

基于层次分析法的危化品道路运输事故风险分析方法

单心如, 王峰*, 李晓智, 边靖

北京化工大学国家危险化学品生产系统故障预防与监控基础研究实验室, 北京

收稿日期: 2023年7月21日; 录用日期: 2023年8月21日; 发布日期: 2023年8月30日

摘要

危化品的需求量呈不断上升趋势, 随之危化品道路运输过程中的火灾、爆炸、泄漏等事故数量也不断上升, 危害性极强。为了全面辨识危化品道路运输危险性和预防危化品道路运输事故的发生, 本文提出一种基于层次分析法的危化品道路运输关键风险因素权重计算方法, 首先, 从危化品、人员、设备、环境和管理五方面影响因素入手, 分析危化品道路运输安全的关键影响因素; 系统分析危化品道路运输事故的主要原因, 利用层次分析法建立危化品道路运输风险评价层次结构, 进行危化品道路运输事故风险分析, 确定各因素对应评价指标权重并进行量化处理; 利用指标权重来判定各因素对事故发生的影响程度, 对其中权重较大的影响因素提出对应合理的安全对策措施, 有效降低事故发生概率。研究成果将有助于预防危化品道路运输事故危害, 减少人身伤亡和财产损失。

关键词

危化品, 层次分析法, 危化品运输, 风险, 安全对策措施

Risk Analysis of Hazardous Chemical Road Transportation Accidents Based on Analytic Hierarchy Process

Xinru Shan, Feng Wang*, Xiaozhi Li, Jing Bian

National Foundation Research Laboratory of Fault Prevention and Control in Hazardous Chemicals Production System, Beijing University of Chemical Technology, Beijing

Received: Jul. 20st, 2023; accepted: Aug. 21st, 2023; published: Aug. 30th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 单心如, 王峰, 李晓智, 边靖. 基于层次分析法的危化品道路运输事故风险分析方法[J]. 安防技术, 2023, 11(3): 30-39. DOI: 10.12677/jsst.2023.113004

Abstract

The demand for hazardous chemicals is on the rise, and the number of accidents such as fire, explosion and leakage in the road transportation of hazardous chemicals is also rising, which is extremely harmful. In order to fully identify the risk of road transportation of hazardous chemicals and prevent the occurrence of road transportation accidents of hazardous chemicals, this paper proposes a method for calculating the weight of key risk factors of road transportation of hazardous chemicals based on analytic hierarchy process. Firstly, the key influencing factors of road transportation safety of hazardous chemicals are analyzed from five aspects of hazardous chemicals, personnel, equipment, environment and management. The main causes of road transportation accidents of hazardous chemicals are systematically analyzed. The analytic hierarchy process is used to establish the risk assessment hierarchy of road transportation of hazardous chemicals, and the risk analysis of road transportation accidents of hazardous chemicals is carried out to determine the weight of each factor corresponding to the evaluation index and quantify it. The index weight is used to determine the influence degree of each factor on the accident occurrence, and the corresponding reasonable safety countermeasures are put forward for the influencing factors with larger weight, so as to effectively reduce the probability of accident occurrence. The research results will help to prevent the harm of hazardous chemicals road transport accidents and reduce personal casualties and property losses.

Keywords

Analytic Hierarchy Process, Hazardous Chemicals Transportation, Risk, Safety Measures

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

危化品种类繁多,很多危化品具有二重甚至多重危险性。目前化学工业快速发展,危化品种和用量的需求不断增长,危化品道路运输事故数量也不断上升,需要立刻采取措施,降低事故发生概率[1][2]。根据调查,危化品的道路运输事故的发生一般多个原因共同导致,这些原因有,包括车辆设备自身性能差、运输车驾驶人操作失误等直接原因,也包括企业管理不足、恶劣天气影响、危化品自身危险性等间接原因[3]。这些事故对人民健康生命安全财产、经济财产、环境都会造成一定危害[4]。

Lv, Z. [5]等划分了装卸作业、停车场、人防等八类因素作为主要指标,通过对各企业内部共同特征的总结,得出在运输企业分类中起着重要作用的因素; Bu, Q.M.等[6]通过对危化品安全运输的控制策略及措施的研究,提出了包括管理制度、风险预警机制和运输信息平台等的防范措施,建立运输行业标准; Chen, Z.S.等[7]对外包危险材料运输采用 PHFLTS 汇总个人评估,避免信息丢失且提高结果可靠性。众多国内学者也在道路危化品运输的风险分析展开研究,如通过熵权法确定评价指标权重,且进行定量数值和定性概念之间的转换,对危险品道路运输风险进行综合评定[8];通过对危化品运输事故的人为、财产、环境三方面的安全风险分析,提出安全风险防范策略[9]。当前对于危化品道路运输风险的研究在不断完善,但对影响因素考虑的方面较少、评价指标的选取较少,得出的结论局限性较大。

基于此,为了更加全面地辨识危化品道路运输危险性和预防危化品道路运输事故的发生,本文结合

定性分析方法与定量分析方法，结合辨识关键影响因素，建立危化品道路运输事故风险评价层次结构，通过计算分析，确定危化品道路运输过程中的影响程度较大的因素，提出针对性的安全对策措施，能够有针对性地将有效预防危化品道路运输事故的发生。

2. 建立层次结构

2.1. 影响因素分析

影响因素主要分析给危化品运输带来安全隐患的关键因素，为进一步建立危化品道路运输风险评价层次结构提供重要依据。由于危化品自身不稳定的性质，在运输时，相比普通货物的道路运输风险性更大。将危化品道路运输事故风险影响因素分为危化品因素、人员因素、设备因素、环境因素和管理因素五个方面来考虑对事故发生影响较大的关键因素[10]。

1) 危化品一般指具有腐蚀性、爆炸性、毒性、燃烧性、助燃等不同的物理化学性质，对人、设备、环境具有危害的化学品[11]。对危化品道路运输的影响因素主要包括危化品特性、危化品包装和运载量。

2) 人员因素主要体现在影响驾驶人，各种因素会影响驾驶人在运输过程中的应变能力的因素，造成人的失误，引发事故发生。主要包括责任心、心理承受能力、精神状态、工作压力、培训合格程度、技术能力、专业知识、工作经验、安全意识等。

3) 设备因素包括防护装备、车辆等方面存在的危害因素，直接影响了危化品运输系统的整体安全水平。危化品运输量一般来说重量较大，对设备有更高要求。主要包括车辆性能、防护装备、车辆检修情况、监控设备等因素。

4) 环境因素指危化品道路运输作业环境中的危害因素，对危化品道路运输安全性有着不可忽视的影响。主要包括交通密度、气象情况、季节影响、道路条件、地形等。

5) 管理因素指因管理不当造成的危害因素。由于危化品道路运输的特点，对其安全管理应有更高的要求。主要包括法律法规完善性、法律法规执行力、各部门之间配合、任务计划合理性、动态安全监控水平等因素。

2.2. 建立危化品道路运输事故风险评价层次结构

应用层次分析法指将与决策相关的元素分解成多个层次，进行定性和定量分析。该方法可以将危化品道路运输过程按照不同层次结构分解，求解判断矩阵特征向量，得到每一层次元素对应上一层次元素的权重，在进行总排序，得到个元素的组合权重，并根据排序结果分析和解决问题。

根据 2.1 中的危化品道路运输的影响因素建立危化品道路运输事故风险评价层次结构如表 1：

Table 1. Hazardous chemicals road transport accident risk assessment hierarchy structure

表 1. 危化品道路运输事故风险评价层次结构

目标层	准则层	指标层
危化品道路运输事故风险评价(T)	危化品(A_1)	危化品特性(B_1)
		危化品包装(B_2)
		运载量(B_3)
	人员因素(A_2)	责任心(B_4)
		心理承受能力(B_5)
		精神状态(B_6)

Continued

危化品道路运输事故风险评价(T)	人员因素(A ₂)	工作压力(B ₇)
		培训合格程度(B ₈)
		技术能力(B ₉)
		专业知识(B ₁₀)
		工作经验(B ₁₁)
		安全意识(B ₁₂)
	设备因素(A ₃)	车辆性能(B ₁₃)
		防护装备(B ₁₄)
		车辆检修情况(B ₁₅)
		监控设备(B ₁₆)
		交通密度(B ₁₇)
	环境因素(A ₄)	气象情况(B ₁₈)
		季节影响(B ₁₉)
		道路条件(B ₂₀)
		地形(B ₂₁)
		法律法规完善性(B ₂₂)
	管理因素(A ₅)	法律法规执行力(B ₂₃)
		各部门之间配合(B ₂₄)
		任务计划合理性(B ₂₅)
		动态安全监控水平(B ₂₆)

以上因素都在不同程度上可能会影响了危化品道路运输的安全性。在这些影响因素出现安全问题时,危化品道路运输危险性增加,从而导致发生事故的显著提高。为了确定影响程度较大的因素,更有针对性、有效地降低危化品道路运输的危险性,本文将层次分析法结合到危化品道路运输风险指标体系中,对各影响因素进行总体、全面的分析和计算,进而提出合理可行的安全对策措施。在进行实际应用时,可针对不同危化品对此结构进行进一步修正。

3. 基于层次分析法的危化品道路运输风险分析

层次分析法主要步骤有构造判断矩阵、计算特征向量及最大特征值、确定指标权重及一致性检验[12]。

3.1. 构造判断矩阵

根据危化品道路运输事故风险评价层次结构,将递阶层次结构各层上的元素按顺序与相应上一层元素进行比较,形成判断矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{mn}$, 有以下性质:

$$a_{ij} > 0, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ii} = 1 \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中 $a_n(i, j=1, 2, \dots, n)$ 代表元素 U_i 和 U_j 在其上一层元素重要性的比例标度。判断矩阵的值，反映了对各因素相对重要性的认识，一般采用 9 级标度法来进行赋值[13] [14]，具体如表 2。

Table 2. 9 Grade scale method
表 2. 9 级标度法

标度	含义
1	表示两个元素相比，具有同等的重要性
3	表示两个元素相比，前者比后者稍微重要
5	表示两个元素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述两个相邻判断的中间值
倒数	若元素 i 与元素 j 的重要性之比为 a_{ij} ，则元素 j 与元素 i 重要性之比为 $a_{ij} = 1/a_{ji}$

3.2. 计算特征向量及最大特征值

设判断矩阵 A 的最大特征根为 λ_{max} ，它对应的特征向量为 ω ，将 ω 归一化处理之后，转化为同一层次相应元素对于上一层次中的某个元素相对重要性的权重问题。

计算最大特征值：

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \tag{2}$$

3.3. 确定指标权重及一致性检验

判断矩阵不能够完全保持一致，必须进行一致性检验，计算一致性检验指标 CI ：

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{3}$$

一致性指标 CI 值越小表示判断矩阵接近完全一致的程度越大。若随机一致性比率 $CR = CI/RI < 0.10$ ，则说明比较矩阵判断和所求权重系数是可以接受的，若大于 0.1 则需要对其元素取值进行调整。随机一致性指标 RI 的取值见表 3。

Table 3. Average random consistency index RI value
表 3. 平均随机一致性指标 RI 取值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

4. 应用

4.1. 构造判断矩阵

为检验利用层次分析法判定各因素对事故发生影响程度、分析危化品道路运输风险的合理性，邀请

危化品生产企业安全管理人员、参与运输人员 8 位, 组成专家组, 针对近年发生危化品道路运输事故的原因特点, 按照经验对各指标进行打分。本文根据专家工作经验, 给予不同的赋值, 加权平均得到的评分四舍五入, 构造判断矩阵。对于一级指标可构造判断矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/4 & 2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/3 & 3 & 1/2 \\ 4 & 3 & 1 & 5 & 2 \\ 1/2 & 1/3 & 1/5 & 1 & 1/4 \\ 3 & 2 & 1/2 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

4.2. 计算特征向量及最大特征值

运用式(4)对列向量做归一化处理:

$$\bar{a}_{ij} = a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

得到的结果如表 4 所示。

Table 4. The weight of each index in T

表 4. T 中各指标权重

T	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	$\bar{\omega}$	ω
A_1	1	1/2	1/3	2	3	0.805	0.161
A_2	2	1	1/2	3	4	1.309	0.262
A_3	3	2	1	4	5	2.081	0.416
A_4	1/2	1/3	1/4	1	2	0.493	0.099
A_5	1/3	1/4	1/5	1/2	1	0.312	0.062

对其做归一化处理, 计算得到特征向量 $\omega = \{0.161, 0.262, 0.416, 0.099, 0.062\}$ 。

根据 $A\omega = \lambda_{\max}\omega$, 求出最大特征值 $\lambda_{\max}(A) = 5.068$ 。

4.3. 确定指标权重及一致性检验

根据式(3)将最大特征值 $\lambda_{\max}(A)$ 代入, 对结果进行一致性检验得到 $CI = 0.017$, 查看一致性指标 $RI = 1.120$, 得到一致性比例 $CR = CI/RI = 0.015 < 0.1$, 所以该判断矩阵指标结果通过一致性检验。

同理可确定其他指标权重, 如表 5~9。

Table 5. The weight of each index in A_1

表 5. A_1 中各指标权重

A_1	B_1	B_2	B_3	权重系数
B_1	1	4	3	0.623
B_2	1/4	1	1/2	0.137
B_3	1/3	2	1	0.239
$\lambda_{\max} = 3.018$		$CI = 0.009$	$CR = 0.018$	

Table 6. The weight of each index in A_2
表 6. A_2 中各指标权重

A_2	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}	B_{12}	权重系数
B_4	1	2	3	4	1/3	1/2	1/3	1/4	1/2	0.070
B_5	1/2	1	2	3	1/4	1/3	1/4	1/5	1/3	0.047
B_6	1/3	1/2	1	2	1/5	1/4	1/5	1/6	1/4	0.032
B_7	1/4	1/3	1/2	1	1/6	1/5	1/6	1/7	1/5	0.023
B_8	3	4	5	6	1	2	1	1/2	2	0.172
B_9	2	3	4	5	1/2	1	1/2	1/3	1	0.108
B_{10}	3	4	5	6	1	2	1	1/2	2	0.172
B_{11}	4	5	6	7	2	3	2	1	3	0.266
B_{12}	2	3	4	5	1/2	1	1/2	1/3	1	0.108
$\lambda_{\max} = 9.222$					$CI = 0.028$		$CR = 0.019$			

Table 7. The weight of each index in A_3
表 7. A_3 中各指标权重

A_3	B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{16}	\bar{w}	
B_{13}	1	1/2	1/6	1/4	0.071	
B_{14}	2	1	1/5	1/3	0.112	
B_{15}	6	5	1	3	0.558	
B_{16}	4	3	1/3	1	0.259	
$\lambda_{\max} = 4.079$					$CI = 0.026$	$CR = 0.030$

Table 8. The weight of each index in A_4
表 8. A_4 中各指标权重

A_4	B_{17}	B_{18}	B_{19}	B_{20}	B_{21}	权重系数
B_{17}	1	1/2	5	1/3	3	0.177
B_{18}	2	1	6	1/2	4	0.273
B_{19}	1/5	1/6	1	1/7	1/3	0.042
B_{20}	3	2	7	1	1/5	0.425
B_{21}	1/3	1/4	3	5	1	0.084
$\lambda_{\max} = 5.138$					$CI = 0.034$	$CR = 0.031$

Table 9. The weight of each index in A_5
表 9. A_5 中各指标权重

A_5	B_{22}	B_{23}	B_{24}	B_{25}	B_{26}	权重系数
B_{22}	1	1/2	1/3	1/5	1/4	0.062
B_{23}	2	1	1/2	1/4	1/3	0.099

Continued

B_{24}	3	2	1	1	2	0.161
B_{25}	5	4	3	1	2	0.416
B_{26}	4	3	2	1/2	1	0.262
		$\lambda_{\max} = 5.068$	$CI = 0.017$	$CR = 0.015$		

上表中计算出的各判断矩阵的一致性比例 CR 均小于 0.1, 均通过一致性检验说明计算得到的各因素权重具备一定的客观性。得到的各级指标权重与总权重[15]见表 10。

Table 10. Index weight at all levels

表 10. 各级指标权重

准则层	权重	指标层	权重	总权重	排序
A_1	0.161	B_1	0.623	0.100	3
		B_2	0.137	0.022	15
		B_3	0.239	0.038	8
A_2	0.262	B_4	0.070	0.018	17
		B_5	0.047	0.012	20
		B_6	0.032	0.008	22
		B_7	0.023	0.006	24
		B_8	0.172	0.045	6
		B_9	0.108	0.028	11
		B_{10}	0.172	0.045	7
		B_{11}	0.266	0.070	4
		B_{12}	0.108	0.028	12
A_3	0.416	B_{13}	0.071	0.030	9
		B_{14}	0.112	0.047	5
		B_{15}	0.558	0.232	1
		B_{16}	0.259	0.108	2
A_4	0.099	B_{17}	0.181	0.018	18
		B_{18}	0.275	0.027	13
		B_{19}	0.036	0.004	26
		B_{20}	0.291	0.029	10
		B_{21}	0.217	0.021	16
A_5	0.062	B_{22}	0.062	0.004	25
		B_{23}	0.099	0.006	23
		B_{24}	0.161	0.010	21
		B_{25}	0.416	0.026	14
		B_{26}	0.262	0.016	19

4.4. 结果讨论

基于层次分析法对各判断矩阵及各因素指标权重的计算,以及对结果进行的排序,可以看出:

以整个危化品道路运输事故风险评价层次结构来看,将影响因素划分为危化品、人员、设备、环境和管理五个方面,其中设备因素重要性最高,权重占比 0.416;管理因素重要性最低,权重占比 0.062。危化品道路运输事故风险影响因素重要性综合排序由高到低依次为:设备因素、人员因素、危化品因素、环境因素和管理因素。重要性最高的设备因素中,车辆检修情况因素和监控设备因素所占总权重最高,分别为 0.232 和 0.108,表明车辆检修情况差、监控设备不完善的情况下,对危化品道路运输事故发生的影响较大。此外,占总权重较高的影响因素还有危化品中的危化品特性因素、人员因素中的工作经验因素,分别占总权重的 0.100 和 0.070,分别表明若危化品本身具有的特性危险性越强、运输人员工作经验不足都会使危化品运输事故发生的概率提高。

为避免危化品道路运输事故发生,有效降低事故发生的概率以及随之而来的损失,针对占总权重较大的影响因素提出相应的安全对策措施:

1) 构建和完善危化品道路运输实时监控系統,利用无线通信、GPS、摄像头等硬件模块对运输车辆进行实时监控,准确获取车辆状态信息。及时发现安全隐患;在突发事故时及时联系相关部门,采取救援措施。

2) 对危化品运输车辆进行定期检修,准确检测出现的故障问题,提高车辆检修效率。

3) 加快危化品包装集裝化发展,使包装过程集裝化、机械化。同时保证危化品包装设计与制造工艺合理且符合要求。

4) 加强运输车辆驾驶人员安全教育,增加安全知识积累,提高安全文化素质。

5) 加设可靠性高的防护装备和配套安全装置,如热感灭火装置等。

5. 结论

本文通过对危化品道路运输可能发生的风险影响因素进行分析,结合危化品道路运输事故原因,通过对危化品道路运输的危化品、人员、设备、环境和管理五方面影响因素的分析,建立了危化品道路运输风险综合评价指标结构;结合专家经验,利用层次分析法计算各指标权重即各因素重要程度,并进行排序,得到影响危化品道路运输安全的权重较高的主要影响因素有:车辆检修情况、监控设备、危化品特性、工作经验等;针对危化品道路运输主要影响因素,提出对应的安全对策措施,能够在安全生产中进行有针对性的预防,保证各行业危化品道路运输的安全稳定健康发展,从而达到减少事故发生,保护人身和财产安全的目的。

基金项目

“天津市能源化工防爆安全重点实验室”资助项目:基于 AI 的防爆安全智能巡检技术研究和防爆物联网(ZX2022ZCTYF7612);能源化工防爆物联网监测预警技术研究(JD2319)。

参考文献

- [1] 何洋,王健,袁文燕.危险化学品运输模式的选择模型研究[J].北京化工大学学报:自然科学版,2014(1):122-127.
- [2] 郭健,杨淼禧,骆成,等.基于 LSTM 的跨海桥梁危化品车辆行驶轨迹预测[J].安全与环境工程,2023,30(2):101-108.
- [3] 骆成,周传贵,路亚妮.我国沿海危化品运输事故分析及危险源辨识[J].消防科学与技术,2022,41(1):67-71.
- [4] 程硕,阳富强.2011~2020 年我国危险化学品事故统计及灰色关联分析[J].应用化工,2023,52(1):193-198.

-
- [5] Lv, Z. and Lv, S. (2021) Study on Safety Evaluation of Hazardous Chemicals Transportation Industry in Capital City Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis. 2021 5th *International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Science (AEECS 2021)*, Chengdu, 9 July 2021, Article No. 03072. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124503072>
- [6] Bu, Q.M., Wang, Z.J. and Tong, X. (2013) Research on Cause Analysis and Safety Management for Road Transportation Accidents of Dangerous Chemicals. *Applied Mechanics and Materials*, **361-363**, 2282-2286. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.361-363.2282>
- [7] Chen, Z.S., Li, M., Kong, W.T., *et al.* (2019) Evaluation and Selection of HazMat Transportation Alternatives: A PHFLTS- and TOPSIS-Integrated Multi-Perspective Approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**, Article 4116. <https://doi.org/10.3390/ijerph16214116>
- [8] 梁雪琴. 危险品道路运输风险等级综合评价[J]. 公路交通科技, 2022, 39(4): 184-190.
- [9] 孙苗. 危化品交通运输安全风险分析及防范策略研究[J]. 现代商贸工业, 2018, 39(36): 39-40.
- [10] 孙宁, 王晶晶, 张营. 危化品道路运输安全风险分析及控制研究[J]. 物流科技, 2019, 42(7): 97-98.
- [11] 贾进章, 陈怡诺, 柯丁琳. 基于模糊集和改进 DS 证据理论的危化品道路运输体系贝叶斯网络风险分析[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 38-45.
- [12] 张涛, 武晓炜, 喻红波. 基于 AHP-FUZZY 施工现场安全评价研究[J]. 安防技术, 2019(4): 37-44.
- [13] 卢健强, 兰月, 郭金刚, 等. 基于层次分析法的配电网线损全周期精益化管理[J]. 东北电力技术, 2023, 44(2): 14-49.
- [14] 尚丽, 刘双, 沈群, 等. 典型二氧化碳利用技术的低碳成效综合评估[J]. 化工进展, 2022(41): 1199-1208.
- [15] 汪婧, 刘武兵. 基于 AHP-模糊综合评价法的公共卫生事件网络舆情风险评估[J]. 北京化工大学学报(社会科学版), 2021(1): 23-29.