

改进 G1 - RS - UMT 模型在某配水工程 围岩稳定预测中的应用

靳春玲¹, 党丹丹¹, 贡力¹, 魏晓悦¹, 贺思乐²

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 国网甘肃省电力公司白银供电公司, 甘肃 白银 730900)

摘要: 围岩稳定是保证水工隧洞工程安全稳定的重要前提。以某配水工程水工隧洞为研究背景, 以提升长距离输水隧洞中围岩稳定性等级预测精度为目标, 构建了多因素水工隧洞围岩稳定性预测指标体系, 划分了围岩稳定等级, 采用 G1 - 改进 RS 法对影响指标进行主客观赋权, 并引用博弈论理论运算组合权重, 最后基于未确知测度理论提出改进 G1 - RS - UMT 模型, 完成了围岩稳定等级预测。结果表明: 某配水工程 B4 标段水工隧洞中 9 个典型断面中 GS19 + 590 ~ GS20 + 050 段围岩处于不稳定状态, GS21 + 340 ~ GS28 + 061 里程范围内 8 段围岩皆处为局部稳定状态。通过论证, 改进 G1 - RS - UMT 模型预测结果相比于 TOPSIS 模型其准确度更高, 预测等级与实际情况相符合程度由 66.67% 提高到了 88.89%。该研究为围岩稳定性预测提供了一种新的定量方法, 为水工隧洞围岩稳定性预测结果提供更加有效的支撑。

关键词: 水工隧洞; 未确知测度理论; 改进 G1 - RS 法; 围岩稳定预测; 珠江三角洲水资源配置工程

中图分类号: TV672⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)06-0186-07

Application of improved G1 - RS - UMT model to stability prediction of surrounding rock in a water resources allocation project

JIN Chunling¹, DANG Dandan¹, GONG Li¹, WEI Xiaoyue¹, HE Sile²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Baiyin Power Supply Company of State Grid Gansu Electric Power Company, Baiyin 730900, China)

Abstract: The stability of the surrounding rock is the prerequisite for the safe and stable operation of hydraulic tunnel projects. Taking the hydraulic tunnel of a water resources allocation project as the research object, aiming to improve the prediction accuracy of surrounding rock stability grade of long-distance water conveyance tunnels, a multi-factor hydraulic tunnel surrounding rock stability prediction index system was constructed, and the stability grades of the surrounding rock of different tunnel sections were categorized. Then, G1 - improved RS theory was adopted to weight the impact indicators subjectively and objectively, and game theory was used to calculate the combined weights. Finally, based on the unascertained measurement theory (UMT), an improved G1 - RS - UMT model was proposed to predict the stability grade of the surrounding rock. The results show that among the nine typical sections of the hydraulic tunnel in the B4 section of a water resources allocation project, the surrounding rock of GS19 + 590 - GS20 + 050 is in an unstable state, and the other eight sections within the mileage range of GS21 + 340 - GS28 + 061 are all in partially stable state. According to the comparative analysis, the prediction result of the improved G1 - RS - UMT model is more accurate than that of the TOPSIS model, and the degree of consistency between the predicted result and the actual situation has increased from 66.67% to 88.89%. This research provides a new approach for the prediction of surrounding rock stability of hydraulic tunnels with more accurate and effective prediction results.

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969011); 甘肃省科技计划项目(20JR10RA274, 20JR2RA002, 20JR7RA301)

作者简介: 靳春玲(1976-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 硕士生导师, 主要从事水安全及水利工程项目管理研究工作。

通讯作者: 党丹丹(1998-), 女, 甘肃陇南人, 硕士研究生, 主要从事水环境及渠系工程安全评价工作。

Key words: hydraulic tunnel; unascertained measurement theory; improved G1 - RS theory; stability prediction of surrounding rock; Pearl River Delta Water Resources Allocation Project

1 研究背景

由于水工隧洞施工情况复杂,且开始呈现“长洞线、大洞径、隧洞群”的复杂特性,这使得水工隧洞围岩的稳定性难以得到保证,也增加了围岩支护方案设计和应力分析的难度^[1-2]。因此,为预防支护结构不能稳固围岩,避免造成巨大的人力和财力损失,需要对围岩稳定性做出准确的预测^[3]。

针对水工隧洞及地下工程围岩稳定性等级预测,李唱唱等^[4]对深埋高应力地质条件下引水隧洞的围岩稳定性进行了研究;李一冬等^[5]将基于 Nguyen - Widrow 初始化等算法改进的 BP 神经网络应用到围岩等级预测中,并筛选出了影响围岩稳定性的主导因素;Zhang 等^[6]构建了 6 个影响因子评价体系,基于距离判别分析理论建立了围岩稳定性等级分类模型;宫凤强等^[7]根据突变级数理论对影响围岩稳定性的因素进行层次分解,并结合模糊数学理论得到了围岩稳定类别;Li 等^[8]选用 6 个影响因素作为贝叶斯判别分析法 (Bayes discriminant analysis) 的判别因子,用来确定围岩稳定性的类别;Luo 等^[9]通过对围岩机理的研究,运用 Singh - Mitchell model 模型对隧道运营前的围岩变形规律进行了分析和预测;王克忠等^[10]基于围岩稳定支护结构的力学机理分析和数值模拟,提出了钢拱架复合支护体系可以保证引水洞室的稳定性。针对预测围岩稳定性的理论还有概率统计分析^[11]、支持向量机^[12]、突变级数法^[7]、距离判别分析理论^[13]等。上述研究均取得了一定效果,但存在对影响隧洞围岩稳定的因素考虑不全,评价指标数据处理不当和稳定性分级边界模糊的问题。

综上所述,本文选用能合理反映围岩各项特性的指标,建立了珠江三角洲水资源配置工程 B4 标段围岩稳定性预测体系,采用 G1 (G1 - coefficient)^[14] - 改进 RS (rough set)^[15] 对各影响指标进行主客观赋权,并引用博弈论理论 (game theory)^[16] 运算组合权重,基于未确知测度理论 (unascertained measurement theory, UMT)^[17] 构建了改进 G1 - RS - UMT 模型,用以解决珠江三角洲水资源配置工程 B4 标段的输水隧洞围岩稳定性的预测问题。并依据预测结果进行了开挖及支护方案的设计,取得了理想的效果,本研究可为水工隧洞围岩稳定性等级预测提供一种新的探索方法。

2 水工隧洞围岩稳定性预测模型

水工隧洞围岩稳定预测模型的基础是利用“G1 法 - 改进 RS - 博弈论法”对影响水工隧洞围岩稳定性的指标进行组合赋权,再将组合赋权的结果引入改进 G1 - RS - UMT 模型中,预测出水工隧洞的围岩稳定性等级结果。

2.1 组合赋权

通过 G1 法计算评价指标主观权重,再由改进 RS 法得到指标客观权重,最后基于博弈论法将评价指标的主客观权重进行组合赋权。

2.1.1 G1 法主观赋权 G1 法是基于层次分析法改进后的一种方法,省去了矩阵一致性检验的步骤,同时计算过程也较为简便,其确定评价指标主观权重的计算步骤如下。

Step 1 根据重要度大小确定指标的顺序。对于指标集 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, x_1 为 n 项指标中最重要的一个指标, x_2 为次重要指标,对 n 项指标进行重要度排序可得到: $x_1 > x_2 > \dots > x_n$ 。

Step 2 判断相邻指标间重要性大小 r_i , 重要度量化见表 1^[18]。

表 1 重要度量化表

重要性程度	极度重要	非常重要	较为重要	一般重要	稍微重要	同样重要
r_i 取值	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0

Step 3 计算权重系数。

$$w_n = \left[1 + \sum_{i=2}^n \prod_{k=i}^n r_k \right]^{-1} \quad (1)$$

$$w_{i-1} = w_i \cdot r_i \quad (2)$$

式中: w_n 为第 n 项指标的权重。

2.1.2 改进 RS 法客观赋权 改进 RS 法是为了避免粗糙集理论计算重要度的结果出现“0”的情况,通过改进重要度计算方法^[19]来提高结果的精确度,其确定评价指标客观权重的计算步骤如下。

(1) 粗糙集理论。知识集 $S = (U, R, V, f)$, 其中 $U = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ 为对象集,称为论域; $R = C \cup D$ 为属性集 (若 C 与 D 分别为条件属性集与决策属性集,则 $C \cap D = \emptyset$); $V = U_{r \in R} \cdot V_r$, V_r 为属性, $r \in R$ 为值域; $f: U \times R \rightarrow V$ 为信息函数, $\forall r \in R, X \in U$, $f(x, r) \in V_r$ 。在知识集 $S = (U, R, V, f)$ 中,属性 $a_i \in R$

在属性集 $R - \{a_i\}$ 的重要度定义见公式(3)。

$$\text{Sig}_{R-\{a_i\}} = 1 - \frac{|R|}{R - \{a_i\}} \quad (3)$$

属性 a_i 的权重 W_{ai} 计算见公式(4)。

$$W_{ai} = \frac{\text{Sig}_{R-\{a_i\}}}{\sum_{i=1}^n \text{Sig}_{R-\{R_i\}}} \quad (4)$$

$$|R| = \left| \frac{U}{R_i} \right| = \sum_{i=1}^n |R_i|^2 \quad (5)$$

式中: $|R_i|$ 为集合 R_i 中属性的个数。

(2) 粗糙集的改进。属性 c 的重要度计算如公式(6)所示。

$$\text{Sig}'(c) = I(D|C - \{c\}) - I(D|C) + \frac{\sum_{a \in C} |a(x)| - \sum_{a \in C - \{c\}} |a(x)|}{\sum_{a \in C} |a(x)|} \quad (6)$$

决策属性 $D(U|D = \{D_1, D_2, \dots, D_k\})$ 相对于条件属性集 $C(U|C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\})$ 的条件熵见公式(7)。

$$I(D|C) = \sum_{i=1}^m \frac{|C|^2}{|D|^2} \sum_{j=1}^k \frac{|D_j \cap D_i|}{|c_i|} \left(1 - \frac{|D_j \cap D_i|}{|c_i|} \right) \quad (7)$$

属性 c 的客观权重计算见公式(8)。

$$W'(c) = \frac{\text{Sig}'(c) + I(D|C)}{\sum_{a \in C} \{\text{Sig}'(c) + I(D|\{a\})\}} \quad (8)$$

2.1.3 博弈论组合赋权 G1 法和改进 RS 法各有其优缺点,但究其根本两者有很强的互补性。基于博弈论理论将主客观权重进行线性组合,从而得到评价指标的综合权重,其计算步骤如下。

Step 1 用 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 表示各指标的权重集,构建主、客观权重任意线性组合式如公式(9)所示。

$$w_j = t_1 \alpha_j + t_2 \beta_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中: t_1, t_2 为线性组合系数; w_j 表示所有的权重向量集; α_j 和 β_j 为第 j 种赋权法确定的权重向量。

Step 2 根据博弈论思想构建优化模型如公式(10)所示。

$$\min \left\| \sum_{j=1}^2 (t_1 \alpha_j + t_2 \beta_j) - W_q \right\| \quad (q = 1, 2) \quad (10)$$

式中: W_1 为主观权重; W_2 为客观权重。

Step 3 利用矩阵的微分性质,求出优化模型的最优解。

$$\begin{pmatrix} \alpha\alpha & \alpha\beta \\ \beta\alpha & \beta\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha\alpha \\ \beta\beta \end{pmatrix} \quad (11)$$

Step 4 由式(11)计算可得 t_1 和 t_2 , 然后由公式

(12) 进行归一化处理。

$$t_p^* = t_p / \sum_{p=1}^2 t_p \quad (12)$$

Step 5 计算评价指标的最优组合权重 W^* 。

$$W^* = t_1^* W_1 + t_2^* W_2 \quad (13)$$

2.2 改进 G1 - RS - UMT 预测模型

设待评价的水工隧洞有 n 个洞段,即待评价洞段空间 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 。设第 R_i 洞段($i = 1, 2, \dots, n$)有 m 个评价指标,形成指标空间 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$,则有第 R_i 洞段第 j 个指标的测量值 X_{ij} 。设评价指标有 q 个预测等级,则等级空间 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_q\}$,其中 A_t ($t = 1, 2, \dots, q$) 表示第 t 级,并称 $\{A_1, A_2, \dots, A_q\}$ 为 A 上的有序分割类。

Step 1 计算单指标未确知测度。建立指标的未确知测度函数 $\mu(X_{ij} \in A_t)$,将测量值 X_{ij} 代入求得单指标测度评价矩阵 μ_{ijt} 如公式(14)所示。

$$(\mu_{ijt})_{m \times q} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \cdots & \mu_{i1q} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \cdots & \mu_{i2q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \cdots & \mu_{imq} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Step 2 计算多指标综合测度矩阵

令 $\mu_{it} = \mu(R_i \in A_t)$ 表示第 R_i 洞段属于 A_t 的程度,且 $\mu_{it} \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n \mu_{it} = 1$ 。

$$\mu_{it} = \sum_{j=1}^m \mu_{ijt} W^* \quad (i = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, q) \quad (15)$$

由公式(16) 计算得到多指标综合测度矩阵。

$$(\mu_{it})_{n \times q} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1q} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{m1} & \mu_{m2} & \cdots & \mu_{mq} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Step 3 置信度识别准则。选取置信度 $\lambda = 0.5$ ($0.5 \leq \lambda \leq 1$),若 λ 满足公式(16),则可以确定第 R_i 洞段属于第 t_a 个预测等级 A_{t_a} 。根据预测等级可以得到每个洞段围岩的稳定性状态,进而设计相关开挖及支护方案。

$$t_a = \min \left\{ t : \sum_{i=1}^n \mu_{it} \geq \lambda, t = 1, 2, \dots, q \right\} \quad (17)$$

3 实例应用

珠江三角洲水资源配置工程位于广东省东莞市沙田镇和厚街镇,主要为珠江口东岸三角洲平原地貌,东部沙溪水库附近局部分布丘陵,地表高程多为

0~18 m。以珠江三角洲水资源配置工程的土建施工 B4 标段为例,其主要为 8.453 km 单线输水隧洞,将改进 G1-RS-UMT 模型应用于此水工隧洞围岩的稳定性预测中。

3.1 围岩稳定性预测指标体系

水工隧洞围岩的稳定是由多种因素之间的非线性关系所决定的,影响因素主要有内在因素和工程施工因素^[20],对其进行等级预测是一个非常复杂的过程。基于此,分析珠江三角洲水资源配置工程中影响 B4 标段输水隧洞围岩稳定性的各类因素,主要有:①岩体坚硬程度,岩体坚硬程度作为影响围岩稳定的首要因素,结合所处地质环境能极大程度上反映围岩岩体稳定性^[21];②岩体完整度,岩体完整度所反映的岩体结构状态是决定围岩岩体稳定的关键;③其他因素,除岩体本身以外,地下水、初始地应力等也能对水工隧洞围岩稳定性产生影响。

结合以上对影响围岩稳定性因素的分析,按照

《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)、《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)、《水工隧洞设计规范》(SL279—2016)、《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)、Q 值法、BQ(basic quality)法和 RMR(rock mass rating)法^[22],最终选取了 10 个具有代表性的指标,并将各指标的具体量化标准进行了归类,均分为 5 个等级^[23],I、II、III、IV 和 V 级分别表示围岩处于稳定、基本稳定、局部稳定、不稳定和极不稳定 5 个状态,最后确定出的珠江三角洲水资源配置工程 B4 标段围岩稳定性预测指标体系见表 2。

3.2 数据收集与处理

按照主要结构形式和地质岩性的分布选取 9 个典型隧洞断面进行计算分析,根据《工程测量标准》(GB 50026—2020)、《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)的指标量化细则、实地测量、实验数据等资料,收集处理得到的围岩信息如表 3 所示。

表 2 珠江三角洲水资源配置工程 B4 标段围岩稳定性预测指标体系

一级指标	二级指标	指标层	稳定性等级				
			I	II	III	IV	V
岩体坚硬程度	岩石饱和单轴抗压强度/MPa	X_1	>60	60~30	30~15	15~5	<5
	湿抗压强度/MPa	X_2	>120	120~60	60~30	30~15	<15
	结构面强度系数	X_3	>0.8	0.8~0.6	0.6~0.4	0.4~0.2	<0.2
岩体完整度	岩石质量指标/%	X_4	>90	90~75	75~50	50~25	<25
	主要结构面产状/(°)	X_5	>75	75~60	60~45	45~30	<30
	完整性系数	X_6	>0.75	0.75~0.45	0.45~0.3	0.30~0.20	<0.2
其他因素	地下水含水量/[$L \cdot \min^{-1} \cdot (10m)^{-1}$]	X_7	<5	5~10	10~25	25~125	>125
	弹性抗力系数/($MPa \cdot m^{-1}$)	X_8	>18	12~18	5~12	2~5	<2
	纵波波速/($km \cdot s^{-1}$)	X_9	>4.5	3.7~4.5	3.0~3.7	2.0~3.0	<2.0
	初始地应力/MPa	X_{10}	<1	1~10	10~20	20~40	>40

表 3 珠江三角洲水资源配置工程 B4 标段各洞段围岩信息表

指标层	洞段起止桩号/m								
	GS19+590~	GS20+050~	GS21+340~	GS22+226~	GS22+553~	GS23+788~	GS24+911~	GS26+035~	GS26+900~
	GS20+050	GS21+340	GS22+226	GS22+553	GS23+788	GS24+911	GS26+035	GS26+900	GS28+061
X_1	10	23	17	9	28	11.6	27	22	19
X_2	15.9	23.7	47	55	36	30.3	86	79	56
X_3	0.55	0.52	0.57	0.54	0.35	0.47	0.27	0.6	0.52
X_4	47	59	64	63	57	61	69	59	71
X_5	37	62	61	52	55	59	59	47	62
X_6	0.27	0.74	0.44	0.37	0.38	0.33	0.41	0.76	0.44
X_7	75	17	12	27	20	13	11	11	7.5
X_8	9	8.5	3.5	7.9	7.2	8.1	7.62	6.8	11
X_9	3	3.4	3.65	3.47	3.54	3.77	3.73	3.98	3.71
X_{10}	2.7	1.3	3.5	1.2	1.2	1.7	5.7	2.3	15.1

3.3 构建改进 G1 - RS - UMT 预测模型

3.3.1 组合赋权

(1) G1 法计算主观权重 W_1 。根据表 2 珠江三角洲水资源配置工程 B4 标段围岩稳定性预测指标体系,向多位专家进行咨询,回收问卷并分析计算。 $W_1 = (0.0182:0.0130:0.1503:0.2886:0.1252:0.2405:0.0489:0.0783:0.0218:0.0349)$

(2) 改进 RS 法计算主观权重 W_2 。由 2.1.2 节计算得 $W_2 = (0.1399:0.1049:0.1405:0.0340:0.0340:0.0690:0.1049:0.1305:0.0992:0.1431)$

(3) 运用博弈论计算组合权重 W^* 。组合权重 W^* 计算结果如表 4 所示。

表 4 组合权重计算结果表

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
W^*	0.0787	0.0385	0.1456	0.1885	0.0807
指标	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
W^*	0.1656	0.0729	0.1229	0.0430	0.0636

3.3.2 改进 G1 - RS - UMT 预测模型

Step 1 单指标未确知测度的计算。根据每个指标的未确知测度函数和表 2,构造测度函数如图 1 所示,用以求得单指标未确知测度。以第一个洞段 GS19 + 590 ~ GS20 + 050 为例,得到其单指标未确知测度矩阵 μ_{1ji} 。

$$(\mu_{1ji})_{10 \times 5} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.12 & 0.88 \\ 0 & 0.25 & 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.38 & 0.62 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.933 & 0.067 \\ 0 & 0 & 0.16 & 0.84 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.077 & 0.923 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.588 & 0.412 & 0 \\ 0.622 & 0.378 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Step 2 多指标综合测度评价矩阵的计算。由公式(15)计算得到 9 个隧洞断面的多指标未确知测度向量,以洞段 GS19 + 590 ~ GS20 + 050 为例,其他洞段同理可得,由于篇幅原因没有罗列, $\mu_{1i} = (0.0396, 0.0699, 0.3460, 0.5052, 0.0393)$ 。

Step 3 置信度识别准则。本案例水工隧洞围岩稳定性的预测等级空间 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}$ 满足 $A_t > A_{t+1} (t = 1, 2, 3, 4)$, 置信度 $\lambda = 0.5$ 。对于第 1 个洞段 GS19 + 590 ~ GS20 + 050 有 $t_c = \min\{0.0396 + 0.0699 + 0.3460 + 0.5052 = 0.9607 > 0.5\} = 4$, 故判定该段围岩稳定性预测等级为 IV 级。同理可以得到其他洞段的等级结果,珠江三角洲水资源配置工程 B4 标段水工隧洞围岩稳定性预测等级见表 5。

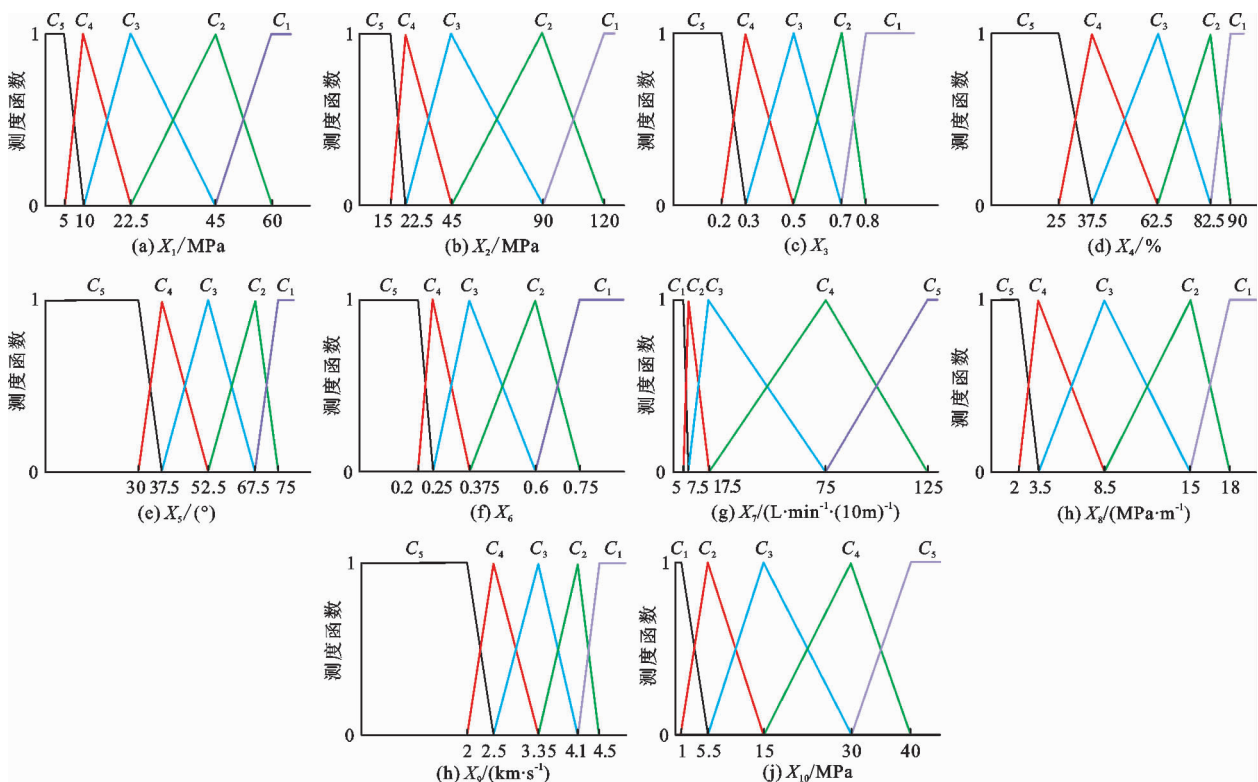


图 1 各指标测度函数

表 5 珠江三角洲水资源配置工程 B4 标段水工隧洞围岩稳定性预测等级

样本 编号	隧洞起止 桩号/m	预测等级					本文 预测	TOPSIS 预测	实际 等级
		I (A ₁)	II (A ₂)	III (A ₃)	IV (A ₄)	V (A ₅)			
1	GS19 + 590 ~ GS20 + 050	0.0396	0.0699	0.3460	0.5052	0.0393	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ
2	GS20 + 050 ~ GS21 + 340	0.2138	0.0893	0.6341	0.0628	0	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ
3	GS21 + 340 ~ GS22 + 226	0.0282	0.2531	0.5612	0.1575	0	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
4	GS22 + 226 ~ GS22 + 553	0.0608	0.0521	0.7724	0.0990	0.0157	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
5	GS22 + 553 ~ GS23 + 788	0.0608	0.0500	0.6880	0.2012	0	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ
6	GS23 + 788 ~ GS24 + 911	0.0537	0.1017	0.6482	0.1964	0	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
7	GS24 + 911 ~ GS26 + 035	0	0.3043	0.5285	0.1236	0.0437	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
8	GS26 + 035 ~ GS26 + 900	0.2108	0.2038	0.4844	0.1009	0	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ
9	GS26 + 900 ~ GS28 + 061	0	0.3439	0.6337	0.0225	0	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

3.4 结果分析

(1)通过计算结果可知该单线输水隧洞除里程范围为 GS19 + 590 ~ GS20 + 050 段围岩等级为Ⅳ级,里程范围为 GS20 + 050 ~ GS21 + 340、GS21 + 340 ~ GS22 + 226、GS22 + 226 ~ GS22 + 553、GS22 + 553 ~ GS23 + 788、GS23 + 788 ~ GS24 + 911、GS24 + 911 ~ GS26 + 035、GS26 + 035 ~ GS26 + 900、GS26 + 900 ~ GS28 + 061 段围岩等级皆为Ⅲ级。与地质资料中的实际等级相比,除 GS19 + 590 ~ GS20 + 050 段以外其他各段围岩预测等级均相同。

(2)由图 2 和表 5 分析可得,改进 G1 - RS - UMT 模型相比于 TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)模型,围岩稳定性等级预测结果与实际等级相符合程度从 66.67% 提高到 88.89%。改进 G1 - RS - UMT 模型为围岩稳定性等级预测提供了一种新方法,可应用于珠江三角洲水资源配置工程的输水隧洞围岩稳定性等级预测问题中。

(3)基于改进 G1 - RS - UMT 模型的预测结果,给出水工隧洞施工及支护方案设计的建议,其中Ⅲ级围岩采用全断面开挖法,炮孔周边间距不大于 50 cm,开挖进尺应不大于 3 m,洞室开挖过程中支护措施如下:①初次支护采用 C15 喷射混凝土,厚 10 cm;②Φ22 注浆锚杆,间距为 2.0 m × 2.0 m;Φ8.0 钢筋网,间距为 15 cm × 15 cm;③二次支护采用 C25 钢筋混凝土,厚度为 20 cm。Ⅳ级围岩采用全断面开挖法,炮孔周边间距不大于 40 cm,开挖进尺应不大于 2 m,洞室开挖过程中支护措施如下:①初次支护采用 C15 喷射混凝土,厚 15 cm;②Φ22 注浆锚杆,间距为 2.0 m × 2.0 m,顶部 180°范围内梅花型

布置;局部采用 20a 型钢格栅拱架;③二次支护采用 C25 钢筋混凝土,厚度为 35 cm。

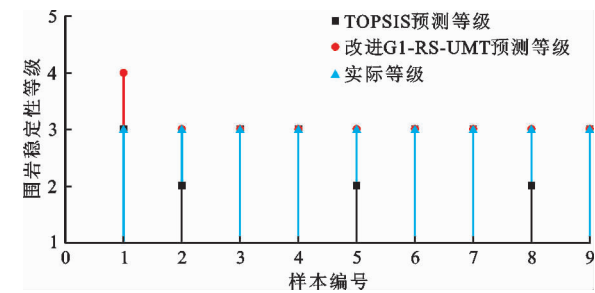


图 2 围岩稳定性等级预测比较分析图

4 结 论

(1)影响水工隧洞围岩稳定性的因素错综复杂,在既有研究和规范的基础上,构建了包含 10 个代表性指标的珠江三角洲水资源配置工程的水工隧洞围岩稳定性预测指标体系。

(2)由于该工程的水工隧洞围岩稳定性预测属于典型的有序分割类问题,且各评价指标信息具有模糊性和不确定性,因此在围岩稳定性等级预测模型中引入 UMT,并提出了改进 G1 - RS - UMT 模型。本模型相比于 TOPSIS 模型其准确度更高,预测结果与实测等级结果相符合程度由 66.67% 提高到 88.89%,验证了该模型预测结果的可靠性。

(3)随着智能设备的普及化,可以将改进 G1 - RS - UMT 模型设计成手机 APP 的形式,实现在勘察设计和施工阶段的水工隧洞围岩稳定性预测和分析,以便快速做出施工及支护方案的改进。

参考文献:

[1] 张玉贤,张继勋,任旭华,等. 基于结构安全的水工隧洞施工仿真系统研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31

- (5):149-156.
- [2] 蒋 晖. 高压水工隧洞衬砌承载结构稳定性分析与评价[D]. 郑州:郑州大学,2019.
- [3] 张国平. 锦屏二级水电站深埋长引水隧洞围岩稳定性分析与研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [4] 李唱唱,侍克斌,姜海波. 深埋高地应力引水隧洞节理围岩稳定性研究[J]. 水资源与水工程学报. 2020,31(2):219-224.
- [5] 李一冬,阮怀宁,朱珍德,等. 基于改进 BP 神经网络的地下工程围岩分类[J]. 人民黄河,2014,36(1):130-133.
- [6] ZHANG Wei, LI Xibing. Stability classification model of mine-lane surrounding rock based on distance discriminant analysis method[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15 (1): 117-120.
- [7] 宫凤强,李夕兵,高 科. 地下工程围岩稳定性分类的突变级数法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2008,39(5):1081-1086.
- [8] LI Chunping, HAO Huibing. Method of Bayes discriminant analysis for classifying minelane surrounding rocks[J]. Journal of the China Coal Society, 2011, 36 (11): 304-307.
- [9] LUO Junhui, MI Decai. The analysis of creep characteristics of the surrounding rock of the carbonaceous rock tunnel based on Singh - Mitchell model[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2018, 108(3): 032033.
- [10] 王克忠,刘耀儒,王玉培,等. 引水隧洞复合支护钢拱架变形特性及围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(2):217-224.
- [11] 王 川,冷先伦,李海轮,等. 节理分布空间变异的地下洞室稳定性概率分析[J]. 岩土力学,2021,42(1):224-232+244.
- [12] 易文豪,王明年,童建军,等. 基于支持向量机的大断面岩质隧道掌子面围岩非均一性判识方法[J]. 中国铁道科学,2021,42(05):112-122.
- [13] 闫长斌,路新景. 基于改进的距离判别分析法的南水北调西线工程 TBM 施工围岩分级[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(7):1446-1451.
- [14] ZHOU Zhiyong, KIZIL M, CHEN Zhongwei, et al. A new approach for selecting best development face ventilation mode based on G1-coefficient of variation method [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(10): 2462-2471.
- [15] 朱海燕. 基于粗糙集理论的指标权重确定算法设计[J]. 淮海工学院学报(自然科学版),2018,27(4):6-9.
- [16] SUN Lingjie, LIU Yingyi, ZHANG Boyang, et al. An integrated decision-making model for transformer condition assessment using game theory and modified evidence combination extended by D numbers[J]. Energies, 2016, 9 (9): 697.
- [17] 穆成林,黄润秋,裴向军,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(6):1057-1063.
- [18] 贡 力,祁英弟,王 婧,等. PCA-PNN 模型在铁路隧道围岩安全性预测评价中的应用[J]. 铁道科学与工程学报. 2020,17(4):940-946.
- [19] 刘芙荣,熊 博,黄向春. 岩体结构面产状与地下建筑物轴线关系初探[J]. 水科学与工程学报,2020,(5):19-21.
- [20] 孙秋霞,孙一心,孙 璐. 基于云物元模型的汽车客运站绿色等级评价[J]. 干旱区资源与环境. 2018,32(2):81-86.
- [21] 谭智天. 中部引黄工程引水隧洞围岩稳定及支护结构分析研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2019.
- [22] 殷明伦. 隧洞岩体质量评价及围岩稳定性的尺度效应研究[D]. 北京:中国矿业大学,2019.
- [23] 祁英弟,靳春玲,贡 力. 基于 ANP-KL-TOPSIS 法的铁路隧道围岩安全性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2019,30(4):54-60.