超级计算创新联盟
Supercomputing Innovation Alliance

高性能计算云（HPC Cloud）白皮书（2021）

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

超级计算创新联盟

2021年9月

版权声明

本白皮书版权属于超级计算创新联盟，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本白皮书文字或者观点的，应注明“来源：超级计算创新联盟”。违反上述声明者，将追究其相关法律责任。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

参与编写单位

中国信息通信研究院、北京航空航天大学、华为技术有限公司、中国科学院计算机网络信息中心、北京并行科技股份有限公司、北京北龙超级云计算有限责任公司、国家超级计算济南中心、联想（北京）信息技术有限公司、广州市品高软件股份有限公司、深圳北鲲云计算有限公司、赛尔网络有限公司、中国科学院声学研究所、北京华恒盛世科技有限公司、联科集团（中国）有限公司、江苏奥工信息技术有限公司、浪潮电子信息产业股份有限公司、戴尔科技集团、腾讯云计算（北京）有限责任公司、中国联通、中国电信、迈普通信技术股份有限公司、苇升信息科技有限公司、优刻得科技股份有限公司、飞腾信息技术有限公司。

主要撰稿人

宋平、穆**珹**博、毕立波、柴瑶琳、韩淑君、刘轶、张东升、高巍、黄海、牛铁、张宏海、乔楠、刘海超、郭宇、甄亚楠、潘景山、刘**弢**、崔吉顺、陈泽涛、邱洋、李青松、林安冬、赵宇、于跃、尤佳莉、韩锐、王思羽、徐雅琳、付鸿雁、黄斌、季宝石、邸双朋、高光辉、许良谋、凌巍才、张天承、邹弘宇、曹畅、张岩、徐洪磊、徐海兵、郭久明、梁颖健、凌奕铭、刘沛、王晓慧、刘勇。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

前　言

“数字化、网络化、智能化”已成为行业应用的基本特征，促进行业应用向多样化与多元化方向发展。在智能化时代，“强大的算力”将成为驱动技术创新与行业高质量发展的核心引擎。高性能计算是解决国家经济建设、社会发展、科技创新、国家安全重大挑战性问题的重要手段。以减低企业投入成本，提高高性能计算资源使用效率为目标的高性能计算云，将成为数字变革的算力赋能底座，满足千行百业数字转型对高性能算力的差异化、定制化需求。

本白皮书基于行业研究和调研报告，梳理了高性能计算云参考模型，提出高性能计算云的基本概念，明确高性能计算云的三个分类；围绕全球市场、应用上云、技术融合三个方面，梳理高性能计算云的产业发展现状，总结提炼数字浪潮背景下高性能计算云的核心价值；提出高性能计算云的参考架构，融合超算云、云超算、多云互联的共性能力与特性能力；系统梳理高性能计算云应用场景与典型案例；最后从计算业务上云、一体化安全防护体系、计算软件服务化、绿色节能等不同方面，展望高性能计算云技术与产业发展趋势。

当然，白皮书仍然存在诸多不足，恳请各界批评指正。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

目 录

一、 高性能计算云发展现状 1
（一）发展背景 1
（二）基本概念与分类 3
（三）产业现状 9
（四）数字浪潮背景下高性能计算云的核心价值 14
二、 高性能计算云参考架构 16
（一）高性能计算云参考架构 16
（二）基础设施层 18
（三）平台层 25
（四）服务层 31
（五）运维管理平台 35
（六）安全防护 37
（七）多云互联 38
三、 高性能计算云应用场景与典型案例 50
（一）能源勘探 50
（二）工业仿真 51
（三）多媒体 56
（四）生命科学 59
（五）气象环保 62
（六）材料研发 69
四、 高性能计算云趋势展望 71

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

（一）计算业务上云加速，高性能计算云产业发展迎来新格局 71
（二）构建一体化安全防护体系是高性能计算云产业发展的根本保障.....72
（三）计算应用软件服务化将成为高性能计算云服务新模式 72
（四）绿色节能将成为高性能计算云高质量发展的关键主题 73
附录 1：缩略语.....75
附录 2：参考文献.....78

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

图 目 录

图 1 HPC Cloud 满足各行业算力需求.....2
图 2 高性能计算云参考模型.....3
图 3 高性能计算云多云互联.....8
图 4 全球高性能计算云市场规模预测.....10
图 5 2024 年高性能计算总体市场规模预测.....11
图 6 2019 年垂直行业应用市场对比.....12
图 7 垂直行业云上 HPC 应用市场规模.....13
图 8 高性能计算云参考架构.....16
图 9 智能化运维平台功能视图.....36
图 10 算力中心间跨域高速互联网络.....39
图 11 通过 IVI 翻译设备将 IPv4/IPv6 网络和资源无缝整合.....41
图 12 GeoEast 地震数据处理解释一体化系统.....51
图 13 基于云超算的流体力学软件.....55
图 14 多媒体渲染集群逻辑架构.....58
图 15 基于 HPC Cloud 的生命科学应用方案.....60
图 16 高性能生物云计算方案.....61
图 17 空气质量动态调控技术平台架构.....64
图 18 基于高性能计算云的空气质量动态调控技术平台.....65
图 19 基于超算云的全球高分辨率海洋环境数值预报系统.....66
图 20 基于图像的强对流天气推演.....67
图 21 基于图像的强对流天气推演.....68

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

图 22 基于图像的强对流天气推演 68
图 23 云化材料基因高性能计算解决方案 70

表 目 录

表 1 传统超算与云超算对比 7

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

一、高性能计算云发展现状

(一)发展背景

以 5G、人工智能、区块链等为代表的新一代 ICT 技术与行业深度融合，引领新一轮的产业变革。“数字化、网络化、智能化”已成为行业应用的基本特征,促进行业应用向多样化与多元化方向发展。在智能化时代，“强大的算力”将成为驱动技术创新与行业高质量发展的核心引擎。近期，工业和信息化部印发《新型数据中心发展三年行动计划(2021-2023 年)》,明确提出要加快提升算力算效水平，加快高性能、智能计算中心部署，推动 CPU、GPU 等异构算力提升，逐步提高自主研发算力的部署比例，推进新型数据中心算力供应多元化，支撑各类智能应用。

高性能计算机以超高的计算性能广泛应用于国民经济各个领域，在应对重大挑战性问题，促进传统产业转型升级，提高人民生活水平，促进重大科学发现等方面发挥着不可替代的作用，是研究和解决各领域挑战性问题的重要手段。近年来，我国高性能计算机研制和应用水平、生产制造能力、实际部署数量均已进入世界前列。高性能计算系统已广泛应用于科学研究、工业制造、人工智能、生物医药等领域，发挥着重要的平台支撑作用，是科学、工业和社会进步的基础，已成为国家重要的信息基础设施。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

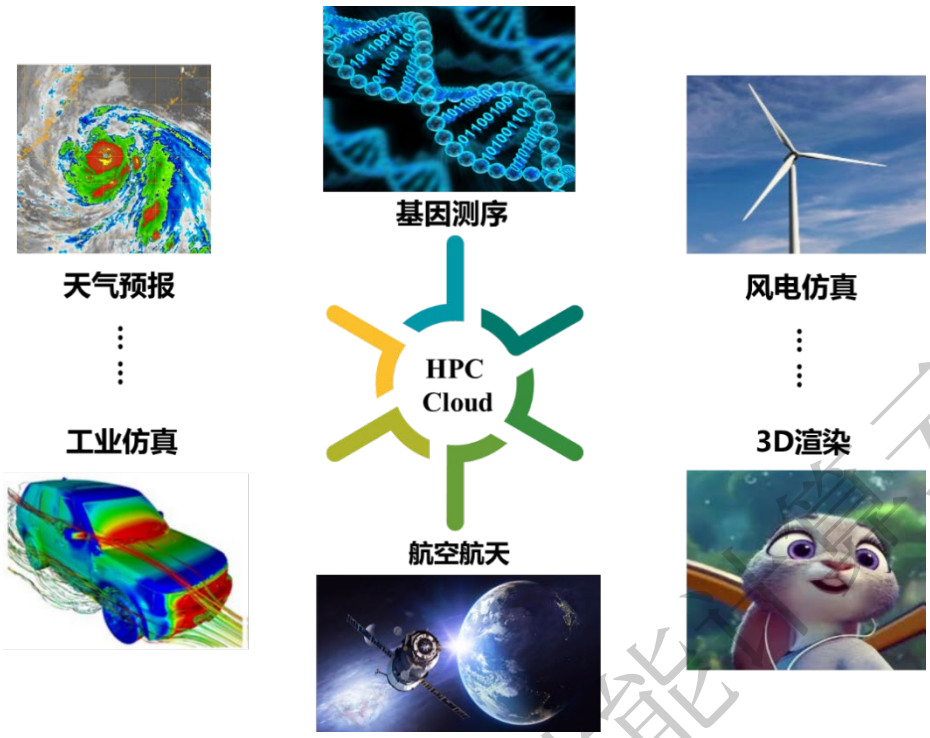

图 1 HPC Cloud 满足各行业算力需求

随着数字化转型的深入，行业应用从时间、空间、资源等不同维度对算力提出更高要求。为满足不同行业灵活的业务形态与计算需求，以云计算技术为服务模式创新的技术手段，以高性能计算服务为核心的高性能计算云（HPC Cloud）受到业界的广泛关注[1]。国内外主流服务商纷纷推出 HPC Cloud 产品，持续拓展高性能计算应用边界。根据 Market Research Future 的研究报告显示，预计到 2023 年，HPC Cloud 的市场规模将达到 220 亿美元。

随着我国“新基建”步伐的加快，算力将成为生产核心竞争力。一个企业乃至整个国家利用高性能算力可以更有效地整合资源，构建生态，培育竞争优势。在算力时代，HPC Cloud 一方面将与大数据、人工智能等新兴技术深度融合，为各类技术的创新演进提供能

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

力底座；另一方面，HPC Cloud 将进一步提升行业应用的深度与广度，不断驱动行业新模式、新业态的蓬勃发展，促进传统产业转型升级。

（二）基本概念与分类

高性能计算云是一种**结合云计算技术**的**高性能计算服务模式**，其中**高性能计算是服务核心，云计算是服务模式创新的技术手段，多云互联是服务能力的扩展支撑**。在此基础上，高性能计算云将与大数据、人工智能等技术深度融合，面向行业应用需求，提供一体化智算服务能力，实现高性能计算云**能力拓展**。

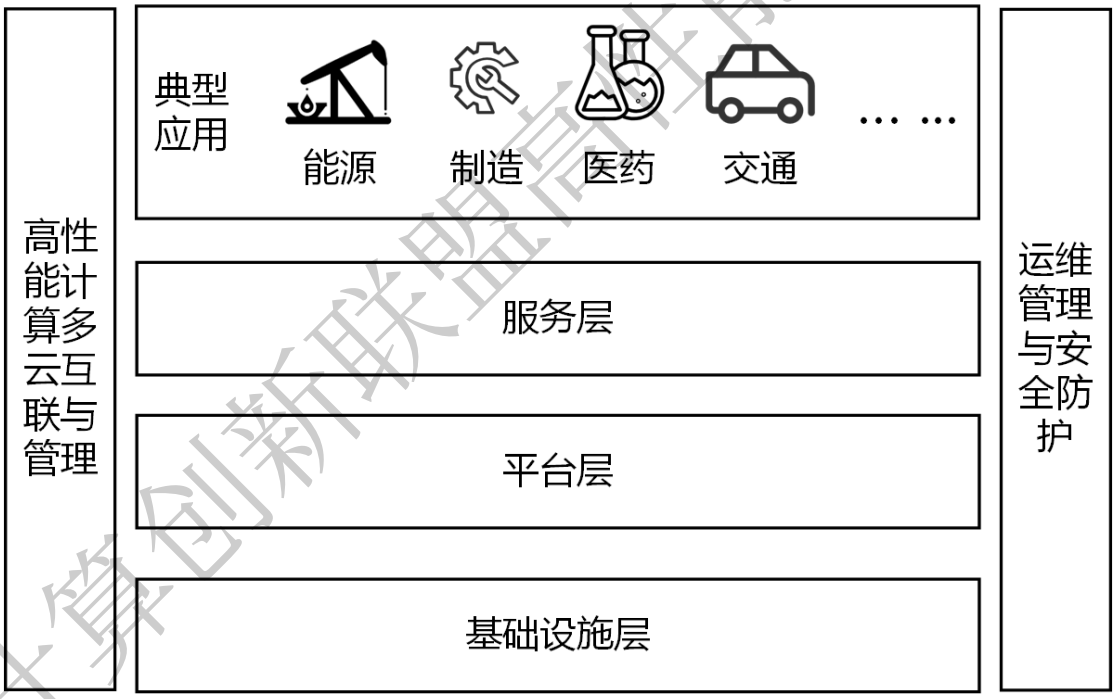

图 2 高性能计算云参考模型

如图 2 所示，高性能计算云主要分为以下关键部分：

- 基础设施层：提供行业高性能计算应用所必须的计算、存储

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

与网络资源。

- 平台层：向下对高性能算力资源解耦，向上提供部署运行高性能应用的相关平台环境。
- 服务层：面向行业高性能应用提供统一的高性能计算云服务平台，满足行业应用差异化、定制化服务需求。
- 运维管理与安全防护：针对高性能计算云不同的层次，提供资源监控、告警监控等运维管理服务以及数据、接口等安全防护服务。
- 高性能计算多云互联与管理：从资源、数据、应用、服务等不同维度实现高性能计算云之间的互联互通，并在此基础上实现统一的多云管理。

目前，高性能计算云产业根据产品形态将高性能计算云分为三类[2]：

（1）**超算云**：超算资源为底座，通过云计算的服务模式为用户提供高性能计算服务。

（2）**云超算**：以通用云资源作为底座，为不同租户提供高性能计算服务。

（3）**多云互联**：在不同高性能计算云之间，实现资源、数据、应用、服务等不同维度的云间协同与统一的多云管理。

超算云和云超算两类产品在高性能计算云参考模型的基础设施、平台和服务方面具有不同的特征。本章节将针对高性能计算云不同产品形态进行详细介绍。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

1.超算云

超算云是传统高性能计算的云化服务模式，通过互联网聚合各大超算中心的计算资源，面向物理、化学、材料、航天、航空、力学、气象、海洋、能源、汽车、生物等各领域广大计算用户，提供弹性按需增值机时服务，保障用户科研任务及时完成，使个人计算用户及企业用户方便使用超算资源。超算云是“超算的云化”，是以超算为底层设施,主要采用物理服务器资源,以解决核心算力问题。

过去的几十年中，各个超算中心往往以“私有化与集中化”的形态，为研究人员、工程师和科学家提供高性能计算服务，单位机构必须为之配备相应的场地、人员和经费等等。随着超算技术和互联网的发展，计算场景和处理的数据量也呈现指数级增长，由于自建超算昂贵的价格、复杂的架构，如何快速获取到与需求相匹配的计算能力成为关注重点。

超算云的出现，解决了科研单位、企业在传统自建超算中“高资金投入，低利用率”的问题，减少或屏蔽市场调研、采购、IDC建设、安装部署、运维管理等诸多工作。“超算云”服务，帮助用户更好、更方便地使用超算资源，成本相比过去大幅降低。

超算云可以看成是传统超算的“云化”演进。对照图 2 所示的高性能计算云参考模型，超算云在不同层次上具有新的特性。在基础设施方面，超算云以超算中心资源作为底座，提供统一的资源调度平台；在平台层方面，超算云调用基础设施层的 API，将高性能计算平台能力与云计算平台能力进行深度融合，提供 CI/CD 等云原

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

生能力的高性能计算平台；在服务层方面，超算云提供统一的云化服务平台，实现计算软件与计算环境的松耦合。

2.云超算

全球各大云服务厂商都推出了云超算服务，客户通过云服务账号可以随时随地购买云 HPC 服务和资源，方便易用。云超算提供了完整的基础能力栈和竞价、竞享实例等新的商业模式，降低了使用门槛。

云超算是以通用云平台为基础，通过对云上网络、计算、存储等基础设施的编排，和对作业调度、监控及其他上层应用的集成，为计算任务提供弹性、自动化、高性能的算力支持的一种计算模式。它是传统高性能计算工作流在云上的应用和延伸，使计算任务可以被提交到云上进行调度、运行、前后置处理、结果保存和展示等。它区别于传统高性能计算主要有以下几个特点:

- 资源弹性伸缩。能基于云平台自动、快速、弹性地调度资源，无需等待，并缓解计算资源限制。
- 配置动态灵活。能根据任务需要选择 CPU、GPU、网络、存储等基础架构来构建合适的计算集群。
- 投入经济可控。基础设施云托管，减少了采购的经济成本和运维的时间成本，弹性伸缩的模式进一步避免了资源

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

表 1 传统超算与云超算对比

对比维度	传统超算	云超算
建设方式	政府/企业自建	云服务厂商/政府建平台/企业自建
服务提供形态	物理机、处理器（核）	IaaS/PaaS/SaaS
资源获取方式	一般是手动审批，开通	自助按需使用，动态申请，动态共享，计算节点按需申请/释放
资源可扩展性	固定资源池，无法快速灵活匹配业务增长	动态扩容资源池
SLA	没有明确的 SLA 保障	提供完整的 SLA 保障
运维	企业自行运维	私有云方案由企业运维，公有云方案中企业无需关注运维
安全	不支持逻辑多租户隔离	支持逻辑多租户隔离等
计费	以核时计费为主，支持粗粒度的存储、网络计费	支持按云服务多样性计费

如表 1 所示，与传统超算对比，云超算在建设方式、服务提供形态等方面具有一定的优势。云超算是基于云原生技术，采用公有云或混合云模式为用户提供的高性能计算服务。云超算具备开箱即用、按需购买使用、资源种类多样、弹性扩展、易用易管理、安全可信和连通性好等优势和特点。云超算是传统 HPC 的软硬件与云原生、AI 等技术结合的新型高性能计算服务模式。

云超算可以看作是云计算向高性能计算方向的能力延伸。对照图 2 所示的高性能计算云参考模型，基础设施层方面，云超算是完全云化的具备更强算力的通用基础设施；在平台层方面，云超算提

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

供高性能计算平台、大数据平台、人工智能平台等多种平台能力；在服务层方面，云超算面向各类行业，提供了集合了大数据、人工智能、高性能计算等服务能力的统一服务平台。

3.多云互联

多云互联是一种云应用策略，通过多云连接策略，企业可连接多个私有云、公有云及混合云平台，将日常业务灵活地分布至不同的云端环境。企业可利用不同云服务供货商的服务优点，选取最合适的云服务组合，同时减低采用单一云服务平台的风险。

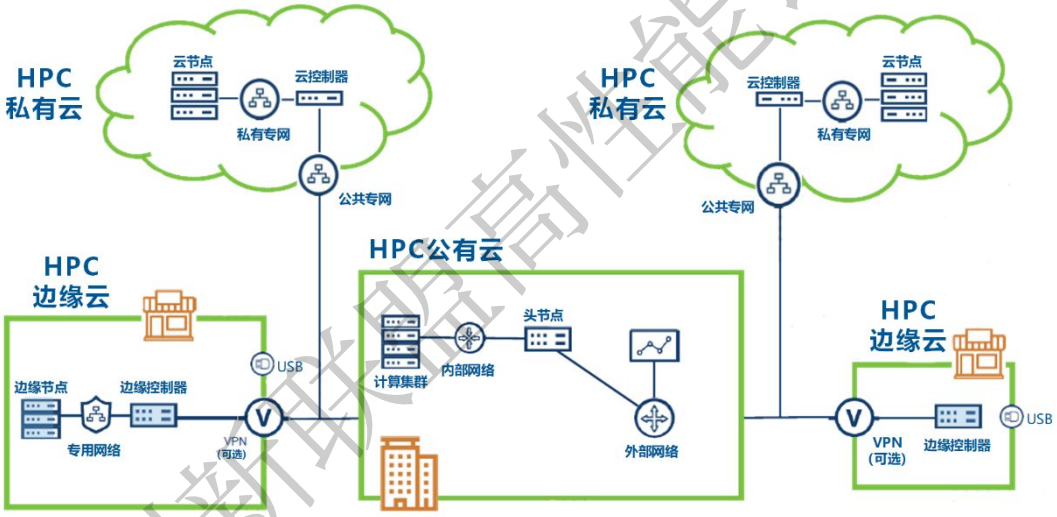

图 3 高性能计算云多云互联

本白皮书提到的多云互联是指不同高性能计算云之间的协同互联与统一管理。如图 3 所示，多云互联的主体既可以是以超算云、云超算为代表的公有高性能计算云（本白皮书简称 HPC 公有云），也可以是企业自建的私有高性能计算云（本白皮书简称 HPC 私有云），还可以是具有高性能计算资源供给能力的边缘云（本白皮书简称

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

HPC 边缘云）。根据互联的主体不同，可以将多云互联划分为以下三个方面：

- HPC 公有云互联：HPC 公有云之间的互联互通，包括但不限于基于云化的超算中心互联、云超算互联、超算资源与云资源互联等。
- HPC 公有云与 HPC 私有云互联：HPC 公有云与 HPC 私有云之间的互联互通。部分企业从生产数据安全的角度出发，将敏感数据使用自建 HPC 私有云处理，并将脱敏后的数据发送至 HPC 公有云协同处理。
- 云边互联：HPC 公有云与 HPC 边缘云之间的互联互通。为了满足近用户侧的高效算力需求，可以利用 HPC 边缘云所提供的高性能计算资源执行对业务实时性要求更高的部分业务流程（如 AI 推理过程），算力资源更加丰富的 HPC 公有云执行对算力要求更高的业务流程（如 AI 训练过程），云边之间通过互联互通实现相互协作。

（三）产业现状

1. 全球高性能计算云市场将迎来爆发式增长

根据 Gartner 的研究数据显示，受疫情影响，全球云计算市场的增速放缓至 13.1%，市场规模为 2083 亿美元，其中 IaaS 市场规模为 592 亿美元，PaaS 市场规模为 463 亿美元，SaaS 市场规模为 1028 亿美元。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

图 4 全球高性能计算云市场规模预测

在全球数字转型浪潮的背景下，高性能计算市场规模持续增长。IDC、Hyperion Research 研究数据显示，2018-2019 年 HPC 市场继续增长且高于预期，2020 年以后，未来五年 HPC 市场（包括服务器、软件、存储和运维服务）将达到 10%的复合年均增长率。2019 年中国高性能市场规模约 282 亿元，云服务渗透率预估约 3%，远低于全球 12%的水平，预计 2024 年，HPC 云服务市场规模达 76 亿元，年复合增长率达 45%。

云计算已成为企业数字转型的充分必要条件，企业上云将进一步提升生产运营数据价值，创造显著的经济效益。随着企业对算力需求的持续增长，高性能计算云市场规模将迎来爆发式增长。如图 4 所示，预计到 2024 年，高性能计算云的市场规模将达到 88 亿美元，市场增速将是线下高性能计算市场规模的 2.5 倍，2019 年至 2024

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

年的 CAGR 为 17.6%。

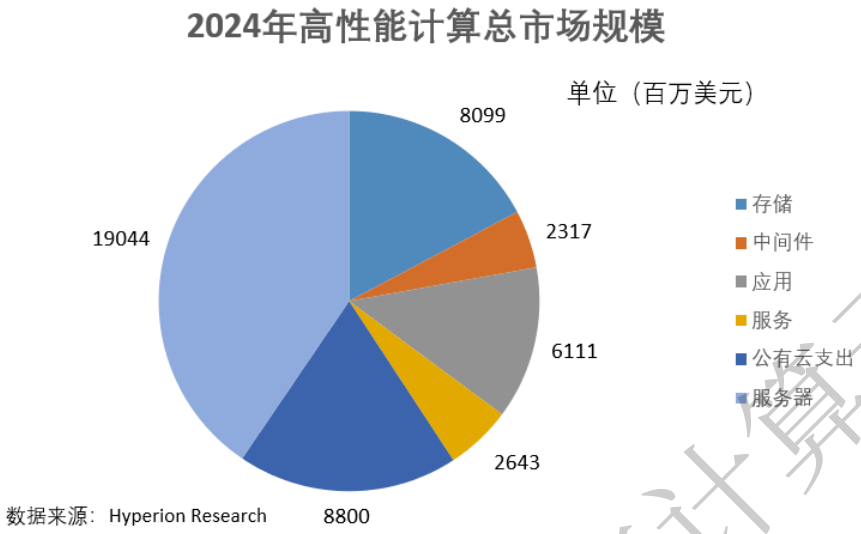

图 5 2024 年高性能计算总体市场规模预测

如图 5 所示，预期到 2024 年，高性能计算总体市场规模将达到 470 亿美元，其中高性能计算云在高性能计算总体的市场规模的占比将达到 18.7%，位列第二，仅次于服务器市场规模。

2. 垂直领域高性能计算应用上云将成为主流

垂直行业用户在使用高性能计算系统运行行业应用时，成本将成为行业应用重点考虑的因素。选择在云上运行高性能计算应用，行业用户将进一步缩短传统方式的排队时间，更加灵活地选择运行应用所需的各类硬件，从而提高成本效益。

高性能计算在人工智能和其他新兴高性能数据分析场景的应用也成为 HPC 应用上云的重要的推动因素，如自动驾驶、精密医学、智慧交通、智慧城市、物联网等。同时，混合云解决方案及多云产

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

品在过去几年增加了计算资源的灵活性，特别是引起了对计算资源有弹性计算需求的用户的关注。

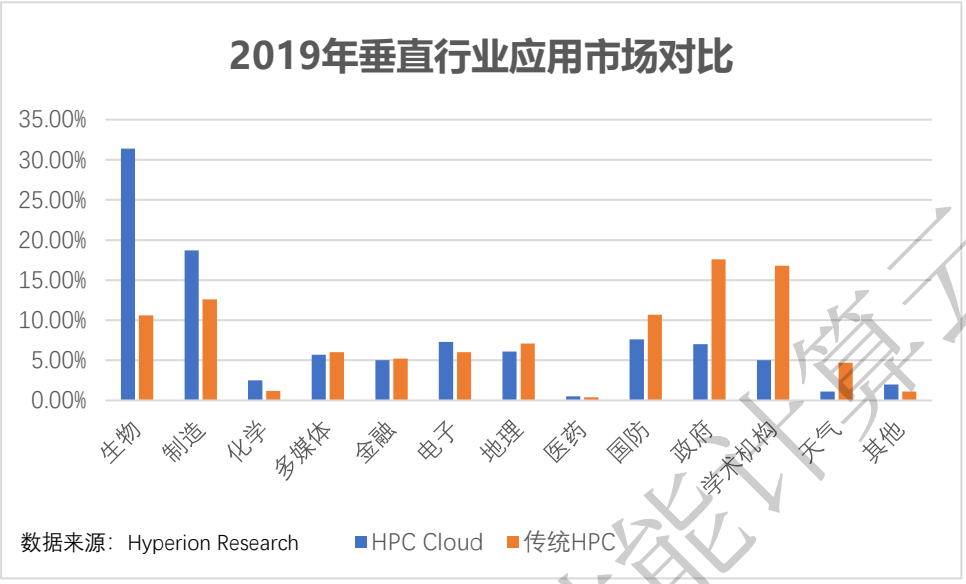

图 6 2019 年垂直行业应用市场对比

部分垂直行业已率先布局高性能计算云市场。如图 6 所示，在 2019 年，生物和制造领域在高性能计算云市场的占比为 50.1%，具有较大比重。在传统高性能计算市场中，政府和学术机构的占比较大，共计 34.4%。多媒体、金融等领域，两者之间的比例基本持平。

更多垂直行业将通过云上的方式部署 HPC 应用。如图 7 所示，预计到 2024 年，生物和制造领域的市场规模将保持领先地位。多媒体、电子、地理、国防、科研、天气等领域的 CAGR 将大于高性能计算云整体市场的 CAGR（17.6%）。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

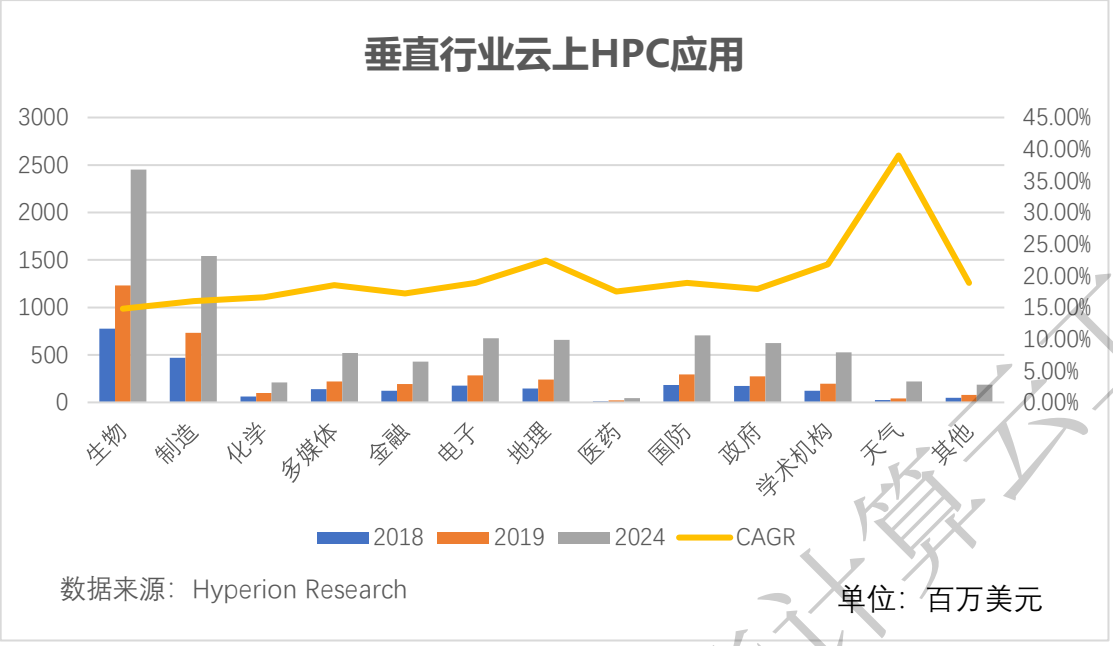

图 7 垂直行业云上 HPC 应用市场规模

3. 人工智能等 ICT 创新技术融合成为高性能计算云发展新趋势

根据国家统计局《2020 年国民经济和社会发展统计公报》显示，2020 年度，我国研究与试验发展经费支出 24,426 亿元，比上年增长 10.3%，与国内生产总值之比为 2.40%，比上年提高 0.16 个百分点。其中基础研究经费 1504 亿元，比上年增长 12.6%，持续保持较快增长。总体上，中国科研支出呈现持续高速增长的发展趋势。

《2020 年政府工作报告》中首次提出“新型基础设施建设（新基建）”在内的“两新一重”的重点建设任务，国家发改委首次明确了“新型基础设施建设”的范围，提到了“以人工智能、云计算、区块链等为代表的新技术基础设施”，其中的“新”包含了技术创新、商业模式创新等理念，高性能计算云作为新型的高性能计算服务和

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

解决方案，为推动传统基础设施的转型升级，基础研究和行业应用的快速发展，发挥着基础而核心的支撑作用。

以云服务商、高性能计算服务提供商为代表的各类厂商均推出了高性能计算云服务，除了提供虚拟机、容器、裸金属服务器、GPU等多种异构算力，以及SSD系列云存储、高性能并行文件系统和高性能网络外，云服务厂商还积极将云原生、AI、大数据等新技术引入到高性能计算云中，提供跨云、跨地域的智慧服务能力，尤其是在工业仿真、生物学、药物研发、金融服务、自动驾驶等领域，行业应用需要高性能计算是分布式的，跨越多个站点，延伸至边缘，连接到远程传感器，运行批量模拟、数字孪生模拟等AI业务。各大云服务厂商也在积极构建高性能计算云的应用生态，在此基础上，实现高性能计算云之间的互联互通，实现算力的远程调度和协同，将实现算力价值的全局最大化。

（四）数字浪潮背景下高性能计算云的核心价值

高性能计算是解决国家经济建设、社会发展、科技创新、国家安全重大挑战性问题的重要手段。以减低企业投入成本，提高高性能计算资源使用效率为目标的高性能计算云，将成为数字变革的算力赋能底座，满足千行百业数字转型对高性能算力的差异化、定制化需求。其中，超算云以超算中心资源为底座，通过云计算技术面向全国科研工作者提供精细化的高性能计算服务，加速科研发展。云超算以通用云基础设施为底座，将高性能计算迁移至云端，并结合大数据、人工智能等新兴技术，提供一体化、智能化的服务模式。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

未来，国家将持续加大对科研经费的投入，超算中心、智算中心等各类算力基础设施将在重点行业、重点地区大规模布局，成为推动社会经济智慧化转型的核心基础设施。作为一种新型服务模式，高性能计算云将进一步面向行业应用需求，充分释放高性能算力资源，加速高性能计算技术与新一代信息技术的融合创新，赋能行业数字变革。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

二、高性能计算云参考架构

(一)高性能计算云参考架构

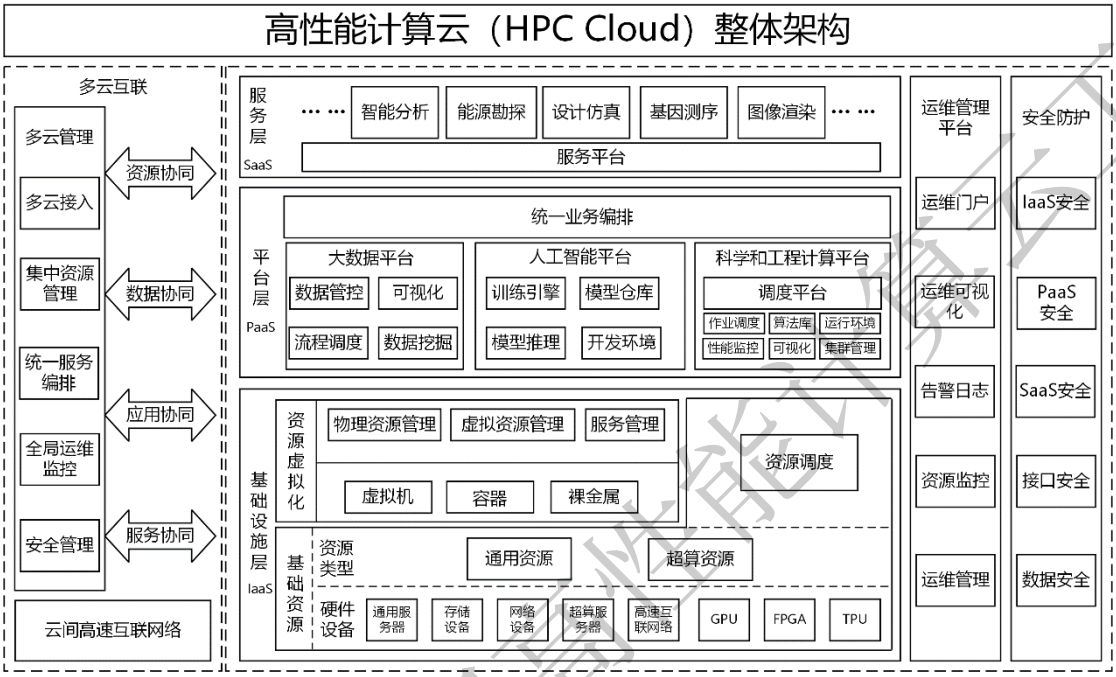

图 8 高性能计算云参考架构

本白皮书从高性能计算云应用需求出发，结合业界优秀高性能计算云实践，在高性能计算云参考模型的基础上，提出了高性能计算云参考架构，如图 8 所示。

高性能计算云参考架构是结合超算云、云超算以及多云互联核心能力的综合性架构。该架构所包含的各项能力，既有现阶段超算云与云超算的共性能力，也有现阶段超算云与云超算的特性能力。**超算云与云超算将沿各自的技术路线演进发展。**

高性能计算云基础设施层为高性能计算云提供了运行行业应用所需的基础算力资源，可向上提供虚拟化能力。基础设施层的硬件

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

资源主要包括通用服务器、存储设备、网络设备、超算服务器、高速互联网络、GPU、FPGA、TPU 等各类计算、存储与网络硬件，其中，超算云以超算资源为主，云超算以通用资源为主。资源虚拟化为高性能计算云服务提供了集中化的资源管理、可弹性的资源调配、较低的运维成本。由于云超算使用通用的云基础设施，因此在资源虚拟化功能方面相对完善。

高性能计算云平台层使用统一的业务编排系统实现对大数据、人工智能、高性能计算等平台的资源和作业进行统一调度与编排。超算云平台层的核心是将超算管理技术通过微服务的方式提供给平台开发者，云超算平台层更加关注大数据、人工智能与高性能计算的协同编排能力。

高性能计算云服务层作为面向行业用户的门户，在基础的平台服务之外，提供了多种行业场景下的高性能计算应用服务，包括智能分析、能源勘测、设计仿真、基因测序、图像渲染等。

运维管理平台建立易管理、可运营、安全可靠、监控报警功能齐全、处理响应机制及时有效的管理体系，以保障高性能计算云平台和业务的持续、可靠运行，运维管理包括资源与业务监控、告警日志、运维管理、运维可视化、运维门户等功能。

安全防护从 IaaS 安全、PaaS 安全、SaaS 安全、接口安全、数据安全等不同层次保护高性能计算云系统安全，以确保各类高性能计算云应用和云服务能够持续、高效、安全、稳定地运行。

多云互联是高性能计算云之间的互联互通，主要包括了 HPC 公

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

有云、HPC 私有云、HPC 边缘云之间从资源、数据、应用与服务四个层面相互协同，并在此基础上实现多云接入、异构管理、资源管理等多云管理功能。

(二)基础设施层

1.基础资源

本节将从计算、存储、网络三个维度，介绍高性能计算云基础资源。

（1）计算资源

在 CPU 处理器架构方面，国内厂商有基于 X86 架构的海光、兆芯,基于 ARM 架构的鲲鹏、飞腾,基于 SW64 架构的申威,基于 LoogISA 架构的龙芯，总体分为四大指令集、六大厂商。

在加速器方面,国内产业界已有多款人工智能/深度学习加速芯片获得应用，自主 GPU 芯片也已出现。

在服务器方面，主要包括通用服务器、超算服务器以及可选集成在其中的 GPU、NPU、FPGA、定制 ASIC 等硬件加速设备。

计算资源的主要特征包括:

- 满足各类业务算力需求: 随着技术的不断发展更新，高性能计算与人工智能、大数据等技术融合趋势愈发明显，人工智能、大数据在算力需求中的占比越来越高。因此，高性能计算云的建设需满足技术不断发展的诉求,采用统一的硬件平台高效承载高性能计算、人工智能、大数据等多种业务，提

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

升资源利用率和运营效率。

- 多元化算力硬件支持:由于业务的多样性以及软件以及算法的多样性，对算力需求的多元化趋势也愈来愈明显。CPU、GPU、NPU、FPGA、乃至定制 ASIC 等主流技术路线各具优势，在不同的领域均已实现实际应用落地。计算子系统的硬件设计需兼顾不同业务的诉求，提供多元化的算力支撑。
- 高密度低能耗: 计算硬件的选型需采用众核 CPU、专用硬件加速器以及先进制程等技术手段，不断提升计算密度；同时需采用液冷等先进散热技术，打造绿色节能的硬件平台。

（2）存储资源

存储系统由存储服务器、磁盘阵列等硬件设备构成，通过并行存储系统实现存储空间的聚合，存储类型包括并行文件存储、块存储、对象存储等，为高性能计算云系统提供数据存储能力。

不同存储类型各具优势。块存储优势是性能高、时延低，适合于 OLTP 数据库、NoSQL 数据库等 IO 密集型的高性能、低时延应用工作负载。但是块存储无法容量弹性扩展，单盘最大只能 32TB，并且对共享访问的支持有限，需要配合类 Oracle RAC、WSFC Windows 故障转移集群等集群管理软件才能进行共享访问。因此，块存储主要还是针对主机的高性能,低时延的存储产品。文件存储提供简单、可伸缩弹性的共享文件存储，配合计算节点实例构建业务系统。可直接像访问本地文件系统一样访问文件存储（直接挂在到服务器）。提供高吞吐和高 IOPS 的同时支持文件的随机读写和在线修改。对象存储相对于文件存储目录树的组织形式，对象存储采用扁平的文件

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

组织形式，采用 REST API 接口访问，不支持文件随机读写，主要适用于互联网架构中海量数据的上传下载和分发。

存储资源的主要特征如下:

- 多存储形态: 应支持并行块存储、文件存储、对象存储、突发缓存等多种存储方式，满足各业务对存储的多样诉求。随着云存储的技术的不断发展,未来兼容 POSIX 的对象存储可能替代传统的 Lustre/GPFS/BGFS 成为并行文件系统的主流实现方式。
- 多租户按需共享:存储子系统应能支持多租户按需申请使用存储资源，动态创建存储空间。各租户存储空间之间有效实现安全隔离，保障数据安全。
- 高可靠: 存储子系统应支持存储高可靠设计，如数据多副本或冗余校验码、节点间冗余备份等。保障存储子系统在存储介质失效、存储节点失效的状态下仍能对外正常提供服务，提升整体系统可靠性。
- 融合存储硬件:存储架构宜考虑采用统一的存储硬件支持多种存储形态，提升存储资源利用率，提升各存储形态可利用带宽、IOPS 等性能上限。

（3）网络资源

高性能计算云网络分为管理网络、云网络、业务网络、存储网络等多个网络平面，为高性能计算云系统内各个设备之间以及高性能计算云之间提供网络互连能力。

传统以太网互联方案和支持 RDMA 技术的网络互联方案是当前

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

主流的网络互联方案。在传统以太网互联方案中，千兆以太网通常用于集群上的二级管理连接，以及小型面向吞吐量的集群的主要互连，高速以太网 (10G、40G 和 100G)主要用于存储网络和局域网，实现系统互联。RDMA 全称远程直接数据存取，通过网络把数据直接传入计算机的内存,将数据从一个系统快速移动到远程系统内存中，实现零拷贝，以解决网络传输中服务器端数据处理的延迟。支持 RDMA 技术的网络互联方案主要包括 InfiniBand 方案以及基于以太网的 RoCE 方案。

网络资源应具备如下主要特征:

- 高带宽低时延: 高性能计算以及人工智能等大型作业在运行时通常采用集群计算方式，集群中各节点间的通信带宽和时延对业务性能至关重要。存储和高性能计算传统上采用封闭的专用网络承载，典型如存储的 FC 网络，高性能计算的 InfiniBand 网络，而这些专有网络技术长期被少数厂商垄断。随着 100GE 的成熟和 400GE 的规模商用，以及智能无损等技术的发展，以太网已经具备赶超传统专网的能力，高性能的智能无损以太网络已成为必然趋势，同时，以太网技术具备开放生态和成熟供应链，可为业务连续性提供基础性保障。
- 多租户网络安全隔离: 网络需支持按租户需求自定义网络地址空间及安全设置，网络按租户配置动态发放，租户间需实现安全隔离。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

- 融合网络硬件设施：整个系统中存在管理网络、云网络、计算网络、存储网络等多种网络平面。为节省建设投资和简化运维管理，应该打破云网络、存储网络和计算网络的多协议架构壁垒，构建基于开放以太网的超融合网络架构，实现多种网络平面的协议融合，从而更好地满足云业务的弹性敏捷以及多租户安全诉求。
- 安全可靠：网络设计架构需考虑端口失效、链路失效、网络节点失效等多种失效可能，采用如链路聚合、网络设备堆叠、网络多路径等技术手段提升网络可靠性。
- 数据快传：优化用户到高性能计算云的网络链路，减少跳转节点，保障网络性能，最大程度利用用户带宽，为用户免费提供低延迟、高吞吐的高质量超算接入网络。

2.资源虚拟化

高性能计算云的建设应综合考虑高性能计算、人工智能、大数据等业务的诉求,从应用需求角度出发,提供多样性资源供给方式。如大多人工智能、大数据业务需采用容器方式调度运行,基因测序、渲染业务则较多采用虚拟机方式运行，而传统 HPC 业务，则多采用物理服务器集群方式运行更为高效。

高性能计算云的建设，需能为租户提供裸金属、虚拟机、容器等多种粒度的计算资源，统一承载 HPC、AI 及通用业务，支持多租户安全隔离及资源按需获取使用。

虚拟机是计算资源云化提供的一种主要方式,可根据业务诉求,

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

按需灵活规格各异的计算资源，尤其适用于基因测序、动漫渲染等采用数据并行方式运行的业务类型。其应具备的主要特征如下:

- 可根据业务诉求选择不同 CPU 核数、内存大小、网络带宽的虚拟机规格;
- 可按需开启/关闭超线程;
- 可按需挂载访问并行文件存储、块存储、对象存储等多种存储资源;
- 可按需支持 GPU 或者 NPU、FPGA、定制 ASIC 等多种异构加速方式。

裸金属服务器作为计算资源云化提供的一种重要补充方式，提供与传统物理服务器完全一致的运行环境，完全避免虚拟化、容器等带来的性能损耗以及潜在兼容性等问题，适用于工业仿真、气象环保等采用模式并行方式运行的大规模作业类型。其应具备的主要特征如下:

- 节点可按需关闭/开启超线程;
- 节点间需支持采用高性能计算专用无阻塞 RDMA 网络互联;
- 支持按需挂载访问并行文件系统以及块存储、对象存储等存储服务;
- 可按需支持 GPU 或 NPU、FPGA、定制 ASIC 等多种异构加速方式。

容器以其轻量、敏捷、更易于部署维护等特征，受到越来越多的关注和应用。人工智能、大数据等新型业务，正更多地采用容器

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

方式调度运行。容器应支持如下特征:

- 支持多类型业务智能混合调度、多级队列、应用拓扑感知、分时复用等调度策略；支持基于优先级，fair-share 等的作业抢占策略。
- 支持高性能计算专用的高带宽低时延 RDMA 网络;
- 支持 GPU 或 NPU、FPGA、定制 ASIC 等异构加速资源的感知和调度;
- 宜支持容器网络与云网络平面融合，提升网络互通性和性能，降低网络转发对资源的消耗;
- 宜支持通过卸载技术将网络转发能力卸载至专用硬件上，进一步提升网络性能，降低网络转发对机器资源和性能的消耗。

资源管理应具备以下能力:

- 租户自助式对虚拟机、裸金属服务器、容器等资源进行创建、删除、启动、关闭、变更规格等生命周期管理;
- 支持租户对网络地址、网络连通性及安全隔离、公网连通性等网络属性按需自定义配置;
- 支持租户对存储类型、存储容量等存储属性按需自定义配置;
- 支持租户远程登录系统，对系统拥有含 root 用户在内的完整控制权限，按需进行系统环境配置、监控等操作。
- 支持创建镜像、备份等管理操作。
- 上述各项管理操作，支持通过 API 完成，提升自动化程度和

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

易用性。

- 可以进一步利用云计算的极致弹性能力，如闲时计算、断点续传等，进一步提高 HPC 服务的性价比。

(三)平台层

1.大数据平台

高性能计算云大数据平台可以满足用户对数据的各种需求，通过管理界面为用户提供统一监控和管理集群内所有组件、主机、告警信息以及日志的功能。在数据云端化的浪潮下，大数据平台与高性能计算云深度融合，以云操作系统作为基础底座，提供独立化的数据平台服务，借助高性能计算云灵活的基础设施资源管理，提供海量数据存储以及高性能的查询分析处理能力，助力企业用户快速构建海量数据处理系统，分析挖掘数据内在价值，并用于指导企业经营决策，完成业务驱动到数据驱动的转型。

高性能计算云大数据平台作为大数据处理的基础平台，支持部署多服务集合的大数据集群，主要包括 Hadoop、ZooKeeper、Hive、Spark、Impala、Hbase、Sqoop、Flink、Elasticsearch、Solr 等服务。支持独立服务集群，如数据库 Hbase、数据库 Redis、消息总线 Kafka、全文检索 Elasticsearch、全文检索 Solr 等，为用户提供了服务独占一个集群的部署方式。

数据存储方面，高性能计算云大数据平台中通常是非结构化数据，采用文件的方式存放。根据高性能计算应用软件的需求，通常

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

对数据进行分层存储。对数据访问延迟极低的数据通常存放在计算节点本；对并行处理的数据存放在并行文件系统存储中；对用户数据和通用数据存放在持久存储中；对结果数据和不常用的数据存放在归档存储中。此外，还要对关键数据进行备份和保护，存放在备份存储中（DP 数据保护存储）。

2.人工智能平台

人工智能平台是面向 AI 开发、加工和应用的一体化软件平台软件。需要对大规模的算力资源池进行统一管理，能够基于硬件基础设施的规格和组网特点实现对算力资源的统一管理、优化调度和运维监控，支持大规模任务数的并行调度和作业管理，进行细粒度的资源实时分配。能够兼容多种 AI 开发框架，提供 AI 模型训练所需要的数据预处理及标注能力，支持算法的单机训练、单机训练和大规模分布式训练,支持自动化的模型部署能力从而帮助 AI 应用打通全链路流程。人工智能平台应该支持自动机器学习，可根据标注数据全自动进行模型设计、参数调优、模型训练、模型压缩和模型部署全流程，无需代码编写和模型开发经验。模型部署上线后能够监控模型推理效果,进行智能诊断发现推理难例并回流到 AI 算法流水线中，帮助提高 AI 模型的应用效果。人工智能平台能够加速 AI 开发，从而降低 AI 应用门槛，助力普惠 AI。

人工智能平台依托于云计算技术,实现一站式的 AI 开发与计算,包括数据处理、算法开发、模型训练、模型部署都可以在平台上完成。底层支持主流的 GPU、NPU 资源，开发者根据需求灵活调用，按

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

需选择 GPU、NPU 型号、数量，操作系统类型、存储空间、网络环境；同时在平台中搭载 Tensorflow、Caffe、Pytorch、MindSpore 等主流深度学习框架，以及 Pycharm、Jupyter 等工具，具备在线推理/训练，代码开发/调试的能力。

在人工智能场景下，训练涉及海量的数据、复杂的深度神经网络结构，需要庞大的计算规模，与训练的计算量相比，推理的计算量较少，但仍然涉及大量的矩阵运算。面对海量的数据处理、复杂的知识推理，常规的单机计算模式已经不能支撑。因此，人工智能平台基于主流的计算框架与多样化算力资源，实现 GPU 资源的灵活调度。利用作业调度系统可以同时调用多块 GPU 卡资源，用户通过互联网访问平台，利用 CLI 实现计算任务的分发，平台同样预置了主流的深度学习框架。

3.科学和工程计算平台

科学和工程计算平台提供了传统高性能计算平台能力。实现高效计算的核心功能离不开其特有的基础软件——集群调度平台。集群调度平台能够有效提高计算机资源利用率，整合池化计算资源，进而提高任务运行性能和吞吐量。

调度平台包括作业调度、状态监控、集群管理、可视化界面等多个功能，核心作用在于整合计算资源，提供集群资源管理和计算任务调度服务。系统提供统一的计算任务提交入口，供用户和上层应用透明地使用集群的计算资源运行计算任务。系统根据计算任务的资源需求，集群服务器资源配额和负载情况，结合配置的调度策

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

略调度计算资源，将计算任务分配到合适的服务器上运行，跟踪和收集计算任务运行的资源使用和运行结果。调度时考虑集群内计算节点负载均衡，充分高效地利用计算集群资源。集群调度平台可有效提高计算集群的资源使用率，减少资源争用，最大化计算任务的运行效率。

集群调度平台不同功能模块具体能力如下:

- **集群调度:**
  - 提供轻量级桌面客户端访问工具及命令行工具等多种访问形式，支持跨平台和多操作系统，支持免 VPN 直接登录超算，用户仅需一个账号即可访问多家超算中心。
  - 资源智能调度: 可按需调度计算资源、下发并管理计算任务，具备多队列任务调度管理功能。减少甚至消除单一集群停机维护、资源不足等对计算业务连续性的影响。
- **作业管理:**
  - 基于开源软件 Slurm，OpenPBS，商业化软件 IBM LSF，Altair PBS Professional 和国产化软件 QuickPool 等调度系统，实现计算任务的调度与编排，简化集群的资源管理。
  - 提供不同的队列管理作业,作业按照队列预定的顺序排列并等待使用资源的机会,队列实施不同的任务调度和控制策略，所有提交到同一队列中的任务，拥有相同的任务调度与控制策略。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

- 支持资源预留、公平共享、优先级、抢占调度、独占调度等资源调度策略，支持 QoS 和基于策略的调度，支持 GPU 调度、数据感知策略等符合各类应用场景的调度策略，合理配置资源，实现资源的高效利用，提高作业执行效率。
- 系统调度任务生成调度决策后，将任务分发到运行节点上运行，跟踪任务运行，收集任务运行资源使用情况，在任务运行结束后获取任务运行结果。
- 提供 CLI、应用软件集成界面、作业脚本等多种提交方式，实现计算任务的灵活管理。

■ **应用集成:**

- 对接计算软件、并行环境、工作流，简化软件的安装部署和使用过程，避免应用程序对环境依赖和不同用户应用环境冲突等问题。

■ **可视化:**

- 利用云端资源实现 2D/3D 图形处理，实现 CAD 建模、CAE 仿真前后处理。
- 无需反复的进行数据下载，在云端完成图形处理与计算过程。

■ **性能监控**:

- 以应用的计算性能为核心，分析计算应用程序运行过程中对各项资源的依赖程度，进而发现应用运行特征，为性能优化、瓶颈分析提供数据支撑。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

- 性能数据种类多、范围广，囊括实际浮点计算能力、指令集处理效率、缓存命中率、内存带宽等专业性能指标，转为并行计算性能分析量身定制。

■ **计量计费：**

- 精准统计用户每一个计算任务所使用的计算资源、时间等信息，随时查看费用详单。

■ **API 接口**

- 提供 API、异步消息队列、多资源智能调度等功能，为计算用户或开发人员提供算力资源调度能力,使得算力资源可以直接为第三方平台提供服务。

4.统一业务编排

业务流编排是通过模板或者 API/SDK 等接口为 HPC 类业务应用与资源的开通和部署,将复杂的业务应用与资源配置通过模板描述，从而实现一键式资源（包括容器、虚拟机及裸机，存储、网络等）与应用的开通与复制。同时提供示例的应用模板，覆盖多种业务场景，方便用户直接使用或为用户设计个性化模板提供参考。

业务流编排就是融合计算时代的 DevOps。既含有 DevOps 沟通开发运维的功能，也具有利用融合计算（HPC、AI、Bigdata）的能力来促进企业业务增长的功能。业务流编排可以利用云计算的 API/SDK 开发接口，快速缩短模型开发部署的迭代周期，凭借更标准化、自动化的流程与基础设施支持来提高模型交付的整体效率。业务流编排还需要提供一个平台，提供方便业务、数据、算法、运

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

维等角色的操作与沟通。

业务流编排可以支持连接 HPC、AI 模型、大数据等技术构建团队和业务，运维团队，建立起一个标准化的数据、计算、模型开发，部署与运维流程，使得企业组织能更好的利用 HPC、AI、Bigda 的能力来促进业务增长。

业务流编排通过缩短开发部署的时间来更快地迭代软件产品，使得公司业务不断进化。业务流编排的逻辑也是通过相似的自动化和迭代形式，加快企业从数据到 HPC、AI、Bigdata 的洞察价值获取速度。

(四)服务层

高性能计算云服务层将为行业用户提供完整的数字化运营服务平台，通过量化集群咨询、管理、维护、营销、计算、生产、结算、分析等环节的服务需求，对服务需求进行标准化管理，将高性能计算云服务能力产品化。

从运营策略上，搭建数字化的营销服务体系，将终端用户引流到线上,进行多租户的管理,并给终端用户提供一整套的支持计划，与终端用户建立数字化联系，通过终端用户的数据监控和分析，合理有效的进行服务支撑和服务推荐，实现营销策略和营销方案的数字化转型,并结合运营的监控数据分析和反馈进行敏捷的策略调整。

从运营能力上，搭建数字化运营能力平台，打通集群软硬件各系统层的账号，搭建统一身份认证体系，并为每个终端用户开通专属的账户；整合 IaaS 层的资源能力，包括计算资源、存储资源、许

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

可资源、网络资源等，为终端用户的计算、存储、生产提供服务，并记录终端用户的资源消耗，管理用户的数据资产，为终端用户提供资源和服务的消费明细、账单服务以及线上支付等计费服务；并建设全面的数据分析服务，了解用户所需、所想，指导运营者进行精准的营销,并为终端用户提供更多的服务其生产场景的报表服务;除此之外的数据及安全审计和日志溯源能力也是运营服务平台的建设目标之一。

为应对 HPC 服务的敏捷化和场景化的需求，高性能计算云服务平台需要更开放、更包容，为满足这样的生态需求，则需构建 HPC Cloud 服务生态订阅平台，主要包含三块:

1.服务开发平台：结合云原生的技术架构，实现服务的容器化和网格化，并通过自动化发布管道、CI 工具实现开发环境到生产环境的快速部署和持续集成。

2.依托数字化运营服务平台进行服务管理、服务订阅订单和服务下发控制、服务镜像管理等能力的建设。

3.建设服务评阅平台，上架各类 HPC 服务提供商的服务应用，如：云资源厂家的计算资源、应用软件厂家的应用能力等；最终形成一个服务市场,供终端用户在其上进行自由的服务的订阅、试用。终端用户也可以在服务市场上根据自己的应用场景去订阅整体的服务解决方案，帮助用户更快速的获取服务产品矩阵，解决具体的生产计算问题。

在服务应用层，为终端用户提供一个数字化的计算服务门户，

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

除了基础的作业平台、用户管理、费用管理、文件管理、通知消息、工单系统等，用户自己从服务市场中订阅的服务应用也将在此处统一呈现，并可以进行服务的管理、续费、退订等操作。平台更提供丰富的南向接口，可以与用户本身的生产系统进行开放性的对接，保障产研的一体化。

高性能计算云服务平台所提供的服务能力应满足以下要求：

- **安全稳定：**
  - 数据资产安全：具备数据完整性、数据保密性、数据备份恢复、数据日志审计、剩余信息保护等完善的数据保护机制。
  - 计算环境安全：具备身份鉴别、访问控制、安全审计、入侵防范、恶意代码防范、可信验证、个人信息保护等完善的计算环境保护机制。
  - 网络环境安全：提供完善的防护控制、网络准入、防病毒、入侵防护、IP 地址封堵、APT 攻击防护、抗 DDOS 攻击、网络流量检测与分析、上网行为分析、威胁流量溯源、网络安全升级、恶意程序检测等一系列的网络防护控制手段，为客户提供可信赖的网络环境。
  - 高可用：提高集群的容灾能力，搭建 AIOPS 平台，并安排运维 24 小时值班待命，保障生产集群的安全稳定。
  - 严重问题实时告警：对集群的严重问题进行实时告警，并配合工单系统进行实时的工单下发以及进度跟进。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

- **计算专注度提升:**
  - 计算界面图形化：需给终端用户提供图形化、已操作的计算服务平台，将与集群的交互、与资源的匹配交给平台自动完成，用户仅需关注生产本身。
  - 作业状态可视：实时展示和通知用户当前作业状态。
  - 作业提交更加智能：细化资源与应用场景的匹配程度，分析应用特性，智能完成资源与作业的匹配，为用户提供最优质的最高效的算力服务。
- **计算效率提升:**
  - 计算作业不在等待：实现多云资源共享，为用户提供海量的计算资源，精准的为客户调度到作业所需的优质算力。
  - 提供最优计算脚本：场景化优化用户计算脚本，并通过 AI 算法模型，不断分析作业的性能指数去调优计算脚本。
- **计算环境丰富:**
  - HPC、AI、大数据合并建设：集群中需要融合 HPC 平台、AI 平台、大数据平台，保障其可以相互调用，共同去处理客户的生产问题。
  - 提供海量应用软件：为客户提供海量的应用软件和软件版本，满足各应用场景所需。
  - 产研结合：打破生产业务流程与研发计算的壁垒，使其流程化互通，实现生产业务的持续集成。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

(五)运维管理平台

运维管理平台以全面可靠的管理体系，保障着平台和业务的持续、可靠运行。资源与业务监控实现云计算资源、云应用与业务的全链路监控，从基础的单一主张被动告警向主动的故障预防与故障快速定位。运维告警监控将出现的故障信息以邮件、短信、声音、屏闪等提醒方式发送给各相关人员，确保及时获取故常信息并响应处理。

运维可视化实现基础环境、物理资源、资源池、云服务、云应用等各类云资源数据的可视化展示，结合整体运行监控，对故障等进行实时可视化告警，并提供声光、短信、邮件等告警方式，辅助云平台运营和 IT 决策。

随着大数据技术和人工智能技术的日益成熟，监控运维系统的功能和架构也随之演进。整合各类运维工具与数据的智能化运维管理平台，不仅可以助力企业运维效率提升，降低运维人力成本，而且可以协助高性能计算云系统进行资源分配，提升资源利用率。

智能运维平台为 IT 管理和运营方提供全面的可用性和性能监控、故障管理、业务影响分析、告警和报表等功能来支撑企业 IT 运营。监控范围可以涵盖数据中心及云中心所有的基础设施、应用软件和服务，通过人工智能算法为用户提供了高附加值的智能分析和预测能力，如图 9 所示。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

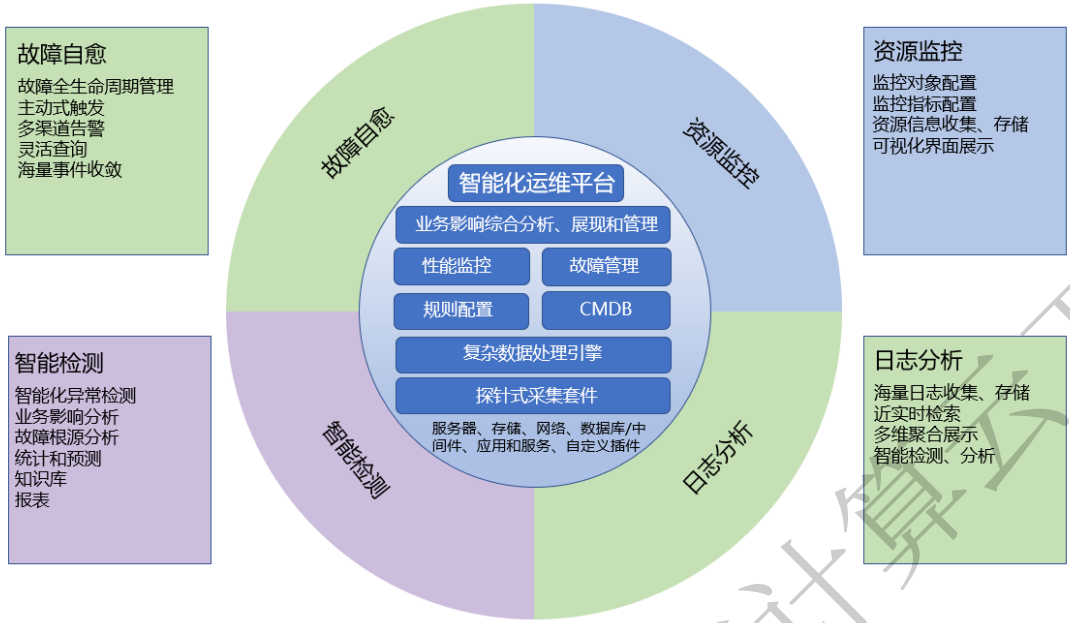

图 9 智能化运维平台功能视图

资源监控包含监控对象配置、监控指标配置、资源信息收集以及可视化界面展示。资源监控能够对运维管理平台服务的系统提供资源信息全天候的收集和存储功能，监控整个系统资源使用情况，为其他人工智能算法模型提供数据支撑。运维管理平台通过可视化界面对相关数据信息进行更直观地显示。

智能检测功能在故障发生时（业务指标发生异常），会触发定位系统开始分析。其主要分为三部分:

- 指标异常程度评判: 系统会收集当前一段时间所有机器和模块的指标数据，并执行异常检测算法去检测所有指标的异常程度。
- 相似异常机器聚类：得到所有指标的异常程度后，通过聚类算法将具有类似指标异常的机器进行聚类。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

- 定位结果排序：通过运行智能排序算法，将所有的聚类结果按照异常程度排名，并最终展现给运维人员。

故障自愈是指任何一种故障都是根据故障的特征来判断是否为故障，而这些故障的特征会被记录在故障库中，以往运维经验一般是由人工记忆，但是由于集群故障、业务服务的数量每日剧增，以前的运维方式已经满足不了日常的运维需求，为了方便后期对用户提供持续的服务,平台把规则部分用到的所有自定义内容集中管理，产品通过不断累积自动化运维的经验，持续供给到系统平台中，丰富可识别故障种类，提高运维效率，累积运维经验资产。

告警日志分析是指通过收集组件实时对日志进行数据收集,将收集到的数据进行数据清洗去除脏数据、无效数据，格式化后将数据统一持久化至数据层供后期展示、分析、统计使用。通过多种日志数据收集方式，满足多场景的数据收集。数据清洗后，将数据进行格式化增强可读性，同时删减无效数据、脏数据和重复数据，提升数据价值。海量数据存储提供了热数据、冷数据、离线数据三种存储方式,冷、热、离线数据的存储方式大幅度提高了系统的健康性、稳定性，同时也可以满足用户对数据的实时分析、周期分析、历史分析等需求。

(六)安全防护

高性能计算云安全防护是将安全技术与高性能计算云进行了深度融合，推动高性能计算云服务商提供更加安全可靠的高性能计算云服务，为高性能计算客户安全上云提供更有利的保障。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

高性能计算云平台安全主要体现在: 1）借助云计算分布式存储的特点，可以降低高性能计算用户数据丢失的风险，提高数据的高可靠性。2）云平台可以对高性能计算资源进行统一抽象与管理，把高性能计算资源转化为统一管理、可灵活调度、可动态分配的逻辑资源，实现 CPU、内存、I/O 等资源地隔离，助力企业摆脱复杂化、碎片化的安全管理模式，实现统一的安全管理。3) 高性能计算云平台借助于云计算的网络虚拟化能力，用户可以对自己的流量进行更精细化的管控与隔离。

数据安全指对高性能计算云用户数据信息资产的机密性、完整性、可用性、认证、授权、持久性等方面的保护。重点对高性能计算云数据全生命周期（数据采集、数据传输、数据存储、数据使用、数据开放、数据共享、数据销毁、数据加密、数据完整性、数据迁移等）内产生的相关数据进行安全保护。

API 作为高性能计算云服务重要的安全边界，在身份认证及鉴权、传输保护、边界防护、API 流量控制等方面采用多重机制和措施进行重点保护，以降低应用层面临的安全威胁。

(七)多云互联

多云互联通过高速网络实现各 HPC 公有云、HPC 私有云、HPC 边缘云之间的计算资源、存储资源、网络资源和软件资源等高性能计算资源的互联互通与资源共享,形成高性能计算核心资源网,统一提供接入服务,能够帮助用户一线入多云,解决当前多云接入的问题,并实现资源管理、服务编排和业务优化、运维监控、安全管理等多

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

云管理功能。

1.云间高速互联网络

云间高速互联网络构建多云互联基础。面向以超算中心等为代表的算力中心之间的互联互通，需要构建具有高速率、高带宽、高冗余等特性的跨域高速互联网络，实现多云之间的协同与管理。

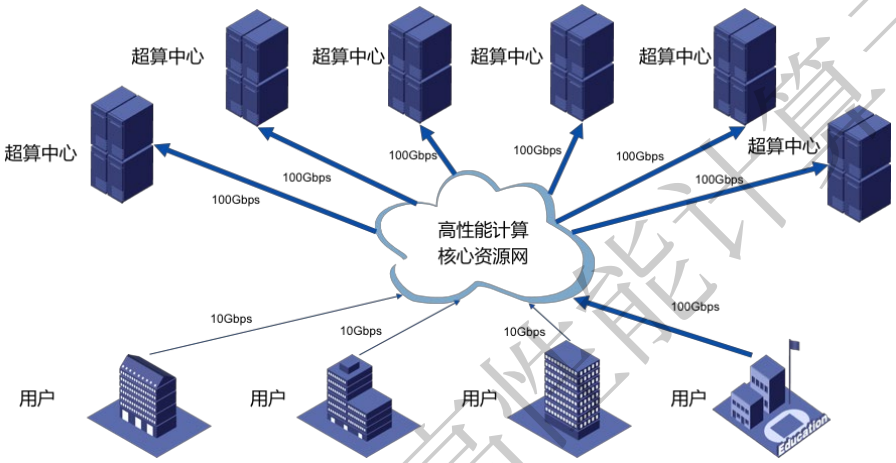

图 10 算力中心间跨域高速互联网络

如图 10 所示。根据各超算中心的算力能力和服务规模，构建 10Gbps-100Gbps 或者更高速率的网络互连，实现超算中心的高速网络连接，形成基于高速网络和超级计算机的高性能计算环境核心资源网。国家级超算中心以 100Gbps 或者更高速率接入核心资源网，其他超算中心以 40Gbps-100Gbps 速率接入核心资源网，用户单位以 10Gbps-100Gbps 的网络接入核心资源网。

在以上物理链路基础上，将各大超算中心及各用户单位接入纯 IPv6 主干网，通过 IPv6 的地址空间优势、唯一寻址和双向互联互通特性，制定统一的 IPv6 地址规划，实现各超算中心及其业务的统

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

一管理、溯源和双向可管可控。同时符合国家的 IPv6 规模部署发展规划，是充分利用 IPv6 优势的创新应用。

为了进一步实现算力中心之间高效地互联互通，无状态 IPv4/IPv6 翻译技术（IVI）、算力网络技术、标识与 IP 混合网络技术、SDN/NFV 等为代表的新兴网络技术受到业界广泛关注。

（1）无状态 IPv4/IPv6 翻译技术

互联网协议第六版（IPv6）是互联网升级演进的必然趋势、网络技术创新的重要方向、网络强国建设的基础支撑。为了解决高速互联网络中 IPv6 与 IPv4 的双向互联互通问题,以及 IPv4 网络跨越纯 IPv6 骨干网络安全高性能传输的问题，清华大学提出了无状态 IPv4/IPv6 翻译技术（IVI）。

为了兼容已有的 IPv4 应用和用户网络,在每个超算中心部署一组无状态翻译 IVI 设备，使得 IPv4 网络/应用和 IPv6 网络/应用之间可以无缝双向互联互通，将存量的 IPv4 应用和新建的 IPv6 应用均纳入核心资源网中来。利用 IVI 技术的高性能特性和 IPv6 的性能优化特性，实现端到端的线速数据传输，为上层多云协同和管理提供高性能传输底座。如图 11 所示。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

图 11 通过 IVI 翻译设备将 IPv4/IPv6 网络和资源无缝整合

在无状态翻译技术中，IPv4 地址和 IPv6 地址之间建立基于算法的映射关系，这样不需要在翻译设备上存储基于会话或连接的状态表，就可以实现 IPv4 和 IPv6 报文之间的高效翻译，这也是“无状态”的含义。因此，IVI 无状态翻译设备可扩展性和安全性好，性能无瓶颈，可以保持端对端的连通性，不存在路由表爆炸问题，非常方便溯源，且可以很好地支持分布式部署和负载均衡，建设成本低，部署速度快，具有很好的可扩展性和可管理性。

（2）算力网络技术

算力网络为高性能计算云的多云互联提供了网络保障。算力网络基于无处不在的网络连接，将动态分布的计算与存储资源互联，通过网络、存储、算力等多维度资源的统一协同调度，使海量的应用能够按需、实时调用泛在分布的计算资源，实现连接和算力在网络的全局优化，提供一致的用户体验。从云化技术来看，需要在目前已实现对虚拟资源编排的基础上，向容器编排和算力编排演进，并针对网络中异构算力资源并存的情况，探索计算能力的统一纳管

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

与提供服务的方式。从网络技术来看，需要在目前已实现云网拉通和统一配置的基础上，向基于 SRv6 技术的网络切片能力增强演进，并增强资源感知与应用感知能力,提升算力触达用户的广度和精度。

通过构建多个大型算力中心作为枢纽节点，打造骨干网络，允许区域内的其他中小型算力中心通过高速网络接入，发挥算力网络准入、计费和账号映射的骨干作用,形成互联联通的算力网络格局。算力网络需要能够支持计算作业通过网络传输进行远程作业调度，从而在本地算力不够的情况下能够使用外部算力完成高性能计算或者 AI 计算，实现算力的“消峰平谷”，提高算力资源的集约化使用水平。算力网络支持算力中心和一体化大数据中心之间的系统对接、远程资源调度和准入互认，进一步打通跨行业、跨地区、跨层级的算力资源。支持基于超级租户的算力资源池管理并对外开放服务，支持算力的联盟化运作，支持政府部门和企事业单位进行科研攻关和应用创新，支持自主可控大模型（如中文 GPT-3）、通用视觉大模型等“卡脖子”技术攻关，更好地支撑国家重大科技战略和产业智能化共性技术的有效协同。算力网络的打通需要配套的高速算力传输网络，优化组网拓扑结构，扩展通信带宽，降低数据时延，支持算力网络的高效供给对接。

（3）标识和 IP 混合网络技术

随着网络技术的发展和网络流量模型的改变，传统的 TCP/IP 网络技术体系，由于 IP 地址既是网络地址又是设备/身份标识的二义性问题，日益暴露出在高带宽传输、VM 迁移以及安全性等方面无法满足当今乃至未来云互联的需求。标识与地址分离是未来网络研

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

究中基本达成的共识，支持标识和 IP 混合路由、逐步迭代演进的架构体系更符合网络的发展趋势，如中国科学院提出的 SEANet 网络技术体系。标识不但可以表示主机，还可以标识各类网络实体，如内容、计算资源、存储资源等。标识和 IP 混合网络既可以支持传统的 IP 网络拓扑寻址和路由，又可以支持主机标识、内容标识、资源标识、服务标识等标识寻址和路由，实现了网络实体和网络服务与拓扑解耦。通过标识和 IP 混合网络不仅可以连接云中心内以及云中心间的 VM 迁移对应用的无感知，还可以用基于 ID 的传输机制实现多路径的云间数据高带宽传输，并且在云中心以及各级数据中心间构建基于数据 ID 的一体化存储资源池，数据的云间备份和转存无需用户参与，同时形成多副本协同优势，有效降低用户的数据获取延时。

从安全角度看，通过标识命名建立基于自验证的全局唯一标识的网络安全体系，主机标识为主机密钥的哈希，支持自我验证（验证主机身份不需要第三方权威），从而保证用户接入的认证和安全。同时，基于标识的路由传输不再遵循传统 IP 路由的计算方法，具备在传输过程中变路径多路径的能力，使得数据传输路径不易预测，提高云间数据传输的隐匿性和安全性。

（4）SDN 管控技术

多云互联专线的方式能够做到网络延迟较小，保证端到端的网络安全，同时为了保证网络传输的可靠性通产也会设计冗余的网络架构，提供冗余线路。然而，多云互联传统专线接入方式下使用固定带宽模式则经常会出现过渡使用或资源冗余的情况出现，无法按需分配给需要的节点使用。通过统一的 SDN 控制方案进行网络管理，

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

可以建立矩阵式全网状拓扑结构业务透视的功能，实现业务自由可编排的互联互通,以及安全策略的统一部署，充分利用混合 IT 基础架构的重要协同作用。与此同时，结合端口流量历史情况、突发流量情况、实时事件等数据进行智能流量预测和分析，做到实时调节分布在全网各地的端口限速，将资源利用效率和变化莫测的带宽需求完美的融合解决，实现任意连接端口的实时弹性可扩展。

2.多云协同

多云协同指从资源、数据、应用、服务四个维度进行紧密协同，并在中心云的统一管理下，实现多个高性能计算云节点之间协同。

（1）资源协同

多云协同作用之一，是在评估可用资源和资源需求的情况下，完成业务的部署和调度和负荷分担。调度过程需依据业务的资源占用、流量、运行状态等，从全局视角，对计算资源、网络互联带宽和延时、存储资源和应用软件资源完成调度和配置，以达到全局的业务整合。

计算资源协同方面，根据业务需求，提供不同类型的虚拟化设备，如计算增强型、GPU 渲染增强型、存储增强型等不同设备。服务商对高性能计算服务应具备精准监控与调度能力，在单个高性能计算云节点计算资源不足时，可以调用其他云端资源进行补充；**存储资源协同方面**,在高性能计算云节点存储热度高、定制化的内容，在云端存储区域长尾内容，将多个云节点的存储能力进行联动，以发挥最大价值;**网络资源协同方面**,可以在云测实现用户多路接入、

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

多云多路互通。当网络发生拥塞的时候，运行在云侧的网络控制器可以及时感知，并将流量引入到较为空闲的链路上。可通过高速传输网络打通算力中心之间连接，在电力输送网络、铁路运输网络、资金划拨网络之外构建智能化时代的算力网络。

（2）数据协同

以智算中心、超算中心为代表的高效算力中心广域分布，存储资源广域分散且隔离自治，高性能计算应用迫切需要可支持跨域统一访问，实现各个算力中心之间的数据协同。数据协同应具备以下基础能力:

跨域数据聚合与访问能力。以不影响并尽可能复用现有底层存储资源管理系统为前提，构建全局资源管理层，提供全局统一资源访问方法和功能,满足资源聚合和访问方法的地理位置无关性需求。在聚合的全局虚拟数据空间上，提供可定制的数据区域划分能力，并按用户、组、全局等不同的资源使用方式建立访问控制列表，访问控制列表通过在底层存储资源管理系统上的映射实现区域间的分割和安全。

数据完整性防护能力。为了保证数据传输过程中的完整性与私密性,采用分片乱序传输方式打乱数据在网络上的连续性,并对首、尾数据分片加密传输，进一步减少数据分片序列信息的泄漏，并对数据分片建立数字指纹来检验数据的完整性。

高效数据共享能力。围绕我国高性能计算环境中广域数据共享需求,通过分析不同类型的大型应用数据访问特征,依据访问热度、

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

负载情况等因素，在广域合理放置数据，构建可多源协同迁移的数据布局，并结合作业的精细化任务分解和数据使用特征，采用计算与远程数据访问的边传边算、同步执行方式，实现广域高效数据共享。

（3）应用协同

在资源协同与数据协同的基础上，面向生物医药、EDA 仿真、CAE 仿真、人工智能、金融科技、能源勘探等典型行业，在不同区域、不同硬件环境、不同平台上，实现特定高性能计算应用的跨域部署、运行、交互与管理。应用协同应具备以下关键能力:

亲和性部署能力。通过分析和提取不同高性能计算应用在资源需求、并发机制、交互方式等不同方面的特征，并结合不同算力中心的软硬件资源特点与运行状态，计算目标应用与目标运行环境的亲和性，通过智能化的调度策略，将应用部署于满足运行效率需求的算力中心中。

跨云互备/容灾能力。为提升业务系统可靠性，企业希望在已部署业务的云之外的其他云上构建异地容灾、异地备份。在云间进行大数据量容灾备份时，利用云间网络节点的计算和存储能力，在多个节点间协同存储发送端数据流，接收端聚合接收，可实现收发两端解耦,实现收发数据无阻碍全速传输,降低突发流量对网络影响。

可靠性保障能力。因网络传输的不确定性，以及应用大规模并行执行的复杂性，需要充分结合现有的 checkpoint 等容错技术，确保高性能计算应用运行过程中，一旦出现软硬件故障，仍可以完成

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

目标任务。

（4）服务协同

高性能计算云服务最终的发展方向是通过云计算为用户提供优质的更高效、优质、精细化的服务，高性能计算云节点使用分布式计算渗透到网络的各个位置，对多高性能计算云统一管理和终端服务精细化控制的需求。高性能计算云的服务协同应具备以下基本能力:

（1）云服务点选择: 企业将业务应用分布式部署在不同云时，用户在接入云服务时有择优选择服务云的需求。基于云间网络构建服务路由体系，网络根据用户的差异化服务需求，感知网络传输、服务负载状态，为用户选择合适的云服务接入点。

（2）资源管理: 精细管理基础资源（包括网络资源、算力资源等）的使用情况，通过监控系统查看可视化使用率等信息。

（3）服务编排和业务优化: 根据用户的需求和策略，结合资源使用情况，为用户的传输作业选择合适的传输通路。提供端到端优化传输服务,且在有多用户复用同一条链路时,可以通过实时测量，对流量进行实时调度，有必要时进行切分和重组，或者在本地超算资源和云端超算资源之间实现按需调配。

（4）运维监控: 对设备状态、资源使用情况和数据的传输过程进行监控，管理员可通过全局视图查看状态和可能的故障，并提供报警功能，方便进行调整。

（5）安全管理: 对有加密需求的流量进行安全的端到端传输。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

使用网络层翻译技术，不修改任何应用层内容，因此可以真正支持端到端的安全传输，防止中间的第三方窃听或攻击。

3.多云管理

在多云的环境中，企业需要能够根据不同的业务场景，按照策略或需要将高性能计算应用负载灵活部署到任意一个或多个云平台中。通过对多云进行纳管，提供多云管理功能，对云资源管理及计费、系统运行状态，以及任务执行过程的可视化监控，并提供丰富的告警机制帮助客户进行快速处理。全面的自动化支持（巡检、监控、防护、审计等），可减少 IT 运维人员繁杂而枯燥的运维工作成本并大幅提升运营效率。多云管理包含多云接入、异构纳管、资源管理、服务编排、全局运维监控、安全管理等功能。

（1）多云接入

多云接入指为服务商向客户提供多云管理平台时，对公有云、私有云以及混合云统一接入的能力，可以创建并配置公有云、私有云、混合云接入环境，可以删除公有云、私有云、混合云接入。

（2）异构纳管

异构纳管指为服务商向客户提供多云管理平台时，能够对 X86 物理机、KVM 平台、VMWare 平台以及容器（Docker）等异构资源进行统一纳管。

（3）资源管理

资源管理指为服务商向客户提供多云管理平台时，能够对虚拟机、存储、镜像、网络等资源进行统一管理的功能。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

（4）服务编排

服务编排指为服务商向客户提供多云管理平台时，能够支持资源编排和应用编排功能。包括申请计算、存储、网络等云资源，配置编排模板，自定义云服务，发布自定义的编排服务，修改云服务配置，删除云服务，申请应用容器、数据库等。

（5）全局运维监控

运维监控指为服务商向客户提供多云管理平台时，提供的运维监控功能，包括容量管理、性能监控、告警管理、负载调度等。

（6）安全管理

安全管理指为服务商向客户提供多云管理平台时，提供安全措施确保管理平台的运行安全，包括用户管理、账号管理、日志审计等。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

三、高性能计算云应用场景与典型案例

(一)能源勘探

1.应用场景及需求

随着石油和天然气勘探业务需求的激增，尤其是地球物理勘探技术的发展，致使勘探行业大步迈进海量数据处理时代。为了实现精准、快速的地质勘测,需要了解和模拟出地下数千米的地质构造，必将产生海量数据。就较为普遍的地震波反射法为例，每次三维测量就会产生几百 TB 乃至 PB 级的数据，然后再进行大量的密集计算和模拟，方便为钻井定位提供参考。随着自然资源的消耗，以及勘探成本的增加，高度复杂的计算建模成为能源勘探和开发的重要工具。

地球物理勘探技术的发展与应用高度依赖于包括高性能计算技术在内的信息技术的发展，尤其是近年来“两宽一高”(宽方位、宽频带、高密度)勘探技术的普及，和逆时偏移、全波形反演等一系列处理解释手段的应用，使得石油勘探对超级计算机的需求进一步增加。

2.典型案例

■ 基于超算云的地震数据处理解释一体化系统

基于超算云的计算资源,开展石油勘探数据处理程序 SaaS 化解决方案，实现复杂地质条件下上千平方公里数据的逆时偏移处理，提供线上算力资源，实现了 GeoEast 地震数据处理解释一体化系统

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

在超算云的应用集成、远程三维可视化分析、高速数据传输等功能，同时利用自研的新性能分析工具对 GeoEast 系统中关键、核心、典型的处理和解释模块进行了运行特征分析，并建立了 GeoEast 系统典型模块运行特征库，为计算性能优化与分析提供数据支撑，如图 12 所示。

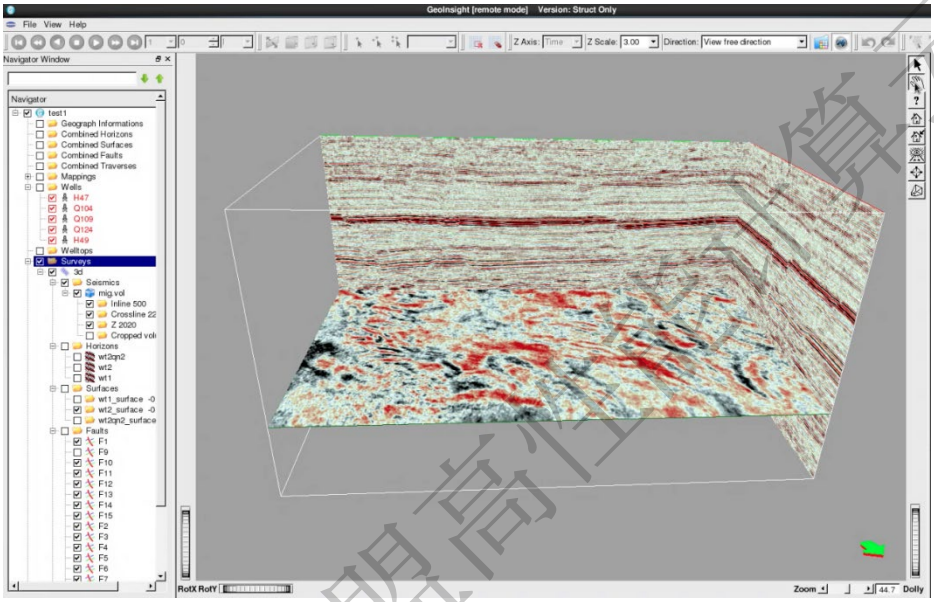

图 12 GeoEast 地震数据处理解释一体化系统

(二)工业仿真

1.应用场景及需求

航空航天、汽车船舶、重型机械等高端制造业是国民经济发展的重要根基，缩短开发周期、降低生产成本、提高创新能力、加快转型升级是推动制造业变革的有效手段。产品研发阶段，设计人员通过工程模拟进行产品验证，最大限度降低物理原型实际测试的需求，由于模型复杂、计算量巨大，用于工程计算和仿真设计的高性

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

能集群成为制造企业研发手段的首选。

国内制造业的高性能计算经历了从无到有、从有到普遍接受的过程，目前正从用得好到追求能效的阶段。随着企业级高性能计算中心和国家超级计算中心的建立，制造行业使用高性能计算平台的频率越来越高。搭建高性能计算平台较早的制造企业，处在系统扩容、IT 架构转型阶段，也对高性能计算平台提出新需求。对技术要求高的制造企业，希望适应持续发展需求，考虑采用前沿技术搭建面向未来的高性能计算中心。

工业仿真领域 HPC 集群主要由多台高性能服务器、共享存储和支持 RDMA 协议的高速网络组成,通过专门的集群调度软件来管理整个集群以及进行任务调度，一般使用 Linux 操作系统，运行的仿真软件主要有碰撞类（LS-DYNA、Pam-Crash、RADIOSS 等）、流体类（Star-CCM+、PowerFLOW、Fluent 等）、NVH（Abaqus、Nastran 等）以及结构分析、疲劳耐久、电磁兼容等。不同的仿真软件有不同的计算特征、对硬件资源的需求也不同。比如流体类和碰撞仿真类软件一般扩展性较好,会进行多机并行计算，对网络的高带宽/低延迟有着较高要求。而结构分析类软件扩展性一般较差，对节点内容容量以及存储读写性能有很高要求。

目前高性能计算云领域在工业制造行业中主要有以下需求:

- **研发数据传输流程复杂:** 研发人员在个人工作站进行模型设计、前后处理，数据通过 FTP 或其他协议上传至高性能计算中心进行分析，保存至本地工作站，期间要进行不少

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

于两次的数据上传、下载。

- **研发时间成本高、效率低**：物理模型越来越复杂，计算时间越来越长，个人工作站单机运行，建模操作需要大量数据资源，长时间无法进行正常办公，研发周期过长。
- **资源分散，部门协作差**：跨国集团、企业分支机构的各研发部门协作沟通日益频繁,现有 IT 结构无法满足高效协同，异地数据资源缺乏统一管理、调度，运维和技术支持难度大。

伴随中国制造业转型升级进程加速，工业产品设计研发过程中正在大量使用计算机辅助创新技术，以计算机辅助设计（CAD）、工程分析仿真验证（CAE）、电子设计自动化（EDA）、计算机辅助工艺设计（CAPP）为代表的研发软件已经成为先进制造业及相关科研院所、设计单位不可或缺的重要研发工具。在制造领域包括航天航空，造船，电子，芯片，设计等领域都有广泛应用。

以汽车行业为例，CAE 能够在汽车设计研发过程中辅助进行汽车结构的刚强度分析、NVH 分析、碰撞分析以及空气动力学分析等。当前很多车企已经建立了自己的汽车 CAE 仿真体系，通过使用仿真软件结合产品实际设计和试验,将复杂的汽车 CAE 仿真进行规范化、流程化、标准化，CAE 工程师依照建立的体系和流程完成各个分析任务，指导汽车设计。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

2.典型案例

■ 钢铁制造业高性能计算方案

某钢铁制造企业研究院搭建高性能计算集群，用于机器学习及人工智能相关应用，用于机器学习的研究和开发工作。因采购的是基于 GPU 架构下的机器学习服务器集群，采用高性能计算集群软件实现对 Nvidia-docker 容器的支持及 Anaconda 框架的支持。为解决集群监控与管理难题，通过使用高性能计算平台，将机器学习节点统一管控起来，实现作业权限分配和限制，更好的服务科研。

某钢铁制造企业仿真实验室搭建重点高性能计算仿真平台，用于 CAD/CAE 设计研究，辅助用户实现快速开发操作。采用传统 HPC 架构+分布式文件系统+高性能计算管理平台来管理整套高性能计算集群平台，通过图形工作站节点进行数据前后处理，高性能计算部分交给高性能计算集群计算。仿真计算效率大幅提升，从而加快了开发设计效率，能够更快的进行设计理论验证，并应用到实际生产中。

■ 基于超算云的流体力学软件

国内某知名国家高新技术企业，专注于智能工业设计和计算机辅助工程的研究和应用。在高性能智能算法和 CAE 算法及工业软件研发领域居国际先进水平。

现代化的产品开发趋向于定制化、小型化、多功能集成化，这些新趋势都带来了特殊挑战。以汽车轻量化压铸产品为例，其研发过程涉及到对强度、散热、流动性的多维度评价。因此基于多物理

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

场仿真结果进行优化，可以提高产品设计质量，提升研发和生产效率。

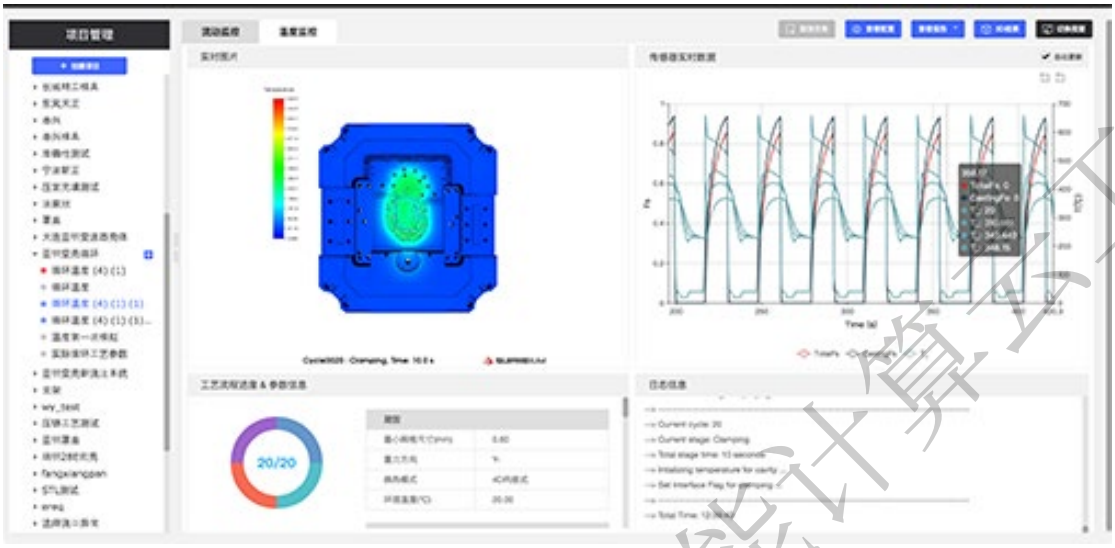

图 13 基于云超算的流体力学软件

完全自主研发的基于并行、多层网格局部加密技术的流体力学求解算法，居国际先进水平；相较国外同等软件，计算效率提升 10 倍，计算规模可扩展至上万核。基于反问题求解的压铸传热计算分析软件计算精度提升至 95%，居国际领先水平。利用超算云的计算资源和平台，已经实现了软件的 SaaS 化服务，如图 13 所示。

■ 基于云超算的 CAE 仿真

国内多个汽车公司 CAE 仿真，使用云超算方案，通过专线接入海量云端高性能资源池。客户可以按需在云上使用 HPC 资源，资源调度更加灵活弹性，大大降低了资源建设的周期，同时节省了企业后续 HPC 集群运维的成本，助力多个车企快速上线新产品。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

(三) 多媒体

1.应用场景及需求

多媒体渲染是指用软件从模型生成图像的过程。模型是用严格定义的语言或者数据结构对于三维物体的描述,它包括几何、视点、纹理以及照明信息。图像是数字图像或者位图图像。渲染的应用领域有：家居渲染、影视渲染、视频游戏、动漫渲染、电视特效、广告特效、AR/VR 以及可视化设计，每一种应用都是特性与技术的综合考虑。从产品维度来看，现在已经有各种不同的渲染工具产品，有些集成到更大的建模或者动画包中，有些是独立产品，有些是开放源代码的产品。从内部算法来看，渲染工具都是根据各种学科理论，经过仔细设计的程序，其中有：光学、视觉感知、数学以及软件开发。 在图像初步创建（通常使用网格骨架构建，建模 3D modeling）之后，就要进行渲染了。渲染将会在上面添加位图纹理或者程序纹理、照明、凸凹纹理映射以及相对于其它物体的位置。得到的结果就是消费者或者观察者所能看到的完整图像。

随着近年市场需求增长及计算机硬件和图形学的迅速发展，渲染得到了越来越广泛的应用。动画渲染耗费大量时间已经成为影响动画制作效率的一个重要因素，在动画节目制作过程中渲染所需要的时间越来越多；而且当今的影视后期制作也已离不开特效渲染的支持，后期制作部门面对观众愈加苛求的挑战，艺术家们不仅需要在每个项目上追求创新，并且需要解决实现复杂特效的快速工具；即使最绚丽的特效，在交付期结束前若不能递交将没有任何市场价

超级计算创新联盟高性能计算公工作组

值。而利用传统的 PC 工作站来进行渲染的方式必定无法满足如此庞大的计算量。因此将 HPC Cloud 技术引入渲染行业领域构建 HPC Cloud 渲染系统，成为了解决动漫影视制作瓶颈、提高工作效率的必要手段。HPC Cloud 渲染系统能够对整个系统资源进行合理的分配和优化，对提交给系统的作业进行有效的管理，实施高效快速的大规模渲染。

2.典型案例

■ 基于云超算的多媒体渲染方案

目前多媒体渲染行业中企业以云计算服务来开展业务的，对云计算消耗量巨大。部分企业本地机器渲染资源不足，周期紧，任务急，任务量大；GPU 资源需求量极高，需要提供专线等定制化服务等问题。

基于云超算的多媒体渲染方案中以“云渲染工具”为载体，为建筑设计、VR/AR、互动游戏、影视动漫、工业设计等多领域三维内容制作提供云端渲染服务，帮助用户快速完成三维内容、动画及效果图的渲染计算，规避因本地电脑配置不足导致渲染慢的问题，大幅提高工作效率，降低用户固定资产投资成本，为用户提供灵活、高效、海量节点无限拓展的极速云端渲染服务。

渲染集群包括云服务与软件两大部分。在一个典型的渲染集群中，云服务部分包括管理节点，调度节点，计算节点，IO 节点及存储。软件部分包括操作系统，渲染器及渲染调度管理软件，部分渲染集群还提供对外的 WEB 管理界面。这样能使用户操作更加方面，

超级计算机系统联盟高性能计算云工作组

增加其易用性。其逻辑架构如图 14 所示:

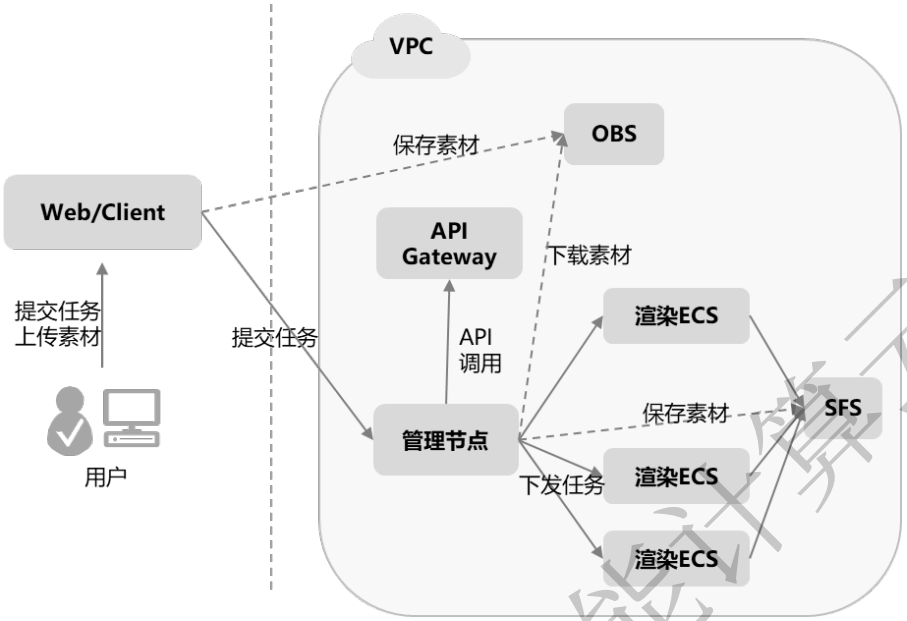

图 14 多媒体渲染集群逻辑架构

在最终构成的渲染集群中，所有计算节点由管理服务器进行统一监管，I0 节点负责管理存储并建立与管理节点以及计算节点之间的数据共享。

基于云超算的多媒体渲染方案具有核心能力:

- 云盘资产预上传,为影视用户提供较为完善的存储解决方案;
- 基于公有云前沿资源配置，节点可动态无限扩展，满足影视用户苛刻需求，可轻松承担庞大渲染量;
- 强大渲染性能，支持拖曳式提交、多级子账号、内网提交、多机渲光子、按需调度任务、云盘备份等多种智能服务;
- 通过云渲染平台的多服务器资源及插件工具,提升出图效率,及时反馈给客户，提供更好的业务服务;

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

- 各服务器资源按需使用，按核小时计费，节约成本 20%以上;
- 专业渲染工程师团队提供 1v1 项目级服务，解决各种模型及渲染疑难问题;
- 企业对账单按月发出，解决财务对账问题。

(四)生命科学

1.应用场景及需求

生命科学涉及到高性能计算的领域诸多，包括基因测序、分子对接和药物筛选等,对算力的需求很大,但普遍存在计算资源老化、本地存储资源不足等问题，阻塞科研流程，影响生产效益。

云超算是基于云原生高性能计算的解决方案，协助传统基因业务更快部署，传统 Cromwell 流程跑在 kubernetes 环境，实现基础资源的高效弹性，适应了基因测序业务量波动的需求。

通过混合云方案实现线下和线上的协同，开发测试和小规模业务在客户自己的数据中心环境中运行，大规模生产业务运行在公有云中，提升了环境隔离和业务弹性能力，大幅提高了业务承载能力的同时大幅降低企业成本。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

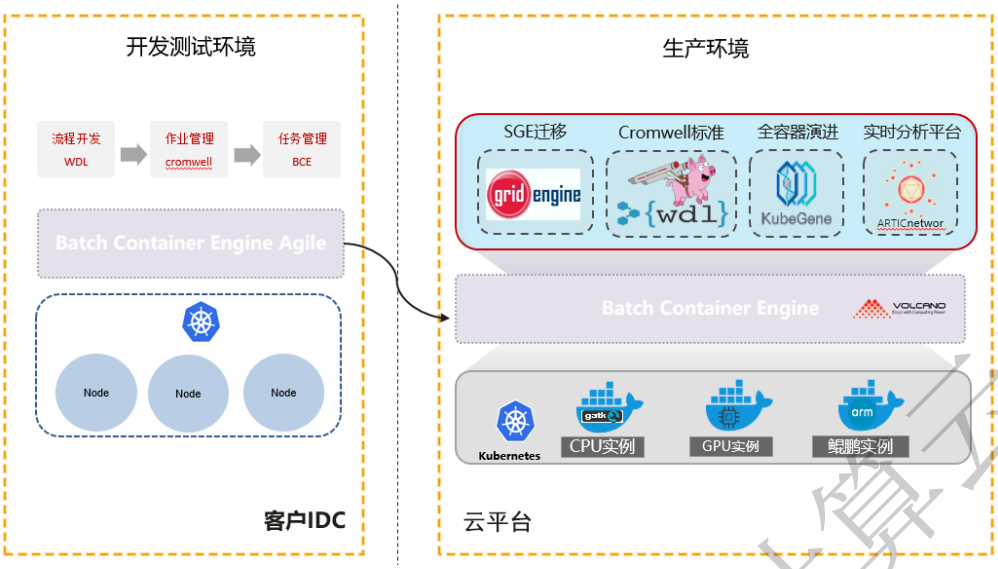

图 15 基于 HPC Cloud 的生命科学应用方案

基于 HPC Cloud 的生命科学应用方案能具备以下能力:

- 自动调度云上丰富的计算资源，包括海量的 CPU 资源和最新的 GPU 资源，支持用户作业并行计算。
- 提供多层级的文件存储服务，包括存储计算时海量小文件的高 IO、高并发的并行文件系统以及计算结果用的持久化存储。
- 能够对计算进行前后置处理，计算结果能实时同步至云桌面，方便后置处理和超参调优。

2.典型案例

■ 基于云超算的分子对接方案

某药企 CADD 部门项目增长迅速,每年需对数千化合物进行分子对接及结合自由能计算，企业内部大部分 GPU 卡为 Nvidia P100 及

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

更早的加速卡，计算规模扩张速度远远跟不上项目增长速度，急需解决计算资源问题。通过云超算平台，用户可以并行调动 200-400 Nvidia v100 卡，将计算时间从数周降至 2 小时，计算效率提高数百倍，项目运算周期缩短，加速新品上市速度。

■ 高性能生物云计算方案

某高新技术企业基于功能基因组学的 BT+IT(高通量基因测序技术、生物信息技术、高性能生物云计算技术)技术，拓展出了高通量测序、生物云平台、质谱检测、智能制造四大业务板块。提供面向生物大数据分析的开放 HPC 云平台，同时可以提供完整的生物信息分析以及整合利用公共数据的解决方案。

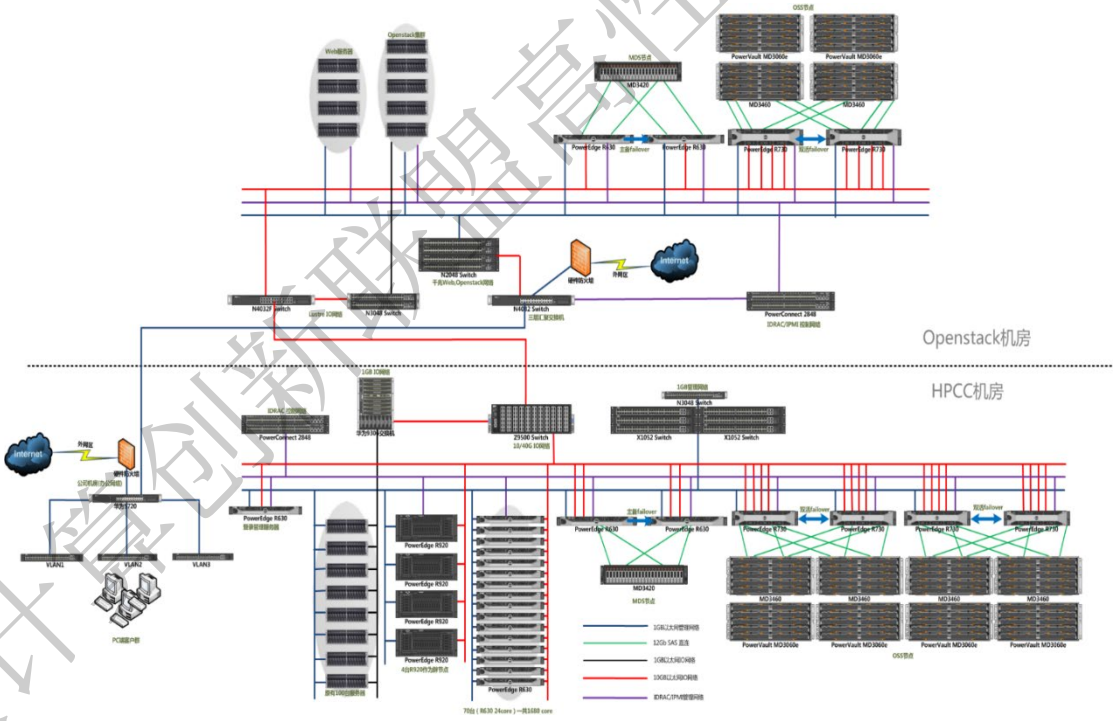

图 16 高性能生物云计算方案

为了更好发展业务，需要高性能计算机、大容量和高吞吐量的

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

存储产品、高带宽和冗余网络设备以及相应 HPC Cloud 软件。

根据用户需求和 HPC 市场主流产品方案，业界提出了一套基于 HPC Cloud 的解决方案，如图 16 所示。该方案由 HPCC 机房和 OpenStack 机房两部分组成。每个机房都部署了 HPC 集群、高性能存储、冗余和高带宽的网络。

HPC 集群采用搭载 Intel x86_64 架构的服务器，存储采用业内著名的 HPC 并行文件系统 Lustre，提供高性能 10GbE 的计算网络、1GbE 的管理监控网络。集群运行 CentOS Linux 操作系统与监控管理软件。

(五)气象环保

1.应用场景及需求

气象、环保、海洋等关系国计民生的各个方面，比如极端天气、重污染天气、极端气候、自然灾害等。气象、环境、海洋预报是指是指根据流体(大气或海洋)的物理和运动特性，在一定的初值和边值条件下，通过大型计算机进行数值计算，求解描写流体演变过程的流体力学、热力学和大气化学控制方程组，预测未来一定时段的流体运动状态和天气现象的方法。随着数值模式的日益成熟、大型计算机性能的不断提升，数值预报系统现已成为气象、海洋行业业务和科研不可或缺的支撑工具。

气象、环境、海洋预报往往通过数值模拟的方式获得，包括气象模式、海洋模式、气候模式、环境模式数据的处理，是典型的计

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

算密集型应用（Computing-Intensive），需要建立一个较好的反映预报时段的数值预报模式和误差较小、计算稳定并相对运算较快的计算方法；其次，由于数值天气预报要利用各种手段（常规观测、雷达观测、船舶观测、卫星观测等）获取气象资料， 因此需要对观测资料做调整、处理和客观分析；再者，由于数值天气预报的计算数据量非常之大，需要依赖超级计算机极强的计算能力。

气象分析在业务应用、计算资源等不同层面均有需求痛点：应用层面，主要需求在于如何用更先进的算法、技术，进一步提升天气预报的精细度、准确性和时效性；计算管理层面，主要痛点在于计算任务调度系统长期以来国外软件系统，产品功能更新慢，费用高，难以针对业务应用以及集群管理优化进行二次开发。

针对气象预报系统的业务需求,现有研究提出了以下相关技术:

■ 具有自主知识产权的计算任务调度器内核

计算任务调度平台实现完全的自主可控,包括底层调度器内核;支持多种调度策略，支持异构调度，支持面向容器的调度。

■ 基于图像分析技术实现极端强对流天气推演

结合对强对流天气雷达云图的识别和对历史强对流天气演进过程的 AI 学习,通过基于图像的推演算法实现对极端强对流天气的预报。

■ 自动化网格与分层时间步长

实现以用户自定义的多种分辨率在多边形区域内自动生成非结构化网格，并同时支持对不同分辨率的网格采用不同的时间步长，

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

以优化算力消耗。

2.典型案例

■ 基于超算云的空气质量调控方案

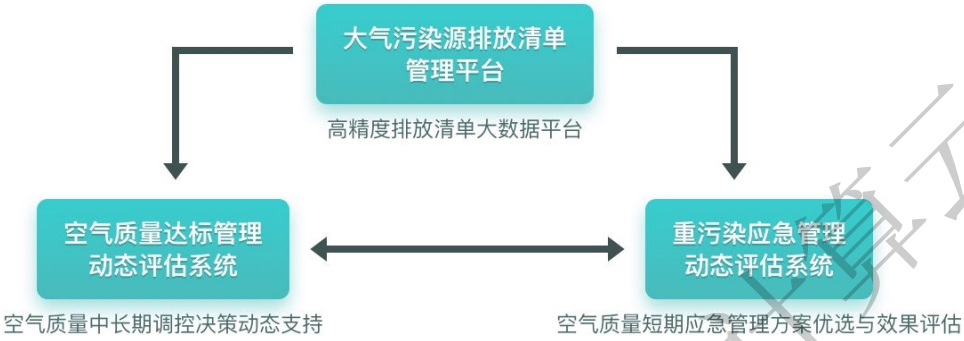

图 17 空气质量动态调控技术平台架构

北京某专注于空气质量管理服务的国家级高新技术企业将空气质量动态调控技术平台和超算云资源进行整合，实现空气质量动态调控技术平台的云化，如图 17 所示。让环保客户以租用云平台的方式，代替传统私有云的使用方式。高性能计算云解决了该数值模式业务运算能力不足的问题，提高了环境预测的及时性、准确性、可靠性和精细化，更早的对污染天气进行预警，更好地分析污染天气情况的规律，更有效地形成防御对策。如图 18 所示。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

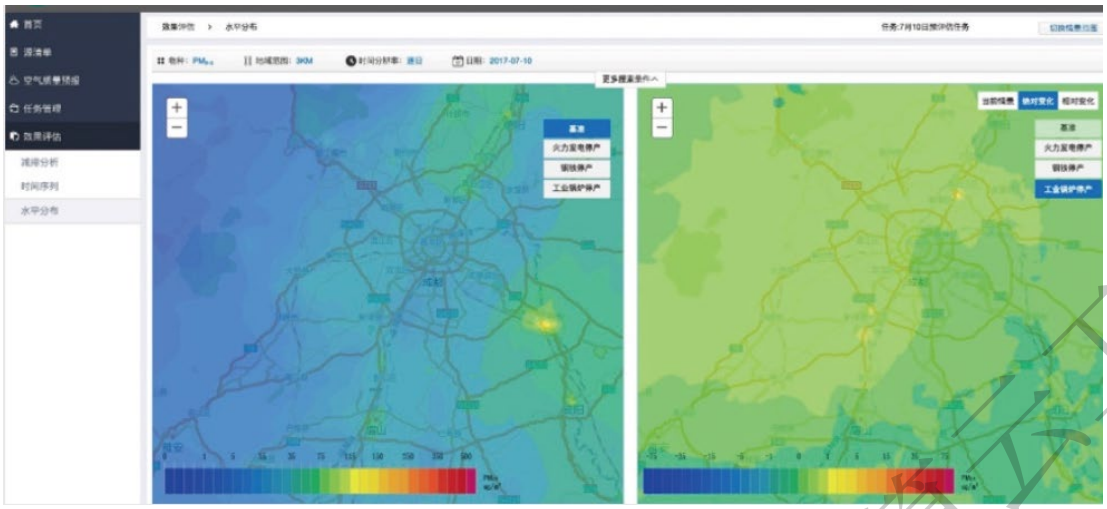

图 18 基于高性能计算云的空气质量动态调控技术平台

■ 基于超算云的全球高分辨率海洋环境数值预报系统

通过超算云资源调度国内两个国家级超级计算中心、两个互联网云平台资源，开发“全球高分辨率海洋环境数值预报系统” 海洋再分析数据利用数据同化方法将海洋动力数值模型与多源海洋观测数据有机结合，充分融合了数值模型与观测各自的优点，可以以较大的精度再现时空连续的海洋各状态变量场，提供过去某时间段、某范围海域内的海洋状态演变的最优估计，如图 19 所示。利用超算云资源实现了水平分辨率 0.1° 、垂向分辨率 54 层的高计算精度，同时根据计算业务研发了 8 个监控警报组件、13 个运行及优化组件，实现了自动更新数据、自动运维、自动推送、自动报警等核心功能，保证了每天 1TB 数据的传输以及 4000 余份海洋预报结果的输出。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

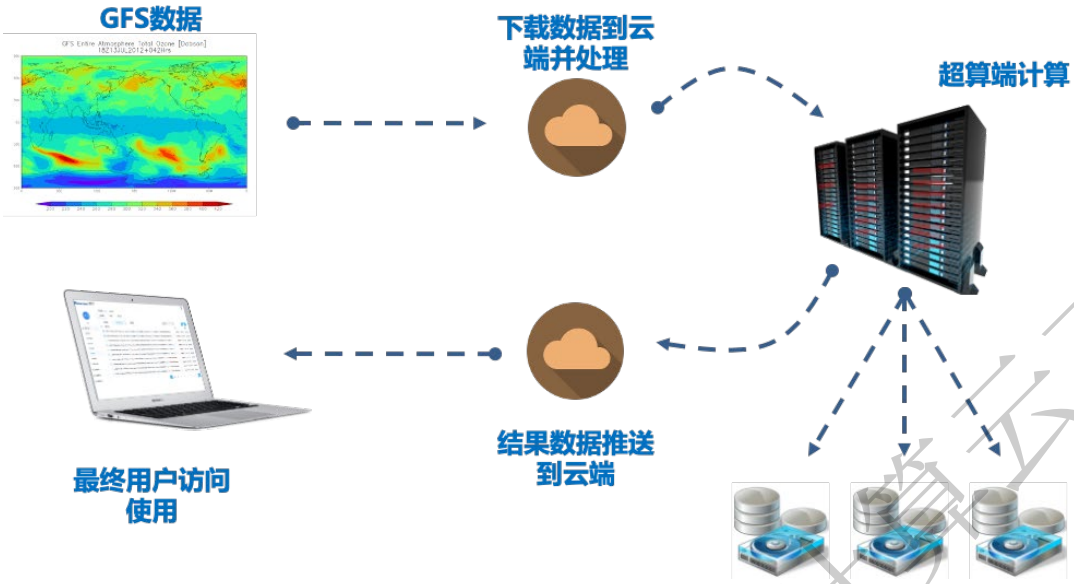

图 19 基于超算云的全球高分辨率海洋环境数值预报系统

■ 基于图像的强对流天气推演

基于图像的强对流天气推演采用了与传统的基于 WRF 的数值天气预报模型完全不同的技术路线，通过对海量雷达反射图历史数据的分析，构建强对流天气的认知模型，以海量的天气演进的历史数据作为训练样本，对 AI 分析算法进行训练，最终实现对未来天气进行自动推演的能力，如图 20 所示。

根据实测数据，该能力对于台风等极端强对流天气的推演达到了较好的效果，可以比较准确地推演出台风中心的移动，台风登录位置，以及小范围强对流天气的产生与消散过程。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

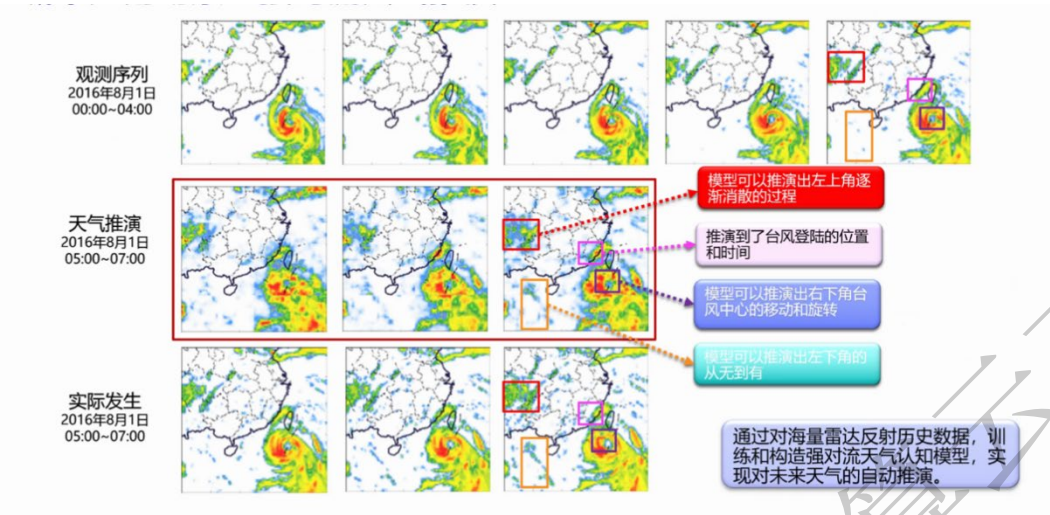

图 20 基于图像的强对流天气推演

■ 自动化网格与分层时间步长技术

某气象模拟平台中，可支持在任意指定形状的区域内，以多种分辨率在多边形区域内自动生成非结构化网格。例如，在多山地形和海岸线区域，使用更高的分辨率，以获取更精确的天气模拟；在平原地带或预报不关注的区域使用尺寸较大的网格，以减少计算开销。

如图 21 所示，可以在世界地图范围内进行区域划分，针对最关注的广东沿海地区，逐渐收敛区域并细化网格颗粒度，气象模拟平台可根据区域的划分自动生成网格。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

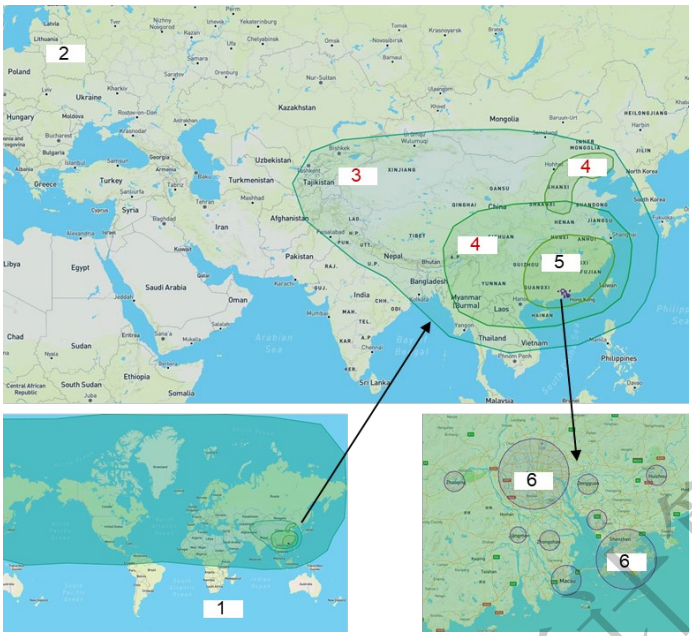

图 21 基于图像的强对流天气推演

除自动生成网格之外，模拟平台可以为不同尺寸的网格分别配置最佳的时间步长，在保证预测准确性的基础上最大程度缩减计算开销，使计算资源更多地集中到关注的网格密集的区域。实际应用中该平台在预测 2021 年 7 月份河南降雨中实现了较为准确的预测，如图 22 所示。

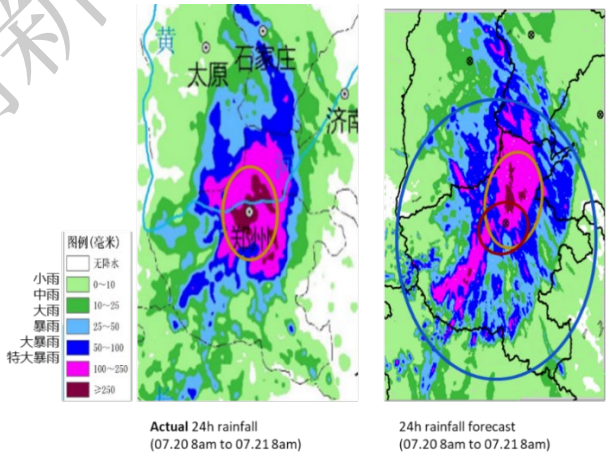

图 22 基于图像的强对流天气推演

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

(六)材料研发

1.应用场景及需求

为了支持材料基因组工程，推动材料科技成果向现实生产力的转化，需要以高通量材料计算、大数据为核心，建立材料基因平台，以加速材料基因计算，提升新材料研发效率；同时基于材料基因数据库与云资源平台的数据共享，帮助更多材料领域的研究人员进行专业探索。

新材料产业不仅是制造业转型升级的产业基础，也是制造强国战略的重点发展领域。以往新材料的研发，大多采用试错法，一种新材料从最初的研究开发，经过性能优化、系统设计与集成、验证、制造再到投入市场，整个周期通常需要 10-20 年时间。不仅研发周期长、成本高，材料研发与应用之间的割裂还往往导致材料研发的成功率不高。

面对工业的快速发展，材料基因组计划应运而生。材料基因组计划是在现有数据库平台基础上，通过高通量计算、实验和大数据分析技术，加速材料发现-研发-生产-应用全过程，从而缩短材料研发周期，降低材料研发成本。这种从应用需求出发，倒推符合相关结构功能材料的方式，可以说对传统材料研发的一种的颠覆。该计划一经推出，就在全球范围内得到广泛响应，发达国家纷纷制定与新材料相关的产业发展战略，在抢占未来制高点的新材料上加大创新力度。我国也将材料基因组计划列为新材料产业发展的重要一环。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

2.典型案例

■ 云化材料基因高性能计算解决方案

如图 23 所示，某研究所基于至强可扩展处理器提出云化材料基因高性能计算解决方案。在高通量材料计算和数据处理平台的建设中，研究所完成了 160 个计算节点、1 个 GPU 节点、2PB 的存储容量的部署，并在材料基因数据处理平台的数据中心中构建了完整的统一分级存储资源池，以及用于资源共享的数据云平台。经过方案的实施，高通量计算平台的算力大幅提升，同时加速了材料基因研发进程，这也正是新材料筛选和模拟工作的第一诉求。

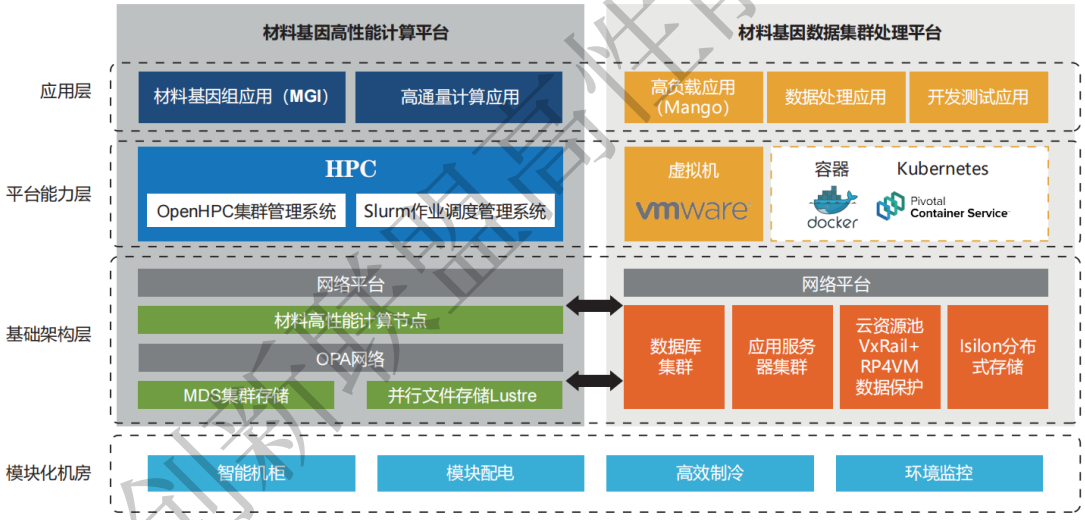

图 23 云化材料基因高性能计算解决方案

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

四、高性能计算云趋势展望

(一)计算业务上云加速，高性能计算云产业发展迎来新格局

随着我国“新基建”部署的持续推进，众多的科研用户、企业用户希望从自建计算系统中解脱出来，避免传统的自建方式所带来的高资金投入、长采购周期、维护难度大、资源更新慢等问题。于此同时，行业数字化转型将进一步提升算力需求的爆发式增长，计算业务上云将成为众多企业的首选[3]。

超级计算将与云计算技术深度融合。超算目前已经成为科学计算、工程计算，以及企业研发、经济发展的重要基础设施。超算与云计算的技术融合发展趋势愈发强烈，超算不仅可以作为云计算的基础，超算还将以云计算的方式提供在线服务、走向更多的行业领域。超算云的出现，使得超算算力资源配置多样化、服务领域多样化、客户服务在线化。在大气变化模拟、核聚变研究、生命科学、天体物理研究，以及目前主流的产业领域，如人工智能、机器学习、数据挖掘、大数据分析领域，超算云都在发挥重要作用。

云化基础设施成为超算与新兴技术的融合创新平台。虽然已经经历了 10 多年的高速发展，云计算仍然是全球 ICT 技术、产业的发展热点，并进一步向云原生的方向发展。基于云计算的云超算充分利用了云计算极致弹性、应用敏捷、业务智能，安全可信的特点，可以适应各行业对超算、AI、大数据、量子计算等各类场景的需求，

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

具有良好的商业模式和产业发展前景，是高性能计算云的重要发展方向和趋势之一。

(二)构建一体化安全防护体系是高性能计算云产业发展的根本保障

传统的安全保障是通过部署防火墙、DDos 安全攻击检测、数据加密等各类安全机制和安全产品，来解决传输安全、网络安全和数据安全等问题。各个安全机制和产品相对孤立、无法构建一体化的安全防御体系。随时零信任、SASE 等安全技术的发展，为高性能计算云的一体化安全体系的建立提供了技术基础。

通过为高性能计算云体系中所有实体构建数字身份，建立身份驱动的云网一体化的访问控制和安全检测架构。构建具备网络内生安全能力的高安全网络用于多云之间的互联与数据传输，不依靠外部部署安全产品，网络内生支持基于数字身份的网内分布式认证、网内加密传输、变路径隐匿传输和支持网内弹性部署的分布式威胁检测和抗攻击等安全能力。通过基于云网一体化的基础架构，以数字身份为基础，以高安全网络为传输载体，建立覆盖云、网、边、端的,云原生的高性能计算云一体化安全防护体系,提供安全传输、威胁检测、数据防泄漏等多种安全服务。

(三)计算应用软件服务化将成为高性能计算云服务新模式

软件及服务作为一种软件分发模型，提供了许多敏捷性和成本效益，使其成为众多业务模型和行业的可靠选择。市场上对计算类

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

软件的需求旺盛，尤其是在 CAE、CFD、EDA、CADD 等专业领域，由于软件的运行需求大规模计算资源，安装及运行过程对客户的 IT 环境要求较高,计算应用软件服务化成为缓解这一难题的有效途径。

高性能计算软件服务化可以实现计算软件与计算环境的松耦合，具有容器化、可视化编程、代码提交即部署、弹性伸缩等功能特征，可以实现计算资源合理调度、自由扩展。供应商能够在云端快速实现软件功能迭代、资源管理和监控、软件协同管理、远程可视化、多用户协作、弹性调度等服务；用户无需管理和控制底层的基础设施，通过互联网按需定购指定的应用软件服务，并根据服务量、服务时间或其他方式支付费用。

软件即服务平台可以简化业务模型，由于其简单性，用户可访问性，安全性和广泛的连接性，在工业仿真、药物研发、环境监测、新能源等企业中的应用越来越广泛。服务化计算软件分发模式也将打破以前按拷贝销售的计算软件分发模式，对降低计算软件使用门槛、实现普惠计算、保护知识产权都有积极意义。

(四)绿色节能将成为高性能计算云高质量发展的关键主题

能耗是至于高性能计算机规模与性能提升的关键瓶颈。根据 2021 年 6 月 TOP500 的数据显示，排名前 10 的超级计算机能耗均超过 2.2 兆瓦，排名第一的富岳（Fugaku）超级计算机的能耗接近 30 兆瓦。2018 年全球数据中心的耗电规模为 205 亿千瓦时，达到全球总用电量的 1%[4]。预计到 2025 年，我国数据中心年耗电量约为 3950 亿千瓦时，占全社会用电量的 4.1%。巨大的能耗不仅给高性能计算

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

机的运营带来了高昂的成本开销,而且对高性能计算机的可靠性和可用性造成直接和潜在的不良影响[5]。

中国坚持走绿色低碳发展道路。党的十九届五中全会将碳达峰、碳中和目标纳入“十四五”规划建议，2021 年碳达峰、碳中和首次被写入政府工作报告。“十四五”时期将成为中国生态文明建设进入以降碳为重点的战略方向，加快绿色低碳循环发展，促进经济社会发展全面绿色转型的关键时期。

以“双碳”为目标，从政策引导、技术创新、标准推进、产业协同等不同维度，体系化推进高性能计算云产业绿色节能发展。通过开展体系结构（如：高能效处理器/加速器等）、系统设计、冷却技术、新能源、虚拟能源管理、资源调度策略等不同层次的技术创新与应用，降低碳排放，提高高性能计算云的系统能效，将成为高性能计算云产业高质量发展的“主旋律”。

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

附录 1：缩略语

2D	2-Dimension	平面图形
3D	3-Dimension	三维
5G	The 5th Generation Mobile Communication Technology	第五代移动通信技术
API	Application Programming Interface	应用程序编程接口
AR	Augmented Reality	增强现实
ARM	Advanced Risc Machines	英国 ARM 公司
ASIC	Application Specific Integrated Circuit	专用集成电路
BT	Bio Technology	生物技术
CAD	Computer Aided Design	计算机辅助设计
CADD	Computer Aided Drug Design	计算机辅助药物设计
CAE	Computer Aided Engineering	计算机辅助工程
CAGR	Compound Annual Growth Rate	复合年均增长率
CAPP	Computer Aided Process Planning	计算机辅助工艺过程设计
CD	Continuous Delivery	持续交付
CFD	Computational Fluid Dynamics	计算流体动力学
CI	Continuous Integration	持续集成
CLI	Command-Line Interface	命令行界面
CPU	Central Processing Unit	中央处理器
DDoS	Distributed Denial Of Service Attack	分布式拒绝服务攻击
DP	Displayport	显示接口
EDA	Electronic Design Automation	电子设计自动化
FC	Fibre Channel	光纤通道
FPGA	Field Programmable Gate Array	现场可编程逻辑门阵列
FTP	File Transfer Protocol	文件传输协议
GPFS	General Parallel File System	通用并行文件系统
GPU	Graphics Processing Unit	图形处理器
HPC	High Performance Computing	高性能计算
I/O	Input/Output	输入/输出
IaaS	Infrastructure As A Service	基础设施即服务

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

IBM	International Business Machines Corporation	国际商业机器公司
ICT	Information And Communications Technology	信息与通信技术
IDC	Internet Data Center	互联网数据中心
IOPS	Input/Output Operations Per Second	每秒进行读写操作的次数
IP	Internet Protocol	互联网协议
IPv4	Internet Protocol Version 4	互联网协议第 4 版
IPv6	Internet Protocol Version 6	互联网协议第 6 版
IT	Internet Technology	互联网技术
IVI	Ipv4/Ipv6	无状态 IPv4/IPv6 翻译技术
KVM	Keyboard Video Mouse	多计算机切换器
NFV	Network Functions Virtualization	网络功能虚拟化
NoSQL	Not Only Sql	非关系型数据库
NPU	Neural-Network Processing Units	网络处理器
NVH	Noise、Vibration、Harshness	NVH 仿真
OLTP	On-Line Transaction Processing	联机事务处理过程
PaaS	Platform As A Service	平台即服务
PB	Petabyte	拍字节
PC	Personal Computer	个人计算机
POSIX	Portable Operating System Interface	可移植操作系统接口
QoS	Quality Of Service	服务质量
RDMA	Remote Direct Memory Access	远程直接数据存取
RoCE	RDMA Over Converged Ethernet	通过以太网使用远程直接内存访问的网络协议
SaaS	Software As A Service	软件即服务
SASE	Secure Access Service Edge	安全访问服务边缘
SDK	Software Development Kit	软件开发工具包
SDN	Software Defined Network	软件定义网络
SRv6	Segment Routing Over Ipv6	IPv6 段路由
SSD	Solid State Disk	固态硬盘

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

TB	Terabyte	太字节
TPU	Tensor Processing Unit	张量处理器
VPN	Virtual Private Network	虚拟专用网络
VR	Virtual Reality	虚拟现实技术
WEB	World Wide Web	全球广域网

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

附录 2：参考文献

[1] Mauch V, Kunze M, Hillenbrand M. High performance cloud computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(6): 1408-1416.

[2] Netto M A S, Calheiros R N, Rodrigues E R, et al. HPC cloud for scientific and business applications: taxonomy, vision, and research challenges[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2018, 51(1): 1-29.

[3] Steve C, Alex N, Bob S, et al. The Future of HPC Cloud Computing[R]. HYPERION RESEARCH, 2019.

[4] Eric Masanet 等，Recalibrating global data center energy-use estimates, Science 28 Feb 2020: Vol. 367, Issue 6481, pp. 984-986.

[5] 黄金礼. 高性能计算机系统能耗管理技术方法研究 [D]. 国防科学技术大学, 2012.

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

超级计算创新联盟高性能计算云工作组

超级计算创新联盟

地址：北京市海淀区中关村南四街4号中科院软件园2号楼110

邮政编码：100190

联系电话：010-58812820

传真：010-58812888

网址：www.sc-innovation-alliance.cn