



# 未来网络发展 白皮书

(2019 版)



第三届未来网络发展大会组委会  
2019年5月

# **未来网络发展白皮书 (2019 版)**

**第三届未来网络发展大会组委会**

**2019 年 5 月**



## 版权声明

本白皮书版权属于第三届未来网络发展大会组委会所有并受法律保护，任何个人或是组织在转载、摘编或以其他方式引用本白皮书中的文字、数据、图片或者观点时，应注明“来源：第三届未来网络发展大会组委会”。否则将违反中国有关知识产权的相关法律和法规，对此第三届未来网络发展大会组委会有权追究侵权者的相关法律责任。

## 编写说明

### 编写单位：

江苏省未来网络创新研究院

### 参与单位：（按首字母排序，排序不分先后）

阿里巴巴网络科技有限公司	北京大学
北京工业大学	北京交通大学
北京邮电大学	东南大学
国家数字交换系统工程技术研究中心	华为技术有限公司
清华大学	盛科网络有限公司
腾讯计算机系统有限公司	网络通信与安全紫金山实验室
新华三集团	云杉世纪网络科技有限公司
中国电信北京研究院	中国科学技术大学
中国科学院计算技术研究所	中国联通网络技术研究院
中国联通研究院	中国信息通信研究院
中国移动研究院	中兴通讯股份有限公司



## 前言

根据 2018 年 5 月份发布的《2018 互联网趋势报告》数据显示，我国正在成为全球互联网中心，无论是在网络规模、用户数量，还是互联网交易额方面我国都居于全球首位。互联网极大地影响着人们的生活和工作方式，已经成为人类社会的重要基础设施和各国的重要战略资源，网络空间（Cyberspace）已成为继陆、海、空和太空之后的人类第五疆域。如今处在全球信息化发展的重要历史时刻，我国亟需抓住这一历史机遇，推动网络信息领域核心技术突破，发挥互联网对实体经济的引领作用，加强网信领域军民融合，主动参与网络空间国际治理进程，自主创新推进我国由网络大国到网络强国的建设。因此，为了响应我国网络强国建设的号召，加快我国未来网络试验设施建设，推进我国未来网络产业发展，在国内多家高校、科研机构及企事业单位的参与和支持下，由江苏省未来网络创新研究院牵头编写了《未来网络发展白皮书（2019 版）》，本白皮书着重介绍全球未来网络领域的最新发展情况。

本白皮书总共分为九个章节，在第一章未来网络的发展背景中，首先分析现有网络面临的严峻挑战，然后引出未来网络的概念内涵及未来网络的特点，紧接着就全球未来网络发展状况展开简要介绍并阐明技术趋势；第二章未来网络前沿热点技术主要聚焦在典型的未来网络体系架构和网络核心技术两个角度，选择具有代表性和前沿性的相关架构以及技术进行普及化介绍；第三章重点就国内外对于未来网络技术的重大应用场景展开介绍，具体包括公共互联网、工业互联网、天地一体化网络、海洋立体通信网络、军民融合网络几个方面；第四章未来网络试验设施将详细的介绍全球在未来网络试验设施方面的基本建设情况；第五章从网络重构、SD-WAN、白盒设备、操作系统、边缘计算等几个角度盘点全球未来网络产业的进展情况；第六章简要介绍近些年全球知名标准化组织在未来网络领域的标准化工作；第七章重点梳理一些业界知名未来网络开源项目；第八章系统总结本白皮书的核心内容，并展望未来网络今后的发展情况；最后，第九章给出了近一年未来网络领域年度大事记和白皮书中出现的缩略语，供全球未来网络领域的研究团队与从业人员了解和参考。



## 目录

前言.....	I
目录.....	III
图目录.....	VII
表目录.....	IX
一、未来网络的发展背景.....	1
1.1 现有网络面临的挑战.....	1
1.2 未来网络的概念内涵.....	3
1.3 全球未来网络发展态势.....	4
二、未来网络前沿热点技术.....	7
2.1 未来网络体系架构.....	7
2.2 软件定义网络.....	14
2.3 网络功能虚拟化.....	18
2.4 边缘计算.....	20
2.5 网络人工智能.....	22
2.6 低时延-确定性网络.....	25
2.7 IPv6 网络.....	27
2.8 区块链网络.....	29
2.9 网络安全.....	31
2.10 5G.....	33
三、未来网络应用场景.....	37
3.1 公共互联网.....	37
3.2 工业互联网.....	38
3.3 天地一体化网络.....	40
3.4 海洋立体通信网络.....	42
3.5 军民融合网络.....	44
四、未来网络试验设施.....	47
4.1 中国未来网络试验设施.....	47
4.2 国际未来网络试验设施.....	49
五、未来网络产业进展.....	55
5.1 网络重构生态.....	55
5.2 SD-WAN 生态.....	58



5.3 白盒设备生态.....	63
5.4 操作系统生态.....	65
5.5 边缘计算生态.....	68
六、未来网络标准进展.....	71
6.1 ITU-T 相关标准.....	71
6.2 CCSA 相关标准.....	73
6.3 IETF 相关标准.....	75
6.4 ETSI 相关标准.....	77
6.5 MEF 相关标准.....	79
七、未来网络开源项目.....	81
7.1 开源生态.....	81
7.1.1 Linux Foundation.....	81
7.1.2 OCP.....	83
7.1.3 ONF.....	85
7.1.4 CNCF.....	86
7.1.5 TIP.....	88
7.2 开源项目.....	90
7.2.1 ONAP.....	90
7.2.2 ODL/ONOS.....	91
7.2.3 SONIC/Stratum/DANOS.....	93
7.2.4 P4.....	95
7.2.5 CORD.....	96
7.2.6 Kubernetes.....	98
7.2.7 Akraino.....	99
7.2.8 StarlingX.....	100
7.2.9 DPDK.....	101
7.2.10 FD.io.....	102
八、总结与展望.....	103
8.1 总结.....	103
8.2 展望.....	104
九、附录.....	107
9.1 年度大事记.....	107
9.2 缩略语.....	108
参考文献.....	115

致谢.....	119
---------	-----



## 图目录

图 2-1 信息中心网络 <sup>[7]</sup> .....	8
图 2-2 XIA 网络架构 <sup>[9]</sup> .....	9
图 2-3 移动优先网络架构 <sup>[12]</sup> .....	9
图 2-4 服务定制网络框架 <sup>[13]</sup> .....	10
图 2-5 可重构通信基础网络体系总体架构 <sup>[14]</sup> .....	11
图 2-6 AND 体系结构示意 <sup>[15]</sup> .....	12
图 2-7 一体化网络与普适服务原型系统 <sup>[16]</sup> .....	13
图 2-8 DAN 服务模型 <sup>[17]</sup> .....	13
图 2-9 ONF 定义的 SDN 基本架构 <sup>[6]</sup> .....	15
图 4-1 未来网络试验项目建设布局 <sup>[58]</sup> .....	48
图 4-2 GENI 计算机网络资源 <sup>[57]</sup> .....	50
图 4-3 FIRE 试验床项目 <sup>[59]</sup> .....	51
图 4-4 JGN-X 项目网络概述图 <sup>[65]</sup> .....	52
图 4-5 KREONET-S 架构和主要组件 <sup>[68]</sup> .....	53
图 7-1 Linux 基金会支持的开源项目 <sup>[91]</sup> .....	83
图 7-2 OCP 社区：项目及子项目 <sup>[93]</sup> .....	85
图 7-3 ONF 与 ON.lab 合并 <sup>[94]</sup> .....	86
图 7-4 CNCF 项目全景图 <sup>[95]</sup> .....	88
图 7-5 ONAP 架构示意图 <sup>[97]</sup> .....	90
图 7-6 ODL 架构图示 <sup>[98]</sup> .....	91
图 7-7 ONOS 技术架构 <sup>[99]</sup> .....	93
图 7-8 SONIC 技术架构 <sup>[82]</sup> .....	94
图 7-9 P4 可编程芯片 Tofino&Tofino2 的兴起 <sup>[100]</sup> .....	96
图 7-10 CORD 业务流程 <sup>[94]</sup> .....	97



## 表目录

表 7-1 Linux 基金会在未来网络领域的开源项目 .....	82
表 7-2 OCP 基金会在未来网络领域的工作组 .....	84
表 7-3 CNCF 在云计算、编排方面的项目 .....	87
表 7-4 TIP 在未来网络相关领域的项目 .....	89
表 9-1 未来网络年度大事纪（2018.5-2019.4） .....	107
表 9-2 英文缩略词对照表 .....	108



## 一、未来网络的发展背景

随着网络用户的不断增多，网络规模不断扩大，网络承载了多种多样的新型业务，呈现出了不断变化的需求，传统网络无法很好地满足这些新业务和新需求，并逐渐暴露出一系列问题。因此我们迫切需要既能在短期内满足新业务需求，又能在长期内全面、彻底地解决互联网架构体系的一系列新的网络架构、新的网络技术和手段。在这样的背景下，未来网络的概念及相关技术正式提出。本章将具体介绍现有网络面临的挑战、未来网络的概念内涵以及全球未来网络的发展态势。

### 1.1 现有网络面临的挑战

经过 50 年的不断发展、应用和完善，Internet 从最初的单一军用网络不断在向包括军用、民用、商用等的各个方面普及，然而传统 TCP/IP 网络设计目的是进行高效的数据传输，因此 IP 协议是一种无连接的、基于数据报文的传输模式，提供“尽力而为”的服务，TCP 使用的重传和滑动窗口机制给实时数据的传输带来难以预料的时间延迟以及抖动，无法保证吞吐量和传送时延等服务质量（Quality of Service, QoS）要求。伴随着 Internet 的飞速普及和需求度的不断加大，TCP/IP 技术本身的局限性，成为了制约网络自身发展的一方面因素，导致现有互联网正面临着前所未有的挑战，包括可扩展性、安全性、管控性、移动性、服务分发能力、绿色节能等一系列问题。

（1）可扩展性问题：一方面，随着用户数量和应用需求的不断增加，网络流量增加的速度已远远超过摩尔定律与路由器性能提升的速度，这要求 IP 网络基础设施每 2 年左右需要全面升级一次，导致运营商不断进行被动扩容，并为之付出了大量成本。另一方面，IPv4 地址枯竭且可扩展性差，骨干路由器的路由表急剧膨胀，目前全球路由表条目已经超过了 3087 万条，其中活跃路由表条目已经超过 80 万条，而且正在以每两年 1.2 倍的速度增长，预测到 2020 年整个路由表条目将可能达到四千万条<sup>[1]</sup>。路由表条目的快速增长大大降低了路由查找性能，增加了路由器的系统开销，而在现有互联网体系结构中，只能通过不断地增加硬件设备性能来缓解该问题，尚未找到根本性的解决方案。

（2）安全性问题：随着互联网应用的飞速发展与大规模普及，网络安全成为了一个不容忽视的重要挑战，包括恶意软件、分布式拒绝服务（Distributed Denial-of-Service, DDoS）攻击、钓鱼软件、应用程序漏洞等安全威胁。由于互联网最初设计的主要目标是实现鲁棒性互联和资源共享，并未充分考虑到网络的安全需求，虽然通过“打补丁”的方式在互联网中部署防火墙或陆续有 IPSec、SSL/TLS、DNSSec、RADIUS 等技术被提出以加强网络安全性，但整个互联网的安全保障仍处于被动应对的状态。随着应用的增多，漏洞也在不断增多，由垃



圾/钓鱼电子邮件引发的网络入侵事故逐年增加，造成严重的用户身份信息泄露。同时，网络中引入的新技术也会带来新的安全漏洞，如 NFV (Networking Function Virtualization, 网络功能虚拟化) 要求多个密码，就是一种潜在的威胁，需要利用其他安全技术保护。总之，网络的安全性问题始终缺乏系统化、内生化的网络安全体系。

(3) 可管可控性与服务质量保障问题：现有互联网采取了“尽力而为”的服务机制，网络本身缺乏感知和测量功能。同时 TCP/IP 网络采用分布式架构，由端系统负责复杂的网络功能，即遵循将服务连接的维护管理工作交由终端完成的设计原则，缺乏对网络资源的全局控制与管理，也没有真正有效的控制与资源调度手段，如流量工程、操作维护、故障检测、容灾抗毁、资源管理功能以及业务差异化等，越来越无法满足未来新型网络应用的需求。随着网络规模越来越大，如何实现网络系统的高效管控、自诊断、自恢复也成为亟需解决的关键难题。

(4) 移动性问题：早期互联网主要为以计算机为代表的具有一定处理能力的固定终端提供数据交换服务。目前，随着便携式移动设备和物联网、泛在网的出现，互联网的终端形态发生了很大变化，突出表现为终端的移动性显著增加，数据传输路径频繁变换，传统 TCP/IP 网络身份地址双重语义的设计规则不利于频繁的切换服务，无法保证低时延、不丢包的会话场景，尤其是对于高速移动的车辆等服务对象，严重破坏了上层应用服务的连续性，甚至难以保证传统意义上的端到端传输。如何高效地实现网络对移动性的支持成为亟待攻克的重要问题。

(5) 高效服务分发问题：过去十年推动互联网发展的主要趋势就是服务的多样性，如 Google、Facebook、YouTube 以及产生大量的互联网流量的类似服务，而云计算的发展和移动设备的增加导致了互联网服务的进一步增长。以视频服务为例，根据思科 VNI 预测<sup>[2]</sup>，到 2022 年，视频将占总 IP 流量的 82%，视频服务如 UHD (Ultra High Definition Television, 超高清)、4K/8K 视频业务正在不断演进，导致视频服务面临着电视使用率和广播使用不断减少、联网设备使用率和流传输不断增加的现状。因此面对大量的服务需求，现有网络面临的一项重要挑战就是如何实现高效的服务分发能力。

(6) 绿色与节能问题：网络通信行业不仅是个高科技行业，也是一个高耗能行业。互联网设备芯片容量与速度的提升，意味着更高的工作频率和复杂的加工工艺，直接导致芯片耗电量的增大，从而增加了设备的功耗，为此需要购买更大容量的供电系统和冷却系统。思科公司的分析报告显示，一些高端路由器能耗甚至已高达兆瓦级。预测显示，全球互联网数据中心的用电功率可能达 300 亿瓦特，相当于 30 个核电站的供电功率。如何构建高效节能的网络<sup>[3]</sup>已经成为影响国民经济和社会发展的重大科技问题。

## 1.2 未来网络的概念内涵

随着网络规模持续扩大、用户数量不断增长、新型互联网业务层出不穷，传统 IP 网络架构在路由扩展性、安全性、可管可控与 QoS 保障、移动性支持、服务分发能力、以及能耗等方面面临着诸多挑战。在此背景下，为了应对传统互联网体系结构逐渐暴露出的这些问题，世界各国已经实施了多项未来网络相关的研究项目，提出了“演进型”和“革命型”两大类的技术路线和解决思路。

“演进型”技术路线的研究人员主张在现有互联网网络体系架构下进行“补丁式”的修补，即基于现有的 TCP/IP 协议栈，（1）提出新的组网技术，改变现有网络形态，包括对网络设备或拓扑进行改造；（2）对已有的网络通信协议进行升级；（3）在现有网络中应用如人工智能、区块链、大数据等新技术手段。从而暂时解决现网中日益暴露的各种问题，使得现有网络架构仍然能够在一定程度上适应新的发展需求。

“革命型”技术路线则认为任何技术体系都有它的生命周期，经过若干年就可能发生较大的革新，IP 网络体系结构也不例外。由于 IP 网络体系结构在设计的时候并没有充分考虑到当前网络应用的复杂性，因此“革命型”技术路线主张采取“Clean Slate”（从头再来）的策略，即在不受现有互联网约束的基础上探讨新的网络体系结构，重新设计网络通信协议，并将其定义为未来网络体系架构，目标是为了从根本上克服传统互联网体系结构在可扩展性、安全性、可管可控与 QoS 保障、移动性、服务分发以及绿色节能等方面的问题，更好地适应未来发展需要，实现网络的可持续发展。

虽然业界提出了“演进型”与“革命型”两大技术路线以解决当前网络面临的问题，但是关于这两种技术路线的争议却很大，它们各有各的缺陷。“演进型”技术路线会使得原本简洁的网络结构变得日益复杂和臃肿；而“革命型”技术路线会减慢实际部署的步伐。

因此，未来网络的核心是提出一种高效、大规模、高度可伸缩、支持异构网络技术融合的基础网络体系结构，涵盖了“演进型”与“革命型”两大技术路线，它既包含了各种新型的网络体系架构，如信息中心网络、服务定制网络等，彻底改变现有 TCP/IP 网络的工作模式；又包含了网络相关的各种关键性的和热点型的技术，如新型组网技术、网络协议升级、以及通过如人工智能等新技术来解决现网存在的一些问题。从而保证既在短期内满足新业务需求，又在长期内全面、彻底的解决现网存在的问题，促进数字信息社会发展。

未来网络作为战略新兴产业的重要发展方向，将对全球智能制造、万物互联、天地一体化网络等技术领域产生重大影响。预计在 2030 年，未来网络将支撑万亿级、人机物、全时空、安全、智能的连接与服务，也就是说未来网络将具备的

能力包括：（1）支持超低时延、超高通量带宽、超大规模连接的能力；（2）满足与实体经济融合的需求，具备支持差异化服务的能力；（3）实现网络、计算、存储多维资源一体化，并具备多维资源统一调度的能力；（4）实现海陆空天一体化融合的网络架构；（5）做到简化硬件设备功能的同时保证其处理性能，并通过软件定义的方式增强网络弹性；（6）具备“智慧大脑”，实现网络运维智能化；（7）成为一个内生安全、主动安全的网络，进而更好的维护全球网络安全。

### 1.3 全球未来网络发展态势

自从未来网络的概念提出以来，全球网络发展水平较高的各个国家如美国、中国、欧盟、日本等从国家战略层面高度重视未来网络的创新，在政策、资金、人才培养等方面纷纷加大投入力度，以支持学术界与产业界对于未来网络体系架构与核心技术的研究和创新。为应对网络的可扩展性、安全性、实时性、移动性、可控可管以及服务质量保障等重大技术挑战，开发新的杀手级应用，美、欧、日、韩、中等先后布局并启动了一批未来网络研究计划<sup>[4]</sup>。目前，全球范围内已经产生了很多新型的体系架构，如信息中心网络、移动优先网络、服务定制网络等，以及创新的网络技术，如软件定义网络、网络功能虚拟化以及边缘计算技术等。

在十余年的时间里，未来网络逐步从学术研究走向产业化发展，新兴的网络架构和技术渐渐进入了全球网络通信产业的生态链。在该产业生态链中，电信运营商、设备厂商、互联网公司等多方力量已经营造了相对开放的环境，共同推动技术的发展和运用。运营商积极与厂商合作，共同推动产品和服务向全球化迈进。厂商凭借资金等方面的优势，加速对业界初创公司的收购和整合，推出全新的面向市场的产品和服务。未来网络领域正在这种“竞合”的理念下快速成长，逐渐在业界掀起新的浪潮，整个产业生态圈也逐渐发展壮大。2019年，Gartner发布了十大战略性技术趋势，包括自主设备、增强分析、AI驱动的开发、数字孪生、赋权的边缘、沉浸式体验、区块链、量子计算等，这些技术趋势和应用将对未来互联网提出新的需求，整个生态圈将迎来更多机遇和挑战。

从技术角度出发，充分考虑全球未来网络发展现状以及未来网络能力的需求，全球未来网络的发展趋势主要包括如下六个方面：

（1）面向2030的网络架构。随着新媒体业务、工业控制、5G等新应用场景的出现，未来网络特别是面向2030年的网络应该具备哪些能力与功能成为了未来网络架构发展需要考虑的关键问题。ITU（国际电信联盟）在ITU-T SG13全会上决议通过了成立Network 2030焦点组（Focus Group on Network 2030，即FG-NET-2030）。该焦点组旨在探索面向2030年及以后的网络技术发展，潜在的包括新的媒体数据传输技术、新的网络服务和应用及其使能技术、新的网络架

构及其演进。由中国信息通信研究院、华为技术有限公司发起的网络 5.0 产业和技术创新联盟于 2018 年 6 月成立，该联盟主要就下一代数据网络—网络 5.0 的相关工作展开筹备，包括梳理其应用需求、定义愿景、设计架构与协议、研究关键技术（如服务质量、移动性、安全等）、实现及验证等，同时通过交流与合作的方式与国内外相关组织达成共识，进一步推动产业界的发展。

（2）数据平面可编程。软件定义网络的可编程性目前仅局限于网络控制平面，其转发平面在很大程度上受制于功能固定的包处理硬件。新一代高性能可编程数据包处理芯片加上高级语言“P4”（[www.P4.org](http://www.P4.org)）的出现，使得摆脱网络数据平面的束缚成为了可能，让网络拥有者、工程师、架构师及管理员可以自上而下地定义数据包的完整处理流程。这种可编程数据平面有助于网络系统供应商进行更快速地迭代开发，甚至直接通过打补丁修复现有产品中发现的数据平面程序漏洞或功能缺陷。它也可以帮助网络拥有者实现最适合其自身需求的具体网络行为。

（3）低时延-确定性时延网络。如何控制端到端的时延、实现超低时延传输是目前 IP 网络面临的重要问题之一，工业控制、远程医疗、机器人、VR 游戏、导弹控制等场景需要端到端时延的精准控制，要求毫秒级的时延和微秒级的抖动；数据中心、5G 物联网等场景下，高性能计算、大数据分析和浪涌型 IO 高并发等技术要求网络满足超低时延的要求。由此可见，低时延、确定性时延成为时延敏感型业务的迫切需求。

（4）网络/计算/存储一体化与智能分发。面向 AR/VR、海量 4K/8K 高清视频等众多新业务需求，网络/计算/存储一体化以及在多维资源一体化平台中融入内容分发能力正在成为未来网络技术发展的重要趋势，这是因为：一方面，并行计算、效用计算、高性能计算等技术逐步成熟，计算与网络基础设施的融合已成必然趋势；另一方面，随着技术进步，存储设备的成本呈现快速下降趋势，在网络中集成存储功能、利用存储换取带宽成为一种可行的设计思路。

（5）网络人工智能。人工智能技术为人类社会的持续创新提供了强大的驱动力，开辟了广阔的应用空间。大规模网络带来了迫切的自动化管理需求，网络引“智”，化“繁”为“简”。网络逐步加强智能化能力，可以使运营商网络运营决策科学化、业务个性化、维护精准化和服务高效化。与此同时，运营商级别的自动化网络操作系统逐步投入使用，为网络人工智能的发展奠定了基础。

（6）网络开源。开源是未来网络研究发展的一个重要特征，目前已经在网络控制平面、数据转发平面、业务编排管理、软硬件及芯片等各个方面都成立了开源项目，如 OpenDaylight、ONOS、ONAP 等，并被广泛认可。



## 二、未来网络前沿热点技术

未来网络覆盖面广、涉及环节多，它不仅包括新的体系架构，还包括一系列新型网络技术。为了梳理未来网络涉及的架构和技术，更好地推动该领域的技术研究与生态构建，本章将从体系架构、软件定义网络、网络功能虚拟化、边缘计算、网络人工智能、低时延-确定性网络、IPv6 网络、区块链网络、网络安全、5G 十个方面介绍未来网络的前沿热点技术，供读者共同交流和探讨。

### 2.1 未来网络体系架构

未来网络体系架构的发展存在革新式和演进式两种方向，革新式能更好的满足未来网络的需求，但实施难度大；演进式易于部署，但将使网络越来越臃肿。为了使读者更全面地了解未来网络体系架构，下面将分别对信息中心网络、eXpressive Internet Architecture、移动优先网络（MobilityFirst）、服务定制网络、全维可定义网络、地址驱动网络、标识一体化网络展开介绍。

#### （1）信息中心网络

在现有的网络使用模式中，信息传递变得越来越重要，通信过程中数据内容位置的重要性被逐渐淡化<sup>[5]</sup>，用户更加关心的是数据内容本身。网络的使用模式已经由传统的面向主机连接模式逐渐演变为以信息为中心的转发模式。因此，信息中心网络（Information-Centric Networking, ICN）的概念被 Xerox PARC 研究中心和 ULCA 大学的科学家提出，它以信息命名方式取代传统的以地址为中心的网络通信模型实现用户对信息搜索和信息获取，旨在增强互联网安全性、支持移动性、提高数据分发和数据收集的能力、支持新应用与新需求<sup>[6]</sup>。根据命名方式的不同，ICN 分为集中式架构和分布式架构，如图 2-1 所示。集中式 ICN 架构采用扁平化的命名方式，即在名字中嵌入内容的哈希，不可读的名字需要通过集中的名字解析服务解析出路由和转发的路径；而分布式 ICN 架构采用分层的命名方式，类似于统一资源定位符（Uniform Resource Locator, URL）的结构，分层的根路径为内容发布者的名字前<sup>[8]</sup>，直接基于内容名字路由，不存在任何解析过程。其中，典型的集中式架构以发布订阅互联网技术（Publish-Subscribe Internet Technology, PURSUIT）/发布订阅互联网路由范式（Publish-Subscribe Internet Routing Paradigm, PSIRP）为代表，典型的分布式架构以命名数据网络（Named Data Networking, NDN）为代表。值得一提的是，NDN 保留了 Internet 的沙漏模型，通过改变细腰层来设计一个天然支持内容分发的通用网络架构，同时重新定义了报文形式和通信节点数据结构。

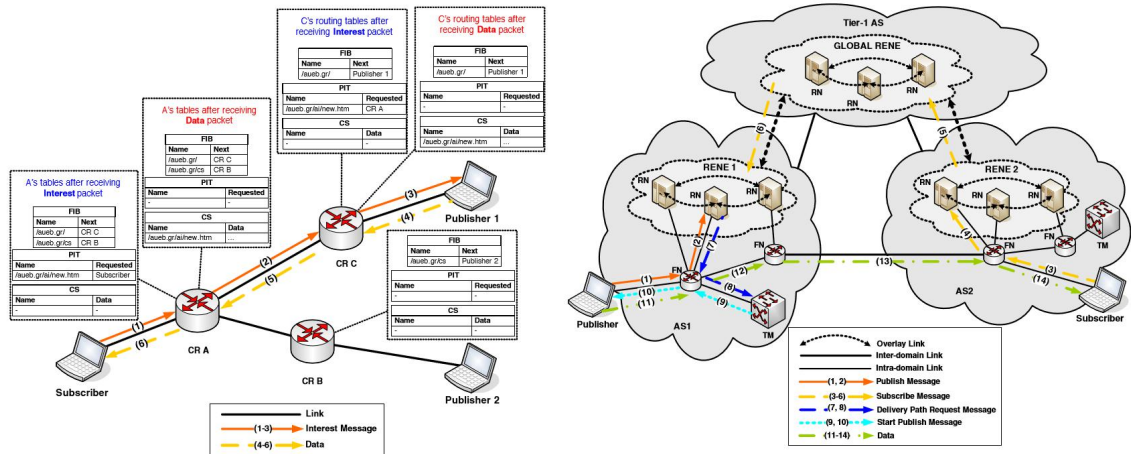


图 2-1 信息中心网络<sup>[7]</sup>

(2) eXpressive Internet Architecture

为了解决网络使用模式多样化，满足对可靠通信的需求，以及有效的协调相关利益者来提供网络服务，卡耐基梅隆大学的研究团队提出了新型网络架构 eXpressive Internet Architecture (XIA)<sup>[9]</sup>，如图 2-2 所示。XIA 主要具有可演进、可信、灵活路由等特点。其中，可演进的特点保证了网络体系架构的细腰不再局限于某一种特定通信主体<sup>[10]</sup>，从而支持了网络的长期演进；可信的特点保证了分组数据的可信转发，是一种 XIA 的内在安全机制；灵活路由特性为路由可靠性并为未来网络与现有网络兼容提供了很大的灵活性。XIA 结构把网络中的发送方或接收方都视为一种通信主体 (Principal)<sup>[11]</sup>。对于不同的 Principal，路由器通过使用不同的处理方式来实现不同的网络功能，同一个应用可以包含多个不同的 Principal 来实现多种网络功能。此外，XIA 采用了 XID (XIA ID) 来提供通信的内在安全性 (Intrinsic Security)，每个 XID 通过密码学的方式生成，通信双方通过 XID 进行身份和内容完整性验证。自 2010 年起，XIA 项目获得了美国 NSF 未来网络体系结构研究计划 (FIA) 的支持，重点关注互联网的演进以及新功能的增量部署。

(3) 移动优先网络 (MobilityFirst)

随着移动设备的发展与普及，随之而来的服务、管理和可信性等方面的变化需要要求在移动平台上设计未来互联网架构，因此,美国罗切斯特大学的研究团队在 2010 年发起了移动优先网络 (MobilityFirst) 项目<sup>[12]</sup>。如图 2-3 所示，该项目的目标设计目标主要包括：在符合动态主机和网络规范的技术上提高移动性；在考虑无线特性的基础上保证鲁棒性；通过加强移动网络和有线网络基础设施的安全性和隐私来保证可靠性；支持灵活的上下文感知的移动网络服务、可发展的网络



服务等特性；具有可管理性和经济可行性。为了满足这些要求，MobilityFirst 基于如下的核心思想构建未来互联网的体系结构：(1)位置标识与身份标识分离；(2)每个命名对象都具有扁平的全局唯一的名字；(3)采用 GNRS 服务完成位置标识与身份标识映射信息的注册、更新、查询；(4)设计多种路由方式应对未来网络的复杂多变场景。自 2010 年起，MobilityFirst 项目获得了美国 NSF 未来网络体系结构研究计划（FIA）的支持，为四个未来互联网研究项目之一。

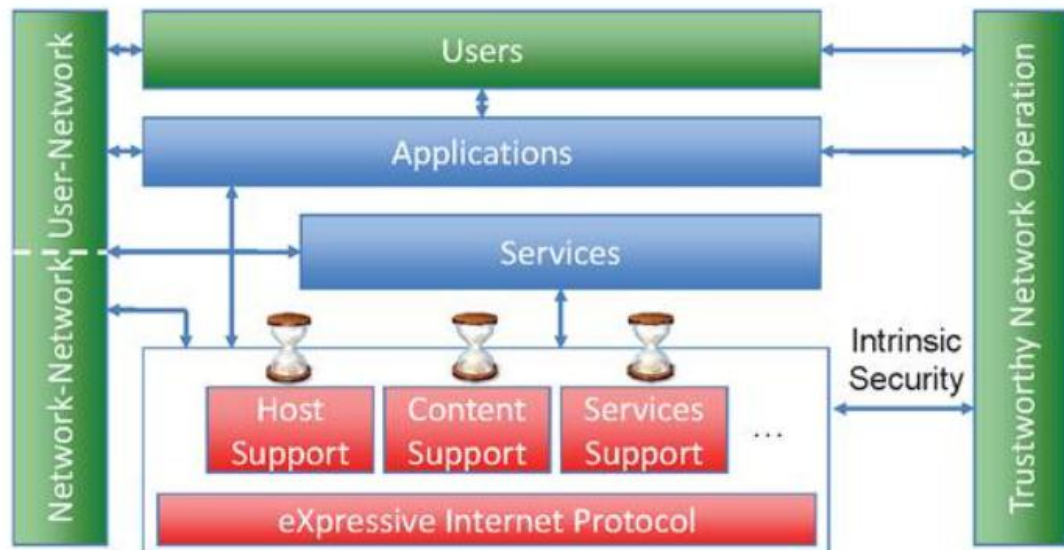


图 2-2 XIA 网络架构<sup>[9]</sup>

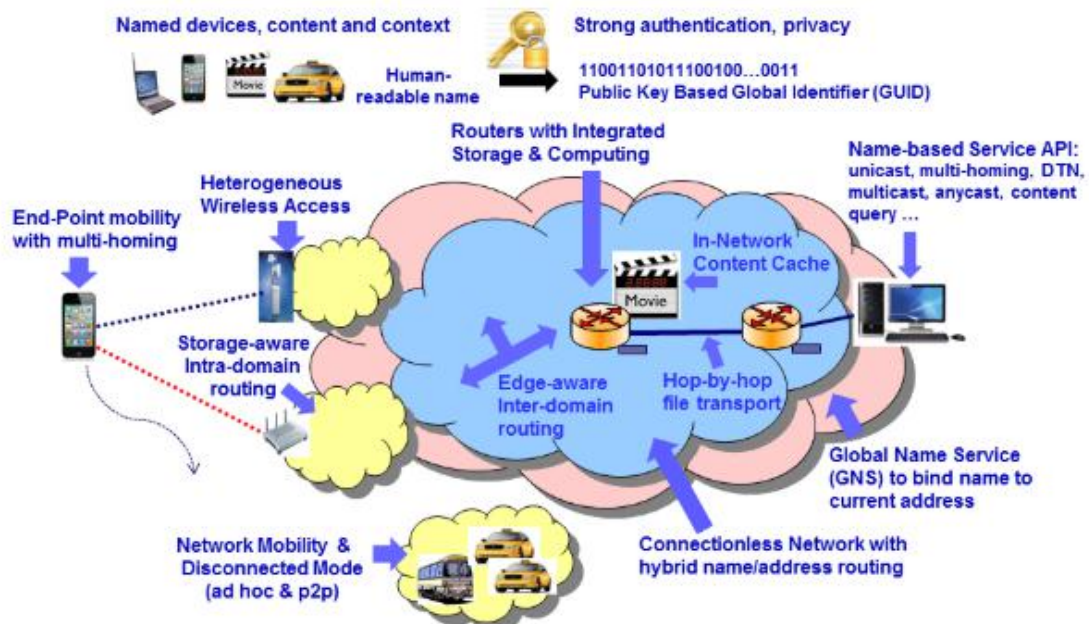


图 2-3 移动优先网络架构<sup>[12]</sup>

#### (4) 服务定制网络



随着互联网业务的迅猛发展，急剧增加的互联网流量、用户的差异化需求以及实体经济与互联网的深度融合使当前网络面临着前所未有的挑战。传统基于TCP/IP的网络体系架构在可扩展性、安全性、可控可管等方面存在很多问题。针对上述挑战，江苏省未来网络创新研究院、北京邮电大学、中科院计算所等单位联合提出了服务定制网络（Service Customized Networking, SCN）的设计理念<sup>[13]</sup>，如图 2-4 所示，SCN 基于软件定义网络设计，继承了其数据控制分离以及网络可编程的主要特点，并针对当前互联网中的问题，增加了网络虚拟化能力以及内容智能调度能力。SCN 网络体系架构主要特点：1）基于网络控制（软件实现）与数据交换（硬件实现）分离解决网络管控复杂问题，可以灵活构建不同服务质量等级的虚拟网络，为不同用户提供差异化服务；2）实现信息内容资源智能有序调度，内容贴近用户部署，解决信息重复传输问题，更有效的利用基础网络资源；3）基于大数据技术对采集的网络数据进行分析，分析的结果会反馈给分发和控制平面，利用数据分析和人工智能为网络内容调度、智能控制提供支撑。

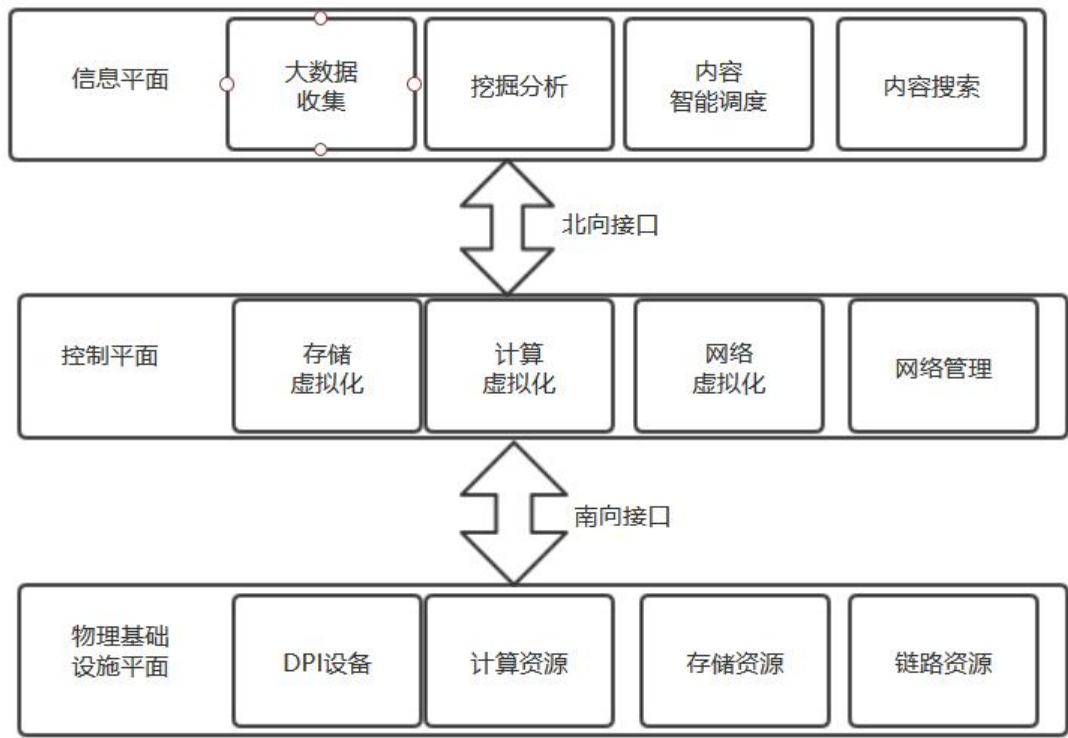


图 2-4 服务定制网络框架<sup>[13]</sup>

（5）全维可定义网络

随着互联网+、智能制造等逐渐成为国民经济命脉领域的新支柱，互联网与经济社会深度融合发展，使得用户对网络的专业化、个性化需求不断提升，然而当前互联网技术内涵的发展却未能充分支撑网络应用外延的拓展，现有网络基础

架构及由此构建的技术体系在智慧化、多元化、个性化、高鲁棒、高效能等方面仍面临一系列重大挑战，制约了其在更广更深层次上支撑经济社会发展。针对上述挑战，解放军战略支援部队信息工程大学团队以 SDN 和 NVF 等作为新型网络技术的创新基础，提出了全维可定义开放网络架构，如图 2-5 所示，以软件定义转发（SDF）、软件定义互连（SDI）、软件定义硬件（SDH）、软件定义协议（SDP）、软件定义芯片（SDC）等，实现对基础网络的拓扑、协议、软/硬件、接口等进行全维度定义，从而达到网元设备开放、协议控制开放、网络资源开放、节点能力开放、网络接口开放、转发控制开放、承载方式开放等目的，为多元化、个性化应用提供了精细化、可定义的网络组件和服务；为打破封闭垄断，消除技术壁垒，变革网络基线技术，开展颠覆性网络架构研究、试验和应用提供基础环境。

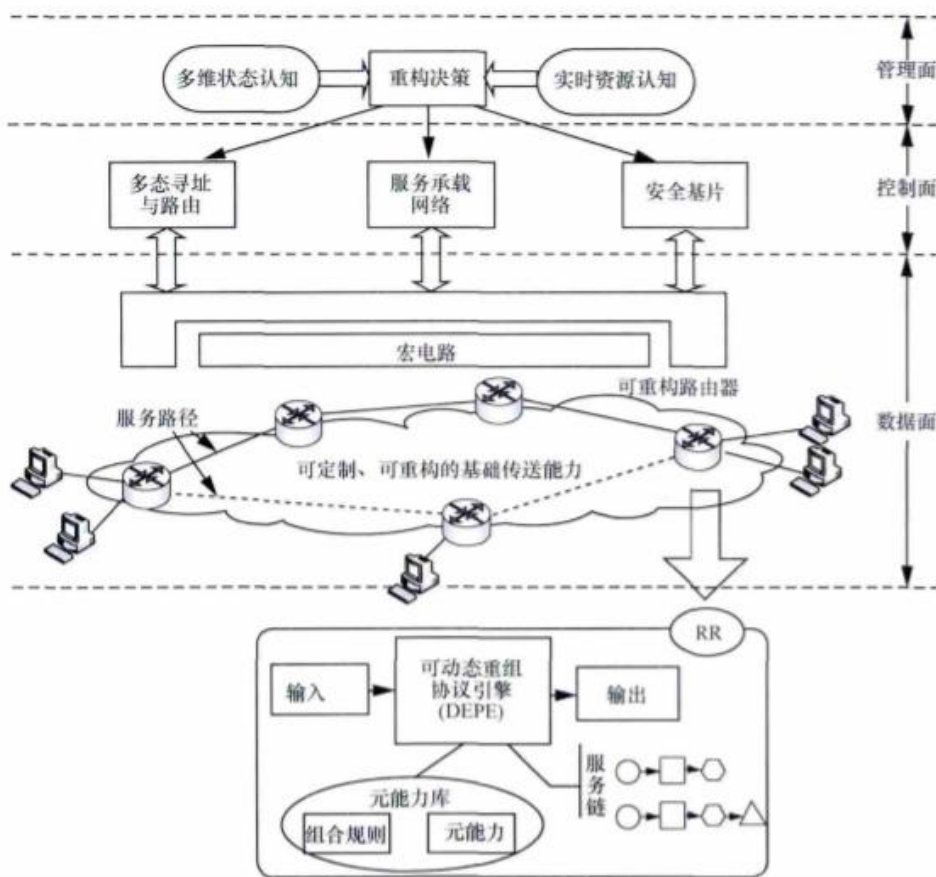


图 2-5 可重构通信基础网络体系总体架构<sup>[14]</sup>

#### （6）地址驱动网络

地址驱动网络（Address Driven Network, ADN）是清华大学提出的一种来网络体系结构<sup>[15]</sup>，如图 2-6 所示。其核心思想是以 IP 地址的创新管理和使用方

法为驱动，充分利用 IP 地址的多重属性，来解决当前互联网面临的规模扩展、平滑移动、安全可信、服务质量、网络虚拟化等问题。地址驱动网络在 IP 地址多重属性得到应用的基础上，能够实现多种技术或应用，包括真实 IP 地址、二维路由、动态 IP 等。其中，二维路由将 IP 报文的源地址和目的地址一起作为路由的依据，完成一些复杂路由；真实 IP 地址和动态 IP 则分别对报文的源地址和目的地址的真实有效性进行验证，防止恶意网络攻击，或者对其他终端发起未得到授权的访问。地址驱动网络能够很好地兼容现有手段，为充分利用 IP 地址资源提供硬件和管理台，渐进并最终完成互联网革新，以满足未来的发展需求。

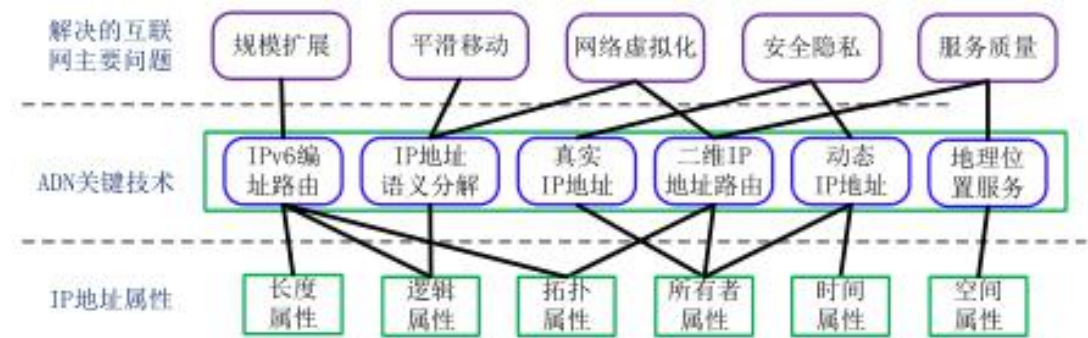


图 2-6 AND 体系结构示意图<sup>[15]</sup>

（7）一体化标识网络

现有信息网络的原始设计思想基本上是一种网络支撑一种主要服务的解耦模式，难以满足网络和服务的多样性需求，针对现有网络存在的弊端，北京交通大学经过多年研究和积累，提出了一种未来网络新型体系架构即一体化标识网络<sup>[16]</sup>，如图 2-7 所示。在新网络体系的模型中，将传统信息网络的分层结构模型统一抽象划分为服务层面和网络层面两个基本层面，即“网通层”和“服务层”，其中“网通层”完成网络一体化，“服务层”实现服务普适化，通过这两层模型构成了该网络体系基础理论框架。“网通层”的作用是在一个一体化的网络平台上提供多元化的网络接入，为数据、语音、视频等业务提供一个一体化的网络通信平台，从而达到有效支持普适服务（即多种服务）的目的。“服务层”创建了虚拟服务模块与虚拟连接模块、服务标识解析映射与连接标识解析映射，以实现对各种业务的统一控制和管理等。

（8）双结构网络

当前主流内容共享网络是在 Internet 之上构建 CDN（Content Delivery Network，内容分发网络）。然而，这种内容共享网络本质上具备上下层两种体系结构，上层结构寄生、依赖于下层结构，导致在 Internet 基础设施较差地区难以实现内容共享。因此，为了打破这种寄生关系，东南大学团队提出了以 Internet

为主结构而以播存网络为次结构的双体系结构内容共享网络（Dual-Architecture Network, DAN）<sup>[17]</sup>。如图 2-8 所示，DAN 主要包括主结构和次结构两个部分，而统一内容标签 UCL（Uniform Content Label）是双结构共栖协同的纽带，用来支持内容信息聚合、传播、管理和个性化服务等多维度内容资源描述。模型主要由大数据中心、接入网、播发中心、广播通道和边缘盒子 EBox 等五个构件组成。大数据中心一方面负责采集用户历史记录，并结合热门内容来分析、感知和预测偏远地区个人和群体用户兴趣，并最终生产适配用户兴趣的内容；接入网是当地用户连接传统广域互联网的有线或无线物理通道；播发中心是广播分发的内容源，为每一条预播发的内容正文进行 UCL 标引；广播通道是单向广播数据传输信道；EBox 是主结构和次结构的物理交汇点，既是广播内容边缘存储库，也是广域互联网接入终端。



图 2-7 一体化网络与普适服务原型系统<sup>[16]</sup>

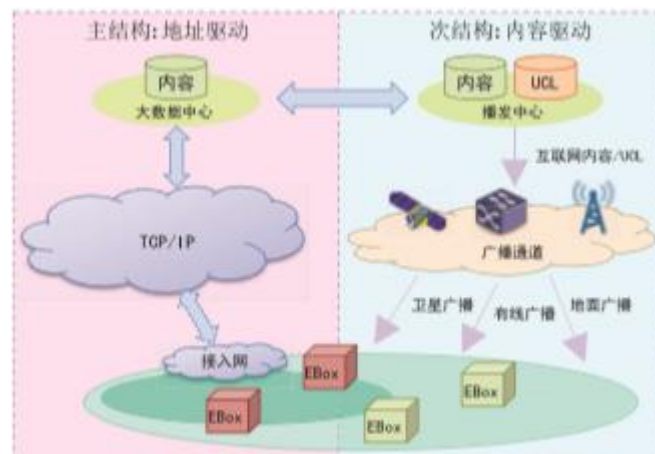


图 2-8 DAN 服务模型<sup>[17]</sup>

## 2.2 软件定义网络

随着互联网用户的日益增多以及用户需求的不断变化，现有以 IP 为网络层的体系架构已经越来越难以持续发展，SDN 应运而生。SDN 是一种数据平面与控制平面分离，并可直接对控制平面编程的新型网络架构。数控分离将有助于底层网络设施资源的抽象和管理视图的集中，从而以虚拟资源的形式支持上层应用与服务，实现更好的灵活性与可控性。SDN 架构主要可以分为三大部分：SDN 控制面、SDN 数据面、SDN 编排面<sup>[18]</sup>，如图 2-9 所示。

控制平面由 SDN 控制器进行集中控制，获取网络资源的全局信息并根据业务需要进行资源的全局调配和优化，如网络服务质量、负载均衡功能等。同时集中控制后，全网的网络设备都由中央控制器去管理，使得网络节点的部署以及维护更加敏捷。

数据平面负责数据处理、转发和状态收集等。其核心是交换机，可以是物理交换机，也可以是虚拟交换机。SDN 中的转发设备将数据平面与控制平面完全解耦，所有数据包的控制策略由远端的控制器通过南向接口协议下发，网络的配置管理同样也由控制器完成，这大大提高了网络管控的效率。交换设备只保留数据平面，专注于数据包的高速转发，降低了交换设备的复杂度。

编排平面是指对网络中的自动行为进行编程，以协调所需的网络硬件和软件元素以支持各种应用和服务的能力。SDN 通过标准的南向接口屏蔽了底层物理转发设备的差异，实现了资源的虚拟化，同时开放了灵活的北向接口供上层业务按需进行网络配置并调用网络资源。SDN 编排器是实现自动部署和敏捷运营的关键技术，可支持跨域、跨层以及跨厂家的资源自动化整合，有助于提升网络能力的开放性以及服务的端到端自动化水平，为客户带来更好的用户体验。开放网络自动化平台（ONAP）使用服务编排器（Service Orchestrator）组件，通过分解服务抽象模型的方式进行硬件虚拟资源池、SDN 控制器、应用控制器、虚拟网络功能等多种资源的自动化规划与配置；Open Source MANO(OSM)利用 MANO 层协调 NFV 基础设施（NFVI）资源，并将它们有效地映射到各种虚拟网络功能（VNF），实现网络服务的灵活组织。

SDN 技术自从问世以来得到了广泛的认可和应用<sup>[19]</sup>，如 VMware 公司在收购了 Nicira 之后，推出了自己的 SDN 网络虚拟化平台 NSX，利用控制平面和编排平面的强大功能，实现了 SDN 在网络虚拟化中应用的实例，成功进军数据中心网络市场；运营商亚太环通（Pacnet）公司在天津启用的 IDC，利用 SDN 技术的开放可编程接口，提供给用户原来无法获得的对网络配置管理和策略部署的灵活性控制，为用户提供自助调整带宽的功能，实现了业务的灵活性；AT&T 提出 Network 3.0 计划，将软件定义网络及其编排功能与大数据、微服务、机器学





基于互联网业务与 SDN 技术的迅猛发展，网络基础架构面临巨大挑战，需要一种全新的技术来支撑基于业务和应用的超大规模流量工程。Segment Routing 就是在这样的背景下，由 IETF 推动的支持 SDN 架构的新型路由转发协议。Segment Routing 是一种源路由机制<sup>[20]</sup>，用于优化 IP，MPLS 的网络能力，可以使网络获得更佳的可扩展性，并以更加简单的方式提供 TE、FRR、MPLS VPN 等功能。在未来的 SDN 网络架构中，Segment Routing 将为网络提供和上层应用快速交互的能力。SR 通过 SDN 控制器，可以根据网络状态，进行源路由路径控制，无需修改路径上网络设备的路由信息，从而使得大规模部署流量工程变得简单可行。Segment Routing 是近年基础网络领域重要创新之一，其意义不亚于甚至超过 20 年前 MPLS 的出现。随着城域网，广域网甚至核心网等 SDN 的规模应用，SR 搭载 SDN 毫无疑问将重塑新型网络，逐步取代传统协议工作方式。

### （2）Intent-Based Networking 技术

当今的竞争激烈和网络繁荣发展环境中需要一个比以往任何时候都更加灵敏和敏捷的网络。思科提出了一种新的网络控制和管理理念，用户只需要提供目的，由网络设施自动翻译为网络配置指令执行，并不断收集和监控网络运行状态进行反馈，从而实现持续优化网络的目的。IBN 体系结构<sup>[21]</sup>使用软件和硬件的组合来控制网络基础设施。它允许用户表达他们期望的网络状态，基础设施配置，以及安全策略等，并且自动实现并维护该状态。IBN 系统具有四个特点：翻译和验证、自动实施、状态意识、保证和动态优化/修复。该方案的提出为数据中心，园区网和广域网等开辟了新局面。SDN 和 IBN 是两种互帮互利的技术，它们既可以各自独立部署，也可以混合部署于网络中。基于 SDN 与 AI 的 IBN 系统能够灵活、快速地执行用户的策略和意图，实现自动化运维，使业务目标与网络结果保持一致。

### （3）P4 技术

软件定义网络的可编程性目前仅局限于网络控制平面，其转发平面在很大程度上受制于功能固定的包处理硬件。新一代高性能可编程数据包处理芯片加上“P4”（[www.P4.org](http://www.P4.org)）高级语言的出现，让网络拥有者、工程师、架构师及管理员可以自上而下地定义数据包的完整处理流程。P4 这种专用的编程语言<sup>[22]</sup>，其目标为协议无关性、目标无关性以及现场可重配置能力，它能够解决 OpenFlow 编程能力不足以及其设计本身所带来的可拓展性差的难题。首先 P4 定义数据包的处理流程，然后利用编译器在不受限于具体协议的交换机或网卡上生成具体的配置，从而实现用 P4 表达的数据包处理逻辑。这种可编程数据平面有助于网络系统供应商进行更快速的迭代开发，甚至直接通过打补丁修复现有产品中发现的数据平面程序漏洞。它也可以帮助网络拥有者实现最适合其自身需求的具体网络

行为。对于网络芯片供应商，它还能使他们能专注于设计并改进那些可重用的数据包处理架构和基本模块，而不是纠缠特定协议里错综复杂的细节和异常行为。

#### （4）SD-WAN 技术

SD-WAN 即软件定义广域网，借助 SD-WAN 技术，广域网技术正在由传统“两点一线”的封闭方式，向灵活的、连接混合（云）多数据中心的、开放方式演进。在 SD-WAN 架构下，设备的管理平面、控制平面与数据转发平面分离，并通过 SD-WAN 控制器实现对全网 SD-WAN 网关的集中管理和控制。复杂的广域网能够在 SD-WAN 架构下变得简单和透明，多种类型的互联结构、多种颗粒度的资源、多种方式的路径选择能够被灵活定义，这种可定义的方式能极大增强广域网的弹性，满足广域网上应用与服务的个性化需求，从根本地解决传统广域网面临的一系列挑战：简化部署、管理与维护；可以帮助企业在互联网上面拓展带宽资源，提高传输效率，控制带宽成本；实现面向业务/应用的或基于链路质量的路径选择；实现流量与性能的可视化管理等。

#### （5）基于 SDN 的 IP+光技术

为了获得合理的带宽成本，IP 骨干网络架构要向扁平化、全互联演进。从技术发展的趋势来看，IP 层和光层在不断地融合<sup>[23]</sup>。随着网络流量的爆发式增长，运营商面临着一系列的挑战，如：骨干网流量快速增长 IP 层和光层扩容成本高昂；IP 网络与光网络协同能力差，业务开通和部署周期长；IP 层和光层无法感知对方的网络拓扑和保护能力，无法有效协同保护；网络优化改造对现网业务影响巨大；从规划到实现部署周期长，成本高。为应对上述挑战，基于 SDN 的 IP+光协同方案被提出。具体的实施方案包括在光层网络构建灵活的带宽云，在 IP 网络实现和光网络灵活的互操作，利用 SDN 控制器实现全局视角的集中控制，和在同一的运维层实现网络的抽象和业务自动化等。

#### （6）软件定义光网络技术

随着云计算、数据中心的广泛应用，各种宽带新业务不断涌现，由此产生的庞大数字洪流给作为信息基础设施的光网络带来巨大挑战。软件定义光网络<sup>[24]</sup>指光网络的结构和功能可根据用户或运营商需求，利用软件编程的方式进行动态定制，从而实现快速响应请求、高效利用资源、灵活提供服务的目的。将软件编程的思想引入光网络业务平面、控制平面和传送平面，使光网络体系架构不仅具备用户业务感知的能力，还具备传输质量感知的能力。基于软件编程控制的思想，可以实现光网络元素的软件可编程控制，从而全面提升光网络的灵活扩展能力，解决传统多层异构网络面临的多个关键问题。

#### （7）智能网卡技术



智能网卡（Smart NIC）和标准网卡（NIC）的根本区别在于 Smart NIC 从主机 CPU 卸载处理量。Smart NIC 将 FPGA、处理器或基于处理器的智能 I/O 控制器与分组处理和虚拟化加速集成在一起。大多数 Smart NIC 可以使用标准的 FPGA 或处理器开发工具进行编程，越来越多的厂商也开始增加了对可编程语言 P4 的支持。具有高级编程功能 Smart NIC 能够提升应用程序和虚拟化性能，实现 SDN 的诸多优势。通过在每台服务器上使用 Smart NIC，运营商可以确保网络虚拟化、负载均衡和其他低级功能从服务器 CPU 中卸载，确保为应用提供最大的处理能力。这将对 SDN 架构的部署提供支持，更高的虚拟化程度与更好的编程拓展性都更有利于 SDN 架构的运行，更充足的运算能力则能够更好地满足集中控制所需要的庞大处理能力。

## 2.3 网络功能虚拟化

随着网络体系结构演进与业务持续发展，网络中部署了越来越多的专用设备（网络中间件）。网络中间件的作用是对数据包进行处理，以实现特定的网络功能，如防火墙、深度包检测、负载均衡器等。这些专用设备有一显著的特点就是和业务的紧耦合。这一特点带来的好处是性能高，符合运营商电信级的业务要求，但是也存在功能单一、封闭、不灵活、价格高昂等问题。在传统的电信网络中，由于业务单一，用户需求变更不频繁，网络规模相对较小，因而基于专用设备的业务部署方式的弊端并不明显，但是随着业务种类的增加，这种软硬件一体化的封闭式架构，带来了通信设备日益臃肿、扩展性受限、功耗大、功能提升空间小、业务上线时间长、资源利用率低、运维难度大、成本高、厂商锁定等一系列问题，难以满足网络及应用的快速创新与动态部署要求。

为了解决专用设备带来的一系列问题，AT&T、英国电信（BT）等运营商公司联合成立了网络功能虚拟化产业联盟，并提出 NFV 的概念。NFV 旨在将虚拟化技术扩展到网络当中，以提供一种新的设计、部署和管理网络业务的方法，达到缩短业务部署上线时间、提升运维灵活性、提高资源利用率、促进新业务的创新、降低 OPEX 和 CAPEX 等目的。其核心思想是将专有的物理网络设备与其上运行的网络功能解耦。也就是说，网络功能以软件的形式来实现，运行在工业标准硬件，如标准服务器上，以取代当前网络中私有、专用和封闭的专用设备。

近年来，NFV 技术与标准迅速发展。2012 年 10 月，NFV 标准工作组（NFV ISG）<sup>[24]</sup>在 ETSI 成立，旨在推动 NFV 业务和技术达成行业共识，加快 NFV 的产业化进程。2013 年，AT&T 首先推出了 Domain 2.0 网络重构计划，旨在通过引入 NFV、ECOMP（Enhanced Control, Orchestration, Management & Policy）、SDN 三大核心要素，提升业务上线速度，实现网络的高效灵活管理。2014 年，OPNFV<sup>[25]</sup>（Open Platform for NFV，NFV 开放平台）开源社区正式成立，社区

为自己划定的前期工作范畴是 NFV 基础设施,即为 NFV 提供一个统一的开源的基础平台,此平台集成 OpenStack、OpenDaylight、OVS、CEPH 等上游社区的成果,并且推动上游社区加速接纳 NFV 相关需求。2017 年 2 月,由 AT&T 主导的 ECOMP 和由中国移动主导的 OPEN-O 两大开源项目合并为 ONAP (Open Network Automation Platform, 开放网络自动化平台)<sup>[26]</sup>。2018 年 6 月, ONAP 第三版本全球开发者大会在中国举行, 参会成员共同讨论 ONAP 下一版本的发展目标、应用场景、新增功能和非功能需求等,并达成一致共识——促进全球电信运营商实际部署 ONAP。

同时,工业界和学术界也针对 NFV 的相关技术与应用场景展开了广泛研究,主要包括以下四个方面:

### (1) NFV 智能化服务编排

传统网络的运营支撑系统 (OSS) 能够完成高层业务编排,但由于传统网络设备的封闭, OSS 只能进行一些简单的管理和操作,所以需要更加灵活与智能的业务编排方式。ETSI 提出了 MANO 负责 NFV 网络的管理,由 NFVO、VNFM 和 VIM 三部分组成。其中的 NFVO 负责对 NFV 网络的业务进行编排,处理网络管理员或者上层应用下发的业务需求,安排业务链中中间件的资源分配和安装。AT&T 公司提出的 ECOMP 平台,以及后来 AT&T 和中国移动等提出 ONAP,都是利用云和网络虚拟化实现更高开发效率和运营自动化的服务,这加速了服务提供商新业务的部署,并降低其运营成本。

### (2) NFV 服务链部署

在 NFV 系统中,一个网络服务由服务链组成,服务链由一系列的虚拟网络功能 (Virtual Network Function, VNF) 组成, VNF 的不同顺序将使服务链产生差异性。将一个业务的服务链部署到基础资源层的过程中,既要满足业务的服务等级需求,又要尽可能去优化资源的部署,从而提高资源的利用率和业务的接受率。服务链部署的问题大致分为两个研究方向,首先是服务链的生成问题,即不同的 VNF 承载着不同的网络功能,研究将不同的 VNF 按序组合,去完成网络服务的要求。其次是服务链的映射问题,类似于虚网映射,其优化属于 NP 难问题,即研究如何在算法复杂度和优化程度之间取舍,设计一种合适的映射算法。

### (3) NFV 性能优化

目前,为了保障业务的性能,需要对 NFV 节点和服务链进行性能优化。针对整条服务链,希伯来大学 Bremler-Barr 等人将网络功能分解成若干个子模块 (例如:收包、包头分析、包头修改等),通过模块的设计来构建统一的数据平面进行集中式的共享或迁移,并有效的消除原有服务链中的模块冗余,提高服务

链的处理性能<sup>[27]</sup>。清华大学毕军等人提出网络功能并行化的包处理方法，将原有串行处理且无依赖关系的网络功能通过包拷贝、合并等方式实现并行化包处理，优化整条服务链的处理延迟和吞吐<sup>[28]</sup>。

#### （4）NFV 的应用场景

目前 NFV 应用场景主要集中在移动核心网、企业核心网、云数据中心等场景。移动核心网场景下，基于 NFV 的虚拟化方案可以使用通用基础设备实现电信网络功能，提升管理和维护效率，增强系统灵活性。2018 年 6 月，IMT-2020(5G) 推进组网络技术工作组发布了《5G 核心网云化部署需求与关键技术白皮书》，指出 5G 的产业化可以通过部署 NFV 实现 5G 的云化组网，使 5G 网络服务更加灵活。企业网场景下，通过引入 SDN/NFV 技术清除企业上云障碍，实现业务智能快速开通。浪潮、山东联通开发的 SD-IPRAN 管控系统平台和云网协同编排器支撑运营商网络功能灵活定制，实现云专线、云资源的统一编排部署，实现分钟级云服务的部署和云网络的开通。云数据中心场景下，引入 SDN/NFV 可以解决虚拟化环境下网络复杂度高、网络运维困难、租户业务之间的隔离性无保障等问题。

## 2.4 边缘计算

随着移动互联网和物联网的发展，数据流量和终端设备连接数量呈现爆炸式增长，这给当前的网络架构带来了严峻挑战；与此同时，随着 4K/8K 视频、虚拟现实/增强现实、工业互联网、车联网等新型业务的不断涌现，对网络的传输和处理能力提出了更高的要求，要求网络具有提供超大带宽、超低时延以及超大连接等服务能力。为了应对上述挑战，业界提出了边缘计算技术，并得到了广泛关注。边缘计算指的是靠近物或数据源头的网络边缘侧，融合网络、计算、存储、应用核心能力的开放平台，该平台就近提供边缘智能服务，满足行业数字在敏捷联接、实时业务、数据优化、应用智能、安全域隐私保护等方面的关键需求<sup>[29]</sup>。

边缘计算是一种开放、弹性、协作的生态系统，可推动移动通信网、互联网和物联网的能力互动和数据互动<sup>[30]</sup>。首先对于开放性，边缘计算能打破传统移动蜂窝网络的封闭性，将网络内的基础设施、网络数据和多样化服务转化为开放的资源，以服务的形式提供给用户和业务开发者，使得业务更贴近用户。其次，边缘计算具有弹性，能够支持资源的灵活调用和配置，并通过自动化方式实现快速响应，使得边缘计算既能适应业务规模的激增和应用的快速变化，也能在时变的网络环境下满足用户需求，保障用户体验，充分降低成本。最后，边缘计算具有协作性，即可将移动蜂窝网络、互联网和物联网更紧密的结合在一起，移动蜂窝网络不止作为互联网和物联网业务的承载通道，而是通过技术协作和商业协作更

好挖掘并满足用户需求，共同开拓更丰富的业务类型、更好的服务体验和更广阔的市场空间。

边缘计算自提出后，受到了标准组织、产业界以及学术界的高度关注。在标准组织方面，2014 年 12 月，ETSI 成立了 MEC ISG 工业标准组，提出了 MEC 标准草案，并于 2016 年将此概念扩展为多接入边缘计算（Multi-Access Edge Computing, MEC）<sup>[31]</sup>。2017 年 3 月，IEEE 推动边缘计算成为 P2413（Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things）重要内容之一。2018 年 12 月，中国电子技术标准化研究院牵头发布《边缘云计算技术及标准化白皮书》，明确了边缘云计算标准化需求，并提出相关建议。

在产业界方面，2018 年 12 月，工业互联网联盟(IIC)和开放雾联盟(OpenFog Consortium)宣布合并，共同推进工业物联网、雾和边缘计算领域协调发展。在学术界方面，ACM SIGCOMM、IEEE INFOCOM、IEEE ICC、IEEE ACCESS 等网络领域顶级期刊与会议也相继组织了关于边缘计算的专刊，对边缘计算相关关键技术开展研究。为了加快边缘计算研究成果的转化和落地，许多学术和产业机构成立了边缘计算相关的研究项目。2018 年 2 月，AT&T 宣布开源其基金会项目 Akraino，该项目是为在虚拟机和容器中运行电信运营商级边缘计算应用而设计，以支持商用级边缘计算应用的可靠性和性能要求。2019 年 1 月，Linux 基金会宣布推出 LF Edge 开源国际组织，旨在建立独立于硬件、芯片、云或操作系统的一个开放的、可互操作的边缘计算框架。除此之外，边缘计算相关的研究项目还包括 elijah、EdgeX Foundry、M-CORD 等。

以下主要就边缘计算的技术架构、卸载技术、资源管理技术展开介绍：

#### （1）边缘计算的技术架构

边缘计算发展至今已有 MEC、微云、雾计算、云接入网等业界广泛认可的技术架构。MEC 意为“多接入边缘计算”，旨在在移动网络边缘提供 IT 服务环境和云计算能力。微云是由卡内基梅隆大学发起的一个用于实现移动增强的开源边缘计算项目，旨在将云部署到离用户更近的地方。雾计算是由思科提出的主要面向物联网场景的新型边缘计算网络架构，它将计算、通信、控制和存储等资源与服务分配给用户或靠近用户的设备与系统上。云接入网是一个由中国移动提出的，融合集中处理、协作式无线电和实时云型基础设施于一体的新型绿色网络框架，它能够解决传统接入网的僵化问题。

#### （2）边缘计算的卸载技术

边缘计算中的卸载技术是将移动终端的计算任务卸载到边缘云环境中，解决终端设备在资源存储、计算性能以及能效等方面不足。计算卸载技术最初在移动云计算（Mobile Cloud Computing, MCC）中提出，用户终端可以通过核心网访

问强大的远程集中式云（Central Cloud, CC），利用其计算和存储资源，将计算任务卸载到云上。虽然 MCC 通过计算卸载延长了移动设备电池寿命，且可以为移动用户提供更复杂的应用程序和更高的数据处理能力，但是会带来高时延以及移动无线网络上的额外负载等问题。边缘计算在移动网络侧部署了计算和存储资源，通过将云服务“下沉”到网络边缘，有效解决时延问题和网络资源占用率问题。

### （3）边缘计算的资源管理技术

资源管理技术主要解决边缘计算系统中计算、存储和网络资源的管理和优化问题。通过协作机制，不仅可以有效提高计算、存储和网络资源的利用效率，还可以极大的改善网络的服务质量和用户的体验。因此，面向协作机制的边缘计算资源管理是一个重要的研究方向。传统的云计算系统在资源管理与优化方面已有大量的研究工作。然而，由于边缘计算有着新的应用场景和特征，在资源管理与优化方面也有着新的特点，因此需要针对它们研究新的内容。

### （4）边缘计算开源平台建设

卡耐基梅隆大学提出的 elijah 开源项目基于从 OpenStack 扩展而来的 OpenStack++ 平台，其核心技术是将 Cloudlet 库与 OpenStack 平台进行集成，从而实现边缘计算的功能。Linux 基金会发起的 EdgeX Foundry 项目旨在设计培育一个 IoT 节点运算的边缘计算模型架构，提供可互操作性、允许即插即用的组件，使其达到工业 IoT 节点运算的简化效果和标准，为物联网计算和互操作组件生态系统建立基础。AT&T 联合 ON.Lab、ONOS、PMC-Sierra 和 Skipio 共同开发的 CORD 项目旨在通过运用 SDN/NFV 和云计算等技术，将端局重新打造成数据中心的开源项目。Linux 基金会开源项目 Akraino 主要对边缘计算系统和应用进行优化，旨在创建一个开源软件堆栈，提供高可用性和高灵活性的云服务支持，以便快速扩展边缘云服务，最大限度的提高服务器支持的应用程序和或用户数量，确保系统的运行可靠性。通过全面的建设边缘计算开源平台，推动边缘计算的快速落地。

## 2.5 网络人工智能

随着信息通信技术和人工智能技术的发展，人类社会正快速向着信息化、智能化的方向发展。人工智能技术为人类社会的持续创新提供了强大的驱动力，开辟了广阔的应用空间。同时，种类繁多且不断增加的网络协议、拓扑和接入方式使得网络的复杂性不断增加，通过传统方式对网络进行监控、建模、整体控制变得愈加困难。网络急需一种更强大智能的方式来解决其中的设计、部署和管理问题。于是，网络人工智能应运而生。将人工智能技术应用到网络中来实现故障定

位、网络故障自修复、网络模式预测、网络覆盖和容量优化、智能网络管理等一系列传统网络中很难实现的功能。

典型的机器学习问题解决流程大致包括问题分析、数据获取、特征选取、模型训练、模型优化五个步骤。对于网络人工智能流程也是一样的，但是网络中的数据获取相比在典型机器学习问题中更加困难。网络人工智能需要以大量的数据为基础，除了少数数据可以从公开数据获取外，绝大多数数据需要依靠网络测量与采集系统实时采集来获取。因此，网络测量与采集系统是网络人工智能的基础。

在 SDN 发展初期，网络测量主要以控制平面主导的测量方法为主。在 P4 等控制平面编程语言提出后，极大扩展了数据平面的灵活性，测量方法也开始转向数据平面主导。例如，P4 联盟提出了带内网络遥测(In-band Network Telemetry, INT)可以直接收集数据包转发过程中真实经历的时延、抖动、误码率、信号强度、队列长度、丢包率等网络信息，同时不需要发送特殊的探测包。在这种强大的数据收集能力的支撑下，人工智能技术可以被应用来解决诸多网络问题。完成数据收集之后，网络问题就与典型的机器学习问题非常相似，可以利用众多的机器学习框架来解决问题。这些框架包括 Tensorflow、Torch、Keras、Caffe、DSSTNE 等等。其中 Tensorflow 是 Google 开源的第二代用于数字计算的软件库。它是基于数据流图的处理框架，同时支持异构设备分布式计算。Tensorflow 以其灵活、便携、高性能的特点一直处于机器学习框架中最火热的地位。Torch 是 Facebook 和 Twitter 主推的一个特别知名的深度学习框架。它包含了大量的机器学习、计算机视觉、信号处理、并行运算的库。Torch 的优势可总结为：构建模型简单、高度模块化、快速高效的 GPU 支持。再辅以 Hadoop、Spark 等开源框架的数据处理能力，就能够支撑网络所需的智能化能力。Hadoop 是由 Apache 基金会开发的分布式系统基础架构，提供 HDFS 用于存储海量数据，以及 MapReduce 用于大规模数据计算。Spark<sup>[32]</sup>也是属于 Apache 的一个开源项目，它使用内运算技术，可以提供比 Hadoop 快 10 到 100 倍的数据处理速度。通过这些开源机器学习框架和数据处理框架以及收集到的数据，很多网络问题都可以尝试解决。

近年来，各标准化组织相继成立了 ETSI ISG ENI、3GPP SA2、ITU-T FG-ML5G 等网络人工智能工作组。同时，产业界和学术界也针对网络人工智能展开了众多研究，例如基于人工智能的网络资源与流量智能管控、自动化网络运维、网络安全、拓扑管理<sup>[33]</sup>、TCP 拥塞控制<sup>[34]</sup>、内容缓存优化<sup>[35]</sup>、QOS 测量<sup>[36]</sup>等。根据技术成熟度与落地情况，以下着重介绍基于人工智能的网络资源与流量智能管控、基于人工智能的自动化网络运维、基于人工智能的网络安全四个方面。

#### (1) 基于人工智能的网络资源智能管控

基于人工智能技术的网络资源管控，可以让资源利用率得到提升。Google 一直在关注减少能源使用这一问题，2018 年，Google 将 DeepMind 实际应用于数据中心，实现平均约 30% 的持续节能。该系统中，AI 以一定频率从数千个传感器中提取数据中心冷却系统的信息，将数据输入神经网络，在保证安全性的条件下，识别出耗能最小的操作并进行工作。此外，MIT 和微软研究院联合设计了基于人工智能的网络资源管理平台 DeepRM。DeepRM 使用了增强学习与深度神经网络结合的学习系统对网络中任务所使用的 CPU 资源<sup>[37]</sup>与网络带宽进行训练。实现了对网络中的 CPU 资源和网络带宽资源进行高效的管理与智能分配，可以有效提高网络资源的利用率，减少任务的完成时间。

### （2）基于人工智能的网络流量管理

由于网络服务于多种业务和多个不同的用户，因此需要在复杂的网络环境中，控制不同的业务流走不同的路径，动态调整路由。华为诺亚方舟实验室开发了 Network Mind 系统，目标是通过人工智能技术实现软件定义网络的网络流量控制。部署在软件定义网络中的 Network Mind，可以自动观察网络流量状况，预测网络流量变化，在其基础上做出数据流的路由决策。在网络视频流量管理与优化上，MIT 的研究者在顶级网络学术会议 SIGCOMM 2017 上发布了 Pensieve<sup>[38]</sup> 人工智能视频流量优化系统。Pensieve 通过对网络中视频流量占用带宽的学习与训练，来对未来流量的带宽进行可靠的预测，从而为视频流选择最优的码率，来减少视频流量在网络中的卡顿现象。香港科技大学的研究者在 SIGCOMM 2018 发布了 AuTO 流量优化方法<sup>[39]</sup>，该方法通过扩展的深度强化学习方法实现数据中心级别的流量自动优化。

### （3）基于人工智能的网络化运维

随着迅速增加的网络规模与不断丰富的网络应用，面对有限的 IT 运维成本，运维难度与日俱增。传统的人工运维方式难以为继。Gartner 在 2016 年提出 AIOps<sup>[40]</sup> 的概念，即通过人工智能的方式来支撑现在日益复杂的运维工作。日本 KDDI 开发了基于 AI 的监视器实现智能运维。首先，通过 SDN/NFV 平台收集系统运行数据。然后，基于 AI 的监视器根据收集的数据进行智能分析并汇报可能的错误事件。最后，SDN/NFV 编排平台将根据汇报的事件自动化处理。微软的 NetPoirot<sup>[41]</sup> 是基于人工智能的数据中心故障定位系统。NetPoirot 可以只观察主机侧的 TCP 数据来定位故障的发生位置。同时，NetPoirot 对于没有训练过的错误也具有很高的故障位置识别率。

### （4）基于人工智能的网络安全

来自网络的安全威胁一直存在于网络当中，特别是随着云计算的普及，网络安全是首先要解决的问题。Oracle 将新的自适应访问功能添加到身份识别云服务

(SOC) 中, 使用机器学习引擎进行风险监控, 扩展其云接入安全代理服务 (CASB), 使其软件即服务 (SaaS) 产品具有自动检测威胁的功能。与此同时, 亚马逊 AWS 也发布了新云服务安全工具 Macie<sup>[42]</sup>。Macie 通过使用机器学习对存储在 Amazon S3 中的数据进行自动保护。它能够识别敏感数据, 例如个人身份信息或知识产权, 并为用户提供仪表板和警报。

## 2.6 低时延-确定性网络

根据全球移动数据流量预测报告<sup>[43]</sup>显示, 到 2020 年全球 IP 网络接入设备将达 263 亿, 其中工业和机器连接将达 122 亿, 相当于总连接设备的一半; 高清和超高清互联网视频将占全球互联网流量的 64%。激增的视频流量和工业机器应用, 带来了大量的拥塞崩溃和数据包延迟; 许多网络应用, 例如工业互联网中的数据上传和控制指令下发、远程机器人手术、无人驾驶、VR 游戏等, 需要将端到端时延控制在微秒到几毫秒量级, 将时延抖动控制在微妙级, 但传统的网络只能将端到端的时延减少到几十毫秒; 除此之外, 网络的时延成为影响集群计算性能的首要指标, 深度学习、分布式计算、分布式存储、计算存储分离等技术对数据中心网络低时延特性提出迫切需求。面对时延敏感性业务的迫切需求, 如何从“尽力而为”到“准时、准确、快速”, 控制并降低端到端的时延对 IP 网络提出了新的挑战。

针对上述实时流量的增加和对多网融合的需求, 传输网提出了对确定性路径传输的需求。ATM 为整合电信网, 提出了映射底三层网络的整体传输方案, 但是技术复杂, 设备昂贵。传统以太网凭借“尽力而为”的简洁思想逐渐在传输网络中占据上风, 但因此会导致不可控的路由路径、丢包率和传输时延。基于以太网成为主流的趋势, 2005 年, IEEE 的 802.1 任务组成立 AVB 任务组, 用于局域网时延敏感的音视频业务的传输。2012 年, AVB 任务组改名 TSN 任务组, 主要应用于各种支持低延时及基于时间同步数据传输的以太网协议。TSN 与 OP-CUA 等相关联盟积极协作, 促进多家标准的统一。IETF 于 2014 年底成立 Deterministic Networking (DetNet) 工作组, 专注于在第 2 层桥接和第 3 层路由段上操作的确定性数据路径, 目标在于将确定性网络通过 IP/MPLS 等技术扩展到广域网上, 并且于 2017 年开始高频率的进行文档更新, 包含整体结构、流量模型、IP 与 MPLS 数据平面结构与安全性等方面。2016 年 5 月, OIF (光联网论坛) 定义了 FlexE 接口帧结构, 实现带宽的捆绑、通道化, 为 5G 切片网络中的确定性路径提供了保证。

根据 IOS 五层模型的顺序, 目前确定性网络技术主要包括 FlexE、AVB/TSN、DetNet。FlexE 应用于物理层与数据链路层之间, 它通过时分复用分发机制, 将多个 Client 接口的数据按照时隙方式调度并分发至多个不同的子通道, 使网络即



具备类似于 TDM（时分复用）的独占时隙、隔离性好的特性，又具备以太网统计复用、网络效率高的特性。AVB/TSN 应用于数据链路层，该技术首先将网络中需求不同的流量分成不同的优先级流，将有确定性需求的流量与其余流量区分开，然后以类似“时分复用”的思想，通过不同的流量整形机制为高优先级流量提供确定的传输“时隙”，以保证时间敏感流量有一条确定的传输路径。DetNet 应用于网络层，该技术的目标是在第 2 层桥接和第 3 层路由段上实现确定传输路径，这些路径可以提供延迟、丢包和抖动的最坏情况界限，以此提供确定的延迟。

低时延网络主要从降低处理时延、优化数据流入手。远程直接数据存取 (Remote Direct Memory Access, RDMA) 技术是为了降低网络传输中服务器端数据处理的延迟而产生的。RDMA 通过网络把数据直接传入计算机的存储区域，而不对操作系统产生影响，具体来说，该技术消除了外部存储器复制和文本交换操作，释放了内存带宽和 CPU 负载，从而降低系统的处理时延。基于优先级的流量控制 (Priority-based Flow Control, PFC) 实现传统流控暂停机制的增强，该技术允许在一条以太网链路上创建 8 个虚拟通道，并为每条虚拟通道指定优先等级 (cos)，允许单独暂停和重启其中任意一条虚拟通道，同时允许其它虚拟通道的流量无中断通过。显式拥塞通知 (Explicit Congestion Notification, ECN)，ECN 是一种路由器报告和主机响应机制，该机制通过路由器监控转发队列状态，并向发送端报告拥塞状态，让发送端在路由器开始丢包前降低发送速率。PFC 和 ECN 技术实现了流量控制的优化。目前，PFC、ECN、RDMA 等技术的融合方案是低时延网络主要的实现手段。

基于这些技术，业界产生了很多优秀案例。华为通过识别大小流、动态调整 ECN 门限、动态负载均衡等方式实现 CloudEngine 系列交换机的低时延网路配置；百度提出 ECN 和 PFC 组合配置，针对 PFC 固有的缺陷问题，通过优先触发 ECN 报文，减少网络中 PFC 的数量，在 PFC 生效前完成流量的降速，实现低时延优化；阿里巴巴在其数据中部署超大规模的 RDMA 高速网络，为人工智能、科学计算等高性能计算、存储业务提供支撑。

低时延-确定性网络旨在面向音视频流量、无线工业互联网、蜂窝网络等网络场景提供确定性的传输服务。该技术已成为当今学术界和产业界研究和关注的热点之一，不仅在学术领域有广阔的研究空间，而且在产业化方面也具有巨大的市场前景。以下将从四个方面进行介绍。

#### （1）基于低时延-确定性网络的工业互联网

网络、数据、安全是工业互联网架构的基础与支撑，其中网络互联是网络的重要组成部分之一，具体包含工厂内网与工厂外网两个部分。工厂内网连接管理系统与机器、环境（如仪表、监测设备）等，负责实时传输数据与控制指令；关

注如何实现高实时性、高可靠性数据通信。工厂外网络用于连接智能工厂、分支机构、上下游协作企业、工业云数据中心、智能产品与用户等主体；需要满足工业实体的互联网接入需求、跨区域之间的互联与隔离需求、工业网络与混合云互联的需求、工业互联网对广域承载网络的差异化需求（QoS、安全/保护等）。因此，通过确定性网络的研究可以全面推动工业互联网革命、加速工业 4.0 的发展。

### （2）基于低时延-确定性网络的 5G 移动通信

5G 的商用时代即将来临，具有极为广阔的发展前景。目前基于 5G 的应用包括远程医疗、自动驾驶、环境监测、娱乐和工业自动化等，这些应用要求 5G 能够支持超低延迟的端到端连接。具体而言，远程机器人手术需要 1-10ms 的时延保证，自动驾驶需要高速率以及 10ms 以内的低延迟以确保快速响应不断变化的道路状况。除此之外，低延时 5G 网络还应满足 AR/VR 的高速率视频传输与极低延迟的需要，以避免视频和音频中的抖动。为此，5G 承载网络可以使用确定性网络来提供跨切片和切片内的传输。

### （3）基于低时延-确定性网络的智慧建筑

智慧建筑的自动化系统（BAS）<sup>[44]</sup>可以管理建筑的设备和传感器，以改善居民的舒适度，减少能源消耗，并探测紧急情况，比如定期测量房间的温度、湿度，远程控制门和灯的开关，对设备的异常状态报警等。该系统的现场网络使用时延敏感的物理接口，若使用以太网或无线网改造则必须具备确定性；除此之外，系统中所包含的各种传感器也需要极低的通信延迟，已保证建筑的安全。

### （4）基于低时延-确定性网络的高质量音视频业务

4K/8K/AR/VR 音视频行业包括音视频制作工作室、直播、广播、电影院、现场音乐会、大型场所（机场，体育场馆，教堂，主题公园）的公共广播媒体和应急系统。一方面该行业出现了不间断流播放、同步播放、消除回声等网络应用需求；另一方面，这个行业正在从点对点的硬件互连转向无线互联，从而降低成本，提高灵活性。因此，该行业未来对确定性网络有较大需求。

## 2.7 IPv6 网络

IPv6（Internet Protocol Version 6）是网络层协议的第二代标准协议，也被称为 IPng（IP Next Generation）。它是 IETF 设计的一套规范，作为 IPv4（Internet Protocol Version 4）的升级版<sup>[45]</sup>。IPv4 协议是目前广泛部署的因特网协议。在因特网发展初期，IPv4 以其协议简单、易于实现、互操作性好的优势而得到快速发展。但随着因特网的迅猛发展，IPv4 设计的不足也日益明显，包括 IPv4 地址空间短缺、报文报头格式设计复杂、IPv4 地址频繁重新配置和编址、路由聚合能力差、端到端安全支持能力差、QoS 支持能力差、对移动性支持能力差等问题<sup>[46]</sup>。IPv6 的出现，解决了 IPv4 存在的这些弊端。

IPv6 的最大优势就是具有近乎无限的地址空间；并且 IPv6 报文头的处理较 IPv4 更为简化，提高了路由转发设备的处理效率；IPv6 协议内置支持通过地址自动配置方式使主机自动发现网络并获取 IPv6 地址，大大提高了内部网络的可管理性；巨大的地址空间使得 IPv6 可以方便的进行层次化网络部署，便于进行路由聚合，提高了路由转发效率；IPv6 中，网络层支持 IPSec 的认证和加密，支持端到端的安全；同时，IPv6 新增了流标记域，提供 QoS 保证；和移动 IPv4 相比，移动 IPv6 使用邻居发现功能可直接实现外地网络的发现并得到转交地址，而不必使用外地代理。并且，利用路由扩展头和目的地址扩展头移动节点和对等节点之间可以直接通信，解决了移动 IPv4 的三角路由、源地址过滤问题，移动通信处理效率更高且对应用层透明。

随着互联网+、车联网、物联网和工业互联网等网络应用融合发展，全球对 IP 地址的需求还将持续增长。Gartner 预计，到 2020 年将有超过 260 亿个物联网设备连接到互联网。全球著名网络设备厂商思科则认为数量更大，预计到 2020 年将有超过 500 亿台设备连接到互联网。然而，IPv4 只有 43 亿个 IP 地址，到 2020 年 IPv4 地址空间可以容纳的连网设备不到估值的 20%。IPv6 重新定义地址空间，采用 128 位地址长度，16 个八位字节，IPv6 地址总数已超过了  $3.4 \times 10^{38}$  个。地球上每个人都有足够的地址可以分配数万亿个地址，几乎可以不受限制的获得 IPv6 地址<sup>[45]</sup>。

自 1998 年以来 IPv6 一直作为发展的愿景目标，现在正逐渐成为现实。全球 IPv6 部署日益增多，IPv6 域名已超过 900 万，全球 23% 的网络宣称已采用 IPv6 连接。Google 的研究报告表明，全球有 37 个国家的 IPv6 流量超过 5%，并且每周还在不断增加，至 2017 年 11 月，使用 IPv6 访问 Google 的用户占总用户最高已超过 21%；截至 2018 年 10 月，全球 IPv6 普及率已经超过 25.04%。Akamai 的研究表明，全球有 7 个国家的 IPv6 流量超过 15%。在日本，2017 年三大移动运营商 NTT、KDDI 和软银正在部署 IPv6。在印度，Reliance JIO 的部署推动了 IPv6 的发展，已使全国 IPv6 流量达到 20% 以上；中国电信、中国移动、中国联通在 2018 年底完成了 IPv6 网络层面的改造。根据 IPv4 Market Group 的预测，2019 年全球 IPv6 用户数将超过 50%，与此同时，IPv4 市场开始下滑<sup>[47]</sup>。

由于 IPv6 具有广阔地址空间和对移动性支持等优势，物联网、大数据、人工智能等产业部署对 IP 地址有很强烈的刚性需求，加速了 IPv6 的实际部署步伐，IPv6 的大规模商用部署将顺势在全世界范围内快速展开。目前对于 IPv6 的研究主要包括以下几个方面<sup>[48]</sup>：

#### (1) 基于 IPv6 的 5G 移动网络

移动网络发展部分由成本因素驱动，移动网络运营商需分别支付 IPv4 和 IPv6 APN（Access Point Name）的费用，因此他们通常在 IPv4 和 IPv6 之间选择一种方式，而不是两者都采用。IPv6 可以解决 5G 的地址问题，因此许多移动网络（在网络条件允许时）加速采用 IPv6，使得移动网络中的 IPv6 流量占 70-95%。ISP 和内容提供商发展的驱动因素是减少运营复杂性，希望通过部署 IPv6 寻求创新机会，降低复杂服务的成本。未来有丰富地址的 5G 还会用于工业领域，解决产业升级与发展问题。

### （2）基于 IPv6 的万物互联

随着智能硬件的不断发展，越来越多的硬件需要接入互联网，如电脑、手机、电视、穿戴设备、汽车、冰箱、空调等等，这导致人均不足一个 IP 地址的 IPv4 已经无法满足需求，促使了 IPv4 逐步向 IPv6 迁移，最终实现万物互联。目前，在物联网中使用多种连接解决方案，ZigBee Secure Energy Profile 2.0、Open Thread Group、开放互联基金会（以前称为开放互连联盟）和其他 IoT 联盟正在对 IPv6，或基于 IEEE 802.15.4 实现 IPv6 通信的 6LowPAN 进行标准化。

### （3）基于 IPv6 的数据中心网络

Google、LinkedIn、Akamai、Netflix 和 Facebook 都在他们的网络中积极的部署 IPv6，以连接外部的 IPv6 用户，通过使用 IPv6 加速了用户分发服务的下载时延。根据 Google 研究报告表明，目前有 37 个国家的 IPv6 流量超过 5%（根据接入谷歌数据中心的流量），有些国家 IPv6 流量占三分之一到二分之一。

## 2.8 区块链网络

2008 年，比特币创始人——中本聪发布《比特币白皮书》，一年后，比特币系统开始运行，这标志着比特币这一数字货币的诞生。从 2010 年到 2015 年，比特币逐渐进入大众视野。2016 年到 2018 年，随着世界主流经济不确定性增强，比特币的需求量迅速扩大。实际上，比特币是区块链技术的应用场景之一，区块链技术由此正式进入人们的关注视线。近年来，学术界和产业界开始尝试将区块链技术应用於其它领域，并朝项目落地的方向迈进。

区块链技术主要由四部分组成：分布式账本、共识机制、密码学原理、对等网络。分布式账本是指多点实现数据同步、复制的去中心化数据存储技术，每个节点存储的数据是独立的；共识机制是指决定分布式系统中由哪个节点发起交易，以及其他节点如何就该交易达成一致的方法；密码学原理是指实现防篡改、通信加密、身份认证等功能的技术集合，主要包括哈希算法、TLS 加密技术和 CA 认证体系；对等网络是指在对等者（Peer）之间分配任务和工作负载的分布式应用架构。一般来说，区块链可以定义为一种融合多种现有技术的分布式计算和存储系统，它利用分布式共识算法生成和更新数据，利用对等网络进行节点间的数据

传输，利用密码学方式保证数据传输和存储的安全性。通过大多数节点认可的数据可以被记录在区块链上，这些数据基本无法篡改，因此人们可以基于这些数据实现价值转移以及其他可信活动。我们知道，蒸汽机释放了人类的生产力、电力解决了人类的基本生活需求、互联网彻底改变了信息传递的方式，而区块链作为构造信任的机器，具备去中心化、公开、透明以及安全等特性，能够解决当前中心化应用权力过大的问题，以低成本的方式充当信任中介，证明价值。因此区块链技术被认为是继蒸汽机、电力、互联网之后，下一代颠覆性的核心技术，将彻底改变整个人类社会价值传递的方式。

因此，区块链技术也得到了国家层面的高度重视。中欧在区块链产业政策中逐渐引领全球，欧盟在 2018 年 2 月已成立欧洲区块链观察论坛，主要职责包括：政策确定，产学研联动，跨国境 BaaS（Blockchain as a Service）服务构建，标准开源制定等。中东地区以迪拜为首在引领区块链的潮流，由政府牵头，企业配合以探索区块链的新技术应用。亚太区域日韩也相对活跃，日本以 NTT 为主，政府背后提供支撑。今年初，韩国国防采办计划管理局（DAPA）宣布启动国防区块链计划，鼓励本国企业为军事应用研发区块链技术。

目前区块链已有较为成熟的开源项目。以太坊（Ethereum）是一个由 Buterin 开发的支持图灵完备脚本运行的区块链开发平台，基于智能合约，降低用户搭建 DApp 应用的门槛，2015 年，以太坊正式上线。超级账本（Hyperledger）是由 Linux 基金会于 2015 年发起的推进区块链数字技术和交易验证的开源项目，旨在构建跨行业开源区块链商业平台，推动各行业成员协同合作、共建开放平台、简化业务流程。OpenChain 是区块链技术公司 Coinprism 的开源工具，目标是大型企业和金融机构，基于一种独特的分布式账本技术，帮助用户部署自己定制的区块链，减少用户的交易成本和结算时间。Corda 是 R3CEV 于 2016 年开源的区块链平台，采用一种类区块链的分布式账本，基于产业标准工具，通过创新智能合约和数据处理，为金融服务设计一种新型分布式的分类帐平台。

区块链网络包括两个主要内容：利用区块链改进现有技术以解决网络的缺陷；将区块链技术与网络结合以构建新型网络生态。

从改进网络缺陷的角度出发，区块链的防篡改、去中心化特点主要应用于域名系统，解决域名解析过程中的中心化、权利集中等问题。Namecoin 是第一个基于区块链的 DNS 系统，它是比特币的一个分支，能够存储除交易之外的 Key-Value 数据。Namecoin 与比特币共用相同的功能和机制，它们基于相同的共识算法，矿工可以同时承担两个系统的记账工作。Blockstack 是第一个建立在比特币区块链上的命名系统，该项目提出分层区块链的概念，使用虚拟链技术实现跨链迁移与链数据整合。

从全球区块链生态构建情况来看,可以将区块链应用分成3类,一类是在计算问题上的应用,即工作量证明,例如典型的比特币、以太坊的应用;一类是在存储问题上的应用,即存储证明,例如 Filecoin 等相关的应用;还有一类是在网络通信问题上的应用,即中继证明,节点在传输数据的同时实现了路径的共识记账,解决现有互联网中存在的一些问题。结合区块链技术,营造网络新生态的开源项目主要为 NKN (New Kind of Network)。该项目的技术核心主要包括:(1)分布式数据传输网络(DDTN), NKN 使用改进的 Chord 分布式哈希表(DHT)的拓扑结构以保证可扩展性。(2)基于元胞自动机的 MVCA 共识算法,这种共识机制并不是像拜占庭协议那样需要全局性的投票,它可以实现高度可扩展,可以支持数百万甚至数十亿个节点的网络规模。(3)中继证明 Proof of Relay(PoR), PoR 使节点在挖矿的同时传递数据。(4)嵌入公钥的 NKN 地址方案,使 NKN 下的端到端加密易于实现。

学术界与产业界对该方向的研究主要包括基于区块链网络的生态构建、基于区块链网络的资源统筹、基于区块链网络的多点控制三个方面。

#### (1) 基于区块链网络的生态构建

区块链能解决价值转移过程中产生的问题,其关键在于利用生态圈的构建形成共识,通过共识产生新的驱动力。在区块链网络中,用户、网络服务商能够就网络平等达成共识,保证网络中立性,建立价值转移的信任基础,打造一种开放、去中心化和社区共建共享的新型网络基础设施和生态系统。具体而言,网络服务商平等对待所有使用该网络的用户,而不是根据自己的利益对服务和内容加以区别;个人用户可以享受更快的传输速度,通过共享多余的网络带宽获得激励;企业可以通过部署更多的节点为其它节点提供传输服务获取经济利益回报。

#### (2) 基于区块链网络的资源统筹

网络资源分配和供需的不均衡导致网络连接和信息传输不够高效,设备服务商和网络运营商可以基于区块链网络,通过数据传输路径信息构建需求分布图与带宽冗余表,从而有效分配网络资源,根据链路品质与数据价值动态调整传输路径。

#### (3) 基于区块链网络的多点控制

传统 SDN 过度依赖中心控制,因此容易导致单点故障。通过区块链化 SDN,使得企业能够根据实时性能和成本进行动态路由,降低数据传输成本并且避免单点故障从而提高整个网络的质量。

## 2.9 网络安全

随着互联网应用的飞速发展与大规模普及,网络形态逐步呈现出了层次化、虚拟化、服务化的特点,网络安全成为了不容忽视的重要挑战,包括恶意软件、

分布式拒绝服务（DDoS）攻击、钓鱼软件、应用程序漏洞等安全威胁。面对下一代网络（5G 网路、物联网）的不断演进，网络安全成为了保证系统正常运行、对外提供服务的基础，需要面对各个层次的安全威胁。目前对于网络安全的研究主要集中在协议安全、网络攻击防御、访问控制和隐私保护四个方面<sup>[49]</sup>。

协议安全方面。TCP/IP 协议簇中，二层协议安全研究主要集中在较为脆弱的无线网络接入方面，目前 WLAN 的认证协议通常基于 802.1x 访问控制架构和 EAP 协议规范来进行设计和分析，用 MD5、PKI 等技术保护认证过程，通过简化会话流程、匿名性设计的方法简化通信开销、提升隐私保护能力。三层及以上协议主要研究安全路由和端到端安全传输协议，它们分别保证了传输线路和对端身份安全，以 IPSec、SSL/TLS 安全协议为代表，IPSec 定义了数据在路由过程中使用的安全功能，引入密钥管理协议 IKE 来实现实体间动态认证，并生成后续通信过程中的会话密钥；SSL/TLS 采用 X.509 认证，并使用认证过程中产生的会话密钥保证两个应用间端到端通信的机密性和可靠性<sup>[49]</sup>。

网络攻击防御方面。随着多种类应用、多层次应用的增多，漏洞也在不断增多，网络中面临着多层次、多种类的安全攻击。通过部署防火墙、配置安全策略，能够防御针对应用服务器的网络攻击，例如 DoS 攻击，以及针对特定协议的攻击，如 DNS 缓存投毒。通过恶意软件检测技术可以保护系统免受恶意软件的危害，例如病毒、蠕虫、木马、rootkits 和僵尸网络等<sup>[49]</sup>。

访问控制方面。随着网络系统的阶段性发展，访问控制技术得到了越来越多的重视。网络系统中用户及资源种类众多，不同的用户对不同的资源(网络、数据和服务)有不同的操作权限，因此需要根据安全需求制定相应的安全策略来保证信息安全和业务的正常运转。访问控制根据相应安全策略对用户访问数据和服务资源的权限进行验证，其核心研究在于安全策略的设计。目前，网络引入的新技术加大了访问控制的需求，如 NFV 要求多个密码，这增加了安全策略设计的复杂性和漏洞产生的潜在威胁<sup>[49]</sup>。

隐私保护方面。随着数字经济建设的不断推进，网络逐步呈现出泛在化趋势，信息孤岛逐步联通，人们对于隐私保护的需求越来越大。目前，在网络环境下，根据不同的隐私保护需求分为两类：一类是针对网络链路信息的保护，如发送/接收者信息、路由信息等；另一类针对网络中的敏感数据保护。对于网络链路信息的保护一般通过设计路由协议方式，动态变化路由信息，隐藏真实路径；对于敏感数据保护会考虑网络不同层次，通过敏感信息隐藏、信息加密技术方法保护隐私<sup>[49]</sup>。

根据前文的叙述，我们知道未来的网络正朝着泛在化、移动化、智能化、可控可控、大流量大带宽的方向发展。因此网络安全的研究方向将包括：5G 网络安全、管控系统安全、集成型内生安全等。

### （1）5G 网络安全

5G 是多种新型无线接入技术和现有无线接入技术集成后的解决方案总称。2019 年是 5G 商用的元年，随着物联网、工业互联网、消费型网络等与 5G 技术的深度融合，未来通过 5G 连接的设备、终端数量将跨量级增长，移动网络的安全显得尤为重要。5G 终端设备拥有软件定义的无线收发与调制方式以及新的错误控制模式。终端设备能够同时接入和访问多种不同的无线网络，并能够根据服务访问的需求自动进行网络的切换。学术界有观点认为，5G 的安全问题实质上来自其组成部分，例如 SDCN 安全、无线网络融合安全、D2D、M2M 安全等。因此，5G 网络安全以可重构、自适应并且轻量级保护机制的设计为主，预防来自应用层的攻击行为。

### （2）管控系统安全

随着 SDN/NFV 技术逐步产业化，新型网络管控系统将逐渐实现运营商级别的部署，但是这种新型的管控系统存在着较大的安全隐患，例如 SDN 控制平面存在身份认证、隔离等问题，过度集中的中心控制器存在单点故障隐患。目前，学术界开始尝试用区块链技术解决部分安全问题，例如去中心化的多控制器证书存储等。

### （3）集成型内生安全

由于互联网最初设计的主要目标是实现鲁棒性互联和资源共享，并未充分考虑到网络的安全需求，虽然通过“打补丁”的方式在互联网中部署防火墙或陆续有 IPSec、SSL/TLS、DNSSec 等技术被提出以加强网络安全性，但整个互联网的安全保障仍处于被动应对的状态。从实施角度出发，集成现有技术的内生安全将成为重点研究方向。2018 年华为提出 SDSec 解决方案，该方案关键在于“以动制动”，集成网络人工智能、虚拟化、软件定义网络等技术实现态势感知、自动化处理与智能运维。

## 2.10 5G

从 1G 到 4G，移动通信的核心是人与人之间的通信，个人通信是移动通信的核心业务。但是随着物联网、工业自动化、无人驾驶的出现，通信的主体开始转向人与物，甚至机器与机器。

5G 是第五代移动通信技术的简称，是 4G 之后的新一代技术创新，是目前移动通信技术发展的最高峰，是改变人类生活和社会的重要力量，具有高速率、低时延、广连接的特点。在传输速度方面，理论上 5G 峰值速率可达 10Gbps，将



会是 4G 的 100 倍以上，4G 时代下载一部高清电影需要几分钟，5G 环境下仅需数秒；在超低时延方面，5G 能为客户提供身临其境的风景观赏、全息直播、全息摄影等 AR/VR 全新应用体验；在广连接方面，5G 将成为未来物联网的中枢，通过 5G 手机可以控制物联网设备，如房屋上的太阳能电池板、家中的空调等，甚至连井盖、电线杆、垃圾桶都可以通过 5G 变成智能设备。

5G 标准是由“第三代合作伙伴计划组织”(3rd Generation Partnership Project, 简称为 3GPP)负责制定的。3GPP 是一个标准化机构，目前其成员包括中国、欧洲、日本、韩国和北美的相关行业机构。2017 年 3GPP 已经完成了 5G 的 R14 标准，美国时间 2018 年 6 月 13 日，3GPP 在美国又出台了 5G 的 R15 标准。R14 标准主要侧重于 5G 系统的框架和关键技术研究，R15 标准才是 5G 的第一版商用标准，也是 5G 第一阶段标准。2019 年，5G 第二阶段标准(R16)进入推进状态，将侧重于工业物联网、基于 5G 新空口的 V2X 等方面的研究。

除此以外，网络运营商和设备制造商也都在为 5G 的推出做准备。与 4G LTE 网络的采用一样，5G 将是一个阶段性的过程，美国运营商一直是毫米波技术的最大拥护者。Verizon 已经是第一家通过固定无线接入服务向消费者提供 5G 服务的公司，Sprint 和 T-Mobile 紧随其后，计划于 2019 年中期推出。在韩国，主要运营商预计在 2019 年上半年进行商用 5G 部署。2019 年 4 月 3 日，韩国于当地时间（UTC+9）23 时启动 5G 网络服务并且成为全球第一个开通 5G 网络的国家。全国范围的 5G 部署预计到 2022 年完成。在日本，2020 年奥运会是 5G 毫米波在密集城市地区试验的下一个目标；诺基亚和 NTT DoCoMo 合作决定于今年下半年开始推出 5G 商业服务。我国正在迅速成为 5G 的主要玩家，华为和中兴等公司为全球运营商提供电信基础设施。中国在国内基础设施方面投资了 1800 亿美元，是日本投资的四倍。中国移动正在试用其服务，并计划在 2020 年全面推出。2019 年 4 月 24 日，在“5G 终端产业合作与创新”主题论坛上，中国联通发布了《中国联通 5G 行业终端总体技术要求白皮书》和《中国联通 5G 通用模组白皮书》，为产业链合作伙伴在 5G 行业终端产品研发与创新提供了指南。

5G 作为目前的热点技术，产业界和学术界对 5G 应用场景和相关技术做了深入的研究。主要包含以下几个方面：

### （1）5G 用例

根据无线网络的需求，5G 用例主要分为增强移动宽带（eMBB）、超可靠和低延迟通信（URLLC）和海量机器类通信（mMTC）三大类。在增强移动宽带（eMBB）场景中，需要 5G 蜂窝网络来支持非常高的数据速率。ITU 的 5G 性能指标显示，5G 的下行峰值数据速率为 20 Gbps，上行的峰值数据速率为 10 Gbps；

在超可靠和低延迟通信（URLLC）场景中，需要具备低延迟和高可靠性。对于低延迟应用（如 AR/VR，V2X 通信，eHealth 服务），5G 网络预计支持小于 1 ms 的接入网延迟和小于 10 ms 的端到端延迟。ITU 进一步建议 5G 的可靠性要大于 99%（意味着数据包在 99% 的情况下需要在允许的延迟预算内到达目的地），对于特定的部署场景和用例甚至要接近 99.999%；在海量机器类通信（mMTC）场景中，5G 强大的连接能力可以快速促进各垂直行业（智慧城市、智能家居、环境监测等）的深度融合。在智能城市、工业物联网这些行业中，它们有大量设备连接到网络。ITU 建议的 5G 目标为预计每公里处理 1w-100w 台设备。

### （2）5G 部署方式

5G 组网支持独立组网 SA 和非独立组网 NSA 两种部署方式。5G 独立组网（SA），采用端到端的 5G 网络架构，从终端、无线新空口到核心网都采用 5G 相关标准，支持 5G 各类接口，实现 5G 各项功能，提供 5G 服务。5G 独立部署方式(SA)是 5G 的最终目标部署方案。5G 非独立组网（NSA），是指 LTE 与 5G 基于双连接技术进行联合组网的方式，也称 LTE 与 5G 之间的紧耦合（Tight-interworking）。LTE 系统中采用双连接时，数据在核心网或者 PDCP 层进行分割后，将用户数据流通过多个基站同时传送给用户。联合组网时，核心网和无线网都存在多种选择。4G/5G 融合部署方式(NSA)是 5G 的过渡方案。

### （3）5G 关键技术

作为 5G 中被广泛讨论的技术，网络切片对于 5G 的意义巨大，相关专业人士认为网络切片是 5G 核心所在。但网络切片的概念一直都没有统一的官方定义。5G Americas 认为网络切片使网络元件和功能可以在每个网络片中轻松配置和重用，以满足特定要求。网络切片的实现被认为与核心网络和 RAN 的端到端功能有着密切关系。每个切片都可以拥有自己的网络架构、工程机制和网络配置。5GPPP 给出的定义是网络切片是一种端到端的概念，涵盖所有网段，包括无线网络、有线接入、核心、传输和边缘网络。它支持在公共基础设施平台上并发部署多个端到端逻辑、自包含和独立的共享或分区网络。中国联通也给出了定义，网络切片是 SDN/NFV 技术应用于 5G 网络的关键服务，一个网络切片将构成一个端到端的逻辑网络，按切片需求方的需求灵活地提供一种或多种网络服务。除了网络切片，大规模天线(MassiveMIMO)、重点区域超密集组网、高频通信、内容分发网络（CDN）、移动边缘计算等技术也是 5G 中必不可少的。



### 三、未来网络应用场景

通过前面的分析与介绍，我们清晰地了解目前未来网络已有的优秀成果和热点方向。为了更加明确我国未来网络发展的技术方向，加快推进我国未来网络的发展，本章将在充分考虑全球未来网络发展趋势以及我国国情需求的基础上，重点聚焦未来网络的应用场景，突出产业价值。

#### 3.1 公共互联网

公共互联网主要面向最终用户提供声音、数据、视频等多种网络服务与应用。随着数据和视频内容的持续增加，对网络带宽的需求越来越大，尤其是 4K/8K 高清视频、AR/VR、直播点播等业务的出现，用户希望获得更好的用户体验，希望网络能够提供更高的数据容量。例如 4K 视频是未来网络中的重要业务，其带宽需求比准 4K 和极致 4K 高清视频有数倍的增长。单用户看普通 4K 视频需要 20Mbps 带宽，收看极致 4K 则需要 100Mbps 带宽，8K 视频则需要 800Mbps 的带宽。然而，根据中国宽带发展联盟的宽带测速报告显示，在 2017 年第四季度，我国固定宽带用户的忙闲时加权平均可用下载速率为 19.01Mbps，即使在北京、上海等最发达地区，这一速率也仅略高于 20Mbps。可见，目前我国宽带网络能力距离 VR 产业的发展需求仍有相当距离，未来公共互联网仍需要进一步提升优化，才能满足增强沉浸式交互体验对大带宽的需求。为此，需要利用软件定义广域网、边缘计算等技术来减少跨网流量、提升网络带宽资源的整体利用率，并通过减少具有超高速带宽的新型数据通信网络来适应网络流量的急剧提升。

对于运营商而言，面对大流量和大连接的业务需求，其暴露出网络结构的不合理性，需要对现在的网络架构进行转型。同时运营商本身也面临着从“管道连接”向“智能管道”转型的需求。随着以 SDN 为代表的未来网络技术的不断成熟和小规模试验验证，未来网络将尝试开始在运营商网络，包括移动核心网、移动回传网、大规模数据中心、骨干网等场景中展开大规模商用部署，运营商网络将通过融合 SDN/NFV/Cloud 等新的网络重构技术手段，实现网络设备 IT 化、网络转发层和控制层的分离，强化大数据应用，构建可全局按需调度资源、网络能力完全开放的运营一体化网络。

AT&T 是 Domain2.0 NFV/SDN 计划的早期推动者，该运营商在 2017 年实现了 55% 的网络虚拟化和软件控制，并计划到 2020 年将软件控制率提高到 75%，达到“核心网络功能”；2017 年 AT&T 提出网络 3.0 Indigo，旨在实现基于 SDN/NFV 的 IT 与 CT 技术深度融合。中国电信在 2016 年发布了 CTNet2025 计划，为重构网络做出规划。目前中国电信基于自主研发的协同编排系统，通过编排器协同不同厂商的控制器并兼容现网的多种网络协议，保障了网络端到端的能

力；自主研发 MANO 系统中的 NFVO 和 VIM 等两大关键组件，推动了 NFV 走向现网；利用优质全球专线网络和云业务资源，面向在全球多个节点提供“本质上强大”的 SD-WAN 产品。中国移动主导成立了 Carrier-Grade SDN 工作组，推动 SDN 在运营商网络的应用；在 CCSA 推动 NFV 相关标准化的进展，牵头成立了包括总体技术要求、MANO、硬件等多个标准的制定；在 2018 工业互联网峰会上，中国移动提出将 SD-WAN 技术应用到工业互联网当中。中国联通在 2015 年推出 CUBE-Net2.0 战略以应对网络重构挑战。中国联通积极参与 ITU, 3GPP, ETSI NFV, IETF 等相关标准组织；积极参与 OPNFV 和 ODL 等开源社区；成立 SDN/NFV 创新中心，将 SDN/NFV 相关的研发与试验成果反馈到各个产业链中，也推动了相关产业链的发展。

对于互联网公司而言，未来网络的开源生态降低了其进军产业的门槛，互联网公司能够将未来网络技术与其积累的丰富业务经验有机结合，大大提升个性化网络服务质量；其中，数据中心业务已经成为了互联网公司在业务创新应用方面的典型代表。Google 早在 2012 年便基于自研设备 Saturn（土星）控制器在全球部署 SDN-WAN 网络 B4，用来连接其全球数据中心的私有骨干网络。Google 于 2013 年 8 月发表白皮书《B4: Experience with a Globally-Deployed Software Defined WAN》，于 2018 年发表第二篇《B4 and After: Managing Hierarchy, Partitioning, and Asymmetry for Availability and Scale in Google Software-Defined WAN》分享其部署经验。2017 年，腾讯推出 5.0V 数据中心网络架构，引入 SDN/NFV 技术为其私有云客户提供多样化的、可定制的服务，使用户只需要在软件中调用简单的 API 接口，便可以完成包括用户网络自定义、部署自动化、专线互联在内的网络功能的弹性实现。2018 年 4 月，华为首次发布三层开放的 SD-WAN 架构，该方案具备 uCPE (通用客户终端设备)、第三方应用系统对接、多云部署等方面的开放能力，用户通过与华为 SD-WAN 方案提供的开放接口及业务平台快速对接，实现与运营支撑系统/业务支撑系统/第三方门户的快速集成。2018 年，Equinix 推出 Cloud Exchange Fabric 系统，该系统通过 SDN 平台，将其在全球的 200 多个数据中心连接起来，以简单、直接、安全、动态的方式连接全球范围内的分布式基础设施和数字生态系统。

### 3.2 工业互联网

工业互联网是面向制造业数字化、网络化、智能化需求，构建基于海量数据采集、汇聚、分析的服务体系，支撑制造资源泛在连接、弹性供给、高效配置的工业云网。工业互联网的核心是基于全面互联而形成数据驱动的智能，网络、数据、安全是工业和互联网两个视角的共性基础和支撑。其中，“网络”是工业系统互联和工业数据传输交换的支撑基础，包括网络联接、标识解析、边缘计算等

关键技术。实现人、物品、机器、车间、企业等全要素，以及设计、研发、生产、管理、服务等各环节的泛在深度互联<sup>[50]</sup>。

早在 2011 年，“工业 4.0”在德国汉诺威工业展中被首先提出，随即被列入德国高科技战略 2020 计划。2014 年 3 月，美国的互联网以及 ICT 巨头与传统制造业领导厂商携手 GE、思科、IBM、英特尔等 80 多家企业成立了工业互联网联盟（Industrial Internet Consortium, IIC），在技术、标准、产业化等方面做出一系列前瞻性布局。2015 年 6 月，日本经济贸易产业省和日本机械工程师协会发起由 53 家日本制造商组成的日本工业价值链促进会（Industrial Value Chain Initiative, IVI），推进标准与模型制定工作。借鉴了德国的工业 4.0 计划，我国于 2015 年 5 月印发《中国制造 2025》计划，并在部分地区展开试点工作，目标在 2025 年对制造业完成升级转型。2016 年 2 月，工业互联网产业联盟在北京举行成立大会，该联盟立足于为推动《中国制造 2025》和“互联网+”融合发展提供必要支撑。

在网络与实体经济深度融合的背景下，工业互联网需要满足低时延、确定性时延、网络安全、网络业务定制、万亿级的连接等多方面的工业需求，需要采用软件定义网络、边缘计算、网络人工智能等新的技术架构来解决工业互联网领域的网络挑战。未来网络技术可以助力工业互联网的发展，具体而言：软件定义网络加强了工业互联网网络的集中管控能力，实现了网络资源调度的智能化和差异化，边缘计算主要解决工业互联网安全和实时控制等问题，网络人工智能有助于完善工业系统诊断、预测、决策和控制等智能化功能。此外，还需要实现基于时间敏感网络的 IT/OT 融合系统、基于边缘计算的工厂内集成应用、工业适配的低功耗广域网、工业互联网标识解析架构、工业互联网标识解析方案、异构标识的多根互联技术、开放环境的可信解析技术、工厂外部的协议转换技术、车间内部的灵活组网技术、工业互联网安全机制等。

2016 年 8 月，工业互联网联盟发布《工业互联网体系架构（1.0 版本）》，提出了工业互联网内涵、目标、体系架构、关键要素和发展方向，旨在推动业界对工业互联网达成广泛共识。

2018 年 6 月，工业和信息化部印发《工业互联网发展行动计划（2018-2020 年）》<sup>[51]</sup>，目标到 2020 年底，初步建成工业互联网基础设施和产业体系，包括适用于工业互联网高可靠、广覆盖、大带宽、可定制的企业外网络基础设施，企业外网络基本具备互联网协议第六版（IPv6）支持能力；形成重点行业企业内网络改造的典型模式。初步构建工业互联网标识解析体系，建成 5 个左右标识解析国家顶级节点，标识注册量超过 20 亿。重点任务规划包括基础设施能力提升行动和标识解析体系构建行动，基础设施能力提升行动包括完善工业互联网网络体

系顶层设计、升级建设工业互联网企业外网、支持工业企业建设改造工业互联网企业内网络等；标识解析体系构建行动包括根节点、顶级结点、注册管理系统建设，实现标识解析系统互联互通等。

2018 年 11 月，工业和信息化部办公厅印发《关于 2018 年工业互联网试点示范项目名单的公示》<sup>[52]</sup>，公布了 72 个试点示范项目。其中网络化改造集成创新应用试点示范项目包括：基于先进网络架构的工业互联网集成应用试点示范、基于蜂窝物联网的智能工厂示范项目、基于工业云的江淮汽车网络综合改造与集成、基于互联网远程运维服务的智能环卫装备试点示范等。标识解析集成创新应用试点示范项目包括：工业互联网标识解析公共服务系统示范项目、面向云制造的工业互联网标识解析二级节点系统及应用、汽车行业工业互联网标识解析二级节点建设、基于 Xrea 工业互联网平台的标识解析技术集成应用等。

2019 年 2 月，工业互联网联盟发布《工业互联网标准体系（2.0 版本）》，在紧密结合《工业互联网标准体系框架（版本 1.0）》、全面总结工业互联网标准化需求基础上，修订了工业互联网标准体系框架及重点标准化方向，梳理了已有工业互联网标准及未来要制定的联盟标准，形成统一、综合、开放的工业互联网标准体系。

### 3.3 天地一体化网络

天地一体化信息网络的定义是将不同轨道(GEO、LEO 等)、多种类型卫星(中继星、通信星、侦察星等)、临近空间平台、地面应用终端等按空间信息资源的最大有效综合利用原则，进行互通互联，有机地构成系统优化、功能完备的智能化体系，形成能与海、陆、空基的信息系统融为一体的信息获取、传输与综合应用网络。它的实现可提高通信的容量和时效性，增强信息网络的可靠性和抗毁伤性，将各种应用整合成一个有机整体。

天地一体化网络是各国实施全球战略的重要手段之一。目前，全球在轨卫星约 1350 颗，其中美国在轨卫星为 548 颗，占全球总量 41%。美军为实现其全球战略，构建了以全球联网的 9 个地面信息港为依托，以 37 颗高轨军事通信卫星为主体，以铱星低轨移动通信星座等商用通信卫星为补充的军民融合的天地一体化信息网络，可实现多个异构网络的互联互通和通信的全球覆盖。在民用领域，国际海事卫星组织目前已构建了 8 颗高轨海事卫星和 22 个地面互联关口站组成的天地一体化信息网络，它可与移动通信网、地面互联网互联融合，可为海、陆、空各行业用户提供全球化、全天候、全天时、全方位通信服务，已实际形成了对全球的民航空中交通管制、船舶海上交通管制的通信保障。2016 年，太空探索技术公司（SpaceX）向美国联邦通信委员会（FCC）提出申请，希望能发射 4425 颗卫星<sup>[53]</sup>，为全球提供比目前更加高效的互联网服务。2017 年 6 月，BT、

Avanti、SES、University of Surrey 等 16 家企业及研究机构联合成立了 SaT5G (Satellite and Terrestrial Network for 5G) 联盟, 计划在 30 个月内完成卫星与 5G 的无缝集成方案, 并进行试用。2018 年 1 月, ALIX 项目成立, 该项目源于欧洲航天局 (ESA) 的“5G 卫星计划”, 其目标是积极参与 3GPP 标准化过程, 以定义 5G 卫星组件及其与其他网络的接口。

当前, 天地一体化网络涉及多项科学技术难题的攻关, 包括卫星轨位和频谱的统筹规划、高速星间激光通信、卫星网络顶层体系结构、低轨卫星星间高效路由、星地移动切换协议、高中低轨异构卫星星座间的异构组网、星上资源动态按需分配、星上服务质量严格保证、基于软件定义的卫星资源管控、卫星网络安全防护、复杂星座运维管控、星上高速低功耗路由交换设备、动态拓扑半实物仿真平台等。天地一体化网络也将积极探索服务军事目标和国计民生的典型示范应用, 包括联合作战、公共安全、应急救援、抢险救援、交通物流、航空管理、海洋维权、智慧城市等, 以此拓展新兴信息服务业态, 带动信息产业化发展和转型<sup>[54]</sup>。

天地一体化网络自 2006 年在国内被首次提出以来, 建设一个基于中国本土的天地一体化信息系统的重要价值不断成为业内共识。该系统能够满足在军事、民生、科学研究等领域的重要需求, 在民用领域, 特别是在发生突发事件时, 其能够保障应急通信的畅通。我国目前跟天地一体化网络相关的重大项目有:

1) 中国电子科技集团牵头的天地一体化信息网络作为我国“科技创新 2030”重大项目, 已经在国家“十三五”规划纲要以及《“十三五”国家科技创新规划》当中被明确列入。天地一体化信息网络由三部分组成, 包括天基骨干网、天基接入网、地基节点网, 同时它还可以与地面互联网和移动通信网保持互联互通, 实现一个“全球覆盖、随遇接入、按需服务、安全可信”的天地一体化信息网络体系。

2) 中国航天科技集团公司提出了“鸿雁”全球卫星星座通信系统建设计划, 该系统将由数百颗以上低轨道小卫星及全球数据业务处理中心组成, 具有全天候、全时段及在复杂地形条件下的实时双向通信能力, 可在全球范围内提供移动通信、宽带互联网接入、物联网、导航增强、航空数据业务、航海数据业务等六大应用服务, 首次使我国卫星通信覆盖领域扩展至远洋甚至两极地区, 为用户提供全球无缝覆盖的实时数据通信和综合信息服务, 实现“沟通连接万物、全球永不失联”<sup>[55]</sup>, 构建成我国自主“海、陆、空、天”一体的卫星移动通信与空间互联网接入系统。

3) “虹云”工程是中国航天科工五大商业航天工程之一, 是我国首次提出建立的基于小卫星的地轨宽带互联网接入系统。该项工程计划发射 156 颗卫星, 这些卫星将在距离地面 1000 公里的轨道上组网运行。中国航天科工集团计划于



2022 年完成“虹云”工程的完整星座部署，建设成一个星载宽带全球移动互联网，提供全球无缝覆盖的宽带移动通信服务，为各类用户构建“通信、导航、遥感”一体化的综合信息平台，满足我国以及国际上互联网不发达地区、规模化用户单元能够同时共享宽带接入互联网的需求。

### 3.4 海洋立体通信网络

海洋立体通信网络是指基于岸基、浮空平台、卫星、深空、浮台、船舰和一体化地面管控中心等技术构建的，符合海洋通信气候环境特征、实现无缝覆盖、高效可靠、宽带高速并且成本合理的通信网络。目前，全球信息化发展领域已全面拓到生产生活科研空间，包括海洋、陆地、天空、太空等，因此，建设海陆空天有机结合一体化的信息基础设施，推动海陆空天一体化信息化联动发展，打造多层、立体、多角度、全方位、全天候的信息空间，具有深远意义。

海洋信息传输需要经历水和空气两种介质，由水下节点（包括水下传感器节点、水下巡航器等）、水面中继节点（包括船只和浮标）、空中节点（包括卫星和无人机）等组成一个海洋信息传输网络。海洋通信系统的发展经历过数次技术迭代，多种技术被用于解决海洋场景下的通信网络问题。国际上典型的海上无线通信有中频（MF）NAVTEX、高频（HF）PACTOR 系统、甚高频（VHF）Telenor 系统和船舶自动识别系统（automatic identification system, AIS）等。卫星通信在海洋通信中拥有不可替代的地位，海洋卫星通信系统能实现对全球“无缝隙”覆盖，在世界范围内，典型的海洋卫星通信系统包括海事卫星系统（INMARSAT）、铱星系统（Iridium）、北斗卫星导航系统（BeiDou）和我国发射的“天通一号”卫星移动通信系统等。由于陆地通信网络具有安全、稳定、容量大、速度快、价格低廉、技术成熟等特点，将蜂窝网、无线城域网（WMAN）、无线局域网（WLAN）等成熟的网络技术应用用于岸基近海海洋通信也是一个很好的组网选择。

从科学视角来看，海洋信息网络的特殊性与海洋本体的特殊性密切相关。海洋空间广袤，从沿岸、近海、周边海域，推及到远海大洋和南北两极，从天空、水面、水体延伸至深海，相比陆地海洋信息获取传输的范围更广、环境更为特殊。在法律角度上，内水、领海、专属经济区、大陆架、国际公海等不同区域的拥有的权利差异显著，对信息规划管理政策的设计提出了更高的要求。海洋质地的液态性、流动性、立体性特征，使海洋信息的复杂性和不确定性更为明显，海洋信息综合分析处理难度更高；从技术视角来看，海洋信息网络发展必须依赖于多种技术的交叉融合和集成创新。除广泛应用信息领域的基础通用技术之外，还需要加强海洋通信网络重大基础科学问题、海洋综合感知技术、海上无线通信技术、海洋卫星技术、水下组网技术、海洋装备试验验证平台等方面的研究，打破核心技术受制于人的局面；从应用视角来看，海洋事务涵盖海洋经济可持续发展、海

洋环境保护与生态修复、海洋资源开发利用、海洋灾害与事故处置、国际海洋事务应对等方面，涉及海洋、渔业、交通、环保等多个行业。建设海洋信息网络是一项综合性、体系性工作，只有在多维度、多领域开展广泛深度的融合，才能发挥海洋信息技术在加快推进海洋强国战略中的效用<sup>[55]</sup>。

海洋信息网络实施设计，包括建设海洋信息化基础设施体系，建立完善海洋综合感知网，整合建设海洋地面综合通信网络，逐步建设空天地海一体化的立体通信网络；建设海洋信息资源体系，整合汇集海洋信息资源，统筹建设国家海洋云平台，开展海洋大数据智能挖掘与分析；建设海洋信息应用服务体系，提高海洋信息政务服务水平，提升海洋综合管理决策信息服务能力，升海洋综合管理决策信息服务能力，提升海洋环境认知信息服务支撑能力；建设海洋信息化支撑保障体系，构建海洋信息化技术支撑体系，构建海洋信息化环境保障体系<sup>[56]</sup>。我国目前跟海洋信息网络相关的重大项目有：

1) 中电科“蓝海信息网络”。该项目旨在通过构建“天、空、岸、海、潜”一体化海洋综合信息网络与军民融合海洋信息共享服务平台，包括目标环境全域感知、通信网络互联互通、信息资源共享服务等能力，全面支撑军、警、民各类海洋智慧应用服务，保障海洋重大行动和战略通道安全，支持海洋开发利用。按照体系带系统、系统带装备、装备促应用的原则，中国电科采用快速原型方法，推进蓝海信息网络和各类关键装备建设，并不断提升认识海洋、经略海洋能力，打造创新发展新动能，开拓军民融合新形态，构筑全球领先新优势。

2) “智慧海洋”工程。该工程项目将“工业化+信息化”与海洋领域进行了深度的融合，其目标就是要全面提升经略海洋能力的整体解决方案。该项目将完善的海洋信息采集与传输体系作为基础，同时构建自主安全可控的海洋云环境作为支撑，充分的、自成体系的整合了海洋权益、管控、开发三大领域的装备和活动，进一步采用互联网大数据和工业大数据技术，实现海洋活动协同、海洋资源共享、智慧经略海洋的终极目标。

3) 863 计划海洋技术领域“水声通信网络节点及组网关键技术”。该项目的总体目标是研制水声通信网络节点工程样机，形成一套可运行的试验性水声通信网络，构建水声通信网技术研究发展平台<sup>[57]</sup>，该技术在海洋科学考察、环境监测、资源调查、海洋工程、国防建设等方面具有广泛的应用前景。该项目由中科院声学所牵头，并整合了中船重工第七一五研究所、哈尔滨工程大学和浙江大学等国内优势研究单位共同参与。目前项目组已研制了基于 MPSK、MFSK、OFDM 不同制式的水声通信节点，制定了水声通信网技术规范，构建了涵盖 13 个水声通信节点的水声通信网络<sup>[57]</sup>，开展了为期 45 天规范化海上试验，海上组网试验经过第三方检验验证，系统运行稳定，表明关键技术取得突破。

4) 海洋立体通信网络示范验证平台。海洋立体通信网络示范验证平台项目依托深圳鹏城实验室, 针对海洋通信网络带宽窄、能力弱、覆盖率低, 无法实现广域连续监控、保障海上正常商贸服务和航道安全等问题, 综合利用浮空平台、卫星、岸基、岛礁、海上浮台等中继节点, 研究新型海洋立体化网络通信系统, 能确保海上适应海洋环境变化、信号无缝覆盖、用户体验满意、数据业务高速传输, 同时还可以保证兼容卫星通信网络、无线通信网络、移动通信等多种通信网络模式, 并具有完善的网络管控机制, 能够进行各通信系统资源的协调, 让不同区域、不同业务、不同要求的用户具备自由选择通信网路的能力, 实现稳定、高效、低廉、可靠的海上通信网络服务, 使南海成为我国海上丝绸之路的重要门户和核心枢纽。

### 3.5 军民融合网络

军民融合网络是指把国防和军队现代化建设深深融入经济社会发展体系之中, 为实现国防和军队现代化提供丰厚的资源和可持续发展的后劲。军民融合网络应当在满足军事网络需求的前提下, 提供民用网络的功能, 同时必须保证网络状态变化过程的安全、可控等。

在世界局势日趋复杂的背景下, 网络空间安全治理已经成为各国发展国防事业的重点, 军民融合网络更是重点发展方向之一。2016年, 美国陆军部首席信息官办公室发布《2025-2040 网络发展规划》, 指出到 2025 年, 通过构建全球覆盖、安全可靠、高吞吐和计算资源充足、边缘 IT 化、强化管控的未来网络环境, 实现军事、民用和它国合作伙伴的融合互联。2017 年, 美国国防部预先研究计划局 (DARPA) 宣布“海基物联网” (Ocean of Things) 计划, 该计划旨在通过部署成千上万个小型、低成本的浮标, 形成分布式传感器网络, 从而在大洋广域实现持久的海上态势感知。2018 年, 美国白宫和国防部分别发布《国家网络空间战略》和《国防部网络空间战略》, 分别从国家和军队角度提出了网络空间的发展方向, 强调了网络空间的重要性和联合作战的需求。2018 年, AT&T 发布《国防网络的现状与展望》, 提出面向军事网络技术的十大挑战与六大趋势。建议 SDN/NFV 等未来网络技术应用用于军事网络。2018 年, DARPA 启动 Blackjack 项目及附属项目, 项目开发人工智能、机器自治和网络安全技术, 寻求自治、集成、在轨网络空间安全、在轨编码解决方案。随着中国信息化建设步伐的不断加快, 具备军事作战能力的军民融合网络建设已经成为中国军队现代化建设道路上一项长期、复杂而又艰巨的重要任务。十九大报告明确指出, “确保到二〇二〇年基本实现机械化, 信息化建设取得重大进展, 战略能力有大的提升”。

从军民融合网络的战时场景出发。尽管计算机网络技术在民用领域已经运用多年且较为成熟, 但是战场环境下运用此类技术依然存在移动性、鲁棒性、链路

带宽限制等不同于民用领域的挑战。信息化作战条件要求军事网络具备解决网络协同融合、网络抗毁、网络安全、海量信息交互、信息贴近作战单元部署、虚拟化和差异化的问题。具体而言，军事网络需要解决人、机、物的保障性互联互通，提供信息化、协同作战能力。此外，对于远端的指挥中心来说，需要完成军队实时作战情况、卫星、传感器采集的海量数据的信息收集；对军事部署、导弹发射等进行远程控制；并对战场数据进行实时分析处理，辅助决策。为此，军事网络需要能够解决远距离的控制问题，实现人、机、物的精确可控，需要做到对服务质量（端到端带宽、端到端时延等）的精确控制、面向战场节点失效场景提供网络抗毁自愈能力、面向战场的高动态与自组织。

从军民融合网络的民用场景出发。该网络及其关键设施需要具备强大的防御能力，能够全天候全方位感知国家各领域、各行业关键信息基础设施的网络流量动态，及时识别异常流量等重大安全风险，具备灵敏的自动调节、线路切换，甚至区域隔离的能力。为此，军用、民用网络需要解决态势感知、灵敏控制、安全切换的问题，做到网络异动准确识别、网络控制灵敏有效、双网切换无缝平滑。现阶段，网络设备的核心技术体系绝大部分都掌握在他国手中，这成为军民融合网络发展的致命隐患，具体而言包括集成电路、基础软件、核心元器件等，为此军民融合网络需要解决核心技术自主创新问题，实现网络操作系统、新型智能网卡芯片等的技术攻关。

就我国实际情况而言，网络空间安全内忧外患严峻局面仍未扭转，美国始终把持我国“网络命脉”，窃取我国核心数据资产。当务之急是以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，强化军民融合深度发展，扎实部署“网络空间安全力量体系”，铸牢制衡强敌和实现第二个百年目标的网络空间安全保障。因此，我国的军民融合网络应当满足“网络空间安全力量体系”建设要求，实现攻防兼备、自主可控，具备监测、预警、防御网络攻击的能力。



## 四、未来网络试验设施

试验验证是互联网研究、设备开发、应用创新的基本方法，未来网络技术的创新与应用需要一个大规模、国家级的试验网络平台，以支持创新架构和技术的测试验证。目前，美国、欧盟、日本、韩国等国家均建设了国家级的网络创新试验环境，我国也高度重视，建设了未来网络试验设施。本章将主要对以上国家在未来网络试验设施建设的基本情况展开详细的介绍。

### 4.1 中国未来网络试验设施

核心技术，国之重器。要从国际国内大势出发，加速推动信息领域核心技术突破。为适应全球网络变革的新趋势，2018 年国家发改委批复了未来网络试验设施项目的建设，建设周期 5 年，这是我国在通信与信息工程领域的唯一的国家重大科技基础设施，是国家重大科技基础设施建设中长期规划（2012—2030 年）优先安排的项目。如图 4-1 所示，未来网络试验设施项目由江苏省未来网络创新研究院牵头，清华大学、中国科学技术大学、深圳电信研究院共同参与，将建设涵盖包括南京、北京、合肥、深圳等 40 个主要城市，包含 88 个主干网络节点和 133 个边缘网络试验节点，主要城市节点之间通过 100G 骨干光纤互联，并分别在南京、北京、合肥、深圳建设“一总三分”运行管控中心以及 4 个创新实验中心。实现与运营商网络、中国科技网、中国教育网等国内互联网骨干网络及美国 GENI、欧盟 Onelab 等国际试验床的互联互通。基于自主网络操作系统和全新网络架构，构建了全球首个基于白盒交换设备覆盖全国的 100G 广域示范网络。设施可支持服务定制网络、一体化智能网络等的创新研究，满足天地一体化网络、空间卫星互联网、5G 创新应用、工业互联网、网络空间安全与评测、大规模高清视频等多种试验验证需求。

未来网络试验设施将支撑国家网络强国战略需求，重点满足“十三五”期间（到 2020 年）国家建设网络强国战略的试验需求，包括未来网络科学研究、产业发展与网络空间安全的试验需求，建设一个先进、开放、灵活、易使用、国际化、可持续发展，与现有网络（IPv4 和 IPv6）互联互通的大规模通用未来网络试验设施，保证主体结构相对稳定，可为各类试验用户提供灵活多样的分层试验服务，为研究未来网络创新体系结构提供简单、高效、低成本的试验验证环境，支撑我国网络科学与网络空间技术研究在核心芯片与关键设备、网络操作系统、路由控制技术、网络虚拟化技术、安全可信机制、大规模组网试验、创新业务系统等方面取得重大突破。项目的具体建设目标包括：

1) 设计未来网络试验设施的体系结构，研究并实现分层试验服务、网络管理与资源调度、网络虚拟化、可编程、联邦、协议无关转发等关键技术的突破，

其成果将形成一系列国内外专利及标准；研制满足项目需求的分层服务网络设备和虚拟化可编程设备、网络操作系统、IP 主干试验网资源调度与试验服务系统、IP 主干试验网网络管理与安全监测系统等核心设备及系统。

2) 建设覆盖 40 个城市、稳定、可靠的基础底层网络和计算存储等基础设施，可提供分层试验服务能力。其中光传输网络单波支持 100G；骨干数据网络具备 100G/10Gbps 接口，支持可编程虚拟网络的切片服务模式，支持以 IPv6 和 IPv4 为基础的分层服务；计算存储基础设施支持云化部署。建设南京运行管控总中心，负责监测全网运行状态，维护全网资源统一视图，运行管理试验服务门户，协调全网资源为用户提供统一的试验服务。试验设施将实现与现网及国内外相关未来网络试验床的互联互通。

3) 研发建设典型的示范应用实例，建设未来网络测试和标准化平台，充分展示试验设施在网络管理调度、分层服务、可编程性、并行无干扰试验、网络流量智能调度、试验资源的可视化管理、异构网络联邦互联等方面的特性和优势。利用试验设施开展第三方用户的试验应用实例，促进我国在网络体系结构、关键技术、核心设备与新型业务等方面的创新与应用，推动全国未来网络技术创新研究的广泛开展，相关技术成果将形成一系列有国际影响力的标准、论文和专利。



图 4-1 未来网络试验项目建设布局<sup>[58]</sup>

2019 年初，项目完成初步设计方案批复，正式启动建设。四家共建单位通力协作，核心设备和系统的研发取得重大突破，设备功能与性能持续升级。在与中交信通、中国联通等单位的密切合作下，设施首批 12 个主干网络节点，北京、

太原、郑州、西安、合肥、南京、武汉、成都、杭州、南昌、广州、深圳率先开通，在教学产学研等方面的集聚成果初显。

设施可为天眼、散裂中子源、合肥国家综合性科学中心等其他国家重大项目提供先进可靠的超高速网络试验平台；为政府提供智慧城市关键技术的示范验证。

设施现与国内主要通信设备商和运营商广泛开展微服务化网络操作系统、面向 2030 的未来网络、高通量可重构智能网络检测仪等创新技术的验证；并与富士康航天云网、熊猫电子、江苏北人等有影响的企业开展工业互联网关键技术研发与应用示范；同时，为各高校科研院所提供真实与虚拟场景的课程实验教学和科研平台。

未来网络试验设施将紧密围绕“网络强国”和“创新驱动发展”战略，充分发挥国家重大科技基础设施平台优势，为我国应对发展环境变化、把握发展自主权、提高核心竞争力提供有力的网络支撑。

其中，自主研发的中国网络操作系统（CNOS）已经在电信运营商网络、行业专网等领域取得了规模化商用。CNOS 网络操作系统具有全局状态实时采集、业务按需服务、资源智能调度三大功能。可实现基于微服务的功能动态扩展，分钟级链路开通，毫秒级故障倒换，端到端逐跳可控等能力，可兼容厂商设备和白盒化设备，在全球处于领先水平。目前，CNOS 网络操作系统已成功应用于中国联通 A 网中，覆盖全国 300 多个城市 1000 多个节点，成为全球电信领域最大规模的 SDN 广域网应用案例，并已稳定运行 2 年以上。同时，该系统还应用于中国移动、腾讯、青云、南凌等运营商和互联网公司。此外，CNOS 网络操作系统正服务于我国信息通信领域唯一的国家重大科技基础设施建设项目——未来网络试验设施（CENI），支撑建设了全球首个基于白牌交换设备的覆盖全国 40 个城市 100G 带宽的国家级网络创新试验环境，这在全球属首例。

现阶段，该研究团队正在基于 CNOS 网络操作系统构建开放、充满活力的网络产业生态，未来将进一步加强其在工业互联网、天地一体化网络、军民融合网络等领域的规模化应用与推广，支撑国家网络强国战略。

## 4.2 国际未来网络试验设施

全球网络创新环境（Global Environment for Network Innovations, GENI）<sup>[59]</sup>是美国国家科学基金会下一代网络项目行动计划，目的是创建一个新的互联网试验环境。GENI 项目是一个长期的大型研究项目，于 2007 年 5 月专门成立了 GENI 项目办公室（GENI Project Office, GPO）作为其管理机构。按照系统架构设计，GENI 首先会将网络资源分割成不同功能的资源子集，保证不同研究团体可以共享资源，并为他们可提供跨资源的非 IP 连接以及仪器和测量工具。如图 4-2 所



示，整个 GENI 的体系结构可分为三层，自上而下分别是：物理网络基层、用户管理核心（GMC）层和用户服务层<sup>[60]</sup>。其中，物理网络基层为用户团体创建虚拟网络提供基础资源；GMC 层通过设计可靠、可预测、安全的体系结构，利用抽象、接口、命名空间同 GENI 体系结构绑定起来；用户服务层依托环境设施提供开放服务，支持包括开发人员和研究人员等在内的数个不同用户团体的研究工作。

在 GENI 平台的基础上，面向无线网络领域的试验需求，美国 NSF 启动了高级无线研究平台（Platforms for Advanced Wireless Research, PAWR）项目，PAWR 项目由 PAWR 项目办公室（PPO）管理，PPO 是由美国 Ignite 公司和美国东北大学运营，计划于 2020 年初将高级无线研究的第一套平台投入使用。

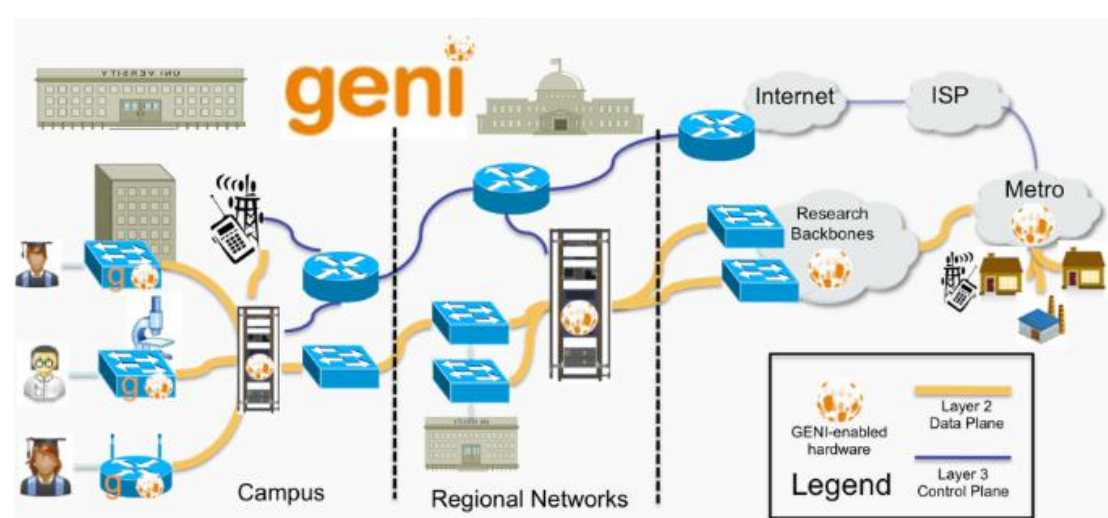


图 4-2 GENI 计算机网络资源<sup>[59]</sup>

## （2）欧盟 FIRE

未来互联网研究与实验（Future Internet Research and Experimentation, FIRE）<sup>[61]</sup>是欧盟通过将现有和未来的互联网试验平台进行联合，建设的一个动态可持续的欧洲试验基础设施平台，如图 4-3 所示。FIRE 计划在各个领域设立了众多项目并进行建设，包括有线网络试验床、OpenFlow 试验床、云计算试验床、物联网试验床、无线网络试验床等类型。

有线试验床以巴黎六大建设的 PlanetLab Europe<sup>[62]</sup>为代表，基于 IP 网络和通用服务器建设大规模试验网络，提供 L3 层及以上的试验服务能力，目前已经覆盖欧洲、美国、亚洲、澳洲等 205 个区域，包含 343 个服务节点。OpenFlow 试验床以 OFELIA<sup>[63]</sup>为代表，其建设方案与 GENI 类似，通过 VPN 互联多个 OpenFlow 区域网络，允许用户通过对控制器编程，进行 L2 层网络实验。该试验床重点研究 OpenFlow 网络的虚拟化技术，网络采用基于 VLAN-ID 的分片技术，并通过 FlowVisor 和 VeRTIGO 划分子网。云计算网络试验床以 BonFire<sup>[64]</sup>为代表，

由分布在欧洲的多家单位和物理设备构成，包括光设备、交换机和各种 IT 资源（计算、存储），旨在验证云架构、云概念和商业模型的合理性和实用性，作为云服务软件原型系统的测试平台。物联网试验床以 SMART SANTANDER<sup>[65]</sup>智慧城市项目为代表，在桑坦德市建立覆盖全市的物联网网络，支持无线传感器网络试验以及基于物联网感知信息的应用试验两个类型的试验，截止到 2017 年传感器节点已经达到 15000 多个。无线网络试验床以 NITOS<sup>[66]</sup>为代表，基于 SDN 建立了小规模室内无线网络和大规模的室外无线网络，包括 Wi-Fi, WiMAX 和 LTE 等无线传输技术，支持无线网络协议在真实网络场景下的验证。

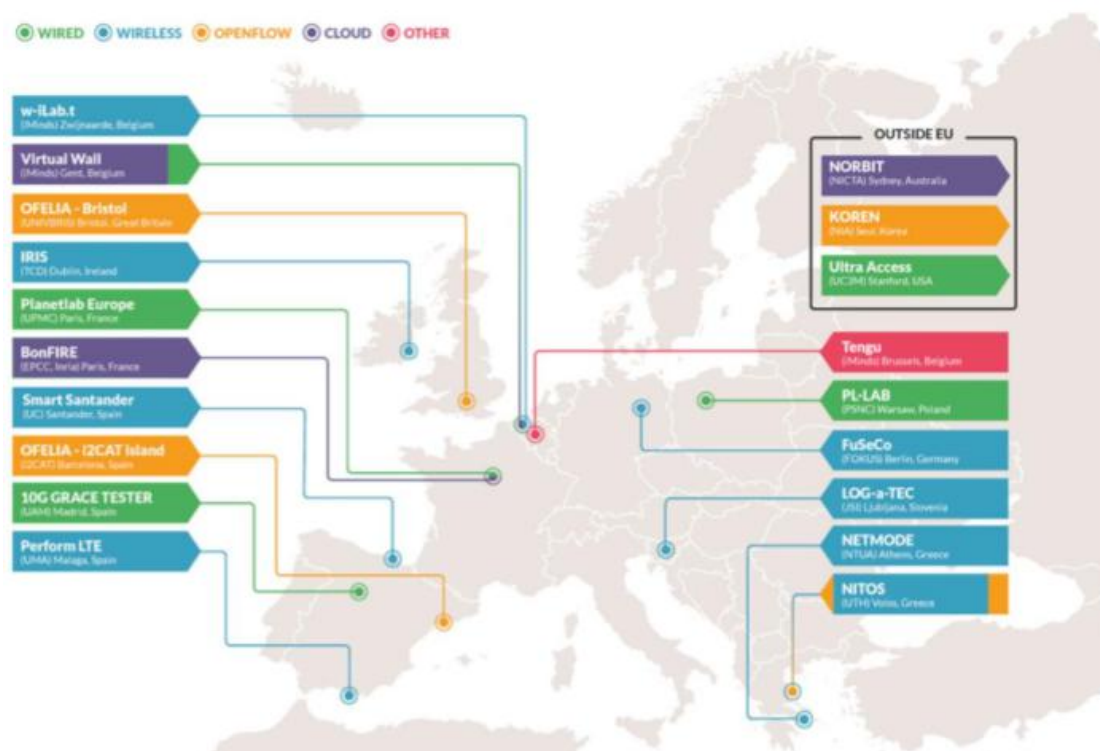


图 4-3 FIRE 试验床项目<sup>[61]</sup>

### （3）日本 JGN-X

日本国家研究与信息发展研究院和通信技术（NICT）在 1999 年开始启动了日本 G 比特网络（Japan Gigabit Network, JGN）项目；2004 年升级至 JGN2 网络，具有广泛的多播和 IPv6 功能；2011 年，进一步启动 JGN-X（Japan Gigabit Network-X）<sup>[67]</sup>项目，如图 4-4 所示，旨在建立新一代网络。JGN-X 网络组成的设备包括二层交换机和三层路由器，并在全日本拥有 22 个接入点。连接骨干点的骨干网由 10Gbps 到 40Gbps 的网络组成，其他接入点通过 1Gbps 宽带方式接入。JGN-X 具有虚拟路由器和虚拟存储的全国性基础虚拟环境，在 15 个站点提供可编程网络环境，并具有 T 比特级光学传输的测试环境。此外，通过使用 5

个国际电路，目前， JGN-X 网络测试平台研发实验室建立了四大研究主题：网络编排（运营管理）研究、大规模仿真研究、有线/无线网络虚拟化基础研究、光/无线综合网络控制研究。JGN-X 正被研究人员和研究机构广泛应用于新一代网络的相关研究项目和项目示范等活动中。JGN-X 实现了与美国、泰国、新加坡、韩国、中国、欧洲和其他国家的网络互连。

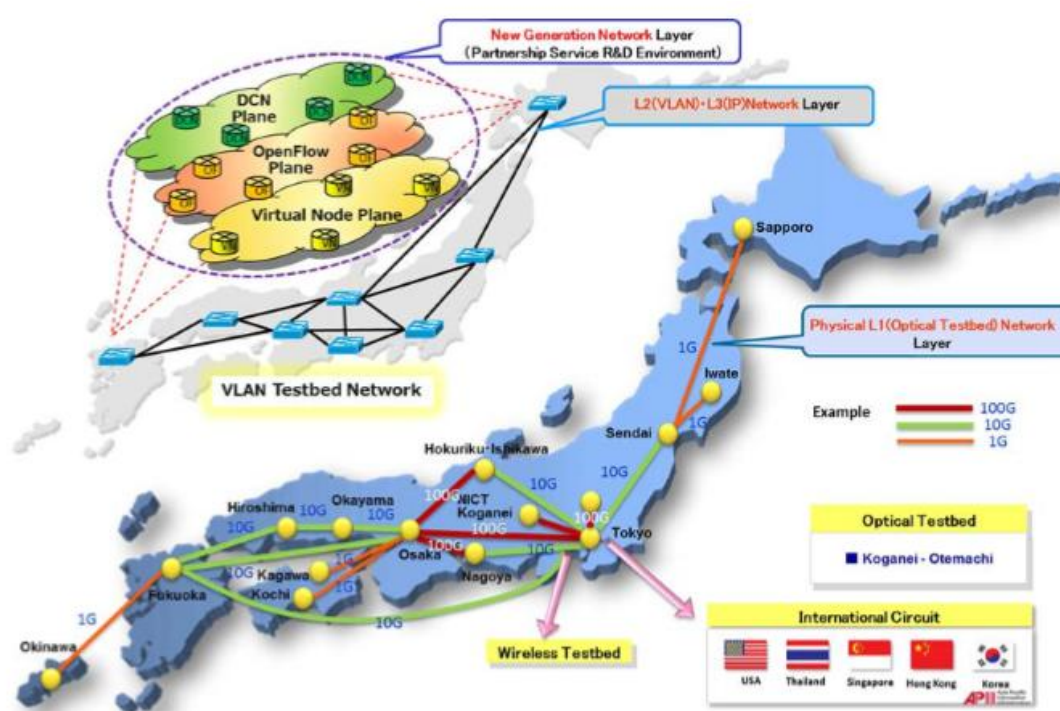


图 4-4 JGN-X 项目网络概述图<sup>[67]</sup>

#### （4）韩国 KREONET-s

韩国未来网络试验项目 KREONET-s<sup>[68]</sup>旨在推动 KREONET 基础设施的软件定义改造。KREONET 是韩国 KISTI 研究所旗下主要的全国性教育科研网。该项目第一阶段目标是为 KREONET 用户提供韩国的第一个 SDN-WAN（Software Defined WAN，软件定义广域网）服务，这个阶段在 2017 年已完成。第二阶段从 2018 年至 2020 年，其目标是基于 SDN 控制器和可编程网络设备，提供一个全国范围内的可编程网络基础设施，具体建设方案包括高性能数据平面、基于分布式的 ONOS 集群控制平面以及应用服务层面，用户可以通过开放 API 来访问这些基础设施。

如图 4-5 所示，KREONET-s 项目一共有五个节点，组成网络集群。该项目上层的应用包括部署虚拟专用网络，以及试验用户的可视化开发能力。KREONET-s 项目建成了一个 7×24 小时的网络操作中心，包括在韩国全境范围

内的 17 个 G 比特汇聚节点，以及通向美国、中国和欧洲的 4 个万兆比特国际连接节点，并且基于虚拟专用网络并行提供多项服务，包括单域 SDN 服务、SDN-IP 服务、以及和其他机构合作的跨域 SDN 服务。

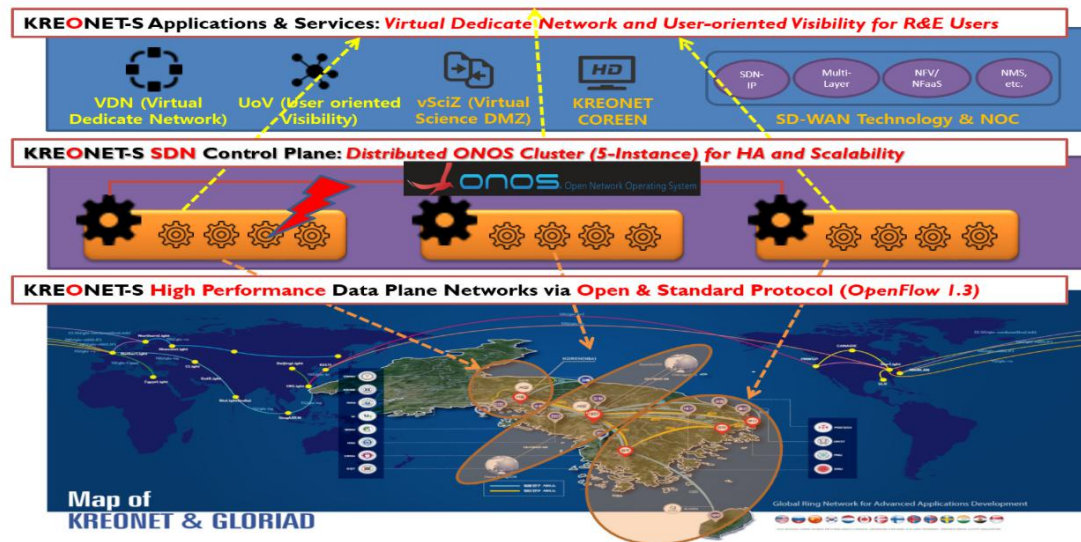


图 4-5 KREONET-S 架构和主要组件<sup>[68]</sup>





## 五、未来网络产业进展

未来网络概念提出已有多多年，在这些年间，未来网络产业从无到有，从渺小到壮大，目前已经形成了一条相对完善、生机勃勃、健康发展的生态链。在产业界相对开放的环境下，运营商、设备商、互联网公司等多方戮力同心，展开合作，共同致力于未来网络技术的发展与应用。例如，针对局部网络中动态变化的用户需求，产业界使用 SDN/NFV 进行网络编排使其满足复杂的情况，针对广域网内的不同组织及用户，使用 SD-WAN 提供解决方案，降低管理成本；针对传统电信行业的黑盒子交换机结构固化、灵活性差等问题，现今产业界纷纷使用开放式的白盒交换机以提高网络的开放性、灵活性，便于提高网络性能。

根据 IDC 预测<sup>[69]</sup>，2020 年全球软件定义网络物理网络基础设施市场规模将达到 125 亿美元；虚拟化/控制层软件市场规模将达到 24 亿美元，年复合增长率将达到 64%；SDN 应用（包括网络和安全服务）将实现 66% 的年复合增长率，届时市场规模将超过 35 亿美元；SD-WAN 市场规模将超过 60 亿美元。随着 5G 时代到来，数据量暴增，数据全部传至数据中心容易导致网络拥塞，边缘计算网络大势所趋。2020 年将有超过 500 亿的终端与设备联网，而有 50% 的物联网网络将面临网络带宽的限制，40% 的数据需要在网络边缘分析、处理与储存。根据 Statististics MRC 预测<sup>[70]</sup>，2026 年边缘计算市场规模将达到约 205 亿美元。

本章将主要从网络重构生态、SD-WAN 生态、白盒设备生态、操作系统生态、边缘计算五方面展开介绍。

### 5.1 网络重构生态

传统网络具有结构僵化、功能单一、灵活性差等缺点，越来越难以满足用户的新需求。因此 SDN/NFV 等概念应势而出，有效的增强了网络的灵活性与可控性，并受到了业界的广泛关注。而现今智慧医疗、智慧农业、智能驾驶、工业互联网、智能家居等新应用、新场景的出现进一步刺激了市场对新型网络架构的需求，与 SDN、NFV、5G 一起推动着电信业发生一场“网络重构”的革命。

（1）近年全球运营商都在加快网络重构的实施速度。

早在 2009 年，AT&T 就发布了 Domain 1.0 计划，完成了从无线/有线向全 IP 架构方向的演进。2013 年 9 月 AT&T 启动 Domain 2.0 计划，该计划拟通过 SDN/NFV 技术将网络基础设施从“以硬件为中心”转向“以软件为中心”，实现基于云架构的开放网络。AT&T 软件化作为 Domain 2.0 计划的重要组成部分，目标是到 2020 年将 75% 的网络实现虚拟化。2015 年预计完成 5%，实际完成 5.7%；2016 年预计完成 30%，实际完成 34%；2017 年预计完成 55%，实际完成 55%。截止 2018 年末，该计划实际已完成 65%。Domain 2.0 项目中的网络系统架构部

分还提出了业务的云化，所谓的“云化”是指整个信息行业中的角色都在进行云架构的调整。在此项目的指导下，AT&T 推出了 AT&T 集成云（AT&T Integrated Cloud, AIC），Domain2.0 项目通过用 AIC 建立共享标准网络的云平台，在此基础上打造一个云端的网络环境<sup>[71]</sup>。2017 年 2 月，AT&T 提出 Network 3.0 计划并命名为 Indigo，Indigo 将软件定义网络及其编排功能与大数据、微服务、机器学习、人工智能、网络接入和网络安全等新兴技术集成在一起，提供多组织间的数据共享和数据安全服务。

德国电信（Deutsche Telekom, DT）在 2015 年的世界移动大会（MWC 2015）上公布了泛欧网络的项目 PAN-EUROPEAN，布局 SDN、NFV 领域，致力于通过网络重构提供电信领域低成本解决方案<sup>[72]</sup>。在 2017 年世界移动大会上，德国电信展示了 5G 网络切片在移动宽带融合（FMC）、增强现实（AR）、机械臂控制三个应用场景的用例。该运营商积极与设备厂商华为等合作，在 5G 设备研发、5G 标准以及 5G 应用领域开展工作。2018 年 8 月，德国电信（Deutsche Telekom）呼吁其他电信运营商加入 Telecom Infra Project (TIP)，该项目旨在将电信运营商、基础设施提供商、系统集成商聚集到一起共同合作发展新技术用新技术来改变传统的构建与部署电信网络基础设施。

2011 年，NTT 发起 Arcstar 项目，该项目使用 SDN 技术连接跨越全球各地十几个国家的云数据中心，随后向全球推出 Arcstar Universal One（UNO）网络服务；2013 年 NTT 开始网络平台开放创新的研究计划；2014 年在日本发布了 SDN 技术的研究成果，同年完成了对 Virtela 的收购，并利用其研发能力，将 SDN 和 NFV 技术应用在 UNO 网络；2015 年 NTT 推出 Overlay 虚拟网络服务，为企业用户提供 Overlay VPN 服务；2017 年 NTT 推出软件定义一切和管理（SDx+M）战略，助力企业实现数字化转型。目前，Arcstar Universal One（UNO）网络推出的服务已经覆盖了全球的 196 个国家和地区。

2015 年 9 月，中国联通对外发布了“面向云服务的泛在宽带弹性网络”（CUBE Net 2.0），倡导云管协同的网络发展理念，致力于推动基于 CUBE-Net2.0 的网络转型和业务创新<sup>[73]</sup>。2018 年 3 月，发布了“云联网”等多个面向政企客户和 OTT 的云网协同新产品，率先开启了国内运营商提供云网一体化服务的进程，推进网络重构，加快 5G 商用，转型成为数字化服务提供商，并在 15 个省市开展了 Edge-Cloud 规模试点，推动了产业链的发展<sup>[74]</sup>。计划 19 年在福州等 16 个城市开展 5G 试点，研发 5G 特色应用，加速我国 5G 进展。

自 Novonet 提出以来，中国移动重点关注新的架构、新的运营与新的服务，在 2018 年 4 月的 SDN/NFV 大会上<sup>[73]</sup>，移动宣布下一代网络目标架构设计的重

点工作是依托电信集成云（TIC）技术，全面实现网络功能优化，包括流量调度、网络组网设计等功能。

在网络重构方面，中国电信在 2016 年 7 月发布了《CTNet2025 网络架构白皮书》，全面启动网络智能化重构，阶段性目标是到 2020 年，云网协同能力达到一定规模，基础设施云化基本部署<sup>[75]</sup>；到 2025 年，全网实现智能、集约、开放。其中 2018 年 3 月已经完成了新一代网络系统的顶层设计和自主研发的统一 PaaS 平台的选择和承建方式。利用 NFV 技术在三个典型场景开展了应用部署：面向 VoLTE 需求，建设了全球最大 vIMS 网；面向小流量大并发业务场景和物联网业务场景，分别展开了基于 x86 服务器转发的 vBRAS 和 vEPC 试点。2018 年上旬已经完成了上述场景的三层解耦或全解耦测试。

（2）设备商作为未来网络大潮的重要组成部分，也在积极推动网络重构。

思科是业界知名的 SDN 产品提供商，并致力于推动 5G 产业的发展<sup>[76]</sup>。在 2019 MWC 会上，宣布通过 5G 技术，推动网络重构进程，目前已与 40 家服务提供商正在积极尝试和部署其 5G 产品，并与多家网络运营商达成 5G 交易。该公司推出的应用为中心的基础设施（ACI）是业界最初的 SDN 产品之一，主要面向 SDN 的数据中心应用场景。2017 年发布了 ACI 3.0 版本，能够支持用户连接管理不同地区的多个数据中心，统一管理多云环境，为数据中心互连开辟了新的途径。

在 2018 年 2 月举行的世界移动大会（MWC 2018）上，爱立信宣布 5G 业务开启运营，2018 年 6 月爱立信和英特尔携手中国移动研究院成功展示了首个符合 3GPP 独立组网（SA）标准的 5G 新空口（NR）的异构厂家互联互通测试<sup>[77]</sup>，并且已经与全球领先的运营商达成了超过 40 项 5G 网络测试的合作意向，通过广泛行业合作全面推动 5G 商用。

随着 5G、AI、云技术等到来，华为网络侧的目标是全面云化（All Cloud），全面推进 SDN/NFV 与网络云化，提出了 SOFTCOM AI 的战略理念，将 5G 与网络结合，利用人工智能自动决策，提高网络自动化程度，降低运维成本<sup>[78]</sup>。而在 2019 年 1 月华为总裁提出“网络极简战略”，斥资 1000 亿美元进行网络体系重构，实现网络架构极简、网络交易模式极简、网络极安全、隐私保护等目标。

（3）互联网公司积极重构自己的数据中心网络。

2013 年 8 月的 SIGCOMM 会议上，谷歌首次将其如何利用 SDN 技术解决数据中心之间流量问题的方案通过论文（B4: Experience with a Globally-Deployed Software Defined WAN）公之于众，这是业界首个 SDN 的商用案例。在随后的几年中，谷歌先后发布了 Jupiter 和 Andromeda。在 2017 年的 ONS 大会上，谷歌发布了 SDN 架构的第四个部分 Espresso。Google 通过 SDN 的途径来构建 Jupiter，



Jupiter 是一个能够支持超过 10 万台服务器规模的数据中心互联架构。Google 构建 B4 网络实现了数据中心的连接，它支持超过 1 Pb/s 的总带宽来承载其服务，能够在各个园区网之间实时复制数据。Google 的 Andromeda 是一个网络功能虚拟化（NFV）堆栈，可以将其本机应用程序的功能提供给在谷歌云平台上运行的容器和虚拟机。Espresso 将 SDN 扩展到 Google 网络的边缘，连接到全球其他网络。Espresso 根据网络连接实时性的测量数据，动态智能化地为个人用户提供服务。

腾讯一直以来都是开放网络和 SDN 的先行者，在公有云网络、数据中心网络、IP 广域网等领域均有着长期的积累与实践。基于互联网方法论构建开放与 SDN 网络平台，为腾讯自有海量业务和公有云业务提供有力保障。早在数年前，腾讯开始在广域 DCI 网络试点 SDN 路径集中计算架构，经过多年积累与演进，在 2017 年 Q4，腾讯 DCI 网络成功上线了全球首个基于纯交换芯片平台的 SDN-based SR-TE 网络架构。该架构基于 Segment Routing 技术和 SDN 思想，率先实现了在数 10 万服务器级别的多个 IDC 园区间通讯，进行全局视角的、带宽利用率和链路质量等多维度、可定义约束条件的智能调度。此外，腾讯在公网流量调度方面也颇有心得，利用 SDN 的思想构建了基于业务指标、网络质量、成本等多维度的公网流量调度系统，实现了应用驱动的公网流量平台。腾讯广域网络始终向着打造软件定义的、开放的高度智能化网络的目标坚实的前行着。

## 5.2 SD-WAN 生态

SD-WAN 代表了 SDN 技术在 2015 年最引人关注的应用，旨在帮助用户降低广域网（WAN）的开支和提高网络连接灵活性。SD-WAN 指的是“将 SDN 技术应用到广域网场景中所形成的一种服务，这种服务用于连接广阔地理范围的企业网络，包括企业的分支机构以及数据中心。”现在，SD-WAN 市场使用网络虚拟化来利用、管理和保护互联网宽带，为企业应用构建更强大的网络，SD-WAN 正在蓬勃发展，并有望达到数十亿美元的企业网络服务，而企业和服务提供商终端用户群体对 SD-WAN 技术需求十分迫切，SD-WAN 能够降低部署和管理企业网络的资本支出(CAPEX)和运营支出(OPEX)。IDC 表示，SD-WAN 市场将成为“企业的支柱”，到 2022 年市场规模可达到 45 亿美元，并从 2017 年到 2022 年以 40.4%的复合年增长率增长<sup>[79]</sup>。仅在 2017 年，SD-WAN 基础设施收入在 2017 年增长了 83.3%，达到 8.33 亿美元。而 SD-WAN 软件组件(包括控制器和虚拟网络功能)的收入增长速度几乎是硬件组件的两倍。在未来五年内，SD-WAN 软件收入将以 41%的复合年增长率增长，而硬件则为 21%。

### (1) 运营商公司

AT&T 率先在全球推出基于软件定义网络的随选网络服务（Network on Demand），允许用户实时地订购和改变网络服务，帮助用户更好地控制业务、添加和更改网络服务、扩展带宽和优化成本等。AT&T 联合 VeloCloud 等公司推出了面向 150 个国家和地区的 SD-WAN 服务，优化网络连接。目前，AT&T 正与 VMware 合作，在运营商的 SD-WAN 服务中实现 5G 功能。AT&T 将其称为“革命性的组合”，声称它将为 SD-WAN 软件和蜂窝网络带来更好的控制。AT&T 提供两种 SD-WAN 产品：一种是基于网络的 SD-WAN，它最初于 2017 年在美国推出，并于 2018 年扩展到 150 多个国家；另一种是基于 VMware 的 VeloCloud SD-WAN 的顶级 SD-WAN 产品，两种产品都将使用 VMware 技术。去年年底，AT&T 在 12 个市场推出了移动 5G 服务。AT&T 与 VMware 的合作是其固定无线支柱的一部分，因为它将把 SD-WAN 服务作为其全国无线宽带服务的一部分。现在企业将能够利用 SD-WAN 和蜂窝网络，并且能够通过更换调制解调器将其升级到 5G 连接。5G 功能将扩展其目前部署的 SD-WAN 产品。

此外，德国电信与 VeloCloud 合作，用 SD-WAN 技术连接位于柏林的 Telekom 创新实验室总部和位于加州 Mountain View 市的硅谷创新中心。日本 NTT 推出的“SDx+M”服务组合，旨在增强网络可编程性和云计算基础设施环境，该服务能够使得用户将来自多个提供商的云服务与其本地系统相结合，连接全球办公室、物联网(IoT)设备和智能手机。SDx+M 主要由 CMP、Global Management One、Wide Angle 三个管理平台 and SD-NS、SD-LAN、SD-Exchange 三个网络解决方案构成，能够保证网络监控和安全性，使用户能够更有效地利用其网络资源，并根据日志数据监测威胁；同时 SDx+M 还具备 SD-WAN 的组件，配有软件定义网络服务（SD-NS），能够让用户部署 SD-WAN 这样的网络功能，并提供安全功能、远程和移动连接功能。

中国联通在网络服务创新领域，推出了随选网络，以互联网形式提供网络业务，使网络业务提供方式从运营商定义向用户自定义的模式转变。引入边缘计算，提升网络在计算、存储方面的扩展能力，创造一个高性能、低延迟、高带宽的电信级服务环境。通过与厂商的合作提供 SD-WAN 业务，满足企业云服务需求。近两年，中国联通积极推动基于 CUBE-Net2.0 的网络转型和业务创新。在 2018 年 3 月 9 日，作为网络业务创新的重要领袖，中国联通发布了“云联网”等多个面向政企客户和 OTT 的云网协同新产品，率先开启了国内运营商提供云网一体化服务的进程。中国联通推出的 IP 骨干网 SDN 演进计划，取得了多项技术突破，如 SDN 大规模商用部署、强大的软件控制能力、先进的系统架构、多种新技术应用、新业务快速开发。

中国移动推出了 NovoDC 多租户虚拟网络，用户可自助开通数据中心内的虚拟网络；推出了 NovoWAN 全局流量调度优化系统，实时感知网络流量，全局集中调度流量，提升 IP 网络带宽利用率，兼顾保证关键业务质量；推出了 SPTN 端到端集成开通服务，用户可以自助开通跨省集客专栈；实现移动核心网的灵活业务编排，GGSN、PGW 等网关功能的硬件接口标准化，控制功能软件化，灵活组合实现业务编排能力。

中国电信为了解决现有网络方案存在的问题和满足客户的新需求，基于 SDN、NFV 和云技术，自主研发了云网随选 SD-WAN 应用系统，包括编排器、控制器、门户等，实现与 SDN Overlay 系统、IPRAN 系统、云管平台的异构对接，可以实现 L2 和 L3 VPN，实现与多厂家设备的互通，应用于云网协同、多点 VPN 等多种场景，为客户提供自服务、按需调整的“网+云+应用”服务能力，并可助力企业客户上网、上云和万物互联。特别的，中国电信随选网络 SD-WAN 应用项目是中国电信支持国家“双创”和实施网络重构战略的重要技术探索和应用实践，实现了在云网协同、多点 VPN、智能园区和物联网等多种场景的应用。云网随选 SD-WAN 实现了网络、云、SaaS 多种异构资源的统一编排调度，实现了云、网资源的“分钟级”的开通及灵活调整。中国电信随选网络 SD-WAN 系统提出了面向创业园区的中小企业创新解决方案，并在中国电信江苏、重庆、北京、浙江及物联网公司等 7 个单位规模部署，为创业园区、创业客户提供自服务、按需调整的网络能力，助力企业客户上网、上云和万物互联，成为中小企业发展的助推器。

## （2）设备厂商

Juniper 则将目标放在了边缘计算上，将边缘计算、5G 与 SD-WAN 结合，juniper 的 SDN 产品 Contrail，是跨企业数据中心（Contrail Enterprise Multicloud），广域网（Contrail SD-WAN），电信云（Contrail Cloud）以及边缘基站、中心站点和交换站点的软件组合（Contrail Edge Cloud）。Contrail 是基于 Linux 基金会的开放 Tungsten Fabric 项目，并将继续为 Linux 基金会的 Akraino Edge Stack 项目做贡献。

思科在过去的一年中为进军 SD-WAN 市场进行了重大收购行动，以 6.1 亿美元收购了 Viptela，并建立了自己的 SD-WAN 平台，与美国运营商 Verizon 合作，使用思科软件定义的广域网平台来支持移动 5G 设备，这是两家在虚拟网络服务、园区和分支机构业务的延伸。两家公司表示，移动 SD-WAN 服务“为企业使用 5G 网络奠定了基础，并使移动和物联网设备的应用性能得到更多控制。”2018 年 2 月，Cisco-Viptela 收获了首个运营商用户，法国电信运营商 Orange 宣布将会采用思科全新的 SD-WAN 服务。在软件化方面，思科 CEO Chuck Robbins

在 2017 年 6 月份宣布思科正在开发基于意图的网络（IBN）软件，声称该软件可以检测加密流量中的恶意软件威胁，并且认为 IBN 是影响未来 30 年的网络。2018 年 1 月的 Cisco Live 大会上，思科宣称其 IBN 已经进入了第二阶段，开始关注保障问题（Assurance），让企业能够实现从园区到分支机构，到核心网再到数据中心网络的可视化和自动化。思科还积极拥抱云化趋势，依托 HyperFlex 平台创新，加速多云发展。思科在软件化、云化和数字化的大潮中，积极拥抱新的技术趋势，推动未来网络的发展。通过 Sprint，思科将提供其网络融合系统 540 路由器，该公司称其能够将回程网络容量增加三倍，并为核心传输网络提供 100G 连接。这两家公司表示，新的路由技术，加上思科的网络服务协调器和流媒体遥测技术，意味着 Sprint “能够更好地满足 5G 在目标位置的容量需求”。

在 2018 年华为全球分析师大会上，平安科技宣布，通过华为 SD-WAN（软件定义广域网）专线互联解决方案快速上线 AI 客服业务，为用户提供“随时随地、安全可靠、高效便捷”的极致体验保险服务。这次合作将为双方未来开展更丰富的联合创新打下坚实基础，促进平安科技云战略的实施，加速金融行业数字化转型。AI 客服所使用的生物认证、大数据、语音语义识别等技术会使语音与视频的流量消耗大增，但由于现有的门店专线带宽较小，无法承载 AI 流量，而新建 MPLS 专线不仅成本高且开通时间极长。平安从业务支撑，快速交付，优化成本等角度出发，在保留原有私有专线的基础上，在 AI 客服项目中创新性的应用了华为提供的规模化 SD-WAN 解决方案，实现了快速交付、灵活选择线路资源，最优化智慧客服体验，最大化联接效率，取得了较大的成效。华为 SD-WAN 解决方案及系列接入网关（uCPE），提供分支与分支、分支与数据中心、分支与云之间的按需互联，并通过应用级智能选路、VAS（增值业务）分钟级获取和智能运维构建极致体验企业互联。华为 SD-WAN 凭借 Hybrid WAN、ZTP 即插即用快速开局、集中可视运维、生态开放等特性，为 AI 客服提供最优链路保障，最优座席体验，实现出单效率从 2 小时减少到 10 分钟。平安科技通过采用华为 SD-WAN 解决方案，大幅降低专线成本，快速上线 AI 客服业务，提升运维效率降低运维成本，并确保 AI 客服的最佳体验。

### （3）软件公司

在 19 年的世界移动通信大会上，各大厂商纷纷公布了 2018 年在 SD-WAN 领域的最新进展。VMware 宣布扩大其软件定义的广域网（SD-WAN）集成，并扩大与 ADVA Optical Networking, Telco Systems, RingCentral, SevOne 和 Plixer 的合作，且以 4.5 亿美元收购了 VeloCloud，旨在为企业和服务提供商提供易于部署的服务和应用程序，并提高整个网络的可视性。现在，VMware SD-WAN 与 ADVA Optical Networking 和 Telco Systems 集成，以提供通用客户端设备（uCPE）

解决方案，将多个服务与 VMware SD-WAN 整合到一个 x86 平台上。客户还可以利用编排工具对 VMware SD-WAN 虚拟网络功能（VNFs）进行全生命周期管理，不仅可以实例化服务，还可以对这些功能进行服务链管理<sup>[80]</sup>。

北京华夏创新科技有限公司（AppEx Networks）与 2018 年推出了自己的旗舰运营平台 CloudWAN，CloudWAN 兼具 SD-WAN 运营模式和产品模式的功能及服务，为用户提供企业组网、云连接及 SaaS 访问优化服务。目前在全球部署超过 300 个 POP 节点，通过中央控制器智能调度整网资源，为企业提供通达全球的高速互连网络。CloudWAN 打破了 SD-WAN 产品模式和运营模式间的壁垒，加入了以组网自动化为核心的产品型 SD-WAN 的全套功能：可视化组网规划、ZeroTouch 自动部署、全网可视化监控，自动生成报表等。CloudWAN 采用了以互联网为主，专线为辅的混合组网方案，对延时敏感的应用流量（往往是音频会议这样的实时性要求高的交互式应用）采用低延时专线传输，而大量的对延时敏感度不高的应用传输在经过优化的互联网链路上。由于主要采用互联网组网，CloudWAN 企业级链路性价比大幅提升；同时通过整网链路质量监控及路由优化，互联网的海量带宽及多通路（任意两点之间存在大量通路可选）也优势得以发挥，可以较好的支持企业内部大量信息流的稳定传输。

达闼科技是业界知名的云端智能机器人运营公司，达闼的云端智能机器人将机器人的认知系统放在云端，传感器、驱动等硬件放在机器人本体上，通过安全高速通信网络将二者连接起来，实现云端操控机器人的能力。VBN 是连接机器人终端和云端大脑的机器人神经网络，VBN POP 点覆盖北上广深等国内主要发达城市，同时覆盖美国、日本、新加坡等发达国家。基于 SD-WAN 快速自动化部署和集中运维的理念，达闼在 VBN 所有 POP 点部署 SD-WAN Gateway，形成了一套基于 SD-WAN 的工业互联网专网，机器人智能终端通过 Client 或 CPE 就近接入，并提供 FEC 协议优化，云端大脑与 VBN 骨干网实现一体化部署，实现端到端高安全、高质量的网络传输，并构建一套基于 SD-WAN Gateway、CPE 和 Client 的可视化运维管理体系。达闼的工业互联网专网高效融合了 SD-WAN、物联网接入、MPLS 专网、云网一体化等理念的网络，为要求低时延、高可靠、大带宽的数据传输的工业应用领域提供了很好的解决方案参考，同时快速部署和集中运维的能力又能适应移动智能终端快速增长的需求，有效的解决了基于互联网传输的网络传输不稳定、网络质量不高、容易遭受网络攻击的问题，最后一公里基于物联网/互联网的协议优化，又极大的降低了可能的本地专线成本和提升了终端部署的灵活性。而基于 SD-WAN 的部署和运维管理模式，则可以快速满足机器人终端爆发式增长带来的网络规模扩展需求，为以后的技术与应用发展提供了较好的参考。

### 5.3 白盒设备生态

随着 SDN/NFV、云计算的深入发展，在传统网络向未来网络的演进过渡进程中，硬件的白盒化成为了一个主流的趋势。网络设备纷纷往白盒化演进，白盒交换机与传统交换机的不同是白盒交换机采用开放的架构实现了交换机软件与硬件的解耦，使得网络设备更加通用化，提高网络开放性，灵活性以及可编程能力，降低综合拥有成本（TCO）<sup>[81]</sup>。白盒交换机通常由原始设备制造商（ODM），如智邦、富士康等提供硬件，再由用户选择自研或者第三方提供网络操作系统（NOS）。通过白盒交换机可以对网络控制应用快速迭代，使用 SDN 的方式对网络进行深度优化。随着 SDN 的高速发展，互联网与运营商巨头公司纷纷自研 NOS 并将其贡献到开源社区打造白盒生态圈，促进整个产业的发展，比如微软的 SONiC、AT&T 的 DANOS 等。

#### （1）运营商公司

AT&T 是白盒（White Box）交换机的有力支持者<sup>[71]</sup>，它认为网络的未来是白盒化，设备的白盒化能让运营商取代传统的路由交换设备，降低成本，此外还能避免被厂商锁定。2017 年 11 月，AT&T 推出分布式网络操作系统（DNOS）开放架构，发布了 DNOS 白皮书，并在 2018 年 2 月将该项目开源。除了推出 DANOS 开源项目外，AT&T 在 2017 年 3 月完成了基于白盒交换机的测试，并于 4 月份在其现有的基于 MPLS 的网络中安装了 Barefoot 的 Tofino 白盒交换机。2018 年 2 月，Linux 基金在 AT&T 边缘计算系统和应用程序研究的基础上推出了面向边缘计算的开源项目 Akraino。2018 年 3 月 AT&T 宣布将 DNOS 正式托管给 Linux 基金会，改名为 DANOS，从开源社区中吸取养分，获得相关社区的贡献，并于 2018 年底首次发布代码。目前 DANOS 得到了各种 Linux 基金会团体和成员的支持，包括博通、Inocybe、Metaswitch 和 Silicom 等。DANOS 主要是面对运营商网络需求的场景，通过部署装有 DANOS 操作系统的白盒交换机可以满足客户边缘网络（包括 uCPE 设备和小区站点路由器）、全局路由网络（包括核心路由设备以及运营商边缘 PE 设备）、本地路由网络（包括 spine-leaf 网络设备）等多个场景需求。

#### （2）互联网公司

微软在 2015 年发布了自研的白盒交换机网络操作系统 Azure Cloud Switch (ACS)<sup>[82]</sup>，并在 2016 年的 OCP（Open Compute Project）大会上将其开源，命名为 Software for Open Networking in the Cloud (SONiC)。SONiC 基于微软的交换机接口抽象（Switch Abstraction Interface, SAI），被多个芯片厂商的芯片平台支持。SONiC 是基于 Linux 的网络操作系统，并利用了容器化技术，将各个网络功能部署在容器当中，实现网络应用的灵活性。SONiC 的开源使云服务运营商可以借

鉴微软在云数据中心网络的经验，并利用其开源的特性，开发出针对性的网络应用。目前 SONiC 和 SAI 已经被众多芯片厂商诸如 Barefoot Networks、Broadcom Limited、Cavium、Mellanox Technologies 等的 ASICs 芯片所支持。在国内，开放数据中心委员会（ODCC）网络工作组的凤凰项目，也是依托 SONiC 开源社区，打造“白盒+开源 OS”的网络生态。凤凰项目通过选择社区稳定的 SONiC 版本软件，并于 18 年 9 月份发布了开源网络 OS 发行版 V1.0 正式版本。

与微软类似的，谷歌也将大量精力投注在了白盒设备及其对应的操作系统上。2018 年 3 月，谷歌推出了 Stratum 项目，该开源项目将用于实现真正的软件定义的数据平面参考平台，其目标是提供一个白盒交换机和开放软件系统。Stratum 是一个开源的，独立于芯片的交换机操作系统，用于软件定义网络。Stratum 公开了一组下一代 SDN 接口，包括 P4Runtime 和 OpenConfig，实现了转发设备的可互换性和转发行为的可编程性。Stratum 提供完整的白盒交换机解决方案，真正实现 SDN 的“软件定义”承诺。Stratum 已于 2019 年进入完全开放阶段，并计划在 Apache 2.0 许可下运行。

阿里巴巴积极参与开放数据中心委员会并主导了其中的多个核心项目的工作。其中 2017 年 8 月发起的凤凰项目的目标是推动“白盒+开源 OS”的网络生态，促进中国开放网络和 SDN 网络的进一步发展。凤凰项目成立于 2017 年，项目的初始成员包括阿里巴巴集团、腾讯、百度、京东、中国移动和中国联通六家单位。凤凰项目的内容包括：SONiC 凤凰发行版，稳定、易用、LTS 版本化管理的开源交换机 NOS；白盒交换机与凤凰发行版兼容性测试；提供开源运维管理工具等等。

### （3）设备厂商

2018 年 3 月，台湾智邦科技 Accton 全资子公司 Edgecore 宣布向 OCP 提供 400G 数据交换机设计<sup>[83]</sup>，帮助网络运营商满足日益增长的网络容量需求以及不断增加的网络交换机带宽压力，提高新一代开放网络的性能，同年 7 月，Edgecore 又在阿姆斯特丹 OCP 地区峰会上宣布其 10G PON OLT 白盒交换机设备得到 OCP 项目全面认可，并即将发布一系列 OCP 标准的 GPON OLT 产品。Edgecore 指出这种基于开源硬件的 OLT 产品在 CORD（中心局重构为数据中心）架构中会有重要应用。多年以来，Edgecore 一直是开放式网络设备领域的领导者，未来也将继续推进白盒设备领域的发展。

富士通（Fujitsu）是一家日本的信息和通信技术（ICT）公司，既是开源网络服务编排软件 ONAP 的成员，也是 ONOS 董事会成员。并积极参与其北向 API 设计/编码计划。该公司还通过提供首个 R-CORD POD 参与了 ON.Lab 的 R-CORD 项目。同时，富士通也热衷于在光网络中实现白盒概念，2016 年，AT&T 与 Ciena

和富士通一起参与了 Open ROADM 互操作性现场试验。此外像英业达(Inventec)、启碁科技(Wistron NeWeb Corp)等硬件制造商也积极与 Barefoot 合作,利用 Barefoot Tofino 芯片的可编程特性开发白盒交换机,共同推动白盒生态的发展。

#### (4) 芯片厂商

2017 年 1 月, Barefoot Networks 推出首款采用可编程交换机芯片 Tofino,帮助网络工程师和运营商可以控制数据包处理,并开发自己的功能。为了在超大规模和企业数据中心实现更高的可编程性,2018 年 12 月 Barefoot Networks 推出了第二代 Tofino。目前,该公司致力于开发基于 P4 的网络芯片 Tofino 和软件开发套件 Capilano,并帮助 P4 社区发展壮大。

2017 年 6 月, Broadcom 宣布推出 Trident 3 ASIC,该芯片可编程、大容量适用于园区网络。同年, Broadcom 推出用于白盒交换机的商用芯片 Tomahawk 3,帮助企业解决超大规模网络中带宽和低功耗问题,满足网络中大量连接的需求。2019 年 3 月, Broadcom 推出业界首个用于数据中心和云基础架构的 OCP NIC 3.0 适配器的完整产品组合,使业界方便构建高性能服务器系统并有效扩展网络容量,以满足机器学习等高带宽应用的需求。Broadcom 也是开放计算项目(OCP)的主要贡献者之一,大约七成的 OCP 网络硬件和存储都包含 Broadcom 技术。

盛科网络(Centec Netorks)是一家 IP/以太网核心交换芯片提供商,深耕于交换芯片领域,目前已经成功商业化推出 6 代交换芯片产品,满足云时代、边缘计算技术演进需求。基于自研的核心交换芯片,盛科打造了面向企业用户的传统三层交换机产品和 SDN 白牌产品,在 SDN 生态中扮演着重要角色。此外,盛科网络也是 OCP 项目的贡献者之一,在开源操作系统方面,是 SONiC、SAI、凤凰项目的深度参与者,并基于 SONiC 和 SAI 开发相应的操作系统,满足用户的多样化需求,是全球交换芯片领域的主要挑战者。

## 5.4 操作系统生态

开源的白盒操作系统,除了上述提到的 Stratum、SONiC、DNOS,还有 OCP 的 Switch Light OS 和 Linux Foudation 的 Open Switch。Switch Light OS 是一种基于 Open Network Linux (ONL) 的开放式网络以太网交换机操作系统。该系统是一个以 SDN 为中心的 NOS, Big Switch 已经将其发展成与白盒硬件紧密集成,并确保 OpenFlow 类似的功能可以在数据中心的交换芯片上运行。Switch Light OS 不是传统的与操作员交互的 NOS,更像是一种为了 SDN 控制器上的应用而设的一个代理(agent)。Big Switch 的 Big Cloud Fabric 和 Big Monitoring Fabric 控制器可以通过 Switch Light NOS 来给矩阵内的白盒交换机发布程序指令。目前该系统是 Open Compute Project 中的一项开源工作。

#### (1) 设备厂商



惠普公司也是开源 NOS 的重要力量。近两年惠普在硬件市场上不断遭受到其他设备厂商的竞争，但不可否认的是其最初推出的交换机操作系统 Open Switch 也在交换机操作系统史上留下了浓墨重彩的一笔，后来该操作系统被置于 Linux 基金会旗下成为独立的开源项目。Open Switch 主要有以下几个特点：提供 Linux OS 环境中网络交换机平台的硬件设备的抽象；使用标准的开源软件，包括 ONIE 安装程序和基于 Debian Jessie 发行版的未修改的 Linux 内核；提供强大而灵活的编程 API - 控制平面服务（CPS）；使用 Linux 标准 API 或 CPS 访问 OpenSwitch 网络功能；提供丰富的网络功能，包括使用 CPS 完全访问 NPU ACL 和 QoS 功能。HP 有两个正在开发的操作系统，ProVision 和 Comware（不包括 Aruba for Campus/Wireless）。ComWare 操作系统一直是惠普网络的核心，它运行在基于机箱的交换机和 WAN 路由器上，具有广泛的功能和协议。ProVision 操作系统运行在 HP 内部开发的 ProCurve 网络硬件上，在局域网交换、园区网络中非常流行。HP 还有一个白盒以太网交换机的 Whitebrand 产品战略，允许在其硬件设备上运行 Cumulus、PicOS 等第三方操作系统。

2015 年 Pluribus Networks 与戴尔合作，将其 Pluribus Open Netvisor Linux 操作系统安装在硬件巨头戴尔的开放式网络交换机上。分布式网络 Netvisor OS 是 Pluribus 的软件定义网络（SDN）产品，在 Pluribus SDN 愿景中 Netvisor OS 可以实现裸机硬件可编程性，将网络视为单一实体，如服务器，还增加了虚拟化，集群和自动化功能。Pluribus Open Netvisor Linux 结合了 Linux 的优点，而这些优点主要有即插即用，应用程序感知结构，高级网络流程编程以及嵌入式分析和可见性功能。该软件包将随 Dell 的开放网络的交换机一起提供，例如 S6000-ON 和 S4048-ON 等型号设备。

Arista 在其基于 Linux 的可扩展操作系统（EOS）上建立了良好的声誉，该系统可以运行在多种产品（类似于瞻博网络的 Junos）。因为 EOS 是基于 Linux 的，所以它对编程是开放的，工程师可以将控制平面与物理网络分开。例如，工程师可以对网络进行编程，以自动响应移动的 VM 或为云环境动态配置网络资源。Arista 可扩展操作系统 EOS 是面向下一代数据中心和云网络的解决方案核心。使用 Arista EOS 构建的云架构可扩展到数十万个计算和存储节点，并具有大规模工作的管理和配置功能。通过其可编程性，EOS 支持一系列软件应用程序，可提供工作流程自动化，网络可视性和分析，以及可以将虚拟化、管理、自动化和编排服务的第三方应用程序快速集成。

Junos OS 以简单和创新为基础，是瞻博网络物理、虚拟网络和安全产品组合的单一操作系统，其主要的服务对象是运营商。Junos OS 是硬件路由器中使用的基于 FreeBSD 的操作系统。它也是交换和安全设备中使用的操作系统。Junos OS

以 DevOps 为设计理念，具有多种可编程性、脚本支持、开放 API 和流行的编排框架。

## （2）其它初创公司

SDN 创业公司 Pica8（品科科技）主要在为白盒交换机提供基于 SDN 的网络操作系统（OS），Pica8 的产品包含硬件和软件部分。硬件是一系列白盒交换机，能够支持多种芯片，这些硬件是实现 SDN 的载体，而软件则是 PicOS，也就是 Pica8 为白盒交换机构建的网络操作系统软件，能够在白盒交换机上提供差异化的网络应用和服务。PicOS 分为两个版本，PICOS 企业版和 PICOS SDN 版。二者包含相同的 Debian Linux 发行版，同样具有未经修改的内核，可实现最大的 DevOps 可编程性。PICOS 企业版支持 Pica8 的 CrossFlow 功能。而且只有 PICOS 企业版可以同时使用 L2/L3 协议和 OpenFlow 控制网络中的每个交换机端口。PICOS SDN 支持所有主要的 OpenFlow 控制器，包括 OpenStack Neutron ML2、ONOS、ODL、HPE 的 VAN、NEC 的 ProgrammableFlow 控制器和 Ryu。PicOS 可以运行在多家制造商的裸机交换机上。

Cumulus Networks 由 JR Rivers 和 Nolan Leake 于 2010 年创立，Cumulus 的目标是提供开源的、基于 linux 的交换机操作系统，希望能够成为 Google 的 MSDC。通过 Cumulus Linux，用户可以使其数据中心网络高度自动化、摆脱昂贵专有硬件的束缚。可以说 Cumulus 的操作系统是开创了业界操作系统的先河。Cumulus Linux 使用自动化工具来管理网络基础设施，并希望通过这些现有工具实现自动化网络交换机的配置。Cumulus 积极参与开放计算项目，并将多个项目贡献给社区。Cumulus 自成立以来，在 Cumulus Linux 网络操作系统上主要有以下一些合作。2014 年，戴尔与 Cumulus 达成协议，通过其交换机提供 Cumulus Linux 网络操作系统的选项。2015 年，Hewlett Packard Enterprise 与 Cumulus Networks 达成协议，在其 Altoline 交换机上提供 Cumulus Linux。2016 年，Mellanox 与 Cumulus Networks 达成协议，在其 Spectrum 交换机上提供 Cumulus Linux。SnapRoute 是一家新创业公司，主要为公司数据中心的网络硬件提供开源的软件。

SnapRoute 是由苹果的工程师创办的一家初创公司，主要为公司数据中心的网络硬件提供开源的软件，由 AT&T 和微软风险投资公司的资金注入。SnapRoute 将其 FlexSwitch 开源软件贡献给 Facebook 的开放计算项目（OCP）。FlexSwitch 已经部署在生产网络中，并得到了开放计算项目的认可。SnapRoute 的大部分优势在于，它使网络工程师能够对网络进行编程和管理。SnapRoute 的交换机操作系统很受 AT&T 的青睐。

初创公司 Arrcus 在 2018 年 7 月推出了 ArcOS 系统。这是一个独立的，与硬件无关的网络操作系统，适用于白盒系统，专门针对服务提供商和云计算平台的

大规模可扩展基础设施。该公司新推出的 ArcOS 网络操作系统已移植到 Broadcom 的 StrataDNX Jericho+ 和 StrataXGS Trident 3 交换芯片平台。ArcOS 构建于模块化微服务范例之上，并提供先进的第 3 层路由功能。2019 年 1 月，该公司宣布 ArcOS 系统可用于支持针对 5G 和超大规模云环境优化的 400 千兆以太网（GbE）和高密度 100GbE 交换平台。

## 5.5 边缘计算生态

随着大数据、人工智能、物联网、5G 等技术的快速发展，百亿联网设备、海量数据、超低延时等需求都对现有的云计算模式提出了挑战，边缘计算应运而生。近年来，边缘计算日趋火热，同时它还是 OpenStack 中的创新驱动力。边缘计算是一种分散式运算的架构，它将应用程序、数据资料与服务的运算从网络中心节点移往网络逻辑上的边缘节点来处理。边缘计算能够提高数据处理能力，使数据处理最接近数据源，从而提供更好的性能和实时体验。据 IDC 统计数据显示，到 2020 年将有超过 500 亿的终端和设备联网，其中超过 50% 的数据需要在网络边缘侧分析、处理与存储，边缘计算市场之大，可超万亿。也正是如此，各大巨头纷纷发力边缘计算，边缘计算市场吸引了许多知名企业，包括 AWS、思科、华为、AT&T、微软等。

### （1）互联网公司

2017 Build 大会上，微软全球 CEO Satya Nadella 正式向中国市场推出了微软混合云解决方案 Azure Stack，它可以将云端能力融入到终端，数据可在本地处理，然后进行聚合分析与决策，属于边缘计算服务，同年该公司正在推进的“智能云/智能边缘”策略中重点强调了边缘计算业务。在 2018 年度举行的微软开发者大会上，微软通过发布关于使用语音、摄像头以及人工智能技术的新一代边缘计算工具引导更多开发人员，将业务重心从 Windows 操作系统转移到智能边缘计算方面来。微软还宣布与高通建立合作伙伴关系，合作构建一个运行 Azure IoT Edge 的可视化人工智能开发人员工具包。2019 年 3 月，微软宣布推出 Azure Data Box Edge 混合云平台，使计算和存储更接近数据源。

AWS 也不示弱，2017 年年底发布的 Greengrass 软件可以“将 AWS 无缝扩展到设备上，以便它们可以对其生成的数据进行本地操作，同时仍使用云端进行管理、分析和长期存储”。2018 年 4 月，AWS 的边缘计算平台 AWS Greengrass 以支持机器学习推理的形式进行了改版，凭借 Greengrass 对机器学习的最新支持，客户将能够构建自己的 DeepLens 设备，并在边缘进行推理。AWS 的 Snowball Edge 是一种数据迁移和边缘计算设备，支持数据迁移、数据传输、图像整理、IoT 传感器流捕获和机器学习。

Google 在 2017 年发布了全新的边缘计算服务 Cloud IoT Core，协助企业连接及管理物联网装置，以及快速处理物联网装置所采集的数据。2018 年 7 月，Google 推出了新的边缘计算平台 Cloud IoT Edge，可将 Google Cloud 强大的数据处理和机器学习能力扩展到数十亿台边缘设备，以便实时处理来自传感器的数据，并在本地预测结果。

2016 年，阿里云开始布局边缘计算。2018 年阿里云宣布未来的核心战略是“云+边+端”三位一体的计算模式。2018 年 3 月，其已推出首个 IoT 边缘计算产品 Link Edge，可被用于 AI 实践，在发布时已经有 16 家芯片公司、52 家设备商、184 款模组和网关支持阿里云物联网操作系统和边缘计算产品。2019 年 1 月，阿里云发布物联网边缘网关技术，实现低成本接入边缘计算能力。

VMware 在 2018 年世界移动大会(MWC)上引入了新的分布式计算栈，目标是在偏远的工业环境、制造和监控等领域的特定边缘用例。该公司还表示，正在与美国国家科学基金会(NSF)合作，以加速边缘计算基础设施的设计。此外，VMware 正在与制造 IP 视频监控产品的 Axis 通信公司合作，开发一种智能监视边缘解决方案，最初将在戴尔的 PowerEdge 服务器和戴尔 Dell Edge Gateway 上运行，且将包括 VMware 软件。

## (2) 设备厂商

2017 年世界移动通信大会(MWC 2017)上，华为推出了 Edge-Computing-IoT (EC-IoT) 解决方案，创新地将边缘计算和云托管平台应用于物联网领域。除了 EC-IoT 解决方案之外，华为还拥有智能边缘平台 IEF，在 2018 年全连接大会上，华为公布了可实现全场景覆盖的昇腾芯片，边缘计算也包含其中。此外，早在 2016 年的时候，华为就联合创立了边缘计算产业联盟(ECC)。

思科早在 2011 年就提出了与边缘计算本质极为类似的雾计算概念，并在北美及欧洲部分地区实现应用。2017 年年中思科实现边缘计算与微软 Azure 云平台之间互联，确保为企业从边缘到云端的整体性服务。目前，思科已与全球多个运营商如 Verizon、德国电信、Rakuten、Reliance Jio 部署了商用的分布式数据中心 MEC 解决方案，主要提供如 Open vRAN、vBBU、移动 CDN、CUPS (UPF 下沉) 等服务，实现了全方位的业务布放能力。

## (3) 运营商

中国移动早在 2018 年 10 月 30 日成立了边缘计算开放实验室，已经和合作伙伴进行试验床建设共 15 项，涵盖了高清视频处理、人工智能、TSN 等新兴技术，涉及智慧楼宇、智慧建造、柔性制造、CDN、云游戏和车联网等多个场景。在 2019MWC 大会上，中国移动还发布了《中国移动边缘计算技术白皮书》明确了技术路线，以及边缘计算“Pioneer 300”先锋行动，目标在 2019 年评估 100

个可部署边缘计算设备的试验节点，开放 100 个边缘计算能力 API，引入 100 个边缘计算合作伙伴，助力商业应用落地。

中国电信打造边缘计算开放平台 ECOP，构建边缘云网融合的网络服务平台及应用使能环境，推进边缘业务应用创新发展。另外中国电信在 MEC 方面提出 5G MEC 融合架构，基于通用硬件平台，支持 MEC 功能、业务应用快速部署。同时支持用户面业务下沉、业务应用本地部署，实现用户面及业务的分布式、近距离、按需部署，还支持网络信息感知与开放。

中国联通 2018 年在 15 个省市开展了 Edge-Cloud 规模试点，打造智慧港口、智能驾驶、智慧场馆、智能制造、视频监控、云游戏、智慧医疗等 30 余个试商用样板工程。2019 年中国联通联合华为等合作伙伴发布了《中国联通 CUBE-Edge 2.0 及行业实践白皮书》。据了解该白皮书依托中国联通的 5G 网络演进和 MEC 业务需求，重点阐述了 MEC 整体架构和 CUDE-Edge 2.0 边缘智能业务平台。白皮书中指出，MEC 边缘云将高带宽、低时延、本地化业务下沉到网络边缘，成为 5G 网络重构和数字化转型的关键利器。

AT&T 表示边缘计算是支持新技术的关键部分，包括物联网、软件定义网络、区块链、人工智能和 5G。AT&T 正在 AR/VR 型应用、自动驾驶和智能城市项目的支持方面使用边缘计算。2018 年 AT&T 启动了针对 AR/VR 用户体验的测试项目。这一项目期望能够通过 MEC 实现为移动用户在 5G 网络环境下提供更好的 AR/VR 体验。在这种用户场景下，MEC 通过网络数据确定用户位置并将数据流实时提供给用户，本地增强现实服务器提供内容匹配计算和推送，实现本地实景和增强现实内容频道的高度聚合，为不在现场的用户提供更多选择，或者为用户带来独特的视角体验。

## 六、未来网络标准进展

随着未来网络领域技术标准竞争越来越激烈，以 ITU-T、CCSA、IETF、ETSI、和 MEF 等为代表的标准化组织纷纷召开会议并开展相关标准制定工作，推动着未来网络的应用与发展。由于这些标准组织所推出的标准具有架构的科学性、内容的先进性、用户潜在需求的预知性和对市场变化的适应性等特征，这些标准广泛被业界所认同，本章将重点对这些标准化组织近些年的重要标准工作展开介绍。

### 6.1 ITU-T 相关标准

国际电信联盟电信标准组织(ITU-T)创建于 1993 年，是国际电信联盟管理的专门制定通信国际标准的组织。ITU-T 由多个研究组组成，每个研究组被称为 Study Group (SG)。

ITU-T 在 2012 年开始对 SDN 与电信网络结合的标准进行研究。下一代网络的研究组 SG13 首先启动了对 Y.FNsdn-fm 和 Y.FNsdn 两个项目的研究，分别对应 SDN 的需求研究和框架研究，初步提出了在电信网络中实现 SDN 架构的方案。后经与 ONF 协商，ITU-T 进一步明确了 SDN 相关架构的研究方向，以及侧重在电信运营商中的应用场景研究。

2013 年 SG13 全会上，ITU-T 对 SDN 相关的研究课题进行了整合，并修改了 Y.FNsdn 项目的研究范围，全面覆盖了 SDN 的定义、总体特征、功能需求和架构等。ITU-T SG11 结合 SG13，开展了 SDN 信令需求和协议标准化的工作。主要议题包括：软件定义的宽带接入网(SBAN)应用场景及信令需求(Q.SBAN)、SDN 信令架构(Q.Supplement-SDN)、基于宽带网关的灵活网络业务组合及信令需求(Q.SBNG)、跨层优化的接口及信令需求(Q.CSO)、支持 IPv6 的标准化智能可编程接口应用场景及信令需求(Q.IPv6UIP)。

SG11 将研究的 SDN 信令架构与 ONF 制定的 OpenFlow 及 OF-CONFIG 协议相兼容，并在此基础上基于通信网络的需求进行协议扩展或者对不同层面的协议标准进行定义。SG15 在 2013 年 2 月的 Q12/Q14 中间会议上宣布开始研究 SDN 对传送网架构的影响，并根据会议提交的多篇文稿确定了 SDN 在传送网方面的主要研究方向，这些研究点将会是 SG15 Q12/Q14 后续 SDN 研究的重点。SG17 负责所有 ITU-T 研究组中与安全相关的课题，并与其他开源组织或 ICT 产业联盟进行合作，目前 Q2/Q6 正在研究关于 SDN 架构和应用方面的安全问题。2013 年 6 月，ITU-T 成立了 SDN 联合协调活动组(Joint Coordination Activity on SDN, JCA-SDN)，将会更多地协助 SG13 完成其领导的工作，即从整体上规划和开展 SDN 领域的研究，通过协调其他 SDN 相关的研究组以维持 SDN 研究内容的整

体一致性。从 2015 年 6 月开始, JCA-SDN 直接向 SG13 汇报其研究进展。在 2016 年 4 月的 SG13 主会期间, JCA-SDN 活动组确定了下一阶段的研究工作。

在物联网领域, ITU-T 在 2015 年成立了 SG20 推进物联网与智慧城市相关标准化工作。2017 年 3 月, SG20 正式更名为“物联网和智慧城市研究组”, SG20 的成立在 ITU-T 内部解决了物联网和智慧城市相关标准制定分散、协调工作量大、制定周期较长等问题, 有利于 ITU-T 物联网和智慧城市相关标准的发展。SG20 成立之后, ITU-T 物联网和智慧城市相关标准的制定进程加速, 一是新立项目较多, 4 次会议共有将近 40 项标准立项; 二是 ITU-T 内部物联网和智慧城市相关标准研制的整合进程加速; 三是全球标准化组织之间的协调工作逐步开展。

在 5G 承载网领域, ITU-T SG15 在 2018 年 4 月发布了多项成果: 完成 5G 承载技术报告 GSTR-TN5G: Transport network support of IMT-2020/5G (支持 IMT-2020/5G 的传送网), 为启动 5G 承载技术的研究奠定了基础, 标志着 ITU-T SG15 的工作重心由 5G 承载需求讨论转变到 5G 承载方案讨论; 完成 G.sup.5gotn: Application of OTN to 5G Transport (OTN 在 5G 传送中的应用) 立项, 该项目描述了 OTN 技术作为 5G 承载方案解决 GSTR-TN5G 中关于前传、中传以及回传的需求, 同时指出 OTN 技术在 5G 承载标准化中的发展方向, 标志着 ITU-T SG15 对 OTN 技术应用在 5G 承载方案的认可, 也是首个得到认可的端到端 5G 承载技术; 完成 G.ctn5g: Characteristics of transport networks to support IMT-2020/5G (支持 IMT-2020/5G 的传送网特性) 标准立项, 主要规范 5G 承载方案的需求和特性。

特别的, 2018 年 ITU-T 重点致力于推动未来网络发展方面的工作, 并成立了相关工作组。ITU-T 网络 2030 焦点组 (Focus Group on Network 2030, 即 FG-NET-2030) 于 ITU-T SG13 全会上 (日内瓦, 2018 年 7 月 16-27 日) 建立, 旨在探索面向 2030 年及以后的新兴 ICT 部门网络需求以及 IMT-2020 (5G) 系统的预期进展, 潜在的包括新的媒体数据传输技术、新的网络服务和应用及其使能技术、新的网络架构及其演进<sup>[84]</sup>。

网络 2030 工作组第一次全会在 18 年 10 月展开, 主要从新媒体业务、工业控制、5G 等应用场景出发, 重点分析了未来网络愿景、需求和发展趋势, 同时介绍了一些新技术和新架构, 如 Flexible IP 和 Big IP, 对 IP 网络做一些改动, 使其更有能力、更强大, 满足未来网络的发展需求。

同时, 会上正式成立了 3 个工作组 (用例和需求组、网络服务和技术组、网络架构和基础设施组) 用于更好地分类和推动相关文稿的输出, 并审议了本次会议征集的十余篇文稿。这些文稿包括了未来网络应用场景和需求分析、未来网络协议和功能的需求分析以及新的架构设计需求等内容。第一次全会从各个层面对未来网络做出了一定的趋势分析, 其中, 新媒体技术大带宽需求和多感觉同步传

输需求被多次提及，将成为网络 2030 关键驱动力之一。另外，卫星通信及其和陆地网络的融合、线缆有线传输技术向 Tbps 发展、支撑垂直行业发展的更灵活的网络技术、大灾难管理时的应急网络、未来智慧城市的异构和多传感器网络的发展等方向也受到了与会者的广泛关注，将会是未来网络发展的关键趋势。

第二次全会于 18 年 12 月召开<sup>[85]</sup>。来自运营商、设备商、服务提供商、研究机构和大学等众多单位的代表出席会议，共同回顾了网络的发展历史和现状，探讨了未来网络面临的挑战和网络技术的未来新趋势。第二次全会按用例和需求组、服务和技术组、架构组三个子工作组分别对提交的文稿及工作组的工作内容进行了详细的讨论。特别是用例和需求组，聚集了众多未来网络应用案例，包括光场三维显示、沉浸式技术支撑的工业监测和远程医疗、卫星通信、灵活寻址/实时预警/云化 PLC、未来虚拟农场、网络智能运维、新型网络服务等。同时，这些新兴应用也对未来网络提出了技术和商业模式上的需求及挑战。

## 6.2 CCSA 相关标准

中国通信标准化协会 (China Communications Standards Association, CCSA) 是负责制定国内通信行业标准的主要组织。CCSA 紧跟国际最前沿技术的发展趋势，是国内主导 SDN/NFV 等标准化工作的重要机构，具体研究及标准化工作主要分布在 IP 与多媒体通信技术工作委员会 (TC1)、网络与交换技术工作委员会 (TC3)、无线通信委员会 (TC5) 等。

IP 与多媒体通信技术工作委员会成立了以软件定义为核心特征的未来数据网络 (FDN) 特别工作组，重点研究基于 SDN 技术的未来数据网络的场景需求、架构和协议标准。网络与交换技术工作委员会成立了软件化智能型通信网络子工作组 (SVN)，该工作组主要负责基于 SDN 的智能型通信网络、网络虚拟化、未来网络 3 个方面的研究和标准化工作。此外，网络管理与营运支撑技术工作委员会重点研究 SDN 管理架构、SDN 管理功能需求、SDN 管理接口功能需求、SDN 管理接口信息模型等方面。无线通信委员会研究分析虚拟化、SDN 等技术对移动网架构和技术发展的影响，以实现移动网络高效的建设、扩容及运营，实现新兴网络的灵活能力和快速部署。

CCSA 在 SDN 标准方面先后立项 31 个标准项目，其中包括行业标准 15 项、协会标准 2 项、课题研究 14 项，全面覆盖应用与业务层、控制层、基础设施层，以及北向 API、南向接口等。同时围绕基于 SDN 的热点技术开展相关的关键技术研究和标准化工作，制定《基于 SDN 的二层 VPN 组网技术要求》、《基于 SDN 的网络随选系统 总体架构及技术要求》等行业标准。

CCSA 在 NFV 标准方面先后立项 34 个标准项目，包括行业标准 12 项、协会标准 1 项、研究课题 21 项，其中 3 项横跨 SDN 和 NFV。标准重点聚焦 MANO，



涵盖 VNF、NFVI，并延伸到 OSS 和模板。同时制定了《网络功能虚拟化编排器（NFVO）技术要求总体要求》、《核心网网络功能虚拟化 总体技术要求》等标准规范。

2018 年 CCSA 针对 5G 网络云化、5G 网络切片、5G 网络边缘计算、SD-WAN、城域网新架构、确定性网络以及网络 AI 等多个方面开展了相关的标准化制定研究工作。在容器虚拟化方面，2018 年 2 月 CCSA TC7WG1 工作组成立了网络功能虚拟化容器化网元编排管理研究项目，同年 7 月 CCSA TC3WG3 成立了容器在网络功能虚拟化中的应用及架构研究项目，经过 8 次密集会议，CCSA 完成了 NFVO 系列 6 项行业标准、1 项研究报告的报批。在 5G 网络切片方面，CCSA TC3 建立了相关网络切片行业标准，包括 IP 网络切片总体架构及技术要求、路由器设备支持 IP 网络切片功能技术要求、支持 IP 网络切片的灵活最优路径算法技术要求、支持 IP 网络切片的增强型虚拟专用网（VPN+）技术要求和灵活以太网（FlexE）接口技术要求。在边缘云关键技术方面，CCSA TC3 对边缘云部署业务的需求进行了调研分析，并对边缘云的架构、硬件、虚拟层、编排管理技术、组网、可靠性和安全性，以及网元演进对边缘云的要求/边缘云为业务提供的能力进行了研究。在城域网新架构方面，CCSA TC3 在中国联通的带领下制定了基于 SDN 的城域综合 IP 承载网络参考架构及网络转发面、控制面和管理面等技术要求，同时还由中国电信牵头制定了云化 IP 城域网参考架构及接口技术要求。在 SD-WAN 方面，CCSA TC3 制定了 SD-WAN 行业标准，包括 SD-WAN 总体技术要求（已立项）、SD-WAN 关键技术指标体系和测试方法，以及与 SD-WAN 增值业务技术要求相关的广域网加速、敏捷运维和安全服务标准。CCSA 还将确定性网络纳入了研究范围，针对广域网中提供 Layer3 确定性服务网络的总体架构、用户网络接口、资源预留信令、确定性转发机制和 OAM 工具集等方面进行了研究。在网络 AI 方面，CCSA TC3 基于人工智能的网络业务量预测及应用场景、网络智能化引擎在未来网络中的应用和 IP 承载网络智能化使能技术开展了一系列标准研究工作。

特别的，2018 年 CCSA 重点致力于推进网络 5.0 发展，并成立了相应的工作组。CCSA 网络 5.0 技术标准推进委员会（CCSA-TC614）在 18 年 11 月正式成立，委员会的主要技术领域包括：分析新应用对数据网络的需求及现网存在的问题，明确网络 5.0 的目标愿景与具体指标，构建网络 5.0 技术体系架构，进行创新研究和规范，推动相关技术点的验证、部署与运营，组织与建设产业链、推进产业化进程。在第一次全会上正式成立了 7 个工作组，分别是网络 5.0 需求工作组、网络 5.0 架构工作组、网络 5.0 接口与协议工作组、网络 5.0 安全与可信

工作组、网络 5.0 验证与基础设施工作组、网络 5.0 管理与运营工作组，对网络 5.0 的各个方面展开研究。

2019 年 1 月，网络 5.0 委员会第二次全会召开<sup>[86]</sup>，该次全会需求工作组和架构工作组分别基于前期的工作提交了网络 5.0 需求草案文稿和体系架构草案文稿，并就两个文稿的内容进行了细致的讨论，用于指导后期的修改和完善。其余工作组也基于各自的工作进行了报告，包括网络 5.0 场景与技术要求、未来网络应用场景和需求分析、网络智慧化运营、未来网络移动性支持、未来网络安全可信的需求、网络 5.0 协议和架构的匹配等方向。

在最近召开的第三次全会上<sup>[87]</sup>，主要针对未来智慧农业的场景与需求、主动防御的网络安全探讨、网络需求分析、未来网络安全可信的需求、5G 新型核心网络架构技术等场景进行了深入而细致的讨论，明确了网络 5.0 的产业发展方向、体系架构等问题，并在会上发布了《网络 5.0 参考架构白皮书》，并宣布了《网络 5.0 产业白皮书》的发布计划。

### 6.3 IETF 相关标准

国际互联网工程任务组（The Internet Engineering Task Force, IETF）是全球互联网最具权威的技术标准化组织，主要任务是负责互联网相关技术规范的研发和制定，当前绝大多数国际互联网技术标准都是出自 IETF。

早在 SDN 提出以前，IETF 就对类似 SDN 的方法和技术做出研究，与 SDN 相关的项目分别是转发分离工作组（Forwarding and Control Element Separation, ForCES）和应用层流量优化工作组（Application-Layer Traffic Optimization, ALTO）。2013 年 7 月，IETF 成立了路由系统接口（Interface to the Routing System, I2RS）工作组，致力于 SDN 标准开发工作。其目标有两个，第一个是标准化网络范围内的多层拓扑，二是标准化设备的路由信息库（RIB）编程，RIB 编程可以与 OpenFlow 结合使用。I2RS 还有一个非官方目标是对网络功能虚拟化（NFV）服务链进行编程。同年，IETF 的一项名为网络服务链（Network Service Chaining, NSC）的全新工作还处于萌芽阶段，尚未成立正式的工作组，仍处于 BoF 讨论阶段，BoF 的目标是调查 IETF 社区是否有足够的兴趣从事特定领域的工作。NSC BoF 将与 ETSI NFV Group 制定的目标保持一致，以生成可用于信号和维护网络服务链的协议。

目前，IETF 以软件驱动网络（Software Driven Network）为出发点来研究 SDN 并提出 IETF 定义的 SDN 架构，重点关注控制平面北向接口规范，对于南向接口并未有相关的标准化建议。2017 年 7 月，在 IETF 第 99 次会议上，NMRG 研究组讨论了关于 SDN 控制器在网络中的放置问题，提出了“基于 MLG 的 SDN 环境表示参考模型和 SDN 自动管理架构”。I2RS（Interface to the Routing System）

工作组进一步更新了网络拓扑模型的草案和 BNG 控制分离信息模型。IETF 目前与 SDN 相关的研究项目/工作组主要有 6 个，分别是：

- XML-based SDN (Software Driven Network)，IETF 在第 82 次会议上以软件驱动网络为出发点研究 SDN 并成立 SDN BOF，提出 IETF 定义的 SDN 架构，主要研究重点是在不修改现有硬件的情况下基于 XML 网关技术利用 NETCONF 和已有设备接口实现 SDN；
- ForCES (Forwarding and Control Element Separation)，主要定义设备内部转发与控制分离的需求、框架、协议、转发单元模型和 MIB 等，目前已发布 15 个 RFC，协议标准基本完善；
- ALTO (Application-Layer Traffic Optimization)，为应用层提供更多的网络信息，完成应用层的流量优化，用于判断的参数包括最大带宽、最少跨域和最低成本等。目前已发布 4 个 RFC，包括需求、协议和服务器发现等内容，正在定义 ALTO 部署、信息模型和数据模型等方面的标准；
- I2RS (Interface to the Routing System)，核心思想是在传统网络设备路由及转发系统的基础上开放新的接口与外部控制层进行通信，外部控制层通过设备反馈的事件、拓扑变化和流量统计等信息动态下发路由状态、策略等。选择使用 IETF 现有的管理协议 NETCONF 和 YANG 来实现路由系统的开放。目前已完成了用例和架构标准的开发，正在定义信息模型、数据模型；
- PCE (Path Computation Element)，针对 SDN 的内容主要是有状态的 PCE 技术，该技术是一种基于 MPLS 的路径集中计算技术，除传统 MPLS-TE 的输入外，增加了标签交换路径信息，使网络整体流量模型最优；
- SDNRG (Software-defined Networking Research Group)，主要讨论 SDN 模型的分类、可扩展性、应用场景、多层可编程及反馈控制、系统复杂性、接口和安全性等相关内容。

IETF 成立了信息中心网络研究组 (Information-Centric Networking Research Group, ICNRG)，其主要目标是将正在进行的 ICN (Information centric networking) 研究与整个互联网发展相关的解决方案相结合，旨在提高网络的传输效率、增强网络的可扩展性以及通信方案的稳健性。

特别地，在 2018 年该组织成立了两个新的项目组，并在 SDN、NFV、SR 等方向输出了一系列成果。

在 SDN/NFV 方面，IETF 的 I2RS、SDNRG 工作组发布了一些新的标准。2018 年 9 月，I2RS 工作组发布了 RFC8430 与 RFC8431，用于规范 RIB 信息模型<sup>[88]</sup>。

2018 年 10 月，IETF-SDNRG 工作组提出了软件定义光传输网络中的路由机制（SD-OTN）以及数据中心网络中的路由优化机制。

随着虚拟化、网络 Overlay 和编排技术的推出，网络运营商对服务功能的需求越来越突出，IETF 于 2018 年推出了服务功能链工作组（Service Function Chaining Working Group, SFC WG），其职责主要管理 SFC 组件的 YANG 模型、制定相关标准。SFC WG 目前已经发布了用于服务功能链的架构（RFC 7665）和网络服务报头（RFC 8300）等标准。

在快速重路由方面，为了解决无环路的备选路由（Loop-Free Alternates, LFA）以及远程无环路的备选路由（RLFA）存在的上述问题，IETF 提出了基于 MRT（Maximally Redundant Trees）的备份路由计算机制，旨在寻找能够达到 100% 覆盖率的快速重路由技术。理论上存在备份路由的场景下，MRT 均能产生备份路由，彻底解决了某些场景下无备份路由的问题。在网络传送方面，IETF SPRING（Source Packet Routing In Networking）工作组提出的新一代网络传送技术标准 SR，以及一个新的 IPv6 报头 SRv6，用为 IP 和 MPLS 网络引入可控的标签分配，为网络提供高级流量引导能力。

## 6.4 ETSI 相关标准

欧洲电信标准协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)是独立的非赢利性的欧洲地区性信息和通信技术(ICT)标准化组织，这些技术包括：电信、广播和相关领域，ETSI 现有来自欧洲和其他地区共 55 个国家的 688 名成员，其中包括制造商、网络运营商、政府、服务提供商、研究实体以及用户等 ICT 领域内的重要成员。

2012 年 10 月，在 ETSI 的推动下发起成立网络功能虚拟化标准工作组（Network Functions Virtualization Industry Specification Group, NFV ISG），着重从电信运营商角度提出对 NFV 的需求，推进电信网络的 NFV 技术与标准化工作，目前已有超过 220 家网络运营商、电信设备供应商、IT 设备供应商以及技术供应商参与。

2014 年 11 月，NFV ISG 完成了第一阶段工作，发布第三版 NFV 技术白皮书，阐述电信领域引入 NFV 技术的优势，以及 ETSI NFV 的研究工作进展和计划。NFV 技术白皮书的内容主要涉及 NFV 的定义、应用场景、基本功能、发展优势以及与 SDN 等的关系等。从 2015 年底开始进入第二阶段工作，将更加注重 NFV 的应用与部署。针对管理与编排（MANO）功能需求和接口、VNF 包、Hypervisor 域进行规范制定，同时对 NFV 基础设施节点架构、NFV 部署架构、虚拟化等技术进行研究。2017 年，ETSI 举行了 NFV PLUGTEST 活动，致力于解决 NFV 的互操作性问题。同年 10 月，ETSI 针对多厂商的互操作性问题发布

了新的 NFV 规范，统一了 API 接口，使运营商能够加快技术的推广。目前 ETSI NFV ISG 正在致力于推出 NFV Release 3，旨在为网络功能虚拟化运行提供规范和建议，研究如何将 NFV 应用于网络切片并提高安全性。

此外 ETSI 还成立了多接入边缘计算项目，旨在为移动网边缘提供 IT 服务环境和云计算能力。在 2017 年 3 月 ETSI MEC 第 9 次会议上，ETSI 移动边缘计算（Mobile Edge Computing, MEC）行业规范工作组正式更名为多接入边缘计算工作组，以应对第二阶段工作中的挑战，更好地反映并满足非移动运营商的需求。此外，ETSI 还成立了 Zero-Touch 工作组，该小组的目标是定义工作实践和系统，使所有操作流程和任务（如交付、部署、配置、优化等）自动执行，以实现敏捷、高效和定制的服务管理和新兴的、未来的自动化网络。Zero-Touch 网络和业务管理行业规范组（ZSM ISG）将采用包括网络切片在内的 5G 网络管理和技术，引入更高效的自动化。

2018 年 ETSI 主要工作聚焦于智能网络与多接入边缘计算领域，分别成立了工作组展开研究。

2018 年 1 月，ETSI 成立了零接触网络和服务管理行业规范组（ZSM ISG）并进行了首次会议。规范组首次会议选举出了领导团队，启动了首批工作议题的讨论，并发起了与其他标准团体、论坛和开源社区的合作。会议的一个首要成果是就 5 项工作议题达成了一致，其中包括：零接触系统端到端视图使用案例的发展、要求及参考架构，还包括对自动化技术和网络切片管理等领域的分析。ETSI ZSM ISG 的目标是提供一种使所有的操作流程和任务（如交付、部署、配置、保证和优化）自动执行的解决方案，最理想的情况是 100%自动执行。工作组认为，随着 5G 及其构建模块的发展，提供一个端到端视图聚焦自动化的网络和服务管理是非常必要的。工作组希望向市场提供开放的简单的解决方案，同时与其他标准团体和开源项目展开合作，共同推进未来网络发展。

在 2019 年初，ETSI 多接入边缘计算（MEC）小组创建了它的第一个工作组-部署和生态系统工作组，或称“Decode”<sup>[89]</sup>。新小组将重点关注使用标准化 API 实现和部署基于 MEC 的系统。这些系统利用了 MEC 定义的框架及其服务。工作组将帮助促进使用开源组件来验证 MEC 用例或系统实体。此外，Decode 正致力于利用云应用程序设计、编排、自动化以及安全可靠的改进来实现这些 MEC 系统的最佳实践。Decode 的另一个关键要素是，该小组将进一步推动 ISG 的工作，以实现运营商的采用和互操作性。它将通过为 MEC 的测试创建进一步的规范来实现这一点，包括 API 一致性规范和指南。MEC ISG 最近演示了许多使用其概念验证（PoC）框架的实现。其中包括使用服务感知无线接入网络（RAN）

MEC PoC 优化视频用户体验、边缘视频编排、使用多服务 MEC 平台实现高级服务交付，以及低延迟工业物联网。该组织已经发布了 12 个 PoC。

## 6.5 MEF 相关标准

城域以太网论坛（MEF）成立于 2011 年，是一个专注于解决城域以太网技术问题的非盈利性组织。MEF 主要从四个方面开展技术工作：城域以太网的架构、城域以太网提供的业务、城域以太网的保护和 QoS、城域以太网的管理。MEF 的成员已超过 200 家，包括来自世界各地的服务提供商、硬件和软件技术供应商、测试/培训服务商和其他公司等。

MEF 在 2014 年提出第三张网（The Third Network）的概念，旨在将按需灵活分配的互联网与运营商级以太网 2.0（CE 2.0）的性能和安全保证结合在一起，为跨网络域提供协调的、有保证的敏捷的连接服务网络。第三张网的服务主要应用在物理服务端点之间（如以太网端口）以及虚拟端点连接的虚拟机或虚拟网络功能上。MEF 将以 CE 2.0 为基础，基于网络即服务原则，用户可以动态地按需地创建、修改或删除服务，满足多运营商网络中的服务订购、性能、应用和分析等需求，同时满足定义生命周期服务编排（LSO）和 API 的安全需求。

在 2016 年 7 月发布的《运营商以太网和 NFV 白皮书》中，MEF 表示将通过生命周期服务编排功能扩展其 CE 2.0 服务来实现敏捷的、有保证的增强型服务。LSO 将包含现有的 WAN 基础设施元素、软件定义网络（SDN）和网络功能虚拟化（NFV）元素。

2017 年 11 月，MEF 发布了 MEF 3.0 架构，用于在全球自动化网络生态系统中定义和交付灵活有保证的通信服务。MEF 3.0 服务为用户提供了在数字经济中所需的动态性能和安全性能，将复杂的标准化服务与新兴的 LSO 和 API 套件相结合，提供按需、以云为中心的体验，使用户通过应用程序对网络资源和服务功能进行控制。MEF 3.0 扩展了 CE 2.0 的服务和技术，推动了数字化转型的发展。

特别的，2018 年 MEF 主要致力于 SDN、SD-WAN 等方向的工作，并分别推出了新的行业规范。2018 年 4 月，MEF 在其 3.0 架构下发布了两个新的规范，分别是网络资源管理信息模型（MEF 59）和网络资源调配接口配置文件规范（MEF 60），并联合 Linux 基金会和 ETSI 共同推出了业界首个 SDN/NFV 的认证。2018 年 10 月 MEF 在其年度 MEF18 会议上发布了一套广泛的软件定义广域网（SD-WAN）规范。随着 SD-WAN 市场的发展势头<sup>[90]</sup>，这些标准将有助于提供标准化蓝图，用于比较 SD-WAN 服务和技术的功能集和互操作性。MEF 的 SD-WAN 服务规范描述了应用感知，over-the-top WAN 连接服务的要求，这些服务使用策略来确定如何通过网络基础设施转发应用流。



## 七、未来网络开源项目

在未来网络的研究与发展进程中，开源软件起到了巨大的作用。开源软件以快速迭代、开放、免费等特性受到了广大研究人员的青睐，具有很强的前瞻性。在信息网络的研究中，开源软件涉及从单个设备的软件实现到平台级软件系统的方方面面。本章将主要介绍在未来网络方面具有一定影响力的开源软件基金会以及许多在国际上受关注的开源项目，首先从发展现状、参与项目、未来发展方向等方面介绍开源软件基金会，随后从开源项目的发展状况、功能特性以及应用场景等三个角度对网络、云计算、边缘计算等方面的开源项目展开介绍。

### 7.1 开源生态

#### 7.1.1 Linux Foundation

Linux 基金会成立于 2000 年，是一个中立的非营利性组织，由开放源码发展实验室(Open Source Development Labs, OSDL)和自由标准组织(Free Standards Group, FSG)联合成立，致力于围绕开源项目构建可持续的生态系统，以加速技术开发和商业应用。Linux 基金会及其项目通过共享技术创新和开源，促进 Linux 技术社区、应用开发商、行业和最终用户不断创新解决 Linux 生态系统面临的紧迫问题。

Linux 基金会及其项目通过共享技术创新和开源，促进 Linux 技术社区、应用开发商、行业和最终用户不断创新解决 Linux 生态系统面临的紧迫问题。旨在建立、构建和维护开源创新技术，重点涉及企业 IT、嵌入式系统、云计算、网络等开源项目，甚至已有的一些网络创新项目正在帮助重新定义一切可能的想法并付诸实施，包括用于跨行业区块链技术的 Hyperledger、ONAP、实现虚拟网络功能的策略驱动软件自动化、用于生产级容器编排的云计算基金会项目以及由 FD.io、OpenDaylight、ONAP、OPNFV、PND、SNAS 六大项目联合而成的 LFN 基金会项目等。

2019 年 1 月，Linux 基金会宣布推出 LF Edge 开源国际组织，旨在建立独立于硬件、芯片、云或操作系统的一个开放的、可互操作的边缘计算框架。LF Edge 由 5 个项目组成，它们将支持非传统视频和联网领域的更低延迟、更快的处理和移动性的新兴边缘应用。5 个项目包括 Akraino Edge Stack, EdgeX Foundry, Open Glossary of Edge Computing, Home Edge 和 EVE，通过将电信、云和企业(代表位置、延迟和移动差异化)的优势形成一个统一的软件栈，LF Edge 将有助于加速快速增长的边缘设备的部署（预计到 2020 年将超过 200 亿）。为了使物联网取得更广泛的成功，目前四分五裂的边缘市场需要共同努力，并为物联网行业的未来提出一个共同的、建设性的愿景。



Linux 基金会承载了世界上许多最重要的开源项目<sup>[91]</sup>（如图 7-1 所示），其中较为知名的包括 CORD、Kubernetes、DPDK 等。在未来网络发展方面涉及软件定义网络、存储、安全、虚拟化、容器、边缘计算、区块链等未来网络新兴技术。

表 7-1 Linux 基金会在未来网络领域的开源项目

网络领域	涉及项目	功能描述
SDN、虚拟化	LFN	将 FD.io、OpenDaylight、ONAP、OPNFV、PND、SNAS 整合为一个项目，提高跨网络项目的协作性和运营效率。
	ONOS	提供一个 SDN 控制平面（南向和北向 API），及一系列的管理、控制和服务应用程序。
	Open vSwitch	多层虚拟交换机。
	Open Switch	基于 Linux 的交换机网络操作系统(NOS)平台。
	OpenSDS	软件定义存储处理多存储平台的横向扩展云环境。
	Open Security Controller	软件定义安全协调解决方案，自动部署虚拟化网络安全功能。支持东西向数据中心的安全性，减少软件定义网络环境中的威胁。
云和容器	Open Container Initiative	开放式容器，创建开放式行业标准。
	Kubernetes	将容器分组为逻辑单元，自动化容器化应用程序的部署、扩展和管理。
边缘计算	Akraino Edge Stack	创建一个开源软件堆栈，改善网络的边缘云基础设施状态。
	EdgeX Foundry	物联网边缘计算标准化互操作框架。
	Open Glossary of Edge Computing	开放边缘计算术语表
	消费者边缘计	消费者边缘计算服务平台

	算服务平台	
	EVE	IIoT 边缘操作系统
区块链	Hyperledger	创建企业级、开源分布式分类框架，协助组织扩展、建立行业专属的应用程序、平台和硬件系统。

图 7-1 Linux 基金会支持的开源项目<sup>[91]</sup>

### 7.1.2 OCP

OCP<sup>[92]</sup>成立于 2011 年,是一个快速发展的全球合作社区,由 Facebook、Intel、Rackspace、高盛及 Andy Bechtolsheim 携手共享开源设计推出的开放计算项目,已被纳入开放计算项目基金会。OCP 专注于重新设计硬件技术,使其更加高效、灵活和可扩展,以有效支持计算基础设施不断增长的需求。其愿景是硬件领域如同软件领域一样为未来网络开源带来创造力和协作力。

OCP 为个人和组织提供与他人分享知识产权的体系架构,以设计、使用、支持和推动交付最有效的服务器、存储器和数据中心硬件作为可扩展计算使命的工程社区,通过开源硬件和软件相结合促进服务、存储和数据中心技术的开放与普及。OCP 正在重新定义技术基础设施,设计更高效、更灵活、更加可扩展的商用硬件,为未来网络产业发展摆脱专有的、“一刀切”的设备束缚。为保证开源开放的一致性,OCP 提出需满足四项核心要求为开源提供基础:有效性、可

扩展性、开放性、影响力。OCP 基金会在未来网络发展方面的主要工作组有：高性能计算（HPC）、开放计算网络、安全（孵化）项目、开放计算存储、电信等项目，每个工作组孵化一个或多个项目（如下图 7-2）。

在 2019 年 3 月的 OCP 全球峰会上，百度宣布与 Facebook 和微软合作，<sup>[65]</sup> 定义 OCP 加速器模块（OAM）规范，以增加人工智能（AI）加速器的性能。有望缩短 AI 加速器的开发并加速大规模应用。Submer 公司推出了全新的 SmartPodX 平台——全球首款符合标准 19 英寸服务器格式的液浸式冷却系统，以及适用于高性能，超级计算和超大规模基础设施的开放式计算项目（OCP）规范。与此同时，华为宣布与 OCP 展开合作，将在其最新的全球数据中心采用 OCP 的 Open Rack。它是第一个专为数据中心设计的机架标准，将机架集成到数据中心基础设施中，有助于降低总体拥有成本（TCO）并提高规模计算领域的能效。

表 7-2 OCP 基金会在未来网络领域的工作组

项目名称	描述	项目范围	主要参与者
高性能计算（HPC）	开发完全开放的异构计算、网络和结构平台，实现低延迟高性能计算和大数据分析的快速创新。	1. 低延迟切换及低延迟可扩展存储； 2. 通过以太网从 HPC Fabrics / 集群技术连接到非集群网络。	Rackspac、IBM
开放计算网络	促进网络硬件和软件开发，支持完全开放的网络技术堆栈。	1. 完全隔离并开放网络软件和硬件； 2. 软件定义网络（SDN）、协议栈和虚拟化； 3. 网络架构和拓扑，硬件抽象层、防火墙功能及负载均衡等。	Facebook、微软
安全项目	创建设计和规范软件安全，为保护所有 IT 设备及网络提供基础。	1. 完整的标准接口、协议和操作系统； 2. 保护并验证所有可变存储； 3. 使用多功能的回滚保护。	微软、谷歌
开放计算存储		1. OpenRack 存储机箱； 2. 推广采用 OpenBMC。	Western Digital、Hyve Solutions

电信项目	应用开放式 OCP 模型,将现有专有解决方案转变为 OCP 解决方案。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 与 OCP 产品和规格相兼容;</li> <li>2. 针对传统数据中心部署的实现。</li> </ol>	SK 电信、Verizon、AT&T
------	-------------------------------------	---	--------------------

## OCP COMMUNITY: PROJECTS & SUB-PROJECTS



图 7-2 OCP 社区：项目及子项目<sup>[93]</sup>

### 7.1.3 ONF

ON.LAB 组织<sup>[94]</sup>是由 SDN 两大非赢利组织开放网络基金会（Open Networking Foundation, ONF）和开放网络实验室（Open Networking Lab, ON.Lab）合并而成。2011 年 Nick McKeown 及 Scott Shenker 创立了 ONF, 随后他们与 Guru Parulkar 创建了 ON.Lab, 这两大组织的成立, 成功地将 SDN 推向前台, 并获得业界的广泛关注, 为推动 SDN 的采用和落地奠定了基础。

ONF 是 SDN 领域公认的领导者和标准承载者。自成立以来, ONF 已成功推动软件定义网络从前景不明到被下一代网络包括运营商、设备商、服务提供商普遍接受, 同时 ONF 也在积极探索基于新的用于转发平面编程语言 P4 的开发, 促进软件定义网络的发展。

由 Facebook、Intel、Rackspace、高盛及 Andy Bechtolsheim 携手共享开源设计推出的开放计算项目, 已被纳入开放计算项目基金会。OCP 专注于重新设计硬件技术, 使其更加高效、灵活和可扩展, 以有效支持计算基础设施不断增长的需求。其愿景是硬件领域如同软件领域一样为未来网络开源带来创造力和协作力。

2017 年 2 月，ONF 和 ON.Lab 两大组织合并，如图 7-3 所示，成立了一个新的制定 OpenFlow 标准的开源组织。ONF 和 ON.Lab 的合并，通过将标准和开源软件整合到一起重塑网络的未来，推动未来网络尤其是 SDN 的发展、应用、提升和落地，引领开源时代的技术进步(如下图 7-3)。ON.LAB 的主要成员有 AT&T、Google、NTT、SK 电信和 Verizon 等运营商及其他中外公司。

截止 2019 年，ONF 拥有 3 个平台：ONOS、Mininet、CORD,支持 7 个开源项目：M-CORD、ODTN、XOS、R-CORD、TRELLIS、E-CORD、VOLTHA、STRATUM，分别致力于 SDN/NFV、下一代移动网络、宽带接入、下一代 WAN 等方面。

## New ONF Being Formed to Lead in this New Open Source Era

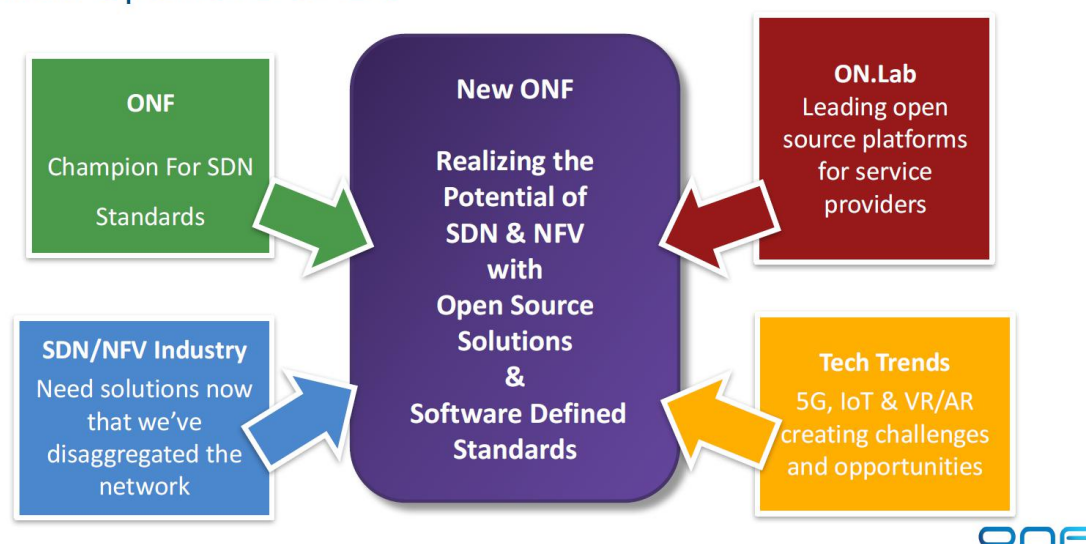


图 7-3 ONF 与 ON.lab 合并<sup>[94]</sup>

### 7.1.4 CNCF

云原生计算基金会（Cloud Native Computing Foundation, CNCF）<sup>[95]</sup>是 2015 年成立的隶属于 Linux 基金会的围绕“云原生”服务云计算的非营利性基金会项目。CNCF 致力于维护和集成开源技术，支持编排容器化微服务架构应用，通过技术优势和用户价值创造一套新的通用容器技术，推动本土云计算和服务的发展。CNCF 的成员主要包括 Google、IBM、Intel、Docker、RedHat 等知名公司，也包括 DaoCloud 等后起之秀及一系列终端用户与支持者。CNCF 的成员代表了容器、云计算技术、IT 服务和终端用户，致力于共同营造全球云原生生态系统，携手推动现代化企业架构的进程。

云原生应用计算使用开源软件栈将应用程序部署为微服务，将每个部分打包到自己的容器中，并动态地编排这些容器以优化资源利用率。CNCF 在多个领域

都维护有大量的项目（如下图 7-4），且 CNCF 在云计算、编排方面的主要项目有：

表 7-3 CNCF 在云计算、编排方面的项目

项目名称	描述
Kubernetes	集群中管理跨多台主机容器化应用的开源系统。
Prometheus	专注时间序列数据，提供广泛集成支持的开源监控解决方案。
OpenTracing	分布式追踪开源标准。
Fluentd	创建统一日志层的开源数据收集器。
Linkerd	提供可靠性支持、自动化负载均衡、服务发现和运行时可恢复性的开源“服务网格”项目。
gRPC	现代化高性能开源远程调用框架。
CoreDNS	快速灵活的构建 DNS 服务器方案
containerd	将容器运行时及其管理功能从 Docker Daemon 剥离的镜像管理和容器执行技术。
rkt	简化搭环境等部署工作，提高容器安全性和易用性的容器引擎。

2018 年 9 月，CNCF 与 LF 展开合作，推动 ONAP 与 Kubernetes 在下一代网络进行融合，VNF 也将迁移至 CNF 上，这将为网络空间带来更大的弹性，并允许网络更高级别的自我管理和可扩展性。

在 2019MWC 大会上，CNCF 推出了新的云原生网络功能（CNF）测试平台，进一步推动了传统电信市场的发展<sup>[95]</sup>。这个试验台是由 CNCF 和 Linux 基金会的 LF 网络(LFN)小组合作开发的。它将代码重新打包为容器成为 CNF 并提高了运行在 Kubernetes 上的能力。

CNCF 计划为支持分布式、可扩展的应用组件和组装方式提出一种规范，期望定义出能够支持云原生应用和容器的整个基础设施堆栈。到 2021 年，将定位快速部署的云原生技术，比如全球 DevOps 和微服务，以加速云计算本地计算的应用。



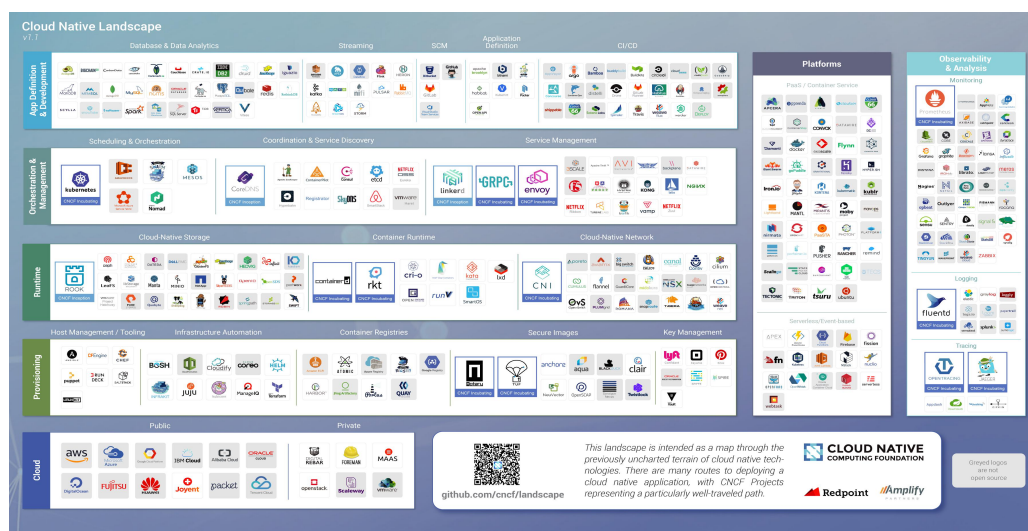


图 7-4 CNCF 项目全景图<sup>[95]</sup>

### 7.1.5 TIP

电信基础设施联盟（Telecom Infra Project consortium, TIP）是 2016 年由 Facebook 主导成立的一个开放组织，旨在重新思考如何设计和部署电信网络基础设施。TIP 有 500 多个成员，包括运营商、基础设施提供商、系统集成商以及其他大小科技公司，旨在将电信设备和软件发展为更高效、灵活、可互操作的形式。Facebook、英特尔和诺基亚等 TIP 成员承诺提供一套初始参考设计，而其他成员如运营商 Deutsche Telekom 和 SK Telecom 将帮助定义和部署符合他们需要的技术<sup>[96]</sup>。

TIP 将软件与硬件组件分离，以提高效率并创建创新解决方案，该项目主要集中在三个关键领域：接入、回传和核心网/管理，运用开放的开放计算项目（OCP）模型来刺激创新。在传统的封闭系统中，组件是非捆绑的，运营商在构建网络时相对灵活，使得运营商能够显著提升农村和城市部署的运营效率，但成本会大幅上涨。随着工作的开展，TIP 的成员将共同加快在 5G 等技术方面的发展，将提供更快捷的连接和丰富的服务。

TIP 是 OTT 向电信运营商赋能的一个努力，试图用云技术和新的商业模式对通信行业进行一次改造。TIP 的技术创新更多的是在架构和理念上的创新，他们直接应用了更新的技术平台，对通信技术进行了更大胆的解构。

2016 年 Facebook 与 Globe 合作启动了一项基于 TIP 原则的试点部署，以连接菲律宾的一个从未进行蜂窝覆盖的小村庄。此外，英国运营商 EE 也计划与 TIP 合作，在偏远的苏格兰高地推出 4G 网络。2018 年 2 月 Facebook 与诺基亚、英国电信和德国电信等多家 TIP 运营商成员合作推出两项无线网络计划 Terragraph 和 OpenCellular，以实现“让更多人上网”的目标。2019 年 2 月 TIP 首次展示

了两个新的项目组 OpenRAN 5G NR 和 WiFi，以及其技术如何在端到端移动网络架构中协同工作。

表 7-4 TIP 在未来网络相关领域的项目

网络领域	涉及项目	描述
接入	边缘计算	专注于网络边缘的服务/应用的实验室和现场实施。
	Edge Application Developer	创建开放 API 和 SDK。
	Power and Connectivity	致力于促进建立连接和电力基础设施的组织之间的协作和互操作性。
	RAN	系统集成和站点优化，通过创新、经济高效的端到端解决方案解决系统集成问题
		Open Cellular，专注于无线接入平台（包括蜂窝）和相关技术。
		Solutions Integration，开发多厂商互操作性，进而开发 open RAN 架构。
		Open RAN，是一项基于供应商中立的通用硬件和软件定义技术，旨在构建 2G、3G 和 4G RAN 解决方案。
		CrowdCell，开发 LTE 中继架构，以通过降低 CAPEX 和 OPEX 投资来扩展室内覆盖范围。
		vRAN Fronthaul，专注于开发可在 vBBU 和 RRU 之间通过非理想前端部署和操作的虚拟化 RAN 解决方案。
		5G NR，通过 TIP 协作，为 5G NR 接入点定义一个易于配置和部署的白盒平台。
		WiFi，促进部署 WiFi 的组织、基础设施供应商和服务提供商之间的协作、探索和标准化。
回传	Millimeter Wave (mmWave) Networks	定义和推进 60GHz 无线网络解决方案。



	Open Optical & Packet Transport	加速光网络和 IP 网络的创新。
核心网/管理	人工智能与应用 机器学习	专注于基于机器的决策和自动修复的应用。
	端到端网络切片 (E2E-NS)	利用 TIP 确定可以研究、开发和演示的 E2E 用例。
	People and Process	共享文化和流程转换实践。

## 7.2 开源项目

开源项目现已成为未来网络科技发展的重要成分，覆盖了未来网络发展的方方面面，主要包括网络开源项目、云计算开源项目、边缘计算开源项目等，如 ODL、ONOS、ONAP、SONiC、P4 等都是较为著名的网络开源项目，而 kubernetes、CORD 分别代表了典型的云计算开源项目与边缘计算开源项目。本节将对这几个主要项目进行介绍，包括一些概况与 18 年以来的发展情况。

### 7.2.1 ONAP

开放网络自动化平台(ONAP)于 2017 年 3 月成立,由 AT&T 的 Open-ECOMP 和中国移动主导的 Open-O 项目合并而成。ONAP 架构示意图如图 7-5 所示, ONAP 的功能特性主要有:为物理和虚拟网络的策略编排和自动化提供平台;为 VNF、SDN 网络以及构建在这两项基础设施之上的高级服务提供设计、创建、协调、监控和生命周期管理能力;快速实现自动化新服务;元数据策略驱动架构,更加灵活;组件可复用;弹性可扩展。ONAP 的成员包括业界的主要厂商、服务提供商、系统集成商和咨询公司,如 Amdocs、ARM、AT&T、中国移动、中国电信、中国联通、思科、爱立信、华为、IBM、英特尔等。

2018 年 6 月初 ONAP 发布了北京版本,该版本在模型规范制定的社区流程和方法、模型设计的工具、信息模型和标准保持、数据模型和 OASIS TOSCA 等方面达成了一致,具体架构见下图 7-5。ONAP 提供的应用场景主要有:在快速部署和拆除虚拟资源的移动环境中,对服务进行实时监控和映射提供基础;将 ONAP 用于 VoLTE,将语音整合到 IP 网络,设计、部署、监控和管理复杂的端到端 VoLTE 业务;也可以通过 ONAP 使用家庭虚拟客户终端设备(Residential vCPE)提供增值服务,降低对底层的依赖性;使用 ONAP 协调网络点播服务并在 LTE 网络和虚拟网络功能中加以应用,将 NFV 与物理组件和 OSS 进行编排,构建新的数据中心。同时 ONAP 能够与 SD-WAN 相结合,在 IP 光传输网络、移动网络、企业网和电信云中具有发展潜力,努力促进标准实施和开源。其中一

大亮点是 OOM（ONAP Operations Manager）的成熟，它使用流行的 rancher/helm/k8s 技术来部署和管理 ONAP 的生命周期，极大地简化和方便了 ONAP 的部署，同时节省了大量主机资源，从而让 OOM 成为了推荐的部署方式<sup>[97]</sup>。2018 年 12 月，ONAP 发布了卡萨布兰卡版本，引入了许多新功能，其中最重要的两个新功能为 5G 和 CCVPN（跨域和跨层 VPN），且适配了 MEF3.0 与 ETSI NFV-SOL003 等行业标准，同时使用了 Kubernetes 简化了系统的安装，增强了系统的性能。

在 2019 年 2 月的 MWC2019 上,中国移动展出了基于 ONAP（开放网络自动化平台）实现 AI 场景驱动的智能编排原型系统，用于智能企业专线业务：可在自助开通企业分支站点的同时，按需部署智能安防系统等站点增值业务并对其开放 ONAP 的业务实时调整能力。部署在分支边缘、由中国移动自主研发的异常监测模块检测出的本地异常，将触发 ONAP 业务控制策略实时调节该分支与总部站点之间的专线带宽，使总部的实时监控视频更加流畅。

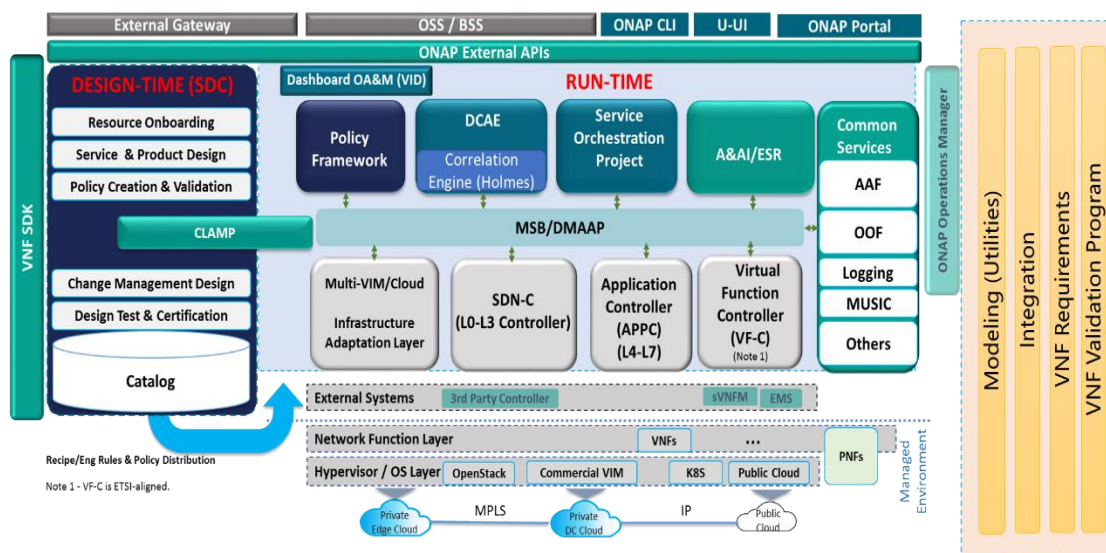


图 7-5 ONAP 架构示意图<sup>[97]</sup>

### 7.2.2 ODL/ONOS

OpenDayLight 开源项目是 2013 年由思科、IBM 等多家通信、IT 巨头合作启动的 Linux 基金会下的 SDN 控制器项目，目标是建立一个开源开放的平台，推动 SDN/NFV 技术的创新。OpenDaylight 提供了一个开放的开源 SDN 框架，其控制器平台是 OpenDaylight 的核心，包含一系列动态可拔插的网络功能组件。南向接口通过业务抽象层对控制器平台代码提供统一的接口，屏蔽底层设备协议的差别，使网络服务与底层设备协议完全解耦。北向支持开放服务网关初始化（Open Service Gateway Initiative, OSGI）框架和双向的 REST 接口，同时提供网络模型、网元、拓扑等多种 API 接口供应用层调用，具体架构见下图 7-6。

OpenDaylight 的特性主要有：在性能和扩展性上支持集群模式，支持 OpenStack HA；在易用性上整合功能并实现更加友好的 UI；使用多种方法的抽象网络模型；提供广泛的用例。

OpenDaylight 的应用已进入到物联网/无线领域，在集群方面也做出了很大的进步。在运营商领域，爱立信也在 OpenDaylight 的基础上提出了 VPN 方案。

2018 年 3 月，ODL 发布了 Oxygen 版本<sup>[98]</sup>，修复了一些之前版本的 bug 并提高了项目的稳定性，且增加了对 EVPN、L3VPN、GRE 隧道等服务的支持。2018 年 9 月，ODL 发布了第九个版本——Fluorine，显著的提高了性能，提供了大多数主要用户所需的核心组件，便于商业和内部解决方案提供商以及下游供应商使用像 ONAP 和 OpenStack 这样的项目进行开发，且增加了对 WAN、Cloud、边缘计算、服务功能链等服务的适配，增强了通用性。

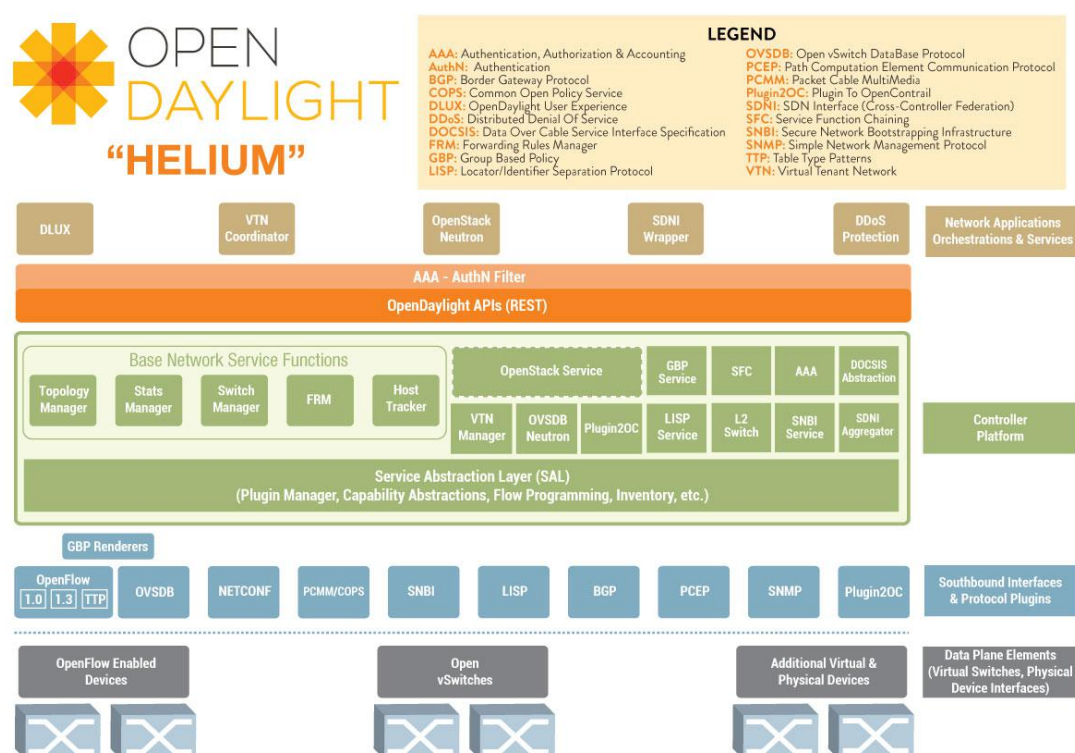


图 7-6 ODL 架构图示<sup>[98]</sup>

ONOS 是由最早创造发明 SDN 的斯坦福、伯克利等知名大学联合运营商、设备制造商发起的非营利性开源社区组织，其目标是创建一个开源的 SDN 网络操作系统，旨在满足运营商对网络性能的电信级要求，满足运营商网络迁移到 SDN 网络的需求，其对 SDN 的发展有重要的影响力。

ONOS 架构从设计之初充分考虑了运营商的网络需求，即高可靠、高扩展能力和高性能，同时也充分考虑了南、北向 API 接口的抽象，以期待在 SDN 应用领域有更广泛的适应性。ONOS 技术架构见下图 7-7，其基本特性包括：分部式内核架构通过分布式集群方式来满足网络扩展性、可靠性和高性能要求；北向接

口抽象 API 提供网络全局视图，实现对网络的控制、管理和业务配置，提供对网络的灵活可编程能力；南向接口抽象 API 实现传统网络和未来 SDN 网络的混合组网及平滑迁移的能力，提高灵活性；软件模块化使网络控制软件更加容易开发、调试、维护和升级。

ONOS 提供的应用场景主要有：SDN 多层的协同控制，通过 SDN 控制器实现 IP 层和光层的协同控制，提升网络的效率与性能；SDN 与 IP 网络的融合实现 SDN 网络与现有 IP 网络的混合组网与迁移；基于 SDN 网络架构和分段路由应用，简化网络的业务配置；基于 SDN 技术释放网络功能，提升运营商网络的价值。

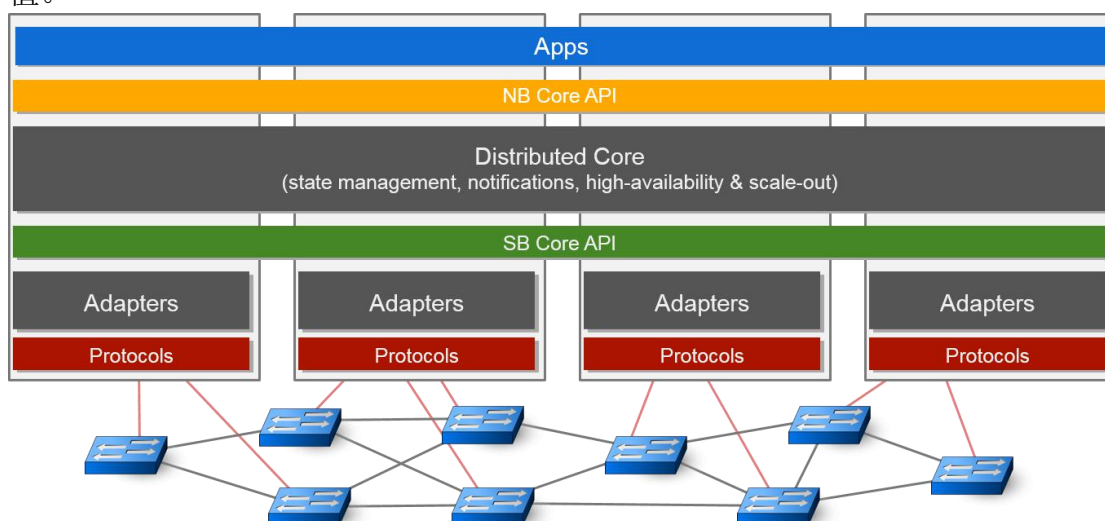


图 7-7 ONOS 技术架构<sup>[99]</sup>

### 7.2.3 SONiC/Stratum/DANOS

SONiC (Software for Open Networking in the Cloud) 是 2015 年微软建立的向 OCP 开源的一个将传统交换机操作系统软件分解成多个容器化组件的创新方案，能够让运营商在多个交换机厂商的硬件上共享相同的软件堆栈，使得增加新的组件和功能变得更加方便。SONiC 建立在交换机抽象接口 (SAI) 的基础上，定义一个标准化 API，网络硬件供应商可以通过它来开发创新的硬件平台，在保持与 ASIC 编程接口一致的前提下，能够在芯片、CPU、功率、端口密度、光、速度等方面实现快速创新，同时保持其在多个平台上实现统一的软件解决方案。SONiC 技术架构见下图 7-8，目前 Arista、博通、戴尔、Mellanox、思科、盛科等公司也正在积极参与 SONiC 项目。

SONiC 的主要功能特性有：在网络各层使用最佳的交换机硬件；在不影响最终用户使用的前提下平滑部署升级新功能；利用云端深度遥测和全自动化技术解决故障；能够使 SDN 软件使用统一的结构控制网络中所有的硬件元素，消除重复并减少故障；具有极高的可扩展性。



SONiC 的核心是针对云网络场景，优先考虑简化和规模化管理，运营人员以最小的工作量插入新组件、第三方、专有或开源软件，可根据特定场景定制 SONiC。领英 (LinkedIn) 使用开源 SONiC 实现的交换平台，解耦网络硬件和软件，使其能够在任意平台上运行选择的芯片，并灵活地使用遥测、警报、Kafka、记录、安全和软件开发工具包等基础设施软件。同时，SONiC 在架构上引入容器 Docker，轻量级虚拟系统的设计使得软硬系统之间和协议模块之间完全解耦，可以实现各种各样的组合，这推动了 OCP 社区以及其他厂商在开放网络方面的创新。

SONiC 和 SAI 在 2018 年获得了业界广泛的支持，大多数主要网络芯片供应商都在其 ASIC 上支持 SAI：Barefoot Networks、Tofino、Trident and TomahawkCavium、XPlaint 等。博通、Marvell、Barefoot、微软正在推动 SAI 的监控和遥测功能发展，以深入了解 ASIC 和强大的分析功能。Mellanox、Cavium、戴尔、盛科为 SAI 提供协议通知，以支持更丰富的协议支持和大规模网络场景，例如 MPLS、增强 ACL 模式、桥接模式、L2/L3 组播、分段路由和 802.1BR。戴尔和 Metaswitch 通过添加 L3 快速重路由和 BFD，为 SAI 带来了故障弹性和性能。由 Mellanox 和博通推动的管道模型以及戴尔的多 NPU 丰富了 SAI 和建立在顶层的网络协议栈应用的基础设施。

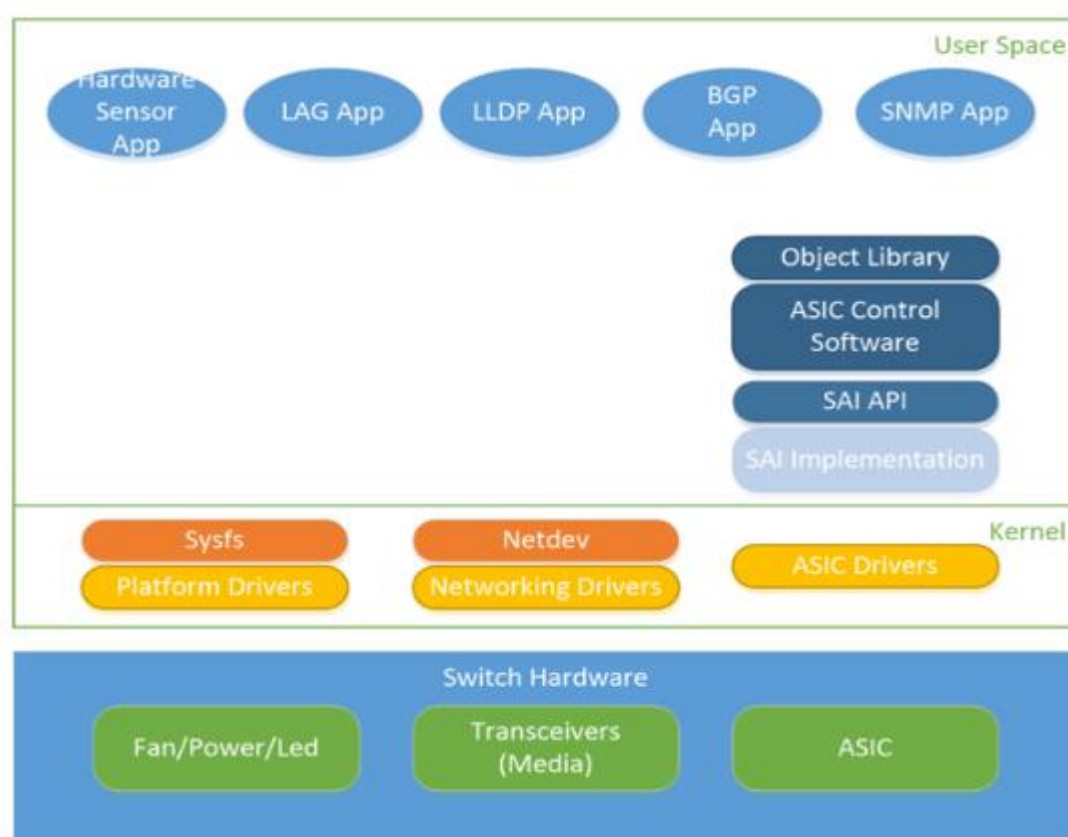


图 7-8 SONIC 技术架构<sup>[82]</sup>

Stratum 项目是 2018 年 3 月开放网络基金会（ONF）在谷歌的支持下推出的开源项目，该项目被定位为“下一代软件定义网络（SDN）”，Stratum 项目将用于实现真正的软件定义的数据平面参考平台，其目标是提供一个白盒交换机和开放软件系统。Stratum 公开了一组下一代 SDN 接口，包括 P4Runtime 和 OpenConfig，实现了转发设备的可互换性和转发行为的可编程性。P4Runtime 提供的控制平面软件方法是 Stratum 平台的核心，用来控制交换机、路由器、防火墙、负载均衡器等的转发平面。Stratum 实现了最新的下一代 SDN 接口，并未嵌入控制协议，而是旨在支持外部网络操作系统或嵌入式交换机管理和控制（例如 BGP）。通过这种方式，Stratum 将支持各种用例和各种市场应用，例如云 SDN 数据平面、云 SDN Fabric 平台、CORD 和带嵌入式控制的“thick”交换机等。

整个 2018 年，Stratum 项目都处于孵化阶段，项目成员可以完全访问代码，Stratum 将于 2019 年进入完全开放阶段，并计划在 Apache 2.0 许可下运行。

DANOS 的前身是分布式网络操作系统（dNOS）项目。2017 年 11 月 AT&T 发布了致力于开发白盒交换机操作系统 dNOS 项目，2018 年 3 月 AT&T 宣布将 dNOS 正式托管给 Linux 基金会，并且将项目名称改为 DANOS（Dis-Aggregated Network Operating System 分解网络操作系统）。DANOS 将提供一个开放的 NOS 框架，利用现有的开源资源和硬件平台，如白盒交换机、白盒路由器和 uCPE 等。目前，DANOS 得到了各种 Linux 基金会团体和成员的支持，包括 Broadcom、Inocybe、Metaswitch 和 Silicom。DANOS 还要求标准的应用程序编程接口，它提供了具有基本操作系统、数据平面以及控制和管理平面的框架。DANOS 包括了五个操作系统：FRR、SONiC SAI、Open Switch、Stratum 和 P4。2019 年 4 月，AT&T 在多伦多和伦敦部署了白盒网络，并表示白盒部署使用的软件堆栈将成为 DANOS 项目的一部分，AT&T 计划很快将其代码贡献引入社区。

#### 7.2.4 P4

P4（Programming Protocol-Independent Packet Processors）是 2015 年由斯坦福大学的 Nick McKeown 教授和普林斯顿大学的 Jennifer Rexford 教授、Google、Intel、微软和 Barefoot Networks 共同发起创立的作为数据平面领域专用语言（DSL）描述交换机内部对数据报文处理逻辑的开源项目，是对底层设备数据处理行为进行编程的高级语言。使用者可以直接使用 P4 语言编写网络应用，经编译对底层设备进行配置使其完成用户的功能需求。P4 开源社区现已超过 60 个成员，正在开发各种新的网络行为和新的运用，其编程语言交换机内部数据报文处理过程的灵活定义让网络设计者可以自上而下地定义数据报的完整处理流程。

P4 的三个目标是：可重构性，即可修改已配置过的交换机数据处理方式，允许用户随时改变包解析和处理的程序，并在编译后配置交换机，真正实现可重

配能力；协议独立性，即网络设备不与任何特定的网络协议绑定，用户可以使用 P4 语言描述任何网络数据平面协议和数据包处理行为；目标独立性，即设备描述数据处理行为时不受底层硬件的特性所约束，就可实现对数据包处理方式的编程描述。

P4 应用场景及发展重点是网络核心的控制、数据平面：P4 可以使用在服务器主导网络互联方向，降低服务器负荷并实现新功能；依据系统/设备灵活度/复杂度要求，P4 在数据平面可以运行于完全可编程的通用 CPU（如路由器、Web 代理服务器、防火墙等）；对于底层软件，使用 P4 为网络媒体数据流提供组播功能，实现信息中心模式网络互联；使用 P4 降低宿主负荷并在 SmartNIC 上实现 5G 网络协议；使用 P4 帮助 OpenFlow 控制器向 NIC 和交换机推送安全策略；对于虚拟应用，使用 P4 降低 NFV 系统宿主 VNF 功能负荷和/或增强 VNF 功能。2018 年 3 月 5 日<sup>[100]</sup>，赛灵思公司 Barefoot Networks 公司（首创高速 P4），联袂演示了可帮助网络运营商以纳秒级精细粒度对每个数据包实现可视性的端到端网络性能监控解决方案。2018 年 12 月，Barefoot 推出了 Tofino 2，世界首个 P4-可全编程网络交换机 ASIC 的新一代产品，全面提高了网络交换机的性能，推动了工业网络架构的发展，如图 7-9 所示给出了 P4 芯片的演进史。综上，P4 从 CPU 到高端的 ASIC 都有广泛的应用前景。

### General Industry Trend: Rise of the Domain Specific Architectures (DSAs)

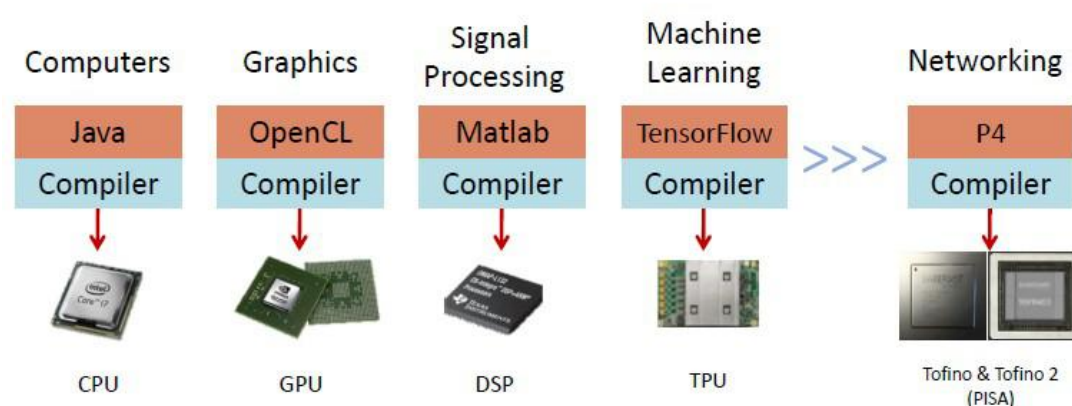


图 7-9 P4 可编程芯片 Tofino&Tofino2 的兴起<sup>[100]</sup>

## 7.2.5 CORD

CORD (Central Office Re-Architected as a Data Center, 端局重构为数据中心) 是 2015 年 ONF 组织推动的开源边缘计算的项目，旨在使用白盒硬件、开源软件定义网络 (SDN) 和网络功能虚拟化 (NFV) 软件，将数据中心的经济性和云端敏捷性引入到电信端局，白盒提供虚拟化的控制功能与用户进行连接。CORD 的

成员包括 AT&T、中国联通、Comcast、谷歌、SK 电信、Verizon、Sprint、DT、思科、富士通、Intel、NEC 和三星等。

CORD 的主要功能特性有：利用 SDN 实现网络设备控制面和数据面分离，使网络能力开放、可编程；使用 NFV，实现网络功能虚拟化，降低 CAPEX 及 OPEX；利用云技术提升业务/网络伸缩性，使业务部署更敏捷；给 central office 提供数据中心的经济性和云计算的敏捷性，更加简化、易部署。CORD 的业务交互流程也十分新颖，具体交互流程见下图 7-10。

CORD 最新版本支持所有用户类型，包括住宅、移动设备和企业通用共享云基础设施。ONOS 结合 CORD 已有面对移动网络的 M-CORD、面对企业网络的 E-CORD、和面对固定网络的 R-CORD 的应用，除此以外，CORD 应用作为具有住宅支持（R-CORD）的基础分布和可用于支持移动或企业用户的单独虚拟网络功能（VNF）；CORD 构建了多种功能和工具，实现用于 DevOps 开发和部署技术的 CI/CD 构建过程，简化定制过程提高了灵活性，硬件和厂商都可按需进行选择 and 替换，运营商可以实现定制化的功能满足特定需求。

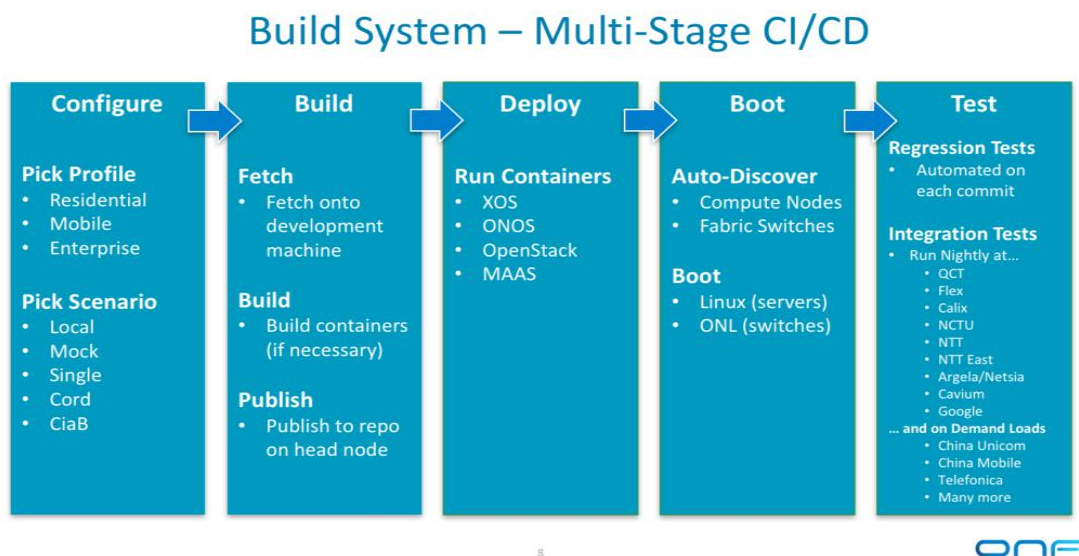


图 7-10 CORD 业务流程<sup>[94]</sup>

2018 年 3 月，谷歌与 ONF 合作推出了 stratum 项目，其目标是提供一个白盒交换机和开放软件系统。而在其后不久，CORD 就实现了对 stratum 的支持，在结合了 stratum 的情况下，CORD 开始支持可编程网络结构中 VNF 实例化的道路，大大提高了边缘云的可扩展性和成本效率。

2018 年 4 月，中国联通在北京搭建完成国内首个基于 CORD 最新版本的电信边缘云开发平台<sup>[101]</sup>，组建了包括云计算初创公司、投资公司、芯片公司等在内的国内首个网络开源产业联盟。并结合 3GPP 5G 标准化需求，就移动网络差



异化保障的需求，牵头推动社区首个基于开源容器化技术的差异化服务解决方案，从而快速满足垂直行业需求。

### 7.2.6 Kubernetes

Kubernetes (K8S) <sup>[92]</sup>是 2015 年 Google 开放的一个以容器为中心的基础架构，是一个在物理集群或虚拟机集群上调度和运行容器并提供容器自动部署、扩展和管理的开源平台。K8S 构建于 Docker 之上，提供应用部署、维护、扩展机制等功能。开发者利用 K8S 能方便地管理跨机器运行容器化的应用，实现了更加高效、灵动的容器管理。本质上，K8S 可以看作是基于容器技术的 mini-PaaS 平台。

K8S 的主要功能有：使用 Docker 对应用程序包装、实例化；以集群的方式运行、管理跨机器的容器；解决 Docker 跨机器容器之间的通讯问题；自我修复机制使得容器集群达到可预期状态。

通过使用 K8S 可以实现：自动化容器的部署和复制；随时扩展或收缩容器规模；将容器组织化，提供容器间负载均衡；方便升级应用程序容器；提供容器弹性等。K8S 的高可用方案在新一代数字化企业云平台里可作为一个底层的容器调度平台支撑上层微服务的部署运行。在集群管理的部署方案中，K8S 服务的稳定运行也起着至关重要的作用。

2018 年末，Kuberntes 核心团队被 Vmware 收购，全力推进计算软件的成熟速度，以配合白盒网络设备的迭代，我们有理由相信，一个新的浪潮即将到来。

2019 年 2 月，容器管理软件提供商 Rancher Labs 宣布推出轻量级 Kubernetes 发行版 K3s，这款产品专为在资源有限的环境中运行 Kubernetes 的研发和运维人员设计<sup>[102]</sup>。Rancher 此次发布的 K3s 项目，将满足在边缘计算环境中运行在 x86、ARM64 和 ARMv7 处理器上的小型、易于管理的 Kubernetes 集群日益增长的需求。现有的 Kubernetes 发行版通常是内存密集型的，在边缘计算环境中显得过于复杂。业界急需一个轻量级的、资源占用率较低的 kubernetes 发行版以满足边缘计算环境的需求。K3s 可以为这些团队提供一个小于 512MB RAM 的 Kubernetes 发行版，非常适用于边缘计算的用例。零售、金融、电信、公共事业和制造业的企业也将对 K3s 有非常大的需求。

为了减少运行 Kubernetes 所需内存，Rancher K3s 开发团队主要专注于以下四个方面的主要变化：

(1) 删除旧的、非必须的代码：K3s 不包括任何默认禁用的 Alpha 功能或者过时的功能，原有的 API 组件目前仍运行于标准部署当中。除此之外，Rancher 还删除了所有非默认许可控制器，in-tree 云提供商和存储驱动程序，但允许用户添加任何他们需要的驱动程序。

(2)整合正在运行的打包进程:为了节省 RAM,Rancher 将通常在 Kubernetes 管理服务器上运行的多流程合并为单个流程。Rancher 还将在工作节点上运行的 kubelet、kubeproxy 和 flannel 代理进程组合成一个进程。

(3)使用 containerd 代替 Docker 作为运行时的容器引擎:通过将 containerd 替换成 Docker,Rancher 能够显著减少运行时占用空间,删除 libnetwork、swarm、Docker 存储驱动程序和其他插件等功能。

(4)除了 etcd 之外,引入 SQLite 作为可选的数据存储:Rancher 在 k3s 中添加了 SQLite 作为可选的数据存储,从而为 etcd 提供了一个轻量级的替代方案。该方案不仅占用了较少的内存,而且大幅简化了操作。

随着 Kubernetes 的部署开始有边缘部署的发展趋势,企业需要运维管理的 Kubernetes 集群数量正在迅速增加。在许多最有趣的边缘计算用例当中,组织将运行成千上万的只有一个、两个或者三个节点的 Kubernetes 集群,运维人员需要负责管理如此大规模的基础架构,而 K3s 正是为此而生,旨在最大限度地简化用户的安装和操作体验。K3s 主要功能包括:

(1)生产级 Kubernetes:K3s 是一个符合标准的、CNCF 官方认证的 Kubernetes 发行版。

(2)一个没有主机依赖的二进制文件:在任何设备上安装 Kubernetes 所需的一切都包含在这一个 40MB 的二进制文件当中,不需要像 KuberSpray、KubeADM 或者 RKE 这样的外部安装程序。只需要一个命令,用户就可以配置或者升级单节点 K3s 集群。

(3)简单地向集群添加节点:若想向集群添加其他节点,管理员只需在新节点上运行一条命令,指向原始服务器,通过安全 token 传递即可。

(4)自动生成证书:集群启动时,在 Kubernetes 主服务器和节点之间建立 TLS 所需的所有证书都会被自动创建,还会自动创建服务账号的加密密钥。

### 7.2.7 Akraino

Akraino Edge Stack 是 Linux 基金会于 2018 年 2 月推出的边缘计算开源项目,支持针对边缘计算系统和应用程序优化的高可用性云服务,旨在改善企业边缘、OTT 边缘和运营商边缘网络的边缘云基础架构状态,为用户提供全新级别的灵活性,以便快速扩展边缘云服务,最大限度地提高每台服务器上支持的应用程序或用户数量,并帮助确保必须始终处于运行状态系统的可靠性。据了解,现有的开源项目(如 OpenStack)不能够满足边缘解决方案的需求,Akraino 将有助于为运营商,提供商和物联网提供易用性高、可靠性强和性能高的服务。

Akraino Edge Stack 代码基于 AT&T 的 Network Cloud 开发,在虚拟机(VM)和容器中开发运行的运营商级计算应用程序,Linux Foundation 使用该代码构成

Akraino 项目，并向 Linux 社区开放和提供。提供的方案将实现为边缘和远程边缘的电信相关用例创建集成堆栈，并达到 5 毫秒到 20 毫秒的延迟，企业和工业物联网堆栈则实现低于 5 毫秒的延迟。

Akraino Edge Stack 将支持广泛的 Telco、Enterprise 和 Industrial Edge 用例，其中包含针对已定义的用例和经过验证的硬件和软件配置。社区已创建了基于用例的 BP，此外，社区旨在解决 API 定义，将 API 标准化实现边缘用例。Akraino 项目涉及到了众多的项目和软件，包括 Airship、Calico、Camunda、CI/CD、Ceph、CNI、Gerrit、Jenkins、JIRA、Kubernetes、Nexus 3、ONAP、OpenStack、OVS-DPDK、SR-IOV、Tempest 等。总的来说，Akraino Edge Stack 社区专注于 Edge API、中间件、软件开发工具包（SDK），并允许与第三方云的跨平台实现互操作性。Edge 堆栈还将支持 Edge 应用程序的开发和创建应用程序/虚拟网络功能（VNF）生态系统。Akraino 项目成员有 ARM、AT&T、戴尔 EMC、爱立信、华为、英特尔公司、inwinSTACK、瞻博网络、诺基亚、高通、Radisys、红帽和风河等。

2018 年 3 月 Linux 基金会宣布扩大行业支持，英特尔公司将其 TitaniumCloud 云技术组合和网络边缘虚拟化软件开发套件贡献给 Akraino Edge Stack，以支持针对边缘计算系统和应用程序优化的高可用性云服务。2018 年 8 月，随着项目的推进和生态系统的发展，Linux 基金会宣布 Akraino Edge Stack 从形成转变为“Execute（执行）”。

#### 7.2.8 StarlingX

StarlingX 是 OpenStack 基金会于 2018 年 10 月启动的一个独立的开源项目，StarlingX 是一个完整的云基础架构软件堆栈，适用于工业物联网、电信、视频传输和其他超低延迟用例中要求最苛刻的应用程序。基于为关键任务应用程序部署的成熟软件，新开源的 StarlingX 代码是可扩展解决方案中边缘实现的基础，现在可以投入生产。

StarlingX 项目是一个独立的开源项目，专注于边缘计算，它不是 OpenStack 子项目。同时，StarlingX 使用了许多 OpenStack 服务来提供核心的计算、存储和网络功能。它基于英特尔和风河贡献的种子代码，并将自己的组件与 OpenStack、Ceph 和 OVS 等领先的开源项目结合在一起，组成一套完美的软件方案。

虽然 StarlingX 也是在 Akraino 的框架下，但它大多基于 OpenStack 架构而来，并且向上层提供了一系列虚拟网络化功能（Virtual Network Functions），方便上层的编排器来调用 IaaS 层的资源，而底层则是使用目前云计算平台的 Best Practice，即控制服务、计算服务（kvm）、网络服务（ovs）、存储服务（ceph）来完成。另外，StarlingX 除了拥有 OpenStack 组件外，还增加了很多中间件如

Software Management Service、Fault Management Service、Host Management Service 等，提供了更多的底层 API，比 OpenStack 支持的功能点更多。

StarlingX 本质上仍然是一个高端版的 OpenStack，StarlingX 的边缘部署还是基于熟悉的 OpenStack 多 region 的方式，但是它比多 region 功能更多，如可以部署和管理边缘的 region，配置可以在全部的 region 生效，报错汇总到中心云，社区的 patch 可以在中心云和边缘云一键修复（联网同步社区 patch，并通过界面一键修复平台 bug），中心云和边缘云通过 L3 网络相互通信，边缘云也各自有一个 portal，只不过这个 portal 功能较少，只能实现部分管理功能。

与 StarlingX 不同的是，MEC 的想法是把计算和存储资源部署在边缘，来满足某些应用严苛的延迟要求，并与蜂窝基站、5G 等新兴技术结合，通过把终端计算量 offloading 到边缘，来实现真正的边缘计算。而 StarlingX 目前只是基于 OpenStack 技术把基础设施管理延伸到了边缘，它不像 Akriano 那样提供了一整套的管理物理资源的云技术、容器技术、管理编排技术，也不像 MEC 那样面向终端计算量 offloading 到边缘的场景而提供的解决方案。

### 7.2.9 DPDK

数据平面开发套件（DPDK）项目由 Intel、6Wind 等公司于 2010 年创建，在 17 年 4 月加入 Linux 基金会。DPDK 主要基于 Linux 系统运行，是 NFV 领域的一个关键性技术，它不同于 Linux 系统以通用性设计为目的，而是专注于网络应用中数据包的高性能处理，可以极大提高数据处理性能和吞吐量，提高数据平面应用程序的工作效率。

DPDK 的宗旨是创建开源、生产级、厂商中立的软件平台，实现快速数据平台的 I/O，用户可以在 DPDK 上构建和运行数据平面应用程序，至今已完成了 5 个主要版本的更替，包括来自 25 个不同组织的 160 多个人的贡献。该项目的成员涵盖了电信服务提供商、网络和云计算基础设施提供商以及多个硬件厂商，其金牌会员有 ARM、AT&T、F5、Intel、Mellanox、Marvell、爱立信、恩智浦、红帽和中兴通讯，银牌成员包括 6WIND、Broadcom、华为和思博伦。

DPDK 作为优秀的用户空间高性能数据包加速套件，支持来自多个供应商的主流 CPU 架构，用于对各种 CPU 架构上运行的数据包处理工作负载进行加速。同时也被用在多个网络数据处理方案中用来提高性能，如 MoonGen，mTCP，Ostinato，Lagopus，Fast Data（FD.io），Open vSwitch，OPNFV 和 OpenStack 等项目。网络在人们通信方式的基础中越来越重要，性能、吞吐量和延迟对于无线核心和接入、有线基础设施、路由器、负载均衡器、防火墙、视频流、VoIP 等应用中角色越来越重要，通过快速地数据包处理，DPDK 使得电信行业能够将性能敏感的应用程序迁移到云端。

2019 年 DPDK 发布了 19.02 版本，增加了对按原始分配释放大页的支持，可在 DPDK 中寄存外部内存的 API，增加了一个新的性能测试工具来测试 compressdev PMD，测试压缩率和压缩吞吐量，添加了 IPsec 库等功能。随着早期目标的达成和更多通用处理器体系的加入，DPDK 逐渐成为通用多核处理器高性能数据包处理的业界标杆。

#### 7.2.10 FD.io

FD.io (Fast data - Input/Output) 是 Linux 基金会下的开源项目，诞生于 16 年 2 月，是许多项目和库的一个集合，旨在提供一个模块化、可扩展的用户态报文处理框架，能支持高吞吐量、低延迟、高资源利用率的 IO 服务，其可适用于多种硬件架构 (x86, ARM 和 PowerPC) 和部署环境 (裸机、虚拟机和容器)。

FD.io 开源项目的关键组件是 VPP (Vector Packet Processing) 库，一套基于 DPDK 的网络帧处理完整解决方案，它提供了一种高速数据包处理引擎。VPP 的高度模块化让用户可以根据需求实现定制化的服务节点插件，另外 VPP 还具有服务的易插件化，丰富的基础功能，良好的扩展性等技术特色。

自推出以来，FD.io 已经汇集了来自多个不同组织的两百多位贡献者，包括网络运营商、服务提供商、芯片供应商、集成商和研究人员，共同推动基于软件的包处理创新。除了 VPP，FD.io 充分利用 DPDK 特性以支持额外的项目，包括 NSH\_SFC、Honeycomb 和 ONE 来加速网络功能虚拟化的数据面。此外，FD.io 还与其他关键的开源项目进行集成，以支持网络功能虚拟化和软件定义网络。目前已经集成的开源项目包括：K8s、OpenStack、ONAP 和 OpenDaylight。

2019 年 2 月一个新的 FD.io 项目混合信息中心网络 (HICN) 诞生，这是一种基于互联网协议的独特网络架构，重新思考信息本身的通信，而不是信息的位置，其开发的目的是支持一些关键的工业应用，如 5G，物联网 (IoT)，移动边缘计算和云原生应用。

## 八、总结与展望

### 8.1 总结

在今天这个时代，互联网已经成为人们生活、学习、工作必不可少的一部分。如果说第一次互联网革命是在产业内部发生，第二次互联网革命则是在消费行业发生，而第三次互联网革命就是在互联网与实体经济融合的背景下诞生的，这就是未来网络。未来网络革命是一场渐进式的技术革命，它必将关系着国计民生，掀起一场信息化的网络战争。目前，国外相关领域的专家、团队对未来网络技术的研究和应用的部署关注度非常高，国内学术界和业界也在逐步达成一致的共识，全面启动我国未来网络的科学研究和部署实施。基于这样的背景下，我们继续组织开展了《未来网络发展白皮书（2019）》的撰写工作，对未来网络领域最新的发展情况进行系统性的梳理和总结、对未来网络领域的认知进行进一步的提升，以期对我国该领域的全面发展起到一定的参考价值，助力网络强国和工业强国的发展。

本白皮书首先介绍了未来网络的发展背景，明确了现网面临的巨大挑战、给出了未来网络的概念内涵、梳理了全球未来网络的发展态势；其次介绍了未来网络前沿热点技术并分析了它们的技术重点，包括一系列新型网络体系架构、软件定义网络、网络功能虚拟化、边缘计算、网络人工智能、低时延-确定性网络、IPv6 网络、区块链网络、网络安全、5G 十大方向；紧接着详细的归纳了未来网络五大应用场景，包括传统的公共互联网、目前我国高度重视的工业互联网、天地一体化网络、海洋立体通信网络以及军民融合网络，总结这些场景正在和即将开展的具体工作；同时就全球未来网络试验设施的建设情况进行普及性的介绍；进一步梳理了未来网络五大产业方向，包括网络重构、SD-WAN、白盒设备、操作系统、边缘计算，就这些产业生态公司的进展情况进行全面的介绍；并且分别就未来网络标准化进展和开源项目情况进行了梳理；最后对本白皮书进行总结，展望未来网络今后重点工作，并将 2018 年 5 月至今的未来网络年度大事记进行综合盘点。

面向“4K/8K、AR/VR”、“工业互联网”等新兴互联网应用发展的大潮，网络面临着一系列新的要求与挑战，未来网络与实体经济结合，将渗透到社会的方方面面，有十分巨大的市场前景。我国目前对于未来网络的核心发展思路是基于 SDN/NFV 构建以 DC 为中心的新型网络，以云（数据中心）为中心，结合 SDN 技术，构建云管融合的新型网络架构，解决云网络、云接入、云连接三大场景。由此，催生了未来网络领域百花齐放的盛况，SD-WAN、多云协同、边缘计算、确定性网络、网络人工智能、开放开源等创新技术趋势正在深入影响和变革我们

网络产业形态，基于全新架构构建的未来网络创新试验环境为这些网络相关技术的发展与创新提供着高效的平台。未来网络技术将不断演进发展驱动应用服务创新，将会极大地服务社会的发展。

## 8.2 展望

未来网络将继续朝着软件化、智能化、开放化和服务差异化的方向发展，通过网络的软件化实现网络资源的灵活调度和按需调控、实现网络功能的部署和动态调整；通过网络的智能化构建资源可调度、能力可开放、容量可弹性伸缩、架构可灵活调整的未来网络，掀起一场颠覆性的全球网络革命；通过网络的开放化（软件开源化和硬件白盒化）提升网络建设者对网络的掌控能力，营造未来网络开放生态环境，实现商业模式创新；通过网络服务的差异化，为不同目标用户群提供个性化服务，促进未来网络业务的创新和新兴业务的发展。未来网络的发展对于我国网络强国、制造强国的发展和建设将起到关键的基础支撑，未来它将主要从网络体系结构、未来网络核心关键技术、网络操作系统、未来网络重点应用等方面开展相关工作。

（1）在网络体系结构方面，设计面向 2030 的网络架构，探索新媒体、新服务、新架构、新 IP 四大领域，支持 AR/VR、全息、工业互联网、触觉互联网、车联网等新应用的交付，从根本上提供一个高质量的网络服务环境；

（2）在未来网络核心关键技术方面，重点突破数据平面可编程、低时延与确定性网络、边缘计算、区块链网络、网络计算存储一体化、网络人工智能、雾计算等一系列关键核心技术，支持实现“中国网络 2030”，抢占未来网络技术发展高地；

（3）在网络操作系统方面，要抓住时代赋予的机遇，加快在网络控制方面与业务编排方面的研发，重点研究白盒网络操作系统，改变我国缺“芯”少“魂”的现状，显著提升我国在网络操作系统领域的国际话语权和规则制定权；

（4）在重点应用领域方面，加强面向公共互联网、工业互联网、军民融合、海陆空天一体化、5G 等重大场景的示范应用成果输出，开展核心技术在这些重大场景的一系列示范应用，培育经济转型发展新动能，引领我国乃至国际的创新发展。

通过加强技术和示范应用的发展和推广，进一步形成自主可控的未来网络产业生态链，致力于打造“芯片-设备-网络体系架构-核心关键技术-大规模未来网络试验设施-重大应用示范”的产业生态，整合我国电信运营商、设备厂商、互联网公司、研究机构及高校的资源优势，在全国范围内形成多个知名的科研创新和产业创新高地，打造未来网络教育平台，培养更多优秀的技术型人才，大幅提

高我国在未来网络领域的创新能力，支撑我国在未来网络领域跻身创新型国家前列，引领技术和产业发展。

SDN 技术从诞生到现在成熟的商业应用也就用了十几年，未来网络在接下来的十年中也必将发生翻天覆地的变化，未来网络的创新将会极大地促进社会的发展，并服务于我国网络强国的战略。





## 九、附录

### 9.1 年度大事记

表 9-1 未来网络年度大事记（2018.5-2019.4）

2018 年 5 月	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) ONF 成立 ODTN 项目，向光网络引入解耦和开源；</li> <li>(2) 5 月 11 日-12 日 2018 全球未来网络发展峰会在南京举行；</li> <li>(3) ETSI OSM 发布第四版本。</li> </ul>
2018 年 6 月	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) MEF 推出 MEF 3.0 架构内的多厂商 SD-WAN 实施项目；</li> <li>(2) 思科推出云原生宽带路由器；</li> <li>(3) AT&amp;T 以 840 亿美元收购时代华纳；</li> <li>(4) 中国电信和华为联合举办 ONAP 卡萨布兰卡版本开发者大会；</li> <li>(5) 6 月 27 日-29 日，世界移动大会（MWC）在上海举行，5G 成为最大的主角。</li> </ul>
2018 年 7 月	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) IEEE 为计算、存储、控制和网络技术制定了雾计算标准；</li> <li>(2) 欧洲加速 5G 研究，5GPPP 启动第三阶段 EVE、VINNI、ENESIS 基础设施项目；</li> <li>(3) 报道称亚马逊云考虑低价出售网络交换机。</li> </ul>
2018 年 8 月	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) ONAP Casablanca 关键技术研讨会 8 月 9 日-10 日在西安举行；</li> <li>(2) 思科以 23.5 亿美元收购互联网安全创业公司 Duo Security；</li> <li>(3) 8 月 20 日-25 日，ACM SIGCOMM 会议在匈牙利布达佩斯召开；</li> <li>(4) VMware 收购 CloudHealth 以扩大其新兴的云服务。</li> </ul>
2018 年 9 月	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 裸机云计算初创公司 Packet 获得 2500 万美元的 B 轮融资，构建边缘网络；</li> <li>(2) 中国移动、沃达丰和华为联合演示 ONAP 跨运营商 VPN 编排功能；</li> <li>(3) Linux 基金会宣布将与电信和云行业领导者进一步合作，推动虚拟网络功能（VNF）迁移到云原生网络功能（CNF）。</li> </ul>
2018 年 10 月	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) ITU 举办第一届网络 2030 研讨会，探讨 2030 年及之后的未来数字社会和网络发展；</li> <li>(2) Open Source Networking Days（OSN Days）中国行在北京、上海、南京成功召开；</li> <li>(3) MEF 发布 SD-WAN 标准，启动 3.0 SD-WAN 服务认证的认证计划；</li> <li>(4) IBM 以 340 亿美元收购 Red Hat，瞄准在企业中管理多云；</li> </ul>

	(5) OpenStack 基金会已经启动了另一个独立的开源项目 -StarlingX 项目，该项目将专注于边缘计算。
2018 年 11 月	<p>(1) 11 月 3 日，中国首届 SD-WAN 峰会在北京成功召开；</p> <p>(2) 在拉斯维加斯举行的发布会上，亚马逊公司的云计算部门宣布推出 Outposts；</p> <p>(3) Tungsten Fabric 推出性能实验室以推动 Edge-cloud 生态系统的发展；</p> <p>(4) 思科推出 400G 数据中心交换机，扩展基于意图的网络；</p> <p>(5) 2018 年 11 月 14 日-16 日，“GNTC 全球网络技术大会”在南京火热举行；</p> <p>(6) 2018 年 11 月 15 日，P4 2018 中国峰会在北京举行。</p>
2018 年 12 月	<p>(1) 思科宣布将以 6.6 亿美元的现金和股权奖励收购加州半导体公司 Luxtera；</p> <p>(2) AT&amp;T 在美国 12 城上线 5G 网络；</p> <p>(3) Barefoot Networks 推出可编程网络交换芯片 Tofino™2；</p> <p>(4) ONAP 发布 Casablanca，以增强跨开放源代码网络堆栈部署能力；</p> <p>(5) AT&amp;T 将大规模生产测试白盒路由器。</p>
2019 年 1 月	<p>(1) 华为发布了基于人工智能（AI）的数据中心交换机 CloudEngine 16800；</p> <p>(2) 2019 年 1 月 24 日，首届 SRv6 产业论坛在中国深圳举办。</p>
2019 年 2 月	<p>(1) 华为在泰国 Chonburi 推出了 5G 试验台，这是中国设备供应商在东南亚的第一家；</p> <p>(2) Sprint 起诉 AT&amp;T，指控 AT&amp;T 在“5G E”营销策略中用“假 5G”技术欺骗客户；</p> <p>(3) 工业互联网联盟（IIC）和 OpenFog 联盟合并。</p>
2019 年 3 月	(1) Nvidia 以 69 亿美元收购芯片制造商 Mellanox Technologies。
2019 年 4 月	<p>(1) ONF 和 P4 社区完成合并，致力于加速以运营商为主导的开源的创新；</p> <p>(2) 4 月 17 日-18 日，2019 中国 SDN/NFV/AI 大会在北京举行。</p>

## 9.2 缩略语

表 9-2 英文缩略词对照表

英文缩写	英文全拼	中文释义
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
ADN	Address Driven Network	地址驱动网络
ADN	Application Driven Network	应用驱动网络

AIC	AT&T Integrated Cloud	AT&T 集成云
AIS	Automatic Identification System	自动识别系统
APN	Access Point Name	接入点名称
AR	Augmented Reality	增强现实
ARPA	Advanced Research Projects Agency	美国国防部高级研究计划署
BaaS	Blockchain as a Service	区块链即服务
BAS	Building Automation System	智慧建筑的自动化系统
CASB	Cloud Access Security Broker	云业务安全接入代理
CAPEX	Capital Expenditure	资本支出
CC	Central Cloud	远程集中式云
CCSA	China Communications Standards Association	中国通信标准化协会
CDN	Content Delivery Network	内容分发网络
Choicenet	Network Innovation through Choice	机会网络
CNCF	Cloud Native Computing Foundation	云原生计算基金会
CORD	Central Office Re-Architected as a Data Center	端局重构为数据中心
CPE	Customer Premise Equipment	客户端设备
CS	Content Store	内容缓存库
D2D	Device-to-Device	设备到设备通信
DAN	Dual-Architecture Network	双体系结构内容共享网络
DDoS	Distributed Denial-of-Service	分布式拒绝服务
DDTN	Distributed Data Transmission Network	分布式数据传输网络
DetNET	The Deterministic Networking	确定性网络
DNOS	Distributed Network Operating System	分布式网络操作系统
DPDK	Data Plane Development Kit	数据平面开发套件
ECC	Edge Computing Consortium	边缘计算产业联盟

ECOMP	Enhanced Control, Orchestration, Management & Policy	增强控制，协调，管理和策略
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	欧洲电信标准化协会
FCC	Federal Communications Commission	美国联邦通信委员会
FD.io	Fast data - Input/Output	快速数据项目
FIA	Future Internet Architecture	未来网络体系结构
FIB	Forwarding Information Base	转发信息表
FIRE	Flex Ethernet	灵活以太网技术
ForCES	Forwarding and Control Element Separation	转发分离工作组
FSG	Free Standards Group	自由标准组织
GENI	Global Environment for Network Innovations	全球网络创新环境
GPO	GENI Project Office	GENI 项目办公室
HDFS	Hadoop Distributed File System	Hadoop 分布式文件系统
HTTP	Hypertext Transfer Protocol	超文本传输协议
IBN	Intent-Based Networking	基于意图的网络
ICN	Information-Centric Networking	信息中心网络
ICNRG	Information-Centric Networking Research Group	信息中心网络研究组
IDC	Internet Data Center	互联网数据中心
IDN	Intent-Driven Network	意图驱动的智简网络
IETF	Internet Engineering Task Force	国际互联网工程任务组
IIC	Industrial Internet Alliance	工业互联网联盟
IKE	Internet Key Exchange	因特网密钥交换协议
INT	In-band Network Telemetry	带内网络遥测
IPSec	Internet Protocol Security	互联网协议安全
IPV4	Internet Protocol Version 4	网络层协议的第一代标准协议

IPv6	Internet Protocol Version 6	网络层协议的第二代标准协议
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector	国际电信联盟标准化组织
IVI	Industrial Value Chain Initiative	工业价值链促进会
JCA-SDN	Joint Coordination Activity on SDN	SDN 联合协调活动组
JGN	Japan Gigabit Network	日本 G 比特网络
LFA	Loop-Free Alternates	无环路的备选路由
LSO	Lifecycle Service Orchestration	生命周期服务编排
M2M	Machine-to-Machine/Man	以机器终端智能交互为核心的、网络化的应用与服务
MANO	Management and Network Orchestration	管理和网络编排
MCC	Mobile Cloud Computing	移动云计算
MEC	Multi-Access Edge Computing	多接入边缘计算
MEC	Mobile Edge Computing	移动边缘计算
MEF	Metro Ethernet Forum	城域以太网论坛
MFSK	Multi-Frequency Shift Keying	多进制频移键控
MPSK	Multiple Phase Shift Keying	多进制数字相位调制
MRT	Maximally Redundant Trees	最大冗余树木
NDN	Named-Data Networking	命名数据网络
NFV	Networking Function Virtualization	网络功能虚拟化
NFV ISG	Network Functions Virtualization Industry Specification Group	网络功能虚拟化标准工作组
NFVI	Network Functional Virtualization Infrastructure	网络功能虚拟化基础设施
NIC	Network Information Center	网络信息中心
NFVO	Network Function Virtualization Orchestrator	网络功能虚拟化编排器
NKN	New Kind of Network	新型网络
NOS	Network operating system	网络操作系统

NSF	National Science Foundation	美国国家科学基金会
NWGN	New Generation Network	新一代互联网
OAM	OCP Accelerator Module	OCP 加速器模块
OCP	Open Compute Project	开放计算项目
ODCC	Open Data Center Committee	开放数据中心委员会
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用技术
OMF	control and management framework	控制和管理架构
ONF	Optical Network Forum	光联网论坛
ON.Lab	Open Networking Lab	开放网络实验室
ONAP	Open Network Automation Platform	开放网络自动化平台
ONF	Open Networking Foundation	开放网络基金会
ONOS	Open Networking Operating System	开放网络操作系统
OOM	ONAP Operations Manager	ONAP 运营经理
OPEX	Operating Expense	运营成本
OPNFV	Open Platform for NFV	NFV 开放平台
OSDL	Open Source Development Labs	开放源码发展实验室
OSS	Operational Support System	运营支撑系统
P4	Programming Protocol-Independent Packet Processors	编程协议无关的数据包处理器
PAWR	Platforms for Advanced Wireless Research	高级无线研究平台
PIT	Pending Interest Table	待定兴趣表
PKI	Public Key Infrastructure	公钥基础设施
PoR	Proof of Relay	中继证明
PPPoE	Point-to-Point Protocol Over Ethernet	以太网上的点对点协议
PSIRP	Publish-Subscribe Internet Routing Paradigm	发布订阅互联网路由范式
PURSUIT	Publish-Subscribe Internet Technology	发布订阅互联网技术

QoS	Quality of Service	服务质量
SaaS	Software as a Service	软件即服务
SAI	Switch Abstraction Interface	交换机抽象接口
SCN	Service Customized Networking	服务定制网络
SDC	Software Defined Chip	软件定义芯片
SDF	Software Defined Forwarding	软件定义转发
SDI	Software Defined Interconnection	软件定义互连
SDH	Software Defined Hardware	软件定义硬件
SDP	Software Defined Protocol	软件定义协议
SDN	Software Defined Networking	软件定义网络
SD-WAN	Software Defined WAN	软件定义广域网
SFC WG	Service Function Chaining Working Group	服务功能链工作组
SIGCOMM	Special Interest Group on Data Communication	数据通信专业组
SONIC	Software for Open Networking in the Cloud	云中的开放网络软件
SR	Segment Routing	分段路由
TDM	Time Division Multiplexing	时分复用
TPM	trustedplatform module	受信平台模块
UCL	Uniform Content Label	统一内容标签
UHD	Ultra High Definition Television	超高清
URL	Uniform Resource Locator	统一资源定位符
vDC	Virtual Data Center	虚拟数据中心
VIM	Virtualised Infrastructure Manager	虚拟化基础设施管理器
VNFM	Network Functions Virtualisation Manager	网络功能虚拟化管理器
VNF	Virtual Network Function	虚拟网络功能
VPP	Vector Packet Processing	矢量数据包处理



VR	Virtual Reality	虚拟现实
WWW	World Wide Web	万维网
XIA	eXpressive Internet Architecture	良好的网络架构

## 参考文献

- [1] <http://bgp.potaroo.net/as6447/>
- [2] [https://www.cisco.com/c/zh\\_cn/about/press/2019/02-22.html](https://www.cisco.com/c/zh_cn/about/press/2019/02-22.html)
- [3] Y Yang, M Xu, D Wang, et al. A Hop-by-hop Routing Mechanism for Green Internet. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), 2016, 27(1): 2-16.
- [4] 余少华. 未来网络的一种新范式:网络智能体和城市智能体(特邀). 光通信研究, 2018, 44(6): 1-10.
- [5] 吴超等. 信息中心网络发展研究综述. 计算机学报, 2015, 38(3): 455-471.
- [6] 黄韬, 刘江, 霍如等. 未来网络体系结构研究综述. 通信学报, 2014, 35(8): 184-197.
- [7] G Xylomenos, C Ververidis, V Siris, et al. A Survey of Information-Centric Networking Research. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2):1024-1049.
- [8] 霍如. 信息中信网络缓存资源管理与应用研究. 北京邮电大学博士论文, 2017.
- [9] <https://www.cs.cmu.edu/~xia/>
- [10] 孟宏伟, 陈钟, 孟子骞等. 未来网络XIA中的虚拟机跨子网迁移. 通信学报, 2016, 37(3): 107-116.
- [11] 洪学海, 马中盛, 范灵俊. 关于未来网络研究的调研报告. 2017.
- [12] <http://mobilityfirst.winlab.rutgers.edu/>
- [13] 刘韵洁, 黄韬, 张娇等. 服务定制网络. 通信学报, 2014, 35(12): 1-9.
- [14] 兰巨龙, 熊钢, 胡宇翔, 刘释然, 程东年.可重构基础网络体系研究与探索.
- [15] 吴建平, 李丹, 毕军等. ADN: 地址驱动的网络体系结构. 计算机学报, 2016, 39(6): 1081-1091.
- [16] 张宏科, 苏伟. 新网络体系基础研究——一体化网络与普适服务. 电子学报, 2007, 35(4): 593- 598.
- [17] 刘旋, 杨鹏, 董永强. 双结构网络内容共享能力研究. 电子学报, 2018, 46 (4): 849-855.
- [18] N McKeown, T Anderson, H Balakrishnan, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69-74.
- [19] J Yang, K Zhu, Y Ran, et al, Joint Admission Control and Routing via Approximate Dynamic Programming for Streaming Video over Software-Defined Networking. IEEE Transactions on Multimedia, 2017, 19(3): 619-631.
- [20] C Filsfils, N Nainar, C Pignataro, et al. The segment routing architecture. Global Communications Conference (GLOBECOM), 2015.
- [21] Cisco. Intent-Based Networking and Extending the Enterprise. <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/internet-of-things/nb-09-intent-base-d-iot-wp-cte-en.pdf>.
- [22] P Bosshart, D Daly, G Gibb, et al. P4: Programming protocol-independent packet processors. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 87-95.
- [23] 师严, 简伟, 曹畅等. SDN在IP层与光融合中的应用研究. 邮电设计技术, 2014(6):72-75.
- [24] <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/nfv>
- [25] <https://www.opnfv.org/>
- [26] <https://www.onap.org/>
- [27] A Bremler-Barr, Y Harchol, D Hay. OpenBox: A Software-Defined Framework for Developing, Deploying, and Managing Network Functions. ACM SIGCOMM, 2016.
- [28] C Sun, J Bi, Z Zheng, et al. NFP: Enabling Network Function Parallelism in NFV. ACM

- SIGCOMM'17, 2017.
- [29] 中国信通院牵头推荐ITU-TSG20“物联网边缘计算”国际标准. 电信工程技术与标准化, 2018, (2): 92.
- [30] ETSI M. Mobile Edge Computing (MEC): Framework and reference architecture. ETSI, DGS MEC, 3, 2016.
- [31] M Patel, B Naughton, C Chan, et al. Mobile-edge computing introductory technical white paper. White Paper, Mobile-edge Computing (MEC) industry initiative, 2014.
- [32] <https://spark.apache.org/>
- [33] Streiffer C , Chen H , Benson T , et al. DeepConfig: Automating Data Center Network Topologies Management with Machine Learning, 2017.
- [34] Kong Y , Zang H , Ma X . Improving TCP Congestion Control with Machine Intelligence. Proceedings of the 2018 Workshop on Network Meets AI & ML.
- [35] A Narayanan, S Verma, E Ramadan, et al. DeepCache: A Deep Learning Based Framework For Content Caching. In Proceedings of the 2018 Workshop on Network Meets AI & ML (NetAI'18).
- [36] Shihan Xiao, Dongdong He, and Zhibo Gong. Deep-Q: Traffic-driven QoS Inference using Deep Generative Network. In Proceedings of the 2018 Workshop on Network Meets AI & ML (NetAI'18).
- [37] H Mao, M Alizadeh, I Menache, et al. Resource Management with Deep Reinforcement Learning. ACM Workshop on Hot Topics in Networks, 2016.
- [38] H Mao, R Netravali, and M Alizadeh. Neural Adaptive Video Streaming with Pensieve. In Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication, 2017.
- [39] Li Chen, Justinas Lingys, Kai Chen, and Feng Liu. AuTO: scaling deep reinforcement learning for datacenter-scale automatic traffic optimization. In Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication, 2018.
- [40] Gartner Market Guide for AIOps Platforms. <https://www.gartner.com/doc/3772124/market-guide-aiops-platforms>
- [41] B Arzani, S Ciraci, B Loo, et al. Taking the Blame Game out of Data Centers Operations with NetPoirot. In Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference, 2016.
- [42] <https://aws.amazon.com/macie/>
- [43] Cisco Visual Networking Index(VNI) 预测报告 (2015-2020). [http://www.cisco.com/c/zh\\_cn/about/press/corporate-news/2017/02-08.html](http://www.cisco.com/c/zh_cn/about/press/corporate-news/2017/02-08.html).
- [44] GROSSMAN E. Deterministic Networking Use Cases draft-ietf-detnet-use-cases-18. September, 2018.
- [45] 下一代互联网国家工程中心全球IPv6测试中心. 2017 IPv6支持度报告. 2017.
- [46] Cisco. How Can Service Providers Face IPv4 Address Exhaustion?. 2012.
- [47] Internet Society. State of IPv6 Deployment 2017. 2017.
- [48] Cisco. IPv6 for the Enterprise in 2015. 2015.
- [49] 张焕国, 韩文报, 来学嘉, et al. 网络空间安全综述. 中国科学:信息科学, 2016, 46(2):125-164.
- [50] 工业互联网产业联盟(AII) . 《工业互联网标准体系(2.0)》, 2019.
- [51] 工信部信管函〔2018〕188号.
- [52] 工信厅信管函〔2018〕410号.

- [53] SpaceX计划2019年发射互联网卫星, <http://www.techweb.com>
- [54] 尼摩. 低轨通信星座: 全球互联信号覆盖无死角. 中国航天报, 2018.
- [55] 夏明华, 朱又敏, 陈二虎, et al. 海洋通信的发展现状与时代挑战. 中国科学:信息科学, 2017(06):5-23.
- [56] 李晋, 蒋冰, 姜晓轶等. 海洋信息化规划研究. 科技导报, 2018, (14): 57-62.
- [57] 陈焱琨. 水声通信网络时延分析与媒体接入协议设计. 华南理工大学博士学位论文, 2018.
- [58] <http://www.cinic.org.cn/hy/tx/425877.html>
- [59] <http://www.geni.net/>, 2014.
- [60] 刘家俊, 王琨, 王长山. GENI 的研究与设计. 现代电信科技, 2008, (2): 44-47.
- [61] <https://www.ict-fire.eu/>
- [62] <https://www.planet-lab.eu/>
- [63] <http://www.fibre-ict.eu/index.php/testbeds/ofelia>
- [64] <http://www.bonfire-project.eu/>
- [65] <http://www.smartsantander.eu/>
- [66] <https://nitlab.inf.uth.gr/NITlab/nitos>
- [67] <https://www.jgn.nict.go.jp/>
- [68] <http://www.kreonet-s.net/>
- [69] <https://www.idc.com/cn/>
- [70] <https://www.strategymrc.com/report/edge-computing-market/description>
- [71] <https://www.att.com/contactus/index.html>
- [72] <https://www.detecon.com/de/node/57>
- [73] <http://app.idcquan.com/mobile.php?contentid=123089>
- [74] <http://www.elecfans.com/application/Communication/675066.html>
- [75] 中国电信发布CTNet2025网络架构白皮书 <https://www.sdnlab.com/17354.html>
- [76] <https://www.cisco.com>
- [77] [http://www.sohu.com/a/236033719\\_312742](http://www.sohu.com/a/236033719_312742)
- [78] <http://www.elecfans.com/d/678790.html>
- [79] <https://www.sdnlab.com/21271.html>
- [80] <https://www.sdnlab.com/23006.html>
- [81] [http://www.sohu.com/a/274072781\\_128075](http://www.sohu.com/a/274072781_128075)
- [82] <https://www.sdnlab.com/20309.html?from=timeline>
- [83] <https://www.edge-core.com/tw/news-inquiry.php?cls=5&id=326>
- [84] <https://www.itu.int/en/ITU-T/Pages/default.aspx>
- [85] <https://www.msccbsc.com/viewnews-2272097.html>
- [86] [http://www.ccsa.org.cn/article\\_new/show\\_article.php?article\\_id=cyzx\\_9d124939-d32c-4c40-39b6-5c23292348df](http://www.ccsa.org.cn/article_new/show_article.php?article_id=cyzx_9d124939-d32c-4c40-39b6-5c23292348df)
- [87] [http://www.ccsa.org.cn/article\\_new/show\\_article.php?article\\_id=cyzx\\_6b4c3cde-ea43-7502-e43a-5c80cfla4069](http://www.ccsa.org.cn/article_new/show_article.php?article_id=cyzx_6b4c3cde-ea43-7502-e43a-5c80cfla4069)
- [88] <https://www.ietf.org/>
- [89] <https://www.etsi.org/>
- [90] <http://www.mef.net/>
- [91] <https://www.linuxfoundation.org/>
- [92] 全球未来网络白皮书 (2018)
- [93] <https://www.opencompute.org/>

- [94] <https://www.opennetworking.org/>
- [95] <https://www.cncf.io/>
- [96] [https://en.wikipedia.org/wiki/Telecom\\_Infra\\_Project](https://en.wikipedia.org/wiki/Telecom_Infra_Project)
- [97] <https://www.onap.org/>
- [98] <https://www.opendaylight.org/>
- [99] <https://www.sdnlab.com/6800.html>
- [100] <https://p4.org/>
- [101] <http://www.elecfans.com/tongxin/20180619696229.html>
- [102] <https://k3s.io/>

## 致谢

光阴似箭，历时三个月，《未来网络发展白皮书（2019 版）》的编写至此告一段落，掩卷思量，饮水思源，在此仅表达第三届未来网络发展大会组委会的殷切期许和拳拳谢意。

“科技改变生活，网络引领未来。”未来网络的核心要义就是在现有的网络架构基础上建设智能的网络高速公路，用于计算、存储、交换和传输等领域。为建立网络强国，需超前布局未来网络，加快新型未来网络设施建设，推动未来网络与现有网络的兼容发展。我国目前对于未来网络的核心思路是基于 SDN/NFV 构建以 DC 为中心的新型网络，以云（数据中心）为中心，结合 SDN 技术，构建云管融合的新型网络架构，解决云网络、云接入、云连接三大场景。鉴于网络发展的重要性，未来网络领域受到了全球的关注和重视。上至国家政府层面，下至研究机构、企业公司，都在积极地推动未来网络的蓬勃发展。第三届未来网络发展大会组委会期望通过发布《未来网络发展白皮书（2019 版）》，让更多相关领域的科研团队和从业人员对未来网络建立系统性的了解，并期待和欢迎更多有识之士加入到未来网络创新的大环境中，为未来网络的发展与创新添砖加瓦，积极推动网络事业的发展。

《未来网络发展白皮书（2019 版）》的编写得到了众多相关单位和专家的大力支持，感谢你们积极地参与到本白皮书的编写工作中，不仅贡献了宝贵的时间，提供了丰富的素材，提出了许多具有建设性的意见和建议，还参与了本白皮书的修改工作。同时也感谢牵头负责白皮书编撰工作的 SDNLAB 团队，以及其它参与编写校正的相关人员，感谢你们在资料调研、文字撰写、版面设计、文字校对、文稿润色、发表安排等方面的辛勤工作。最后第三届未来网络发展大会组委会在此衷心感谢所有帮助和支持我们的各界人士！你们的支持和反馈对于未来网络的发展至关重要。





**网络全球 决胜未来**  
NETWORK GLOBALIZATION WINNING THE FUTURE

