

基于变权 TOPSIS 模型的围岩质量评价方法研究^{*}

王凤山 钱 津

(陆军工程大学野战工程学院 南京 210007)

摘 要 围岩质量评价是一个复杂的多目标风险决策问题。以反映围岩评价本质思想和关键概念为目标,选取了围岩的抗压强度(单轴)、岩石质量指标、岩体完整性系数、地下水发育状态、岩体声波速度、结构面走向与洞轴线夹角 6 个指标,运用均值化方法组合计算信息熵和变异系数法的指标权值,并结合 TOPSIS 法构建了围岩质量的评价模型;然后将该模型运用到新疆克州布伦口-公格尔水电站地下洞室 4 个标段的围岩质量评价。研究表明,模型计算结果与现场实测数据基本吻合,说明所建立的围岩质量变权 TOPSIS 评价模型能有效地得出合理理论。

关键词 围岩质量评价;变异系数法;熵值法;均值化;TOPSIS 模型

中图分类号 E917

DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-9730. 2023. 01. 028

Research on Evaluation Method of Surrounding Rock Quality Based on Variable Weight TOPSIS Model

WANG Fengshan QIAN Jin

(Field Engineering College, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007)

Abstract Surrounding rock quality evaluation is a complex multi-objective risk decision-making problem. To reflect the nature of thought and the key concepts surrounding rock evaluation is the target, the selection of the surrounding rock uniaxial compressive strength and rock quality index, integrity coefficient of rock mass, groundwater development status, the trend of the acoustic wave velocity of rock mass, the structural plane and the hole axis Angle of six indicators, information entropy are calculated by using average method combination and variation coefficient method of index weights. Combined with TOPSIS method, the evaluation model of surrounding rock quality is established. Then the model is applied to the surrounding rock quality evaluation of four underground caverns of Bulunkou-Gongger Hydropower Station. The results show that the calculation results of the model are basically consistent with the field measured data, which indicates that the variable weight TOPSIS evaluation model established for surrounding rock quality can effectively obtain a reasonable theory.

Key Words surrounding rock quality evaluation, coefficient of variation method, entropy value method, average method, TOPSIS model

Class Number E917

1 引言

围岩作为支撑地下结构荷载的主要成分,其质量评价是工程界研究的热点问题^[1]。围岩受岩体结构面、受力状态、地应力环境及开挖扰动等因素影响,易引起塌方、岩爆、涌水等工程灾害,有效把握围岩自然属性与工程特性,科学提取和分析围岩质量评价指标,是围岩质量评价的关键事项。

辨析围岩变形与破坏的衍化机理和致灾过程,是解析围岩质量评价所要解决的核心节点问题^[2],全面考察影响围岩稳定性的多重要素,以期把握围岩质量评价中的模糊性、随机性特征。以弥补常规决策的偏差为目标,变权 TOPSIS 模型强调因素权重与因素状态值的联系、演变特征。集合 TOPSIS^[3]方法应用于围岩质量评价,寻求基于正、负理想方案间的一致和妥协,以期提高决策结果的科学有效性。

^{*} 收稿日期:2022年7月16日,修回日期:2022年8月21日

作者简介:王凤山,男,博士,教授,研究方向:防护工程系统建模与仿真。钱津,男,硕士,研究方向:工程建设与维护管理。

2 围岩质量影响因素概述

围岩有着稳定性的系统,但其同时还具有开放性,根据位置和时间不同而变化,遵循地表、地下等外力作用下围岩地质体系统物质、能量和信息的

交互机制和平衡作用,适应量化评估围岩质量仿真推演的需要,从系统化角度建立影响围岩质量的结构、要素、介质的规范化描述^[4],实现了影响围岩质量要素及指标提取的一致性语义表达,如图1所示。

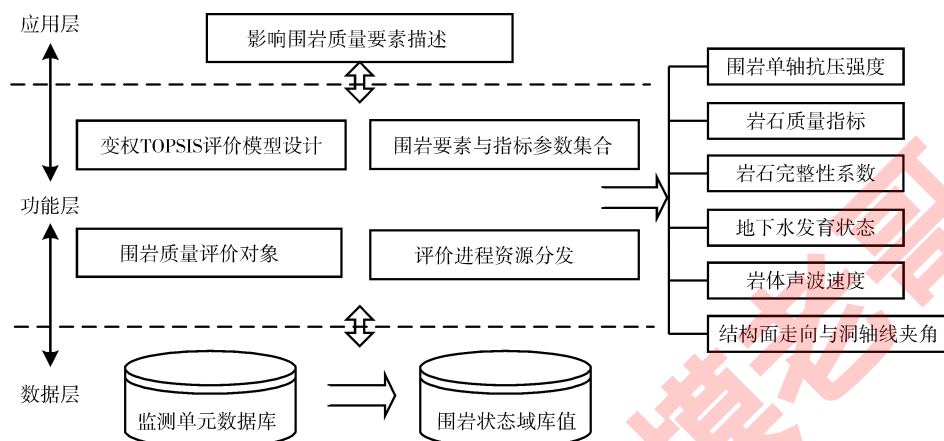


图1 影响围岩质量要素描述

图1中,围岩质量评价要素在结构上反映评价模型的本质思想和关键概念,是考察围岩质量整体作用体系的重要工具^[5]。围岩稳定性受岩体质量、完整程度、地壳外力等多种内外因素的影响,对围岩质量评价要素的辨识和集合设计,目的是构建围岩质量评价模型的指标体系,为质量评价模型和系统分析奠定基础,参考文献资料和行业规范^[6],选取6个因素作为围岩稳定性评价的指标,分别为岩石抗压强度(单轴) K_1 、岩石质量指标 K_2 、岩体完整性系数 K_3 、地下水发育状态 K_4 、岩体声波速度 K_5 以及结构面走向与洞轴线夹角 K_6 ,建立指标体系集合, $K=\{K_1, K_2, \dots, K_n\}$, ($1 \leq n \leq 6$)。

3 指标权重计算

3.1 熵值法计算指标权重

熵值法^[7]以原始信息作为数据支撑,是一种度量无序程度的客观赋权方法。其中心思想是通过监测各项指标的变异程度来测算出指标熵值的大小:熵值越大,反映出该指标信息的不确定性越大,包含的信息越小;反之,熵值越小,则该指标信息的稳定性越好,相应包含的信息越大。

1) 设对 m 种方案 s_i ($1 \leq i \leq m$) 构成围岩质量方案集合 $S=\{s_i | 1 \leq i \leq m\}$ 进行对比评价,结合 n 项指标属性构成 $m \times n$ 原始数据矩阵,记作 $S_{mn}=\{s_{ij}\}_{m \times n}$,即为

$$S_{m \times n} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, i 表示评价方案数量, j 表示指标属性个数, s_{ij} 为第 i 个方案第 j 个指标值。

2) 采取极差法对围岩质量评估原始数据矩阵 S_{mn} 进行标准化处理。结合式(2)、式(3)计算标准化矩阵 S' 。

围岩质量指标呈现效益型特征时:

$$s'_{ij} = \frac{s_{ij} - \min_j(s_{ij})}{\max_j(s_{ij}) - \min_j(s_{ij})} \quad (2)$$

围岩质量指标呈现成本型特征时:

$$s'_{ij} = \frac{\max_j(s_{ij}) - s_{ij}}{\max_j(s_{ij}) - \min_j(s_{ij})} \quad (3)$$

3) 根据熵值计算方法(4),围岩质量第 i 个要素指标下 S_i 的熵值为

$$z_i = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \times \ln(p_{ij}) \quad (4)$$

式(4)中 p_{ui} 表示围岩质量第 i 项指标下,第 m 个指标段的特征比重,则:

$$p_{ij} = \frac{1 + s'_{ij}}{\sum_{i=1}^m (1 + s'_{ij})} \quad (5)$$

式(4)中, z_i 表示围岩质量各指标要素的信息熵值,熵值越大,表示出围岩质量指标体系的整体稳

定性越差,权重越小。至此,计算围岩质量评估指标的权重 α_i 为

$$\alpha_i = \frac{1 - Z_i}{\sum_{i=1}^n (1 - Z_i)} \quad (6)$$

式(6)中, $0 \leq \alpha_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ 。

3.2 变异系数法计算指标权重

传统熵值法仅依赖于数据本身的离散性,在测算权重时出现有的权重过大或过小的情况,对应指标数据为0和1时算出熵值均为0,很容易会造成关键信息的丢失。变异系数^[8]是衡量方案中各个属性值变异程度大小的统计值,变异系数法^[9]则是通过计算各属性在被评价对象上变异程度而得到权重的客观赋值方法。

第一步:对第 j 个被评价属性参数值求取均值 \bar{s}_j 和标准差 σ_j :

$$\begin{cases} \bar{s}_j = \sum_{i=1}^m s_{ij} / m \quad (1 \leq j \leq n) \\ \sigma_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (s_{ij} - \bar{s}_j)^2 / m} \quad (1 \leq j \leq n) \end{cases} \quad (7)$$

第二步:计算第 j 个属性指标的变异程度 γ_j :

$$\gamma_j = \sigma_j / \bar{s}_j \quad (1 \leq j \leq n) \quad (8)$$

第三步:计算出各项指标的权重 β_j ,通过对相应指标的变异程度进行“归一化”处理:

$$\beta_j = \gamma_j / \sum_{i=1}^m \gamma_j \quad (1 \leq j \leq n) \quad (9)$$

3.3 均值化计算指标权重

考虑不同单一赋权法间偏差值较大,利用熵值法和变异系数法分别确定围岩评价权重 $\{\alpha_j\}$ 、 $\{\beta_j\}$ ($1 \leq j \leq n$),虽然消除了方案属性量纲的差异,但也消除了各指标变异程度上的差异,因此,通过引入均值思想^[10]对指标权重进行平衡处理,具体如下:

$$\omega = \{\omega_j\} (1 \leq j \leq n) \quad (10)$$

式(10)中, $\omega_j = a \cdot \alpha_j + (1 - a) \beta_j$,本文取 $a = 0.5$ 。

4 变权TOPSIS评价模型

TOPSIS法^[11]又叫逼近理想解的排序法,是经典的多属性决策方法。其中心思想在于:对方案进行评价时,首先计算出最佳方案和最差方案,即:评价问题的理想解和负理想解,然后利用欧式距离计算法求出各指标对象与正理想解和负理想解之间的贴近程度,进而通过与理想解的相对贴近度对方案进行排序和评价,若评价对象距离正理想解最近

且距离负理想解最远,则为最佳方案,反之最差^[8]。

但TOPSIS方法^[12]所采取的指标权重基本上是由专家主观确定的,其客观准确度较低。因此运用均值化方法组合计算信息熵和变异系数法的指标权重,取代了以专家经验主观上确定权重的方法,同时根据TOPSIS法结合各指标属性的评价^[13],对最终的目标方案进行整体评价。

1)建立目标方案评价模型的决策矩阵并进行相应的标准化处理,得到矩阵 S ,如式(11)。

$$S = (s_{ij})_{m \times n} = (y_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2})_{m \times n} \quad (11)$$

2)根据确定的各评价指标权重系数,构建加权标准决策矩阵 U ,如式(12)。

$$U = (u_{ij})_{m \times n} = \omega_j \cdot (s_{ij})_{m \times n} \quad (12)$$

3)确定正理想值 U^+ 和负理想值 U^- ,计算正、负理想值,如式(13)、(14)。

$$U^+ = \left\{ \begin{cases} \{\max_{1 \leq i \leq m} u_{ij} | j \in J^+, (\min_{1 \leq i \leq m} u_{ij} | j \in J^-)\} \\ \{u_1^+, u_2^+, \dots, u_n^+\} \end{cases} \right\} \quad (13)$$

$$U^- = \left\{ \begin{cases} \{\min_{1 \leq i \leq m} u_{ij} | j \in J^+, (\max_{1 \leq i \leq m} u_{ij} | j \in J^-)\} \\ \{u_1^-, u_2^-, \dots, u_n^-\} \end{cases} \right\} \quad (14)$$

式(13)、(14)中, J^+ 为效益型评价指标集, J^- 为成本型评价指标集。

4)求任一解 y_{ij} 到正负理想解的距离 L_i^+ 、 L_i^- ,如式(15)、(16)。

$$L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_j^+)^2} \quad (15)$$

$$L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_j^-)^2} \quad (16)$$

式(15)、(16)中, u^+ 、 u^- 分别表示正负理想解的第 j 个分量。

5)计算各方案到理想解的贴近度 G_i 。

$$G_i = L_i^- / (L_i^- + L_i^+) \quad (17)$$

式(17)中, $0 \leq G_i \leq 1$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

6)根据相对贴近度 G_i 对各个方案进行排序,选择贴近度最大的方案为较优方案。

5 模型计算

5.1 标准化决策矩阵

以地下洞室内典型区域为例,根据文献[11]对4个标段内围岩稳定性指标为例,给出围岩稳定性样本 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 的相关特征指标取值,构建地下洞室结构的围岩稳定性质量评价样本集,其量化参数如表1。

表1 围岩稳定性质量评价样本集

方案	Rc	RQD	Kv	A	V	θ
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
s_1	127	81	0.68	47	5200	63
s_2	106	68	0.57	73	3500	54
s_3	78	51	0.62	112	2900	41
s_4	83	49	0.45	105	3200	32

建立方案决策矩阵 Y , 利用式(11)对矩阵 Y 进行规范化处理, 则标准化矩阵 S 表示如下:

$$S = \begin{bmatrix} 0.6323 & 0.6367 & 0.5801 & 0.2665 & 0.6831 & 0.6433 \\ 0.5278 & 0.5345 & 0.4862 & 0.4139 & 0.4598 & 0.5514 \\ 0.3884 & 0.4009 & 0.5289 & 0.6350 & 0.3810 & 0.4187 \\ 0.4133 & 0.3851 & 0.3839 & 0.5953 & 0.4204 & 0.3268 \end{bmatrix}$$

5.2 计算指标权重

根据公式计算熵值法、变异系数法、均值化法下的指标权重, 具体如表2所示。

表2 围岩质量评价指标权重

	α	β	ω
Rc	0.17672	0.146468	0.16159
RQD	0.18779	0.155323	0.17155
Kv	0.13247	0.10758	0.12003
A	0.17699	0.228176	0.20258
V	0.17516	0.177823	0.17649
θ	0.15089	0.184631	0.16776

表2中, 分别表示出三种方法下的指标权重 α 、 β 、 ω , 并以此为数据支撑进行各方案正、负理想求解。

5.3 求解各方案正、负理想解

依据式(13)~(14)依次求得各方案正、负理想解, 如表3所示。

表3 围岩质量评价方案正、负理想解

	熵值法		变异系数		均值化	
	U_{α}^{+}	U_{α}^{-}	U_{β}^{+}	U_{β}^{-}	U_{ω}^{+}	U_{ω}^{-}
Rc	0.11	0.07	0.09	0.06	0.08	0.05
RQD	0.12	0.07	0.10	0.06	0.09	0.05
Kv	0.08	0.05	0.06	0.04	0.04	0.03
A	0.05	0.11	0.06	0.14	0.08	0.19
V	0.12	0.07	0.12	0.07	0.12	0.07
θ	0.12	0.06	0.12	0.06	0.13	0.06

5.4 计算到正负理想解的距离

依据式(15)~(16)依次求得各方案到正、负理想解的距离, 如表4所示。

5.5 计算相对贴适度并排序

根据式(17)依次求得各方案的相对贴适度 G , 如表5所示。

表4 评价方案到正、负理想解的距离

	熵值法		变异系数		均值化	
	L_{α}^{+}	L_{α}^{-}	L_{β}^{+}	L_{β}^{-}	L_{ω}^{+}	L_{ω}^{-}
s_1	0	0.12	0	0.13	0	0.15
s_2	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.09
s_3	0.11	0.03	0.12	0.02	0.14	0.02
s_4	0.11	0.01	0.12	0.01	0.13	0.01

表5 围岩质量评价方案贴适度

	熵值法 G_{α}	变异系数 G_{β}	均值化 G_{ω}
s_1	1	1	1
s_2	0.5486	0.5541	0.5688
s_3	0.1857	0.1622	0.1290
s_4	0.0859	0.0915	0.0958

5.6 模型效果分析

根据表5对围岩质量评价方案贴适度进行排序, 熵值法、变异系数法与均值化下的方案贴适度排序一致, 结果为 $s_1 > s_2 > s_3 > s_4$ 。数据显示, 均值化作用后的围岩质量评价方案中, 方案 s_2 的贴适度高于常权作用下的方案贴适度, 且方案 s_3 、 s_4 的贴适度更接近, 对比工程实测数据更符合实际。通过贴适度大小排序可以清晰得出方案 s_1 的围岩质量最好、稳定性最高, 对比工程实测结果一致, 表明基于变权TOPSIS的围岩质量评价模型计算结果可靠, 准确性较高, 具有较好的应用价值。

6 结语

1) 针对围岩质量评价的多指标性, 从系统化的角度提取影响围岩质量的各种因素, 选取围岩单轴抗压强度、岩石质量指标、岩石完整性系数、地下水发育状态、岩体声波速度、结构面走向与洞轴线夹角作为评价指标, 构建围岩质量评价模型^[11]。

2) 在评价过程中, 采用熵值法、变异系数法对评价指标进行均值化赋值, 克服了单一赋权法中标差差异较大、敏感性较强等特征对围岩质量评价结果的影响, 增强了围岩质量评价模型的科学性、安全性。

3) 以工程实例为数据支撑进行仿真计算, 在围岩现地指标测算值和方法算出组合权重值的基础上, 计算理性点贴适度与实例工程数据对比, 结果表明基于变权TOPSIS的围岩质量评价模型得出的结论与实际结果一致, 表明该方法、模型的合理可行。

(下转第191页)

- [6] 戴干策,陈敏恒.化工流体力学[M].北京:化学工业出版社,1988:10-15.
- [7] Leblanc P, Paillat T, Cabaleiro J. Flow electrification investigated under the effect of the wall shearing stress [C]//2016 Electrostatic Joint Conference, 2016: 154-162.
- [8] Leblanc P, Cabaleiro J M, Paillat T, et al. Impact of the laminar flow on the electrical double layer development [J]. Journal of Electrostatics, 2016(23): 1-5.
- [9] Cabaleiro J, Paillat T, Moreau O. Modeling of static development and dynamic behavior of the electrical double layer at oil pressboard interface [C]// Electrostatic Joint Conference, 2009: 254-268.
- [10] Leblanc P, Paillat T, Cabaleiro J M, et al. Flow electrification investigated under the effect of the wall shearing stress [C]// 2016 Electrostatics Joint Conference, Proc, 2016, 12(3): 140-155.
- [11] Moreau O, Cabaleiro J, Paillat T, et al. Influence of the wall shearing stress on flow electrification [C]// International Symposium on Thermal Plasmas Electrical Discharges and Dielectric Material, Reunion Island, 2016, 2(14): 1145-1152.
- [12] 王红梅.对流扩散方程的特征有限元方法[D].济南:山东大学, 2012.
- [13] Kameo A, Fumio H, Shiro Y, et al. Mass transfer and current distribution under free convection conditions [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2009, 107(3): 242-246.
- [14] Ferziger J H. Computational Methods for Fluid Dynamics [M]. Washington D.C: NBS, 2012: 20-25.
- [15] Tang A, Bao J, Skyllas-Kazacos M. Thermal modeling of battery configuration and self-discharge reactions in vanadium redox flow battery [J]. Journal of Power Sources, 2012, 216(5): 498-501.
- [16] 袁镒吾,刘又文.确定平板层流边界层速度分布的一种方法[J].应用数学和力学, 1999, 20(4): 427-432.
- [17] 陈涛,张国亮.化工传递过程基础[M].第三版.北京:化学工业出版社, 2009: 80-81.
- [18] Mohamed E A, Thierry P, Gerard T. Numerical simulation of the electrical double layer development: physicochemical model at the solid and dielectric liquid interface for laminar flow electrification phenomenon [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1463-1475.
- [19] Sonke S, Kyosti K. Transient solutions of potential steps at the rotating disc electrode with steady state initial concentration profiles for one electron transfer reactions [J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(8): 6812-6823.

(上接第137页)

参考文献

- [1] 穆成林,黄润秋,等.基于组合赋权—未确知测度理论的围岩稳定性评价[J].岩土工程学报, 2016, 38(06): 1057-1063.
- [2] 常晓林,张美丽,杨海云,等.基于联系熵的围岩稳定性评价研究[J].岩土力学, 2010, 31(01): 99-101.
- [3] 王莉芳.基于组合赋权与灰色改进TOPSIS方法的受灾点应急物质需求紧迫性分级评价[J].安全与环境工程, 2017, 24(06): 94-100.
- [4] 刘永,谭显坤,张航,等.椿树垭隧道岩体结构特征与围岩稳定性分析[J].安全与环境工程, 2010, 17(05): 106-112.
- [5] Bao X, Wang Z, Ma S, et al. Fine quality evaluation of surrounding rock of an underground hydropower station [J]. E3S Web of Conferences, 2020, 194(5): 5041.
- [6] 建设部.工程岩体分级标准:GB50218-94[S].北京:中国计划出版社, 1995.
- [7] 王凤山,杨志宏,郭子曜.基于改进熵权物元模型的作战方案评估[J].指挥控制与仿真, 2021, 43(02): 82-90.
- [8] 王先明,姜枫,赵阳.基于变权理论TOPSIS的空降场评估方法研究[J].电子质量, 2020, 12(04): 5-8.
- [9] Polly P D. Variability in mammalian dentitions: size-related bias in the coefficient of variation [J]. Biological Journal of the Linnean Society, 2010: 64.
- [10] 孙健,魏丽英.基于均值化主成分分析的交通安全评价方法研究[J].交通信息与安全, 2012, 30(01): 90-93, 98.
- [11] 曾韬睿,王林峰,翁其能.基于理想点法与组合赋权的围岩质量评价模型[J].重庆理工大学学报(自然科学), 2019(10): 79-85.
- [12] 王占武,唐凯,严良.基于熵权TOPSIS法的火电厂选址综合决策[J].安全与环境工程, 2011, 18(05): 103-106.