

高性能计算机发展历程及现状

学号：202122280534 姓名：陈玉熙

一、研究意义

高性能计算 (High Performance Computing, HPC) 是利用并行处理和互联技术将多个计算节点连接起来，从而高效、可靠、快速地运行高级应用程序的过程，在许多情况下又被称作超级计算 (Supercomputing)。高性能计算可以提供比普通台式计算机或工作站更高的性能，以解决科学、工程或商业中的复杂问题，已成为解决科学研究、经济发展、国家安全等方面诸多重大难题的重要手段。

目前，高性能计算科学与技术已成为世界各国竞相争夺的战略制高点。一些发达国家和发展中国家纷纷制定战略计划，投入大量资金，加速研究开发步伐。例如美国从 20 世纪 70 年代起就实施了一系列推动计算科学发展的国家计划，包括“战略计算机计划” (SCP)、“高性能计算和通讯计划” (HPCC)、“加速战略计算计划” (ASCI)、“先进计算设施伙伴计划” (PACI) 等。

而目前我国已建成由 17 个高性能计算中心构成的国家高性能计算服务环境，资源能力位居世界前列，尖端成果不断涌现。我国研制的超级计算机已连续 10 余次在以 Linpack 性能排名的 HPC TOP500 中夺冠，我国学者开发的超算应用还连续两次获得 ACM 戈登·贝尔奖，说明我国不但能造出世界上速度最快的计算机，而且能在超级计算机上实现其他国家还做不到的实际应用，高性能计算已像航天和高铁一样成为中国的“名片”。同时，各国纷纷加强高性能计算研发布局和应用拓展，我国已做好百亿亿次计算的战略部署，新一轮竞争已经开始。



图 1. 第一台超级计算机 —— CDC 6600

二、产生背景

1964 年，有“超算之父”之称的 Seymour Cray 研制的 CDC 6600（图 1）问世，并安装到美国 Livermore 和 Los Alamos 国家实验室，开启了高性能计算技术和产业 60 年的持续发展与繁荣。

自 1964 年以后，高性能计算的演变路线可简单地分为 Cray 时代和多计算机时代(表 1)。

表 1. 高性能计算 60 年演变的 2 个阶段

第一阶段：Cray 时代		第二阶段：多计算机时代
特征	单一共享内存	基于高速互连的多计算机
时间	1964-1993 年	1993 年至今
代表性系统	CDC6600/7600、Cray 系列、NEC SX、“银河”、757、KJ8920、“曙光一号”	Cosmic Cube、CM5、ASCI Red、IBM RoadRunner、“曙光”1000—7000、“神威”“天河”
主要技术挑战	硬件体系结构、处理器并行、访存延迟和带宽、多线程	系统互连、多计算机操作系统、并行编程
编程模型	Fortran	MPI

1. Cray 时代（1964-1993）

从 20 世纪 60—90 年代初期的 30 年被称为“Cray 时代”，以单一内存向量机的技术革新为主导，Cray 定义和引领了前 30 年的高性能计算市场。

1974 年，控制数据公司 CDC 推出了 CDC STAR-100,它是首先使用向量处理器(Vector Processor)的计算机，被认为是第一台向量机。1982 年,克雷公司生产的 Cray X- MP/2 诞生，它是世界上第一部并行向量计算机。Cray X-MP 系列计算机基于并行向量处理机结构，并行向量处理机是将向量处理器直接并行的一种体系结构。

当时的并行向量机占领高性能计算市场达 20 年之久，向量机处理对提高计算机运算速度十分有利，有利于流水线的充分利用，有利于多功能部件的充分利用，但由于时钟周期已接近物理极限，向量计算机的进一步发展已经不太可能。

2. MPP 蓬勃发展阶段（1990 年至今）

从 20 世纪 90 年代迄今的后 30 年被称为“多计算机时代”，由于微处理器的出现，以及大量工业标准硬件的普及，以大规模互连多个通用乃至商用的计算部件的可扩展系统结构的技术创新主导了迄今为止的高性能计算发展。

大规模并行处理计算机(MPP)是指由大量结点通过高带宽低延时的专有网络互联而组成的大规模计算机，其中每一个结点由处理器 / 缓存、局部存储器和网络接口电路构成。MPP 阶段，高性能计算已经不仅仅用于“顶天”的国家层面，在满足国家战略应用对性能巅峰需求的同时，

“立地”成为发展的主要目标，市场驱动、高性能计算应用普及成为第二阶段的显著特点。

三、研究现状

国际上,自 1993 年起每年都会按 Linpack 的测试性能公布世界范围内已安装的前 500 台高性能计算机排行,这已成为高性能计算机研制生产、市场发展、应用交流和趋势分析预测的重要参考。目前最新榜单前 10 名如表 2 所示。

表 2. 2021 年 11 月最新国际超算 TOP 500 榜单前 10 名

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	<u>Supercomputer Fugaku</u> - Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442,010.0	537,212.0	29,899
2	<u>Summit</u> - IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
3	<u>Sierra</u> - IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438
4	<u>Sunway TaihuLight</u> - NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
5	<u>Perlmutter</u> - HPE DOE/SC/LBNL/NERSC United States	761,856	70,870.0	93,750.0	2,589
6	<u>Selene</u> - Nvidia NVIDIA Corporation United States	555,520	63,460.0	79,215.0	2,646
7	<u>Tianhe-2A</u> - NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
8	<u>JUWELS Booster Module</u> - Atos Forschungszentrum Juelich (FZJ) Germany	449,280	44,120.0	70,980.0	1,764
9	<u>HPC5</u> - DELL EMC Eni S.p.A. Italy	669,760	35,450.0	51,720.8	2,252
10	<u>Voyager-EUS2</u> - Microsoft Azure Azure East US 2 United States	253,440	30,050.0	39,531.2	

2002 年之前，我国高性能计算机未曾向国际申报 Linpack 性能测试结果，故而未列入国际 TOP500 排行榜。2002 年，中国软件行业协会数学软件分会首次发布中国高性能计算机性能排行榜，并在随后每一年的 10 月末或 11 月初公布当年我国高性能计算机性能 TOP100 排行榜。在过去的十余年间，已由中国软件行业协会数学软件分会联合中国计算机学会高性能计算专业委员会与国家 863 高性能计算机评测中心发布的，以 Linpack 作为基准测试程序(Benchmark)测试的性能最高的 100 台计算机系统名单——中国高性能计算机百强 (China Top 100 List of High Performance Computing, 简称中国 TOP100)。这一举动,为促进我国高性能计算机的研制及在众多领域的应用推广作出了积极贡献。

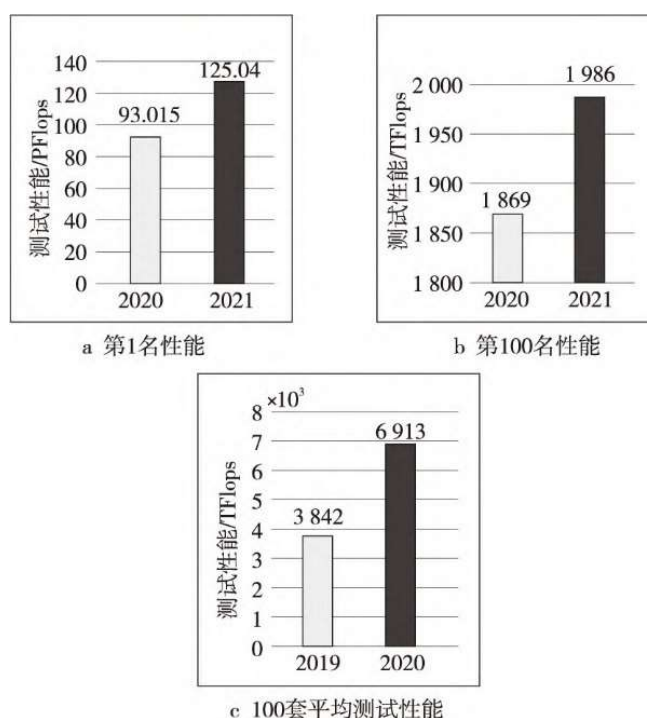


图 2. 2021 年中国 HPC TOP100 系统与 2020 年系统性能对照

以最近两年对比来看，2021 年所有 100 套入榜系统的 Linpack 平均性能为 6913 TFlops，这是 2020 年平均性能 3842 TFlops 的 1.79 倍。平均性能增速较 2020 年的 1.1 有较大提升，主要归功于前 10 套系统的变化。2021 年中国 HPC TOP100 系统与 2020 年系统性能对照如图 2 所示。

图 3 则给出了 2021 年中国 HPC TOP100 中的行业应用领域的性能份额统计，包括算力服务 (46%)、超算中心 (24%)、人工智能 (9%)、云计算 (5%)、短视频 (4%)、科学计算 (3%)、金融 (2%)、互联网 (1%)、教育科研 (1%)、能源石油 (1%)、电子商务 (1%)、政府 (1%)、工业制造 (1%) 和电信 (1%)。

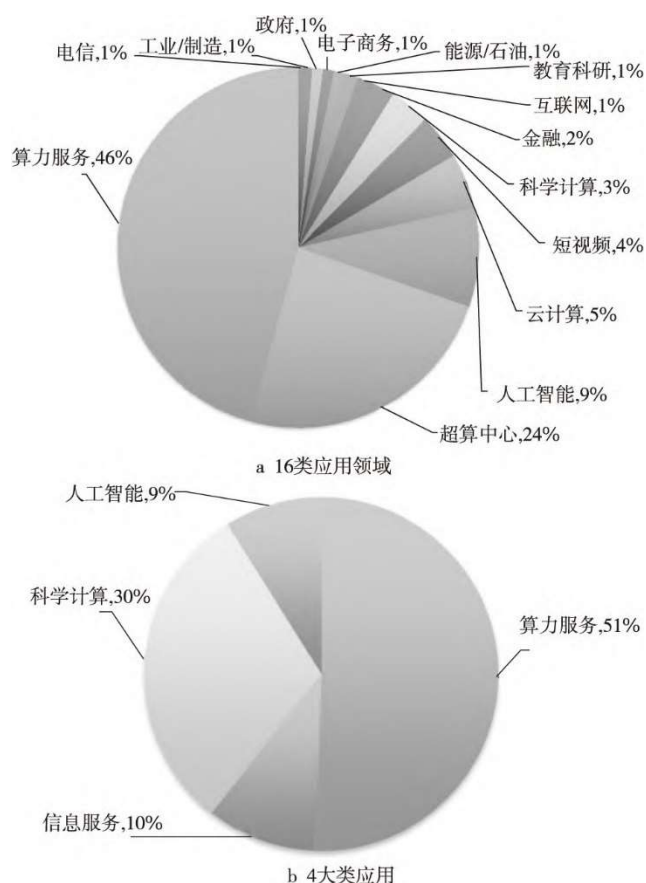


图 3. TOP100 系统在不同应用领域的分布

依据应用模式的不同，上述应用可进一步大致归并为 4 大类：

- (1) 算力服务类。这是今年新增的一类服务，反映了算力经济的蓬勃发展。
- (2) 人工智能类。Map-Reduce、深度学习计算模型等基于数据的（非数值类）应用。
- (3) 科学与工程计算类。主要指传统的数值计算类应用，通常是计算密集型（也有数据密集型）。
- (4) 信息服务类。频繁交互的互联网服务类应用。

2021 年度，算力服务类应用系统占据所有系统的 51%，人工智能类应用系统占据 9%，传统的科学与工程计算类应用系统与 2020 年的 30% 持平，信息服务类应用系统比 2020 年有所微降，从 11% 降到 10%。

再从发展角度来看，2021 年中国高性能计算机继续呈现快速发展态势，无论是性能、应用领域还是应用规模均有着长足发展。图 3 给出了 2002~2021 年共 20 年来 TOP100 数据变化。可以看到，近 10 年来，第 1 名系统受国家相关科研计划影响，其性能呈跳跃式发展；最后 1 名系统性能则呈规律性指数增长，但是幅度逐步减缓，2022 年入榜性能预计在 2.2~2.3 PFlops。

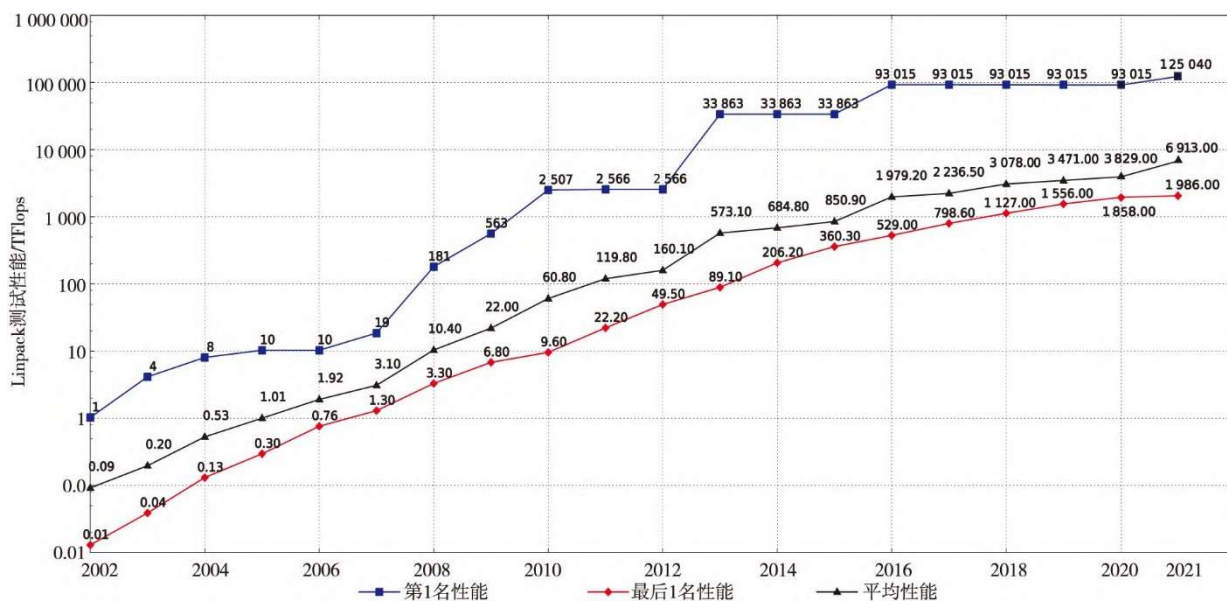


图 4. 2002~2021 年中国 HPC TOP100 数据对照

四、现存挑战

从现阶段来看，高性能计算机发展的挑战可以分为在摩尔定律失效前如何可持续地构建 E 级系统，和后摩尔定律时代的革命性技术。

1. 可持续地构建 E 级系统。高性能计算正处于向 E 级(10^{18})迈进的时代，中美两国都相继宣布了 E 级超级计算机的研制计划。尽管突破 E 级计算关口的相关技术路线基本明确，但如何构建可持续的 E 级超算系统，如数百 Eflops 系统的技术路线尚不明确。在未来新型器件真正成熟之前，最大的挑战是如何在高性能计算机体系结构和系统技术上的创新，应对整个系统的部件复杂度和能耗难以承受的问题，持续发展数百 Eflops 的系统。

2. 后摩尔定律时代的超算系统。随着集成电路的发展进入后摩尔时代，器件特征尺已趋于物理极限，当前器件的原理和结构已经难以满足未来 Z 级(10^{21})乃至更高性能 Y 级(10^{24}) 超级计算机的要求。如何利用新型器件是构建后 E 级时代超算系统的首要挑战，包括：基于光学计算原理和超导计算原理的新型器件、基于硅光技术的新互连和量子计算机等。

五、未来展望

综合从 2002 年开始的中国大陆高性能计算机 TOP100 排行榜的第一名 Linpack 性能、第一名峰值性能和总性能，我们得到了图 3 中的中国高性能计算机性能发展趋势图(2002-2021)。从图中的数据可以看出，中国高性能计算机的研制和生产也是有一定规律的。我们可以看到，

从 2002 年到 2005 年，中国超算的发展经历了一次快速发展期，这个发展期维持到 2005 年(4 年)，然后在 2005 年开始进入一个平稳发展期。而 2007 年排行榜第一名性能的小幅增长，是一个信号，说明大陆地区开始走出平稳发展期，进入新一轮快速发展期。2008 年百万亿次机器的出现，证实了我们的观察。2009 年千万亿次天河一号的提前横空出世，颠覆了我们之前的 2010 年底或 2011 年初发布峰值千万亿次国产机器的预言。2010 年 11 月，天河一号 A 登顶世界 TOP500 第一名，作为这个从 2008 年开始的超算发展活跃期的一个休止符。直到 2012 年天河一号 A 再夺国内 TOP100 第一，标志着我国超算的研制仍然维持在平稳发展期，这个周期在 2013 年被天河二号的出现结束。2013 年 6 月，天河二号帮助中国再夺世界第一且连续六次蝉联世界第一和连续三次蝉联中国 TOP100 第一，说明中国超算发展在短暂进入活跃期后，再次进入平稳发展期。这个平稳发展期本来应该在 2015 年结束，但是由于限售时间的影响，而推迟到 2016 年结束。果然，中国超算在 2016 年以超算排行榜连续第八次夺取冠军、首次获得总数量第一名且总性能几乎与美国持平、国产超算应用在国产神威太湖之光超级计算机获得戈登贝尔奖和中国科技大学大学生团队在美国 SC 大会比赛获得单项和总冠军等最强音，将 2016 年定格为中国超算的大满贯年。2017 年开始，中国超算再次不可避免地进入一个新的平稳发展期，没有新的大机器发布，三家超算研制单位在获得科技部的资助后专心研制新的 E 级超级计算机。2018 年，三台 E 级原型机均已部署到位，将正式决定哪几家获得最后的 E 级系统的研制资格。新的快速发展期将最早在 2022 年重新启动。与此同时，美国的超级计算机将迎来一轮活跃期，美国的几台 100PFlops 超级计算机将陆续发布，为美国重新夺回世界第一的位置。2020 年，日本的 Fugaku 机器获得冠军并保持至今，峰值超过 500PFlops，Linpack 性能达到 422PFlops。从第一名的峰值性能趋势预测可以看出，根据新收集的数据，可以得到的新预测结果是：峰值 Exaflops 的机器将在 2022 年~2023 年间出现。

展望 2022 年，各国 E 级计算机计划的发展是未来最值得关注的大事。我国三套 E 级原型系统的研制均已顺利完成，最后的 E 级系统研制任务何时完成值得关注。随着美国 E 级超级计算机系统研制计划的提前和中国 E 级超级计算系统研制计划的可能延后，中美两个超级计算大国之间，谁能在 2022 年夺取世界第一的位置，充满了变数。