

互联网体系结构的研究与思考

任丰原

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘要: 互联网是人类信息社会重要的基础设施,网络体系结构设计是其健康、有序和可持续发展的基础研究课题. 本文首先梳理了网络体系结构的定义,概括了互联网发展的现状和面临的主要挑战,分析了网络体系结构研究在应对挑战和促进互联网发展中的意义和作用;然后概略介绍了历史上互联网体系结构相关的研究计划和项目,总结了相关研究成果,重点分析了网络体系结构研究实践中形成的主要观点,对网络体系结构“革命式”和“演进式”的技术路线分别进行了评述;接着分析和总结了近期的相关研究进展和发展趋势;最后结合历史和近期的相关研究,讨论了若干网体系结构研究意义、方法、设想和影响的思考与认识.

关键词: 互联网;体系结构;参考模型;可演进

基金项目: 国家重点研发计划(No.2022YFB2901404);国家自然科学基金(No.62132007, No.62221003)

中图分类号: TP393.0;TP393.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2024)01-0373-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230755

Internet Architecture Research and Reflections

REN Feng-yuan

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Internet is the paramount infrastructure in information society, and the architecture designing is one of fundamental research issues on promoting its healthy, orderly and sustainable development. This paper clears up the definition of network architecture, summarizes the current situation and key challenges of Internet development, and elucidates the impact and significance of network architecture research in facing challenges and facilitating Internet development. Subsequently, the historical research plans and projects on Internet architecture are outlined, and some key viewpoints and important results obtained in these research investigations are presented. Two main technical roadmaps to update network architecture, including in the fashion of both revolution and evolution, are discussed, respectively. Both recent research progress and future trend are discussed in details. Finally, based on historical and recent research results, the paper provides some opinions and comments about significance, impact, methodology and incentive in network architecture research.

Key words: Internet; architecture; reference model; evolution

Foundation Item(s): National Key Research and Development Plan (No.2022YFB2901404); National Natural Science Foundation of China (No.62132007, No.62221003)

1 互联网的发展及其体系结构研究的意义

毋庸置疑,互联网是二十世纪人类最重要的发明之一,已经渗透到人类社会的方方面面,并且还在持续而深刻地影响及改变着人类生产和生活的方式. 就如同铁路和高速公路的蓬勃发展给工业社会带来了广泛而深远的影响一样,互联网必将成为信息社会人类重

要的基础设施之一,没有互联网就如同没有电力和交通网络一样难以想象. 数字化时代对信息的综合采集、存储、传输、处理和利用,最终通过无处不在的互联网平台将全球范围的人类社会更紧密地联系起来,以不可抗拒之势影响和冲击人类社会政治、经济、军事、日常工作和生活方方面面. 互联网及其应用的发展水平是衡量一个国家综合实力的重要标志之一.

1.1 网络体系结构的定义

计算机网络经典教材中“网络体系结构”一般指网络协议分层模型与协议的集合^[1,2],是一个概括总结性定义,用来描述现实中存在的真实网络,可视作“网络体系结构”的广义定义.相应地,狭义的“网络体系结构”则用来描述一组计算机通信协议和机制设计的抽象指导原则,是领域专家深思熟虑且经过实践反复检验的.在充分理解设计需求的基础上,网络体系结构界定的基本原则可以指导具体设计在若干备选方案中做出合理选择^[3].换言之,狭义的“网络体系结构”定义中蕴含的基本准则为网络协议和算法设计所需的技术决策提供原则性指导,依此确认具体设计的合理性,确保最终解决方案的一致性和连贯性,保障各子系统或部件能顺利组合在一起协调工作,并满足功能要求.故而,狭义的“网络体系结构”可视为一种抽象定义,用来描述设计网络的基础模型和一般性原则,指导具体研究工作如何设计当前并不存在的网络.网络体系结构研究不倾向解决具体而孤立的问题,侧重在前瞻性思想的引导下探索系统性克服诸多根本问题且满足发展需求的基础性解决方案,是着眼未来中长期发展的研究任务.本文主要从互联网研究角度出发,大部分情形下所讨论的互联网体系结构应该是其狭义定义界定的范围.

1.2 互联网发展中的“不变”与“变化”

回顾互联网技术发展历史,几十年来体系结构保持相对稳定,有观点甚至认为骨化的网络体系结构僵硬得难以适应新业务发展需求.Geoff^[4]曾撰文总结互联网在2008—2018年这10年间发生的变化.整体性结论是:相较10年前,当前的互联网没有发生大的变化.网络基础设施倾向于抵制各种可能引起变化的企图和努力,成因被归结为:互联网规模增大,惯性质量也相应增加,抵抗变化的阻力也必然增加.参照梅特卡夫定理提出了一个命题:网络抵抗变化的固有阻力(或惯性质量)与用户数的平方直接相关.事实上,该命题描述互联网体系结构可能是恰当的,但互联网中的具体技术却一直在持续演化,方便运营商构建更好的网络,具体变化可大致概括为四个方面:

(1) 软件定义网络、虚拟化网路和网络功能虚拟化等基础设施层面引入的新技术,方便了网络管理,改善了应用性能,加强了安全或隐私保护.

(2) 网络处理器、可编程路由器和智能网卡等灵活的硬件设计模块便利了设备更新升级.

(3) 新协议开发增强了网络系统的安全性与可信性.

(4) 新流量管理策略与算法设计更好地适应了新应用需求,也改善了网络传输性能.

总结看来,互联网发展过程中宏观层面体系结构的骨化或停滞与微观层面具体技术创新升级之间存在内在冲突,“不变”和“变化”的张力在持续增加.

1.3 互联网发展面临的主要挑战

虽然互联网取得了巨大成功,却依旧面临着不小的技术挑战,主要表现在以下两个方面:

(1) 鲁棒性差,脆弱,不安全.较难有效抵抗各种攻击、欺骗和劫持;隐私保护机制不完善,容易造成信息泄漏;发生安全相关事件较难准确定位问责.

(2) 适应性弱.一些新应用对传输的实时交互性、确定性和可靠性等有较为苛刻的要求,主机间“尽力而为”的分组传输模型适应能力弱;以主机为主要参考对象的协议栈设计没有充分考虑端系统的多样性和异构性.

采用“自下而上”打补丁的方法,升级更新具体技术适应新业务和新终端的发展需要是一种技术途径;而采用“自上而下”完善体系结构,从根本性解决问题和克服挑战则被视为一种更有效的方法.

1.4 互联网体系结构研究的意义

体系结构是计算机学科的基础与核心.一定功能的计算机系统可由不同的组成结构实现,但性能上界通常由系统结构的特性决定.如何设计特定结构,实现预期功能,取得理想性能,一直是计算机学科研究的基础与核心问题.互联网的基础是计算机网络,作为计算机系统的一个主要组成部分,自然需要遵循计算机系统研究的一般规律.体系结构之于计算机和网络系统就如同构造学在建筑专业的作用和意义,砖混结构升级到框架结构的效能提升是显见的.研究网络体系结构对促进互联网发展的意义也在于如此.

网络体系结构指导原则下产生的设计通常具有通用性,往往有条件或能力成为系统性的解决方案,支持系列应用,也有机会凭借可重用性分摊成本,节省投资.作为提供基础服务的系统性解决方案,需要顺应发展趋势,同时支持可持续发展.如果没有相对稳定的核心理念支撑,任其自生自灭,随着时间的推移,其自身的基本属性可能会受到侵蚀或萎缩而无法自持,最终必会被替代.从这个角度分析,体系结构承担着网络技术在快速发展过程中定义和刻画其基本特征和属性的重要作用.

体系结构定义的准则会引导具体设计或技术向一致方向演进发展.失去体系结构设计原则的指导,具体设计有可能在短期目标的驱使下产生针对具体问题的单点解决方案.日积月累形成的系列单点解决方案可能会使整个系统逐渐变得复杂、不灵活甚至紊乱.此外,体系结构对业务的原生支持可使用户自动获得基

融服务,方便组合生成新业务.最后,体系结构的研究是有长期目标的长周期实践活动,也会产生短期衍生成果.但没有长期目标驱动的短期研究是较难对互联网发展产生深远影响的.自互联网诞生以来,经历长期的实践和研究,互联网体系结构领域已经总结出了不少类似“公理”的认识,成为指导互联网设计和发展的指导原则.“边缘论”^[5]就是其中较为知名的设计指导原则之一.秉持“智能”终端和“笨”网络的基本理念,使互联网设计采取了一条完全不同于传统电信网络的技术路线.一定程度上,互联网能发展到当今如此庞大的规模,“边缘论”蕴含的基本设计思想具有不可磨灭的贡献.协议栈分层模型^[3]是网络体系结构设计中另外一个重要的指导原则,方便在不同层的功能模块间实现隔离,利于在各功能子系统内部独立优化实现.其他如“命运共享”(Fate Sharing)原则和应用层成帧(Application Level Framing, ALF)^[6]等,都是互联网体系结构相关研究中取得的代表性成果,成为互联网体系结构的基本要素.“命运共享”原则可视为“边缘论”基本思想导出的推论,强调实体一旦丢失或损坏,与它相关联的状态信息丢失是无关紧要的.应用层成帧原则强调由应用层来负责将业务数据分割成基本操作单元,下层协议在处理数据时尽量保持分割单元的边界.该原则利于在异构物理链路上设计出开销小、灵活且高效的消息交互机制.

2 相关研究计划及主要结论

2.1 互联网络体系结构研究回顾

早在本世纪初,David Clark 等就认识到需要适时地重新审视互联网体系结构,研究是否有必要改变它以更好地适应当下和未来新需求^[7].2000年,美国国防部高级研究计划署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)资助了 NewArch 项目^[8],以探索如何重新设计互联网体系结构来满足现实和未来的需求.

2002年,美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)资助的一个由 Jim Kurose 作为主席的研讨会,产生了一份报告,明确肯定了在互联网基础设施领域进行颠覆性技术探索的价值,也指出了开展相关研究面临的挑战^[9].这份报告成为 NSF 后来资助互联网体系结构系列重大研究计划和重点项目的思想策源地,意图采用托马斯·库恩《科学革命的结构》^[10]一书主要观点,变革研究范式来应对金融、电网、交通流量管理等基础设施系统接入互联网后可能出现的诸如安全性和脆弱性等危机.

2003年,NSF 启动 Clean Slate 100×100 研究项目,采用“推倒重来”的思路设计全新网络,目标是用至少

100 Mbps 链路将 1 亿个(100 个百万)家庭用户接入互联网,同时用 1 Gbps 链路接入 1 百万个小企业.2005年,NSF 出资 3 亿美元实施“全球网络创新环境”(Global Environment for Networking Innovation, GENI)研究计划,旨在构建一个能连接所有设备的全新网络基础设施平台,激发技术创新,促进互联网发展,刺激经济增长.GENI 计划由研究项目和实验平台两部分组成:前者侧重研究创新网络技术,如内置安全机制和网络管理功能等,增强互联网的安全性和可管理性;后者的重点是搭建规模化网络实验床,接入异构设备或网络,部署和验证网络体系结构和技术方面的创新成果.2006年,NSF 的计算机和网络系统(Computer and Network Systems, CNS)分部在网络技术与系统(Networking Technology and Systems, NeTS)项目中发布了未来互联网设计(Future Internet Network Design, FIND)研究计划,分三个阶段资助更具协作、综合和包容的研究设想,不受以往设计思路的束缚或羁绊,为 21 世纪的互联网探索(可能是)激进创新的网络技术和体系结构.2009年,在完成了第一阶段的研究任务后,由 Vint Cerf 等专家组成的观察团对项目进行了评估,最终报告认为多数资助项目都涉及网络体系结构这一重要课题,且多采用“推倒重来”的技术路线,而不是对已有技术的渐进式改良.应该继续开展下一阶段的研究工作^[11].为此,2010年 NSF 启动了未来互联网体系结构(Future Internet Architecture, FIA)研究计划,在广泛征集研究建议书的基础上,最终资助了包括“移动优先”(Mobility-First),“命名数据网络”(Named Data Network, NDN),“可表达互联网体系结构”(eXpressive Internet Architecture, XIA),“星云”(Nebula)和“选择网络”(ChoiceNet)等 5 个项目,从不同侧面探索未来互联网体系结构,其中前三个项目因对网络体系结构做出了重要创新贡献,有必要在真实网络实验床上对原型系统进行功能验证和性能测试.2014年 NSF 对这三个项目按最初规划进行了最后一阶段资助^[12].

欧盟也相当重视互联网相关研究.2007年,在第七框架(FP7)中启动了“未来互联网研究和试验”(Future Internet Research and Experimentation, FIRE)研究计划^[13].FIRE 与 GENI 有类似的诉求:一方面致力资助在未来互联网体系结构和网络互连技术等方面进行长期而富有远见的实验研究;另一方面试图整合已有和新建设的网络测试床,形成大规模的网络实验平台,支持网络中长期研究.FIRE 还鼓励交叉学科研究,主张互联网本身不仅是一种技术,已成为一个复杂巨系统,其体系结构和技术的缓慢更新或激进变革可能会在经济和社会层面引起难以预料的影响或结果,比如伦理和法律等方面的问题.互联网的成功部分体现在它对人类

社会潜移默化的影响,同时人类社会可能会不断对互联网提出新的挑战,诸如网络与社会、经济等交叉领域的研究课题也属 FIRE 资助的范畴。

其他国家,譬如日本和韩国,也非常重视未来互联网的研究,分别于 2006 年和 2007 年启动了“未来互联网论坛”^[14]和“新一代网络促进论坛”^[15]。日本还规划描绘出了至 2020 年的下一代网络研究与发展路线图^[16]。

2003 年开始,中国也通过“国家重点基础研究发展计划”(973 计划)对互联网体系结构和网络技术的基础创新研究进行了长期连续资助,其中包括清华大学主持的“新一代互联网体系结构理论研究”(2003—2013 年),北京交通大学等单位承担的“一体化可信网络与普适服务体系基础研究”(2007—2011 年),上海交通大学等单位承担的“无线传感网络的基础理论及关键技术研究”(2006—2010 年)^[17],以及中科院计算所等单位承担的“面向服务的未来互联网体系结构与机制研究”(2011—2015 年)。

2.2 主要结论

NewArch 项目最终的总结报告指出:网络体系结构除需保持分层模块化的简洁性,也需充分考虑性能和安全性等功能要求。虽然传统互联网体系结构遵循的“边缘论”理念指导具体设计采用健忘性存储转发方式完成了将数据从源端传送到目的端的基本功能,但这一基本理念也受到了网络核心和边缘相冲突目标的挑战,未来网络体系结构的设计需考虑这一利益纠葛和争斗。同时,报告也总结出了当时互联网体系结构设计中的包括统计复用、边缘论和协议分层模型等 11 条第一性原理,以及分布式控制、全局路由计算和最小依赖性等 7 条第二性原理^[18]。Clark 在文献^[19]中重点讨论了利益互斥的相关者之间的“争斗”(tussle)将如何影响互联网发展,适应这种“争斗”对于互联网体系结构的发展至关重要,并方向性地提供了一些设计指导原则,包括:

(1) 为了保护成熟应用,能做的就是尽量避免“争斗”。

(2) 增强或完善现有成熟应用是必要的。

(3) 为新应用保持网络开放和透明是重要目标。

(4) 难以保持透明性的情形可能出现,需要给出相应的解决方案。

(5) 信息泄露或窥探将难以避免。

此外,还特别强调了机制与策略分离这一年代久远且起源不明的设计思想在未来互联网体系结构设计中的重要意义。设计的机制不应过分了依赖具体策略,而应允许使用系统的人调整机制以满足特定需求。

基于前期研究中所得理解与认识,Clark 研究团队尝试重构互联网体系结构,最重要的贡献是提出了“知

识平面”的概念^[20],是对平面化的协议分层模型的立体拓展,主要功能是收集网络状态的观测和配置信息构造网络行为模型,进行分析推理后生成响应,为网络中基本工作单元提供决策支持。有“知识平面”的辅助,网络可以适应状态或需求的变化,依照高级指令的定义进行组装,自动发现问题,分析和报告故障原因,并尝试自动修复。研究还特别指出,要使“知识平面”正真发挥作用,需依赖 AI 或认知系统工具的支持。2018 年,Clark 将自己和团队多年研究互联网体系结构的体会与所得整理成了专著 *Designing an Internet*^[21]。

Clean Slate 100×100 项目最重要的学术贡献之一则是提出了具有 4D 平面的网络体系结构^[22],奉行“推倒重来”的设计思想得到了一个全新设计,主张网络体系结构应该具有 4D 平面。其中决策平面(decision plane)负责所有与网络控制相关的决策,包括可达性、负载均衡、安全与访问控制和接口配置等;传播平面(dissemination plane)为网络节点设备连接到决策单元提供鲁棒可靠的消息交互机制;发现平面(discovery plane)则负责发现网络中的物理实体,并为它们产生逻辑标识;数据平面(data plane)则依据决策平面输出的状态操作独立分组。4D 网络体系结构的决策平面逻辑上可见全网视角的拓扑结构和实时流量。借助发现平面收集测量数据,可实现系统级的全局优化目标。决策平面可直接控制数据平面中的操作,无需对控制平面建模,将大部分控制状态和逻辑从设备中抽取出来方便实现简单协议,也利于采用强大的决策算法来实现复杂目标。

GENI 的目标是搭建虚拟的分布式网络实验环境来探索颠覆性网络技术,应对互联网日渐骨化僵硬的发展趋势。基于切片化和深度可编程能力等核心概念,GENI 为“推倒重来”的网络互连技术、协议设计与评价、分布式网内业务开发、社交网络、内容管理与分发以及网络安全等相关方向的研究拓展了实验研究空间和平台^[23]。OpenFlow 是 GENI 资助斯坦福大学的 Clean Slate 项目研究中对网络体系结构变革产生深远影响的概念。项目研究目标是“重塑互联网”,旨在改变日渐骨化的互联网体系结构,更新或修正不合时宜的设计,促进互联网进一步发展。OpenFlow 概念源自原型系统 Ethane^[24],它将以流为基本操作单元的以太交换机和集中控制器集成耦合在一起,允许网络管理员定义全网范围内的细粒度管理规则,然后直接部署实施。Ethane 在斯坦福校园网上管理三百多台主机,正常运行了近四个月。在其研发和部署经验的启发下,项目负责人 Nick McKeown 和多位网络领域有影响力学者一起抽象凝练,提出了 OpenFlow 概念。在《ACM 计算机通信评论杂志》上联合署名发表了立场性论文“OpenFlow: En-

abling Innovation in Campus Networks”^[25]. OpenFlow 之于网络体系结构研究的最大贡献是它将传统网络设备数据平面和控制平面进行了解耦分离,通过集中式控制器以标准化接口对网络设备进行管理和配置,为网络资源动态管理与配置提供了更大空间,方便促进网络革新与新应用开发. 略有不解的是,不知出于何种考虑,论文标题将这种革新限制在了校园网范畴. OpenFlow 主张的集中式控制模式是对传统互联网体系结构倡导和坚持的分布式控制的一次突破性尝试. 作为对 OpenFlow 概念内涵中数据与控制平面分离以及集中式控制等理念的继承与发展,一时间涌现出了不同的控制器平台,程序员们在控制器上尝试开发了很多应用,包括动态访问控制、服务器负载均衡、网络虚拟化、能耗有效的网络管理策略、虚拟机无缝迁移和用户移动管理等^[26].

随后,软件定义网络(Software Defined Network, SDN)概念出现. Google 的广域网流量管理系统^[27]和 Nicira 的网络虚拟化平台^[28]取得商业成功,并都宣称采用了 SDN 技术. 之后大型信息技术公司,如云运营商、电信运营商、设备制造商和金融服务公司共同发起成立了一个对 SDN 发展影响深远的组织,即开放网络基金会(Open Networking Foundation, ONF). SDN 是 GENI 项目孕育出的革新互联网体系结构的重要成果,它继承了 OpenFlow 解耦分离控制和数据平面的基本思想,同时整合了控制平面的功能,使同一软件程序可以控制多个数据平面的工作单元,赋予网络设备更丰富、更有力的可编程性. Raghavan 等意识到网络基础设施和体系结构的紧耦合导致任何体系结构的改变都需要设备厂商和运营厂商付出可观研发和部署成本,阻碍了体系结构演进,为此他们继承 SDN 的基本思想,将体系结构从网络基础设施中解耦出来,提出了软件定义互联网体系结构的设想(Software Defined Internet Architecture, SDIA)^[29]. 采用多协议标记交换技术区分核心与边缘网络,在边缘引入控制器,利用边缘路由器的软件转发能力,使新的多样的网络体系结构得以方便部署. 此外,SDIA 将使体系结构与网络业务之间鲜明的边界模糊化,利于新业务的开发和部署^[29].

未来互联网体系结构(FIA)研究计划资助的 5 个项目多采用“推倒重来”的技术路线,从不同侧面探索未来互联网体系结构的设计.

“移动优先”项目^[30]干净清晰地将移动终端的名字或标识从网络地址或位置中分离出来,以此增强对移动性的支持;通过引入充分可扩展的分布式全局名字服务系统实现了标识和地址绑定,并进一步提供内生验证方式增强了安全性,同时也方便了移动业务开发. 项目组成员总结经验时认为,研究中最具洞察力的认

识是引入逻辑上集中式的全局命名系统,这对增强移动性和安全性的具有非凡价值.

“命名数据网络”项目^[31]的基本思路源自 2006 年 Van Jacobson 提出的“以内容为中心”的网络(Content-Centric Networking, CCN),主要研究如何从以主机为中心的网络体系结构向以数据为中心的网络体系结构转变. NDN 通过命名数据而不是位置将数据本身视为网络中的第一类实体,主张保护数据本身,而不是像传统互联网那样保护数据容器. 由此将对数据的信任从对主机的信任中分离出来,同时也提供了诸如面向内容的缓存等优化通信效率的机制. NDN 面临的主要技术挑战在于可扩展路由、快速转发、可信模型和安全、内容与隐私保护等方面.

“可表达互联网体系结构”项目^[32]对传统互联网“细腰”模型中的网络层赋予了可演化能力,支持高层或底层技术的演进,定了一些可普遍使用的类标识支持具有内生安全的可表达、可演化和可信任的操作,方便升级或更新网络基础功能,以及开展新体系结构设计. 为解决体系结构演化过程中增量部署的问题,XIA 在网络层借助翻译技术解决了分组路径上可能遇到异构体系结构的问题.

“星云”项目^[33]侧重研究支持云计算的未来互联网体系结构,建议采用高可靠路由器和支支持可扩展控制平面实施定制策略的多路径来为云计算环境提供弹性网络服务.

“选择网络”项目^[34]探索在体系结构中引入“经济平面”来方便运营商为客户提供新业务. 建立经济与网络业务间不同时间尺度的关联,方便用户在业务的替代方案中进行理性选择,利于网络业务提供商之间形成良性竞争,促进良好生态的建立和技术进步.

2.3 观点与认识

总结已有相关研究,不难获得一些有关网络体系结构研究的宏观认识与体会,不管是正面的经验,还是负面的教训,都将对未来互联网研究产生积极作用.

2.3.1 网络体系结构的相对稳定与持续演变

网络体系结构,特别是其狭义定义中作为设计指导原则的核心理念,在互联网取得巨大成功的背景下通常是被普遍推崇和推广的.“边缘论”和分布式控制就是两个被普遍接收和遵循的设计准则. 回顾历史,主动网络^[35]符合“推倒重来”的理念,嵌入分组中的移动代码为用户在网络中提供了计算能力,使网络节点从比特流的“搬运工”变成了有处理能力的计算引擎,使网络应用软件的开发摆脱了现有体系结构下固有模式的制约,加速了新业务、新应用的开发和部署^[36]. 但当时却受到了很大质疑,人们认为主动网络赋予网络的可编程能力违背了“边缘论”的核心思想,坚持主张与

应用相关的功能应该提升到最接近应用层的位置实现,位于较低层的功能实现是冗余甚至可能是无价值的,最多有利于性能的增强。虽然也有学者肯定主动网络的探索,认为可编程能力能使网络恰如其分地实现客户所需要的业务,从根本上与“边缘论”的思想相一致。考虑安全等综合因素,主动网络方向的探索最终没有得以坚持。但主动网络倡导的网络可编程能力被随后出现的 OpenFlow 和 SDN 所吸收采纳,在不同层面采用不同方式进行了实践。换言之,虽然主动网络、OpenFlow 和 SDN 都在一定程度上挑战了“边缘论”的设计理念,但互联网体系结构在发展过程中对它们却表现出了不同的接受程度。这也意味着狭义网络体系结构定义中的设计思想或准则并非一成不变,而是在相对稳定的前提下不断调整以适应技术和应用发展需要的。互联网发展过程出现了越来越多的功能性 Middlebox, 网内计算(In-Networking Computing, INC)等概念在数据中心网络等特定场景下的出现和兴起也从不同侧面揭示互联网体系结构发展过程中的内在规律。早期互联网的设计者从实践中摸索总结出的分布式控制模式,被后来的设计者在很长一段时间内不加质疑地沿袭,几乎成为网络控制与管理协议的经典实现范式。但多协议标记交换等技术引入集中控制器,并被工程实践证实可行,后来的 OpenFlow 和 SDN 也广泛采用了集中控制模式。Clark 在 NewArch 项目总结报告将分布式控制归纳为网络体系结构设计思想中 7 条第二性原理之一也不再具有坚实可靠的事实依据。互联网体系结构和其设计指导思想与原则,在较大时间尺度上在保持相对稳定的前提下不断演化发展既是客观事实,也是需要遵从的内在规律。

2.3.2 “革命式”或“演进式”发展路线

在互联网体系结构如何适应发展需要进行创新这一基本问题上,有两种不完全相同的认识和观点。一种观点坚持“推倒重来”的全新设计思路,主张采用不受当前互联网设计思想的禁锢,采取崭新的技术路线,提出适合未来互联网发展需要的全新体系结构,从性能、安全、可信、鲁棒和可靠等多个层面使未来互联网得以完善或升级,甚至是革新。另一种观点则认为网络体系结构的研究需要理解和认识当前互联网的行为,确认存在或即将出现的问题与挑战,在一定的约束或限制下寻求可能的解决方案。其中的约束主要来自两个方面:

(1) 后向兼容性。新的解决方案需要与传统互联网体系结构保持互操作,并支持无缝平滑过渡。

(2) 可增量部署性。新技术即便不能全局部署,但早期实施者应获得可见的利益。

前一种观点是互联网及其体系结构的研究允许采用激进的“革命式”技术路线;后一种观点则相对保守,

在认同需要发展变化的基础上,支持“演进式”改良路线。支持“革命式”发展路线的理由是互联网虽然取得了巨大成功,但网络技术本身依旧年轻而没有发展成熟,不应受当前互联网设计的禁锢或约束^[37]。Clean Slate 研究计划是支持“革命式”发展路线的。底层逻辑是试图通过研究范式的变革来解决面临的危机。支持“演进式”改良路线的理由主要出于价值和成本的考虑。任何新的技术要是不能直接或间接提供当前技术所无法提供的有足够价值的新业务,同时还要付出可观的迁移成本,则通常难以被最终采纳和部署^[37]。回顾网络研究历史,崭新的技术最终没有得以应用的例证不乏其数,缺乏后向兼容性和不支持增量部署而导致附加成本抵消可能带来的价值是被放弃的主要原因之一。

还有一种观点则认为:科学理论需要革命性创新,而工程技术则应该渐进式演进。互联网是一个人造的复杂巨系统,虽然有关它的研究中可能包含着理论的要害和成分,但更多是需要解决的技术问题。放弃当前已具备相当规模的互联网基础设施,采用革命性技术方案进行重建,即便不考虑经济成本因素,仅就任务的艰巨性而言也是难以估量的。

值得注意的是,无论持那种观点,网络研究共同体在创新网体系结构设计,促进互联网发展这一基本点应该取得了近乎一致的共识^[38]。总结已有研究实践的经验和教训,“演进式”技术路线应该得到了更多认同。虽然 OpenFlow 和 SDN 是在 Clean Slate 研究项目资助下取得的成果,但分析其技术要素的特征,能得到普遍接受并在工程实践中部署实施,具备后向兼容和可增量部署是不可或缺的属性,也就是说它们在一定程度上暗合了“演进式”技术路线的内在发展规律。

3 最近的研究进展

互联网体系结构研究经历一个时期的密集性探索实践后,进入争论、反思和再认识阶段,后经历了短暂沉寂,于 2015 年前后再一次得到各国政府、学术界和工业界等多方面的关注和重视。

3.1 未来互联网研究计划

欧盟地平线 2020 计划资助未来互联网研究,旨在促进网络和计算基础设施的技术创新,解决关键问题,加速互联网发展。该计划在信息通信技术专题 5 (Information and Communications Technology 5, ICT5) 中规划了“智能网络和新型互联网体系结构”研究计划,主要从可演进互联网 (Evolutionary Internet) 和前瞻性互联网 (Visionary/Clean Slate Internet) 两大方面持续资助互联网相关研究。2020 年欧盟又启动了下一代互联网^[39] (Next-Generation Internet, NGI) 计划,愿景是 2030 年建立更加民主、有弹性、可持续、可信和包容的互联

网,塑造欧洲数字化未来。

美国新近对网络研究和基础平台建设资助主要集中在研发和建设能源科学网络(ESnet)^[40]。ESnet是一个用于科学发现和研究的性能网络基础平台,能源部出资,伯克利劳伦斯国家实验负责建设和管理。2017—2022年执行了ESnet第6期的研发和建设任务。ESnet6在网络体结构探索和新技术研发上做出了很多创新的努力与实践。2021年NSF资助了一个新的网络体系结构研究项目,探索在ESnet平台上如何实现可扩充互联网(extensible Internet),更好地服务科学研究。思科公司的研究人员则提出了“可预测互联网”的研究动议^[41]。

2021年,中国在重点研发计划启动了“多模态网络与通信”专项,开展全维可定义的多模态智慧网络体系的相关研究,重点解决现有网络体系结构僵化、难以适应多样业务的不同需求、应对未知威胁的脆弱性等基础问题,通过网络体系结构的全维度可定义和各功能子层的多模态支持,完善网络功能、性能、效能、安全等属性,最终实现灵活支持新型网络技术的多模态智慧网络愿景^[42]。

3.2 研究进展

欧盟地平线2020计划资助的“智能网络和新型互联网体系结构”研究项目开始于网络体系结构“革命式”或“演进式”技术路线的争论期,对两条技术路线的相关研究都给予了一定支持,如延时容忍网络、敏感业务网络、信息为中心网络和对象与人的网络等课题倾向于激进革新,而网络管理与控制、软件定义网络、网络虚拟化、绿色互联网、内容分发和网络编码等方向则侧重演进。

下一代互联网(Next Generation Internet, NGI)的使命是重新构想和设计下一代互联网,反映人类的基本价值观,塑造欧洲数字化未来^[43]。技术目标是研究如何扩展或重构协议栈分层模型来实现下一代互联网。2020年发布了项目工作报告,纲领性阐述了基本设计理念和构想,认同协议分层模型在传统互联网设计中发挥的不可替代的作用,同时也指出单纯的技术视角无法满足未来互联网在社会和人文方面的诉求。构建更加民主、有弹性、可持续、可信和包容的下一代互联网需同时考虑社会和技术两方面的因素。基于此考虑,重构了传统的协议栈分层模型,为下一代互联网定义出了新参考模型。虽然沿用了开放系统互连模型的7层基本结构,但各层的功能被重新定义,引入了一些新的功能层,省略或合并了一些已有的功能层。新的分层模型自顶向下依次是“社会影响层”“信息层”“应用层”“技术和软件开发层”“数据和传输层”“标准、协议和互联网管理层”和“物理基础设施和硬件层”。依照新参考模型设计的下一代互联网除提供

传统互联网的基本功能外,还将采用跨层协同工作的方式支持互联网向“民主”“有弹性”“可持续”“可信”和“包容”等属性的方向演进。

能源科学网络(ESnet6)^[40]提出了“空心”的概念性体系结构,强调网络核心与边缘的功能分离。负责传输的核心网络需支持带宽的持续扩展,利用软件定义网络的可编程能力实现按需分配带宽,以及网络状态和性能监测。同时,流量工程技术对故障和不均衡负载等异常状态保持有弹性的适应能力。承载业务的边缘网络也需具备可编程能力,同时网络功能虚拟化和业务链,方便设备的管理与控制、新业务开发,业务的动态实例化以及根据业务需求动态分配和调整资源,保障业务QoS需求。ESnet6在自动化业务编排、测量、运维和管理等方面也进行了探索和尝试^[44],提供数据缓存、流量遥测、流量前缀监测、过滤和重定向、DDoS探测和防御、L2/3虚拟私有网络等特色网络服务。ESnet6于2020年10月正式上线运行,成为服务科研研究的先进网络的实验床,骨干链路带宽达到1 Tbps。分层体系架构和端到端可编程网络技术为在网络基础设施上跨管理域构建自动化平台按需定制业务提供了技术条件,同时也能实施高精度的状态与性能遥测,安全性也得以显著增强^[45]。

可预测互联网^[41]的基本设计思想是通过统计或机器学习的方法建立数据驱动模型来较为准确地预测网络短期或中长期的运行状态或动态行为,进而有条件积极主动地采取针对性措施,避免可能的失效或差错给网络性能和用户体验带来负面影响。网络体系结构如何支持不同资源粒度和不同时间尺度的状态观测,训练能进行准确预测的模型是该项研究需要解决关键问题,也是实现自愈网络或自动化运维网络的基础。

学术界在互联网体系结构的探索也有新的进展。斯坦福大学的研究者提出自编程网络(Self-Programming Network, SPN),可以看成是对SDN概念的深化与拓展,主张为网络提供感知、学习、推理和控制的基本能力来实现网络系统自治,并以数据中心网络为背景提出了一种以网卡为中心的SPN原型系统。为运营商提供更加开放的编程接口,打破骨化的体系结构对新业务开发和部署的制约也被认为是一种演进网络体系结构的途径^[46]。加州大学伯克利分校网络与系统研究小组提出了一种支持互联网体系结构长期演进的技术框架Trotsky,使互联网体系结构支持可扩充性(extensibility),方便对现有互联网体系结构进行后向兼容性改造,支持新网络体系结构的增量部署,由此互联网的功能不再唯一由“细腰”模型定义,而是由共存的多个体系结构的实例联合定义。该体系结构的可扩充性将从根本上改变互联网的基本属性,为创新和发展提

供了更大空间^[47]。Trotsky 支持多个网络体系结构实例共存,主要设计思想是将域互连解构成不同性质的任务。域内保持传统的三层(L3)互连,而在域的边界节点上部署增强节点,在三层上引入子层(L3.5)实现域间互连。

基于 Trotsky 的提供的可扩充性能力,Balakrishram 等又进一步提出可扩充互联网(Extensible Internet, EI)的研究动议^[48]。主要思想是支持新功能与服务的动态可扩充应该是互联网体系结构的一种基本属性。同时,体系结构的演进应保证向后兼容,使新功能组件能与已有的功能模块协调运行和和谐共生。与早期研究可扩展互联网(Scalable Internet, SI)的动机不同, EI 强调互联网如何支持更多新功能和业务,而 SI 则侧重研究如何接入异构网络和设备,提升互联网的规模。EI 研究动议一方面来自 Trotsky 提供的技术支持,同时也受到内容分发网络(Content Delivery Network, CDN)和数据中心网络(Data Center Network, DCN)研究实践中所获经验与认识的启发。CDN 中在接近用户的节点上实施网内缓存和离线处理很大程度上优化了应用性能。DCN 中开发新技术并演进网络体系结构的尝试得到了规模化商业应用的验证。这些成功的努力都没有受到传统互联网骨化细腰模型的制约和限制。文献^[48]仅阐述了 EI 的研究动议,初步给出了顶层概念设计,未来还需要深入的具体研究工作来丰富和完善。

国内有关多模态网络的研究刚刚展开。邬江兴院士总结了现阶段互联网发展面临的主要挑战,并对新型网络的技术特征进行了思考,认为“开放基因”“功能基因”“效能基因”和“鲁棒基因”是应以内生方式为新网络发展提供持续演进动力^[49]。

4 若干思考与认识

4.1 网络体系结构的设计假设

互联网作为一种典型的人造复杂系统,设计有特定的历史背景,自然会默认不少前提条件,暗含一定假设。设计之初,一致利益共同体对主机形态的端系统可信假设有一定的合理性。进入商业应用后因缺少内生安全机制产生危机也是必然。体系结构研究需要在不同发展阶段对设计的前提条件和假设进行反复且仔细审视。互联网体系结构中的“尽力而为”传输模型虽因难以支持实时性业务而被不断质疑,或许是因为有“带宽过量预约”^[50]和“码率自适应”^[51]等解决方案缓解矛盾冲突,质疑声也逐渐平息。未来工业互联网应用传输高可靠性和确定性的苛刻需求能否再一次找到补救性解决方案,目前来看依旧是未知的。是否需要放弃体系结构中已有的前提和假设,扩展业务传输模型是一个值得研究问题。此外,在主机作为端

系统主要形态的背景下设计的协议栈能否适应包括虚拟机、容器、智能电话和嵌入式设备等异构端系统构成的复杂环境,也是未来互联网体系结构研究需要关注的问题之一。

4.2 网络体系结构的设计目标

网络体系结构研究的目标难以定义得足够清晰,实际研究工作需多采取实用主义方法论,尽可能避免陷入“大而不当,小而无用”的窘境。解决互联网发展过程中面临的基础性问题、严峻性技术挑战和适应新应用和新计算范式的需求是网络体系结构研究需要考虑的首要原则。云计算推动了数据中心网络体系结构的演进。边缘计算^[52]已初步显现出流行普及的趋势,未来互联网体系结构如何适应这一新计算范式是一值得重视的开放课题。AR/VR 和元宇宙等是具有潜力的互联网新应用,体系结构如何演化更好地适配这些富有技术挑战的新应用也是一个需要深入思考的问题。物联网和工业互联网最终融入互联网基础设施平台是可以预见的未来。如何演进体系结构,提供基础服务以增强传输的可靠性和确定性,是一体化融合网络需要考虑的问题。开展互联网体系结构研究需要考虑商业实践的实际情况,遴选有挑战且有潜力的特色应用展示创新演进的价值和力量,否则容易陷入泛泛的纯学术讨论或空谈。

4.3 网络体系结构的演进方式

网络体系结构的演进式技术路线得到较为普遍的认同。演进本身也有两种不同方式。一种是系统以大体恒定的速度保持缓慢变化,可称之为渐进演进。另一种则是较长时间保持相对稳定,却在短时间内发生剧烈变化。生物学中将这种演变称为间断平衡^[53]。就已有的事实观察,采用间断平衡模型描述互联网体系结构的演进更为贴切。此外,演进意味着需要考虑历史积累,因此保持后向兼容性是可演进的互联网体系结构在技术层面无法摆脱的约束。还有,工程领域通常设计的目标是性能优化,可演进网络体系结构的设计不应该以此为首要目标,而应以支持演化本身为第一要义。不能只强调短期性能优化而影响体系结构的长期演化。演进体系结构的根本目的是疏解外界环境或条件变化带来的困境,满足新应用需求。环境或条件保持不变,且完全可知的前提下,优化有可预期的成效。但如果环境变化或条件未知,探求预设优化目标的努力很可能得不偿失,甚至是产生方向性错误。

4.4 网络体系结构分层模型的扩展

回顾互联网体系结构的研究历史,有不少经验和启发值得未来研究重视。网络体系结构的协议分层模型是复杂系统设计中奉行“分而治之”理念的结果,形

式上呈现为系统的模块化设计. 每个模块负责一定功能, 实现特定目标, 是整个系统中相对独立或自治的一部分. 不同的模块连接或耦合在一起可以实现更为复杂的功能, 这一点是模块化设计利于系统实现可演进性的优势. 与之相对应的一体化设计方法在试图为增加部分新功能而改变整个系统时可能涉及更多内部的调整或更新而阻碍整个系统的演化进程. 总结网络体系结构的成功研究案例, 有一个共性特征值得注意, 即其输出成果都会在一定形式表现为对分层模型的完善或拓展. 譬如, 引入功能性平面或子层、分离解耦不同功能的平面和立体性扩展等. 抽象应用需求, 定义相应的功能子层或引入必要的平面是网络体系结构研究实践中值得借鉴的方法. 结合“知识平面”^[20]基本思想, 引入 AI 技术, 演进网络体系结构实现网络自动化管理是一个值得期待的研究方向.

4.5 网络体系结构中的控制模式

自互联网诞生以来, 分布式控制一直被奉为圭臬. 单点失效是集中式控制的固有硬伤, 分布式控制对孤立的组件功能失效有较强的容错能力, 同时也利于系统规模可扩展性的实现. 这两点都是互联网早期设计相当注重的技术目标, 青睐分布式控制模式也是自然选择. 随着 MPLS 和 SDN 等新技术在局部引入集中式控制获得成功, 互联网体系结构设计不再强调单一控制模式已是事实, 未来集成集中式和分布式优点的集散(decentralized)控制模式是否有更大发挥空间是一个值得探讨和思考的基础问题.

4.6 网络体系结构受微观技术创新的影响

网络体系结构的研究通常采用“自上而下”设计方法, 微观层面的技术创新需要自治宏观层面体系结构的设计思想, 但微观技术对宏观体系结构的反作用力也不容被忽视.

分段路由^[54]作为一种源路由技术, 因其在支持扩展业务时无需对网络节点进行繁琐复杂的配置, 有良好的扩展性而得到了普遍关注. 在数据平面通用编程模型的支持下, 读取嵌在分组头中的指令序列, 进行相应的分组处理和转发, 实现特定网络功能. 段路由技术与 IPv6 和 MPLS 的结合, 以及渐进部署和实施将如何影响网络体系结构演化, 是值得关注的问题.

OpenFlow 是作为一种独立的技术创新而出现的, 最终却导致了控制平面与数据平面分离的设计原则, 对体系结构的研究产生了深刻影响. SDN 则增强了分离出来的控制平面的可编程能力, 加速了数据中心网络和广域网演进的进程. P4^[55]为数据平面赋予的可编程能力方便了创新应用的开发与部署, 能在真实运营的网络环境中尝试和测试新的网络应用^[56], 但其

对网络体系结构的影响有待进一步观察、发现和挖掘.

Linux 内核的快速数据通路(eXpress Data Path, XDP)框架^[57]给端系统赋予的可编程能力为协议栈加速和虚拟化网络性能优化提供了机会, 如何影响主机网络设计及其体系结构演进同样是一个值得关注的问题. 联合网络节点和端系统上的深度可编程能力给网络管理与控制带来更大空间^[58].

新的网络遥测技术^[59]支持细粒度的实时网络状态监测, 基于状态信息的动态管理利于改善网络性能、可用性、安全和效率. 如何在体系结构层面提供遥测能力, 挖掘 4D 中“发现平面”的潜力^[22], 并加以利用优化网络管理, 有待深入研究.

5 展望

互联网无疑是人类历史上发明的最具影响力的人造复杂巨系统, 深远而深刻地改变了和正在改变着人类文明和生活. 迄今为止, 这一基础设施上已经接入了近三百亿台设备, 为全球超五十多亿的用户服务, 平均每天生成和传输着约十几艾字节的比特流量^[60], 其带宽超摩尔定律的发展趋势没有放缓迹象, 触角依旧在不断地延伸扩展, 孕育出层出不穷的新应用改变着我们的生活. 渐进演进正在骨化的互联网体系结构, 适应新计算模式和新应用发展需要是被普遍认同的基本观点. 前瞻性地评估未来互联网的发展趋势, 预测主流计算模式和主导性应用, 分析归纳相应的技术目标和设计约束, 重新审视现存设计中不切实际或不合理的假设与前提, 采取“自顶向下”和“自下而上”相结合的方式, 以需求为牵引, 在微观技术创新的驱动下, 归纳和抽象互联网演进过程中需要拓展的基础功能要素, 采用可行的方案扩展和更新协议分层模型, 将拓展的基础功能固化到设计参考模型中, 保持后向兼容性的条件下实现可增量部署, 从体结构层面循序渐进地提升互联网支持新应用和新需求的能力, 是一项复杂且具挑战性的研究任务, 需要学术界、工业界和标准化组织等多方的紧密合作, 共同探索符合客观规律的互联网体系结构演进蓝图, 攻克核心关键技术, 促进未来互联网的蓬勃发展.

致谢 感谢在华为三丫坡技术论坛上领域专家对本文的提纲和主要观点给予的建设性评价和意见. 同时, 也感谢华为南京研究所的多位技术专家们认真阅读了论文初稿, 并提供了宝贵的意见和建议.

参考文献

[1] TANENBAUM A S, NICK FEAMSTER, DAVID

- WETHERALL. Network Computer[M]. 6th Edition. New York: Pearson Education, 2021: 31.
- [2] KUROSE J F, ROSS K W. Networking Computer: A Top-Down Approach[M]. 8th Edition. New York: Pearson Education, 2020: 47.
- [3] CLARK D D, TENNENHOUSE D L. Architectural considerations for a new generation of protocols[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1990, 20(4): 200-208.
- [4] GEOFF H. Another 10 years late, the ISP column[EB/OL]. (2007-11-01)[2023-10-05]. <https://www.potaroo.net/ispcol/2007-11/nanog.pdf>.
- [5] SALTZER J H, REED D P, CLARK D D. End-to-end arguments in system design[J]. ACM Transactions on Computer Systems, 2(4): 277-288.
- [6] CLARK D. The design philosophy of the DARPA Internet protocols[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1988, 18(4): 106-114.
- [7] BRADEN R, CLARK D D, SHENKER S, et al. Developing a next-generation Internet architecture[EB/OL]. (2000-07-15) [2023-10-05]. <https://groups.csail.mit.edu/ana/Publications/DevelopingaNextGenerationInternetArchitecture.pdf>.
- [8] BRADEN B, CHIAPPA N, CLARK D, et al. Newarch project: Future-generation internet architecture[EB/OL]. (2003-01-01)[2023-12-03]. <https://www.isi.edu/newarch/>.
- [9] BRADEN B, GERLA M, KUROSE J, et al. NSF Workshop on Network Research Testbeds[R/OL]. (2002-10-01) [2023-11-03]. http://gaia.cs.umass.edu/testbed_workshop.
- [10] KUHN T S. The Structure of Scientific Revolutions[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1962.
- [11] CERF V, DAVIE B, GREENBERG A, et al. FIND Observer Panel Report[R/OL]. (2009-04-01) [2023-08-03]. http://www.nets-find.net/FIND_report_final.pdf.
- [12] FISHER D. A look behind the future Internet architectures efforts[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 45-49.
- [13] GAVRAS A, KARILA A, FDIDA S, MAY M, et al. Future internet research and experimentation: The FIRE initiative[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(3): 89-92.
- [14] FIF. Future Internet forum (FIF) [EB/OL]. (2007-05-01) [2023-12-03]. <http://www.fif.kr/>.
- [15] YANO H. The new generation network promotion forum and its activities[J]. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 2015, 62(2): 209-214.
- [16] NISHINA, GA N, HARAI H. Progress and results of new-generation network research and development[J]. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 2015, 62(2): 7-13.
- [17] 吴建平, 刘莹, 吴茜. 新一代互联网体系结构理论研究进展[J]. 中国科学E辑, 2008, 38(10): 1540-1564.
- WU J P, LIU Y, WU Q. Research progress on architecture theory of the new generation Internet[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2008, 38(10): 1540-1564. (in Chinese)
- [18] CLARK D D, SOLLINS K, WROCLAWSKI J, et al. New arch: Future Generation Internet Architecture[R/OL]. (2003-12-01) [2023-05-03]. <https://www.isi.edu/newarch/iDOCS/final.finalreport.pdf>.
- [19] CLARK D D, WROCLAWSKI J, SOLLINS K R, et al. Tussle in cyberspace: Defining tomorrow's Internet[C]//IEEE/ACM Transactions on Networking. Piscataway: IEEE, 2005: 462-475.
- [20] CLARK D D, PARTRIDGE C, RAMMING J C, et al. A knowledge plane for the Internet[C]//Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM, 2003: 3-10.
- [21] CLARK D D. Designing an Internet[M]. Cambridge: The MIT Press, 2018.
- [22] GREENBERG A, HJALMTYSSON G, MALTZ D A, et al. A clean slate 4D approach to network control and management[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2005, 35(5): 41-54.
- [23] BERMAN M, CHASE J S, LANDWEBER L, et al. GENI: A federated testbed for innovative network experiments[J]. Computer Networks, 2014, 61: 5-23.
- [24] CASADO M, FREEDMAN M, PETTIT J, et al. Ethane: Taking control of the enterprise[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(4): 1-12.
- [25] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69-74.
- [26] FEAMSTER N, REXFORD J, ZEGURA E. The road to SDN: An intellectual history of programmable networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(2): 87-98.
- [27] JAIN S, KUMAR A, MANDAL S, et al. B4: Experience with a globally-deployed software defined WAN[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 Conference on

- SIGCOMM. New York: ACM, 2013: 3-14.
- [28] NICIRA. VMware NSX[EB/OL]. (2012-08-01)[2023-05-03]. <http://nicira.com/en/network-virtualization-platform>.
- [29] RAGHAVAN B, CASADO M, KOPONEN T, et al. Software-defined Internet architecture: Decoupling architecture from infrastructure[C]//Proceedings of the 11th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM, 2012: 43-48.
- [30] VENKATARAMANI A, KUROSE J F, RAYCHAUDHURI D, et al. MobilityFirst[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 74-80.
- [31] ZHANG L X, AFANASYEV A, BURKE J, et al. Named data networking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 66-73.
- [32] D NAYLOR, PETER STEENKISTE, MK MUKERJEE, et al. XIA: Architecting a more trustworthy and evolvable internet[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 50-57.
- [33] ANDERSON T, BIRMAN K, BROBERG R, et al. A brief overview of the NEBULA future Internet architecture[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 81-86.
- [34] WOLF T, GRIFFIOEN J, CALVERT K, et al. ChoiceNet: Toward an economy plane for the Internet[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 58-65.
- [35] TENNENHOUSE D L, WETHERALL D J. Toward an active network architecture[C]//Proceedings Volume 2667, Multimedia Computing and Networking 1996. San Jose: SPIE, 1996: 2-16.
- [36] 任丰原, 任勇, 山秀明. 主动网络的研究与发展[J]. 软件学报, 2001, 12(11): 1614-1622.
REN F Y, REN Y, SHAN X M. Research and development of active network[J]. Journal of Software, 2001, 12(11): 1614-1622. (in Chinese)
- [37] REXFORD J, DOVROLIS C. Future Internet architecture [J]. Communications of the ACM, 2010, 53(9): 36-40.
- [38] KOPONEN T, SHENKER S, BALAKRISHNAN H, et al. Architecting for innovation[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(3): 24-36.
- [39] NGI. Next generation Internet[EB/OL]. (2023-05-03)[2023-12-03]. <https://www.ngi.eu>.
- [40] ESnet. Energy sciences network[EB/OL]. (2015-01-01)[2023-12-03]. <https://www.es.net>.
- [41] VASSEUR J P. Towards a predictive Internet[EB/OL]. (2021-09-01)[2023-12-03]. <https://techblog.cisco.com/blog>.
- [42] 胡宇翔, 伊鹏, 孙鹏浩, 等. 全维可定义的多模态智慧网络体系研究[J]. 通信学报, 2019, 40(8): 1-12.
HU Y X, YI P, SUN P H, et al. Research on the full-dimensional defined polymorphic smart network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(8): 1-12. (in Chinese)
- [43] European Commission. Next generation Internet initiative [EB/OL]. (2023-05-27)[2023-12-03]. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/next-generation-internet-initiative>.
- [44] GUOK C, GIUNTOLI P. ESnet6: Building tomorrow's big science networks[EB/OL]. (2016-11-30)[2023-07-10]. https://tnc17.geant.org/getfile/tnc17_paper_ESnet6TNC17FINAL_30Nov2016.pdf.
- [45] KINCADE K. ESnet launches next-generation network to enhance collaborative science[EB/OL]. (2022-10-11)[2023-05-03]. <https://newscenter.lbl.gov/2022/10/11/esnet-launches-next-generation-network/>.
- [46] GENG Y L, LIU S Y, WANG F R, et al. Self-programming networks: Architecture and algorithms[C]//2017 55th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). Piscataway: IEEE, 2017: 3-6.
- [47] MCCAULEY J, HARCHOL Y, PANDA A, et al. Enabling a permanent revolution in Internet architecture[C]//Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM, 2019: 1-14.
- [48] BALAKRISHNAN H, CULLER D, ESTRIN D, et al. Revitalizing the public Internet by making it extensible[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2021, 51(2): 18-24.
- [49] 邬江兴. 新型网络技术发展思考[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(8): 1102-1111.
WU J X. Thoughts on the development of novel network technology[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2018, 48(8): 1102-1111. (in Chinese)
- [50] Nature Electronics. Take it to the edge[EB/OL]. (2019-02-03)[2023-12-03]. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0203-8>.
- [51] MCCABE J. Over-provisioning vs QoS[EB/OL]. (2008-10-25)[2023-12-03]. <https://people.cs.rutgers.edu/~rmartin/teaching/fall08/cs552/position-papers/014-01.pdf>.
- [52] 3GPP SP-090710. Adaptive HTTP Streaming in PSS[EB/OL]. (2010-01-01)[2023-12-03]. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/26234-CRs.htm>.
- [53] ELDREDGE N, GOULD S J. Punctuaulibria: An alternative to phyletic gradualism[M]//Models in Paleobiology (Ed.1972). San Francisco: Freeman, Cooper & Company, 1972.

- [54] FILSFILS C, DUKES D, PREVIDI S, et al. IPv6 segment routing header: RFC 8754[S]. Fremont: Internet Engineering Task Force, 2020.
- [55] BOSSHART P, DALY D, GIBB G, et al. P4: Programming protocol-independent packet processors[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 87-95.
- [56] FOSTER N, MCKEOWN N, REXFORD J, et al. Using deep programmability to put network owners in control[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2020, 50(4): 82-88.
- [57] VIEIRA M A M, CASTANHO M S, PACÍFICO R D G, et al. Fast packet processing with eBPF and XDP: Concepts, code, challenges, and applications[J]. ACM Computing Surveys, 2020, 53(1): 16.
- [58] PANDA A, MCCAULEY J, TOOTOONCHIAN A, et al. Open network interfaces for carrier networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2016, 46(1): 5-11.
- [59] YU M L. Network telemetry: Towards a top-down approach[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2019, 49(1): 11-16.
- [60] CISCO. Cisco Annual iInternet Report (2018-2023) White Paper[R/OL]. (2020-07-01) [2023-12-03]. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>.

作者简介



任丰原 男,1970年6月出生于甘肃省临洮县.现为清华大学计算机科学与技术系教授、博士生导师.主要从事网络体系结构与流量管理、数据中心网络、工业互联网/物联网等方向的教学与科研工作.发表学术论文200余篇.获包括国家自然科学奖在内的7项国家级、省部级科技成果奖.

E-mail: renfy@tsinghua.edu.cn