

引用格式:肖遥,张东胜,董博恺. 基于IAHP和模糊综合评判的企业安全风险预警系统研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2020, 47(5): 109–117.

XIAO Yao, ZHANG DongSheng, DONG BoKai. An enterprise safety risk early warning system based on an interval analytic hierarchy process (IAHP) and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2020, 47(5): 109–117.

基于IAHP和模糊综合评判的企业安全风险预警系统研究

肖 遥 张东胜* 董博恺

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘 要: 为有效控制企业安全生产风险,实现安全风险早期预警,基于理论及企业安全管理体系研究,确定了安全风险预警评价指标,采用区间层次分析法(IAHP)计算指标权重,确定了预警监测关键点,并运用模糊综合评判法构建作业现场安全风险预警评价模型与评价思路。研究结果表明:区间层次分析法和模糊综合评判法能够较好地对作业现场安全风险进行评估;该风险预警系统能够实现企业安全风险的量化评估,确定风险预警等级。实例分析结果与实际情况基本相符,表明本文风险预警系统能够为企业安全风险水平的管控提供指导。

关键词: 安全生产; 风险预警; 区间层次分析法(IAHP)

中图分类号: X928 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2020.05.015

引 言

安全生产是企业生存和发展最基本的要求和保障,基于安全生产的现状和安全科学技术的发展,安全生产管理理念逐渐从事后吸取教训转向事前预防管理。企业风险预警就是对生产场所的风险进行测评,通过对影响企业安全生产风险的关键指标综合评价,进而采取相应的预控措施以降低企业的风险水平。因此,研究并建立企业安全风险预警系统,对提高企业安全管理水平,控制企业的生产风险和促进稳定发展具有重要意义。

对于风险预警模型,国外较早在金融、消防预警等领域开展研究并取得诸多成果,如 Engle 等^[1] 创建了自回归条件异方差(ARCH)模型,用于定量测量经济领域中的风险和不确定性风险。Rathnayaka 等^[2] 在石油安全的实例应用研究中提出了基于事故前兆预警的事故建模和风险评估框架。目前,我国企业安全生产风险预警体系的实践研究还处于初

级阶段,且主要集中在石油化工、电力煤炭和建筑业等行业领域^[3–8]。陈美龄等^[9] 基于人、物、隐患、管理以及事故等5个因素建立了风险预警指标体系,成功将指标系统运用到风险预警中。张兰等^[4] 基于模糊理论对煤气化工企业风险评价指标体系进行构建研究,为企业风险控制提供了实际方案。现有的预警算法能够完成对由定性定量系统相结合组成的复杂生产系统的评价,赋予企业安全风险预警更高的可信度^[10–11]。但就实际生产情况而言,企业风险指标体系的构建和评价模型的研究还有待深入,很多企业尚未建立安全风险评估预警机制,风险评估以单一指标衡量或经验判断的主观定性测量为主,在理论基础、实施效率及可操作性等方面还有很大的提升空间,以至于生产过程中的隐患和风险态势很难得到较为可靠的判断和预警^[11]。我国现行的法律法规管理体系提出对企业风险的评价预警管理要求,即以安全生产标准化等级评审和环境/职业健康管理体系审核为重要的企业隐患检查和风评手段^[12],前者复核周期为3年,后者为1年,此评审间隔较企业生产周期来说普遍较长、及时性较差,导致企业所承担事故发生风险持续增大,而由此造成的后果往往是企业所不能够承受的。故而关于企业风

收稿日期: 2020-02-06

第一作者: 女,1995年生,硕士生

* 通信联系人

E-mail: zhangds@mail.buct.edu.cn

险评价预警体系构建方面的研究亟待继续深入。

鉴于此,本文的企业安全风险预警即以安全生产法及现行风险隐患双轨控制理念为依据,基于企业安全生产标准化和职业安全体系脉络构建企业安全风险评估指标体系和企业安全风险评价模型,评判体系中各指标的运行状态,以期得出企业安全风险水平及各风险指标的风险度等级,拟为企业安全风险预警和重点监测点的确定提供决策参考,并以某企业机械加工作业现场为实例进行应用。

1 评价指标体系的构建及赋值

企业安全风险预警的核心在于建立较为完善的风险测评模型,而构建模型的前提是构建一个科学有效的安全风险预警指标体系。

1.1 安全风险预警指标体系构建

1.1.1 指标选取的理论基础

现代事故致因理论指出,任何安全事故的发生都不是单一因素造成的,是一定环境下,人的不安全行为和物的不安全状态直接导致的,此外还要考虑管理方面的缺陷而造成的综合结果^[13]。

企业作业现场的风险因素主要包括人员的不安全状态、生产环节的危险物质、复杂的生产设备、内外部环境的不稳定因素和管理制度的不完善或缺失等。风险预控是预防事故发生的重要手段,即运用系统原理对生产系统,各岗位中存在的人、物、环、管相关的不安全因素全面辨识并分析评估,使风险处于动态的受控状态。

1.1.2 指标选取原则

安全风险预警评价指标体系的目标是反映生产过程中的基本状况及主要安全特征,以戴明环为核心思想的安全生产标准化和环境/职业健康管理体

系是企业安全管理体系较为成熟且实用的代表^[14]。本文以此为脉络提炼指标体系,指标体系是由若干单项指标组成的整体,是对系统安全能力和条件水平的细致化体现,指标的选取遵循科学性、系统性、动态性、可量化、独立性和可对比性原则^[15-17]。

1.1.3 指标体系的构成

企业安全风险预警评价体系分为目标层、一级指标(准则层)和二级指标(评价指标层)。目标层即为企业安全风险水平;根据事故致因理论以及系统本质安全化的研究,得出生产现场的安全态势是由人员、物质、环境、管理因素的相互作用和影响造成的,故准则层确定为人员、物、环境和安全管理 4 个一级指标;二级指标从安全隐患现状和应急能力考量,由 16 个评价指标构成,具体见图 1。各评价指标说明如下。

(1)人员因素 人员因素是企业生产系统中的关键要素,其风险水平受到生产现场人员数目、员工素养和人员组织水平的影响,本文确定了 4 个评价指标:①作业现场人员配备,即技术人员和安全人员的安排是否符合场所安全要求和规定;②作业人员技能水平,即人员的持证上岗率和作业周期内三违发生率;③人员安全素质,包括人员安全意识水平和应急处置技能评价;④管理人员组织能力,通过周期内管理人员安全工作事项履职率衡量。

(2)物的因素 生产系统中设备及物料存在的风险因素主要包含 3 个评价指标:①物料危险性,即对系统涉及物料进行危险源辨识并根据结果落实相应管理措施的情况;②设备安全运行水平,反映机械设备的固有属性和运行状况,通过设备的周期故障率水平、维保合规率和更新改造率三要素综合评价;③设备安全技术措施,用于预防、控制、减少和消除

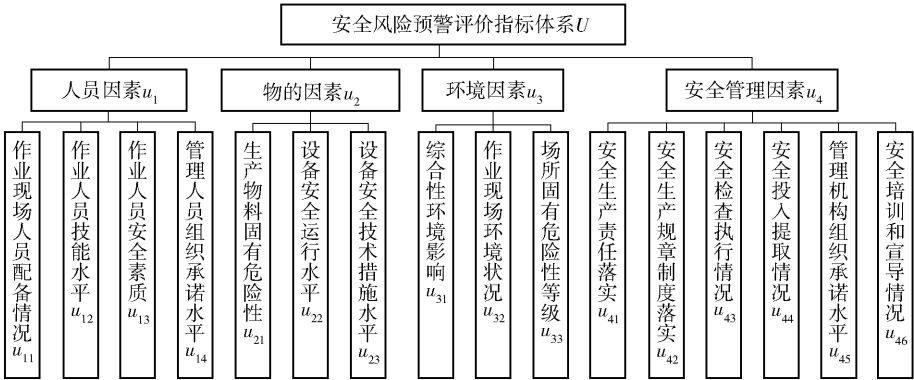


图1 安全风险预警评价指标体系

Fig.1 Safety risk early warning evaluation index system

事故影响的技术措施,以人员劳动保护装备配备使用、设备安全防护装置和安全标识的可视化程度三要素综合评分。

(3)环境因素 生产劳动场所各种构成要素的综合,根据环境因素的种类和级别对系统安全风险水平产生的阶段性影响划分为 3 个指标:①综合性环境影响,如阅兵、节假日等重大社会活动等通过社会环境及周边单位影响指数描述;②作业现场环境状况,受到天气或灾害影响,通过场所的光照、温度、风速、噪声等影响指数综合考量;③场所固有危险性等级,为场所经过专业安全评价的本身固有危险等级水平,通常由企业聘请第三方专业安全评价机构或由企业技术安全管理部门组织评价小组,应用 LEC 评价法(likelihood,事故发生的可能性;exposure,人员暴露于危险环境中的频繁程度;criticality,一旦发生事故可能造成的后果)^[18]对潜在危险性作业环境中的危险源进行安全评价,得出的现场危险等级和相应控制措施的落实情况综合表示为场所固有危险性等级。

(4)安全管理因素 安全管理体系是控制安全风险,预防事故发生的重要环节,本文选取管理体系中的 6 个阶段性要素作为评价指标:①安全生产责任落实,以人员及部门责任清单掌握情况和执行率进行考核;②规章制度落实情况,对安全生产规章制度体系和执行情况进行评价;③安全检查执行情况,包括各级检查的完成率和隐患整改完成率两部分;④安全生产投入考察,对安全预算管理和执行依据相关规定考核评价;⑤管理机构组织承诺水平,通过安全工作任务上传下达的有效指数评价;⑥安全培训和宣导情况,以日常、定期、专题安全教育和活动的开展情况进行考察。

1.2 指标体系权重分析

遵循公开、公正、多样性和客观性的原则,运用区间层次分析法(IAHP)确定指标权重。不同于层次分析法(AHP),区间层次分析法综合考虑了针对同一要素专家评估结果的差异性,在做两两判断、形成区间数判断矩阵时,以区间标示元素的重要度尽可能全面地确定各个指标的影响程度,形成区间判断矩阵。

判断区间的中点和宽度分别用不同的标度来确定,采用传统的 1~9 标度法^[19],通过专家赋值量化形成判断矩阵。区间确定了取值范围或变异程度,反映判断的模糊性和不确定性。整个 IAHP 计算过

程都是围绕 1.1 节的企业安全风险预警评价指标体系层次结构展开,以求得各个指标对于企业安全风险水平的相对重要性评分,即各层次指标的权重。选用 IAHP 权重计算方法中的区间特征根法(IEM)进行计算,计算步骤如下。

表 1 中设相对重要性比值为 a_{ij} ,表示指标 A_i 与指标 A_j 重要度比值。设 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 为一致性区间矩阵,即 $a_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+]$ 且 $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} = \left[\frac{1}{a_{ij}^+}, \frac{1}{a_{ij}^-} \right]$,记为 $A^+ = (a_{ij}^+)_{n \times n}$,则 $A = [A^-, A^+]$ 。同样对于区间向量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,也存在 $x_i = [x_i^-, x_i^+]$ 。记 $x^- = (x_1^-, x_2^-, \dots, x_n^-)^T, x^+ = (x_1^+, x_2^+, \dots, x_n^+)^T$,有 $x = [x^-, x^+]$ 。

表 1 1~9 标度法
Table 1 1~9 scale method

标度	含义
1	指标 A_i 与指标 A_j 相比,具有相同重要性
3	指标 A_i 与指标 A_j 相比,判断感到稍微重要
5	指标 A_i 与指标 A_j 相比,判断感到明显重要
7	指标 A_i 与指标 A_j 相比,判断感到强烈重要
9	指标 A_i 与指标 A_j 相比,判断感到极端重要
2,4,6,8	指标 A_i 与指标 A_j 相比,上述相邻判断的中间值
$1/a_{ij}$	指标 A_i 与指标 A_j 相比,判断值为 a_{ij} ,则有 $1/a_{ij} = a_{ji}$

1)以准则层中 4 个一级指标分别对总风险预警目标的重要性构建区间判断矩阵,如表 2 所示。

取区间判断矩阵中各因素的下限和上限分解为两个定值矩阵 A_1^+ 和 A_1^- ,分别计算这两个判断矩阵的最大特征根。求得一级指标区间上下限判断矩阵并得到其最大特征根分别为 $\lambda_1^+ = 4.773\ 6$ 和 $\lambda_1^- = 3.615\ 3$;将准则层区间判断矩阵最大特征值对应的正分量的特征向量归一化,得到 $x_1^+ = (0.265\ 6, 0.155\ 7, 0.098\ 3, 0.480\ 4)^T$ 和 $x_1^- = (0.257\ 0, 0.153\ 4, 0.101\ 0, 0.488\ 6)^T$ 。

将 A_1^-, A_1^+ 分别代入式(1)和(2)得到区间特征值的中间系数 $k = 0.932\ 8, m = 1.049\ 3$,其中 k, m 是满足 $0 < kx_1^- \leq mx_1^+$ 的全体正实数。

$$k = \sqrt[n]{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+}}}$$

(1)

$$m = \sqrt[n]{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-}}}$$

(2)

代入 $w = [kx_1^-, mx_1^+]$ 得到 $w_1 = [0.2397, 0.2787]$,

$w_2 = [0.1430, 0.1633]$, $w_3 = [0.0942, 0.1031]$, $w_4 = [0.4557, 0.5041]$ 为权重向量的 4 个权重区间值。

2) 区间判断矩阵的一致性检验。IAHP 将传统点值 AHP 的一致性指标推广到区间数, 以此判断区间判断矩阵的一致性程度。首先通过近似公式(3)求得区间判断矩阵最大特征根 λ_{\max} , 再根据一致性检验公式(4)求得一级指标的一致性比率 $CR = 0.0728 < 0.1$, 满足一致要求, 其中, A 为一致性区间矩阵, CR 为一致性比率, CI 为一致性指标, RI 为随机一致性指标。当一致性程度过低时, 需进行修正直到满足一致性要求。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{n w_i} \tag{3}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\bar{\lambda}_{\max} - n}{RI(n-1)} < 0.1 \tag{4}$$

3) 将上述权重值转化为中心形式, 即 $w =$

$(m(A_i), r_i)$ 。其中, $m(A_1)$ 为一级指标的相对权重估计, 有 $m(A_1) = (kx_1^- + mx_1^+)/2$; r_1 是权重估计的不确定性, 有 $r_1 = m(A_1) - kx_1^-$ 。

$$w_1 = \begin{pmatrix} (m(A_1), r_1) \\ (m(A_2), r_2) \\ (m(A_3), r_3) \\ (m(A_4), r_4) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2613, 0.0215 \\ 0.1545, 0.0114 \\ 0.0997, 0.0054 \\ 0.4845, 0.0287 \end{pmatrix}$$

一般情况下, $m(A_i)$ 的数值大小表示相应指标的权重大小, 由此可知企业安全风险评价一级指标的重要性及权重依次为人员因素 0.2613、物的因素 0.1545、环境因素 0.0997 和安全管理因素 0.4845。同理, 可求得各一级指标下二级指标的权重值 $m(A_{ij})$, 再与其对应的准则层权重 $m(A_i)$ 相乘, 可得二级指标对目标层的综合评价权重大小(表 3)。

表 2 一级指标区间判断矩阵及权重

Table 2 First-level indicator interval judgment matrix and weight

要素	人员因素 u_1	物的因素 u_2	环境因素 u_3	安全管理因素 u_4	权重 W
人员因素 u_1	[1,1]	[2,3]	[2,3]	[1/3,1/2]	0.2678
物的因素 u_2	[1/3,1/2]	[1,1]	[2,3]	[1/4,1/3]	0.1542
环境因素 u_3	[1/3,1/2]	[1/3,1/2]	[1,1]	[1/4,1/3]	0.0978
安全管理因素 u_4	[2,3]	[3,4]	[3,4]	[1,1]	0.4799

表 3 安全风险预警评价指标体系权重

Table 3 Weight rankings of risk indexes for the safety risk early-warning evaluation system

目标层	准则层(一级指标)		评价层(二级指标)		评价指标描述	综合评价权重
	风险因子	权重	风险因子			
安全风险评价指标体系 U	u_1 人员因素	0.2613	u_{11} 作业现场人员配备情况	技术人员、安全人员合规配备指数	0.0352	
			u_{12} 作业人员技能水平	人员资质、作业人员三违发生率	0.0998	
			u_{13} 作业人员安全素质	人员安全意识、应急处置技能	0.0587	
			u_{14} 管理人员组织承诺水平	管理人员安全工作事项履行率	0.0676	
	u_2 物的因素	0.1545	u_{21} 生产物料固有危险性	危险源辨识及管理情况	0.0401	
			u_{22} 设备安全运行水平	设备故障率、维保合规率、更新改造率	0.0866	
			u_{23} 设备安全技术措施水平	劳保配备率、防护装置、安全标识可视化程度	0.0278	
	u_3 环境因素	0.0997	u_{31} 综合性环境影响	社会活动及周边单位影响指数	0.0397	
			u_{32} 作业现场环境状况	光照、温度、风速、噪声环境影响指数	0.0252	
			u_{33} 场所固有危险性等级	场所专业安全评价得到的危险等级水平	0.0348	
	u_4 安全管理因素	0.4845	u_{41} 安全生产责任落实	各层级安全生产责任清单执行率	0.0885	
			u_{42} 安全生产规章制度落实	规章制度体系建立、执行合规性评价	0.1115	
			u_{43} 安全检查执行情况	各级安全检查完成率、隐患整改完成率	0.0984	
			u_{44} 安全生产投入提取情况	安全生产投入预算管理及执行指数	0.0724	
			u_{45} 管理机构组织承诺水平	安全工作任务上传下达有效指数	0.0679	
			u_{46} 安全培训和宣导情况	定期、日常、专题安全培训的落实实施率	0.0458	

1.3 综合分析

根据专家评分结果运用模糊综合分析法计算可得体系中各指标权重。一级指标的重要程度从高到低依次为安全管理因素、人员因素、物的因素和环境因素。二级指标中以安全规章制度落实、人员技能水平、安全检查情况、设备安全运行水平及责任制的落实情况为主要风险因子,所占比例达到总权重的 48.48%。其中,单个风险因子—安全生产规章制度落实情况占据二级评价指标中的最高权重,约为 11.15%。综上所述,在人-机-环生产系统中,“人”作为系统的主体,其本身具有很大的不确定性,则“人”主导的安全管理因素和人员自身成为体系中的重点风险影响因子,与之相比系统中“环境”和“物”的本质安全化伴随社会经济和科技的发展取得了较大的提升。我国企业普遍面临安全管理水平与风险管控所需管理能力之间的不平衡,故而提升企业安全风险预警管控能力,加强重点风险因子的监测预警势在必行。

2 安全风险预警评价模型的构建

模糊综合评价法是运用模糊数学工具对多层次、多因素系统特征进行总体评判的一种定性定量相结合的评价方法^[19],能够对企业安全风险预警评价指标体系中的主观性和客观性评价指标进行模糊计量。

2.1 确定因素集

依据企业安全风险评价体系中的层级结构分解企业安全风险要素,确定影响因素,组成因素集

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$$
 (5)

$$u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \cdots, u_{im}\}$$
 (6)

式中, $u_i(i=1,2,3,4)$ 为影响安全风险水平的一级指标, $u_{ij}(j=1,2,\cdots,n;n$ 为一级指标所包含二级指标的个数)为二级评价指标,是一级指标的影响因子。

2.2 确定权重集

因素集中各因素对于目标层的重要程度是不同的,为各个因素集 u_i 分配相应的权值 $w_i(i=1,2,3,4)$,由权值组成的因素权重集 W 为因素集 U 上的模糊子集

$$W = \{w_1, w_2, w_3, w_4\}$$
 (7)

$$w_i = \{w_{i1}, w_{i2}, \cdots, w_{im}\}$$
 (8)

式中,权值 w_i 是一级指标要素对目标层 U 的隶属

度,即为各个指标的综合评价权重, $w_{ij}(j=1,2,\cdots,m;m$ 是一级指标对应二级指标个数)为各级指标权重值,满足归一性和非负性条件。

2.3 确定评价集

评价集是对评判对象可能做出评判结果的集合。根据安全风险要素的特点汇总国内外专家学者的意见,定义评价等级并指定分值

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{5, 4, 3, 2, 1\}$$
 (9)

其中,各个指标都是在其前后相邻的评价等级之间处于某种模糊的分布状态,要实现对这种模糊的分布状态的量化描述,需要通过隶属函数来进行转换。将各个指标的安全状态符合度评价等级自高到低划分为 5 级,对应 1~5 分不同的量化分数,见表 4。

表 4 评价指标隶属度子集

Table 4 Evaluation index membership degree subset					
评价集	安全状态	评价分值	评价集	安全状态	评价分值
v_1	非常符合	5	v_4	基本符合	2
v_2	比较符合	4	v_5	不符合	1
v_3	一般符合	3			

2.4 模糊综合评价

模糊评价矩阵是由各个评价因素的评价结果组合而成,根据体系结构开展逐级评价。对指标体系中的二级评价指标要素 u_{ij} 进行单因素评价,以确定其对应的评价集元素 v_k 的隶属度(可能性程度) r_{ijk} 。则 u_{ij} 的评判结果为 $R_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, \cdots, r_{ij5})^T(i=1,2,3,4;j=1,2,\cdots,m;m$ 是一级指标对应二级指标个数)是单因素模糊评判集,组成模糊矩阵

$$R_i = (R_{i1}, R_{i2}, \cdots, R_{im})^T = \begin{pmatrix} r_{i11} & \cdots & r_{i15} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{im1} & \cdots & r_{im5} \end{pmatrix}$$
 (10)

(1)进行一级模糊综合评价。按加权平均型模糊算子由模糊矩阵 R_i 与因素权重集 w_i 相乘,可得到二级风险因素指标的综合评价集 B_i 。

$$B_i = w_i \circ R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \cdots, b_{i5})$$
 (11)

(2)二级模糊综合评价。以一层评价结果为基础,求得总目标层的综合评价集。

$$B = W \circ B_i = (b_1, b_2, \cdots, b_5)$$
 (12)

根据模糊理论的最大隶属原则,取最大 b 值作为最优结果, p 为风险分数区间,则系统风险评价总分为

$$P = B \circ p \tag{13}$$

(3)风险预警等级确定。根据风险可能导致的危险性视屏、紧急程度和发展趋势,确定了5级风险

预警等级(表5)。根据风险分数 P 确定现场安全风险预警等级并根据实际情况采取相应的风险预控措施。

表5 风险预警等级
Table 5 Risk warning levels

P	风险等级	预警等级	信号	风险描述及预警对策
$P < 60$	高	I	红色	风险水平大且不受控,启动红色预警,需全面停止作业,开展风险隐患排查,直至隐患排除或将风险控制在可接受范围内才能继续作业。
$60 \leq P < 70$	较高	II	橙色	风险水平很大且难以控制,启动橙色预警,短时间内停止作业,有针对性开展相对全面隐患排查治理,直至风险控制在可接受水平后继续作业。
$70 \leq P < 80$	中	III	黄色	风险水平较大且较难控制,启动黄色预警,需停止局部作业活动,开展风险隐患整改,直至隐患排除或将风险控制在可接受水平后才能继续作业。
$80 \leq P < 90$	较低	IV	蓝色	风险水平一般且基本可控,启动蓝色预警,可在一定控制防护措施下继续作业,同时排查隐患降低风险至可接受水平。
$90 \leq P < 100$	低	V	绿色	风险水平较低且处于可控状态,不启动预警,正常工作,现场人员保持警惕和关注,并持续优化改进风险态势。

3 实例分析

3.1 应用说明

1)所研究预警系统的构建机理是事故致因理论及风险预控理论,核心思想是戴明环理论,目标是促进生产系统实现系统安全、风险稳态并持续优化,其中生产系统是能将一定输入转化为特定输出的具有增值性的有机整体,大到企业小到具体的作业现场都可以作为研究对象。

2)根据指标的可量化和动态性原则,指标数据的收集统计尽量依托生产现场已有的信息统计渠道,通过直接观察、访谈和监测获得,观察评价人员应当包括各层级专业人员,且以月度为单位定期对生产系统的运行情况进行评价。

3)评价指标包括定性和定量指标,专家对照相关标准规范综合评价各个指标要素,结合实际情况综合分析确定分值。

3.2 应用实例

选取刚完成安全生产标准化评估的某机械加工企业的切割作业现场进行安全风险现状评估与验证。该生产系统基本情况如下:切割作业现场所在的车间的危险等级为三级,由剪切组、材料组和仓储配送组3个班组组成,包括主管领导2人、班组长3人和30个作业工人,负责完成金属板材的剪切加工等任务。

现成立10人风险评价小组,由公司专职安全生产管理者、现场负责人、班组长及一线工人组成。

1)模糊综合评价

以人员因素 u_1 中作业现场人员配备情况 u_{11} 指标评价为例,评审小组根据表2评判该指标的安全状态,采用抽查询问等方法调查。切割作业要求定员3人,均持证上岗,现场配备有兼职安全管理人员1人,问询得知由于岗位安排或个人原因偶尔存在临时换班或缺值的现象,由于是开放现场故存在作业无关人员流动的情况。根据上述条件,评审组专家做出评价结果如下:认为 u_{11} 非常符合安全状态并给出5分评价为1人,概率为0.1;有7人认为 u_{11} 比较符合要求,评分为4;剩余2人认为安全状态一般,评分3分。由此可得 u_{11} 的模糊向量 $R_{11} = (0.1, 0.7, 0.2, 0, 0)$ 。

同理,求得一级指标模糊综合评价结果

$$B_1 = w_1 \circ R_1 = (0.1484, 0.5527, 0.2989, 0, 0)$$

归一化处理得到 u_1 在各个风险等级的隶属度 $B_1 = (0.1484, 0.5527, 0.2989, 0, 0)$,同理可得一级指标 $u_2、u_3、u_4$ 的综合评价集 $B_2 \sim B_4$ 分别为 $B_2 = (0.2380, 0.4900, 0.2360, 0.0920, 0)$, $B_3 = (0.5599, 0.0901, 0.3500, 0, 0)$, $B_4 = (0.2365, 0.3544, 0.3071, 0.1019, 0.0183)$ 。在此基础上,进行二级模糊综合评价,得到企业安全风险 U 的综合评价集 $B = W \circ B = (0.241, 0.395, 0.292, 0.062, 0.008)$ 。

2) 安全风险评价总分

代入式(13)得到企业安全风险得分下限 $P^- = B \circ p^- = 77.85$ 。同理, 上限 $P^+ = 87.83$ 。

则实例企业某机械加工企业的切制作业现场在该月的安全生产风险评价得分为: $P = (77.85 + 87.83) / 2 = 82.84$ 。

3.3 评价结果分析

根据表 5, 实例生产系统在该月的安全生产风险评价得分为 82.84 分, 处于较低风险区域, 为Ⅳ级蓝色预警等级。根据模糊综合评价, 一级指标风险由高到低依次为安全管理因素、人员因素、物的因素和环境因素, 可见决定系统风险水平的主要因素为安全管理因素, 其中需要重点强化安全培训与宣导的实施、责任制落实和规章制度落实; 其次是人员风险因素, 需要持续关注作业人员技能提升和管理人员组织承诺水平; 在物的因素方面, 随着安全技术的发展, 设备安全技术措施不断升级加之普遍能够落实设备运行规范要求, 其风险水平逐渐降低; 环境因素综合评估风险最低, 需关注天气变化对生产可能造成的影响。综合以上分析, 可知系统主要风险因素是安全管理, 需要强化教育培训活动和责任制的落实, 如制定履职清单以及互查机制等, 其次需要持续关注人员技能的提升, 磨练技术、端正态度, 确保三违零发生。

根据系统顺利完成安全标准化评级以及评审整改项记录, 并结合对现场人员的访谈, 了解到该方法与安全标准化评价结果一致, 风险水平与实际情况相符。

4 结论

(1) 在企业安全管理体系和风险分析的基础上, 基于生产系统实际构建了人-物-环-管为一级要素的分级风险预警指标体系, 该体系由 4 个一级指标和 16 个二级指标组成。运用在赋权合理性上更优的区间层次分析法确定指标权重, 降低了人为因素的影响。

(2) 区间层次分析法与模糊综合评价法的结合为企业安全风险预警提供了定性、定量结合的方法思路, 是企业安全风险预警评价系统研究的补充。系统的实例研究结果与现实较为吻合, 说明了本文所提系统的实用性和可操作性。

本文研究重点是在安全风险评价预警系统权重

分析的基础上结合模糊评价方法, 构建企业安全风险评价模型, 而安全风险评价预警指标系统的层次结构和指标的确定仅基于风险分析及安全生产标准化体系的要素进行初步探讨, 在未来还需要进行深入的研究完善。

参考文献:

- [1] ENGLE R F, BOLERSLEV T. Modelling the persistence of conditional variances [J]. *Econometric Reviews*, 1986, 5(1): 1-50.
- [2] RATHNAYAKA S, KHAN F, AMAYOTTE P, et al. Accident modeling and risk assessment framework for safety critical decision-making: application to deepwater drilling operation [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2013, 227(1): 86-105.
- [3] HUANG D M, CHANG X K, LIU Y J, et al. Design of early-warning system model for gas explosion [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 121-126: 2643-2647.
- [4] 张兰, 许江, 王克全. 基于模糊理论的煤气化企业安全评价指标体系建立及应用 [J]. *重庆大学学报*, 2019, 42(12): 99-110.
ZHANG L, XU J, WANG K Q. Build and application of safety evaluation indexes system for coal gasification enterprises based on fuzzy theory [J]. *Journal of Chongqing University*, 2019, 42(12): 99-110. (in Chinese)
- [5] 孙金凤, 陈国华. 重大危险源事故风险预警技术研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2010, 6(2): 44-50.
SUN J F, CHEN G H. Research on pre-warning technology for accidents risk of major hazards [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2010, 6(2): 44-50. (in Chinese)
- [6] 谭伟峰. 城市公共消防安全风险预警评价体系构建研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10(5): 129-133.
TAN W F. Study on construction of early-warning and evaluation system for public fire safety risk in city [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2014, 10(5): 129-133. (in Chinese)
- [7] 徐东超, 罗云, 卢成, 等. 石油井下作业井喷风险预警分级模型研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(3): 156-160.
XU D C, LUO Y, LU C, et al. Warning ranking for blowout risk of down hole operation [J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(3): 156-160. (in Chinese)

- [8] 赵学刚, 魏朗. 道路交通安全风险预警模糊评判模型[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(4): 365-368.
ZHAO X G, WEI L. The mathematical model of road traffic security risk forewarning[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2009, 40(4): 365-368. (in Chinese)
- [9] 陈美龄, 侯茜, 邬开发, 等. 钢铁企业生产事故风险预警指标研究[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(12): 52-55.
CHEN M L, HOU Q, WU K F, et al. Study on risk early warning index for iron and steel enterprises accidents[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(12): 52-55. (in Chinese)
- [10] 肖琴, 罗帆. 基于突变理论和模糊集的机场飞行区安全风险评价[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1730-1736.
XIAO Q, LUO F. On the safety risk assessment of the airport flight area based on the catastrophe theory and fuzzy set[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(5): 1730-1736. (in Chinese)
- [11] 徐涛龙, 姚安林, 蒋宏业, 等. 基于模糊综合评价的城市燃气管网第三方破坏失效可能性研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(8): 165-169.
XU T L, YAO A L, JIANG H Y, et al. Study on failure possibility of third-party damage to the urban gas pipeline network based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(8): 165-169. (in Chinese)
- [12] 严己. 基于安全生产标准化体系的安全生产预警系统的构建[J]. 山西科技, 2016, 31(4): 139-143.
YAN J. Construction of work safety early warning system based on work safety standardization system[J]. Shanxi Science and Technology, 2016, 31(4): 139-143. (in Chinese)
- [13] 彭仁和. 人类工效学: 人机环科学匹配[N]. 中国安全生产报, 2014-10-16.
PENG R H. Ergonomics: human-machine environment science matching[N]. China Work Safety Report, 2014-10-16. (in Chinese)
- [14] 吕洋. 安全生产标准化与职业健康管理体系在安全生产管理中的积极作用[J]. 中国科技投资, 2017(1): 230.
LV Y. The positive role of work safety standardization and occupational health management system in work safety management[J]. China Venture Capital, 2017(1): 230. (in Chinese)
- [15] 李秀成, 何婷婷. 建筑安装工程施工安全风险评价指标体系的构建[J]. 中外企业家, 2017(11): 101-102.
LI X C, HE T T. Construction of risk evaluation index system for construction safety of construction and installation engineering[J]. Chinese and Foreign Entrepreneurs, 2017(11): 101-102. (in Chinese)
- [16] 罗云, 樊运晓. 风险分析与安全评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
LUO Y, FAN Y X. Risk analysis and safety valuation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [17] 崔文, 罗云, 曾珠, 等. 机电类特种设备典型事故风险分级预警预控方法研究[J]. 工业安全与环保, 2014, 40(5): 59-62, 4.
CUI W, LUO Y, ZENG Z, et al. The study of ranking methods of the typical accidents risks of machinery and electronic special equipment for early-warning and pre-controlling[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2014, 40(5): 59-62, 4. (in Chinese)
- [18] 唐军, 司尚斌. LEC 风险评价法改进与应用[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第五卷)——中国核学会 2017 年学术年会论文集第 8 册. 威海: 中国核学会, 2017: 329-334.
TANG J, SI S B. Improvement and application of the LEC risk assessment method[C]//China Nuclear Society. Progress Report on Nuclear Science and Technology in China(5)—Proceedings of the 2017 Annual Conference of the Chinese Nuclear Society, Vol 8. Weihai: Chinese Nuclear Society, 2017: 329-334. (in Chinese)
- [19] 周毅, 赵晓刚. 基于区间层次分析法的石油库防火防爆安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(12): 58-63.
ZHOU Y, ZHAO X G. Safety assessment for fire and explosion of petroleum depot based on IAHP[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(12): 58-63. (in Chinese)
- [20] 杨涛, 党光远. 企业安全生产事故风险预警研究综述[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(4): 123-129.
YANG T, DANG G Y. Research advance review on the early-warning system for production safety in the enterprises[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(4): 123-129. (in Chinese)

**An enterprise safety risk early warning system based on
an interval analytic hierarchy process (IAHP) and
fuzzy comprehensive evaluation**

XIAO Yao ZHANG DongSheng* DONG BoKai

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : In order to provide early waring of effectively control and enterprise production safety risks , this work determines the safety risk early-warning evaluation indicators based on theoretical research and the safety management system of the enterprise. It adopts the interval analytic hierarchy process (IAHP) to calculate the weight of the indicators and determine the key issues in early-warning monitoring. The fuzzy comprehensive evaluation method is used to construct a safety risk early-warning evaluation model and suggestions for risk assessment of the production site. The results show that ; the interval analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method can better evaluate the safety risk of the production site and that the risk early warning system can realize a quantitative assessment of enterprise safety risk , and determine the risk early warning level. The results of the case analysis are in good agreement with the actual situation. Thus the risk early warning system can provide guidance for the management and control of enterprise safety risk levels.

Key words: production safety ; risk early warning ; interval analytic hierarchy process (IAHP)

(责任编辑:吴万玲)