

9-15-2024

## Research on System-of-systems Confrontation Simulation Method Based on Operation Loops

Shan Zhong

*The 1st Research Department, 28th Research Institute of China Electronics Technology Corporation,  
Nanjing 210001, China*

Yesheng Zhu

*The 1st Research Department, 28th Research Institute of China Electronics Technology Corporation,  
Nanjing 210001, China*

Menglu Zhou

*The 1st Research Department, 28th Research Institute of China Electronics Technology Corporation,  
Nanjing 210001, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Research on System-of-systems Confrontation Simulation Method Based on Operation Loops

## Abstract

**Abstract:** In the field of modeling and analyzing capabilities for operation system-of-systems (SoS), traditional structured capability assessment models lack the analysis of the interaction between both rivals and armies in different roles. The system model based on operation loop theory can be combined with the relationship between sensor, decision-making, influence, and target nodes for system capability calculation, but the existing model is usually only suitable for static analysis and cannot be used for dynamic simulation of SoS confrontation. In order to solve the problems above, a SoS confrontation simulation method based on operation loops is proposed. It abstracts both rivals' SoS as confrontation network model, develops combat strategies, extracts executing operation loops from strategy steps and generates an edge execution sequence by decomposition and scheduling algorithm. After the execution of edge sequence with the concept of self-information, the combat efficacy and strike effectiveness of operation loops can be figured out to promote the evolution of the SoS. The benefits can be solved by combining the revenue function selected by strategic or campaign purpose, and combat result and losses of both rivals can be summarized. The simulation results prove that the method can simulate the combat process and derive the confrontation results relying on strategies and operation SoS. It's proved to be effective and feasible for operation SoS confrontation's simulation.

## Keywords

system-of-systems confrontation, operation loop, execution sequence of combat edges, operation strategy, self-information quantity

## Recommended Citation

Zhong Shan, Zhu Yesheng, Zhou Menglu. Research on System-of-systems Confrontation Simulation Method Based on Operation Loops[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2219-2230.

# 基于作战环的体系对抗仿真方法研究

钟山, 朱叶盛, 周梦璐

(中国电子科技集团公司第二十八研究所 第一研究部, 江苏 南京 210001)

**摘要:** 在作战体系能力的建模与分析领域, 传统的结构化能力评估模型缺乏对对抗双方以及体系中不同角色的部队之间相互作用的分析, 而基于作战环理论的体系模型虽然可以结合传感、决策、影响、目标类节点间的关系进行体系能力计算, 但通常只适用于静态分析, 不能用于体系对抗的动态仿真。提出一种基于作战环的体系对抗仿真方法, 将双方作战体系抽象为体系对抗网络模型, 通过设定作战策略, 抽取每个策略步骤将要实施的作战环。经过作战边的分解与调度算法生成作战边执行序列, 再引入自信息量的概念逐个执行作战边, 计算作战环的打击效能与毁伤效果, 推动双方作战体系的演化。结合根据战略战役目的选取的收益函数求解收益, 总结双方的胜负和作战损失。仿真结果表明: 该方法能够依托策略和作战体系模拟对抗的过程并推导出对抗结果, 具备用于体系对抗仿真的有效与可行性。

**关键词:** 体系对抗; 作战环; 作战边执行序列; 作战策略; 自信息量

中图分类号: TP319

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2024)09-2219-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0592

**引用格式:** 钟山, 朱叶盛, 周梦璐. 基于作战环的体系对抗仿真方法研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(9): 2219-2230.

**Reference format:** Zhong Shan, Zhu Yesheng, Zhou Menglu. Research on System-of-systems Confrontation Simulation Method Based on Operation Loops[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2219-2230.

## Research on System-of-systems Confrontation Simulation Method Based on Operation Loops

Zhong Shan, Zhu Yesheng, Zhou Menglu

(The 1st Research Department, 28th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Nanjing 210001, China)

**Abstract:** In the field of modeling and analyzing capabilities for operation system-of-systems (SoS), traditional structured capability assessment models lack the analysis of the interaction between both rivals and armies in different roles. The system model based on operation loop theory can be combined with the relationship between sensor, decision-making, influence, and target nodes for system capability calculation, but the existing model is usually only suitable for static analysis and cannot be used for dynamic simulation of SoS confrontation. In order to solve the problems above, a SoS confrontation simulation method based on operation loops is proposed. It abstracts both rivals' SoS as confrontation network model, develops combat strategies, extracts executing operation loops from strategy steps and generates an edge execution sequence by decomposition and scheduling algorithm. After the execution of edge sequence with the concept of self-information, the combat efficacy and strike effectiveness of operation loops can be figured out to promote the evolution of the SoS. The benefits can be solved by combining the revenue function selected by strategic or campaign purpose, and combat result and losses

收稿日期: 2023-05-19

修回日期: 2023-08-07

第一作者: 钟山(1990-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为作战模拟仿真。

of both rivals can be summarized. The simulation results prove that the method can simulate the combat process and derive the confrontation results relying on strategies and operation SoS. It's proved to be effective and feasible for operation SoS confrontation's simulation.

**Keywords:** system-of-systems confrontation; operation loop; execution sequence of combat edges; operation strategy; self-information quantity

## 0 引言

随着军事与信息技术的发展，体系作战成为现代战争的重要特征，体系对抗的仿真分析也成为了重要的课题。由于作战体系中，不同的部队分别扮演侦察探测、指控、火力打击、电子干扰、后装保障等不同角色，不同能力的高低均可对作战体系综合效能产生重大影响<sup>[1]</sup>，为此，通常建立作战体系的结构化能力模型，以层次分析法、QFD(quality function deployment)等综合评估的方法计算能力值<sup>[2-3]</sup>。这种方法适用于作战体系静态能力的数值计算，但没有对作战过程的模拟，也难以考量扮演不同角色的部队之间以及交战部队之间的相互作用，不能用于体系对抗时的仿真计算。

作战环作为一种作战体系网络化建模方法，充分考虑了作战体系中不同角色的相互关系，将作战力量抽象为“目标-传感-决策-影响”4类节点并顺连成环，构建出完整的作战过程<sup>[4]</sup>。文献[5-6]提出了基于作战环的体系效能与关键节点的计算方法；文献[7-8]提出了基于作战环的抗毁性评估方法，但这些方法仅针对其中一方的作战体系打击独立目标的场景，未考虑双方作战体系相互攻伐的情况。文献[9]提出了基于策略的体系对抗博弈建模方法，在已知双方各策略收益时，用博弈论选取最优策略，而对双方在既定策略下体系对抗模拟收益的计算方法未作深入分析。

本文提出一种基于作战环的体系对抗仿真方法：根据双方作战体系建立体系对抗网络模型重点分析模型中作战边效能的评估计算方法；定义双方作战策略，将静态模型转变为作战环序列，编排出具备时间信息的作战边执行序列；推演边

的执行来模拟对抗过程，计算双方最终收益。

## 1 体系对抗网络模型的建立

为了对体系对抗作仿真，需要基于作战环理论将双方的作战体系转换为体系对抗网络模型。

### 1.1 体系对抗网络模型的基本要素

定义红蓝双方参战时的作战体系对抗网络模型：

$$G = \{V, L, S^V, T^L, E^L\} \quad (1)$$

$V$ ：将双方作战单元按能力抽象为传感节点S、决策节点D、影响节点I中的一个或多个，形成节点集 $V$ 。此外，一方的作战单元都是另一方的目标节点 $T$ 。

$L$ ：根据对抗中节点间关系，建立有向作战边<sup>[10]</sup>，形成边集合 $L$ 。作战边根据首尾节点类型可分为 $T \rightarrow S$ 、 $S \rightarrow S$ 、 $S \rightarrow D$ 、 $D \rightarrow D$ 、 $D \rightarrow I$ 、 $I \rightarrow T$ 共6类，对应目标侦察、情报流转与融合、情报上报、指挥决策与信息流转、指令下达、目标打击6种关系。根据作战环理论，作战边按节点类型顺次连接可形成作战环，表明从 $T \rightarrow S$ 边开始到 $I \rightarrow T$ 边结束实施了一次作战并产生作战效果，如图1所示。

$S^V$ ：节点健康度集合，表示节点作战单元的实时状态相较计划中满状态的比值，取值范围为0~1。由于受到打击后节点健康度的下降会削弱节点的自身能力，因此，节点健康度应当被纳入打击效果的计算。

$T^L$ ：执行作战边时预估的消耗时间集合。

$E^L$ ：所有作战边的效能集合，表示当前战场环境中，作战边在首尾节点健康度为1的情况下对任务要求的满足程度，近似于作战边执行成功的概率，取值范围为0~1。

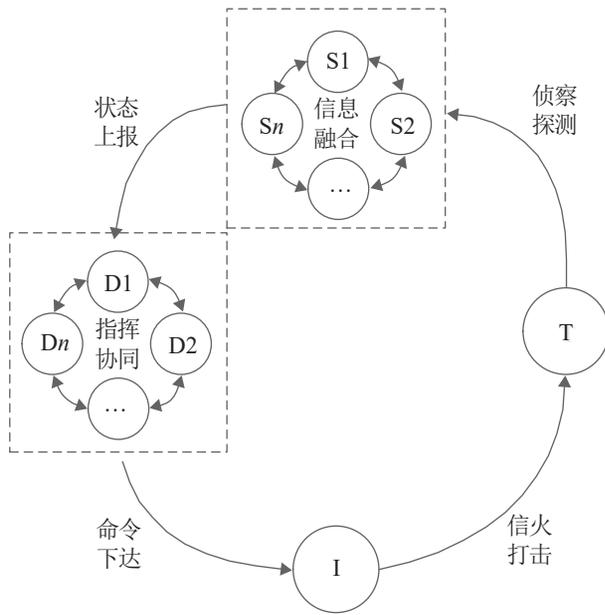


图1 作战环结构  
Fig. 1 Structural of operation loop

### 1.2 作战边效能计算建模

一条作战边代表作战过程的一个环节，其执行效果受相关节点性能和战场环境的影响。分析6类作战边对应的作战环节可知，作战边可分为三大类：T→S为目标侦察；I→T为目标打击；S→S、S→D、D→D、D→I的本质是信息处理<sup>[11]</sup>。对于不同大类的作战边，预置不同的性能评估指标、隶属函数和指标权重，建立体系对抗网络模型时即可求解作战边效能。设 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 为作战边预设的一组评估指标， $R_i(x)$ 为指标 $x_i$ 的隶属函数， $\omega_i$ 为指标 $x_i$ 的权重，则作战边的效能为

$$E_L = \prod_{i=1}^N (R_i(x_i))^{\omega_i} \quad (2)$$

作战场景千变万化，需要根据具体情况设定作战边性能指标、隶属函数和权重。例如，对于目标打击作战边，火炮打击、舰载无人机对舰打击、潜艇对舰打击、时敏目标打击的效能都有不同的计算方式<sup>[12-15]</sup>，不存在既通用又精确的评估模型。

### 1.3 目标侦察作战边建模

目标侦察的实施平台主要含侦察卫星、远程预警雷达和机动侦察平台等类型。以侦察机为例，影响作战边效能的性能指标主要包含最大探测距离、巡航时间、气象影响。三者权重设置为 $\omega_d = 0.6$ 、 $\omega_t = 0.2$ 、 $\omega_w = 0.2$ 。

最大探测距离取决于机动侦察平台的最大探测半径和目标节点的隐身能力。设 $r_{max}$ 为载荷最大探测半径，单位为km， $\lambda_h$ 为目标的隐身系数，取值范围0~1，能力越强越接近1。

$$d = \frac{e^{-\lambda_h} - e^{-1}}{1 - e^{-1}} r_{max} \quad (3)$$

隶属函数 $R_d(d)$ 根据作战边对探测距离的需求来设定，可设定为阶段型函数，假设需要最大探测范围为500 km，则隶属函数为

$$R_d(d) = \begin{cases} 1, & d \geq 500 \\ 0.9, & 300 \leq d < 500 \\ 0.8, & 200 \leq d < 300 \\ 0.7, & 100 \leq d < 200 \\ 0.5, & 0 < d < 100 \end{cases} \quad (4)$$

巡航时间为机动侦察平台本身的性能参数，若理想巡航时间为10 h，则巡航时间的隶属函数为

$$R_t(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 10 \\ 0.9, & 5 \leq t < 10 \\ 0.8, & 2 \leq t < 5 \\ 0.7, & 1 \leq t < 2 \\ 0.3, & 0 < t < 1 \end{cases} \quad (5)$$

气象影响对于侦察机而言，主要的环境影响来自气象，可以结合平台自身性能设定气象影响的隶属函数为

$$R_w(w) = \begin{cases} 1, & w = \text{晴朗} \\ 0.7, & w = \text{多云} \\ 0.5, & w = \text{阴或小雨} \\ 0, & w = \text{大暴雨等恶劣天气} \end{cases} \quad (6)$$

### 1.4 目标打击作战边建模

目标打击有多种形式，本文仅讨论传统的火力打击，火力打击效果主要由命中概率 $p_h$ 和命中

后的毁伤概率 $p_r$ 构成。二者隶属函数为 $R_h(p)=p$ 、 $R_r(p)=p$ ， $\omega_h=\omega_r=0.5$ ，建立指标体系如图2所示，其中，各项满足度的取值范围为0~1；各项能力的取值范围大于0。

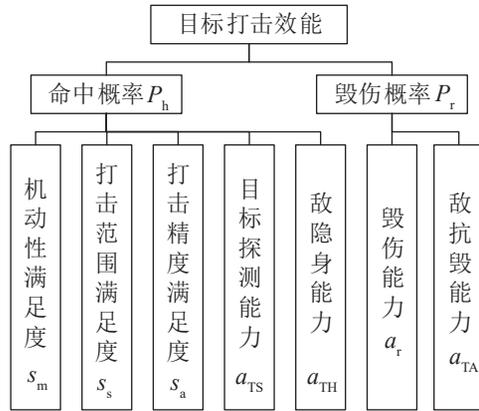


图2 目标打击效能指标体系图

Fig. 2 Indicator diagram of target strike efficient

$$p_h = s_m^{\omega_m} \times s_s^{\omega_s} \times s_a^{\omega_a} \times e^{-\omega_{TS} \frac{\lambda_s a_{TH}}{a_{TS}}} \quad (7)$$

$$p_r = e^{-\lambda_r \frac{a_{TA}}{a_r}} \quad (8)$$

式中： $\lambda_s$ 、 $\lambda_r$ 分别为目标探测和目标毁伤时的调节因子。

### 1.5 信息处理作战边建模

信息处理作战边的能力包括通信能力与信息分析处理能力。通信能力主要考虑作战边对应通信链路的覆盖能力、通信容量和有效性<sup>[16]</sup>，量化指标明确，适合用能力隶属度的方式计算；信息分析处理能力结合了指挥所情报分析、决策生成与作战指挥的综合能力，涉及计算设备性能、指挥人员与组织架构的能力，难以量化计算，需要建立完备的效能评估指标体系综合评估能力满足度<sup>[17]</sup>。

通信能力的隶属度计算选取传输速率、误码率和时延作为性能指标。例如，对于地面站指挥无人机的D→I边，设通信传输速率为 $B$ ，单位为mb/s，误码率为 $p_c$ ，时延为 $\tau$ ，单位为s，则三者隶属函数分别为

$$R_B(B) = \begin{cases} 1, & B \geq 10 \\ 0.8, & 2 \leq B < 10 \\ 0.5, & 0.01 \leq B < 2 \\ 0, & B < 0.01 \end{cases} \quad (9)$$

$$R_c(p) = \begin{cases} 1, & 0 < p \leq 10^{-8} \\ -0.1 \times \lg x, & 10^{-8} < p \leq 10^{-5} \\ 0, & p > 10^{-5} \end{cases} \quad (10)$$

$$R_v(\tau) = e^{-\lambda_k \tau^2}, \tau \geq 0 \quad (11)$$

式中： $\lambda_k$ 为调节因子，用来调节时延增加对隶属度下降的影响程度。结合层次分析法等评估手段得到信息分析处理能力满足度 $R_1$ ，四者权重 $\omega_B = \omega_c = \omega_v = 0.2$ ， $\omega_1 = 0.4$ 。

## 2 作战边执行序列的生成

体系对抗网络模型是一个无时间维度的静态模型，描述了作战体系具备的实施作战环的能力，而在作战仿真中，这些作战环实施与否以及先后顺序并不确定。要模拟对抗过程，需要为双方定义作战策略，以此推导双方作战环的执行顺序，形成作战环序列。由于作战环在执行中的任一时刻仅可能占用某一条边两端的节点，阻碍该节点参与的其他作战边的执行，因此，模拟对抗过程时，需要将作战环拆解成边，在作战边粒度上编排时间信息，生成作战边执行序列，形成对抗过程仿真的基础。

### 2.1 作战策略的定义

指挥员制定作战计划时需要设置打击目标优先级并规定投入的作战资源，据此对作战策略做出定义：作战策略是双方各自针对打击目标集的一个打击步骤序列，每个步骤包含一个打击目标节点和一组本方节点，代表着本方将以此数个节点协同完成对目标的打击。各步骤间作战相互独立，前序步骤先于后序步骤启动，但不一定先于后序步骤完成。策略的数学描述为

$$\pi_c = (\zeta_{c1}, \zeta_{c2}, \dots, \zeta_{cN}), c \in \{\text{红方, 蓝方}\} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \zeta_{ci} &= \{T_{ci}^{\text{node}}, C_{ci}\}, \\ T_{ci}^{\text{node}} &\in V_c, C_{ci} \subseteq V_c, i \in [1, N_c] \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $T_{ci}^{\text{node}}$  和  $C_{ci}$  分别为  $c$  方的策略中第  $i$  个步骤  $\zeta_{ci}$  的打击目标节点和本方节点资源集;  $\tilde{c}$  为与  $c$  方交战的敌方。

## 2.2 作战环序列的生成

根据作战策略的步骤依次从体系对抗网络模型中提取满足要求的作战环, 形成作战环序列。设  $A_{ci}$  为  $\pi_c$  中由  $\zeta_{ci}$  生成的一组作战环, 则双方作战环序列为

$$A_c = (A_{c1}, A_{c2}, \dots, A_{cN}), \quad (14)$$

$$A_{ci} = \{A_{ci,1}, A_{ci,2}, \dots, A_{ci,M}\} \quad (15)$$

对于  $A_{ci}$  中的任一环  $\Lambda_{ci,j}$  上包含的边集合  $L_{ci,j}$  和节点集合  $V_{ci,j}$ , 需满足  $L_{ci,j} \subseteq L_c, j \in [1, M_{ci}]$ , 其中,  $M_{ci}$  是  $\zeta_{ci}$  中包含的协同打击环的数目,  $V_{ci,j}$  中的节点包含本方的 S、D、I 节点和一个对方的节点作为 T 节点。

## 2.3 作战环分解与边序列生成

将作战环分解成作战边执行序列时, 如果只有一个作战环需要分解, 则将作战环以 T→S 类边作为起点, I→T 类边作为终点, 顺序依次编排即可。如图3所示。

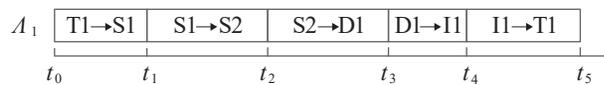


图3 单作战环的边序列

Fig. 3 Single loop's edge sequence

如果有多个作战环需要分解, 则要根据步骤的先后依次将作战环拆解为作战边安排到时间轴上, 后加入的作战边在不与已加入的边冲突的情况下尽早执行。作战边加入时是否冲突, 要根据作战边及其实施节点的分解特性而定。

同一步骤中的节点具有协同关系, 如果步骤中有多个作战环需要分解, 就要考虑它们之间的相互影响。要考虑不同作战环中的同一条边可否复用, 以及作战环中执行的作战边对节点的占用, 以此来分配环中作战边的执行时间。

(1) 对于 T→S 类边, 一个步骤中一个 S 类节点对于相同目标只需一次侦察即可, 即一条起终点相同的 T→S 类边可被同一步骤内的多个作战环复用。同时, 通常一次侦察任务只对一个作战单元实施侦察, 故 S 类节点一次只能执行一条 T→S 类边。

(2) 对于 S→S、S→D、D→D、D→I 类边, 每个作战环都需要分别完成其对应的信息融合、状态上报、指挥协同、命令下达操作, 作战边不可复用。同时, 以上操作均属于信息域, 其执行主体一侦察单元、指挥所和打击单元的信息处理设备都支持并行工作, 所以, 这几类边的执行不会独占实施节点。

(3) 对于 I→T 类边, 按照策略定义, 对于拥有相同 I→T 类边的多个作战环来说, 其前序的步骤是为了打击目标所作的协同侦察与指挥, 故可认为打击行为本身只执行一次, 即作战边可复用。又由于一个作战单元一次作战任务通常只针对一个目标单元, 因此 I 类节点一次只能执行一条 I→T 类边。

对于不同步骤中的作战环, 由于它们之间是相对独立作战的, 不具备协同关系, 因此, 不同步骤内作战环的边不能复用。

## 2.4 作战边执行序列实例

假设红方有 3 个 S 节点 S1、S2、S3, 1 个指挥节点 D1 和 2 个影响节点 I1、I2, 共有 2 个待打击的蓝方目标 T1、T2, 通过某种策略形成了作战步骤  $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ , 其中  $\zeta_1$  有 1 个作战环  $A_1$ ,  $\zeta_2$  中有 3 个作战环  $A_2 \sim A_4$ 。通过前文规则, 作战环生成作战边序列实例如图4所示。

$A_1$  和  $A_2$  通过相同的侦察节点 S1 执行了 T→S 类边, 由于该类边独占实施节点, 因此, 后续步骤的  $A_2$  等到前者的 T1→S1 完成后的  $t_1$  时刻才执行。之后的 S→S、S→D、D→I 类边, 由于不会独占实施节点, 因此, 两个环可以并行执行。而 I→T 类边因为独占了 I 节点, 因此,  $A_2$  的 I1→T2

边直到 $A_1$ 的 $I1 \rightarrow T1$ 结束的 $t_3$ 时刻才执行。

$A_3$ 和 $A_4$ 由不同的S节点对T2节点实施侦察， $T2 \rightarrow S3$ 、 $T2 \rightarrow S2$ 可以同时开展； $S3 \rightarrow S2$ 与 $T2 \rightarrow S2$ 、 $S3 \rightarrow S2$ 与 $S2 \rightarrow D1$ 之间均存在相同的节点 $S2$ ，但由于 $S3 \rightarrow S2$ 不独占实施节点，因此，均可以同时执行；2个作战环执行相同的边 $S2 \rightarrow D1$ 、 $D1 \rightarrow I2$ ，这2条边不可以复用，同时不会占用实施节点，所以，2个作战环将分别且并行执行这2条边；2个作战环共享相同的打击边 $I2 \rightarrow T2$ ，于 $t_2$ 时刻同时开始打击。

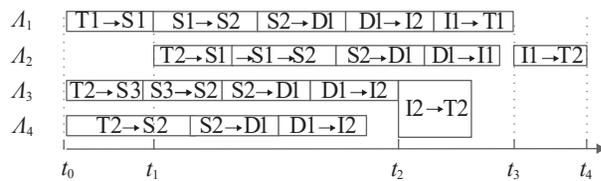


图4 多作战环生成的边序列  
Fig. 4 Edge sequence from multiple operation loops

得到作战边执行序列后，依次执行作战边计算实施效果，就能模拟体系对抗的过程，完成体系对抗仿真。

### 3 基于作战环的体系对抗仿真

作战环只有在完成闭环时才会产生打击效果，而 $I \rightarrow T$ 类边是作战环的最后一条边，因此，执行体系对抗仿真计算时，需要以作战边序列中所有 $I \rightarrow T$ 类边的结束时间为顺序遍历对应的作战环，根据作战环的打击效能修改目的节点健康度，就能模拟一次作战环的实施。以此为基础，可以根据作战边序列模拟体系对抗，求得对抗结果。

#### 3.1 一个作战环的打击模拟

一个作战环执行完成，相当于一个作战单元对目标完成了一次打击，目标的节点健康度将会下降。通常，节点健康度的下降意味着其作战单元的兵力减少或主战装备损毁，会对本方作战环造成效能折扣，因此，设 $E_i^L$ 为作战环上各边的作战效能， $S_j^V$ 为环上各节点的健康度，则作战环的

综合打击效能为

$$E^A = \prod_{i=1}^M E_i^L \times \prod_{j=1}^N S_j^V \quad (16)$$

式中： $M$ 为环上作战边总数； $N$ 为环上节点总数。

当目标遭到一个作战环打击后，其新健康度 $S_T'$ 与原来的健康度 $S_T$ 的比值取决于 $E^A$ 的大小。考虑到当作战部队的战损率高于某个值时，部队将完全丧失作战能力，而武器平台遭受关键伤害时也会彻底瘫痪，因此为所有节点设定一个阈值 $\theta$ ，低于该阈值时该节点的健康度将置为0，受到打击后的健康度为

$$S_T' = \begin{cases} S_T \times (1 - E^A), & S_T \times (1 - E^A) > \theta \\ 0, & S_T \times (1 - E^A) \leq \theta \end{cases} \quad (17)$$

#### 3.2 $I \rightarrow T$ 类边相同时多环协同模拟

$I \rightarrow T$ 类边相同时的多个作战环协同，意味着侦察探测、信息融合处理与命令下达环节可能有多条边并联，但最终由一个打击节点完成打击。作战环有多个，但实际打击节点对目标节点的作战只进行一次。

将每个作战环分为 $T \rightarrow I$ 、 $I \rightarrow T$ 两部分，其中 $T \rightarrow I$ 部分是作战环中 $T \rightarrow S$ 、 $S \rightarrow S$ 、 $S \rightarrow D$ 、 $D \rightarrow D$ 、 $D \rightarrow I$ 这几类边的串联。将这些协同作战环中并联的 $T \rightarrow I$ 部分等效为一条 $T \rightarrow I$ 边求出等效效能 $E_{T \rightarrow I}$ ，就可进行 $I \rightarrow T$ 类边相同时多环协同的打击模拟，如图5所示。

$E_{T \rightarrow I}$ 的计算分2个步骤：①计算协同作战环中每个环 $T \rightarrow I$ 边的等效作战效能；②求解这些 $T \rightarrow I$ 边等效效能的并联效能。每个环的 $T \rightarrow I$ 边等效作战效能，即所串联的作战边效能及串联的节点健康度的乘积。

$$E_{T \rightarrow I, k}^L = \prod_{i=1}^{M+1} E_{i, k}^L \times \prod_{j=1}^M S_{j, k}^V \quad (18)$$

对于第 $k$ 条并联的 $T \rightarrow I$ 边而言， $M$ 是 $T \rightarrow I$ 边的S节点和D节点的总个数， $E_{i, k}^L$ 为 $T \rightarrow I$ 边中每条边的作战效能， $S_{j, k}^V$ 为 $T \rightarrow I$ 边经过的各S和D节点的健康度。

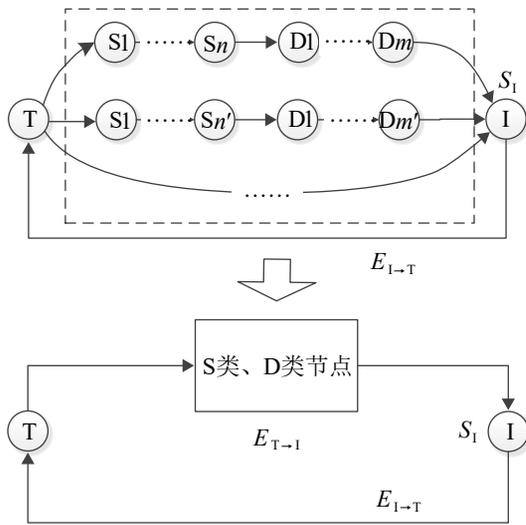


图5 I→T类边相同时的作战环等效图

Fig. 5 Equivalent diagram of operation loops with same I-T edge

采用基于自信息量的效能计算方法<sup>[18]</sup>求解T→I边并联的效能。根据T→I边的效能求解其自信息量, 对边k求解自信息量:

$$H_{T \rightarrow I, k}^L = -\ln E_{T \rightarrow I, k}^L \quad (19)$$

边的自信息量支持并联运算:

$$H_{T \rightarrow I}^L = 1 / \sum_{k=1}^N \frac{1}{H_{T \rightarrow I, k}^L} \quad (20)$$

式中: N为并联的T→I边的数量。

求得并联T→I边的自信息量 $H_{T \rightarrow I}^L$ 后, 再通过式(19)的反函数式可求得并联效能:

$$E_{T \rightarrow I}^L = e^{-H_{T \rightarrow I}^L} \quad (21)$$

等效作战环的作战效能为

$$E^A = E_{T \rightarrow I}^L \times E_{I \rightarrow T}^L \times S_I \quad (22)$$

结合式(17)可求得遭受这样的等效作战环打击后目标节点的健康度 $S_I'$ 。

### 3.3 基于作战边序列的对抗模拟

随着作战的持续, 双方节点的健康度将逐渐下降。当一个节点彻底失能时, 该节点参与的所有作战环都将失去意义, 这时双方会按照既定策略调整作战, 不再执行这些作战环。此时, 应当对现有对抗网络重新生成作战边执行序列后再继

续仿真。如此反复生成作战边序列并模拟执行, 若一方所有作战环全部中断或双方策略的步骤全部执行完成, 则仿真结束。

结合双方节点的价值权重, 仿真结束后可以计算双方的作战收益。设 $\Omega^V$ 为对抗网络中所有节点的价值权重集合, 若以削弱对方有生力量为作战目标, 则双方收益为

$$U_c = \sum_i \omega_{i,c} (1 - S_{i,c}), \omega_{i,c} \in \Omega^V \quad (23)$$

若以削弱对方有生力量并保全本方力量为作战目标, 则双方收益为

$$U_c = \sum_i \omega_{i,c} (1 - S_{i,c}) - \sum_j \omega_{j,c} (1 - S_{j,c}),$$

$$(\omega_{i,c}, \omega_{j,c}) \in \Omega^V \quad (24)$$

## 4 实例分析

本章构建一个体系对抗场景实例, 通过建立与分析体系对抗模型, 为双方制定可用作战策略集。利用基于作战环的体系对抗仿真方法, 求解出双方分别遍历所有策略作对抗时的收益, 优选双方的最优策略。结合体系对抗收益矩阵, 从是否优先攻击关键节点、分兵或集中攻击、如何分兵攻击等方面分析双方选取不同策略对抗时胜败的原因。

### 4.1 体系对抗场景设定

红方集结兵力准备对蓝方发起打击, 红方可投入力量包括1个指挥所, 2个空中侦察编队和3个火力打击编队, 而蓝方守军为1个指挥所, 1个空中侦察编队和2个火力打击编队。已知对抗中所有作战的环境条件相同, 双方指挥所远在后方且保护严密不会遭受攻击, 而其他兵力单元都处于可打击范围内。红方掌握双方作战力量情况后, 需要制定打击策略, 以期有效打击对方并减少本方损失。

### 4.2 体系对抗网络模型建立

根据场景设定可建立节点集合 $V$ 、作战边集

合 $L$ 并生成作战体系对抗网络,如图6所示。各节点初始默认为满状态, $S^V$ 中所有节点健康度均为1。双方节点失能的阈值 $\theta$ 均设为0.3。设本次仿真双方所有节点的价值相同,则红方的收益见式(25),蓝方收益为红方收益的取反。

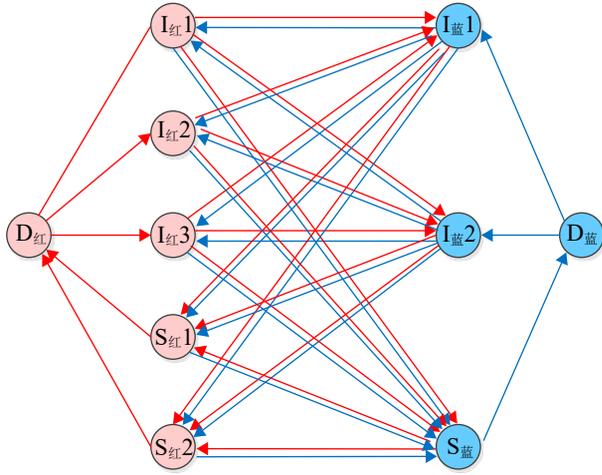


图6 体系对抗网络模型

Fig. 6 SoS confront network model

$$U_{\text{红}} = \sum_j (1 - S_{j,\text{蓝}}) - \sum_i (1 - S_{i,\text{红}}) \quad (25)$$

将双方作战边分类并列举出关联性能指标,以红方作战边为例展示,如表1所示。

表1 红方体系对抗网络中作战边的分类与关联指标  
Table 1 Classification and correlation indicators of combat edges in red's SoS confrontation networks

所属类型	关联指标	作战边
信息处理	通信传输速率	$D_{\text{红}} \rightarrow I_{\text{红}}$
	误码率、时延	$S_{\text{红}} \rightarrow D_{\text{红}}$
	信息处理分析能力满足度	
目标打击	命中概率	$I_{\text{红}} \rightarrow I_{\text{蓝}}$
	毁伤概率	$I_{\text{红}} \rightarrow S_{\text{蓝}}$
目标侦察	最大探测距离	$I_{\text{蓝}} \rightarrow S_{\text{红}}$
	巡航时间、气象影响	$S_{\text{蓝}} \rightarrow S_{\text{红}}$

利用上述指标及其隶属函数与权重,可计算双方作战边效能。以 $I_{\text{蓝}}1 \rightarrow S_{\text{红}}1$ 边为例,已知交战区域天气晴朗, $S_{\text{红}}1$ 节点的巡航时间为3 h,最大探测距离520 km,目标编队 $I_{\text{蓝}}1$ 缺少有力的反侦察措施,隐身系数为0.3。则通过1.3节设定的隶属函数和权重,可求得 $I_{\text{蓝}}1 \rightarrow S_{\text{红}}1$ 边效能约为0.7。通

过上述方法,求得场景下双方所有作战边的效能 $E^L$ ,并估算耗时集 $T^L$ 如表2所示。

表2 双方作战边属性

Table 2 Attributes of both rivals combat edges

类型	红方			蓝方		
	作战边	$E^L$	$T^L/\text{min}$	作战边	$E^L$	$T^L/\text{min}$
D→I	$D_{\text{红}}1 \rightarrow I_{\text{红}}1$	1.0	60	$D_{\text{蓝}}1 \rightarrow I_{\text{蓝}}1$	1.0	60
	$D_{\text{红}}1 \rightarrow I_{\text{红}}2$	1.0	60	$D_{\text{蓝}}1 \rightarrow I_{\text{蓝}}2$	1.0	60
	$D_{\text{红}}1 \rightarrow I_{\text{红}}3$	1.0	60			
S→D	$S_{\text{红}}1 \rightarrow D_{\text{红}}1$	1.0	60	$S_{\text{蓝}}1 \rightarrow D_{\text{蓝}}1$	1.0	60
	$S_{\text{红}}2 \rightarrow D_{\text{红}}1$	1.0	60			
I→T	$I_{\text{红}}1 \rightarrow I_{\text{蓝}}1$	0.7	100	$I_{\text{蓝}}1 \rightarrow I_{\text{红}}1$	0.9	100
	$I_{\text{红}}1 \rightarrow I_{\text{蓝}}2$	0.7	100	$I_{\text{蓝}}1 \rightarrow I_{\text{红}}2$	0.9	100
	$I_{\text{红}}1 \rightarrow S_{\text{蓝}}$	0.4	160	$I_{\text{蓝}}1 \rightarrow I_{\text{红}}3$	0.9	100
	$I_{\text{红}}2 \rightarrow I_{\text{蓝}}1$	0.6	100	$I_{\text{蓝}}1 \rightarrow S_{\text{红}}1$	0.5	160
	$I_{\text{红}}2 \rightarrow I_{\text{蓝}}2$	0.6	100	$I_{\text{蓝}}1 \rightarrow S_{\text{红}}2$	0.5	160
	$I_{\text{红}}2 \rightarrow S_{\text{蓝}}1$	0.4	160	$I_{\text{蓝}}2 \rightarrow I_{\text{红}}1$	0.9	100
	$I_{\text{红}}3 \rightarrow I_{\text{蓝}}1$	0.5	100	$I_{\text{蓝}}2 \rightarrow I_{\text{红}}2$	0.9	100
	$I_{\text{红}}3 \rightarrow I_{\text{蓝}}2$	0.5	100	$I_{\text{蓝}}2 \rightarrow I_{\text{红}}3$	0.9	100
	$I_{\text{红}}3 \rightarrow S_{\text{蓝}}$	0.4	160	$I_{\text{蓝}}2 \rightarrow S_{\text{红}}1$	0.5	160
				$I_{\text{蓝}}2 \rightarrow S_{\text{红}}2$	0.5	160
T→S	$I_{\text{蓝}}1 \rightarrow S_{\text{红}}1$	0.7	80	$I_{\text{红}}1 \rightarrow S_{\text{蓝}}1$	0.9	80
	$I_{\text{蓝}}2 \rightarrow S_{\text{红}}1$	0.7	80	$I_{\text{红}}2 \rightarrow S_{\text{蓝}}1$	0.9	80
	$S_{\text{蓝}}1 \rightarrow S_{\text{红}}1$	0.5	140	$I_{\text{红}}3 \rightarrow S_{\text{蓝}}1$	0.9	80
	$I_{\text{蓝}}1 \rightarrow S_{\text{红}}2$	0.7	80	$S_{\text{红}}1 \rightarrow S_{\text{蓝}}1$	0.6	140
	$I_{\text{蓝}}2 \rightarrow S_{\text{红}}2$	0.7	80	$S_{\text{红}}2 \rightarrow S_{\text{蓝}}1$	0.6	140
	$S_{\text{蓝}}1 \rightarrow S_{\text{红}}2$	0.5	140			

### 4.3 体系对抗策略集建立与仿真

分析表2可以看出:

(1) 红方侦察和打击编队的数量更多,但性能均低于蓝方。红方的3个I节点性能均不同,而红方的S节点、蓝方的I节点、双方的D节点性能均相同。

(2) 蓝方的S节点是关键节点,被击毁后蓝方作战体系将丧失战斗力,但S节点比I节点的打击难度要高。

基于以上分析,为红方制定数种作战策略:所有节点优先集中攻击蓝方S节点、所有节点优先集中攻击蓝方I节点,将I和S节点分为两组分别攻击蓝方2个I节点,最后只剩S节点时再合兵

攻击, 分兵攻击的方式依 I 节点分组不同又有 3 种分法。由此, 可以为红方设置 5 种作战策略如表 3 所示。

表 3 红方策略集  
Table 3 Strategy set of red

策略	策略描述	目标	投入力量
$\pi_{红1}$	集中攻击 S	$S_{蓝1}$	$D_{红1}, S_{红1}, S_{红2}, I_{红1}, I_{红2}, I_{红3}$
		$I_{蓝1}$	$D_{红1}, S_{红1}, S_{红2}, I_{红1}, I_{红2}, I_{红3}$
$\pi_{红2}$	集中攻击 I	$I_{蓝2}$	$D_{红1}, S_{红1}, S_{红2}, I_{红1}, I_{红2}, I_{红3}$
		$I_{蓝1}$	$D_{红1}, S_{红1}, S_{红2}, I_{红1}, I_{红2}, I_{红3}$
$\pi_{红3}$	分兵攻击 I ( $I_{红3}$ 一组)	$I_{蓝1}$	$D_{红1}, S_{红1}, I_{红1}, I_{红2}$
		$I_{蓝2}$	$D_{红1}, S_{红2}, I_{红3}$
		$S_{蓝1}$	$D_{红1}, S_{红1}, S_{红2}, I_{红1}, I_{红2}, I_{红3}$
$\pi_{红4}$	分兵攻击 I ( $I_{红2}$ 一组)	$I_{蓝1}$	$D_{红1}, S_{红1}, I_{红1}, I_{红3}$
		$I_{蓝2}$	$D_{红1}, S_{红2}, I_{红2}$
		$S_{蓝1}$	$D_{红1}, S_{红1}, S_{红2}, I_{红1}, I_{红2}, I_{红3}$
$\pi_{红5}$	分兵攻击 I ( $I_{红1}$ 一组)	$I_{蓝1}$	$D_{红1}, S_{红1}, I_{红2}, I_{红3}$
		$I_{蓝2}$	$D_{红1}, S_{红2}, I_{红1}$
		$S_{蓝1}$	$D_{红1}, S_{红1}, S_{红2}, I_{红1}, I_{红2}, I_{红3}$

同时, 蓝方也可能采取不同策略。蓝方可采取集中攻击和分兵攻击 2 种情况。关于攻击顺序, 由于蓝方攻击红方 I 节点的作战环耗时相同, 而优先攻击  $I_{红1}$  节点带来效益更大, 因此, 不考虑优先攻击  $I_{红2}$ 、 $I_{红3}$ , 攻击 S 类节点耗时和收益一致, 默认优先攻击  $S_{蓝1}$  节点。本文预设 4 种蓝方策略, 如表 4 所示。

依次从双方策略集中各抽取一个策略两两进行对抗仿真, 可得到红方的收益矩阵, 如表 5 所示。

对收益矩阵分析可知, 对于蓝方而言, 最优的策略是  $\pi_{蓝2}$ , 分兵攻击且优先攻击  $I_{红1}$  节点。对

红方而言最优的策略是  $\pi_{红5}$ 。

表 4 蓝方策略集  
Table 4 Strategy set of blue

策略	策略描述	目标	投入力量
$\pi_{蓝1}$	集中攻击 I	$I_{红1}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$I_{红2}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$I_{红3}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$S_{红1}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
$\pi_{蓝2}$	分兵攻击 I	$S_{红2}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$I_{红1}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}$
		$I_{红2}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$I_{红3}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
$\pi_{蓝3}$	集中攻击 S	$S_{红1}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$S_{红2}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$I_{红1}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$I_{红2}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
$\pi_{蓝4}$	分兵攻击 S	$I_{红3}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$S_{红2}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$S_{红1}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}$
		$I_{红1}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝2}$
$\pi_{蓝5}$	分兵攻击 S	$I_{红2}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$I_{红3}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$S_{红2}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$
		$S_{红1}$	$D_{蓝1}, S_{蓝1}, I_{蓝1}, I_{蓝2}$

#### 4.4 目标优先级不同的结果影响分析

对表 5 的分析可以看出, 当蓝方采取优先攻击 S 节点时, 将必然在对抗中失败; 当蓝方采取优先攻击 I 节点, 红方采取集中攻击 S 节点时, 红方也将失败。提取  $\pi_{红1}$  与  $\pi_{蓝1}$  对抗过程, 如表 6 所示。表中“时刻”列表示对抗开始某分钟后的时刻, 如“300”表示对抗开始后 300 min 的时刻。

可以看出, 虽然  $S_{蓝1}$  是关键节点, 但由于打击耗时过长, 效能过低, 当  $S_{蓝1}$  受到攻击而健康度下降时, 红方已损失惨重, 并导致对  $S_{蓝1}$  的打击效果不佳, 最终对抗失败。同理, 双方其他优先攻击 S 节点的策略都是不可行的。可见, 优先摧毁关键节点与优先削弱作战力量策略的优劣需要辩证分析, 不顾客观情况强行攻击关键节点并不可取。

表5 红方收益矩阵  
Table 5 Earning matrix of red

	$\pi_{\text{蓝}1}$	$\pi_{\text{蓝}2}$	$\pi_{\text{蓝}3}$	$\pi_{\text{蓝}4}$
$\pi_{\text{红}1}$	-3.96	-3.96	2.00	2.70
$\pi_{\text{红}2}$	0.28	-1.12	3.00	3.00
$\pi_{\text{红}3}$	-0.17	-0.17	1.63	1.82
$\pi_{\text{红}4}$	0.04	0.04	1.78	1.95
$\pi_{\text{红}5}$	0.25	0.25	1.92	2.08

表6  $\pi_{\text{红}1} - \pi_{\text{蓝}1}$  对抗过程表  
Table 6 Confrontation process of  $\pi_{\text{红}1} - \pi_{\text{蓝}1}$ 

时刻	$S_{\text{红}}$	$S_{\text{蓝}}$
300	$I_{\text{红}1:1} \rightarrow 0$	—
400	$I_{\text{红}2:1} \rightarrow 0$	—
420	—	$S_{\text{蓝}1:1} \rightarrow 0.72$
500	$I_{\text{红}3:1} \rightarrow 0$	—
660	$S_{\text{红}1:1} \rightarrow 0.38$	—
820	$S_{\text{红}2:1} \rightarrow 0.38$	—
收益	-3.96	3.96

#### 4.5 分兵/集中攻击结果对比分析

结合表5, 红方采取集中攻击I节点时( $\pi_{\text{红}2}$ ), 对抗结果因蓝方的集中/分兵策略( $\pi_{\text{蓝}1}/\pi_{\text{蓝}2}$ )而大不一样, 提取这2组策略的对抗过程表如表7所示。

表7  $\pi_{\text{红}2} - \pi_{\text{蓝}1}/\pi_{\text{蓝}2}$  对抗过程表  
Table 7 Confrontation process of  $\pi_{\text{红}2} - \pi_{\text{蓝}1}/\pi_{\text{蓝}2}$ 

时刻	$\pi_{\text{红}2} - \pi_{\text{蓝}1}$		$\pi_{\text{红}2} - \pi_{\text{蓝}2}$	
	$S_{\text{红}}$	$S_{\text{蓝}}$	$S_{\text{红}}$	$S_{\text{蓝}}$
300	$I_{\text{红}1:1} \rightarrow 0$	$I_{\text{蓝}1:1} \rightarrow 0$	$I_{\text{红}1:1} \rightarrow 0$	$I_{\text{蓝}1:1} \rightarrow 0$
380	—	—	$I_{\text{红}2:1} \rightarrow 0$	—
400	$I_{\text{红}2:1} \rightarrow 0$	$I_{\text{蓝}2:1} \rightarrow 0$	—	$I_{\text{蓝}2:1} \rightarrow 0.58$
480	—	—	$I_{\text{红}3:1} \rightarrow 0.53$	—
580	—	$S_{\text{蓝}1:1} \rightarrow 0.72$	—	$S_{\text{蓝}1:1} \rightarrow 0.79$
660	—	—	$S_{\text{红}1:1} \rightarrow 0.86$	—
960	—	—	$S_{\text{红}2:1} \rightarrow 0.86$	—
收益	0.28	-0.28	-1.12	1.12

可以看出, 由于蓝方单个I节点就足以摧毁目标, 因此, 分兵攻击加速了打击 $I_{\text{红}2}$ 作战环的完成, 使得蓝方后续损失更小, 在节点更少的情况

下取得胜利。

但是, 当红方采取分兵攻击策略( $\pi_{\text{红}3}$ 、 $\pi_{\text{红}4}$ 、 $\pi_{\text{红}5}$ )时, 蓝方的策略选择并未改变双方收益。提取 $\pi_{\text{红}3} - \pi_{\text{蓝}1}$ 与 $\pi_{\text{红}3} - \pi_{\text{蓝}2}$ 的对抗过程作分析, 如表8所示, 蓝方只有一个S节点, 目标为 $I_{\text{红}2}$ 时的侦察边 $I_{\text{红}2} - S_{\text{蓝}1}$ 需要在目标为 $I_{\text{红}1}$ 的侦察边 $I_{\text{红}1} - S_{\text{蓝}1}$ 结束后才能执行, 而红方的 $I_{\text{蓝}1} - S_{\text{红}1}$ 和 $I_{\text{蓝}2} - S_{\text{红}2}$ 侦察边可以同时执行。S节点数量的瓶颈使蓝方分兵攻击未能赶在红方的下一轮攻击前削弱对手, 所以未影响对抗结果。

表8  $\pi_{\text{红}3} - \pi_{\text{蓝}1}/\pi_{\text{蓝}2}$  对抗过程表  
Table 8 Confrontation process of  $\pi_{\text{红}3} - \pi_{\text{蓝}1}/\pi_{\text{蓝}2}$ 

时刻	$\pi_{\text{红}3} - \pi_{\text{蓝}1}$		$\pi_{\text{红}3} - \pi_{\text{蓝}2}$	
	$S_{\text{红}}$	$S_{\text{蓝}}$	$S_{\text{红}}$	$S_{\text{蓝}}$
300	$I_{\text{红}1:1} \rightarrow 0$	$I_{\text{蓝}1, I_{\text{蓝}2}: 1 \rightarrow 0,$	$I_{\text{红}1:1} \rightarrow 0$	$I_{\text{蓝}1, I_{\text{蓝}2}: 1 \rightarrow 0,$
		$1 \rightarrow 0.65$		$1 \rightarrow 0.65$
380	—	—	$I_{\text{红}2:1} \rightarrow 0.47$	—
400	$I_{\text{红}2:1} \rightarrow 0.47$	—	—	—
560	$I_{\text{红}3:1} \rightarrow 0.47$	$S_{\text{蓝}1:1} \rightarrow 0.34$	$I_{\text{红}3:1} \rightarrow 0.47$	$S_{\text{蓝}1:1} \rightarrow 0.34$
820	$S_{\text{红}1:1} \rightarrow 0.93$	—	$S_{\text{红}1:1} \rightarrow 0.93$	—
1020	$S_{\text{红}2:1} \rightarrow 0.93$	—	$S_{\text{红}2:1} \rightarrow 0.93$	—
收益	-0.17	0.17	-0.17	0.17

结合 $\pi_{\text{红}2} - \pi_{\text{蓝}1}$ 、 $\pi_{\text{红}3} - \pi_{\text{蓝}1}$ 、 $\pi_{\text{红}2} - \pi_{\text{蓝}2}$ 、 $\pi_{\text{红}3} - \pi_{\text{蓝}2}$ 对抗过程分析可知, 在作战时间充裕的情况下, 集中攻击可以造成更彻底的打击, 兰彻斯特平方律为“集中兵力, 各个击破”策略提供了理论支持<sup>[9]</sup>, 这是 $\pi_{\text{红}2} - \pi_{\text{蓝}1}$ 相比 $\pi_{\text{红}3} - \pi_{\text{蓝}1}$ , 红方能取胜的原因, 但是集中攻击会使得完成多目标打击的周期增加, 这在时间紧迫时可能造成更大损失, 如 $\pi_{\text{红}2} - \pi_{\text{蓝}2}$ , 而此时分兵攻击能够取得更好的效果, 若红方将 $\pi_{\text{红}2}$ 改为 $\pi_{\text{红}3}$ , 则情况有所好转。

### 4.6 不同分兵攻击结果对比分析

参考表5, 提取 $\pi_{红}3-\pi_{蓝}1$ 、 $\pi_{红}5-\pi_{蓝}1$ 的对抗过程如表9所示。分析2组对抗结果可知, 分兵攻击可以加快多目标作战环的完成, 但是如何合理分配力量, 使各分队的力量能够充分发挥就需要慎重考虑。 $\pi_{红}3$ 未合理分配2队力量,  $I_{红}1$ 的能力存在浪费, 造成了红方的失败, 而采用力量分配更合理的 $\pi_{红}5$ 时, 红方取得了胜利。

表9  $1\pi_{红}3/\pi_{红}5 - \pi_{蓝}1$  对抗过程表  
Table 9 Confrontation process of  $\pi_{红}3/\pi_{红}5 - \pi_{蓝}1$

时刻	$\pi_{红}3 - \pi_{蓝}1$		$\pi_{红}5 - \pi_{蓝}1$	
	$S_{红}$	$S_{蓝}$	$S_{红}$	$S_{蓝}$
		$I_{蓝}1, I_{蓝}2:$		$I_{蓝}1, I_{蓝}2:$
300	$I_{红}1:1 \rightarrow 0$	$1 \rightarrow 0,$ $1 \rightarrow 0.65$	$I_{红}1:1 \rightarrow 0$	$1 \rightarrow 0,$ $1 \rightarrow 0.51$
400	$I_{红}2:1 \rightarrow$ 0.47	—	$I_{红}2:1 \rightarrow$ 0.59	—
560	$I_{红}3:1 \rightarrow$ 0.47	$S_{蓝}1:1 \rightarrow$ 0.33	$I_{红}3:1 \rightarrow$ 0.59	$S_{蓝}1:1 \rightarrow$ 0.32
820	$S_{红}1:1 \rightarrow$ 0.93	—	$S_{红}1:1 \rightarrow$ 0.95	—
1020	$S_{红}2:1 \rightarrow$ 0.93	—	$S_{红}2:1 \rightarrow$ 0.95	—
收益	-0.17	0.17	0.25	-0.25

## 5 结论

基于作战环的体系对抗仿真方法, 实现了从作战体系模型静态分析到体系对抗动态仿真的转变: 引入了不同打击策略的影响, 通过模拟对抗过程计算作战效果, 为策略的优劣提供量化的参考。基于该方法实施的体系对抗仿真实例, 分析了双方多种策略的对抗结果和背后的军事原理, 验证了方法的正确性。

该方法仅针对指挥、侦察、打击类力量建模, 并未考虑后勤保障这一重要力量, 而对多力量协同打击的分析计算也不够深入, 后续将对这些因素在体系对抗仿真中的作用进行更多的论证与分析。

### 参考文献:

- [1] 刘德胜, 马宝林, 葛亚维. 作战体系建模方法与应用[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(5): 1-6.  
Liu Desheng, Ma Baolin, Ge Yawei. Modeling Method and Application of Combat System of Systems[J]. Command Control & Simulation, 2020, 42(5): 1-6.
- [2] 程贲, 谭跃进, 黄魏, 等. 基于能力需求视角的武器装备体系评估[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(2): 320-323.  
Cheng Ben, Tan Yuejin, Huang Wei, et al. Weapon System-of-systems Evaluation Based on Capability Requirement Perspective[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(2): 320-323.
- [3] 孙云柯. 不确定信息下武器装备体系能-效综合评估技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.  
Sun Yunke. Research on Comprehensive Evaluation Technology of Capability and Effectiveness for Weapon Equipment System-of-systems Under Uncertain Information[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [4] 李旋. 基于OODA环的作战网络评估与优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.  
Li Xuan. Research on Evaluation and Optimization of Combat Network Based on OODA Loop[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [5] 王涛, 汪刘应, 常雷雷, 等. 基于作战环的导弹作战体系效能动态评估[J]. 现代防御技术, 2019, 47(3): 42-49.  
Wang Tao, Wang Liuying, Chang Leilei, et al. Dynamic Evaluation of Missile Combat System Effectiveness Based on Operation Loop[J]. Modern Defence Technology, 2019, 47(3): 42-49.
- [6] 罗凯, 张明智, 吴曦. 基于作战环的空间信息时效网关键节点分析模型[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(7): 1572-1576.  
Luo Kai, Zhang Mingzhi, Wu Xi. Key Nodes Analysis Model for Space Information Temporal Network Based on Operation Loop[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(7): 1572-1576.
- [7] 韩琪, 庞波, 李森, 等. 韧性评估方法与优化策略[J]. 国防科技大学学报, 2023, 21: 219-239.  
Han Qi, Pang Bo, Li Sen, et al. Evaluation Method and Optimization Strategies of Resilience for Air & Space Defense System of Systems Based on Kill Network Theory and Improved Self-information Quantity[J]. Defence Technology, 2023, 21: 219-239.
- [8] 孙利娜, 梁葆华, 陈志伟. 综合节点重要性及攻击代价的作战网络抗毁性分析[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(10): 119-124.  
Sun Lina, Liang Baohua, Chen Zhiwei. Combat Network Invulnerability Analysis Considering Node Importance

- and Attack Cost[J]. *Fire Control & Command Control*, 2022, 47(10): 119-124.
- [9] 雷梓烽. 基于OODA环的作战体系对抗博弈建模研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.  
Lei Zifeng. Research on Operation System-of-systems Combat Game Model Based on OODA Loop[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [10] 方冰, 张翠侠, 戴昕林, 等. 基于OODA环的网络信息体系信息架构贡献度评估[J]. *指挥信息系统与技术*, 2022, 13(4): 52-57.  
Fang Bing, Zhang Cuixia, Dai Xinlin, et al. Information Architecture Contribution Evaluation for Networking Information-centric SoS Based on OODA Loop[J]. *Command Information System and Technology*, 2022, 13(4): 52-57.
- [11] 商慧琳. 武器装备体系作战网络建模及能力评估方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.  
Shang Huilin. Research on Armament System-of-systems Operation Network Modeling and Capability Evaluation Methods[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [12] 陈红彬, 钱林方, 赵立宏, 等. 多用途中口径火炮火力综合打击效能评估[J]. *南京理工大学学报*, 2013, 37(1): 182-186.  
Chen Hongbin, Qian Linfang, Zhao Lihong, et al. Firepower Integrated Strike Effectiveness Evaluation for Multi-role Medium Caliber Gun[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2013, 37(1): 182-186.
- [13] 王波, 于升涛, 孙凯华. 舰载无人机对海突击作战效能评估研究[J]. *无人系统技术*, 2023, 6(1): 72-81.  
Wang Bo, Yu Shengtao, Sun Kaihua. Research on the Effectiveness Evaluation of Shipborne UAV in Sea Assault Operations[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2023, 6(1): 72-81.
- [14] 吴超, 徐宏飞. 潜艇打击水面舰艇的作战方案效能评估ADC法[J]. *火力与指挥控制*, 2005, 30(2): 75-77, 80.  
Wu Chao, Xu Hongfei. Effectiveness Evaluation Method of QADC for Operational Project of Which Submarine Attack Naval Ship[J]. *Fire Control & Command Control*, 2005, 30(2): 75-77, 80.
- [15] 陈军, 高晓光, 丁琳. 时敏打击系统作战效能评估与费用分析[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(17): 4042-4044, 4060.  
Chen Jun, Gao Xiaoguang, Ding Lin. Operational Effectiveness Evaluation and Cost-effectiveness Analysis of System for Destroying Time-sensitive Target[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(17): 4042-4044, 4060.
- [16] 王剑钦, 张伟华, 马润年. 基于指数标度和灰色理论的空军通信能力评估模型[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2009, 10(5): 64-69.  
Wang Jianqin, Zhang Weihua, Ma Runnian. Evaluation Model of Air Force Communication Capability Based on Index Scale and Grey Theory[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2009, 10(5): 64-69.
- [17] 许贵君, 王晖, 赵凯. 基于仿真的装备保障指挥效能评估方法研究[J]. *计算机仿真*, 2017, 34(11): 1-6.  
Xu Guijun, Wang Hui, Zhao Kai. Effectiveness Evaluation Method Based on Simulation for Equipment Support Command[J]. *Computer Simulation*, 2017, 34(11): 1-6.
- [18] 罗承昆, 陈云翔, 胡旭, 等. 基于作战环和自信息量的装备体系贡献率评估方法[J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(6): 741-748.  
Luo Chengkun, Chen Yunxiang, Hu Xu, et al. Evaluation Method of Equipment's Contribution Rate to System-of-systems Based on Operation Loop and Self-information Quantity[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(6): 741-748.
- [19] 孟令辉, 孙宝琛, 迭旭鹏, 等. 基于兰彻斯特方程的进攻战斗作战方案动态调整方法研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2020, 42(5): 97-100.  
Meng Linghui, Sun Baochen, Die Xupeng, et al. Dynamic Adjustment Method of Attacking Battle Plan Based on Lanchester's Equation[J]. *Command Control & Simulation*, 2020, 42(5): 97-100.