

# 基于复合模型的轨道运输事故风险分析

徐青伟, 许开立

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为了系统化地分析斜巷轨道运输事故, 提出了在贝叶斯网络的基础上融合预先危险性分析-保护层分析(PHA-LOPA)、蝴蝶结分析于一体的复合模型风险分析方法。首先, 借助于 GeNIe 软件实现贝叶斯网络的双向推理能力, 辨识出风险贝叶斯事故节点; 然后, 对事故节点进行 PHA-LOPA 研究, 确定引起事故的原因、造成的结果, 设置独立保护层降低事故节点的危险性等级; 最后, 对剩余危险性等级仍然较高的事故节点进行蝴蝶结分析, 设置安全屏障, 进一步控制事故的发生。以某矿斜巷轨道运输事故为例, 应用该复合模型风险分析方法, 结果验证了所提方法的正确性和可行性。

**关 键 词:** 贝叶斯网络; 预先危险性分析; 保护层分析; 蝴蝶结分析; 轨道运输事故

**中图分类号:** X 936      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2018)07-1048-05

## Risk Analysis of Rail Haulage Accident Based on Composite Model

XU Qing-wei, XU Kai-li

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: XU Kai-li, E-mail: kaili\_xu@aliyun.com)

**Abstract:** A composite risk analysis model was put forward to analyze the rail haulage accident in inclined tunnel systematically. The model combines preliminary hazard analysis-layer of protection analysis (PHA-LOPA) with bow-tie analysis together based on Bayesian network. First, taking advantage of two-way reasoning ability of Bayesian network identified the risk Bayesian accident nodes with the help of GeNIe software. Second, the accident nodes was studied using PHA-LOPA to determine the causes and results of the accident, and to set independent protection layer to reduce the risk level of the accident nodes. Third, bow-tie analysis was performed on the accident node where the residual risk level was still high, safety barriers were set and the occurrence of the accident was further controlled. The proposed composite risk analysis model was applied to a rail haulage accident in inclined tunnel in a mine, and the validity and feasibility was verified by the results.

**Key words:** Bayesian network; preliminary hazard analysis; layer of protection analysis; bow-tie analysis; rail haulage accident

我国的工业化进程中, 伴随着现代机械化生产, 不可避免地出现了各类事故<sup>[1]</sup>。轨道运输贯穿于矿井生产的大多数过程, 直接涉及到人员与物料的运送, 一旦发生事故, 很可能导致重大人员伤亡或财产损失。因此, 对轨道运输事故进行风险分析, 能有效地防止轨道运输事故的发生, 对于实现矿井的安全生产具有重要意义。目前, 关于轨

道运输事故的风险分析, 均是简单地定性或定量分析<sup>[2]</sup>, 缺少系统化的分析方法。

贝叶斯网络可以实现前向推理和后向推理, 具有很强的双向推理能力, 能够辨识出容易导致事故的风险贝叶斯事故节点, 在风险分析领域应用广泛。例如, Khakzad<sup>[3]</sup>将贝叶斯网络用于化学基础设施的多米诺效应风险分析; Yu 等<sup>[4]</sup>将贝

叶斯网络用于城市高速公路事故的风险分析; Tang 等<sup>[5]</sup>将贝叶斯网络用于突发性水污染事件的风险分析. 然而,关于贝叶斯网络在轨道运输事故中的应用,并未见相关的研究报道. 因此,本文将贝叶斯网络引入轨道运输事故的风险分析.

尽管贝叶斯网络能辨识出事故节点,如果不结合其他一些分析方法,它也不能提供有效的预防措施<sup>[6-7]</sup>. 预先危险性分析-保护层分析(PHA-LOPA)能预先识别导致事故的初始事件,确定其产生的原因、危险性等级及产生的影响,采取独立保护层措施,阻止事故的发生或降低初始事件的危险性等级<sup>[8]</sup>. 蝴蝶结分析将事故树与事件树相结合,能够同时分析顶事件的发生原因和事故后果<sup>[9-10]</sup>. 基于此,本文提出了在贝叶斯网络的基础上,融合了 PHA-LOPA、蝴蝶结分析于一体的复合模型风险分析方法,并将其在某矿斜巷轨道运输事故中的应用情况进行了说明.

# 1 复合模型风险分析理论

## 1.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络由代表变量的节点与连接变量节点的边组成,是一个有向无环图,根据贝叶斯推理建立各个变量之间的依赖关系. 贝叶斯网络的理论基础是贝叶斯公式:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}.$$

(1)

式中: $P(A)$ 是先验概率; $P(A|B)$ 是后验概率; $P(B|A)$ 是似然概率.

假设变量  $A$  存在  $a_1, a_2, \cdots, a_n$  个状态,则由全概率公式可得

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B|a_i)P(a_i).$$

(2)

结合式(1)和式(2)可以求出后验概率  $P(A|B)$ .

贝叶斯网络具有强大的不确定性推理能力,不仅能进行前向推理,由原因导出结果,而且能实现后向推理,由结果导出原因.

## 1.2 PHA-LOPA

预先危险性分析(PHA)是一种定性评价系统内危险因素和危险程度的方法;保护层分析(LOPA)是通过分析事故场景中的初始事件、后果和独立保护层,对事故场景风险进行半定量评估的一种系统方法. PHA-LOPA 就是预先识别导致事故的初始事件,确定其产生的原因、危险性等级及产生的影响,采取独立保护层措施,阻止事故的发生或降低初始事件的危险性等级<sup>[8]</sup>. 初始

事件的危险性等级划分为 4 级,见表 1.

表 1 危险性等级划分

Table 1 Risk levels division

等级	危险程度	可能的后果
I	安全的	暂时不能发生事故,可以忽略
II	临界的	有导致事故的可能性,事故处于临界状态,可能造成人员伤亡或财产损失,应采取措施予以控制
III	危险的	可能导致事故发生,造成人员伤亡或财产损失,必须采取措施进行控制
IV	灾难的	会导致事故发生,造成人员严重伤亡或财产巨大损失,必须立即设法消除

## 1.3 蝴蝶结分析

蝴蝶结主要由事故原因、事故前预防控制措施、顶事件、事故后减缓控制措施与事故后果 5 部分组成. 蝴蝶结分析原理如图 1 所示.

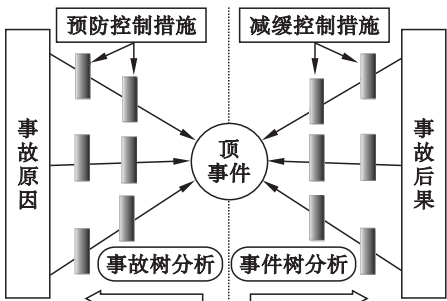


图 1 蝴蝶结分析

Fig. 1 Bow-tie analysis

# 2 复合模型风险分析步骤

基于贝叶斯网络的融合 PHA-LOPA、蝴蝶结分析于一体的复合模型风险分析方法主要步骤如下:

- 1) 编制顶事件事故树,将其映射成对应的贝叶斯网络,利用贝叶斯网络的双向推理能力,借助于 GeNIe 软件确定事故发生的概率与基本事件的后验概率,并逐个考察某一基本事件发生与否对顶事件发生概率的影响,找出容易导致事故发生的基本事件,选择该基本事件为风险贝叶斯事故节点.
- 2) 对风险贝叶斯事故节点进行 PHA-LOPA 研究,考察事故发生的场景,确定引起事故的起因、造成的影响以及危险性等级,设置相应的独立保护层,降低风险贝叶斯事故节点的危险性等级.

3) 对于危险性等级仍然较高的风险贝叶斯事故节点,采用蝴蝶结分析进行研究,识别风险贝叶斯事故节点的引发原因与导致后果,采取预防控制措施与减缓控制措施,设置安全屏障,控制事故的发生.

3 复合模型风险分析方法应用举例

斜巷轨道运输跑车事故,主要是指斜巷上部的车场或在斜巷轨道上行驶的矿车,脱离了钢丝绳的牵引,矿车沿着斜巷高速下滑所导致的事故.跑车事故的后果很严重,如果下部车场的作业人员未及时躲避,将会造成重大人身伤亡;同时,跑车事故也会损坏通风管路、水管、电缆、巷道支架等,造成严重财产损失.

本节主要介绍复合模型风险分析方法在斜巷轨道运输事故中的应用情况.

3.1 斜巷轨道运输事故的事故树与贝叶斯网络

以文献[2]中的案例为例进行说明,某矿斜巷轨道运输事故的事故树如图 2 所示.

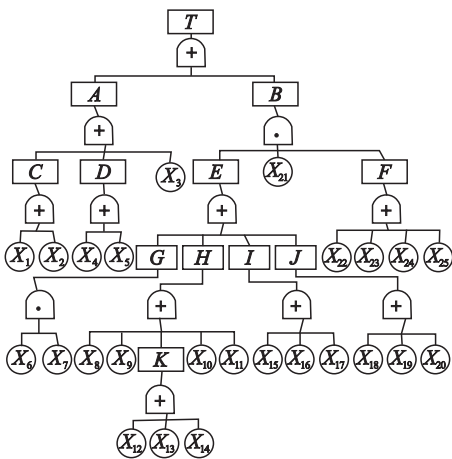


图 2 斜巷轨道运输事故的事故树  
Fig. 2 Fault tree of rail haulage accident in inclined tunnel

图 2 中各符号含义:  $T$  为顶事件,即轨道运输事故;  $A$  为掉道;  $B$  为跑车致伤(亡);  $C$  为轨道故障;  $D$  为矿车故障;  $E$  为跑车;  $F$  为人在危险区;  $G$  为带绳跑车;  $H$  为断绳;  $I$  为连接装置使用失误;  $J$  为连接装置故障;  $K$  为绳受冲击力;  $X_1$  为轨道上有障碍物;  $X_2$  为轨道质量不符合要求;  $X_3$  为超速上提或下放;  $X_4$  为掉轮;  $X_5$  为断轴;  $X_6$  为超重放车;  $X_7$  为制动装置故障;  $X_8$  为磨损严重;  $X_9$  为强度不够;  $X_{10}$  为锈蚀;  $X_{11}$  为扭结;  $X_{12}$  为加速度过大;  $X_{13}$  为运行突然中断;  $X_{14}$  为绳过松或上提受阻;  $X_{15}$  为未使用保险绳;  $X_{16}$  为未插销子或漏销;  $X_{17}$  为未

挂钩、链;  $X_{18}$  为链环断裂;  $X_{19}$  为销子断裂或窜出;  $X_{20}$  为钩、链或绳扣故障;  $X_{21}$  为挡(或阻)车装置故障;  $X_{22}$  为信号故障;  $X_{23}$  为行走;  $X_{24}$  为作业;  $X_{25}$  为未及时躲避.

根据图 2 中的故障树可以进行简单地定性分析,从事故树的逻辑门构成来看,逻辑或门占 83%,说明事故发生的可能性较大,即危险性较大.

将图 2 中的事故树映射成对应的贝叶斯网络,见图 3.

为了计算顶事件斜巷轨道运输事故的发生概率,还需掌握各基本事件的发生概率.各基本事件的发生概率(先验概率)见表 2.

表 2 基本事件与顶事件概率  
Table 2 Probability of basic event and top event

基本事件	先验概率	后验概率	$P(T X_i=1)$	$P(T X_i=0)$
$X_1$	0.010 0	0.455 5	1.000	0.012
$X_2$	0.008 0	0.364 4	1.000	0.014
$X_3$	0.003 0	0.136 6	1.000	0.019
$X_4$	0.000 7	0.031 9	1.000	0.021
$X_5$	0.000 4	0.018 2	1.000	0.022
$X_6$	0.006 0	0.006 0	0.022	0.022
$X_7$	0.000 1	0.000 1	0.022	0.022
$X_8$	0.006 0	0.006 0	0.022	0.022
$X_9$	0.000 1	0.000 1	0.022	0.022
$X_{10}$	0.100 0	0.100 4	0.022	0.022
$X_{11}$	0.010 0	0.010 0	0.022	0.022
$X_{12}$	0.000 3	0.000 3	0.022	0.022
$X_{13}$	0.000 1	0.000 1	0.022	0.022
$X_{14}$	0.001 0	0.001 0	0.022	0.022
$X_{15}$	0.001 0	0.001 0	0.022	0.022
$X_{16}$	0.002 0	0.002 0	0.022	0.022
$X_{17}$	0.001 0	0.001 0	0.022	0.022
$X_{18}$	0.000 1	0.000 1	0.022	0.022
$X_{19}$	0.000 1	0.000 1	0.022	0.022
$X_{20}$	0.002 0	0.002 0	0.022	0.022
$X_{21}$	0.000 5	0.001 0	0.045	0.022
$X_{22}$	0.002 0	0.002 0	0.022	0.022
$X_{23}$	0.100 0	0.100 2	0.022	0.022
$X_{24}$	0.001 0	0.001 0	0.022	0.022
$X_{25}$	0.100 0	0.100 2	0.022	0.022

将各基本事件的先验概率及其逻辑关系在贝叶斯网络中更新,借助于 GeNIe 软件,利用贝叶斯网络的前向推理能力,可得顶事件斜巷轨道运输事故的发生概率  $P(T) = 0.022$ ;利用贝叶斯网

络的后向推理能力,假设顶事件已经发生,即添加 $P(T)=1$ ,可得各基本事件的后验概率,见表 2;另外,逐个考察各基本事件发生与否对顶事件发生概率的影响,即分别计算 $P(T|X_i=1)$ 与 $P(T|X_i=0)$ 的大小,见表 2.

由表 2 中各基本事件的后验概率与 $P(T|X_i=1)$ 可知,斜巷轨道运输事故的发生很有可能是 $X_1$ 轨道上有障碍物、 $X_2$ 轨道质量不合要求、 $X_3$ 超速上提或下放、 $X_4$ 掉轮、 $X_5$ 断轴、 $X_{21}$ 插(或挡)车装置故障等基本事件引起的.

综合分析各基本事件的后验概率 $P(T|X_i=1)$ 与 $P(T|X_i=0)$ 可知,基本事件 $X_4,X_5,X_{21}$ 虽然很有可能导致顶事件的发生,但当其不发生时,并

不能显著降低顶事件的发生概率;而基本事件 $X_1,X_2,X_3$ 不发生时,能显著降低顶事件的发生概率.因此,按照引起顶事件发生的可能性与采取预防措施的有效性,将基本事件分为三类,第一类: $\{X_1,X_2,X_3\}$ ;第二类: $\{X_4,X_5,X_{21}\}$ ;第三类: $\{$ 剩余基本事件 $\}$ .

3.2 事故节点的 PHA – LOPA 研究

由贝叶斯网络分析可知,斜巷轨道运输事故很有可能是基本事件 $X_3$ 超速上提或下放引起的,且采取措施预防该基本事件的发生,能有效降低顶事件的发生概率.因此,选择基本事件 $X_3$ 超速上提或下放为风险贝叶斯事故节点,进行 PHA – LOPA 研究,见表 3.

表 3 矿车超速上提或下放 PHA – LOPA 风险评估

Table 3 Risk assessment of tramcar speeding up or down with PHA – LOPA

事故场景描述	起因	结果	级别	独立保护层	剩余级别	建议措施
超速上提或下放,使矿车发生掉道事故,导致轨道旁边的矿工伤亡,或设备损坏	①人为失误 ②矿车装载量超标或空车	①人员伤亡 ②设备损坏	Ⅲ	① 加强员工安全培训 ② 运行前检查矿车装载量	Ⅱ	仍有发生事故的可能性,建议继续增加防护措施

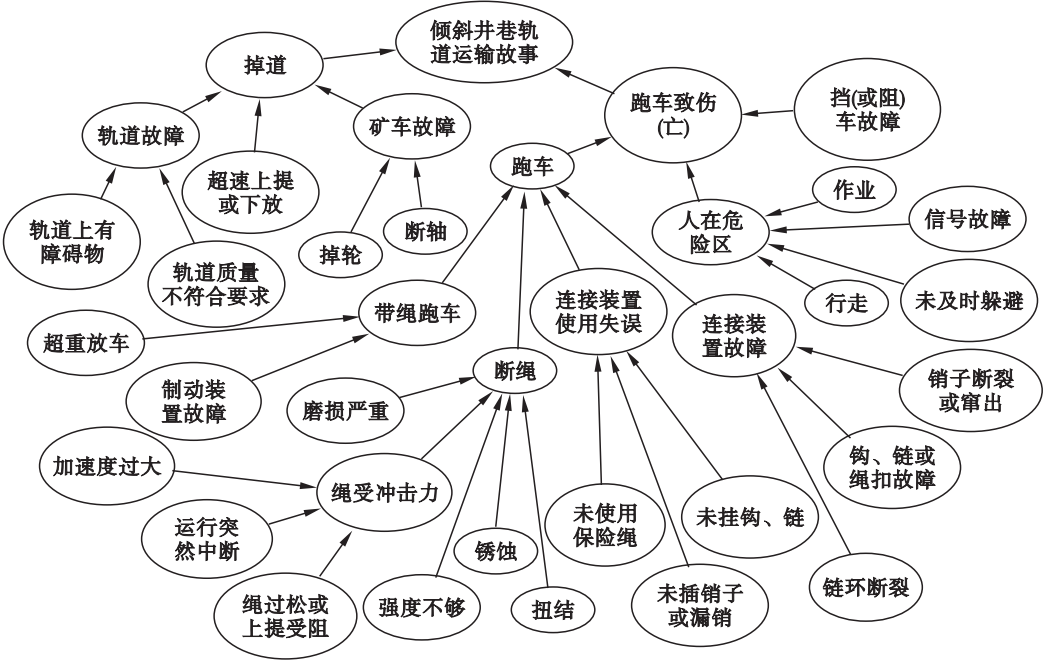


图 3 斜巷轨道运输事故贝叶斯网络

Fig. 3 Bayesian network of rail haulage accident in inclined tunnel

3.3 蝴蝶结分析

对 $X_3$ 超速上提或下放基本事件进行 PHA – LOPA 风险分析,在采取两层独立保护层防护措施之后,造成斜巷轨道运输事故的危险性等级由Ⅲ级降到Ⅱ级,仍然需要继续增加防护措施.

以 $X_3$ 超速上提或下放基本事件为例进行蝴蝶结分析,识别基本事件的引发原因与导致后果,

采取安全防护措施防止斜巷轨道运输事故的发生,见图 4.

从图 4 中分析可知,左侧是事故树分析,得出引发超速上提或下放的原因;右侧是事件树分析,得出超速上提或下放导致的事故后果.左侧的 12 条措施是防止引起超速上提或下放的预防控制措施,右侧的 10 条措施是降低超速上提或下放导致



事故后果的减缓控制措施. 通过蝴蝶结分析,可进一步降低斜巷轨道运输事故发生的风险.

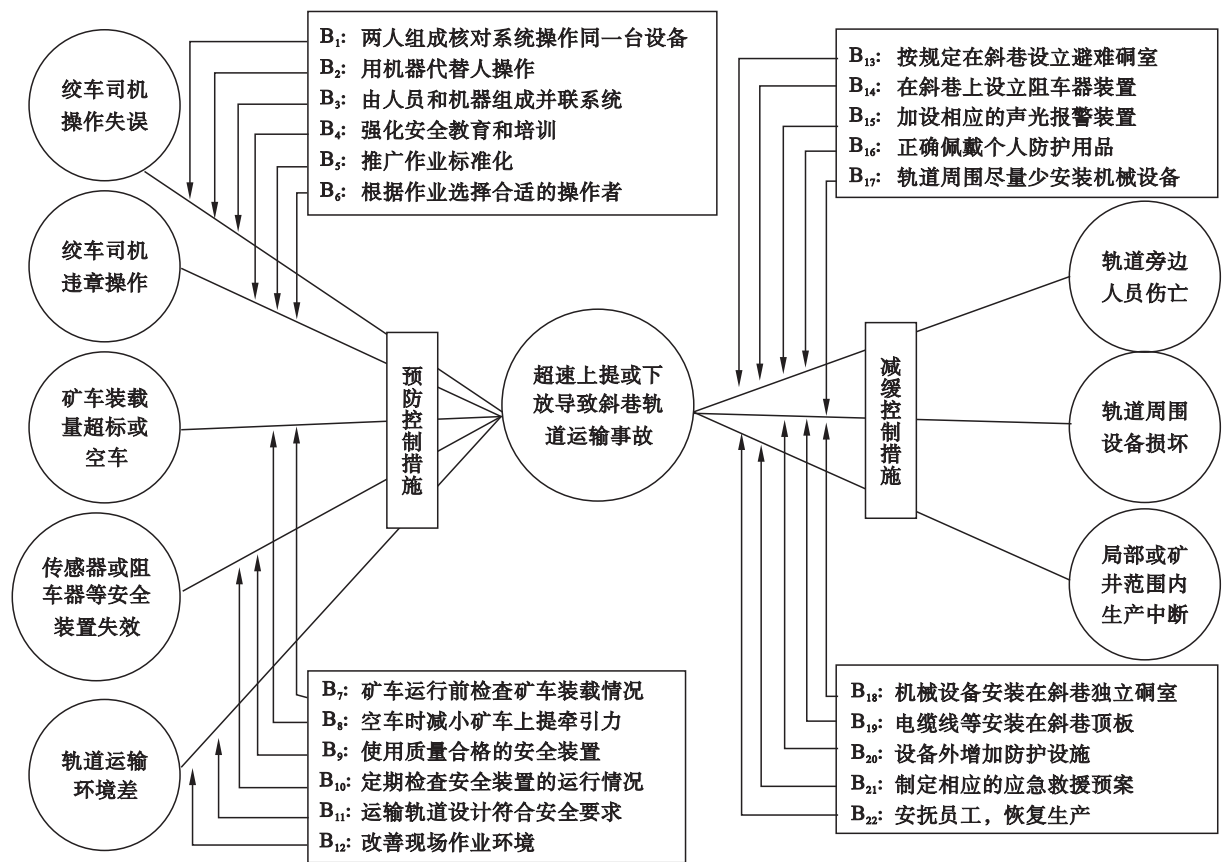


图 4 矿车超速上提或下放蝴蝶结分析  
Fig. 4 Bow-tie analysis of tramcar speeding up or down

4 结 论

- 1) 本文提出了基于贝叶斯网络的融合 PHA - LOPA、蝴蝶结分析于一体的复合模型风险分析方法.
- 2) 以某矿斜巷轨道运输事故为例,对复合模型风险分析方法的应用情况进行了说明,为防止事故的发生提供指导和依据.
- 3) 本文提出的复合模型风险分析方法对事故的发生情况分析较透彻,可在其他领域推广应用.

参考文献:

[ 1 ] Xu Q W, Xu K L. Evaluation of ambient air quality based on synthetic cloud model [ J ]. *Fresenius Environment Bulletin*, 2018, 27 ( 1 ) : 141 - 146.

[ 2 ] 景国勋,冯长根,杜文. 倾斜井巷轨道运输事故的系统安全分析[ J ]. 中国安全科学学报,2000,10(3) : 23 - 27. ( Jing Guo-xun, Feng Chang-gen, Du Wen. System safety analysis on rail haulage accident in inclined tunnel [ J ]. *China Safety Science Journal*, 2000, 10 ( 3 ) : 23 - 27. )

[ 3 ] Khakzad N. Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures [ J ].

*Reliability Engineering and System Safety*, 2015, 138 : 263 - 272.

[ 4 ] Yu R G, Wang X S, Yang K, et al. Crash risk analysis for Shanghai urban expressways: a Bayesian semi-parametric modeling approach [ J ]. *Accident Analysis and Prevention*, 2016, 95 : 495 - 502.

[ 5 ] Tang C H, Yi Y J, Yang Z F, et al. Risk analysis of emergent water pollution accidents based on a Bayesian network [ J ]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 165 ( 2 ) : 199 - 205.

[ 6 ] Badreddine A, Amor N B. A Bayesian approach to construct bow tie diagrams for risk evaluation [ J ]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2013, 91 : 159 - 171.

[ 7 ] Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network [ J ]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2013, 91 : 46 - 53.

[ 8 ] Summers A, Vogtmann W, Smolen S. Improving PHA/LOPA by consistent consequence severity estimation [ J ]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, 24 : 879 - 885.

[ 9 ] Xu Q W, Xu K L. Mine safety assessment using gray relational analysis and bow tie model [ J ]. *PLoS ONE*, 2018, 13 ( 3 ) : e0193576.

[ 10 ] Aqlan F, Ali E M. Integrating lean principles and fuzzy bow-tie analysis for risk assessment in chemical industry [ J ]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, 29 : 39 - 48.