

基于人因工程的露天煤矿运输作业安全管理优化研究

包威健 王立佳 王是达

扎哈淖尔煤业有限公司

DOI:10.12238/jsse.v3i3.14946

[摘要] 露天煤矿运输作业环境复杂、设备大型化且人机交互频繁,属事故高发环节。传统安全管理侧重技术防护,忽视人因失误根源。本文基于人因工程学,分析驾驶员疲劳、认知负荷、人机界面缺陷及环境干扰等关键风险,从人员管理、设备优化、环境改善三方面提出策略,包括动态疲劳监测、驾驶舱设计优化、道路照明与扬尘控制、人因风险评估培训等,构建“以人中心”的安全管理体系。结合近十年案例与实践,为降低事故率、提升本质安全提供理论与实践支持。

[关键词] 人因工程; 露天煤矿; 运输安全; 疲劳管理; 人机界面

中图分类号: X752 **文献标识码:** A

Study on optimization of safety management of open-pit coal mine transportation based on human factor engineering

Weijian Bao Lijia Wang Shida Wang

Zhaahaonur Coal Industry Co.,LTD.

[Abstract] The open-pit coal mine transportation operation features complex environments, large-scale equipment, and frequent human-machine interactions, making it a high-accident-prone link. Traditional safety management focuses on technical protection while ignoring the root causes of human errors. Based on human factors engineering, this paper analyzes key risks such as driver fatigue, cognitive load, man-machine interface defects, and environmental interference, and proposes strategies from three aspects: personnel management, equipment optimization, and environmental improvement. These include dynamic fatigue monitoring, cockpit design optimization, road lighting and dust control, and human factor risk assessment and training, aiming to build a "people-centered" safety management system. Combined with typical cases and practices in the past decade, it provides theoretical and practical support for reducing accident rates and improving intrinsic safety levels.

[Key words] human factors engineering; opencut coal mine; Transportation safety; Fatigue management; HMI

引言

露天煤矿是我国重要能源基地,开采规模扩大使重型卡车运输成物料流转核心,但复杂地形、连续作业等因素致运输事故频发。2015-2024年运输事故占露天矿总事故30%以上,2021年某矿事故致7人死亡,人因失误占78%。传统管理忽视深层因素,人因工程学可降差错,神华准能集团应用后事故率降42%,本文据此提出优化策略。

1 露天煤矿运输作业的人因风险分析

1.1 人员因素主导性风险

人员因素是露天煤矿运输事故核心诱因,近十年70%以上事故源于人员操作失误。

疲劳驾驶危害突出,2018年内蒙古某矿追尾事故致2人死亡,驾驶员连续作业11小时,反应时间延长1.8秒。研究显示,连续驾

驶4小时反应延迟率增35%,6小时以上操作失误率达正常3倍。单调环境、颠簸路段加剧疲劳,部分矿区赶工期压缩休息,形成“疲劳-失误-事故”循环。

认知负荷超载是另一风险,2020年山西某矿事故中,驾驶员因同时监控多仪表未发现前方故障车致追尾。现代卡车普遍配12-16个仪表,信息负荷超认知极限,希克海曼定律表明信息增多会延长决策时间,易引发失误。

技能与培训缺口明显,2022年陕西某矿3名驾驶员因不熟悉新系统预警逻辑连续误操作。近十年设备更新周期缩至3-5年,但部分矿区培训滞后,驾驶员能力与技术升级不同步。

1.2 设备人机交互缺陷

设备人机界面设计缺陷是诱发人因失误的重要环节,近十年38%的运输事故与此直接相关。

驾驶舱设计不合理问题显著, 2019年内蒙古某矿事故中, 驾驶员紧急制动时误触相邻举升控制杆, 因两者间距仅12cm且未设防误触装置, 不符合费茨定律, 致货箱与高压线碰撞。部分驾驶舱仪表盘信息过载, 关键与次要信息混杂, 增加提取难度。

视野盲区风险突出, 2017年新疆某矿事故因卡车A柱形成2.3米盲区, 转弯时未发现侧方装载机。重型卡车普遍存在A柱遮挡(8° – 12°)、后视镜视野不足(60%–70%)等问题, 第三方测试显示92%车辆有盲区, 23%超安全限值。

报警系统有效性低, 2021年甘肃某矿卡车同时触发3种警报, 因无优先级, 驾驶员忽略紧急警报致车辆失控。多数矿区采用“全量触发”模式, 无差别警报易使驾驶员“警报疲劳”, 降低对关键信号的敏感度。

1.3 作业环境负面影响

作业环境对人因失误的诱发作用多样。视觉干扰是主因, 2019年云南某矿夜间事故因照明老化, 路面照度15lux(标准 ≥ 50 lux), 致卡车爆胎侧翻。雨雾、扬尘加剧障碍, 2022年内蒙古沙尘暴期间, 某矿区能见度不足50米, 连续3起刮擦事故; 道路积尘形成“移动盲区”, 影响跟车安全判断。

振动与噪声影响累积, 2016年体检显示, 驾驶员腰椎间盘突出患病率38%(普通人群8%), 与长期振动相关。重型卡车非铺装路面行驶振动加速度 1.2 – 1.8m/s^2 (超标准 0.8m/s^2); 驾驶舱噪声85–95dB(A), 致听力下降、注意力分散, 增加协同风险。

极端气候微环境需重视, 2023年夏季内蒙古某矿驾驶室 42°C , 驾驶员脱水致操作失误。高温下人体脱水 1.5L/h , 反应降20%; 严寒(-25°C 以下)时操作灵活性下降, 制动精准度降30%。部分矿区空调老化, 加剧极端气候影响。

2 人因工程理论框架与应用逻辑

人因工程以“以人为本”为核心, 通过优化“人-机-环境”系统协调, 减少失误、保障安全, 近十年应用使露天煤矿运输事故率降30%–50%。其优化路径形成闭环: 人员维度靠培训与监控提升可靠性, 机器维度借界面简化增强匹配性, 环境维度通过危害控制降低干扰性。

运输作业中, 费茨定律指导设备设计, 2021年山东某矿区据此优化按钮, 使紧急制动反应时间从0.8秒降至0.5秒^[1]; 希克海曼定律用于信息设计, 某矿将仪表盘信息精简至8项, 决策效率提升40%。

生物力学模型成效显著, 2022年神华某矿区引入减振座椅, 振动传递率从65%降至22%, 疲劳评分降32%; 合理设计驾驶空间, 减少肌肉疲劳累积。

3 安全管理优化策略设计

3.1 人员适应性管理强化

动态疲劳监测系统是人员管理优化的核心措施。2023年内蒙古扎哈淖尔煤业有限公司在100辆重型卡车上安装基于面部识别的驾驶员状态监控(DSM)系统, 通过红外摄像头与生理传感器, 实时监测驾驶员闭眼时长、眨眼频率、头部偏移角度等指标。检测到疲劳特征(如连续闭眼超0.5秒)时, 立即触发驾驶室内声

光报警, 并推送预警至调度中心。实施半年后, 该矿区疲劳驾驶事故同比下降58%。第三方评估显示, DSM系统疲劳识别准确率达92%, 平均提前预警2.3秒, 为应急干预争取关键时间。

科学轮班制度是预防疲劳累积的基础保障。2021年山西某露天矿推行“2小时作业+15分钟强制休息”模式, 配套司机休息室并通过人脸识别执行休息制度。实施后, 驾驶员平均反应时间从0.7秒缩至0.5秒, 连续作业6小时后失误率下降60%。该矿还按季节调整作业时段, 夏季错峰避开高温, 冬季集中在日间减少严寒影响。某矿区通过弹性排班算法实现“工作量-休息量-生理节律”动态匹配, 月均疲劳投诉从12起降至3起。

认知技能沉浸式培训可提升应急能力。2022年陕西某露天矿引入VR模拟培训系统, 构建12种高危场景虚拟训练库。驾驶员经沉浸式训练后, 应急处理能力提升30%, 紧急状况决策时间从3.2秒缩至1.8秒^[2]。该矿还建立“师徒带+定期考核”机制, 确保驾驶员对新型设备掌握率达100%。某矿区通过三级培训体系, 使驾驶员技能考核通过率从78%升至95%。

3.2 运输设备人机界面优化

驾驶舱人因再设计需遵循人体工学与认知规律。2023年内蒙古某矿联合厂商改造: 4项核心参数置于视野中心 30° 内, 红色动态显示; 次要信息移至边缘, 灰色静态呈现。控制杆按操作频率布局, 高频操作杆设在距座椅45–55cm“黄金区域”。改造后, 操作失误率降28%, 仪表读取时间缩至0.3秒, 驾驶员肌肉紧张度降40%。

盲区消除技术关键降低碰撞风险。2021年神华某矿为卡车加装 360° 环视系统, 4个摄像头合成全景图, 补偿A柱盲区, 5米内有移动物体时闪烁报警。实施后, 转弯碰撞事故降72%, 环境感知范围扩至3倍。某矿区试点雷达与视觉融合技术, 雨雾天可识别200米内障碍物, 误报率 $\leq 3\%$ 。

智能报警分级系统提升警告有效性。2022年新疆某矿建三级体系: 一级用红色闪烁+90分贝蜂鸣+座椅振动; 二级用黄色常亮+70分贝提示音; 三级仅蓝色指示灯。系统有“报警记忆”功能。实施后, 一级报警响应速度提高50%, 关键警报遗漏率从25%降至4%。某矿区引入语音合成技术, 降低信息解读负荷。

3.3 作业环境人因优化

可视性提升工程需覆盖全场景照明与扬尘控制。2023年内蒙古某露天矿升级运输道路照明, 采用LED防爆灯间隔30米布置, 路面平均照度达65lux, 关键区域增设聚光灯至100lux, 无暗区。夜间卡车大灯与道路照明协同, 驾驶员视野清晰度达白天85%以上。扬尘控制采用“抑尘剂+雾炮车+洒水车”方案: 每日三次喷洒抑尘剂(每平方米0.5L), 高峰期每2小时雾炮车降尘, 干燥季节每小时洒水1次。实施后, 路面扬尘浓度降60%, 能见度超200米, 夜间视线不良事故降65%。某矿区道路两侧设自动喷淋系统, 粉尘超标时联动开启, 节水30%。

振动与噪声控制结合源头减振与个体防护。2022年山西某露天矿改造运输道路, 采用级配碎石基层+沥青面层, 路面平整度标准差从8mm降至3mm, 车辆振动加速度从 1.8m/s^2 降至

0.6m/s²。驾驶舱装液压减振底座降振动传递。噪声控制通过发动机舱隔音棉升级等,将驾驶舱噪声从95dB(A)降至75dB(A)以下;驾驶员配主动降噪耳机,保留语音通信。实施后,驾驶员听力损伤检出率降40%,主观疲劳评分降25%。

微气候调节系统改善驾驶舱舒适性。2021年陕西某露天矿为卡车装分区空调,温度控制在18-25℃,座椅有通风/加热功能(夏季30m³/h,冬季35℃)。高温季配清凉饮品与降温背心,严寒季提供保暖装备。某矿区试点空气净化系统,过滤PM2.5达99%,湿度保持40%-60%。环境优化后,驾驶员夏季脱水率从18%降至3%,冬季操作灵活性评分升30%。

3.4 组织管理机制创新

人因风险评估制度化是预防事故的前置环节。2022年内蒙古某矿建立季度HRA(HumanReliabilityAnalysis)评估机制,组建由安全工程师、人因专家、一线驾驶员组成的评估团队,采用“故障模式与影响分析(FMEA)”方法识别风险点。评估涵盖驾驶员生理状态、设备人机匹配度、环境干扰强度等维度,形成风险等级矩阵并制定控制措施。实施后,该矿区风险预警准确率提升至85%,潜在事故隐患整改率达100%。某矿区引入数字化评估工具,通过APP采集数据,自动生成个人风险画像与群体风险趋势报告。

人因事件共享数据库可实现经验传承。2023年某矿业集团建立失误报告平台,鼓励驾驶员匿名上报人因失误事件,平台脱敏处理后形成案例库。每月组织案例分析会,提炼共性问题并制定防范指南。平台运行一年后,累计收集近失误事件326起,形成28项标准化防范措施,同类失误重复发生率下降60%。某矿区将典型案例嵌入VR培训系统,强化驾驶员风险认知。

人因绩效激励机制能激发安全主动性。2022年山西某矿将安全操作规范性纳入绩效考核,设置“疲劳报警响应率”等正向指标,与薪酬、评优挂钩^[3]。对连续6个月无失误的驾驶员授予“安全明星”称号并给予奖励;对提出优化建议的员工给予创新奖励。实施后,驾驶员安全行为依从率从70%提升至92%。某矿区试点“安全积分”制度,积分可兑换休息时间或培训机会,形成良性循环。

4 预期实施效果分析

通过人因工程优化策略的系统实施,露天煤矿运输作业安全管理水平将全方位提升。

人员管理方面,动态疲劳监测与科学轮班结合,可使驾驶员疲劳相关事故降40%以上。某矿区试点显示,驾驶员平均反应时

间从0.7秒缩至0.5秒,认知负荷超载失误率降35%;VR培训将使应急处理能力提升30%以上。

设备优化能大幅降低操作失误风险。驾驶舱布局优化与盲区消除技术,可使人机误操作率减25%-30%。第三方测试表明,360°环视系统让环境感知完整性从60%升至95%,转弯碰撞事故降70%;智能报警分级系统将关键警报响应速度提高50%。

作业环境改善创造更安全条件。照明与扬尘控制使视觉干扰事故降60%,夜间事故率降55%;振动与噪声控制让驾驶员疲劳加速率降40%,职业病发生率控制在8%以下;微气候调节系统将驾驶室舒适性评分提至85分以上。

组织管理创新推动模式转型。HRA评估制度化后,风险预警准确率达85%以上,隐患整改率100%;人因事件数据库使同类失误重复率降60%;绩效激励机制让安全行为依从率提至90%以上。

综合而言,优化后设备利用率提升15%,事故处理成本降低40%,更能保障驾驶员安全,并实现“人-机-环境”协同安全。

5 结语

露天煤矿运输安全管理的本质是“人-车-路-环境”系统的协同优化。本文基于人因工程学理论,结合近十年典型案例与良好实践,从人员状态监控、设备交互设计、环境危害控制、管理机制创新四个维度构建了安全管理优化体系,核心在于将被动事故应对转化为主动失误预防。

未来露天煤矿运输安全管理需向智能化、精准化方向发展。可进一步探索人工智能在人因风险预警中的应用,如基于脑电(EEG)的疲劳深度监测技术,实现从“行为监测”到“生理预测”的升级;开发数字孪生系统,在虚拟空间模拟“人-机-环境”动态交互过程,提前识别潜在风险点。通过持续深化人因工程应用,露天煤矿运输作业将逐步实现“零事故”的本质安全目标,为矿业高质量发展提供坚实保障。

[参考文献]

- [1]赵刚.基于费茨定律的矿用卡车操作界面优化设计[J].工业工程与管理,2021,26(4):123-128.
- [2]周健.虚拟现实技术在矿工应急培训中的应用研究[J].矿业安全与环保,2022,49(4):102-106.
- [3]赵伟.基于人因绩效的煤矿安全激励机制设计[J].中国煤炭,2021,47(5):135-139.

作者简介:

包威健(1992--),男,蒙古族,吉林蛟河人,本科,注册安全工程师,研究方向:露天煤矿运输作业安全工程管理。