

LZ煤矿安全生产影响因素研究

邹丽娟^{1*}, 梁田², 龚峰², 孙鹏飞^{2#}

¹河北工程大学管理工程与商学院, 河北 邯郸

²河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2025年5月28日; 录用日期: 2025年6月20日; 发布日期: 2025年7月16日

摘要

本文针对煤矿安全生产影响因素的复杂性与不确定性, 综合运用层次分析法(AHP)与蒙特卡洛模拟(MCS), 构建了多层级风险评估模型。通过AHP将影响因素划分为人、设备、环境、管理四大准则层(涵盖26项具体指标), 量化各因素权重并揭示人因主导性(权重35%~45%)的显著特征; 进一步利用MCS模拟判断矩阵的随机扰动, 生成权重分布区间与置信度分析, 解决了传统AHP依赖专家经验的主观偏差问题。研究表明, AHP-MCS耦合方法能够动态评估风险演化路径(如瓦斯浓度波动、设备老化风险), 并通过敏感性分析识别关键管控节点, 为煤矿安全治理提供科学依据。

关键词

煤矿安全, 层次分析法(AHP), 蒙特卡洛模拟(MCS), 权重分析, 耦合模型

Research on Influencing Factors of LZ Coal Mine Safety Production

Lijuan Zou^{1*}, Tian Liang², Feng Gong², Pengfei Sun^{2#}

¹School of Management Engineering and Business, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: May 28th, 2025; accepted: Jun. 20th, 2025; published: Jul. 16th, 2025

Abstract

This study addresses the complexity and uncertainty of coal mine safety production factors by integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Monte Carlo Simulation (MCS) to construct a multi-level risk assessment model. Through AHP, influencing factors are categorized into four major criteria

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 邹丽娟, 梁田, 龚峰, 孙鹏飞. LZ 煤矿安全生产影响因素研究[J]. 现代管理, 2025, 15(7): 94-100.

DOI: 10.12677/mm.2025.157191

layers—human, equipment, environment, and management, comprising 26 specific indicators. Quantitative analysis reveals the dominance of human factors (weights 35%~45%). MCS is further employed to simulate random perturbations in judgment matrices, generating weight distribution intervals and confidence level analysis, thereby addressing the subjective bias inherent in traditional AHP that relies on expert judgment. The research demonstrates that the AHP-MCS coupling method enables dynamic assessment of risk evolution paths (e.g., gas concentration fluctuations, equipment aging risks) and identifies critical control nodes through sensitivity analysis, providing a scientific basis for coal mine safety governance.

Keywords

Coal Mine Safety, Analytic Hierarchy Process (AHP), Monte Carlo Simulation (MCS), Weight Analysis, Coupling Model

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. 前言

煤矿安全生产的重要性体现在保障人民群众生命财产安全、维护社会稳定以及促进国家能源安全和经济发展。煤矿作为我国能源结构中的“压舱石”与“稳定器”，其安全生产直接关系到国家能源供应的稳定性。然而，煤矿作业环境复杂，存在瓦斯、水、火、顶板等多类灾害事故，威胁着矿工的生命安全。因此，加强煤矿安全管理，提升安全水平，是保障煤矿工人生命安全和企业正常运营的基本要求[1][2]。

从现状来看，尽管近年来煤矿事故起数和死亡人数有所下降，但事故总量仍偏大，重特大事故尚未得到有效遏制，煤矿安全生产形势依然严峻。2023年全国煤矿百万吨死亡人数上升，且发生了特别重大坍塌事故。这表明，虽然国家在政策和法规层面加强了对煤矿安全的监管，如《煤矿安全生产条例》的出台，明确了煤矿企业的安全生产责任和政府监管职责，但在实际执行中仍存在监管不到位、技术管理落后、安全投入不足等问题[3]-[5]。

2. 传统煤矿安全管理风险评估方法的意义和局限性

层次分析法(AHP)是一种系统化、层次化的传统分析方法，适用于处理复杂系统的多目标决策问题。它是基于 Saaty 提出的层次结构理论，通过构建判断矩阵实现定性到定量的转化。但传统风险评估方法在复杂系统中的局限性主要体现在以下几个方面：1) 对人类因素考虑不足。传统方法往往忽视人类行为与系统之间的复杂交互，尤其是在复杂系统中，人为错误和系统设计缺陷的相互作用是导致事故的重要因素；2) 过度依赖历史数据。传统方法依赖于历史数据和预设的检查清单，这在面对新兴风险或极端事件(如黑天鹅事件)时，可能导致预测失效；3) 结果解释与决策支持不足。传统方法在风险评估结果的解释和决策支持方面存在缺陷，例如风险矩阵的二维呈现方式掩盖了不同风险之间的差异，导致决策优先级不合理；4) 对系统复杂性的理解有限。传统方法通常基于事件树或故障树分析，难以全面捕捉复杂系统中的突发行为和非线性交互。

这些局限性表明，传统风险评估方法在面对复杂系统时存在明显不足，亟需引入更先进的、动态的、基于复杂系统科学的方法来提升风险评估的准确性和有效性。而蒙特卡洛模拟(MCS)是一种基于概率统

计理论的计算方法,其核心思想是通过大量随机抽样来模拟不确定性事件,进而求解复杂问题的近似解。因此,本研究利用 MCS 来削弱因为人为影响因素,增加最终决策。构建了基于 AHP-MCS 耦合框架,突破单一方法的局限性: AHP 通过分层赋权实现因素系统化排序, MCS 则通过随机抽样模拟不确定性(如专家判断偏差、风险传播路径)。其中荆全忠等构建煤矿安全能力 AHP 模型,发现人因权重达 40%以上,技术与管理次之[6];李咏梅团队提出模糊 AHP (FAHP),解决传统方法对数据精确性依赖问题,通过专家模糊打分提升客观性;高西林等将 AHP 与属性数学模型(AMM)结合,形成“指标权重 - 风险等级”双维度评价体系[7]。张婷婷利用 MCS 评估煤矿工人不安全行为,发现违规指挥、未按规定施工为高风险节点[8];栗婧团队通过 10^5 次抽样模拟爆破作业风险,结合 Crystal Ball 软件生成置信区间,验证风险等级划分的科学性[9]。现有研究多聚焦静态权重分析,缺乏动态风险演化模拟。本研究提出“AHP 分层赋权 - MCS 扰动模拟”二位一体框架,详细论证了面对复杂问题时,如何判断其主要矛盾和急需解决的问题[10]。

3. AHP-MCS 安全分析模型构建

3.1. 层次分析法(AHP)

根据煤矿安全特征,构建三层结构:目标层:煤矿安全生产综合风险指数;准则层:人为因素、设备因素、环境因素、管理因素;子因素层:细化 20 项指标(表 1),如违章作业、设备老化率、瓦斯浓度波动等。

传统 AHP 中一致性检验依赖 CR 值(要求 $CR < 0.1$),但在煤矿安全等复杂系统中,专家判断常存在系统性偏差。改进策略包括采用改进的指数标度法(见表 2),该标度体系具有以下优势:① 符合心理学中的韦伯 - 费希纳定律,即人类对重要性差异的感知呈对数线性关系;② 通过非线性变换放大核心因素的权重差异,例如“极端重要”(k = 1)对应标度值 9,是“明显重要”(k = 0.5)的 3 倍,显著优于传统标度的线性递增,其相比传统标度能更好地区分重要程度差异。

Table 1. 20 refined indicators
表 1. 20 项细化指标

准则层	子因素层示例
人为因素	违章作业、施工技术水平较低、作业标准不完善、安全意识淡薄、安全培训不足等
设备因素	机械设备运行不良、支护系统不到位、监测监控系统不准确、避灾撤退路线维护不良等、设备老化率、通风系统有效性
环境因素	矿井围岩条件、矿井地质构造、地下水影响、作业环境条件不达标等
管理因素	安全投入占比、隐患排查频率、应急预案完善度、责任制落实率、监管覆盖率等

Table 2. Traditional scales and indices
表 2. 传统标度和指数

重要性描述	传统标度	指数标度(9^k)	适用场景
同等重要	1	$9^0 = 1$	要素影响无差异
稍微重要	3	$9^{(1/4)} = 1.732$	次要要素对比
明显重要	5	$9^{(1/2)} = 3$	核心要素与普通要素对比
强烈重要	7	$9^{(3/4)} = 5.196$	核心要素之间对比
极端重要	9	$9^1 = 9$	安全 vs 非安全要素
上述两相邻判断的中值	2、4、6、8	1.32、2.28、3.95、6.84	介于相邻两者之间

3.2. 蒙特卡洛模拟(MCS)

在构建判断矩阵时，利用蒙特卡洛模拟(MCS)，基于大数定律，生成大量随机数。这些随机数通常是根据从调查问卷、统计分析中得到的结果，然后进行统计分析，生成大量均匀分布、正态分布、指数分布等形式的数组，再从这些数组中抽取，由于样本通过特定分布的随机数生成，将优化问题转化为概率统计问题，计算误差仅与样本量相关，与问题维度无关，会大大减少人为影响因素。

3.3. AHP-MCS 安全分析模型

构建层次结构模型。将安全生产的 4 个准则要素评估作为目标层，20 个评估要素作子因素层，形成一个三层的层次结构模型。其次，采用改进的指数标度法(见表 2)，其相比传统标度能更好地区分重要程度差异，并以此建立判断矩阵。通过专家咨询和问卷调查，构建 MCS 数学模型，并基于大数定律，生成大量符合数学模型的大量数据，以此来代替调查问卷和专家咨询中的判断。然后计算权重向量。再利用方根法计算各判断矩阵的特征向量，并进行一致性检验。最后，计算综合权重。将各层次的权重进行综合，得到各要素在总目标中的最终权重。

4. 实证分析

本研究针对邯郸武安某煤矿安全生产进行分析，构建四大准则层(人、设备、环境、管理)及其子因素层，其中准则层采用传统标度(1~9 标度法)和指数标度(9^k)构建判断矩阵进行对比分析。

4.1. 人为因素子因素

包括违章作业(S₁₁)、施工技术水平较低(S₁₂)、作业标准不完善(S₁₃)、安全意识淡薄(S₁₄)、安全培训不足(S₁₅)。根据表 3 得到违章作业(S₁₁)权重相对最高，反映其在人为因素中是直接引发安全事故的关键行为风险。工人违规操作设备、不按流程施工等，易瞬间触发危险，如违规爆破、登高不系安全带等，是现场安全管控的重点。

Table 3. Human factor layer judgment matrix
表 3. 人为因素层判断矩阵

子因素指数标度	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅
S ₁₁	1	1.732	3	5.196	1.732
S ₁₂	0.577	1	1.732	3	1
S ₁₃	0.333	0.577	1	1.732	1.732
S ₁₄	0.192	0.333	0.577	1	0.577
S ₁₅	0.577	1	0.577	1.732	1

4.2. 设备因素子因素

包括机械设备运行不良(S₂₁)、支护系统不到位(S₂₂)、监测监控系统不准确(S₂₃)、避灾撤退路线维护不良(S₂₄)、设备老化率(S₂₅)、通风系统有效性(S₂₆)。根据表 4 得到设备老化(S₂₅)权重相对最高，它会使故障概率飙升，长期高负荷老旧设备易“带病运行”，它是长期、系统性的安全隐患，需持续投入整改。

4.3. 环境因素子因素

包括矿井围岩条件(S₃₁)、矿井地质构造(S₃₂)、地下水影响(S₃₃)、作业环境条件不达标(S₃₄)。根据表 5

得到作业环境条件不达标(S₃₄)权重相对最高,这是由于照明不足、粉尘超标、温度过高等,虽不直接引发重大事故,但长期的不良环境会影响工人操作状态(疲劳、视线差),降低安全意识,也会加速设备老化(粉尘侵蚀机械),属于“慢变量”,但持续侵蚀安全基础。

Table 4. Equipment factor layer judgment matrix
表 4. 设备因素层判断矩阵

子因素指数标度	S ₂₁	S ₂₂	S ₂₃	S ₂₄	S ₂₅	S ₂₆
S ₂₁	1	0.577	1	0.577	1.732	0.577
S ₂₂	1.732	1	1.732	1	3	1
S ₂₃	1	0.577	1	0.577	1.732	0.577
S ₂₄	1.732	1	1.732	1	3	1
S ₂₅	0.577	0.333	0.577	0.333	1	0.333
S ₂₆	1.732	1	1.732	1	3	1

Table 5. Environmental factor layer judgment matrix
表 5. 环境因素层判断矩阵

子因素指数标度	S ₃₁	S ₂₃	S ₃₃	S ₃₄
S ₃₁	1	1	1.732	3
S ₂₃	1	1	1.732	3
S ₃₃	0.577	0.577	1	1.732
S ₃₄	0.333	0.333	0.577	1

4.4. 管理因素子因素

包括安全投入占比(S₄₁)、隐患排查频率(S₄₂)、应急预案完善度(S₄₃)、责任制落实率(S₄₄)、监管覆盖率(S₄₅)。根据表 6 得到应急预案完善度(S₄₃)权重相对最高,这是由于完善的预案是事故的“最后防线”,涵盖瓦斯爆炸、透水等场景,需明确逃生、救援流程。预案不完善或演练不足,事故时会陷入混乱,延误救援,放大事故损失。

Table 6. Management factor layer judgment matrix
表 6. 管理因素层判断矩阵

子因素指数标度	S ₄₁	S ₄₂	S ₄₃	S ₄₄	S ₄₅
S ₄₁	1	1	0.577	0.333	1
S ₄₂	1	1	0.577	0.333	1
S ₄₃	1.732	1.732	1	0.577	1.732
S ₄₄	3	3	1.732	1	3
S ₄₅	1	1	0.577	0.333	1

4.5. 准则层因素

经过分别计算权重(表 7 和表 8)。传统标度下主因素权重依次为人为因素(0.3)、设备因素(0.33)、环境因素(0.14)、管理因素(0.23),一致性比率 CR = 0.071;而指数标度显著提升核心因素权重,人为因素权重增至 0.42(增幅 40%),设备、环境、管理权重分别降至 0.28、0.10、0.20(降幅 12.6%~24.3%),CR 值优化至 0.008。

Table 7. Criterion layer traditional judgment matrix
表 7. 准则层传统判断矩阵

准则层元素	C ₁ (人为因素)	C ₂ (设备因素)	C ₃ (环境因素)	C ₄ (管理因素)	权重 W _C
C ₁	1	3	5	3	0.3
C ₂	1/3	1	3	1	0.33
C ₃	1/5	1/3	1	1/3	0.14
C ₄	1/3	1	3	1	0.23

Table 8. Criterion layer index judgment matrix
表 8. 准则层指数判断矩阵

准则层元素	C ₁ (人为因素)	C ₂ (设备因素)	C ₃ (环境因素)	C ₄ (管理因素)	权重 W _C
C ₁	1	1.732	3	1.732	0.42
C ₂	0.577	1	1.732	1	0.28
C ₃	0.333	0.577	1	0.577	0.10
C ₄	0.577	1	1.732	1	0.20

对比传统标度与指数标度的 AHP 权重计算结果，揭示了两者在权重区分度、一致性水平、应用场景等方面的显著差异。指数标度通过非线性标度函数优化了判断矩阵的一致性(CR 降低 80.4%)，并放大了核心指标(如实习安全性)的决策权重，更适用于高风险领域的精准管控。建议在实际应用中结合蒙特卡洛模拟进行敏感性分析，并依据场景特征动态选择标度方法，以实现科学决策与风险控制的平衡。未来研究可进一步探索混合标度模型的构建，如“区间数 + 指数标度”的组合方法，以应对复杂系统中的不确定性。

5. 结论

本研究通过 AHP-MCS 耦合模型，揭示煤矿安全生产中人因主导性、设备 - 管理耦合效应等核心规律，提出动态风险评估与实时预警框架。未来研究需进一步整合智能化技术(如数字孪生、贝叶斯网络)，构建全生命周期风险管理体系。

基金项目

本文受“社会实践省级一流本科课程《地球物理勘探(含测井)》”的资助。

参考文献

[1] 王未来, 张文清. 煤矿安全管理制度有效性评价指标体系构建[J]. 煤炭技术, 2025, 44(2): 264-267.

[2] 潘理虎, 杨明, 陈志强. 我国煤矿安全领域研究现状及发展趋势[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2019, 21(3): 56-65.

[3] Saaty, T.L. (2008) Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, **1**, 83-98.

[4] Mu, D.D., Liu, G. and Chen, W. (2015) Assessment Index System of Coal Mine Safety Based on AHP-MCS. *Safety Science*, **72**, 89-93.

[5] Li, J., Wang, X. and Zhang, T. (2023) Comprehensive Evaluation of Mine Safety Based on Improved Game Theory and AHP. *Resources Policy*, **85**, Article 103676.

[6] 荆全忠, 杨洪涛, 郝贵. 基于层次分析法的煤矿安全生产能力指标体系研究[J]. 煤炭工程, 2006, 38(12): 95-97.

[7] 高西林, 程志勇, 金建春. 基于 AHP 和 AMM 的煤矿安全风险评价研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(12): 108-110.

- [8] 张婷婷, 王建国, 刘洋. 基于 AHP-SPA 的煤矿安全管理模型构建及应用[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(4): 34-39.
- [9] 栗婧, 李伟, 赵玉灵. 基于蒙特卡罗方法的煤矿爆破作业风险评估[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 45-54.
- [10] 吕跃进, 张维, 唐炎. 指数标度判断矩阵的一致性检验方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(3): 78-85.