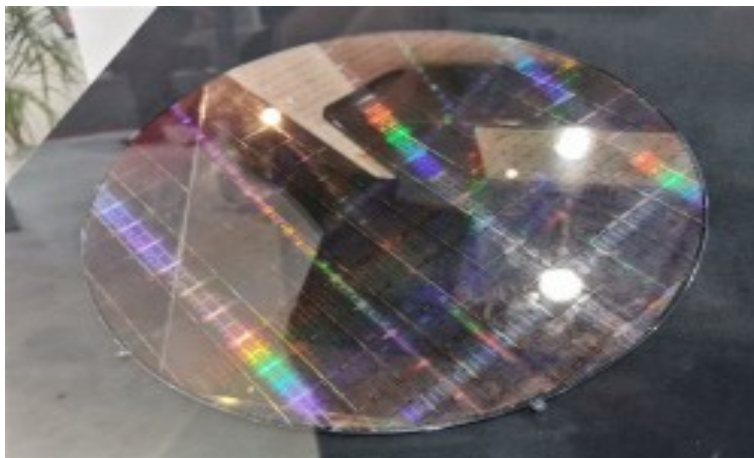


图 2.2: ARM 架构 A64FX 处理器晶圆

### 2.3 功耗分析

ARM 由于采用 RISC，在功耗方面有着 x86 架构难以比拟的优势，而 ARM 架构 A64FX 处理器，相比于其他超算所采用的 x86 处理器，在体积、功耗、成本方面有着更为显著的优势。而今超算多采用机群式超级计算机系统，在拥有结构灵活、安全性高、通用性强、易于扩展、高可用性和高性价比的益处的同时，功耗、散热等问题则愈发凸显。而富岳采用的 RM 架构 A64FX 处理器正好能够极大地解决这方面的问题。

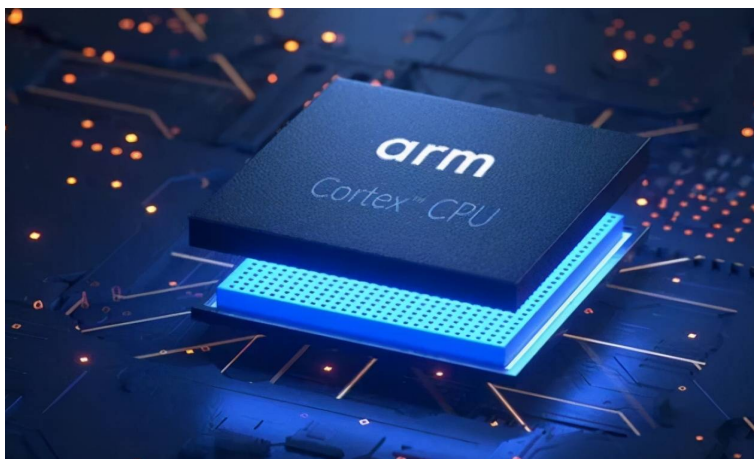


图 2.3: ARM

## 3 新旧超算的比较

新旧世界顶尖超算排行，如图3.4所示。

新旧世界顶尖超算对比，如表1所示。

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	Jaguar - Cray XT5-HE Opteron 6-core 2.6 GHz, Cray/HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	224,162	1,759.0	2,331.0	6,950
2	Roadrunner - BladeCenter Q522/LS21 Cluster, PowerXCell 8i 3.2 GHz / Opteron DC 1.8 GHz, Voltaire Infiniband, IBM DOE/NNSA/LLNL United States	122,400	1,042.0	1,375.8	2,345
3	Kraken XT5 - Cray XT5-HE Opteron 6-core 2.6 GHz, Cray/HPE National Institute for Computational Sciences/University of Tennessee United States	98,928	831.7	1,028.9	3,090
4	JUGENE - Blue Gene/P Solution, IBM Forschungszentrum Juelich (FZJ) Germany	294,912	825.5	1,002.7	2,268

(a) NOVEMBER 2009|TOP 500

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442,010.0	537,212.0	29,899
2	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
3	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438
4	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway, NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371

(b) NOVEMBER 2021|TOP 500

图 3.4: 2021 年与 2009 年十一月 TOP-500 前四名

	FAGUKU	JAGUAR
Site	RIKEN Center for Computational Science	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory
Manufacturer	Fujitsu	Cray/HPE
Cores	7,630,848	298,592
Memory	5,087,232 GB	598,016 GB
Processor	A64FX 48C 2.2GHz	Opteron 6274 16C 2.2GHz
Interconnect	Tofu interconnect D	Cray Gemini interconnect
Linpack Performance (Rmax)	442,010 TFlop/s	1,941 TFlop/s
Theoretical Peak (Rpeak)	537,212 TFlop/s	2,627.61 TFlop/s
Nmax	21,288,960	6,329,856
Power	29,899.23 kW (Optimized: 26248.36 kW)	5,142.00 kW (Submitted)
Operating System	Red Hat Enterprise Linux	Cray Linux Environment

表 1: FAGUKU 与 JAGUER 各方面的对比

由于年代相差较远，JAGUAR 从各个方面已经难以与 FUGAKU 抗衡。在处理器方面，Opteron 处理器作为第一个在工业标准 X86 架构上进行 64 位的扩展（AMD64 指令集），在当年可谓风靡一时。基于 Opteron 处理器的计算机采用 64 位操作系统可以突破传统的 32 位计算系统被限制在 4 GB 的内存寻址能力，同时已有的 32 位操作系统和 32 位应用程序也能在 Opteron 处理器上很好地运行。后来，ARM 官方于 2011 年 11 月推出了首个 ARM 平台的 64 位处理器架构 ARMv8。而今这已经成为一种常态，随着对 64 位处理器研究的不断深入与延展，如今诞生的基于 ARM 平台、继承于 SPARC64 架构的 Arm 超级处理器 A64FX 在性能、功耗等各个方面都有了长足的进步。

## 4 总结与展望

随着时代的发展，处理器架构的发展愈发迅猛，计算机的处理能力愈发迅捷，超算的功能愈发强大。超级计算机不仅是一个国家综合科研水平的重要标志，也是综合支撑国家安全、经济和社会发展等可持续发展的不可替代的信息技术手段。

我国《“十三五”国家科技创新规划》（国发〔2016〕43 号）明确提出“发展先进计算技术，重点加强 E 级（百亿亿次级）计算、云计算、量子计算、人本计算、异构计算、智能计算、机器学习等技术研发及应用”。高性能计算已经成为解决国家发展面临的重大挑战性和科技创新的必备工具，如能源短缺、环境污染、全球气候变化等可持续发展的困难。

习近平总书记在 2018 年 5 月 28 日的两院院士大会上指出，“以信息化、智能化为杠杆培育新动能。要突出先导性和支柱性，优先培育和大力发展一批战略性新兴产业集群，构建产业体系新支柱。要推进互联网、大数据、人工智能同实体经济深度融合”。

超级计算机的传统应用领域是科学研究，如气象预测、石油勘探、CAE 仿真、新材料研究、新药发现、基因测序等。但时至今日，超算应用领域早已扩展至互联网、物联网、人工智能等领域，超级计算技术也渗透到了人们日常生活的方方面面。目前，超级计算机支撑着我们几乎所有的大型信息基础设施；未来，其也将成为城市的智慧大脑，汇聚海量数据，优化城市管理和服 务，改善市民生活质量，为我们创造更加美好的生活。

参考文献 [2] [1] [6] [4] [5] [3]

超链接 [TOP-500](#)

## 参考文献

- [1] Meuer and W. H. The top500 project: Looking back over 15 years of supercomputing experience. *PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation*, 31(2), 2008.
- [2] 历军. 中国超算产业发展现状分析. 中国科学院院刊, (6):8, 2019.
- [3] 吴艳霞. 计算机体系结构. 计算机体系结构, 2010.
- [4] 方粮. 超级计算机发展现状及趋势分析. 智能物联技术, 52(5):8, 2020.
- [5] 柯文. 中国超级计算机发展大事记. 科学 24 小时, (2):1, 2010.
- [6] 车永刚, 柳佳, 王正华, and 李晓梅. 超级计算机体系结构及应用情况. 计算机工程与科学, 25(6):5, 2003.