

中文引用格式:王红力,杨鑫刚. 基于安全控制结构模型的高校实验室安全风险动态评估[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(8):61-68.

英文引用格式:WANG Hongli, YANG Xingang. Safety risk dynamic assessment in university laboratories based on safety control structure model[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8):61-68.

基于安全控制结构模型的高校实验室 安全风险动态评估*

王红力¹讲师, 杨鑫刚^{**2}副教授

(1 中国劳动关系学院 安全工程学院, 北京 100048; 2 中国劳动关系学院 劳动教育学院, 北京 100048)

中图分类号: X913.4 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.08.1867

基金项目: 中央高校基本科研业务费(22ZYJS015); 北京市社会科学基金决策咨询项目资助(22JCC123)。

【摘要】 为有效评估高校实验室安全风险状态和优化动态安全管理对策, 提出一种基于多层安全控制结构模型的高校实验室安全动态评估方法。首先, 建立一种多层安全控制结构模型, 以确定高校实验室火灾爆炸事故的致因因素和控制缺陷; 在此基础上, 提出一种基于系统理论的事故模型和贝叶斯网络(BN)相结合的安全动态反馈评价方法, 推断计算出高校实验室安全风险状态的概率、分析影响事故的风险因素, 识别出高校实验室安全中的关键风险因素。研究表明: 基于安全控制结构模型的风险动态评估方法涵盖了传统方法识别的所有风险, 同时还能够发现潜在风险; 对危险化学品的操作不正确, 试验过程违反操作规程以及电气线路出现老化、短路或缺陷等因素是影响高校实验室安全风险的关键风险因素。

【关键词】 安全控制结构模型; 高校实验室; 安全风险; 不安全控制行为(UCA); 动态评估

Safety risk dynamic assessment in university laboratories based on safety control structure model

WANG Hongli¹, YANG Xingang²

(1 School of Safety Engineering, China University of Labor Relations, Beijing 100048, China;

2 School of Labor Education, China University of Labor Relations, Beijing 100048, China)

Abstract: To effectively evaluate the safety risk status and optimize safety management strategies in university laboratories, a dynamic safety assessment method was proposed based on a multi-layered safety control structure model. Firstly, a multi-layer safety control structure model was developed to identify the causal factors and control deficiencies of fire and explosion accidents in the university laboratory. Then, a safety dynamic feedback evaluation method was developed integrating an accident model based on system theory and Bayesian networks. Finally, the proposed evaluation model was used to determine the risk probability, analyze risk factors affecting safety incidents, and identify key risk factors in university laboratory safety. The results indicated that the proposed evaluation method based on the safety control structure model covered all risks identified by traditional methods and identified potential risks.

* 文章编号: 1003-3033(2024)08-0061-08; 收稿日期: 2024-03-20; 修稿日期: 2024-06-23

** 通信作者: 杨鑫刚(1982—), 男, 河北邯郸人, 博士, 副教授, 主要从事安全科学与工程、劳动教育等方面的研究。E-mail: xingang2005@126.com。

Furthermore, the incorrect operation of hazardous chemicals, violation of operation procedures during the experiment, and the aging, short circuits, or defects in electrical lines were key risk factors affecting laboratory safety risks of universities.

Keywords: safety control structure model; university laboratory; safety risk; unsafe control action; dynamic assessment

0 引言

高等教育机构中实验室安全是确保学术研究和教育活动顺利进行的关键环节。随着实验室在学术研究中的不断发展和突破性创新,试验过程中的复杂不确定性因素也不断增加,对安全管理的需求也日益增长。统计发现,实验室火灾爆炸事故是实验室主要的安全事故类型^[1-4]。鉴于此,强化风险动态评估和管理措施,确保实验室操作的安全性和合规性,是预防此类事故的关键。因此,全面分析评估、预防控制高校实验室安全风险事故的发生显得尤为重要。

对于高校实验室安全,学术界进行了广泛研究,OMIDVARI等^[5]基于经验数据定量评估了高校实验室的火灾风险。PENG Tong等^[6]提出了一种实验室安全管理评价方法,发现了实验室管理过程中的潜在漏洞操作。杨立成等^[7]从人、物、管理3方面建立了高校实验室的轨迹交叉事故模型,深入分析了实验室事故发生的原因,并针对高校实验室安全事故防范提出有针对性的措施。郭海军等^[8]基于“2-4”模型法,研究了高校危化品实验室的事故发生原因,并从个人层面和组织层面提出改进建议。安宇等^[1]构建了高校实验室不安全行为的模糊贝叶斯网络(Fuzzy Bayesian Network, FBN)模型,进而分析了人的不安全行为的风险因素。然而,当前针对高校实验室安全风险分析的研究主要侧重于基于统计数据的定性分析,如传统的安全风险分析技术(失效模式和影响分析、故障树分析^[9]等),这些方法有其局限性,只能进行单一故障识别,往往会缺失导致致命风险的事件,即分析不够充分;并且分析结果完全只取决于分析人员的技能,因此,需要对其进行深入研究。基于系统理论事故模型与过程(System-Theoretic Accident Model and Process, STAMP)能够发现许多传统方法没有找到的风险事件。然而,STAMP没有定量分析能力。

为克服这些限制,笔者拟提出一种基于安全控制结构模型的高校实验室安全风险动态评估方法。通过以高校实验室火灾爆炸事故为例,构建高校实验室

火灾的控制关联模型,量化风险因素之间的因果关系和风险传递机制,全面分析和评估高校实验室安全风险,提出有针对性的高校实验室火灾事故的控制措施,以期优化高校实验室安全管理提供借鉴。

1 多层安全控制结构模型的安全风险动态评估

提出一种基于安全控制结构模型的高校实验室安全风险动态评估方法,包括2个阶段:

1) 通过STAMP进行风险识别和场景分析^[10],确定不安全控制行为(Unsafe Control Action, UCA),构建高校实验室安全控制结构模型。安全控制结构是第2阶段所建立的FBN^[11]结构的基础。在复杂系统中,由初始事件触发的级联失效可能最终导致灾难性事故的发生。

2) 使用FBN进行风险动态模型的建模和评估。

利用贝叶斯网络(Bayesian Network, BN),将风险演化过程转化为网络计算,从而实现安全控制结构模型的量化分析。图1显示了详细的方法框架,包括阶段、步骤及其关系。

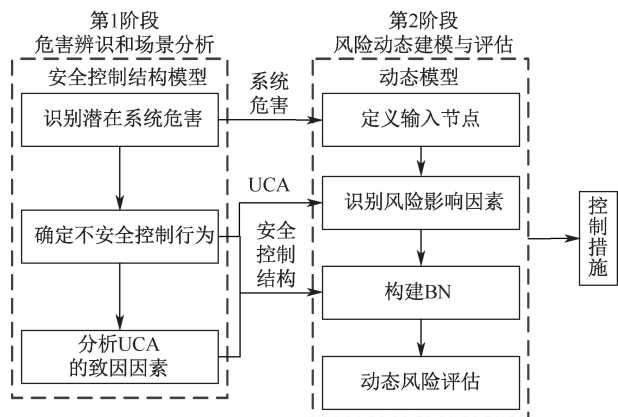


图1 基于多层安全控制结构模型的风险动态评估框架

Fig. 1 Dynamic risk analysis framework based on multi-layer safety control structure model

2 高校实验室的危害辨识与分析

基于事故致因STAMP模型,以高校实验室火灾

爆炸事故为对象,通过调研梳理 2003—2022 年 95 起高校实验室火灾爆炸事故致因,构建高校实验室火灾爆炸致因 STAMP 模型,并识别可能的危害和控制缺陷,全面查找影响高校实验室火灾爆炸事故的可能风险因素。

2.1 识别潜在的系统危害

在分析 STAMP 安全前,首要考虑的是明确分析目标。对于高校实验室的安全风险而言,旨在维护实验室的安全运作,并保障师生的人身安全。随之确定系统级事故,即导致系统产生损失的意外事件。文中确定系统级事故为高校实验室极易发生的系统级事故—火灾爆炸(A-1)。

通过分析近 20 年高校实验室极易发生的火灾爆炸事故致因,95 起高校实验室火灾爆炸事故中有 70 起事故涉及到危险化学品。因此,根据调研分析结果以及危险化学品目录,文中高校实验室火灾爆炸事故的系统危害,主要包括 4 种系统危害:着火性物质着火、易燃性物质火灾、爆炸性物质爆炸和电气设备设施火灾,见表 1。

表 1 高校实验室火灾爆炸系统级危险

Table 1 System-level hazard in university laboratory

编号	危害	相关事故
H-1	着火性物质* 火灾	A-1
H-2	易燃性物质火灾	
H-3	爆炸性物质** 爆炸	
H-4	电气设备设施火灾	

注:* 着火性物质包括:强氧化性物质、强酸性物质、低温着火性物质、自燃性物质、禁水性物质;** 爆炸性物质包括:分解爆炸性物质、爆炸品、可燃性气体。

2.2 建立多层安全控制结构模型

分层安全控制结构,包括高层制定的约束要求和低层反馈回路,更直观地表达出系统各层级的关系。针对高校实验室,采用分层安全控制结构描述火灾爆炸事故,受控过程包括系统级危害以及它们之间的相互作用。受控系统的安全约束必须由控制结构/控制回路强制执行。包括 3 个层次的安全控制结构:微控制层、中间控制层和宏观控制层。

图 2 展示了受控系统 3 个层次的安全控制结构模型。社会系统中的微控制包括高校内部的人员(如试验的学生、试验指导老师、学院和实验室安全领导小组成员等)。技术系统中的微控制层包括实验室中的危险化学品、安全监测设备、个人防护装备等。社会系统中作为中间控制层的组织因素涉及当地政府及其机构、学校和社会组织等。技术系统中

作为中间控制层的信息物理因素涉及安全设计、安全维护、安全操作和安全发展。社会系统中作为宏观控制层的社会学因素包括文化、法律、规章制度、政策等。而技术系统中作为宏观控制层的技术因素包括通信、计算机等。如实验室安全领导小组负责各项检查事项和定期监督工作。在宏观层面分析中,社会因素包括法律(如法律法规、标准)、政策(如学校政策)、组织文化(如安全文化)等等。再如,学校的安全管理受其安全文化的控制。因此,社会系统中的中间控制层和宏观控制层可以分别视为个体因素的组织背景和社会背景。

2.3 确定 UCA

为保障实验室安全运行,必须确保系统中各个部分都能够有效地执行安全措施。要预防事故发生,关键在于理解高校实验室在不同控制层面上的安全约束失效的原因。针对高校实验室火灾爆炸事故中每个控制层级的,文中确定了每个控制层级中违反安全约束的 UCA 及其可能发生的危险,如图 3 所示。

2.4 高校实验室火灾爆炸风险因素

根据 STAMP 的分析结果,将各控制层级的 UCA,按照行为者活动、物理过程、设备设施及周边以及管理控制 4 类整理划分影响高校实验室火灾爆炸的安全风险因素。

1) 行为者活动因素。行动者活动因素,指的是影响实验室工作人员在处理危险化学品和进行相关工作时决策和行为的各种因素。在高校实验室这个特定环境中,影响其火灾爆炸的行动者活动因素包括:违规将危险化学品堆放于实验室 M_1 、试验过程违反操作规程 M_2 、试验者个人能力不足 M_3 、对危险化学品的操作不正确 M_4 、发现隐患不及时处理 M_5 、试验后处理不妥当 M_6 、未佩戴或正确使用防护用具 M_7 以及用电不当或错误 M_8 。

2) 物理过程因素。物理过程因素,通常是指与实验室环境中处理危险化学品时涉及的物理性质和过程有关的因素。这些因素对于确保实验室工作人员的安全以及防止化学品泄漏或事故至关重要。影响高校实验室火灾爆炸的物理过程因素有:危险化学品储存和管理不当 P_1 、燃烧反应或化学反应失控 P_2 、试验过程中周边有易燃可燃物质 P_3 、使用着火性、易燃性、爆炸性物质时附近有火源或高温 P_4 、使用易燃性物质或可燃性气体时逸入空气 P_5 、爆炸性物质处理不正确 P_6 以及组织的应急不及 P_7 。

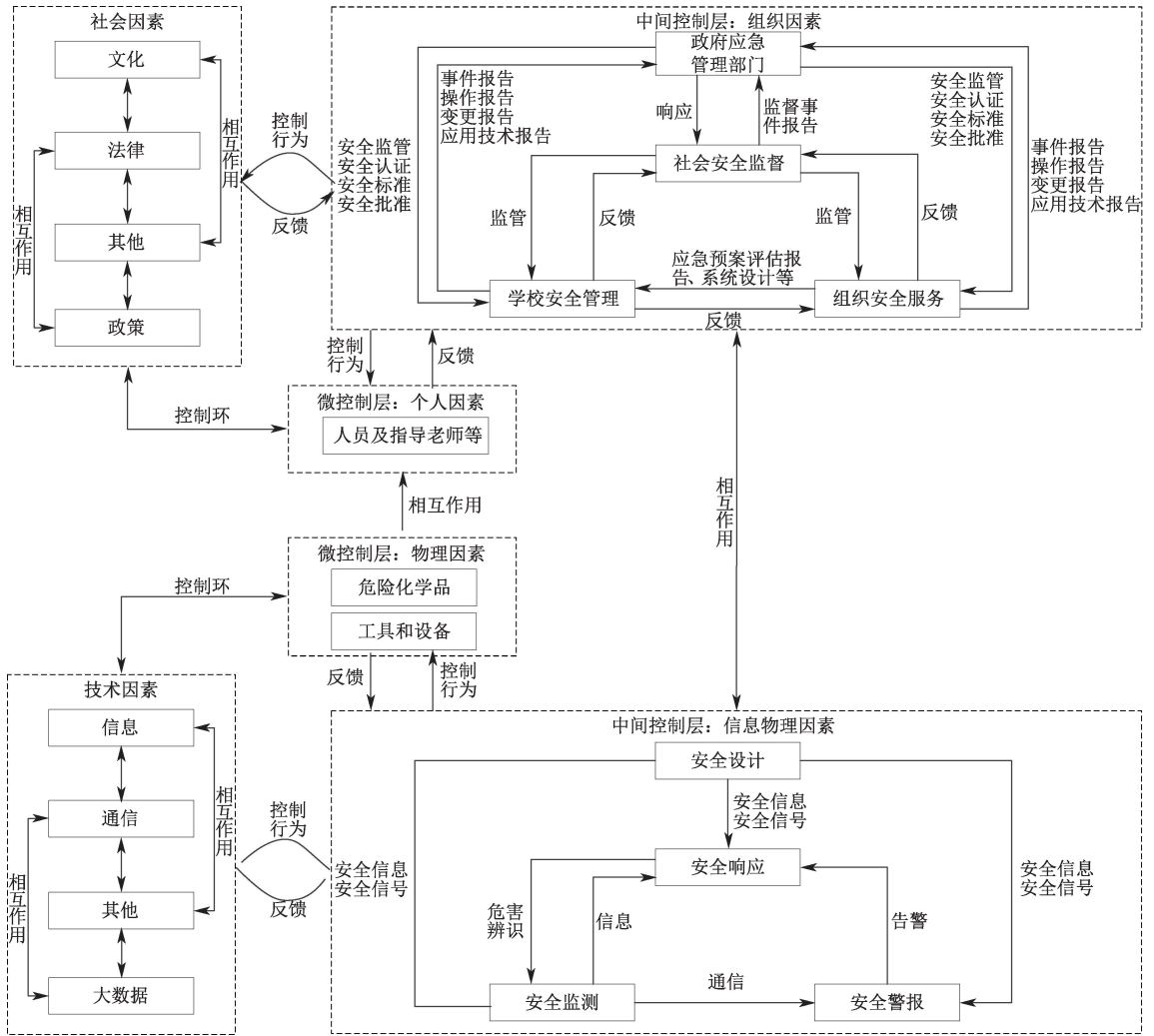


图2 3层次安全控制结构

Fig. 2 Three-level safety control structure

3) 设备设施及周边因素。设备设施及周边因素是指与危险化学品实验室中使用的设备和设施及周边环境有关的各种因素。这些因素对于确保实验室工作人员的安全以及有效执行化学试验和操作非常重要。影响高校实验室火灾爆炸的设备设施因素有:实验室布局不合理 B_1 、个体防护用具不合格 B_2 、长时间运转 B_3 、压力容器、反应釜陈旧漏气 B_4 、电气线路出现老化、短路或缺陷 B_5 、仪器设备长备故障或失效 B_6 、通风系统没有、失效 B_7 、电气设安全防护装置没有、失效或缺陷 B_8 、消防设施不合格 B_9 、安全疏散设置不合理 B_{10} 以及温度、湿度不符合试验条件 B_{11} 。

4) 管理控制因素。管理控制因素指的是在高校实验室中采取的管理和控制措施,以确保实验室操作的安全性和有效性。这些因素涉及管理层面的规章制度、政策、程序和实践,旨在规范实验室的运

作并最大程度地减少意外风险。影响高校实验室火灾爆炸的管理控制因素有:安全操作规程有误(不足) C_1 、安全管理制度不完善 C_2 、安全教育培训缺失、不到位 C_3 、实验室安全监督和督导无效 C_4 、未制定有效的应急预案 C_5 。

3 基于BN的动态风险模型与评估

3.1 构建BN拓扑结构

分析高校实验室火灾爆炸的危害辨识以及安全风险因素的结果,得到高校实验室火灾爆炸风险对应的BN模型,如图4所示。

3.2 确定节点风险概率

由于缺乏关于高校实验室火灾爆炸相关参数数据,引入模糊理论与BN相结合,确定各节点的发生概率。为使本模型的评估结果更加准确,通过多个专家在事故样本基础上辅助评价高校实验室火灾爆



图 3 各控制层级的UCA
Fig. 3 UCA for each level

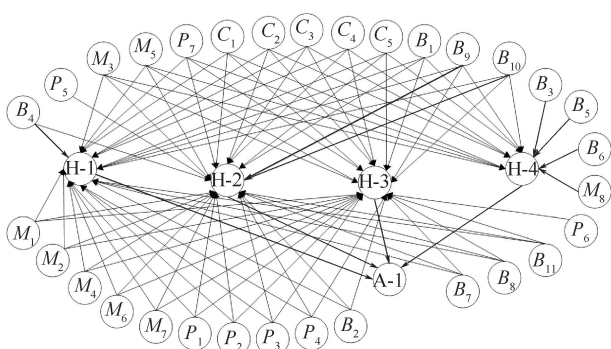


图 4 高校实验室火灾爆炸风险 BN 模型
Fig. 4 BN model of fire and explosion risk in university laboratories

炸风险因素,将每个节点的状态分为很低、低、偏低、中等、偏高、高和很高 7 个等级,具体模糊数表现形

式见表 2。

表 2 模糊数形式

Table 2 Fuzzy number forms

状态等级	模糊数形式
很低	(0, 0.025, 0.05)
低	(0.05, 0.15, 0.25)
偏低	(0.25, 0.35, 0.45)
中等	(0.45, 0.5, 0.55)
偏高	(0.55, 0.65, 0.75)
高	(0.75, 0.8, 0.85)
很高	(0.85, 0.925, 1)

为保证专家意见的一致性,采用相似性聚合方法来整合每位专家的模糊意见^[11]。专家 E_m 和专家 E_n 的意见分别表示为 $\tilde{E}_m(a_1, a_2, a_3)$ 和 $\tilde{E}_n(b_1, b_2,$

b_3), 专家 m 对专家 n 的相似函数:

$$S_{mn} = 1 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 |a_i - b_i| \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中: S_{mn} 为专家 m 对专家 n 的意见相似度; a_i 和 b_i 分别为每位专家意见中第 i 个模糊数, 结果在 0~1 之间。

专家意见平均一致度 \bar{A}_m 计算见下式:

$$\bar{A}_m = \frac{1}{M-1} \sum_{\substack{i=1 \\ m \neq n}}^M S_{mn} \quad (2)$$

式中 M 为专家人数。

专家意见相对一致度 R_m 计算见下式:

$$R_m = \frac{\bar{A}_m}{\sum_{k=1}^M \bar{A}_k} \quad (3)$$

计算专家一致性系数 U_m 见下式:

$$U_m = \beta \cdot \omega_m + (1 - \beta) R_m \quad (4)$$

式中: ω_m 为专家的权重, 按照职称、年龄、经验 3 个标准来计算; β 为 ω_m 比 R_m 的相对重要程度, 取 0.5。

专家意见的汇总值 \tilde{E}_{AG} 计算见下式:

$$\tilde{E}_{AG} = U_1 \times \tilde{E}_1 + U_2 \times \tilde{E}_2 + \dots + U_M \times \tilde{E}_M \quad (5)$$

采用均值面积法进行去模糊化处理, 模糊化的专家意见值 d 见下式:

$$d = \frac{a_1 + 2a_2 + a_3}{4} \quad (6)$$

式中: a_1 为专家 E_m 的第 1 个模糊数; a_2 为专家 E_m 的第 2 个模糊数; a_3 为专家 E_m 的第 3 个模糊数。

根据专家调查法收集到 7 位专家的模糊意见, 由式(1)~式(6)计算得出各节点的先验概率, 见表 3。

表 3 各节点的专家判断、模糊概率

Table 3 Expert judgment, fuzzy probabilities of each node

符号	专家						模糊概率
	1	2	3	4	5	6	
M_1	偏高	中等	高	偏高	偏高	中等	0.154 7
M_2	中等	高	中等	高	偏低	中等	0.129 1
M_3	低	低	偏低	低	很低	很低	0.084 8
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
C_3	很低	低	低	很低	很低	很低	0.013 1
C_4	低	偏低	很低	很低	低	低	0.086 9
C_5	很低	很低	很低	低	低	低	0.017 8

3.3 双向推理分析

1) 正向因果推理。当已知根节点的先验概率

和样本值时, 通过利用 BN 的正向推理, 得到系统叶节点的故障率或故障概率^[11]。假设已知根节点 $\{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}\}$ 的先验概率, 可计算出叶节点 $\{x_n\}$ 发生故障 (即 $x_n = 1$) 的概率为:

$$P(x_n = 1) = \sum_{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}} P(x_1, x_2, \dots, x_n = 1) = \sum_{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}} \prod_{i=1}^{n-1} P(x_n = 1 | x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) P(x_i | x_1, x_2, \dots, x_{i-1}) = \sum_{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}} \prod_{i=1}^{n-1} P(x_n = 1 | A(x_n)) P(x_i | A(x_i)) \quad (7)$$

利用 GeNIe4.0 推断高校实验室火灾爆炸风险的概率。基于 3.2 节得到的高校实验室火灾爆炸事故中各节点发生的模糊概率, 通过应用式(7)综合计算得出, 高校实验室火灾爆炸风险发生的概率为 0.147 8, 较高校实验室其他风险事件发生的比例^[2-3]高很多。由此可见: 高校实验室发生火灾爆炸的潜在安全风险是相当高的。所构建的 BN 模型能够提供一种动态的分析模型, 用于预警高校实验室可能发生的火灾爆炸风险。各控制层可以利用日常的安全检查数据来驱动这个模型, 进行风险评估, 从而更方便地采取适当的安全措施。

2) 反向诊断推理。通过诊断推理, 主要依据 BN 计算来调查给定结果的各种概率。这种方法具备反向推理分析的能力, 能够即时识别并暴露导致事故发生的关键因素, 从而实现诊断。在已知 $P(X) = 1$ 的条件下, 通过 GeNIe4.0 计算得到各节点的后验概率, 具体结果如图 5 所示。

根据分析结果, 从图 5 看出, 对危险化学品的操作不正确 M_4 的后验概率最高, 其次是电气线路出现老化、短路或缺陷 B_5 , 说明这些因素引起高校实验室火灾爆炸风险的可能性最大。按照此流程, 持续更新节点的故障概率, 并将这些数据作为最新证据输入至 BN 模型, 用以执行后续的风险评估过程。这一过程将反复进行, 直至高校实验室的安全风险得到有效的管控。

3.4 敏感性分析

通过实施敏感性分析, 可评估 BN 内任一变量对其他变量波动的影响强度, 进而在 BN 模型中识别出具有决定性影响的风险要素。通过 GeNIe4.0 对安全风险因素进行敏感性分析如图 6 所示。

从图 6 看出, BN 模型内各个节点的敏感性被划分为 4 个不同级别, 其中, 高敏感为试验过程违反操作规程 M_2 ; 较敏感的是对危险化学品的操作不正确

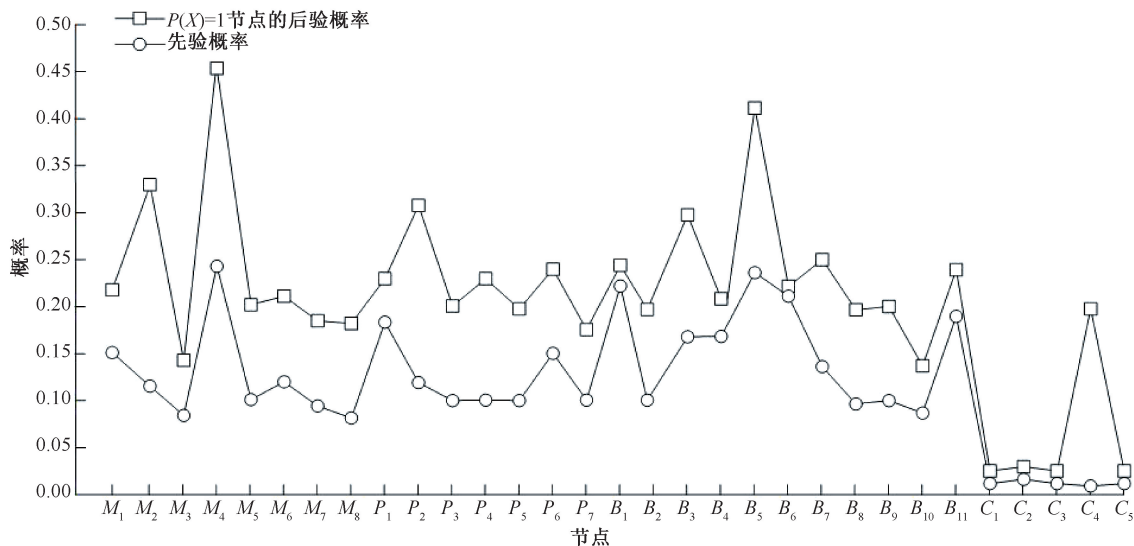


图 5 各节点的先验概率和后验概率

Fig. 5 Prior and posterior probabilities of each node

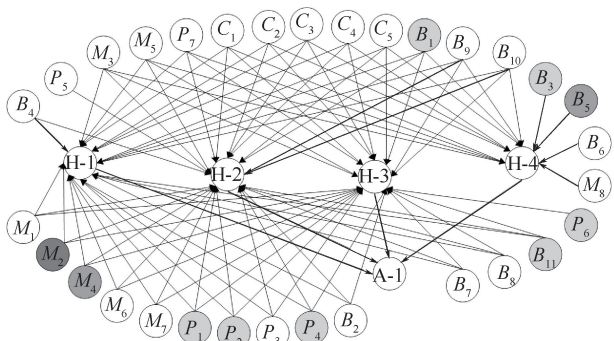


图 6 敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis

M₄ 以及电气线路出现老化、短路或缺陷 B₅。通过敏感性分析发现,它们是高校实验室火灾爆炸的关键影响因素,应多加控制。

4 高校实验室安全风险控制措施

高校实验室风险控制是一个复杂的系统工程,通常需要考虑多方面的因素,结合高校实验室火灾爆炸事故的 STAMP 致因分析以及 BN 的双向推理、敏感性分析结果,对于关键风险因素,应当多加管理,并提出以下有针对性的控制措施。

1) 设置自动监控监测系统。引入自动监控系统,监测实验室内关键参数,如温度、压力、气体浓度等。一旦发现异常,及时触发报警并采取措施。并且实现远程监控,使实验室管理人员能够随时随地监测实验室的运行状态,及时发现问题并采取措施。

2) 实施有效的培训和教育。提供针对性的系统化危险化学品操作培训,包括正确的操作方法和

紧急处置措施。提高实验室工作人员对潜在风险的认识,强化安全意识。

3) 安全试验设计和风险评估。在试验设计阶段,考虑潜在的燃烧反应或化学反应失控风险,并进行全面的风险评估。采取必要的安全措施,如加入惰性气体控制氛围、提供足够通风等措施,以降低化学反应风险。

4) 加强设备和设施管理。定期检查实验室设备和设施,确保其符合安全标准。确保设备的正常运行和定期维护,及时替换老化设备,以防止短路和火灾风险。

5) 动态安全管理。采用持续改进的理念,及时更新实验室的安全标准和操作流程,并定期进行现状风险评估,以适应不断变化的实验室环境和科研需求。

5 结 论

1) 提出一种基于多层安全控制结构模型的高校实验室安全动态评估方法,并通过分析高校实验室中的分级控制和反馈意见,构建一个多层安全控制结构模型,以确定引发高校实验室火灾爆炸风险状态的 UCA 及较为完备的风险因素。

2) 通过基于 BN 的量化评估模型动态评估高校实验室安全风险,一方面识别高校实验室火灾爆炸的潜在风险致因因素和控制缺陷。另一方面,特别是实现动态评估试验过程,以捕捉影响高校实验室火灾爆炸事故的主要风险因素和关键风险因素,如对危险化学品的操作不正确、燃烧反应或化学反

应失控等。同时,提出有针对性的高校实验室风险控制措施,包括严格的监督和有效的安全试验设计和风险评估等,为高校实验室的安全风险动态评估和管理提供有力支持和指导。

参 考 文 献

- [1] 安宇,李子琪,王祎,等. 基于 FBN 的高校实验室不安全行为风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(5): 160-167.
AN Yu, LI Ziqi, WANG Hui, et al. Risk assessment on unsafe behaviors of university laboratories based on FBN[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(5): 160-167.
- [2] 叶元兴,马静,赵玉泽,等. 基于 150 起实验室事故的统计分析及安全管理对策研究[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(12): 317-322.
YE Yuanxing, MA Jing, ZHAO Yuze, et al. Based on the research on statistical analysis and safety management countermeasure based on 150 laboratory accidents[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(12): 317-322.
- [3] 贺蕾,廖婵娟,卢丽丽,等. 112 起高校实验室事故统计分析 with 防控对策研究[J]. 中国公共安全: 学术版, 2017(2): 49-53.
HE Lei, LIAO Chanjuan, LU Lili, et al. Research on statistic and countermeasure of 112 university laboratory accidents[J]. China Public Security: Academy Edition, 2017(2): 49-53.
- [4] 李志红. 100 起实验室安全事故统计分析 and 对策研究[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(4): 210-213.
LI Zhihong. Research on statistical analyses and countermeasures of 100 laboratory accidents[J]. Experimental Technology and Management, 2014, 31(4): 210-213.
- [5] OMIDVARI M, MANSOURI N, NOURI J. A pattern of fire risk assessment and emergency management in educational center laboratories[J]. Safety Science, 2015, 73: 34-42.
- [6] PENG Tong, LI Chao, ZHOU Xinbin. Application of machine learning to laboratory safety management assessment [J]. Safety Science, 2019, 120: 263-267.
- [7] 杨立成,陈彦军,崔长欢,等. 基于轨迹交叉理论的高校实验室安全管理研究[J]. 中国医药导报, 2021, 18(9): 185-188.
YANG Licheng, CHEN Yanjun, CUI Changhuan, et al. Research on university laboratory safety management based on track intersecting theory[J]. China Medical Herald, 2021, 18(9): 185-188.
- [8] 郭海军,唐寒露,王凯,等. 基于 24Model 的高校危化品实验室事故分析及对策[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(11): 168-174.
GUO Haijun, TANG Hanlu, WANG Kai, et al. Accident analysis and countermeasures of university hazardous chemical laboratory based on 24Model [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(11): 168-174.
- [9] 埃里克森[美]. 危险分析技术[M]. 赵廷弟, 焦健, 赵远, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012: 12-25.
ERICSON C A. Hazard analysis techniques for system safety[M]. ZHAO Tingdi, JIAO Jian, ZHAO Yuan, et al, Translated. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 12-25.
- [10] LEVENSON N. Engineering a safer world: systems thinking applied to safety[M]. Cambridge: MIT Press, 2011: 1-33.
- [11] SAKAR C, KOSEGLU B, TOZ A C, et al. Analysing the effects of liquefaction on capsizing through integrating interpretive structural modelling (ISM) and fuzzy Bayesian networks (FBN)[J]. Ocean Engineering, 2020, 215: DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107917.

作者简介: 王红力 (1986—), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 讲师, 主要从事系统安全工程、安全预测与风险评价等方面的研究。E-mail: whl1011@126.com。