

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.04.020

基于贝叶斯网络的毁伤评估模型

程浩, 谢鹏翔, 郝艳红

(中国人民解放军炮兵学院 5 系, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为提高火力毁伤评估的效率, 对贝叶斯网络理论进行了研究拓展, 在综合分析毁伤信息源及其相互关系的基础上, 建立了基于贝叶斯网络的毁伤评估模型, 包括: 贝叶斯网络模型的构造、贝叶斯网络模型的概率估计、贝叶斯网络模型的更新, 并对更新过程进行了探讨。结果表明, 该模型可利用各种信息源较快地对毁伤效果进行系统评估, 提高毁伤评估的效率。

关键词: 贝叶斯网络; 毁伤评估; 火力毁伤

中图分类号: N945.16 **文献标识码:** A

Model of Damage Assessment Based on Bayesian Networks

CHENG Hao, XIE Peng-xiang, HAO Yan-hong

(No. 5 Department, Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: To improve the efficiency of fire damage assessment, the theory of Bayesian networks is evolved, on the basis of system analysis of damage information resource and correlativity, damage assessment model based on the Bayesian networks is constructed, the research includes the constitution, the probability estimation and the renewal of model based on the Bayesian networks. Finally, discuss the renewal process. The result shows that the model can be assessed by system, the damage effect based on damage information resource and the efficiency of damage assessment can be increased.

Keywords: Bayesian networks; Damage assessment; Fire damage

0 引言

火力毁伤评估是通过理论分析计算, 求得火力毁伤程度的数学期望, 并运用观测评估手段, 对诸军兵种火力毁伤行动的全过程, 或对某一战役方向、阶段、地域、时节, 或对某一集群目标毁伤的实际情况、状态变化和目标的反应等诸多因素, 进行观察、计算、分析、评定, 进而得出综合性判定结论。实施科学的火力毁伤评估, 是优化联合战役火力打击体系、提高诸军兵种综合火力毁伤能力的基础, 也是实施战役指挥决策、合理配置战役资源、正确组织火力毁伤行动的依据。故对其进行研究。

1 贝叶斯网络

1.1 贝叶斯网络概述

1988 年, Pearl 在总结并发展前人工作的基础上, 提出了贝叶斯网络。20 世纪 90 年代, 有效的推理和学习算法大大推动了贝叶斯网络的发展和应用, 并首先在专家系统得到了广泛的应用。随着研究的逐渐成熟, 贝叶斯网络已经被广泛应用在医疗诊断、数据挖掘、模式识别、决策支持等领域。

贝叶斯网络是描述数据变量相互之间依赖关系

的有向无环图, 是贝叶斯概率方法和有向无环图网络拓扑结构的有机结合。其中, 结点代表属性域中的随机变量, 结点间的有向弧代表了变量间的条件依赖关系, 变量之间的关系强度由结点与其父结点之间的条件概率来表示, 它提供了表示因果信息的方法。贝叶斯网络是基于概率推理的一种数学模型。

1.2 贝叶斯网络的构造原理

Bayesian 网由网络拓扑结构 S (代表变量的结点及连接这些结点的有向弧线) 和局部概率分布 (每个变量结点的条件概率表) 组成。假设随机变量 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, Bayesian 网中的 n 个结点与每个随机变量 X_i 一一对应。结点变量是任何问题的抽象, 如测试值、观测现象、意见征询等。结点间的有向弧线代表了结点间的相互关系, 结点间缺省弧线则表示条件独立。如果存在从 X_j , 指向 X_i 的有向弧线, 则称 X_j 为 X_i 的父结点, 用 $P(X_i|X_j)$ 表示联结强度。显然 X_i 的父结点为一结点集, 用 $P_a(X_i)$ 表示 S 中 X_i 的父结点集合。在 Bayesian 网中, 结点只依赖于它的父结点集, 而和它的非父结

收稿日期: 2009-10-23; 修回日期: 2009-12-18

作者简介: 程浩 (1976-), 男, 湖北人, 炮兵学院在读博士研究生, 从事兵种作战计算研究。

点 (集) 是条件独立的。除条件独立性外, 每个结点还关联一个概率表。如果结点 X_i 没有父结点, 则表中只包含先验概率 $P(X_i)$; 如果结点 X_i 只有一个父结点 X_j , 则表中包含条件概率 $P(X_i|X_j)$; 如果结点 X_i 有多个父结点 $P_a(X_i)$, 则表中包含条件概率 $P(X_i|P_a(X_i))$ 。于是 X 的联合概率分布可表示为:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P_a(X_i)) \quad (1)$$

如果结点 X_i 所有可能的状态个数为 b , 即 $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ib}\}$, 父结点集 $P_a(X_i)$ 所有可能状态的个数为 c , 即 $P_a(X_i) = \{P_a(X_{i1}), P_a(X_{i2}), \dots, P_a(X_{ic})\}$ 。令 P_{ijk} 表示第 i 个结点 X_i 的父结点 $P_a(X_i)$ 处于状态 j 时, X_i 处于状态 k 的条件概率, 则有:

$$P_{ijk} = P(X_{ik} | P_a(X_{ij})) \quad (2)$$

下面以有 5 个结点组成的系统为例, 说明 Bayesian 网的联合概率计算方法。它们的关系可以用 Bayesian 网表示, 如图 1。

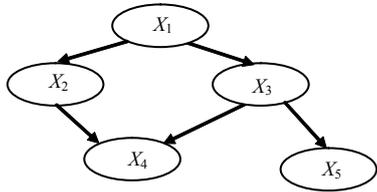


图 1 贝叶斯网络图

则系统 $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$, 系统的联合概率为:

$$P(X) = P(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = (X_1) \cdot P(X_2|X_1) \cdot P(X_3|X_1) \cdot P(X_4|X_2, X_3) \cdot P(X_5|X_3) \quad (3)$$

1.3 贝叶斯网络信念的传播与更新

定义信念为 $Bel(x) = P(x|e)$, 即在由已知证据 e 的情况下, 事件 x 发生的条件概率, 反映在一定环境下某一事件发生的可能性。

e 可表示为 $e = e_x^- \cup e_x^+$, 其中 e_x^- 反映的是以 X 为根结点的子树, e_x^+ 反映的是树的其余部分, 则信念可表示为:

$$Bel(x) = P(x|e_x^-, e_x^+) = \alpha P(e_x^-|e_x^+, x) P(x|e_x^+) = \alpha P(e_x^-|x) P(x|e_x^+)$$

式中 $\alpha = [P(e_x^-|e_x^+)]^{-1}$ 为归一化因子。

令 $\lambda(x) = P(e_x^-|x)$, 表示对诊断的支持; $\pi(x) = P(x|e_x^+)$, 表示对预报的支持, 则有:

$$Bel(x) = \alpha \lambda(x) \pi(x) \quad (4)$$

在实际推理过程中, 当观测证据 e 到来时, 网络信念得到更新。

2 基于贝叶斯网络的毁伤评估模型

2.1 贝叶斯网络模型的构造

贝叶斯网络的建立是一项比较复杂、困难的工作, 它没有现成的规矩, 只能根据实际问题, 依靠相关领域专家确定贝叶斯网络的结点, 其后的主要任务就是学习它的结构和参数。对于毁伤评估模型的建立, 必须综合考虑战场上各种信息源及其之间的相互作用关系, 建立相应的网络模型, 并根据以往战斗中各种信息源之间相互影响程度的大小, 确定网络中各结点的条件概率 (即在父结点处于某种损伤模式时子结点发生某种损伤模式的条件概率)。作为一个实用的贝叶斯网络, 必须明确定义每一个结点, 决定它所有可能的状态。另外, 对每一个结点需要为每一种可能的状态确定一个条件概率。整个网络包括所有的结点及其条件概率分布。

基于贝叶斯网络的毁伤评估, 就是根据战前的预先毁伤评估信息以及毁伤后收集到的各种毁伤信息, 通过建立的贝叶斯网络, 借助贝叶斯网络的推理功能, 对毁伤的效果进行综合评估。

要获取完整、准确、及时的毁伤信息, 必须要有联合的侦察体系, 全时空的侦察范围, 以及一体化的情报共享机制。目前, 我军毁伤信息获取的手段主要有: 卫星、侦察机、无人机、直升机、侦察弹等空中或地面的照相或摄像; 光学、激光、红外等观测器材的直接观察; 雷达侦听等电子侦察; 其它, 如特工侦察、火力侦察等。由于毁伤评估的时效性要求越来越高, 而各种侦察手段获取的毁伤信息时效性不一, 为了充分发挥贝叶斯网络的快速推理功能, 评估模型只考虑其中几种最主要、获取最快速的毁伤信息 (如战前的预先毁伤评估预测信息, 武器系统的录像, 无人机、侦察弹、地面光学器材获取的侦察信息等)。根据各种毁伤信息对毁伤评估的影响, 建立毁伤评估的贝叶斯网络模型。

毁伤判定准则是毁伤评估的基本依据。它描述了对各种目标的毁伤等级及其相应的毁伤程度。在评估模型中, 实时毁伤评估的结果输出就处理成毁

伤目标的毁伤等级及其发生的概率。因此, 模型中各结点的状态即为毁伤目标的毁伤等级。为了比较准确的反映目标的毁伤状态, 将毁伤等级可化为 4 个级别:

- 1) 轻度毁伤: 毁伤程度 < 20%;
- 2) 中度毁伤: 毁伤程度 20% ~ 30%;
- 3) 重度毁伤: 毁伤程度 30% ~ 60%;
- 4) 报废: 毁伤程度 > 60%。

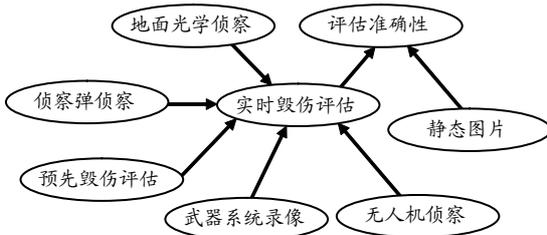


图 2 毁伤评估的贝叶斯网络图

图 2 为建立的毁伤评估的贝叶斯网络。毁伤实施后, 在战场上通过联合侦察体系获取毁伤信息, 如战前的预先毁伤评估预测信息, 武器系统的录像, 无人机、侦察弹、地面光学器材获取的侦察信息等, 将这些信息输入到评估系统中, 借助贝叶斯网络的推理功能, 将毁伤信息传输到整个网络, 更新网络, 并及时输出实时的毁伤评估结论。

由于军事卫星或侦察机获取的评估信息(如拍摄到的图片)相对来说与实际毁伤情况比较接近, 可以作为真实的毁伤情况, 但它们的获取通常需要几个小时, 甚至几天或更长的时间。因此, 为了保证毁伤评估的实时性, 通常用战场上能够快速获取的毁伤信息去更新网络, 如武器系统的录像, 无人机、侦察弹、地面光学器材获取的侦察信息等, 而用军事卫星或侦察机获取的静态图片作为实际毁伤去评估毁伤评估结论的准确性, 以评价模型的准确性及提出修正模型的依据。

2.2 贝叶斯网络模型的概率估计

贝叶斯网络模型条件概率的确定一般比较复杂, 往往根据具体问题, 由专家经验确定或由统计实验确定。根据毁伤信息收集手段的特点, 结合运用专家经验与统计数据, 针对各个节点性质的不同来选择不同方法以确定依附在各节点上的条件概率, 以减少人为因素在其中的比重。具体说来, 对于易于通过进行多次重复试验或软件模拟得到条件概率的节点, 可以通过试验数据进行统计分析来计算该节点的条件概率。

以预先毁伤评估为例, 预先毁伤评估通常针对

具体的目标, 根据目标特性分析、价值分析、对目标的火力毁伤方案、所选用的武器平台和弹药等信息, 建立对目标的火力分配模型、武器弹药匹配模型和毁伤模型, 开发对目标毁伤的仿真系统, 通过实验或模拟来预测目标在火力打击下可能的毁伤等级及其发生的概率。当然, 也可借助联合武器系统控制软件等来确定被打击目标的客观毁伤水平、选择的武器系统及相关策略, 为决策者提供特定火力打击下目标毁伤水平的粗略估计。

2.3 贝叶斯网络模型的更新

贝叶斯网络的更新是指当某些变量的观测值给定后, 每个变量的信用更新的过程。

信用传递的过程如下, 令 e 为所有观测变量取值的集合, 如令实时毁伤评估结点为 x 。 e 可分成 2 个子集: e_x^- : 代表 x 子节点所有被观测的变量(若 x 本身也被观测, 则包括 x), 而 e_x^+ 表示所有其它变量。则观测变量对 x 的信用影响可表达成以下 2 个值: $\lambda(x) = P(e_x^- | x)$ 和 $\pi(x) = P(x | e_x^+)$ 。

由于 x 具有多个离散的值, 即有多种状态, 如对于实时毁伤评估结点有轻度损伤、中度损伤、重度损伤、报废等 4 种状态, 所以, $\lambda(x)$ 和 $\pi(x)$ 实际上是向量, 它的元素与 x 的每个离散值都相关:

$$\lambda(x) = [\lambda(x_1), \lambda(x_2), \dots, \lambda(x_i)]$$

$$\pi(x) = [\pi(x_1), \pi(x_2), \dots, \pi(x_i)]$$

利用式 (4) 可以计算并寻找新的信用。然后 $\lambda(x)$ 和 $\pi(x)$ 值以一种顺序的方式在变量间传递。

计算 λ : $\lambda(x)$ 通过 $\lambda(y_1), \lambda(y_2), \dots, \lambda(y_m)$ 计算, 其中 y_1, y_2, \dots, y_m 是 x 的所有子节点(变量), 先 x 被观测的结果是 x^0 , 向量 $\lambda(x)$ 的各元素指定如下:

$$\lambda(x_i) = 0 \text{ if } x_i \neq x^0, \lambda(x_i) = 1 \text{ if } x_i = x^0$$

对于 x 未被观测的情况, 有:

$$\lambda(x) = P(e_x^- | x) = \lambda_{y_1}(x) \cdot \lambda_{y_2}(x) \cdots \lambda_{y_m}(x) \quad (5)$$

由于 $e_{y_1}^-, e_{y_2}^-, \dots, e_{y_m}^-$ 是彼此条件无关的, 并且定义如下: $\lambda_{y_i}(x) = P(e_{y_i}^- | x)$

对每一个 $\lambda_{y_i}(x)$, 其计算如下:

$$\lambda_{y_i}(x) = P(e_{y_i}^- | x) = \sum_{y_i} \lambda(y_i) \cdot P(e_{y_i}^- | x) \quad (6)$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0.4619 & 0.5645 & 0.3107 & 0.5070 \\ 0.5147 & 0.6855 & 0.4971 & 0.6337 \\ 0.4120 & 0.3629 & 0.4349 & 0.4436 \\ 0.3650 & 0.2823 & 0.6835 & 0.3802 \end{pmatrix}$$

将其归一化处理, 得到归一化矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} 0.2634 & 0.2979 & 0.1613 & 0.2581 \\ 0.2935 & 0.3617 & 0.2581 & 0.3226 \\ 0.2349 & 0.1915 & 0.2258 & 0.2258 \\ 0.2082 & 0.1489 & 0.3548 & 0.1935 \end{pmatrix}$$

计算出各信息熵值为:

$$E = (0.9578 \quad 0.9234 \quad 0.9363 \quad 0.9507)$$

计算出各指标的权重为:

$$W = (0.1820 \quad 0.3305 \quad 0.2748 \quad 0.2127)^T$$

对 4 种方案进行评估可得理想方案为:

$$P_0 = [0.95 \quad 170 \quad 110 \quad 30]^T$$

在各指标中, 毁伤概率、水雷数量和水雷障碍生命力越大越好, 完成布雷任务的时间是越短越好, 根据效益和成本型公式, 形成各方案与理想方案的同一度矩阵:

$$Q = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

(上接第 65 页)

故要计算 $\lambda(x)$, 只需要计算 x 的子变量的 λ 值及其子变量的条件概率。向量 $\lambda(x)$ 可由下式计算:

$$\lambda(x) = \prod_{y_i} \sum_{y_i} \lambda(y_i) \cdot P(e_{y_i}^- | x) \quad (7)$$

类似地, 计算 $\pi(x)$ 的值, 仅需计算 x 父节点变量的 π 值及其条件概率, 而且要计算 π 值, 需要首先计算其父节点变量 π 值。

贝叶斯网络具有在给定的信息下进行推理的能力。即当贝叶斯网络中特定变量状态的详细信息可用时, 它提供了一种更新网络中任何相关结点的能力。这使得用户能将获得的信息输入网络, 并且在网络中查寻任何相关结点的后验概率。因此, 通过收集到的战场上的毁伤信息如武器系统的视频录像等, 与预先毁伤评估相结合, 用户可以得到网络中任何变量的后验概率分布。

3 结论

通过以上分析表明, 贝叶斯网络模型在毁伤评

$$\begin{bmatrix} 0.9474 & 0.8235 & 0.4545 & 0.7500 \\ 1.0000 & 1.0000 & 0.7273 & 0.6000 \\ 0.8947 & 0.5294 & 0.6364 & 0.8571 \\ 0.8421 & 0.4118 & 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

又 $W = (0.1820 \quad 0.3305 \quad 0.2748 \quad 0.2127)^T$ 由

$$R = QW^T \text{ 可得 } R = [0.7290 \quad 0.8400 \quad 0.6950 \quad 0.7769]$$

根据各评价方案与理想方案的同一度大小可得 4 个备选方案的优劣顺序为: $P2 > P4 > P1 > P3$ 。

4 结束语

采用熵权理论确定指标权重, 降低了权重计算的人为因素影响, 增加了决策的科学性, 运用集对分析方法进行布雷作战方案优选, 方法简单、结果直观, 具有较强的实用性。

参考文献:

- [1] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [2] 袁山增, 等. 基于 SPA - AHP 的防空作战方案决策模型[J]. 兵工自动化, 2007, 26(8): 17-19.
- [3] 葛杰, 等. 防空兵群机动部署方案的优选方法[J]. 兵工自动化, 2007, 26(8): 15-16.
- [4] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.
- [5] 滕兆新, 等. 基于熵权的布雷作战方案优选[J]. 火力与指挥控制 2008, 33(7): 143-152.

估中, 一方面可利用现有系统不能使用的战场信息更新网络, 提高评估的准确性; 另一方面, 它可根据预先毁伤评估及战场上最快收集到的毁伤信息毁伤评估, 在战场上争取了时间, 提高了毁伤评估的时效性。作为新兴的决策分析工具用于毁伤评估领域, 贝叶斯网络必将推进毁伤评估的更快广泛应用。

参考文献:

- [1] 郑津生. 联合战役陆军火力毁伤理论[M]. 北京: 军事科学出版社, 2005.
- [2] 刘现华, 张文. 对我军火力毁伤评估问题的若干思考[J]. 军事学术, 2004(4): 35-38.
- [3] 彭征明, 李云芝, 罗小明, 等. 基于贝叶斯网的作战效能评估方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2007(2): 105-109.
- [4] 陈健, 孙冀辉, 米双山. 基于贝叶斯网络的装备部件战斗损伤研究[J]. 航空兵器, 2005(4): 6-9.
- [5] 王润生, 贾希胜, 王卫国, 等. 基于贝叶斯网络的损伤定位研究[J]. 兵工学报, 2006(4): 726-730.
- [6] Daniel W.Franzen. A Bayesian Decision Model For Battle Damage Assessment[D]. US: US Air University, 1999.