

一种全局同质化相依网络耦合模式

高彦丽 陈世明

A global homogenizing coupled pattern of interdependent networks

Gao Yan-Li Chen Shi-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 148901 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.148901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.148901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向成本-收益好的无标度耦合网络构建方法

[A toward cost-effective scale-free coupling network construction method](#)

物理学报.2016, 65(9): 098901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.098901>

有倾向性重连产生的反匹配网络

[Disassortative networks generated by directed rewiring](#)

物理学报.2015, 64(19): 198901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198901>

基于度的正/负相关相依网络模型及其鲁棒性研究

[The model of interdependent network based on positive/negative correlation of the degree and its robustness study](#)

物理学报.2015, 64(4): 048902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.048902>

疾病传播与级联失效相互作用的研究: 度不相关网络中疾病扩散条件的分析

[Dynamic interplay between epidemics and cascades: Epidemic outbreaks in uncorrelated networks](#)

物理学报.2014, 63(21): 218902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.218902>

火灾逃生过程的模拟与讨论 -----以吉林禽业火灾为例

[Simulation of pedestrian evacuation based on Jilin fire](#)

物理学报.2014, 63(17): 178902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.178902>

一种全局同质化相依网络耦合模式*

高彦丽 陈世明†

(华东交通大学电气与电子工程学院, 南昌 330013)

(2016年1月22日收到; 2016年4月11日收到修改稿)

相依网络的相依模式(耦合模式)是影响其鲁棒性的重要因素之一. 本文针对具有无标度特性的两个子网络提出一种全局同质化相依网络耦合模式. 该模式以子网络的总度分布均匀化为原则建立相依网络的相依边, 一方面压缩度分布宽度, 提高其对随机失效的抗毁性, 另一方面避开对度大节点(关键节点)的相依, 提高其对蓄意攻击的抗毁性. 论文将其与常见的节点一对一的同配、异配及随机相依模式以及一对多随机相依模式作了对比分析, 仿真研究其在随机失效和蓄意攻击下的鲁棒性能. 研究表明, 本文所提全局同质化相依网络耦合模式能大大提高无标度子网络所构成的相依网络抗级联失效能力. 本文研究成果能够为相依网络的安全设计等提供指导意义.

关键词: 相依模式, 相依网络, 鲁棒性, 级联失效

PACS: 89.75.-k, 89.75.Fb

DOI: 10.7498/aps.65.148901

1 引言

网络安全备受人们关注, 在过去的十多年内, 学者们针对单个网络(实际网络及各种模拟网络)中动态级联失效建模^[1-3], 有效保护和控制级联失效传播策略^[4-7]、对比不同攻击策略^[8-11]作了大量的研究工作. 然而众多类似2003年意大利电站事故^[12-15]的发生激发了人们对具有两个及以上具有相依关系的网络面对级联失效的抗毁性研究, 这是目前复杂网络中的研究热点之一.

2010年, Buldyrew等^[13]在《Nature》杂志上提出相互依存网络面对级联失效的鲁棒性理论分析模型, 开启了人们从复杂网络角度研究相互依存网络的新篇章. Buldyrew等分析了级联失效过程, 发现相依网络比单层网络更脆弱. Vespignani^[14]得到同样的结论, 网络之间的相依关系, 大大降低了具有密切耦合关系的基础设施网络的鲁棒性能, 所以提出在设计系统时需要考虑相依网络的级联失效问题. 由此, 相依网络面对级联失效的

各方面研究都不断开展^[15-18], 特别是网络之间的耦合关系与网络安全性能之间关系的研究^[19-27]. 文献^[19]对无标度网及随机网络组成的不同相依网络在三种不同的相依模式(同配相依 assortative link (AL), 异配相依 disassortative link (DL), 随机相依 random link (RL))下, 考虑负载容量及负载失效后容量的重分配情况进行了研究, 研究发现网络结构及网络间的耦合模式均对网络的鲁棒性能有影响; 文献^[20]重点对比分析了相同及不同子网络类型在一对一节点随机耦合模式下构成的相依网络鲁棒性能差异, 研究发现不同类型子网络所构成的相依网络比相同类型子网络构成的相依网络更加脆弱; 文献^[21]研究了三种典型网络随机相依情况下, 文献^[22]研究了BA网络在三种相依模式(AL/DL/RL)下, 耦合强度对网络鲁棒性能的影响; 文献^[23]研究了蓄意攻击下耦合参数对系统鲁棒性的影响. 上述研究前提都基于节点一对一完全相依, 也有文献研究了多重相依对网络鲁棒性能的影响, 文献^[24]研究表明多重依存关系导致了级联失效由一级相变转化为二级相变, 网络鲁

* 国家自然科学基金(批准号: 61364017)和教育部人文社会科学研究规划基金(批准号: 13YJAZH010)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shmchen@ecjtu.jx.cn

棒性得到明显增强. 文献 [25] 则更进一步研究了相依网络的鲁棒性能与相依节点比例和相依冗余度 (一对一或一对多相依) 的关系. 上述研究成果均对相依网络的构建具有一定的指导意义, 然而现实相依网络的相依关系灵活, 并非固定为在单一相依或多重相依的情况, 且现有文献多为固定相依模式 (AL/DL/RL) 的对比研究. 为此本文研究一种网络相依模式, 能动态灵活地建立两个子网络之间的相依边, 使其具有较强的鲁棒性.

单一网络的研究中提出网络增边策略以提高网络的鲁棒性能 [28,29], 两个独立网络相依关系的建立, 其实也可以理解为网络和网络之间的增边连结, 本文受此启发, 并根据已有相依网络鲁棒性研究结论, 提出一种全局同质化相依网络连接模式. 该方法以子网络总度分布均匀化为原则, 动态地在两个子网络间建立相依边. 其优势在于, 一方面压缩相依网络的度分布, 提高其面对随机失效的鲁棒性能, 另一方面又避开了度大节点的相互依存, 从而有效提高其面对蓄意攻击的鲁棒性能. 众多基础设施网络均具有无标度特性, 因此本文构建两个具有相同节点数, 不同特性的 BA 无标度网络组成 BA-BA 相依网络. 为了证明所提相依网络耦合模

式可以提高网络鲁棒性能, 采用上述文献研究常用的三种节点一对一耦合关系 (AL/DL/RL) 以及一对多随机相依模式做对比分析. 仿真结果表明, 无论面对随机攻击还是蓄意攻击, 所提全局同质化相依模式均能提高相依网络的鲁棒性能.

2 级联失效模型及耦合模式

2.1 相依网络级联失效模型

本文定义如图 1 (a) 所示相依网络模型为不完全的具有多重对应关系的相依网络, 其中不完全指网络中含有独立节点, 如图 1 (a) 中, A 网络节点 A3, A5 及 B 网络节点 B2, B5, 这些节点与对方网络不存在依存关系. 多重对应指相依关系的多样性, 即相依网络中既包括节点一对一的相依, 又包含一对多的相依, 如图 1 (a) 中, 节点 A4 仅依赖于节点 B4, 而节点 A6 则与 B4 和 B6 存在一对二的相依关系. 当独立节点数为零及不存在一对多相依关系时, 该模型蜕化为完全单一相依模型, 因此该相依网络模型是对现实基础设施相互依赖关系更细致的刻画, 更具有研究意义.

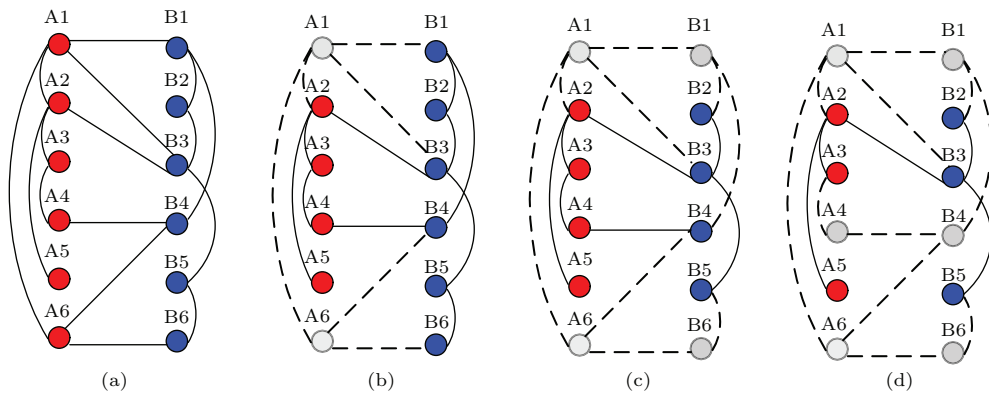


图 1 (网刊彩色) 相依网络级联失效模型 (a) 网络最初状态; (b) 第一步失效; (c) 第二步失效; (d) 稳定状态
 Fig. 1. (color online) Cascading model of interdependent networks: (a) Initial state; (b) first failure state; (c) second failure state; (d) final stable state.

假设相依网络由两个子网络 A 和 B 组成, 每个子网络内部的节点连接定义为连接边 (connectivity links), 网络 A 和网络 B 之间节点连接定义为相依边 (dependency links). 当相依网络中 A 或 B 网络的节点受到攻击或随机失效时, 网络 A 或 B 会破碎成几个碎片, 该模型假定只有属于网络 A 或网络 B 巨元组内 (giant component) 的节点能够保持功能, 而属于其他碎片的节点会失去功能. 假定网络

A 中部分节点受到初始攻击而失效, 网络 A 会破碎为若干碎片, 不属于 A 网络巨元组的节点因此失效; A 网络中的失效节点也会导致 B 网络中相应的节点失效, 从而导致 B 网络破碎, 不属于 B 网络巨元组的节点也因此失效. 再进一步, B 网络中的失效节点导致 A 网络中相应的节点失效, 从而使 A 网络再次发生破碎, 如此反复进行下去, 经历一定步数的失效后系统最终达到稳定.

整个级联失效的过程如图 1 所示. 系统最初状态如图 1(a), 假设 A 网络中 degree 大的节点 A1 受到蓄意攻击, 第一个阶段失效过程移除节点 A1 相应的连接边和相依边, 由于网络 A 中的节点 A6 不在巨元组内, 所以 A6 失去功能, 移除 A6 及其连边后, 系统如图 1(b) 所示. 第二阶段失效过程中, 网络 B 的节点 B1, B6 由于失去了网络 A 的相依边, 从而失效, 见图 1(c). 第三阶段失效过程: 节点 B1 和 B6 的失效使得 B4 节点不在最大连通片, 引发进一步的失效反应使得节点 A4 失去了相依边失效. 级联失效停止, 最终网络稳定如图 1(d) 所示.

2.2 相依网络抗级联失效鲁棒性测度

本文采用最大连通片规模 N' 与原网络 (未遭受到攻击时的网络) 规模 N 之比作为网络鲁棒性的度量指标 $G^{[30]}$, 即 $G = N'/N$. G 值越大说明网络的损坏程度越小, 网络所具有的鲁棒性能越好. 其中, $N' = N'_A + N'_B$, $N = N_A + N_B$, N_A 代表子网络 A 的节点数, N_B 代表子网络 B 的节点数, N'_A 代表子网络 A 受攻击后巨元组内的存活节点数, N'_B 代表子网络 B 受攻击后巨元组内的存活节点数.

2.3 相依模式

假设两个具有相同节点数 N 的网络 A 和网络 B, 需要在 A, B 网络间建立 N 条相依边. 对子网络 A 内的节点按照度从小到大进行排序, 并标注为 A_i ($i = 1, 2, \dots, N$), 即, $k_{A_1} \leq k_{A_2} \leq \dots, \leq k_{A_{N-1}} \leq k_{A_N}$, k_{A_i} 代表节点 A_i 的度, 如果两个节点具有相同的度, 则对它们进行随机排序; 同样对子网络 B 内的节点按照度从小到大进行排序, 并标注为 B_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 即 $k_{B_1} \leq k_{B_2} \leq \dots, \leq k_{B_{N-1}} \leq k_{B_N}$, k_{B_i} 代表节点 B_i 的度, 如果两个节点具有相同的度, 则对它们进行随机排序. 文献研究常用三种节点一对一完全相依模式为^[19-23]: 1) 同配模式 (assortative link) 即相关连接, 把网络 A 和 B 的节点按照度相关性建立相依连接, 即 $A_i \leftrightarrow B_i$, 度小的节点与度小的节点相依, 度大的节点与度大的节点相依, 如图 2(a) 所示; 2) 异配模式 (disassortative link) 即不相关连接, 把网络 A 中的度大节点与网络 B 的度小节点建立相依, 即 $A_i \leftrightarrow B_{N-i+1}$, 如图 2(b) 所示; 3) 随机模式 (random link) 即随机选择一对节点, 建立相依边, 如图 2(c) 所示.

本文提出一种全局同质化相依模式 (global homogenizing link), 简称 GH 模式, 该模式以单个网络 A/B 的总度分布均匀化为原则, 在子网络间建立相依边. 具体方法首先求出原始网络 A, B 的平均度 $\langle k_A \rangle$, 则耦合后网络 A' 的平均度为 $\langle k_{A'} \rangle = \langle k_A \rangle + 1$. 按照以下规则在两个已经标注好序号 A_i 和 B_i 的网络中建立相依边, 步骤如下.

第一步: 选择 A 网络中度最小的节点 A_1 , 依次与 B 网络前 m 个节点 B_1, B_2, \dots, B_m 建立相依边, 其中 $m = \langle k_{A'} \rangle - k_{A_1}$, $k_{B_1} \leq k_{B_2} \leq \dots, \leq k_{B_{m-1}} \leq k_{B_m} \leq \dots, \leq k_{B_N}$ 使得节点 A_1 的总度等于平均度 $\langle k_{A'} \rangle$.

第二步: 重新计算网络 A 中节点度, 按照度从小到大进行排序, 并标注为 A_i ($i = 1, 2, \dots, N$), 即, $k_{A_1} \leq k_{A_2} \leq \dots, \leq k_{A_{N-1}} \leq k_{A_N}$, k_{A_i} 代表节点 A_i 的度, 如果节点具有相同的度, 则优先排列尚未建立过相依边的节点.

第三步: 重新计算网络 B 中节点度, 对网络 B 中的节点按照度从小到大依次排序, 并标注为 B_i , 如果两个节点具有相同的度, 则优先排列尚未建立过相依边的节点.

每次建立相依边前判断是否已经产生了 N 条相依边, 不是则重复第一步到第三步, 依次建立相依边, 直到完成 N 条相依边的建立为止.

例如, 图 2(d) 中子网络 A, B 各有 7 个节点, $N = 7$. 图中 first 下的一系列数据为最初节点的度, 可见 $\langle k_A \rangle = 4$, 如果产生 7 条耦合边, 则耦合后子网络 A 的平均度 $\langle k_{A'} \rangle = 5$, 因此第一个度最小的节点 A_1 上可以产生 $5 - 2 = 3$ 条相依边. 第一步与子网络 B 中的度最小的三个节点建立相依关系, 即图 2(d) 中三条黑色实线, 重新计算子网络 B 的节点度为 step1 下面一系列数据. 节点 A_2 上可以产生 $5 - 3 = 2$ 条相依边, 与网络 B 中 step1 下度最小的两个节点建立相依关系, 即图中两条红色短虚线. 重新计算子网络 B 的节点度为 step2 下面一系列数据. 节点 A_3 上可以产生 $5 - 3 = 2$ 条相依边, 与网络 B 中 step2 下度最小的节点 B_1 及优先选择 B_4 建立相依关系, 即图中两条蓝色长虚线. 至此一共建立了 7 条相依边, 相依边建立完成后节点总的度分布非常均匀, 见图 2(d) 中 final 下的数据.

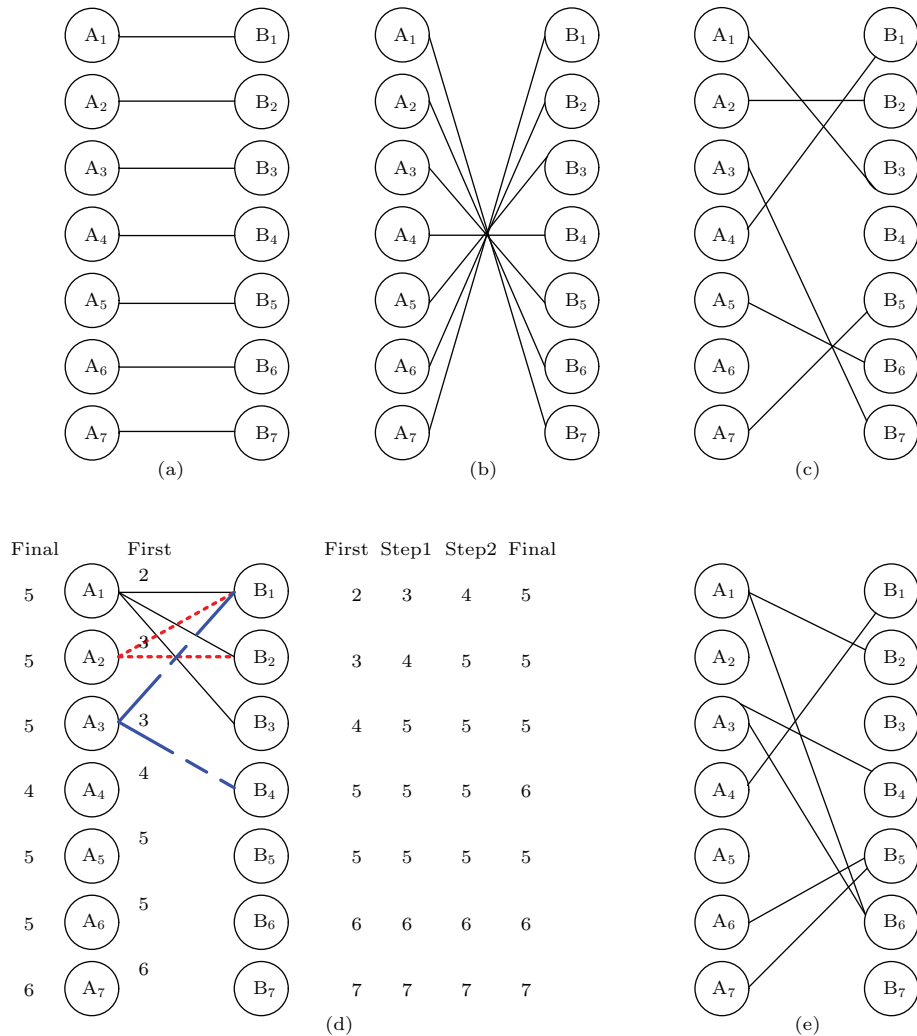


图2 (网刊彩色) 相依网络耦合模式示意图 (a) 同配耦合; (b) 异配耦合; (c) 随机耦合; (d) 全局同质耦合; (e) 全局随机耦合

Fig. 2. (color online) Coupled patterns of interdependent networks: (a) AL; (b) DL; (c) RL; (d) GH; (e) GRL.

GH模式为节点一对多相依模式,为了更好地说明GH模式的优势,特构建一种一对多的随机相依模式,即全局随机相依模式(global random link),其规则为,限定每个节点最多产生的相依边为 $m = \langle k_{A'} \rangle - k_{A_1}$ 的条件下,随机在两个网络之间建立相依边,如图2(e)所示.

3 仿真结果及分析

3.1 仿真实施

构建BA无标度网络模型^[31]的方式为:给定初始节点 λ_0 ,每个时间步增加一个节点和 λ 条边,且按照择优概率连接到已有的节点上,生成参数不同的网络A和网络B.网络A共有500个节点,平均度为4;网络B共有500个节点,平均度为6.按照图2中的5种耦合模式构建相依网络A-B的500

条相依边,并对A网络实施蓄意攻击或随机失效处理.

蓄意攻击策略为对网络A中节点度进行降序排列,攻击排序靠前的比例为 f 的节点.利用相依网络级联失效模型,计算五种耦合模式下网络存活的巨元组规模与原网络规模的比值 G ,结果如图3所示,具体仿真数据见表1.随机失效策略为随机选择一定比例 f 的节点失效(去除),利用相依网络级联失效模型,计算五种耦合模式下网络存活的巨元组规模与原网络规模的比值 G ,结果如图4所示,具体仿真数据见表2.所有结果均为运行20次的平均结果.

3.2 仿真结果分析

从图3及图4可以看出,GH模式对应的曲线下降趋势最为缓慢,从表1和表2中的数据也可以

看出, 相同移除比例下, GH模式下对应的网络存活规模 G 的值最大, 因此无论随机失效还是蓄意攻击, 全局同质化相依模式的抗毁性都优于其他模式.

观察图3和图4, GH/GRL模式对应的曲线变化趋势较其他三种模式(AL/DL/RL) 缓慢. 分析表1和表2中的数据可见, 相同移除比例 f 下, GH/GRL模式下对应的网络存活规模 G 的值均大于其他三种模式, 因此无论随机失效还是蓄意攻击, 建立相同相依边的条件下, 一对多的不完全相依模式(GH/GRL)要优于一对一的完全相依模式(AL/DL/RL). 而一对多的不完全相依模式中, 全局同质化相依模式(GH)优于一对多随机相依模式(GRL), 特别是在蓄意攻击情况下其效果更加明显. 蓄意攻击下同样攻击14%的节点, GH模式下网络的存活规模为35.2%, 而GRL模式下网络的存活规模为26.7%, 相当于多挽救了约9%的节点. 随

机失效65%的节点, GH模式下网络的存活规模为36.44%, 而GRL模式下网络的存活规模为29.37%, 相当于多挽救了约7%的节点.

对比分析三种一对一完全相依模式(AL/DL/RL)的变化曲线, 可以看出对于随机失效, 同配模式优于随机模式, 而随机模式优于异配模式. 然而对于蓄意攻击而言, 从表1中的数据可知, 同样攻击6%的节点, AL模式的网络存活规模仅为37.9%, 而RL模式的网络存活规模为72.73%, DL模式的网络存活规模仅为81%. 因此蓄意攻击下异配模式优于随机模式, 而随机模式优于同配模式. 这是因为同配模式下, 度大的节点和度大的节点相依, 蓄意攻击度大的节点, 造成的毁坏显然最大, 因此同配模式在蓄意攻击下显得更加脆弱. 而异配模式, 由于度大的节点和度小的节点相依, 所以对于蓄意攻击而言具有一定的抗毁性.

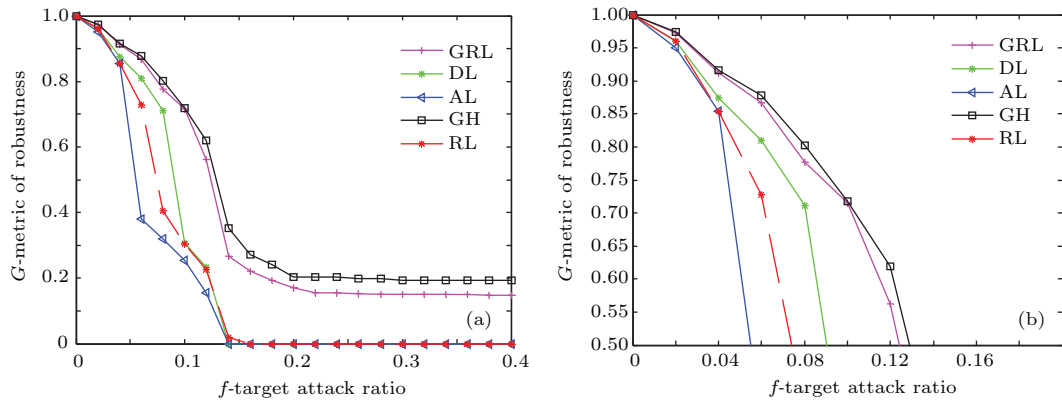


图3 (网刊彩色) BA-BA 蓄意攻击 (a) 攻击比例0—40%; (b) 攻击比例0—14%

Fig. 3. (color online) BA-BA targeted attacks: (a) f from 0 to 40%; (b) f from 0 to 14%.

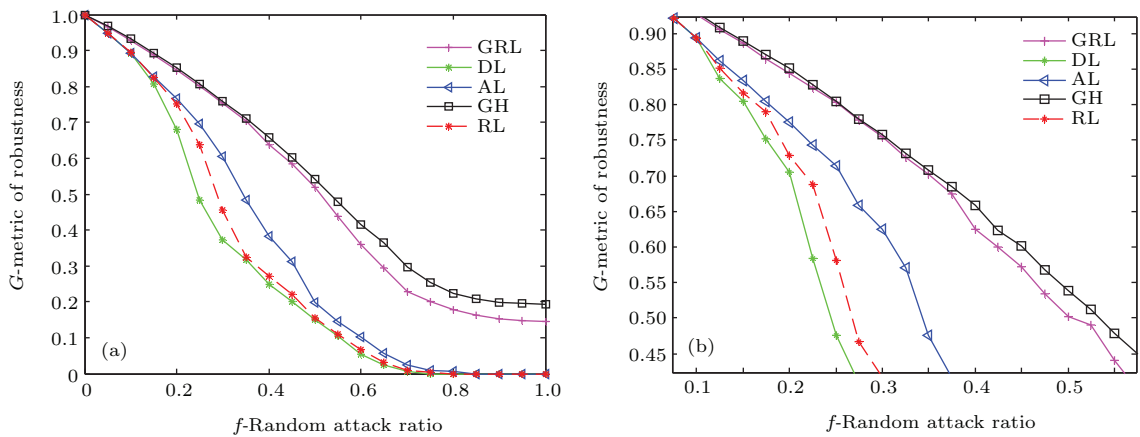


图4 (网刊彩色) BA-BA 随机失效 (a) 随机失效比例0—100%; (b) 随机失效比例0—55%

Fig. 4. BA-BA random failures: (a) f from 0 to 100%; (b) f from 0 to 55%.

对比图3和图4可以看出, 大约攻击15%的重要节点, A网络就濒临瘫痪, 而随机失效的比例约为75%, A网络才濒临瘫痪, 可见蓄意攻击对网络的破坏强劲. 因此在网络安全研究中, 对关键节点的识别及保护, 具有重要的研究意义.

以上结论通过数值仿真得到, 下面从图2更加直观地解释这些结论. 假设图中AB后面的数字代表节点的度数, 例如图中A₂代表该节点的度数为2. 比较图2(a)和图2(b), 发现蓄意攻击度大的节点, 对于图2(a)中, A₇和B₇相依, 一次攻击则移除14条边, 故网络不堪一击; 而图2(b), 如果攻击A₇, 则共破坏8条边, 因此网络相对抗毁性好. 对于随机攻击, 图2(b)每次攻击均破坏8条连边, 更加脆弱, 而同配模式则分散了风险, 故而鲁棒性能优于异配模式. 由于随机耦合模式的随机性, 使得其对于随机失效和蓄意攻击的鲁棒性能均介于AL和

DL之间.

分析图2(d)和图2(e), 可以看出一对多的相依模式能够提高相依网络的鲁棒性能. 如图2(d)中, 假设A₂节点失效, 由于网络中的多重相依关系的存在, 并不会造成B网络中的相依节点失效. 而对于一对一相依网络, A网络节点失效必然导致B网络中的相依节点失效, 因此GH和GRL模式鲁棒性能要优于AL, DL及RL, 与文献[24, 25]结论符合.

相依网络的度分布越宽, 网络面对随机失效的鲁棒性越脆弱^[13], 而GH模式使得网络的总度分布均匀化, 即压缩了度分布的宽度, 因此提高了相依网络随机失效时的抗毁性. 并且GH模式又避免了对度大节点的相依, 由此也提高了相依网络对蓄意攻击时的抗毁性.

表1 蓄意攻击仿真数据
Table 1. Data of targeted attack.

<i>f</i>	0.0200	0.0400	0.0600	0.0800	0.1000	0.1200	0.1400	0.1600	0.1800	0.2000
GH	0.9740	0.9160	0.8780	0.8030	0.7180	0.6190	0.3520	0.2720	0.2420	0.2030
GRL	0.9724	0.9123	0.8666	0.7777	0.7150	0.5626	0.2670	0.2210	0.1933	0.1714
AL	0.9500	0.8540	0.3790	0.3190	0.2540	0.1550	0	0	0	0
RL	0.9600	0.8543	0.7273	0.4056	0.3041	0.2252	0.0192	0	0	0
DL	0.9600	0.8740	0.8100	0.7120	0.3060	0.2330	0.3166	0	0	0
<i>f</i>	0.2200	0.2400	0.2600	0.2800	0.3000	0.3200	0.3400	0.3600	0.3800	0.4000
GH	0.2030	0.2030	0.1970	0.1970	0.1940	0.1940	0.1940	0.1940	0.1940	0.1940
GRL	0.1553	0.1553	0.1528	0.1506	0.1505	0.1505	0.1505	0.1505	0.1489	0.1489
AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表2 随机失效仿真数据
Table 2. Data of random failure.

<i>f</i>	0.0500	0.1000	0.1500	0.2000	0.2500	0.3000	0.3500	0.4000	0.4500	0.5000
GH	0.9679	0.9319	0.8923	0.8514	0.8072	0.7596	0.7106	0.6586	0.6018	0.5413
GRL	0.9652	0.9276	0.8865	0.8435	0.8018	0.7534	0.7026	0.6375	0.5850	0.5193
AL	0.9490	0.8937	0.8271	0.7662	0.6965	0.6037	0.4835	0.3825	0.3125	0.1975
RL	0.9491	0.8940	0.8257	0.7510	0.6365	0.4564	0.3236	0.2714	0.2200	0.1562
DL	0.9491	0.8937	0.8061	0.6804	0.4831	0.3736	0.3166	0.2495	0.1997	0.1494

表2 随机失效仿真数据(续)
Table 2. Data of random failure (continued).

f	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
GH	0.4797	0.4159	0.3644	0.2970	0.2532	0.2240	0.2072	0.1987	0.1954	0.1940
GRL	0.4387	0.3608	0.2937	0.2297	0.2011	0.1792	0.1629	0.1520	0.1475	0.1447
AL	0.1457	0.1021	0.0571	0.0244	0.0099	0.0064	0	0	0	0
RL	0.1096	0.0680	0.0310	0.0098	0.0035	0	0	0	0	0
DL	0.1044	0.0543	0.0237	0.0054	0	0	0	0	0	0

4 结 论

本文针对两个具有相同节点的BA无标度网络, 提出全局同质化相依边建立模式, 并将其与常见的节点一对一的同配、异配及随机相依模式以及一对多的全局随机相依模式做了仿真分析, 对比研究了其在随机失效和蓄意攻击下的鲁棒性能. 研究结论表明无论随机失效还是蓄意攻击, 全局同质化相依模式的抗毁性都优于其他模式. 这是因为该模式以子网络的总度分布均匀化为原则建立相依网络的相依边, 一方面压缩度分布宽度, 提高了其对随机失效的抗毁性, 另一方面避开度大节点(关键节点)的相依, 提高了其对蓄意攻击的抗毁性. 研究还发现无论随机失效还是蓄意攻击, 建立相同相依边的条件下, 一对多的不完全相依模式(GH/GRL)要优于一对一的完全相依模式(AL/DL/RL); 三种一对一完全相依模式(AL/DL/RL)中, 面临随机失效时, 同配模式优于随机模式, 而随机模式优于异配模式. 然而对于蓄意攻击而言, 异配模式优于随机模式, 而随机模式优于同配模式; 蓄意攻击对网络的破坏强劲, 因此在网络安全研究中, 对关键节点的识别及保护, 具有重要的研究意义.

综上, 本文所提全局同质化相依关系建立模式在提高相依网络面临随机失效及蓄意攻击下的抗毁性方面具有显著优势, 对相依网络的相依关系设计具有重要指导意义.

参考文献

[1] Wang W X, Lai Y C, Dieter A 2011 *Chaos* **21** 033112
 [2] Chen S M, Pang S P, Zou X Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 058901
 [3] Mirzasoleiman B, Babaei M, Jalili M, Safari M 2011 *Phys. Rev. E* **84** 046114
 [4] Schäfer M, Scholz J, Greiner M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 108701
 [5] Wang J W 2012 *Nonlinear Dyn.* **70** 1959

[6] Yang R, Wang W X, Lai Y C, Chen G R 2009 *Phys. Rev. E* **79** 026112
 [7] Buzna L, Peters K, Ammoser H, Kühnert C, Helbing D 2007 *Phys. Rev. E* **75** 056107
 [8] Nie T Y, Guo Z, Zhao K, Lu Z M 2015 *Physica A* **424** 248
 [9] Zhao L, Park K, Lai Y C, Ye N 2005 *Phys. Rev. E* **72** 025104
 [10] Moreira A A, Andrade Jr J S, Herrmann H J, Indekeu J O 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 018701
 [11] Wang J W, Rong L L 2009 *Safety Sci.* **47** 1332
 [12] Rosato V, Issacharoff L, Tiriticco F, Meloni S, DePorcellinis S, Setola R 2008 *Int. J. Crit. Infrastruct.* **4** 63
 [13] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, Stanley H E, Havlin S 2010 *Nature* **464** 1025
 [14] Vespignani A 2010 *Nature* **464** 984
 [15] Wang J W, Rong L L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3714 (in Chinese) [王建伟, 荣莉莉 2009 物理学报 **58** 3714]
 [16] Buldyrev S V, Shere N W, Cwlich G A 2011 *Phys. Rev. E* **83** 016112
 [17] Parshani R, Rozenblat C, Ietri D, Ducruet C, Havlin S 2010 *Europhys. Lett.* **92** 68002
 [18] Zhou D, Stanley H E, D'Agostino G, Scala A 2012 *Phys. Rev. E* **86** 066103
 [19] Wang J W, Chen J, Qian J F 2014 *Physica A* **393** 535
 [20] Cheng Z S, Cao J D 2015 *Physica A* **430** 193
 [21] Chen S M, Zou X Q, Lü H, Xu Q G 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 028902 (in Chinese) [陈世明, 邹小群, 吕辉, 徐青刚 2014 物理学报 **63** 028902]
 [22] Wang J W, Yun L, Qiao F Z 2015 *Physica A* **430** 242
 [23] Chen Z, Du W B, Cao X B, Zhou X L 2015 *Chaos, Solitons Fractals* **80** 7
 [24] Shao J, Buldyrev S V, Havlin S, Stanley H E 2011 *Phys. Rev. E* **83** 036116
 [25] Chen S M, Lü H, Xu Q G, Xu Y F, Lai Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 048902 (in Chinese) [陈世明, 吕辉, 徐青刚, 许云飞, 赖强 2015 物理学报 **64** 048902]
 [26] Wang J W, Jiang C, Qian J F 2013 *Int. J. Mod. Phys. C* **24** 1350076
 [27] Wang J W 2013 *Physica A* **392** 2257
 [28] Cao X B, Hong C, Du W B, Zhang J 2013 *Chaos, Solitons Fractals* **57** 35
 [29] Huang W, Chow TWS 2010 *Chaos* **20** 033123
 [30] Motter A E 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 098701
 [31] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509

A global homogenizing coupled pattern of interdependent networks*

Gao Yan-Li Chen Shi-Ming[†]*(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)*

(Received 22 January 2016; revised manuscript received 11 April 2016)

Abstract

Many infrastructure networks interact with and depend on each other to provide proper functionality. The interdependence between networks has catastrophic effects on their robustness. Events taking place in one system can propagate to any other coupled system. Recently, great efforts have been dedicated to the research on how the coupled pattern between two networks affects the robustness of interdependent networks. However, how to dynamically construct the links between two interdependent networks to obtain stronger robustness is rarely studied. To fill this gap, a global homogenizing coupled pattern between two scale-free networks is proposed in this paper. Making the final degrees of nodes distributed evenly is the principle for building the dependency links, which has the following two merits. First, the system robustness against random failure is enhanced by compressing the broadness of degree distribution. Second, the system invulnerability against targeted attack is improved by avoiding dependence on high-degree nodes. In order to better investigate its efficiency on improving the robustness of coupled networks against cascading failures, we adopt other four kinds of coupled patterns to make a comparative analysis, i.e., the assortative link (AL), the disassortative link (DL), the random link (RL) and global random link (GRL). We construct the BA-BA interdependent networks with the above 5 coupled patterns respectively. After applying targeted attacks and random failures to the networks, we use the ratio of giant component size after cascades to initial network size to measure the robustness of the coupled networks. It is numerically found that the interdependent network based on global homogenizing coupled pattern shows the strongest robustness under targeted attacks or random failures. The global homogenizing coupled pattern is more efficient to avoid the cascading propagation under targeted attack than random failure. Finally, the reasonable explanations for simulation results is given by a simply graph. This work is very helpful for designing the interdependent networks against cascading failures.

Keywords: coupled pattern, interdependent network, robustness, cascading failure**PACS:** 89.75.-k, 89.75.Fb**DOI:** 10.7498/aps.65.148901

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61364017) and the Humanities and Social Science Project of Ministry of Education of China (Grant No. 13YJAZH010).

[†] Corresponding author. E-mail: shmchen@ecjtu.jx.cn