

负荷作用下相依网络中的级联故障

彭兴钊 姚宏 杜军 王哲 丁超

Load-induced cascading failure in interdependent network

Peng Xing-Zhao Yao Hong Du Jun Wang Zhe Ding Chao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 048901 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.048901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.048901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于局部路由策略的复杂网络拥塞控制

Congestion control in complex network based on local routing strategy

物理学报.2014, 63(24): 248901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248901>

基于节点间依赖度的社团结构划分方法

Partitioning community structure in complex networks based on node dependent degree

物理学报.2014, 63(17): 178901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.178901>

基于时滞耦合映像格子的多耦合边耦合网络级联抗毁性研究

Study on cascading invulnerability of multi-coupling-links coupled networks based on time-delay coupled map lattices model

物理学报.2014, 63(7): 078901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.078901>

基于相继故障信息的网络节点重要度演化机理分析

Evolution mechanism of node importance based on the information about cascading failures in complex networks

物理学报.2014, 63(6): 068902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.068902>

基于节点度信息的自愿免疫模型研究

Analysis of voluntary vaccination model based on the node degree information

物理学报.2013, 62(21): 218901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.218901>

负荷作用下相依网络中的级联故障*

彭兴钊^{1)†} 姚宏²⁾ 杜军¹⁾ 王哲¹⁾ 丁超¹⁾

1)(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

2)(空军工程大学理学院, 西安 710051)

(2014年7月11日收到; 2014年9月28日收到修改稿)

研究负荷作用下相依网络中的级联故障具有重要的现实意义, 可为提高相依网络的鲁棒性提供参考. 构建了双层相依网络级联故障模型, 主要研究了外部度和内部度对负荷贡献比、耦合因素、层内度-度相关性对相依网络级联故障的影响. 研究表明, 当外部度和内部度对负荷贡献比达到一定值时, 相依网络抵抗级联故障的鲁棒性最强. 而耦合因素的影响是多方面的, 为了达到较高鲁棒性, 建议采用异配耦合方式和尽可能大的平均外部度, 并尽量使外部度保持均匀分布. 另外, 与不考虑负荷作用时相反, 当表征层内度-度相关性的相关系数越大时, 其抵抗级联故障的能力越强.

关键词: 相依网络, 级联故障, 负荷作用, 鲁棒性

PACS: 89.75.Fb, 89.75.Hc

DOI: 10.7498/aps.64.048901

1 引言

级联故障普遍存在于现实系统中, 例如大规模停电事故、交通堵塞以及互联网瘫痪等都与级联故障密切相关^[1,2]. 复杂网络作为现实系统的一种高度抽象, 自从复杂网络理论诞生以来, 已就复杂网络框架下的级联故障进行了深入研究, 但大部分成果都是基于孤立网络得来的^[2-14], 由于目前级联故障已经深入到耦合网络层面, 现有结论面临被更改的可能. 从普遍联系的观点来看, 现实中并不存在完全孤立的网络, 各网络间都存在各种各样的耦合关系, 例如火力电网、水力电网、核电网和风力电网等组成的电力耦合网络, 极大地提高了供电效率, 这是一种相互连接关系; 电力网络和计算机网络相互依赖, 一方面电力网络为计算机网络的正常运行提供了电力支持, 另一方面计算机网络反过来又控制电力网络的发电运行, 这是一种相互依赖关系, 这样的耦合网络称为相依网络. 本文主要关注相依网络中的级联故障. 相依网络中的级联故障真

正受到关注始于2010年Buldyrev等^[15]的工作, 他们以双层相依网络为例, 两层网络中的节点一对一随机耦合, 假设只有最大连通子图中的节点可正常运行, 当随机去除一层网络中的部分节点, 最大连通子图之外的节点将失效, 由于网络间的相互依赖关系, 另一层网络中的耦合节点也将失效, 由此循环往复, 可能引发大规模的级联故障. 他们提出了一个解决这种相依网络级联故障的理论框架. 之后, 相依网络的级联故障在这个理论框架内进行了广泛的研究, 并得出许多有别于孤立网络的结论^[16-23].

上述研究没有涉及相依网络中存在负荷及负荷流动时的级联故障, 而负荷在现实网络中是广泛存在的, 例如电力网络中传输的电量、交通网络中运送的乘客和物资、互联网(Internet)传送的流量包等. 实际上, 基于负荷的级联故障已在孤立网络中进行了广泛研究, 涉及级联故障的建模^[2-6]、攻击策略对级联故障的影响^[7-10]、级联故障的预防与控制等^[11-14]. 本文将推广到相依网络. 考虑相依网络中的耦合因素, 建立基于相依网络的级联

* 陕西省自然科学基金(批准号: 2012JM8035)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pxz0311@163.com

故障模型,在此基础上研究了内部度和外部度对负荷的贡献比、耦合方式和耦合强度等耦合因素、层内节点连接相似度对相依网络级联故障的影响.

2 基于负荷的相依网络级联故障建模

不失一般性,本文采用由两个子网络构成的双层相依网络,记为网络A和网络B,节点总数分别为 N_A 和 N_B ,因而相依网络总规模为 $N = N_A + N_B$.网络A和网络B中节点随机连接,网络A和网络B的边称为内部边,一个节点所拥有的内部边的数目称为节点的内部度,用 k 表示,网络A和网络B的内部度分布分别为 $P(k^A)$ 和 $P(k^B)$,其平均内部度分别为 $\langle k^A \rangle$ 和 $\langle k^B \rangle$.网络A和网络B之间的边称为耦合边,一个节点拥有的耦合边的数目称为节点的外部度,用 d 表示,网络A和网络B的外部度分布分别为 $P(d^A)$ 和 $P(d^B)$,其平均外部度分别为 $\langle d^A \rangle$ 和 $\langle d^B \rangle$.本文设定两个子网络具有相同规模、平均内部度和平均外部度,即 $N_A = N_B = N/2$, $\langle k \rangle = \langle k^A \rangle = \langle k^B \rangle$, $\langle d \rangle = \langle d^A \rangle = \langle d^B \rangle$.由于现实网络大都具有无标度特征,本文采用经典的Barabási-Albert (BA)无标度网络模型^[24]生成内部度服从幂律分布的网络A和网络B.BA网络采用增长和择优连接两种机理生成:1)增长,初始网络为节点数为 m_0 的全耦合网络,每次引入一个带有 $m(m \leq m_0)$ 条边的新节点;2)择优连接,这 m 条新边以概率 $k_i / \sum_j k_j$ 与网络中的节点 i 相连.重复以上步骤,直至生成大小为 $N_A = N_B = N/2$ 的网络,这样生成的网络的内部度分布服从 $P(k) \propto k^{-\gamma}$ 形式的幂律分布,其中 $\gamma \equiv 3$.这里,网络A和网络B的平均内部度由参数 m 唯一确定,即

$$\langle k \rangle = \langle k^A \rangle = \langle k^B \rangle \approx 2m.$$

与孤立网络中级联故障建模不同,相依网络中级联故障的建模需要考虑耦合因素的影响,这也是以往研究中所忽略的^[25-28].一般情况下,节点的负荷由节点的介数或节点的度定义,由于节点度与节点介数具有较强的相关性^[29,30],因此本文采用文献^[4, 5, 9]的方法,采用节点度定义节点初始负荷.以网络A为例,由于耦合边的存在,只考虑内部边显然是不合适的,比如对于电力网络中的发电机组,如果与多个计算机相连,其有很大的可能

承担更多的负荷.因此本文定义节点 i 的初始负荷 $L_i(0)$ 为

$$L_i(0) = \mu k_i^\alpha + (1 - \mu) d_i^\beta. \quad (1)$$

在不引起歧义的情况下,(1)式省略了上标A.式中, k_i 和 d_i 分布表示网络A中节点 i 的内部度和外部度; α , β 和 μ 是控制参数,控制着内部度和外部度对初始负荷分布的影响.

一般地,节点 i 的容量 C_i 与其初始负荷 $L_i(0)$ 成正比:

$$C_i = (1 + \lambda) L_i(0), \quad (2)$$

其中, $\lambda > 0$ 表示容忍系数,是容量冗余的一种量度.显然, λ 越大,容量冗余的成本越大,但其抵抗级联故障的能力越强.

假设网络A中节点 i 遭受攻击而故障,设节点 j 为其在网络A中的一个邻居,则故障节点 i 将其上负荷按下式所示比例传递给节点 j :

$$\Pi_j^A = \frac{C_j^A}{\sum_{n \in \Gamma_i} C_n^A}, \quad (3)$$

其中, Γ_i 表示节点 i 的邻居节点集合, $n \in \Gamma_i$ 表示 n 为节点 i 的一个邻居节点.

如果节点 j 从故障节点 i 接收负荷后,其总负荷超出了容量,即

$$L_j^A + \Pi_j^A L_i^A > C_j^A, \quad (4)$$

此时,节点 j 故障,从网络A中移除,并进一步将其上负荷按(3)式分配给其邻居节点,由此循环,级联故障就在网络A中传播开来.在此过程中,网络A中的级联故障将通过耦合作用对网络B产生影响.假设节点 l 为网络B中的一个节点,如果节点 l 在网络A中所有的耦合节点都故障(由于本文将故障节点做移除处理,因此等同于节点 l 在网络A中没有耦合节点,即节点 l 的外部度 $d_l = 0$),则节点 l 故障,设节点 t 是节点 l 在网络B的邻居节点,则节点 l 将如下比例的负荷传递给节点 t :

$$\Pi_t^B = \frac{C_t^B}{\sum_{z \in \Gamma_l} C_z^B}. \quad (5)$$

同理,如果节点 t 从故障节点 l 接收负荷后,其总负荷超出了容量,则节点 t 故障,其负荷按(5)式分配给其邻居节点,此过程循环,级联故障在网络B中传播开来.同理,在此过程中,如果网络A中的

节点在网络B中的耦合节点全部故障, 则该节点故障.

由以上描述可以看出, 一个节点的故障可能有两种原因: 一是各层网络中负荷流动造成节点负荷超限引起的传播故障; 二是由于节点移除造成耦合节点的缺失而导致的耦合故障. 本文假定一层网络节点必须有至少一个耦合节点以保证其正常工作, 因此本文假设每个节点外部度 $d \geq 1$ (在生成耦合边时, 如不特别说明, 首先以随机方式将网络A中的节点与网络B中的节点一对一耦合, 然后再随机地或以一定规则添加其他耦合边), 因而平均外部度 $\langle d \rangle \geq 1$, 这样保证了在相依网络遭受攻击之前, 没有耦合故障的发生.

为了触发级联故障, 我们同时攻击网络A中最大负荷的节点和网络B中最大负荷的节点. 假设级联故障结束后, 网络A和网络B的故障节点总数分别为 F_A 和 F_B , 那么相依网络总的故障规模 s 为

$$s = (F_A + F_B) / (N_A + N_B). \quad (6)$$

为了消除偶然因素的影响, 本文将随机生成 M 个相依网络模型进行仿真, 得到的故障规模分别为 s_1, s_2, \dots, s_{500} , 取其平均值 $S = (s_1 + s_2 + \dots + s_{500}) / M$, 称 S 为平均故障规模, 本文取 $M = 500$. 显然, 平均故障规模 S 是度量级联故障程度的一个天然指标.

3 仿真分析

3.1 外部度和内部度对负荷的贡献比对相依网络级联故障的影响

在初始负荷的定义(1)式中, 当参数 α 和 β 取一定值时, 参数 μ 控制着内部度和外部度对初始负荷的贡献度, μ 越大, 内部度对初始负荷的贡献度越大, 外部度对初始负荷的贡献度越小. 在孤立网络中, 当 α 和 β 越大, 攻击负荷大的节点将引发最严重的级联故障[4,5,9]. 在仿真中, 固定 $\alpha = \beta = 1$, 观察 μ 对耦合网络鲁棒性的影响. 如不特别说明, 本文BA网络参数统一设置为: $N_A = N_B = 500$, $m_0 = m = 3$, 因此相依网络规模为 $N = 1000$, 内部度 $\langle k \rangle \approx 2m = 6$. 令 $\langle d \rangle = 4$, 当 μ 取不同值时的 S - λ 曲线如图1所示.

从图1可以看出: 当 μ 值取为 0, 0.05, 0.2 时, μ 值越大, 平均故障规模 S 越大; 而当 μ 值取为 0.4,

0.8, 1 时, μ 值越大, S 值越小. 为了更清晰地观察 μ 对相依网络级联故障的影响, 我们定义了 λ_h 来表征当平均故障规模 S 达到 h 时对应的 λ 值, 很明显, λ_h 越小表示相依网络抵抗级联故障的能力越强. 图2即为 λ_h - μ 曲线, 这里给出了 $h = 0.2, 0.4, 0.6$ 和 0.8 时的情形.

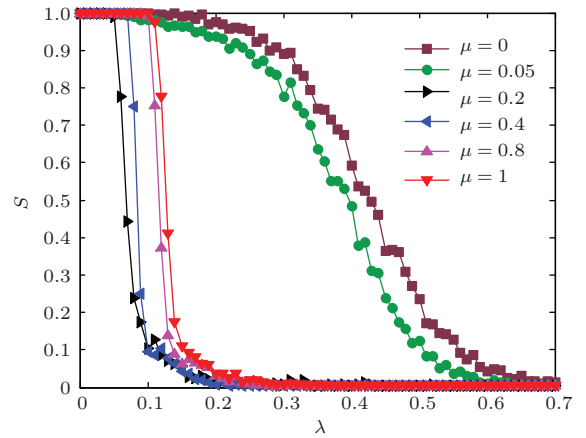


图1 (网刊彩色) μ 取不同值时的 S - λ 曲线

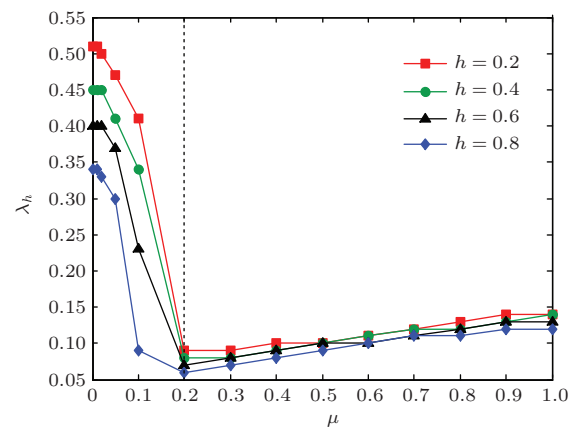


图2 (网刊彩色) λ_h - μ 曲线

从图2可以看出, λ_h - μ 曲线存在一个极小值 μ_T , 极点 μ_T 约等于 0.2, 当 $\mu < 0.2$ 时, $\lambda_h(\mu)$ 是减函数; 当 $\mu > 0.2$ 时, $\lambda_h(\mu)$ 是增函数. 由于 λ_h 越小, 相依网络越鲁棒, 因此, 当 $\mu < \mu_T$ 时, 随着 μ 值增大, 相依网络抵抗级联故障能力越强; 当 $\mu > \mu_T$ 时, 随着 μ 值增大, 相依网络抵抗级联故障能力越弱. 由于所取参数的原因, 对于其他平均外部度或平均内部度等参数不同的相依网络, 我们验证了其阈值 μ_T 并不等于 0.2, 但阈值 μ_T 是存在的. 由此我们得出结论: 当度量外部度和内部度对负荷贡献比的指标达到一个阈值 μ_T 时, 相依网络具有最强抵抗级联故障的鲁棒性.

对于其他平均外部度或平均内部度等参数不同的相依网络, 本文将进一步探索 μ_T 是如何随这些参数变化的. 图 3 是当平均外部度 $\langle d \rangle = 6$ 时, 不同平均内部度 $\langle k \rangle$ 情况下的 $\lambda_h - \mu$ 曲线, 这里 $h = 0.4$.

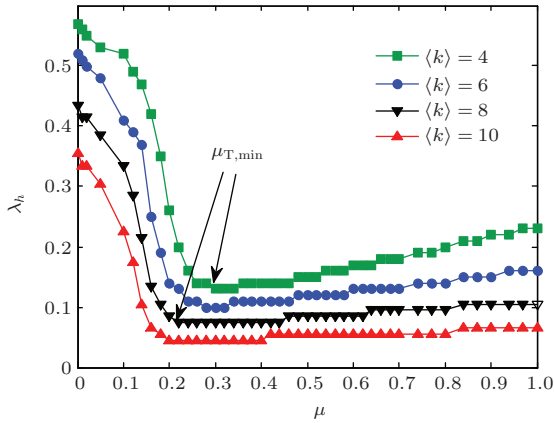


图 3 不同平均内部度 $\langle k \rangle$ 情况下的 $\lambda_h - \mu$ 曲线

从图 3 可以看出, 随着平均内部度 $\langle k \rangle$ 的增大, 其 $\lambda_h - \mu$ 曲线越来越靠下, 因而平均内部度 $\langle k \rangle$ 越大, 相依网络的鲁棒性越强. 另外从图 3 还可看出, 随着平均内部度 $\langle k \rangle$ 的增大, 阈值 μ_T 逐渐减小, 特别是首次达到极小值点的 $\mu_{T,min}$ 值是随着 $\langle k \rangle$ 的增大而减小的.

由于图 3 中固定 $\langle d \rangle = 6$, 因而当 $\langle k \rangle = 6$, $\langle d \rangle = 6$ 时, $\mu_T \approx 0.3$. 而由图 2 可知, 当 $\langle k \rangle = 6$, $\langle d \rangle = 4$ 时, $\mu_T \approx 0.2$. 可以初步判断在相依网络中, 随着平均外部度 $\langle d \rangle$ 的增大, 阈值 μ_T 有增大的趋势, 仿真得到的 $\lambda_h - \mu$ 曲线也进一步验证了这个结论 (在文中未给出). 我们同样得出, 随着平均外部度 $\langle d \rangle$ 的增大, 其 $\lambda_h - \mu$ 曲线越来越靠下, 即相依网络随着平均外部度 $\langle d \rangle$ 的增大而变得更鲁棒, 这个结论还将在 3.2.3 节中进一步验证.

我们根据初始负荷的定义 (1) 式对所观察到的现象进行简单分析. 根据前面得出的结论, 当外部度保持不变时, 平均内部度 $\langle k \rangle$ 越大, μ_T 越小, 从 (1) 式可以看出这有抑制内部度在初始负荷分配中占比增大的作用. 而当内部度保持不变时, 平均外部度 $\langle d \rangle$ 越大, μ_T 越大, 这又有抑制外部度在初始负荷分配中占比的作用. 因此, 在相依网络中, 可通过调节参数 μ 来控制内部度和外部度对初始负荷的贡献比, 当 μ 达到某一值 μ_T 时, 即内部度与外部度对初始负荷贡献比达到某一比例时, 相依网络

具有最强抵抗级联故障的鲁棒性.

3.2 耦合因素对相依网络级联故障的影响

3.2.1 耦合方式对相依网络级联故障的影响

耦合边的添加方式主要有三种: 随机耦合、同配耦合、异配耦合. 随机耦合即耦合边是随机添加的, 同配耦合指的是两个网络中内部度或负荷相近的节点倾向于建立连接, 而异配耦合则是两个网络中内部度或负荷相差较大的节点倾向于建立连接. 为了便于观察三种耦合方式对相依网络级联故障的影响, 本文构建了 $\langle d \rangle = 1$ 情况下的严格同配耦合和严格异配耦合的相依网络: 对于严格同配耦合, 将网络 A 中内部度最大节点、次大节点、第 3 大节点……最小节点, 分别与网络 B 中内部度最大节点、次大节点、第 3 大节点……最小节点建立耦合边; 对于严格异配耦合, 将网络 A 中内部度最大节点、次大节点、第 3 大节点……最小节点, 分别与网络 B 中内部度最小节点、次小节点、第 3 小节点……最大节点建立耦合边. 取 $\mu = 0.8$, 其余参数同前, 相依网络在 3 种耦合方式下的 $S - \lambda$ 曲线如图 4 所示.

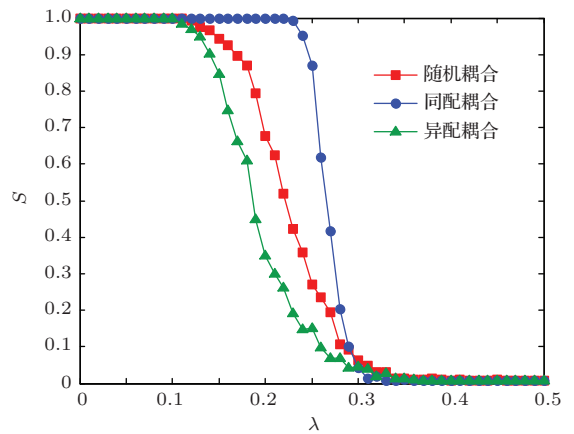


图 4 (网刊彩色) 3 种耦合方式下相依网络的 $S - \lambda$ 曲线

从图 4 可以看出, 相依网络在异配耦合时具有最强的抵抗级联故障的鲁棒性, 随机耦合次之, 同配耦合最差. 这与相互连接网络是相反的, 根据文献 [31], 考虑负荷因素, 相互连接网络在同配耦合时鲁棒性最强, 随机耦合次之, 异配耦合最差.

3.2.2 外部度分布对相依网络级联故障的影响

以上所采用的外部度分布不论是 $\langle d \rangle = 1$ 时的

单一分布或是 $\langle d \rangle > 1$ 时的随机分布, 都可看作随机均匀分布. 下面我们考虑外部度分布非均匀的情况, 研究外部度分布对相依网络级联故障的影响.

根据外部度分布与内部度分布是否相关, 有两种非均匀外部度分布方案. 对于外部度分布与内部度分布不相关的情形(情形I), 我们拓展了 Goh 等 [29] 提出的方案, 具体步骤如下.

将网络 A 中的所有节点从 1 到 N_A 进行编号, 并为每个节点赋值 $p_i^A = i^{-\delta}$ ($i = 1, 2, \dots, N_A$), 同样将网络 B 中所有节点从 1 到 N_B 进行编号并赋值 $p_j^B = j^{-\delta}$ ($j = 1, 2, \dots, N_B$), 这里 δ ($0 < \delta < 1$) 是一个可调参数. 将所有权值加权归一化, 即

$$\hat{p}_i^A = \frac{p_i^A}{\sum_k p_k^A}, \quad \hat{p}_j^B = \frac{p_j^B}{\sum_k p_k^B}, \quad (7)$$

从而有

$$\sum_{i=1}^N \hat{p}_i^A = 1, \quad \sum_{j=1}^N \hat{p}_j^B = 1. \quad (8)$$

接着添加耦合边, 在网络 A 中节点 i 和网络 B 中节点 j 添加一条耦合边的概率正比于节点 i 和节点 j 的权值 \hat{p}_i^A 和 \hat{p}_j^B , 按此规则一直加边, 直到相依网络中达到要求的耦合边为止. 这样生成的相依网络的外部度分布满足无标度特性, 即 $P(d) \propto d^{-\gamma}$, 并且 γ 满足: $\gamma = 1 + 1/\delta$.

对于外部度分布与内部度分布相关的情形(情形 II), 首先以如下概率 Π^A

$$\Pi_i^A = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, N_A) \quad (9)$$

从网络 A 中选择一个节点 i^A , 再以如下概率 Π^B

$$\Pi_s^B = \frac{k_s}{\sum_t k_t} \quad (s, t = 1, 2, \dots, N_B) \quad (10)$$

从网络 B 中选择一个节点 j^B . 然后在节点 i^A 和 j^B 之间建立一条耦合边, 重复此步骤, 直到建立 $N \langle d \rangle / 2$ 条耦合边, 由于内部度大的节点拥有更大的 Π^A 或 Π^B 值, 更容易被选中, 因此建立的相依网络具有内部度越大, 外部度也就越大的特征. 由于选用优先选择概率, 其外部度分布服从不均匀的幂律分布.

仿真取 $\langle d \rangle = 4$, $\mu = 0.6$, 其他参数设置同前. 图 5 给出了随机均匀分布、情形 I、情形 II 这 3 种情形下的 S - λ 曲线.

从图 5 可以看出, 平均故障规模 S 从大到小依次为情形 I、情形 II、随机均匀分布, 即相依网络在外部度随机均匀分布时具有最强抵抗级联故障的能力, 其次是外部度与内部度相关的幂律分布, 最后是外部度与内部度完全不相关的幂律分布.

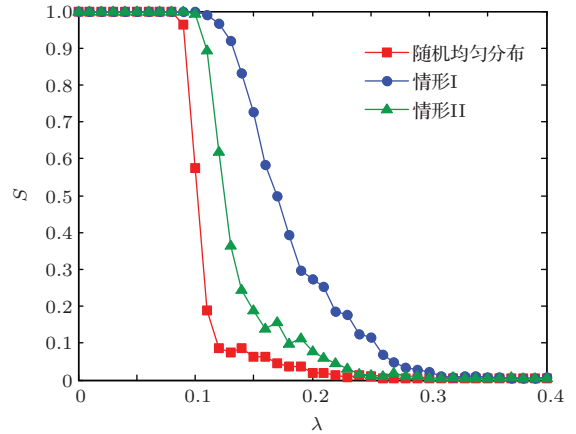


图 5 (网刊彩色) 3 种情形下的 S - λ 曲线

3.2.3 耦合强度对相依网络级联故障的影响

平均外部度 $\langle d \rangle$ 表示平均每个节点拥有耦合边的数目, 其值越大, 耦合越强, 因此平均外部度可表征相依网络的耦合强度. 下面考察平均外部度对相依网络级联故障的影响. 令 $\mu = 0.8$, 其余参数不变. 图 6 为 $\langle d \rangle$ 取不同值时的 S - λ 曲线.

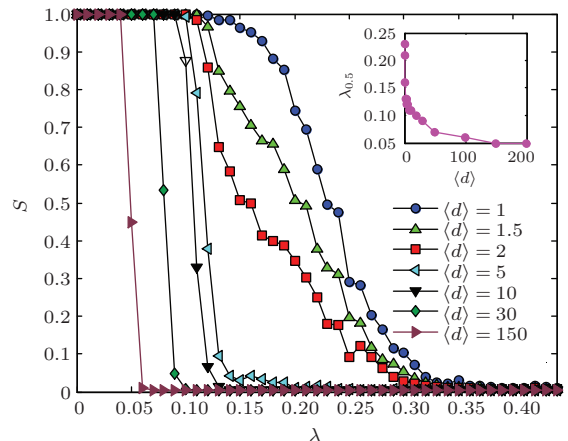


图 6 (网刊彩色) $\langle d \rangle$ 取不同值时的 S - λ 曲线

从图 6 可以看出, 当 $\langle d \rangle$ 取值为 1, 1.5, 2, 5, 10, 30, 150 时, 随着 $\langle d \rangle$ 的增大, 相依网络平均故障规模有减小的趋势. 从图 6 中内插图的 λ_h - $\langle d \rangle$ 曲线可以更清晰地观察到这个趋势 ($h = 0.5$), 这是由于 λ_h 是关于 $\langle d \rangle$ 的一个减函数. 直观上也很容易理解:

由于耦合强度的增大, 耦合故障的风险降低, 进而降低整个平均故障规模, 如果耦合强度趋于无穷大, 那么将不存在耦合故障, 相依网络中级联故障的传播等同于级联故障在各个孤立网络中的传播.

3.3 层内节点连接相似度对耦合鲁棒性的影响

层内节点连接相似度即孤立网络中的度-度相关性, 其描述的是在网络A和网络B中, 度大的节点是倾向于与度大的节点相连还是与度小的节点相连, 如果度大的节点倾向于与度大的节点相连, 则称为同配连接, 否则称为异配连接. 可用 Pearson 相关系数 r ($-1 < r < 1$) 来描述网络的度-度相关性 [32]:

$$r = \frac{\frac{1}{E} \sum_i j_i k_i - \left[\frac{1}{E} \sum_i \frac{1}{2} (j_i + k_i) \right]^2}{\frac{1}{E} \sum_i \frac{1}{2} (j_i^2 + k_i^2) - \left[\frac{1}{E} \sum_i \frac{1}{2} (j_i + k_i) \right]^2}, \quad (11)$$

其中, j_i, k_i 分别表示连接第 i 条边的两个节点 j, k 的度; E 表示网络的总边数. 当 $r > 0$ 时, 网络是同配连接; 当 $r < 0$ 时, 网络是异配连接.

本文使用保度重连法生成不同相关系数的网络. 保度重连法如图 7 所示. 首先随机选择网络中两条边 ab 和 cd , 如果 a 和 d 不相邻且 b 和 c 不相邻, 则按图 7 中 I 所示方法重连; 如果 a 和 c 不相邻且 b 和 d 不相邻, 则按图 7 中 II 所示方法重连, 否则重新选择两边进行重连. 保度重连法的实施不改变原有网络的度分布.

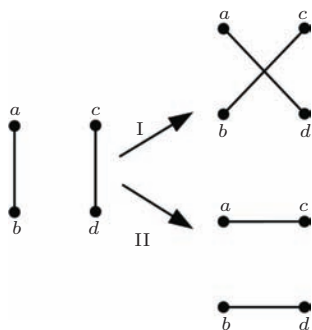


图 7 保度重连法示意图

基于保度重连法生成不同相关系数网络的步骤如下:

- 1) 计算原始网络的相关系数 r ;

- 2) 按图 7 进行重连操作, 计算重连后网络的相关系数 r' ;

- 3) 若 $r' > r$ (或 $r' < r$), 则令 $r = r'$, 转向步骤 2; 否则, 直接转向步骤 2;

- 4) 此过程一直循环, 直到达到设定的 r 值.

下面仿真分析相关系数 r 对相依网络级联故障的影响. 令 $\langle d \rangle = 4, \mu = 0.6$, 其他参数不变, 耦合方式为随机耦合. 图 8 为不同 r 值时相依网络的 $S-\lambda$ 曲线.

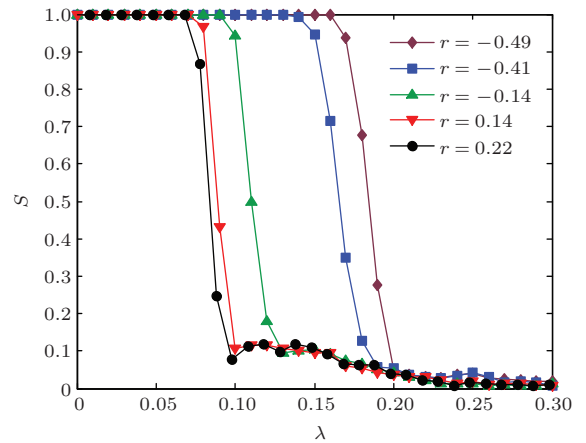


图 8 (网刊彩色) 不同 r 值时相依网络的 $S-\lambda$ 曲线

从图 8 可以看出, 随着 r 值的增大, 平均故障规模 S 变小, 即层内连接的同配性将增强网络抵抗级联故障的鲁棒性. 这与文献 [21] 所得结论正好相反. 需要指出的是, 文献 [21] 研究的是忽略负荷作用下相依网络的鲁棒性. 由此可以看出负荷等动力学因素确实对相依网络的级联故障产生了重大影响.

4 结 论

相依网络在现实中有广泛的代表性, 例如电力-计算机相依网络、物流-交通相依网络等, 网络间的这种耦合一方面促进了网络间的交流, 另一方面也增大了级联故障跨网传播的风险. 在负荷作用下, 考虑耦合因素, 本文建立了相依网络级联故障模型, 对负荷流动动力学过程和相依网络拓扑结构的相互影响进行了综合研究. 我们的研究表明, 当外部度和内部度对负荷贡献比达到一定值时, 相依网络具有最强的抵抗级联故障的能力. 耦合因素作为相依网络区别于孤立网络的一个最主要特征, 其对相依网络中级联故障的影响也是多方面的. 本文

研究表明, 当采用同配耦合方式, 并在保证外部度分布尽量均匀的情况下增大耦合强度, 将提高相依网络抵抗级联故障的鲁棒性. 另外, 我们发现, 不同于忽略负荷时的情形, 在负荷作用下相依网络层内连接的同配性有助于抑制级联故障的传播. 本文的研究可为建立高可靠性的相依网络和提高相依网络的鲁棒性提供参考.

参考文献

- [1] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, Chavez M, Hwang D U 2006 *Phys. Rep.* **424** 175
- [2] Motter A E, Lai Y C 2002 *Phys. Rev. E* **66** 065102
- [3] Crucitti P, Latora V, Marchiori M 2004 *Phys. Rev. E* **69** 045104(R)
- [4] Wang J W, Rong L L 2009 *Physica A* **388** 1289
- [5] Wang J W, Rong L L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3714 (in Chinese) [王健伟, 荣莉莉 2009 物理学报 **58** 3714]
- [6] Zhang J F, Yang L X, Gao Z Y 2010 *Int. J. Mod. Phys. C* **21** 991
- [7] Motter A E 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 098701
- [8] Zhao L, Park K, Lai Y C 2004 *Phys. Rev. E* **70** 035101(R)
- [9] Wang J W, Rong L L, Zhang L, Zhang Z Z 2008 *Physica A* **387** 6671
- [10] Wei D Q, Luo X S, Zhang B 2012 *Physica A* **391** 2771
- [11] Ash J, Newth D 2007 *Physica A* **380** 673
- [12] Li P, Wang B H, Sun H, Gao P, Zhou T 2008 *Eur. Phys. J. B* **62** 101
- [13] Dou B L, Wang X G, Zhang S Y 2010 *Physica A* **389** 2310
- [14] Hu K, Hu T, Tang Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 080206
- [15] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, Stanley H E, Havlin S 2010 *Nature* **464** 1025
- [16] Parshani R, Buldyrev S V, Havlin S 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 048701
- [17] Shao J, Buldyrev S V, Havlin S, Stanley H E 2011 *Phys. Rev. E* **83** 036116
- [18] Huang X Q, Gao J X, Buldyrev S V, Havlin S, Stanley H E 2011 *Phys. Rev. E* **83** 065101(R)
- [19] Buldyrev S V, Shere N W, Cwlich G A 2011 *Phys. Rev. E* **83** 016112
- [20] Zhou D, Stanley H E, D'Agostino G, Scala A 2012 *Phys. Rev. E* **86** 066103
- [21] Gao J X, Buldyrev S V, Stanley H E, Havlin S 2012 *Nat. Phys.* **8** 40
- [22] Zhou D, Gao J X, Havlin S, Stanley H E 2013 *Phys. Rev. E* **87** 052812
- [23] Shao S, Huang X Q, Stanley H E, Havlin S 2014 *Phys. Rev. E* **89** 032812
- [24] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [25] Zio E, Sansavini G 2011 *IEEE. Trans. Reliab.* **60** 94
- [26] Brummitt C D, D'Souza R M, Leicht E A 2012 *PNAS* **109** E680
- [27] Qiu Y Z 2013 *Physica A* **392** 1920
- [28] Peng X Z, Yao H, Du J, Ding C, Zhang Z H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 078901 (in Chinese) [彭兴钊, 姚宏, 杜军, 丁超, 张志浩 2014 物理学报 **63** 078901]
- [29] Goh K I, Kahng B, Kim D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 278701
- [30] Barthélemy M 2004 *Euro. Phys. J. B* **38** 163
- [31] Tan F, Xia Y X, Zhang W P, Jin X Y 2013 *Europhys. Lett.* **102** 28009
- [32] Newman M E J 2010 *Networks: an Introduction* (New York: Oxford University Press)

Load-induced cascading failure in interdependent network^{*}

Peng Xing-Zhao^{1)†} Yao Hong²⁾ Du Jun¹⁾ Wang Zhe¹⁾ Ding Chao¹⁾

1) (*Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China*)

2) (*Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China*)

(Received 11 July 2014; revised manuscript received 28 September 2014)

Abstract

The study of load-induced cascading failures in interdependent networks is of great realistic significance, which can provide valuable reference for designing high robust interdependent network or improving their robustness. In this paper, we establish a cascading model for a double layer interdependent network, and study the effects of the contributions of inter-degree and intra-degree to the loads, the coupling, and the intra-node linking similarity on the cascading failure in the interdependent network. Our studies show that when the contributions of inter-degree and intra-degree to the loads attain some values, the interdependent network reaches the highest robustness against cascading failures. As a notable feature for the interdependent network that is different from an isolated network, the coupling must have a significant influence on cascading failure in the interdependent network. In order to reach higher robustness, we suggest that the disassortative coupling be used and the inter-degree be made as homogeneous as possible under condition that a larger average inter-degree is adopted. In addition, we find that it is contrary to the case of neglecting loads that when the Pearson correlation coefficient for measuring the intra-layer degree-degree relation is larger, the interdependent network is more robust against cascading failures.

Keywords: interdependent networks, cascading failure, load-induced, robustness

PACS: 89.75.Fb, 89.75.Hc

DOI: [10.7498/aps.64.048901](https://doi.org/10.7498/aps.64.048901)

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2012JM8035).

[†] Corresponding author. E-mail: pxz0311@163.com