

基于博弈-优化雷达图模型的岩爆等级评价

龙晶晶¹,赵丽军¹,张千俊²,张雄伟^{3*}(1. 甘肃厂坝有色金属有限责任公司厂坝铅锌矿; 2. 德阳昊华清平磷矿有限公司;
3. 昆明有色冶金设计研究院股份公司)

摘要:岩爆作为开挖地下岩土工程主要难题之一,岩爆等级评价已成为该领域重要的研究方向。为了准确评价地下开挖工程的岩爆等级,提出了一种基于博弈-优化雷达图的岩爆等级评价模型。选取岩石脆性系数 σ_c/σ_1 、应力系数 σ_3/σ_1 、弹性变形能指数 W_{et} 、岩体完整性系数 K_v 和埋深 h ,构建了岩爆等级的评价体系。选取岩爆不同评价指标等级划分标准,利用改进层次分析法和CRITIC法分别计算主、客观权重,根据博弈论理论确定组合权重。结合雷达图原理,优化雷达图,建立不同岩爆等级的雷达图特征向量评估函数范围,再根据待评价样本的雷达图特征向量评估函数大小对其岩爆等级进行评价。为了验证该评价模型的有效性和可靠性,利用该模型对东山铜矿开采过程中的岩爆实例进行分析。研究结果显示:基于博弈-优化雷达图的岩爆等级评价结果与实际岩爆等级相吻合,证明该岩爆等级评价模型有良好的实用性。

关键词:深井开采;岩爆;等级评价;层次分析法;博弈论赋权;雷达图

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)04-0019-06

doi:10.11792/hj20250404

引言

岩爆,即岩体在承受高地应力时,一旦其内部积聚的能量超过其破坏极限,便可能引发地质现象^[1]。这通常由于地下工程开挖活动破坏了岩体内应力的平衡状态,应力超出岩石的强度极限。岩体内储存的弹性形变势能瞬间大量释放,进而造成岩石爆裂、碎片脱落和弹射。近年来,随着深部岩体工程的数量与开挖深度的持续增长,岩爆问题日益凸显。岩爆突发性和破坏性强,对工作人员和机械设备的安全构成严重威胁。岩爆作为地下深部岩体工程的一大安全隐患,其形成原因十分复杂,充满了随机性和不确定性^[2]。因此,如何快速且有效地预测岩爆强度,已成为该领域当前研究的核心课题。

为了探索解析岩爆的成因机制,众多学者已从多个视角开展了深入的研究。早期,HOEK等^[3-5]通过深入研究岩石强度、能量和形变与岩爆之间的关系,提出了各具特色的岩爆指标判据。随着研究的不断深入,人们逐渐认识到岩爆的形成过程与其影响因素之间存在着复杂的非线性关系。因此,应用数学、大数据分析和深度学习等先进的人工智能技术被引入岩爆研究中。LI等^[6]探索了BNS在岩爆预测和分类

中的新应用。XUE等^[7]则运用粗糙集理论对岩爆指标进行研究,并结合可拓理论构建了岩爆预测模型。SHUKL等^[8]则利用多种机器学习算法对地下工程的岩爆进行了预测,并对这些方法的有效性进行了综合评估。此外,ZHANG等^[9]创新性地将博弈论赋权理论与云模型相结合,实现了对岩爆强度的预测,并通过 $F1$ 值对模型的判别能力进行了量化分析。然而,上述方法都过于依赖大量的岩爆数据。在样本数量有限的情况下,张千俊等^[10]引入了灰靶决策理论进行岩爆预测,灰靶决策理论特别适用于处理样本少、信息不足的不确定性系统,通过不同靶心距离表示岩爆等级,从而实现对岩爆强度的预测。但在该领域,基于小样本数据进行岩爆等级评价的方法还较少。

本文在传统雷达图的基础上,针对其指标排列顺序差异而导致评价结果多样性的问题,对传统雷达图进行了优化,并与博弈论相结合,提出了一种基于博弈-优化雷达图的岩爆等级评价模型。首先,采用博弈论原理将改进层次分析法(AHP)与CRITIC法的权重组合优化,充分考虑主、客观因素,使得赋权更加合理。其次,通过比较优化雷达图的面积和周长来计算样本特征向量和评估函数,再利用评估函数对岩爆等级进行评价。最后,利用该模型对东山铜矿6种岩体

收稿日期:2024-09-23; 修回日期:2024-11-01

基金项目:四川省自然科学基金项目(2022NSFSC1147)

作者简介:龙晶晶(1991—),男,工程师,硕士,从事采矿技术管理工作;E-mail:1152579896@qq.com

*通信作者:张雄伟(1988—),男,高级工程师,从事矿山岩石力学与总图运输方面的研究工作;E-mail:372751969@qq.com

进行岩爆预测,表明了该模型在岩爆等级评价方面的准确性,为基于小样本岩爆评价研究提供了一种新方法。

1 博弈-优化雷达图评价模型

1.1 博弈-优化雷达图评价模型原理

雷达图法作为一种传统针对多指标目标的评价方法,已广泛应用于很多领域^[11-12]。它通过数值与图形相结合的方式,将评价区域扩展到二维空间,把评估目标的多个指标值置于不同的指标轴上,依次连接各指标轴上指标点构成传统的雷达图(如图1所示),通过所围成雷达图的面积和周长对评估目标进行综合评价,具有便捷性和直观性。

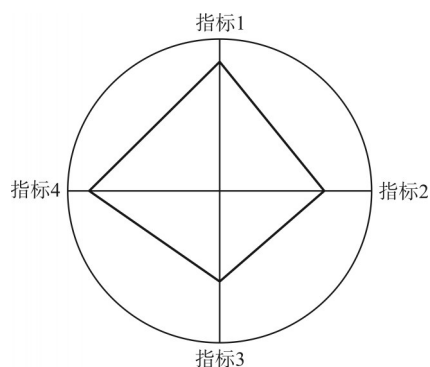


图1 传统雷达图

Fig. 1 Traditional radar chart

但在评价过程中,由于指标排序不同,造成评价结果没有唯一性的问题随着评价指标数目的增加而越发严重。针对这一问题,本文对传统雷达图进行优化,以权重值分配各指标轴夹角,归一化值确定指标点位置的方法避免了此缺陷。考虑到单一权重在准确性上受主、客观赋权方法的影响,采用改进层次分析法和CRITIC法计算主、客观权重,利用博弈论理论计算组合权重,结合优化的雷达图,建立了基于博弈-优化雷达图的岩爆等级评价模型。模型的构建流程如图2所示。

1.2 归一化样本矩阵建立

假设此次等级评价共有 m 个样本, n 个指标,则样本矩阵 $A=[a_{ij}](i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n)$ 。由于各指标之间数量级和性质不同,所以需要对本样本矩阵进行归一化处理,消除不同变量间的影响,得到归一化矩阵 X 。

正向指标归一化公式为:

$$x = \frac{a_{ij} - \min(a_{ij})}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (1)$$

负向指标归一化公式为:

$$x = \frac{\max(a_{ij}) - a_{ij}}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (2)$$

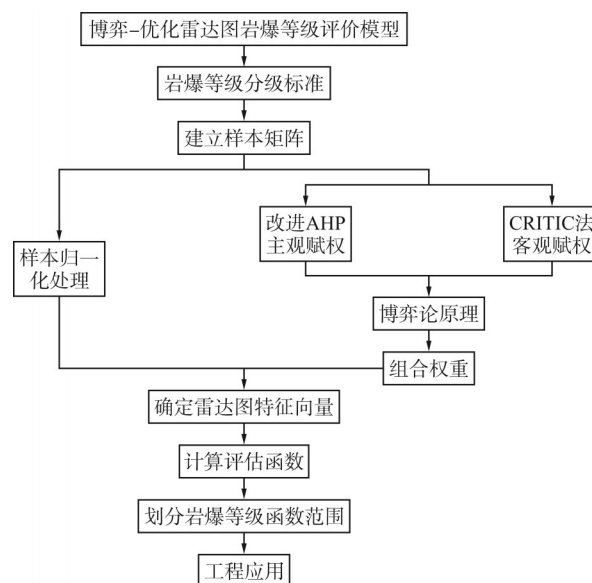


图2 基于博弈-优化雷达图的岩爆等级评价模型流程

Fig. 2 Flowchart of rockburst grade evaluation model based on game-optimized radar chart

式中: x 为归一化值; $\max(a_{ij})$ 和 $\min(a_{ij})$ 分别为第 i 个指标中的最大值和最小值。

根据式(1)和式(2),可得到样本矩阵 A 的归一化矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}。$$

1.3 雷达图特征向量提取

以 O 为圆心作单位长度为1的圆,从 O 点依次按权重顺序辐射出 k 条虚线,顺时针依次旋转角度 $\theta_j = 2\pi w_j$,虚线与单位圆的交点依次为 $A, B, C, \dots$,指标轴为对应旋转角度扇形的角平分线。根据归一化样本矩阵中的数值,在对应的指标轴上标出相应的点,随后依次连接各点构成样本雷达图,如图3所示。

雷达图有2个特征值:雷达图面积 S_i 和雷达图周长 L_i ^[13-14],其计算如式(3)、式(4)所示。

$$S_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \sin\left(\frac{\theta_j}{2}\right) \quad (3)$$

$$L_i = \sum_{j=1}^n 2 \sqrt{1 + x_{ij}^2 - 2x_{ij} \cos\left(\frac{\theta_j}{2}\right)} \quad (4)$$

式中: x_{ij} 为归一化处理后的第 i 个样本的第 j 个指标; θ_j 为雷达图第 j 个指标轴两边虚线的夹角。

根据雷达图面积 S_i 和雷达图周长 L_i 提取特征向量 $D=(D_{i1}, D_{i2})$ ^[15],计算公式如下:

$$D_{i1} = \frac{S_i}{S_{\max}} \quad (5)$$

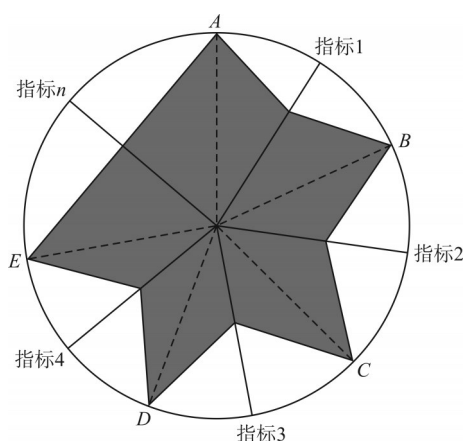


图3 优化雷达图

Fig. 3 Optimized radar chart

$$D_{i2} = \frac{4\pi S_i}{L_i^2} \quad (6)$$

式中: D_{i1} 为评价目标在同类目标中的实力; D_{i2} 为评价目标指标均衡程度。

1.4 评估函数构建

评估函数 f 反映了评价目标综合性能程度,计算公式如式(7)所示:

$$f = \sqrt{D_{i1} D_{i2}} \quad (7)$$

比较样本雷达图评估函数 f 大小, f 越大,评价样本越安全。

2 评价指标权重确定

2.1 改进 AHP 确定主客观权重

改进 AHP 是一种主观赋权法,与普通 AHP 相比,改进后的 AHP 具有计算过程简便、不需要一致性检验等优点^[16]。具体过程如下:

1)将 n 个指标($x_1, x_2, \dots, x_n$)按照重要程度进行排列,确定序关系:

$$h_1 > h_2 > \dots > h_n \quad (8)$$

2)对相邻指标 h_{k-1} 和 h_k 的重要性程度之比 D_{k-1}/D_k 进行赋值, B_k 定义公式为:

$$B_k = \frac{D_{k-1}}{D_k} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (9)$$

B_k 赋值如表1所示。

表1 B_k 赋值结果Table 1 B_k assignment results

B_k 赋值	B_k 取值说明
1.0	指标 h_{k-1} 与指标 h_k 同样重要
1.4	指标 h_{k-1} 比指标 h_k 明显重要
1.6	指标 h_{k-1} 比指标 h_k 强烈重要
1.8	指标 h_{k-1} 比指标 h_k 极端重要

3)确定权重 w_n ,计算公式为:

$$w_n = \left(1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n B_k\right)^{-1} \quad (10)$$

$$w_{k-1} = B_k w_k \quad (11)$$

2.2 CRITIC 法确定客观权重

CRITIC 法作为常用的客观赋权法之一,其独特之处在于综合考虑了指标之间的冲突性和对比强度来进行赋权。在权重计算过程中,CRITIC 法深入探究不同指标间的相关性和差异性,通过计算各指标间的相关系数来评估其冲突性,即指标间的相互影响程度。同时,利用标准差来衡量各指标的对比强度,即指标在不同评价方案间的取值差距大小。具体计算过程见参考文献[9]。

2.3 博弈论组合赋权

为了避免单一赋权可能导致的权重准确性问题,利用博弈论思想,构建博弈论组合赋权模型,对几种赋权方法得到的权重进行组合优化,目标是最小化各赋权方法之间的权重差异,找出其中的一致性,同时确保组合后的权重能够最大程度地反映评价指标的实际重要性^[10]。具体步骤如下:

1)假设用 L 种赋权方法对 n 个评价指标进行赋权,则权重矩阵为:

$$W = (w_{kp})_{L \times n} \quad (12)$$

式中: w_{kp} 为第 k ($k=1, 2, \dots, L$)个赋权方法的第 p ($p=1, 2, \dots, n$)个评价指标相对应的权重值。

2)对各权重向量进行线性组合:

$$w_i = \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T \quad (13)$$

式中: α_k 为第 k 个赋权方法线性组合系数。

3)为了得到最优组合系数 α_k ,利用矩阵微分性质,建立最优化一阶导数条件的线性方程组,即:

$$\begin{bmatrix} w_1 \cdot w_1^T & \cdots & w_1 \cdot w_L^T \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_L \cdot w_1^T & \cdots & w_L \cdot w_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \cdot w_1^T \\ \vdots \\ w_L \cdot w_L^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

4)根据式(14)计算得到优化线性组合系数 α_k ,再由 $\alpha_k^* = \alpha_k / \sum_{k=1}^L \alpha_k$ 对其进行标准化处理,最后得到组合权重 w^* 计算公式为:

$$w^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* w_k^T \quad (15)$$

3 评价模型构建与计算

3.1 评价体系建立

岩爆演化过程影响因素众多,因此,在岩爆等级评价过程中,评价指标的选取尤为重要,所选指标要避免导致评价过程复杂化或片面化。岩爆的影响因素可分为内部因素和外部因素2个方面。岩体周围的应力分布发生变化是外部因素,岩体本身的力学性

质是内部因素^[17]。本文在深入剖析岩爆机制,综合考虑岩爆发生因素的基础上,选取5个关键指标:岩石脆性系数(σ_c/σ_t)、应力系数(σ_θ/σ_c)、弹性变形能指数(W_{et})、岩体完整性系数(K_v)和埋深(h)作为预测岩爆等级的重要指标,进而建立评价指标体系。

3.2 等级划分标准和学习样本确定

根据岩爆等级相关研究与分类标准,以及岩爆判据和分级的相关研究成果^[7,18],建立了具体的岩爆等级划分标准,如表2所示。

表2 岩爆等级划分标准

Table 2 Classification criteria for rockburst grade

岩爆等级	评价指标				
	σ_c/σ_t	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v	h/m
I	40 ~ 80	0 ~ 0.3	0 ~ 2	0 ~ 0.555	0 ~ 50
II	26.7 ~ 40	0.3 ~ 0.5	2 ~ 3.5	0.555 ~ 0.65	50 ~ 200
III	14.5 ~ 26.7	0.5 ~ 0.7	3.5 ~ 5	0.65 ~ 0.75	200 ~ 700
IV	0 ~ 14.5	0.7 ~ 1	5 ~ 10	0.75 ~ 1	700 ~ 2 000

利用上述岩爆等级划分标准数据,建立5个初始学习样本,具体数据如表3所示。

表3 岩爆数据学习样本

Table 3 Learning sample of rockburst data

样本	评价指标				
	σ_c/σ_t	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v	h/m
1	80	0	0	0	0
2	40	0.3	2	0.555	50
3	26.7	0.5	3.5	0.65	200
4	14.5	0.7	5	0.75	700
5	0	1	10	1	2 000

3.3 归一化样本矩阵计算

所选岩爆评价指标体系中, σ_c/σ_t 为正向指标,

σ_θ/σ_c 、 W_{et} 、 K_v 、 h 均为负向指标,根据式(1)、式(2)对样本各指标数据进行处理,建立归一化样本矩阵,结果如表4所示。

表4 归一化样本区间

Table 4 Normalized sample intervals

样本	评价指标				
	σ_c/σ_t	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v	h
1	1	1	1	1	1
2	0.5	0.7	0.8	0.445	0.975
3	0.333 75	0.5	0.65	0.35	0.9
4	0.181 25	0.3	0.5	0.25	0.65
5	0	0	0	0	0

3.4 评价指标权重值计算

通过改进 AHP、CRITIC 法分别求得对应指标的主、客观权重,然后通过博弈论原理进行权重优化组合,得到最优组合权重值。3种赋权法所得权重值如表5所示。

表5 不同赋权法权重值

Table 5 Weight values from different weighting methods

赋权方法	评价指标				
	σ_c/σ_t	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v	h
改进 AHP	0.169	0.292	0.244	0.141	0.203
CRITIC 法	0.197	0.111	0.137	0.198	0.357
博弈论	0.179	0.194	0.185	0.166	0.276

3.5 特征向量计算

选用博弈论所得的最优组合权重值和归一化样本矩阵各指标值绘制优化雷达图,如图4所示。然后运用式(3)~(6)计算5个样本优化雷达图的面积、周长和特征向量,数据如表6所示。

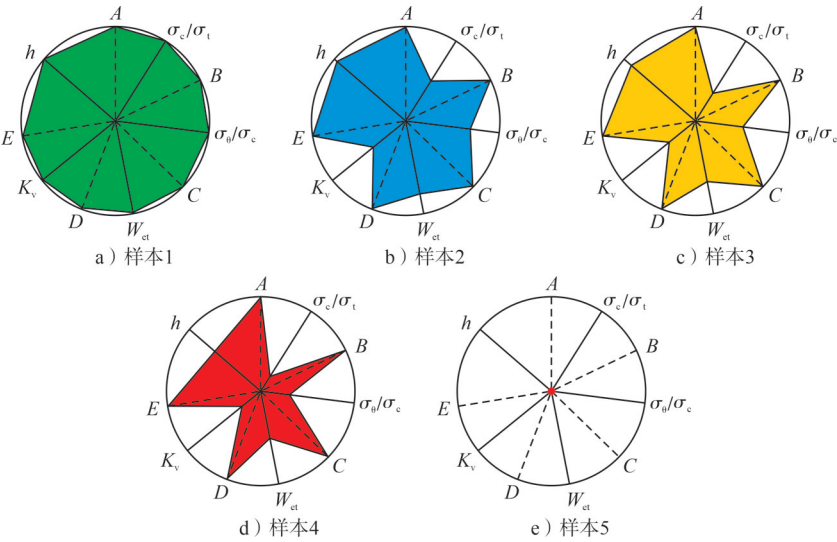


图4 样本优化雷达图

Fig. 4 Optimized radar chart of samples

表 6 样本雷达图数据

Table 6 Radar chart data of samples

样本	S_i	L_i	D_{i1}	D_{i2}
1	2.915	6.168	1	0.963
2	2.071	6.506	0.71	0.615
3	1.681	6.991	0.577	0.432
4	1.163	7.648	0.399	0.25
5	0	0	0	0

3.6 评估函数计算和分级范围确定

把表 6 中的特征向量代入式(7),计算得到 5 个样本的评估函数 f ,数据结果如表 7 所示。

表 7 评估函数数据

Table 7 Evaluation function data

样本	1	2	3	4	5
f	0.981	0.661	0.499	0.316	0

根据表 2 的岩爆等级划分标准,对表 7 样本评估函数进行分级排序,得到不同岩爆等级评估函数划分范围,具体结果如表 8 所示。

表 8 不同岩爆等级评估函数划分范围

Table 8 Classification ranges of evaluation functions for different rockburst levels

岩爆等级	评估函数范围
I	(0.661, 0.981]
II	(0.499, 0.661]
III	(0.316, 0.499]
IV	[0, 0.316]

4 工程实例评价

为了验证博弈-优化雷达图岩爆等级评价模型的准确性,本文根据东山铜矿 730 m 中段 6 种含矿岩体进行岩爆预测^[19],以其岩石力学参数作为标准对模型进行了检验,具体数据如表 9 所示。

表 9 东山铜矿 6 种含矿岩体的岩石力学参数

Table 9 Rock mechanical parameters of 6 rock masses from the Dongshan Copper Mine

岩石类型	岩石力学参数				
	σ_c/σ_t	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v	h/m
矽卡岩	8.06	0.55	3.97	0.75	634
闪长岩	14.56	0.37	10.57	0.71	727.5
石榴石矽卡岩	9.89	0.61	5.76	0.82	762.5
栖霞组大理岩	11.51	0.82	3.11	0.55	795
粉砂岩	7.58	0.53	7.27	0.68	843
石英砂岩	13.43	0.44	6.38	0.67	851.5

采用博弈-优化雷达图岩爆等级评价模型依次对 6 种含矿岩体进行岩爆预测,求得对应的雷达图评估

函数 f ,根据表 8 的不同岩爆等级评估函数划分范围评价岩爆等级,具体预测结果如表 10 所示。对比分析博弈-优化雷达图岩爆等级评价模型预测结果、传统雷达图预测结果与实际岩爆等级,本文评价结果准确率高于传统雷达图准确率,且与实际岩爆等级完全符合,说明了博弈-优化雷达图模型在岩爆等级评价中的准确性与可靠性。

表 10 岩爆等级评价结果

Table 10 Rockburst grade evaluation results

岩石类型	f	博弈-优化 雷达图	雷达图	实际等级
矽卡岩	0.356 4	III	III	III
闪长岩	0.164 9	IV	IV	IV
石榴石矽卡岩	0.287 5	IV	IV	III ~ IV
栖霞组大理岩	0.346 2	III	III	III
粉砂岩	0.286 0	IV	IV	IV
石英砂岩	0.338 4	III	IV	III

5 结 论

1)岩爆演化是一种复杂的非线性变化过程,影响因素众多,以岩爆等级划分标准数据作为样本,选取 σ_c/σ_t 、 σ_θ/σ_c 、 W_{et} 、 K_v 和 h 建立岩爆等级评价指标体系,运用博弈论原理对改进 AHP 和 CRITIC 法所得的主、客观权重进行重组赋权,结合优化雷达图,建立岩爆评价模型。

2)运用博弈-优化雷达图岩爆等级评价模型对东山铜矿 730 m 中段 6 种含矿岩体进行岩爆预测,评价结果准确率高于传统雷达图,且和实际岩爆等级一致,验证了该模型的准确性和适用性,进而说明博弈-优化雷达图岩爆等级评价模型在工程岩爆评价应用中具有较好的效果。

3)博弈-优化雷达图岩爆等级评价模型具有方便、直观的特点,通过雷达图评估函数大小来评价岩爆等级。优化后能够有效改进雷达图受指标排序影响的问题,进而提高博弈-优化雷达图岩爆等级评价模型的准确性和可靠性。目前,雷达图应用于岩爆预测的研究还很少,还需要针对雷达图自身的不足进行更深层次的探索和改进,使得岩爆评价结果更加趋近于实际。

[参 考 文 献]

[1] 王道林,田明华,朱德彬,等.基于多维云模型的深井岩爆倾向综合评价[J].黄金,2024,45(2):1-7.
[2] 石小庆.基于 KPCA-GWO-SVM 模型的岩爆预测及应用[J].黄金,2023,44(4):13-18.
[3] HOEK E, BROWN E T. Underground excavation in rock[M]. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
[4] KIDYBINSKI A Q. Bursting liability indices of coal[J]. International

- Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Pergamon, 1981, 18(4):295-304.
- [5] 陆家佑. 水工引水隧洞岩爆机制研究[C]//中国岩石力学与工程学会, 岩石力学数值计算及模型试验专业委员会. 第一届全国岩石力学数值计算及模型试验讨论会论文集. 成都: 西南交通大学出版社, 1986: 210-214.
- [6] LI N, FENG X, JIMENEZ R. Predicting rock burst hazard with incomplete data using Bayesian networks[J]. Tunn Undergr Space Technol, 2017, 61: 61-70.
- [7] XUE Y, LI Z, LI S, et al. Prediction of rock burst in underground caverns based on rough set and extensible comprehensive evaluation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(1): 417-429.
- [8] SHUKL A, KHANDEL W, KANKAR P. Prediction and assessment of rock burst using various meta-heuristic approaches [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2021, 38(3): 1 375-1 381.
- [9] ZHANG Q J, LIU C J, GUO S, et al. Evaluation of the rock burst intensity of a cloud model based on the critic method and the order relation analysis method [J]. Mining, Metallurgy Exploration, 2023, 40(5): 1 849-1 863.
- [10] 张千俊, 刘传举, 刘泉, 等. 基于博弈-灰靶模型的岩爆烈度等级评价[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(1): 55-60.
- [11] 杨甜. 基于雷达图的公共图书馆阅读推广社会合作评价研究[J]. 文化创新比较研究, 2024, 8(3): 194-198.
- [12] 张原飞, 王项南, 郭毅, 等. 基于改进雷达图法的海洋能发电装置电能质量综合评价[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 413-418.
- [13] 海军, 宋秉龙. 运用雷达图分析法开展航空运输投送能力评估探析[J]. 国防交通工程与技术, 2021, 19(5): 17-19, 28.
- [14] 程志友, 朱唯韦, 陶青, 等. 基于改进雷达图的配电系统电能质量评估方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(14): 34-39, 67.
- [15] 孙雅薇, 田建宇, 梁炜, 等. 基于雷达图法的通信网络效能可视化建模[J]. 计算机仿真, 2019, 36(10): 1-5.
- [16] 黄旭, 叶聪林, 陈家钊, 等. 基于G1法和云化物元模型的充填体稳定性评价[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(1): 13-18.
- [17] YI L, ZHAO J, YU W, et al. Health status evaluation of catenary based on normal fuzzy matter-element and game theory [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15(5): 2 373-2 385.
- [18] 王羽, 许强, 柴贺军, 等. 工程岩爆灾害判别的RBF-AR耦合模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 1 943-1 949, 1 965.
- [19] WANG J C, HUANG M J, GUO J. Rock burst evaluation using the critic algorithm-based cloud model [J]. Frontiers in Physics, 2021, 8: 593701.

Rockburst grade evaluation based on game-optimized radar chart model

Long Jingjing¹, Zhao Lijun¹, Zhang Qianjun², Zhang Xiongwei³

(1. Changba Lead-Zinc Mine, Gansu Changba Nonferrous Metals Co., Ltd.;

2. Deyang Haohua Qingping Phosphate Mine Co., Ltd.;

3. Kunming Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd.)

Abstract: Rockburst, a critical challenge in underground geotechnical engineering, has made rockburst grade evaluation a pivotal research focus. To accurately assess rockburst grades in underground excavation projects, this study proposes a rockburst grade evaluation system based on a game-optimized radar chart. First, an evaluation system for rockburst was established using rock brittleness coefficient σ_c/σ_p , stress coefficient σ_p/σ_c , elastic strain energy index W_{e1} , rock mass integrity coefficient K , and burial depth h . Grade classification standards for these indicators were defined. Subjective and objective weights were calculated using an improved analytic hierarchy process and the CRITIC method, respectively, with combined weights determined via game theory. By integrating radar chart principles and optimized radar chart, a characteristic vector evaluation function range for different rockburst grades was developed. The rockburst grade of a sample was then evaluated based on the magnitude of its radar chart characteristic vector evaluation function. To validate the model's effectiveness and reliability, it was applied to analyze rockburst cases during mining operations at the Dongshan Copper Mine. Results demonstrate that the evaluation outcomes based on game-optimized radar chart align with actual rockburst grades, confirming the rockburst grade evaluation model's practicality.

Keywords: deep shaft mining; rockburst; grade evaluation; analytic hierarchy process; game theory weighting; radar chart