

吴育谦, 宋明, 刘尚各, 等. 基于 MTS-Choquet 群决策法的隧道施工方法优化研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(6): 58-66.

WU Yuqian, SONG Ming, LIU Shangge, et al. MTS-Choquet group decision-making method-based study on optimization of tunnel construction method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(6): 58-66.

基于 MTS-Choquet 群决策法的隧道施工方法优化研究

吴育谦¹, 宋明², 刘尚各², 谢全敏³

(1. 广东省南粤交通怀阳高速公路管理中心, 广东 广州 510100; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 3. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 目前隧道施工方法选择主要以经验为主, 以相应数值模拟结果分析为辅, 其优化决策理论研究方面比较滞后。为此, 基于马田系统(MTS)、Choquet 模糊积分、群决策和信噪比等基本理论, 建立了隧道施工方法优选决策模型。该模型以施工环境等 6 个指标构成评价指标体系, 依托区间数构建各专家 h 决策矩阵及异常工法区间矩阵, 并聚合群决策矩阵和相关规范化, 然后基于标准差、方差、马氏距离理论求解各子属性集 Y_q 下异常工法区间矩阵间的马氏距离矩阵, 进而由望大特性信噪比求得各属性模糊测度值, 最后分别按工法各属性、各工法计算 Choquet 模糊积分综合评价值并排序, 确定最优隧道施工方法。将该模型应用于怀阳高速公路马咀隧道 IV 级围岩, 对 CD(I_1)、CRD(I_2)、双侧壁导坑开挖(I_3) 三种工法进行了评判, 得到了其优劣排序为 $I_3 > I_2 > I_1$, 即该隧道 IV 级围岩最优施工方法为双侧壁导坑法, 这与目前经验认知结果一致。

关键词: 隧道工程; 施工方法优选群决策; 马田系统; 区间 Choquet 模糊积分; 望大特性区间信噪比; 马氏距离

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.06.007

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)06-0058-09



MTS-Choquet group decision-making method-based study on optimization of tunnel construction method

WU Yuqian¹, SONG Ming², LIU Shangge², XIE Quanmin³

(1. Huaiyang Expressway Management Center of Guangdong Nanyue Transportation Investment & Construction Co., Ltd., Guangzhou 510100, Guangdong, China; 2. CCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, Hubei, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Based on the basic theories, i. e. Mahalanobis-Taguchi System (MTS), Martin System, Choquet fuzzy integral, group decision making, signal-noise ratio, etc., a decision-making model for optimizing tunnel construction method is established. For

收稿日期: 2020-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779197)

作者简介: 吴育谦(1972—), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事土木交通工程施工与管理工作。E-mail: 2083649885@qq.com

通信作者: 谢全敏(1988—), 男, 教授, 博士, 主要从事隧道及地下工程方面教学与研究。E-mail: xiequanmin@126.com

which six indexes, such as construction environment, etc. are taken for building up the evaluation index system, and then the h decision matrix of each expert and the interval matrix of unconventional construction method are built up in accordance with the relevant interval number, while the group decision matrix and the related normalization are aggregated as well. Afterwards, the Mahalanobis distance matrix among the interval matrices of unconventional construction methods under each sub-attribute set Y_q are solved on the basis of standard deviation, variance and Mahalanobis distance theory. Furthermore, the fuzzy measure values of all the attributes are obtained with the relevant larger-the-better characteristic signal-noise ratio. Finally, the optimal tunnel construction method is determined in accordance with all the attributes of all the construction methods, the calculated comprehensive evaluation values of Choquet fuzzy integral of all the construction methods and their sequence orders. The model is applied to the grade IV surrounding rock of Mazui Tunnel of Huaiyang Expressway for evaluating the three construction methods, i. e. CD (I_1), CRD (I_2) and double side-wall heading excavation, from which it is obtained that the ranking of their merit and defect is $I_3 > I_2 > I_1$, that is to say, the double side-wall heading excavation method is the optimal construction method for the construction of the grade IV surrounding rock of the tunnel, which is consistent with the empirical cognitive result at present.

Keywords: tunnel engineering; group decision-making of construction method optimization; Martin System (MTS); interval Choquet fuzzy integral; larger-the-better characteristic signal-noise ratio; Mahalanobis distance

0 引言

在隧道建设过程中隧道施工方法的选择是关键一环,如果选择不当,一方面会造成隧道施工风险增加,另一方面可能会造成成本偏高或是工期偏长。因此,合理的选择隧道施工方法具有重要的实际意义。

目前已有学者对隧道施工方法的优化展开了一系列的研究:许崇帮等^[1]依托贵州马林隧道,利用有限元软件,从位移、应力角度分析了双侧壁导坑法、CRD法、三台阶法、CD法变形、受力特征,得出双侧壁导坑开挖法更优的结论;丁保军等^[2]为研究地面沉降与施工参数之间的关系,提出一种基于DBN的盾构隧道施工参数优化模型,确定了各施工参数的最优设定区间;李跃强^[3]利用FLAC^{3D}软件对浅埋偏压大断面隧道洞口段开挖顺序进行了研究,得出加强超前支护,采用分步开挖工法,并先开挖靠近边坡坡面一侧的结论;朱苦竹等^[4]利用FLAC^{3D}软件,研究了大跨度隧道浅埋软岩段的施工最优方法;王薇等^[5]以某城市地下公路浅埋暗挖隧道为研究对象,采用有限元方法对CRD法及中隔壁台阶法进行三维动态开挖数值模拟,并比较两种工法在施工安全、质量、进度及造价方面的优劣势,建议工程采用CD法进行施工;李浩等^[6]利用因次分析法、制变量法得到导坑形状和导坑开挖位置数据,并立了有限元分析程序,得到采用双侧壁导坑法施工V级围岩二车道隧道拱顶位移最小的情况数据;李波等^[7]采用数值模拟优化了CD法和三台阶七步开挖法的循环进尺参数并与现场实测数据进行对比,验证模型可靠性;张英才等^[8]基于有限元理论的实际施工过程仿真计算,

得出合理的超大断面黄土隧道开挖工法;王凯^[9]通过相关调研和技术等方面指标的比较,确定了不同结构形式地铁站适用的工法;周艺等^[10]采取现场试验与数值模拟相结合的方法,分析了7种不同工法下的洞周变形等3种指标特征变形、受力规律,得到了最优的工法;郭文明等^[11-12]基于有限元数值模拟方法及多目标优化层次分析法,兼顾经济性指标,得出最优工法。

纵观已有的研究成果可知,目前隧道施工方法优化的研究主要是通过数值模拟,辅以现场实测数据比对,综合考虑施工经济性、技术难度等方面,从而确定适用某个项目的隧道施工方法。隧道施工方法选择以经验判断为主,缺乏理论支持,特别是评价模型影响因素指标很多,归纳起来有定量指标和定性指标两类,其中定量指标,不受人为主观判断影响,而定性指标受到人为主观判断的影响,解决评价中人为主观因素影响的相关理论研究滞后。

马田系统(MTS)包括马氏距离、信噪比、马氏空间、模糊积分、群决策、特征选择、阈值和数据环境等基本理论。MTS是基于数据分析的模式识别技术,可消除主观因素的影响,数据处理不需做假设^[13],目前被应用在故障检测^[14-15]、风险预测^[16-18]和服务评价^[19-22]等一些领域,在隧道工程领域还未见应用报道。为此,本文基于马田系统理论特点,提出了基于MTS-Choquet群决策法的隧道施工方法,并应用于怀阳高速公路马咀隧道IV级围岩施工方法优选。该方法可较好地消除主观因素的影响,为隧道施工方法优化提供了一种理论方法。

1 优化模型

1.1 基本理论

首先, 设工法集 $I = \{ I_t \}, t=1, 2, 3, \dots, m$, 其中, I_t 表示第 t 个工法。

第二, 设专家集 $H = \{ h_l \}, l=1, 2, 3, \dots, a$, 其中, h_l 表示决策过程中第 l 位专家。

第三, 设属性集 $X = \{ x_p \}, p=1, 2, 3, \dots, b$, 其中, x_p 表示对应工法 I_t 下的第 p 个属性指标。子属性集 $Y_q = \{ Y_1, Y_2, \dots, Y_{2^p} \}$ 为 $P(X)$ 上的 2^p 个子集合, 其中 $q \in \{ 1, 2, \dots, 2^p \}$ 。

第四, 区间数权重向量表示为 $D(\otimes) = \{ (d(\otimes)^{(h)}, d^\circ(\otimes)^{(h)}) \}$ 。其中 $d(\otimes)^{(h)}$ 表示分配给专家 h 的权重, $d^\circ(\otimes)^{(h)}$ 表示 $d(\otimes)^{(h)}$ 的灰度, 解释为权重的可靠程度。

第五, 区间数矩阵 $R(\otimes)^{(h)} = [r_{ij}^{(h)}]_{m \times p}$, 其中, $r_{ij}^{(h)}$ 是专家 h 给出的工法 I_t 的属性 x_j 的区间属性值, 由上界 $r_{ij}^{L(h)}$ 和下界 $r_{ij}^{U(h)}$ 组成。 $\tilde{R}(\otimes) = [[r_{ij}^L, r_{ij}^U]]_{m \times p}$ 表示聚合后的专家群区间数矩阵, r_{ij}^L 和 r_{ij}^U 分别表示聚合后的上、下界。

第六, 属性指标分经济型和效益型两种指标, 对经济型指标要规范化处理, 其中, $[H]$ 是规范化的专家群决策矩阵, h_{ij}^L 和 h_{ij}^U 分别是规范后区间属性值上、下、界, 解释为专家群给出的工法 I_t 的属性 x_j 的规范化的区间属性值。

第七, $O(\otimes) = [[O_{kj}^L, O_{kj}^U]]_{n \times p}$ 表示为异常工法区间矩阵, 解释为专家群决策矩阵中异常样本评判数据所构成的矩阵。其中, O_{kj}^L 和 O_{kj}^U 表示在工法 I_t 下的属性 x_j 的区间属性值的上、下界, 此处, n 取为 2, k 可取 1 或 2。规范化后的矩阵为 $\tilde{O}(\otimes) = [z_{kj}^L, z_{kj}^U]$, 其中, \bar{X}_j 和 S_j^2 分别为属性 x_j 下的均值和标准差, V 为相关系数矩阵。

第八, $[D]$ 为规范化异常工法马氏距离区间矩阵。 $[MD_{kq}^L, MD_{kq}^U]$ 为第 k 个异常工法数据之间的马氏距离, 上、下界分别为对应计算得到的最小值和最大值, d_{kq}^L, d_{kq}^U 分母分别取对应异常 k 工法样本不同子属性集的 MD_{kq}^L 和 MD_{kq}^U 的最小值。其中, $Z_{kq}^L = [[z_{kj}^L | j \in Y_q]]$ 和 $Z_{kq}^U = [[z_{kj}^U | j \in Y_q]]$ 。 $(Z_{kq}^L)^T$ 和 $(Z_{kq}^U)^T$ 分别是 Z_{kq}^L, Z_{kq}^U 的转置矩阵。 V_q 是基于子属性集 Y_q 的相关系数矩阵, V_q^{-1} 是 V_q 的逆矩阵。

第九, g_{Y_q} 是基于子属性集 Y_q 的模糊测度。 η_{Y_q} 和 η_X 分别是基于 Y_q 和 X 的望大特性信噪比, η_{Y_q} 值越

大, 表示某属性在决策过程中发挥作用越大。 $\int \tilde{f}_i dg$ 为工法 I_t 区间 Choquet 模糊积分综合评价。

第十, 跟据收回专家问卷数, 结合各专家的工程经验、知识阅历、决策水平等, 采用 AHP 分析法可得到专家 h 灰色模糊权重向量评判细则如表 1 所列。

表 1 专家 h 区间数权重向量评判细则
Table 1 Judgment evaluation rules for grey fuzzy weight vectors of expert

一级指标 e	二级指标 f	一级权重 w_{he}	二级权重 w_{hef}	灰度
专业职称	高级工程师(50%)	0.241 7	0.317 4	[0, 0.2]
	工程师(20%)		0.278 6	(0.2, 0.4)
	助理工程师(20%)		0.225 9	(0.4, 0.5)
	其他(10%)		0.178 1	(0.5, 1.0)
实践时间	5 a 以下(10%)	0.268 5	0.138 9	(0.7, 1.0)
	5~15 a(20%)		0.221 5	(0.3, 0.7)
	15~30 a(30%)		0.305 2	(0.1, 0.3)
	30 a 以上(40%)		0.334 4	[0, 0.1]
专业领域	隧道工程(50%)	0.257 3	0.293 2	[0, 0.1]
	边坡工程(20%)		0.230 5	(0.1, 0.3)
	结构工程(20%)		0.172 4	(0.3, 0.5)
	市政工程(5%)		0.169 9	(0.5, 0.8)
	其他(5%)		0.134 0	(0.8, 1.0)
学历层次	研究生(30%)	0.232 5	0.240 1	[0, 0.2]
	本科(50%)		0.214 2	(0.2, 0.3)
	大专(10%)		0.205 1	(0.3, 0.5)
	中专(5%)		0.185 6	(0.5, 0.6)
	其他(5%)		0.155 0	(0.6, 1.0)

注: w_{he} 和 w_{hef} 分别为一级和二级属性指标权重值; e 代表一级指标, 一级指标数有 4 个, 即 e 取 1, 2, 3, 4; f 代表每个一级指标对应的二级指标, 每个一级指标对应的二级指标数 5 个, 即 f 取 1, 2, 3, 4, 5

1.2 指标评价体系

在隧道围岩等级确定以后, 影响隧道施工方法的因素主要有造价、环境和技术三方面。根据目前隧道施工经验及研究成果, 本文选取施工环境等 6 个指标构成评价体系, 并构建评价标准如表 2 所列。

1.3 优化模型建立

1.3.1 确定专家 h 区间数权重向量 $D(\otimes)$

依据表 1, 各专家 h 的权重向量计算为

$$D(\otimes) = \{ (d(\otimes)^{(h)}, d^\circ(\otimes)^{(h)}) \} = \{ (d(\otimes)^{(1)}, d^\circ(\otimes)^{(1)}), (d(\otimes)^{(2)}, d^\circ(\otimes)^{(2)}), \dots, (d(\otimes)^{(l)}, d^\circ(\otimes)^{(l)}) \} \quad (1)$$

其中

$$d(\otimes)^{(h)} = \sum_{i=1}^e w_{he} w_{hef} / \sum_{h=1}^l \sum_{i=1}^e w_{he} w_{hef}$$

$$d^\circ(\otimes)^{(h)} = \sum_{i=1}^e w_{he} d^\circ(\otimes)^{(hf)}$$

表 2 评价指标体系及评判标准
Table 2 Evaluation index system and evaluation criteria

一级指标	二级指标	评价打分细则
施工环境 (x ₁)	拱部沉降 围岩扰动 地表沉降	小(80~100) , 较小(60~80) , 一般(40~60) , 较大(20~40) , 大(0~20)
工程造价 (x ₂)	建筑材料费用 机械费用 支护拆除费用	高(0~30) , 较高(30~60) , 较低(60~80) , 低(80~100)
施工技术难易程度 (x ₃)	适用大埋深 适用偏压段 钢支撑的安装 临时支护拆除 工序转换难易	容易(70~100) , 较易(40~70) , 一般, 困难(20~40) , 极其困难(0~20)
	材料重复利用	好(80~100) , 较好(60~80) , 一般(40~60) , 差(0~40)
开挖进尺 (x ₄)	进尺大小	小(0~20) , 一般(20~60) , 较大(60~80) , 大(80~100)
	进尺循环周期	短(80~100) , 较短(60~80) , 较长(40~60) , 长(0~40)
适应性 (x ₅)	对大变形适应性	好(80~100) , 较好(60~80) , 一般(40~60) , 差(0~40)
	对突泥突水适应性	好(80~100) , 较好(60~80) , 一般(40~60) , 差(0~40)
	对岩爆适应性	好(80~100) , 较好(60~80) , 一般(40~60) , 差(0~40)
施工机械化水平 (x ₆)	人工机械占比 机械集约化 机械运转效率	好(90~100) , 较好(70~90) , 一般(50~70) 较差(30~50) , 差(10~30) , 极差(0~10)

$$d^{(h)} \geq 0, \sum_{h=1}^l d^{(h)} = 1, 0 \leq d^{\circ}(\otimes)^{(h)} \leq 1$$

1.3.2 确定专家 h 区间数矩阵 R(⊗)

参与决策的相关专家依据表 2 评价指标体系及评判标准给出初始区间数决策矩阵如下

$$R(\otimes)^{(h)} = (r_{ij}^{(h)})_{m \times p} = [(r_{ij}^{L(h)}, r_{ij}^{U(h)})]_{m \times p} \quad (2)$$

1.3.3 确定专家群区间数矩阵 $\tilde{R}(\otimes)$ 并规范化

将各专家 h 的区间数矩阵进行聚合, 即

$$\tilde{R}(\otimes) = [(r_{ij}^L, r_{ij}^U)]_{m \times p} \quad (3)$$

其中

$$r_{ij}^L = \sum_{h=1}^l d^{(h)} r_{ij}^{L(h)}$$

$$r_{ij}^U = \frac{\sum_{h=1}^l (d^{\circ}(\otimes)^{(h)} + r_{ij}^{U(h)})}{l}$$

区分效益、成本型指标进行规范化, 则有规范化矩阵 [H] 为

$$[H] = \begin{bmatrix} [h_{11}^L, h_{11}^U] & [h_{12}^L, h_{12}^U] & \cdots & [h_{1j}^L, h_{1j}^U] \\ [h_{21}^L, h_{21}^U] & [h_{22}^L, h_{22}^U] & \cdots & [h_{2j}^L, h_{2j}^U] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [h_{l1}^L, h_{l1}^U] & [h_{l2}^L, h_{l2}^U] & \cdots & [h_{lj}^L, h_{lj}^U] \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{ij}^L = \frac{r_{ij}^L}{\sum_{t=1}^m r_{ij}^U}, h_{ij}^U = \frac{r_{ij}^U}{\sum_{t=1}^m r_{ij}^L}, x_j \text{ 为效益型指标} \\ h_{ij}^L = \frac{1}{\sum_{t=1}^m \frac{1}{r_{ij}^L}}, h_{ij}^U = \frac{r_{ij}^U}{\sum_{t=1}^m \frac{1}{r_{ij}^L}}, x_j \text{ 为成本型指标} \end{array} \right.$$

1.3.4 确定异常工法区间矩阵 O(⊗)

由规范化专家群区间数矩阵中异常评判数据构成异常工法区间矩阵如下

$$O(\otimes) = [(o_{kj}^L, o_{kj}^U)]_{n \times p} \quad (5)$$

式中, n 取为 2; k 可取 1, 2。

当指标是效益型时, 有

$$\left\{ \begin{array}{l} [o_{1j}^L, o_{1j}^U] = [\max_k r_{kj}^L, \max_k r_{kj}^U] \\ [o_{2j}^L, o_{2j}^U] = [\min_k r_{kj}^L, \min_k r_{kj}^U] \end{array} \right. \quad (6)$$

当指标是成本型时, 有

$$\left\{ \begin{array}{l} [o_{1j}^L, o_{1j}^U] = [\min_k r_{kj}^L, \min_k r_{kj}^U] \\ [o_{2j}^L, o_{2j}^U] = [\max_k r_{kj}^L, \max_k r_{kj}^U] \end{array} \right. \quad (7)$$

1.3.5 确定标准化异常工法区间矩阵 $\tilde{O}(\otimes)$

结合均值、标准差对式 (5) 的结果, 按照式 (6) 进行规范, 则

$$\tilde{O}(\otimes) = [z_{kj}^L, z_{kj}^U] = \left[\frac{O_{kj}^L - \bar{X}_j}{S_j}, \frac{O_{kj}^U - \bar{X}_j}{S_j} \right] \quad (8)$$

其中

$$\bar{X}_j = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (r_{ij}^U + r_{ij}^L)$$

$$S_j^2 = \frac{1}{3m} \sum_{i=1}^m [(r_{ij}^U)^2 + r_{ij}^U r_{ij}^L + (r_{ij}^L)^2] - \frac{1}{4m^2} \left[\sum_{i=1}^m (r_{ij}^L + r_{ij}^U) \right]^2$$

1.3.6 确定相关系数矩阵 V

对专家群区间数矩阵进行计算, 得到相关系数矩阵如下

$$V = [V_{ij}]_{p \times p}, \quad i, j = 1, 2, \dots, p \quad (9)$$

其中

$$V_{ij} = S_{ij}/S_i S_j$$

$$S_{ij} = \frac{1}{4m} \sum_{i=1}^m (r_{ii}^L + r_{ii}^U) (r_{ij}^L + r_{ij}^U) -$$

$$\frac{1}{4m^2} \left[\sum_{i=1}^m (r_{ii}^L + r_{ii}^U) \right] \left[\sum_{i=1}^m (r_{ij}^L + r_{ij}^U) \right]$$

$$S_j^2 = \frac{1}{3m} \sum_{i=1}^m [(r_{ij}^U)^2 + r_{ij}^U r_{ij}^L + (r_{ij}^L)^2] - \frac{1}{4m^2} \left[\sum_{i=1}^m (r_{ij}^L + r_{ij}^U) \right]^2$$

1.3.7 确定规范化异常工法马氏距离区间矩阵 [D]

对子属性集 Y_q 进行计算求解, 得到马氏距离区间矩阵为

$$[D] = \begin{bmatrix} [d_{11}^L, d_{11}^U] & [d_{12}^L, d_{12}^U] & \dots & [d_{1q}^L, d_{1q}^U] \\ [d_{k1}^L, d_{k1}^U] & [d_{k2}^L, d_{k2}^U] & \dots & [d_{kq}^L, d_{kq}^U] \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$d_{kq}^L = \frac{MD_{kq}^L}{\min_k \min_q (MD_{kq}^L, MD_{kq}^U)}$$

$$d_{kq}^U = \frac{MD_{kq}^U}{\min_k \min_q (MD_{kq}^L, MD_{kq}^U)}$$

$$[MD_{kq}^L, MD_{kq}^U] =$$

$$\min/\max \left[\sqrt{\frac{Z_{kq}^L V_q^{-1} (Z_{kq}^L)^T}{|Y_q|}}, \sqrt{\frac{Z_{kq}^U V_q^{-1} (Z_{kq}^U)^T}{|Y_q|}} \right]$$

1.3.8 确定各工法属性模糊测度 g_{Y_q}

结合望大特性区间信噪比值, 求得各工法的属性模糊度如下

$$g_{Y_q} = \frac{\eta_{Y_q}}{\eta_X}, \quad Y_q \in X, \quad q = 1, 2, \dots, 2^p \quad (11)$$

其中

$$\eta_{Y_q} = -\log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{d_{kq}^U d_{kq}^L} \right]$$

$$\eta_X = -\log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{d_{kX}^U d_{kX}^L} \right]$$

1.3.9 确定各工法区间 Choquet 模糊积分综合评价

值 $\int f_i dg$

规范化群决策矩阵 [H] 工法 I_i 中任意两区间属性值计算如下

$$\rho(\bar{f} [h_{ij}^L, h_{ij}^U]) \geq \bar{f} [h_{ly}^L, h_{ly}^U]) =$$

$$\max \left\{ 1 - \max \left(\frac{h_{ly}^U - h_{ij}^L}{h_{ij}^U - h_{ij}^L - h_{ly}^U + h_{ly}^L} \rho \right), \rho \right\} \quad (12)$$

由式 (12) 计算所得值越大, 则两属性间大小关系越确定。

若工法 I_i 中各区间属性值大小关系为

$$\bar{f}(x_w) \leq \bar{f}(x_y) \leq \dots \leq \bar{f}(x_z), \quad x_w, x_y, x_z \in X$$

则有

$$\int \bar{f}_i dg = [\int f_i^L dg, \int f_i^U dg,] = [f^L(x_w)(g_X - g_{Y_{q_w}}) + f^L(x_y)(g_{Y_{q_w}} - g_{Y_{q_y}}) + \dots + f^L(x_z)g_z, f^U(x_w)(g_X - g_{Y_{q_w}}) + f^U(x_y)(g_{Y_{q_w}} - g_{Y_{q_y}}) + \dots + f^U(x_z)g_z] \quad (13)$$

其中

$$x_w \in X, x_w \notin Y_{q_w}, X \supseteq Y_{q_w}$$

$$x_y \in Y_{q_w}, x_y \notin Y_{q_y}, Y_{q_w} \supseteq Y_{q_y}$$

1.3.10 确定最优工法 I_i

对任意两工法 I_a 、 I_b 的区间 Choquet 积分综合评价进行排序如下

$$\rho(\int \bar{f}_a dg \geq \int \bar{f}_b dg) =$$

$$\max \left\{ 1 - \max \left(\frac{\int f_b^U dg - \int f_a^L dg}{\int f_a^U dg - \int f_a^L dg - \int f_b^U dg - \int f_b^L dg} \rho \right), \rho \right\} \quad (14)$$

依据式 (14) 排序结果, 最大值即为最优工法。

2 应用研究

2.1 工程概况

怀阳高速公路马咀隧道左线起讫桩号为 ZK7+990—ZK9+646, 长度为 1 656 m; 右线起讫桩号为 K8+020—K9+673, 长度为 1 653 m。图 1 为马咀隧道工程典型平面布置图, 隧道穿过丘陵地貌区, 地形起伏大, 受郴州-怀集断裂带影响, 围岩主要由全风化砂岩—中风化砂岩组成, 以 IV 级围岩为主; 在长期的地质构造及风化作用下, 节理裂隙发育, 岩体较破碎, 地下水丰富, 工程地质水文条件较差, 这是马咀隧道施工难点所在, 在施工过程中易发生大变形、坍

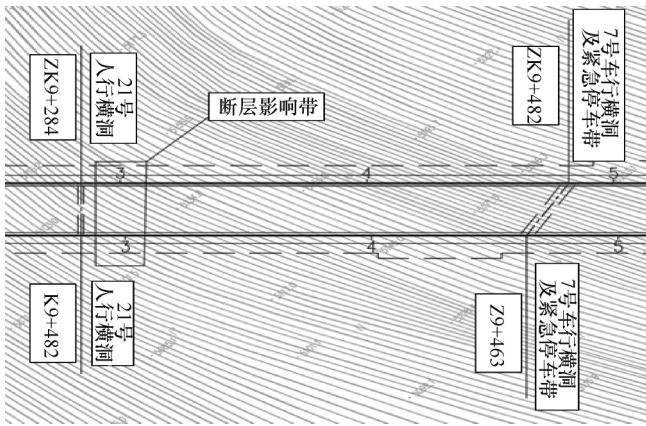


图1 马咀隧道工程典型平面布置

Fig. 1 The typical plane layout chart of Mazui tunnel project

塌、冒顶、掉块和涌水等安全问题。

2.2 工法及属性指标

对于马咀隧道IV级围岩开挖,可采用的工法主要有CD法、CRD法和双侧壁导坑开挖法。各工法参数选取如下。

2.2.1 工法(I_i)

I₁: CD法,左右各两台阶开挖,采用中隔壁支护,超前小导管拱部注浆支护,循环进尺取为0.7 m。

I₂: CRD法,在CD法每侧上台阶开挖后的基础上加设钢筋混凝土临时仰拱。

I₃: 双侧壁导坑开挖法,左右两侧导坑先后依次

超前开挖,中部分上、下两台阶开挖,拱部超前小导管注浆补强,循环进尺取为0.5 m。

2.2.2 属性(x_j)

选取施工环境(x₁)、工程造价(x₂)、施工技术难易程度(x₃)、开挖进尺(x₄)、适应性(x₅)、施工机械化水平(x₆)构成属性集X。

根据怀阳高速公路马咀隧道施工设计资料,可初步获得马咀隧道各工法的主要定量指标值如表3所列。

表3 马咀隧道各工法的主要定量指标值

Table 3 The main quantitative index value of each construction method of Mazui tunnel

工法	工程造价 /万元·m ⁻¹	开挖进尺 /m	每循环 周期/h
CD法	9.5	0.7	10
CRD法	11.2	0.7	12
双侧壁导坑开挖法	12.6	0.5	13

2.2.3 专家(h_i)

邀请五位隧道方面相关专家构成专家集H = {h₁, h₂, h₃, h₄, h₅}。

2.3 优化计算

优化计算步骤如下:

步骤1,结合相关专家实际情况,依据式(1)、表1给出各专家h区间数权重向量(见表4)。

步骤2,各专家h依据表2给出如式(2)形式的

表4 各专家h规范化初始区间数矩阵

Table 4 Each expert h normalizes the initial interval number matrix

I _i	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆
$h_1(D(\otimes)) = (0.24, 0.10)$						
I ₁	(70, 75)	(895, 1000)	(63, 78)	(120, 150)	(76, 80)	(20, 30)
I ₂	(74, 79)	(915, 1056)	(53, 60)	(70, 80)	(38, 55)	(15, 31)
I ₃	(82, 88)	(900, 1100)	(25, 45)	(30, 40)	(41, 48)	(10, 18)
$h_2(D(\otimes)) = (0.19, 0.25)$						
I ₁	(73, 79)	(1080, 1150)	(0.6, 0.3)	(85, 100)	(65, 75)	(17, 29)
I ₂	(60, 68)	(1000, 1100)	(0.6, 0.1)	(65, 90)	(34, 58)	(19, 35)
I ₃	(60, 66)	(1200, 1500)	(0.6, 0.3)	(42, 60)	(31, 50)	(8, 21)
$h_3(D(\otimes)) = (0.22, 0.15)$						
I ₁	(83, 88)	(900, 930)	(52, 65)	(70, 65)	(71, 80)	(18, 29)
I ₂	(71, 80)	(850, 1150)	(35, 50)	(62, 68)	(29, 39)	(18, 20)
I ₃	(65, 70)	(1100, 1200)	(45, 48)	(50, 60)	(21, 38)	(10, 19)
$h_4(D(\otimes)) = (0.19, 0.27)$						
I ₁	(68, 75)	(750, 790)	(68, 75)	(40, 65)	(69, 75)	(32, 45)
I ₂	(55, 62)	(850, 1100)	(53, 60)	(76, 95)	(19, 38)	(22, 33)
I ₃	(50, 55)	(800, 900)	(34, 48)	(30, 50)	(23, 43)	(8, 17)
$h_5(D(\otimes)) = (0.15, 0.41)$						
I ₁	(74, 80)	(1000, 1080)	(55, 68)	(50, 75)	(73, 82)	(29, 33)
I ₂	(75, 79)	(1100, 1200)	(43, 65)	(58, 65)	(30, 41)	(19, 22)
I ₃	(65, 70)	(1000, 1050)	(33, 55)	(41, 70)	(13, 34)	(11, 21)

初始区间数矩阵, 并按照式 (3) 聚合成群决策矩阵并进行规范化, 结果如表 5 所列。

步骤 3, 依据式 (5) 确定异常工法区间数矩阵, 并按式 (8) 进行规范化, 结果如表 6 所列。

步骤 4, 按照式 (9) 确定相关系数矩阵, 按照式 (10) 确定规范化的异常工法区间数矩阵间的马氏距离, 结果如表 7 所列。

步骤 5, 按照式 (11) 计算各工法属性模糊测度值, 计算结果如表 7 所列。

步骤 6, 按照式 (12) 确定各工法区间 Choquet 模糊积分综合评价值, 依式 (14) 进行排序, 并确定最优工法。由式 (12) 得到的各工法区间 Choquet 模糊积分综合评价值分别为 $I_1: \int \bar{f}_1 dg = [0.326, 0.495]$ $I_2: \int \bar{f}_2 dg = [0.211, 0.383]$ $I_3: \int \bar{f}_3 dg = [0.201, 0.359]$ 。进而由式 (14) 对任意两工法的区间 Choquet 模糊积分综合评价值进行比较, 得到 $I_3 > I_2 > I_1$ 的排序结果, 由此得出怀阳高速公路马咀隧道 IV 级围岩最优工法为 I_3 工法, 即双侧壁导坑开挖法更适用该段的实际情况。

表 5 规范化群决策矩阵

Table 5 Group decision matrix

k	I_1	I_2	I_3
k_1	(0.33, 0.39)	(0.30, 0.36)	(0.29, 0.34)
k_2	(0.32, 0.42)	(0.27, 0.39)	(0.27, 0.36)
k_3	(0.33, 0.51)	(0.25, 0.41)	(0.20, 0.36)
k_4	(0.35, 0.55)	(0.25, 0.40)	(0.18, 0.34)
k_5	(0.42, 0.62)	(0.18, 0.37)	(0.16, 0.34)
k_6	(0.28, 0.67)	(0.22, 0.57)	(0.11, 0.39)

表 6 异常工法区间数矩阵

Table 6 The exception method matrix

	k_1	(0.33, 0.39)	(0.29, 0.34)
初始数据	k_2	(0.27, 0.36)	(0.32, 0.42)
	k_3	(0.33, 0.51)	(0.20, 0.36)
	k_4	(0.35, 0.55)	(0.18, 0.34)
	k_5	(0.42, 0.62)	(0.16, 0.34)
	k_6	(0.28, 0.67)	(0.11, 0.39)
	规范化数据	k_1	(-0.34, 2.23)
k_2		(-1.90, 0.64)	(-0.49, 2.14)
k_3		(-0.18, 2.21)	(-1.89, 0.17)
k_4		(0.08, 2.18)	(-1.77, -0.06)
k_5		(0.54, 2.04)	(-1.40, -0.07)
k_6		(-0.73, 2.20)	(-1.93, 0.12)

表 7 规范化马氏距离及模糊测度值

Table 7 Normalized Mahalanobis distance and fuzzy measure values

q	Y_q	$MD_{I_q}^L$	$MD_{I_q}^U$	g_{Y_q}	q	Y_q	MD_{2q}^L	MD_{2q}^U	g_{Y_q}
1	{0}	0	0	0.00	33	{2, 3, 4}	77.81	198.05	0.24
2	{1}	1.98	3.01	0.06	34	{2, 3, 5}	7 783 641.15	240 727 143.09	0.97
3	{2}	13.02	1.00	0.08	35	{2, 3, 6}	8 767 274.50	227 703 731.58	0.96
4	{3}	1.00	2.73	0.04	36	{2, 4, 5}	6 443 304.12	273 921 230.71	0.97
5	{4}	3.26	19.55	0.09	37	{2, 4, 6}	7 361 931.19	293 214 014.09	0.97
6	{5}	2.47	2.12	0.03	38	{2, 5, 6}	6 815 032.66	242 102 888.67	0.95
7	{6}	4.48	3.08	0.05	39	{3, 4, 5}	6 656 888.70	85 311 168.80	0.93
8	{1, 2}	301.23	115.58	0.31	40	{3, 4, 6}	10 907 803.73	139 788 649.98	0.95
9	{1, 3}	15.50	58.61	0.19	41	{3, 5, 6}	3 502 376.45	44 884 606.24	0.76
10	{1, 4}	98.84	23.53	0.23	42	{4, 5, 6}	39 672 399.14	35 172 147.42	0.93
11	{1, 5}	18.85	4.56	0.14	43	{1, 2, 3, 4}	1 664 498.89	329 664 797.34	0.94
12	{1, 6}	7.31	3.10	0.10	44	{1, 2, 3, 5}	23 464 016.14	221 794 403.80	1.00
13	{2, 3}	135.85	19.59	0.24	45	{1, 2, 3, 6}	8 201 013.76	217 866 051.32	0.97
14	{2, 4}	273.52	29.47	0.27	46	{1, 2, 4, 5}	13 383 292.94	241 672 411.31	0.97
15	{2, 5}	73.46	5.54	0.18	47	{1, 2, 4, 6}	6 204 785.92	250 849 361.41	0.96
16	{2, 6}	21.85	5.52	0.15	48	{1, 2, 5, 6}	12 115 669.48	218 141 192.87	0.96
17	{3, 4}	35.63	7.61	0.17	49	{1, 3, 4, 5}	27 877 975.14	78 128 795.63	0.96
18	{3, 5}	11.61	3.18	0.11	50	{1, 3, 4, 6}	9 316 149.37	137 168 518.81	0.97
19	{3, 6}	11.25	3.14	0.09	51	{1, 3, 5, 6}	6 870 616.37	364 924 591.61	0.99
20	{4, 5}	8.05	2.61	0.06	52	{1, 4, 5, 6}	4 696 814.76	759 819 398.25	0.93
21	{4, 6}	13.80	3.31	0.11	53	{2, 3, 4, 5}	6 585 632.25	673 850 634.78	0.96
22	{5, 6}	11.42	3.14	0.10	54	{2, 3, 4, 6}	6 320 424.16	837 320 942.97	0.94
23	{1, 2, 3}	33 280 280.96	6 613 414.47	0.95	55	{2, 3, 5, 6}	8 892 914.02	350 079 517.56	0.97
24	{1, 2, 4}	21 859 342.51	6 603 095.73	0.94	56	{2, 4, 5, 6}	12 419 305.66	516 757 570.90	0.95
25	{1, 2, 5}	43 202 573.81	7 224 204.22	0.96	57	{3, 4, 5, 6}	2 456 633.45	31 482 916.46	0.90
26	{1, 2, 6}	40 501 225.58	7 828 332.82	0.96	58	{1, 2, 3, 4, 5}	930 416.34	193 973 565.55	0.93
27	{1, 3, 4}	7 366 337.55	2 086 120.21	0.87	59	{1, 2, 3, 4, 6}	8 201 420.43	217 533 605.02	0.97
28	{1, 3, 5}	19 148 769.56	2 268 712.39	0.91	60	{1, 2, 3, 5, 6}	10 227 539.43	213 692 239.00	0.97
29	{1, 3, 6}	8 969 566.29	2 041 476.03	0.87	61	{1, 2, 4, 5, 6}	7 960 541.50	208 164 137.25	0.95
30	{1, 4, 5}	17 700 330.18	4 028 600.56	0.92	62	{1, 3, 4, 5, 6}	6 118 067.07	78 405 915.43	0.92
31	{1, 4, 6}	10 267 047.08	4 276 912.35	0.90	63	{2, 3, 4, 5, 6}	8 778 927.15	206 085 974.11	0.96
32	{1, 5, 6}	12 153 818.65	2 766 212.84	0.90	64	{1, 2, 3, 4, 5, 6}	47 675 541.99	207 417 557.61	1.00

2.4 结果讨论

采用本文建立的优化方法对怀阳高速公路马咀隧道Ⅳ级围岩开挖施工法进行了优化,获得了其最优工法为双侧壁导坑开挖法,该结果与采用常规成熟方法层次分析法^[23]和多属性群决策法^[23]进行优化结果一致,说明本文所建立的基于 MTS-Choquet 群决策法的隧道施工方法有效和可行。另外对咀隧道Ⅳ级围岩开挖进行了施工监测,其结果为: CD、CRD 法和双侧壁导坑法拱顶的沉降量分别为 31.2 mm、26.5 mm 和 18.20 mm,由此可知,采用双侧壁导坑开挖法施工变形最小,有利于施工安全,为对马咀隧道Ⅳ级围岩开挖的最优工法。

本文方法与目前常规方法相比较,其优点在于:本文方法基于数据分析的模式识别技术,可消除主观因素的影响,数据处理不需做假设,其评价更为合理。影响隧道施工方法的因素指标很多,但本文方法应用研究时,仅选取施工环境、工程造价、施工技术难易程度、开挖进尺、适应性和施工机械化水平等 6 个指标不能够涵盖施工方法全生命周期过程,仅能对初期施工方法优选提供理论依据,不能就动态施工过程进行分析,所以本文方法的适宜性还有待于进一步研究。

3 结论与建议

(1) 本文基于马田系统理论,建立了隧道施工方法优化的扩展 MTS-Choquet 群决策法及其评价指标体系。

(2) 利用本文所建模优化得到了怀阳高速公路马咀隧道Ⅳ级围岩施工方案为双侧壁导坑开挖法,该法与 CD 法、CRD 相比,虽然施工复杂些,所耗材料略多,工期也稍长,但双侧壁导坑开挖法对隧道围岩变形控制效果较好,而实际马咀隧道Ⅳ级围岩施工变形较大,不易控制,所以,为了施工安全,综合考虑推荐马咀隧道Ⅳ级围岩施工采用双侧壁导坑开挖法为最优工法。

(3) 在隧道建设过程中,隧道施工方法选择不仅影响隧道施工效率与成本,而且对施工安全产生直接影响,但目前隧道施工方法选择优化决策理论研究较薄弱,建议今后进一步加强这方面研究,尤其是基于隧道工程案例的大数据技术、案例推理技术和专家系统等理论的隧道工程建设决策理论及系统研发,对提高我国现代隧道施工技术的智能水平,推动隧道工程学科的发展,具有重要的理论意义。

参考文献(References):

- [1] 许崇帮,杨志刚,王皓,等. 浅埋大断面隧道施工方法优化分析[J]. 公路, 2016, 61(4): 261-265.
XU Chongbang, YANG Zhigang, WANG Hao, et al. Optimization analysis of shallow buried large section tunnel construction method [J]. Highway, 2016, 61(4): 261-265.
- [2] 丁保军,吴贤国,张立茂,等. 基于 DBN 的盾构隧道施工参数优化方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3215-3222.
DING Baojun, WU Xianguo, ZHANG Limao, et al. Study on optimization method of shield tunnel construction parameters based on DBN [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3215-3222.
- [3] 李跃强. 浅埋偏压大断面隧道洞口段开挖顺序优化[J]. 公路, 2018, 63(2): 286-291.
LI Yueqiang. Optimization of excavation sequence of portal section of shallow-buried and large-section tunnel [J]. Highway, 2018, 63(2): 286-291.
- [4] 朱苦竹,张书强,庄瑞鸿. 浅埋软岩大跨度隧道开挖工法研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(1): 66-73.
ZHU Kuzhu, ZHANG Shuqiang, ZHUANG Ruihong. Study on excavation method of shallow-buried soft rock long-span tunnel [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science Edition, 2018, 34(1): 66-73.
- [5] 王薇,潘文硕,卞家胜,等. 城市地下公路隧道浅埋暗挖施工方法优化及应用研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(5): 209-216.
WANG Wei, PAN Wenshuo, BIAN Jiasheng, et al. Optimization and application of shallow buried and excavation construction methods for urban underground highway tunnels [J]. Modern Tunnel Technology, 2017, 54(5): 209-216.
- [6] 李浩,韩立军,孟庆彬,等. V 级围岩二车道隧道双侧壁导坑法优化分析[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(6): 118-125.
LI Hao, HAN Lijun, MENG Qingbin, et al. Optimization analysis of double-wall guide pit method for V-class surrounding rock two-lane tunnel [J]. Modern Tunnel Technology, 2015, 52(6): 118-125.
- [7] 李波,吴立,左清军,等. 复杂地质条件下特大断面隧道施工工法及其循环进尺参数的优化研究[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(4): 159-164.
LI Bo, WU Li, ZUO Qingjun, et al. Optimization of construction method and cyclic footage of super-large section tunnel under complex geological conditions [J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(4): 159-164.
- [8] 张英才,胡国伟,辛振省. 大断面黄土隧道开挖工法对比分析与选择[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(3): 87-92.
ZHANG Yingcai, HU Guowei, XIN Zhensheng. Comparative analysis and selection of excavation method for large section loess tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(3): 87-92.
- [9] 王凯. 浅埋暗挖地铁车站结构型式和施工方法优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
WANG Kai. Research on structure type and construction method opti-

- mization of shallow buried underground station [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [10] 周艺,何川,邹育麟,等. 破碎千枚岩隧道施工工法比选试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 537-548.
ZHOU Yi, HE Chuan, ZOU Yulin, et al. Experimental study on construction method of broken phyllite tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 537-548.
- [11] 郭文明. 公路超大断面隧道扁平率及施工方法优选研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
GUO Wenming. Study on the flattening rate and construction method of highway super-large section tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [12] 孙永超,陈玮. 软岩浅埋大断面地铁隧道施工方法优选研究[J]. 施工技术, 2017, 46(24): 48-53.
SUN Yongchao, CHEN Wei. Study on the optimization of construction method for shallow-buried large-section subway tunnel with soft rock [J]. Construction Engineering, 2017, 46(24): 48-53.
- [13] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
CHEN Kui. Experimental design and analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [14] 陈俊洵,程龙生,胡绍林,等. 基于 EMD 的改进马田系统的滚动轴承故障诊断[J]. 振动与冲击, 2017, 36(5): 151-156.
CHEN Junxun, CHENG Longsheng, HU Shaolin, et al. Fault diagnosis of rolling bearings based on EMD for improved Martin System [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(5): 151-156.
- [15] 任江涛,蔡远文,史建伟,等. 基于马田系统的设备健康监测技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 2003: 634-637.
REN Jiangtao, CAI Yuanwen, SHI Jianwei, et al. Research on equipment health monitoring technology based on Martin System [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 2003: 634-637.
- [16] 曾伟,郝玉国,范瑞祥,等,李存斌. 基于马田系统和灰色累积前景理论的变压器区间数维修风险决策[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015, 42(5): 100-110.
ZENG Wei, HAO Yuguo, FAN Ruixiang, et al. Research on maintenance risk decision of transformer interval based on Martin System and grey cumulative prospect theory [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2015, 42(5): 100-110.
- [17] VAN WEYENBERGE B, XAVIER D, ROBBY C. Development of a risk assessment method for life safety in case of fire in rail tunnels [J]. Fire Technology, 2016, 5(52): 1465-1479.
- [18] USMAN F, BANUAR N, KURNIAWAN T B, et al. Integration of spherical 360° panoramic virtual tour with assessment data for risk assessment and maintenance of tunnel and cavern [J]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 85(8): 50-56.
- [19] 李晓伟. 基于马田系统的物业管理服务质量评价及应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
LI Xiaowei. Evaluation and application of property management service quality based on Martin System [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [20] 赵国伟. 养老机构服务质量评价指标体系研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
ZHAO Guowei. Research on the evaluation index system of service quality of old-age care institutions [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [21] 林哲. 基于粗糙集的马田系统研究及其在银行直接营销客户分类中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
LIN Zhe. Research on Martin System based on rough set and its application in bank direct marketing customer classification [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [22] 邹雅莹. 基于 k-means 算法的马田系统研究及其在个人信用评价中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
ZOU Yaying. Research on Martin System based on k-means algorithm and its application in personal credit evaluation [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [23] 张彩江,沈岐平. 基于层次分析(AHP)的深层软基处理方案优化选择研究: 一个案例[J]. 系统工程, 2006, 24(9): 121-125.
ZHANG Caijiang, SHEN Qiping. Analysis on the appraising & scheme selection of deep soft foundation reinforcement: case in meihe expressway project [J]. Systems Engineering, 2006, 24(9): 121-125.
- [24] 谢全敏,丁修元. 基于灰色模糊多属性群决策的隧道施工方法优化[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(5): 1-6.
XIE Quanmin, DING Xiuyuan. Optimization of tunnel construction method based on grey fuzzy multi-attribute group decision-making [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(5): 1-6.

(责任编辑 陈小敏)