

# 未来网络与工业互联网发展综述

吴文君<sup>1,2</sup>, 姚海鹏<sup>1,3</sup>, 黄 韬<sup>1,3</sup>, 王露瑶<sup>1</sup>, 张延华<sup>1,2</sup>, 刘韵洁<sup>1,3</sup>

(1. 北京未来网络科技高精尖创新中心, 北京 100124; 2. 北京工业大学信息学部信息与通信工程学院, 北京 100124;  
3. 北京邮电大学网络与交换国家重点实验室, 北京 100876)

**摘 要:** 随着经济社会的发展, 人们对网络和服务质量的需求不断提高, 传统网络架构难以满足日益增长的需求, 未来网络技术受到了广泛的关注. 近年来, 互联网与传统产业的深度融合促成了工业互联网的出现, 也推动当今互联网逐渐由“消费型”领域扩展到“生产型”领域, 给未来网络技术的发展带来了新的挑战和机遇. 从工业互联网发展现状出发, 分析其对网络的新需求, 阐述未来网络发展的新趋势和新技术, 并对未来网络试验设施及其对工业互联网的支持进行介绍.

**关键词:** 未来网络; 工业互联网; 软件定义网络(SDN); 软件定义网络、存储和计算(SD-NCC); 知识定义网络(KDN)

中图分类号: TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)02-0163-10

doi: 10.11936/bjtxb2017010007

## Survey of Development on Future Networks and Industrial Internet

WU Wenjun<sup>1,2</sup>, YAO Haipeng<sup>1,3</sup>, HUANG Tao<sup>1,3</sup>, WANG Luyao<sup>1</sup>, ZHANG Yanhua<sup>1,2</sup>, LIU Yunjie<sup>1,3</sup>

(1. Beijing Advanced Innovation Center for Future Internet Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Information and Communications Engineering, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

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

**Abstract:** With the development of economy and society, the demand for network and the quality of service are constantly improved. The traditional network architecture cannot meet the increasing demand, thus the future network technologies have been paid more and more attention. In recent years, the integration of Internet and traditional industry contributed to the emergence of industrial Internet. The current Internet is expanded from the field of “consumption” into the field of “production” gradually, which has brought new challenges and opportunities in the development of future network technologies. This paper analyzes the current situation of the development of industrial Internet and its new demands on the future networks. Considering the demands of industrial Internet, the new trends and new technologies of future networks are analyzed and the future network test facilities are introduced.

**Key words:** future networks; industrial Internet; software defined networking (SDN); software defined networking, caching and computing (SD-NCC); knowledge-defined networking (KDN)

收稿日期: 2017-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61571021, 61471056)

作者简介: 吴文君(1985—), 女, 讲师, 主要从事移动通信理论与技术、未来网络技术和工业互联网方面的研究, E-mail: wenjunwu@bjut.edu.cn

通信作者: 刘韵洁(1943—), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事未来网络体系架构方面的研究, E-mail: liuyj@chinaunicom.cn

20世纪以来,全球互联网迅猛发展.在中国,随着经济的高速发展,互联网发展也尤为迅猛.近20年来涌现出阿里巴巴、百度、腾讯等互联网领军企业,它们在电商、搜索和社交等领域做出了举世瞩目的成绩和贡献<sup>[1]</sup>.根据2013年的数据,中国互联网经济占总GDP的4.4%,高于美国同期的4.3%<sup>[2]</sup>.

随着信息通信技术创新与演进速度的不断加快,信息、生物、新材料、新能源等领域出现了交叉融合的趋势,全球正在迎来产业变革和科技革命<sup>[3]</sup>.全球发达国家“重金融、轻工业”的思维方式开始转变,纷纷制订了国家级战略,以推动互联网与传统产业融合,抢占发展制高点.虽然在2013年中国互联网经济占GDP比例高于美国,但是据麦肯锡公司统计,就云服务渗透率和中小企业互联网使用率来比较,我国仅相当于美国的1/3~1/4<sup>[2]</sup>.由此可见,与消费互联网发展比较,我国的工业互联网发展相对滞后,这与我国产业链、产业模式和产业变革基础等息息相关.VMware公司认为,中国的企业互联网要到2040年才能赶上美国<sup>[4]</sup>.为应对挑战,我国提出了“中国制造2025”和“互联网+”行动计划,积极推进工业互联网发展.

在当前工业互联网发展的影响下,互联网逐渐由“消费型”领域扩展到“生产型”领域,而传统基于TCP/IP的网络体系结构在可扩展性、安全性、可控、可管等方面都无法适应这一变化,未来网络技术发展面临全新的挑战和机遇.本文将从全球工业互联网发展现状出发,分析工业互联网发展对网络的新需求,阐述未来网络发展的趋势及新技术,最后对未来网络试验设施进行介绍.

## 1 工业互联网

### 1.1 工业互联网发展现状

伴随着社会的发展和技术的进步,到目前已经

发生了3次世界工业革命,制造业经历了手工制造、机械化生产、大规模流水线制造和自动化生产的演变过程.近年来,随着信息通信技术创新与演进,各国积极推动信息通信产业与传统产业融合,制造业正在迎来下一代变革.

2012年11月,美国通用电气公司发布了《工业互联网:打破智慧与机器的边界》白皮书<sup>[5]</sup>,指出工业互联网将传感器及其他先进的仪器仪表嵌入各种机器,收集并分析海量数据,用以改进机器性能,提高系统和网络的效率.当从智能设备和系统收集到足够的信息以促进数据驱动的学习时,就会出现智能决策,将会使工业互联网的全部潜力得到发挥,整个工业经济都能享受到提高生产力、降低成本和减少排放的收益.据预测:在美国,如果工业互联网能够使生产率每年提高1%~1.5%,那么未来20年,它将使美国人的平均收入比当前水平提高25%~40%;如果世界其他地区能够确保实现美国生产率增长的一半,那么工业互联网在此期间将为全球GDP增加10万亿~15万亿美元<sup>[5]</sup>.

2011年4月,在汉诺威工业博览会上出现了“工业4.0”这一概念<sup>[6]</sup>.工业4.0作为德国政府提出的一个战略计划,得到德国联邦经济技术部和教育研究部的资助,政府投入2亿欧元来支持工业领域的革命性创新.研究表明,以信息物理系统(cyber-physical systems,CPS)为核心,旨在实现全生命周期内的制造单元自动控制,推进制造业向智能化转型的工业4.0将会引领制造业的下一代变革<sup>[7-8]</sup>.从工业革命前到工业4.0,制造业的发展趋势如图1所示.目前,德国电气电子和信息技术协会已经发布了工业4.0标准化路线图,意味着工业4.0从建议方案走向了实际阶段,西门子等传统巨头也已开始部署实验性项目建设.

除此之外,日本也在加快战略布局.尽管日本



图1 制造业发展趋势

Fig. 1 Development trend of manufacturing

工业机器人处于世界领先地位,但是为了应对世界发展潮流,日本政府希望借助传感器、人工智能等技术,将机器人产业与信息技术相融合,使其向自主化、网络化和终端数据化方向发展。同时,进一步迈向实用化和产业化,使机器人技术可以与制造业、服务业、医疗、基础设施与防灾抗灾、深海作业和航天航空等领域结合,将日本机器人技术推向国际,提升其国际竞争力。2015年1月23日,日本政府对外发布了“机器人新战略”,决定了该国将在未来5年重点提升机器人产业水平<sup>[9]</sup>。

我国面临来自全球制造业强国的压力,在制造业水平上与美、德、日等国尚存在一定差距。据麦肯锡咨询公司报告:2015年我国劳动生产率仅为经济合作与发展组织成员国平均水平的15%~30%<sup>[10]</sup>。为了推进产业转型升级,不断提高生产效率,提升我国制造业的国际影响力和地位,2015年3月,李克强总理在政府工作报告中提出了“中国制造2025”的概念。随后发布的《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》为“中国制造2025”增添了新的元素与活力。不同于美国、德国、日本等发达国家制订的国家战略和计划,我国要走适合自己国情的战略道路,借助我国移动互联网、云计算、大数据、物联网等领域发展的良好势头,与现代制造业进行有机结合。因此,推动“中国制造2025”,一方面要积极弥补我国传统制造业的不足,主攻智能制造,基于制造业数字化、产品智能化,推进新材料和新能源的应用,另一方面也要强调互联网与工业相融合,以未来网络技术为支撑,利用互联网技术推进产业升级。

在各国积极提出工业互联网相关战略计划的同时,为切实有效地推进工业互联网实现,标准化工作的意义得以凸显。工业互联网联盟(Industrial Internet Consortium, IIC)作为一个全球化的产业联盟于2014年3月成立,目前已有包括华为、IBM、博世、施耐德、3M等知名企业在内的200多家企业、机构和高校成员。IIC致力于推进全球工业互联网标准发展,定义和开发参考系统架构,并且已与工业4.0平台(Plattform Industrie 4.0)建立合作,以支持来自不同领域的系统的互操作性。我国的工业互联网产业联盟于2016年2月由中国信息通信研究院联合制造业、通信业、互联网等相关企业共同发起成立,现有会员单位200多家。该联盟在工业互联网重大问题研究、标准研制、技术试验验证、产业推广等方面积极开展工作,并发布了《工业互联网体系架构(版本1.0)》白皮书。

## 1.2 工业互联网发展对网络的新需求

当前,工业互联网的发展正推动着互联网逐渐由“消费型”领域扩展到“生产型”领域,互联网与实体经济深度融合已成为未来发展的必然趋势。互联网的发展促进了产业的发展与变革,而产业的变革也对网络技术提出了新的需求。

研究指出,支持工业4.0的一种典型CPS架构可以用分层的5C模型来表示<sup>[7]</sup>,即连接层(connection level)、数据信息转化层(data-to-information conversion level)、网络层(cyber level)、认知层(cognition level)和配置层(configuration level)。根据5C模型,工业互联网需要支持灵活的设备和传感器组网、实时可靠的信息传输、高效的大数据存储分析,对未来网络技术在资源配置的灵活性、传输的时效性、可靠性和安全性方面提出了更高的要求,具体体现在以下几个方面:

1) 灵活的差异化服务质量保障机制。当前,全球工业系统与高级计算、分析、感应技术以及互联网技术正在融合,需要智能机器间的网络连接、传感器之间的网络连接以及人机连接的支撑<sup>[11]</sup>,因此,工业互联网既需要支持高带宽的图像、视频业务,又需要支持大连接、低速率的传感器和控制信号业务,同时还需要支持传统的与人交互的各类业务,网络支持的业务特点和需求差异巨大。传统网络设备硬件和软件紧耦合,网络缺乏针对业务的差异化资源配置能力,需要将网络的控制平面与数据平面分离,并结合网络资源虚拟化技术,采用有效的机制和算法实现网络资源的灵活配置和可定制的差异化服务质量保障。

2) 高效的传输和时延保障能力。在工业互联网中,对设备、机器人、传感器等的实时远程遥控和动态配置信号都对传输时延要求极高,同时,需要实时处理的图像、视频信号也对时延有极高的要求,一般在几十ms内。为了保障实时性,一方面需要利用大数据技术智能配置网络资源,另一方面也需要实现内容和数据处理的下沉,利用就近服务用户的新技术和机制,减少网内信息冗余,提升时延保障能力。

3) 高可靠性和安全性。在服务消费型业务为主的传统网络中,可靠性和安全性的重要性已经凸显。在工业互联网中,业务传输的可靠性和安全性直接关系到生产安全、产品安全,并影响到企业的利益,还间接影响到公共安全,因此,工业互联网对可靠性和安全性的需求更为强烈。然而,工业互联网

中存在海量终端,极易借此发起网络攻击,并产生强大的破坏力.工业互联网对可靠性和安全性的高要求与其自身的薄弱性之间矛盾突出,不仅需要提升网络安全技术水平,也需要未来网络技术从架构设计上提供更好的安全保障机制.

## 2 未来网络

回顾网络技术的发展,从1969年诞生的主要用于军事与科研领域的第一代互联网——阿帕网<sup>[12]</sup>,到1991年出现的给人们经济文化生活带来极大便利的第二代互联网——万维网,互联网逐步深入各个领域,为经济社会的发展做出了突出贡献.随着人们对网络和服务质量的需求不断提高,网络流量激增,以移动互联网为代表的全球IP流量高速增长,给网络基础设施带来巨大压力及挑战,传统网络架构难以满足日益增长的需求,促使了未来网络技术发展.互联网与产业的深度融合,在对网络技术带来新挑战的同时,也为未来网络技术的发展带来了新的机遇和驱动力.

### 2.1 未来网络发展现状及趋势

当前,未来网络技术已成为一个备受关注的研究方向,不仅具有巨大的产业化前景,同时也涉及国家的核心利益与信息安全,因此,各国政府都高度关注这一领域的发展,并启动了一系列重大项目和研究计划<sup>[13]</sup>,包括美国国家科学基金支持的未来互联网设计(FIND)计划和未来互联网架构(FIA)计划、欧盟第七框架(FP7)计划中支持的未来互联网架构与设计(4WARD)项目和可扩展自适应互联网解决方案(SALT)、日本的新一代网络研究发展计划(New-Generation Network R&D Project)等.未来网络也得到了我国政府的高度重视,科技部启动了面向未来网络架构的研究计划,相关科研项目也得到了国家自然科学基金委支持.

从技术上看,未来网络领域比较有代表性的工作包括软件定义网络(software defined networking, SDN)<sup>[14]</sup>、信息中心网络(information-centric networking, ICN)<sup>[15]</sup>、服务中心网络(service-centric networking, SCN)<sup>[16]</sup>和用户中心网络(user-centric networking, UCN)<sup>[17]</sup>等.此外,大数据技术和人工智能的发展,为未来网络向智能网络发展提供了契机.

SDN起源于2006年斯坦福大学的Clean Slate研究课题,2008年,McKeown教授在Sigcomm会议上展示了基于OpenFlow网络的演示试验,SDN的发展思路逐渐形成<sup>[18]</sup>.SDN是一种新型的网络架构,

将网络设备控制平面与数据平面分离,屏蔽了来自底层网络设备的差异.在SDN架构下,若需要对网络进行修改,无须大面积改动基础设施,只需要通过编程重新定义网络规则.SDN能够极大地提升现有网络的可控、可管性和灵活性,有效降低网络服务提供者的投资成本和运营成本<sup>[19]</sup>.然而,SDN集中的控制平面设计制约了网络规模的扩展,影响着SDN推广应用的进程,因此,SDN可扩展技术得到了研究人员的极大关注<sup>[20-21]</sup>.

2011年3月,开放网络基金会(Open Networking Foundation, ONF)组织成立<sup>[22]</sup>,它致力于通过开放标准开发来促进SDN的推广应用,最突出的贡献在于对OpenFlow标准的推进和完善.OpenFlow作为第一个SDN标准,对SDN的发展起到了积极的推动作用,是开放软件定义网络架构的重要组成部分.目前,OpenFlow标准已发布1.5.1版本.Google B4是全球首个基于SDN技术成功实现数据中心互联网组网的案例,其链路使用率从平均30%提升至接近95%,充分证明了SDN技术的可行性<sup>[23]</sup>.然而,SDN关注的重点是数据平面的交换和转发,对用户关心的内容和服务的直接关注不足,因此,仅有SDN技术并不够.

ICN是近年来未来网络的一类发展方向的总称,美国的CCN(content-centric networking)、DONA(data-oriented network architecture)和欧盟的4WARD、SAIL等研究内容都涉及ICN<sup>[13]</sup>.ICN借助恰当的策略在网络中缓存内容,利用“存储换带宽”的思想来降低链路带宽消耗,有效支持内容和数据的下沉,提供了就近服务用户的新机制;同时,ICN直接对信息内容本身进行保护,不再像传统IP网络主要保护数据包和通道的安全,从而实现从信任主机到信任信息内容的设计思路转变,提供了一种新的安全机制.为了有效地实现ICN,缓存技术<sup>[24-25]</sup>、命名解析与路由技术<sup>[26-27]</sup>和发布订阅架构<sup>[28]</sup>的研究成为热点.

在ICN架构基础上,SCN被提出来,它增加了服务中心层,旨在为用户提供就近和按需的服务<sup>[16]</sup>.我国研究人员提出的服务定制网络是SCN架构中的一类<sup>[29]</sup>.服务定制网络继承了SDN数据控制分离以及网络可编程的主要特点,增加了网络虚拟化能力以及内容智能调度能力.它能够融合存储、计算、传输等功能,形成虚拟化服务池,根据用户需求,通过信息资源智能调度,构建具有不同等级服务能力的虚拟网络,为不同用户提供定制的差异化

服务。服务描述与统一标识技术<sup>[30]</sup>、服务发现技术<sup>[31]</sup>和服务迁移技术<sup>[32]</sup>等是 SCN 实现中的关键技术,因而受到了学术界的大量关注。

考虑到未来网络中,用户可以被看作是网络的重要组成部分之一,研究人员提出了 UCN 的概念。在 UCN 架构下,用户不仅是网络内容的使用者和提供者,还成为网络传输的一部分,可以基于某种激励机制,共享网络服务与资源<sup>[13]</sup>。研究人员在 UCN 中引入以用户为中心的命名空间,将网络的核心要素从传统互联网中的地址或设备转变为用户自身,通过用户标识构建用户与应用、用户与设备、用户与地址之间的映射关系,实现用户间的灵活通信<sup>[33]</sup>。用户身份管理和网络信任模型<sup>[34]</sup>关系到网络的安全性和 UCN 的可实现性,因此,得到了广泛的重视。同时,用户行为分析<sup>[35]</sup>对提升 UCN 性能具有积极意义,也得到了深入研究。

综合分析未来网络发展现状,SDN 技术已经成为未来网络发展的基础之一,以信息为中心、服务为中心、用户为中心的网络架构成为未来网络的重要发展方向。结合工业互联网对未来网络技术的需求和技术融合的特点,本文认为未来网络发展还将呈现两大主要趋势:

1) 从软件定义网络到软件定义一切。目前,SDN 技术已经得到了广泛的关注和研究,ICN、SCN、UCN 的发展使得存储、计算、传输能力的融合与虚拟化成为未来网络技术的重要基础。然而,仅将软件定义的思想用于管理网络路由转发,并不能将路由转发与内容存储和信息分析处理有机结合。根据著名咨询机构 Gartner 于 2016 年 7 月发布的预测,软件定义一切(software defined anything,SDx)已经逐渐从概念走向实际,有望在 2~5 年内被应用<sup>[36]</sup>。因此,在未来网络技术的发展中,软件定义的网络、存储和计算将形成统一的架构,为 ICN、SCN、UCN 的发展和实现带来极大的便利。

2) 数据驱动的智能网络架构。软件定义的思想为未来网络带来了出色的灵活性,然而,在 SDN 中,当网络规模增加、交换机数量巨大时,庞大数量的转发规则的计算将让控制器不堪重负,此时,网络需要更高效的智能的转发决策机制。更具挑战的是,当 SDx 的思想应用到未来网络中,控制器管理范畴将从转发扩展到存储、计算等多个维度,并最终决策出诸如定制服务策略这样的多维结果,上述多维的决策问题将给控制器运行效率带来巨大的压力。值得庆幸的是,近年来,数据科学本身发展迅

速,大规模数据实时处理的方法和相关理论都得到了深入的研究,据 Google 专家刘俊达介绍,未来网络可具备利用运行数据、应用和服务数据驱动网络优化和改进的能力<sup>[37]</sup>,因此,数据驱动的智能网络管理将为未来网络发展注入新的动力。

## 2.2 未来网络新技术

针对未来网络发展的新趋势,本文重点对软件定义网络、存储和计算(software defined networking, caching and computing,SD-NCC)<sup>[38]</sup>以及知识定义网络(knowledge-defined networking,KDN)<sup>[39]</sup>进行介绍。

### 2.2.1 SD-NCC

SD-NCC 是一种新的集成网络架构,该架构结合了 SDN 的可编程控制思想和 ICN 的信息中心思想,将网络、存储和计算资源抽象为统一的资源池,根据上层应用的不同需求进行有效的网络、存储和计算资源调度,屏蔽了底层设备和接入网络等的差异<sup>[38]</sup>。

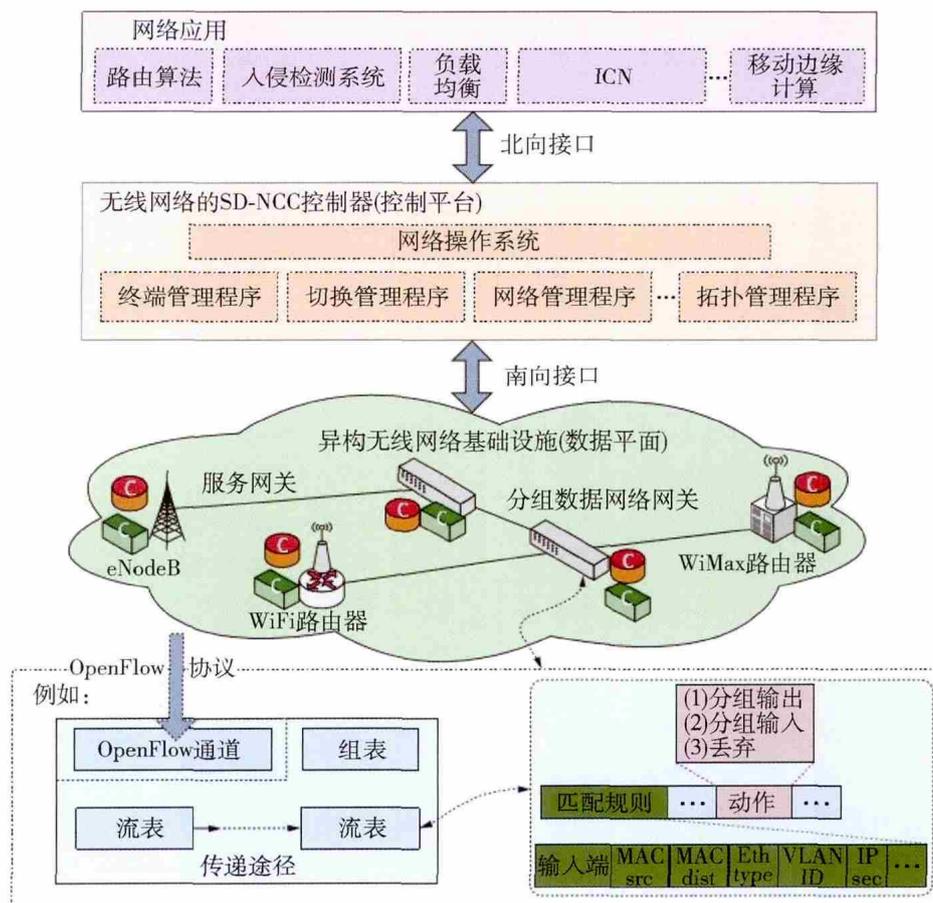
当前,SDN 和 ICN 都受到了极大的关注,研究成果丰硕<sup>[40-41]</sup>。与此同时,云计算<sup>[42]</sup>、雾计算<sup>[43]</sup>和移动边缘计算<sup>[44]</sup>也备受重视,且已被广泛应用。然而,网络的交换转发、存储和计算 3 个重要领域的研究相对独立,缺乏有机的结合机制,成为未来网络技术发展和支撑新型应用的制约,SD-NCC 的提出使这一问题得到了解决。

Huo 等<sup>[38]</sup>以无线网络为例,为每个网络节点配备存储和计算能力,对 SD-NCC 架构及其实现进行了详细的阐述。如图 2 所示,网络中存在一个逻辑的控制平面,网络中的应用将能耗、服务质量等具体需求通过北向接口发送到控制平面,控制器根据需求对数据平面的规则、动作进行设计,将应用需求转换为对底层设备资源的需求;控制平面也具备监测能力,能够通过终端、交换、网络、拓扑等系统管理程序将物理设施抽象为虚拟资源切片,并按照上层应用的需求进行资源切片的动态调度;同时,控制器还通过南向接口,将通信、计算、接入、存储等指令下发到数据平面的流表中,实现底层设备的动态管控。

目前,SD-NCC 架构还处在研究起步阶段,在网络、存储和计算资源协同调度方案、可扩展性和安全性方面还有待深入研究。同时,在 SD-NCC 未来的应用推广中,利益相关各方的协作机制也有待探讨。

### 2.2.2 KDN

KDN 是一种将人工智能技术融入网络的新型

图2 软件定义网络、存储和计算架构的实现<sup>[38]</sup>Fig. 2 Implementation of software defined networking, caching and computing<sup>[38]</sup>

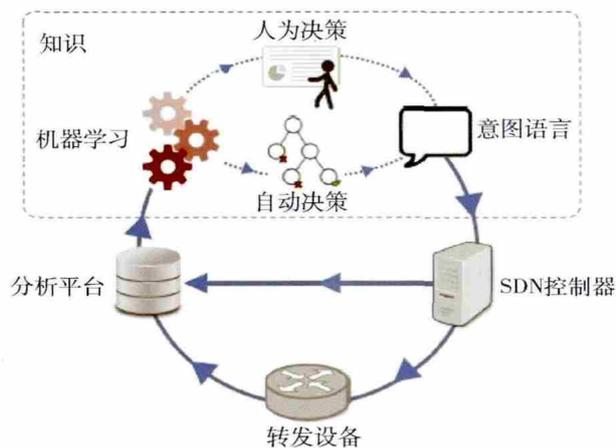
网络架构,它以SDN为基础,在集中式网络分析平台中利用实时分组信息、配置信息和网络状态监测数据进行智能决策,并通过控制器下发指令,实现网络的智能管控<sup>[39]</sup>。

早在2003年就有研究人员考虑将人工智能技术用以控制和操作网络,提出了“互联网知识平面”的概念<sup>[45]</sup>。然而,由于当时网络为分布式系统,网络节点获取的网络信息有限,且设备计算、存储能力不足,上述概念并没有应用部署。SDN的出现使得网络具备了逻辑上集中的控制平面,控制器成为了具有整体知识的逻辑单点<sup>[46]</sup>。同时,网络设备的计算和存储能力增强,促进了网络实时监测技术的发展。利用SDN提供的集中控制平面和网络监测技术提供的实时分组信息、配置信息和网络状态数据,知识平面可以采用机器学习技术来分析关于网络的知识,并且实现网络转发的智能控制。

Mestres等<sup>[39]</sup>介绍了一种KDN架构,该架构在传统SDN中增加了知识平面,为SDN融入了行为

建模和智能决策的能力。KDN借鉴了黑盒优化<sup>[47]</sup>和反馈控制系统中的神经网络<sup>[48]</sup>等思想,构造了一个控制环路来提供自动控制、建议、优化、验证和测试的功能。图3展示了KDN控制网络的基本流程<sup>[39]</sup>,主要包括:网络分析平台从数据平面转发设备和SDN控制器收集数据包状态、网络状态、控制管理状态和服务状态等信息,形成网络的全局视图;在此基础上,网络分析平台将历史的和实时的网络全局视图信息传递到知识平面的机器学习模块,进行网络模式的抽取,获得关于网络的知识;在知识平面中,利用机器学习进行网络控制的决策,将其通过意图驱动的语言表示出来,并通过控制器以数据平面可执行的命令形式下发。

KDN可用于大规模的网络资源虚拟化和管控,能够进行短期的动态网络配置和长期的网络规划,对解决SDN的可扩展性和实现SD-NCC具有积极作用。然而,KDN也面临一些挑战,在适用于网络管控的机器学习算法、非确定性网络、标准化的网络数据集等方面都还需要进行深入研究。

图3 KDN 控制环路<sup>[39]</sup>Fig.3 KDN operating cycle diagram<sup>[39]</sup>

### 3 未来网络试验设施

20世纪90年代,美国、日本、韩国以及欧盟等发达国家开始率先研究未来互联网架构,相继展开了大规模网络试验环境的研究和部署,取得进展的项目有美国全球网络创新环境(global environment for network innovations, GENI)、欧盟的OneLab和日本的JGN2plus等。其中GENI项目由斯坦福大学、麻省理工学院、思科、微软和IBM等参与建设,几乎囊括了美国所有的顶级研究机构和企业。该项目主要由2部分组成,一部分是GENI研究计划(GENI Research Program),另一部分则是为研究计划提供研发验证平台的GENI全球实验设施(GENI Global Experimental Facility)<sup>[49]</sup>。

我国政府和学术界也十分重视未来网络及其试验平台的建设。中国下一代互联网示范工程(CNGI)项目<sup>[50]</sup>、国家“863”计划研究项目“未来网络体系结构创新环境(future network innovation environment, FINE)”、中国科学院战略性科技先导专项“面向感知中国的新一代信息技术研究”等都支持了未来网络试验平台的建设。

2016年,我国未来网络试验设施项目建议书正式获国家发展和改革委员会批复,中国网络创新环境(China environment for network innovations, CENI)建设正式启动。CENI拟建成试验设施网络覆盖规模超过40个城市,支撑不少于128个异构网络并行实验,将为工业互联网、空间网络、光网络和量子网络研究提供必要的实验验证条件<sup>[51]</sup>。与国内外已有试验设施相比,CENI的先进性主要体现在以下几个方面:

1) 世界上首个以链路层虚拟化为基础的深度虚拟网络。GENI、OneLab等以IP技术为基础的试验网络采用Overlay方式构建虚拟网络。CENI网络不采用IP Overlay技术,能够摆脱IP技术的各项束缚,有效避免新型非IP网络体系结构及协议技术在部署验证过程中受承载IP网络的干扰,真实体现新技术所带来的进步。

2) 高效超大规模跨域网络资源管理与调度。CENI项目将自主研发全新的网络操作系统,形成全网资源统一视图,以更加透明的方式观测和管理网络,通过全新的管理模式解决传统网络的安全性及可靠性问题。在此基础上,通过创新的体系结构实现计算、存储、链路资源整合,以服务代替资源提供给网络终端用户,既能最大化满足用户需求,又能实现网络资源的高效利用。CENI网络操作系统将充分发挥软件定义网络的各项优势,实现全网集中控制。

3) 海量信息感知与超细粒度智能分析。作为一个全新的试验网络,CENI网络在设计之初就充分考虑了传统互联网在测量感知与信息收集方面的不足,通过虚拟化方式支持构建动态多层次测量感知系统,实现更灵活和更立体的信息收集和按需动态测量。同时,试验网络将采用通用的大数据分析系统处理引擎,能够最大范围地满足各种业务需求,辅以高效的信息存储收集系统,能够支持智能网络管理和各类科学试验。

4) 百亿级终端模拟与流量生成系统。未来互联网发展的一个重要趋势就是终端数量会达到空前的规模。为此,CENI项目专门设计实现了一套能模拟百亿级终端的流量生成系统,能够有效解决试验设施必然存在的终端数目不足等问题,通过模拟终端行为的方式生成流量,为试验业务的开展提供支持。

CENI的各项特点契合了未来网络软件定义一切和数据驱动的智能网络架构的趋势,同时,CENI融合了现有未来网络的信息中心、服务中心、用户中心等先进思想,其基于软件定义思想的网络操作系统与整合存储、计算、链路资源提供定制服务的形式能够满足工业互联网在灵活性、高效型、可靠性、安全性方面的需求。因此,CENI为工业互联网的研究和试验提供了良好的未来网络环境,同时,工业互联网也为未来网络新技术的测试提供了必要的应用场景。

## 4 结论

1) “生产型”业务在互联网中的重要性日益凸显,本文针对工业互联网发展现状进行了重点分析,认为其对网络的新需求主要体现在灵活的差异化服务质量保障机制、高效的传输和时延保障能力、高可靠性和安全性3个方面。

2) 综合分析未来网络多种技术融合的特点和工业互联网对未来网络技术的需求,本文认为未来网络发展还将呈现软件定义一切和数据驱动的智能网络架构两大新趋势。

3) 各国对未来网络试验设施的建设高度重视,我国的CENI项目建设将为工业互联网的研究和试验提供良好的未来网络环境,同时,工业互联网也将为未来网络新技术的测试提供必要的应用场景,二者相互促进发展,将有利于推进我国建设网络强国和“中国制造2025”计划的实现。

### 参考文献:

- [1] 任兴洲. 产业互联网的发展与创新[J]. 中国发展观察, 2015(8): 58-59.  
REN X Z. Development and innovation of industrial Internet[J]. China Development Observation, 2015(8): 58-59. (in Chinese)
- [2] WOETZEL J, ORR G, LAU A, et al. China's digital transformation: the Internet's impact on productivity and growth[R/OL]. [2016-07-10]. <http://www.mckinsey.com/industries/high-tech/our-insights/chinas-digital-transformation>.
- [3] 于新东, 牛少凤. 全球战略性新兴产业发展的主要异同点与未来趋势[J]. 国际经贸探索, 2011(10): 4-11.  
YU X D, NIU S F. Main similarities and differences in the development of strategic new industries and future tendency forecast[J]. International Economics and Trade Research, 2011(10): 4-11. (in Chinese)
- [4] 邬贺铨. “互联网+”行动计划: 机遇与挑战[J]. 人民论坛·学术前沿, 2015(10): 6-14.  
WU H Q. The “Internet Plus” action plan: opportunities and challenges[J]. People's Forum · Academic Frontiers, 2015(10): 6-14. (in Chinese)
- [5] EVANS P C, ANNUNZIATA M. Industrial Internet: pushing the boundaries of minds and machines[R/OL]. [2012-11-26]. [https://www.ge.com/docs/chapters/Industrial\\_Internet.pdf](https://www.ge.com/docs/chapters/Industrial_Internet.pdf).
- [6] 胡晶. 工业互联网、工业4.0和“两化”深度融合的比较研究[J]. 学术交流, 2015(1): 151-158.

- HU J. A comparative study on industrial Internet, Industry 4.0 and the integration of information and industrialization[J]. Academic Exchange, 2015(1): 151-158. (in Chinese)
- [7] LEE J, BAGHERI B, KAO H A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems[J]. Manufacturing Letters, 2015, 3: 18-23.
- [8] LIU C, JIANG P. A cyber-physical system architecture in shop floor for intelligent manufacturing[J]. Procedia Cirp, 2016, 56: 372-377.
- [9] 王伟. 日本机器人新战略浅析[J]. 机器人技术与应用, 2015(1): 17-18.  
WANG W. Analysis of Japanese robot's new strategy[J]. Robot Technique and Application, 2015(1): 17-18. (in Chinese)
- [10] WOETZEL J, CHEN Y G, SEONG J, et al. China's choice: capturing the \$5 trillion productivity opportunity[R/OL]. [2016-06-20]. <http://www.mckinsey.com/global-themes/employment-and-growth/capturing-chinas-5-trillion-productivity-opportunity>.
- [11] 沈苏彬, 杨震. 工业互联网概念和模型分析[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2015, 35(5): 1-10.  
SHEN S B, YANG Z. Analysis on the concepts and models of the industrial Internet[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 35(5): 1-10. (in Chinese)
- [12] 殷晓蓉. 阿帕对于因特网的贡献及其内在意义[J]. 现代传播, 2002(1): 49-52.  
YIN X R. The contribution of ARPA for the Internet and its intrinsic significance[J]. Modern Communication, 2002(1): 49-52. (in Chinese)
- [13] 刘韵洁, 黄韬, 姚海鹏, 等. 未来网络的研究进展与展望[M]//中国信息化形势分析与预测(2014). 北京: 社会科学文献出版社, 2014: 132-173.
- [14] KIRKPATRICK K. Software-defined networking[J]. Communications of the ACM, 2013, 56(9): 16-19.
- [15] AHLGREN B, DANNEWITZ C, IMBRENDA C, et al. A survey of information-centric networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26-36.
- [16] BRAUN T, MAUTHE A, SIRIS V. Service-centric networking extensions[C]//Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing. Portugal, Coimbra: ACM, 2013: 583-590.
- [17] ALDINI A, BOGLIOLO A. User-centric networking[M]. Switzerland: Springer, 2014.
- [18] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review,

- 2008, 38(2): 69-74.
- [19] 刘韵洁, 黄韬, 张娇. SDN 发展趋势[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(6): 48-51.  
LIU Y J, HUANG T, ZHANG J. SDN development trend [J]. ZTE Communications, 2016, 22(6): 48-51. (in Chinese)
- [20] YU M, REXFORD J, FREEDMAN M J, et al. Scalable flow-based networking with DIFANE [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 40(4): 351-362.
- [21] CURTIS A R, MOGUL J C, TOURRILHES J, et al. DevoFlow: scaling flow management for high-performance networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(4): 254-265.
- [22] ONF White Paper. Software-defined networking: the new norm for networks [EB/OL]. [2012-04-13]. <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/white-papers/wp-sdn-newnorm.pdf>.
- [23] JAIN S, KUMAR A, MANDAL S, et al. B4: experience with a globally-deployed software defined WAN[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 3-14.
- [24] MUSCARIELLO L, CAROFIGLIO G, GALLO M. Bandwidth and storage sharing performance in information centric networking [C] // Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-centric Networking. Toronto: ACM, 2011: 26-31.
- [25] FAYAZBAKSH S K, LIN Y, TOOTOONCHIAN A, et al. Less pain, most of the gain: incrementally deployable ICN [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 147-158.
- [26] KATSAROS K, XYLOMENOS G, POLYZOS G C. MultiCache: an overlay architecture for information-centric networking [J]. Computer Networks, 2011, 55(4): 936-947.
- [27] D'AMBROSIO M, DANNEWITZ C, KARL H, et al. MDHT: a hierarchical name resolution service for information-centric networks [C] // Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-centric Networking. Toronto: ACM, 2011: 7-12.
- [28] D'AMBROSIO M, FASANO P, MARCHISIO M, et al. Providing data dissemination services in the future Internet [C] // IEEE GLOBECOM 2008. New Orleans: IEEE, 2008: 1-6.
- [29] 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. (in Chinese)
- [30] CARDOSO J, BARROS A, MAY N, et al. Towards a unified service description language for the Internet of services: requirements and first developments [C] // 2010 IEEE International Conference on Services Computing (SCC). Miami: IEEE, 2010: 602-609.
- [31] CHAKRABORTY D, JOSHI A, YESHA Y, et al. Toward distributed service discovery in pervasive computing environments [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(2): 97-112.
- [32] OIKONOMOU K, STAVRAKAKIS I. Scalable service migration in autonomic network environments [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(1): 84-94.
- [33] WANG Y, BI J, PENG C, et al. UNA: a new Internet architecture for user-level multi-homing and mobility [C] // Proceedings of the 6th International Conference on Future Internet Technologies. Seoul: ACM, 2011: 13-18.
- [34] BURMESTER M, DAS P, EDWARDS M, et al. Multi-domain trust management in variable-threat environments—a user-centric model [C] // IEEE Military Communications Conference, MILCOM 2009. Boston: IEEE, 2009: 1-7.
- [35] BENEVENUTO F, RODRIGUES T, CHA M, et al. Characterizing user behavior in online social networks [C] // Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference. Chicago: ACM, 2009: 49-62.
- [36] WALKER M J, BURTON B, CANTARA M. Hype cycle for emerging technologies, 2016 [EB/OL]. [2016-07-02]. <https://www.gartner.com/doc/3383817>.
- [37] 刘俊达. 以数据驱动未来网络 [EB/OL]. [2014-12-10]. <http://www.sdnlab.com/4853.html>.  
LIU J D. Data-driven future networks [EB / OL]. [2014-12-10]. <http://www.sdnlab.com/4853.html>. (in Chinese)
- [38] HUO R, YU F R, HUANG T, et al. Software defined networking, caching, and computing for green wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(11): 185-193.
- [39] MESTRES A, RODRIGUEZ-NATAL A, CARNER J, et al. Knowledge-defined networking [EB/OL]. [2016-06-23]. <https://arxiv.org/abs/1606.06222>.
- [40] WANG K, LI H, YU F R, et al. Virtual resource allocation in software-defined information-centric cellular networks with device-to-device communications and imperfect CSI [J]. IEEE Transactions on Vehicular

- Technology ,2016 ,65( 12) : 10011-10021.
- [41] FANG C , YU F R , HUANG T , et al. A survey of green information-centric networking: research issues and challenges [ J ]. IEEE Communications Surveys & Tutorials ,2015 ,17( 3) : 1455-1472.
- [42] ARMBRUST M , FOX A , GRIFFITH R , et al. A view of cloud computing [ J ]. Communications of the ACM , 2010 ,53( 4) : 50-58.
- [43] SARKAR S , CHATTERJEE S , MISRA S. Assessment of the suitability of fog computing in the context of Internet of things [ J ]. IEEE Transactions on Cloud Computing , 2015 , PP( 99) : 1-14.
- [44] ETSI. Mobile-edge computing-introductory technical white paper [ EB/OL ]. [2014-09-15]. [https://portal.etsi.org/Portals/0/TBpages/MEC/Docs/Mobile-edge\\_Computing\\_-\\_Introductory\\_Technical\\_White\\_Paper\\_V1%2018-09-14.pdf](https://portal.etsi.org/Portals/0/TBpages/MEC/Docs/Mobile-edge_Computing_-_Introductory_Technical_White_Paper_V1%2018-09-14.pdf).
- [45] CLARK D D , PARTRIDGE C , RAMMING J C , et al. A knowledge plane for the Internet [ C ] // Proceedings of the 2003 Conference on Applications , Technologies , Architectures , and Protocols for Computer Communications. Karlsruhe: ACM ,2003: 3-10.
- [46] KREUTZ D , RAMOS F M V , VERISSIMO P E , et al. Software-defined networking: a comprehensive survey [ J ]. Proceedings of the IEEE ,2015 ,103( 1) : 14-76.
- [47] RIOS L M , SAHINIDIS N V. Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations [ J ]. Journal of Global Optimization ,2013 ,56( 3) : 1247-1293.
- [48] NARENDRA K S , PARTHASARATHY K. Identification and control of dynamical systems using neural networks [ J ]. IEEE Transactions on Neural Networks , 1990 , 1 ( 1) : 4-27.
- [49] 胡萍,安捷. GENI、FIND和CNGI、高可信网络的关系与发展[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2007,46(11): 41-44.  
HU P , AN J. Research on the relationship among GENI , FIND , CNGI and high credibility network [ J ]. Journal of Xiamen University ( Natural Science ) , 2007 , 46 ( 11) : 41-44. ( in Chinese)
- [50] 胡萍. 我国互联网发展现状和CNGI的应用前景分析[J]. 科学管理研究,2008,26(12): 21-23.  
HU P. Analysis of the present situation for Internet in China and application prospect of CNGI [ J ]. Scientific Management Research , 2008 , 26 ( 12) : 21-23. ( in Chinese)
- [51] 中国科技大学未来网络实验室. 未来网络试验设施项目建议书已获国家发改委批复 [ EB/OL ]. [2016-11-10]. <http://lfn.ustc.edu.cn/index.php/Vindex/article/356>.  
University of Science and Technology of China. Laboratory for Future Networks. Future network test facility project proposal has been approved by the National Development and Reform Commission [ EB/OL ]. [2016-11-10]. <http://lfn.ustc.edu.cn/index.php/Vindex/article/356>. ( in Chinese)

(责任编辑 梁洁)