

文章编号:1001-2486(2011)05-0097-06

基于随机时间影响网络的联合火力打击方案评估*

朱延广,朱一凡,雷永林,曹星平

(国防科技大学 信息系统与管理学院,湖南 长沙 410073)

摘要:联合火力打击方案评估是作战筹划和指挥决策的核心问题之一,对于打击手段的选择、战法的运用等具有重要的影响,其难点是在不确定条件下有效地建立作战方案到使命目标达成效果之间的映射关系。作战仿真方法往往存在突出的低效率问题,而解析模型的方法难以充分反映目标体系的内部联系和整体效果。目前概率推理模型广泛应用于军事领域的作战方案评估,典型的模型是时间影响网络,其扩展的随机时间影响网络提高了不确定时间延迟的描述能力,因此提出基于随机时间影响网络的联合火力打击方案评估方法,最后结合一个案例对该方法的有效性进行验证。

关键词:联合打击方案;因果关系模型;随机时间影响网络

中图分类号:E926 文献标识码:A

Stochastic Timed Influence Net Based Joint Fire Strike Plan Assessment

ZHU Yan-guang, ZHU Yi-fan, LEI Yong-lin, CAO Xing-ping

(College of Information Systems and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Assessment of the joint strike plan is a pivotal task for planning and decision-making, and it plays a crucial role in selection and employment of operational art. The challenge is how to model the mapping from plans to mission effectively in uncertain situation. Simulation system is inefficient in evaluating plans, while analytic models are unable to reflect the interaction and overall effect of the target system. The probability reasoning models have currently been utilized extensively in the assessment of military operation, and the typical model is Timed Influence Net (TIN). Stochastic Timed Influence Net (STIN) is an extensional version of TIN that has enhanced the description of uncertain delay in TIN. Thus, the method of STIN based joint strike plan assessment was provided. Finally, a numerical experiment was presented to demonstrate the effectiveness of above method.

Key words: joint strike plan; causal model; stochastic timed influence net

联合火力打击方案是指多军兵种火力资源对目标进行选择、分配以及根据特定的时空关系遂行打击任务的作战方案,描述为一系列打击任务按照时序关系组成的作战任务序列。联合火力打击方案的制定必须集中于预期效果,从而达成联合战役的使命目标。军事决策人员面临的首要任务是寻找达成这些预期效果的最佳策略,即选择优化的联合火力打击方案。其中,作战方案评估是作战方案优化需要解决的首要问题。

作战方案评估的一种比较流行的手段是计算机仿真^[1-3],其评估的基本过程是:生成作战方案——将作战方案映射为仿真需要的输入想定——多次作战仿真运行——仿真结果分析——

方案改进和完善。计算机仿真不足之处是效率低、时间长^[4],主要表现为三个方面:首先是作战方案映射为想定的录入时间;其次是仿真运行的时间开销;最后是仿真评估分析的时间。基于解析模型的方法是作战方案评估的另一个主要手段^[5-9],该方法首先对影响作战效果的各种因素做出合理性假设,通过输入某些参数,构建联合打击方案到作战效果之间尽可能真实的解析模型。典型的对抗效果类参数是“武器一目标毁伤度”(毁伤概率、生存概率),典型的目标价值类参数是“基本目标价值”(目标优先级、威胁指数、收益)。基于解析模型的方法一方面难以得到用于建模的基本定量信息;另一方面作为一种“黑箱”

* 收稿日期:2011-03-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91024015;61074107)

作者简介:朱延广(1981—),男,博士生。

方法,不能充分反映目标体系内部联系和整体效果的产生过程,不利于军事人员进行协作分析。

目前基于概率网络的方法广泛应用于作战方案评估,其中时间影响网络(Time Influence Nets, TIN)是代表性的概率网络^[10-11]。TIN是 Wagenhals 等在影响网络(Influence Nets, IN)的基本框架中引入时间参数,提高了IN对于动态不确定性的建模能力。IN是基于贝叶斯理论框架,引入CAST(Causal Strengths)逻辑,用于克服贝叶斯网络的条件概率知识获取和概率推理的瓶颈^[12-14]。TIN已经广泛应用于基于效果作战(Effects-Based Operations, EBO)领域中作战方案评估^[15-16]。

然而在联合火力打击作战过程中,作战任务直接或间接效果的产生和传播时间往往具有不确定性。TIN受到时间延迟确定性假设的限制,不能够很好地描述这种时间延迟的不确定性。文献[17]在标准TIN中引入随机时间延迟、时延可变强度和随机信度序列3个参数,提出随机时间影响网络(Stochastic Time Influence Nets, STIN)模型。本文从定性定量相结合的角度出发,基于STIN研究联合打击方案的评估方法。基本研究思路是:首先给出用于联合火力打击方案评估的STIN的一般建模过程,其次建立基于STIN的作战方案评估指标体系,最后结合一个案例对该方法的有效性进行验证。

1 随机时间影响网络

STIN在拓扑结构上是一个有向无环图,节点表示随机变量,节点之间的有向边表示变量之间的影响关系。STIN可以描述为六元组:

$$STIN = \langle V, E, C, B, D, A \rangle$$

- V:表示STIN中节点的集合;
- E:表示STIN中有向边的集合;
- C:表示STIN中节点之间影响强度的集合;
- B:表示STIN中的基准和先验概率集合;
- D:表示STIN中节点间的影响效果信息产生或传递的随机时间延迟集合;
- A:表示STIN中的输入方案,即所有可控节点的信度序列构成的集合。

典型的随机时间影响网络如图1所示。其中可控节点A、B和C的先验概率分别为0.1,效果节点D和E的基准概率分别为0.5。节点A对节点D、E为真分别起促进作用,节点B和C对节点D为真以及节点D对节点E为真分别起抑制作用。节点A对节点E的影响关系可以描述为:节

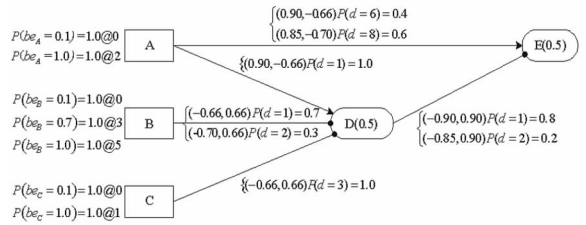


图1 随机时间影响网络示例

Fig. 1 A sample of stochastic timed influence net

点A对E产生影响的时间延迟为6个时间单元的概率是0.4,为8个时间单元的概率是0.6;当时间延迟为6个时间单元时,节点A对E的影响程度是(0.90, - 0.66),当时间延迟为8个时间单元时,节点A对E的影响程度是(0.85, - 0.70)。其它影响关系的描述与之类似。可控节点A的输入方案可以描述为:在时刻1之前的信度一定为0.1,在时刻2以后的信度一定为1。可控节点B和C的输入方案描述与A相似。

图1所示的STIN通过概率传播计算,可以得到效果节点D的随机信度序列如表1所示。

表1 效果节点D的随机信度序列

Tab. 1 Stochastic belief sequence of effect D

时段	信度取值	取值概率	信度期望	信度熵
[0, 2]	0.7232	1.0	0.7232	0
[3, 3]	0.9812	1.0	0.9812	0
[4, 4]	0.6822	0.7	0.7499	0.8813
	0.9078	0.3		
[5, 5]	0.6392	0.3	0.6693	0.8813
	0.6822	0.7		
[6, 6]	0.5675	0.7	0.5890	0.8813
	0.6392	0.3		
[7, ∞]	0.5098	0.3	0.5502	0.8813
	0.5675	0.7		

通过表1可以看出,可控节点A、B和C对效果节点D的影响效果是一个随机序列,这是由时间延迟的随机性引起的。

2 基于STIN的打击方案评估模型

利用STIN进行联合火力打击方案评估,首要条件是进行STIN建模。

2.1 随机时间影响网络建模过程

构建支持联合火力打击方案效能评估的STIN,需要以使命目标达成效果为牵引分为以下三个步骤进行。

(1) 辨识影响因素

影响联合火力打击方案效能的因素以使命目标为核心,可以分为4种类型描述为以下四元组:

$$V = \langle V_{tr}, V_{de}, V_{me}, V_{fe} \rangle$$

V_{tr} :表示打击任务节点,打击任务的执行是导致使命目标达成的根本原因。比如红方运用导弹对蓝方的机场目标进行连续突击任务;

V_{de} :表示直接效果节点,直接效果表示打击任务对目标打击的直接毁伤效果,比如机场跑道的毁伤可以通过弹坑在机场的散布进行计算;

V_{me} :表示中间效果节点,中间效果表示从使命目标出发,对影响使命目标的因素进行层层分解,一直分解到直接效果节点为止,比如夺取制空权需要削弱的地空拦截能力对应中间节点;

V_{fe} :表示最终效果节点,最终效果表示使命目标的达成情况,是联合火力打击方案效能评估的落脚点。

直接毁伤效果可以使用统计概率度量,度量中间效果和最终效果主观概率是较好的选择。

(2) 分析影响链路

影响使命目标的关键事件或者期望效果之间具有很强的因果影响关系,按照影响因素的辨识过程,可以将不同类型节点之间的因果影响关系描述为以下四元组:

$$E = \langle E_{td}, E_{dm}, E_{mm}, E_{df} \rangle$$

其中, E_{td} 表示打击任务与直接效果间的因果影响关系集合, $E_{td} \subseteq V_{tr} \otimes V_{de}$;

E_{dm} 表示直接效果与中间效果间的因果影响关系集合, $E_{dm} \subseteq V_{de} \otimes V_{me}$;

E_{mm} 表示中间效果之间的因果影响关系集合, $E_{mm} \subseteq V_{me} \otimes V_{me}$;

E_{df} 表示底层效果与最终效果间的因果影响关系集合, $E_{df} \subseteq (V_{de} \cup V_{me}) \otimes V_{fe}$ 。

通过以上两个步骤,可以确定 STIN 的拓扑结构以及节点间的定性影响关系。比如削弱蓝方地空拦截能力会促进制空权的获取,而对地空导弹发射架实施火力打击会促进蓝方地空拦截能力的降低。

(3) 指定模型参数

STIN 的模型参数包括四个部分:CAST 参数、先验概率、时间延迟以及输入方案,CAST 包括:基准概率和影响强度。

其中先验概率用于描述打击任务(根节点)在初始时刻的执行概率,而基准概率用于描述效果节点(非根节点)在初始时刻达成预期效果的概率。先验概率和基准概率可以表示为 $P(V)$,即节点取值为真的概率。

影响强度用于描述父节点对子节点状态变化的影响程度,可以描述为以下二元组:

$$C = \langle C_i, C_e \rangle$$

其中, C_i 表示打击任务对直接效果的贡献程度,可以简记为 $A \rightarrow O: = \langle h(d), 0 \rangle$,即当任务 A 执行并且持续时间为 d 时,对目标 O 达成预期毁伤效果的贡献值为 $h(d)$,否则没有影响。

C_e 表示打击效果之间的影响程度,可以记为 $M_i \rightarrow M_h: = \langle h(d), g(d) \rangle$,其中 d 表示 M_i 对 M_h 产生影响的时间延迟。 M_i 对 M_h 若为促进影响,那么当 M_i 的预期效果达成时,对 M_h 效果达成的贡献程度为 $h(d)$,当 M_i 的预期效果未达成时,对 M_h 效果达成的抑制程度是 $g(d)$;若为抑制影响,那么当 M_i 的预期效果达成时,对 M_h 效果达成的抑制程度为 $h(d)$,当 M_i 的预期效果未达成时,对 M_h 效果达成的贡献程度是 $g(d)$ 。

CAST 参数可以转换为条件概率表,转化规则可以参考文献[13]。

时间延迟集中体现了随机时间影响网络的时间特征,用于描述相关节点之间影响效果产生的时间滞后特性,依据对节点和边的分类,时间延迟分为两个部分描述为以下二元组:

$$D = \langle D_i, D_e \rangle$$

其中, D_i 表示打击任务在对目标进行打击过程中的作战持续时间,即打击任务产生直接效果的时间延迟,比如打击任务的开始时刻为 T ,结束时刻为 $T+30$,打击任务的时间延迟为 30;

D_e 表示打击效果之间的信息处理或者传递时间,比如蓝方导弹发射架遭受打击结束时,导弹发射架的物理状态发生破坏可能需要一定的时间延迟,然后才会对地空拦截能力产生影响。

2.2 联合火力打击方案评估的指标体系

(1) 统计性分析指标

统计性分析主要考虑信度期望序列分析,信度期望序列是指随机信度在各个时刻的期望组成的序列。

①最大信度期望:这个指标可以用于衡量输入方案对关注效果节点产生的最大平均作用效果,指标值越大越好。比如表 1 中,节点 D 的最大信度期望等于 0.9812。

②到达最大信度期望的时刻:这个指标可以用于衡量输入方案对关注效果节点产生最大平均作用效果的效率,指标值越小越好。比如表 1 中,节点 D 到达最大信度期望的时刻等于 3。

③指定时刻的信度期望:这个指标可以用于衡量在指定时刻,输入方案对关注效果节点产生的平均作用效果,指标值越大越好。比如表 1 中,节点 D 在时刻 5 的信度期望等于 0.6693。

④指定时段的平均信度期望:这个指标可以用于衡量在指定时段,输入方案对关注效果节点产生的综合作用效果,指标值越大越好。比如表1中,节点D在时段[4,5]内的平均信度期望等于 $(0.7499 + 0.6693)/2 = 0.7096$ 。

(2)不确定性分析指标

不确定性分析主要考虑信度熵序列分析,信度熵序列是指随机信度在各个时刻的熵组成的序列。

①最大信度熵:这个指标可以用于衡量输入方案对关注效果节点产生作用效果的最大不确定性,指标值越小越好。比如表1中,节点D的最大信度熵等于0.8813。

②指定时刻的信度熵:这个指标可以用于衡量在指定时刻,输入方案对关注效果节点产生作用效果的不确定性,指标值越小越好。比如表1中,节点D在时刻5的信度熵等于0.8813。

③指定时刻的信度熵差分:这个指标可以用于衡量在指定时刻,输入方案对关注效果节点产生作用效果不确定性的变化程度,指标值越小越好。比如表1中,节点D在时刻5的信度熵差分等于 $(0.8813 - 0.8813)/(5 - 4) = 0$ 。

④指定时段的平均信度熵:这个指标可以用于衡量在指定时段,输入方案对关注效果节点产生作用效果的平均不确定性,指标绝对值越小越好。比如表1中,节点D在时段[4,5]内的平均

信度熵等于 $(0.8813 + 0.8813)/2 = 0.8813$ 。

(3)置信性分析指标

置信性分析主要考虑满足指定置信度的条件下,指标置信区间分析,基于置信性分析的指标如下所示:

①指定时刻的 α 置信信度:这个指标用于衡量在指定时刻,置信度为 α 时,方案对效果节点产生的作用效果,指标值越大越好。

比如表1中,效果节点D在时刻5时,如果指定置信度为 $\alpha = 0.7$,那么效果节点D的置信信度为0.6822,即 $P(be(5) \geq 0.6822) \geq 0.7$ 。

②指定时段的 α 平均置信信度:这个指标用于衡量在指定时段,置信度为 α 时,方案对效果节点产生的综合作用效果,指标值越大越好。

比如表1中,效果节点E在时段[4,5]内,如果指定置信度为 $\alpha = 0.8$,那么效果节点D的平均置信信度为0.6822,即 $P(\text{avg}[4,5] \geq 0.6822) \geq 0.8$ 。

3 案例分析

参考文献[19],地空拦截能力、空地打击能力、空空拦截能力通常是制空权所拥有的主要作战能力,因此为了有效地削弱蓝方上述作战能力,红方计划制定12个可行的作战任务对相关目标实施打击,建立支持联合火力打击夺取制空权问题研究的STIN如图2所示。

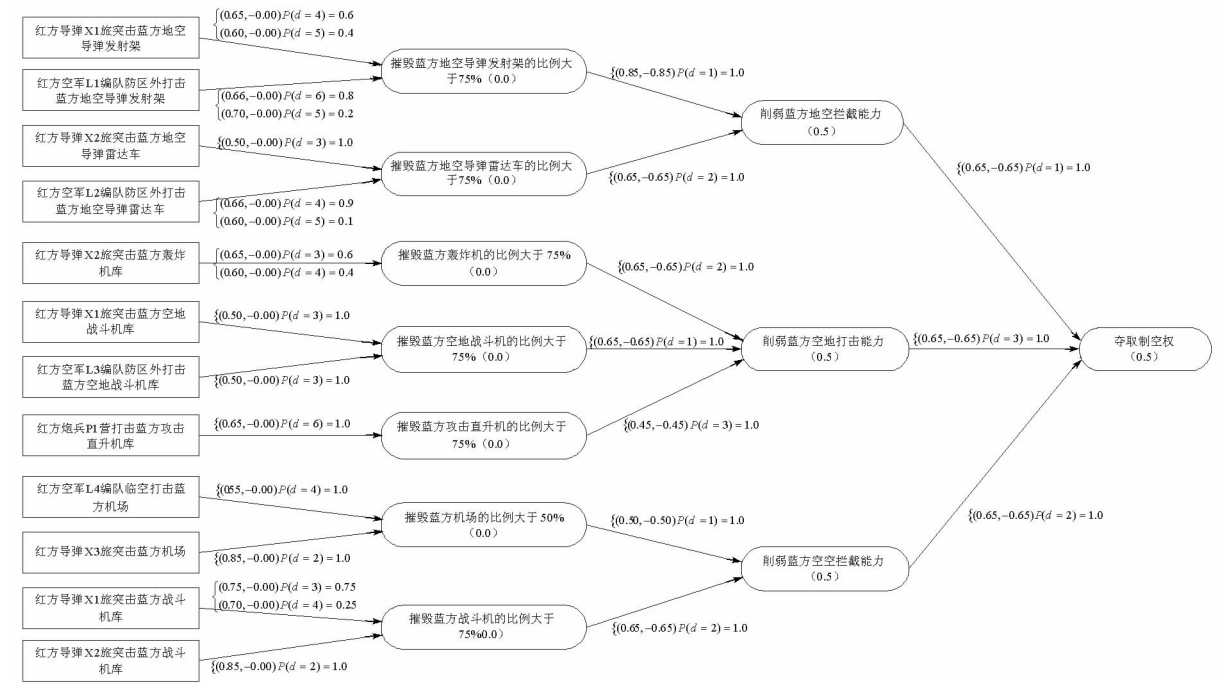


图2 联合火力打击夺取制空权的随机时间影响网络
Fig. 2 A sample of joint fire strike against airpower based on STIN

在战役进行到夺取制空权阶段时,通过当前态势分析,指定夺取制空权以及削弱蓝方地空拦截能力、空地打击能力和空空拦截能力的初始信度概率具有最大不确定性,即基准概率等于0.5。而打击任务的直接效果在初始时刻均一定未达成预期效果,即基准概率等于0.0。红方导弹X1旅突击蓝方地空导弹发射架的突击时间为4个时间单位的可能性为0.6,此时对摧毁蓝方地空导弹发射架的比例大于75%的预期效果的影响强度为(0.65, -0.00),也就是说,在上述任务执行结束后,对上述效果达成的贡献程度等于0.65,而

如果不执行的话,对上述效果达成没有影响。

同理上述任务也有可能经过5个时间单位的时间延迟完成,可能性为0.4,此时对预期效果的贡献程度等于0.60。当对蓝方地空导弹发射架的打击达成预期效果时,那么对削弱蓝方地空拦截能力的贡献程度等于0.65,而如果未能达成预期效果的话,那么对削弱蓝方地空拦截能力的抑制程度等于0.65,二者影响效果产生的时间延迟等于1。打击任务在初始时刻均不执行,即根节点的先验概率均等于0.0。输入方案如表2所示。

表2 评估分析的输入方案
Tab.2 Scenarios for assessment

联合火力打击方案一		联合火力打击方案二	
打击任务名称	执行时刻	打击任务名称	执行时刻
导弹 X1 旅突击蓝方地空导弹发射架	2	空军 L1 编队防区外打击蓝方地空导弹发射架	2
导弹 X2 旅突击蓝方地空导弹雷达车	3	空军 L2 编队防区外打击蓝方地空导弹雷达车	3
导弹 X2 旅突击蓝方轰炸机库	1	导弹 X2 旅突击蓝方轰炸机库	1
导弹 X1 旅突击蓝方空地战斗机库	4	空军 L3 编队防区外打击蓝方空地战斗机库	4
炮兵 P1 营打击蓝方攻击直升机库	3	炮兵 P1 营打击蓝方攻击直升机库	5
空军 I4 编队临空打击蓝方机场	5	导弹 X3 旅突击蓝方机场	4
导弹 X1 旅突击蓝方战斗机库	3	导弹 X2 旅突击蓝方战斗机库	3

考虑表2给出的两个输入方案。对于联合火力打击方案一来说,导弹X1旅突击蓝方地空导弹发射架的打击任务在时刻2时开始执行,即在时刻2之前,上述任务对应的根节点以先验概率等于0.0的可能性对相关的效果节点产生影响,从时刻2起,上述任务对应的根节点以概率等于1.0的可能性对相关的效果节点产生影响。

如图3所示,将信度期望的最大值作为输入方案评估指标,那么方案二显然优于方案一;将信度期望最大值产生的效率作为评估指标,那么方案一显然优于方案二;将关注时刻10的信度期望作为评估指标,那么方案二显然优于方案一;将关注时段[9,12]的综合信度期望(折线面积)作为评估指标,那么方案二显然优于方案一。

通过信度传播计算,上述两个方案中叶节点的信度期望序列如图3所示,叶节点的信度熵序列如图4所示。

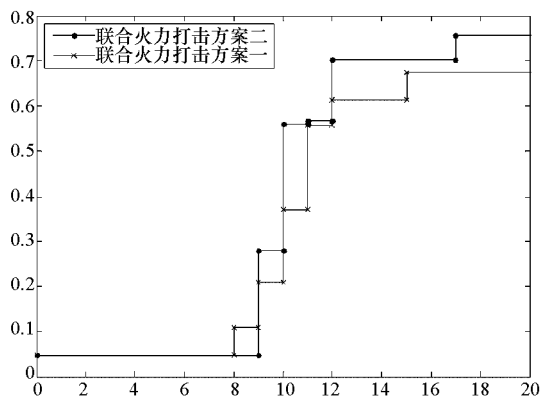


图3 叶节点的信度期望序列图

Fig.3 Belief expectation sequence of leaf node

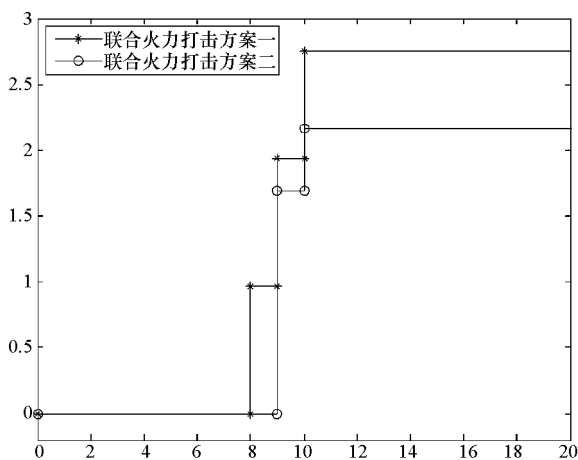


图4 叶节点的信度熵序列图

Fig.4 Belief entropy sequence of leaf node

如图4所示,将信度熵的最大值作为输入方案评估指标,那么方案二显然优于方案一;将关注时段[9,12]的综合信度期望(折线面积)作为评估指标,那么方案二显然优于方案一。

时刻 10 的信度熵作为评估指标,那么方案二显然优于方案一;将关注时刻 10 的信度熵的差分作为评估指标,那么方案二显然优于方案一;将关注时段 [9,12] 的综合信度熵(折线面积)作为评估指标,那么方案二显然优于方案一。

通过上述评估分析,可以得到以下结论:基于不确定性分析指标和置信性分析指标,方案二均优于方案一;基于统计性分析指标,方案一只有有效性指标优于方案二,其余均比方案二差。因此可以认为方案二在整体上优于方案一。

当两者之间的优劣关系比较复杂时,可以参考文献[18]选用合适的多属性决策方法进行方案决策,这里不做论述。

4 结论

针对联合火力打击方案优化的需要,提出基于 STIN 的联合火力打击方案评估方法,给出 STIN 建模的一般流程,建立了基于 STIN 进行方案评估的指标体系,通过案例介绍 STIN 在打击方案评估中的一般使用方法。与其它方法相比,该方法始终围绕于打击任务对物理目标的毁伤效果与使命目标达成之间因果影响关系分析,从而在一定程度上可以指导对使命目标达成具有显著促进作用的打击任务选择和调度执行。

基于 STIN 进行联合火力打击方案评估还有很多工作需要展开,比如:

①目前 STIN 的参数指定是领域专家依据经验知识人工指定的,如何将仿真数据引入参数的指定,增强 STIN 的有效性是下一步需要深入研究的问题。

②支持联合火力打击方案评估的 STIN 模型目前主要考虑打击手段和打击目标,如何对指挥控制、信息对抗等“软因素”进行建模也是下一步需要深入研究的问题。

参考文献:

- [1] Marshak W P, Winkler R, Fiebig C B, et al. Evaluating Intelligent Aiding of Course of Action Decisions Using the Fox Genetic Algorithm in 2-d and 3-d interfaces [C]//Proceedings of the 3rd Annual Fed Lab Symposium, 1999.
- [2] Kewley R H, Embrechts M J. Computational Military Tactical Planning System [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2002, 32(2): 161-171.
- [3] 秦前付,曹存根,徐浣. 基于图论的作战计划军事效果评估[J]. 计算机科学, 2005, 32(7): 148-151.
- [4] Dengiz B, Alabas C. Simulation Optimization Using Tabu Search [C]//Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. Orlando, Florida: IEEE Press, 2000: 805-810.
- [5] 张最良,李长生,赵文志,丁富力. 军事运筹学[M]. 北京:军事科学出版社, 2005.
- [6] 王振宇,马亚平,李柯. 联合打击火力分配方案优化方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2005, 19(2): 12-17.
- [7] 黄俊伟,王雪琴,陈万玉. 联合火力战火力资源分配模型研究[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(5): 56-58.
- [8] 石影,黄子才,洪钧. 三军联合打击效果的评估[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(4): 24-28.
- [9] 黄路炜,毕义明,杨继锋. 常规导弹联合作战火力运用方法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(9): 2118-2120.
- [10] Wagenhals L W, Shin I, Levis A H. Creating Executable Models of Influence Nets with Coloured Petri Nets [J]. International Journal of STIT, Springer-Verlag, 1998(2): 168-181.
- [11] 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.
- [12] Cooper G F. The Computation Complexity of Probabilistic Inference Using Bayesian Belief Networks [J]. Artificial Intelligence, 1990(42): 393-405.
- [13] Dagum P, Luby M. Approximating Probabilistic Inference in Bayesian Belief Networks Is Np-Hard [J]. Artificial Intelligence, 1993(60): 141-153.
- [14] Rosen J A, Smith W L. Influence Net Modeling with Causal Strengths: An Evolutionary Approach [C]//Proceedings of the 1996 Command and Control Research and Technology Symposium, Monterey CA, 1996.
- [15] Wagenhals L W. Influence Nets and Bayesian Net Approaches for Course of Action [R]. Adversary Behavioral Modeling Maxwell AFB, Montgomery AL, 2008.
- [16] Wagenhals L W, Levis A H. Course of Action Analysis in a Cultural Landscape Using Influence Nets [C]//Proceedings of the IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications, Honolulu, 2007.
- [17] 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.
- [18] Figueira J, Greco S, Ehrgott M. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the ART Surveys [M]. Springer Science + Business Media, Inc. 2005.
- [19] Clark C C R, Cook C T J. A Practical Approach to Effects-based Operational Assessment [J]. Air & Space Power Journal, 2008, XXII(2): 82-99.