

## 任务联盟演化过程行动策略优选的 DINs 建模

万路军, 姚佩阳, 马方方, 税冬东, 李瑞

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

**摘要:** 优化选择一定的行动策略能促使任务联盟向期望的目标效果演化。考虑部分事件/行动在不同时段下影响强度不相一致, 使用考虑影响值时变的动态影响网(DINs)对联盟演化过程行动策略优选问题进行建模, 给出因果强度逻辑下概率传播参数设计的一致性条件, 并基于因果强度逻辑进行影响值计算。结合空中进攻作战想定案例进行仿真验证, 计算结果表明, 通过部分事件/行动节点影响值变化下进行策略优选提高了对因果关系的建模能力。

**关键词:** 多作战智能体; 任务联盟; 行动策略; 动态影响网; 网络中心作战体系

**中图分类号:** V271.4; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)07-0024-07

## Modeling of Action Strategy Optimization in Task Coalition Evolution Based on DINs

WAN Lu-jun, YAO Pei-yang, MA Fang-fang, SHUI Dong-dong, LI Rui

(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Selecting optimized action strategy can make the task coalition evolve towards the expected operation effect. Considering that the influence strength of events/actions is not consistent in different time horizons, a time-varying Dynamic Influence Nets (DINs) was utilized to model the action strategy optimization in the process of task coalition evolution. Based on causal strength logic, the consistent condition of probability propagation was given and the influence constant was calculated out. Simulation was made to an aerial attack campaign case. The result shows that the action strategy optimization considering the variation of influence constants can improve the capability of cause and effect modeling.

**Key words:** multi-agent for combat; task coalition; action strategy; dynamic influence net; network centric warfare system

### 0 引言

未来网络中心作战体系下强调聚力前沿, 突出战术层面作战力量的自主决策和自同步作战能力, 将多作战智能体形成任务联盟<sup>[1]</sup> (task coalition) 协同执行战斗任务, 是未来适应和实践自同步作战理念的重要途径之一。联盟完成任务的过程是联盟与环境相互作用并不断向期望目标定向演化的过程。为确保联盟演化的有序和定向, 需要采取一定行动策略对联盟演化进程进行干预, 而如何优选行动策略便是联盟演化的一个关键问题。

在面对不确定事件环境时, 动态贝叶斯网络<sup>[2]</sup> (Dynamic Bayesian Networks, DBNs) 是一种有效的因果关系建模范式, DBNs 不仅能满足对不确定事件行为的建模要求, 而且能够很好地描述事件-效果之间的因果关系, 但 DBNs 在应用时需要定义节点间条件概率, 这些概率参数有时难以获得, 并且需要专家指定, 往往主观性较强。为解决 DBNs 面临的上述问题, 乔治梅森大学的研究团队在贝叶斯网络(Bayesian Networks, BNs)的基础上, 结合因果强度逻辑(Causal Strength logic, CAST)参数, 提出了一种不确定推理建模机制——影响网<sup>[3]</sup> (Influence Nets, INs)。相比于 BNs, INs 具有以下优点: 1) 综合考虑事件发生与不发生对目标事件的正负面影响; 2) 通过指定 CAST 参数代替条件概率, 大大减少所需指定参数的个数, 参数含义表达更直观明确; 3) 利用变化的循环置信传播(Loopy Belief Propagation, LBP)进行概率推理, 是非 NP-hard 的。为克服 INs 没有自然描述时

收稿日期: 2013-07-27

修回日期: 2013-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(61273048); 空军工程大学信息与导航学院博士创新基金(KDY2011002)

作者简介: 万路军(1986—), 男, 江苏连云港人, 博士生, 研究方向为指挥控制理论与方法、有人/无人智能体协同作战等。

间机制的缺陷,Haider等在INs的基本框架中引入时间逻辑组件,将INs拓展为赋时影响网(Timed Influence Nets,TINs),提高了INs对动态不确定性的建模能力。在此基础上,文献[5]考虑不同事件序列和事件影响的记忆特性,将TINs进一步拓展为动态影响网(Dynamic Influence Nets,DINs)。由于INs采用非概率知识获取模式和近似推理机制,分析描述复杂系统行为具有显著优势,近年国内研究人员相继开展对INs理论延展和应用层面的研究。文献[6]通过引入随机时间延迟和随机信度序列两个模型参数,形成一种随机时间影响网络(Stochastic Timed Influence Nets,STIN),并将STIN应用到联合火力打击目标选择<sup>[7]</sup>、方案评估<sup>[8]</sup>和方案优化<sup>[9]</sup>,一定程度上提高了联合火力打击计划制定的效率和水平。此外,在弹道导弹防御系统中的关键事件分析中<sup>[10]</sup>、作战行动序列生成<sup>[11]</sup>、作战任务效能计算<sup>[12]</sup>等方面,INs均得到有效应用。围绕指挥控制组织行动过程(Course of Action,COA)设计问题<sup>[13]</sup>,团队前期采用改进的DINs对战役规划COA问题进行建模,并利用粒子群优化算法对其模型进行优化求解,取得较好的COA优选效果,但在正负影响值聚合时采用直接相加的处理方式,有悖于INs建模的一致性条件。

总体而言,从影响网的基础理论和实践应用来看,影响网在因果影响关系建模中具有显著优势。对联盟演化过程行动策略优选进行建模,无论是INs、TINs还是STIN均将事件影响强度视为时恒参数,行动或事件只在某一时间阶段具有影响效应,这制约了影响网对复杂因果关系系统的建模能力,因为在联盟演化过程中,往往存在行动或事件根节点对子节点的影响值随时间推移而变化的情况。因此,本文在影响值一致性分析基础上,利用具有考虑时变影响值能力的DINs构建联盟演化过程行动策略优选模型,以提高和改善对因果关系的描述和建模能力。

## 1 任务联盟演化过程行动策略分析

### 1.1 任务联盟演化及过程要素

任务联盟为有效完成某一特定的使命任务,达成预期作战效果,要根据战场环境可能的变化,选择联盟相应的行动策略。因此,任务联盟演化的方向是有效完成既定的任务目标。而由于态势变化的不确定性,会出现阻挠联盟实现其期望目标的不可控因素,称之为事件(Event,E);任务联盟为克服被动事件的影响所采取的对措施,称之为行动(Action,A)。任务联盟将在事件和行动的共同驱使下不断演化,以期实现其最终任务目标。

事件:是敌方影响联盟运作,阻挠其实现目标的行

为,是任务联盟不可控的阻力因素。事件可视为敌方根据战场态势的变化而采取的行动,与态势变化相关联。设可能发生的事件集合为 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_{N_E}\}$ ,  $N_E = |E|$ 为事件数量。通常情况下,事件是随机发生的,可由领域专家给出其在某一阶段的发生概率,假设在使命任务的执行过程中,联盟演化可划分为 $T$ 个阶段,令事件 $E_i$ 在联盟演化 $t_k$ 阶段的发生概率为 $P_k\{E_i = 1\} = P_k(E_i)$ ,  $1 \leq i \leq N_E$ ,  $P_k(E_i)$ 是一个概率区间,本文假设 $P_k(E_i)$ 在其概率区间内服从近似正态分布。

行动:针对特定的使命任务,由相关领域专家确定可获取的基本行动集合 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{N_A}\}$ ,  $N_A = |A|$ 为行动的数量。记 $P_k\{A_i = 1\} = P_k(A_i) = 1$ ,  $1 \leq i \leq N_A$ ,表示在联盟演化 $t_k$ 阶段采取了行动 $A_i$ 。若没有任何约束,单个行动 $A_i$ 所构成的行动策略有 $2^T$ 种,但实际联盟演化中,受到资源、路径等条件的约束, $A_i$ 的可行行动策略远小于 $2^T$ 种。设单个行动 $A_i$ 构成的可行行动策略集合为 $\pi(A_i) = \{a_i^j | 1 \leq j \leq |\pi(A_i)|\}$ ,  $|\pi(A_i)|$ 为可行策略集的元素数,联盟的演化过程就是所有行动的集合 $G = \{a_i | a_i \in \pi(A_i), 1 \leq i \leq N_A\}$ ,联盟演化过程空间为 $\Pi_G = \pi(A_1) \times \pi(A_2) \times \dots \times \pi(A_{N_A})$ 。

期望演化效果(Desired evolutionary effects):联盟演化的终极目标,演化过程的目的就是期望演化效果所获得的联合概率最大。设某态势下要达到的期望效果集合为 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_{N_D}\}$ ,  $N_D = |D|$ 为可获取的期望演化效果的个数。

阶段演化效果(Stage evolutionary effects):联盟演化达到最终期望效果的中间阶段性效果,由于联盟演化过程中会涉及相当多的事件、行动和期望效果,增加了直接建立这些变量间的定性关系的难度。通过阶段演化效果可建立这些变量因素之间关系的过渡关联,这能有效缓解变量因果关系描述困难的问题。设某态势下定义的阶段演化效果集合为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{N_S}\}$ ,  $N_S = |S|$ 为阶段演化效果的个数。

### 1.2 影响网的基本模型

以事件 $B$ 受到事件集 $\{A_i\}_{1 \leq i \leq n}$ 的影响为例,分析事件集 $\{A_i\}_{1 \leq i \leq n}$ 中事件发生与否(真/假)对事件 $B$ 发生概率的影响。假设 $X^n$ 为一个 $n$ 维的二值随机向量,其中,第 $j$ 个分量记为 $X_j$ ,如果事件 $A_j$ 发生,则 $X_j = 1$ ,如果事件 $A_j$ 不发生,则 $X_j = 0$ 。记 $x^n$ 为随机向量 $X^n$ 的实际值,表示事件集 $\{A_i\}_{1 \leq i \leq n}$ 的某一个状态向量。为量化状态向量 $x^n$ 对事件 $B$ 的影响,通过以下定性关系来描述状态向量 $x^n$ 对事件 $B$ 的影响值 $h_n(x^n)$ ,为

$$h_n(x^n) = \begin{cases} 1, & \text{给定 } x^n, \text{事件 } B \text{ 一定发生} \\ -1, & \text{给定 } x^n, \text{事件 } B \text{ 一定不发生} \\ 0, & \text{事件 } B \text{ 发生概率与 } x^n \text{ 无关} \end{cases} \quad (1)$$

对于给定状态向量  $\mathbf{x}^n$ , 设事件  $B$  的发生概率为  $P(B|\mathbf{x}^n)$ , 则影响值  $h_n(\mathbf{x}^n)$  的定量定义为

$$P(B|\mathbf{x}^n) = \begin{cases} 1, & h_n(\mathbf{x}^n) = 1 \\ P(B), & h_n(\mathbf{x}^n) = 0 \\ 0, & h_n(\mathbf{x}^n) = -1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $P(B)$  为事件  $B$  发生的非条件概率, 利用线性插值法扩展影响值  $h_n(\mathbf{x}^n)$  的取值, 使  $h_n(\mathbf{x}^n) \in [-1, 1]$ 。通过线性插值法, 用影响值  $h_n(\mathbf{x}^n)$  和事件  $B$  的非条件概率  $P(B)$  可推出事件  $B$  的条件概率  $P(B|\mathbf{x}^n)$  为  $P(B|\mathbf{x}^n) =$

$$\begin{cases} P(B) + h_n(\mathbf{x}^n) \cdot [1 - P(B)], & h_n(\mathbf{x}^n) \in [0, 1] \\ P(B) + h_n(\mathbf{x}^n) \cdot P(B), & h_n(\mathbf{x}^n) \in [-1, 0] \end{cases} \quad (3)$$

定义函数  $\text{sgn } \gamma = \begin{cases} 1, & \gamma \geq 0 \\ 0, & \gamma < 0 \end{cases}$ , 则式(3)转化为

$$P(B|\mathbf{x}^n) = P(B) \cdot \{1 + h_n(\mathbf{x}^n)\}^{1 - \text{sgn } h_n(\mathbf{x}^n)} \cdot \{1 + h_n(\mathbf{x}^n) \cdot [1 - P(B)] \cdot P^{-1}(B)\}^{\text{sgn } h_n(\mathbf{x}^n)} \quad (4)$$

因此, 影响网形式上可以表示为数组  $(V, E, C, A, B)$ 。其中,  $G = (V, E)$  代表满足马尔科夫条件的一个有向无环图;  $V$  表示  $IN$  中节点集, 每一个节点代表一个二值随机变量;  $E$  表示  $IN$  中边的集合, 代表节点间的因果影响;  $C$  是  $IN$  中节点之间影响值集, 且  $E \rightarrow \{[h^{(i)}(x_i = 1), h^{(i)}(x_i = 0)]\}$ ,  $h's \in [-1, 1]$ ;  $A$  是  $V$  的子集, 表示外部影响事件集  $\{A_i\}_{1 \leq i \leq n}$  以及相应向量  $\mathbf{X}^n$  的状态;  $B$  是外部影响事件集  $\{A_i\}_{1 \leq i \leq n}$  状态向量  $\mathbf{X}^n$  的概率分布, 其中根节点对应先验概率, 非根节点对应基准概率。特别的, 在事件集  $\{A_i\}_{1 \leq i \leq n}$  的基数为 1 时, 如果  $x = 1$ , 则  $h(x) = h$ ; 若  $x = 0$ , 则  $h(x) = g$ ,  $h, g$  分别表示事件  $A$  为真、假时对目标事件  $B$  的影响强度值。

### 1.3 基于 DINs 的联盟演化过程行动策略优选模型

INs 作为一种利用影响值映射到条件概率的 BNs, 是 BNs 的一个实例。采用 INs 对联盟演化过程中各变量之间的因果联系进行建模, 就是将事件、行动、阶段演化效果和期望演化效果建立因果链接联系, 链接的因果影响强度用影响值来表示。考虑到任务联盟演化是一个动态问题, 行动和事件是随态势的变化而变化的, 采用 INs 无法有效描述多参数变量的时间演变过程。TINs 是利用影响值延时作用描述多变量间的动态影响, 通过建立节点概率序列来分析效果节点演化效果, 会导致各时间段的节点概率相互独立, 不符合状态转移马尔科夫链特性。因此, 本文借鉴 DBNs 中的时间描述机制, 采用多时段的 DINs 对联盟演化问题进行建模, 同时对各时段影响强度值采用时变函数形式表示。在实际描述因果事件关联时, 影响效果可能会持续一个时间段, 影响强度会随时间的进程而逐渐衰

减或逐渐增强。为此在 TINs 的基础上, 改变影响值固定不变的模式, 建立影响值的时间函数, 以体现影响强度随时间变化的特点。

对于每个给定的影响值, 其与时间段的函数关系可用阶梯函数表示

$$f(h_1^{(i)}(x_i), t) = u(\gamma) \cdot h_1^{(i)}(x_i), u(\gamma) \in [0, 1] \quad (5)$$

$$u(\gamma) = \begin{cases} u_1, & \gamma \in (0, t_1] \\ u_2, & \gamma \in (t_1, t_2] \\ \vdots & \vdots \\ u_T, & \gamma \in (t_{T-1}, t_T] \end{cases} \quad (6)$$

对于每个给定的影响值  $h_1^{(i)}(x_i)$ , 其与时间点的衰减关系分别采用式(6)的负指数函数表示, 式(6)是由给定值  $h_1^{(i)}(x_i)$  经过一段时间衰减至某一值, 而后影响强度一直维持该水平。

$$f(h_1^{(i)}(x_i), t) = h_1^{(i)}(x_i) \cdot e^{-\alpha(t-t_0)}, 0 < \alpha < 1 \ \& \ t_0 \geq 0 \quad (6)$$

$$f(h_1^{(i)}(x_i), t) = \begin{cases} h_1^{(i)}(x_i), & t = t_0 \\ h_1^{(i)}(x_i) \cdot (1 - e^{-\alpha_k(t-t_0)}), & t \in (t_0, t_k] \\ h_1^{(i)}(x_i) \cdot (1 - e^{-\alpha_k(t_k-t_0)}), & t \in (t_k, t_T] \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $t_0 < t_k < t_T$ , 由于全局影响值  $h_n(\mathbf{x}^n)$  与个体影响值  $h_1^{(i)}(x_i)$  满足可累加的条件, 因此  $h_n(\mathbf{x}^n)$  与时间段及时间点的函数关系可采用相同的函数表示形式。行动策略优选模型如图 1 所示。

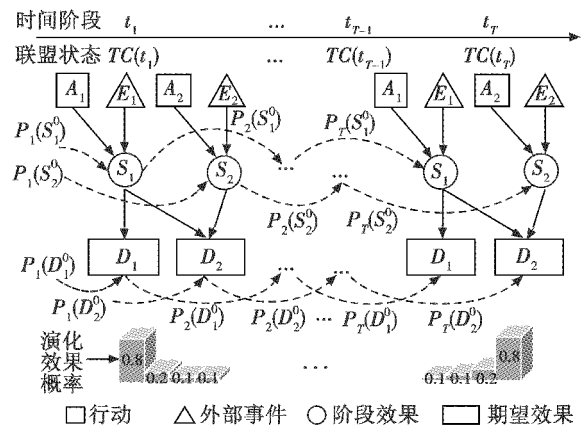


图 1 基于 DINs 的联盟演化过程行动策略优选模型

Fig. 1 Optimized model selection of coalition evolutionary action strategy based on DINs

图 1 的模型中未标识出因果事件之间的影响值  $h(x)$ , 由于联盟演化过程中影响因素状态转移具有马尔科夫链特性, 因此, 期望效果节点和阶段效果节点在动态演化过程中具有相互影响关系, 期望效果节点和中间效果节点的当前阶段的状态与其前一个阶段的状态有关, 虚线上的参数  $P_i(V_i^0) (t=1, 2, \dots, T), V_i \in \{SUD\}$ , 表示前一阶段向当前阶段传递的这些节点的前一阶段的

状态,表示这些节点前一阶段为真的概率,即  $P_i(V_i^0) = P_{i-1}(V_i)$ 。在联盟功能资源和时间资源所允许的条件下,期望联盟演化过程中的系列行动策略可以获得极大化的期望效果评估。描述为

$$\Omega^* = \arg \max_{\Omega \in \Omega_c} \left\{ \prod_{i=1}^{ND} P\{D_i(t_T) | TC(t_0), G\} \right\} \quad (8)$$

$$\text{s. t. } R(\Omega) \leq R_{TC} \quad \& \quad T(\Omega) \leq T_{TC}$$

式中:在最佳行动策略  $\Omega^*$  的执行下联盟要由初始状态  $TC(t_0)$  最终到达期望状态  $TC(t_T)$ ;同时采取的行动策略  $\Omega$  所消耗的资源必须在联盟所能提供的资源总量  $R_{TC}$  以内;行动策略  $\Omega$  的完成时间必须在使命任务约定的完成时限  $T_{TC}$  之内。

## 2 基于CAST逻辑的概率传播算法

影响网的概率传播是一种近似推理,要求具有概率传导关联的根节点与子节点相互独立,由于采用影响值描述因果事件关系,而影响值由领域专家给出,因此要保证构建的模型一致<sup>[14]</sup>。概率传播机制为:只要根节点的概率沿时间轴方向发生变化,根节点将以新的概率对子节点产生动态影响,且影响强度值在不同时段下可能发生变化。

### 2.1 INs与BNs模型的一致性条件

为使影响值能够准确表示条件概率  $P(B | \mathbf{x}^n)$ ,影响值大小必须满足贝叶斯定理和全概定理<sup>[14]</sup>,将全概率公式  $P(B) = \sum_{\mathbf{x}^n} P(\mathbf{x}^n) \cdot P(B | \mathbf{x}^n)$  代入式(4)可得

$$\sum_{\mathbf{x}^n} \{P(\mathbf{x}^n) \cdot \{1 + h_n(\mathbf{x}^n)\}^{1-\text{sgn } h_n(\mathbf{x}^n)} \cdot \{1 + h_n(\mathbf{x}^n)\} \cdot [1 - P(B)] \cdot P^{-1}(B)\}^{\text{sgn } h_n(\mathbf{x}^n)} = 1 \quad (9)$$

由于非条件概率  $P(\mathbf{x}^n)$  和影响值  $h_n(\mathbf{x}^n)$  都是设计参数,因此式(9)便是参数设计的一致性条件,可将其表示为一种更直接简单的方式

$$[1 - P(B)] \sum_{\text{sgn } h_n(\mathbf{x}^n) = 1} P(\mathbf{x}^n) h_n(\mathbf{x}^n) = P(B) \sum_{\text{sgn } h_n(\mathbf{x}^n) = 0} P(\mathbf{x}^n) |h_n(\mathbf{x}^n)| \quad (10)$$

$$P(B) = \left[ \sum_{\text{sgn } h_n(\mathbf{x}^n) = 1} P(\mathbf{x}^n) h_n(\mathbf{x}^n) \right] \cdot \left[ \sum_{\text{sgn } h_n(\mathbf{x}^n) = 0} P(\mathbf{x}^n) |h_n(\mathbf{x}^n)| \right]^{-1} \quad (11)$$

式(11)中,  $\sum_{\mathbf{x}^n, \text{sgn } h_n(\mathbf{x}^n) = 0} P(\mathbf{x}^n) |h_n(\mathbf{x}^n)| \neq 0$ 。因此在设计参数时,当得到先验概率  $P(\mathbf{x}^n)$  的新信息后,  $P(B)$  和(或)  $h_n(\mathbf{x}^n)$  也相应调整以满足式(10)中的条件。式(10)后半部分包含许多自由参数,因而即便指定了概率  $P(B)$  和  $P(\mathbf{x}^n)$  也无法唯一确定影响值  $h_n(\mathbf{x}^n)$ ;但是,指定了  $P(\mathbf{x}^n)$  和  $h_n(\mathbf{x}^n)$  就可以唯一确定  $P(B)$ 。

### 2.2 CAST逻辑下的概率传播计算

由于子节点在任意时段的概率值是由根节点决定的,每一时段内根节点对子节点的影响强度值具有不确定性,因此需要每次概率传播前更新根节点概率和影响值,然后逐层计算更新子节点概率。在参数设计一致性基础上,具体概率传播计算步骤如下所述。

1) 对于构建的影响网  $G = (V, E)$ ,选定某根节点  $V_r$ ,采用Dijkstra方法分别计算其到目标子节点  $V_d (d = 1, 2, \dots, D)$  的最短距离  $W(V_r, V_d)$ ,将整个划分为  $L = \max_{d \in D} [W(V_r, V_d)]$  层。

2) 判断  $t_k \leq t_T$ ,若成立则更新影响网层数  $L$ 、根节点先验概率,根据式(6)、式(7)更新根节点与子节点之间的影响强度值,转3);否则结束计算,输出目标子节点独立概率值和联合概率值。

3) 计算子节点的条件概率分布。

给定影响值  $\{h_i^{(i)}(x_i)\}_{1 \leq i \leq n}$ ,一个二维随机状态向量  $\mathbf{x}^n$  对目标子节点  $B$  的影响值为  $h_n(\mathbf{x}^n)$ ,则子节点  $B$  的条件概率  $P(B | \mathbf{x}^n)$  计算如下:

① 聚合负影响强度值为

$$I_{\text{negative}} = \prod_{i: h_i^{(i)}(x_i) < 0} (1 - |h_i^{(i)}(x_i)|); \quad (12)$$

② 聚合正影响强度值为

$$I_{\text{positive}} = \prod_{i: h_i^{(i)}(x_i) > 0} (1 - |h_i^{(i)}(x_i)|); \quad (13)$$

③ 合并正负影响强度值,得到整体影响值  $h_n(\mathbf{x}^n)$  算式为

$$h_n(\mathbf{x}^n) = [I_{\text{negative}} - I_{\text{positive}}] \cdot [\max(I_{\text{negative}}, I_{\text{positive}})]^{-1}; \quad (14)$$

④ 条件概率的计算

$$P(B | \mathbf{x}^n) = \begin{cases} P(B) + h_n(\mathbf{x}^n) \cdot [1 - P(B)]; & h_n(\mathbf{x}^n) \geq 0 \\ P(B) + h_n(\mathbf{x}^n) \cdot P(B); & h_n(\mathbf{x}^n) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $P(B)$  目标子节点  $B$  的基准概率。

4) 计算子节点的发生概率。

给定子节点  $B$  的条件概率  $P(B | \mathbf{x}^n)$  和根节点的先验概率  $P(\mathbf{x}^n)$ ,根据全概公式和根节点发生概率相互独立假设,可得

$$P(B) = \sum_{\mathbf{x}^n \in X^n} [P(B | \mathbf{x}^n) \cdot P(\mathbf{x}^n)] = \sum_{\mathbf{x}^n \in X^n} [P(B | \mathbf{x}^n) \cdot P(X^1) \cdot P(X^2) \cdot \dots \cdot P(X^n)] \quad (16)$$

5) 判断是否各层节点发生概率均计算完成,若未完成,  $L = L + 1$  返回2);若完成,则更新时间阶段  $[t_{k-1}, t_k]$ ,并返回2)。

## 3 案例设计与仿真分析

### 3.1 仿真案例

案例想定为攻击某离岸岛屿,岛屿具有完备防御体系,配有港口(舰队)、雷达阵地、机场、兵营、仓库以

及指挥中心。行动目标:集结各种空中力量实施统一行动,摧毁敌所有关键目标,迫使其放弃岛屿。为达成作战目标,在资源和时间的约束下,联盟可采取的行动有: $A_1$  为空对空攻击,压制毁伤敌空中拦截编队; $A_2$  为空对海攻击,压制毁伤敌具有防空能力的水面舰艇; $A_3$  为空对地攻击无反制能力的固定目标(预定目标); $A_4$  为空对地攻击有反制能力的固定目标; $A_5$  为空对地攻击无反制能力的移动目标(预定目标); $A_6$  为空对地攻击有反制能力的移动目标; $A_7$  为信息支援行动; $A_8$  为空中警戒截击; $A_9$  为电子干扰; $A_{10}$  为空中补给行动(燃料补给)。外部随机事件最有可能发生并影响较大的有: $E_1$  为敌机(编队)空中拦截行动; $E_2$  为敌水面舰艇对空拦截行动; $E_3$  为敌地面防空系统对空拦截行动; $E_4$  为敌实施电子反干扰; $E_5$  为敌增援飞机(编队)空中拦截行动。在行动和外部随机事件共同作用下产生的联盟阶段效果为: $S_1$  表示空对空任务的执行质量和攻击效果; $S_2$  表示空对海任务的执行质量和攻击效果; $S_3$  表示空对地有反制能力目标攻击的任务执行质量和攻击效果; $S_4$  表示空中编队攻击预定目标前集结汇合; $S_5$  表示预定目标的摧毁程度; $S_6$  表示空中编队返航集结汇合。联盟演化最终期望达成的效果为: $D_1$  为成功完成战役使命; $D_2$  为战役损失程度。在专家知识基础上,利用 DINs 建立联盟演化行动过程策略模型及模型中影响强度的基准赋值,如图 2 所示。

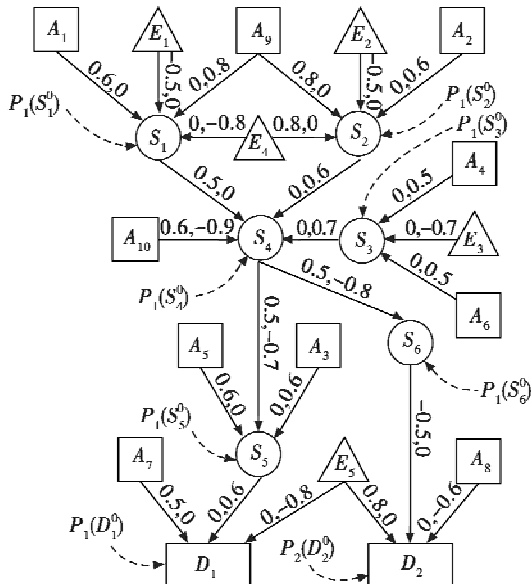


图 2 行动、事件与效果的动态影响网  
Fig. 2 Dynamic influence network of actions, events and effects

根据战役计划领域专家的分析,任务联盟的演化过程分为 6 个时间阶段: $[t_0, t_1]$  时段内对海面舰艇进行压制毁伤; $[t_1, t_2]$  对敌空中拦截编队进行截击; $[t_2,$

$t_3]$  突击地面具有反制能力的固定和移动目标; $[t_3, t_4]$  经空中补给燃料后编队集结汇合; $[t_4, t_5]$  打击固定和移动的预定目标; $[t_5, t_6]$  空中截击敌增援编队,编队集结返航。通过以往经验知识和专家分析,给出各个时段外部随机事件发生概率,见表 1。

表 1 外部随机事件的发生概率

Table 1 The occurrence probability of external random events

随机事件	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$
$[t_0, t_1]$	0	[0.7, 0.9]	0	[0.5, 0.7]	0
$[t_1, t_2]$	[0.7, 0.9]	[0.3, 0.4]	0	[0.5, 0.7]	0
$[t_2, t_3]$	[0.3, 0.4]	0	[0.6, 0.8]	0	0
$[t_3, t_4]$	0	0	[0.3, 0.4]	0	[0, 0.2]
$[t_4, t_5]$	0	0	0	0	[0.2, 0.4]
$[t_5, t_6]$	0	0	0	0	[0.6, 0.8]

从任务联盟应对战役进程的角度,结合计划领域专家知识确定各时段的行动策略见表 2。

表 2 演化各时段的可采取行动策略

Table 2 The feasible action strategy for different evolutionary period

行动策略	$A_1$			$A_2$			$A_3$		
	$a_1^1$	$a_1^2$	$a_1^3$	$a_2^1$	$a_2^2$	$a_2^3$	$a_3^1$	$a_3^2$	$a_3^3$
$[t_0, t_1]$	1	0	0	1	0	0	0	0	0
$[t_1, t_2]$	0	1	0	0	1	0	0	0	0
$[t_2, t_3]$	0	0	1	0	0	1	0	0	0
$[t_3, t_4]$	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$[t_4, t_5]$	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$[t_5, t_6]$	0	0	0	0	0	0	0	0	1

行动策略	$A_4$			$A_5$			$A_6$		
	$a_4^1$	$a_4^2$	$a_4^3$	$a_5^1$	$a_5^2$	$a_5^3$	$a_6^1$	$a_6^2$	$a_6^3$
$[t_0, t_1]$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$[t_1, t_2]$	1	0	0	0	0	0	0	1	0
$[t_2, t_3]$	0	1	1	0	0	0	0	0	1
$[t_3, t_4]$	0	0	1	1	0	0	0	0	1
$[t_4, t_5]$	0	0	0	0	1	0	1	0	0
$[t_5, t_6]$	0	0	0	0	0	1	1	0	0

行动策略	$A_7$			$A_8$		
	$a_7^1$	$a_7^2$	$a_7^3$	$a_8^1$	$a_8^2$	$a_8^3$
$[t_0, t_1]$	1	1	1	1	1	1
$[t_1, t_2]$	0	1	1	1	1	1
$[t_2, t_3]$	0	0	1	1	1	0
$[t_3, t_4]$	0	0	0	1	1	0
$[t_4, t_5]$	0	0	0	0	1	1
$[t_5, t_6]$	0	0	0	0	1	0

行动策略	$A_8$			$A_9$			$A_{10}$			
	$a_8^3$	$a_8^4$	$a_9^1$	$a_9^2$	$a_9^3$	$a_9^4$	$a_9^5$	$a_9^6$	$a_{10}^1$	$a_{10}^2$
$[t_0, t_1]$	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
$[t_1, t_2]$	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
$[t_2, t_3]$	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
$[t_3, t_4]$	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
$[t_4, t_5]$	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0
$[t_5, t_6]$	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0

### 3.2 仿真结果分析

算法用 Matlab 语言编程实现,并在 Inter (R)

Pentium(R) 4 CPU 3.00 GHz 计算机上进行仿真验证。LGA 和标准 GA 的具体参数设置为：种群规模  $N_d = 30$ 、迭代次数  $n_{iterative} = 50$ 、交叉概率  $p_c = 0.8$ 、个体变异概率  $p_m = 0.05$ 、染色体特征学习概率  $p_l = 0.75$ 。行动  $A_9$  的电子干扰对  $S_1$  和  $S_2$  影响值分别在  $[t_1, t_2]$  和  $[t_0, t_1]$  时段效果最佳，随后由于敌采用应对措施，干扰效果在  $[t_2, t_3]$  和  $[t_1, t_2]$  时段下降，在  $[t_3, t_4]$  时段后取消该行动，影响强度值将维持不变，取衰减系数  $\alpha = 0.1$ 。以联盟达到目标效果最后阶段最大(联合)概率为目标函数，不考虑部分节点影响强度变化，计算得到联盟演化过程应选择的最佳行动策略  $\Omega_1$  为  $(a_1^1, a_2^2, a_3^3, a_4^3, a_5^1, a_6^3, a_7^6, a_8^2, a_9^6, a_{10}^1)$ ；在行动  $A_9$  的电子干扰对  $S_1$  和  $S_2$  影响值变化下，最佳行动策略  $\Omega_2$  为  $(a_1^2, a_2^2, a_3^3, a_4^3, a_5^1, a_6^3, a_7^6, a_8^4, a_9^4, a_{10}^1)$ 。

图3和图4中的目标函数  $f_1(s)$ 、 $f_2(s)$  分别为节点  $D_1$  和  $D_2$  的发生概率；目标函数  $f_3(s)$  为节点  $D_1$  发生、 $D_2$  不发生的联合概率。行动策略  $\Omega_1$  达到最大概率时间为  $t_4$ ，行动策略  $\Omega_2$  达到最大概率时间为  $t_3$ ，而后目标函数  $f_1(s)$ 、 $f_3(s)$  均下降，主要是由于事件  $E_5$  增加了战役损失程度，降低了任务完成概率，但行动策略  $\Omega_2$  是基于影响强度值变化重新优选的策略，并在最后两个时间段均采取行动  $A_8$ ，其最后的目标函数  $f_3(s) = 0.8897$  优于  $\Omega_1$  的目标函数  $f_3(s) = 0.7875$ 。

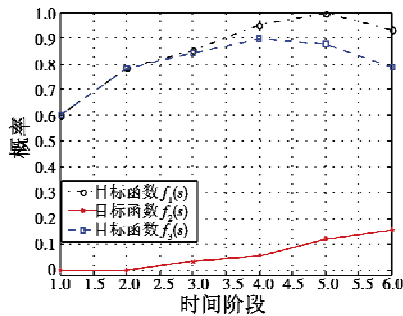


图3 行动策略  $\Omega_1$  的目标节点概率变化

Fig.3 Object node probability change of action strategy  $\Omega_1$

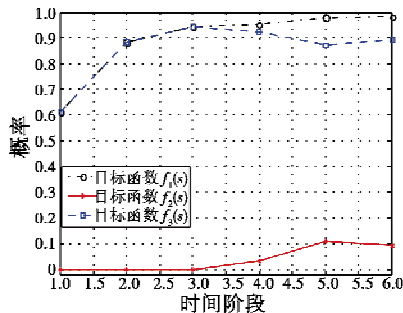


图4 行动策略  $\Omega_2$  的目标节点概率变化

Fig.4 Object node probability change of action strategy  $\Omega_2$

由图5给出的行动策略  $\Omega_2$  下各阶段节点的概率变化直方图中可看出， $S_1$  到  $S_6$  的阶段节点具有概率记

忆效应，这说明在有效赋予先验知识的条件下，构建具有中间节点的联盟演化 DINs 模型可以有效评估出目标节点的优劣，并可根据不同评价指标和决策偏好选择各时段下的行动策略。

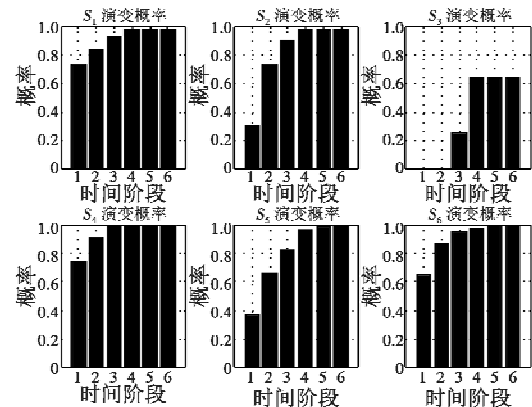


图5 行动策略  $\Omega_2$  下中间节点  $S_1$  至  $S_6$  概率变化

Fig.5 Probability change of middle node  $S_1$  to  $S_6$  for action strategy  $\Omega_2$

#### 4 结束语

针对联盟演化过程存在不确定因素多的特点，在任务联盟定向演化的目标约束下，优选出演化过程多时段下的行动策略，采用了一种考虑影响值变化的 DINs 建立联盟演化行动策略优选模型。为保证 INs 与 BNs 构建的模型一致，给出了参数设计的一致性条件和确定方法，设计了基于 CAST 逻辑的概率传播算法。由于没有充分的数据来源，仿真案例中的 CAST 参数定义存在一定程度的简化，需要在下一步研究中予以完善。

#### 参考文献

[1] 万路军,姚佩阳,孙鹏,等. 有人-无人作战智能体任务联盟形成策略方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2013,14(3):10-14.  
WAN L J, YAO P Y, SUN P, et al. Strategy of manned-unmanned combat agents task coalition formation [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013, 14(3):10-14.

[2] MURPHY K P. Dynamic Bayesian networks: Representation, inference and learning[D]. Berkeley: California University, 2000.

[3] ROSEN J A, SMITH W L. Influence net modeling with causal strengths: An evolutionary approach[C] //Proceedings of Command and Control Research and Technology Symposium, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1996:699-708.

[4] HAIDER S, LEVIS A H. A heuristic approach for belief

- updating in timed influence nets [C]//Proceedings of 2004 Command and Control Research and Technology Symposium, San Deigo, 2004.
- [5] HAIDER S, LEVIS A H. Finding effective course of action using particle swarm optimization[C]//IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2008:1135-1150.
- [6] ZHU Y G, LEI Y L. Stochastic timed influence nets [C]//Proceedings of the IEEE 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling, Taiyuan, 2010:634-638.
- [7] 朱延广,朱一凡. 基于影响网络的联合火力打击目标选择方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2010, 24(3):64-69.  
ZHU Y G, ZHU Y F. Method of joint fire strike target selected based on influence nets [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2010, 24(3):64-69.
- [8] 朱延广,朱一凡,雷永林,等. 基于随机时间影响网络的联合火力打击方案评估[J]. 国防科学技术大学学报, 2011, 33(5):97-102.  
ZHU Y G, ZHU Y F, LEI Y L, et al. Stochastic timed influence net based joint fire strike plan assessment [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(5):97-102.
- [9] 朱延广,朱一凡,雷永林,等. 随机时间影响网络建模方法——扩展事件影响网络的确定性时间延迟[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(8):1814-1825.  
ZHU Y G, ZHU Y F, LEI Y L, et al. A new timed influence net model with stochastic delay [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(8):1814-1825.
- [10] 杨翠蓉,王明哲,廖晶静. 用影响网分析复杂系统关键事件[J]. 应用科学学报, 2010, 28(6):639-645.  
YANG C R, WANG M Z, LIAO J J. Analysis of key events in complex systems using influence nets [J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 28(6):639-645.
- [11] 杜正军,陈超,姜鑫. 基于影响网络与不完全信息多阶段博弈的作战行动序列模型及求解方法[J]. 国防科学技术大学学报, 2012, 34(3):63-67, 84.  
DU Z J, CHEN C, JIANG X. Modeling and solution method of course of action based on influence net and multi-stage gamed with incomplete information [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(3):63-67, 84.
- [12] 程恺,张宏军,张睿,等. 基于扩展时间影响网络的作战任务效能计算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(12):2492-2497.  
CHENG K, ZHANG H J, ZHANG R, et al. Calculation of operational task effectiveness based on extended timed influence nets [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(12):2492-2497.
- [13] 张杰勇,姚佩阳,阳东升,等. 基于 DINs 和 PSO 的组织行动过程选择方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(10):1985-1993.  
ZHANG J Y, YAO P Y, YANG D S, et al. Approach to organizational course of actions selection based on DINs and PSO [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(10):1985-1993.
- [14] ZAIDI A K, PAPANTONI T P. Theory of influence networks [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2010, 60(4):457-491.

(上接第 13 页)

- LONG T, CHEN Y, SHEN L C. Distributed cooperative mission control based on contract mechanism for multiple unmanned combat aerial vehicles [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, 28(2):352-357.
- [7] 叶媛媛,闵春平,沈林成,等. 基于满意决策的多 UAV 协同目标分配方法[J]. 国防科学技术大学学报, 2005, 27(4):116-120.  
YE Y Y, MIN C P, SHEN L C, et al. Satisficing-decision-based targets assigning for cooperative UCAVs [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(4):116-120.
- [8] 汤连生. 基于满意决策支持系统的地下水管理研究[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(6):23-28.  
TANG L S. Satisficing-decision-based underground water management [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992, 19(6):23-28.
- [9] 李静. 基于有限理性满意决策原则的出发时间选择模型[J]. 山东交通学院学报, 2007, 15(2):15-18.  
LI J. Departure time choice model based on bounded rational satisficing decision [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2007, 15(2):15-18.
- [10] BACHARACH M. The epistemic structure of a theory of a game [J]. Theory and Decision, 1994, 37:7-48.