

网络弹性研究进展

刘密霞^{1,2} 朱红蕾²

(国家行政学院电子政务研究中心 北京 100089)¹ (兰州理工大学计算机与通信学院 兰州 730050)²

摘要 网络弹性(Network Resilience)必将作为下一代异构网络必要的设计与操作属性,被定义为在面临不同的失效或挑战时,能够提供和保持可接受服务水平的能力。从系统的角度对网络弹性进行了深入的研究,首先对网络弹性从定义、模型、实现与评估等方面进行深入的分析,接着讨论基于态势感知的网络弹性研究模型,并详细阐述了模型的每一层功能及实现方法,最后给出了网络弹性研究的发展方向。

关键词 网络弹性,态势感知,弹性态势,弹性分析

Study of Network Resilience

LIU Mi-xia^{1,2} ZHU Hong-lei²

(E-government Research Center, Chinese Academy of Governance, Beijing 100089, China)¹

(College of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)²

Abstract Resilience in the network, which is defined as the ability of the networks to provide and maintain an acceptable level of service in the face of various faults and challenges to normal operation, must be viewed as an essential design and operational characteristic of future networks in general, and the Global Internet in particular. This paper is about network resilience in heterogeneous environment based on situational awareness in the holistic view. The works are organized as follows; first, definition, model, realization and assessment of network resilience are analyzed in depth; then, network resilience model based on situational awareness is discussed, and function and realization methods of each level are depicted in detail; at last we talk about the next step research of network resilience.

Keywords Network resilience, Situational awareness, Resilience situation, Resilience analysis

1 引言

当前我们花费了大量的人力、财力对网络安全、网络可靠性、网络可生存性、风险评估等方面进行研究使其提高服务质量,但是当前的网络在面临恶意攻击、人为操作失误以及通信量注入等方面仍旧表现得很脆弱。因此, Sterbenz^[1]等提出网络弹性(Network Resilience)必将作为下一代异构网络(包括 Internet、Ad hoc 和无线传感器网络等)必要的设计与操作属性,并把弹性定义为在面临故障和挑战的时候网络可以提供并保持可接受的服务水平。目前为了实现计算机网络的弹性,研究工作主要从3个方面进行:针对组件失效的故障容忍与可生存性研究,针对通信路径故障的路由协议研究,针对注入通信量的通信量容忍研究。这些研究思路存在几个问题:首先这些方法看起来有一定的关联,但在实际操作方面这些关联却很难获得,并且没有从系统或整体的角度来研究网络弹性问题^[2];其次,没有统一的网络弹性评价标准,对网络弹性的认识不足;最后就是没有用形式化的方法从攻击和防御两个方面进行网络弹性态势的分析与预测,形成网络弹性参数。

本文在分析当前网络弹性研究的基础上强调从系统的角度研究网络弹性,把风险管理、安全、可生存性等集成到一起,

进行网络弹性管理:对网络事件提前预测与分析,而不仅仅是在遭遇攻击或失效之后才考虑如何恢复到可以接受的服务水平,变事后恢复为提前预测,使网络保持良好的弹性。网络弹性作为一个基础设施提供的服务给使用者,需要威胁和挑战模型来理解和检测不利的事件,需要进行成本效益分析,需要进行网络的状态管理,需要网络具有自我保护和自适应机制等。因此加强网络空间的态势感知能力,提高网络的弹性,是当前和下一代 Internet 网络亟待解决的问题。

2 网络弹性研究

2.1 不同领域对弹性的定义

Holling^[3]认为工程系统的弹性可以定义为中断产生之后在要求的时间之内返回到正常的功能状态,而在生态学中系统的弹性是指系统的均衡状态改变之前吸收扰动的能力。弹性的重点在于最大化系统的能力,以有效地应对任何不利的、快速改变的和不可预见的变化。国内的研究人员对供应网络的弹性进行了定义和研究,把供应网络的弹性定义为在失效冲击下偏离均衡但能快速恢复到正常状态的能力,失效事件限定在发生概率较低且影响较大的失效,弹性不是抗冲击性,也不是适应冲击的能力,而是从冲击影响下的快速恢复能力^[4,5]。Najjar^[6]等人首次把网络弹性定义为网络中的潜

本文受欧盟 FP7 ResumeNet (FP7-224619), 甘肃省自然科学基金项目(1014RJZA005), 兰州理工大学博士基金项目(BS14200903)资助。

刘密霞(1975-), 女, 博士, 副教授, 主要研究领域为网络弹性、网络态势感知、电子政务, E-mail: liumx@nsa.gov.cn.

在失效连接的概率 p , 即网络以概率 $1-p$ 保持连接时失效的最大结点数。Liu^[7] 等人把网络弹性定义为失效发生时丢失通信量的百分比。Sterbenz^[1] 等根据网络的特点把网络弹性定义为在面临故障和挑战的时候网络可以提供并保持可接受的服务水平的, 并把网络弹性量化为在正常操作状态面临挑战时, 测量服务的降级^[8]。从这些定义可见, 弹性与鲁棒性、可生存性等概念之间存在联系, 又有混淆, 因此 Bishop 等人^[9] 提出应从整体的角度研究一个系统确切的需求。纵观这些网络弹性的定义, 它们只是在失效发生之后对丢失的通信量、失效的最大结点数、网络的状态等方面被动的测量, 而不能满足弹性对恢复能力的要求, 对网络弹性的管理却要求从被动反应向主动响应转变^[10]。

2.2 网络弹性模型的研究

简单地讲, 通常需要一个参考模型或者框架来理解诸如安全和弹性的问题, 并能考虑安全和弹性如何被保证、维护和提高。模型还可以帮助我们决定寻找什么样的信息, 并通过提供的方法来解释前后顺序的关系。网络弹性模型首先要理解网络当前的状态, 因此需要对当前发生的事件进行解释。对事件的理解模型有“Domino”模型和“Swiss cheese”模型, 这两个模型认为事件的发生是一个序列关系, 在理解突然的、意想不到的事件是有效的, 但却不能描述会导致事件发生的安全逐步丢失的情况^[10]。Rasmussen 提出的“Drift to danger”模型^[11]对弹性的概念主要集中于对失去控制的阻止, 而没有考虑对失去控制的恢复。针对系统的弹性需要有方法确定当前的状态, Mayron 等^[12]提出了认知-神经生理模型来获得弹性的网络安全, 但是这种通过描述症状的方法很难在网络中获得当前态势的评估。

欧洲网络信息安全部(ENISA)意识到公众通信网络服务弹性研究的重要性, 从政策与策略、网络提供者、技术 3 个不同的角度分别设立了研究项目, 进行了全面的研究^[13]。Sterbenz, Hutchison 等研究人员就是在这样的背景下做了大量的调查研究之后提出了一个系统化的网络弹性体系框架^[1]。他们提出的 ResiliNets 的策略为 D2R2+DR, Defend, Detection, Remediate, Recover 是内部控制环, 主要是保证一个系统迅速地适应挑战和攻击并保持可接受的服务水平。外部环由 Diagnose 和 Refine 组成, 主要是对系统的长期评估, 诊断出故障的真正原因, 从而增强系统的防范能力, 提高内部环中的监测能力。他们的研究建立了物理失效与服务之间的二维关系, 但是却没有给出状态变迁之间的详细说明, 没有考虑恢复功能引起服务状态的变化, 同时也没有考虑在物理功能正常的情况下, 网络受攻击时对服务的影响。

2.3 网络弹性实现与评估的研究

在流量工程(Traffic Engineering)中, 多协议标记交换 MPLS (Multi Protocol Label Switching) 结合了 IP 网络强大的三层路由功能和传统二层网络高效的转发机制, 为将来的 Internet 体系提出了清晰的网络弹性需求。因此很多研究针对结点或链路的失效, 提供不同的恢复机制来实现网络弹性。Autenrieth 和 Kirsädter^[14] 根据不同的网络弹性需求按照恢复时间、恢复机制、恢复路径的建立, 以及资源分配的方式把网络弹性需求分为 4 类, 并在文献^[15]中提出了扩展的 QoS 模型 Resilience-Differentiated QoS (RD-QoS), 通过使用 MPLS 在 IP 网络中提供弹性服务。在面临网络失效的时候,

利用弹性机制可以重新构建受影响的通信链路。这种机制可以分为两类^[16]: 一种是保护交换, 一种是重建机制。保护交换是提前建立路径备份, 而重建是在事件发生之后找到一个新的路径。多个失效对网络可用性的影响会导致复杂的计算, 因此很多研究只考虑单个或两种失效来分析网络弹性。Menth^[17] 提出了一个包交换通信网络的弹性分析框架, 同时考虑失效、用户行为的改变和域间路由的变化引起一些进出口对的不可用以及链路超载, 并在文献^[18]中利用自保护多路径的形式平衡负载提供网络弹性服务。Seoanea^[19] 考虑失效传播对光 GMPLS 环的影响, 应用 CTMC 模型可以选择合适的修复率获得可用性需求。Haider^[20] 调研了下一代网络的各种恢复技术, 通过保护交换与恢复来获得网络的弹性。Rostami^[21] 通过建立多样路由算法, 在源和目的结点之间找出最大共享风险链路组的方法来提高通信网络对失效的弹性。这些研究是针对任意结点失效发生之后对网络弹性的影响, 没有失效的诊断与定位, 没有一个统一的网络弹性量化评估的方法, 并且没有建立起底层的失效与上层网络服务提供之间的对应关系。

上面的研究是从结点或链路失效发生之后来分析网络的弹性, 研究人员继续从网络拓扑的角度来分析网络弹性。Kim^[22] 根据 Internet 的网络拓扑符合结点度的幂率(power law)分布的特点, 提出了不同的进化策略来增加网络拓扑的弹性, 而不是简单地增加更多的链路。Salles^[23] 提出了网络弹性的参数来增加网络的鲁棒性, 通过在网络的拓扑中提供替换增加网络的弹性。研究人员还在无线 mesh 网络、传感器网络、Ad hoc 网络中提出了无线网络弹性的策略^[24, 25, 8]。Josephd 等^[26] 在他们的专利中通过对有不同网络资源结点的异构网络环境的抽象网络资源模型创建一个实例的方法来为异构网络提供有弹性的和可靠的端到端的连接。Kousalya 等^[27] 开发了 WSNs (Wireless Sensor Networks) 的密钥管理机制, 增强了 WSNs 的弹性。这些研究从物理链路的角度考虑应对失效的网络弹性策略, 不考虑实时的网络变化情况。例如对于攻击来说, 有时并没有造成结点、链路的失效或网络通信量的增加, 却对网络的弹性造成了破坏, 导致所提供服务的状态的变化。

在网络弹性分类方面, Cholda^[28] 等对通信网络的弹性分类进行调研, 认为对弹性进行分类的原因是和 QoS 相关的, 必须定义弹性参数来满足端到端的基本需求, 进行弹性评估方法研究与量化是将来的需求。本体论被用来识别弹性在网络安全分类中的作用^[29], 但是却没有考虑恢复的功能。

在网络弹性评估方面, MPLS 作为在 RD-QoS 框架^[15] 和 QoR (Quality of Resilience)^[30] 网络弹性的评估对象, REF (Resilience Evolution Framework)^[31] 可以用来评估一般的基于保护模型的协议, 如 SCTP, MPLS。这些评估方法是针对具体的保护交换或恢复方法, 没有考虑攻防双方的行为, 没有形成统一的评价体系。为了获得计算机网络信息的弹性需求, 计算机的防御需要从“reactive”向“proactive”转变^[32], 也就是提高网络的弹性不能只从网络恢复的角度来达到要求, 应该提前预测攻击的发生, 然后在攻击渗透和引起损害之前使用防御策略对攻击进行响应。

2.4 基于整体的网络弹性研究

要获得系统的整体弹性, 首先需要自适应来进行预测也

就是会发生什么,然后引起注意就是想要找到什么,最后能够响应就是做什么^[33]。这与态势感知(Situational Awareness, SA)^[34]的察觉、理解和预测有着相同的过程,文献^[35]提出了基于态势感知的弹性网络的研究,主要讨论如何实现一个完整的网络弹性系统。

国内研究人员在网络态势感知的研究领域进行了大量的研究,如龚正虎等^[36]对网络态势感知从态势模型、网络态势的知识表示、网络态势的评估方法和态势的应用等方面进行了深入的研究,认为基于融合的网络态势感知必将成为网络管理的发展方向;韦勇等^[37,38]研究了网络安全态势评估模型、评估方法;郭文忠等^[39]进行了网络安全态势要素提取方法的研究;张勇等提出了基于 Markov 博弈模型的网络安全态势感知方法^[40]。但是目前收集到的文献中对弹性网络的研究涉及得比较少。其中孙建华^[41]等进行了对等网络的弹性分析,主要还是从底层网络节点失效之后的分析。Xu Ming 等^[42]研究了动态路由机制来提高 P2P 网络的弹性,刘希龙^[4]和王星星^[5]进行了供应链网络的弹性机制的研究。北航的研究人员进行了分类 MPLS 弹性机制的研究,主要是优化保护交换机制对资源的消耗^[43]。

综上,从国内外的研究现状可以看出,这些研究没有在统一的网络弹性模型的指导下进行,大多数研究人员不管是考虑 P2P 网络的弹性还是异构网络的弹性,都是从网络连接的底层的角度讨论问题,这很难建立起底层失效与服务质量的关系。Sterbenz 等^[1]虽然建立了这种对应关系,却只考虑网络降级处理,没有考虑不影响底层失效的攻击行为对网络弹性的作用,也没有考虑恢复技术对弹性的影响。而网络弹性把网络安全性作为一个过程进行研究,提供监视网络的新的测量和方法,并提供新的干预方法来提高网络的安全性。

3 基于态势感知的网络弹性模型

针对当前的研究,提出的基于态势感知的网络弹性模型如图 1 所示,分成 4 个部分:异构网络环境弹性态势元素的第一级融合;根据第一级的融合结果,分析网络失效的步骤,形成第二级的失效融合;增加网络拓扑、网络服务、网络状态等信息,预测服务失效的第三级融合;补救措施实施之后,网络恢复到的状态,形成第四级的行动与评估。

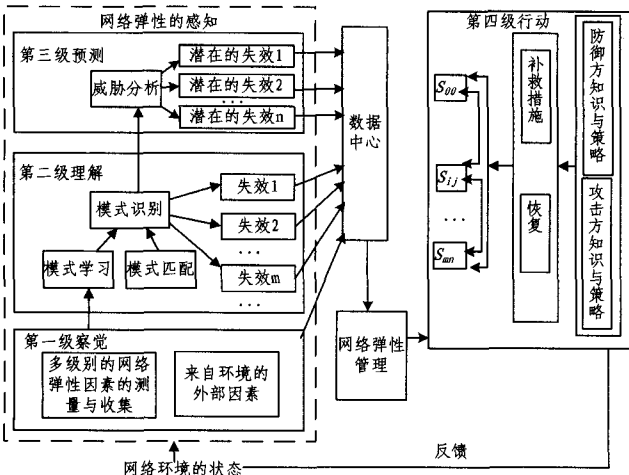


图 1 基于态势感知的网络弹性模型

第一级,察觉、观测网络中的有用数据。将来的网络结构包括光网络、无线网络等,因此具有复杂性、多样性和异构性。

这一层不仅收集来自内部网络传感器的收据,也会收集来自外部环境的数据。这是因为无线网络很容易受到外部因素的干扰,如天气、电子干扰等。内部因素包括故障、拓扑、安全、通信量、漏洞与资源等。故障是对误用配置或违反策略的数据的收集,安全模块收集来自 IDS、Firewall、误用检测等导致恶意攻击的报警信息,拓扑模块中将会检测拓扑的变化,通过测量通信量检测 DDoS 和 Flash Crowd,网络中配置计算机的重要性将会在资源模块中实现,在漏洞模块中检测网络的弱点。

第二级,理解网络弹性的当前状态。在这一级,决策支持者要根据收集到的数据形成整个网络环境的总体视图,理解对象和事件的属性。这里采用高级信息融合的方法,通过模式匹配可以跟踪一个潜在的失效。这里使用了 D-S 证据理论、Markov 模型以及图的理论。这一级的融合称为纵向融合。横向融合主要对各个态势元素所发出的报警,通过 D-S 证据理论进行融合,每个传感器发出的报警相互独立,分别包括 {Normal, Abnormal} 状态。纵向融合主要判断当前网络的弹性态势,多步失效是否发生,把横向的融合结果进行纵向融合,从而判断网络当前的弹性态势。

第三级,预测影响网络弹性的失效行为。增加网络拓扑、网络服务、网络状态等信息,进行更高级的融合,应用 Markov 模型和基于 Petri 网的模型预测,可以识别潜在的失效行为是否发生。在这一级还会提出评估参数,来评测自己对失效行为检测的好坏,例如信任度测量系统检测真实失效的好坏,纯度测量正确的检测率,费用的有效性来度量失效的重要度与费用的关系。

第四级,采取的行动引起网络弹性状态的变化。根据前面的潜在失效的发生进行响应,并确定系统恢复到何种状态,这是最后网络弹性评估的最主要环节。在这一级,网络弹性管理将执行资源分配并提供信息反馈,通过博弈论,网络的状态将会根据攻击和防御者的行为从一个向另一个改变。网络弹性状态的二维关系,以及用 Petri 网描述的状态变迁图如图 2 所示。横向表示操作状态的降级,分为正常、部分降级和严重降级;纵向表示所提供的服务的降级,分为可接受的服务、受损的服务和不可接受的服务。其中 S_{00} 表示操作状态正常地情况下提供可接受的服务, S_{22} 表示操作严重降级和服务不可用的状态。这种状态表示是比较大的粒度,网络的实际状态可以根据实际情况调整网络弹性状态的粒度。为了描述系统的状态的变迁, Petri 网是很好的建模工具,其中 g_{ij} 表示会导致状态变迁的失效或恢复。

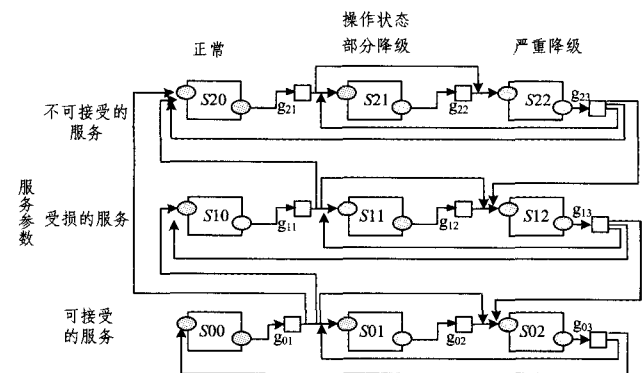


图 2 网络弹性状态空间及基于 Petri 网的网络弹性变迁模型

遵循这样的网络弹性模型可以从整体的角度进行网络弹

性的分析和评估,在确定了失效的发生、预测了潜在的失效,并根据博弈论分析网络弹性状态的变化之后,可以对网络弹性进行有效的评测。

结束语 提高网络的弹性不能只从网络恢复的角度来达到要求,应该提前预测攻击的发生,然后在攻击渗透和引起损害之前使用防御策略对攻击进行响应。而态势感知可以理解当前的行为,预测下一步的行为,并分析当前行为的威胁与影响。因此本文在深入分析了网络弹性的研究现状后,分析了基于态势感知的网络弹性模型。对异构网络的网络弹性态势进行系统的研究,主要需要从4个方面进行:基于态势感知的异构网络弹性管理模型的建立;表示弹性的态势元素分析和基于高级信息融合的服务或网络部分失效的预测研究;基于博弈理论的网络弹性的评测分析;基于本体论的网络弹性的量化参数与分类。具体内容如下:

1) 基于态势感知的异构网络弹性管理模型的建立。建立基于态势感知的异构网络的弹性模型,综合考虑 JDL 的数据模型和 Endsley 的态势感知模型以及网络弹性的特点,在 Endsley 的态势感知模型的基础上增加反应弹性的 Action 行为,并融入 JDL 的反馈机制。优化弹性管理模型,使模型具有察觉事件的发生、理解当前的状态、预测下一步的行为,并能及时做出响应的能力。

2) 表示弹性的态势元素分析和基于高级信息融合的服务或网络部分失效的预测研究。对异构网络环境下网络弹性态势元素进行深入分析,表示网络弹性的态势元素有哪些,给出各元素的准确含义。网络弹性态势应该由哪些元素构成,这些元素分别表示什么。比如研究对象是什么,适用的场景是什么,时间的需求是什么,下一阶段的范围是什么。基于高级信息融合的网络弹性态势感知的研究,采用高级信息融合的方法把异构网络的弹性态势问题分为4步来解决:第一步是当前有什么情况发生,会使服务失效吗?第二步是真正有没有服务失效,会使网络降级吗?第三步是根据当前的情况预测会有哪些服务失效?第四步是我们采取什么方式保持当前的服务水平,或使当前的状态恢复到好的状态或是正常状态。要解决这些问题需要描述服务的不同水平以及所处的状态,需要定义状态的变迁、服务与状态的对应关系,需要应用不同的算法如 Bayesian 网络、Markov 模型或者图论的理论进行模式匹配来确定失效的发生,采用博弈理论确定好的防御策略,达到纳什均衡。

3) 基于博弈理论的网络弹性态势的识别与评测分析,同时考虑攻击方或其他因素造成的失效与防御方的恢复,应用博弈理论选择纳什均衡,从而确定好的防御策略。应用随机 Petri 网 SPN (Stochastic Petri Net) 建立操作状态与服务水平的二维模型,用 SPN 描述各个状态之间的变化,并建立基于博弈论的攻击与恢复网络弹性模型,应用纳什均衡选择每个参与者的优化策略,为防御方的恢复策略提供指导和优化配置,从而提高网络的弹性。同时找到每个参与者的 SPN 模型的可达树来识别网络的弹性态势。

4) 基于本体论的网络弹性的参数与分类,网络弹性需求是对可靠性、可维护性和可用性需求的组合,并把网络弹性的概念应用到网络设计中。为了表示端到端的弹性,针对不同用户对网络弹性的不同需求,需要建立端到端的弹性本体模型,网络弹性作为根结点,然后建立和它相连的直接分类,如它所面临的威胁、测量弹性的方法、获得弹性的路径等。通过

对网络弹性进行分类,用本体形式化地表示网络弹性域的概念知识,从而表达端到端的网络弹性,为新的弹性网络的设计提供详细的说明。

参考文献

- [1] Sterbenz J P G, Hutchison D, Cetinkaya E K. Resilience and Survivability in Communication Network: Strategies, Principles, and Survey and Disciplines [J]. *Computer Networks*, 2010(54): 1245-1265
- [2] Smith P, Hutchison D, Scholler M. Network Resilience: A Systematic Approach [J]. *Communications Magazine*, IEEE, 2011
- [3] Holling C S. Engineering Resilience versus Ecological Resilience [M]. *Engineering within Ecological Constraints*, National Academies Press, 1999: 31-44
- [4] 刘希龙. 供应网络弹性研究 [D]. 上海: 上海交通大学博士论文, 2007
- [5] 王星星. 突发事件下供应链弹性机制研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2010
- [6] Najjar W, Gaudiot J. Network resilience: A measure of fault tolerance [J]. *IEEE Trans. Comput.*, 1990, 39(2): 174-181
- [7] Liu Guang-lei, Ji Chuan-yi. Scalability of Network-Failure Resilience: Analysis Using Multi-Layer Probabilistic Graphical Models [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(1)
- [8] Jabbar A, Narra H, Sterbenz J P G. An approach to quantifying resilience in mobile ad hoc networks [C] // 8th International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN). 2011
- [9] Bishop M, Carvalho M, Ford R, et al. Resilience is More Than Availability [C] // *Proceedings of the New Security Paradigms Workshop*. 2011
- [10] Hollnagel E, Woods D, Leveson N. Resilience Engineering [M]. *Concepts and Precepts*, Ashgate Publishing, 2006
- [11] Rasmussen J, Svedung I. Proactive risk management in a dynamic society [M]. Karlstad, Sweden: Swedish Rescue Services Agency, 2000
- [12] Mayron L M, Bahr G S. A Hybrid Cognitive-Neurophysiological Approach to Resilient Cyber Security [C] // *The 2010 Military Communication Conference-Cyber Security and Network Management*. 2010
- [13] <http://www.enisa.europa.eu/act/res>
- [14] Autenrieth A, Kirstädter A. Components of MPLS Recovery Supporting Differentiated Resilience Requirements [C] // *Proceedings of the IFIP Workshop on IP and ATM Traffic Management (WATM/EUNICE 2001)*. Paris, September 2001
- [15] Autenrieth A, Kirstädter A. Resilience-Differentiated QoS-Extensions to RSVP and DiffServ to Signal End-to-End IP Resilience Requirements [C] // *Proceeding of the 3rd International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks*. 2001
- [16] Bassiri B, Heydari S S. Network Survivability in Large-Scale Regional Failure Scenarios [C] // *C3S2E'09*. 2009
- [17] Menth M, Duelli M. Efficiency of Routing and Resilience Mechanisms in Packet-Switched Communication Networks [C] // *European Transactions on Telecommunications*. 2009
- [18] Menth M. Self-Protecting Multipaths (SPM): Efficient Resilience for Transport Networks [J]. *Recent Advances in Providing QoS and Reliability in the Future Internet Backbone*, Nova Science Pub., 2010

(下转第 67 页)

类算法,能够根据用户特性,引导用户加入到某项服务中。根据本文提出的模糊置信度传播算法,我们优化了网络结构,充电站实现了平稳的电量供给,用户通过网络的地理信息,能寻找到最近、最快的充电站为其服务。这些信息,作为网络后台大数据挖掘的统计信息,根据以往积累的数据,可以进一步优化网络的拓扑特性。

参 考 文 献

- [1] Kwak H, Lee C, Park H. What is Twitter, a Social Network or a News Media? WWW 2010
- [2] boyd D M, Ellison N B. Social Network Sites: Definition, History, and Scholarship[J]. Journal of Computer-Mediated Communication, 2008, 13
- [3] Abramson G, Kuperman M. Social games in a social network, 2000
- [4] Ortega J L, Aguillo I F. Visualization of the Nordic academic web: Link analysis using social network tools[J]. Information Processing and Management, 2007
- [5] Kadushin C. Introduction to Social Network Theory: Chapter 2. Some Basic Network Concepts and Propositions, 2004
- [6] Liu Dong, Ye Guang-nan, Chen Ching-ting. Hybrid Social Media Network, MM 2012
- [7] Papadimitriou A, Katsaros D, Manolopoulos Y. Social Network Analysis and its Applications in Wireless Sensor and Vehicular Networks, 2012
- [8] Cestra G, Liguori G, Clementini E. MyTravel: A Geo-referenced Social-Oriented Web 2.0 Application. LNCS 6782; ICCSA 2011, Part I
- [9] Lewis K, Kaufman J, Gonzalez M. Tastes, ties, and time: A new social network dataset using Facebook. Com. 2008
- [10] Borgatti S P, Mehra A, Brass D J. Network Analysis in the Social Sciences. Science 323, 892, 2009
- [11] Sgroi D. Social network theory, broadband and the future of the World Wide Web. Telecommunications Policy, 2008, 32
- [12] Fourli I. Business Model for Mobile Social Network. Master thesis, 2010
- (上接第 49 页)
- [19] Seoanea I, Calle E. Failure propagation in GMPLS optical rings CTMC model and performance analysis[J]. Optical Switching and Networking, 2012, 9(1), 39-51
- [20] Haider A. Recovery Technique in Next Generation Network [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2007, 9(3)
- [21] Rostami M J, Zarandi A A E. MSDP with ACO: A maximal SRLG disjoint routing algorithm based on ant colony optimization [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35
- [22] Kim S, Lee H, Lee W Y. Improving Resiliency of Network Topology with Enhanced Evolving Strategies [C] // The Sixth IEEE International Conference on Computer and Information Technology. 2006
- [23] Salles R M, Marino D A, J R. Strategies and Metric for Resilience in Computer Networks [J]. The Computer Journal Advance Access published, October 2011
- [24] Liu Jia-jia, Jiang Xiao-hong, Nishiyama H. Reliability Assessment for Wireless Mesh Networks Under Probabilistic Region Failure Model [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011
- [25] Wang C-h, Wei S-Y. Highly resilient key distribution strategy for multi-level heterogeneous sensor networks by using deployment knowledge [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2011
- [26] Joseph D, Franks J K, Freeman C N. Reliable and Resilient End-to-End Connectivity for Heterogeneous[Z]. International Business Machines Corporation, 2011/0038256 A1, 2011
- [27] Kousalya C G, Mala G S A. An Energy-Efficient and Resilient Traffic-Aware Key Management Scheme for Wireless Sensor Networks [J]. European Journal of Scientific Research, 2011, 50(2): 246-262
- [28] Cholda P, Mykkltveit A. A survey of resilience differentiation frameworks in communication network [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2007, 9(4)
- [29] ENISA. Ontology and taxonomies for resilience[OL]. <http://www.enisa.europa.eu/act/it/technology-for-resilience/ontology-ws/resontax-draft>, 2011
- [30] Cholda P, Tapolcai J, Cinkler T. Quality of Resilience as a Network Reliability Characterization Tool [J]. IEEE Network, 2009
- [31] Sousa B, Pentikousis K, Curado M. REF: Resilience Evaluation Framework [C] // 2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2010
- [32] Zavidniak P, D'Amico A, McCallant D H. Achieving Information Resilience [J]. Information Security Technique Report, 1999, 4(3): 54-62
- [33] Chandra A. Synergy Between. Biology and Systems Resilience [D]. Missouri University of Science and Technology Thesis, 2010
- [34] Hesse M, Pohlmann N. Internet Situation Awareness[Z]. eCrime Researchers Summit, 2008
- [35] Liu Mi-xia, Tao Feng, Smith P, et al. Situational Awareness for Improving Network Resilience Management [C] // 9th International Conference, ISPEC 2013. Lecture Notes in Computer Science, 7863
- [36] 龚正虎, 卓莹. 网络态势感知研究 [J]. 软件学报, 2010, 21(7)
- [37] 韦勇, 连一峰, 冯国登. 基于信息融合的网络安全态势评估模型 [J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(3): 353-362
- [38] 韦勇, 连一峰. 基于日志审计与性能修正算法的网络安全态势评估模型 [J]. 计算机学报, 2009, 32(4): 763-772
- [39] 郭文忠, 林宗明, 陈国龙. 基于粒子群优化的网络安全态势要素获取 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2009, 48(2)
- [40] 张勇, 谭小彬, 崔孝林, 等. 基于 Markov 博弈模型的网络安全态势感知方法 [J]. 软件学报, 2011
- [41] 孙建华, 李丁丁, 陈浩. 对等网络的网络弹性分析 [J]. 计算机应用, 2007, 27(4)
- [42] Xu Ming, Zhou Shui-geng, Guan Ji-hong. Building Resilient Unstructured Peer-to-Peer Networks Using Mobile Agents [C] // 2010 Sixth International Conference on Semantics, Knowledge and Grids. 2010: 149-156
- [43] Huang He, Wang Jin, Yang Bo. Multi-Class MPLS Resilience Mechanism Supporting Traffic Engineering [C] // Proceedings of the Seventh International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. 2006