



基于模糊 RES-多维云模型的 岩体质量评判方法与应用

周 坦, 胡建华, 匡 也

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要: 选取岩体饱和抗压强度、岩体质量指标、体积节理系数、岩石内纵波波速值、嵌合程度和完整性系数作为岩体质量分级的指标因素, 从系统角度入手, 在一维云的基础上提出一种模糊 RES(岩石系统工程)-多维云岩体质量的分级模型。结果表明: 以云模型改进 RES 编码方式, 可以有效弱化 RES 的主观性; 基于改进的模糊 RES 分析了因素-因素、因素-系统间交互的作用, 从系统的角度确定了因素的重要度; 结合每个指标因素以多维云理论生成 5 朵六维岩体质量等级云模型, 以软件程序实现工程实例验证, 与实际地质报告、可拓法、一维云模型法评判的结果一致。

关键词: 岩石力学; 岩体质量; 模糊 RES; 多维云模型; 优势参数

文章编号: 1004-0609(2019)-08-1771-10

中图分类号: TU45

文献标志码: A

工程岩体作为一个复杂模糊系统, 其质量由系统内多因素相互影响、共同决定。岩体质量评判的准确性和有效性不仅影响施工参数的选取, 而且是进行地质灾变预测、防控的重要前提^[1-2], 岩体质量分级的理论和方法是岩体工程的一项重要研究课题。

随着研究发展, 越来越多的系统工程和数学方法引入岩体质量评判中。周述达等^[3]以灰色聚类法改进分类区分度, 解决了该方法在某些情况下不适用的情况, 结合灰评价模型提高了岩体质量评判的正判率; 胡建华等^[4]建立 RS-TOPSIS 模型应用于地下工程岩体质量评价; 梁桂兰等^[5]基于可拓理论, 以定性、定量相结合的方式实现对岩体质量分级, 取得了良好效果; 李绍红等^[6]耦合蒙特卡洛模拟和 TOPSIS, 针对岩体系统的不确定性, 通过概率描述的可靠度给出分级结果; 曹琛等^[7]利用组合赋权结合不确定性理论中的一维云模型进行了坝基岩体质量分级; 魏博文等^[8]以投影寻踪法求取分级指标的客观权重, 以模糊熵 E 作为云模型的辅助参考构建了分级模型; 除此之外还有神经网络模型^[9]、聚类分析方法^[10]、模糊数学方法^[11]等。这些研究在不同程度、不同领域完善了

岩体质量分级的理论体系。然而, RQD 法(Rock quality designation)、可拓理论分级法等传统方法往往没有考虑指标因素的模糊性和随机性, 作为一个定值参与评判; 距离判别法依赖样本数据, 将各因素视为同等重要, 对差异随机性考虑不充分; 云模型可以实现定性与定量间的模糊转化, 但是传统的一维云只能针对系统中因素单独转换, 在指标因素较多时生成云图较繁琐, 且不能反映系统因素间相互交叉影响的过程。再者, 指标因素权重的合理准确对分级结果有很大的影响, 以往划分权重的方法忽略指标因素间的相互作用, 而实际情况中岩体系统是一个复杂模糊系统, 各因素间可能同时发生二元或是多元的交互作用, 形成交互反馈最终影响岩体质量的分级。

针对岩体系统的多因素复杂模糊性, 采用因素间相互作用的岩石系统工程(Rock engineering system, RES^[12]), 确定指标因素权重。基于不确定云理论^[13]提出一种弱化 RES 的主观性的模糊编码方式。结合多因素共同作用的多维云建立模糊 RES-多维云模型进行岩体质量的分级, 并以实际工程验证, 检验分级模型的有效性。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0602901); 国家自然科学基金资助项目(41672298)

收稿日期: 2018-05-20; 修订日期: 2018-09-30

通信作者: 胡建华, 教授, 博士; 电话: 13278885686; E-mail: hujh21@126.com

1 模糊 RES-多维云模型基本原理

1.1 模糊 RES 基本原理

岩石系统工程(RES)理论是从多因素相互作用、共同决定于某一系统性质的角度出发,进行复杂岩石工程系统问题分析的方法。RES 理论从二元交互作用机理推至系统内多元交互作用,以分析各因素间的相互影响关系^[14]。RES 通过构建多因素交互作用矩阵对复杂岩石系统加以描述。在交互作用矩阵的非对角线区域,以二元因子交互影响原理进行编码。对编码矩阵进行分析,辨识各个因素对复杂模糊系统的交互强度。图 1 所示为 P_1, \dots, P_n n 个因素交互作用矩阵。

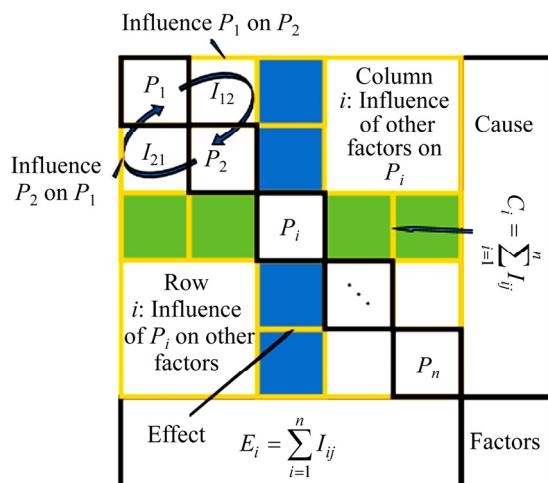


图 1 交互影响矩阵

Fig. 1 Interaction matrix

图 1 中左上角 P_1, P_2 形成一个二元交互矩阵, P_1, P_2 为影响岩体质量的 2 个因素, 该因素居于交互作用矩阵的对角线上, 则对角线因素上方交叉区域编码处 I_{12} 为 P_1 对 P_2 的影响, 对角线下方编码处 I_{21} 则为 P_2 对 P_1 的影响。由双因素交互作用原理推至影响岩体质量的 P_1, \dots, P_n 多因素交互, 矩阵中对角线上方、下方为编码区。通过某一因素的行、列编码分别代表 P_i 对系统其他因素的影响和其他因素对 P_i 的影响。因此, 将行编码值相加则表达 P_i 对系统的影响, 称之为原因(C); 列编码值相加和则代表系统对 P_i 的影响, 称之为效果(E)^[15]。每个因素 $C+E$ 值为因素与系统的交互作用强度, 以其计算因素 P_i 在岩体质量评判系统中的重要度(权重), 如

$$w_i = \frac{C_i + E_i}{\sum_{i=1}^n (C_i + E_i)} \times 100\% \quad (1)$$

采用 RES 方法确定权重时, 构建影响矩阵的编码方式尤为重要。目前, 多因素交互作用矩阵编码常用的是专家半定量法(ESQ), 此方法较为简便, 但是每 2 个因素间的交互强度被赋予一个定值, 忽略了对复杂岩体系统内各因素相互影响的复杂模糊性描述。因此, 在编码过程中引进云模型概念, 借用云理论对自然语言与定量描述间模糊转换的优势, 提出一种新的编码方式, 步骤如下。

1) 引入云模型语气强弱描述。采用 5 朵云模型来进行影响程度表述, 分别为无影响、弱影响、中等影响、强影响、决定性影响。期望 Ex 为定性描述, 所取 5 个整数(1~5), 后者比前者影响程度更强。云模型中熵 En 和超熵 He 的确定采取语气描述中的黄金分割法^[16], 影响标度如表 1 所列。

表 1 影响度标度

Table 1 Impact scale

| Degree of influence | Cloud digital characteristics | | |
|---------------------|-------------------------------|-------|-------|
| | Ex | En | He |
| No influence | 1 | 0.437 | 0.073 |
| Weak influence | 2 | 0.707 | 0.118 |
| Medium influence | 3 | 0.437 | 0.073 |
| Strong influence | 4 | 0.707 | 0.118 |
| Crucially influence | 5 | 0.437 | 0.073 |

2) 将 N 份针对与岩石系统中两两因素相互影响的标度值以云模型的集结算法进行集结, 即在 N 朵云之间生成一朵浮动云。云模型的集结算法可以将多人的评判结果带入决策中, 在体现模糊性的基础上进一步消除主观因素。集结结果即为交互矩阵编码。云集结公式如下:

$$Ex = a_1Ex_1 + a_2Ex_2 + \dots + a_nEx_n \quad (2)$$

$$En = \frac{a_1Ex_1En_1 + a_2Ex_2En_2 + \dots + a_nEx_nEn_n}{a_1Ex_1 + a_2Ex_2 + \dots + a_nEx_n} \quad (3)$$

$$He = \sqrt{He_1^2 + He_2^2 + \dots + He_n^2} \quad (4)$$

式中: a 为不同专家的权重; Ex_n 为第 n 个专家重要度云模型期望; En_n 为第 n 个专家重要度云模型熵; He_n 为第 n 个专家重要度云模型超熵。

1.2 多维正态云模型及算法描述

在复杂模糊系统中, 系统性质是由不同密切相关

的因素共同决定的, 就像“青年人”概念就要从生理年龄和心理年龄2个维度表明。由此将一维云^[17]的概念推至多维云^[18-19], 使之更易于描述多因素共同作用下的定性概念与定量间的转换。以此为基础建立岩体质量评判模型。

设 U 是一个 n 维论域, C 是 U 上的定性概念, 论域中 x 可以看作 U 中定性概念 C 的一次随机实现, 若 $x(x_1, x_2, \dots, x_n) \sim N(Ex(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n), En'(En'_1, En'_2, \dots, En'_n)^2)$; 其中 En' 亦服从正态分布 $En'(En'_1, En'_2, \dots, En'_n) \sim N(En(En_1, En_2, \dots, En_n), He(He_1, He_2, \dots, He_n)^2)$ 。所以从 U 中的元素 x 对于 C 所表达出的定性概念的隶属度 $\mu(x)$ 满足:

$$\mu(x_1, x_2, \dots, x_n) = \exp\left[-\sum_{j=1}^n \frac{(x_j - Ex_j)^2}{2(En'_j)^2}\right] \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (5)$$

则得到的 $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 在 U 上的分布形态称为一朵 n 维正态云。多维云模型算法步骤如下^[20]。

步骤 1: 以 $En(En_1, En_2, \dots, En_n), He(He_1, He_2, \dots, He_n)^2$ 为期望和方差产生正态随机数 $En'(En'_1, En'_2, \dots, En'_n)$;

步骤 2: 以 $Ex(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n), En'(En'_1, En'_2, \dots, En'_n)^2$ 为期望和方差产生 n 维正态随机数 $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$;

步骤 3: 计算 $\mu_i[(x_1, x_2, \dots, x_n)] = \exp\left[-\sum_{j=1}^n \frac{(x_j - Ex_j)^2}{2(En'_j)^2}\right] \quad (j=1,2,3,\dots,n)$, 则 $((x_1, x_2, \dots, x_n), \mu_i)$ 为一个云滴, 是将概念利用云模型在多维数值上的一次随机实现, (x_1, x_2, \dots, x_n) 为每个维度的值, μ_i 为该点对应于第 i 朵多维云的隶属度;

步骤 4: 在算法中输入生成的云滴数目 N , 以循环语句重复 N 次实现步骤 1~3, 保留所有云滴, 即为 1 朵多维云模型。

表 2 岩体质量评价指标分级^[5]

Table 2 Classification of rock mass quality evaluation indicators

| Grade | R_c/MPa | $RQD/\%$ | J_V | $v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | G | K_v |
|-------|------------------|-----------|-----------|------------------------------------|-----------|-----------|
| I | 0.50~1.00 | 0.84~1.00 | 0.92~1.00 | 0.75~1.00 | 0.89~1.00 | 0.72~1.00 |
| II | 0.26~0.50 | 0.63~0.84 | 0.85~0.92 | 0.58~0.75 | 0.67~0.89 | 0.48~0.72 |
| III | 0.13~0.26 | 0.42~0.63 | 0.80~0.85 | 0.47~0.58 | 0.44~0.67 | 0.33~0.48 |
| IV | 0.06~0.13 | 0.21~0.42 | 0.70~0.80 | 0.42~0.47 | 0.22~0.44 | 0.28~0.33 |
| V | 0~0.06 | 0~0.21 | 0~0.70 | 0~0.42 | 0~0.22 | 0~0.28 |

2 基于模糊 RES-多维云的岩体质量评判模型

2.1 岩体质量分级指标及其分级

对于指标的选取应考虑系统性、可获得性、存异性和具有代表性。参考历来指标选取标准和分级研究^[2~7], 选取岩体饱和抗压强度 $R_c(\text{MPa})$ 、岩体质量指标 $RQD(\%)$ 、体积节理系数 J_V 、岩石内纵波波速值 $v_p(\text{m/s})$ 、嵌合程度 G (分紧密、较紧密、较松弛、松弛、极松弛)和完整性系数 K_v 作为岩体质量分级的指标体系。将每个因素指标分为 I~V 5 个等级, 分级指标量纲归一化数值见表 2。

2.2 确定指标要素多维云数字特征

一维云用 $C(Ex, En, He)$ 3 个特征数字表征, n 维正态云用 $3n$ 个数字来描述 $(Ex_1, En_1, He_1; Ex_2, En_2, He_2; \dots; Ex_n, En_n, He_n)$, 其意义相同。由于多维云综合考虑多因素对各等级的影响, 所以岩体质量各指标分级的自然语言到定量转换的多维云模型数字特征确定与一维云转换不同, 本文参考郭戎潇等^[21~22]的研究进行转换:

$$Ex = (N_{\min} + N_{\max})/2 \quad (6)$$

式中: N_{\max} 与 N_{\min} 分别对应相应等级的左、右边界, 在一侧存在无限界限的时候, 根据实测值结合上一等级确定期望值。

在多因素相互影响的前提下, 参考“ $3En$ ”原则, En 以各个指标的最大期望值确定, 且各指标统一:

$$En = Ex_{\max}/3 \quad (7)$$

式中: Ex_{\max} 为各个指标各等级期望的最大值。

超熵是熵的不确定性的度量, 所以在本文根据 En 的大小来确定 He 的值, 一般 $0.01 \leq He \leq 0.1$ 。

以表 2 中分级数据为基础, 按照上述算法, 计算岩体质量分级多维云模型的数字特征, 数字特征如表 3 所示。

表3 岩体质量分级多维云模型的数字特征

Table 3 Numerical characteristics of multi-dimensional cloud model for rock mass quality classification

| Rock mass quality grade | Digital characteristics | R_c/MPa | $RQD/\%$ | J_v | $v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | G | K_v |
|-------------------------|-------------------------|------------------|----------|--------|------------------------------------|--------|--------|
| I | Ex | 0.7500 | 0.9200 | 0.9600 | 0.8750 | 0.9450 | 0.8600 |
| | En | 0.2500 | 0.3067 | 0.3200 | 0.2917 | 0.3150 | 0.2867 |
| | He | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 |
| II | Ex | 0.3800 | 0.7350 | 0.8850 | 0.6650 | 0.7800 | 0.5700 |
| | En | 0.2500 | 0.3067 | 0.3200 | 0.2917 | 0.3150 | 0.2867 |
| | He | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 |
| III | Ex | 0.1950 | 0.5250 | 0.8250 | 0.5250 | 0.5550 | 0.4050 |
| | En | 0.2500 | 0.3067 | 0.3200 | 0.2917 | 0.3150 | 0.2867 |
| | He | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 |
| IV | Ex | 0.0950 | 0.3150 | 0.7500 | 0.4450 | 0.3300 | 0.3050 |
| | En | 0.2500 | 0.3067 | 0.3200 | 0.2917 | 0.3150 | 0.2867 |
| | He | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 |
| V | Ex | 0.0300 | 0.1050 | 0.0035 | 0.2100 | 0.1100 | 0.1400 |
| | En | 0.2500 | 0.3067 | 0.3200 | 0.2917 | 0.3150 | 0.2867 |
| | He | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 | 0.0200 |

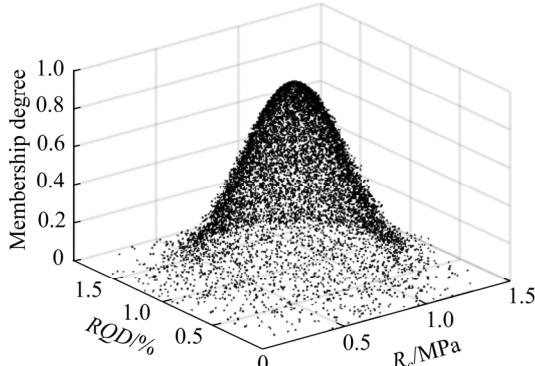
2.3 确定岩体质量等级

在表3的基础上, 每个岩体质量等级可以综合考虑6个指标因素, 按岩体质量等级生成5朵六维的正态云模型。一维云以二维坐标表示, 同理多维云以高维图像直观表示, 为说明问题, 在此以 R_c 和 RQD 两因素为代表生成二维云模型来表示双因素组合定性概念, 如图2所示。在建立多维云基础上, 读取岩体相关指标要素的测量值, 该工程实测数据对应每个岩石质量等级的隶属度由下式确定:

$$\mu(x_1, x_2, \dots, x_n) = \exp\left[-\sum_{j=1}^n \frac{\omega_j (x_j - Ex_{kj})^2}{2(En'_{kj})^2}\right] \quad (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (k=1, 2, \dots, I) \quad (8)$$

式中: n 为维数; I 为岩体质量等级数; μ 为样本数据对每个等级多维云的隶属度。在计算完成后, 依照最大隶属度原则确定其岩体质量等级。

模糊RES-多维云模型的岩体质量评判流程如图3所示。

图2 R_c - RQD 双因素定性概念二维云模型Fig. 2 R_c - RQD two-factor qualitative conceptual 2D cloud model

3 工程实例应用

为检验模糊RES-多维云的岩体质量评判模型的合理性与快速评判能力, 本文选取梁桂兰等^[5]的某坝基工程实例数据为样本。该坝基不同工程段的实测数据和地质报告给出的实际岩体质量分级如表4所列。本节在以RES理论分析因子交互作用的基础上获得因素权重, 应用多维云模型对该工程坝基的岩体质量进行评判, 并与可拓理论分级法、一维云模型等方法进行验证, 对比分析其优缺点, 以说明该方法的适用性。

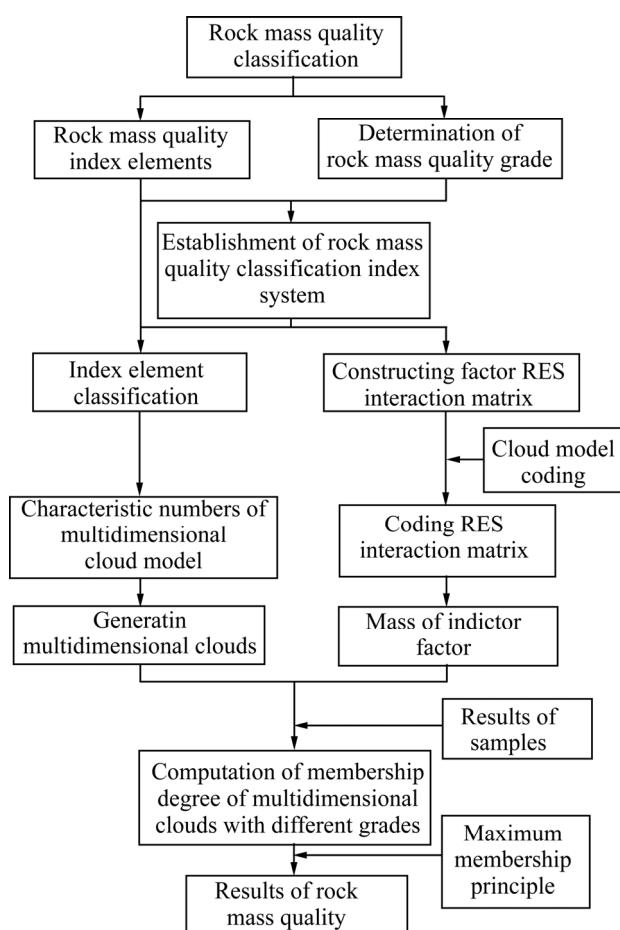


图3 岩体质量评判模型流程

Fig. 3 Flow of rock mass quality evaluation model

3.1 指标因素相关性分析及权重确定

按照1.1节中云模型改进交互作用矩阵的编码方式,建立岩体质量评判系统的RES交互作用矩阵。根据表1中云模型影响度标度(无影响、弱影响、中等影响、强影响、决定性影响),制定空白交互矩阵,由3位有丰富工程经验的等权重专家对矩阵中每组二元因素矩阵分别进行编码。回收编码结果,以1.1节中式(2)~(4)进行3朵云模型的集结。例如岩体波纵波速 v_p 对岩体RQD影响度的云模型编码分别为(2, 0.707, 0.118)(1, 0.437, 0.073)(2, 0.707, 0.118)则集结结果

为(1.6667, 0.6530, 0.1821),即为岩体 v_p 和RQD的二元交互作用矩阵的编码。其余因素间编码以此类推,可得岩体质量评判因素交互作用矩阵全部编码如图4所列。由编码云模型特征数字中除 R_c , K_v 被判定为相互无影响外,其余各因素编码云模型特征数字中 Ex 均不存在1。由此可知,岩体质量分级系统中各个指标因素间存在复杂的交互作用。这些因素相互影响共同决定岩体的质量等级。

对岩体质量评判的因素交互矩阵进行分析处理需引入云的代数运算。在此引入云的加法运算,运算方式如下^[23]。

在某一论域 U 中存在云 $A_1(Ex_1, En_1, He_1)$ 、 $A_2(Ex_2, En_2, He_2)$,则其加法代数运算结果为 $A(Ex, En, He)$,则:

$$Ex = Ex_1 + Ex_2 \quad (9)$$

$$En = \sqrt{En_1^2 + En_2^2} \quad (10)$$

$$He = \sqrt{He_1^2 + He_2^2} \quad (11)$$

以1.1节中方法,将系统中影响因素 P_i 所在的行和列的云编码分别相加,获得该因素交互矩阵中原因(C)云模型,效果(E)云模型,及其与系统的交互强度 $C+E$,如表5所列。利用二维云发生器,以 C 、 E 云模型值为相互影响维度生成6朵指标因素二维云模型,即为岩体质量评判系统中各因素作用-效果($C-E$)图,如图5所示。其中 x 轴为作用 C , y 轴为效果 E , z 轴为隶属度。与传统RES中 $C-E$ 图对比,每个指标因素作用于系统,又被系统影响的交互关系由一个确定的点替代为1朵二维云模型,直观刻画出岩体系统中各个因素交互作用的模糊性和随机性,反映岩体质量系统是一个复杂模糊系统的本质。各个因素在 $C-E$ 图中因果空间的位置代表各因素间的交互作用模式,以 $C=E$ 为边作垂直于底面的平面,将因果空间分为左上和右下2部分,处于右下部分因素对系统优势较大,存在于左上的因素对系统则具有较弱的参数优势。由

表4 岩体各段参数及实际质量等级^[5]Table 4 Parameters of various sections of rock mass and actual quality grade^[5]

| Rock | R_c/MPa | $RQD/\%$ | J_V | $v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | G | K_v | Actual quality |
|------|------------------|----------|-------|------------------------------------|-------|-------|----------------|
| A1 | 0.094 | 0.263 | 0.70 | 0.417 | 0.111 | 0.222 | IV |
| A2 | 0.392 | 0.526 | 0.83 | 0.592 | 0.444 | 0.354 | III |
| A3 | 0.443 | 0.726 | 0.88 | 0.745 | 0.778 | 0.667 | II |
| A4 | 0.530 | 0.842 | 0.93 | 0.783 | 0.889 | 0.737 | I |

| | | | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| R_c/MPa | 3.0000 0.4370 0.1264 | 1.6667 0.6530 0.1821 | 3.3333 0.5450 0.1568 | 1.3333 0.5720 0.1568 | 1.0000 0.4370 0.1264 |
| 2.0000 0.5270 0.1568 | $RQD/\%$ | 2.3333 0.5913 0.1821 | 3.0000 0.4370 0.1264 | 3.3333 0.5450 0.1568 | 3.3333 0.5450 0.1568 |
| 2.3333 0.5913 0.1821 | 4.0000 0.5270 0.1568 | J_v | 4.0000 0.5270 0.1568 | 3.6667 0.4370 0.1264 | 5.0000 0.4370 0.1264 |
| 2.3333 0.5913 0.1821 | 1.6667 0.6530 0.1821 | 1.6667 0.6530 0.1821 | $v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 1.6667 0.6530 0.1821 | 4.0000 0.5270 0.1568 |
| 1.6667 0.6530 0.1821 | 2.0000 0.5270 0.1568 | 2.0000 0.5270 0.1568 | 3.0000 0.4370 0.1264 | G | 3.3333 0.5450 0.1568 |
| 1.0000 0.4370 0.1264 | 4.3333 0.6032 0.1821 | 3.3333 0.5450 0.1568 | 3.6667 0.4370 0.1264 | 1.6667 0.6530 0.1821 | K_v |

图 4 岩体质量分级模型交互作用矩阵编码

Fig. 4 Interaction matrix code of rock mass quality classification model

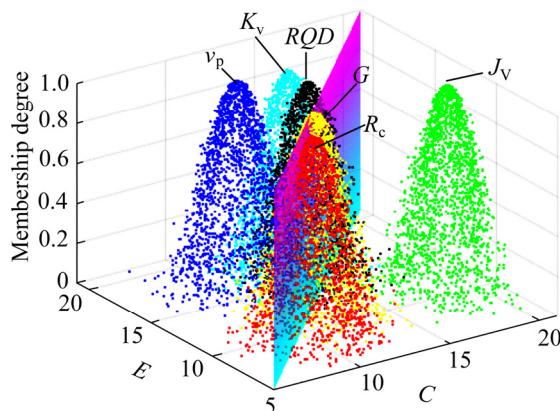
图 5 指标因素 $C-E$ 图Fig. 5 $C-E$ of indicator factor

图 5 可见, 最大优势参数为体积节理数(J_v), 其参数值对系统的影响最大; 最次优势参数为岩体纵波波速(v_p), 因为其受其他因素制约较强。嵌合程度(G)和岩石饱和单轴抗压强度(R_c)期望处于分割面右下, 但是 $C=E$ 面切割其二维云, 所以应模糊认为指标因素对系统的作用和系统对指标因素的影响大致相等。以多维云表示因素与系统的交互关系, 在因果空间中能清晰直观地进行分析, 同时保留了系统因素间的模糊性和随机性, 体现了多维云优势。

图 6 所示为各因素与岩体系统的交互强度直方图。由图 6 可知, 与岩体质量系统最具交互性的参数为岩体完整性系数(K_v)、体积节理数(J_v), 交互性较低的是岩体嵌合程度(G)、岩石饱和单轴抗压强度(R_c)。

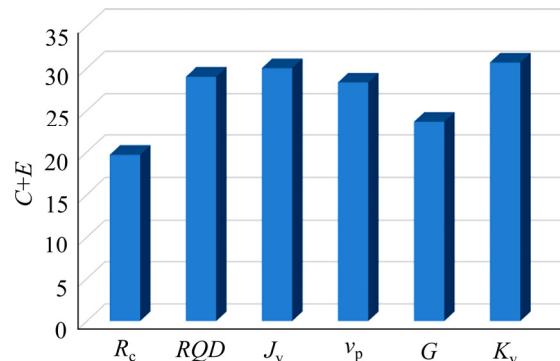


图 6 交互作用强度直方图

Fig. 6 Interaction intensity histogram

结合图 5、图 6 分析, 随各因素 $C+E$ 值的增加, 相应的因素在因果空间中呈自左下至右上延伸分布, 因此因果空间中右上部包含的因素与整个系统的交互作用更强, 相对更重要。

通常一个因素的变化对系统的影响程度(权重)取决于其与系统的交互强度, 当某一因素与系统的交互强度大时, 某一微小的变化都能极大地影响系统的行为, 因此, 因素与系统间的交互强度是判断一个因素对系统贡献的重要条件。在交互强度($C+E$)的基础上, 通过式(1)得出各因素权重 W_i 的结果如表 5 所列。

3.2 岩体质量分级结果及分析

以 Matlab 软件为工具将表 3 中每个级别的多维云模型数字特征分别输入, 结合指标因素权重可以得到

5 朵六维的云模型, 每朵云模型代表一个岩体质量等级。结合表 4 中各段参数的实测结果, 通过式(8)获得各段岩体对每个质量等级的隶属度。各段工程岩体质量等级隶属度如图 7 所示。将本文结果与工程实际岩体质量等级、组合赋权—云模型^[8]、可拓理论^[5]等分级结果进行对比, 结果如表 6 所列。

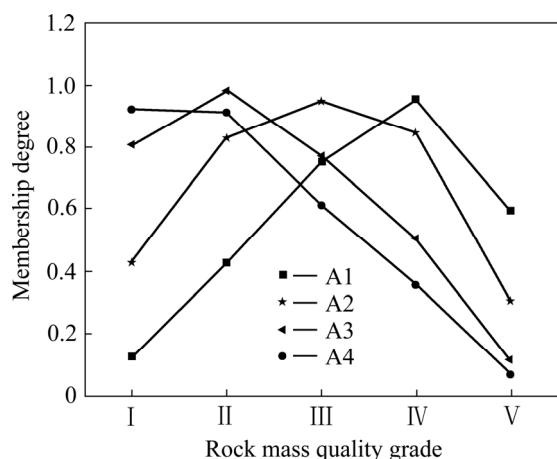


图 7 各段岩体质量隶属度

Fig. 7 Mass membership degree of section

由表 6 可见: 模糊 RES-多维云岩体质量评判模型分级结果与该工程地质报告^[8]给出的岩体实际等级大致相同, 与可拓理论、一维云模型预测的结果也基本吻合。由此验证了 RES 结合多维云模型在岩体分级中的应用是合理有效的。在这里特别注意到 A4 段, 该段岩体质量对 I 级与 II 级的隶属度分别是 0.9209 和 0.9138, 依据最大隶属度原则, 该段属于 I 级, 但岩体系统是一个复杂模糊系统, 具有模糊性和随机性。以多维云模型对岩体质量分级可以有效弱化区间分级的敏感程度。再者其对 II 级隶属度同样超过 0.9, 所以在实际工程施工中, 也应该对该段岩体进行处理后才进行施工^[5]。实际地质报告中也建议对该段岩体进行浅部灌浆处理后再进行施工。由此可见, 基于模糊 RES-多维云模型的岩体质量分级模型在实际分级中更贴合实际, 对工程指导意义更大。

岩体质量是由多个因素相互影响、共同决定的。本文引进岩石系统工程(RES)理论, 以云模型改进其编码方式, 弱化了该方法的主观性。通过对因素交互矩阵处理, 分析了因素间的交互作用。通过因果(C-E)图从空间角度确定系统的最大优势参数和最次优势参

表 5 岩体质量分级指标因素权重

Table 5 Rock mass quality grading index factor weight

| Eigenvalues of Interactive Matrix | Digital characteristics | R_c/MPa | $RQD/\%$ | J_v | $v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | G | K_v |
|-----------------------------------|-------------------------|------------------|----------|--------|------------------------------------|--------|--------|
| C | Ex | 10.333 | 13.999 | 19.000 | 11.334 | 12.000 | 14.000 |
| | En | 1.1969 | 1.1884 | 1.1345 | 1.3808 | 1.2124 | 1.2121 |
| | He | 0.3381 | 0.3506 | 0.3381 | 0.3965 | 0.3506 | 0.3505 |
| E | Ex | 9.3333 | 15.000 | 11.000 | 17.000 | 11.667 | 16.667 |
| | En | 1.2627 | 1.2396 | 1.3331 | 1.0852 | 1.2915 | 1.1197 |
| | He | 0.3781 | 0.3626 | 0.3856 | 1.2124 | 0.3626 | 0.3251 |
| $C+E$ | Ex | 19.667 | 28.999 | 30.000 | 28.333 | 23.667 | 30.667 |
| | En | 1.7398 | 1.7172 | 1.7505 | 1.7562 | 1.7714 | 1.6501 |
| | He | 0.5072 | 0.5044 | 0.5128 | 1.2756 | 0.5044 | 0.4781 |
| $w_i/\%$ | | 12.19 | 17.98 | 17.98 | 18.6 | 17.56 | 14.67 |

表 6 岩体质量分级结果及对比

Table 6 Rock mass quality classification results

| Rock mass | Grade membership | | | | | Actual grade | Extension theory ^[5] | Combination weighting: cloud model ^[8] | Fuzzy RES: multidimensional cloud model |
|-----------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------------|---------------------------------|---|---|
| | I | II | III | IV | V | | | | |
| A1 | 0.1231 | 0.4240 | 0.7511 | 0.9521 | 0.5943 | IV | IV | IV | IV |
| A2 | 0.4262 | 0.8290 | 0.9468 | 0.8445 | 0.3001 | III | III | III | III |
| A3 | 0.8067 | 0.9788 | 0.7654 | 0.5028 | 0.1132 | II | II | II | II |
| A4 | 0.9209 | 0.9138 | 0.6102 | 0.3521 | 0.0645 | I | I | I | I~II* |

数,以指标因素与系统的交互强度来确定因素的权重,增加了权重确定的合理性。云模型是定性自然语言向定量转换的工具,体现了随机性和模糊性。多维云模型在每一等级中将不同因素作为其一维云变量形成1朵综合云模型,只需5朵等级多维云即可完成评判,相较于传统的一维云模型^[4]岩体质量分级时需生成30朵一维云,多维云不仅考虑了指标间的相互作用,体现了多因素共同决定的特点,而且评判更加快捷。

将模糊RES-多维云模型应用于岩体质量评判中,于系统角度对岩体质量进行分析,考虑多因素相互作用,削弱区间分级的敏感性,能直观地刻画岩体系统的复杂模糊性,评判结果合理准确,可信度较高。

4 结论

1) 考虑指标参数的系统性、可获得性,选取岩石饱和抗压强度、岩体质量指标、体积节理系数、岩石内纵波波速值、嵌合程度和完整性系数为岩体质量分级的指标因素,确定岩体质量的5个等级及指标因素分级标准。建立岩体质量分级体系。

2) 针对岩体系统的模糊性,多因素相互作用共同决定的复杂性,引入RES理论从系统的角度分析因素间的交互作用;以云模型改进其编码方式,对编码矩阵进行处理分析,得到因素对系统的作用(C)和系统对因素的效果(E),由交互强度 $C+E$ 确定与系统交互作用最强的因素是岩体完整性系数、体积节理数;由因果($C-E$)二维云图,从空间角度确定体积节理数是岩体质量系统的最大优势参数,并根据其因素与系统交互性质确定因素权重。

3) 将多维云模型应用于岩体质量分级,综合考虑质量分级的模糊性和随机性、多因素共同作用的复杂性;应用基于模糊RES-多维云分级模型对某工程中不同阶段的岩体进行分级,与实际岩体质量等级进行对比,基本吻合;与其他分级方法相比,多维云模型更能体现岩体质量分级的模糊性,实际指导意义更大;对于传统一维云模型,则突出了其分级的多因素综合、简洁易操作性。

REFERENCES

- [1] 雷光伟,杨春和,王贵宾,魏翔,陈世万,霍亮.基于结构面综合指标的岩体质量评价及应用[J].岩土力学,2017,38(8):2343-2350.
LEI Guang-wei, YANG Chun-he, WANG Gui-bin, WEI
- [2] Xiang, CHENG Shi-wan, HUO Liang. Rock quality evaluation and application based on comprehensive index of rock mass structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2343-2350.
- [3] 张彪,戴兴国.基于有限区间云模型和距离判别赋权的岩体质量分类模型[J].水文地质工程地质,2017,44(5):150-157.
ZHANG Biao, DAI Xing-guo. A classification model of rock mass based on finite interval cloud model and distance discrimination weighting[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 150-157.
- [4] 周述达,裴启涛,丁秀丽.改进分类区分度及权重的岩体质量评价灰评估模型及应用[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S2):3671-3679.
ZHOU Shu-da, PEI Qi-tao, DING Xiu-li. Application of grey evaluation model based on classification degree and weight of classification of index to rock mass quality evaluation of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3671-3679.
- [5] 胡建华,尚俊龙,雷涛.基于RS-TOPSIS法的地下工程岩体质量评价[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(11):4412-4419.
HU Jian-hua, SHANG Jun-long, LEI Tao. Rock mass quality evaluation of underground engineering based on RS-TOPSIS method[J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2012, 43(11): 4412-4419.
- [6] 梁桂兰,徐卫亚,谈小龙.基于熵权的可拓理论在岩体质量评价中的应用[J].岩土力学,2010,31(2):535-540.
LIANG Gui-lan, XU Wei-ya, TAN Xiao-long. Application of extension theory based on entropy weight to rock quality evaluation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 535-540.
- [7] 李绍红,王少阳,吴礼舟.基于MCS-TOPSIS耦合模型的岩体质量分类研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(5):1053-1062.
LI Shao-hong, WANG Shao-yang, WU Li-zhou. Quality classification of rock mass based on MCS-TOPSIS coupling model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1053-1062.
- [8] 曹琛,李会中,陈剑平,郑莲婧.基于组合赋权法与云模型坝基岩体质量评价[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(11):1643-1647.
CAO Chen, LI Hui-zhong, CHEN Jian-ping, ZHENG Lian-jing. Rock quality evaluation of dam foundation based on component and cloud model weighting method[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(11): 1643-1647.

[8] 魏博文, 黄海鹏, 徐镇凯. 基于云模型和组合赋权的岩体质量二维评价模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3092–3099.
WEI Bo-wen, HUANG Hai-peng, XU Zhen-ke. Two-dimensional evaluation model of rock mass based on combination weighting and cloud model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3092–3099.

[9] JALALIFAR H, MOJEDIFAR S, SAHEBI A A, NEZAMABADI-POURC H. Application of the adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of a rock engineering classification system[J]. Computers & Geotechnics, 2011, 38(6): 783–790.

[10] 张紫昭, 郭瑞清, 林文成, 田忠锋. 勘探阶段可采煤层顶底板岩体质量分类模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(3): 475–489.
ZHANG Zi-zhao, GUO Rui-qing, LIN Wen-cheng, TIAN Zhong-feng. A classification model for rock mass quality of the roof and floor of productive coal seams during coal geological exploration[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(3): 475–489.

[11] SAMIMI N F, RINNE M, RAFIE M. Uncertainty determination in rock mass classification when using FRMR software[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2015, 115(11): 1073–1082.

[12] RAFIEE R, ATAIEI M, KHALOOKAKAIE R. A new cavability index in block caving mines using fuzzy rock engineering system[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 77: 68–76.

[13] 李德毅, 杜 鹃. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 44–55.
LI De-yi, DU Yi. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 44–55.

[14] JIAO, HUDSON J A. The fully-coupled model for rock engineering systems[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(5): 491–512.

[15] NAGHADDEHI M Z, JIMENEZ R, KHALOOKAKAIE R, JALALI S E. A new open-pit mine slope instability index defined using the improved rock engineering systems approach[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 61: 1–14.

[16] 李志超, 周科平, 林 允. 基于 RS-云模型的硫化矿石自燃倾向性综合评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(9): 126–131.
LI Zhi-chao, ZHOU Ke-ping, LIN Yun. Comprehensive evaluation on spontaneous combustion tendency of sulfide ore based on RS-cloud model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(9): 126–131.

[17] 胡建华, 习智琴, 周科平. 深部采空区尺寸效应的危险度正态云辨识模型[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(10): 70–75.
HU Jian-hua, XI Zhi-qin, ZHOU Ke-ping. Normal cloud model for identifying hazard degree of deep goaf size effect[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(10): 70–75.

[18] 王昭洋, 王 立, 王小艺, 张慧妍, 彭 森, 黄振芳, 刘波. 改进赋权的水体富营养化多维云模型评价[J]. 计算机与应用化学, 2015, 32(3): 346–350.
WANG Zhao-yang, WANG Li, WANG Xiao-ji, ZHANG Hui-yan, PENG Sen, HUANG Zhen-fang, LIU Bo. Multi-dimensional cloud model evaluation of water eutrophication based on improved weight method[J]. Computers and Applied Chemistry, 2015, 32(3): 346–350.

[19] WANG D, ZENG D B, SINGH V P, XU P C, LIU D F, WANG Y K, ZENG X K, WU J C, WANG L C. A multidimension cloud model-based approach for water quality assessment[J]. Environmental Research, 2016, 149: 113–121.

[20] 过 江, 张为星, 赵 岩. 岩爆预测的多维云模型综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1199–1206.
GUO Jiang, ZHANG Wei-xing, ZHAO Yan. A multidimensional cloud model for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1199–1206.

[21] 郭戎潇, 夏靖波, 董淑福, 龙 门. 一种基于多维云模型的多属性综合评价方法[J]. 计算机科学, 2010, 37(11): 75–77.
GUO Rong-xiao, XIA Jing-bo, DONG Shu-fu, LONG Men. Multiple attribute evaluation method based on multidimensional cloud model[J]. Computer Science, 2010, 37(11): 75–77.

[22] 江 迎. 基于云模型和 GIS/RS 的坝堤溃决风险分析及灾害损失评估研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
JIANG Ying. Study on risk analysis and disaster loss assessment of dam break based on cloud model and GIS/RS[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[23] 王洪利. 基于云模型的定性运算理论与方法[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(18): 176–182.
WANG Hong-li. Theory and method of qualitative operation based on cloud model[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(18): 176–182.

Rock mass quality evaluation method and application based on fuzzy RES-multidimensional cloud model

ZHOU Tan, HU Jian-hua, KUANG Ye

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The saturated uniaxial compressive strength, rock quality designation, acoustic longitudinal wave velocity, chimerity and integrality coefficient are selected as the index factors of rock mass quality classification. Based on the system engineering and one-dimensional cloud theory, a fuzzy RES (Rock engineering system)—multidimensional cloud model for rock mass quality evaluation was proposed. The results show that improving the RES coding mode with cloud model can effectively weaken the subjectivity of RES. Based on the improved fuzzy RES, the factors-factors and factors-system interactions are analyzed, and the degree of importance of factors are determined from the perspective of the system. According to each index factor, five six-dimensional cloud models of rock mass quality grade are generated by multidimensional cloud theory. The method is compiled by the software program and verified by an engineering example. The result highly agrees with the geological report, extension theory and one-dimensional cloud model theory.

Key words: rock mechanics; rock mass quality; fuzzy RES; multidimensional cloud model; advantage parameter

Foundation item: Project(2017YFC0602901) supported by the National Basic Research Development Program of China;
Project(41672298) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2018-05-20; **Accepted date:** 2018-09-30

Corresponding author: HU Jian-hua; Tel: +86-13278885686; E-mail: hujh21@126.com

(编辑 龙怀中)