

未来网络体系架构研究综述

黄韬, 刘江, 霍如, 魏亮, 刘韵洁

(北京邮电大学 网络与交换国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 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、内容分发能力、绿色节能等一系列问题, 难以通过增量式的研究模式彻底解决。在这样的背景下, 创新型的未来网络体系架构研究成为当前全球关注的热点领域。通过介绍全球在该领域的研究进展情况, 阐述当前该领域主要的研究成果, 总结分析该领域的研究发展趋势与核心问题, 期望对国内该领域的研究起到参考和帮助。

关键词: 未来网络体系架构; 信息中心网络; 软件定义网络; 云网络; 移动性; 可选网络; 融合

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)08-0184-14

Survey of research on future network architectures

HUANG Tao, LIU Jiang, HUO Ru, WEI Liang, LIU Yun-jie

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

Abstract: Nowadays, the Internet is facing unprecedented challenges, including scalability, security, management, mobility, content distribution capability, and energy saving, etc., which are difficult to solve through incremental development. In such context, it is a hot field of global focus to develop an innovative future network architecture. Firstly, The global progress in this field is introduced. Then the main current research results are described. Finally, the development trends and core problems in this field are discussed. It is expected to be helpful for the domestic research in the related fields.

Key words: future network architecture; information centric networking; software defined networking; cloud networking; mobility; choice network; integration

1 引言

从 20 世纪六七十年代分组网络最初诞生到现在, 互联网已经从一个学术网络演进到广阔的商业网络, 已成为日常生活、商业运行和社会发展中不可或缺的组成部分。然而, 每一项技术都有其生命周期, 随着人们越来越多的使用, 它存在的一些问题也逐渐暴露出来, 这就是新技术诞生的源动力。

未来网络的发展目前正面临着多种多样的问题, 其中较为重要的一个问题就是体系架构的设计。在体系架构设计方面, 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, 许多技术挑

战也在这个过程中显现出来。首先, 现有互联网架构是以 IP 为细腰, 这就意味着核心体系架构难以修改, 新的功能只能通过打补丁的方式在其他层面实施, 这往往导致网络节点臃肿和可扩展性差^[1]; 其次, 互联网正在渗透到更加广泛和深入的商业领域, 例如智能制造、金融商务、家庭电器、可穿戴式设备, 甚至人体植入式设备等, 这就需要更加可信的安全保证, 例如要求网络体系架构本身就具备安全属性, 而现有网络层中缺乏安全机制, 互联网容易受到各种类型的攻击^[2]; 第三, 用户对互联网的使用需求已经从简单的端到端模式转变为对海量内容的获取, 这向传统的 TCP/IP 端到端网络体系架构提出了挑战; 第四, 当前互联网的网络层结

收稿日期: 2014-04-04; 修回日期: 2014-06-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2012CB315801); 国家自然科学基金资助项目(61300184, 61302089); 中央高校基本科研基金资助项目(2013RC0113)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program)(2012CB315801); The National Natural Science Foundation of China (61300184, 61302089); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2013RC0113)

构遵循尽力而为的思想,这使在互联网上直接承载电信级业务仍存在部分技术问题。最后,互联网的建设和运维规模逐年攀升,现有网络结构不具备虚拟化的特征,导致了大量的资源浪费。上述多个层次维度的问题与挑战推动了未来网络革命性体系架构的研究,即“重头再来”的网络架构设计思路。

目前,未来网络的研究正在全球范围开展,包括美国、欧洲、亚洲的多个国家和地区均在未来网络领域展开了持续性研究,虽然具体的研究内容和技术方案可能有些差别,但总体目标与研究方法基本一致。本文通过充分调研不同地区的主要研究项目来讨论未来网络核心架构与相关技术的发展方向。

2 国内外研究现状

未来网络技术已成为当今学术界和产业界研究和关注的热点之一,不仅在学术领域有着广阔的研究空间,而且在产业化方面也具有巨大的市场前景,同时也涉及到国家核心利益与信息安全,因此各国政府都高度关注该领域的发展,并启动了一系列相关的重大项目和研究计划。

2.1 美国

美国关于未来网络架构的研究项目主要由美国国家科学基金会(NSF)组织和管理,目前已开展了未来互联网设计(FIND)和未来互联网架构(FIA)2个研究计划。

2005年开始,FIND资助了关于未来网络各个方面的50多个研究项目,包括新型体系结构、路由机制、网络虚拟化、内容分发系统、网络管理、感知与测量、安全、无线移动等方面,其目的是进行不受现在互联网限制的广泛研究,然后再进行选优。

FIA是继FIND之后的未来网络下一阶段计划,于2010年启动,陆续启动支持了命名数据网络NDN、MobilityFirst、Nebula、XIA、ChoiceNet 5个项目,这些项目分别从内容中心网络架构、移动网络架构、云网络架构、网络安全可信机制、经济模型等方面对未来网络架构的关键机理进行探索研究,2014年,该计划开始进入第2阶段。

2.2 欧盟

2007年开始,欧盟第七框架计划(FP7)陆续资助了150多项关于未来网络研究的项目,包括未来网络架构、云计算、服务互联网、可靠信息通信

技术、网络媒体和搜索系统、未来互联网社会科学方面、应用领域、未来互联网实验床等。其中与未来网络体系结构相关的项目有FIRE^[3]、4WARD^[4]、SAIL、CHANGE、PSIRP等。

4WARD项目的目标是提出克服现有互联网问题的全新整体性解决方案,下设6个子课题,分别从社会经济(非技术问题)、新型体系架构、网络虚拟化、网络管理、高效路径转发、信息中心网络方面展开研究,基本覆盖了未来网络发展的主要研究方向。

SAIL项目由24个业界知名运营商、设备商、研究机构共同参与,其目标是设计适用于运营商的未来网络架构,核心研究内容包括从关注网络节点转向关注信息对象的信息网络,结合云计算技术和网络虚拟化技术的云网络,提供面向异构网络并具有多路径、多协议等特点的开放式连接服务。

2.3 日本

2006年,日本国家信息通信技术研究院(NICT)启动了AKARI研究计划,得到政府、大学、企业的联合资助,该计划的核心思路是摒弃现有网络体系架构限制,从整体出发研究全新的网络架构,并充分考虑与现有网络的过渡问题。AKARI计划首次提出了新一代网络(NWGN, new-generation network)的概念,以区别于传统的下一代网络(NGN, next generation network),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。目前,AKARI计划已完成基本体系架构的设计,并提出了包括光包交换、光路交换、包分多址、传输层控制、位置标识分离、安全、QoS路由等多项创新的技术方案。

2010年,NICT在工业界、学术界和政府的联合协作下,整合了AKARI、JGN-X、Network Virtualization、Service-Oriented Unified Network Operations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。

2.4 中国

2007年,我国科研人员开始积极跟踪未来网络领域的技术发展,并先后开展了“新一代互联网体

系结构理论研究”、“一体化可信网络与普适服务体系基础研究”、“可测可控可管的 IP 网的基础研究”、“新一代互联网体系结构和协议基础研究”等一系列研究项目,针对 IPv6、互联网可信模型、移动性、可管可控等方面开展了相关研究,并对未来互联网新型体系结构及路由节点模型进行了前期探索。2012 年,科技部启动了面向未来互联网架构的研究计划,并重点支持了“面向服务的未来互联网体系结构与机制研究”和“可重构信息通信基础网络体系研究”2 项课题,2013 年,科技部又启动了 4 项未来网络体系结构和创新环境研究项目,期望能进一步加强我国在未来网络领域的研究,尽快与国际水平接轨。与此同时,国家自然科学基金委也启动了“未来互联网体系理论及关键技术研究”、“后 IP 网络体系结构及其机理探索”、“未来网络体系结构与关键技术”等相关项目。

在未来网络发展战略方面,中国科学院与中国工程院在《创新 2050: 科技革命与中国的未来》和《面向 2030 年中国工程科技中长期发展战略研究》报告中都明确提出了我国加强未来网络领域研究的必要性与紧迫性,并分别从基础科研和工程技术 2 个角度指明了我国未来网络发展的战略方向,同时提出了拟开展重大工程科技专项及相关政策与措施建议。

3 当前主要研究成果

3.1 软件定义网络

3.1.1 研究背景

软件定义网络(SDN)的思想来源于美国斯坦福大学 Clean Slate 研究组提出的一种新型网络创新架构 Ethane 项目^[5]。Ethane 最初是为了提出一个新型的企业网络架构,以简化管理模型。随着 Ethane 项目在斯坦福校园中的部署与实验,著名的 OpenFlow 协议^[6]出现了。2008 年, Nick McKeown 教授在 Sigcomm 会议上展示了基于 OpenFlow 网络的演示试验,并随后在美国 GENI 项目中进行了校园网和骨干网规模的试验性部署。随着 OpenFlow 技术的推广,SDN 的概念逐渐浮现,并引起了全球学术界和产业界的高度关注。

2011 年 3 月,德国电信、Google、Facebook、Microsoft、Verizon 和 Yahoo 等几家企业联合成立了 ONF (open networking foundation) 组织^[7],旨在通过产业联盟的方式推动以 OpenFlow 为代表的 SDN

技术发展。2011 年 11 月, IETF 82 次会议启动了软件驱动网络 (software driven network) 工作组的提案并获得批准。其后, IETF 经过 83~85 次会议形成了路由系统接口 I2RS (interface to the routing system) 的协议,进一步在 86~89 次会议上陆续成立了工作组推动该协议的演进,并讨论其在 SDN 架构上实施的可适度及相关用例的讨论分析。2012 年,谷歌公司在其全球 12 个数据中心的互联网络上基于 SDN 架构部署了著名的 B4 网络,用于数据中心间的流量工程,这一实践对 SDN 技术的发展与应用起到了重要推动作用,目前 SDN 正在全球形成技术研究和产业化的热潮。

3.1.2 体系架构

当前的互联网采用了分布式的架构,在这样的框架下,即使只有一个网元(NE, network element)^[8]增加了一种新的协议,也需要应用该协议的管理域内其他所有网元做出相应的结构变更。事实上,在网络中增加一种新的协议往往需要数年时间,才能最终完成从标准化到实际部署的过程,这在很大程度上减缓了网络创新的步伐。而 SDN 则希望能够打破这种“传统”,它让网络可以被软件定义,这就使得网络在满足用户的需求方面更具灵活性,易于实现网络虚拟化,并在一定程度上降低成本。

按照 ONF 的定义,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。因此,控制功能既不再局限于路由器中,也不再局限于只有设备的生产厂商才能够编程和定义。SDN 的本质是逻辑集中、接口开放以及可编程的控制平面。

SDN 的逻辑体系架构如图 1^[7]所示,其中位于中间的 SDN 控制层(基于软件实现)将监视全局信息,并集中实现网络智能。这样对上层应用和策略来说,SDN 网络将呈现为一个逻辑交换设备,从而大大简化了网络的控制与运营。同时,对下层数据转发平面来说,网络交换设备不必支持大量的协议标准,仅仅接受控制器的指令即可,这样也使数据转发平面实现了充分的简化。

3.1.3 关键技术

软件定义网络所涉及的关键技术包括交互协议、网络控制器、架构可扩展性等,下面分别进行简要介绍。

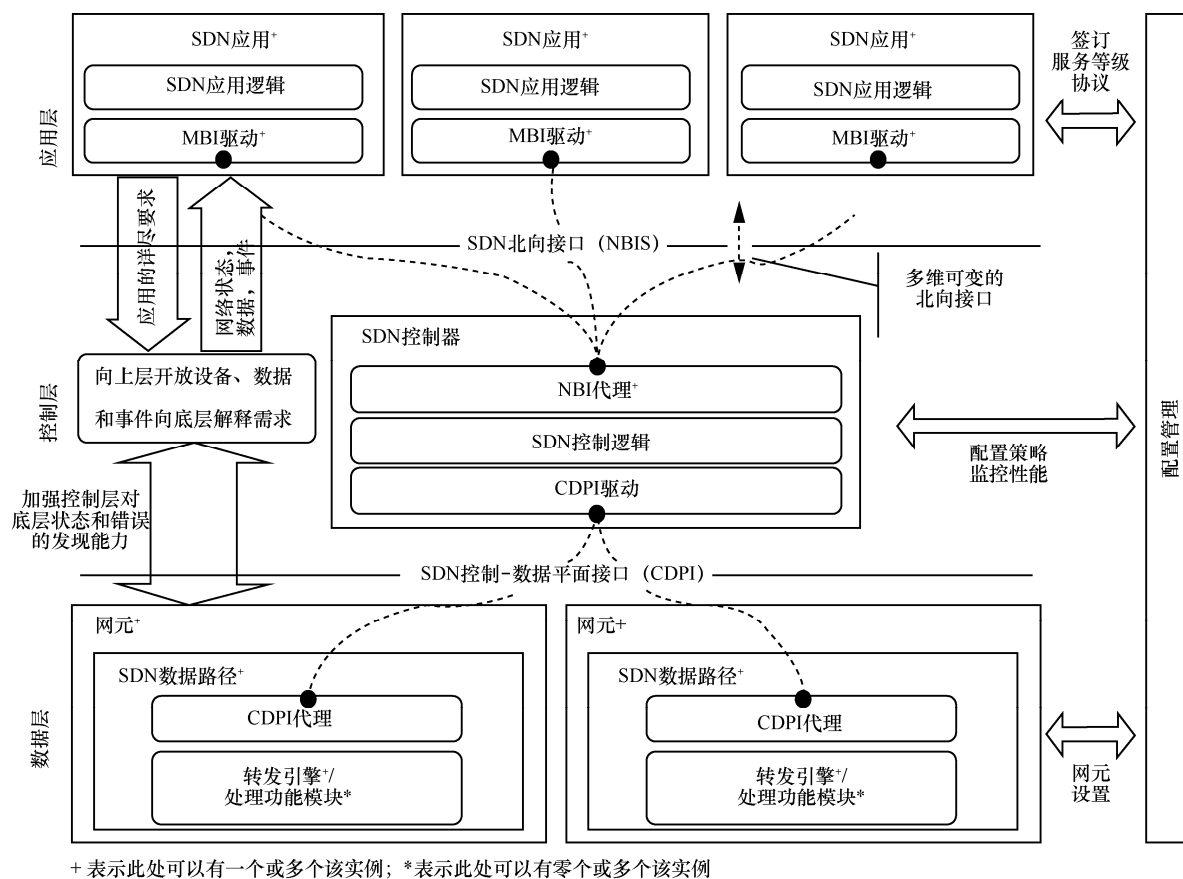


图 1 ONF 定义的 SDN 网络体系架构

1) SDN 网络交互协议

为了实现软件定义功能，该交互协议应当具有 2 个基本特征：首先，协议应能对数据转发平面进行抽象，提供可编程的接口，同时可编程性的实现应尽量不影响数据转发平面的性能；其次，交互协议应简洁高效，以避免控制平面成为网络的瓶颈。目前，第一个具有现实意义的 SDN 协议是 OpenFlow 协议，OpenFlow 协议实现了交换设备与控制设备的相互通信，即 SDN 网络交互协议通过对转发平面设备的流表进行编程。OpenFlow 控制器通过向数据平面的交换机下发、删除和更改流表来指导数据平面的交换机进行数据（流量）的转发，流表是交换机/路由器中进行转发策略控制的核心数据结构，每个流表项包含 3 个域，分别为匹配域、计数域和指令域。OpenFlow 协议就是通过对这 3 个域的配置实现了转发平面的可编程性。

在 OpenFlow v1.0 中每台交换设备中只有一张流表，这张流表中存储着许多的表项，每一个表项都表征了一个“流”及其对应的处理方法。一个数据分组到达交换机后需要先匹配流表，若符合其中

某条表项的特征，则按照相应的动作进行转发，否则封装为 Packet-in 消息通过安全通道交给控制器再由控制器决定如何处理。随着 OpenFlow 协议的持续发展，当前已经更新到 1.4 版本。与 v1.0 版本相比，后续协议相继添加了流水线和组表的架构，并对 MPLS、VLAN 标签、SCTP 协议和 ECN (explicit congestion notification) 等功能进行了支持。虽然基于现有的交换设备作改进在某种程度上限制了一些灵活性，但是 OpenFlow 几乎可以被立即部署到网络中，因而受到了广泛的关注和研究。

2) SDN 网络控制器

控制器是 SDN 网络的重要组成部分，通过交换机上报网络状态等信息，进行网络中的资源管理调度并下发控制信令使得数据平面的交换机可以协调、可靠、高效的工作，类似于网络的操作系统。类比于计算机操作系统，网络操作系统主要为 SDN 提供 2 个方面的功能：一是提供集中式的编程环境，开发者不需要关心网络的实际架构，在开发者看来整个网络就好像一台单独的机器，有统一的资源管理和调度；二是提供抽象的编程开发接口，应用程

序将面向这些接口进行开发,从而获得所需的特定网络特征。为了使整个 SDN 网络可靠而有效地工作,如何设计一个优秀的控制器成为关键。一个好的控制器设计或者架构应该能够让开发者花费最少的时间来开发出自己满意的应用,还应支持在线加载、启动新应用程序。同时还应具有可靠性、高效性、易维护性、易移植性、安全性和简明性,以及南向接口支持、网络虚拟化、网络可编程等特征。

当前针对不同的网络环境,工业界和学术界已经提出多款各种语言编写的开源控制器^[9,10]。而单一控制器的处理能力往往会成为系统性能瓶颈,因此一系列多控制器控制平面技术^[11~14]被相继提出,这部分内容将在可扩展性部分做详细描述。POX^[9]是最早的开源 OpenFlow 控制器之一,仅支持单线程操作,实现了包括 hub、switch、topology 和 route 在内的多种应用,能够提供相应的编程接口,开发人员能够在这些接口上实现自己的应用。Beacon^[10]具有跨平台特性,支持多线程,可以通过 Web 的 UI 进行访问控制,使用者可以通过 Web 界面进行动态的添加或删除模块,灵活性高,由于其高效稳定的优秀特性,已经在多个项目中使用。Big Network Controller 是一款商用版的控制器,由 Big Switch 公司研发,能够支持多达 1 000 个网络设备,每秒连接最多 250 000 台主机。开源控制器 Floodlight 的 API 能够与 Big Network Controller 完全兼容,支持多线程和 Web UI。Ryu 也是由 Python 语言实现的一款控制器,能够支持 OpenFlow v1.0、v1.2 和 v1.3,是目前稳定发布的能够支持协议版本最高的控制器之一。另外,由 Linux 协会联合业内 18 家企业在 2013 年初共同启动研发的 OpenDaylight^[14],是一套实现了模块化、可插拔且极为灵活的控制器,能够被部署在任何支持 Java 的平台上。

3) SDN 网络的可扩展技术

SDN 虽然通过控制平面与数据平面的分离实现了网络的灵活高效管控,但目前集中式的管理平面设计、以及管理平面和数据转发平面的频繁交互必然影响网络系统的整体性能,如控制器负载过重、易受攻击、交互效率低等问题都没有很好地解决方案,这使得 SDN 的应用目前还局限于较小规模的试验网络。因此,对 SDN 网络的可扩展技术研究已成为待攻克的重要技术之一。目前,对 SDN 网络可扩展技术的研究主要集中在设计新型分布

式管理控制架构上。分布式管理控制架构涉及多个关键问题,如控制器全局视图的一致性、系统可用性以及多控制器间的负载均衡等。

当前的分布式控制器架构领域已经产生了一些研究成果。DIFANE^[15]结合了主动和被动 2 种安装流表的方式将流量保持在数据平面,从而减小控制器负载;DevoFlow^[16]采取了规则复制和局部操作 2 种方式来减小 OpenFlow 交换机和控制器的信息交互;HyperFlow^[11]将网络划分为多个逻辑区域,每个逻辑区域内部署一个或多个控制器,所有控制器保存相同的网络信息,需要花费较大的开销实时同步更新。Onix^[12]是一个分层的拓扑结构,每个 Onix 实例需要维护本分区的路由决策,分区间的路由决策则由 Onix 实例构成的集群共同决策。Devolved^[13]能够针对不同类型的应用,灵活采用不同层次的控制器进行控制。该方案包括 Root 控制器和 Local 控制器,其中,Root 控制器能够根据全局网络信息,运行需要全局信息的应用,而 Local 控制器只允许需要本地信息的应用。

3.1.4 小结

SDN 网络的核心思想是通过控制平面与数据转发平面的分离,从而实现逻辑上统一的管理控制,增强网络的智能化高效管理。同时通过提供多样化的开放网络 API 接口,完成网络控制组件和应用组件的灵活设计,从而实现基于应用需求的网络可定义。目前,SDN 网络技术已成为学术界研究的重要技术之一,也正成为网络运营商和网络服务商关注的热点之一。

3.2 信息中心网络

3.2.1 研究背景

随着互联网承载内容的飞速发展,用户访问网络的主要行为之一已经演变成对海量内容的获取,这一行为模式与基于端到端通信的 TCP/IP 网络架构逐渐产生了矛盾,例如,对热点视频的访问可能会造成部分网络反复传送相同的内容,既浪费了资源,也影响了服务质量。为了解决这个问题,学术界提出未来网络应该从当前以“位置”为中心的体系架构,演进到以“信息”为中心的架构,即网络的基本行为模式应该是请求和获取信息,而非实现端到端可达,这类网络体系架构统称为信息中心网络(ICN, information centric networking)。ICN 的研究主要起源于美国和欧盟。其中,美国的主要研究项目包括 CCN、NDN、DONA 等。欧盟的主要研

究项目包括 NetInf、PURSUIT/PSIRP 等；由于 CCN/NDN 完全以内容命名进行路由，更能体现信息中心的特征，因此本文将以 CCN/NDN 为代表介绍信息中心网络的核心思想。

2006 年，施乐帕克研究中心（Xerox PARC）的 Van Jacobson 提出了 CCN（内容中心网络）架构^[17]，FIA 在 2010 年支持的 NDN（命名数据网络）项目也是采用基本相同的架构，由加州大学洛杉矶分校的 Lixia Zhang 项目组承担。CCN/NDN 的目的是要开发一个可以天然适应当前内容获取模式的新型互联网架构，其核心思想是保留 IP 协议栈的沙漏模型，但是细腰层采用类似 URL 的层次化内容命名，从而实现从 IP 为中心向内容/数据为中心的转变；同时，该架构采用全网交换节点缓存模式，以成本不断降低的缓存换取带宽，可以有效减小流量冗余和源服务器负载，并提高服务质量；另外，该架构还采用了对内容本身进行加密的方法，而不是依赖于对信息容器或信道的加密，这在某种程度上也增强了安全性。

3.2.2 体系架构

CCN/NDN 的体系架构设计主要参考了当前 IP 网络的沙漏模型，其协议栈模型如图 2 所示，细腰部分为内容块（content chunk），取代了传统的 IP 细腰。这个结构的优势是可以在方便全球互联的同

时，支持网络层以外各个层级的繁荣发展。

CCN/NDN 中包含 2 种数据分组，分别是兴趣分组（interest packet）和数据分组（data packet），如图 3 所示。兴趣分组主要包含内容命名；数据分组除了内容命名外，还有安全签名和数据。

CCN/NDN 网络的通信是由接收端（即数据请求者）驱动的。为了接收数据，请求者向网络中发送兴趣分组，路由器记录收到兴趣分组的接口，存储在 PIT（pending interest table）中，并且通过在 FIB（forwarding information base）表中查找命名转发兴趣分组。当兴趣分组到达目的节点后，数据分组将会按记录的 PIT 原路返回，沿路删除 PIT 条目，并根据缓存策略决定是否缓存在途经节点的 CS（content store）表中，这样的一次请求和内容返回就构成了 CCN/NDN 网络的基本通信过程。

除了这个基本过程外，为了实现内容与地址的无关，兴趣分组还可能在其他 2 种情况下得到满足并不再转发至目的节点：一是每个兴趣分组到达路由节点后都要经过 CS 表，如果 CS 中已经缓存了该内容，则直接返回数据分组，完成通信；二是在 CS 未能命中的情况下，兴趣分组要经过 PIT 表的检索，如果发现命名相同的条目，意味着同样的请求已经由本节点转发，但却还未收到数据分组，此时只需将收到兴趣分组的端口添加到现存条目中，

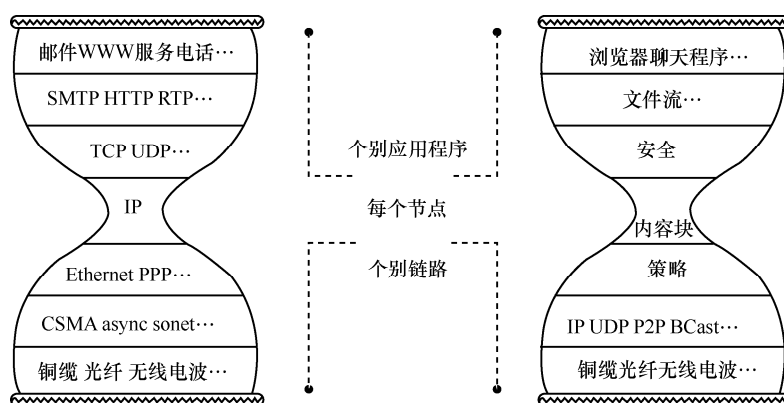


图 2 CCN 协议栈

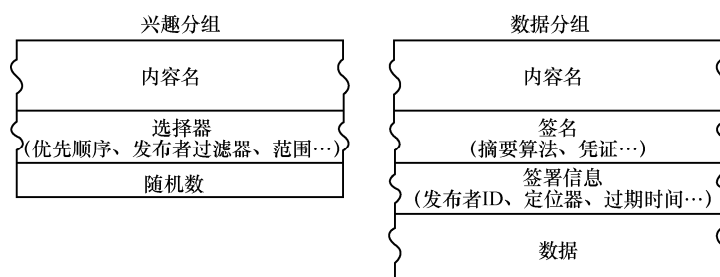


图 3 CCN/NDN 分组格式

则当数据分组返回时,会按照多个记录端口返回,这样就减少了数据分组不必要的重发。上述 2 种情况可以理解为请求的非实时和实时聚合,一种通过 CS 完成,一种通过 PIT 完成,这两张表也是 CCN/NDN 路由节点和传统路由节点的主要区别,如图 4 所示^[18]。

3.2.3 关键技术

CCN 作为一种新型网络体系结构,增添了一些全新的组成要素,同时现有的一些工作机制与工作流程也需要重新设计。文献[17]对 CCN 架构的组成以及各种方案进行了深入剖析。总结起来,所涉及的关键技术主要包括:命名机制、缓存策略、路由与转发机制、传输策略、移动性等。

1) 命名机制

相比传统的 IP 网络,CCN/NDN 不再关注内容存储的地址,解耦了身份与地址双重身份,因此命名可以直接与内容的属性相关。CCN/NDN 采取了分层式的命名结构^[19],例如,由 PARC 生产的一个视频可以命名为/parc/videos/WidgetA.mpg,其中“/”表示名字组成部分的分界,而不是名字的组成部分。这种分层式的命名结构有利于体现不同数据块之间的关系,可以有效聚合,以减少路由条目。为了检索动态生成的数据,请求者与发布者在数据的命名规范上需要统一。

需要注意的是,虽然层级化命名具有良好的可读性和聚合性,但是在查表速度上难以匹敌扁平化命名机制,因此 ICN 领域中也存在以扁平命名为基础的体系架构,但目前命名领域的研究还没有定论,仍需要进一步的探讨和论证。

2) 缓存策略

随着存储技术的日益成熟,其价格不断降低,这也是 CCN/NDN 架构提出的基础之一,即采用全网节点部署缓存的方法来实现未来网络内容的高效分发。由于每个数据分组都独立于其源目的地址,路由器可以将它缓存到 CS 中响应后续的请求。CCN/NDN 路由器中的 CS 与 IP 路由器中的 Buffer 类似,都是用来缓存数据分组的,区别是 IP 路由器将数据分组转发之后不能再利用该数据分组,而 CCN/NDN 路由器还可以重复使用该数据,因为在 CCN/NDN 中该数据可以根据命名识别。除了增强内容的分发效率,CCN/NDN 的缓存还可以用来提升分组丢失重传的效率。

CCN/NDN 领域目前有很多研究集中在缓存策略的设计方面,包括缓存替换策略、放置决定策略、管理技术等。文献[20]给出了现有 CCN/NDN 缓存技术的研究综述。现有大部分研究主要分成 2 类:一是通过建立数学模型或仿真实验的方法,评估 ICN 系统现有缓存策略性能^[21~25];二是提出各种新

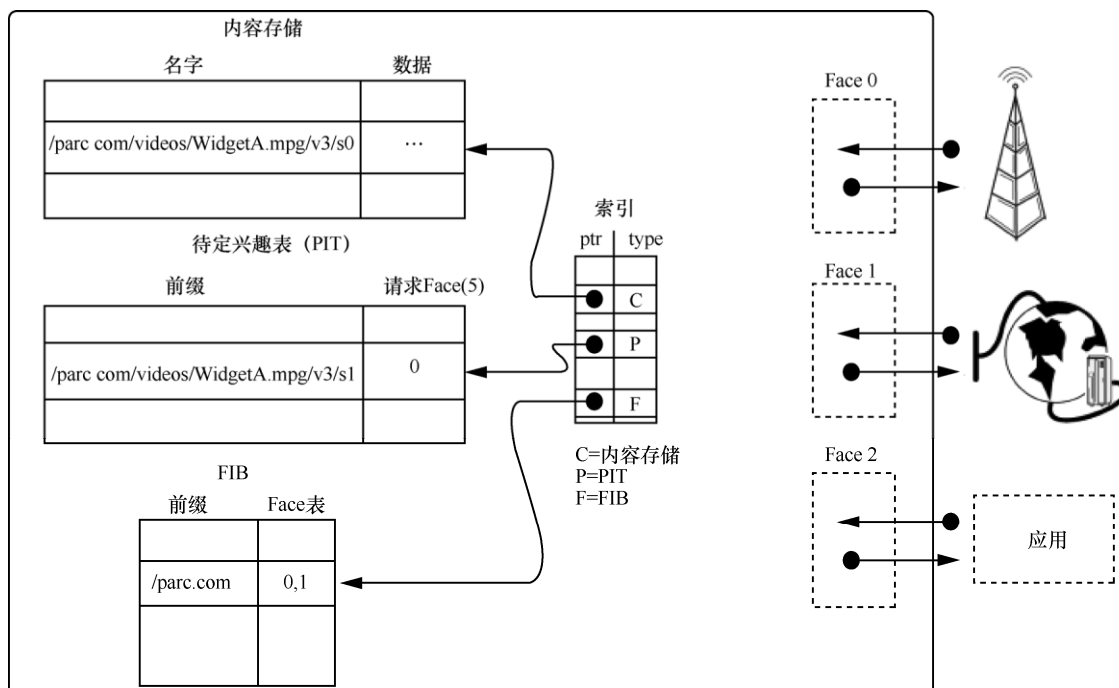


图 4 CCN/NDN 节点转发模型

型缓存策略以提升网络性能^[26~36]。

3) 路由与转发机制

在 CCN/NDN 架构中, 网络的路由机制也不再基于 IP 地址, 而是基于内容命名进行路由。内容路由与 IP 路由的目的类似, 即让各个网络节点知晓网络中的内容情况, 以便于对请求进行转发。目前在 CCNx 中普遍使用 OSPFN 路由算法^[37], 类似传统的 OSPF 协议。文献[38~45]同样也是采用了各种优化算法实现基于传统的 OSPF 协议进行改进。文献[46~50]结合 CCN/NDN 网络中的缓存设计路由策略, 使得路由充分利用缓存资源以提升性能。支持移动环境的 CCN 路由方法也产生了部分研究成果^[51]。

CCN/NDN 的转发策略能够根据数据平面的状态调整转发决策。该领域的研究主要通过观测兴趣分组/数据分组的流量或历史痕迹, 检测到连接失败、拥塞等信息, 进而寻找替换的路径来避免类似问题。已有的研究包括: 通过传递探测信息来感知更优的路径^[52,53]; 通过多路径转发来自适应地选择最优的通信路径^[54]; 通过结合缓存状态来设计动态可调的转发策略^[40]。它们都在一定程度上增加了通信开销或其他代价, 但是能够有效地避免链路失效或产生延迟。

4) 移动性

随着无线通信技术的发展, 用户对互联网的移动性支持需求越来越强烈, 然而由于 IP 具有身份位置的双重属性, 使当前互联网没办法很好支持移动性。CCN/NDN 基于请求者驱动的模式可以很好地解决终端移动的问题, 因为网络节点会暂存传输中的数据分组, 当用户重新定位以后, 可以通过一些策略重新发送未收到内容的兴趣分组, 实现无缝移动^[55]。但是在源端的移动性问题中, 鉴于 CCN 中层级化命名机制与地址相关, 因此会造成路由重新收敛的问题, 文献[56~60]对此展开了一定程度的研究。另外, CCN 本身支持为用户提供多数据源(网络中众多的缓存), 一定程度上减轻了内容提供者移动带来的影响^[59]。

3.2.4 小结

CCN/NDN 作为一种新型网络体系结构, 颠覆了人们对传统 IP 网络的认识, 给出了一个崭新的研究视角。虽然还存在较多的技术细节问题没有得到完善, 目前也缺乏具有革命意义的应用驱动, 但是随着研究的不断进步, CCN/NDN 将有希望为现有

网络模型带来革命性的变化。

3.3 其他未来网络模型

3.3.1 移动网络

考虑到现有 IP 网络的设计基于固定的端到端的连接, 不能解决移动设备和服务动态增加的需求趋势, 因此随着网络需求的转变, 越来越多的研究者认为未来网络架构设计应具备移动性的基本属性。FIA 项目在 2010 年支持的 MobilityFirst 就是以移动性为目标, 由美国罗格斯大学和其他 7 个大学共同合作, 其目标是设计一种面向移动场景、健壮、可信、以移动终端作为主流设备的网络体系架构, 提供更为强大的安全和信任机制。该体系架构的基本技术特征包括: 支持快速的全局命名解析; 采用公钥基础设施实现网络设备的验证; 核心网络采用扁平地址结构; 支持存储—转发的路由方式; 支持逐跳的分段数据传输; 支持可编程的移动计算模式等。从长期目标来看, MobilityFirst 将致力于通过 V2V 和 V2I 模式实现成千上万车辆的连接, 包括提供服务定位、地理路由以及可靠多播等能力, MobilityFirst 的体系架构如图 5 所示。

3.3.2 云网络

云网络是通过网络虚拟化和自我管理技术, 将云计算的技术和思想融合到未来网络的设计之中, 促进网络中计算、存储和传输资源按需管理控制的新型网络架构。

2010 年, FIA 项目支持了 Nebula, 由宾夕法尼亚大学和其他 11 个大学共同合作, 目的是构建一个云计算中心网络架构。Nebula 认为未来互联网将由一大批高可用和可扩展的数据中心互连组成, 多个云提供商可以独立地使用复制技术, 使得移动用户可以通过有线或无线等不同方式接入到最近的数据中心。因此, 该项目计划构建可靠、可信的高速核心网络连接各个云计算数据中心。其中, 数据中心可由多个提供商提供, 核心网络通过冗余高性能链路和高可靠的路由控制软件实现高可用性。Nebula 的关键组成部分包括: Nebula 数据平面(NDP), 用于建立灵活接入控制和防御攻击的路径; Nebula 虚拟可扩展网络技术(NVENT), 作为控制平面, 提供应用服务的访问和网络抽象(如冗余、一致性和策略路由); Nebula 核心网络, 连接数据中心和高效路由器。Nebula 的体系架构如图 6 所示。

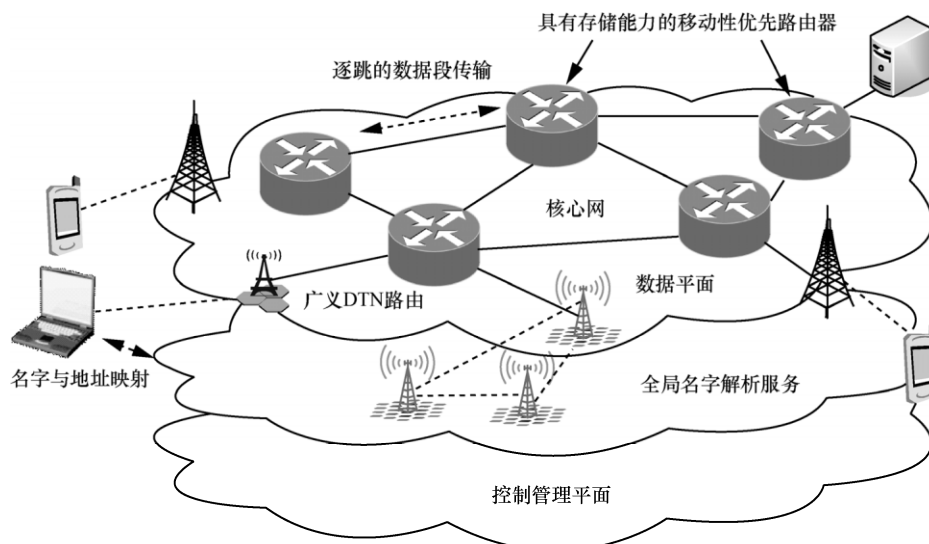


图 5 MobilityFirst 体系架构

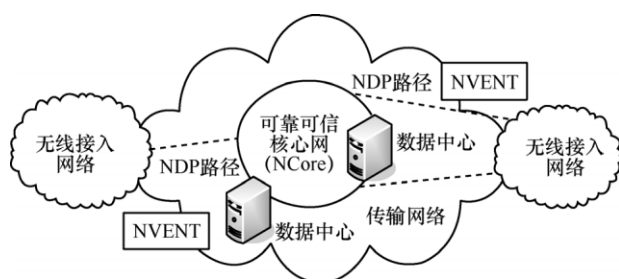


图 6 Nebula 体系架构

3.3.3 可选网络

互联网已经成为了企业、政府、军队和个人通信的关键基础设施。面对当前网络技术的发展趋势和网络被使用的状况，需要互联网提供更多更全面的函数，而现有部署的网络基础设施已经不能满足这些新功能的实施。

2012 年，美国 NSF 在其 FIA 项目中启动了对 ChoiceNet 项目的支持，该项目为互联网演进开启了一个新的架构设计思路，它注重运用经济原则推动网络核心创新持续进行。这种新型网络体系结构的核心思想是支持选择，使得网络不再是黑盒子，通过选择和竞争生成新的应用和商业模型。建立在这些原则之上的网络将能够针对当前和未来的挑战出现新的解决方案，以服务为中心，建立可选择的技术方案与经济之间的关联，其架构如图 7 所示。这项工作的网络架构设计和原型目的是：鼓励可替换方案，允许用户从一系列的服务中进行选择；

用户将对高优先级和具有创新性的服务付费；提供能够保证随时感知可用的替换方案及其性能

的机制。解决方案可以来源于不同方向，包括计算机网络、网络系统、管理科学和网络经济等知识。该项目更广泛的影响在于创新了未来互联网的运营和经济模型，也可能有望成为基础设施的重要特性之一。

3.4 信息中心网络与软件定义网络的融合

3.4.1 研究背景

如上文所述，ICN 的网络架构能够解决内容的冗余传输并且解耦身份标识和位置标识双重身份，其特点如下：以内容为中心的请求应答模型；基于内容命名的路由；网内缓存；内嵌于内容的安全机制。但是也存在一些不足，包括：缺乏内容的主动推送；缺乏全网的集中控制机制；缺乏协议快速演进部署的能力。而 SDN 技术使得复杂的网络变得更加简单，可以更灵活地调度底层物理资源，其特点如下：数据平面专注于转发，控制平面对网络资源拥有全局视图；网络操作系统和业务特性适配以及硬件设备之间的通信可通过设定协议编程实现；可根据上层用户的不同业务需求，灵活高效地分配调度基础网络资源。但是存在如下不足：缺乏缓存机制；缺乏内容控制。

为了让网络与存储和计算融合，综合 ICN 和 SDN 的 2 种技术架构的优势，取长补短，使融合后的架构能够高效利用计算、存储、网络资源，并具有高可控性，是解决目前网络问题和未来网络体系架构发展的重要方向之一。

3.4.2 体系架构

由于 ICN 分为集中式和分布式 2 种系统形式，

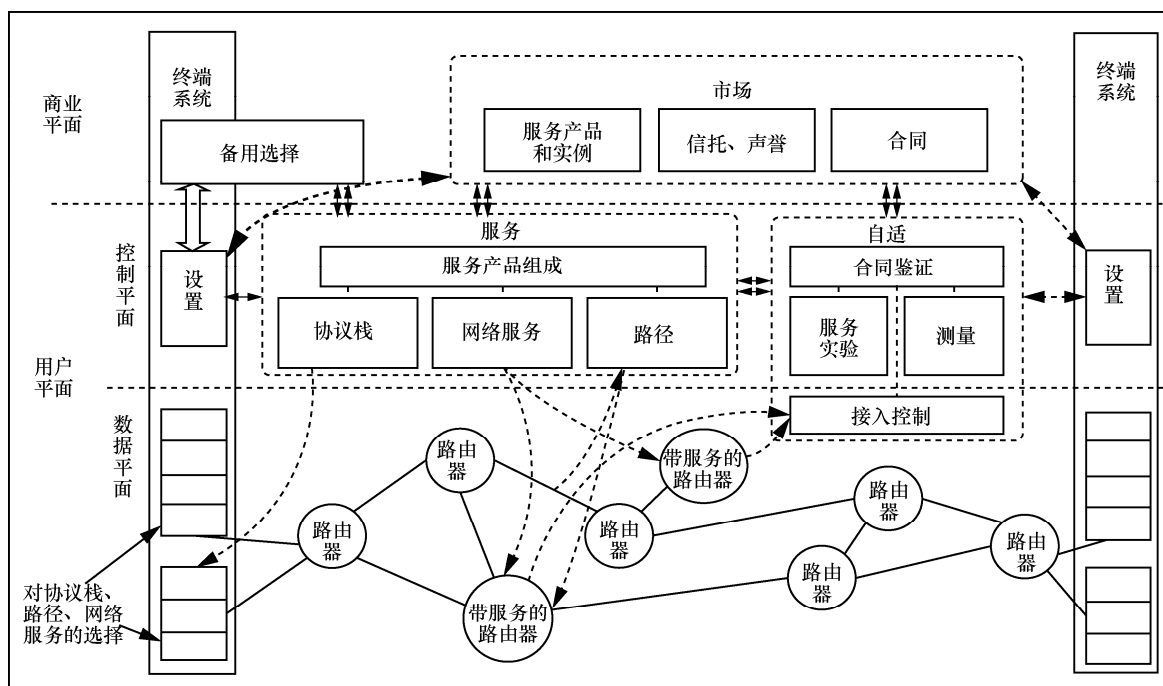


图7 ChoiceNet 架构

因此关于 ICN 和 SDN 的融合也分为这 2 种形式。自从 2012 年开始,关于 ICN 与 SDN 的融合架构开始陆续出现,包括欧盟 FP7 项目 CONVERGENCE 提出的 CONET-over-SDN 架构^[60],韩国首尔国立大学提出的 OF-CCN^[61]架构,以及清华大学提出的 NDN-over-OpenFlow 框架^[62]等。

CONET 是 CONVERGENCE 项目提出的一套以内容为中心的网络设计方案,其核心网络架构如图 8 所示。OFELIA 项目则主要建设了欧洲的 OpenFlow 测试床。为了验证和评估 CONET 的可实施性,欧盟将 CONET 部署到 OFELIA 网络中进行验证,形成了 CONET-over-SDN 的架构方案。

韩国首尔国立大学在 ONS2012 峰会中提出了基于 OpenFlow 平台实施的 ICN 架构的设计思路和实施展示,其架构如图 9 所示。利用现有 OpenFlow 功能实现内容高效分发,将一个私有 IP 地址与每个分发文件映射,同时使用 HTTP 向主机传输内容,支持移动性、多播/任播。控制器维护内容的映射表,记录每个内容存在哪个网络节点中。当某个文件被请求时,控制器为该文件分配一个私有地址,之后该文件的请求分组和数据分组都是用这个分配的私有地址实现转发。

3.4.3 小结

关于架构融合的研究目前还停留在雏形阶段,然而可以明确的是,ICN 和 SDN 融合的目标为:

一方面面向网络运营商构建虚拟化高效管控、物理资源可调度的基础设施网络,另一方面面向网络业务提供商构建可灵活感知、有服务质量保障、内容资源可调度的业务网络,最终建设一套安全可重构、高效可扩展、开放可定义、支持异构融合的新型网络体系结构,解决可扩展性、安全性、移动性、服务质量保障、可控可管、可重构、可感知以及绿色节能等现存问题。

4 未来网络发展趋势分析

未来网络具有重要的研究意义,但是在具体的研究方向上还处于百家争鸣的阶段,在对当前主流的未来网络体系架构进行总结和分析后,从中抽取了以下几个方面,作为未来网络体系架构研究中的重要组成部分或值得讨论的问题。

1) 未来网络应处理好革新式架构与演进式部署的关系

未来网络体系架构重头再来的思想,核心意义是不受到现有互联网架构的束缚和限制,它的架构可以是革新的,但是其部署实施必须是一个循序渐进的过程。目前因特网链接了数十亿节点并且拥有数以百万计的应用程序,因此研究的未来网络架构也必须具备这种特质,即传统的网络节点和应用程序应该要能够在新的架构上进行通信,同样新的节点和应用程序也要能够在现有因特网架构上通信。

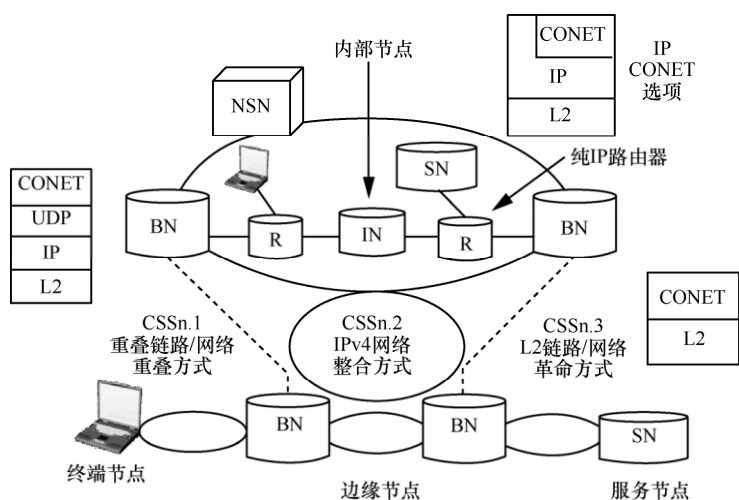


图8 CONET 体系架构

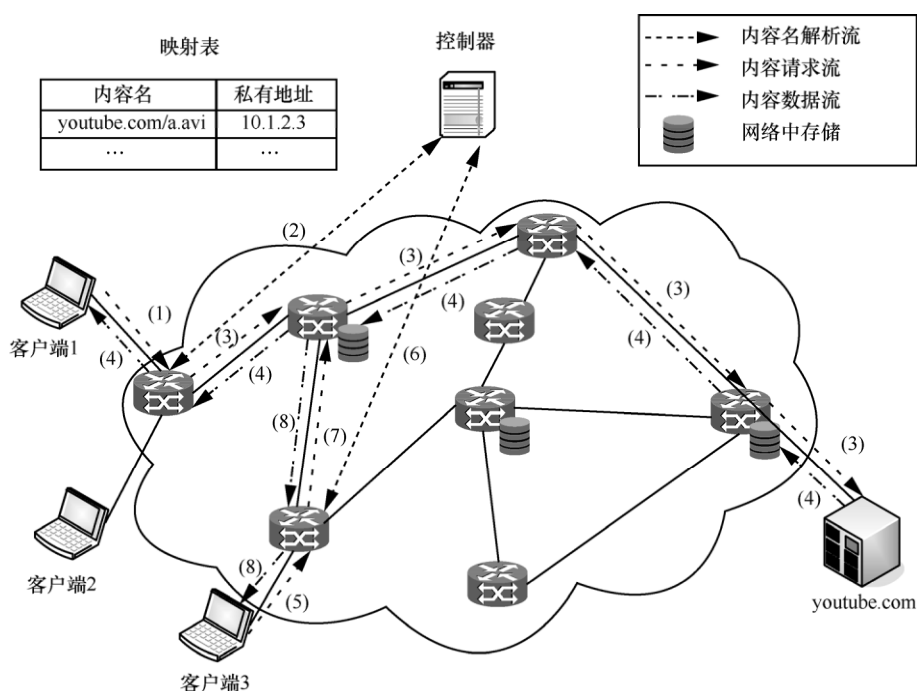


图9 OF-CCN 体系架构

因此新旧设备之间在边界点需要提供特殊的设施，保证能够兼容各种版本的底层通信协议，通过小规模部署不断扩大新架构的规模。

2) 未来网络架构应遵循简单开放的基本原则

互联网的使用模式已经从端到端的通信转变为未来网络的以内容、数据、用户为中心的模式，设计目标的变化自然导致了设计规则的变化。然而，网络简单开放的特征是网络能够繁荣发展的基础，未来网络的设计目标可以继续探讨，功能可以更加多样，但是形成的架构一定要简单开放，才能推动广泛的使用。

3) 未来网络架构设计应注重应用驱动的因素

网络的大规模发展从来都是以应用为驱动的，无论是推动电话网发展的电话业务，还是推动互联网发展的万维网技术，都是鲜活的实例。事实证明，当有足够重要的应用出现时，兼容性、最优性等因素都不会成为问题。因此，未来网络的研究既要定位于优化现在的网络，更要努力寻找一个可以颠覆当前网络架构的新应用类型。

4) 未来网络架构设计应内嵌安全性等需求

未来网络应当具备安全性、移动性、自我管理、中断容忍等一些关键功能。现有的不同项目都是各

自偏重某一些问题展开的研究，单一的一个项目无法解决当前出现的种种挑战。目前像 FIA 这种合作计划正在整合各种先前的研究成果，转化成一个连贯的、融合的项目组。如何整合这些不同的需求和由此产生的架构仍然是一个悬而未决的问题，但这样的趋势已经产生。

5) 未来网络架构应具有天然服务分发能力

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，而云计算和移动设备的增值导致了互联网服务的进一步增长。因此面对大量的服务需求，未来网络的一个基本属性就是高效的服务分发能力，由电信运营商提供来支撑多种多样应用服务提供商使用的能力，满足负载均衡、容错、复制、多宿、移动性、强安全性、定制应用等各种需求，也就是说，服务有可能成为新的细腰层，而内容和 IP 都是它的一种特例。

6) 未来网络架构设计应考虑引入利益相关者之间的博弈关系

未来网络体系架构需要在多个利益相关者（用户、互联网服务提供商、应用服务提供商、数据拥有者和政府）之间提供可扩展灵活的接口进行交互和政策、法律的实施，未来网络的设计必须要综合考虑社会和经济因素，来平衡和调节各利益相关者之间的利益。

7) 未来网络架构验证应考虑建设大规模网络创新实验平台

目前，不同国家的未来网络体系架构研究的测试床都是专门基于先前的研究项目建设的，具有不同的功能和重点。因此从长远的角度来看，如何建立一个可控可管、能够实现资源虚拟化共享的实验平台是未来网络研究的一个重点方向。另外，虚拟共存、资源动态分配、架构优胜劣汰的实验平台特征，也很可能成为未来网络运营的一种基础模式。

5 结束语

未来网络已经得到全球学术界和产业界的充分重视，针对现有网络的不同问题和需求，关于未来网络架构的设计方法也各有特点，呈现出百家争鸣的现状，然而未来网络的最终目标是一致的，都是要建设一个可信可控可管、为用户提供更好服务质量和用户体验的网络。本文介绍了目前未来网络

架构领域的主要研究成果，由于篇幅所限，并没有将所有的项目一一列举，只选择了其中比较具有代表性的项目。期望通过综述该领域的已有研究成果，探讨分析研究目标和方法，总结研究思路，从而为国内相关领域的研究人员提供参考和帮助。

参考文献：

- [1] FELDMANN A. Internet clean-slate design: what and why[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(3):59-64.
- [2] PAUL S, PAN J, JAIN R. Architectures for the future networks and the next generation internet: a survey[J]. Computer Communications, 2011, 34(1):32-42.
- [3] GAVRAS A, KARILA A, FDIDA S, *et al.* Future internet research and experimentation: the fire initiative[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(3): 89-92.
- [4] AHLGREN B, D'AMBROSIO M, DANNEWITZ C, *et al.* Second netinf architecture description[R]. FP7-ICT-2007-1- 216041/D-6.2, 4WARD Project, 2010.
- [5] CASADO M, FREEDMAN M J, PETTIT J, *et al.* Ethane: taking control of the enterprise[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(4): 1-12.
- [6] 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.
- [7] Software-defined networking: the new norm for networks[EB/OL]. <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/openflow/w-p-sdn-newnorm.pdf>.2012.
- [8] Element management systems[EB/OL]. <http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/TMN/ems.pdf>. 2012.
- [9] GUDE N, KOPONEN T, PETTIT J, *et al.* NOX: towards an operating system for networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(3): 105-110.
- [10] ERICKSON D. The beacon openflow controller[A]. Proceedings of the Second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking[C]. Hong Kong, China, 2013. 13-18.
- [11] TOOTOONCHIAN A, GANJALI Y. Hyperflow: a distributed control plane for OpenFlow[A]. Proceedings of the 2010 Internet Network Management Conference on Research on Enterprise Networking[C]. San Jose, CA, USA: USENIX Association, 2010.
- [12] KOPONEN T, CASADO M, GUDE N, *et al.* Onix: a distributed control platform for large-scale production networks[A]. Proceedings of the 9th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation[C]. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2010. 1-6.
- [13] TAM A S W, XI K, CHAO H J. Use of devolved controllers in data center networks[A]. IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)[C]. Shanghai, China, 2011. 596-601.
- [14] OpenDaylight[EB/OL]. <http://www.opendaylight.org/>.2013.
- [15] YU M, REXFORD J, FREEDMAN M J, *et al.* Scalable flow-based networking with difane[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 40(4): 351-362.
- [16] CURTIS A R, MOGUL J C, TOURRILHES J, *et al.* DevoFlow: scaling flow management for high-performance networks[A]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review[C]. Toronto, on, Can-

- ada, 2011. 254-265.
- [17] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, *et al.* Networking named content[J]. Communications of the ACM, 2012, 55(1): 117-124.
- [18] ZHANG L, ESTRIN D, BURKE J, *et al.* Named Data Networking (NDN) Project[R]. Relatório Técnico NDN-0001, Xerox Palo Alto Research Center-PARC, 2010.
- [19] SMETTERS D, JACOBSON V. Securing network content[R]. PARC, 2009.
- [20] ZHANG G, LI Y, LIN T. Caching in information centric networking: a survey[J]. Computer Networks, 2013, 57(16): 3128-3141.
- [21] PSARAS I, CLEGG R G, LANDA R, *et al.* Modelling and Evaluation of CCN-Caching Trees[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2011. 78-91.
- [22] CAROFIGLIO G, GALLO M, MUSCARIELLO L, *et al.* Modeling data transfer in content-centric networking[A]. Proceedings of the 23rd International Teletraffic Congress International Teletraffic Congress[C]. San Francisco, CA, USA, 2011. 111-118.
- [23] MUSCARIELLO L, CAROFIGLIO G, GALLO M. Bandwidth and storage sharing performance in information centric networking[A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information Centric Networking[C]. Toronto, Canada, 2011. 26-31.
- [24] ROSSI D, ROSSINI G. Caching Performance of Content Centric Networks Under Multi-path Routing (and more)[R]. Relatório Técnico, Telecom ParisTech, 2011.
- [25] CAROFIGLIO G, GEHLEN V, PERINO D. Experimental evaluation of memory management in content-centric networking[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Kyoto, Japan, 2011. 1-6.
- [26] PSARAS I, CHAI W, PAVLOU G. In-network cache management and resource allocation for information-centric networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, (99): 1.
- [27] WANG S, BI J, WU J, *et al.* Could in-network caching benefit information-centric networking[A]. Proceedings of the 7th Asian Internet Engineering Conference[C]. Bangkok, Thailand, 2011. 112-115.
- [28] MING Z, XU M, WANG D. Age-based cooperative caching in information-centric networks[A]. IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)[C]. Orlando, FL, USA, 2012. 268-273.
- [29] HE D, CHAI W K, PAVLOU G. Leveraging in-network caching for efficient content delivery in content-centric network[A]. London Communication Symposium[C]. London, England, 2011.
- [30] CHAI W K, HE D, PSARAS I, *et al.* Cache “less for more” in Information-Centric Networks[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [31] ZHU Y, CHEN M, NAKAO A. CONIC: content-oriented network with indexed caching[A]. INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops[C]. San Diego, CA, USA, 2010. 1-6.
- [32] PSARAS I, CHAI W K, PAVLOU G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks[A]. Proceedings of the Second Edition of the ICN Workshop on Information Centric Networking[C]. Helsinki, Finland, 2012. 55-60.
- [33] LI Z, SIMON G. Time-shifted TV in content centric networks: the case for cooperative in-network caching[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Kyoto, Japan, 2011. 1-6.
- [34] LIU Y, SIMON G. Peer-assisted time-shifted streaming systems: design and promises[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Kyoto, Japan, 2011.1-5.
- [35] CHO K, LEE M, PARK K, *et al.* WAVE: Popularity-based and collaborative in network caching for content-oriented networks[A]. IEEE Conference on Computer Communications Workshops[C]. Orlando, FL, USA, 2012. 316-321.
- [36] FRICKER C, ROBERT P, ROBERTS J, *et al.* Impact of traffic mix on caching performance in a content centric network[A]. IEEE Conference on Computer Communications Workshops[C]. Orlando, FL, USA, 2012. 310-315.
- [37] WANG L, HOQUE A, YI C, *et al.* OSPFN: An OSPF Based Routing Protocol for Named Data Networking[R]. NDN-0003, University of Memphis and University of Arizona, 2012.
- [38] HOQUE A K M, AMIN S O, ALYYAN A, *et al.* NISR: named-data link state routing protocol[A]. Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-centric Networking[C]. Hong Kong, China, 2013. 15-20.
- [39] DAI H, LU J, WANG Y, *et al.* A two-layer intra-domain routing scheme for named data networking[A]. IEEE Global Communications Conference[C]. Anaheim, CA, USA, 2012. 2815-2820.
- [40] SHANBHAG S, SCHWAN N, RIMAC I, *et al.* SoCCeR: services over content-centric routing[A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking[C]. Toronto, Canada, 2011. 62-67.
- [41] YE R, XU M. Neighbor cache explore routing strategy in named data network[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2012, 6(7): 593-601.
- [42] HE J J, WANG G Q, LIU J. A content-popularity-based ACO mechanism for content centric networking routing[A]. Proceedings of the 14th International Conference on Communication Technology[C]. Chengdu, China, 2012. 9-11.
- [43] KHAN A Z, BAQAI S, DOGAR F R. QoS aware path selection in content centric networks[A]. 2012 IEEE International Conference on Communications[C]. Ottawa, ON, Canada, 2012. 2645-2649.
- [44] CHENGMING L I, WENJING L I U, OKAMURA K. A greedy ant colony forwarding algorithm for named data networking[J]. Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 2013, 34:17-26.
- [45] YUAN S, LIN T, ZHANG G, *et al.* A future anycast routing scheme for information centric network[A]. 2012 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)[C]. Jeju Island, Korea, 2012. 173-178.
- [46] EUM S, NAKAUCHI K, MURATA M, *et al.* CATT: potential based routing with content caching for ICN[A]. Proceedings of the Second Edition of the ICN Workshop on Information-centric Networking[C]. Helsinki, Finland, 2012. 49-54.
- [47] MELAZZI N B, DETTI A, POMPOSINI M, *et al.* Route discovery and caching: a way to improve the scalability of information-centric networking[A]. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)[C]. Anaheim, CA, USA, 2012. 2701-2707.
- [48] WONG W, GIRALDI M, MAGALHAES M F, *et al.* Content routers: fetching data on network path[A]. 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Kyoto, Japan, 2011. 1-6.
- [49] DAI J, HU Z, LI B, *et al.* Collaborative hierarchical caching with dynamic request routing for massive content distribution[A]. Proceedings IEEE INFOCOM[C]. Orlando, FL, USA, 2012. 2444-2452.
- [50] GUO S, XIE H, SHI G. Collaborative Forwarding and Caching in Content Centric Networks[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [51] MEISEL M, PAPPAS V, ZHANG L. Listen first, broadcast later:

- Topology-agnostic forwarding under high dynamics[A]. Annual Conference of International Technology Alliance in Network and Information Sciences[C]. Aberdeen, England, 2010. 1-8.
- [52] LI C, OKAMURA K, LIU W. Ant colony based forwarding method for content-centric networking[A]. 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)[C]. Barcelona, Spain, 2013. 306-311.
- [53] CHENGMING L I, WENJING L I U, OKAMURA K. A greedy ant colony forwarding algorithm for Named data networking[A]. Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network[C]. 2013.17-26.
- [54] YI C, AFANASYEV A, WANG L, *et al.* Adaptive forwarding in named data networking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(3): 62-67.
- [55] LEE J, KIM D. Proxy-assisted content sharing using content centric networking (CCN) for resource-limited mobile consumer devices[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57(2): 477-483.
- [56] KIM D, KIM J, KIM Y, *et al.* Mobility support in content centric networks[A]. Proceedings of the Second Edition of the ICN Workshop on Information-Centric Networking[C]. Helsinki, Finland, 2012. 13-18.
- [57] LEE J, CHO S, KIM D. Device mobility management in content-centric networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(12): 28-34.
- [58] LEE J, KIM D Y, JANG M, *et al.* Mobility management for mobile-consumer devices in content centric networking (CCN)[A]. 2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics[C]. Las Vegas, USA, 2012. 502-503.
- [59] TYSON G, SASTRY N, RIMAC I, *et al.* A survey of mobility in information-centric networks: challenges and research directions[A]. Proceedings of the 1st ACM Workshop on Emerging Name-Oriented Mobile Networking Design-Architecture, Algorithms, and Applications[C]. Hilton Head, SC, USA, 2012. 1-6.
- [60] VELTRI L, MORABITO G, SALSANO S, *et al.* Supporting information-centric functionality in software defined networks[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Ottawa, ON, Canada, 2012. 6645-6650.
- [61] C-flow: content-oriented networking over OpenFlow[EB/OL]. <http://www.opennetsummit.org/archives/apr12/site/pdf/snu.pdf>.2012.
- [62] The challenges of SDN/OpenFlow in an operational and large-scale network[EB/OL]. <http://www.opennetsummit.org/archives/apr12/bi-tue-challenges.pdf>.2012.

作者简介：



黄韬（1980-），男，重庆人，北京邮电大学副教授，主要研究方向为路由与交换、软件定义网络、内容分发网络等。

刘江（1983-），男，河南郑州人，北京邮电大学讲师，主要研究方向为网络体系架构、网络虚拟化、软件定义网络、信息中心网络等。

霍如（1988-），女，黑龙江哈尔滨人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为计算机网络、信息中心网络、网络缓存策略与算法等。

魏亮（1981-），男，江苏扬州人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为计算机网络、软件定义网络等。

刘韵洁（1943-），男，山东烟台人，中国工程院院士，主要研究方向为未来网络技术、网络体系架构、网络融合与演进等。