

6G:从通信到通感算智融合



6G: From Communication to Integration of Communication, Sensing, Computing, and Intelligence

刘光毅/LIU Guangyi^{1,2}

(1. 中关村泛联移动通信技术创新应用研究院, 中国 北京 100080;

2. 中国移动研究院, 中国 北京 100053)

(1. ZGC Institute of Ubiquitous-X Innovation and Applications, Beijing

100080, China;

2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202504008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250711.1947.002.html>

网络出版日期: 2025-07-14

收稿日期: 2025-05-15

摘要: 移动通信网络已成为现代社会不可或缺的基础设施。6G作为下一代通信技术, 不仅要在通信性能上有质的飞跃, 更需要实现通信、感知、计算、人工智能(AI)等多个领域的深度融合。首先分析了6G网络的驱动力, 包括业务发展需求、网络建设与运维痛点、AI技术引入的挑战。随后, 详细阐述了6G网络架构的关键设计转变, 包括从多能力烟囱式部署到通感算智多能力一体融合、从单一服务到通感算智多能力差异化服务、从外挂式AI到内生式AI, 以及网络运维从事后高成本处理到事前低成本干预。最后, 介绍了6G网络的关键技术, 包括云原生及服务化无线接入网(RAN)、内生AI以及网络数字孪生。这些技术为6G网络的高效、智能、灵活运行提供了有力支撑。

关键词: 6G; 通感算智融合; 云原生; 服务化RAN; 内生AI; 网络数字孪生

Abstract: Mobile communication networks have emerged as an indispensable infrastructure in contemporary society. As the next-generation communication technology, 6G needs to mark a significant leap in communication performance. More importantly, it needs to achieve the deep integration of multiple fields such as communication, sensing, computing, and artificial intelligence (AI). The article first examines the driving forces behind 6G networks, including the demands of service evolution and the challenges in network construction, operation, and maintenance. Subsequently, it elaborates on the pivotal design transformations in the 6G network architecture, encompassing the transition from a siloed multi-capability model to an integrated fusion of communication, sensing, computing, and AI capabilities, from offering a single service to providing differentiated services leveraging these multi-capabilities, from an added-on AI approach to a native AI, and from post-hoc high-cost handling to proactive low-cost intervention. Finally, the article introduces the key technologies of 6G network architecture, including cloud-native and service-based radio access networks (RAN), native AI, and network digital twins. These technologies collectively offer robust support for the efficient, intelligent, and flexible operation of 6G networks.

Keywords: 6G; integration of communication, sensing, computing, and intelligence; cloud-native; service-based RAN; native AI; network digital twin

引用格式: 刘光毅. 6G: 从通信到通感算智融合 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(4): 48-54. DOI: 10.12142/ZTETJ.202504008

Citation: LIU G Y. 6G: from communication to integration of communication, sensing, computing, and intelligence [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(4): 48-54. DOI: 10.12142/ZTETJ.202504008

在5G持续发展与6G创新布局的关键时期, 移动通信网络正面临网络复杂度持续增加, 行业应用需求趋于定制化、差异化、碎片化, 以及人工智能(AI)技术与网络融合带来的挑战。在此背景下, 本文提出6G^[1]通感算智融合网络^[2], 旨在基于云原生、服务化无线接入网(RAN)^[3]、AI、网络数字孪生等技术, 重塑移动信息网络服务的新范式, 推动业界6G通感算智融合内生研究。

1 6G网络演进的驱动力

技术演进与业务需求双轮驱动移动通信网络的发展。移动通信网络在满足社会日益增长的连接需求的同时, 其自身复杂度也在不断攀升。“数字孪生、智慧泛在”作为6G的社会发展愿景, 正推动移动通信网络向智能化方向演进。通感算智融合已成为6G网络发展的重要趋势^[1], 其驱动力主要源于以下3个方面:

1) 业务发展

面向垂直行业, 现有5G网络解决方案主要依赖专网部署或多种标准化产品的组合来满足差异化需求。然而, 面向

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2902100)

企业（ToB）行业需求愈发呈现出定制化、差异化和碎片化的特征，对带宽、时延、可靠性、安全性、连接密度以及特定服务能力（如定位、计算）的需求呈现高度个性化与定制化特征。但现有面向消费者（ToC）的大一统网络产品形态难以满足这些多样化需求，其架构和功能设计相对固化，缺乏足够的灵活性，难以经济、高效地适配碎片化的行业场景，导致客户定制化需求响应速度慢、部署周期长、整体解决方案成本高、资源利用效率低、管理复杂等问题。因此，网络需要更深层次的“简”，其核心在于实现网络能力与服务的模块化、灵活组装和按需供给，以敏捷、经济、高效的方式响应千行百业的需求，降低行业数字化转型门槛。

2) 网络建设与运维

从现网情况看，5G网络参数和功能繁多，使得运维和管理工作复杂，网络性能难以得到优化与保障。在实际运营中，运营商通常需要投入大量的人力和物力进行繁琐的监控、调整以及故障排查工作。同时，网络中专用设备堆叠部署，导致硬件资源难以实现跨域共享与按需分配。这一问题进一步引发网络建设和维护成本居高不下、运营管理流程繁琐、整体能耗效率难以优化等连锁反应，使得新功能部署速度缓慢，难以快速响应市场和用户的需求。这种复杂性已成为网络持续高效发展的瓶颈，需通过架构层面的根本性设计来破解^[4]。

3) AI的引入

AI已经在网络运维中展现出巨大潜力，但目前数据的获取、治理、隐私保护以及跨厂商设备间的互通性制约了

AI模型训练与部署的效率和效果。面向6G，“智”的引入不应仅局限于网络运维层面的事后优化（运维态），更需要深度融合网络的实时运行过程（运行态），实现感知、决策、执行的闭环自治。更为关键的是，6G将超越传统连接，深度融合感知、计算、AI等多种能力。简单的外挂和叠加会导致效率低下、部署运维成本高昂以及协同效果不佳。因此，网络需要内生的“智”，实现通感算智等核心能力的深度融合与一体化设计，为未来创新业务提供智能、高效、低成本的平台支撑。

2 6G通感算智融合网络

6G网络架构以云化为底座、端到端服务化为基因、内生AI为智能引擎、数字孪生为低成本预验证支持，通过功能的模块化与灵活调用、服务的高效与智能编排管控，以最小的功能集按需适配碎片化、个性化业务需求。该架构旨在打造通感算智一体融合的综合能力体系，满足更加丰富的场景需求。如图1所示，6G网络架构通过四大关键设计转变，构建更加智能、高效、灵活的网络体系，实现通感算智深度融合。

转变1：从烟囱式堆叠到平台化共享

传统网络采用垂直烟囱式架构，专用设备堆叠部署且硬件资源不共享，导致网络成本高、能耗高、资源利用率低、扩展性差。差异化、碎片化的无线算力资源难以匹配6G通感算智网络对低时延、高灵活性的能力需求。为此，需通过异构硬件云化，高效整合各类异构硬件资源，支撑上层高效

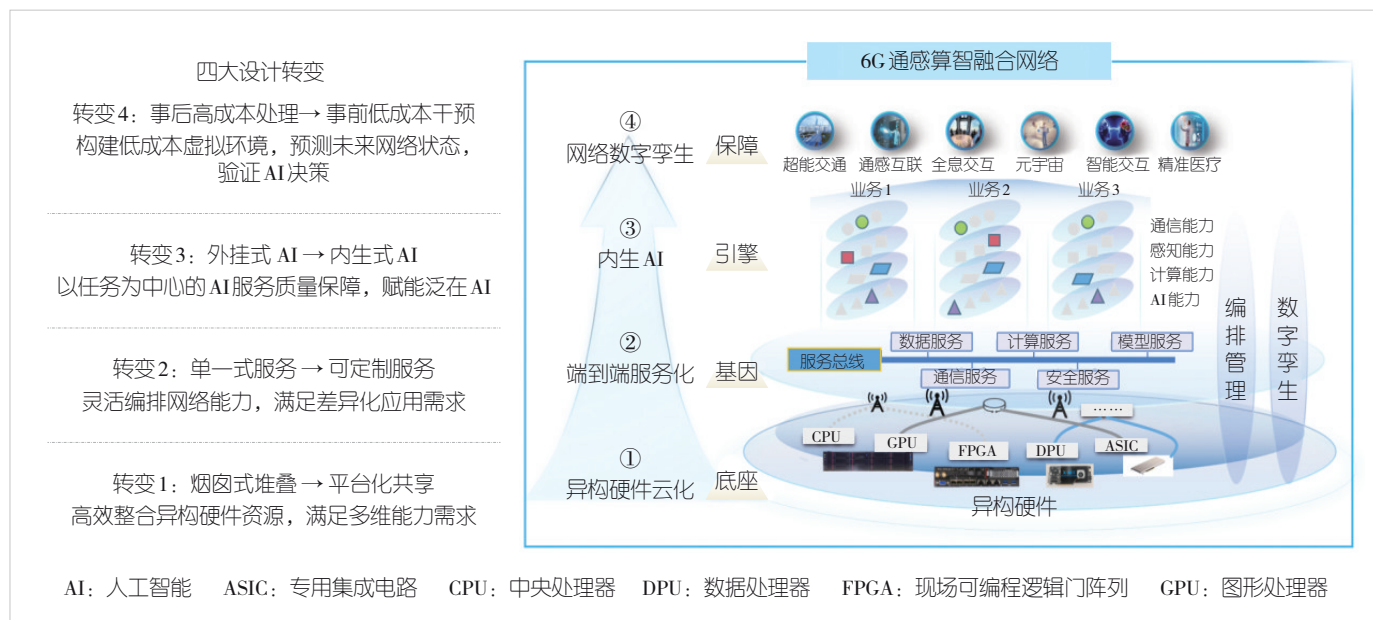


图1 6G通感算智融合网络架构

通感算智算力需求的按需调度，满足不同场景下的高实时、弹性部署需求；同时向下实现算力池化与统一管理，解决无线算力管理难题。

转变2：从单一式服务到可定制服务

5G网络引入服务化架构（SBA）与网络切片技术，实现了一定程度的服务差异化，但其核心理念并未真正延伸至RAN侧。RAN仅通过频率隔离、空口配置满足差异化场景需求，仍存在灵活性不足的问题。6G时代，行业应用的定制化需求更加突出，并将引入通感算智多维网络能力，需要考虑通感算智网络能力的定义与交互，以支撑服务按需提供。端到端服务化可实现网络功能的灵活组合和高效编排，持续满足差异化的服务需求。

转变3：从外挂式AI到内生式AI

“数字孪生、智慧泛在”是6G网络的发展目标。智能网联车、智能终端和智能机器人等智能应用需求呈现更加多样化和复杂化的特点。一方面，需要考虑如何依托6G网络推动AI应用爆发式增长与规模化落地；另一方面，需要探索如何充分利用AI强大的感知、理解、学习能力赋能网络，实现更加高效的通感算智融合设计与运行。未来，6G网络与AI将深度融合，实现内生AI，在6G网络架构内部提供数据采集、数据预处理、模型训练、模型推理、模型评估等AI工作流全生命周期的完整运行环境，同时将AI服务所需的算力、数据、算法、连接与网络功能、协议和流程进行深度融合设计。

转变4：从网络运维的事后高成本处理到事前低成本干预

传统网络运维依赖人工巡检和故障后修复，导致处理成本高且效率低下。例如，5G网络中基站故障的排查与恢复时间可能需要数小时。面对6G通感算智深度融合、AI原生架构以及空天地海一体化组网所带来的更高的网络复杂性与可靠性要求，亟需更高效的运维模式。网络数字孪生技术^[9]可作为低成本预验证的保障，实现预测性主动干预，构建低成本虚拟环境，预测未来网络状态，预验证AI决策。通过预测性维护，系统可在设备性能劣化或潜在故障发生前精准识别风险点，并自动或半自动地执行预防性操作。通过构建动态自治网络，将网络规划、建设、维护和优化工作统一管理，实现从“各环节分开独立”到“数字孪生统一”的转变。

3 6G通感算智融合网络的关键技术

为支持6G网络中的通感算智一体融合，需要重点突破通算资源统一管理、服务化RAN、内生AI和网络数字孪生等关键技术，并形成技术体系。

3.1 通算资源统一管理

计算、AI、感知等能力被视为6G网络核心能力要素，对于满足未来复杂多样的通信需求至关重要。而云原生基站凭借其高度的灵活性、可扩展性与可编程性，为这些关键能力的深度融合提供了坚实基础，使得不同能力能够在基站平台上协同运作，发挥出更大的效能。

面对6G网络中无线算力管理的复杂挑战，需要设计云化异构资源统一管理框架^[2]，实现对异构云化算力资源的全生命周期统一管理。从资源的申请、分配、调度到释放，整个过程都在统一框架下高效进行。这样能够有效解决无线算力资源异构、动态变化带来的管理难题，大幅提升算力资源的利用率和管理效率。

为满足无线网络对低时延的严苛要求，需研发抢占式确定性调度技术，自主编译高实时内核。抢占式确定性调度技术通过对任务进行优先级划分和抢占式调度，确保高优先级任务及时处理；高实时内核可进一步优化系统响应速度和稳定性。两者结合，可实现微秒级响应时延，为工业控制、远程医疗等对实时性要求极高的应用场景提供有力保障。

为满足无线大带宽处理需求，无线云软硬件平衡调优方法被提出。该方法从硬件架构和软件算法两个层面进行优化，满足了400 MHz高带宽基带处理需求，为高清视频传输、虚拟现实等大带宽应用提供支持。

为解决异构硬件底层架构差异带来的复杂性问题，需要突破异构硬件虚拟化技术瓶颈，实现异构资源的池化共享，如图2所示。针对无线多样化平台的软件管理难题，需要突破对象化软件管理方案限制，对服务器、传感器、算力卡等不同类型的平台对象进行抽象建模，实现软件的自动部署、更新和维护，减少人工干预。

3.2 服务化RAN

基于服务化架构，6G通感算智能力将以服务的形式灵活引入RAN，并通过服务化接口（SBI）实现按需调用^[3]。这种设计模式赋予了RAN功能可插拔、网络可定制的特性，使其能够更好地适应未来多样化的业务需求。

为了满足场景的差异化部署需求，“原子化拆分+分子化重构”的场景化网络功能（NF）设计思路是有效的解决方案，如图3所示。通过组合多个原子服务，可以构建出不同的网络功能。这些网络功能可以根据实际部署场景进行灵活配置和组合。

作为RAN迈向服务化的第一步，RAN能力开放将为赋能泛在轻量化智能终端和低时延业务应用提供更多可能。RAN能力开放框架存在两种发展路径：

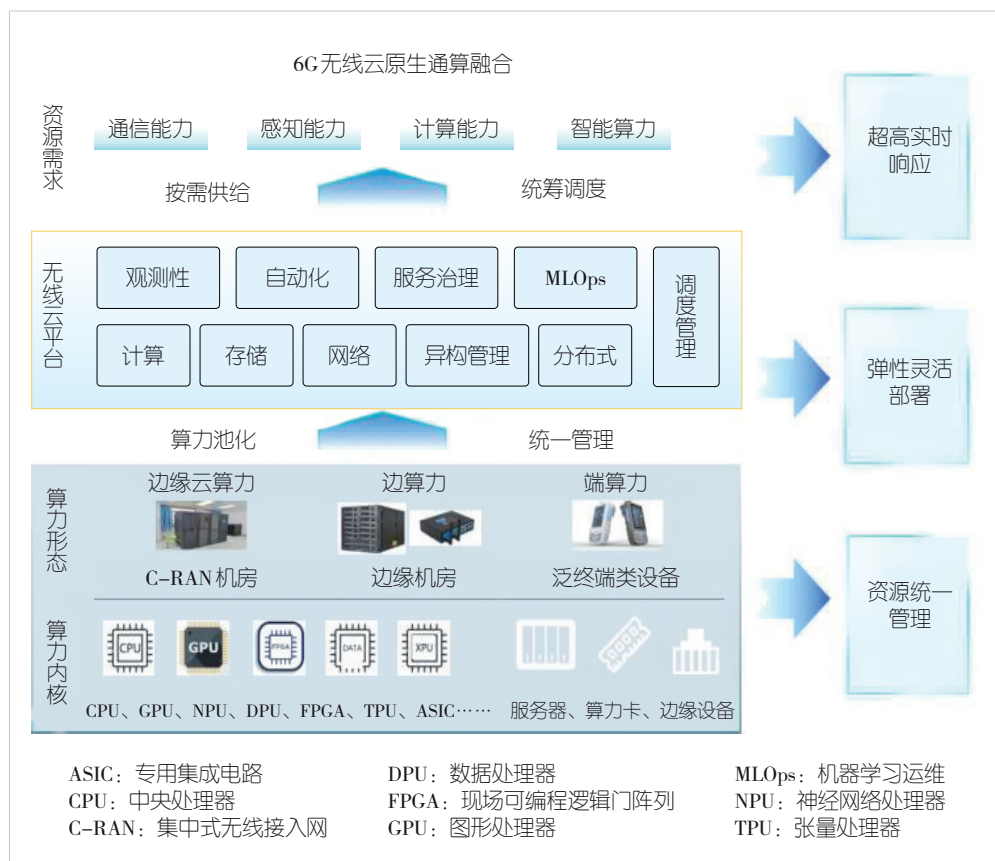


图2 云化异构硬件示意图

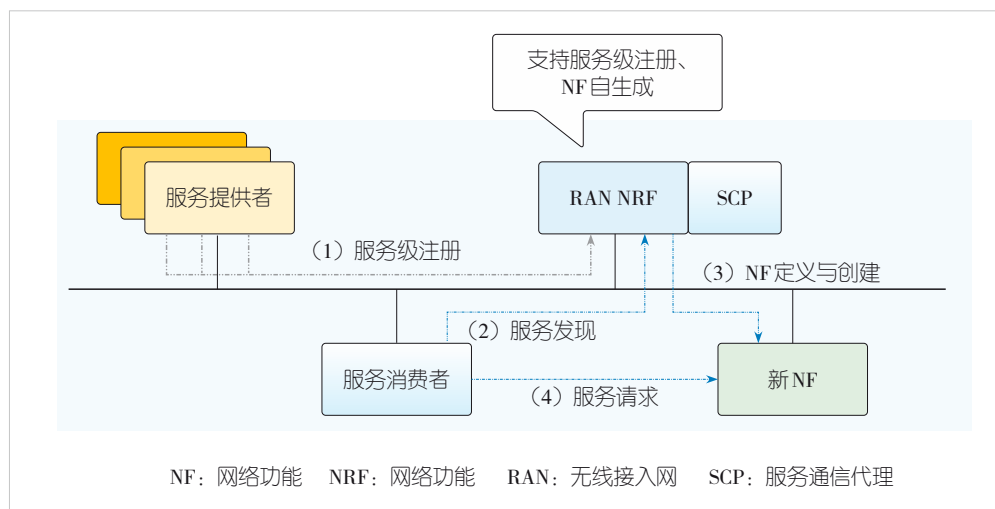


图3 场景化NF自生成

路径1：延续式对外开放，即在不改变现有3GPP能力开放框架的前提下，通过增强网络能力开放功能（NEF）或引入RAN能力开放功能实现RAN能力开放，如图4所示。具体地，该路径又可以通过如下两个方案实现：

• 方案1：RAN能力通过核心网NEF间接对外开放。在这一选项下，RAN与NEF之间可能需要设计服务化接口，

以便于NEF更高效地调用RAN开放能力。二者之间的关系类似于NEF与其他核心网NF之间的调用关系。

• 方案2：在RAN侧引入类似于NEF的RAN能力开放功能。该功能可与应用使能层（如CAPIF）直接交互，实现RAN能力直接对外开放。

路径2：定制化能力开放。如图5所示，该路径与路径1的区别特征在于：

• 特征1：突破NEF唯一开放入口模式，支持NF直接将可开放服务发布到CAPIF。例如，6G RAN功能直接将可开放的服务通过CAPIF-4发布到CAPIF core function，以丰富可开放的网络服务集合。此外，UE和第三方应用也可以将开放服务发布到CAPIF core function，以更好地赋能业务应用。

• 特征2：引入意图驱动的智能编排功能，一方面高效组合开放网络能力以更好地匹配业务需求，另一方面降低客户使用网络能力的门槛。意图驱动的智能编排功能是应用与网络应用程序编程接口（API）之间的桥梁。该功能通过与CAPIF core function交互实现网络API的发现与调用，在实现网络能力的编排组合后，将应用所需能力通过应用使能层API返回给应用。在这种模式

下，应用不能直接发现与调用网络服务，由此降低因网络暴露过多API导致的安全风险。

3.3 内生AI

在6G网络中，通过通算数智融合的编管控技术，完成AI业务需求到底层的多维网络资源的按需映射，实现高效

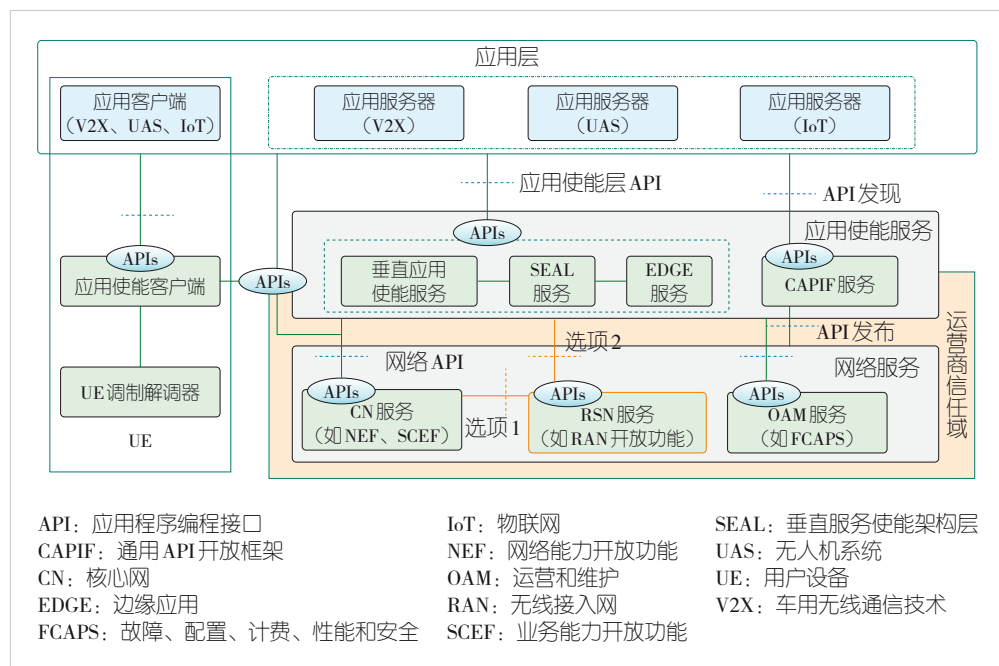


图4 延续式对外开放的RAN能力开放框架

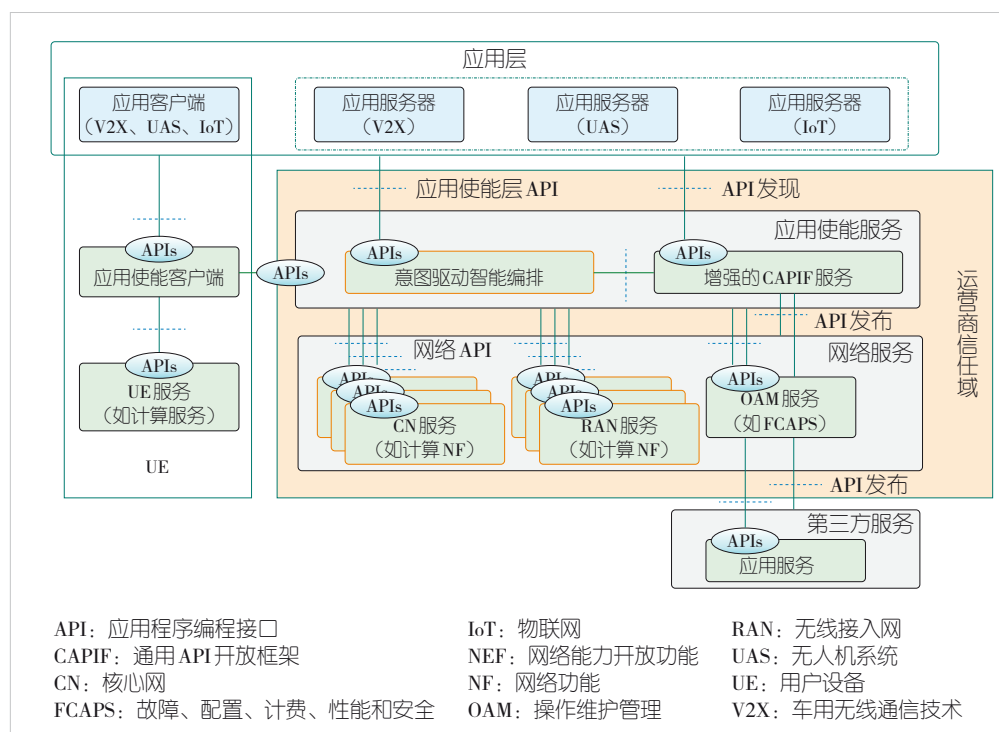


图5 定制化对外开放的RAN能力开放框架

智能决策，满足多样化AI业务需求，如图6所示。该技术通过为不同业务场景提供差异化智能服务，确保服务的高效性和可靠性^[4]。

AI服务编排聚焦于大时间尺度下的批量任务处理，致力于实现AI服务的快速部署。在部署环节，依据AI需求和

执行逻辑，对网络中的AI功能进行合理组合，形成完整的AI服务，并按需部署到网络中。这一过程充分考虑了批量用户的服务质量（用户接受率），确保在满足大量用户需求的同时，保证服务的稳定性和可用性。其中，AI服务功能链编排是核心环节，它能根据AI执行逻辑和网络资源状态，结合服务化RAN设计理念，对网络中的AI功能进行有序编排，形成功能链。这种编排方式能够灵活适应不同业务场景的差异化需求。

AI任务管理主要针对小时间尺度下的单个任务，通过调度保障单个用户的AI服务质量（QoAIS），如时延、准确性等关键指标。在调度方面，充分考虑通信、计算、数据与智能各环节的耦合性，进行AI任务到功能的精准调度。根据用户需求、信道条件和计算资源状态等，动态调整任务调度策略。

AI多维资源控制技术聚焦于实时控制网络中的连接、计算、数据和模型四要素资源，确保每个环节的执行符合通信时延、计算时延等关键指标要求。根据任务的实际需求和网络的实时状态，合理分配和调度资源，提高资源利用率，同时保障AI服务的质量。针对通信、计算、智能与数据独立控制导致的效率低、延迟高等问题，在控制面与用户面设计了相应的多维资源融合机制。在控制面，建立统一的控制，实现对通信、计算、数据和智能资源的集中管理和协同调度，提高资源利用效率；在用户面，通过用户面映射功能，实现通算资源的实时置换。当用户发起通信请求时，用户面依据用户时延要求和当前通信时

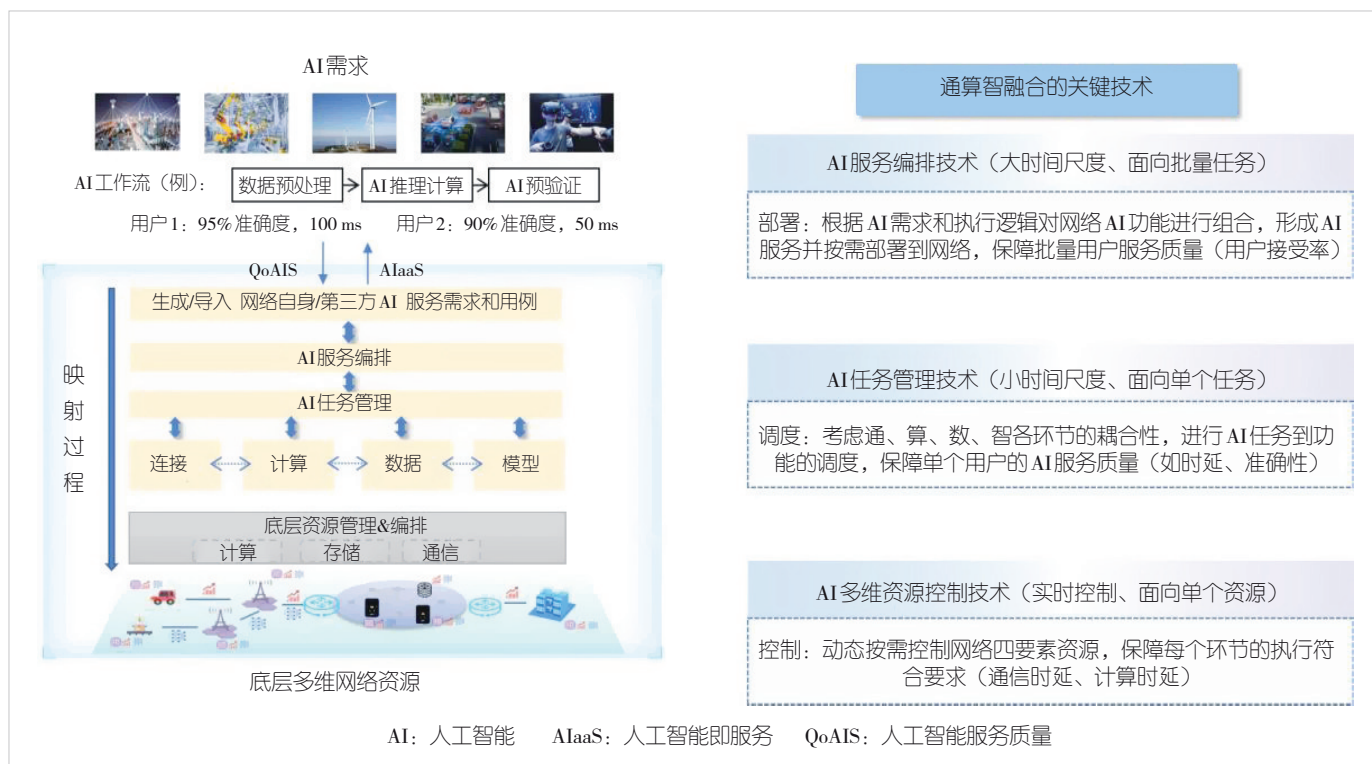


图6 通算数智融合的编管控技术

延, 在计算资源池中动态筛选计算资源, 以满足用户需求。

3.4 网络数字孪生

在6G网络向智能化、高效运维演进的过程中, 网络数字孪生 (NDT) 利用数字化技术创建物理网络的虚拟映射, 能够对物理网络的行为和性能进行精准模拟, 为简化多维能力的6G网络管理、实现AI决策预验证的智能化提供强有力的支持^[5]。

网络数字孪生的功能实现依赖于多项关键技术。高效数据采集和生成技术是NDT的基础。6G网络规模庞大且结构复杂, 要实现物理网络与孪生网络的大规模数据同步, 必须依赖高效的数据采集和生成技术。该技术能够快速、准确地收集物理网络中的各类数据, 包括设备状态、流量信息、用户行为等, 为后续模拟分析供应充实的数据资源。

高精度孪生建模技术是NDT的核心。该技术通过构建精准映射物理网络的高精度孪生模型, 力求在时空维度上全方位地再现物理网络的状态、功能和性能, 为网络提供一个与现实世界高度契合的虚拟镜像。高精度孪生建模技术使用融合注意力机制和神经网络的建模方法, 能够深入挖掘网络中节点和边的关系, 实现高效建模, 极大地提高了网络推理和策略预验证的准确度。在由多数字孪生 (DT) 模型组成的网络全局DT模型中, 不同网络节点和边的DT模型根据各

自物理网元的架构和功能定制而成, 缺乏对网络整体功能的深入理解和优化, 导致网络DT模型效率低下。将扩散模型引入由多个DT模型串联组成的网络模型中, 不仅可以实现高效的多模型协同优化, 达成建模精度与成本之间的平衡, 还能显著提升NDT建模优化的准确度。在资源有限的情况下, 依然能够保证构建出高质量的网络DT模型, 这对于NDT在大规模网络中的实际应用至关重要。

智能编排和管理技术是NDT实现高效运作的关键。通过智能解析方法, 采用多模态智能解析技术对DT任务请求进行深度分析, 能够精准地将复杂的任务请求拆解为3个核心要素: 数据、孪生模型与计算需求, 为后续的资源分配和任务部署提供依据。在编排阶段, 依据智能解析得到的三要素信息, 结合网络的拓扑结构, 运用智能编排算法可对DT模型进行自动化部署。通过智能解析与编排的协同, 可实现NDT的智能闭环管理, 使得网络能够动态适应任务需求的变化, 为NDT的高效运行和广泛应用提供有力支撑。

高性能仿真和预验证技术是NDT的重要应用方向。NDT支持对网络AI决策以及性能指标进行预验证, 通过高性能仿真技术, 在虚拟环境中模拟网络在不同场景下的运行情况, 评估AI策略的有效性和可行性。在6G网络中, AI策略的更新速度较快, 若不及时验证其可行性, 可能会导致网络

性能恶化。NDT能够提前预测未来的网络状态，对AI策略进行全面、深入的预验证，及时发现潜在问题并进行优化调整，确保AI策略在实际应用中能够发挥最佳效果。

4 结束语

6G网络作为未来通信技术的发展方向，其通感算智融合的特性将极大地推动各行业的数字化和智能化转型升级。通过构建以云化为底座、端到端服务化为基因、内生AI为智能引擎的新型网络架构，6G可实现从传统通信网络向智能服务平台的本质跨越。通过云原生、服务化RAN、内生AI以及网络数字孪生等关键技术，6G网络将实现更加智能、高效、灵活的运行，可以有效解决5G网络复杂度高、能耗大、对业务适应能力弱等行业痛点。未来，随着技术的不断进步和应用场景的不断拓展，6G网络将在更多领域发挥重要作用，推动社会向更加数字化、智能化的方向发展。

参考文献

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G无线系统设计原则和典型特征 [R]. 2023
- [2] I C-L, HUANG J, CRESPI N. 6G access and edge computing – ICDT deep convergence [M]// BERTIN E, CRESPI N, MAGEDANZ T. Shaping Future 6G Networks: Needs, Impacts, and Technologies. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2022: 187–220. DOI: 10.1002/9781119765554.ch12

- [3] LI N, LIU G, ZHANG H, et al. Micro-service-based radio access network [J]. China communications, 2022, 19(3): 1–15
- [4] LIU G, LI N, DENG J, et al. The SOLIDS 6G mobile network architecture: driving forces, features, and functional topology [J]. Engineering, 2022, 8: 42–59
- [5] DENG J, ZHENG Q, LIU G, et al. A digital twin approach for self-optimization of mobile networks [C]//2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). IEEE, 2021. DOI:10.1109/WCNCW49093.2021.9420037

作者简介



刘光毅，中国移动通信集团有限公司集团级首席专家、6G总监，中关村泛联院首席科学家，教授级高工，中国通信学会会士，享受国务院政府特殊津贴专家，科技部中青年科技创新领军人才，6G推进组无线组副组长；曾主持和参与国家级研发项目10余项，2016年荣获国家科技进步奖特等奖，2015年获中国通信学会科技进步奖特等奖，2017年所在团队入选央企楷模，2020年入选全国劳模，先后荣获中国通信标准化协会科学技术奖一等奖和二等奖共5项、国家知识产权局颁发的中国专利奖金奖1项和优秀奖3项；发表学术论文200余篇，申请发明专利500余项，参与国际标准制定20余项，出版专著《6G重塑世界》《6G：从通信到多能力融合的革命》等。