

岩体质量评判的多粒度计算方法

刘 谦^{1*}, 杜宝苍^{1,2}, 毛 华^{1#}, 连萌璇¹, 刘 川¹, 张植明¹, 杨兰珍¹

¹河北大学, 河北 保定

²河北金融学院, 河北 保定

收稿日期: 2022年5月12日; 录用日期: 2022年6月16日; 发布日期: 2022年6月23日

摘 要

地下工程岩体质量评判是进行工程设计、灾难控制的重要依据。为了提高评判效率, 利用多粒度计算的方法对工程围岩稳定性进行质量评判。首先, 对多粒度形式背景的粒度树上的属性块进行组合; 其次, 给出了计算广义介粒度剪枝形式背景权重的方法; 最后, 计算影响工程岩体质量的指标权重的方法, 并用实例证明了方法的可行性和科学性。

关键词

多粒度形式背景, 岩体质量评判, 粒计算, 权重

Multi-Grained Calculation Method for Rock Mass Quality Evaluation

Qian Liu^{1*}, Baocang Du^{1,2}, Hua Mao^{1#}, Mengxuan Lian¹, Chang Liu¹, Zhiming Zhang¹, Lanzhen Yang¹

¹University of Hebei, Baoding Hebei

²Hebei Finance University, Baoding Hebei

Received: May 12th, 2022; accepted: Jun. 16th, 2022; published: Jun. 23rd, 2022

Abstract

Quality evaluation of underground engineering rock mass is an important basis for engineering design and disaster control. In order to improve the evaluation efficiency, the multi-granularity calculation method is used to evaluate the stability of surrounding rock. Firstly, attribute blocks in

*第一作者。

#通讯作者。

the granularity tree of multi-granularity formal background are combined. Secondly, the weight is taken as the criterion to evaluate the performance of optimal rock mass selection in underground engineering. Finally, the effectiveness of the weight-based optimal rock mass selection metric method is analyzed.

Keywords

Multi-Granularity Formal Concept, Rock Mass Quality Evaluation, Granular Computing, Weight

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在工程施工中,为了给工程设计、支护衬砌、建筑物选型和施工方法选择等提供参数和依据,需对地下工程围岩进行质量评价。

目前,针对岩体质量评判,国内外有不少学者提出了许多建设性的方法[1]-[19]。例如,刘飞跃等[1]使用 Mask-RCNN 深度学习识别出所需要的岩芯段,进行 RQD 计算,之后结合钻孔信息和地址模型实现对岩体质量的精细化评价;陈卫忠等[2]提出裂隙岩体地下工程稳定性研究的重点发展方向,并讨论了裂隙岩体的三维几何表征与数值建模等;这些方法均在工程施工中起到了重要作用,但影响工程岩体质量的因素很复杂,不但取决于岩体内部的地质结构,还取决于外部环境,是多种因素的综合作用。

粒计算是 1997 年有模糊数学之父的 Zadeh 与 Lin 教授提出的一个研究课题,是一种看待客观世界的世界观和方法论[20] [21] [22]。其主要思想是采用粒度思想解决复杂问题,把复杂问题抽象、划分,从而转化为若干较为简单的问题的求解过程的理论、方法、技术以及工具等。也是当前计算智能领域最新的一种模拟人类多粒度以及分层思维来解决问题的方法,目前已经成功运用到众多领域[23]-[35]。

岩体质量分析是分析工程岩体地质条件、认识岩体工程特性,为工程地质灾害原因做出评判依据的重要准备工作。多粒度的思想更适合分析影响因素较复杂的岩体质量评判。本文以文献[5]中某市抽水蓄能电站的工程岩体为形式背景,通过对多粒度形式背景的粒度树上的属性块进行组合,将权重作为组合形式背景优劣的判别标准,以评价最优岩体选择的性能。

本文第一节为引言,主要介绍研究背景以及国内外研究现状;第二节为预备知识,主要介绍本文所涉及到的定理和国家标准;第三节为本文的重点研究内容,通过多粒度形式背景的方法对地下工程岩体进行评判;第四节为工程实例;第五节为结论和展望。

2. 预备知识

本节将给出后文所涉及的有关概念理论和国家标准。关于信息粒化的具体详情见文献[22],多粒度形式背景见文献[27];关于工程岩体质量评判的具体详情见文献[7]。

2.1. 粒计算

本节相关多粒度形式背景的定义详见文献[27]。

定义 2.1 形如 $C = (U, A)$ 表示信息系统,其中 U 表示对象的非空集合; A 表示属性的非空集合,对于任意的属性 $a \in A$, 存在一个对应值集 V_a , 满足 $a: U \rightarrow V_a$, 在给定的信息系统 $C = (U, A)$ 中,若对任意

的属性 $a \in A$ ，值集 V_a 不为空，则称其为完备信息系统。

定义 2.2 设 (U, M, I) 为形式背景，其中 I 是对象集 U 与属性集 M 之间的二元关系。 Ia 表示属性 a 拥有的对象，对于 $B \subseteq M$ ，若 $U = \bigcup_{a \in B} Ia$ ，且 $Ia(a \in B)$ 两两不相交，则称 B 为 (U, M, I) 的单粒度类属性块。

定义 2.3 设 (U, M_i, I_i) ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$) 为 n 个单粒度形式背景， $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{is}$ 是 M_i 的类属性块，其中 $B_{1k}, B_{2k}, \dots, B_{nk}$ ($k \in \{1, 2, \dots, s\}$) 是不同粒度下的同类别属性块。若 $(U, M_1, I_1) < (U, M_2, I_2) < \dots < (U, M_n, I_n)$ ，则称 $\pi = \bigcup_{i=1}^n (U, M_i, I_i)$ 为多粒度形式背景。

定义 2.4 设 $\pi = \bigcup_{i=1}^n (U, M_i, I_i)$ 为多粒度形式背景， $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{is}$ 是 M_i 的类属性块。令

$M_m = B_{n1} \cup B_{n2} \cup \dots \cup B_{ns}$ ，其中 $n_1, n_2, \dots, n_s \in \{1, 2, \dots, n\}$ ， $I_m \subseteq U \times M_m$ ，则称 (U, M_m, I_m) 为介粒度形式背景。

定义 2.5 设 (U, M, I) 为形式背景，对于 $a \in M$ ，若属性 a 及其特化属性能够形成一棵树，则称它为 a 的粒度树，记做 T_a 。

定义 2.6 设 $\pi = \bigcup_{i=1}^n (U, M_i, I_i)$ 可形成 s 棵 $n+1$ 层的粒度树，令 $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{is}$ 是 M_i 的类属性块， $B_{1k}, B_{2k}, \dots, B_{nk}$ ($k \in \{1, 2, \dots, s\}$) 是第 k 棵粒度树上 2 至 $n+1$ 层的属性，且每个属性块包含的子属性块个数相同(记为 γ_k)， $B_{1k}^1, B_{2k}^2, \dots, B_{nk}^{\gamma_k}$ 为 B_{ik} 的划分， $D_k = \bigcup_{t=1}^{\gamma_k} B_{nk}^t$ 为第 k 棵粒度树上的多粒度剪枝类属性块。若

$$M_{gmp} = \bigcup_{k=1}^s D_k, \quad I_{gmp} \subseteq U \times M_{gmp}$$

则称 $S = (U, M_{gmp}, I_{gmp})$ 为 π 的一个广义介粒度剪枝形式背景。

定义 2.7 广义介粒度剪枝形式背景的粒度和等于各个多粒度剪枝类属性块的粒度之和，且多粒度剪枝类属性块的粒度又等于其子属性块的平均粒度。 $S = (U, M_{gmp}, I_{gmp})$ 的粒度和定义为

$$GS(M_{gmp}) = \sum_{k=1}^s \frac{\sum_{t=1}^{\gamma_k} n_t}{\gamma_k}$$

其中 $\{n_1, n_2, n_3, \dots, n_{\gamma_k}\} \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$ 。

2.2. 工程岩体质量评价

地下工程围岩划分为 5 个等级，即稳定、较稳定、一般、不稳定、极不稳定，分别用罗马数字 I、II、III、IV 和 V 来表示。影响地下工程围岩稳定性的因素很复杂，不但取决于岩体内部的地质结构，还取决于外部环境，是多种因素的综合作用。

Table 1. Classification standard for rock mass grade of underground engineering
表 1. 地下工程岩体等级分类标准

等级	$R_{QD}/\%$	R_W/MPa	K_v	K_f	$\omega/[\text{L} \cdot (\text{min} \cdot 10\text{m})^{-1}]$
I	90~100	120~200	0.75~1.00	0.8~1.0	0~5
II	75~90	60~120	0.45~0.75	0.6~0.8	5~10
III	50~75	30~60	0.30~0.45	0.4~0.6	10~25
IV	25~50	15~30	0.20~0.30	0.2~0.4	25~125
V	0~25	0~15	0.00~0.20	0.0~0.2	125~300

根据已有研究成果以及有关的国家规范标准[7]，遵循科学性、重要性和易测性的原则，同时考虑实际工程经验。最后选取：岩石质量指标 R_{QD} 、岩石单轴饱和抗压强度 R_W 、岩石完整性系数 K_V 、结构面强度系数 K_f 和地下水渗水量 ω 这 5 个指标作为影响地下工程岩体质量因素。见表 1。

3. 基于多粒度形式背景的岩体质量评判模型

3.1. 岩体质量评价的粒计算模型建立

首先，生成多粒度形式背景的粒度树。根据属性和粒化属性分布在不同的粒度层中，将属性之间的特化和泛化关系放到粒度树上进行研究，既而可以清楚分辨出属性之间的粒度层次关系。

给定一个信息系统 $C = (U, A)$ ，其中 $U = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 表示对象集； $A = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_m\}$ 表示属性集。先将信息系统转换成多个单粒度形式背景，再将多个单粒度形式背景并置形成多粒度形式背景 (U, M_1, I_1) 。

在工程中，影响地下工程岩体质量因素的结构面强度系数 K_f ，可以从结构面的抗剪强度、结构面的抗拉强度这两部分进行研究。通常结构面的抗拉强度非常小，所以抗剪强度和抗拉强度对 K_f 的影响所占权重也应不同。同样，结构面的抗剪强度又受摩擦角、粘聚力等剪应力作用的影响。

例 1 给定一个信息系统 $C = (U, A)$ ，其中 $U = \{1, 2, 3\}$ 表示地下工程岩体质量评判对象； $A = \{K_f, \omega\}$ 表示影响地下工程岩体质量评判的指标， K_f 为结构面强度系数； ω 为地下水渗水量。见表 2。

Table 2. Information system $C = (U, A)$

表 2. 信息系统 $C = (U, A)$

U	K_f	$\omega/[\text{L}\cdot(\text{min}\cdot 10\text{m})^{-1}]$
1	0.45	0
2	0.55	10.5
3	0.52	12.0
4	0.38	21.0
5	0.30	18.5

根据数据表的阈值，可将信息系统中的多值属性 K_f 分成 2 个子类：“[0.30, 0.45)”和 “[0.45, 0.60)”，分别记为 a_1 和 a_2 ；将多值属性 ω 分成 2 个子类：“[0, 15)”和 “[15, 25)”，分别记为 a_3 和 a_4 。则信息系统 $C = (U, A)$ 可转化为形式背景 (U, M_1, I_1) ，见表 3。其中，若对象满足该属性则，横纵坐标的交叉处为 1；若对象不满足该属性则为 0。

Table 3. Formal context (U, M_1, I_1)

表 3. 形式背景 (U, M_1, I_1)

U	a_1	a_2	a_3	a_4
1	0	1	1	0
2	0	1	1	0
3	0	1	1	0
4	1	0	0	1
5	1	0	0	1

此外, 根据数据本身, 还可把 a_1, a_2, a_3 和 a_4 进一步细分, 将 a_1 细分为“[0.30, 0.37)”和“[0.37, 0.45)”, 分别记为 b_1 和 b_2 ; 将 a_2 细分为“[0.45, 0.52)”和“[0.52, 0.60)”, 分别记为 b_3 和 b_4 ; 将 a_3 细分为“[0, 5)”、“[5, 10)”和“[10, 15)”, 分别记为 b_5, b_6 和 b_7 ; 将 a_4 细分为“[15, 20)”和“[20, 25)”, 分别记为 b_8 和 b_9 。形式背景则转化为表 4。

Table 4. Formal context (U, M_2, I_2)

表 4. 形式背景 (U, M_2, I_2)

U	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	0	0	1	0

针对表 2 和表 3 中的数据, 显然有 $Ia_1 \cup Ia_2 = Ia_3 \cup Ia_4 = U$ 。因此表 3 有两个类属性块, 分别记为 $M_1 = \{a_1, a_2\}, M_2 = \{a_3, a_4, a_5\}$; 同样, 表 3 中也有两个类属性块 $M_3 = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}, M_4 = \{b_5, b_6, b_7, b_8, b_9\}$ 。其中, $Ia_1 = Ib_1 \cup Ib_2, Ia_2 = Ib_3 \cup Ib_4, Ia_3 = Ib_5 \cup Ib_6 \cup Ib_7, Ia_4 = Ib_8 \cup Ib_9$, 有 $M_1 < M_3$ 和 $M_2 < M_4$, 即 (U, M_1, I_1) 和 (U, M_2, I_2) 之间形成了粒度粗细关系, 所以表 3 和表 4 可并置形成多粒度形式背景 $\pi = \bigcup_{i=1}^2 (U, M_i, I_i)$ 。

由此可知 π 是由 2 个单粒度形式背景组成的, 且每个单粒度形式背景均有 2 个类属性块, 所以 π 可形成 2 棵 3 层的属性粒度树, 如图 1 和图 2。

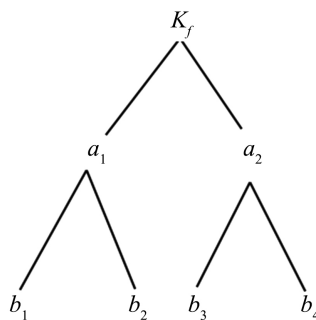


Figure 1. Attribute granularity tree T_{a1} of structural plane strength coefficient K_f
图 1. 结构面强度系数 K_f 的属性粒度树 T_{a1}

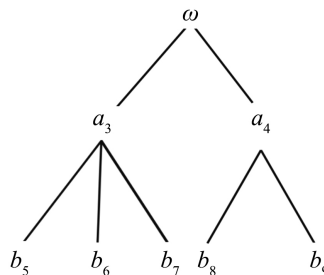


Figure 2. Attribute granularity tree T_{a2} of groundwater seepage ω
图 2. 地下水渗水量 ω 的属性粒度树 T_{a2}

3.2. 岩体质量评价的粒计算模型建立

在对属性进行分块时, 如果分块太细, 则会增加时间复杂度; 如果分块太粗, 则不能很好的将数据和实际问题进行匹配。所以, 分块的粗细, 即信息粗细程度的刻画很重要。

定义 3.1 广义介粒度剪枝形式背景 (U, M_{gmp}, I_{gmp}) 的信息粒度定义为

$$D(M_{gmp}) = |U| \sum_{y \in U} \frac{|U|}{|y^{\nabla\nabla}|}. \quad (1)$$

其中, 广义介粒度形式背景 (U, M_{gmp}, I_{gmp}) 的所有属性概念为 $\{y^{\nabla}, y^{\nabla\nabla} | y \in U\}$ 。由定义可知, 属性粒度树剪取越细的分支组合, 信息粒度的值就越大。

定义 3.2 广义介粒度剪枝形式背景 (U, M_{gmp}, I_{gmp}) 的权重定义为

$$W(M_{gmp}) = \frac{1}{|U| \sum_{y \in U} \left(\frac{|U|}{|y^{\nabla\nabla}|} \right)}. \quad (2)$$

定义 3.3 设 $(U, M_{gmp}^{\alpha}, I_{gmp}^{\alpha})$ 和 $(U, M_{gmp}^{\beta}, I_{gmp}^{\beta})$ 为多粒度形式背景 $\pi = \bigcup_{i=1}^n (U, M_i, I_i)$ 的两个广义介粒度剪枝形式背景, 若 $GS(M_{gmp}^{\alpha}) = GS(M_{gmp}^{\beta})$ 且 $W(M_{gmp}^{\alpha}) > W(M_{gmp}^{\beta})$, 则称 $(U, M_{gmp}^{\alpha}, I_{gmp}^{\alpha})$ 的粒度组合优于 $(U, M_{gmp}^{\beta}, I_{gmp}^{\beta})$ 。

也就是说权重相同的广义介粒度剪枝形式背景, 信息粒度越大的粒度组合越优。

例 2 在图 1 和图 2 中, 结构面强度系数 K_f 粒度树 T_{a1} 的剪枝方式有 4 中: $B_{11} = \{a_1, a_2\}$, $B_{12} = \{a_1, b_3, b_4\}$, $B_{13} = \{b_1, b_2, a_2\}$, $B_{14} = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$; 地下水渗水量 ω 粒度树 T_{a2} 的剪枝方式也有 4 中: $B_{21} = \{a_3, a_4\}$, $B_{22} = \{a_3, b_8, b_9\}$, $B_{23} = \{b_5, b_6, b_7, a_4\}$, $B_{24} = \{b_5, b_6, b_7, b_8, b_9\}$ 。先将他们两两组合可得到 16 种广义介粒度剪枝形式背景, 分别记为 $S^{\mu} = (U, M_{gmp}^{\mu}, I_{gmp}^{\mu})$ 。其各广义介粒度形式背景的权重和粒度和见表 5。

Table 5. The weight and granularity sum of each generalized medium granularity formal context of Figure 1 and Figure 2
表 5. 图 1 和图 2 的各广义介粒度形式背景的权重和粒度和

剪枝背景	粒度和	权重	剪枝背景	粒度和	权重
S^1	2	1/32	S^9	2.5	1/100
S^2	2.5	1/100	S^{10}	3	1/144
S^3	2.5	1/144	S^{11}	3	1/196
S^4	3	1/112	S^{12}	3.5	1/256
S^5	2.5	1/100	S^{13}	3	1/100
S^6	3	1/144	S^{14}	3.5	1/112
S^7	3	1/196	S^{15}	3.5	1/256
S^8	3.5	1/256	S^{16}	4	1/324

由定义可知当粒度和为 2 或 4 时, 广义介粒度剪枝形式背景 S^1 或 S^{16} 的权重最大, 即为 S^1 和 S^{16} 为该粒度和下的最优剪枝形式背景; 当粒度和为 2.5 时, S^2 、 S^5 和 S^9 为该粒度和下的最优剪枝形式背景; 当粒度和为 3 时, S^{13} 为最优剪枝形式背景; 当粒度和为 3.5 时, S^{14} 为最优剪枝形式背景。

3.3. 岩体质量评价的粒计算模型分析

广义介粒度剪枝形式背景在岩体质量评价中的工程意义：对目标岩体的各项指标通过系统的分类计算方法，得到最优剪枝形式背景，即影响岩体质量的每个指标的最优分类区间。首先，通过生成属性粒度树的方法，建立广义介粒度剪枝形式背景；其次，给出计算广义介粒度剪枝形式背景的权重，来得到最优剪枝形式背景；最后，根据其工程意义，找到判断岩体质量的最优剪枝形式背景，既而得到岩体质量每个指标的最优分类区间。

在本文方法中，给出了计算广义介粒度剪枝形式背景权重的方法，在工程上即为，计算影响工程岩体质量的指标权重的方法；在其他文献当中，或者是通过约简概念格的方法对属性进行约简，将影响岩体质量的指标缩减；或者是通过其他新模型在岩体质量各项指标的测量上进行优化，从而达到简化数据处理的目的；或者只是针对某些特定的地区、地形或地貌使用，在指标的权重上相关研究较少。

本文通过工程岩体的广义介粒度形式背景，计算其权重，从而得到影响岩体质量每个指标的最优分类区间，将分类具体化，通过对各项数据细分的方法，得到具体各项指标细分的程度和细分的最优区间。

3.4. 岩体质量评价的粒计算模型算法分析

3.4.1. 算法目的

通过多粒度形式背景的方法，计算地下工程岩体质量指标的权重。

工程意义：希望通过计算广义介粒度形式背景的权重的方法，达到计算最优工程岩体质量指标分类的方法。

3.4.2. 算法内容

输入：地下工程岩体样本质量指标样本数据；

输出：影响地下工程岩体样本质量指标的权重。

第一步：通过对岩体样本数据细分的方法，建立专属地下工程岩体的多粒度形式背景；

第二步：根据多粒度形式背景，生成地下工程岩体的属性粒度树；

第三步：根据多粒度属性块的不同组合方式，生成基于粒度树的广义介粒度形式背景；

第四步：由广义介粒度形式背景，计算每个介粒度形式背景的权重。

4. 实际案例

采用文献[5]以某市抽水蓄能电站的地下工程岩体作为评判对象。该电站分2期建成，分别设1条引水隧道，采用独立地下厂房和开关站。以2期3组真实数据为样本，建立模糊相及矩阵进行总体排序。如下表6所示。

Table 6. Underground engineering rock mass learning sample data

表 6. 地下工程岩体学习样本数据

编号	$R_{QD}/\%$	R_W/MPa	K_v	K_f	$\omega/[\text{L}\cdot(\text{min}\cdot 10\text{m})^{-1}]$
样本 1	71.8	90.1	0.57	0.45	0
样本 2	51.0	40.2	0.38	0.55	10.5
样本 3	52.0	25.0	0.22	0.52	12.0

下面将用本文的方法实现表6中地下工程岩体的质量评判。

首先, 生成多粒度形式背景的粒度树。

根据每一列数据阈值, 可将 R_{QD} 细分为 “[40, 65)” 和 “[65, 90)”, 分别记为 e_1 和 e_2 ; R_W 细分为 “[25, 50)” 和 “[50, 100)”, 分别记为 e_3 和 e_4 ; K_V 细分为 “[0.20, 0.40)” 和 “[0.40, 0.60)”, 分别记为 e_5 和 e_6 ; K_f 细分为 “[0.40, 0.50)” 和 “[0.50, 0.60)”, 分别记为 e_7 和 e_8 ; ω 细分为 “[0, 10)” 和 “[10, 15)”, 分别记为 e_9 和 e_{10} 。若样本 i ($i = 1, 2, 3$) 满足该项指标 e_j ($j = 1, 2, 3, \dots, 10$) 记为 “1”, 若不满足该项指标记为 “0”。将样本集记为对象集 U ; 将指标集记为属性集 M , 两者之间的关系为 I , 见表 7 形式背景 (U, M, I) 。

Table 7. Formal context (U, M, I)

表 7. 形式背景 (U, M, I)

U	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}
1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0
2	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1
3	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1

根据每一列数据阈值, 仍可以继续细分, 将 e_1 细分为 “[40, 52)” 和 “[52, 55)”, 分别记为 f_1 和 f_2 ; 将 e_2 细分为 “[65, 75)”, 分别记为 f_3 ; 将 e_3 细分为 “[25, 40)” 和 “[40, 50)”, 分别记为 f_4 和 f_5 ; 将 e_4 细分为 “[90, 100)”, 记为 f_6 ; 将 e_5 细分为 “[0.20, 0.30)” 和 “[0.30, 0.40)”, 分别记为 f_7 和 f_8 ; 将 e_6 细分为 “[0.50, 0.60)”, 分别记为 f_9 ; 将 e_7 细分为 “[0.45, 0.50)”, 分别记为 f_{10} ; 将 e_8 细分为 “[0.50, 0.55)” 和 “[0.55, 0.60)”, 分别记为 f_{11} 和 f_{12} ; 将 e_9 细分为 “[0, 5)”, 分别记为 f_{13} ; 将 e_{10} 细分为 “[10, 12)” 和 “[12, 15)”, 分别记为 f_{14} 和 f_{15} 。见表 8, 记为形式背景 (U, M', I) 。

Table 8. Formal context (U, M', I)

表 8. 形式背景 (U, M', I)

U	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
2	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0
3	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1

由表 7 和表 8 可得多粒度形式背景 $\pi = \bigcup_{i=1}^5 (U, M_i, I_i)$ 的属性粒度树, 如图 3。

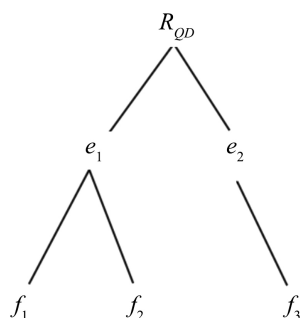


Figure 3. Grain size tree T_{a3} of rock mass quality index R_{QD}

图 3. 岩石质量指标 R_{QD} 的粒度树 T_{a3}

其余 4 个指标属性粒度树形式和图 3 形式相同, 这里便不再一一列举。

按预备知识中对多粒度类属性块的定义, 可将图 3 岩石质量指标 R_{QD} 的属性粒度树剪枝组合为 $\{e_1, e_2\}$, $\{e_1, f_3\}$, $\{e_2, f_1, f_2\}$, $\{f_1, f_2, f_3\}$ 4 个多粒度剪枝类属性块。

计算表 6 中的形式背景的信息粒度, 由定义可知, 表 7 的广义介粒度剪枝形式背景 $(U, M_{gmp}^1, I_{gmp}^1)$ 是由图 3 岩石质量指标 R_{QD} 的属性粒度树的第 2 层, 以及其余 4 个指标的属性粒度树的第 2 层进行属性组合得到的。

图 3 的岩石质量指标 R_{QD} 的粒度树 T_{a3} 的剪枝方式共有 4 种: $B_{31} = \{e_1, e_2\}$, $B_{32} = \{e_1, f_3\}$, $B_{33} = \{f_1, f_2, e_2\}$, $B_{34} = \{f_1, f_2, f_3\}$; 同理, 其余 4 个指标的粒度树 T_{ai} ($i = 4, 5, 6, 7$) 的剪枝方式也分别有 4 种; 它们两两组合便能形成表 6 的广义介粒度剪枝形式背景。

例: 当 $S^1 = (U, M_{gmp}^1, I_{gmp}^1)$, 其中 $M_{gmp} = \bigcup_{k=1}^5 D_k$; $D_k = \bigcup_{r=1}^{10} B_{n,k}^r$; $I_{gmp} \subseteq U \times M_{gmp}$ 时,
 $e_1^{\vee\vee} = e_3^{\vee\vee} = e_5^{\vee\vee} = e_8^{\vee\vee} = e_{10}^{\vee\vee} = \{e_1, e_3, e_5, e_8, e_{10}\}$, $e_2^{\vee\vee} = e_4^{\vee\vee} = e_6^{\vee\vee} = e_7^{\vee\vee} = e_9^{\vee\vee} = \{e_2, e_4, e_6, e_7, e_9\}$, 则
 $D(M_{gmp}) = 10 \left(\frac{10}{5} \times 10 \right) = 200$; $W(M_{gmp}) = \frac{1}{200}$ 。

即广义介粒度剪枝形式背景:

$$S^1 = (U, M_{gmp}^1, I_{gmp}^1) \text{ 的 } W(M_{gmp}) = \frac{1}{200}。$$

5. 结论与展望

本文方法在复杂度上虽没有大幅度提升, 但在计算工程岩体各项质量指标上提出了新颖的计算思路和方法, 即通过计算工程岩体广义介粒度剪枝形式背景权重的方法, 对工程岩体各项指标的权重有个整体的分析, 但在计算具体每项指标的具体权重上没有给出相关定义, 这将在未来的工作中体现。相关工程施工方面的知识, 期待更多相关专业人士的加入和指导。

基金项目

河北大学 2022 年研究生创新资助项目(HBU2022bs028)。

参考文献

- [1] 刘飞跃, 刘一汉, 杨天鸿, 等. 基于岩芯图像深度学习的矿山岩体质量精细化评价[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 968-974.
- [2] 陈卫忠, 王鲁瑀, 谭贤君, 等. 裂隙岩体地下工程稳定性研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1945-1961.
- [3] 周坦, 胡建华, 匡也. 基于模糊 RES-多维云模型的岩体质量评判方法与应用[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(8): 1771-1780.
- [4] 丁振杰, 郑俊, 吕庆, 等. 《工程岩体分级标准》中边坡工程岩体质量指标计算的讨论[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 275-280.
- [5] 邬书良, 陈建宏, 周智勇, 等. 约简概念格与模糊优选在地下工程岩体质量评判中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(10): 3872-3878.
- [6] 陈雪峰, 陈文涛, 罗建梅, 等. 熵权 TOPSIS 模型在地下工程岩体质量评价中的应用[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(3): 20-23.
- [7] 中华人民共和国水利部. 工程岩体分级标准(GB/T50218-2014) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [8] Muhammad, H., Yanjun, S., Peng, S., et al. (2022) Evaluation of Engineering Rock Mass Quality via Integration between Geophysical and Rock Mechanical Parameters. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 1-21.
- [9] Gottron, D. and Henk, A. (2021) Upscaling of Fractured Rock Mass Properties—An Example Comparing Discrete

- Fracture Network (DFN) Modeling and Empirical Relations Based on Engineering Rock Mass Classifications. *Engineering Geology*, **294**, Article ID: 106382. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106382>
- [10] Wei, M.D., Feng, D., Ji, Y.L., *et al.* (2021) Effect of Fluid Pressure Gradient on the Factor of Safety in Rock Stability Analysis. *Engineering Geology*, **294**, Article ID: 106346. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106346>
- [11] Liu, K.Y., Liu, B.G. and Fang, Y. (2019) An Intelligent Model Based on Statistical Learning Theory for Engineering Rock Mass Classification. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **78**, 4533-4548. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1419-y>
- [12] Chahra, Y., Riad, B. and Mustapha, T. (2021) Application of Classification Systems for the Assessment of Rock Mass Stability—Case of National Road 43, Jijel, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, Article No. 203. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06537-1>
- [13] Xie, M.W., Liu, W.M., Du, Y., *et al.* (2021) The Evaluation Method of Rock Mass Stability Based on Natural Frequency. *Advances in Civil Engineering*, **2021**, Article ID: 6652960. <https://doi.org/10.1155/2021/6652960>
- [14] 周坦, 胡建华, 匡也. 基于模糊 RES-多维云模型的岩体质量评判方法与应用[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(8): 1771-1780.
- [15] 陈顺满, 吴爱祥, 王贻明, 等. 基于粗糙集和改进功效系数法的岩体质量评判[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 36-41.
- [16] 陈武, 晏鄂川, 崔学杰, 等. 基于变权重区间模糊评判法的岩体质量评判[J]. 人民长江, 2018, 49(18): 69-74.
- [17] 李建斌, 郑赢豪, 荆留杰, 等. 基于岩体聚类分级的 TBM 掘进参数预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2): 3326-3337.
- [18] 王凤云. 深埋隧道软弱围岩稳定性分析及其锚固控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2160.
- [19] 张嶙, 李邵军, 徐鼎平, 等. 双江口水电站主厂房开挖初期围岩变形破裂与稳定性分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 520-532.
- [20] Zadeh, L. (1979) Fuzzy Sets and Information Granularity. In: *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*, North-Holland, Amsterdam, 3-18.
- [21] Lin, T.Y. (1998) Granular Computing on Binary Relations: Data Mining and Neighborhood Systems. In: *Rough Sets in Knowledge Discovery*, Physica-Verlag, Heidelberg, 107-121.
- [22] Yao, Y.Y. (2004) Granular Computing. *Computer Science*, **10**, 31-35.
- [23] Marilyn, B., Gonzalo, N., Koen, V., *et al.* (2021) Data Quality Measures Based on Granular Computing for Multi-Label Classification. *Information Sciences*, **560**, 51-67. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.01.027>
- [24] Lu, C., Xu, P. and Cong, L.H. (2020) Fault Diagnosis Model Based on Granular Computing and Echo State Network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **94**, Article ID: 103694. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103694>
- [25] Liu, X.Q., Wang, Y.J. and Wang, L.D. (2021) Sustainable Competitiveness Evaluation of Container Liners Based on Granular Computing and Social Network Group Decision Making. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. (Prepublish)
- [26] Liu, N., Su, Z.S., Wu, H.Y., *et al.* (2021) Conversion-Based Aggregation Algorithms for Linear Ordinal Rankings Combined with Granular Computing. *Knowledge-Based Systems*, **219**, Article ID: 106880. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.106880>
- [27] 李金海, 贺建君. 多粒度形式背景的不确定性度量与最优粒度选择[J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1299-1308.
- [28] 李金海, 王飞, 吴伟志, 等. 基于粒计算的多粒度数据分析方法综述[J]. 数据采集与处理, 2021, 36(3): 418-435.
- [29] 李金海, 贺建君, 吴伟志. 多粒度形式概念分析的类属性块优化[J]. 山东大学学报(理学版), 2020, 55(5): 1-12.
- [30] 李金海, 李玉斐, 米允龙, 等. 多粒度形式概念分析的介粒度标记方法[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(2): 447-458.
- [31] 李金海, 王飞, 吴伟志, 等. 基于粒计算的多粒度数据分析方法综述[J]. 数据采集与处理, 2021, 36(3): 418-435.
- [32] 丁宏飞, 罗霞, 刘博, 等. 一种基于粒计算的道路交通流参数预测方法[P]. 中国专利, CN105185106B, 2017.
- [33] 王国胤, 代劲, 李昊. 基于多粒度认知计算的生产安全管理与决策[J]. 中国科学基金, 2021, 35(5): 752-758.
- [34] 张恒汝, 朱科霖, 徐媛媛, 等. 抽油机井参数优化的粒计算方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(6): 115-123.
- [35] 毛华, 刘谦, 连萌璇, 等. 地下工程岩体质量评判的三支决策方法[J]. 河北大学学报. (已录用)