

基于有限资源提升网络可生存性的拓扑重构方法*

李黎¹⁾²⁾† 郑庆华¹⁾ 管晓宏¹⁾

1) (西安交通大学电信学院, 智能网络与网络安全教育部重点实验室, 西安 710049)

2) (陕西师范大学计算机科学学院, 西安 710062)

(2013年12月2日收到; 2014年4月27日收到修改稿)

给定网络拓扑结构和有限添加边资源, 如何优化配置添加边使重构后的网络拓扑结构具有最优可生存性是非常有价值的研究问题. 本文首先明确网络可生存性的量化评估指标, 以移除节点后网络结构的鲁棒性和有效性为优化目标, 提出网络拓扑重构优化问题的建模与分析方法. 同时在给定资源代价的约束下, 为实现添加边资源配置效率的最大化, 提出优先配置节点加强保护圈的启发式算法. 仿真实验表明, 该算法在有限资源约束的随机局部故障和选择性攻击环境中, 能兼顾改善网络鲁棒性和传输效率, 有效提升网络结构的可生存性.

关键词: 鲁棒性和有效性, 网络拓扑重构, 有限资源配置, 优化模型

PACS: 02.10.Ox, 01.78.+p, 88.05.Lg

DOI: 10.7498/aps.63.170201

1 引言

网络信息基础设施像交通运输、电力设施等一样已成为国家基础设施, 但在运行中经常会受到干扰或破坏, 造成基础设施的可用性和生存性出现问题. 因此, 网络信息基础设施适应环境变化、抵御攻击破坏的可生存能力, 已逐步成为人们关注的焦点. 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安全性和可靠性提出了更高要求, 也成为公共安全领域研究的重要课题. 网络遭遇故障或攻击相当于从网络中移除节点和边, 这通常会影响到网络传输和网络中节点间的连接程度, 甚至导致本来连通的网络不再连通. 仅考虑反映网络传输性能的效率指标或反映网络连通情况的鲁棒性指标, 并不能全面反映网络性能的变化. 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(scale-free)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选择性攻击, 网络就会显得异常脆弱^[1].

改造原有网络结构提升网络可生存性的方法很多^[2-12], 其中, 基于添加边的网络拓扑重构方法受到很多关注^[2-9]. 基于节点度信息的添加边方法, 因为算法实现简单, 在现有添加边方法中应用广泛^[2-4,6]. 文献^[2]讨论了随机添加边(random addition, RA)和最低度优先添加边(lowest degree preference addition, LDP)方法, 文献^[3]中仿真实验结果表明LDP方法能显著提升无标度网络在选择性攻击下的鲁棒性, 文献^[4]提出了一种依概率优先添加边(degree probability preference, DPP)方法. 文献^[5]探讨了通过添加最少数目的边最大化代数连通度的拓扑重构方案, 提到了随机且最低度优先添加边(random and lowest degree preference addition, RLP)方法. 与RLP方法类似, 文献^[6]中提到了随机且最高度优先添加边(random and highest degree preference addition, RHP)方法. 为兼顾改善网络鲁棒性和有效性, 同时考虑到

* 国家自然科学基金(批准号: 61303092, 61221063, 61173112, 61173190)、教育部创新团队发展计划(批准号: IRT13035)、陕西省自然科学基金基础研究(批准号: 2014JQ8305)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: GK201401002)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lili@snnu.edu.cn

获取节点度信息的简单特点, 文献[7]中提到了一种基于节点度适应性的优先添加边 (degree-fitness based preference addition, DFP) 方法. 对现有这些基于添加边的拓扑重构方法进行分析, 文献[2, 3, 5, 6]侧重于改善网络结构的鲁棒性, 并没有考虑对网络传输效率的优化; 文献[2—4, 6, 8]在添加边改造网络结构的过程中, 并没有考虑资源/成本的约束, 这与现实不符. 总体来说, 现有添加边方法在动态网络环境中提升网络可生存性的能力有限. 因此, 在有限资源约束下, 兼顾网络鲁棒性和有效性, 提升网络可生存性的拓扑重构方法研究仍是非常具有挑战性的课题.

本文提出基于有限添加边的网络拓扑重构 (network topology reconfiguration with limited link addition, NTRLA) 优化问题, 与静态网络中通过添加有限数目的边使网络直径相对最小的添加边问题[13]不同. NTRLA 优化问题考虑在动态网络环境下, 如何配置有限添加边以改造原有网络拓扑结构, 使重构后的网络结构具有兼顾网络鲁棒性和有效性的最优可生存性. 在文献[13]中, Schoone 等已证明添加边问题是 NPC 问题, 该问题的研究结果将为我们 NTRLA 优化问题的研究提供借鉴. 为实现 NTRLA 优化问题的近似求解, 我们研究兼顾改善网络鲁棒性和有效性的近似最优算法. 在 WDM 网状光网络中引入了 p-Cycles 法[14], 其中节点环绕 p-Cycles 可保护所有圈上边、跨接边、所环绕的特定节点和通过特定节点的双向流. 但有限资源约束下, 配置节点环绕 p-Cycles 仍存在着资源需求量大 (其结构特点决定仅适用于网状、格状等稠密网络) 和保护能力有限 (仅能实现对环绕节点的有效保护, 但对于多个节点同时失效却无能为力) 的问题. 而本文提出的节点保护圈结构可配置到任意网络拓扑结构, 特别是, 节点加强保护圈不仅能有效保护单个节点失效, 也能有效保护局部多个节点同时失效.

本文创新性的工作体现在: 1) 为有效保护单个和多个相邻节点同时失效, 提出节点保护圈 (node-protecting cycles, 简称 np-cycles) 和节点加强保护圈 (enhanced np-cycles, 简称 enp-cycles) 结构. 2) 鉴于 NTRLA 问题是一个 NP-hard 问题, 为更有效地求解该问题, 设计一种联合考虑网络鲁棒性、传输有效性和资源共享的优化配置节点加强

保护圈 (preferential configuration enhanced node-protecting cycles, PCNC) 的启发式算法.

2 网络拓扑重构模型

2.1 量化评估指标

可生存的网络拓扑结构评价涉及到网络的连通鲁棒性和传输有效性, 单独用某一方面指标来度量都是不完备的[15—20]. 本文提出一种联合考虑网络结构鲁棒性、传输有效性以及网络环境变化的网络可生存性指标, 以此来刻画节点移除对网络传输效率和网络连通性的影响, 从而反映网络拓扑结构适应环境变化的生存能力.

假设 $G = (V, E)$ 是由 $|V| = n$ 个节点和 $|E| = um$ 条边组成的网络图. 图 G 中 w_{ij} 表示节点 i 和 j 之间边权的值, $w_{ij} = \infty$ 表示节点 i 与 j 不相邻. 网络中边权用来表示节点之间信息流通的难易程度, 数值越小, 信息流通越容易, 网络传输效率越高[15]. 节点距离是指两节点之间所有路径边权之和的最小值, 用 d 表示. 如果节点 i 和 j 之间不存在路径, 则 $d(i, j) = \infty$. 当网络为无权网络时, d 表示两节点之间最短路径上的边数. 本文中, 网络有效性指标 η^E 定义为

$$\eta^E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d(i, j)}, \quad (1)$$

其中, $d(i, j) = \min \left\{ \sum_{ij} w_{ij} \right\}$, 对 $d(i, j)$ 取倒数避免了节点对在不连通网络中节点距离为 ∞ 的情况.

本文中定义移除节点 k 的网络鲁棒性指标 η_k^R 为

$$\eta_k^R = \frac{1}{(n-1)(n-2)} \sum_{j \neq i \in G_k} r_{ij}, \quad (2)$$

其中, G_k 表示在 G 中移除节点 k 后的网络子图, r_{ij} 表示图 G_k 中节点 i 和 j 的连通参数, 若节点 i 到 j 一步可达, $r_{ij} = 1$, 否则, $r_{ij} = 0$. 则给定网络图 G 的网络鲁棒性指标 η^R 可定义为

$$\eta^R = \sum_{k \in G} p_k \cdot \eta_k^R, \quad (3)$$

其中, p_k 表示节点 k 被移除的概率, 令 $p_k = 1/n$ 表示随机故障, 即在图 G 中移除任意节点的概率是相同的. 在选择性攻击中, 节点度值越大其被移除的概率也就越大. 网络鲁棒性指标可刻画出不同攻击方式下, 网络整体连通性受到的破坏情况, 克服了

常用的最大连通子图指标不能描述剩余网络结构连通状况的特点^[16].

动态网络环境中,网络结构是变化的,网络可生存性指标应具有动态性^[17,18].本文中联合考虑网络鲁棒性、传输有效性以及网络环境变化的网络可生存性指标定义为

$$\Gamma = \alpha \cdot \eta^R + (1 - \alpha) \cdot \eta^E, \quad (4)$$

其中, α 为权重系数,受网络环境变化影响,取值范围 $[0, 1]$. 当 $\alpha = 0$ 时,表示网络生存追求最高网络传输效率而不考虑网络鲁棒性;当 $\alpha = 1$ 时,表示网络生存完全依赖于网络鲁棒性而不考虑网络传输效率的影响. 对于其他 α 取值,表明网络适应环境的可生存能力不仅依赖于网络鲁棒性也依赖于网络传输效率. 网络可生存性指标通过调整 α 取值来均衡网络生存对网络鲁棒性和网络有效性的依赖,适应动态网络环境变化进而对网络可生存性进行评估.

2.2 问题建模

本文提出的 NTRLA 优化问题可形式化描述为: 给定网络拓扑图 $G(V, E)$ 和正整数 q , 如何合理配置有限添加边集 $E' (|E'| \leq q, E' \cap E = \emptyset)$, 使得重构后的图 $G'(V, E \cup E')$ 具有最优网络可生存性. 其中, 网络可生存性用指标 Γ 来衡量, 即使 $\Gamma(G')$ 有最大值.

在有限添加边资源约束下, 建模 NTRLA 优化问题

$$\begin{aligned} & \text{Max } \Gamma(G'(V, E \cup E')), \\ & \text{s.t. } E' = \{(u_1, v_1), (u_2, v_2), \dots, (u_q, v_q)\}, \\ & u_i, v_i \in V, u_i \neq v_i, (u_i, v_i) \notin E, i \in [1, q], \end{aligned}$$

其中, 可生存性指标 $\Gamma (0 < \Gamma \leq 1)$ 量化刻画了节点移除对网络连通鲁棒性和传输有效性的影响, 反映网络系统维持网络功能、适应环境变化的能力.

下面通过一简单示例来描述 NTRLA 问题. 如图 1 所示, $E' = \{(1, 6), (1, 7), (1, 8), (2, 9), (3, 9), (4, 6), \dots\}$ 表示可利用的添加边集. 从图 1(a) 中看出, 移除节点 5 或 7 会使得图不连通, 而在图 1(b) 中通过添加一条边 $(2, 9) \in E'$ 之后, 节点 5 或 7 的移除不再会使图 1(a) 不连通, 并且移除任意单个节点对图中其他节点距离影响也不再明显. 相比于其他添加边方法, 优先添加边 $(2, 9)$ 既不会改变图

中节点度的最大值, 也能最大程度地改善单个节点和局部相邻多个节点移除情况下的网络可生存性. 图 1 展示了仅通过添加一条边 ($q = 1$) 优化给定网络拓扑图的示例.

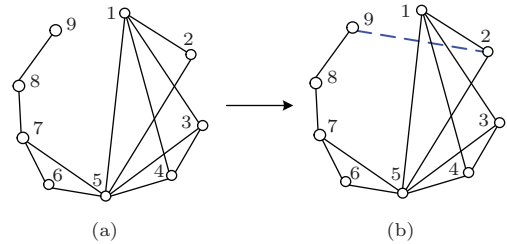


图 1 添加一条边优化网络拓扑结构图的示例 (a) 初始图; (b) 一条合适的添加边

2.3 节点加强保护圈结构

针对节点移除对网络连通性和传输效率的影响, 本文提出节点保护圈和节点加强保护圈结构. 在网络图 $G(V, E)$ 中, B_k 表示节点 k 的邻居节点集, 即 $B_k = \{u | (u, k) \in E\}$. 下面给出节点保护圈和加强节点保护圈的相关定义.

定义 1 节点保护圈, 圈 x_k 被称为节点 k 的保护圈是指节点 k 和它的邻节点 $u, v (u, v \in B_k)$ 都在圈 x_k 上, 那么当节点 k 被移除时, 其邻节点 u, v 之间就存在一条不经过该节点的相连路径.

定义 2 圈阶数 (np-cycles order, CO), 圈 x_k 的阶数定义为 $CO(x_k) = \sum_{u \in B_k} \varepsilon_{x_k}^u$, 其中, $\varepsilon_{x_k}^u$ 表示节点 k 的邻节点 u 是否在保护圈 x_k 上, 如果节点 u 在保护圈 x_k 上, 则 $\varepsilon_{x_k}^u = 1$, 否则 $\varepsilon_{x_k}^u = 0$.

当统计圈 x_k 阶数时, 如果节点 k 的邻节点 u 在圈 x_k 上出现不止一次, 则计算 $CO(x_k)$ 指标时只统计一次. 节点 k 的保护圈 x_k 称为合格节点保护圈, 当且仅当圈 x_k 阶数为 $|B_k|$, 即 $CO(x_k) = |B_k|$.

定义 3 圈效率 (np-cycles efficiency, CE), 圈 x_k 的效率定义为 $CE(x_k) = \sum_{u \in B_k} \varepsilon_{x_k}^u / L_{x_k}$, 其中, L_{x_k} 表示保护圈 x_k 的长度, 即 x_k 上含有边的数目.

上述效率最高的合格节点保护圈仅能有效保护单个节点, 使该节点在被移除时对网络连通性和传输效率没有影响; 但对于节点和其邻节点同时被移除, 即多个节点同时失效的情况却无能为力. 为实现相邻多个节点同时失效的有效保护, 可进一步定义节点加强保护圈 (enhanced node-protecting cycles, 简称 enp-cycles), 使其不仅能够有效保护单

个节点失效,也能有效保护多个相邻节点的同时失效.

定义 4 节点加强保护圈,圈 x_k 被称为节点加强保护圈,当且仅当 x_k 上节点 k 的任意邻节点对 u, v 之间都存在一条不经过节点 k 和其他邻节点的路径.

定义 5 最优节点保护圈 (local optimum np-cycles), 圈 x_k 被称为最优节点保护圈,当且仅当 x_k 是节点加强保护圈,并且满足节点 k 的任意邻节点对之间都通过直接边相连.

图 2 描述了图 1 中存在最优节点保护圈的示例. 在图 2 (a) 中, 节点 2 和 6 的最优节点保护圈如蓝色和桔色粗线所示, 图 2 (b) 中节点 3 和 4 的最优节点保护圈如图所示, 其中加粗线为节点 3 和 4 的最优节点保护圈的重叠部分. 最优节点保护圈不仅能有效保护单个节点失效, 而且对于局部相邻多个节点的同时失效也能起到保护作用. 此外, 最优节点保护圈还能使网络上流经该保护节点的数据流都可以被其邻节点的跨接链路保护.

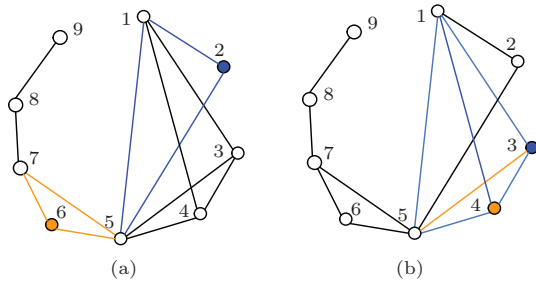


图 2 最优节点保护圈示例 (a) 包含 3 个节点; (b) 包含 4 个节点

定理 1 网络可生存性指标 $\Gamma(G)$ 会随着图 G 中节点保护圈阶数的增加而单调增加.

证明 令 x_{k_i} 是图 $G(V, E)$ 中节点 k 的保护圈, 其阶数 $CO(x_{k_i}) = r$, 表明 x_{k_i} 上含有 r 个 k 的邻节点. 假设存在节点 b 和 u , 节点 b 是 k 的邻节点, 即 $b \in B_k$, 则有 $d_G(k, b) = 1$ (即在图 G 中, 节点 k 和 b 之间的最短路径长度为 1). 节点 u 和 k 是可达的, 并且节点 u 和 b 之间不存在不经过节点 k 其他最短路径, 令 $d_G(u, b) = d_G(u, k) + 1$ (其中, 节点 u 可以是 k 的邻居节点). 因此, 对于节点 b 来说, 如果其只与节点 k 相连, 则 $d_{G_k}(v, b) = \infty, \forall v \in V - \{k\}$.

令 $l \notin E$ 是一条添加边, 使得生成图 $G'(V, E \cup \{l\})$ 在圈 x_{k_i} 基础上配置一个新的含有节点 b 的圈 $x_{k_{i+1}}$. 因此, 在图 G' 中存在一个用于保护节点 k 阶数为 $r + 1$ ($CO(x_{k_{i+1}}) = r + 1$) 的节点

保护圈, 它含有 $r + 1$ 个 k 的邻节点. 为证明定理 1, 必须要说明 $\Gamma(G) \leq \Gamma(G')$ 成立.

在图 G' 中, 因为节点 u 和 b 之间存在一条不经过节点 k 的路径, 所以 $d_{G'_k}(u, b) \leq d_{G_k}(v, b) = \infty, \forall u \in V - \{k\}$ 成立. 根据可生存性指标定义, $\Gamma(G) \leq \Gamma(G')$ 成立.

综上所述, 定理 1 成立.

定理 2 若网络拓扑图 G 中, 任意节点都至少有一个合格节点保护圈, 则 G 是 2-连通图.

证明 若图 G 中任意节点都有一个合格节点保护圈, 据合格节点保护圈的定义可知, G 中的每一节点都和它所有的邻居节点共圈. 也就是说, G 中任 2 个节点共圈. 根据 k 连通图性质, 图 G 是 k 连通图当且仅当 G 中任 k 个节点共圈. 可知定理 2 成立.

定理 3 若网络拓扑图 G 中, 任意节点都具有最优节点保护圈, 则 G 是完全图.

证明 根据最优节点保护圈的定义可知定理 3 成立.

3 网络拓扑重构算法

3.1 基本思想

为求解 NTRLA 优化问题, 本文提出优先配置节点加强保护圈 (preferential configuration enhanced node-protecting cycles, PCNC) 的拓扑重构方法. PCNC 方法的基本思想是通过添加边贡献率指标优先地选择高贡献率的添加边以配置有效地节点加强保护圈以保护网络中更多的节点和边, 使网络在移除节点和边的情况下能维持网络功能的鲁棒性和有效性.

在 PCNC 方法实现过程中, 选择添加边以优化配置节点保护圈有三方面的重构目标. 其一, 改善网络在随机故障和选择性攻击情况下的网络鲁棒性; 其二, 通过缩短网络中节点之间通信距离改善网络传输效率; 其三, 降低网络资源成本. 为实现这些目标, PCNC 方法实现过程的基本思路如下:

1) 改善网络鲁棒性

鉴于选择性攻击中, 高度值节点及连接边容易成为目标对象, 而低度值节点及连接边更容易生存下来, 在 PCNC 方法实现中, 我们更倾向于优先添加那些连接低度节点的边. 此外, 在低度值节点之

间添加边也能有效地改善网络中度分布的不均匀性, 进而改善网络鲁棒性.

2) 改善网络传输效率

基于网络中节点之间信息总是沿着最短路径来传播, 我们选择配置具有高效率的节点加强保护圈. 节点加强保护圈效率越高, 其被保护节点的邻居节点之间的传输路径越短, 也就意味着节点加强保护圈的能力越强.

3) 降低网络资源成本

在资源有限情况下, 通过资源共享可提高重构过程中添加边资源的利用率. 定义添加边贡献率指标来衡量哪些边能被更多的节点加强保护圈所包含并共享, 具有高的资源利用率.

3.2 添加边贡献率指标

给定网络拓扑图 $G(V, E)$ 和添加边集 E' . 其中, $k \in V$, 用 v_k 表示节点 k 的权值, 用于衡量移除节点 k 对网络性能的影响. 为简化问题, 在本文中所有节点权值是相同的. 定义添加边 $l \in E'$ 的贡献率指标为 $\text{Ctr}(l)$, 用于衡量边 l 对于配置有效保护圈的贡献价值, 即体现对含有边 l 的保护圈性能提高所贡献的价值.

$$\text{Ctr}(l) = \sum_{k \in V} v_k \cdot W(\pi_k^l), \quad (5)$$

其中, π_k^l 表示含有边 l 用于保护节点 k 的保护圈集合; $W(\pi_k^l)$ 表示含有边 l 用于保护节点 k 的保护圈上边的总权值, 其具体定义如下:

$$W(\pi_k^l) = \sum_{i \in \{1, 2, \dots, |\pi_k^l|\}} \sum_{e \in \pi_{k_i}^l} w_e, \quad (6)$$

其中, $|\pi_k^l|$ 表示集合 π_k^l 中含有保护圈的数目, $\sum_{e \in \pi_{k_i}^l} w_e$ 表示在保护圈 $\pi_{k_i}^l \in \pi_k^l$ 上所有边权的累加和.

添加边贡献率指标的定义表明, 添加边贡献率指标越高, 该添加边对优化配置节点加强保护圈的贡献价值越多. 因此, 可基于 (5) 式定义优先选择添加边的概率, $\text{Ctr}(l)/c(l)$ 指标能反映优化配置节点加强保护圈的添加的边优先权顺序.

3.3 模型构造

为实现节点加强保护圈的优化配置, 根据添加边贡献率指标建立基于 PCNC 方法的 NTRLA 优

化问题模型,

$$\text{Max} \sum_{l \in E'} \frac{\text{Ctr}(l)}{c(l)}, \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \sum_{l \in E'} c(l) \leq C_0, \quad (8)$$

其中, $c(l)$ 表示选择添加的边 l 的代价, $\text{Ctr}(l)/c(l)$ 表示优化配置边 l 的贡献效率, C_0 是给定的添加边约束.

基于 PCNC 方法的 NTRLA 优化问题模型形式化地描述了在确保添加边总代价满足给定资源约束条件下, 为最大化添加边资源贡献效率, 应优先选择添加边贡献率大并且添加边资源代价小的连接边.

3.4 PCNC 算法

PCNC 算法建立在基于 PCNC 方法的 NTRLA 优化问题模型基础上, 同时考虑了基于局部节点度信息的添加边方法的简单性和高效性.

一般来说, 网络拓扑图中节点度小于 2 的节点处于网络边缘, 移除这些节点对网络功能影响不明显. 因此, 在 PCNC 算法实现过程中不考虑配置节点度小于 2 的那些节点的加强保护圈. 此外, 在算法实现中需要明确可利用添加边的资源集、添加边的代价以及计算添加边贡献率指标过程中用到的相关参数等.

PCNC 算法基本步骤如下:

步骤 1 首先, 在图 $G(V, E)$ 中添加所有可利用的边集 E' ($E' \cap E = \emptyset$), 形成扩展图 $G'(V, E + E')$, 生成图 G' 有可能是完全图. 图 G' 中任一条边 $e \in E \cup E'$ 都赋有一定的权值表示该边结构属性或负载情况. 在本文 PCNC 算法实现中, 边权的值定义为

$$w_e = \begin{cases} 0, & e \in E, \\ \text{weight}(e), & e \in E', \end{cases}$$

其中, $\text{weight}(e)$ 是权值函数, 定义为直接边连接的两节点的度平均值倒数.

步骤 2 在图 G 中为保护节点集中的每个节点寻找局部的加强节点保护圈. 搜索算法首先从每个保护节点出发, 以此寻找该节点的邻节点间的最小权重路径, 次小权重路径, \dots , 然后将他各个邻节点间的路径顺次连接, 再与保护节点连起来构成保护该节点的加强保护圈集.

步骤3 计算添加的边 $l \in E'$ 的贡献率指标 $\text{Ctr}(l)$. 由于在步骤2)中, 节点 k 的加强保护圈不惟一并且含有添加的边 $l \in E'$ 不尽相同, 因此为了让有限添加边的利用率最大, 利用添加边贡献率指标衡量添加边对网络中需保护节点的加强保护圈构成的贡献价值.

步骤4 根据添加边贡献率指标值的高低, 优先选择高贡献率的可利用添加边配置节点加强保护圈以提高网络鲁棒性和有效性. 在一个具有 n 个节点 um 条边的网络拓扑图中添加一条边有 $\binom{n}{2} - um$ 中不同的方式. 对于更大的网络拓扑图, 特别是稀疏图来说, 假设添加 q 条边, 则添加边的方案近似有 $\left(\binom{n}{2} - um\right)^q$ 种, 比较所有可能添加边方案, 从中选出最优添加边集合属于指数时间复杂度问题. 相比于完全遍历 NTRLA 优化问题的解空间具有指数时间复杂度, 本文提出的 PCNC 算法通过搜索保护节点的加强节点保护圈以实现网络拓扑结构的优化配置, 在统计加强节点保护圈时还可以根据其效率指标缩小搜索的解空间. 从上一节算法步骤可知, 整个算法的时间复杂度主要取决于求解节点对之间的最短距离, 由于 Dijkstra 算法的时间复杂度为 $O(n^3)$, 所以该算法在最坏情况下的时间复杂度为 $O(n^4)$.

4 仿真结果及分析

4.1 仿真环境和仿真目标

为验证 PCNC 算法有效性, 在给定网络拓扑图和有限添加边约束的情况下, 通过网络可生存性指标和常用拓扑结构特性指标来分析比较 PCNC 算法和典型添加边算法的重构性能. 典型基于节点度的添加边算法在相关工作有介绍, 如表 1 所列.

表 1 典型的基于节点度的添加边方法

LDP	最低度优先添加边
RLP	随机且最低度优先添加边
RHP	随机且最高度优先添加边
DPP	依概率优先添加边
DFP	节点度适应性优先添加边

在仿真实验中, 每条曲线值都表示运行 50 个轮次的平均值. 仿真主要目标包括:

1) 在动态网络环境中, 网络可生存能力对网络鲁棒性和有效性都有依赖且依赖程度不同. 基于网络可生存性指标并考虑权重系数 α 取不同值时不同添加边算法的性能变化趋势, 评估 PCNC 算法是否兼顾网络鲁棒性和网络有效性, 是否更适用于动态网络环境.

2) 在有限添加边资源约束下, 基于常用拓扑结构特性指标, 评估 PCNC 算法在动态网络环境中是否能有效改善网络鲁棒性和传输效率, 提升网络拓扑结构的可生存性.

4.2 基于 Internet 路由级拓扑的仿真结果

为使仿真环境更接近于实际 Internet, 使用网络拓扑生成器 NEM(network manipulator)^[21] 生成路由器级拓扑图, 如图 3 所示. 有限添加边约束是指对具有 n 个节点 um 条边的网络拓扑图通过添加边算法进行重构时, 添加边数目不超过图中可利用添加边总数 $\binom{n}{2} - um$ 的一定比例.

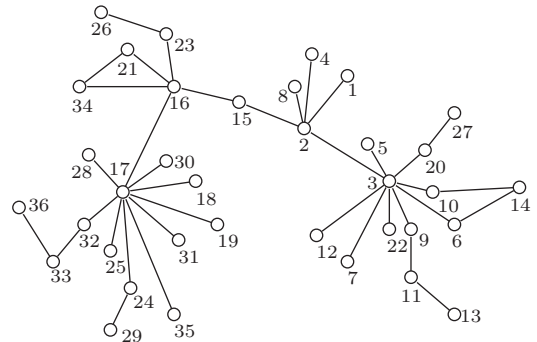


图 3 路由级网络拓扑图

4.2.1 基于网络可生存性指标的比较

在添加边数目约束下, 通过权重系数 α 取不同值比较 PCNC 算法和 LDP, RLP, RHP, DPP, DFP 算法提升网络可生存性的重构性能. 图 4 描述 α 取值为 0, 0.2, 0.5, 0.8 和 1 时, PCNC 与典型添加边算法关于网络可生存性指标随添加边数目增加而变化情况, 其中, 基于 PCNC 依次添加边集合为 $\{(13, 18), (1, 36), (4, 26), (8, 29), (19, 27), (5, 35), (14, 25), (7, 28), (12, 30), (22, 31), (18, 21), (18, 34)\}$. 从图中数据分析可知: 1) 当 $\alpha = 0$ 时, PCNC 算法性能仅优于 RLP, DFP 和 LDP 算法, 如图 4(a) 所示. 2) 当 $\alpha = 1$ 时, 在典型添加边算法中 DFP

算法性能较优, LDP 和 RLP 算法的性能优于 RHP 和 DPP 算法; 而 PCNC 算法与这些添加边算法相比较, 具有更明显的优势, 如图 4(e) 所示. 3) 随着 α 取值增大, RHP 和 DPP 算法的劣势越来越明显; RLP 和 LDP 算法的性能在逐步提高; 与 RLP

和 LDP 算法相比, DFP 算法的性能提高显著; 与其他添加边算法性能提高的趋势相比, PCNC 算法的性能提高更显著. 由此可看出, PCNC 算法不仅能够兼顾改善网络传输效率, 而且更适用于改善恶劣环境下的网络可生存性.

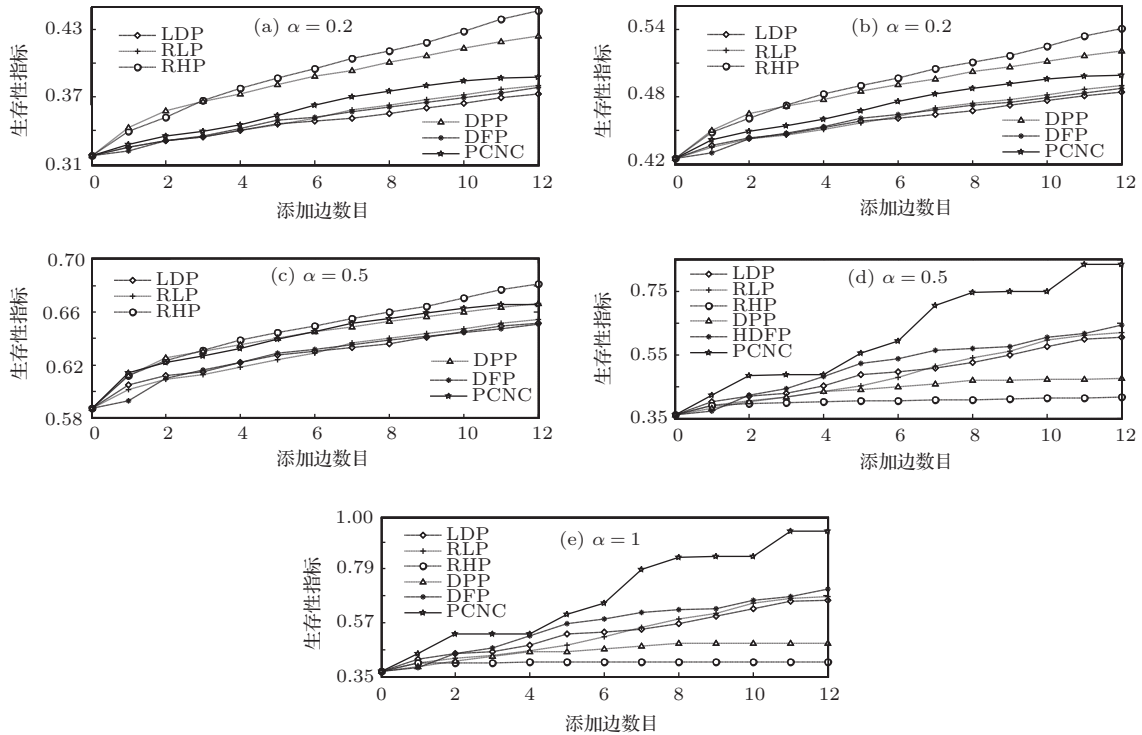


图 4 PCNC 与典型添加边算法关于网络可生存性指标比较

4.2.2 动态网络环境下基于常用拓扑结构特性指标的比较

在仿真试验中, 我们设计随机局部攻击和选择性攻击两种攻击方式. 随机局部攻击是指从网络中首先随机地移除一个节点, 依次随机移除的节点是上一次移除节点的邻节点; 选择性攻击是指把网络中节点度值高的节点依次移除. 基于常用拓扑结构特性指标: 最大连通子图规模和网络有效率, 分别记为 LCC 指标和 E 指标, 来比较分析网络拓扑结构在遭遇随机局部攻击和选择性攻击情形的网络性能变化. 考虑有限添加边数目约束, 我们讨论的拓扑重构图分别是基于 LDP, DPP 和 PCNC 算法对图 3 通过优先添加 6 条边后配置得到的.

图 5 描述了随着随机局部移除节点数目的增加, 原图和基于 LDP, DPP 和 PCNC 算法配置的重构图中 LCC 指标和 E 指标的变化情况. 从图 5(a) 可以看出, 与 LDP 和 DPP 重构图相比较, PCNC 重构图对随机局部移除多个节点的网络连通性的

改善有明显的优势; 在图 5(b) 中从 E 指标变化的整个趋势来看, 与图 5(a) 的情况类似, 图 5(b) 中 PCNC 对 E 指标曲线下下降延缓的优势也非常明显. 从图 5 可看出, PCNC 重构图对应的 LCC 和 E 指标值都明显高于典型的 LDP 和 DPP 算法, 由此可知, PCNC 算法在随机局部移除多个节点的情况下能有效改善网络的连通性和传输效率.

图 6 描述了随着选择性攻击中移除节点数目的增加, 原图和基于 LDP, DPP 和 PCNC 算法的重构图中 LCC 指标和 E 指标的变化情况. 其中, 在移除节点过程中若节点度值相同, 则在相同度值的节点集中随机选择下一节点的移除. 从图 6 可看出, 不论是对 LCC 指标的影响还是对 E 指标的影响, 与 LDP 和 DPP 算法相比, PCNC 算法都具有明显优势. 因此, 与典型的 LDP 和 DPP 算法相比, PCNC 算法在选择性移除多个节点的情况下对网络连通性和传输效率的改善也具有明显优势.

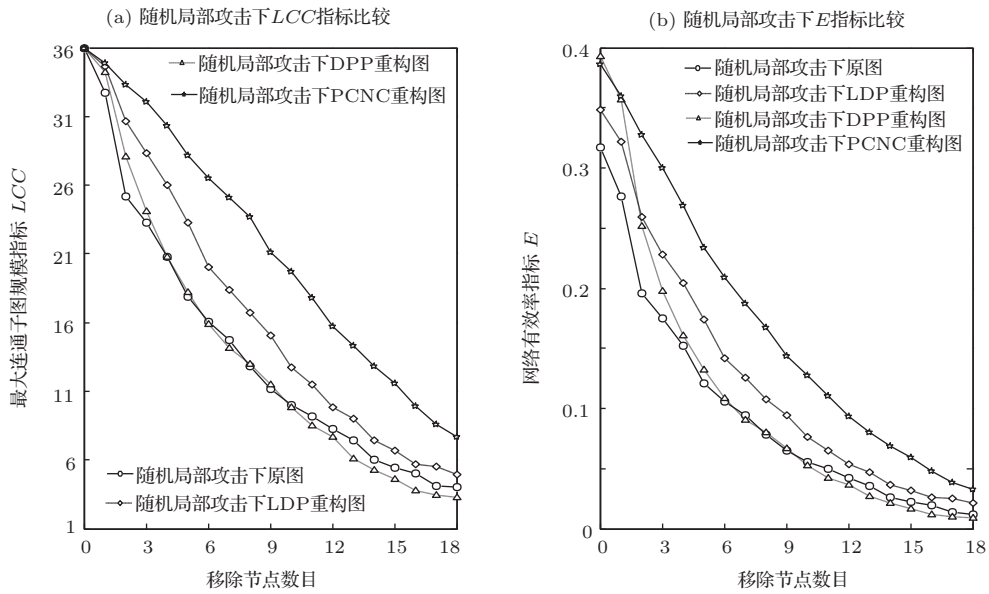


图5 随机局部攻击下原图与重构图LCC和E指标比较

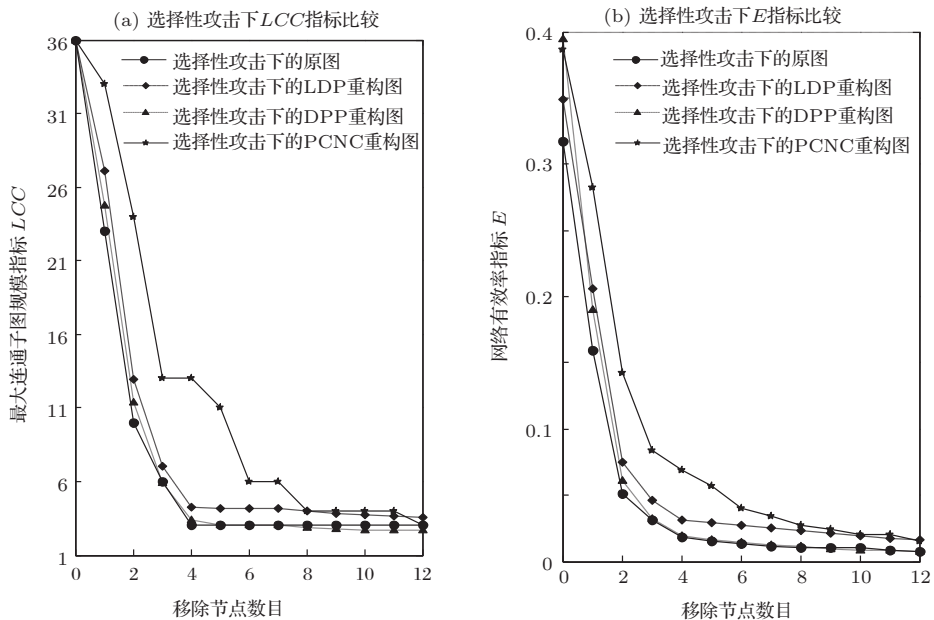


图6 选择性攻击下原图与重构图LCC和E指标比较

4.3 基于BA模型的仿真结果

为验证在有限资源约束下PCNC算法能有效改善网络鲁棒性和传输效率的结论,本节在基于BA模型生成的网络拓扑图上开展进一步的性能分析.为使得生成网络拓扑图的幂律指数满足2至3范围,我们对基本BA模型进行扩展,生成的算法如下:1)增长:初始网络 $m_0 = 2$,包含一条边.网络增长的过程分为两个阶段,第一个阶段 $m = 2$,第二个阶段 $m = 1$;2)优先连接:新节点与已存在节点的连接策略采用基本BA模型中与节点度成正

比的策略.基于该BA模型算法生成了一个包含80个节点90条边的网络拓扑图.在比较不同添加边算法生成重构图的性能时,考虑到有限添加边约束,统一添加边的数目不多于30条.

4.3.1 基于网络可生存性指标的比较

图7描述了权重系数 α 分别取值为0, 0.2, 0.5, 0.8和1时,PCNC与LDP, RLP, RHP, DPP, DFP这些典型添加边算法关于网络可生存性指标的比较.从图中数据分析可知:1)当 $\alpha \leq 0.5$ 时,基于BA模型的网络可生存性指标随添加边数目增加的

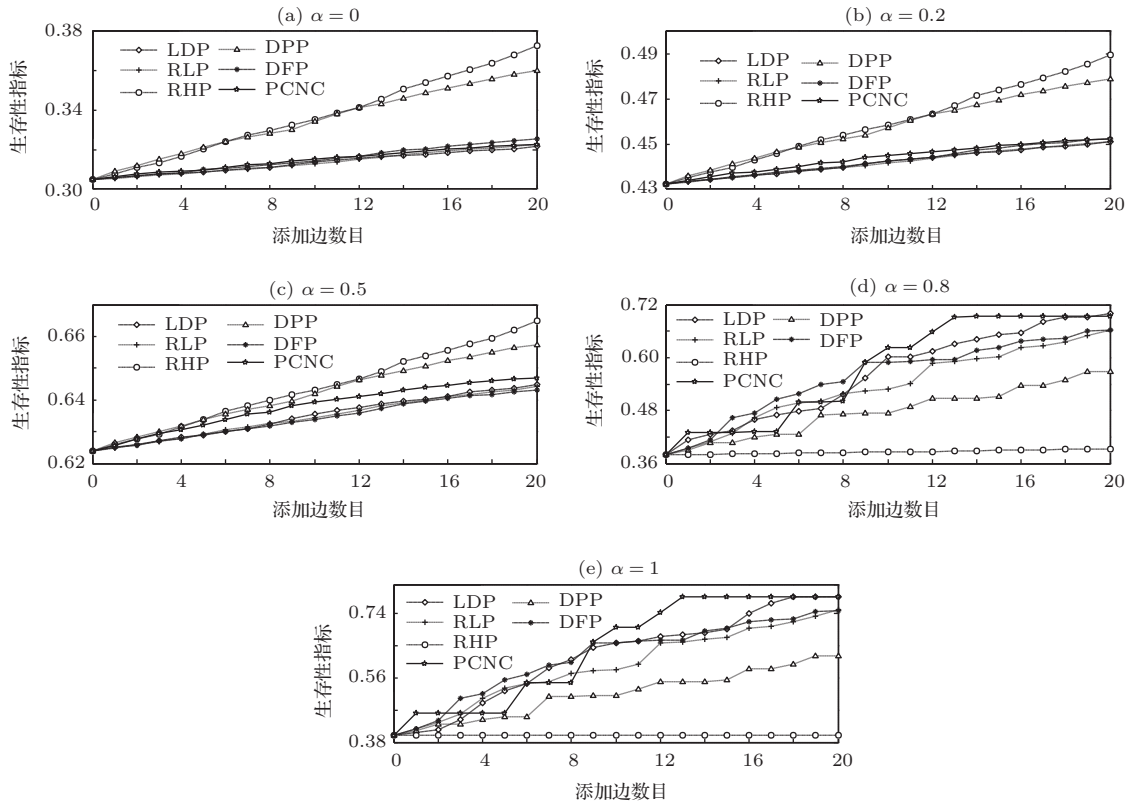


图7 PCNC与典型添加边算法关于网络可生存性指标比较

变化趋势与图4中的变化趋势相似; 2) 当 $\alpha = 0.8, 1$ 时, 与PCNC算法在图4中改善网络可生存性的优势相比, 基于BA模型的网络中PCNC算法与典型添加边算法相比较, 其性能优势不很显著, 如图7(d)和(e)所示.

4.3.2 动态网络环境下基于常用拓扑结构特性指标的比较

仿真实验中, 根据有限添加边数目的约束, 拓扑重构图分别是基于LDP, DPP和PCNC算法通

过优先添加30条边后配置得到的. 图8描述了随着随机局部移除节点数目的增加, 原图和基于PCNC, LDP, DPP算法配置的重构图中LCC指标和E指标的变化情况. 从图8(a)可看出, 与LDP和DPP的重构图相比较, PCNC重构图对网络连通性的改善具有明显优势; 与图8(a)所示的情况相比, 图8(b)中PCNC重构图对网络传输效率改善的优势不明显, 特别是在随机移除节点数目比较少的情况下. 从图8可看出, 在随机移除网络中节点

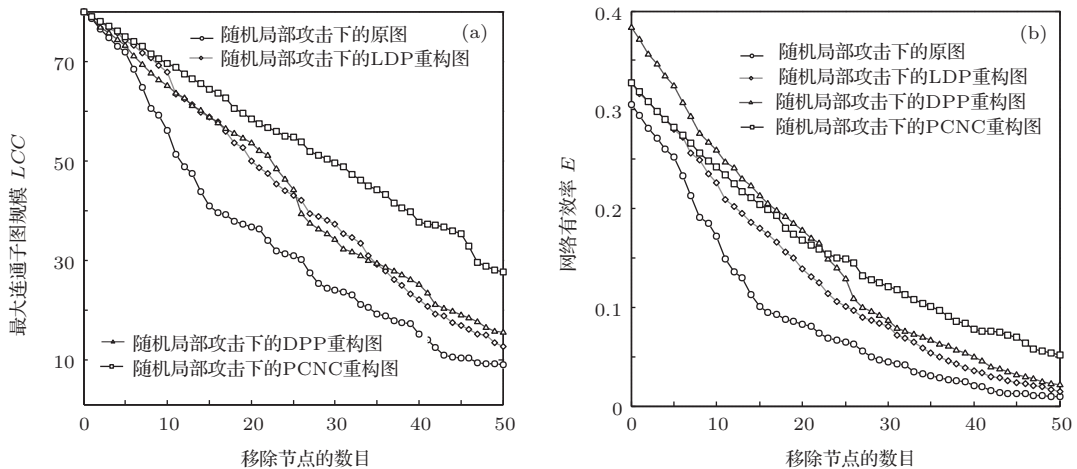


图8 随机局部攻击下原图与重构图LCC和E指标比较 (a) 最大连通子图规模LCC; (b) 网络有效率E

的过程中, PCNC 重构图对应的 LCC 指标和 E 指标值都明显高于原图, 由此可知, PCNC 算法在随机移除节点的情况下能有效改善网络的连通性和传输效率.

图 9 描述了随着选择性攻击中移除节点数目的增加, 原图和基于 PCNC, LDP, DPP 的重构图

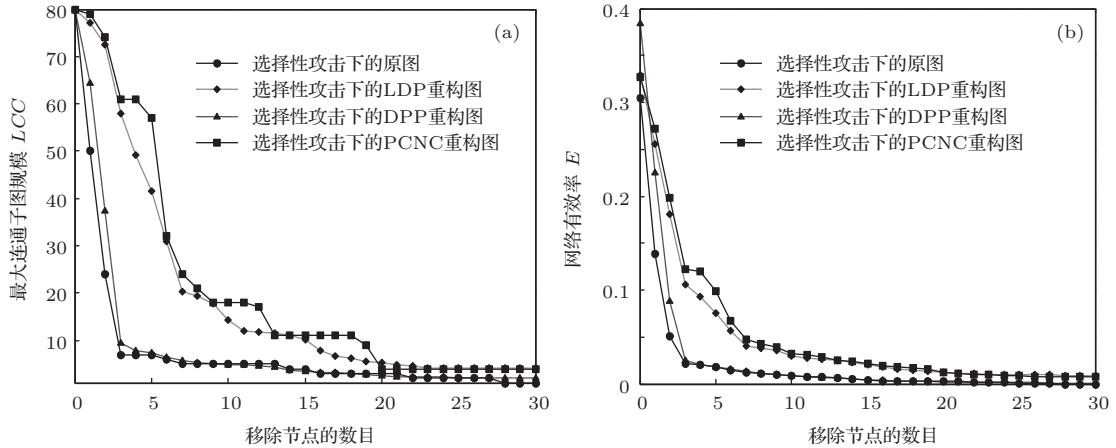


图 9 选择性攻击下原图与重构图 LCC 和 E 指标比较 (a) 最大连通子图规模 LCC ; (b) 网络有效率 E

5 结论与进一步工作

与现有添加边问题仅考虑静态网络中如何添加尽可能少的边而改善网络传输效率的目标不同, 我们提出的网络拓扑重构优化问题, 研究在动态网络环境中如何配置有限添加边资源以改造原有网络拓扑结构, 使重构的网络拓扑结构具有兼顾网络鲁棒性和传输效率的最优网络可生存性. 为提供失效节点和连接边的保护, 本文提出了节点保护圈和加强节点保护圈结构, 给出了相关基本定义以及理论基础. 为有效地量化评估不同网络拓扑重构方法对网络综合性能的影响, 本文定义了网络可生存性指标, 以刻画节点移除对网络鲁棒性和传输效率的影响. 为求解资源约束的网络拓扑重构优化问题, 本文提出了启发式的优先配置节点加强保护圈的 PCNC 算法. 仿真实验表明, PCNC 算法在有限资源约束的随机局部攻击和选择性攻击的动态网络环境中, 能兼顾改善网络鲁棒性和传输效率, 有效提升网络拓扑结构的可生存性.

下一步工作的重点主要体现在以下两方面, 一是研究有权网络中有限资源优化配置方法. 实际网络几乎都是有权网络, 研究有权网络才能更好地捕捉和揭示真实网络上动力学特征与拓扑结构之间

中 LCC 指标和 E 指标的变化情况. 从图 9 可看出, 不论是对 LCC 指标影响还是对 E 指标影响, 与 LDP 和 DPP 算法相比, PCNC 都具有优势. 因此, 与 PCNC 算法在随机局部移除节点情况下改善网络性能相比, PCNC 算法在选择性移除节点情况下对网络性能的改善更有优势.

的联系, 以及权重变化对网络系统功能的影响和作用. 另一方面是在现有网络拓扑重构模型和方法研究基础上, 进一步开展大规模网络系统中基于有限资源优化配置提升网络可生存性的拓扑重构方法研究.

参考文献

- [1] Albert R, Jeong H, Barabasi A L 2000 *Nature* **406** 378
- [2] Beygelzimer A, Grinstein G, Linsker R, Rish I 2005 *Physica A* **357** 593
- [3] Zhao J C, Xu K 2009 *Phys. A: Math. Theor.* **42** 195003
- [4] Sekiyama K, Araki H 2007 *Proceedings of the 2nd International Workshop on Self-Organizing System (IWSOS 2007)* The Lake District, UK, September 11–13, 2007 p119
- [5] Wang H J, Miegheem P V 2008 *Proceedings of the 3rd International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems (Bionetics 2008)* Hyogo, Japan, November 25–28, 2008
- [6] Martinez M C S 2009 *Ph. D. Dissertation* (Delft, Delft University of Technology)
- [7] Li L, Jia Q S, Guan X H, Wang H T 2012 *KSII T Internet Info* **6** 1333
- [8] Wang H T, Zhao Q C, Jia Q S, Guan X H, Li L 2013 *IEEE Trans. on Wireless Communications* **12** 4518
- [9] Huang W, Chow T W S 2010 *Chaos* **20** 033123
- [10] Zhang G Q, Wang D, Li G 2007 *Phys. Rev. E* **76** 017101

- [11] Zhang G Q, Cheng S Q 2012 *Sci. Sin. Infom.* **42** 149 (in Chinese) [张国清, 程苏琦 2012 中国科学 **42** 149]
- [12] Cai J, Yu S Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 058901 (in Chinese) [蔡君余顺争 2013 物理学报 **62** 058901]
- [13] Schoone A A, Bodlaeder H L, Leeuwen J V 1987 *Journal of Graph Theory* **11** 409
- [14] Kiaei M S, Assi C, Jaumard B 2009 *IEEE Communications Survey & Tutorials* **11** 53
- [15] Zhou X, Zhang F M, Zhou W P, Zou W P, Yang F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 190201 (in Chinese) [周漩, 张凤鸣, 周卫平, 邹伟, 杨帆 2012 物理学报 **61** 190201]
- [16] Yu X, Li Y H, Zheng X P, Zhang H Y, Guo Y L 2008 *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)* **48** 541 (in Chinese) [余新, 李艳和, 郑小平, 张汉一, 郭奕理 2008 清华大学学报(自然科学版) **48** 541]
- [17] Holme P, Saramaki J 2012 *Phys. Rep.* **519** 97
- [18] Liu J G, Ren Z M, Guo Q, Wang P H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 178901 (in Chinese) [刘建国, 任卓明, 郭强, 汪秉宏 2013 物理学报 **62** 178901]
- [19] Ren Z M, Shao F, Liu J G, Guo Q, Wang P H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 128901 (in Chinese) [任卓明, 邵凤, 刘建国, 郭强, 汪秉宏 2013 物理学报 **62** 128901]
- [20] Hu Q C, Yin Y S, Ma P F, G Y, Zhang Y, Xing C X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 140101 (in Chinese) [胡庆成, 尹龔燊, 马鹏斐, 高旻, 张勇, 邢春晓 2013 物理学报 **62** 140101]
- [21] Zhang D Y, Hu M Z, Zhang H L 2006 *Journal on Communications* **27** 74 (in Chinese) [张冬艳, 胡铭曾, 张宏莉 2006 通信学报 **27** 74]

A topological reconfiguration method for enhancing networks survivability with limited resources*

Li Li^{1)2)†} Zheng Qing-Hua¹⁾ Guan Xiao-Hong¹⁾

1) (Key Laboratory for Intelligent Network and Network Security of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (School of Computer Science and Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

(Received 2 December 2013; revised manuscript received 27 April 2014)

Abstract

For an existing network and in limited link addition resources, it is a valuable task to determine optimally the new link resources such that the resulting network is the most robust and efficient. In this paper, we investigate the modeling and analysing of network topological reconfiguration optimization with limited link addition (NTRLA). The network survivability metric is proposed to quantitatively characterize the robustness and efficiency of a network. To approximately solve the NTRLA problem, a heuristic algorithm based on the preferential configuration of enhanced node-protecting cycles (PCNC) is proposed. Simulation results show that the PCNC method can effectively improve the network robustness and communication efficiency at the cost of the least added link resources under either random or targeted attack.

Keywords: robust connectivity and communication efficiency, network topology reconfiguration, limited resource configuration, optimization model

PACS: 02.10.Ox, 01.78.+p, 88.05.Lg

DOI: 10.7498/aps.63.170201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61303092, 61221063, 61173112, 61173190), the Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. IRT13035), the Natul Science Foundation of Shaanxi Province of China (Grand No. 2014JQ8305), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No.GK201401002).

† Corresponding author. E-mail: lili@snnu.edu.cn