

doi: 10.7690/bgzdh.2016.06.017

基于贝叶斯网络的舰船目标毁伤评估

马晓明^{1,2}, 丁平¹, 晏卫东¹

(1. 中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001; 2. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为制定对目标舰船实施后续打击等计划提供有效支持, 针对舰船目标毁伤评估问题的复杂性和困难, 利用贝叶斯网络在不确定性推理计算方面的优势, 采用 GeNIe 软件建立目标舰船毁伤评估的贝叶斯网络, 并以某型舰船为例, 根据舰船目标的物理结构层次、功能结构层次和毁伤模式等特征, 依据专家评估确定贝叶斯网络节点条件概率分布, 在舰船目标物理毁伤及遭受攻击前后运动的变化状况等情报分析的基础上进行推理评估。结果表明, 该方法能很好地实现舰船目标作战效能与目标物理毁伤程度映射关系的量化分析。

关键词: 贝叶斯网络; 舰船毁伤评估; GeNIe; 概率分布

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Warship-damage Assessment Based on Bayesian Networks

Ma Xiaoming^{1,2}, Ding Ping¹, Yan Weidong¹

(1. No. 92941 Unit of PLA, Huludao 125001, China;

2. School of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: For establishment plan to attack target warship again etc. provide an effective reference, according to the complexity and difficulty of the warship-damage assessment, in view of the advantages of the Bayesian network in processing indefinite information, base on the structure layer and injured mode and function characteristic of warship target, build up the model of Bayesian networks for assessing the damage of the warship by GeNIe. Base on the analysis about the physics injures and moving intelligence of warship target, inferring and assessing the result, and according to the experts' judgment to make sure the node conditional probability distribute. The model can nicely carry out the effect of battle and physics injure degree to reflect the quantity of shooting the relation turn analysis.

Keywords: Bayesian networks; warship-damage assessment; GeNIe; probability distribution

0 引言

舰船毁伤效能评估是指对舰船目标进行打击之后, 对其毁伤状态进行侦查和评判的过程, 是制定后续作战计划前必须进行的工作。其目的是重新评估舰船目标的剩余作战效能, 包括目标的机动能力、对海打击能力、对潜打击能力和对空防御能力等作战指标, 从而为我方是否进行后续打击和选择后续打击兵力兵器、打击方式、制定打击计划等提供参考^[1-2]。同时舰艇作为海战中重要的作战平台, 越来越受到各个国家的高度重视, 这也推动了舰船毁伤效果评估方法的研究, 其中, 美、法和瑞典等国较早开展目标毁伤效能评估方面的研究, 在 20 世纪 90 年代, 就已成功开发出了相关评估程序和软件^[3]。

舰船目标毁伤效果评估工作是一项非常复杂的系统决策问题, 其特点: 1) 舰船系统组织规模庞大, 一个系统中包含许多分系统, 这些分系统又由若干其他子系统组成; 2) 系统的关系错综复杂, 相互影

响, 具有多层结构; 3) 决策过程中会有许多随机不确定的信息和模糊信息。为了对实弹打靶试验或仿真试验中获取的各种复杂信息进行多层次处理, 尽可能降低由于复杂环境和信息源的不确定性造成的融合信息的不确定性, 笔者以某型舰船为例, 介绍基于贝叶斯网络的舰船类目标的毁伤评估方法。

1 贝叶斯网络

贝叶斯网络是贝叶斯方法的扩展, 基于概率推理, 解决不确定性、不完整性问题而提出的^[4]。贝叶斯网络是表示描述领域问题或事件的所有变量间概率依赖关系, 可表示为 $S = \langle N, A, \theta \rangle$, 这里每个节点 $n \in N$ 表示网络所表示领域的变量, 每条边 $a \in A$ 表示各变量间的依赖关系, 同时网络中每个节点都对应一个条件概率分布表 (conditional probability distribute table, CPT), 它指明了该节点与其父节点之间相互依赖的概率关系, θ 表示 CPT 的参数。

收稿日期: 2016-01-22; 修回日期: 2016-03-01

作者简介: 马晓明(1980—), 男, 山东人, 硕士, 工程师, 从事导弹武器试验及毁伤效能评估研究。

贝叶斯网络的一个关键特征是它提供了一种把联合概率分布分解为局部分布的方法。贝叶斯网络的定量部分给出变量间不确定性的数值度量。笔者用大写字母 $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ 表示领域变量, 用小写字母 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 表示变量的取值, 那么贝叶斯网络的联合概率分布可以用下面的式子表示:

$$p(x) = \prod_i p(x_i | \text{parent}(x_i)) \quad (1)$$

2 典型舰船目标特性分析

首先, 舰船目标具有一定的物理结构, 当舰船遭受反舰导弹打击并命中后, 会一定程度地改变其本身的物理结构, 所以把舰船物理特征的变化作为舰船标毁伤特性的一个变量。其次, 舰船目标本身都具有完成其作战任务所必备的功能, 对舰船毁伤的主要目的是要对目标舰船所完成作战任务的能力或具有的功能进行毁伤, 而不是其本身结构的毁伤, 因此还需对其功能进一步分析^[5]。

由于舰船目标结构复杂, 不同部位具有不同的作战功能, 同时反舰导弹命中目标舰船不同部位时, 对其所造成的毁伤模式和程度也有区别。反舰导弹爆炸产生巨大的冲击波、高速破片等作用会对目标舰船命中部位舱室产生巨大破坏效果。如果目标舰船被多枚反舰导弹击中结构要害部位, 容易造成舰船彻底毁伤、爆炸或沉没; 如果未击中主结构要害部位, 则舰船的主体结构受影响有限, 但内部武器装备及人员受影响可能较大。不同的反舰导弹战斗部类型对同一舰船目标进行打击, 即使命中相同部位舱室, 但其内部结构与功能毁伤也会不一样^[6]; 所以对舰船目标, 应更注重研究其功能毁伤特性。舰船目标功能特性其主要由反舰导弹的类型、舰船结构毁伤程度、人员的伤亡情况和武器装备的毁伤等情况决定^[7]。

3 建立贝叶斯网络

笔者建立舰船毁伤评估贝叶斯网络, 主要进行以下方面工作:

1) 确定描述舰船毁伤评估因素和其状态, 即贝叶斯网络模型变量及其包含的各种状态。首先确定贝叶斯网络模型包含的所有相关变量, 即确定贝叶斯网络的节点; 其次确定各节点具有的和描述问题相关的所有状态, 并对各状态的概念进行定义^[8-9]。

2) 确定各变量之间的依赖关系, 根据造成舰船毁伤的因果关系确定各变量顺序, 原因变量在前,

结果变量在后, 以有向线段表示依赖关系, 建立一个条件独立的有向无环图。应用因果关系建立贝叶斯网络往往使得网络结构简单, 概率分布易于评估。

3) 确定变量间的分布参数, 建立各节点条件概率分布表。在该贝叶斯网络模型中, 由领域内的专家根据其经验知识, 给定各节点的条件概率分布^[10]。

4 舰船目标毁伤评估模型

4.1 贝叶斯网络模型结构确定

为使敌舰船目标丧失完成作战任务的能力, 船体物理结构的破坏不能从根本上体现出舰船各功能的毁伤, 也不存在严格的对应关系。例如, 反舰导弹命中舰船某舱室(如舰员生活舱), 会使其结构彻底毁坏, 但在执行作战任务过程中该舱室不参与作战任务; 因此对舰船的整体作战能力影响不大, 如果没有把舰船的武器系统、通信系统、电力系统和动力系统等设施彻底毁坏, 舰船还具有较高的完成作战任务的能力^[11-12]。应用相应情报手段可获得船体外部结构的毁伤和舰船受攻击前后运动状态的变化情况, 将其作为网络父节点初始状态的输入, 利用贝叶斯网络推理, 对舰船目标物理毁伤到功能毁伤的转换关系进行概率分析, 实现对舰船目标的总体功能毁伤评估。

在分析舰船目标物理层次结构、功能的层次结构和毁伤特性的基础上, 采用 GeNIe 贝叶斯网络分析软件建立目标舰船毁伤评估贝叶斯网络模型, 如图1所示。

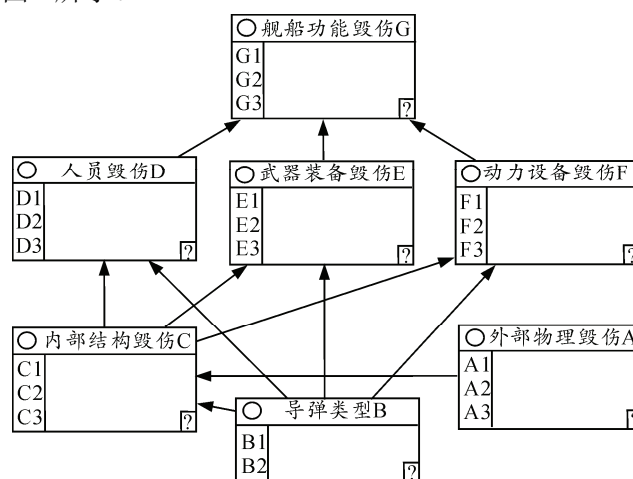


图1 目标舰船功能毁伤贝叶斯网络模型

4.2 节点的状态确定

舰船功能毁伤等级(G)。对舰船目标提出了3个毁伤等级: 重度毁伤(G1)、中度毁伤(G2)和轻度毁伤(G3)。重度毁伤, 是指舰船目标的总体功能毁

伤了 70%以上；目标中度毁伤，是指舰船目标的总体功能丧失 20%~70%；目标轻度毁伤，是指舰船目标的总体功能丧失 20%以下^[1]。

物理结构毁伤等级(A)：重度毁伤(A1)、中度毁伤(A2)、轻度毁伤(A3)；

反舰导弹战斗部类型(B)：重型反舰导弹(B1)、轻型反舰导弹(B2)；

内部结构毁伤等级(C)：重度毁伤(C1)、中度毁伤(C2)、轻度毁伤(C3)；

人员毁伤等级(D)：重伤(D1)、轻伤(D2)、完好(D3)；

武器装备毁伤等级(E)：完全损坏(E1)、部分损坏(E2)、完好(E3)；

动力设备毁伤(F)：完全损坏(F1)、部分损坏(F2)、完好(F3)。

根据战场毁伤信息情报收集手段的特点，笔者结合运用专家经验与试验数据，对易于通过进行多次重复试验或软件模拟(如蒙特卡罗方法)得到网络各节点的条件概率分布，其他网络节点可以通过试验数据进行统计分析或专家评估的方法来确定该节点的条件概率分布^[13]。

根据所建立的贝叶斯网络结构，由式(1)可得到舰船总体功能毁伤各等级概率：

$$P(G) = P(A, B, C, D, E, F, G) = P(A)P(B)P(C|A, B) \cdot$$

$$P(D|B, C)P(E|B, C)P(F|B, C)P(G|D, E, F)。$$

其中毁伤概率最大的等级作为舰船目标总体功能毁伤等级。

表 5 舰船总体功能毁伤节点 G 概率分布

等级	全损 E1									部分损坏 E2									完好 E3								
	全损 F1			部分损坏 F2			完好 F3			全损 F1			部分损坏 F2			完好 F3			全损 F1			部分损坏 F2			完好 F3		
	重伤(D1)	轻伤(D2)	完好(D3)	重伤(D1)	轻伤(D2)	完好(D3)	重伤(D1)	轻伤(D2)	完好(D3)	重伤(D1)	轻伤(D2)	完好(D3)	重伤(D1)	轻伤(D2)	完好(D3)	重伤(D1)	轻伤(D2)	完好(D3)	重伤(D1)	轻伤(D2)	完好(D3)	重伤(D1)	轻伤(D2)	完好(D3)	重伤(D1)	轻伤(D2)	完好(D3)
重度G1	0.95	0.81	0.72	0.91	0.76	0.69	0.72	0.69	0.48	0.90	0.77	0.61	0.86	0.71	0.53	0.65	0.56	0.48	0.81	0.69	0.50	0.66	0.58	0.51	0.51	0.35	0.11
中度G2	0.05	0.14	0.20	0.06	0.15	0.18	0.20	0.18	0.21	0.08	0.15	0.24	0.11	0.18	0.28	0.23	0.26	0.27	0.09	0.16	0.28	0.23	0.25	0.27	0.25	0.20	0.13
轻度G3	0	0.05	0.08	0.03	0.09	0.13	0.08	0.13	0.31	0.02	0.08	0.15	0.03	0.11	0.19	0.12	0.18	0.25	0.10	0.15	0.22	0.11	0.17	0.22	0.24	0.45	0.76

根据舰船目标的毁伤情报，得出目标的外部结构毁伤等级为中度毁伤；对目标打击所采用的导弹为轻型反舰导弹；根据舰载警戒探测雷达发现敌舰船目标遭受反舰导弹攻击后，航速由 30 节变为 10 节。外部物理毁伤取中度毁伤(A2)；导弹类型取轻型反舰导弹(B2)；动力设备毁伤取部分损伤(F2)。

将网络中各节点的条件概率分布输入所建立的贝叶斯网络模型，将目标舰船外部物理毁伤节点、

5 应用实例

由于实弹试验和作战数据的缺乏，本实例网络模型中非根节点的条件概率分布由专家根据其经验评估确定。

内部结构毁伤节点条件概率 $P(C|A, B)$ 分布如表 1 所示；人员毁伤节点条件概率 $P(D|B, C)$ 分布如表 2 所示；武器装备毁伤节点条件概率分布如表 3 所示；动力设备毁伤节点条件概率 $P(F|B, C)$ 分布如表 4 所示；舰船总体功能毁伤节点条件概率 $P(G|D, E, F)$ 分布如表 5 所示。

表 1 内部结构毁伤节点 C 概率分布

等级	重型反舰导弹(B1)			轻型反舰导弹(B2)		
	重度(A1)	中度(A2)	轻度(A3)	重度(A1)	中度(A2)	轻度(A3)
重度 C1	0.75	0.35	0.13	0.60	0.25	0.05
中度 C2	0.15	0.51	0.38	0.25	0.31	0.18
轻度 C3	0.10	0.14	0.49	0.15	0.44	0.77

表 2 人员毁伤节点 D 概率分布

等级	重型反舰导弹(B1)			轻型反舰导弹(B2)		
	重度(C1)	中度(C2)	轻度(C3)	重度(C1)	中度(C2)	轻度(C3)
重伤 D1	0.83	0.61	0.48	0.71	0.49	0.24
轻伤 D2	0.16	0.29	0.34	0.24	0.36	0.35
完好 D3	0.01	0.10	0.18	0.05	0.15	0.41

表 3 武器装备毁伤节点 E 概率分布

等级	重型反舰导弹(B1)			轻型反舰导弹(B2)		
	重度(C1)	中度(C2)	轻度(C3)	重度(C1)	中度(C2)	轻度(C3)
全损 E1	0.95	0.60	0.24	0.82	0.52	0.20
部分 E2	0.05	0.35	0.36	0.13	0.36	0.27
完好 E3	0	0.05	0.40	0.05	0.12	0.53

表 4 动力设备毁伤节点 F 概率分布

等级	重型反舰导弹(B1)			轻型反舰导弹(B2)		
	重度(C1)	中度(C2)	轻度(C3)	重度(C1)	中度(C2)	轻度(C3)
全损 F1	0.92	0.56	0.30	0.75	0.42	0.18
部分 F2	0.06	0.35	0.55	0.15	0.36	0.30
完好 F3	0.02	0.09	0.15	0.10	0.22	0.52

导弹类型节点和动力设备毁伤节点的观测信息值输入网络模型，并更新网络结构。更新结果如图 2。

由计算结果可知：舰船目标功能毁伤概率 $P(G)$

为 $\begin{pmatrix} P(G1) \\ P(G2) \\ P(G3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.71 \\ 0.18 \\ 0.11 \end{pmatrix}$ ；所以，该敌舰船遭受攻击后

的毁伤等级为重度毁伤。指挥员可根据此信息和作

战意图制定下一步攻击计划。

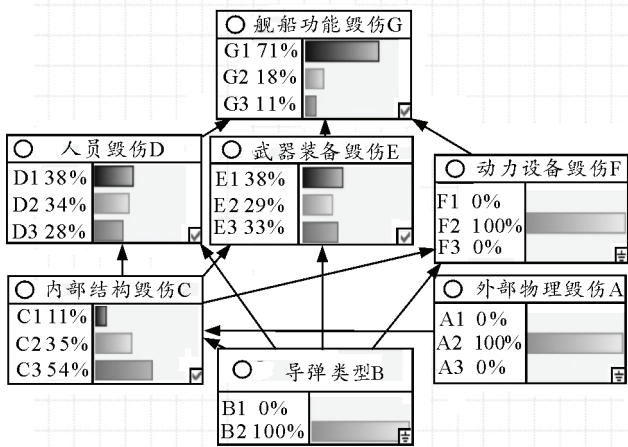


图 2 目标舰船贝叶斯网络模型计算结果

6 结论

贝叶斯网络模型是一个能很好解决复杂舰船系统目标毁伤评估的有力工具，它所独具的双向推理功能，使其在评估战斗毁伤问题中更具优势。通过对该毁伤评估模型的修改及拓展，可用于战时实时、动态、快速、准确的复杂武器系统战斗毁伤评估。

参考文献：

[1] 程浩, 谢鹏翔, 郝艳红. 基于贝叶斯网络的毁伤评估模型[J]. 兵工自动化, 2010, 29(4): 63-65.

[2] 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.

[3] 卢永刚, 司洪利, 钱立新. 舰船毁伤仿真评估方法的现状及研究内容[J]. 现代防御技术, 2009, 37(1): 133-137.

[4] 张连文, 郭海鹏. 贝叶斯网引论[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 31-45.

[5] 吴正龙, 许梅生. 炮兵精确打击目标后验毁伤评估研究[J]. 炮兵学院学报, 2009(3): 42-45.

[6] 张晓今, 张为华, 江振宇. 导弹系统性能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 85-112.

[7] 许梅生, 王瀛. 基于贝叶斯网络的目标功能毁伤评估[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(5): 134-137.

[8] 罗文, 李敏勇, 张晓锐. 基于贝叶斯网络的事态认识[J]. 火力与指挥控制, 2010(3): 89-92.

[9] 王辉. 用于预测的贝叶斯网络[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2002, 34(1): 9-14.

[10] 薛万欣, 刘大有, 张弘. Bayesian 网中概率参数学习方法[J]. 电子学报, 2003, 31(11): 1686-1689.

[11] 钱猛, 胡升泽, 刘忠, 等. 基于 SysML 的作战行动序列建模方法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(8): 15-19.

[12] 赵建立, 高会生, 赵生岗. 贝叶斯网络在可靠性评估中的应用[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(2): 51-53.

[13] 陈键, 李忠民, 王永明, 等. 基于贝叶斯网络的装备部件战斗损伤评估模型[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(2): 329-332.

(上接第 59 页)

图 6 是采用专家系统控制时，低温气流从冷板切入大舱时舱内压力曲线。

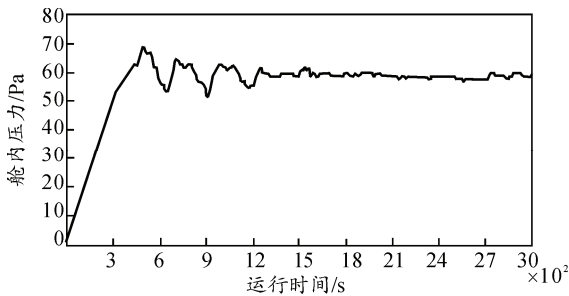


图 6 舱内压力控制曲线

通过比较图 5、图 6 可以看出：仅靠智能仪表的常规 PID 控制不能完全满足系统要求，虽然保证了舱内压力维持微正压的条件；但舱压稳定性较差，精度较低。而采用专家系统控制时，不仅满足了系统基本要求，而且舱内压力稳定，控制精度更高。

5 结论

笔者采用专家系统控制，很好地满足了试验要

求，不仅通过了相关部门组织的专家验收，而且顺利完成了多项型号试验。实际运行结果证明了该测控系统的可行性和可靠性。同时，该算法对该领域相关类似的问题如何解决有一定的借鉴意义。

参考文献：

[1] 王常力, 廖道文. 集散型控制系统的设计与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 21-23.

[2] 蔡自兴, 约翰 德尔金, 龚涛. 高级专家系统: 原理、设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 20-22.

[3] 纪宇潇, 张继华, 刘旺开, 等. 基于专家系统的热动力试验台测控系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(6): 56-58.

[4] 常海娟, 庞丽萍. 战斗机高空综合环境模拟舱压力控制策略研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(11): 5-8.

[5] 向运飞, 刘旺开, 沈为群. 双路热动力试验台集散控制系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2002, 10(10): 653-655.

[6] 邓丁奇, 张继华, 高飞, 等. 高低温空间环境模拟测控系统[J]. 兵工自动化, 2015, 34(2): 76-80.