doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20250002

基于演化博弈的空间信息网资源恢复策略

刘 军，季冰玉
（东北大学 计算机科学与工程学院，辽宁 沈阳 110169）

摘 要：针对空间信息网遭受网络攻击风险大、故障发生后恢复难度高的问题，提出了一种基于演化博弈理论的资源恢复策略. 首先，定义了网络效率和网络需求满足率指标，并给出网络弹性的计算方法，以评估故障网络的恢复能力；然后，提出了局部网络中竞争恢复资源的分配策略和按概率决定的资源恢复策略，并基于上述策略建立网络弹性模型；最后，基于三元公共物品博弈、自适应的赢存输变策略选择机制和Fermi动态更新规则进行网络故障节点间的演化博弈，进而完成恢复资源分配. 网络弹性评估结果表明，对于完全故障网络和部分故障网络，基于演化博弈的恢复资源分配策略均取得了最优的恢复效果和恢复期网络弹性.

关 键 词：空间信息网；复杂网络；网络弹性；级联故障；演化博弈
中图分类号：TP 20 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026(2026)04-0042-09

Resource Recovery Strategy for Spatial Information Networks Based on Evolutionary Game

LIU Jun, *JI Bing-yu*
(School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: JI Bing-yu, E-mail: 2201717@stu.neu.edu.cn)

Abstract: A resource recovery strategy based on evolutionary game theory was proposed to address the high risks of network attacks and the challenges in recovering from failures in spatial information networks. The strategy first defined network efficiency and demand satisfaction rate as performance indicators and introduced a method for calculating network elasticity to assess the recovery capability of a failed network. A resource allocation strategy was then developed for the competitive recovery of resources in local networks, along with a probabilistic approach to resource recovery. By using these strategies, a network elasticity model was constructed. Finally, evolutionary game theory was applied to the interactions between faulty network nodes, utilizing a ternary public goods game, an adaptive strategy selection mechanism based on success or failure, and Fermi dynamic updating rules to guide the allocation of recovered resources. The evaluation of network elasticity demonstrates that the proposed allocation strategy achieves optimal recovery outcomes and network elasticity in both fully and partially failed networks.

Key words: spatial information network; complex network; network elasticity; cascading failure; evolutionary game

随着需求的提升和高新技术的发展，传统信息通信系统正向复杂巨型系统演化. 空间信息网作为一种智能、综合的分布式信息网络[1]，不仅为军事作战提供一体化的侦察、导航等服务，还为陆海空通信、海洋气象预报、太空科研等提供全方位支持，具有巨大的军事和经济价值. 然而空间信息网作为关键基础设施，其遭遇网络攻击的风险显著，尤其是关键网络节点一旦遭受攻击，可能导致级联故障，从而严重损害网络功能[2-4].

在此背景下，研究者关注于抗毁性研究和弹性研究. 抗毁性研究关注网络在遭受攻击或故障时保持关键任务执行的能力. Albert等[5]首次提出

收稿日期：2025-01-02
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金资助项目(62501133).
作者简介：刘 军(1969—)，男，辽宁沈阳人，东北大学教授，博士生导师.
通信作者：季冰玉，E-mail：2201717@stu.neu.edu.cn.

了基于最大连通子图和平均路径长度的抗毁性度量指标,为评估和增强空间信息网抗毁性提供了理论基础,但未能充分考虑网络关键节点对网络性能的影响.Yang等[6]基于K-shell算法量化了节点的关键性,从而提高了对网络关键特征的识别能力,显著提升了抗毁性评估的准确性和效率,但未考虑拓扑结构对网络性能的影响.在拓扑结构抗毁性评估方面,Boccaletti等[7]分析了网络的时变性和多层性,采用复杂网络理论方法建立了网络的动态拓扑结构,并研究了其动态特性和抗毁性.李淑庆等[8]引入负载分配阻抗系数,优化了负载结构,从而减少了级联过程中失效节点的数量,提升了网络的抗毁性.

抗毁性研究主要集中在故障发生阶段,难以应对故障已发生后的恢复场景.弹性是指网络在遭受攻击或故障后迅速恢复并维持关键功能的能力[9],而资源恢复策略则是确保恢复过程有效实施的具体手段[10].现阶段资源恢复策略研究主要集中在复杂网络理论以及地面网络的研究上.Liu等[11]研究了信息物理电力系统(cyber-physical power system, CPPS)中相互依赖网络在多种故障下的表现,认为较轻的碎片化和更好的兼容性使CPPS在面对级联故障时更具鲁棒性,然而,该研究主要关注了电力系统中的相互依赖性,而没有考虑其他类型复杂网络(如空间信息网络)中不同网络层次和资源分配的独特性.Yue等[12]提出了一种针对故障前后两个阶段的恢复策略,以增强系统对连锁故障事件的抵抗能力,但该策略更多侧重于单一网络层面的恢复,缺乏对多层网络、特别是具有多种资源类型的综合恢复机制的探讨.Zhang等[13]针对信息物理供应链网络(cyber-physical supply chain networks, CPSCNs)提出了一个包含4种混合故障模式的级联失效模型,并提出两阶段恢复策略,改进了考虑时间约束的恢复模型,以提高网络性能.O'Neil等[14]研究了在随机故障后增强网络弹性的方法,提出混合整数非线性优化模型,从而确保高效恢复,同时最大限度地减少中断对关键基础设施性能的影响,但假设网络结构和故障模式较为简单,并未考虑大规模复杂网络中因动态环境变化而导致的恢复策略调整问题.

因此,空间信息网络的资源恢复策略面临以下关键挑战:1)现有的网络弹性评估方案难以应对大规模、复杂的空间信息网络;2)空间信息网络内恢复资源具有稀缺性、地理异构性和类型异构性特征,现有资源分配方案难以高效调度,无法保证关键节点和链路的及时恢复.

本文提出了一种基于演化博弈的空间信息网资源恢复策略:1)提出了一种针对空间信息网络的弹性评估方法,量化网络在面对攻击或故障时的恢复能力;2)提出了资源分配和概率恢复策略,有效调度恢复资源,确保网络在不同故障场景下实现快速恢复与灵活应对;3)引入演化博弈理论,优化资源分配策略.

1　网络架构及评估指标

空间信息网络是以多卫星协同组网为核心架构的通信系统,通过星间链路与星地链路,将太空轨道上的航天器、空间站、卫星平台与地面基站等异构节点互联,形成一个多层次、多维度的空间通信网络体系[15],实现空间节点间的实时数据传输与信息交互.

1.1　空间信息网架构

空间信息网是由深空通信网络、同步卫星中继网络、中低轨卫星网络、地面有线/无线网络以及移动网络等共同构成的巨型复杂网络.其结构高度异构,集成了天基与地基网络的多层次功能,同时具备全球覆盖能力,支持数据中继、信息存储与用户接入等多种任务[16].然而,星间链路状态复杂、星上资源受限,以及建设成本、规模和计算存储能力的限制,对其技术实现提出了巨大挑战[17].现有空间信息网的架构融合了天基骨干网、卫星接入网和地基骨干网.天基骨干网位于地球同步轨道,由多个骨干节点卫星组成,通过无线通信技术实现互联,提供中继和存储功能;卫星接入网分布于不同轨道,为各类用户提供按需接入服务;地基骨干网则通过地面基站实现卫星与地面网络的融合,承担网络控制、通信资源管理、信息处理等关键任务.

1.2　网络弹性的评估指标

为了全面反映网络在资源利用和服务质量的综合表现,本文选择网络效率和需求满足率的乘积作为网络弹性衡量指标,评估网络在不同应用场景下的整体性能,避免仅关注单一维度而导致评估结果失真现象.

网络效率是衡量网络节点间的连通水平和连通质量的指标.假设节点之间的网络流选择最短路径传输,两节点间的传输效率可表示为

$$\varepsilon_{ij}=\frac{1}{\gamma_{ij}}. \tag{1}$$

式中，γ_{ij}为最短路径跳数，间接反映了全局节点入网/退网导致的路径重构能力，这更符合空间信息网络拓扑结构受星间链路切换、星地可见性窗口等影响而呈现的高动态性.

网络效率为

$$E(G)=\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i,j\in V(G)}\frac{1}{\gamma_{ij}}. \tag{2}$$

式中：n为网络节点总数；$V(G)$为节点集合.

网络效率$E(G)$的值越大，网络整体的连通性越好，节点间通信流的传输效率越高.

网络需求满足率反映了网络中通信流的总体传输状态.用节点的负载来近似表示节点的需求值：

$$e_i=\frac{1}{3}rL_i. \tag{3}$$

式中：r为模拟节点间需求差异性的随机数，$r\in[0.5,1.5]$；L_i为节点i的初始负载.

网络需求满足率为

$$D(G)=\frac{\sum_{i\in V(G)}e_i}{\sum_{j\in V_0(G)}e_j}. \tag{4}$$

式中$V_0(G)$是初始节点集.$0<D(G)<1$；当网络无故障时，$D(G)=1$.

随机数的引入可映射空间信息网节点因能源限制、载荷切换导致的容量波动.通过需求满足率评估资源动态调整下的服务保障能力，体现资源受限环境下的网络弹性特征.

综上，得到网络弹性$R(G)$：

$$R(G)=\frac{\int_{t_0}^{t_1}E(G)\cdot D(G)\mathrm{d}t}{t_1-t_0}. \tag{5}$$

式中t_1-t_0表示网络恢复期的总持续时间.

$R(G)$结合网络效率$E(G)$和需求满足率$D(G)$，全面表征系统性能，从而反映网络弹性.

2 空间信息网弹性模型的建立

为更深入地分析网络在故障发生和恢复过程中的动态行为，将空间信息网络的弹性模型划分为两部分：故障发生阶段的级联故障模型和恢复阶段的故障恢复模型，如图1所示.首先，将空间信息网络抽象为复杂网络，并基于此构建无标度网络模型.然后，根据级联失效规则建立级联故障模型.随后，提出局部资源分配策略和故障概率恢复策略，以此建立故障恢复模型，全面描述网络的弹性机制.

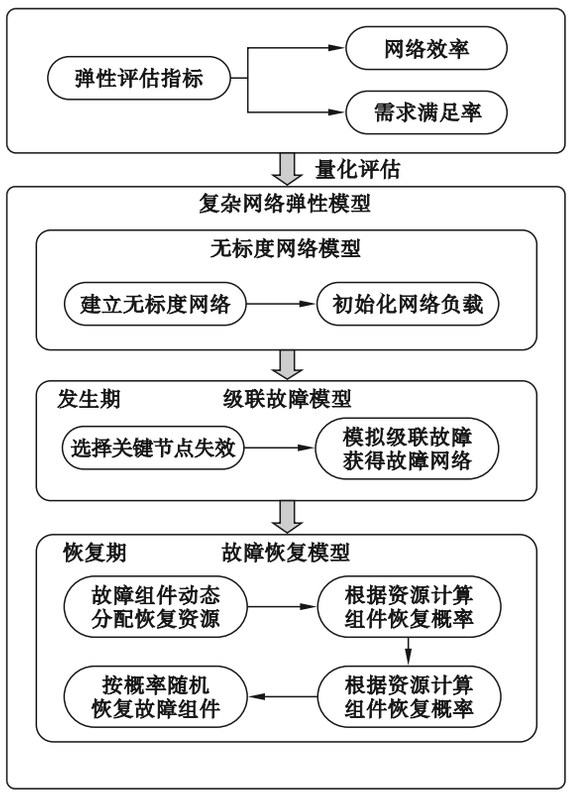


图1 空间信息网弹性模型

Fig. 1 Elasticity model of spatial information network

2.1 空间信息网拓扑模型的建立

为降低模型计算复杂度，本文只考虑节点和链路的连通性、中继跳数、带宽等核心指标，将模型限定为节点和链路以负载传递为核心的拓扑关系.将地面站、航天器、各类工作卫星和骨干网卫星统一描述为网络中的节点，将节点的承载能力和当前流量分别描述为节点的容量和负载，将地间、星地间和星间信道传输以及一些中继站统一描述为链路，将该链路可以支撑的带宽和当前网络流量分别定义为链路的容量和负载.

构建方法和各项参数定义如下：

1）通过分析空间信息网理论模型的各节点度，用无标度网络表示空间信息网的拓扑结构模型.

2）节点i的初始负载为

$$L_i=d_i\left(\sum_{j\in B_i}(d_j-1)\right). \tag{6}$$

式中：B_i是节点i的邻节点集；d_i，d_j分别是节点i和j的节点度.

假设网络中节点的容量C_i与初始负载L_i成正比，C_i可表示为

$$C_i=(1+\alpha)L_i. \tag{7}$$

式中：α是可调的容差参数，用于调节网络剩余的

可用负载,α越小网络的级联故障现象越严重.空间信息网由于开销和硬件条件的限制,容差参数较一般网络更大,取$0 \leqslant \alpha \leqslant 2$.

2.2　级联故障模型设计

为方便恢复期的研究和实验,本文对较稳定的负载-容量(ML)级联故障模型进行改进,从而减少前期的不可控变量.改进的ML模型的节点有正常、故障和孤立3种状态,边有正常和故障2种状态.级联故障过程如图2所示.

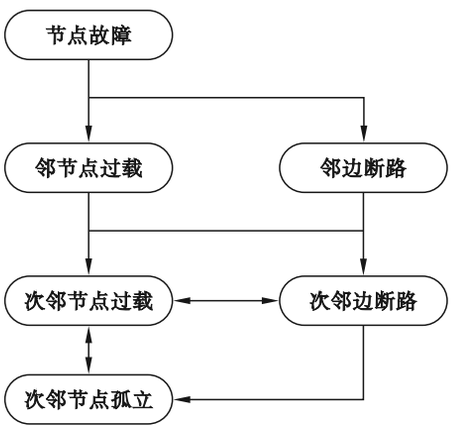


图2　级联故障过程

Fig. 2　Process of cascading failures

当节点i发生故障时,其自身负载将分配给无故障的邻节点,以图3为例,故障节点1的负载将分配给节点2,3,4.节点i的邻节点分配负载为

$$\Delta L_j = \frac{L_i d_j}{\sum_{k \in B_i} d_k}. \tag{8}$$

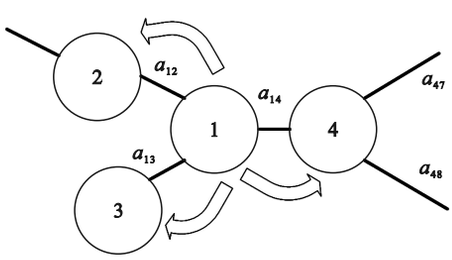


图3　故障节点负载分配过程

Fig. 3　Load distribution process of faulty nodes

即邻节点j的节点度d_j越大,它分配到的负载越多.同时故障节点i邻边负载将分配给另一端节点j的正常边,即图3中a_{14}的负载将分配给a_{47}和a_{48}.每个正常边分配到的负载为

$$\Delta l_{jk} = \frac{l_{ij}\kappa_{jk}}{\sum_{k \in B_j} \kappa_{jk}}. \tag{9}$$

式中:l_{ij}表示故障边a_{ij}的负载;κ_{jk}表示正常边a_{jk}容量.正常边的容量κ_{jk}越大,其被分配的负载越多.若邻边自身未过载,则在节点恢复正常后邻边也会随之连通.

当边a_{ij}出现故障时,其会向节点i,j的正常邻边分配负载,即图4中故障边a_{12}将向节点1的邻边a_{13},a_{14}和节点2的邻边a_{25},a_{26}分配负载.这些边分得负载与其自身容量成正比,i,j邻边获得的负载分别为

$$\Delta l_{im} = \frac{l_{ij} c_{im}}{\sum_{m \in B_i} c_{im} + \sum_{n \in B_j} c_{jn}}, \tag{10}$$

$$\Delta l_{jn} = \frac{l_{ij} c_{jn}}{\sum_{n \in B_j} c_{jn} + \sum_{m \in B_i} c_{im}}. \tag{11}$$

式中B_j是节点j的邻节点集.

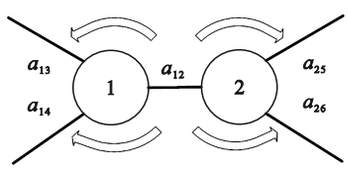


图4　故障边负载分配过程

Fig. 4　Load distribution process of faulty edges

空间信息网络对随机攻击有很好的抵抗能力,但大节点受到的蓄意攻击或意外故障对无标度网络有很大的破坏性.本文针对大节点的故障场景建立级联故障模型,流程如下:

1)假定一大节点出现故障,该节点分配负载后,在网络中删除该节点及其邻边;

2)遍历上一轮的正常节点,修改新过载节点和孤立节点的状态,在网络中删除这些节点及其邻边;

3)遍历上一轮中的正常边,删除网络中新产生的过载边;

4)重复执行第2步和第3步,直到节点和边不再出现过载.级联故障过程结束.

2.3　网络恢复策略

考虑到空间信息网难以进行全局资源分配,将实际资源统一定义:在无标度网络中各个节点拥有一定的初始恢复资源,节点和边只能与邻节点及邻边进行资源调度分配.空间信息网节点的初始恢复资源大小与节点度d_i成正比,即网络中节点i的初始恢复资源为

$$r_i = h d_i^2. \tag{12}$$

式中:h是随机数,$h \in [0.5, 1.5]$.

2.3.1　局部资源分配策略

复杂网络的恢复期目标是对级联故障模型的受损网络进行恢复,根据拥有资源的节点状态分别提出具体的资源分配策略.

正常节点不需要恢复资源,会将全部资源分配给故障的邻边和邻节点.设正常节点资源为r_i,相邻故障节点j需求为e_j,故障节点恢复难度为c_j;故障边a_{ij}需求为e_{ij},故障边恢复难度为c_{ij},故障邻节点获得的恢复资源为

$$\Delta r_j=\frac{e_jc_j\beta}{\beta\sum_{j\in B_i'}e_jc_j+\sum_{a_{ij}\in E_i'}e_{ij}c_{ij}}\cdot r_i. \tag{13}$$

式中:E_i'节点的故障邻边集;B_i'是节点i的故障邻节点集;β是节点和边的资源分配比重.故障边a_{ij}的需求权重e_{ij}定义当j为正常节点时,边的恢复具有高优先级,即$e_{ij}=1$;而j为故障节点时,需等待节点的恢复,即$e_{ij}=e_j$.类似地,故障邻边获得的恢复资源为

$$\Delta r_{ij}=\frac{e_{ij}c_{ij}}{\beta\sum_{j\in B_i'}e_jc_j+\sum_{a_{ij}\in E_i'}e_{ij}c_{ij}}\cdot r_i. \tag{14}$$

故障节点会参与资源分配,其中小节点由于竞争恢复资源时处于劣势,恢复速度缓慢,影响整体恢复效果.因此设置参数γ调节参与分配的资源比例,$0<\gamma<1$.设定故障节点的故障边恢复资源分配给该故障节点和其故障邻节点.定义故障节点获得的恢复资源为

$$\Delta r_j=\frac{e_jc_j}{\sum_{j\in B_i'+i}e_jc_j}\cdot r_i. \tag{15}$$

式中,$B_i'+i$表示故障节点i和它的故障邻边的集合.

2.3.2 按概率的恢复策略

每个故障组件按恢复概率转变为正常状态或是维持故障状态.节点和边的恢复概率为

$$p=\frac{r_L}{fc}. \tag{16}$$

式中:f是随机恢复难度参数,$0.5\leqslant f\leqslant 2$;$c$是基本恢复难度.节点$i$的基本恢复难度$c_i$为

$$c_i=fd_i. \tag{17}$$

边a_{ij}的基本恢复难度c_{ij}为

$$c_{ij}=l\left(d_i+d_j\right). \tag{18}$$

式中:l是固定的难度系数,起到调节网络总体恢复速度和归一化的效果.最终计算出恢复概率p,$p\in[0,1]$.

成功恢复的故障节点会将自身状态转变为正常状态,在下一个时间步依据正常节点资源分配策略对本时间步占用的资源进行分配.而故障边恢复正常后,若其两端点均正常,则将自身状态转变为正常状态,向两端点均分占用的恢复资源;若有一个端点故障,则向该端点转移全部恢复资源,在端点恢复前该边虽然正常但无法连通,在弹性评估时仍视作失效边.

3 基于演化博弈的恢复策略

上述过程通过考虑节点和边的故障状态、连通关系及节点需求值,计算故障节点和边的恢复优先级,这种方法可以计算节点对网络性能恢复的重要程度.然而,基于固定优先级的判断可能导致资源过度集中于大节点,小节点长时间无法恢复.本文提出基于演化博弈的恢复策略模型,对网络恢复策略进行改进,更准确地计算故障组件资源分配优先度和资源分配值.

3.1 三元公共物品博弈设计

公共物品博弈具有多人参与、非排他性和考虑参与者差异性的特征,复杂网络节点与其邻节点作为博弈的参与者.公共物品博弈有两种策略,“合作”即投入一定量的资金,“背叛”即不投入资金通过“搭便车”获得公共池中的分配资金.假设某次有N位参与者的博弈,参与者的初始资金是b_i,投入的资金是z_i,翻倍系数q调节对合作策略的奖励程度,按照平分公共物品的规则清空公共池,本次博弈获得的资金收益是

$$\Delta w=\frac{q\sum_{i=1}^{N}z_i}{N}-z_i. \tag{19}$$

最终的总资金,即流转给下一次博弈的初始资金是

$$W=b_i+\frac{q\sum_{i=1}^{N}z_i}{N}-z_i. \tag{20}$$

使用公共物品博弈的目标是用复杂网络各故障节点的策略选择来表示节点对于恢复资源的需求优先级:用故障节点的合作策略表示其对获取资源的低优先级;用背叛策略表示其对获取资源的高优先级.

但公共物品博弈到达均衡状态时往往出现一种策略完全压倒另一种策略的情况并且优势策略不稳定,因此本文采用三元公共物品博弈来改善各个策略的共存状态,设置“半合作”策略,即参与者可向资金池投入“合作”策略一半的资金.

3.2 非确定性更新规则

个体策略演化和学习试错的规则被称为策略更新规则.在演化博弈中,空间信息网属于有限种群,因此在研究中应采用非确定性更新规则.Fermi动态更新规则可以调节选择强度,适用

于动态复杂网络.Fermi动态更新规则的内容是:节点i会按式(21)计算得到的概率将自身策略转变为其随机选择的邻居j的策略.

$$p_i=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-\delta\left(g_j-g_i\right)}}. \tag{21}$$

式中:$\delta>0$,是选择强度,反映有限网络且个体非理性条件下噪声的影响程度,并调节个体策略选择的随机性;g_i和g_j分别为i和j的收益.

3.3　自适应的赢存输变偏好选择机制

非确定性更新规则通过随机选择机制来避免出现局部最优的情况,但级联故障中博弈网络规模较小,不存在严重的局部最优问题.因此更新规则可以选用更具指向性的寻优机制来降低到达动态均衡的时间成本和计算成本.对此提出一种自适应的赢存输变(win stay and lose shift,WSLS)偏好选择机制.设在博弈轮次t进行博弈策略更新的节点为i,博弈对象为节点j,学习的对象为R_i,i和j的收益分别为g_i和g_j,自适应的WSLS偏好选择机制流程如下:

1)如果节点i在上一轮以自身为学习对象,则在本轮i从其邻节点集B_i中随机选择一个节点j作为自己的学习对象.

2)如果节点i在上一轮选择邻节点为学习对象,则比较i的本轮收益$g_i(t)$和上一轮收益$g_i(t-1)$.如果$g_i(t)\geqslant g_i(t-1)$,节点i就保持学习对象不变,$R_i(t)=R_i(t-1)$;如果$g_i(t)<g_i(t-1)$,节点i就从剩余邻节点集$B_i-R_i(t-1)$中随机选择一个节点作为学习对象,即$R_i(t)=j,j\in B_i-R_i(t-1)$.

在这一过程中,节点i需要结合Fermi动态更新规则决定是否改变其学习对象:

$$R_i(t)=j,x\leqslant p_i. \tag{22}$$

$$R_i(t)=i,x>p_i. \tag{23}$$

式中,x为随机数,$x\in(0,1)$.

3.4　基于演化博弈的网络恢复模型

基于演化博弈的网络恢复模型可分为演化博弈阶段、资源分配阶段和故障恢复阶段.每个时间步按顺序执行这3个阶段.

3.4.1　节点的博弈策略选择过程

演化博弈阶段的目的是确定本时间步每个故障节点的策略选择,各个节点的策略选择表示了该节点在与邻节点组成的局部网络对恢复资源的需求程度.因此每个时间步中都需要进行一场包含多个博弈轮次的演化博弈过程.具体算法如下:

1)本轮遍历所有n个故障节点:每个节点与其全部故障邻节点进行n场公共物品博弈,每场博弈更新节点的当前资金W;

2)计算各个节点本轮和上一轮的资金差值ΔW,使用自适应的WSLS策略选择机制确定该节点的策略学习对象,每轮资金W_t计算公式如下:

$$W_t=\sum_{x=1}^{n+1}\Delta g_x-(n+1)z. \tag{24}$$

式中:$n+1$是该节点参加的公共物品博弈场次;Δg_x是第x场博弈的资金收益;z是根据策略选择单场投入的资金量;

3)计算每个节点的策略学习概率p,并按概率p更新每个节点的策略选择;

4)记录选择每个策略的故障节点数,如果多轮博弈后节点数目只有微小波动,即达到动态均衡,则结束演化博弈算法并输出各节点的策略;否则保留当前策略选择和资金W,跳转步骤1)重复算法.

3.4.2　基于演化博弈的资源分配策略

基于演化博弈的资源分配策略与局部资源分配策略相似,主要区别在于:基于演化博弈的资源分配策略在计算时增加了策略选择权重;故障边不再与故障节点一起参与恢复资源分配,而是先进行节点分配再由节点向故障边二次分配恢复资源;在演化博弈阶段,孤立节点与故障节点一同参与博弈获得策略选择,在资源分配阶段二者有相同的分配方式.设节点的策略选择权重$S\in\{s_{\mathrm{c}},s_{\mathrm{h}},s_{\mathrm{b}}\}$,其中$s_{\mathrm{c}}$,$s_{\mathrm{h}}$和$s_{\mathrm{b}}$分别为合作、半合作和背叛策略的权重.

正常节点的恢复资源全部分给故障邻节点和孤立邻节点.则故障或孤立邻节点获得的恢复资源为

$$\Delta r_j=\frac{e_jS_jc_j}{\sum\limits_{k\in B_i'}e_kS_kc_k}\cdot r_i. \tag{25}$$

在第一次分配时,为避免小节点竞争恢复资源处于劣势,规定合作策略节点给出1/2恢复资源,半合作策略给出1/4恢复资源,而背叛策略不给出恢复资源.故障节点和孤立节点给出的恢复资源分给其自身及相邻的故障与孤立节点.给出资源比值γ_i,则相邻的故障与孤立节点获得的恢复资源为

$$\Delta r_j=\frac{e_jS_jc_j}{\sum\limits_{k\in B_i'+j}e_kS_kc_k}\cdot r_i\gamma_i. \tag{26}$$

第二次分配是上述节点完成资源分配后,孤

立节点向故障邻边分配恢复资源的过程.此时向负载能力强且与正常节点连接的邻边倾斜资源,剩余负载由其他邻边均分.负载能力强的邻边即与节点度最大的邻节点的连边,其分配到的恢复资源为

$$\Delta r_{ij}=\frac{\lambda}{n+\lambda-1}\cdot r_i. \tag{27}$$

式中λ为资源倾斜系数.

其他邻边分配到的恢复资源为

$$\Delta r_{ij}=\frac{1}{n+\lambda-1}\cdot r_i. \tag{28}$$

3.4.3 故障恢复策略

故障恢复阶段各个故障组件的恢复方法与按概率恢复方法基本相同.但基于演化博弈的故障恢复策略在故障节点恢复完成后需判断邻边是否故障,如果邻边全部故障则该节点转变为孤立节点,否则该节点转变为正常节点.故障节点的状态转变如图5所示.

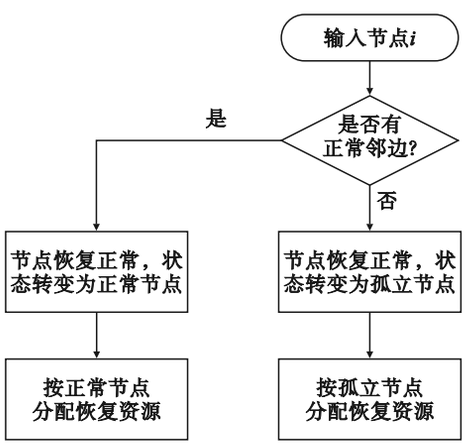


图5 资源分配阶段故障节点状态转变

Fig. 5 State transition of faulty node in resource allocation stage

4 仿真与性能分析

本文实验在eclipse的Agent仿真插件Repast建模,选用Java语言编写程序.构建了节点数n=300的无标度网络,初始的全连接网络节点数m_0取值为3,增加一个节点同时增加连接边数m=2,最后建立的网络有$2n-3$条边,符合空间信息网的动态连通特性.使用2.1节中的公式计算节点和边的的初始负载和容量,完成网络模型的初始化.因为空间信息网相较于地面的许多实际复杂网络有更苛刻的硬件条件和更紧缺的软件资源,所以各种资源余量较小,设置节点和边的容量的容差参数分别为1和0.5,恢复难度系数分别为0.01和0.1.实验中假设级联故障模型完全失效,并规定不同参数实验组在每轮实验中使用同一个级联故障模型进行恢复.

4.1 公共物品博弈的策略共存仿真

设置各节点的初始资金为节点度,合作策略投入1单位资金,半合作策略投入0.5单位资金,背叛策略不投入资金.通过进行二元和三元公共物品博弈的仿真实验,研究主导策略下其他策略的留存情况,得到策略选择的情况如表1和表2所示.

三元公共物品博弈实验中有63%的场次合作策略占了主导地位,有34%的场次半合作策略占了主导地位,背叛策略几乎无法占据主导地位.相较于二元博弈主导策略的不确定性,三元公共物品博弈能使演化博弈比较稳定地结束在合作和半合作策略主导的场景下,降低了主导策略的占比,能够缓解主导策略压倒其他策略的情况.所以三元公共物品博弈更有利于反映节点的恢复资源需求情况,指导节点资源分配.

表1 三元公共物品博弈策略选择

Table1 Strategy selection of ternary public goods game

主导策略	主导次数	合作数	半合作数	背叛数
合作	63	223	54	23
半合作	34	57	205	38
背叛	3	30	73	197

表2 二元公共物品博弈策略选择

Table2 Strategy selection of binary public goods game

主导策略	主导次数	合作数	背叛数
合作	55	279	21
背叛	45	52	248

4.2 网络恢复期弹性仿真分析

网络中的节点根据节点度大小分为大节点(不超过10个)、次大节点(不超过30个)和小节点(大于200个).实验分别使用均分恢复资源策略、局部资源分配策略和改进的基于演化博弈的恢复资源策略对级联故障网络进行恢复仿真.

4.2.1 完全故障网络仿真分析

在无标度网络中使一大节点故障,模拟级联失效过程得到故障网络.最终得到的网络恢复期性能曲线对比如图6所示,由网络性能曲线计算得到的网络弹性如图7所示.由图可知,恢复资源均分策略获得的前100时间步恢复比较缓慢、网

络弹性最差,在第100时间步时网络还有一部分故障节点和边未恢复.局部资源分配策略明显优于均分策略,在前20步能够快速恢复关键节点和边使得完全失效的故障网络可以重建基本功能,之后也能保持较快的速度恢复网络性能.而基于演化博弈的资源分配策略有最好的效果,相比于局部资源分配策略能够更好地提高整体恢复能力,加快关键节点恢复,从而提高网络弹性.

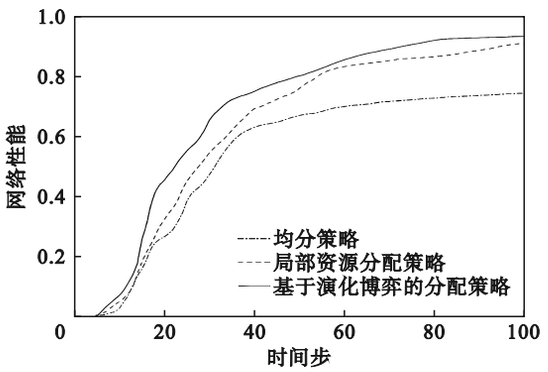


图6　完全故障网络恢复期网络性能

Fig. 6　Network performance of a completely failed network during recovery period

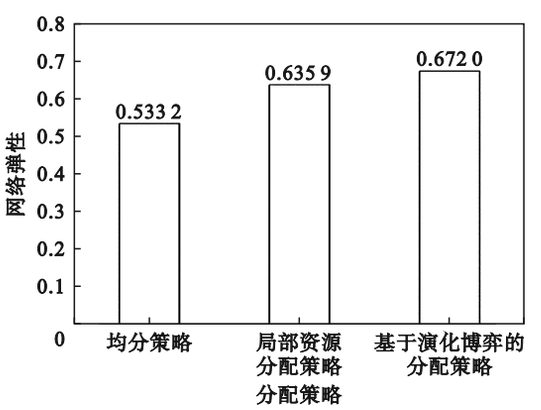


图7　完全故障网络恢复期网络弹性

Fig. 7　Network elasticity of a completely failed network during recovery period

4.2.2　部分故障网络仿真分析

在无标度网络中令一次大节点故障,模拟级联失效过程得到部分故障网络[18].最终得到的网络恢复期性能曲线对比如图8所示,计算得到的网络弹性如图9所示.

次大节点故障往往只会导致网络的部分失效,但一部分节点和边的故障仍会使网络的传输效率明显下降.如图8和图9所示,在次大节点级联故障产生的部分故障网络上,各方法在恢复初期的性能曲线斜率都比在完全故障网络上高,这是因为部分故障网络的故障组件较少时,在有限资源局部分配时能分得更多资源.50个时间步后使用3种恢复策略在部分失效的网络上均能得到较好的恢复效果.局部资源分配策略在恢复速率上优于均分策略.基于演化博弈的资源分配策略很好地分配了恢复资源,使得网络快速恢复,在性能恢复速率上优于另外两种策略,在50个时间步内网络基本全部恢复.

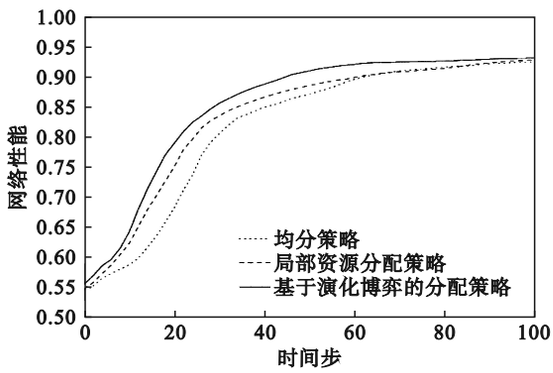


图8　部分故障网络恢复期网络性能

Fig. 8　Network performance of partially failed network during recovery period

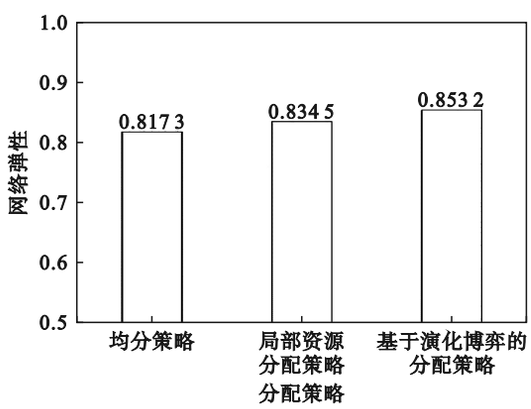


图9　部分故障网络恢复期网络弹性

Fig. 9　Network elasticity of partially failed network during recovery period

综上所述,无论是部分故障还是完全故障的网络,基于演化博弈的资源分配策略都能够有效地分配恢复资源,快速恢复关键组件,进而提高网络性能并获得最佳的网络弹性.

4.3　复杂度分析

资源恢复策略的时间复杂度主要由局部资源分配,按概率恢复和基于演化博弈的优化策略决定.局部资源分配涉及遍历邻居并计算权重,复杂度为 $O(n\langle k\rangle)$;按概率恢复的复杂度为 $O(n)$.演化博弈策略优化包括三元公共物品博弈、Fermi动态更新和自适应WSLS机制,每轮博弈的复杂度为 $O(n\langle k\rangle)$,整体收敛复杂度约为

$O(Tn\langle k\rangle)$,其中T为收敛轮次,通常远小于n.最终该策略的复杂度为$O(n\langle k\rangle)$.

5 结 论

1)针对空间信息网布局广、组件异构性高等特点设计故障恢复模型,提出了在局部邻节点间分配恢复资源的局部资源分配策略和各故障组件按概率恢复的概率恢复策略.

2)为进一步提高恢复期的网络弹性,本文使用演化博弈策略选择反映节点对恢复资源的需求优先级,优化局部资源分配策略.利用三元公共物品博弈和自适应的WSLS策略选择机制确定恢复期时间步的故障节点和孤立节点的策略选择.建立了基于演化博弈的恢复策略模型,包括演化博弈、资源分配和故障恢复3个阶段.

3)仿真结果表明,基于演化博弈的资源分配策略恢复效果最好,恢复期网络弹性最高.

参考文献:

[1] 刘军,杨青文,王金涛,等.基于改进遗传算法的空间信息网恢复策略[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(4):524-530.
(Liu Jun, Yang Qing-wen, Wang Jin-tao, et al. Spatial information network recovery strategy based on improved genetic algorithm [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(4): 524-530.)

[2] Diro A, Kaisar S, Vasilakos V A, et al. Anomaly detection for space information networks: a survey of challenges, techniques, and future directions [J]. *Computers & Security*, 2024, 139: 103705.

[3] Wang X S, Du Y, Fan T, et al. Threat analysis for space information network based on network security attributes: a review [J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2022, 9(3): 3429-3468.

[4] Wu Y P, Chen Z L, Zhao X D, et al. Propagation model of cascading failure based on discrete dynamical system [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 209: 107424.

[5] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2004, 340: 388-394.

[6] Yang Y H, Huang W C, Xu A H, et al. Syncretic K-shell algorithm for node importance identification and invulnerability evaluation of urban rail transit network [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2023, 120: 400-419.

[7] Boccaletti S, Bianconi G, Criado R, et al. The structure and dynamics of multilayer networks [J]. *Physics Reports*, 2014, 544(1): 101-122.

[8] 李淑庆,宋易宵,钟国剑.考虑近邻度值之和的城市轨道网络抗毁性研究[J].系统仿真学报,2023,6(12):1-11.
(Li Shu-qing, Song Yi-xiao, Zhong Guo-jian. Destruction resistance study of urban rail network considering the sum of nearest neighbor degree values [J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 6(12): 1-11.)

[9] Lam C Y. Resilience of logistics network: analysis and design [C]// 2016 World Congress on Industrial Control Systems Security (WCICSS). London, 2016: 1-5.

[10] Wang Y H, Wang L Y, Xiao X S, et al. Distributed elastic recovery strategy of AC/DC hybrid microgrid under false data injection attack [J]. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*, 2023, 8(4): 280-288.

[11] Liu H, Chen X, Huo L, et al. Impact of inter-network assortativity on robustness against cascading failures in cyber-physical power systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 217: 108068.

[12] Yue M, Zhang H L. Recovery strategy of virtual power plant with resilience improvement under cascaded failure scenarios[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2023, 148: 108918.

[13] Zhang L, Zhou J, Ma Y Z, et al. Resilience improvement of cyber-physical supply chain networks considering cascading failures with mixed failure modes[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 187: 109812.

[14] O'Neil R, Diallo C, Khatab A, et al. Enhancing critical network infrastructure resilience through optimal post-disruption maintenance and routing decisions[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2025, 257: 110717.

[15] Yu Q, Wang J C, Bai L. Architecture and critical technologies of space information networks [J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2016, 1(3): 1-9.

[16] Du J, Jiang C X, Guo Q, et al. Cooperative earth observation through complex space information networks [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(2): 136-144.

[17] Liu S, Wang H M, Wang S T, et al. Space-based information integrated network technology and performance analysis based on cognitive radio [C]// International Conference on Machine Learning and Intelligent Communications. Cham: Springer, 2016: 201-208.

[18] Zhong J L, Sanhedrai H, Zhang F M, et al. Network endurance against cascading overload failure[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 201: 106916.