

采空区顶板事故动态贝叶斯模型

张 准¹, 马海军², 唐立建²

1. 云南有色地质局楚雄勘察院, 云南楚雄 675000
2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093

摘要 在采空区危害中, 顶板破坏是主要灾害事故之一, 一旦发生塌陷事故影响恶劣。本文在对采空区顶板事故进行事故树分析法 (FTA) 定性分析的基础上, 采用贝叶斯网络转化的方法对采空区顶板事故树进行转化, 建立采空区顶板事故贝叶斯网络模型, 同时采用基于 Matlab 的 BNT 软件包进行定量计算, 无需确定权重, 对先验概率和后验概率结果对比分析, 得出影响采空区的主要因素, 认为采空区顶板事故发生的条件概率中, 施工人员未按照设计开采和支护不当的重要度最大, 因此在实际施工过程中, 施工人员必须严格按照设计开采, 加强支护, 以确保采空区顶板稳定。

关键词 事故树分析法; 动态贝叶斯网络; 采空区; 定量分析

中图分类号 TD362

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)21-0048-04

Dynamic Bayesian Models for Gob Roof Accidents

ZHANG Zhun¹, MA Haijun², TANG Lijian²

1. Chuxiong Investigation Institute, Yunnan Nonferrous Metals Geological Bureau, Chuxiong 675000, Yunnan Province, China
2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

Abstract The roof damage is one of the major cause of hazards in the gob in case of collapse accidents. In the stability analysis of the mined area on the roof with multi-objective evaluation and decision analysis, the extensive use is made of analytic hierarchy process, utility function method, and fuzzy membership function method. Among a variety of objectives, a complex relationship often makes the use of these analysis methods very difficult, especially in determining the weight factors of the objectives, which would affect the application of these methods. In the context of the gob roof accident and the Fault Tree Analysis (FTA), the qualitative analysis based on Bayesian network is transformed by the method of the gob roof fault tree transformation, to establish the gob roof accident Bayesian network model, with the use of packages based on Matlab BNT quantitative calculation, In this way, it is necessary to determine weights and the prior probability and the posterior probability are used in comparison and analysis of the gob to identify the main factors related to the gob roof accidents in the conditional probability, with the construction workers not working in accordance with the design and improper exploitation and support being of the greatest importance, therefore, in the actual construction process, the construction workers must strictly follow the design of mining, to enhance support to ensure the stability of the gob roof.

Keywords fault tree analysis; dynamic Bayesian networks; gob; quantitative analysis

0 引言

在对采空区顶板稳定性分析的多目标评价决策分析中, 广泛采用层次分析法、效用函数法、模糊隶属度函数法等, 采空区数值模拟主要使用有限单元法、边界单元法、离散单元法及有限差分法等。国外开发的相应软件有限元分析软件 ANSYS, 有限差分法软件 Flac、Flac3D, 离散单元法软件 UDEC、3DEC, 国内的如岩石破裂过程分析软件 RFPA 等。李

俊平等^[1]应用 ANSYS 有限元程序, 研究了极限跨度、悬臂状态下的极限跨度和切顶深度, 分析了采空区处理对后续开采的影响, 同时还利用有限元数值计算进行离层模拟倾斜采空场处理时的地表移动与覆岩破坏规律研究。张娇等^[2]采用 Plaxis 3DTunnel 建立三维数值模型, 并对其不同开挖顺序的开挖过程地压活动规律和围岩稳定性进行数值模拟, 揭示了采空区不同开挖阶段应力的集中部位和围岩的潜在破坏部位。钟刚

收稿日期: 2010-04-26; 修回日期: 2010-10-22

作者简介: 张准, 工程师, 研究方向为矿山开发与地质勘探, 电子信箱: 273115287@qq.com

等^[3]、唐有德等^[4]采用三维弹塑性有限元数值分析软件 3D-sigma 软件对具体矿山进行了模拟。尽管采空区稳定性研究在现场测试、理论分析、数值模拟等方面已经取得了不少成果,但是由于定性和定量分析各单一因素,很难得出采空区稳定性的结论,模糊综合评判在采空区稳定性评价的应用中,虽然考虑了大量对采空区稳定性影响的因素,但关于评价指标的选取、评语集的确定、权重计算、隶属函数的建立等一系列问题中,还存在一些不足,其取值的合理性和准确性需要进一步完善。而且各种目标之间存在复杂关系,这些分析方法很难确定各目标因素之间的权重,致使权重的取值带有较大主观性,影响这些方法的应用^[5]。

本文首先建立采空区顶板事故树模型,然后根据贝叶斯网络转换方法,建立采空区顶板事故贝叶斯模型,基于 Matlab 的 BNT 软件包进行定量计算,无需计算权重^[5-6],找出事故发生的原因次序,从而给出适当的安全防范措施。

1 贝叶斯网络

贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)是一种用图表示知识的方法,并且是可以计算的概率模型,通过这种网络,可以综合各种来源的数据,并对这些数据进行综合的推理^[6]。动态贝叶斯网络(Dynamic Bayesian Networks, DBN)是建立在静态贝叶斯网络和隐 Markov 模型基础上的图形结构,是初始网络在时间上的一种扩展^[7]。

目前,已有不少针对 BN 网络进行建模和推理分析的软件包,其中 BNT (Bayesian Net Toolbox) 软件包是 Kevin P. Murphy 基于 Matlab 语言开发的,提供了多种底层基础函数数据库,支持精确推理和近似推理、参数学习和结构学习、静态模型和动态模型,可扩展性良好^[8]。本文采用 BNT 软件包对采空区顶板事故进行建模和分析。

2 采空区顶板事故 DBN 模型

本模型是在故事树分析法(FTA)基础上提出的一种基于 DBN 的采空区顶板事故分析模型。首先将 FTA 转换 DBN,然后放宽对 FTA 的假设以便建立更合适的分析模型。

2.1 将事故树转换为贝叶斯网络

采空区顶板事故主要是由于未按照设计开采,支护不当,导致暴露时间比较长,引起采空区顶板的大面积塌陷和片帮。

事故树如图 1 所示。

事故树向贝叶斯网络转化算法^[7]如下。

步骤 1 对事故树中的基本事件或中间事件,在贝叶斯网络中建立一个根节点,并根据该事件名称进行命名。重复事件只建立一个节点。

步骤 2 按照事故树中相应基本事件或中间事件的失效分布确定贝叶斯网络中根节点的先验分布。

步骤 3 对事故树中的逻辑门,在贝叶斯网络中建立一个相应的节点,并根据该逻辑门的输出事件名称进行命名。

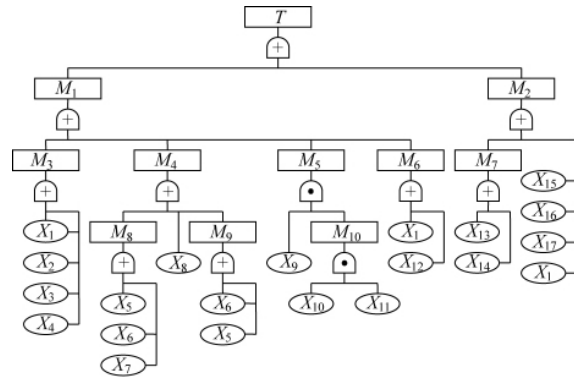


图 1 采空区顶板事故树
Fig. 1 Gob roof fault tree

重复的输出事件只建立一个节点。

步骤 4 按照事故树中顶事件、中间事件和底事件之间的连接关系建立贝叶斯网络中节点之间的连接;

步骤 5 按照事故树中与、或、非以及表决逻辑关系确定贝叶斯网络中非根节点的条件概率分布^[7]。

与/或逻辑关系对应的贝叶斯网络拓扑结构及条件概率分布如图 2 所示。

根据算法将事故树转化为贝叶斯网络,如图 3 所示。

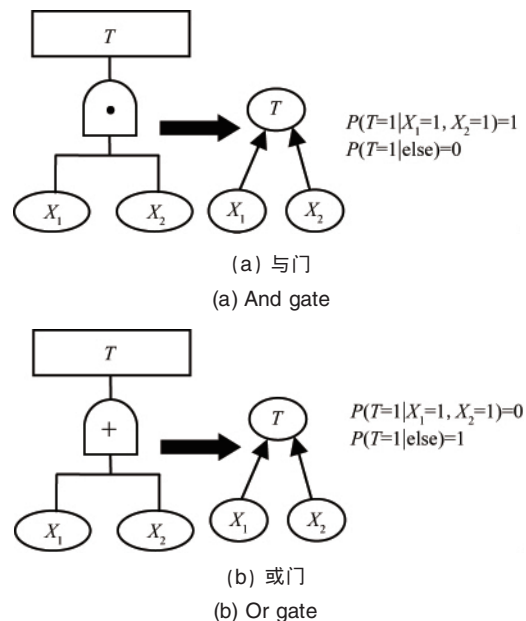


图 2 与/或逻辑关系在贝叶斯网络中的表示
Fig. 2 Expression of and/or logical relations in the Bayesian network

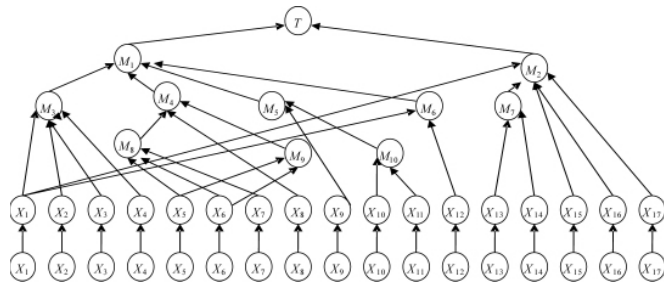


图3 采空区顶板事故树对应的贝叶斯网络模型
Fig. 3 Gob roof fault tree corresponding to the Bayesian network model

2.2 采空区顶板事故 DBN 模型分析

顶事件 T 在任意时刻 t 的发生概率为

$$P(t) = P(T_t=1 | X_{01}=0, X_{02}=0, \dots, X_{0n}=0) \quad (1)$$

其中 X_{0i} 为初始网络中根节点 X_i 在 0 时刻的状态, m 为初始网络中根节点的数目。

事件 M_k 在各个时刻发生的后验概率为^[10]

$$P(M_{ik}=1 | M_{im}=1) = \frac{P(M_{ik}=1, M_{im}=1)}{P(M_{im}=1)} \quad (t=0, 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

模型满足常均值模型,常均值模型是一种应用广泛且简单的时间序列模型,它体现了动态线性模型的许多重要的基本概念和分析特性。

$$m_t = m_{t-1} + A_t e_t \quad (3)$$

其中, $A_t = R_t / Q_t, e_t = y_t - m_{t-1}$ 。式(3)来源于文献[10]贝叶斯定理 1 的推论,这表明 m_t 是水平的先验估计 m_{t-1} 和观测值 y_t 的加权平均,其权为 A_t ,有时也称 A_t 为修正系数。 e_t 为预测误差。当先验分布比似然分布 $p(y_t | \mu_t, D_{t-1})$ 更集中时, A_t 更接近于零;相反,当先验分布比似然分布更分散时, A_t 更接近于 1。

根据基于先验知识假定各基本事件的发生初始概率(先验概率)^[11],利用 BNT 计算得到各基本事件的概率在 $M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9, M_{10}, M_{11}, M_{12}$ 等事件发生时的更新情况,例如计算在 T_0 时刻事件 M_3 发生时 X_1 发生的概率,利用式(2)可得

$$P(X_1=1 | M_3=1) = \frac{P(X_1=1, M_3=1)}{P(M_3=1)} = \frac{P(M_3=1 | X_1=1)}{\sum_{k=1}^2 P(M_3=1, X_k=1)} = \frac{0.036}{0.036+0.024+0.031+0.026} = 0.308$$

利用 BNT 软件包可以快速计算出各基本事件的更新概率,如表 1 所示。

初始概率描述了人们基于先验知识对系统安全现状的认识,当输入不同的节点证据时,证据所携带的信息遍历整个网络,改变网络中各个节点的概率分布,节点间的连接强度确定了所受影响的大小,逻辑上实现贝叶斯网络的诊断、预测、辩解和混合推理模式,比如向模型中输入顶板处理不当、作业人员违章处理事件后,推理得到顶板暴露时间过长,导致顶板塌陷事故发生的可能性增大等。

M_2 发生的时刻为 t_0 ,根据式(2)可计算出顶事件 T 在 t_0 时刻发生概率为

$$P(t_0) = P(T=1 | X_{t_01}, X_{t_02}, \dots, X_{t_015}) = \sum_{k=3}^7 P(M_k=1) = 0.024 + 0.031 + 0.026 + 0.034 + 0.028 + 0.034 + 0.028 + 0.015 + 0.032 + 0.018 + 0.026 + 0.042 + 0.018 \times 0.026 \times 0.042 + 0.031 + 0.024 + 0.022 + 0.016 + 0.022 + 0.084 = 0.537$$

根据式(3)可计算出各基本事件发生的概率更新,利用 Matlab 软件的 BNT 软件包可以算出顶事件随时间推移在 t 时刻发生的概率,如表 2 所示。可以看出,如果支护不当,时

表 1 采空区顶板事故分析模型的初始概率和推理结果

Table 1 Gob roof accident analysis model and the inference results of the initial probability

节点	状态	初始概率	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	M_{11}	M_{12}
X_1	1	0.036	0.308	0.036	0.036	0.3	0.036	0.036	0.036	0.036	0.105	0.177
X_2	1	0.024	0.205	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.07	0.024
X_3	1	0.031	0.265	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.09	0.031
X_4	1	0.026	0.222	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.076	0.026
X_5	1	0.034	0.034	0.312	0.034	0.034	0.034	0.442	0.548	0.034	0.099	0.034
X_6	1	0.028	0.028	0.257	0.028	0.028	0.028	0.364	0.452	0.028	0.082	0.028
X_7	1	0.015	0.015	0.138	0.015	0.015	0.015	0.194	0.015	0.015	0.044	0.015
X_8	1	0.032	0.032	0.293	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.093	0.032
X_9	1	0.018	0.018	0.018	0.209	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.053	0.018
X_{10}	1	0.026	0.026	0.026	0.302	0.026	0.026	0.026	0.026	0.382	0.076	0.026
X_{11}	1	0.042	0.042	0.042	0.489	0.042	0.042	0.042	0.042	0.618	0.122	0.042
X_{12}	1	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.09	0.031
X_{13}	1	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.522	0.024	0.024	0.024	0.024	0.118
X_{14}	1	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.478	0.022	0.022	0.022	0.022	0.108
X_{15}	1	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.078
X_{16}	1	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.108
X_{17}	1	0.084	0.084	0.084	0.084	0.7	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.412

表 2 顶板塌陷 (M_2) 发生后顶事件在 t 时刻发生的概率

Table 2 After roof collapse (M_2) the top event probability of occurrence at time t

时间 t/h	0	1	2	3	4	5	6	7
$P(t)$	0.537	0.541	0.545	0.547	0.552	0.553	0.558	0.559

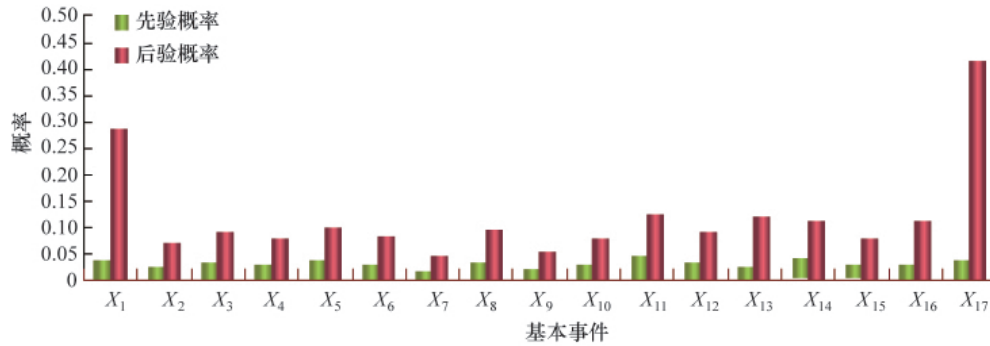


图 4 各基本事件的先验概率和事故发生后的后验概率比较直方图

Fig. 4 Comparison posterior probability histogram of priori probability and the basic event after the accident

间越长顶事件发生的概率越大。

顶事件在 t 时刻发生, 则 M_1 或 M_2 一定发生, 综合表 1 的数据可以绘出各基本事件的先验概率和事故发生后的后验概率直方图, 如图 4 所示。可看出, X_1 、 X_{17} 发生的后验概率最大, 即在采空区顶板事故主要影响因素中, X_1 (未按设计开采)、 X_{17} (支护不当) 对采空区顶板事故影响最大, 在施工和管理过程中, 应引起高度重视, 严格按照设计施工, 同时在施工过程中加强支护。

3 结论

通过对采空区顶板事故进行分析评价, 可以得出如下结论。

- 1) 运用事故树方法, 建立了采空区顶板事故树模型, 对采空区顶板事故进行定性分析。
- 2) 通过对采空区顶板事故树分析, 运用贝叶斯网络转换方法建立采空区顶板事故贝叶斯模型, 对采空区顶板事故进行定量分析, 确定影响采空区顶板事故的主要因素, 可以为类似的采空区顶板管理提供依据。
- 3) 运用贝叶斯网络方法能够建立事故定量分析模型, 进行定量分析, 找出影响事故的主要因素, 较事故树方法的定性分析更准确、更具说服力。

参考文献 (References)

[1] 李俊平, 彭作为, 周创兵, 等. 木架山采空区处理方案研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3884-3890.
Li Junping, Peng Zuowei, Zhou Chuangbing, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3884-3890.

[2] 张娇, 姜谔男, 易南概, 等. 东坪金矿采空区开挖过程的三维有限元数值模拟[J]. 中国矿业, 2006, 15(11): 81-84.

Zhang Jiao, Jiang Ainan, Yi Nangai, et al. China Mining Magazine, 2006, 15(11): 81-84.

[3] 钟刚, 韩方建. 平水铜矿采空区稳定性数值分析[J]. 金属矿山, 2004(3): 8-11.
Zhong Gang, Han Fangjian. Metal Mine, 2004(3): 8-11.

[4] 唐有德, 姚香. 类框架结构支撑采空区的力学稳定性分析 [J]. 有色金属: 矿山部分, 2004, 56(2): 21-22, 29.
Tang Youde, Yao Xiang. Nonferrous Metals: Mine Section, 2004, 56(2): 21-22, 29.

[5] 张钦礼, 朱永刚. 采空区顶板事故分析与安全管理[J]. 采矿技术, 2006, 6(3): 340-344.
Zhang Qinli, Zhu Yonggang. Mining Technology, 2006, 6(3): 340-344.

[6] 王广彦, 马志军, 胡起伟. 基于贝叶斯网络的故障树分析[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(6): 79-83.
Wang Guangyan, Ma Zhijun, Wu Qiwei. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(6): 79-83.

[7] 周忠宝, 董豆豆, 周经伦. 贝叶斯网络在可靠性分析中的应用[J]. 系统工程理论与实践. 2006, 26(6): 95-100.
Zhou Zhongbao, Dong Doudou, Zhou Jinglun. Systems Engineering - Theory & Practice, 2006, 26(6): 95-100.

[8] van der Gaag L C. Bayesian belief networks: Odds and ends [J]. The Computer Journal, 1996, 39: 97-113.

[9] 周忠宝, 周经伦, 金光. 基于贝叶斯网络的概率安全评估方法研究[J]. 系统工程学报, 2006, 21(6): 636-643.
Zhou Zhongbao, Zhou Jinglun, Jing Guang. Systems Engineering, 2006, 21(6): 636-643.

[10] 陈茜. 动态贝叶斯模型研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007: 10-22.
Chen Qian. Dynamic Bayesian model [D]. Changsha: Central South University, 2007: 10-22.

[11] 谢斌, 张明珠, 严于鲜. 贝叶斯网络对故障树方法的改进 [J]. 绵阳师范学院学报, 2004, 23(2): 29-33.
Xie Bin, Zhang Mingzhu, Yan Yuxian. Journal of Mianyang Normal University, 2004, 23(2): 29-33.

(责任编辑 代丽)