



# 计算机科学

COMPUTER SCIENCE

## 高性能计算技术及标准现状分析

陆平静, 熊泽宇, 赖明澈

### 引用本文

陆平静, 熊泽宇, 赖明澈. 高性能计算技术及标准现状分析[J]. 计算机科学, 2023, 50(11): 1-7.

LU Pingjing, XIONG Zeyu, LAI Mingche. [Survey on High-performance Computing Technology and Standards](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(11): 1-7.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

**Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)**

### [FL\\_Raft:基于联邦学习模型的选举共识方案](#)

FL\_Raft:Election Consensus Programme Based on Federated Learning Model  
计算机科学, 2023, 50(11): 364-373. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.221000134>

### [面向医疗物联网的匿名认证协议](#)

Anonymous Authentication Protocol for Medical Internet of Things  
计算机科学, 2023, 50(8): 359-364. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220700151>

### [基于“嵩山”超级计算机系统下HHL算法的模拟实现](#)

Simulation Implementation of HHL Algorithm Based on Songshan Supercomputer System  
计算机科学, 2023, 50(6): 74-80. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220500108>

### [第一性原理极化率计算中的众核优化方法研究](#)

Many-core Optimization Method for the Calculation of Ab initio Polarizability  
计算机科学, 2023, 50(6): 1-9. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220700162>

### [基于改进DQN算法的容器集群自均衡调度策略](#)

Self-balanced Scheduling Strategy for Container Cluster Based on Improved DQN Algorithm  
计算机科学, 2023, 50(4): 233-240. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300215>

# 高性能计算技术及标准现状分析

陆平静 熊泽宇 赖明澈

国防科技大学计算机学院 长沙 410073

(pingjinglu@nudt.edu.cn)

**摘要** 高性能计算是科技创新体系的重要组成,是知识创新和技术创新的重要能力支撑,是新时期下与理论、实验并重的三大科技创新手段之一。在过去的三十年间,高性能计算取得了以突飞猛进的进展,高性能计算已经进入 E 级计算时代,我国在高性能计算领域也取得了跨越式的发展,取得了天河、神威、曙光为代表的一系列成果,高性能系统研制水平跻身国际一流行列。随着摩尔定律接近极限,高性能计算技术的性能提升之路面临巨大挑战,在后摩尔时代,将依赖算法、软件和硬件架构去提升高性能计算机系统的终极性能。另一方面,与高性能计算机技术飞速发展相比,高性能计算标准的发展还存在很多不足。文中首先分析了当前国内外高性能计算机技术的发展现状及趋势,然后剖析了当前国内外高性能计算标准的现状及趋势,最后给出了当前发展中国高性能计算机标准的必要性和重要性。

**关键词:** 高性能计算; E 级计算; 计算机体系结构; 标准; 集群; 大规模并行处理机; 后摩尔时代

**中图分类号** TP393

## Survey on High-performance Computing Technology and Standards

LU Pingjing, XIONG Zeyu and LAI Mingche

School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

**Abstract** As an indispensable support for knowledge and technological innovation, high-performance computing (HPC) is an important component for scientific and technological innovation system. In the new era, being an alternative way of scientific research, it is equally important as theories and experiments. In the past thirty years, HPC has achieved magic improvement, and has entered the era of exascale computing. China has achieved remarkable development in HPC, and has achieved a series of achievements represented by Tianhe, Sunway, and Dawning. China's high-performance system development level ranks among the top international ranks. Performance gains through semiconductor miniaturization is challenging after Moore's law ends. In the post-Moore era, improvements in computing power, opportunities for growth in computing performance will increasingly come from technologies from software, algorithms, and hardware architecture. Meanwhile, there are still many deficiencies in the development of HPC standards. This paper analyzes the current status and development trends of HPC technology and standards, analyzes the state-of-art of the current HPC standards, and proposes the necessity and importance of developing national HPC standards.

**Keywords** High-performance computing, Exascale computing, Computer architecture, Standards, Cluster, Massively parallel processor, Post-Moore era

## 1 引言

高性能计算机在国防、信息安全、石油勘探、气象预报、生物制药、工程仿真、科学计算、商业计算等领域有旺盛需求,是关系国家安全和国民经济重要部门的关键技术装备,是我国国民经济十四五发展纲要中重要培育的技术,也是我国信息产业十四五规划中的重要议题<sup>[1]</sup>。随着“先锋”(Frontier) E 级系统的推出,国际上高性能计算机系统的研制水平已达到 E 级(百亿亿次)<sup>[2]</sup>。我国高性能计算技术水平也已跻身国际领先行列,“天河一号”<sup>[3]</sup>“天河二号”<sup>[4-6]</sup>“太湖之光”<sup>[7-8]</sup>

等国产高性能计算机系统在世界超级计算机 Top500 排名中多次排名榜首。随着天河、神威、曙光等高性能计算机系统的研制成功,我国高性能计算机系统研制主要单位基本实现了核心关键技术自主可控。

随着高性能计算机的需求逐渐增加以及高性能计算技术水平的提升,标准的重要性愈加显著,标准缺失带来的种种弊端日益突显。中国常说“标准先行”,主导标准就等于掌握了关键技术装备的“话语权”,标准作为贸易博弈和科技竞争的工具,标准化成为高性能计算技术发展的迫切需求。2007 年,中国高性能计算机标准工作委员会(简称“高标委”)成立,

到稿日期:2022-11-02 返修日期:2023-02-07

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB0300101)

This work was supported by the National Key R & D Program of China(2021YFB0300101).

通信作者:熊泽宇(xiongzeyu08@nudt.edu.cn)

高标委由曙光公司发起,浪潮、中科院计算所都赫然在列,涵盖芯片、操作系统、服务器、交换存储、基础架构等主要国内计算机厂商<sup>[9-10]</sup>。中国人民解放军装备发展部也在成立多个军用标准化技术委员会。2021年10月,中共中央、国务院印发了《国家标准化发展纲要》,强调在两化融合、新一代信息技术、大数据等应用前景广阔的技术领域,同步部署技术研发、标准研制与产业推广,推动标准化与科技创新互动发展<sup>[11]</sup>。因此,在全球竞争背景下,我国亟需在高性能计算领域加强标准的研究和制订,巩固在高性能计算领域的科研优势,用“标准”的武器来发展自己,争取更大的话语权,提高产业竞争的层次。

本文首先分析了当前国内外高性能计算机技术发展的现状及趋势。然后,从国际标准、国家标准、军用标准、行业标准和企业标准几个方面,剖析了当前国内外高性能计算机标准的现状。最后,给出了当前发展中国高性能计算机标准的必要性和重要性。

## 2 高性能计算技术发展现状及趋势分析

### 2.1 高性能计算技术发展现状

高性能计算是科技创新体系的重要组成部分,是知识创新和技术创新的重要能力支撑,其相对于理论研究方法具有定量、精确的特点,相对于实验方法具有适于极端复杂条件模拟、易重复、周期短、成本低等特点,因此已经成为21世纪与理论、实验并重的三大科技创新手段之一。随着“先锋”E级系统的落地,目前国际上高性能计算机系统研制水平已达到E级计算水平。

由于高性能计算机发挥的重要作用以及对更强大算力的需求,近年来世界各国纷纷设立E级超算相关研究专项,开展E级系统研制,抢占国家发展制高点<sup>[12-13]</sup>。包括美国的E级计算项目(Exascale Computing Project, ECP),日本国家高性能计算基础设施(High-Performance Computing Infrastructure, HPCI)计划,欧洲高性能计算(The European High-Performance Computing, EuroHPC)、E级“EU Mont-Blanc计划”(Mont-Blanc 2020)以及“地平线2020”(Horizon 2020)计划,中国的高性能计算专项等<sup>[13]</sup>。

美国在高性能计算领域具有全面领先优势,能源部、自然科学基金会等部门持续参与投资规划和应用引导,在系统研制、计算应用、超算服务及其人员结构等方面保持了国际领先的地位。随着2022年6月Top500排行榜发布,榜首为Frontier的E级系统落地<sup>[9]</sup>。

日本长期坚持独立自主发展高性能计算的道路,强调以社会问题为导向,发展科学计算解决社会问题,以及科学计算与研究领域融合实现新的科学发现,将针对药物发现与医疗保健、一般灾害预防、能源环境问题和经济社会预测等4个重点领域<sup>[13]</sup>。日本文部省2014年6月宣布启动E级计划,名为“富岳”(Fugaku),用于国家高性能计算基础设施。Fugaku系统于2021年完成研制,由文部科学省主导,理化学研究所计算科学中心负责实施,日本电气、富士通等公司承担研制,2021年6月在Top500排行榜上跃居榜首,2022年6月Frontier系统发布,“富岳”系统在Top500排行榜上退居

第二。日本已经开始积极为“富岳”后的下一代超算系统做准备,发起了“Fugaku Next”的可行性研究。

欧盟高度重视应用,采用“应用为上”的高性能计算发展道路,重点侧重于软件、应用和算法的研究,欧盟曾规划了若干个发展计划<sup>[13]</sup>。如德国的E级创新中心(Exascale Innovation Center, EIC)计划;西班牙巴塞罗那超级计算中心启动了E级“EU Mont-Blanc计划”;法国BULL公司的“SEQUANA”计划等。欧盟2013年启动“地平线2020”(Horizon 2020)计划,其中的探索基金项目“面向百亿亿次的高性能计算”于2014—2020年投入7亿欧元开展研究,开展了“地平线2020”研发计划,推进下一代高性能计算技术发展,计划在2023年前后部署两台E级系统,其中一台采用欧盟自研技术。近期,EuroHPC宣布其支持的欧洲首台E级超算系统“Jupiter(木星)”将于2023年部署安装。2022年11月的Top500排行榜中排名前10的系统中包含两台欧洲系统,芬兰的LUMI系统<sup>[9]</sup>占据了Top500第3位,HPL基准测试速度由152 PFlop/s升级到309.1 PFlop/s,是欧洲最大的系统;另一台为欧洲高性能计算共同计划(EuroHPC JU)资助的E级计算先导系统“Leonardo”,以174.7 PFlop/s的性能位列第四。上一届Top500中排名第十的法国Adastra系统<sup>[9]</sup>的HPL基准测试速度为46.1 PFlop/s,跌至第十一名,是欧洲第三强的系统。

在美“全方位遏制中国”的战略背景下,我国加大科研投入,发挥集体创新优势,高性能计算技术水平已跻身国际领先行列,“天河一号”“天河二号”“太湖之光”等国产高性能计算机系统在世界超级计算机Top500排名中多次排名榜首。“天河二号”已经连续十年共计在20届榜单上位列前十,破纪录地成为了世界超算史上Top10榜单中保持时间最长的系统。我国高性能计算机系统研制的主要单位基本实现了核心技术自主可控。

### 2.2 高性能计算发展趋势分析

总体来看,高性能计算领域呈现以下发展趋势与特点。

1)摩尔定律接近极限,依赖半导体工艺持续提升系统峰值性能之路充满挑战。

当前高性能计算机的性能提升主要依赖于单节点计算性能的提升和计算节点数量的增加。根据Top500世界高性能计算机排行榜,近30年来,高性能计算峰值性能总体呈现线性增长趋势,每10年提升约1000倍<sup>[2]</sup>。随着集成电路工艺节点逼近物理极限,微电子技术难以持续遵循摩尔定律演进发展,最小线宽已达到几个纳米,产生了费米钉扎、库伦阻塞、量子隧穿、杂质涨落及自旋输运等物理现象<sup>[14]</sup>,延续了50余年的摩尔定律面临来自物理极限、经济限制等多重压力,使得基于硅的CMOS技术依靠单纯尺寸缩小来提升集成度,面临着物理原理和工艺技术的巨大挑战,芯片设计生产难度加大,峰值性能持续提升之路充满挑战<sup>[15]</sup>。

另一方面,随着晶体管密度的增加,单位面积内的功耗也越来越大,由此产生的巨大热量严重影响了集成电路的高频性能和可靠性<sup>[16]</sup>。例如,从1997年到2010年,CMOS器件的栅长缩小至原来的1/300,但能耗密度增加了近10万倍,时钟频率只提高了2000倍左右<sup>[17]</sup>。登纳德缩放(Denard

Scaling)让我们能够在维持同等能耗的情况下持续提升性能<sup>[18]</sup>。但如图1所示,自2007年开始,这一缩放效应开始变缓,出现了几次阶跃。直至2012年,每平方纳米的功耗开始快速升高,导致能耗增大,效率下降<sup>[19]</sup>,功耗成了高性能计算机系统芯片设计的重大挑战。

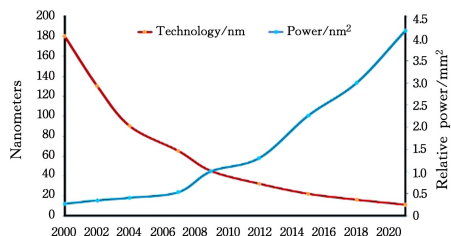


图1 半导体工艺、能耗与登纳德缩放<sup>[19]</sup>

Fig. 1 Semiconductor process, energy consumption, and Dennard scaling<sup>[19]</sup>

2) 多种体系结构路线并行迭代发展,应用领域特点各异。

自1964年世界上第一台高性能计算机CDC6600问世以来,超级计算机迅速发展,高性能计算机体系结构也在不断发展变化。根据Top500的分类方法,高性能计算机先后出现了集群(Cluster)、大规模并行处理系统(Massively Parallel Processor, MPP)、星群(Constellations)、对称多处理机(Symmetric Multiprocessor, SMP)、单指令多数据流机(Single-Instruction Multiple-Data, SIMD)和并行向量处理机(Parallel Vector Processor, PVP)等体系结构<sup>[20]</sup>。

高性能计算机体系结构演化,不断追求方便性和灵活性,高性能计算机主流体系结构从向量机到SMP,再到MPP,最后高性能计算机Top500排行榜上只有Cluster和MPP两种体系结构。Cluster以高获得性、高可扩展性等优势成为发展主流,而MPP架构的机器以其高性能也常被用于高性能计算的高端领域。这两类系统的基本区别源于构建系统的组件。Cluster通常采用市场上的商用硬件、软件和网络组件。而MPP采用定制的计算节点、插件、模块和机壳,它们之间的互连被特定封装。MPP要求高带宽、低延迟、更好的能效和高可靠性,因为MPP处理器间的互连更好,MPP仍将在高端市场占有一席之地。虽然采用MPP架构的高性能计算机在Top500中的数量不多,但能获得更高的性能,它们常用于高性能计算的高端领域。图2给出了2017—2021年间Top500中采用MPP架构和Cluster架构系统的份额分布,每个数据系列从左至右的3个柱状图分别是Top500中排名前500(记为Top500)、前100(记为Top100)和前10(记为Top10)系统中MPP架构和Cluster架构系统的份额分布。

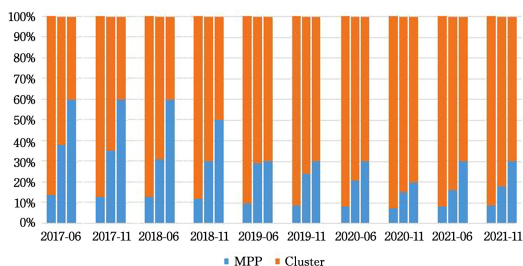


图2 近5年国际高性能计算排行榜中体系结构份额分布

Fig. 2 Computer architecture share distribution of HPCs in recent 5 years

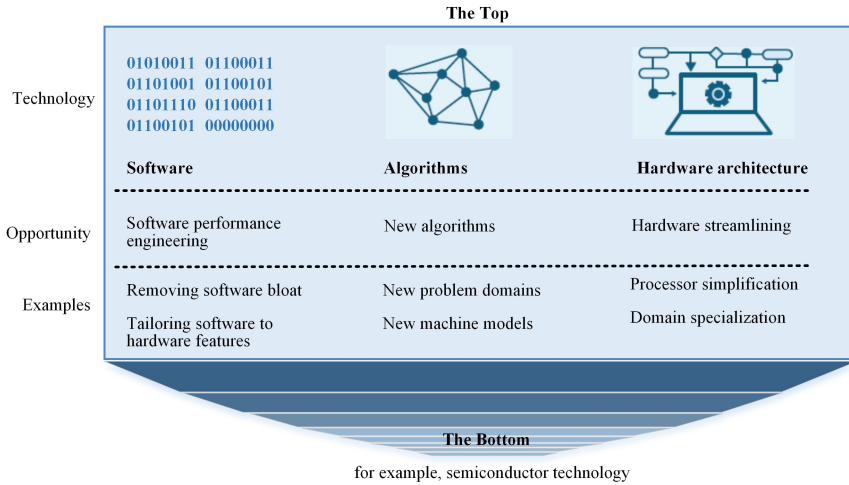
从图2可以看出,目前高性能计算机体系结构到Top500的机器是90%的Cluster加上10%的MPP,工业标准化的机群系统Cluster占据Top500 HPC排行榜的垄断地位,占据了绝对主导地位;Top100的机器是80%的Cluster加上20%的MPP,MPP系统份额在提升;Top10的机器是70%的Cluster加上30%的MPP。另一方面,Top500系统中,MPP架构的机器以20%左右的系统份额占据40%左右的性能份额,Cluster架构的机器以80%左右的系统份额占据60%左右的性能份额;而在Top10系统中,MPP架构的机器以30%左右的系统份额占据50%左右的性能份额。在高性能计算的高端领域,MPP架构的超级计算机与Cluster架构的超级计算机系统性能份额持平,虽然在高性能计算领域Cluster占据了绝对优势,但面向高端市场的MPP结构系统亦不容忽视。

同时,榜单上的系统呈现同构、异构系统并存的局面。在第十届全国社会媒体处理大会(SMP 2022)上,图灵奖得主Jack Dongarra指出:未来的HPC系统将可以被定制化<sup>[21]</sup>。当前,HPC主要有CPU和GPU两种类型的处理器,未来将采用更多不同的单元,如FPGA、机器学习加速器和ASIC芯片等。采用更多不同结构和范式的处理器将会越来越多地被添加到HPC计算系统中,如神经形态处理、量子计算以及光计算等,它们或将发挥越来越重要的作用。在构建新的HPC系统时,人们将能够按需使用相应的模块与功能。未来高性能计算机需要在同构与异构、通用与专用、动态与静态之间获得最优平衡<sup>[22]</sup>,灵活组织体系结构,实现多种计算资源比例灵活调整和性能功耗的平衡,应用于不同的场景,适应不同应用领域的需求,高效实现不同性能目标,多种技术路线呈现迭代发展的趋势。

3) 后摩尔时代,通过算法、软件和硬件架构提升HPC系统的终极性能仍然存在大量空间。

计算机性能的改善大部分来自于数十年来半导体工艺的提升带来的计算机部件的小型化,这是诺贝尔奖得主物理学家所预见的趋势。1959年,费曼在美国物理学会的演讲中提出:“底层有大量空间”<sup>[23]</sup>。1975年,英特尔公司创始人摩尔预言了这种小型化趋势的规律性,现在称之为摩尔定律<sup>[24]</sup>。随着摩尔定律接近极限,半导体微型化作为提高计算机性能的一种可行的方法,正逐渐走向枯竭——在“底层”没有更多的空间。计算性能增长的机会仍然存在,特别是在计算技术栈的“顶层”:软件、算法和硬件架构<sup>[25]</sup>。在后摩尔时代,计算能力的提升将越来越多地来自于计算栈“顶层”的技术,而不是来自于“底层”的技术,从而扭转了这一历史趋势。

HPC硬件在不断地演进,有标量计算机、向量计算机、分布式系统、加速器以及混合精度计算机等。当前计算机领域发生着3个重大的变化,高性能计算、深度学习以及边缘计算与人工智能。正如Charles等<sup>[25]</sup>所述,在摩尔定律之后,通过软件、算法和硬件架构去提升HPC系统的终极性能仍然存在很大的空间。如图3所示,算法和软件应该随着硬件不断的进化,软件可以通过性能工程变得更高效率,算法为解决提供了更有效的方法,硬件架构通过精简化和领域定制提升了系统性能。

图3 后摩尔时代 HPC 性能的提升之路<sup>[25]</sup>Fig. 3 HPC performance gains after Moore's law ends<sup>[25]</sup>

“后摩尔”时代,必须将算法、软件与芯片硬件架构紧耦合。目前 AI 算法发展速度是每 3~4 个月所需算力翻倍,而摩尔定律远远跟不上这个速度。若要解决该问题,除了研发高性能硬件芯片,还需要设计匹配芯片的算法,利用高性能低精度的专用加速芯片设计功能有效、性能满足条件的算法。另外,现代高性能应用程序对数学库的依赖无处不在,而且数学库中算法的执行性能起着至关重要的作用,在数值算法设计和实现层面依然需要进行大量的优化以充分发挥高性能应用的性能。与此同时,计算能力和带宽之间的差距不断扩大,使得与算术运算相比数据访问和通信显得极其昂贵。因此,需要调整传统数值算法以适应不断变化的硬件芯片设计,根据应用的特定需求调整混合精度通信格式,通过混合精度编译环境的建立,采用针对性、自动化的编译手段。现有编程框架(OpenMPI, MPICH, OpenMP 等)也需面向未来超算系统提出新型编程框架、简化超算编程<sup>[13]</sup>,以实现高性能计算敏捷开发的目的。通过软件、算法、编程框架、编译优化等“顶层”优化设计,完成“后摩尔”时代高性能计算的新的突破,保证持续有效的算力保障。

### 3 高性能计算标准发展现状及趋势分析

#### 3.1 高性能计算标准发展现状

基于高性能计算机市场的巨大空间以及目前高性能计算机产品的复杂多样性,目前业界已经成立了多个面向高性能计算机产品的行业标准组织,这些标准组织由整机制造商、芯片制造商、通信厂商、系统集成商等共同组成,旨在为新兴的高性能计算机市场如刀片服务器市场、机群市场建立统一的产品设计标准与性能指标,从而带动相关企业的合作互惠。但目前还没有一个得到业界主流厂商全面支持的高性能计算机产品标准,各个企业或行业标准组织在高性能计算机领域制定的各类规范都还未形成全面推广的局面。

目前,在国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)、国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)、国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)三大国际标准组织中,尚无系统

化描述高性能计算机的标准和标准组织存在<sup>[22]</sup>。

国内也成立了高性能计算标准化组织开展了高性能计算机相关标准制修订工作。2007 年 3 月 28 日,高标委成立,高标委由曙光公司发起,浪潮、中科院计算所都赫然在列,涵盖芯片、操作系统、服务器、交换存储、基础架构等主要国内计算机厂商<sup>[26]</sup>。高标委下设刀片式服务器、高性能计算机安全、集群操作系统、个人高性能计算机、高性能计算机应用、基础架构和知识产权 7 个工作组,7 个工作组分别由不同的企业来主导,分别围绕计算刀片、机柜基础架构系统、电源系统、散热系统等领域开展工作。2022 年 8 月 10 日,中国电子工业标准化技术协会成立新一代计算标准工作委员会<sup>[27]</sup>。筹建新一代计算标准工作委员会的初衷,一方面是积极响应国家方针政策,持续优化国家标准、行业标准、团体标准、企业标准供给结构,不断扩大新一代计算领域标准的覆盖范围;另一方面是凝聚行业核心力量,充分发挥标准的引领作用,积极贡献技术方案,解决“卡脖子”问题,促进中国标准与国际标准体系相互兼容,推动标准、合格评定活动国际互认。中国电子工业标准化技术协会新一代计算标准工作委员会由中国电子技术标准化研究院、华为技术有限公司牵头,联合阿里云、腾讯、浪潮等 41 家单位共同发起成立。2022 年 1 月,CCF 通过了 CCF 标准工作委员会主任和执行委员的名单,并于 4 月选举产生了首批 38 位标准工委委员<sup>[28]</sup>。CCF 标准工委的主要工作包括但不限于制定计算机及相关领域的 CCF 标准;推动 CCF 标准的测试认证等落地实施;宣传 CCF 标准,开展与其他标准及联盟组织的标准化合作;将各界在计算机领域的标准化需求转化为 CCF 标准立项,通过 CCF 标准进一步深化产学研融合。中国人民解放军装备发展部也在成立多个军用标准化技术委员会,并发布了若干高性能计算相关国家军用标准。

但目前还没有一个得到业界主流厂商全面支持的高性能计算机国家标准,系统化描述高性能计算机的标准只有一个国家军用标准:GJB 7034A-2021《军用高性能集群计算机系统通用要求》<sup>[29]</sup>,该标准制定了高性能集群计算机系统组成、功能及质量特性等方面的通用要求。

由于高性能计算机当前是对机群、小型机、高端服务器、刀片式服务器等产品的泛称,而且高性能计算机一般由计算处理分系统、高速互连分系统、存储分系统、编译系统等相关软硬件功能子模块组成,是一整套各类 IT 技术的整合体。目前在高性能计算机领域,虽然关于高性能计算机整机系统的标准只有《军用高性能集群计算机系统通用要求》<sup>[29]</sup>,但已经修订若干关于高性能计算机子模块的标准。国际标准组织中,当前各类高性能计算机的产品形态和相关标准,大量采用了 ISO/IEC/ITU 标准体系中各功能子模块的技术标准<sup>[10,26]</sup>。目前在高性能计算机领域的相关标准如下。

1) 硬件架构相关标准,包括 CompactPCI 标准<sup>[30-33]</sup>与 ATCA 标准<sup>[34]</sup>。

2) 刀片服务器相关标准,包括固件技术要求<sup>[35]</sup>、电气技术要求<sup>[36]</sup>、机械技术要求<sup>[37]</sup>、管理模块技术要求<sup>[38]</sup>、IO 扩展适配器要求<sup>[39]</sup>等。

3) 高性能计算机监控、管理、测试与评估相关标准,包括硬件管理标准与规范,具体为智能平台管理接口标准<sup>[40-41]</sup>、服务器硬件系统管理架构(System Management Architecture for Server Hardware, SMASH)标准<sup>[42-43]</sup>、新时代数据中心管理标准 Redfish<sup>[44]</sup>、高性能计算机监控管理标准<sup>[45]</sup>、高性能计算机系统测试与评估规范<sup>[46-47]</sup>以及正在制定的高性能计算国家标准计划:《信息技术 高性能计算系统 管理监控平台技术要求》(正在起草)<sup>[48]</sup>和《高性能计算机系统能效测试方法》(正在批准)<sup>[49]</sup>。

4) 高速互连网络标准,包括 Nvidia InfiniBand<sup>[50-51]</sup>, Intel Omni-Path<sup>[52-54]</sup>, HPE Slingshot<sup>[55-56]</sup>, 以及 Fugaku ToFu<sup>[57-58]</sup>, Bull BXI<sup>[59]</sup>, TH-Express<sup>[3-6]</sup>, Sunway<sup>[7-8]</sup>等定制/专属网络的其他网络标准、超级计算机互连网络设计要求<sup>[60]</sup>等。

5) 数据传输与存储相关标准,包括光纤传输标准、以太网传输标准、InfiniBand 传输标准、IDE 磁盘驱动标准、SATA 磁盘驱动标准、SAS、RAID、iSCSI、PCI/PCI-Express 总线标准等<sup>[10,26]</sup>,以及存储系统要求<sup>[61]</sup>、磁盘阵列要求等<sup>[62]</sup>。

6) 高性能软件相关标准,包括并行语言及编译系统设计要求<sup>[63]</sup>、并行程序开发环境设计要求<sup>[64-65]</sup>、并行操作系统设计要求<sup>[66-67]</sup>、高性能计算通信标准 MPI<sup>[68-69]</sup>等。

### 3.2 高性能计算标准趋势分析

近年来,中国高性能计算机产业已有所发展,随着银河/天河、神州/神威、曙光等高性能计算机系统的研制成功,我国高性能计算在国际上实现了“跟跑”“并跑”到“领跑”的跨越,高性能计算主要单位基本实现核心技术自主可控,目前这 3 家单位由于涉及高性能计算机系统研制,都被美国列入实体控制清单,并在国防、气象、证券等诸多领域得到运用,但标准缺失带来的弊端也日益显现。由于标准缺失,一是复杂而难以对接的系统延长了用户装机时间,增加了使用成本,也影响了高性能计算机的普及速度;二是无统一的标准使得产业链上下游厂商难以协同,从而难以发挥整合优势;三是在涉及国家安全的一些高性能计算领域,国外企业占据垄断地位,在一些关键技术接口规范上不得不向外界开放,使中国的国家安全和利益受到潜在威胁<sup>[10,39]</sup>。与此同时,欧、美、日等国家纷纷加大了对高性能计算机技术和标准的投入,一些跨国

公司成立联盟组织,通过控制标准来控制市场。高性能计算机领域亟需标准。

高性能计算机涉及整机构架、存储、网络、操作系统、安全等多个技术模块,技术体系复杂多样。如果没有统一的技术标准,将难以形成规模效益,严重阻碍产业的发展。因此,加快高性能计算机标准化工作对推动中国高性能计算机应用领域自主创新、提升产业核心竞争力,有着深远的意义。在全球竞争的背景下,从市场、产业和国家利益角度来看,高性能计算机领域都亟需一套统一并且能对产业发展起到良性推动作用的标准,用“标准”的武器来发展自己,提升产业竞争的层次。加速我国高性能计算的标准化和产业化,推进高性能计算系统在互操作性、可扩展性、管理性和整体构建成本等方面的发展,增强我国高性能计算产业的国际竞争力。

**结束语** 当前,高性能计算发展迅速,已经进入 E 级计算时代,我国在高性能计算领域也取得了跨越式的发展,取得了以天河、神威、曙光为代表的一系列成果,我国高性能系统研制水平跻身国际一流行列,我国高性能计算机系统研制主要单位基本实现了核心关键技术自主可控。

与高性能计算机技术飞速发展相比,高性能计算标准发展相对滞后。目前国际上尚无统一的高性能计算机标准,在 ISO, IEC, ITU 三大国际标准组织中,尚没有一个系统的高性能计算机和服务器的标准,也没有一个得到业界主流厂商全面支持的高性能计算机产品标准,各个企业或行业标准组织在高性能计算机领域制定的各类规范都还未形成全面推广的局面,导致现有的各个标准之间很难融合。随着高性能计算机需求的逐渐增加,标准的重要性愈来愈显著,标准缺失带来的种种弊端日益突显,这将给整个产业的发展带来不利影响。因此,面对目前的国际形势,以及国家和军队信息体系发展需要,迫切需要制定高性能计算标准规范,形成和推广非强制标准,整合行业资源,巩固高性能计算领域的科研优势,争取更大的话语权。促进战略、技术、科研、标准、市场等沟通协作,推动协同创新攻关,推动我国高性能计算机技术、生态及计算机相关产业健康和长远发展。

本文首先分析了当前国内外高性能计算机技术发展的现状及趋势;然后,剖析了当前国内外高性能计算机标准的现状;最后,给出了当前发展中国高性能计算机标准的必要性和重要性。

### 参 考 文 献

- [1] LIAO X K, LU K, YANG C Q, et al. Moving from exascale to zettascale computing: challenges and techniques [J]. *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, 2018, 19(10): 1236-1244.
- [2] ZHENG W. Research trend of large-scale supercomputers and applications from the Top500 and Gordon Bell Prize [J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63: 128-141.
- [3] YANG X J, LIAO X K, XU W X, et al. Th-1: first petaflop supercomputer [J]. *Frontiers of Computer Science in China*, 2010, 4(4): 445-455.
- [4] WANG R B, LU K, CHEN J, et al. Brief Introduction of TianHe exascale Prototype System [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2021, 26: 361-369.

- [5] LIAO X K, PANG Z B, WANG K F, et al. High performance interconnect network for TianHe system [J]. *Journal of Computer Science & Technology*, 2015, 30: 259-272.
- [6] PANG Z B, XIE M, ZHANG J, et al. The TH Express high-performance interconnect networks [J]. *Frontiers of Computer Science*, 2014, 8: 357-366.
- [7] FU H H, LIAO J F, YANG J Z, et al. The Sunway TaihuLight supercomputer: System and applications [J]. *Science China Information Sciences*, 2016, 59(7): 1-16.
- [8] GAO J G, ZHENG F, QI F B, et al. Sunway supercomputer architecture towards exascale computing: Analysis and practice [J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64: 177-197.
- [9] YAO W L. High performance computer standards: moving forward in hope and light [J]. *Information Technology and Standardization*, 2007(6): 4-7.
- [10] ZENG Y, WANG J. Analysis of High-performance Computer Technology and Standards in China [J]. *Information Technology and Standards*, 2016(10): 9-12.
- [11] The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council issued the "National Standardization Development Outline" [EB/OL]. (2021-10-10) [2022-11-23]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content\\_5647347](http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5647347).
- [12] LU K, WANG R B, DONG Y, et al. Challenges and opportunities in the development of exascale high performance computer systems [R]. *Development Report of 2019—2020. China Computer Science and Technology*, 2020: 418-437.
- [13] TAN G M, XUE W, ZHAI J D, et al. Status and trends of high performance computing [R]. *Development Report of 2018—2019. China Computer Science and Technology*, 2019.
- [14] WANG Y Y, WANG Y W. Micro-nano electronics discipline/industrial development history and rules [J]. *Science China Information Sciences*, 2012, 42(12): 1485-1508.
- [15] Thirteen Challenges of Electronic Information Engineering Science and Technology Development (2022) [R]. *Research on China Electronic Information Engineering Science and Technology Development*, 2022.
- [16] SUN J, LI M, WU H Q, et al. Frontiers and Trends of Microelectronics in Post Moore Era [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2020, 34: 652-659.
- [17] HUANG R, LI M, AN X, et al. New device technology for integrated circuits in the post-Moore era [J]. *Science China Information Sciences*, 2012, 42: 1529-1543.
- [18] DENNARD R, GAENSSLEN F. H, RIDEOUT V L, et al. Design of ion-implanted MOSFETs with very small physical dimensions [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1974, 9(5): 256-268.
- [19] HENNESSY, J L, PATTERSON D A. A New Golden Age for Computer Architecture [J]. *Communication ACM*, 2019, 62: 48-60.
- [20] LI B, LU P J. The Evolution of Supercomputer Architecture: a Historical Perspective [C]//19th CCF Conference on Computer Engineering and Technology, 2015: 145-153.
- [21] JACK D. An overview of high performance computing, the importance of AI/ML and future requirements [R]. *Invited reports, SMP 2022, Beijing*.
- [22] JOHN H. The End of the four eras of computer architecture and the rise of the fifth Era [J]. *Communication of the Chinese Computer Federation*, 2021, 17(1): 38-44.
- [23] FEYNMAN R P. There's plenty of room at the bottom [J]. *Engineering and Science*, 1960, 23: 22-36.
- [24] MOORE G E. Progress in digital integrated electronics [C]//International Electron Devices Meeting Technical Digest, IEEE, 1975: 11-13.
- [25] CHARLES E L, NEIL C T, JOEL S E, et al. There's plenty of room at the Top: What will drive computer performance after Moore's law? [J]. *Science*, 2020, 368: 6495.
- [26] ZENG Y. Comprehensive Review of High-productivity Computer Technologies and Standards [J]. *Information Technology and Standards*, 2008, 7: 17-20.
- [27] Founding Conference of New Generation Computing Standards Working Committee Held in Beijing [EB/OL]. (2022-08-19) [2022-11-23]. <http://jl.cesi.cn/cesi/202208/8692.html>.
- [28] CCF. List of first members of CCF standards committee released. [EB/OL]. (2022-04-26) [2022-11-23]. <https://www.ccf.org.cn/Focus/2022-04-26/761383.shtml>.
- [29] GJB 7034A-2021, General requirements for military high performance cluster computing system [S]. Beijing: Equipment Development Department of Central Military Commission, 2021.
- [30] PCI-SIG. homepage of PCI-SIG [EB/OL]. (2022-08-19) [2022-11-23]. <http://www.pcisig.com>.
- [31] PCI-SIG. PICMG|Open Standards for Embedded Computing [EB/OL]. (2022-08-19) [2022-11-23]. <http://www.picmg.org/pdf/pcichort.pdf>.
- [32] PCI-SIG. PCI-Only-e-PCI-X [EB/OL]. (2022-08-19) [2022-11-23]. <http://www.picmg.org/PCI-Only-e-PCI-X.stm>.
- [33] compactPCI [EB/OL]. (2022-04-19) [2022-11-23]. <https://baike.baidu.com/item/compactPCI>.
- [34] ATCA Standards and Testing. [EB/OL]. (2014-06-20) [2022-11-23]. <https://yongshengcao.blog.csdn.net/article/>.
- [35] SJ/T 11721-2018, High performance computing system-Blade Server-Compute Blade Firmware Technical Requirements [S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2018.
- [36] SJ/T 11719-2018, High performance computing system-Blade Server-Compute Blade Electrical Specifications [S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2018.
- [37] SJ/T 11720-2018, High performance computing system-Blade Server- Compute Blade mechanical technical requirements [S]. Beijing, Ministry of Industry and Information Technology, 2018.
- [38] SJ/T 11536.1-2015, High performance computing system-Blade Server-Part 1: Management Module Technical Requirements [S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2015.
- [39] HUGHES J E, SCOLLARD M L, LAND R, et al. BladeCenter processor blades, I/O expansion adapters, and units [J]. *IBM Journal of Research and Development*, 2005, 49(6): 837-859.
- [40] WUNG D S. Intelligent Platform Management Interface (IPMI) [R]. SLAC National Accelerator Laboratory Technical Report, 2011.
- [41] BHATIA A, MAITY S. Distributed Intelligent Platform Management Interface (D-IPMI) System and Method Thereof:

- U. S. Patent 14/700,843 [P]. 2015-4-30.
- [42] DMTF homepage[EB/OL]. [2022-11-23]. <https://www.dmtf.org/>.
- [43] Standard on server management: SMASH[EB/OL]. (2005-01-12) [2022-11-23]. [https://blog.csdn.net/iteye\\_11590/article/details/81313653](https://blog.csdn.net/iteye_11590/article/details/81313653).
- [44] New era data center management standard Redfish [EB/OL]. (2021-07-30) [2022-11-23]. [https://blog.csdn.net/weixin\\_32821251/article/details/119268494?spm=1001.2014.3001.5501](https://blog.csdn.net/weixin_32821251/article/details/119268494?spm=1001.2014.3001.5501).
- [45] SJ/T 11537-2015, High-performance computer cluster monitoring system technical requirements [S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2015.
- [46] QX/T 148-2020, Specification for testing and evaluation of high-performance computer systems in the meteorological field [S]. Beijing, China Meteorological Bureau, 2020.
- [47] QX/T 148-2011, Specification for testing and evaluation of high-performance computer systems in the meteorological field [S]. Beijing, China Meteorological Bureau, 2020.
- [48] 20213259-T-469, Information technology—High performance computing system—Technical requirement for management and monitor platform [S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2021.
- [49] 20190820-T-469, Test methods of energy efficiency for high performance computer system [S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2019.
- [50] InfiniBand Networking Solutions [EB/OL]. <http://network.nvidia.com/en-us/networking/infiniband-switching>.
- [51] InfiniBand Trade Association. Infiniband™ Architecture Specification; Release 1. 2. 1 [S]. Infiniband Trade Association; Beaverton, OR, USA, 2007; Volume 1.
- [52] BIRRITTELLA M S, DEBBAGE M, HUGGAHALLI R, et al. Enabling Scalable High-Performance Systems with the Intel Omni-Path Architecture [J]. IEEE Micro, 2016, 36(4): 38-47.
- [53] TRADER T. With New Owner and New Roadmap, and Independent Omni-Path Is Staging a Comeback. HPC Wire [EB/OL]. <https://www.hpcwire.com/2021/07/23/with-new-owner-and-new-roadmap-an-independent-omni-path-is-staging-a-comeback/>.
- [54] MURPHY P. Cornelis networks omni-path: Purpose built high-performance fabrics for HPC/HPDA/AI [C]// Proceedings of the Supercomputing Frontiers Europe, 2021.
- [55] DE S D, DI G S, MCMAHON K H, et al. An in-depth analysis of the slingshot interconnect [C]// Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 2020: 1-14.
- [56] HPE. HPE Slingshot\_The Interconnect for the Exascale Era Technical White Paper [EB/OL]. <https://assets.ext.hpe.com/is/content/hpedam/documents/a50002000-2999/a50002368/a50002368enw.pdf>.
- [57] AJIMA Y, INOUE T, HIRAMOTO S, et al. Tofu interconnect 2: System-on-chip integration of high-performance interconnect [C]// International Conference on Supercomputing, 2014: 498-507.
- [58] AJIMA Y, KAWASHIWA T, OKAMOTO T. The tofu interconnect [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Cluster Computing, 2018: 646-654.
- [59] SAID D, THIBAUT P S, PANZIERA J P, et al. The BXI interconnect architecture [C]// Proceedings of the IEEE 23rd Annual Symposium on High-Performance Interconnects, 2015: 18-25.
- [60] GJB 5615-2006, Design requirement for interconnect network of military supercomputer [S]. Beijing: Equipment Development Department of Central Military Commission, 2006.
- [61] GJB 5614-2006, Specification for memory system of military supercomputer [S]. Beijing: Equipment Development Department of Central Military Commission, 2006.
- [62] GJB 5169-2004, General specification for disk array of high performance computer [S]. Beijing: Equipment Development Department of Central Military Commission, 2004.
- [63] GJB 4456-2002, Design requirement for parallel language and compilation system of military supercomputer [S]. Beijing: Equipment Development Department of Central Military Commission, 2002.
- [64] GJB/Z 4894-2018, Design guide for parallel program and development environment of supercomputer [S]. Beijing: Equipment Development Department of Central Military Commission, 2018.
- [65] GJB 4894-2003, Design requirement for parallel program development environment of supercomputer [S]. Beijing: Equipment Development Department of Central Military Commission, 2003.
- [66] GJB 4893A-2018, Design requirement for parallel operating system of supercomputer [S]. Beijing: Equipment Development Department of Central Military Commission, 2018.
- [67] GJB 4893-2003, Design requirement for parallel operating system of supercomputer [S]. Beijing: Equipment Development Department of Central Military Commission, 2003.
- [68] BERNHOLDT D E, BOEHM S, BOSILCA G, et al. A survey of MPI usage in the US exascale computing project [J]. Concurrency & Computation: Practice & Experience, 32(3): e4851.
- [69] CHUNDURI S, PARKER S, BALAJI P, et al. Characterization of MPI usage on a production supercomputer [C]// Proceedings of International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis. IEEE Press, 2018, 30.



**LU Pingjing**, born in 1984, Ph.D, associate research fellow, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include high performance computing, computer architecture, and interconnect network.



**XIONG Zeyu**, born in 1990, Ph.D, associate research fellow. His main research interests include high performance computing, and computer architecture.