

# 融算网络体系基础研究

张宏科<sup>1,2</sup>, 于成晓<sup>2</sup>, 权 伟<sup>1,2</sup>, 张宇明<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 鹏城实验室, 广东深圳 518055; 3. 北京邮电大学计算机学院, 北京 100876)

**摘 要:** 随着国家数字经济战略加快实施建设, 算力基础设施成为数字经济发展的关键引擎. 新一代网络技术从信息数据通信向信息数据智能化处理转变, 泛在的计算、存储以及传输资源的融合逐步形成算力网络. 算力网络作为我国率先提出的新型网络架构, 是推动我国信息产业发展, 支撑我国“十四五”发展规划中“网络强化、数字中国”发展战略的重要基础. 在此背景下, 算力网络被提出旨在推动网络体系与算力体系的深度融合: 一方面通过算力提升网络服务质量, 资源调度以及服务功能的编排能力, 实现智能高效的网络算力服务; 另一方面网络作为连接纽带将离散的数据中心、超算中心等泛在算力进行融合, 实现以云为中心的算力资源运营, 利用网络促进算力高效调度. 然而, 算力网络研究尚处于起步阶段, 在架构、标准以及技术方面尚未达成共识, 相关架构、标准的设计依赖传统网络技术, 缺乏构建统一的算力网络标准体系, 研究面临诸多新需求和新挑战, 如“在哪算”“算什么”和“怎么算”等. 本文基于前期“标识网络”与“智慧标识网络”研究, 针对异构网络的深度融合与网络智慧化创新两大必然趋势, 创造性提出“融算网络”体系及其关键机制, 突破多网融合组网与高效兼容、多维统一标识及智能解析映射、按需组网及算网协同传输、算网融合的协同计算与优化等技术, 构建算网深度融合的新型网络体系理论, 旨在为不同行业 and 用户按需提供多元化算力服务支撑. “融算网络”突破网络专网发展视角, 结合网络融合化、智慧化发展趋势, 研究构建新型理论体系与突破关键核心技术, 实现核心技术自主可控、可兼容替代现有网络、功能性能领先国际的原创性建设目标, 满足国家与行业重大战略需求, 促进国家数字经济的发展, 为全国一体化算力整体布局奠定理论基础.

**关键词:** 算力网络; 融算网络; 算力标识; 网络体系架构

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)12-2928-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221140

## Fundamental Research on Computing Integration Networking

ZHANG Hong-ke<sup>1,2</sup>, YU Cheng-xiao<sup>2</sup>, QUAN Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu-ming<sup>3</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

3. School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** With the national digital economy strategy to accelerate the implementation of construction, computing infrastructure has become an important engine for the development of the digital economy. The new generation network technology has changed from information data communication to intelligent processing of information data, and the integration of ubiquitous computing, storage and transmission resources has gradually formed the computing networking. As a new type of network architecture first proposed by my country, computing networking is an important basis for promoting the development of my country's information industry and supporting the development strategy of “network strengthening and digital China” in our country's “14th Five-Year Plan” development plan. In this context, computing networking is proposed to build the deep integration of network system and computing system. On the one hand, it improves network service quality, resource scheduling, and service function orchestration capabilities through computing, and realizes intelligent and efficient network computing services; on the other hand, convergence realizes cloud-centric computing resource operation, and uses the network to promote efficient scheduling of computing. However, the research on computing networking is still in its infancy, and no consensus has been reached on architecture, standards, and technologies. The design of relevant architecture and standards relies on traditional network technology, and there is a lack of building a unified computing networking

standard system. The research faces many new needs and new challenges, such as “where to compute”, “what to compute” and “how to compute”. In this paper, based on the previous works of identifier networking and smart identifier networking, we propose a novel network architecture with its associated key mechanisms, namely computing integration networking (CIN) in view of the two inevitable trends of deep integration of heterogeneous networks and intelligent network innovation. By multi-network fusion networking and high-efficiency compatibility, multi-dimensional unified identification and intelligent analysis and mapping, on-demand networking and computing-network collaborative transmission, collaborative computing and optimization of computing-network integration, CIN constructs a new network system theory with deep integration of computing networking. It aims to provide diversified computing services for different industries and users on demand. CIN breaks through the development perspective of network private network, combines the development trend of network integration and intelligence, researches and builds a new theoretical system and construction, breaks through key core technologies, and realizes core technologies that are independently controllable and compatible to replace existing networks and functions. The original construction goal of leading international performance meets the major strategic needs of the country and the industry, promotes the development of the national digital economy, and lays a theoretical foundation for the overall layout of the national integrated computing.

**Key words:** computing networking; computing integration networking; computing identifier; network architecture

## 1 引言

近年来,人工智能(Artificial Intelligence, AI)、车联网、云计算等新技术和产业蓬勃发展。在这种背景下,联网设备呈现异构性、多样性趋势,海量数据的传输、存储、计算对现有互联网带来了极大挑战<sup>[1]</sup>。与此同时,数字经济已成为驱动我国经济发展不可或缺的力量,算力作为其中不可缺少的核心技术,在信息数据处理、智能算法优化等方面起着决定性作用。《2021—2022全球算力指数评估报告》指出,我国已经成为世界算力发展的领跑者。如何实现算力之间统一调度、弹性适配,完成构建更加高效、广泛的新兴技术应用以及新一代数字基础设施迫在眉睫。

算力是数字经济的核心生产力,算力基础设施是数字经济发展的引擎。近年来,欧美等地区对高新技术的输出进行了严厉管制,使我国在核心芯片制造等方面面临“卡脖子”窘境。而算力是解决我国当前核心芯片制造工艺短期内受制于人的必由路径。通过打造算网深度融合目标,引入人工智能、边缘计算等新兴技术,构建支撑经济社会数字化转型的新一代数字基础设施,实现全国算力网络一盘棋,合力拉动自主算力网络的应用示范。

算力网络作为一种新型网络架构已经逐渐被业界认可,成为网络演进的重要方向和国家重大战略规划。当前,全球主要国家和地区都已经加快算力网络布局。2020年11月,美国白宫发布《开拓未来的先进计算生态系统战略计划》,将计算生态系统纳入国家战略<sup>[1]</sup>;2019年,日本投入1300亿日元打造新一代超级计算机;2020年9月,欧盟投资80亿欧元在量子计算为主的新一代超级计算技术上进行创新。2019年11月,国内三大运营商先后发布了算力网络、算力感知网络、计算优先网络、算网一体等相关概念及白皮书,率先开启了

对算力互联、算网协同等方向的探索<sup>[2]</sup>。

然而,传统网络体系与机理存在各种严重弊端,难以满足新型网络的发展急需。导致这些弊端的根源在于现有互联网难以适应新业态高速发展,无法适应现有互联网主动适配用户需求。设计新型互联网适配高效算力势在必行。为此,国内外先后启动一系列重大项目,以思科公司为代表,提出了基于意图的网络架构(Intent-Based Network, IBN),进一步改善网络自动化和复杂问题抽象化能力<sup>[3]</sup>。此外,微软公司主导的SoNiC开源平台,力图实现路由交换设备融合,降低硬件设备的管理复杂度。在国内,华为公司提出基于全面云化的智简网络<sup>[4]</sup>(Intent-Driven Network, IDN)。此外,国内诸多高校、科研院所相继提出多模态网络、孪生网络、算力网络等理论与方法,为新型网络体系结构进一步创新奠定基础。

传统算力和网络相对独立,二者仅为简单的连接关系。国内外针对网络体系与技术创新已经开展众多研究,但尚未形成较为完善的新型网络体系。算力优势已经不在于算力自身体量,而是亟须探索形成高效且可广泛支撑的新型网络体系架构。面临机遇期,我国亟须新型网络体系与技术创新,满足自主可控和建设网络强国的重大战略需求,为新型网络发展提供自主建设方案。为此,基于前期“标识网络”<sup>[5]</sup>“智慧标识网络”<sup>[6,7]</sup>研究,本文针对异构网络的深度融合与网络智慧化创新两大必然趋势,从理论体系和关键技术两个层面进行突破,创建替代兼容、自主可控、深度融合、高级智慧的融算网络体系,并依托标识网络,实现“网算”“算网”一体深度融合为特色的新型网络体系。

## 2 融算网络体系架构

算力网络是应对云网融合向算网融合转变的产

物,具备高效传输、智能调度、内生安全、可扩展性等能力,能够接入不同类型的算力资源.同时,算力网络与新型网络研究相辅相成,相互促进,融合进步.为此,本文提出基于标识网络的融算网络体系模型,如图1所示,建立新型网络体系.融算网络体系模型采用“三层”“三域”总体架构:广义服务层、映射适配层和融合网络层共同构成纵向“三层”的架构;实体域、感控域和知识域共同构成横向“三域”架构.

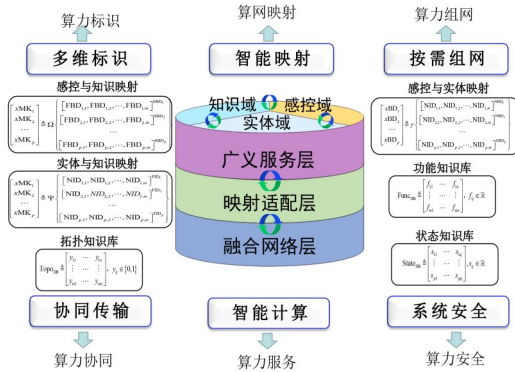


图1 融算网络体系架构模型

具体地,“三层”中,广义服务层主要负责对算力服务进行标识和算力服务标识的描述,以便于统一化算力服务的匹配与查找过程;映射适配层主要负责承接算力标识与族群标识、族群标识与组件标识之间的相互映射关系,通过感知网络状态与算力服务需求实现服务与网络资源动态适配,以便最大化满足用户差异化算力服务;融合网络层主要负责满足算力服务在数据传输层面的可靠性,主要包括互联网、卫星网络、数据中心网络、超算中心、泛在算力单元(计算、存储),以及通信设备等,并且支持IPv4, IPv6等在内的异构网络协议通信,满足用户对于算力服务的高效利用.

“三域”中,实体域负责格式化描述网络实体组件与服务、功能等虚拟实体,实现资源命名的统一,相对静态;感控域负责网络动态控制、计算与协同,针对于算力服务行为描述、族群行为描述、组件行为描述等根据智慧决策命令生成的特定行为规则,相对动态;知识域用于收集服务、策略、网络对象的动态量化映射经验信息,生成拓扑知识库、状态知识库、功能知识库等.

融算网络体系的核心特点在于全网统一化的多类别、多形态标识定义,以及层间、域间的高效匹配映射,可以有效地完成网络中各个模块的部署.总之,融算网络“三层”“三域”体系通过动态感知网络状态,并智能匹配算力等服务需求,进而选择适合的网络族群及其内部网络组件来提供相应的服务.

综上所述,融算网络体系模型通过映射适配层,将广义服务层与融合网络层纵向解耦,实现算力服务层面与网络层面协同调动、智慧融合.该体系架构一方面有利于网络为用户提供可定制化的算力服务,另一方面也有利于为用户提供虚拟专网来满足相关算力服务在可靠性、安全性、可扩展性等方面的需求.它通过纵向解耦方式达到“算网”动态适配,实现了通过网络对算力服务的智能调度.进一步地,它通过实体域、感控域和知识域对控制平面和运行平面进行横向解耦,便于“网算”协同映射,通过算力提升网络性能,实现服务可控可管以及服务的动态按需调度.具体地,从“网中有算”角度来看,以网络为中心的算网融合,对标识网络的感知、编排、调度能力等方面有效提升,通过算力提高标识网络的综合性能.从“算中有网”角度来看,以云为中心的算网融合,把异构、分布的算力连接协同成统一的算力资源池,进行算力资源运营,融算网络通过自身“三层”“三域”的独特优势为算力之间连接支撑和协同调度提升效率.“网算”“算网”一体深度融合,优化互补.在此基础上,融算网络内生支持多维标识、智能映射、按需组网、协同传输、智能计算、系统安全等功能,为新型算力网络提供了良好的网络架构.

### 3 融算网络标识解析映射机制

为了实现算力普适化,融算网络体系在广义服务层对算力服务进行统一命名.在“实体域”内采用算力标识CID(Computing ID)来标记一次算力服务.算力标识CID定义如下:

$$CID \triangleq \Psi(C_{\text{type}}, C_{\text{data}}) \quad (1)$$

其中,  $C_{\text{type}}$  和  $C_{\text{data}}$  分别代表算力服务的类型和算力服务数据,  $\Psi(\cdot)$  代表算力标识生成函数.

在“感控域”中引入算力行为描述CBD,对算力服务的网络行为进行精细化表征.算力行为描述CBD是算力资源与网络资源在服务层面融合表征后的统一标识.网络算力行为描述CBD定义如下:

$$CBD \triangleq \begin{pmatrix} \{b_{\text{Type}}^{\text{CB}}, b_{\text{Size}}^{\text{CB}}, \dots\}_B \\ \{b_{\text{Location}}^{\text{CT}}, b_{\text{Cache}}^{\text{CT}}, \dots\}_T \\ \{b_{\text{QoS}}^{\text{CP}}, b_{\text{Bandwidth}}^{\text{CP}}, b_{\text{Delay}}^{\text{CP}}, b_{\text{Loss}}^{\text{CP}}, \dots\}_P \\ \{b_{\text{Type}}^{\text{CF}}, b_{\text{Version}}^{\text{CF}}, b_{\text{Credibility}}^{\text{CF}}, b_{\text{Sign}}^{\text{CF}}, \dots\}_F \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中,  $B, T, P, F$  分别定义为对应着算力信息、拓扑信息、性能信息和功能信息.对于算力行为描述CBD而言,算力信息包括算力资源类型  $b_{\text{Type}}^{\text{CB}}$ 、算力资源大小  $b_{\text{Size}}^{\text{CB}}$  等;拓扑信息包括算力服务位置  $b_{\text{Location}}^{\text{CT}}$ 、算力服务数据缓存位置  $b_{\text{Cache}}^{\text{CT}}$  等;性能信息包括满足算力传输的服务质量要求  $b_{\text{QoS}}^{\text{CP}}$ 、带宽大小  $b_{\text{Bandwidth}}^{\text{CP}}$ 、时延高低  $b_{\text{Delay}}^{\text{CP}}$ 、

丢包率高 $b_{Loss}^{CF}$ 等;功能信息包括算力服务类型 $b_{Type}^{CF}$ 、算力服务版本号 $b_{Version}^{CF}$ 、信用属性 $b_{Credibility}^{CF}$ 、签名 $b_{Sign}^{CF}$ 等.其中算力资源类型和算力资源大小代表提供服务所需的算力信息,与算力标识对应;算力服务位置以及算力服务数据缓存位置代表算力所能提供的服务在网络中的位置信息;算力行为描述的性能信息是对算力服务提供所需的性能要求;算力服务的功能信息则是算力所提供的服务类型、提供商版本、提供者签名等,对算力服务的可信、可靠、安全性提供可溯源的保障支撑.

在“知识域”内引入算力管理知识CMK,主要负责生成算力服务的智能化管理,根据拓扑知识库、状态知识库以及功能知识库标识的网络状态信息以及算力资源信息完成算力上层算力服务需求到底层网络组件的适配.CMK定义如下:

$$CMK \triangleq \begin{pmatrix} \lambda[CID_1, CBD_1] \\ \lambda[CID_2, CBD_2] \\ \vdots \\ \lambda[CID_n, CBD_n] \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [\widetilde{NID}_{1,1}, \widetilde{NID}_{1,2}, \dots, \widetilde{NID}_{1,a}]^{FID_1} \\ [\widetilde{NID}_{2,1}, \widetilde{NID}_{2,2}, \dots, \widetilde{NID}_{2,b}]^{FID_2} \\ \vdots \\ [\widetilde{NID}_{s,1}, \widetilde{NID}_{s,2}, \dots, \widetilde{NID}_{s,c}]^{FID_s} \end{array} \right\} \triangleq A \left( [CID, CBD, CMK], \begin{pmatrix} \widetilde{FID}_1 \\ \widetilde{FID}_2 \\ \vdots \\ \widetilde{FID}_s \end{pmatrix}, \left\{ \begin{array}{l} [\widetilde{NID}_{1,1}, \widetilde{NID}_{1,2}, \dots, \widetilde{NID}_{1,i}]^{FID_1} \\ [\widetilde{NID}_{2,1}, \widetilde{NID}_{2,2}, \dots, \widetilde{NID}_{2,j}]^{FID_2} \\ \vdots \\ [\widetilde{NID}_{s,1}, \widetilde{NID}_{s,2}, \dots, \widetilde{NID}_{s,k}]^{FID_s} \end{array} \right\} \right) \quad (5)$$

其中, $[\widetilde{NID}_{s,1}, \widetilde{NID}_{s,2}, \dots, \widetilde{NID}_{s,c}]^{FID_s}$ 代表融合网络层在通过博弈决策后,所选择的第 $s$ 个族群 $FID_s$ 中的包含的网络组件集合; $\widetilde{FID}_1 \sim \widetilde{FID}_s$ 为式(5)中被选出的 $s$ 个族群功能模块的族群标识; $[CID, CBD, CMK]$ 表示制定服务的算力标识、算力需求行为描述和算力管理知识; $[\widetilde{NID}_{s,1}, \widetilde{NID}_{s,2}, \dots, \widetilde{NID}_{s,k}]^{FID_s}$ 表示组件聚类后的第 $s$ 个族群 $FID_s$ 中所包含的网络组件集合; $A(\cdot)$ 表示为博弈决策函数.

总体来看,算力标识和算力行为描述实现了对算力服务的统一命名、统一标识、高效查找与灵活匹配,从服务层面完成了“网算”与“算网”的双向融合需求表征;算力标识与族群标识之间的动态映射完成了算力和网络的聚合,从映射适配层面实现了算力服务资源与网络资源的协同调度;族群标识和组件标识的映射决策构建了面向服务需求的算网设施协同框架,在融合网络层面完成了算网能力的协同聚类与池化集成.最后,通过三方面的动态联动完成对算力需求、族群适配、组件筛选等多方面多维度的博弈决策,根据算力服务需求,智能化选择相应的网络族群及其网络组件,实现网络资源的协同调度.

其中, $\lambda(\cdot)$ 代表算力服务执行状态检测函数.

在此基础上,将算力标识到族群标识之间的映射引入至广义服务层,为智慧服务寻找到最佳的资源提供适配策略,实现网络与算力资源的协同调度,完成基于算力的按需组网,提高算网一体的深度融合能力.因此,算力标识映射至族群标识的过程定义如下:

$$\begin{pmatrix} \widetilde{FID}_1 \\ \widetilde{FID}_2 \\ \dots \\ \widetilde{FID}_s \end{pmatrix} \triangleq \Omega \left( [CID, CBD, CMK], \begin{pmatrix} FID_1, FBD_1 \\ FID_2, FBD_2 \\ \dots \\ FID_f, FBD_f \end{pmatrix} \right) \quad (4)$$

其中, $\widetilde{FID}_1 \sim \widetilde{FID}_s$ 根据按需组网的要求被选中的 $s$ 个族群功能模块的族群标识; $[CID, CBD, CMK]$ 表示制定服务的算力标识、算力需求行为描述和算力管理知识; $[FID_1, FBD_1] \sim [FID_f, FBD_f]$ 是网络中存在的 $f$ 对族群标识和族群行为描述; $\Omega(\cdot)$ 是行为匹配映射函数.

另外,映射适配层合理匹配广义服务层的服务需求和融合网络层的网络资源,为算力服务筛选出理想的网络族群及其相应的网络组件,为用户提供良好的服务体验,实现网络资源的高效利用.

#### 4 融算网络关键技术

融算网络总体技术方案如图2所示,技术方案由基础建设、网络侧面和应用侧面三部分构成.在基础建设方面,异构跨域的超算节点为大型应用提供算力支撑.在应用侧面方面,面向各种大规模训练平台、研究数据云、多语义翻译平台等提供差异化的算力支撑与协同调度能力,保障业务的稳定、可靠运行,实现跨节点分布学习,为大模型、大应用等提供超级算力.在网络侧面方面,结合标识网络的自身特点,引入标识认证协议、标识映射协议等,为超算中心提供安全、稳定、可靠的接入管控机制;同时,借助标识网络的分片组网协议和自主网络协议,实现网络分片内部协同一致、外部互补联动,提供特定的整体功能.在此基础上,引入算力标识命名以及算力路由协议等模块,实时监测当前的计算能力状态与网络状态,并作为路由信息发布至网络中,使不同超算节点相互联动、协同调度,优化用户体验、计算资源利用率等,实现应用侧面平台统一调度,弹性分配.通常算力网络分为“网中有算”和“算中有网”两种视角.“网中有算”聚焦基础建设,通过优化网络部分的计算存储、

资源协同能力等方式来提高网络功能性;“算中有网”则聚焦应用侧面,借助现有网络,通过计算来提高网络的服务能力和新业务的支撑能力.两种视角重点不同,融算网络总体技术方案将两种视角优化互补,互相促进,突破多网融合组网与高效兼容、多维统一标识及智能解析映射、按需组网及算网协同传输、算网融合的协同计算与优化等技术,更好地完成算网一体深度融合.

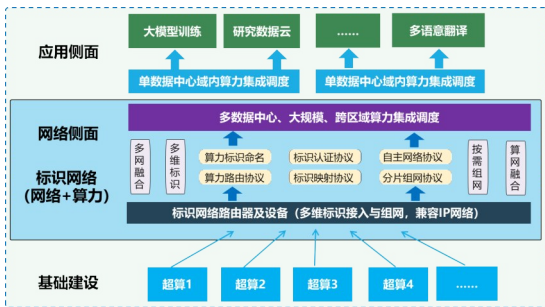


图2 融算网络总体技术方案

### 4.1 多网融合组网与高效兼容技术

为满足异构算力中心高质量互联互通与协同运作的的需求,针对算力中心网际组网中连接异构、算力资源不均衡、管理分散以及业务多样的问题,聚焦跨域异构算力中心高效互联组网体系架构设计,在现有IP网络基础上,建立标识网络设备间的虚拟链路实现标识网络功能,搭建“网上专网”,实现标识网络功能,完成标识网络设备独立组网.与此同时,将“标识网络”功能作为独立功能配置使用,保留并完全兼容现有IP网络功能<sup>[8]</sup>.多网融合组网与高效兼容技术如图3所示,针对传统互联网用户,通过IP网络接入设备接入至核心网,实现端到端传输,并获取相应的算力资源满足自身服务需求.针对专网用户,通过标识网络接入设备接入至核心网中,采用VxLAN技术建立标识网络设备间的虚拟链路,实现标识网络功能.其中,虚拟链路的管理灵活可控,在网络层实现IPv4,IPv6和标识网络等多种标识的融合协同通信,是实现融算网络资源适配的关键.

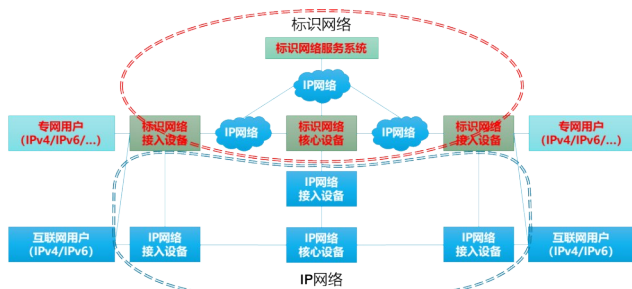


图3 多网融合组网与高效兼容

### 4.2 多维统一标识及智能解析映射技术

融算网络旨在融合包括算力标识在内的全网多维标识,制定算网标识统一命名机制和多样化标识寻址机制<sup>[9]</sup>.在算网标识统一命名机制方面,对算力进行统一承载和准确表征,同时对算力标识及行为在感控域内进行描述.通过引入算力标识以及标识网络自身的服务标识、接入标识和路由标识等多维标识,对算网资源协同调度,高效完成算力服务.在多样化标识寻址方面,引入面向算力的寻址技术,针对算力信息进行算力路由,并且兼容现有网络互联互通.在多维资源动态感知机制中,算力资源与网络资源和服务资源一起作为新型网络体系为用户提供高质量服务.同时研究服务和网络资源智慧映射管理机制,提出基于多维度属性的网络对象智慧索引、发现和定位机制,提出支持复杂场景下标识映射高效发布和查询机制,研究多维标识网络资源的动态感知方法,提出面向多维属性和差异化确定性服务需求的资源智慧适配和协同机制.图4展示了一种多维标识智慧映射及算网协同适配场景,该场景由边缘网络和核心网络两部分组成,其中边缘网络包括终端用户和算力服务资源池,核心网络包括接入路由器、核心路由器、算网协同映射服务器等.算网协同映射服务器通过分布式布局,高效完成服务资源、网络资源、算力资源的统一感知;终端用户通过智慧解析映射将接入标识映射为核心网内路由标识,进一步地,算网协同映射服务器根据算力服务资源池的算力资源感知评估终端用户请求算力的规模,并且基于实时网络资源与服务资源的状态,下发服务策略完成终端用户的服务请求.此基础上,基于标识网络具有内生安全的特性<sup>[10]</sup>,通过终端身份的统一安全接入认证机制,有效地建立终端算力资源和核心网络间的互信环境,将伪造的终端屏蔽于合法的网络之外,同时又使终端免于非法网络的欺骗.在此场景下,终端用户请求算力资源池,在完成对核心网络内网络资源、服务资源的综合评估,实现资源池间算力协同调度.

### 4.3 按需组网及算网协同传输技术

利用上述包括算力标识在内的多维统一标识以及智能映射技术,完成网络算力资源的感知与协同调度.在此基础上,提出融合算力标识在内的多维标识接入技术,设计分布式与集中式混合的按需组网机制,为用户构建虚拟专网,并提供算力服务与网络资源动态按需调整的能力与接口<sup>[11]</sup>.同时,研究算力按需服务与路由转发技术,实现细粒度资源预留和数据流动态调度.针对当前单一网络链路可靠性低,无法满足复杂环境下的数据传输需求的问题,深度融合有线网络、蜂窝网络(3G/4G/5G等)以及非蜂窝网络(卫星网络、Wi-Fi等)

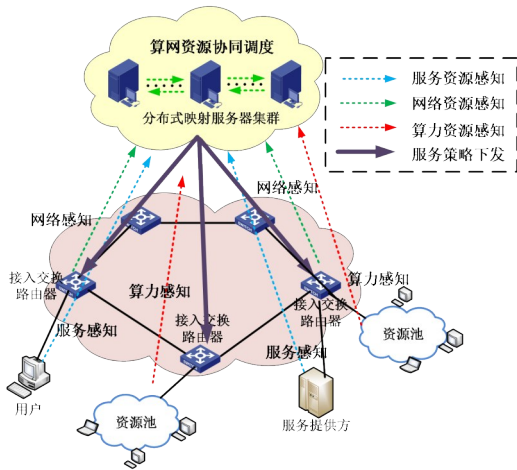


图4 多维标识智慧映射及算网协同适配

资源进行多路协同传输,为算力资源高效传输提供保障. 建立基于网络环境的动态网络资源适配机制,根据实时网络状态,采用多网系自适应编码策略,实现数据的多路径可靠传输,实现异构网络融合,形成融合网. 图5所示是多路融合编码的算力资源协同传输技术<sup>[12]</sup>,包含算力数据动态串并编码方案、多路协同高效编码技术等,通过构建算网资源动态匹配和算网资源动态调度机制,可有效实现终端用户的算力资源请求与网络资源动态适配,感知异构网络状态,融合异构网络资源实现数据多路协同传输,实现算力资源高效传输,解决异构网络下算网协同传输难题,为用户提供高效可控的算力服务.

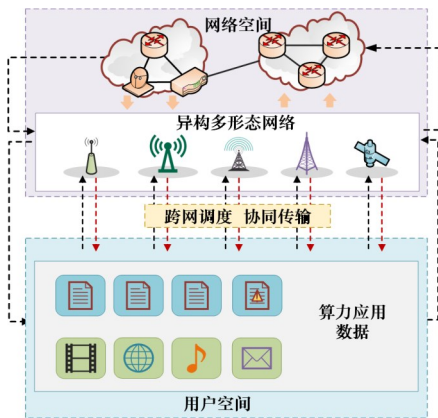


图5 多路融合编码的算力资源协同传输技术

#### 4.4 算网融合的协同计算与优化技术

算力资源柔性互联与动态适配是算网融合的关键所在,要在算网资源要素方面进行层次化抽象建模,对算力资源进行感知、组合与动态适配. 在不同超算中心之间,设计资源敏感的协同计算方法,对算力网络资源进行评估;建立算网资源效能模型,实现面向算网资源最优的计算组合. 进一步地,针对不同超算中心多方协

同的调度优化,制定算力、网络与数据多层调度策略;针对不同计算任务,完成任务动态计算的自主优化. 图6是跨网协同计算与优化场景. 针对不同算力计算任务,跨区域的模型节点、计算节点联合协同调度,共同完成算力服务. 特别地,例如多语言交流训练平台、开源协同创新平台、大规模分布式训练平台等,从模型节点到算力节点,需要各自制定相适应的模型和计算组合适配对应的实体平台.

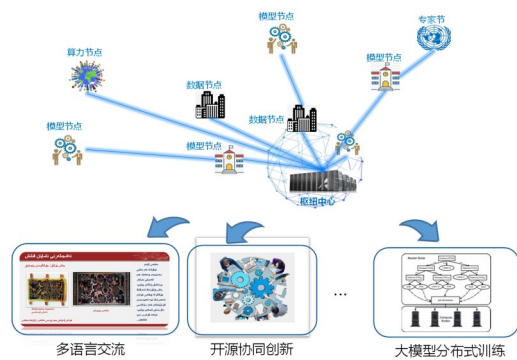


图6 算网融合的跨协同计算与优化

#### 5 结束语

本文创造性提出“融算网络”体系及其关键机制,以“三层”“三域”网络架构为基础,突破多网融合组网与高效兼容、多维统一标识与智能解析映射、按需组网与算网协同传输等关键技术,旨在为不同行业 and 用户按需提供多元化算力服务支撑,满足数字经济发展的底座需求. 在未来的工作中,将依据“融算网络”模型与关键技术搭建原型系统,对其设计理念进行验证,并根据相应结果进行优化和改进.

#### 参考文献

- [1] Subcommittee on Future Advanced Computing Ecosystem Committee on Technology of The National Science & Technology Council, Pioneering the future advanced computing ecosystem: A strategic plan [EB/OL]. (2020-11)[2022-10-10]. <https://www.nitrd.gov/pubs/Future-Advanced-Computing-Ecosystem-Strategic-Plan-Nov-2020.pdf>.
- [2] 中国联通网络技术研究院. 中国联通算力网络白皮书 [EB/OL]. (2020-04)[2022-10-10]. <http://www.impcia.net/Uploads/report/2020-04-29/5ea92233af1e4.pdf>.
- [3] VELASCO L, SIGNORELLI M, DE DIOS O G, et al. End-to-end intent-based networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(10): 106-112.
- [4] OUYANG Y, YANG C G, SONG Y B, et al. A brief survey and implementation on refinement for intent-driven networking[J]. IEEE Network, 2021, 35(6): 75-83.

- [5] 张宏科, 苏伟. 新网络体系基础研究——一体化网络与普适服务[J]. 电子学报, 2007, 35(4): 593-598.  
ZHANG H K, SU W. Fundamental research on the architecture of new network—Universal network and pervasive services[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 593-598. (in Chinese)
- [6] 张宏科, 罗洪斌. 智慧协同网络体系基础研究[J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1249-1252, 1254.  
ZHANG H K, LUO H B. Fundamental research on theories of smart and cooperative networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1249-1252, 1254. (in Chinese)
- [7] 张宏科, 冯博昊, 权伟. 智融标识网络基础研究[J]. 电子学报, 2019, 47(5): 977-982.  
ZHANG H K, FENG B H, QUAN W. Fundamental research on smart integration identifier networking[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(5): 977-982. (in Chinese)
- [8] FENG B H, ZHANG H K, ZHOU H C, et al. Locator/identifier split networking: A promising future Internet architecture[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2927-2948.
- [9] ZHANG H K, QUAN W, CHAO H C, et al. Smart identifier network: A collaborative architecture for the future Internet[J]. IEEE Network, 2016, 30(3): 46-51.
- [10] 支婷, 刘颖, 周华春, 等. 智慧标识网络服务机理研究进展及安全性分析[J]. 电子学报, 2021, 49(8): 1653-1664.  
ZHI T, LIU Y, ZHOU H C, et al. Research progress and security analysis of the service mechanism in smart identifier network[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(8): 1653-1664. (in Chinese)
- [11] QUAN W, LIU Y N, ZHANG H K, et al. Enhancing crowd collaborations for software defined vehicular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(8): 80-86.
- [12] 权伟, 崔恩放, 张宏科. 多源协作的传输控制机制[J]. 电子学报, 2018, 46(10): 2527-2533.  
QUAN W, CUI E F, ZHANG H K. Multi-source collaborative transmission control mechanism[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(10): 2527-2533. (in Chinese)

#### 作者简介



张宏科 男, 1957年9月出生于山西省大同市. 中国工程院院士, 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 移动专用网络国家工程研究中心主任. 主要研究方向为新一代信息网络理论与关键技术.  
E-mail: hkzhang@bjtu.edu.cn



于成晓(通讯作者) 男, 1993年2月出生于辽宁省大连市. 鹏城实验室助理研究员. 主要研究方向为新型网络传输协议理论与关键技术.  
E-mail: yuchx@pcl.ac.cn



权伟 男, 1987年7月出生于山西省运城市. 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 移动专用网络国家工程研究中心新型网络系统研究所副所长, 中国通信标准化协会TC1 WG4工作组副组长. 主要研究方向为新型网络体系架构、高可靠网络传输关键技术.  
E-mail: weiquan@bjtu.edu.cn



张宇明 男, 1990年6月出生于河南省洛阳市. 北京邮电大学计算机学院博士后. 主要研究方向为新一代信息网络理论与关键技术.  
E-mail: yumingzhang@bupt.edu.cn