

关于下一代网络的体系结构

李国杰

(中国科学院计算技术研究所, 北京 100080)

[摘要] 归纳了对下一代网络的共识与分歧, 分析了产生分歧的原因, 提出应重视网络体系结构研究, 包括重新认识边缘论 (end-to-end argument)、光通信与分组交换技术的融合、UNI 模式向 NNI 模式的过渡, 同时要关注网络结构和动力学规律的基础研究。

[关键词] 网络体系结构; 光通信; 分组交换; UNI; NNI; 网络动力学

[中图分类号] TP 393.02 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2002) 08-0040-04

1 关于下一代网络的共识与分歧

1.1 对下一代网络的基本共识

· 光纤通信技术发展速度超过 Moore 定律, DWDM 将成为光纤通信的主流技术。

· 基于 IP 协议的数字业务将逐步成为通信与网络的主要业务。

· 无线与移动通信是下一代网络的重要组成部分, 固定与移动网络的融合是重要的发展方向。

· 近期内还不能实现光分组交换, 建设下一代网络需要光 (子) 技术 (线路交换) 与电子技术 (分组交换) 互补结合。

· 下一代网络应具有可扩展性、灵活性、QoS、安全性及电信运行级的可靠性, 提供充分的地址 (IPv6)。

· 下一代网络应致力于信息共享与协同工作, 在 TCP/IP、Web 协议基础上形成更易于共享与协作的新标准与新协议。

1.2 对下一代网络认识上的某些分歧

· 分布式服务 (自助餐式) 还是集中式服务 (超级市场式)?

· 网络的智能在边缘还是在中央? Internet 的

基本论点 end to end argument 是否仍然成立? 骨干网做简单些还是做复杂些?

· 按功能分割网络设备, 即按服务器—路由器—交换机等几个层次实行横向集成还是按业务分割如话音、数据等实现纵向集成?

· 是客户/服务器 (client/server) 结构还是对等结构 (peer to peer)?

· 是试图取消信令减少控制还是强调信令与控制? 需不需要独立于数据层的控制网?

· 从较长的时间 (10~15 年) 来看, 分歧在于是重点发展全光网络还是光电混合网络。

· 从较短时间来看, 分歧的焦点集中在数据链路层的实现, 即 IP 层与物理层之间采用什么技术, 重点发展 IP over DWDM 还是 IP/SDH/DWDM?

· 在指导思想上是 Internet 替代战略还是在话音业务基础上逐步增加业务能力的渐进战略? 是强调三网在竞争中走向一种技术为主的统一还是强调技术融合 (convergence)?

1.3 对下一代网络存在分歧的原因

· 由于技术背景不同 (计算机、邮电通信、广电等), 每个学者对下一代网络技术的侧重有所不同。

[收稿日期] 2002-05-28; **修回日期** 2002-06-10

[基金项目] 中国科学院知识创新重点方向项目

[作者简介] 李国杰 (1943-), 男, 湖南邵阳市人, 中国工程院院士, 博士, 中国科学院计算技术研究所研究员, 博士生导师

·由于不同行业有不同的经济利益，对网络发展前景尤其是过渡措施的不同看法实际上反映了不同的经济利益要求。

·下一代网络的预测与规划不完全是技术问题，而是国家经济结构的优化问题，应注意听取经济学家的意见。

·认识上的分歧往往如同一个硬币的两面，都有合理的成分。

1.4 发展远景与摸石头过河

不管对下一代网络的发展趋势有多大分歧，但目前进行网络建设基本上都是采用外国大公司的设备。因此，从某种意义上讲，目前是几家大网络公司的产品决定网络发展的方向，而大公司是从市场短期需求出发开发新产品，采取摸石头过河的技术路线。是跟着外国大公司走还是要独立思考，做一些前瞻性研究，以我国的自主技术影响下一代网络标准，值得深思。

2 下一代网络体系结构

2.1 应高度重视网络体系结构研究

所谓网络体系结构 (network architecture) 有时也称为网络顶层设计，是一个网络系统 (从物理连接到应用) 的总体结构，包括描述协议和通信机制的设计原则^[1]。网络系统结构是基于对网络各种应用的深入了解抽象出来的设计原则的选择。我国在水利、交通、建筑等大型工程中历来十分重视总体设计，但一到网络建设常常忽略了体系结构。网络技术发展十分迅速，更需要有前瞻性的体系结构设计。我国目前网络建设中出现的许多问题，其源皆出于忽视体系结构。在讨论下一代网络时一定要十分重视网络体系结构研究。

2.2 Internet 体系结构的初衷与需求变化

Internet 体系结构是 20 世纪 70 年代确定的。在近 10 年内 IETF 制定的各种标准 (RFC) 中有 40 多项标准涉及体系结构 (标题中有 architecture)。在 Internet 协会中除了大家熟悉的 IETF 外还有一个重要的机构 ITB (Internet Architecture Board)，它起到 Internet 体系结构看门狗的作用，使得 Internet 的设计原则 30 年来没有大的改变。

在 Internet 的发展初期面对的主要需求是网络互相连通、网络的鲁棒性、网络设备的异构性、分布式的管理、低成本和容易上网，因此当时确定的

Internet 网络体系结构是无连接的分组交换结构 (dumb network)，高层的功能放在网络边缘，采用路由机制和尽力服务 (best effort) 原则。

30 年来 Internet 已有巨大发展，全世界已有 5 亿人通过家庭电脑上网，各种以前未想到的应用对网络体系结构提出了许多新的需求，例如移动性、随时变化的资源、流媒体服务、网络能力的分配 (不完全根据公平性，同时要考虑付费多少) 等等。这些新的应用要求我们不得不重新审视 Internet 体系结构，甚至考虑要进行革命性的变革。但网络体系结构的改变不仅要考虑技术上需求，还要考虑许多非技术的因素，包括企业模式、法律法规等等，因此，不能完全采用自顶向下的方式，应采用迭代改进的方式。新的体系结构不可能完全满足所有的应用要求，必须抽取最基本的较共同的需求 (称为元需求)。根据元需求定义全球网络机制的最小集合，再定义满足不同需求的子体系结构。

2.3 边缘论 (end-to-end argument) 受到挑战

20 世纪 80 年代初总结出 Internet 边缘论原则的 MIT 教授 David Clark (ITB 首届主席) 最近发表了一篇要重新思考 Internet 设计原则的重要论文^[2]。20 年前他提出的 end-to-end argument 表述为：“一种应用功能只有当其知识和帮助置于通信系统的边缘才能完全和正确地实现，因此将提供这种应用功能作为通信系统本身的性质是不可能的。”当时提出这种论断的依据是网络是不可靠的，最终检查是否正确执行只能在处于传输终端的应用层。让网络核心部分只做最通用的数据传输，而不实现特殊应用，有不少优点：如降低核心网络复杂性，便于升级；提高网络通用性和灵活性，增加新应用不必改变核心网络；提高可靠性等等。但是 20 年后网络应用环境已大大改变。由于用户急剧增加而互不了解，Internet 已变成没有信用的世界，必须在网络的核心部分增加认证、授权等机制使网络更可信。尽力服务不能保证服务质量，特别是流媒体服务质量，需要在网络中间增加存储节点。ISP 服务的多样化，要求基于中间服务器的应用。出于信息安全等方面的考虑，政府与中介组织参与网络内容与服务的监督管理，网络核心不可能再是 Dumb 网。Internet 初期的用户都属于技术型，而现今已普及到一般老百姓，许多复杂的软件放在服务器而不是 end。所有这些变化都要求增加核心网络的功能。今天的商业模式不再是 end to end，而主要是

service inside the network。我们面临十分复杂的应用需求，但不可能走回头路，用简单集中服务代替边缘论。当寻求新的网络体系结构时，end to end原则所追求的灵活性和开放性应当保留。

2.4 光通信与分组交换技术的融合

线路交换 (circuit switch) 和分组交换 (packet switch) 是当代通信网络两大主流技术，前者与光技术紧密相连，后者与电子技术相连。从某种意义上讲，未来的网络就是在光与电的技术融合上做文章。近几年来，光纤通信技术发展基本上每半年翻一番，而电子技术发展已从 18 个月翻一番逐步降低到 2 年翻一番，差距越来越大。今后一二十年，大量的原始创新将致力于缩小这两者的间隔。当代物理学研究揭示，光电交接的太赫 (THz) 区域有许多奇妙的特性^[3]。目前线路交换的瓶颈在于光电转换。所谓光交叉连接设备 (OXC) 至今还是先转成电信号再交换。如果在 THz 附近发明一种新技术，有可能直接用光实现分组交换，则将引起网络与通信的一场革命。

路由器带宽利用率极低，只有 5%~50%，通信行业是所有工业部门中能力利用率最低的产业。当今的路由器太傻，出现阻塞唯一的办法就是丢包，不能识别语音流、图像流和文字流。最需要攻克的不仅仅是提高路由器的速度，而是提高其智能。用全光技术实现交换和路由是许多网络通信科研人员的理想。目前 OXC 只比电分组交换密集 2~3 倍，竞争力还不够，今后发展到光子交叉互连 (photon cross connect switch) 可以在更大粒度上实现交换。由于传输的光波如何延迟和存储的技术还处于实验室阶段，全光路由器实用化的路还很长。但如同程控交换机代替了手工话务员一样，全光网的自动控制、智能化的全光分组交换网络可能会取代今天光网上的手工操作，值得探索。

2.5 UNI 和 NNI 模式

网络上有两种控制机制，路由机制与信令控制机制，无连接的网络用路由机制，有连接的网络靠信令控制建立连接。这两者是水火不容还是可以互相融合是值得研究的问题。其实路由和信令都是实现网络自动化需要的控制技术。线路交换网要全自动，也必须有路由信息。即使 IP over optical network 也必须在光器件内增加路由与交换功能。国外学者目前在研究两种模式，试图统一分组交换和线路交换^[4]。

第一种模式是 UNI 模式，即 user-network interface。这是一种层次迭加型的体系结构，将光网络看成服务层，而 IP 层看成客户层。它提供改进的信令协议，允许客户端向网络要求服务。在这种模式中，分组交换网和光学网的路由及控制过程是分离的，两个网络域通过 UNI 界面动态交互联系，UNI 使得双方能互相知道对方。UNI 要求新一代的光学服务。ITU-T 提出的自动交换光网络 (ASON) 是这种模型的代表。这是一种渐进型的模式，技术上相对较成熟。缺点是不利于网络资源全面优化，两个控制面带来管理上的麻烦。UNI 的界面定在什么地方也是引起争议的大问题，如果网络层只管点到点的传输即只批发骨干网带宽，前几年的事实已证明纯宽带网公司难以生存。但如果网络层一直管到应用，用户自主的灵活性等的 Internet 优点将会丢失。

另一种模式是 NNI (network-network interface)。这是一种集成模式或者称为对等模式，即采用统一的控制平面，实现对等的交换，线路交换与分组交换可集成在一个设备中。进一步发展是在光网上实现动态控制，按需建立和撤销光线路。这就需要光器件之间有路由协议发现邻居和拓扑结构，也需要信令协议建立 NNI。在光网中采用基于 IP 的路由机制和信令协议提出了新的挑战，需要修改 IP 控制以适应光器件的体系结构。这种模式的优点是采用统一的控制平台，可进行综合优化设计实现更有效的流量工程管理。由于 IP 路由器了解光网络拓扑信息，可进行显式路由。集成模式的缺点是技术上难度较大，尤其是要求网络运行商提供网络拓扑信息，商业上整合不容易。

分组交换与光网的更紧密耦合是下一代网络的发展方向。Internet 之父 Roberts 教授最近多次发表文章和讲话，阐明这一发展方向^[5]，Roberts 教授推测的下一代网络发展方向，值得重视。

我国已开展示范网研究工作并正在组织新的示范网工程。从过去经验来看，示范网侧重于外国新设备的联网演示，主要起到验证国外设备与软件联网可行性的作用，其中也用到一些自主研发的设备或软件，但推广的力度不大。下一代网络如何构建尚没有满意的答案，除了渐进方案外，也应当鼓励提出一些带革命性的方案，即使与当前协议标准不兼容，只要在性能或其他方面有数量级的提高，也值得一试。“八六三”计划尤其应支持有创新思想

的试验网。通过试验网验证新的协议, 加大对制定国际标准的影响。

3 重视对网络动力学规律的基础研究

IP 协议看起来很简单, Internet 中不计其数的数据包似乎都在随机的发送, 但整体上能正常运行而且具有很强的商业竞争力, 背后一定有深刻的道理。网络界学者对网络动力学行为的研究还很不深入。近两年, 美国 NSF 支持图灵奖获得者 R. Karp 等学者, 从事 Internet 基础理论研究。值得指出的是美国 Barabasi 等物理学者近年来在 Science、Physics Review Letter 等顶级刊物上发表数十篇关于 Internet 结构与动力学基础研究的论文, 引起学术界较大反响^[6]。最近的研究结果表明, 互联网与万维网的节点链接不符合泊松分布而符合帕累托分布, 节点连接数的分布与节点总数无关, 因此称为 Scale-free 网。互联网与万维网都是个小世界, 根据大规模数据统计结果, 任意 2 个网页之间的平均“距离”小于 20, 任意 2 个路由器之间平均“距离”小于 10。互联网与万维网的 Scale-free 及小世界特征是由其演进的动态规律形成的(新的节点倾向于与已有较多链接的节点相连)。实际存在于人类社会和生物界的许多复杂网络, 例如蛋白质折叠、演艺圈、论文署名作者和引用等都具有与 Internet 及 Web 相同的特征。

Scale-free 网络具有很强的容错性, 但比随机

形成的网络更易受攻击, 连接最密集的节点成为最易受攻击而导致网络瘫痪的瓶颈。建立 Internet 的初衷是应对攻击, 但网络的演进出乎创造者的意料。21 世纪是复杂性世纪, 深入理解复杂性的 2 个层次——结构与动力学是要面对的严峻挑战。在考虑下一代网络体系结构时, 一定要重视有关网络结构与动力学的基础理论研究。

参考文献

- [1] Braden R, Clark D, Shenker S, et al. Developing a next-generation internet architecture [EB/OL]. <http://www.ana.lcs.mit.edu>, 2000-07-15
- [2] Blumental M S, Clark D D. Rethinking the design of the internet: the end to end arguments vs. the brave new world [J]. ACM Trans on Internet Technology, 2001, 1(1): 70~109
- [3] 江绵恒. 新时期办院方针的思考 [R]. 在 2002 年中科院工作会议上的报告, 2002
- [4] Caspian. Evolution of the optical internetwork——building the intelligent optical packet network [EB/OL]. www.caspiannetworks.com, 2000-12
- [5] Caspian. The challenge of building efficient networks——issue, opportunities and new concepts [EB/OL]. www.caspiannetworks.com, 2000-11
- [6] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks [J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 48~97

The Next Generation of Network Architecture

Li Guojie

(Institute of Computing Technology, CAS, Beijing 100080, China)

[Abstract] This paper summarized the agreement and divergence about viewpoints of the next generation of network, then the reasons of divergence were analyzed. It pointed out that much attention should be paid to the researches on network architecture, including rethinking of End-to-End Argument, combining of packet switching with optical networking, and evolution from UNI overlay architecture to unified NNI architecture. Finally, the importance of basic researches on the Internet, such as the network dynamics, is also put forward.

[Key words] network architecture; optical communication; packet switch; UNI; NNI; Internet dynamics