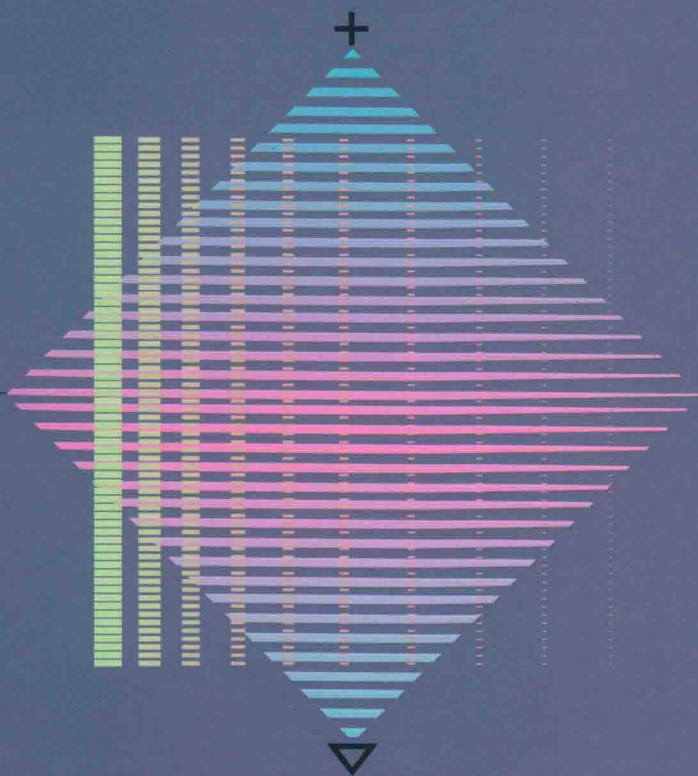


命名数据网络

原理、技术与应用



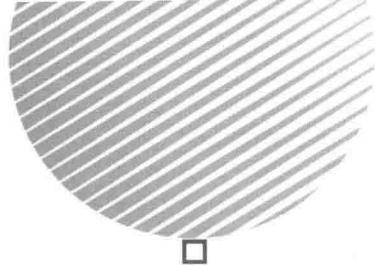
谢人超 霍如 刘江 黄韬 刘韵洁
编著



中国工信出版集团

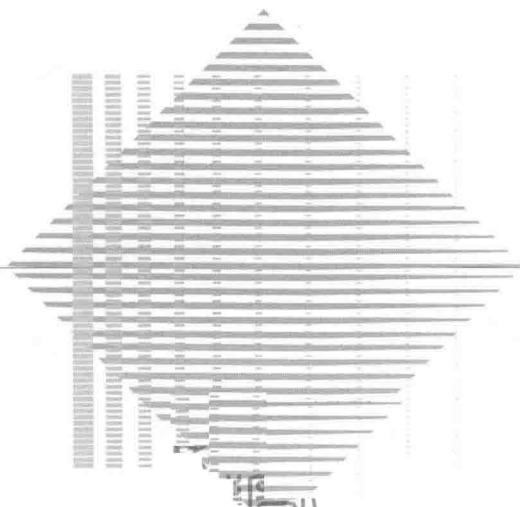


人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



命名数据网络

原理、技术与应用



谢人超 霍如 刘江 黄韬 刘韵洁
编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

命名数据网络原理、技术与应用 / 谢人超等编著

. — 北京 : 人民邮电出版社, 2019.2

ISBN 978-7-115-49169-5

I. ①命… II. ①谢… III. ①计算机网络 IV.
①TP393

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第272831号

内 容 提 要

本书从关键技术原理、应用案例与实践 3 个角度, 对命名数据网络 (NDN) 技术进行了全面剖析和深入解读, 全书共 12 章。

本书涉及的内容广泛、技术思想凝练, 突出核心原理和关键技术的阐述, 同时力图深入讲解 NDN 实验平台与仿真平台的使用过程。本书对从事 NDN 技术研发的专业人士、网络运营管理人员、相关专业高校学生以及对 NDN 技术感兴趣的读者, 都具有一定的参考价值。

◆ 编 著 谢人超 霍 如 刘 江 黄 韬 刘韵洁

责任编辑 邢建春

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京市艺辉印刷有限公司印刷

◆ 开本: 700×1000 1/16

印张: 14

2019 年 2 月第 1 版

字数: 275 千字

2019 年 2 月北京第 1 次印刷

定价: 108.00 元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

序 言

在现有的网络使用模式中，信息传递变得越来越重要，通信方式中数据位置的重要性逐渐被淡化，相对于数据所存储的物理或逻辑位置而言，用户更加关心的是信息数据内容本身。网络的使用模式已经由传统的以主机为中心逐渐演变为以内容为中心。在此趋势下，业界提出了信息中心网络（Information Centric Networking, ICN）技术，即通过基于内容命名寻址进行内容请求代替传统的基于 IP 地址寻址。ICN 的出现能够较好地满足人们对以信息为中心的通信方式的需求。尤其是随着计算和存储成为网络的重要功能，计算、存储与网络基础设施的融合也正成为未来网络发展的重要趋势，ICN 的出现也为构建网络、计算、存储一体化融合的未来网络提供了重要的技术支撑。

自信息中心网络思想提出以后，世界各国纷纷布局，启动了一系列相关研究项目，包括 CCN、NDN、DONA、NetInf、PURSUIT/PSIRP、POINT 等。其中，NDN 作为未来网络的重要发展方向之一，自提出以来就保持着旺盛的生命力。近几年，NDN 在高水平大学与国际大公司的积极推动下获得了巨大的发展，目前产业界力量都在围绕 NDN 技术进行积极布局，以期能在互联网演进的大浪潮中占得一席之地。我国产业界、学术界也纷纷意识到了 NDN 的重要性，积极推动我国相关力量在 NDN 领域发力，高校研究机构、网络设备商、运营商等纷纷投入大量人力、物力以加强在 NDN 领域的研究。

本书主要由北京邮电大学未来网络理论与应用实验室的教师和同学完成，是目前我国少有的专注这一领域的成果。这个团队隶属于北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室，长期从事电信网、互联网及其演进的未来网络技术创新研究，在信息中心网络领域的研究具有多年经验，并取得了一些研究成果。本书就是他们的研究心得与成果总结，很好地将 NDN 领域理论与实

验进行了结合，令读者既可以打下理论的基础又可根据书中提供的实验部分获得实践能力提升，对其他从事该方向的研究人员具有重要的参考借鉴意义。因此，推荐本书给有意愿和志向努力进行开拓性研究的相关科技工作者、教师和学生。

刘韵洁

2018年9月

前言

随着互联网业务的蓬勃发展，互联网用户的需求从主机之间的通信模式逐渐向主机到网络的信息重复访问演进，用户关注的重心从信息的存储位置转向信息本身。基于 TCP/IP 的传统网络架构难以适应这一趋势的转变，阻碍了网络发展，因此迫切需要新的技术解决方案突破传统网络架构对网络发展的限制。

在此背景下，为了摆脱传统体系结构对信息访问的束缚，以信息为中心的网络通信模型，即信息中心网络（Information Centric Networking, ICN）成为备受关注的焦点。信息中心网络的核心思想是采用以信息命名方式取代传统以地址为中心的网络通信模型，从而方便用户进行内容搜索和内容获取，实现从以 IP 为中心向以内容为中心的转变，解决地址空间可扩展、流量冗余、移动性、安全性等问题。

自信息中心网络思想提出以后，世界各国纷纷布局，启动了一系列相关研究项目。美国学术界率先启动了面向内容的网络体系架构相关研究项目，包括 DONA、CCN、命名数据网络（Named Data Networking, NDN）等，欧盟也陆续启动了 NetInf、PURSUIT/PSIRP、POINT 等相关研究项目。其中，NDN 与 CCN 思想类似，是美国国家科学基金于 2010 年 8 月宣布支持 4 个未来互联网架构方面的重点科研项目之一。经过科研人员的不懈努力，NDN 项目取得了令人瞩目的发展，并被视作 ICN 未来网络架构中的主流技术，具有非常广泛的应用前景。

本书不仅对 NDN 的发展历史与趋势、基本架构与原理进行了阐述，还对 NDN 涉及的关键技术与最新进展、应用前景与实践进行了详细的讲解。本书第 1 章对网络的发展历史、网络发展面临的问题以及未来网络研究趋势进行了介绍，同时对围绕 ICN 开展的各种项目进行了简单概述。第 2 章对 NDN 进行了全面的介绍，呈现给读者完全不同于传统的互联网体系架构。第 3~8 章分别对 NDN

的命名机制、缓存机制、路由与转发机制、传输控制机制、移动性管理机制和网络安全等关键技术进行了详细的阐述,同时对 NDN 在这些关键技术上已取得的成果进行了总结分析,并对最新进展进行了追踪。第 9 章介绍了 NDN 的典型应用场景,包括 NDN 在物联网、移动网络、车联网以及特殊场景网络的应用。第 10 章阐述了 NDN 与 TCP/IP 网络的融合部署问题,并对相应的解决方案进行了详细分析。第 11 章介绍了开源软件平台 NDN 转发守护进程(NDN Forwarding Daemon, NFD),详细介绍了 NFD 的架构与各组成模块,同时阐述了其安装与使用过程。第 12 章对 NDN 仿真平台进行了论述,重点介绍了基于 NS-3 的事件模拟器 ndnSIM 与 mini-NDN,并对其安装与使用进行了详细描述。

为便于读者检索,本书在附录中给出了 NDN 相关缩略语。

参与撰写和审校本书的人员还有来自北京邮电大学的博士生与硕士生,包括李诚成、贾庆民、陈清霞、李肖璐、张然、王芳、苏毅、许朝、徐京薇、吕潇阳、邹贵今、欧思维、王秋宁等。在此对大家表示衷心感谢。

最后,感谢人民邮电出版社的大力支持和高效工作,使本书能尽早与读者见面。

本书是作者在科研过程中对 NDN 的研究总结,希望能够对读者有所帮助。由于作者水平有限,同时 NDN 技术仍处于发展之中,因此书中难免存在疏漏,真诚地企盼读者批评指正。

作 者

2018 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 互联网发展现状	1
1.1.1 互联网发展趋势与挑战	1
1.1.2 未来网络研究进展	4
1.2 信息中心网络概述	6
1.2.1 基本思想	6
1.2.2 国际科研项目	7
1.2.3 最新研究进展	9
1.3 本书组织结构	10
第 2 章 命名数据网络概述	12
2.1 NDN 基本原理	12
2.1.1 NDN 设计原则	12
2.1.2 NDN 体系架构	13
2.1.3 NDN 工作机制	14
2.2 NDN 关键技术	16
2.2.1 命名机制	17
2.2.2 缓存机制	18
2.2.3 路由机制	19
2.2.4 转发机制	20
2.2.5 传输控制机制	21
2.2.6 移动性管理机制	22
2.2.7 安全机制	23
2.3 NDN 实验环境与仿真平台	23
2.4 本章小结	26

第3章 命名数据网络命名机制	28
3.1 NDN 命名设计原则	28
3.2 NDN 命名方法	29
3.3 NDN 命名解析	32
3.4 命名机制研究进展	33
3.5 本章小结	34
第4章 命名数据网络缓存机制	35
4.1 缓存技术概述	36
4.1.1 传统 IP 网络缓存	36
4.1.2 NDN 缓存	37
4.1.3 对比与分析	38
4.2 设计原则与评价指标	39
4.2.1 网络整体性能角度评价指标	39
4.2.2 路由器设备缓存角度评价指标	40
4.3 NDN 缓存决定策略	41
4.3.1 非合作缓存决定策略	41
4.3.2 合作缓存决定策略	42
4.4 NDN 缓存替换策略	43
4.5 本章小结	45
第5章 命名数据网络路由和转发	49
5.1 路由和转发概述	49
5.1.1 IP 网络路由和转发	50
5.1.2 NDN 路由和转发	51
5.1.3 对比与分析	51
5.2 设计原则与评价指标	53
5.3 NDN 路由策略	54
5.3.1 OSPFN 协议	54
5.3.2 NLSR 协议	57
5.4 NDN 转发策略	64
5.4.1 基本转发策略	64
5.4.2 其他转发策略	66
5.5 本章小结	67

第 6 章	命名数据网络传输控制	70
6.1	传输控制概述	70
6.1.1	IP 网络传输控制	70
6.1.2	NDN 传输控制	71
6.1.3	对比与分析	72
6.2	设计原则与评价指标	73
6.3	用户端传输控制	74
6.4	路由器逐跳传输控制	76
6.5	本章小结	79
第 7 章	命名数据网络移动性管理	82
7.1	移动性管理概述	82
7.1.1	IP 网络移动性管理	82
7.1.2	NDN 移动性管理	83
7.1.3	对比与分析	85
7.2	设计原则与评价指标	88
7.3	NDN 请求端移动性管理	89
7.3.1	NDN 请求端移动性的缓存策略	89
7.3.2	NDN 请求端移动性管理方案	93
7.4	NDN 内容源移动性管理	96
7.5	本章小结	101
第 8 章	命名数据网络安全机制	104
8.1	NDN 安全概述	104
8.2	隐私保护	105
8.3	访问控制	107
8.4	信任管理	110
8.5	网络攻击	115
8.6	本章小结	120
第 9 章	命名数据网络应用	122
9.1	NDN 在物联网的应用	122
9.1.1	物联网概述	122
9.1.2	NDN 在智能家居中的应用	123

9.1.3	NDN 在健康物联网的应用	127
9.1.4	NDN 在无线体域网的应用	132
9.2	NDN 在 LTE 网络的应用	135
9.2.1	LTE 网络概述	135
9.2.2	NDN 在 LTE 网络的应用	137
9.3	NDN 在车联网的应用	140
9.3.1	车联网概述	140
9.3.2	NDN 在车联网的应用	142
9.4	NDN 在特殊场景网络的应用	146
9.5	本章小结	150
第 10 章	命名数据网络与 IP 网络融合	153
10.1	NDN 与 IP 网络融合概述	153
10.2	基于网关方式的融合方案	154
10.2.1	设计原则和性能指标	154
10.2.2	基于 TCP/NDN 转换的融合方案	155
10.2.3	基于 HTTP/NDN 转换的融合方案	157
10.3	增量部署融合方案	162
10.4	本章小结	165
第 11 章	NFD 开源软件平台	168
11.1	NFD 简介	168
11.2	NFD 架构分析	169
11.2.1	NFD 模块	169
11.2.2	NFD 处理流程	170
11.2.3	NFD 管理方式	171
11.3	NFD 模块分析	172
11.3.1	接口	172
11.3.2	数据结构	173
11.3.3	转发流程	174
11.3.4	转发策略	179
11.3.5	NFD 管理	180
11.3.6	RIB 管理	182
11.3.7	安全	185
11.3.8	通用服务	185

11.4	NFD 应用实例	187
11.4.1	NFD 平台安装与配置	187
11.4.2	ChronoChat 应用示例	189
11.5	本章小结	193
第 12 章	命名数据网络仿真平台	194
12.1	ndnSIM 仿真平台	194
12.1.1	ndnSIM 简介	194
12.1.2	ndnSIM 整体设计	195
12.1.3	ndnSIM 安装与配置	198
12.1.4	ndnSIM 仿真案例	199
12.2	mini-NDN 仿真平台	204
12.2.1	mini-NDN 简介	204
12.2.2	mini-NDN 安装与配置	204
12.2.3	mini-NDN 仿真实验	205
12.3	本章小结	207
附录	缩略词对照表	209

第 1 章

绪 论

互联网已成为现代社会最重要的基础设施之一，网络信息化带动了整个世界经济的发展，促进了人类社会的进步。而伴随着网络的大规模使用，传统网络正在面临着一系列的变革与挑战，促使未来网络的飞速发展。因此，本章首先对互联网发展现状进行分析，然后对未来网络的研究进展展开叙述，并着重对未来网络候选技术之一——信息中心网络展开介绍。

1.1 互联网发展现状

1.1.1 互联网发展趋势与挑战

互联网已成为现代社会最重要的基础设施之一，被广泛应用于社会经济、文化、政治、军事和生活的各个领域，是推动经济发展和社会进步的重要因素，互联网产业已成为我国国民经济重要的新兴产业。如图 1-1 所示，由中国互联网络信息中心（CNNIC）发布的第 41 次《中国互联网络发展状况统计报告》显示，截至 2017 年 12 月，我国网民规模达到 7.72 亿，普及率达到 55.8%，超过全球平均水平（51.7%）4.1 个百分点，超过亚洲平均水平（46.7%）9.1 个百分点。

互联网的蓬勃发展使其已经深入渗透到全球经济社会的各个领域，成为经济发展和社会运行的基本要素。然而，随着互联网用户规模和业务规模的不断增长，以及 4K/8K 高清视频、虚拟现实/增强现实（AR/VR）、工业互联网、物联网、社交网络等新应用模式的出现，最初基于 TCP/IP 的为满足单一数据通信需求而设计、遵循“核心简单，边缘智能”设计原则的传统互联网体系结构逐渐暴露出一些固有的问题和局限，在可扩展性、可管可控性、安全性、移动性以及绿色节能等方面难以适应网络规模的急剧扩张。

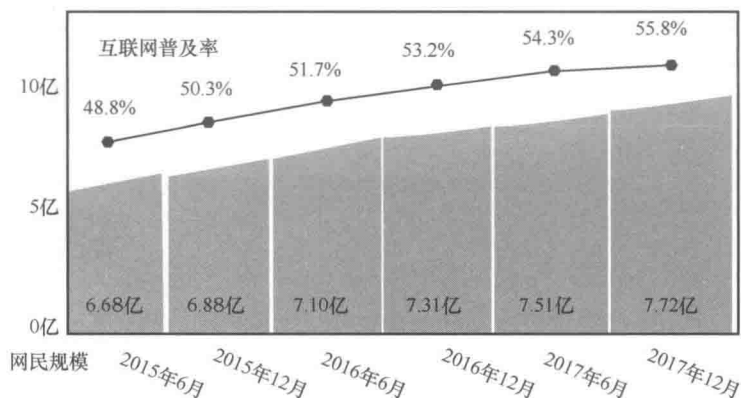


图 1-1 中国互联网络发展状况统计调查

(1) 可扩展性：据 Cisco 公司 2017 年发布的 VNI 报告显示，预计 2021 年全球 IP 网络数据总流量将达到 3.3 ZB，相比 2016 年将增长 3 倍，连接到网络的设备数量也将达到人口数量的 3 倍。随着用户数量和应用需求不断增加，网络流量的增长速度已经打破摩尔定律，远超路由器性能提升的速度，这导致运营商不断进行被动扩容，并为之付出大量成本。另外，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 3384 万条，其中，活跃路由表条目已经超过 74 万条，而且正在以每两年 1.25 倍的速度增长，预计到 2020 年整个路由表条目将达到 4000 万条。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) 可管可控性：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。工业互联网、物联网、车联网等新兴应用的出现对互联网在可管可控性方面提出了更高的要求，这对于传统互联网无疑是一个巨大的挑战。

(3) 安全性：随着互联网应用的飞速发展与大规模普及，网络安全成为一个不容忽视的重要挑战，存在着恶意软件、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。由于互联网最初设计的主要目标是实现顽健性互联和资源共享，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提出采用 IPSec、SSL/TLS、DNSSec、RADIUS 等技术以加强网络安全性，但整个互联网的安全保障仍处于被动应对的状态。随着应用增多，漏洞也不断增多，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,如网络功能虚拟化(Networking Function Virtualization, NFV)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,始终缺乏系统化、内生化的网络安全体系。

(4) 移动性: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、车联网的出现,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地切换服务,无法满足低时延、不丢包的会话场景需求,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解决的重要问题。

(5) 绿色节能: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更复杂的加工工艺,直接导致芯片耗电量增大,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。据估计,全球互联网数据中心的用电功率可达 300 亿瓦特,相当于 30 个核电站的供电功率,节能降耗已经成为网络运营商必须面对和亟待解决的技术难题。

为了应对当前互联网发展带来的前所未有的挑战,美国、欧盟、亚洲等国家和地区纷纷在未来网络体系架构及未来网络关键技术等方面展开了研究,主要包括“演进型”与“革命型”技术路线。“演进型”技术路线的研究人员主张在现有互联网网络体系下进行“补丁式”的修补,对网络设备或拓扑进行改造,使其适应新的发展需求。其主要解决思路是基于现有的互联网体系结构(TCP/IP 协议栈),提出一些新的协议或对一些原有协议和机制进行完善和更新。一般来说,这些协议仅仅关注互联网体系结构中的某个或某几个问题,如路由的可扩展性、端到端原则、网络的安全性和可信性,以及网络的自治特性等。“革命型”技术路线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,因此主张采取“从头再来(Clean-Slate)”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,并将其定义为未来互联网(Future Internet),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、可管可控性、安全性、移动性以及绿色节能等方面的问题,以适应未来发展的需要,实现网络的可持续发展。

现有的互联网是沙漏结构,以 IP 为其细腰,这意味着添加新的功能只能通过打补丁的方式在其他层实现,而网络核心体系难以修改,因此造成网络节点臃肿和可扩展性差。“演进型”路线虽然具有比较强的可操作性与延续性,短期内可以

取得很好的成果，但是长期来看，补丁式的演进可能会降低整个网络架构的灵活性、可靠性和可管理性，不能从根本上解决当前互联网所面临的各种问题。因此，构建一个全新的网络体系结构，即“从头再来”的革命型网络设计思路成为各国研究的热点。

1.1.2 未来网络研究进展

针对“革命型”的网络设计思路，世界各国纷纷启动了未来网络研究项目，从国家战略层面对未来网络架构创新及部署实施方面高度重视。美国、欧盟、中国、日本等国家和地区在政策、资金、人才培养等方面纷纷加大投入，通过支持未来网络相关领域的科研项目进行未来网络核心技术的研究与创新，推进技术的实验和验证，并都在争当相关标准的制定者和领跑者。

(1) 美国

自 2005 年起，美国国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）已投入超过 3 亿美元，联合 100 多家单位，共同建设国家级的网络试验床原型——全球网络创新环境（Global Environment for Network Innovation, GENI），并进一步转化为建设真实可用的试验网络，促进全球未来互联网革命性的创新。并且，NSF 设立了包括命名数据网络（Named-Data Networking, NDN）、MobilityFirst、NEBULA、XIA（eXpressive Internet Architecture）、机会网络（Network Innovation through Choice, Choicenet）在内的 5 个未来互联网体系结构研究项目，促进未来网络各项相关关键技术研究的革新。2017 年 9 月，NSF 继续发布了计算机与网络系统（CNS）核心项目指南，重点支持计算机系统研究（CSR）和网络技术与系统（NeTS）两大核心计划。其中，网络技术与系统聚焦对网络基础科学和技术进步的变革性研究以及引领未来新一代高性能网络和未来互联网架构发展的系统研究。

(2) 欧盟

欧盟第七框架计划（European Community's Seventh Framework Programme, FP7）从 2007 年开始陆续资助了上百项未来网络研究项目，包括 FIRE、SAIL、CHANGE、PSIRP 等，并取得了重要成果。此后，欧盟于 2014 年投入 800 亿欧元启动了为期 7 年的 Horizon2020 计划（即 FP8 计划），该计划目前支持 ICT 征集发布的第一个工作计划（ICT2014/2015 年）中关于未来网络研究的 10 个方向，包括智能网络及新型网络架构、智能光无线网络技术、先进的云基础设施和服务及未来网络中先进的 5G 网络设施等研究方向。ICT 工作计划指出，互联网架构领域的下一波研究浪潮应该解决现行网络架构中存在的问题，并将着手部署最有发展潜力的网络架构。其中，在智能网络及新型网络架构领域中，POINT、

UMOBILE、RIFE 等项目利用信息中心网络 (Information Centric Networking, ICN)、时延容忍网络 (Delay-Tolerant Networking, DTN) 的优点, 继续对未来网络的构建和发展进行持续研究。2017 年, 欧盟宣布将在 2018~2020 年间启动第二阶段的研究计划, 将投入 1.49 亿欧元支持以 5G 网络、B5G 网络为代表的未来网络技术研究工作。

(3) 日本

日本国家信息通信技术研究院 (NICT) 于 2006 年启动了 AKARI 研究计划。AKARI 计划首次提出了新一代网络 (New-Generation Network, NWGN) 的概念, 以区别于传统的下一代网络 (Next Generation Network, NGN), 并提出了未来网络架构设计需要遵循的简单、真实连接、可持续演进 3 大原则。2010 年, NICT 整合了 AKARI、JGN-X、Network Virtualization 等多个未来网络领域的相关研究项目, 形成了新一代网络研究与发展计划 (New-Generation Network R&D Project)。该计划目标是覆盖新一代网络研究的各个领域, 通过有效合作探讨未来网络相关领域的核心技术成果, 使未来网络可以满足大规模、多终端情景下的高层次用户需求, 解决未来网络的可持续发展问题, 并创造新的社会价值。2011 年, 日本启动了 JGN-X 项目, 旨在建立新一代网络, 并根据技术趋势提高网络功能和性能。通过试验台的运作, 日本推动广泛的研发活动、各种应用的展示和尖端网络技术的发展。目前, 日本新一代网络及其扩展的中心主要是 JGN-X 试验台网络。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。连接骨干节点的骨干网由 10~40 Gbit/s 的网络组成。其他接入点通过带宽连接, 如 1 Gbit/s。当前, JGN-X 被研究人员和研究机构广泛应用于研究项目和项目示范等活动中。

(4) 中国

面对互联网的主要技术挑战和下一代互联网的重大需求, 我国在《“十三五”国家科技创新规划》中, 明确将天地一体化信息网络、大数据、智能制造和机器人等列入科技创新 2030 重大工程中。国务院在《“十三五”国家信息化规划》中也明确提出超前布局未来网络, 加快工业互联网、能源互联网、空间互联网等新型网络设施建设, 推动未来网络与现有网络兼容发展。同时, 2016 年年底, 国家发展和改革委员会正式启动了国家重大基础设施“未来网络试验设施”的建设。这期间, 科学技术部、国家自然科学基金委员会等也都在积极设立新型网络、未来互联网等相关研究计划, 关于软件定义网络、互联网可信模型、移动性、可控等未来网络相关方向的国家重点基础研究发展计划 (973 计划)、国家高技术研究发展计划 (863 计划)、国家科技重大专项等科研项目也陆续启动, 以试图建立一套完整的未来网络架构及关键技术研究体系。

未来互联网的研究将是一个长期的过程, 各国之间展开了激烈的竞争, 关