

基于熵权TOPSIS模型的爆破作业安全风险影响因素评价分析

黎明^{1,2}, 刘华丽¹, 邢英¹, 张锐¹, 范文杰²

¹中国人民解放军陆军工程大学野战工程学院, 江苏 南京

²69006部队, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年4月16日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月16日

摘要

为科学评价爆破作业安全风险影响因素, 文章建立了基于熵权和TOPSIS方法相结合的爆破作业安全风险评价模型。该模型以“三实”作业法律法规为基础, 运用熵权法精准确定了影响因素的指标权重, 并利用TOPSIS法对爆破作业的影响因素, 如安全管理、人员、环境、设备等, 进行分级评价, 得出影响因素的最优排序结果, 从而设计出爆破作业的最合理方案。最后通过实践验证了本方法的可行性, 其结果表明该模型方法可靠有效, 且有效避免了主观性。

关键词

熵权法, TOPSIS法, 爆破作业, 爆破作业影响因素, 评价分析

Evaluation and Analysis of Influencing Factors of Safety Risks in Blasting Operations Based on Entropy Weight and TOPSIS Model

Ming Li^{1,2}, Huali Liu¹, Ying Xing¹, Rui Zhang¹, Wenjie Fan²

¹College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu

²Unit 69006 of PLA, Urumqi Xinjiang

Received: Apr. 16th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 16th, 2025

Abstract

To scientifically evaluate the factors affecting the safety risks of blasting operations, this paper

文章引用: 黎明, 刘华丽, 邢英, 张锐, 范文杰. 基于熵权 TOPSIS 模型的爆破作业安全风险影响因素评价分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(5): 405-416. DOI: 10.12677/mos.2025.145403

establishes a blasting operation safety risk assessment model based on the combination of entropy weight and the TOPSIS method. This model is based on the laws and regulations of the “Three Realms” operation and uses the entropy weight method to accurately determine the index weights of influencing factors. The TOPSIS method is used to grade and evaluate the influencing factors of blasting operations, such as safety management, personnel, environment, equipment, etc. The optimal ranking of influencing factors is obtained, and the most reasonable blasting operation plan is designed. Finally, the feasibility of this method is verified through practice, and the results show that the model method is reliable and effective and effectively avoids subjectivity.

Keywords

Entropy Weight Method, TOPSIS Method, Blasting Operation, Factors Affecting Blasting Operations, Evaluation Analysis

Copyright © 2025 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

爆破作业作为一项高风险、高挑战、高难度、高精度度的特殊作业，在新形势下，面临着强度攀升、难度剧增、环境复杂多变、设施设备可靠性波动等严峻挑战，如何准确、全面、客观地评估爆破作业的安全风险，探究多事故风险传递的关键路径[1]，提前预知和把握风险危机，及时采取应对之策，积极争取风险管控主动权，已成为爆破作业领域内研究的热点问题。

近年来，国内外很多学者积极探索爆破作业安全风险评估方法。胡义焕[2]等用模糊综合评判与危险性分析法进行了施工安全风险评价，但指标数值矩阵阶数较大，计算过程繁琐，实际应用有所受限；王涛[3]等利用模糊层次分析法构建爆破效果评价体系，该方法依赖专家主观赋值来判断指标重要性，易导致评价结果主观性较强；Bhagya Jayasinghe [4]等利用层次分析法分析评价爆破安全评价体系中各因素的影响情况，但比较因素较多，易导致矩阵一致性构造能力弱、标度值与排序方法不一致等问题；单仁亮[5]等提出了基于灰色关联分析的综合评价模型在爆破方案选定中的应用，将指标的关联系数及权重相结合，提出了爆破方案综合评价模型，在一定程度上解决了主观因素影响偏大的问题，但评价体系在复杂现实场景中适用性不足；王佳[6]提出基于多属性决策的工业控制系统安全风险评估方法，根据控制系统网络结构，构建安全风险评估模型，但通过多个决策者参与赋值判断系统脆弱性，导致指标体系时效性、可靠性欠佳。

鉴于上述问题，本文在前人研究的基础之上，从爆破作业方案生成的影响因素出发，引入熵权 TOPSIS 法构建爆破作业安全风险影响因素指标评价模型，旨在为爆破作业方案优选提供更科学、更可靠的方法和建议。

2. 爆破作业安全风险影响因素指标体系构建

2.1. 影响因素关联指标的建立

爆破作业安全风险影响因素指标构建可采取风险管理的方式，通过风险识别确定安全风险因素，参考工程爆破和安全风险评估相关文献[7]-[10]，构建包含 4 个一级指标和 16 个二级指标的爆破作业安全风险影响指标，如图 1 所示。

1) 安全管理。安全管理是指为推进爆破作业全流程、全要素、全方位的安全预防,实现从开始到结束、从个人到组织、从局部到系统的全面安全管理。其以风险管理为核心,全面提高安全风险防控能力和效率。主要包括基础训练、安全检查、爆破器材管理和安全教育培训。

2) 人员因素。人是实施爆破作业的主体,涵盖各个要素、各个环节、各个层面,需全面考量人员专业素质,包括指挥员、勤务人员、作业手和技术能手,严格依法依规操作是确保安全的前提。

3) 环境影响。爆破作业环境影响是指爆区及周围的自然及人为条件对爆破安全的影响,主要分为爆炸物储存和自然环境影响,如气象条件、地质条件、光照条件等。合理选择有利环境条件是爆破作业安全设施的前提。

4) 爆破器材。爆破器材是实施爆破作业安全的重要物质基础,器材的正常使用、精心维护、安全运行和科学检修,使其处于良好的技术状态是保障爆破作业的物质基础。主要包括炸药质量、起爆网络和器材质量等。

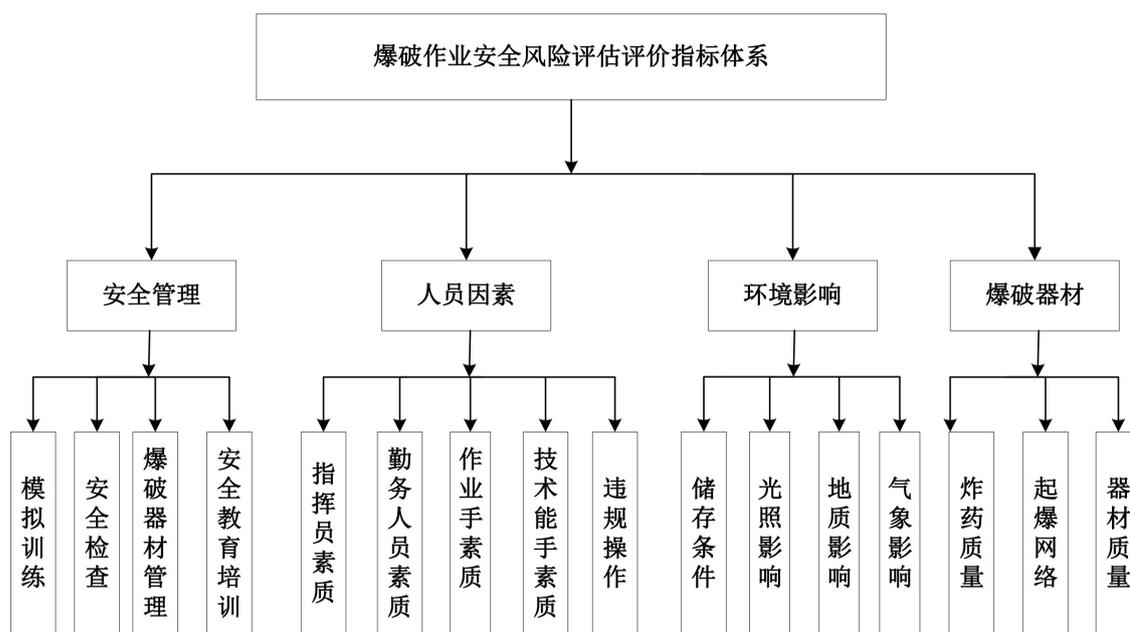


Figure 1. Indicators of influencing factors for safety risk assessment of blasting operations

图 1. 爆破作业安全风险评估影响因素指标

2.2. 建立影响因素指标评价指数矩阵

Table 1. Risk assessment index matrix for blasting operations

表 1. 爆破作业风险评估指数矩阵

可能性等级	严重性等级				
	灾难	严重	轻度	轻微	
A 频繁	1	3	7	13	
B 有可能	2	5	9	16	
C 有时	4	6	11	18	
D 极少	8	10	14	19	
E 不可能	12	15	17	20	

本文采用 GB 6722-2014《爆破安全规程》[11]和《民用爆炸物品安全管理条例》[12],制定评判标准,从风险因素发生的概率和严重性程度进行估计和评价,然后对风险度量化排序,从而确定各种风险的相对重要性并识别出关键风险。危险可能性分为频繁发生(A级)、很可能发生(B级)、有时发生(C级)、极少发生(D级)和不可能发生(E级)5个级别。爆破作业风险评估指数矩阵,通常将最高风险指数定为1,对应于危险事件频繁发生并具有灾难性后果。最低风险指数为20,对应于危险事件几乎不可能发生且后果轻微,如表1、图2所示。

评估指数为1~5,为不可接受的风险;评估指数为6~9,为不希望有的风险,需由指挥员决策;评估指数为10~17,经专家评审后方可接受;评估指数为18~20,不经评审即可接受。

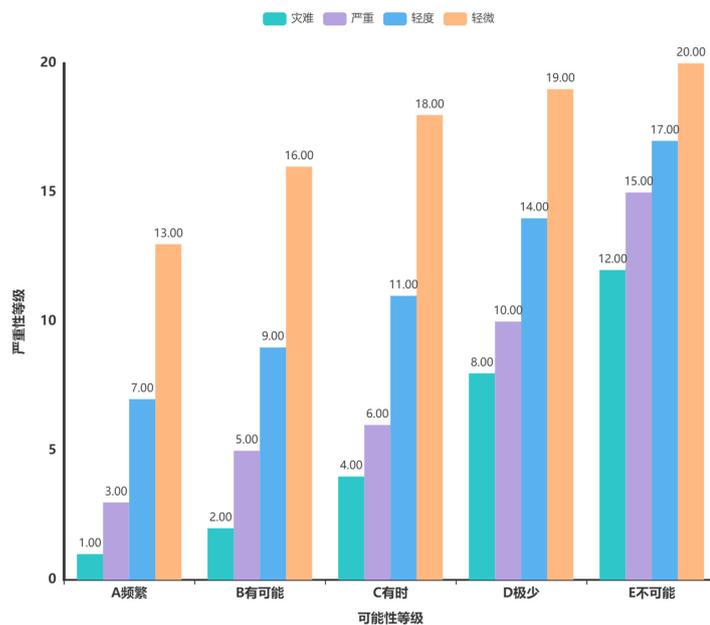


Figure 2. Risk assessment index chart for blasting operations
图2. 爆破作业风险评估指数图

3. 爆破作业安全风险评估模型构建

在确定好影响因素指标体系构建的基础上,本文提出的熵权法与TOPSIS法相结合的爆破作业安全风险评估模型,是一种多元决策分析方法模型[13]。熵权法是定性与定量相结合的权重系数结构分析法,可根据各项指标的变异程度来确定指标权重,是一种客观赋权法,可避免人为因素带来的影响;TOPSIS法是针对多指标多对象的一种综合评价方法,可以反映各方案与最优解之间的差距;将两种方法结合,克服了主观条件影响的同时,可在复杂无序的决策方案中得到合理的评价结果。

3.1. 构建初始指标矩阵

构建多指标决策矩阵 A , x_1, x_2, \dots, x_n 表示爆破作业安全风险影响因素评价指标,用 n 个指标对 m 个待评价对象进行评价,得到 $m \times n$ 个评价数据 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$),则原始数据矩阵为:

$$A = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$$

3.2. 指标矩阵规范化

在爆破作业安全风险影响因素评价体系中,不同指标有不同的计量单位,且在数值范围上也存在较大差异。为确保数据的可比性与分析的有效性,采用极差法对指标矩阵进行标准化处理,消除不同类型评价指标的量纲和正负不一致性,从而得到标准化矩阵 Y :

$$Y = \begin{cases} y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} & \text{当 } y_{ij} \text{ 为正向指标时} \\ y_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} & \text{当 } y_{ij} \text{ 为负向指标时} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\max(x_{ij})$ 、 $\min(x_{ij})$ 分别为评价指标内的最大、最小值。为避免标准化后数据出现零值或负值影响后续运算意义,对数据进行整体平移,即 $y_{ij} = y_{ij} + \alpha$, 为最大限度保留原始数据, α 取值尽可能小,所以取 $\alpha = 0.0001$ 。

3.3. 基于熵权的影响因素权重确定

1) 计算初始指标权重。针对给定的第 j 项评价指标,计算第 i 个备选方案在该指标上的数值所占的比重 p_{ij} 。

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

2) 计算熵值。熵值 e_j 用于衡量不确定性的指标,熵值越小,其不确定性越低,则该指标在整个集合中的重要性和影响力越大,其相应的权重也越大。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

3) 计算第 j 项指标差异系数。差异系数 g_j 能够有效衡量各个指标的变异程度,反映了各个指标的波动情况。差异系数越大,效用值越大,在综合评价中所赋予的权重越大,反之,权重相对较小。

$$g_j = 1 - e_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

4) 计算权重系数。权重系数 ω_j 能够反映不同指标在综合评价中的重要程度,使评价结果更加科学、合理。

$$\omega_j = \frac{g_j}{\sum_{i=1}^m g_j} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

计算指标的权重为 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ 。

5) 计算各方案的加权矩阵。将归一化处理的风险评价矩阵与熵权法确定的权重相乘,计算加权归一化处理矩阵 C :

$$C = (y_{ij})_{mn} = (\omega_j p_{ij})_{mn} \quad (7)$$

3.4. 基于 TOPSIS 模型的影响因素分析

1) 确定正负理想解。将爆破作业安全风险评估方案的正理想解和负理想解分别记为 C^+ 和 C^- :

$$C^+ = [C_1^+, C_2^+, \dots, C_m^+], C^- = [C_1^-, C_2^-, \dots, C_m^-] \quad (8)$$

正理想解:

$$C^+ = \max(C_{1j}, C_{2j}, \dots, C_{mj}) \quad (9)$$

负理想解:

$$C^- = \min(C_{1j}, C_{2j}, \dots, C_{mj}) \quad (10)$$

2) 计算最优距离与最劣距离。通过得出的正负理想解得出欧式距离:

$$d^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$d^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

3) 计算各评价对象与最优方案的理想贴近度:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (13)$$

C_i 的取值范围为[0,1], 最优解与最差解的 C_i 值分别为 1 和 0, 越接近 1 说明评价对象的评分越好。安全风险评估最终按照贴近度的大小对评价结果进行排序, 相对贴近度越大, 则爆破作业安全风险影响因素风险越高, 可能发生安全事故的风险越高; 相对贴近度越小, 则爆破作业安全风险影响因素风险越低, 可能发生安全事故的风险越低。

基于熵权和 TOPSIS 模型构建的爆破作业安全风险影响因素评估评价流程图如图 3 所示。

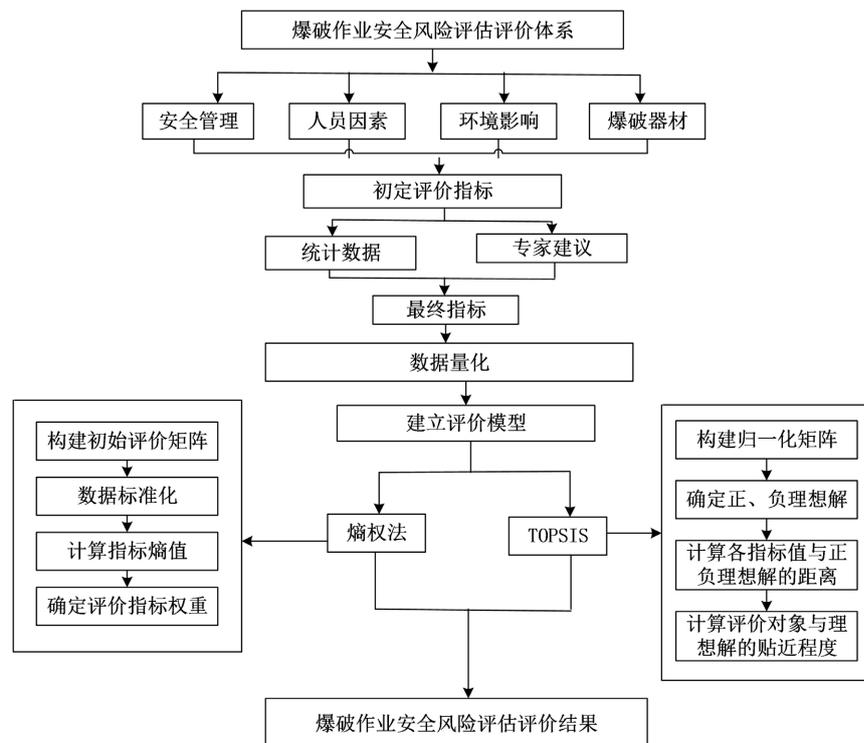


Figure 3. Flowchart for safety risk assessment and evaluation of blasting operations
图 3. 爆破作业安全风险评价流程图

4. 案例应用

4.1. 案例验证

某单位计划组织爆破作业，任务涉及 6 支分队。根据图 1 建立的爆破作业安全风险影响因素指标体系，统计各分队参训人员、时间、爆破器材种类和数量、场地和环境等基础数据。根据表 1 中爆破作业安全风险评估指数，得出各分队爆破作业实施方案，如表 2 所示。

4.2. 案例分析

4.2.1. 初始数据

爆破作业安全风险评估影响因素的初始指标确定，可以组织人员填写《爆破作业安全风险评估指标重要性调查问卷》，并邀请多位专家对影响因素指标的重要性打分。结合李克特量表法[14]，判断被调查者对爆破作业影响因素的态度强弱以及在这一量表上的不同状态。需要说明的是，在爆破作业实践中，影响安全风险的指标还有很多，且不同专家对评估指标相对重要性的认知是有差别的。

爆破作业安全风险影响因素评价指标既包括定性指标，如安全教育培训、指挥员素质、勤务人员素质等，也包含定量指标，如光照影响、气象影响、炸药质量等。其中，定量指标进行归一化时又分为正向指标和负向指标，正向指标越大越好，如炸药质量、起爆网络等，负向指标越小越好，如违规操作、光照影响等。

Table 2. Index table for safety risk assessment of blasting operations

表 2. 爆破作业安全风险评估指标表

序号	一级指标	二级指标	指标类型	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
1	安全管理	模拟训练	定量(+)	9.8	8.8	9.6	8.1	7.2	8.6
2		安全检查	定量(+)	9.2	8.6	7.6	8.3	9.4	8.3
3		爆破器材管理	定性	7.5	9.1	8.2	9.4	8.3	7.4
4		安全教育培训	定性	9.3	9.4	9.4	9.6	9.1	9.6
5	人员因素	指挥员素质	定性	9.3	9.2	9.7	9.6	9.4	9.8
6		勤务人员素质	定性	8.9	9.1	8.7	8.8	8.6	9.2
7		作业手素质	定性	8.3	8.6	9.2	8.9	9.3	8.8
8		技术能手素质	定性	9.2	9.4	9.6	9.1	9.7	9.8
9	环境影响	违规操作	定量(-)	2.2	2.3	2.1	2.2	2.4	2.1
10		储存条件	定量(+)	9.7	9.6	9.8	9.4	9.7	9.9
11		光照影响	定量(-)	3.3	3.4	2.2	3.8	3.7	2.9
12		地质影响	定量(-)	2.3	2.1	2.6	2.4	2.8	2.1
13	爆破器材	气象影响	定量(-)	3.8	4.2	4.9	2.8	3.4	4.9
14		炸药质量	定量(+)	9.8	9.8	9.7	9.3	9.1	8.7
15		起爆网络	定量(+)	9.4	9.7	9.3	9.6	9.3	9.6
16		器材质量	定量(+)	9.1	9.3	9.2	9.6	9.5	9.1

4.2.2. 初始数据权重计算

根据问卷调查和专家打分情况，找出各指标之间的相互影响关系，构建网络层次模型[15]，如图 4 所示。

采用文献[9]所用方法，建立判断矩阵和超矩阵，然后借助 Yaamp 软件确定初始权重，如表 3 所示。

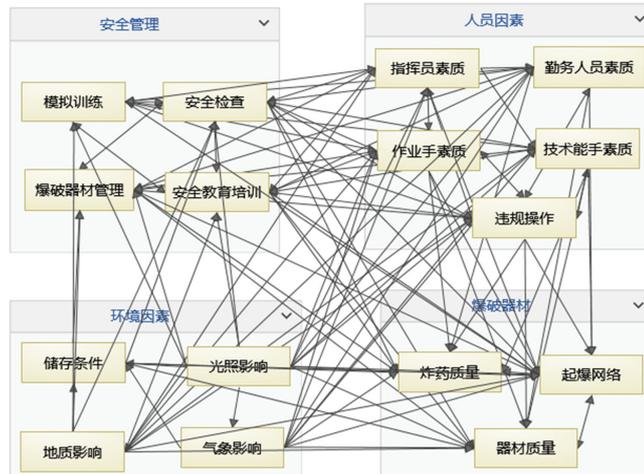


Figure 4. Network hierarchical model diagram
图 4. 网络层级模型图

Table 3. Initial indicator weights and ranking table
表 3. 初始指标权重及排序表

指标	归一化权重	极限权重	排序
模拟训练	0.336	0.095	4
安全检查	0.830	0.051	8
爆破器材管理	0.578	0.031	12
安全教育培训	0.187	0.049	9
指挥员素质	0.351	0.101	3
勤务人员素质	0.250	0.069	5
作业手素质	0.403	0.144	2
技术能手素质	0.362	0.036	10
违规操作	0.509	0.183	1
储存条件	0.219	0.021	16
光照影响	0.516	0.053	7
地质影响	0.221	0.023	15
气象影响	0.180	0.059	6
炸药质量	0.484	0.026	13
起爆网络	0.346	0.035	11
器材质量	0.231	0.024	14

4.2.3 熵权权重计算

按照 3.3 节的方法计算出基于熵权的影响因素权重和熵值，如表 4 所示。分析计算结果可知：在评价指标体系中，一级指标中安全管理、人员因素、环境影响和爆破器材分别占比为 22.363%、36.603%、26.642%、14.373%，其中，人员因素权重系数最高；二级指标中违规操作权重系数最高，为 11.943%。

由此可知，人员因素是影响爆破作业安全的决定性因素，其中，是否存在违规操作是影响爆破作业安全的关键。环境影响和安全管理占比相对较高，环境条件多为不可控因素，但可根据前期勘察和天气预报灵活选择，安全管理属于作业前准备，准备工作越充分，安全风险评估指数就越低。

Table 4. Entropy weight index weight and information entropy value table

表 4. 熵权指标权重和信息熵值表

指标	熵值 e	信息效用值 d	权重
模拟训练	0.682	0.138	4.532
安全检查	0.857	1.143	4.679
爆破器材管理	0.764	0.236	7.747
安全教育培训	0.835	0.165	5.405
指挥员素质	0.854	0.146	4.792
勤务人员素质	0.773	0.227	7.44
作业手素质	0.873	0.163	5.336
技术能手素质	0.784	0.216	7.092
违规操作	0.636	0.364	11.943
储存条件	0.825	0.175	5.722
光照影响	0.75	0.25	8.202
地质影响	0.856	0.144	4.706
气象影响	0.756	0.244	8.012
炸药质量	0.867	0.133	4.371
起爆网络	0.822	0.178	5.842
器材质量	0.873	0.127	4.16

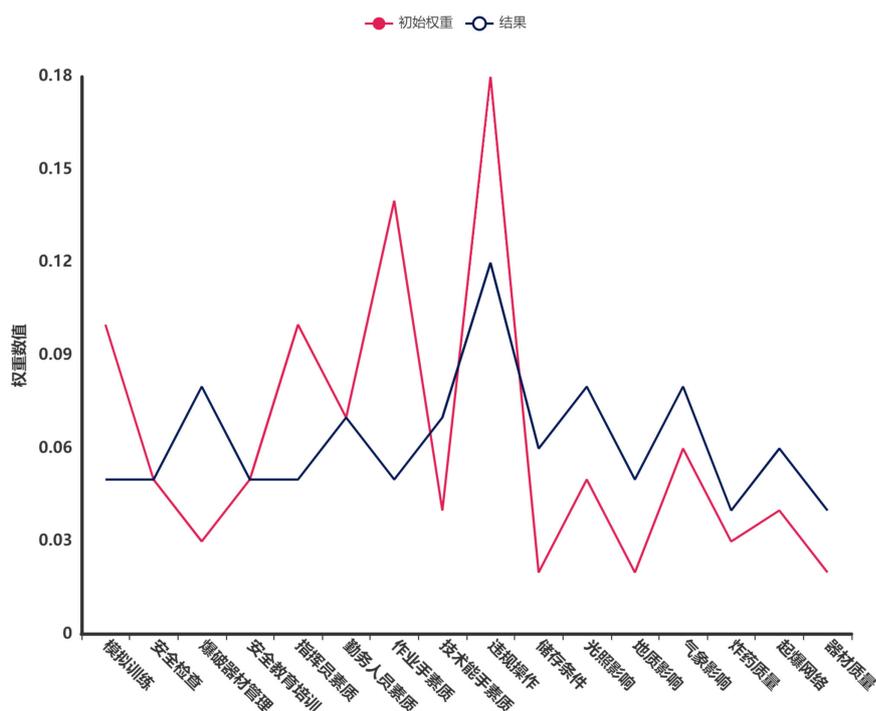


Figure 5. Comparison chart of ANP method and entropy weight method results

图 5. ANP 法和熵权法结果对比图

熵权法通过计算指标的信息熵来衡量指标所包含的信息量，信息量越大，熵值越小，权重越高，该方法依据数据的内在规律进行权重分配，相较于 ANP 层次分析法的专家赋值，能够更客观地反映指标的重要程度；熵权法的计算过程相对简单，主要涉及数据的标准化和熵值、权重计算，相较于 ANP 层次分析法在构建判断矩阵后，需要进行一致性检验等复杂计算过程，若指标较多、计算量大且一致性检验不通过时，需反复调整判断矩阵，增加了计算的复杂性和工作量；熵权法对不同类型的数据有较好的适应性，相较于 ANP 层次分析法对数据的一致性要求较高，构造判断矩阵困难，熵权法指标评价相比 ANP 层次分析法结果波动相对较弱，权重对比如图 5 所示。

4.2.4. 基于熵权的 TOPSIS 计算

根据前文构建的评估模型，对爆破作业方案展开评估。利用表 3 提供的加权决策数据，根据 3.4 节的计算方法，得出各指标在 6 个方案中的最大值集合和最小值集合，并确定为参考序列，即正理想解距离 (D^+) 和负理想解距离 (D^-)，表明了每个方案与理想最优(劣)方案之间的绝对差距， D^+ 越小，说明方案与理想最优方案之间的差异越小； D^- 越大，说明方案与理想最劣方案之间的差异越大。因此， D^+ 越小、 D^- 越大说明方案越好。进而，方案的综合得分指数越大说明方案越好，从而得出爆破作业安全风险评估评价结果，如表 5 所示。正理想解分别为 68.2%、63.2%、66.4%、56.2%、67.2%、60.4%；负理想解分别为 50.2%、52%、57.8%、70.3%、56.8%、71%，综合得分指数分别为 42.4%、45.2%、46.5%、55.6%、45.8%，54%，故方案的优劣排序为：方案 4 > 方案 6 > 方案 3 > 方案 5 > 方案 2 > 方案 1，评价结果如图 6 所示。

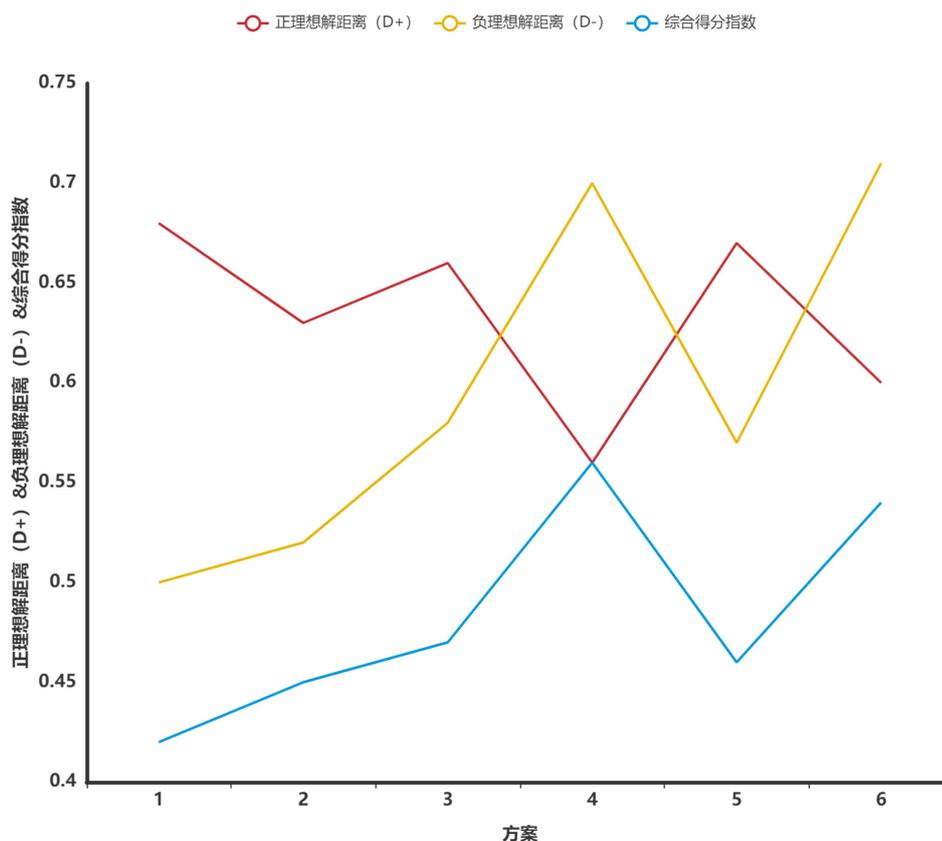


Figure 6. Assessment results of safety risks in blasting operations

图 6. 爆破作业安全风险评估评价结果图

Table 5. Results of safety risk assessment for blasting operations
表 5. 爆破作业安全风险评估评价结果表

方案	正理想解距离(D+)	负理想解距离(D-)	综合得分指数	评价结果排序
1	0.681 743 51	0.502 078 92	0.424 116 75	6
2	0.631 664 35	0.520 468 83	0.451 743 64	5
3	0.664 087 693	0.577 851 36	0.465 281 58	3
4	0.561 749 46	0.703 607 69	0.556 054 62	1
5	0.672 239 06	0.568 178 48	0.458 054 21	4
6	0.604 334 77	0.710 119 79	0.5402 391 3	2

4.3. 评价结果分析

分析各方案的具体指标数据,发现方案 4 在多个关键指标上表现较好,比如在炸药质量、起爆网络等指标上数值较高,在违规操作等负向指标数值相对较低,使其在综合评价中得分较高、排序靠前,体现出该方案在控制安全风险方面的优势,说明评估结果能准确反映各方案的实际安全风险水平。

从一级指标权重来看,人员因素权重最大,符合爆破作业实际情况。在爆破作业中,人员因素、操作规范程度对安全风险影响重大,违规操作权重占比最高,说明其对安全风险影响最为显著。因此,应着重加强人员的管理和培训,提高指挥员、勤务人员、作业手和技术能手素质,规范作业流程,减少违规操作行为,从而有效降低安全风险。

5. 结论

针对爆破作业安全风险评估难题,本文深入剖析影响因素,构建熵权 TOPSIS 评价模型,实现对各影响因素风险等级的精准判定,以爆破作业实际为背景进行安全风险评价,依据评价结果为监测和预防提供有效指导。

1) 融合网络层析分析法、李科特量表法与熵权 TOPSIS 法,有效降低主观性,构建科学合理的评估模型,实现对评价对象客观准确的评价与排序。

2) 将爆破安全风险评估模型划分 4 个一级指标、16 个二级指标,根据综合评判权重,得出一级指标权重由大到小的排序为人员因素、环境因素、安全管理、工具器材,符合爆破作业的实际经验,验证了模型的合理性。

3) 尽管熵权 TOPSIS 法在减少主观因素影响方面成效显著,但考虑到人员训练水平差异、环境复杂多变且影响因素众多等现实情况,模型仍存在一定局限性,下一步应提高评价模型的牢固性和多属性条件下的评判模型。

参考文献

- [1] 柯丽华,陈魁香,胡南燕,等.基于 SNA 的露天矿爆破安全风险评估[J].中国安全科学学报,2022,32(10):49-50.
- [2] 胡义焕,韩静媛,赖健维.基于模糊综合评价与危险性分析法的施工安全风险评价[J].科技创新与应用,2023,13(29):116-120.
- [3] 王涛,黄海,马龙浩,等.基于层次分析-模糊综合评价法的隧道爆破效果评估[J].工业建筑,2023,53(S02):592-595.
- [4] Khandelwal, M., Kankar, P. and Harsha, S. (2010) Evaluation and Prediction of Blast Induced Ground Vibration Using Support Vector Machine. *Mining Science and Technology (China)*, **20**, 64-70.
[https://doi.org/10.1016/s1674-5264\(09\)60162-9](https://doi.org/10.1016/s1674-5264(09)60162-9)

-
- [5] 单仁亮, 黄宝龙, 李广景. 基于灰色关联分析的综合评价模型在爆破方案选定中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(z1): 206-210.
- [6] 王佳. 基于多属性决策的工业控制系统安全风险评估[J]. 工业技术创新, 2020, 7(1): 6-11.
- [7] 张淋怡, 池恩安, 赵明生 等. PHA-物元法综合评价在工程爆破安全评价中的应用[J]. 采矿技术, 2021, 21(3): 129-133.
- [8] 田成祥, 付成群, 吴海鹏, 等. 基于 GA-BP 网络的工程兵桥梁爆破方案评估模型[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(8): 229-232.
- [9] Song, S., Shi, Y., Li, Z., Huang, X. and Xing, Y. (2023) Analysis of Ground Motion Measurement Data under Engineering Blasting Condition. *Vibroengineering Procedia*, **49**, 62-66. <https://doi.org/10.21595/vp.2023.23295>
- [10] Wenhua, Y., Lei, Y., Zhenhuan, W., Jianhua, Y., Tiejun, T. and Liansheng, L. (2022) Geotechnical Engineering Blasting: A New Modal Aliasing Cancellation Methodology of Vibration Signal De-Noising. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **21**, 313-323. <https://doi.org/10.1007/s11803-022-2094-3>
- [11] 中华人民共和国国家标准. GB6722-2014, 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [12] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国民用爆炸物品安全管理条例(国务院令第 466 号) [M]. 北京: 中国法制出版社, 2014.
- [13] 霍正刚, 陈晓茹. 基于熵权-TOPSIS 法的建筑业高质量发展水平评价研究[J]. 工程管理学报, 2024, 38(6): 6-11.
- [14] 刘英霞. 基于李克特量表的职教高考内容改革现状调研与优化对策[J]. 山东开放大学学报, 2024(1): 4-8.
- [15] 徐迎兴, 任钰. 基于 ANP-TOPSIS 的船舶修理项目优先级评价体系[J]. 上海船舶运输科学研究学报, 2023, 46(5): 58-64.