

新型网络技术创新发展战略研究

李丹, 胡宇翔, 鄂江兴

(战略支援部队信息工程大学, 郑州 450002)

摘要: 日益增长的新业务需求和互联网经济的持续发展对网络通信与服务能力的要求都在不断增加, 现有网络基础架构及由此构建的技术体系正面临一系列重大挑战, 新型网络架构与关键技术已经成为全球新一轮科技革命和产业升级的核心, 亟需开展我国新型网络技术创新的战略构想和发展路径研究。本文对当前网络技术面临的挑战进行分析研判, 讨论了国内外新型网络领域的发展现状, 概括了新型网络技术发展趋势; 总结了我国在新型网络领域的差距和发展目标, 从新型网络架构、网络全维可定义技术、多模态寻址路由技术、网络智能化技术、内生安全构造等方面, 提出了我国新型网络发展的关键技术和对策建议。在技术路线层面, 建议发展开放、融合、安全的新架构, 构建具有智慧化、多元化、个性化、高鲁棒、高效能等特性的新型网络环境; 在国家政策层面, 建议从技术研发、产业生态构建、市场准入等角度入手, 给予相应的研发计划、示范应用、产品扶持等政策支持。

关键词: 新型网络架构; 全维可定义; 多模态寻址路由; 网络智能化; 内生安全构造

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Innovative Development Strategy of New Network Technologies

Li Dan, Hu Yuxiang, Wu Jiangxing

(PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The ever-increasing demand for new businesses and the continuous development of the Internet economy have increasingly demanded network communications and service capabilities, and the infrastructure and the deriving technology system of the existing network still face a series of major challenges. New network architectures and key technologies have become the core of a new round of technological revolution and industrial upgrading in the world. Therefore, studying the strategic conception and development paths of new network technology innovation becomes an urgent need for China. In this article, we analyze the challenges faced by the current network technology, discuss the development status of new network fields in China and abroad, and summarize the development trend of new network technologies. Subsequently, we summarize the gaps and development goals of China in the new network field. Finally we propose the key technologies for the new network development in China, including new network architecture, network full-dimension definable technology, polymorphic addressing and routing technology, network intelligence technology, and endogenous security structure. From the aspect of technology roadmap, we suggest that an open, integrated, and secure new architecture should be established to build a new network environment that is intelligent, diversified, personalized, robust, and efficient. From the aspect of national policy, we suggest that support policies should be formulated regarding technology research and development, industrial ecology construction, and market access.

Keywords: new network architecture; full-dimension definable; polymorphic addressing and routing; network intelligence; endogenous security structure

收稿日期: 2021-01-16; **修回日期:** 2021-02-20

通讯作者: 李丹, 战略支援部队信息工程大学副研究员, 研究方向为新型网络体系架构与核心技术; E-mail: pkulidan@foxmail.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“网络强国”(2020-ZD-14)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

随着信息通信网络技术的不断发展，互联网逐渐成为与国家发展、人民生活息息相关的重要基础设施，对国民经济建设、人民生活水平提高产生了深远的影响。互联网与人类社会深度融合，传统的端到端模式已经不能满足人们对网络的使用需求；海量内容获取、高清视频直播、低延迟远程控制等新兴业务的不断涌现，物联网、区块链、云计算等创新技术的快速发展，为传统产业转型升级提供了强大的应用需求、基础设施与服务平台支撑，为经济发展提供了新动能 [1]。

新型网络指对现有网络基础架构及由此构建的技术体系进行变革和创新的网络 [2]。近年来，新型网络架构一直都是全球学术界和产业界的关注焦点。随着大数据、云计算、人工智能（AI）、软件定义网络/网络功能虚拟化（SDN/NFV）、第五代移动通信技术（5G）的深入研究，新型网络技术与演进已经成为重要的国家战略和发展契机，相关成果已经得到了初步应用，展现出了一定的生命力和市场前景 [3]。

本文针对我国新型网络技术的创新发展战略进行研究，首先对当前网络技术发展面临的挑战进行分析研判，讨论全球新型网络技术的发展现状和趋势，其次总结我国新型网络技术发展面临的差距和发展目标，最后从新型网络架构、网络全维可定义技术、多模态寻址路由技术、网络智慧化技术、内生安全构造等方面，提出我国新型网络发展的关键技术，并从技术发展和国家政策两个层面提出对策建议。

二、网络技术发展挑战分析研判

据《第47次中国互联网络发展状况统计报告》统计，截至2020年12月，我国网民规模达到9.89亿人，互联网普及率为70.4%；网民的年龄分布、学历层次、职业结构、收入水平呈现多元化特点，个性化的新型应用发展迅猛。全国一体化政务服务平台推出的“防疫健康码”累计申领近9亿人，使用量超过400亿人次；在线教育和在线医疗逐渐成为常态，网络新闻、网络购物、手机支付等用户年增长率接近10%，网络文学、网络音乐、网络

理财、网上外卖、即时通信的用户规模也取得高速增长；以短视频应用为代表的网络视频使用率达到93.7%。随着网络用户的不断增多、网络规模不断扩大，多种多样的业务需求在灵活性/扩展性、差异化/定制化服务、移动性支持、全域运维管理、安全可信等方面给新型网络创新发展提出了诸多挑战。

一是灵活性/扩展性挑战。伴随着网络技术的不断发展，接入网络的通信主体种类和数量也越来越多，不同类型、不同形式、不同功能的设备都可以接入网络，连接将变得无处不在；各种各样的终端按需接入、随时联网，使得网络拓扑、通信环境变得复杂且不确定；新设备、新技术、新协议、新业务不断出现，单一的网际互连协议（IP）网络难以支撑新兴业务需求，使得新兴业务的灵活部署和优化变得越发困难。

二是差异化/定制化服务挑战。网络中的业务种类和数量呈井喷式增长，不同的业务对网络功能类型、传输处理性能及安全等级有着不同的需求，同类业务在不同时刻、不同场景下对网络的需求也会发生变化。网络中的新兴业务对定制化服务能力提出了更高要求，如超低时延需求、确定性时延需求、高通量传输需求等。现有网络服务模式难以支持不同业务的差异化、定制化服务需求，丢包重传的可靠性传输机制制约了时延和吞吐率性能提升，多业务并发带来的数据包同步、乱序等问题也间接影响高带宽、低时延业务的性能表现，亟待发展更加高效的调度编排策略与同步机制。

三是移动性支持挑战。随着手机、平板电脑、智能手环等便携式移动设备的快速更新换代，网络终端的数量和移动性显著增加，数据传输路径需要频繁变换，使得移动性管理问题凸显。大量设备的同时移动将引发巨量信令，对现有网络带来巨大的信令冲击；移动设备在不同的网络接入点之间切换，网络拓扑实时变化，传统基于网络拓扑结构的经典路由协议难以直接应用。现有网络移动协议虽然能够解决移动性问题，但同时引入了嵌套移动网络路由问题，且移动路由器失效与性能瓶颈、接入点切换性能下降问题仍然没有得到较好解决。这些问题严重影响了网络移动技术的广泛应用和进一步发展。

四是全域运维管理挑战。伴随着电脑、手机、

汽车等物理通信主体数量的急剧膨胀, 虚拟通信主体如虚拟机、容器、进程、线程、函数等通信需求的增长速度也相当可观; 通信连接数量呈现爆炸式增长, 网络已经不再单单是数据包的转发, 而是融入存储和计算, 形成连通、存储、计算等各种资源有机组合的复杂系统。网络管理和运维需要统筹考虑全域的连通、存储、计算资源, 现有网络 IP 地址不能直接标识各类网络通信主体, 不仅配置复杂、管理困难, 而且无法反映网络业务多样化的寻址需求。

五是安全可信挑战。安全可信已经成为评价网络系统性能的核心要素之一; 完整的安全可信机制, 既要保证网络中各个组成单元的安全, 又要保证通信双方身份的可信; 在端到端通信过程中实时监督通信的真实性、隐私性、机密性, 当网络故障或网络攻击出现时, 网络系统还要保持一定的可用性。现有网络安全体系本质上是基于网络边界并依赖先验知识的“外挂式+补丁式”防御体系, 其防御效果取决于清晰的防御边界、完备的先验知识、精确的感知能力; 既无法防御缺乏先验知识的未知攻击等不确定性威胁, 也很难适应防御边界日益模糊的场景, 整个互联网的安全保障处于被动应对的状态, 网络的安全可信无法得到充分保障。

三、新型网络技术发展现状

近年来, 新型网络一直是学术界和产业界关注的焦点。新型网络技术与演进已经成为重要的国家战略和发展契机, 各国政府均高度关注该领域的研究进展, 积极出台相关法律和政策, 鼓励探索新型网络发展的解决思路和技术方案。

(一) 国外新型网络发展现状

为了加快网络技术的创新发展, 美国国家科学基金会 (NSF) 实施了全球网络创新环境计划 [4], 之后对 4 个未来互联网体系结构项目进行了持续资助, 分别是命名数据网络 (NDN)、移动优先 (MobilityFirst)、星云 (NEBULA)、表现式互联网架构 (XIA)。网络与信息技术研究与发展计划公布的 2021 财年预算包含了人工智能与大规模网络等 11 个重点领域, 主要研究软件定义基础设施、未来网络架构与协议等。先进制造伙伴计划 [5] 是美

国“再工业化”战略中的重点创新计划, 提出了构建“国家制造业创新网络”的目标, 重点突破信息物理系统、先进传感与控制、大数据分析、可信网络、高性能计算、信息安全等关键技术, 为工业互联网的发展和应用提供有力支撑。

从 2014 年开始, 欧盟提出 Horizon 2020 研究计划 [6], 在 7 年时间内总投入达 800 亿欧元, 助力新型网络科研成果的创新和产业化。2017 年, 欧盟宣布在 2018—2020 年继续实施第二阶段研究计划, 支持以 5G、超五代移动通信系统 (B5G) 为代表的新型网络技术研究工作。2017 年, 欧洲电信标准化协会 (ETSI) 批准成立了网络人工智能标准工作组 (ENI) [7], 研究范围包括分析传统网络、SDN/NFV 网络中的运维需求, 引导运营商构建自适应感知、灵活策略定义支撑、智能化决策与执行的体系架构。

(二) 国内新型网络发展现状

我国对新型网络技术领域给予了高度关注和重视。紫金山实验室、北京邮电大学等单位联合提出了服务定制网络 [8] 的设计理念; 基于软件定义网络设计, 继承了数据控制分离、网络可编程等主要特点, 增加了网络虚拟化能力、内容智能调度能力。北京交通大学提出了一种未来网络新型体系架构 (一体化标识网络) [9], 对传统信息网络的分层结构模型进行了更新; 模型由网络层面和服务层面组成, 前者完成网络一体化, 后者实现服务普适化。清华大学牵头构建的未来网络创新环境 (FINE) 平台 [10], 包含开放设备、网络操作系统、虚拟化平台、上层业务; 支撑各种新型网络体系结构和 IPv6 新协议的研究试验, 支持真实源地址验证的下一代互联网架构。战略支援部队信息工程大学提出的多模态智慧网络 [11], 由多模态网元设施、各种介质传输/传送网、多种或多个运行在标准化即插即用软硬件接口上的网络模态、智能化运维管理系统组成。相应网络模态通过标准化软硬件接口从多模态网元设施获得所需的计算/存储/交换资源, 各种网络模态的技术演进、业务发展、应用创新、运维管理属于原有的网络体系, 各自独立部署或演进发展; 网络模态的技术体制与多模态网络支撑环境相分离, 在机理上保证多模态网络不与已有或未来的网络技术体制以及多样化的垂直

行业应用相兼容，而且确保多种或多个网络模式之间具有足够的隔离度。

（三）新型网络技术的发展趋势

综合分析当前网络发展的挑战、国内外新型网络技术的发展现状，可以发现新型网络发展整体呈现以下趋势：一是建立开放、灵活、通用的新型网络架构，提高网络控制和管理的灵活性，增强对网络新技术、新协议的支持能力，充分满足新型网络不断演进的业务需求；二是提供数据转发平面的可编程能力，使得网络及设备完全由软件定义，自上而下、彻底地向用户开放；三是实现超低时延/确定性时延的网络传输，使得网络从“尽力而为”向“准时、准确、快速”转变；四是将（AI）技术应用于网络，通过网络的智能化或智能子系统更加便捷高效地提供优质网络服务；五是网络与云的敏捷打通、按需互联，云和网高度协同而不再各自独立，承载网络可根据各类云服务需求开放网络能力；六是支持内生安全，提升网络服务的抗入侵能力和安全性能。

四、我国新型网络发展的差距

近年来，我国网络与通信技术加速由跟随发展转向创新驱动，突出理论基础创新，不断在关键技术研究方面冲击国际先进水平，取得了一批具有较大影响力的创新成果，初步实现技术发展由跟跑与部分并跑到部分并跑与少量领跑的突破。在新型网络领域，我国紧跟全球未来互联网体系架构研究的最新进展，自主提出多个未来网络的体系架构和系统理论，在 IPv4/IPv6 互通、SDN/NFV、源地址认证、情景网络、智慧标识网络、服务定制网络、全维可定义网络、试验网络基础设施等方向取得了特色发展。

也要注意，在战略性的超前研究、基础理论、系统与概念创新、操作系统、核心器件、关键材料和工艺装备等方面，我国的综合实力仍相对薄弱，与第一梯队的美国差距较大，与德国、英国、日本、韩国等国家同处于第二梯队，核心技术受制于人的局面没有得到根本性改变。我国与世界先进国家的差距主要体现在：一是基础研究有待加强，原创性、基础性、先导性的理论研究亟待重大突破，在国际

上具备引领地位的创新技术基础理论较为缺乏；二是新型网络核心技术的对外依赖度高，面临“在别人墙基上砌房子”的现实挑战，现有研究大多基于国外科研团队的核心技术，具有自主知识产权的核心技术亟待创新；三是自主创新技术产业生态有待完善，虽然在全维可定义网络、网络内生安全等方向获得一定进展，但是个别的单点突破尚未形成集群优势，产业配套能力有待增强。

五、我国新型网络发展的目标

（一）面向 2035 的总体目标

在新型网络创新发展方面，我国网络强国的总体目标是：以承接国家战略为导向，把握信息技术向智慧化、多元化、个性化、高鲁棒、高效能等方向发展并逐步升级换代的历史机遇，研究自主创新的新型网络体系结构及其核心技术；发展面向人-机-物泛在互联、智慧化、可演进的新型网络环境，形成新型网络总体架构和核心产品的系列化技术规范、测评标准和专利群；为我国信息网络技术创新和产业升级提供可能的基础理论和总体架构指导，为网络技术创新和设备研发提供支撑环境，为我国网络强国战略的实施提供相应的核心技术与能力支撑。

（二）阶段性目标

第一阶段（2021—2025 年），我国新型网络的发展目标是：研究自主创新的新型网络体系结构及其核心技术，在基础理论研究、关键设备研制、系统集成方面取得一批突破性成果，构建新型网络核心专利和标准规范体系。新型网络创新对国家经济社会各领域的战略性基础性普惠效应初步显现。

第二阶段（2026—2030 年），我国新型网络的发展目标是：在新型网络核心技术取得突破性进展的基础上，完成具有自主知识产权的新型网络核心芯片、设备、系统研制；建设国际一流水平的新型网络试验环境，通过大规模组网验证新型网络架构和支撑技术的实际效能；完成新型网络核心部件与系统的产业布局，部署新型网络示范工程的推广应用。新型网络技术和产品开始应用于部分典型场景，取得一定的经济社会效益。

第三阶段（2031—2035 年），我国新型网络的

发展目标是：以增量部署的形式，将新型网络逐步应用于核心网络、垂直行业网络、数据中心网络等典型应用环境；推动信息向新型网络的演化过渡，孵化具有国际竞争力的创新型科研平台和企业厂商，形成开放、融合的新型网络技术和产业发展生态环境。新型网络技术和产品得到广泛应用，产生显著的经济社会效益。

六、新型网络发展的关键技术

（一）新型网络体系架构

针对信息网络的智慧化、多元化、个性化、高鲁棒、高效能等发展需求，将网络技术体制与支撑环境分离，最大程度释放新兴应用驱动的网络技术体制创新活力，显著降低新型网络体制的应用部署与服务提供门槛 [12]。提出网络基线技术全维可定义的技术理念，构建开放融合的新一代信息通信网络基础设施，营造各种网络体制共生共存、安全可信、开放开源的多样化网络生态；以可编程“即插即用”接口适配各类网络体制与垂直行业应用场景，力求根本性改变既有网络技术体制与应用部署的排他性演进方式，创建支持进化与突变兼容并蓄的网络技术发展范式。

新型网络架构将 AI 技术、内生安全构造嵌入到网络体系中，通过 AI 与网络技术深度融合，构建基于全局视图、协调统一、自主认知的智能控制系统，实现网络基础设施智能化、网络控制智能化、网络管理智能化，大幅度降低网络的运维成本，显著提升网络运维的效率和便捷性。通过将网络安全设备与接入模式、部署方式、实现功能进行解耦，在网络中植入基于动态异构冗余的内生安全结构，有效应对网络软硬件设计过程中不可避免的安全漏洞及后门，维持不确定扰动下系统服务功能和性能的鲁棒性，实现端到端通信业务安全、网络基础设施安全。

基于上述新型网络体系架构，新型网络关键技术如图 1 所示，以全维可定义的开放式体制适配多元化垂直行业网络发展需求，打造包容性、多元化的网络生态环境；以多模态寻址路由支撑更加多元化的高性能服务，促进网络空间和现实物理空间的服务融合；以网络智慧化技术为网络多元业务需求智慧适配时变服务，支撑网络的智慧化传输、管理、

运维，显著提升网络效能；以拟态构造为内生安全基因，注入到网络运行的各环节，构建高鲁棒、高可信、高可用网络。



图 1 新型网络关键技术

（二）网络全维可定义技术

网络基线一般由协议体系、交换模式、控制机制 3 个维度的功能组成。网络全维可定义技术指，基于面向领域的软硬件协同处理架构（DSA）和软件定义硬件方法（SDH），对协议体系（物理 / 链路 / 网络）、交换模式（电路 / 分组）、控制机制（共路 / 随路）等网络基线功能进行现场可定义的工程实现技术 [11]。

凡是按照网络技术体制、网络所支持的行业应用、网络的运维体系、网络部署等方式定义的物理实体网络，都可以抽象为一种能通过标准化软硬件接口运行的网络模态。基于网络全维可定义技术，可以构建支持多种或多个网络模态共生运行的物理网元设施。通过标准化的即插即用接口，为多种网络模态定义的寻址方式、报文格式、路由协议、信令方式、计算 / 存储 / 转发机制、交换方式、调度策略、安全机制、服务质量、运维管理等提供技术实现层面的软硬件支持；具有网元环境中软硬件资源的智能化动态分配、管理、保障功能，支撑多种或多个网络模态及相关应用在网元设施上的独立部署、运行或运营。

（三）多模态寻址路由技术

在网络体系结构中内嵌新型的寻址与路由功能要素，实现对 IP、内容标识、身份标识、地理空间标识等多模态标识共存与协同的支持 [13]。基于身份标识的寻址路由方式提升多样化终端接入的灵活性和服务一致性，从本质上解决终端移动性问题，有效提高网络可管可控能力。基于内容标识的寻址路由方式在网络节点中融入计算、存储、传输能力，在感知数据内容、预测用户需求的基础上，实现以用户为中心的网络数据自适应流动和汇聚机制，使

用户获得高效的内容获取体验。基于地理空间位置标识的寻址路由方式根据网络空间与地理空间的相互映射关系，完成地理空间定制化服务，如对某区域内所有上网用户进行消息推送、对热点区域用户进行服务推荐等；还支持网络安全部门对某网络地址进行实时追踪、对突发事件的人员统计等任务。

多模态寻址路由技术通过实时需求分析灵活实现对网络状态、用户需求、服务类型、安全需求的自动适配，并在数据传输过程中按照不同传输环节特征进行智能标识空间切换，从而在根本上解决传统网络只能通过 IP 进行标识的瓶颈问题，满足不断涌现的多元化、专业化新兴服务需求。

（四）网络智慧化技术

以深度学习、增强学习等 AI 技术为依托，以网络传输效能、节点运行效能、业务承载效能、服务提供效能等为约束，在网络测量、功能编排、流量调度、运维管理等方面进行智能控制并自我优化，从而构建“感知-决策-适配”一体的智慧化管理控制闭环，满足不同业务的差异化服务质量需求，实现对复杂网络的精细化、精准化管理 [14]。

网络智慧化技术灵活定义感知对象、感知动作、关联规则，通过对探针报文格式和内容、探测路径、测量原语、编排调度控制等测量功能的灵活可编程定制，实现对底层网络环境的精准测量感知，并基于高层感知语义的统一描述模型生成全网视图。利用 AI 技术对全网视图进行快速分析，实现复杂多样化业务与资源间的拟合决策：训练智能路由调度策略，解决传统依靠人工预先制定策略在复杂多变的网络运行环境下动态适应性较差的问题；训练智能资源编排策略，解决传统基于人工分析和决策难以在实时运行过程中对复杂多变的状况进行细致考虑等问题；训练智能运维管理策略，解决网络运维过程中人为分析存在处理周期长、专业依赖性强、难以多层次关联等问题。

（五）内生安全构造技术

内生安全指利用技术系统自身架构、功能与运行机制等内源性效应而获得的可量化设计、可验证度量的安全功能；作用域同时涵盖可靠性和可信性领域，功能有效性既不依赖关于攻击者的先验知识

或特征信息，也不依赖（但可以融合）外挂式的传统安全技术，仅以架构特有的内生安全机制即可实现基于目标系统内生安全问题的确定或不确定威胁抑制功能。利用内生安全构造的运行机制能够自然地融合当前或未来的防御技术与安全手段，高效构建集先天性免疫“面防御”与后天性免疫“点防御”为一体的融合式防御体系，既能精确抑制特征行为清晰的网络攻击，也能有效管控未知形态的不确定安全威胁。“改变攻防不对称游戏规则”的变革性意义在于，有望彻底抵消基于“隐匿漏洞、设置后门”的不对称战略优势，也预示“可设计、可验证”的内生安全必将成为新一代信息系统或控制装置的标志性功能 [15]。

内生安全功能源于独特的动态异构冗余架构、广义鲁棒控制机制导致的“测不准”效应，所形成的时空不一致防御迷雾使得攻击者在理论和工程上不可能反推出网络系统的实现结构、运行机制、缺陷问题，从而给攻击者利用目标对象中存在的攻击资源（如漏洞后门、病毒木马等）达成安全威胁的过程实现带来了难以克服的挑战，从根本上颠覆了当前基于软硬件设计脆弱性或缺陷的攻击理论与方法。

七、对策建议

（一）技术发展建议

在推动网络增量式部署、演进式发展的同时，利用新思路、新方法对互联网技术体系进行基础性变革，构建新型网络体系架构和技术体系，成为大势所趋。我国新型网络技术的发展路线建议为：在外部需求的牵引下，加强网络技术领域创新，促进技术研发由外挂式向内生性转变；发展开放、融合、安全的新架构，以全维可定义架构适配业务需求，整合新兴技术助力网络发展，构建具有智慧化、多元化、个性化、高鲁棒、高效能等特性的多模态智慧网络；使得新型网络为用户提供新服务、新智慧、新安全，支撑网络的智慧化传输、管理、运维，增强网络的高可信、高可用、高鲁棒三位一体服务。

（二）政策建议

第一，部署国家专项重点研发计划，持续支持新型网络技术发展。不断深化多模态智慧网络理论

研究, 创立有国际影响力的学术技术品牌。营造产业发展生态, 体系化布局新型网络原生技术、基础共性技术和标准与测评技术, 推动形成覆盖专利群、硬件工具库、标准规范在内的技术支撑体系, 构筑技术推广应用生态环境。

第二, 布局行业领域示范应用专项, 推动技术深化应用。面向国家安全和国民经济发展主战场, 聚焦新一代云化信息基础设施、工业互联网等行业领域, 实施研发布局和示范应用, 打造行业应用标杆, “以点带面” 推动新型网络技术再创新和发展。

第三, 制定新型网络技术推广政策, 加速产品快速落地。针对现有新型网络技术在产业落地层面存在的壁垒问题, 加快制定新型网络技术标准、技术产品测评方法; 出台积极的产业扶持政策, 降低新型网络产品市场准入门槛, 提高各行业采用新型网络技术路线的积极性。

参考文献

- [1] Wu J X. Thoughts on the development of novel network technology [J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61: 1–10.
- [2] 邬江兴, 兰巨龙, 程东年. 新型网络体系结构 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
Wu J X, Lan J L, Cheng D N. Novel network architecture [M]. Beijing: Posts & Telecom Press Co., Ltd., 2014.
- [3] 黄韬, 刘江, 霍如, 等. 未来网络体系架构研究综述 [J]. *通信学报*, 2014, 35(8): 184–197.
Huang T, Liu J, Huo R, et al. Review of future network architecture [J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(8): 184–197.
- [4] Elliott C. GENI-global environment for network innovations [C]. Montreal: The 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks, 2008.
- [5] Anonymous. Advanced manufacturing partnership hailed [J]. *Manufacturing Engineering*, 2011, 147(2): 17–18.
- [6] Soldani D, Manzalini A. Horizon 2020 and beyond: On the 5G operating system for a true digital society [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2015, 10(1): 32–42.
- [7] Wang Y, Forbes R, Caviglioli C, et al. Network management and orchestration using artificial intelligence: Overview of ETSI ENI [J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(4): 58–65.
- [8] 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 network [J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(12): 1–9.
- [9] Zhang H, Quan W, Chao H C, et al. Smart identifier network: A collaborative architecture for the future Internet [J]. *IEEE Network*, 2016, 30(3): 46–51.
- [10] 毕军. SDN体系结构与未来网络体系结构创新环境 [J]. *电信科学*, 2013, 29(8): 6–15.
Bi J. SDN architecture and future network innovation environment [J]. *Telecommunication Science*, 2013, 29(8): 6–15.
- [11] 胡宇翔, 伊鹏, 孙鹏浩, 等. 全维可定义的多模态智慧网络体系研究 [J]. *通信学报*, 2019 (8): 1–12.
Hu Y X, Yin P, Sun P H, et al. Research on the full-dimensional defined polymorphic smart network [J]. *Journal on Communications*, 2019 (8): 1–12.
- [12] 邬江兴. 新型网络技术发展思考 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48(8): 1102–1111.
Wu J X. Thoughts on the development of novel network technology [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2018, 48(8): 1102–1111.
- [13] Hu Y, Li D, Sun P, et al. Polymorphic smart network: An open, flexible and universal architecture for future heterogeneous networks [J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2020 (99): 1.
- [14] 兰巨龙, 于倡和, 胡宇翔, 等. 基于深度增强学习的软件定义网络路由优化机制 [J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(11): 2669–2674.
Lan J L, Yu C H, Hu Y X, et al. A SDN routing optimization mechanism based on deep reinforcement learning [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2019, 41(11): 2669–2674.
- [15] Hu H, Wu J, Wang Z, et al. Mimic defense: A designed-in cybersecurity defense framework [J]. *IET Information Security*, 2018, 12(3): 226–237.