

通算存智一体协同的未来网络模型

胡玉姣¹, 黄韬^{1,2}, 贾庆民¹, 谢人超^{1,2}, 刘韵洁^{1,2}

(1. 紫金山实验室未来网络研究中心, 江苏 南京 211111; 2. 北京邮电大学网络与交换国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 针对智能时代多样化多形态业务对未来网络按需、精准、高效服务的诉求, 提出了一种通算存智一体协同的网络模型 (3CI-CoNet)。首先以通信技术连接计算设备与存储设备, 构建网内计算和网内存储的硬件底座, 然后在底座上部署智能网络模型及算法, 为网内业务构建智能的网络环境, 同时链接与行业/应用相关的智能设备、平台及算法, 为新兴应用提供智能的网络服务, 保障各业务的有序高效运行。设计了3CI-CoNet的层次化功能架构, 包含基础资源层、智能接入层、按需服务层和业务表达层, 各层次间相辅相成, 协同构建了智能的网络环境和网络服务。进一步, 结合自动驾驶和智能制造中的典型场景, 论述了3CI-CoNet及其功能架构、运营机制对多形态业务高效运行的支撑作用, 阐述了3CI-CoNet在智能时代的推广和应用价值。以智能制造中多AGV按需调度业务场景为原型, 通过将3CI-CoNet与其他网络模型相对比, 定性定量论证了3CI-CoNet对提升业务效能具有积极作用。最后, 总结了3CI-CoNet的未来发展趋势和面临的技术挑战。

关键词: 通算存智一体协同网络; 未来网络; 智能应用; 新型架构

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024089

Future network model for integrated collaboration of communication, computing, caching and intelligence

HU Yujiao¹, HUANG Tao^{1,2}, JIA Qingmin¹, XIE Renchao^{1,2}, LIU Yunjie^{1,2}

1. Future Network Research Center, Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

2. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: In order to adapt to the demands of diverse businesses for on-demand, accurate and efficient network services, the communication-computing-caching-intelligence cooperative network (3CI-CoNet) was proposed. The hardware bases of 3CI-CoNet was built by connecting computing devices and storage devices with communication technologies. Intelligent models and algorithms were deployed on the bases to build an intelligent network environment. Simultaneously, 3CI-CoNet connected with intelligent devices, platforms, and algorithms relevant to various industries and applications to provide intelligent network services for emerging applications, ensuring the orderly and efficient operation of various services. 3CI-CoNet was designed with a hierarchical functional architecture, including the foundational resource layer, intelligent access layer, on-demand service layer, and business expression layer. These layers worked together to construct an intelligent network environment and network services. Furthermore, in conjunction with typical scenarios in autonomous driving and smart manufacturing, the functional architecture and operational mechanisms of 3CI-CoNet were discussed. Using the on-demand scheduling of multiple automated guided vehicle (AGV) in intelligent manufacturing as a prototype, a qualitative and quantitative analysis was performed to demonstrate the positive impacts of 3CI-CoNet on enhancing business efficiency. Finally, the future development trends and the technological challenges of 3CI-CoNet were summarized.

Keywords: 3CI-CoNet, future network, intelligent applications, novel architecture

收稿日期: 2023-11-01; 修回日期: 2024-03-11

通信作者: 贾庆民, jiaqingmin@pmlabs.com.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.92367104, No.92267301); 江宁百家湖计划基金资助项目 (No.74072203-3)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.92367104, No.92267301), The Jiangning Baijia Lake Plan Program (No.74072203-3)

0 引言

近年来,网络作为维持社会正常运转的神经系统,以及实现智能制造、智慧城市、智慧交通、元宇宙等新时代愿景的关键使能技术,得到了产学研各界的广泛关注。然而,根据 Drazen 统计,全球流媒体业务每年以7倍的速度增长,物联网终端规模呈爆炸式增长,业务云化也让数据中心对带宽的需求不断增长。这使当前网络遭遇了流量爆炸、接入终端剧增、网络时延增加、用户体验下降等危机。世界主要发达国家政府及组织高度重视网络技术的发展,积极出台了相关的战略政策,支持网络技术的快速发展,以及与各行各业应用的有效结合,以期能够逐步支撑现有产业形态、商业模式和生活方式的智能化转型。

网络技术自诞生以来,紧随时代发展需求,已经过多轮演化,从最初的PC (personal computer) 互联网与移动互联网,不断与其他领域技术相结合,为网络增效提速,其中具有里程碑意义的网络模型发展阶段包括:1) 通存融合网络范式通过将通信技术与存储技术相结合,利用网内缓存减轻主干网以及服务器的流量压力;2) 通算融合网络范式通过通信技术连接云/边/端算力,构建了网内计算的能力;3) 通算存融合网络范式通过将通信、存储及计算技术相融合,构建了网内计算与网内存储的能力,降低了网内拥塞,提升了网内传输效率。

然而,面向2030年及以后的应用,接入网络的服务会愈发复杂多样,用户对服务质量也会更加高标准严要求,以增强现实/虚拟现实 (AR/VR, augmented reality/virtual reality)^[1]、全息通话、元宇宙和数字孪生^[2]为代表的新一代虚实联动沉浸式应用更是对网络具有超低时延、超高可靠性和超快响应的需求,这促使未来网络具备自感知、自适应和自学习的能力,即网络可自主感知网内业务的特性,并根据业务特性,调整网络的局部结构或运行策略以提供面向业务的按需、精准、快响应和低时延服务,同时网络需要在不断运行中,根据网内业务请求分布频率等状态信息,升级网络服务策略和组织结构。此时,虽然通算存融合网络模型具备网内计算与网内存储的能力,但是由于其缺乏智能大脑,难以根据网内业务的需求,有效地调度和利用网内资源,因此难以明显提升网络性能。

值得欣慰的是,在通信技术不断发展的同时,智能算法也在掀起变革,迎来了高速发展阶段,为构建智能大脑提供了有效、先进的技术支撑。其中以深度学习^[3]、区块链^[4]和知识图谱^[5]为代表的智能技术及相应理论方法蓬勃发展、相互融合,从根本上提高了智能算法处理复杂不确定性任务的能力;聚焦特定功能、采用特殊架构的芯片、传感器等工程技术也在不断突破,奠定了良好的智能硬件基础;智能技术也在与其他各领域技术不断融合,使方法更贴合行业需求并逐渐应用在各行业(如图像处理^[6]、语音识别^[7]、无人机协同^[8]等)。借助这些智能算法,可提高网络对业务形态的适应能力、对业务高效运行的支撑能力、对数据流量的传输分析能力、快速实时响应用户请求的服务能力、对网络整体架构的调整能力和对网内资源的调度组织利用能力。并且智能算法可以赋能网络不断进化和学习的能力,网内智能模型的升级也可不断增强网内业务的执行效能,从而使整个网络具备泛在智能性。

目前,国内外学术界均期望通过与智能技术相结合提升网络性能。6G无线通信技术发展指南明确提出,在6G网络中融入智能技术以实现较5G更高的频谱/能量/成本效率、更高的传输速率、10倍以上的更低时延、100倍以上的连接数密度、更高的智能水平、亚厘米级的定位精度和接近100%的覆盖率^[9]。刘韵洁等^[10]提出了服务定制网络,通过信息资源智能有序调度实现差异化服务能力并消减网内传输过程中的信息冗余问题。Yu^[11]构想了智能互联网,旨在通过区块链等可信技术克服现代网络中的信息过载、虚假信息难以鉴别等问题,促进人-人、人-机和机-机高效协同作业。然而,在实际探索中,6G通信由于功能结构与体系结构复杂,还未切实将智能技术融入其中,形成统一的系统化研究框架和思路。服务定制网络更专注于网络的差异化服务能力,难以全面满足未来应用需求。智能互联网聚焦于网内智能的可信共享,但未能结合网络结构设计和网内运行机制做深入探索。本文提出的通算存智一体协同网络(3CI-CoNet, communication-computing-caching-intelligence cooperative network)的未来网络模型可以视为在这3种研究方向下对未来网络结构的一种探索。具体来说,本文的贡献可概括如下。

1) 提出通算存智一体协同的未来网络模型, 以通信、计算、存储、智能理论与方法为底座, 以层次化功能架构为建设基准, 为未来网络构建智能的网络环境, 提供智能的网络服务。

2) 结合自动驾驶和智能制造的典型应用场景, 详细论述 3CI-CoNet 及其功能架构与运营机制提升业务效能的过程, 据此定性说明 3CI-CoNet 对加速行业数字智能化转型具有积极作用。

3) 以智能制造中多自动导引车 (AGV, automated guided vehicle) 按需调度业务场景为原型, 横向对比了 3CI-CoNet、通算存融合网络、通存智融合网络、通算智融合网络、算存智融合网络、通算融合网络、通存融合网络等网络模型对行业/应用升级的促进作用, 在性能提升层面上验证了 3CI-CoNet 较其他网络模型具有显著优势。

1 国内外研究现状

由于海量数据传输, 网络拥塞现象逐渐显著, 同时受以自动驾驶、智能制造等为代表的新兴智能业务个性化网络诉求的影响, 国内外正积极探索新型网络范式, 主要包括通存融合、通算融合和通算存融合网络范式。

1.1 通存融合网络范式

通存融合网络范式将网络通信技术和存储功能紧密结合, 以提高传输性能, 减少通信时延, 增强网络的可拓展性。代表性技术包括内容发布网络 (CDN, content delivery network) [12-14]、信息中心网络 (ICN, information-centric networking) [15-17] 等。

CDN 是构建在现有互联网基础上的一层智能虚拟网络, 其结构如图 1 所示。网络各处部署 CDN 存储服务器, 内容发布者将其内容同步至网络中各存储服务器, 当用户接入网络访问对应内容时, 就可从就近服务器获取。通过这种方式, CDN 减少了相同包在网内的传输次数, 降低了网络拥塞, 提高了用户访问速度。文献[12]总结了 CDN 近年来的研究动态, 并注明 CDN 的未来发展趋势是与边缘计算和机器学习融合。文献[13]通过一系列案例论证了 CDN 生态正在变得越来越复杂, 且需要与智能计算技术融合才能更好地应对未来市场需求。

ICN 是一种新型的通存融合网络架构技术, 被认为是一种重要的未来网络备选技术方案。与基于 IP 采用以主机为中心的端到端通信模式的现有网络

结构不同, ICN 强调以信息内容为中心的通信模式, 通过在网络层融合内容缓存, 建立以内容名字为基础的路由转发机制, 实现了基于信息内容的网络通信, 进而构建了一种通存融合网络范式。文献[15-16]总结了 ICN 的研究进展, 包括标识与标识解析、数据缓存与路由机制等。文献[17]将 ICN 应用至移动网络中, 研究者也确信 ICN 的未来发展需要与智能计算技术相结合。

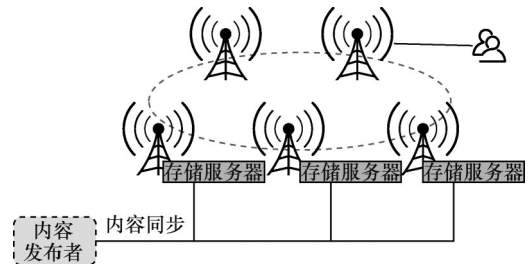


图 1 CDN 结构

然而, 随着智能计算技术的发展, 越来越多的计算任务涌入网络, 涵盖了大规模数据处理、机器学习、深度学习等复杂任务, 这些任务的复杂性和计算需求的增加超出了通存融合网络范式的设计架构, 使这一范式已无法有效适应智能时代计算任务的特殊性和需求, 因而需要设计更为灵活和高效的网络计算模型。

1.2 通算融合网络范式

通算融合网络范式旨在通过网络将泛在的云/边/端算力连接起来, 借用算力提升网内计算效率, 使网络能够实现面向海量数据的高效高质量转发, 同时, 基于网络的高质量转发使得海量的应用能够按需、实时调度不同地方的计算资源, 提高了计算资源利用率。通算融合网络范式的代表性成果是云网融合和算网融合。

云网融合是基于业务需求和技术创新并行驱动带来的网络架构的深刻变革, 是云和网高度协同、互为支撑、互为借鉴的一种概念模式。云网融合发展表现在两方面, 一是云计算业务的开展需要强大的网络能力支撑; 二是网络资源的优化也需要借鉴云计算的理念。5G 核心网云化部署就是典型的云网融合实用案例。云网融合首先将“计算”的概念明确引入网络中, 基于云专网, 逐步推动云网融合发展的 3 个步骤: ① 网适云, 即让企业上云; ② 网促云, 即把控云网入口优势; ③ 云网与应用融合, 即赋能行业数字化转型。最终实现网络与云的敏捷

打通和按需互联,并体现出云网融合智能化、自服务、高速、灵活等特性。云网融合结构如图2所示。用户及通信设备连接至云端服务器,使用其上部署的算力设备完成各自的计算任务。由于云算力距离网络终端过远,难以满足用户的时延敏感型任务需求,因此,网络资源也与多接入边缘计算(MEC, multi-access edge computing)融合,形成如图3所示的结构,从而为网络运行及终端用户提供更快速敏捷的算力。

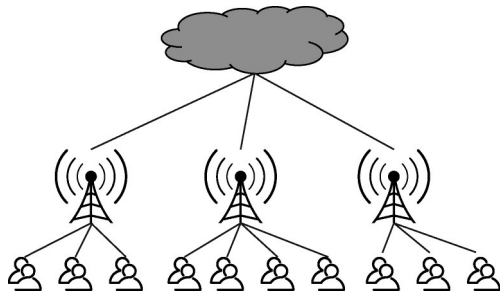


图2 云网融合结构

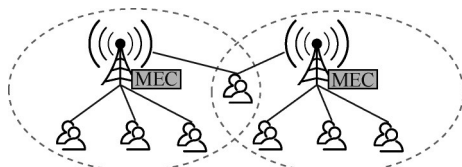


图3 边缘算力与网络融合结构

算网融合实现边缘算力、云算力与网络的融合,算力网络是算网融合的重要成果。文献[18]综述了算力网络早期的一些观点以及国家政策指导。文献[19]提出了确定性算力网络架构,通过算力资源与网络资源预留方法为算力网络用户提供确定性时延服务。文献[20]提出了融智算力网络的内生智能和业务智能平面,设计了相应的功能架构。文献[21]提出了融算网络体系,以及在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方面的技术指导。文献[22]以算网融合方式使能未来移动通信网络,从网络结构、系统能力以及资源管理方面论述了算网融合移动通信网络的特性,并提出分层网络结构和异构通信机制使能算网融合网络的高效可靠运行。

总体来说,通算融合网络范式在网内提供了大量的计算资源以保障计算任务的算力需求,并且可通过有效的算力协同方法,保持网内算力的负载均

衡。但是这一架构难以满足网内存储型业务,包括数据存储、流媒体、会话等业务的高效支持,同时,由于缺少网络存储的有力支撑,也难以实现数据以及任务的可追溯性。

1.3 通算存融合网络范式

通算存融合网络范式结构如图4所示,将网络、算力和存储三要素联合^[23-24],以泛在计算、泛在存储为重要载体,通过共享网内存储资源降低源服务器和主干网的信息响应和传输压力,减轻网络拥塞,实现未来人/机/物随时随地安全可靠普适互联、协同共生的愿景,最终以更为绿色环保的方式为用户提供无差别精准化的泛在接入和访问服务。部分通算存融合网络范式还可支持基于机器学习、深度学习、知识图谱等智能资源管理模式。

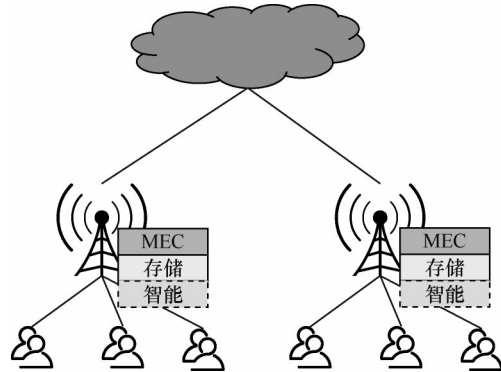


图4 通算存融合网络范式结构

通算存融合网络范式已经在学术界引起了一些思考,也是近年来研究的热点网络范式。文献[25]从软件定义网络(SDN, software defined network)、网络功能虚拟化(NFV, network functions virtualization)技术以及自动驾驶应用场景等角度分析了在技术赋能车联网强化后通算存能力以及性能提升面临的问题。文献[26]提出了一种软件定义通算存的集成式架构,目的是提升端到端系统满足不同应用需求的能力,并表现出良好的性能。文献[27]提出了一种使用资源认知引擎和数据引擎的新型网络体系结构,通过网内计算、存储和通信技术,实现信息的端到端超低时延传输。文献[28]基于通算存融合方式提出了智能开放的服务感知6G网络结构,并分析了相应的关键技术及发展挑战,包括频谱管理、信道构建、传输控制等。

通算存融合网络范式将计算和存储资源都融入网络中,但核心目标是通过引入计算和存储资源提

升网络资源效能，降低网络拥塞，而且网内的智能化设计，主要专注于网络资源的优化与控制^[26-28]，而且对于网络资源编排与调度机制的研究也主要采用一种从头再来的思想，不能很好地利用现有的庞大的智能化知识积累，将其快速转换为可促进行业应用发展的实际生产力。

基于以上分析，需要一种能够兼容计算、存储和通信的网络资源，用来支持网内多维资源高层抽象建模以及智能化编排调度，且能够充分利用行业应用现有的庞大的智能化知识积累，然后以网络这一普适泛在互联的方式向网络用户，包括个人用户和企业用户，提供智能的通算存服务的新型网络范式。为此，本文提出了通算存智一体协同的网络模型。

2 通算存智一体协同的网络模型

2.1 内涵

通算存智一体协同网络是顺应智能时代发展需求的技术，旨在通过网络技术、算力资源、存储技术与智能算法协同共生，贯穿网络组织结构设计、网内资源动态调配、网络服务与管理等多个环节，满足以人为本的高可靠、低时延、快响应、按需精准服务的网络需求，实现网内智能的可信共享和升级。

如图5所示，通信、计算、缓存和智能模型四大研究方向基于各自领域的使能技术协同共生，实现四位一体，共同实现3CI-CoNet的发展愿景。

2.1.1 3CI-CoNet的发展愿景

根据3CI-CoNet的定义，可以认为3CI-CoNet的发展愿景包含2个维度：一是构建智能的网络环境，二是提供智能的网络服务。

智能的网络环境是指局域网/广域网可根据网内业务流量，自主调整运行模式；随着网络运行，能够自主调整网络结构；可自主感知网络设备/资源的接入与退出；能够实现网内各项资源（计算资源、通信资源、存储资源和智能模型/服务）的可信互联、共享与升级；能够对资源配置优化提出可行性建议。

智能的网络服务是指网络能够自主感知接入网络的智能化服务或定制服务，并自主选择网内计算节点配置该服务；能够自主感知用户请求的网络服务形态，并调度至相应的节点满足用户需求；随着网络运行，能够根据运营数据调整服务配置情况。

总体来说，智能的网络环境为各项业务搭建普适可靠的运行环境，智能的网络服务保障用户定制业务的有序高效运行。

2.1.2 3CI-CoNet的表现形式

3CI-CoNet首先通过通信技术将网内可用的算力节点和存储节点连接起来，构成了3CI-CoNet的硬件底座。然后在硬件底座之上，部署各类智能模型及算法，作为指挥员调度和编排各类网内资源，从而保障3CI-CoNet的高效运转。具体地，3CI-CoNet利用算力资源提供硬件及计算平台支撑，智能算法强化网内资源自适应调度效率并保障业务的正常运转，缓存机制保障网内信息及业务信息的快速及时存储；将算力资源与智能算法结合实现网内智能计算，缓存机制与智能算法联合实现内容的网内智能缓存，最终通信、计算、缓存和智能模型四类资源协同作业，共同实现3CI-CoNet的发展愿景。

2.2 3CI-CoNet层次化功能架构

3CI-CoNet的层次化功能架构如图6所示，主

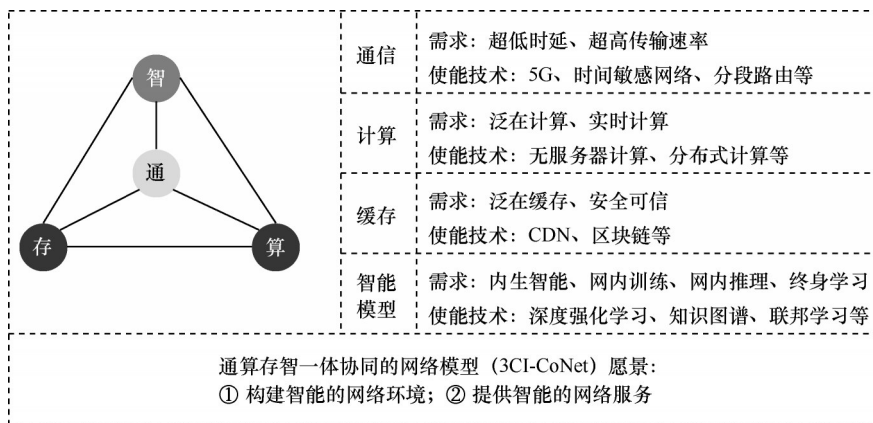


图5 3CI-CoNet的发展愿景及表现形式

要划分为4层：基础资源层、智能接入层、按需服务层和业务表达层。

2.2.1 3CI-CoNet 层次化功能架构描述

基础资源层为3CI-CoNet的正常运行提供必要的资源保障，具体包括通信设备（路由器、交换机等）、计算设备（CPU、GPU等）、存储设备（硬盘、RAM/ROM等）和智能模型/应用（调度模型、智能应用等）。

智能接入层一体化标识、抽象和管理基础资源层中主动接入的资源或者由接入层通过特定方式发现的资源，目的是将计算、存储、网络、智能等多维资源和服务统一纳入网络体系中，实现对多维资源的一体化管控。同时智能接入层也会允许与行业/应用相关的设施和智能算法/平台接入，增强3CI-CoNet对行业及应用的理解。智能接入层是3CI-CoNet架构中的神经系统，上下连通了智能网络的软硬件，确保了泛在、无差别精准化、高可靠连接服务的正确运行。智能接入层的使能技术可划分为标识技术、抽象技术与管理技术。典型的标识技术包括唯一标识符技术和元数据标识技术，其

中，唯一标识符技术确保每个资源都有独特的标识。元数据标识技术会描述资源的属性与特征，使其更容易被理解。抽象技术包括虚拟化技术和容器化技术，其中，虚拟化技术将底层物理资源抽象为虚拟资源，使其更灵活地分配和管理基础硬件资源；容器化技术将应用程序及其依赖项进行抽象，使其能够在不同环境中运行。管理技术包括配置管理、资源调度和优化、自动化运维技术。配置管理使用相应工具自动化和标准化资源的配置过程，确保资源按照预期状态进行；资源调度和优化会使用预先设计好的算法和策略进行资源调度；自动化运维技术利用自动化工具和脚本来执行日常运维任务，提高了效率并减少了错误。

按需服务层是支撑3CI-CoNet高效运行的大脑，提供了面向服务的网联及共享、智能编排和网络调度，实现通、算、存、智多维资源的可信互联与共享机制，多元服务的灵活部署，以及面向上层业务的精准化无差别网络连接服务。按需服务层从功能层次上可进一步划分为3个层次，即服务网联及共享、服务智能编排和通信网管控。服务网联及

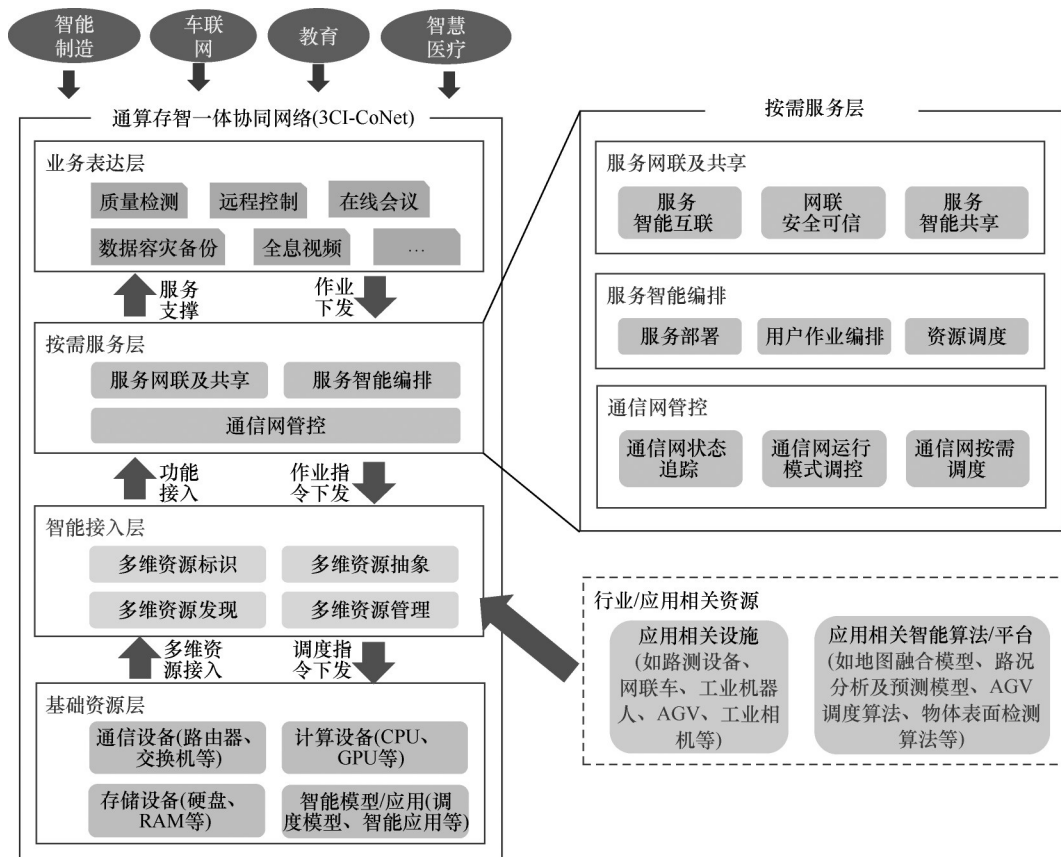


图 6 3CI-CoNet的层次化功能架构

共享旨在通过引入区块链、联邦学习等技术,实现多元服务的可信互联和共享;服务智能编排旨在实现多维网内资源的敏捷弹性调度和基于用户意图的应用和服务编排;通信网管控需要实现对网内资源的状态追踪,同时实现对接入网络、边边协同网络的感知、转发、时延确定性管理和路由路径确定性管理,从而保障服务的高效分发和传输,并能够根据网络流量自主调控运行模式。按需服务层的主要使能技术包括区块链、联邦学习、强化学习与终身学习、网络功能虚拟化和智能路由管理等技术。区块链技术提供去中心化信任机制,确保多元服务的可信互联和共享。联邦学习实现多元服务的模型共享,构建在分布式环境中的协同学习能力,以提升整个系统的智能化水平。强化学习与终身学习基于用户意图和用户满意度,不断提升服务智能编排算法的性能,从而实现个性化、精准化的服务智能编排。网络功能虚拟化技术实现网络资源的灵活分配和管理。智能路由管理技术可通过高效算法进行网络流量管理,确保服务的高效传输与分发。

业务表达层的主要任务是面向各垂直行业,针对行业不同业务的特性和需求定制化表达作业任务,使下层网络能够识别、理解并满足作业任务需求,从而提高 3CI-CoNet 服务的效率,提升用户体验的满意度。业务表达层是面向行业面向应用的 3CI-CoNet 服务入口。业务表达层的主要使能技术包括领域特定语言和数据模型、RESTful API 和 Web 服务、身份验证技术。领域特定语言和数据模型能够使 3CI-CoNet 清晰地表达不同行业和任务的特定需求,从而实现更高层次的按需服务。RESTful API 和 Web 服务技术为 3CI-CoNet 提供灵活的接入接口,使用户能够通过标准化的 HTTP 协议提交任务和获取结果。身份验证技术确保只有授权合理合法的用户才能够访问 3CI-CoNet,保护业务任务和数据的安全。

2.2.2 智能的网络环境构建机理

3CI-CoNet 总体架构的各层次相辅相成,共同构建智能的网络环境。

基础资源层的计算设备、存储设备、通信设备为构建智能的网络环境提供硬件设施,支撑网内存储和网内计算,智能模型则为网络环境增加了智慧,使其能够自主感知、思考和决策,但是这一层的各项资源仍是相互独立的。

智能接入层通过通信网络连接计算设备和存储设备,建立资源互联关系拓扑,并通过多维资源一体化标识标记各类资源,便于统一管理。多维资源管理模块追踪各类资源的状态变化以及向硬件设备下发指令。多维资源抽象模块将标识后的资源封装后上报至按需服务层。智能接入层实现设备层面的互联互通,为 3CI-CoNet 构建了硬件底座。

按需服务层的服务网联及共享模块基于区块链、消息通报等方式实现服务的可信互联与共享,通过服务智能编排模块的资源调度功能充分利用网内资源制定实现用户发布的作业执行指令;通信网管控模块追踪网络状态,并根据网内流量拥塞程度动态调控数据传输模式,将作业执行指令按照需求发送至对应的节点。按需服务层实现服务层面的互联互通,以及通过加载智能模型构建的智慧大脑实现自主感知、自主调控与自主决策,是构建智能的网络环境的核心。

2.2.3 智能的网络服务构建机理

为 3CI-CoNet 构建智能的网络服务,需要 3CI-CoNet 各层次协同作业,具体操作总结如下。

基础资源层的计算与存储节点是提供网络服务的实际载体,智能应用则是服务的软件表现形式。

智能接入层标识、抽象基础资源层的智能应用以及行业/应用接入的与应用相关的智能算法/平台服务/相关其他设施,并追踪其配置状态和使用状态变化,将对应信息上传至按需服务层。

按需服务层基于服务智能编排模块的服务部署功能,根据用户流量以及服务特性将服务部署在一个或多个算力节点上,并在算力节点上开启一个或多个副本,以满足用户作业的高并发处理需求。根据服务特性以及用户作业任务特性,用户作业编排功能将用户作业分解为多个子作业,每个子作业对应特定的服务。资源调度功能将根据服务部署的情况、资源的使用现状以及作业的时空需求,为各项子作业分配计算资源、存储资源和智能服务资源。再通过通信网管控模块的通信网按需调度功能基于当前通信网的运行模式,将作业指令下发至智能接入层的多维资源管理模块,由其调度基础资源执行作业。

业务表达层是用户接入 3CI-CoNet 智能的网络服务的入口,面向用户的应用功能都是底层智能服务聚合的体现,也提供了用户作业描述到 3CI-

CoNet作业描述的转换。

2.3 3CI-CoNet 运行机制

如图6所示, 3CI-CoNet的运行过程可划分为2个部分, 即上行过程和下行过程。

2.3.1 3CI-CoNet 的上行过程

上行过程包括多维资源接入、功能接入、服务支撑三大环节, 为3CI-CoNet建立智能的网络环境与提供智能的网络服务。

多维资源接入。基础资源层的网算存智资源, 以及应用行业的相关设施、算法与平台接入智能接入层, 基于唯一标识符技术或元数据标识技术进行标识, 基于虚拟化技术与容器化技术进行抽象, 基于配置管理与自动化运维技术进行管理。

功能接入。智能接入层将网算存智及行业资源的能力抽象为各种通信/计算/决策功能后, 将其接入按需服务层, 基于深度学习、联邦学习等方法实现服务智能编排与调度及系统整体优化, 基于智能路由技术实现数据高质量传输。

服务支撑。按需服务层将网内的各种服务基于人工智能方法实现按需编排后, 再通过虚拟化技术与容器化技术整合成庞大的服务池, 支撑来自业务表达层的服务需求。

2.3.2 3CI-CoNet 的下行过程

下行过程包括作业下发、作业指令下发、调度指令下发3个环节, 是3CI-CoNet响应用户请求和执行任务的过程。

作业下发。业务表达层经过身份验证后, 通过RESTful API和Web服务技术接收来自行业应用的业务, 确认服务池可满足业务需求后, 基于领域特定语言和数据模型, 将业务表达为服务池可理解的作业任务, 然后下发至按需服务层。

作业指令下发。按需服务层首先根据作业特性及行业知识, 将用户作业分解为一个或多个有执行次序的子作业, 然后从网络服务集合中选择可满足各子作业的服务集合, 基于智能算力调度方法调度和部署相应服务的算力节点, 确定作业顺序, 生成作业指令, 并通过通信网管控将作业指令下发至智能接入层。

调度指令下发。智能接入层接收到作业指令后, 按照指令内容, 调度基础资源层以及行业/应用相关资源实现子作业, 并根据作业要求向用户反馈结果。

2.4 3CI-CoNet与其他网络的差异

当前通存融合、通算融合、通算存融合网络的先进研究中也在通过不断引入智能技术来提升网络智能性, 但更多关注单一维度资源的智能管理, 即从网络维度或算力维度实现对不同行业和应用场景的定制化支持。例如, 文献[28]认为未来6G网络需要设计智能的频谱共享机制、时延感知智能传输协议等来保障物联网通信流量的可靠有效传输。

与之相比, 3CI-CoNet实现了通算存智多维资源更综合全面的智能化管理, 并支持将行业/应用相关的智能模型/平台也作为一种智能资源接入网络中。具体来说, 3CI-CoNet不仅能够采用机器学习、深度学习等方式提升网络资源的利用率, 还能够基于定制化与智能化的编排算法, 将行业应用智能算法/构建按需部署至相应算力节点, 从而构建智能的网络环境, 然后基于算网融合的高效调度算法, 及时为行业相关的计算/通信/存储任务分配相应资源, 保障任务的执行效率。

3 3CI-CoNet 的关键技术

通算存智一体协同网络模型不仅支持对网络自身的组织结构与资源调配的持续优化, 还保障对行业应用需求的高质量可靠响应, 主要的关键技术包括多维资源的一体化标识建模、多维资源的实时高效按需调度、服务特性感知的智能编排和服务视图的快速生成与任务适配。

3.1 多维资源的一体化标识建模

多维资源的一体化标识建模技术服务于3CI-CoNet的智能接入层, 需在综合考虑通算存智资源的类型、地理位置和相互耦合等多个维度的特性的情况下, 制定统一的标识体系, 为每个资源赋予唯一标识符, 并对其进行信息建模, 其中包括资源的类型、地理位置、时间戳等关键信息。同时, 还需要基于图数据库或其他关系型数据库, 建立资源之间的关联关系模型, 生成对应图表, 以便更好地组织和调度多种类型的资源。这一建模技术提高了资源整合性、灵活性和可扩展性, 为实现通算存智资源的智能化管理和优化利用提供了有力支持。

目前, 国内外在这方面的研究主要从标识体系设计与建模、语义建模与知识图谱、区块链技术以及国际国内行业标准等方面着手。标识体系设计与建模关注如何设计和建模一体化标识体系, 以适应不

同类型资源的标识需求, 代表性算法包括通用唯一标识符 (UUID, universally unique identifier)^[29]、Snowflake^[30]、基于属性的编码规则等。语义建模与知识图谱通过对实体、关系和属性等信息进行建模, 捕捉数据之间的语义关系, 主要方法包括资源描述框架 (RDF, resource description framework)^[31]、网络本体语言 (OWL, Web ontology language)^[32]、BERT (bidirectional encoder representations from transformers)^[7]等。区块链技术^[4]也被引入标识技术研究中, 以确保标识的唯一性、不可篡改性和安全性。

3.2 多维资源的实时高效按需调度

多维资源的实时高效按需调度技术服务于 3CI-CoNet 的按需服务层, 首先利用监测工具和传感器实时采集通算存智资源的使用状况, 包括 CPU、内存、网络带宽等多维指标, 然后, 使用实时数据分析技术, 分析当前网络的工作负载情况以及网内任务的执行状态, 再根据实时需求分配资源, 避免资源过剩或不足, 实现资源的动态调整, 以适应不同负载情况。并且结合历史数据和趋势分析, 预测未来的负载变化, 提前规划资源分配策略, 从而更智能地应对系统变化。多维资源的实时高效按需调度强调即时响应系统变化, 而且通过资源预测和规划, 实现对未来负载的预测性优化, 使整个通算存智系统更为灵活、高效和可扩展。

目前, 国内外研究主要聚焦于算力资源的实时高效按需调度, 代表性研究成果包括 Borg、Apache Mesos、Turbine、弹性计算服务 (ECS, elastic compute service)、云容器引擎 (CCE, cloud container engine) 等。Borg 是谷歌内部使用的算力集群管理系统^[33], 可支持算力大规模分布式运行, Kubernetes^[34-35]是 Borg 的开源版本, 已被国内外云计算公司与学术界广泛关注。Apache Mesos^[36-37]是由 UC Berkeley 团队开发的集群管理系统, 允许多种框架在共享的集群资源上运行, 从而提升资源利用率。Turbine^[38]是 Facebook 采用的实时调度工具, 通过资源隔离、集中式管理等方式, 实现在数据中更灵活、可移植和高效管理应用程序的便捷化。ECS 和 CCE 是由阿里云和 Huawei 云根据各自业务需求实现的资源动态调度系统。

3.3 服务特性感知的智能编排

服务特性感知的智能编排技术服务于 3CI-

CoNet 的按需服务层, 是指在服务部署和管理过程中, 系统能够基于测控、度量和传感器等工具感知服务的性能指标、响应时间、负载情况、安全性要求等特性, 再通过机器学习算法或其他特定方法对收集到的服务特性进行分析与建模, 形成对服务行为的理解, 然后, 基于服务的特性, 自动选择最优的服务部署和运行策略, 以满足服务的性能要求和网内资源利用率要求, 同时动态地根据服务运行过程中的实际情况对服务部署进行调整, 实现服务的弹性伸缩, 以适应不同的工作负载。服务特性感知的智能编排能够考虑到服务的性能、可用性、安全性等方面的特性, 以满足用户需求、提高系统效率和资源利用率。

目前, 国内外云计算公司在服务弹性编排方面也开展了大量的研究和实践工作。Kubernetes 支持自定义阈值的容器与服务弹性扩缩容策略, 并被 KubeEdge 拓展了, 因此容器化应用能够在边缘设备上运行。各云商 (如 AWS、Azure 等), 也在其云计算平台上部署了各自的自动伸缩算法, 允许用户根据实际负载需求动态调整资源规模。总体上, 制定服务智能编排的主要方法包括基于强化学习的算法, 根据 Agent 接收到的环境反馈动态地调整服务编排策略; 监督学习算法, 建立服务特性与编排策略之间的映射, 从而在新场景中做出更准确的编排决策; 遗传算法和进化算法, 通过模拟生物进化过程, 找到最适合当前环境的解; 基于预设规则的编排, 使用预定义的规则集来指导服务的部署和调整。

3.4 服务视图的快速生成与任务适配

服务视图的快速生成与适配技术服务于 3CI-CoNet 的业务表达层, 通过网内信息的自动收集与关联识别, 迅速生成服务集群的全面拓扑视图, 包括服务间的依赖关系、调用链和数据流, 能通过实时监控服务状态和性能, 快速更新服务视图。并且, 引入智能任务适配算法, 根据具体任务的需求, 迅速且准确地选择适合的服务, 以提高网络的任务执行效率。服务视图的快速生成与任务适配技术使网络能够基于实时服务视图, 更迅速、高效地应对动态的任务需求。

目前, 国内外在服务视图的快速生成方面取得一些研究和实践成果。微服务架构监控工具, 如 Prometheus、Grafana、Zipkin 等, 已经在实践中得

到广泛应用,可以实时监控微服务之间的通信、依赖关系和性能参数,支持生成实时的服务视图。分布式追踪系统,如Jaeger、OpenTelemetry等能够捕获和分析分布式应用程序的调用链,帮助生成服务之间的关系和拓扑视图。Dynatrace是一种全栈性能监测工具,可以实时监控微服务应用程序的性能。它提供自动拓扑映射功能,能够显示服务之间的关系,帮助理解整个系统的结构。在服务视图的快速适配方面的研究工作较少,主要通过业务提交时指定需要使用的服务和相应资源,然后由网络自主调度相应资源支撑业务的方法实现。

4 3CI-CoNet 的智能应用分析

3CI-CoNet及其模型架构可有效赋能未来智能应用。本文接下来将围绕自动驾驶和智能制造2个关系国计民生的重要应用,分析3CI-CoNet在其中可能发挥的积极作用。

4.1 自动驾驶

近年来,自动驾驶得到产学研界的重点关注,各国政府提出相应政策,产业公司积极合作,学术界开展前沿探索,共同推进自动驾驶产业的发展。自动驾驶具有多种应用场景,中国移动在《5G车联网技术与需求白皮书》中提出,场景按需求分为安全驾驶、驾驶效率、远程驾驶和信息服务四类。3CI-CoNet有潜力应对自动驾驶场景下的需求。

4.1.1 总体陈述

将3CI-CoNet应用至自动驾驶中时,其基础资源层将包括路测基础设施(RSU, road side unit)、网联汽车、网络通信设备、网内的算力节点及存储节点和智能资源。其中,RSU包括路测各类传感器、高清摄像头、交通指示灯等,主要作用是采集道路信息和车辆行驶信息,如道路拥塞程度、路面湿滑程度、车辆周边环境、车辆所在位置等;网内的算力节点及存储节点分别提供计算平台和存储设备,以支持大数据存储、分析和智能化决策;网络通信设备包含无线通信网设备和互联网设备,主要作用是连接RSU、网联汽车、算力节点、存储节点和互联网,使数据可以流通和利用。产学研界已经在自动驾驶领域深耕多年,取得了一系列的成果,可将其作为智能资源。另外,在自动驾驶中网联汽车本身具备感知内部行驶状态的能力、自动或手动驾驶的能力和通信能力,也会作为具有移动性的基

础资源接入3CI-CoNet中。

在明确基础资源后,3CI-CoNet将首先基于运行机制的上行过程实现基础资源智能接入,并提供相应服务,接着通过下行过程调用网内资源为应用中的业务提供优质服务。

4.1.2 具体用例分析

本节将结合具体用例论证3CI-CoNet及其模型对自动驾驶业务的有效支持。

1) 路况地图更新及预测

为网联汽车提供准确高精度的路况地图有助于安全驾驶和提升驾驶效率,是自动驾驶中的一个固化的重要应用。3CI-CoNet各功能层次为实现路况地图更新及预测的行为包括以下几点。

① 业务表达层。按照一定频率提交路况地图更新及预测请求至按需服务层。

② 按需服务层。接收请求,并根据当前网络各节点利用率状态,从配置路况地图更新及预测服务的节点集合中选择一组算力节点与存储节点,作为服务供应方,然后编排请求响应过程,通过确定性网调度将指令发送至智能接入层。指令的具体内容如下:要求路测传感器收集道路上的车辆信息,包括车流量、车的行驶轨迹、目的地、行驶速度等;要求各传感器将收集的信息通过通信网络传输至预先分配的算力节点;要求算力节点结合道路静态图对数据进行分析、融合及预测形成局部路况地图,并对未来信息(车辆目的地、规划好的行驶轨迹等)进行分析和整理;要求算力节点将计算结果存储至指定存储节点,并将结果传输至更高层次的算力节点;要求高层算力节点收集到多个局部地图后,进行路况地图融合,形成覆盖范围和视野更广的路况地图,并根据未来信息预测未来路况,再将未来信息过滤、整理和分析后传输给更高层次的处理器,这一过程一直重复,直到形成限定区域的全局路况地图及预测路况地图。

③ 智能接入层。主要是多维资源管理模块按照指令内容,调度接入的各类资源,包括基础资源以及与行业/应用相关的资源。

④ 基础资源层。按照接收到的指令执行计算、存储和传输任务。

在整个业务响应过程中,通信、计算、存储和智能算法均发挥了重要作用。每一次数据的确定性传输都是基于先进的网络通信技术;路况地图更新

及预测过程中的每一次数据分析、融合、预测都会采用智能算法提高准确度和计算效率；算力节点要提供充足的算力支持，同时存储节点也需保障充足的存储资源；业务响应过程中算力节点和存储节点的选择（即何处算、何处存）均需要考虑到节点状态和网络状态，选择机制的确定和优化也可以采用智能算法基于历史数据不断优化，从而在结构上优化服务于自动驾驶的3CI-CoNet。

2) 娱乐视频业务

车载娱乐视频请求属于信息服务类业务，其特点是灵活性较强、可随时随地发生、移动性强和对带宽需求高。对这一类应用需求，3CI-CoNet仍然有潜力在多维异构资源的支持下表现出良好的性能。

在3CI-CoNet的框架下，首先多媒体资源请求抵达业务表达层。业务表达层判定请求可以通过向互联网请求资源而得到满足，因此形成作业任务后下发至按需服务层。按需服务层考虑到车辆的移动性以及各路测基站的服务范围限制，将请求的大带宽视频资源划分为多段，综合网联汽车的行驶速度、轨迹、目的地以及道路路况，预先判定可以响应请求的网络基站，然后将该段资源预先传输至对应基站，用户一旦进入基站服务范围就可以快速加载预缓存的视频。也就是说，按需服务层将视频请求根据自动驾驶内情况划分为多个缓存服务，然后进行编排和调度，最后通过通信网络传输相应的媒体资源到指定的存储节点。3CI-CoNet通过预缓存服务，可以加快大带宽资源的响应速度，提高网络带宽和存储资源的有效利用率，提升用户满意度。

在整个请求响应过程中，媒体资源的预缓存位置的计算依赖于算力节点提供算力支持，基于网联汽车信息以及路况地图的预测算法提高预缓存的准确性，存储节点保障必要的缓存功能，同时通信网络保证媒体资源的可靠传输。

4.2 智能制造

竞争激烈的商业环境和日益增长的个性化定制需求推动着制造业的数字化转型升级。3CI-CoNet是顺应国家需求，助力实现智能制造发展目标的重要攻坚技术。本节以柔性生产线为主要场景，分析3CI-CoNet对智能制造的积极作用。

4.2.1 总体陈述

柔性生产线上引入了多种智能设备以提高生产

线敏捷性和批量化定制能力，主要的智能设备包括工业机器人（如柔性机器人、SCREA机器人、直角坐标机器人、关节型机器人）、车间智能运输设备（如AGV、传送带）、监测感知设备（如压力、位移、温度、扭矩等多类型传感器、摄像机、RFID）、检测设备（如工业照相机、激光检测仪）等。

3CI-CoNet的上行过程首先将柔性生产线上部分智能设备接入3CI-CoNet中，加强3CI-CoNet对行业的理解，同时，又将工厂内的通、算、存、智多维异构基础资源纳管到3CI-CoNet中，为行业业务的高效开展创建必要条件；其次，智能接入层将多维设备一体化标识后，向按需服务层提供必要的功能；按需服务层整合接入的功能，保障业务表达层下发作业的实现。3CI-CoNet通过下行过程满足业务需求，提供高效、节能、无差异的优质服务。

4.2.2 具体用例分析

本节接下来通过2个具体用例分析3CI-CoNet的层次化功能架构可助力制造业智能化升级。

1) AGV 按需调度

3CI-CoNet的层次化功能架构可有效支撑海量AGV按需调度作业，具体的响应过程介绍如下。

业务表达层。接收用户提交的一系列AGV调度请求，将其转换为下层可理解的作业任务，即运输物品至某一位置，然后，将作业任务下发至按需服务层。

按需服务层。接收到作业任务后，3CI-CoNet可利用网内可靠的通信条件，汇总AGV当前的运行状态，然后分析各作业需求，获取AGV调度领域内智能模型/平台的知识，通过网内多算力协同方式，快速决策并执行各作业任务的AGV。将决策结果通过确定性网络调度发送至智能接入层。

智能接入层。多维资源管理模块接收到指令后，明确AGV的作业内容，对AGV的移动路径、货位上下架等行为进行预先规划，将指令下发至AGV，并监督AGV的执行状态，合理调控AGV行为，避免AGV碰撞以及互锁的情况。

基础资源层。保障业务响应过程中的算力和存储需求，保障作业执行过程中数据传输的可靠性，提供多算力协同调度智能模型。

行业/应用相关资源。提供AGV智能调度模型，并且保持AGV联网，使其可以根据3CI-CoNet的作业指令工作，及时上报运行状态给资源管理模

块,且随时准备接收新的指令。

虽然当前已存在AGV调度管理系统,可支持有限规模的AGV调度作业,但是,随着柔性生产线的不断升级,AGV集群按需调度需求显著增加,现有系统有限的算力、存储、通信能力都将限制行业升级。3CI-CoNet基于其泛在算力、泛在存储和泛在智能的优势,可有效应对这一难题。在3CI-CoNet框架下,存在多个算力节点,为行业应用快速决策所需的强算力提供充足的算力保障;多个存储节点,有效存储业务实施过程中的工业大数据;强大的通信能力,保障多节点接入以及低时延高可靠的信息交换;高效的网内资源智能算法,合理调度各类资源,最大化业务执行效率;先进领域的智能模型,快速应用至具体行业,提升应用的智能化水平。在3CI-CoNet框架下,各项服务相互独立运行又彼此共享重要信息。

2) 基于机器视觉的产品表面缺陷检测

在生产过程中,及时进行缺陷检测非常重要,目的是确保在每个制造/组装环节中,产品及中间产物均为高质量高可靠的。机器视觉系统因其较人眼表现出的高精度、强适应性、高分辨率、数字化表征、客观统一的评估标准等优势,成为产品表面缺陷监测的重要智能方式之一,也是制造业重要的数字化转型用例之一。但是,由于所需算力与存储成本高和通信带宽与精度要求高,目前仍然难以在实际生产中实现较低成本高效率大规模应用机器视觉。3CI-CoNet有潜力为大规模的基于机器视觉的产品表面缺陷检测提供有效解决方案。

业务表达层。接收用户(智能物联网设备或工作人员)提交的产品检测任务,将各任务按照检测对象和目标进行分类,并转换为专用的作业任务,然后下发至按需服务层。

按需服务层。将业务实现划分为高精图像获取、图像检测及结果反馈、图像及检测结果存储等多项服务。服务智能编排平面则将每项服务编排,并按需调度算力资源、行业应用的智能算法、存储资源完成作业,然后将决策结果转化为作业指令下发至智能接入层。

智能接入层。接收到表面检测的作业任务以及网算存智资源的调度指令后,向基础资源层下发资源调度指令,使用指定的网络信道将检测任务及时转发至对应的算力节点进行处理,再将处理结果返

回至用户。

基础资源层。提供检测任务传输所需的可靠信道,执行任务所需的算力和存储资源以及进行服务编排与调度的智能模型。

行业/应用相关资源。提供各类产品表面缺陷检测模型,并保证提交作业任务的物联网设备持续在线。

5 实验验证

以智能制造中AGV按需调度的应用场景为原型,设计了一组横向实验对比3CI-CoNet、通算存融合网络、通存智融合网络、通算智融合网络、算存智融合网络、通算融合网络、通存融合网络等网络模型,在性能层面上验证3CI-CoNet及其功能模型对行业/应用升级的积极作用。

5.1 实验设计

5.1.1 3CI-CoNet资源描述

实验中用到的多维资源的作用、资源间协同策略、AGV按需调度方法可描述如下。

1) 多维资源的作用

通信设备是连接计算设备、存储设备和AGV,建立数据、指令和消息的传输通道。

计算设备可保障AGV按需调度过程中的算力需求。实验中存在2种计算设备,通用计算设备和AGV。通用计算设备同时配置CPU与GPU,可满足基于神经网络的智能模型所需的高速计算需求;AGV由于受低成本限制,只配置CPU,可满足基本的计算需求。

存储设备可存储AGV按需调度过程中产生的数据。实验中存在2种存储设备,通用存储设备和AGV。通用存储设备的存储容量高且读写速度快;AGV的存储容量小。

智能模型包括网内资源智能协同模型与行业应用相关的智能模型/平台,即AGV按需调度模型。

2) 资源间协同策略

实验支持的网内资源协同策略介绍如下。

云上集中决策。在通用计算设备上完成AGV调度决策,并为所有AGV规划静态的移动轨迹。

云边协同。在通用计算设备上完成AGV调度决策,AGV端负责执行具体作业,即根据调度指令计算行驶路径,并在行驶过程中动态调控轨迹避免与其他AGV发生碰撞,完成指定的调度作业。

边边协同。AGV 按照自身固化的协同策略决策协同行为，并与其他 AGV 沟通，直到决策一致。再根据决策结果执行具体作业，执行过程与云边协同相同。

通信计算存储资源智能协同的网络范式，如通算存融合网络范式和 3CI-CoNet，可自主选择一种网内资源协同策略支持行业应用。

3) AGV 按需调度方法

AGV 按需调度应用场景主要解决的问题是，给定一组需要派送物料的位置和参与任务的 AGV，要求多台 AGV 协同作业，尽快将物料配送至对应的位置。这一问题可分层次建模为多旅行商问题 (MTSP, multiple traveling salesman problem) 和移动规划问题。MTSP^[39-40]将派送任务按照一定顺序分配至各个 AGV，确保每个派送任务都能够被执行，且不会被重复执行。移动规划问题保障 AGV 无碰撞地执行具体作业^[41-42]。

5.1.2 横向实验中的网络模型说明

横向对比实验设计了 7 个网络模型，各网络模型的资源配置情况如表 1 所示，可用功能汇总情况如表 2 所示，其中，√表示可用，○表示不可用。

表 1 各网络模型的资源配置情况

序号	网络模型	网内资源配置				
		计算设备 (CPU+GPU)	存储设备	通信设备	网络智能模型	行业智能模型
1	3CI-CoNet	√	√	√	√	√
2	通算存融合	√	√	√	○	○
3	通存智融合	○	√	√	√	○
4	通算智融合	√	○	√	√	○
5	算存智融合	√	√	○	√	○
6	通算融合	√	○	√	○	○
7	通存融合	○	√	√	○	○

表 2 各网络模型可用功能汇总情况

序号	网络模型	策略功能					大数据存储
		云上集中决策	云边协同	边边协同	OR-Tools	DRL	
1	3CI-CoNet	√	√	√	√	√	√
2	通算存融合	√	√	√	√	○	√
3	通存智融合	○	○	√	√	○	√
4	通算智融合	√	√	√	√	○	○
5	算存智融合	○	○	○	√	○	√
6	通算融合	√	○	○	√	○	○
7	通存融合	○	○	√	√	○	√

各网络模型的具体描述如下。

1) 3CI-CoNet 网络模型。将 3CI-CoNet 应用至 AGV 按需调度场景时，智能接入层利用通信设备连接计算设备、存储设备与行业/应用相关的多台 AGV，追踪各项资源状态变化，建立资源状态动态拓扑，并上报至按需服务层。同时由于 3CI-CoNet 互连网络资源可支持网络智能模型与行业智能模型的升级，边边协同/云边协同策略和 AGV 按需调度求解工具及模型 (ORTools、DRL) 可上传至按需服务层。按需服务层约定 3CI-CoNet 面向 AGV 按需调度的资源间协同策略，并将功能封装为服务后通过业务表达层承接用户请求。

2) 通算存融合网络模型。通算存融合网络可支持网内资源智能协同，即可采用云/云边/边边协同 3 种网内资源智能协同方式，但由于不具备行业模型和算法升级功能，只能采用 ORTools 作为 AGV 按需调度的求解工具。

3) 通存智融合网络模型。通存智融合网络模型配置了通信设备、存储设备和网络智能模型升级功能，但未配置通用计算设备，因此使用 AGV 自带的 CPU 进行计算，使用边边协同模式和 AGV 按需调度求解工具 (ORTools)。

4) 通算智融合网络模型。通算智融合网络模型具备计算、通信、网络智能模型升级功能，可通过算力智能调度使用云/云边/边边协同决策，由于缺少与行业应用智能资源的适配，只能采用 ORTools 作为 AGV 按需调度的求解工具，未配置大容量的存储设备，因此无法保存 AGV 按需调度过程中产生的大量数据。

5) 算存智融合网络模型。算存智融合网络模型配置通用计算设备、存储设备和网络智能模型，但未配置通信设备，致使各项资源难以协同，在 AGV 按需调度场景中，各个 AGV 只能各自独立作业。且由于没有数据传输通道，执行作业过程中产生的数据也无法保存，后期难以复现和核验作业数据。

6) 通算融合网络模型。通算融合网络模型配置通用计算设备和通信设备，未配置存储设备和网络/行业智能模型升级功能，只能使用云上决策，并使用 ORTools 作为 AGV 调度决策工具，且运行中数据难以保存。

7) 通存融合网络模型。通存融合网络模型配

置存储设备和通信设备,可传输/保存运行中的大数据,未配置通用计算设备和网络/行业智能模型升级功能,因此,只能采用边边协同功能和固化的 ORTools 作为 AGV 调度决策工具。

5.1.3 实验场景和实验模型说明

在 AGV 按需调度应用场景中,10 台 AGV 负责完成 100 个派送作业,AGV 作业范围总面积为 60 m×60 m,各派送位置均匀分布在场内。实验环境的网络带宽为 10 Mbit/s,云端计算设备配置 Nvidia GTX 2080Ti 和 Intel Xeon Gold 5215 CPU,边缘端计算设备配置 Intel Xeon Gold 5215 CPU,存储容量为 1 TB。对于行业应用智能模型,假设在初始状态时,网内只配置 Gurobi 和 ORTools 为多 AGV 任务分配求解,且被固化至 AGV 策略模块,但是由于 Gurobi 计算最优解的求解复杂度过高,大多数情况下只采用 ORTools 求解(这一观点在文献[41]中已得到论证)。而后,在性能更优的基于深度强化学习(DRL, deep reinforcement learning)的模型(GNN+DisPN)被提出,可支持智能算法升级的网络模型则会加载该模型,其他网络模型则只能继续采用原本固化的 Gurobi 和 ORTools 求解器。

实验采取控制变量法,将网络模型、网络资源协同模型和面向应用的调度模型分别组合后,生成 17 种组合,对应 17 个服务策略。实验中 17 个服务策略的组合模式如表 3 所示,其中,√表示采用,○表示不采用。

实验的主要量化指标包括为 AGV 规划各自作业集合所需的计算次数、通信次数、调度决策用时和完成任务用时,同时,也从数据是否可追溯的角度,分析各个服务策略的性能。计算次数是指在 AGV 调度决策过程中使用 ORTools 和 DRL 模型的次数;通信次数是指决策过程中 AGV 与 AGV 间、AGV 与云端服务器间的信息交换次数;调度决策用时是指各网络范式支持的调度算法为 AGV 分配各自作业集合所需的时间;完成任务用时是指根据调度算法决策的作业分配结论,AGV 完成任务所需的时间。数据可追溯性是指 AGV 执行作业过程中的数据可被保存,执行过程可在后期通过数据复现。

5.2 实验结果分析

各服务策略的实验统计结果如图 7~图 9 所示。

表 3 服务策略的组合模式

服务策略	采用的网络模型	采用的策略功能					
		云上集中决策	云边协同	边边协同	OR-Tools	DRL	大数据存储
1.1	3CI-CoNet	○	√	○	○	√	√
1.2	3CI-CoNet	○	○	√	○	√	√
1.3	3CI-CoNet	○	√	○	√	○	√
1.4	3CI-CoNet	○	○	√	√	○	√
1.5	3CI-CoNet	√	○	○	√	○	√
1.6	3CI-CoNet	√	○	○	○	√	√
2.1	通算存融合	√	○	○	√	○	√
2.2	通算存融合	○	√	○	√	○	√
2.3	通算存融合	○	○	√	√	○	√
3.1	通存智融合	○	○	√	○	√	√
3.2	通存智融合	○	○	√	√	○	√
4.1	通算智融合	√	○	○	√	○	○
4.2	通算智融合	○	√	○	√	○	○
4.3	通算智融合	○	○	√	√	○	○
5.1	算存智融合	○	○	○	√	○	○
6.1	通算融合	√	○	○	√	○	○
7.1	通存融合	○	○	√	√	○	√

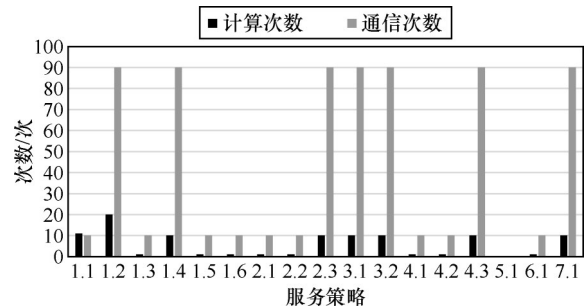


图 7 各服务策略的计算次数和通信次数统计

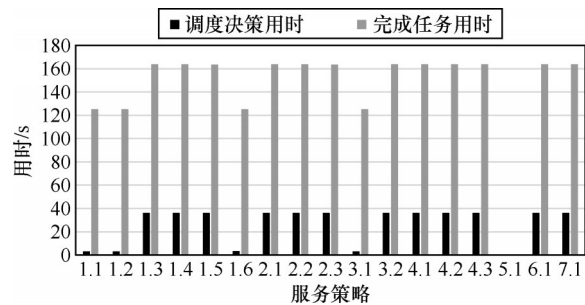


图 8 各服务策略的调度决策用时和完成任务用时统计

从图 7 可知,在多 AGV 按需调度的场景中,当使用 DRL 方法时,采用云上集中决策、云边协同和边边协同的服务策略所需的计算次数与通信次数依次增加。这主要是因为云上集中决策会为所有 AGV 规划任务以及任务执行顺序,结果下发至

AGV后, AGV不再需要二次计算, AGV间也不需要通信确认各自任务;云边协同模式会在云上进行高层次任务分配,各任务的完成顺序规划由AGV进行二次规划,AGV之间仍然不需要通信确认各自任务;采用边边协同模式时,AGV需要分别进行任务分配和任务顺序规划2次计算,因此计算次数最多,而且AGV之间还需要通信明确任务分工。图8中调度决策用时和完成任务用时统计实验数据表明, DRL较ORTools表现出更高的性能,也表明了智能的网络服务对促进业务性能具有积极作用。同时,图8中服务策略1.1、1.2、1.5和3.1均采用相同的网络服务(DRL),但是在计算用时方面的性能比差异显著,主要是因为网络环境提供的服务策略不同,这也说明了智能的网络服务与智能的网络环境相辅相成、互相促进,更有利于提升业务性能。在AGV按需调度场景中,云边协同的网络环境与采用DRL的网络服务表现出更好的性能,如服务策略1.1较其他策略在计算次数、通信次数、计算用时、决策结果方面的表现更佳。图9统计了各服务策略的数据可追溯性的实验结果。由图9可知,服务策略4.1、4.2、4.3、5.1和6.1由于采用的网络模型为不具备大容量存储设备的网络服务,AGV数据不能保存,因此不具备数据追溯能力,难以提供可靠的服务。

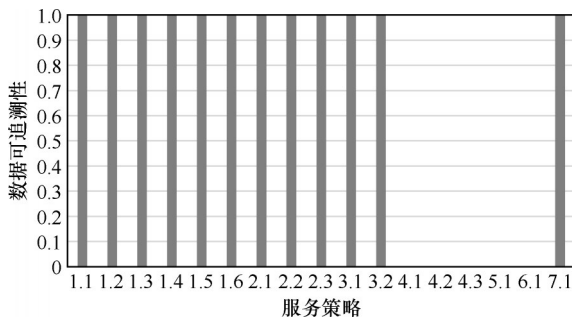


图9 各服务策略的数据可追溯性统计

图7~图9的实验数据表明,服务策略1.1综合表现最优,既能够快速计算出优质的决策结果,又能够减少在计算与通信方面的资源开销,同时还能够追溯运行中的大数据,保障系统可靠运转。这也说明了当采取3CI-CoNet网络模型,具备智能的网络环境与网络服务后,从中选择更合适的网内资源协同策略和应用/业务相关模型,会显著提升业务效能。

6 发展趋势与技术挑战

3CI-CoNet作为一种融合通信、计算、存储和智能技术的新型网络模型,还存在一些趋势性的技术问题亟待突破,具体总结如下。

6.1 通算存智资源标识与解析

3CI-CoNet包含通算存智四类资源,各类资源作用不同但是相互关联。通信资源实现数据传输,计算资源提供数据分析所需算力,存储资源保存数据,智能资源决策数据的存储位置和计算位置,并分析数据。智能资源需部署在某些合适的计算资源上,才能发挥应有价值,助力构建智能的网络环境和提供智能的网络服务。随着网络规模变大,网内的通算存智资源量级也在增加,网络资源的管理与协同关系维护也变得更加复杂。资源标识与解析方法通过给资源分配唯一标识符,能够更轻松地跟踪、分配、监控和维护资源,也有助于快速发现资源的动态加入和退出。因此,设计一种通算存智资源标识与解析方法是未来研究的一个重要方向。

6.2 3CI-CoNet路由机制

以云AR/VR等为代表的新兴应用需要网络为其提供智能的运行环境,如自动分配合适的计算设备和存储设备处理相关的数据。3CI-CoNet可构建智能运行环境以满足应用需求,服务过程主要包含3个步骤:首先,将应用任务信息发送至相应的决策节点,由决策节点指派合适的算力节点和存储节点;然后,将任务数据发送至指派的算力节点和存储节点;最后,将结果传输至目标节点。但是,目前还缺乏一种能够自主保持服务连接的高效路由机制支撑3CL-CoNet的智能服务。因此,3CI-CoNet路由机制的研究也是未来的一个重要方向。

6.3 3CI-CoNet自动化治理

使3CI-CoNet长期为新兴应用提供智能的网络环境和网络服务的关键挑战之一是研究一套3CI-CoNet自动化治理方法,包括设计智能配置引擎,根据网络流量统计数据和各资源的状态统计数据,调整网络节点的资源配置方案,优化智能模型及算法的部署位置和部署方式;研究自动化网络性能优化方法,基于网络运行状态的监管信息和智能分析模型,识别局域网络的性能问题和瓶颈,自主进行负载均衡和缓存优化,自动化调整局域网络的运行模式。

7 结束语

通过分析智能时代对于网络智能高效灵活按需服务的要求, 本文提出了3CI-CoNet, 旨在将算力资源、存储技术和智能模型引入通信网络中, 实现智能可升级进化的网内计算及网内存储, 提升行业/应用效能; 深入分析了3CI-CoNet的内涵, 构建了3CI-CoNet的层次化功能架构, 并详细论述了基于层次化功能架构为未来网络构建智能的网络环境和提供智能的网络服务的过程。结合自动驾驶和智能制造两大重要的智能应用, 分析了3CI-CoNet及其功能架构对促进业务升级的积极作用。进一步地, 通过横向对比各网络结构在多AGV按需调度场景下的实验表现, 说明3CI-CoNet可为智能业务提供高可靠、高性能的服务。最后, 对3CI-CoNet的未来发展趋势和技术挑战进行总结。

参考文献:

- [1] LI X, YI W, CHI H L, et al. A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety[J]. *Automation in Construction*, 2018, 86: 150-162.
- [2] JIANG Y C, YIN S, LI K, et al. Industrial applications of digital twins[J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2021, 379(2207): 20200360.
- [3] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436-444.
- [4] ZHENG Z B, XIE S A, DAI H N, et al. Blockchain challenges and opportunities: a survey[J]. *International Journal of Web and Grid Services*, 2018, 14(4): 352-375.
- [5] DAI Y F, WANG S P, XIONG N N, et al. A survey on knowledge graph embedding: approaches, applications and benchmarks[J]. *Electronics*, 2020, 9(5): 750.
- [6] ZHANG Z, LEE W S. Deep graphical feature learning for the feature matching problem[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 5086-5095.
- [7] DEVLIN J, CHANG M W, LEE K, et al. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[J]. *arXiv Preprint, arXiv: 1810.04805*, 2018.
- [8] MOON J, PAPAIOANNOU S, LAOUDIAS C, et al. Deep reinforcement learning multi-UAV trajectory control for target tracking[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(20): 15441-15455.
- [9] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 64(1): 110301.
- [10] 刘韵洁, 黄韬, 张娇, 等. 服务定制网络[J]. *通信学报*, 2014, 35(12): 1-9.
LIU Y J, HUANG T, ZHANG J, et al. Service customized networking[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(12): 1-9.
- [11] YU F R. From information networking to intelligence networking: motivations, scenarios, and challenges[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(6): 209-216.
- [12] ZOLFAGHARI B, SRIVASTAVA G, ROY S, et al. Content delivery networks: state of the art, trends, and future roadmap[J]. *ACM Computing Surveys*, 2020, 53(2): 1-34.
- [13] STOCKER V, SMARAGDAKIS G, LEHR W, et al. The growing complexity of content delivery networks: challenges and implications for the Internet ecosystem[J]. *Telecommunications Policy*, 2017, 41(10): 1003-1016.
- [14] SHANMUGAM K, GOLREZAEI N, DIMAKIS A G, et al. Femto-Caching: wireless content delivery through distributed caching helpers[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, 59(12): 8402-8413.
- [15] XYLOMENOS G, VERVERIDIS C N, SIRIS V A, et al. A survey of information-centric networking research[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(2): 1024-1049.
- [16] VASILAKOS A V, LI Z, SIMON G, et al. Information centric network: research challenges and opportunities[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, 52: 1-10.
- [17] FANG C, YAO H P, WANG Z W, et al. A survey of mobile information-centric networking: research issues and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 2353-2371.
- [18] 贾庆民, 丁瑞, 刘辉, 等. 算力网络研究进展综述[J]. *网络与信息安全学报*, 2021, 7(5): 1-12.
JIA Q M, DING R, LIU H, et al. Survey on research progress for compute first networking[J]. *Chinese Journal of Network and Information Security*, 2021, 7(5): 1-12.
- [19] 贾庆民, 胡玉姣, 张华宇, 等. 确定性算力网络研究[J]. *通信学报*, 2022, 43(10): 55-64.
JIA Q M, HU Y J, ZHANG H Y, et al. Research on deterministic computing power network[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(10): 55-64.
- [20] 胡玉姣, 贾庆民, 孙庆爽, 等. 融智算力网络及其功能架构[J]. *计算机科学*, 2022, 49(9): 249-259.
HU Y J, JIA Q M, SUN Q S, et al. Functional architecture to intelligent computing power network[J]. *Computer Science*, 2022, 49(9): 249-259.
- [21] 张宏科, 于成晓, 权伟, 等. 融算网络体系基础研究[J]. *电子学报*, 2022, 50(12): 2928-2934.
ZHANG H K, YU C X, QUAN W, et al. Fundamental research on computing integration networking[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(12): 2928-2934.
- [22] ZHOU Y Q, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(5): 20-27.
- [23] SUN Y P, CHEN Z Y, TAO M X, et al. Communications, caching, and computing for mobile virtual reality: modeling and tradeoff[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(11): 7573-7586.
- [24] KAZMI S M A, DANG T N, YAQOOB I, et al. Infotainment enabled smart cars: a joint communication, caching, and computation approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(9): 8408-8420.
- [25] ZHUANG W H, YE Q, LYU F, et al. SDN/NFV-empowered future IoV with enhanced communication, computing, and caching[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2020, 108(2): 274-291.
- [26] CHEN Q X, YU F R, HUANG T, et al. An integrated framework for software defined networking, caching, and computing[J]. *IEEE Net-*

- work, 2017, 31(3): 46-55.
- [27] CHEN M, QIAN Y F, HAO Y X, et al. Data-driven computing and caching in 5G networks: architecture and delay analysis[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(1): 70-75.
- [28] ZHOU Y Q, LIU L, WANG L, et al. Service-aware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3): 253-260.
- [29] LEACH P, MEALLING M, SALZ R. A universally unique IDentifier (UUID) URN namespace[J]. RFC, 2005, 4122: 1-32.
- [30] DAGEVILLE B, CRUANES T, ZUKOWSKI M, et al. The snowflake elastic data warehouse[C]// Proceedings of the 2016 International Conference on Management of Data. New York: ACM Press, 2016: 215-226.
- [31] DECKER S, MITRA P, MELNIK S. Framework for the semantic Web: an RDF tutorial[J]. IEEE Internet Computing, 2000, 4(6): 68-73.
- [32] MCGUINNESS D L, VAN HARMELEN F. OWL Web ontology language overview[J]. W3C Recommendation, 2004, 10(10): 2004.
- [33] VERMA A, PEDROSA L, KORUPOLU M, et al. Large-scale cluster management at Google with Borg[C]// Proceedings of the Tenth European Conference on Computer Systems. New York: ACM Press, 2015: 1-17.
- [34] CARRIÓN C. Kubernetes scheduling: taxonomy, ongoing issues and challenges[J]. ACM Computing Surveys, 2022, 55(7):1-37.
- [35] SENJAB K, ABBAS S, AHMED N, et al. A survey of Kubernetes scheduling algorithms[J]. Journal of Cloud Computing, 2023, 12(1): 87.
- [36] FRAMPTON M. Apache mesos[M]. Berkeley: Apress, 2018.
- [37] SAHA P, BELTRE A, GOVINDARAJU M. Exploring the fairness and resource distribution in an apache mesos environment[C]// Proceedings of the 2018 IEEE 11th International Conference on Cloud Computing (CLOUD). Piscataway: IEEE Press, 2018: 434-441.
- [38] MEI Y, CHENG L W, TALWAR V, et al. Turbine: facebook's service management platform for stream processing[C]// Proceedings of the 2020 IEEE 36th International Conference on Data Engineering (ICDE). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1591-1602.
- [39] HU Y J, YAO Y, LEE W S. A reinforcement learning approach for optimizing multiple traveling salesman problems over graphs[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 204: 106244.
- [40] KAEMPFER Y, WOLF L. Learning the multiple traveling salesman problem with permutation invariant pooling networks[J]. arXiv Preprint, arXiv: 1803.09621, 2018.
- [41] HU Y J, YAO Y, REN Q, et al. 3D multi-UAV cooperative velocity-aware motion planning[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 102: 762-774.
- [42] MA X B, JIAO Z Y, WANG Z K, et al. 3-D decentralized prioritized

motion planning and coordination for high-density operations of micro aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(3): 939-953.

[作者简介]



胡玉姣 (1993-), 女, 陕西榆林人, 博士, 紫金山实验室研究员, 主要研究方向为信息物理系统、强化学习、边缘计算、未来网络架构等。



黄韬 (1980-), 男, 重庆人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为路由与交换、软件定义网络、内容分发网络、确定性网络、算力网络等。



贾庆民 (1990-), 男, 山东泰安人, 博士, 紫金山实验室研究员, 主要研究方向为算力网络、确定性网络、边缘智能、工业互联网等。



谢人超 (1984-), 男, 福建南平人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信息中心网络、工业互联网、算力网络、边缘计算、无服务器计算。



刘韵洁 (1943-), 男, 山东烟台人, 中国工程院院士, 主要研究方向为未来网络体系架构设计。