可演进的新一代互联网体系结构研究进展

吴建平 林 嵩 徐 恪 刘 莹 朱 敏

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

摘 要 当前互联网正处于向新一代互联网过渡发展的阶段.对于新一代互联网体系结构的发展方向,支持革命式路线的研究人员认为应该重新设计,但他们提出的方案难以在目前的互联网实际部署;支持改良式路线的研究人员认为应该在现有互联网的基础上进行修改,但某些修改在一定程度上破坏了互联网的设计原则,影响了新应用的部署.互联网发展历史表明,当前互联网的核心机制和设计原则仍然具有旺盛的生命力,可以适用于新一代互联网,而需要修改的则是部分基本要素(例如 IPv4 协议向 IPv6 协议的发展).综合这些方面的考虑,我们认为新一代互联网体系结构的发展应当采用一个称为演进的中间路线:保持互联网的核心和设计原则相对稳定,谨慎地改变约束其扩展的基本要素,以适应和更好地支持未来的应用需求.文中首先分析了互联网体系结构的发展趋势,提出了可演进性的定义,阐述了可演进体系结构的设计原则和设计约束.可演进性的关键是如何确定重要的核心和设计原则,如何划分核心原则和基本要素之间的界限,如何分析研究者们提出的互联网体系结构或者某种协议机制是否符合可演进性.针对这些问题,文中提出了互联网体系结构可演进性评估模型的若干思路.在此基础上,进一步提出了基于 IP 的可演进网络体系结构实验网络的设计思路,以期为研究人员提供实验和验证体系结构设计的可用平台.该实验平台与现有实验平台的主要区别是强调了进行实验的体系结构和协议机制应当符合可演进性设计原则,使得这些体系结构和协议机制在当前互联网中有可能得到实际部署.

关键词 互联网体系结构;可演进;设计原则;评估模型;实验平台;下一代互联网

中图法分类号 TP393 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2012.01094

Advances in Evolvable New Generation Internet Architecture

WU Jian-Ping LIN Song XU Ke LIU Ying ZHU Min

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

Abstract The current Internet is at the stage of transition to the Next Generation Internet (NGI). For the direction of the NGI architecture, some researchers agree with the "clean slate" approach, and suggest that Internet should be redesigned, but their proposals are difficult to be deployed in the current Internet. Some researchers agree with the "evolutionary" approach, and suggest that we should focus on improving the current Internet, but some of their modifications break the Internet's design principles, creating obstacles for the deployment of new applications. The history of Internet shows that the core mechanisms and design principles of Internet are still strong enough to be used in NGI, while its basic elements should be properly modified (such as the transition from the IPv4 protocol to the IPv6 protocol). Summing up these considerations we believe that the development of NGI architecture should adopt a path called "evolvable", which is a compromise between "clean-slate" and "evolutionary": keeping Internet's core design principles, and carefully change its basic elements in order to accommodate and better support requirements

收稿日期:2012-02-22;最终修改稿收到日期:2012-04-13.本课题得到国家"九七三"重点基础研究发展规划项目"新一代互联网体系结构和协议基础研究"(2009CB320501,2009CB320503)和国家自然科学基金(61170292)资助.**吴建平**,男,1953 年生,博士,教授,主要研究领域为计算机网络体系结构、协议工程学、新一代互联网.E-mail: jianping@cernet.edu.cn.**林 嵩**,男,1984 年生,博士研究生,主要研究方向为新一代互联网、P2P 网络.**徐 恪**,男,1974 年生,博士,教授,主要研究领域为新一代互联网、交换和路由结构、P2P 网络、覆盖网络、物联网.**刘 莹**,女,1973 年生,博士,副研究员,主要研究领域为计算机网络体系结构、新一代互联网.**朱 敏**,女,1977 年生,博士研究生,主要研究方向为新一代互联网.

from new applications. This paper analyzes the development trends of the Internet architecture, proposes the definition of evolvability, and puts forward design principles and design constraints of the evolvable Internet architecture. In this analysis, there are problems that should be solved, such as why the proposed core design principles are important, how to determine the boundaries between the design principles and basic elements, how to evaluate the evolvability of an Internet architecture proposed by researchers, etc. To solve these problems, we propose several ideas for the evaluation model of Internet architecture evolvability. Based on these design principles and evaluation models, we further propose the preliminary ideas of designing an IP-based experiment platform for evolvable Internet architectures, in order to help the researchers to test and validate their architecture designs. The key difference between our platform and other network experiment platform lies on that our platform ensures the evolvability of architecture designs, so that these architecture designs can be effectively deployed in the current Internet.

Keywords　Internet architecture; evolvable; design principle; evaluation model; experiment platform; next generation Internet

1　引　言

新一代互联网体系结构的研究已经开展多年，取得了若干成果，但也有不尽人意的地方. 关于新一代互联网体系结构设计，有革命式和改良式两种路线. 支持革命式路线的研究人员认为应该重新设计，由于过于理想化，导致其设计的体系结构部署性差，方案难以在目前的互联网实际部署，目前发展缓慢、仍然没有实际的解决方案应用于互联网. 而支持改良式路线的研究人员认为应该在现有互联网的基础上进行修改，但相关的修改有“头疼医头脚疼医脚”之嫌，在一定程度上破坏了互联网的设计原则. 例如，NAT(Network Address Translators)已经得到广泛部署，但是它并不是解决问题的根本方法，它破坏了端到端的设计原则，导致了 P2P 应用的额外负担、管理和安全等方面的问题[1].

另一方面，当前互联网发展迅速，而且对新应用的支持良好，其原因在于互联网的无连接分组交换、端到端等核心机制和设计原则依然充满活力，仍然适用于新一代互联网. 同时互联网正处在从 IPv4 向 IPv6 过渡的阶段，约束互联网发展的 IPv4 这一基本要素发展为 IPv6. 由此可见互联网的核心原则保持相对稳定，而其基本要素则需要恰当修改(例如 IPv4 协议向 IPv6 协议的演化).

综合这些因素，我们认为新一代互联网体系结构的发展应当采用一个称为可演进的中间路线：保持互联网的核心和设计原则相对稳定，谨慎地改变约束其扩展的基本要素，以适应和更好地支持新应用需求.

为了使得研究人员对互联网体系结构的修改能够保持可演进性，我们认为需要提出可演进体系结构设计原则. 我们提出了可演进体系结构的三个设计原则(演化核相对稳定性、模块性和最优性)和两个设计约束(经济性和可部署性).

为什么这些核心和设计原则是重要的，如何确定核心原则和基本要素之间的界限，如何确定研究者们提出的互联网体系结构或者某种协议机制是否符合可演进性. 针对这些问题，我们提出了互联网体系结构可演进性评估模型的几个思路：互联网体系结构扩展及演进的原因在于更好地支持不断增加的新的应用需求，因此从应用的角度出发，研究基于应用适应能力的互联网体系结构可演进性评估模型；新协议机制在与旧协议机制的竞争中能否获胜是新协议机制可部署性的重要方面，也是网络体系结构演进过程中的重要问题，互联网协议机制最终是用户选择的，因此我们从用户选择的角度出发，研究基于用户效用的网络演化分析模型；另一方面互联网是 ISP 提供的，体系结构对 ISP 是否有激励效果也决定了哪个体系结构会在竞争中胜出，所以也可以从 ISP 效用的角度出发研究网络演化分析模型.

在这些设计原则和评估模型的基础上，我们认为，在一个完全没有限制的环境下进行设计，并不利于网络研究人员得到合适的网络体系结构设计. 相反，在确定可演进网络体系结构设计原则的前提下，进行体系结构研究，能够保证进行实验的体系结构

和协议机制能够在当前互联网中进行实际部署.因此,我们提出了基于IP的可演进网络体系结构实验网络设计的思路.我们的研究目的并不是设计一种新的可演进的网络体系结构,而是提供一个实验网络,使得基于IP的可演进网络体系结构都可以在该实验网络上进行实验,以期为研究人员提供试验和验证体系结构设计可演进性的实验网络.

本文第2节回顾互联网体系结构可演进性相关研究工作;第3节给出可演进体系结构的定义和设计原则;第4节分析互联网体系结构可演进性评估模型;第5节给出基于IP的可演进网络体系结构实验网络设计;第6节对全文进行总结.

2 相关工作

面对传统互联网体系结构暴露出来的可扩展性及安全性等问题,自1996年起,研究者们即开始对现有互联网络体系结构的基础理论不断进行新的思考[2-4],并在此基础上提出了许多新协议、算法和体系结构.但是,对于"互联网体系结构如何发展"的根本问题,研究者们的意见并不一致.目前,主要包括以下两种研究路线:

(1)革命式.又称为"clean-slate"或"改革型"路线,其出发点是突破一切限制,放弃现有互联网体系结构,重新设计新一代互联网,从根本上解决现有体系结构存在的问题.例如,Openflow①、NDN②等都是基于这一思想进行的设计.

(2)改良式.又称为"dirty-slate"、"incremental"、"进化式"或"革新型"路线,其思路是针对现有互联网体系结构存在的不足进行增量式修补.如解决地址问题的CIDR协议、解决传输服务质量问题的CDN体系结构、解决用户移动性问题的Mobile IP协议、解决QoS问题的DiffServ和RSVP以及解决安全认证问题的IPsec协议都是对现有互联网体系结构进行的改良.

这两种发展路线的支持者在文献[5]中阐明了各自的观点:

支持革命式路线[6]的研究者Rexford并不否定改良式的发展路线,但是她为当前互联网体系结构的设计原则是当前体系结构固有的,很难改变,而现有的一些挑战又很难在当前设计原则下得到解决.虽然研究人员已经提出了一些补丁来解决或部分解决互联网存在的问题,但是还缺少建立在严格模型和经过实践检验的技术上的、能够指导设计和运营人员的真正的学术准则.因此,为了使互联网向一个安全、可靠、高效的基础设施持续发展,革命式设计是很重要的也是必须的,因为它能够帮助网络研究领域得到一个成熟的发展原则,并藉此最终得到一个值得研究团体信任的互联网体系结构;同时,从革命式路线所得到的深刻见解能够并且应该帮助互联网当前的发展.

支持改良式路线的研究者Dovrolis则认为,互联网的研究目标在于理解当前互联网的行为,确认存在的或者紧迫的问题,并在与旧系统兼容和增量部署两个限制条件下解决问题.而革命式的思路超越当前互联网体系结构,旨在设计一种优于当前互联网的体系结构,并没有考虑转换代价,导致提出的很多方案由于部署开销大于部署所得到的好处,至今尚未得到大规模的实际应用,反倒是改良式的方案比较让人接受.Dovrolis还强调了实验性ISP比实验床要重要得多,同时强调了对互联网实际使用情况作测量的重要性.Dovrolis在文献[7-8]中详细表述了对改良式路线的支持.

从经济学和社会学的角度考虑,我们认为保持稳定、持续的演进对互联网体系结构的发展尤为重要.脱离现有互联网进行全新设计对于大量应用而言并不实际,而仅通过增量式的改良也不能解决现有互联网体系结构固有的弊端.是否存在一条既能实现稳定过渡又能满足应用需求不断扩展的中间路线呢?本文中我们将给出肯定的答案.

从各国新一代互联网体系结构研究的现状来看,无论是基于改良式的路线还是基于革命式的路线,在互联网体系结构的发展过程中都取得了很多成果,而研究重点也主要集中在未来互联网体系结构的关键技术研究和实验平台的建立上.安全性、可扩展性、移动性等是这些项目主要关心的问题.表1对基于两种路线的代表性成果和项目进行了总结,我们可以看出基于改良式路线的研究都具有可增量部署的特性,它们都是为解决现有体系结构的具体问题进行的针对性修补,具有很好的效用,但考虑问题不全面.而革命式的演进思路较改良式路线更偏向于学术,更具前瞻性,在研究中都考虑了现有体系结构存在的可扩展性、移动性和安全性问题.但革命

① OpenFlow. http://www.openflow.org

② Zhang L X, Estrin D, Burke J et al. Named Data Networking (NDN) project. NSF Future Internet Architecture Project, 2010. http://www.named-data.net/ndn-proj.pdf

式路线脱离了当前互联网，因此不具备增量部署的能力，不如改良式路线务实，贴近实际工程应用. 因此，到目前为止，可实际应用的研究成果仍然相对较少.

表 1　新一代互联网体系结构研究项目

路线	项目名称	负责人	目标	关键研究内容	设计原则			
					增量部署	可扩展性	移动性	安全性
改良式	LISP	IETF	缓解、抑制路由表的膨胀，解决路由的可扩展问题.	基于路由的身份位置分离技术	√	√	—	—
	CDN	IETF	解决互联网信息传输性能、访问质量问题.	请求重定向技术、内容路由、内容分发、内容存储、内容管理、负载均衡技术	√	√	—	—
	Mobile IP	IETF	解决移动设备的通信持续问题.	地址绑定技术、隧道技术、路由优化技术	√	√	√	—
	IPsec	IETF	解决互联网通信的认证、通信数据私密性和完整性等安全问题.	加密技术	√	—	—	√
革命式	NewArch	DARPA	摆脱当前互联网体系结构束缚，定义并实现一个面向未来的互联网体系结构.	身份位置分离技术、基于角色而非协议的体系结构构造、显示拥塞控制机制、分区机制、支持源路由选择的路由体系结构	—	√	—	—
	GENI	NSF	为未来互联网的研究、开发和部署提供一个通用的大规模试验环境.	可编程技术、分片及虚拟化技术	—	√	—	√
	FIND	NSF-NeTS	构造可融合多种网络环境和应用及服务需求的互联网.	虚拟化技术、智能感知网络、用户控制的路由技术等	—	√	√	√
	NDN	Zhang Lixia	构造基于名字的全新互联网体系结构.	基于名字的路由、转发等技术	—	—	√	—
	MobilityFirst	Dipankar Raychaudhuri	支持移动通信的未来互联网体系结构.	全局名字解析及路由服务、通用的容迟网络路由协议、逐跳传输技术	—	√	√	√
	NEBULA	Jonathan Smith	建立一个更具安全性的基于云的新一代互联网体系结构.	网络虚拟化技术、加密技术、容错路由路径	—	√	√	√
	XIA	Peter Steenkiste	构建一种安全的未来互联网体系结构.	AIP 协议、Tapa 体系结构等	—	—	—	√

3　可演进互联网体系结构的概念及设计原则

基于革命式和改良式的互联网体系结构发展路线分别在创新性、可扩展性和互联网体系结构的稳定过渡方面提出了许多值得借鉴的思路. 但考虑到实用性和灵活性，我们认为这两种路线不能很好地在保持现有体系结构优势的同时进行持续稳定的创新. 基于革命式的路线在一个完全没有限制的环境下进行设计，并不利于现有体系结构的过渡和迁移. 而基于改良式的设计则偏于保守，各种各样的修补式方案加剧了现有互联网体系结构的复杂性和管理难度，甚至导致互联网体系结构在解决部分问题的同时引入了更多新问题. 考虑到技术、经济和社会等因素的影响，我们认为保证互联网体系结构在保持一定核心原则相对稳定的情况下持续稳定的演进对于互联网体系结构的发展而言尤为重要. 因此，如果能够保证互联网体系结构在改良式发展的基础上引入改革式路线的创新思路将是一个更佳的选择.

3.1　互联网体系结构演进的两个关键问题

基于革命式的路线和改良式路线最大的区别在于是否摒弃当前互联网体系结构进行发展. 从稳定过渡的角度，我们认为，立足当前互联网体系结构显然更具说服力. 但是，在此之前，我们首先需要回答以下两个问题：

问题 1. 互联网体系结构设计是否仍然具备不断发展的潜力？

如图 1，在互联网自创建以来的 40 多年历史中，适应了很多新的应用需求. 尤其是近十年来，面对 P2P、社会网络、云计算等新型应用带来的技术挑战，互联网通过自身的调整、协议的添加和更新很好地适应了新需求. 面对互联网体系结构安全性、IP 地址有限、移动性等的挑战，互联网也通过添加新的协议，如 CIDR、NAT、IPsec、mobile 等技术使互联网度过了一次次的危机. 那么现在互联网是否还可以不断适应新的应用挑战呢？

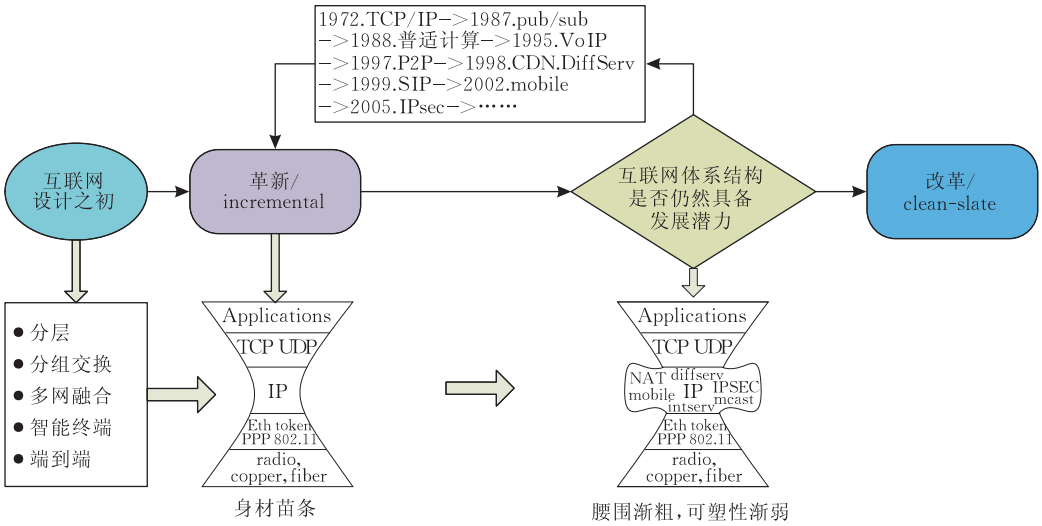

图 1 互联网体系结构的演进路线

回顾互联网体系结构的发展历史，我们发现 Clark[9] 在 1988 年提出的互联网设计目标仍然适用于当前及未来的互联网体系结构，即首先互联网需要把多个已存在网络连接起来，同时实现以下目标：

(1) 互联网必须在一部分网络或者网关失效的情况下，其余部分还能继续通信.

(2) 互联网必须能够支持多种通信服务.

(3) 互联网必须能够容纳多种网络接入.

(4) 互联网必须能够分布式管理它的资源.

(5) 互联网体系结构应该是有成本效益的.

(6) 互联网体系结构应该允许主机较容易接入.

(7) 互联网体系结构资源的使用必须可以计费.

为实现这些目标，Feldmann 在文献[6]中总结了互联网设计之初的 5 个原则(如图 1). 这些原则是互联网的技术精髓和成功经验以及互联网体系结构不断发展壮大的根源，也是互联网在长期大规模技术实验基础上逐步形成的体系结构的重要内容. 例如，端到端原则正是互联网体系结构开放、灵活的根源. 尽管部分研究者认为这些设计原则中的一部分已经不符合当前的互联网体系需求的现状[10]，随着应用需求的刺激，我们也的确需要重新思考现有体系结构的设计原则，但是这并不意味着我们就要完全抛弃最初的设计原则，打造一个全新的互联网体系结构. 例如，尽管随着技术的发展，互联网的核心可实现的功能越来越多，也越来越可靠，但是这种复杂化同样会加剧互联网管理的难度且增加被攻击的风险，即使类似 NAT 以及防火墙这样的中间件已经得到了用户的认可，但是这些机制并不是解决问题的根本，同时也导致了更多管理的问题，端到端的保证仍然需要坚持.

事实上，我们可以想象，要想完全改变并且替代现有互联网体系结构是多么困难、甚至是不可能实现的一个任务，继承和发扬这些原则仍然有利于互联网体系结构的发展. 一方面，完全重新构建一个互联网体系结构从经济角度来说将得不偿失. 正如 Douglas Comer 教授提到的，制定一个有限的目标，构建一个具体的系统，或者解决一个具体的工程问题，比起一个宏伟的目标、复杂的系统更为现实①. 从目前革命式的发展来看，从零开始的思路也的确过于脱离现有实际，研究过程不但耗费大量的资源，且很难替换现有体系结构，实验性的结果也并不实用. 另一方面，事实上，互联网体系结构的设计原则与当前的应用目标并不完全冲突. 新一代互联网体系结构设计的目标除了互联网设计之初的目标以外，当前互联网体系结构的设计还需要考虑以下需求[11]：

(1) 扩展性. 新一代互联网应该从主要连接计算机系统扩展到连接所有可以连接的电子设备. 接入终端设备的种类和数量更多，网络的规模更大，应用更广泛.

(2) 高性能. 新一代互联网应该提供更高的传输速度，特别是端到端的传输速度应该至少达到 100 Mbps，以支持更高性能的新一代互联网应用.

(3) 安全性. 新一代互联网应该在开放、简单和

① Douglas Comer, Lessons Learned From The Internet Project. http://www.cs.purdue.edu/people/comer

共享为宗旨的技术优势基础上，建立完备的安全保障体系，从网络体系结构上保证网络信息的真实性和可追溯性，进而提供安全可信的网络服务.

(4) 实时性. 新一代互联网应该改变目前互联网“尽力而为”的服务质量控制策略，提供可控制和有保障的网络服务质量控制，支持组播、大规模视频和实时交互等新一代互联网应用.

(5) 移动性. 新一代互联网应该采用先进的无线移动通信技术，实现一个“无处不在，无时不在”的移动互联网，真正成为人们随时可用、随处可用的生活、工作和学习环境.

(6) 易管理. 新一代互联网应该克服目前互联网难以有效管理的特点，从网络体系结构上提供有效的网络管理元素和手段，实现可靠的网络、业务和用户综合管理能力.

(7) 经济性. 新一代互联网应该克服目前互联网基础网络运营商投入巨资建设网络但是亏损，网络信息内容提供商基于网络提供服务却高额盈利的不合理经济模式，创立合理、公平、和谐的多方盈利模式，保持互联网良性和可持续发展.

这些新的需求和目标与原有的部分设计原则并不矛盾. 总的来说，在互联网体系结构的演进过程中，我们仍然要立足现有的体系结构，继承和发扬并创新现有互联网体系结构的精髓，这更有利于互联网体系结构持续稳定的发展和平滑的过渡. 当然，立足于当前体系结构并不意味着单纯的在现有体系结构上打补丁. 头痛医头、脚痛医脚的方式并不能解决互联网体系结构的根本问题，显然，为了保持互联网体系结构的持续发展，还需要吸取革命式路线的创新思想，进行一些系统性的、原则性的改革.

问题 2. 如何在保持互联网体系结构现有优势的同时吸取革命式路线的创新思路?

互联网体系结构发展已经有 40 年的历史，以人类的成长阶段来算，互联网已经进入中年，和人类的中年危机相似，互联网同样面临“腰围越来越粗，可塑性越来越差”的问题，Kurose 指出①，为了克服当前的危机，互联网体系结构的设计应该解放思想，保持身材. 我们可以这样理解，为了适应新的应用和需求，保持互联网体系结构的持续发展，在互联网体系结构演进中除了遵循现有的互联网体系结构核心设计原则外，还需要借鉴革命式的创新思路，而不是仅通过打补丁的方式修修补补.

基于革命式的发展思路在设计中从现有及未来的需求出发，充分考虑互联网体系结构的开放性. 因此，为了利用这种灵活性又保证互联网体系结构的现有优势，可以在保持互联网体系结构核心原则的情况下，对互联网体系结构的基本要素进行一定的改革. 而事实上，IPv6 正是在现有体系结构基础上进行革命性创新的重要尝试.

3.2　互联网体系结构可演进性定义

经过上述的分析，我们认为互联网体系结构的发展首先应该考虑 3 个必要条件：

(1) 为了保护现有业务和网络基础设施，互联网体系结构的发展必须具有良好的稳定性，也即是说新的协议或应用能在当前互联网体系结构中保持增量部署的特性，以便新一代互联网能够在当前体系结构基础上稳定过渡.

(2) 为了保证互联网能够在多维评价指标上呈现良好的变化以满足需求的增长并促进新型应用的发展，互联网体系结构必须实现良好的可扩展性，也就是说为了保持互联网体系结构的持续发展，互联网体系结构需要进行必要的创新性改革.

(3) 作为面向用户服务的当前互联网体系结构而言，在发展过程中除了具备良好的技术前瞻性外，还需要能够产生良好的经济效益.

因此，为了在保护原有应用和技术稳定发展的同时，实现对新型应用和技术的支持，互联网体系结构必须立足于现有体系结构，在革新与稳定交错发展当中保持持续不断的演进. 基于此，我们提出如下的互联网体系结构可演进性的定义.

定义 1.　互联网体系结构的可演进性指互联网体系结构必须通过改变约束其扩展的基本要素，而产生新的指标扩展空间的特性.

如图 2 所示，可将可演进的互联网体系结构分

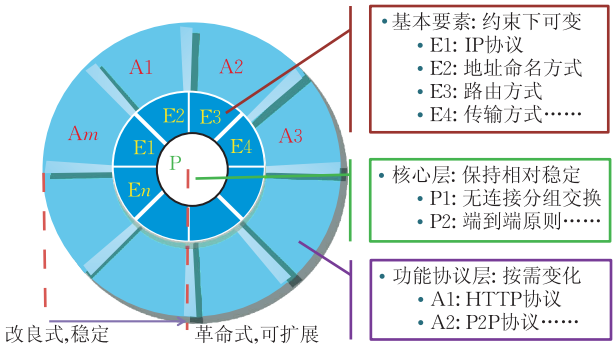

图 2　互联网体系结构可演进性示意图

① Kurose J. Networking, successes, new challenges, and an expanding waist, as the field approaches 40. IEEE Infocom keynote talk. March 2004. http://www.acm.org/fcrc/PlenaryTalks/Kurose.pdf

为 3 个层次:核心层、基本要素层及功能协议层.其中核心层指为保证互联网体系结构的稳定发展所必须坚持的互联网体系结构设计原则.基本要素层指可在一定约束条件下进行修改的协议,例如 IP 协议、地址命名方式、路由方式及传输方式等.功能协议层主要代表一些上层的应用协议,如 HTTP、P2P 协议等.

互联网体系结构可演进性的定义与基于改良式的扩展性路线存在明显区别,互联网体系结构的可扩展性是指在互联网体系结构基本要素相对稳定的情况下,规模、功能、性能等指标随网络需求变化而变化的特性.即如图 3 所示,改良式可扩展路线仅对功能协议层的协议进行修改,而互联网体系结构的可演进性在保持核相对稳定的情况下,可以改变体系结构的基本要素,提供了更灵活的选择.同时,互联网体系结构可演进性的定义还考虑到互联网体系结构发展中的稳定性问题.因此,与无所不可变的革命式路线相比更具稳定性.如图 3,我们提出的互联网体系结构可演进发展路线在革命式发展路线和改良式发展路线之间找到了一个很好的基于稳定和可扩展的平衡点.

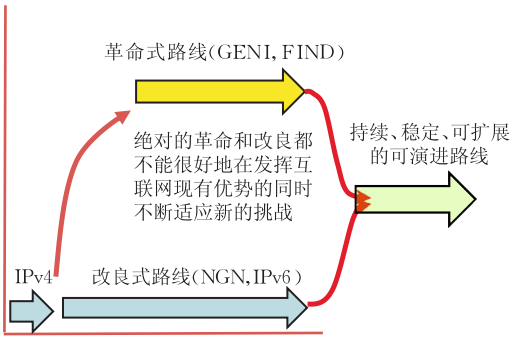

图 3 互联网体系结构可演进发展路线

3.3 可演进互联网体系结构的设计原则

互联网体系结构迫切需要发展的原因在于其固有的缺陷无法很好适应新的应用需求,包括 IP 地址有限、缺乏有效的管理和安全机制、防范攻击能力脆弱、可扩展性差等.由于移动性、多媒体、普适计算、即时通信、信息管理以及融合无线网络、传感器网络等多种应用需求对互联网体系结构的功能和性能提出了更高要求,因此,要实现互联网体系结构的演进首先必须在技术上满足应用提出的各种功能和性能需求.此外,互联网发展至今,一直坚持改良式的路线,为了适应各种应用需求进行了很多打补丁式的改良.有部分改良是成功的或临时性的,例如 CIDR.而有一些改良则耗费了相当的资源但并没有在实际部署中得到应用.这些措施无法应用的原因并不在于其不符合应用的技术需求,而在于其不具备良好的经济可行性.另外,基于革命式的路线由于过于理想化导致其设计的体系结构部署性差,目前发展缓慢、仍然没有实际的解决方案应用于互联网的事实,也让我们意识到互联网体系结构的演进不仅仅是技术上的进步,还应该考虑到社会和经济因素的影响.因此,在进行可演进的互联网体系结构设计时,必须考虑以下两大需求:

(1) 可演进的互联网体系结构必须满足技术可行性.

(2) 可演进的互联网体系结构必须满足经济可行性.

结合互联网体系结构可演进性的定义,我们确定了可演进性互联网体系结构的设计原则:

(1) 演化核相对稳定性.互联网体系结构在演进过程中需要保持其关键机制或原则相对稳定.由经验,我们将无连接分组交换和端到端原则确定为可能的演化核,演化核的确定组成需要通过可演进性评估模型确定.

(2) 模块性.互联网体系结构设计时,不同功能模块之间接口清晰,避免过度耦合,以满足各种可能的功能和性能需求.

(3) 最优性.互联网体系结构在符合其它设计原则和设计约束的情况下,整体性能尽量最优.

同时,我们认为符合可演进性的互联网体系结构还应该满足以下设计约束:

(1) 经济性约束.互联网体系结构能够为网络运营商带来经济效益,且能保持互联网中各种角色之间的效益均衡.

(2) 可部署性约束.新体系结构的设计能够吸引运营商部署.

如前文图 2 所示,我们将互联网体系结构划分为 3 层,但是如何确定各层之间的分界线是互联网体系结构可演进性研究中的难题.为此,我们需要构建一个互联网体系结构可演进性评估模型,用以评估互联网体系结构的发展趋势,最终确定互联网体系结构各层的组成.

4 互联网体系结构可演进性评估

前一节我们介绍了互联网体系结构可演进性定义和可演进互联网体系结构的设计原则.然而一个体系结构的可演进性并不是一目了然的:可演进互

联网体系结构的发展在保持核心原则相对稳定的情况下，将在一定条件下对基本要素进行改革，如何确定研究者们提出的互联网体系结构或者某种协议机制是否符合可演进性，如何确定哪些体系结构或协议更具发展优势，需要一种统一的评价标准. 如图 4 所示，基于对定义和设计原则的分析，我们提出了互联网体系结构可演进性模型评估的多个思路：

(1) 互联网体系结构扩展及演进的原因在于更好的支持不断增加的新应用需求. 因此可以从应用角度出发，研究基于应用适应能力的互联网体系结构可演进性评估模型.

(2) 新协议机制在与旧协议机制的竞争中能否获胜是新协议机制可部署性的重要方面，也是网络体系结构演进过程中的重要问题. 互联网协议机制最终是用户选择的，因此我们从用户选择的角度出发，基于微分方程等数学工具，研究基于用户效用的网络演化分析模型.

(3) 互联网是 ISP 提供的，体系结构对 ISP 是否有有激励效果也决定了哪个体系结构会在竞争中胜出，所以也可以基于博弈论等数学工具，从 ISP 效用的角度出发研究网络演化分析模型.

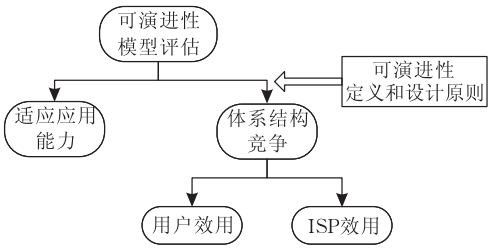

图 4　互联网体系结构可演进性模型评估思路示意图

接下来本节依次具体介绍这几个思路，并介绍几个思路下已有的研究工作和我们已经取得的一些研究进展.

4.1　基于应用适应能力的互联网体系结构可演进性评估模型

直观而言，互联网体系结构扩展及演进的原因在于更好地支持不断增加的新的应用需求. 在互联网体系结构可扩展分析方法方面，Xu 等人[12]给出了互联网体系结构多维可扩展性的定义，并提出了基于多种约束条件评价互联网多维可扩展性的数学方法，并结合实例研究了互联网在性能、规模和服务 3 个方面的可扩展性问题.

仅研究可扩展性还是不够的，我们拟从应用角度出发，研究互联网体系结构的可演进性评估模型. 部署在互联网上的网络应用是互联网普及的根本原因，因为它们能提供给用户各种各样的服务. 事实上，正是由于互联网应用的发展驱动了互联网的发展. 诸如 E-mail、Web、即时通信、P2P、多用户网络游戏、流存储视频、实时视频会议等各种类型的应用在互联网达到新高度的过程中起到了关键性的推动和促进作用. 可以说，互联网体系结构是否具备长期的活力与其支持应用需求的能力密切相关，我们将其称为互联网体系结构的应用适应能力(Application Adaptation CapaciTy，2ACT).

如图 5，我们认为互联网体系结构的应用适应能力包括两个方面：

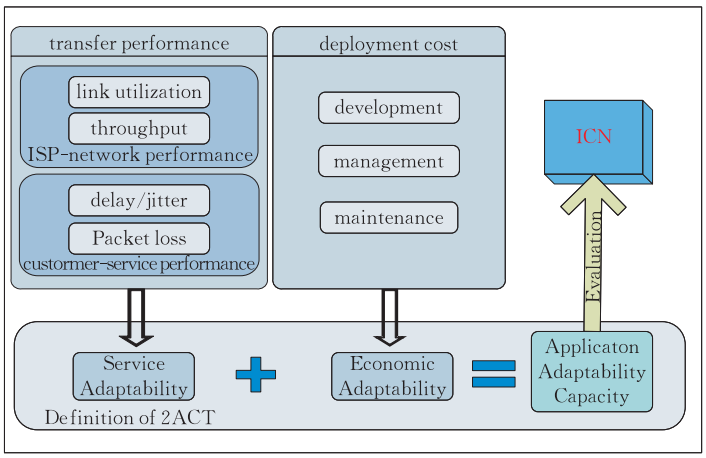

图 5　互联网体系结构应用适应能力模型框架

(1) 服务适应性

我们认为体系结构提供服务的能力是影响其发展的重要因素之一，我们将这种能力称为互联网体系结构的服务适应性. 对于不同的 ISP 或用户而言，互联网中的应用数据比例或应用需求比例并不相同，为此，我们建立了一个通用的互联网体系结构服

务适应性评估模型：

$$\mathrm{ACT}_{\mathrm{service}}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}p_{ij}Perf_{ij}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{j=1}^{n}p_{ij}=1 \tag{1}$$

其中，$\mathrm{ACT}_{\mathrm{service}}$表示互联网体系结构的服务适应能力，$m$ 表示应用分类方式的数量，n 表示在某一种分类方式下应用数据的类型种类，p_{ij} 表示在第 i 中分类方式下的第 j 类应用数据(流量)在网络中所占的比例，$Perf_{ij}$ 为互联网体系结构传输应用数据的性能，它可以表示为延迟、带宽利用率、路由跳数等性能参数的函数.

(2)经济适应性

互联网体系结构的经济适应性首先取决于其部署应要产生的开销，主要包括开发新的网络设备、升级现有网络产品、提高网络管理水平等，记为 C_{dep}. 除网络体系结构的部署以外，互联网体系结构的经济适应性还取决于其应用部署后的维护和管理所产生的支出，这里我们将其记作 C_{mt}. 互联网体系结构的经济适应性模型表示为

$$C_{\mathrm{economic}}=C_{\mathrm{dep}}+C_{\mathrm{mt}} \tag{2}$$

综合互联网体系结构服务适应性模型和经济适应性模型，我们构建了如下的互联网体系结构应用适应能力 2ACT 评估模型：

$$\begin{aligned}\text{minimize 2ACT}&=\alpha\mathrm{ACT}_{\mathrm{service}}+\beta C_{\mathrm{economic}}\\&=\frac{\alpha}{m}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}p_{ij}Perf_{ij}+\beta C_{\mathrm{economic}}\end{aligned}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{j=1}^{n}p_{ij}=1 \tag{3}$$

其中，α 和 β 用于调节应用适应性和经济适应性对可演进评估的影响. 该模型不仅适用于对不同互联网体系结构的可演进性进行评估，也适用于评估某种互联网技术.

由于互联网硬件的功能和性能也具备了一定的条件，在更便宜的存储和带宽的支持下，基于内容为中心的网络(如信息中心网络 ICN)和基于内容缓存(in-network caching)的通信模式开始受到推崇，并发展成为互联网演进过程中的一个重要方向. 由于基于内容缓存的体系结构需要消耗大量的存储开销，同时内容缓存使得网络面临着很大的路由可扩展性、快速转发、安全保护和隐私、数据缓存开销等问题，因此在应用需求不同及开销不同的情况下，内容缓存机制的优势仍然值得进一步研究. 利用 2ACT 模型，我们对基于内容缓存机制体系结构的应用适应能力和当前未部署内容缓存机制的体系结构进行了评估. 结论表明内容缓存机制仅在一定的性能和经济约束条件下才表现出更好的应用适应能力.

4.2 基于用户效用的网络演化分析模型

在互联网体系结构的演进过程中，多个体系结构并存的局面时常存在，例如 IPv4 和 IPv6 共存的局面. 新体系结构在与旧体系结构的竞争中能否获胜，竞争过程如何，是否有一些机制可以促进这个演化过程，这是新体系结构可部署性的重要方面. 基于前文的可演进互联网体系结构设计原则的分析，也是新体系结构可演进性的重要方面.

在网络比例演化建模问题上，已有一些文献[13-16]从用户或者 ISP 的效用着手考虑，研究了两个体系结构在一定初始比例条件下演化的情况. 这些模型在确定用户效用函数与网络部署比例的关系之后，运用微分方程等方法分析了网络部署比例的进一步变化情况.

我们采用和推广了这样的分析框架. 在下面的这个框架中，我们假设 n 个体系结构并存，从用户效用出发建模考察体系结构部署比例变化的情况. 注意到客观用户效用随网络规模而变化，不同用户对相同客观用户效用也可能有不同的主观评价，这两点使得这个演化过程需要较为复杂的建模分析.

记 $user_{\mathrm{all}}$ 为问题涉及的所有用户数目. 设 n 个网络当前占所考察全体用户 $user_{\mathrm{all}}$ 比例依次为

$$x(t)=(x_1(t),x_2(t),\cdots,x_n(t)) \tag{4}$$

记 $net\in\{1,2,\cdots,n\}$ 为网络序号. $gain(net,x(t))$ 为用户使用网络 net 每月获得的客观收益，$gainfix(gain,user)$ 为用户对客观收益的主观修正. $ucost(net,x(t))$ 为当前比例 x 条件下网络 net 向每个用户每月收取的费用. 则选择网络 net 的用户 $user$ 的每月效用为

$$util(user,net,x(t))=gainfix(gain(net,x(t)),user)-ucost(net,x(t)) \tag{5}$$

记 $H_i(x(t))$ 为当前应该选择 x_i 的用户比例，即用户效用 $util(user,net,x_i(t))$ 为正且比其他的用户效用 $util(user,net,x_j(t))(j\neq i)$ 大的用户的比例，即有

$$\frac{\mathrm{d}x_i(t)}{\mathrm{d}t}=\gamma(H_i(x(t))-x_i(t)) \tag{6}$$

记 $ncost(net,x(t))$ 为当前比例 x 条件下网络

net 每月的整体开销. 用户支付的费用即网络的整体费用除以该网络用户数，从而用户每月支付的费用

$$ucost(net,x(t))=\frac{ncost(net,x(t))}{\lfloor user_{\text{all}}\times x_{net}(t)\rfloor} \tag{7}$$

至此我们建立了基于用户效用和微分方程的网络演进分析模型的框架. 在具体问题中完成对用户效用的建模之后，我们便可以计算出 $util$ 和 $H_i(x(t))$，从而利用式(6)给出网络比例演化过程的解析表达式，或者直接进行数值计算.

我们将这个分析框架应用于“三网”融合问题. 三网融合是指电信网、广播电视网和互联网融合发展，实现三网互联互通、资源共享，为用户提供话音、数据和广播电视等多种服务. 三网融合提出至今已经过数年的发展，但并未最终完成，仍然处于多个网络共存的状态. 这个现象是否正常？有没有办法解决？大部分已有工作仅仅从定性角度讨论. 这里我们采用基于微分方程的网络演进分析模型进行分析，说服力较强，有助于对三网融合问题的分析和解决.

利用前面的模型框架，我们对三网融合环境下用户效用进行了具体计算，得到三网融合演化模型. 我们采用调研到的典型参数作为输入. 记互联网、电信网、广播网在 t 时刻占所有用户的比例依次为 $x_1(t)$，$x_2(t)$，$x_3(t)$. 我们在 $x_1(0)+x_2(0)+x_3(0)\leq 1$ 的范围内均匀选择了近百组初值. 对于每一组初值，采用模型计算其发展趋势. 图 6 给出了典型参数对应的三网融合演化结果. 例如图 6 中左下角椭圆圈出的线即从(0.602,0.002,0.302)的初始比例逐步演变到左下角(0.914,0.001,0.001)附近并收敛.

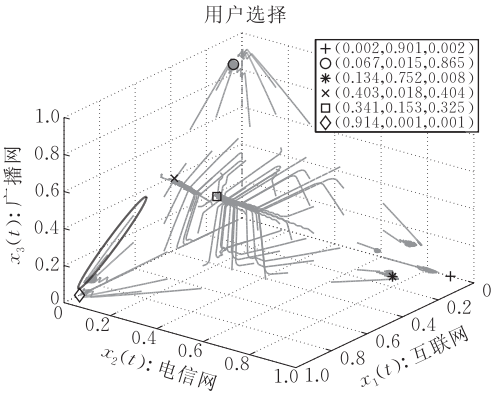

图 6　典型参数下三网融合的演化结果

结合其它一些分析，结果表明，为了促进三网融合，需要国家或者相关企业提供额外的资金投入，而三网融合的结果确实有利于减小网络系统整体开销.

从这个分析过程可以看出，这里所提出的基于微分方程的网络演进分析模型确实可以应用于网络比例演化的分析. 除了微分方程的方法之外，也可以考虑采用 Mean Field[17-18] 等其它数学工具来研究网络比例演化问题.

4.3　基于 ISP 效用的网络演化分析模型

互联网是 ISP 提供的，体系结构对 ISP 是否有激励效果也决定了哪个体系结构会在竞争中胜出. 在对可演进互联网体系结构设计约束(经济性约束和可部署性约束)的分析中，我们也分析了 ISP 对网络体系结构部署的重要作用. 所以基于博弈论等数学工具，从 ISP 效用的角度出发研究网络演化分析模型，也是一个重要思路.

Trinh 等人[19] 利用博弈论和进化动力学的工具对 IPv6 的过渡和部署问题进行了建模分析和研究，并从中获得了重要的指导信息.

纵观 IPv6 的研究，可以发现，目前绝大部分针对 IPv6 的研究都集中在技术上，包括地址的分配、双协议栈共存、新路由协议设计等，对 IPv6 在真实环境中部署和运行的问题并没有做深入的分析. 结果导致 IPv6 的技术研究取得大量成果，实际部署和运行的研究却进展缓慢.

Trinh 等人分析了 IPv6 部署缓慢的原因. 首先，作者将互联网中的 AS(Autonomous System)作为互相连接和通信且相互独立的博弈者来对待. 这些 AS 可以根据实际情况，包括运行某种协议的网络所能获得的收益、所需要的运作成本、协议迁移所需要的开销等，自主选择在自己网络中所运行的协议. 然后，通过博弈理论的分析，作者发现所有 AS 都使用 IPv6 协议栈将是博弈的纳什均衡，也就是说所有的 AS 都部署和使用 IPv6 是最优的情况(AS 获得的效益最大)，从而在理论上说明了部署和运行 IPv6 的优势. 除此之外，作者还利用进化动力学工具对 IPv6 部署规模的特性进行了分析，结果发现如果在初始阶段，互联网中有一定数量的 AS 部署了 IPv6(具体的实现可能需要政府组织对 IPv6 的部署实施激励措施)，那么 IPv6 的全网部署就会更快更可行.

Trinh 等人的研究说明，互联网的发展并不完全是技术上的问题. 其它因素，如商业运作、管理运维等，都是不可忽略的重要因素. 因此我们在研究互联网体系结构的发展时需要对各方面因素尤其是互联网体系结构所能产生的经济效益进行综合考虑.

5 可演进网络体系结构实验网络

近年来,许多新的体系结构被提出,很难说未来哪一种或几种结构将部署与实际应用.但是,在诸如数据、视频、音频、移动及无线等多种应用的驱动下,多种网络体系结构并存、融合的可能性越来越大.因此,开发一种可兼容并支持多种网络体系结构的可演进体系结构实验网络,不但有利于我们了解各种网络体系结构的优势和缺陷,也有利于我们看清体系结构未来的发展方向或者指导未来的发展.

本节先介绍实验网络设计思路和整体架构;然后重点以地址和标识管理系统为例,介绍实验网络的设计方法;最后介绍我们在互联网体系结构演进方面的初步实践.

5.1 实验网络设计思路和整体架构

体系结构实验网络的思路并不是全新的思想,相关研究已经开展多年,取得了一些成果,但也有不尽人意的地方.我们认为,在一个没有限制的环境下进行设计,并不利于网络研究人员得到相当合适的网络体系结构设计.相反,在确定可演进网络体系结构设计原则的前提下,特别是在保持互联网演化核相对稳定的前提下,进行体系结构研究,很可能是更有利的.

基于这样的观察和思考,我们希望在实验网络中要求实验方案遵循可演进网络体系结构的设计原则(演化核相对稳定性、模块性和最优性)和设计约束(经济性约束和可部署性约束).这样的实验网络比 GENI① 限制稍微严格一些.通过牺牲一定的实验自由度,换取实验方案的可部署性和其它可演进特性,使得实验方案可以应用于实际网络.这样的限制是合理和有实际意义的.而对于其它方面我们则允许实验人员自由设计.

在这样的原则下我们提出可演进网络体系结构实验网络的设计构想.我们的研究目的并不是设计一种新的可演进的网络体系结构,而是提供一个实验网络,使得基于 IP 的可演进网络体系结构都可以在该实验网络上进行实验.

该实验网络应该满足如下需求:

(1)保证可演进网络体系结构的各项原则:一方面实验网络在设计约束的时候应该尽量将可演进原则作为设计约束,另一方面网络应该提供一些方法,方便研究人员验证设计结果的可演进性.

(2)承载多种现有体系结构或未来的体系结构,主要是要求实验网络设计时能够把握基于分组交换网络体系结构的关键共性.

(3)协助保证网络传输的低延迟、低开销.

(4)协助保证网络中的各种安全性问题.

(5)通过提供通用的通信原语,协调各种体系结构,保证它们之间的相互通信.

我们所设计的实验网络示意图如图 7 所示.从网络体系结构的主要组成部分出发,我们认为需要研究基于 IP 的可演进网络体系结构地址、路由、传输这 3 个模块的通用参考模型和实验网络设计,如

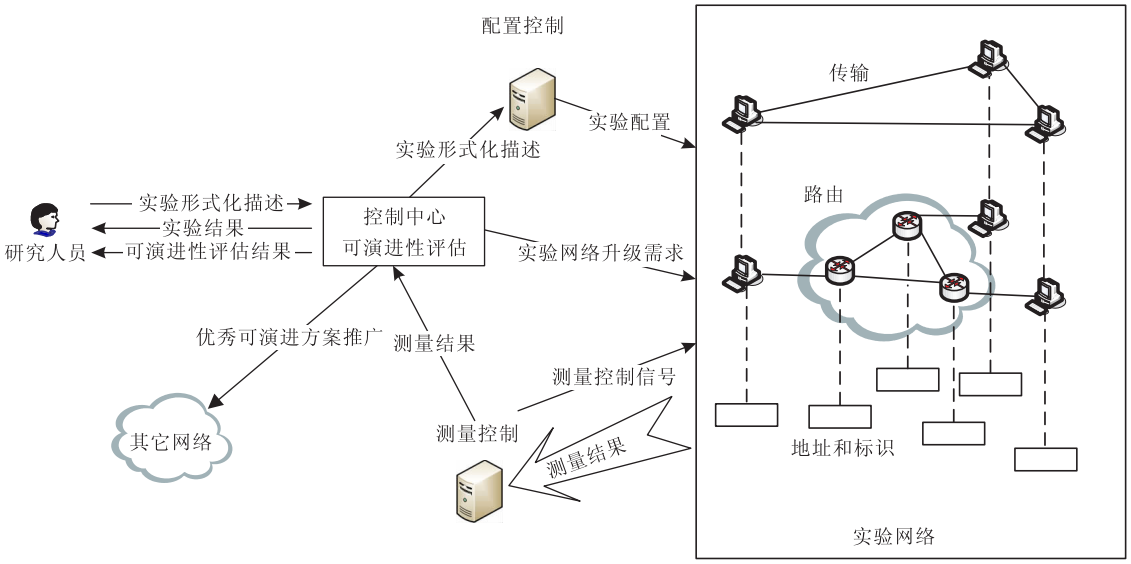

图 7 实验网络示意图

① GENI. http://www.geni.net

图 7 右侧实验网络部分所示. 整个实验平台由控制中心来主导. 研究人员根据我们制定的实验形式化描述方法，将实验方案及其形式化描述向控制中心申请. 控制中心同意实验后，将实验配置通过配置控制服务器部署到整个实验网络. 测量控制服务器负责对网络情况进行测量，汇总测量结果向控制中心报告. 控制中心收到实验结果后，结合实验方案，基于我们所提出的可演进性评估方法，对所提出方案的可演进性进行评估，并将实验结果和可演进性评估结果反馈给研究人员. 与此同时，控制中心对于优秀的可演进方案，可以协助研究人员推广到其他运营商的网络. 控制中心还可以针对我们和研究人员的进一步研究需求，对实验网络进行一定的升级.

5.2　地址和标识管理系统

下面重点以地址和标识管理系统为例，介绍实验网络的设计方法.

未来的地址和标识管理系统应能在现有 IP 网络环境下动态地支持各种不同的网络服务和新的业务需求，并且可采用一个分布式解析映射系统对概念范畴内的不同实体进行区分和访问. 其中的每个实体具备分配一个标识，地址和标识属性语意完备规范，可被编程语言系统描述，使其在网络中能得以灵活地编址和处理(包含有可执行代码)，从而实现更开放、更高性能和可提供更多高层服务的通用地址和标识管理系统. 其动态可编程特性主要体现在通过一系列应用编程接口(APIs)构建高适应性的、多样化的寻址结构(包括可用规范语意描述和定义的身份标识和位置标识空间). 网络节点由被动地传输信息发展为能主动地处理信息，用户同时也由被动地使用网络发展到能主动地可伸缩地参与和定制自己需要的地址与标识模型.

可编程的地址与标识管理系统和传统地址系统有显著差异. 图 8 以三维的形式给出了可编程的地址与标识管理系统的一个计算模型. 这个模型包含了 Internet 参考模型(即应用层、传输层、网络层、链路层)，并在其之上扩展了分布式映射解析、控制和管理平台. 这种对传输、控制和管理的划分使我们的计算模型能同时适用于现有和未来的互联网. 我们的通用模型能为不同的网络提供统一的抽象解释. 通过在网络中注入可编程功能可实现网络地址和表示结构、规范和服务的伸缩性和异构融合性，使得可编程的地址与标识管理系统在这些平台上可以对网络体系结构的各层次(包括应用层、传输层、网络层和链路层)进行编程.

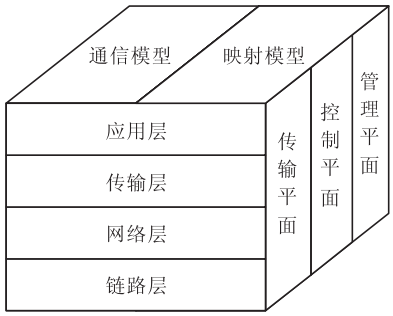

图 8　可编程的地址与标识管理系统模型

我们通过 XML 来描述地址或者标识，图 9 给出了 IPv6 地址属性的 XML 描述例子.

```
〈?xml version="1.0"?〉
〈xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
 elementFormDefault="qualified" 〉
  〈xs:simpleType name="ipv6_Address" 〉
   〈xs:restriction base="xs:string" 〉
    〈xs:pattern value="([A-Fa-f0-9]{1,4}:){7}[A-Fa-f0-9]
                       {1,4}"/〉
   〈/xs:restriction〉
  〈/xs:simpleType〉
〈/xs:schema〉
```

图 9　IPv6 地址属性 XML 描述例子

5.3　互联网体系结构演进的初步实践

目前，工业界和学术界许多研究者都倾向于将 IPv6 作为新一代互联网的 IP 层协议. 为了解决互联网地址空间枯竭的问题，IETF 早在 1995 年前就制定了 IPv6 协议并于 1996 年开始创建 IPv6 实验网 6Bore. 随后，美国、中国也相继开展了基于 IPv6 的相关研究.

1996 年 10 月，美国政府宣布启动“新一代互联网”(NGI)研究计划以推动互联网的更新换代. 为解决当时互联网带宽不足、网络服务质量得不到保证、安全性差等问题，由 34 所大学和科研机构在芝加哥组建了 Internet2，并成立了 UCAID(The University Corporation for Advanced Internet Development)以管理 Internet2. 其主要目的是共同开发和部署高级网络应用及技术，加速未来互联网的发展，并最终建成全球性的商业化互联网. 目前，Internet2 已经成为一个全球性的未来互联网研究组织，其成员已超过 200 所大学、45 个企业及 60 个政府机构，同时它还拥有 50 个国际合作伙伴①.

我国较早开展了 IPv6 的国际合作研究. 1998

① About Internet2. http://www.internet2.edu/about

年,中国教育和科研计算机网 CERNET 加入了 6Bore,并建立了国内第一个 IPv6 实验床. 2000 年底,国家自然科学基金委支持启动了"中国高速互联研究实验网络(NSFCNET)"项目,研制成功了中国第一个地区性新一代互联网实验网络并首次实现了与 Internet2 的连接.

2003 年中国新一代互联网示范工程(CNGI 项目)启动,该项目的主要目的是搭建以 IPv6 为核心的新一代互联网实验平台. 以此项目的启动为标志,中国的 IPv6 进入了实质性发展阶段. 该项目建成了下一代中国教育与科研计算机学术网(CNGI-CERNET2,如图 10)、中国电信、中国网通/中国科学院、中国移动、中国联通、中国铁通等六大核心网,以及北京和上海两个国内国际互联交换中心.

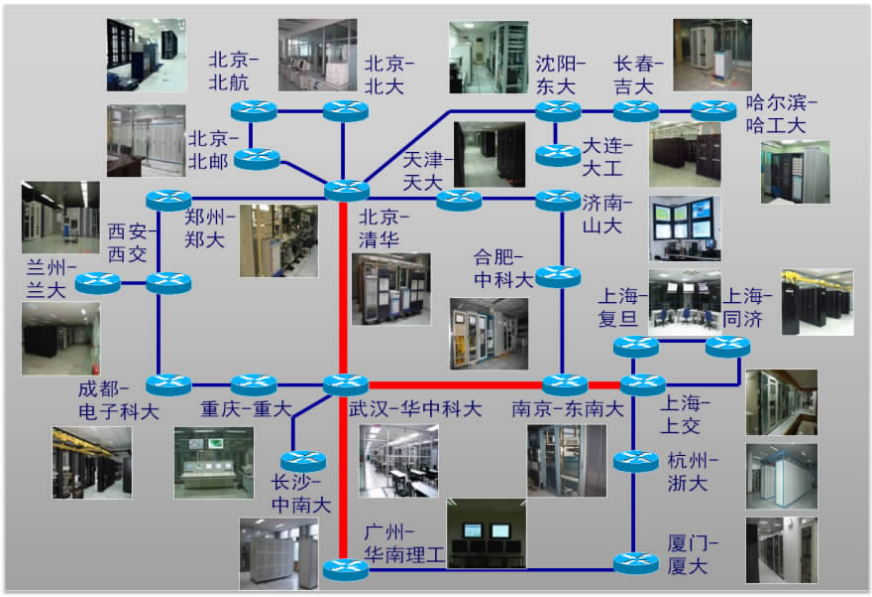

图 10 CNGI-CERNET2 主干网

当然,IPv6 并不代表新一代的互联网体系结构,它只是互联网体系结构的一次演进. 为了保持互联网体系结构的持续发展,在必要的情况下,为了满足应用需求,互联网体系结构还需要在不违背现有体系结构基本原则的情况下进行其它必要的改革.

使用 CERNET2 作为平台有如下优势:

(1) CERNET2 作为一个以 IPv6 为核心的新一代互联网,是未来发展的方向,在该平台中表现良好的体系结构和协议机制更容易适应未来需求;

(2) 目前,CERNET2 分布到全国各地,流量曲线模型已经与商业网络流量相近①,主干网入/出流量常年在 30Gbps 以上②,其规模完全达到大规模网络实验的要求;

(3) 作为一个实验网络,CERNET2 上部署实验较商用网络更容易.

6 总 结

本文回顾了互联网设计原则与互联网体系结构可演进性相关的研究工作,提出了可演进体系结构的 3 个设计原则(演化核相对稳定性、模块性和最优性)和两个设计约束(经济性和可部署性). 基于这些设计原则,我们提出了互联网体系结构可演进性评估模型. 此外,我们还提出了基于 IP 的可演进网络体系结构实验网络的设计思路.

在本文所提出的框架下,我们计划进一步研究互联网体系结构可演进性评估模型,针对所提出的思路进一步完善和总结评估框架,并实际应用于若干体系结构重要问题的可演进性评估. 另一方面我们将进一步完善网络体系结构实验网络以便实际部署使用,并不断完善和深化所提出的可演进性设计原则和设计约束.

参 考 文 献

[1] Srisuresh P, Ford B, Kegel D. State of Peer-to-Peer (P2P) communication across Network Address Translators

① 6NOC 2009 年 4 月:CNGI-CERNET2 流量曲线与商业网络趋同. http://www.edu.cn/6noc_7426/20090608/t20090608_382958.shtml

② 6NOC 2011 年 6 月:CNGI-CERNET2 南京节点出流量名列前茅. http://www.edu.cn/6noc_7426/20110905/t20110905_679504.shtml

(NATs). RFC 5128. March 2008

[2] Wu Jian-Ping, Wu Qian, Xu Ke. Research and exploration of next-generation Internet architecture. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(9): 1536-1548(in Chinese)
(吴建平，吴茜，徐恪. 下一代互联网体系结构基础研究及探索. 计算机学报，2008，31(9)：1536-1548)

[3] Xu Ke, Zhu Min, Liu Ying et al. Research progress in the evolvability of new-generation Internet architecture//CCF. Development Report on China's Computer Science and Technology 2010. Beijing: China Machine Press, 2011: 72-101(in Chinese)
(徐恪，朱敏，刘莹等. 新一代互联网体系结构可演进性研究进展//中国计算机学会. 2010 中国计算机科学技术发展报告. 北京：机械工业出版社，2011：72-101)

[4] Akhshabi S, Dovrolis C. The evolution of layered protocol stacks leads to an hourglass-shaped architecture//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 Conference. New York, USA, 2011: 206-217

[5] Rexford J, Dovrolis C. Future Internet architecture: Clean-slate versus evolutionary research. Communications of the ACM, 2010, 53(9): 36-40

[6] Feldmann A. Internet clean-slate design: What and why? ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(3): 59-64

[7] Dovrolis C, Streelman J T. Evolvable network architectures: What can we learn from biology? ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 40(2): 72-77

[8] Dovrolis C. What would Darwin think about clean-slate architectures? ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(1): 29-34

[9] Clark D D. The design philosophy of the DARPA Internet protocols. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1988, 18(4): 106-114

[10] Blumenthal M, Clark D. Rethinking the design of the Internet: The end-to-end arguments vs. the brave new world. ACM Transactions on Internet Technology, 2001, 1(1): 70-109

[11] Wu Jian-Ping, Liu Ying, Wu Qian. Theoretical research progress in new-generation Internet architecture. Science in China Series E: Information Sciences, 2008, 38(10): 1540-1564(in Chinese)
(吴建平，刘莹，吴茜. 新一代互联网体系结构理论研究进展. 中国科学 E 辑：信息科学，2008，38(10)：1540-1564)

[12] Xu K, Xu M W, Li Q et al. Analysis and case study on multi-dimensional scalability of Internet architecture. Science in China Series F: Information Sciences, 2008, 51(11): 1661-1680

[13] Chan H W, Dash D, Perrig A et al. Modeling adoptability of secure BGP protocols. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2006, 34(1): 389-390

[14] Joseph D, Shetty N, Chuang J et al. Modeling the adoption of new network architectures//Proceedings of the 2007 ACM CoNEXT conference. New York, USA, 2007: 5:1-5:12

[15] Sen S. On economic viability of network systems and architectures[Ph. D. dissertation]. University of Pennsylvania, Charlottesville, USA, 2011

[16] Sen S, Jin Y, Guéri R et al. Modeling the dynamics of network technology adoption and the role of converters. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(6): 1793-1805

[17] Lelarge M, Bolot J. Network externalities and the deployment of security features and protocols in the Internet. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2008, 36(1): 37-48

[18] Benam M, Le Boudec J-Y. A class of mean field interaction models for computer and communication systems//Proceedings of the 4th International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools. Brussels, Belgium, 2009: 39:1-39:10

[19] Trinh T, Gyarmati L, Sallai G. Migrating to IPv6: A game-theoretic perspective//Proceedings of the 35th Conference on Local Computer Networks (LCN). Denver, USA, 2010: 344-347

WU Jian-Ping, born in 1953, Ph.D., professor, Ph. D. supervisor. His main research interests include computer network architecture, protocol engineering and Next Generation Internet (NGI).

LIN Song, born in 1984, Ph. D. candidate. His main interests include Next Generation Internet and P2P network.

XU Ke, born in 1974, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His main research interests include Next Generation Internet, switching and routing structure, P2P network, overlay network and Internet of Things.

LIU Ying, born in 1973, Ph. D., associate professor. Her main research interests include computer network architecture and Next Generation Internet.

ZHU Min, born in 1977, Ph. D. candidate. Her main research interest is Next Generation Internet.

Background

The current Internet is at the stage of transition to the Next Generation Internet (NGI). Over the past several years, the networking research community has engaged in how to move the Internet forward. Some researchers agree with the "clean slate" approach, and suggest that Internet should be redesigned. Some researchers agree with the "evolutionary" approach, and suggest that we should focus on improving the current Internet.

By analyzing the advantages and disadvantages of the two approaches, as well as the situation of the current Internet, we believe that the development of NGI architecture should adopt a path called "evolvable", which is a compromise between "clean-slate" and "evolutionary": keeping Internet's core design principles, and carefully change its basic elements in order to accommodate and better support requirements from new applications.

To better address problems related with Internet architecture evolvability, this paper analyzes the development trends of the Internet architecture, proposes the definition of evolvability, and put forward design principles and design constraints of the evolvable Internet architecture. We also propose several ideas for the evaluation model of Internet architecture evolvability, and put forward the preliminary ideas of designing an IP-based experiment platform for evolvable Internet architectures.

This work has been supported by National Basic Research Program (973 Program) of China (No. 2009CB320501, No. 2009CB320503), and National Natural Science Foundation of China (No. 61170292).