



指挥控制与仿真

Command Control & Simulation

ISSN 1673-3819, CN 32-1759/TJ

《指挥控制与仿真》网络首发论文

题目：基于复杂网络的军事通信网络建模与分析
作者：叶晨浩，郭士萃，朱巍
收稿日期：2024-11-21
网络首发日期：2025-04-15
引用格式：叶晨浩，郭士萃，朱巍. 基于复杂网络的军事通信网络建模与分析[J/OL]. 指挥控制与仿真. <https://link.cnki.net/urlid/32.1759.TJ.20250414.1554.006>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

引用格式:叶晨浩,郭士萃,朱巍.基于复杂网络的军事通信网络建模与分析[J].指挥控制与仿真. YE C H, GUO S L, ZHU W. Modeling and analysis of military communication networks based on complex networks[J]. Command Control & Simulation.

基于复杂网络的军事通信网络建模与分析

叶晨浩, 郭士萃, 朱巍

(国防科技大学信息通信学院, 湖北 武汉 430000)

摘要:针对军事通信网络结构复杂、手段多样的特点,分别从相依网络和多层网络的视角建立两种典型军事通信网络模型,并重点以相依网络为例通过节点重要度分析、级联失效等方面对军事通信网络中节点重要性和网络鲁棒性进行分析。最后选取某兵棋推演平台作战想定中通信网络组织计划进行建模仿真,得到了节点重要度排序结果,及攻击手段、节点容量、负载分配等对军事通信网络级联失效过程的影响关系,对军事通信网络连通性和鲁棒性分析等具有参考意义。

关键词:级联失效;相依网络;鲁棒性

文献标志码:A

Modeling and analysis of military communication networks based on complex networks

YE Chenhao, GUO Shiluo, ZHU Wei

(School of Information and Communication, National University of Defense Technology, Hubei Wuhan 430000)

Abstract: In recognition of the intricate structure and multifaceted nature of military communication networks, two typical models of such networks are established, respectively, from the viewpoints of interdependent and multilayer networks. With a particular emphasis on interdependent networks, an analysis is conducted on the importance of nodes and the robustness of military communication networks through node importance analysis and cascading failure assessments. To validate the models, a modeling and simulation is performed based on the communication network organization plan outlined in a military wargame scenario. The results obtained encompass the ranking of node importance and the impact of various factors, such as attack methods, node capacity, and load distribution, on the cascading failure process within military communication networks. These findings offer valuable insights for the analysis of connectivity and robustness in military communication networks.

Key words: cascading failure; interdependent networks; robustness

网络信息体系将陆、海、空、天、电、网等多维空间中的各类作战资源联为一体,其基本特征为“网络中心,信息主导,体系支撑”^[1]。而通信网络是实现各类资源互联互通的基础,稳定、不间断、高抗毁性的通信网络可增效联合作战体系对抗效能。但同时通信网络正面临物理毁伤如火力打击与信息攻击如电网攻击、节点损毁、通信干扰与体系崩溃等多样化威胁^[2]。当前军事通信网络具有多类异构系统^[3],具有典型复杂网络的特征,构建符合实际的军事通信网络模型并在不同攻击策略下进行鲁棒性分析,对于通信网络优化具有重要意义。

在多层网络节点重要度评价方面,Halu等人^[4]基于不同网络层之间的相互作用关系定义了多层

PageRank 算法;Lv等人^[5]利用四阶张量建立多层复杂网络模型,并通过将多层 PageRank 算法和基于重力的算法相结合,通过对节点度指标的替代实现算法改进,并在真实网络中表现较好。An等人^[6]建立基于动态影响范围和群体重要性的多层网络关键节点识别新方法,并在真实网络和人工网络中进行测试。随着研究的深入,Lv等人^[7]又提出同时考虑顶点的 PageRank 中心性评分、顶点所在社区的重要性以及社区内顶点在两步内影响其他社区顶点能力的社区中心性测量方法(CBCM)和改进多层 PageRank 算法相结合的多层网络节点重要度排序方法。

异构通信网络之间并非孤立存在,而是相互之间存在依赖、合作等关系,从而构成相依网络。BULDYREV 等人^[8]基于渗流理论构建了相依网络级联故障渗流模型,并对网络鲁棒性进行研究。沈迪等人^[9]基于介数分析法,研究了面向双层网络的级联失效模型,并将强度因子引入到介数计算中,更符合实际网络情况。文献^[10]建立对称相依网络和非对称相依

收稿日期:2024-11-21

修回日期:2025-01-03

作者简介:叶晨浩(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为复杂网络建模。

朱巍(1980—),男,教授,博士,博士生导师。

网络,并构建了基于负载重分配的级联失效模型,比较不同边权值对相依网络的贡献程度。而在军事领域,岳地久等人^[11]根据指控网络结构特点,构建了“两域四网”模型,并用节点重要度、指控效能和抗毁性等指标进行分析。综合来看,目前相关研究均将通信网络看作单层模型,重点分析通信网络与指控等其他网络构成的相依网络,而军事通信网络本身就是一个复杂系统,从传输手段上看,具有短波、超短波、卫星、数据链、散射等多种通信手段^[12],单层网络显然无法分析出当前军事网络遭受攻击后产生的级联失效问题。

因此本文在以上研究的基础上选取军事通信网络为研究对象,构建相依网络模型^[13]、多层网络模型和基于综合重要度节点失效的网络鲁棒性分析方法。然后依据某兵棋推演平台想定中通信网络组织计划的相关数据,客观全面地定量分析网络的静态拓扑特性和节点重要性,定量对比分析节点随机攻击、蓄意攻击、降级后随机攻击和降级后蓄意攻击 4 种情形下网络的鲁棒性,并分析相依强度和攻击规模对网络鲁棒性的影响。

1 军事通信网络结构建模

1.1 军事通信网络特征分析

军事通信网络是指由多个交换节点用传输链路互联以一定的拓扑结构构成的用于作战指挥、通信联络和信息传输的通信网络^[14]。同时军事通信网络具有通信手段多样性、业务承载综合性等特征,并且受指挥体制、管理层级等因素影响构成典型的复杂巨系统。从通信手段、业务承载等不同角度出发,可构建不同的网络模型,为下一步分析打下基础。

其中军事通信网络内部结构可以用数学方法描述,以双层网络为例。分别构建子网络 G_A 和子网络 G_B , G_A 和 G_B 均为无向加权网络。边可以分为两类,一类是子网络内部连接边,另一类是子网络间连边。节点总数为 $N = N_A + N_B$,它们都有特定的网络拓扑结构,并通过一定的方式进行连接。其中子网络中内部节点连接的边为层内边,子网络之间节点连接的边为层间边。以子网络 G_A 为例,其可以表示为 $G_A = [V_A, E_A, W_A]$ 。其中 $V_A = \{VA_1, VA_2, \dots, VA_n\}$ 为 G_A 的节点集合, n 表示节点数量; $E_A = \{EA_1, EA_2, \dots, EA_m\}$ 为 G_A 的边集合, m 为边的数量; $W_A = \{WA_1, WA_2, \dots, WA_m\}$ 为每条边的权值,权值根据节点间实际通信链路所承担的话音、视频等业务所需的通信带宽确定,假设传递语音、视频业务所需的最小带宽之比为 1:32,因此当 $WA_1 = 1$ 表示该连边主要传递语音业务, $WA_2 = 32$ 表示该连边可用来传递视频业务;同理构建 $G_B = [V_B, E_B, W_B]$,而层间

连边可以用 $G_C = [(V_A, V_B), E_C, W_C]$ 表示。

1.2 基于不同通信手段的多层相依网络

两个或两个以上存在依赖关系的相对独立的子网组成一个复杂网络系统,该网络可视为相依网络^[15],这种网络结构反映了现实世界中该系统之间的相互依存关系。通信网络中的节点失效,意味着指挥机构可能受到了精确打击、通信干扰等毁伤,现实中多数通信系统相依赖于同一装备实体上,即集成通信装备。当集成通信装备实体受到打击时,可视为其内部所有通信系统均失效,可视为构成相依网络。本文的相依网络由独立的若干子网络构成,根据军事通信网络中异构系统的类型可以构建多层相依网络模型。

以双层相依网络为例,示意图如下图 1 所示:

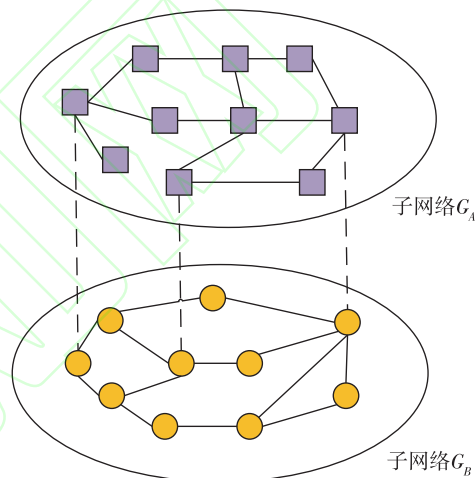


图 1 双层通信网络相依模型

Fig. 1 Coupled model of dual-layer communication network

该图中相依网络由不同通信传输方式的子网络组成,其中有子网络 G_A 10 个通信节点,13 条层内边; G_B 中有 10 个通信节点,15 条层内边;其中该相依网络中包含 3 个集成通信装备,因此在两个子网络中构成 3 条层间连边。

1.3 基于不同业务承载的多层网络

从节点功能上看,通信网络应具有侦察、指控、打击等类型;其中侦察节点可构成侦察子网,子网内部主要进行侦察信息协同交互;指控节点之间可构成指控子网,子网内部主要按照指挥层级进行指控信息传递;打击节点之间可构成打击子网,子网内部进行打击信息协同;同时由于侦察节点需将侦察信息经过一定处理后传递给指控节点,指控节点将命令传递给打击节点,因此子网间也存在信息交互,因此可利用多层网络模型进行描述。

与上文类似,可构建多层网络模型如下图 2 所示:军事通信网络除了按照以上两种方法进行结构建

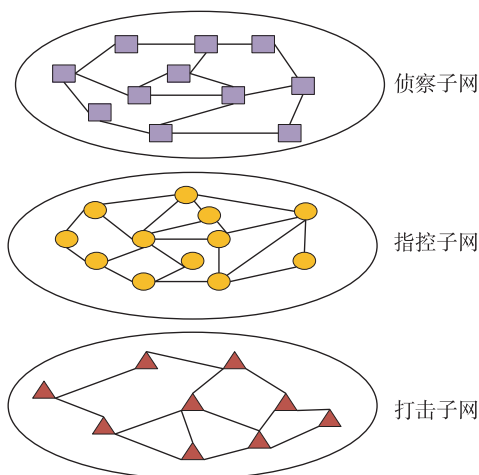


图2 多层网络模型

Fig. 2 Multi-layer network model

模外,还可以按照各网络层所处理信息的类型进行建模,如短波网除可传递话音外还可传递文本等,当短波频率受到干扰时,可根据实际情况选择不同的手段传递信息。在以上建模的基础上,本文重点针对基于不同通信手段的相依网络进行分析,主要从节点重要度排序和级联失效两个方面进行分析。

2 相依网络级联失效分析

针对多层相依网络模型,通过节点受毁后产生的级联失效进行网络鲁棒性分析,可通过设立级联失效模型进行研究。

2.1 基于节点度的初始负载和最大容量

节点介数是指网络中所有最短路径中经过该节点的路径数目占最短路径总数的比例,反映了节点在整个网络中的作用和影响。传统的初始负载和初始容量大多都基于介数中心性进行设定,并没有考虑边权值的影响。由于各边所承担的作战任务不同,因此考虑将边权值引入节点介数计算式:

$$b_i = \frac{\sum_{g < k} w_{gk} \frac{l(g, k, i)}{l(g, k)}}{N(N-1)/2} \quad (1)$$

其中 b_i 为节点介数,为归一化处理后的值, w_{gk} 各边权值, $l(g, k)$ 为 g 和 k 节点之间的最短路径数量, $l(g, k, i)$ 为 g 和 k 节点之间的最短路径中经过 i 节点的最短路径数量, N 为节点数量。 b_i 在考虑节点的信息流转能力的基础上,同时考虑军事通信网络中边权值的影响。

$$L_i = \alpha d_i \sum_{j \in \tau_i} b_j \quad (2)$$

其中 L_i 表示节点初始负载, α 为可调参数, $\sum_{j \in \tau_i} b_j$ 表示节点 i 的相邻节点的介数和; d_i 为节点 i 的度,表示节

点 i 与其他节点连接边的数量。

而军事通信网络中节点的初始容量通常会高于节点负载,从而保持冗余性。初始容量可定义为:

$$C_i = (1 + \gamma) L_i \quad (3)$$

其中 C_i 表示节点初始容量, γ 为可调参数,一般情况下节点初始容量会大于节点初始负载,并保持一定的冗余量。

2.2 级联失效过程分析及规则设计

以双层相依网络为例,两个子网络的层内边以及连接两网络的层间边均有各自的负载,分析级联失效过程如下图2所示:

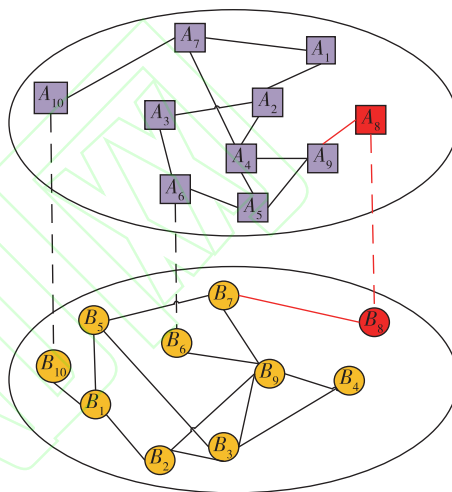


图3 级联失效过程

Fig. 3 Cascading failure process

破坏网络 C_A 中的 A_8 节点后,通过相依层间边相连的 B_8 节点也失效,同时 A_8-A_9 、 A_8-B_8 、 B_8-B_7 连边也失效。因此这两个节点的负载会分配到其他点上,假设某一超过负载,因此需要将该节点的负载也进行重分配,最终达到稳定状态。

经过上述级联失效过程分析可知,因节点相依关系失效时导致的结果与以往的相依网络级联失效模型结果存在不同之处。因此,设计相依网络中级联失效规则如下:

规则1:当相依节点受攻击或突发故障处于失效状态时,在相依网络中删除其与其相依的节点,同时删除所有与节点相连的边,即相依失效。在实际军事通信网络中,当集成通信装备受毁,两相依节点将同时失效。

规则2:当由于负载重分配产生超出节点负载能力时,超出负载能力的节点可直接视为失效。在实际军事通信网络中,节点负载大于节点容量时可视为对于该节点的业务需求超出其实际能力,因此可判定该节点失效。

规则 3:求解最大连通子图,删除不在最大连通子图内的节点。在实际军事通信网络中,不在最大连通子图的节点无法与其余通信节点进行业务通联,即丧失传递信息能力,因此可判定该节点失效。

2.3 节点攻击策略

当对复杂网络进行攻击时,通常采用以下 2 类攻击方式:随机攻击和蓄意攻击^[11]。这 3 类攻击方式的本质区别在于对目标网络相关信息获取程度不同,通常可以用网络中节点的重要度来描述。当无法或者不需要掌握所要攻击网络的信息时,通常采用随机攻击的方式。而蓄意攻击则是在通过侦察、情报等一系列手段获取所要攻击网络的全部信息时重点攻击其重要节点。而随机攻击的目标节点是从网络中随机抽取的节点,其节点重要度成随机分布。

在军事通信领域对抗中,双方之间的通信干扰软杀伤和火力摧毁硬杀伤均是重要手段。因此在随机攻击、不完全信息攻击和蓄意攻击的基础上,本文提出降级攻击的概念,降级攻击是指采用一系列电子对抗设备和手段如通信干扰增加噪声等,以降低指定区域和目标的通信装备的初始容量以达到攻击目的。

$$C_i = (1 + \beta\gamma) L_i \quad (4)$$

其中 C_i 为节点初始容量, β 为降级攻击系数,取值范围为 $[0, 1]$ 。当通信网络受到噪声攻击等时,信噪比会降低,从而导致信道容量的下降。因此在节点攻击中加入降级攻击,当相依网络受到降级攻击后再采取随机攻击和蓄意攻击手段,可能会造成大量节点现有负载超出节点容量的情况,从而产生级联失效。相对于随机攻击和蓄意攻击,降级攻击攻击的范围更广,能够对指定区域内通信装备甚至所有通信装备造成干扰,从而给军事通信网络带来严重危害。

2.4 相依网络鲁棒性指标

网络鲁棒性是指网络在遭遇随机故障或者蓄意攻击,以及在节点或边受损的情况下,仍具有提供关键服务或功能的能力^[16]。最大连通度为节点被攻击后最大连通子图节点数量与未被攻击的最大连通子图节点数量的比值,用于描述网络受到攻击后被破坏的程度。考虑到在实际通信网络中,保持节点之间连通性才能有效聚合多域多维作战力量,而网络效能可作为量化节点间连通性和通信效率的指标,其定义如下:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in V} \frac{1}{d_{ij}} \quad (5)$$

其中 d_{ij} 为节点 i 和 j 之间的最短路径, N 为节点数量。

考虑到在级联失效过程中最大连通子图的连通情况,使用最大连通子图相对效能的概念,采用最大连通

子图相对效能比 η 作为衡量节点间通信效率的鲁棒性指标^[17],其定义如下:

$$\eta = \frac{N'}{N} \frac{1}{N'(N'-1)} \sum_{i \neq j \in V'} \frac{1}{d_{ij}} = \frac{1}{N(N'-1)} \sum_{i \neq j \in V'} \frac{1}{d_{ij}} \quad (6)$$

其中 N' 为网络受到攻击并稳定后的最大连通子图的节点数量。当 η 值越大时,网络鲁棒性越强。

根据以上定义,整个相依网络的级联失效模型计算如下:

步骤 1:初始化 G_A 、 G_B 和 G_C 的关联矩阵;

步骤 2:计算每个节点的度和介数,并计算节点初始负载和初始容量;

步骤 3:选择网络攻击初始节点,并将受攻击的单元移除;

步骤 4:删除对应相依节点及两节点各自连边。

步骤 5:求极大连通子图,删除不在最大连通子图内的节点。

步骤 6:将失效节点的负载进行重分配,迭代直到达到稳定状态。

3 节点重要度评价

对于不同通信手段构成的军事通信网络而言,可以用节点重要度指标评价网络的可靠性。对节点重要度排序后可迅速找出军事通信网络中的关键节点。在此基础上可针对关键节点进行重点防范,并采取设立相关替代节点等措施提升网络的抗毁性。

3.1 单层网络中节点重要度评价

单层网络中有多种节点重要度评价指标,本文分别从网络局部特征和全局特征考虑,利用节点度和介数刻画军事通信网络中单层网络节点重要度。其中节点度主要表示某个节点与周围其他节点连边的数量,可表示为:

$$d_{ij} = \sum_{j=1}^N a_{ij} \quad (7)$$

其中 d_{ij} 表示节点 i 的度值, N 表示单层网络中节点数量, a_{ij} 表示节点 i 和 j 之间是否存在连边,当 $a_{ij} = 1$ 时节点间存在连边,当 $a_{ij} = 0$ 时不存在。

节点介数是指网络中通过该节点的最短路径条数,可表示为:

$$b_i = \sum_{j \neq k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}} \quad (8)$$

其中 b_i 表示节点 i 的介数值, $g_{jk}(i)$ 表示节点 j 与节点 k 之间经过节点 i 的最短路径条数, g_{jk} 表示节点 j 与节点 k 之间的最短路径条数。

3.2 相依网络中节点重要度评价

节点在相依网络中的重要度评价方法相关研究正

逐步深入,本文采用基于多层 PageRank 的方法,首先进行节点在单层网络中的节点重要度评价,然后分析各网络层在相依网络中的重要度,最后进行综合处理便可得到节点在相依网络中的重要度。

对于相依网络而言,可以用四阶张量表示不同网络层间节点和层内节点的连边关系,表达式如下所示:

$$a_{i,\alpha,j,\beta} = \begin{cases} 1 & \text{if } \alpha = \beta, i \neq j \\ 1 & \text{if } \alpha \neq \beta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

基于多层 PageRank 算法,构造两个归一化的四阶张量,其表达式分别为:

$$o_{i,\alpha,j,\beta} = \frac{a_{i,\alpha,j,\beta}}{\sum_{j=1}^N a_{i,\alpha,j,\beta}} \quad (10)$$

$$r_{i,\alpha,j,\beta} = \frac{a_{i,\alpha,j,\beta}}{\sum_{\beta=1}^L r_{i,\alpha,j,\beta}} \quad (11)$$

其中 $o_{i,\alpha,j,\beta}$ 表示在给定节点到达的前提下,到达网络层 G_α 的概率; $r_{i,\alpha,j,\beta}$ 表示给定节点到达的前提下,利用网络层 G_α 的概率。在以上方程的基础上,可得各节点和网络层的中心性度量值,可分别表示为:

$$x_j = \sum_{i=1}^N \sum_{\alpha=1}^L \sum_{\beta=1}^L o_{i,\alpha,j,\beta} \cdot x_i \cdot y_\alpha \cdot y_\beta, 1 \leq j \leq N \quad (12)$$

$$y_\beta = \sum_{i=1}^N \sum_{\alpha=1}^L \sum_{j=1}^N r_{i,\alpha,j,\beta} \cdot x_i \cdot x_j \cdot y_\alpha, 1 \leq \beta \leq L \quad (13)$$

用节点度中心性 d 分别表示节点在单层网络中的重要度,因此节点在相依网络中的中心性 D 可表示为:

$$D = \sum_{\beta=1}^L y_\beta \cdot d \quad (14)$$

4 仿真分析

运用 Matlab2022a 软件进行仿真实验,根据某兵棋推演平台军事通信网络组织的相关数据,构建通信网络模型。为简化计算,选取两种常用军事通信系统 A 和 B 进行仿真,其相关参数和拓扑图如下所示:

表 1 通信网络相关参数

Tab. 1 Parameters related to communication networks

特征参数	数值	参数意义
网络 A 节点总数(个)	164	军事通信网络 1 中通信节点数量
连接边数(条)	209	通信节点之间建立通信链路的数量
网络 B 节点总数(个)	54	军事通信网络 2 中通信节点数量
连接边数(条)	114	通信节点之间建立通信链路的数量

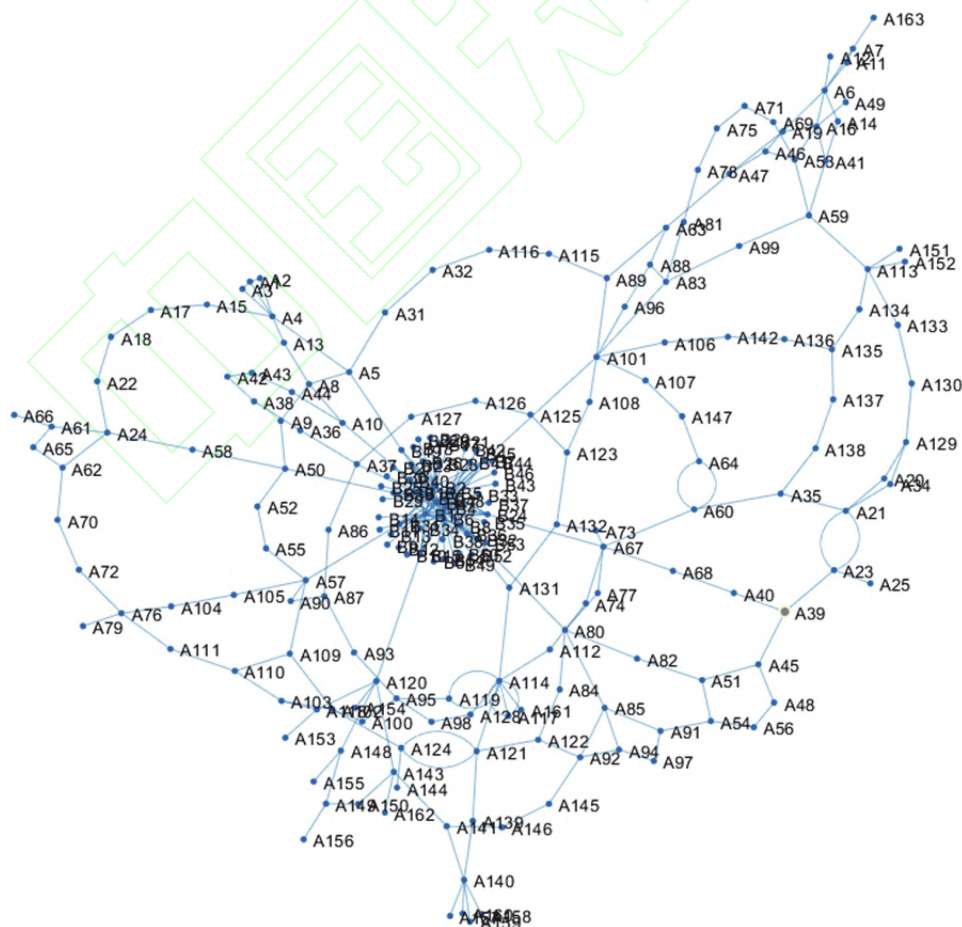


图 4 通信网络拓扑图

Fig. 4 Topologymap of a communication network

其中网络 A 中有 164 个通信单元,各通信单元之间互联互通;网络 B 中有 54 个通信单元,各通信单元之间互联互通;而某型集成通信装备同时装配有两种异构通信单元,可视为两种异构单元相依形成相依边。网络 A 和网络 B 之间相依连边数量为 10 条,即网络中

存在 10 个集成通信装备。为规避随机攻击的不确定性,数据均为独立重复 100 次的平均结果。

4.1 节点重要度计算

同时对通信网络 A 和 B 单独进行节点度和介数计算,结果如下图 5 所示:

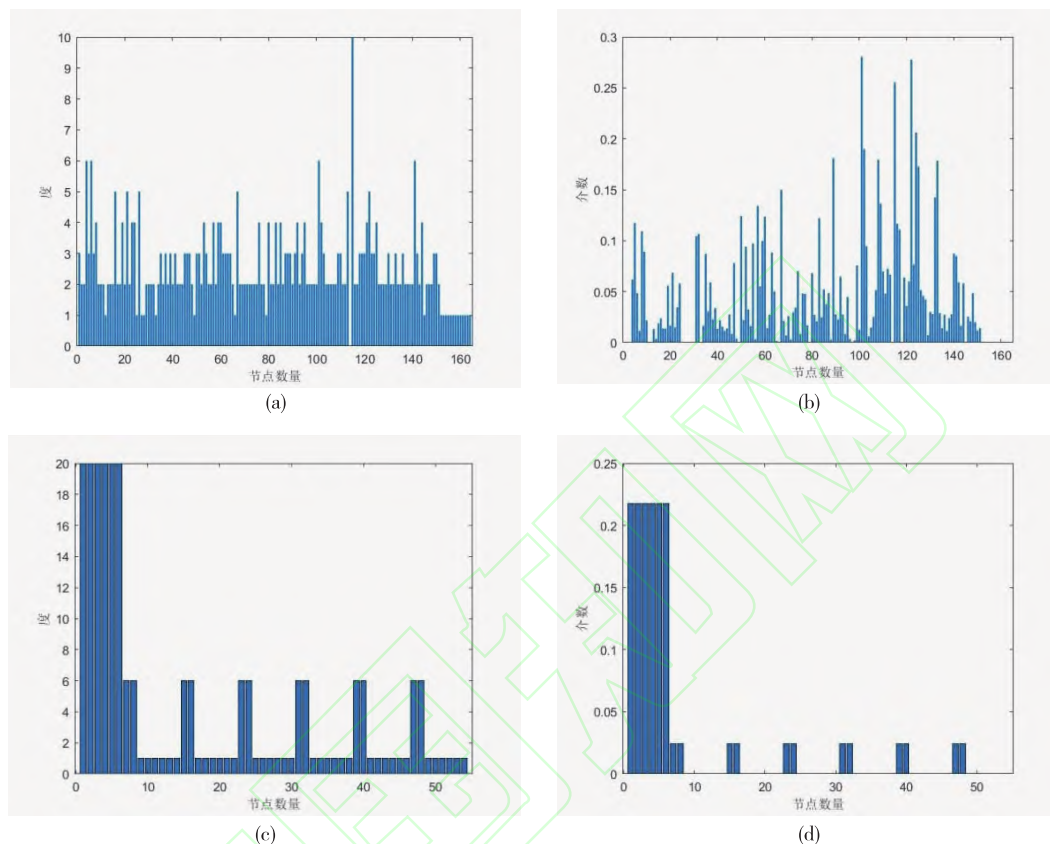


图 5 度分布与节点介数

Fig. 5 Degreedistribution and node betweenness

对于通信网络 A 和 B 而言,两个子网络中具有度值较大的节点,考虑到通信节点之间的连边关系与作战中指挥关系密切相关,因此为保障需要与多个单元建立通联关系的节点,通信节点中必然会有部分节点具有较大的度值。而通信网络 A 中介数值分布更加均匀,表示该网络边扁平化特征更加明显^[18];通信网络 B 中大部分节点的介数为 0,表示该网络中存在较多的边缘节点,这是由于通信网络 B 主要有少部分骨干节点承担通联任务,而大多数节点只是接入其中作为终端使用。

由于现有相依网络节点重要度评价方法中通常认为不同网络层中节点数目相同。针对军事通信网络模型中各子网络节点数量不一致的情况,本文采取增加虚拟节点的方式,即只增加节点而不增加连边,这样既能保证子网络中节点数量一致,又不影响原有网络的各项性能。最终得到相依网络中节点重要度评价结果为:

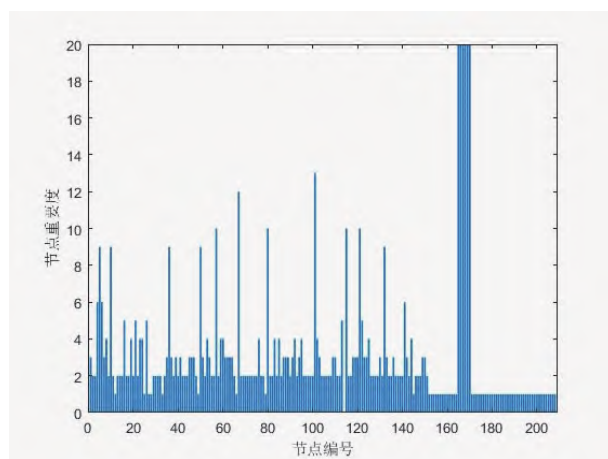


图 6 相依网络节点重要度

Fig. 6 Importance of interdependent network nodes

4.2 不同攻击策略下鲁棒性分析

典型攻击策略主要有以下四种:随机攻击、蓄意攻击、降级后的随机攻击和降级后的蓄意攻击。在节点

负载和节点容量等参数保持一致的情况下,不同攻击策略下网络鲁棒性随攻击规模变化如图 7 所示:

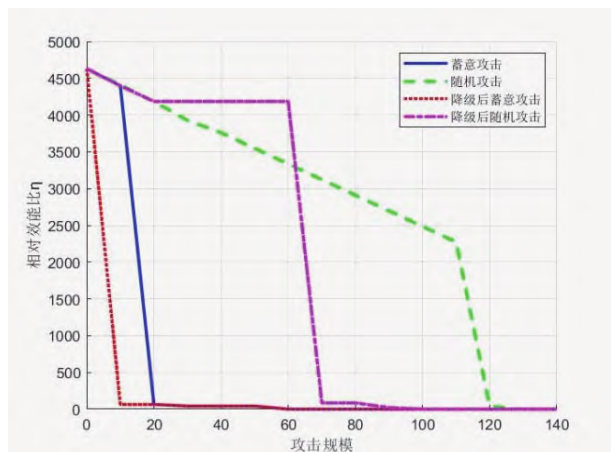


图 7 不同攻击策略下网络鲁棒性随攻击规模变化图

Fig. 7 Graph of network robustness varying with attack scale under different attack strategies

当网络遭到蓄意攻击时,优先攻击度值最大的前 20 个节点时,整个通信网络基本就处于瘫痪状态;而在随机攻击情况下,达到同样瘫痪通信网络的结果需要攻击更多的节点。而在降级攻击后,通信网络中各个节点的初始负载保持不变,而初始容量下降,本文采用的攻击策略为降级后节点容量变为降级前的 70%;此时再采取蓄意攻击和随机攻击,基本只需要攻击对应一半的节点数就能达到同样的级联失效效果。

4.3 不同相依连边下鲁棒性分析

在相依网络中通常将子网络中相依节点的数量与子网络内所有节点数量的比值定义为相依比例 J ,可表示为:

$$J = \frac{N_{b_b}}{N_b} \quad (15)$$

其中 N_b 表示子网络中的节点数量, N_{b_b} 表示子网络中相依节点数量。考虑作战真实情况,为验证集成通信装备对通信网络鲁棒性影响程度问题,将集成通信装备数量直接定义为相依强度。当相依强度越低时,集成通信装备数量越少;反之,相依强度越高,集成通信装备数量越多。在随机攻击策略下,网络鲁棒性随相依强度和攻击规模的变化如下图 8 所示:

在随机攻击策略下,当相依强度不变时,通信网络相对效能比随节点攻击规模增大而线性变小,并且在达到阈值点后趋于 0;当节点攻击规模一定时,通信网络相对效能比随相依强度增大而线性增长;而达到同样的级联失效效果,随着相依强度增长,攻击规模也需要同步增长。

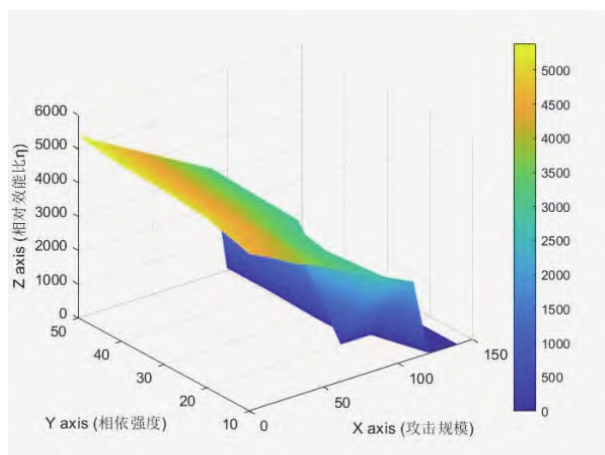


图 8 网络鲁棒性随相依强度和攻击规模的变化图

Fig. 8 Graph of network robustness varying with coupling strength and attack scale

5 结束语

本文分析了军事通信网络的相关特点,从不同视角出发建立军事通信网络相依网络模型、多层网络模型等,同时对节点在单层网络和多层网络中的节点重要度进行分析,并在节点攻击策略中提出降级攻击概念,分析四种攻击手段下,网络鲁棒性受攻击规模的影响;从仿真结果中可知,当攻击达到一定规模时,网络连通性会发生急剧变化,表现为渗流理论中的一阶相变,即通信网络内部的相依性。下一步将结合军事通信网络动态变化实际,重点对动态军事通信网络的性能进行分析。

参考文献:

- [1] 张杰勇,何宜超,孙昱,等.网络信息体系联动的影响因素重要性等级评估方法[J].系统工程与电子技术,2019,41(10):2287-2292.
ZHANG J Y, HE Y C, SUN Y, et al. Method for assessing the importance level of influencing factors of network information system-of-systems linkage[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(10): 2287-2292.
- [2] 王哲,李建华,康东.网络信息体系双层异质相依网络模型鲁棒性[J].系统工程与电子技术,2021,43(4):961-969.
WANG Z, LI J H, KANG D. Robustness of two-layer heterogeneous interdependent network model for networked information system of system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(4): 961-969.
- [3] 穆成坡,龚鹏,张睿恒.军事通信网络技术[M].北京:北京理工大学出版社,2018.

- MU C P, GONG P, ZHANG R H. Military communication network technology [M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2018.
- [4] HALU A, MONDRAGÓN R J, PANZARASA P, et al. Multiplex PageRank [J]. PLoS One, 2013, 8 (10): e78293.
- [5] LV L S, ZHANG T, HU P, et al. An improved gravity centrality for finding important nodes in multi-layer networks based on multi-PageRank [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238: 122 171.
- [6] AN Z Y, HU X H, JIANG R X, et al. A novel method for identifying key nodes in multi-layer networks based on dynamic influence range and community importance [J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 305: 112 639.
- [7] LV L S, HU P, ZHENG Z J, et al. A community-based centrality measure for identifying key nodes in multilayer networks [J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2023, 11(2): 1-16.
- [8] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks [J]. Nature, 2010, 464(7291): 1 025-1 028.
- [9] 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 Complexity Science, 2014, 11(3): 12-18.
- [10] 陈世明, 邹小群, 吕辉, 等. 面向级联失效的相依网络鲁棒性研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(2): 028902.
- CHEN S M, ZOU X Q, (LÜ/LV/LU/LYU) H, et al. Research on robustness of interdependent network for suppressing cascading failure [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(2): 028902.
- [11] 岳地久, 李建华, 王哲, 等. 非对称相依指控网络模型构建与分析 [J]. 军事运筹与评估, 2023, 38(2): 53-60.
- YUE D J, LI J H, WANG Z, et al. Construction and analysis of asymmetric interdependent command and control network models [J]. Military Operations Research and Evaluation, 2023, 38(2): 53-60.
- [12] 付凯, 夏靖波. 基于 DEMATEL-ISM 的军事通信网络系统结构分析 [J]. 军事运筹与系统工程, 2017, 31(1): 46-51.
- FU K, XIA J B. Military Operations Research and Systems Engineering, 2017, 31(1): 46-51.
- [13] 胡宸瀚, 马亮, 王健. 铁路运输复杂网络的拓扑特征与动力学研究综述 [J]. 铁路计算机应用, 2021, 30(2): 10-17.
- HU C H, MA L, WANG J. Review of research on topological features and dynamics of complex railway transportation network [J]. Railway Computer Application, 2021, 30(2): 10-17.
- [14] 潘习林, 于全. 一体化军事通信网络建模仿真面临的挑战 [J]. 军事运筹与系统工程, 2004, 18(2): 27-30.
- PAN X L, YU Q. Challenges in modeling and simulation of integrated military communication network [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2004, 18(2): 27-30.
- [15] 韩伟涛, 伊鹏, 马海龙, 等. 异质弱相依网络鲁棒性研究 [J]. 物理学报, 2019, 68(18): 198-205.
- HAN W T, YI P, MA H L, et al. Robustness of interdependent networks with heterogeneous weak inter-layer links [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(18): 198-205.
- [16] 吴俊, 谭跃进, 邓宏钟, 等. 基于不等概率抽样的不完全信息条件下复杂网络抗毁性模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1 207-1 217.
- WU J, TAN Y J, DENG H Z, et al. Model for invulnerability of complex networks with incomplete information based on unequal probability sampling [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(7): 1 207-1 217.
- [17] 王学光, 张爱新, 窦炳琳. 复杂网络上的非线性负载容量模型 [J]. 计算机科学, 2021, 48(6): 282-287.
- WANG X G, ZHANG A X, DOU B L. Non-linear load capacity model of complex networks [J]. Computer Science, 2021, 48(6): 282-287.
- [18] 崔琼, 李建华, 王鹏, 等. 指挥信息系统双层相依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. Research on Cascading failures in a double-layer coupled network model of command information systems [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(5): 100-108.

(责任编辑:许韦韦)