

双重预防机制下井工煤矿 HFACS-IAHP 风险耦合模型构建

马宗利

呼图壁县西沟煤炭有限责任公司 新疆昌吉

【摘要】双重预防机制是井工煤矿安全管理的核心框架，而风险耦合效应常导致单一风险演变为重大事故。将人因分析与分类系统（HFACS）与改进层次分析法（IAHP）结合，构建风险耦合模型可有效破解这一难题。该模型通过 HFACS 拆解人、机、环、管等维度的风险因子，借助 IAHP 量化因子间的耦合强度，识别关键耦合路径与风险叠加区域。此模型既实现了风险因子的系统性梳理，又提升了耦合风险评估的精准度，为井工煤矿风险分级管控与隐患排查治理提供了科学工具，助力双重预防机制落地见效。

【关键词】双重预防机制；井工煤矿；HFACS；IAHP；风险耦合模型

【收稿日期】2025 年 8 月 21 日 **【出刊日期】**2025 年 9 月 17 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250212

Construction of HFACS-IAHP risk coupling model for underground coal mines under dual prevention mechanism

Zongli Ma

Hutubi County Xigou Coal Co., Ltd., Changji, Xinjiang

【Abstract】 The dual prevention mechanism serves as the core framework for safety management in underground coal mines, yet the risk coupling effect often causes single risks to evolve into major accidents. Integrating the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) with the Improved Analytic Hierarchy Process (IAHP) to construct a risk coupling model can effectively address this issue. The model decomposes risk factors in dimensions such as human, machine, environment, and management through HFACS, and quantifies the coupling intensity between factors with the help of IAHP to identify key coupling paths and risk areas. This model not only realizes the systematic sorting of risk factors but also improves the accuracy of coupled risk assessment, providing a scientific tool for risk classification management and hidden danger investigation and governance in underground coal mines, and helping the dual prevention mechanism to take effect.

【Keywords】 Dual prevention mechanism; Underground coal mine; HFACS; IAHP; Risk coupling model

引言

井工煤矿作业环境复杂，风险因子间的耦合作用是事故发生的重要诱因。传统风险评估多聚焦单一因素，难以揭示多因子相互作用的叠加效应，导致双重预防机制在实践中存在管控盲区。HFACS-IAHP 风险耦合模型的构建，为破解这一困境提供了新思路。通过系统化拆解风险因子并量化耦合关系，可精准定位风险演化的关键节点，使双重预防机制从“被动应对”转向“主动防控”，为井工煤矿安全管理注入新的技术动能。

1 井工煤矿风险耦合特征及现有评估方法的局限性

1.1 井工煤矿风险耦合的多维特征

井工煤矿风险耦合呈现出多因子交互、层级传递与动态演化的复杂特征。在空间维度上，人因失误与设备故障常形成直接耦合，如操作人员误操作引发掘进机故障，进而导致支护系统失效，形成“人-机-环”的链式反应。时间维度上，初始风险会随作业进程不断累积，微小的通风参数偏差可能在数小时内与瓦斯浓度变化耦合，形成区域性安全隐患^[1]。从作用机制看，风险耦合存在协同放大效应，单一的粉尘超标风险在遇到违规动火作业时，其危害程度会呈指数级提升。此外，耦合路径具有隐蔽性，地质构造缺陷与设备老化的耦合作用往往在事故发生后才被追溯确认，

增加了风险预判的难度。传统风险评估方法多聚焦单一风险因子的独立分析,难以反映耦合作用的整体影响。定性评估如安全检查表法,仅能列举各类风险的存在状态,无法量化因子间的关联强度,导致对耦合风险的分级缺乏科学依据。定量评估中的故障树分析,虽能识别事故的直接诱因,但在多因子交叉作用场景下,其逻辑门结构难以涵盖所有耦合路径,易遗漏关键风险组合。概率风险评估模型则因假设风险因子相互独立,无法模拟耦合过程中的非线性变化,对复合风险的发生概率计算偏差较大。

1.2 评估指标体系的片面性

现有评估指标体系存在维度缺失与权重失衡的问题。指标设计多侧重设备状态与环境参数,对管理缺陷与人员心理等隐性因子的考量不足,导致对“管—人”耦合风险的评估流于表面^[2]。在指标权重分配上,常采用固定比例赋值,未能体现不同作业场景下风险因子的动态影响,如回采面与掘进面的风险因子权重应因耦合机制差异而有所区别,但现有方法多采用统一标准,降低了评估的针对性。此外,指标间的关联性未被纳入考量,如通风效率与瓦斯浓度的耦合系数未在指标体系中体现,难以反映风险的协同效应。现有评估方法对动态作业环境的适应性较弱,难以跟踪风险耦合的实时变化。静态评估模型无法随开采进度更新风险因子的耦合关系,当工作面推进至断层区域时,原有的评估结果仍沿用初始参数,导致对新形成的“地质-设备”耦合风险反应滞后。预测能力的局限更为突出,传统的趋势外推法在处理耦合风险的非线性演化时误差显著,无法准确预判瓦斯突出与顶板垮落的耦合发生时间,影响应急准备的时效性。

2 双重预防机制下 HFACS-IAHP 风险耦合模型的构建路径

2.1 基于 HFACS 的风险因子系统拆解

依托人因分析与分类系统(HFACS)框架,对井工煤矿风险因子进行多维度拆解,为耦合关系分析奠定基础。从组织影响、不安全监督、不安全行为前提、不安全行为四个层级,梳理“人-机-环-管”系统中的风险因子^[3]。组织影响层面聚焦安全管理体系缺陷,如制度缺失、资源配置不足等;不安全监督层面涵盖监管不到位、培训不足等因素;不安全行为前提涉及人员生理心理状态、作业环境干扰等;不安全行为则包括操作失误、违规作业等直接行为。通过层级映射,将地质构造、设备状态等环境与机

器因子纳入对应层级,形成覆盖全系统的风险因子清单,确保耦合分析无遗漏。引入改进层次分析法(IAHP)实现风险因子耦合强度的定量化评估^[4]。构建耦合判断矩阵,将风险因子间的相互影响程度转化为可比的数值关系,通过一致性检验优化矩阵合理性。针对传统层次分析法的主观性偏差,引入模糊数学理论对判断矩阵进行修正,结合专家经验与现场实际案例确定权重系数,提升耦合强度评估的客观性。将量化结果划分为强耦合、中耦合、弱耦合三个等级,明确不同风险组合的相互作用程度,为识别关键耦合路径提供数据支撑。

2.2 风险耦合网络模型的构建与验证

基于因子拆解与强度量化结果,构建可视化的风险耦合网络模型。以节点表示风险因子,以边的粗细表示耦合强度,通过社会网络分析方法识别网络中的核心节点与关键路径,即对事故演化起主导作用的风险耦合关系。将模型输出的关键耦合路径与历史事故案例进行比对验证,调整因子层级与耦合强度参数,确保模型对实际风险演化规律的贴合度。通过敏感性分析测试模型稳定性,当某一风险因子发生变化时,观察其对耦合网络整体的影响程度,验证模型的可靠性。将风险耦合模型与双重预防机制的分级管控、隐患排查要求进行功能对接。根据耦合风险的等级划分结果,制定差异化管控策略,强耦合风险纳入重点管控清单,配置专项资源进行治理;中弱耦合风险按常规流程管控。在隐患排查模块中嵌入耦合路径识别功能,通过模型预判多因子共同作用可能形成的隐患,生成针对性排查清单,指导现场检查聚焦关键耦合点。建立模型迭代机制,将隐患治理效果与风险耦合数据反馈至模型,动态更新因子权重与耦合强度参数,实现与双重预防机制的持续适配。

3 风险耦合模型的验证

3.1 验证指标体系的构建

风险耦合模型的验证需建立多维度指标体系,以全面评估模型的有效性与可靠性。核心指标包括耦合路径识别准确率,即模型输出的关键耦合关系与实际事故诱因的匹配程度;耦合强度量化偏差,通过对比模型计算值与现场实测的风险相互作用数据,衡量量化精度;模型稳定性系数,反映在输入参数微小波动时,输出结果的变异程度^[5]。辅助指标涵盖覆盖度,确保模型对“人-机-环-管”全系统耦合关

系的捕捉无遗漏；响应时效，评估模型在处理动态风险数据时的运算速度与输出及时性。指标体系需与井工煤矿实际安全管理需求对接，既包含可量化的数值标准，也纳入专家对模型实用性的定性评价。验证数据的质量直接影响模型评估的可信度，需通过多渠道采集并进行系统化处理。历史事故案例数据是核心来源，需梳理事故调查报告中的风险因子关联记录，提取耦合路径与作用强度等关键信息，去重筛选后形成标准化案例库^[6]。现场实时监测数据用于动态验证，通过传感器网络采集不同作业面的风险因子状态参数，经降噪、归一化处理后输入模型，对比输出结果与现场实际风险演化趋势。专家经验数据通过德尔菲法收集，组织煤矿安全领域专家对典型耦合场景进行评估，形成权威的参照标准。数据处理过程中需建立时空校准机制，确保不同来源数据在时间节点与空间位置上的一致性，为验证提供可靠基准。

3.2 案例回溯验证方法的应用

案例回溯是验证模型对历史风险耦合规律捕捉能力的有效手段。选取具有代表性的井工煤矿事故案例，将事故发生前的风险因子状态输入模型，运行模型生成耦合路径与风险等级预测结果。通过对比模型输出的关键耦合点与事故调查报告认定的直接诱因、间接因素，分析模型对耦合链的还原程度。对于复杂事故案例，需拆解其多阶段演化过程，验证模型在不同阶段对耦合关系变化的识别准确性。案例回溯不仅关注模型对事故结果的预判，更注重分析其对耦合过程中各因子作用强度变化的模拟精度，通过偏差分析定位模型参数设置的优化空间。动态场景模拟用于测试模型在实时风险演化中的适应能力^[7]。基于井工煤矿常见的动态作业场景，如工作面推进、设备启停、人员换班等，构建虚拟仿真环境，设定初始风险因子状态与变化规则。将模拟场景数据输入模型，跟踪模型输出的耦合风险等级与演化路径，与预设的场景发展逻辑进行比对。重点验证模型对突发风险耦合的响应，如某一因子突然超标时，模型能否快速识别其与其他因子的新耦合关系并更新预警结果。模拟过程中需引入随机扰动因素，测试模型在非预期风险介入时的稳定性，评估其在复杂动态环境中的实用价值。

3.3 验证结果的分析与模型迭代

验证结果需通过多维度分析转化为模型优化依

据。定量分析聚焦指标达标情况，计算各验证指标的实际值与标准值的偏差率，确定模型的优势环节与薄弱点。定性分析结合专家评审意见，评估模型输出结果对安全决策的支撑作用，判断其在实际应用中的可操作性^[8]。针对验证中发现的问题，如耦合强度量化偏差较大、动态响应滞后等，追溯至模型构建的各个环节，调整 HFACS 层级划分、IAHP 判断矩阵修正系数等关键参数。建立迭代优化机制，将验证结果反馈至模型架构设计中，通过多次验证-修正循环，逐步提升模型对井工煤矿风险耦合规律的拟合精度。

4 结语

双重预防机制下井工煤矿 HFACS-IAHP 风险耦合模型的构建，有效弥补了传统风险评估对耦合效应关注不足的缺陷。通过系统拆解风险因子、量化耦合关系，精准识别了风险演化的关键节点，为风险分级管控与隐患排查提供了科学依据。该模型的应用推动双重预防机制从理论框架走向实践落地，对提升井工煤矿安全管理的系统性与前瞻性具有重要意义，为类似高危行业的风险治理提供了有益借鉴。

参考文献

- [1] 吕立华.A 公司双重预防机制评价模型研究[J].交通科技与管理,2025,6(15):183-185.
- [2] 白含锦,蒋楠,蒋太平.双重预防机制在地质灾害治理施工项目中的应用[J].四川地质学报,2025,45(S1):179-182.
- [3] 黄战卫,贾志鹏,周婷,等.基于信息化技术的油田双重预防机制构建路径研究[J].中国管理信息化,2025,28(14):236-238.
- [4] 江柳,王云海,韩毅,等.化工企业双重预防机制数字化转型瓶颈与破局研究[J].劳动保护,2025,(07):76-79.
- [5] 甄昆昆.基于双重预防机制的煤矿安全智能集成管理系统设计与应用[J].内蒙古煤炭经济,2025,(12):100-102.
- [6] 刘嘉辉.煤矿钻井施工安全标准化与双重预防机制融合应用研究[J].中国品牌与防伪,2025,(06):209-210.
- [7] 曹恒,王俊丰,邵岩,等.基于风险值修正的双重预防机制建立[J].石化技术,2025,32(06):313-315.
- [8] 程明仁,庄丽君.双重预防机制在化工安全生产管理中的应用探讨[J].化工管理,2025,(15):93-96.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS