

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 86 次

学部工作局学术与文化处 编报
《中国科学》杂志社

2019 年 3 月 28 日

“未来信息通信网络”科学与技术前沿论坛综述

一、背景

随着物联网、移动互联网、云计算、大数据、人工智能等技术的快速发展与广泛应用，信息通信网络的内涵和外延不断丰富，已从传统面向人的服务转为面向人、机、物服务的新业态，在改变着人们生活方式的同时，也不断带动产业结构调整和经济增长方式的转变，日益深刻地影响着社会经济、国计民生、思想文化等方面。例如，到 2018 年底，全球互联网用户数达 39 亿，移动电话用户数突破 80 亿，电信服务业收入超过 16100 亿美元，我国的信息通信技术(ICT, Information and Communication Technology)总产值突破 24 万亿，同比增长 11.1%，产业增加值达 7.2 万亿，占 GDP 比重的 7.7%。预计到 2030 年，移动网络连接的设备总量将超过 1 千亿部，技术应用和经济价值前景广阔。

与此同时，国际网络界自 20 世纪 90 年代开始，不断对现有网络结构和功能进行优化，以积极应对快速增长的网络效能需求，着力解决网络本身固有的体系结构僵化、动态自愈能力弱、协议体系庞大、效率低、安全性差等诸多问题，也一直在积极探索未来信息通信网络

的发展方向，例如，主动网络、GENI（Global Environment for Network Innovation）的 GMC（GENI Management Core）体系结构、SDN/NVF（Software Defined Network/Network Functions Virtualization）、意图驱动网络等。我国部署了一系列国家自然科学基金重大研究计划、国家重点基础研究发展计划、国家高技术研究发展计划等，如开展面向服务的未来互联网体系结构、智慧协同网络、未来天地一体化信息网络、空间信息网络基础理论与关键技术等研究。这些新思路、新方法都对信息通信网络创新发展作了重要探索。

中国科学院学部组织召开“未来信息通信网络”科学与技术前沿论坛，旨在围绕信息通信网络学科的发展方向、重点布局等，为信息通信网络领域的专家、学者搭建一个形势分析、成果展示、学术争鸣、协同合作的交流平台，启迪创新思维，探索前沿科学理论和新技术增长点，并在国家层面上进行相关领域研究提前谋划部署，提出具有前瞻性、可行性的规划与建议。

二、论坛概况

2018年11月16日，“未来信息通信网络”科学与技术前沿论坛在中国科学院学术会堂召开。中国科学院院士、军事科学院系统工程研究院研究员尹浩和中国科学院院士、清华大学信息科学技术学院院长陆建华教授担任本次论坛的执行主席。论坛期间，刘韵洁院士、邬江兴院士、陆建华院士、尹浩院士分别作特邀报告；张宏科教授、李建东教授、朱洪波教授、孙震强副总工和赵亚军高级工程师分别作专题报告；陆建华院士、尹浩院士分别主持了特邀报告会和专题研讨会。来自国内信息通信网络领域知名高等院校、研究机构、企业的近200余位专家、学者参加论坛。与会专家围绕论坛主题，结合各自研究领域，对未来信息通信网络发展的趋势和前景、理论和技术的创新方法和思路，进行了热烈的交流和深入的讨论。

本次论坛由中国科学院学部主办，中国科学院信息技术学部和中

中国科学院学部学术与出版工作委员会承办，清华大学、《中国科学》杂志社、北京交通大学、北京邮电大学、南京邮电大学、西安电子科技大学、中兴通讯股份有限公司、中国信息通信研究院、中国电信北京研究院、华为技术有限公司、军事科学院系统工程研究院复杂系统仿真总体重点实验室协办。论坛的学术报告以视频资料的方式保存。

三、论坛重点关注的议题及报告

（一）议题 1：未来信息通信网络体系架构及标识体系创新

北京邮电大学刘韵洁院士围绕未来网络的技术发展趋势和未来网络试验设施项目，作了题为“未来网络创新，服务社会发展”的报告。报告指出，经过 40 多年的发展，互联网已成为人类社会的重要基础设施和国家的重要战略资源，正发展成为继陆、海、空和太空之后的人类第五疆域——网络空间（Cyberspace）。未来的互联网将像水、电、空气一样，成为社会生活不可或缺的一部分。面向 2030 年的网络，将是一个能够支撑万亿级、人机物、全时空、安全、智能的连接与服务的网络。目前，未来网络已经成为全球竞争焦点，软件定义网络、网络功能虚拟化、数据中心网络、网络操作系统、开源硬件等新技术和新趋势的出现正不断革新传统互联网技术。中国在未来网络领域已积极开展布局，国家主导的“未来网络试验设施项目（CENI）”将为突破未来网络基础理论和支撑新一代互联网实验提供大规模、国家级的实验平台。面向“互联网+”、“产业互联网”发展的大潮，未来网络与实体经济结合，将有十分巨大的市场前景与机遇。

讨论：我国信息通信网络发展布局及产业化布局？

（1）新型网络体系与机理研究，探索满足下一代互联网需求的颠覆性创新发展思路，创建与设计自主新型的互联网体系、机理与系统，以按需满足用户普适服务需求，按需高效提供网络多元化支撑，兼顾现有网络改良和演进，考虑未来网络发展；（2）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；（3）加快基于 IPv6、工业以太网、泛在无线、软件定义网络（SDN）、5G 及工业云计算、大数据等新型技术的工业互联网部署；（4）掌握新型计算、高速互联、先进存储、体系化安全保障等核心技术，全面突破 5G 技术、6G 技术、核心路由交换技术、超高速大容量智能光传输技术，积极推动量子计算、神经网络等前沿技术发展。

解放军信息工程大学邬江兴院士就“多模态全维可定义智慧网络”作了丰富精彩的报告。报告指出：面对信息网络与经济社会深度融合发展带来的专业化服务承载需求，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、高效能等方面仍存在一系列挑战。传统的因特网正在成为数字经济发展的瓶颈，它是基于封闭网元的技术平台，三大使能技术，也就是基于 IP 的传输协议、分布式存储转发模式以及路由控制。传统的因特网在作出卓越历史贡献的同时，受时代局限性的影响，这种端到端的、透明转发、尽力而为的方式，以及基于彼此信任，没有网络攻击的背景使得它的发展出现了很严重的局限性。整个国际社会也认识到原先的使能技术，使得互联网的发展路线出现一点僵化，限制了多元化的应用，因此致力于研究新型网络技术。报告分析了全维可定义智慧网络技术创新的现实基础，明确了全维可定义智慧网络的基本技术特征，提出以开放架构为基础、以基线技术重塑为切入点，谈论了基线技术重塑下新型网络的核心运行机理，为信息网络技术创新与突破探索可能的方法和途径。

讨论：我国网络空间安全领域急需解决的核心关键问题？

（1）核心元器件、操作系统严重依赖国外，缺乏自主可控的基础。我国尚未掌握核心技术的生产能力和研发能力，导致网络安全发展受制于人，没有自己的编程语言和开发环境。即使是我国领先的量子保密通信技术，量子光源、量子探测器、量子真随机数发生器等高性能光量子核心器件技术依赖于国外厂商提供，仍是我国摆脱国外制约、

实现自主发展的关键。(2) 安全防御技术落后，对高级别复杂性威胁应对能力不足，特别是应对大数据、云计算等新型技术网络安全风险能力不足。在 APT (Advanced Persistent Threat) 攻击检测和防御方面，不能及时发现 APT 攻击，无法对其分析取证，难以掌握整个攻击过程，并缺乏有效的反击手段。(3) 大部分网络空间安全领域尚未形成有核心影响力的研究团队和科研机构。特定领域的研究取得突破进展，但尚未形成系统化、体系化的网络空间安全解决方案，研究成果产业化尚处于初探阶段。国内瞩目的研究成果有主动防御、拟态网络、可信计算和量子保密通信等。

北京交通大学张宏科教授介绍了“普适标识网络体系及系统”的研究工作。随着用户数量和应用规模不断扩大，现有网络原始设计思想受到严重挑战，在移动性、安全性、实时性等诸多方面暴露出严重弊端。另一方面，随着高铁、智能制造等特殊行业的高速发展，迫切需要高移动、高安全、低时延等可靠通信网络支撑。张宏科教授带领科研团队历经 20 余年研究，在前期标识网络、智慧标识网络成果的基础上，进一步提出并发展了普适标识网络体系、机理与机制，支持按需满足用户多元化服务，高效提供网络多元化支撑，兼顾现有网络改良和演进，并考虑未来网络发展。

讨论：普适标识能否解决 IP 网络标识的根本性问题？

普适标识以标识为核心，提出标识定义划分、标识解析映射和标识协议栈通信的新网络技术，构建自主网络协议栈和多重解析映射系统（替代 DNS），支持自身安全性、移动性等，兼容现有 IP 网络和应用等，能够突破传统网络多标识、安全移动性差的原始设计弊端。

（二）议题 2：信息通信网络学科基本内涵及演进

军事科学院尹浩院士围绕信息通信网络学科发展现状和未来趋势，作了题为“未来信息通信网络学科发展战略”的报告。报告指出，信息通信网络极大地推动了社会进步和经济发展，深刻地影响着国计

民生，与人们的生产生活密切相关。未来信息通信网络学科发展战略是我国网络核心技术自主可控发展，实现网络强国的根本支撑。报告介绍了当前信息通信网络学科发展现状和未来趋势，以及下一步学科在网络架构、基础理论及关键技术创新等方面的发展布局构想，为我国未来信息通信网络学科的前瞻、持续、快速、稳步发展及科学布局提供参考。

讨论：信息、通信、网络三要素之间的关系？

从信息、通信、网络三要素独立发展到三者融合发展，信息通信网络的发展形态呈现出以下几个特点：（1）三要素初步融合阶段，使能传统技术/系统的升级和演进，从而实现低成本、高速率、高能效等性能的提升，比如移动通信系统演进至 5G，卫星通信系统升级至卫星互联网，光纤通信系统演进至光通信网，类似的变化也发生在其他技术/系统，如无线通信系统、光通信系统、广播电视系统、遥感遥测系统、导航与定位系统等；（2）三要素的深度融合，通过变革性的通信信息网络体系架构，使通信、网络、云计算、大数据、区块链、人工智能、脑科学、生物计算等技术要素深度融合，形成通信—计算—数据—智能融合发展的全新生态；（3）信息通信网络与实体行业融合，给实体行业注入变革性要素，形成新兴信息通信网络，如车联网、农业物联网、工业物联网、能源互联网等。信息通信网络技术还将进一步与智慧城市、智慧医疗、虚拟现实、数据服务、金融业、服务业、信息业、智慧农业、工业互联网、航空航天、文化产业等行业领域加速渗透，应用成果将层出不穷。

西安电子科技大学李建东教授就“信息通信网络内涵及发展趋势”作了系统深入的介绍，阐述了对信息通信网络内涵的基本理解，重新审视了信息通信网络发展的基础理论及其变化特征，重点分析了信息通信网络全频谱、全空间、新维度不断拓展的发展趋势，同时讨论了数据、网络、智能三者之间的耦合关系与关键技术，对信息通信

网络发展的基础问题研究具有很好的指导意义。

讨论：信息通信网络的新概念、新技术发展？

当前，信息通信网络的新概念推出、新技术应用层出不穷，不断开花结果，同时也不断朝着新方向快速发展，主要体现在高容量、高安全、高可靠、低时延、大跨度、全智能等方面。高容量是信息通信网络不断追求的主要目标，高频段、大带宽、大阵列传输技术蓬勃发展，太赫兹通信、可见光通信等技术也从理论向实际应用转型，通过涡旋模态来寻找新传输维度的研究也备受关注，而超高密度组网也成为提升网络容量；高安全是信息通信网络的基础保障，量子通信、紫外光通信等新技术从物理机理的角度为信息通信提供了安全保证，而智能隐蔽波形、区块链、高安全密钥等新技术的不断演进也为信息通信网络提供了良好的安全屏障；高可靠是面向机器通信以及行业典型应用场景的关键，信源与信道联合的高可靠码型设计以及高可靠波形设计都是值得期待的研究领域；低时延是车联网、工业互联网应用的重大需求，车车通信、车路协同、无线工业控制等领域低时延新技术亟待突破；大跨度是信息通信网络保障人类活动全空间拓展的基础，多层卫星通信、深海蓝绿光通信、深空通信、跨介质通信等新技术与新概念的不断研究与成熟将不断拓展人类的信息足迹；全智能是信息通信网络技术不断升华的里程碑，面向人机物全维度的语义通信、意图通信逐渐成为了研究的焦点，而从业务到接入再到网络的全流程智能分析与处理技术也是进一步解放信息生产力的关键。

（三）议题 3：万物互联的信息通信网络技术应用及产业发展

针对万物互联的全球覆盖需求，清华大学陆建华院士以“空间网络科技发展挑战与机遇”为题作了特邀报告，阐述了空间信息网络的概念与内涵及战略意义，结合美国与中国空间信息网络的发展现状及其比较，从技术发展路径、安全策略等方面分析总结了我国发展空间信息网络面临的挑战，最后结合当前我国“一带一路”发展战略以及

卫星互联网和天基物联网的发展热潮，提出了发展我国空间信息网络的思考和建议。

讨论：空间信息网络发展的关键技术？

(1) 高速传输组网交换路由技术：突破大容量、高可靠交换结构的设计方法，采用软件定义网络体系架构设计可重构的星载路由器/交换机。(2) 自主空间网络操作系统和安全软件架构：采用认知计算方法，基于软件功能的代数分解实现模块化、结构化和故障隔离，解决软件系统的自主安全和自主重构难题。(3) 综合多维资源限制的资源管理技术：根据网络拓扑变化、频谱使用情况、节点能耗状态等信息，综合利用功率、频谱、时间、空间等多维资源，研究多任务资源优化调度、探测/传输/处理联合资源优化、实时调整、鲁棒性调度等关键技术。(4) 可信通信架构与安全网络协议体系：基于逻辑网络的结构化思想，设计空间通信网络协议，构建结合物理连接与协议连接的安全管理网，并依据现有空间通信网络特征，协同通信与网络，实现具备存储、计算、通信融合的综合能力。

南京邮电大学朱洪波教授针对物联网环境下的新型网络技术进行了深入探讨。当前，随着物联网和“互联网+”的迅速发展，信息技术领域仅仅以不断增加带宽和提高速率作为技术指标、以人际信息交互和传输作为目标功能已经很难满足新的社会发展需求。信息技术和信息产业正面临历史性转折和发展机遇，互联网时代开始进入后互联网或者物联网时代。物联网时代信息产业的主要任务应该是为社会实体经济的智能化发展提供支撑技术和基础设施。物联网促进了从“以网络为中心的服务”到“以服务为中心的网络”的一场信息技术革命。物联网的技术思想就是将网络边缘环境的所有事物（包括人、机、物在内所有实体和虚拟的物端对象）都以泛在网络形式实现智能化按需接入，进行信息传输和按需协同交互。因此，物联网时代信息技术的发展重点在于互联网的“末梢效应”及其“边缘价值”。

讨论：我国物联网行业存在的短板弱项问题？

(1) 高端传感器的设计及制造能力依然薄弱。在工业控制、车辆碰撞预警、车路交互等应用场景中对高精度、智能化的高端传感器需求将大幅提升，而由于高端传感器种类多、跨学科研发技术门槛高、开发成本大，我国高端传感器基本依靠进口。(2) 通用物联网平台的研发能力有待加强。总体看来，我国物联网平台仍处于发展初期，在聚合资源以及带动技术产品、组织管理、经营模式创新方面的潜力远未充分释放，相对国际领先物联网平台的竞争优势不明显。在国内物联网平台企业尚未有效“走出去”的情况下，国外物联网平台已加速进入国内市场，如美国 GE 公司已宣布其物联网平台向全球企业开放。(3) 物联网标准制定的协调统筹不足。物联网标准化缺乏统一的规划和部署，造成物联网标准众多，各标准范围不清晰，物联网标准的重叠和缺失较为严重。由于物联网应用种类繁多，需求差异较大，现有标准还不能满足物联网各个产业应用的需求。标准的推广力度不足造成标准化滞后于市场和企业需求，对行业的指导不足。

中国电信北京研究院孙震强副总工就当前云网融合的现状与发展趋势作了深入分析，从“上云”到“入云”阐述了网络云化的不同发展阶段，以及目前业界在网络云化方面的举措和进展，同时指出未来云化网络的三大重要趋势：基于 SDN 的控制层分离和跨域互联、NFV 的深度解耦、基础设施的统一集约和容器化部署。

讨论：网络云化的具体模式问题？

针对 NFV 三层解耦问题，重点解决亲和性和非亲和性、跨层协同等问题，解决不同厂商虚拟化网元在统一的云资源池实现容器化部署的问题，研究相应的网络云容器化管理和 VNF 容器化部署的技术。

中兴通讯股份有限公司赵亚军高级工程师针对物联网场景驱动下的 5G 技术发展问题，作了题为“Views on Beyond 5G”的大会报告，介绍 5G 标准现状，并给出关于 5G 下一步增强的观点认识，展望未来

移动通信系统（6G）的愿景，认为 6G 的关键技术至少可以包括三大部分：扩展频谱资源，包括太赫兹和可见光等；基础关键理论和技术，包括先进编码技术、基于太赫兹的 MIMO 技术、压缩感知等；关键技术特性，包括天地一体化通信、无线传感网络等。

讨论：万物互联的云网端协同平台技术及应用？

网络是连接终端和云的通道，包括接入网、城域网、骨干网和专用承载网等，以 IP 为主导的网络，强调的是网络层的路由选择。云是 IT 资源的提供者，向应用提供计算、存储和网络三种能力：以 IT 为主导的云计算，目的是实现各种应用。构建云网一体化基础设施，用网络的能力支撑云计算的发展，用云计算的理念优化网络资源，促使各种资源能够按照用户的需求，动态、弹性地调度和调配。在云化网络架构和路径顶层设计方面，构建统一的云化网络架构，给出现网从 CT（Communication Technology）向 ICT 演进发展的路径和步骤；在网络云化底层软件和中间件研究方面，研究具有异构组网和分布式独立部署能力的底层软件和中间件，支持多种业务开发框架和微服务框架，具有虚拟机和容器的统一管理和编排能力；在网络云化实施关键技术和模式研究方面，研究解决 NFV 三层解耦的关键问题，如跨层协同等，提出网络云容器化管理和 VNF 容器化部署的技术要求。

四、论坛总结

此次论坛成功搭建了相关领域专家学者的高层次交流平台，与会专家、学者碰撞思想，共同探索，系统评述和前瞻预测未来信息通信网络前沿技术发展方向、重点布局等，深刻剖析了未来信息通信网络发展的新问题、新方法和新思路，科学判断和预测凝练符合中国“未来信息通信网络”发展需求的前沿科技问题和重大战略方向的研究。通过对未来信息通信网络规划发展的深入讨论，论坛达成以下几点共识：

1. 创新基础理论与方法，谋求重大技术突破

当前信息通信网络领域是以技术发展应用为先，基础理论创新稍显滞后。未来发展需着重强调基础理论与技术创新协调发展，充分发挥理论对技术的变革性影响，寻求技术的基础性和革命性突破。近年来，IT领域的重大创新主要来自相关技术领域的交叉融合和应用创新，而不是基础理论发展带动的技术突破，因此技术门槛不高，潜力有限，后劲不足。从信息领域的发展规律来看，需要新技术成果和新需求牵引和倒逼相应基础理论创新发展，再基于新的基础理论带动技术创新应用。

2. 新型网络体系架构及关键技术创新

在网络体系架构方面，开放化、虚拟化、智能化和融合化已经成为未来信息通信网络的重要特征和发展方向，需要加快在未来网络新的理论体系和支撑未来网络体系架构的关键技术研究方面的布局，如开展多样化标识寻址技术、大规模可扩展路由、新型网络移动性技术等研究，谋求未来网络发展基础的领先优势。

3. 信息通信网络与人工智能的深度融合

面对网络应用场景的复杂多变、业务种类多种多样、用户行为特征时变多样，以及联接终端高度智能等发展态势，信息通信网络的能力需求将不断提升，智能化水平将不断提高。需要着重关注的问题是如何给网络加装“大脑”，让网络具备像人一样的认知能力，感知网络环境变化、自身状态变化和用户行为特征变化，通过学习信道特性、用户特征、位置特征、业务特征等，优化网络架构、组网和传输方法，调整网络资源，主动适应这些内外部条件的变化，提供安全可靠、实时高效的差异化服务。

4. 进一步推动信息、通信、网络三个领域交叉渗透、深度融合

21世纪以来，信息领域的学术界和产业界提出的主要创新技术（簇）包括信息通信技术、物联网、移动互联网、信息物理系统、车联网、工业互联网、“互联网+”等，这些技术大体可以看作是信息、

通信、网络三个领域的直接结合，或者传统互联网概念的延伸扩展，因此在深度融合方向尚有较大发展空间。

本次论坛深入探讨了我国信息通信网络学科发展的主要方向和需重点关注的技术领域，从国家战略需求高度，前瞻布局、提前谋划，为未来信息通信网络学科建设发展战略的重点布局、发展策略和路线，提供了重要的指导性意见和建议。信息通信网络学科发展，将围绕网络强国、制造强国等国家战略和宏伟目标，夯实基础理论，加快网络智能化步伐，积极应对快速增长的网络效能需求，培育革命性新技术、培养高技术人才队伍，有力支撑国家战略的全面实施。

（作者：尹浩，中国科学院院士，军事科学院系统工程研究院系统总体研究所所长、研究员；任保全，军事科学院系统工程研究院系统总体研究所高工；李洪钧，军事科学院创新研究院协同创新项目部助理研究员）