

# 互联网体系结构评估模型、机制及方法研究综述

徐 恪 朱 敏 林 闯

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

**摘 要** 互联网体系结构评估模型是推动互联网体系结构持续发展的理论支撑,它可以为运营商提供网络体系结构设计的相关建议,从而使运营商可选取最适合的协议或机制构建符合各种应用需求的互联网体系结构.随着互联网应用日趋多样化,互联网的安全性、稳定性、移动性等面临越来越大的挑战.互联网体系结构的演进已经成为学术界和工业界的共识,面向现有体系结构问题的修补策略以及革命式的体系结构方案不断被提出,借鉴前者的稳定性和后者的创新性,我们提出了一种基于演进式的互联网体系结构发展思路.为了更好地了解各种互联网体系结构发展方案,近年来,研究人员分别从协议、框架等不同方面对体系结构的服务能力、发展能力和安全能力进行了评估,互联网体系结构评估方法已经成为未来互联网体系结构研究的一大热点.文中介绍了与互联网体系结构发展密切相关的五种特性的基本评估模型,包括可服务性、可扩展性、可部署性、可演化性和可信性评估模型;归纳了用于构造互联网体系结构评估模型的机制,重点讨论了效用机制在这五类基本评估模型中的应用;并对用于实现互联网体系结构评估的若干方法进行了总结.基于上述讨论,文中最后从互联网体系结构的内在特性和外在特性出发,提出了一种基于适应能力的互联网体系结构可演进性评估系统,并对互联网体系结构评估领域的发展进行了展望.

**关键词** 互联网体系结构;评估模型;效用;可演进性

**中图法分类号** TP393 **DOI号**: 10.3724/SP.J.1016.2012.01985

## Internet Architecture Evaluation Models, Mechanisms and Methods

XU Ke ZHU Min LIN Chuang

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

**Abstract** The Internet architecture evaluation models serve as the theoretical foundation to promote the sustainable development of the Internet architecture. It ensures that the operators and users of the Internet are able to choose the most suitable protocols or mechanisms to construct an Internet architecture that satisfies various kinds of application requirements. With the increasing diversity of the Internet applications, the security, stability, and mobility of Internet are facing more and more challenges. Therefore, the evolution of the Internet architecture has become the consensus among both academics and industry practitioners. In recent years, both the modification strategies and the Dirty-Slate strategies of the internet architecture have been proposed. Building on the stability of the former and the novelty of the latter, we propose an Internet architecture based on the evolutionary model. Beside the internet architecture itself, the architecture evaluation methods have also become increasingly important in the design of Internet architecture. The service capacity, the development capacity, and the security capacity of the Internet architecture have been assessed by researchers from the perspectives of the protocol and the frame-

收稿日期:2012-06-30;最终修改稿收到日期:2012-08-16. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2009CB320501, 2012CB315803)、国家自然科学基金(61170292, 60970104)和国家科技重大专项(2012ZX03005001-001)资助. 徐 恪,男,1974年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为新一代互联网体系结构、高性能路由器、P2P 与应用层网络、Overlay 网络、物联网. E-mail: xuke@mail. tsinghua. edu. cn. 朱 敏,女,1977年生,博士研究生,主要研究方向为计算机网络体系结构研究及其评估. 林 闯,男,1948年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络、系统性能评价、安全分析、Petri 网及其应用.

work. In this article, we introduce the basic evaluation models of the serviceability, the scalability, the deployment, the evolvability and the reliability of the Internet architecture; summarize the mechanisms of constructing the Internet architecture evaluation models; discuss the application of the utility theory in the evaluation models; and survey the existing evaluation methods. Based on the survey, we propose an adaptability-oriented Internet architecture evaluation system, taking into consideration of the internal and external properties of the Internet architecture; and discuss the prospectus of the Internet architecture evaluation.

**Keywords** Internet architecture; evaluation model; utility; evolutionary

## 1 引 言

互联网的飞速发展促进了社会的进步和人类生活方式的改变<sup>[1-5]</sup>,与此同时,创新应用和新型计算模式的不断涌现,也加速了互联网前进的步伐和角色的转变,尤其是近年来,P2P 等多媒体应用和云计算得到大规模发展,互联网的功能开始由传统的“通信信道”向“数据处理平台”转变.然而,在规模爆炸式增长,应用频繁更新,无线移动通信技术不断发展的影响下,现有互联网体系结构与不断变化的应用环境之间的矛盾日益尖锐.未来互联网体系结构的发展问题已经成为学术界和工业界关注的焦点<sup>[6-8]</sup>,目前,相关的研究思路可以分为三类,如图 1 所示.

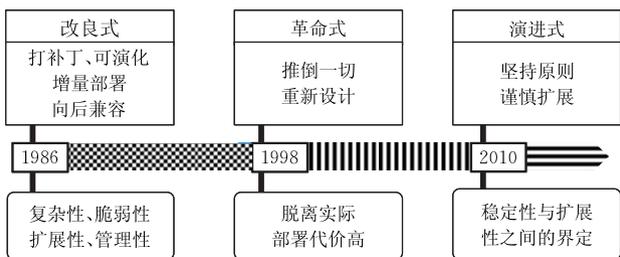


图 1 互联网体系结构发展思路

一直以来,互联网工程任务组织 IETF<sup>①</sup>(Internet Engineering Task Force)对互联网各技术领域开展了持续深入的研究,并发布了大量 RFC(Request for Comments)标准用于解决互联网体系结构的传输安全、传输服务质量、地址解析、用户移动等问题.这些标准在维持互联网体系结构向后兼容的前提下以打补丁的方式,对体系结构进行了增量式的修补,因此被称为改良式的发展路线.尽管如此,由于传统互联网体系结构本身在可扩展性、安全性、移动性等方面存在固有的弊端,针对性的修补策略仍然难以满足当前复杂的应用需求变化.同时,由于改良的方式加入了大量中间件,导致互联网体系结

构原有的沙漏模型受到破坏,使其演变为一个打满各种“补丁”的复杂而臃肿的结构,面临着更加严重的脆弱性、可扩展性、管理和互操作等问题.

针对如何解决现有互联网体系结构的不足以及未来互联网体系结构如何发展的问题,世界各地的研究者和学者们也开展了大量研究项目并发表了大批研究论文,提出了相关建议,这些思路可以归纳为革命式和演进式两种.

主张革命式路线的研究者认为互联网当前的应用新需求已经超出了传统互联网的处理能力,因此突破限制,设计全新的互联网体系结构,从根本上解决现有体系结构存在的问题才是未来互联网体系结构的发展思路.目前,世界各发达国家都在这一思想指导下开展了相关的研究,例如,美国政府资助的 FIND<sup>②</sup>(Future Internet Network Design)、美国顶尖机构及大学支持的国家级未来互联网实验床 GENI<sup>③</sup>(Global Environment for Network Innovations)、欧盟的 FIRE<sup>④</sup>(Future Internet Research and Experimentation)等,文献[9-10]对这些研究项目进行了较全面的总结.在这些项目的指导下,研究者们提出了各种未来互联网体系结构架构,包括基于开放性思路的体系结构 FII<sup>[11]</sup>、XIA<sup>[12]</sup>、OPAE<sup>[13]</sup>,具备 ID/Locator 分离思想的协议 AIP<sup>[14]</sup>、HIP<sup>[15]</sup>,面向数据的网络 CCN<sup>[16]</sup>、NDN<sup>[17]</sup>、DONA<sup>[18]</sup>,以及面向安全的分层命名体系结构<sup>[19-20]</sup>等.尽管革命式路线的研究从理论上解决了互联网体系结构的许多问题,但是它脱离了当前体系结构的社会现状,导致其设计、部署的代价远超过其可能获取的利益,因此目前并无太多实质性进展.

鉴于改良式路线过于墨守成规,革命式过于激进,一部分研究者开始寻求折中的方案,例如,

① <http://www.ietf.org/>

② <http://www.nets-find.net/>

③ <http://www.geni.net/>

④ <http://cordis.europa.eu/fp7/ict/fire/>

Ratnasamy 等人<sup>[21]</sup>就从技术和经济两个角度出发,提出了可演化的 IP 的概念,作者将体系结构的进化理解成一种循序渐进的改变并通过分析一种全新的 IP 协议在当前网络中的部署过程对这一概念进行了说明.这类方案说明了在改良式和革命式的路线中寻求第三种思路的可能性,但它们大都未给出具体的发展思路.而针对当前互联网体系结构的发展瓶颈,Blumenthal 和 Clark<sup>[22]</sup>对互联网体系结构的最初设计原则也重新进行了审视,提出体系结构的发展只会不断地寻求新的平衡点,而任何对技术形态的一种最终预测都是不准确也不必要的.同时,他们认为现有体系结构的众多设计原则都是互联网得以滋生、创新和发展的必要条件,不应被草率丢弃.遵循这一思想以及研究者们前期的工作,借鉴改良式和革命式各自在稳定性和创新性上的优点,Xu 和 Wu 等<sup>[23-24]</sup>提出了介于两者之间的基于演进式的互联网体系结构发展思路.与革命式的发展思路不同,演进式思路认为互联网的无连接分组交换、端到端等核心机制和设计原则是保持互联网充满活力和迅速发展的根本原因.因此,在扩展当前体系结构时,应坚持这些核心和设计原则相对稳定.此外,不同于改良式路线,演进式的思路在坚持核心原则不变的基础上,还提出应进行适当的突破性革新,谨慎地改变约束体系结构扩展的基本要素,以适应和更好地支持新应用需求.值得说明的是,坚持或突破现有的哪些设计原则以保证在保持互联网体系结构稳定过渡的同时,增强其可扩展性是可演进路线研究中的重点和难点.

针对未来互联网体系结构的发展,数以百计的新方案、新策略被提出,然而,目前被广泛接受并被应用的方案却很少.事实上,在进行未来互联网体系结构理论架构研究的同时,研究者们需要确保自己提供的方案得到大众的认可,这也正是互联网体系结构评估工作的主要目的所在.

对互联网体系结构进行评估,首先需要明确互联网体系结构的定义.由于互联网是一门偏重实践性的工程技术学科,因此尽管“互联网体系结构”已经是计算机研究领域中耳熟能详的用语,但到目前为止,业界对其仍然没有明确、统一、完整的定义.研究者通常会根据需要和不同的理解赋予其不同的涵义.例如,Tanenbaum<sup>[25]</sup>将互联网体系结构定义为分层和协议的集合,Peterson 等人<sup>[26]</sup>将互联网体系结构定义为指导互联网设计与实现的通用蓝图,Clark 等人<sup>[27]</sup>则将互联网体系结构定义为指导互联

网关键设计(如协议、机制、算法等)的一系列抽象原则,包括自定义的报文分组、端到端原则、多种技术及全局寻址方案等.

从互联网体系结构的定义可以看出互联网体系结构是一个囊括了协议、算法、机制、框架各层次元素的系统.因此,针对互联网体系结构的评估也相当复杂,从互联网体系结构协议、算法、机制到互联网框架的功能和性能评估,从体系结构完整性到安全性的评估,从体系结构服务能力到发展能力的评估,相关的研究成果层出不穷.这些评估工作为互联网体系结构的发展提供了有效的理论支撑.用户、运营商、内容提供商通过参考体系结构相关的评估结果,如各种性能参数,可以解决哪些发展方案更可取、各种方案并存下的发展趋势等问题.此外,互联网体系结构评估工作也为互联网中决策者的选择乃至国家的互联网政策走向提供了参考、借鉴和指导依据.

本文在简要介绍目前互联网体系结构发展思路的基础上,从评估模型、机制、方法三个角度对互联网体系结构评估工作目前的研究现状进行了综述,重点对与互联网体系结构发展密切相关的体系结构服务能力(可服务性)、发展能力(包括可部署性、可扩展性、可演化性)和安全能力(主要指可信性)的评估工作进行了总结,并从适应性的角度提出了一种全新的互联网体系结构可演进性评估思路,以期对未来互联网体系结构的研究和评估提供参考.

本文第 2 节简要总结互联网体系结构评估工作近年来的发展现状;第 3 节介绍五种对互联网体系结构发展最具影响的评估模型,包括互联网体系结构可服务性、可扩展性、可部署性、可演化性和可信性评估模型;第 4 节对互联网体系结构的评估机制—效用机制的相关背景及其在五种互联网体系结构基本评估模型中的应用进行介绍;第 5 节对实现互联网体系结构评估的方法,即各学科在互联网体系结构评估中的应用进行总结;第 6 节在分析和比较当前评估工作成果的基础上,讨论互联网体系结构可演进性评估的要素,并提出一种基于适应能力的互联网体系结构可演进性评估系统;最后一节对全文进行总结和展望.

## 2 互联网体系结构评估工作现状

互联网是一个囊括各种协议、能提供多种应用服务的复杂系统,不同层次、不同角度具有不同的评价指标,很难用一套统一的标准和手段来评估,毫无

疑问,互联网体系结构的评估工作具有极大的挑战性.本节将对互联网体系结构目前的两种主要评估手段:基于定性分析和比较的评估和基于模型的评估进行总结分析.

## 2.1 基于定性分析比较的互联网体系结构评估

结合理论的定性分析通过抽象思维和对比来揭示事物的本质和内在联系,在各学科的研究中一直扮演着重要的角色,它也是互联网体系结构评估的主要手段之一.例如表 1 中的相关文献就使用了定性分析和比较的方法揭示互联网体系结构的一些本质特性.

表 1 基于定性分析比较的互联网体系结构评估示例

文献	内容描述
[28]	对互联网体系结构面临的挑战、如何使用革命式路线解决这些挑战以及如何评估这些解决方案进行了分析阐述.
[29][30]	对计算机网络体系结构发展与生物遗传学之间的相似性进行了对比分析并提出了互联网体系结构发展的基本原则.
[31]	Rexford 和 Dovrolis 分别旗帜鲜明地论述了各自对革命式发展路线和改良式发展路线的不同态度.

文献[31]中,支持革命式路线的 Rexford 认为边缘论的确为现有互联网的底层传输和上层应用提供了极大的灵活性,也为互联网的创新和发展发挥了重要作用,但这种体系过于僵化,难以适应复杂的需求变化,而缺乏条理性和系统性的打补丁策略也进一步加剧了现有互联网体系结构的杂乱无章和漏洞百出的问题.反观革命式设计,力图从设计之初就将网络可编程属性、体系结构的独立、模块化、条理化融入考虑,以有效解决附着在现有体系中的安全、管理、业务等方面的问题,更有利于也更适于未来各种应用需求的发展.而支持改良式路线的 Dovrolis 对此进行了针锋相对的讨论,他认为改良式路线的目标是分析互联网现有的行为特征,识别其存在的问题并在遵循向后兼容以及增量部署的原则下解决问题,是符合演进发展规律的.事实上,大量符合演进特性的技术,例如 NAT、Diffserv 也确实在互联网发展中得到了合理的应用.同时,TCP/IP 的体系结构和边缘论思想正是互联网不断衍生、发展壮大,乃至必需坚守的根本. Dovrolis 还指出尽管革命式发展思路看似新鲜,实则由来已久,曾经具有相当的影响力但最终都无疾而终的主动网络<sup>[32]</sup>、传输协议 XCP<sup>[33]</sup>、域间路由体系结构 NIMROD<sup>[34]</sup>都产生于这一思想.这种在不受现有技术体制制约的条件下设计全新且最优体系结构的方式导致其所需的成本远远超过了它们可能带来的利益,而互联网的发展

绝对不是简单的技术问题,它是一个复杂的综合系统,因此想通过一个经济受极大约束的新技术来取代一个虽然技术相对处于劣势但已广泛部署的技术是不太可能的.

尽管基于定性分析和比较的方法让研究者们更好地了解了互联网体系结构发展中各种思路的优劣,但是它仅属于一种主观的分析,并不能为用户和运营商们带来客观的影响,也没有确实的数据结果提供参考.建立合理的数学模型对于互联网体系结构评估工作至关重要.

## 2.2 基于模型的互联网体系结构评估

模型是对现实世界中各种事物本质特性的抽象表示,它将现实问题归结为相应的数学、物理学、经济学等科学问题,并利用相关学科的方法和理论对问题进行深入研究,是分析、构造、开发各种系统必不可少的工具.对于复杂的互联网体系结构而言,建立有效的模型可以对体系结构给予定性和定量的评价,因此,模型是目前用于互联网体系结构评估最主要的手段.

尽管建立模型的手段和方法因为需求的不同而多种多样,但建立模型的过程通常大同小异.在现有互联网体系结构的评估工作中,基于模型的评估一般围绕以下 3 个问题展开(如图 2 所示):

(1) 评估对象(who),即评估什么的问题.

体系结构是一种具有层次关系的架构,分布在不同层次的多种协议机制共同为实现各种应用需求提供服务.因此,根据评估主体对象的不同可以将互联网体系结构的评估分为面向体系结构机制、协议的评估及面向体系结构框架的评估.

无论是协议还是体系结构框架,都包括多种属性特征,如性能、可用性、安全性、灵活性、可靠性、容错性、向后兼容性、可扩展性、可部署性等,通常研究者们也会针对不同的特征进行评估建模.因此,根据评估目标对象的不同,又可以将互联网体系结构的评估分为体系结构服务能力的评估、体系结构发展能力的评估以及体系结构安全能力的评估.

互联网体系结构的服务能力主要指其能够为用户提供的各种应用服务性能,这里我们将其简称为体系结构的可服务性,如 RAS(Reliability, Availability, Serviceability)、QoS、可管理性、稳定性等.其中,RAS 是评价体系结构硬件性能的重要指标,它反映了计算机持续运行、处理各种状况的能力.QoS 对体系结构满足用户需求的能力,即体系结构的数据传输能力进行评估,评估对象主要包括数据传输的

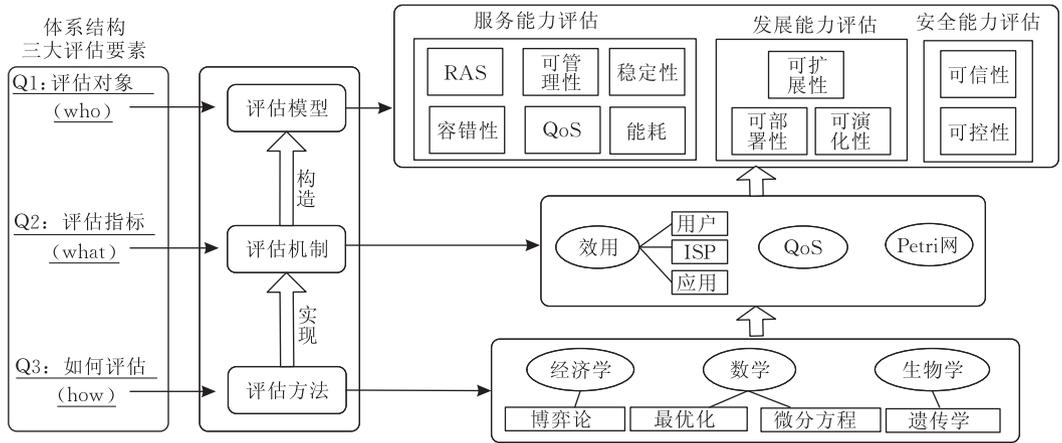


图 2 互联网体系结构评估模型、机制和方法

延迟、带宽、丢包率等性能。可管理性是对体系结构友好性的评估，稳定性是指系统对抗外来作用的能力。互联网体系结构的发展能力主要包括影响体系结构长期生存的体系结构的可扩展性、可部署性及可演化性等能力。互联网体系结构的安全

能力即其对抗、应对攻击的能力，本文主要指可信性、可控性等安全相关的属性。为了更好地理解互联网体系结构发展思路、体系结构相关属性及后续评估工作，我们对文中的相关概念进行了总结，如表 2 所示。

表 2 互联网体系结构评估相关概念说明

体系结构发展	改良式	革命式	演进式
概念	在维持互联网体系结构向后兼容的前提下以打补丁的方式，对体系结构进行增量式修补。	突破限制，设计全新的互联网体系结构，从根本上解决现有体系结构存在的问题。	在坚持核心原则不变的基础上进行适当的突破性革新，谨慎地改变约束体系结构扩展的基本要素，以适应和更好地支持新应用需求。
服务能力(可服务性)	互联网体系结构以性能参数为指标，为用户提供应用服务的能力。		
能力评估	发展能力	互联网体系结构的各项性能指标参数随着网络规模扩大不发生明显下降的特性。	
	可扩展性	新的协议或体系结构能够实现全网部署的特性。	
	可部署性	体系结构适应各种变化的能力。	
安全能力(可信性)	包含可用性、可靠性、安全性、健壮性等的综合指标。		

后文中未特指的情况下，互联网体系结构的评估均表示针对体系结构框架本身而非协议的评估。

(2) 评估指标(what)，即采用什么样的标准进行评估。

确定了评估对象后，用什么标准对评估对象进行量化是互联网体系结构评估的一个重要问题。对于协议、机制的评估来说，通常直接测量、模拟其对其服务的支持度，即服务质量，就可以很好地确定其性能，但对于体系结构框架而言，很难用测量的方法对整个系统机制的发展能力和应用能力进行评估，因此，通过间接的方法来衡量体系结构的优劣是最佳的选择。

互联网中包括多种介质实体，如用户、ISP、网络提供商、政府、内容提供商等<sup>[27]</sup>。不同的实体因为利益和需求的不同会进行不同的选择，例如，用户使用互联网的根本目的是为了运行各种应用程序并进行通信、交互活动，因此，某种具有良好通信性能的技术或用户友好的互联网体系结构将更具备吸引用户

群体的能力。作为商业 ISP 而言，基于获取的利益进行体系结构的选择是毫无疑问的，因此能为 ISP 带来更多利益的体系结构设计将更受到青睐。可见，实体的选择对互联网体系结构的发展起着至关重要的作用<sup>[21-22, 35]</sup>，因此，通过用户和 ISP 在不同互联网体系结构中获取的效用来确定其选择并衡量互联网体系结构的发展能力已经成为互联网体系结构评估的主要手段。事实上，正是由于效用理论对于分析决策者对待风险态度的有效性，促进了互联网体系结构评估工作的发展。本文也将主要针对效用理论在互联网体系结构评估中的应用进行介绍。

(3) 如何评估(how)，即采用什么样的方法来实现评估。

评估指标仅仅明确了互联网体系结构的判别标准和理论依据，如何将其通过一定的数学方法表达出来是互联网体系结构评估建模最为关键的一步。

近年来，各学科融合的趋势越来越明显，结合其它学科的知识来实现互联网体系结构的评估成为目

前互联网体系结构评估工作的主要手段. 根据分析采用的学科手段不同, 可以将这些评估方法分为基于博弈论的方法、基于最优化理论的方法、基于微分方程的方法等.

围绕上述 3 个问题, 可以将互联网体系结构的评估工作分为评估模型、评估机制和评估方法三个层次. 如图 2 所示, 不同的评估模型分别对应不同的评估对象, 而评估机制是构造评估模型的理论基础, 评估方法则是评估机制的具体应用实现. 不同的评估模型可以采用相同的评估机制来构造, 不同的评估方法可以用于实现同一种评估机制. 换句话说, 评估模型、评估机制和评估方法的对应关系是灵活的, 三个层次之间的对应形成了各种各样的互联网体系结构评估模型系统.

### 2.3 互联网体系结构评估工作特点总结

表 3 对互联网体系结构目前的两种主要评估手

段进行了总结, 可以看出现有互联网体系结构评估工作的主要特点包括:

(1) 由于互联网体系结构的复杂性, 互联网体系结构的评估工作主要基于各种模型完成, 且根据评估对象的不同, 评估工作呈现层次、阶梯式的逻辑特色.

(2) 互联网体系结构发展的主要影响因素包括用户和 ISP 的选择, 因此大多评估工作都依赖于用户和 ISP 的效用进行建模.

(3) 随着物理学、生物遗传学、统计学等学科知识在计算机学科中的广泛应用, 借助博弈论、微分方程、最优化理论等各学科的理论进行体系结构的评估建模成为当前互联网体系结构的主要评估方法.

(4) 基于理论分析和模型构造分别从定性和定量角度对体系结构进行了评估, 两者共同为互联网体系结构的发展提供参考.

表 3 互联网体系结构评估现状总结

定性分析和比较		基于模型的评估		
		模型	机制	方法
功能	通过抽象思维和对比, 分析体系结构的优缺点以及发展趋势.	抽象不同评估对象, 进行建模 (协议、框架、属性等).	建模的理论基础, 即评估依赖的指标.	建模的具体实现手段.
特点	直观分析描述.	多层次、多角度的评估模型.	效用和性能参数是主要的评估指标.	多学科融合是主要的评估手段.
优点	直观分析, 利于了解体系结构之间的本质差异 (定性).	通过本质特性的抽象建模, 化繁为简, 给予体系结构相应的定量评价.		
缺点	无法明确体系结构功能、性能等的直接差异性.	一般仅针对特定目标对象进行分析, 很难全面反映体系结构各方面的特征.		

相关细节我们将在后续章节中进行详细阐述.

## 3 互联网体系结构评估模型研究

丰富多彩的服务和应用是互联网流行的主要原因, 因此, 互联网体系结构的可服务性对其持续发展具有决定性的影响作用, 它们是互联网体系结构评估的主要考察对象. 此外, 对于未来互联网体系结构的研究而言, 发展能力和安全性也是与其密切相关的、无法依靠独立的协议或算法而需从体系结构整体的角度进行综合考虑的关键要素. 尤其是近年来, 互联网普及和应用规模的扩大对互联网体系结构不断提出了新的要求. 因此, 确保体系结构具有良好的可扩展性、可部署性、可演化性和可信性, 使其能够适应不断变化的应用需求成为当前互联网体系结构设计和发展的重要问题. 本节将对当前评估工作中, 针对体系结构的可服务性、可扩展性、可部署性、可演化性以及可信性等五种特性构建的基本评估模型进行总结.

### 3.1 互联网体系结构可服务性评估模型

目前, 针对互联网体系结构可服务性的评估工作已经很成熟. 通常, 研究者们会从测量和模型两个方面着手对体系结构的可服务性进行评估. 前者通过设备或程序直接对服务的各项性能指标进行计算, 这种方法直观简单, 但受到测量设备、环境和方法的影响, 有时难以操作. 后者通过模拟系统的行为建立适当的模型对体系结构的性能指标进行分析, 与前者相比, 受到的约束条件较少, 还可用于对未知的系统进行预测. 文献[36-40]就通过马尔可夫链、进程代数或 Petri 网等模型对各种网络系统的各种服务性能进行了评估. 本节将对其中 Petri 网模型的应用进行简介.

Petri 网是用于分析异步、并发的计算机系统的有效模型. 它通过严格的数学表述和直观的图形表达方式来描述和分析系统, 是目前广泛使用的系统性能评价模型. 林闯对随机 Petri 网理论及其分析技术、建模方法、模型的分解和压缩、性能界限求解技术等进行了介绍, 并详细讨论了随机 Petri 网在

通信协议性能建模、ATM 网络性能建模以及计算机系统 and 软件系统性能评价中的应用<sup>[41]</sup>. Zaitserv 等人<sup>[42]</sup>通过一个有色 Petri 网参数模型对基于交换的以太网的吞吐率、帧传输时间等性能进行了评估. Tan 等人<sup>[43]</sup>使用随机 Petri 网对资源共享系统的性能进行了评估. 此外, 还有许多通过 Petri 网建立的用于评估体系结构可靠性、正确性等性能的评估工具, 包括 GreatSPN<sup>[44]</sup>、Sharpe<sup>[45]</sup>、TimeNet<sup>[46]</sup>、PIPE<sup>[47]</sup>等.

文献[40]中, 作者使用随机 Petri 网模型对面向服务的体系结构(SOA)在不同负载场景下的性能和可用性进行了评估. SOA 是从软件服务的角度出发构建的面向分布式计算的体系结构方法<sup>[48]</sup>. SOA 将服务作为其基本要素, 业务系统中的功能都被封装成相对独立的服务, 并通过统一的接口进行交互. 现有资源可以不加修改加入现有业务系统, 此外, 它还具备松耦合、平台无关等特点. 目前最为流行的 SOA 服务构建语言是 BPEL<sup>[49]</sup>. BPEL 使用基本和扩展的结构来支持复杂的操作, 基本的结构包括用于请求 Web 服务器执行某种操作的 Invoke 结构, 用于等待消息到来的 Receive 结构, 用于延迟处理的 Wait 结构等; 扩展结构包括串行执行一组操作的 Sequence 结构, 并行或同步执行操作的 Flow 结构等. 文献[40]中, 作者建立了用于评估 BPEL 处理进程性能的 GSPN(通用随机 Petri 网)模型, 它由一系列模拟各种复杂处理进程的 GSPN 块及组件规则组成. 例如, 图 3(a)即为一个基本的进程模型, 图 3(b)和图 3(c)分别代表 BPEL 的 Sequence 结构和并行(AND)结构.

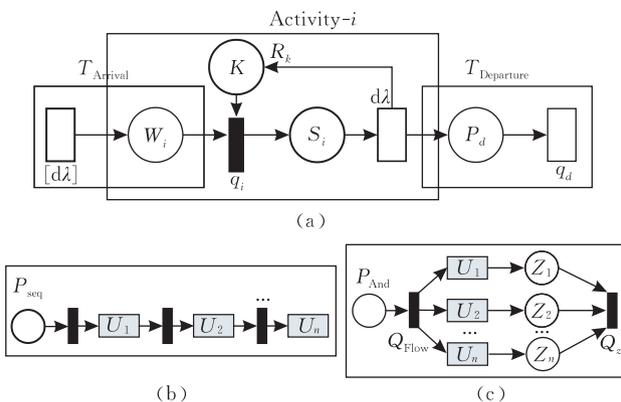


图 3 BPEL 基本进程模型及进程组成规则<sup>[40]</sup>

图 3(a)的 Activity 块中,  $W$ 、 $S$  分别代表用户等待服务、执行请求,  $R_k$  包括执行 Activity 的资源. 延迟  $d_r$  ( $d_s$ ) 表示在带宽为  $b$  的网络中接收(或发送)大小为  $m_r$  ( $m_s$ ) 的消息的延迟.  $d_{\text{bpe}}$  表示 BPEL 引擎向

服务器调度者发送消息的延迟. 图 3(b)和图 3(c)中的  $U$  可以由一个或多个 Activity 组成. 作者的实验结果表明随机模拟模型可以预测并正确反映各种场景下真实系统的行为.

从当前评估工作可以发现, 随机 Petri 网可以清晰、简便地描述系统状态间的逻辑关系和动态变化过程, 因此在互联网体系结构可服务性评估中得到了很好地应用, 也为其提供了很好的模型.

### 3.2 互联网体系结构可扩展性评估模型

对互联网体系结构进行可扩展性研究和分析, 首先需要理解可扩展性的概念. Neuman 在文献[50]中对系统可扩展性给出了如下的定义: 可扩展性指用户和系统资源的增加不会导致系统性能的明显下降, 也不会增加管理的复杂性. 当此系统专指互联网体系结构时, 其良好的可扩展性就是指当网络规模扩大后(主要是节点和链路数量的增加), 不会使该网络体系的各项性能指标参数发生明显下降.

目前, 互联网体系结构的可扩展性分析和评估主要集中在 Overlay 网络<sup>[51-53]</sup>和 Ad Hoc 网络<sup>[54-57]</sup>上, 主要的手段仍然是理论分析和实验模拟. 文献[51]中, 作者使用分布式的流量控制和拓扑构造算法设计了一个非结构化的 P2P 系统并对其可扩展性进行了实验模拟评估, 结果发现网络拓扑结构对 Overlay 网络体系结构可扩展性具有极大的影响. 文献[58]中, 作者定义了一个框架模型对 Ad Hoc 网络中各种路由协议在不同网络大小、移动环境等情况下的可扩展性进行了评估. 作者将可扩展性定义为网络支持其不断增长的限制参数(参数的增加将降低网络性能)的能力. 例如, 假设在网络限制参数为  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$  ( $\lambda$  表示网络规模、移动频率、报文产生速率等)的网络中, 最小流量负载为  $Tr(\lambda_1, \lambda_2)$ , 那么其网络可扩展性要素定义为

$$\psi_{\lambda_i} \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\lambda_i \rightarrow \infty} \frac{\log Tr(\lambda_1, \lambda_2, \dots)}{\log \lambda_i}.$$

也就是说, 在参数为  $\lambda_i$  的条件下, 网络保持可扩展的条件为: 随着参数  $\lambda_i$  的增加, 网络最小流量负载的增长速度低于网络速率  $R^{\text{net}}$  可支持的速度, 即

$$\psi_{\lambda_i} \leq \lim_{\lambda_i \rightarrow \infty} \frac{\log R^{\text{net}}(\lambda_1, \lambda_2, \dots)}{\log \lambda_i}.$$

利用该模型, 作者对 Ad Hoc 网络的各种路由协议, 包括 PF、SLS、DSR、HierLS、DSR、HierLSu、ZRP 及 HSLs 的可扩展性进行了分析和评价. 结果表明在移动的情况下, RF 和 ZR 可扩展性更好, 在网络规模增长的情况下, HSLs 的可扩展性更好.

上述提到的文献都是针对特定网络类型进行的评估,它们都不能反映互联网的复杂多样性,也无法适用于一般的网络系统.为此,Xu 等人<sup>[59]</sup>对互联网体系结构的可扩展性问题进行了进一步的研究与思考,给出了适用于一般网络系统的互联网体系结构的可扩展性定义,并提出了基于多种约束条件评价互联网可扩展性的数学模型和分析方法.

文献[59]中,作者将互联网体系结构中可控制的因素,如报文发送速率、链路带宽等定义为约束条件,即  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,而约束条件变化的范围称为约束空间,需要考查的互联网体系结构特性,如吞吐量、稳定性、网络成本等称为评价指标,  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$  为评价指标集合.文中定义多维可扩展性即多约束多目标的可扩展,即综合考虑多个评价指标随着多个约束条件变化而具有的可扩展性.由此,作者提出了互联网体系结构多约束一维的静态可扩展性评价模型:

$$S_i = y_i = f_i(X) = f_i\{x_1, x_2, \dots, x_n\}, X \in \emptyset,$$

其中,  $f_i$  即是评价指标  $y_i$  随着约束条件  $X$  变化的规律函数.在此基础上,作者进一步定义了多维可扩展性的评价模型:

$$S = k_1 \times S_1 + k_2 \times S_2 + \dots + k_m \times S_m,$$

其中  $k_1, k_2, \dots, k_m$  代表  $m$  个评价指标各自的权重,它们由客观因素决定,或者由评价者根据自身的偏好和决策决定,不同的权重设置会得到不同的结果.

利用这一模型,作者还讨论了 TCP/IP 和 ROFL 这两种转发机制的规模可扩展性,研究对比了内容分发网络(Content Delivery Network, CDN) 和对等网络(Peer-to-Peer, P2P)的性能可扩展性<sup>[60]</sup>.通过模型分析结果和模拟实验结果的对比,发现这种互联网多维可扩展性定义和评价方法可以有效评价互联网在各个方面的可扩展性,为新一代互联网体系结构的分析和评价提供了可行的思路和方法.

### 3.3 互联网体系结构可部署性评估模型

互联网体系结构的发展过程中,针对同一种问题的解决提案有很多,而多种协议或体系结构并存的局面也时有发生,但仅有少数协议和体系结构方案能真正部署并得以应用.例如,我们都知道 IPv6 诞生于 1996 年并引起了世界各国的高度关注,然而据统计,相对于 IPv4 来说,当前互联网中 IPv6 的使用规模只占极小的比例(不到 1%).尽管全球顶级 IPv4 地址已经分配完毕,IPv6 的部署和使用情况却不容乐观.事实上,目前绝大部分针对 IPv6 的研究都集中在技术攻关上,包括地址的分配、双协议栈共

存、新路由协议设计等等,但 IPv6 在真实环境中部署和运行的问题并没有得到足够的重视,结果导致 IPv6 的技术研究取得大量成果,实际部署和运行却进展缓慢. IPv6 应用普及缓慢的教训足以说明在互联网体系结构的设计过程中评估其可部署性的重要性.可以说,具备足够的部署能力是体系结构得以生存发展的根本前提.

针对体系结构的可部署性问题,研究者们进行了大量的分析. Joseph 等人<sup>[61]</sup>将互联网中的用户作为独立的决策者,分析了两种存在竞争的体系结构在不同的用户初始比例下的部署趋势. Gill 和 Chang 等分别在文献[62]和文献[63]中讨论了影响 SBGP 协议部署的因素. Gyarmati 等人<sup>[64]</sup>对 IPv6 的过渡和部署问题进行了建模分析和研究,作者将互联网中的 AS 作为相互独立的对象对待,AS 可以根据各自的收益和支出(访问开销、操作运行开销等)选择所采用和支持的协议,由此建立了基于 AS 的效用模型并模拟分析了在 IPv4 和 IPv6 用户初始比例一定的情况下各个 AS 的动态选择变化趋势.详细内容请参考后续章节.

### 3.4 互联网体系结构可演化性评估模型

可演化性(evolvability)的说法我们并不陌生,通常,它用于形容某个系统具有自适应的演化能力<sup>[65]</sup>.在互联网领域,可演化性最初主要用于软件工程.互联网体系结构作为一种发展、变化、更新迅速、资源密集的大型系统,对于可演化性具有很强的需求.事实上,体系结构中众多具有顽强生命力的协议都具备可演化的特性,而目前基于可编程思想的体系结构设计最终目的也是为了实现体系结构的可演化性.近年来,随着未来互联网体系结构的研究进展,可演化性在体系结构中的定义得到了更多的诠释(如表 4).这些定义虽然并不完全相同,但它们都强调了体系结构应对变化的能力需求.

表 4 互联网体系结构可演化性定义

文献	代表作者	Evolvability
[66]	Rowe	系统适应或处理环境、需求及实现技术等变化的能力.
[67]	Isaac	通过经济代价实现发展的能力.
[68]	Percivall	系统随着环境变化而易于被修改的特性.
[69]	Hilliard	在维持原有体系结构完整性的情况下,系统为满足新的用户需求、适应新的不可预见任务的可变程度.
[70]	Steiner	通过发展和操作,体系结构具备的适应需求及实现技术变化的属性.
[71]	Rowe	系统在其生命周期内,在保持体系结构完整性时使用最小可能代价适应需求变化的能力.

未来互联网体系结构研究项目的开展促进了可演化性思想在体系结构框架设计中的应用. 例如文献[12,24,72]都提出了可演化体系结构的设计思路, 尽管如此, 目前还没有公认的体系结构可演化性的评估模型和方法, 用于证明不同体系结构的演化性差异. 近年来, 研究者们已经意识到可演化性评估工作的重要性并进行了相关的探索. 文献[73]利用主动测量和被动测量的方法统计分析了 TCP 协议的演化, 并研究了互联网本身的演化(如中间件的加入)对端到端协议、显示拥塞控制协议等传统互联网体系结构协议的影响. 文献[74]从 AS 的角度对网络规模的增长规律进行了分析和预测, 并应用  $k$ -core 分解方法对体系结构的稳定状态、演化状态进行了分析. 文献[75]从项目管理的角度出发提出了一种称为  $\mathcal{A}evol$  的工具, 它能够提供用于表现体系结构演化路径及接口关系的平台, 进而由此衡量体系结构的演化性及演化方式. 文献[76]提出了一个称为  $EvoArch$  的抽象模型来研究体系结构协议栈的演化.

$EvoArch$  根据互联网体系结构的分层设计原则, 即各层之间的主从使用关系以及同一层协议之间的竞争关系来构建演化模型. 它将体系结构协议栈中的协议使用节点来表示, 协议之间的关系使用带方向的边来表示. 则某个节点  $u$  的演化价值记为

$$v(u) = \begin{cases} \sum_{p \in P(u)} v(p), & l(u) < L \\ 1, & l(u) = L \end{cases},$$

其中,  $P(u)$  表示以节点  $u$  为起点的树, 即为所有使用协议  $u$  的上层协议栈的协议组成的树.  $L$  表示协议栈的层次. 与  $u$  存在竞争关系, 即与  $u$  提供类似服务的同一层的协议节点集合为  $C(u)$ , 且

$$\omega \in C(u) \text{ 如果 } l(\omega) = l(u) \text{ 并且 } \frac{|P(u) \cap P(\omega)|}{|P(u)|} \geq c,$$

其中  $c$  为竞争阈值. 协议节点间的竞争关系是非对称的, 例如一个通用的协议(提供多种服务)与一个专用的协议之间, 前者是后者的竞争者, 因为它可以提供与后者类似的多种服务, 但后者并不一定能成为前者的竞争者, 因为后者提供的服务可能仅是前者的很少一部分. 竞争阈值正是用于确定两者关系的一个界定值. 对于与  $u$  存在竞争关系的协议节点而言, 最具竞争力的协议即效用值最大的节点, 即  $v_c(u) = \max_{\omega \in C(u)} v(\omega)$ . 如果,  $u$  不存在竞争协议, 则  $v(u) = 0$ . 如果  $v(u) > 0$ , 则节点  $u$  在竞争过程中“死亡”的概率为

$$p_u(r) = e^{\frac{-zr}{1-r}}, \quad r = \frac{v(u)}{v_c(u)},$$

其中,  $z$  用于表示协议间竞争的强度. 图 4 为一个具有 4 层协议的体系结构中各协议节点的价值关系图.

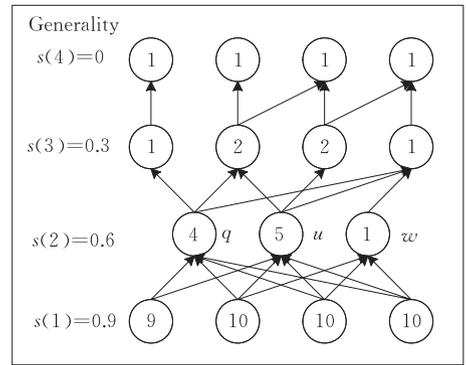


图 4 4 层网络节点价值示意图<sup>[76]</sup>

作者根据该层次化的效用竞争模型, 对互联网体系结构协议的演化过程进行了模拟, 得到的演化结果与目前互联网沙漏状的协议栈结构一致, 进而从侧面解释了互联网体系结构沙漏状协议栈的合理性.

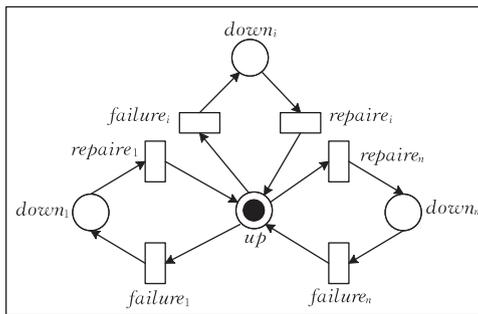
尽管现有的互联网体系结构可演化性评估研究还处于初级阶段, 但相关的探索对于互联网体系结构的发展而言是一个很好的促进.

### 3.5 互联网的体系结构的可信性评估模型

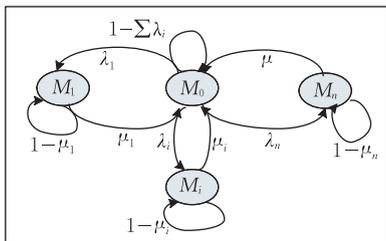
安全问题是传统互联网体系结构的固有弊端, 互联网早期的设计对象为彼此信任的群体, 因此安全问题根本不在考虑范围中. 如今, 面对复杂的互联网应用环境, 即使 IPsec 等协议的出现也未能完全解决体系结构的安全性问题. 在基于革命式路线的未来互联网体系结构研究中, 安全性被作为互联网体系结构设计的一大重要问题进行研究, 可信、可靠的协议设计, 完整性、私有性的信息保护等安全特性在体系结构的设计中开始得到体现.

体系结构的安全性评估是其安全性研究的重要理论基础, 早期的互联网体系结构安全评估工作主要针对复杂的协议进行, 如协议的漏洞挖掘, 使用的主要是定性分析和评价, 以便能及时指导体系结构安全机制的构建. 近年来, 随着系统可靠性研究的进一步发展, 许多用于可靠性研究的技巧被应用到体系结构的安全评估中, 评估对象也逐步扩展到对系统级以及入侵容忍度的模拟分析<sup>[77-79]</sup>, 而形式化的数学模型尤其是组合模型、马尔可夫回应模型、随机模型、随机博弈模型等开始广泛应用于体系结构的安全性评估中<sup>[80-85]</sup>.

可信性相比安全性而言,具有更广泛的技术内涵,它是“更安全”的技术描述,是一种包括传统意义上的安全性的属性<sup>[86]</sup>.文献[85]中,作者将可信性定义为可靠性、可用性、可维护性、可运行性、可生存性等五种性能参数的组合,并对随机 Petri 网在网络系统可信性建模中的分析方法和步骤进行了研究.以串联关键系统(任意部件的失效会引起整个系统的失效)为例,作者首先将组成系统的  $n$  个部件的失效率和修复率分别设置为  $failure_i = \lambda_i$  和  $repair_i = \mu_i$ ,并以此建立了如图 5(a)所示的描述系统可信性的随机 Petri 网模型,其中,  $up$  和  $down$  分别表示正常服务状态和失效状态,  $failure$  表示引起服务失效的事件.



(a) 串联可修复系统的SPN模型



(b) 串联可修复系统SPN模型的马尔可夫链

图 5 系统可信性的随机 Petri 网模型<sup>[85]</sup>

完成随机 Petri 网对系统的可信性建模后,通过分析状态转移的情况就可以得到图 5(b)所示的相应的马尔可夫链(MC)及相应的状态转移矩阵  $Q = [q_{ij}]$ . 其中,  $Q$  的对角线上的元素  $q_{ij}$  等于从状态  $M_i$  输出的各条弧上标注的速率之和的负值. 对于非对角线上的元素  $q_{ij}$  而言,当从状态  $M_i$  到状态  $M_j$  有一条弧相连时,则弧上标注的速度即是  $q_{ij}$  的值,否则  $q_{ij} = 0$ . 例如,根据图 5,得到的状态转移矩阵

$$Q = \begin{bmatrix} \Delta & \lambda_1 & \cdots & \lambda_n \\ \mu_1 & -\mu_1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mu_n & 0 & \cdots & -\mu_n \end{bmatrix},$$

其中,  $\Delta = -\sum_{i=1}^n \lambda_i$ .

设 MC 中  $n$  个状态的稳定状态概率是一个行向量  $\boldsymbol{\pi} = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ , 根据马尔可夫过程有

$$\begin{cases} \boldsymbol{\pi} \times \boldsymbol{Q} = 0 \\ \sum_{i=0}^n \pi_i = 1 \end{cases}.$$

根据这一线性方程组就可以得到每个可达标识的稳定状态概率  $P_i(t = \infty) = \pi_i (1 \leq i \leq n)$ . 在此基础上,便可以进一步分析可信性的各个参数,包括可用性、可维护性、可运行性、可生存性等.

除了随机模型外,近年来基于平均场构造的安全性评估模型也开始得到关注<sup>[87]</sup>. 平均场通过平均的作用来反映独立对象的加和效果,能简化复杂问题的研究,早期在研究传染病的传播中具有很好的效果,近年来在计算机安全领域研究病毒的传播和安全策略的部署分析中得到了很好的应用,鉴于其统计性的特点,相信也可在可信评估中发挥用武之地.

### 3.6 讨论

根据评估对象、目标、层次的不同,可以建立不同的互联网体系结构评估模型. 本节对互联网体系结构发展最具影响的五个要素,即可服务性、可扩展性、可部署性、可演化性以及可信性的评估问题进行了总结. 值得说明的是,尽管研究对象不同,针对的问题不同,在进行评估建模时,采用的实现机制和方法却大都相同. 尤其是效用理论、QoS 性能参数和 Petri 网在构建互联网体系结构各类评估模型中都发挥了重要作用. 研究者们通常通过 QoS 性能参数和 Petri 网对体系结构进行定性的分析;通过效用量化用户和 ISP 在互联网中的收益,并分析互联网体系结构的发展趋势和各相关体系结构之间的竞争关系. 而融合各类学科,利用数学、经济学、物理学等各学科的理论来实现各类模型也是现有互联网体系结构评估工作的一大特点.

## 4 基于效用的互联网体系结构评估机制研究

效用理论是经济学范畴中研究消费者如何在各种商品之间分配投入,以达到心理上最大程度满足的理论. 效用的概念最早由 Bernoulli<sup>[88]</sup> 提出,用于刻画人们对决策行为的评价,他指出人们的效用依赖于决策获益后的心理满足,即效用是收益的对数函数. 19 世纪中期, Bentham<sup>[89]</sup> 发展了效用的概念,他认为效用应是心理满足与个人支出之间的差值.

20 世纪中期, von Neumann 和 Morgenstern 提出了“期望效用理论”<sup>[90]</sup>, 该理论假设决策者根据个人偏好对决策选项进行排序, 并根据效用最大化的原则进行选择, 这种方式将效用发展为可测量的客观指标(偏好的量化), 奠定了现代效用理论的基础, 随后众多研究者在期望效用理论的基础上做了大量修正和扩展. 效用理论详细的发展历史和效用理论的相关信息在文献[91-93]中进行了介绍.

随着计算机学科与经济学等各领域的相互渗透, 效用理论开始大量应用于研究和处理网络中的相关问题, 包括网络资源的分配<sup>[94]</sup>及定价与计费<sup>[95-97]</sup>、流量控制的分析<sup>[98]</sup>及拥塞管理<sup>[99]</sup>、网络体系结构的评估<sup>[100-101]</sup>及信息技术的选择<sup>[102]</sup>等. 事实上, 早在 20 世纪末, Shenker<sup>[103]</sup>就已经将效用理论应用于未来互联网的研究中. 本节将重点对近年来效用理论在互联网体系结构发展能力评估中的应用进行总结. 在此之前, 我们先给出效用函数的一般定义:

一个实值函数  $U: P \rightarrow R$ , 如果对于所有的

$$x_0, x_1 \in P, U(x_0) \geq U(x_1) \Leftrightarrow x_0 \geq x_1,$$

则  $U$  称为代表偏好关系的效用函数, 其中,  $x_0 \geq x_1$  表示对于决策人而言,  $x_0$  不优于  $x_1$ .

效用函数的定义包括多种形式, 不过效用函数的参数通常为效用的作用对象、影响决策的因素等. 例如在计算网络资源的使用情况时, 可以将效用定义为诸如延迟、丢包率、带宽等服务质量参数的函数; 在为具有博弈关系的对象进行决策时, 可以将博弈者的定价、用户数量等作为效用函数的参数.

#### 4.1 针对特定问题的基本效用模型

众所周知, ISP 对于互联网体系结构或某种新技术的发展有着至关重要的影响, 因此为了新技术或体系结构架构的发展, 必须吸引尽可能多的 ISP 对其进行部署. 通常政府部门或工业界的投资会造就小部分 ISP 首先部署新技术, 这对最终推动新技术在更多乃至全部 ISP 上部署具有决定性的影响. Gill 等人<sup>[62]</sup>提出了一种在互联网中部署 SBGP 的策略, 并构建了一个基于用户流量的 ISP 效用模型, 用于验证通过少数部署推动全网部署这一策略的有效性.

对于 ISP 而言, 新技术值得部署的前提就在于它能为 ISP 带来更好的收益, 这也就意味着更多的用户群及用户流量. 由于 ISP 可以通过转发更多来自其客户端的流量或向客户端转发更多的数据流量来提高自己的效用, 文献[62]中, 作者将 ISP 的效用

分为“入效用”和“出效用”两种. “入效用”表示 ISP 通过其客户边向目标  $d$  转发的来自其客户端用户的所有流量, 记为

$$u_n(S) = \sum_{Destns\ d} \sum_{Sources\ i \in T(d,s)} \omega_i,$$

其中,  $Sources$  表示源节点,  $Destns$  表示目标节点,  $S$  表示网络当前的状态, 即网络中 SBGP 部署的情况.  $T(d, s)$  表示状态  $S$  下产生的通过  $ISP_n$ 、以所有目标  $d$  为根、以 AS 为节点的传输路径树,  $\hat{T}(d, s)$  表示其中一颗子树.  $i$  表示子树中的 AS 节点,  $\omega_i$  表示 AS 产生的流量. “出效用”表示 ISP 通过某个客户边(customer edge)向其所有客户端用户目标  $d$  转发流量的总和, 记为

$$u_n(S) = \sum_{Destns\ d \in \hat{D}(n)} \sum_{Sources\ i \in T(d,s)} \omega_i,$$

其中,  $\hat{D}(n)$  表示  $ISP_n$  的客户端用户集合.

例如, 如图 6, 假设目标为 AS 22822 和 AS 31420,  $ISP_n$  的编号为 8866, 所有 AS 通过 8866 转发的流量设为 1, 由于目标中仅 AS 31420 属于  $\hat{D}(n)$ , 因此其出效用为 AS 15169、22822、8928、25076、34376 通过 8866 向目标 31420 转发的数据流的总和. 对于目标 31420 而言, AS 25076 和 34376 是其客户端子树成员, 对于目标 22822 而言, 31420、25076、34376 是其客户端子树成员, 因此 ISP 8866 的入效用即为 5. 而 ISP 是否部署 SBGP 决策的依据为

$$u_n(\neg S_n, S_{-n}) > (1 + \theta) u_n(S),$$

其中,  $(\neg S_n, S_{-n})$  表示  $ISP_n$  从当前状态转换为对应的状态, 即从部署 SBGP 的状态转换到关闭 SBGP 的状态或反之. 该决策条件表明 ISP 进行 SBGP 部署的前提条件是其部署后的收益能超过部署之前  $\theta$ . 当然,  $\theta$  的取值不同也会影响到 SBGP 在网络中的部署程度. 实验结果发现在  $\theta < 50\%$  时, 即使早期部署 SBGP 的 ISP 很少, 经过效用的竞争, 最后 SBGP 也能在全网约 85% 的 AS 或 ISP 上部署, 而当

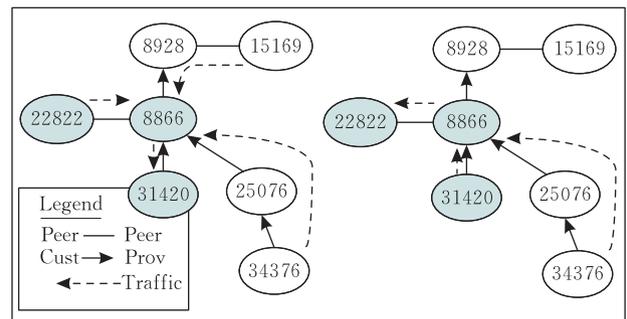


图 6 目标 31420, 22822<sup>[62]</sup>

$\theta \geq 10\%$  时, 早期选择哪些 ISP 部署 SBGP 对最终 SBGP 在整个网络的部署具有不同的影响.

#### 4.2 通用的基本效用模型

文献[62]中, 作者利用 ISP 流量的变化情况来反映其效用的变化情况, 进而为 ISP 的决策提供参考. 但是, 这个效用模型仅考虑了 ISP 自身的短期效益变化, 没有考虑其它 ISP 决策变化对某个 ISP 的影响. 此外, 该模型仅适用于 SBGP 协议的部署. Joseph 等人<sup>[61]</sup>建立了一个更为通用的基于用户效用的评估模型, 用于分析并确定影响互联网体系结构应用部署的各种因素.

前面提到过互联网体系结构的演进过程中, 多种协议或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, 竞争的过程如何, 是否有一些机制可以促进这个演化过程, 这是研究体系结构可部署性的重要问题, 文献[61]对这些问题进行了调研. 作者假设网络中存在两种竞争的体系结构 A 和 B, 网络中的用户数量为  $N$ , 初始状态下, 选择 A 的用户数量比例为  $x_A$ , 选择 B 的用户数量比例为  $x_B = 1 - x_A$ . 用户可以根据 A、B 提供的网络收益进行选择. 选择 A 的用户(这里称为 A 类用户)还可以选择使用转换器享受 B 提供的服务, 反之亦然. 选择 A 的用户中使用 AB 转换器的用户比例为  $x_{AB}$ ; 选择 B 的用户(这里称为 B 类用户)中使用 BA 转换器的用户比例为  $x_{BA}$ . 由此得到不使用 AB 转换器的 A 类用户的效益为

$$U_{A_{\text{only}}} = \alpha_A + \beta N x_A + \beta N x_{BA} x_B (1 - q_A),$$

其中,  $\alpha_A$  表示 A 提供给用户的, 且与其他用户的状态(通信)无关的独立收益, 例如移动服务等.  $\beta N x_A$  表示与 A 类的  $N x_A$  个用户进行通信所获得的网络收益,  $\beta$  用于调节网络收益对于用户的重要性.  $\beta N x_{BA} x_B (1 - q_A)$  表示用户与使用 BA 转换器的  $N x_{BA} x_B$  个 B 类用户进行通信所获得的网络收益. 由于转换器无法提供完全兼容的服务, 因此使用 BA 转换器的 B 类用户无法提供与 A 类用户完全相同的服务, 因此, 作者使用  $(1 - q_A)$  来说明转换器的有效性.

当 A 类用户使用 AB 转换器时, 可能由于转换器的引入导致其从 A 网获得的收益降低, 例如转换器带来更多的安全风险、网络延迟等, 因此作者使用参数  $r_A$  来表示收益的降低. 通过 AB 转换器, A 类用户可以与所有 B 类用户通信, 但是转换器不可能是 100% 有效的, 因此使用 AB 转换器的 A 类用户

从 B 网获取的网络收益降低为原有  $\beta N x_B$  的  $(1 - q_B)$ . 此外, 通过 AB 转换器, A 类用户还可以享用 B 提供的独立效益  $\alpha_B$ , 文中使用  $t_B$  来表示 A 类用户获得该收益的比例, 由此得到使用 AB 转换器的 A 类用户的效益为

$$U_{AB} = (1 - r_A)(\alpha_A + \beta N x_A) + \beta N x_B (1 - q_B) + t_B \alpha_B.$$

B 类用户的收益模型与 A 类用户相似, 网络中所有用户的总效益为

$$TU = N(1 - x_{AB})x_A U_{A_{\text{only}}} + N x_{AB} x_A U_{AB} + N(1 - x_{BA})x_B U_{B_{\text{only}}} + N x_{BA} x_B U_{BA}.$$

在考虑用户进行体系结构迁移的过程中, 文献[61]采用了与文献[40]类似的分时间段进行效用的计算并根据不同的效用情况进行切换的方法, 不同的是, 文献[61]在计算过程中对用户随机进行迭代计算, 以便尽可能将用户之间的相互影响考虑在内. 利用该模型, 作者分析了不同  $r, t, q, \beta, \alpha_A/\alpha_B$  对体系结构部署的影响, 实验结果发现新的体系结构总需要一定的时间才能得到部署, 政府或业界的支持将对新体系结构的部署起到积极的推动作用, 而转换器在体系结构的部署中有利有弊, 功能、性能过于良好的转换器可能将阻碍新体系结构的发展.

#### 4.3 讨论

效用机制在互联网体系结构的评估中起到了重要的作用, 它可用于构造各种互联网体系结构评估模型, 但具体的实现方法各不相同. 一般而言, 在进行效用建模的时候研究者通常需要考虑以下两个问题: 如何选择效用函数与效用参数以及如何确定效用函数与参数之间的关系.

现有的研究方法在设计效用模型时, 通常从网络受益者的角度构造目标函数, 因此承担着网络中重要角色的终端用户和 ISP 也就成为目标函数的主要考虑对象. 例如, 文献[61, 104-105]就对终端用户在网络中的效用情况进行了建模, 文献[1, 62-64]对网络中 ISP 的效用进行了建模. 至于效用参数, 终端用户的效用建模可以使用用户数据流量在网络中的传输性能(如速率、可靠性、延迟、抖动等)来直接表示, 也可以使用与用户通信的节点数量及获得的资源、服务情况及支付的费用等来抽象表示. ISP 的效用可以根据网络拓扑相关参数, 如用户流量、用户数量、网络运行消耗等进行建模.

## 5 互联网体系结构评估方法研究

效用机制和各种性能参数仅是用于构造互联网

体系结构评估模型的基础理论和评价指标,如何实现对效用函数和性能参数函数的建模,并分析体系结构的可服务性、发展能力和安全能力、不同互联网体系结构之间的竞争关系以及互联网体系结构的动态发展趋势还需要借助其它手段,这即是互联网体系结构评估方法的主要任务。

本节,我们首先对目前用于实现互联网体系结构效用函数的评估方法进行总结。

### 5.1 基于微分方程的互联网体系结构可部署性评估

微分方程是数学的重要分支,是当代科学和工程的基础.微分方程模型通过导数和微分来描述物体和对象随时间或空间而演化和变化的规律,因此被大量应用于自然科学和社会科学的各个领域.它也是用于分析互联网体系结构发展趋势的有效工具。

与文献[61]的出发点相同,文献[104-105]也从相互竞争的新技术着手、从用户的角度出发,对影响互联网体系结构的相关因素(如转换器)进行了分析.不同的是,后两者根据网络部署初始比例(用户比例)构建了相应的体系结构(或新技术)效用模型,并运用微分方程的方法分析了网络部署比例随着用户选择变化而变化的动态情况。

文献[105]中,作者定义了部署比例分别为  $x_1$  和  $x_2$  的两种不同的体系结构,其效用函数模型分别为

$$U_1 = \theta q_1 + (x_1 + \alpha_1 \beta x_2) - p_1,$$

$$U_2 = \theta q_2 + (\beta x_2 + \alpha_2 x_1) - p_2,$$

其中,  $\theta$  是一个随机变量,用于表示具有不同价值观的用户对技术的“定价”,  $q$  表示技术质量(如功能、性能、可靠性等).事实上,  $\theta q$  与文献[54]中用户效用模型的  $\alpha_i$  含义相同,即为体系结构提供给用户的独立收益.  $(x_1 + \alpha_1 \beta x_2)$  表示体系结构的网络收益,即用户效用.鉴于 Metcalfe 定律指出网络收益与使用该网络技术的用户数量成正比,作者使用了线性关系来表示用户效用与体系结构效用的关系.  $\alpha_1$  表示中转器为体系结构 1 中用户提供与体系结构 2 中的用户互连通信的能力,  $\beta$  为不同体系结构对效用的不同定价的校正因子(技术 1 默认为单位 1)、 $p$  为体系结构维持运行所需的开销,也即是用户使用某种体系结构所需付出的代价。

由该效用模型可以看出,体系结构效用的变化与  $x_i$  的变化有关,而用户的动态变化可以通过微分方程来反映.假设某时间  $t$  下,用户的选择情况为  $\underline{x}(t) = (x_1(t), x_2(t))$ ,  $H_i(\underline{x}(t))$  表示  $t$  时刻技术  $i$  提供更优的效用的用户分布情况.也就是说

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \gamma(H_i(\underline{x}(t)) - x_i(t)),$$

其中,  $\gamma$  表示用户转换体系结构的概率。

作者将  $\theta_i^0(\underline{x})$  定义为使得  $U_i(\theta_i^0, \underline{x}) = 0$  的临界值,则在确定的时刻,可以将用户的选择确定在  $0 \leq x_1 + x_2 \leq 1$ 、 $\theta_1^0, \theta_2^0, \theta_3^0$  不同取值组成的如图 7 中的 9 个不同区域  $R_1 \sim R_9$  中,随后,通过微分方程求解得到各个区域用户选择的变化轨道,结果发现:在不同的初始部署条件下,部署过程都会有相应的稳定平衡点;而最终用户到达稳态的条件为

$$\frac{dx_i(t)}{dt} \Big|_{x_i(t)=x_i^*} = 0 \Leftrightarrow x_i^* = H_i(x^*), i \in \{1, 2\}.$$

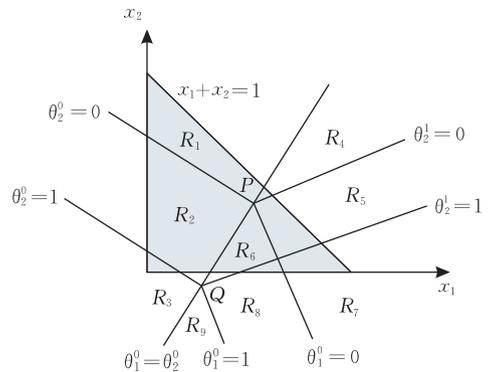


图 7 用户选择区域划分<sup>[105]</sup>

Xu 等人<sup>[106]</sup>采用和推广了上述模型,将其应用于分析多种网络体系结构并存下用户选择的变化趋势,并对采用无连接分组交换技术、基于连接的数据流传输、基于无连接分组交换及组播技术的三种并存的体系结构类型进行了实例分析,并在三种网络初始比例不同的情况下进行了模拟计算,结果如图 8 所示,可见无论初始比例如何,体系结构的发展最终会收敛到一种或两种体系结构并存的情况,而初始比例越高的体系结构发展也越有优势。

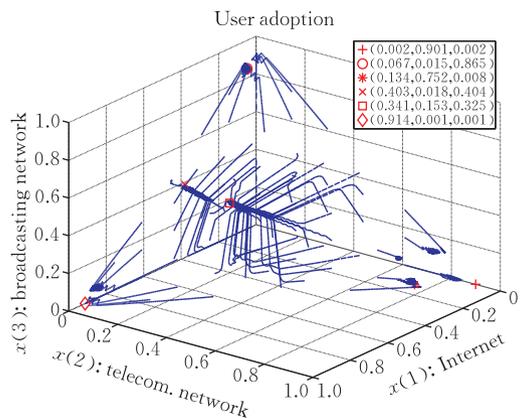


图 8 三种体系结构并存的演化结果<sup>[106]</sup>

**5.2 基于博弈论的互联网体系结构可部署性评估**  
博弈论是经济学的标准分析工具之一,用于研

究具有竞争性质的现象,近年来也开始广泛应用于计算机科学的流量工程、网络安全以及体系结构等各个方向.

文献[64]中,作者对互联网中的 AS 进行了效用建模,并利用博弈论对 IPv6 的过渡和部署问题进行了分析和研究.作者将互联网中处于不同层次的 AS 作为互相连接、通信且相互独立的博弈者来对待,这些 AS 可以根据各自收入及支出的实际情况,即所获得的网络收益、所需要的运作成本、协议迁移所需要的开销、传输数据的开销等,自主选择在网络中运行的协议(IPv4 或 IPv6).假设  $AS_i$  拥有  $n_i$  个终端用户,每个用户为了与互联网建立连接关系,需要支出的访问开销,即向  $AS_i$  缴纳的费用为  $p$ ;  $AS_i$  的运行操作开销为  $O_i^{p(i)}$ ,  $p(i)$  代表  $AS_i$  使用的协议;  $AS_i$  的效用模型为

$$\Pi_{AS_i} = n_i p + \sum_{l \in L(i)} c_{p(l) \rightarrow p(i)} t_{l \rightarrow i} - O_i^{p(i)} - \sum_{h \in H(i)} c_{p(l) \rightarrow p(h)} t_{l \rightarrow h} + c_c t_{i \rightarrow h},$$

其中,  $c_{i \rightarrow j}$  表示  $AS_i$  需要向  $AS_j$  支付的传输数据的开销,  $c_c$  表示  $AS_i$  使用 IPv4/6 协议的情况下获得的转换开销;  $t_{l \rightarrow i}$  表示  $AS_i$  向  $AS_j$  传输的数据流数量;  $L(i)$  和  $H(i)$  分别代表  $AS_i$  的下级和上级 AS. 通过博弈论和效用分析,作者发现所有 AS 都使用 IPv6 协议栈将是博弈的纳什均衡,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),从理论上说明了部署和运行 IPv6 的优势.

### 5.3 基于随机博弈网的互联网体系结构安全性评估

随机模型是用于描述不确定现象的模型,它可以有效分析系统的局部行为,对于评估体系结构的安全性,例如漏洞发现、攻击者的行为、体系结构的行为以及敏感性分析等具有很好的效果.遗憾的是,随机模型无法描述网络攻击行为的动态博弈过程和攻击中人和系统的行为和状态变化过程,为此,林闯等人<sup>[107]</sup>提出了一种称为随机博弈网(Stochastic Game Net, SGN)的理论和模型方法,以便更有效地对网络中的安全问题进行分析和评价.

作者将随机博弈网定义为一个使用 9 元组表示的模型:  $SGN = (N, P, T, F, \pi, \lambda, R, U, M)$ , 其中,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  表示局中人的集合;  $P$  为位置集合,表示行为人可以采取行为的状态;  $T$  为行为集合,可以表示为攻击者的行为集合  $A_i = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$  和防御者的行为集合  $D_i = \{d_1, d_2, \dots, d_L\}$ ;  $F \in I \cup O$  为弧的集合,  $I \in P \times T, O \subseteq (T \times P) T$ ;  $\pi: T \rightarrow [0, 1]$  表示选择某个特定弧的选择策略,  $\omega: F \rightarrow A$  弧的权重函数,表示变迁发生所需要或生成的标记个数与类

别;  $\lambda$  为变迁响应速率的集合;  $R: T \rightarrow (\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_n)$  是每个变迁响应速率的集合;  $M$  为标识集合;  $U^k(s_i)$  表示局中人  $k$  在状态  $s_i$  时的效用函数,它可以表示为  $U^k(M_0, \pi) = f^k(M_0; \pi^1, \pi^2, \dots, \pi^n)$ ,  $\pi^k$  为局中人  $k$  的策略. 根据此效用函数,行为人可以进行相应的决策.

利用随机博弈网的概念, Wang 等人<sup>[83]</sup>成功对一个典型企业网络在多种攻防环境下的行为进行了建模和安全分析.作者建立了在  $N$  为 2, 即博弈者为攻击和防御双方的情况下的攻防随机博弈网模型.首先,作者从攻击者的视角出发,根据攻击的步骤和系统的脆弱性构造了攻击生成图,随后将其转换为随机 Petri 网模型,并在此基础上构建了攻防策略博弈模型.对于攻击者,如果一个攻击行为在位置  $p_i$  被选中,且攻击成功也未被检测到,则攻击行为将会转移到其它位置,由此,博弈行为可以使用  $K \times L$  的矩阵来表示,行为对  $(a_k, d_l)$  的输出结果  $\gamma_{kl}$  可以表示为

$$\gamma_{kl} \begin{cases} r_{kl} + \sum_j \delta_j U(p_j), & \text{攻击成功} \\ c_{kl}, & \text{其它} \end{cases},$$

其中,  $r_{kl}$  为攻击者在位置  $p_i$  的回报,此时攻击者和防御者的行为分别为  $a_k$  和  $d_l$ ,  $\delta_j$  为折扣系数.在位置  $p_i$  处博弈双方都按照均衡条件下的策略来选择行为,通过求解攻击者的效用

$$\max_{\pi_i^1, \pi_i^2} E(\pi_i^1, \pi_i^2)$$

来获得.根据攻防模型,即可以对攻击成功率及脆弱性节点进行分析评价.

### 5.4 基于最优化理论的互联网体系结构评估

最优化理论是一门利用数学方法来研究如何实现各种系统的最优化的理论,它根据特定的衡量指标来选择能发挥和提高系统效能的最优方案,为决策者提供科学的优化途径和决策依据,因此最优化理论被深入广泛地用于解决计算机领域的一些问题.

事实上,使用最优化的概念来解决 TCP/IP 网络的问题最早在文献[108]中由 Kelly 等人提出,并已经在拥塞控制、流量管理和控制等问题的处理中得到了大量应用<sup>[109-111]</sup>.文献[112]中, Xu 等人提出了一种新颖的流量管理协议.该协议通过引入对数障碍算法,将多路径效用最大化问题转化为用户效用和路由或拥塞控制等的联合优化问题进行求解.文献[113]中,作者通过建立基于多商品流约束的效用最大化模型,为网络链路增加一套权重,利用 OSPF 协议实现了最优流量工程.文献[114]中,作者对最优化方法在互联网体系结构评估中的应用进

行了总结,作者将体系结构的分层合理性问题表示为一个通用的网络效用最大化(NUM)问题:在垂直分解层面,NUM对应通信网络的不同分层机制(功能模块处于不同层次),每一个层次分别对应一个分解的子问题,层次之间的接口使用与子问题相关的拉格朗日双栈变量来表示;在水平分解层面,NUM表示为一个功能模块的不同分布计算和控制方式(地理位置不同的网络元素),NUM的形式如下:

$$\max \sum_s U_s(x_s, p_{e,s}) + \sum_j V_j(\omega_j)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{R}x \leq c(\omega, P_e)$$

$$x \in C_1(P_e), x \in C_2(\mathbf{F}), \text{ 或 } x \in \Pi(\omega)$$

其中,  $x_s$  和  $\omega_j$  分别代表源  $s$  的速率及网络元素  $j$  的物理层资源,效用函数  $U_s, V_j$  是任意的非线性、单调函数.  $\mathbf{R}$  为路由矩阵,  $c$  为逻辑链路容量,它是物理层资源  $\omega$  及期望的解码错误概率  $P_e$  的函数. 当然,速率  $x$  还处于一定的约束条件下,例如介质访问成功的概率  $C_2(\mathbf{F})$  (更通用的说,即时间约束集  $\Pi$ ).  $\mathbf{F}$  为竞争矩阵. 在 NUM 中,优化变量包括  $x, \omega, P_e, \mathbf{R}$  及  $\mathbf{F}$ .

针对特定的问题,可以定制具有不同目标函数、优化变量的 NUM 模型. 文献[115]对分层体系结构中各功能模块如 TCP 拥塞控制、介质访问控制等协议的问题进行了综述.

## 5.5 讨论

利用各学科的知识来构造互联网体系结构的效用模型,有效实现了对互联网体系结构各方面能力的分析评估. 同时,通过对现有评估工作的总结还可以得到一个重要结论:互联网的发展并不完全是技术问题,其它因素,如商业运作、管理运维、政

府及企业的支持等,都是不可忽略的重要因素,在研究互联网体系结构的发展时需要对各方面因素进行综合考虑.

此外,相比效用机制的应用,以互联网体系结构性参数为指标进行评估的方法已经很成熟,例如测量、模拟、模型分析等,文献[116]对这些方法进行了总结. 值得一提的是,近年来,网络演算(Network Calculus)也开始大量应用于分析传输延迟、拥塞控制等计算机网络服务质量属性. 网络演算是一种确定性排队理论,它基于离散事件动态系统实现,其概念和方法最初由 Cruz<sup>[117]</sup>提出,用于分析数据流在漏洞整形器约束下的各种传输机制,如多路复用器、FIFO 缓冲等的性能特性. 之后,网络演算在引入极小代数理论并扩展了服务曲线的定义以后开始广泛应用于计算机专业的各个领域,如 Ad Hoc 网络、无线网络、以太网以及分布式系统等,且在网络建模和系统性能分析中取得了良好的成果,文献[118-121]对网络演算在性能评估中的相关研究成果进行了总结.

## 6 基于适应能力的互联网体系结构可演进性评估

前文在总结互联网体系结构发展现状的基础上,对现有互联网体系结构评估工作进行了综述,详细介绍了效用理论和各学科在互联网体系结构服务能力、发展能力和安全能力评估中的应用方式和应用特点,主要的评估模型、机制和方法如表 5 所示. 事实上,现有的评估方法主要针对互联网体系结构的功能和性能等服务能力,针对互联网体系结构的发展能力进行评价的工作仍然处于初级阶段.

表 5 体系结构评估现状总结

文献	描述说明	评估模型	评估机制	评估方法
[41-47]	随机 Petri 网在通信协议性能(吞吐率、RAS、可信性等)评估中的应用.	可服务性	性能参数	随机 Petri 网
[59]	提出适用于一般网络系统的互联网体系结构多维可扩展性定义及基于多约束条件的互联网多维扩展性评估模型.	可扩展性	吞吐量、稳定性、网络成本等参数	数学模型
[61]	分析两种竞争的体系结构的应用部署趋势,确定影响部署趋势的相关因素.	可部署性	用户效用	数学模型
[62]	验证以少数部署 SBGP 协议推动全网部署 SBGP 协议这一策略的有效性.	可部署性	ISP 效用	数学模型
[64]	IPv6 协议的过渡和部署分析.	可部署性	AS 效用	博弈论
[73-76]	对协议、网络规模、体系结构架构进行抽象建模,分析其发展规律和演化状态.	可演化性	协议效用	测量或数学模型
[78]	对 SITAR 体系结构安全性的建模和评估.	安全性	入侵容忍度	随机回报网
[104],[105]	两种新技术或体系结构在不同初始部署比例下的发展趋势.	可部署性	体系结构效用(用户)	微分方程
[118-121]	系统性能分析.	可服务性	性能参数	网络演算
[83],[107]	网络在各种攻防环境下的行为和安全性分析.	安全性	攻击成功率、脆弱性	随机博弈网
[114],[115]	体系结构协议分层的研究.	特性	网络效用	最优化理论

在互联网体系结构发展能力评估的现有工作中,研究者主要从用户和 ISP 的角度对互联网体系结构的效用进行建模,这种方式仅能对体系结构的发展能力进行侧面的评价.事实上,未来互联网体系结构的研究是源于当前体系结构的一些固有弊端造成其难以很好地适应不断变化的复杂的应用需求,SOA 的发展进一步深化了以“服务”为中心的互联网体系结构的思想,我们认为,从提供服务的基本元素,即应用的角度直接对互联网体系结构的演进性进行进一步的评价是很有必要的.

从前文提到的互联网体系结构可演进性定义的描述中,可以理解,互联网体系结构的可演进性本身就是用于描述体系结构持续发展能力的一个综合要素.基于此,本节将根据互联网的内在特性和外在特性,提出一种基于适应能力的互联网体系结构可演进性评估系统.

### 6.1 互联网体系结构保持可演进性的三大要素

根据现有互联网体系结构可演进性定义的描述,我们认为某种新的协议、机制乃至全新的体系结构设计能在不断变化的网络环境下获得竞争力并保持持续稳定的发展需求,即具备较好的可演进性,应满足 3 个条件(如图 9):

(1) 可扩展性. 符合当前的应用发展需求,并具备可扩展能力以适应应用需求的变化.

互联网得以广泛流行的主要原因在于其能为用户提供诸如 Email、Web、视频的应用服务.反之,用户的应用需求也在不断驱动着互联网体系结构的进步和发展.直观而言,面对各种可能的应用服务需

求,都能为用户提供良好服务的体系结构才能得到认可和支持并得以长期发展.因此,互联网体系结构可演进性评估应能对体系结构提供不同应用服务的能力给予适当评价.

(2) 可部署性. 具备与不同体系结构协议通信的能力并具备兼容性及增量部署能力.

无论是哪种体系结构,为了保护现有业务和网络基础设施的稳定过渡,在设计过程中都需要考虑兼容性问题.同时,随着互联网的发展,未来一段时期内可能有多种体系结构并存.因此,为了便于与异构体系结构进行通信,灵活、开放的设计对于体系结构的生存至关重要.毫无疑问,在进行互联网体系结构可演进性评估时,需要能够对体系结构的上诉能力进行考察.

(3) 经济收益性. 能为网络中的各种实体介质带来良好的效益.

互联网是由各种实体介质组成的一个综合架构,用户、ISP、内容提供商、基础架构厂商各自承担着互联网中重要的角色.各种实体介质对体系结构的发展起着至关重要的作用,尤其是用户和 ISP,作为互联网体系结构的直接受益者和网络互连的主体,其选择将直接影响体系结构在互联网中应用和部署的状况.而用户和 ISP 进行选择的依据在于自身从网络中获取的经济效益.对于用户而言,即其需求满足的程度、体系结构提供的服务质量以及其支出的一个均衡;对于 ISP 而言,即来自关联用户的收益、传输收益及为进行传输所需的支出.评价互联网体系结构的经济效益也是互联网体系结构可演进性

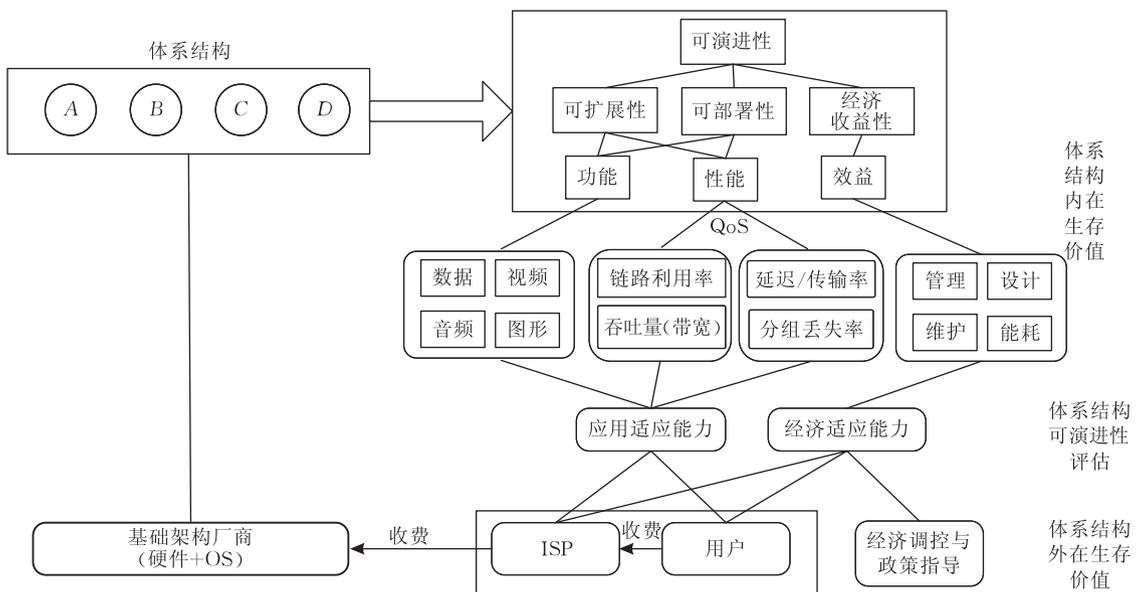


图 9 基于适应能力的互联网体系结构可演进性评估系统

评估的一大要点。

## 6.2 基于适应能力的互联网体系结构可演进性评估框架

根据前一节提出的互联网体系结构可演进性评估的三大要素,我们建立了基于适应能力的互联网体系结构可演进性评估系统。如图 9 所示,互联网体系结构的适应能力包括应用适应能力和经济适应能力两部分,前者是对互联网体系结构可扩展性和可部署性的总结,后者是对互联网体系结构经济效益性的总结,它们共同影响并决定着互联网体系结构的持续发展。可演进性评估系统分别从体系结构的内在生存价值和外在生存价值两个方面对互联网体系结构的适应能力进行评估建模。

### 6.2.1 互联网体系结构内在生存价值

互联网体系结构的功能和性能是影响互联网体系结构发展的根本原因,它代表了体系结构的技术性及提供服务的能力,这里我们称其为互联网体系结构的应用适应能力。具体而言,体系结构的功能主要指其能够提供的应用服务种类,体系结构的性能主要指其提供服务的质量。对于 ISP 而言,这就意味着不同的资源利用率和吞吐率等网络性能;对于用户而言,就意味着不同的 QoS 服务性能(延迟、抖动、丢包率);而对于体系结构本身而言,这意味着不同的数据传输能力。毫无疑问,具有较好应用适应能力,即数据传输能力的体系结构将能为用户提供更好的服务,进而得到更多的用户支持,具有更持久的发展能力。

此外,互联网的发展不仅仅是一个技术问题,诸如 ISP 的利益、管理、维护开销、技术迁移等因素都是影响体系结构长远发展不可忽略的因素。具有经济效益的体系结构,不仅意味着能为互联网介质带来良好的收益,也意味着不会给使用者造成过多的管理、维护开销及能耗。这是对互联网体系结构本身复杂程度的反映,这里我们将其称为互联网体系结构的经济适应能力。

互联网体系结构的功能、性能和管理开销、能耗等是对互联网体系结构本身的直接评价,因此这里称为互联网体系结构的内在生存价值。

### 6.2.2 互联网体系结构外在生存价值

互联网体系结构内在生存价值是对互联网体系结构可演进性的直观概括。如图 9,用户和 ISP 作为互联网中的主要介质实体,根据各自不同的应用需求及相应的费用情况,选择所用的体系结构,它们从侧面反映了体系结构的应用适应能力和经济适应能

力,因此可以说用户和 ISP 的选择是体系结构生存价值的外在体现。

## 6.3 小结

基于适应能力的互联网体系结构评估系统结合不同类型应用的传输性能和用户、ISP 的效用进行建模,有效反映了互联网体系结构的可扩展性、可部署性、经济效益等特性。文献[122]利用该系统构建了基于适应能力的互联网体系结构可演化性评估模型,并对两种适于多媒体数据传输的机制、IP 组播协议和内容缓存机制进行了评估,结果如图 10 所示,可以发现这两种在理论上具有优势的协议需要在满足一定的经济性和性能约束条件下部署才能发挥优势。

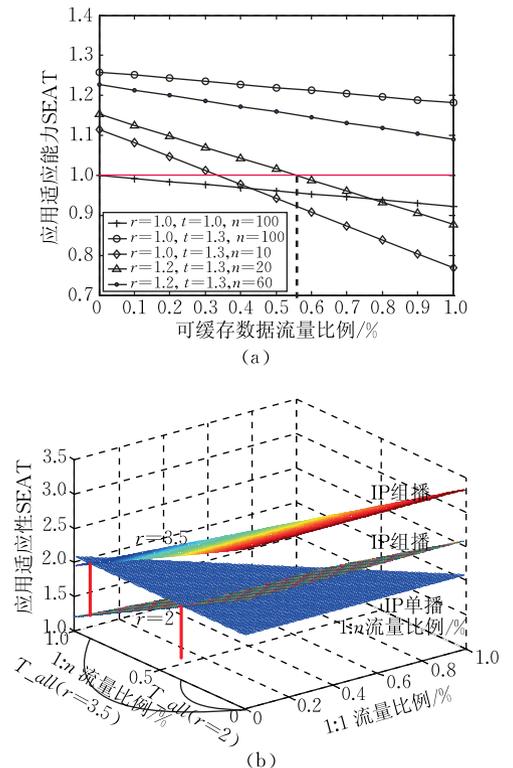


图 10 不同经济开销、数据传输性能下内容缓存机制(a)和 IP 组播协议(b)的应用适应能力<sup>[122]</sup>

值得注意的是,互联网体系结构的内在特性和外在特性两者之间的关联关系较为复杂。内在特性是用户和 ISP 进行选择的依据,外在特性是内在特性的直接反映并对内在特性产生影响。如何量化两种特性对体系结构可演化性的影响需要进一步进行研究和探索。此外,建立评估模型仅是互联网体系结构可演化性发展研究中的第一步,利用评估模型进行模拟实验,并指导互联网体系结构设计才是评估研究工作的最终目的。

## 7 总结及展望

互联网体系结构评估是未来互联网体系结构发展研究的核心问题,是目前学术界和工业界的研究热点,相关的众多研究成果也被应用于指导互联网协议或未来互联网体系结构的建设.本文对互联网体系结构的评估模型、评估机制及评估方法进行了总结,重点对互联网体系结构可服务性、可扩展性、可部署性、可演化性和可信性的评估工作进行了阐述,对效用机制和各学科在互联网体系结构评估工作中的应用进行了分析,并提出了一种基于适应能力的互联网体系结构可演进性评估系统.

由现有评估工作可以发现多学科的融合、经济效用的利用仍然是未来互联网体系结构评估工作的主要手段.此外,互联网体系结构评估工作还存在许多挑战:

(1) 互联网体系结构的可演进性是一个综合的评估对象,其评估指标及要素需要在研究中不断扩展和完善.

(2) 互联网介质实体的主观和社会因素对其选择有着至关重要的影响,但这些因素难以量化.目前,借助统计物理学中的平均场方法分析互联网中各实体之间相互影响的工作已经开始受到关注,将其应用于研究各介质实体在互联网体系结构发展中的选择和影响是互联网体系结构评估工作的可选之策.

(3) 互联网体系结构的评估是一项综合任务,单靠一种方法或一种机制难以实现全面评估,因此如何利用系统的评估框架,组合使用多种数学工具来实现多角度、全方位的评估是未来互联网体系结构评估工作的重点.

### 参 考 文 献

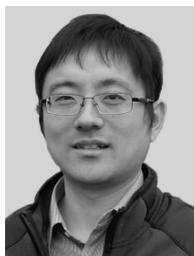
- [1] Kleinrock L. History of the internet and its flexible future. *IEEE Wireless Communications*, 2008, 15(1): 8-18
- [2] Day J. *Patterns in Network Architecture: A Return to Fundamentals*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2008
- [3] Lawrence E, Newton S, Corbitt B, Lawrence J, Dann S, Thanasankit T. *Internet Commerce: Digital Models for Business*. 3rd Edition. Milton, Qld; John Wiley & Sons, 2003
- [4] Dhamdhere A, Dovrolis C. Ten years in the evolution of the internet ecosystem//*Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement (IMC)*. Vouliagmeni, Greece, 2008; 183-196
- [5] Atzori L, Lera A, Morabito G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 2010, 54(15): 2787-2805
- [6] Xie Gao-Gang, Zhang Yu-Jun, Li Zhen-Yu, Sun Yi, Xie Ying-Ke, Li Zhong-Cheng, Liu Yun-Jie. A survey on future Internet architecture. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(6): 1109-1119(in Chinese)  
(谢高岗, 张玉军, 李振宇, 孙毅, 谢应科, 李忠诚, 刘韵洁. 未来互联网体系结构研究综述. *计算机学报*, 2012, 35(6): 1109-1119)
- [7] Lin Chuang, Jia Zi-Xiao, Meng Kun. Research on adaptive future Internet architecture. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(6): 1077-1093(in Chinese)  
(林闯, 贾子晓, 孟坤. 自适应的未来网络体系结构. *计算机学报*, 2012, 35(6): 1077-1093)
- [8] Yin Hao, Zhan Tong-Yu, Lin Chuang. Multimedia networking: From content delivery networks to future Internet. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(6): 1120-1130(in Chinese)  
(尹浩, 詹同宇, 林闯. 多媒体网络: 从内容分发网络到未来互联网. *计算机学报*, 2012, 35(6): 1120-1130)
- [9] Wu Jian-Ping, Li Xing, Liu Ying. Research status and development trends of next-generation internet architecture. *ZTE Communications*, 2011, 17(2): 10-14(in Chinese)  
(吴建平, 李星, 刘莹. 下一代互联网体系结构研究现状和发展趋势. *中兴通讯技术*, 2011, 17(2): 10-14)
- [10] Pan J, Paul S, Jain R. A survey of the research on future internet architectures. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(7): 26-36
- [11] Koponen T, Shenker S, Balakrishnan H, Feamster N, Ganichev I, Ghodsi A, Godfrey P B, McKeown N, Parulkar G, Raghavan B, Rexford J, Arianfar S, Kuptsov D. Architecting for innovation. *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, 2011, 41(3): 24-36
- [12] Anand A, Dogar F, Han D, Li B, Lim H, Machado M, Wu W, Akella A, Andersen D, Byers J, Seshan S, Steenkiste P. XIA: An Architecture for an evolvable and trustworthy Internet//*Proceedings of the HotNets*. Cambridge, USA, 2011: 1-6
- [13] Ghodsi A, Shenker S, Koponen T, Singla A, Raghavan B, Wilcox J. Intelligent design enables architectural evolution//*Proceedings of the HotNets*. Cambridge, USA, 2011: 1-6
- [14] Andersen D G, Balakrishnan H, Feamster N, Koponen T, Moon D, Shenker S. Accountable Internet protocol (AIP)//*Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference on Data Communication*. Seattle, USA, 2008; 339-350
- [15] Moskowitz R, Nikander P, Jokela P, Henderson T. Host identity protocol. RFC 5201
- [16] Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, Plass M F, Briggs N H, Braynard R L. Networking named content//*Proceedings of the International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT)*. Rome, Italy, 2009; 1-12
- [17] Zhang L X, Estrin D, Burke J, Jacobson V, Thornton J et al. Named data networking (NDN) project. PARC Technical Report NDN-0001, 2010

- [18] Koponen T, Chawla M, Chun B G, Ermolinskiy A, Kim K H, Shenker S, Stoica I. A data-oriented (and beyond) network architecture. *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, 2007, 37(4): 181-192
- [19] Balakrishnan H, Lakshminarayanan K, Ratnasamy S, Shenker S, Stoica I, Walfish M. A layered naming architecture for the Internet//*Proceedings of the ACM SIGCOMM*. Portland, USA, 2004: 343-352
- [20] Jung H Y, Koh S J. Mobile-Oriented Future Internet (MOFI): Architecture and Protocols, Release 1.2. Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), 2010
- [21] Ratnasamy S, Shenker S, McCanne S. Towards an evolvable Internet architecture//*Proceedings of the SIGCOMM*. Philadelphia, USA, 2005: 313-324
- [22] Blumenthal M S, Clark D D. Rethinking the design of the Internet: The end-to-end arguments vs. the brave new world. *ACM Transactions on Internet Technology (TOIT)*, 2001, 1(1): 70-109
- [23] Xu Ke, Zhu Min, Liu Ying, Lin Song. Advances of the evolvability of the new generation internet architecture//China Computer Federation. *China Computer Science and Technology Development Report (2010)*. Beijing: China Machine Press, 2011: 72-101(in Chinese)  
(徐格, 朱敏, 刘莹, 林嵩. 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)
- [24] Wu Jian-Ping, Lin Song, Xu Ke, Liu Ying, Zhu Min. Advances in evolvable new generation Internet architecture research. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(6): 1094-1108(in Chinese)  
(吴建平, 林嵩, 徐格, 刘莹, 朱敏. 可演进的新一代互联网体系结构研究进展. *计算机学报*, 2012, 35(6): 1094-1108)
- [25] Tanenbaum A S. *Computer Networks*. 4th Edition. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2002
- [26] Peterson L L, Davie B S. *Computer Networks: A Systems Approach*. 3rd Edition. San Francisco CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2003
- [27] Clark D D, Wroclawski J, Sollins K R, Braden R. Tussle in cyberspace: Defining tomorrow's Internet. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 2005, 13(3): 462-475
- [28] Feldmann A. Internet clean-slate design: What and why? *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2007, 37(3): 59-64
- [29] Dovrolis C, Streedman J T. Evolvable network architectures: What can we learn from biology? *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2010, 40(2): 72-77
- [30] Dovrolis C. What would darwin think about clean-slate architectures? *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, 38(1): 29-34
- [31] Rexford J, Dovrolis C. Future Internet architecture: Clean-slate versus evolutionary research. *Communications of the ACM*, 2010, 53(9): 36-40
- [32] Tennenhouse D L, Smith J M, Sincoskie W D, Wetherall D J, Minden G J. A survey of active network research. *IEEE Communications Magazine*, 1997, 35(1): 80-86
- [33] Zhang Y, Henderson T R. An implementation and experimental study of the explicit control protocol(XCP)//*Proceedings of the IEEE INFOCOM*. Malibu, USA, 2005: 1037-1048
- [34] Castineyra I, Chiappa N, Steenstrup M. The nimrod routing architecture. RFC 1992
- [35] Gallaher M P, Rowe B. IPv6 economic impact assessment-final report. National Institute of Standards and Technology, U. S. Department of Commerce, 2005
- [36] Kong X Z, Huang J W, Lin C, Ungsunan P. Performance, fault-tolerance and scalability analysis of virtual infrastructure management system//*Proceedings of the IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications*. Chengdu, China, 2009: 282-289
- [37] Liu F Q, Yin H, Lin C. A General performance evaluation framework for streaming service over 3G/B3G//*Proceedings of the 8th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science(ICIS 2009)*. Phoenix, USA, 2009: 159-168
- [38] Hermanns H, Herzog Ulrich, Katoen Joost-Pieter. Process algebra for performance evaluation. *Theoretical Computer Science*, 2002, 274(1-2): 43-87
- [39] Dumitrescu M. Stochastic Petri nets architectural modules for power system availability//*Proceedings of the 9th International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*. Dubrovnik, Croatia, 2002: 745-748
- [40] Teixeira M, Lima R, Oliveira C, Maciel P. Performance evaluation of service-oriented architecture through stochastic Petri nets//*Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*. San Antonio, USA, 2009: 2831-2836
- [41] Lin Chuang. *Stochastic Petri Net and Performance Evaluation*. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese)  
(林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005)
- [42] Zaitsev D A, Shmeleva T R. Parametric Petri net model for ethernet performance and QoS evaluation//*Proceedings of the 16th Workshop on Algorithms and Tools for Petri Nets*. Karlsruhe, Germany, 2009: 15-28
- [43] Tan Z X, Lin C, Qu Y. Approximate performance analysis of resource sharing systems using stochastic Petri net//*Proceedings of the Advanced Simulation Technologies Conference, 2004 (ASTC'04)*. Arlington, Virginia, 2004
- [44] Chiola G, Franceschinis G, Gaeta R, Ribaud M. GreatSPN 1.7: GRaphical editor and analyzer for timed and stochastic Petri nets. *Performance Evaluation Special Issue on Performance Modeling Tools*, 1995, 24(1-2): 47-68
- [45] Trivedi K S, Sahnner R A. SHARPE at the age of twenty two. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 2009, 36(4): 52-57
- [46] German R, Kelling C, Zimmermann A, Hommel G. TimeNET: A toolkit for evaluating non-Markovian stochastic Petri nets. *Performance Evaluation*, 1995, 24(1-2): 69-87
- [47] Bonet P, Lladó C M, Puigjaner R, Knottenbelt W J. PIPE v2.5: A Petri net tool for performance modeling//*Proceedings*

- of the 23rd Latin American Conference on Informatics (CLEI 2007). San Jose, Costa Rica, 2007
- [48] Erl Thomas. *Service-Oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2005
- [49] Vasiliev Y. *SOA and WS-BPEL: Composing Service-Oriented Architecture Solutions with PHP and Open-Source Active BPEL*. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2007
- [50] Neuman B C. *Scale in distributed systems//Readings in Distributed Computing System*. New York, USA: Institute of Electrical & Electronics Engineer, IEEE Computer Society Press, 1994
- [51] Lv Q, Ratnasamy S, Shenker S. Can heterogeneity make gnutella scalable? *Lecture Notes Computer Science (LNCS)*, 2002, 2429: 94-103
- [52] Ratnasamy S, Francis P, Handley M et al. A scalable content-addressable network//*Proceedings of the SIGCOMM*. San Diego, USA, 2001: 161-172
- [53] Stoica I, Morris R, Karger D et al. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications//*Proceedings of the SIGCOMM*. San Diego, USA, 2001: 149-160
- [54] Broch J, Maltz D, Johnson D et al. A performance comparison of multihop wireless ad hoc network routing protocols//*Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*. Dallas, Texas, 1998: 85-97
- [55] Park V D, Corson S. A performance comparison of the temporally-ordered routing algorithm and ideal link-state routing//*Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. Nagai Memorial Hall, Japan, 1998: 85-97
- [56] Perkins C E, Royer E M, Das S R et al. Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks. *IEEE Personal Communications Magazine*, 2001, 8(1): 16-28
- [57] Grossglauser M, Tse D N C. Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2002, 10(4): 477-486
- [58] Santivanez C A, McDonald B, Stavrakakis I et al. On the scalability of ad hoc routing protocols//*Proceedings of the Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEEINFOCOM)*. New York, USA, 2002: 1688-1697
- [59] 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
- [60] Lin Song, Wu Jian-Ping, Xu Ke. Analysis and evaluation of Internet resource distribution models. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2010, 50(1): 58-62(in Chinese)  
(林嵩, 吴建平, 徐格. 因特网资源分发模式分析与评价. *清华大学学报*, 2010, 50(1): 58-62)
- [61] Joseph D, Shetty N, Chuang J, Stoica I. Modeling the adoption of new network architectures//*Proceedings of the 2007 the International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies (ACM CoNEXT)*. New York, USA, 2007: 49-60
- [62] Gill P, Schapira M, Goldberg S. Let the market drive deployment: A strategy for transitioning to BGP security//*Proceedings of the SIGCOMM*. Toronto, Canada, 2011: 14-25
- [63] Chang H, Dash D, Perrig A, Zhang H. Modeling adoptability of secure BGP protocol//*Proceedings of the SIGCOMM*. Pisa, Italy, 2006: 279-290
- [64] Gyarmati L, Trinh T A. On the migration to IPv6: A game-theoretic perspective. Budapest; Budapest University of Technology and Economics, Netecon09; Technical Report, 2009
- [65] Kirschner M, Gerhart J. Evolvability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1998, 95(15): 8420-8427
- [66] Rowe D, Leaney J R. Evaluating evolvability of computer based systems architectures—An ontological approach//*Proceedings of the International Conference on the Engineering of Computer-Based Systems (ECBS)*. Monterey, USA, 1997: 360-367
- [67] Isaac D, McConaughy G. The role of architecture and evolutionary development in accommodating change//*Proceedings of the National Council on Systems Engineering (NCOSE)*. San Jose, USA, 1994: 541-545
- [68] Percivall G S. System architecture for evolutionary system development//*Proceedings of the 4th Annual Symposium of the International Council on Systems Engineering (INCOSE)*. San Jose, USA, 1994: 571-575
- [69] Hilliard R F, Kurland M J, Litvintchouk S D. MITRE's architecture quality assessment//*Proceedings of the Software Engineering and Economics Conference*. McLean, USA, 1997: 1-9
- [70] Steiner R. Systems architecture and evolvability-definitions and perspective//*Proceedings of the 8th Annual Symposium of the International Council on System Engineering*. Vancouver, Canada, 1998
- [71] Rowe D, Leaney J, Lowe D. Defining Systems Evolvability—A Taxonomy of change//*Proceedings of the International Conference and Workshop on Engineering Computer Based Systems*. Jerusalem, Israel, 1998: 45-52
- [72] Bode S. On the role of evolvability for architectural design//*Proceedings of the Im Focus das Leben. Workshop Modellierung und Beherrschung der Komplexität, GI-Edition Lecture Notes in Informatics (LNI)-154P*. Bonner Köllen, 2009: 3256-3263
- [73] Medina A, Allman M, Floyd S. Measuring the evolution of transport protocols in the Internet. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2005, 35(2): 37-52
- [74] Zhang G Q, Zhang G Q, Yang Q F, Cheng S Q, Zhou T. Evolution of the Internet and its cores. *New Journal of Physics*, 2008, 10(12): 1-11
- [75] Garlan D, Schmerl B. Ævol: A tool for defining and planning architecture evolution//*Proceedings of the 2009 IEEE 31st International Conference on Software Engineering*. Vancouver, Canada, 2009: 591-594

- [76] Akhshabi S, Dovrolis C. The evolution of layered protocol stacks leads to an hourglass-shaped architecture//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011. Toronto, Canada, 2011; 206-217
- [77] Venkataraghavan V, Nair S, Seidel P M. Simulation-based validation of security protocols//Proceedings of the OPNET-WORKS. Washington DC, 2002
- [78] Apostol D, Foote-Lennox T, Markham T, Dowd A, Lu R, O'Brian D. Checkmate network security modeling//Proceedings of the DARPA Information Survivability Conference and Exposition (DISCEX). Anaheim, USA, 2001; 214-226
- [79] Gorodetski V, Kotenko I, Karsaev O. Multi-agent technologies for computer network security: Attack simulation, intrusion detection and intrusion detection learning. *International Journal of Computer Systems Science and Engineering*, 2003, 18(4): 191-200
- [80] Wang D, Madan B, Trivedi K S. Security analysis of SITAR intrusion-tolerant system//Proceedings of the ACM Workshop Survivable and Self-Regenerative Systems (SSRS). Fairfax, USA, 2003; 23-32
- [81] Sallhammar K, Helvik B E, Knapskog S J. A game-theoretic approach to stochastic security and dependability evaluation//Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Dependable, Autonomic and Secure Computing. Indianapolis, USA, 2006; 61-68
- [82] Nicol D M, Sanders W H, Trivedi K S. Model-based evaluation: From dependability to security. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2004, 1(1): 48-65
- [83] Wang Yuan-Zhuo, Lin Chuang, Cheng Xue-Qi, Fang Bin-Xing. Analysis for Network Attack-Defense Based on Stochastic Game Model. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(9): 1748-1762(in Chinese)  
(王元卓, 林闯, 程学旗, 方滨兴. 基于随机博弈模型的网络攻防量化分析方法. *计算机学报*, 2010, 33(9): 1748-1762)
- [84] Lin C, Wang Y, Li Q L. Stochastic modeling and evaluation for network security. *Chinese Journal of Computers*, 2005, 28(12): 1943-1956(in Chinese)  
(林闯, 汪洋, 李泉林. 网络安全的随机模型方法与评价技术. *计算机学报*, 2005, 28(12): 1943-1956)
- [85] Lin Chuang, Wang Yuan-Zhuo, Yang Yang, Qu Yang. Research on network dependability analysis methods based on stochastic Petri net. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(2): 322-332(in Chinese)  
(林闯, 王元卓, 扬扬, 曲杨. 基于随机 Petri 网的网络可信性分析方法研究. *电子学报*, 2006, 34(2): 322-332)
- [86] Lin Chuang, Ren Feng-Yuan. Controllable trustworthy and scalable new generation Internet. *Journal of Software*, 2004, 15(2): 1815-1821(in Chinese)  
(林闯, 任丰源. 可控可信可扩展的新一代互联网. *软件学报*, 2004, 15(2): 1815-1821)
- [87] Lelarge M, Bolot J. A local mean field analysis of security investments in networks//Proceedings of the Workshop on Economics of Networks, Systems, and Computation (NetEcon). Seattle, USA, 2008; 25-30
- [88] Bernoulli D. Translated by Sommer L. Exposition of a new theory on the measurement of risk. *Econometrica*, 1954, 22: 23-26(Original work published 1738, 5: 175-192)
- [89] Bentham J. *An Introduction to the Principles of Morals and Legislation*. Oxford, England; Blackwell, 1984 (Original work published 1789)
- [90] von Neumann J, Morgenstern O, Rubinstein A. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton, New Jersey, USA; Princeton University Press, 1947
- [91] Stigler G. The development of utility theory II. *The Journal of Political Economy*, 1950, 58(5): 373-396
- [92] Read D. Utility theory from Jeremy Bentham to Daniel Kahneman. London School of Economics Working Paper, No: LSEOR 04-64, Department of Operational Research, London School of Economics and Political Science, London, UK, 2004
- [93] Rabin M. Risk aversion and expected-utility theory: A calibration theorem. *Econometrica*, 2000, 68(5): 1281-1292
- [94] Palomar D P, Chiang M. A tutorial on decomposition methods for network utility maximization. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(8): 1439-1451
- [95] Samadi P, Mohsenian-Rad A, Schober R, Wong V W S, Jatskevich J. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid//Proceedings of the Smart-GridComm. Gaithersburg, Maryland, USA, 2010; 415-420
- [96] Yeo C S, Buyya R. Pricing for utility-driven resource management and allocation in clusters. *International Journal of High Performance Computing Applications*, 2007, 21(4): 405-418
- [97] He H, Xu K, Liu Y. Internet resource pricing models, mechanisms, and methods. *Networking Science*, 2012, 1(1-4): 48-66
- [98] Wang J H, Chiu D M, Lui J C. A game-theoretic analysis of the implications of overlay network traffic on ISP peering. *Computer Networks*, 2008, 52(15): 2961-2974
- [99] Lee J W, Chiang M, Calderbank R A. Jointly optimal congestion and contention control based on network utility maximization. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(3): 216-218
- [100] Shi L, Liu C B, Liu B. Network utility maximization for triple-play services. *Computer Communications*, 2008, 31(10): 2257-2269
- [101] Li Y H, Guo X L, Li Y S, Zheng X L. A utility-based network selection mechanism in heterogeneous wireless networks//Proceedings of the International Conference on WNIS (Wireless Networks and Information Systems). Shanghai, China, 2009; 201-204
- [102] Dan Y. The utility evaluation analysis of information technology based on it's usage frequency//Proceedings of the International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). Xi'an, China, 2011; 278-282
- [103] Shenker S J. Fundamental design issues for the future Internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1995, 13(7): 1176-1188
- [104] Sen S. On economic viability and choices of networked systems & architectures. Thesis Proposal 2010
- [105] Sen S, Jin Y, Guéri R, Hosanagar K. Modeling the dynamics of network technology adoption and the role of converters. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18(6): 1793-1805

- [106] Xu Ke, Lin Song, Wu Jian-Ping. A three-network convergence evolution model and analysis based on user utility. *Chinese Journal of Computers*, to appear (in Chinese) (徐恪, 林嵩, 吴建平. 基于用户效用的三网融合演化模型与分析. *计算机学报*, 待发表)
- [107] Lin Chuang, Wang Yuan-Zhuo, Wang Yang. *Analysis and Evaluation of Network Security Based on Stochastic Game Model*. Beijing: Tsinghua University Press, 2011 (in Chinese) (林闯, 王元卓, 汪洋. 基于随机博弈模型的网络安全分析与评价. 北京: 清华大学出版社, 2011)
- [108] Kelly F P, Maulloo A, Tan D. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operational Research Society*, 1998, 49(3): 237-252
- [109] Kunniyur S, Srikant R. End-to-end congestion control schemes: utility functions, random losses and ECN marks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(5): 689-702
- [110] Low S H. A duality model of TCP and queue management algorithms. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(4): 525-536
- [111] Low S H, Lapsley D E. Optimization flow control, I: Basic algorithm and convergence. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1999, 7(6): 861-874
- [112] Xu K, Liu J C, Zhang J X. LBMP: A logarithm-barrier-based multipath protocol for Internet traffic management. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, 22(3): 476-488
- [113] Xu K, Liu H Y, Liu J C, Shen M. One more weight is enough: Toward the optimal traffic engineering with OSPF//*Proceedings of the 31st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. Minneapolis, USA, 2011: 836-846
- [114] Chiang M, Low S H, Calderbank A R, Doyle J C. Layering as optimization decomposition: A mathematical theory of network architectures. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 255-312
- [115] Chiang M. Balancing transport and physical layer in wireless multihop networks: Jointly optimal congestion control and power control. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(1): 104-116
- [116] Kobayashi H, Mark B L. *System Modeling and Analysis: Foundations of System Performance Evaluation*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2009
- [117] Cruz R L. A calculus for network delay, Part I: Network elements in isolation. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1991, 36(2): 114-131
- [118] Boudec J Y L, Thiran P. *Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing System for the Internet*. New York: Springer-Verlag, 2001
- [119] Fidler M. Survey of deterministic and stochastic service curve models in the network calculus. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2010, 12(1): 59-86
- [120] Jiang Yuming. *Stochastic Network Calculus for Performance Analysis of Internet Networks—An Overview and Outlook*//*Proceedings of the ICNC*. Maui, USA, 2012: 638-644
- [121] Ciucu F, Schmitt Jens. Perspectives on network calculus—No free lunch, but still good value//*Proceedings of the SIGCOMM*. Helsinki, Finland, 2012: 311-322
- [122] Zhu Min, Xu Ke, Lin Song. The adaptability model for evaluation of Internet architecture's evolvability and case studies. *Chinese Journal of Computers*, to appear (in Chinese) (朱敏, 徐恪, 林嵩. 面向适应能力的互联网体系结构演进性评估模型与实例分析. *计算机学报*, 待发表)



**XU Ke**, born in 1974, Ph.D., professor, Ph.D. supervisor. His research interests mainly include architecture of next-generation Internet, high performance router, P2P and overlay network, Internet of Things.

**ZHU Min**, born in 1977, Ph.D. candidate. Her main research interests include architecture of next-generation Internet and its evaluation.

**LIN Chuang**, born in 1948, Ph.D., professor, Ph.D. supervisor. His research interests include computer networks, performance evaluation, network security analysis, and Petri nets theory and its applications.

## Background

The current Internet is at the shift to the Next Generation Internet (NGI). Over the past several years, the networking research community has engaged in how to push the Internet forward; many new ideas have been proposed by now. Some evaluation models have also been proposed to check whether these proposals are adaptable to the needs of the application evaluation and investigate their development trend. This paper provides a thorough overview of the current evaluation models, mechanisms and methods of the Internet architecture; then it proposes an evaluation framework

based on the adaptability of the architecture.

This work is supported by the National Basic Research Program (973 Program) of China (No. 2009CB320501, No. 2012CB315803), the National Natural Science Foundation of China (No. 61170292), and National Science and Technology Major Project (No. 2012ZX03005001-001). These projects aim to make advances to the Next Generation Internet and the evolution of the Internet. This paper summarizes the evaluation models and methods of the Internet architecture.