

# 基于动态影响网的 C2 组织 COA 问题建模

张杰勇 姚佩阳 孙 鹏

(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

**摘要** 提出了用动态影响网(Dynamic Influence Nets, DINs)对指挥控制(Command and Control, C2)组织行动过程(Course of Actions, COA)问题进行建模的方法。该方法通过引入因果强度参数,替代了传统动态贝叶斯网络中的条件概率表。给出了利用因果强度参数进行概率传播的具体计算方法。结合一个联合作战的仿真算例,验证了该建模方法的优越性和有效性。

**关键词** 指挥控制组织,行动过程,动态影响网,因果强度,动态贝叶斯网络

中图分类号 TP393 文献标识码 A

## Modeling of COA Problem of C2 Organization Based on Dynamic Influence Nets

ZHANG Jie-yong YAO Pei-yang SUN Peng

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract** A method based on dynamic influence nets(DINs) which models the course of actions(COA) problem of command and control(C2) organization was proposed. In this method, the causal strength parameters are introduced instead of conditional probability tables, and the probability propagation algorithm using causal strength parameters was presented. At last, the superiority and efficiency of this modeling method was illuminated by a case of joint campaign.

**Keywords** C2 organization, Course of actions, Dynamic influence nets, Causal strength, Dynamic Bayesian networks

组织权变理论认为,一个合适的组织设计是组织高效能运行的关键,这一点也被大量的实验研究所证实,而建立一个有效的组织行动过程(Course Of Actions, COA)则是组织设计的重要步骤之一<sup>[1,2]</sup>。在军事指挥控制(Command and Control, C2)领域,研究 C2 组织的 COA 问题主要是战役规划问题上的基于效果的军事行动过程的选择,即基于效果作战思想的技术实现<sup>[3]</sup>。从本质上讲,COA 问题是依据有限的资源采用最佳的 COA 来完成某一使命任务的问题,实质上是对动态的行动-效果之间的因果联系进行建模,并对该模型进行优化求解的过程。COA 问题建模的主要方法是动态贝叶斯网络(Dynamic Bayesian Networks, DBNs)<sup>[3,4]</sup>,DBNs 是一种处理不确定性事件的机制,这种机制能够满足对动态不确定的战场空间建模的要求,并且能够很好地描述行动-效果之间的因果联系<sup>[5]</sup>。

但是,在军事 C2 领域,应用 DBNs 对 COA 问题进行建模是有局限性的,因为 DBNs 在其知识获取阶段,需要详细地定义其节点条件概率表(Conditional Probability Tables, CPT)中的大量参数,并且这些参数的数量会随父节点数目的增加呈指数级增长。而在该领域中,要想通过获取大量的经验数据来定义 CPT 中众多的条件概率是极为困难的。针对上述问题,本文引入动态影响网(Dynamic Influence Nets, DINs)对 COA 问题进行建模,通过使用因果强度(CAusal

Strength, CAST)参数从直观上来定义因果节点之间的正面或负面的影响,替代 DBNs 中的 CPT,从而有效地缓解 DBNs 在知识获取方面的瓶颈问题。

## 1 C2 组织 COA 问题的基本概念

为了下文描述方便,对 C2 组织 COA 问题中的一些基本概念进行描述。

行动(Action):是 C2 组织对环境有目的的改造所采取的措施,是 C2 组织可控的利导因素。一次战役规划中的基本行动由领域专家定义。在 C2 组织资源状态约束下,依据联合作战的协同原则,由军事领域专家确定可获取的基本行动的集合  $A = \{A_i | 1 \leq i \leq NA\}$ ,  $NA = |A|$ , 表示行动的数量。假设在完成使命的过程中的环境演化可划分为  $T+1$  个阶段,并且假设  $t_0$  阶段的环境状态为  $En(t_0)$ ,且在  $t_0$  阶段不采取任何行动,记  $P_k\{A_i = 1\} = 1, 1 \leq i \leq NA$  且  $1 \leq k \leq T$ ,表示在环境演化的  $t_k$  阶段采取了行动  $A_i$ 。显然,在没有任何约束的情况下,由单个行动  $A_i$  所构成的行动策略有  $2^T$  种(从“ $0(t_1) \cdots 0(t_T)$ ”到“ $1(t_1) \cdots 1(t_T)$ ”)。但是,在实际战役规划中,在组织资源约束和行动协同原则的限制下,由单个行动  $A_i$  构成的可行的行动策略的数量远小于  $2^T$ 。设由单个行动  $A_i$  构成的可行的行动策略集合为  $\Omega_{A_i} = \{a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^{r_i}\}$ (由领域专家定义,其数量  $r_i$  远小于  $2^T$ ,集合中每一个元素  $a_i^j (1 \leq j \leq$

到稿日期:2011-06-07 返修日期:2011-08-18 本文受国家高技术研究发展计划(863 计划)(2010AAJ146)和空军工程大学电讯工程学院博士创新基金(200907)资助。

张杰勇(1983—),男,博士生,主要研究方向为指挥控制组织建模,E-mail:dumu3110728@126.com;姚佩阳(1960—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为指挥自动化;孙 鹏(1973—),男,副教授,主要研究方向为指挥自动化。

$r_i$ )是一个长度为  $T$  的序列“ $a_i^1(t_1), a_i^1(t_2), \dots, a_i^1(t_T)$ ”,  $a_i^1(t_k) \in \{0, 1\} (1 \leq k \leq T)$  表示在  $t_k$  阶段组织是否采取了行动  $A_i$ 。而 COA 则是所有行动的集合  $S = \{(a_1, a_2, \dots, a_{NA}) \mid a_i \in \Omega_{A_i}, 1 \leq i \leq NA\}$ , 其整个可行的 COA 空间为  $\Omega_S = \Omega_{A_1} \times \Omega_{A_2} \times \dots \times \Omega_{A_{NA}}$ 。

外部事件(Event):是外界影响 C2 组织运作、阻挠组织实现目标的行为。设可能发生外部事件的集合为  $E = \{E_i \mid 1 \leq i \leq NE\}$ ,  $NE = |E|$ ,  $NE$  为外部事件的数量。通常由领域专家给出外部事件在某一阶段的发生概率,记外部事件  $E_i$  在环境演化的  $t_k$  阶段发生的概率为  $P_k\{E_i = 1\} = P_k(E)$ ,  $1 \leq i \leq NE$  且  $1 \leq k \leq T$ 。

期望效果(Desired effects):是 C2 组织需要实现目标,是 C2 组织采取 COA 所要达到的预期结果。组织采取 COA 的目的就是使期望效果的获得概率最大。设某种环境下要达到的期望效果的集合为  $D = \{D_i \mid 1 \leq i \leq ND\}$ ,  $ND = |D|$ , 表示期望效果的数量。设某一行动过程  $S$  下,期望效果的获得概率为  $F(S) = P\{D_1(t_T) \cdot D_2(t_T) \cdot \dots \cdot D_{ND}(t_T) \mid En(t_0), S\}$ , 其中,  $En(t_0)$  为  $t_0$  阶段的环境状态(初始状态),  $S$  为某一 COA, C2 组织采取 COA 的目的就是极大化  $F(S)$ 。

中间效果(InterMediate effects):中间效果不是 C2 组织最终所需要得到的效果,它只是达到最终期望效果的中间阶段性效果,但是它对建立行动、外部事件与期望效果之间的联系非常有用。通常一次复杂的战役规划会涉及相当多的行动、外部事件和期望效果,这就导致给直接建立这些变量之间的定性关系增加了很大的困难,因此规划者需要通过中间效果对这些变量因素之间相互影响关系进行分类来建立关联。设某种环境下需要定义的中间效果的集合为  $M = \{M_i \mid 1 \leq i \leq NM\}$ ,  $NM = |M|$ ,  $NM$  为中间效果的数量。

## 2 基于 INs 的 COA 问题的静态模型

影响网(Influence Nets, INs)<sup>[6,7]</sup>作为贝叶斯网络的一个实例,是为了解决贝叶斯网络存在的大量的知识需要获取和精确的概率推理算法难以构造两方面的缺陷<sup>[8]</sup>而提出来的。它使用 CAST 参数来表示知识的抽取和变化的循环置信传播(loopy belief propagation)以进行概率推理<sup>[9,10]</sup>。针对本文所研究问题的特殊性,对标准的 INs 进行了变化。主要的图形上的变化是将所有的圆头边变化为箭头边,而因果事件之间的正面的或负面的影响只通过 CAST 参数来体现。

通过 INs 对 COA 问题中各变量之间的因果联系进行建模,实质上是把行动、外部事件、中间效果和期望效果通过表示因果联系的链接联系起来,而这些链接的因果影响的强度则用 CAST 参数来表示。一个基于 INs 的 COA 问题的静态模型如图 1 所示。

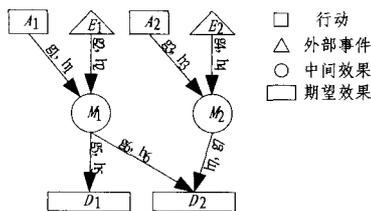


图1 基于 INs 的 COA 问题的静态模型

基于 INs 的 COA 问题的静态模型可以表示为三元组  $G = (V, L, CAST)$ , 其中  $V = \{A, E, M, D\}$  分别表示行动、外

部事件、中间效果和期望效果;带箭头的链接集  $L = \{(A, M), (E, M), (M, D)\}$  描述了这些变量之间的因果关系;CAST 参数和链接相对应,表示该链接的因果影响强度,  $CAST = (g, h)$ ,  $-1 < g, h < 1$ 。  $g$  和  $h$  的含义分别为:  $g$  取正(或负)值,表示父节点为真时对子节点为真时产生的正面(或负面)影响的强度;而  $h$  取正(或负)值,表示父节点为假时对子节点为真时产生的正面(或负面)影响的强度。

## 3 基于 DINs 的 COA 问题的动态模型

INs 与贝叶斯网络一样,主要缺点在于没有描述时间的自然机制<sup>[11]</sup>,只能描述 COA 问题的某一时间阶段的静态因果联系。而 C2 组织 COA 问题是一个动态的问题,是伴随 COA 演化的环境状态、资源状态和事件过程的同步演化过程。在其演化过程中,行动与外部事件是随环境状态变化而变化的,则采用 INs 并不能对这一过程进行有效描述。因此,在 INs 的基础上,引入了时间的因素,使用 DINs 来对 COA 问题进行建模。

基于 DINs 的 COA 问题的动态模型如图 2 所示。图 2 中虚线表示期望效果和中间效果在动态演化过程中的相互影响关系,虚线上的参数  $P_t(V_i^0) (1 \leq t \leq T, V_i \in \{M \cup D\})$ , 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,且表示这些节点前一阶段为真的概率,即  $P_t(V_i^0) = P_{t-1}(V_i)$ 。基于以上描述,伴随 COA 演化的环境状态转移具有马尔科夫链特性。图 2 所建立的 DINs 是对这一过程的简洁描述,图 2 中没有标出因果节点之间的 CAST 参数。

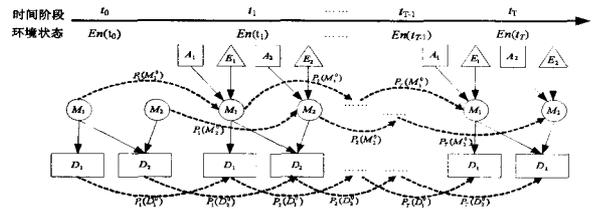


图2 基于 DINs 的 COA 问题的动态模型

## 4 基于 CAST 参数 COA 的 $F(S)$ 的计算

COA 问题建模的主要目的就是通过对所构建的行动-外部事件-效果的影响关系,利用领域专家定义的 CAST 参数来进行概率的推理,最终求得 COA 的  $F(S)$ 。这也是利用 DINs 对 COA 问题建模所需要解决的关键技术问题。

### 4.1 基于 CAST 参数的概率传播算法

计算 COA 的  $F(S)$  就是在已知行动过程  $S$  的条件下,通过 DINs 构建的因果影响关系以及专家定义的 CAST 参数,求解期望效果的获得概率的过程,其中的一个关键环节就是基于 CAST 参数的概率传播。本节以图 3 中一个基于 DINs 的阶段静态模型为例,来描述基于 CAST 参数的概率传播算法。

在图 3 中,  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$  表示条件事件,  $Y$  表示目标事件(表示期望效果或中间效果),  $P_t(Y^0)$  表示  $t-1$  阶段向  $t$  阶段传递的目标事件  $Y$  在  $t-1$  阶段为真的概率,  $P_t(Y^0) = P_{t-1}(Y)$ 。图 3(a)的  $(g_i, h_i) (i = 1, 2, \dots, n)$  表示因果影响强度,其中  $g_i$  表示条件事件  $X_i$  为真时对目标事件  $Y$  为真的影响强度,而  $h_i$  表示条件事件  $X_i$  为假时对目标事件  $Y$  为真的影响强度。  $g_i, h_i > 0$  表示正面影响,  $g_i, h_i < 0$  表示负面

影响,  $g_i, h_i=0$  表示无影响。而求解目标事件  $Y$  (期望效果或中间效果) 获得概率, 即求  $P_t(Y)$  的值。

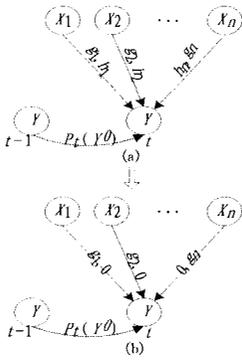


图3 基于 DINs 的阶段静态模型

考虑本文求解问题的实际情况, 假设所有的条件事件  $X_i$  都是相互独立的; 并且假设当条件事件  $X_i$  为假(不发生)时对目标事件  $Y$  的变化无影响, 也就是当没有行动和外部事件发生时, 所有的目标事件的获得概率保持不变, 即  $h_i=0 (i=1, 2, \dots, n)$ , 这与实际情况相符。因此, 可以将图 3(a) 图转化为图 3(b) 图。

**定义**  $X^n$  表示一个  $n$  维的二值随机向量集合,  $X = \{x^n = (X_1, X_2, \dots, X_n) | X_i = \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n\}$ , 其中  $x^n$  表示集合中的一个  $n$  维的二值向量,  $X_i$  表示第  $i$  个条件事件,  $X_i=1$  表示  $X_i$  为真(发生), 而  $X_i=0$  表示  $X_i$  为假(不发生)。  $x^n$  表示所有条件事件的某一个状态向量。由于所有条件事件都有两个状态, 因此  $x^n$  的数量为  $2^n$  个。

由全概率公式可得:

$$\begin{aligned} P_t(Y) &= \sum_{x^n \in X^n} [P_t(Y|x^n) \cdot P_t(x^n)] \\ &= \sum_{x^n \in X^n} [P_t(Y|x^n) \cdot P_t(X_1, X_2, \dots, X_n)] \\ &= \sum_{x^n \in X^n} [P_t(Y|x^n) \cdot P_t(X_1) \cdot P_t(X_2) \cdots \\ &\quad P_t(X_n)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $t$  阶段条件事件  $X_i$  的先验概率  $P_t(X_i) (i=1, 2, \dots, n)$  是已知的(行动的发生概率由 COA 决定, 如果某一 COA 在这一阶段采取了该行动, 则该行动的发生概率为 1, 否则为 0; 而外部事件在这一阶段的发生概率由领域专家给出), 因此求解  $t$  阶段目标事件  $Y$  获得概率  $P_t(Y)$  只需求  $P_t(Y|x^n)$ , 即求给定  $x^n$  的情况下目标事件  $Y$  的发生概率。

为了量化  $x^n$  对目标事件  $Y$  的影响, 本文通过以下定性关系来描述  $x^n$  对目标事件  $Y$  影响值  $AI(x^n)$ 。假如对于给定的  $x^n$ , 目标事件  $Y$  肯定为真(肯定发生), 则  $AI(x^n)=1$ ; 假如对于给定的  $x^n$ , 目标事件  $Y$  肯定为假(肯定不发生), 则  $AI(x^n)=-1$ ; 假如对于给定的  $x^n$ , 目标事件发生概率与其无关, 则  $AI(x^n)=0$ 。即:

$$AI(x^n) = \begin{cases} 1, & \text{给定 } x^n, Y \text{ 肯定发生} \\ -1, & \text{给定 } x^n, Y \text{ 肯定不发生} \\ 0, & Y \text{ 的发生概率与给定 } x^n \text{ 无关} \end{cases} \quad (2)$$

由以上关于  $AI(x^n)$  的定性分析可以得:

$$P_t(Y|x^n) = \begin{cases} 1, & AI(x^n)=1 \\ P_t(Y^0), & AI(x^n)=0 \\ 0, & AI(x^n)=-1 \end{cases} \quad (3)$$

使用线性插值的方法扩展  $AI(x^n)$  的取值, 使  $AI(x^n) \in$

$[-1, 1]$ , 由式(3)得:

$$P_t(Y|x^n) = \begin{cases} P_t(Y^0) + AI(x^n) \cdot [1 - P_t(Y^0)], & AI(x^n) \in [0, 1] \\ P_t(Y^0) + AI(x^n) \cdot P_t(Y^0), & AI(x^n) \in [-1, 0) \end{cases} \quad (4)$$

可以将式(4)转化为:

$$P_t(Y|x^n) = P_t(Y^0) \cdot \{1 + AI(x^n) \cdot [1 - P_t(Y^0)]\} \cdot P_t^{-1}(Y^0)^{\{\text{sgn}(AI(x^n))\}} \cdot \{1 + AI(x^n)\}^{1 - \text{sgn}(AI(x^n))} \quad (5)$$

其中:

$$\text{sgn}(ra) = \begin{cases} 1, & \text{if } ra \geq 0 \\ 0, & \text{if } ra < 0 \end{cases} \quad (6)$$

而对于求  $x^n$  对目标事件  $Y$  影响值  $AI(x^n)$ , 且  $AI(x^n) \in [-1, 1]$ , 可以通过 CAST 参数根据以下步骤对其求解。

步骤 1 聚合  $x^n$  中全部的正面影响, 得出正面影响值  $PI$ ;

$$PI = 1 - \prod_i (1 - g_i), \forall g_i > 0 \quad (7)$$

步骤 2 聚合  $x^n$  中全部的负面影响, 得出负面影响值  $NI$ ;

$$NI = \prod_i (1 + g_i) - 1, \forall g_i < 0 \quad (8)$$

步骤 3 结合  $PI$  和  $NI$ , 得出  $x^n$  对目标事件  $Y$  的影响值  $AI(x^n)$ 。

$$AI(x^n) = PI + NI \quad (9)$$

#### 4.2 计算 $F(S)$ 的方法流程

由基于 DINs 的 COA 动态模型可知, 期望效果是伴随行动和外部事件的演化而同步演化的, 并且其演化具有马尔科夫链特性。因此, 求解 COA 的  $F(S)$  的方法步骤如下:

步骤 1 由  $t_0$  阶段向  $t_1$  阶段传递环境的初始状态(中间效果和期望效果的发生概率), 令  $P_1(V_i^?) = P_0(V_i), V_i \in \{M \cup D\}$ ,  $P_0(V_i)$  表示  $t_0$  阶段目标事件的发生概率;

步骤 2 设  $k=1$ ;

步骤 3 选择  $t_k$  阶段中可行的行动策略, 假如  $t_k$  阶段选择了行动  $A_i (1 \leq i \leq NA)$ , 则  $P_k(A_i) = 1$ , 否则  $P_k(A_i) = 0$ ;

步骤 4 由领域专家给出  $t_k$  阶段外部事件  $E_i (1 \leq i \leq NE)$  发生的概率;

步骤 5 利用以上描述的基于 CAST 参数的概率传播算法, 计算  $t_k$  阶段的中间效果和期望效果的发生概率;

步骤 6 向  $t_{k+1}$  阶段传递  $t_k$  阶段的中间效果和期望效果的发生概率, 即  $P_{k+1}(V_i^?) = P_k(V_i), V_i \in \{M \cup D\}$ ;

步骤 7  $k=k+1$ , 假如  $k \leq T$ , 返回步骤 3;

步骤 8 输出  $P_T(V_i), V_i \in \{M \cup D\}, F(S) = \prod_{i=1}^{ND} P_T(D_i)$ 。

#### 5 算例仿真分析

为了验证建模方法的适用性和有效性, 以文献[12]中的联合作战的战役想定为仿真算例, 对本文建模方法进行验证。由各变量所构成的 INs 如图 4 所示<sup>[12]</sup>。其中  $A_1$ : 对空防御行动;  $A_2$ : 对海防御行动(反舰);  $A_3$ : 反潜行动;  $A_4$ : 炮火压制;  $A_5$ : 地面部队进攻;  $A_6$ : 装甲兵进攻;  $A_7$ : 排雷;  $A_8$ : 侦查行动;  $E_1$ : 敌机的空中袭击;  $E_2$ : 敌机动部队的阻击行动;  $E_3$ : 敌增援部队的阻击行动;  $E_4$ : 敌导弹发射阵地的导弹袭击;  $E_5$ : 敌舰艇部队的阻击行动;  $M_1$ : 登岛编队的陆地威胁;  $M_2$ : 登岛编队

空中威胁;  $M_3$ : 登岛编队的海上威胁;  $M_4$ : 友军部队的兵力损失威胁;  $D_1$ : 成功完成战役使命;  $D_2$ : 战役损失。通过专家知识给出的因果事件之间的 CAST 参数如图 4 所示。

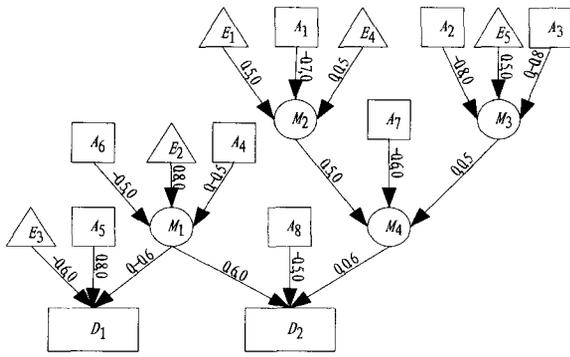


图 4 行动、外部事件、中间效果和期望效果构成的 INs

表 1 可获取行动列表

行动	A1						A2				A3				A4			
	$a_1^1$	$a_1^2$	$a_1^3$	$a_1^4$	$a_1^5$	$a_1^6$	$a_2^1$	$a_2^2$	$a_2^3$	$a_2^4$	$a_3^1$	$a_3^2$	$a_3^3$	$a_3^4$	$a_4^1$	$a_4^2$		
$t_1$	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0		
$t_2$	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0		
$t_3$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0		
$t_4$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
$t_5$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

行动	A4			A5			A6			A7			A8			
	$a_4^1$	$a_4^2$	$a_4^3$	$a_5^1$	$a_5^2$	$a_5^3$	$a_6^1$	$a_6^2$	$a_6^3$	$a_7^1$	$a_7^2$	$a_7^3$	$a_8^1$	$a_8^2$	$a_8^3$	$a_8^4$
$t_1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
$t_2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
$t_3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
$t_4$	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
$t_5$	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1

表 2 外部事件的发生概率

时间阶段	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$
$M_1$	0.5	0.5	0.5	0	0
$M_2$	0	0	0	0.7	0
$M_3$	0	0	0	0	0.7
$M_4$	0.5	0.5	0.5	0	0
$M_5$	0.7	0.7	0.7	0	0

### 5.1 模型比较

基于 DINs 的 COA 问题模型与传统的基于 DBNs 的 COA 问题模型<sup>[3,4]</sup>相比,具有以下两点优势:

(1)DBNs 中使用 CPT 来表示事件之间的因果关系不直观,并与领域专家头脑中对该不确定性概率的理解方式不一致。而 DINs 中使用 CAST 参数表达事件之间的因果关系强度显得更为直观,更符合人的思维模式,且其知识结构与领域专家头脑中的知识结构能够很好地对应。比如算例中定义  $A_1, E_1, E_4$  对  $M_2$  的影响时,只需要定义  $A_1$  对  $M_2$  的影响强度、 $E_1$  对  $M_2$  的影响强度和  $E_4$  对  $M_2$  的影响强度,从而可以推出  $A_1, E_1, E_4$  对  $M_2$  的影响。相比基于 DBNs 的 COA 问题模型中直接定义 CPT 中的条件概率,其显得更为直观,更加符合领域专家的思维方式。

(2)使用 DBNs 需要定义的 CPT 中参数的数量随着条件事件数目的增加以指数级别增长;而使用 DINs 需要定义的 CAST 参数,其数量随着条件事件数目的增加呈线性增长。本文研究的军事 C2 领域,缺乏相应的经验数据的获取途径,使用 DINs 大大缓解了模型在知识获取方面的瓶颈问题。比如在上述算例中,所需要定义的 CAST 参数为 36 个,要小于文献[12]中 CPT 所需要定义的 96 个参数。

假设在  $t_0$  阶段,  $P_0(M_i)=0, M_i \in \{M_1, M_2, M_3, M_4\}; P_0(D_1)=0, D_1 \in \{D_1, D_2\}$ 。假设  $T=5$ ,由专家知识给出的行动策略空间如表 1 所列(部分数据来自于文献[4,13]),可行的行动过程为  $S=\{(a_1, a_2, \dots, a_8) | a_i \in \Omega_{a_i}, 1 \leq i \leq 8\}$ 。

由领域专家给出各个阶段外部事件的发生概率如表 2 所列。

设所求的目标函数有 3 个,分别为:

目标函数 1:  $D_1$  为真的概率,即  $F_1(S)=P\{D_1(t_5)=1 | X(t_0), S\}$ ;

目标函数 2:  $D_2$  为真的概率,即  $F_2(S)=P\{D_2(t_5)=1 | X(t_0), S\}$ ;

目标函数 3:  $D_1$  为真并且  $D_2$  为假的概率,即  $F_3(S)=P\{D_1(t_5)=1, D_2(t_5)=0 | X(t_0), S\}$ 。

因此,采用 DINs 对 C2 组织 COA 问题进行建模更为合适,也充分体现了基于 DINs 的 COA 问题模型的适用性。

### 5.2 概率传播算法的有效性分析

验证基于 DINs 的 COA 问题模型的有效性,主要需要验证基于 CAST 参数的概率传播算法的有效性。

因此,分别在两个不同的行动过程下计算 3 个目标函数,两个不同的行动过程为  $S_1=(a_1^1, a_2^2, a_3^3, a_4^1, a_5^2, a_6^3, a_7^2, a_8^8)$  和  $S_2=(a_1^2, a_2^3, a_3^4, a_4^2, a_5^3, a_6^4, a_7^3, a_8^8)$ 。在这两个行动过程下的目标函数的变化分别如图 5 和图 6 所示。

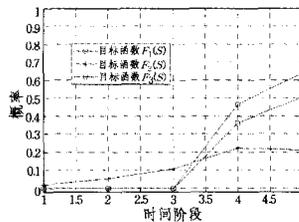


图 5 在行动过程  $S_1$  下的目标函数的变化

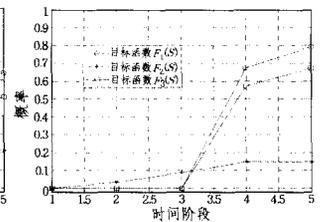


图 6 在行动过程  $S_2$  下的目标函数的变化

由图 5 和 6 可知,对于目标函数  $F_3(S)$  来说,  $F_3(S_1)=0.5064, F_3(S_2)=0.6741$ ,可得行动过程  $S_2$  的效果要优于行动过程  $S_1$ 。这样可以说明,只要 CAST 参数定义合理,利用本文设计的基于 CAST 参数的概率传播算法,能够得出所求的  $F(S)$  值,进而可以进行每个 COA 之间性能的比较,体现了本文设计的基于 CAST 参数计算 COA 的  $F(S)$  的方法有效性。

勒效应影响 TDOA 对时间的估计,海水介质分层的特点使声信号不按直线传播,直接影响了 TOA 和 AOA 的精度,水下环境复杂多变,水声信号衰减规律难以估计,使用 RSS 测距法也更加困难,总之,水声信号的传播特征严重限制了现有测距技术的精度。

(2)更加注重成本控制,在保证效率和精度的前提下,尽可能减少 GPS 浮标、AUV 和 水下信标节点的数目,以减少定位算法的限制条件和前提条件。

(3)定位与导航相结合,水下定位技术为各种水下航行器的导航提供了不可或缺的信息支持。目前研究者已提出了惯性定位导航、声学定位导航和地球物理学定位导航 3 种水下定位导航技术。

本文对 UWSN 的节点定位问题进行了研究。总结了目前已有的定位问题的研究成果,分析对比了不同算法的优缺点,提出了一种距离无关的水下定位算法-多面体质心算法,并利用仿真实验验证了该定位算法的性能和效果,该算法优于原有的距离无关定位算法。最后,指出了水下定位研究应注意的问题及发展趋势。

## 参 考 文 献

[1] Garcia J E. Ad-hoc positioning for Sensors in Underwater Acoustic Networks[C]//IEEE Oceans'04. Japan, 2004

[2] Erol M, Vieira L F M, Gerla M. Auv-aided localization for underwater sensor networks [C]// International Conference on

Wireless Algorithms Systems and Applications (WASA2007). Washington, USA, 2007; 44-54

[3] Zhou Zhong, Cui Jun-hong, Amvrossios B. Scalable Localization with Mobility Prediction for Underwater Sensor Networks[C]//The 27th Conference on Computer Communications(InfoCom). Washington, USA, 2008; 2198-2206

[4] Zhou Yi, He Jian-hua, Chen Kai, et al. An Area Localization Scheme for Large Scale Underwater Wireless Sensor Networks [C]//International Conference on Communications and Mobile Computing. Washington, USA, 2009; 543-549

[5] Luo Han-jiang, Zhao Yi-yang, Guo Zhong-wen, et al. UDB: Using directional beacons for localization in underwater sensor networks[C]//ICPADS 2008. Melbourne, Victoria, Australia, 2008; 551-558

[6] Luo Han-jiang, Guo Zhong-wen, Dong Wei, et al. LDB: Localization with Directional Beacons for Sparse 3D Underwater Acoustic Sensor Networks[J]. Journal of Networks, 2010, 5(2): 90-101

[7] 洪璐. 水下传感器网络高效数据传输协议研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011

[8] 金仁成, 王艳辉, 王立鼎, 等. 无线传感器网络节点硬件平台设计[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(12): 48-50

[9] 李海涵, 张丕状. 水下传感器网络节点定位信号设计[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(1): 81-83

[10] 袁正午, 梁均写. 基于虚拟力的无线传感器网络多跳定位算法[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2010, 22(1): 122-126

(上接第 98 页)

**结束语** 本文在分析基于 DBNs 的 C2 组织 COA 问题模型的局限性的基础上,提出了使用 DINs 对 COA 问题进行建模方法,描述了基于 INs 的 COA 问题的静态模型、基于 DINs 的 COA 问题的动态模型,设计了利用 CAST 参数进行概率传播的计算方法。最后,通过算例验证了所建模型的优越性和所提概率传播算法的有效性。所建模型有效缓解了 C2 组织 COA 问题在知识获取方面的瓶颈问题,相比于 DBNs,它更加适合对 C2 组织的 COA 问题的建模。本课题的下一步工作就是基于 DINs 所建的 COA 问题模型进行 COA 的优选。

## 参 考 文 献

[1] Entin E E. Optimized command and control architectures for improved process and performance[C]//Proceedings of 1999 Command and Control Research and Technology Symposium. Newport, RI; Office of Naval Research, 1999

[2] Hocevar S P, Kemple W G, Kleinman D, et al. Assessments of simulated performance of alternative architectures for command and control; the role of coordination[C]//Proceedings of 1999 Command and Control Research and Technology Symposium. Monterey, CA; Naval Postgraduate School, 1999

[3] 阳东升, 张维明, 刘忠, 等. 组织过程策略优化的案例分析与求解[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1648-1654

[4] Tu H Y, Levchuk Y N, Pattipati K R. Robust action strategies to induce desired effects[J]. IEEE Transactions on Systems,

Man, and Cybernetics, 2004, 34(5): 664-680

[5] Neapolitan R E. Learning Bayesian Networks[M]. Englewood Cliffs, New Jersey; Prentice-Hall, 2003

[6] Rosen J A, Smith W L. Influence net modeling with causal strengths; an evolutionary approach[C]//Proceedings of 1996 Command and Control Research and Technology Symposium. Monterey, CA; Naval Postgraduate School, 1996; 699-708

[7] Rosen J A, Smith W L. Influencing global situations; a collaborative approach[M]. US Air Force Air Chronicles, 1996

[8] Cooper G F. The computation complexity of probabilistic inference using Bayesian belief networks[J]. Artificial Intelligence, 1990, 42: 393-405

[9] Haide S, Levis A H. Effective course-of-action determination to achieve desired effects[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2007, 37(6): 1140-1150

[10] Haide S. From dynamic influence nets to dynamic Bayesian networks; a transformation algorithm[J]. International Journal of Intelligent System, 2009, 24: 919-933

[11] Aliferis C F, Cooper G F. A structurally and temporally extended Bayesian belief network model; definitions, properties and modeling techniques[C]//Proceedings of the 12th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. Portland, Oregon; Morgan Kaufmann, 1996

[12] 阳东升, 张维明, 刘忠, 等. 指控组织设计方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2010; 98-122

[13] 彭小宏, 阳东升, 武云鹏, 等. 基于 EAP-GA 的联合作战行动计划[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(2): 1-4