控制与决策
Control and Decision

双层相依网络化指挥信息系统级联失效研究

邢积超， 陈楚湘， 朱兆梁， 李艳

引用本文:
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.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0696

双层相依网络化指挥信息系统级联失效研究

邢积超†, 陈楚湘, 朱兆梁, 李 艳

(战略支援部队信息工程大学 信息作战指挥系，郑州 450001)

摘 要: 网络化指挥信息系统是现代信息化条件下体系作战的基础支撑和重要枢纽. 在分析网络化指挥信息系统结构功能基础上,构建带权重的双层相依网络,提出一种考虑节点过载和节点修复的级联失效模型,并在基于节点权重的负载重分配策略基础上构造基于节点相似、基于节点剩余容量和综合分配3种改进型策略. 以“LB演习”数据为样本,针对攻击方式、负载重分配策略和网络性能参数对网络抗毁性影响展开研究. 仿真结果表明:物理层重要节点对网络性能影响最为关键,并且网络性能会在蓄意攻击下产生突变现象;改进的3种策略,特别是综合分配策略,能够显著提升网络抗毁性,网络性能参数能够在一定范围内大幅提升网络抗毁性,避免大规模级联失效现象.

关键词: 网络化指挥信息系统；指挥控制；赋权网络；双层相依网络；级联失效；网络抗毁性

中图分类号: N94 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0696 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

引用格式: 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.

Cascading failure of double layer networked command information system

XING Ji-chao†, CHEN Chu-xiang, ZHU Zhao-liang, LI Yan

(Department of Information Operations Command，PLA Strategic Support Force Information Engineering University，Zhengzhou 450001，China)

Abstract: The networked command information system is the basic support and important hubs for system operations under the conditions of modern informationization. Based on the analysis of the structure and function of the networked command information system, this paper constructs a double layer dependent network with weights, proposes a cascade failure model considering node overload and node repair, and constructs three improved strategies based on the weight-based load redistribution strategy. Taking the "LB manoeuvre" data as a sample, the effects of attack mode, load redistribution strategy and network performance parameters on network invulnerability are studied. The simulation results show that the important nodes of the physical layer are the most critical to the network performance, and the network performance will be abrupt under the deliberate attack. The improved three strategies, especially the comprehensive redistribution strategy, can significantly improve the network invulnerability. And in a certain range, the network invulnerability is greatly improved.

Keywords: networked command information system；command and control；weight network；double layer dependent network；cascading failure；network invulnerability

0 引 言

指挥信息系统(command information system, CIS)是以计算机为核心,具有指挥控制、侦察预警、通信、火力打击和其他作战信息保障功能的军事信息系统[1]. 随着军事信息技术不断发展,基于信息栅格构建的网络化指挥信息系统(networked command information system, NCIS)已经成为体系作战的基础支撑和重要枢纽. 网络化程度的提升,一方面成倍增加了指挥信息系统效能,同时也使得系统面临更为严重的级联失效风险. 因此,研究网络化指挥信息系统的级联失效特点,对于提升系统自身鲁棒性,保持体系对抗中的竞争优势具有重要意义.

级联失效过程是指,网络中一个或几个节点(边)的失效会通过节点之间的相互作用引发其他节点的

收稿日期: 2019-05-20；**修回日期:** 2019-07-31.
基金项目: 国家自然科学基金项目(61773399).
责任编委: 张维海.
†通讯作者. E-mail: 380582362@qq.com.

失效,最终导致相当一部分节点甚至整个网络崩溃的现象[2]. 作为复杂网络重要的动力学特征之一,级联失效近年来一直是一项研究热点[3-4],成果主要包括级联失效建模[5-8]、基于级联失效的网络鲁棒性研究[9-11]、不同负载分配策略对级联失效的影响[12-13]等,但大多在单层网络框架下进行. 现实中大部分网络并不是相互独立的,而是以某种方式耦合在一起,比如电力-计算机网络中,电力网络需要依靠计算机系统进行通信和调度,而计算机网络又依靠电力网提供能源支持,一旦其中某一网络发生故障,则会通过网络间的耦合关系对另一网络造成影响[14]. 随着级联失效研究不断深入,这种耦合网络或称为相依网络上的级联失效成为热点. 文献[15]在ER随机网络和BA网络的基础上,建立了一对多相依网络模型,并通过研究表明,该耦合方式可以使网络级联失效中的渗流相变由一阶转变为二阶,从而提高网络整体鲁棒性. 文献[16]建立多对多部分相依网络模型,研究了不同打击方式对网络鲁棒性的影响,并得出耦合强度是导致网络渗流相变呈现一阶或二阶的关键因素,进而求解出临界耦合强度值. 文献[17]针对部分耦合网络和一对一全耦合网络两种模型,提出了低相对介数内加边策略和低相对介数耦合加边策略,进一步研究了负载参数和加边策略共同影响下的网络鲁棒性问题. 上述研究中,网络模型主要以BA无标度网络、ER随机网络、NC最近邻网络、WS小世界网络等经典模型为主,研究成果具有一定的理论意义和指导意义.

除经典模型外,部分学者也对现实军事网络上的级联失效问题进行初步探索. 文献[18]以军事指挥网为基础构建双层网络模型,通过定义交互强度因子改进节点介数的计算方法突出了耦合网络中节点业务对网络流量的影响. 文献[19]提出了一种双层耦合的体系作战信息流转网络模型,引入任务协作因子改进节点介数计算方法,并重新设计节点负荷重分配策略和失效判定条件,进而研究失效演化规律. 文献[20]针对指挥信息系统结构功能建立双层耦合网络模型,设置实体打击、赛博攻击和混合攻击3种攻击方式,并通过仿真实验验证不同攻击强度和攻击模式下的指挥信息系统级联失效机理. 但现有基于军事信息网络或指挥信息系统的级联失效研究还存在以下问题:

1) 模型假设均为无向无权网络,没有考虑节点自身性能、承担任务等固有属性的差异,与实际情况存在一定差距;

2) 级联失效主要基于负载-容量模型,节点状态通常只能单向地从正常变为失效,未考虑失效节点可以通过技术修复重新变为正常节点,以及负载超过节点容量时节点可能并未失效而只是性能下降等情况;

3) 负载重分配主要是在考虑失效节点的邻居节点剩余容量基础上进行的分配策略,模型较为单一且忽略了节点的性能、任务等差异.

鉴于此,本文基于网络化指挥信息系统,构建一种赋权的双层相依网络模型,定义了节点正常、过载和失效3种状态及转移条件,并在基于节点权重的负载重分配策略(WR策略)基础上,提出SR、SCR、CR等3种改进型负载重分配策略,研究不同策略及性能参数对网络抗毁性的影响. 仿真结果表明:3种改进的负载重分配策略较WR策略而言,能够有效提升网络抗毁性,其中CR策略效果最为显著;过载参数δ和恢复系数η对网络抗毁性提升存在能力极限,即参数增加到一定阈值后,网络性能几乎不随其参数值的增大而变化.

1 网络化指挥信息系统建模

网络化指挥信息系统(NCIS)是建立在军事通信系统之上,由侦察情报系统、火力打击系统、指挥控制系统、综合保障系统等构成,并集成融合多种通信网、功能网和业务系统的复杂军事信息系统,是信息化条件下体系作战的重要支撑[1]. 由于NCIS中各作战要素之间存在信息通信、指挥控制、协同支援等多种关联关系,需要构造一种多层网络模型,从不同视角对NCIS中各要素及关联关系进行建模描述,以便于后续研究. 由于信息通信是各作战要素关联成体系的基础,指挥控制、协同支援等其他关联关系是在通信基础上围绕作战任务和业务关系而进一步抽象出的逻辑连接,可将NCIS看作是由物理层网络和逻辑层网络耦合而成的网络模型,如图1所示.

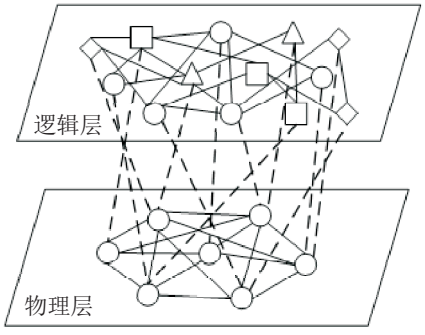

图1 双层耦合网络模型

图1中,物理层由实体节点和通信链路构成;逻辑层是将作战单元按照侦察情报、指挥控制等不同功能映射成功能节点,并用边表示节点之间信息交互

关系所构成的网络. 两层网络通过实体节点与功能节点之间的自然映射关系进行耦合,并相互影响. 由于NCIS是集成并融合多种功能网和业务系统的复杂军事信息系统,为便于研究,选取NCIS中侦察情报、指挥控制、火力打击和综合保障4个主要功能[1,20]构建逻辑层功能节点.

1.1　物理层网络

物理层网络G_P为无向赋权网络,表示为$G_P=(V_P,E_P,W_P)$. 其中:V_P为实体节点集合,对应实体作战单元,如雷达、歼击机、高炮集群等,$V_P=\{p_i|i=1,2,\ldots,N_P\}$表示$V_P$有$N_P$个节点;$E_P=[e_{ij}]_{N_P\times N_P}$为边的集合,对应实体节点之间的通信链路,如无线通信链路、卫星通信链路等,若p_i与p_j之间有通信链路,则$e_{ij}=1$,否则$e_{ij}=0$;$W_P=\{w_{ij}|i,j=1,2,\ldots,N_P\}$表示边权重的集合,边权$w_{ij}$用来表示节点$p_i$与$p_j$之间通信链路种类数,如节点$p_i$与节点$p_j$之间存在短波通信和卫星通信2种链路,则$w_{ij}=2$,若$p_i$与$p_j$之间无通信链路,则$w_{ij}=0$. 通常为便于计算和处理,可按如下方法将边权重转化为节点权重:

$$w_i=\frac{1}{k}\sum_{j=1,j\neq i}^{N_P}w_{ij}, \tag{1}$$

其中k为节点p_i的度. 因此,物理层网络G_P可用矩阵$A_P=[a_{ij}]_{N_P\times N_P}$表示,其中对角线元素$a_{ii}$为转化后节点$p_i$的权值$w_i$,非对角线元素表示节点间的通联关系,即

$$a_{ij}=\begin{cases}1,\ p_i\text{与}p_j\text{有通信链路;}\\0,\ p_i\text{与}p_j\text{无通信链路.}\end{cases}$$

1.2　逻辑层网络

逻辑层网络G_L是无向赋权网络,表示为$G_L=(V_L,E_L,W_L)$. 其中:V_L为功能节点集合,由物理层实体节点映射得到,根据上文分析,功能节点可分为侦察情报节点V_L^R、火力打击节点V_L^F、指挥控制节点V_L^C和综合保障节点V_L^S四类,即$V_L=V_L^R\bigcup V_L^F\bigcup V_L^C\bigcup V_L^S$,设$G_L$有$N_L$个节点,即$V_L=\{p_i|i=1,2,\ldots,N_L\}$;$E_L=[e_{ij}]_{N_L\times N_L}$为边的集合,对应功能节点之间的信息交互,如指控信息交互、协同信息交互等,若p_i与p_j之间有信息交互,则$e_{ij}=1$,否则$e_{ij}=0$;$W_L=\{w_{ij}|i,j=1,2,\ldots,N_L\}$为边权重集合,节点$p_i$与$p_j$之间边权重的大小$w_{ij}$表示在一定任务下节点间信息交互量,同样的,为便于计算和处理,利用式(1)将边权重转化为节点权重,转化后的节点权重w_i反映了节点p_i所能承担的任务强度大小. 因此,逻辑层网络G_L可用矩阵$B_L=[b_{ij}]_{N_L\times N_L}$表示,对角线元素$b_{ii}$表示节点$p_i$的权重值$w_i$,非对角线元素表示节点之间的信息交互关系,即

$$b_{ij}=\begin{cases}1,\ p_i\text{与}p_j\text{存在信息交互;}\\0,\ p_i\text{与}p_j\text{没有信息交互.}\end{cases}$$

1.3　双层相依网络

由上述分析可知,在NCIS中,逻辑层网络中的节点由物理层网络中的实体节点按照其功能划分映射得到,若实体节点p_i同时具备$A,B,\ldots,N$个功能,则在逻辑层中存在相应的功能节点$p_i^A,p_i^B,\ldots,p_i^N$. 自然的,NCIS中物理层网络与逻辑层网络之间存在一对多的依赖边[4,15],即一个实体节点可能是多个功能节点的物理基础,而一个功能节点必须依靠一个实体节点才能正常发挥功能作用. 以$E_C=[e_{ij}]_{N_P\times N_L}$表示双层网络之间依赖边的集合,若物理层节点$p_i$与逻辑层节点$p_j$之间存在依赖边,则$e_{ij}=1$,否则$e_{ij}=0$.

综上,可构建网络化指挥信息系统的双层相依网络模型,用多元组$\mathrm{GM}=\Theta(G_P,G_L,E_C)$表示.

2　网络化指挥信息系统的级联失效过程

NCIS中,节点受自身性能和在网络中所处地位等因素影响,通常承担不同的业务量并具备不同大小的业务处理能力. 当节点受到敌方攻击时,会造成其自身功能结构受损而无法正常工作. 此时,通常采取将其业务分配到相邻节点的方式确保NCIS整体任务完成. 但在业务分配过程中,可能会因策略问题导致节点承担业务超过其处理能力造成节点失效,进而引发更大规模的失效现象. 因此,需要从节点初始负载、节点容量、节点状态、负载分配策略等方面对NCIS的级联失效过程进行建模描述.

2.1　节点初始负载与容量

节点负载反映节点所承载的业务量,在NCIS中,节点初始负载可定义为:在初始条件下,网络中各节点为完成特定使命任务而承担的业务大小. 由于节点初始负载其大小通常与节点的局部或全局信息有关[21-22],考虑本文所构建的模型中:节点的介数代表节点全局信息,介数越大反映该节点在网络中的地位越重要,故其应承担较多的业务,初始负载较大;节点权重和节点的邻居权重之和代表节点局部信息,节点权重越大反映节点自身性能越强,应承担较多业务;节点的邻居权重和越大,反映在局部范围内节点作用地位越突出,其初始负载也应较大. 因此,可将节点的初始负载定义为

$$L_i=(1+\alpha)\Big(B_iw_i\sum_{j\in M_i}w_j\Big)^{\beta}. \tag{2}$$

其中:α和β为控制节点初始负载强度的参数,可使初始负载大小调节更为灵活,且$\alpha \geqslant 0, \beta > 0$;$w_i$为节点$i$的权重;$M_i$为节点$i$的邻居节点集合;$B_i$为节点$i$的介数,有

$$B_i = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}, \tag{3}$$

g_{jk}为节点j与节点k之间最短路径条数,$g_{jk}(i)$为节点j与节点k之间通过i的最短路径条数.

节点容量反映节点处理负载的能力,文献[21]中,节点容量是其初始负载的线性正比例函数,即节点的初始负载-容量比是定值;文献[23]研究结果表明,在大量真实网络中,容量小的节点具备较大的剩余容量比例,即容量与初始负载之间表现为非线性关系. 在NCIS中,当节点的初始负载较大时,表明节点自身性能较强,在网络中的重要性较为突出,则该节点与其他节点之间的交互更为频繁,并且其承担的业务在总体任务中较为重要,因此节点一般处于近似满负荷的工作状态,其剩余容量较小;相反的,当节点初始负载较小时,表明节点重要性较为一般,此时节点反而有相对较大的剩余容量[19-20]. 因此,本文借鉴文献[23],采用非线性函数描述节点容量与初始负载之间的关系,即

$$C_i = L_i + \lambda L_i^{\gamma}. \tag{4}$$

其中:C_i为节点p_i的容量;λ和γ为容量调节参数,使得节点容量与初始负载之间的大小比例更为灵活,且$\lambda \in (0,1), \gamma > 0$.

2.2 节点状态判定

在大多数复杂网络级联失效研究中,节点只有正常、失效2种状态,且失效节点一般不能恢复. 考虑NCIS实际情况,节点在受到攻击或因级联效应失效后,可通过一定技术手段予以恢复;并且当节点负载大于容量时,可能并未失效,只是运行效能下降并存在一定失效风险,即存在“过载”这一状态[13]. 因此,本文定义节点存在正常、过载和失效3种状态,并引入过载系数$\delta \in (0,1)$和恢复因子$\eta \in (0,1)$,分别用于描述节点对于超过其容量的额外负载处理能力和节点修复能力,则某一时刻节点所处状态可按如下方法判断:

1) 若$L_i(t) \leqslant C_i$,则表明当前节点负载并未超过其容量阈值,节点处于正常状态.

2) 若$C_i < L_i(t) \leqslant (1+\delta)C_i$,则表明虽然节点负载超过容量,但依然在其额外负载处理能力之内. 此时节点处于过载状态,并且节点负载超过容量的值越大,节点面临失效的概率越大,即存在失效概率

$$p_i = \frac{L_i(t) - C_i}{\delta C_i} \tag{5}$$

使得当$r_1 \leqslant p_i$时节点失效,其中r_1为0~1的随机数.

3) 若$L_i(t) > (1+\delta)C_i$,则表明节点负载已经超出其额外处理能力,节点失效.

4) 根据上文分析,失效节点可通过技术修复重新变为正常节点,即当$r_2 \leqslant \eta$时节点可恢复成正常节点,r_2为0~1的随机数.

5) 根据第1.3节中双层相依网络中的依赖边描述可知,物理层节点是逻辑层节点的实体基础,逻辑层节点是物理层节点的功能表现,两层节点之间的状态会通过之间的依赖关系相互影响,即:当物理层节点p_i失效时,逻辑层与之存在依赖边的节点$p_j, \ldots, p_k$均失效;相反的,当与物理层节点p_i存在依赖边的逻辑层节点$p_j, \ldots, p_k$均失效时,物理层节点p_i才失效.

综上,可以总结节点不同状态之间的转换关系如图2所示.

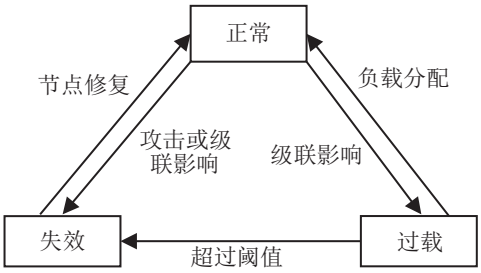

图2 节点状态转移关系

由图2可见,正常节点在受到攻击或级联效应影响时,可能造成自身负载增加,转变为过载状态或失效状态;过载节点可以通过向邻居节点分流自身负载的方式恢复成正常节点,或因自身负载无法转移而变成失效节点;失效节点可以在一定技术手段恢复下重新变为正常节点.

2.3 节点负载分配过程

对于NCIS而言,每个节点都在系统中承担一定任务,当它失效故障后,需要将其所承担任务负载进行分流,以保证系统整体运行稳定.

首先,规定节点负载只在节点所在网络层内的同类邻居节点之间进行分流,即对于物理层而言,实体节点之间无类别划分,可以直接在邻居节点之间分流负载;对于逻辑层而言,功能节点存在侦察情报、火力打击、指挥控制、综合保障4种不同类型,因此在分流节点负载时需先考虑节点类型.

其次,对于失效节点p_i而言,需要将其所有负载L_i以某种策略分配给其同类未失效邻居节点,并更新邻居节点的负载.

最后,对于过载节点,用剩余系数μ描述节点分配负载后自身承担的负载,满足$0 \leqslant \mu \leqslant 1$,过载节点$p_i$剩余负载量为$\mu C_i$,则$t$时刻失效节点$p_i$分配给其同类未失效邻居节点$p_k$的负载量可表示为

$$\Delta L_{ik}(t) = [L_i(t) - \mu C_i]\Pi_{ik}, \tag{6}$$

其中Π_{ik}为过载节点p_i对未失效节点p_k的负载分配比例,采用不同的负载分配策略对应不同的分配比例. 可以看出,当$\mu = 1$时,表明节点只分流超过其容量的多余负载,能保证节点恰好处于正常状态;当$\mu = 0$时,表明节点分流其所有负载,与失效状态时节点分流情况相同,因此可将失效状态的节点分流过程看作过载状态下的一个特例.

2.4　负载分配策略

在级联失效过程中,节点负载分配策略主要有平均分配[24]、全局分配[25]、局部择优分配[12]等,且不同分配策略对网络鲁棒性影响的差异较大. 对于加权网络而言,现有成果主要是基于节点权重的重分配策略(weight redistribution, WR),即对于某一失效节点p_i的邻居节点p_k而言,其权重越大,从p_i节点处分配到的负载越多[26]. 节点p_k分配到的负载比例为

$$\Pi_{ik}^{\mathrm{WR}} = w_k \Big/ \sum_{j\in\Gamma_i} w_j, \tag{7}$$

其中Γ_i为与节点p_i相连且未失效的同类节点集合.

然而,这种基于节点权重的分配策略过程较为理想化,且忽略了网络中节点之间的差异,存在一定的改进空间. 文献[13,26]研究表明,节点紧密度之差越大,表明节点的功能结构差异越大,在负载分配时应当分配较小负载,且节点实际剩余容量大小也应当作为负载分配需考虑因素之一. 故本文在WR策略基础上,提出3种优化的负载分配策略,并通过仿真实验验证各策略对于网络鲁棒性的影响情况.

2.4.1　节点相似分配策略(SR)

由于节点权重反映节点自身能力属性,节点负载反映节点承载任务. 节点p_i与其相连节点p_k之间权重差值$|w_i - w_k|$越小,表明p_i与p_k之间的功能作用越相似,则两节点所承载的任务越相似,因此p_k节点可以更多地承载p_i的负载,其分配比例Π_{ik}^{SR}计算为

$$\Pi_{ik}^{\mathrm{SR}} = 1 - \frac{|w_i - w_k|}{\sum\limits_{j\in\Gamma_i} |w_i - w_j|}, \tag{8}$$

其中Γ_i为与节点p_i相连且未失效的同类节点集合.

2.4.2　剩余容量分配策略(SCR)

节点p_i的剩余容量是t时刻节点容量与其负载的差值,即$C_i - L_i(t)$,反映该节点能够处理新增负载的能力. 因此,节点剩余容量越大,其可承载的负载也越多. 待分类节点(过载或失效)p_i分配至同类未失效邻居节点p_k的比例为

$$\Pi_{ik}^{\mathrm{SCR}} = \frac{C_k - L_k(t)}{\sum\limits_{j\in\Gamma_i} [C_j - L_j(t)]}. \tag{9}$$

其中: $L_k(t)$为t时刻节点容量, Γ_i为与节点p_i相连且未失效的同类节点集合.

2.4.3　综合分配策略(CR)

将WR策略、SR策略和SCR策略进行加权组合,可得到混合策略,其分配比例Π_{ik}^{CR}计算如下:

$$\Pi_{ik}^{\mathrm{CR}} = \theta_1\Pi_{ik}^{\mathrm{WR}} + \theta_2\Pi_{ik}^{\mathrm{SR}} + \theta_3\Pi_{ik}^{\mathrm{SCR}}, \tag{10}$$

其中θ_1、θ_2、θ_3为混合权重,且满足$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 1$.

3　仿真实验与分析

3.1　实验样本及网络参数

根据前文模型方法,对“LB演习”中红方NCIS进行建模并研究其级联失效现象. 从演习数据中抽象出物理层实体节点数$N_P = 27$,逻辑层功能节点数

表1　物理层网络节点权重

节点编号	权重	节点编号	权重	节点编号	权重
1	2.286	10	1.750	19	1.333
2	2.143	11	2.000	20	1.600
3	2.000	12	1.500	21	1.400
4	1.800	13	1.400	22	1.500
5	1.714	14	1.500	23	1.600
6	1.750	15	1.600	24	1.750
7	1.600	16	1.400	25	1.667
8	1.750	17	1.667	26	1.778
9	1.600	18	2.000	27	1.667

表2　逻辑层网络节点权重

节点编号	权重	节点编号	权重	节点编号	权重
1	0.917	16	0.780	31	0.633
2	0.867	17	0.800	32	0.699
3	0.900	18	0.820	33	0.633
4	0.900	19	0.700	34	0.699
5	0.833	20	0.760	35	0.600
6	0.850	21	0.720	36	0.699
7	0.800	22	0.700	37	0.699
8	0.917	23	0.700	38	0.633
9	0.833	24	0.633	39	0.798
10	0.817	25	0.666	40	0.765
11	0.950	26	0.699	41	0.732
12	0.820	27	0.600	42	0.798
13	0.780	28	0.666	43	0.600
14	0.720	29	0.633		
15	0.700	30	0.633		

$N_L = 43$. 根据各节点之间的关联关系,生成相应的物理层和逻辑层网络模型,进而考虑网络中节点边权重,可利用式(1)分别计算出各节点的权重值,如表1和表2所示.

仿真实验中,采取独立重复50次取结果平均值的方法消除随机误差,并利用未失效节点比率B代表网络抗毁性,有

$$B = \frac{N_P^O + N_L^O}{N_P + N_L}, \tag{11}$$

其中N_P^O和N_L^O分别为物理层、逻辑层正常节点数量. 借鉴文献[13, 18, 21-25]的成果经验,设置网络初始化参数如表3所示.

表3 网络初始化参数

参数	初始值	参数	初始值
α	0.1	η	0.5
β	0.8	μ	0.4
λ	0.5	θ_1	1/3
γ	1.1	θ_2	1/3
δ	0.3	θ_3	1/3

3.2 攻击类型仿真分析

根据前文模型方法,对“LB演习”中红方NCIS进行建模并研究其级联失效现象. 从演习数据中,针对不同类型攻击及负载重分配策略可能会对网络抗毁性造成的影响,设定攻击强度参数P,以及物理层随机攻击(random attack of physical network, RAP)、物理层蓄意攻击(intentional attack of physical network, IAP)、逻辑层随机攻击(random attack of logical network, RAL)、逻辑层蓄意攻击(intentional attack of logical network, IAL)四种攻击方式,对双层相依网络模型上的级联失效问题进行仿真实验. 其中:P为网络在初始条件下受攻击而失效的节点数;RAP和RAL分别指从物理层、逻辑层网络中随机选出P个节点使其失效;IAP和IAL分别指从物理层、逻辑层网络中度较高的节点中选出P个节点使其失效.

3.2.1 物理层攻击

取P分别等于2和6,在RAP和IAP攻击下,分别使用上述4种策略对NCIS网络模型上的级联失效问题进行仿真,结果如图3和图4所示. 由图3和图4可见,在网络遭受物理层攻击时,无论使用哪种负载重分配策略,网络性能均先下降,而后趋于平稳. 相比于WR策略而言,本文提出的3种改进型策略均能一定程度提升网络抗毁性,特别是CR策略效果最为明显. 这是由于CR策略综合考虑了节点权重、性能差异以及剩余容量大小等多种因素对负载重分配策略的影响,能够较好地缓解因节点失效而产生的级联影响. 同时,图3和图4中,紫色曲线均表示攻击强度$P = 2$,蓝色曲线均代表攻击强度$P = 6$. 对比可以看出,在攻击强度一定的情况下,蓄意攻击对网络造成的影响明显大于随机攻击,这是由于关键节点自身负载较高,一旦失效会造成其他节点难以承载所分配的负载,进而产生级联效应,造成网络较大规模受损. 并且从图4可以看出,当攻击强度较大时,蓄意攻击会使几乎整个网络失效.

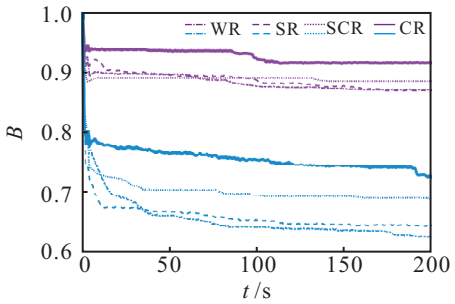

图3 物理层随机攻击下网络性能变化曲线

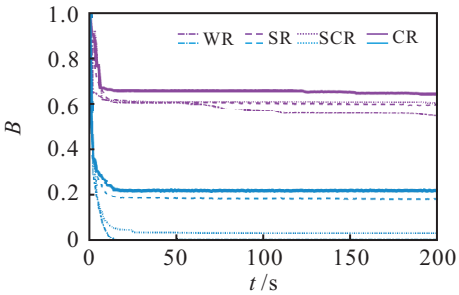

图4 物理层蓄意攻击下网络性能变化曲线

3.2.2 逻辑层攻击

取P分别等于2和6,在RAL和IAL攻击下,分别使用上述4种策略对NCIS网络模型上的级联失效问题进行仿真,结果如图5和图6所示.

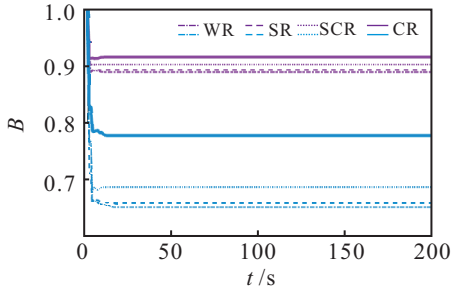

图5 逻辑层随机攻击下网络性能变化曲线

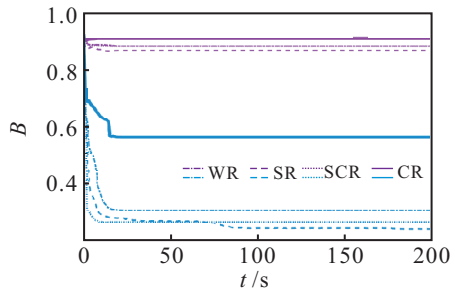

图6 逻辑层蓄意攻击下网络性能变化曲线

图5和图6中,紫色曲线均表示攻击强度$P = 2$,蓝色曲线均表示攻击强度$P = 6$. 对比可知,在逻辑层网络遭受攻击时,网络性能会经过较少的迭代次数而达到稳定状态,与物理层攻击相似的是,在4种负载重分配策略中,CR策略同样能够明显提升网络抗毁性,并且逻辑层蓄意攻击对网络性能影响也明显大于随机攻击产生的影响,表明网络同时具有鲁棒性和脆弱性的特点.

3.3　攻击强度变化

为进一步探讨不同攻击类型对网络性能的影响,在上述实验基础上令攻击强度P递增,并取网络性能稳定后的B值为输出,结果如图7和图8所示.

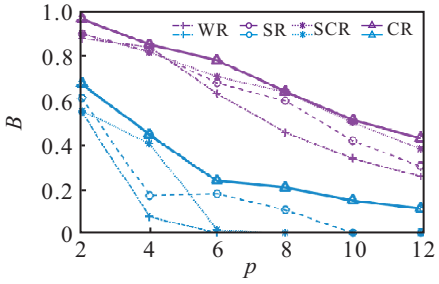

图 7　物理层不同攻击强度下网络性能变化曲线

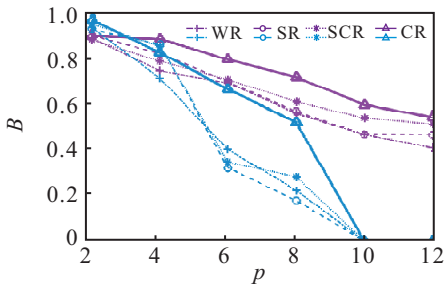

图 8　逻辑层不同攻击强度下网络性能变化曲线

图7和图8中,紫色曲线均表示随机攻击下网络性能变化情况,蓝色曲线均表示蓄意攻击下网络性能变化情况. 对比可知,本文所改进的3种负载分配策略较WR策略而言,均能够在一定程度上提升网络抗毁性,并且CR策略最优. 随机攻击条件下(图7和图8紫色曲线),网络性能随攻击强度的增加下降较为平缓,呈现一定线性规律;同时,在蓄意攻击条件下(图7和图8蓝色曲线),网络性能会在攻击强度达到某阈值后急剧下降,并且在攻击强度P一定的情况下,物理层蓄意攻击造成的影响明显大于逻辑层蓄意攻击. 这是由于受网络层间耦合关系影响,物理层节点一旦失效,便会立刻造成与之相耦合的逻辑层节点失效,造成较大范围的影响;而由于物理层节点与逻辑层节点是一对多映射关系,导致逻辑层节点失效较难通过层级耦合关系而影响物理层节点状态. 由表4可以看出,物理层攻击造成的初始节点失效平均数约为相同条件下逻辑层攻击的1.66倍,表明物理层网络受攻击更易产生级联失效现象.

表4　不同攻击下初始失效节点平均数

P	RAP攻击	RAL攻击	IAP攻击	IAL攻击
2	5.4	3.62	6	2
4	10.28	5.08	12	4
6	15.54	9.24	17	6
8	20.66	12.32	22	8
10	25.66	14.32	26	20
12	30.92	20.1	30	28

综上所述,本文构建的双层相依网络模型在面临不同类型攻击时体现出“既鲁棒、又脆弱”的特点,与已知的NCIS特点相符[1],并且存在攻击强度阈值,使得当蓄意攻击超过阈值时会导致网络性能急剧下降. 物理层网络受攻击产生的网络级联失效现象强于逻辑层网络受攻击,其重要节点是影响网络抗毁性的关键因素,并且改进的3种负载重分配策略较WR策略均能提升网络抗毁性,特别是CR策略效果明显优于其他策略.

3.4　网络性能参数仿真分析

网络参数能够在一定程度上反映节点和网络的整体性能,同时也关系着网络构造的成本,需综合考虑. 在前文研究基础上,主要研究过载参数δ和恢复系数η对网络抗毁性的影响.

3.4.1　过载参数δ变化

在表2所示网络初始化参数的基础上,保持其他参数不变,选取不同的δ值,并采用CR策略对网络抗毁性进行研究,仿真结果如图9和图10所示.

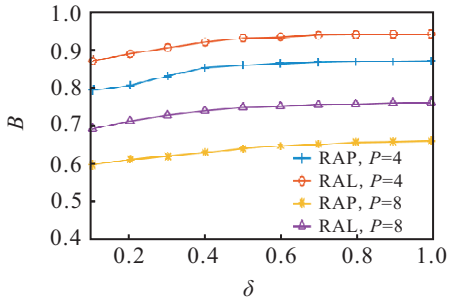

图 9　随机攻击下过载参数δ对网络性能影响曲线

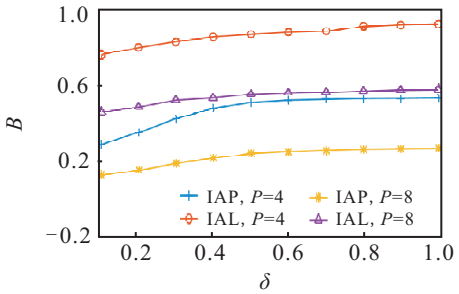

图 10　蓄意攻击下过载参数δ对网络性能影响曲线

过载参数δ反映的是节点处理超过其容量的额外负载能力,δ越大表明节点能够容忍的额外负载越高,失效概率越低. 由图9和图10可见,随着δ值的增大,网络抗毁性不断增强,并且相比于随机攻击而言,δ对于提升网络面对蓄意攻击时的抗毁性效果更为明显. 同时,过载参数对于网络抗毁性提升作用有限,在本文中,当$\delta \geqslant 0.7$时,网络抗毁性几乎不随δ值的增大而提升.

3.4.2 恢复系数η变化

恢复系数η的大小决定了节点在失效之后,可以通过技术手段修复而重新变为正常节点的能力高低. 然而,综合考虑网络抗毁性能和资源成本,η的值并非越大越好. 在表2所示网络初始化参数的基础上,保持其他参数不变,通过仿真实验探究η对网络抗毁性的影响,结果如图11和图12所示.

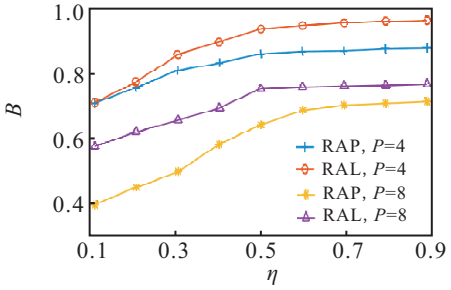

图11 随机攻击下恢复系数η对网络性能影响曲线

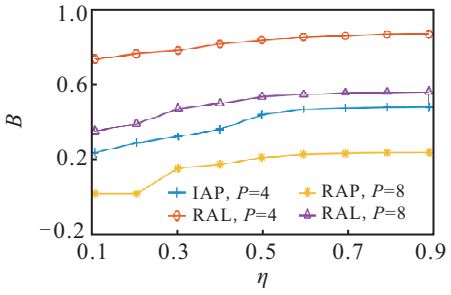

图12 蓄意攻击下恢复系数η对网络性能影响曲线

由于恢复系数η值的大小决定网络中失效节点恢复概率,由图11和图12可见,恢复系数η对于网络抗毁性提升效果明显. 但存在一个阈值,如本文中当$\eta \leqslant 0.6$时,网络抗毁性随η值的增加而迅速提升,表明当η较小时,通过提升节点恢复能力,能够较好地对抗级联失效现象对网络抗毁性带来的负面影响;而当$\eta > 0.6$时,网络抗毁性随η值变化并不明显,表明此时单纯增加节点修复能力并不能有效提升网络抗毁性,还需要综合考虑网络其他性能参数以及负载重分配策略等因素的影响.

综上所述,过载参数δ和恢复系数η均能在一定程度上提升网络抗毁性,但二者均存在一定的适用范围和作用极限. 此外,通过仿真发现,对于蓄意攻击,特别是逻辑层网络上的蓄意攻击,δ和η均不能解决网络在面临大量攻击时的性能突变现象,其对于网络抗毁性的调节能力较为有限.

4 结 论

本文在分析NCIS特点的基础上,构建了一种带权重的双层相依网络模型,在此模型基础上分析了该模型的级联失效过程,并从攻击类型、负载重分配策略、网络性能参数等3个方面展开研究,得到如下结论:

1) NCIS具有“既鲁棒、又脆弱”的特点,能够较好地抵抗随机攻击,但对于蓄意攻击而言,存在临界攻击强度,一旦超过该强度,网络抗毁性将急剧下降并最终导致大面积崩溃现象;

2) 相比于逻辑层网络,由于物理层网络作为NCIS的实体组成,其关键节点一旦受到打击,将使得网络性能严重下降,需要重点加以防护;

3) 负载重分配中,CR策略由于综合考虑了节点权重、性能差异以及剩余容量大小等多种因素对负载重分配策略的影响,能够较大幅度提升网络抗毁性;

4) 在一定限度内提升过载参数和恢复系数,能够提升网络抗毁性,但参数超过一定阈值后,网络抗毁性提升不明显.

以上结果有效地反映了NCIS部分节点受攻击失效后对系统性能带来的变化特征,为进一步研究NCIS结构优化、级联失效现象的控制和防范提供了参考. 此外,考虑信息化条件下,以病毒、木马等为主的攻击手段将给网络带来类似疾病传播式的失效过程,将该过程与基于负载-容量的失效过程有机结合,更为细致准确地刻画网络演化特征将成为未来的研究方向之一.

参考文献(References)

[1] 蓝羽石, 毛少杰, 王珩. 指挥信息系统结构理论与优化方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 12-16.
(Lan Y S, Mao S J, Wang H. Theory and optimization of C4ISR system structure[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 12-16.)

[2] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: Structure and dynamics[J]. Physics Reports, 2006, 424(4/5): 175-308.

[3] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(6794): 378-382.

[4] 老松杨, 王竣德, 白亮. 相依网络研究综述[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(1): 122-128.
(Lao S Y, Wang J D, Bai L. Review of the interdependent

networks[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(1): 122-128.)

[5] Watts D J. A simple model of global cascades on random networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 2002, 99(9): 5766-5771.

[6] Yang R, Wang W X, Lai Y C, et al. Optimal weighting scheme for suppressing cascades and traffic congestion in complex networks[J]. Physical Review E, 2009, 79(2): 026112.

[7] Xia Y X, Fan J, Hill D J. Cascading failure in Watts-Strogatz small-world networks[J]. Physica A-statistical Mechanics and Its Applications, 2010, 389(6): 1281-1285.

[8] Guo C, Wang L N, Li Y, et al. Study on network cascading failures based on load-capacity model[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(12): 2529-2538.

[9] Wang W X, Chen G R. Universal robustness characteristic of weighted networks against cascading failure[J]. Physical Review E, 2008, 77(2): 026101.

[10] Cao X B, Hong C, Du W B, et al. Improving the network robustness against cascading failures by adding links[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2013, 57: 35-40.

[11] Wang J W. Robustness of complex networks with the local protection strategy against cascading failures[J]. Safety Science, 2013, 53: 219-225.

[12] Hong C, Zhang J, Du W B, et al. Cascading failures with local load redistribution in interdependent Watts-Strogatz networks[J]. International Journal of Modern Physics C, 2016, 27(11): 1650131.

[13] 郝羽成, 李成兵, 魏磊. 考虑节点过载的复杂网络级联失效模型[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(10): 2282-2287.
(Hao Y C, Li C B, Wei L. Cascading failure model of complex networks considering overloaded nodes[J]. System Engineering and Electronics, 2018, 40(10): 2282-2287.)

[14] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464(7291): 1025-1028.

[15] Shao J, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Cascade of failures in coupled network systems with multiple support-dependence relations[J]. Physical Review E, 2011, 83(3): 036116.

[16] Dong G G, Gao J X, Tian L X, et al. Percolation of partially interdependent networks under targeted attack[J]. Physical Review E, 2012, 85 (1): 016112.

[17] 陈世明, 戴亚明, 程运洪. 提高相依网络鲁棒性的加边策略研究[J]. 电子科技大学学报, 2019, 48(1): 103-109.
(Chen S M, Dai Y M, Cheng Y H. Research of the link addition strategies for improving the robustness of interdependent networks[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2019, 48(1): 103-109.)

[18] 沈迪, 李建华, 熊金石, 等. 一种基于介数的双层复杂网络级联失效模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2014, 11(3): 12-18.
(Shen D, Li J H, Xiong J S, et al. A cascading failure model of double layer complex networks based on betweenness[J]. Complex Systems and Complex Science, 2014, 11(3): 12-18.)

[19] 杨迎辉, 李建华, 沈迪, 等. 体系作战信息流转层级网络级联失效模型[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(7): 2099-2103.
(Yang Y H, Li J H, Shen D, et al. Cascading failure model for systematic operations information flowing layered network[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(7): 2099-2103.)

[20] 崔琼, 李建华, 王鹏, 等. 指挥信息系统双层耦合网络模型级联失效研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(5): 100-108.
(Cui Q, Li J H, Wang P, et al. Cascading failure of command information system bi-layer coupled network model[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(5): 100-108.)

[21] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(6): 065102.

[22] Moreno Y, Gómez J B, Pacheco A F. Instability of scale-free networks under node-breaking avalances[J]. Europhysics Letters, 2002, 58(4): 630-636.

[23] Kim D H, Motter A E. Resource allocation pattern in infrastructure networks[J]. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2008, 41(22): 224019.

[24] Moreno Y, Pastor-Satorras R, Vazquez A, et al. Critical load and congestion instabilities in scale-free networks[J]. Europhysics Letters, 2003, 62(2): 292-298.

[25] Sun H J, Zhao H, Wu J J. A robust matching model of capacity to defense cascading failure on complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2008, 387(25): 6431-6435.

[26] 韩丽, 刘彬, 邓玉静, 等. 加权无标度网络的级联失效模型[J]. 软件学报, 2017, 28(10): 2769-2781.
(Han L, Liu B, Deng Y J, et al. Cascading failure model of weighted scale-free networks[J]. Journal of Software, 2017, 28(10): 2769-2781.)

作者简介

邢积超(1991−), 男, 硕士, 从事复杂网络建模、复杂网络演化的研究, E-mail: 380582362@qq.com;

陈楚湘(1972−), 男, 教授, 博士, 从事系统工程复杂网络、管理信息系统等研究, E-mail: xx_ccx@163.com;

朱兆梁(1993−), 男, 硕士生, 从事复杂系统评估的研究, E-mail: zhuzhaoliang49@163.com;

李艳(1988−), 女, 讲师, 从事网络安全等研究, E-mail: 15136288109@139.com.

(责任编辑：郑晓蕾)