

算力时代网络运力研究报告

(2022 年)

中国信息通信研究院技术与标准研究所

2022年9月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。

前 言

“十四五”期间，我国数字经济将逐步转向深化应用、规范发展、普惠共享的新阶段。数字产业化应用、产业数字化转型等发展离不开算力资源的强力支撑，数字经济进入以算力为核心生产力的新时代。算力的供给和使用需以可靠的网络连接为基础，网络运力（即承载能力）成为支撑算力服务及应用发展的关键。同时，算力时代背景下差异化业务承载、算力数据和应用安全保障等挑战进一步凸显，面向算力业务需求的多维感知、基于云网边端一体化调度、提供确定性承载能力、保障业务承载的安全性等成为业界关注焦点，构建面向算力时代的高品质运力底座成为大势所趋。

本研究报告从网络运力现状、算力时代所面临的主要需求和挑战等出发，提出面向算力时代的高品质网络运力七大关键特征，即光缆层高通达、大容量全光底座、IP和光协同、多层次确定性承载、多维算力感知和路由、智能化管控运维、高安全算力承载等。建议产业各相关方在政策支持、技术研究、产品研发、产业应用及质量监测等方面通力协作，共同推动算力时代的网络运力发展演进，助力我国数字经济持续高质量发展。

目 录

一、 数字经济进入算力时代，运力筑基作用凸显.....	1
(一) 算力时代业务需求增长强劲.....	1
(二) 多级算力供给体系加速构建.....	2
(三) 运力筑基作用持续强化.....	4
二、 网络运力持续演进，资源调配能力不断增强.....	5
(一) 网络规模和应用稳步提升.....	5
(二) 网络运力架构持续扁平化.....	6
(三) 网络资源可控性逐步增强.....	7
三、 算力时代新型需求明确，驱动网络运力加速演进.....	8
(一) 多层次跨域调度和灵活异构接入.....	8
(二) 多场景差异化资源调配需求强化.....	10
(三) 数据安全风险保障要求显著提升.....	11
四、 多维按需协同推动创新，构建高质量网络运力.....	12
(一) 优化光缆网络高通达拓扑.....	13
(二) 持续构建大容量全光底座.....	14
(三) 强化 IP 和光多维协同联动.....	16
(四) 提升网络智能和运维水平.....	17
(五) 多层次化支撑确定性承载.....	18
(六) 多维算力资源感知和路由.....	19
(七) 增强网络运力高安全能力.....	20
五、 强化网络运力顶层设计，助力经济高质量发展.....	22
(一) 加强网络运力发展统筹规划.....	22
(二) 增强网络运力自主创新能力.....	23
(三) 推动网络运力产业协同发展.....	23
(四) 构建网络运力服务监测体系.....	24

图 目 录

图 1 消费互联网与产业互联网典型特征	2
图 2 多级算力供给体系示意	4
图 3 我国光缆线路长度发展情况	5
图 4 各类云边端应用场景下的接入方式	9
图 5 算力应用典型承载需求和算力需求	10
图 6 高品质网络运力技术视图	13
图 7 全光运力底座时延圈示例	15
图 8 网络运力绿色发展技术示例	16
图 9 IP 和光网控制协同联动示意	17
图 10 网络运力协同管控	18
图 11 L0~L3 层确定性承载技术示例	19
图 12 网络运力的安全防护体系示意	21

一、数字经济进入算力时代，运力筑基作用凸显

（一）算力时代业务需求增长强劲

数字经济已进入以算力为核心生产力的新阶段。“十四五”时期，我国数字经济转向深化应用、规范发展、普惠共享的新阶段，2021 年，我国数字经济发展取得新突破，数字经济规模达到 45.5 万亿元，同比名义增长 16.2%，高于同期 GDP 名义增速 3.4 个百分点，占 GDP 比重达到 39.8%¹。数据、算力和算法已成为数字经济涉及生产资料、生产力和生产关系的三大核心生产要素。作为发挥数据生产要素价值的关键驱动力，算力对经济增长的拉动具有长期性和倍增效应。根据《2021-2022 全球计算力指数报告》，计算力指数平均每提高 1 点，数字经济和 GDP 将分别增长 3.5%和 1.8%，数字经济已逐步进入以算力为核心生产力的新阶段。

消费互联网新业态和新模式的竞相发展催生泛在计算及算力协同需求。2021 年我国互联网用户规模突破 10 亿大关，数字医疗、数字办公的用户规模同比增长 38.7%、35.7%，数字娱乐、智能出行和网络直播等用户规模也呈普遍增长态势，推动海量数据计算需求持续增长；智能手机、VR/AR 头显、智能网联汽车、物联网终端、智慧家庭网关、工业园区网关等智能终端的多元化分布式发展，驱动海量数据处理从集中式计算向分布式云计算发展，并逐步从云端向边侧和端侧扩散，催生数据泛在处理及云边端算力的协同调度需求。

产业互联网数据量呈指数级增长。2020 年，我国产业数字化规模

¹ 中国信息通信研究院《中国数字经济发展报告（2022 年）》

达 31.7 万亿元，占数字经济总规模的比重高达 80.9%。一方面，相对消费互联网，产业互联网数据量更庞大且增速更迅猛，智能制造、智能安防、车联网等典型应用产生的数据爆发增长，譬如一辆联网的自动驾驶汽车每天将产生 12TB 的数据，相当于大致 3000 个互联网用户的日数据量。另一方面，产业互联网应用与工业、农业及服务业等产业领域的设计、研发、制造、经营等每个环节密切相关，对数据处理的实时度及精确度要求更高，需要强大泛在的算力资源及高质量的网络传输配合完成数据的高效处理，譬如 L4 级别的自动驾驶的算力要求高达 100TOPS。

算力时代消费互联网与产业互联网的典型特征、算力及运力需求特性见图 1。



来源：中国信息通信研究院

图 1 消费互联网与产业互联网典型特征

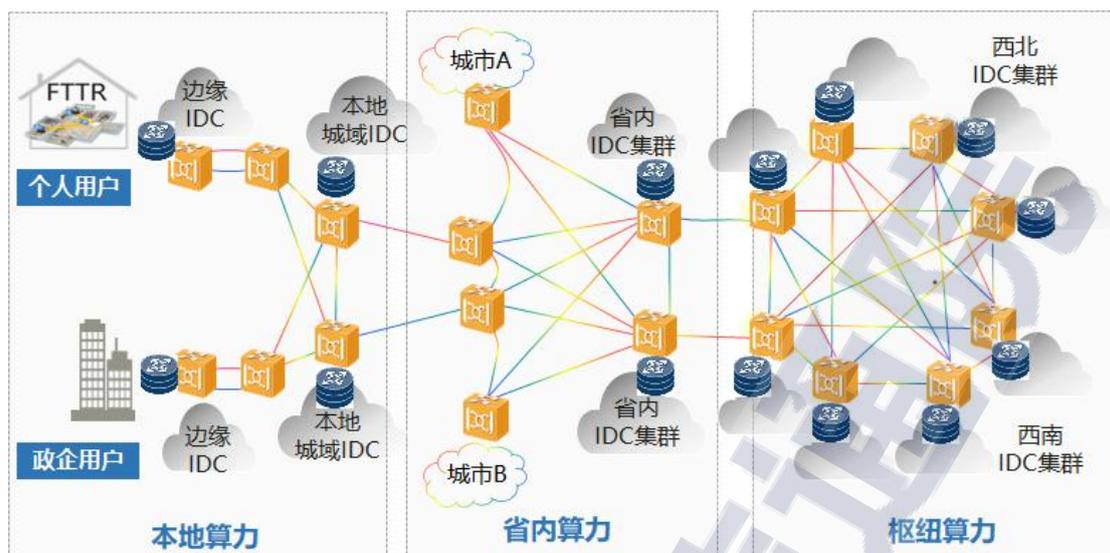
（二）多级算力供给体系加速构建

国家政策与产业应用助推多层次算力供给体系形成。在国家政策

层面，2021 年 5 月，国家发改委会同有关部门发布了《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》，指出将布局建设全国一体化算力网络国家枢纽节点。2022 年 1 月工信部、发改委联合印发《关于促进云网融合、加快中小城市信息基础设施建设的通知》，组织实施云网强基行动，增强中小城市网络基础设施承载和服务能力，推进应用基础设施优化布局，建立多层次、体系化的算力供给体系。2022 年 6 月，国家发改委再次提出要强化全国一体化大数据中心布局，支撑“东数西算”工程建设，推动各枢纽节点建设尽快落地生效。

在产业应用层面，以视频、游戏、电子商务等为代表的消费互联网行业蓬勃发展，以金融、物流、制造等为代表的传统行业数字化转型不断深入，人工智能、边缘计算等新兴技术陆续推广部署，互联网企业以及有数据化转型需求的传统企业对数据及算力的需求，推动了各地数据中心的加速建设。同时，数字化转型业务收入已成为国内三大运营商的营收亮点，各运营商也在加快网络运力的前瞻布局和建设，作为算力基础设施建设的主力军，助推算力供给体系形成。

跨东西部多省市的算力资源布局已初步完成。目前国内已经初步形成多级算力中心体系，包括西部算力中心集群，各个省市的算力中心以及本地互联网数据中心（IDC），如图 2。随着八大算力枢纽和十大算力中心集群的规模建设，以及千行百业的数字化转型发展，算力应用将进一步向各类行业用户和广大消费者延伸，将逐步形成泛在、多层次和体系化的算力供给体系。



来源：中国信息通信研究院

图 2 多级算力供给体系示意

（三）运力筑基作用持续强化

网络运力整体服务能力大幅提升。截至 2022 年二季度，我国三家基础电信企业固定互联网宽带接入用户总数达 5.66 亿户，光纤接入（FTTH/O）用户达到 5.38 亿户，5G 移动电话用户达到 4.75 亿户，蜂窝物联网终端用户达到 16.67 亿户，移动互联网用户数达 14.55 亿户²，庞大用户规模的加速增长离不开网络运力服务能力的显著提升。

算力时代网络运力筑基进一步凸显。随着云计算、大数据、物联网、工业互联网、区块链、人工智能、虚拟现实/增强现实等数字技术和产业的融合应用发展，预计我国每年对算力的需求将以 20%+ 的速度快速增长，算力成为数字经济进一步发展需要突破的关键瓶颈。算力的供给和使用，数据的采集、处理和使用，用户服务的申请、获取和使用均以可靠的网络连接为基础。作为算力服务的承载底座，网络

² 工信部 2022 年一季度通信业经济运行情况

是连接用户、应用、数据和算力的桥梁，其运力至关重要，需要将部署在云、边、端各层面的计算资源高效组织和调度，以满足算力时代的高品质 ICT 应用，进一步凸显筑基作用。

二、网络运力持续演进，资源调配能力不断增强

（一）网络规模和应用稳步提升

光缆网络建设平稳推进。目前我国已经建成全球规模最大的光纤宽带网络。截至 2021 年底，全国光缆线路总长度达到 5488 万公里（见图 3），其中接入网光缆长度占比达 63.8%，为我国数字经济蓬勃发展提供了坚实支撑。



来源：工业和信息化部

图 3 我国光缆线路长度发展情况

网络运力技术持续演进。光传送网络层面，超高速、大容量和灵活化等发展态势持续。100Gb/s 和 200Gb/s OTN/WDM 传输、可重构分叉复用设备（ROADM）全光组网等已规模商用，并向 400Gb/s 及

以上速率有序推进。多业务综合接入承载能力进一步提升，面向 5G 承载的分组化传送技术由分组传送网（PTN）等逐步演进为切片分组网（SPN），光传送网（OTN）专线等应用逐渐向城域边缘下沉，光业务单元（OSU）等更小颗粒的品质承载技术持续探索。IP 网络层面，IPv4+IPv6 双栈、SRv6 和确定性 IP 转发、IPsec 隧道和零信任安全等技术逐步引入，组网和安全等能力进一步提升。网络管控层面，软件定义网络（SDN）、网络功能虚拟化（NFV）、网络切片协同编排、人工智能和大数据分析等技术应用逐步深入，网络智能管控能力、协同编排能力等显著增强。

业界逐步推出面向算力的承载网络规划。确定性、智能化、定制化、灵活扩展、IP+光协同以及服务能力开放等已成为网络运力发展新特征，加速构建满足算网一体与云网融合发展的新型网络运力引起产业高度关注。截止目前，国内运营商相继发布了面向算网一体与云网融合的网络发展战略规划，中国电信提出“网是基础、云为核心、网随云动、云网一体”的云网融合战略，并推动承载网向智能城域网和全光网络 2.0 发展。中国移动提出算力感知网络（CAN）体系架构，构建基于光交叉连接设备（OXC）的新一代光电联动全光网，并推动 SD-WAN 和高品质云专网演进；中国联通依托 CUBE-Net 3.0 网络创新体系，发布了算力时代全光底座建设规划并已在 4 省市开展实践。

（二）网络运力架构持续扁平化

运营商内承载网络架构持续扁平化。IP 网络层面，为了实现互联网骨干层业务的快速疏导和汇聚，逐步形成了城域汇聚接入、省级汇

聚和骨干核心的网络层次。随着本地数据流量和边缘计算节点的大幅增加，单一运营商城域汇聚节点间的互联度增加，需要减少城域的汇聚接入层次，城域 IP 网络架构将进一步扁平化，5G 承载网和 IP 城域网将趋于统一融合发展模式。光传送网络层面，与 IP 层网络扁平化相对应，省际干线、省内干线逐步趋于扁平化融合，适应新需求推动以 ROADM/OXC 节点构建全光高速直达网络，城域层面逐步向政企客户和工业园区等边缘侧延伸。

运营商间骨干直联点逐步增加，网络间互通架构进一步扁平化。目前我国运营商 IP 互联网络间的互联互通采用直联点对等互联的方式实现。经过多年发展，我国的国家互联网骨干直联点由最初的北京、上海、广州三个已发展到了 2022 年的 19 个，通过增加骨干直联点，减少了跨不同运营商互联网的路由跳数，极大提升了跨网络连接的速度和质量。

云数据中心间扁平化的多云互连趋势明显。随着云计算技术的迅速发展和推广应用，信息服务平台加速向云服务迁移，云数据中心之间、用户和云数据中心之间的数据流量激增。为保障接入用户云服务的数据通信质量，云服务提供商、电信运营商等在云数据中心之间构建全光直联通路已成为典型模式，进一步扁平化云间互联架构，同时结合骨干和城域一体化组网，逐步实现一跳入云，提升用户上云的服务体验。

(三) 网络资源可控性逐步增强

开放的管控接口，增强网络调度便捷性。承载网络虽然具备层次

化网络管理系统，但是端到端业务配置开通时间偏长，通常需要几天乃至一周时间，不能满足新兴业务的快速响应需求。运营商利用 SDN 和 NFV 等技术对网络资源进行逐级抽象和信息建模，实现了基于管控接口的跨域业务配置功能，大大提升了端到端业务配置速度。另一方面，通过开发跨越多技术网络的编排运营系统，将用户需求进行编排映射，通过面向应用层意图驱动的北向接口对网络资源进行配置，相比传统的人工调单方式，进一步提升了业务调度的便捷性和响应速度。

AI 技术在网络运力中的应用逐步加速。随着网络运力业务场景向多样化和复杂化方向发展，对网络管理的智能化需求日益凸显。通过引入 AI 和大数据挖掘分析等技术，对网络资源进行实时动态监控、分析与预测，从而实现更加准确和智能的网络运力运维。目前国内外已经有众多组织机构正在踊跃开展网络智能化管控系统开发和自智网络的分级标准研究，国内运营商也针对各种智能化运维场景开展现网试点，AI 技术在网络运力中的应用正在逐步加速。

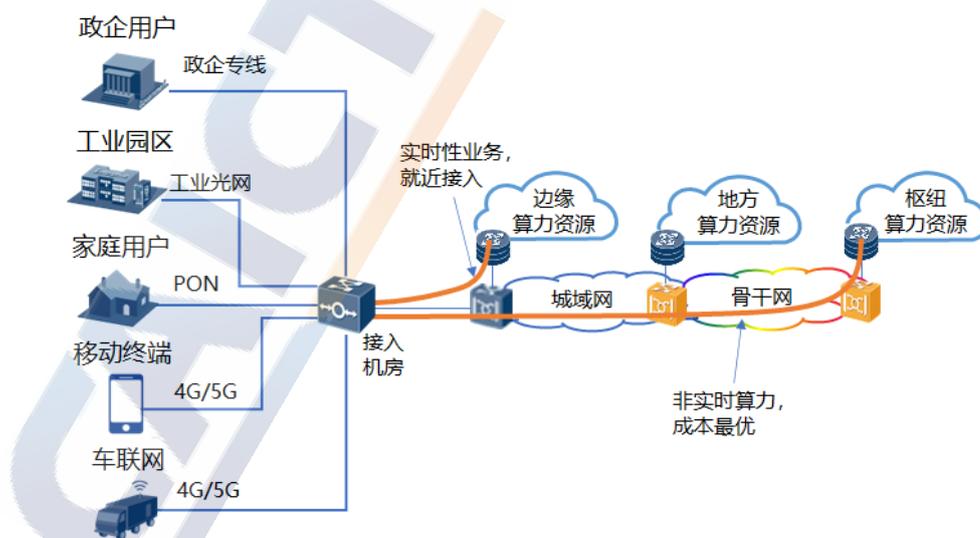
三、算力时代新型需求明确，驱动网络运力加速演进

(一) 多层次跨域调度和灵活异构接入

多层次跨域算力调度需求推动网络运力架构革新。随着国家级、省级和地市级等多级算力中心体系的形成，以及泛在算力应用需求进一步向边缘云的分布式计算和用户侧智能终端延伸，运力不仅要支撑实现国家八大区域算力节点之间、各层级算力节点之间的同级或多级低碳化算力调度，还要实现云计算的中心云节点、区域云节点和千行

百业的边缘计算节点之间的多层次、广覆盖的算力资源调度，网络运力架构和业务调度模式进一步革新势在必行。

灵活化算力应用和多态异构共存共驱网络运力演进。与传统消费互联网以宽带接入用户和 4G/5G 基站为主的数据流量特征不同，产业互联网各类行业的大数据分析带来的算力调度需求各异，譬如对于实时性要求高的工业机器视觉等算力应用，要调用边缘云算力和本地/区域 IDC 算力；对于实时性要求不高但成本敏感的影视作品后期制作渲染等算力应用，可调用西部地区 IDC 集群的算力资源。另外，云网边端的各类设备形态和技术多样，接入网络方式各异，端到端异构网络互通组网和协同管控难度增大。譬如企业园区存在固定办公设备和移动设备，工业园区存在智能制造和信息监控设备，家庭中有智能家居和家庭网关等多设备，并且采用政企专线、工业光网、无源光网（PON）宽带、4G/5G 无线网络等不同的接入方式，如图 4 所示，差异化算力应用和多态异构共存等驱动网络运力加速演进。



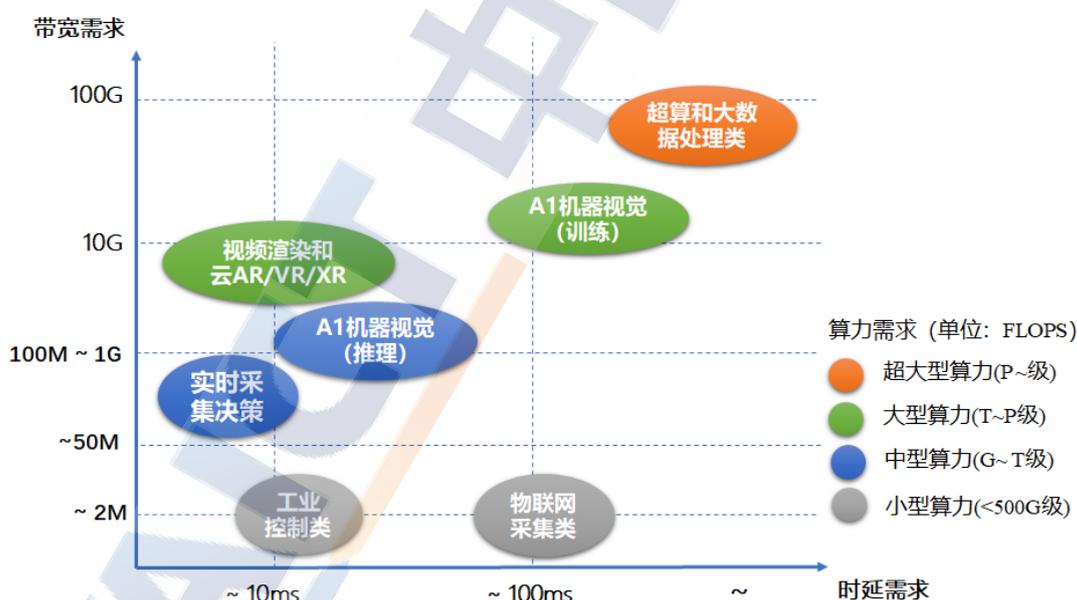
来源：中国信息通信研究院

图 4 各类云边端应用场景下的接入方式

（二）多场景差异化资源调配需求强化

多应用场景和差异化算力调度进一步推动网络运力革新。不同典型应用场景的算力需求和承载需求趋向多样化，推动网络运力持续革新发展。例如科学技术、政府大数据治理等超算和大数据类应用提出了强算力、大带宽和高可靠的承载需求，AI 机器视觉类、AR/VR 和视频渲染类应用对带宽和时延要求高，远程状态监测、性能测量和远程控制等物联网数据采集数量虽然带宽需求较小，但是要求提供广泛覆盖和海量链接。

算力应用的承载需要更泛在灵活的网络连接、更精细化的业务感知和更加确定性的网络服务能力。基于不同的行业应用场景，算力应用的典型承载需求和算力资源需求如图 5 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 5 算力应用典型承载需求和算力需求³

业务多维感知成为运力的典型网络要求。不同行业的算力应用需

³ 算力需求分级参考 CCSA《面向业务体验的算力需求量化与建模研究》

求在承载网络性能、算力类型和算力规模上均存在明显差异。为满足行业算力应用的差异化承载需求，需支持多维算力感知功能，进一步提升业务高质量体验。**算力接入的广覆盖和流量/流向的多样性需要灵活泛在的连接能力。**算力服务供给要保证算力使用的便捷性，面向多层泛在算力资源，保障用户灵活接入。结合多方向复杂流量流向，承载网骨干层需支持快速敏捷的算力接入和智能化调度能力。**确定性网络成为高品质承载的重要保障。**确定性带宽、确定性低时延/抖动、高可靠性等网络能力成为有效支撑行业关键应用的优先网络属性，如在数据存储灾备场景下，需要提供跨地域大带宽、低时延、高可靠的确定性网络服务。

(三) 数据安全风险保障要求显著提升

算力数据安全性要求进一步提升。因算力数据同时涉及消费互联网和产业互联网，算力数据的安全性要求明显提升。譬如，政务、医疗和金融数据关系国家及个人数据安全，产业互联网和物联网的数据安全涉及国家信息基础设施的安全命脉，企业核心生产数据一旦泄露，将对企业造成重大损失等。算力数据的高安全和隐私保护等需求特性，要求算力承载网络提供更高的网络安全防护能力，多措施强化以避免数据泄露、篡改和丢失等风险。

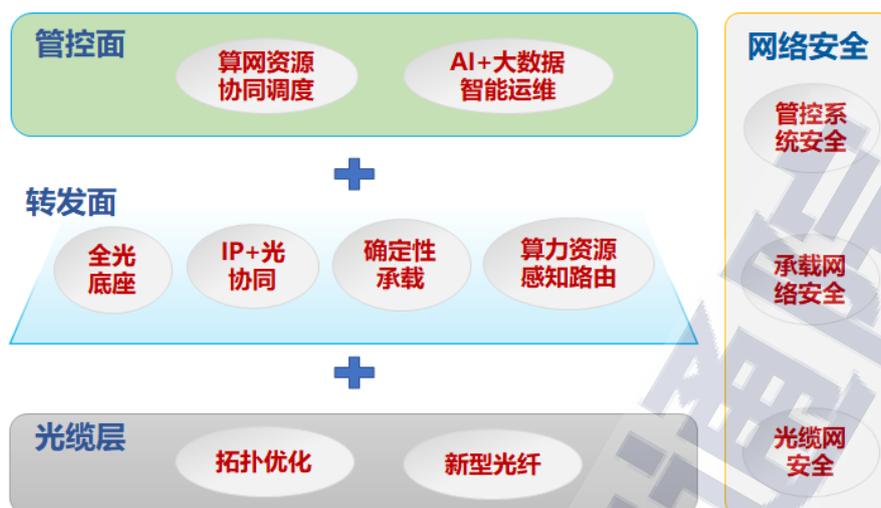
算力应用引入新的数据和网络安全风险。为了实现算力资源的按需动态调度，算网融合运营平台需要收集和分析大量的业务应用信息、算力分布信息和网络资源综合信息，重要数据高度集中化增加了致敏感信息泄露或被篡改的风险；此外，云网边端的分布式调度模式，端

到端跨域组网和异构网络互通场景，导致数据传输的路径更多，服务面更广，数据安全风险随之增加；最后，采用业务感知协议和网络控制协议，实现算网之间多维动态感知和驱动算力资源按需调度，网络安全和可靠性带来的风险也随之增加。

在算力数据传输过程中，需面向算力承载需求，系统分析包括光缆层、数据转发面和管控系统等安全风险点，构建体系化的网络运力安全治理架构，不断提升数据和网络安全防护水平。

四、多维按需协同推动创新，构建高质量网络运力

适应算力时代发展需求，推动多维技术协同创新，构建高品质网络运力底座。如图 6 所示，在光纤光缆层，结合算力应用模式优化物理直达路由资源布局；在转发层，针对云网边端多技术异构网络、多智能终端接入和差异化业务承载等需求，加速网络运力核心技术创新和升级演进，进一步强化全光底座传送、IP+光协同、确定性承载、多维算力资源感知和路由等能力；在管控层，推动提升算网资源协同调度、基于 AI+大数据分析预测的智能化运维能力等。另外，基于算力应用安全关键需求，针对光纤光缆层、转发层和管控层进一步协同提升体系化、网络安全防护能力等。



来源：中国信息通信研究院

图 6 高品质网络运力技术视图

（一）优化光缆网络高通达拓扑

优化光缆网拓扑结构以实现全域覆盖，进一步增加算力节点间的物理连通度。现有光缆网主要满足传统电信业务机房和消费互联网业务为主的数据中心互连需求，在全面覆盖八大国家算力枢纽节点和十大国家数据中心集群的拓扑结构和连通度方面，尚待优化完善国家枢纽节点之间的直达路由光缆，增加节点的光缆路由方向，进一步提升网络的物理连通度。此外，同步建设区域内重要城市间的直达光缆，保障数据中心（DC）集群之间、DC 集群内以及城市群内支持实现低时延、高可靠和高通达互联互通。

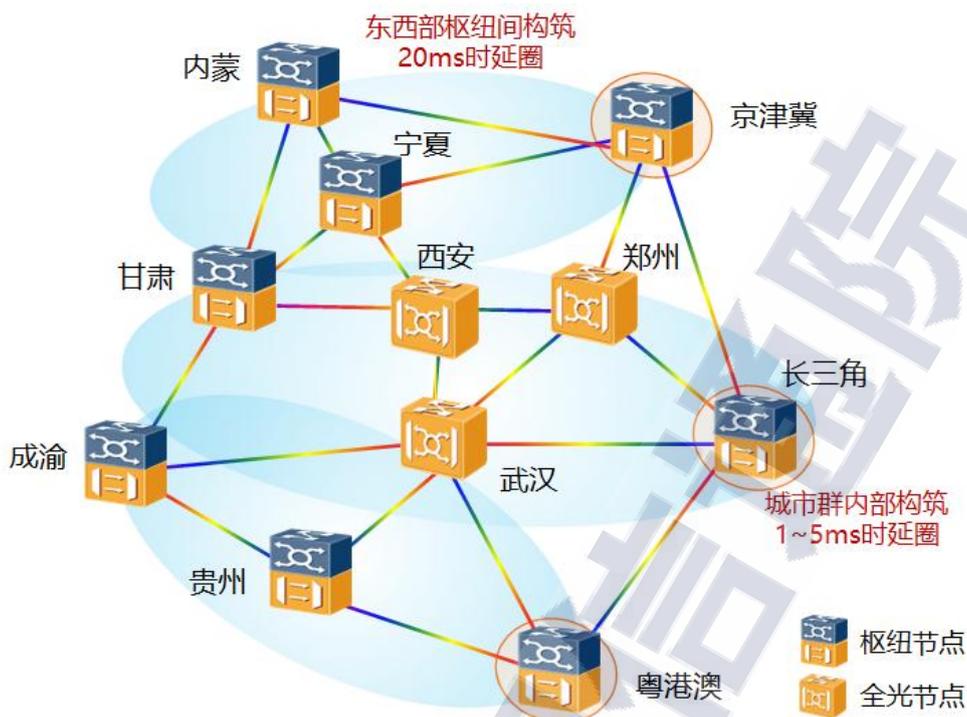
进一步探索新型光纤应用和研究，适应算力数据及应用迅猛增长需求。我国运营商在 2016 年左右启动 ITU-T G.654E 超低损光纤的应用评估，目前已逐步进入工程化应用阶段，东数西算等工程将进一步加快推动 G.654E 光纤在省际干线的部署。另外，在算力应用数据量迅猛增长的强力驱动下，业界也在积极探索多芯光纤（MCF）、少模

光纤（FMF）和空芯光纤等面向超大容量、低时延等特性的新型光纤技术研究和验证评估，目前整体尚处于产业发展初期，有待多方持续推动发展。

（二）持续构建大容量全光底座

构建泛在全覆盖的扁平化全光网络，通过全光互联提供低时延、大带宽和广覆盖的基础网络能力。在城域网层面持续推动 OTN 和 ROADM 的规模部署，基于新一代 OTN、SPN 等技术实现高品质算力专线业务的多颗粒灵活接入和硬切片带宽保障，满足各类算力应用对带宽、时延和可靠性等 SLA 指标的差异化诉求；骨干网层面，持续推动 400Gb/s 及以上速率路由器和光传输系统的规模部署，构建大容量、波长颗粒灵活调度的骨干全光网络。

面向“东数西算”等场景，通过全光交换节点实现光层直达，减少电层设备引入的节点处理时延，构建以算力枢纽节点等为中心的多层次时延圈（见图 7）。譬如在东西部的算力枢纽中心之间，构建 20ms 的时延圈；在区域内的城市群间或城市内部，根据传输距离和覆盖规模，构建 1~5ms 的时延圈，满足算力应用业务的低时延需求。



来源：中国信息通信研究院

图 7 全光运力底座时延圈示例

充分发挥全光底座低碳潜能并持续创新，打造绿色网络运力。在实现全光组网构建低碳运力底座的同时，进一步基于多维技术创新持续助力节能减排，如图 8 所示。在芯片和模块等基础单元方面，进一步提升电域芯片工艺制程、光电模块集成度等，推进光子集成、基于硅光的光电合封等新型模块技术发展；在日常供电和能耗控制方面，逐步采用高压直流提升设备电源效率，积极探索基于 AI 的智能动态节能模式，充分发挥网络运力在不同流量场景下的降耗能力。

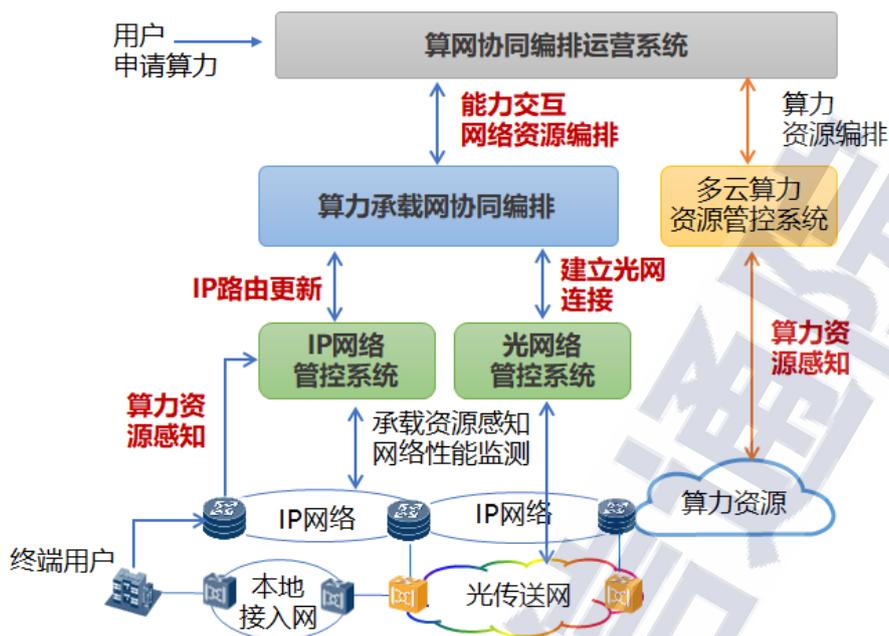


来源：中国信息通信研究院

图 8 网络运力绿色发展技术示例

（三）强化 IP 和光多维协同联动

IP 和光网络强化协同控制，支撑算力应用端到端敏捷开通。进一步推动 IP 和光网络协同联动，借助网络协同编排系统，实现承载层端到端 IP 路由更新及光层连接配置，为各类算力应用的客户按需分配算力资源并提供高品质的网络连接。IP 网络负责算力应用感知和算力标识感知，并将算力资源调度策略及其对带宽、时延等性能需求，映射为光网络管控系统或网络设备能识别的信息类型，实现端到端业务请求策略、算力资源派发和网络连接配置的精准匹配和实时调度，如图 9 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 9 IP 和光网控制协同联动示意

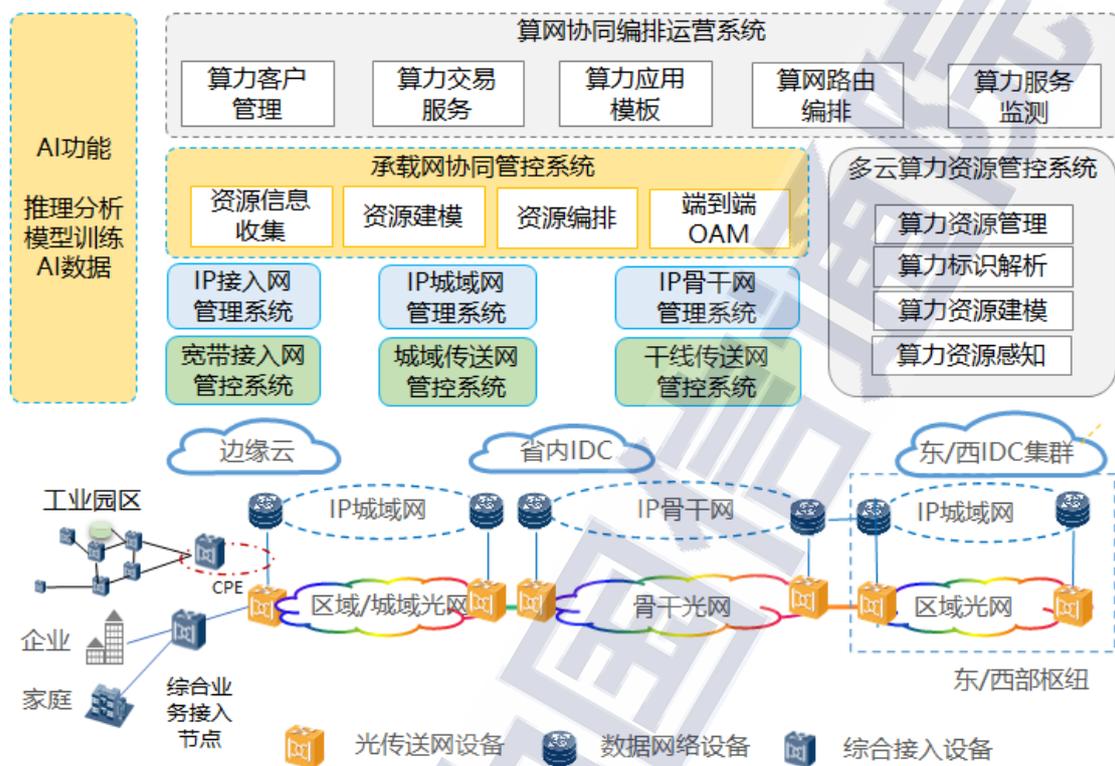
多层生存性机制进一步协同，提升算力应用可靠性。推动光网络光电保护恢复机制与 IP 网络自愈机制多层协同的逐步探索，基于设置拖延时间，以及交互保护组配置、网络链路状态和故障告警信息等实现多维度协同，提升网络高可靠性和业务高可用率。

(四) 提升网络智能和运维水平

端到端跨域管控，实现算力业务的快速接入和服务提供。聚焦接入网、城域和干线传送网以及 IP 网络关键资源特性进行统一建模，规范开放管控接口，解决多技术层次、多区域网络端到端业务配置问题，实现算力用户业务的快速接入和算力及网络资源快速提供。

引入算网协同机制，支撑算力和网络资源的协同编排。为管控系统定义面向算力承载需求的网络切片及业务协同编排接口，将网络运力的资源信息上报给上层的算网协同编排运营系统，如图 10 所示。

网络运力协同管控系统基于算网协同运营系统的网络资源编排需求，配置路由和连接资源。



来源：中国信息通信研究院

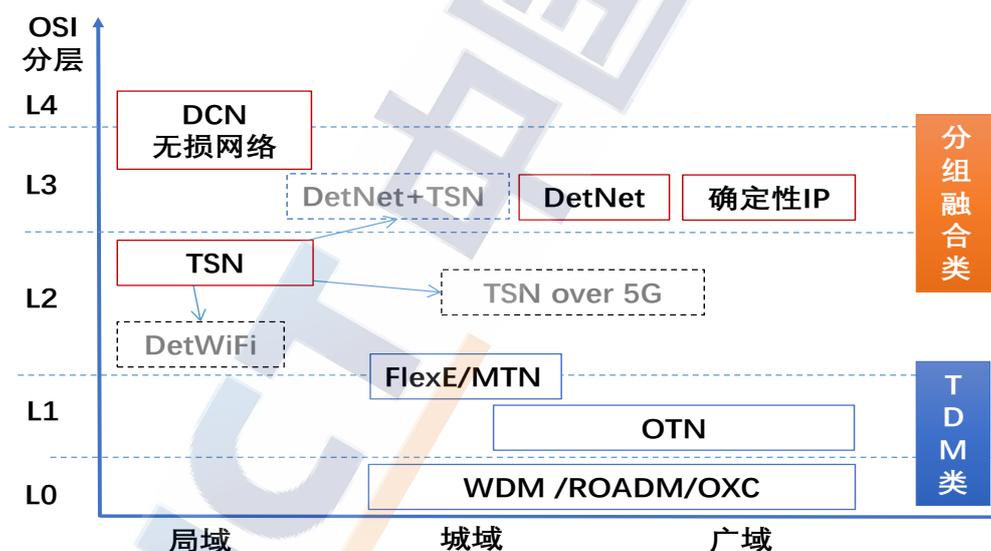
图 10 网络运力协同管控

借助 AI 和大数据分析功能，提升网络运力智能化。利用网络拓扑资源感知、端到端 OAM 监测等技术，实现跨层、跨域的端到端网络状态监测，同时基于 AI、数字孪生等技术，实现资源配置优化、业务端到端时延监测分析、故障定位和预测、健康度评估和优化、网络和客户流量预测等，实现网络运维智能化，提升网络运维效能。

(五) 多层次化支撑确定性承载

资源、路由和时延的确定性支撑算力业务的高质量承载。承载网络基于网络切片、路径规划、资源预留等融合创新，支持可规划、可

预期的流量调度，将时延、抖动和可靠性等控制在有界的范围内，满足算力应用确定性承载需求。网络转发面可在 L0~L3 等层引入差异化确定性技术，构建面向云边端算力协同调度的确定性融合承载网络，如图 11 所示。譬如通过 L0~L1 层 OTN/ROADM/OXC 光电协同组网打造高速灵活的算力全光运力底座，实现枢纽间、骨干数据中心间的全光互联；在城域网和接入网层面，面向城域内的云边协同、边边协同等网络连接需求，通过 L1~L3 的 MTN/SPN、确定性 IP 和差异化的服务质量控制，在 IP 网络引入 SR/SRv6 技术实现确定性的路由，引入周期性的队列调度技术，实现时延、抖动和带宽、丢包率等关键参数的确定性。



来源：中国信息通信研究院

图 11 L0~L3 层确定性承载技术示例

（六）多维算力资源感知和路由

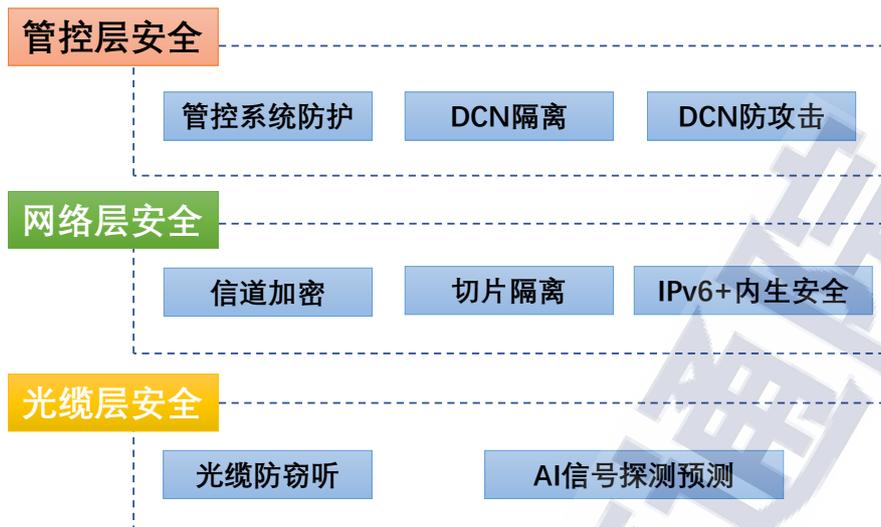
异构资源纳管实现泛在算力资源感知。算力资源由分布在网络上的云计算数据中心、边缘计算数据中心、人工智能数据中心以及高性

能计算中心等中包含的异构算力资源组成。在向用户提供算力服务时，这些异构资源需要利用异构资源纳管进行统一感知、度量和调度。异构资源纳管包含了对异构算力资源的感知、度量以及调度。针对泛在的云边端算力资源，异构资源纳管通过采用模型函数，将不同类型的算力资源采用统一的度量单位进行度量，形成业务层可理解、可阅读的零散算力资源池，并利用算力标识进行管理和调度，为网络运力的资源匹配调度提供基础保障。

发展计算优先网络（CFN）技术推进算力路由实现。计算优先网络（CFN）拟采用路由信息的形式，将当前网络中的算力及网络态势发布到网络中，并直接在网络内将算力任务相关的报文路由至合适的算力节点，以提升用户体验与网络利用率。算力路由不仅要考虑 IP 可达性，还要同时考虑网络拓扑下算力资源的动态变化与可服务状态。同时在路由恢复的基础上，增加对于算力任务重路由及调度的考量。目前，计算优先网络（CFN）还处于研究发展阶段，还需开展更多算网融合路由技术创新和产业应用探索。

（七）增强网络运力高安全能力

完善网络运力安全防护体系，满足算力数据和网络安全需求。应侧重关注光缆网信息泄露、IP 和光转发层网络攻击、集中式管控系统安全风险等诸多因素，逐步强化网络运力安全体系，满足算力数据安全和网络安全防护需求，如图 12 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 12 网络运力的安全防护体系示意

借助光纤信号异常智能化监测加固光纤光缆层安全。基于光纤光缆的非法窃听会造成海量网络信息泄露，积极探索光纤光缆窃听防御机制及部署应用，同时可引入 AI 助力分析光纤网络运行状况，及时预警异常情况，增强光纤网络安全性。

采用网络切片、管道加密等提升光网络安全。面向不同算力应用的承载，可引入高安全隔离技术如网络切片，实现网络资源的物理层或逻辑层隔离，并通过网络多层保护进一步提高业务可用性和数据传输的可靠性。此外可灵活按需选择 L1/L2/L3 层管道加密技术，对网络数据进行加密保护，进一步提升网络运力的安全防护能力。

基于 IPv6+ 技术增强 IP 网络内生安全。IPv6 有巨大的地址空间，通过对地址的编码，可以实现更好的网络溯源能力；同时利用 IPv6 协议更加强大的扩展性，将 IPSec 选项放在扩展报头中，实现网络内生安全。不断发展的 SRv6、APN6 等“IPv6+”技术，在安全领域可以形成融合创新，基于网络内生安全能力实现网安协同、安全监测、应用

管控和安全编排，实现业务精细化安全管控。

网络管控层提升管控系统及数据通信网络（DCN）安全。SDN 集中式的管控架构对管控系统安全性要求提高，可通过防火墙、多级备份、病毒防护、漏洞扫描、安全接入认证等手段，提供系统级的安全防护手段。另外，运力管控信息的 DCN 网络应和互联网实现硬隔离，在利用运维手段减少外部攻击风险的同时，引入 IP 网络安全机制以提高 DCN 网络的安全防护能力。

五、强化网络运力顶层设计，助力经济高质量发展

算力对数字经济发展的驱动价值已成业界共识，“东数西算”工程对算力服务基础设施影响深远。网络运力是支撑算力高品质连接、算力应用快速访问、算力资源灵活调度与编排的信息基础设施底座，其重要性也愈加凸显。目前我国网络运力已在网络规模、承载能力等方面取得长足发展，面向算力时代新需求，全光低时延、IP+光协同、确定可靠承载、多维协同感知、网络自智运维、绿色节能低碳成为未来网络运力发展的重要方向。

立足“十四五”发展时机，聚焦算力时代的网络运力未来发展，建议产业各方在网络统筹规划、技术创新攻关、产业协同发展、质量监测评估等多个方面协同推进，构建面向算力灵活调度、资源差异化调配、数据安全可靠的高质量网络运力，支撑算力行业应用，持续推动数字经济高质量发展。

（一）加强网络运力发展统筹规划

从顶层设计层面进一步强化面向算力的网络运力发展统筹规划，

加大对支撑算力时代的新型网络运力自主创新攻关、应用探索评估验证、标准化研制、产业发展投资等方面的扶持力度，进一步完善配套产业体系，夯实数字经济基础底座，引导网络运力技术产业持续向绿色低碳、健康集约方向发展。

（二）增强网络运力自主创新能力

面向算力时代诸多应用需求，聚焦面向算力应用需求的网络运力架构演进、全光底座构建、确定性承载、IP+光网络协同管控、网络智能管控运维、跨域跨网一体化调度、安全体系构建等，加强研发投入和关键技术攻关，引导网络运力向高速化、智能化、敏捷化、品质化、安全化等方向发展推动产学研用协同，加快推动关键技术领域的成果产出与产业转化，持续增强我国支撑算力服务的新型网络运力创新能力。

（三）推动网络运力产业协同发展

基于标准组织、产业联盟等多种途径，协同产业链各关键主体，实现算力、云和网多种基础性资源的优势互补，推动实现网络运力全链条的软硬件自主性协议及标准自主性并实现互联互通。同时，推动构建算力时代网络运力技术创新应用公共服务平台，联合产业各方积极开展运力新型技术及质量标准等验证评估，培育孵化面向算力服务的典型网络运力新应用，通过开展创新应用大赛、示范工程等形式，推动面向算力的新型运力应用试点，加快推动面向算力服务的新型网络运力产业链成熟，构建运力新生态。

（四）构建网络运力服务监测体系

加快构建网络运力的多维度评估指标体系，形成可量化、可评测的考核体系，指导产业各方在网络运力在应用试点、工程实施、规模部署等阶段，基于评估指标体系形成的网络质量评测结果，推动超算中心、数据中心与网络运力之间的高效供给对接。在此基础上，加速构建全国性和区域性的网络运力服务质量监测体系，以“测”促“建”，以“测”促“用”，通过开展网络运力服务质量的监测评估，带动网络运力基础设施建设、新技术创新应用、网络优化提升，充分发挥数据和算力的第一生产要素作用，推动我国数字经济高质量蓬勃发展。

中国信息通信研究院 技术与标准研究所

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-62300112

传真：010-62300123

网址：www.caict.ac.cn

