

1-8-2019

## Construction and Utilization of Simulation Meta-model Based on Influence Diagram Game

Zhong Lin

*1. College of Control Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China;;*

Mingan Tong

*2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;*

Li Sheng

*1. College of Control Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, 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.

---

## Construction and Utilization of Simulation Meta-model Based on Influence Diagram Game

### Abstract

**Abstract:** To overcome the shortcomings of the meta-model, *the dynamic influence diagram game is used as simulation meta-model. A construction process and the utilization for structured dynamic influence diagram game (DIDG) are presented. The necessary simulation data are gathered for the construction of a DIDG that presents the changes in simulation state with chance nodes. The decision alternatives and objectives of the decision problem are included in the DIDG as decision and utility nodes. The adversary's action is represented by an explicit decision node in which case an influence diagram game results. The constructed DIDG is solved to find the optimal both sides' decision alternatives that maximize the expected value of the utility function. The DIDG is also used for studying the evolution of the simulation, conducting what-if analyses, and solving optimal strategies of the game as well as studying the strategies' effects on the evolution of simulation. The simulation results show the construction of DIDG from simulation data and their utilization in the analysis of decision problems are feasible and effective.*

### Keywords

meta-model, dynamic influence diagram game, discrete event, what-if analysis

### Recommended Citation

Zhong Lin, Tong Mingan, Li Sheng. Construction and Utilization of Simulation Meta-model Based on Influence Diagram Game[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 2858-2863.

# 基于影响图对策的仿真元模型构造及使用方法

钟麟<sup>1</sup>, 佟明安<sup>2</sup>, 李盛<sup>1</sup>

(1. 西京学院 控制工程学院, 陕西 西安 710123; 2. 西北工业大学, 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 针对目前仿真元模型的不足, 引入动态影响图对策到作为仿真元模型, 提出了动态影响图对策构造步骤及使用方法。仿真状态、决策方案和决策目标分别用机会结点、决策结点和效用结点表示, 对手的行为采用决策者相似的决策结点进行建模。构造基于影响图对策元模型的步骤包括选择变量和确定仿真数据、确定影响图对策的拓扑结构和概率表以及检验拓扑结构和概率表。通过空战仿真实例, 表明该元模型在仿真的时间演变、假设分析和最优决策三方面的应用效果较好, 克服了当前元模型的不足。

**关键词:** 元模型; 动态影响图对策; 离散事件; 假设分析

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 08-2858-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808006

## Construction and Utilization of Simulation Meta-model Based on Influence Diagram Game

Zhong Lin<sup>1</sup>, Tong Mingan<sup>2</sup>, Li Sheng<sup>1</sup>

(1. College of Control Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** To overcome the shortcomings of the meta-model, the dynamic influence diagram game is used as simulation meta-model. A construction process and the utilization for structured dynamic influence diagram game (DIDG) are presented. The necessary simulation data are gathered for the construction of a DIDG that presents the changes in simulation state with chance nodes. The decision alternatives and objectives of the decision problem are included in the DIDG as decision and utility nodes. The adversary's action is represented by an explicit decision node in which case an influence diagram game results. The constructed DIDG is solved to find the optimal both sides' decision alternatives that maximize the expected value of the utility function. The DIDG is also used for studying the evolution of the simulation, conducting what-if analyses, and solving optimal strategies of the game as well as studying the strategies' effects on the evolution of simulation. The simulation results show the construction of DIDG from simulation data and their utilization in the analysis of decision problems are feasible and effective.

**Keywords:** meta-model; dynamic influence diagram game; discrete event; what-if analysis

## 引言

仿真元模型是对高精度仿真模型所定义关系的一种数学近似, 能有效地近似大型仿真模型及所

仿真真实系统的相对小而简单的模型。因此, 它应用广泛, 例如经济分析, 军事冲突分析等。常见的仿真元模型包括: 回归模型<sup>[1]</sup>, 遗传算法<sup>[2]</sup>, Kriging<sup>[3]</sup>, 对策模型<sup>[4]</sup>等。上述模型都不能表示仿真状态变量随时间变化情况, 不能描述仿真状态变量在不同时间之间的关系。文献[5]利用动态贝叶斯网络作为仿真元模型, 克服这些不足。但是, 该模型没有考虑到决策者的偏好、对手所采取的行动以及不能提供直接的手段优化仿真输出。



收稿日期: 2016-11-03 修回日期: 2017-01-10;  
基金项目: 国家自然科学基金(61371163);  
作者简介: 钟麟(1975-), 男, 江西宜春, 博士, 讲师, 研究方向为复杂系统建模等; 佟明安(1936-), 男, 辽宁, 教授, 研究方向航空火力控制等; 李盛(1972-), 男, 甘肃兰州, 博士, 副教授, 研究方向为系统建模、数据处理等。

<http://www.china-simulation.com>

• 2858 •

针对目前仿真元模型的不足, 将动态影响图对策作为仿真元模型, 提出构造基于动态影响图对策的仿真元模型的具体步骤。最优决策获取通过最大化对策双方的期望效用函数, 动态影响图对策也可用于研究仿真状态变量随时间的变化以及假设分析。

## 1 基于动态影响图对策的元模型

整个构造过程包括: 选择变量、确定仿真数据, 确定拓扑结构和效用函数、评估概率表, 经检验拓扑结构以及概率表。

### 1.1 选择变量和确定仿真数据

影响图对策是影响图理论的拓展, 是与非协商对策论相结合的理论。动态影响图对策是在单级影响图对策基础上, 引入时间片概念, 主要用于解决动态决策问题, 概略图见图 1。在图 1 中矩形表示决策结点, 圆形表示机会结点, 菱形表示价值结点。

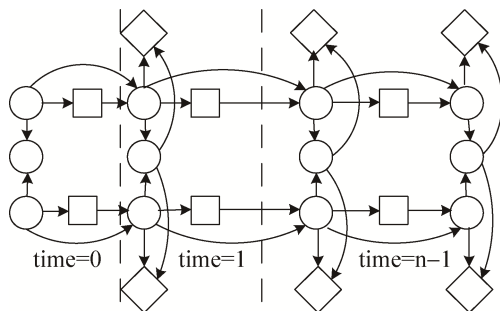


图 1 动态影响图对策概略图

Fig. 1 Overview of dynamic influence diagram game

建立动态影响图对策的第一步是从所有变量中选择所需变量, 即图中的结点。这些变量包括: (1) 状态变量。对策双方的状态变量是对策问题全面、有效的描述。在每一时刻  $t \in \{t_0, t_1, \dots, t_f\}$ , 对策的仿真状态用离散随机变量  $x^i(t)$  表示, 这里  $i$  表示对策的局中人。在动态影响图对策模型中, 状态变量用机会结点表示。(2) 决策变量。由于仿真参数影响仿真的演变, 如果仿真参数是可控的, 则可以用决策变量表示, 而在影响图模型中用决策结点表示。(3) 外部变量。如果仿真参数不可控, 则用外部随机变量表示, 在影响图中用机会结点表

示。(4) 价值变量。在影响图中用价值结点表示, 它表示局中人的目标。仿真输出通过机会结点的概率分布表示。

在动态影响图对策模型中, 可以认为时间是连续的, 即仿真事件可以在任何时刻  $t \in [t_0, t_f]$  发生。在  $[t_0, t_f]$  观测到的时间序列仿真数据可以反映仿真状态变化情况, 而仿真状态的概率分布可以通过多次仿真估计获得。通过大量仿真数据可以获得仿真状态的高精度估计概率曲线, 并将其作为参考概率曲线。在建立动态影响图对策结构时, 仿真数据还可用于估计动态影响图对策的条件概率表。

参考概率曲线可用于确定离散采样的次数。如果采样次数足够多, 则离散后的概率曲线就能表示参考概率曲线的变化情况, 则离散后的曲线应该比较光滑, 同时采样次数越大, 元模型精度越高但也越复杂。除此之外, 离散时刻的选择也是影响到元模型的精度的因素之一, 也是重点考虑的问题。

最优采样次数可以根据如下的步骤获得:

- 1) 假设  $j=1$  和  $t \in [t_0, t_f]$ , 变量的数值  $l \in L$  的概率用  $p^l(t) = p(x(t) = l)$  表示;  $L$  为变量的取值范围;
- 2) 确定每一近似概率误差是否小于  $\varepsilon$ , 即  $\max_t e^l(t) = \max_t |\hat{p}^l(t) - p^l(t)|$  是否小于  $\varepsilon$  ( $\varepsilon$  由分析者自己设定), 这里  $p^l(t)$  为参考概率,  $\hat{p}^l(t) = p^l(t_0) + \frac{t-t_0}{t_f-t_0} [p^l(t_f) - p^l(t_0)]$ 。如果满足上述条件, 则跳转到步骤 5), 否则跳转到步骤 3);

3) 获得时间间隔  $\Delta t$ 。选择造成概率误差最大的数值  $k \in L$ , 时间间隔  $\Delta t$  满足下述方程:

$$\max_{t \in [t_0, t_0 + \Delta t]} e^k(t) = \max_{t \in [t_0, t_0 + \Delta t]} |\hat{p}^k(t) - p^k(t)| = \varepsilon, \text{ 这里}$$

$$\hat{p}^k(t) = p^k(t_0) + \frac{t-t_0}{\Delta t} [p^k(t_0 + \Delta t) - p^k(t_0)] \quad (1)$$

4) 令  $t_0 := t_0 + \Delta t$ ,  $j := j+1$ , 跳转到步骤 2);

5) 获得最优采样次数  $n$ 。令  $n = j+1$ , 输出  $n$ 。

一旦获得最优采样次数, 则采样的时刻可以通过求解下述最优化问题获得:

$$\min_T \left[ \max_{t \in [t_0, t_f], l \in L} |\hat{p}^l(t) - p^l(t)| \right] \quad (2)$$

式中:  $T = \{t_0, t_1, \dots, t_f\}$ , 元素的数目  $|T| = n$ 。

## 1.2 确定拓扑结构和概率表

变量和采样时刻确定后,影响图对策的拓扑结构,也就是变量之间的关系,可以根据专家知识、对策双方的背景知识以及仿真数据集成的方法获得<sup>[7]</sup>。确定影响图对策的结点后,根据专家知识和背景知识画出原始图。先确定单个时间片段的结构,然后确定各时间片段之间的关系,获得多个原始影响图,再依据打分方法从多个影响图中选择一个最适合的结构。打分方法基于模型规模和从模型及仿真数据获得的概率匹配度之间的权衡。如果从仿真数据学习中发现结点之间存在明显地缺适性,则将额外的弧加入到结点之间,从而改进原始影响图对策。最后是加入对策双方的价值结点,获得最终影响图对策。

概率的估计基于观察到的频率,也就是观测到变量在各取值的次数。在影响图对策中,每一变量  $x_i(t)$  都有一个条件概率表。条件概率表提供每一结点的父结点各取值组合的条件概率  $p(x_i(t) | \Phi_i = l_\Phi)$ , 则条件概率  $\theta_l = p(x_i(t) = l | \Phi_i = l_\Phi)$  的估计值为:

$$\hat{\theta}_l = N_l / N_\Phi \quad (3)$$

式中:  $N_l$  为观测到仿真中  $x_i(t) = l$  且  $\Phi_i = l_\Phi$  次数, 而  $N_\Phi$  为观测到仿真中  $\Phi_i = l_\Phi$  的次数。在影响图对策中,局中人的偏好利用效用函数建模。效用函数可由决策者设定,也可通过仿真数据学习获得<sup>[7]</sup>。

## 1.3 结构和概率表正确性检验

影响图对策模型正确性检验需要检验结构和概率表两个方面。结构检验基于下面3条准则:(1)有向图无环路;(2)如果有价值结点,则它没有后序结点;(3)有一条路径包含所有的决策结点。

概率表的检验一般采用和测试和乘测试两种方法。(1)和测试:和测试是检验一个结点的所有概率是否满足归一性。设  $C$  是一个二值结点,先确定  $P(C)$  的值,一定时间后,再确定  $P(\bar{C})$  的值,将两者相加,如果等于或接近1,说明数值接近真实,否则要重新获取;(2)乘测试:设  $C_1$  是  $C_2$  唯一

的一个父结点,则  $P(C_2) = \sum P(C_1)P(C_2|C_1)$ , 可以先获取  $P(C_1)$  和  $P(C_2|C_1)$  的值,然后获取  $P(C_2)$ , 测试上式两边接近或相等,如果是,则结果可信,否则重新获取。

## 2 影响图对策元模型的使用

影响图对策元模型具有如下功用:可以用于研究给定仿真状态随时间的变化情况以及追踪它的概率,实施假设分析,求解对策的最优策略以及策略对仿真演变的影响。

### 2.1 仿真的时间演变

假定  $S(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$ , 这里  $x_i(t)$  ( $i = 1, \dots, n$ ) 为仿真状态变量。在影响图对策模型中,在特定时刻  $t \in T = \{t_1, \dots, t_f\}$  的概率分布的时间演变描述了在整个仿真期间仿真状态的变化,用  $p(S(t))$  表示。换句话说,影响图对策用于计算状态变量在时刻  $t \in T$  的概率,即  $p(S(t) = l_S)$ 。研究单个仿真变量,可以追踪  $p(x_i(t))$ 。而且,状态变量特定的取值可以通过  $p(x_i(t) = l)$  ( $l \in L_i$ ) 进行追踪。观察概率  $p(x_i(t) = l)$  可以用于分析给定仿真事件发生的可能性。为了分析局中人可以采用策略,影响图对策可以用于评估局中人每一策略条件概率分布  $p(S(t) = l_S | d_i^1(i) = d_i^1, d_j^2(j) = d_j^2)$ , 这里局中人1、2的策略分别为  $d_i^1(i) \in D^1(i)$ 、 $d_j^2(j) \in D^2(j)$ ,  $D^1(i)$  和  $D^2(j)$  分别为局中人1、2的策略集。条件概率分布描述了策略选择后仿真结果随时间变化的情况。如果变量有期望值,则它的平均值可以用期望值代替,期望值的计算公式为:

$$E(x_i(t)) = \sum_{l \in L_i} l \cdot p(x_i(t) = l) \quad (4)$$

### 2.2 假设分析

在假设分析中,影响图对策用于确定条件概率  $p(S(t) | x_i(t) = l)$ , 即固定若干个随机变量的取值,观测其它仿真变量的联合概率的变化。因此条件概率揭示了观测的仿真状态与仿真时间演变之间的联系。同样的分析也可用于在决策结点上的局中人策略对仿真状态的影响,即当选择策略对  $(d_i^1, d_j^2)$

以及观测到在时刻  $t$  上状态  $l$ , 计算条件概率  $p(S(t) | x_i(t) = l, d_i^1(i) = d_i^1, d_j^2(j) = d_j^2)$  分析概率随时间的变化。表示仿真参数的外部随机变量也可用相似的方法进行分析。

假设外部变量为  $z_j = h$ , 则用  $p(S(t) | z_j = h)$  或者  $p(x_i(t) | z_j = h)$  对状态变量进行更新, 检验这些条件概率, 判断仿真是否受这些外部变量的影响。如果同时分析外部变量与策略对的影响, 则可以计算条件概率  $p(S(t) | z_r = h, d_i^1(i) = d_i^1, d_j^2(j) = d_j^2)$ 。在假设分析中的条件概率也可以用于计算在时间  $t \in T$  上仿真状态的条件期望, 计算公式如式(5)所示。

$$E(x_i(t_f) | x_i(t) = l) = \sum_{m \in L_i} m \cdot p(x_i(t_f) = m | x_i(t) = l) \quad (5)$$

### 2.3 最优策略的求解

求解影响图对策就是观察策略对怎样影响效用结点。由于对策双方是不能合作的, 且双方同时获得相关信息, 因此可以同时最大化非零和影响图对策的支付, 从策略对中找到 Pareto 平衡。如果模型较为简单, 可以采用枚举法。如果模型复杂, 则可以采用移动平均控制法<sup>[7]</sup>, 即每个阶段的决策向量的计算仅仅考虑前面决策的几个阶段, 计算过程一直重复到对策结束。另一方面, 影响图对策也保留重要的信息, 用于进一步研究不同的效用函数对 Pareto 平衡的影响。如果一个局中人选择一个策略, 另一个局中人可以最大化期望效用找出效用最大的策略, 这与影响图的求解没有区别。

## 3 仿真实例

通过一个空战仿真分析的例子来说明影响图对策的构造和应用。空战中飞机运动学和动力学方程、导弹和雷达模型以及其他模型见文献[7]。空战双方为红蓝两方, 各有一架飞机, 都挂载两枚导弹。空战的初始状态是红机处于优势, 红机靠近蓝机正准备发射导弹攻击蓝机。

利用本文提出的方法, 建立了影响图对策。在

时间  $t$  上空战仿真状态用两个状态变量  $S(t) = \{x_1(t), x_2(t)\}$  表示, 在图 2 中用机会结点表示。这两个变量有各自的指标分别为“在时间  $t$  红机生存”和“在时间  $t$  蓝机生存”。当状态变量为二元的, 则它们取值集合为  $L_1 = L_2 = \{0, 1\}$ , 则两个变量可以定义空战 4 各状态: 1) 红机优势: 红机生存且蓝机被击落, 即  $x_1(t) = 1, x_2(t) = 0$ ; 2) 蓝机优势: 蓝机生存且红机被击落, 即  $x_1(t) = 0, x_2(t) = 1$ ; 3) 均势: 双方都生存, 即  $x_1(t) = 1, x_2(t) = 1$ ; 4) 均不利: 双方都被击落, 即  $x_1(t) = 0, x_2(t) = 0$ 。红蓝双方都有两条策略供选择: 攻击策略和防御策略, 图 2 中用决策结点表示。攻击策略是不管对手态势以击落对方为目标, 而防御策略是仅在处于优势时才攻击对方, 否则先规避, 抢占有利位置再攻击。在构造影响图对策的过程中, 首先使用仿真数据估计状态变量的概率曲线。重复进行了仿真 2000 次, 每一次终止的条件是红蓝双方被击落或者在时间达到终止时间  $t_f = 300$  s。根据设定的精度  $\varepsilon = 0.03$  以及本文提出的算法, 可以确定时间片段的数目为  $|T| = 10$ , 最优时刻的位置为  $T = \{0, 56, 79, 89, 97, 121, 132, 185, 230, 300\}$ 。影响图对策模型见图 2。在图 2 中, 黑色箭头的表示原始影响图对策, 而白色箭头的弧表示利用仿真数据加入的额外弧。图 3 是仿真估计曲线图, 虚线是参考估计曲线, 从图中可以看出元模型效果理想。图 3 描述了当双方都选择攻击策略后空战进展情况。概率曲线说明在 79 s 前和 185 s 后状态变量的概率分布没有突出的变化。因此, 最明显的变化发生在 79~185 s 这段时间。“红方优势”和“蓝方优势”的概率在 89~132 s 之间有两个峰值。原因是红方首先发射导弹, 然后蓝方在未击落之前也发射导弹。在这种情形下, 双方不管态势总是攻击对方。在 89 s 时, 红方先发射导弹, 在 97 s 前击落蓝方的概率为 0.45。不过, 蓝方在未击落之前也有时间发射导弹。在仿真结束时, 红方优势的概率为 0.303, 蓝方优势为 0.184, 均不利为 0.378, 均势为 0.135。利用影响图对策元模型, 很容易分析出仿真的进展。

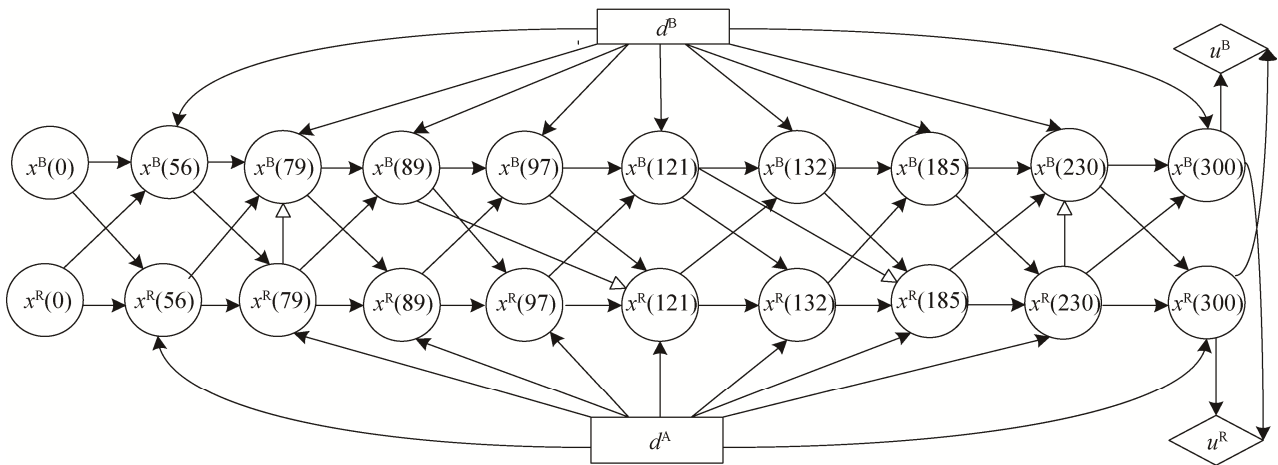


图2 空战的影响图对策元模型  
Fig. 2 Influence diagram game for air combat

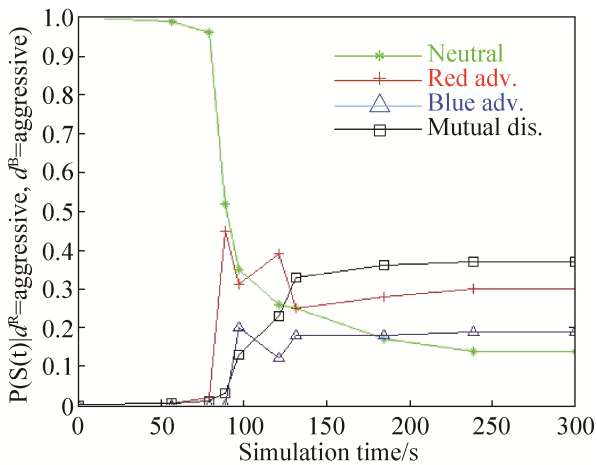
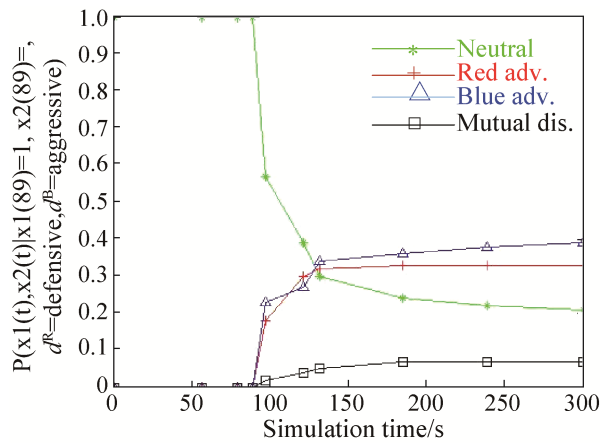


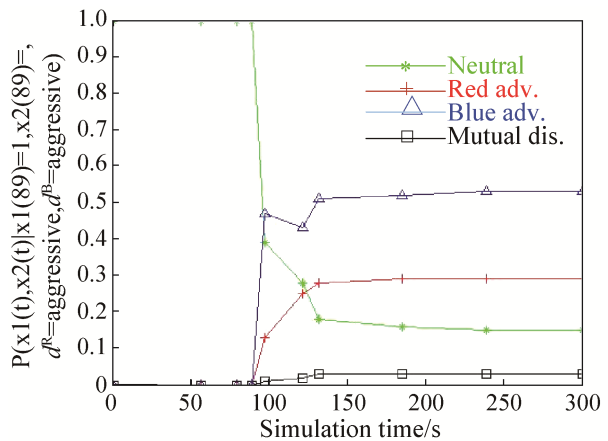
图3 红蓝双方都选择攻击策略下概率曲线  
Fig. 3 Probability curves that both sides select aggressive strategy

为了研究在不同时刻仿真状态不同取值之间的关系,可以利用影响图对策元模型进行假设分析。例如,假设在时刻  $t = 89\text{ s}$ ,红蓝双方都还生存,蓝方选择攻击策略,而红方选择分别选择两种策略,即  $x_1(89) = 1, x_2(89) = 1, d^B = \{\text{aggressive}\}$  和  $d^R = \{\text{aggressive, defensive}\}$ 。近似曲线如图3所示。

从图4可以看出如果红方的第一枚导弹没有击中蓝方,则采用防御策略是相对糟糕的。在这种情况下蓝方赢得空战的概率为 0.514,而红方只有 0.288。



(a) Probability curves that the red side selects defensive strategy and the blue side selects aggressive strategy



(b) Probability curves that both sides select aggressive strategy

图4 利用影响图对策元模型进行假设分析的结果图  
Fig. 4 The result figures of what-if based on influence diagram game

影响图对策第三方面的应用是获得对策双方的最优策略。如果蓝方选择攻击策略, 效用结点的各状态概率分布见表 1, 在表 2 中提出了三个效用函数, 效用函数  $f_1(\cdot)$  表示决策者的目标是红方的生存,  $f_2(\cdot)$  表示仅对击落蓝方感兴趣,  $f_3(\cdot)$  表示红方赢得胜利。表 2 也说明不同效用函数产生不同最优决策。如果选择  $f_1(\cdot)$  和  $f_3(\cdot)$ , 则防御策略更合适。而选择效用函数  $f_2(\cdot)$ , 则决策者更倾向于攻击策略。如果红蓝双方有两个策略可供选择, 则 Pareto 平衡就是非零和对策的解。假设对策双方都选择效用函数  $f_1(\cdot)$ , 则防御策略是双方的最优策略, 计算结果见表 3。

表 1 效用结点的各状态概率分布

策略	红方优势	蓝方优势	均不利	均势
防御	0.386	0.269	0.161	0.184
攻击	0.293	0.190	0.375	0.142

表 2 不同效用函数下红方的最优决策

目标	效用函数	效用函数的取值			期望效用	
		红方优势	蓝方优势	均不利		
生存	$f_1(\cdot)$	1	0	0	1	0.570 > 0.435
击落	$f_2(\cdot)$	1	0	1	0	0.547 < 0.658
胜	$f_3(\cdot)$	1	0	0	0	0.386 > 0.293

表 3 对策双方的最优解

		蓝	
		防御	攻击
红	防御	(0.604, 0.537)	(0.570, 0.453)
	攻击	(0.509, 0.465)	(0.435, 0.332)

## 4 结论

本文提出了基于动态影响图对策和离散事件仿真的仿真元模型用于解决决策问题。机会结点表示仿真状态, 决策选择和目标分别用决策结点和效用结点表示, 对手的行为用决策结点进行建模。如果需要研究非控因素的影响, 则将仿真参数作为外部变量加入到影响图对策中。影响图对策元模型有如下用途: 研究时间演变和追踪给定仿真状态的概

率, 实施假设分析, 获得对策双方的最优策略以及策略对仿真的影响。仿真结果表明本文提出构造和使用方法可行、有效。今后任务将是将多目标影响图引入到元模型研究中。

## 参考文献:

- [1] J P C Kleijnen. Regression and Kriging metamodels with their experimental designs in simulation[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2016, 248(2): 93-96.
- [2] 王广彦, 贾希胜, 李经中, 等. 遗传算法的经验公式仿真元模型的构建方法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(10): 119-123.  
WANG Guangyan, JIA Xisheng, LI Jingzhong, et al. The Study of Experiential Formula Simulation Metamodel Based on Genetic Algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(10): 119-123.
- [3] J P C Kleijnen. Kriging metamodeling in simulation: A review[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2013, 230(3): 707-716.
- [4] C S Longstreet. A meta-model for developing simulation games in higher education and professional development training[C]. International Conference on Computer Game, 2012: 39-44.
- [5] T Kibret. A Bayesian Network Meta-analysis for Binary Outcome: A Simulation Study[J]. Clinical Epidemiology (S1179-1349), 2014, 54(3): 644-655.
- [6] 钟麟, 佟明安, 钟卫, 等. 影响图对策在多机协同空战的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(4): 450-453.  
ZHONG Lin, TONG Ming-an, ZHONG Wei, et al. Application of multistage influence diagram game theory for multiple cooperative air combat[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(4): 450-453.
- [7] 钟麟. 复杂条件下编队协同空战智能决策研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2008: 92-105.  
ZHONG Lin. Study on intelligent decision-making for cooperative team air combat under conditions of complexity [D]. Xi'an: Northwestern polytechnical university, 2008: 92-105.
- [8] 罗键, 武鹤. 基于交互式动态影响图的对手建模[J]. 控制与决策, 2016, 31(4): 635-639.  
LUO Jian, WU He. Opponent modeling based on interactive dynamic influence diagram[J]. Control and decision, 2016, 31(4): 635-639.
- [9] Julien Fatissou, Victor Oswald, François Lalonde. Influence diagram of physiological and environmental factors affecting heart rate variability: an extended literature overview[J]. Heart International (S1826-1868), 2016, 11(1): 32-40.