

## 指控网络攻击优势评估指标体系研究

王皖阳<sup>1</sup>, 吴勇<sup>1</sup>, 刘金星<sup>2,3</sup>

(1. 武汉理工大学自动化学院, 武汉 430070; 2. 空军第一航空学院, 河南 信阳 464000;

3. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 基于复杂网络理论以及指控网络的组织结构特性等, 对指挥控制网络的拓扑结构以及网络特征进行分析, 给出指挥控制网络信息流通效率的主要影响因素, 并据此提出网络攻击优势的概念、建立网络攻击优势的评估指标体系, 用层次分析法对网络攻击优势进行了评估和分析, 为指控网络攻击效果评估提供依据。

**关键词:** 攻击效果评估; 复杂网络; 指标体系; 指挥控制网

**中图分类号:** V271.4; TN956 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)12-0029-05

## Evaluation Index System of Combat Command and Control Network Attack Dominance

WANG Wan-yang<sup>1</sup>, WU Yong<sup>1</sup>, LIU Jin-xing<sup>2,3</sup>

(1. College of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. The First Aeronautical Institute of

Air Force, Xinyang 464000; 3. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** Analysis is made to topological structure of command and control network and its characteristics based on the theory of complex network and the organization characteristic of the command and control network. The main factors that have influence on information flow efficiency of the command and control network are presented, based on which the concept of network attack dominance is proposed, and an evaluation index system is established for it accordingly. Analytic hierarchy process is used for evaluation of the network attack dominance, which provides a reference for evaluating the effect of network attack.

**Key words:** attack effect evaluation; complex network; indicator system; command and control network

### 0 引言

现代战争是基于网络的体系对抗, 战场的每一方都是一个以作战平台中特定方式耦合的动态网络。网络不仅为各级作战单元提供了相关的态势信息、指控信息, 而且为武器的发射与制导提供了信息。因此, 对指控网络的打击在作战中可起到事半功倍的效果。目前, 美国等发达国家在网络侦察与打击研究方面取得了实质性的进展并运用于实战中, 取得了令人瞩目的战果。2007年发生在叙以边界的局部冲突, 就显著地表明了打击指控网络在战争中的地位与效果<sup>[1-2]</sup>。在国内, 各相关研究机构在网络拓扑结构分析、网络动力学等方面取得了一些成果<sup>[3]</sup>, 但对于指控功能的结合

做得仍不够到位。基于这一点, 本文根据指挥控制网络的拓扑结构和指挥控制功能, 对指挥控制网络的网络特性进行分析; 提出网络攻击优势度的概念以及网络攻击优势的评估指标和递阶层次评估结构, 为分析和评估敌方指控网络的脆弱点提供依据和借鉴。

### 1 指挥控制网络拓扑结构及其特性

获取敌方指挥控制网络的网络拓扑结构对了解网络组成、结构、网络通联关系具有重要的意义, 是实施战场网络侦察和打击的基础。

#### 1.1 指挥控制网络模型

由于战场中的作战平台具有多重属性, 可以看成是一个由节点和边组成的网络, 其结构可用图论的方法进行表示。

**定义1** 指挥控制网络可以定义为由节点集合  $V$  和边集合  $E$  组成的图  $G = \{V, E\}$ 。其中,  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ , 代表组成指挥控制网络的指挥控制节点、传感

器节点、作战节点等;  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ , 代表节点之间信息传递关系。图  $G$  的邻接矩阵  $A = (a_{ij})$ , 其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 之间有边相连} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 之间无边相连} \end{cases} \quad (1)$$

根据图论的思想, 建立的某指挥控制网络的拓扑结构模型见图 1, 图中的各个节点被赋予了实际意义。

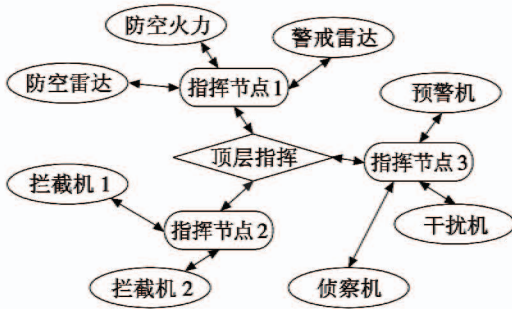


图 1 指挥控制网络拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of command and control network

### 1.2 指控网络的网络特征

敌方指控网络特征是评估网络攻击效能、制定网络攻击决策的依据, 但敌方网络结构是未知的。为实现对敌方指控网络的有效评估, 本文基于网络侦察所提供的作战平台辐射信息以及平台之间的信息交互情况, 借鉴复杂网络中的相关网络特征思想, 将任意交战平台、网络中继节点、指挥机构皆视为网络中的一个节点, 节点之间的通信链路被视为网络的边。

#### 1.2.1 节点信息交互通道数

节点信息交互通道表示在一个时期内, 该节点与其他相邻节点的信息连接情况, 数量越大, 表明该节点接收或发送的信息量也就越大, 与网络中的任一节点直接相连的节点的集合称为节点的邻域  $\delta_{ki}$ 。  $\delta_{ki} = \{V_j | V_j \in V, a_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n\}$ , 则节点信息通道数为

$$k = |\delta_{ki}| = \sum_{V_j \in \delta_{ki}} a_{ij} \quad (2)$$

#### 1.2.2 节点交互通道分布

节点交互通道分布情况可以用分布函数  $P(k)$  表示, 即一个随机选定的节点度恰好为  $k$  的概率, 见图 2。

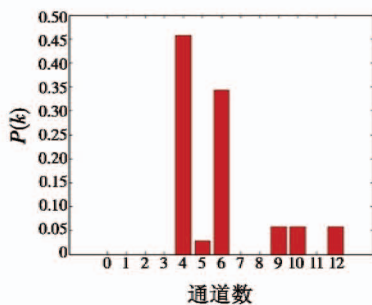


图 2 节点交互通道分布

Fig. 2 Node interaction channel distribution

#### 1.2.3 网络聚类系数

网络聚类系数<sup>[3]</sup>: 节点  $i$  的聚类系数定义为所有与节点  $j$  相邻节点之间连边的数目占可能的最大连边数目的比例。

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (3)$$

式中:  $C_i$  为网络中所有节点聚类系数的平均值;  $E_i$  为实际存在的边数;  $k_i$  为节点相邻节点的个数。网络聚类系数表示在一个作战集群内, 各节点之间的协调能力以及网络重建能力。

#### 1.2.4 平均信息交互距离

平均信息交互距离代表了网络中任意两个节点之间物理距离的平均值, 其值越大网络中的信息的流动和共享就越复杂。平均信息交互距离可表示为

$$A_L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N+1)} \sum_{i>j} d_{ij} \quad (4)$$

式中,  $d_{ij}$  表示网络中任意两个节点之间的路径长度。

#### 1.2.5 信息媒介中心性

在网络中, 如果某个节点、链路处于多个信息交互的路径中, 则该节点和链路的工作状态将影响众多信息的正常传递。网络的信息媒介中心性衡量指标包括节点周转度、链路周转度和周转相关度。

##### 1) 节点周转度。

假设在网络中, 任意节点对  $V_i$  和  $V_j$  之间存在  $n$  条捷径, 节点  $V_k$  相对于节点对  $V_i, V_j$  的节点周转度指的是节点  $V_k$  处于该节点对的捷径上的能力。

设节点对  $V_i, V_j$  之间不经过节点  $V_k$  的捷径数量为  $B(k)$ , 经过节点  $V_k$  的捷径数量为  $S(k)$ , 则网络节点的周转度可表示为

$$C(k) = \frac{S(k)}{S(k) + B(k)} \quad (5)$$

图 3 给出了一个节点周转度的计算结果。

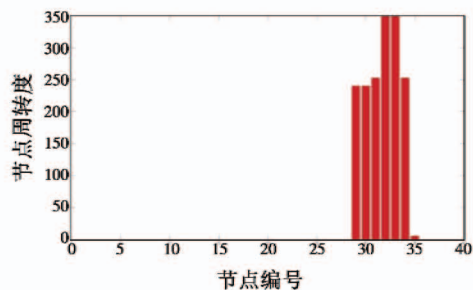


图 3 节点周转度

Fig. 3 Node turnover graphs

##### 2) 链路的周转度。

链路的周转度表明一个节点落在其他任意两节点最短路径上的程度, 描述其在整个网络数据传输中起

到多大的转发作用。链路的周转度可表示为

$$C_e = \sum_{i \neq j \in V} \frac{R_{ij}(e)}{R_{ij}} \quad (6)$$

式中,  $R_{ij}(e)$  表示节点  $i$  和  $j$  之间最短路径经过边  $e$  的数目。图 4 给出了链路的周转度的一个计算结果。

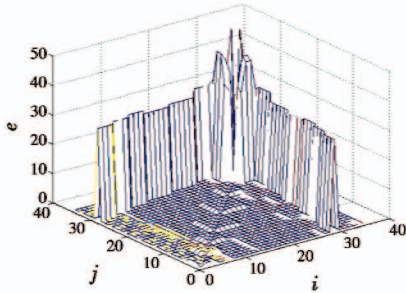


图 4 链路周转度

Fig.4 Link turnover graphs

### 3) 周转相关度。

在指控网络中,一个节点和其他节点的路径越短,则表明这个节点在网络中的周转性越高;反之,这个节点在网络中处于边缘状态。某个节点的周转相关度  $K(i)$  可表示为节点距离其他节点距离的倒数,即

$$K(i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^n d_{ij}} \quad (7)$$

#### 1.2.6 网络通信效率

网络通信效率表示的是信息分发的速率,在网络中,如果各节点的信息流路径长,则信息分发的速率低;反之,速率高。因此,在相关文献中<sup>[4]</sup>,将网络通信效率作为衡量网络效能的一个指标。

$$E = \frac{1}{A_L} \quad (8)$$

即将网络中各节点的平均路径的倒数作为衡量网络通信的效率。

## 2 网络攻击优势概念

实际作战中可采用“软杀伤”或“硬杀伤”对敌方网络节点和通信链路进行打击,实现破坏敌方指控网络的信息传输和正常工作。为了对指控网络攻击优势进行描述,提出指控功能域的概念,以实现特定信息传输的描述和界定。

**定义 2** 指控功能域是实现指挥控制网络特有功能的临近节点的集合。  $F_i = \{v_s \mid v_s \in (\delta_{k,s} \cap_{v_s, v_i \in \delta_k} \delta_{k,t} \cup \delta_{k,i})\}$ 。指控功能域中的任意节点之间的路径可表示为  $P(v_s, v_j) = \{ \{v_s, v_j\} \text{ 或者 } \{v_s, v_i, v_j\} \text{ 或者 } \{v_s, v'_i, v_j\} \mid v'_i \in F_i \text{ 且 } v'_i \neq v_i \}$ 。

按照指控网络功能可将其划分为态势感知域和指挥控制域。节点类型可划分为:指挥类、武器类、传感

器类。

**定义 3** 网络攻击优势是指基于当前任务目标,对敌方指挥控制网络进行打击而获取的网络攻击效能。取决于敌方指挥控制信息发送损失率、共享态势信息损失率、网络重组能力等要素<sup>[5-7]</sup>。其表达式为

$$I_{\text{PRO}} = w_1 C_{\text{LOS}} + w_2 S_{\text{LOS}} + w_3 N_R \quad (9)$$

式中:  $I_{\text{PRO}}$  表示我方网络攻击优势;  $C_{\text{LOS}}$  表示敌方指控信息发送损失率;  $S_{\text{LOS}}$  表明敌方指控网络态势信息损失率;  $N_R$  表示敌方网络重组能力;  $w_1, w_2, w_3$  为加权系数。

### 2.1 指挥控制信息损失率

对敌方指挥控制网络中的指挥控制节点进行打击可导致敌方所发送的指挥控制通信效率下降,从而获取网络攻击效能。指挥控制信息损失率可表示为

$$C_{\text{LOS}} = \frac{E_{\text{CD}}}{E_{\text{CI}}} \quad (10)$$

式中:  $E_{\text{CD}}$  表示打击后指控网络的信息通信效率;  $E_{\text{CI}}$  表示打击前指控网络信息通信效率。

在实际指挥控制网络中,指挥权限较高的节点往往具有较低的度数。如果一个节点和其他节点之间的捷径最短,则说明该节点向其他节点发送信息的效率最高,其在网络中的地位也就越高。

**定义 4** 指挥控制度表示网络中一个节点对其他节点的信息交互和指挥控制情况,是节点之间的交互通道、周转相关度和周转度的乘积。

$$C_{\text{degree}} = 1/K_i \cdot K(i) \cdot C(k) \quad (11)$$

式中:  $C_{\text{degree}}$  表示某个节点的指挥控制度;  $K_i$  节点的度数  $K(i)$  表明一个节点的周转相关度;  $C(k)$  表示节点周转度。

由图 5 可见,在敌方网络节点未知的情况下,应用该方法可识别出大部分敌方指挥控制节点。

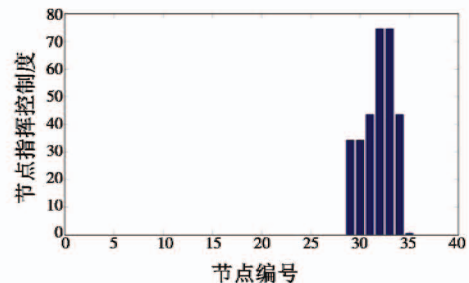


图 5 节点的指挥控制度分布

Fig.5 Command and control node degree distribution

### 2.2 态势共享信息损失率

态势共享信息损失率表示的是在对网络中的节点或通信链路打击后,敌方指挥控制网络信息传输效率的比值。态势信息传输率是由特定的传感器向指挥控制节点和武器节点传输信息的效率,即

$$S_{LOS} = \frac{E_{sd}}{E_s} \quad (12)$$

式中： $E_{sd}$ 表示网络遭受打击后的态势信息传输效率； $E_s$ 表示网络遭受打击之前的态势信息传输效率。

### 2.3 网络重组能力

当网络某个节点或链路遭受打击之后,由该链路和节点负责传输的信息将会被转移到其他节点和链路。网络的重组能力主要与节点的聚类系数和度数有关<sup>[8]</sup>,对于聚类大的网络节点实施攻击可大幅度地降低网络信息的重组能力。

网络重组能力可表示为

$$N_R = \frac{N_D}{N} \quad (13)$$

式中： $N_D$ 为网络遭受打击以后的网络信息传输效率； $N$ 为网络遭受打击前的网络信息传输效率。

## 3 网络攻击优势评估方法

网络攻击优势评估可采用层次分析法实现量化决策,指标评估体系用目标层、准则层和效能因素层三层递阶指标结构进行评估<sup>[9]</sup>(见图6)。

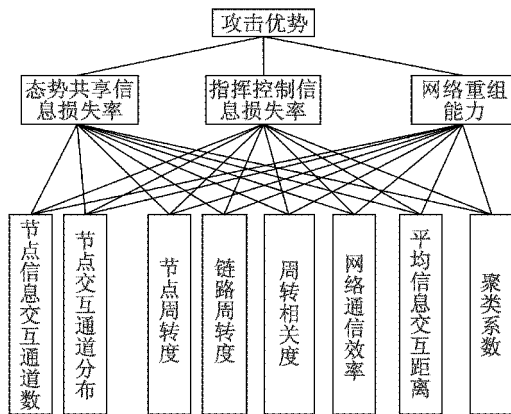


图 6 评估指标体系

Fig. 6 Evaluation system

由于目前缺乏有关定量的敌方指挥控制网络相关数据,因此,采用基于专家打分的层次分析法对网络攻击优势进行评估,是制定战场打击决策的有效且可行的方法。

层次结构模型的最上层为目标层,中间层为准则层,第三层为指标层。在评估中,将目标层定义为网络攻击优势,将影响网络攻击优势的态势信息损失率、指挥控制信息损失率、网络重组能力作为准则层的元素,第三层由相关的网络特征参数构成。

### 3.1 构造判断矩阵

判断矩阵表示针对上一层某因素而言,本层次与之有关的各因素之间的相对重要性。其形式为

$$A = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{pmatrix}。$$

按照9级打分原则,多名专家进行打分,取专家打分平均值,构造判断矩阵,设准则层的判断矩阵为A,效能因素层的判断矩阵为B。经过专家打分后的判断矩阵分别如下所述。

准则层判断矩阵为  $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$ , 选取效能

因素层判断矩阵为

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 4 & 5 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 5 & 6 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 5 & 4 & 5 \\ 1/4 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1/5 & 1/4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1/5 & 1/4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/3 & 1/5 & 1/5 & 1/7 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1/2 & 1/5 & 1/3 & 1/4 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 1 & 1/2 & 1/3 & 1/4 & 2 & 2 \\ 5 & 5 & 2 & 1 & 1/3 & 1/5 & 2 & 2 \\ 5 & 4 & 3 & 3 & 1 & 1/2 & 3 & 3 \\ 7 & 5 & 4 & 5 & 2 & 1 & 5 & 5 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1/5 & 1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1/4 & 1/4 & 1/5 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1/3 & 1/4 & 1/3 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ 4 & 3 & 4 & 1 & 1 & 1 & 4 & 4 \\ 5 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1/3 & 1/4 & 1/2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1/3 & 1/4 & 1/2 & 1 & 1 \end{pmatrix}。$$

### 3.2 计算权重

层次权重就是根据判断矩阵计算对于上一层某因素而言,本层次与之有联系的因素重要性次序的权重。在矩阵运算中表现为求最大特征值对应的特征向量。这里采用方根法计算准则层的因素相对于目标层的层次单排序<sup>[10]</sup>。

1) 准则层权重。

根据判断矩阵,求取准则层权重 $\omega_A$ ,计算结果: $\omega_A = (0.4806, 0.4054, 0.1140)$ ,最大特征根 $\lambda_{max} = 3.029063$ ,一致性指标 $C_1 = 0.0145$ ,平均一致性指标 $R_1 = 0.58$ ,一致性比例 $C_R = 0.0251, C_R < 0.1$ ,满足一

致性。

### 2) 效能因素层权重。

效能因素层各因素权重  $\omega_B$  如下所述。各个因素的权重向量为:  $\omega_{B_1} = (0.3247, 0.2146, 0.1749, 0.0681, 0.0603, 0.0531, 0.0489)$ ,  $\lambda_{\max B_1} = 8.973419$ ,  $C_{1B_1} = 0.1391$ ,  $R_{1B_1} = 1.41$ ,  $C_{RB_1} = 0.0247$ ,  $C_{RB_1} < 0.1$ , 满足一致性。

$\omega_{B_2} = (0.0529, 0.0619, 0.1391, 0.2125, 0.3387, 0.0579, 0.0465)$ ,  $\lambda_{\max B_2} = 8.973419$ ,  $C_{1B_2} = 0.1391$ ,  $R_{1B_2} = 1.41$ ,  $C_{RB_2} = 0.0937$ ,  $C_{RB_2} < 0.1$ , 满足一致性。

$\omega_{B_3} = (0.0611, 0.0692, 0.0667, 0.2151, 0.2409, 0.2051, 0.0709, 0.0709)$ ,  $\lambda_{\max B_3} = 8.083118$ ,  $C_{1B_3} = 0.0119$ ,  $R_{1B_3} = 1.41$ ,  $C_{RB_3} = 0.0986$ ,  $C_{RB_3} < 0.1$ , 满足一致性。

### 3) 组合权重。

组合权重的计算数值如下:  $\omega = (0.1845, 0.1361, 0.1283, 0.1136, 0.1426, 0.1874, 0.0571, 0.0504)$ 。组合一致性效验:  $C_R = 0.0779 < 0.1$ 。

通过采用归一化的方法对影响网络攻击优势的指标因素进行归一化处理, 以实现对指标的有效量化。影响攻击优势的各个指标的量纲不尽相同, 因此, 在评估时, 应将各个指标进行相应的处理, 才能进行评估。

## 4 结束语

本文针对空战指控网络, 提出了一种基于层次分析法的攻击优势评估方法, 引入了影响攻击优势的网络特征, 构建了评估指标体系。由于网络攻击的具体情况十分复杂, 获取数据信息初始值难, 打分差异和归一化等情况, 使得指标权重的确定变得比较困难, 可能会影响最终的评估结果精度。上述这些难点问题都是在以后研究中需要进一步优化的地方。

### 参考文献

- [1] 朱松. 从以色列空袭叙利亚看“舒特”[J]. 国际电子战, 2010(7): 18-21. (ZHU S. Shute from the Israeli air strikes in Syria[J]. International Electronic Warfare, 2010(7): 18-21.)
- [2] DELLER S, BOWLING S R, RABADI G A, et al. Applying the information age combat model: quantitative analysis of network centric operations[J]. The International C2 Journal, 2009(1): 24-26.
- [3] 祁建清, 王春艳, 周肖章. 基于最大流理论的网络对抗效能评估模型及应用[J]. 军事运筹与系统工程, 2009, 23(2): 48-50. (QI J Q, WANG C Y, ZHOU X Z. Network countermeasure effectiveness evaluation model based on maximum flow theory and its application[J]. Military Operations in System Engineering, 2009, 23(2): 48-50.)
- [4] 朱涛, 常国岑, 施笑安. 基于复杂网络的指挥信息系统拓扑模型研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(6): 1574-1576, 1581. (ZHU T, CHANG G C, SHI X A. Research on topology model of command information system based on complex network[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(6): 1574-1576, 1581.)
- [5] 王永杰, 江亮, 鲜明, 等. 网络攻击效果在线评估模型与算法研究[J]. 计算机科学, 2007, 34(5): 72-74. (WANG Y J, JIANG L, XIAN M, et al. Research of online evaluation model and algorithm for network attack effect[J]. Computer Science, 2007, 34(5): 72-74.)
- [6] ALBERTS D S, JAMES M. 网络中心战与复杂性理论[M]. 郁军, 贲可贵, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004. (ALBERTS D S, JAMES M. Network centric warfare and complexity theory[J]. Translated by YU J, BEN K G. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.)
- [7] YANG R, WANG B H, REN J, et al. Epidemic spreading on heterogeneous networks with identical infectivity[J]. Physics Letters A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007, 364(3): 189-193.
- [8] ASHA J, NEWTH D. Optimizing complex networks for resilience against cascading failure[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2007, 380: 673-683.
- [9] 刘进, 王永杰, 张义荣, 等. 层次分析法在网络攻击效果评估中的应用[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(3): 113-115. (LIU J, WANG Y J, ZHANG Y R. Application of analytic hierarchy process to network attack effect evaluation[J]. Computer Application Research, 2004, 21(3): 113-115.)
- [10] 李大鹏, 谭乐祖, 黎漫斯. 舰艇编队超视距反导威胁评估指标主观权重确定[J]. 电光与控制, 2013, 20(11): 21-25. (LI D P, TAN L Z, LI M S. Subjective weight determination of warship formation in over-the-horizon anti-missile threat estimation[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(11): 21-25.)

欢迎踊跃投稿

欢迎刊登广告