

控制与决策

Control and Decision

基于边耦合的双层网络鲁棒性优化

高彦丽, 梁崇生, 陈世明

引用本文:

高彦丽,梁崇生,陈世明. 基于边耦合的双层网络鲁棒性优化[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2714–2720.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.2204>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于强化学习的倒立摆分数阶梯度下降RBF控制](#)

Reinforcement learning based fractional gradient descent RBF neural network control of inverted pendulum
控制与决策. 2021, 36(1): 125–134 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0816>

[基于卷积神经网络的云雾遮挡舰船目标识别](#)

Obscured ship target recognition based on convolutional neural network
控制与决策. 2021, 36(3): 661–668 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0781>

[复杂背景下全景视频运动小目标检测算法](#)

Panoramic video motion small target detection algorithm in complex background
控制与决策. 2021, 36(1): 249–256 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0686>

[基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制](#)

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller
控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

[双层相依网络化指挥信息系统级联失效研究](#)

Cascading failure of double layer networked command information system
控制与决策. 2020, 35(12): 3017–3025 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0696>

基于边耦合的双层网络鲁棒性优化

高彦丽, 梁崇生, 陈世明[†]

(华东交通大学 电气与自动化工程学院, 南昌 330013)

摘要: 近年来相依网络鲁棒性的研究引起人们广泛关注, 考虑到实际网络中具有边耦合关系的一类双层边耦合网络, 研究网络中存在边失效时双层网络中的网络结构和负载容量模型参数对边耦合网络鲁棒性的影响. 研究表明: 网络结构越趋向异质化, 网络鲁棒性越好; 直接受攻击网络的负载容量参数能够有效改变网络的相变行为, 容量增大使得耦合网络的相变行为从一阶到混合相变, 再到二阶相变, 但不会提高网络在大规模攻击下的存活规模, 并且通过增大直接受攻击网络的负载容量参数来改善网络鲁棒性需要花费的代价较高; 间接受攻击网络负载容量参数增大可以显著提高网络的鲁棒性, 其效果受网络初始负载分布影响. 进一步研究发现, 改变网络的初始负载模型函数可以调整影响网络存活规模的负载容量参数的关键值, 最后分析了成本约束下耦合网络鲁棒性能最优化的容量参数设置.

关键词: 相依网络; 边耦合; 级联失效; 负载重分配; 渗流相变; 鲁棒性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2204

引用格式: 高彦丽, 梁崇生, 陈世明. 基于边耦合的双层网络鲁棒性优化[J]. 控制与决策, 2023, 38(9): 2714-2720.

Robustness optimization of two-layer network based on edge coupling

GAO Yan-li, LIANG Chong-sheng, CHEN Shi-ming[†]

(College of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In recent years, the research on the robustness of interdependent networks has attracted lots of attention. Considering a type of two-layer edge-coupled networks with edge-coupling relationships in practical networks, this paper studies the effects of network structure and load capacity model parameters on the robustness of edge-coupled networks when there is an edge failure in the network. The results show that the network structure tends to be more heterogeneous, and the system is more robust. The load capacity parameters of the directly attacked network can effectively change the percolation behaviors of the network, and the increasing of the initial capacity makes the percolation behaviors change from first-order phase transitions to hybrid-phase transitions, and then to the second-order phase transitions, but it is unable to increase the survival scale of the network under large-scale attacks and it costs too much to improve the robustness. The increasing of initial capacity parameter of the indirectly attacked network can significantly improve the robustness of the network, and is affected by the initial load distribution of the network. Further research finds that the different initial load models function leads to the different initial load distributions, which can optimize the value of the critical load capacity parameter. Finally, the capacity parameter settings for optimizing the robust performance of the coupled network under cost constraints are analyzed.

Keywords: interdependent networks; edge coupling; cascading failures; load redistribution; percolation phase transitions; robustness

0 引言

现代社会中电网、交通网、移动通信网等网络化的社会基础设施与人们生活有着密切的联系, 进入信息化时代后, 这些网络都不是孤立存在和运行的, 而是通过相互协作和相互依赖发挥其功能和作用. 相依关系一定程度上提高了网络的效率, 但同时也增

加了相依网络的脆弱性^[1]. 例如, 2003年意大利大规模停电事故^[2], 电力网络中节点失效后导致通信控制网络中节点失效, 电网调度系统无法正常工作, 随后电力网络与通信控制网络间发生了大规模的级联失效. 在此后的一段时间里, 相依网络在随机攻击和蓄意攻击下的鲁棒性研究受到了学者们的广泛关注^[3],

收稿日期: 2021-12-21; 录用日期: 2022-05-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61973118); 江西省重点研发计划重点项目(20212BBE51010).

责任编辑: 李忠奎.

[†]通讯作者. E-mail: shmchen@ecjtu.jx.cn.

而基于渗流理论的研究方法被广泛应用^[4-6]. 研究发现, 双层网络中层间相互依赖关系会使得系统更加脆弱, 而层间互联关系会使得网络更加鲁棒^[7-8]. 网络间耦合强度的降低会导致系统从一阶到二阶的渗流相变^[9].

此外, 网络中由于节点和边故障导致的负载波动对相依网络的鲁棒性能也有显著影响. 例如, 电力网络中的电能、交通网络中乘客和货物等, 节点和边的失效可能导致网络负载的重分配, 而负载的重分配则会引发网络的级联过载进而发生失效. 为了研究这种现象, Motter等^[10]提出了负载容量线性模型, 通过调节负载容忍参数改变负载容量, 当网络中节点的负载大于其容量时, 节点失效. 基于负载容量线性模型的思想, 后续学者们提出了各种改进模型. 例如, 窦炳琳等^[11]提出基于节点介数确定的节点初始负载, 建立了更加符合实际网络特点的负载非线性模型. 陈世明等^[12]采用多目标粒子群优化算法对负载容量非线性模型参数进行优化, 优化后的负载容量非线性模型可以在有限的网络成本下更好地提高网络对级联失效的抵御能力. 沙堆模型^[13]的特点是失效节点会将负载分配至其相邻节点. 光纤束模型^[14]的特点是一条线路发生故障时, 它所承载的负载将在其余线路之间平均重新分配. 进一步的研究将负载容量模型从单个网络推广至相依网络中, 研究负载重分配导致的网络故障在耦合网络的层间和层内传播^[15-17]. 考虑实际耦合网络的负载重分配下故障传播的研究, 包括信息指挥系统^[18]、装备保障网络^[19]、多层供应链网络^[20]等.

本文考虑一类具有边耦合关系的双层网络, 网络中一条边失效后, 其负载可以分配到另一个与其具有耦合关系的网络中. 例如长途旅行时, 如果两地间的铁路运输由于天气原因出现故障, 则人们很有可能会选择航空路线出行. 这种情况下两个网络间存在着负载作用下的边耦合关系以及边渗流的现象, 目前这方面的研究尚有待开展和深入. 文献[21]考虑到实际网络中存在的边相依关系, 开发了基于自治方程的数学框架研究边相依网络的鲁棒性, 但没有考虑负载重分配作用下边耦合网络的级联故障. 本文建立负载重分配作用下的边耦合网络模型, 研究在边渗流情况下网络结构和负载容量参数对边耦合网络间负载级联故障的影响, 分析成本约束下耦合网络鲁棒性能最优化的容量参数设置, 进而得出此类网络的鲁棒性优化策略.

1 负载边耦合网络模型

1.1 模型建立

建立随机一对一双层边耦合网络模型如图1所示. 图中实线为网络内部连接边, 虚线为网络间的耦合连接边, 边 e_{ij} 和边 e_{cd} 分别为子网络A和子网络B中具有耦合关系的边.

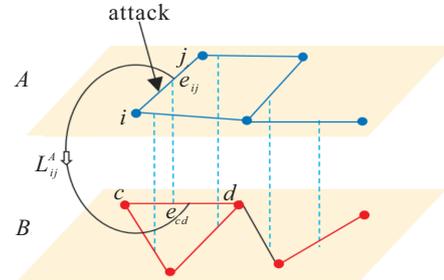


图1 边耦合网络的边负载分配示意图

定义网络边的初始负载为

$$L_{ij}^A = (k_i + k_j)^{a_1}, \quad (1)$$

$$L_{cd}^B = (k_c + k_d)^{a_2}. \quad (2)$$

其中: k_i, k_j, k_c 和 k_d 分别为节点 i 、节点 j 、节点 c 和节点 d 的度值, a_1 和 a_2 分别为网络A和网络B的初始负载系数.

定义网络边的负载容量为

$$C_{ij}^A = (1 + b_1)L_{ij}^A, \quad (3)$$

$$C_{cd}^B = (1 + b_2)L_{cd}^B, \quad (4)$$

其中 b_1, b_2 分别为网络A和网络B的负载容量系数. 当边 e_{ij} 失效后, 其上的负载采用相依重分配的方式向耦合边进行分配, 耦合边 e_{cd} 获得边 e_{ij} 全部负载, 此时边 e_{cd} 的负载为

$$\widetilde{L}_{cd}^B = L_{ij}^A + L_{cd}^B. \quad (5)$$

若此时 $\widetilde{L}_{cd}^B > C_{cd}^B$, 则边 e_{cd} 失效. 网络B若有边失效, 则负载同样按此原则向网络A分配.

1.2 级联失效过程

子网络A在遭受攻击后可能发生级联失效, 本文中的失效规则包括: 1) 过载失效: 当边 e_{ij} 上的负载超过其最大容量时, 边 e_{ij} 失效; 2) 非连通失效: 当边 e_{ij} 脱离子网络的最大连通分支时, 边 e_{ij} 失效. 图2给出了负载重分配下边耦合网络级联失效过程. 子网络A中 q_1 比例边失效, 随后不在子网络A中最大连通图外的节点和边失效, 这些所有失效边的负载将分配至子网络B的边上, 假设此时子网络B中负载失效边比例为 q_2 ; 随后不在子网络B中最大联通图内的节点和边失效, 假设这部分边的比例为 q_3 , q_3 包含的边中仅有 q_4 比例边在子网络A中还有与之具有耦合关系的

边;假设子网络A中有 q_5 比例边与子网络B中 q_4 比例边相耦合,这时将子网络B中 q_4 边的初始负载分配至子网络A中 q_5 边上;随后判断子网络A中 q_5 包

含的边是否失效,若失效则继续进行下一轮级联失效,否则耦合网络达到稳定状态。

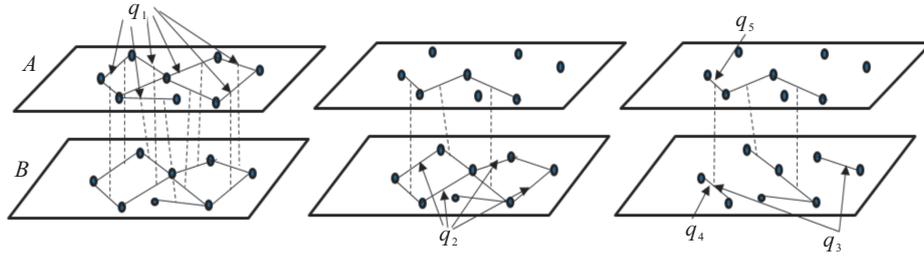


图2 边耦合网络负载分配下的级联失效示意图

1.3 网络鲁棒性测度指标

刻画网络鲁棒性能指标为稳定后耦合网络中最大连通分支的节点数量与耦合网络节点总数的比例. 设 N_A 和 N_B 分别为子网络A和子网络B的节点总数,子网络A和子网络B中最大连通分支节点数为 \widetilde{N}_A 和 \widetilde{N}_B ,则存活节点比例为

$$s = \frac{\widetilde{N}_A + \widetilde{N}_B}{N_A + N_B}. \quad (6)$$

为了消除实验偶然因素的影响,进行 n 次独立仿真实验,得到一组存活节点比例 s_1, s_2, \dots, s_n ,平均值为

$$GC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i. \quad (7)$$

GC即为耦合网络平均存活节点比例,稳定状态下耦合网络的GC越大,网络的鲁棒性能越好.

2 实验仿真与分析

为了研究网络结构、负载容量参数等对边耦合网络相变行为的影响,考虑到RStudio平台具有程序结构清晰、网络生成便捷的特点,同时可以利用其中的“igraph”包快速建立边耦合网络负载级联故障模型,因此在RStudio平台中进行仿真实验. 无特殊说明情况下,默认参数设置为:网络节点数量 $N_A = N_B = 10000$, $a_1 = a_2 = 1$,ER(Erdős-Rényi)随机网络和RR(random regular)规则网络的平均度 $\langle k \rangle = 5$,BA(Barabási-Albert)无标度网络 $m_0 = 1, m = 3$,独立仿真实验次数 $n = 30$,攻击方式为随机攻击子网络A中的 q 比例边,即保留 $1 - q$ 比例的边.

2.1 不同网络结构对边耦合网络相变行为的影响

采用边数均为50000条的ER-ER、BA-BA、RR-RR三种边耦合网络进行仿真,以观察在网络边数相同的情况下,网络的类型对负载边耦合网络鲁棒性的影响. 图3给出了3种网络结构下耦合网络相变行为的对比,其中 $b_1 = b_2 = 1$.

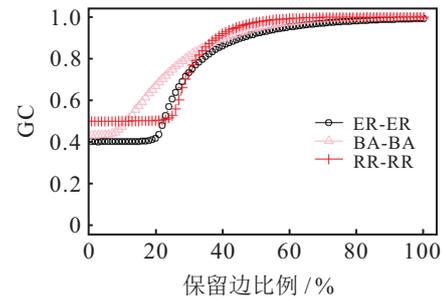


图3 不同网络结构下耦合网络相变行为对比

由图3可以看到,BA-BA网络对比ER-ER、RR-RR网络具有较小的二阶相变阈值点,这是由于BA网络具有幂律分布的结构特性,这种结构对于随机攻击具有更好的鲁棒性. RR-RR网络在大范围攻击下,对比BA-BA、ER-ER网络,在稳定后具有更大的联通子图,这是因为RR网络具有非常匀质的网络结构,在 $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 1$ 参数下,每条边的负载容量正好可以容纳下自己的初始负载和与其具有耦合关系的边的初始负载. 因此,在面对大规模的随机攻击时,GC大小维持在0.5.

2.2 容量系数 b_2 对边耦合网络相变行为的影响

为了比较子网络的负载容量系数 b_2 对耦合网络相变行为的影响,选用ER-ER边耦合网络,在 $b_1 = 1$ 时观察 b_2 变化对耦合网络相变行为的影响,结果如图4所示.

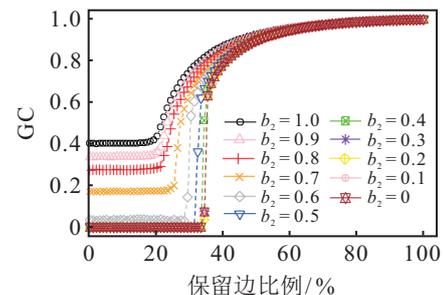


图4 容量系数 b_2 对耦合网络相变行为的影响

由图4可以看到,负载容量系数 b_2 的增加可以显

著提升网络鲁棒性能,网络的相变行为呈现了从一阶相变到二阶相变的变化,这是因为 b_2 的增加可以增大子网络 B 中边的负载容量,从而改善网络的鲁棒性能.同时也看到, b_2 参数在某个关键值处小幅增加时可以显著改善网络在大规模攻击下的存活规模,称该关键值为影响网络存活规模的容量参数关键值.从图4可以看出,当 b_2 值为0.6时,在大规模攻击下耦合网络稳定时的存活规模接近于0,而 b_2 值为0.7时,大规模攻击下耦合网络稳定时的存活规模接近0.2. b_2 参数对于耦合网络相变行为的改变主要体现在控制由于子网络 A 中失效边导致子网络 B 中失效边的比例 q_2 , $b_2 = 0.6$ 时子网络 A 中失效边分配而来的负载恰好略大于绝大部分子网络 B 中与之耦合的边的可承受负载容量.此时若 b_2 小幅增大,则子网络 B 中有相当部分边的可承受负载容量大于子网络 A 失效边分配而来的负载,因此 b_2 小幅增大可以极大地提高网络在大规模攻击下的存活规模.显然, b_2 对于负载边耦合网络在大规模攻击下存活规模的影响与网络中边的初始负载分布有密切关系.

为了验证这一分析,本文从以下3个方面研究 b_2 对于负载边耦合网络在大规模攻击下的存活规模的影响: 1) 不同网络平均度; 2) 不同网络结构; 3) 不同初始负载函数.

图5为ER-ER负载边耦合网络在网络平均度值 $\langle k \rangle = 4, 5, 7$ 时, b_2 参数与大规模攻击下网络的最终稳定存活规模GC的关系曲线.

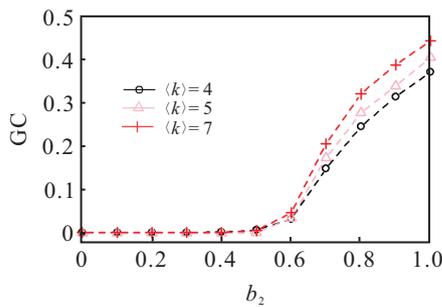


图5 不同 $\langle k \rangle$ 值下耦合网络的存活规模

由图5可以看到,耦合网络在3种不同平均度下, $b_2 = 0.6$ 后继续增大时,网络存活规模会有显著提升,因此ER网络的平均度不同并不会改变影响ER-ER边耦合网络存活规模的关键阈值.

图6为ER-ER边耦合网络在平均度值 $\langle k \rangle = 4, 5, 7$ 时网络的初始负载分布.虽然网络初始负载值对应的分布概率不同,但可以看到网络初始负载分布曲线形状相似,曲线的峰值区间均位于各自初始负载值区间的中间区域,可以认为在大规模攻击下影响ER-ER边耦合网络存活规模的容量参数关键值与网络的平

均度无关.

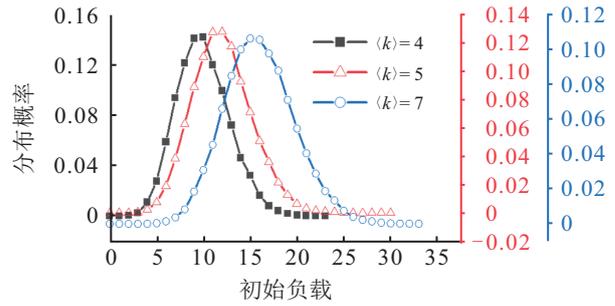
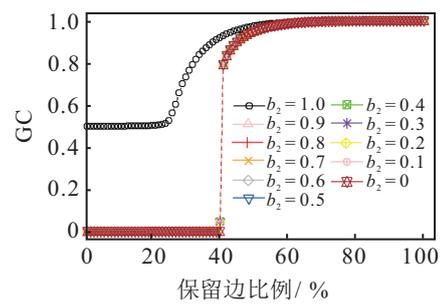
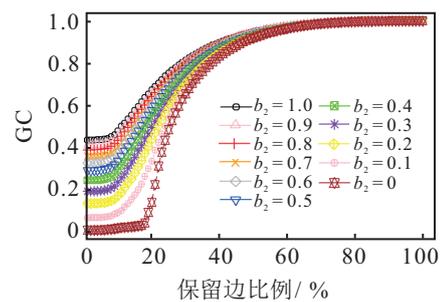


图6 不同 $\langle k \rangle$ 值下耦合网络的初始负载分布

选取RR-RR和BA-BA耦合网络相变行为如图7所示.图7(a)为RR-RR耦合网络在 b_2 变化时网络渗流行为的变化,当 $b_2 < 1$ 时,其相变行为都是一阶相变,当 $b_2 = 1$ 时,其相变行为变为二阶相变.这是由于RR网络是一个非常均匀的网络,在平均度 $\langle k \rangle = 5$ 时,每条边的初始负载均为10,当 $b_2 = 1$ 时,子网络 B 中边的负载容量恰好能承受子网络 A 中失效边分配而来的初始负载.图7(b)为BA-BA边耦合网络在 b_2 变化时网络渗流行为的变化.当 b_2 较小时, b_2 值的增加可以较为显著地提高网络的鲁棒性能,随着 b_2 值变大, b_2 值增加对提高网络鲁棒性能效果也逐渐减弱.这是因为BA网络是一个非常异质的网络,初始负载遵循幂律分布,多数边的初始负载均较小,因此在 b_2 较小时, b_2 增加可以使得子网络 B 中的边能够承受子网络 A 中大多数失效边分配来的较小初始负载.当 b_2 较大时,由于网络中初始负载较大边比较少,增大 b_2 并不能显著提高网络在大规模攻击下的存活规模.



(a) RR-RR



(b) BA-BA

图7 RR-RR、BA-BA耦合网络相变行为

2.3 初始负载函数对边耦合网络相变行为的影响

为了研究不同初始负载函数下 b_2 参数对负载边耦合网络相变行为的影响,通过改变初始负载函数来改变网络的初始负载分布,定义新的初始负载函数(乘积模型)如下:

$$L_{ij}^A = (k_i k_j)^{a_1}, \tag{8}$$

$$L_{cd}^B = (k_c k_d)^{a_2}. \tag{9}$$

网络的边的负载容量定义与前文相同.

使用 ER-ER 边耦合网络进行仿真,由图8可见,在新的初始负载函数下,边耦合网络在大规模攻击下存活规模的关键阈值为0.3,小于上述的0.6.

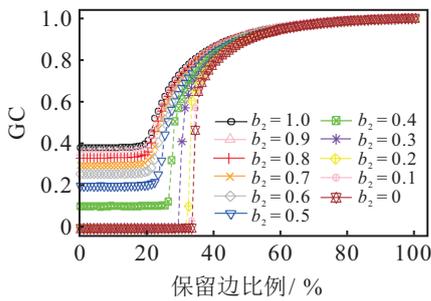


图8 乘积模型下 b_2 对耦合网络相变行为的影响

初始负载模型的改变显著降低了边耦合网络在大规模攻击下影响网络存活规模的负载容量参数关键值.图9为两种初始负载函数下网络中边的初始负载分布.

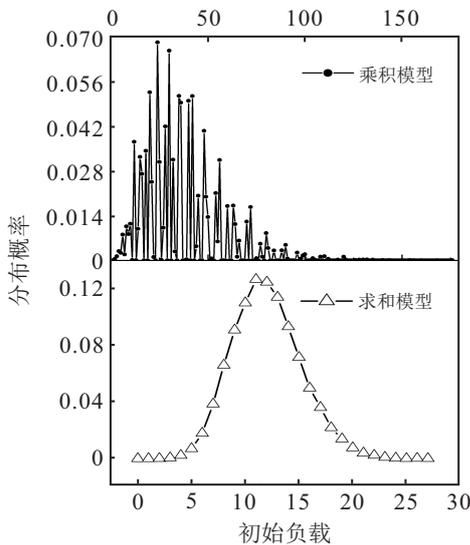


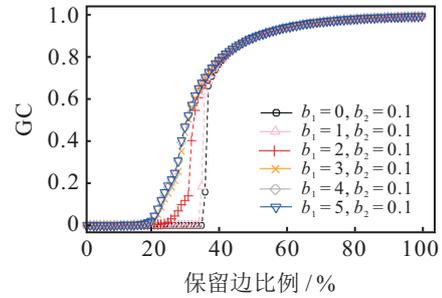
图9 边的初始负载分布对比

由图9可以看到,其负载分布均服从泊松分布,对比第1.1节的初始负载模型(求和模型),新的初始负载模型(乘积模型)下的负载分布曲线峰值区间更加靠近其初始负载值区间的左侧,表明在新的初始负载函数下网络中多数边的初始负载值位于网络初始负载值区间中相对较小的位置,因此 b_2 较小即可使

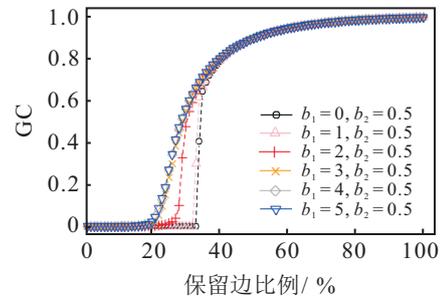
得子网络 B 中的边能够承受子网络 A 中多数失效边分配而来的相对较小的负载.

2.4 容量系数 b_1 对边耦合网络相变行为的影响

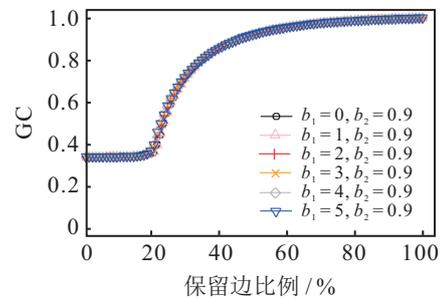
为了研究不同负载容量系数 b_1 对边耦合网络相变行为的影响,实验均采用第1.1节建立的负载模型,在 $b_2 = 0.1, 0.5, 0.9$ 时观察 b_1 变化对耦合网络相变行为的影响.



(a) $b_2 = 0.1$



(b) $b_2 = 0.5$



(c) $b_2 = 0.9$

图10 b_1 对边耦合网络相变行为的影响

图10显示了 b_1 参数的增大对比 b_2 参数增大对耦合网络鲁棒性改善呈现出的不同特征:1) b_1 增大不能改善耦合网络遭受大规模攻击时的存活规模;2) 由图10(a)和(b)可以看到随着 b_1 增大,渗流相变阈值点减小,且 b_1 的增大幅值均比较大,因此增大 b_1 可以通过减小耦合网络渗流的相变阈值实现进而改善网络的鲁棒性,但要求 b_1 的增大幅值比较大,这对于成本的要求较高;3) 图10(a)中当 $b_2 = 0.1, b_1 = 2$ 时渗流行为呈现出混合相变,因此当 b_2 值较小时增大 b_1 可使得耦合网络的相变行为从一阶相变过渡到混合相变,最后到达二阶相变;4) 由图10(c)可以看到当 b_2 较大时, b_1 增大难以改变网络的渗流行为,此时通过

增加 b_1 改善耦合网络鲁棒性变得愈加困难.

产生上述现象的原因是, b_1 参数影响子网络A中边在负载重分配后承担的负载容量,其决定了由子网络B中失效边导致子网络A中与之具有耦合关系的边失效的数量,即影响图2中 q_5 比例的边是否失效. 在大规模攻击子网络A中的边时,由图2可以看到 q_5 值非常小,能够发现 b_1 增大不能改善网络遭受大规模攻击时的稳定性. 当攻击规模适中,保留节点比例位于一阶相变阈值与二阶相变阈值中间时,耦合网络间会发生大规模的级联失效,此时 q_3 变得较大,子网络A中的 q_5 也会较大,通过增大 b_1 能够有效减小 q_5 ,进而改善耦合网络的鲁棒性,能够观察到网络渗流行为从一阶相变到二阶相变的过程. b_2 越大,子网络B中边的负载容量越大,由子网络A失效边导致的子网络B中失效边的比例 q_2 就越小,子网络B不容易发生大规模的级联失效,因此 q_3 也非常小,网络A失效边的比例 q_5 便更小了. 因此可以看到, b_2 越大,通过 b_1 改善网络稳定性便越困难.

2.5 成本约束下边耦合网络鲁棒性能最优化

耦合网络的相变行为反映了网络的鲁棒性能,其中最重要的指标之一便是网络的渗流相变阈值 p_c , p_c 越小,耦合网络鲁棒性能越好. 考虑到增加 b_2 参数对耦合网络鲁棒性能的影响更加明显,且花费的代价也更多,因此重点研究 b_2 参数与耦合网络渗流相变阈值的关系.

以ER-ER边耦合网络为例,采用第1.1节建立的负载容量模型,维持 $b_1 = 1$,通过仿真得到不同 b_2 参数下耦合网络的渗流相变阈值 p_c ,同时在Matlab中利用有理数函数对 b_2 与 p_c 的实测值进行拟合,结果如图11所示. 可见,随着 b_2 参数的增加,耦合网络的相变阈值呈现出一种明显的非线性趋势, b_2 参数较小或者较大时, b_2 的增加不会改变耦合网络的相变阈值. b_2 参数为0.4~1.2之间时, b_2 的增加会大幅度减小耦合网络的相变阈值.

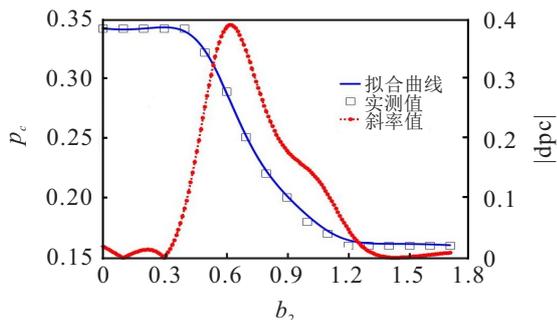


图 11 b_2 与 p_c 关系图和斜率值

图 11 中,拟合曲线的斜率取得最大值,即 $|\Delta p_c / \Delta b_2|$ 取最大值时,仅需要极小的增量 Δb_2 即可使得 p_c 有最大的降幅. 这表明该时刻耦合网络在成本花费与鲁棒性能之间获得了一个最优的平衡.

对图 11 中拟合曲线逐个点求斜率,可以看出,在负载容量系数 b_2 取值为0.6时,斜率取得最大值,表明此时耦合网络在单位花费投入下能够取得最优的鲁棒性能,此时若继续增大负载容量系数 b_2 ,虽然也能提升耦合网络的鲁棒性能,但效果会愈加不明显.

3 结 论

本文建立了考虑负载重分配的具有边耦合关系的一类双层耦合网络模型,通过研究边渗流情况下网络结构和负载容量参数对边耦合网络鲁棒性能的影响,分析了成本约束下耦合网络鲁棒性能最优化的容量参数设置,进而得出此类网络的鲁棒性优化策略.

首先研究发现耦合网络结构越趋向异质化,网络对随机攻击的鲁棒性越好;间接受攻击网络的负载容量参数的增大与直接受攻击网络的负载容量参数增大对网络鲁棒性能的改善表现出显著的差异,间接受攻击网络的负载容量参数增大可以显著提高网络的鲁棒性,其效果受网络初始负载分布影响. 进一步研究发现,改变ER-ER网络的平均度并不能改变影响网络存活规模的容量参数的关键值,但改变网络的初始负载模型函数却可以调整该关键值. 通过增大直接受攻击网络的负载容量参数来改善耦合网络的鲁棒性能需要更多的成本,但会使得耦合网络的相变行为从一阶不连续相变到混合相变,直至二阶相变. 同时还发现,增大直接受攻击网络的负载容量参数不会提高网络在大规模攻击下的存活规模,并且随着间接受攻击网络负载容量参数的增大,通过增大直接受攻击网络的负载容量参数改善网络鲁棒性变得愈加困难.

综上,本文提出如下优化策略以改善负载重分配下的边耦合网络鲁棒性: 1)网络结构趋向异质化,能够增加耦合网络在随机攻击下的鲁棒性; 2)增加间接受攻击网络的负载容量能够在较低成本的情况下显著改善网络的鲁棒性,在大规模攻击下,增加间接受攻击网络的负载容量对耦合网络存活规模的影响与网络的初始负载分布密切相关; 3)在间接受攻击网络的负载容量较小时,增加直接受攻击网络的负载容量能够减小耦合网络相变阈值点,同时能够维持网络在大规模攻击下的存活规模,而当间接受攻击网络的负载容量较大时,不建议采取增加直接受攻击网络的负载容量来改善网络的鲁棒性; 4)考虑到容量花

费的代价,采取增加间接受攻击网络的负载容量能以最经济的方式同时改善耦合网络的渗流阈值和在大规模攻击下的存活规模,并且在成本约束下存在着使得耦合网络鲁棒性能最优的负载容量参数设置. 本文结论对于探寻最优的控制策略以提高负载重分配情况下边耦合网络的鲁棒性具有科学的指导意义.

参考文献(References)

- [1] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. *Nature*, 2010, 464(7291): 1025-1028.
- [2] 甘德强, 胡江溢, 韩祯祥. 2003年国际若干停电事故思考[J]. *电力系统自动化*, 2004, 28(3): 1-4.
(Gan D Q, Hu J Y, Han Z X. Thinking of several international power out ages in 2003[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(3): 1-4.)
- [3] Gao J X, Buldyrev S V, Stanley H E, et al. Networks formed from interdependent networks[J]. *Nature Physics*, 2012, 8(1): 40-48.
- [4] Leicht E A, D'Souza R M. Percolation on interacting networks[J/OL]. 2009, arXiv: 0907.0894.
- [5] Gao J X, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Robustness of a network of networks[J/OL]. 2010, arXiv: 1010.5829.
- [6] Cao Y Y, Liu R R, Jia C X, et al. Percolation in multilayer complex networks with connectivity and interdependency topological structures[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2021, 92: 105492.
- [7] Zheng K, Liu Y, Wang Y, et al. k -core percolation on interdependent and interconnected multiplex networks[J]. *Europhysics Letters*, 2021, 133(4): 48003.
- [8] Reis S D S, Hu Y Q, Babino A, et al. Avoiding catastrophic failure in correlated networks of networks[J]. *Nature Physics*, 2014, 10(10): 762-767.
- [9] Parshani R, Buldyrev S V, Havlin S. Interdependent networks: Reducing the coupling strength leads to a change from a first to second order percolation transition[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(4): 048701.
- [10] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2003, 66(6): 065102.
- [11] 窦炳琳, 张世永. 复杂网络上级联失效的负载容量模型[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(7): 1459-1463.
(Dou B L, Zhang S Y. Load-capacity model for cascading failures of complex networks[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(7): 1459-1463.)
- [12] 陈世明, 庞少鹏, 邹小群, 等. 面向级联失效的加权网络负载容量非线性模型鲁棒性优化[J]. *控制与决策*, 2013, 28(7): 1041-1045.
(Chen S M, Pang S P, Zou X Q, et al. Robustness optimization of load-capacity nonlinear model in weighted network for cascading failure[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(7): 1041-1045.)
- [13] Bonabeau E. Sandpile dynamics on random graphs[J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1995, 64(1): 327-328.
- [14] Yağan O. Robustness of power systems under a democratic fiber bundle-like model[J]. *Physical Review E*, 2015, 91(6): 062811.
- [15] Zhang Y, Arenas A, Yağan O. Cascading failures in interdependent systems under a flow redistribution model[J]. *Physical Review E*, 2018, 97(2): 022307.
- [16] Artime O, de Domenico M. Abrupt transition due to non-local cascade propagation in multiplex systems[J]. *New Journal of Physics*, 2020, 22(9): 093035.
- [17] 刘文静, 靳岚, 张金刚. 负载作用下相互依存网络的鲁棒性分析[J]. *甘肃科学学报*, 2018, 30(4): 115-118.
(Liu W J, Jin L, Zhang J G. Robustness analysis of interdependence network under loading effect[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2018, 30(4): 115-118.)
- [18] 邢积超, 陈楚湘, 朱兆梁, 等. 双层相依网络化指挥信息系统级联失效研究[J]. *控制与决策*, 2020, 35(12): 3017-3025.
(Xing J C, Chen C X, Zhu Z L, et al. Cascading failure of double layer networked command information system[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(12): 3017-3025.)
- [19] 张强, 曹军海, 宋太亮, 等. 装备保障网络中考虑负载再分配的级联失效分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(6): 86-90.
(Zhang Q, Cao J H, Song T L, et al. Cascading failure analysis considering load redistribution in equipment support network[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(6): 86-90.)
- [20] 李姝, 杨华, 宋波. 多层供应链网络中欠载失效和过载级联失效的协同演化研究[J]. *计算机科学*, 2021, 48(10): 351-358.
(Li S, Yang H, Song B. Study on co-evolution of underload failure and overload cascading failure in multi-layer supply chain network[J]. *Computer Science*, 2021, 48(10): 351-358.)
- [21] Gao Y L, Chen S M, Zhou J, et al. Percolation of edge-coupled interdependent networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, 580: 126136.

作者简介

高彦丽(1978—),女,副教授,博士,从事复杂网络鲁棒性能、复杂网络理论及应用等研究, E-mail: gyanli0826@163.com;

梁崇生(1998—),男,硕士生,从事复杂网络鲁棒性能的研究, E-mail: 1157820228@qq.com;

陈世明(1977—),男,教授,博士,从事复杂网络理论及应用、多智能体系统协调控制、PSO优化算法等研究, E-mail: shmchen@ecjtu.jx.cn.