

中文引用格式:王飞跃,王心雨,张文俊,等. 烟花爆竹生产企业安全风险动态评价[J]. 中国安全科学学报,2025,35(3):10-18.

英文引用格式:WANG Feiyue, WANG Xinyu, ZHANG Wenjun, et al. Safety risk dynamic evaluation of fireworks production enterprises[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(3): 10-18.

# 烟花爆竹生产企业安全风险动态评价\*

王飞跃<sup>1</sup>教授, 王心雨<sup>1</sup>, 张文俊<sup>2</sup>工程师, 刘辉<sup>\*\*1</sup>

(1 中南大学 中南大学防灾科学与技术研究所, 湖南 长沙 410075;

2 湖南省安全技术中心, 湖南 长沙 410006)

中图分类号: X932

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.03.0761

资助项目: 湖南省应急管理厅政府采购项目(HFW202300466)。

**【摘要】** 为降低烟花爆竹生产企业的安全风险, 消除现有安全评价机制存在的主观性与静态局限性, 基于扎根理论(GT)构建烟花爆竹生产企业安全风险的评价指标体系, 应用频数型网络分析法-反向传播神经网络(ANP-BPNN)模型计算评价指标的评价值与权重, 运用系统动力学(SD)方法建立烟花爆竹生产企业安全风险水平动态评价模型, 并以某烟花爆竹重大爆炸事故涉事企业加以验证。结果表明: 烟花爆竹生产企业安全风险动态评价模型能够准确捕捉安全风险的发展趋势, 通过持续性的安全风险动态评价, 预测安全风险水平达到较大风险状态的时间, 弹性调整烟花爆竹生产企业安全风险评价的间隔时间, 以确保企业始终保持安全的生产状态。

**【关键词】** 烟花爆竹; 生产企业; 安全风险; 动态评价; 安全生产; 系统动力学(SD)

## Safety risk dynamic evaluation of fireworks production enterprises

WANG Feiyue<sup>1</sup>, WANG Xinyu<sup>1</sup>, ZHANG Wenjun<sup>2</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>

(1 Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha Hunan 410075, China; 2 Hunan Safety Technology Center, Changsha Hunan 410006, China)

**Abstract:** To reduce the safety risk of fireworks production enterprises and eliminate the subjectivity and static limitations of the current safety evaluation mechanism, an evaluation indicator system of the safety risk for firework production enterprise was constructed based on the grounded theory (GT). The evaluation values and weights of the evaluation indicators were calculated by applying the frequency-based Analytic Network Process-Back Propagation Neuron Network (ANP-BPNN) model. The dynamic evaluation of the safety risk level of firework production enterprise was achieved based on SD, and verified with an enterprise involved in a major fireworks explosion accident of fireworks. The results show that the dynamic evaluation model of safety risk for fireworks production enterprises can accurately capture the development trend of the safety risk. The interval between safety risk evaluations of fireworks production enterprises is flexibly adjusted based on predicted time for safety risk level to reach the higher risk. The continuous dynamic evaluation of safety risk can ensure that the enterprise always maintains a safe production state.

**Keywords:** fireworks; production enterprise; safety risk; dynamic evaluation; work safe; system dynamics (SD)

\* 文章编号: 1003-3033(2025)03-0010-09; 收稿日期: 2024-10-13; 修稿日期: 2024-12-24

\*\* 通信作者: 刘辉(1995—), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 研究方向为安全风险评估。E-mail: lhui0421@163.com。

## 0 引言

烟花爆竹的原料、半成品及成品均具有易燃易爆性<sup>[1]</sup>,因此,烟花爆竹行业的事故发生率较高,属于高危行业范畴<sup>[2]</sup>。当前,国家实行的安全生产许可制度要求每3年对烟花爆竹生产企业进行一次安全现状评价<sup>[3]</sup>。然而,据不完全统计,2010—2023年,发生的136起烟花爆竹生产安全事故中,107起事故的涉事企业在事故发生时均持有有效的安全生产许可证。大量事故的发生充分暴露出当前烟花爆竹生产企业的安全评价机制存在不足,构建一套科学的安全风险动态评价机制,对烟花爆竹行业的健康发展具有重要意义。

鉴于烟花爆竹的制造过程主要依赖手工操作,缺乏标准化的操作流程、管道等要素,造成危险与可操作性分析等传统的安全评价方法难以有效应用<sup>[4]</sup>。此外,烟花爆竹生产企业的安全风险评价指标多为定性指标,难以精确量化。因此,实践中多采用安全检查表法进行定性分析。文献调研发现,目前,学术界研究烟花爆竹行业安全风险评价方法主要集中于仅得出符合性结论的定性分析方法<sup>[5]</sup>、带有主观判断的半定量或定量方法<sup>[6-7]</sup>,以及仅从某一角度进行评估的定量方法<sup>[8-9]</sup>。现有研究未系统探究各安全风险因素间的因果关联,且多停留在静态层面,无法描述安全风险的动态演化过程。

系统动力学(System Dynamics, SD)作为一种研

究复杂系统行为和演化的方法,近年来被逐步应用于安全风险动态模拟。席永涛等<sup>[10]</sup>运用SD方法,依托永盛轮在北极航行的数据,仿真并验证了北极冰区船舶航行风险传递网络模型的有效性和准确性;江新等<sup>[11]</sup>运用SD理论,分析了洞室施工人员安全认知影响因素间的相互依赖关系。实践证明,SD可用于解决动态、多重反馈的复杂社会系统安全问题,这为消除现有烟花爆竹生产事故评价机制存在的局限性提供了有效的思路与途径。

鉴于此,笔者拟从风险定义角度出发,以2010—2022年的112份烟花爆竹生产安全事故调查报告为基础,运用SD方法建立烟花爆竹生产企业安全风险水平动态评价模型,系统探究烟花爆竹生产企业安全风险水平的演变机制,以期预防烟花爆竹事故的发生并提高企业的安全管理水平。

## 1 安全风险评价体系

### 1.1 安全风险评价指标体系

利用扎根理论(Grounded Theory, GT),从调研到的112份烟花爆竹生产安全事故调查报告中抽象出安全风险影响因素,构建烟花爆竹生产企业安全风险评价指标体系。经过理论饱和度与差异显著性检验<sup>[12]</sup>,建立以人员、设备、材料、环境和管理5个主范畴为一级评价指标的评价指标体系,包含27个副范畴为二级评价指标,见表1。

表1 烟花爆竹生产企业安全风险评价指标体系

Table 1 Safety risk evaluation indicator system for fireworks production enterprises

一级评价指标 $I$	二级评价指标 $I_k$	一级评价指标 $I$	二级评价指标 $I_k$
人员风险水平 $A$	三类管理人员责任意识水平 $A_1$	管理风险水平 $E$	定量生产、储存及运输情况 $D_3$
	从业人员安全素质水平 $A_2$		安全教育培训情况 $E_1$
	定员作业情况 $A_3$		三类管理人员资格证明情况 $E_2$
	人员身心状态 $A_4$		特种作业人员资格证明情况 $E_3$
设备风险水平 $B$	安全设施设备设置情况 $B_1$		应急预案编制及演练情况 $E_4$
	机械设备工作情况 $B_2$		原料出入库制度实施情况 $E_5$
	工具合格合规情况 $B_3$		危险品储存与运输制度实施情况 $E_6$
环境风险水平 $C$	静电 $C_1$		全员安全生产责任制落实情况 $E_7$
	温度 $C_2$		规章制度建设情况 $E_8$
	湿度 $C_3$		安全生产组织机构构建情况 $E_9$
	生产工艺布置情况 $C_4$		双重预防机制构建实施情况 $E_{10}$
	总体布局情况 $C_5$		设备设施购置及维护情况 $E_{11}$
材料风险水平 $D$	原辅料合格合规情况 $D_1$	安全生产现场管理情况 $E_{12}$	
	药物残留情况 $D_2$		

### 1.2 安全风险评价指标评价价值与权重

风险  $R$ ,通常被视为事故发生可能性  $L$  与后果

严重度  $S$  的综合体现<sup>[13]</sup>。遵循风险定义的框架,分别从  $L$  与  $S$  出发,应用频数型网络分析法-反向传

播神经网络 (Analytic Network Process-Back Propagation Neuron Network, ANP-BPNN) 模型<sup>[12]</sup>, 确定各评价指标  $I_k$  的评价值  $V_L-I_k$  和  $V_S-I_k$ 、在频数型

ANP 事故发生可能性评价模型中的权重  $w_{I_k}$  以及 BPNN 事故后果严重度评价模型中的权重矩阵与偏置向量  $W_{(1)}$ 、 $W_{(2)}$ 、 $b_{(1)}$ 、 $b_{(2)}$ , 见表 2、表 3。

表 2 频数型 ANP 事故发生可能性评价模型中各评价指标的归一化权重值

Table 2 Normalized weight values of the evaluation indicators in the frequency-based ANP accident evaluation model

$I_k$	权重 $w_{I_k}$	权重 $w_{I_k}$ 排序	$I_k$	权重 $w_{I_k}$	权重 $w_{I_k}$ 排序	$I_k$	权重 $w_{I_k}$	权重 $w_{I_k}$ 排序
$A_1$	0.045 3	8	$C_3$	0.014 0	17	$E_4$	0.017 2	16
$A_2$	0.195 5	1	$C_4$	0.01 21	21	$E_5$	0.035 9	10
$A_3$	0.055 9	4	$C_5$	0.040 2	9	$E_6$	0.027 9	11
$A_4$	0.056 4	3	$D_1$	0.005 1	26	$E_7$	0.013 8	18
$B_1$	0.046 4	7	$D_2$	0.019 6	12	$E_8$	0.011 2	22
$B_2$	0.013 2	20	$D_3$	0.055 2	5	$E_9$	0.004 0	27
$B_3$	0.018 4	14	$E_1$	0.183 0	2	$E_{10}$	0.018 2	15
$C_1$	0.019 0	13	$E_2$	0.006 0	25	$E_{11}$	0.011 1	23
$C_2$	0.006 6	24	$E_3$	0.013 7	19	$E_{12}$	0.055 2	5

表 3 BPNN 事故后果严重度评价模型较优参数

Table 3 Optimized parameters of the BPNN model for evaluating the severity of the consequences of accidents

参数	较优值				
$(W_{(1)})^T$	-4.346 2	1.950 2	-1.053 1	0.752 4	-1.327 3
	4.461 9	1.999 6	1.187 7	-0.850 3	-2.185 9
	-1.925 6	-1.823 1	0.785	2.084 6	6.554 6
	-9.038 8	0.098 2	-0.560 2	-3.132 2	5.234 4
	4.073 8	-1.438 3	-0.102 6	1.100 8	2.702 2
	-5.696 6	2.788 3	0.860 6	2.519 3	-5.238 2
	5.551	1.420 7	0.648 9	-0.393 3	1.307 5
	3.671 8	-1.713 8	-0.861 1	-5.005 8	0.852 2
	1.439 8	-0.482 5	-2.049 3	-1.224 5	-1.710 4
	-1.784 5	0.397	1.478 8	4.069 7	1.639 7
	-3.274 3	2.350 7	-1.531 3	-0.668 3	-4.083 9
	4.794 5	-3.373 2	1.496 9	0.357 5	-2.066
	-4.932 3	-0.411 7	-0.444 4	1.57 8	3.622 7
	6.146 5	-3.215 9	1.116 3	2.964 5	-3.470 1
	0.022 6	0.624 3	-1.909	-4.295 4	-1.816 7
	-2.776 6	2.752 5	-1.520 3	0.667 4	-2.409 7
	-0.648 9	1.173 4	0.465 1	0.260 7	-1.239
	-1.620 1	2.920 1	1.096	0.095 3	-2.239 9
	-1.167 5	-4.827 1	-1.224 5	-1.269 9	1.704 3
	2.544 2	-0.496	0.889 8	2.787 4	-6.323 8
	-5.945 5	0.303	1.302 8	2.469 7	0.848 4
	-1.839	-2.674 3	-0.268 5	-2.48	3.367 2
	-0.007 1	1.690 7	-1.352 1	-0.537 8	-3.477 1
	-0.756 6	4.054 4	-0.365 9	-0.636 9	-0.493 9
	-1.701 3	4.418 7	0.334 5	-1.959 9	-1.134 8
	4.648 7	-2.434 6	2.682 7	1.231	4.790 1
	-1.527 9	-1.825 2	0.340 8	-1.356 4	0.873 2

续表 3

参数	较优值				
$W_{(2)}$	-2.691 9	-2.420 2	4.450 9	-2.336 7	-2.039 1
$(b_{(1)})^T$	2.908 7	-0.722 8	0.764 5	1.521 9	1.886 5
$b_{(2)}$	2.232 2				

### 1.3 安全风险评价等级尺度

收集 100 家烟花爆竹生产企业的安全评价报告,应用频数型 ANP-BPNN 模型评价事故企业与非事故企业的安全风险水平<sup>[12]</sup>。经过 K 均值聚类分析,并参照双重预防机制,将烟花爆竹生产企业安全风险的评价结果划分为重大风险、较大风险、一般风险及低风险 4 个层级<sup>[14-15]</sup>,见表 4。

表 4 烟花爆竹生产企业安全风险等级评价尺度

Table 4 Evaluation scale of the safety risk level for fireworks production enterprises

评价等级	评价值
低风险	[0, 0.002 0)
一般风险	[0.002 0, 0.056 0)
较大风险	[0.056 0, 0.176 0)
重大风险	[0.176 0, 1.000 0)

## 2 安全风险动态评价模型

### 2.1 评价指标因果反馈模型

基于事故致因理论,烟花爆竹生产企业的安全风险源于人员、设备、环境、材料和管理 5 个子系统的耦合作用。具体而言,每个子系统都对整体的安全风险水平产生直接且重要的影响。其中,管理因素对其他 4 个子系统均产生直接的影响,而人员因

素可通过管理因素与其余 3 个因素相互作用。基于 SD 建模原理,构建烟花爆竹生产企业安全风险评价指标间的因果反馈模型,如图 1 所示。其中,  $O_1$  为

危险环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  为当下时刻的环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $O_2$  为低风险上限值;  $R'$  为系统总体安全风险水平与理想值 ( $O_2$ ) 的差值。

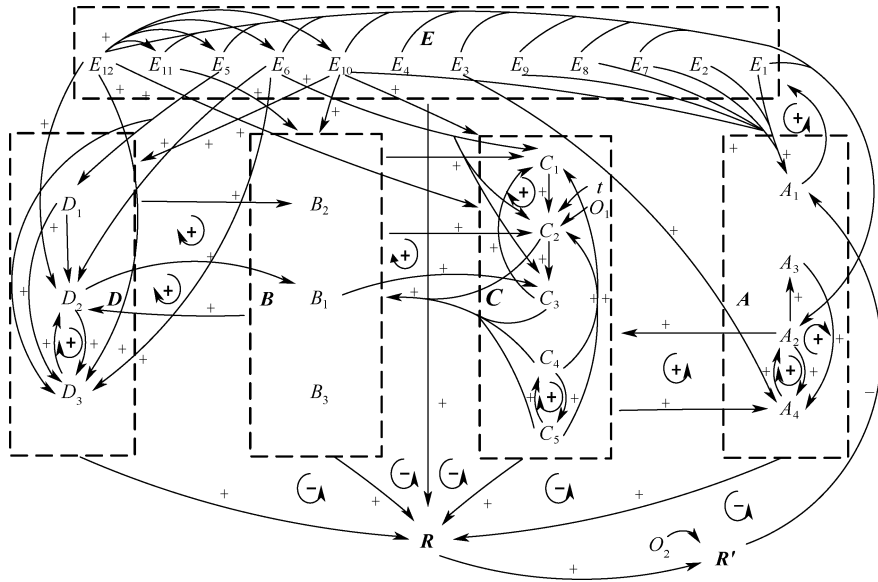


图 1 烟花爆竹生产企业安全风险评价指标因果反馈模型

Fig. 1 Causal feedback model of safety risk evaluation indicators for fireworks production enterprises

### 2.2 SD 流图

$R$  的预测是基于  $I_k$  随时间推移所形成的时间序列数据。因此,将  $I_k$  的无量纲评价价值  $V_L-I_k$  和  $V_S-I_k$  设定为水准变量,并假定其变化率  $\Delta V_L-I_k$ 、 $\Delta V_S-I_k$

为速率变量,不变的  $O_1$ 、 $O_2$  设为常量,  $t$ 、 $L$ 、 $S$ 、 $R$ 、 $R'$  作为辅助变量,得到 SD 流图,如图 2 所示。其中,  $I_k$  前的速率变量为其对应的变化率,  $V_L-C'_2$  的含义见模型函数关系式。

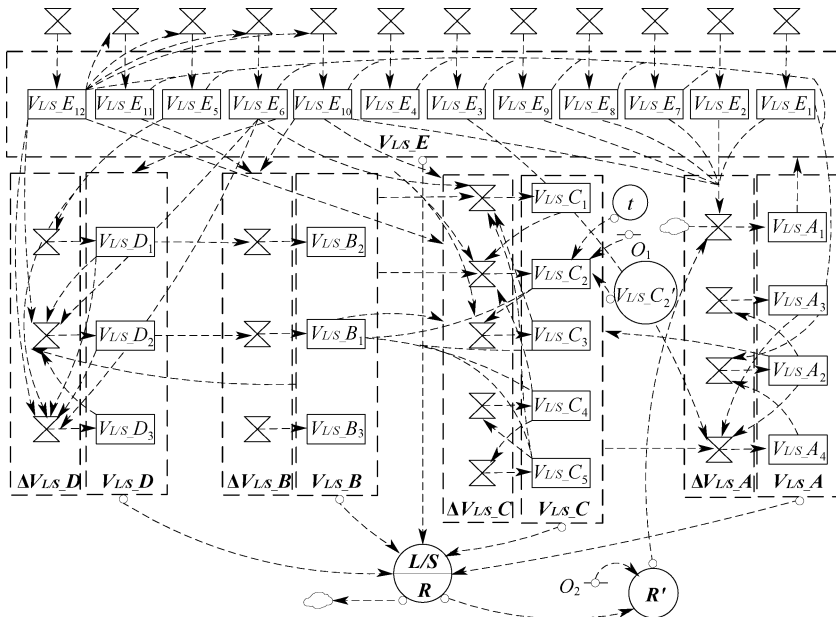


图 2 烟花爆竹生产企业安全风险水平 SD 流图

Fig. 2 SD flow diagram of safety risk level in fireworks production enterprises

### 2.3 模型函数关系式

二级评价指标的变化率对模型函数关系式,即 DYNAMO 方程的确定至关重要。由于安全风险因素间相互关联,通过考量与之关联的各二级评价指标当前的评价值,确定其当前到下一时刻的变化率。在这一过程中,  $A_1$  受到系统总体安全风险水平与理想状态(低风险)之间差值  $R'$  的影响。

鉴于无法获得各事故企业在进行安全评价时的安全生产条件,以调研所得的 100 份安全评价报告数据的平均值作为参考。再获取事故企业从开展安全评价至发生事故期间,平均每天的二级评价指标变化率 ( $\Delta V_{L-I_k}, \Delta V_{S-I_k}$ ) 数据。将  $\Delta V_{L-I_k}, \Delta V_{S-I_k}$  作为因变量,发生事故时与之关联的二级评价指标评价值 ( $V_{L-J_l}, V_{S-J_l}$ ) 和  $R'$  作为自变量,探究其间的函数关系。初步假设  $\Delta V_{L-I_k}(\Delta V_{S-I_k})$  同  $V_{L-J_l}(V_{S-J_l})$  和  $R'$  之间存在线性关系,采用 SPSS 软件进行线性建模分析。然而,分析结果显示,模型的准确性均较差,其应为非线性关系。

因此,对各二级评价指标变化率进行带有 AdamW<sup>[16]</sup> 优化器的 BPNN 非线性建模<sup>[12]</sup>。首先,根据下式标准化处理各二级评价指标变化率(期望输出值),将其映射到 0~1 的范围内。其次,将因变量  $V_{L-J_l}(V_{S-J_l})$  与  $R'$  作为输入层,隐藏层的节点个数设定为一级评价指标的数量 5,进行预训练调整超参数学习率与衰减系数<sup>[12]</sup>。

$$\overline{\Delta V_{L/S-I_k}} = \frac{\Delta V_{L/S-I_k} - \min(\Delta V_{L/S-I_k})}{\max(\Delta V_{L/S-I_k}) - \min(\Delta V_{L/S-I_k})} \quad (1)$$

得到各二级评价指标变化率 DYNAMO 方程的具体函数形式,如下式所示。其中,  $J_l$  为与  $I_k$  相互关联的其余二级评价指标,如图 1 与图 2 所示;  $\mathbf{W}_{(1)L/S-I_k}, \mathbf{W}_{(2)L/S-I_k}, \mathbf{b}_{(1)L/S-I_k}, \mathbf{b}_{(2)L/S-I_k}$  为对应的各二级评价指标变化率 BPNN 模型权重矩阵与偏置向量参数。

$$\overline{\Delta V_{L/S-I_k}} = \text{Sigmoid}(\mathbf{W}_{(2)L/S-I_k} \text{Sigmoid}(\mathbf{W}_{(1)L/S-I_k} (V_{L/S-J_l}, R')^T + \mathbf{b}_{(1)L/S-I_k}) + \mathbf{b}_{(2)L/S-I_k}) \quad (2)$$

$$\Delta V_{L/S-I_k} = \overline{\Delta V_{L/S-I_k}} (\max(\Delta V_{L/S-I_k}) - \min(\Delta V_{L/S-I_k})) + \min(\Delta V_{L/S-I_k}) \quad (3)$$

至此,烟花爆竹生产企业安全风险动态评价模型搭建完成,定义模型的主要 DYNAMO 方程如下:

$$V_{L/S-I_k} \cdot L = \min(1, \max(0, V_{L/S-I_k} \cdot K + \text{DT} \times \Delta V_{L/S-I_k} \cdot KL)) \quad (4)$$

$$L \cdot K = \sum_{j=A}^E \sum_{k=1}^{n_i} w_{I_k} V_{L-I_k} \cdot K \quad (5)$$

$$S \cdot K = \text{Sigmoid}(\mathbf{W}_{(2)} \text{Sigmoid}(\mathbf{W}_{(1)} (V_{S-A_1} \cdot K, \dots, V_{S-E_{12}} \cdot K)^T + \mathbf{b}_{(1)}) + \mathbf{b}_{(2)}) \quad (6)$$

$$R \cdot K = L \cdot K \times S \cdot K \quad (7)$$

$$R' \cdot K = R \cdot K - O_2 \quad (8)$$

风险因素  $C_2$  包括热量积聚与环境温度过高 2 个概念, DYNAMO 方程应考虑环境温度,如下式:

$$V_{L-C_2} \cdot L = \min(0.5, \max(0, V_{L-C_2}' \cdot K + \text{DT} \times \Delta V_{L-C_2} \cdot KL)) + \text{CLIP}(0.5, 0, t \cdot L, O_1) \quad (9)$$

$$V_{L-C_2}' \cdot K = \min(0.5, \max(0, V_{L-C_2}' \cdot J + \text{DT} \times \Delta V_{L-C_2} \cdot JK)) \quad (10)$$

$$V_{L-C_2}' = \text{SWICH}(0, 0.5, G) \quad (11)$$

$$V_{S-C_2} \cdot L = \min(1, \max(0, V_{S-C_2}' \cdot K + \text{DT} \times \Delta V_{S-C_2} \cdot KL)) + \text{CLIP}(1, 0, t \cdot L, O_1) \quad (12)$$

$$V_{S-C_2}' \cdot K = \min(1, \max(0, V_{S-C_2}' \cdot J + \text{DT} \times \Delta V_{S-C_2} \cdot JK)) \quad (13)$$

$$V_{S-C_2}' = \text{SWICH}(0, 1, G) \quad (14)$$

$$O_1 = 35 \quad (15)$$

$$t \cdot K = \text{TABLE}(\text{temp}, K, 0, 1 \ 100, 1) \quad (16)$$

$$\text{temp} = t_0, t_1, \dots, t_{100} \quad (17)$$

式中:DT 为仿真时间步长,取 1 天; CLIP、SWICH 与 TABLE 分别为截取函数、转移函数和表函数<sup>[17]</sup>;  $J, K, L$  分别为上一时刻、当前时刻和下一时刻<sup>[17]</sup>;  $t_i$  为仿真模拟第  $i$  天的最高温度, °C;  $G$  为热量积聚;基于现安全生产许可证有效期为 3 年,仿真时间取 1 100 天。

## 3 安全风险动态评价模型应用

### 3.1 安全风险动态模拟仿真应用

以 Z 公司烟花爆竹重大爆炸事故为例,调研其发生事故前最近一次开展安全现状评价时的安全生产条件,依据已建立的评价指标体系和量化方法,量化处理评价报告中关于各二级评价指标的定性描述,见表 5,未列出二级评价指标的评价值为 0。

表 5 Z 公司开展安全现状评价时的评价指标

Table 5 Quantitative table of evaluation indicators obtained by safety actuality evaluation for enterprise Z

$I_k$	安全生产条件	$V_{L-I_k}$	$V_{S-I_k}$
$A_1$	企业主要负责人与安全管理人员未按相关规定在引线库安装防雷设施,设置合格的黑火药中转防护屏障	0.666 7	0.666 7
$B_1$	引线库未安装防雷设施	0.333 3	0.333 3
$C_5$	黑火药中转防护屏障不符合要求	0.166 7	0.200 0
$E_{10}$	未排查出引线库未安装防雷设施等隐患	0.333 3	0.250 0

由于模型函数关系式包含 BPNN 模型方程与矩阵运算,常用的 Vensim PLE 软件不便构建。因此,将差分方程式的递推逻辑转化为编程语言中的迭代逻辑,在 Python 环境下编程建立动态评价模型。通过输入 Z 公司开展安全现状评价时的安全生产条件,得到安全风险动态模拟结果,如图 3 所示。

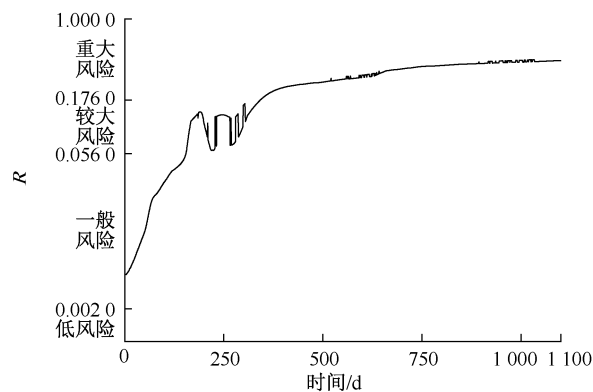


图 3 Z 公司安全风险动态模拟结果

Fig. 3 Dynamic simulation results of the safety risk of enterprise Z

由图 3 可知:开展安全现状评价时,Z 公司处于一般安全风险状态。若不加以控制,据模拟预测,大

约 5 个月后,Z 公司的安全风险将升级到较大风险,而 343 天后将演进为重大风险。其中,仿真时间为 180~300 天时正值夏季高温,35℃ 以上高温的出现致使二级评价指标  $C_2$  的评价值发生突变。在这个阶段,由于系统整体的安全风险水平较低,因此,更容易受到单一评价指标变化的影响,导致安全风险水平在这段时间内出现频繁的波动。

2019 年 12 月 4 日,Z 公司发生一起重大爆炸事故,距离此次安全现状评价的时间间隔为 363 天。这一时间跨度与该公司安全风险水平预测达到重大风险状态的时间仅相差 20 天,进一步证实构建的烟花爆竹生产企业安全风险动态评价模型在安全风险仿真方面具有重要的参考价值。

### 3.2 安全风险控制方案决策应用

以 Z 公司发生事故时的安全生产条件为基础,提出针对性的安全风险管控措施。通过模拟仿真不同方案,深入探讨烟花爆竹生产企业安全风险动态评价模型在风险控制方案决策中的实际应用。同理,将事故调查报告中对事故原因的定性描述转化为具体的评价值,见表 6。

表 6 Z 公司发生事故时的评价指标

Table 6 Quantitative table of evaluation indicators for enterprise Z in the event of the accident

$I_k$	安全生产条件	$V_{L-I_k}$	$V_{S-I_k}$
$A_1$	法人代表未尽职,实际负责人无安全管理资质;专职安全员未专职从事安全管理工作;12 号工房管理人员无证参与生产管理工作	1	1
$A_2$	员工缺乏基本安全意识和应急避险技能;生产成品没有及时转运;员工搬出实底塑料筐时,筐内“彩雷”药饼与残留药物摩擦引发火灾	0.666 7	0.600 0
$A_3$	发生爆炸的 11 号工房定员 10 人,实有 15 人	0.333 3	0.500 0
$A_4$	违规使用超龄员工从事 1.1 级工序作业	0.500 0	0.250 0
$C_5$	事发工房成品、半成品堵塞通道;违规搭建的建筑物妨碍员工逃生疏散;组织员工在 1.3 级工房从事 1.1 级工序裸露药物产品作业	0.500 0	0.600 0
$D_1$	—	0	0
$D_2$	员工搬出实底塑料筐时,筐内“彩雷”药饼与残留药物摩擦引发火灾	0.500 0	0.500 0
$D_3$	工房成品和半成品药量超量	0.333 3	0.500 0
$E_1$	对从业人员的安全生产教育培训组织不力,新员工未经培训考核就上岗作业	1	1
$E_2$	法定代表人因年满 60 岁,未延期办理安全生产管理资格证;实际负责人和 12 号工房管理人员无证参与管理工作	1	0.750 0
$E_7$	C 厂区长期独立生产经营	0.333 3	0.333 3
$E_{10}$	企业风险管控和隐患排查治理不足,对其超药量等违法行为视而不见;民警检查 C 厂区时,发现其引线中转库存超限量约 4 倍,下达了立即整改指令,但未及时采取有效措施消除隐患	0.666 7	0.500 0
$E_{12}$	管理人员与从业人员上班时间不一致;工区未加强包装工序中除去残留药物粉尘的安全管理;超许可范围接单生产,包括“彩雷”等不在许可范围内的产品	0.500 0	0.500 0

1) 关键因素决策。权重与敏感性分析结果表明<sup>[12]</sup>:在烟花爆竹生产企业的安全风险管理中, $A_1$ 、

$A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $B_1$ 、 $C_5$ 、 $E_1$ 、 $E_{12}$  这 8 个安全风险因素扮演着重要的角色,且除  $B_1$  外均为该起事故的致因因

素。其中,  $A_2$  与  $C_5$  在事故发生可能性与后果严重程度评价模型中分别表现出最大的权重和最高的敏感度, 而  $E_1$  与  $E_{12}$  在 2 个维度都展现出显著的关键性。

因此, 针对这 8 个安全风险因素, 特别是  $A_2$ 、 $C_5$ 、 $E_1$  与  $E_{12}$ , 制定安全风险控制方案, 见表 7。

表 7 安全风险控制方案

Table 7 Safety risk control schemes

$I_k$	方案 a	方案 b	方案 c	方案 d
$A_1$	—	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$
$A_2$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$
$A_3$	0	—	0	0
$A_4$	0	0	—	0
$B_1$	0	0	0	—
$C_5$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$
$E_1$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$	初值 - $\frac{\text{初值}}{30} \times \text{DT}$
$E_{12}$	0	0	0	0

在原 DYNAMO 方程的基础上, 将对应二级评价指标的方程改写为表 7 中相应部分(初值不变), 以表征对其采取的管控措施。其中,  $A_3$ 、 $A_4$ 、 $B_1$  以及  $E_{12}$  可一次整改或控制到位, 如将超龄员工调离特种作业岗位。而将  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $C_5$ 、 $E_1$  的整改期限设为 1 个月(30 天), 如存在违规搭建的建筑物, 拆除需一定时间。不同方案的安全风险控制模拟仿真结果如图 4 所示。

手工操作。因此, 员工的违规操作是导致烟花爆竹生产安全事故频发以及事故扩大造成人员伤亡和财产损失的关键因素。因此, 方案 c 在安全风险控制方面的效果最不理想, 最早出现安全风险逆增长的情况, 而方案 d 的效果也相对较差。

$A_1$  对于企业的安全管理质量具有重要的影响。事实上, 管理因素往往是事故发生的根本原因, 也是许多事故反复发生的关键因素, 对人员、设备、材料和环境 4 个因素均产生直接的正反馈影响。因此, 在方案 a 中, 即使其他因素得到改善, 其后期所面临的安全风险将急剧增加。

综上所述, 对于 Z 公司, 首要任务是针对  $A_2$ 、 $C_5$ 、 $E_1$  与  $E_{12}$  这 4 个核心因素实施有效的控制措施。在此基础上, 结合企业安全投入预算的实际情况, 应依次并优先消除  $A_4$ 、 $A_1$ 、 $B_1$  与  $A_3$  这 4 个风险因素。

2) 整改期限决策。受人力、物力等资源的限制, 难以对所有措施都进行全力投入。延迟是系统对输入作出反应并产生输出的时间间隔, 是社会复杂反馈系统高度非线性的重要原因。在烟花爆竹生产企业的安全风险系统中, 不同因素的作用机制和延迟时间不同。因此, 整改期限的决策也是安全风险管理中重要的一环。假定 Z 公司的安全投入预算为一般水平, 选定方案 b 开展隐患整改工作。 $A_4$ 、 $B_1$  与  $E_{12}$  同样采取一次控制或整改到位的方式, 设定 4 种方案, 即 b1、b2、b3、b4, 依次将  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $C_5$  与  $E_1$  的整改期限调整为 10 天。不同方案的安全风险控制模拟仿真结果如图 5 所示。

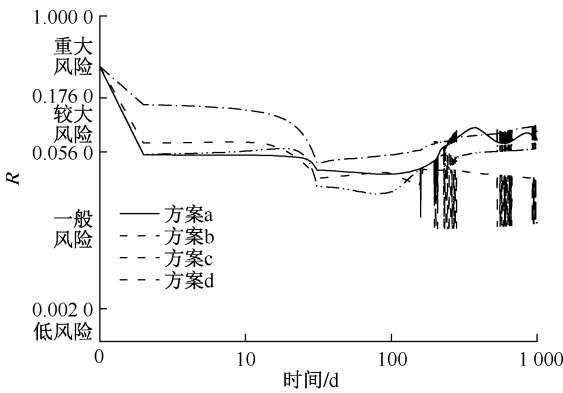


图 4 不同安全风险控制方案下 Z 公司的安全风险变化趋势

Fig. 4 Trend of safety risk in enterprise Z under different safety risk control schemes

在仿真过程的后期阶段, 安全风险水平相对较低, 在夏季出现明显的波动现象。图 4 中, 方案 b 在有效管理和控制安全风险方面表现出色。根据深入分析事故成因, 人的不安全行为和物质的不稳定状态是事故发生的直接诱因。鉴于烟火药对摩擦和机械振动异常敏感<sup>[18]</sup>, 烟花爆竹的生产过程大多依赖

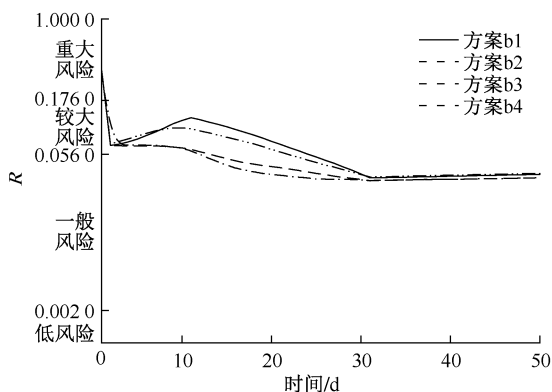


图5 不同整改期限方案下Z公司的安全风险变化趋势

Fig. 5 Trend of safety risk in enterprise Z under different rectification deadline schemes

由图5可知:方案b3对烟花爆竹生产企业安全风险水平的影响最为直接且迅速,方案b2次之。因此,应结合企业安全投入情况,优先并有序地控制与改进总体布局情况、从业人员安全素质水平、安全教育培训情况以及三类管理人员的安全责任意识水平。

烟花爆竹生产企业安全风险系统的负反馈回路中多存在 $A_1$ 与 $E_1$ 安全风险因素。当安全风险水平降低时,员工可能会产生侥幸心理和懈怠情绪。另一方面,为迅速控制这2项安全风险因素,企业会采取严苛的奖惩制度或频繁的安全教育培训等措施。然而,这些措施有可能引发员工的抵触情绪和逆反心理,导致安全风险水平在方案b1与方案b4实施后的一段时间内出现逆增长现象。因此,企业在制

定安全管理策略时,应充分考虑员工的心理变化和和行为反应,避免适得其反。

## 4 结论

1) 实例分析结果显示,事故企业安全风险水平达到重大风险状态的预测时间节点与事故发生时间基本一致,事故后果严重度评价结果与实际相吻合,验证了烟花爆竹生产企业安全风险动态评价模型的科学性与实用性。

2) 不同安全风险控制方案下Z公司的安全风险模拟结果显示,在烟花爆竹生产过程中,管理和人员因素对安全风险水平有显著影响,且这种影响具有较长的滞后性,短期内难以显著改善。因此,为有效降低烟花爆竹生产企业的安全风险,必须坚持长期、稳定且持续的安全管理工作。

3) 在实际工作中,人员流动、设备升级和天气预报局限等因素可能影响中长期安全风险模拟结果的准确性。而频繁的安全风险评估可能干扰企业的正常运营。未来研究可结合图像识别、物联网等技术,自动识别和分析生产环境中的安全风险,量化评价指标,降低成本并提高评价的及时性和有效性。

4) 企业在规划安全管理策略时,不仅要关注安全风险的控制成效,更要全面考量人力与物力资源的投入成本。未来的研究可尝试运用成本效益分析等科学方法,量化分析安全管理措施涉及的人力与物力成本,并将其整合进动态评价模型中,以制定更加周全的安全管理方案。

## 参考文献

- [1] CHEN Weichun, LIN Yuhao, OUYANG Shinmei, et al. Effect of relative humidity on the emission height and reaction force of single-tube fireworks[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2023, 148(11): 4 997-5 007.
- [2] BILLOCK R M, CHOUNTHIRATH T, SMITH G A. Pediatric firework-related injuries presenting to united states emergency departments, 1990-2014[J]. Clinical Pediatrics, 2016, 56(6): 535-544.
- [3] 安全生产许可证条例[EB/OL]. (2015-03-25). [https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/flfg/art/2020/art\\_e7578da4b6694da8b981041bf2ad4830.html](https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/flfg/art/2020/art_e7578da4b6694da8b981041bf2ad4830.html).
- [4] MAHADEVAN S, SIVAPIRAKASAM S, SWAMINATHAN G. Accident data analysis and hazard assessment in fireworks manufacture[J]. Science and Technology of Energetic Materials, 2008, 69: 161-168.
- [5] SIVAPIRAKASAM S P, SURIANARAYANAN M, SWAMINATHAN G. Hazard assessment for the safe storage, manufacturing and handling of flash compositions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(2): 254-256.
- [6] 谌倩. 基于AHP的长沙烟花爆竹企业生产安全水平评价及政府监管优化研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2021. CHEN Qian. Research on evaluation of production safety level of Changsha fireworks and firecrackers enterprises and optimization of government supervision based on AHP [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2021.

- [7] AJITH S, ARUMUGAPRABU V, AJITH V, et al. Hazard identification and risk assessment in firework industry[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 1 083-1 085.
- [8] ANANDHAN M, PRABAHARAN T, MUHAIDHEEN M, et al. Fire safety assessment in manufacturing of fireworks products[J]. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, 9: 1 336-1 345.
- [9] NALLATHAMBI I, RAMAR R, PUSTOKHIN D A, et al. Prediction of influencing atmospheric conditions for explosion Avoidance in fireworks manufacturing industry: a network approach[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 304: DOI: 10.1016/J.ENVPOL.2022.119182.
- [10] 席永涛, 张靓, 付姗姗, 等. 基于 SFN-SD 的北极冰区船舶航行风险传递路径研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(4): 52-60.  
XI Yongtao, ZHANG Liang, FU Shanshan, et al. Research on risk transfer path of ship navigation in Arctic waters based on SFN and SD [J]. *China Safety Science Journal*, 2023,33(4): 52-60.
- [11] 江新, 张腾飞, 陈婧, 等. 复杂系统视角下洞室施工人员安全认知仿真研究[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(2): 22-30.  
JIANG Xin, ZHANG Tengfei, CHEN Jing, et al. Numerical study on safety cognition of cavern constructors from perspective of complex system [J]. *China Safety Science Journal*, 2024,34(2): 22-30.
- [12] WANG Feiyue, WANG Xinyu, LIU Dingli, et al. Comprehensive safety risk evaluation of fireworks production enterprises using the frequency-based ANP and BPNN[J]. *Heliyon*, 2023, 9(11): DOI:10.1016/J.HELİYON.2023.E21724.
- [13] 雷长群. 安全生产领域基本概念辨析及双重预防机制研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2017,13(2): 17-21.  
LEI Changqun. Study on basic concepts discrimination and double prevention mechanism in the field of work safety [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017,13(2): 17-21.
- [14] 卞斌彬, 黄玉庆, 刘志坚, 等. 基于双重预防机制的安全评价指标体系构建[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(增 1): 45-50.  
BIAN Binbin, HUANG Yuqing, LIU Zhijian, et al. Construction of safety evaluation index system based on double prevention mechanism [J]. *China Safety Science Journal*, 2022,32(S1): 45-50.
- [15] 杨慧敏, 石琴, 陈一锴, 等. 基于混合聚类的农村公路单车事故影响因素分析[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(8): 129-136.  
YANG Huimin, SHI Qin, CHEN Yikai, et al. Influencing factors for single vehicle accidents on rural highways based on hybrid clustering approach [J]. *China Safety Science Journal*, 2020,30(8): 129-136.
- [16] LOSHCHILOV I, HUTTER F. Decoupled weight decay regularization [C]. *International Conference on Learning Representations*, 2017: DOI:10.48550/arXiv.1711.05101.
- [17] 汪应洛. 系统工程(第五版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019:80-100.
- [18] 刘木森, 谷群远. 烟火药剂的机械撞击敏感度试验不确定度分析[J]. *流体测量与控制*, 2022,3(2): 49-51.  
LIU Musen, GU Qunyuan. Uncertainty analysis of mechanical impact sensitivity test of pyrotechnic agents [J]. *Fluid Measurement & Control*, 2022,3(2): 49-51.



**作者简介:** 王飞跃 (1977—),男,重庆人,博士,教授,主要从事城市公共安全与应急管理等方面的研究。E-mail: wfyhn@163.com。