

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0805

基于 LEC-熵权法的车间生产违规行为危险等级评估

何立峰, 钟健翔, 屠建飞*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 人为违规行为是引发生产车间安全事故的重要因素, 为有效管控违规行为、优化生产现场安全管理、保障生产人员的安全, 构建了一套针对人员违规行为的危险评估模型。新建模型基于经典 LEC 法思想, 重新定义了表征行为危险程度的三个核心指标: 行为频率(F)、事故概率(P)和后果严重性(S)。为避免主观因素对指标权重分配的干扰, 运用熵权法对三个核心指标进行客观赋权, 综合评估危险值, 并依据危险值大小划分相应的危险等级, 为后续针对性安全管控提供科学、量化的依据。以 2019—2021 年电力企业的安全事故数据为例进行实证研究, 危险评估结果表明: “操作错误, 忽视安全, 忽视警告”和“冒险进入危险场所”等行为属于高危险行为。针对此评估结果, 须立即制定并落实专项整改措施, 杜绝此类行为的出现, 进而降低安全事故的发生率, 保障生产现场的安全。

关键词: 危险评估; LEC 法; 熵权法; 违规行为; 安全管理

中图分类号: X9

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2026) 01-0092-06

Assessment of the hazardous level of workshop production violation behavior based on the LEC-entropy weight method

HE Lifeng, ZHONG Jianxiang, TU Jianfei*

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Violation behaviors by individuals are a significant factor in triggering safety accidents in production workshops. To effectively manage violation behaviors, optimize on-site production safety management, and ensure the safety of production personnel, this paper constructs a hazard assessment model. Based on the concept of the LEC method, the model defines three indicators to represent behavioral dangers, including behavioral frequency (F), accident probability (P), and severity of consequences (S). The entropy weight method is employed to objectively assign weights to the indicators, with which the hazard is comprehensively evaluated and classified into hazard levels, providing a basis for targeted safety management. An empirical study is conducted using safety accident data from the power enterprises from 2019 to 2021. The hazard assessment results indicate that behaviors such as “operational errors, ignoring safety, ignoring warnings” and “entering hazardous areas recklessly” are high-risk behaviors that need to be rectified immediately to eliminate the occurrence of such behaviors, reduce safety accidents, and ensure on-site production safety.

Keywords: risk assessment; LEC method; entropy weight method; violation behavior; safety management

收稿日期: 2025-08-01

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(22078164); 宁波市重点研发项目(2023Z153, 2023Z061)

第一作者: 何立峰, 硕士研究生, 主要研究方向为生产现场安全管理。E-mail: 1980298763@qq.com

*通信作者: 屠建飞, 博士/副教授, 主要研究方向为复杂系统安全与可靠性管理。E-mail: tujianfei@nbu.edu.cn

确保安全生产是我国经济建设和社会事业发展的重要保障,不仅关乎人民群众的生命财产安全,更对保障经济建设有序推进、社会事业持续进步具有不可替代的支撑作用。目前,我国生产安全事故发生率虽呈逐年下降的良好态势,但由此造成的损失依旧需要高度重视,造成这一现象的主要原因还是员工的安全意识薄弱以及企业的投入上存在短板(如安全设施不完善等)。根据文献[1]统计显示,人为违规行为导致安全事故发生的比例占82%以上。此外,安全生产对于确保员工的安全健康,保障企业生产持续稳定协调发展,具有十分重大的意义。通过评估违规行为的危险等级,能够增强工人的安全意识,为企业生产安全管理提供参考,可正确引导安全管控的方向,实现安全管理资源合理分配,避免生产现场的危险程度进一步加深。因此,构建科学有效的违规行为危险等级评估体系,对生产过程中的人员违规行为开展系统性评估,已成为当前强化生产安全管理、防范安全事故发生的关键举措。

人为违规行为是安全事故发生的重要影响因素,也是国内外研究的主要焦点。目前,对于违规行为的评估方法主要有层次分析法^[2-3]、集对分析法^[4]、蒙特卡罗法^[5-7]等。李红霞等^[8]采取AHP-熵权法确定矿山工人不安全行为影响因素指标的综合权重,并通过模糊综合评价法分析各因素对不安全行为的影响大小,为矿山安全管理提供科学依据。刘海滨等^[9]提出基于正态云模型综合评判法来评价煤炭企业员工不安全行为的风险等级,评价结果以云图形式呈现,精准掌握了员工不安全行为的主要风险因素,为员工不安全行为的管理与风险控制提供一种新的分析手段。马奔等^[10]将灰色理论的决策评价与解释结构模型法相结合,评估实验室不安全行为的影响因素及相互关系,确定导致实验室不安全行为的本质因素,为有效防控高校实验室安全事故提供参考。上述方法虽然能够有效地评估行为的风险因素,但也无法对违规行为的危险性进行有效评估。

目前常用危险性评估方法是LEC(Likelihood-Exposure-Consequence)法,即根据三要素:事故的可能性(L)、暴露频率(E)和后果严重性(C)乘积来评估作业条件的危险性。以往研究中,陆莹

等^[11]采用相对量化指标对传统LEC法进行改进,结合建筑信息模型(Building Information Modelling, BIM)和数据库技术实现对地铁施工安全风险的自动评价,对提高施工现场安全管理水平有重要现实意义。许兴武等^[12]通过专家综合权重降低个人主观因素的影响,并引入安全管理补偿系数对传统LEC评价法进行改进,进一步提高了堤防施工风险评价的科学性,为水利工程施工的安全风险评估提供了借鉴。传统LEC法主要针对现场整体作业条件的评估(如安全隐患等),存在主观性较强问题,无法客观准确评估实际生产现场的危险性。目前,普遍采取客观赋权法以优化评估结果,提高研究客观性。熵权法能够降低主观因素影响,适用于大部分评估项目,实际应用广泛。如李银红等^[13]采用层次分析法和熵权法组合赋权,最大限度减少信息损失,尽可能地接近实际结果。付鸿鑫等^[14]提出熵权法和G2法组合赋权,修正传统LEC法的风险数值计算方法,以消除专家打分的主观性,使风险评价更加科学。杨亚琪^[15]采取改进LEC法与AHP-熵权法相结合,评估稀贵车间的安全风险程度,实现安全风险的分级管控与隐患的分级排查治理。虽然已有传统LEC方法与熵权法结合的相关研究,但在车间违规行为危险评估方面,还存在缺乏实际应用的不足,尚未形成成熟、可推广的评估体系。

因此,本文结合LEC评估法思想,针对车间生产过程中人为违规行为,提出危险评估指标,采用熵权法来弥补LEC危险计算的弊端,并进一步构建危险评估模型,综合评估行为的危险性。此外,利用行为危险等级确定事件处理的优先级,为企业对生产人员管理决策提供相关参考,进而提高车间生产安全。

1 危险评估模型

为全面科学地评估人为违规行为的潜在危险,本文在传统LEC法基础上进行改进与优化,构建结构清晰、更为客观的危险评估模型,以提升安全管理的科学性及效率。新模型以人为违规行为作为研究对象,结合行为特性和实际管理需求,从指标构建、危险性计算、等级划分和管理措施等方面进行系统设计。

模型总体结构如图1所示。模型基本工作流程

如下: (1) 收集相关历史数据进行分类辨别, 识别各岗位存在的各类违规行为, 进行归类处理, 为后续定量分析奠定基础; (2) 构建危险评估指标, 针对每类行为, 计算改进后 LEC 法的三项指标数据, 即事故后果严重程度、事故发生概率和行为出现频繁性; (3) 采用熵权法计算行为危险性, 通过构建并标准化原始数据矩阵计算指标的熵权值, 综合评估出每类行为危险性数值, 数值越高代表该行为的潜在危险越大; (4) 进行危险等级判定, 根据预设危险区间确定每类行为的危险等级, 企业可依据危险评估结果做出针对性调整, 并采取差异化的管控与整改措施, 实现精准化安全管理。

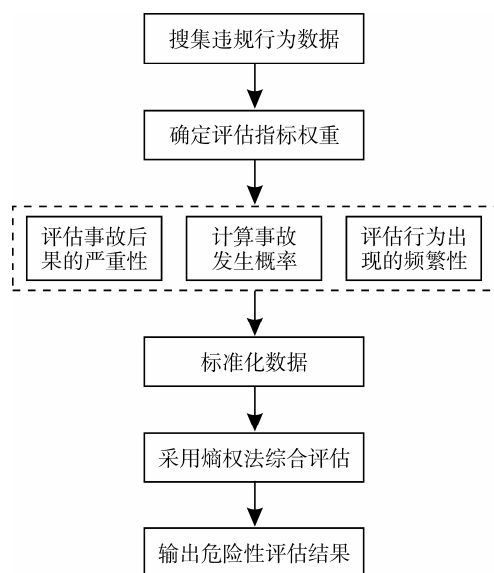


图1 违规行为危险评估模型

2 危险评估指标

传统 LEC 法虽能有效评估整体作业条件的危险性, 但无法准确评估单一类型行为的危险性。因此, 本文重新定义指标表述与赋值: 事故发生造成后果的严重性 (Severity, 参数 S)、事故发生概率 (Probability, 参数 P) 和违规行为出现的频繁性 (Frequency, 参数 F), 并根据各指标的重要程度来调整赋值范围。

(1) 严重性: 用于评估事故发生的后果。本文参考文献[16]对严重性进行具体描述与赋值, 并做出部分调整, 具体见表1。

(2) 事故发生概率: 指某类违规行为引起事故的发生概率, 如概率越高, 则表示越容易造成伤

表1 严重性的具体描述与取值范围

严重性	具体描述	取值范围
特大	造成多人死亡或巨额经济损失	9~10
重大	造成人员伤亡或重大经济损失	7~8
中等	重伤与伤残或者少量经济损失	4~6
轻微	需要救助或者造成些许的经济损失	1~3

亡, 工人的安全性越低。发生概率通常通过统计历史数据进行确定, 取值范围为 0%~100%。

(3) 频繁性: 反映某类违规行为出现的频繁性。本文 F 打分标准参考文献[17], 并在此基础上进行部分调整。通过违规行为出现频率高低进行打分, 对于“高频率行为”打分为 10, “基本上不出现”则打分为 0.1, 具体赋值情况见表2。

表2 频繁性的具体赋值

频率描述	区间范围	赋值
出现频率高	[0.8, 1]	10
出现频率较高	[0.6, 0.8)	8
出现频率中等	[0.4, 0.6)	6
出现频率较低	[0.2, 0.4)	4
出现频率低	[0.05, 0.2)	2
基本不出现	[0, 0.05)	0.1

3 危险等级评估

为实现对违规行为危险性的定量评估, 本文在构建 F 、 P 、 S 三项指标基础上, 采用熵权法对各指标予以赋权, 计算出每种违规行为的综合危险值 (记为 Z), 并依据综合危险值进行危险等级划分, 为后续企业管理提供科学依据。

3.1 违规行为的危险性计算

本文采用熵权法综合评估违规行为的危险性。熵权法是一种客观赋权方法, 核心是根据各项指标观测值提供信息的多少来确定其权重, 还能通过度量指标的无序性来判断指标中包含信息量的大小。在处理多指标赋权问题时, 该方法能有效减少人为主观赋值带来的结果偏差, 降低主观因素的影响, 提升评估结果的客观性和准确性。

(1) 构建原始数据矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$:

$$X = \begin{Bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} \end{Bmatrix}_{m \times 3} \quad (1)$$

式中: m 为待评估的违规行为类别数; n 为评估指标个数, $n=3$; x_{ij} 表示第 i 类违规行为 ($i=1,2,\dots,m$) 的第 j 个指标 ($j=1,2,\dots,n$) 的取值。此外, 式 (1)~(7) 中的 i, j 取值范围相同。

熵权法计算时, 需要先确定是正向指标还是负向指标, 因此通常采用极差标准化对原始数据矩阵进行标准化处理 (式 (2)), 标准矩阵 $Y=(y_{ij})_{m \times n}$ 。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{1j}, \dots, x_{mj})}{\max(x_{1j}, \dots, x_{mj}) - \min(x_{1j}, \dots, x_{mj})} \quad (2)$$

(2) 计算第 i 个违规行为的第 j 个指标的数值概率 P_{ij} :

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (3)$$

利用熵权公式计算第 j 个指标的权重 ω_j , 计算过程如式 (4)~(6)。

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \times \sum_{i=1}^m (P_{ij} \times \ln P_{ij}) \quad (4)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (6)$$

式中: e_j 为指标的信息熵; d_j 为信息冗余度。

(3) 综合考虑三项指标及其权重, 构建行为危险值计算公式 (第 i 类违规行为的危险综合评分 Z_i):

$$Z_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \times y_{ij} \quad (7)$$

3.2 危险等级划分

在实际生产车间中, 多种违规行为往往同时出现。针对此类情形, 企业通常会依据违规行为的紧急程度进行有序处理, 而本文则通过违规行为的危险等级来确定其处理的优先级别。违规行为的危险等级越高, 引发事故的可能性越大, 造成事故的后果越严重, 此类行为应优先处理, 因此需要调整对其的重视程度和管理措施, 从而提高生产环境的安全性。例如, 企业可根据违规行为的危险等级来调整巡查频率, 对危险等级高的违规行为进行严格管控。本文参考文献[18]对违规行为危险等级进行划分, 结合综合评分 Z (取值范围为 0~1), 做出适当调整, 将 Z 的取值范围平均划分成 4 个区间, 分

别对应 4 个危险等级。关于危险等级的具体描述与划分标准详见表 3。

表 3 危险等级的具体描述与划分标准

危险等级	描述	划分标准
IV	危险性高, 容易导致重大伤亡和巨大损失, 不能容忍, 需要立即整改	[0.75, 1]
III	危险性较高, 可能导致较大伤亡和重大经济损失, 采取有效措施防控	[0.50, 0.75)
II	中等危险, 危害性一般, 需要密切关注, 加强监管	[0.25, 0.50)
I	危险性较低, 属于可接受的危险, 进行口头教育	[0, 0.25)

4 实际案例分析

为清晰展现危险评估模型的实际应用效果与可行性, 本文以电力行业安全生产为例进行实例分析。电力生产是我国国民经济的重要支柱产业, 也是工业生产中不可或缺的能源支撑。但当前电力行业仍偶有安全事故发生, 造成了一定的人员伤亡和经济损失。基于此, 本文通过评估 2019—2021 年全国电力企业人身事故中人为违规行为, 计算违规行为的危险性, 为企业生产管理提供科学决策依据和量化参考。本文具体数据来源于国家能源局对电力企业事故的调查通报, 统计结果显示: 其间共发生 109 起安全事故, 其中, 89 起事故由人为违规行为直接或间接导致, 占比超过 81%; 18 起事故源于事物不安全状态引起的事故 (如设备故障、防护设施缺失等); 2 起事故则是员工突发疾病造成的。依据《企业职工伤亡事故分类》(GB 6441-86), 本文对 89 起违规行为引发事故中涉及的“人为违规行为”进行分类, 并统计各类行为造成的伤亡情况和事故起数, 具体分类统计数据见表 4。

表 4 事故数据

类别	违规行为	事故/起	伤亡统计
B1	在必须使用个人防护用品用具的作业或场合中, 忽视其使用	14	14 人死亡
B2	使用不安全设备	6	5 人死亡, 1 人重伤

表 4 （续）

类别	违规行为	事故/起	伤亡统计
B3	在起吊物下作业、停留	1	1 人死亡
B4	攀、坐不安全位置	17	22 人死亡，4 人受伤
B5	操作错误，忽视安全，忽视警告	23	33 人死亡，2 人重伤，1 人受伤
B6	机器运转时加油、修理、检查、调整、焊扫、清扫等工作	4	3 人死亡、2 人重伤
B7	冒险进入危险场所	24	34 人死亡

4.1 评估指标赋值

一般判断各种行为造成事故后果的严重性，需要依据事故伤亡情况和经济损失数据计算得出。因此，本文基于表 4 中的伤亡统计结果以及事故起数计算伤亡均值，并根据表 1 中对 S 的具体描述，确定事故后果严重性 S 的得分。同时，将事故起数视为违规行为出现的频次，根据式（8）计算违规行为出现的频率 F_i ，并依据表 2 确定频繁性 F 。此外，事故发生概率 P 的计算公式为式（9）。上述各项指标的具体计算结果详见表 5。

$$F_i = \frac{N_i}{N_c} \tag{8}$$

$$P = \frac{N_i}{N} \tag{9}$$

式中： i 表示行为类别， $i=1,2,\cdots,7$ ； N_i 表示第 i 类行为的事故起数； N_c 为违规行为出现的总次数，本文以人为违规行为引起的事故起数作为出现次数； N 表示事故总起数。

表 5 计算结果

代号	S	$P/\%$	F	Z	危险等级
B1	7	12.84	2	0.46	II
B2	6	5.50	2	0.23	I
B3	7	0.92	0.1	0.11	I
B4	8	15.60	2	0.62	III
B5	9	21.10	4	0.98	IV
B6	7	3.67	0.1	0.16	I
B7	8	22.02	4	0.89	IV

4.2 指标权重与行为危险综合评估值计算

结合各指标的赋值情况，违规行为共有 7 种类型，据此构建原始数据矩阵 $X_{7\times 3}$ 。以 F 指标为例，

其权重 ω_1 计算过程如下。

首先，根据式（2）进行标准化处理，得到标准化 F 值为（0.33,0,0.33,0.67,1,0.33,0.67）。

然后，通过式（10）~（12）计算得出 F 的权重 ω_1 。在计算数值概率时，以 B1 类行为为例，其类行为的概率 P_{i1} ：

$$P_{i1} = \frac{y_{i1}}{\sum_{i=1}^7 y_{i1}} = \frac{0.33}{3.33} = 0.1 \tag{10}$$

其中， y_{i1} 是标准化 F 的值。

通过上述概率计算方法，得到 F 指标的违规行为概率 P_{i1} 为（0.1,0,0.1,0.2,0.3,0.1,0.2）。

$$e_1 = -\frac{1}{\ln 7} \times \sum_{i=1}^7 (P_{i1} \times \ln(P_{i1})) = -0.514 \times (-0.628) = 0.32 \tag{11}$$

式中： e_1 为指标 F 的信息熵。

同理，可计算得出各指标的信息熵 e_j ，结果分别为（0.32,0.34,0.35）。

$$\omega_1 = \frac{1-e_1}{\sum_{j=1}^3 (1-e_j)} = \frac{0.68}{1.99} = 0.34 \tag{12}$$

根据上述计算过程，同理可计算得到另外两项指标的权重分别为 $\omega_2 = 0.33$ ， $\omega_3 = 0.33$ 。

将各指标的权重代入式（7），可计算出每类违规行为的危险综合评分 Z ，具体结果见表 5。结合表 5 的计算结果，可以看出“操作错误，忽视安全，忽视警告”（B5）和“冒险进入危险场所”（B7）行为属于高危险等级，容易导致伤亡程度高、经济损失大的事故后果，是必须优先处理的行为，需要立即予以整改；“攀、坐不安全位置”（B4）行为则属于较高危险等级的违规行为，须采取有效措施进行防控；“在必须使用个人防护用品用具的作业或场合中，忽视其使用”（B1）属于中等危险行为，同样应引起重视，加强监管；其余违规行为危险等级虽然相对较低，但仍须加强管理，否则也可能造成恶劣影响。

根据行为的评估结果，电力企业管理层在开展新员工培训时，应着重强调“操作错误，忽视安全，忽视警告”“冒险进入危险场所”“攀、坐不安全位置”及“在必须使用个人防护用品用具的作业或场合中，忽视其使用”等行为的危险性。对于高危险性的行为，企业应尽快开展针对性的安全教育培训，并采取有效整改措施，以杜绝此类违规行为的

出现。同时,现场监管人员除要加强日常监管力度外,还应适当提高对高风险等级违规行为的巡查频次,以确保生产现场的安全。

5 结论

本文借鉴LEC评估法核心理念,构建了针对违规行为的危险评估模型,该模型包含三项危险评估指标,分别是事故后果的严重性 S 、事故发生概率 P 、违规行为出现的频繁性 F 。与传统LEC法计算危险性不同,本文采用熵权法综合评估违规行为的危险性,并划分危险等级。为验证模型的有效性,将危险评估模型应用于电力企业的违规行为评估中,通过采集和统计各类违规行为引起的事故起数以及伤亡人数,对各指标进行赋值,并计算出各指标的熵权以及违规行为的危险综合评分。研究结果表明,基于LEC-熵权法构建的车间生产违规行为危险评估模型能够有效量化违规行为风险,验证了模型在车间生产违规行为危险评估中的适用性与有效性。

参考文献:

- [1] 黄博涛,曹玉鑫. 2015—2024 年中国重特大生产安全事故分析[J]. 中国公共安全, 2024(8):1-4.
- [2] 迟鹏德,曹庆贵. 基于未确知测度理论的矿工不安全行为风险评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(4): 120-125.
- [3] 杨文旺,邢浩然. 煤矿爆破工不安全行为致因分析与控制[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3):983-987.
- [4] 郑侨宏,韩勇. 基于多元联系数的矿工不安全行为风险态势评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(2): 186-192.
- [5] 王伯翔. 机械制造业作业岗位不安全行为风险评估及预测研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2021.
- [6] 许素睿. 基于蒙特卡罗法的煤矿工人不安全行为风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(4):172-178.
- [7] 佟瑞鹏,马晓飞. 基于蒙特卡罗法的家具制造工人不安全行为风险评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(7):187-192.
- [8] 李红霞,樊恒子,陈磊,等. 智慧矿山工人不安全行为影响因素模糊评价[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(1): 39-43.
- [9] 刘海滨,周佳宁,路燕娜. 基于云模型的煤矿员工不安全行为评价研究[J]. 中国煤炭, 2017, 43(10):123-127.
- [10] 马奔,张洪铭,冯祥瑞,等. 基于 Grey-DEMATEL-ISM 法的化学化工类专业学生实验不安全行为的影响因素研究[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(5):266-274.
- [11] 陆莹,吴国琛,邓韞璇,等. 基于 BIM-改进 LEC 法的地铁施工安全风险自动评价方法[J]. 土木工程学报, 2022, 55(增刊 2):129-138.
- [12] 许兴武,吴浩,刘永强,等. 基于改进 LEC 法的堤防施工危险源辨识及评价[J]. 水电能源科学, 2022, 40(5): 131-134.
- [13] 李银红,陆诗阳,孙一文,等. 基于组合赋权的生物技术人员不安全行为评估指标体系研究[J]. 军事医学, 2023, 47(11):862-866.
- [14] 付鸿鑫,徐颖,程琳,等. 基于熵值-G2 法改进 LEC 法的地铁施工安全评价[J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(1):111-120.
- [15] 杨亚琪. 铜冶炼企业稀贵车间双重预防机制的研究和应用[D]. 天津:天津理工大学, 2023.
- [16] 郭红领,张知田,郁润. 基于危险系数的施工工人不安全行为评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(11):873-879.
- [17] 田水承,郭谦,张江江,等. 基于蒙特卡罗法的建筑工人不安全行为风险评估[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(2):373-379.
- [18] 汪岩. 基于改进型的风险矩阵构建中石油国际业务社会安全风险评价体系库初探[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(增刊 2):5-10.

(责任编辑 章践立)