

网络生存适应性的多目标评估

李黎^{1,2,3}, 管晓宏^{1,2,4,5}, 赵千川^{4,5}, 王恒涛^{4,5}

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学智能网络与网络安全教育部重点实验室, 710049, 西安; 3. 陕西师范大学计算机科学学院, 710062, 西安; 4. 清华大学自动化系, 10084, 北京; 5. 清华大学信息科学与技术国家实验室, 100084, 北京)

摘要: 为了更好地测度网络适应环境变化的能力,提出了一种简单的多目标量化评估网络生存适应性的方法. 该方法将网络效率、网络鲁棒性和网络代价等多个优化目标结合起来,通过定量加权的方法对网络拓扑的生存适应性进行综合评估,避免了仅依靠网络平均路径长度、最大连通子图规模等单一度量指标进行评估的不足. 仿真实验结果表明,综合了环型和星型结构优势的 Hub 型拓扑结构的生存适应性比较高,节点度分布较均匀的 ARPA 网络的生存适应性比较优,提高网络拓扑度分布的均匀性是改善网络拓扑生存适应性的有效措施. 该评估方法不仅能够有效度量不同网络结构在动态环境下的生存适应能力,还能进一步为网络拓扑的优化、设计和重构提供有益的指导.

关键词: 网络生存适应性; 评估; 多目标优化; 网络效率; 网络鲁棒性

中图分类号: TP309 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)10-0001-07

Multi-Objective Evaluation of Network Survival Fitness

LI Li^{1,2,3}, GUAN Xiaohong^{1,2,4,5}, ZHAO Qianchuan^{4,5}, WANG Hengtao^{4,5}

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Key Laboratory for Intelligent Network and Network Security of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. College of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;
4. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. State Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new evaluation method of network survival fitness (NSF) based on multi-objective optimization is proposed to measure the adaptability of network topology against failure and attacks in networks. NSF is evaluated by considering network efficiency, network robustness and network cost, and overcomes the shortcoming of single-objective optimization method. The results show that the Hub formation balances the need for efficiency and robustness quite well, and that network survival fitness can be enhanced by improving the topological homogeneous degree distribution. It is also found that the proposed method effectively evaluates the survival fitness of different network structures under dynamic environments, and provides useful guidance in designing, optimizing and reconfiguring of the network topology.

Keywords: network survival fitness; evaluation; multi-objective optimization; network efficiency; network robustness

以因特网为代表的信息网络已成为现代社会最重要的基础设施之一,在经济、军事、文化和管理等

各个层面上产生了日益广泛和深远的影响.然而,网络系统在运行中经常会受到干扰或破坏,从而导致其性能降低甚至功能完全丧失.网络系统适应环境变化抵御攻击破坏的能力,已经成为了人们关注的焦点,特别是突发公共事件的快速反应和应急处置,对网络基础设施的安全性和可靠性提出了更高的要求^[1-2].

事实上,因特网以及现实中的许多网络都具有明显的无标度特性,面对不同的攻击策略会表现出不同的鲁棒性和抗毁性.遭遇随机故障时,只有当绝大多数节点被移除后,网络才会最终解体,而当网络遭遇蓄意攻击时,只要移除节点的比例超过一个很小的阈值(约 0.18),网络中最大连通子图中的节点比例将近似为 0^[3].无标度网络对于随机故障表现出健壮性,而对于蓄意攻击则显得异常脆弱.Venkata 等^[4]依据达尔文适者生存的原理提出了复杂网络自组织演化适应性的模型框架,认为不论是自然的还是人工的网络系统都只有适应环境的变化,才具有强的生命力.本文把网络系统维持网络功能、适应环境变化的能力称为网络的生存适应性.研究网络生存适应性的重要意义在于,网络系统的设计^[4]、重构^[5-6]只有适应环境的变化,才能满足系统生存的目标,使网络系统稳定并得以发展.

大量研究表明,网络拓扑决定网络所拥有的特性,从网络中移除节点或边,通常会影响到网络中最短路径的变化.由于不确定的网络环境和影响网络系统正常运行因素的多样性,使网络系统生存适应性的评估呈现出不确定性、关联性以及综合性等特征,这给网络系统的评估带来了极大的困难.

本文中,对网络生存适应能力的评估通过网络生存的目标来反映,而网络生存的目标主要依赖网络效率(反映网络传输性能)、网络鲁棒性(反映网络连通可用性)、网络资源代价以及网络环境等因素.鉴于以上多种因素对网络生存适应能力的影响,本文提出了一种多目标优化的网络生存适应性(Network Survival Fitness, NSF)评估方法,该方法能克服单一指标参数只从某方面反映网络结构属性的不足,联合多个目标参数更全面地评估网络结构的生存适应性.

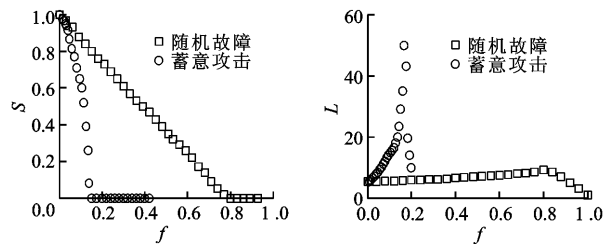
1 相关研究

近年来,在刻画网络结构的统计特性上提出了许多概念和方法,其中有 3 个基本的概念:平均路径长度、最大连通子图和节点的度.平均路径长度常用

于反映网络传输的性能.最大连通子图的规模常用来衡量网络功能的可用性.直观地看,一个节点的度越大就意味着这个节点在某种意义上越“重要”.

系统科学的研究方法用网络连通性反映系统某种功能的完整性,通过度量节点移除对网络连通的破坏程度来反映网络的鲁棒性^[7].Frank 等^[8]认为结合度(指边连通度,是使网络不连通所应去掉的最少边数)和连接度(指点连通度,是使网络不连通所应去掉的最少节点数)是两个重要的连通性测度,它们描述了破坏网络拓扑结构使其解体的难易程度,所采用的网络生存依据为网络中任何一对节点之间至少存在一条路径,即仅考虑了网络的连通性.但是,对于通信网络来说,如果一对节点之间幸存的路径很长,致使信息传输时延迟到不可容忍的程度,那么,这条路径也就没有多大意义了.

文献[3]比较了随机网络和无标度网络遭到攻击和故障时的不同表现,验证了对随机故障的鲁棒性和对蓄意攻击的脆弱性是无标度网络的基本特征,并指出其根源在于无标度网络中度分布的不均匀性.该文中假设移除的节点数占原始网络总节点数的比例为 f ,用最大连通子图的规模 S 和平均路径长度 L 与 f 的关系来度量网络的鲁棒性.图 1a 描述了通过 S 随 f 变化曲线考察无标度网络在故障和攻击下被分割的情况.仅通过 S 的变化,还不能完全刻画网络被分割后的不连通情况,因为没有考虑到最大连通子图外的剩余结构在移除节点后被分割的情况.从图 1b 中可看出,随着 f 的增加, L 会出现先增加后减小的情况,这是因为移除网络中的节点不仅会使网络中连通节点对之间的距离变长,也会使网络被分割变得不连通,前一个因素使得 L 增加,后一个因素使得 L 减小.因此,仅用 L 的变化来反映网络性能的变化具有局限性.



(a) 连通子图规模的变化情况 (b) 路径长度的变化情况

图1 BA 无标度网络分别在故障和攻击下最大连通子图规模和平均路径长度的变化情况^[3]

余新等^[9]提出了一种联合平均路径长度和网络连通度变化梯度来评估网络中节点重要性的方法,

该方法中虽然考虑用两个指标联合进行评估,但指标在评估的过程中仍是孤立的. 黄海滨等^[10]在研究蛋白质网络关键节点评估的过程中,分析了单个(独立)参数存在的不足,从相关分析出发提出了复合参数的构造方法. 受到这些研究的启发,本文提出了一种联合网络效率、网络鲁棒性、网络代价和环境因素多目标优化的网络生存适应性评估方法.

2 网络生存适应性评估

当网络遭遇故障或攻击时,网络中的传输行为(如包传输、负载分配等)和网络中节点之间的连接程度都可能受到影响. 网络直径、平均路径长度和接近度等指标常用来反映网络传输性能,而连接度、最大连通子图、核度等指标常用来反映网络的连通可用性. 但是,单独用任何一个量仅能从某方面反映网络生存适应性所依赖的网络特性,不能全面反映网络生存适应能力的真实情况. 例如,星型集中式网络结构具有较小的平均路径长度,但中心节点的移除会使整个网络崩溃;无标度网络结构从平均路径长度和对随机故障具有鲁棒性的角度来看是比较高效的,但面对高度值节点的恶意攻击,网络就会十分敏感.

2.1 多目标优化模型

在不确定的网络环境下,网络生存适应性的优化应考虑:①网络生存追求高效率;②网络生存依赖高鲁棒性;③网络成本的约束. 根据网络生存适应性的优化目标,建立多目标优化模型

$$\begin{aligned} & \max \quad \eta_{\text{eff}} \\ & \max \quad \eta_{\text{rob}} \\ & \text{s. t. } C \leq C_0 \end{aligned}$$

可使用加权平均法把上述的多目标优化问题转化为单目标优化问题

$$\max (1-\alpha)\eta_{\text{eff}} + \alpha\eta_{\text{rob}} - C$$

式中: η_{eff} 表示网络效率,反映网络服务性能的高低; η_{rob} 表示网络鲁棒性,反映网络的连通可用性; C 表示网络代价,与网络冗余结构、改善网络结构所需资源等有关,满足不大于给定的代价约束 C_0 ;加权数 α 受不确定环境影响,取值为 $[0, 1]$.

在网络生存适应性的优化模型中,为最大化系统的生存适应性,需降低网络成本,减少网络资源的消耗. 在网络代价一定时,可通过调整 α 的取值以适应环境变化,优化网络生存目标对网络效率和网络鲁棒性的依赖程度.

本文的网络拓扑生存适应性优化模型具有以下

特点.

(1)网络生存目标适应环境需求变化. 环境条件不同时,网络生存适应性对网络效率和网络鲁棒性的依赖也不同. 当网络环境较优时,网络生存关注网络性能,追求最优的服务效率;当网络环境恶劣时,网络生存关注网络连通可用性,网络生存依赖较高的连通鲁棒性.

(2)兼顾网络效率和网络鲁棒性的多目标评估. 在网络代价一定时,追求高效率和高鲁棒性往往是冲突的,例如星型结构的网络效率非常显著,但鲁棒性差,而环型结构的鲁棒性有优势,但效率不理想^[4].

(3)为网络拓扑的设计和重构提供有益指导. 在网络资源受限的情况下,如何优化配置可利用资源以最大化网络生存适应性,是现阶段我们研究网络拓扑重构问题的重要内容.

2.2 度量指标及分析评估

本文首先从网络节点传输信息的有效性以及网络节点抵御攻击破坏的连通能力两个方面,提出衡量网络效率和网络鲁棒性的测度指标. 给定网络拓扑图 $G(V, E)$, $n = |V|$ 表示网络中的节点数, $m = |E|$ 表示网络中的边数. 网络中两个节点 i 和 j 之间的距离 d_{ij} 定义为连接这两个节点的最短路径上的边数.

定义 1 网络效率(η_e)为网络中任意两个节点之间距离倒数之和的平均值,即

$$\eta_e = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \in G} \sum_{j \neq i \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (1)$$

式中:如果节点 i 和 j 之间不存在路径, d_{ij} 就为 ∞ , $\frac{1}{d_{ij}} = 0$.

网络效率指标中对两点间最短距离取倒数避免了两节点不连通时最短路径长度为 ∞ 的情况,克服了网络直径、平均路径长度指标不适用于网络被分割的情况. 网络效率指标描述了网络中信息的传播能力,网络中较短的距离意味着更少的消息传递时间和花费. 对于动态网络,效率越高通常意味着信息在网络中越容易传输.

本文把网络中移除节点 k 后(即删除该节点以及同时删除与该点直接相连的边)仍连通的节点对数与网络总节点对数之比称为移除节点 k 的网络鲁棒性,即

$$\eta_R(G_k) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \in G_k} \sum_{j \neq i \in G_k} \ell_{ij} \quad (2)$$

式中: G_k 为移除节点 k 后的网络子图; ℓ_{ij} 为图 G_k 中

节点 i 到 j 的连通参数,若节点 i 到 j 有路径,则 $\ell_{ij}=1$,否则, $\ell_{ij}=0$. 移除节点 k 的网络鲁棒性描述了移除该节点后网络的连通性,反映了网络被分割的情况. $\eta_R(G_k)$ 取值范围为 $[0, 1]$, $\eta_R(G_k)$ 值越小,表示移除节点 k 后网络中不连通的节点对越多,网络被分割的程度越严重.

现实中对网络进行攻击破坏的方式很多,比较典型的是随机故障和蓄意攻击. 随机故障指随机地移除网络的节点,蓄意攻击通常是指有意识地移除网络中节点度最高的节点. 考虑不同破坏方式,采用 $q(k)$ 表示节点 k 在不确定网络环境下被移除的概率,对于随机故障,假设网络中所有节点具有相同的移除概率,因此 $q(k)=\frac{1}{n}$.

定义 2 网络鲁棒性(η_R)用来衡量移除任意一个节点后网络中剩余节点之间仍能保持连通能力的平均影响,也就是移除任意节点后网络中仍连通的节点对数与网络总节点对数之比的均值,即

$$\eta_R = \sum_{k \in G} q(k) \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \in G_k} \sum_{j \neq i \in G_k} \ell_{ij} \quad (3)$$

网络鲁棒性指标刻画了不同破坏方式下,整体网络连通性受到的破坏情况,克服了最大连通子图不能描述网络中剩余结构连通状况的缺点^[9].

假设网络图中连接边的代价相同,连通 n 个节点需要 $n-1$ 条边. 若连接边多于 $n-1$ 条,冗余的边会增加网络投入的成本.

定义 3 网络结构冗余性(β)为图 G 中的多余边数(网络图中实际边数与其最小连通树的边数之差)与同规模完全图中多余边数的比,即

$$\beta = \begin{cases} 0, & m < n-1 \\ \frac{m - (n-1)}{(1/2)n(n-1) - (n-1)}, & m \geq n-1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: m 为图 G 中的实际边数; $n-1$ 为连通网络最小连通树的边数; β 的取值范围为 $[0, 1]$, 当 $\beta=1$ 时,对应完全连通图.

在定义了衡量网络效率、网络鲁棒性和网络代价的具体指标 η_E 、 η_R 、 β 的基础上,给出一种量化的满足网络生存适应性多目标评估需求的网络生存适应性指标.

定义 4 网络拓扑图 G 的生存适应性(Γ)定义为

$$\Gamma(G) = (1-\alpha)\eta_E + \alpha\eta_R - \beta \quad (5)$$

式中: η_E 为网络效率; η_R 为网络鲁棒性; β 为网络结构冗余性; α 为加权系数.

网络生存适应性通过调整 α 取值来均衡网络生

存对网络效率和网络鲁棒性的依赖,适应环境变化,进而对网络生存适应性进行评估. 当 $\alpha=0$ 时,表示良好的网络环境,网络生存追求最优网络效率而不妥协考虑连通鲁棒性;当 $\alpha=1$ 时,表示恶劣的网络环境,网络生存完全依赖于网络鲁棒性;当 $\alpha=0.5$ 时,表示随机故障的网络环境,网络生存兼顾网络效率和连通鲁棒性. 一般认为,网络被分割带来的影响大于网络中最短路径的增加,最短路径的增加还可能提供满足需求的基本服务,而网络被分割则意味着节点对之间通信彻底中断,网络服务失效^[9]. 所以,一般取 $\alpha=0.7 \sim 0.8$,表示蓄意攻击下的网络环境,表明网络生存更依赖于网络鲁棒性.

考虑到对网络中节点移除的两种典型策略,网络效率可分为随机故障下的平均效率(E_{ave})和蓄意攻击下的最差效率(E_{wor}),网络鲁棒性也可分为随机故障下的平均鲁棒性(R_{ave})和蓄意攻击下的最差鲁棒性(R_{wor}).

$$E_{ave}(G) = \frac{1}{n} \sum_{k \in G} \eta_E(G_k) \quad (6)$$

$$E_{wor}(G) = \min_k \eta_E(G_k) \quad (7)$$

$$R_{ave}(G) = \frac{1}{n} \sum_{k \in G} \frac{N(G_k)}{N(G)} \quad (8)$$

$$R_{wor}(G) = \min_k \frac{N(G_k)}{N(G)} \quad (9)$$

式中: $\eta_E(G_k)$ 表示图 G_k 中任意两节点之间距离倒数之和的平均值; $N(G_k)$ 表示图 G_k 中仍连通的节点对数目; $N(G)$ 表示连通图 G 中的节点对数目. 针对不确定环境下网络可能遭遇的随机故障和蓄意攻击,网络的生存适应性评估可侧重讨论网络在平均情况下的生存适应性(Γ_{ave})和最坏情况下的生存适应性(Γ_{wor}). 给定网络拓扑图 G , 当 β 一定时, Γ_{ave} 和 Γ_{wor} 可描述为

$$\Gamma_{ave}(G) = 0.5E_{ave}(G) + 0.5R_{ave}(G) \quad (10)$$

$$\Gamma_{wor}(G_k) = 0.2\eta_E(G_k) + 0.8R_{wor}(G_k) \quad (11)$$

在蓄意攻击情况下,网络生存更依赖于网络鲁棒性. 对于 $\eta_E(G_k) \leq \eta_E(G_{k'})$, 只有当移除节点 k 和 k' 的网络鲁棒性相同时,本文才认为移除节点 k 比移除节点 k' 的情况更严重.

3 仿真分析

3.1 典型网络拓扑

首先考察 $\beta=0$ 或 β 非常小的情况下,一些典型网络拓扑结构的生存适应性评估. 图 2 所示节点数

$n=30$, 边数 $m=29$ 或 30 , 其中, 图 2e 是五边 Hub 型结构. 为归一化不同拓扑结构的网络效率而进行比较, 定义相对效率(η_{RE})为拓扑自身的网络效率与同规模星型拓扑网络效率的比.

表 1 对比了不同测度指标(平均路径长度 L 、相对效率 η_{RE} 、最大连通子图中的平均路径长度 L_{max} 及规模 S 、平均鲁棒性 R_{ave} 和最差鲁棒性 R_{wor})下的各网络拓扑特性, 并给出了图 2 中典型网络拓扑的生存适应性评估指标(平均生存适应性 Γ_{ave} 和最差生

η_{RE} 、 R_{ave} 和 R_{wor} 各项指标可知, 星型结构的网络效率最高, 但星型结构在最坏情况下鲁棒性最差. 与线型结构相比, 树型结构的网络效率较优, 但在最坏情况下的鲁棒性也比较差. 环型结构在最坏情况下鲁棒性最好, 但网络效率偏低. 通过网络生存适应性多目标评估可知, 当 $\alpha=0.5$ 时, 随着网络规模的增加, 在典型拓扑结构中, Hub 型结构能够更好地均衡网络效率和网络鲁棒性, 具有比较高的生存适应性.

3.2 ARPA 网络

以实际的网络拓扑为例, 用图 3a 所示 ARPA 网络拓扑分析网络生存适应性多目标评估的有效性. 该拓扑由 21 个节点和 26 条链路组成, 是欧美比较普遍的干线网络拓扑, 其平均度值在 2~3 之间, 是大多数节点度为 2 的较均匀网络. ARPA 网络对于移除一个节点的随机故障和蓄意攻击, 都不会导致网络不连通, 表明 ARPA 网络鲁棒性很高. 一般情况下, 我们仅考虑移除一个节点的情况, 因为在大多数网络中同时有两个或多个节点失效的概率相当小. 图 3b 是与 ARPA 网络同规模的基于圈结构构造的网络拓扑图, 简称为圈图, 表 2 显示 ARPA 网络的相关指标.

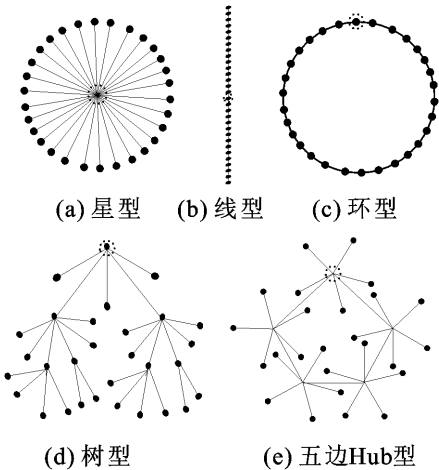
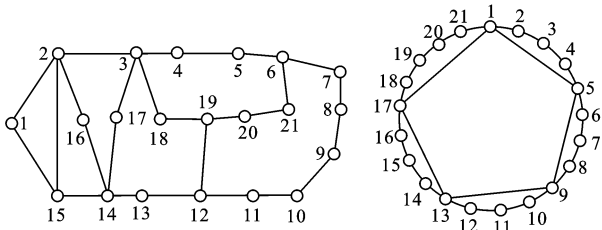


图 2 典型网络拓扑结构

存适应性 Γ_{wor}). 在连通的网络拓扑图中, η_{RE} 与常用于衡量网络传输性能的指标 L 的测量结果一致, 表明星型结构的传输性能最优, 线型结构最差. 在移除各网络拓扑中一个重要节点(如图 2 所示典型拓扑图中虚线圈内的节点)致使网络被分割的情况下, 如表 1 中第 4 列所示, 仅用指标 L_{max} 的变化来反映各网络拓扑中传输性能的变化具有局限性. 指标 S 也仅能体现各网络拓扑被分割得到的最大连通子图的规模, 而剩余结构被分割的情况则体现不出来. 根据



(a) ARPA 网络拓扑图 (b) 圈图

图 3 ARPA 网络拓扑图及其圈图

表 1 图 2 中典型网络拓扑的特性及生存适应性指标比较

拓扑结构	L	η_{RE}	L_{max}	S	R_{ave}	R_{wor}	Γ_{ave}	Γ_{wor}
星型	1.933	1.000 0	∞	1	0.902 2	0.000 0	0.709 4	0.000 0
线型	10.333	0.387 3	5.333	15	0.622 2	0.450 6	0.400 2	0.393 1
树型	3.497	0.661 2	2.436	13	0.850 1	0.342 5	0.589 8	0.308 5
环型	7.759	0.424 8	10.000	29	0.933 3	0.933 3	0.572 4	0.788 9
五边 Hub 型	2.908	0.741 8	2.020	24	0.883 5	0.634 5	0.630 3	0.562 3

表 2 ARPA 网络的相关指标

拓扑结构	η_E	η_{RE}	E_{ave}	E_{wor}	R_{ave}	R_{wor}	Γ_{ave}	Γ_{wor}
ARPA	0.388 6	0.709 6	0.378 3	0.346 0	0.904 8	0.904 8	0.797 8	0.850 2

3.3 网络生存适应性的改善

网络生存适应性指标不仅能有效度量不同网络结构在不同环境下的生存适应性,还能在网络结构的优化和重构提供指导.对已存在的网络拓扑结构生存适应性的改善,可以考虑添加边、重连边等网络拓扑重构机制^[5,11].本节考察在可用资源受限的情况下,随机添加边、最低节点度优先添加边和优先配置节点保护圈3种拓扑重构机制对改善网络生存适应性的效力.随机添加边机制是指网络图中随机选取2个不连通节点添加边;最低节点度优先添加边机制是指优先在网络图中节点度最低的不连通节点之间添加边,若存在2个以上的最低节点度,则从其中随机选取;优先配置节点保护圈机制是指优先选取网络图中对所有候选节点保护贡献效率最大的边进行配置.为使仿真环境更接近于实际的 Internet,使用网络拓扑生成器 NEM(network manipulator)^[12]生成路由级的网络拓扑图,如图4所示.

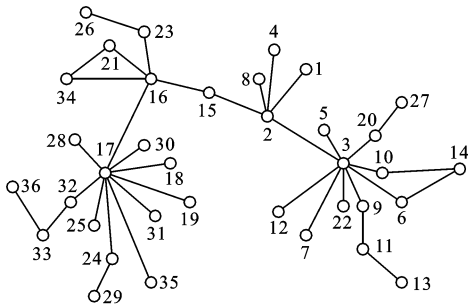
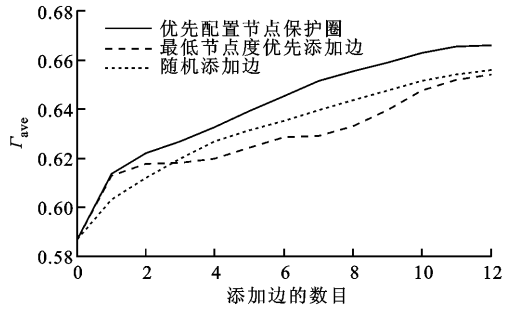


图4 路由级网络拓扑图

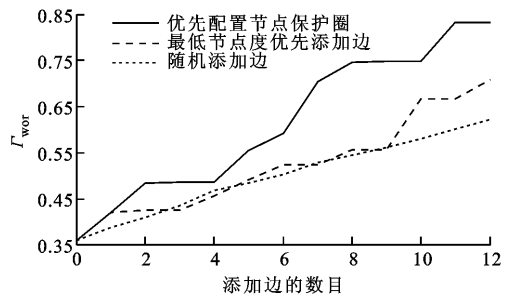
3种拓扑重构机制对网络生存适应性的影响如图5所示,在添加边数目相同的情况下,优先配置节点保护圈机制不论是在平均情况下还是最坏情况下,对网络拓扑生存适应性的改善都要优于随机添加边和最低节点度优先添加边的机制.分析其原因,优先配置节点保护圈机制不仅优先考虑在节点度低的不连通节点间添加边以均衡网络度的分布,而且还从共享资源角度,尽可能提高添加边的贡献率来优化边的配置.由此可见,在资源受限的情况下,提高网络拓扑中度分布的均匀性是改善已存在网络拓扑生存适应性的有效措施.

4 结论

结构决定功能是系统科学的基本观点,网络结构的生存适应性是保证网络系统功能可生存的基础.与采用单一(独立)指标或多个指标(但多指标在评估过程中仍然是孤立的)的评估方法不同,本文提出了一种联合网络效率、网络鲁棒性、网络结构冗余



(a)3种拓扑重构机制在平均情况下对网络生存适应性的影响



(b)3种拓扑重构机制在最坏情况下对网络生存适应性的影响

图5 3种拓扑重构机制对网络生存适应性的影响

性和环境因素、多指标优化网络生存适应性的评估方法,该方法能适应环境的变化,动态地度量不同网络拓扑的生存适应能力.实验结果表明:①联合环型和星型结构优势的 Hub 型拓扑结构的生存适应性比较高;②节点度分布较均匀的 ARPA 网络的生存适应性比较优;③提高网络拓扑度分布的均匀性是改善网络拓扑生存适应性的有效措施.

在下一步的工作中,我们将把生存适应性的概念、评估方法应用到带权网络图中,进而度量网络路由方案、网络资源分配方案等;鉴于网络拓扑生存适应性的评估结果,进一步研究如何改善网络的生存适应性,在网络拓扑层和资源管理层采用何种重构策略,能有效地提高网络生存的适应能力.网络不可能百分之百地安全,对网络生存适应性进行分析和评估,对于改进网络系统设计、实现网络重构以及提高网络适应环境的生存能力具有重大的指导和现实意义.

参考文献:

- [1] 新华社. 国家中长期科学和技术发展规划纲要. (2006-2020年) [EB/OL]. (2006-02-09) [2010-03-10].

- http://www.gov.cn/jrzg/2006-02/09/content_183787.htm.
- [2] BRODY K B. ENG/EFRI FY07 awards announcement [EB/OL]. (2007-08-28) [2010-03-10]. <http://www.nsf.gov/eng/efri/fy07awards.jsp>.
- [3] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 406(7): 378-382.
- [4] VENKATASUBRAMANIAN V, KATARE S, PATKAR P R et al. Spontaneous emergence of complex optimal networks through evolutionary adaptation [J]. Computers and Chemical Engineering, 2004, 128(9): 1789-1798.
- [5] SEKIYAMA K, ARAKI H. Network topology reconfiguration against targeted and random attack [C] // Proceedings of International Workshop on Self-Organizing Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 119-130.
- [6] 李黎,管晓宏,蔡忠闽,等. 可重构网络系统的模型及体系结构[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 4(4): 637-641.
- LI Li, GUAN Xiaohong, CAI Zhongmin, et al. Reconfigurable network model and architecture [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2009, 4(4): 637-641.
- [7] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 1版. 北京:清华大学出版社, 2006:18-36.
- [8] FRANK H, FRISCH I. Analysis and design of survivable network [J]. IEEE Trans Communication Technology, 1970, 18(5): 567-662.
- [9] 余新,李艳和,郑小平,等. 基于网络性能变化梯度的通信网络节点重要程度评价方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(4):541-544.
- YU Xin, LI Yanhe, ZHENG Xiaoping, et al. Node importance evaluation based on communication network performance grads [J]. Journal of Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2008, 48(4): 541-544.
- [10] 黄海滨,杨路明,王建新,等. 基于复合参数的蛋白质网络关键节点识别技术[J]. 自动化学报, 2008, 34(11):1388-1395.
- HUANG Haibin, YANG Luming, WANG Jianxin, et al. Identification technique of essential nodes in protein networks based on combined parameters[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(11):1388-1395.
- [11] BEYGELZIMER A, GRINSTEIN G, LINSKER R, et al. Improving network robustness by edge modification [J]. Physica: A, 2005(357): 593-612.
- [12] 张冬艳,胡铭曾,张宏莉. 基于测量的网络性能评价方法研究[J]. 通信学报, 2006, 27(10):74-79.
- ZHANG Dongyan, HU Mingzeng, ZHANG Hongli. Study on network performance evaluation method based on measurement [J]. Journal on Communications, 2006, 27(10):74-79.

[本刊相关文献链接]

- 多 P2P 覆盖网络的带宽分配方法. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 5-8.
- 面向信息系统的生存性恢复机制. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 18-22.
- 无线局域网自适应安全管理框架及其应用. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 34-38.
- 网络结构鲁棒性指标及应用研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 93-7.
- 内容寻址网络的 P2P 语义 Web 服务组合系统架构. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 6-10.
- 一种支持大规模应用层组播的混合拓扑覆盖网络. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 11-14.
- 一种适于主-从模式网络计算的事件驱动架构. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 39-43.
- 自适应滤波实时网络流量异常检测方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 1-5.
- 基于隐马尔可夫模型的无线局域网媒体接入控制层入侵检测方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 26-30.
- 网环步进码片上网络自适应路由算法设计. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 70-74.

(编辑 武红江)