



专题：6G

知识定义的意图网络自治

王敬宇¹, 周铨², 张蕾³, 刘聪², 庄子睿¹, 杨红伟², 陈丹阳², 朱艳宏², 陆璐², 廖建新¹

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876;

2. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053; 3. 中国联合网络通信集团有限公司, 北京 100033)

摘要: 通信网络的复杂性决定了意图网络自治是无法一蹴而就的, 关键在于以全局视角, 打通多个网络管控问题域, 将网络规律、机理、策略凝练为知识, 构建全场景资源调配的知识空间, 最终实现意图网络的泛在智能化。围绕 6G 意图网络, 将知识定义智能作为关键使能技术, 以提高意图网络的感知和决策闭环能力, 构建自学习、自运维的意图网络。实现完全的 6G 网络自治是一个长期目标, 需要分步实现, 从提供重复执行操作的替代方案, 到执行网络环境和网络设备状态的感知和监控, 根据多种因素和策略做出决策, 以及有效感知最终用户体验, 直到最后网络能够感知运营商和用户的意图, 自我优化和演进。

关键词: 基于意图网络; 知识定义网络; 网络自治; 自运维; 感知和监控

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021220

Knowledge-defined intent-based network autonomy

WANG Jingyu¹, ZHOU Cheng², ZHANG Lei³, LIU Cong², ZHUANG Zirui¹,

YANG Hongwei², CHEN Danyang², ZHU Yanhong², LU Lu², LIAO Jianxin¹

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

2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

3. China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100033, China

Abstract: The complexity of the network determines that the autonomy of the intention network can't be achieved at one go. The key is to break through multiple problem domains of network management and control from a global perspective, to summarize the network rules, mechanisms and strategies into knowledge, to build the knowledge space of resource allocation in the whole scene, and finally to realize the ubiquitous intelligence of the intention network. Focusing on 6G intention network, which takes knowledge-defined intelligence as the key enabling technology

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1807803, No.2020YFB1807800); 国家自然科学基金资助项目 (No.62071067, No.62001054); 教育部-中国移动科研基金项目 (No.MCM20200202, No.MCM20180101); 北京邮电大学-中国移动研究院联合创新中心项目

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1807803, No.2020YFB1807800), The National Natural Science Foundation of China (No.62071067, No.62001054), Ministry of Education and China Mobile Joint Fund (No.MCM20200202, No.MCM20180101), Funded by Beijing University of Posts and Telecommunications-China Mobile Research Institute Joint Innovation Center



to improve the perception and decision-making closed-loop ability of intention network, and constructs a self-learning, self-operating and self-maintaining intention network. Achieving full autonomy in 6G networks is a long-term goal, which requires step by step evolvments, from providing repeat operation alternatives, to performing perception and monitoring on network environment and equipment states, to making decisions according to a number of factors and strategies, to effectively sensing end-user experience, and finally to a fully autonomous intelligent network that senses the intention of operators and users, self-optimizes and self-evolves.

Key words: intent-based network, knowledge-defined network, network autonomy, self-operation and maintenance, perception and monitoring

1 引言

随着移动通信逐步迈入 5G 时代,当前的电信网络运行管理模式已经不足以支撑不断增长的网络演进、业务发展和用户体验的要求。5G 网络具备高体系性、高复杂性、超大规模、高可靠性、高动态性的特点,运维成本居高不下。网络的功能维度和节点数目的显著增加,使得人脑几乎不可能理解现有网络架构,并迅速找到最佳解决方案。运营商迫切需要基于 AI 打造智能化的网络管道,以快速识别新业务,全面洞察用户行为,并根据不同业务类型和用户体验需求实现网络精细化运营。将 AI 技术与通信网络的硬件、软件、系统、流程等深度融合,把 AI 的解决目标和承载方式都设在网络内部,利用 AI 技术助力通信网络运营流程智能化,实现提质、增效、降本,使能业务敏捷创新,构建一个高度智能的自动化网络,并逐步向自治网络演进。网络自治将成为 5G-Advanced 和 6G 时代移动通信网络的核心要素。

2 智能网络研究现状

近年来,有关智能网络的研究和讨论在工业界和学术界都非常火热,内生智能已经成为 6G 网络研究共识。AI+Network 的融合发展将给通信网络注入新的技术活力,开启前所未有的可能性,ETSI、3GPP、ITU-T、TMF、GSMA 和国内 CCSA 等标准化组织纷纷展开智能网络前期的标准研究工作。其中,智能化的一个关键愿景就是——实

现网络自治,但还需要整个行业形成对网络自治的统一认识和理解,不断明晰网络自治的概念,共同丰富网络自治案例。当前的案例还比较初级,且不成体系,并不具有可演进性。

此外,业界还提出了不少新网络形态,如智简网络^[1-2]、意图网络^[2-4]、价值网络^[5-6]、算力网络^[7-8]和自动驾驶网络^[9]等,很多内核都依赖 AI 驱动。但如何引入 AI,依然面临巨大的技术难题和挑战,由于场景的差异,机器视觉和自然语言处理领域的 AI 模型和算法难以直接应用到网络当中,在泛化性、闭环端到端决策、可解释性等方面依然存在技术瓶颈。当前用 AI 解决网络问题的初步探索,更多是概念模型,少数实现案例仅在业务和运维等外在问题上,且承载大多在云端。如何网络内生引入 AI 是个巨大的难点,需要 AI 核心算法的创新,并与工程实践的优化集成,探索将人工代价转换为知识,由知识驱动下一代网络。学术界已经开始探索将人工代价转换为知识,由知识驱动下一代网络。最有代表性的是 MIT 的 David Clark 教授提出的网络知识平面(knowledge plane)^[10],被公认是一个优秀的理论设想,但一直没能实现系统设计和部署。因此,将知识平面有效嵌入并融合进现有网络,预计会提升网络自动化管控和运行的效率。

2.1 ETSI

ETSI 十分重视 AI 技术在 ICT 领域的应用,于 2020 年 6 月发布“AI 及其用于 ETSI 的未来方向”白皮书。2017 年 2 月,ETSI 成立业界首个网

络智能化规范组——体验式网络智能行业规范小组 (experiential networked intelligence industry specification group, ENI ISG) [11]。ENI ISG 定义了基于“感知-适应-决策执行”控制模型的认知网络管理架构,利用 AI 和上下文感知策略,根据用户需求、环境状况和业务目标的变化来调整网络服务;通过自动化的服务提供、运营和保障以及切片管理和资源编排优化来提升 5G 网络性能。目前,该小组的输出成果包括术语规范、概念验证 (PoC) 框架、应用案例、智能网络分级、意图感知的自治网以及 ENI 架构等。

2.2 3GPP

3GPP SA WG5 在 2018 年 9 月的第 81 次会议上通过了“意图驱动的移动网络管理服务 (IDMS_MN)”,在该项目的输出 TR28.812 [12] 中明确了意图驱动的网络管理服务的概念、自动化机制、应用场景以及描述意图的机制等。在 2020 年 6 月召开的第 131 次会议上,3GPP SA WG5 成立“自治网络分级 (autonomous network level, ANL)”标准项目 [13]。该项目由中国移动作为独立报告人牵头,旨在 3GPP 框架内,基于网络“规-建-维-优”四大类典型场景,规范自治网络的工作流程、管理要求和分级方法,明确不同网络自治能力标准对 3GPP 现有功能特性的增强技术要求,牵引网络智能化相关标准工作。

2.3 ITU-T

ITU-T 主要由 SG13 进行在未来网络中实现机器学习的研究工作。ITU-T SG13 于 2017 年 11 月成立了面向包括 5G 在内的未来网络机器学习 (ML5G) 焦点组。该焦点组负责起草机器学习适用于未来网络的技术报告和规范,包括网络体系结构、接口、协议、算法、应用案例与数据格式等 [14]。目前,ML5G 第二阶段工作已于 2020 年 7 月结束,后续的研究将在 ITU-T SG13 继续推进。除了 ITU-T SG13,在 ITU-T SG15 于 2020 年 1 月的全会上,Q12 和 Q14 确定将“机器学习如何应

用到传送网”纳入标准工作范围,并希望能够充分分析 AI/ML 在传送网中的用途。

综上,智能相关技术设计主体思路都是相对统一的,即利用人工智能/机器学习对数据进行建模分析形成知识,利用闭环控制对策略反复优化,最终目的是寻求对网络管控的最优解,对网络各层各级协调调度、智能管控。知识定义利用知识的先验性,解决传统 AI 技术中普遍存在的经验储备不足的短板,尽可能避免 AI 运算“从零开始”。最终能够达到实现全网络“去人化”“全程序化”的愿景。

3 意图网络自治研究现状

3.1 意图网络

在各种新型网络形态中,意图驱动网络 (intent-driven network, IDN) 或基于意图网络 (intent-based network, IBN, 本文简称意图网络) 就是实现网络自治的关键技术。它的思想最早来自软件定义网络基于意图的北向接口,后来由 Gartner 于 2017 年正式提出 [15],得到业界的普遍关注,也就是“我希望网络达到某一种情形”,网络将自动转译并完成后续的操作。意图网络包含以下几个关键步骤。

(1) 获取到用户所提出的网络需求,即意图。例如,意图 “I want to connect A to B.”,用 $\langle A, \text{connect}, B \rangle$ 表示意图并作为输入发送到网络;

(2) 将接收到的意图转译成网络策略;

(3) 根据当前网络的状态验证策略的可执行性,将通过验证的策略下发到实际网络中;

(4) 系统实时地监控网络状态,确保用户意图正确实现,并将结果反馈给用户。

随着意图网络的引入,网络自治的发展目标逐步清晰,就是逐步实现网络的自规划、自适应、自优化、自管理、资源按需服务,最终达成“网随意动”。其中,如何有效获取用户意图是关键难点,目前出现一些基于 DSL (domain-specific languages) 设计的意图表示语言,如阿里的 LAI



和华为的 NEMO，都是通过一些关键字原语和表达语句来描述用户对网络的需求。如提供了 scope、modify、check 等几种原语描述用户的意图需求。对于添加一条“A 可以连通 B”的意图，便可以使用“scope A*,B* allow A*,B* control A→B check fix”来描述该意图。非常类似网络领域的 SQL 语句，可以给网络控制器发送命令，进行对应的配置。优点是可以在特定的环境下描述用户意图，得到的配置策略具有很高的准确性。缺点也很突出，并不是用户的自然语言表达，抽象级别仍然较低，需要向 NLP 方向演进。同时，如何生成满足该需求的网络策略，还缺乏必要的智能性。这也是实现网络自治，而不只是人治的关键。

3.2 网络自治

随着网络规模的扩展及信息交换的复杂化，维持这种网络的动态性需要可靠的运维机制。5G-Advanced 网络演进与 AI 能力的引入，可以提

高网络的感知和决策闭环能力。电信网络运维经验与专家知识的数字化，为网络从人工运维向自治运维提供了技术底座。在网络自动化闭环过程中，需要将人工经验与知识转化为机器可理解的知识图谱，从而在推理分析、意图驱动和闭环决策中发挥重要作用。类似车辆自动驾驶，3GPP、TMF 和 GSMA 都提出了网络自治的分级标准，图 1 中给出的是 GSMA 的智能自治网络分级标准^[16-17]。通信网络的复杂性决定了智能自治网络是无法一蹴而就的，应该循序渐进，分 L0~L5 这 6 个阶段逐步推进。

目前，现网各种系统的智能化处于 L1 和 L2 级，ITU-T《IMT-2020 及未来网络智能评估框架》建议书给出的部分案例处于 L2~L3 的级别^[17]。实现完全的智能自治网络是一个长期目标，这个过程只能循序渐进，需要分步实现：从提供重复执行操作的替代方案，到执行网络环境和网络设

阶段		关键特征	评估维度					
			执行	感知	分析	决策	意图	场景
L0	人工运营网络	全人工操作	人工	人工	人工	人工	人工	无
L1	辅助运营网络	工具辅助数据采集，人工分析决策	系统为主	人工为主	人工	人工	人工	少量场景
L2	初级智能自治网络	部分场景基于静态策略自动分析，人工决策	系统	系统为主	人工为主	人工	人工	部分场景
L3	中级智能自治网络	特定场景实现动态策略自动分析，预先设计场景系统辅助人工决策	系统	系统	系统为主	人工为主	人工	多数场景
L4	高级智能自治网络	系统实现动态策略完整闭环，预先设计场景系统自动完成意图感知和实现	系统	系统	系统	系统为主	人工为主	绝大多数场景
L5	完全智能自治网络	全部场景系统完成全部闭环，系统自动完成意图感知和实现	系统	系统	系统	系统	系统	全场景
备注说明			所有等级的决策和执行都支持人工介入，人工审核结论及执行指令具有最高权限					

图 1 GSMA 智能自治网络分级

备状态的感知和监控,根据多种因素和策略作出决策,并有效感知最终用户体验,直到最后网络能够感知运营商和用户的意图、自我优化和演进。

因此,面向 6G 智能自治网络,需要构建 AI 和大数据引擎,考虑不同网络层次的特点,进行解耦设计、微模块化实现、分层部署;同时聚焦高价值场景、按需引入 AI 能力、逐步推进,最终实现泛在的业务网络智能化与全面的智能网络自治。

4 知识定义的意图网络

4.1 设计思路

尽管软件定义网络为计算机通信网络注入了新的活力,提供了更加灵活可用的网络管理接口,提供了全局的网络运行状态视角,然而仍然没有回答一个关键的问题:如何理解当前网络的运行状态,并将这一理解应用到网络管理、优化和控制当中。21 世纪初,Clark 等^[10]提出“知识平面”的概念来减少网络管理中配置、诊断和设计的成本,知识平面应当能够应对从基础网络本身所收集到的不完整、不一致、误导性的甚至恶意的数据;应当能够协调网络成员冲突或不一致的高层次目标;应当能够应对网络环境或短期或长期的变化。知识平面提议借助人工智能技术,将“智能”根植在未来网络的基因里。

近年,Mestres 等人^[18]又重新整理了这一概念,认为 Clark 的远景可以被实现,并进一步提出“知识定义网络”的概念。中国科学技术大学朱近康教授提出未来智能网络中有三大核心^[19]:智能管控的极其简洁的网络架构、知识+数据双驱动的学习机制、全场景全业务动态联合优化。团队认为以上 3 点在未来网络中缺一不可,同时提出未来智能网络应该具备的三大能力:全场景管控、全知识学习、全透明优化。文献^[19]中强调,知识+数据驱动学习是未来智能网络的基础,能够实现网际间抑或网络内的学习优化,并构成一个动

态联合优化体系,有助于实现未来网络的智能自主管控。

鉴于软件定义网络的最新发展,在知识定义网络中,知识平面可以进一步具体化,构建在控制平面和数据平面上层,将智能和推理集成到软件定义网络的决策过程之中。通过解耦的控制平面和数据平面,知识平面可以获取全局的网络状态信息以及灵活的网络控制能力,使用人工智能技术处理网络数据生成知识,并利用这些知识管理网络。作为长期愿景,知识平面可以学习网络是如何运作的,并最终自动化地管理和控制网络。知识定义网络的发展历程如图 2 所示。

本文提出基于知识定义的意图网络,对网络状态进行遥测和感知,并结合人工智能与机器学习分析所提供的丰富的网络知识对网络意图进行理解,最后借助软件定义网络的集中控制,实现网络意图的执行和方案部署。

- 转发件和软件定义网络控制器→分析平台:分析平台的责任是获取足够多的信息全面地描述整个网络。当数据层转发数据包时,分析平台实时地监控数据层;这样,平台就能够获得精准的数据流量信息。除此之外,平台还会向软件定义网络控制器查询控制层和数据层的状态。为了高效地学习网络的行为并且更全面地了解网络,收集网络不同状态、不同环境下的信息是十分重要的。因此,分析平台会存储所有的历史数据。
- 分析平台→机器学习:机器学习算法可以从知识定义网络的网络行为中学习知识。当前和历史信息用来给算法提供数据集,最终会生成网络的抽象模型。机器学习的方式有 3 种:监督学习、非监督学习、强化学习。
- 机器学习→北向控制器接口:知识层的存在缓解分析平台收集的遥测数据与控制具

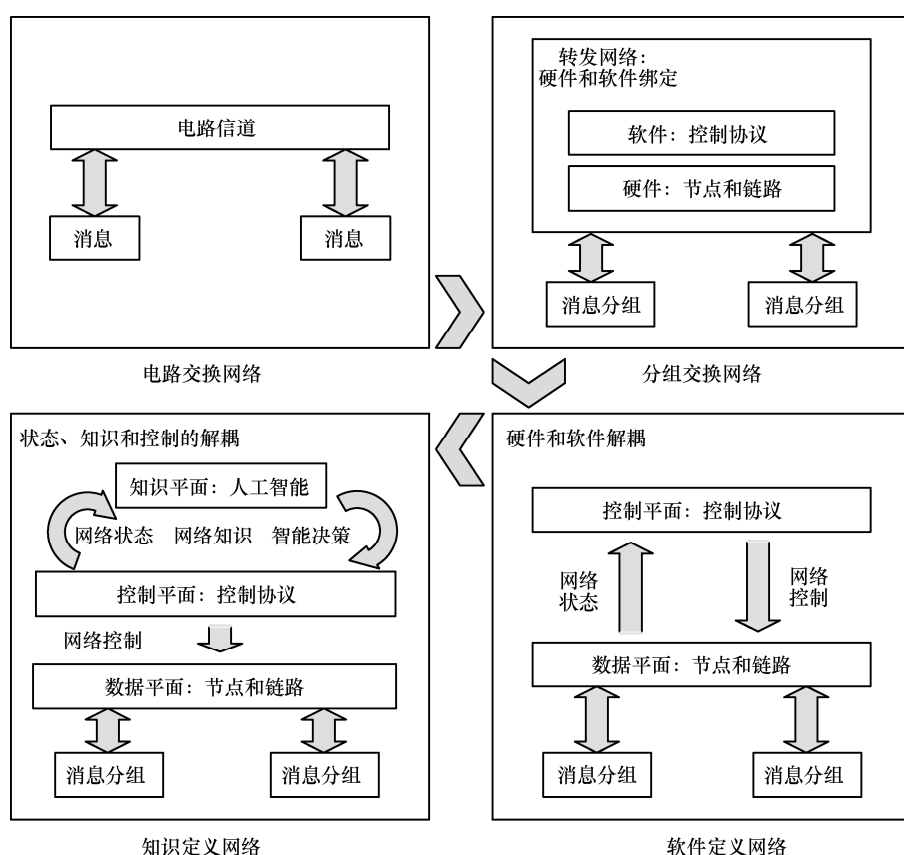


图2 知识定义网络的发展历程

体操作过程之间的差距。传统上，网络运营商必须从网络测量中收集的指标进行研究，并决定如何对网络采取行动。在知识定义网络中，这个过程中的一部分负担分给了知识层。知识层的优势是可以利用机器学习自动为运营商管理网络提出建议。

- 北向控制器接口→软件定义网络控制器：北向控制器 API 提供一个通用的“网络意图”接口，供基于软件的网络应用和决策者控制网络元素。网络的使用者通过 API 表达“网络意图”，即其对网络的需求。结合分析平台提供的网络状态与网络知识，使用者的意图会被知识层进一步转化为具体的控制指令。软件定义网络控制器提供的 API 可以是传统的命令式语言，也可以是声明式语言，知识层可以通过训练获得处

理命令式语言或是声明式语言的能力。

- 软件定义网络控制器→转发件：控制命令通过控制器的南向协议被下发到转发设备，这样数据层就可以使用知识层产生的决策运行。

4.2 知识生成

“知识驱动”可以理解为对传统“数据驱动”的升级，知识由数据生成，知识属于一般性数据驱动的高级状态，并具有一定通用性。以全局视角代替具体案例的局部视角，以全局视角打通多个网络管控问题域，将按需服务的相关网络规律、机理、策略凝练为知识，构建全域资源调配的知识空间。引入外部先验知识来提升单纯数据驱动无法满足的效果，机器学习的神经网络模型也是知识的一种载体。如图3所示，网络知识包含4种形式：历史记载、客观现状、主观体验和动作反馈。

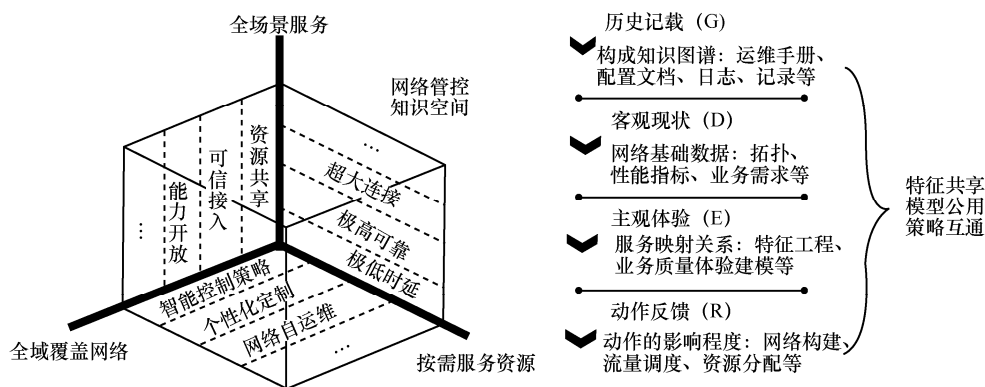


图3 网络知识的4种形式

上述4种形式包含了人类所能总结的知识库、常识库，以及机器所能理解的知识。从网络运维手册、网络设备手册以及网络配置文档等资料中，以机器学习、自然语言处理等自动化的方式构建网络管控知识图谱。网络管控知识图谱是针对网络管控的人类经验知识的抽象，可以用于智能化管控策略的验证与补充，提升网络管控知识的可用性。区别于传统数据驱动，网络管控知识图谱可以更好地解决策略生成的可解释性和逻辑推理的问题，挖掘已经学习的知识点之间的深层关系，推理探索新的知识点。同时，为了适配网络场景的多样性，本文首次提出了特征共享、模型公用、策略互通，进一步提升了知识的通用性和普适性，并通过不断学习，让知识空间自我丰富。通过4方面的素材形成知识空间，通过机器学习、特征工程做知识凝练，把共享的特征输入神经网络，使模型可以共用，支持多种不同的任务，再进一步形成策略，作为最终结果为多种管控任务所用。

通过机器学习把数据凝练成知识，从数据中学习获取有价值的知识（经验策略、性能指标），抽象一些来总结，按照所解决的问题，知识分为三大类，分别是：是什么、为什么和怎么办，如图4所示。

从形态上来看，又可以分为直观的知识形态，比如文字、图片、规则等；以及非直观的知识形态，比如数据标注、逻辑关系、因果关系、算法、

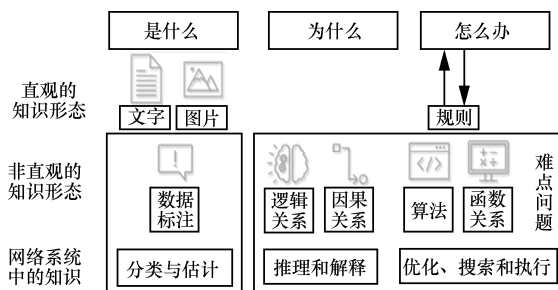


图4 对网络知识的理解

函数关系等。具体到通信网络中的知识，则涵盖了：节点、链路、流量性质的分类与估计；模型的推理与解释；决策的优化、搜索与执行。其中分类和估计是现有工作比较充分的研究点。而后面两项依然是待解决的难点问题。

网络知识表达的一种重要的形式，是结构化的语义知识图谱，以符号形式描述物理世界中的概念及其相互关系。通过自动化和半自动化方式，可以形成实体间关联性的形式化表达，用于描述物理世界中的概念及其相互关系。其基本组成单位是“实体-关系-实体”三元组，以及“实体-属性-值”对，实体间通过关系相互关联，构成网状的知识结构，方便用来做智能运维、智能决策、网络自动驾驶等。

同时，并不限制知识的具体形式，机器学习的模型也可以作为承载知识的载体，通过机器学习生成模型，定义网络策略。虽然已有较多成果利用现有的AI算法如VAE、DRL等来直接解决

网络问题，但是其效果往往不是特别理想，并不是终极解决方案。面对更普适的网络场景，只有打开神经网络的黑盒，提出真正适合网络特性的AI模型，才能进一步真正实现智能网络自治。

知识定义网络区别于其它网络模式的最大特点是其可以利用对知识的分析使用使自己具有“智慧”。因此,确定知识的来龙去脉是尤为重要的。图 5 为目前主流的知识定义网络中知识的形成与运用过程。

首先数据通过一定的规则被分类整理成有相关性的信息，这些信息可以按需被存储在数据库中，以方便调用。接着系统需要通过人工智能对信息进行学习理解产生模型化的知识，通常情况下系统会将知识也存储在数据库中，以便在未来的闭环控制中循环利用知识并提升系统效率。然后根据意图和知识系统进行学习和推理，即通过了解用户、服务等意图匹配相关的知识模型，经过训练学习之后找到满足意图的最优解。最后，网络按照最优解进行调整，新的行为又会产生新

的数据被系统回收，依次往复。

4.3 系统架构

知识定义的意图网络总体架构分为4个平面：用户面、意图面、控制面和数据面，如图6所示。

用户面通过用户意图识别的人网交互机制，实现 6G 网络的随心所欲。不管是用户输入的意图，还是网络内部的修正、优化意图，都会转化为统一的网络意图表达模型。意图转译采用语义匹配和实体挖掘模型相结合方式，利用深度学习方法处理时序长文本，根据预测的语义模版序列，再对长文本意图的实体进行挖掘，其实体挖掘模型采用 LSTM+Attention 层。然后，用户意图需求和网络状态数据都接入“网络知识决策平台”进行智能决策，这也是网络自治内部运行的核心。

知识定义作为意图网络的重要使能技术，将基础网络和神经网络深度融合，构建自学习、自维护的智能网络。经历知识表征、网络编排和策略生成流程，然后生成配置信息通过控制面，自动化下发给数据面。其中，知识表征需要处理当

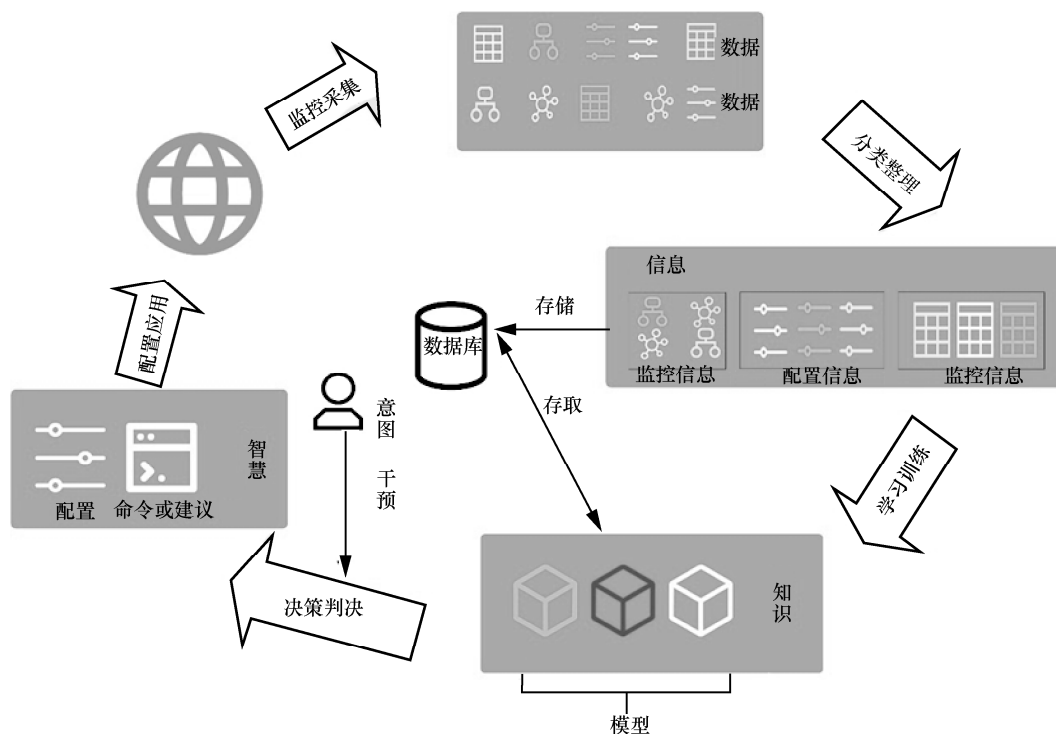


图5 知识的形成与运用过程

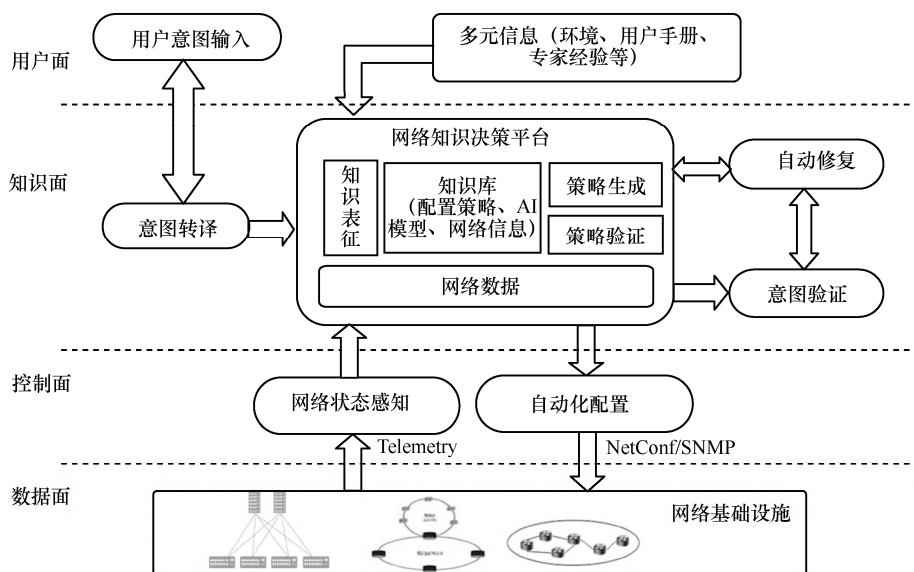


图6 知识定义的意图网络架构

前网络内外部流量状态、全真网络拓扑先验知识、各级用户意图等多模态数据，进行感知识别甚至预测，形成支持多场景决策的形式化表达。引入更多的先验知识，包括拓扑、专家规则、运维经验等，其中数据格式可以包含知识图谱，运维手册，日志以及预训练模型等，经过知识表征后，实现模型共享，使得各种网络策略生成更加高效精准。此外，还特别加入了“策略验证”和“意图验证”双层保证，确保意图表达的完整性、去模糊性，提供意图保障、网络数字孪生和故障自动化修复，突破网络自治的最大瓶颈。

5 智能网络自治的探索

团队前期研发的智能运维产品已经在 4G 和 5G 现网和多个行业都实现了产业应用，汇集运维知识经验和 AI 算法，围绕日志分析、告警压缩、异常检测、根因定位等场景，提供超过 20 种 AI 原子能力，覆盖网络运维业务大部分流程和运维业务需求，如日志解析、故障发现、故障预测、告警聚合、故障定位等。然而，仅仅通过数据驱动的基础机器学习算法，目前的识别准确率，对

异常检测任务还尚可，对根因分析等推理场景效果还不甚理想，距离自治网络的要求还有很大距离，有必要引入外部知识来构建、更新和推理更复杂的外部网络世界。

5.1 图感知的深度学习的智能网络决策算法

机器学习和人工智能技术在网络领域中应用的首要问题是如何设计能够有效理解输入数据的神经网络结构。在其他领域的经验表明，一个与所解决问题高度适应的神经网络结构将极大地提高神经网络模型在该问题上的学习能力。团队提出图感知的深度学习的智能网络决策算法^[20]，将逐跳的路由决策问题建模成从已知网络状态到下一条最优路由的分类问题，并创新性地提出了使用图感知的神经网络层对输入数据进行学习和特征抽取。基于输入数据节点间的拓扑学连接关系，针对路由问题使用介数中心性筛选高度相关的邻域节点，构建图感知的邻域卷积算子，通过该邻域卷积操作实现对输入拓扑结构信息的有效理解和学习。针对逐跳的路由决策，通过根据决策结果逐步修正输入数据，使得输入数据能够包含一定的历史决策信息，提升多跳决策结果的可用性。实验表明，



所提算法能够实现更短的训练时间, 达到更高的决策准确度, 并且达到更高的多跳决策准确度。

5.2 基于案例的智能方案学习与推断算法

基于案例的推断对已有的优化算法加以利用, 实现快速的优化决策^[21]。特别地, 介绍了一个基于深度神经网络的网络状态表征方法, 能够把高维的网络状态转换成低维的特征向量, 并根据此特征向量与案例库中的已有案例进行对比, 挑选最相似的案例进行重用。该系统优于现有的流量分割和流量工程路由方案, 能够以较高的执行速度完成策略推断, 并提供有竞争力的近优解。

对于变化和复杂的新兴网络, 巨大的训练成本阻止了在变化或差异的环境下快速收敛。利用生成对抗网络来学习适用于不同网络环境下基于深度强化学习的路由的域不变特征^[22], 该机制利用了之前的案例模型, 加速了训练过程, 并处理网络状态和拓扑的变化。在生产级软件交换机和控制器中实现了该路由算法, 同时通过多种拓扑和网络状态分布对其进行综合评估, 效果不仅优于现有的基于深度强化学习的路由框架, 而且比朴素迁移学习算法具有更高的训练效率。

5.3 高鲁棒性网络调度算法

通过使用批量马尔可夫到达过程对网络流量模式进行建模, 证明具有高变化、突发性和随机输入的网络路由问题可以建模为马尔可夫决策过程, 并且可以使用基于价值迭代的强化学习方法进行解决^[23]。此外, 深度强化学习模块可以有效地学习和估计长期李雅普诺夫漂移以及惩罚函数, 因此就队列积压量、端到端时延、信息使用年限和吞吐量而言, 它提供了优秀的结果。所提算法在多种设置下均优于基线方法, 并且收敛速度比现有方法快, 在各种拓扑下均具有良好的性能, 因此可以在一般情况下使用。所提出的基于区块链的信息交换协议可以为路由框架提供可信的网络统计信息。

此外, 还解决了动态复杂的物联网场景下的服务功能链映射问题^[24], 将一些复杂的虚拟网络功能分解成一组虚拟网络功能单元和一个内部连接图, 在支持 NFV 的物联网中构建虚拟网络功能转发图。在此模型中, 给出了服务功能链映射问题的环境状态、动作空间和奖励函数。此外, 还利用 DQL 的经验回放和目标网络来提高该方案的收敛性能。

5.4 复杂图网络系统的异常检测

理解了网络拓扑后, 提出将时间序列和图空间特征结合的神经网络检测模型^[25], 可以实现复杂图网络系统的异常检测。为了解决网络中节点设备异常检测、智能运维、根因分析等问题, 针对链路时延、网络吞吐率、设备内存使用率等时序数据, 提出了一种基于图的门控卷积编解码异常检测模型。考虑网络场景的实时性需求以及网络拓扑连接关系对时序数据的影响, 基于门控卷积对时序数据并行提取时间维度特征并通过图卷积挖掘空间依赖关系。基于时空特征提取模块组成的编码器对原始输入时序数据编码后, 卷积模块组成的解码器用于重构时序数据。原始数据和重构数据间的残差进一步用于计算异常分数并检测异常。不同于传统的异常检测针对单点的情况, 加入了网络拓扑中节点间的连接关系, 对时序数据在不同时刻存在的异常波动进行检测。经现网测试, 准确率可以达到 95%, 也有较好的模型泛化能力。

研发出一种基于多阶段机器学习的连续区间异常检测模型^[26], 该模型利用了异常区间的连续性对训练集数据进行筛选, 并对被检出的真/假异常报告进行重新分类, 有效地减少了异常误报的数量。利用滑动窗口提取的多个特征组成的特征集被证明能够较好地描述 KPI 时间序列的特征。

5.5 智能网络自治的服务闭环流程

AI 技术带来的网络智能化价值明显, 但网络最终实现自治仍然面临很多挑战, 实际业务中流

程断点很多,有必要打通各个流程断点,提供服务自动化执行各种 IT 流程工作,实现真正的超自动化。海量网优数据中抽取隐含的关联特征和规则,建立算法模型,优化参数调整策略,提高网络资源利用率以及网络容量。提供了网络自动化管理、故障发现、智能选路(自愈)等功能。基于网络指标异常检测技术实现 6G 网络的闭环控制。

从全局运行流程上来看,意图网络自治的基本理念是将资源分组,每组资源只实现一个简单的功能,将网络中服务的实现分拆成资源工作组的组合。不同层次间的交互通过意图 API 实现,实现意图的过程通过多层闭环完成,使网络的实际状态达到意图所定义的预期状态。如图 7 所示,将需求拆分成每个资源运行组的集合(从右到左),从商业意图(目标)到服务的集合,再到资源的集合,将资源可实现的功能累加成服务、业务的功能,最后满足商业目的(从左到右)。

以路由故障为例,在网络系统出现问题时,必然难以维持用户意图。通过知识加持 AI 技术进行网络分析,快速准确发现故障点,反馈回控制

器进行自决策,找到新恢复路由。自动化交接和自愈流程会保障故障路由流量被无缝地转移到新路由上,不会影响用户体验。

网络运行状态具有高动态性,在使用知识定义方法解决网络路由问题时,如果只使用预先离线训练的方法将面临诸多难点,如训练数据的获取、网络运行状态统计特性改变后的再训练等问题。相比于传统的业务保障机制,基于意图的自治方案可以实现毫秒级信息上报,秒级故障定界定位。再结合控制器的多重保护机制,最终为客户带来故障发生零感知的用户体验。

6 结束语

人类社会、人工智能的发展和演进,发源于知识的传播与传承,而关键点在于设计可解释、可传授的知识表达和知识载体。同样地,一个智能的网络,不但要完成对自身状态的理解和对自身性能的优化,更应当将这一系列知识传播出去,如开环状态下需要人类介入调控的时候恰到好处地提供信息、评估和方法;又或者闭环状态下在不同网络之间交流知识,共同发展,完成网络的

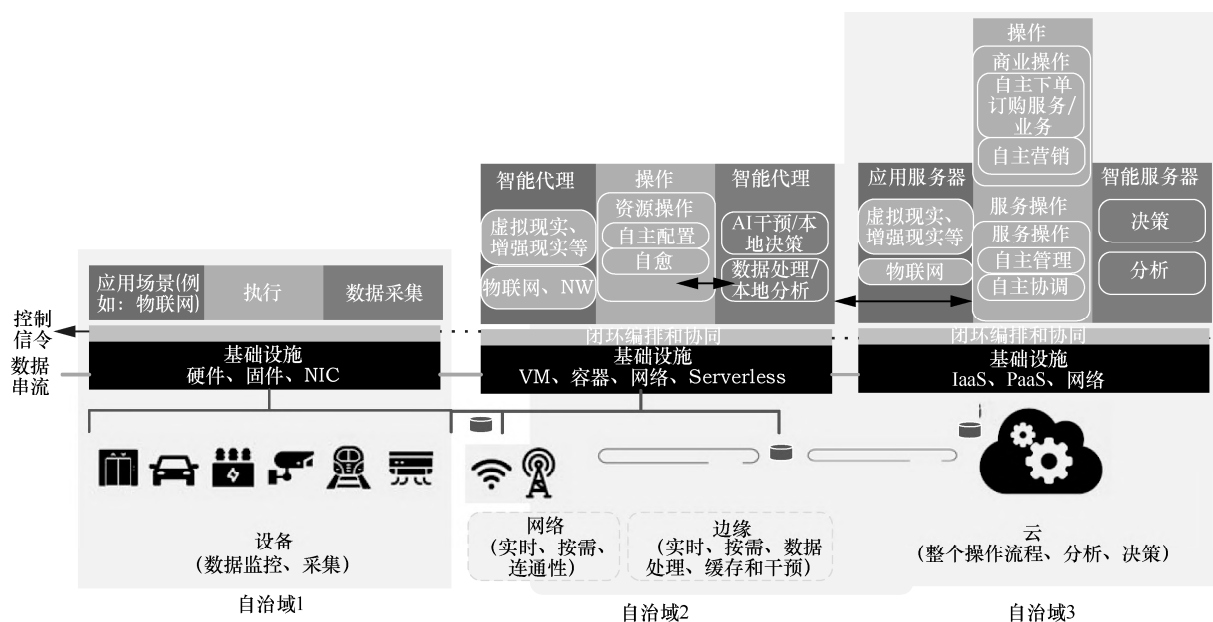


图7 高阶自主网络架构解决方案



自我演进。

为了支撑知识定义的自治管控策略, 需要构建知识空间, 以逻辑集中化的 AI 平台为智能引擎, 为 6G 网络管控平台和网元赋予 AI 认知能力。基于这样的架构, 可以实现知识赋能网络自治, 并完成意图从规划到创建再到优化的全生命周期闭环维护, 有朝一日实现无人值守的网络自动驾驶。

知识定义的意图网络自治研究为智能网络自治构想了一条路线, 通过构建人工智能和大数据引擎, 考虑不同网络层次的特点, 进行解耦设计、微模块化实现、分层部署; 同时聚焦高价值场景、按需引入 AI 能力、逐步推进, 这必然是一个长期过程, 此历程需要汇聚产业合力, 最终实现泛在的业务网络智能化与全面的智能网络自治。

参考文献:

- [1] 张平, 许晓东, 韩书君, 等. 智简无线网络赋能行业应用[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(6): 1-9.
ZHANG P, XU X D, HAN S J, et al. Entropy reduced mobile networks empowering industrial applications[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(6): 1-9.
- [2] 华为技术有限公司. 智简网络 (IDN) 白皮书[EB]. 2019.
Huawei Technologies Co., Ltd.. Intent-driven network white paper[EB]. 2019.
- [3] ZEYDAN E, TURK Y. Recent advances in intent-based networking: a survey[C]//Proceedings of 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [4] SZIGETI T, ZACKS D, FALKNER M, ARENA S. Cisco digital network architecture: intent-based networking for the enterprise[M]. New Jersey: Cisco Press, 2018.
- [5] LAURIER W. Blockchain value networks[C]//Proceedings of 2019 IEEE Social Implications of Technology (SIT) and Information Management (SITIM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [6] VALTANEN K, BACKMAN J, YRJÖLÄ S. Creating value through blockchain powered resource configurations: analysis of 5G network slice brokering case[C]//Proceedings of 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). Piscataway: IEEE Press, 2018: 185-190.
- [7] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信感知计算融合: 6G 网络愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021: 1-10.
YAN S, PENG M G, WANG W B. Integration of communication, sensing and computing: the vision and key technologies of 6G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021: 1-10.
- [8] 姚惠娟, 陆璐, 段晓东. 算力感知网络架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术, 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.
- [9] 华为技术有限公司. 自动驾驶网络解决方案白皮书[R]. 2020.
Huawei Technologies Co., Ltd.. ADN solution white paper (autonomous driving network)[R]. 2020.
- [10] CLARK D D, PARTRIDGE C, RAMMING J C, et al. A knowledge plane for the Internet[C]//SIGCOMM '03: Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, 2003: 3-10.
- [11] ETSI. Experiential networked intelligence (ENI); system architecture: ETSI GS ENI 005[S]. 2019.
- [12] 3GPP. Telecommunication management; study on scenarios for Intent driven management services for mobile networks: TR 28.812[S]. 2020.
- [13] 通信世界网. 中国移动牵头 3GPP 成立自治网络分级标准项目[N]. 2020.
Communication World Network. China Mobile leads 3GPP to establish autonomous network classification standard project[N]. 2020.
- [14] ITU. Focus group on machine learning for future networks including 5G[S]. 2020.
- [15] Gartner. Innovation insight: intent-based networking systems[EB]. 2017.
- [16] GSMA. AI in network use cases in China[S]. 2019.
- [17] ITU-T. Framework for evaluating intelligence levels of future networks including IMT-2020: ITU-T Y.3173[S]. 2020.
- [18] MESTRES A, RODRIGUEZ-NATAL A, CARNER J, et al. Knowledge-defined networking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2017, 47(3): 2-10.
- [19] 朱近康. 知识+数据驱动学习: 未来网络智能的基础[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(4): 46-49.
ZHU J K. Knowledge-and-data driven learning: foundation of future network intelligence[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(4): 46-49.
- [20] ZHUANG Z R, WANG J Y, QI Q, et al. Toward greater intelligence in route planning: a graph-aware deep learning approach[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(2): 1658-1669.
- [21] ZHUANG Z R, WANG J Y, QI Q, et al. A case-based decision system for routing in packet-switched networks[C]//Proceedings of 2018 IEEE 37th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC). Piscataway: IEEE Press,

2018: 1-2.

- [22] DONG T J, QI Q, WANG J Y, et al. Generative adversarial network-based transfer reinforcement learning for routing with prior knowledge[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(2): 1673-1689.
- [23] ZHUANG Z R, WANG J Y, QI Q, et al. Adaptive and robust routing with Lyapunov-based deep RL in MEC networks enabled by blockchains[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(4): 2208-2225.
- [24] FU X Y, YU F R, WANG J Y, et al. Dynamic service function chain embedding for NFV-enabled IoT: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(1): 507-519.
- [25] WANG J Y, JING Y H, QI Q, et al. ALSR: an adaptive label screening and relearning approach for interval-oriented anomaly detection[J]. Expert Systems With Applications, 2019, 136: 94-104.

[作者简介]



王敬宇（1978-），男，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为智能网络、机器学习、边缘计算等。



周铨（1979-），男，中国移动通信有限公司研究院项目经理，主要研究方向为 IP 网络技术和网络智能化。



张蕾（1978-），女，中国联合网络通信集团有限公司高级工程师，主要研究方向为通信网络、云网融合、人工智能等。

刘聪（1980-），男，博士，中国移动通信有限公司研究院高级工程师，主要研究方向为人工智能、物联网等。

庄子睿（1993-），男，博士，北京邮电大学在站博士后，主要研究方向为网络智能路由、资源优化、机器学习等。

杨红伟（1982-），男，中国移动通信有限公司研究院项目经理，主要研究方向网络智能化、网络性能测量。

陈丹阳（1995-），女，中国移动通信有限公司研究院研究员，主要研究方向为数字孪生网络和意图网络。

朱艳宏（1992-），女，中国移动通信有限公司研究院算法模型研究员，主要研究方向为网络智能化、6G 新技术。

陆璐（1979-），女，中国移动通信有限公司研究院网络与 IT 技术研究所副所长，CCSA TC5 核心网组组长，主要研究方向为移动核心网、未来网络架构、边缘计算等。

廖建新（1965-），男，博士，北京邮电大学网络智能研究中心主任、教授、博士生导师，教育部长江学者特聘教授，主要研究方向为网络智能化、IMS/NGN 增值业务技术。