

# 算力网络信息通告技术研究综述

卫敏<sup>1,2</sup>, 赵倩颖<sup>2,3</sup>, 唐静<sup>2</sup>, 高瑞韩<sup>1</sup>, 潘禹辰<sup>1</sup>, 王念瑞<sup>1</sup>, 张兴<sup>1</sup>

(1.北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2.中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209;  
3.北京邮电大学卓越工程师学院, 北京 100876)

**摘要:** 为了全面研究算力网络中信息通告技术的发展情况, 促进算力网络面向6G等未来网络演进, 结合算力网络集中式、分布式、混合式部署架构, 分析对比了信息通告的方法和特征, 在此基础上, 对关键性能指标进行建模分析。考虑到当前信息通告的收敛时延、网络开销和路由振荡的挑战, 调研了现有解决方案。最后, 对未来网络中的信息通告进行展望, 并提出新的信息通告架构。新架构充分考虑了未来网络通告范畴扩大、异构算力协同的趋势, 可有效促进算力网络在未来网络中的广泛应用。

**关键词:** 算力网络; 信息通告; 算力路由; 未来网络

**中图分类号:** TP393.0

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2025149

## Survey of information notification technology in computing power networks

WEI Min<sup>1,2</sup>, ZHAO Qianying<sup>2,3</sup>, TANG Jing<sup>2</sup>, GAO Ruihan<sup>1</sup>, PAN Yuchen<sup>1</sup>,  
WANG Nianrui<sup>1</sup>, ZHANG Xing<sup>1</sup>

1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. China Telecom Research Institute, Beijing 102209, China

3. Graduate College for Engineers, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract:** To comprehensively study the development of information notification technology in computing power networks and promote the evolution of computing power networks toward future networks such as 6G, the information notification technologies by combining the centralized, distributed, and hybrid deployment architectures of computing power networks was analyzed and compared. On this basis, key performance indicators were modeled and analyzed. Considering the current challenges of convergence delay, network overhead, and network flapping in information notification, existing solutions were investigated. Finally, the prospects for information notification in future networks were discussed, and a new information notification architecture was proposed. The new architecture fully considers the trends of expanded notification scope and heterogeneous computing power collaboration in future networks, which can effectively promote the wide application of computing power networks in future networks.

**Keywords:** computing power network, information notification, computing power routing, future network

### 0 引言

国内运营商在2019年首次提出算力网络

(CPN, computing power network)的概念<sup>[1-3]</sup>, 该概念迅速在产业界、学术界获得广泛关注, 发展成为

收稿日期: 2025-06-09; 修回日期: 2025-08-15

通信作者: 张兴, hszhang@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(No.2023YFB2904100)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2023YFB2904100)

前沿研究领域之一。算力网络的主要思想之一是通过网络分发计算、存储等资源信息,并根据用户的不同业务需求,实现最优的资源服务与网络连接方案,从而实现整网资源的高效分配与管理<sup>[4]</sup>。信息通告作为算力网络的关键技术之一<sup>[5]</sup>,负责收集和同步算力网络的资源信息,为资源调度和编排提供基础。

算力网络一般通过控制面进行信息通告<sup>[4,6]</sup>。算力网络有3种架构:集中式、分布式和混合式,这3种架构的控制面实现方式不同,对应的信息通告方式也存在差异。在集中式架构中,编排管理平台统一获取资源信息与状态;在分布式架构中,资源信息被封装进IP数据包,通过相邻路由在指定区域内进行通告,并依据网络时延、算力规模等多要素更新路由表项;在混合式架构中,信息分发和收集方式与分布式架构大致相同,其区别在于混合式方案在获取资源信息后需要上传给编排管理平台,以便于后续统一的资源调度。

本文围绕算力网络的信息通告,阐述了3种架构下的技术观点和实现方法,主要贡献可总结为以下3个方面。

1) 本文对近年来算力网络的研究工作进行系统梳理,综合3种架构下信息通告的实现方式,对比其在核心思想和关键步骤的不同。

2) 通过分析3种架构下的信息通告过程,本文提出衡量信息通告过程的关键性能指标,分别是信息年龄、网络带宽、网络能耗,信息年龄代表资源信息被感知的及时性,带宽和能耗分别对应网络和能源的消耗情况,通过建模可以获得信息通告性能的影响因素。

3) 本文还提出面向以6G为代表的未来网络的信息通告架构,这个架构考虑了未来网络资源范畴的扩大和类型的增加,将信息通告从算力网络控制层扩展到包含4个层级的架构。

## 1 相关工作

算力网络有3种部署架构,即集中式、分布式和混合式。集中式架构通过中心化编排管理平台实现全局资源纳管与统一调度,适用于云计算中心、超算中心等强管控场景,当算力节点过多时,调度时延会有所增加。分布式架构基于路由协议实现算力状态动态扩散与路由节点自主决策,适用于边缘计算、物联网等低时延需求场景。混合式架构结合前

两者优势,通过分布式机制实现资源信息通告,依托集中式平台完成全局调度,在广域算力共享、云边协同等场景中有广泛的应用潜力,受部署成本和复杂性的限制,目前该架构仍缺乏成熟的应用方案。

### 1.1 算力网络架构

本文就2019年以来算力网络领域发表的论文情况进行了调研,如图1所示,数据表明,近3年研究工作的总量远超前期,算力网络的基础架构、关键技术、实践方案等已在业界达成广泛共识。算力网络包括资源层、控制层、服务层和编排管理层,其中,资源层提供上层所需的计算资源、网络资源、存储资源和服务资源;控制层负责收集资源信息,发送至服务层供业务调用并接收服务层指令,配置业务所需的算网资源;服务层面向用户业务需求,匹配最优算力资源;编排管理层负责算力网络的整体编排、安全管理和运维。信息通告主要由控制层完成,包含资源信息的感知(收集)和分发2个过程,其目的是实时收集和同步算力节点的资源状态,为全局编排决策提供数据支撑。信息通告的内容主要包括带宽、时延、节点拓扑等网络资源信息,以及计算单元的计算、内存、存储和服务分级等算力资源信息,通常采用结构化数据格式或扩展路由由协议进行传输。

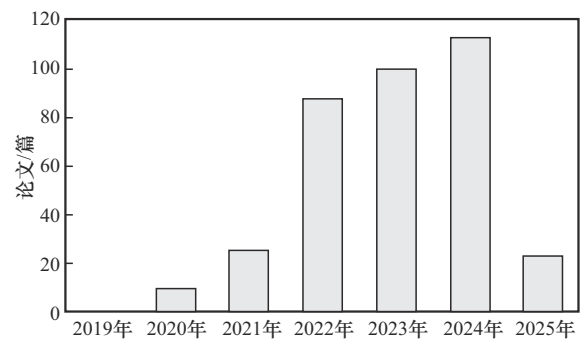


图1 算力网络研究工作分布

在算力网络的集中式架构中,编排管理平台将端、边、云各级算力节点与网络统一纳管<sup>[6]</sup>,平台具备资源信息感知、资源分配调度和网络连接管理等基本功能。在信息通告时,通过编排管理平台直接收集所有算网节点的资源信息。

对于分布式架构,文献[7]提出了利用边界网关协议(BGP, border gateway protocol)通告算力信息的方案,涵盖移动边缘计算站点和承载网网元之间的消息传递。何涛等<sup>[8]</sup>基于计算优先网络

(CFN, computing first network) 协议, 将资源状况作为路由信息分发和扩散, CFN路由器还可根据不同的业务构建路由信息表, 各类业务请求在此基础上完成流量调度。分布式架构的信息通告具体实现方案略有差异, 其共同特征是基于路由器记录和转发获取到的最新的算力状态信息和网络状态信息, 每个路由器都维护一个最新的节点资源信息表。资源信息表包括每一个转发路径对应的资源节点的算力资源状态、下一跳地址端口和该转发路径的时延等网络性能状态。

混合式架构<sup>[9]</sup>中资源信息的感知和分发与分布式架构一致, 不同之处在于其编排管理平台需要在信息通告完成后获取完整的资源信息, 以便后续用户接入平台进行统一的资源编排调度, 即信息通告是分布式的, 而资源编排调度是集中式的<sup>[4]</sup>。

表1对3种算力网络架构在核心思想和信息通告方式2个维度进行了对比。在集中式架构中, 信息通告、路由决策和资源调度统一由算力网络编排管理平台进行, 基于当前已有的软件定义网络(SDN, software defined network)/网络功能虚拟化(NFV, network function virtualization)控制平台和网络架构, 实现方案简单。分布式架构由分散的网络节点协作完成信息通告, 在协议标准化方面有较高的要求, 实现方式相比集中式更加复杂, 但支持多方异构资源接入, 具有较好的扩展性。在分布式架构下, 控制面功能由网络节点完成, 决策点更靠近用户接入, 在路径选择时不需要经过上级平台的决策和下发, 可实现信息的快速传递, 适应时延敏感型业务。混合式架构融合了集中式和分布式的特点, 既有良好的扩展性, 也在资源调度上有集中式架构的全局资源视图。

## 1.2 集中式算力网络信息通告

### 1.2.1 信息通告方式

在如图2所示的集中式信息通告方案中, 资源状态信息通告有2种机制, 即主动式通告和被动式通告, 分别对应a1和a2。在主动式通告中, 由资源节点(包括算力和网络节点)各自按照预设周期向编排管理平台上报完整的算网状态信息; 在被动式通告中, 编排管理平台触发数据采集指令, 资源节点采用事件驱动模式上报特定指标。

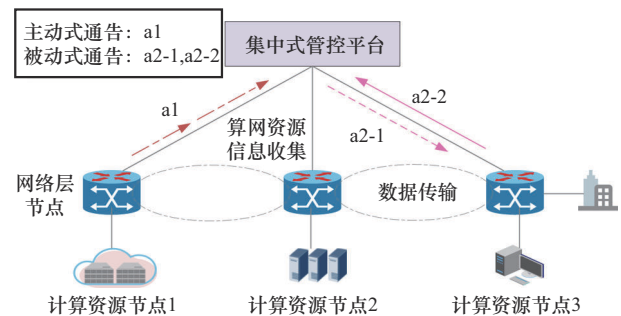


图2 算力网络集中式信息通告方案

信息通告需要对算网资源的信息进行感知和分发。在集中式架构中, 该过程涵盖算力、网络资源状态的量化建模、动态监测和信息发布, 以构建算网状态信息库。算力网络系统可通过主动上报或者被动采集等方式实现资源状态信息的实时感知, 并依托编排管理平台进行全局优化决策, 从而支撑基于算网一体化的智能路由与资源编排。

### 1.2.2 网络资源信息感知

网络资源状态感知的核心任务是对网络承载性能进行实时监测和通告。其监测维度主要包括基础性能指标(如时延、抖动、丢包率、吞吐量等)、连接状态、流量特征和拓扑信息等。

表1 3种算力网络架构的核心思想和信息通告方式的对比

架构类型	核心思想	信息通告方式
集中式	拥有基于SDN的集中式编排管理平台, 负责资源的感知、抽象与计算, 并与算力网络交易平台对接用户的业务请求。该平台根据用户选择的计算资源节点, 对客户端节点建立网络连接并进行资源分配。兼容当前底层网络架构与IP实现	由编排管理平台统一收集算力和网络资源的状态信息。算力资源信息的收集建立在算力量度的基础上, 网络信息收集或感知的难点在于网络测量方法, 根据是否主动向网络发送探测报文, 可分为主动式和被动式 <sup>[10]</sup>
分布式	根据网络的分布式控制方式, 扩展网络协议, 协议报文携带算力(计算、存储)状态信息。各节点实时维护局部的算力、网络资源信息, 用户根据路由由节点里的资源信息表选择最优服务路径。局部区域算力路由效率高, 需升级网络设备	通过在分布式路由协议(如BGP、IGP等)中增加相应的算力资源信息分发能力来实现, 可将算力状态信息通告至邻近节点, 同时通过Telemetry等技术获取网络信息, 如带宽、时延、抖动等
混合式	与分布式架构的区别在于, 通过分布式控制方案获取资源信息及形成路由表项, 编排管理平台获取资源信息后, 对接用户业务需求, 对客户端节点建立网络连接并进行资源分配	在BGP等IP路由协议中增加相应字段, 分发过程结束后将资源信息发送给编排管理平台

目前有多种技术用来实现网络资源状态感知。主动测量技术以双向主动测量协议 (TWAMP, two way active measurement protocol) 为代表, 通过主动发送探测报文获取端到端性能指标<sup>[11]</sup>; 被动测量技术如 IP 流信息输出 (IPFIX, IP flow information export), 具有较强的扩展性和灵活性; 此外, 还有基于 Telemetry 技术的带内网络遥测 (INT, in-band network telemetry)<sup>[12]</sup>和带内操作管理和维护 (IOAM, in-situ operation administration and maintenance)<sup>[13-14]</sup>等随流检测技术。

随着 AI 深度融入网络研究, 网络资源信息感知性能的优化也越来越多地和 AI 结合。Kavehmadavani 等<sup>[15]</sup>通过循环神经网络长短期记忆 (RNN LSTM, recurrent neural network long short-term memory) 和多智能体深度强化学习技术, 进行基于历史数据的动态流量预测和分配, 通过切片感知优化智能转向流量的有效性, 可在一定程度上弥补网络感知的滞后性和不准确性问题。

### 1.2.3 算力资源信息感知

编排管理平台通常以基于 Kubernetes 的容器技术为主流方案, 通过定制化研发实现细粒度的资源感知与智能调度, 为上层应用提供稳定可靠的算力支撑<sup>[16]</sup>。

然而, 原生 Kubernetes 在复杂任务和动态资源调度方面存在局限, 促使业界提出诸多先进技术来实现 Kubernetes 中资源的高效感知和调度<sup>[17-18]</sup>。编排管理平台通常采用多层次资源监控架构, 即算力节点层通过控制器实时采集物理资源状态; 容器层利用 cAdvisor 等工具监控资源使用; 集群层通过状态同步组件维护资源视图。同时, 平台通过标准化接口支持异构计算设备接入, 并集成网络和存储性能监控, 构建端到端的资源感知体系。

算力信息的通告要以算力建模为基础。算力资源具有显著的异构特性, 涵盖 CPU、GPU、TPU 等多种计算单元<sup>[19]</sup>以及内存容量、带宽、I/O 性能和通信能力等多维资源指标<sup>[20]</sup>, 传统仅用每秒浮点运算次数 (FLOPS, floating point operation per second) 来表征计算性能的做法已显不足。柴若楠等<sup>[21]</sup>提出一种先静后动的混合式度量方法, 采用熵权法评估算力节点的芯片运算能力、算法能力和存储等静态指标并按照评分分段, 再结合 CPU/GPU 空闲率、吞吐率等动态指标通过  $n$  维欧氏距离

匹配用户任务需求, 选取最优节点。

祝淑琼等<sup>[22]</sup>提出一个较为全面的度量框架, 对物联网设备的计算、存储、通信、功耗和电源等 5 个关键维度的资源进行评估。在计算维度中, 评估内容包括芯片类型、运算精度、计算速度及特定模型下的吞吐率。运算精度  $P$  下的计算速率  $\bar{R}_i^P$  通常由处理器核数  $N_{\text{core}}$ 、时钟频率  $F$  及单周期浮点计算值  $D$  衡量, 即

$$\bar{R}_i^P = N_{\text{core}} \times F \times D \quad (1)$$

此外, 完成特定推理任务的吞吐率可表示为  $\bar{T}_i^{\text{Task}} = \frac{N^{\text{Task}}}{T}$ , 其中  $N^{\text{Task}}$  为周期  $T$  内完成任务的次数。在存储维度中, 涵盖外存 (如硬盘) 和内存的度量, 均通过最小存储单元与其数量的乘积来表征。

该度量框架实现了包括算力资源在内的资源精细化建模, 然而, 其建模指标需与具体计算任务的性能需求严格对应, 因此在高动态复杂调度场景下缺乏足够的灵活性。

近年来, 基于机器学习的资源建模方法因其强大的时序预测和自适应能力受到广泛关注。其中, 深度强化学习为多维度计算资源的感知提供了新的技术路径, 通过智能预测资源状态来辅助算力建模, 以应对动态环境下的资源管理挑战。Zhang 等<sup>[23]</sup>考虑了计算、存储、带宽、时延等不同的服务需求, 建立了多目标感知嵌入式约束, 结合深度强化学习算法进行资源建模。为增强对动态计算资源的感知, Cheng 等<sup>[24]</sup>提出了学习计算资源轨迹的门控循环单元 (GRU, gated recurrent unit) 网络, 引入对服务器历史负载序列的时序建模, 其记忆门控机制能有效捕捉边缘计算场景中的算力波动模式 (如周期性业务负载), 实现了对非线性资源动态的数字化表征。

## 1.3 分布式及混合式算力网络信息通告方法

### 1.3.1 信息通告方式

算力网络分布式和混合式架构的信息通告均依托于 IP 网络的分布式路由协议实现, 统称分布式通告。算力资源节点的算力状态信息通过扩展传统路由协议的字段进行标准化封装和扩散, 使算力信息能够与路由更新报文协同传输, 同步至邻近节点及域内所有网络节点。以 BGP 路由协议为例, 采用扩展的 BGP Update 报文格式, 新增算力路由属性 (CRA, computing-aware routing attribute), 其格

式如图3所示,包含算力节点类型(资源/服务)、算力路由出口节点设备的Router ID、算力服务ID(通常为Anycast地址)、算力节点IP地址以及算力与网络信息的类型长度值(TLV, type-length-value)字段。算力路由属性中Attr.Flags的O(optional)、T(transitive)、E(extended)3个比特应置为1。O=1,T=1表示该属性为可选且需传递属性,即不识别该属性的设备仍会接收该属性,并将其转发给其他BGP对等体;E=1表示属性的length扩展为2B。通过新增算力路由地址族,避免对现有BGP地址族路由造成影响,通告触发方式分为算力感知触发(节点主动推送变更)和业务需求触发(用户请求路由刷新)。

基于扩展路由协议,各节点可动态维护全局算力信息,持续更新算力与网络资源的实时状态,为后续的联合优化决策(如负载均衡、业务路径计算等)提供数据支撑。作为算力网络的代表性方案,分布式通告机制可以充分利用承载网中IP路由器的管控功能,具有低时延、高可靠性等优势,有望成为算力网络信息通告长期解决方案<sup>[25-26]</sup>,但目前仍面临诸多技术挑战,需进一步研究完善。

在分布式通告中,各计算节点首先自定义协

议报文封装资源状态参数,实现基于网络协议的信息通告,流程如图4中的a2和a3-1所示。网络层路由控制器负责收集域内所有计算节点的动态资源数据,包括计算服务能力和负载等关键指标,并完成资源服务标识与边界接口协议的关联映射,最终将整合信息存储至节点资源信息表中。为构建全局资源感知能力,该架构支持2种信息分发模式:1)通过相邻节点间的增量同步实现局部信息更新;2)采用全网广播机制实现全局状态同步。此外,为优化通信效率,也可将通过业务数据包实现随路监测。

在混合式算力网络架构下,增设了控制面编排管理平台。该架构采用分布式信息通告机制,但需额外通过北向接口将算力状态信息上传至集中式编排管理平台,如图4中的a3-2所示,实现了分布式采集与集中管控的结合。

以某具体应用场景为例,介绍基于信息通告机制的算力网络业务分配方法。在图4所示的算力网络分布式信息通告方案中,某一区域内网络层节点所有路由器分别完成算网资源信息的实时采集,通过域内算力路由协议将采集到的信息进行通告。网络收敛后,用户U就近接入网络节点2,并发起一

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1
Attr.Flags=(O,T,E)								Attr.Type Code=64								Attr.Length															
算力节点类型																															
算力路由由出口节点设备的BGP Router ID																															
算力服务ID (占用4 B或16 B)																															
算力节点IP地址 (占用4 B或16 B)																															
算力与网络信息的总长度																															
算力与网络信息选项 (由<type, length, value>三元组组成)																															

图3 基于BGP的信息通告格式

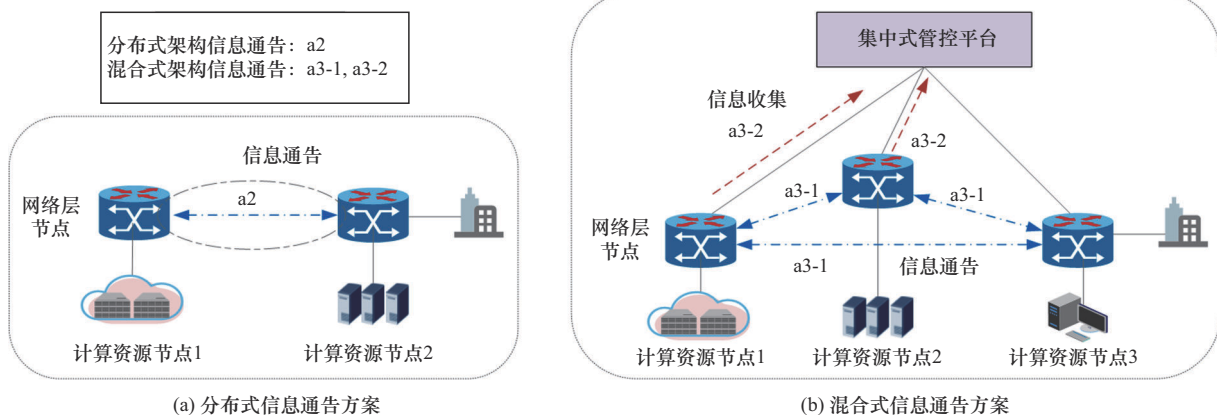


图4 算力网络分布式和混合式信息通告方案

个大数据分析业务请求 A, 该业务具有超大规模并行计算和长周期批处理的特点, 适合分配至云计算节点 1。因此网络节点 2 与计算节点 1 建立连接, 将该业务发送到计算资源节点 1。

与集中式信息通告类似, 分布式通告进行资源感知与分发需协同处理网络和算力数据。网络资源感知通过主动探测、被动流量分析以及 BGP 扩展协议等实现基础网络性能指标及路径质量数据的采集, 算力资源感知则包含静态属性 (如节点类型、服务 ID)、动态负载 (如 CPU/GPU 利用率) 和服务能力 (如任务类型支持), 主要依赖节点级硬件监控和容器化采集技术。目前算力感知标准化接口体系尚在演进阶段, 面临跨平台兼容性等挑战。

### 1.3.2 典型的分布式信息通告技术

当前, 常用路由协议分为内部网关协议 (IGP, interior gateway protocol) 和外部网关协议 (EGP, external gateway protocol) 2 种类型, EGP 的代表是 BGP, 当前版本是 BGP-4<sup>[27]</sup>。为满足算力信息在域内及域间同步的需求, 业界正从标准制定和技术研发 2 个维度推进路由协议扩展: 国际互联网工程任务组 (IETF, Internet Engineering Task Force) 已启动对 IGP 和 BGP 的扩展标准化工作, 国内运营商也在积极开展算力路由协议的相关研究。

中国电信在算力网关<sup>[28]</sup>的基础上, 通过 BGP 的扩展协议—算力边界网关协议 (CP-BGP, computing power BGP) 将收集的算力资源信息进行通告。算力网关是部署在算力网络分布式和混合式架构中的一种开放网络设备。在传统网络设备基础上引入分布式容器化设计, 通过解耦硬件与网络操作系统, 将功能模块部署于独立 Docker 容器, 显著提升了系统的灵活性、可编程性和扩展能力。该方案基于 BGP Update 报文实现算力资源与网络状态信息的协同传输, 保留了 BGP 在路由信息分发方面的成熟优势。

中国移动提出算力感知网络 (CAN, computing-aware networking)<sup>[29]</sup>技术, 在 BGP 消息中嵌入节点的负载状态和服务能力等字段, 使边缘路由器能交换算力信息; 同时, 多个算力节点可共享任播 (Anycast)<sup>[30]</sup>地址发布信息, 但需扩展 BGP 以支持同一任播地址对应不同下一跳和动态算力指标的路由优选。在 CAN 基础上, 提出算力路由 (CATS, computing-aware traffic steering), 该技术基

于分布式控制架构并引入算力因子, 实时采集资源的多维负载指标 (CPU/内存/存储利用率、请求队列深度等)。转发设备在识别服务流量的同时, 基于网络状态和算力因子进行联合评估, 通过内置的调度模块实现智能路由决策。

中国联通则提出一种混合式路由决策机制<sup>[31]</sup>, 通过分层信息通告实现算力与网络协同。首先, 算力区域内各路由器采集本地算力资源与网络指标信息; 其次, 关键设备间通过 BGP 扩展协议通告网络连接状态; 再次, 各路由器在域内广播采集信息, 生成本地算力服务路由表; 最后, 关键设备将区域连接状态和算力资源信息汇总上报至控制层。该机制通过分布式信息采集与集中式信息汇聚相结合, 为基于业务属性和资源分布的路由决策提供全局视图。

在分布式通告中, 高效的信息通告机制对任务调度和负载均衡至关重要。然而, 随着算力规模扩大和网络环境动态化, 这种通告机制在实际应用中面临显著的网络开销问题。在大规模跨域部署中频繁状态同步会引发指数级增长的控制流量, 不仅消耗宝贵的带宽资源, 还可能导致网络拥塞。传统的路由协议通常采用周期性的洪泛或逐跳传播机制, 信息扩散方式缺乏针对性, 使大量与业务无关的冗余信息在网络中传播。此外, 动态算力环境中资源状态高频变更会导致通告信息快速过期, 触发更频繁的同步。这些问题在需要实时感知算力资源状态的场景下尤为突出。

## 2 信息通告评价指标

信息通告的主要目标是为资源的编排调度提供决策依据, 通告效率主要受通告类型 (集中式或分布式)、信息年龄、通告范畴等的影响。信息通告会造成一定的网络开销。本节从建模角度分析信息通告的性能评价指标, 包括信息年龄、网络带宽和网络能耗。

为获取信息通告评价指标, 假设算力网络中网络节点集合为  $R$ , 网络节点  $i$  到网络节点  $j$  的有向链路集合为  $L = \{(i, j) | i, j \in R\}$ , 变量  $r(i)$  代表路由由节点  $i$  是否参与资源通告消息的感知或分发过程,  $r(i) = 1$  表示参与,  $r(i) = 0$  表示不参与; 同理, 变量  $l(i, j)$  表示相应链路是否用于传输通告消息,  $l(i, j) = 1$  表示参与,  $l(i, j) = 0$  表示不参与。假设算

力网络系统完成一次信息通告用时为 $T$ , 且 $T > 0$ 。

## 2.1 信息年龄

在算力网络系统中, 信息年龄是用于衡量资源信息新鲜度和时效性的指标, 是某一资源信息最后一次更新到被编排管理平台或所有网络节点接收到更新后信息的时间间隔。在集中式信息通告中, 信息年龄主要受到感知频率的影响, 感知频率越高, 信息年龄越小; 在分布式信息通告中, 除了感知频率外, 还受到路由收敛时延的影响, 收敛时延越低, 信息年龄越小。假设算力网络中算力节点集合为 $C$ , 在 $t$ 时刻, 编排管理平台所收集的平均信息年龄可表示为

$$AoI(t) = \frac{\sum_{n=0}^{|R|+|C|-1} (t - t_n^{\text{last}})}{|R|+|C|-1} \quad (2)$$

其中,  $t_n^{\text{last}}$  表示第 $n$ 个资源节点最新一次更新信息的时间, 平台需要对所有的算力和网络节点资源信息进行收集。

对于分布式信息通告, 资源状态信息仅存储在网络节点上, 则 $t$ 时刻网络节点上的平均信息年龄 $\overline{AoI}(t)$ 为

$$\overline{AoI}(t) = \frac{\sum_{k=0}^{|R|-1} AoI_k(t)}{|R|} \quad (3)$$

其中,  $\overline{AoI}(t)$  代表网络节点 $k$ 的信息年龄。由于每个网络节点会接收所有资源节点(包括网络节点和算力节点)的更新消息, 假设 $t_{k,m}^{\text{last}}$  代表第 $k$ 个网络节点最近一次更新资源节点 $m$ 的时刻, 则

$$AoI_k(t) = \sum_{m=0}^{|R|+|C|-1} (t - t_{k,m}^{\text{last}}) \quad (4)$$

## 2.2 网络开销

### 2.2.1 网络带宽

信息通告的网络带宽占用情况取决于多个因素, 包括感知信息的维度、报文结构、资源信息变化的快慢、感知频率、算力节点和网络节点的数量等。例如, 当感知信息的维度越多时, 扩展报文头的字段长度会相应增加, 所占用的带宽数量呈线性增加; 当网络节点数量较多时, 会引起通告链路数量的增加, 继而影响通告过程所占用的总带宽数量。方便起见, 假设单个信息通告报文长度为 $S \cdot B$  ( $S$ 的大小主要由感知信息维度、报文结构决定), 则信息通告占用的总带宽为

$$\frac{8 \times S \times \sum_{(i,j) \in L} l(i,j)}{T} \quad (5)$$

值得注意的是, 集中式信息通告和分布式信息通告的带宽占用表达式相同, 区别在于信息通告报文长度 $S$ 和通告链路集合。集中式和分布式通告的报文结构不同, 且前者的链路仅为资源节点与编排管理平台间的链路, 其参与通告的链路总数小于分布式通告链路总数。

### 2.2.2 网络能耗

算力网络信息通告的网络能耗主要包括路由节点能耗以及链路能耗。路由节点能耗由通告消息的接收、处理、发送产生, 链路能耗由传输设备运行功耗及其他辅助设备能耗组成。以一个路由自治域内的信息通告为例, 其能耗为

$$\sum_{i \in R} r(i) P_R t(i) + \sum_{(i,j) \in L} l(i,j) P_L t(i,j) \quad (6)$$

其中,  $P_R$  和  $P_L$  分别代表路由节点和链路在感知或分发资源通告消息时的功率,  $t(i)$  和  $t(i,j)$  分别代表路由节点 $i$ 和链路 $(i,j)$ 的转发时长。需要注意的是, 由于集中式和分布式信息通告实现方式不同, 因此 $P_R$ 和 $P_L$ 也会有差别。

在集中式信息通告中, 由编排管理平台统一汇总资源信息, 仅发生资源更新的算网节点与平台间的路由节点和链路参与通告消息转发, 则存在

$$\sum_{i \in R} r(i) < |R| \quad (7)$$

在分布式信息通告中, 任意算网节点的资源更新消息需通过IP同步给所有路由节点 $R$ , 则有

$$\sum_{i \in R} r(i) = |R| \quad (8)$$

即所有网络节点均需参与信息通告过程。

## 3 信息通告的挑战和优化

### 3.1 信息同步的收敛时延挑战与优化

算力网络中, 信息通告的收敛时延是全网所有算力、网络信息在编排管理平台或网络节点完成更新同步所需要的时间, 该时延直接决定了信息新鲜度, 进而影响资源调度的精度、资源利用率和用户体验<sup>[32]</sup>。收敛时延过高会导致调度决策基于过时信息, 出现资源浪费、服务时延增加甚至业务中断等问题。集中式信息通告的收敛时延主要受到感知频率和网络性能的影响, 而分布式通告的时延还受路由收敛速度的影响, 收敛时延更高。

业界认为分布式通告收敛时延高的最主要因素是算力节点规模与网络拓扑复杂性。随着边缘计算和物联网的发展,网络中节点规模已从亿级、数十亿级扩展到现在的上百亿级<sup>[33]</sup>,要实现全网信息一致性需要跨越更多节点和中继,极大地拉长了通告链路和同步时间,与此同时,由于网络中存在多跳路由、冗余链路、环路等复杂结构且存在连接故障、新节点加入等拓扑改变情况,信息同步时面临路径不唯一、非最优等问题,这不仅增加了同步实现的复杂度,还容易导致部分节点同步收敛缓慢<sup>[34-35]</sup>。在实际场景下,如果资源状态的更新频率远高于路由表项或同步机制的更新周期,也会产生额外的等待时延,降低信息新鲜度<sup>[36]</sup>。现有路由协议在设计之初并没有考虑算力网络高动态性和异构性,特别是在面向未来 6G 网络场景下,业务类型和资源状态更加多样,所需通告的信息维度显著增加,现有协议需反复修改和扩展,协议的可维护性和可扩展性面临极大挑战<sup>[37]</sup>。

为了应对节点规模大与拓扑复杂造成的分布式收敛时延高,路径选择优化、多路径传播等方法有着很好的效果,表 2 整理了相关参考文献。在路径选择算法中,以时延为约束是一种直接且有效的手段,文献[38]提出了一种基于多商品流问题的路径选择方法,采用低时延路径优先策略,将流量尽量分配到时延较低的链路上,并且引入了“余量”的动态分配机制,在每条链路中为可能的流量高峰预

留部分容量,避免了短路径因流量激增而迅速拥塞,从而降低了信息通告的收敛时延。

多路径传播也是有效降低分布式收敛时延的方法,文献[39]探讨了通过多路径传输的方式来降低信息通告的收敛时延,提出了基于自组织映射(SOM, self-organizing map)的多路同步算法(SMSA, SOM-based multi-route synchronization algorithm),利用环状 SOM 对旅行商问题进行求解,将逆欧几里得距离算法(IEDA, inverse Euclidean distance algorithm)得到的节点坐标作为输入,生成多个不同的同步路线。文献[40]探讨了机会路由(OR, opportunistic routing)与多路径 TCP 结合的方法,与未结合机会路由的方法相比,时延降低 10%,冗余广播次数减少 8.4%,功耗减少 15.9%。

为解决同步机制和协议设计导致的分布式收敛时延高的问题,许多学者也进行了新协议的设计或旧有协议的改进以适应算力网络场景的信息通告。文献[41]中提出的 CP-BGP 在 BGP Update 消息中新增“算力属性字段”,采用二进制编码描述算力资源的归一化指标。文献[42]提出基于 BGP 的分级路由机制,设计了新的通告机制,即粗颗粒的算力资源状态仅在边缘计算节点或数据中心节点之间通告,细颗粒度算力服务状态则在边缘计算或数据中心节点所归属的域内网络边缘节点通过 IGP 进行维护。文献[43]利用 SRv6 的网络可编程能力,通过将 ServiceID 与 SRv6 段识别信息(SID)关联,进

表 2 收敛时延的优化方法对比

方法	主要内容	实现方式	局限性
文献[38]	以时延为约束,提出了一种基于多商品流问题的路径选择方法	采用低时延路径优先策略,将流量尽量分配到时延较低的链路上,并且引入“余量”的动态分配机制,在每条链路中为可能的流量高峰预留部分容量	严重依赖静态、精确的拓扑、链路时延与容量估计,无法反映运行时链路故障、拓扑演进和负载突发
文献[39-40]	利用多路径传播设计算法,降低分布式收敛时延	生成多个不同的同步路线,让多接收者共同转发每个分段,减少冗余广播	针对服务器多集群场景,未考虑集群内收敛时延的变化问题;引入额外控制报文与路径管理开销,可能抵消广播减少带来的收益
文献[41-43]	利用 SRv6 的网络可编程能力,提出 CP-BGP 和基于 BGP 的分级路由机制	通过将 ServiceID 和 SRv6 段识别信息关联,扩展 BGP 加入算力信息字段,粗颗粒度算力资源状态仅在边缘计算节点或数据中心节点之间通告,细颗粒度算力服务状态则在边缘计算或数据中心节点所归属的域内进行维护	概念和方案较为成熟,未提供仿真或大规模部署的性能验证数据
文献[44-45]	提出一种分布式一致协议	节点分为领导者(Leader)和跟随者(Follower),利用选举机制进行 Leader 选举,然后 Follower 向 Leader 发送自己的信息,Leader 更新后向所有 Follower 同步	若中间日志丢失,后续日志即使到达也需阻塞等待,降低并发性;实际系统难以实现

行联合注册和统一编排, 结合网络软件定义网络将网络资源连接服务、切片服务、服务级别协议 (SLA, service level agreement) 可视等多种服务类型能力开放出来, 并实现服务状态实时感知。

除了网络层的协议创新外, 还可以基于主流分布式一致性协议 (如 raft<sup>[44]</sup>、paxos<sup>[45]</sup>) 的思想, 设计了一种新的计算路由层, 用于发布分布式订阅或定向更新, 该方法可以与路由协议解耦, 减少计算资源变化对路由规则收敛的影响, 还可以根据实际网络特点和用户需求对分布式一致性协议进行改进, 使其更加实用。

### 3.2 信息通告的网络开销挑战与优化

信息通告的网络开销主要包括完成一轮通告所需的信息条数、网络带宽占用和协议报文处理成本等。网络开销的大小直接影响网络传输效率、节点资源利用率及系统整体稳定性<sup>[46]</sup>。

随着 VR、元宇宙等新兴业务层出不穷, 算力网络业务类型的丰富和服务精细化程度的提升, 算力节点需要更新鲜、更多维的通告信息, 能耗、服务实例和业务信息、需求信息等也不断被纳入算力信息体系中<sup>[47-48]</sup>。此外, 现有路由协议 (如 BGP、SRv6) 的头部格式和报文封装机制未针对算力信息特征优化, 扩展字段的文本编码方式导致协议头部开销占比过高<sup>[49-50]</sup>, 这也是当前主流方案导致算力通告网络开销大的重要原因。表 3 对该部分研究工作进行了简要归纳。

依据式(5)可知, 优化通告链路数可以有效降低网络带宽占用, 同时为有效业务释放更多带宽资源。文献[51]提出一种安全能源感知元启发式路由协议 (SEAMHR, secure energy aware meta-heuristic

routing protocol), 利用链路完整性参数和跳数来指导路由决策, 加入 CTR 模式的深度学习自动编码器进行数据加密和安全通信, 获得更好的能耗、吞吐量、丢包、开销表现。此外, 能耗也是网络开销的优化指标之一, 文献[52]采用蝴蝶优化算法 (BOA, butterfly optimization algorithm) 和蚁群优化 (ACO, ant colony optimization) 开发一种集群型节能路由协议, 以延长网络寿命并减少能量消耗。

除了单一针对路由链路数、能耗等的优化方案, 对链路数与能耗、收敛时间等因素联合优化的方法能更多维度、更全面地解决网络开销大的问题。文献[53]提出了一种将 ACO 和最小链路数 (MHC, minimum hop count) 相结合的混合路由算法, 仿真结果显示, 该算法在收敛速度和最优路径寻找成功率等方面优于传统算法。文献[54]提出优化多约束路由算法, 同时优化跳数、能量消耗和路径时延等多种 QoS 约束, 使用按需距离矢量 (AODV, ad hoc on-demand distance vector) 协议进行路由, 实现快速适应动态链路状态, 减少处理和内存开销。

此外, 对节点进行分层处理也是降低通告网络开销的重要手段。文献[55]提出基于最优链路数的非均匀分簇路由算法, 核心理念是通过推导最优链路数, 计算出节点与基站直线传输数据时能耗最小的路径, 采用最优链路数策略降低能耗 10%~20%, 并延长了网络生命周期。文献[56]提出一种基于链路数限制的高能效分簇路由算法, 该算法流程分为分簇阶段和数据传输阶段, 分簇阶段节点广播自身信息并更新邻居队列, 综合节点剩余能量、通信开销和簇成员数量确定簇头, 普通节点根据簇头声明

表 3 网络开销的优化方法对比

方法	主要内容	实现方式	局限性
文献[51-52]	提出基于启发式算法的路由协议, 通过优化链路数或能耗, 有效延长网络生命周期	加入 CTR 模式的深度学习自动编码器进行数据加密和安全通信; 通过启发式算法优化选路和选举簇头	依赖 GPS 同步与静态部署, 不适应移动环境; 参数敏感且需预先调优
文献[53-54]	联合优化通告链路数和能耗等多种指标, 实现动态网络中快速、稳定的多约束最优路径选取	利用跳数标记将网络划分层级; 沿用按需广播, 并通过多路径发现、后向路由重用及能量感知切换实现路径选取	算法假设节点静止、同质与可靠链路, 未考虑移动或链路失效; 快速刷新的路由表项容易引起路由振荡
文献[52,55-56]	对节点进行分层处理, 通过合理分簇来降低能耗、延长网络生命周期	先根据算法模型确定簇头, 再利用经验公式确定覆盖范围, 转发阶段基于最优跳数进行从簇头到基站的多跳转发	不适用于节点异构和可移动网络, 缺少自适应机制
文献[57-59]	提出 SRv6 的报文头压缩方案	定义了新的 Segment 类型和 SID 来进行报文头压缩	需专用硬件解析; 地址块固定; 映射表占用资源

信息决定是否加入某簇；数据传输阶段紧急数据采用快速模式，普通数据采用能量效率更高的正常模式。此外，协议报文头压缩也是降低算力通告网络开销的优化路径之一，文献[57-59]提出 G-SRv6 方案、uSID 方案、SRm6 方案，实现了 SRv6 报文头的高效压缩。

### 3.3 信息通告中的路由振荡挑战与优化

在传统网络中，路由振荡通常源于路由策略配置冲突、网络拓扑变化以及路由协议自身的局限性<sup>[60-62]</sup>。在算力网络中，主要发生在分布式信息通告场景下，由于算力需要感知的参数更多，且算力状态变化更加频繁，通过网络协议通告算力信息将面临更严峻的路由振荡问题。表 4 对典型的路由振荡优化方法进行了总结说明。

文献[63]提出了一种层次化分布式算力路由机制，解决由算力资源状态频繁变化引发的网络路由振荡问题。该机制将资源参数分为快变域和慢变域。快变域是指包括如 CPU 利用率、内存占用率等频繁变化的参数；慢变域是指包括节点的地理位置、硬件类型等变化较慢的参数。通过对 2 类参数采用不同的更新策略，可以在保证路由决策准确性的同时，减少不必要的状态更新，降低路由振荡发生的可能性。

此外，针对算力资源动态变化频繁的问题，文献[41]提出了通过引入数据库缓存与算力路由表解耦的机制，从源头上降低算力网络中因状态波动带来的路由不稳定性。该方法首先将算力资源的动态状态以键值对形式存储于数据库中，再通过构建独立的算力路由表，将算力资源的转发路径选择与传统 IP 路由逻辑解耦，使算力变化仅影响算力层的路由表，而不触发 IP 路由的频繁波动。结合 SLA 协议指标，依据设定的门限条件筛选算力信息，当超出阈值（如 CPU 利用率超过 70%）时触发路由调整，进一步压制了小幅度资源变化带来的链路不稳定性。除上述方法外，还可以通过设置恰当的感

知时间窗口，以周期性感知降低算力状态频繁变化对路由协议的影响。

### 3.4 信息通告中的安全性隐私和跨域协同挑战

信息通告也面临较为严峻的安全性隐私与跨域协同挑战。安全性隐私方面，算力资源状态、用户业务需求等敏感信息在传输中易被窃听、篡改和伪造，恶意节点伪造信息会误导调度，导致资源错配与业务中断；边缘节点和终端的用户隐私数据若保护不当，在同步中易泄露，违反数据合规要求。现有路由协议安全机制难适配算力信息特性，传统加密协议增加通告时延，边缘节点资源有限，难以平衡隐私保护与性能。跨域协同层面，算力向云边端协同的架构拓展，不同管理域网络协议与算力管理机制存在差异，致使域间信息转换困难；跨域算力状态更新需跨越多层网络边界，收敛时延大幅增加，传统路由协议难以适应算力动态变化，信息一致性维护困难，易引发服务故障。

为应对这些挑战，业界积极探索优化方法。在安全性隐私优化方面，采用基于联盟链的共识协议<sup>[64]</sup>、属性基加密<sup>[65]</sup>等方案，实现隐私保护、信息安全与权限管理。跨域协同优化可通过部署协议转换网关统一信息描述语言、分层协同处理快慢变信息<sup>[63]</sup>等手段，减少跨域传输开销，提升协同效率。

## 4 未来展望

在新一代算力网络架构演进中，信息通告机制作为各类资源协同调度的关键，其性能决定了系统服务质量和资源使用效率。随着 6G 通感算融合体系的逐步完善<sup>[66]</sup>，算力网络技术正从 IP 领域逐步扩展到移动领域，使移动算力网络成为学术界和产业界共同关注的前沿研究热点<sup>[67-69]</sup>。因此，信息通告机制的范畴和内容也发生变化，亟须系统性的理论创新和技术突破。

在信息通告范围方面，传统算力网络的信息通告主要面向算力节点和路由节点，6G 引入对用户

表 4 路由振荡的优化方法对比

方法	实现方式	局限性
文献[63]	将资源参数进行分类，对不同类型参数采用不同的更新策略，减少慢变域参数的更新次数	聚焦解决算力路由与网络稳定性的矛盾，忽略与数据存储等相关技术的协同优化
文献[41]	将算力路由表与网络路由表解耦，并设置资源信息变化门限值	路由表存储空间增加；忽略门限值以下的资源变化，影响实时性
常用方法	设置恰当的感知时间窗口，降低状态更新频次	影响资源信息更新的及时性

终端、接入网、核心网等节点算力的感知和通告<sup>[70]</sup>；在通告内容方面，传统算力网络主要针对资源信息和部分服务信息，6G则包含“信号级”“数据级”“特征级”“内容级”的感知和分发<sup>[71]</sup>。例如，信号级感知可以实现无线信道状态的精细化监测，为资源动态分配提供实时依据；内容级感知可支持应用层语义信息的传递。信息通告从狭义到广义的发展，不仅拓展了信息通告的边界，还为6G系统的原生内生智能、通感一体化融合等愿景特征提供基础。

智算业务的爆发式增长进一步加速了信息通告技术的演进。大模型训练场景催生万卡、十万卡甚至百万卡的智算中心建设需求，集群规模的可扩展性、训练框架的适配性及网络传输性能成为关键指标；在模型推理场景下，应用场景的多样性要求网络同时满足个人终端轻量化推理和企业级大规模推理的差异化需求，时延和算力泛在性成为技术攻关的重点。为应对这些挑战，需构建跨域协同的算力网络架构，通过整合无线侧和有线侧算力资源，实现6G通感算网络 and 传统面向IP的算力网络的融合，从而提供覆盖云边端的联合计算服务。在融合架构下，信息通告需突破有线或无线资源独立感知的局限，将2类资源联合感知，为异构资源的协同调度提供准确的资源信息依据。

基于上述技术需求和发展特点，面向未来网络的信息通告架构需脱离控制层，进一步向资源和用户侧延伸，逐步具备全域感知、智能融合、动态决策和便捷交互的特点。因此，根据功能不同，将新架构分为4个层级，分别是资源感知采集层、信息处理分析层、通告决策控制层和用户应用接口层，如图5所示。

资源感知采集层通过新型传感器与自组织网络技术，实现对多源异构资源及用户需求的全域实时感知，解决跨协议协同难题。一方面，负责对基站、核心网、数据中心等无线侧和有线侧算力网络资源的状态进行感知，包括算力使用情况、网络拥塞情况、负载程度、性能指标等；另一方面，可通过大模型提示词等手段收集用户的需求信息，如算力类型、规模、时延要求，以及用户的业务场景描述。

信息处理分析层将来自资源感知采集层的异构数据整合成统一格式，再运用智能化算法对数据集深入分析，挖掘信息数据里的特征和关联关系，为通告决策提供依据。该层可运用边缘智能计算与融合算法，对感知数据进行深度整合与分析，挖掘数据关联，减少数据回传开销。

通告决策控制层借助联邦学习、博弈论及智能决策引擎，实现多主体协同与策略动态适配，提升

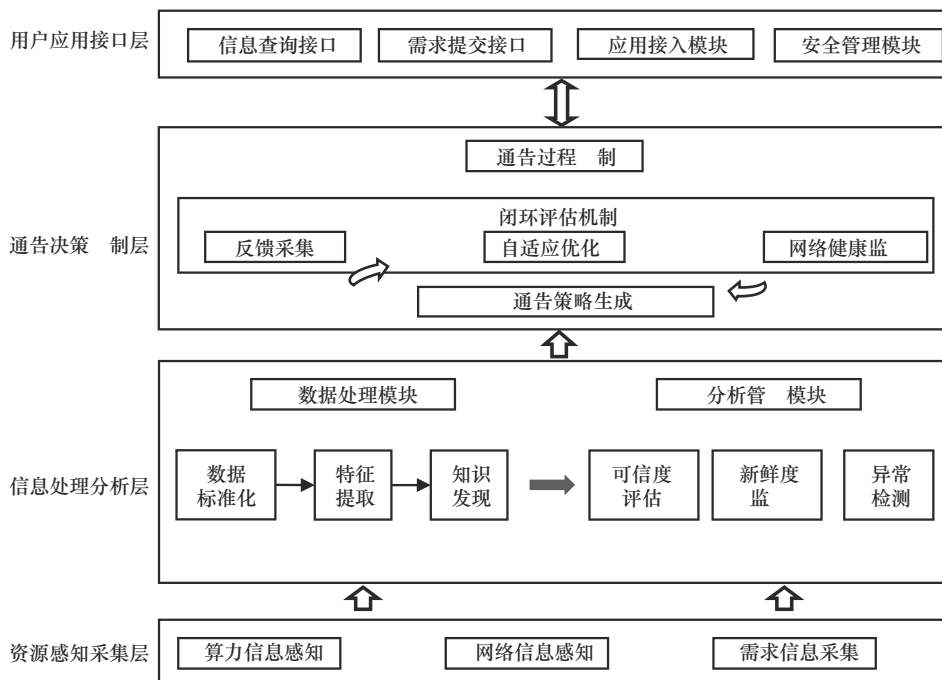


图5 面向未来网络的信息通告架构

资源利用率与决策准确性。该层是信息通告架构的核心,以信息处理分析层输出的数据特征和关联关系为依据,结合网络整体运行状态,完成对信息通告全流程的策略制定和精准控制。其中,通告策略生成模块综合网络拓扑结构、算力资源负载、业务需求优先级等因素,制定信息通告关键策略,包括确定通告内容、规划通告频率、划定通告范围等,避免无效通告。

用户应用接口层为用户提供统一接口,用户可以通过该接口查询和获取所需的信息,以及提交自己的业务需求。该层可能出现交互便捷性不足、语义理解误差等问题,可通过支持自然语言处理的人机交互界面,让用户以对话形式描述复杂算力需求;采用自适应接口适配技术,根据应用类型自动调整接口参数。但目前语义理解准确性仍需提升。

相比于传统信息通告,由4层架构协作构成的“感知-认知-决策-执行-反馈”闭环系统显著拓展了通告范畴,强化了异构算力协同,提高了信息通告效率与可靠性,为未来算力网络发展提供了有力支撑。

## 5 结束语

算力网络的信息通告是进行资源编排调度的基础,本文从算力网络的3种部署架构出发,详细分析对比了不同架构下信息通告的主流实现方法和核心特征,对信息年龄、网络带宽和网络能耗3个性能指标进行建模,从建模中可以直观获取信息通告的性能影响因素。此外,本文还对算力网络信息通告尤其是分布式信息通告的现存挑战进行了调研,阐述现有学术和工程领域对相应挑战的解决方案。最后,针对未来网络场景下信息通告的新特征,本文提出包含4个层级的功能架构图,该架构充分考虑了未来网络通告范畴扩大、异构算力协同的趋势,可有效促进算力网络的信息通告在未来6G网络中的演进。

## 参考文献:

[1] 雷波,刘增义,王旭亮,等.基于云、网、边融合的边缘计算新方案:算力网络[J].电信科学,2019,35(9):44-51.  
LEI B, LIU Z Y, WANG X L, et al. Computing network: a new multi-access edge computing[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(9): 44-51.

[2] 中国联通网络技术研究院.中国联通算力网络白皮书[R].2019.  
China United Network Communications Technology Research Institute. White paper on China Unicom's computing power network[R]. 2019.

[3] TANG X Y, CAO C, WANG Y X, et al. Computing power network: the architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement[J]. China Communications, 2021, 18(2): 175-185.

[4] 雷波,陈运清,王旭亮,等.边缘计算与算力网络:5G+AI时代的新型算力平台与网络连接[M].北京:电子工业出版社,2020.  
LEI B, CHEN Y Q, WANG X L, et al. Edge computing and computing power network: new computing platform and network connection in the 5G+AI era[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.

[5] 姚惠娟,陆璐,段晓东.算力感知网络架构与关键技术[J].中兴通信技术,2021,27(3):7-11.  
YAO H J, LU L, DUAN X D. Architecture and key technologies for computing-aware networking[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(3): 7-11.

[6] 郭凤仙,孙耀华,彭木根.6G算力网络:体系架构与关键技术[J].无线电通信技术,2023,49(1):21-30.  
GUO F X, SUN Y H, PENG M G. Computing force networks in 6G: architecture and key technologies[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(1): 21-30.

[7] 曹畅,张帅,刘莹,等.基于通信云和承载网协同的算力网络编排技术[J].电信科学,2020,36(7):55-62.  
CAO C, ZHANG S, LIU Y, et al. Convergence of telco cloud and bearer network based computing power network orchestration[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(7): 55-62.

[8] 何涛,曹畅,唐雄燕,等.面向6G需求的算力网络技术[J].移动通信,2020,44(6):131-135.  
HE T, CAO C, TANG X Y, et al. Research on computing power network technology for 6G requirements[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 131-135.

[9] 庞冉,易昕昕,辛亮,等.算力网络路由调度技术研究[J].电信科学,2023,39(8):149-156.  
PANG R, YI X X, XIN L, et al. Research on routing scheduling technology of computing power network[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(8): 149-156.

[10] 唐静,雷波,李云鹤,等.面向网络5.0的新型网络体系测试实践及思考[J].信息通信技术与政策,2023(12):56-61.  
TANG J, LEI B, LI Y H, et al. Practice and reflection on new network architecture test based on Network 5.0[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2023(12): 56-61.

[11] MORTON A. Active and passive metrics and methods (with hybrid types in-between)[R]. 2016.

[12] KIM C, SIVARAMAN A, KATTA N, et al. In-band network telemetry via programmable dataplanes[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2015 Conference. New York: ACM Press, 2015: 1-2.

[13] BROCKNERS F, BHANDARI S, MIZRAHI T. Data fields for in situ operations, administration, and maintenance(IOAM)[R]. 2022.

[14] GUPTA V, DE S. SBL-based adaptive sensing framework for WSN-assisted IoT applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(6): 4598-4612.

[15] KAVEHMADAVANI F, NGUYEN V D, VU T X, et al. Empowering traffic steering in 6G open RAN with deep reinforcement learning[J].

- IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(10): 12782-12798.
- [16] AHMED G E H, GIL-CASTIÑEIRA F, COSTA-MONTENEGRO E. KubCG: a dynamic Kubernetes scheduler for heterogeneous clusters[J]. Software: Practice and Experience, 2021, 51(2): 213-234.
- [17] OSMANI L, KAUPPINEN T, KOMU M, et al. Multi-cloud connectivity for Kubernetes in 5G networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(10): 42-47.
- [18] LIU Z J, CHEN C, LI J J, et al. KubFBS: a fine-grained and balance-aware scheduling system for deep learning tasks based on Kubernetes[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2022, 34(11): e6836.
- [19] 李建飞, 曹畅, 李奥, 等. 算力网络中面向业务体验的算力建模[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(5): 34-38, 52.  
LI J F, CAO C, LI A, et al. Computing power modeling for business experience in computing power network[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(5): 34-38, 52.
- [20] 杜宗鹏, 李志强, 陆璐. 算力网络四面三级算力度量技术体系[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(4): 8-13.  
DU Z P, LI Z Q, LU L. Three-level and four-aspect computing measurement system in computing force network[J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(4): 8-13.
- [21] 柴若楠, 郜帅, 兰江雨, 等. 算力网络中高效算力资源度量方法[J]. 计算机研究与发展, 2023, 60(4): 763-771.  
CHAI R N, GAO S, LAN J Y, et al. Efficient computing resource metric method in computing-first network[J]. Journal of Computer Research and Development, 2023, 60(4): 763-771.
- [22] 祝淑琼, 徐青青, 李小涛, 等. 算力度量与任务调度: 物联网端侧设备策略研究[J]. 电信科学, 2024, 40(4): 122-138.  
ZHU S Q, XU Q Q, LI X T, et al. Computational measurement and task scheduling: a study on IoT edge device strategies[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(4): 122-138.
- [23] ZHANG P Y, CHEN N, XU G J, et al. Multi-target-aware dynamic resource scheduling for cloud-fog-edge multi-tier computing network[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(5): 3885-3897.
- [24] CHENG S, FENG F Z, BI T, et al. Resource-aware reinforcement learning-based transmission optimization for mobile augmented reality in edge computing[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2025, 11(4): 2356-2367.
- [25] 段晓东, 姚惠娟, 付月霞, 等. 面向算网一体化演进的算力网络技术[J]. 电信科学, 2021, 37(10): 76-85.  
DUAN X D, YAO H J, FU Y X, et al. Computing force network technologies for computing and network integration evolution[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(10): 76-85.
- [26] 雷波, 赵倩颖. CPN: 一种计算/网络资源联合优化方案探讨[J]. 数据与计算发展前沿, 2020, 2(4): 55-64.  
LEI B, ZHAO Q Y. CPN: a joint optimization solution of computing/network resources[J]. Frontiers of Data & Computing, 2020, 2(4): 55-64.
- [27] REKHTER Y, LI T, HARES S. A border gateway protocol 4(BGP-4)[R]. 2006.
- [28] 马思聪, 孙吉斌, 孙一豪. 东数西算场景下的算力网关研发及应用[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(4): 2-7.  
MA S C, SUN J B, SUN Y H. Research and application of computing power gateway in east-data-west-computing project[J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(4): 2-7.
- [29] WANG X Y, DUAN X D, YAO K H, et al. Computing-aware network (CAN): a systematic design of computing and network convergence[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2024, 25(5): 633-644.
- [30] PARK V D, MACKER J P. Anycast routing for mobile networking[C]// Proceedings of the MILCOM 1999. IEEE Military Communications Conference Proceedings. Piscataway: IEEE Press, 1999: 1-5.
- [31] 魏汝翔, 刘琦, 赵广, 等. 东数西算下面向业务的路由策略分析与探索[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(4): 14-18.  
WEI R X, LIU Q, ZHAO G, et al. Analysis and exploration of service oriented routing strategies in east-data-west-computing requirement transfer[J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(4): 14-18.
- [32] SUN Y K, LEI B, LIU J L, et al. Computing power network: a survey[J]. China Communications, 2024, 21(9): 109-145.
- [33] NIU C Y, WU F, TANG S J, et al. Billion-scale federated learning on mobile clients: a submodel design with tunable privacy[C]// Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2020: 1-14.
- [34] 张兴, 曲哲言, 孙钰坤, 等. 端侧算力网络: 架构与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2024, 47(3): 1-9, 23.  
ZHANG X, QU Z Y, SUN Y K, et al. Terminal-side computing power network: architecture and key technologies[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024, 47(3): 1-9, 23.
- [35] DA SILVA R B, SOUZA MOTA E. A survey on approaches to reduce BGP interdomain routing convergence delay on the Internet[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2949-2984.
- [36] FABRIKANT A, SYED U, REXFORD J. There's something about MRI: timing diversity can exponentially worsen BGP convergence[C]// 2011 Proceedings IEEE INFOCOM. Piscataway: IEEE Press, 2011: 2975-2983.
- [37] 北京世纪互联宽带数据中心有限公司. 一种算力资源分配方法、装置及相关设备[P]. 中国: CN118233463A, 2024.  
Beijing 21vianet Broadband Data Center Co., Ltd. A computing resource allocation method, device and related equipment[P]. China: CN118233463A, 2024.
- [38] GVOZDIEV N, VISSICCHIO S, KARP B, et al. On low-latency-capable topologies, and their impact on the design of intra-domain routing[C]// Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM Press, 2018: 88-102.
- [39] LI K X, ZHANG X, WANG W B. Multipath information announcement algorithm for computing power network based on self-organizing map network[C]// Proceedings of the 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.
- [40] KALAIVANI D, SRINIVASAN L, SARAVANAN K. Using multipath TCP and opportunistic routing in IoT network[C]// Proceedings of the 2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT). Piscataway: IEEE Press, 2022: 94-104.

- [41] 中兴通讯股份有限公司. 算力网络中算力通告和路由方法、电子设备和存储介质[P]. 中国: CN117527692A, 2024.  
ZTE Corporation. A method, electronic device and storage medium for computing power notification and routing in computing power network[P]. China: CN117527692A, 2024.
- [42] 黄光平, 史伟强, 谭斌. 基于SRv6的算力网络资源和服务编排调度[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(3): 23-28.  
HUANG G P, SHI W Q, TAN B. Computing power network resources based on SRv6 and its service arrangement and scheduling[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(3): 23-28.
- [43] 张帅, 曹畅, 唐雄燕. 基于SRv6的算力网络技术体系研究[J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(1): 11-15.  
ZHANG S, CAO C, TANG X Y. Computing power network technology architecture based on SRv6[J]. ZTE Technology Journal, 2022, 28(1): 11-15.
- [44] ONGARO D, OUSTERHOUT J. In search of an understandable consensus algorithm[C] // Proceedings of the 2014 USENIX Annual Technical Conference. Berkeley: USENIX Association, 2014: 305-319.
- [45] LAMPORT L. Paxos made simple[J]. ACM SIGACT News, 2001, 32(4): 51-58.
- [46] JIN H W, YOO C. Impact of protocol overheads on network throughput over high-speed interconnects: measurement, analysis, and improvement[J]. The Journal of Supercomputing, 2007, 41(1): 17-40.
- [47] ZHANG S Y, LIM W Y B, NG W C, et al. Toward green metaverse networking: technologies, advancements, and future directions[J]. IEEE Network, 2023, 37(5): 223-232.
- [48] 周舸帆, 雷波. 算力网络中基于算力标识的算力服务需求匹配[J]. 数据与计算发展前沿, 2022, 4(6): 20-28.  
ZHOU G F, LEI B. Computing service demand matching based on computing power identification in computing power network[J]. Frontiers of Data & Computing, 2022, 4(6): 20-28.
- [49] 浪潮通信技术有限公司. 一种基于BGP流规则通告算力信息的方法及系统[P]. 中国: CN116560853A, 2023.  
Inspur Communications Technology Co., Ltd. A method and system for notifying computing power information based on BGP flow rules[P]. China: CN116560853A, 2023.
- [50] LORETI P, MAYER A, LUNGARONI P, et al. SRv6-PM: a cloud-native architecture for performance monitoring of SRv6 networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(1): 611-626.
- [51] GURRAM G V, SHARIF N C, BIRADAR R L. A secure energy aware meta-heuristic routing protocol (SEAMHR) for sustainable IoT-wireless sensor network (WSN) [J]. Theoretical Computer Science, 2022, 930: 63-76.
- [52] MAHESHWARI P, SHARMA A K, VERMA K. Energy efficient cluster based routing protocol for WSN using butterfly optimization algorithm and ant colony optimization[J]. Ad Hoc Networks, 2021, 110: 102317.
- [53] JIANG A L, ZHENG L H. An effective hybrid routing algorithm in WSN: ant colony optimization in combination with hop count minimization[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1020.
- [54] ELATTAR H M, ELEMARY M. Energy, delay and hop count multi-constraints QoS routing algorithm for wireless ad-hoc networks[C]// Proceedings of the 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2017: 568-573.
- [55] 孙振, 王凯, 王亚刚. 分簇路由算法中的多跳跳数及中继节点优化[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(6): 1299-1305.  
SUN Z, WANG K, WANG Y G. Hop number and relay nodes optimization in clustering routing algorithms[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(6): 1299-1305.
- [56] 蔡钊, 马林华, 黄绍城, 等. 基于跳数限制的高能效分簇路由算法[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(11): 129-132, 136.  
CAI Z, MA L H, HUANG S C, et al. High energy-efficient clustering routing algorithm based on hop-constrained[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(11): 129-132, 136.
- [57] IETF. Generalized SRv6 network programming for SRv6 compression[S]. 2022.
- [58] IETF. Network programming extension: SRv6 uSID instruction[S]. 2022.
- [59] IETF. The IPv6 compact routing header(CRH)[S]. 2022.
- [60] 赵会群, 高远. 一种基于AS关系的BGP路由策略冲突检测算法[J]. 计算机工程与科学, 2002, 24(2): 50-53.  
ZHAO H Q, GAO Y. An algorithm for checking the policy conflict of BGP routing based on AS relationship[J]. Computer Engineering & Science, 2002, 24(2): 50-53.
- [61] 北京邮电大学. 基于链路破坏度的动态自适应的路由震荡抑制方法[P]. 中国: CN102868603A, 2015.  
Beijing University of Posts and Telecommunications. A dynamic adaptive routing oscillation suppression method based on link damage degree[P]. China: CN102868603A, 2015.
- [62] 黄光平, 谭斌, 吉晓威. 一种面向服务的算网路由架构方案[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(4): 38-42.  
HUANG G P, TAN B, JI X W. An architecture solution of service-oriented routing for computing and networking[J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(4): 38-42.
- [63] 黄光平, 史伟强, 谭斌. 基于SRv6的算力网络资源和服务编排调度[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(3): 23-28.  
HUANG G P, SHI W Q, TAN B. Computing power network resources based on SRv6 and its service arrangement and scheduling[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(3): 23-28.
- [64] 刘漳辉, 林哲旭, 陈汉林, 等. 一种基于联盟区块链的数据可信共享方案[J/OL]. 计算机科学, 2025: 1-14. (2025-03-19).  
LIU Z H, LIN Z X, CHEN H L, et al. A trusted data sharing scheme based on alliance blockchain[J/OL]. Computer Science, 2025: 1-14. (2025-03-19).
- [65] MA H, ZHANG R, WAN Z G, et al. Verifiable and exculpable outsourced attribute-based encryption for access control in cloud computing[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2017, 14(6): 679-692.
- [66] 中国通信学会. 通感算一体化网络前沿报告[R]. 2022.  
China Institute of Communications. Frontier report on integrated sensing, communication and computing network[R]. 2022.
- [67] 张雪贝, 隋腾飞, 曹畅, 等. 面向6G的移动算力网络思考与探索[J]. 信息通信技术, 2024, 18(4): 24-30.  
ZHANG X B, SUI T F, CAO C, et al. Thinking and exploration of mo-

bile computing power network for 6G[J]. Information and Communications Technologies, 2024, 18(4): 24-30.

[68] 许曰强. 移动边缘算力网络中的资源管理技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.

XU Y Q. Research on resource management technology in mobile edge computing power network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.

[69] 李福昌, 李露, 高谦. 无线网络智算融合需求及技术研究[J]. 移动通信, 2024, 48(8): 2-7.

LI F C, LI L, GAO Q. Research on demand and technology of intelligent computing fusion in wireless networks[J]. Mobile Communications, 2024, 48(8): 2-7.

[70] 姜大洁, 袁雁南, 周通, 等. 面向6G的通感算融合服务、系统架构与关键技术[J]. 移动通信, 2023, 47(3): 2-13.

JIANG D J, YUAN Y N, ZHOU T, et al. Services, system architecture and key technologies for 6G integrated communication, sensing and computing[J]. Mobile Communications, 2023, 47(3): 2-13.

[71] 段向阳, 杨立, 夏树强, 等. 通感算智一体化技术发展模式[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 37-48.

DUAN X Y, YANG L, XIA S Q, et al. Technology development mode of communication/sensing/computing/intelligence integration[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(3): 37-48.

#### [作者简介]



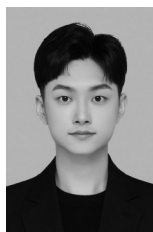
**卫敏** (1990-), 女, 山西运城人, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为算力网络、智算网络等。



**赵倩颖** (1991-), 女, 河北秦皇岛人, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为算力网络、智算网络等。



**唐静** (1993-), 女, 江苏盐城人, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为确定性网络、智算网络等。



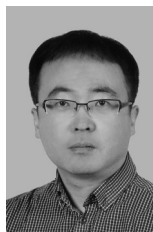
**高瑞韩** (2000-), 男, 山东威海人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为面向通算一体网络的信息感知通告和任务调度技术。



**潘禹辰** (2000-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为通信感知一体化、算力网络等。



**王念瑞** (2002-), 女, 河南郑州人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为面向6G算网融合的信息感知和信息通告技术。



**张兴** (1980-), 男, 陕西渭南人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为5G/6G移动通信、卫星互联网、算力网络等。