

坑道工程口部毁伤等级评定

白二雷¹, 许金余^{1,2}

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 西北工业大学 力学与建筑工程学院, 陕西 西安 710072)

摘要:坑道工程口部毁伤等级的评定,是制定抢修预案的重要依据。传统的方法只能给出定性的评定结果,无法提供量化的评定结论,导致评定结果产生较大的偏差。为保证评定结果的客观真实性,首先根据抢修的难易程度及毁伤的严重性划分了坑道工程口部毁伤的等级标准,分析了坑道口部毁伤的影响因素,并确定了属性及取值;建立了坑道口部毁伤等级评定的贝叶斯网络结构,利用专家经验给出了网络参数,推导了毁伤程度的联合概率分布表达式。给出了应用实例,利用 GeNIe 进行建模和推理,结果表明:贝叶斯网络模型能够自然地融入坑道口部毁伤评定的不确定性影响因素,将专家的先验知识和后验的实际数据很好地结合起来,表示出变量间的概率关系,评定结果与数值模拟分析结果吻合良好。

关键词:坑道工程;毁伤等级;贝叶斯网络

中图分类号: TU93⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)05-0062-04

坑道工程口部毁伤等级的评定,是制定抢修预案的重要依据。20世纪70年代以来,西方发达国家开展了有关战场毁伤评定的研究与应用工作。国外在进行战场毁伤评估研究时,主要是通过建立模型、进行模拟试验及收集实际毁伤数据等手段来支持毁伤评定^[1]。我国从20世纪80年代后期开展相关研究,常用的毁伤评定方法有模糊综合评定法和神经网络法^[2]。这些方法受人为主观因素影响较大,无法对毁伤中的不确定性因素进行描述,导致评定结果产生较大偏差。坑道工程口部战时毁伤程度受攻击武器的打击效应及坑道自身的防护能力等诸多因素的影响,这些因素大多为不确定性的随机因素,这决定了坑道的毁伤程度也是随机变量,所以用概率形式表示坑道的毁伤程度是一种可行且合理的思路。贝叶斯网络能够将专家的先验知识和后验的实际毁伤数据很好地结合起来,表示出变量间的概率关系^[3]。因此,本文采用贝叶斯网络对坑道工程口部的毁伤等级进行评定。

1 坑道口部毁伤等级标准

坑道工程口部的毁伤类型可分为:允许毁伤、可抢修毁伤和不可抢修毁伤等类型^[4]。其判断原则为:若毁伤不影响其完成预定的保存与隐蔽作战飞机的功能,即为允许毁伤;若毁伤在当时的条件下无法抢修或因无法在规定的时间内完成抢修,即为不可抢修毁伤,此时可认为该坑道工程在战争中损失了;若毁伤在当时的抢修能力下能在规定的时间内完成抢修,即为可抢修毁伤。按照这个原则,可进一步将坑道工程口部划分为3个毁伤等级。

严重毁伤:洞口边坡倒塌,洞口一定深度的拱部及边墙衬砌遭到破坏,结构失去承重能力;口部出现大量塌落围岩,口部被堵死。通过抢修可恢复其功能,但所需的抢修资源相对较多,所需要的时间较长。

中度毁伤:洞口边坡尚未倒塌或大部分未倒塌;口部围岩局部塌落。局部补强加固后即可恢复其功能。

收稿日期:2008-04-02

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(SJ08E₂10)

作者简介:白二雷(1979-),男,河南焦作人,博士,主要从事防护工程,结构工程研究;E-mail: baierlei@163.com
许金余(1963-),男,吉林靖宇人,教授,博士生导师,主要从事防护工程,结构工程研究。

轻微毁伤:洞口边坡未倒塌,口部轻微受损,出现少量塌落围岩,不需抢修即可使飞机出洞。

2 坑道口部毁伤因素分析

坑道口部的毁伤程度取决于坑道的综合防护能力和来袭武器的打击效应。坑道口部的防护能力主要由最小防护层厚度、围岩类型防护方式决定来袭武器的打击能力取决于弹片的大小、速度及其在破片场内的分布等因素,而弹片的这些因素,又与战斗部的形状、结构、材料等多种因素相关。通过分析可得表 1 所示的坑道工程口部毁伤因素及其属性取值。

表 1 坑道工程口部毁伤因素及取值

Tab. 1 Damage factors and values of the sap gateway

编号	因素名称	取值
1	弹头形状	a. 圆形;b. 锥形
2	弹体重量	a. 轻(<1 000 kg);b. 中(1 000 kg-2 000 kg);c. 重(>2 000 kg)
3	侵彻角度	a. 小(0°-30°);b. 中(30°-60°);c. 大(60°-90°)
4	撞地速度	a. 低速(<1 300 m/s);b. 中速(1 300 ms-3 000 m/s);c. 高速(>3 000 m/s)
5	装药质量	a. 轻(<150 kg);b. 中(150 kg-250 kg);c. 重(>250 kg)
6	攻击方式	a. 侵彻岩体爆炸;b. 口部触地爆
7	最小防护层厚度	a. 厚(≥20 m);b. 薄(<20 m)
8	围岩类型	a. I类;b. II类;c. III类;d. IV类
9	防护方式	a. 主动防护;b. 被动防护

注:表中划分标准是参考常用的常规攻击武器的参数并征求专家意见的基础上而确定^[5]。

3 坑道口部毁伤评定的贝叶斯网络

3.1 网络结构的建立

将表 1 中的毁伤因素作为要建立的贝叶斯网络的节点,得到有向无环图。然后确定节点之间连接的方向,得到坑道口部毁伤评定的贝叶斯网络结构,如图 1 所示。

3.2 网络参数的确定

坑道工程口部毁伤等级评定的贝叶斯网络结构建立之后,要利用网络进行推理、进行毁伤评定就必须确定网络参数——分配根节点的先验概率和每个非根节点的条件概率分布表(CPT)。由于实际数据缺乏,这两项数据均暂时需要坑道抢修专家根据经验事先给出。

首先确定根节点“装药质量”、“弹头形状”、“弹体重量”、“侵彻角度”、“撞地速度”、“攻击方式”、“最小防护层厚度”的先验概率。根节点处于各状态的概率可按相等考虑。然后由专家确定爆轰波能量,侵彻深度,口部毁伤程度的条件概率分布表(CPT)^[6]。

3.3 网络的推理机制

令 q 表示装药质量, s 表示弹头形状, w 表示弹体重量, a 表示侵彻角度, v 表示撞地速度, e 表示爆轰波能量, c 表示侵彻深度, p 表示攻击方式, h 表示防护层厚度, r 表示围岩类型, f 表示防护方式, d 表示毁伤程度。

求坑道工程口部在各影响因素联合分布下的条件概率,即求概率 $P(d|e, c, p, h, r, f)$ 的过程,实质上是一个贝叶斯学习的过程。根据贝叶斯定理^[7]可得:

$$P(d|e, c, p, h, r, f) = P(e, c, p, h, r, f|d)P(d) / P(e, c, p, h, r, f) = P(e, c, p, h, r, f|d)P(d) \tag{1}$$

运用条件独立性假设^[8]可得:

$$P(e, c, p, h, r, f|d) = P(e|d)P(h|d)P(r|d)P(f|d)P(c, p|d) \tag{2}$$

故式(1)可写成:

$$P(d|e, c, p, h, r, f) = P(e, c, p, h, r, f|d)P(d) = P(e|d)P(h|d)P(r|d)P(f|d)P(c, p|d)P(d) \tag{3}$$

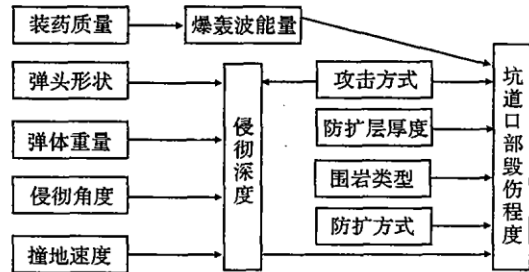


图 1 毁伤等级评定的贝叶斯网络

Fig. 1 Bayesian network for damage grade assessment

根据给出的先验概率及条件概率,即可求得 $P(d|e,c,p,h,r,f)$ 的值。同理可以求得:

$$P(c|s,w,a,v,p) = P(s,w,a,v,p|c)P(c) = P(s|c)P(w|c)P(a|c)P(v|c)P(p|c)P(c) \quad (4)$$

根据已确定的网络结构,利用局部概率分布可以得到网络中各变量间的联合概率分布。就本网络而言,各变量间的联合概率可以表示如下:

$$P(q,s,w,a,v,e,c,p,h,r,f,d) = P(q)P(s)P(w)P(a)P(v)P(p)P(h)P(e|q)P(c|s,w,a,v,p)P(d|e,c,p,h,r,f) \quad (5)$$

将式(3)、(4)代入式(5)可得评定模型中各变量间的联合概率分布:

$$P(q,s,w,a,v,e,c,p,h,r,f,d) = P(q)P(s)P(w)P(a)P(v)P(p)P(h)P(e|q)P(s|c)P(w|c)P(a|c)P(v|c)P(p|c)P(c)P(e|d)P(h|d)P(r|d)P(f|d)P(c,p|d)P(d) \quad (6)$$

根据联合概率分布,可以通过反复应用贝叶斯公式和乘积与求和公式得到网络中任意想知道的概率。

4 应用实例

在给定了贝叶斯网络的网络结构和条件概率后,根据使用者提供的证据,本文利用贝叶斯网络推理平台 GeNIe^[9],计算网络各个节点相应状态的概率值。

4.1 坑道毁伤概况

已知某坑道工程位于南方某地区,该坑道口部防护门为推拉式平板钢门,跨度为 40 m。坑道结构主体完好,无破损。该坑道周围围岩岩性较好,为 II 类围岩,口部最小防护层厚度为 20 m,防护方式为被动防护。假设战时该坑道工程遭到敌方 GBU-28/B 制导炸弹的攻击,炸弹侵彻岩体后爆炸,使坑道遭受毁伤。已知 GBU-28/B 制导炸弹弹体重量为 2 130 kg,装药质量为 306 kg,弹头形状为圆形。

4.2 坑道口部毁伤等级评定

根据建立的坑道口部毁伤评定的贝叶斯网络结构,利用 GeNIe 推理工具对坑道口部毁伤等级进行评定。由已知的攻击武器的参数、攻击方式以及坑道的最小防护层厚度、围岩类型、防护方式,根据坑道工程口部毁伤因素及其属性取值,给定证据后,更新网络可得到坑道口部处于严重毁伤状态的概率为 63%,高于其它状态,从而得出坑道口部的毁伤等级为严重毁伤,如图 2 所示。

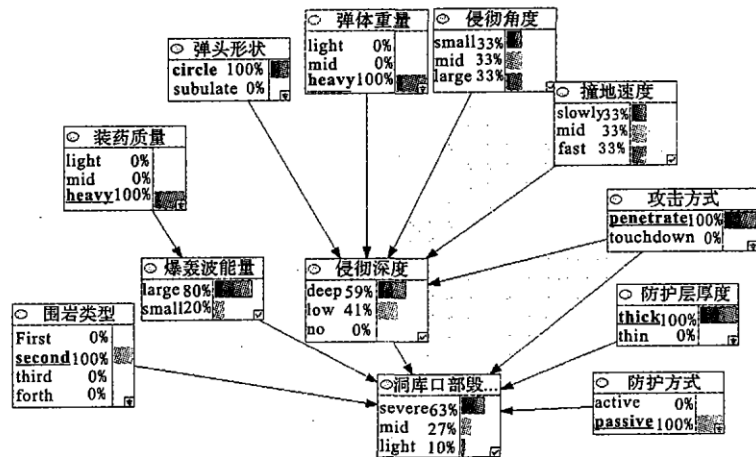


图 2 坑道口部毁伤评定结果

Fig. 2 Damage assessment result of the sap gateway

文献[10]对该坑道工程口部在 GBU-28/B 制导炸弹袭击下的破坏

效应进行了三维数值仿真模拟分析,结果表明该坑道口部在 GBU-28/B 制导炸弹袭击下口部出现大量塌落围岩,口部被堵死,根据本文对坑道口部毁伤等级的划分标准,可确定该坑道工程口部处于严重毁伤状态,与贝叶斯网络的推理结果一致。

5 结论

本文建立了坑道工程口部战时毁伤等级评定的贝叶斯网络结构,采用贝叶斯网络推理平台 GeNIe 进行了评定推理,主要得出以下结论:

1) 贝叶斯网络能够用概率的形式表示坑道口部毁伤评定的结果,给出量化的评定结论,且用图形化的知识表达,使结果更加清晰,直观,便于理解。

2) 根据评定结果可知:坑道工程口部是战时敌人重点攻击的目标,在常规武器打击下,口部处于严重毁伤的概率较大,因此,应加强坑道口部的防护措施。

同时,贝叶斯网络结构参数的取值对毁伤等级评定效果的影响较大,而由于实际毁伤数据的匮乏,本文中贝叶斯网络结构的条件概率及先验概率,均由坑道工程领域的专家事先给出,这对毁伤评定结果有一定的影响,需要在系统使用的过程当中再不断由知识工程师和领域专家进行调节,使网络结构趋于完善,评定结果更精确。

参考文献:

- [1] 李建平,石全,甘茂治. 装备战场抢修理论与应用[M]. 北京:兵器工业出版社,2000.
LI Jianping, SHI Quan, GAN Maozhi. Theory and Application of Equipment Battlefield Repair[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 黄惠南. 雷达装备战场损伤评估与修复专家系统研究[D]. 长沙:国防科技大学,2005.
HUANG Huinan. Reaearch on the Expert System of the BDAR for the Radar Equipment[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2005. (in Chinese)
- [3] 陈健,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.
CHEN Jian, LI Zhongmin, WANG Yongming, et al. Component battle Damage Assessment Model Based on Bayesian Network [J]. System Engineering and Electronics, 2007, 29(2): 329-332. (in Chinese)
- [4] Ball R E. The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design[M]. New York: American Institute of Aeronautics, Inc, 1985: 10-23.
- [5] Liu Li, Quan Shi, Wang Runsheng. Troubleshooting or Damage Assessing Based on Bayesian-network: IMS2003 Proceedings of International Conference on Intelligent Maintenance System, Xi'an, China, 2003[C]. Xi'an: [s. n.], 2003: 914-920.
- [6] Xie Ming, Jiang Qing-Yuan, Xie Shuang. Optimization of Control of Network with Inverse Method of Deep Foundation[J]. International Journal of Project Management, 2002, 9(12): 387-390.
- [7] Darwiche A. A Different Approach to Inference in Bayesian networks[J]. Journal of the ACM, 2003, 50(3): 280-305.
- [8] Cheng Jie. Learning Bayesian Networks From Data: An Information-theory Based Approach[J]. Artificial Intelligence, 2002, 137(12): 43-90.
- [9] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, et al. Improving the Analysis of Dependable Systems By Mapping Fault Trees Into Bayesian Networks[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 71(3): 249-260.
- [10] 邓春梅,许金余,沈刘军. 装药爆炸下地下拱形结构变形及破坏特征分析[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2007, 8(5): 534-537.
DENG Chunmei, XU Jinyu, SHEN LiuJun. Deformation and Damage Characteristics Analysis of Underground Arch Structure Subjected to Subsurface Blast[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 8(5): 534-537. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)

Damage Grade Assessment of Sap Gateway

BAI Er-lei¹, XU Jin-yu^{1,2}

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. College of Mechanics and Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The damage grade assessment of the sap gateway is an important basis for the rush-repair scheme making. The traditional method can only give the qualitative result, but can't provide quantitative result, thus a greater error is caused in assessment result. First, this paper gives the partition criterion of the damage grade, then analyzes the factor that influences the damage degree of the sap gateway and determines the attribute and values. Furthermore, the Bayesian network for assessing the damage grade of the sap gateway is established, the network parameters are given by utilizing the experiences of experts, and the united probability distribution formula of the damage degree is deduced. Finally, an example is given, which is solved by reasoning platform GeNIe. The conclusion is drawn that the Bayesian network model can introduce the random factors influencing the damage degree, and by well combining the experiences of experts with the damage data, the probability relationship of the variables is given. The assessment result is consistent with the numerical simulation result.

Key words: sap project; damage grade; Bayesian network