

计算网络化研究报告

(2022 年)

算网融合产业及标准推进委员会

2022年12月

版权声明

本白皮书版权属于算网融合产业及标准推进委员会，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：算网融合产业及标准推进委员会”。违反上述声明者，编者将追究其相关法律责任。



参与编写单位

中国信息通信研究院、北京航空航天大学、国家超级计算济南中心、国家超级计算天津中心、天翼云科技有限公司、曙光智算信息技术有限公司、国网信息通信产业集团有限公司北京分公司、联想（北京）信息技术有限公司、中电云计算技术有限公司、北京华恒盛世科技有限公司、中国联合网络通信集团有限公司、北京并行科技有限公司、北京北龙超级云计算有限责任公司、联智科技（北京）有限公司、戴尔股份有限公司、浙江九州云信息科技有限公司、亚信科技（中国）有限公司、上海即算科技有限公司、芯启源电子科技有限公司

主要撰稿人

宋平、穆域博、宋尧、刘轶、王哲、毕立波、刘弢、张玮、谭立状、冯景华、徐斌、艾天翔、杨莉、王春新、邹颖、柴瑶琳、党小东、张云畅、韩维娜、崔吉顺、张洋、陈沙克、苏斌、王文星、张岩、王施霁、刘爽、乔楠、甄亚楠、郭宇、付鸿雁、吴跃、胡卫国、苏楠、郭建超、马雷明、王真容、王琛琛、辛少帅

前 言

为了满足数字化应用多样化的算力处理需求，以超级计算、云计算、智能计算、边缘计算为代表的各类算力服务，通过差异化的服务能力，赋能行业数字变革，计算网络化的出现使得各种设备、系统、服务和应用之间可以实现高效、灵活、安全、可靠的互联互通，从而带来提高工作效率、优化资源配置、改善生活质量、促进可持续发展等优势。

本研究报告旨在探讨计算网络化的概念、内涵与主要特征、典型实践、应用案例以及对计算网络化发展趋势展望。本研究报告是对计算网络化的一次深入探讨和研究，希望能够为相关从业人员提供有益的参考和借鉴。同时，也欢迎广大读者提出宝贵的意见和建议，共同推动计算网络化的快速发展。

目 录

一、 计算网络化是算网融合发展的必然路径.....	1
(一) 算力已成为促进数字经济发展的核心引擎.....	1
(二) 算力全面互联充分满足数字时代发展需求.....	3
(三) 计算网络化以算网融合为目标持续演进.....	4
二、 计算网络化概念、内涵与特征.....	7
(一) 计算网络化基本概念与内涵.....	7
(二) 计算网络化主要特征.....	8
三、 计算网络化典型实践.....	13
(一) 概述.....	13
(二) 分布式云.....	14
(三) 边缘计算.....	18
(四) 高性能计算云.....	21
(五) 智能计算.....	25
四、 计算网络化应用案例.....	30
(一) 超算互联网应用方案.....	30
(二) 工业制造领域智能质检方案.....	32
(三) 音视频领域边缘 VR 方案.....	35
五、 计算网络化发展趋势展望.....	36
(一) 建立健全标准体系，引导计算网络化良性发展.....	36
(二) 加速构建网络基础设施，推进算力全面互联.....	37
(三) 夯实计算网络化技术底座，实现多元算力一体协同.....	37
(四) 智能算力全面发力，助力 AI 大模型应用落地.....	37
缩略语.....	38
参考文献.....	40

图 目 录

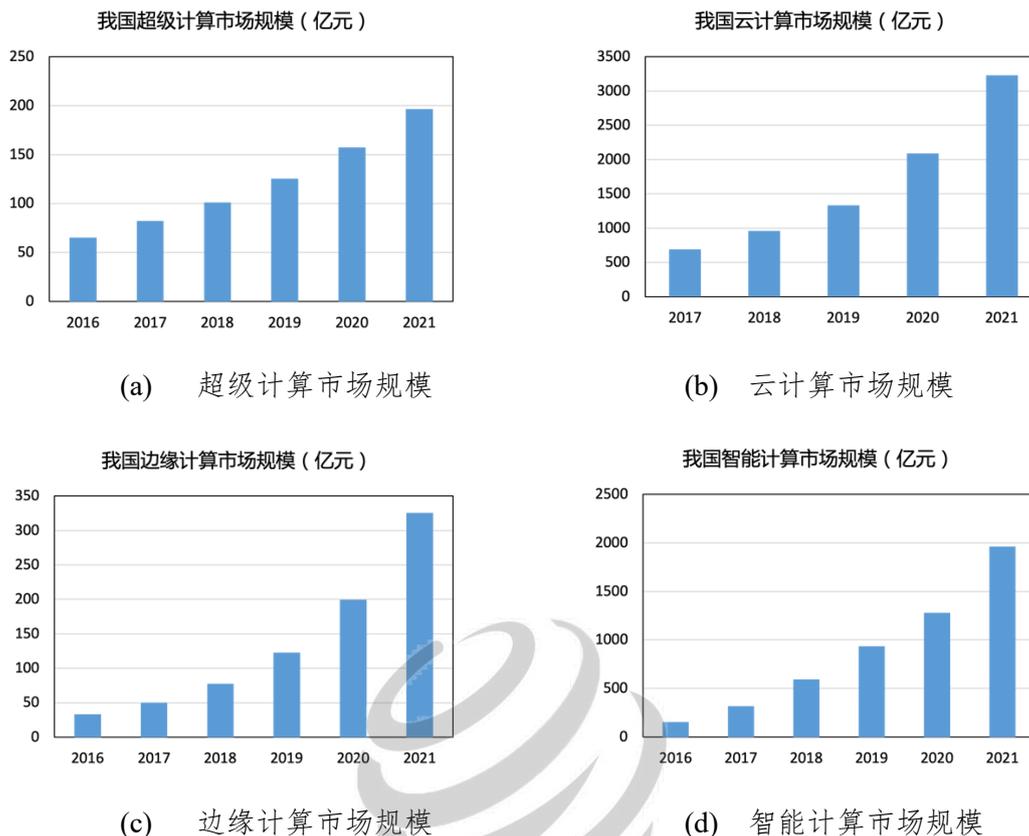
图 1 2022 年算力市场规模统计	2
图 2 计算网络化发展的三个阶段	5
图 3 计算网络化主要特征	8
图 4 计算网络化典型实践对比	14
图 5 分布式云参考模型	16
图 6 边缘计算参考模型	20
图 7 HPC Cloud 满足各行业算力需求	22
图 8 高性能计算云参考模型	23
图 9 智能计算服务参考模型	27
图 10 “算力生产-算力互联-算力配给”融合的超算互联网	31
图 11 超算互联网直连网络拓扑	31
图 12 基于区块链的数据共享访问控制机制	32
图 13 工业质检典型场景部署架构	34
图 14 “5G+云 VR”网络架构	36

一、计算网络化是算网融合发展的必然路径

(一) 算力已成为促进数字经济发展的核心引擎

《中国数字经济发展研究报告（2023年）》显示，数字经济作为我国国民经济的重要支柱地位更加凸显，数字经济规模首次突破 50 万亿元。我国数据资源丰富，数据产量达到6.6 ZB，同比增加29.4%，占全球数据总产量（67 ZB）的9.9%。日益丰富的数字化场景、海量的数据规模与复杂处理需求，进一步驱动算力规模持续扩大，加速算力技术创新升级。根据IDC《2021-2022全球算力指数评估报告》的相关数据显示，国家算力与GDP的走势呈现显著正相关，算力指数平均每提高1点，国家的数字经济和GDP将分别增长3.5‰和1.8‰。

在数字化应用需求驱动下，我国正统筹推进算力基础设施建设，助推产业转型升级与科技创新。2021年，国家发改委等四部门联合发布《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》，布局建设全国一体化算力网络国家枢纽节点，构建国家一体化算力服务平台；同年，工信部发布《“十四五”信息通信行业发展规划》，提出建设形成多层次算力设施体系；2023年，中共中央、国务院印发了《数字中国建设整体布局规划》，系统优化算力基础设施布局，促进东西部算力高效互补和协同联动。在国家政策的支持下，2022年我国算力总规模达到180EFlops，居全球第二，我国中东部省份率先布局算力设施。



来源：中国信息通信研究院、沙利文等研究机构发布的报告

图 1 2022 年算力市场规模统计

为了满足数字化应用多样化的算力处理需求，以超级计算、云计算、智能计算、边缘计算为代表的各类算力服务，通过差异化的服务能力，赋能行业数字变革。如图 1 所示，截止至2021年，我国各类算力市场规模持续增长，算力服务能力迎来全面发展。在超算方面，我国已经进入E级计算时代，超级计算机规模与美国呈现“并跑”态势；随着众多互联网企业加入，超算服务质量不断提升，超算产业迎来新格局。在云边算力方面，以云服务为基础的算力服务具备泛在化、普惠化和标准化的特点，云原生技术持续落地，带动云边算力架构与应用性能的全面提升。在智算方面，人工智能计算的需求高速增长，促进智算中心基础设施规

模部署，智算服务即将进入社会生活的方方面面。此外，国家“十四五”规划聚焦高端芯片、人工智能关键算法等关键领域，全面布局人工智能技术。

（二）算力全面互联充分满足数字时代发展需求

行业数字化转型助推消费互联网向产业互联网迈进，不论是传统的消费互联网还是新兴的产业互联网，对各类算力的全面互联、算力服务一体化均有强烈需求。在消费互联网方面，消费用户规模持续增长，已经突破 10 亿。手机、汽车、电视、家庭网关、VR 设备等消费用户所使用的智能终端设备越发多元。海量数据处理正在向边缘扩散，根据 Gartner 预测，到 2025 年超过 50% 的企业关键数据将在数据中心以外或云以外的地点创建和处理，云/边/端算力协同已成为基本能力要求。在产业互联网方面，大科学装置、智能制造、智慧安防、车联网等领域数据爆发式增长，并在实时性、精确度方面提出了更高要求，例如：中国天眼 FAST 天文观测每秒产生 6GB 数据，对观测数据的计算分析要求高速传输，便于更快发现科学目标；车联网路侧计算设备端到端处理时延宜小于 100 毫秒且车辆信息检测精度不小于 95%。此时，单一算力已难以满足需求，需利用高质量网络实现算力中心之间的互联互通，形成更为强大的算力资源。

各类行业不同应用场景均需要算力之间相互协同，满足应用处理需求。例如，在交通行业的车路协同场景中，智能网联汽车控制系统要求云边端算力协同调度，将人、车、路、云的物理空间、信息空间

融合为一体，实现智能网联汽车交通系统安全、节能、舒适及高效运行。此外，气象行业通过国省跨域超算算力统筹与算力资源统一服务，应对未来气象应用对算力的挑战。

不同数字应用的执行过程各具特点，利用算力互联可以进一步提升应用执行效率。例如，在如材料基因组工程的高通量计算，可充分利用计算任务间的松耦合性，将任务分配到分散的可用节点，充分利用算力互联网络连接的各算力的闲置资源；在生物信息、智慧病理等领域，边缘侧的测序仪将获得的测序数据作预处理，通过网络传到算力中心进行进一步处理，实现云边协同；在海气耦合模式中，WRF 和 ROMS 应用之间耦合较弱，可以将不同应用映射到不同的算力中心，并通过高速互联网络进行协同计算。

综上所述，从宏观行业数字化发展，到不同行业数字化场景的需求，再到各类数字化应用执行，算力设施互联互通、算力服务一体化发展已成为满足数字化转型需求的关键能力，是现阶段算网融合发展的必然路径。

（三） 计算网络化以算网融合为目标持续演进

如何便捷地获取并使用算力，一直是人们追求的目标。“网络计算”的概念起源于 20 世纪 80 年代计算机网络的出现，这也是计算网络化概念的雏形。网络计算强调通过网络连接网上分散的计算机，汇聚网络连接的各类硬件和软件资源，形成能力更为强大的计算系统^[1]。

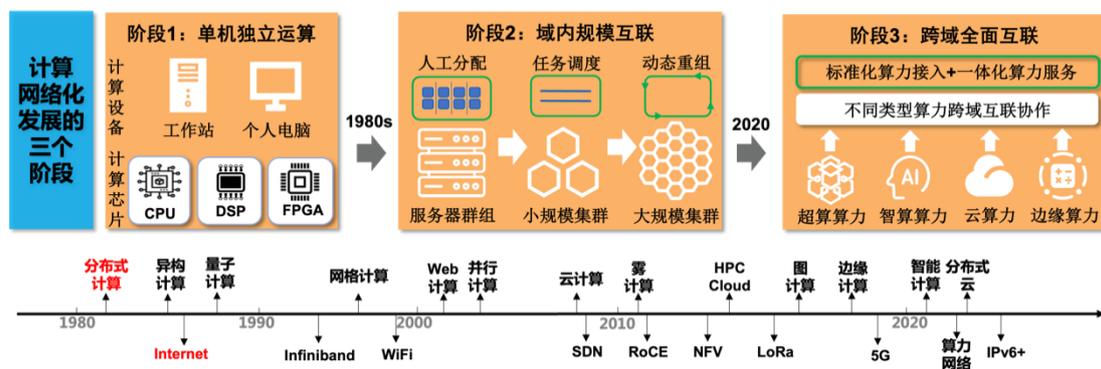


图 2 计算网络化发展的三个阶段

以算网融合为最终目标，计算网络化概念从 20 世纪 80 年代开始持续演进发展。在 40 年来的发展过程中，业界涌现了众多典型技术实践。本报告将计算网络化发展历程归纳为三个阶段，即单机独立运算阶段、域内规模互联阶段、跨域全面互联阶段，如图 2 所示。

- **单机独立运算阶段**（20 世纪 80 年代网络出现以前），以个人电脑、工作站为代表的计算设备独立执行运算。应用只能部署、运行在一台独立的计算设备中，一台计算设备可以通过分时交互等方式运行不同的应用。在这个阶段，产业注重各类计算芯片的研发，不断突破单机的计算性能，与此同时，分布式计算等计算网络化的概念被提出，重点解决单一计算设备的性能瓶颈问题。
- **域内规模互联阶段**（1990 年至 2020 年），伴随计算机网络的出现与发展，各类计算设备利用网络相互协同，满足应用更高的算力需求。大规模应用可以同时部署在多台计算设备中，由不同的计算设备执行不同的处理任务。该阶段重点关注一

个区域内计算设备的互联，经历了服务器群组到小规模集群再到大规模集群的演进。随着域内算力规模的增加，任务分配方式也从原始的人工分配方式，发展到统一任务调度方式以及根据用户需求的弹性调度方式。随着集群可扩展性的不断提升，单集群能耗、集约化等问题极大限制了集群规模。

- **跨域全面互联阶段**（2020年以后）是数字时代背景下计算网络化演进的全新阶段，重点解决单一集群规模受限，无法满足产业互联网更大规模数据处理需求等痛点问题。该阶段包括超算算力、智算算力、云算力、边缘算力等在内的各类算力，通过标准化的接口，利用 IPv6+、算力网络、SD-WAN 等先进网络技术，实现跨域全面互联，并提供一体化的算力服务。应用的部署不再受到体系架构、地理位置等因素的制约，可专注于完成自身任务，无需关心算力资源情况。

计算网络化的跨域全面互联阶段体现了计算技术与网络技术融合程度的不断深入，网络不再仅仅发挥数据流转作用，而是更多的助力计算任务的高效执行。得益于域内规模互联阶段网格计算等技术对算力跨域互联的积极探索，在跨域全面互联阶段，融合多元算力的一体化算力服务能力也将得到了全面提升。

二、计算网络化概念、内涵与特征

(一) 计算网络化基本概念与内涵

计算网络化以算网融合为最终目标，旨在利用高质量互连网络连接算力软硬件资源，构建算力规模更大、服务能力更强的算力系统，其中高质量互连网络是计算网络化的能力基础，一体化算力服务是计算网络化的能力核心。计算网络化的本质是一种算力资源服务，未来企业客户或者个人用户不仅需要网络和云，也需要灵活的把计算任务调度到合适的地方。

计算网络化是算网融合发展的重要趋势、必然路径与发展阶段。计算网络化应满足以下条件：

- **基本内涵：** 计算网络化强调以计算服务为核心，网络是算力服务的基础，计算网络化中网元设备不提供算力服务。
- **呈现形式：** 计算网络化最终要构建一个算力全面互联的一体化算力服务平台/系统。
- **能力主体：** 计算网络化依赖于各类算力设备与多元算力中心提供的算力服务能力。
- **以网助算：** 计算网络化利用高质量互连网络保障计算服务过程中的网络质量，并可通过网络的调度与优化，提升应用执行效率。

(二) 计算网络化主要特征



图 3 计算网络化主要特征

在千行百业数字化应用需求的驱动下，计算网络化发展迎来了新阶段。算力多元分散、网络广域互联、资源弹性供给、服务多维一体、应用规模部署成为了现阶段计算网络化发展的关键特征，如图 3 所示。

1. 算力多元分散

算力多元分散特征指的是算力资源不再集中于单一的算力中心，而是分散在多个地方，具有异构多样的特点，并且在不同的算力中心

之间，角色也不尽相同。该特征可以从算力中心内部与算力中心之间两个方面阐述。

在算力中心内部。不同体系架构的计算硬件相互协作，满足不同**计算需求**。算力中心内部的算力资源可以包括不同类型的计算节点、存储设备、网络设备等，并且这些资源可能采用不同的处理器架构、不同的操作系统、不同的存储介质等。在一个算力中心内部，需要通过虚拟化等不同的技术整合多元异构的算力资源，提供统一的算力服务。

在算力中心之间，各类算力中心部署位置广域分散、角色多样、服务能力存在差异。我国正体系化推进算力基础设施建设，不同算力中心之间形成广域分散态势，不同算力中心的算力资源配置存在差异。不同算力中心角色多样，为满足不同应用的算力需求，服务能力也各不相同。其中，既包括提供强大算力的超算服务，也包括满足用户弹性需求的云算力服务，还包括面向人工智能计算的智算服务等。

算力多元分散特征既反映了计算网络化的趋势，也对计算资源的管理、调度等提出了新的挑战。

2. 网络广域互联

网络广域互联特征是计算网络化的一个重要特征，它指的是计算网络中不同算力中心之间可以通过高速网络连接实现互通，同时还能够在多方面广域协同互联的基础上更好地实现资源共享、任务协同等目标。

在高速网络连接方面，算力中心之间通过高速网络进行连接，以保证计算任务的高效执行和数据的快速传输。这些高速网络通常具有较高的带宽和较低的延迟，可以实现快速的数据传输和响应。同时，这些高速网络也需要支持多种通信协议和安全机制，以确保网络的稳定性和安全性。

在广域协同互联方面，利用高速互联网络，算力中心之间从资源、数据等多个层面实现跨域的协同互联。例如，在资源协同方面，可以利用资源虚拟化技术将分布在不同地方的计算节点组织成虚拟的计算资源池，实现资源的共享和调度；在应用协同方面，可以利用容器化技术将应用程序封装成容器，实现跨平台和跨云的部署和管理；在服务协同方面，还可以在在不同的算力中心部署分布式计算服务，实现计算任务在不同算力中心上的分布式协同执行，提高计算效率和可靠性。

网络广域互联特征提供了更加灵活、高效的资源管理和调度方式，同时也为不同应用场景下的计算任务提供了更加多样化的执行模式。

3. 资源弹性供给

资源弹性供给特征是指构建云化环境，基于资源虚拟化技术实现跨域资源聚合，并能够根据用户需求和应用负载等因素实现资源的弹性调度和供给。

在资源聚合方面，可以利用虚拟化技术实现计算、存储、网络的资源聚合。计算网络化中的云化环境通常采用资源虚拟化技术将分布

在不同地方的物理资源汇聚成虚拟的资源池，以便于用户快速获取和使用资源。这些虚拟资源可以根据用户需求实现动态分配和管理，用户可以根据自己的需求灵活选择不同类型和规模的虚拟资源，并可以跨域地访问和使用这些资源。

在弹性调度方面，计算网络化中的云化环境通常可以根据用户需求和应用负载等因素实现资源的弹性供给和调度。例如，当应用负载增加时，云环境可以自动调整资源供给，以满足应用的需要；当负载减少时，云环境可以自动释放多余资源，以节约成本。这种资源弹性调度的特征不仅可以提高资源利用率和成本效益，还可以满足不同用户和应用的需求，提高服务质量和用户体验。

资源弹性供给特征提供了更加灵活、高效的资源管理和调度方式，同时也为不同应用场景下的计算任务提供了更加多样化的执行模式。

4. 服务多维一体

服务多维一体特征是指计算网络化中的算力服务从单节点多层次供给模式向多节点一体化服务平台模式转变，最终实现算力服务的多维一体。

在多层次算力供给方面，单算力中心应从基础设施、平台和应用等多个层次为用户提供算力服务。在基础设施服务方面，应提供包括计算、存储和网络资源在内的基础资源服务能力；在平台服务方面，应提供包括云计算平台、人工智能平台、大数据平台等各类开发平台能力；在应用服务方面，应面向行业应用提供行业及应用平台服务能力。

力。通过不同层次的算力服务能力，算力用户可以快速利用算力资源构建所需的行业应用。

在一体化算力服务方面，在网络互联互通、资源协同共享的基础上，构建跨各类算力中心的一体化算力服务能力。算力服务的一体化既包括算力资源的全面整合，也包括算力服务能力的全面升级。算力用户可以通过统一的算力服务平台，根据地理位置、资源类型、配套软件等不同因素进行选择，快速构建应用。与此同时，算力用户还可以通过统一的服务门户进行运维管理与安全防护。

服务多维一体特征为用户提供了更加全面、便捷的服务支持，同时也为服务提供商提供了更加灵活、高效的服务管理和调度方式。

5. 应用规模部署

应用规模部署特征是指行业应用从定制化的应用按需部署方式转向规模化的应用分布式部署方式，实现应用的规模化和灵活部署。

在应用按需部署方面，算力用户可以根据地理位置、数据存储位置、资源类型、开发环境等各类因素，选择合适的算力中心快速部署应用。服务提供商可以将应用部署运行在不同的算力中心上，不同算力中心的应用可以按需进行协同联动，满足不同地区的用户需求。例如，可以在不同地区的算力中心上部署直播互动服务，根据不同区域用户人数、使用习惯，调整应用的算力资源配置。

在应用分布式部署方面，针对计算量大且存在跨域协作需求的应用，可以将应用分解为多个计算任务，由不同的算力中心协同计算。

例如，一个应用所需处理的数据存储在广域分散的不同位置，可以将数据处理任务按照数据存储位置进行划分，将不同的处理任务分发到不同的算力中心节点进行计算，避免大量数据在网络中的传输，提高计算效率。

应用规模部署特征为用户提供了更加灵活、范围更加广泛的应用部署服务，同时也为应用提供商提供了更加便捷、高效的应用部署和管理方式。

三、计算网络化典型实践

(一) 概述

全球各国在计算网络化技术探索中纷纷取得突破。美国能源部资助 ESnet 建设，我国各网络运营商积极探索算力网络发展，旨在构建算力中心间的高速可靠网络连接，实现算力资源间的全面互联互通；美国“研发基础设施（RDI）国家战略”、“美国国家人工智能研究资源(NAIRR)”计划、中国“国家超算互联网”、“中国算力网—智算网络”等都是各类算力的计算网络化发展关键战略布局。

如图 4 所示，本报告重点分析对比了云算力、边缘算力、超算算力、智能算力四类主要算力的网络化发展的典型实践^[2-5]。分布式云等不同典型实践具备不同特征，根据时延等级可分别支持冷、温、热等业务类型，满足政企、金融、互联网、交通、制造、能源、材料、气

象、生物等不同行业差异化需求。

	算力多元分散	网络广域互联	资源弹性供给	服务多维一体	应用规模部署	服务类型	应用场景覆盖率	典型行业应用
分布式云	以云计算中心为基础，算力资源异构	多云互联互通、多层次高效协同	支持资源虚拟化、统一管理、弹性调度	资源、数据、服务、应用、运维、安全、调度等多维度服务统一管理	支持应用规模化、分布式部署	温业务（时延相对敏感业务）	40%-50%	政企、金融、公有云、网站、视频、游戏、交通
边缘计算	涵盖云计算中心、边缘计算中心，算力资源异构	算力中心互联互通、多层次高效协同	支持资源虚拟化、统一管理、弹性调度	提供高效算力、海量接入、安全防护、智能分析等融合服务	应用按需部署	热业务（低时延业务）	10%-20%	金融、网站、视频、电商、游戏、交通
高性能计算云	涵盖超算中心、云计算中心，算力资源异构	算力中心互联互通、多层次高效协同	支持资源虚拟化、统一管理、弹性调度	提供完整的数字化运营服务平台，提供作业、用户、费用、文件等多维一体的算力服务	支持规模化、亲和性部署	冷业务（时延不敏感业务）	10%-20%	制造、能源、材料、气象、生物、视频
智能计算	涵盖超算中心、超算中心、云计算中心、边缘计算中心，算力资源异构	高速网络互通，算力中心协同互联存在挑战	支持资源虚拟化、统一管理、弹性调度	提供资源管理、算力、数据、算法一体化的服务能力	按需定制化部署	冷业务（时延不敏感业务）	10%-20%	视频、AI、游戏、制造、交通、农林、医疗

图 4 计算网络化典型实践对比

(二) 分布式云

1. 实践背景

过去的十年是云计算迅猛发展的十年，全球云计算市场规模持续增长。在我国，云计算市场从最初的十几亿规模增长到 2021 年的 3200 余亿规模。同时，云计算政策环境日益完善，企业上云进程进一步加速，云计算技术日趋成熟，其应用范围也从互联网行业扩展至政务、金融、工业、能源、交通、医疗等传统行业。随着数字经济的蓬勃发展，云计算与各行业深度融合，成为企业数字化转型的核心平台。

在数字化浪潮下，5G 和物联网的规模化部署落地，推动了边缘云的建设需求急剧增加，云边协同已成为重要趋势。为应对企业混合

多云部署模式、应用高可用容灾等差异化需求，云计算从过去单一数据中心的部署方式逐渐向多个物理位置的数据中心部署转变，同时也从中心化架构扩展为分布式架构。在这种背景下，分布式云的概念应运而生，并成为云计算未来重要的发展趋势^[2]。

2. 基本概念与参考架构

国内外研究机构、标准组织和企业提出分布式云概念，并开展标准化定义。国外研究机构 **Gartner** 对于分布式云的定义：将公有云服务(通常包括必要的硬件和软件)分布到不同的物理位置(即边缘)，而服务的所有权、运营、治理、更新和发展仍然由原始公有云提供商负责。**Gartner** 认为分布式云解决了用户让云计算资源更靠近数据和业务产生的物理位置需求，实现业务低时延、降低数据成本、做到数据本地存储。但 **Gartner** 对于分布式云的定义仍局限于公有云厂商提供，并且缺少统一管理

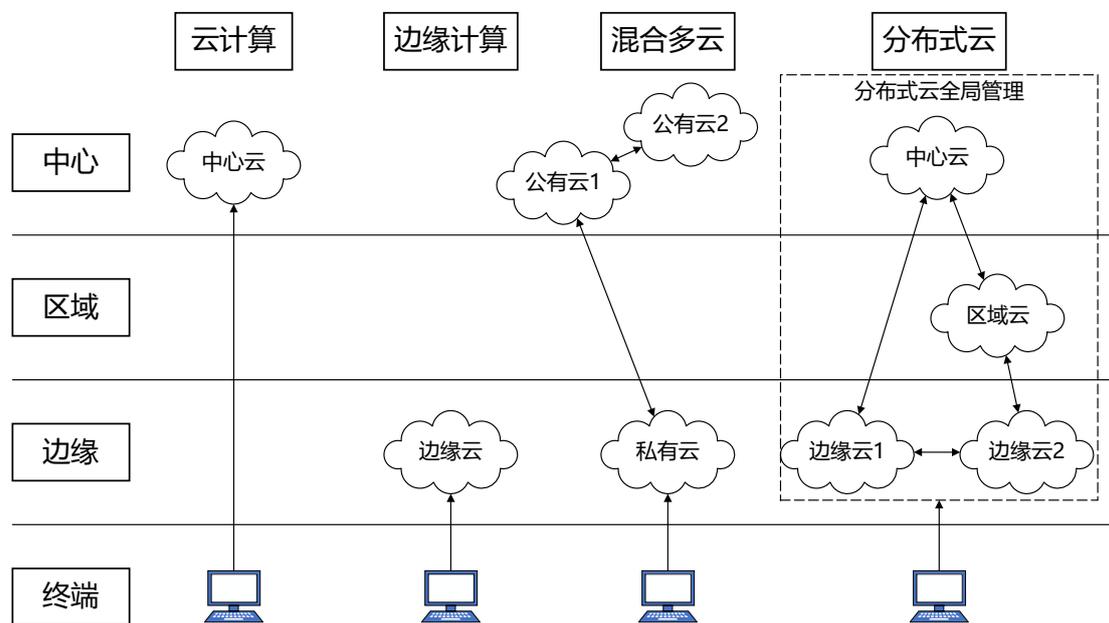


图 5 分布式云参考模型

中国信息通信研究院 2019 年在 ITU-T 联合立项《分布式云全局管理框架》国际标准，进一步明确分布式云标准定义：分布式云是一种将云服务按需部署到不同地理位置，提供统一管理能力的云计算模式。分布式云落地形态可表现为中心云、区域云和边缘云，如图 5 所示^[2]。

- **中心云**具备对不同地理位置物理和虚拟资源池管理能力；
- **区域云**将中心云全部或部分云服务部署在特定区域，以支持用户业务对云服务定制化需求；
- **边缘云**位于尽可能靠近事物和数据源头的网络边缘侧位置，提供可弹性扩展的云服务能力，具有以提供快速响应时间、低延迟和轻量计算等的云服务特点，并能够支持与中心云或区域云进行协同。

分布式云摒弃了公有云、私有云、混合云、多云等分类，而是将地理位置作为考量因素，为用户提供不同位置的云资源统一管理平面。

3. 分布式云与计算网络化的关系

分布式云是云计算网络化的一种典型实践，它通过网络连通多个云计算中心，并统一管理和弹性调度多云上的资源，为用户算力、数据、管理、安全、运维一体化的云服务能力。分布式云体现了计算网络化的多项特征。

在算力多元分散方面，分布式云以云计算中心为基础，按地理位置分为中心云、区域云、边缘云等，且各云计算中心内算力资源异构多样。分布式云统一管理多云中分散、多元的算力资源，向用户提供云计算服务。

在网络广域互联方面，分布式云基于高速网络连接各个云计算中心，实现多云间的互联互通，支持多云在资源、数据、应用、服务等多层级的高效协同。

在资源弹性供给方面，分布式云作为云计算的发展和演进，具备云计算技术的资源虚拟化能力，可向用户提供弹性可扩展的资源服务能力。

在服务多维一体方面，分布式云通过全局管理平台提供对中心、区域、边缘全局统一管理能力，实现了分布式云在资源、数据、服务、应用、运维、安全、调度等多维度服务统一视角管理。

在应用规模部署方面，分布式云向用户提供应用按需、弹性部署

服务，同时分布式云具备分布式部署能力，可实现应用在多云上的规模化、分布式部署。

(三) 边缘计算

1. 实践背景

数字经济成为构建新发展格局的关键支撑。党的十九届五中全会提出，要加快构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局，把实施扩大内需战略同深化供给侧结构性改革有机结合起来，以创新驱动、高质量供给引领和创造新需求。数字化转型过程将以信息技术，特别是新一代信息通信技术为基础。

在数字经济发展需求的驱动下，新建数据量将超过过去 30 年的总和，娱乐数据将保持主体地位，生产数据占比将持续增长。数字经济时代，80%的数据和计算将发生在边缘。作为行业数字化转型的基础赋能平台，边缘计算通过网络边缘位置，为各类行业用户提供数字化、网络化、智能化服务，以满足行业数字变革过程中在低时延、大带宽、智能分析、海量数据、安全可信、高效算力等不同方面的差异化需求^[3]。

全球各国积极推进边缘计算的战略布局。以美国、欧洲为代表的发达国家，均将边缘计算列入产业数字化转型中的关键环节和技术进行统筹部署，并积极推进创新应用。我国高度重视边缘计算的发展，近期工信部印发了《5G 应用“扬帆”行动计划（2021-2023 年）》、《新

型数据中心发展三年行动计划（2021-2023 年）》、《工业互联网综合标准化体系建设指南（2021 版）》等相关文件，积极推进边缘计算在工业互联网等多个领域的技术、标准与产业发展。

2. 基本概念与参考架构

在全球数字经济浪潮和各国战略布局的推动下，边缘计算技术与产业飞速发展，边缘计算的内涵与架构已形成行业共识，如图 6 所示。各类端侧设备通过多种协议接入边缘侧，实现统一管理和业务交互。在边缘侧与端侧间通过边云协同技术，实现云侧的统一纳管和边缘侧的智能化部署，满足各类应用场景需求。网络作为云、边、端之间互联互通的“桥梁”，为三者间协同联动提供必要基础。

在边缘计算分类方式上，Linux 基金会的 LF Edge 根据部署的位置，将边缘计算划分为用户边缘和服务提供商边缘两类。其中，用户边缘包括端侧设备、网关设备以及边缘数据中心等；服务提供商边缘包括访问边缘和区域边缘等。按照技术实现方式，边缘计算可分为运营商边缘、云边缘和工业边缘三类，且已在垂直行业不同场景中广泛应用。

- **运营商边缘**：基于运营商网络，在基站、中心机房等位置部署计算资源，提供边缘服务。
- **云边缘**：云服务商基于 CDN 节点和网络构建，通过虚拟化技术，将算力“下沉”到距离用户较近的城域内，构建边缘服务能力。

- **工业边缘:** 通常在工业企业内部构建边缘基础设施, 面向“人、机、料、法、环”产品质量管理全环节, 部署边缘应用, 实现 OT 与 ICT 的深度融合。

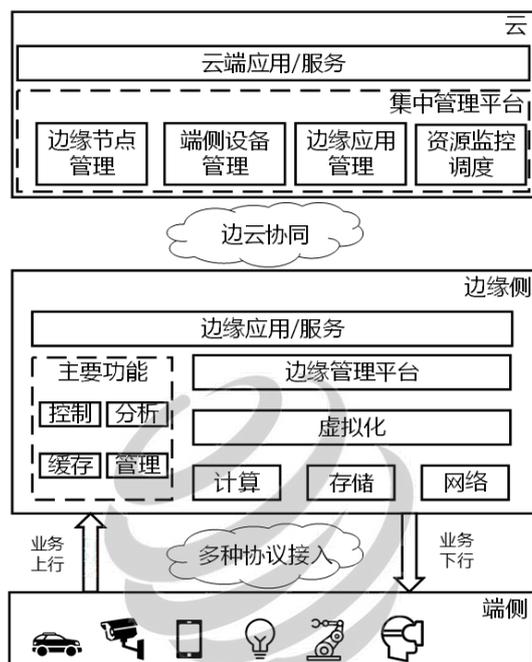


图 6 边缘计算参考模型

3. 边缘计算与计算网络化的关系

边缘计算聚合分散边缘计算节点的异构算力资源, 以网络连通云、边、端实现协同联动, 基于资源虚拟化技术实现资源的池化和统一分配, 提供数字化、网络化、智能化服务, 边缘计算涵盖计算网络化多项特征。

在算力多元分散方面, 边缘计算的算力资源广泛分布且多元异构, 并且边缘计算具备云边协同、边边协同、云边端一体化^[6]等多种服务模式, 算力中心角色多样, 可满足用户差异化、定制化需求。

在网络广域互联方面，单一边缘计算节点的算力资源规模有限，因此往往采用云边、边边协同的服务模式，以高速网络连接为基础，协同利用多算力中心的算力资源，向用户提供低时延、多样化的服务能力。

在资源弹性供给方面，边缘计算以虚拟化技术为基础，实现分散异构资源的池化，进而支撑资源的统一管理与弹性调度。

在服务多维一体方面，边缘计算与 5G、人工智能等新一代 ICT 技术融合创新，提供高效算力、海量接入、安全防护、智能分析等融合服务能力。

在应用规模部署方面，边缘计算算力资源有限，通常采用按需部署模式，以合理利用算力资源、满足用户定制化需求。

(四) 高性能计算云

1. 实践背景

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^[4]。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。

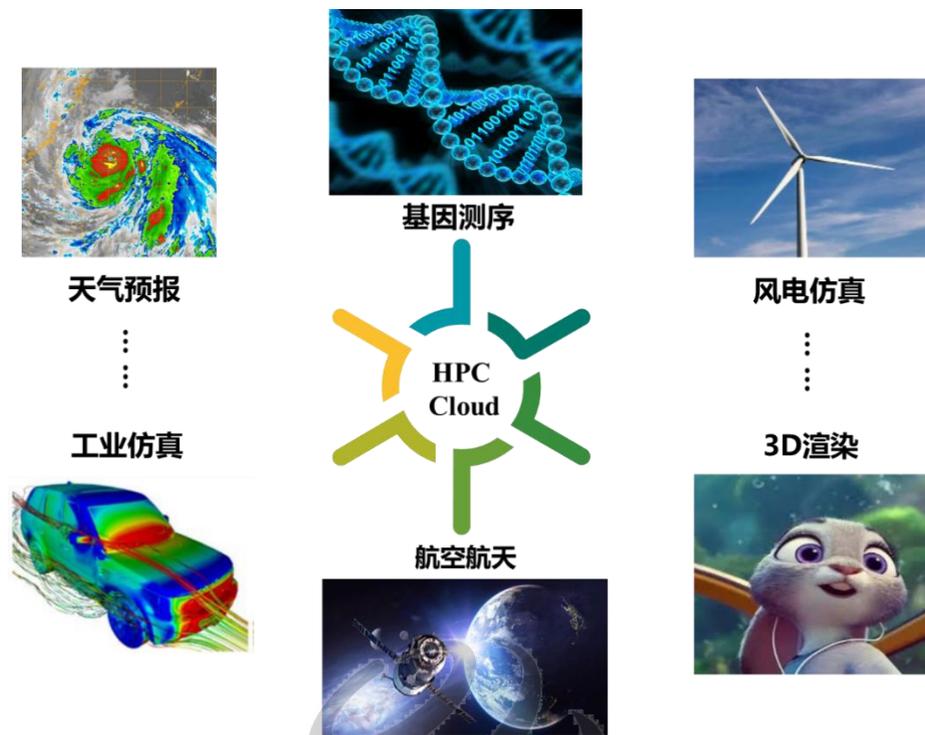


图 7 HPC Cloud 满足各行业算力需求

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，如图 7 所示。

2023 年 4 月，国家科技部启动“国家超算互联网”部署工作。超算互联网是以互联网的思维运营超算中心，并连接产业生态中的算力供给、应用开发、运营服务、用户等各方能力和资源，构建一体化超

算算力网络和服务平台。国家超算互联网是继 HPC Cloud 之后，高性能计算网络化的进一步发展升级，将可形成技术先进、模式创新、服务优质、生态完善的总体布局。

2. 基本概念与参考架构

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 8 高性能计算云参考模型

如图 8 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：

- **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。
- **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。
- **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。

3. 高性能计算云与计算网络化的关系

高性能计算云是超级计算网络化的一种典型实践，它通过统一管理和分配多种异构算力资源，基于高速网络连接算力中心，结合云计算技术实现资源弹性供给，提供完整的服务链条和分布式部署技术，体现了计算网络化的多项特征，为用户提供了高效、灵活、可扩展的

高性能计算服务。

在算力多元分散方面，高性能计算云涵盖超算云、云超算、多云互联等多种产品形态，广域分散的算力中心在高性能计算云中具有不同角色，并且算力中心内多元异构的算力资源可被统一管理和分配，方便用户按需选择算力资源。

在网络广域互联方面，高性能计算云基于高速网络连接各个算力中心，实现算力中心间高效的数据传输和消息通信，支持多算力中心在资源、数据、应用、服务等多层级的协同。

在资源弹性供给方面，高性能计算云基于云计算技术实现服务模式创新，通过资源虚拟化能力实现分散资源的聚合，并支撑资源的弹性调度。

在服务多维一体方面，高性能计算云为行业用户提供完整的数字化运营服务平台，构建多算力中心一体化的服务链条，面向用户提供作业平台、用户管理、费用管理、文件管理等多维一体的算力服务。

在应用规模部署方面，高性能计算云基于分布式部署技术，可在不同区域、不同硬件环境、不同平台上，实现高性能计算应用的规模化部署和亲和性部署。

(五) 智能计算

1. 实践背景

人工智能是新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力量^[7]。近年

来，人工智能在全球范围内的市场规模维持高速稳定增长，尤其是随着 ChatGPT 等生成式人工智能（AIGC）的落地应用，给人工智能市场带来了飞跃式发展。在中国市场，生成式 AI 的应用规模有望在 2025 年突破 2000 亿元。这一巨大的市场潜力吸引着业内龙头企业竞相推出万亿参数量级别的大模型，并且对底层 GPU 支撑规模提出了更高的万卡级别要求。然而，如何满足如此庞大规模的训练任务，对资源的规模、网络的性能、可靠性等方面都提出了前所未有的挑战。

人工智能产业的蓬勃发展为智能计算的发展提供了巨大的机遇。当前，我国人工智能技术快速发展，数据和算力资源日益丰富，应用场景不断拓展，配套政策持续完善。随着智能化社会构建需求的扩大，各行业各领域对智能算力的需求日趋强烈，全国范围内掀起了智能计算中心的建设浪潮，智能算力规模迅速扩大，智能计算服务赋能各产业智能化创新发展。

2021 年底，鹏城实验室牵头成立了人工智能算力网络推进联盟，推进各地人工智能计算中心联接成网，打造“中国算力网—智算网络”，标志着人工智能计算中心正逐步走向人工智能算力网络，智能计算服务网络化已成为智能计算的重要发展方向^[8]

2. 基本概念与参考架构

智能计算中心基于人工智能理论、采用人工智能计算架构，通过高性能网络实现智算中心间的高效协同，并提供包括算力服务、数据服务和算法服务等智能计算服务。智能计算服务参考模型如图 9 所

示。



图 9 智能计算服务参考模型

- **资源服务**：提供智算中心内存储、计算、网络资源的统一管理、调度与分配。
- **算力服务**：用户无需关注底层算力芯片和技术细节，只需通过选择业务场景、算法模型等，获取服务方案，驱动 AI 模型进行数据深度加工。
- **数据服务**：为用户提供多元化的数据服务，例如数据存储、数据接入、数据管理等。
- **算法服务**：用户可专注于自身领域的业务逻辑和数据，依托智能计算服务提供的语音、图像、自然语言处理、决策等领域的算法能力，实现低成本、低门槛的 AI 模型训练。
- **协同互联服务**：智算中心间通过高性能网络互联，打通智能

算力的生产供应，支撑数据开放共享，支持 AI 大模型协同训练、联邦学习等典型应用场景。

3. 智能计算与计算网络化的关系

以“中国算力网—智算网络”为代表的智能计算服务，畅想了智能计算网络化发展的未来趋势。多个广域分散的智算中心、超算中心、云算中心、边缘计算中心通过网络协同互联，实现异构算力资源的聚合和智能化分配，向用户提供算力、数据、算法一体化的智能计算服务。

在**算力多元分散**方面，智能计算服务可分布在智算中心、超算中心、云算中心、边缘计算中心，算力中心角色多样，且中心内部涵盖 CPU、GPU、TPU 等各类异构算力资源。

在**网络广域互联**方面，提供智能计算服务的算力中心间可通过高速网络实现互通，AI 大模型训练、联邦学习等应用的出现也给智算中心通过网络协同互联带来了较大挑战^[9]。

在**资源弹性供给**方面，智能计算服务基于资源虚拟化能力实现分散异构算力资源的池化，从而支撑资源的统一分配和弹性调度。

在**服务多维一体**方面，智能计算服务为用户提供资源管理、算力、数据、算法一体化的服务能力，并正积极开展智算中心协同互联能力探索与演进。

在**应用规模部署**方面，当前智能计算服务大多采用定制化部署模式，随着多智算中心互联的演进发展，智能计算服务的应用多中心规

模化部署能力也将逐步完善。



算网融合推委会
CCNIS

四、计算网络化应用案例

(一) 超算互联网应用方案

1. 应用场景与需求

超级计算是推进大科学计划和大科学工程研发的重要支撑，是数字经济发展的重要引擎，是支撑综合国力提升的国之利器。随着我国科技、经济水平的不断提升，过去十年我国的超算事业迎来了飞速发展，我国超算的发展已从“跟跑”转向“并跑”和部分“领跑”的阶段。然而受限于对网络技术的投入，我国超算互联网的发展较发达国家有很大差距，这制约了国家对超算中心的宏观布局、超算中心之间的资源调配和协同计算，以及超算算力的输送。在未来算力需求持续增加的情况下，构建“超算互联、云边协同；超算为主，边端补充”的分布式超算算力部署方案，探究算力—网络融合的全局资源高效组织供应极为必要。

2. 典型案例

如图 10 所示，超算互联网应用方案提出了“算力生产-算力互联-算力配给”融合的超算互联网体系结构，涵盖算力和网络异构资源，覆盖算力资源从产生到传送再到应用全部生命周期。如图 11 所示，方案提出了优化的超算互联网直连网络拓扑，在给定节点数量和网络连接约束情况下可获得最优或接近最优的网络性能。

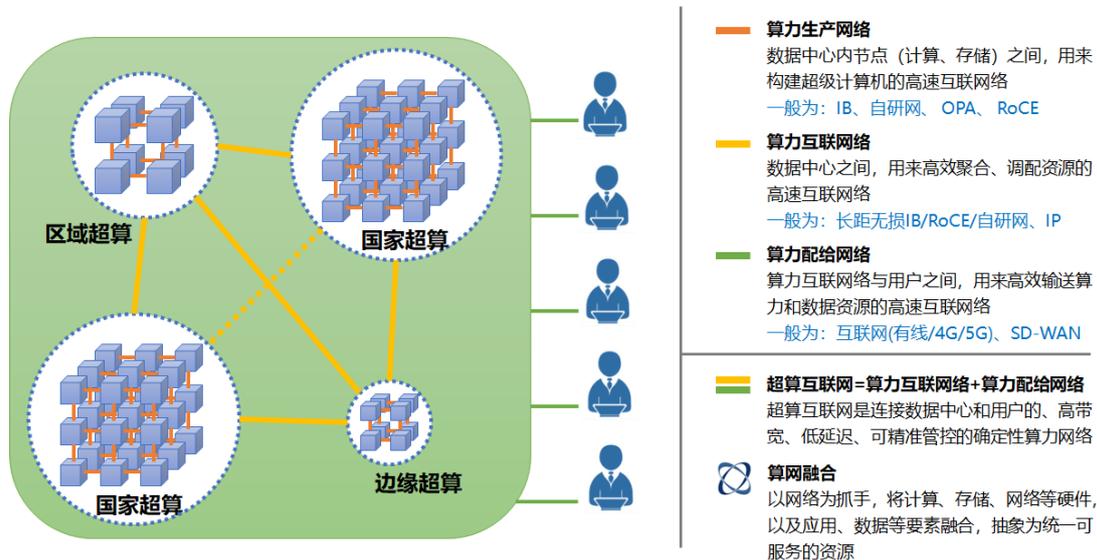


图 10 “算力生产-算力互联-算力配给”融合的超算互联网

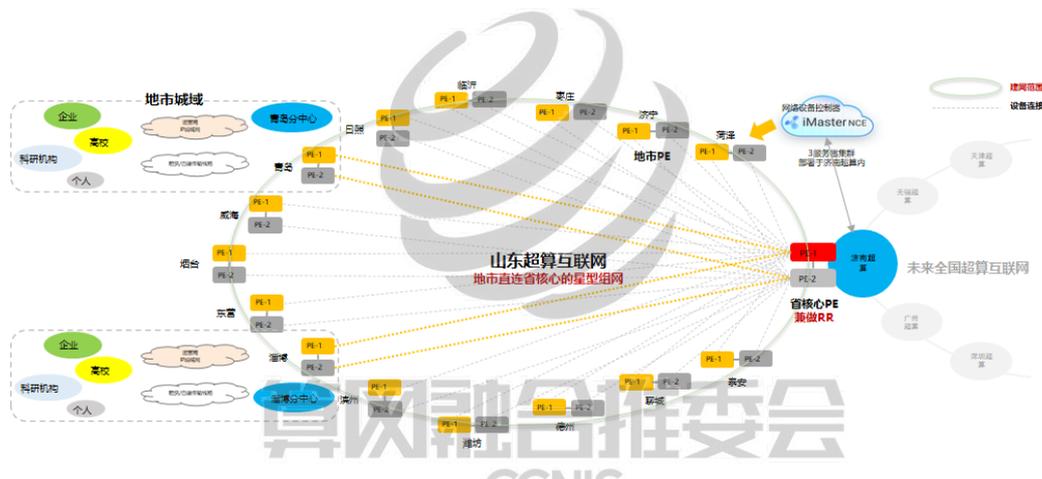


图 11 超算互联网直连网络拓扑

如图 12 所示，方案将区块链技术引入超算互联网多中心用户访问身份认证中，设计了基于身份链的跨域身份认证方案，提出了基于属性签名的跨数据中心身份认证方法，支持跨中心高效身份认证；设计了基于属性和 LDAP 的细粒度访问控制框架，可有效支持跨数据中心的访问控制；提出了基于区块链的公平支付、基于群签名的区块链匿名交易监管解决方案，支持无需可信第三方监督执行、隐私保护的

区块链交易监管；设计了基于联盟链的跨中心的用户认证和访问控制方法，实现跨中心的资源协同、可信计费和快速清分。

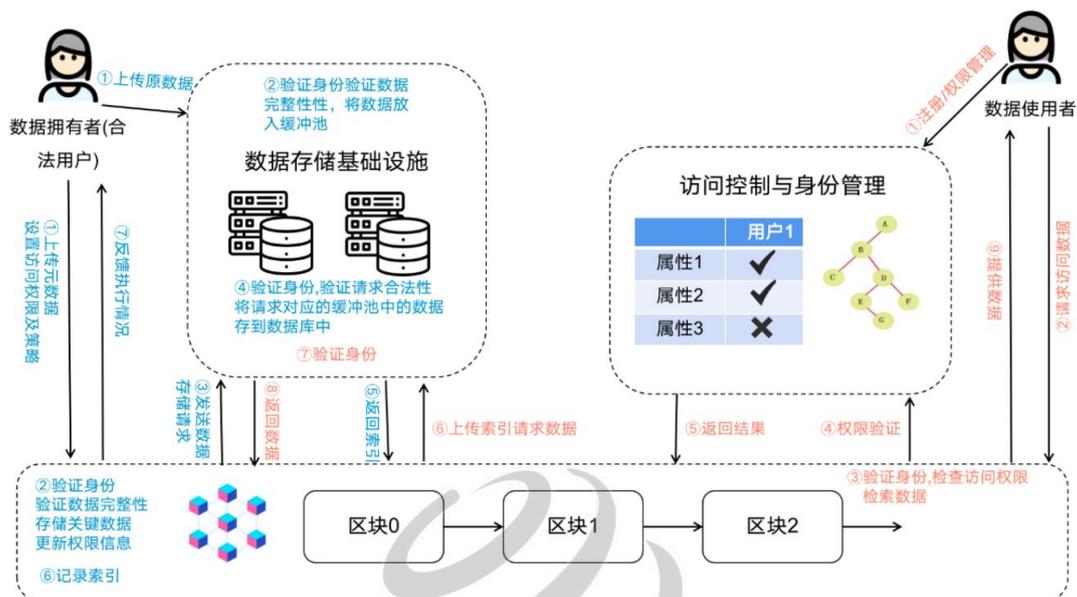


图 12 基于区块链的数据共享访问控制机制

通过超算互联网关键技术研发和试验网建设，以济南、青岛为两极，覆盖山东的超算格局正逐步构建，以基础科学研究、生态环保、高端装备、新能源新材料、健康医疗、大科学计划等应用需求为核心，满足国家省市等重大战略和工程的计算需求。

(二) 工业制造领域智能质检方案

1. 应用场景与需求

计算机、通信、消费类电子等 3C 产品通常对精密度和外观要求非常高，而微小结构件检测产量大、人力耗用巨大，缺陷类型多、数据无法收集，人工检测已经成为制造业效率提升和成本降低的瓶颈。

工业 AI 质检解决方案中通过边缘计算技术能够对 5G 传输来的数据做到实时分析处理，保障工厂生产效率的同时实现无人化质检。通过机器视觉+人工智能深度学习算法能够处理很难提取的特征如产品表面的细小瑕疵，同时能够消除由于拍摄、光源、对焦等一系列问题，带来的影响。

2. 典型案例

在服务器、计算机等硬件生产过程中，服务器组装、质检等环节主要依靠人工操作，前一生产环节完成后通过 AGV 小车自动运输到下一生产环节，形成一套完整的生产线。服务器组装完成后，通过 AGV 小车自动运输到 PQC 班检台，通过扫码枪人工扫码获取该型号服务器检测项（看板显示质检内容），员工根据检测项对服务器进行相应检测（整个检测过程持续几分钟），检测通过后，拍照留底（三张照片，上方、前后侧），如检测到缺陷则人工处理通过后再拍照留底。PQC 班检内容包括核对机器配置、看下线缆是否安装到位、线缆/板卡/内存安装位置是否正确、标签粘贴是否正确、散热器安装是否正确等。简单来说，在生产过程中，散热器在组装时存在正反面装反的情况、部分 CPU 存在弯针问题、标签及 logo 错误、主板螺丝数量不足以及设备划伤等情况，通过人工检验效率低、长时间存在视觉疲劳、容易误判。

针对以上需求，计划通过 5G+边缘计算+人工智能技术，利用散热器现有正反面区分标识进行自动判别，对常见 CPU 弯针情况进行

检测与识别以及对标签、logo、主板螺丝数量、划伤等情况进行自动化识别与检测，减少硬件故障率，提高质检效率，提升工作质量与自动化程度。

如图 13 所示，通过 5G 网络基础设施，在边缘侧搭建 5G 工业质检平台，利用视觉检测技术实现产线的智能质检，提升质量稳定性和质检准确度。通过云端协同管理系统在边缘节点侧的调度协同、数据协同与中心云侧的调度协同、数据协同相结合，提供的云端训练及分发算法、边端计算及应用，满足各类质检场景需求。

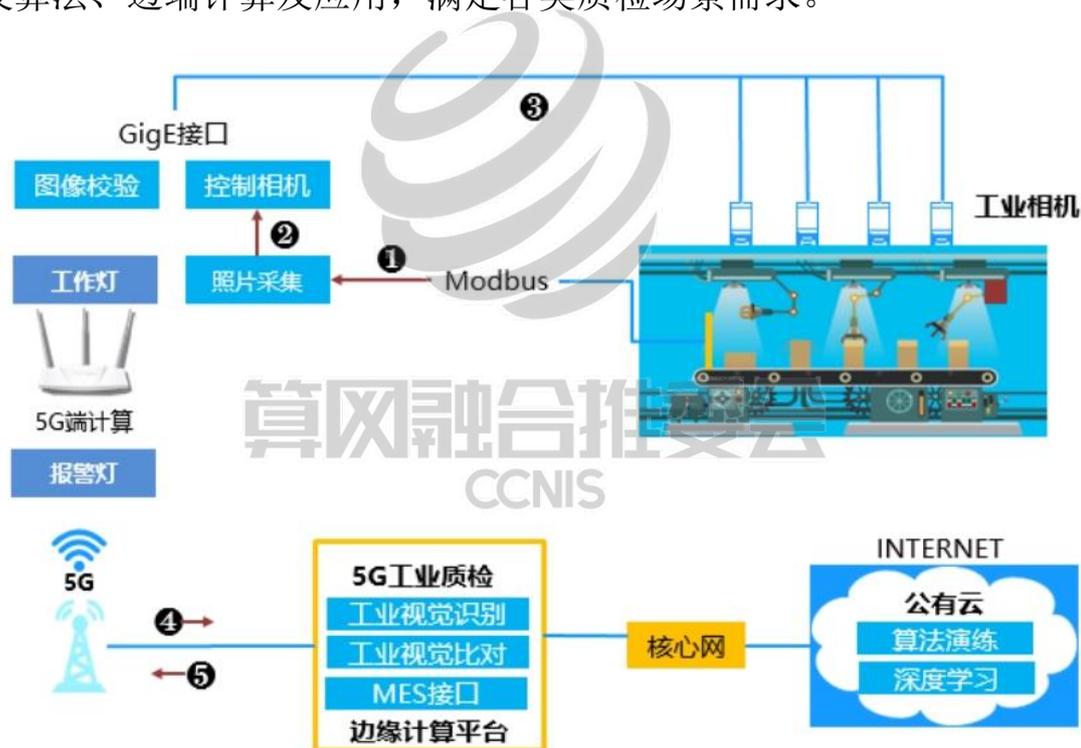


图 13 工业质检典型场景部署架构

基于 5G、AI、边缘计算、机器学习等新兴技术，结合某产业园 K1 工厂服务器等产品生产制造过程中面临的实际问题，打造集数据采集、数据传输（5G 网络）、缺陷检测、质检结果反馈、展示与统计

等全流程贯通的 5G+工业视觉质检平台，自动识别检测 K1 工厂在生产服务器等硬件产品过程中风扇装反、标签遗漏等情况，有效解放人力，提高质检效率、提高生产效率，提升产品合格率，提升工作质量与自动化程度，助力工厂数字化转型升级。

(三) 音视频领域边缘 VR 方案

1. 应用场景与需求

在全球移动产业迈向 5G 的背景下，运营商正加大力度，积极探索 MEC 技术在各种行业应用中的价值，并希望通过 MEC 和 5G 技术进一步推动 IT 与 CT 的融合。对运营商而言，可以充分利用边缘计算探索新的应用场景，发挥云、边缘、核心电信网络的集成优势，为自身提供更加广阔的发展空间。

在众多“5G+MEC”的行业应用中，视频类应用占比较大。当前，超高清视频业务在低时延、大带宽、高并发方面需求强烈，要求运营商的 MEC 节点应具备按需提供计算、存储能力，并可支持通过云边协同提升业务服务能力。新兴的 AR/VR 类业务，需要支持用户以自然的方式与虚拟环境中的物体进行交互操作的重要方式。在时延和带宽等方面，不同的沉浸体验程度对于运营商网络提出了更高的要求。

2. 典型案例

如图 14 所示，面向 5G+VR 内容服务，建立基于固移融合的服务能力。利用 5G MEC 资源，在本地 DC、边缘 DC、接入机房等多

位置搭建云渲染资源节点，支撑广大移动网络用户对于 VR 实时渲染业务的需求；同时利用 5G MEC 建立 vCDN 资源，并结合 5G 网络切片技术，开辟独立的网络资源，实现 5G 承载 IPTV 业务。

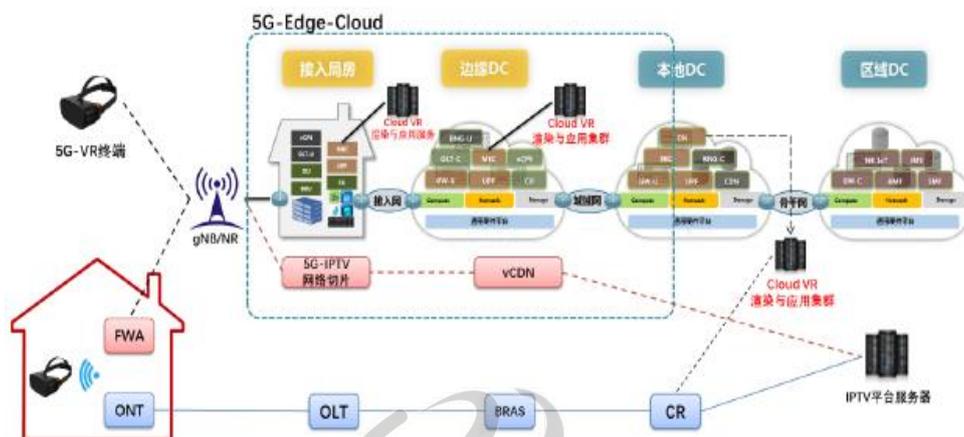


图 14 “5G+云 VR” 网络架构

边缘 VR 平台实现了应用管理、云渲染/云流化平台管理、云渲染/云流化资源监控、统一门户配置系统、业务管理系统、探针监测系统六大功能，可自动调节带宽、视频码率，调节终端显示分辨率，通过对用户行为预判，完成视频定向传播，从而降低了内容传输带宽和终端界面压力，实现低成本，高品质的视频内容展现。

五、计算网络化发展趋势展望

(一) 建立健全标准体系，引导计算网络化良性发展

当前，各国家和组织机构均将计算网络化作为重要战略部署，但各类算力服务能力差异化明显、质量良莠不齐。构建完善的计算网络

化标准体系，通过健全的服务能力与服务质量评价标准，对云算力、超算算力、智能算力、边缘算力等不同算力体系进行整合统一，是引导计算网络化良性、规范发展的基本前提和根本保障。

（二） 加速构建网络基础设施，推进算力全面互联

与发达国家相比，我国网络基础设施的建设部署严重滞后，现有网络资源不足。通过结合 SDN/NFV、SRv6、算力网络等未来网络技术，建立跨地域算力中心高速互连网络基础设施，改善算力中心之间的网络互连条件，提升环境网络互连的性能和数据传输的安全性，是实现算力全面互联、协同的重要基础。

（三） 夯实计算网络化技术底座，实现多元算力一体协同

计算网络化发展汇聚多元泛在算力，提供一体化算力服务，在满足用户差异化需求的同时，也带来了多元算力异构和跨域算力协同的挑战。开展计算网络化技术体系研究，突破跨域协同计算架构、异构算力统一管理调度等关键技术，以加速计算网络化发展，支持多元泛在算力一体化、协同化服务。

（四） 智能算力全面发力，助力 AI 大模型应用落地

随着 AI 大模型应用的横空出世，智算算力迎来全面发展期。伴随着智算中心网络全新升级、异构算力一体协同技术演进，智能计算网络化必将得到长足发展。在未来，智能计算网络化技术将不断创新

演进，成为 ChatGPT、Copilot、文心一言等 AI 大模型应用落地实践的重要“助推器”。

缩略语

3C		
3D	3-Dimension	三维
5G	The 5th Generation Mobile Communication Technology	第五代移动通信技术
AGV	Automated Guided Vehicle	自动导引运输车
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AIGC	Artificial Intelligence Generated Content	生成式人工智能
AR	Augmented Reality	增强现实
CDN	Content Delivery Network	内容分发网络
CPU	Central Processing Unit	中央处理器
CT	Communications Technology	通信技术
DC	Data Center	数据中心
EFlops	Exa-floating-point operations per second	每秒 10^{18} 次浮点运算
GDP	Gross Domestic Product	国内生产总值
GPU	Graphics Processing Unit	图形处理器
HPC	High Performance Computing	高性能计算
ICT	Information and Communications Technology	信息通信技术
IDC	Internet Data Center	互联网数据中心
IPv6	Internet Protocol Version 6	互联网协议第 6 版
IT	Internet Technology	互联网技术
MEC	Multi-access Edge Computing	多接入边缘计算
NFV	Network Functions Virtualization	网络功能虚拟化
OT	Operational Technology	运营技术
PC	Personal Computer	个人计算机

PQC	Process Quality Control	过程质量控制
ROMS	Regional Ocean Model System	区域海洋模拟系统
SDN	Software Defined Network	软件定义网络
SRv6	Segment Routing over IPv6	基于 IPv6 转发平面的段路由
TPU	Tensor Processing Unit	张量处理器
VR	Virtual Reality	虚拟现实技术
WEB	World Wide Web	全球广域网
WRF	The Weather Research and Forecasting Model	天气预报模式
ZB	Zetta Byte	十万亿亿字节



算网融合推委会
CCNIS

参考文献

- [1] 钱德沛, 栾钟治, 刘轶. 从网格到“东数西算”: 构建国家算力基础设施[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(9): 1561-1574.
- [2] 分布式云发展白皮书. 2022.
- [3] 边缘计算+技术白皮书. 2021
- [4] 高性能计算云 (HPC Cloud) 白皮书. 2021
- [5] 智能计算中心创新发展指南. 2023
- [6] 云边端一体化发展报告. 2022
- [7] 智能计算中心规划建设指南. 2020
- [8] 高文. 中国算力网的机遇与挑战[J]. 中国计算机学会通讯, 2023.
- [9] 面向 AI 大模型的智算中心网络演进白皮书. 2023

算网融合推委会
CCNIS

算网融合产业及标准推进委员会（TC621）

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-62300556

传真：010-62304980

网址：www.ccnis.org.cn

