

基于控制环的作战网络对抗模型*

白亮,肖延东,侯绿林,老松杨

(国防科技大学 信息系统工程重点实验室,湖南 长沙 410073)

摘要:战争的手段和用兵之道总是随着技术的发展而变化,借鉴网络中心战的思想,深入分析了分布式作战网络的生成机制,及其对抗行为的微观和宏观机制。在此基础上,针对信息时代由信息优势获得作战效能的本质特点,提出了控制环和行动节奏的概念,刻画不同对抗体系信息效能的差异;进而提出了作战网络的对抗模型和度量作战网络的效能指标。通过仿真实验分析,对比研究了不同网络结构(传统型、协同式和分布式)、不同攻击模式(随机打击、指控优先打击和度优先打击)对交战过程和结果的影响。

关键词:作战网络;控制环;作战建模;

中图分类号:TP316 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)03-0042-06

Operational network combat model based on control loop

BAI Liang, XIAO Yandong, HOU Lulin, LAO Songyang

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Means of warfare and using of the military force are always changing as technology changes. Learning from the idea of NCW, it explored the formation mechanism of the operation network, and analyzed the combat behavior of micro and macro mechanisms. Aiming at the feature of obtaining the operational effectiveness through the information superiority, it proposed the conception of the control loop and the action rhythm in the information age, which reflected the different capability of using information between the combat systems. Thus, it proposed the combat model of operational network, and the performance indicators of measuring the operational network. It designed the experiments to study the engagement process and results of the different network structures, the different attack patterns.

Key words: operational network; control loop; combat model

战争的手段和用兵之道总是随着技术的发展而变化^[1]。在信息时代,作战领域多维化、作战力量联合化,参战实体数量多、规模大,实体之间实时紧密联系、巨量信息交互,作战样式由“以平台为中心”向“以网络为中心”跨越,作战行动是以网络为中心的体系与体系之间的对抗^[2]。现代战争通过对参战单元的有机组合,连入作战网络发挥体系的强大力量,这种作战模式具有作战意图隐蔽、战场资源自适应动态分配以及作战力量自同步的特点^[3]。作战行动的成败不再是由兵力规模和损耗来简单衡量,而是基于整个作战体系的整体效能。

目前对作战系统建模的主要方法有:Petri网^[4],复杂网络^[5-8,12]和多智能体系统^[9](MAS)。近年来,网络科学为信息时代作战建模提供了一种全新的视角,深入洞察体系对抗的复杂性。

1 作战网络与对抗过程抽象

把作战单元视为节点,己方节点之间产生的

各种联系(探测、通信、控制、协同)视为边,由诸多的点和边形成的网络称为作战网络。

信息时代的交战模型依然存在传统的OODA回路(Observe、Orient、Decide、Act),只不过其概念内涵更加丰富。OODA认为整个作战的基本流程是观察、定位、决策、行动的循环过程。一次攻击行动的过程始于传感器,通过决策者最后达到火力单元。对于作战网络而言,这体现了不同作战单元之间的四种“联系”——指控、探测、协同和交战。而作战网络中的作战单元和单元之间“联系”的集合就构成了整个作战网络的对抗过程。

2 作战网络模型构建

2.1 异质节点抽象

根据作战网络对抗过程的抽象,可以将交战要素抽象为传感器节点(Sensor)、决策者节点(Decide)、火力节点(Fire)和目标节点(Target),并用节点之间的有向连接实现指控 R^{C2} 、探测

* 收稿日期:2012-11-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60902094)

作者简介:白亮(1978—),男,陕西西安人,副教授,博士,E-mail:bailiang@nudt.edu.cn

R^S 、协同 R^{CO} 和交战 R^F 四类关系。

传感器节点 S :表示侦察、探测类的作战单元,提供作战空间感知的作战要素,负责探测其他节点的可观测数据,并把这些信息传给决策者。

决策者节点 D :表示网络的指挥控制中心,接受从传感器传来的信息,对火力节点下达攻击命令和调整己方节点部署。

火力节点 F :表示能执行攻击的作战单元,接受决策者的攻击指令才能对敌方目标进行攻击或干扰。

目标节点 T :表示作战网络中的所有节点,比如敌方网络中的决策者、传感器、影响者对我方来说都是目标。同样我方的这些节点也同样是目标节点。

同时进一步描述作战中存在的四类关系——指控 R^{C2} 、探测 R^S 、协同 R^{CO} 和交战 R^F 。指控关系是上一级指挥节点指挥下一级指挥节点或指挥节点命令火力节点进行攻击;探测关系是传感器节点探测敌方和我方节点;协同关系是为达成一定的作战目的,同级之间直接协同或同级之间通过上级协同;交战关系是火力节点攻击对方目标节点。

2.2 作战网络模型

作战网络构建既要受到指控机制、体制的影响,也要受到各种规则的连接约束。总的说来,构建作战网络要符合真实作战的三大特性:

- 1) 必须符合真实作战体系的指挥控制结构和机制,保证指控信息流能正确流动;
- 2) 作战网络应具有向心性,有中央节点、有层次性,且从内到外指挥级别依次降低;
- 3) F 、 S 节点一定是网络中的叶节点。

在上述节点抽象和约束定义的基础上,发现现有的传统的作战网络是在树状指控网上演化来的,具有鲜明的指挥层级,同级之间不能相互指挥,指挥需要上级协调。为适应作战样式和编制体制的调整,出现了同级指控节点之间直接协同的网络,我们称之为协同式网络。随着信息化武器平台的出现,为了适应网络中心战的作战要求——实现信息共享、动态调整、扁平化指挥。通过消减指挥层级、增大中间指挥节点、传感器互联,演化为分布式网络。

3 基于控制环的作战网络对抗机制分析

作战网络的对抗行为由宏观和微观两个方面决定。微观是指节点自身能力和它的行为约束,宏观指整个网络在诸多节点有规则的行动下体现

出的整体作战效能。微观上刻画了节点的属性、性能,宏观上则体现了体系的反应周期、信息优势、作战效能等能力。图1描述了作战网络中宏观机制和微观机制的相互作用。

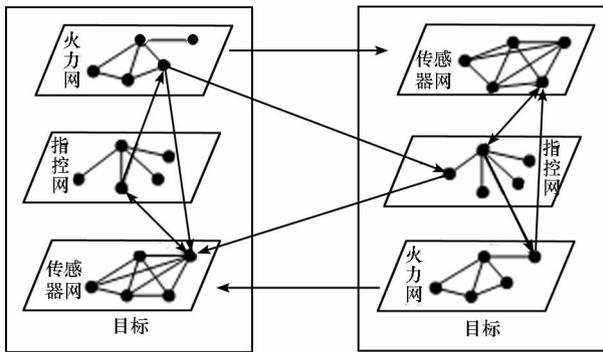


图1 作战网络中宏观和微观机制相互作用

Fig.1 The interaction of combat network between macro and micro mechanisms

被广泛接受的OODA理论认为,作战活动是一个观察、定向、决策和行动的循环控制过程。结合上述作战网络模型中节点链路抽象不难发现,作战网络中节点在微观层面的属性、能力及其联系是作战网络宏观能力的本质体现和承载,这种微观机制表现为节点之间通过边的联系形成的各类“控制、传递过程”,例如传感器节点与决策、火力节点形成的“探测关系”是节点之间情报收集态势感知的信息传递过程,决策节点与火力、传感器节点形成的“指挥关系”是指控过程。从作战的使命任务出发,本文将这种微观机制的表现称之为“控制环”,认为作战网络中的作战活动是在它的基础上完成,另一方面,控制环的“有机结合”形成了宏观层面作战网络的作战效能。

3.1 控制环

定义1 控制环(Control Loop),由 D 、 S 和 F 节点组成一个能够完成作战行动的控制回路。 S 探测到 F 、 D 的位置、状态信息,并将这些信息传递给 D , D 根据各种情况综合判断后给 F 和 S 下达指令,如图2所示。

定义2 标准控制环(Standard Control Loop)是由 S 、 D 、 F 节点组成的完成一次攻击过程的最基本单元,如图2(a)所示。形式化描述为点,边,连边的三元组, V 表示点, E 表示边, δ_{SCL} 表示点与点之间连边的规则。

$$SCL = \{V, E, \delta_{SCL}\}$$

- 1) $V = \{D, S, F\}, |V|$ (节点个数) = 3;
- 2) $|E|$ (边的个数) = 4;
- 3) $\forall x, y \in V, \text{if } (x, y) \in \{R^{C2}, R^C, R^S\}, \text{ then}$

$\delta_{SCL} = \text{Link} - \text{edge}(x, y)$;

4) 从任意节点出发, 经过链路之后都可以回到初始节点。

网络中心战强调的“信息优势”更加关注网络各个作战要素的互联互通, 信息条件下的作战活动, 作战要素之间的联系更加紧密^[1]。传感器之间可以互相通信, 表现了战场信息的共享能力; 决策单元之间也可以互相联系, 反映了指挥控制的协同。这就大大扩展了控制环的回路, 因此基于标准控制环的概念, 我们进一步定义广义控制环。

定义 3 广义控制环 (Generalized Control Loop), 是按照节点连接规则由多个 S 、 D 、 F 节点组成的完成一次攻击过程的单元, 如图 2(b) 所示。形式化描述还是点, 边, 连边的三元组。

$SCL = \{V, E, \delta_{SCL}\}$

1) $V = V_D \cup V_S \cup V_F, |V| \geq 3$;

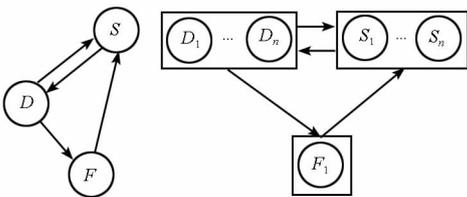
2) $|E| \geq 4$;

3) $\forall x, y \in V, \text{if}(x, y) \in \{R^{C2}, R^C, R^S, R^{CO}\}$,

then $\delta_{GCL} = \text{Link} - \text{edge}(x, y)$;

4) 从任意节点出发, 经过链路之后都可以回到初始节点。

通过控制环的定义可以看到, 从环中任意一个节点开始搜索, 只要构成环都能回到初始节点。但是现实的作战网络中, 信息传递的次数越多, 越延误战机, 因此在模型中规定广义控制环的路径不超过 6 条链路。



(a) 标准控制环

(b) 广义控制环

(a) Standard control loop (b) Generalized control loop

图 2 标准控制环和广义控制环

Fig. 2 Standard control loop and generalized control loop

3.2 行动节奏

作战活动通常都是始于 S 节点, 中间经过若干次通信、决策, 最后由 F 节点实施战斗行动。从网络的角度出发, 这样一次行动就是穿过数个节点的一条链路。假定网络中的信息传递速率一样, 那么信息通过节点数目越多的链路就要花费很长的时间, 这个时间成为决定作战网络作战效能的重要因素, 我们称之为行动节奏。较慢的行动节奏必然导致战斗行动反应迟缓, 不是贻误战

机, 就是很有可能来不及反应就被摧毁, 其作战效能必然较低。

定义 4 行动节奏 (Action Rhythm), 是指交战过程中从发现到决策到最终打击所需要的时间。交战双方体系结构、装备性能、指控能力上的种种差异导致了双方行动节奏不同。

本文提出的作战网络中, 不同的网络结构代表了不同的指挥体制, 一般包括三种类型: 传统型、协同式和分布式。传统型网络由于具有严格的指挥层级, 信息传递的链路是最长的; 协同式网络由于同级之间可以直接协同, 信息传递的链路次之; 分布式网络由于指挥结构扁平化、动态融合的特征, 它的传递链路是最短的。因此, 不同的网络结构必然造成了整个网络的平均信息传递链路长短不一, 这就造成了行动节奏有快有慢, 为了从宏观上衡量整个网络的平均信息传递链路, 我们引入了信息效能 (IE) 的概念, 它是在不考虑信息传递质量和每个节点信息处理时间的情况下, 用链路距离的倒数表示信息传递速率, 距离越长, 速率越慢, 花费的时间越多。

另一方面, 实际过程中战机稍纵即逝, 信息在控制环中传递的次数越多, 越可能贻误战机。标准控制环 (SCL) 是路径最短的控制环, 反应时间最短, 在交战中首先使用, 但是往往这种控制环数量有限, 且生存能力很弱, 一旦环中有节点被摧毁, 环也就不存在了。而广义控制环 (GCL) 则刻画了交战网络中可能完成作战任务的所有路径, 显然标准控制环的行动节奏明显快于广义控制环, 但是交战过程中更可能用到广义控制环。因此, 广义控制环越多, 行动节奏越慢, 标准控制环越多, 行动节奏越快。

因此, 行动节奏 T_{CR} 可表示为信息效能, 标准控制环、广义控制环数量的函数, 即

$$T_{CR} = f(IE, N_{SCL}, N_{GCL}) = k * \frac{1}{IE * N_{SCL}} * N_{GCL}, k \text{ 是}$$

系数。

1) $T_{CR} \propto 1/IE$; IE 越高, T_{CR} 越小, 行动节奏越快;

2) $T_{CR} \propto N_{GCL}$; GCL 越多, T_{CR} 越大, 行动节奏越慢;

3) $T_{CR} \propto 1/N_{SCL}$; SCL 越多, T_{CR} 越小, 行动节奏越快。

4 作战网络对抗仿真分析

4.1 作战网络能力评价

作战网络既是对战争复杂巨系统各个作战要

素之间联系和相互作用的体现,同时它又是复杂网络在军事领域的应用。下面将从交战模型的角度提出分布式作战网络的网络效能,从复杂网络的角度衡量作战网络的参数。

作战网络效能是从交战的目的出发,综合衡量网络能够打击对手的效能,反映信息时代由信息优势获得作战效能。

4.1.1 信息效能

信息流通是发挥网络中心战能力的关键因素——战场信息及时传送、信息高质量无损传递都是衡量网络中心战的信息效能的标准。通常,反应网络效能的一个关键指标是网络的平均距离 $\langle d \rangle$ ^[7]。因此,可以认为一条链路的距离的倒数是信息在这条链路传递的速率,距离越长,速度越慢,花费的时间越长。如果将网络中所有链路的速率统计起来,就反应了这个网络的信息传递速率。这恰恰反应了网络的信息效能(IE)——在不考虑信息传输质量的情况下,衡量网络整体的传输速率,速率越大,信息效能越好。

$$IE = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$$

其中, N 是某一方的节点数目, d_{ij} 是从节点 i 到节点 j 的最短路径长度,如果节点之间不连通,那么 $d_{ij} = +\infty$ 。那么 IE 越大,速率越快, T_{CR} 越小,行动节奏越快。

4.1.2 作战效能

无论是现实作战过程还是用于作战模拟的交战模型,其系统演进都是时间离散的。而且一次成功的攻击过程既受到攻击方行动节奏的制约,还受到该方打击能力的限制,因此,我们认为作战效能评价的是作战过程中前后交战时刻的兵力差,它从整个交战过程上描述了攻击方在行动节奏和打击能力两方制约条件下的表现。

$$FE = \sum_{i=1}^s \frac{\text{被攻击方节点数}(i) - \text{被攻击方节点数}(i+1)}{\text{攻击方节点数}(i)}$$

其中 s 为整个交战过程的持续时间。

4.1.3 作战潜力

分布式网络作战的一个主要特点就是作战网络具有动态重组能力,我们称之为作战潜力。在提出的分布式作战网络模型中,作战潜力体现在网络中重组“控制环”的能力大小,即网络是否能在某些控制环被破坏的情况下,通过选择其他节点和边组建具有相应能力的控制环,进而演化为作战效能。根据提出的分布式作战网络模型定义不难发现,在节点数相同的情况下,网络中广义控制环数量越多,其重组控制环的能力越强,即作战潜

力越大。因此,定义作战潜力为网络中平均每个节点参与的环路数:

$$FP = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \frac{N_{CCL}(i)}{N(i)}$$

其中 s 为整个交战过程的持续时间, $N(i)$ 表示 i 交战时刻的节点总数。

4.2 作战网络效能的静态分析

作战网络效能静态分析是指作战网络在非交战状态下所表现出的网络效能和网络参数。本文对传统型、协同式和分布式的作战网络静态效能进行分析。设置作战网络指挥层级为 5,指挥跨度为 3, $N_D = N_S = 121$, $N_F = 81$ 。各效能指标如表 1 所示。

表 1 作战网络效能静态分析

Tab. 1 Operational network performance static analysis

类型	IE	FP	聚类系数	链路节点比(L/N)
传统	0.098	0.753	0.048	1.741
协同	0.135	2.937	0.119	2.247
分布	0.234	3.620	0.273	2.964

通过上表数据分析,可以得到以下结论:

(1) 分布式的作战网络在信息效能、聚类系数和作战潜力上有很大跃升,使得分布式网络在行动节奏和战场自重组能力上明显优于其他两种网络结构。协同的网络效能好于传统的作战网络。

(2) 分布式的作战网络虽然网络能力有很大提高,但是却花费了更大的代价(L/N 比较高),它不仅体现在组网时增加了节点之间连通的物理代价,而且还大大增加了网络的复杂性,这使得作战网络更加难以管理和控制。那么分布式的网络是否有足够高的“投入产出比”,这还需要在动态对抗中研究。

4.3 作战网络对抗仿真实验

现代作战理论认为,根据情报获取能力的不同,攻击行动是在完全信息和非完全信息条件下进行的^[11]。因此,可以定义三种攻击模式:度优先打击(Degree-first-attack):在完全信息条件下,优先攻击交战网络中从高到低的敌方节点。指控优先打击(C2-first-attack):在完全信息条件下优先攻击敌方交战网络中的指控节点。随机打击(Random-attack):在非完全信息条件下,随机选择对方节点进行攻击。

依据本文提出的控制环的概念分析,Random-attack 就是随机性摧毁环中的任一节点,

C2-first-attack 是攻击环中的决策者, Degree-first-attack 是攻击环中的度较高的传感器。为了验证本文提出的分布式作战网络模型以及对抗机制的有效性和正确性, 分别从不同网络结构、不同攻击模式和节点配置对交战进程和结果的影响进行仿真实验。

设置作战背景为旅级之间的对抗, 网络指挥层级为 5, 指挥跨度为 3, $N_D^b = N_D^s = 121$, $N_S^b = N_S^s = 121$, $N_F^b = N_F^s = 81$, 双方打击能力为 0.5, 探测能力均为 0.8。

实验研究对抗双方规模相同 (D 、 S 、 F 节点数目相同), 网络结构不同, 对抗模式相同的条件下对交战进程和结果的影响。设计了九组实验。网络结构相同, 对抗模式不同的条件下对交战进程和结果的影响。设计了九组实验。

综合上述实验, 图 3 表示了传统型网络在与另两种网络交战中受到不同攻击模式的作战效能 (FE)。图 4 表示了协同式网络在与另两种网络交战中受到不同攻击模式的作战效能 (FE)。图 5 表示了分布式网络在与另两种网络交战中受到不同攻击模式的作战效能 (FE)。

通过对网络的作战效能分析, 可以得到以下结论:

(1) 得到了三种作战网络抵抗不同攻击模式的能力, 如表 2 所示。

表 2 三种作战网络抗攻击能力

Tab2 Three operational network performance anti-attack capability

类型	抗随机攻击	抗指控优先	抗度优先攻击
传统型	差	一般	差
协同式	一般	好	一般
扁平状	好	差	好

(2) 协同式网络与传统网络对抗作战效能大大提高, 但对抗耗时较长, 取胜付出的代价较大 (取胜后存活的节点数较少)。与分布式网络对抗过程有胶着状态。虽然网络效能低于分布式网络, 但是协同式网络的广义控制环的平均路径较短, 指挥节点互联适度。这说明未来的作战网络既要有高效的信息优势, 战斗编组又要小型化、模块化、精确化。

(3) 无论何种结构的网络对抗, 度优先攻击模式的效果与随机攻击的效果相差不大, 都没有指控优先的攻击模式效果好, 说明指控节点是交战网络的中枢。美军在近来作战常用的“五环理

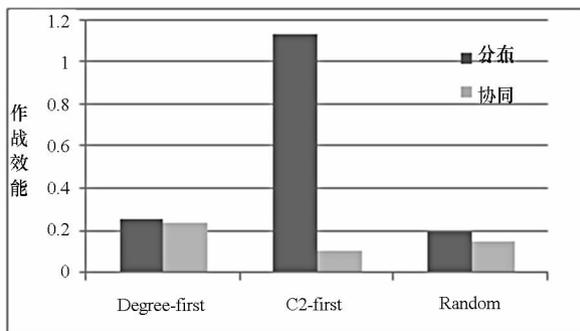


图 3 传统型网络的作战效能

Fig. 3 The fight effectiveness of the traditional network

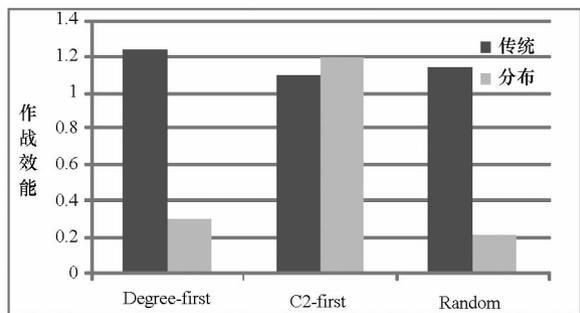


图 4 协同式网络的作战效能

Fig. 4 The fight effectiveness of the collaborative network

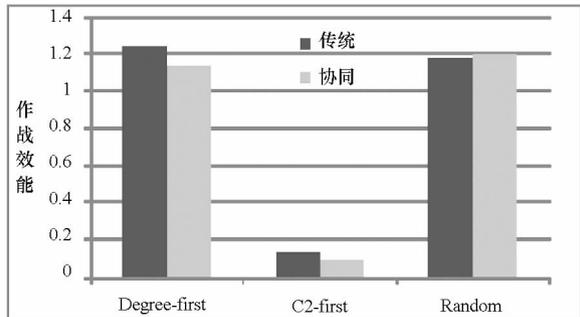


图 5 分布式网络的作战效能

Fig. 5 The fight effectiveness of the distributed network

论”认为打击目标应该首选敌人最脆弱的关键——统帅结构, 美军在伊拉克战争中针对性使用的“斩首行动”和“扑克牌通缉令行动”都取得了很好的作战效果。

(4) 现代作战理论认为, 体系破击 (攻击度较高的指控节点) 的攻击模式更占优, 但是分布式网络的仿真显示结果不是这样的。原因在于度较高的指控节点一般处于指控网的中间级别, 而中间级别的指控节点数量众多、重组能力强, 提高了网络的稳定性, 因此并不是整个网络一击而中的要害。

5 结束语

借鉴网络中心战思想, 构建了一个作战网络模型, 在模型中提出了控制环和行动节奏的概念,

刻画了信息条件下宏观和微观因素对作战效果的影响。应用若干特征参数对三种不同的作战网络效能进行了能力评估。参照美军军事改革的情况,设计了对抗实验,研究了不同网络结构、不同攻击模式和不同兵力配比对交战过程和结果的影响,得到了一些有意义的结论:

(1)将作战网络剖解来看,都是由许多个环和非环交织融合组成的,网络结构的不同正是网络中微观的环的差异,从而使得作战网络表现出了不同的信息效能、行动节奏、作战潜力和作战效能,最终影响了交战结果。

(2)在信息条件下的网络化对抗过程是各个作战要素非线性叠加,会使“强者更强,弱者更弱”,要研究对手,根据不同的对象、环境、条件特征攻击对方的“Achilles' Heel”。

参考文献 (References)

- [1] Alberts David, Moffat James. 网络中心战与复杂性理论 [M]. 北京:电子工业出版社,2004.
Alberts David, Moffat James. Network-centric warfare and complexity theory [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 胡晓峰,罗批,司光亚,等. 战争复杂系统建模与仿真 [M]. 北京:国防大学出版社,2005.
HU Xiaofeng, LUO Pi, SI Guangya, et al. The war complex system modeling and simulation [M]. Beijing: National Defense University Press, 2005. (in Chinese)
- [3] Jeff Cares. Distributed networked operations—the foundations of network centric warfare [M]. 北京:北京邮电大学出版社,2006.
Jeff Cares. Distributed networked operations—the foundations of network centric warfare [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006. (in Chinese)
- [4] 涂拥军,李敬辉,黄高明. 基于对象 Petri 网的水面舰艇编队网络中心战系统建模 [J]. 通信与信息技术, 2007, 30 (17): 14 - 21.
TU Yongjun, LI Jinghui, HUANG Gaoming. A model of fleet NCW system based on object-oriented Petri net [J]. Communication and Information Technology, 2007, 30 (17): 14 - 21. (in Chinese)
- [5] 李德毅,王新政,胡钢锋. 网络化战争与复杂网络 [J]. 中国军事科学, 2006, 19(3): 111 - 119.
LI Deyi, WANG Xinzhen, HU Gangfeng. Network warfare and complex networks [J]. Chinese Military Science, 2006, 19 (3): 111 - 119. (in Chinese)
- [6] 胡斌,黎放,郑建华. 基于复杂网络的舰艇编队网络中心战模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(8): 1960 - 1964.
HU Bin, LI Fang, DENG Jianhua. Research on warship fleet NCW model base on complex networks [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(8): 1960 - 1964. (in Chinese)
- [7] 俞杰,王伟,张国宁. 基于复杂网络的联合作战指挥体系研究 [J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(2): 5 - 10.
YU Jie, WANG Wei, ZHANG Guoning. Research on joint operations command system based on complex network [J]. Fire Control and Command Control, 2011, 36 (2): 5 - 10. (in Chinese)
- [8] 朱涛,常国岑,施笑安. 基于复杂网络的作战系统结构研究 [J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(z1): 136 - 140.
ZHU Tao, CHANG Guocen, SHI Xiaolan. Research on structure of combat system based on complex networks [J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33 (z1): 136 - 140. (in Chinese)
- [9] Andrew Ilachinski. 人工战争: 基于多 Agent 的作战仿真 [M]. 北京:电子工业出版社,2010.
Andrew Ilachinski. Artificial war: combat simulation based on multi-agent [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [10] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks [J]. Review of Modern Physics (S0034 - 6861), 2002, 74(1): 47 - 97.
- [11] 金伟新. 体系对抗复杂网络建模与仿真 [M]. 北京:电子工业出版社,2010.
JIN Weixin. Sos-Ops M&S based on the complex network [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [12] Deller S, Bell M I, Bowling S R, et al. Applying the information age combat model: quantitative analysis of network centric operations [J]. The International C2 Journal, 2009, 3(1).