

应用研究·非煤矿山·

高海拔矿山无轨运输系统“人-机-环境” 综合安全评价方法研究

Exploring a man-machine-environment comprehensive safety evaluation method
for trackless transportation systems in high altitude mines

马俊生¹, 肖志雄², 王树勋¹, 黄莹莹², 马黎明¹

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 1000381; 2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430000)

摘要:针对现有高海拔矿山井下无轨运输安全评价体系不健全、安全状态评价标准不完善的问题,从人的不安全状态、运输设备的不安全状态、环境的不安全因素三个方面分析了高海拔矿山井下无轨运输系统的安全影响因素,建立了高海拔寒区人-机-环境安全评价体系,形成了各指标的安全等级评价标准,并基于层次分析方法(AHP)计算了各指标的权重,结合模糊评价方法(FCE)构建了高海拔矿山无轨运输多因素耦合人-机-环境系统安全评价模型。基于该模型以某高寒矿山为实例进行了评价分析,得到安全评分90.88,安全性好。

关键词:层次分析法; 模糊综合评价理论; 评价模型; 权重计算

中图分类号: TD79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2021)03-0001-06

Abstract: The present models for evaluating the safety of underground trackless transportation in high altitude mines are less than well rounded. An attempt was made to evaluate the safety thereof in three aspects: the safety/unsafety of humans, transport equipment, and the environment, and a model was built to that effect, with parameters and standards developed for each facet, and weight assigned through the analytic hierarchy process (AHP). The model was further built following the fuzzy comprehensive evaluation (FCE) method to be a multi-factor-coupled man-machine-environment comprehensive safety evaluation model. This model was used in assessing the safety of a certain high altitude mine, and a score of 90.88 was reached, indicating sound safety of the mine.

Key words: analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation theory; evaluation model; weighted calculation

1 前言

随着经济的快速发展,矿产资源的需求日益增大,平原地区的矿产资源已经难以满足当下矿产资源的需求。而高海拔寒区拥有大量矿产资源,因此对高寒地区矿产资源的开发已成为当下缓解矿产资源紧缺问题的重要途径之一^[1]。高海拔低温低压的恶劣环境给矿山开采生产带来诸多困难,在影响人体健康的同时也阻碍运输设备的正常工作,导致矿山运输环境十分严峻。

适用于平原地区的矿山井下无轨运输安全评价体系已经难以满足高海拔矿山的需要,因此研发一套适合高海拔寒区矿山井下无轨运输的安全评价模型显得尤为重要^[2-3]。

2 高海拔矿山井下无轨运输系统的安全影响因素

高海拔矿山井下无轨运输安全受多种因素的影响,主要包括人、机和环境三个方面。

从对人体健康影响的角度来看,随着海拔高度逐渐增加,大气压强明显降低,大气中的氧分压和含氧量也同步降低,人体内肺泡的氧分压明显下降,进而使人体血液饱和度和血氧分压也明显降低,轻则导致驾驶员身体机能下降,重则威胁驾驶员生命安全。所以针对驾驶员的心率、血压、血氧和体温指标的安全评价具有重要意义^[4]。

[作者简介] 马俊生(1981-),男,教授级高级工程师,从事金属非金属地下矿山的科研、咨询和设计工作。

[基金项目] 国家重点研发计划项目(编号:2018YFC0808405)

[引用格式] 马俊生,肖志雄,王树勋,等.高海拔矿山无轨运输系统“人-机-环境”综合安全评价方法研究[J].中国矿山工程,2021,50(3):1-6.

从车辆运行状态来看,高寒地区低温缺氧的特点同样对矿用无轨车辆内燃机的工作产生显著影响。一方面由于燃料的不充分燃烧,容易产生有毒有害的尾气,污染井下运输环境的同时也损害着工作人员的健康。另一方面也降低了内燃机的工作效率,造成了化石燃料的浪费^[5]。针对井下无轨运输车辆的尾气、载重和速度指标的评价可反映运输设备的安全状态^[6]。

从井下无轨运输环境的角度出发,由道路分布强度、围岩变形指标、有害气体浓度、含氧量以及排尘风速组成的环境安全评价指标反映了井下无轨运输环境的安全程度^[7]。

基于以上分析,本文建立了由人的不安全状态、运输设备的不安全状态和环境的不安全因素组成的人-机-环境安全评价体系。并基于层次分析法(AHP)的模糊综合性分析方法(FCE)对大量复杂

的信息进行模糊综合分析处理,建立了人-机-环境多因素安全评价模型,该模型可基于现场监测数据,对安全进行评价分级进而指导决策。

3 基于人-机-环境安全评价体系的建立

结合安全科学理论和高海拔矿山井下无轨运输现状,基于人、机和环境三大要素构建高海拔矿山井下无轨运输安全评体系见表1。

建立安全评价体系的目的是根据该体系可以对各指标进行评分分级,进而根据监测数据评价现场安全等级,并根据相关参考文献对各指标进行区间等级评分,形成各安全指标评价标准。查阅相关文献可知,人的不安全状态指标评价标准^[8-10]见表2,运输设备的不安全状态评价标准^[11-13]见表3,环境的不安全因素指标评价标准^[14-17]见表4。

表1 安全评价体系

目标层	一级指标	二级指标	编号
高海拔矿山井下无轨运输安全性综合评价体系	人的不安全状态	心率指标	C ₁₁
		血氧指标	C ₁₂
		血压指标	C ₁₃
		体温指标	C ₁₄
	运输设备的不安全状态	尾气指标	C21
		载重指标	C22
		速度指标	C23
	环境的不安全因素	道路分布强度	C31
		巷道围岩变形指标	C32
		CO浓度指标	C33
		含氧量指标	C34
		NO ₂ 浓度指标	C35
		排尘风速指标	C36

表2 人的不安全状态指标评价标准

指标名称/评价等级	好 (100~90)	较好 (90~75)	一般 (75~55)	较差 55~40	差 40~0
心率/(次/分钟)	70~80	(60~70]∪(80~90]	(90~100]	(50~60]∪(100~110]	<50或>110
血氧(SpO ₂)/%	95~100	90~95	85~90	80~85	<80
血压(收缩压)/mmHg	105~115	(100~105]∪(115~120]	(95~100]∪(120~125]	(90~95]∪(125~130]	<90或>130
体温/℃	36.5~37.5	(36.3~36.5)∪(37.5~37.7]	(36~36.3]∪(37.7~38]	(35.5~36]∪(38~38.5]	≤35.5或≥38.5

表3 运输设备的不安全状态评价标准

指标名称/评价等级	好 (100~90)	较好 (90~75)	一般 (75~55)	较差 55~40	差 40~0
尾气(烟度)/R _b	0~0.2	0.2~0.5	0.5~0.7	0.7~0.9	>0.9
载重(井下矿用卡车)/t	≤8	8~10	10~12	12~14	14~16
速度/km·h ⁻¹	0~20	20~25	25~35	35~45	>45

表4 环境的不安全因素指标评价标准

指标名称/评价等级	好 (100~90)	较好 (90~75)	一般 (75~55)	较差 55~40	差 40~0
道路分布强度/ R_n	(4.0~5.0]	(3.0~4.0]	(2.0~3.0]	(1.0~2.0]	(0.0~1.0]
巷道围岩稳定性指标(单轴抗压强度)/MPa	≥ 60	30~60	20~30	10~20	<10
CO浓度指标/ 10^{-6}	0~25	25~50	50~200	200~400	>400
含氧量指标(占空气百分比)/%	20~22	18~20	15~18	13~15	<13
NO ₂ 浓度指标/ $mg \cdot m^{-3}$	0~28	28~40	40~60	60~80	>80
排尘风速指标/ $m \cdot s^{-1}$	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1	1~2	<0.25或>2

4 高海拔地区安全评价模型构建

高海拔地区井下运输涉及多个安全评价指标,将诸多分散的指标整合为完整的模糊综合评价体系明确各指标之间关系以及各指标所占权重值显得尤为重要。综合考虑指标之间的串、并联关系,基于层次分析法(AHP)以及模糊综合评价方法(FCE)对其进行优化,提出一套改进的模糊综合评价体系,更加合理地完成对高海拔寒区井下无轨运输系统安全性的评价。

4.1 基于AHP法确定权重

4.1.1 建立权重判断矩阵

各指标对高海拔矿山井下运输风险的影响程度是不同的,因此通过将各定性指标分析转化为定量分析,通过权重体现其重要性程度。但权重值的确定往往受主观臆测影响,在不同人的不同价值观以及不同身体状态影响下其往往存在较大差异。为了尽量避免主观臆测导致的误差影响,本文采用层次分析法通过专家判断评定,从而得到各指标的权重值。具体步骤如下。

1) 建立层次结构模型

为打造一个有效的多层次分析模型,通常将风险评估体系分为三个层次,分别是目标层、准则层以及指标层。

2) 建立权重判断矩阵

通常采用1~9度标度法,通过专家将两两要素进行对比并确定其重要性程度。1~9度标度法见表5。

表5 1~9度标度法

标度	说明
$b_{ij} = B_i/B_j = 1$	要素 B_i 与要素 B_j 同样重要
$b_{ij} = B_i/B_j = 3$	要素 B_i 比要素 B_j 稍微重要
$b_{ij} = B_i/B_j = 5$	要素 B_i 比要素 B_j 明显重要
$b_{ij} = B_i/B_j = 7$	要素 B_i 比要素 B_j 强烈重要
$b_{ij} = B_i/B_j = 9$	要素 B_i 比要素 B_j 极端重要
$b_{ij} = B_i/B_j = 2, 4, 6, 8$	上述两两相邻判断矩阵的中间值

3) 计算指标权重系数

在单层次条件下,为了计算指标权重系数,通常使用特征值法计算出判断矩阵行元素的均值,其计算公式为

$$\bar{W}_i = n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n b_{ij}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: n ——矩阵阶数。

将 $\bar{W} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)^T$ 进行归一化处理,计算公式为

$$\bar{W}_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: \bar{W}_i ——该指标的权重系数,得出权重向量是 $\bar{W} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)^T$ 。

4) 单层次一致性检验

一致性检验是为了确定各指标重要程度的协调性,防止出现指标权重相互冲突。

一致性评价指标 CI 计算公式为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

其中, λ_{\max} 是判断矩阵的最大特征值,计算公式如下:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{AW_i}{W_i} \quad (4)$$

一致性比率 CR 计算公式为

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

其中, RI 为层次分析方法的指标,具有平均、随机和一致性,其具体取值见表6。

当 $CR < 0.1$ 时,可以认为该判断矩阵符合一致性检验,反之则要重新调整判断矩阵。

5) 总层次排序

同一层次下,如果所有层次都是单独进行排序的话,需自上而下逐层进行总层次排序。其计算公式为

表6 RI 具体取值表

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56

$$M_i = \alpha_i W_i \tag{6}$$

式中： α_i ——上层指标的权值；

W_i ——本层次指标的权重。

总层次排序一致性评价指标计算公式为

$$CI_{总} = \alpha_i CI \tag{7}$$

总层次排序的随机一致性指标计算公式为

$$RI_{总} = \alpha_i RI \tag{8}$$

总层次排序随机一致性比率为

$$CR_{总} = \frac{CI_{总}}{RI_{总}} \tag{9}$$

同样当 $CR_{总} < 0.1$ 时,判定构成多层次结构的判断矩阵通过一致性检验。

4.1.2 各级指标权重计算

根据层次分析法对高海拔矿山井下运输风险各指标权重进行计算。

1) 计算人的不安全状态 B_1 指标权重

首先,构建人的不安全行为 B_1 的判断矩阵为

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & 4 & 3 \\ 1/3 & 1/4 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

其次,计算判断矩阵 B_1 每一行元素的几何平均值,经过归一化处理得到权重向量

$$W_1 = (0.2771, 0.4658, 0.0960, 0.1611)^T$$

最后,计算得到一致性比率 $CR = 0.0115 < 0.1$,可以看出满足一致性判断,说明各项指标之间的重要程度相协调,权重值有效。

2) 计算运输机器的不安全状态 B_2 指标权重

运输设备的不安全状态 B_2 的判断矩阵为

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/3 \\ 3 & 3 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

根据该矩阵,计算得到权重向量为

$$W_2 = (0.1593, 0.2519, 0.5889)^T$$

一致性比率 $CR = 0.0465 < 0.1$,符合一致性判断。

3) 计算环境的不安全状态 B_3 指标权重

环境的不安全状态 B_3 的判断矩阵为

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1/3 \\ 3 & 3 & 1 & 1/2 & 2 & 1/3 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 3 & 2 \\ 3 & 2 & 1/2 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 2 & 3 & 3 & 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

根据该矩阵,计算得到权重向量为

$$W_3 = (0.0940, 0.0740, 0.1763, 0.2781, 0.1269, 0.2507)^T$$

一致性比率 $CR = 0.08166 < 0.1$,符合一致性判断。

4) 计算高海拔矿山井下无轨运输风险指标准则层 A 指标权重

高海拔矿山井下无轨运输风险评价准则层 A 判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 1/3 \\ 2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

根据该矩阵,计算得到权重向量为

$$W = (0.2973, 0.1639, 0.5390)$$

一致性比率 $CR = 0.0079 < 0.1$,符合一致性判断。

4.2 基于层次分析理论的模糊评价模型

将层次分析法和模糊评价方法结合形成模糊综合评价模型,建立流程分为以下六个步骤^[18]。

4.2.1 建立因素集

从众多因素中筛选出重要的评价指标,建立评价因素集为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$,其中 $n = 13$ 。

4.2.2 建立评价集

每个评价因素分为多个评价因子。评价等级分为 5 个,即 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} = \{\text{好, 较好, 一般, 较差, 差}\}$

4.2.3 建立权重集

一级指标权重集:

$$W = \{W_1, W_2, W_3\}$$

二级指标权重集:

$$W_i = \{W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{ij}\}$$

W_i 是一级指标权重集合中第 i 个因素的权重数值; W_{ij} 是二级指标权重集合中第 j 个因素的权重数

值。

4.2.4 构造因素评判矩阵

以评价标准 U 和评价因素 V 之间的模糊关系为依据,得到模糊关系矩阵,即评判矩阵 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (r_{ij})_{m \times n} \quad (14)$$

其中, r_{ij} 取值范围为 $[0, 1]$, r_{ij} 为因素 v_i 对应等级 u_j 的隶属关系。

4.2.5 构建综合评价模型

进行2级评价之前,要对低级别因素进行综合性的评价,进而运用结果对高层次因素评价,才能得出最终结果。

1) 1级综合评级

根据所得的定量指标和定性指标得分,对 R_i 的单因素进行评判,得出评判矩阵 R_i 为

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} & r_{n5} \end{bmatrix} \quad (15)$$

对评判矩阵 R_i 进行模糊合成运算,得到单因素综合评价向量为

$$B_i = W_i R_i = \{b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}, b_{i5}\}$$

2) 2级综合评级

更高层中所有因素整合的综合评价由1级综合评价构成,即:

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}$$

2级综合评级模型为

$$B = WR = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$$

4.2.6 评价结果处理

通过以上五个步骤建立综合评价模型后,需要对评价所得结果采取进一步的处理,通常采用加权平均法处理。设评价等级 $U = (100, 80, 60, 40, 20)$, 则评价结果为

$$U = \frac{\sum_{j=1}^m b_j u_j}{\sum_{j=1}^m b_j} \quad (16)$$

若评价指标归一化后,则:

$$U = \sum_{j=1}^m b_j u_j \quad (17)$$

b_j 作为权数,因素 u_j 的等级作为变量,计算即可得出最终的结果。

5 实例分析

基于高海拔地区金属矿山各传感器的数据,结合评价指标的计算方法,得出该阶段的各指标数据,从而得到评分值。

首先采用层次分析法确定的一级 (W_i) 和二级权重 (W_{ij}) 值,具体见表7。构建因素评判矩阵,以人的不安全状态为例,由隶属函数计算隶属度,形成评判矩阵为

$$R_i = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.55 & 0.25 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W_i = (0.2771, 0.4658, 0.0960, 0.1611)$$

$$B_1 = W_i R_i = (0.6449, 0.3311, 0.024, 0, 0)$$

同理可得:

$$B_2 = (0.6562, 0.2525, 0.0537, 0.0378, 0)$$

$$B_3 = (0.3568, 0.2350, 0.3804, 0.0278, 0)$$

由此可得高寒地区多因素耦合人-机-环系统评价的模糊评判矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}$$

$$W = (0.2973, 0.1639, 0.5390)$$

$$B = WR = (0.4916, 0.2665, 0.2210, 0.0212, 0)$$

采用加权平均方法,选择评价集区间的最大值组合成为评价向量,设 $U = (100, 90, 75, 55, 40)$, 那么高海拔高寒地区多因素耦合人-机-环系统安全性综合计算结果为 $u = 90.88$, 总体情况为“好”。

6 结论

本文针对高海拔寒区井下无轨运输的安全问题,通过分析井下无轨运输系统安全性影响因素,建立了由3个一级指标,13个二级指标组成的精细化安全评价体系。采用融合改进的层次分析法和模糊综合评价理论,构建了高海拔矿山井下无轨运输安全评价模型。在二级模糊评价模型的构建上,对正态分布隶属函数进行优化。

表7 高海拔高寒地区多因素耦合人-机-环系统安全性综合指标权重

目标层	一级指标	W_i	二级指标	W_{ij}
高海拔高寒地区多因素耦合人-机-环系统安全性综合评价	人的不安全状态	0.2973	心率	0.2771
			血氧	0.4658
			血压	0.0960
			体温	0.1611
	运输设备的不安全状态	0.1639	尾气	0.1593
			载重	0.2519
			速度	0.5890
	环境的不安全因素	0.5390	道路分布强度	0.0940
			巷道围岩变形	0.0740
			CO浓度	0.1763
			含氧量	0.2781
			NO ₂ 浓度	0.1269
			排尘风速	0.2507

基于实例和高海拔矿山无轨运输多因素耦合人-机-环境系统安全评价模型计算了该高海拔矿山各安全指标的权重值,得到安全评分为90.88。验证了采用模糊综合评价模型对高海拔地区多因素耦合人-机-环系统进行综合评价是可行的。

[参考文献]

[1] 杨鹏,吕文生. 高寒地区矿山深部通风防尘技术研究[M]. 北京:冶金工业出版社,2012.

[2] 张聪瑞,杨旭春,王树勋,等. 高海拔矿山井下运输环境感知技术研究[J]. 金属矿山,2020(10):111-117.

[3] 胡军锋. 高海拔高寒地区矿山总图设计探析[J]. 中国矿山工程,2010,39(6):38-40,48.

[4] 任高峰,葛永翔,马俊生,等. 高海拔矿山无轨运输车辆驾驶员安全保障技术研究[J]. 金属矿山,2020(10):104-110.

[5] 王成龙. 高海拔环境下柴油机喷雾撞壁及燃烧特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.

[6] 邓攀. 高海拔地区隧道工程施工方案评价研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.

[7] 潘晓东,詹嘉,杜志刚. 基于人机工程学的山区公路平曲线设计指标安全评价研究[J]. 中南公路工程,2007,32(3):21-23,75.

[8] 田炜宁,马兰,何江. 煤矿健康工人正常心率范围的研究[J]. 宁夏医学杂志,2018,40(2):142-143.

[9] 殷丽,傅琪,王洁君,等. 智能血氧饱和度监测系统设

计与实现[J]. 测控技术,2018,37(8):78-81.

[10] 畅晓园,鹿育萨,杨济民,等. 正常血压人群静息心率与心血管病危险因素的相关性研究[J]. 中华高血压杂志,2016,24(8):800-800.

[11] 鲍久圣,何小路,葛世荣,等. 井下混合动力无轨胶轮车驱动系统模糊逻辑控制策略研究[J]. 煤炭学报,2019,44(S1):320-329.

[12] 张慧文,田多宝. 煤矿井下车辆定位与信号控制技术[J]. 陕西煤炭,2021,40(2):124-126,136.

[13] 罗成名. 链式传感网中煤矿井下移动装备位姿感知理论及技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014.

[14] 康红普,牛多龙,张镇,等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(10):1977-1987.

[15] 邱冠豪,吴超,黄山果. 矿井压气等熵膨胀与节流膨胀降温效果对比研究[J]. 中国安全生产科学技术,2014,10(4):59-64.

[16] 丁一轩. 某煤矿井下工作场所职业危害因素分析研究[D]. 安徽:安徽理工大学,2018.

[17] 成学东,张永彬,冯茂林,等. 规模化高效采矿地下无轨设备配套应用研究[J]. 有色设备,2015(3):41-44,51.

[18] 孔祥松,方杰,蒿晓林,等. 煤矿地下水库人工坝体安全多层次模糊综合评价研究[J]. 煤炭工程,2019,51(9):158-161.