

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201310014

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.16734785.201310014.html>

# 贝叶斯网络的目标打击过程中关键行动选择方法

雷霆<sup>1,2</sup>, 朱承<sup>1</sup>, 张维明<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073; 2. 军事科学院 运筹所, 北京 100091)

**摘要:**研究了如何在打击复杂关联目标过程中选择关键行动的问题。在描述目标体系层次结构和典型目标间影响关系的基础上,使用面向对象贝叶斯网络构建了打击目标体系效果分析模型,并基于目标间属性相似度给出了计算目标响应影响关系条件概率的方法,给出了基于深度搜索的关键行动选择的启发式算法,最后,以典型的防空目标体系为例对模型进行了分析与验证。结果表明,该模型和方法能够在目标间具有复杂关联的条件下为打击行动决策提供辅助。

**关键词:**目标体系;目标选择;面向对象贝叶斯网络;关键行动集;目标关联

**中图分类号:** TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2014)03-0349-06

中文引用格式:雷霆,朱承,张维明. 贝叶斯网络的目标打击过程中关键行动选择方法[J]. 智能系统学报, 2014, 9(3): 349-354.

英文引用格式:LEI Ting, ZHU Cheng, ZHANG Weiming. Bayes network based critical action selecting method in target striking process[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(3): 349-354.

## Bayes network based critical action selecting method in target striking process

LEI Ting<sup>1,2</sup>, ZHU Cheng<sup>1</sup>, ZHANG Weiming<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Institute of Military Operation Research of the Academy, Military Science, Beijing 100091, China)

**Abstract:** This article deals with selecting critical actions for destroying the targets having correlation. Firstly, the structure of the target system of system (TSoS) and the typical influence among targets are analyzed, and the target SoS striking effect analysis model is constructed by the object-oriented Bayesian network (OOBN), and the conditional probability of reaction relations between targets is calculated by the similarities between targets attributes. Secondly, a heuristic based on deep-first-search is proposed for critical action selection. Finally, an example of typical air defense TSoS is given for analyzing and validating the model, and the result shows that the proposed model and the method can provide assurance for critical action selecting decision making under the conditions of complex relations among targets.

**Keywords:** target SoS; target selecting; object-oriented Bayesian network; critical action set; target recorelation

如何有效分析和选择打击具有复杂关联的目标,是军事决策中的关键问题。目标间的复杂关联可以用目标体系(target system of system, TSoS)来描述。目标体系是由多个作战系统构成的集合,每

个作战系统实现自身任务,并对体系的使命产生影响<sup>[1]</sup>。每个作战系统又是由多个作战单元间关联构成的集合。由于目标体系的层次结构,对作战单元打击会引起目标系统直至体系的失效。

目前对目标体系打击的研究主要是采用贝叶斯网络(Bayesian network, BN)<sup>[2]</sup>、影响网<sup>[3]</sup>、影响图<sup>[4]</sup>等概率网络方法分析目标体系薄弱点,以求解目标打击行动序列或者目标集,但由于目标体系内

收稿日期:2013-10-09 网络出版日期:2014-06-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71001105, 91024006, 61273322).

通信作者:雷霆. E-mail:leiting\_nudt@126.com.

部关联的复杂性,这些方法需要输入大量条件概率,并且对网络拓扑和概率知识重用性较差。有些文献使用图论<sup>[5]</sup>或故障树方法<sup>[6-7]</sup>描述目标毁伤对目标体系失效的影响,但未考虑行动结果的不确定性。

为处理目标体系中影响关系的复杂性,文中使用面向对象贝叶斯网络<sup>[8]</sup>(object-oriented Bayesian network, OOBN)分析目标体系层次间失效影响的拓扑结构,建立打击目标体系效果分析模型,在此基础上给出了关键目标选择方法,并举例说明了建模和求解的过程。

## 1 目标体系结构描述和典型影响关系

由目标体系定义可知,目标体系可被层层分解为目标系统、目标单元。

目标单元是组成目标体系的最小元素,其状态为正常、摧毁;目标系统是由多个目标单元组成的提供独立功能的集合,其能力状态受到目标单元状态影响,划分为运行、失效 2 种状态;目标体系是由多个目标系统组成的完成某个使命任务的集合,其能力状态受到包含的目标系统能力状态的影响,按照是否具备完成使命能力被划分为运行、失效。

目标体系在遭受打击后,目标状态间会体现以下 3 种典型关系:层次失效影响关系、共同毁伤关系、响应关系。

### 1) 层次失效影响关系

根据目标体系层次,目标单元的失效会引起其他目标或者上层目标系统的失效,目标系统的失效可能引起其他目标系统或者整个目标体系的失效。

### 2) 共同毁伤关系

由于目标单元间在空间(地理空间、电磁空间等)上的邻近关系,当对某一目标单元打击时,会同时对多个目标单元造成附带毁伤,例如对桥梁进行摧毁,可同时摧毁通过桥梁上的通信、电力线路。

### 3) 响应关系

敌方目标体系还存在响应关系,为提高目标体系生存能力,目标单元可能具有备份目标或者接替目标,当目标单元毁伤时,敌方进行响应,使用这些目标备份或者接替该毁伤目标,使得目标体系继续运转完成任务。

## 2 打击目标体系效果分析模型

建立打击目标体系效果分析模型,分析目标体系层次间的影响关系,是选择关键行动集的前提。BN 能较好描述这种复杂影响关系<sup>[1-3]</sup>,但普通贝叶斯网络需要获取大量的条件概率表,建模复杂度随着目标和关联数量增加而不断加大。本文采用 OOBN<sup>[8]</sup>方法简化 BN 的建立过程。OOBN<sup>[8]</sup>采用

面向对象思想,OOBN 中的类是一个 BN 片断,其内部可能包含其他类实例。OOBN 利用小的片断构建复杂系统模型,降低了对于复杂系统建立 BN 模型的复杂性和难度。

### 2.1 打击目标体系效果分析建模的基本步骤

使用 OOBN 描述打击目标体系的效果分析模型的基本步骤为:1)分析目标体系各层元素间、行动与目标单元间的影响关系,建立目标体系层次失效影响的实体关系图;2)分析对象内部影响关系的 BN 片段,创建对应的类、类实例化,建立目标体系层次失效影响 OOBN;3)进行概率推理,分析打击行动造成的目标体系层次失效影响效果。

### 2.2 目标体系层次间失效影响的实体关系图

为分析对目标体系的打击效果,需明确目标体系层次失效影响的过程。首先,当对目标实施打击时,目标运行模式不同,摧毁概率不同,例如打击在行进状态下和在隐蔽状态下车辆的成功概率存在不同;其次,目标单元毁伤引起目标系统能力的失效,进而引起上一层目标系统能力的失效,直至影响目标体系能力的失效。实体关系如图 1 所示。

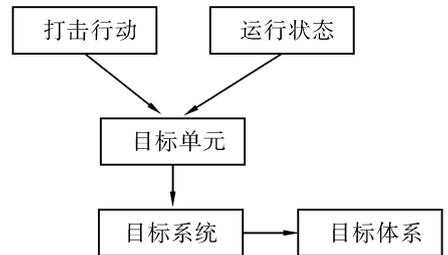


图 1 目标体系层次失效影响的实体关系

Fig.1 Entity relations graph of failure influences among target levels of TSoS

### 2.3 目标体系层次间失效影响关系的 BN 片断图

按照 BN 片断的影响层次关系,可分为行动对目标单元的影响片断、目标单元对目标系统的影响片断、目标系统对目标系统(体系)的影响片断。

细化每一个片断输入、输出节点,确定 BN 拓扑结构和每个节点的条件概率表,为 OOBN 的建立奠定基础<sup>[9]</sup>。设  $D_i$  为打击行动,  $T_i$  为目标单元节点,  $R_i$  为目标单元运行模式,  $C_i$  为目标单元能力,  $M_i$  为目标系统节点,  $E_i$  为目标系统能力,  $S_i$  为目标体系能力。用正方形表示决策节点,如打击行动等;长方形表示目标系统的类,如目标系统、目标单元等;圆圈表示随机节点,如目标单元运行状态;虚线圆圈或正方形表示输入节点,实线圆圈表示输出节点。

#### 2.3.1 行动对目标单元的影响片断

设输入节点为:打击行动  $D_i$ , 目标运行模式  $R_i$ ; 输出节点为:目标单元能力  $C_i$ 。行动对目标单元的影响片断图如图 2 所示。

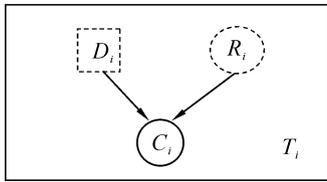


图 2 行动对目标单元影响片断

Fig.2 The fragment of the influence action exerts upon target unit

设有 2 种目标运行模式  $W_1$ 、 $W_2$ ,其初始分布概率分别为  $P_0$ 、 $1 - P_0$ 。行动对目标单元影响的条件概率如表 1 所示。

表 1 行动对目标单元影响概率表

Table 1 The probability of the influence action exerts upon target

$D_i$	$R_i$	$C_i$	
		true	false
true	$W_1$	$P_1$	$1-P_1$
true	$W_2$	$P_2$	$1-P_2$
false	—	1	0

在打击中存在共同毁伤,即同一打击行动会引起多个目标单元毁伤,在 OOBN 中描述为由一个打击行动节点指向多个目标单元能力节点。如图 3 所示,打击行动  $D_i$  影响了目标单元  $T_i$  和  $T_j$ 。

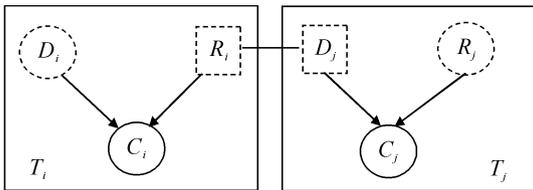


图 3 打击行动对目标单元影响片断(共同毁伤)

Fig.3 The fragment of the influence action exerts upon target units (common damage)

2.3.2 目标单元对目标系统的影响片断

设输入节点为:目标单元能力  $C_i$ 、 $C_j$ ,输出节点为:目标系统能力  $E_i$ 。目标单元对目标系统的影响片断如图 4 所示。

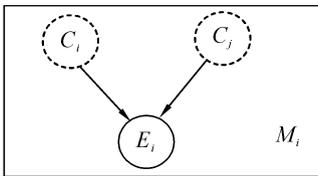


图 4 目标单元对目标系统的影响片断

Fig.4 The fragment of the influence target units exert upon system

如果目标之间是备份或者接替关系,则目标状态之间是上下文独立关系,上下文独立关系<sup>[10]</sup>是指贝叶斯网络中某些状态变量取特定值后,其余状态变量间存在的独立关系。当主目标未被毁伤时,目

标系统的状态只与主目标产生关联,在主目标被毁伤时,目标系统状态只与备份(接替)目标的状态相关。设  $T_i$  是主目标,  $T_j$  是备份或者接替目标,对应条件概率如表 2 所示。

表 2 备份关系的条件概率表

Table 2 The conditional probabilities of backup relation

$T_i$	$T_j$	$E_i$	
		true	false
true	—	1	0
alse	true	$P_1$	$1-P_1$
false	false	0	1

2.3.3 目标系统对目标系统(体系)的影响片断

设输入节点为:目标系统能力  $E_i$ 、 $E_j$ ,输出节点为:目标系统  $M_k$  的能力节点  $E_k$  或目标体系的能力节点  $S$ 。如图 5 所示。

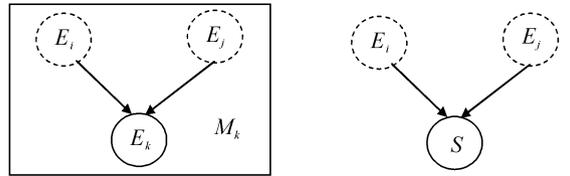


图 5 目标系统对目标系统(体系)影响片断

Fig.5 The fragment of the influence target systems exert upon target system (TSoS)

根据目标系统的包含关系,被包含目标系统的能力节点指向上层目标系统的能力节点,再由目标系统能力节点指向目标体系能力节点。

2.4 目标体系层次失效影响关系的 OOBN 图

根据各片断的输入、输出节点和目标体系、目标系统、目标单元的层次影响关系,将各种片断组织起来,构成目标体系的完整 OOBN,如图 6 所示。

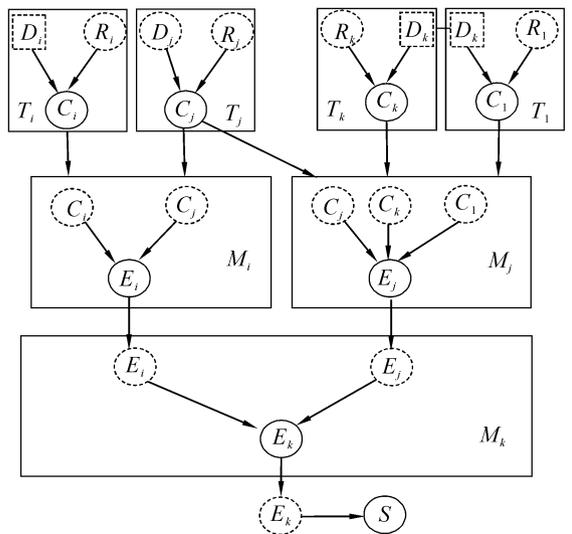


图 6 目标体系层次失效影响 OOBN 拓扑结构

Fig.6 The structure of the failure influence in TSoS

图6刻画了打击行动与目标单元状态间的相关性、目标体系不同层次能力的失效影响特性。用表示关联性的有向弧链接各节点,构成整个模型。

在对 OOBN 进行推理时,将其按照文献[11]中的算法将其先转化为普通的 BN,再实施 BN 推理。

### 2.5 目标间响应关系的条件概率计算方法

当目标单元与目标系统间、目标系统与目标系统(体系)间的关系类型是逻辑“与”、“或”、“N中取K”关系,能够直接转化为目标对目标系统的概率影响关系,文献[6]中给出了各类逻辑影响关系到贝叶斯网络条件概率表的映射关系。

当目标单元之间是备份或者接替关系时,备选目标对主目标的备份成功概率难以直接给出,本文通过目标单元间属性相似度的方法来计算备选目标对主目标的备份成功概率。假设有目标  $T_j$  是目标  $T_i$  的备选目标,能够对  $T_i$  的功能进行接替或者备份,则判断每个目标与目标  $T_i$  属性的相似度  $D_{i,j}$ ,相似度越大的备选目标  $T_j$ ,其备份目标  $T_i$  的能力就越大,相似度为1时,完全能够备份主目标运行。

假设目标单元  $N_i$  的属性取值为向量  $(a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_n)$ ,  $(1 \leq k \leq K)$ , 备选目标中  $N_j$  的属性取值向量取值为  $(b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,k}, \dots, b_{j,n})$   $(1 \leq k \leq K)$ , 在此给出相似度阈值:

$D_A = (D_1, D_2, \dots, D_k, \dots, D_K)$ ,  $(1 \leq k \leq K)$ , 认为当备选目标与主目标之间在第  $k$  个属性上的距离绝对值大于阈值  $D_k$  时,两者之间不会发生响应关联;例如时间紧迫度阈值  $D_T$ , 当备选目标接替或备份主目标所需响应时间  $T$  大于  $D_T$  时,备份成功概率为0。

目标的属性分为2类:越大越优型和越小越优型,当属性为前者,  $r_k = 1$ ; 当属性为后者,  $r_k = -1$ 。不同目标在第  $k$  个属性上的距离值  $d_k \in [0, 1]$ , 当备选目标属性值优于或等于主目标属性值时,  $d_k = 0$ ; 当两者之间距离值大于阈值时,两者不发生响应关联,  $d_k = 1$ 。

$$d_k = \begin{cases} 0, r_k \cdot (a_k - b_k) \leq 0 \\ \frac{|a_k - b_k|}{D_k}, 0 < r_k \cdot (a_k - b_k) < D_k \\ 1, r_k \cdot (a_k - b_k) > D_k \end{cases}$$

再计算备选目标对主目标的功能匹配度为两者属性的综合相似度,即为

$$D_k = \begin{cases} 1 - \sqrt{\sum_{k=1}^K d_k^2}, \forall k \in [1, K], d_k \neq 1 \\ 0, \exists k \in [1, K], d_k = 1 \end{cases}$$

$D_k$  即是备选目标备份主目标的成功概率。

### 3 深度优先关键行动选择启发式算法

在实施对目标体系的打击时,需要以最小的代价达成使目标体系崩溃的目的。关键行动是指给定打击目标体系的失效程度指标(失效概率),所需要采取的最小行动集。

设打击目的是使得目标体系失效概率  $p \geq P_D$ , 对应的关键行动集选择步骤:

- 1) 从体系层次树自上而下进行深度搜索;
- 2) 对于同一层次的节点,优先选择共享节点或共同毁伤节点;在分解到目标单元层时,优先选择摧毁概率最高的目标单元;
- 3) 若兄弟节点是并联目标,加入这些节点,若兄弟节点是串联目标,则忽略;
- 4) 自上而下重复2)至4),直至完全分解到目标单元层,从而得到一个最小打击目标集  $T$ , 从  $T$  中删除重复的目标单元;
- 5) 若  $T$  中的目标单元存在共同毁伤目标,则将能够共同毁伤的其他目标单元加入根据 BN 推理算法,计算  $T$  对应的目标体系失效概率  $p$ ;
- 6) 若  $p \geq P_D$ , 输出  $T$  作为关键目标集,否则转7);
- 7) 则对于余下目标集  $\bar{T}$  中的目标单元  $N_i$ , 如果  $\bar{T}$  中存在  $N_i$  的并联目标,则在  $T$  中加入  $N_i$  和其并联目标,计算对应的体系失效概率  $p_i'$ , 得到平均失效增幅  $d_i = \frac{p_i' - p}{n}$ ,  $n$  为并联目标数量;
- 8) 对于  $\bar{T}$  中不存在并联轴节点的目标单元  $N_i$ , 在  $T$  中加入  $N_i$ , 计算对应的体系失效概率  $p_i'$ , 得到平均失效增幅  $d_i = p_i' - p$ ;
- 9) 若  $p_i' < P_D$ , 则  $T$  加入失效增幅  $d_i$  最大的目标  $N_i$ , 如果  $N_i$  存在并联目标,则也加入  $T$ 。从  $\bar{T}$  中删除加入  $T$  的目标。转到步骤7);
- 10) 若  $p_i' \geq P_D$ , 输出  $T$  作为关键目标集。

### 4 分析与验证

文中以典型的防空目标体系为例说明该方法的使用。案例中的防空体系可分解为指控系统、火力系统,之间为逻辑与关系;指控系统分解为前方指挥系统和后方指挥系统,之间为逻辑与关系;前方指挥系统由指挥中心和机动指挥所实现,机动指挥所在指挥中心毁伤后从隐蔽进入运

行状态进行备份,成功概率为0.8;后方指挥系统由指挥所1和指挥所2实现,之间为逻辑或关系;火力系统分为防御系统和进攻系统,之间为逻辑与关系;防御系统包括防空阵地1、2和机场1,逻辑关系为 $N$ 中取 $K$ 关系,若其中2个节点被摧毁,系统失效;进攻系统包括机场1、2,之间为逻辑或关系;机场1、2都可被分解为跑道和机群,之间为逻辑与关系。指挥所2和防空阵地1属于共同毁伤节点,机场1是防御系统和进攻系统的共享节点。

在不同目标状态下打击行动的成功概率如表3所示。首先分析得到目标体系层次失效影响对应的对象关系,如图7所示。根据实体关系图,建立OOBN,并根据文献[11]的方法,将其转化为普通贝叶斯网络,如图8所示,用GENIE<sup>[12]</sup>绘制,对于只有一种运行状态的目标,不再画出其运行模式节点。

表3 在不同目标状态下的打击行动成功概率  
Table 3 The success probability of actions under different target states

打击目标	运行状态	成功概率
指挥中心	运行	0.6
机动指挥所	隐蔽	0.3
机动指挥所	运行	0.8
指挥所1	运行	0.5
指挥所2	运行	0.6
防空阵地1	隐蔽	0.3
防空阵地1	运行	0.6
防空阵地2	隐蔽	0.4
防空阵地2	运行	0.7
跑道1	运行	0.7
机群1	隐蔽	0.5
机群1	跑道	0.8
跑道2	运行	0.7
机群2	隐蔽	0.4
机群2	跑道	0.8

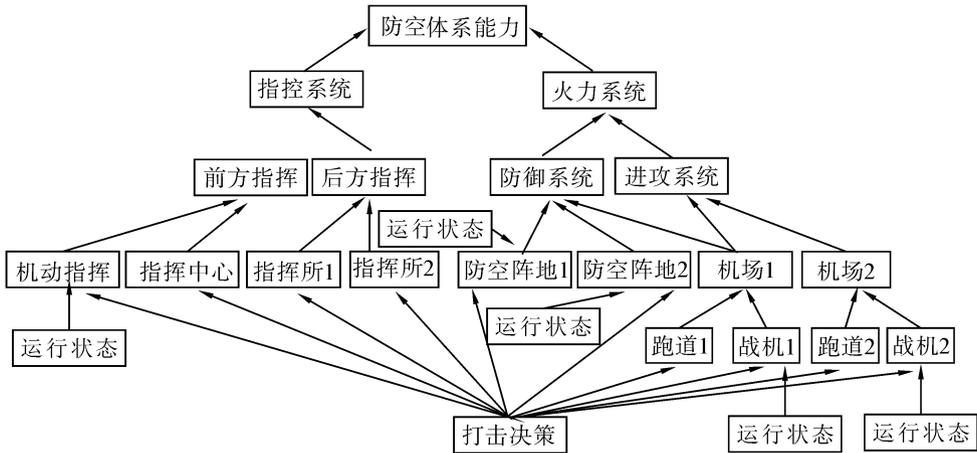


图7 防空目标体系层次失效影响实体关系图

Fig.7 The entity relation of the failure influence among the air force TSoS

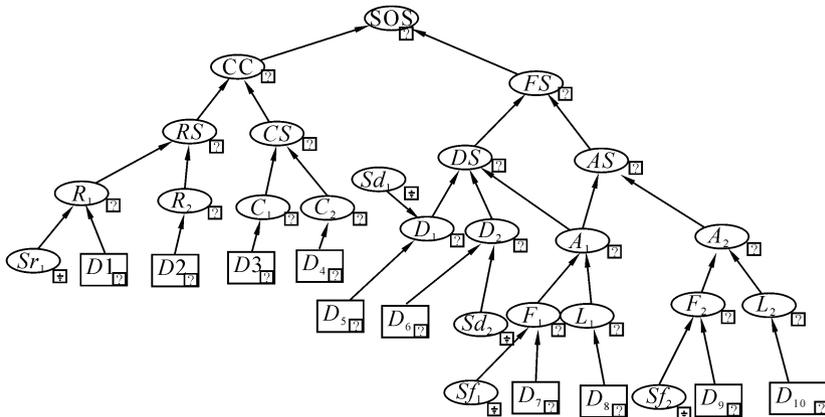


图8 目标体系的贝叶斯网络

Fig.8 Bayes network of TSoS

已知各节点初始状态,除了机动指挥所、防空阵地 1、机群 2 的运行状态为隐蔽,其他节点的状态均为运行。设目标体系的失效阈值为 70%,即要使得目标体系的失效概率达到 70%以上,求解所需要选择的最小行动集。

根据第 2 节的方法,得到打击集为打击机动指挥所、指挥中心、指挥所 1、指挥所 2、防御阵地 2、机群 1,在该打击集下目标体系的失效概率为 77%。

设目标体系的失效阈值为 80%,根据该方法求得的最小打击集为打击机动指挥所、指挥中心、指挥所 1、指挥所 2、防御阵地 1、防御阵地 2、机群 1,在该打击集下,目标体系的失效概率为 83%。

## 5 结束语

文中基于目标体系结构和典型目标影响关系,使用 OOBN 建立了打击目标体系效果分析模型,给出了目标间影响关联的条件概率计算方法,并使用基于深度搜索的启发式算法求解关键打击行动。和以往研究相比,该建模方法能减少目标体系中影响关系的建模复杂性,增加重用性。通过典型的防空目标体系实验表明,所提出的模型和求解方法能为选择打击具有复杂关联关系的目标提供有效辅助。

## 参考文献:

- [1] ZHOU Y, ZHU C, LEI T, et al. A COG analysis model of system-of-systems (SoS) based on multi-entity Bayesian networks[C]//The 13th International Conference on Artificial Intelligence. Las Vegas, Nevada, USA, 2011.
- [2] FALZON L. Using Bayesian network analysis to support centre of gravity analysis in military planning[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 170: 629-643.
- [3] KUTER U, NAU D, GOSSINK D, et al. Lemmer. Interactive course-of-action planning using causal models[C]//Proceedings of the Third International Conference on Knowledge Systems for Coalition Operations. Pensacola, USA, 2004: 1-12.
- [4] POUSI J. Decision analytical approach to effects-based operations[D]. Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology, 2009: 35-63.
- [5] 秦前付,曹存根,徐洗. 基于图论的计划军事效果评估[J]. 计算机科学, 2005, 32(7): 148-151.  
QIN Qianfu, CAO Cungen, XU Guang. Evaluating military effect of air operational plan based on network theory[J]. Computer Science, 2005, 32(7): 148-151.
- [6] 李新其,向爱红,李红霞. 系统目标毁伤效果评估问题研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(1): 57-62.  
LI Xinqi, XIANG Aihong, LI Hongxia. Calculation and assessment on damage effect of system target[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(1): 57-61.
- [7] 袁震宇,谢春思,张宇,等. 基于故障树的系统目标打击决策模型研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(7): 52-55.  
YUAN Zhengyu XIE Chunsi, ZHANG Yu, et al. Model study of system-target attacking decision based on fault tree[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(7): 52-55.
- [8] KOLLER D, PFEFFER A. Object-oriented Bayesian networks [C]//Proceedings of the Thirteenth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. Providence, Rhode Island, USA, 1997: 302-313.
- [9] 蒋国萍,陈英武. 基于面向对象贝叶斯网络的软件项目风险评估[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(2): 353-356.  
JIANG Guoping, CHEN Yingwu. Software project risk evaluation method based on object-oriented Bayesian network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(2): 353-356.
- [10] 黄友平. 贝叶斯网络研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2005: 20-21.  
HUANG Youping. Research on Bayesian Network[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2005: 20-21.
- [11] BANGS O, WUILLEMIN P H. Top-down construction and repetitive structures representation in Bayesian networks [C]//Proceedings of the Thirteenth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference. Orlando, Florida, USA, 2000: 282-286.
- [12] University of Pittsburgh Decision Systems Laboratory. Graphical Network Interface (GeNie2.0) [EB/OL]. Available: <http://genie.sis.pitt.edu/>.