

基于熵权法-多维云模型的围岩稳定性分类

方诗圣, 田海涛, 黄德洲

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对围岩综合稳定性分类的模糊性问题, 通过熵权法与云模型结合, 利用熵权法计算得到围岩稳定性评估中的各指标的权重, 并通过对已有的一维云模型拓展, 得到多维度云模型, 以此方法建立稳定性评价模型, 并依托实测围岩样本数据进行计算分级。本文建立 5 维度云模型, 将其评价结果与其他方法的评价结果对比, 表明该评估模型在围岩稳定性分类中应用的可行性。

关键词: 熵权法; 隶属度; 云滴; 围岩; 权重; 非线性

中图分类号: TU 457 **文献标识码:** A

Classification of stability of surrounding rock using Entropy Weight Method and multi-dimensional cloud model

FANG Shi-sheng, TIAN Hai-tao, HUANG De-zhou

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In view of the fuzzy problem of the comprehensive stability classification of surrounding rock, by combining the entropy weight method and cloud model, the weights of the indexes in the stability evaluation of the surrounding rock are obtained by the entropy weight method, and the multidimensional cloud model is obtained by extending the existing-dimension cloud model, and the stability evaluation model is established by this method, And based on the measured surrounding rock sample data to calculate the classification. A 5 dimensional cloud model is established to compare its evaluation results with those of other methods, which shows the feasibility of the evaluation model in the classification of surrounding rock stability.

Key words: Entropy Weight Method; membership degree; cloud drops; surrounding rock; weight; nonlinear

0 引言

当前我国正高速发展, 日益突出的交通问题与能源问题正在通过高铁、高速公路和地铁等交通工程与采矿工程的不断建设来逐步缓解, 而围岩稳定性评价是这些建设中多数需涉及的岩石地下工程必须面对的关键问题, 合理正确的围岩稳定性分类将影响工程的设计施工及造价。连建发^[1]通过可拓方法建立了地下工程围岩评价的物元模型, 通过关联函数确定各评价指标权重并计算围岩的稳定性评级, 机器学习方法中的随机森林算法^[2], 支持向量机^{[3][4]}和人工神经网络^[5]等算法也应用到了围岩稳定性评价中, 并得到了比较满意的评价结果, 但机器学习算法中需要解决的问题是学习资源的不足, 而且这些方法并不能很好地围岩稳定问题中的模糊性和随机性考虑在

内, 因此汪明武^{[6][7][8]}等人通过建立基于一维云模型的边坡稳定性评价模型, 并对围岩样本做出了与其他方法^[1]一致的评价结果, 其在论文^{[6][7]}中将云模型对各评价指标的评价结果, 通过权重^[1]进行线性组合, 得到各分类等级最终的确度, 并取最大确定度对应的等级作为最终评价等级。而本文方法^[9]虽然在核心思想上同一维云模型相似, 但通过对一维云模型的拓展, 改进云模型参数的选取, 将多个评价指标整合到一个模型中, 在评价模型的建模工作量上由几十个变为几个, 并改用熵权法^[10]确定各指标权重, 最后以此方法建立新模型实现综合评价结果的计算, 并验证该方法的可行性。

1 云模型理论

作者简介: 方诗圣 (1962—), 男, 安徽安庆人, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师, E-mail:fangss@126.com;
田海涛 (1994—), 男, 河南驻马店人, 合肥工业大学硕士生;
黄德洲 (1994—), 男, 安徽淮北人, 合肥工业大学硕士生。

李德毅^[11]等在传统模糊集理论和概率统计的基础上提出了定性定量不确定性转换模型——云模型，并以云模型为基础经过系统研究和发展形成了云理论，其理论能够有效地实现定性概念与定量数据之间的转换，或者简单地说云模型是定性定量间转换的不确定性模型，其在数据挖掘和模糊评价中有着广泛的应用。

1.1 云模型定义

设 U 是一个论域 $U=\{x\}$ ， T 是与 U 相联系的语言值。 U 中的元素 x 对于 T 所表达的定性概念的隶属度 $C_T(x)$ 是一个具有稳定倾向的随机数，隶属度在论域上的分布称为隶属云，简称为云，随机数集 $\{x\}$ 中的每一个元素 x 称该云上的为一个云滴。

$C_T(x)$ 在 $[0,1]$ 中取值，云是从论域 U 到区间 $[0,1]$ 的映射，即：

$$C_T(x):U \rightarrow [0,1], \forall x \in U, x \rightarrow C_T(x) \quad (1)$$

上述表明云滴集 $\{x\}$ 对应一个隶属度集 $\{C_T(x)\}$ ，而隶属度集的统计学特征即表征了该模型由定量与定性之间的数学关系，云理论中定义了期望 Ex ，熵 En 和超熵 He 这 3 个特征数据，即表明云滴集与隶属度集关系的统计学特征，也来表征一个云模型。

期望 Ex 即为整个云滴集 $\{x\}$ 在定量上的期望值，该值随着云滴数量的增加无限指向云的中央位置，是最能代表这个定性概念的值。

熵 En ：是定性概念模糊度的度量，反映了在论域中可被这个概念所接受的数值范围，体现了定性概念亦此亦彼性的裕度。熵越大，概念所接受的数值范围也越大，概念越模糊。

超熵 He ：是模型的熵 En 的熵，反映了云滴的离散程度。超熵越大，云滴离散度越大，隶属度的随机性越大，云的“厚度”也越大。

1.2 一维云模型

正态云模型是最常用的云滴分布类型，其中每一个云滴都通过云发生器产生，云发生器主要有正向云发生器和逆向云发生器两种。这里只用正向云发生器即可，正向云发生器能够实现定性向定量的转化，即基于云模型的 3 个特征数据和云滴数 N ，计算输出 N 个云滴的定量值及由这些云滴构成的云图。

其每个云滴生成算法如下：

1、 $x = G(Ex, En)$ ，其中 x 为云发生器的一次发生结果， G 为正向云发生器，且 $\{x\}$ 满足 $x \sim N(Ex, En)$ ；

2、 $En' = G(En, He)$ ，其中 En' 为云发生器的

一次发生结果，且 $\{En'\}$ 满足 $x \sim N(En, He^2)$ ；

3、计算 x 的确定度 μ

$$\mu(x) = \exp\left(\frac{-(x - Ex)^2}{2En'}\right), \quad (2)$$

其模型可视化如图 1 所示：

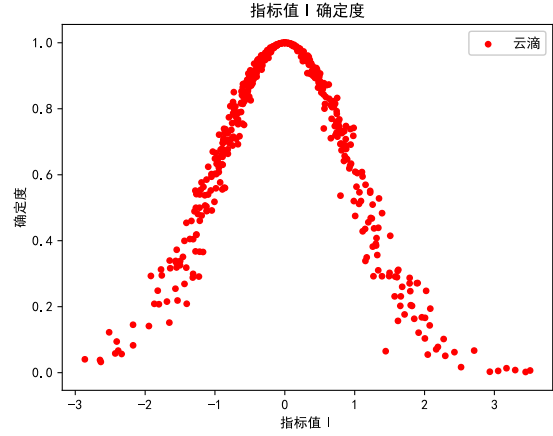


图 1 云滴对于指标 l 的确定度

1.3 多维云模型

多维云模型^[12]同一维云模型类似，区别在于一维云模型中每个云滴的确定度与一个指标量相关，而多维云模型中每个云滴的确定度受多个指标量影响，即每个云滴的确定度整合了多个指标，这也是在同样评价指标下多维云模型在数量上比一维云模型少许多的原因。

其云模型也是由 3 个特征数据与云滴数 N 组成，这 3 个特征数据不再是单个数值，而是多维向量，其维度与云模型的维度一致。

其每个云滴生成算法如下：

1、对每一维度的特征数据 Ex_i, En_i ，使 $x_i = G(Ex_i, En_i)$ ，其中 x_i 为云发生器 G 的一次发生结果，且 $\{x_i\}$ 满足 $x_i \sim N(Ex_i, En_i)$ ；

2、对每一维度的特征数据 En_i, He_i ，使 $En_i' = G(En_i, He_i)$ ，其中 En_i' 为云发生器 G 的一次发生结果，且 $\{En_i'\}$ 满足 $x_i \sim N(En_i, He_i)$ ；

3、计算 $x(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ 的确定度 μ

$$\mu(x(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)) = \exp\left(-\sum_{i=1}^m [w_i \frac{(x_i - Ex_i)^2}{2(En_i')^2}]\right), \quad (3)$$

上式中 $\{w_i\}$ 为各评价指标权重。

高维度云模型无法图形表示，图 2 以二维云模型为例进行云模型可视化。

2 熵权法

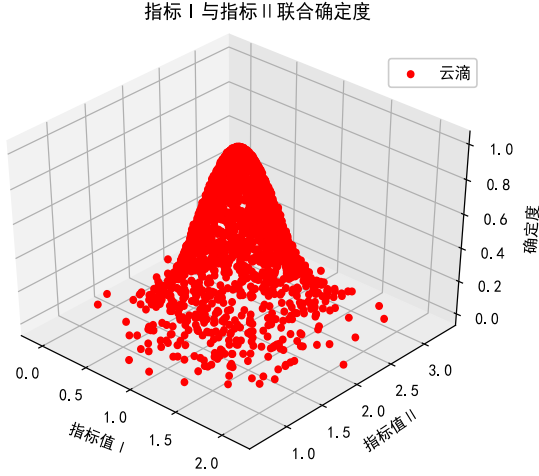


图2 云滴对于指标 I 与指标 II 的确定度

在信息论中，熵是对不确定性的一种度量。信息量越大，不确定性就越小，熵也就越小；信息量越小，不确定性越大，熵也越大。

根据熵的特性，可以通过计算熵值来判断一个事件的随机性及无序程度，也可以用熵值来判断某个指标的离散程度，指标的离散程度越大，该指标对综合评价的影响（权重）越大。

熵权法是一种客观赋权法。其计算步骤如下：

1、对 n 个样本， m 个指标，则 x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个指标的数值 ($i=1,2,3, \dots, n; j=1,2,3, \dots, m$)；

2、指标按下式进行归一化处理：

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj}\}}, \quad (4)$$

3、计算第 j 项指标下第 i 个样本值占该指标的比重：

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}}, \quad (i=1,2,3, \dots, n; j=1,2,3, \dots, m) \quad (5)$$

4、计算第 j 项指标的熵值：

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}), \quad j=1,2,3, \dots, m \quad (6)$$

其中， $k = \frac{1}{\ln(n)} > 0$ ，满足 $e_j \geq 0$ 。

5、计算信息熵冗余度（差异）：

$$d_j = 1 - e_j, \quad j=1,2,3, \dots, m \quad (7)$$

6、计算各项指标的权重：

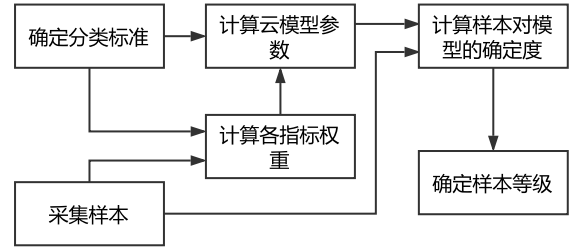
$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}, \quad j=1,2,3, \dots, m \quad (8)$$

由以上步骤可以计算得到该样本中各指标权重。

3 围岩稳定性模型的创建

3.1 基本过程

通过对每个云模型确定基本参数，一旦参数确定，该云模型即被确定，继而计算实际样本数据对该云模型的确定度，对于围岩稳定等级的划分，可确定五个不同等级的模型，任一样本在每个等级下即可计算出对应的确定度，根据确定度大小即可确定该样本最可能属于哪个等级。其基本计算流程如下：



3.2 多维云模型参数确定

围岩稳定性受影响因素很多，依据工程经验和统计分析，得出边坡稳定性主要与地形地貌特征、地质环境特征和气象水文特征等因素有关，这里参照文献[13]选择评价指标 C1 为岩石质量指标(RQD (%))，C2 为湿抗压强度(R_w /MPa)，C3 为完整性系数(K_v)，C4 为结构面强度系数(K_f)，C5 为地下水渗水量($W/L \cdot \min/10m$)，这五项指标作为评价依据，每项指标将指标值按照表 1 划分为 5 个稳定等级。

云模型的 Ex , En 及 He 参数即由上分级表确定，设 $S_{min,ij}$ 及 $S_{max,ij}$ 为 i 指标下等级 j 的指标上下限时，取 j 等级多维云模型的期望向量为：

$$Ex_j = \left\{ \frac{(S_{max,ij} + S_{min,ij})}{2} \right\}, \quad i=C1, C2, \dots, C5 \quad (9)$$

j 等级多维云模型的熵向量为：

$$En_j = \left\{ \frac{(S_{max,ij} - S_{min,ij})}{6} \right\}, \quad i=C1, C2, \dots, C5 \quad (10)$$

超熵 He 体现了某一确定度下指标值的离散程度，这里参考文献[7]取值 0.01。

表 1 围岩稳定性各指标分类标准^[13]

分类等级	岩石质量指标 RQD/ %	湿抗压强度 R _w / MPa	完整性系数 K _v	结构面强度系数 K _f	地下水渗水量 W/ (L•min/10m)
稳定 N1	90~100	120~200	0.75~1.00	0.80~1.00	0~5
基本稳定 N2	75~90	60~120	0.45~0.75	0.60~0.80	5~10
稳定性差 N3	50~75	30~60	0.30~0.45	0.40~0.60	10~25
不稳定 N4	25~50	15~30	0.20~0.30	0.20~0.40	25~125
极不稳定 N5	0~25	0~15	0.00~0.20	0.00~0.20	125~300

表 2 围岩样本实测指标值^[13]

样 本	岩石质量指 标 RQD/ %	湿抗压 强度 R _w / MPa	完整 性系 数 K _v	结构面 强度系 数 K _f	地下水渗水量 W/ (L•min/10m)
1	82	95	0.7	0.35	20
2	68	90	0.57	0.35	20
3	40	25	0.22	0.35	20
4	87	95	0.7	0.5	10
5	76	90	0.57	0.5	10
6	76	95	0.7	0.5	10
7	72	90	0.57	0.5	10
8	51	40	0.38	0.5	10
9	52	25	0.22	0.5	10
10	68	90	0.38	0.3	20
11	28	40	0.32	0.3	20
12	51	25	0.15	0.3	20

通过以上过程计算得到多维云模型 Ex , En , He 参数见表 4。

云模型云滴确定度的计算需提供各指标对综合评价所占的权重, 本文通过文献[13]搜集的 12 个实际围岩样本数据如表 2。

利用熵权法计算过程及权重向量 $\{w_j\}$ 见表 3。

表 3 熵权法权重计算过程

量值	岩石质 量指标 RQD	湿抗压 强度 R _w	完整性 系数 K _v	结构面 强度系 数 K _f	地下水 渗水量 W
k	0.40243	0.40243	0.40243	0.40243	0.40243
e_j	0.97296	0.92812	0.93761	0.98323	0.96105
d_j	0.02704	0.07187	0.06238	0.01676	0.03894
w_j	0.12460	0.33121	0.28748	0.07723	0.17947

3.3 确定度计算

通过式 (3) 将样本数据、权重向量 $\{w_j\}$ 和云模型 Ex , En , He 参数结合, 计算得到每个样本对于各个稳定等级的确定度, 其中确定度最大的隶属等级即为多维云模型评价等级。

4 实例验证

为验证本模型在实际围岩稳定性评价中的可靠性及易用性, 按 3 中方式创建五维度云模型, 5 个维度即为围岩实测指标值中的 5 个指标项, 由于总体模型在数据维度上达到 6 维度, 因此无法通过可视化方式表达模型。在此针对表 2 中 12 个样本数据进行计算分级。

根据表 1 评价标准, 按 3.2 过程计算得到表 4 中五维云模型参数, 根据熵权法计算得到表 3 中指标权重, 由式 (3) 计算得到每个实测样本数据对于各个稳定级别的综合确定度, 每个样本计算所得 5 个确定度中最大者对应的稳定等级即为最终稳定性评级。计算结果见表 5。

由表 5 结果可见, 本模型在五个稳定性等级上的计算结果大小上呈现出明显区分度, 且每个样本的非零确定度都存在连续的 2~3 个稳定性等级之间, 不存在稳定性跳跃的可能性, 该结果表明围岩样本在稳定性上是具有唯一指向性的, 而实际中已确定的围岩的稳定性也是唯一的, 该结果在这点上与实际相符。

本模型在给定样本的综合评级结果上与文献[14]的可拓评价模型评价结果一致, 与文献[13]的模糊模式识别法评价结果在样本 2 与样本 9 存在不一致, 对于样本 2, 本模型在五个评价结果中只有 N2 和 N3 的确定度为非零, N2 的确定度为 0.0000000000003, N3 的确定度为 0.0000000000089, 因此该评价结果可认定为样本 2 在稳定性上位于 N2 与 N3 之间, 偏向于 N3, 可认为文献[13]模型评价样本 2 属于 N2 是偏小的, 这点与文献[14]看法一致。样本 9 的计算结果显示其非零确定性存在 N2~N4 之间, N2 确定度最小 0.0000000000002, N3 确定度次之 0.000084536086, N4 确定度最大 0.015908787288, 因此可认为样本 9 确定度在 N3 与 N4 之间, 偏向于 N4, 文献[13]模型评价样本 9 属于 N3 仍是偏小的, 以上对比可认为本模型在

表 4 多维云模型 Ex , En , He 参数

分类等级	Ex	En	He
N1	(95,160,0.875,0.9,2.5)	(1.67,13.33,0.04,0.03,0.83)	(0.01, 0.01, 0.01, 0.01,0.01)
N2	(82.5,90,0.6,0.7,7.5)	(2.50,10.00,0.05,0.03,0.83)	(0.01, 0.01, 0.01, 0.01,0.01)
N3	(62.5,45,0.375,0.5,17.5)	(4.17,5.00,0.03,0.03,2.50)	(0.01, 0.01, 0.01, 0.01,0.01)
N4	(37.5,22.5,0.25,0.3,75)	(4.17,2.50,0.02,0.03,16.67)	(0.01, 0.01, 0.01, 0.01,0.01)
N5	(12.5,7.5,0.1,0.1,212.5)	(4.17,2.50,0.03,0.03,29.17)	(0.01, 0.01, 0.01, 0.01,0.01)

表 5 围岩稳定性计算结果及对比

样本	样本对于各等级的隶属度					M*	M1	M2
	N1	N2	N3	N4	N5			
1	0.000000000000	0.000000000013	0.000000000000	0.000000000000	0.000000000000	N2	N2	N2
2	0.000000000000	0.000000000003	0.000000000089	0.000000000000	0.000000000000	N3	N3	N2
3	0.000000000000	0.000000000000	0.000019144869	0.179449095755	0.000000007034	N4	N4	N4
4	0.000000000987	0.048995306700	0.000000000000	0.000000000000	0.000000000000	N2	N2	N2
5	0.000000000000	0.069202832445	0.000000000055	0.000000000000	0.000000000000	N2	N2	N2
6	0.000000000001	0.039347288663	0.000000000000	0.000000000000	0.000000000000	N2	N2	N2
7	0.000000000000	0.035135546347	0.000000000077	0.000000000000	0.000000000000	N2	N2	N2
8	0.000000000000	0.000000005538	0.233736740150	0.000000001575	0.000000000000	N3	N3	N3
9	0.000000000000	0.000000000000	0.000084536086	0.015908787288	0.000000000009	N4	N4	N3
10	0.000000000000	0.000000000000	0.000000303334	0.000000000000	0.000000000000	N3	N3	N3
11	0.000000000000	0.000000000000	0.000001343531	0.000006450073	0.000000000000	N4	N4	N4
12	0.000000000000	0.000000000000	0.000000087893	0.000938273444	0.000000005296	N4	N4	N4

注：M*表示本文模型计算结果，M1 表示文献[14]模型计算结果，M2 表示文献[13]模型计算结果。

计算结果上是合理的。

5 结语

本文将熵权法与多维云模型应用在围岩稳定评价中，通过对现有的一维云模型拓展为多维云模型，只需创建 5 不同稳定等级多维云模型即可计算确定度，并用熵权法计算指标权值，计算量较小，整体上减少了建模的复杂程度。结果显示了熵权法-多维云模型评价围岩综合稳定性的可行性，该方法计算过程相对简单且结果可靠，可在各类模糊性问题处理中使用，能客观地反映定性问题与定量指标之间的关系。本模型采用熵权法确定指标权重，实测样本越多，其计算所得指标权重越稳定，可将算法集成为学习机，通过累积实测数据来不断调整指标权重，使之达到更加稳定状态。

[参 考 文 献]

[1]连建发,慎乃齐,张杰坤.基于可拓方法的地下工程围岩评价研究[J].岩石力学与工程学报,2004(09):1450-1453.
[2]刘阳.基于随机森林的回收巷道围岩稳定性预测[J].黑龙江科技信

息,2016(36):72.
[3]赵婷,黄德镛,王佳信,张燕飞.基于向量机的煤层顶底板围岩稳定性分类研究[J].煤矿机械,2016,37(11):175-177.
[4]张宏伟.围岩稳定性评判的支持向量机多分类模型[J].河南科学,2010,28(10):1278-1281.
[5]周盛全,吴基文.基于人工神经网络的隧道围岩稳定性分类[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2012,32(03):7-11.
[6]汪明武,朱其坤,赵奎元,蒋辉,金菊良.基于有限区间联系云的围岩稳定性评价模型[J].岩土力学,2016,37(S1):140-144+165.
[7]李健,汪明武,徐鹏,徐鹏冲.基于云模型的围岩稳定性分类[J].岩土工程学报,2014,36(01):83-87.
[8]张军,陈征宙,刘登峰.基于云模型的岩质边坡稳定性评估研究[J].水文地质工程地质,2014,41(06):44-50.
[9]曾德彪. 基于多维正态云模型的水体富营养化评价方法[D].南京大学,2015.
[10]邹志红,孙靖南,任广平.模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J].环境科学学报,2005(04):552-556.
[11]李德毅,刘常昱,杜鹃,韩旭.不确定性人工智能[J].软件学报,2004(11):1583-1594. [1]李晓超,钟登华,任炳昱,邓韶辉,祝玉珊.基于模糊 RES-云模型的坝基岩体可灌性评价研究[J].水利学报,2017,48(11):1311-1323.

- [12]杨朝晖,李德毅.二维云模型及其在预测中的应用[J].计算机学报,1998(11):961-969.
- [13]陆兆溱,王京,吕亚平.模糊模式识别法在围岩稳定性分类上的应用[J].河海大学学报,1991(06):97-101.
- [14]胡宝清.可拓评价方法在围岩稳定性分类中的应用[J].水利学报,2000(02):66-70.
- [15]汪明武,李丽,金菊良.围岩稳定性集对分析 - 可变模糊集综合评价模型[J].岩土工程学报,2008(06):941-944.

通讯作者: 田海涛

手 机: 18326077303

Email: 874612467@qq.com