

10-14-2020

Cascading Failure Analysis of Equipment Support Network Based on SIRV Virus Propagation Theory

Zhang Qiang

1. Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China; ;

Junhai Cao

1. Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China; ;

Tailiang Song

2. Chinese Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100072, China;

Haidong Du

1. Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Cascading Failure Analysis of Equipment Support Network Based on SIRV Virus Propagation Theory

Abstract

Abstract: According to the complexity phenomenon of equipment support network being attacked by the enemy, *the similarity between network cascading process and virus propagation process is compared and analyzed. On the basis of the existing load capacity cascading failure model, the process of virus immune propagation is integrated, four different states of support nodes are defined, and the cascade transmission model of equipment support network is constructed, which can better reproduce the real situation of our support organization being attacked by the enemy and public opinion. The simulation and comparison shows that when the defense resources are limited and the time is urgent, the active immune strategy is a priority, and can achieve better effect of resisting cascading failure with the implementation of target immune strategy, and thus the equipment support network has strong robustness and good recovery ability.*

Keywords

equipment support network, cascading failure, node immunity, virus propagation

Authors

Zhang Qiang, Junhai Cao, Tailiang Song, Haidong Du, and Chuang Zhang

Recommended Citation

Zhang Qiang, Cao Junhai, Song Tailiang, Du Haidong, Zhang Chuang. Cascading Failure Analysis of Equipment Support Network Based on SIRV Virus Propagation Theory[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(10): 1847-1853.

基于 SIRV 病毒传播理论的装备保障网络级联失效分析

张强¹, 曹军海^{1*}, 宋太亮², 杜海东¹, 张闯¹

(1. 陆军装甲兵学院装备保障与再制造系, 北京 100072; 2. 中国国防科技信息中心, 北京 100072)

摘要: 针对装备保障网络遭受敌方攻击时所显现出的复杂性现象, 对比分析网络级联过程与病毒传播过程的相似性。在已有的负载容量级联故障传递模型基础上, 融入了病毒免疫传播的过程, 定义保障节点的 4 种不同状态, 构建基于病毒免疫传播理论的装备保障网络级联传递模型, 更好地再现了我方保障机构受到敌方实际打击和舆情攻击时的真实状况。通过仿真对比分析表明, 在防御资源有限和时间迫切的情况时, 优先考虑主动免疫策略, 能够取得较好的抵御级联失效的效果, 还可以辅助实施目标免疫策略, 从而使装备保障网络具有较强的健壮性和较好的恢复能力。

关键词: 装备保障网络; 级联失效; 节点免疫; 病毒传播

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 10-1847-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0504

Cascading Failure Analysis of Equipment Support Network Based on SIRV Virus Propagation Theory

Zhang Qiang¹, Cao Junhai^{1*}, Song Tailiang², Du Haidong¹, Zhang Chuang¹

(1. Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China;

2. Chinese Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100072, China)

Abstract: According to the complexity phenomenon of equipment support network being attacked by the enemy, the similarity between network cascading process and virus propagation process is compared and analyzed. On the basis of the existing load capacity cascading failure model, the process of virus immune propagation is integrated, four different states of support nodes are defined, and the cascade transmission model of equipment support network is constructed, which can better reproduce the real situation of our support organization being attacked by the enemy and public opinion. The simulation and comparison shows that when the defense resources are limited and the time is urgent, the active immune strategy is a priority, and can achieve better effect of resisting cascading failure with the implementation of target immune strategy, and thus the equipment support network has strong robustness and good recovery ability.

Keywords: equipment support network; cascading failure; node immunity; virus propagation

引言

随着现实社会中复杂系统与复杂系统之间交

互关系的加深, 相依网络的级联失效逐步成为学者们的研究热点^[1-7]。级联失效过程是指, 网络中一些节点发生失效并被移除网络, 这一现象会通过相互之间的连边关系造成其他部分节点的失效并最终也被移除网络, 最后以一传十、十传百的方式造成大部分节点乃至网络全部失效崩溃的现象^[8]。目前对网络级联失效的研究, 大都是基于节点负载超



收稿日期: 2020-07-20 修回日期: 2020-08-04;
基金项目: 装备预研领域基金(61400010301);
作者简介: 张强(1991-), 男, 河北衡水, 博士生, 研究方向为综合保障体系仿真、复杂网络; 曹军海(通讯作者 1972-), 男, 陕西西安, 博士, 副教授, 博导, 研究方向为综合保障体系仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1847 •

出自身能力阈值而造成的失效过程,部分是基于病毒传播模型的级联失效研究,但实际上,这 2 种过程往往是交织在一起造成级联失效的。这里提到的“病毒”,不仅仅可以指新冠肺炎病毒、流感病毒、乙肝病毒等实际存在于人类社会环境中的疾病病原体,还可以是作战网络中的虚假敌情、舆情网络中的谣言、通信网络中的计算机病毒等。级联失效所造成的一传十、十传百的后果和病毒传播的过程很大程度上类似,因此将病毒传播理论运用到复杂网络的级联失效研究中一方面是将我方保障机构受到敌方实际打击和舆情攻击时的状况真实地通过模型再现出来,另一方面可以据此找出更好的抵御敌方攻击的方法。

从系统动力学角度来看,病毒的传播过程就类似于复杂网络中的级联失效现象,因而用复杂网络相关理论去分析病毒传播问题可以取得很好的效果;那么用病毒传播的一些理论去分析复杂网络级联失效的过程也就存在合理的可能。李科成^[9]运用复杂网络的理论构建出流感病毒的传播模型,仿真出全球流感传播的动态过程特性,并能够很好地预测其趋势,从而抑制其大范围传播。李黎等^[10]运用复杂网络的仿真方法去分析病毒的传播过程,提出一种有限临时删边的病毒控制策略。许丹等^[11]针对病毒传播的控制策略问题,探究出不同拓扑结构的网络中传播率临界值。因此,本文针对装备保障网络实际中遭受攻击后的失效特点,通过病毒传播模型和负载容量模型去更真实地模拟该级联失效过程,进一步去发现能够较好提升我军装备保障能力的节点免疫策略。

1 负载容量模型

负载容量模型是学者们研究并且应用比较多的一种级联失效模型。该模型的核心思想就是每一个节点具备一定的最初负载承受能力,这个承受能力的大小受到节点的度值、介数值等属性参数的影响。如果网络中某一个节点受到攻击致

使被移出网络,那么该节点原本应该承受的负载就会遵循某一比例去分摊给它的邻居节点。一部分邻居节点原本应该承担的负载加上分摊得到的负载,总和就有可能超过其承担能力的最大阈值,从而引起更大范围的节点失效。这种失效就是“负载容量”模型中的级联失效。具体过程如图 1 所示。

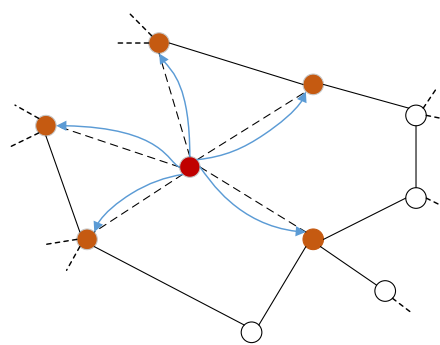


图 1 基于负载容量的级联失效
Fig. 1 Cascading failures process based on load capacity

整个装备保障网络从业务和功能上主要划分为装备维修保障子网络和装备储存与供应(储供)子网络^[12],装备维修保障子网络和装备储存供应保障子网络从结构上就构成了相依网络。该网络模型用邻接矩阵 W 表示:

$$W = (w_{ij})_{N \times N} = \begin{bmatrix} W_A & W_{AB} \\ W_{BA} & W_B \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (1)$$

式中: N 为网络节点总数; w_{ij} 为相邻两节点 v_i 和 v_j 的连接关系, $w_{ij} \in \{0,1\}$; 矩阵 W_A 描述了网络 A 中节点之间的连边关系; 矩阵 W_B 描述了网络 B 中节点之间的连边关系; W_{AB} 、 W_{BA} 描述了相依节点之间的联系。

设定节点的最初始负载由公式(2)得到:

$$L_i(0) = \gamma k_s^\alpha + (1 - \gamma) k_c^\beta \quad (2)$$

式中: k_s 和 k_c 分别为网络节点的内部度(与目标节点相连的处于同一网络中的节点数目)和外部度(与目标节点相连的处于相依网络中的节点数目); α 、 β 、 γ 为控制参数,表示网络的内部度和外部耦合度对负载分布的影响大小。

节点 i 可以承载的最大负载容量值 C_i 为

$$C_i = (1 + \lambda)L_i(0) \quad (3)$$

式中: λ 为负载容忍系数, 其值越大, 网络模型就能够越好地抵抗级联失效带来的不良后果, 同样地就会消耗越多的保障成本。

2 基于 SIRV 的病毒传播模型

2.1 SIRV 病毒传播模型

对病毒传播机制进行探究一般存在一个前提假设: 在传播网络中, 不同传播阶段的节点被划分为不同的状态, 每个节点在某一个时间点上只能处于一种状态中, 在某个指定条件下节点可以在不同状态之间转换^[13]。

典型的病毒传播 SIR 模型是将研究对象划分为 3 种状态: 易感染状态(susceptible, S)、感染状态(infected, I)和移除状态(removed, R)。易感染状态是人群中存在容易感染某类病毒的一类, 感染状态是一类人已经感染病毒并具有传播病毒的能力, 移除状态是已感染病毒的人由于没有有效治疗而死亡脱离人群。但是此类模型并没有考虑节点的免疫恢复机制, 随后有学者提出节点的免疫状态(vaccination, V), 即一部分没有感染病毒的人由于提前接种疫苗而获得抗体, 不再感染此类病毒。当整个病毒传播网络达到最终稳定状态时, 人群中只存在免疫和移除 2 种状态其他 2 种状态并不存在。

假定易感人群 S 接触病毒后以概率 χ (感染率) 转化为感染状态 I , 而处于感染状态的人 I 由于缺乏治疗将以概率 δ (移除率为 δ , 那么治愈率为 $1-\delta$) 转化为移除状态 R 。在整个病毒蔓延过程中, 一些个体由于获取到了疫苗信息, 从而会以一定的接受度接种疫苗变为免疫个体而不会被传染病毒, 概率为 $h(t)$ (免疫率)。传播过程可以表示为:

$$\begin{cases} S + I \xrightarrow{\chi} 2I \\ I \xrightarrow{\delta} R \\ S \xrightarrow{h(t)} V \end{cases} \quad (4)$$

若 $s(t)$, $i(t)$, $r(t)$, $v(t)$ 为 t 时刻各个群体的人群密度, 此过程可以用微分方程表示为:

$$\begin{cases} ds(t)/dt = -\chi s(t)i(t) - s(t)h(t) \\ di(t)/dt = \chi s(t)i(t) - \delta i(t) \\ dr(t)/dt = \delta i(t) \\ dv(t)/dt = s(t)h(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: 免疫率 $h(t)$ 的大小通常与其周围的感染人数 $m_i(t)$ 和其自身的个体疫苗接受度 ζ 有关^[14], 如公式(6)所示。

$$h(t) = 1 - e^{-\zeta m(t)} \quad (6)$$

当疫苗接受度 ζ 的值等于 0 时, 就表示人们对“接种疫苗来预防疾病很重要”这个讯息已经麻木, 不再进行疫苗接种, 这时整个传播过程就转化为 SIR 模型。当疫苗接受度 ζ 为固定值时, 免疫率 $h(t)$ 只和周围的感染人数 $m_i(t)$ 有关。感染人数越多, 个体接收到疫情严重讯息就增多, 就会越意识到该病毒的肆虐, 就有越大的几率接种疫苗来防止自身受到感染。

2.2 节点免疫策略

各类研究中涉及的免疫策略大致有下列几种:

(1) 随机免疫。随机免疫就是在网络总体节点中随机地选择一些节点去实施免疫措施, 使其不被攻击从而不参与级联失效过程中。如果定义免疫百分比为 τ , 那么就等同为将病毒传播率 χ 下调到 $\chi(1-\tau)$ 。因为此方法选择免疫节点时的随机性与作战和保障活动特点不相符, 在保障节点的防御上很难取得较好的效果, 所以本文不予以比较考虑。

(2) 目标免疫。目标免疫就是有针对性地选择网络中少部分关键节点去实施免疫措施, 用较少的成本达到较好的收益效果。目标免疫作为一种全局性控制策略, 需要知道较多的全局性网络信息, 这在作战和保障活动中往往难度比较大且全局信息的精准度不稳定, 因此本文对目标免疫进行一些改进, 选择文献[15]中节点合度较高的部分节点为目标节点进行免疫, 这样只需要获取局部的信息就可

以达到较好的节点免疫控制。

(3) 熟人免疫。熟人免疫的主要思想就是从 N 个节点中随机地选取比例为 κ 的节点。然后再从这些节点的邻居节点中随机地选择一个实施免疫。从本质上看核心还是“随机”二字，应该算是随机免疫的复杂版本。

(4) 主动免疫。主动免疫的主要思想就是选择某些染病节点的邻居节点中有较大几率染病的节点去免疫。

3 基于 SIRV 的保障网络级联失效模型

3.1 保障节点状态分析

装备保障网络中某一节点遭受敌方蓄意、随机或灰色攻击后，节点会有一定几率失效丧失其原有保障功能。如果该节点预先进行了相应的防护措施，那么该节点可能就不会失效；一些失效后节点所承担的原有保障任务通常会被其邻居节点分摊，从而可能导致其某些邻居节点负载超出自身固有保障能力而随之失效。这个过程与病毒的传播机制相类似，装备保障节点也存在初始状态、易受攻击状态、免疫状态、移除状态等，因而考虑用病毒的传播机制来研究装备保障网络的故障级联传递过程，从而更好地对装备保障网络进行防护。

按照病毒免疫传播理论及装备保障网络的实际运行情况，将装备保障节点分为 4 类状态：

(1) 正常状态。处于该状态的装备保障节点具备应有的保障能力，但在遭受敌方的攻击后会立即失去保障能力，即容易遭受攻击的节点。

(2) 被攻击状态。承担一定保障任务的保障节点受到敌方的攻击，失去保障能力且把保障任务分担至其他节点，引起一定规模的级联失效，也就是处于该状态的节点能够传递并扩大敌方攻击造成的后果。

(3) 防御加强状态，即免疫攻击状态。保障节

点收到我方其他节点情报，某时刻有可能遭受敌方的攻击，从而获得一定加强力量并采取一系列有效防御措施，从而不受敌方攻击影响，保持原有的保障能力。

(4) 移除状态。保障节点受到敌方攻击后失去保障能力，下一时刻将从保障网络中移除，不再传递遭受攻击造成的后果而引发级联失效。

节点的状态转移关系如图 2 所示。

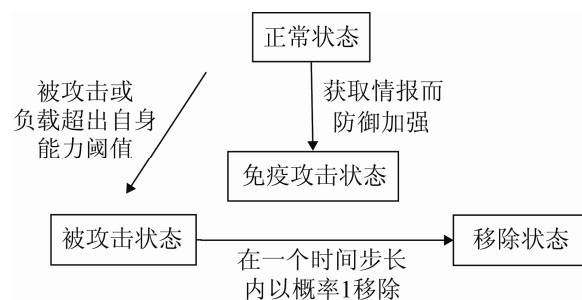


图 2 保障节点的几种状态之间的转变关系
Fig. 2 State transition diagram of support node

3.2 免疫传播动态过程

为了能够清楚地叙述装备维修保障相依网络“病毒”（情报信息）传播和节点级联失效地相互作用情况，将模型步骤叙述如下：

step 1 初始化：遵循现行装备保障体制机制，将不同保障机构视为节点，将相互之间的信息、资源交互反馈关系视为边，依照地理联系、供应关系、指挥关系等抽象出保障相依网络拓扑结构。接下来用随机数产生的方式选取维修保障网络（网络 A）中的一小部分节点，定义这些节点为被攻击状态。

step 2 “病毒”传播免疫阶段：在设定的每一个仿真时间步长内都存在 2 个过程，“病毒”传播和负载容量失效传递。在“病毒”传播过程中，如果处于同一网络中的某一正常节点与被攻击状态节点之间存在连边，那么该正常节点将会以一定几率 $h(t)$ 获得有效的情报信息进行加强防御，进入防御加强状态，从而免疫敌方下一时间步长的攻击。按照公式(6)，连边数量越多，意味着获取的情报越有效， $h(t)$ 值就越大。与此同时，处于被攻击状态的节点

按照概率 δ 变为移除状态。

step 3 负载容量级联失效: 在这个过程中, 装备储存供应网络(网络 B)中缺少相依连边的正常节点将会失效。失效后的节点将按照负载容量模型将自身承担的负载按照一定比例关系分摊至其邻居节点。此时如果邻居节点的最新负载值超出了固有的最大容量阈值, 那么该邻居节点也会发生失效, 进而导致更大范围的节点失效。用同样的方式判断网络 B 中所有正常状态节点是否因负载超出阈值而失效。如果某一节点失效, 那么与之相连的相依连边也应该从网络中删除。同理, 网络 A 中的正常状态节点也会因为缺少相依连边而失效被移除网络。

step 4 停止条件: 当 2 个网络中的所有节点都处于免疫状态时, 级联失效过程结束, 整体达到稳定状态。否则将按照 step 2~3 继续发生失效传递。整个过程如图 3 所示。

上述模型存在的一个先决条件就是级联失效发生的速度比较快, “病毒”传播过程需要一定的时间。例如, 某一维修机构节点在遭受敌方的蓄意打击后, 被击中的瞬间就已经失去效用, 从正常状态转变为被攻击状态, 不具备保障能力。而情报信息的传播则需要相对比较长的时间。

4 不同免疫策略下的网络级联失效敏感性分析

为了探究装备保障网络在不同免疫策略下的级联失效区别, 以文献[12]中构建的装备保障相依网络为研究对象, 分析其在目标免疫和主动免疫 2 种不同免疫策略下的级联失效过程, 通过网络稳定时免疫节点的比例和网络稳定所需的时间步长来判断 2 种策略的优劣。

网络总节点数为 400, 特征属性参数如表 1 所示。设定感染率 $\chi=0.5$, 移除率为 $\delta=0.3$, 免疫接受度 $\zeta=0.6$ 。仿真对比结果如图 4 所示。

通过仿真曲线结合保障活动实际情况可以分析得出, 当仿真时间足够长、网络最终稳定时, 节点只有移除状态和免疫状态 2 种; 但由于保障任务的时效性和保障资源的有限性, 网络往往没有到达最终稳定状态, 作战任务就已经结束。因此, 在作战时效和保障资源有限的前提下, 主动保障能够较快的使保障网络恢复到一个较好的状态, 这就对保障任务态势的预测及保障资源的预置预储提出了较高的要求。

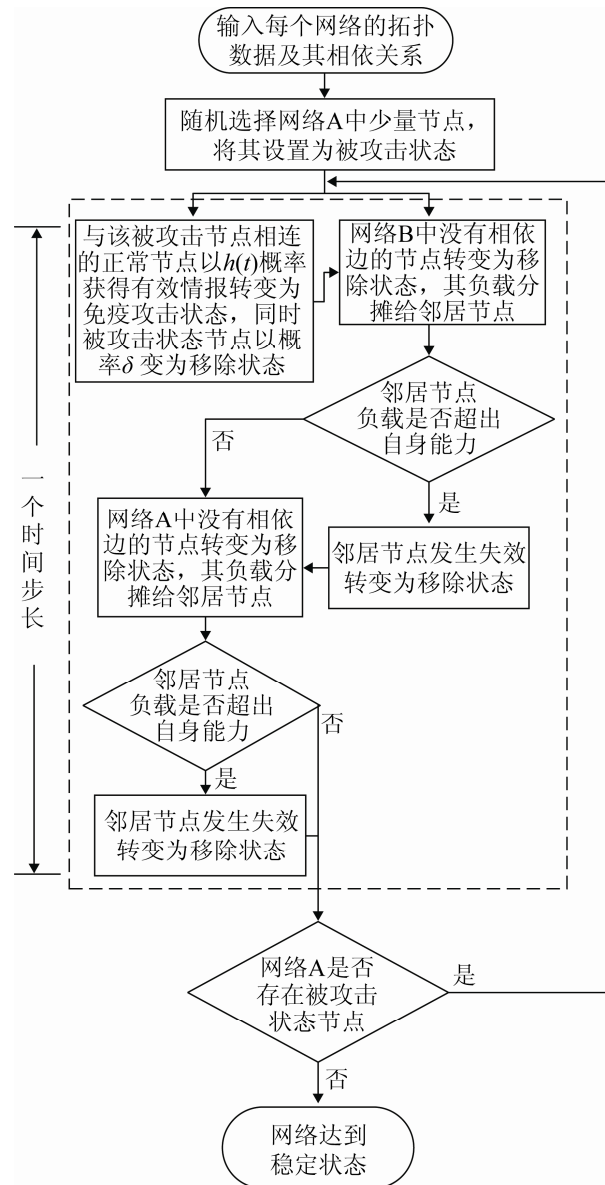
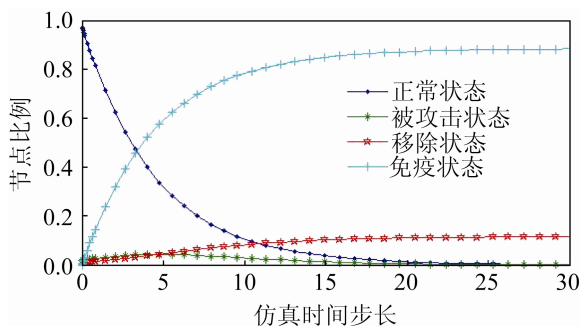


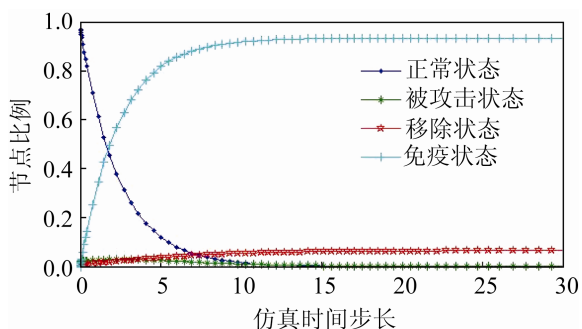
图 3 节点免疫的级联失效过程
Fig. 3 Cascading failure process of node immunity

表 1 装备保障网络的特征参数
Tab. 1 Characteristic parameters of network A and network B

网络名称	节点数	边数	平均度	聚类系数	路径长度平均值
网络 A	200	950	7.60	0.10	2.64
网络 B	200	1 518	7.55	0.11	2.67



(a) 目标免疫策略下的仿真曲线



(b) 主动免疫策略下的仿真曲线

图 4 2 种免疫策略的仿真结果对比图

Fig. 4 Comparison of simulation results of two strategies

5 结论

装备维修保障和装备储存供应保障是装备保障的重要内容,装备保障网络是完成作战任务的有力支撑。本文通过构建基于 SIRV 病毒传播理论的装备保障网络级联失效分析模型,仿真保障机构在战时遭受攻击时的损毁情况;通过对比主动免疫和目标免疫两种策略,发现主动免疫策略能够较好地提高装备保障网络的抗打击能力。主动免疫在战时可以体现在对战场局势的预测上,精准掌握部队的保障需求,实现精确保障、快速保障。下一步如果增加保障成本的限制参数,从而去分析得出免疫比例的合理阈值,实现用较少的保障成本和保障时间

获得最大的保障效能,提高我军智能化战争下的保障能力。

参考文献:

- [1] Peng X Z, Yao H, Du J, et al. Cascading failures in two-layered interdependent scale-free networks[J]. Applied Mechanics and Materials (S1662-7482), 2013, 419: 918-924.
- [2] 张文萍. 基于耦合网络的级联失效研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Zhang Wenping. Cascades on interconnected networks [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [3] Wang J W, Li Y, Zheng Q F. Cascading load model in interdependent networks with coupled strength[J]. Physica A (S0378-4371), 2015, 430: 242-253.
- [4] Hong C, Zhang J, Du W B. Cascading failures with local load redistribution in interdependent Watts-Strogatz networks[J]. International Journal of Modern Physics C (S0129-1831), 2016, 27(11): 1650131.
- [5] Wang J, Fang H, Qin X. Cascading failures on correlated interdependent networks with dependency groups[J]. Physica A (S0378-4371), 2019, 530: 121355.
- [6] Su X, Ma J, Chen N, et al. Cascading failures on interdependent networks with multiple dependency links and cliques[J]. Physica A (S0378-4371), 2019, 526: 120907.
- [7] Zhang T, Zhang Y, Zhu X, et al. Cascading failures on interdependent networks with star dependent links[J]. Physica A (S0378-4371), 2019, 535: 122222.
- [8] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: Structure and dynamics[J]. Physics Reports (S0370-1573), 2006, 424(4/5): 175308.
- [9] 李科成. 基于复杂网络的流感病毒传播模型研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
Li Kecheng. Study on epidemic model of influenza virus based on complex network[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [10] 李黎, 张瑞芳, 杜娜娜, 等. 基于有限临时删边的病毒传播控制策略[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 651-659.
Li Li, Zhang Ruifang, Du Nana, et al. Virus propagation control strategy based on limited temporary links removed[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2019, 55(4): 651-659.
- [11] 许丹, 李翔, 汪小帆. 复杂网络病毒传播的局域控制研究[J]. 物理学报, 2007, 56(3): 1313-1317.
Xu Dan, Li Xiang, Wang Xiaofan. An investigation on

- local area control of virus spreading in complex networks[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(3): 1313-1317.
- [12] 张强, 宋太亮, 曹军海. 考虑节点相依关系地装备保障网络演化模型[J]. *兵工学报*, 2019, 40(9): 1918-1927.
Zhang Qiang, Song Tailiang, Cao Junhai. Evolution model of equipment support network considering interdependent relationship[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(9): 1918-1927.
- [13] 蒋路茸. 相依网络中 SIR 病毒传播研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Jiang Lurong. Study of epidemic spreading with SIR model in interdependent networks[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [14] 白杨. 多重网络上病毒传播模型[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
Bai Yang. Modeling of virus propagation on multiple networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [15] 张强, 曹军海, 宋太亮. 基于合度的装备保障网络节点重要性评估[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(12): 2657-2663.
Zhang Qiang, Cao Junhai, Song Tailiang. Evaluation method of node importance in equipment support network based on polymeric degree[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(12): 2657-2663.