



## 通信网络三次变革及AI化变革的关键技术

张同须, 段晓东, 程伟强, 张晓光

(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

**摘要:** 系统梳理了通信网络几十年的发展变化, 提出了通信网络大约每十年发生一次具有里程碑意义的重大变革的规律, 即从最初的电路交换开始, 发生了IP化变革、IT化变革和正在进行的AI化变革这三次变革。系统总结分析了这三次变革并重点剖析了AI化变革: 网络IP化通过从电路交换到分组交换和从交换IP化到端到端全IP化的演进, 实现了数据业务的高效承载; 网络IT化基于软件定义网络 (software defined network, SDN) /网络功能虚拟化 (network functions virtualization, NFV) 等技术, 推动了通信网络架构由封闭、刚性向开放、弹性的转变; 网络AI化的核心在于“网络使能AI”与“AI赋能网络”的双向赋能, 前者旨在构建支撑超大规模智算的高性能互联底座, 后者将AI深度融入网络系统, 推动网络运行、网络运维以及应用与服务向目标驱动、全域自主的“智能原生”范式演进。最后, 对未来通信网络发展进行了展望, 提出未来“AI+”时代将推动通信网络从单纯的连接基础设施向智能化、服务化的新型信息基础设施转型和升级。

**关键词:** 通信网络; IP化变革; IT化变革; AI化变革

**中图分类号:** TN915; TP393

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.DXKX260045

## Three revolutions of communication networks and key technologies for AI-driven revolution

Zhang Tongxu, Duan Xiaodong, Cheng Weiqiang, Zhang Xiaoguang

China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

**Abstract:** The development of communication networks over several decades was systematically reviewed, and the law that communication networks undergo a landmark major revolution approximately every decade was proposed. Starting from the initial circuit switching, there were three revolutions: the IP-based revolution, the IT-based revolution, and the ongoing AI-driven revolution. These three revolutions with a focus on the AI-driven one were summarized and analyzed: the IP-based revolution enabled highly efficient data transmission by evolving from circuit switching to packet switching and from IP-based switching to end-to-end IP networking, the IT-based revolution, driven by technologies such as software defined network (SDN) and network functions virtualization (NFV) etc, upgraded communication network architectures from closed and rigid to open and elastic, the key points of the AI-driven revolution

收稿日期: 2026-01-15; 修回日期: 2026-03-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2024YFB2906600, No.2024YFB2906601)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No.2024YFB2906600, No.2024YFB2906601)



were “network for AI” and “AI for network”. The former aimed to construct a high-performance interconnection base for ultra-large-scale intelligent computing, while the latter integrated AI deeply into network systems, promoting the evolution of network operation, network maintenance, as well as applications and services towards a goal-driven, fully autonomous “intelligence-native” paradigm. Finally, the prospect of the future development of communication networks was prospected, and it was proposed that the future “AI+” era would drive the transformation and upgrading of communication networks from mere connectivity infrastructure to intelligent and service-oriented new information infrastructure.

**Key words:** communication network, IP-based revolution, IT-based revolution, AI-driven revolution

## 0 引言

通信网络的演进和发展是驱动经济社会信息化发展的核心引擎。在过去二三十年间，通信网络技术经历过三次具有里程碑意义的重大变革，每一次都深刻重塑了通信网络基础设施的架构和能力。通信网络的三次变革如图1所示。

第一次变革始于21世纪初，以电信网络互联网协议（Internet protocol, IP）化为主要特征。在窄带数字技术逐步替代模拟语音的基础上，互联网用户规模与带宽需求呈爆发式增长，推动电信运营商从单一语音业务向语音与数据的融合业务转型。网络IP化<sup>[1]</sup>以传输控制协议（transmission control protocol, TCP）/IP、多协议标签交换（multi-protocol label switching, MPLS）、分组传送网（packet transport network, PTN）、软交换、IP多媒

体子系统（IP multimedia subsystem, IMS）等关键技术为支撑，实现了通信网络从电路交换到分组交换、从局部IP化向端到端全IP化的根本转变。全IP网络架构有效促成了语音与数据业务的融合发展，成为移动通信从模拟向数字、从单一语音业务向综合业务融合的重要里程碑。此后，在全IP架构基础上，基于IPv6的段路由（segment routing over IPv6, SRv6）、长期演进语音承载（voice over long-term evolution, VoLTE）等与IP相关的创新技术持续演进，不断拓展其应用边界与性能极限，继续在网络架构与业务承载中发挥关键作用。

第二次变革是从2010年前后开始的信息技术（information technology, IT）化转型。随着3G/4G移动通信与宽带接入技术的普及，宽带数字语音、中高速数据与多媒体业务逐渐成为主流。同时，大量新兴厂商进入通信产业生态，引入丰

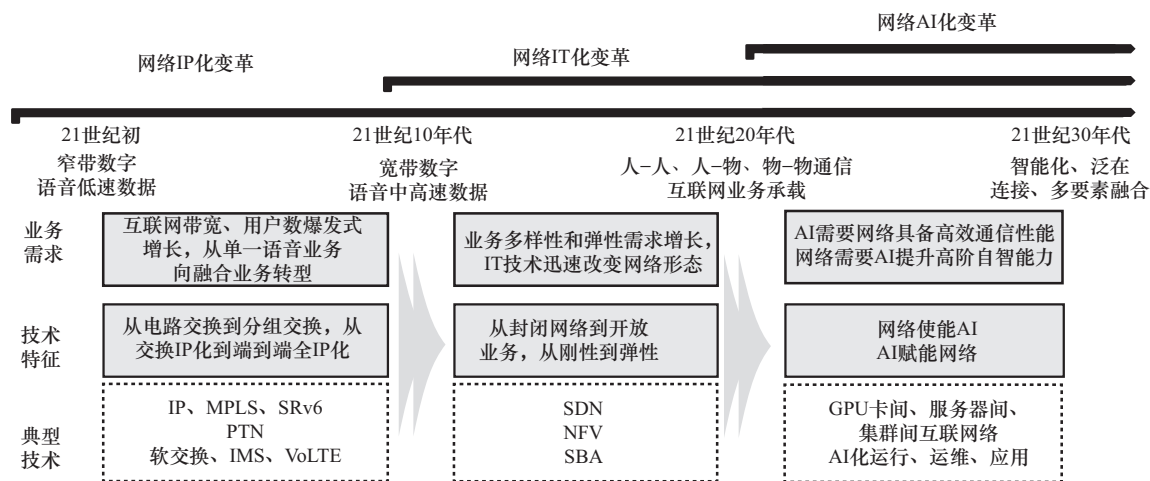


图1 通信网络的三次变革

富的IT理念与技术,将软件定义网络(software defined network, SDN)和网络功能虚拟化(network functions virtualization, NFV)等新型IT技术引入电信领域,打破了传统网络的封闭架构,显著提升了网络资源的调度效率与灵活性。5G服务化架构(service-based architecture, SBA)的提出,进一步推动了网络功能的模块化与软件化,为云计算、物联网等新兴业务形态的兴起奠定了坚实基础。

当前正处于始于2020年前后的第三次变革,即通信网络的人工智能(artificial intelligence, AI)化转型。伴随5G/6G技术、万物智联与产业数字化的转型发展,通信网络日益成为支撑各行业信息化转型的关键基础设施。AI技术与通信网络加速深度融合,推动网络向“网络使能AI(network for AI)”和“AI赋能网络(AI for network)”双向赋能的新阶段演进。以全向智感互联(omni-directional intelligent sensing express architecture, OISA)、基于融合以太网的远程直接内存访问(RDMA over converged Ethernet, RoCE)、全调度以太网(global scheduling Ethernet, GSE)、联邦学习及AI化运行和运维等为代表的关键技术,正推动网络向智能化、泛在连接、多要素融合方向不断演进。

从业务需求与技术创新双重视角看,通信网络的每一次重大变革都借助新型信息技术推动社会生产与生活方式的深刻变革,不断重塑人类社会的连接范式与价值创造模式。本文旨在系统梳理通信网络IP化与IT化变革历程,并重点探讨AI化变革中的关键技术及其未来发展趋势。

## 1 通信网络IP化变革

随着互联网需求的爆发式增长,传统时分复用(time division multiplexing, TDM)电路交换网络因带宽利用率低、成本高、扩展性差等问

题,难以支撑语音、视频、数据等多媒体业务的融合发展需求。通信网络IP化变革成为技术、业务与政策共同驱动的必然选择。通信网络IP化变革先后历经了交换IP化、连接IP化、端到端全IP化这3个阶段。

### 1.1 交换IP化

2000年前后,以视频流媒体、在线游戏和即时通信为代表的非结构化流量激增,传统电话网络基于TDM方式采用固定带宽分配模式,导致资源利用率低,且扩容成本高。在此背景下,软交换技术应运而生,成为通信网络向IP化转型的关键突破口<sup>[2]</sup>。通过将传统程控交换机的控制层与承载层分离,并基于IP协议栈重构网络架构,软交换实现了语音、数据与视频业务的统一承载,显著提升了网络灵活性,并使单端口成本降低40%以上,网络运维效率提升30%以上。

### 1.2 连接IP化

同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)技术是一种被广泛采用的以电路交换为核心的传输技术,但是无法满足分组业务飞速发展的需求,运营商从2009年开始规模引入PTN,用于2G/3G基站回传和全业务承载。PTN采用IP化内核,基于多协议标签交换-传送架构(multi-protocol label switching-transport profile, MPLS-TP)的传送网络技术,提供高效率的多业务承载,具备强大的保护、操作管理维护、灵活的统计复用和服务质量(quality of service, QoS)能力<sup>[3]</sup>。

### 1.3 端到端全IP化

在软交换实现核心网IP化基础上,IMS架构通过会话初始协议(session initialization protocol, SIP)实现了固定网络、移动网络与互联网的深度融合,标志着通信网络进入端到端全IP化的新纪元。IMS以控制与业务分离为核心理念,构建了统一的会话管理层,支持语音、视频、即时消息等业务的跨网络无缝衔接<sup>[4]</sup>。



在此基础上，VoLTE 技术依托 4G LTE 全 IP 架构，将语音业务从传统的电路交换域迁移至分组域，首次实现了语音与数据业务的并发传输。通过采用自适应多速率宽带编码技术，VoLTE 将语音质量较 2G/3G 语音质量提升 40%，同时呼叫接续时延从 5~8 s 降低至 1~2 s，引领基础电信业务进入高清化新时代。

#### 1.4 IP 自身技术演进

IP 是互联网“沙漏模型”中承上启下的核心，IP 的灵活性、扩展性与稳定性是互联网得以持续发展的基石。IP 网络本身也历经了 IPv4、IPv6、MPLS 到 SRv6/通用 SRv6 (generalized SRv6, G-SRv6) 的代际演进，推动网络能力向低时延、高可靠、确定性、智能化与高安全等方向全面提升。其中，SRv6/G-SRv6 已成为构建新一代 IP 网络的核心基础协议。

20 世纪 80 年代，IPv4 协议被正式标准化，通过定义网络设备间的数据通信与寻址机制，全球范围内的互联互通成为可能。在控制层面，它依靠内部网关协议 (interior gateway protocol, IGP) 和边界网关协议 (border gateway protocol, BGP)；在转发层面，则基于 IPv4 目的地址查表转发，初步构建了互联网的基础框架。到了 20 世纪 90 年代，为应对 IPv4 地址枯竭、安全性不足及移动性支持有限等问题，IPv6 协议登上历史舞台，其 128 bit 的巨大地址空间从根本上极大扩展了寻址能力，并内嵌了对高效传输、安全加密、移动性及未来扩展的良好支持，由此成为互联网核心协议。进入 21 世纪初，MPLS 协议在转发面引入标签交换机制，实现了更快速的路径转发，在控制面则新增了标签分发协议 (label distribution protocol, LDP) 等，与 IGP 协同工作，有效提升了网络流量工程能力和 QoS 的保障水平。

随着网络业务日趋复杂，MPLS 在灵活性、可编程性、协议复杂性以及跨域协同等方面面临瓶颈。为应对这些挑战，21 世纪 10 年代后，基

于源路由理念并基于 IPv6 设计的 SRv6 技术逐步成熟。SRv6 将 IPv6 作为底层承载协议，通过定义灵活的可编程指令，实现了网络路径可编程，简化了协议复杂度并极大增强了网络能力和业务驱动能力，成为新一代 IP 承载协议。在这一进程中，中国公司主导的 G-SRv6 技术作出了关键贡献，并被因特网工程任务组 (Internet Engineering Task Force, IETF) 发布为 RFC 9800 国际标准，它在兼容 SRv6 的前提下，通过创新的压缩机制有效解决了原生 SRv6 报文头开销过大的问题，显著提升了承载效率，为 SRv6 在全球运营商网络中的大规模部署扫清了障碍。目前，G-SRv6 已在全球多个主流运营商的网络中实现规模商用。

通信网络的 IP 化变革是一次深刻的技术范式转移，它重构了通信网络的底层架构，推动了封闭、刚性的传统电信体系转向开放、灵活和标准化的全球信息基础设施。这一变革不仅实现了多业务的统一承载与融合发展，更以“简洁核心、智能边缘”的设计哲学催生了持续的应用创新，奠定了互联网经济的基石。从顶层设计角度看，通信网络 IP 化确立的“分层解耦”“开放接口”“标准先行”等核心原则，赋予了网络各层独立演进的能力，并依托 TCP/IP 等全球共识标准构建起协同发展的产业生态。这些理念与实践，为此后的 IT 化与 AI 化网络变革确立了基本框架并铺平了道路。

## 2 通信网络 IT 化变革

运营商传统网络由软硬一体、转控合一的网络设备组成，业务烟囱式发展、功能单厂商绑定，容易造成业务上线周期长、资源弹性低、开放性不足等问题。随着移动数据流量的爆炸式增长，业务呈多样化发展趋势，对标互联网巨头以天为周期的应用发布速度，运营商网络快速适应新业务要求的压力越来越大，对传统网络升级改

造的需求也日益凸显，亟须借鉴IT云计算、AI等技术对传统基础网络实施变革，这成为运营商提升网络适应性和效率的必然选择。

通信网络的IT化实质上是对网元、连接和架构的柔化。网元柔化方面，利用NFV等技术解耦软硬一体网络，实现硬件通用化、业务软件化、功能可编程；连接柔化方面，借助SDN等技术对网络进行灵活调度和统一编排，实现网络的自动化开通和高质量、差异化服务；架构柔化方面，引入SBA开启了网络即服务的新范式，实现网络的多样化、定制化和敏捷性。

### 2.1 网元柔化

通信网元的IT化变革重点体现在两个方面：一是基础架构的变革，以NFV技术为依托，将电信网元以软件的形式部署于云化资源池上，实现资源可全局调度、业务可快速部署、能力可全面开放、容量可弹性伸缩、架构可灵活调整，为构建开放、敏捷、弹性、高效的网络架构奠定了技术基础；二是管理流程的变革，构建以流程规范化、数据标准化、工具自动化为核心的持续集成-持续测试-持续交付（continuous integration-continuous testing-continuous delivery, CI-CT-CD）管理体系，通过大规模自动化集成、验证、部署，极大地提升了云化网络的上线和迭代效率。

### 2.2 连接柔化

连接柔化以承载网和传输网的全面SDN化为核心，推动网络架构的革新，实现了控制平面与转发平面的分离。通过引入集中式控制器，连接柔化实现了对底层网络资源的统一管控与灵活调度，显著提升了网络的控制能力和智能化水平。这一变革使得网络能够支持智能柔化的动态选路，从而满足5G、云网、算力网络等新兴业务对IP承载网在智能化、自动化、低时延、高带宽以及差异化服务等方面的需求。切片分组网（slicing packet network, SPN）是一种先进的回传网技术，在提供大带宽数据回传的同时，还提

供“高可靠硬切片”和“弹性软切片”的能力，为多种5G业务提供基于差异化的承载服务。基于SDN理念，SPN支持硬切片和软切片部署和运维的自动化能力，并提供跨域业务的智能协同能力，保证连接资源在动态调整时，业务无感知、零中断。

### 2.3 架构柔化

传统网络架构存在功能紧耦、接口刚性、设备黑盒等问题，难以满足业务多样化、定制化和敏捷性的需求。基于此，基于信息与通信技术（information and communications technology, ICT）融合思路设计的5G SBA应运而生。SBA通过能力原子化、接口IT化、服务自组织，满足多样化、定制化、敏捷性业务需求，开启了网络即服务的演进新范式，实现了移动通信架构的柔性变革。

5G切片是架构柔性变革的实例化体现，通过切片内网络功能的原子化，为网络能力的灵活组合、网络切片的差异化构建提供基础，进而为5G网络赋能千行百业数字化变革提供支撑。

通信网络的IT化变革是基于ICT融合对传统网络基础设施、业务逻辑的深度重构，它使通信网络的重心前移至用户侧，开放、可编程及自动化特性使得业务可以按需开通和快速上线，灵活、敏捷及自动化特性使得业务可以动态伸缩，两大能力组合使运营商可以轻松应对日新月异的市场需求，帮助运营商提高竞争力，同时还能维持高水平的可靠性、可用性和安全性。然而，网元、连接和架构的柔化带来管理的复杂度，对运营商的技术水平及运营能力提出了更高要求。随着ICT融合的进一步深化，更丰富经验的积累及更优秀技术（如云原生）的引入必将促成下一波IT化变革浪潮，驱动网络重心进一步前移至管理侧，从而提高运营效率和降低运营成本。通信网络的IT化变革正在进行，但还远未结束。



### 3 通信网络AI化变革

通信网络AI化变革包括“网络使能AI”和“AI赋能网络”两个方面。“网络使能AI”是指通过网络架构与协议栈的优化与增强，构建具备超低时延与超高带宽的网络基础设施，为大规模AI训练/推理提供高效数据传输通道，从而有效降低分布式计算中的通信开销，提升AI训练/推理效率。“AI赋能网络”是将AI技术（如深度学习、强化学习）应用于网络基础设施的运维和业务运营中，实现故障准确预测、资源调度效率提升、运维成本降低等，从而提升网络性能并改善用户体验。总体而言，通信网络AI化变革呈现协同演进的特征：网络优化加速AI应用落地、推动AI技术发展；AI技术又进一步促进网络智能化升级和转型。二者相互支撑、彼此促进，形成良性循环。

#### 3.1 网络使能AI

在大规模智算集群中，网络互联效率已成为制约集群整体算力提升的关键因素之一。由于AI大模型训练所需的智算中心规模日益增大，集群的有效算力不再由单芯片算力的叠加来决定，而是受到系统加速比与有效运行时间的共同影响。其中，网络性能决定图形处理单元（graphics processing unit, GPU）集群算力加速比，网络可用性决定GPU集群稳定性与有效运行时间。例如，当网络带宽不足或时延过高时，GPU在完成计算后会因等待数据而进入长久的空闲时间，导致集群的有效算力远低于其理论值。

提升网络互联效率包含3个层次：第一，通过优化GPU卡间互联（Scale-Up）网络技术，显著提升计算单元利用率和单个节点的算效；第二，机间互联（Scale-Out）网络进一步扩展集群规模，支持千卡、万卡级集群扩展，支撑万亿参数模型训练；第三，集群间互联（Scale-Across）网络实现跨集群资源的高效协同与统一调度。通

过卡间互联、机间互联、集群间互联的网络技术优化，共同加速高效智算集群的构建，充分释放GPU集群算力，助力人工智能业务快速发展。

#### 3.1.1 卡间互联技术

卡间互联是指在智算服务器内，多GPU之间进行数据传输和通信的技术。随着大语言模型在算法结构等方面的快速演进，模型复杂度、参数量以及训练数据规模均呈指数级增长趋势，GPU卡间互联的通信效率，尤其是带宽和时延性能，已成为影响模型训练和推理的关键因素。当前，智算服务器内典型GPU卡间互联架构有3种典型的拓扑形态：全互联、Cube-Mesh立方体互联和交换拓扑互联<sup>[5-6]</sup>。GPU卡间互联拓扑设计直接影响Scale-Up卡间通信协议的选择与制定，具体包括GPU互联距离、互联规模、互联形态、通信语义以及可靠性等，是决定互联协议的关键因素。

当前，主流的GPU互联协议可划分成3类：总线互联、以太互联和混合互联。总线互联协议（如快速外设互连（peripheral component interconnect express, PCIe））最初被用于服务器内部连接GPU、CPU、内存等板级组件，其互联特点是高速、极低时延，支持直接内存操作和内存一致性，但其物理限制使其规模通常不超过百卡<sup>[7]</sup>。以太互联协议（如RoCE）则主要用于服务器之间实现上千甚至上万卡的集群通信，但其较高的协议开销导致通信时延较高，难以满足GPU间极低的时延需求<sup>[8]</sup>。为了兼顾二者的优势，混合互联协议（如超级加速器链接（ultra accelerator link, UALink）、纵向扩展以太网（Scale-Up Ethernet）、SUE、OISA）进行了融合：底层利用成熟以太网物理层和链路层技术保证传输与扩展性；上层逻辑则更接近总线协议，专注于高效传输GPU内存事务，旨在实现接近总线的低时延与内存交互效率，同时保留以太网的灵活性与大规模连接能力<sup>[9]</sup>。

混合互联协议因其突破总线协议的规模瓶

颈，同时解决了以太协议传输时延高的缺陷，成为适合 GPU 卡间互联场景的有效解决方案，已得到国内外产业的广泛认可。其中，UALink 协议由超威半导体（AMD）、思科、亚马逊（AWS）等公司联合提出，SUE 由博通公司提出。上述两种方案均由海外 GPU 和交换芯片厂商主导。OISA 则是由中国移动主导、国内 GPU 与交换芯片厂商参与的卡间互联方案。OISA 通过定义物理层、数据层、事务层标准，实现了大规模 GPU 对等架构的全互联通信。OISA 协议栈整体架构如图 2 所示。

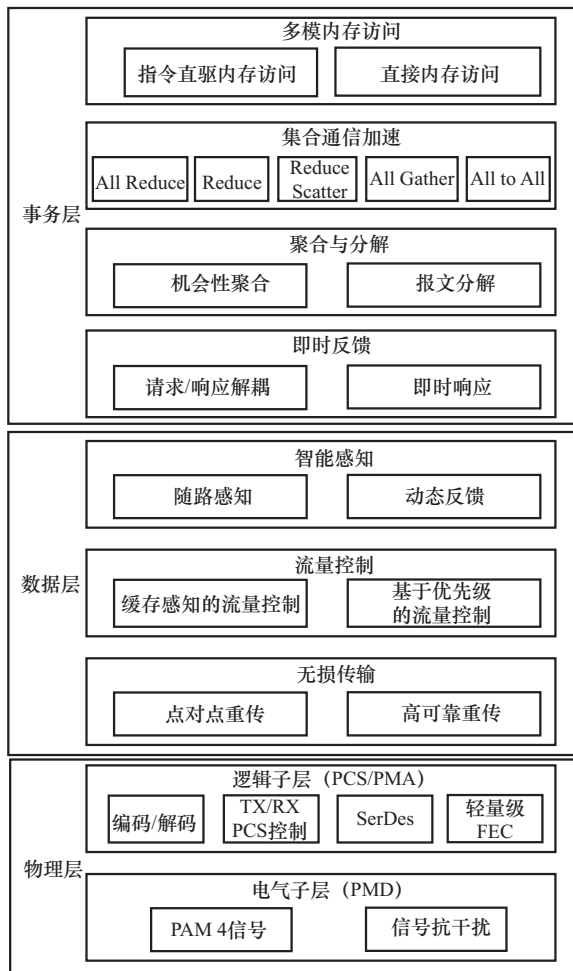


图 2 OISA 协议栈整体架构

OISA 协议栈由 3 个功能层组成：事务层、数据层和物理层。以发送方向为例，事务层在接收到来自 GPU 片上网络的与事务相关的信号（如事

务类型、目标 GPU 标识、地址信息和事务数据等）并进行映射封装后，得到事务层数据包；随后，事务层数据包传递至数据层，并由数据层实现校验字段插入等功能；最后由物理层编码后经物理链路发送出去。各功能层包含的关键核心功能如下。

(1) 在事务层中，OISA 设计了多模内存访问、集合通信加速、聚合与分解和即时反馈四大关键功能。其中，多模内存访问模型为应对 GPU 在不同应用场景下多样化的内存交互需求而设计，在单一的互联架构上，为不同粒度的内存操作提供最优化的执行路径，融合了用于细粒度访问的指令驱动指令直驱内存访问（Load/Store）模式，以及用于粗粒度数据搬运的直接内存访问模式；集合通信加速能力通过将部分集合通信的计算任务从 GPU 终端节点卸载至交换芯片中，减少 GPU 与交换芯片的频繁数据搬运，降低模型训练和推理的时延；聚合与分解能力为应对分布式应用中存在的高频次、小报文通信负载而设计，通过在源端进行报文聚合以及在目的端进行报文分解，最大限度地摊销单次传输的协议头开销，提升小报文通信场景下的有效数据吞吐率与系统整体效率；即时反馈能力将事务通信的逻辑完成与物理完成解耦，以满足高频、细粒度的通信场景需求。

(2) 在数据层中，OISA 设计了智能感知、流量控制和无损传输三大核心功能。智能感知机制旨在向数据报文中插入不同的感知标签，通过原位收集逐跳状态信息，随路探测并收集传输路径上的链路及设备状态，从而精确识别网络拥塞点；在流量控制方面，OISA 支持基于优先级的流量控制与缓存感知的流量控制，根据数据传输的特性，为不同的流量类别选择并配置合适的流量控制策略，通过实时监控和流量模式分析，动态调整资源分配和数据传输速率，确保数据流的最优分配和信息提取；在无损传输方面，OISA 支持数据层



重传技术，该技术能够在数据层检测到错误，并立即触发点对点的重传机制，避免错误影响整个协议栈，从而实现数据传输的低时延和高可靠性。

(3) 在物理层中，OISA 的逻辑功能子层兼容了业界广泛采纳的 IEEE 802.3 标准的相关要求，以确保协议能够利用成熟的生态系统和组件技术，并设计了轻量级前向纠错（forward error correction, FEC）功能和多种数据传输速率，以保障在高速信号传输过程中的数据完整性，并降低对比特错误的敏感度。

借助 GPU 卡间互联技术，GPU 芯片可支持从单机 8 卡的智算服务器向超节点设备形态升级。目前，业界已有英伟达 NVL72、华为 CCloudMatrix 384 等超节点产品，通过将百卡级 GPU 高速互联并以高密部署的方式集成在单个机柜中，高效承载上层模型训练和推理业务。然而，随着模型能力的进一步提升，超节点设备也将受限于铜缆介质的物理距离和速率瓶颈，导致其整体性能逼近极限。因此，业界也在布局新一代光互连技术。规避铜缆局限性问题的直接途径之一是尽量缩短电传输的距离，最佳方案是芯片级出光。当前，业界广泛关注 GPU 芯片与光引擎近距离封装的近封装光学（near-package optics, NPO）、GPU 芯片与光引擎在一个芯片基板上封装的共封装光学（co-packaged optics, CPO）以及 GPU 芯片内集成光引擎的光输入/输出（optical input/output, OIO）等创新方案。受限于技术成熟度和市场需求度两方面因素，光替代电并非一蹴而就。未来，预判 GPU 侧光互连技术将从 NPO 起步，交换芯片侧光互连技术则从 CPO 起步向前演进。这种发展趋势亟须产业共同制定光互连标准，在物理连接和互连协议上进一步规范市场，从而促进光互连技术的发展。

### 3.1.2 机间互联技术

智算中心机间互联面临高带宽、高并发、低时延、高可靠和大规模扩展的核心需求。随着 AI

大模型的发展，GPU 集群规模不断扩大，叠加 GPU 芯片算力提升，驱动网络基础设施代际升级：交换机端口速率从 200 Gbit/s 向 400 Gbit/s、800 Gbit/s 提升，交换芯片容量从 25.6 Tbit/s 向 51.2 Tbit/s、102.4 Tbit/s 提升。在此趋势下，机间互连网络需要具备良好的可扩展性，支持万卡甚至十万卡的超大规模无收敛组网能力，还需要具备高性能转发能力。

当前，智算中心机间互连技术主要有 InfiniBand 和 RoCE 两种技术路线。其中，InfiniBand 采用专有硬件与协议，生态成熟但封闭，建设与运维成本较高；RoCE 基于标准以太网，具备开放性与成本优势，但转发性能受限。尽管业界持续优化 RoCE，但其基于流的传统以太网转发机制在稀疏模型训练等场景中仍存在根本性局限，对性能的提升有限。因此，新一代以太网技术的突破已成为全球 AI 基础设施竞争的焦点。

当前，新型智算中心机间互连技术主要包括两大主要技术流派：超以太网联盟（ultra Ethernet consortium, UEC）和全调度以太网（global scheduling Ethernet, GSE）技术。其中，UEC 由博通、思科、微软等国际巨头牵头成立，秉持生态开放的理念，通过优化物理层、链路层、传输层和软件接口层等方面的技术，提升智算网络通信效率能力。GSE 是由中国移动联合产业伙伴提出的新型以太网转发和调度机制，其核心技术包括基于报文容器（packet container, PKTC）的多路径喷洒和基于动态全局调度队列（dynamic global scheduling queue, DGSQ）的主动拥塞避免等，旨在为智算集群打造高性能、低时延、高可靠、原生无损的机间网络<sup>[10]</sup>。

GSE 的整体架构分为 3 层——控制层、网络层与计算层，如图 3 所示。其中，控制层为可选的集中式全调度操作系统（global scheduling op-

erating system, GSOS) 收集网络全局信息, 实现基于全局信息编址、日常运维管理等功能; 网络层将全调度网络处理节点 (global scheduling processor, GSP) 作为网络边缘处理节点, 用于接入计算流量, 并对流量做全局调度, 流量上行时具备动态负载均衡能力, 流量下行时具备流量排序能力, 全调度交换网络 (global scheduling fabric, GSF) 作为网络核心交换节点, 用于汇聚 GSP 节点, 具备动态负载均衡能力以及反压信息发布能力, 通过 GSP 和 GSF 的分工协作, 构建具备全网流量有序调度、各链路间负载均衡、精细反压等技术融合的网络技术; 计算层用于支持灵活的接入方案, 提供 GPU 计算能力。

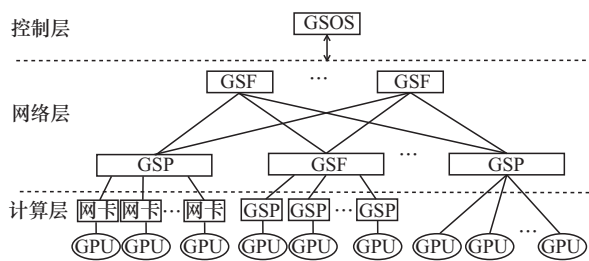


图3 GSE的整体架构

为适应智算中心多样化的硬件环境, 满足不同 GPU 服务器组网需求, GSE 支持 GSE-N2N (network-to-network) 和 GSE-E2E (end-to-end) 两大部署场景, 如图4所示。其中, GSE-N2N 部署场景面向 GPU 与网卡深度集成的服务器形态, 网卡不感知网络行为, 将网络交换设备作为 GSP 和 GSF 节点, 支持 GSE 报文封装、解封装、乱序及授权调度机制等 GSE 的全部功能; GSE-E2E 部署场景针对配备独立网卡的 GPU 服务器, 通过将部分 GSE 能力延伸至 GPU 服务器的网卡, 将网卡作为 GSP 节点, 实现 GSE 报文头的封装、解封装及授权调度, 网络设备作为 GSF 节点, 负责实现基于报文容器的极致负载均衡, 端网协同完成端到端的 GSE 能力<sup>[11]</sup>。

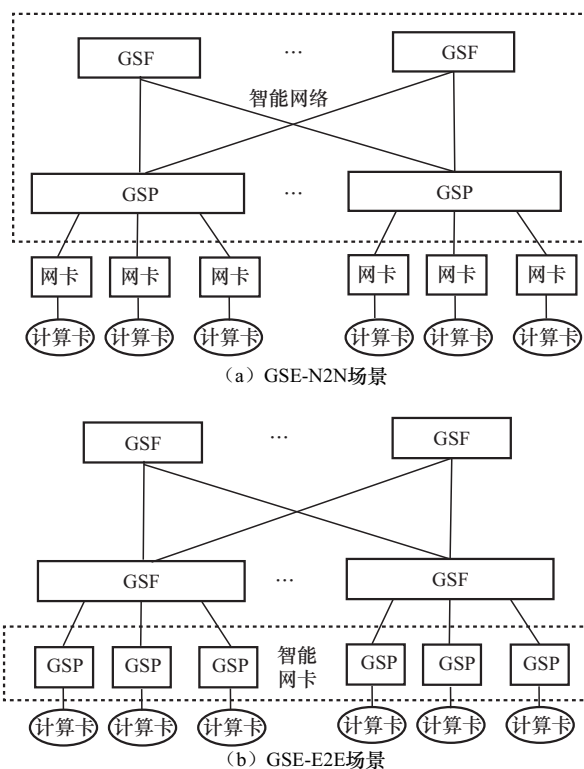


图4 GSE两大部署场景

GSE 通过革新以太网转发机制, 突破无损网络性能瓶颈, 其核心创新主要体现在以下方面。

(1) 基于 PKTC 的负载均衡: GSE 结合逐包喷洒低时延以及拼包交换高均衡性的优势, 引入了基于 PKTC 的转发机制, 在源节点将数据包逻辑组装成固定长度的虚拟 PKTC, 不需要缓存报文和构建实际容器, 以容器为最小单元进行多路径喷洒, 目的 GSP 节点在接收报文后, 基于 PKTC 粒度进行重排序, 解决了大流量高并发场景堵塞的问题。

(2) 基于 DGSQ 授权的拥塞避免: 在 GSP 节点上建立网络中所有设备出口的虚拟队列, 以实现该节点到对应所有出端口的流量调度, 调度带宽依赖授权请求和响应机制, 目的 GSP 节点按需向源 GSP 节点授权来主动调控入网流量, 避免多对一引发的拥塞问题, 实现网络原生无损。

(3) 全局+分布式控制面: 集中控制器 GSOS 进行全局编址, 设备间通过 BGP 扩展交互设备信



息，分布式构建GSE转发表，支持即插即用与弹性扩展。

(4) 微秒级故障无损收敛：通过光电信号与误码率实时监测故障点，快速感知链路/设备故障，并基于66B原子码块进行全局故障通告，实现全网负载与授权策略的动态调整，最大化保障故障场景下无损<sup>[12]</sup>。

基于以上创新，GSE实现了上行带宽小于下行带宽，同等芯片容量支持更大组网规模。中试验证表明，在LLama2-13B大模型训练测试下，相较于RoCE，GSE网络性能提升30%以上，达到业界领先水平。

随着智算集群规模持续扩展，传统电交换网络因芯片容量受限、功耗攀升、布线复杂等原因显现瓶颈，而光交换凭借超大带宽、超低时延、低功耗及速率协议无关特性，与电交换形成互补的光电混合网络成为重要发展方向。然而，光电混合网络落地面临多重挑战：物理层方面，光损耗高、光模块性能要求严苛，光交换粒度粗，难实现灵活调度；链路层方面，资源调度机制尚未统一；网络层方面，光路切换与路由更新时间差异大，路由与拓扑管理适配不足；传输层方面，缺乏适配的高性能传输与流量调度机制；应用层方面，控制编排复杂，集合通信与网络拓扑失配。未来，需要突破新型光开关、智能拓扑重构等关键技术，推进各层级标准制定与产业协同，推动光电混合网络规模化商用，以支撑智算中心高效发展。

### 3.1.3 集群间互联技术

随着GPT-5.0等大模型持续突破单智算中心

算力极限，传统超大规模智算中心已难以支撑万亿参数算力需求，智算网络架构正逐步从卡间互联、机间互联向跨域互联（Scale-Across）演进。当前，国际厂商如博通、英伟达和思科等相继推出了面向智算集群互联的Scale-Across专用芯片与解决方案，智算“跨域互联”领域竞争激烈。国内以阿里巴巴、腾讯为代表的互联网企业开始构建高性能以太网跨智算中心互联系统。

面向跨智算中心场景下高突发、多并发“大象流”传输导致的网络运力下降与算力效率损失等问题，中国移动革新传统流量分发、安全加密与接口保护机制，提出以超宽管道（SuperPipe）、弹性通道（FlexLane）以及物理层安全（physical layer security, PHYSec）加密为核心的以太网智算互联技术体系，如图5所示。

中国移动自2024年起积极布局基于以太网的跨智算中心互联Scale-Across网络技术，形成完整的技术体系，包括以下三大关键技术。

(1) SuperPipe：传统广域网采用五元组哈希方式进行负载分担，容易将“大象流”分担至同一物理链路，导致拥塞丢包，影响整体算效。SuperPipe技术基于报文组分发的广域网以太网端口聚合机制，支持单通道400 Gbit/s~32 Tbit/s自适应带宽调整，有效解决了传统链路聚合在跨智算中心高收敛场景下的负载不均问题。该技术首先通过报文流分类识别与分组标记，然后依据分组ID进行组调度与逻辑端口映射，最后在接收端按分组ID完成乱序重排。SuperPipe可为多条物理端口间的大象流提供自适应负载均衡，显著增强网络对突发高带宽流量的适应能力，为智算中

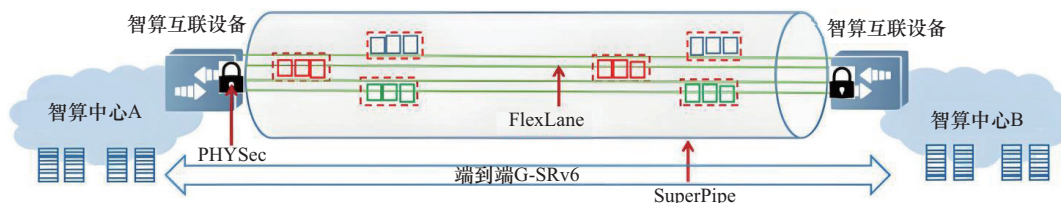


图5 以太网智算互联技术体系

心间的高性能互联提供带宽支撑。

(2) FlexLane<sup>[13]</sup>: 网络互联是集群可靠性的关键环节, 任何互联链路故障都可能导致AI任务发生小时级或更长时间中断, 严重影响算效并造成算力资源的浪费。FlexLane技术通过在以太网物理层实时监测通道状态与精准故障识别, 在信号劣化前主动隔离异常通道, 并降速运行。链路两端通过状态协商协议实现故障处理与速率调整的同步, 确保传输的一致性。FlexLane借助灵活的多通道架构, 支持故障通道降速运行, 以低成本提升链路可靠性, 保障AI训推业务的连续稳定运行。

(3) PHYSec: 智算中心通过以太网传输涉及企业安全生产的AI模型参数以及敏感数据, 其在传输的过程中面临泄露的风险, 因此, 具有极高的安全诉求。传统的媒体访问控制安全(media access control security, MACSec)加密机制虽可保障数据链路层安全, 但加密后仍会暴露以太网帧头部信息, 且认证过程带来封装开销, 占用了业务带宽。PHYSec技术的原理是将密码学算法下沉到以太网物理层, 利用物理层内生填充域构建比特容器以承载加解密参数, 并对该容器内的比特流进行机密性与完整性保护。该技术可在光模块的数字信号处理芯片中实现, 能够突破传统网络安全机制在带宽开销、时延及保护范围等方面的瓶颈, 解决传统安全机制造成的链路性能下降问题, 从而实现零开销、低时延、全流量覆盖的加解密。

基于上述技术, 可将分散的算力资源高效整合, 以低成本实现“聚沙成塔”, 解决百公里级城市群算力碎片化问题。试点验证表明, 在跨智算中心700亿参数大模型训练中, 采用流水线并行方式, 实现了98%以上的等效算力效率, 这是探索跨智算中心互联新架构和新技术的重要突破。

展望未来, 智算中心互联中光通信技术将与

IP深度协同发展。在技术演进方面, 传输速率向800 Gbit/s/1.6 Tbit/s ZR+高速接口升级, 传输距离扩展至 $10^6$  m量级, 同时400 Gbit/s ZR/ZR+成本进一步降低; 在产业生态方面, 400 Gbit/s/800 Gbit/s ZR新技术逐步替代存量100 Gbit/s光模块市场, 思科、诺基亚及国内互联网头部企业已开展了IP与光融合的技术方案研究, 以及跨智算集群互联的应用。IP与光融合的智算集群互联技术架构凭借高带宽、高可靠和低成本优势, 正逐步向运营商城域网、广域网场景发展。

### 3.2 AI赋能网络

通信网络的智能化转型, 即AI赋能网络, 其核心在于将AI技术深度集成至网络体系中, 以推动网络向自主化、智能化演进。AI赋能网络重点围绕运维智能、运行智能以及应用与服务智能3方面展开。其中, 运维智能面向网管系统, 聚焦于网络全生命周期(规划、建设、维护、优化、运营)的自动化管理; 运行智能通过引入AI, 推动网元运行向高可靠、业务体验向高质量迈进; 在此基础上, 应用与服务智能利用AI来丰富应用体验, 推动服务模式由“资源式服务”向“任务式服务”演进。

#### 3.2.1 网络运维智能

网络运维智能通过网络运维大模型实现网络全景状态洞察、全域知识智能推理、跨系统集成控制, 面向“规、建、维、优、营”网络运维运营全流程。其价值主要体现在3个方面: 第一, 通过网络运维大模型实现对网络质量与隐患的主动预防、提前发现及修复, 提升网络整体可用性与质量。第二, 通过网络运维大模型实现智能质检、验收、稽核, 提升运维人员一线现场作业效率。第三, 通过网络运维大模型实现智能预测和控制策略, 有效降低基站和机房等基础设施的能耗, 达成绿色节能目标。

网络运维智能的系统性实现, 依赖于一个端到端、全场景的产品与技术支撑体系, 该体系包



含4个关键组成部分：第一，网络智能化平台，对外开放柔性的网络仿真环境，吸引合作伙伴共同开展网络运维智能的技术创新，并将优秀的技术引入生产网络中使用；对内承载所有的网络运维大模型的推理和网络智能化小模型能力，以逻辑集中、云边协同的方式支撑全网所有省份开展网络智能化应用。第二，网络智能化能力，基于网络运维大模型构建“4+X”网络智能化能力体系，支撑网络运维各类应用。其中，“4”代表网络专属能力，包括预测智能、感知智能、诊断智能<sup>[14]</sup>、控制智能；“X”代表通用AI能力在网络域的适配。第三，网络智能化应用，围绕“规、建、维、优、营、资”打造网络智能化标杆应用，实现网络智能化应用规模化价值突破，形成规模效应的商用产品。第四，标准与产业引领，电信管理论坛（TeleManagement Forum, TMF）、第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）、欧洲电信标准组织（European Telecommunications Standards Institute, ETSI）、中国通信标准化协会（China Communications Standards Association, CCSA）等标准组织，从顶层设计、业务场景与AI专业技术3个维度全面布局标准工作，引领产业。

### 3.2.2 网络运行智能

网络运行智能面向各种网络运行类的场景和业务，通过引入AI技术对海量网络数据进行分析与建模，对内实现网络体验优化、运行效率提升，对外实现能力开放。

网络运行过程中会产出各类高价值数据，包括鉴权、会话等网络信令数据，用户标识、签约等用户数据，速率、时延、丢包等性能数据，用户定位、信号覆盖等位置数据等。在这些数据基础上，可构建出用户移动分析、体验质量（quality of experience, QoE）分析、流量预测、拥塞预测等丰富的AI原子能力，进而支撑各类

网络运行场景。这些场景可按不同粒度划分为用户级、业务级、网络级。针对用户级，网络运行智能可通过用户画像、移动性分析和行为分析等，精准洞察个体需求，提升服务个性化和体验感知；针对业务级，可依托应用识别、QoE感知、业务质差判断等，持续优化业务质量；针对网络级，可通过智能寻呼、网元负载分析及用户面性能优化等方式，提升网络整体运行效率。

通过以上应用场景，网络运行智能可实现四大业务价值：一是推理和预测用户行为，通过差异化管理，提升用户体验；二是分析网络信令、业务流量，提升网络运行效率，降低成本；三是通过智能诊断和预测，辅助网络进行故障排除和网络优化；四是开放网络能力和数据，服务行业企业，构建产业生态，形成新发展契机和收入增长点。

### 3.2.3 网络应用与服务智能

在网络运维与运行智能的基础上，通过AI与基础通信业务的融合，可打造创新业务形态，催生更多新型应用，其中代表性案例包括AI新通话和任务式服务。

（1）AI新通话：通话作为电信服务的核心业务之一，通过引入AI交互和内容生成能力，同时整合服务资源，实现智能翻译、语音通话可视化等功能，可打破传统边界，将其升级为“服务连接”，从而提升通信的趣味性和质量。一方面，借助AI技术，能够实现语音识别、智能翻译以及智能表情等互动功能，让通话变得更生动有趣，重新获得增长动力；另一方面，AI技术能够有效整合各类资源，将通话延伸至身份验证、智能客服、远程协助等场景，以创造新的业务价值。

（2）任务式服务：任务式服务是基于AI大模型构建的一种新型网络服务模式，旨在打造以用户需求为导向、以任务完成为核心的服务交付方

式。用户通过自然语言明确提出需求后，系统可通过意图感知理解任务内容，依托“算网大脑”智能调度网络资源，实现从业务场景理解到资源调度策略制定的全流程自动化。相比传统的资源式服务，任务式服务不需要用户关注底层复杂算网环境，只要提出任务目标，系统即可自动完成算力、网络、数据等多要素的智能编排，提供性能最优、成本可控、体验极佳的算网服务，对于实现“东数西存”“东视西渲”“中训边推”等国家战略场景的智能化具有重要意义。

#### 4 结束语

通信网络经历了从IP化、IT化到AI化的三次重大变革，每一次都驱动着网络效率与能力实现跨越式提升。当前，AI化变革正以“网络使能AI”与“AI赋能网络”为核心，推动网络与人工智能的深度融合与双向赋能。“网络使能AI”致力于构建高效、低时延的互联底座，以释放超大规模智算集群的算力潜能；“AI赋能网络”则旨在推动网络运维、运行与业务服务向自动化、智能化演进，以提供更稳定、高效、智慧的网络服务。

未来，这一变革将持续深化，沿上述双路径演进，推动网络从单纯的连接基础设施向智能化、服务化的新型信息基础设施全面升级。在“网络使能AI”方面，核心是面向超大规模智算中心，构建高效、安全的智算网络体系，通过优化卡间、机间与集群间的协议与架构，提升关键设备性能，并突破高性能故障管理、高速接口及加密传输等技术，为打造超大带宽、超低时延、超高可靠且安全的智算网络夯实基础。在“AI赋能网络”方面，AI与网络的融合将从表层赋能走向“智能原生”的深度重构。网络运行将从基于规则的自动化，迈向目标驱动、全域自主的自治系统；网络服务则演进为能主动理解与预判需求的智能体服务。面向6G，AI

能力将深度嵌入网络架构设计，其服务核心也将从人拓展至海量自主智能体，使之真正成为数字智能社会的核心中枢。“网络使能AI”与“AI赋能网络”二者协同并进，将共同推动通信网络向更高效、更灵活、更智能的方向发展，为“AI+”时代奠定坚实基础。变革不是一蹴而就的，IP化、IT化、AI化这三大变革仍然在持续深化，是未来通信网络基础设施发展的核心驱动力。

#### 参考文献：

- [1] 崔海东. 移动网络IP化的趋势、内涵和策略[J]. 现代电信科技, 2008, 38(4): 26-30, 36.  
Cui H D. Trends, connotation and policy for mobile network IP-based[J]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2008, 38(4): 26-30, 36.
- [2] Wang W W, He M Z. Softswitch for the next generation network (NGN)[C]//Proceedings of the 2009 Global Mobile Congress. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [3] 李勤. LTE-A回传网解决方案研究[J]. 电信技术, 2016(1): 23-27.  
Li Q. Research on LTE-A backhaul network solution[J]. Telecommunications Technology, 2016(1): 23-27.
- [4] Sánchez-Esguevillas A, Carro B, Camarillo G, et al. IMS: the new generation of Internet-protocol-based multimedia services[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(8): 1860-1881.
- [5] Feng Y X, Xiang D, Ma K S. A scalable methodology for designing efficient interconnection network of chiplets[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1059-1071.
- [6] Zu Y, Ghaffarkhah A, Dang H V, et al. Resiliency at scale: managing Google's TPuv4 machine learning supercomputer[C]//Proceedings of the 21st USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 24). 2024: 761-774.
- [7] Li A, Song S L, Chen J Y, et al. Evaluating modern GPU interconnect: PCIe, NVLink, NV-SLI, NVSwitch and GPUDirect[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2020, 31(1): 94-110.
- [8] Gangidi A, Miao R, Zheng S B, et al. RDMA over Ethernet for distributed training at meta scale[C]//Proceedings of the ACM



- SIGCOMM 2024 Conference. New York: ACM Press, 2024: 57-70.
- [9] Lee H S. Toward disaggregated and heterogenous AI systems[J]. IEEE Micro, 2025, 45(3): 4-5.
- [10] 中国移动通信研究院. 面向AI大模型的智算中心网络演进白皮书[R]. 2023-05-10.  
China Mobile Research Institute. White paper on the evolution of intelligent computing center network for AI large models[R]. 2023-05-10.
- [11] 段晓东, 程伟强, 王瑞雪, 等. 面向新型智能计算中心的全调度以太网技术[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(4): 57-63.  
Duan X D, Cheng W Q, Wang R X, et al. Global scheduling Ethernet for new intelligent computing center[J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(4): 57-63.
- [12] 段晓东, 李婕妤, 程伟强, 等. 面向智算中心的新型以太网需求与关键技术[J]. 电信科学, 2024, 40(6): 146-159.  
Duan X D, Li J Y, Cheng W Q, et al. Challenges and key technologies of new Ethernet for intelligent computing center[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(6): 146-159.
- [13] 中国移动通信有限公司研究院. 面向新型智算中心的以太网弹性通道(FlexLane)技术白皮书[R]. 2025-04-24.  
China Mobile Communications Co., Ltd. Research Institute. Ethernet FlexLane technology white paper for new artificial intelligence data center[R]. 2025-04-24.
- [14] Hua X L, Li Q, Zhang Z, et al. CSDnet: causal inference aided handover parameter adjusting effect estimation in cellular networks[C]//Proceedings of the ICC 2023-IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 5304-5309.

## [作者简介]



张同须 (1964- ), 男, 中国移动通信有限公司研究院科技委名誉主任、正高级工程师、全国工程勘察设计大师, 主要研究方向为移动及数据通信网络的设计。



段晓东 (1977- ), 男, 中国移动通信有限公司研究院副院长、“新世纪百千万人才工程”国家级人选, 正高级工程师, 主要研究方向为下一代互联网、算力网络、5G网络架构、6G网络架构、SDN/NFV等。



程伟强 (1980- ), 男, 中国移动通信有限公司研究院基础网络技术研究所副所长、正高级工程师, 主要研究方向为下一代互联网、数据中心网络、传输网等技术和标准。



张晓光 (1980- ), 男, 中国移动通信有限公司研究院网络与IT技术研究所副所长、高级工程师, 主要研究方向为网络云自动化集成体系及系统构建、算力网络软硬件架构设计、产业链创新体系及评估模型。