

6G 智能内生网络架构及关键技术分析



Architecture and Key Technologies of 6G Intelligent Endogenous Network

李文璟/LI Wenjing, 喻鹏/YU Peng, 张平/ZHANG Ping

(北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 中国 北京 100876)
(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing
University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202305002

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20231017.0948.002.html>

网络出版日期: 2023-10-18

收稿日期: 2023-08-05

摘要: 智能内生已成为6G网络的重要特征之一,也是当前业界关注的重点。首先解析了6G智能内生网络(IEN)的概念和特征,并对分层分面设计理念和典型架构进行了分析。之后,总结和展望了6G IEN架构的标准化进展。结合这些研究和进展,总结6G IEN面临的挑战,从知识表征与构建、意图驱动、分布式人工智能(AI)和AI可解释性4个角度分析了6G IEN的关键技术,为6G IEN架构的进一步演进提供了参考依据。

关键词: 6G; IEN; AI; 网络架构

Abstract: The intelligent endogenous network has become one of the important characteristics of the 6G network, and is also the focus of the current industry. The concept and characteristics of 6G intelligent endogenous network (IEN) are analyzed, as well as the layered design concepts and typical architectures of 6G IEN. Then the standardization progress of 6G IEN architecture is summarized. Based on research and standardization progress, the challenges faced by 6G IEN are summarized, and the key technologies are analyzed from the perspectives of knowledge characterization and construction, intention-driven, distributed artificial intelligence (AI), and AI interpretability, which provides a reference for the further evolution of 6G intelligent endogenous network architecture.

Keywords: 6G; IEN; AI; network architecture

引用格式: 李文璟, 喻鹏, 张平. 6G智能内生网络架构及关键技术分析[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(5): 2-8. DOI: 10.12142/ZTETJ.202305002

Citation: LI W J, YU P, ZHANG P. Architecture and key technologies of 6G intelligent endogenous network [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(5): 2-8. DOI: 10.12142/ZTETJ.202305002

未来,人类将进入智能化时代。6G将提供智能化时代的网络连接服务,实现人机物间的智能互联和智慧协同。与人工智能(AI)技术深度融合,构建智能内生网络(IEN)已成为6G网络的重要特征。

目前5G网络的很多方面已经应用了AI技术。但是5G网络在架构设计之初,并未考虑AI技术,因此其智能化应用是在传统网络架构上进行优化和改造的,总体属于“外挂式智能”。外挂式智能是指采用AI技术在某个或某些方面提高网络运行的智能化水平,而不是从架构层面根本性地引入智能化。这种外挂式智能只是对传统架构和技术的局部增强,但在全面提升网络的智能化及自治水平方面就显得力不

从心。因此6G网络需要在架构设计之初就全面考虑与智能化的深度融合,构建架构级智能内生,使智能成为网络的“基因”,从而实现以AI为基础的新型智能通信网络。

本文首先提出了6G智能内生网络的概念和特征,然后对6G智能内生网络架构在产业界、学术界的研究和标准化现状、6G智能内生网络的关键技术进行了分析,为未来6G智能化网络架构的演进提供了一定的参考依据。

1 智能内生网络概念及特征

目前,学术界和产业界对智能内生概念并没有统一的定义。相对于外挂式智能,6G智能内生网络是与智能要素深度融合的网络,通过对智能要素的分布式编排、部署和协同调度,按需实现对内对外的智能服务。6G智能内生网络通过在端到端系统引入智能能力,助力网络实现无人工干预的

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U22B2031)

自感知、自分析、自决策、自执行和自评估的闭环自治。

6G智能内生网络将体现出分层分布式智能、智能要素服务化、服务自适应构建与开放性，以及开放安全性等特征。

1) 分层分布式智能：为满足未来6G全息化、沉浸式、虚实结合的业务需求，解决算力、时延、传输能耗、数据隐私等问题，智能要素的下沉部署已成为趋势，智能化逐渐从集中式向分布式发展。同时，集中式管控与分布式协作形成分层智能，共同实现跨域、跨网络的智能协同，满足不同智能业务的差异化需求。

2) 智能要素服务化：通过对智能要素（算力、算法和数据）的模块化设计，实现智能要素的独立扩展演进和灵活编排部署，并可通过服务的形式独立或联合对外提供智能化能力，达到智能化能力的高效复用。

3) 服务自适应构建与开放性：智能内生网络能够自主感知业务及网络运营需求，针对不同行业、用户及场景差异，自主实现对智能要素的设计、编排和调度，按需实现服务的自适应构建，精准匹配业务需求；同时，还可以支持服务的对外开放，向内外服务消费者提供各类服务。

4) 开放安全性：未来6G服务场景的多样化和泛在化，使得智能内生网络提供的服务能被各类服务消费者安全可信地订购和调用，并能保证智能服务的隐私性、鲁棒性和可解释性。

2 智能内生网络架构研究现状

面向6G网络智能化发展需求，为支持6G智能内生网络的特征和实现目标，产业界和学术界对智能内生网络架构进行了广泛的研究和探讨，同时6G智能内生网络架构的标准化工作也在持续推进中。

2.1 产业界与学术界的研究现状

为了支持6G网络的智能内生，当前产业界和学术界从网络架构角度，提出了新的智能平面和网元功能。

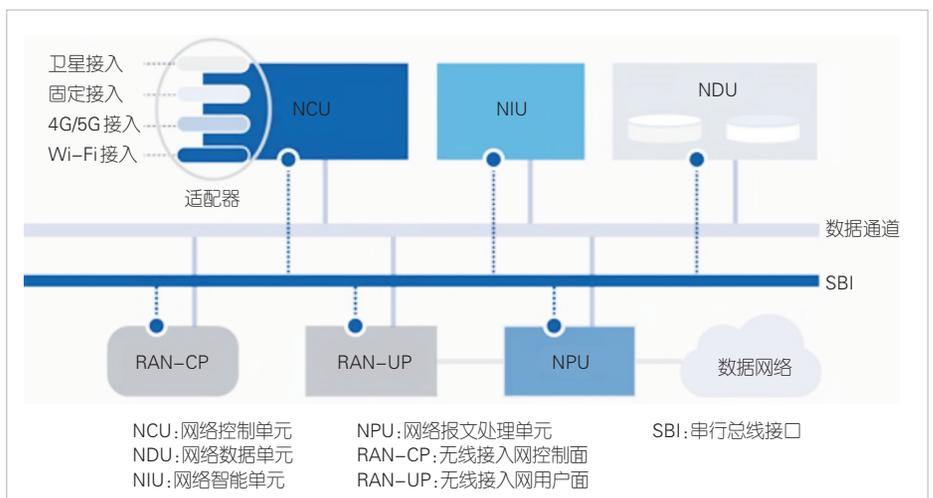
中国移动提出了“三体四层五面”的6G总体架构，从空间、逻辑与功能组成3个角度呈现了跨域、跨层、多维的6G网络。“三体”为网络本体、管理编排体、数字孪生体，“四层”为资源与算力层、路由与连接层、服务化功能层、开放使能层，

“五面”为控制面、用户面、数据面、智能面、安全面。其中，智能面是实现智能服务的物理载体，既可以为服务对象提供本地AI能力，又可以通过分布式智能节点的协同提供全局AI能力。安全面以“安全数据+AI”为驱动的安全感知和主动防护，构筑零信任的安全体系，实现安全内生^[1]。

中国电信和中兴通讯联合提出“三层四面”的6G网络智能化架构，包括云网资源层、网络功能层和应用使能层，以及控制面、用户面、数据面和智能面。与“四面”相对应，网络架构简化成四大网络单元：网络控制单元（NCU）、网络报文处理单元（NPU）、网络数据单元（NDU）和网络智能单元（NIU），各网络单元的互联采用串行总线接口（SBI）和数据通道双总线，改进了现有网络网元数量多、信令复杂等问题，实现灵活可定制的网络。SBI是现有的服务化信令交互总线，延续了已有服务化设计理念，将服务化范围由核心网控制面发展至用户面，同时进一步向无线接入网（RAN）延伸，包括RAN控制面（RAN-CP）和RAN用户面（RAN-UP），实现移动领域端到端的服务化；数据通道为新增数据总线，不同网络单元通过数据通道与NDU交互，以达到数据的高效获取与处理^[2]，具体如图1所示。

该架构呈现智能内生、分布式协同的特点，即“独立AI+内嵌AI”混合模式。NCU、NPU、NDU等网络单元一方面通过内嵌NIU服务，具备数据处理和AI分析能力，同时与独立NIU组成分布式学习和推理框架，按需、动态调配各NIU的数据、能力和算力资源，共同构建多点协同的智能内生网络^[2]。

从智能化能力的生成和演进方式来看，当前以规则式算法为核心的网络运行机理受限于通信-感知-计算能力和刚性预设式的规则，很难动态适配持续变化的用户需求和网络



▲图1 数据驱动的分布自治架构

环境。为了使网络有效累积并自主利用运行经验，实现网络运行及管控能力的自主迭代演进，文献[3]提出了以知识为中心的智能内生网络架构，如图2所示^[3]。

该架构内层是自进化核，或称为“知识大脑”，即以知识为核心，实现知识的获取、分析和更新，将网络的运行和维护经验以知识的方式识别并积累，从而为网络的自进化提供智能基础。外层是面向内生智能的网络闭环运行与管理功能，以实现网络的自主运行和自主维护，包含感知、规划、部署、运行、评估5个阶段，通过感知向自进化核提供数据和经验输入，根据自进化核提供的知识实现网络的规划、部署、运行和评估。

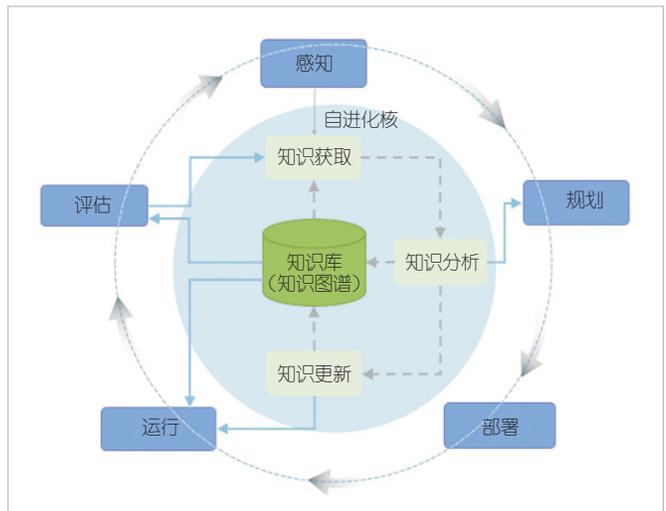
为了改善数据驱动的深度模型数据获取成本高、可解释性弱、鲁棒性不强等问题，文献[4]提出引入逻辑、视觉、物理定律和因果等知识，建立以海量数据为驱动、以知识为引导和约束的AI方法，为智能内生网络提供丰富的知识库。

为了提升智能化程度，文献[5]引入了意图抽象平面和认知平面，提出了意图抽象与知识联合驱动的6G内生智能网络架构，使6G网络支持感知-通信-决策-控制能力，能够自主感知周围环境及应用服务特性，从而进行自动化决策与闭环控制。该架构的目标是实现网络零接触、可交互、会学习，包括意图抽象平面、认知平面、管理平面、控制平面和数据平面，具体如图3所示^[5]。

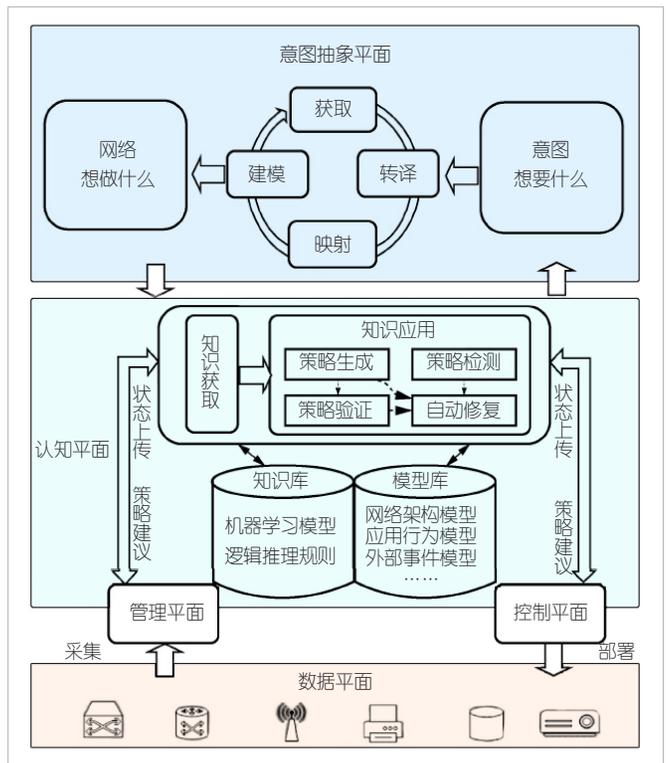
意图抽象平面的目标是从“想要什么”转换为“想做什么”；认知平面的目标是从“想做什么”转换为“怎么配置”，这需要通过知识获取和知识应用来实现。因此，本文所提的架构融合了基于意图的网络与知识定义网络的优势：首先抽象用户意图和感知网络状态，然后基于网络知识进行管控策略的生成与部署，最终实现内生智能网络的目标。

从智能要素服务化角度，华为等多家单位联合提出了一种以任务为中心的6G网络AI架构，引入了AI管理单元来管理AI任务，如图4所示。为支持网络原生AI能力，网络架构角度有3个变化：无线网络系统管控对象从“会话”变为“任务”；调度资源从连接资源变为连接、计算、数据和算法四要素资源，实现智能要素服务化；基于任务粒度的管控需要实现四要素的深度协同^[6]。

该架构包括网络AI管理编排（NAMO）和任务管控两部分核心内容。其中，NAMO完成从AI业务到任务的分解、映射和AI业务流编排，通常非实时，一般部署于管理域；而任务管控则完成任务实例的部署、控制、执行及生命周期管理，一般部署在控制面，以确保任务控制的实时和高效。该架构通过在无线通信系统中原生集成和融合四要素协同能力，并通过NAMO和任务管控的协同，最终保障了网络AI



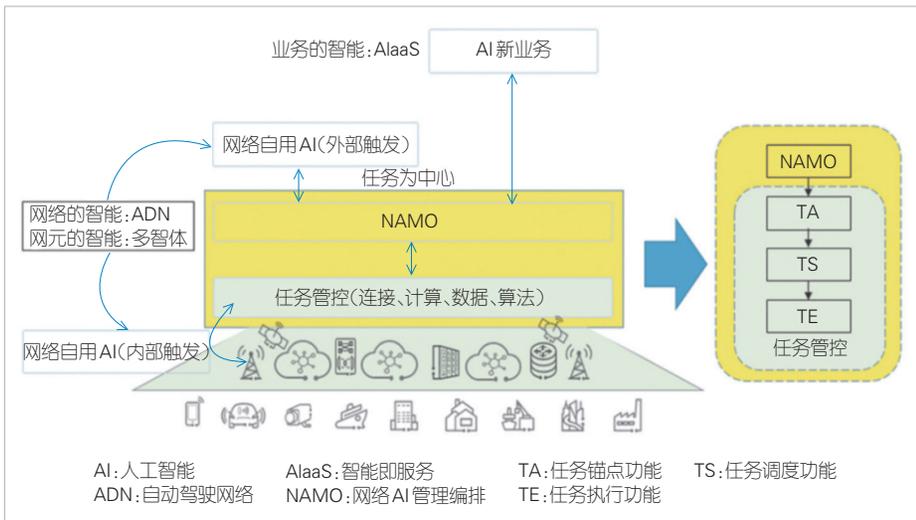
▲图2 双层闭环的网络运行与管控架构图^[3]



▲图3 意图抽象与知识联合驱动的6G内生智能网络架构^[5]

服务质量（QoAIS）^[6]。

综上所述，目前对6G智能内生网络架构的广泛探讨从分层分面的总体架构、智能能力生成、智能能力提升、AI能力编排与管理、分布式AI单元协作等方面展开，这体现了6G智能内生网络支持分层分布式智能、智能要素服务化、服务自适应构建，以及开放安全的特征。但当前关于6G智能内生网络架构的研究仍处于探索阶段。研究人员对6G智能内生网络架构进行自由探索，主要侧重于功能设计、架构



▲图4 以任务为中心的逻辑架构^[6]

设计，以及小规模、部分功能的原型系统实现，尚缺少大规模、全功能的实现支撑。

2.2 标准化研究现状

面向6G通信场景复杂化、业务需求多样化、业务体验个性化的需求，6G网络如何与AI相结合在不断地探索和演进中。欧洲电信标准化协会（ETSI）、电信管理论坛（TM Forum）、第3代合作伙伴计划（3GPP）、国际电信联盟电信标准分局（ITU-T）和IMT-2030（6G）推进组等标准化组织或论坛均取得了一系列进展。

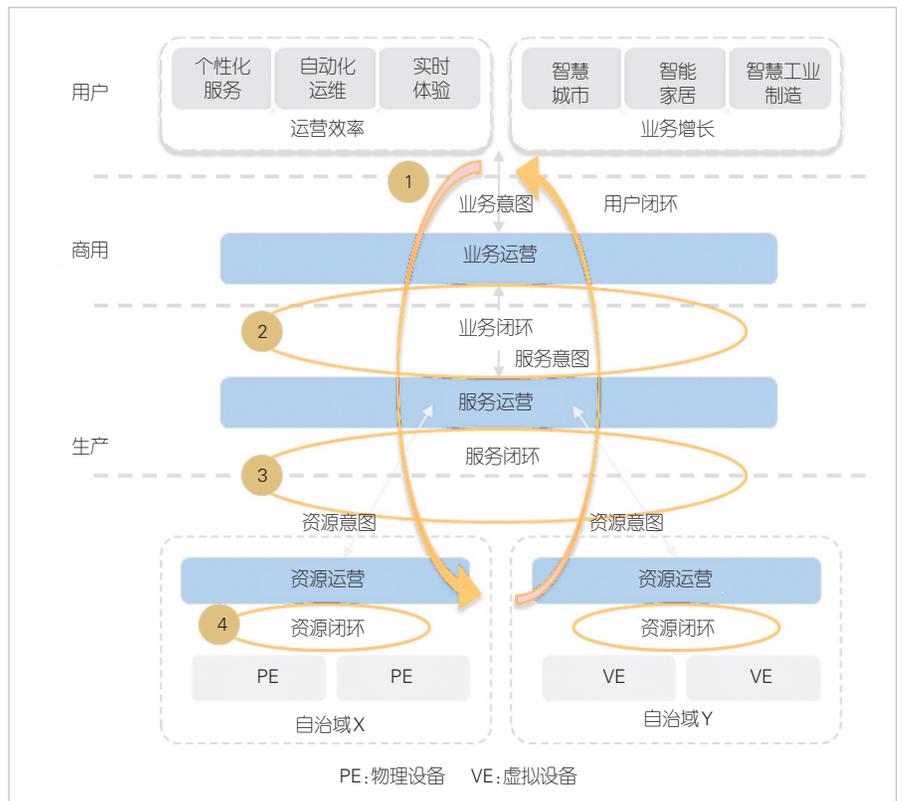
ETSI很早就开始了网络与AI结合领域的探索，2017年就成立了体验式网络智能（ENI）工作组，致力于构建基于数据驱动决策和闭环控制的人工智能网络体系架构。ENI定义了一种用于网络运维、业务编排、网络保障等应用，提供基于模型、策略驱动、上下文感知的智能化服务的人工智能引擎，其功能架构包含知识管理、模型管理、策略管理等模块，通过对数据进行处理，利用AI模型可以为网络提供自动化服务运营和保障，并提供切片管理和资源编排。ENI系统基于体验式架构，通过自学习原则积累经验以持续提高运营效率，并使系统能够随着时间的推移实现提议到实施决策的全流程闭环控制。目前，ENI的功能还在不断地演进和丰富，如

支持基于意图驱动的网络等^[7]。

TM Forum提出了自治网络框架，该框架分为3个层级和4个闭环，如图5所示。其中，3个层级为通用运营能力，可支撑所有场景和业务需求，具体包括：资源运营层，面向单个自治域提供网络资源和能力自动化；服务运营层，面向多个自治域提供信息通信（IT）服务、网络规划、设计、上线、发放、保障和优化运营能力；业务运营层，面向自治网络业务，提供客户、生态和合作伙伴的使能和运营能力。4个闭环实现层间全生命周期交互，具体包括：用户闭环

实现上述3个层级之间和其他3个闭环间的交互；业务闭环实现业务和服务运营层之间的交互；服务闭环实现服务、网络和IT资源运营层之间的闭环；资源闭环实现以自治域为粒度的网络与信息通信技术（ICT）资源运营间的交互^[8]。

3GPP很早就开始了网络智能化的研究。R15版本首次引入网络数据分析功能（NWDAF），并将其作为AI网元。R17对NWDAF的架构和功能进行了增强，包括NWDAF的



▲图5 TM Forum的自治网络框架^[8]

逻辑功能拆分及逻辑功能间的交互，多NWDAF实例协作进行数据训练和模型共享，新功能实体的引入以提高数据收集效率，增强实时性等。R17还推进管理面的智能化，引入管理数据分析（MDA）。根据R18阶段发布版本，NWDAF进行了功能强化和解耦，将逻辑分析能力独立，并可调用机器学习（ML）模型和能力，通过树形级联调取其他NWDAF数据联合分析，将ML模型和能力集中进行统一管理。3GPP预计将在2025年下半年（R20）开始对6G技术进行标准化^[7]。

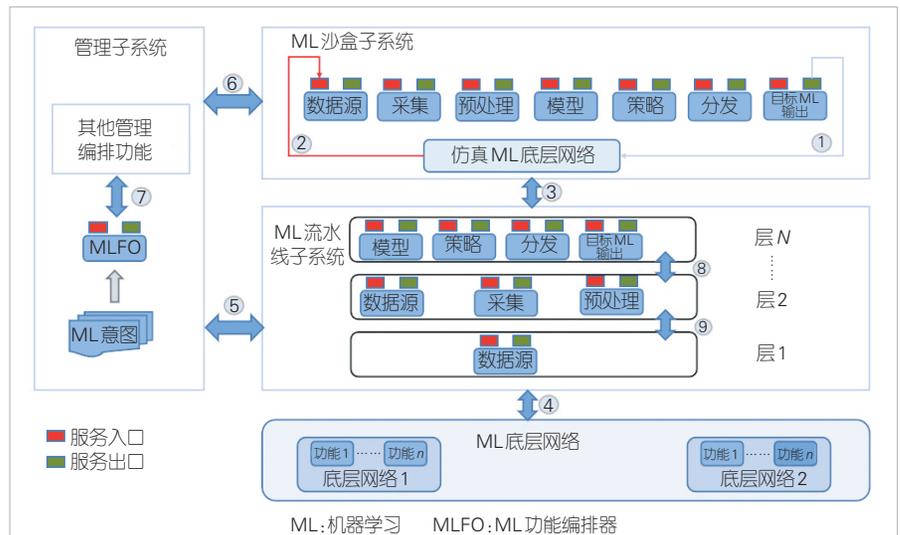
ITU-T SG13成立了未来网络机器学习焦点小组（ML5G），致力于ML在5G及未来网络中的应用。该小组完成了关于AI用例、架构框架、智能级别、数据处理、ML功能编排器（MLFO）、服务框架等多项技术规范，提出一套针对机器学习的管理子系统，如图6所示。针对机器学习全生命周期中各阶段所需的不同功能，该小组还提出了跨域、多云、不同层级的多层级ML工作流。其中，完整的网络分析功能由一组ML管道节点构成，包括数据源、数据采集器、数据预处理器、ML模型、模型输出分配器和接收器等。这些节点可视为逻辑实体，具体部署位置由功能编排器来管理。为降低由于模型不确定性给网络带来的风险，该架构还采用了沙盒（sandbox）概念，作为独立环境专门用于ML模型的训练、测试和评估^[9]。

IMT-2030（6G）推进组于2019年6月由中国工业和信息化部等部委共同推动成立，是中国研究和开展国际交流与合作的主要平台，对6G愿景、典型场景、无线技术和网络架构等展开系列研究。在IMT-2030网络组标准研讨中，形成了面向6G网络的智能内生网络体系框架雏形。该体系框架从逻辑层次上分为3层^[10]，从下到上依次为异构资源层、功能和编排管理层以及能力开放层，如图7所示。

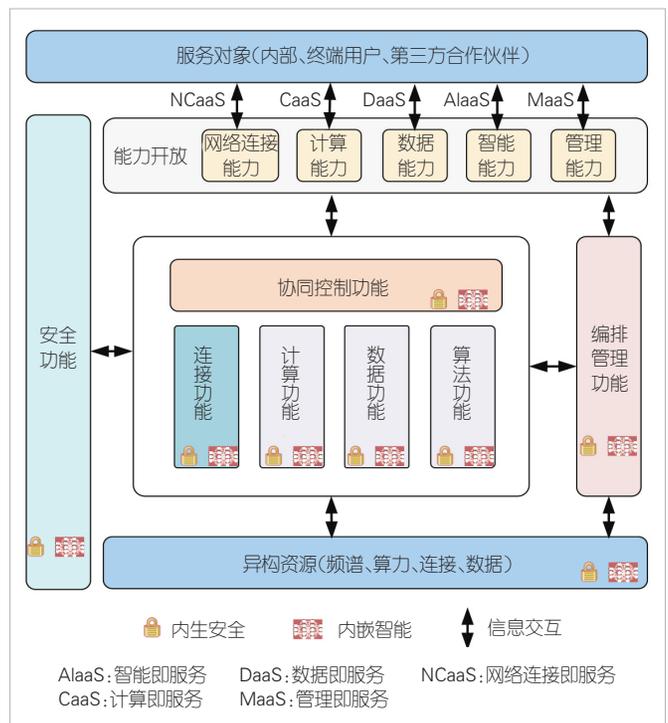
异构资源层提供网络连接、频谱、算力和数据等多维资源，是基础设施层；功能和编排管理层包括编排管理功能、协同控制功能、连接功能、计算功能、数据功能和算法功能，通过对多维资源（算力、算法、数据、连接）的实时监控、融合调度、联合编排，以及对各种任务实例的全生命周期的实时管理与控制，来提供AI相关服务，该层是提供AI服务的核心功能层；能力开放层作为服务的开放平台，以统一的服务化接口向任何潜在的服务消费者提供各类服务。

该体系框架的核心在于将网络连接与算力、算法、数据等AI三要素协同考虑，形成AI四要素，并通过对AI四要素的融合编排和协同调度，构建网络分布式智能服务的基础。同时，通过引入更加高效和实时的协同控制功能，在编排管理给出的编排流基础上，该体系实现AI四要素的实时协同管理和动态调整，与编排管理功能形成功能分层，协同实现低时延的高效网络管理，并实现跨区跨域间协同控制信息的高效交互，从而有效支持6G网络的智能内生。

综上所述，与学术界、产业界研究相对应，标准化工作



▲图6 TU-T ML5G架构^[9]



▲图7 IMT-2030网络组智能内生网络体系框架图^[10]

也包含智能能力生成、意图驱动的自智网络、AI要素协同、AI能力编排、支持分布式智能等相关方向。但目前的标准工作仍处于预研阶段，系统性设计智能内生网络功能及流程的工作还比较少，但相关工作也引发了业界的广泛关注，更具体的工作将进一步展开。

3 智能内生网络关键技术

面对规则式算法灵活性差、意图功能支持程度较低、AI单元协作能力较差、深度学习模型可解释性差等问题，6G智能内生网络在智能能力生成、智能化程度、AI能力部署、AI可信度等方面均面临诸多挑战。为应对这些挑战，本文从知识表征与构建、意图驱动、分布式AI和AI可解释性4个角度分析6G智能内生网络的关键技术。

3.1 知识表征与构建技术

知识将在6G智能内生网络中发挥重要的作用。知识不仅是网络数据，还可以是相关网络规律、机理、策略等的进一步凝练，具有历史记载、客观事实、经验积累、客观反馈等形式。知识除了人类所能总结的知识库、常识库外，还包括机器所能理解的知识。因此6G网络多维主客观知识的表征与构建是基础技术，包括知识获取、知识抽取、知识融合和知识存储等方面。

知识获取是获取不同来源、不同结构的数据，是知识构建的前提。结构化和半结构化数据通常包括网络状态数据、网络运行和故障日志、运维手册等，只需要简单读预处理和映射即可作为后续数据分析系统的输入；而非结构化数据如专家经验、意图命令等则需要借助自然语言处理、信息抽取等技术来帮助提取有效信息。知识抽取是知识构建的核心，包括知识建模、实体抽取、属性抽取、关系抽取等，抽取方法与数据类型及结构化程度密切相关，常用技术包括知识映射、自然语言处理与深度学习等。知识融合是对不同来源、不同语言或不同结构的知识进行融合，从而对于已有知识进行补充、更新和去重，包括内容清洗、分块与记录连接等子任务^[11]。知识存储则综合考虑应用场景、系统性能、推理能力各方面需求，并使用图数据库或资源定义框架数据库进行存储，部分场景下也可使用关系型数据库进行存储。

3.2 意图驱动技术

6G智能内生网络将是意图驱动的网络。6G网络将以更高级别抽象的方式提取业务或用户意图，借助AI技术实现意图的识别、转译和验证，并在网络状态感知和精准预测的基础上，基于意图完成网络自动化部署配置、网络自主优化

和故障自愈等。意图驱动技术的应用，将完成网络全生命周期的自动化和智能化管理，极大地提升网络的运维效率，降低运维成本，提高对业务变化的响应速度。

意图驱动网络的关键技术包括意图转译和意图验证等。意图转译工作是意图驱动技术中的核心任务，它实现了用户意图到网络策略的转变。该工作主要采用自然语言处理的方法对意图进行处理，包括对用户意图进行关键字提取、词法分析、语义挖掘等操作，从而获得用户期望的网络运行状态。意图转译工作使用智能化的方法生成网络策略。在策略下发之前，策略的可执行性需要被验证，主要包括资源可用性、策略冲突及策略正确性3个方面。为实现资源可用性验证，网络状态信息数据库需要被维护；在策略冲突方面，意图功能模块需要检测待下发策略与网络当前策略是否存在冗余、覆盖、泛化、相关、重叠等冲突，并应通过设置优先级等方法进行冲突消解；在策略正确性验证方面，可采用形式化验证方法，将复杂系统建模为数学模型，开展模型检查、定理证明、符号执行以及符号执行问题（SAT）/可满足性模理论（SMT）求解等^[12]。

3.3 分布式AI技术

空天地海一体化的6G网络是人、机、物融合的网络，将产生大量且多样的数据。这些数据分布在不同的网络、系统、网元上。如果将这些数据集中起来训练，将会产生高昂的计算及传输成本，并带来安全隐患，因此，分布式AI将是实现6G智能内生网络的关键技术。利用大规模分布式边缘设备的潜力，分布式AI技术可以解决集中式AI的瓶颈问题，降低通信开销并解决数据隐私保护问题。分布式AI和群智式的推理协同，将构筑6G全新的智能生态系统。

分布式AI技术主要分为分布式AI训练和分布式AI推理两方面。对于分布式AI训练问题，联邦学习是一种经典架构，参与训练的客户端无须上传本地数据，只需将训练后的模型参数更新上传，再由边缘服务器节点聚合、更新后下发给参与学习的客户端。空中计算技术可以利用无线链路上行多址接入信道的信号叠加特性，通过通信和计算的一体化设计，有效降低分布式训练过程中的通信开销和时延。分布式AI推理，即在网络边缘分布式执行AI模型。考虑到边缘节点的计算存储资源有限，如何减小及优化模型在分布式推理中显得尤为重要。常见模型压缩方法包括网络剪枝、知识蒸馏、参数量化、结构优化等^[13]。

3.4 AI可解释性技术

AI模型凭借其高精度、强泛化性等重要优势，将与

6G网络深度融合，构筑智能内生网络。但是，AI模型特别是深度学习模型，参数多、结构复杂，人们往往难以对其决策进行预判和解释。AI模型的黑盒特性对其在6G网络中的部署提出了挑战，可解释性的缺乏将给系统可靠性带来很多潜在风险，引发道德和法律方面的问题。因此，AI可解释性技术对于建设可靠稳健安全可信的6G智能内生网络至关重要^[14]。

AI可解释性可以分为事前可解释性和事后可解释性。事前可解释性通过训练结构简单、可解释性好的模型，如朴素贝叶斯、线性回归、决策树、基于规则的模型等，或将可解释性结合到具体的模型结构中来实现模型本身的内置可解释性，如广义加性模型、自注意力机制等。事后可解释性指通过开发可解释性技术解释已训练好的AI/ML模型，分为全局可解释性和局部可解释性。全局可解释性旨在帮助理解复杂模型背后的整体逻辑及内部的工作机制，例如规则提取、模型蒸馏、激活最大化解解释等；而局部可解释性旨在理解机器学习模型针对某一个输入样本的决策过程和决策依据，例如梯度反向传播解释、特征反演解释等^[15]。

4 结束语

面向6G实现万物智联、提供泛在智能的愿景，智能内生将成为6G网络的核心基因。本文提出了6G智能内生网络的概念和特征，分析了6G智能内生网络架构的学术研究和标准化进展，指出了6G智能内生网络的关键技术，为未来6G智能内生网络发展提供了参考。

目前6G研究方兴未艾，智能内生网络研究也处于热点阶段，但许多工作尚集中在概念、架构和功能设计及部分功能的验证上，系统性的工作还较少，融合AI和网络的标准工作也还在研究和推进中。6G智能内生网络仍面临高效性、安全性、可解释性等诸多方面的挑战，需要业界进一步的研究和推进。

致谢

感谢北京邮电大学张俊也博士对本文的贡献！

参考文献

[1] 中国移动通信集团有限公司. 中国移动6G网络架构技术白皮书[R]. 2022
 [2] 中国电信研究院, 中兴通讯. 6G网络架构展望白皮书[R]. 2023
 [3] ZHOU F Q, LI W J, YANG Y, et al. Intelligence-endogenous networks: innovative network paradigm for 6G[J]. IEEE wireless communications, 2022, 29(1): 40-47. DOI: 10.1109/MWC.004.00320
 [4] 金哲, 张引, 吴飞, 等. 数据驱动与知识引导结合下人工智能算法模型[J]. 电子

与信息学报, 2023, 45(7): 2580-2594
 [5] 杨静雅, 唐晓刚, 周一青, 等. 意图抽象与知识联合驱动的6G内生智能网络架构[J]. 通信学报, 2023, 44(2): 12-26. DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023016
 [6] 吴建军, 邓娟, 彭程晖, 等. 任务为中心的6G网络AI架构[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(4): 599-613. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3114.2022.04.005
 [7] 亚信科技, 清华大学, 中国电信, 等. 6G OSS技术白皮书[R]. 2023
 [8] TM Forum. 自智网络白皮书3.0[R]. 2021
 [9] Architectural framework for machine learning in future networks including IMT-2020: ITU-T Y.3172[S]. 2020
 [10] IMT-2030(6G)网络技术工作组. 面向6G网络的智能内生体系架构研究[R]. 2022
 [11] 6GANA. B5G/6G网络智能数据分析: 网络数据采集、知识表示与推理、特征数据构建与评估[R]. 2022
 [12] 李福亮, 范广宇, 王兴伟, 等. 基于意图的网络研究综述[J]. 软件学报, 2020, 31(8): 2574-2587. DOI: 10.13328/j.cnki.jos.006088
 [13] SHI Y M, YANG K, JIANG T, et al. Communication-efficient edge AI: algorithms and systems[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2020, 22(4): 2167-2191. DOI: 10.1109/COMST.2020.3007787
 [14] WU Y L, LIN G Z, GE J G. Knowledge-powered explainable artificial intelligence for network automation toward 6G[J]. IEEE network, 2022, 36(3): 16-23. DOI: 10.1109/MNET.005.2100541
 [15] 纪守领, 李进锋, 杜天宇, 等. 机器学习模型可解释性方法、应用与安全研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(10): 2071-2096. DOI: 10.7544/j.issn1000-1239.2019.20190540

作者简介



李文璟，北京邮电大学教授、博士生导师，中国通信学会高级会员；主要研究领域为无线网络智能管理、B5G/6G网络架构；先后主持国家“863”计划课题、国家科技重大专项项目、国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目及面上项目等10余项；出版论著2本，以第一起草人起草通信行业标准20余项。



喻鹏，北京邮电大学未来学院副院长、副教授、博士生导师，IEEE/EAI高级会员、中国通信学会高级会员；主要研究方向为B5G/6G网络管理与优化；近年来主持/参与了国家级项目10余项，参与起草了国际行业/企业标准10余项，荣获科技奖励5次、国际期刊/会议最佳论文奖4次；发表论文60余篇。



张平，中国工程院院士，北京邮电大学教授、博士生导师、网络与交换技术全国重点实验室主任，国家自然科学基金委“创新研究群体”带头人；主要研究方向为先进移动通信系统等；先后获国家科学技术进步奖特等奖1项、国家科学技术进步奖一等奖1项、国家技术发明奖二等奖3项、国家科学技术进步奖二等奖2项，获首届“全国创新争先奖”奖章、光华工程科技奖、何梁何利基金科学与技术进步奖，带领的团队入选首批“全国高校黄大年式教师团队”。