



算网一体 网络架构及技术体系展望 白皮书

2022年



中国移动研究院

前 言

为推动国家新基建战略的落实和“东数西算”工程走向纵深，中国移动系统打造以5G、算力网络、智慧中台为重点的新型信息基础设施，创新构建“连接+算力+能力”新型信息服务体系，制定了算力网络总体发展策略，明确了核心理念、场景展望、发展路径以及技术体系，提出了“泛在协同”、“融合统一”和“一体共生”的三个发展阶段。

算网一体是算力网络发展的目标阶段，是计算和网络两大学科深度融合形成的新型技术簇，是融合贯通多要素的一体化服务，是实现算力网络即取即用社会级服务愿景的重要途径。本白皮书旨在面向算网一体的演进，研判基于网络 and 计算深度融合的算网一体发展路径，从网络架构及技术创新发展的角度，提出算网一体的设计原则、定义、特征以及体系架构，并以此为基础阐述了算网一体的关键技术和发展前景。

本白皮书的版权归中国移动所有，未经授权，任何单位或个人不得复制或拷贝本建议之部分或全部内容。

编写单位：中国移动研究院

目 录

目 录.....	1
1 算网一体的背景.....	1
1.1 驱动力.....	1
1.2 产业发展.....	1
2 算网一体发展研判及设计原则.....	3
2.1 趋势研判.....	3
2.2 路径研判.....	3
2.3 设计原则.....	5
3 算网一体的定义和架构.....	6
3.1 定义和特征.....	6
3.2 体系架构.....	6
4 算网一体演进的八大关键技术问题.....	9
4.1 网络和计算资源的统一度量.....	9
4.2 网络和计算的协同感知.....	10
4.3 算网一体的灵活按需调度.....	11
4.4 “转发即计算”的在网计算模式.....	11
4.5 高效公平的算网一体交易平台.....	12
4.6 算网一体的确定性服务.....	12
4.7 算网一体的自优化和自运维能力.....	13
4.8 算网一体与 6G 网络协同设计.....	14
5 算网一体的挑战和展望.....	14
缩略语列表.....	16
参考文献.....	18

1 算网一体的背景

1.1 驱动力

政策驱动：2020年4月国家发改委发布“新基建”战略，明确包含信息基础设施、融合基础设施等。2021年5月多部委联合印发《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》，提出建设全国一体化算力网络国家枢纽节点，加快实施“东数西算”工程，提升跨区域算力调度水平，构建国家算力网络体系。算力和网络作为信息基础设施的两大核心要素，通过相互促进、深度融合推动算力网络持续演进。

需求驱动：新型应用对网络 and 计算提出了更高品质要求，例如超高清AR/VR、智能驾驶、智慧医疗等要求极低时延、极低丢包、大带宽的网络资源以及高精度、低处理时延等计算资源。对网络 and 计算单方面性能优化已无法满足应用需求，且网、算资源隔离的形态不利于资源利用率的提升。业务需求驱动网、算不断融合，打破算网界限，通过算网一体提升整体性能。

技术驱动：传统网络面临单一学科理论难以突破的挑战，例如香农定理和摩尔定律已经触及极限、冯式架构出现存储墙功耗墙问题。多学科交叉融合是创新的重要途径，跨领域融合经常呈现出“1+1>2”的效果，正成为领域创新发展的新动力和源泉。随着技术的发展，DOICT融合趋势逐渐清晰，网络 and 计算一体化将助力突破单领域发展瓶颈，实现算网跨越式发展。

1.2 产业发展

随着数字经济时代新技术的不断涌现，推动基础设施、算力和网络编排、业务运营管理向算网一体化方向演进和发展。中国移动在2018年启动了算力网络关键技术算力感知网络CAN^{[1][2]}的研究、标准化和试点部署验证；2019年和2020年发布了算力感知网络系列白皮书；2021年联合华为、中兴等11家合作伙伴发布了《算力网络白皮书》^[3]，确立了算力网络为全新发展计划；2022年发布了《算力网络技术白皮书》^[4]，阐述了算力网络的十大技术发展方向和核心技术体系，包括面向算网一体的原创技术体系和技术路线。中国电信发布的《云网融合2030

技术白皮书》和中国联通发布的 CUBE-Net 3.0 网络体系中，也都把“算力网络”作为公司未来网络演进的重要方向。

国内外组织已经逐步开展在算网融合方面的工作。在国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）包含有 5 项标准的算力网络国际标准体系已初步建立，并形成统一术语——算网融合 CNC（Computing and Network Convergence），覆盖了 IMT-2020 及未来网络、NGNe（Next Generation Network Evolution，下一代网络演进）、新型计算等技术领域，涉及需求、架构、服务保障、信令协议、管理编排等方向。在国际互联网工程任务组（Internet Engineering Task Force, IETF），2019 年 2 月成立了在网计算研究组 COINRG（Computing in Network Research Group），主要面向数据中心，研究在网计算技术的需求和应用场景。2022 年 3 月，算力感知网络（Computing Aware Network, CAN）的工作组筹备会 BoF（Birds of a Feather）在 IETF 第 113 次会议中召开，引起 IETF 主席、IRTF 主席、路由域工作组主席等专家的热切关注。第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）面向 R19 也开始提出算力感知网络（CAN）等相关立项和讨论。

国内行业组织如 CCSA（China Communications Standards Association，中国通信标准化协会）、中国通信学会、网络 5.0 联盟、IMT-2030(6G)推进组纷纷启动算网一体相关标准的制定。2020 年 9 月，网络 5.0 产业联盟成立了“算力网络特设工作组”。2021 年 7 月，中国通信学会成立算网融合标准工作组，开始算网融合领域的团标制定。2022 年 1 月，CCSA 正式成立了算网融合标准推进委员会（TC621），积极推动算网融合标准实施和产业化。IMT-2030(6G)网络技术工作组已正式启动 6G 网络中的算网一体需求和关键技术研究。2022 年 1 月，中国移动牵头成立了多样性算力产业及标准推进委员会（TC622），致力于推动多样性算力软硬件生态繁荣、带动中国计算产业成熟。

2021 年 6 月，在第五届未来网络大会上，中国移动主导的《算力感知架构和技术体系创新》，成功入选中国通信学会 2021 年未来网络领先创新科技成果。同时在峰会上展示了业界首个算力感知网络概念原型系统。2021 年 9 月，在网络 5.0 产业和技术创新联盟峰会上，中国移动主导的算力网络项目《算力感知技术架构创新及标准化》和《算力路由技术创新》2 项成果入选中国通信学会 2021

年网络 5.0 领先创新科技成果。同月，中国移动联合高校自主研发的首个分布式算力路由原型和泛在调度原型在国际信息通信展览会上亮相，有力验证了算力网络可以使能新型算网联合调度，从而提供“连接+计算”的新型融合业务。

2 算网一体发展研判及设计原则

2.1 趋势研判

基于应用需求、技术发展、国家政策的多元驱动，对算网一体进行如下研判：

（一）连接要素从单一互联向多元互联转变

当前网络的连接主体呈现多元化，包括用户、算力、终端、数据等多要素均需要网络互连，网络形态也进一步向空天地海协同演变，覆盖外太空、地球空间、陆地、海洋等自然空间，为天基、空基、陆基、海基等各类用户的活动提供信息服务基础设施，其连接要素不断丰富。

（二）处理模式从“信息转发”向“信息处理”转变

随着算力从集中到分布再到立体泛在，信息处理逐渐从网络外围向网络中心演进，网络从单纯的通信网络向集通信、计算、存储为一体的信息通信网络转变。网络从连接算力，演变为感知、调度、编排算力，对内实现算力内生，对外提供一体服务。

（三）技术发展从“单领域自演进”到“跨领域多融合”转变

传统网络已面临单一学科理论难以突破的挑战，例如香农定理和摩尔定律已经触及极限、冯式架构出现存储墙功耗墙问题。解决这些问题需要科学突破，需要以网络为平台和纽带，进行跨域多融合创新。算网一体演进需要充分发挥网络领先优势，融合贯通网、云、数、智、安、边、端、链（ABCDNETS）多要素。

2.2 路径研判

算网一体的发展路径由计算和网络两大元素共同决定。从宏观上讲，能够提供算力的组成单元包括计算单元、计算芯片、计算设备、计算系统；能够提供连接能力的组成单元可以细分为片上总线、板级总线、网络设备、网络系统。从能力维度看，计算指算力，网络指连接；从实体维度看，计算和网络都有各自

的组成部分，分别提供不同的算力和连接能力。

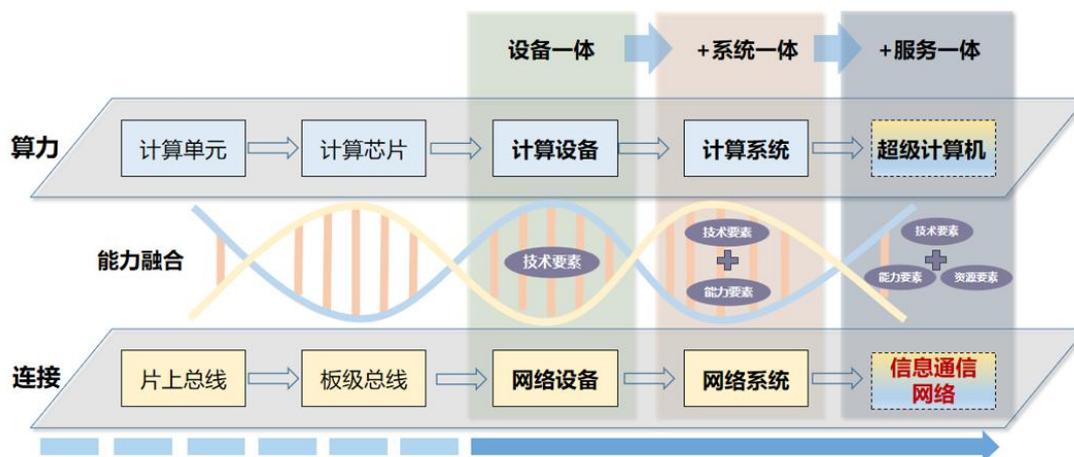


图 1 算网一体的发展路径

我们通常理解的“网”是指由多种网络设备组成，具有连接能力的基础设施。一般来讲，片上总线、板级总线都属于设备内部互联方式，不在“网”的范畴之内。因此，算网一体最基本的组成单元是计算设备和网络设备，最初开始从设备层面呈现技术要素的融合，并且随着技术要素、能力要素、资源要素的不断驱动，由设备一体向系统一体发展，最终实现服务一体。

从系统层次看，计算系统的主要代表为云数据中心，超算中心等，而网络系统的代表为互联网(Internet)以及 5G 移动通信网络。算网一体系统包含了设备级算网一体，除融合计算、网络、存储等技术要素外，还充分融合了数、智、安、链等能力要素，在表现形式方面更为丰富。目前看来，6G 网络预计将成为算网一体系统，移动通信网络系统将和分布式云系统充分融合，云、边、端算力将借助网络实现高速泛在，一体融合。

从设备层次看，算网一体主要表现在设备既具备一定信息处理功能，同时具备信息转发能力。技术要素融合在设备级算网一体中发挥着主要作用。比如算力路由、在网计算就是典型的设备级算网一体关键技术。算力路由技术，基于网络、计算、存储、服务的状态感知，将算力信息注入路由表，生成“网络+计算”的新型路由表。算力路由技术基于用户的业务请求，通过网络、计算联合路径计算，按需、动态生成业务调度策略，并实现基于 IPv6 、SRv6 等协议的可编程算力路由转发路径。在网计算技术将计算设备处理的业务卸载至网络设备，利用网络设备的闲散算力，边走边算，实现数据随转随算，开创应用、网络联合处理模式，

实现应用服务加速。

从服务层次看，算网一体服务也将逐步呈现一体化，可以实现算力如水、电一般即取即用的社会级服务。算网一体服务演进过程中，需要综合技术要素、能力要素以及能源、土地等资源要素。

从整体来看，算网一体以多要素融合、多层次服务形式从设备一体化到服务一体化演进；分开来看，呈现出以计算为主和以网络为主的两种发展路径和目标。前者演进目标是一体化超级计算机，提供强大的算力；后者演进目标是信息处理网络，通过网络实现算力原生和算力泛在。

本白皮书从网络的视角对算网一体进行思考和展望，系统梳理了算网一体的定义、架构及技术体系。

2.3 设计原则

面向算网一体演进的未來网络设计原则需要顺应 IP 网络的发展历史和趋势，同时考虑自顶向下、演进与变革共存、融合创新等原则。

（一）自顶向下原则

以架构统一牵引算网的融合设计。算网一体的网络将不再是简单的连接媒体，计算元素的引入将带来设备、协议、调度、服务等不同层面的变化，需要自顶向下的从架构出发考虑整体设计。

（二）演进与变革共存原则

平滑分阶段演进与有限域技术变革相结合。算网一体的创新很大程度上依赖于未来 IP 技术创新，IP 创新难度大、周期长，是创新中的塔尖。新技术的创新需要考虑后向兼容，在继承传统 IP 优势的基础上，实现 IP 在有限域的更灵活应用。

（三）融合创新原则

融合应用、资源多要素创新。面向算网一体演进的網絡需要充分发挥基础连接的优势，通过网络感知和融合应用需求、计算资源等多要素，实现算网共生，提供一体化服务。

3 算网一体的定义和架构

3.1 定义和特征

算网一体的定义：算网一体是算力网络发展的目标阶段，是计算和网络两大学科深度融合形成的新型技术簇，是融合贯通多要素的一体化服务，是实现算力网络即取即用社会级服务愿景的重要途径。

算网一体的特征包括：

- ❖ **设备一体化：**支持网络 and 计算相互感知、协同调度功能的新设备。通过外挂或者内嵌/内生的方式，形成支持“算力感知”、“网络感知”或“转发即计算”等的多种形态的设备硬件。
- ❖ **协议一体化：**支持算力、网络、服务等多维资源信息感知和调度的新协议，包括算力感知协议、算力路由协议、算力配置协议和算力 OAM 协议等，可通过网络协议扩展并携带计算信息，或者定义新型协议实现。
- ❖ **调度一体化：**网络 and 计算在管理调度层面打通，提供统筹考虑的序列调度能力，或“转发即计算”的原子化功能细粒度并行调度能力。网络支持考虑计算维度的全局调度，或者保障局部最优的信息调度。
- ❖ **服务一体化：**网络 and 计算服务统一入口，通过能力的相互补充和调用，面向用户提供一体的网络和计算服务。

3.2 体系架构

基于算网一体的定义和特征，本章节进一步提出了算网一体的参考体系架构，其中，形态体系、技术体系、设备体系、协议体系共同打造算网一体基础设施，支撑新能力、新服务和新生态。

算网一体的发展顺应产业、政策以及技术的多方面驱动，网络域和计算域将在广域网和局域网呈现不同的演进形态，从而催生出一系列技术体系，驱动新型算网一体设备体系的发展，新型设备之间的通信也将会构建出新的协议体系。

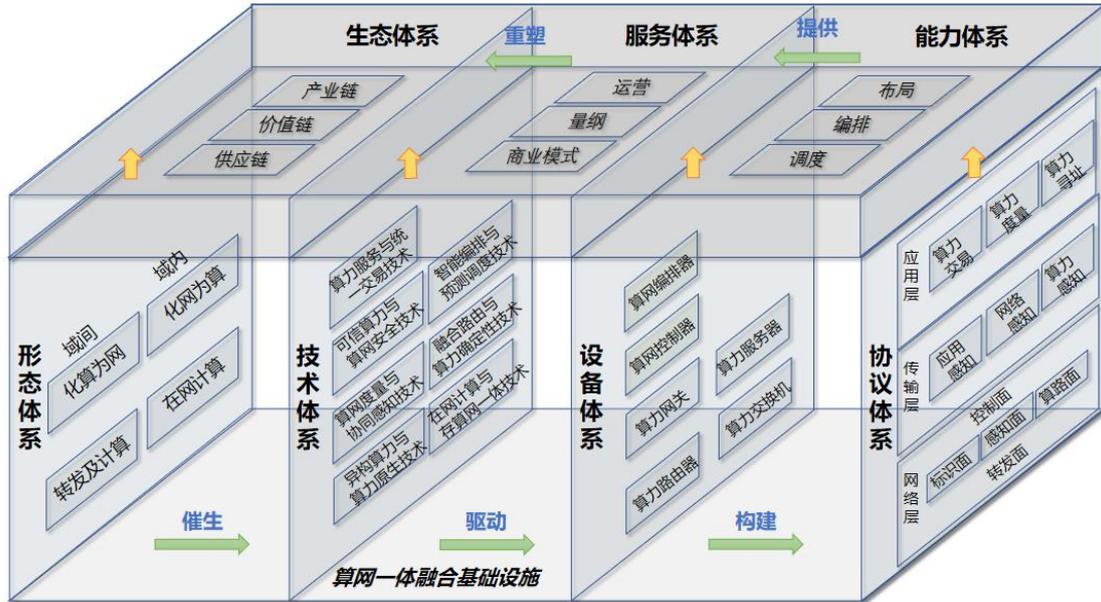


图 2 算网一体的体系架构

（一）形态体系

根据算网一体的演进路线研判，算网一体包括以网为主和以算为主两种路线。当前的网络主要包括域间的广域网连接和域内的局域网连接，广域网由于其连接范围广，计算要素相对稀疏，仍然主要保持“网”的特性；局域网由于其连接范围有限，计算要素相对密集，将更多呈现“算”的特性。所以，算网一体在面向域间和域内的演进中，将呈现“域内化网为算”和“域间化算为网”两种形态。

域内化网为算：域内因为归属同一运营主体，有望丢掉分层解耦的“包袱”，通过软硬深度融合，率先实现基础设施充分池化，变成一台超级计算机。

域间化算为网：域间网络承担着高效连通多运营主体算力和服务的任务，兼容互通是首要任务，分层模型的思想仍将沿用。

（二）技术体系

基于形态体系的发展，算网一体将产生多个层面的基础性、前瞻性、挑战性技术，通过融合计算技术和网络技术构建核心的算网一体技术。

算网一体核心技术以网络 and 计算的一体化服务为目标，研究算力度量、算力感知、算力路由、在网计算、算力交易、确定性服务、算网一体编排、通感算一体等技术。

（三） 设备体系

设备是技术的载体、是能力的底座、是服务的支撑。算网一体技术体系的发展，算网一体基础设施需要新型设备和系统承载，包括算力路由设备、算力网关设备、算网控制设备、算网编排器、算网调度器等以网为主的设备，以及包括云化 UPF（User Plane Function，用户面功能）、云化小站等以算为主的设备，共同构建算网一体的设备体系。

（四） 协议体系

设备的功能实现以及设备之间的通信需要新的算网一体协议。算网一体协议主要作用在域间的算网一体演进，从 OSI 七层协议模型演进而来，分层引入新信息、新能力，构建算网一体协议体系。

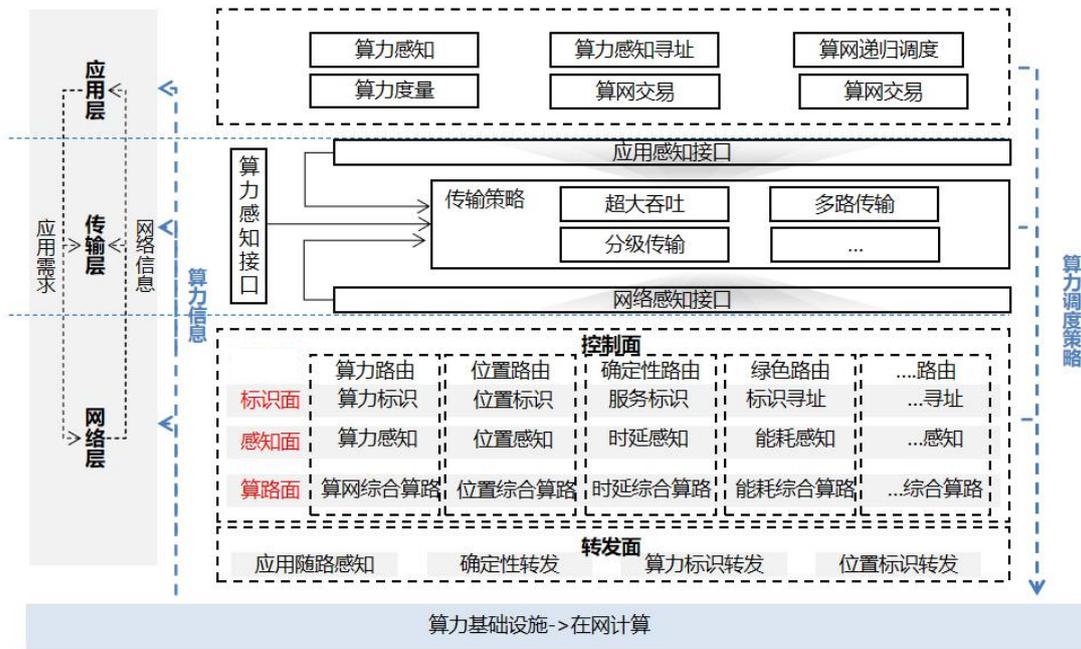


图 3 算网一体协议体系

算力和网络的融合可以发生在不同的层次，从网络层融合、传输层融合到应用层融合，其将引入不同的信息，增加不同的能力，最终体现为算网一体协议体系创新。在网络层融合时，考虑到 IP 细腰模型的兼容性和可扩展性，可开展基于 L3.5 的创新，兼顾兼容性和创新性，构建新的 overlay 层。

（五） 能力体系

算网一体的新型能力体系，包括资源布局、编排、调度等能力。资源布局能力是将泛在的网络和计算资源根据资源环境、用户需求的规模和特性进行部署；

编排能力是对算网资源的统一纳管，算网融合类业务的一体化编排，以及算网业务的全生命周期管理；调度能力面向更加动态的业务请求进行调度，在提高资源利用率的同时，满足各类业务的差异化需求。

（六）服务体系

算网一体的新型服务体系，包括交易、激励等服务，将催生新的商业模式。社会算力资源并网将推动实现“全局算力一盘棋”，结合新型激励机制可以提升各方参与积极性，共同促进算网新服务发展，呈现算网泛在分布、一体供给、协同编排、灵活取用、绿色设计等特点，同时通过多方参与博弈实现算力和网络的均衡优化。

（七）生态体系

算网一体的新型生态体系，包括产业链、价值链、供应链等。当前社会处在 IT 与 CT 技术融合持续深入的时代，未来还将与 OT 等技术进一步融合。新型生态体系的构建将有助于整合多方的力量，共同推进算网一体走向成熟。

4 算网一体演进的八大关键技术问题

算网一体的演进涉及多领域学科和技术的交叉融合，充满了未知性和挑战性，需要解决以下八大关键技术问题。

4.1 网络和计算资源的统一度量

网络的度量目前已经比较成熟，算力的度量还缺乏统一的标准。电信运营商传统上主要提供网络资源，用户的需求、网络能力的度量相对也比较成熟。在算力网络的场景中，运营商支持提供算力和网络的综合服务。统一的度量标准，统一的描述方式，类似于统一的语言，有助于算力网络的各个网元之间高效协作。这时需要对算力也有一个方便的度量机制，这个机制一方面需要支持对用户的算力需求的描述，另一方面也需要支持对提供的算力资源的能力描述。当前，算力的度量还没有一个统一的标准。芯片的种类繁多，例如 CPU/GPU/FPGA/ASIC/DPU/TPU，这些芯片都有自己的相关性能指标及各自的应用场景，很难给出一个单维度的度量单位。

算力度量的主要工作是面向未来差异化的业务需求，构建统一算力度量体

系，映射异构计算资源，实现算力资源合理分配和高效调用。通过从通信、存储、计算多个维度进行算力资源的建模和评估，以及对业务需求进行建模，支持业务按需映射到网络 and 计算资源，为业务的动态调度和路由寻址提供支撑。算力度量是算力通告，算力调度，算力交易，算力运营等的重要基础。

算力度量主要服务于算力用户的算力资源选择，是沟通算力用户和算力资源的桥梁，存在着巨大的创新空间。不同的业务对算力的要求不同，同时不同规模的 MEC 或者是 DC，能提供的算力也不同。算力的通告和调度技术中，通常会参考多个维度的算力信息，例如计算节点的负载、计算芯片的 FLOPS（Floating-point Operation per Second，每秒浮点计算指令操作次数）、I/O 的效能、内存的架构、快取内存一致性等，按照算力服务的需求来进行个性化的通告和决策。

4.2 网络 and 计算的协同感知

算网感知是算网一体的前提，需要打通网络领域、计算领域、应用领域的信息边界，为进一步的协同、调度、融合提供基础。算网感知包括算力感知、网络感知、应用感知及多维资源协同感知。

算力感知是对算力能力信息（包括算力节点 ID，算力配置等）、算力资源状态信息（CPU/GPU、部署形态、部署位置等）、算力服务信息（Service ID、服务连接数、服务持续时间等）等要素的全面感知。网络感知是对网络性能指标（时延、抖动、丢包等）、网络设备状态（拓扑、配置、资源）、网络流量信息（流量大小、优先级、速率等）等关键指标。应用感知主要是对应用类型、业务状态的精确识别。

当前领域内感知方案相对成熟，但算、网、应用协同感知仍然有难点，需打通网络 and 计算领域的信息边界，实现双方资源相互通告。根据业务应用的部署情况，需要设计自适应算力通告协议，在数据面自适应地进行的算力服务、网络资源和算力资源实时状态信息的通告，进一步实现算力和网络状态资源信息的实时相互感知，为进一步的协同、调度、融合提供基础。

4.3 算网一体的灵活按需调度

在算网协同感知的基础上，网络演进的核心诉求是算力与网络的一体化调度，通过网络来感知、调度、编排算力，形成融合算力信息的新型路由基础架构和协议，使云游戏、人工智能、视频分析等海量的应用能够按需、实时调用不同位置、差异化的算力资源，通过连接和算力的全局优化，实现用户体验、资源利用率和网络效率的最优组合。

面对此目标，顺应信息通信网络由数据转发向数据处理转变的趋势，需探索新型算力路由与寻址机制，研究从单一距离向量路由到算力、距离多要素叠加融合路由演进，基于 IPv6/SRv6 等协议进行继承性创新；需探索 underlay、overlay 以及两者协同的多种技术路线，形成新型路由协议和寻址机制；需研究“算力+网络”的多因子联合调度算法，基于对算力资源/服务的部署位置、实时状态、负载信息的感知，以及对业务需求的感知，按需动态生成业务调度策略，将业务沿最佳网络路径调度到目的算力节点。

4.4 “转发即计算”的在网计算模式

算网一体的目标之一是实现按需的“转发即计算”服务，将计算融入网络，使网络根据业务需求和资源状态按需参与计算，实现高效的数据处理，从而提升系统整体计算效率，降低网络延迟，减少总体能耗。

在网计算架构包含三层，分别为异构资源层、能力抽象层、应用服务层。异构资源层包含可编程交换机，以及 DPU、FPGA 等可自定义逻辑的加速卡。能力抽象层通过利用 IPDK、DPDK、P4 等开源编程语言或工具包实现在网计算能力抽象。应用服务层主要包括网络功能卸载、计算功能加速以及安全功能应用。常见的网络功能卸载包括数据平面实现 4 层负载均衡、NAT；计算功能加速包括面向 AI 计算的在网参数聚合，以及分布式流式系统的冗余数据压缩；安全功能应用包括 DDoS 流量统计及过滤、IPS 网络入侵检测系统等。

实现高效的在网计算依赖于软硬件协同设计，需要结合底层硬件和上层应用进行一体化设计，对底层硬件进行抽象，同时将应用相关的部分功能以计算原语的形式卸载到异构可编程硬件，从而实现数据转发和数据处理的并行操作。当前

在网计算技术处在研究初期，面临三方面的挑战：首先，网络设备资源受限，可编程网络设备片上存储和运算资源有限，限制了除转发以外的功能实现；其次，异构硬件统一抽象面临难题，不同类型芯片之间需要抽象外，不同芯片架构如何协调统一共同完成任务，是值得讨论的问题；最后，在网计算原语碎片化，很难以可重用的方式卸载到设备内部，用于不同的应用。

4.5 高效公平的算网一体交易平台

为吸引更多的社会算力加入，亟需构建多元供给方之间的算力网络交易与激励体系，一方面通过多方算网交易的建模和智能供需匹配，搭建算力消费者和算力供给方之间的交易桥梁，另一方面构建高效可靠的算网激励体系，基于历史交易行为实现良性交易循环，实现智能、公平、泛在、多方、可信的算力交易，形成社会多方算力、多层次能力共享的新商业模式。为实现高效的算网交易，需考虑如下 5 个问题：算力并网问题，算网感知和建模问题、多方算网交易公平、高效问题、多方算网激励问题、可信算网交易问题。

面向算网交易的五大问题，在算力并网实现“全网算力一盘棋”的基础上，统筹考虑需求、供给侧参数（性能、能耗、价格）和目标参数，以及激励要素。通过多维感知算网业务意图，实现对业务的算力需求、网络需求以及需求优先级信息、权重信息的感知；通过业务意图输入、意图翻译、意图校验等技术，实现算网业务意图的精准感知和解析。

多方智能匹配包括算网消费者和算网供给方的双向匹配机制，通过博弈算法、全局优化算法^[5]等在多个算网供给方中选出合适的算网供给方，满足消费者业务需求，提升算网交易的成功率，实现全局算网交易的优化。此外，传统集中式算网交易中心可能会成为性能瓶颈，存在单点故障的问题，以及可信问题，因此通过与区块链的结合^[6]，实现对社会算力和服务的统一的注册和交易，进一步实现多方去中心化的分布式算网交易决策。

4.6 算网一体的确定性服务

随着新型业务的发展，网络对确定性的需求正在逐渐提升。从最初面向超低时延的工业、电力等场景的确定性服务，向着更通用的个人消费型业务场景延

伸，最终走向全行业的普遍确定性。实现可规划、可预期的服务质量，从整体提升业务的效率和体验的舒适度，确保数字经济社会井然有序的运行。

然而，传统 IP 网络为了保障全局资源的最高利用率通常会牺牲一定的服务质量，或者通过预留单独的网络和计算资源，实现隔离性和独占性，从而保障高 SLA 要求的业务服务质量。传统的计算领域同理，通过线程的高频切换来保证整个系统的效率，对于实时性任务，需要线程之间的资源抢占，如实时操作系统、线程锁等，通过独占等方式保障计算资源，从而保障计算任务的实时完成。

算网一体的目标是通过计算资源和网络资源的联合动态调度实现高效的资源利用，面向特定业务提供一体化的极致服务体验，是对传统“尽力而为”或“资源独占”方式的改进。两大领域的确定性技术在算网一体阶段需要进一步的协同和联合设计：一方面，将确定性网络看做是算网一体节点之前连接的“总线”，确保数据的确定性传输；另一方面，借助确定性网络中资源预留、队列调度等技术原理，进一步攻克计算领域的确定性保障技术，如计算线程对于资源的锁定和抢占，从而实现端到端的确定性服务保障。

4.7 算网一体的自优化和自运维能力

随着算网一体的演进，新型网络和计算的融合将催生更丰富的用户业务，算网规模日益增大，也将大大提升网络的运维和管理的复杂度。同时，大规模网络发展也面临着诸如灵活性不足，新技术研发周期长、部署难度大，网络优化成本高、风险大等诸多困难。

为了更好的解决上述困难，提升算网一体的自由化和自运维能力，数字孪生网络与意图网络等概念和技术被相继提出并得到业界认可^[7]。数字孪生网络是一个包含物理网络实体，以数字化方式创建物理网络实体的虚拟孪生体，且二者之间可实时交互映射的网络系统。结合意图网络对于用户意图的精确解析和自动意图保障，数字孪生网络系统可以通过的高保真的虚实实时交互，实现对物理网络的高效分析，诊断，仿真和控制。

基于计算资源、网络资源和业务需求的动态性，保障业务 SLA 的资源调度的有效性需要多维度表征，包括计算资源的综合消耗、网络资源的消耗、以及业务价值同资源消耗“效能比”。算网数字孪生网络系统可以考虑特定业务的 SLA

等级和算力需求等级，并综合考虑算网资源的成本和时空特性，构建调度模型，提供业务调度有效性的量化评估。以此为基础，可以在更大时空尺度上，评估出“网算业”综合运营的有效性，进而实现算网资源的全局最优编排。

4.8 算网一体与 6G 网络协同设计

目前的移动网络中，通信、感知、计算割立分治，存在传不畅、感不全、算不及的问题。网络很难满足苛刻的时延和带宽要求，网络感知功能还较为局限，算力资源不够丰富和灵活。

算网一体可以与 6G 网络协同设计，实现通信、感知、计算的相互促进和增强。通信功能可以有效传递和汇聚感知信息，以支撑多节点协作感知，进而扩展感知的维度和深度。实时共享的分布式算力可对感知数据进行定制化的特征抽取及信息融合处理，借助先进算法模型将原始感知信息转化为可被终端或用户直接理解的意图及语义信息，实现从环境感知到环境认知的能力增强。感知功能通过获取更丰富的用户信息、环境数据等为通信提供先验信息。智能终端可利用随取随用的分布式算力，进行精准高效的信道估计、测量及快速波束对准，有效增强智能终端的信息处理能力；智能云网可通过多维数据融合处理及大数据分析，重构未知的物理信道状态，设计最优传输方式，提升通信的整体性能。增强后的感知功能可以为分布式算力的最优化快速调度提供先验信息，也可以为 AI 服务与应用提供更丰富的数据来源，以增强训练模型的鲁棒性；而增强后的通信功能则进一步提高了算力网络的泛在计算能力，实现 6G 时代各类场景下算力资源的即用即配^[8]。

算网一体与 6G 网络协同设计还面临着诸多挑战，需解决的关键问题包括：通、感、算融合机理，业务需求与通、感、算资源的需求映射；分布式通、感、算如何在网络架构中实现深度融合；通、感、算资源的高效感知与灵活调度难。

5 算网一体的挑战和展望

面向国家政策、产业发展以及技术创新趋势，计算和网络的融合已经成为业界热点，并且呈现出一体化发展的趋势，在学术界、产业界等已经开展了相关的研究和试验工作，但仍然面临一些问题和挑战：

1. 算网一体的创新很大程度是 IP 技术的创新，难度大，周期长，是创新金字塔的塔尖，需要理论和方法论的突破。

2. 算网一体的发展需要同时考虑兼容性和变革性，自顶向下，以架构为牵引进行系统创新。

3. 多要素多学科融合驱动算网一体化发展，需进一步探索设备、协议、调度、服务一体的实现程度和难度。

4. 实现一体供给、协同编排、灵活取用的算网一体服务，需考虑算力和网络的均衡优化，建立完善的激励机制。

希望与产学研各界携手探索算网一体融合学科领域，凝聚共识，推进产业发展！

缩略语列表

缩略语	英文全名	中文解释
5G	5th Generation Mobile Networks	第五代移动通信
6G	6th Generation Mobile Networks	第六代移动通信
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AR	Augmented Reality	增强现实
ASIC	Application Specific Integrated Circuit	专用集成电路
CAN	Computing -Aware Network	算力感知网络
CPU	Central Processing Unit	中央处理器
DC	Data Center	数据中心
DDoS	Distributed Denial of Service	分布式拒绝服务攻击
DPU	Data Processing Unit	数据处理器
E2E	End to End	端到端
FLOPS	Floating-point Operation per Second	每秒浮点计算指令操作次数
FPGA	Field Programmable Gate Array	现场可编程门阵列
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
IETF	The Internet Engineering Task Force	国际互联网工程任务组
IP	Internet Protocol	网际互联网协议
IPU	Infrastructure Processing Unit	基础设施处理单元
ITU	International Telecommunication Union	国际电信联盟
MEC	Multi-access Edge Computing	多接入边缘计算
NFV	Network Function Virtualization	网络功能虚拟化
OAM	Operations, Administration and Maintenance	操作,管理和维护
OSI	Open System Interconnection	开放系统互联
QoS	Quality of Service	服务质量
QUIC	Quick UDP Internet Connection	快速 UDP 互联网连接协议
SDN	Software Defined Network	软件定义网络
SLA	Service Level Agreement	服务等级协议
SRv6	Segment Routing over IPv6	基于 IPv6 的分段路由

TPU	Tensor Processing Unit	张量处理器
UPF	User Plane Function	用户面功能
VPN	Virtual Private Network	虚拟专网
VR	Virtual Reality	虚拟现实

参考文献

- [1] 算力感知网络（CAN）技术白皮书（2021 版）. 中国移动研究院. 2021.
- [2] 算力感知网络（CAN）技术白皮书. 中国移动研究院. 2019.
- [3] 算力网络白皮书. Computing Force Network Whitepaper. 中国移动. 2021.
- [4] 算力网络技术白皮书. Computing Force Network Technology Whitepaper. 中国移动. 2022.
- [5] Yuan L , He Q , Tan S , et al. CoopEdge: A Decentralized Blockchain-based Platform for Cooperative Edge Computing[C]// WWW '21: The Web Conference 2021. 2021.
- [6] Xu, Z., Ren, H., Liang, W., Xia, Q., Zhou, W., Wu, G., & Zhou, P. (2021). Near Optimal and Dynamic Mechanisms Towards a Stable NFV Market in Multi-Tier Cloud Networks. IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications.
- [7] 孙滔, 周铨, 段晓东等. 数字孪生网络(DTN): 概念、架构及关键技术. 自动化学报, 2021, 47(3): 569-582
- [8] 通感算一体化网络 前沿报告. 中国通信学会. 2021.
<https://www.china-cic.cn/upload/202202/24/57dba93bea4f494f9f5fc72a52f81468.pdf>