

第 3 章 互联网体系结构评估模型

3.1 引言

第 2 章中提到,近十年来,伴随着互联网规模的迅速膨胀,网络流量和用户数量的指数增长,以及互联网应用类型和终端接入设备的多样化发展,传统互联网体系结构在鲁棒性、安全性、移动性等方面的问题表现得越来越明显。针对这些问题部署的中间件和新的协议不但没能完全解决当前互联网体系结构存在的问题,还使得体系结构的网络层越来越臃肿,导致了更严重的复杂性、脆弱性、可扩展性、管理和互操作问题。当前的互联网体系结构在功能和性能甚至协议栈结构和设计原则等各方面都面临着巨大的挑战,研发新一代互联网体系结构已经成为学术界和工业界的共识。

2011 年 2 月 3 日,全球互联网地址分配机构(IANA)正式将 IPv4 地址库剩余的 5 个 A 类地址平均分配给 AFRINIC、APNIC、ARIN、LACNIC 以及 RIPE NCC 五个地区性互联网注册管理机构(RIR),同年 4 月 15 日 APNIC 宣布其 IPv4 地址分配完毕^①。IPv4 地址的耗尽进一步加速了新一代互联网体系结构研究和部署的进程。

近十几年来,针对如何解决现有互联网体系结构存在的不足以及未来互联网体系结构如何发展的问题,研究者们提出了很多建议,也发表了大量的研究论文。根据出发点的不同,这些研究思路大致可以归为革命式、改良式和演进式 3 种。这 3 种思路的主要区别在于坚持现有体系结构设计原则的程度不同,革命式路线主张彻底推翻现有体系结构,从头再来;改良式路线则坚持现有体系结构设计原则不变,仅进行增量式修补;演进式路线介于前两者之间,提倡在稳定过渡的同时进行适当的改革。

尽管有关未来互联网体系结构发展的理论研究取得了很好的成果,但有影响的应用并不多。事实上,在对互联网体系结构发展路线问题进行深入理论研究的同时,确定众多的技术思路和设计选项是否符合互联网体系结构发展的需求,究竟哪种技术或方向更具影响力、更具备发展的潜力,是很有必要的。这就需要有效的评估、衡量这些协议和体系结构各方面属性的方法。

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。由于互联网体系结构研究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含义。例如,Tanenbaum 等将互联网体系结构定义为分层和协议的集合^[1],Peterson 等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^[2],Clark 等则将互联网体系结构定义为指导互联网关键设计(如协议、机制和算法等)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^[3]。本书第 1 章对当前互联网体系结构设计中的主要问题进行了回顾。

^① http://en.wikipedia.org/wiki/IPv4_address_exhaustion.

从互联网体系结构的定义可以看出互联网体系结构包括协议、算法、机制和框架各层次元素,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、运营商和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”和“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。

本章从评估模型、机制和方法 3 个角度对互联网体系结构评估工作的研究现状进行介绍,重点对与未来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)的评估工作进行总结,并从应用适应性的角度提出一种全新的互联网体系结构评估思路,以期对未来互联网体系结构的研究和评估工作提供参考。

具体章节安排如下: 3.2 节简要总结互联网体系结构评估工作近年来的发展现状。3.3 节介绍 5 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。3.4 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互联网体系结构基本评估模型中的应用进行介绍。3.5 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。3.6 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发展能力的评估要素,并介绍一种互联网体系结构可演进性评估框架。3.7 节介绍一种面向应用适应能力的互联网体系结构模型 2ACT,并利用提出的模型对当前互联网通信模式中的两个重要问题——in-network 内容缓存机制和组播机制进行分析和讨论。最后对本章进行总结。

3.2 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,从不同的层次分析,从不同的视角观察都需要不同的评价指标,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。

3.2.1 基于定性分析和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,在各学科的研究工作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。表 3.1 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。

文献[7]中,支持革命式路线的 Jennifer 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奠定了基础,但这种体系结构过于僵化,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使得现有互联网体系结构更加杂乱无章和漏洞百出。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、模块化和条理化融入考虑,以有效解决附着在现有体系结构中

表 3.1 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 |
|--------|---|
| [4] | 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 |
| [5][6] | 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 |
| [7] | Jennifer Rexford 和 Constantine 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 |

的安全、管理和业务等方面的问题,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 Constantine 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,乃至必须坚守的根本属性。Constantine Dovrolis 还指出,尽管革命式的发展思路看似新鲜,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^[8]、传输控制协议 XCP^[9]、域间路由体系结构 NIMROD^[10]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,互联网是一个复杂的综合系统,必须考虑其经济性约束,试图通过一个成本很高的新技术来取代一个技术相对处于劣势但已广泛部署的技术并不可行。

尽管基于定性分析和比较的方法可以让研究者们更好地了解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提供明确的数据结果或者定量的评估结论。因此,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。

3.2.2 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、物理学和经济学等科学问题,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、构造和开发各种系统的必不可少的工具。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 3.1 所示)。

1. 评估对象(who)

评估对象(who)即评估什么问题。

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。

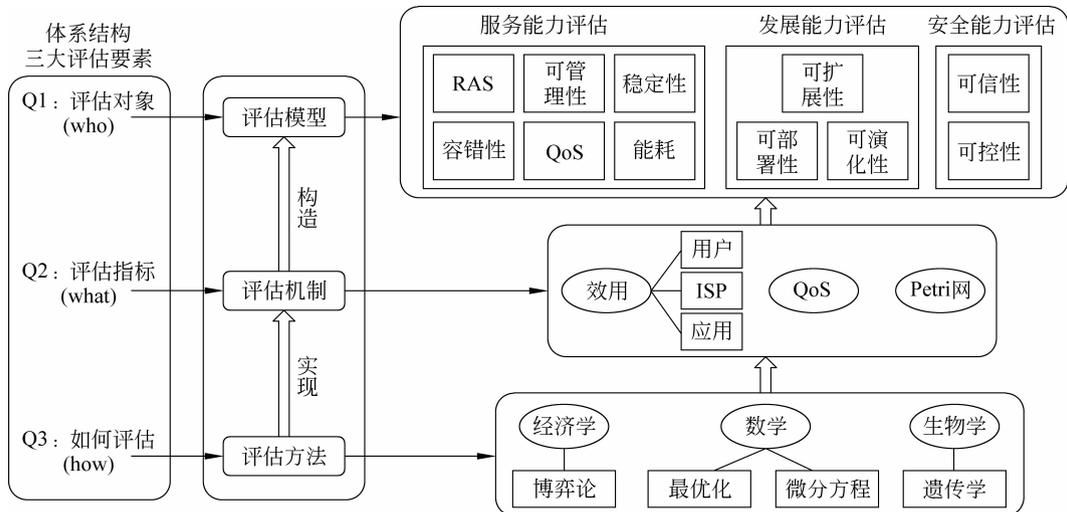


图 3.1 互联网体系结构评估模型、机制和方法

无论是机制、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、可扩展性和可部署性等,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,这里将其简称为体系结构的可服务性,如 RAS(Reliability, Availability, Serviceability)、QoS、可管理性和稳定性等。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延迟、带宽和丢包率等性能。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,这里主要指可信性、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的评估工作,我们对文中的相关概念进行了总结,如表 3.2 所示。

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机制、协议的评估。

2. 评估指标(what)

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。对于机制和协议的评估来说,通常直接测量、模拟其对服务的支持度,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。

表 3.2 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的修补 | 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的应用需求 |
| 能力评估 | 服务能力(可服务性) | 互联网体系结构为用户提供应用服务的能力,以性能参数为指标 | | |
| | 发展能力 | 可扩展性 | 互联网体系结构的各项性能指标随着网络规模扩大不发生明显下降的特性 | |
| | | 可部署性 | 新的协议或体系结构能够实现全网部署的特性 | |
| | | 可演化性 | 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、安全性和健壮性等的综合指标 | | |

互联网中存在多种实体,如用户、ISP 和内容提供商等^[3],政府也会对互联网的运营施加影响。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,基于预期获益的大小进行体系结构的选择是合理的,因此能为 ISP 带来更多利益的体系结构将更受到青睐。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^[11-13],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。效用理论是面临风险情况下进行决策的有效方法,目前已经广泛应用于互联网体系结构评估。本章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)

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,结合其他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。根据采用的手段不同,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以及基于微分方程的方法等。本书的后续章节将对这些方法的具体应用进行详细的介绍。

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 3 个层次。如图 3.1 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,3 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。

3.2.3 互联网体系结构评估工作特点总结

表 3.3 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如下:

(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,而且根据评估对象的不同,评估工作呈现层次、阶梯式的逻辑特点。

(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,因此大多数评估工作都通过对用户和 ISP 的效用进行建模来开展。

(3) 随着物理学、生物遗传学和统计学等学科在计算机学科中的广泛应用,借助博弈论、最优化理论和微分方程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) 基于定性分析和比较的方法和基于模型的方法分别从定性和定量的角度对体系结构进行评估,两者共同为互联网体系结构发展提供参考。

相关细节将在后续章节中详细阐述。

表 3.3 互联网体系结构评估现状总结

| 分类 | 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等方法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、框架和属性等) | 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 | | |

3.3 基于模型的互联网体系结构评估

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,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,以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 5 种特性构建的基本评估模型进行总结。

3.3.1 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[14]、[15]、[16]、[17]和[18]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。本节对 Petri 网模型的应用进行简介。

Petri 网(Petri Net,PN)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。清华大学林闯教授在文献[19]中对随机 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和软件系统性能评价中的应用。文献[20]对动态优化理论与随机 Petri 网理论相结合的马尔可夫决策 Petri 网和随机博弈网模型的建模方法与应用实例进行了总结。

简单来说,PN 就是一个由位置、变迁和弧组成的图。图 3.2 描述了共享资源情况下一个资源的 PN 模型。PN 中,位置用于表示系统可能的状态,如是否故障、资源状况等;变迁用于表示引起系统状态发生改变的事件,如攻击事件、资源存取等;弧用于表示状态与事件之间的关系,包括事件可能产生的状态以及状态的转换。例如,图 3.2 使用了两个位置 P_{idle} 和 P_{busy} 来表示资源的状态,使用两个变迁 t_{start} 和 t_{end} 来描述了两个状态的修改。PN 中,标记包含在位置中,标记的动态变化即表示系统状态的变迁。例如,图 3.2 中有一个标记,表示为资源实体,初始状态下它包含在位置 P_{idle} 中。随机 Petri 网(Stochastic Petri Net,SPN)模型中,位置可能含有多个标记。事件发生后,多个标记可能在不同的位置朝不同的方向流动。每个变迁有输入位置和输出位置。输入位置是从位置到变迁,输出位置则相反。当一个变迁所有输入位置中标记数量大于或等于相应输入弧的标记数量时,变迁就是可实施的。SPN 中,变迁从可实施到真正实施之间需要经过一个随机的时间。PN 在互联网体系结构的评估中得到了充分的应用。例如,Zaitserv 等通过一个有色 PN 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^[21]。Tan 等使用 SPN 对资源共享系统的性能进行了评估^[22]。此外,还有许多通过 PN 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^[23]、Sharp^[24]、TimeNet^[25] 和 PIPE^[26] 等。

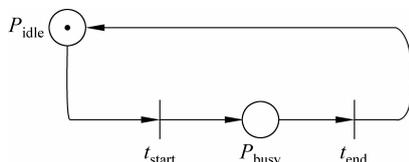


图 3.2 资源 PN 模型

文献[18]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^[27]。SOA 将服务作为其基本的要素,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^[28]。

BPEL 使用基本结构和扩展结构来支持复杂的操作,基本结构包括用于请求 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[18]中,作者建立了用于评估 BPEL 处理进程性能的广义随机 Petri 网(Generalized Stochastic Petri Nets,GSPN)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 3.3(a)即为一个基本的进程模型,图 3.3(b)和图 3.3(c)分别代表 BPEL 的串行(Sequence)结构和并行(And)结构。

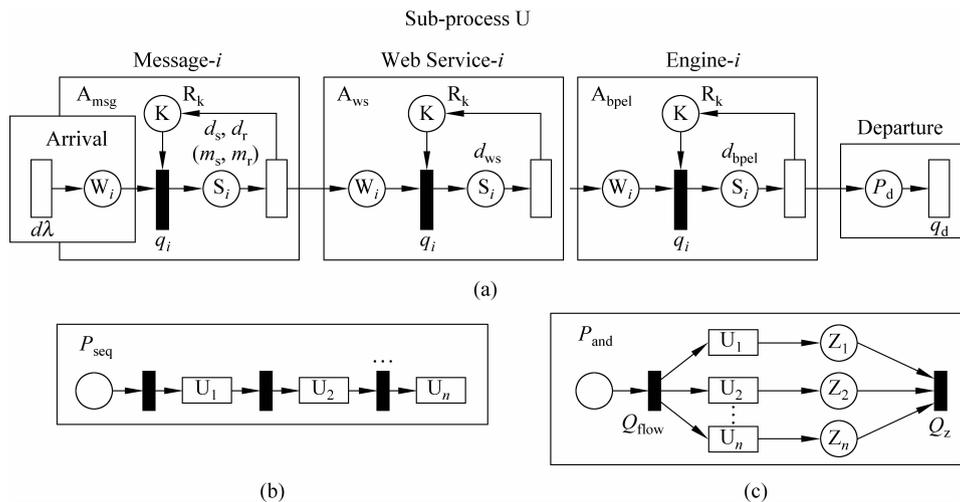


图 3.3 BPEL 基本进程模型及进程组成规则

图 3.3(a)的 Activity 块中(这是图中各个功能组件的通称),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 ($d_r = m_r/b, d_s = m_s/b$) 的网络中接收(或发送)大小为 m_r (m_s) 的消息的延迟。 d_{bpel} 表示 BPEL 引擎向服务器调度者发送消息的延迟。图 3.3(b)和图 3.3(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。

从随机 Petri 网在当前评价工作中的应用来看,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的应用,也为其提供了很好的模型。

第 8 章将详细介绍采用随机过程和随机 Petri 网的建模方法和实例分析。

3.3.2 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[29]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。

利用理论分析和实验模拟,研究者们对 Overlay 网络^[30-32]和 Ad Hoc 网络^[33,34]的可扩展性进行了大量分析和评估。例如,文献[30]中,Lv 等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[34]中,Santivance 等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规模、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 $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ (λ 表示网络规模、移动频率和报文产生速率等)的网络中,最小流量负载为 $\text{Tr}(\lambda_1, \lambda_2, \dots)$,那么其网络可扩展性要素定义为

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

其中,网络的最小流量负载是指当所有节点都具有瞬时全网拓扑信息时,在可用的最短路径上进行分组转发所需的最小带宽总和。网络可扩展性的定义指出了在参数为 λ_i 的条件下,网络保持可扩展的条件为:随着参数 λ_i 的增加,网络最小流量负载的增长速度低于网络速率 R^{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(Plain Flooding,无路由)、SLS(Standard Link State)、DSR(Dynamic Source Routing)^[35]、HierLS(Hierarchical Link State)^[36]、ZRP(Zone Routing Protocol)^[37]及 HSLs(Hazy Sighted Link State)^[38]的可扩展性进行了分析和评价。结果表明,在移动的情况下,PF 和 ZRP 的可扩展性更好,在网络规模增长的情况下,HSLs 的可扩展性更好。

上面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,文献[39]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[39]中,Xu 等将互联网体系结构的可扩展性定义为互联网体系结构的评价指标随着网络若干约束条件在一定范围内变化而具有的特性,它具有 4 个要素:约束条件、约束区间、评价指标和变化规律。其中,互联网体系结构中可控制的因素,如报文发送速率、链路带宽等被称为约束条件,即 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,它决定了可扩展性是否全面地考虑了所有的因素,是适用范围的体现。而约束条件变化的范围称为约束空间,它决定了可扩展性有效的范围,体系结构可扩展性的优劣只是在约束区间内才有效,超出这个区间则是无意义的。所谓评价指标,是指需要考察的互联网体系结构的某个具有优劣意义的特性,例如吞吐量、稳定性和网络成本等, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 为评价指标集合。变化规律即评价指标随约束条件变化的规律,它是可扩展性的一个直接体现,例如,性能随规模线性增长的系统肯定比随规模对数增长的系统的可扩展性要好。

文献[39]定义了体系结构可扩展性的多层含义,根据不同的考察目的,可扩展性包括静态可扩展性、动态可扩展性和累积可扩展性。

(1) 静态可扩展性:是指评价指标当前的值所代表的体系结构优劣的特性。例如,对于两个不同的网络体系结构,一个有较大的吞吐量,另一个只有很小的吞吐量,则第一个体系结构在吞吐量这个评价指标上的静态可扩展性要优于第二个体系结构。

(2) 动态可扩展性：是指在某一个时刻(并非是时间上的时刻,而是约束条件的即时值所在的当前位置)评价指标随约束条件变化而发生变化的快慢。例如,有 3 个体系结构,它们的系统总吞吐量的变化情况分别为:一个随着端用户速率呈线性增长,一个是呈对数增长,一个呈倒数下降,那么它们 3 个在吞吐量这一评价指标上动态可扩展性是依次下降的。

(3) 累积可扩展性：是指在约束区间内的评价函数的累积结果。它是约束条件一段范围内的累积特性,与某一个时刻孰优孰劣无关。

对于体系结构的评价,不能只考虑某个可扩展性,应该综合 3 个可扩展性对系统做出评价。比如 A 系统和 B 系统在约束区间内静态可扩展性有时 A 好,有时 B 好,但是 A 系统的动态可扩展性一直比 B 好,同时 A 系统的累积可扩展性也比 B 系统的要好,那么用户应倾向于选择 A 系统。当比较两个系统 X 和 Y 的时候,对于这 3 个可扩展性的综合考虑,主要可以从每个可扩展目标上得到 X 和 Y 的比较,直接相加或者加权相加得到整体评价。如何选择加权方式,权重可以由决策者讨论决定。当重视未来发展的时候,可以重视动态可扩展;当重视约束区间内的整体情况时,则应当重视综合可扩展。

根据评价目标数量不同又可以分为一维可扩展性和多维可扩展性,一维可扩展性按照约束条件的数量不同又可以分为单约束的一维可扩展性和多约束的一维可扩展性。

1. 单约束一维可扩展性

单约束一维可扩展性即单约束单目标的可扩展,是指某一个评价指标随着某一个约束条件变化而具有的可扩展性。它的评价函数为

$$y_i = f_{ij}(x_j), \quad x_j \in [x_{j1}, x_{j2}]$$

其中, y_i 是评价目标, x_j 是单约束条件, f_{ij} 是评价目标 y_i 随着约束条件 x_j 变化的规律函数, $[x_{j1}, x_{j2}]$ 是约束区间。例如,评价一个网络体系结构对于 P2P 流媒体点播应用的支持性能时,如果将网络传输速率作为约束条件,而把用户的等待时间作为评价目标,则是一个单约束一维可扩展性问题。

根据可扩展性对考查目的的分类,可以定义 3 种不同含义的单约束一维可扩展性。

1) 静态可扩展性

静态可扩展性就是指系统当前的评价目标好坏,因此可以用评价函数来表示,即

$$S_{ij} = y_{ij} = f_{ij}(x_j), \quad x_j \in [x_{j1}, x_{j2}]$$

2) 动态可扩展性

动态可扩展性是评价函数某“时刻”的变化特性,因此可以将其定义为评价函数对约束条件的一阶导数,即

$$D_{ij}(x_{j0}) = \left. \frac{dy_{ij}}{dx_j} \right|_{x_j=x_{j0}} = f'_{ij}(x_{j0})$$

即在 $x_j = x_{j0}$ 时刻体系结构的动态可扩展性为 $D_{ij}(x_{j0})$ 。这是当约束条件为连续约束条件时的定义。研究中还会遇到一些离散的约束条件,例如网络规模,可以定义它的动态可扩展性为

$$D_{ij}(x_{j,k}) = \frac{\Delta y_{ij}}{\Delta x_j} = \frac{f_{ij}(x_{j,k+1}) - f_{ij}(x_{j,k})}{x_{j,k+1} - x_{j,k}}, \quad x_{j,k} \neq x''_j$$

其中, $x_{j,k}$ 表示约束条件 x_j 取第 k 个值。

事实上,单约束一维动态可扩展性的几何意义就是 x_j 在约束点 x_{j0} 或 $x_{j,k}$ 的斜率。

3) 累积可扩展性

累积可扩展性反映了约束区间内的评价函数累积特性,因此定义连续约束条件的单约束一维累积可扩展性为

$$C_{ij} = \int_{x_j'}^{x_j''} f_{ij}(x_j) dx_j$$

而定义离散约束条件的单约束一维累积可扩展性为

$$C_{ij} = \sum_{x_{j,k}} f_{ij}(x_{j,k})(x_{j,k+1} - x_{j,k}), \quad x_{j,k} \neq x_{j,k+1}$$

2. 多约束一维可扩展性

多约束一维可扩展性即多约束单目标的可扩展性,是指某一个评价指标随着多个约束条件变化而具有的可扩展性。它的评价函数为

$$y_i = f_i(\mathbf{X}) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad \mathbf{X} \in \Phi$$

其中, y_i 是评价目标, \mathbf{X} 是多约束条件向量, x_1, x_2, \dots, x_n 是每一个约束条件, f_i 是评价目标 y_i 随着约束条件 \mathbf{X} 变化的规律函数, Φ 是约束区间。

根据可扩展性对评价目的的分类,多约束一维可扩展性也包含 3 种不同含义的可扩展性:静态可扩展性、动态可扩展性和累积可扩展性。其中,静态可扩展性可使用多约束一维可扩展性的评价函数来表示。

1) 动态可扩展性

首先考虑约束条件全部为连续约束的情况。多约束的动态可扩展性定义比单约束的动态可扩展性定义要复杂一些,需要考虑各个约束条件的相关性。

假设任意两个约束条件不具有相关性,即任一个 x_i 的取值都与 x_j 无关。则它的动态可扩展性定义为

$$D_i(\mathbf{X}_0) = \frac{\partial^n y_i}{\partial x_1 \partial x_2 \cdots \partial x_n} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_0} = \frac{\partial^n f_i(\mathbf{X})}{\partial x_1 \partial x_2 \cdots \partial x_n} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_0}$$

再假设所有的 x_i 都是相关的,它们都是另外一个变量 t 的函数,即有

$$x_j = z_j(t)$$

$$y_i = f_i(\mathbf{X}) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_i(z_1(t), \dots, z_n(t)) = f_{\dot{i}}(t)$$

这时动态可扩展性则可简化为单约束的一维可扩展性,即

$$D_i(\mathbf{X}_0) = \frac{df_{\dot{i}}}{dt} \Big|_{t=t_0} = f'_{\dot{i}}(t_0)$$

其中

$$\mathbf{X}_0 = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) = (z_1(t_0), z_2(t_0), \dots, z_n(t_0))$$

考虑一般性,如果多个约束条件当中前 $t(1)$ 个与 t_1 相关,接下来的 $t(2)$ 个与 t_2 相关,……前 $t(l)$ 个与 t_l 相关,最后还有 $r-q+1$ 个不相关,即令 $(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,t(i)})$ 与 t_i 相关, $x_{i,j} = z_{i,j}(t_i)$, x_q, x_{q+1}, \dots, x_r 不与任何 x 相关,其中 $i=1, 2, \dots, l, j=1, 2, \dots, t(i)$, 则有

$$(r-q+1) + \sum_{i=1}^l t(i) = n$$

于是 $f_i(\mathbf{X})$ 可以写成

$$f_i(\mathbf{X}) = f_{\dot{i}}(t_1, t_2, \dots, t_l, x_q, x_{q+1}, \dots, x_r)$$

则动态可扩展性的定义如下:

$$D_i(\mathbf{X}_0) = \frac{\partial^{(l+r-q+1)} f_{ij}}{\partial t_1 \partial t_2 \cdots \partial t_l \partial x_q \cdots \partial x_r} \Big|_{t_i=t_{i0}, x_i=x_{i0}} = f_{ij}^{(l+r-q+1)}(t_{10}, t_{20}, \cdots, t_{l0}, x_{q0}, \cdots, x_{r0})$$

其中当 $t_i = t_{i0}$ ($i=1, 2, \cdots, l$), $x_i = x_{i0}$ ($i=q, q+1, \cdots, r$) 时 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0$ 。

当约束条件全部为离散约束时, 动态可扩展性的定义如下:

$$D_i(\mathbf{X}_0) = \frac{f_{ij}(t_{1,k_1+1}, t_{2,k_2+1}, \cdots, t_{l,k_l+1}, x_{q,k_q+1}, \cdots, x_{r,k_r+1}) - f_{ij}(t_{1,k_1}, t_{2,k_2}, \cdots, t_{l,k_l}, x_{q,k_q}, \cdots, x_{r,k_r})}{(t_{1,k_1+1} - x_{1,k_1})(t_{2,k_2+1} - x_{2,k_2}) \cdots (x_{r,k_r+1} - x_{r,k_r})}$$

其中, 当 $t_i = t_{i,k_i}$ ($i=1, 2, \cdots, l$), $x_i = x_{i,k_i}$ ($i=q, q+1, \cdots, r$) 时 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0$ 。

当约束条件既有连续约束又有离散约束时的考虑方法和全部是连续约束的考虑方法一样, 这里不再叙述。

2) 累积可扩展性

根据约束条件彼此的相关性不同, 分别考虑两种情况。首先假设所有的约束条件不相关, 则累积可扩展性定义为

$$C_i = \int_{\mathbf{X} \in \Phi} f_i(\mathbf{X}) d\mathbf{X} = \int_{x_{11}}^{x_{12}} \int_{x_{21}}^{x_{22}} \cdots \int_{x_{n1}}^{x_{n2}} f_i(x_1, x_2, \cdots, x_n) dx_1 dx_2 \cdots dx_n$$

由定义可以看出, 它是函数 $f_i(\mathbf{X})$ 在 $\mathbf{X} \in \Phi$ 内围成的曲面柱体的体积。当所有的约束条件都与 t 相关时, 可以定义它的累积可扩展性为

$$S_i = \int_{\Gamma} f_i(\mathbf{X}) dl$$

其中, l 是曲线 $x_j = z_j(t)$ 的方程式, 它的几何意义是对该曲线进行第一类曲线积分。因为

$$dl = \sqrt{dx_1^2 + dx_2^2 + \cdots + dx_n^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n z_j'(t)^2} dt$$

所以

$$C_i = \int_{t'}^{t''} f_i(\mathbf{X}) \sqrt{\sum_{j=1}^n z_j'(t)^2} dt$$

当约束条件全部为离散条件且不相关时, 累积可扩展性定义为

$$C_i = \sum_{x_1} \sum_{x_2} \cdots \sum_{x_n} f_i(\mathbf{X}) \Delta x_1 \Delta x_2 \cdots \Delta x_n$$

当约束条件全部为离散条件且全部与 t 相关时, 累积可扩展性定义为

$$C_i = \sum_t f_i(\mathbf{X}) \Delta t$$

对于更一般的情况, 当约束条件既有离散条件又有约束条件, 而它们之间既有彼此相关的, 又有彼此不相关的情况, 思考方法和上面的分析方法是一样的, 这里不再叙述。

3. 多维可扩展性

多维可扩展性即多约束多目标的可扩展性, 是指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。互联网体系结构的多维评价函数即静态可扩展性为

$$S = k_1 S_1 + k_2 S_2 + \cdots + k_m S_m$$

其中, S_i 分别代表每一种多约束一维的静态可扩展性函数。 k_1, k_2, \cdots, k_m 是 m 个评价目标各自的权重, 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, 作者讨论了 TCP/IP 和 ROFL(Routing on Flat Labels)^[40] 这两种转发机制的规模可扩展性, 实验结果表明 TCP/IP 比 ROFL 在传输延迟以及消耗的硬件存储空

间两个方面的可扩展性都要好。作者还利用多维可扩展评估模型研究对比了内容分发网络(Content Delivery Network, CDN)和 P2P 系统的性能可扩展性,结果如图 3.4 所示,可以看到,结论和理论分析结果一致,P2P 在大多数情况下平均下载时间比 CDN 要少,P2P 在下载时间的指标上关于链路带宽和硬盘容量这两个约束条件的性能可扩展性较好。文献[41]利用该模型对不同体系中不同服务模式的服务可扩展性进行了评估。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。

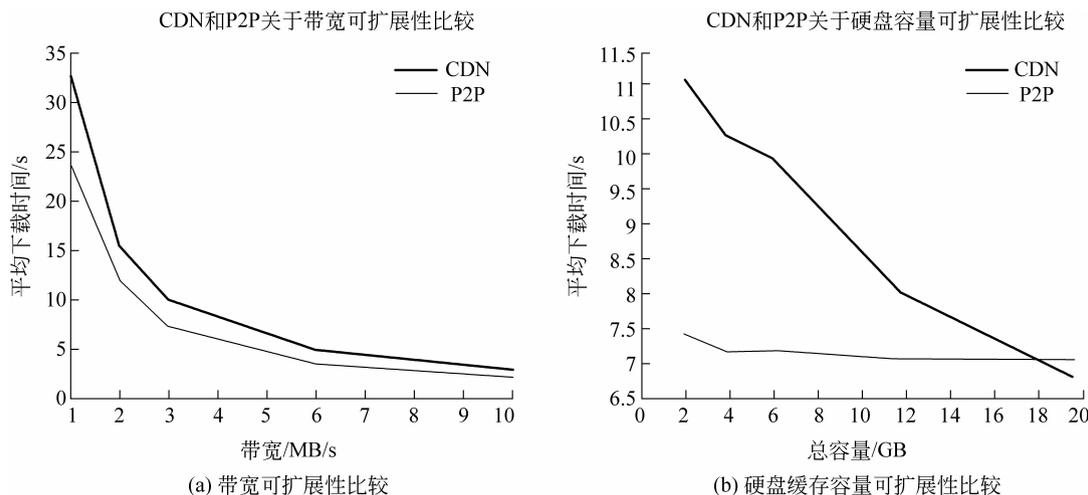


图 3.4 CDN 和 P2P 的性能可扩展性比较

3.3.3 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,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^[42]。Gill 和 Chang 等分别在文献[43]和[44]中讨论了影响 SBGP 协议部署的因素。Gyarmati 等对 IPv6 的过渡和部署问题进行了建模分析和研究^[45],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。详细内容请参见后续章节。

3.3.4 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^[46]。在计算机领域, 可演化性最初主要用于软件设计工程。互联网作为一种发展变化快、更新迅速、资源密集的大型系统, 对于可演化性有很强需求。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 3.4 所示)。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 3.4 互联网体系结构可演化性定义

| 文献 | 代表作者 | 可演化性 |
|------|-----------------|---|
| [47] | D. Rowe | 系统适应或处理环境、需求及实现技术等变化的能力 |
| [48] | D. Isaac | 通过经济的代价实现发展的能力 |
| [49] | G. S. Percivall | 系统随着环境变化而易于被修改的特性 |
| [50] | R. F. 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、适应新的不可预料任务的可变程度 |
| [51] | R. 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 |
| [52] | D. 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的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[53]和[54]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[55]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、显式拥塞控制协议等传统互联网协议的影响。文献[56]从 AS 的角度对网络规模的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[57]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[58]提出了一个称为 EvoArch 的抽象模型来研究体系结构和协议栈的演化。

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互联网体系结构协议栈的演化模型。它将体系结构协议栈中的协议用节点表示, 协议之间的关系用带方向的边表示。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, 由所有使用协议 u 的上层协议栈的协议组成的树。 $l(u)$ 表示节点 u 的层次。 L 表示协议栈的总层次。 例如, 图 3.5 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。 可以看到, 位于第 4 层(也就是图中最高层)属于应用协议的节点因为没有使用它们的协议, 因此可以将它们看作一棵由自己组成的树, 其演化价值为 1。 第 $L-1$ 层节点的价值为其子树根节点价值之和, 依此类推。 例如, 位于 $L-2$ 层的节点 q 拥有 3 棵子树, 其根节点分别为 $r1, r2, r4$, 因此其价值为 $r1, r2, r4$ 节点的价值之和, 即 q 的演化价值为 4。

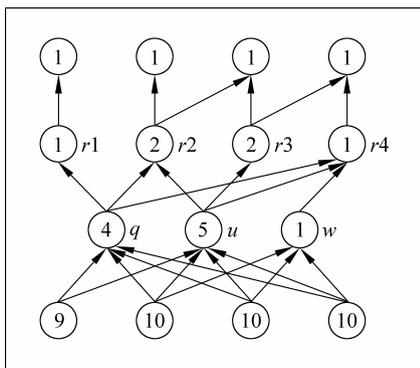


图 3.5 4层网络节点价值示意图

协议栈中, 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 $C(u)$, $C(u)$ 的元素的判定条件为:

$$w \in C(u) \text{ if } l(w) = l(u) \text{ and } \frac{|P(u) \cap P(w)|}{|P(u)|} \geq c$$

其中 c 为竞争阈值。上述式子说明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 $v_c(u) = \max_{w \in C(u)} v(w)$ 。如果, u 不存在竞争协议, 则 $v(u) = 0$ 。如果 $v_c(u) > 0$, 则节点 u 在竞争过程中“死亡”的概率为

$$p_d(r) = e^{-\frac{z}{r}}, \quad r = \frac{v(u)}{v_c(u)}$$

其中, z 用于表示协议间竞争的强度。

研究者们构建了一个层次化的协议栈, 并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, 进而从一定程度上解释了互联网体系结构沙漏状协议栈的合理性。此外, 研究者们还发现协议的价值必须高于其最强竞争者价值的 90% 才可能在竞争过程中存活下来, 为了获得更好的可演化性, 体系结构必须保持窄腰特性, 专用的协议应尽可能部署在协议栈的上层。

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未来发展起到了很好的促进作用。

3.3.5 互联网体系结构可信性评估模型

安全防护能力弱, 不支持可信访问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, 因此完全没有考虑安全问题。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受到重视。

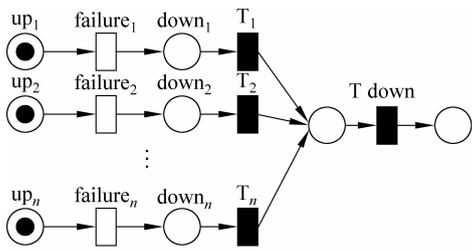
体系结构的安全性评估是其安全性研究的重要理论基础,早期的互联网体系结构安全评估工作主要针对复杂的协议进行,如协议的漏洞挖掘,使用的主要是定性分析和评价,以便能及时指导体系结构安全机制的构建。近年来,随着系统可靠性研究的进一步发展,许多用于可靠性研究的技巧被应用到体系结构的安全评估中,评估对象也逐步扩展到对系统级以及入侵容忍度的模拟分析^[59-61],而形式化的数学模型尤其是组合模型、马尔可夫模型、随机模型和随机博弈模型等开始广泛应用于体系结构的安全性评估中^[62-65]。

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^[66]。文献[67]中,林闯等将可信性定义为可靠性、可用性、可维护性、可运行性和可生存性 5 种性能参数的组合,并对随机 Petri 网在网络系统可信性评估建模中的分析方法和步骤进行了研究。作者提出使用 5 个步骤来应用随机 Petri 网分析系统的可信赖性:

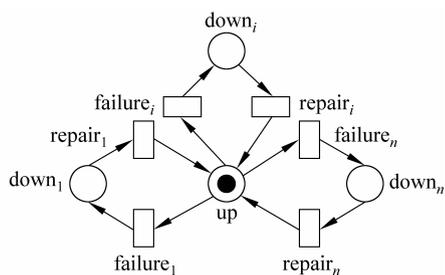
- (1) 针对特定系统建立描述系统性能的 SPN 模型。
- (2) 建立描述资源的服务失效和修复过程的系统容错 SPN 模型,资源与性能模型中的相应位置对应。
- (3) 合并性能模型和系统容错模型生成系统可信赖性模型。
- (4) 细化 SPN 模型结构,求出可达图及相应马尔可夫链。
- (5) 计算各状态瞬态和稳态概率以求出可信赖性的各个指标。

下面以文献中串联关键系统为例说明建立可信赖 SPN 模型和求解可信赖参数的过程。串联关键系统中,任意部件的失效会引起整个系统的失效。

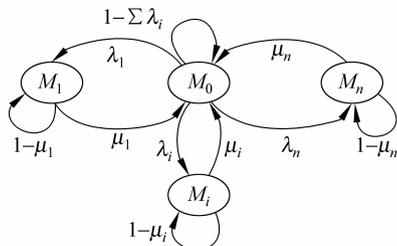
首先,建立性能模型的具体过程可参考文献[19]。如图 3.6(a)和图 3.6(b)分别为串联关键系统的服务失效模型和可修复系统的 SPN 模型,其中白色和黑色的长方形分别表示事



(a) 串联可修复系统服务失效SPN模型



(b) 系统容错SPN模型



(c) SPN模型对应的马尔可夫链

图 3.6 串联关键系统可信性评估模型示例

件变迁和瞬时变迁。up 表示正常服务状态,down 为服务失效状态, failure 表示引起服务失效的事件,每个部件的失效率和修复率分别为 $\text{failure}_i = \lambda_i$ 和 $\text{repair}_i = \mu_i$ 。

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 3.6(c) 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 3.6(c),得到的状态转移矩阵为

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

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 $\Pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$,根据马尔可夫过程有

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

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,包括可靠性、可用性、可维护性、可运行性和可生存性等。例如,系统可靠性为

$$R(t) = P_0(t) = \exp(\Delta t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right)$$

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^[68]。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作用。

3.3.6 小结

根据评估对象、目标和层次的不同,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 5 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,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、经济学和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。

3.4 效用机制在互联网体系结构评估工作中的应用

3.4.1 效用的相关理论介绍

效用(utility)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 Daniel Bernouli^[69]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,效用并非随着收益数量的增加而呈线性增长,实际上,一般认为效用是收益的对数函数。相同的收益对于不同的个体效用也不同,例如对于一个富人和一个穷人而言,同样的收益产生的满意程度显然不同。19世纪中期,Jeremy Bentham 发展了效用的概念^[70],他认为效用应该是心理满足与个人支出之间的差值,给人愉悦感受的效用是积极的,而给人带来痛苦的效用则是消极的。早期的效用理论将个人主观情绪引入效用中,对效用的发展奠定了很好的基础并对经济产生了显著影响,但不足的是当时的效用还停留在理论表述阶段,无法进行数学表示和计算。

20世纪中期,Von Neumann 和 Morgenstern 提出了“期望效用理论”^[71],该理论认为,效用与决策者的个人偏好相关,决策者可以根据各自的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[72]、[73]和[74]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网络中的相关问题,包括网络资源的分配^[75]及定价与计费^[76-78]、流量控制的分析^[79]及拥塞管理^[80]、网络体系结构的评估^[81,82]及信息技术的选择^[83]等。早在1995年,S. Shenker 就已经将效用理论应用于互联网的研究中^[84]。本节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,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 $x_0, x_1 \in P, U(x_0) \geq U(x_1) \Leftrightarrow x_0 \succcurlyeq x_1$,则 U 称为代表偏好关系的效用函数,其中, $x_0 \succcurlyeq x_1$ 表示对于决策人而言, x_1 不优于 x_0 。

效用函数的定义包括多种形式,不过在互联网体系结构的评估应用中,效用的作用对象通常为 ISP、用户等互联网体系结构中的重要角色,或是互联网体系结构的资源等对象。而效用函数的参数通常为影响决策的因素等。例如,在描述计算网络资源的使用情况时,可以将效用定义为诸如延迟、丢包率和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和用户数量等作为效用函数的参数。

3.4.2 基于 ISP 的效用模型

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、会促使小部分 ISP 首先部署新技术,这对最终推动新技术在更多乃至全部的 ISP 上部署具有决定性的影响。Gill 等就提出了这样一种在互联网中部署安全域间路由协议 SBGP^[85]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^[43]。

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。为了创造局部经济效益刺激 ISP 部署 SBGP,文献[43]提出以下策略:

(1) 对于仅传播 outgoing BGP 宣告向外告知自己的 IP 前缀的末端 AS,可以部署简化的即单向的 SBGP 协议,或者由 ISP 代表其末端客户进行签名保证其安全性。

(2) AS 选择路由时,如果其他路由属性相同,AS 优先选择部署 SBGP 的路由进行传输。

(3) 提议政府或工作组织通过经济调控确保网络中小部分 AS 进行 SBGP 早期部署。

为了验证这一策略的有效性,研究者们提出基于 ISP 的效用模型模拟 SBGP 的部署过程。

首先,假设网络中部分 AS 已经部署 SBGP,随后通过 ISP 效用计算全网部署 SBGP 的过程。由于 ISP 可以通过转发更多来自其客户网络的流量或向客户网络转发更多的数据流量来提高自己的效用,文献中,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(customer edge)向目标 d 转发的来自其客户网络用户的所有流量,记为:

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

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, $\hat{T}(d,s)$ 表示其中一棵子树。 i 表示子树中的 AS 节点, ω_i 表示 AS 产生的流量。“出效用”表示 ISP 通过某个客户边向其所有客户网络用户目标 d 转发流量的总和,记为

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

其中, $\hat{D}(n)$ 表示 ISP n 的客户网络用户集合。

例如,如图 3.7 所示,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 和 34376 通过 AS 8866 向目标 31420 转发的数据流的总合 5。对于目标 31420 而言,AS 25076 和 34376 是其客户网络子树成员,对于目标 22822 而言,31420、25076 和 34376 是其客户网络子树成员,因此 ISP 8866 的入效用即为 5。而 ISP

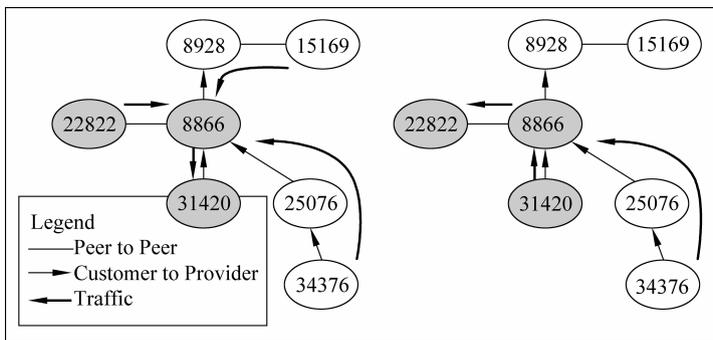


图 3.7 目标 31420,22822^[43]

是否部署 SBGP 决策的依据为

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

其中, $(-S_n, S_{-n})$ 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 θ 倍。当然, θ 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 $\theta < 5\%$ 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 $\theta \geq 10\%$ 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。事实上, 当 $\theta \geq 10\%$ 时, 早期随机选择 200 个 AS 对 SBGP 在网络中的部署影响远低于仅选择 5 个顶级的 AS 进行早期部署, 可见早期的合理选择对 SBGP 进行部署的重要性。

3.4.3 基于用户的基本效用模型

文献[43]的作者利用 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。除了通过 ISP 的效用来进行互联网体系结构的协议分析之外, 通过用户效用进行互联网体系结构的评估也是目前的常用手段。例如, 文献[42]就建立了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, 是否有一些机制如转换器、转化开销等会促进或阻碍这个演化过程, 这是研究体系结构可部署性的重要问题, 文献[42]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 , 且用户的效益来自于两个方面: 独立效益和网络效益。独立效益是不依赖于选择同一体系结构的其他用户且与其他用户的状态(通信)无关的独立收益, 它取决于体系结构为用户提供的独有属性或功能, 例如, IPv6 协议为用户提供的足够的地址空间特性和自动地址配置功能、移动通信协议提供的移动服务等。用户与选择同一体系结构的其他用户之间进行通信获取的效益则称为网络效益。

文献[42]假设初始状态下, 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

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

其中, α_A 表示 A 提供给用户的独立效益等。 $\beta N x_A$ 表示与 A 类的 $N x_A$ 个用户进行通信所获得的网络收益, β 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, 文献[42]的作者使用 $(1 - q_A)$ 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, 文献[42]的作者使用参数 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