

文章编号: 1673-9469 (2019) 03-0067-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.013

基于改进熵权-突变级数法的岩爆等级评判

郭延华, 李乐昱

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为能够准确预测岩爆等级, 从岩性、应力、围岩三方面选取岩爆发生的五个因素作为预测评价指标, 通过改进后的熵权公式来计算评价指标的重要程度; 结合突变级数法中多维的印第安人茅舍模型对无量纲处理后的岩爆样本数据进行归一化计算得到突变级数值, 并划分岩爆等级区间。最后将此方法应用在江边水电站隧道岩爆预测中。结果表明: 利用该方法评判岩爆等级, 模型维数较多, 评判结果客观、准确, 和实际工程情况一致, 与其他方面相比具有一定优势。

关键词: 改进熵权法; 突变级数法; 印第安人茅舍模型; 岩爆等级; 预测

中图分类号: TD324

文献标识码: A

Evaluation of Rock Burst Level Based on the Improved Entropy Weight-Catastrophe Progression Method

GUO Yanhua, LI Leyu

(College of Civil Engineering, HeBei University of Engineering, HanDan 056038, China)

Abstract: In order to accurately predict the rock burst level, five factors of rock burst occurrence were selected from three aspects of lithology, stress, and surrounding rock as the prediction evaluation index, and the importance of evaluation index was calculated by using the improved entropy weight formula. Combined with the multi-dimensional Indian huts model in the catastrophe progression method, the data of rock burst samples after dimensionless processing were normalized to obtain the catastrophe sequence value, and the rock burst interval was divided. Finally, this method is applied to the rock burst prediction of Jiangbian hydropower station tunnel. The results show that the method is objective, accurate, and consistent with the actual engineering situation and has certain advantages over other aspects.

Key words: improved entropy method; catastrophe progression method; the Indians huts model; level of rock burst; prediction

岩爆是岩体在高地应力下工程开挖中经常遇到的地质灾害, 它是由于岩体开挖卸荷导致的围岩应力重分布, 使储存在岩体内的弹性能瞬间释放的现象。岩爆往往会给施工人员和设备带来不可估量的损失, 故对其发生和等级的预测就显得十分必要。近年来, 研究者们先后提出了模糊综合判别法^[1]、灰色关联分析理论^[2]、可拓评判法^[3]、投影寻踪法^[4]、云模型^[5]、距离判别分析法^[6]、支持向量机法^[7]等岩爆等级预测方法, 并取得了一定成果。然而, 由于岩爆发生的复杂性以及各类理论自身存在的缺

陷等问题, 它们在实际工程应用中均存在一定局限性。随着模糊数学和突变理论不断发展, 利用突变级数法来预测岩爆等级的方法应运而生。然而突变级数法对于指标权重的处理存在主观性, 且多采用低维数的模型。

鉴于以上问题, 本文选用影响岩爆的五个主要因素作为评判指标, 采用改进熵权法对指标权重进行客观排序, 避免了常用的专家打分法来评价指标权重的主观性, 并结合突变级数法中维数较多的印第安人茅舍突变模型来计算突变级数值。最后将结

收稿日期: 2019-05-30

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E2014402099)

作者简介: 郭延华 (1972-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 副教授, 主要从事煤矿安全、地下工程等方面的研究工作。

果与实际岩爆情况进行研究分析。研究成果可为多因素岩爆的预测提供借鉴与参考。

1 研究的理论与方法

1.1 突变理论与突变级数法

突变理论是一门描述自然界中突变现象的新兴学科。它的主要特征是依据所研究系统的势函数对临界点进行分类,进而研究各类临界点附近的非连续性态特征,它可针对内部作用还不明确的系统进行分析。

突变级数法是以突变理论为基础发展起来的一种综合评价方法,它以势函数 $f(x)$ 为研究对象,并通过系统状态变量和外部控制变量来描述系统的突变。此时令 $f'(x)=0$ 可得到由势函数所有临界点组合而成的平衡曲面方程 A ;令 $f''(x)=0$,可得到平衡曲面的奇点集方程 B ;再联立 $f'(x)=0$ 和 $f''(x)=0$,消去状态变量 x ,即可得到系统中反映状态变量和控制变量之间关系的分叉集方程,当控制变量满足此方程时系统将发生突变^[8-9]。

为了使突变模型与模糊数学隶属函数相结合,需要将状态变量和各个控制变量的值取在同一范围,即限制在 $[0, 1]$,因此要通过分解形式的分叉集方程导出归一化公式,将系统内控制变量的不同质态转化为统一质态,即通过状态变量所表示的质态。现以尖点模型为例进行分析,其分解形式的分叉集方程^[9-10]见式(1)

$$\begin{cases} a = -6x^2 \\ b = 8x^3 \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)变换为式(2)

$$\begin{cases} x_a = \sqrt{-\frac{a}{6}} \\ x_b = \sqrt[3]{\frac{b}{8}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_a 、 x_b 分别为 a 、 b 所对应的 x 值。

若使 $|x|=1$,则 $a=-6$, $b=8$,这样就确定了 x 、 a 、 b 的取值范围,即 $|x|$ 取 $0 \sim 1$ 、 $|a|$ 取 $0 \sim 6$ 、 $|b|$ 取 $0 \sim 8$ 。为了使计算简便,将它们的值限定在 $0 \sim 1$ 范围内。为此,使

$$\begin{cases} a = -6a' \\ b = 8b' \end{cases} \quad (3)$$

得到

$$\begin{cases} x_a = \sqrt{a'} \\ x_b = \sqrt[3]{b'} \end{cases} \quad (4)$$

则 a' 、 b' 和 x 的值都限定在了 $0 \sim 1$ 范围内,于是 x 、 a 、 b 都可以使用突变级数了。式(4)即为尖点模型归一化公式。同理可得到其他模型的归一化公式。接下来依据归一化公式进行综合量化计算,可得到表征系统状态的综合突变隶属度值,即突变级数值,利用该值对系统进行综合评判分析。当系统有一个状态变量,五个控制变量时称为印第安人茅舍突变模型。其势函数、分叉集方程、归一化公式^[11]见式(5)~(7):

$$\begin{aligned} f_5(x) &= x^7 + a^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex \quad (5) \\ a &= -11x^2, b = 20x^3, c = -15x^4, d = 14x^5, e = -15x^6 \quad (6) \\ x_a &= a^{1/2}, x_b = b^{1/3}, x_c = c^{1/4}, x_d = d^{1/5}, x_e = e^{1/6} \quad (7) \end{aligned}$$

1.2 改进熵权-印第安人茅舍突变模型的构建

熵最早是出现在物理的经典热力学中,用来表示物质状态的一个参量,它是对系统不确定性的一种度量。后来申农将熵的概念引入到信息论中,并将信息源信号的不确定性称为信息熵^[12]。因此在对某一指标进行研究时,它的熵值越小,则该指标所包含的信息越多,系统状态的不确定性也就越小,在后期的决策环节中就越重要,故所拥有的权重越高。利用熵权法能够有效避免权重决策的主观影响,使研究结果更加客观。

然而传统熵权计算公式存在三点不足:(1)在计算过程中出现 $P_{ij}=0$ 和 $P_{ij}=1$ 时,则 $P_{ij}\ln(P_{ij})=0$ 的特殊约定显然是不合理的^[13];(2)如果指标熵值接近于1,则其相互间的微小变化可能引起不同指标熵权的较大改变;(3)评价指标的差异性系数比例相同时,则不管熵值间差异程度如何变化,不同因子下权重的计算结果均相同^[14]。针对传统熵权计算公式存在的不足,本文选用改进熵权公式进行计算。

由于突变级数法的计算特征,需要对每个层次中不同指标的相对重要程度进行排序,本文所选的五个指标即为印第安人茅舍突变模型中的五个控制变量,通过改进熵权法来确定五个指标的相对重要程度,再根据重要程度的先后顺序代入到相应模型的归一化公式中进行计算,最后由指标评判原则得到突变级数值。

2 评价模型的实现过程

2.1 改进熵权法的权重计算

本文所选用的评判指标分为两类:(1)正向指标,

即越大越好型，如弹性应变能指数、岩石单轴抗压强度、应力系数、岩石完整性系数；(2) 逆向指标，即越小越好型，如强度应力比。假设共有 m 项评价样本， n 项评价指标，运用式(8)、式(9)分别对正向、逆向两种指标数据进行无量纲处理。

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min(j)}}{x_{\max(j)} - x_{\min(j)}} \quad (8)$$

$$X_{ij} = \frac{x_{\max(j)} - x_{ij}}{x_{\max(j)} - x_{\min(j)}} \quad (9)$$

式中： x_{ij} 为第 i 个样本第 j 向指标的初始数据； $x_{\min(j)}$ 、 $x_{\max(j)}$ 分别代表第 j 个评价指标实测数据的最小值和最大值； X_{ij} 为无量纲处理后的数据。

熵值及权重的计算分为两步，第一步：计算指标的熵值 E_j ，见式(10)

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (10)$$

式中： $i = 1, 2, \dots, m$ ； $j = 1, 2, \dots, n$ ； K 为常数， $K = 1/\ln m$ ； P_{ij} 为第 i 项样本的第 j 个指标的比重，即 $P_{ij} =$

$$\frac{X_{ij} + 0.1}{\sum_{i=1}^m (X_{ij} + 0.1)}。$$

第二步：利用改进的权重公式计算各指标的权重 μ_j ，见式(11)

$$\mu_j = \frac{\exp\left(\sum_{k=1}^n E_k + 1 - E_j\right) - \exp(E_j)}{\sum_{j=1}^n [\exp\left(\sum_{k=1}^n E_k + 1 - E_j\right) - \exp(E_j)]} \quad (11)$$

式中： $\mu_j \in [0, 1]$ ，且 $\sum_{j=1}^n \mu_j = 1$ 。

2.2 突变级数值的计算

2.2.1 指标归一化处理

把无量纲处理后的数据代入到印第安人茅舍突变模型相应的归一化公式中进行计算，其中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 指标的选取由上述熵值计算所得权重大小来决定，所占权重越大，字母顺序越靠前。

2.2.2 指标评判原则

通过归一化公式对相同对象的不同控制变量计算出的值可采用3种评判原则，即互补性原则、非互补性原则、过阈值后互补原则。如果系统中的控制变量之间可以相互替代，则满足互补性原则，按照“平均值”的方式进行取值，即 $x = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i}{i}$ ，($i=1, 2, \dots, 5$)，如果系统中的控制变量之间相互不可替代，则满足非互补性原则，按照“大中取小”的方式进行取值，即 $x = \min\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ ，($i=1, 2, \dots, 5$) 其中 x 代表状态变量， $x_1, x_2, \dots, x_5$ 代表控制变量；如果控制变量必须达到某个阈值条件后才互补，则

称之为过阈值后互补原则。

3 评价模型在岩爆等级评判中的应用

3.1 指标选取与等级划分

根据岩性、应力、围岩三方面选取影响岩爆发生的五个因素作为评判指标，即单轴抗压强度、弹性应变能指数、强度应力比、岩体完整性系数、切向应力与单轴抗压强度比，并将岩爆等级划分为1、2、3、4级，分别表示无岩爆、弱岩爆、中等程度岩爆、强岩爆。

3.2 突变模型的应用

选用文献[15]给出的20个完整且具有代表性的样本原始数据，根据改进熵权法计算公式，得到指标的熵值和权重，如表1所示。

表1 各指标熵值与权重

Tab.1 Entropy value and weight of each indicator

指标	σ_c	σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v
熵值	0.961 1	0.972 5	0.947 8	0.948 5	0.965 2
权重	0.199 6	0.197 2	0.202 3	0.202 2	0.198 7

根据指标权重大小对无量纲处理的数据进行归一化计算，得到突变级数值。以第一个样本为例，根据式(7)得：

$$x_a = x_{\sigma_\theta/\sigma_c} = 0.833^{\frac{1}{2}} \approx 0.913$$

$$x_b = x_{W_{et}} = 1^{\frac{1}{3}} = 1$$

$$x_c = x_{\sigma_c} = 0.922^{\frac{1}{4}} \approx 0.980$$

$$x_d = x_{K_v} = 1^{\frac{1}{5}} = 1$$

$$x_e = x_{\sigma_c/\sigma_1} = 0.982^{\frac{1}{6}} \approx 0.997$$

由于导致岩爆发生的五种因素之间具有一定的关联性，因此综合评价指标选用“平均值”原则来求最终的突变级数值，即

$$(x_a + x_b + x_c + x_d + x_e)/5 \approx 0.98$$

同理，可求出其他样本对应的突变级数值，计算结果汇总见表2。

根据表2所得结果，以岩爆样本的突变级数值为横坐标，以岩爆实际等级为纵坐标，绘制散点图，见图1所示。

由图1可知，突变级数值的大小与实际岩爆等级有很好的正相关性，突变级数值对岩爆等级的区分度较为明显，因此将岩爆等级划分为四个区间，

表 2 样本的无量纲处理与突变级数的计算
Tab.2 Dimensionless treatment of samples and calculation of mutation series

样本 编号	岩爆样本无量纲化处理						突变级 数值	回代 等级
	σ_c/MPa	σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v	岩爆实际等级		
1	0.922	0.982	0.833	1.000	1.000	4	0.98	4
2	0.576	0.858	0.690	0.389	0.676	3	0.87	3
3	0.294	0.307	0.024	0.220	0.270	1	0.62	1
4	0.606	0.862	0.619	0.477	0.649	3	0.87	3
5	0.423	0.546	0.262	0.436	0.216	2	0.74	2
6	0.000	0.710	0.524	0.000	0.297	2	0.49*	1
7	1.000	1.000	0.810	0.905	0.811	4	0.97	4
8	0.731	0.860	0.714	0.337	0.703	3	0.87	3
9	0.240	0.579	0.333	0.069	0.459	2	0.69	1
10	0.158	0.412	0.095	0.171	0.135	1	0.61	1
11	0.470	0.693	0.333	0.341	0.568	2	0.79	2
12	0.681	0.949	0.667	0.786	0.811	3	0.92	3
13	0.161	0.470	0.214	0.194	0.351	1	0.67	1
14	0.859	0.976	0.929	0.754	0.730	3	0.95	3
15	0.267	0.000	0.048	0.171	0.162	1	0.44	1
16	0.837	0.951	0.571	0.393	0.541	3	0.86	3
17	0.966	0.995	1.000	0.983	0.595	4	0.98	4
18	0.521	0.550	0.286	0.304	0.324	2	0.75	2
19	0.237	0.159	0.000	0.182	0.000	1	0.40	1
20	0.567	0.925	0.762	0.767	0.730	3	0.92	3

注：* 表示存在偏差数值，绘制散点图时忽略该点。

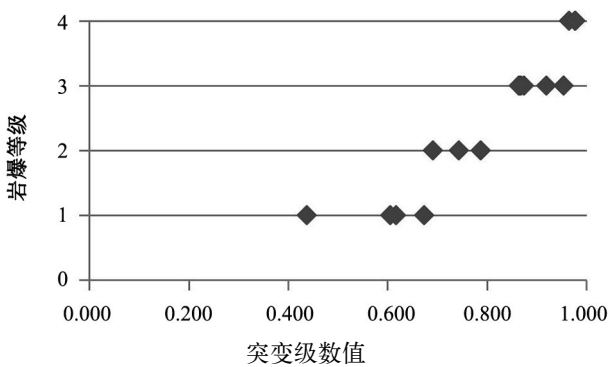


图 1 突变级数值与岩爆等级对应关系
Fig.1 Corresponding relationship between catastrophe grade and rockburst grade

即无岩爆 [0.00, 0.70)、弱岩爆 [0.70, 0.80]、中等程度岩爆 (0.80, 0.95]、强岩爆 (0.95, 1.00]。其中，中括号表示包含界限值，小括号表示不包含其界限值。

接下来将 20 个样本向划分好的不同岩爆等级的突变级数区间进行回代，结果如表 2 所示，除了 6 点、9 点外其他评判结果与实际情况一致，准确率为 90%，初步说明该方法可行的。

4 实例验证

江边水电站^[15]坐落于四川西部甘孜藏族自治州的东南部方向，为九龙河干流下游河段梯段开发的第五个梯段电站，也是该河段最后一级电站。该水电站所采用的方案为有坝引水式，其总库容量约为 $133 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，装机容量为 330 MW。引水隧洞由白龙庙滑坡体的下游穿过山脊，长度约为 8.6 km，开挖洞径约为 8.4 m，埋深比较大，通常在 300 ~ 1 690 m 范围内，全线埋深大于 300 m 的洞段占总洞段的 54%，属于深埋隧洞，且大部分都有发生岩爆的可能。当施工洞室埋深超过 550 m 时，就已达到中等岩爆区深度，岩爆现象频发，开挖工作受到极大影响，局部洞段在高地应力作用下有发生强烈岩爆的可能。

将本文所研究的预测岩爆等级的方法应用于该工程后期某几个洞段的岩爆预测中，数据及预测结果见表 3。

由表 3 可以看出，运用改进熵权 - 印第安人茅

表3 江边水电站隧洞岩爆等级的预测
Tab.3 Prediction of tunnel rock burst grade of Jiangbian hydropower station

样本编号	σ_c	σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v	突变级数值	预测等级	实际等级
1	137.22	4.40	0.59	3.46	0.68	0.91	3	3
2	140.21	5.33	0.43	3.14	0.60	0.70	2	2
3	130.21	21.11	0.30	4.21	0.52	0.20	1	1

舍突变模型的预测结果同工程实际情况相吻合，且该方法计算过程简单、方便。然而该方法与原始数据质量好坏存在一定影响，因此在实际应用中仍需进一步完善与检验。

5 结论

1) 运用改进熵权法对影响岩爆发生的五个指标进行权重计算，能够避免传统熵权公式计算带来的误差和人为主观因素的影响，保证了结果的客观性和准确性。

2) 突变级数法中考虑多种影响因素作用下的模型多为尖点、燕尾、蝴蝶突变模型。然而印第安人茅舍突变模型其控制变量维数多于以上几种，故在岩爆等级预测中具有一定优势。

3) 根据计算所得的突变级数值将岩爆划分为无岩爆、弱岩爆、中等程度岩爆、强岩爆4个等级，并通过数据回代以及工程实例验证了此方法的适用性。

4) 从本文的评价方法可知，结果的准确与否和岩爆样本数据的质量有一定关系，因此对于数据的选取需要进一步完善。

参考文献：

- [1] 王元汉, 李卧东, 李启光, 等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998(5): 15-23.
- [2] 裴启涛, 李海波, 刘亚群, 等. 基于改进的灰评估模型在岩爆中的预测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2088-2093.
- [3] 邱道宏, 张乐文, 李术才, 等. 基于优化理论的权重反分析方法研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 259-264.
- [4] 徐飞, 徐卫亚. 岩爆预测的粒子群优化投影寻踪模型 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 718-723.
- [5] 陈杰, 孟锦根. 岩爆烈度分级预测的云模型法及其应用 [J]. 人民长江, 2016, 4(15): 82-86.
- [6] 宫凤强, 李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007(5): 1012-1018.
- [7] ZHOU Jian, LI Xibing, SHI Xiuzhi. Long-term prediction model of rock burst in underground openings using heuristic algorithms and support vector machines [J]. Safety Science, 2012, 50: 629-644.
- [8] 孟凡生, 李美莹. 我国能源消费影响因素评价研究——基于突变级数法和改进熵值法的分析 [J]. 系统工程, 2012, 30(8): 10-15.
- [9] 张浩, 邱斌, 唐孟娇, 等. 基于改进突变级数法的农产品冷链物流风险评估模型 [J]. 系统工程学报, 2018, 33(3): 412-421.
- [10] 罗振华, 钟蒙繁, 张念, 等. 基于突变级数法的页岩气探采综合环境影响评价研究 [J]. 地质与勘探, 2018, 54(1): 174-182.
- [11] 夏琨, 王华, 韩沂桦, 等. 基于突变理论的太湖富营养化程度判别 [J]. 环境科学与技术, 2015, 38(4): 183-188.
- [12] 邹华, 徐纷纷, 杨朔. 基于熵值法的我国区域创新能力评价研究 [J]. 科技管理研究, 2013, 33(23): 56-61.
- [13] 陕振沛, 宁宝权, 郭亚丹. 基于组合赋权灰色关联TOPSIS的节水灌溉效益评价 [J]. 节水灌溉, 2018(9): 102-107.
- [14] 裴启涛, 李海波, 刘亚群, 等. 基于组合赋权的岩爆倾向性预测灰评估模型及应用 [J]. 岩土力学, 2014, 35(S1): 49-56.
- [15] 邱道宏, 李术才, 张乐文, 等. 基于模型可靠性检查的QGA-SVM岩爆倾向性分类研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(5): 981-991.

(责任编辑 王利君)