



DOI: 10.12382/bgxb.2022.0623

基于OODA环的杀伤网节点重要性评估

陈登, 陈楚湘*, 周春华

(战略支援部队信息工程大学, 河南 郑州 450001)

摘要: 基于网络信息体系的联合作战中, 破坏敌杀伤网、降效敌杀伤体系作战效能, 要求能够识别敌杀伤网中关键节点。基于OODA环理论及杀伤链概念建模, 利用节点删除法, 通过网络作战能力及网络循环效率两项指标的下降程度评估杀伤网节点的重要性, 克服传统评估方法在指标计算中存在冗余的问题, 提高评估精度。采用该方法评估某作战演练中敌方杀伤网节点的重要性, 精准识别指挥决策节点的枢纽作用, 验证方法的有效性, 并对杀伤网节点的重要性进行评估排序, 为选择进攻要点提供依据。

关键词: OODA环; 杀伤链; 节点删除法; 作战能力; 循环效率

中图分类号: E917 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2024)02-0363-10

Importance Evaluation of Kill Network Nodes Based on OODA Loop

CHEN Deng, CHEN Chuxiang*, ZHOU Chunhua

(PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: In joint operations based on the network information system, paralyzing the enemy kill network and reducing the operational effectiveness of enemy kill system requires the ability to identify the key nodes in the enemy kill networks. Kill network modeling based on OODA loop theory and kill chain operational concept, this paper uses the node deletion method to evaluate the importance of kill network nodes through the decline degree of network operational capability and network cycle efficiency, so as to overcome the problem of redundancy in the index calculation of traditional evaluation methods and improve the evaluation accuracy. This method is used to evaluate the importance of enemy kill network nodes in the operation drill, which accurately identifies the pivotal role of command and decision nodes to verify the effectiveness of the method, and which evaluates and ranks the importance of kill network nodes to provide a basis for selecting attack nodes.

Keywords: OODA loop; kill chain; node deletion method; operational capability; cycle efficiency

0 引言

随着信息技术的发展以及马赛克战、决策中心战、联合全域作战等新型作战概念的提出, 杀伤链向复杂化、系统化、网络化的杀伤网演变。为贯彻我反介入/区域拒止战略, 降效敌杀伤网作战效能, 需精

准评估识别敌杀伤网中关键节点。目前, 节点重要性评估研究中最常用的理论是复杂网络理论^[1], 多数文献基于节点的度、距离、介数中心性、接近中心性、聚集系数等复杂网络特征指标或这些指标的改进值评估网络节点的重要性^[2]。此外, 一些具有创造性新方法的广泛应用丰富了网络节点重要性评估

研究,例如节点删除法^[3]、节点收缩法^[4]、效率矩阵法^[5]等。文献[6]定义了复杂网络的冗余度,并基于此量化网络的抗毁性,实现并验证了网络节点的重要性评估。文献[1]综合考虑节点的属性、位置以及 m 阶邻居节点的度重要度贡献和介数重要度贡献,提出了基于 m 阶邻居节点重要度贡献的节点重要度评估方法。文献[7]根据网络邻居节点的拓扑结构结合万有引力定律,提出一种基于改进重力中心性的复杂网络节点重要性评估方法。文献[8]结合数学中的拓扑学和物理学中的场论思想,提出基于拓扑势的重要度排序方法。文献[9]结合节点度值、节点介数和边介数这 3 类静态特征量,利用熵值法构建了算法模型,对作战网络中各军事目标的价值进行评估。然而,上述文献在抽象建立复杂网络模型时,对节点在网络中担负的功能考虑不足,以致在计算复杂网络特征指标时存在冗余,降低了评估精度。文献[10]以侦察-整编-决策-打击(Observe-Orient-Decide-Act, OODA)环理论为基础建模,根据作战实体所负作战任务对节点进行抽象,并基于目标节点打击率及目标节点打击效率构建网络效能评估指标,实现了作战网络的效能评估,开阔了建模思路。但该方法在对网络中链路建模时,对节点之间存在的反馈链路未作考虑,作战环的类型考虑不够充分。

本文针对上述建模与评估方法的不足,基于博伊德 OODA 环理论^[11-12],按照战场中作战力量及平台所负功能进行节点的抽象,按照杀伤链中信息流转路径进行链路的抽象,提出了考虑反馈循环的杀伤网建模方法,而后运用节点删除法,基于节点删除后杀伤网作战能力及循环效率的下降程度,构建杀伤网节点重要性评估指标,实现对杀伤网节点重要性的综合评估。最后,通过某作战演练中拟制的敌杀伤网为例,对评估方法进行验证分析。

1 基于 OODA 环的杀伤网建模

1.1 建模基础

1996 年美空军罗纳德将军提出杀伤链的概念,即打击目标的作战过程可以分为发现、定位、跟踪、瞄准、交战和评估 6 个阶段,简称为 F2T2EA^[13-16]。随着“化整为零、分布作战”的提出,杀伤链已不足以完成对杀伤体系的宏观描述,于是 2018 年,美国防部在 C⁴ISRNET 会议上提出杀伤网^[17]的概念。美国为巩固大国竞争中优势地位,在网络中心战的基础上提出决策中心战的概念,意图通过快速反应、

灵活重组、多域协同、分布作战的联合作战体系获取认知域的非对称优势,其中,杀伤网是跨域协同联合作战的基础。因此,科学合理地对杀伤网进行建模研究是降效敌方杀伤体系作战效能、破解非对称作战的关键。

OODA 环理论自博伊德提出以来,便成为了描述作战过程的经典理论。该理论将作战进程抽象成由大量的 Observe、Orient、Decide、Act 组成的循环,其中:Observe 就是利用各类侦测设备进行观察感知战场信息,进行态势感知;Orient 就是融合处理侦测设备收集的各种信息,进行态势评估;Decide 就是依据态势形成作战构想,下定作战决心;Act 就是各类作战力量、武器平台针对性打击作战目标^[18-19]。因此,按照 OODA 的基本逻辑链路,对照实际作战问题,可将战场中的作战力量或武器平台抽象成 Observations、Orientation、Decision、Action 四类节点,其中 Observations 代表侦察预警体系,Orientation 代表态势评估体系,Decision 代表指挥决策体系,Action 代表打击体系。基于抽象结果,结合 F2T2EA 的概念内涵,将节点按照 F2T2EA 中信息流转路径连接形成杀伤链。大量的杀伤链相互交织形成杀伤网。据此,可完成对杀伤网中节点、链接、网络、杀伤链的建模。

1.2 杀伤网节点建模

基于 OODA 环理论对战场中作战实体进行抽象建模时,会出现多个作战实体协同担任同一功能的情况,也存在单一作战实体担任多种功能的情况,如俄乌战争中无人机在战场中担负察打一体功能。为确保节点抽象的规范化,现明确抽象规则如下:

规则 1 作战实体与节点非一一映射关系,若作战实体集合系同一作战功能,将作战实体集合抽象为一个节点。

规则 2 若单一作战实体有多项作战功能,将作战实体抽象成多类节点。

根据上述规则,可将作战实体抽象记为以下 4 类作战节点:

1) 侦测节点 V^R (Observations): 表示其在作战进程中担任情报侦搜任务,如过顶侦察卫星、信号频谱分析仪、水下监听站、雷达、声呐等。

2) 信息整编节点 V^P (Orientation): 表示其在作战进程中担负接收、筛选、融合情报的任务,如目标综合定位系统、卫星信号接收站等。

3) 指挥决策节点 V^C (Decision): 表示其在作战进程中担负做出决策、下达作战命令的任务,如一体

化指挥平台、预警机等。

4) 打击节点 V^k (Action): 表示其在作战进程中担负打击作战目标的任务, 如战斗机、歼击机、电子干扰机、病毒、蠕虫等。

1.3 杀伤网链接建模

OODA 环理论认为, 在 OODA 环循环过程中共存在 3 类正向链接和 2 类反馈链接^[20], 如图 1 所示。

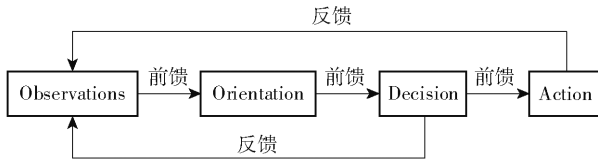


图1 OODA 环
Fig. 1 OODA loop

根据杀伤链的概念可知, 作战过程中, 信息流沿 F2T2EA 流转, 因此可将 Action 至 Observations 的反馈看成下一条杀伤链的起始。据此, 可完成对杀伤网中各链接的抽象建模。为确保杀伤网中链接抽象建模的规范化, 将链接简称为边, 并明确抽象规则如下:

规则 3 节点间边依杀伤链循环建立, 是有向边, 且不存逆循环。

规则 4 担负多项作战功能的作战实体, 作战功能由内部不同的模块担负, 实体内部仍存在信息流转。

规则 5 信息流以光速传播, 对同一战场中作战实体间信息流的传输距离做理想假设。

根据理论分析及规则限定, 可将作战实体间链接关系抽象成 7 类有向边:

1) 侦察攻击边 $V^R \rightarrow V^k$, 记为 E_k^R , 表示由于当前作战高时效性的特点, 部分侦察一体化作战实体执行察打一体策略, 打击目标的时敏性强, 通常附带政治、军事影响较小, 不需通过指挥机构决策处置。此类边实际为节点的自环, 俄乌战争中无人机是其中代表。根据规则 2, 将此类作战实体抽象成两个节点。根据规则 4、规则 5, 同一作战实体分化的两个节点间仍存在与其他节点相类似的边。

2) 信息预处理边 $V^R \rightarrow V^P$, 记为 E_P^R , 表示作战进程中侦察节点将侦察所得情报交由信息整编节点进行噪声过滤、情报整合处理的过程。

3) 收集上报边 $V^R \rightarrow V^C$, 记为 E_C^R , 表示作战进程中, 指挥决策节点自身整编侦察节点收集的情报并直接进行决策的过程, 适用于信息量较少, 指挥层次

较低的作战进程。

4) 整编上报边 $V^P \rightarrow V^C$, 记为 E_C^P , 表示作战进程中, 信息整编节点将过滤、筛选整合后的有效作战情报上报至指挥决策节点, 供指挥官决策的过程。

5) 指令下达边 $V_1^C \rightarrow V_2^C$, 记为 E_{C2}^{C1} , 两个指挥决策节点之间的信息流动, 表示作战进程中, 上级指挥决策节点向下级指挥决策节点下达作战命令, 由下级指挥决策节点根据自身编成, 将上级作战指令细化分配的过程。

6) 行动控制边 $V^C \rightarrow V^k$, 记为 E_k^C , 表示作战进程中, 指挥决策节点向编成内打击节点下达行动命令, 对所属作战区域目标进行杀伤的过程。

7) 信息反馈边 $V^C \rightarrow V^R$: 记为 E_R^C , 表示作战进程中, 指挥决策节点向侦察节点发送情报信息需求或要求侦察节点核实情报信息的过程。

1.4 杀伤网网络建模

信息化条件下, 跨域协同联合作战是作战的主要形式, 指挥体系按照作战指挥中心、作战群、作战分队的样式分布式展开。为确保杀伤网网络建模的科学客观性, 应根据上述实际情况抽象建模。根据复杂网络理论, 网络模型为节点和边的集合, 基于上述节点和边的抽象建模, 可进行网络的抽象建模。为确保网络抽象的规范化, 明确抽象规则如下:

规则 6 对单个节点或边的状态做无故障假设, 排除节点或边自身状态对网络特征属性的影响, 即认为节点的信息处理能力以及边的传输能力都是理想的。

规则 7 为不失一般性, 将网络中指挥决策节点抽象成上下两级节点。

根据上述规则, 网络的抽象化描述为

$$G = (V, E) \begin{cases} V = V^R \cup V^P \cup V^C \cup V^k \\ E = E_k^R \cup E_C^R \cup E_P^R \cup E_C^P \cup E_{C2}^{C1} \cup E_k^C \cup E_R^C \end{cases}$$

式中: G 表示网络模型。

1.5 杀伤网杀伤链建模

基于杀伤网网络模型, 根据杀伤链的概念内涵, 称由侦察节点到打击节点的链路为杀伤链。据此, 可进行杀伤链的抽象建模。为确保抽象的规范化, 明确抽象规则如下:

规则 8 不构成杀伤链的边为无效边。

规则 9 高级别指挥决策节点参与的杀伤链需信息整编节点预处理信息。

根据上述 9 项规则, 排除掉无效链路, 可从杀伤网中抽出 2 类反馈循环和 4 类无反馈杀伤链, 二者

相互组合共可构成 12 类杀伤链。其中 2 类反馈循环为

- 1) $V^R \rightarrow V^C \rightarrow V^R$, 简化的反馈循环, 记为 F_1 。
 - 2) $V^R \rightarrow V^P \rightarrow V^C \rightarrow V^R$, 常规反馈循环, 记为 F_2 。
- 4 类无反馈杀伤链分别为
- 1) $V^R \rightarrow V^K$, 侦攻一体杀伤链, 记为 C_1 。
 - 2) $V^R \rightarrow V^C \rightarrow V^K$, 简化杀伤链, 记为 C_2 。
 - 3) $V^R \rightarrow V^P \rightarrow V^C \rightarrow V^K$, 常规杀伤链, 记为 C_3 。
 - 4) $V^R \rightarrow V^P \rightarrow V_2^C \rightarrow V_1^C \rightarrow V^K$, 重要目标杀伤链 C_4 ,

包含两个指挥决策节点之间的信息流动。

在真实作战进程中, 由侦测节点收集的情报信息往往是不完全的或需进一步确认的, 指挥决策节点在获取情报信息后, 将会综合当前所有情报并向侦测节点提出情报需求或者要求侦测节点核实情报信息。因此, 具有指挥决策节点反馈循环的杀伤链是作战过程中最为常用的杀伤链。第 1 类反馈循环 F_1 与 4 类无反馈杀伤链组合构成 4 类杀伤链为

- 1) $V^R \rightarrow V^C \rightarrow V^R \rightarrow V^K$, 记为 $F_1 C_1$ 。
- 2) $V^R \rightarrow V^C \rightarrow V^R \rightarrow V^C \rightarrow V^K$, 记为 $F_1 C_2$ 。
- 3) $V^R \rightarrow V^C \rightarrow V^R \rightarrow V^P \rightarrow V^C \rightarrow V^K$, 记为 $F_1 C_3$ 。
- 4) $V^R \rightarrow V^C \rightarrow V^R \rightarrow V^P \rightarrow V_2^C \rightarrow V_1^C \rightarrow V^K$, 记为 $F_1 C_4$ 。

第 2 类反馈循环 F_2 与 4 类无反馈杀伤链组合构成 4 类杀伤链为

- 1) $V^R \rightarrow V^P \rightarrow V^C \rightarrow V^R \rightarrow V^K$, 记为 $F_2 C_1$ 。
- 2) $V^R \rightarrow V^P \rightarrow V^C \rightarrow V^R \rightarrow V^C \rightarrow V^K$, 记为 $F_2 C_2$ 。
- 3) $V^R \rightarrow V^P \rightarrow V^C \rightarrow V^R \rightarrow V^P \rightarrow V^C \rightarrow V^K$, 记为 $F_2 C_3$ 。
- 4) $V^R \rightarrow V^P \rightarrow V^C \rightarrow V^R \rightarrow V^P \rightarrow V_2^C \rightarrow V_1^C \rightarrow V^K$, 记为 $F_2 C_4$ 。

2 关键节点重要性评估方法

在多域协同作战的杀伤网作战模式下, 若能针对性破坏敌杀伤网关键节点, 降效敌杀伤网作战效能, 则可通过杀伤网的级联反应产生跨域作战影响, 制胜联合作战^[21]。杀伤网中所有杀伤链的杀伤能力代表整个杀伤体系的作战能力, 所有杀伤链的平均循环速率代表整个杀伤体系的循环效率, 因此, 可用所有杀伤链的杀伤能力及平均循环速率表征杀伤网的作战效能。据此, 本文采用节点删除法, 在删除杀伤网中节点后, 基于杀伤网循环效率及作战能力的下降程度构建节点重要性评估指标, 衡量节点的重要性。

2.1 杀伤网作战能力

杀伤网作战能力是指可对敌方作战体系造成损

伤的程 度, 通常用作战目标的价值及对作战目标造成的毁伤程度综合衡量。

根据复杂网络理论, 杀伤网的作战能力与网中杀伤链的数量正相关, 即杀伤链越多, 表明在作战中针对目标可采取的杀伤方式越多, 对目标的杀伤效果越能得到保证, 越能形成不对称作战优势, 杀伤网的作战能力则越强。

依据网络的抽象模型, 用 $| \cdot |$ 表示集合元素的个数, 可知网络中节点个数 N 为

$$N = |V^R| + |V^P| + |V^C| + |V^K| \quad (1)$$

为方便表示, 将集合 V 中节点按照 $\{V^R, V^P, V^C, V^K\}$ 的顺序进行排列。

令 A 表示杀伤网中正向边邻接矩阵, A^R 表示由 $E = E_K^R \cup E_C^R \cup E_P^R$ 参与构成的正向边邻接矩阵, 矩阵中元素为

$$a_{ij}^R = \begin{cases} 1, & v_i \rightarrow v_j \in E_K^R \cup E_P^R \cup E_C^R \\ 0, & v_i \rightarrow v_j \notin E_K^R \cup E_P^R \cup E_C^R \end{cases} \quad (2)$$

式中: $1 \leq i, j \leq N$ 。

同理, 可得到由 E_C^P 构成的正向边邻接矩阵 A^P , 矩阵中的元素为

$$a_{ij}^P = \begin{cases} 1, & v_i \rightarrow v_j \in E_C^P \\ 0, & v_i \rightarrow v_j \notin E_C^P \end{cases} \quad (3)$$

由 $E_{C2}^{C1} \cup E_K^C$ 构成的正向边邻接矩阵 A^C , 矩阵中的元素为

$$a_{ij}^C = \begin{cases} 1, & v_i \rightarrow v_j \in E_{C2}^{C1} \cup E_K^C \\ 0, & v_i \rightarrow v_j \notin E_{C2}^{C1} \cup E_K^C \end{cases} \quad (4)$$

令 B 表示杀伤网中反馈边邻接矩阵, B^C 表示由反馈边 E_R^C 构成的反馈边邻接矩阵, 矩阵中的元素为

$$b_{ij}^C = \begin{cases} 1, & v_i \rightarrow v_j \in E_R^C \\ 0, & v_i \rightarrow v_j \notin E_R^C \end{cases} \quad (5)$$

据此, 令

$$S^1 = A^R \quad (6)$$

$$S^2 = A^R A^C \quad (7)$$

$$S^3 = A^R A^P A^C \quad (8)$$

$$S^4 = A^R A^P A^C A^C \quad (9)$$

$$S^5 = A^R B^C A^R \quad (10)$$

$$S^6 = A^R B^C A^R A^C \quad (11)$$

$$S^7 = A^R B^C A^R A^P A^C \quad (12)$$

$$S^8 = A^R B^C A^R A^P A^C A^C \quad (13)$$

$$S^9 = A^R A^P B^C A^R \quad (14)$$

$$S^{10} = A^R A^P B^C A^R A^C \quad (15)$$

$$S^{11} = A^R A^P B^C A^R A^P A^C \quad (16)$$

$$S^{12} = A^R A^P B^C A^R A^P A^C A^C \quad (17)$$

S^k 中的元素 s_{ij}^k 分别表示侦测节点 i 与打击节点 j 之间存在杀伤链 C_1 链、 C_2 链、 C_3 链、 C_4 链、 $F_1 C_1$ 链、 $F_1 C_2$ 链、 $F_1 C_3$ 链、 $F_1 C_4$ 链、 $F_2 C_1$ 链、 $F_2 C_2$ 链、 $F_2 C_3$ 链、 $F_2 C_4$ 链的数量, $i \in [1, |V^R|]$, $j \in (|V^R| + |V^P| + |V^C|, N]$, $k = 1, 2, \dots, 12$ 。令 l_k 分别表示杀伤网中存在 12 类杀伤链的总量, L 表示所有杀伤链的总量, 则

$$l_k = \sum_{i=1}^{|V^R|} \sum_{j=|V^R|+|V^P|+|V^C|+1}^N s_{ij}^k \quad (18)$$

$$L = \sum_{k=1}^{12} l_k \quad (19)$$

整个作战进程中, 杀伤网中不同杀伤链针对战场中不同作战目标, 实现对战场上作战目标的全覆盖。不同种类的杀伤链针对的作战目标不同, 其可对敌方作战体系造成的杀伤效果也不相同。通常而言, 有上级指挥决策节点参与的杀伤链, 其所针对的作战目标蕴含较大作战价值, 相应杀伤链对敌方作战体系的杀伤能力强; 需要指挥决策节点向侦测节点反馈的杀伤链, 其所针对的作战目标较为重要, 需要确认情报或增加情报来源, 相应杀伤链对敌方作战体系也具备较强的杀伤能力。因此, 不同杀伤链的杀伤能力不同, 可根据杀伤链的种类赋予不同的权值系数。令

$$Ca = \sum_{k=1}^{12} w_k l_k \quad (20)$$

式中: Ca 为杀伤网的作战能力; w_k 为不同杀伤链的权值系数, 战时由指挥员根据作战需要赋值、作战演练时由领域专家根据经验赋值。

2.2 杀伤网循环效率

杀伤网的循环效率表征作战情报在杀伤网中的处理速度。具有相同作战能力的杀伤网, 其循环效率越快, 杀伤链行动效率越高, 则能抢占作战先机, 制胜作战。因此, 杀伤网的作战效能除与作战能力相关外, 也与杀伤网的循环效率相关。在复杂网络理论中, 情报处理的速度可由情报经过的节点或边的数量线性表示, 虽然在规则 5 中规定信息流以光速传播, 但节点对情报的处理需要消耗时间, 同时随着杀伤链边数的增加, 情报失真的概率也逐渐增大。因此, 并不妨碍杀伤网循环效率用情报经过杀伤链节点或边的数量表示。令

$$Eff = \frac{L}{\sum_{k=1}^{12} l_k \cdot d_k} \quad (21)$$

式中: Eff 为杀伤网循环效率; d_k 为不同杀伤链所包含边的数量, 体现情报处理的整个流程。

2.3 节点重要性

杀伤网节点的重要性应从节点对杀伤网作战效能的影响考量, 换言之, 通过杀伤网的作战能力和循环效率两方面综合评价节点的重要性。基于节点删除法, 用节点删除后杀伤网作战能力及循环效率的下降程度构建节点重要性评估指标 In , 即

$$In = \left(1 - \frac{Ca'}{Ca} \cdot \frac{Eff'}{Eff}\right) \times 100\% \quad (22)$$

式中: Ca' 表示节点删除后杀伤网的作战能力; Eff' 表示节点删除后杀伤网的循环效率。

根据式 (22), 节点删除后, 若杀伤网的作战能力下降越大, 则 Ca'/Ca 越小, 若杀伤网的循环效率下降越明显, 则 Eff'/Eff 越小, In 值就越大, 所删除节点的重要性就越高。对于敌方杀伤网而言, 是我方破袭敌方杀伤网的关键目标。

3 示例验证与分析

3.1 验证分析

以某联合作战演练想定中敌方杀伤网为例, 验证本文所提评估方法的有效性, 网络模型如图 2 所示。

敌方杀伤网拓扑结构由 1 个联合作战指挥中心、2 个作战群、4 个信息整编机构、11 个作战分队 (含 2 个一体化作战指挥平台, 按规则 2 将其分为侦测和打击两类节点) 共 4 类 18 个节点及它们之间链接关系构成, 将网络模型置于 Gephi 软件中可视化显示, 结果如图 3 所示, 图中 R|K|1、R2、R3、R4、R5、R6、R|K|7 分别代表 $V_1^R (V_1^K)$ 、 V_2^R 、 V_3^R 、 V_4^R 、 V_5^R 、 V_6^R 、 $V_7^R (V_6^K)$, P1、P2、P3、P4 分别代表 V_1^P 、 V_2^P 、 V_3^P 、 V_4^P , C1、C2、C3 分别代表 V_1^C 、 V_2^C 、 V_3^C , K2、K3、K4、K5 分别代表 V_2^K 、 V_3^K 、 V_4^K 、 V_5^K , 下文同。

由本文设计指标完成对敌杀伤网节点重要性评估, 首先完成如下准备工作。

1) 将节点集合 V 中节点按照 $\{V^R, V^P, V^C, V^K\}$ 的顺序进行排列, 即整个节点集按照侦测节点 $\{V_1^R (V_1^K), V_2^R, V_3^R, V_4^R, V_5^R, V_6^R, V_7^R (V_6^K)\}$ 、信息整编节点 $\{V_1^P, V_2^P, V_3^P, V_4^P\}$ 、指挥决策节点 $\{V_1^C, V_2^C, V_3^C\}$ 、打击节点 $\{V_2^K, V_3^K, V_4^K, V_5^K\}$ 的顺序标识成节点 1 ~ 18。

2) 为区分杀伤网中不同杀伤链的杀伤能力, 根据作战演练评估组评估专家意见, 为 w_k 赋值 $\{1.0, 1.2, 1.2^2, 1.2^3, 1.2, 1.2^2, 1.2^3, 1.2^4, 1.2^2, 1.2^3,$

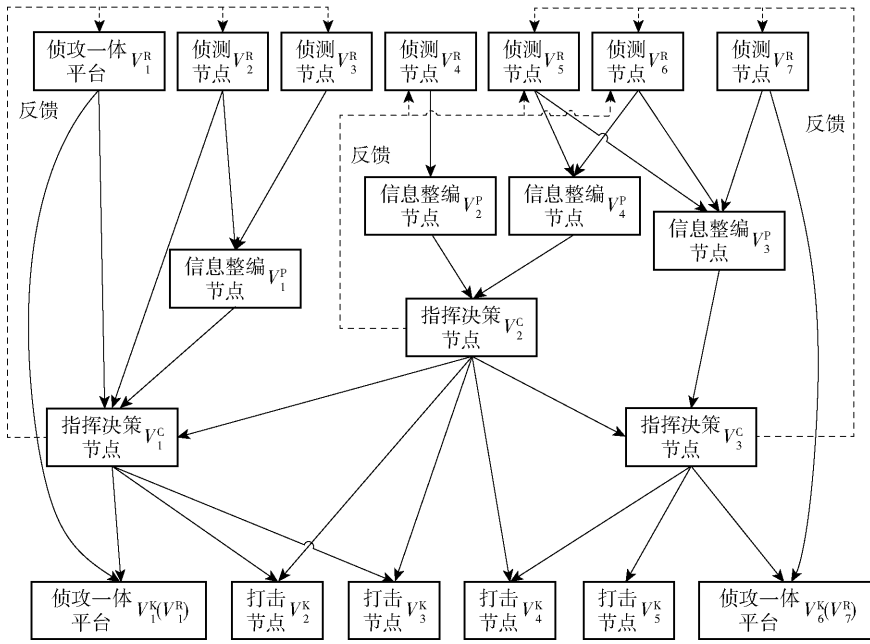


图 2 杀伤网络抽象模型

Fig. 2 Abstract model of kill network

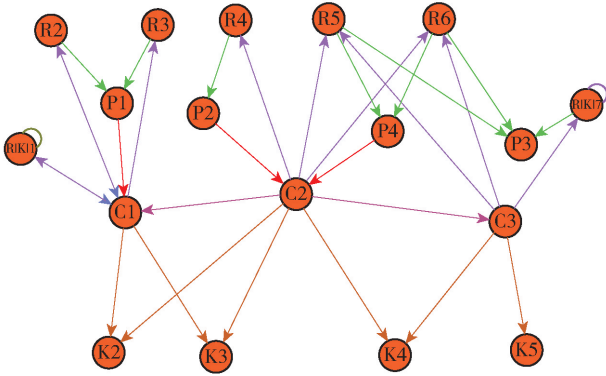


图 3 杀伤网络可视化模型

Fig. 3 Visual model of kill network

该类节点的摧毁而丧失作用。杀伤网中仅存有一些杀伤能力小、循环速率快的杀伤链,如侦测一体杀伤链 C_1 ,会使剩余杀伤链的平均循环速率比完整杀伤网的循环速率要快,因此出现了表 1 中循环效率不降反增的现象。以指挥决策节点 V_2^C 为例,指挥决策节点 V_2^C 被摧毁后的杀伤网如图 4 所示。

表 1 节点重要性评估结果

Table 1 Evaluation results of node importance %

节点	Ca'/Ca	Eff'/Eff	In
1	81.54	96.93	20.96
2	87.34	96.83	15.43
3	92.20	99.13	8.61
4	77.04	102.73	20.86
5	53.90	108.42	41.57
6	53.90	108.42	41.57
7	75.08	101.73	23.62
8	86.54	97.96	15.22
9	77.04	102.73	20.86
10	58.96	105.21	37.97
11	39.45	117.13	53.79
12	59.86	97.40	41.70
13	31.11	120.59	62.49
14	44.66	110.26	50.76
15	80.80	99.44	19.65
16	80.80	99.44	19.65
17	80.41	101.01	18.77
18	86.53	101.06	12.55

$1.2^4, 1.2^5\}$, 为 d_k 赋值 $\{1, 2, 3, 4, 3, 4, 5, 6, 4, 5, 6, 7\}$ 。

3) 仿真计算。经计算,结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,杀伤网中部分关键节点一旦被摧毁,杀伤网作战效能呈断崖式下滑,较为显著的节点有 $V_2^C, V_4^P, V_3^C, V_1^C, V_6^R, V_5^R, V_3^P$, 这些节点对杀伤网作战效能的影响都在 35% 以上,表明这些节点对应的作战实体一旦被针对,大量的杀伤链将被破坏,杀伤网作战效能骤降。同时可以看到,杀伤网中部分节点被摧毁,整个杀伤网的循环效率不降反增,典型的有 $V_2^C, V_4^P, V_3^C, V_5^R, V_6^R, V_3^P, V_2^P$ 。分析可知,该类节点对应的作战实体一旦被针对,整个杀伤体系将被破坏,整张杀伤网将被打散成几个不相联系的小杀伤网或者被打散成单独的杀伤链,甚至部分节点或链路会因

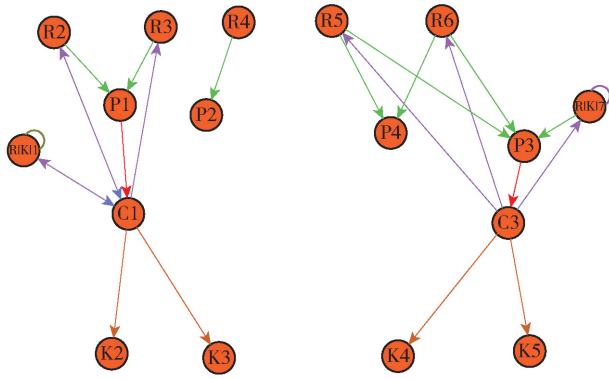


图4 节点 V_2^c 被摧毁后的杀伤网

Fig. 4 Kill network after destroying node V_2^c

从图4中可以看出,若 V_2^c 被摧毁,则除与其直接相连的链接失效外,信息整编节点 V_2^c 、 V_4^p 以及与二者直接相连的链接也将失效,甚至包括 V_4^r 都将丧失作用,整个杀伤网被破坏成两个子网。剩余杀伤链的杀伤能力只有原杀伤网的31.1%,大量针对重要目标且需要指挥决策节点 V_2^c 反馈的杀伤链失效,剩余杀伤链因杀伤能力小、情报流转路径短而使其平均循环效率为原杀伤网的120.6%。但是综合来看,指挥决策节点 V_2^c 的摧毁对于整个杀伤网而言是致命的。

综上所述,只有在保证杀伤网作战能力的基础上提高循环效率才具有意义。设想最极端情况:整个战场中全部都是侦攻一体杀伤链 C_1 ,循环速率达到最大,但却不具备杀伤敌关键目标的能力,同样无法获取战场制权。因此,本文通过作战能力和循环效率两项指标综合评估节点的重要性是科学的、合理的、有效的。综合来看,重要性靠前的节点有 V_2^c 、 V_4^p 、 V_3^c 、 V_1^c 、 V_5^r 、 V_6^r 、 V_3^p ,所有节点重要性排序如图5所示。

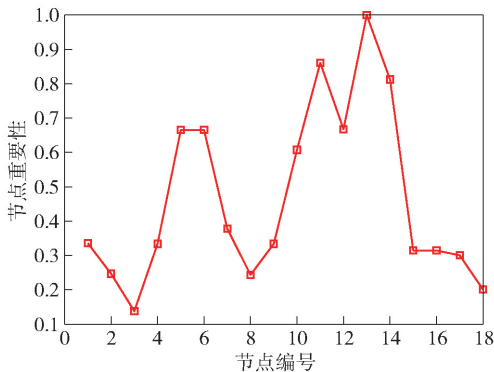


图5 杀伤网网络节点重要性

Fig. 5 The importance of kill network nodes

由仿真结果更进一步地分析:本文构想的敌杀

伤网中含有两层指挥机构,上层指挥决策节点 V_2^c 的 In 值为62.49%,明显高于下层指挥决策节点 V_1^c 、 V_3^c 的 In 值,彰显出高层指挥决策节点的军事价值。为疏解指挥决策节点 V_2^c 的指挥压力,采用任务式指挥的方式赋予指挥决策节点 V_1^c 、 V_3^c 独立指挥的权力,可以看到,若采用集中式指挥的方式,上层指挥决策节点收回指挥权力,将进一步拔高上层指挥决策节点的重要性。由式(21)可知,整个杀伤体系的循环速率也将下降,杀伤网的抗毁性将进一步降低。此外,杀伤链的网络化虽然增强了杀伤体系的作战效能和鲁棒性,但“撒手锏”武器的重要作用仍然能够凸显出来,例如侦测节点 V_5^r 、 V_6^r 的 In 值明显高于其他侦测节点,表明网络化增加了体系的作战效能及鲁棒性,但并未改变节点的重要程度。

3.2 对比分析

依托构建的杀伤网网络模型,采用度中心性、介数中心性、接近中心性、PageRank、特征中心性^[22]等复杂网络节点重要性评估方法评估网络模型的节点,与本文所提评估方法进行对比分析。对比分析主要包括两部分,一是模型对比,二是仿真结果对比。

3.2.1 模型对比

传统基于复杂网络理论的建模方法与本文基于OODA环理论的建模方法最大的区别在于是否区分节点的功能。本文构建的杀伤网中,一旦同类节点全被摧毁,将无法构成完整的杀伤链,整个杀伤网将失去作战能力,例如所有打击节点全被摧毁,则无法实现对作战目标的有效杀伤。而传统基于复杂网络理论的建模方法,即使同类节点全被摧毁,而网络中大部分节点和边仍然存在,节点的度 D 、介数中心度 C_b 、接近中心度 C_c 、PageRank 值 Pr 、特征向量中心度 C_e 等复杂网络指标仍然存在,如图6所示。

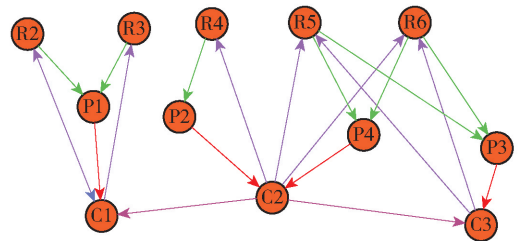


图6 打击节点被摧毁后的杀伤网

Fig. 6 Kill network after destroying the action nodes

在真实作战场景下,若打击力量不复存在,则无法有效打击作战目标,换言之,整个作战体系将失去作战能力。此外,本文采用的建模方法还能

客观反映网络的级联反应,例如本文所提指挥决策节点 V_2^C 失效,节点 V_2^P, V_4^P, V_4^R 因杀伤链之间的连锁反应也随之失效。由此可见本文建模理论更加符合实际。

3.2.2 仿真结果对比

用所建杀伤网网络模型中各节点的度 D 、介数中心度 Cb 、接近中心度 Cc 、PageRank 值 Pr 、特征向量中心度 Ce 五项指标分别评估网络节点的重要性,评估结果表 2。

表 2 节点重要性评估指标

Table 2 Evaluation indexes of node importance

节点	D	Cb	Cc	Pr	Ce
1	5	0	0.5	0.027	0.787
2	3	5.5	0.6	0.027	0.427
3	2	5.5	0.4	0.027	0.427
4	2	7	0.301	0.023	0.145
5	4	21.83	0.333	0.033	0.415
6	4	21.83	0.333	0.033	0.415
7	5	0.33	0.190	0.024	1
8	3	5	0.545	0.049	0.403
9	2	15	0.410	0.034	0.084
10	4	20	0.229	0.052	0.880
11	3	56	0.410	0.042	0.420
12	10	54	0.857	0.088	0.898
13	10	95	0.64	0.079	0.266
14	8	36	0.285	0.068	0.559
15	2	0	0	0.035	0.572
16	2	0	0	0.035	0.572
17	2	0	0	0.033	0.415
18	1	0	0	0.024	0.270

整理表 2 中数据,不同指标求得的重要性排序靠前的节点情况如表 3 所示。

表 3 不同指标节点重要性排序

Table 3 Ranking of the importance of nodes under different indexes

指标	节点重要性排序(部分)
In	$V_2^C, V_4^P, V_3^C, V_1^C, V_5^R, V_6^R, V_3^P$
D	$V_1^C, V_2^C, V_3^C, V_1^R, V_7^R, V_5^R, V_6^R$
Cb	$V_2^C, V_1^C, V_4^P, V_3^C, V_3^P, V_5^R, V_6^R$
Cc	$V_1^C, V_2^C, V_2^R, V_1^P, V_1^R, V_3^C, V_3^R$
Pr	$V_1^C, V_2^C, V_3^C, V_1^P, V_4^P, V_2^R, V_3^R$
Ce	$V_1^R, V_1^C, V_7^R, V_3^P, V_2^R, V_3^R, V_3^R$

从表 3 中知,只有本文构建的节点重要性评估指标与介数中心度将高级指挥决策节点 V_2^C 置于最重要的位置,而根据图 3 和 3.1 节分析,高级指挥决策节点在本文所建杀伤网中处于枢纽地位。因此,通过杀伤网的度 D 、接近中心度 Cc 、PageRank 值 Pr 、特征向量中心度 Ce 评估节点重要性的精度相对较低,经最大值归一化处理评估指标值之间的对比如图 7 所示。

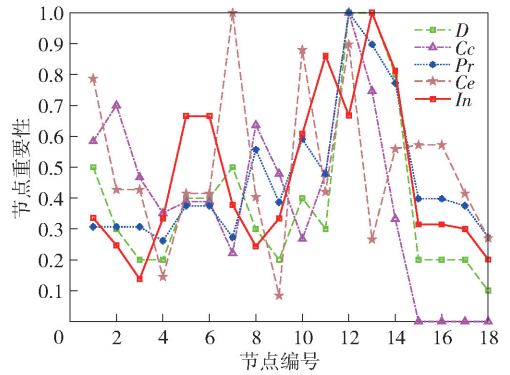


图 7 评估结果对比 I

Fig. 7 Comparison of evaluation results I

介数中心度与本文构建评估指标的有效性可以通过对比指挥决策节点 V_1^C 与指挥决策节点 V_3^C 在杀伤网模型中的重要性进行分析验证。由构建的网络模型可知,指挥决策节点 V_3^C 与上级指挥决策节点 V_2^C 具有更紧密的联系,即与上级指挥决策节点 V_2^C 有关的侦察情报反馈可以交由指挥决策节点 V_3^C 处理。换言之,指挥决策节点 V_3^C 的重要性比指挥决策节点 V_1^C 更加靠前,这在联合作战演练想定中也可以得到印证。在杀伤网网络模型的基础上,分别删除指挥决策节点 V_1^C 、指挥决策节点 V_3^C ,则可分别得到杀伤网网络模型,如图 8、图 9 所示。经上述分析验证,本文所构建节点重要性评估值 In 较介数中心度 Cb 具有更高的评估精度,二者之间的对比如图 10 所示。

理论而言,对节点抽象建模的规则 1 类似于节点收缩法,是对同类型作战实体的聚合建模,例如将担负杀伤任务的无人机蜂群建模成一个打击节点。如文献[23]中所述,蜂群内部是以自组网的形式交叉连接,具有很强的鲁棒性,单个作战实体与整个节点的重要性呈非线性相关,并且 In 值的计算具有扩展性,节点数量的增加不影响计算结果的合理性。此外,通览计算结果,去中心化的作战模式虽然降低了单个节点在同类节点中的重要性,但是指挥决策节点在整个打击体系中仍然处于中心地位。

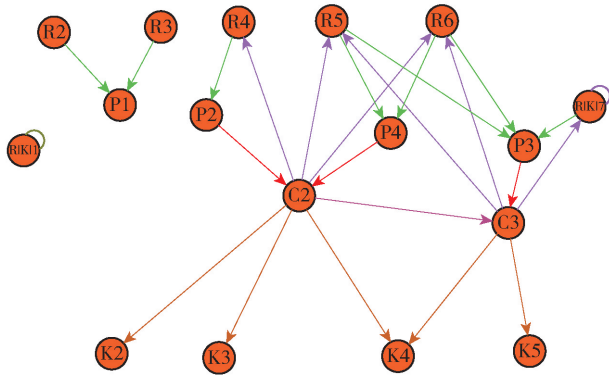


图 8 节点 V_1^c 被摧毁后的杀伤网

Fig. 8 Kill network after destroying node V_1^c

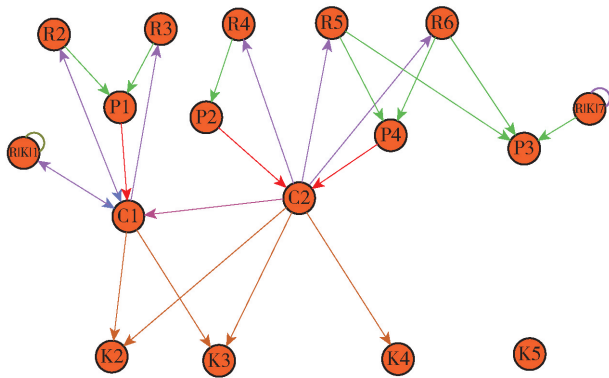


图 9 节点 V_3^c 被摧毁后的杀伤网

Fig. 9 Kill network after destroying node V_3^c

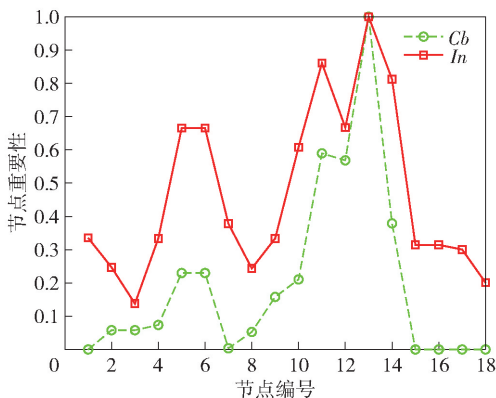


图 10 评估结果对比 II

Fig. 10 Comparison of evaluation results II

从古至今,由国外到国内,不论任何时期的战争,指挥机构都因指挥决策权而处于作战核心枢纽地位,这是军事理论的共识。由图 5 可见,本文方法将指挥决策节点 V_2^c 、 V_3^c 、 V_1^c 的重要性凸显了出来,符合军事理论基本认知,这也间接证明了方法的有效性。然而,对杀伤网重要节点的评估绝不能仅限于验证指挥决策节点的重要性,还要识别出与指挥决

策节点重要性相当的关键节点。在作战进程中,作战双方都能充分认识到指挥机构的重要作用,并投入充足的防护资源加强对指挥机构的防护,因此,指挥机构虽然价值重大,但“斩首”行动却因针对性防护而不易奏效。然而,作战双方因缺乏有效的评估手段而对于那些非指挥机构的关键节点疏于防范,这也就成了破坏敌方杀伤网的关键点。识别敌方杀伤网的关键节点,针对性破袭敌防御力量薄弱的杀伤网脆弱点,瘫痪敌杀伤网,这将成为未来战争费效比较高的作战策略。因此,本文所提评估杀伤网节点重要性的方法能够对指挥机构制定作战策略起到重要的辅助作用。

4 结论

本文提出基于 OODA 环理论和杀伤链作战概念,按照作战力量及平台担任的功能及信息流转的过程建模,克服传统评估方法存在计算冗余的问题;从杀伤网的杀伤能力和循环效率两个维度评估节点的重要性,客观有效地识别出杀伤网中的关键节点。以某联合作战演练对敌方杀伤网的构想为例,实现了对网络节点重要性的评估和排序。通过对计算结果的对比分析,既佐证了方法的有效性,又提出了针对性的作战策略,为本文方法在作战筹划中的具体应用奠定了理论基础。

本文评估方法除可用于节点重要性评估以外,还可以对比不同杀伤网的鲁棒性。此外,对杀伤链重要性的评估以及在考虑打击资源、打击难度、打击成本的情况下,通过评估打击行动的费效比进行打击目标的策略选择都是下一步需要研究解决的问题。

参考文献 (References)

[1] 王锋,许梁煌,郑玉芳. 基于 m 阶邻居节点的复杂网络关键节点评估[J]. 福州大学学报(自然科学版),2019,47(2):237 - 243.
WANG F, XU L H, ZHENG Y F. Critical network node evaluation based on m -order neighbor nodes[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2019, 47(2): 237 - 243. (in Chinese)

[2] 魏青,沈艳丽,肖桃顺,等. 基于复杂网络的作战体系要素重要度评估方法[J]. 中国电子科学研究院学报,2020,15(11):1075 - 1079.
WEI Q, SHEN Y L, XIAO T S, et al. The Importance of elements of combat systems based on complex networks[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(11):1075 - 1079. (in Chinese)

- [3] WANG Y, DI Z R, FAN Y. Identifying and characterizing nodes important to community structure using the spectrum of the graph [J]. *PLoS ONE*, 2011, 6(11): e27418.
- [4] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(11): 79-84.
TAN Y J, WU J, DENG H Z. Evaluation method for node importance based on node contraction in complex networks [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2006, 26(11): 79-84. (in Chinese)
- [5] 周璇, 张凤鸣, 李克武, 等. 利用重要度评价矩阵确定复杂网络关键节点[J]. *物理学报*, 2012, 61(5): 1-7.
ZHOU X, ZHANG F M, LI K W, et al. Finding vital node by node importance evaluation matrix in complex networks [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 1-7. (in Chinese)
- [6] 王梓行, 姜大立, 漆磊, 等. 基于冗余度的复杂网络抗毁性及节点重要度评估模型[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2020, 17(3): 78-85.
WANG Z H, JIANG D L, QI L, et al. Complex network invulnerability and node importance evaluation model based on redundancy [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2020, 17(3): 78-85. (in Chinese)
- [7] 张宪立, 唐建新. 一种新的复杂网络节点重要性评估方法[J]. *计算机工程*, 2021, 47(2): 139-145.
ZHANG X L, TANG J X. A novel evaluation method of node importance in complex network [J]. *Computer Engineering*, 2021, 47(2): 139-145. (in Chinese)
- [8] 王超, 郭基联, 符凌云. 基于拓扑势的作战体系网络节点重要度评估方法[J]. *兵工学报*, 2020, 41(8): 1658-1664.
WANG C, GUO J L, FU L Y. Research on evaluation method of node importance of combat system-of-systems network based on topological potential [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(8): 1658-1664. (in Chinese)
- [9] 张鑫伟, 李亚雄, 赵久奋, 等. 基于复杂网络理论的熵值法军事目标价值评估[J]. *指挥控制与仿真*, 2021, 43(6): 53-57.
ZHANG X W, LI Y X, ZHAO J F, et al. Evaluation method of military target based on complex network theory and entropy method [J]. *Command Control & Simulation*, 2021, 43(6): 53-57. (in Chinese)
- [10] 杨坪生, 王钰, 杨洋, 等. 基于作战环的不同节点攻击策略下的作战网络效能评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(11): 3220-3228.
YANG W S, WANG Y, YANG Y, et al. Combat network effectiveness evaluation under different node attack strategies based on operation loop [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(11): 3220-3228. (in Chinese)
- [11] HUANG Y Y. Modeling and simulation method of the emergency response systems based on OODA [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2015, 89: 527-540.
- [12] GRANT T. Unifying planning and control using an OODA-based architecture [C] // *Proceedings of SAICSIT 2005*. White River, South African; South African Institute for Computer Scientists and Information Technologists, 2005: 111-113.
- [13] BILTGEN P T. A methodology for capability-based technology evaluation for systems-of-systems [D]. Atlanta, GA, US: Georgia Institute of Technology, 2007: 129-142.
- [14] MARZOLF G S. Time-critical targeting: predictive versus reactionary methods, analysis for the future [D]. Maxwell, AL, US: Air University, 2004: 8-9.
- [15] WICKS M. Cognitive radar: a way forward [C] // *Proceedings of IEEE RadarCon (RADAR)*. Kansas City, MO, US: IEEE, 2011: 012-017.
- [16] SMITH R M. Using kill-chain analysis to develop surface ship CONOPs to defend against anti-ship cruise missiles [D]. Monterey, CA, US: Naval Postgraduate School, 2010: 22-24.
- [17] 杨争争, 白浩, 侯勇. 陆战场杀伤网模型与资源优化初探[J]. *火炮发射与控制学报*, 2022(5): 49-53, 71.
YANG Z Z, BAI H, HOU Y. Preliminary exploration on a land battlefield killweb model and resource optimization [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2022(5): 49-53, 71. (in Chinese)
- [18] 郭雷平, 段文博, 刘宇, 等. 基于OODA环的合成部队光电装备作战效能评估[J]. *兵工学报*, 2022, 43(1): 177-182.
GUO L P, DUAN W B, LIU Y, et al. Operational effectiveness evaluation of optoelectronic equipment for combined arms based on OODA loop [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(1): 177-182. (in Chinese)
- [19] 陈清霖, 田鸿堂, 王鹏, 等. 基于“OODA”环的分布式协同作战武器编配方案[J]. *兵工学报*, 2021, 42(8): 1780-1788.
CHEN Q L, TIAN H T, WANG P, et al. A Collocation scheme of distributed cooperative operational weapons based on OODA loop [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(8): 1780-1788. (in Chinese)
- [20] BOYD J R. The essence of winning and losing [DB/OL]. (2016-05-21) [2022-07-18]. <https://www.docin.com/p-1589685626.html>.
- [21] 王耀祖, 尚柏林, 宋笔锋, 等. 基于杀伤链的作战体系网络关键节点识别方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(3): 736-744.
WANG Y Z, SHANG B L, SONG B F, et al. Identification method of key node in operational system-of-systems network based on kill chain [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(3): 736-744. (in Chinese)
- [22] 秦长江, 吴克宇, 成清, 等. 基于杀伤网贡献率的动态体系节点重要度评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(6): 1732-1742.
QING C J, WU K Y, CHENG Q, et al. Node importance evaluation in dynamic combat system based on kill-web contribution rate [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(6): 1732-1742. (in Chinese)
- [23] 陈晔, 范铭楷, 李泽宏, 等. 蜂群无人机的网络鲁棒性设计[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(11): 2633-2640.
CHEN W, FAN M K, LI Z H, et al. Design of network robustness for drone swarm system [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(11): 2633-2640. (in Chinese)