

军事信息栅格级联失效模型及鲁棒性策略研究

沈 迪¹, 李建华¹, 张 强¹, 朱 瑞²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077;

2. 中国人民解放军 93801 部队, 陕西 咸阳 712200)

摘 要: 构建了军事信息栅格(military information grid, MIG)级联失效模型, 深入分析 MIG 级联失效特性, 并在此基础上提出了鲁棒性建设策略。基于相互依存网络理论分析模型, 将 MIG 划分为通信基础网和信息服务网, 改进了节点介数计算方法, 突出了服务关系对通信流量的影响, 并定义了节点失效判定准则, 研究了失效节点通信负荷和信息服务负荷重分配规律及因此造成的失效传播原理。通过引入成本惩罚函数和砥柱节点的概念, 构建数学模型, 研究并提出了兼顾投入成本和抗毁效益的建设策略。仿真实验结果表明, 少量砥柱节点能力的加强, 即可有效提高全栅格体系的抗级联失效特性。

关键词: 军事信息栅格; 级联失效; 鲁棒性; 相互依存网络; 介数

中图分类号: E 919

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2015.02.13

Research on military information grid cascading failure model and robustness strategy

SHEN Di¹, LI Jian-hua¹, ZHANG Qiang¹, ZHU Rui²

(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Unit 93801 of the PLA, Xianyang 712200, China)

Abstract: A model of military information grid cascading failure is constructed, and the characteristic of military information grid (MIG) cascading failure is thoroughly analyzed, based on which a robustness strategy of MIG building is proposed. Based on the theoretic analysis model of interdependence networks, MIG is divided into communicating basic net and information service net. The algorithm of betweenness is improved, so affection of service relation to communicating flux could be validated. The proposed model defines the judging regulation of node cascading, and studies the reassigning rules of communicating load and service load of cascading nodes, so the principle of cascading spread can be studied too. By introducing the punish function of cost and the concept of mainstay nodes, a mathematical model for studying robustness strategy of MIG building is built, which gives consideration to investment cost and resistance-failure. Simulation experiments show that, resistance-cascading failure of MIG can be prompted obviously just by enhancing capacity of a few of mainstay nodes.

Keywords: military information grid (MIG); cascading failure; robustness; interdependence networks; betweenness

0 引 言

以面向服务体系架构(service-oriented architecture, SOA)设计与构建的军事信息栅格具有服务松耦合、功能强动态的特征, 可满足多军兵种联合作战对战场信息高度共享以及业务功能按需定制的要求, 从而有效避免传统军事信息系统因多层级、多分支结构而导致的可扩展性差、适应能力弱等缺陷。美军在全球信息栅格(global information

grid, GIG)建设中构建了网络中心企业服务(net-centric enterprise service, NCES)^[1], 实现上层军事业务应用的动态支持, 在历次反恐战争以及其常规军事防护中均表现出时敏性好、信息处理能力强的优势。在信息化条件下作战, 军事信息栅格体系作为战斗力生成的主要要素之一, 是交战双方攻击的重要目标, 其自身的鲁棒性将对战局产生较大影响, 必须予以高度关注。然而, 目前国内外关于军事信息栅格(military information grid, MIG)的研究主要集中

收稿日期:2014-02-20; 修回日期:2014-04-23; 网络优先出版日期:2014-07-13。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20140713.1457.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(61174162); 全军军事类研究生基金(2012JY003-585)资助课题

于其体系结构特征和组织运用模式^[2-3],关于鲁棒性的研究并不多见,且其中大多局限于MIG信息网络层面^[4-6],但“网络”不能等同于“栅格”,后者的鲁棒性特征中须兼顾服务层和业务逻辑层的依赖关系^[7],同时MIG节点的连接受指挥关系和地域的影响,呈明显的无标度特征^[8],故MIG具备层级复杂网络的基本特征。因此,本文对MIG鲁棒性的研究首先从分析其功能结构特征入手,运用复杂网络相互和依存网络基本理论,构建基于介数的级联失效模型,在深入分析了MIG的级联失效特性的基础上,通过引入成本惩罚函数,研究并提出了MIG鲁棒性策略。

1 MIG 结构特征

美军将GIG定义为“全球互连的、端到端的、为了按作战人员、决策者和支持人员的需要收集、处理、存储、分发和管理信息的一组关联过程和人员的信息能力”^[9]。而支撑这些“信息能力”的是军事信息栅格体系内具有开发式接口,功能松耦合的大量信息服务,通过服务的按需组合形成具有明确意义的信息功能,并最终集成为支撑作战的信息保障能力,如图1所示。

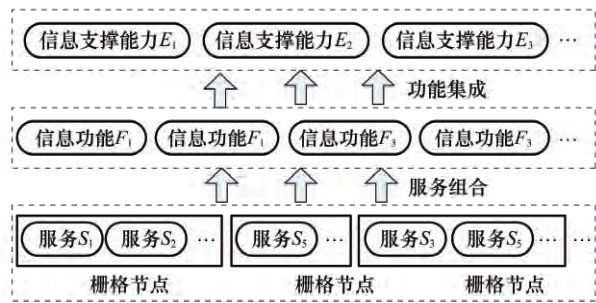


图1 MIG信息支撑能力构成关系

从层次结构分析,MIG体系内栅格节点与承载服务之间的关系如图2所示,可将其视为两个层面,下层网络 N_L 由通信链路节点构成,节点关系受到坐标和方位约束,一般相邻节点之间才产生链路关系。上层网络 N_T 由信息服务 S_i ,由信息服务之间的关系完全由业务逻辑决定,不受位置约束,关系较为复杂,1个基础通信节点可以承载数个信息服务,即1个 N_L 节点上可以对应若干 N_T 节点, N_L 与 N_T 节点之间存在以下影响关系:

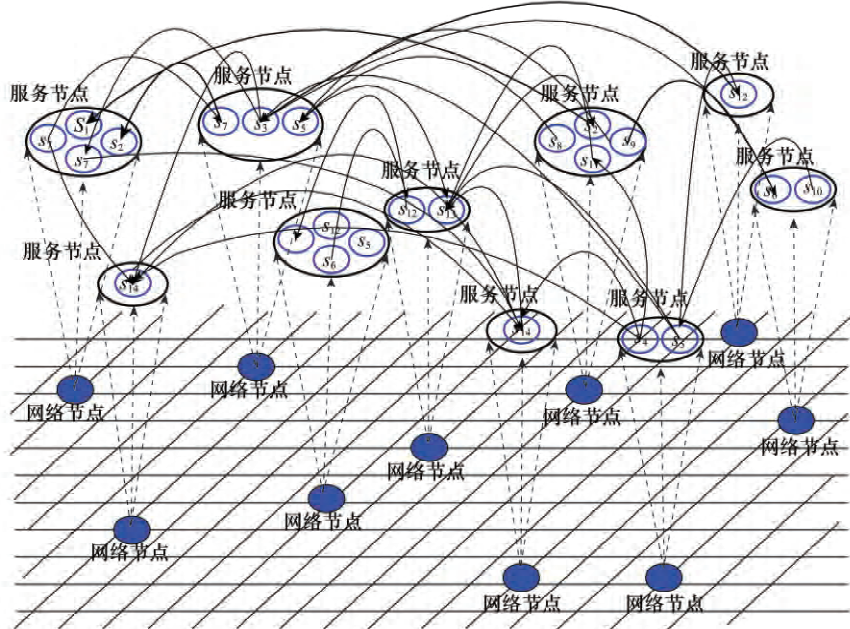


图2 栅格节点与承载服务之间的关系

(1) 节点之间通信流量:当两个服务 S_i 和 S_j 之间服务关系较为密切时,必然会增加其所在节点 i, j 之间的通信链路 $L(i, j)$ 的负荷,反之则影响较少,则体系内通信链路的权重因此产生差异,最终影响体系的毁伤传播效果和整体抗毁性。

(2) 节点失效影响关系:通信网络层对服务网络层的影响 $N_L \rightarrow N_T$,当节点的通信链路失效,其信息服务必然同时失效;服务网络层对通信网络层的影响 $N_T \rightarrow N_L$,当节点信息服务失效,则其服务负荷被重新分配后,对基

础通信网络产生影响。即两层节点的失效按照各自的拓扑逻辑关系传播,又相互交织影响,MIG中这类关系属于相互依存网关系范畴。对于该领域的研究,文献^[7]于2010年提出的相互依存网的理论分析模型^[7],详细描述并深入分析了双向依赖关系的网络特征,文献^[10-12]分别对一对一、多对多和无标度节点连接关系的相互依存网的鲁棒性进行了研究。在本文中,对 N_L 与 N_T 相互依存关系的分析将在MIG的级联失效模型的构建中展开。

2 基于介数的 MIG 级联失效模型

2.1 MIG 节点介数定义

介数分析法在复杂网络级联失效模型的研究中具有明显优势和认同度,文献[13-15]均基于介数分析法对复杂网络的节点关系和级联失效情况进行了研究,但这些研究均只针对单层网络,关于相互依存网络的相关研究仍然较少。以下根据 MIG 中 N_L 与 N_T 节点的依存关系,对介数计算式进行必要改进。在单层网络研究中,对于网络节点介数的定义式^[16-18]一般为

$$b_i = \frac{\sum_{p < q} \frac{l(p, q, i)}{l(p, q)}}{n(n-1)/2} \quad (1)$$

式中, $l(p, q)$ 表示网络中节点 p 和 q 间的可达最短路径的总数; $l(p, q, i)$ 表示其中经过点 i 的路径数; n 表示网络节点的总数。式(1)对网络节点介数的计算完全根据网络的拓扑结构进行,并认为所有节点在网络中的地位对等,对于每个节点介数的计算将遍历所有其他网络节点。但这并不符合实际情况,因为在大多数实际网络中任意两个节点 i, j 之间是否会产生信息(或能量)的交流,以及交流的“热度”与这两个节点之间是否存在业务关系,以及业务关系的密切程度有关,从网络相互依存的角度考虑,本文对 N_T 的服务关系作如下定义:

定义 1 $C(m \times n)$ 表示为节点服务承载矩阵, m 为网络节点的数量, n 为网络所具备服务种类的数量, c_{ij} 为 0 或 1, 表示一个网络节点是否承载某个信息服务。

定义 2 $A(n \times n)$ 表示为信息服务的关联矩阵, a_{ij} 为 0 或 1, 表示服务 s_i 和 s_j 之间是否存在业务关系, A 为对称矩阵。

定义 3 $R(m \times m) = C \cdot A \cdot C^T / 2$, 则根据 C 和 A 定义, 矩阵 R 意义为栅格节点关系矩阵, r_{ij} 表示信息节点 i 和 j 之间信息交流强度, 值越大表示节点之间有业务关系的服务越多, 信息交流热度大, R 也是对称矩阵。则基于上述定义, 将交流热度因子引入介数计算式后, 网络节点 i 介数定义为

$$b_i = \frac{\sum_{p < q} r_{pq} \cdot \frac{l(p, q, i)}{l(p, q)}}{n(n-1)/2} \quad (2)$$

式(2)将信息交互强度 r_{pq} 作为权值与可达路径相比相乘, 不仅反应了通信链路拓扑结构中节点的重要程度, 也将上层网络 N_T 的信息服务关系考虑其中, 将两层相互依存的网络关联, 使得介数计算值更具实际参考价值。

2.2 MIG 节点负荷定义

在上述栅格节点介数定义的基础上, 定义通信链路层 N_L 节点初始负荷为

$$L_i^{\text{ini}} = \alpha d_i \sum_{m \in \Gamma_i} b_m \quad (3)$$

式中, d_i 为节点 i 的度; Γ_i 表示节点 i 的邻居节点集合; m 为节点 i 的 1 个邻居节点; b_m 表示节点 m 的介数值; α 为可

调参数。式(3)表达的意义为 N_L 层节点的初始负荷与节点在通信链路层拓扑的位置有关, 位置越核心初始负荷越大, 则定义 N_L 节点最大负荷为

$$L_i^{\text{max}} = (1 + \eta) L_i^{\text{ini}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中, η 为能力调节参数, 该能力参数表达的实际意义为, 由该节点软、硬件建设情况对其可承担的最大负荷造成的影响。

定义 N_T 节点初始负荷为

$$T_i^{\text{ini}} = \beta d_i \sum_{k \in \Omega_i} \omega_k \quad (5)$$

式中, d_i 表示节点 i 的度; Ω_i 表示节点 i 所承载的服务集合; ω_k 为节点 i 所承载的信息服务服务 s_k 所需的系统开销; β 为可调参数。式(5)的意义为 N_T 层节点初始负荷与其初始所承载的服务所需的系统总开销成正比。同理, 定义 N_T 节点最大负荷为

$$T_i^{\text{max}} = (1 + \lambda) T_i^{\text{ini}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中, λ 为能力调节参数, 其实际意义与 η 相同。

2.3 毁伤级联传播分析

(1) 节点功能失效

MIG 节点功能失效表现为两个层面, 一是通信功能失效, 由节点 i 作为通信链路起始节点或过程节点的通信链路均不存在, 即

$$\Omega_{l(g, k, i)} = \emptyset \cup \Omega_{l(g, i, j)} = \emptyset \cup \Omega_{l(i, k, j)} = \emptyset \quad (7)$$

式中, $\Omega_{l(g, k, i)}$ 表示经过节点 i 的可达通信链路集合。二是信息服务失效, 节点 i 承载的信息服务不可工作, 或信息服务可工作但无法与外界进行信息交互, 即 N_L 层通信链路失效:

$$\Omega_{s(i)} = \emptyset \cup \text{式}(7) \quad (8)$$

式中, $\Omega_{s(i)}$ 表示经过节点 i 的承载的可用服务集合, 服务的状态与节点所在硬件环境、系统容量等均有关, 当节点受到攻击, 或系统开销超过饱和容量时, 所承载的服务均会受到影响。

(2) 负荷重分配

MIG 发生级联失效的原因是失效节点 i 的通信负荷 ΔL_i 和服务负荷 ΔT_i 被分配到了栅格内的其他节点, 并造成其他节点因负荷超额而失效, 且这一过程被迭代扩散。在信息(或能量)流通网络中, 当节点是失效时, 原节点的负荷一般按照形如式(9)择优概率进行分配:

$$P_j = \frac{X_j}{\sum_{n \in \Gamma_i} X_n} \quad (9)$$

式中, Γ_i 表示失效节点 i 的邻居节点的集合; P_j 表示节点 j 分流节点 i 负荷的概率; X_j 表示节点 j 的择优属性, 在本文 N_L 中, X_j 为节点初始负荷 L_j 。

故 N_L 失效节点 i 上的负荷重新分配到它的邻居节点 j 上, 择优概率定义为

$$P_j^l = \frac{L_j}{\sum_{n \in \Gamma_i} L_n} = \frac{\alpha d_j \sum_{m \in \Gamma_j} b_m}{\sum_{n \in \Gamma_i} (\alpha d_n \sum_{q \in \Gamma_n} b_q)} \quad (10)$$

节点 j 收到的额外负荷为

$$\Delta L_j^i = \Delta L_i \cdot P_j^i \quad (11)$$

式(10)和式(11)表达的意义为,失效节点 i 的负荷将以较大的概率分配给相邻节点中初始负荷 L_j 较大的点,这与实际情况十分相符。如在物流网中,当某个货运站点瘫痪失效时,将其囤积的货物分流给附近吞吐量较大的站点是十分合理的。但 N_T 失效节点按此法分配负荷是不可行的,因为 MIG 的信息服务具有专业性,不可随意替代,必须寻找具有相同服务的节点分配。犹如瘫痪货运站内部分货物需要冷藏,则必须寻找具有冷库服务的站点分流。而这一过程在本文模型中为一迭代搜索过程。

定义一次迭代择优概率为

$$P_{j-1}^{s_k} = \frac{T_{j-1}}{\sum_{n \in \Gamma_j, s_k \in \Omega_n} T_n} = \frac{\alpha L_{j-1} \sum_{m \in \Omega_{j-1}} e_m}{\sum_{n \in \Gamma_j, s_k \in \Omega_n} (\alpha L_{n-1} \sum_{q \in \Omega_n} e_q)} \quad (12)$$

式(12)表达的意义为,对于 N_T 失效节点的某个服务 S_k 的负荷,将被配到相邻的具备该服务的节点中,且分配概率与该节点的初始服务负荷成正比。则节点 $j-1$ 收到的额外服务 S_k 负荷为

$$\Delta T_j^i = e_k P_{j-1}^{s_k} \quad (13)$$

当 1 次搜索失败,即相邻节点均无相同服务 S_k 时,则进入迭代搜索,经过 h 次迭代后,节点 $j-h$ 被选择的概率为

$$P_{j-h}^{s_k} = \frac{L_{j-1}}{\sum_{n \in \Gamma_j} L_n} \times \frac{L_{j-2}}{\sum_{n \in \Gamma_{j-1}} L_n} \times \dots \times \frac{L_{j-h-1}}{\sum_{n \in \Gamma_{j-h-2}} L_n} \times \frac{T_{j-h}}{\sum_{n \in \Gamma_{j-h}, s_k \in \Omega_n} T_n} \quad (14)$$

式(14)表达的意义为,在迭代搜索节点时,搜索路径的择优概率与路径包含的节点个数成正比,当迭代至发现具备相同服务的节点时,以与初始服务负荷成正比的概率分配负荷。犹如将需要冷藏货物沿着路况最好的道路寻找具备冷库的站点,并按照库容量分配货物。节点 $j-h$ 收到的额外关于服务 s_k 负荷同式(13)。

此处,有一个仍然值得讨论的问题是:当节点 i 失效后,其所承载通信负荷 L_i^{ini} 和服务负荷 T_i^{ini} 将以何比率重新分配给其他节点,因为信息栅格不同于能量交换网或交通网,无论是 N_L 层还是 N_T 层,节点的功能存在一定差异,同时,节点失效原因也会对其产生影响,如当节点受到病毒和木马的攻击失效后,不仅其自身的功能瘫痪,而且还有可能向其他节点发送大量无用数据包,从而分配了更多的负荷。因此,定义失效节点待分配通信负荷为

$$\sum_i \Delta L_i^j = e^{u_j} \cdot L_j^{\text{max}} \quad (15)$$

式中, ΔL_i^j 表示栅格中某节点 i 收到的关于失效节点 j 的通信负荷; u_j 为节点 j 的失效负荷指数调节参数,在实际案例中, u_j 应根据实际通信网络性能、服务功能特性结合专家意见设定。为计算简便,在本文的模型推导和实验仿真中设所有的 $u_j = 0$ 。

同理,用相同方法处理不同类别军事服务在级联失效传播中的影响,则定义失效节点待分配服务负荷为

$$\sum_i \Delta T_i^j = \sum_{k \in \Omega_j} e^{v_k} \cdot \omega_k \quad (16)$$

式中, ΔT_i^j 表示栅格中某节点 i 收到的关于失效节点 j 的服务负荷; v_k 为服务 s_k 的失效负荷指数调节参数,用于突出不同军事服务在失效后产生的额外负荷的差异,其设置方法同 u_j 。同样,在本文的模型推导和实验仿真中设所有的 $v_k = 0$ 。

(3) 失效传播

当 MIG 内存活节点 j 被分配来自失效节点的额外通信负荷超出可承担范围时, j 通信功能将也失效,此时 N_L 节点级联失效条件为

$$L_j + \sum_{i \in \Pi_j} \Delta L_i > L_j^{\text{max}} \quad (17)$$

同理,当节点 j 被分配到额外服务负荷超出大负荷时, j 服务也将失效,此时 N_T 节点级联失效条件为

$$T_j + \sum_{i \in \Phi_j} T_i > T_j^{\text{max}} \quad (18)$$

同式(8) N_T 节点失效条件应为

$$T_j + \sum_{i \in \Phi_j} T_i > T_j^{\text{max}} \cup \text{式(17)} \quad (19)$$

显然,依照负荷重分配方式(见式(10)~式(14))和毁伤判别条件(见式(17)~式(19)),如果 MIG 节点抗毁能力较差,传播始终得不到终止,则级联失效就会随着迭代次数的增加呈洪泛式扩散,最终造成全体系的瘫痪。

2.4 级联失效模型仿真验证

利用 Matlab(2010VA)仿真实验验证模型有效性,实验以 XX 区域指挥信息系统(信息栅格)为模型对象,该系统的 N_L 层拓扑结构如图 3 所示,共有 54 个栅格节点,承载 17 种主要的军事信息服务。

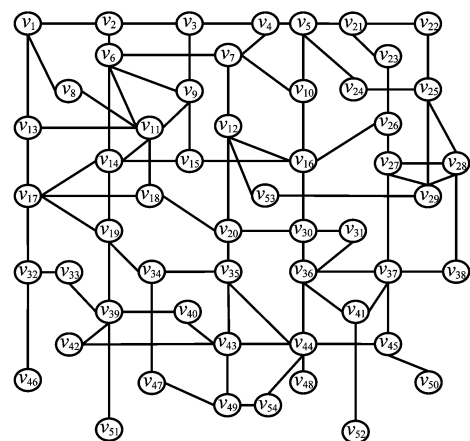


图 3 XX 区域指挥信息栅格 N_L 层拓扑结构

服务关联矩阵 A 和节点服务承载矩阵 C 的部分数据如式(20)和式(21)所示。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & & & & \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

信息服务的开销 ω_k 定义: $\omega_k = \sum r_{kj}$, 其意义为服务 s_k 与栅格中其他服务交互的关系越多, 其服务开销越大, 所有节点初始负荷能力参数 α 和 β 均设为 1, 最大负荷能力参数 η 和 λ 根据实验需要灵活调节。

首先, 根据两种不同算法解算 XX 区域网络化指挥信息系统 N_L 层节点的介数, 由于本文的介数计算式中加权相乘 r_{ij} , 为使结果具有对比性, 对介数计算值进行归一处理, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 两组节点介数值总体近似,

但本文算法的节点介数值差异明显大于经典介数算法, 这是由于乘积信息交流强度因子后, 承载较多服务的节点在 N_L 层中的重要度被提高了, 反之则被弱化, 从而使得节点间极化更为明显。

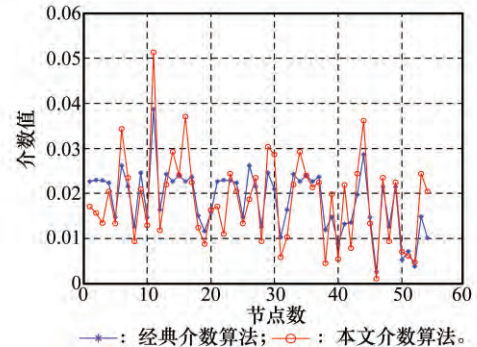


图 4 两种介数计算值的比较

实验采用 2 种攻击策略: 随机攻击和蓄意攻击。随机攻击: 攻击网络中 2 个普通节点; 蓄意攻击: 攻击网络中的 2 个核心节点。在本实验中, 节点 7、11、17、34、44 承载所有种类的服务, 为核心节点, 其余为普通节点。设 η 和 λ 均为 0.4, 以考察不同攻击策略下, 节点失效的传播速度和影响范围。实验迭代步骤设计如下:

步骤 1 将初始化受攻击节点归入最新失效节点集 Λ_L 和 Λ_T ;

步骤 2 分别根据式(10)和式(14)计算并重分配 Λ_L 和 Λ_T 中节点的通信负荷与服务负荷, 删除这些节点, 置 Λ_L 和 Λ_T 为 \emptyset ;

步骤 3 考察 N_L 的所有节点, 当满足式(17)时, 将其加入 Λ_L , 考察 N_T 的所有节点, 当节点满足式(19), 将其加入 Λ_T ;

步骤 4 判断 Λ_L 和 Λ_T 是否为 \emptyset , 当其中有一个不为 \emptyset 时, 进入步骤 2 (下一次迭代), 当两个均为 \emptyset 时, 级联失效终止, 计算步骤结束。

以失效迭代次数为参考系, 栅格体系级联失效的情况如图 5 所示。

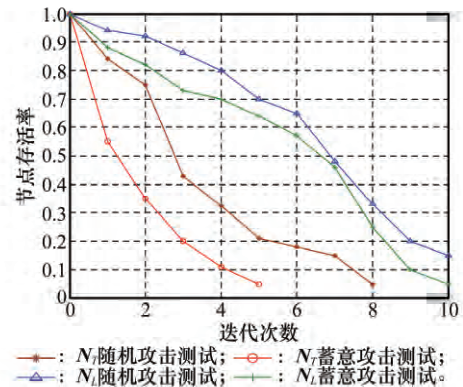


图 5 当 $\eta=\lambda=0.4$ 时 N_L 与 N_T 级联失效趋势

从图5中可知,在MIG受到攻击后, N_T 层失效传播速度明显快于 N_L 层,特别是当核心节点受损,失效的级联传播影响较大。如图5中所示,核心节点受到蓄意攻击,传播迭代5次后,栅格体系几乎陷于整体瘫痪状态。为进一步了解 N_T 的级联失效状态和攻击节点选择的影响,本文还进行了失效传播路线跟踪实验,设 η 和 λ 均为0.4,采用随机攻击方式(选择初始节点17和44),跟踪结果如图6所示。

分析图6的失效传播路线可以发现,攻击节点17和44后, N_T 层的级联失效主要由节点核心节点17引发,经过3次迭代后级联失效呈洪泛式迅速瘫痪整个栅格体系。

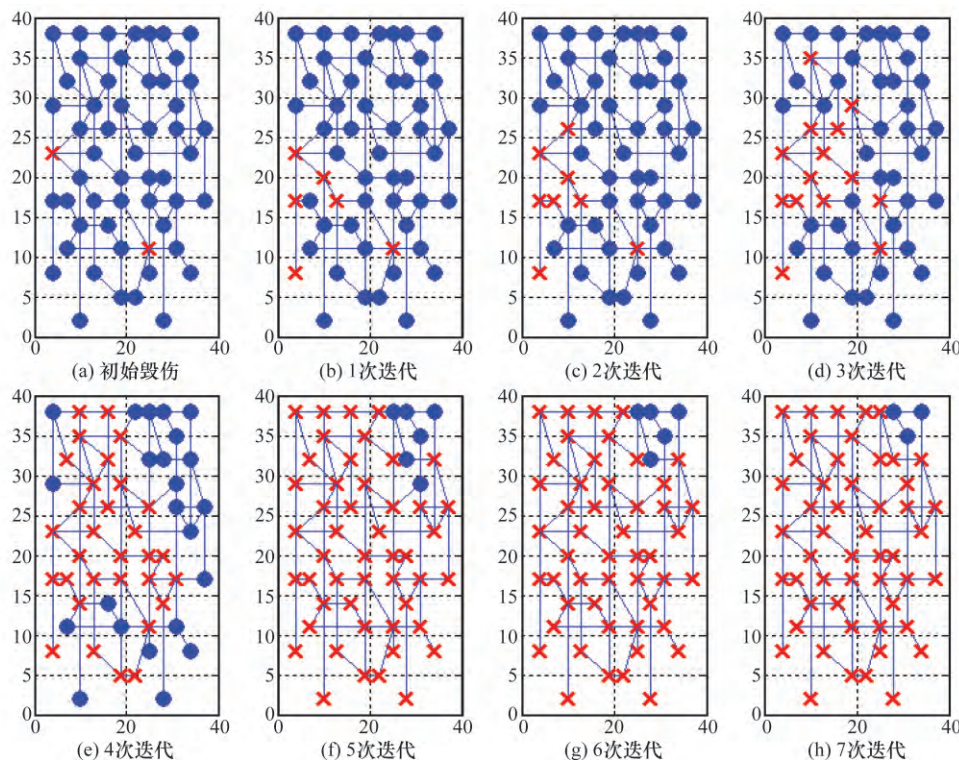


图6 当 $\eta=\lambda=0.4$ 时 N_T 节点失效情况跟踪

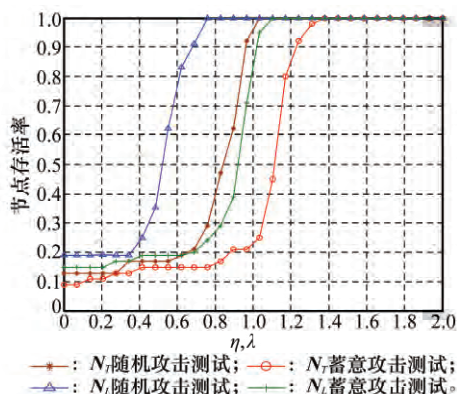


图7 节点存活率变化趋势

从图7中可知,能力调节参数作为节点最大(通信或者

需要说明的是节点21、22和23最后存活且达到稳态,是由于在一定的毁伤传播路径和失效顺序影响下,它们之间形成了一个孤立子网,这个与外界子网联通性弱,更易存活。

为考察栅格体系级联失效的一般性特征,以有效支撑体系鲁棒性策略的制定,仿真实验还测试了不同能力调节参数(η 和 λ)对栅格节点最终存活率的影响。实验中设定所有节点能力调节参数为相同值,在(0,2)范围内调节 η 和 λ ,调节时,设 $\eta=\lambda$,等间隔取30个采样点,循环记录每次级联失效实验迭代终止后的节点最终存活率(存活节点数/总节点数),实验最终记录结果如图7所示。

服务)负荷容量的体现,对体系的级联失效影响较大。在本实验中,当能力调节参数 $\eta<0.4$ 或 $\lambda<0.7$ 时,任意攻击方式均造成了体系整体瘫痪,而当 $\eta>1.1$ 且 $\lambda>1.4$,节点存活率均达到100%(除初始节点外),体系的级联失效情况基本消失。

3 鲁棒性策略研究

3.1 惩罚函数

从2.4节仿真实验可知,要控制栅格体系的级联失效,可通过增大节点能力调节参数,即增加节点最大(通信或者服务)负荷容量实现。但这无疑将增大栅格体系的建设投入,特别是对每个节点的负荷容量扩展至2.4倍以上,显然不合理。故在栅格体系鲁棒性策略研究中引入惩罚函数,设对 N_L 单节点的惩罚函数为

$$p_i(v_i) = e^{\left(\frac{C_i \eta_i}{L_i}\right)^{\frac{1}{\lambda_i}}} \quad (22)$$

式中, η_i 表示节点 i 能力调节参数; L_i 表示节点初始通信负荷; C_i 为常系数, 用于调节惩罚函数值 (penalty function value, PFV) 的数量级。式(22)表示节点 i 的 PFV 与节点 i 的最大负荷建设容量成正比, 与其初始负荷 L_i 成反比。则 N_L 全网络的惩罚函数设为

$$P(N_L) = \sum_{i=1}^n p_i(v_i) - n \quad (23)$$

式中, n 表示网络节点规模, 减 n 是为保持惩罚函数最小为 0。同理, 对 N_T 单节点的惩罚函数设为

$$p_i(v_i) = e^{\left(\frac{C_i \lambda_i}{T_i}\right)^{\frac{1}{\lambda_i}}} \quad (24)$$

N_T 全网络的惩罚函数设为

$$P(N_T) = \sum_{i=1}^n p_i(v_i) - n \quad (25)$$

式中, λ_i 表示节点 i 能力调节参数; T_i 表示节点初始服务负荷; C_i 为常系数, 用于调节 PFV 的数量级。式(25)表达的意义与式(23)近似。图 8 显示了能力调节参数对 PFV 的影响。

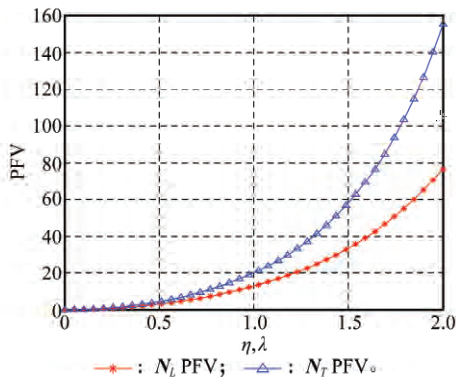


图 8 $P(N_L)$ 和 $P(N_T)$ 值变化趋势

3.2 砥柱节点遴选

由于建设成本投入有限, 不可能对栅格体系所有节点的容量进行鲁棒性扩建, 因此本文的鲁棒性策略是遴选部分节点作为栅格砥柱节点集 Γ_{rob} , 遴选的目标是 N_L 层砥柱节点囊括尽可能多的通信交互量, 而 N_T 层砥柱节点囊括尽可能多的信息服务开销。转化为数学模型为

$$T_{\varphi(N, \chi)} = \max\left(\sum_{i \in \Gamma_{rob}} b_i, \sum_{k \in \Gamma_{rob}} \omega_k\right) \quad (26)$$

s. t.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n p_i(v_i) - n < V_{NL} \\ \sum_{i=1}^n p_i(v_i) - n < V_{NT} \end{cases} \quad (27)$$

式中, $\Gamma_{rob(\chi)} = \varphi(N, \chi)$, φ 表示节点遴选函数, N 表示目标栅格, χ 表示遴选的砥柱节点总数; V_{NL} 和 V_{NT} 分别表示 N_L 层和 N_T 层惩罚函数的阈值。式(26)要对两个目标求最大值,

属于 NP 难问题, 但在本文模型中却较为简单, 因为根据式(2)的 b_i 值算法, 节点介数值与其所承载服务的服务基本是一致的。如核心节点中, 除节点 34 的值稍低以外, 其余的均是介数值最高的几个点。模型求解过程可简化为

步骤 1 初始化砥柱节点总数 $\chi=1$;

步骤 2 对栅格体系每个节点的 $\sum \omega_k$ 排序;

步骤 3 遴选前 χ 个节点为组成砥柱节点集 $\Gamma_{rob(\chi)}$;

步骤 4 调节砥柱节点集的能力系数 η 和 λ 至鲁棒性

条件, 如在本文模型中 $\eta=1.1, \lambda=1.4$;

步骤 5 计算 $P(N_L)$ 和 $P(N_T)$, 判断是否满足式(27),

若满足则使 $\chi=\chi+1$, 转至步骤 3;

步骤 6 输出 $\sum \omega_k$ 排序前 $\chi=\chi-1$ 个砥柱节点集。

3.3 仿真实验

本节仍以第 2.4 节中的 XX 区域网络化指挥信息系统为对象进行仿真实验, 基本参数设置不变, 在两种强化策略下对栅格体系的级联失效特性经行考察。策略 1: 对所有节点的能力系数 η 和 λ 加强; 策略 2: 根据本文鲁棒性策略遴选砥柱节点, 在 η 和 λ 设为 1.4 的前提下, 设 $V_{NL}=10$, $V_{NT}=15$, 根据第 3.2 节遴选模型解得砥柱节点为 7、11、14、17、22、29、34、44 和 53。采用第 2.4 节中的级联失效仿真实验, 考察 η 和 λ 在 $[0, 2]$ 区域内, 栅格体系的 PFV 和节点存活率分别如图 9 和图 10 所示。

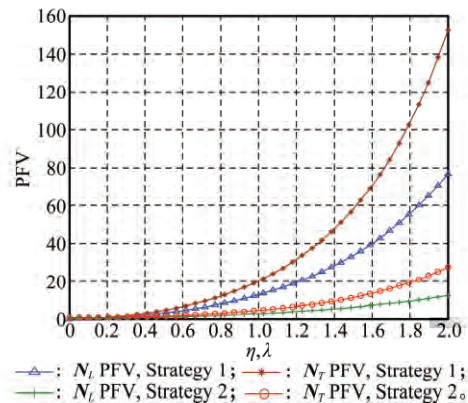


图 9 $P(N_L)$ 和 $P(N_T)$ 值比较

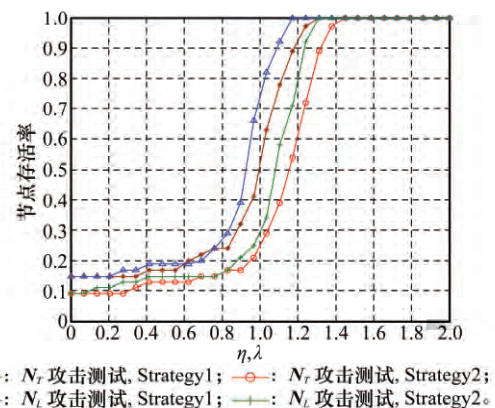


图 10 节点存活率比较

从图9中可以发现,本文策略(策略2)的惩罚函数值明显得到控制, N_L 层和 N_T 层在 $\eta = \lambda = 1.4$ 时, $P(N_L)$ 和 $P(N_T)$ 的值分别为9.85和15.24,较策略1的34.68和57.92有了大幅降低。而抗级联失效特性方面,观察图10可知,两种策略下网系的节点生存率变化曲线较为近似,策略1中 N_L 层和 N_T 层达到稳态时, η 和 λ 的值分别为1.32和1.48,接近于策略2的1.18和1.32,两者相差较少。从中可以得到的结论是,少量砥柱节点的加强,即可有效增强全网系的抗级联失效特性,并可大幅控制建设投入成本。

4 结束语

鲁棒性决定了军事信息栅格在战时的生存能力和运作效能,进而影响战场的决策指挥和火力控制,最终影响作战结果。本文在深入分析MIG体系结构和级联失效规律的基础上,通过引入成本惩罚函数,研究了MIG建设的鲁棒性策略,兼顾了信息栅格的抗毁性和建设成本。但是在2012年,美军控制指挥项目计划负责人Alberts博士在其著作的《敏捷性优势》中已将鲁棒性分离为多能性和弹性,并定义为敏捷性的赋能器之一,从这个角度看,本文的研究只侧重于弹性,于鲁棒性概念尚不全面。因此,在下一步研究中,笔者将重点研究基于信息服务松耦合机制的栅格体系多能性模型,以保证研究完整性。

参考文献:

- [1] Shook R. Net-enabled command capability and joint combat capability enveloper overview brief[R]. Norfolk: US Joint Forces Command, 2007.
- [2] Yang Q S, Ma H Y, Tao R, et al. Research on trust mechanism in military information grid[C]// *Proc. of the International Conference on Computer Science and Information Processing*, 2012:25-28.
- [3] Yu X H, Hu D. Parallel optimization method of service resource allocation in military information system[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2012, 32(9): 2078-2086. (于晓浩, 胡丹. 军事信息系统服务资源分配并行优化方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(9): 2078-2086.)
- [4] Chen X H, Xu Q. Military information grid-based integrated photoelectric detector technology[C]// *Proc. of the 9th International Conference on Grid and Cloud Computing*, 2010:416-419.
- [5] Liu Z, Yang S, Xiu B X, et al. Design and analysis of C2 robust organizational communication structure[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2010, 32(5): 110-117. (刘忠, 杨杉, 修保新, 等. C2组织鲁棒性信息交互结构设计及分析[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(5): 110-117.)
- [6] Di P, Hu T, Hu B, et al. Research on invulnerability of combat net model based on complex networks[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(1): 56-60. (狄鹏, 胡涛, 胡斌, 等. 基于复杂网络的作战网络模型抗毁性研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 56-60.)
- [7] Buldyrev S V, Parshani R, Stanley H E, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. *Nature*, 2010, 464(7291): 1025-1028.
- [8] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [9] Deguzman A, Ebken J, Ho N, et al. Network centric communications for expeditionary or carrier strike groups[R]. San Diego: Space and Naval Warfare Systems Center Command, 2011.
- [10] Johansson J, Hassel H. An approach for modeling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2010 (95): 1335-1344.
- [11] 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): 036116.
- [12] Parshani R, Rozenblat C. Inter-similarity between coupled networks[J]. *Europhysics Letters*, 2010, 92(6): 68002-68006.
- [13] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(6): 065102.
- [14] Wang W, Di P, Hu B. Cascading failure model based on random-walk betweenness[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(9): 1914-1917. (王威, 狄鹏, 胡斌. 基于随机行走介数的级联失效模型[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1914-1917.)
- [15] Zhu T, Chang G C, Zhang S P, et al. Research on model of cascading failure in command and control based on complex networks[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(8): 1817-1820. (朱涛, 常国岑, 张水平, 等. 基于复杂网络的指挥控制级联失效模型研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(8): 1817-1820.)
- [16] Wang J, Liu Y H, Jiao Y. A new cascading failure model with delay time in congested complex networks[J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2009, 18(3): 369-381.
- [17] Zhang G Q, Zhang G Q. Communication network designing: transmission capacity, cost and scalability[J]. *Science China—Series E: Information Sciences*, 2012, 55(11): 2454-2465.
- [18] Wang J, Liu Y H, Jiao Y. Model for cascading failures in congested Internet[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering*, 2008, 9(10): 1331-1335.

作者简介:

沈迪(1986-),男,博士研究生,主要研究方向为空天信息系统规划与建设。

E-mail: hanshanyueyin@sina.com

李建华(1965-),男,教授,博士,主要研究方向为军事通信理论、军队信息化建设。

E-mail: ljh@163.com

张强(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为空天信息系统规划与建设。

E-mail: zq19850626@163.com

朱瑞(1986-),女,助理工程师,硕士,主要研究方向为军事信息保密。

E-mail: nancy.zr@163.com