

动态随机影响图建模方法

赵新 李群 朱一凡

(国防科技大学信息系统与管理学院系统工程系 长沙 410073)

摘要 通过引入时间片的概念和反馈特性,时间片影响图增强了经典影响图描述因果影响关系网络的能力,但仍不足以支撑对复杂系统/体系问题中并发、交互、协同等过程的有效描述。参考离散事件系统建模的相关特性及方法,通过增加一个时间变量节点并扩展现有的模型规范,提出了一种动态随机影响图建模方法;详细说明了该方法的图形化语法、语义,并给出了其模型节点逻辑关系的迭代演算算法。该方法较完整地保持了典型时间片影响图的现有特性,可以作为改进现有方法的折中方案,以描述决策问题中的复杂行为过程。

关键词 决策分析,时间片影响图,离散事件系统仿真,动态随机影响图,模型规范,迭代解算
中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A

Dynamic-stochastic Influence Diagrams for Decision Analysis

ZHAO Xin LI Qun ZHU Yi-fan

(Institute of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract As an expanded mode of Influence Diagrams, the Time-Sliced IDs (TSIDs, or Dynamic IDs) increases cause-effect relationship description capability effectively for decision analysis. But it still can't becomingly describe intercurrent, alternating, or coordinated processes of complex system. Based on the analysis of discrete-event system model, the paper suggested a Dynamic-stochastic IDs (DSIDs) by introducing a time node to expand existing model-criterion, explicated its graphical syntax, and gave its evaluating algorithm. The DSIDs could be used as an effected approach to improve existing Time-Sliced IDs to describe complex processes.

Keywords Decision analysis, Time-sliced influence diagrams, Discrete-event system simulation, Dynamic-stochastic influence diagrams, Model-criterion, Model evaluating

1 引言

现代影响图^[1-4] (Influence Diagrams) 是 20 世纪 80 年代提出的一种严格的概率建模方法,它通过图形化来展示复杂决策问题的高层结构,是促进领域专家、决策者和决策分析者之间交流的有效工具。经过近数十年的发展,它已作为一种对决策问题进行建模的重要的图形化方法,广泛地应用到决策问题以及计算机科学的众多领域(如工业控制、投资风险评价、医疗诊断、医疗技术评估及预测、军事问题分析以及人工智能等)。

虽然,经典影响图最初只是解析分析的概率推理方法,但是随着在其关系层、函数层和数值层所分别或同时进行的演化发展,现已出现面向不同领域和应用的多种形式的影响图^[1,5-12],主要包括:概率影响图、模糊影响图、粗糙影响图、高斯影响图、单调影响图、蒙特卡洛影响图以及时间片影响图等。

其中,尤以时间片影响图^[12,13] (Time-Sliced Influence Di-

agrams, TSIDs) 更值得基于模型所进行的较高层次问题决策分析的相关研究的关注,如图 1 所示。TSIDs 对经典影响图的建模规范和解算规则进行了有效的扩展,使其具有了时间的概念和动力学的特性,在保证影响图决策分析优势的同时,又能够支持微分方程解算、连续系统仿真以及确定型的高层决策分析建模,具有描述复杂问题中的动态性和相互影响的一般能力。在高层进行策略分析中,这种改善了因果影响关系网络描述能力比静态解析影响图模型更进一步,使其更适用于对便于过程平均进行抽象的决策问题进行建模,可以满足数据分析、风险分析、决策分析以及故障分析等应用的需求。

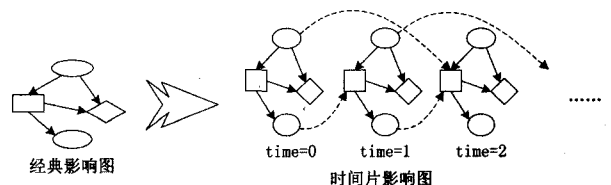


图 1 经典影响图到时间片影响图

到稿日期:2009-09-16 返修日期:2009-12-30 本文受国家自然科学基金项目(60974073, 60974074), 装备预研基金课题(9140C640505)资助。

赵新(1981-),男,博士生,CCF 学生会员,主要研究方向为武器装备体系论证与仿真评估、建模仿真理论等, E-mail: zhx20mg@163.com; 李群(1971-),男,博士,教授,主要研究方向为系统仿真、组合仿真、武器装备论证等;朱一凡(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为建模仿真理论、武器系统作战效能论证与仿真等。

TSIDs 通过引入时间片的概念将时间显式地表示出来,在时间概念和不确定性的研究之间建立起了一座桥梁^[13]。但是,不同建模方法适用于不同的问题,如果该问题中各部件的交互关系不易弄清,那么就不适合进行 TSIDs 的高层决策建模。例如,海军本身包含有航空兵、岸防部队、水面舰艇、潜艇等作战武器,其武器装备体系有着科技含量高、大量装备目标价值大、作战方式复杂等特点;而在海军战役层次的作战体系对抗当中,为了达成作战目的,又十分强调饱和攻击的效果,在海军诸兵种协同的体系对抗当中,包含不同平台、不同编队的多个相互影响的作战回路,这些回路相互交叉,对它们的进一步抽象,是极其困难的。

这类问题^[14,15] 不仅具有复杂的实体,还具有复杂的关系,对它的认识还不明确,不能对其进行完全清晰的把握。而 TSIDs 中所给出的时间和因素间关系的定义又都是固定的,缺乏足够的对诸如交叉协同作战过程的动态特性和随机特性进行合理描述,如图 2 所示。其中,问题固有的可变性带来了随机性,反映在模型结构当中;而动态性不仅是基于时间的演化特性,还包含事件的动态生成。

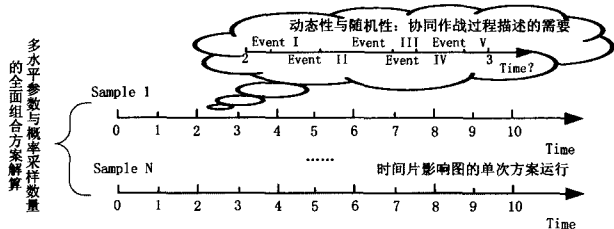


图 2 时间片影响图的描述能力

为了使其具有描述诸如动态随机作战等过程的能力,需要对 TSIDs 进行一定程度的改进,使其能够更好地支持决策分析建模,这同时也是影响图建模理论的进一步发展。

本研究通过引入离散事件系统 (Discrete Event System, DES) 建模仿真方法^[16,18] 中动态和随机过程的描述特性 (该类方法具备对输入与固有随机性时间延迟以及排队系统的表示能力,可以描述并发、协同、子过程等复杂过程),使 TSIDs 在保持现有的分析建模能力及优势的同时,拥有描述高层问题中复杂过程及其交互关系细节的能力。这一建模方法的变化,必定带来模型描述、解算等一系列演变。

2 基于时间片影响图的改进设计

2.1 特征组件的结合方式

从图形语法、语义的角度来说,离散事件建模仿真方法中的节点无论表示的是事件、状态、活动,或是进程^[16,18],都需要与 TSIDs 中的变量产生一定的双向关联关系,且两类部件间的迭代解算应具有统一的时间概念,这是联合建模中所不可回避的问题。

因此,引入一个表示随机事件的“事件时间 (Etime-Event time)”,它与基本“迭代时间 (Ftime-Feedback time)”两者的关系如图 3 所示。

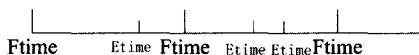


图 3 事件时间与迭代时间的关系

根据不同的问题特点及模型描述需求,考虑仿真解算策略的差异,可知 TSIDs 与 DES 模型部件组件间存在两类结合

方式:第一类是节点混合建模,统一进行整体的仿真解算与分析,它属于对问题的同一个层次模型的不同粒度描述,主要针对对象行为(事件);第二类是模块混合建模,对单个 DES 对象部件进行局部的重复采样解算,它属于对问题的不同层次的一种变分辨率描述,主要针对对象实体。

第一类形式灵活,可以很方便地描述实体对象间的复杂交互和影响关系,且模型解算代价不会有明显变化,因此,尤其适合描述复杂的系统和体系问题;而第二类则更适合于描述具有模块(独立功能)特性的子问题,但对复杂问题中各实体对象间的交互影响关系描述能力十分弱,且解算代价呈线性或指数增长趋势,因此只能作为模型局部部件的一种变分辨率的处理。当然,两类方式在同一模型中也可以同时存在。

本文所进行的研究,是针对 TSIDs 在复杂系统或体系问题描述能力上的缺陷进行的,因此在建模方法上将着重考虑第一类研究方式,它属于多方法混合建模的范畴;而第二类方式作为补充,则属于一般形式的多方法组合建模。

2.2 原理与思路

作为对现有方法的改进研究,理想情况下所给出的建模方法应具有以下特点:

能够支持图形化建模,对 TSIDs 的图元扩展较少;

建模思想直观,尽可能接近人的思维方式;

图形元素易于理解,模型结构便于调整,便于对因果影响机理的解释;

有比较统一的运行规则,便于复杂问题建模和支撑软件设计。

本文中将要给出的改进方法称为“动态随机影响图 (Dynamic-Stochastic Influence Diagrams-DSIDs)”,即可以动态安排随机的事件、过程及影响关系,并支持对动态影响关系的随机处理。为了增加对 DES 模型特性的描述能力,DSIDs 在 TSIDs 的基础上通过只增加一个“时间变量”节点,就将离散事件的时间属性显式地表示出来,起到控制过程描述的作用。这种设计有利于动态随机影响图的语法、语义的协调与整体统一,保持了影响图的整体特性,也便于解算引擎的调用。

当然,影响图与 DES 的建模方法在方法分类上就有先天的区别^[16,18],前者一般是在基于功能的建模方法族中讨论,而后者则属于描述类建模方法族的范畴。具体来说,为在 DSIDs 中获得有限的折中权衡,需要给出有关扩展节点变量含义、规范模型设计原则,以及改进节点迭代解算规则等处理过程的详细说明,如图 4 所示。

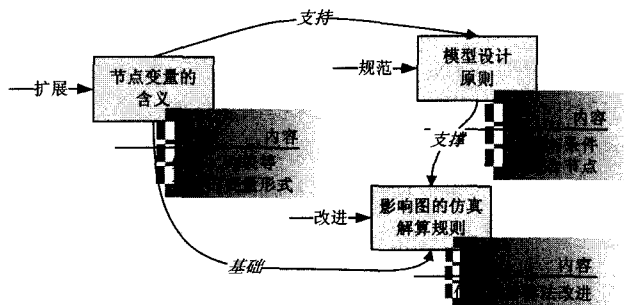


图 4 动态随机影响图的功能实现过程

3 动态随机影响图模型规范

3.1 图形化语法

DSIDs 主要基于 TSIDs 扩展而来,用以描述更加复杂的问题,其基本语法元素同样包括变量节点和影响关系^[1,3,12]。变量节点是以节点形式表示的变量;影响关系是以有向箭线表示的变量节点间的相互影响。可以以下述形式描述 DSIDs:

$$NN = \langle D, M, N, A, h_N, t_{now} \rangle$$

式中, t_{now} 表示当前解算所处的逻辑时间,其它与 TSIDs 的相关定义相同。 D 是节点索引的集合,即节点名的集合; M 是模块描述,表示的只是模型模块化、层次化组织形式,它本身没有变量值以及输入输出关联; N 是变量节点的集合; A 是影响弧段的集合; h_N 是等步长迭代时间的离散时间间隔。

对 $\forall d \in D$, 有 $N_d = \langle n, I_d, E_d, V_{init}, V_d, \Delta_d, \Lambda_d, h \rangle$, 表示的是一个基本变量节点。其中, $n \in NP$ 表示变量的名称, NP 为变量命名空间; h 为迭代时间间隔; V_{init} 量是节点变量的初始值,可以是一个数值,也可以是对其它变量的依赖函数; V_d 是基本变量节点每一时刻所对应的变量值; $I_d \subseteq D$ 是影响基本变量节点 N_d 的节点集; $E_d \subseteq D$ 是受基本变量节点 N_d 影响的节点集; $\Delta_d: \prod_{i \in I_d} V_i \times V_d(t) \rightarrow V_d(t+1)$ 是基本变量节点 N_d 的逻辑功能函数,即节点变量根据当前变量值及输入变量集中变量的当前值,计算得出下一时刻的节点变量值时所依赖的函数; $\Lambda_d: V_d \rightarrow \prod_{j \in E_d} V_j$ 是基本变量节点 N_d 的输出映射函数,即输出所指向的节点变量可以是多个,但每一时刻的输出变量值只有一个,即 $V_d(t)$ 。

DSIDs 的变量节点主要有 5 种,节点集 $N = N_C \cup N_V \cup N_D \cup N_O \cup N_T$, 且 $N_C \cap N_V \cap N_D \cap N_O \cap N_T = \emptyset$, 即机会变量节点、一般变量节点、决策变量节点、目标变量节点和时间变量节点,如图 5 所示。其中,前四项与 TSIDs 中的定义相同^[3,12],而时间变量节点 N_T 是 DSIDs 中所独有的,它以变量节点的形式表示事件发生时刻值。

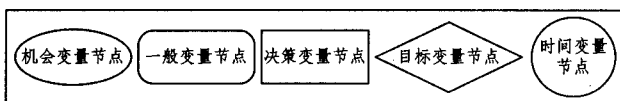


图 5 动态随机影响图的变量节点类型

DSIDs 的影响关系弧段集 $A = A_R \cup A_I \cup A_E \cup A_F \cup A_C \cup A_A$, 且 $A_R \cap A_I \cap A_E \cap A_F \cap A_C \cap A_A = \emptyset$ 。除了“关联弧 A_R ”、“信息弧 A_I ”、“影响弧 A_E ”和“莫忘弧 A_F ”外^[3],还包括“条件弧 A_C ”和“行为弧 A_A ”两种连接,统一采用箭线描述。 $A_C = \{(x, y), x \in N_C \cup N_V, y \in N_T\}$ 为条件弧段子集,其前继节点为后继时间变量节点的逻辑运算提供条件值; $A_A = \{(x, y), x \in N_T, y \in N_V \cup N_T\}$ 为行为弧段子集,即表明事件发生时可以对其它变量节点的影响行为。

3.2 描述性语义

1. 随机事件描述

作为一种从事件的角度描述离散事件系统特性的方法说,需要给出 DSIDs 对以下几个对象的描述途径:

(1) 随机事件的发生时间。每个时间变量节点对应一类事件,节点调用时由该事件发生的当前条件安排事件的发生时间,并将其存储在该时间变量节点中,如图 6 所示。

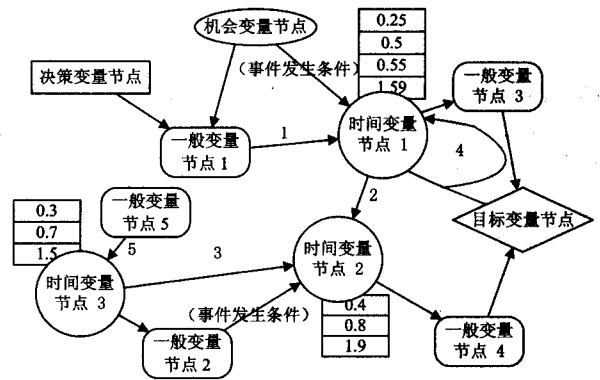


图 6 动态随机影响图及其随机事件描述

(2) 事件发生条件。如图 6 所示,可以利用现有的变量节点值(一般变量节点或机会变量节点)充当事件发生条件,且只在前置事件驱动(安排)另一后置事件时才可能被定义和使用。在条件不满足时,后一事件不会被驱动(安排)。

(3) 事件表。DSIDs 中并没有采用统一的事件表管理,而是根据需要,变量节点可在每个时间利用 index 矩阵给出每类事件的发生时间列表,如图 6 所示。当某个事件发生后,其记录将从列表中移除。

(4) 行为/事件发生对其它变量节点产生的影响。以连接箭线表示该类事件发生时对其它变量节点的影响(其具体执行体现在节点逻辑的迭代演算中),如图 6 所示。在其它计算步骤中,这一类连接箭线将被屏蔽(参见下文),从而可以避免发生逻辑错误。

(5) 驱动事件的发生。从驱动方式上可分为两种:一是在影响图进行整体解算过程中,由其它类型的节点进行事件安排(如图 6 中的“1”,“5”);二是在进行事件扫描和执行时,由其它时间变量节点所驱动(如图 6 中的“2”,“3”,“4”)。而从具体情况上,还可区分为有条件的事件驱动(如图 6 中的“1-4”)和无条件的事件驱动(如图 6 中的“5”)。

2. 关键组件特性描述

除了对随机事件的基本描述功能以外,还需要进一步规范 and 说明 DSIDs 对以下特性的描述能力:

(1) 并发性。并发特性的描述,是 DSIDs 借鉴 DES 建模方法而获得的主要能力之一。DSIDs 可以通过对随机事件的描述和统一调度,完成对并发过程的描述。而并发过程中的冲突问题,同样可以通过设置权重(针对可预见的且可分清优先关系的冲突)或进行随机选择(针对不可预见的或不能分清优先关系的冲突)的方式来解决。

(2) 队列。队列是处于等待状态的实体序列,形成队列的规则称为排队规则。队列是离散事件系统仿真的固有部分,它保证当永久实体被占用时临时实体能够按一定顺序(排队规则)组合在一起。DSIDs 在一般变量节点中使用列表的形式来表示队列,列表的组织可根据排队规则的不同而使用顺序或链表等形式。而在更简单的需求下,队列还可以作为一种状态或特殊实体对待,可以用队列长度表示。

(3) 动态变化的影响关系。影响关系的不确定性和动态变化包含两层含义:一是影响关系权重的动态变化;二是影响目标的不确定性。前者主要在一般变量节点间出现,而后者则主要出现在时间变量节点间,表示事件驱动的不确定性。

虽然一般可以采用在连接线上标记影响权重或转移概率

的形式表示不确定性,但为保持图形关系的简洁和统一性,DSIDs中只使用现有变量节点完成两种影响关系不确定性的描述,如图7所示。这些变量节点利用random函数,在节点内部实现采样,并将其反映到对相应变量的影响上。

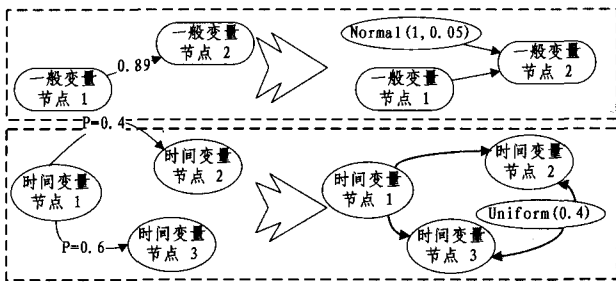


图7 动态变化影响关系的描述

4 模型节点逻辑的迭代演算

DSIDs虽然没有改变影响图模型的层次结构,但是却使得原有规范的语义发生了变化,从而影响了节点间的逻辑关系。

4.1 演算算法描述

DSIDs模型节点迭代调度算法的总控程序如图8所示。

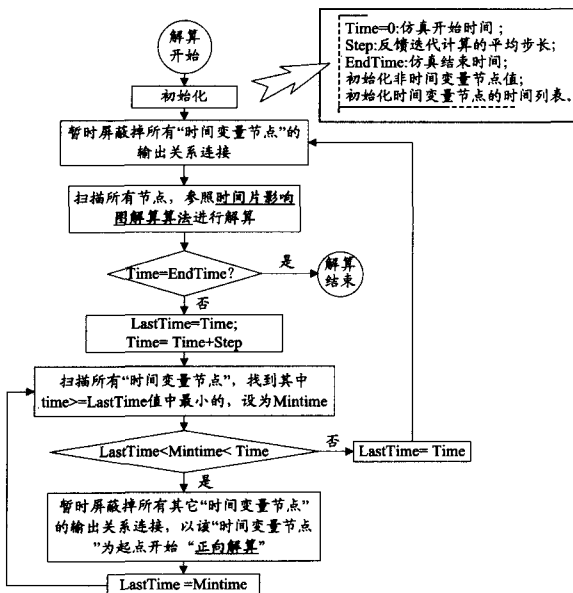


图8 节点逻辑迭代演算算法过程框图

算法中的LastTime表示最近一次的计算时间,它处于Time到Time-Step之间或等于Time-Step,如图9所示。

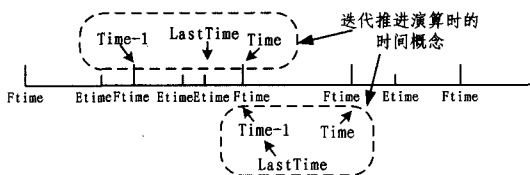


图9 节点变量解算过程中的时间概念

该算法涵盖并兼容TSIDs模型节点的调度方法^[12],因此,在不使用时间变量节点的情况下,DSIDs的模型形式和节点调度方法都是与TSIDs等价的。

4.2 正向解算子过程

“时间片影响图解算算法”的核心内容是在等步长的“时

间”间隔内,计算当前“时刻”所对应的所有变量节点元素的取值,其详细设计和讨论可参见相关文献^[12,13]。

以“时间变量节点”为起点的“正向解算”的算法规则描述如下:

正向解算的基本规则:

(1)计算前,屏蔽掉该时间变量节点的输入连接,屏蔽掉其它时间变量节点的输出连接;

(2)若该节点同时连接有时间变量节点和一般变量节点,则先驱动一般变量节点进行进一步正向解算;

(3)当该节点所连接的一般变量节点或其它时间变量节点的数量大于1时,其调度顺序可以是任意的;

(4)当驱动的目标节点为时间变量节点时,需要判断事件发生条件,并在目标节点中安排事件时间(Etime);

(5)当驱动的目标节点为一般变量节点时,直接利用相关变量节点在LastTime的取值,计算目标节点值;

(6)每当该节点通过某条连接线完成对某节点的正向解算驱动后,断开此连接线(限于此次正向解算的后续计算)。

可以从图6中摘出图10列举的典型解算情况,用以说明“以‘时间变量节点’为起点的正向解算”过程:

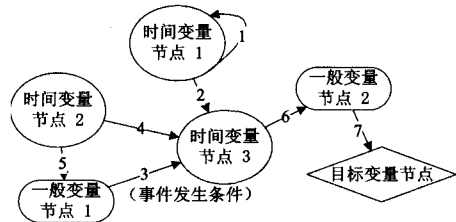


图10 “正向解算”中包含的典型解算情况

(1)以“时间变量节点1”为起点。起点依“连接线1”,找到其目标节点为其自身,因是无条件的事件,于是安排该节点所代表事件的下一发生时刻,之后断开“连接线1”(此次计算中,下同);起点依“连接线2”找到其目标节点为“时间变量节点3”,发现其连接有事件发生条件边“连接线3”,则“时间变量节点3”反向调度“一般变量节点1”,判断事件发生条件是否满足,若满足则安排“时间变量节点3”所代表事件的下一发生时刻,若不满足则无其它操作,之后断开“连接线2”;计算完成。

(2)以“时间变量节点2”为起点。起点依“连接线5”找到目标节点“一般变量节点1”,根据定义计算“一般变量节点1”的当前时刻值,之后断开“连接线5”;起点依“连接线4”找到目标节点“时间变量节点3”,此节点连接有事件发生条件边“连接线3”,则“时间变量节点3”反向调度“一般变量节点1”(该节点的当前值可能已因“时间变量节点2”的调度影响而发生改变),判断事件发生条件是否满足,若满足则安排“时间变量节点3”所代表事件的下一发生时刻,若不满足则无其它操作,之后断开“连接线2”;计算完成。

(3)以“时间变量节点3”为起点。起点依“连接线6”找到目标节点“一般变量节点2”,根据节点定义计算目标变量“一般变量节点2”的当前时刻值,之后“连接线6”在此次计算中断开;计算完成。

结束语 虽然从某种角度上讲,也可以将本项研究看作是一种多方法建模^[19],但需要指出的是,影响图与离散事件

(下转第193页)

- [5] Jeung H, Liu Q, Shen H T, et al. A hybrid prediction model for moving objects[C]//Proc. of the 24th Int'l Conf. on Data Engineering. USA: IEEE, 2008; 70-79
- [6] Mamoulis N, Cao H, Kollis G, et al. Mining, Indexing, and Querying Historical Spatiotemporal Data[C]// Proc. of the 10th ACM SIGKDD Int'l Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2004; 236-245
- [7] Tao Y, Faloutsos C, Papadias D, et al. Prediction and indexing of moving objects with unknown motion patterns[C]//Proc. of the 2004 ACM SIGMOD Int'l Conf. on Management of Data. New York: ACM, 2004; 611-622
- [8] Aggarwal C C, Agrawal D. On nearest neighbor indexing of non-linear trajectories[C]// Proc. of the 22th ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symp. on Principles of Database Systems. New York: ACM, 2003; 252-259
- [9] Kim S-W, Won J-I, Kim J-D, et al. Path prediction of moving objects on road networks through analyzing past trajectories[C]// Proc. of the 11th Int'l Conf. on Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2007; 379-389
- [10] Ding Zhiming, Guting R H. Managing moving objects on dynamic transportation networks[C]//Proc. of the 16th Int'l Conf. on Scientific and Statistical Database Management. Washington: IEEE Computer Society, 2004; 287-296
- [11] Ding Zhiming, Zhou X. Location Update Strategies for Network-Constrained Moving Objects[C]//Proc. of the 13th Int'l Conf. on Database Systems for Advanced Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2008; 644-652
- [12] Karimi H A, Liu X. A predictive location model for location-based services[C]//Proc. of the 11th ACM Int'l Symp. on Advances in Geographic Information Systems. New York: ACM, 2003; 126-133
- [13] Markov A A. Extension of the limit theorems of probability theory to a sum of variables connected in a chain[Z]. reprinted in Appendix B of: R. Howard. Dynamic Probabilistic Systems, volume 1; Markov Chains. John Wiley and Sons, 1971
- [14] 汪荣鑫. 随机过程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006
- [15] Doob J L. Stochastic Processes[M]. New York: John Wiley and Sons, 1953

(上接第 185 页)

系统建模仿真方法的结合并非组合,而是建模规范和仿真策略的紧密结合,即以影响图为主导,结合离散事件系统建模仿真的特性,构建面向领域问题分析的建模方法。一般来说,采用一种针对特定领域、特点系统类型的建模方法比通用方法更能抓住问题的本质^[19]。

这种 DSIDs 的建模方式尽管还不如经典影响图直观(如以较为“复杂”的形式描述排队系统),而需要建模者了解过程发展和可能发生的事件细节,但是,它以图形化的建模方式,在 TSIDs 基础上进行了图形语法和语义的扩展,较完整地保持了典型分析建模(TSIDs)的现有特性;可以动态地生成随机变量,也可对动态的影响关系进行随机形式的处理,丰富了影响图的描述能力;统一了其中的时间概念,可以描述时序关系和队列,清楚而明确地反映各影响因素和离散事件的发生时间之间的相互关系,更利于深入分析与探索复杂决策问题。

参 考 文 献

- [1] Howard R A, Matheson J E. The Principles and Applications of Decision Analysis [J]. Strategic Decisions Group, Menlo Park, CA, 1984, II: 720-762
- [2] Shachter R D. Evaluating Influence Diagrams [J]. Operations Research, 1986, 34: 871-882
- [3] 詹原瑞,等. 影响图理论与应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 1995
- [4] 姚宏亮,等. 一种基于结构分解的影响图模型选择算法[J]. 计算机科学, 2007, 34(1): 133-139
- [5] López-Díaz M, Rodríguez-Muniz L J. Influence Diagrams with Super Value Nodes Involving Imprecise Information [J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2007, 179: 203-219
- [6] Diehl M, Haines Y Y. Influence Diagrams with Multiple Objectives and Tradeoff Analysis [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans (S1083-4427), 2004, 34(3): 293-304
- [7] Tatman J A, Shachter R D. Dynamic Programming and Influence Diagrams [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1990, 20(2): 365-379
- [8] Shachter R D, Ndilikilikisha P P. Using Potential Influence Diagrams for Probabilistic Inference and Decision Making [C]// Proceedings of the 9th Conference on Uncertainty and Artificial Intelligence. 1993; 383-390
- [9] Ndilikilikisha P P. Potential Influence Diagrams [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 1994, 11: 251-285
- [10] Charnes J, Shenoy P P. Multi-stage Monte Carlo Method for Solving Influence Diagrams Using Local Computation [J]. Management Science, 2004, 50(3): 405-418
- [11] Cano A, Gómez M, Moral S. A Forward-backward Monte Carlo Method for Solving Influence Diagrams [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2006, 42: 119-135
- [12] Analytica User Guide[R]. Lumina Decision Systems, Inc
- [13] Morgan M G, Henrion M. Chapter 10 of Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis [M]. New York: Cambridge University Press, 1990
- [14] Davis P K. Lessons from Defense Planning and Analysis for Thinking About Systems of Systems[R]. Prepared for the Symposium on Complex System Engineering. Santa Monica, Calif: RAND Corporation, 2007
- [15] Davis P K, Henninger A. Analysis, Analysis Practices, and Implications for Modeling and Simulation[R]. Santa Monica, Calif: RAND Corporation, 2007; 5-6
- [16] 王维平,等. 离散事件系统建模与仿真[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006
- [17] Buss A H, et al. Modeling with Event Graphs [C]//Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference. 1996
- [18] Fishwick P A. Simulation Model Design and Execution [M]. Prentice-Hall Inc, 1995
- [19] 王维平,等. 柔性仿真原理与应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003