

# 关联基础设施网络模型研究综述

毛子骏 费奇 欧阳敏 洪流

(华中科技大学系统工程研究所 武汉 430074)

**摘要** 随着人类社会日益复杂化,人们对各种关乎国计民生的关联基础设施网络的安全性和可靠性提出越来越高的要求。关联基础设施网络的模型自然成为了研究焦点之一。对关联基础设施网络的模型研究和应用现状进行了归纳总结,分析了几种有代表性的模型,最后提出了现有的问题和未来的研究方向。

**关键词** 基础设施网络,关联性,模型

## Survey of Model of Interdependent Infrastructures

MAO Zi-jun FEI Qi OU-YANG min HONG Liu

(System Engineering Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** As human society being complex increasingly, people put forward more and more demand on the security and reliability of interdependent infrastructures related to the national economy and people's livelihood. The study on model of interdependent infrastructures naturally becomes a focus. This paper surveyed the research and application status of the model of interdependent infrastructures, several representative theoretic models were introduced and analyzed. Finally, the existing problems and future researching directions were presented.

**Keywords** Infrastructures, Interdependency, Model

## 1 引言

相互关联的基础设施网络系统是现代社会赖以生存维系的基石,美国总统关键设施保护委员会(President's Commission on Critical Infrastructure Protection)于1997年提出的里程碑式的报告《立足之本:保护基础设施网络(Critical Foundations, Protecting America's Infrastructures)》<sup>[1]</sup>拉开了关联基础设施网络研究的序幕。报告指出,国家安全、经济繁荣和社会稳定都依赖于复杂性不断增长的关联基础设施网络。此后,大量美国政府文件<sup>[2-4]</sup>也相继指出基础设施网络关联关系研究的重要性。

基础设施网络包括交通、电力、通信、供水等基础设施网络,它们互相关联、依赖并为人类社会活动提供最基本、最重要的保障。随着社会发展,基础设施网络日趋复杂,网络间的联系和依赖程度也越来越高。网络间的相互关联大幅提高了基础设施网络整体效率的同时,却也带来了负面影响。

美国2001年加利福尼亚电力事故<sup>[5-7]</sup>,2003年中西部、东北部的大停电<sup>[8]</sup>,都对周围的诸多地区造成了巨大的影响,极大地影响了运输、供水、商业以及其他各相关部门,各州的工作、生产、生活等活动基本停摆,造成300多亿美元的直接经济损失。2008年1月底,我国南方遭遇大范围暴雪天气,一方面雪灾使各个基础设施网络受到直接破坏,公路、铁路、航空、电力、供水、运输等网络服务功能严重下降;另一方面由于网络间的相互关联,某些基础设施网络的破坏造成级联影

响引起更大的破坏。据新华社报道,贵州、湖南、江西的10个城市因停电导致大面积长时间停水,雪灾使交通受限,导致煤等原料不能及时运送至火电厂,进而造成供电的更加紧张;同时交通受限也影响了应急系统,使得救援资源不能及时到位,扩大了雪灾的影响。截至2008年2月12日,这次雪灾已造成经济损失达1111亿元。由此可见,因关联关系造成的损失往往要比因灾害直接造成的损失严重得多。

上述突发事件所造成的巨大损失都揭示出一个严肃而紧迫的问题:我们对日益复杂的关联基础设施网络了解还很欠缺,其脆弱性往往直到大规模灾难爆发才被我们认知。忽略基础设施网络之间的关联关系,轻则降低分析研究的有效性,重则导致在危机爆发时做出错误的决策使危机进一步蔓延。因此要真正分析了解基础设施网络各方面的特性,就必须整体分析研究它们彼此间的关联关系。

下面从多种模型的角度综述目前关联基础设施网络有关的研究进展,并对研究中存在的问题和未来发展趋势进行总结和展望。

## 2 相关背景与概念

关联基础设施网络是一个全新的研究领域,近年来国外学者都做了大量的研究,学者们普遍引用并接受了Rinaldi<sup>[9]</sup>提出的关联基础设施网络的基本概念和定义,这些概念和定义包括网络属性、外部环境、运行状态、关联类型、耦合关系和事故类型。关联基础设施网络属性包括表示基础设施网络所

到稿日期:2008-04-10 本课题得到国家自然科学基金(60074008,60574025)和湖北省自然科学基金资助项目(2004ABA055)资助。

毛子骏 博士研究生,主要研究方向为关联基础设施网络与复杂网络;费奇 博士生导师,主要研究方向为决策支持系统、综合集成技术与方法;欧阳敏 博士研究生,主要研究方向为复杂系统与系统网络;洪流 博士后,主要研究方向为协商协调理论、决策支持系统、复杂网络。

有人的组织属性;表示网络控制和管理者的运行属性;表示网络响应时间特性的时间属性;表示网络组份和覆盖区域的空间和结构属性。关联基础设施网络的外部环境包括经济、法律、政策、社会、科技水平等。关联基础设施网络的运行状态包括正常阶段、应急阶段、恢复阶段。关联基础设施网络的关联类型包括物理关联、信息关联、地理关联、逻辑关联。关联网络间的耦合关系包括线性和非线性耦合,松耦合和紧耦合。关联基础设施网络的事故类型包括:多网络同时出现事故(common cause failure);一个网络的事故使其他网络的事故更加严重(escalating failure),一个网络的事故直接造成了其它网络的事故(cascading failure)。

### 3 模型综述

学者根据关联基础设施网络的上述属性,结合各自的关注点提出了一系列研究模型,主要包括网络图模型、Agent模型、物理模型、系统动力学模型、投入产出模型等。各模型的优缺点如表1所列。

表1 关联基础设施网络模型优缺点

模型	优点	缺点
网络图模型	能很好地表示网络拓扑结构	忽略了网络结构的异质特性
Agent模型	能表示关联基础设施网络活动参与者的自治性行为	系统微观结构和功能描述差,网络间的关联关系处理简单
物理模型	能很好地表示关联基础设施网络微观的结构和功能	扩展性不强,难以用于大规模关联基础设施网络建模
系统动力学模型	能反映基础设施系统运行的动力学特性	网络微观结构和功能描述差,网络间的关联关系处理简单
投入产出模型	能宏观、全面的分析危机在关联网络系统中的传播、扩散情况	网络运行和危机传播的微观分析较弱

#### 3.1 网络图模型

基础设施网络为社会生活提供各种必需的基本服务,虽然不同基础设施网络提供的服务不尽相同,但其主要功能不外乎生产、输送、消费各类资源和产品,其结构均是由一系列功能性子系统和子系统之间的连接所组成。将这些子系统抽象为节点,子系统之间的连接抽象为边,就可以用网络图的方式表示基础设施网络的拓扑结构,当对这些节点和边赋予功能属性时,就可以用来描述基础设施网络的功能特性并由此建立关联基础设施网络的网络图模型。在网络图模型中常采用节点的响应函数和节点间的依赖关系来表示基础设施网络的关联关系。

Wolthusen<sup>[10-12]</sup>在模型中定义了简单的物理关联。模型中的节点具有生产、消费和存储属性,通过不同的依赖方式接受外界各种资源并对其它网络提供服务。

Wallace<sup>[13]</sup>于2003年提出了关联基础设施网络的五类关联关系:输入关系(Input),共享关系(Shared),独享关系(Exclusive or),地域关系(Co-located)和相互关系(Mutual)。Lee<sup>[14]</sup>于2007年用数学语言形式化表述了这5种关系,建立ILN(Interdependent Layer Network)模型对纽约曼哈顿地区基础设施网络进行了分析。

美国Idaho国家实验室的Dudenhoefter<sup>[15]</sup>在Rinaldi提出的4种关联类型的基础上增加了社会关联,并用节点间的动作响应函数对这5种关联关系进行数学定义,构建了基于图的关联基础设施网络模型和CIMS仿真系统。

关联基础设施网络的运行状态具有一定的不确定性,引起其危机的事故和攻击行为也是在一定概率下发生的,于是有学者将概率等方法引入到网络图模型中来描述基础设施系统运行的不确定性。Leonardo<sup>[16]</sup>用条件概率表示节点间关联关系。定义节点的条件概率属性 $P(W_j | P_i)$ ,  $P(Failure W_j | Failure P_i) = p_{w_j | p_i}$ 表示当网络P中的第i个元素失效的时候,网络W中第j个元素失效的概率。

Nozick<sup>[17]</sup>和Xu<sup>[18]</sup>用网络图和马尔可夫过程来建立关联基础设施网络模型。模型利用马尔可夫过程表示基础设施网络系统稳定时和转移过程中的服务状态,很好地描述了基础设施网络功能运行的不确定性。模型的不足在于马尔可夫过程在一些情况下需要很长的状态转移时间。

以上这些模型用网络图的方式描述了基础设施网络的内部结构和彼此间的关联关系,能很好地反映基础设施网络的微观拓扑结构,不足在于过于简单化处理了不同网络间的功能性差异,基础设施网络内部组份的异质性被忽略了。

#### 3.2 Agent 仿真模型

基础设施网络中资源的提供,产品的生产、输送、购买都是市场中的经济行为,所有经济参与者,如公司、银行、政府部门、家庭等的行为都会直接影响基础设施系统的运行,这些经济体彼此行为的交互关系是基础设施网络关联性的重要方面。人们业已广泛采用Agent模型来分析基础设施网络和其相关经济体的行为<sup>[19-22]</sup>。模型利用Agent表示基础设施网络活动中的经济参与体,用Agent的自治性表示经济体的个体行为,用Agent间的交互来模拟市场中的经济活动。这类研究中以美国Sandia和Argonne国家实验室的研究工作为代表。

Sandia国家实验室先后开发了基础设施网络经济仿真模型——Aspen<sup>[23]</sup>, Aspen-EE (Electricity Enhancement)<sup>[24]</sup>和NABLE(Next-generation Agent-based Economic Laboratory)<sup>[25-27]</sup>。它们利用Agent来代表各式各样的经济活动参与者,每个Agent彼此沟通,自治行动,从以往经验中学习,逐步进化,通过选择行为来改善自身的经济地位。其中Aspen-EE扩展了Aspen对电力市场分析的能力,NABLE扩展了Aspen-EE对通信网络的分析能力。

Argonne国家实验室开发了EMCAS(Electricity Market Complex Adaptive Systems)<sup>[28-30]</sup>和Restore模型<sup>[31]</sup>。EMCAS模型利用Agent代表多样的市场参与者,每个Agent都具有独特的商业策略、目标、风险属性和决策规则,Agent在不完全信息下做出决策。Restore模型利用Monte Carlo仿真评估灾害后关联基础设施网络恢复的时间和经济成本,主要用于受损关联基础设施网络的后继分析。

这些微观经济活动仿真有助于分析经济体和基础设施网络的动态关系,包括基础设施网络的灾害如何影响各经济体,经济体在灾害中的应急行为,各经济体应急行为对基础设施网络灾害的影响等。

#### 3.3 投入产出模型

Wassily Leontief于1973年提出投入产出模型<sup>[32]</sup>并获得Noble奖,其后该模型一直被人们用来建立经济行业的模型,研究并预测一个经济行业的变化对其他经济行业的影响。Haimes和Jiang<sup>[33]</sup>于2001年改造投入产出模型来描述基础设施网络间的关联关系。模型假设系统间的物理和经济关联

关系是同层次的,认为系统间的物理关联关系在某种程度上可以由经济关联关系表示,系统间关联经济量的多少反映了系统间物理关系的紧密程度。Haimes 分析了美国 500 个行业生产和消费的经济量<sup>[34]</sup>得到各行业之间的关联矩阵。当某基础设施网络出现危机时,将该基础设施网络的损失作为输入,利用关联矩阵求得危机在其他各基础设施网络造成的损失,进而分析危机在各基础设施网络间的传播。模型第一次提出时是宏观的、线性的、静态的,随后 Haimes, Jiang, Santos<sup>[35-38]</sup>等人逐渐将其丰富扩展成为非线性、动态的模型。

投入产出模型提供了一个量化多个基础设施网络之间关联度的方法,能宏观、全面地分析危机在关联基础设施网络之间的传播、扩散情况,在分析危机造成的级联影响时效果显著。模型的不足在于:无法适用于物理联系和经济联系不十分紧密的系统;模型对数据依赖性强;宏观分析较好,微观分析较弱。

### 3.4 物理模型

物理模型从工程技术角度分析基础设施网络系统,根据基础设施网络实际的系统组份和功能流程来建立模型。该模型囊括详尽丰富的系统信息,能够最优模拟关联基础设施网络的物理工程特性,常用来分析电网、煤气网、水网等工程技术特性较强的基础设施网络及它们之间的关联影响。美国 Los Alamos 国家实验室开发了 IEISS(Interdependent Energy Infrastructure Simulation System)<sup>[39]</sup>来对关联能源网络系统建模,分析能源事故发生后地区的响应情况。美国 Bell 实验室开发了 N-SMART (Network Simulation Modeling and Analysis Research Tool)<sup>[40]</sup>来支持有线和无线通讯网络的模型仿真。

物理模型能很好地表示关联基础设施网络微观的结构和功能属性,仿真其在稳定运行和危机时的状态。但由于基础设施网络自身和彼此关联关系的复杂性,很难对大范围的多个关联基础设施网络建立物理模型抑或建立的物理模型过于复杂,仿真难以实现,因此很难将物理模型推广到复杂多网络关联的研究中去。

### 3.5 系统动力学模型

系统动力学模型利用系统动力学中的流和流位来表示基础设施网络中生产、输送、消费的服务和产品,用多个网络间流动的服务和产品来表示基础设施网络间的关联关系。该模型能很好地描述基础设施网络的功能和业务流程,刻画关联基础设施网络的动力学特性。系统动力学模型利用系统动力学方法对物理模型抽象,从物理模型中抽象出系统的主要功能和业务流程,降低物理模型的复杂度,能解决物理模型粒度太高,难以进行大规模关联网络研究的问题。Bell 实验室将通讯网络 N-SMART 模型抽象为系统动力学模型,进而分析了其与电力网络、应急服务网络之间的关联关系<sup>[41]</sup>。由美国 Argonne 国家实验室、Los Alamos 国家实验室和 Sandia 国家实验室联合开发的 IMCICM(Integrated Metropolitan Critical Infrastructure Consequence Model)模型<sup>[42]</sup>是一个规模更大的基础设施网络系统动力学模型。该模型对美国所有基础设施网络及其之间的关联关系建立了系统动力学模型,所涉及的基础设施网络包括能源(电力,石油,天然气),通信,交通(航运,高速公路,铁路),应急服务,银行,金融,农业,供水等。

此外,系统动力学也常和其他方法一起用于对基础设施

网络进行建模;Brown<sup>[43]</sup>利用系统动力学模型和 Agent 模型对关联基础设施网络运行及其经济特性进行建模分析;Beyeler<sup>[44]</sup>利用系统动力学模型和物理模型分析了通讯、电力等关联基础设施网络。

系统动力学模型能很好地从功能和业务流程上分析多个关联基础设施网络运行特性、危机爆发的应急行为和网络间的级联影响,并能进行政策评价,检验政策、规章、法律对基础设施网络的影响。

**结束语** 关联基础设施网络作为复杂巨系统,既有复杂的网络结构又对外界提供着复杂的服务功能,其系统结构和功能之间的内在关系一直不为人们所了解,而关联基础设施网络模型的研究将有助于揭示这个问题并为复杂巨系统的研究提供启示。关联基础设施网络是国家安全和人民生活的基础,其理论研究成果能够为我国基础设施网络系统的保护和改进提供理论依据。在过去的几年中,虽然在某些侧面取得了若干初步成果,但关联基础设施网络的研究尚处于起步阶段,并未形成完备的理论和方法体系,还有大量工作有待完成。待进一步研究的问题有:

(1)目前模型通常采用同一时间刻度来简化处理所有基础设施网络的响应时间,而实际基础设施网络的响应时间差异较大,如通讯网响应时间为微秒级,水网为小时级,公路网为日级等,如何在关联基础设施网络模型中处理动态响应时间差异的问题,有待进一步研究。

(2)基础设施网络有着各自独特的结构和功能,而目前模型中通常都没有考虑基础设施网络结构的异质特性,忽略基础设施网络的底层细节,简单相似化处理了基础设施网络中的子系统和组份,这样生成的模型并不精确,难以分析基础设施网络微观运行状况,需要进一步研究能更好反映基础设施网络微观结构和功能的模型。

(3)基础设施网络作为开放系统与外界环境有着复杂的交互影响关系,而目前模型只分析了经济和政策对基础设施网络的部分影响,更全面系统的分析是十分必要的。

(4)基础设施网络的关联关系和危机爆发时的级联影响分析是所有模型分析中的难点,现有工作虽然已经取得了一定成绩,但仍处于探索阶段,大量具有深远影响且极富挑战性的研究工作尚未完成。

(5)关联基础设施网络系统作为庞大、复杂的巨系统,其研究模型中相对微观和相对宏观的模型各有一些,如基础设施网络的物理模型较微观,多网络间关联模型较宏观;区域级的模型较微观,国家的模型较宏观,但缺乏宏观微观相结合的模型。研究建立宏观微观相结合的模型,既可分析网络微观运行机制,又能观察宏观现象,对关联基础设施网络的研究是十分有意义的。

## 参考文献

- [1] President's Commission on Critical Infrastructure Protection, Critical Foundations: Protecting America's Infrastructures, October 1997. <http://www.fas.org/sgp/library/pccip.pdf>
- [2] The National Strategy for the Physical Protection of Critical Infrastructures and Key Assets. The White House, Washington D. C., Referred to hereafter as Strategy, February 2003; 33-34
- [3] National Strategy for Homeland Security. Office of Homeland Security, Washington D. C., July 2002; 34

- [4] The Clinton Administration's Policy on Critical Infrastructure Protection; Presidential Decision Direction 63. The White House, Washington D. C. , May 1998
- [5] Fletcher S. Electric power interruptions curtail California oil and gas production. *Oil Gas J.* , Feb. 2001
- [6] Thompson M. Much of Northern California in the dark; Water pumps stopped. Jan. 2001. <http://www.cnn.com/2001/US/01/17/power.woes.03/index.html>
- [7] Connole P. Calif. power crisis may become national mess, Reuters, Feb. 2001
- [8] U. S. -Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003. Blackout in the United States and Canada; Causes and Recommendations, April 2004
- [9] Rinaldi S, Peerenboom J, Kelly T. Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, IEEE, December 2001; 11-25
- [10] Svendsen N K, Wolthusen S D. Multigraph dependency models for heterogeneous critical infrastructures // Proceedings of the First Annual IFIP WG 11. 10 International Conference on Critical Infrastructure Protection. Hanover, NH, USA; Springer-Verlag, 2007
- [11] Svendsen N K, Wolthusen S D. Connectivity models of interdependency in mixed-type critical infrastructure networks. Information security technical report 12. 2007; 44-55
- [12] Svendsen N K, Wolthusen S D // Proceedings of the 2007 IEEE Workshop on Information Assurance. United States Military Academy, West Point, NY, June 2007
- [13] Wallace W A, Mendonça D, Lee E, et al. Managing disruptions to critical infrastructure interdependencies in the context of the 2001 World Trade Center attack // J. L. Monday, ed. Beyond September 11th; An account of post-disaster research. Natural Hazards Research and Applications Information Center, Boulder, Colo. ; 165-198
- [14] Lee E E II, Mitchell J E, Wallace W A. Restoration of Services in Interdependent Infrastructure Systems; A Network Flows Approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—PART C: Applications and Reviews*, 2007, 37(6): 1303-1317
- [15] Dudenhoefter D D, Permann M R, Manic M. CIMS; A Framework for Infrastructure Interdependency Modeling and Analysis // Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. July 2006
- [16] Leonardo D O, James C I, Barry J G. Seismic response of critical interdependent networks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36: 285-306
- [17] Nozick L, Turnquist M, Jones D, et al. Assessing the Performance of Interdependent Infrastructures and Optimizing Investment // Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on Systems Sciences. Jan. 2004
- [18] Xu Ningxiong, Nozick L, Turnquist M, et al. Optimizing Investment for Recovery in Interdependent Infrastructures // Proceedings of the 40th Hawaii International Conference on Systems Sciences. Jan. 2007
- [19] Tomita Y, Fukui C, Kudo H, et al. Cooperative Protection System with an Agent Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, 13(4): 1060-1066
- [20] Wildberger A M. Modeling with Independent Intelligent Agents for Distributed Control of the Electric Power Grid // Proceedings of the American Power Conference, vol. 59-1, Proceedings of the 1997 59th Annual American Power Conference. Chicago, IL 1997; 361-364
- [21] Wildberger A M. Modeling the Infrastructure Industries as Complex Adaptive Systems // M. des & R. Griebenow, eds. Proceedings of Simulation International XV. San Diego, CA, 1998; 168-173
- [22] Amin M. Toward Secure and Resilient Interdependent Infrastructures. *Journal of Infrastructure Systems*, 2002, 8(3): 67-75
- [23] Basu N, Pryor R J, Quint T, et al. Aspen: A Microsimulation Model of the Economy, SAND96-2459. Albuquerque, NM; Sandia National Laboratories, October 1996
- [24] Barton D C, Eidson E D, Schoenwald D A, et al. Aspen-EE; An Agent-Based Model of Infrastructure Interdependency, SAND 2000-2925. Albuquerque, NM Sandia National Laboratories, 1998
- [25] Schoenwald D, Barton D, Ehlen M. An Agent-Based Simulation Laboratory for Economics and Infrastructure Interdependency // Proceeding of the 2004 American Control Conference. Boston, Massachusetts, June 30 - July 2, 2004
- [26] Tsoukalas L H, Uluyol O. Anticipatory Agents for the Deregulated Electric Power System // Proceedings of the Workshop on Agent Simulation; Applications, Models, and Tools. University of Chicago, October 1999; 114-123
- [27] Thomas R, Mount T D, Zimmerman R, et al. Testing the Effects of Price Responsive Demand on Uniform Price and Soft-Cap Electricity Auctions // Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on Systems Sciences. 2002
- [28] Veselka T, Boyd G, Conzelmann G, et al. Simulating the Behavior of Electricity Markets with an Agent-Based Methodology: The Electricity Market Complex Adaptive System (EMCAS) Model // 22nd International Association for Energy Economics International Conference. Vancouver, BC, Canada, October 2002
- [29] North M J, Thimmapuram P R, Macal C, et al. EMCAS; An Agent-Based Tool for Modeling Electricity Markets // Proceedings of the Agent 2003 Conference on Challenges in Social Simulation. Argonne National Laboratory/The University of Chicago, Chicago, IL, October 2003
- [30] Macal C, Boyd G, Cirillo R, et al. Modeling the Restructured Illinois Electricity Market as a Complex Adaptive System // 24th Annual North American Conference of the USAEE/IAEE; Energy, Environment and Economics in a New Era. Washington, DC, July 2004
- [31] Peerenboom J P, Fisher R E, Whitfield R. Recovering from Disruptions of Interdependent Critical Infrastructures // CRIS/DRM/IIIT/NSF Workshop. Alexandria, VA, September 2001
- [32] Leontief W W. Input-output economics. *Sci. Am.* , October 1951; 15-21
- [33] Haines Y Y, Jiang P. Leontief-based model of risk in complex interconnected infrastructures. *J. Infrastructure. Syst.* , 7(1): 1-12
- [34] United States Department of Commerce. Benchmark input-output accounts of the United States, Bureau of Economic Analysis, Washington D. C. , U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1992

6 所示,分为没有启动动态保护和启用动态保护两种测试情况。没有启动动态保护情况下,系统的 CPU 占用率大部分时间在 90%以上。而在启动动态防御系统情况下,在 Vmstat 启动约 20s 后开始 Syn 攻击,系统实时检测到攻击并自动阻断了攻击,CPU 占用率明显恢复到正常状态,如图 6(a)所示。而没有启动动态防御措施情况下的内存使用率也较启用动态防御情况下的使用率高,如图 6(b)所示。由此可知,基于 NSIS 的动态防御系统较好地实现了 UMTS 核心网防御的目的。

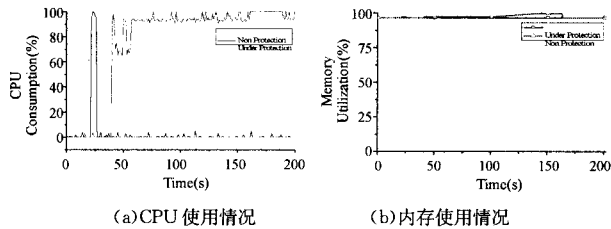


图 6

**结束语** 将 NSIS 信令技术引入到 3G 网络安全中,设计和实现了 NSIS 框架下的 3G 核心网动态防御系统。NSIS 的引入不仅解决了传统网络安全联动协议缺乏通用性的问题,而且继承了 NSIS 信令技术安全、可靠的优点,为新一代融合网络核心网的安全防护提供了有效的手段。下一步的工作是完善入侵检测系统,支持对核心网 GTP 等关键信令协议攻击的检测,优化完善防御系统各个模块性能。

### 参 考 文 献

- [1] Peter L, Martin L, Krzysztof P. Efficient Protection of Mobile Devices by Cross Layer Interaction of Firewall Approaches // Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer-Verlag, 2006, 3970: 155-165
- [2] 郑宇,何大可,梅其祥. 基于自验证公钥的 3G 移动通信系统认证方案. 计算机学报, 2005, 28(8): 1327-1332
- [3] Prasad A, Wang H, Schoo P. Infrastructure Security for Future Mobile Communications System // Proceedings of WPMC 2003. Yokosuka, Japan, 2003, 186-190
- [4] Boman K, Horn G, Howard P, et al. UMTS security. Electronics & Communication Engineering Journal, 2002, 14(5): 191-204
- [5] Günter S. Research Challenges in Security for Next Generation Mobile Networks // Proceedings of Workshop on Pioneering Advanced Mobile Privacy and Security (PAMPAS). Egham, Surrey, United Kingdom, 2002
- [6] 王文奇. 入侵检测与安全防御协同控制研究. 学位论文. 西安: 西北工业大学, 2006
- [7] IETF Draft ietf-nsis-nslp-natfw-18. NAT/Firewall NSIS Signaling Layer Protocol (NSLP). 2008
- [8] IETF Draft ietf-nsis-qos-nslp-16. NSLP for Quality-of-Service signaling. 2008
- [9] Fu Xiaoming, Schulzrinne H, Bader A, et al. NSIS: A New Extensible IP Signaling Protocol Suite. IEEE Communications Magazine, Internet Technology Series, 2005: 133-141
- [10] Fu Xiaoming, Tschofenig H, Hogrefe D. Beyond QoS signaling: A new generic IP signaling framework. Computer Networks, 2006, 50(17): 3416-3433
- [11] IETF RFC 4080. Next steps in signaling (NSIS): framework. 2005
- [12] IETF Draft ietf-nsis-ntlp-15. GIST: general Internet signaling transport. 2008
- [13] 3GPP TS 33. 102 v5. 7. 0. Security architecture. 2008
- [14] Gopal R L, Tat Chan, Ti-Shiang W. User plane firewall for 3G mobile network // Proceedings of 58th IEEE Vehicular Technology Conference. Orlando, USA, 2003; 2117-2121
- [15] Xenakis C, Merakos L. Vulnerabilities and Possible Attacks Against the GPRS Backbone Network // Proceedings of Critical Information Infrastructures Security First International Workshop. CRITIS 2006, LNCS. 2006, 4347: 262-272
- [16] Ning P. Techniques and tools for analyzing intrusion alerts. ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC), 2004, 7(2): 274-318
- [17] Santos J R. Inoperability input-output modeling of disruptions to interdependent economic systems. J. Syst. Eng., 9(1): 20-34
- [18] Haimes Y Y, Horowitz B R, Lambert J H, et al. Inoperability input-output model (IIM) for interdependent infrastructure sectors. II; Case study. J. Infrastructure. Syst., 11(2): 80-92
- [19] Haimes Y Y, Horowitz B R, Lambert J H, et al. Inoperability input-output model (IIM) for interdependent infrastructure sectors. I; Theory and methodology. J. Infrastructure. Syst., 11(2): 67-79
- [20] Jiang P. Input-output inoperability risk model and beyond; a holistic approach // Ph. D. dissertation. Systems and Information Engineering Dept., Univ. of Virginia, Charlottesville, Va
- [21] Los Alamos National Laboratory presentation on the Interdependent Energy Infrastructure Simulation System (IEISS), NISAC Capabilities Demonstrations
- [22] Houck D J, Kim E, O'Reilly G P, et al. A Network Survivability Model for Critical National Infrastructures. Bell Labs Tech. J., 2004, 8(4): 153-172
- [23] O'Reilly G, Uzunalioglu H, Conrad S, et al. Inter-Infrastructure Simulations Across Telecom, Power, and Emergency Services // Proc. 5th Internet Workshop on Design of Reliable Commun. Networks (DRCN '05), Ischia, It., 2005
- [24] Conrad S H, LeClaire R J, O'Reilly G, et al. Critical National Infrastructure Reliability Modeling and Analysis. Bell Labs Technical Journal, 11(3): 57-71
- [25] Brown T, Beyeler W, Barton D. Assessing Infrastructure Interdependencies; The Challenge of Risk Analysis for Complex Adaptive Systems. Int. J. Critical Infrastructures, 2004, 1(1)
- [26] Beyeler W, Conrad S, Corbet T, et al. Inter-Infrastructure Modeling-Ports and Telecommunications. Bell Labs Technical Journal, 2004, 9(2): 91-105

(上接第 8 页)