

基于FAHP-TOPSIS的危险品道路运输 风险评价研究

王寅,王富,徐玮迪,张晓娜

(武汉工程大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070)

摘要: 为有效评估危险品道路运输的风险,完善运输风险评价指标体系,提出一种基于FAHP-TOPSIS的风险评价方法。依据危险品道路运输的特点,在车辆因素中引入车辆性能与使用年限、车龄等指标,构建危险品运输风险评价指标体系;通过FAHP法获取指标权重,结合TOPSIS法计算实际情况与最优、最劣理想解之间的距离,以此对运输风险等级进行评价,提高评价结果的准确性与客观性。以某液氮运输企业为例,用FAHP-TOPSIS法对该企业的运输风险进行评价。结果表明:所评估企业的运输风险等级为一般风险,且人员因素和环境因素对运输风险的影响程度较大,应对其进行重点防控。

关键词: 危险品运输;道路运输;风险评价;模糊层次分析法;TOPSIS法

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0059-05

Assessment and Research on Road Transport Risk of Dangerous Goods Based on FAHP-TOPSIS

WANG Yin, WANG Fu, XU Weidi, ZHANG Xiaona

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Engineering University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to effectively assess the road transport risk of dangerous goods and improve the transport risk assessment index system, a risk assessment method based on FAHP-TOPSIS is proposed. Based on the characteristics of road transport of dangerous goods, the vehicle performance and service life, vehicle age and other indicators are introduced into the vehicle factors to establish the transport risk assessment index system of dangerous goods. The weights of the indicators are obtained through the FAHP method. Combined with TOPSIS method, the distance between the actual situation and the optimal and worst ideal solution is calculated to assess the transport risk level and to improve the accuracy and objectivity of the assessment results. Taking a liquid nitrogen transport enterprise as an example, the FAHP-TOPSIS method is used to assess the transport risk of this enterprise. The results show that the transport risk level of this enterprise is a general risk, and the influence of personnel and environmental factors on the transport risk is larger. Therefore, the focus should be on prevention and control.

Keywords: transport of dangerous goods; road transport; risk assessment; fuzzy analytic hierarchy process; TOPSIS method

0 引言

随着经济与产业的飞速发展,危险品运输的需求日益增多。我国危险品运输总量高达20.3亿t,实现大于10%的年增长。在所有危险品运输方式中,

我国公路运输方式占比70%以上,具有重要地位。不同于普通货物,危险品大都具有特殊的理化性质,如易燃易爆性、放射性、腐蚀性等,在运输过程中易出现侧翻、碰撞、泄漏、燃烧、爆炸、中毒等现象。运输过程往往伴随很大风险,一旦发生事故就可能造成较大的人员伤亡、财产损失及环境污染。因此,对危险品运输风险进行有效评价并及时采取预防和控制措施十分重要。

目前,对危险品道路运输风险评价方面的研究已取得一系列成果。部分学者侧重对危险品运输风险影响因素的探究,Fabinano^[1]在对路径风险评价中

收稿日期: 2024-04-18

基金项目: 武汉工程大学第十五届研究生创新基金资助项目(CX2023363)

作者简介: 王寅(1998—),女,硕士在读,从事危险品运输风险管控研究工作。

通信作者: 王富(1978—),男,博士,教授,从事应急交通管理及交通安全研究工作。电子信箱: wangfu@wit.edu.cn

考虑到交通条件、人员影响等因素,提出新的评价模型,降低了风险分析中的总体不确定性;张圣忠等^[2]提出载货量变化对于路径风险也有重要影响,建立了改进的风险评价模型;Niu^[3]采用生存分析方法分析了风险暴露因素对商用危险品卡车非事故里程的影响,并评价了特定驾驶环境的运输风险水平;基于集对论与变权理论的深入剖析,齐玉超^[4]对长三角区域特大型桥梁下的危险品运输的潜在风险进行了系统研究,成功识别并分析了关键影响因素,为相关部门和企业提供了有针对性的风险防范措施。另外,危险品风险评价方法也一直是学术界研究的热点,沈小燕^[5]构建了危险品物流企业指标体系,通过层次分析法获取了指标中的各项指标权重,并采用了模糊综合评价模型对企业运输风险进行评价,为提升危险品物流企业的安全管理水平提供了新的思路和方法;张建莉^[6]采用灰色聚类法,通过收集企业安全管理的相关数据,对企业的安全管理进行了风险评价研究;李淑霞^[7]基于变一致性优势关系粗糙集理论有效地评估危化品运输环境中的各种不确定因素对风险的影响程度,为制定相应的风险控制策略提供科学依据。

尽管在危险品运输风险评价方面已经取得了很多研究成果,但在评价指标选取方面有待优化,忽略了车辆性能与使用年限、车龄以及周边人口分布与密度等因素对运输风险的影响。另外,危险品运输风险评价方法也有待改进。传统方法在危险品风险评价中确实存在一些局限性,比如忽略了运输系统的模糊性和不确定性,主观性相对较强,从而影响评价结果的精确性。FAHP-TOPSIS法作为一种评价方法,结合了模糊层次分析法和技术一致性排序法,既能够很好地处理评价指标之间的模糊性和不确定性,又能在一定程度上提高评价的客观性,在项目评估、工程管理等各个领域得到了广泛应用。杨洋^[8]从3个不同维度构建了绿色港口评价体系,用FAHP-TOPSIS法分析了不同港口的绿色发展状况,并针对性地制定了合理的发展策略。王亮^[9]将FAHP-TOPSIS法应用到工程管理领域,将不同的超前地质预报方案与理想解进行比选,得到了最优方案。尽管该方法在诸多领域取得不错的效果,但在危险品运输风险评价方面却鲜有学者应用。鉴于此,在传统的危险品运输风险评价指标体系基础上加入了车辆性能与使用年限、车龄等指标,建立了新的评价指标体系,与以往的运输风险评价指标体

系相比更加符合实际。同时,将FAHP-TOPSIS法应用到危险品运输风险研究方面,利用FAHP法获得指标权重,能够将模糊的判断转化为数值,从而更好地反映危险品运输评价指标之间的关系。通过TOPSIS法将模糊的风险评价结果转化为确定性的距离值,进一步提高评估结果的可靠性和可解释性,为危险品运输风险评价方面的研究提供了新的思路与方法。最后通过实证研究,验证该方法的可行性。

1 危险品道路运输风险评价指标体系构建

通过查询文献资料、咨询专家意见,结合危险品运输事故成因理论进行分析,将人员风险因素,设备设施因素,道路因素,环境因素,管理因素和危险品因素这6个因素作为准则层。邀请危险品道路运输风险研究的高校专家学者和危险品运输企业的专业技术人员,对所选取的评价指标进行综合判定,以保留合理指标,剔除、合并或添加部分评价指标,最终确定19个二级指标,见图1。

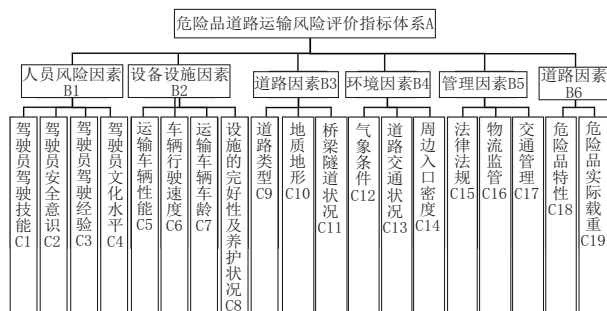


图1 危险品道路运输指标体系

2 基于FAHP-TOPSIS法的综合评价模型构建

2.1 各指标权重的确定

基于构建的危险品道路运输指标体系,我们采用了模糊层次分析法来明确各指标的权重。以下是详细步骤:(1)依据所设定的层次结构,邀请专家对评价指标体系中同一层次内评价指标的重要性进行比较并赋予相应的数值,以此量化指标间的重要性差异,从而确保权重分配的准确性和科学性。专家可以根据“0.1-0.9”标度法进行赋值,表示两个指标之间的重要程度。

$$R = (r_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: n 为指标个数; r_{ij} 为指标 i 比指标 j 的相对重要

度, $r_{ij} + r_{ji} = 1$, 其数值根据“0.1-0.9”标度法得出。

指标之间比较标度取值见表 1。

表 1 指标之间比较标度取值表

标度	含义
0.5	两风险指标同等重要
0.6	风险指标 i 比风险指标 j 稍微重要
0.7	风险指标 i 比风险指标 j 明显重要
0.8	风险指标 i 比风险指标 j 强烈重要
0.9	风险指标 i 比风险指标 j 极度重要
0.1, 0.2, 0.3, 0.4	反比较

(2) 利用公式对模糊互补矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 作数学变换, 得到模糊一致矩阵。

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^n r_{ik}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$f_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$F = (f_{ij})_{n \times n} \quad (4)$$

式中: r_{ik} 为模糊互补矩阵指标 i 比指标 j 的相对重要度赋值; f_{ij} 为模糊一致矩阵指标 i 比指标 j 的相对重要度赋值; F 为模糊一致矩阵。

(3) 模糊一致矩阵权

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2a} + \frac{\sum_{j=1}^n r_{ij}}{na}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$a = \frac{n-1}{2} \quad (6)$$

式中: w_i 为指标 i 相对上层指标的权重。

(4) 指标层次总排序

$$W_i = w_{AB_j} \times w_{B_j C_i} \quad (7)$$

式中: w_{AB_j} 为准则层 B_j 对目标层 A 的权重; $w_{B_j C_i}$ 为指标层 C_i 对准则层 B 的权重; W_i 为指标权重向量。

(5) 模糊判断矩阵的一致性检验

$$r_{ik} - r_{jk} = h(k = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中: h 为常数。

2.2 TOPSIS 评价模型

TOPSIS 法作为一种多属性决策分析方法, 通过比较各方案与理想最优解和理想最劣解的相对距离, 来评估它们与理想方案的贴近程度。该方法能够有效地应用于复杂问题的评价和排序, 从而帮助决策者从众多候选方案中挑选出最佳方案。本文将 TOPSIS 法中的最优、最劣方案替换为风险值最高、最低点, 对危险品运输风险指标体系进行评价, 得出各个风险因素的相对风险贴进度排序。

(1) 构建标准化样本矩阵

首先按式(9)及式(10)将各指标对应的数值转化为同一范围和量纲的数值:

$$\text{正向指标: } Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (9)$$

$$\text{逆向指标: } Z_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (10)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个对象的第 j 个指标的值; Z_{ij} 为标准化计算后的结果。

(2) 构造加权标准化矩阵

$$C = (c_{ij})_{m \times n} = (w_j z_{ij})_{m \times n} \quad (11)$$

式中: C 为加权标准化矩阵; w_j 为通过模糊层次分析法得出的权重向量。

(3) 贴近度计算

$$S_i^+ = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - x_c) \times (A_j^+ - x_c)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - x_c)^2} \times \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_j^+ - x_c)^2}} \quad (12)$$

$$S_i^- = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - x_c) \times (A_j^- - x_c)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - x_c)^2} \times \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_j^- - x_c)^2}} \quad (13)$$

$$E_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (14)$$

$$x_c = \frac{1}{2} (A_j^- + A_j^+) \quad (15)$$

式中: A_j^+ 为第 j 个指标的正理想解; A_j^- 为第 j 个指标的负理想解; E_i 为方案 i 对正理想解的相对贴近度。

3 实证分析

以武汉市危险品运输 M 企业为例, 该企业位于武汉市江岸区, 经营范围包括液氮等气体运输, 运输路线途径武汉大道、黄浦大街、建设大道等区域, 采用专用的液氮厢式运输车, 每车载重量约为 2 100 kg。将该企业道路运输液氮业务作为评价对象, 邀请 10 位具有专业性、经验丰富的专家学者与专业技术人员根据车辆、周边环境、道路条件等相关资料对影响该企业危险品运输安全的指标因素进行打分, 并应用文章建立的基于 FAHP-TOPSIS 的评价模型对其进行风险评价。

3.1 各指标权重的确定

以 6 个一级指标因素为例, 构建一级指标模糊互补矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.8 & 0.6 & 0.6 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.3 & 0.4 & 0.5 \\ 0.2 & 0.6 & 0.5 & 0.3 & 0.6 & 0.6 \\ 0.4 & 0.7 & 0.7 & 0.5 & 0.7 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.4 & 0.3 & 0.5 & 0.4 \\ 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.3 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (16)$$

依据式(3)计算得到一级指标模糊一致矩阵 F :

$$F = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.573 & 0.551 & 0.509 & 0.562 & 0.562 \\ 0.427 & 0.5 & 0.478 & 0.436 & 0.489 & 0.489 \\ 0.449 & 0.522 & 0.5 & 0.457 & 0.511 & 0.511 \\ 0.491 & 0.564 & 0.543 & 0.5 & 0.554 & 0.554 \\ 0.438 & 0.511 & 0.489 & 0.447 & 0.5 & 0.5 \\ 0.438 & 0.511 & 0.489 & 0.447 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (17)$$

经计算可得准则层 B 的 6 个一级指标对目标层 A 的权重向量为: $W_{AB_i}(0.197, 0.147, 0.160, 0.190, 0.153, 0.153)$, $w_1 = 0.197, w_2 = 0.147, w_3 = 0.160, w_4 = 0.190, w_5 = 0.153, w_6 = 0.153$, 其中 $w_1、w_2、w_3、w_4、w_5、w_6$ 分别表示人员风险因素、设备设施因素、道路因素、环境因素、管理因素和危险品因素对目标层 A 的权重。同理可计算指标层 C 的 19 个二级指标对目标层 B 的权重。根据式(7)计算指标层 C 的各个指标对目标层 A 的权重,得到指标体系权重向量 W 与指标层次总排序结果,见表 2。

表 2 层级指标权重及排序

准则层	w_{AB_j}	指标层	$w_{B_jC_i}$	w_{AC_i}	排序
B1	0.197	C1	0.258	0.051	8
		C2	0.283	0.056	6
		C3	0.242	0.047	9
		C4	0.217	0.043	11
B2	0.147	C5	0.208	0.030	15
		C6	0.267	0.040	13
		C7	0.242	0.035	14
		C8	0.283	0.042	12
B3	0.160	C9	0.283	0.046	10
		C10	0.367	0.058	5
		C11	0.350	0.056	6
B4	0.190	C12	0.250	0.047	9
		C13	0.350	0.067	3
		C14	0.400	0.076	2
B5	0.153	C15	0.283	0.043	11
		C16	0.350	0.054	7
		C17	0.367	0.056	6
B6	0.153	C18	0.600	0.091	1
		C19	0.400	0.061	4

3.2 TOPSIS 指标综合评价

为了更精确地评估和管理危险品道路运输风险,将运输风险划分为 5 个等级,见表 3。

通过对危险品道路运输风险评价指标进行分

表 3 风险等级判断标准

风险描述	风险等级	含义
风险极小	I	风险极小,一般不会发生事故
风险较小	II	风险较小,可能发生后果轻微事故
一般	III	临界状态,可能发生事故,暂时不会造成损失风险
风险较大	IV	风险较大,发生较大后果事故,需采取防范性措施
风险极大	V	风险极大,发生重大后果事故,需立即采取措施加以消除

析,并依据以往研究成果^[10]及专家所提建议,得到不同等级指标量化值与专家打分结果见表 4。

表 4 各指标量化值与专家打分结果

序号	I	II	III	IV	V	专家打分结果
C1	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	7
C2	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	7
C3	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	8
C4	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	6
C5	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	6
C6	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	6.5
C7	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	4.5
C8	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	6.5
C9	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	6
C10	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	7
C11	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	5
C12	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	5
C13	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	4
C14	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	5
C15	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	7
C16	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	6.5
C17	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	4.5
C18	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	3
C19	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2	6.5

基于收集的武汉市危险品运输 M 企业风险指标信息,建立人员因素初始评判矩阵:

$$D = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 10 & 10 \\ 8 & 8 & 8 & 8 \\ 6 & 6 & 6 & 6 \\ 4 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 7 & 7 & 8 & 6 \end{bmatrix} \quad (18)$$

在危险品道路运输风险评价指标的人员因素中,驾驶员驾驶技能、驾驶员安全意识、驾驶人驾驶经验、驾驶人文化水平均属于正向指标,值越大越好。通过 SPSS 软件分别计算人员因素的正负理想解、正负理想解距离和相对贴近度。

$$A^+ = \{0.664, 0.664, 0.641, 0.686\} \quad (19)$$

$$A^- = \{0.000, 0.000, 0.000, 0.000\} \quad (20)$$

$$S^+ = \{0.000, 0.332, 0.664, 0.996, 1.328, 0.517\} \quad (21)$$

$$S^- = \{1.328, 0.996, 0.664, 0.332, 0.000, 0.833\} \quad (22)$$

$$E_1 = \{1.000, 0.750, 0.500, 0.250, 0.000, 0.617\} \quad (23)$$

同理,可计算得到基于设施设备因素、道路因素、环境因素、管理因素、危险品因素的各风险等级贴近度分别为

$$E_2 = \{1.000, 0.750, 0.500, 0.250, 0.000, 0.481\} \quad (24)$$

$$E_3 = \{1.000, 0.750, 0.500, 0.250, 0.000, 0.495\} \quad (25)$$

$$E_4 = \{1.000, 0.750, 0.500, 0.250, 0.000, 0.335\} \quad (26)$$

$$E_5 = \{1.000, 0.750, 0.500, 0.250, 0.000, 0.492\} \quad (27)$$

$$E_6 = \{1.000, 0.750, 0.500, 0.250, 0.000, 0.358\} \quad (28)$$

结合FAHP法计算的一级指标权重,可得到综合评价向量 $H=\{1.000, 0.750, 0.500, 0.250, 0.000, 0.465\}$ 。

3.3 评价结果分析

由综合评价向量 H 可得,该企业的危险品运输风险值为0.465,因此可判定该企业危险品运输风险等级为Ⅲ级,与实际相符合,较为真实地反映该企业运输风险状态。由表中各个一级指标权重可知,人员因素 B_1 和环境因素 B_4 权重相对较高,是影响危险品道路运输的两类关键因素。在指标层次总排序结果中,周边人口密度 C_{14} 、道路交通状况 C_{13} 以及危险品特性 C_{18} 等占比相对较大。因此,在危险品运输中要重点关注这几类风险,加强对驾驶人的管理,安排路线时应尽量避开人口密度较大的区域,同时加大对该路段危险品实时运输管理的监控力度,降低运输风险。

4 结 语

(1)根据危险品道路运输的特点,分析危险品道路运输风险的相关影响因素。综合采用实地调研、专家咨询和资料查询等多种方式,精准选取评价指标,构建新的危险品道路运输风险评价指标体系。这些指标涵盖多个方面,包括人员风险因素、设备设施条件、道路状况、环境因素、管理因素以及危险品特性。

(2)采用FAHP与TOPSIS结合的方法对危险品道路运输风险进行评价。首先采用FAHP法获取各指标权重,找出了影响危险品道路运输风险的关键因素即人员因素与环境因素;其次通过指标层次总排序进一步发现周边人口密度、道路交通状况以及危险品特性等对于危险品运输影响较大,危险品实

际载重量与物流监管等因素次之;最后运用TOPSIS法计算实际情况与最优、最劣理想解之间的距离,以此对运输风险等级进行评价,提高了评价结果的准确性与客观性。

(3)以武汉市M企业为例,用FAHP-TOPSIS法对该企业当月运输风险等级进行评价,结果表明运输风险等级为Ⅲ级,存在一定程度的潜在风险。针对这一评估结果,管理者应在日常管理中重点关注人员因素和环境因素对运输活动的影响。在运输路线选取时,应尽量避开人口密度较大的区域,以降低事故发生的可能性。为了最大限度地减少运输风险,企业应在运输前选择适合危险品性质和运输方式的包装,并严格按照相关规定确定合适的载重量。在运输过程中进行实时监控,便于及时发现问题并采取相应的应对措施,从而降低风险发生的可能性,确保运输过程中的安全性和稳定性。

(4)本研究中构建的指标体系选取较为全面,评价方法具有较强的可行性和有效性,有效解决评价过程中的复杂性、模糊性、不确定性问题,适用性较强,可应用于危险品运输风险评价方面,有效帮助相关部门对危险品运输风险进行科学评估和有效管理。

参考文献:

- [1] Fabiano B, Curro F, Pastorino R. A framework for risk assessment and decision-making strategies in dangerous good transportation[J]. 2002, 93(1): 1-15.
- [2] 张圣忠,陈婷婷,孙荣庭,等.考虑载货量的危险品运输车辆路径优化[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2020, 42(4): 290-297.
- [3] Niu Shifeng, Ukkusuri Satish-V. Risk Assessment of Commercial dangerous -goods truck drivers using geo-location data: A case study in China[J]. 2020(137): 105427.
- [4] 齐玉超,张卫刚,陆健.基于集对变权特大桥梁危险品运输安全评价研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(4): 589-593; 651.
- [5] 沈小燕,刘浩学.基于模糊综合评价法的危险化学品物流企业安全评价[J]. 上海海事大学学报, 2008(2): 66-71.
- [6] 张建莉.公路运输液态化学品风险辨识及危险度评价研究[D]. 西安:长安大学, 2006.
- [7] 李淑霞,闫晓青.基于VC-DRSA的危化品公路运输风险不确定因素分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2013, 39(4): 509-513.
- [8] 杨洋,王磊.基于FAHP-TOPSIS法的环渤海湾绿色港口评价研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2019, 32(2): 104-110.
- [9] 王亮,郝海鹏,郑向向,等.基于FAHP-TOPSIS的岩溶隧道超前地质预报方案优化[J]. 灾害学, 2023, 38(4): 39-44.
- [10] 付景浩,王浩楠.基于AHP-TOPSIS的港口机械设备安全风险评价研究[J]. 设备管理与维修, 2023(20): 66-68.