

DOI: 10.11779/CJGE201711020

基于 Mamdani 模糊推理的山岭隧道围岩 RMR14 分级

张 琦^{1,2}, 朱合华³, 黄贤斌³, 李晓军³, 戴国亮^{1,2}

(1. 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室(东南大学), 江苏 南京 210096; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096;
3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 岩体分级方法(RMR14)可充分评价岩体力学性质和结构面的条件, 且可考虑初始地应力场和开挖方式等因素的影响, 非常适用于山岭隧道围岩的评价。但RMR14评级方法的阶梯状评分会引起评分区间边界出现模糊不确定性, 为更加准确地评价岩体质量, 基于Mamdani模糊推理方法, 引入模糊隶属函数来解决模糊不确定性问题。采用“if-then”推理法则实现多输入参数多推理规则的模糊推理, 提出基于Mamdani模糊推理的RMR14岩体分级方法, 并将此方法应用于独平高速溧阳隧道的围岩质量评价。研究结果表明, 基于Mamdani模糊推理的RMR14岩体质量分级方法既可借鉴既有工程经验, 又可恰当处理评分边界的模糊不确定性问题; 与直接采用RMR14分级方法相比, 本文提出的模糊分级方法能更加准确评价围岩质量。

关键词: 山岭隧道; 围岩分级; RMR14; 模糊推理; 工程应用

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)11-2116-09

作者简介: 张 琦(1984-), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩石隧道工程等方面的教学和科研。E-mail: zhangqi@seu.edu.cn。

A new rock mass rating method based on Mamdani fuzzy inference for rock tunnels

ZHANG Qi^{1,2}, ZHU He-hua³, HUANG Xian-bin³, LI Xiao-jun³, DAI Guo-liang^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Concrete and Pre-stressed Concrete Structure, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The rock mass rating (RMR14) method can evaluate the mechanical properties and structural conditions of rock mass comprehensively and consider the engineering factors such as the initial ground stress fields and excavation ways. RMR14 is quite suitable for evaluating the surrounding rock of mountainous tunnels. But the ladder-like rating in RMR14 will cause the fuzzy uncertainty at the interval boundaries. In order to evaluate the quality of rock mass more accurately, the fuzzy membership functions are introduced to solve the problem of fuzzy uncertainty based on the Mamdani fuzzy inference method. A new RMR14 method based on the fuzzy inference is proposed by using the “if - then” reasoning rules to realize multiple input parameters and inference rules of the fuzzy inference. The new method is used to assess the qualities of the surrounding rock mass of Piaoli tunnel of Dushan-Pingtang highway. The results show that the new RMR14 based on the fuzzy inference can draw the existing engineering experience and appropriately solve the boundary problem of fuzzy uncertainty. Compared with the original RMR14, the new RMR14 based on the fuzzy inference can assess the quality of the surrounding rock more accurately and steadily.

Key words: rock tunnel; rock classification; RMR14; fuzzy inference; engineering application

0 引言

岩体隧道工程的设计建设中, 围岩质量紧密控制着工程的安全与稳定, 隧道工程的施工难度、建设成本会随着岩体质量的降低而增加, 因此合理的工程岩体分级是隧道工程岩体稳定性评价的基础^[1-2]。

为评价岩体的地质条件, 目前国内外提出了很多评价岩体质量与地质条件的方法, 如 Bieniawski^[3]提出的岩体 RMR (rock mass rating) 分级方法; Hoek

等^[4]提出的、后经 Sonmez 等^[5]改进的岩体 GSI (geological strength index) 分类方法; Barton 等^[6]提出的 Q 指标分类系统; 中国工程岩体分级标准的岩体基本质量指标 (BQ) 法^[7]等。其中 RMR 分级方法,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602300); 江苏省青年基金项目(BK20150618); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUEK1503)

收稿日期: 2017-02-10

因其考虑因素最为全面、评价指标易于获取而被广泛使用^[8~11]。而当前绝大多数的岩体分级方法是通用型, 没有评价隧道建设中工程条件因素的评分项, 未能考虑隧道开挖断面的形状、跨度、埋深、初始地应力场以及全断面隧道掘进 (TBM) 法、钻爆法等开挖方式因素对围岩质量的影响。针对以上问题, Celada 等^[12]在 1989 年提出的 RMR 分级方法的基础上提出了应用于隧道工程围岩的 RMR 改进分级方法, 简称为 RMR14。Kanik 等^[13]采用 RMR 和 RMR14 分级方法分别对岩体隧道支护系统进行了数值分析和对比, 得出采用 RMR14 的分析结果更为合理。

RMR14 分级方法在考虑岩体的强度力学参数和结构面参数时, 参数评分区间边界上存在着评分的突变性, 从而在进行隧道岩体分级时会产生模糊不确定性。为了处理此类不确定性带来的不能准确描述岩体质量的问题, 可以引入模糊集理论, 通过构造围岩评价参数的隶属函数并在此基础上进行模糊推理, 在考虑工程经验的基础上合理地解决此类不确定性问题。陶振宇等^[14]较早将模糊数学应用于岩石工程分类。此后, 王广军等^[15]运用模糊集理论对岩土工程场地进行分类; 王元汉等^[16]建立岩爆预测的模糊数学综合评判方法; 祁生文等^[17]利用模糊数学方法, 建立 TBM 施工岩体质量分级模糊评价方法。

目前应用模糊推理解决岩石工程中所遇到模糊不确定性问题较为常见, 但由于 RMR14 分级方法需要输入 6 种基本参数组, 其中部分参数组是多因素的, 大多数模糊推理方法在解决多输入参数推理时过程较复杂。Mamdani 模糊推理方法^[18]采用 “if-then” 推理法则, 推理过程非常直接和简明, 在解决多输入参数多推理规则的模糊推理具体独特的优势。本文主要针对 RMR14 岩体分级方法的评分模糊性问题, 引入隶属函数并采取模糊推理的方法, 建立基于 Mamdani 模糊推理方法的 RMR14 模糊评分方法, 解决分级过程中模糊不确定性问题, 提高山岭隧道围岩 RMR14 分级的准确性。

1 RMR14 分级

Celada 等^[12]在 RMR 方法基础上, 通过细化结构面条件评分、采用综合反映 RQD 和不连续面间距评分的每延米不连续面数目指标, 并附加考虑开挖方式、隧道掌子面的应力应变特征以及岩石耐崩解性指数 I_{d2} 等因素来对其进行修正, 获得能够更准确更全面描述隧道岩体质量的 RMR14 围岩分级方法:

$$RMR14 = (RMR14_b + F_0) \cdot F_e \cdot F_s \quad (1)$$

式中 $RMR14_b$ 为不考虑开挖因素的岩体基本质量评分; F_0 为考虑结构面走向与隧道轴线方向关系的修正

项; F_e 为考虑开挖方式的修正系数; F_s 为考虑隧道开挖掌子面应力应变特征的修正系数。岩体基本质量评分 $RMR14_b$ 的表达如下:

$$RMR14_b = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (2)$$

式中, R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 分别为岩石单轴抗压强度、综合考虑 RQD 和结构面间距的不连续面数目、结构面条件 (含延展性、粗糙程度、填充物和风化程度)、地下水赋存条件以及岩石耐崩解性指数 I_{d2} 的评分, 各参数评分详见表 1~6。

表 1 岩石的强度评分 R_1

Table 1 Ratings of strength of intact rock (R_1)

单轴抗压强度/MPa	>250	100~250	50~100	25~50	5~25	1~5	<1
分数	15	12	7	4	2	1	0

表 2 不连续面数目评分 R_2 (综合考虑 RQD 和结构面间距)

Table 2 Ratings of density of discontinuities (R_2)

不连续面数/m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
评分	40	34	31	29	28	27	26	25	24	23	22
不连续面数/m	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
评分	21	20	19	18	17	17	16	15	14	14	13
不连续面数/m	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
评分	13	12	12	11	11	10	10	9	9	9	8
不连续面数/m	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
评分	8	7	7	7	6	6	6	5	4	3	3
不连续面数/m	44	45	46	47	48	49	50				
评分	2	2	1.5	1	1	0.5	0				

表 3 结构面条件评分 R_3

Table 3 Ratings of conditions of discontinuities (R_3)

延展性	<1 m		1~3 m		3~10 m		>10 m	
评分	5		4		2		0	
粗糙程度	非常粗糙		粗糙		平整		光滑	
评分	5		3		1		0	
充填物	坚硬		软弱					
	<5 mm		>5 mm		<5 mm		>5 mm	
评分	5		2		2		0	
风化程度	未风化		中等风化		强风化		完全风化	
评分	5		3		1		0	

表 4 地下水赋存条件评分 R_4

Table 4 Ratings of water (R_4)

地下水赋存条件	完全干燥	润	湿	滴	流
评分	15	10	7	4	0

表 5 岩石耐崩解性指数评分 R_5

Table 5 Ratings of alterability of intact rock (R_5)

岩石耐崩解性指数 I_{d2}	>85%	60%~85%	30%~60%	<30%
评分	10	8	4	0

表 6 节理走向与隧道轴线关系的修正项 F_0 Table 6 Adjustment factors with respect to orientation of axis of tunnel versus discontinuities (F_0)

节理走 向与隧 道轴线 关系	节理走向垂直于隧道轴线		节理走向平行于隧道轴线		不考虑节 理走向		
	顺倾斜方向	逆倾斜方向	倾斜	倾斜	倾斜	倾斜	倾斜
	45° ~ 90°	20° ~ 45°	~ 45°	~ 20°	~ 45°	~ 20°	~ 0°
	90°	45°	90°	45°	90°	45°	20°
得分	很有利	有利	较好	不利	很不利	较好	较好
	0	-2	-5	-10	-12	-5	-5

考虑开挖方式的修正系数 F_e 按下式计算:

$$F_e = \begin{cases} 1 + 2 \left(\frac{\text{RMR14}_b}{100} \right)^2 & (\text{RMR14}_b < 40) \\ 1.32 - \frac{\sqrt{\text{RMR14}_b - 40}}{25} & (\text{RMR14}_b > 40) \end{cases}, \quad (3)$$

其中, 当 $F_e=1$ 时为采用钻爆法开挖时采用的系数。

考虑隧道开挖面应力应变特征的修正系数 F_s 为

$$F_s = \begin{cases} 1.3 & (\text{ICE} < 15) \\ \frac{2.3\sqrt{100 - \text{ICE}}}{7.1 + \sqrt{100 - \text{ICE}}} & (15 < \text{ICE} < 70), \quad (4) \\ 1 & (\text{ICE} > 70) \end{cases}$$

式中, ICE (index of elastic behavior)^[19] 为弹性行为指数, 为表征可能发生在隧道开挖面附近的塑性发展程度的指标, ICE 计算公式如下:

$$\text{ICE} = \begin{cases} \frac{3704\sigma_{ci} e^{\frac{\text{RMR14}_b - 100}{24}}}{(3 - K_0)H} F & (K_0 \leq 1) \\ \frac{3704\sigma_{ci} e^{\frac{\text{RMR14}_b - 100}{24}}}{(3K_0 - 1)H} F & (K_0 \geq 1) \end{cases}, \quad (5)$$

式中, σ_{ci} 为岩石的单轴抗压强度 (MPa), K_0 为水平和竖向原始应力的比值, H 为隧道埋深 (m), F 为形状系数, 见表 7。

表 7 形状系数 F 取值Table 7 Values of shape coefficient F

地下工程开挖	F
圆形隧道, 直径 6 m	1.30
圆形隧道, 直径 10 m	1.00
常规隧道, 14 m 宽	0.75
25 m 宽×60 m 高的洞室	0.55

2 Mamdani 模糊推理方法

RMR14 分级方法阶梯状评分在评分边界会引起模糊不确定性, 为此通过引入模糊集理论, 构造评分参数的隶属函数, 并采用 Mamdani 模糊推理方法来处

理此类不确定性, 为隧道支护设计提供更加合理的围岩分级评分。Mamdani 模糊推理方法因其采用“if-then” 推理法则, 在解决多输入参数多推理规则的模糊推理时过程非常直接和简明^[20]。

2.1 模糊化

模糊化即在考虑以往围岩分级经验的基础上建立评分参数输入输出的隶属分布函数。隶属函数的常见形式主要有高斯分布、三角形分布和梯形分布, 考虑到线性隶属函数的普遍适用性, 本文将采用三角形及梯形隶属函数 (见图 1)。

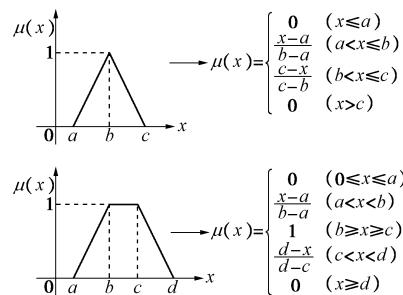


图 1 三角形 (上) 及梯形 (下) 隶属分布函数

Fig. 1 Triangle (up) and trapezoid (down) membership functions
2.2 Mamdani 模糊推理

模糊推理系统是建立在模糊集合论、模糊“if-then” 规则和模糊推理等基础上的计算框架, 其中 Mamdani 算法的普遍法则“if-then” 结构以下列形式给出:

$$R_i: \text{if } x_i \text{ is } A_{il}, y_i \text{ is } B_{il}, \text{ then } z \text{ is } C_i \quad (i=1, 2, \dots, k), \quad (6)$$

式中, k 为法则的数目, x_i , y_i 为输入变量, z 为输出变量, A_{il} , B_{il} 和 C_i 分别为第 i 条推理规则下的输入输出隶属分布。

Mamdani 模糊推理算法将经典的极大-极小合成运算方法作为模糊关系与模糊集合的合成运算法则, 图 2 所示为 Mamdani 模糊推理算法的组成部分。

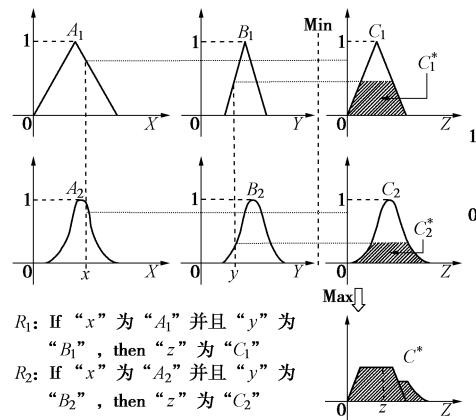
图 2 Mamdani 模糊推理过程^[20-21]

Fig. 2 Mamdani fuzzy inference process

2.3 去模糊化

在模糊基本算法里, 两个或者更多的模糊输出集合的集成得到一个新的模糊集, 通过去模糊化程序转化为一个精确的结果^[20]。矩心(重力中心、重心、面积中心、质量最高的相交区域中心)和极点(最大值法、最大概率法、左右极点法)等为去模糊化的主要方法。由于重心法(COA)的普遍适用和计算上的简便, 本研究采用此方法进行去模糊化。重心法去模糊化方法在一个连续定义域内的定义为

$$Z_{\text{COA}} = \int \mu_A(z) \cdot z dz / \int \mu_A(z) dz , \quad (7)$$

式中, Z_{COA} 为 z 的精确输出量, μ_A 为集成的输出隶属函数。

3 RMR14 分级的 Mamdani 模糊推理

考虑到 RMR14 分级系统中对不连续面数目(DN, 综合考虑 RQD 和结构面间距)的评分 R_{DN} 间隔较小, 评分值比较连续, 因此对其评分采用非线性回归连续化处理 ($R^2=0.99$), 分析结果如下:

$$R_{\text{DN}} = 34.25 - 1.55\text{DN} + 0.033\text{DN}^2 - 3.25 \times 10^{-4}\text{DN}^3 . \quad (8)$$

对 RMR14 分级系统中的岩石的单轴抗压强度(UCS)、结构面条件(DC)、地下水赋存条件(GW)和岩石耐崩解性指数(I_{d2})等基本因素以及岩体软弱结构面走向(DO)与隧道轴线夹角的修正项进行模糊处理。各个因素模糊推理过程中, 隶属函数的确定原则为使得两相邻区间边界处的隶属度为 0.5。

单轴抗压强度(UCS)评分模糊推理过程见图 3, 图中 VVS、VS、S、M、H、VH、VVH 分别代表单轴抗压强度为非常小(<1 MPa)、很小(1~5 MPa)、小(5~25 MPa)、中等(25~50 MPa)、大(50~100 MPa)、很大(100~250 MPa)、非常大(>250 MPa)。单轴抗压强度为 VVS、VS、S、M 时采用三角形分布的隶属函数, 而单轴抗压强度为 H、VH、VVH 时采用梯形分布的隶属函数。单轴抗压强度模糊推理采用 7 条 “if-then” 规则(见表 8), 获得连续的响应面见图 3。

表 8 单轴抗压强度(UCS)模糊推理规则

Table 8 Rules of uniaxial compressive strength (UCS)

序号	模糊推理规则
1	If(UCS 为 VVS) then (R_{UCS} 为 VVS) (1)
2	If(UCS 为 VS) then (R_{UCS} 为 VS) (1)
3	If(UCS 为 S) then (R_{UCS} 为 S) (1)
4	If(UCS 为 M) then (R_{UCS} 为 M) (1)
5	If(UCS 为 H) then (R_{UCS} 为 H) (1)
6	If(UCS 为 VH) then (R_{UCS} 为 VH) (1)
7	If(UCS 为 VVH) then (R_{UCS} 为 VVH) (1)

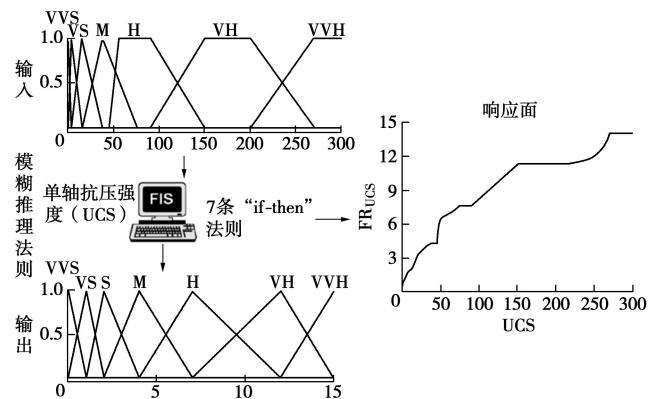


图 3 单轴抗压强度(UCS)评分模糊推理过程

Fig. 3 Fuzzy inference of uniaxial compressive strength (UCS)

地下水赋存条件(GW)评分模糊推理过程见图 4, 图中 CD、SW、W、D、F 分别代表地下水赋存条件为完全干燥、润、湿、滴、流。地下水赋存条件为 CD 时采用三角形分布的隶属函数, 而地下水赋存条件为 SW、W、D、F 时采用梯形分布的隶属函数。地下水赋存条件模糊推理采用 5 条 “if-then” 规则(见表 9), 获得连续的响应面见图 4。

表 9 地下水赋存条件(GW)模糊推理规则

Table 9 Rules of ground water (GW)

序号	模糊推理规则
1	If(GW 为 CD) then (R_{GW} 为 CD) (1)
2	If(GW 为 SW) then (R_{GW} 为 SW) (1)
3	If(GW 为 W) then (R_{GW} 为 W) (1)
4	If(GW 为 D) then (R_{GW} 为 D) (1)
5	If(GW 为 F) then (R_{GW} 为 F) (1)

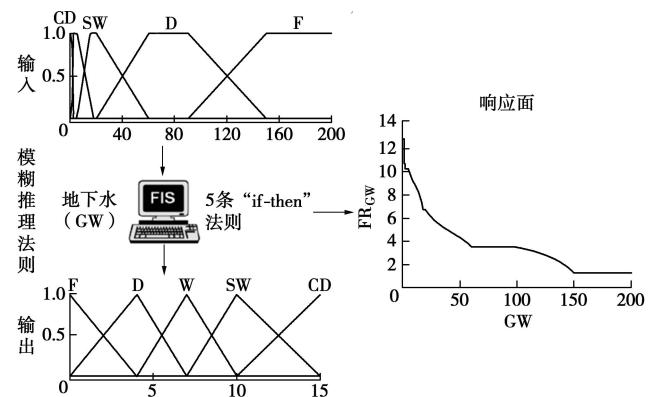


图 4 地下水赋存条件(GW)评分模糊推理过程

Fig. 4 Fuzzy inference of ground water (GW)

岩石耐崩解性指数(I_{d2})评分模糊推理过程见图 5, 图中 S、M、F、L 分别代表岩石耐崩解性指数为小(<30%)、中等(30%~60%)、较大(60%~85%)、大(>85%)。岩石耐崩解性指数为 M、F 时采用三角形分布的隶属函数, 而岩石耐崩解性指数为 S、L 时采用梯形分布的隶属函数。岩石耐崩解性指数模糊推

理采用 4 条 “if-then” 规则（见表 10），获得连续的响应面见图 5。

表 10 岩石耐崩解性指数 (I_{d2}) 模糊推理规则

Table 10 Rules of alterability of intact rock (I_{d2})

序号	模糊推理规则
1	If (I_{d2} 为 S) then ($R_{I_{d2}}$ 为 S) (1)
2	If (I_{d2} 为 M) then ($R_{I_{d2}}$ 为 M) (1)
3	If (I_{d2} 为 F) then ($R_{I_{d2}}$ 为 F) (1)
4	If (I_{d2} 为 L) then ($R_{I_{d2}}$ 为 L) (1)

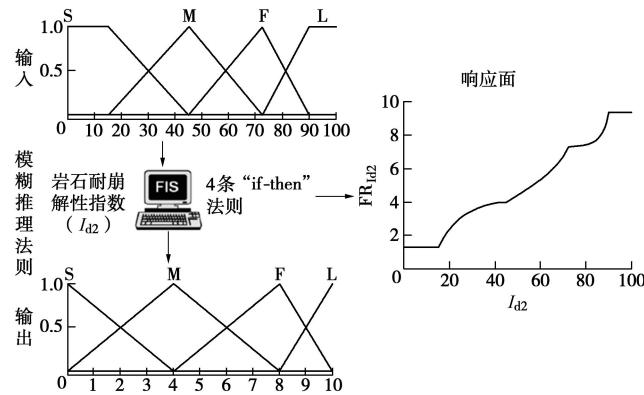


图 5 岩石耐崩解性指数 (I_{d2}) 评分模糊推理过程

Fig. 5 Fuzzy inference of alterability of intact rock (I_{d2})

结构面走向 (DO) 评分模糊推理过程见图 6，图中 VUF、UF、M、F、VF 分别代表岩体软弱结构面走向对隧道影响非常不利、不利、一般、有利、非常有利。结构面走向为 UF、M、F 时采用三角形分布的隶属函数，而结构面走向为 VUF、VF 时采用梯形分布的隶属函数。结构面走向模糊推理采用 5 条 “if-then” 规则（见表 11），获得连续的响应面见图 6。

表 11 结构面走向 (DO) 模糊推理规则

Table 11 Rules of discontinuity orientation (DO)

序号	模糊推理规则
1	If (DO 为 VUF) then (R_{DO} 为 VUF) (1)
2	If (DO 为 UF) then (R_{DO} 为 UF) (1)
3	If (DO 为 M) then (R_{DO} 为 M) (1)
4	If (DO 为 F) then (R_{DO} 为 F) (1)
5	If (DO 为 VF) then (R_{DO} 为 VF) (1)

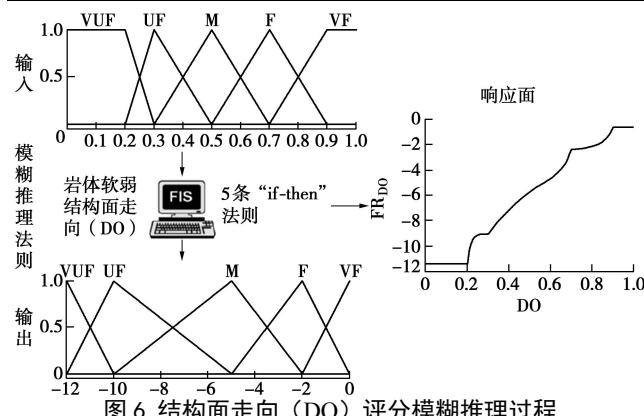


图 6 结构面走向 (DO) 评分模糊推理过程

Fig. 6 Fuzzy inference of discontinuity orientation (DO)

结构面条件 (DC) 评分模糊推理过程见图 7，图中延展性 (Con) 对应的 S、M、L、VL 分别代表结构面迹长为不连续 (< 1 m)、中等 (1~3 m)、较连续 (1~3 m)、非常连续 (> 10 m)；粗糙程度 (R_r) 对应的 SS、S、R、VR 分别代表结构面粗糙程度为光滑、平整、粗糙、非常粗糙；充填物性质 (R_f) 对应的 Hard < 5 mm, Hard > 5 mm, Soft < 5 mm, Soft > 5 mm 分别代表结构面充填物为坚硬且厚度小于 5 mm，坚硬且厚度大于 5 mm、软弱且厚度小于 5 mm，软弱且厚度大于 5 mm；结构面风化程度 (R_w) 对应的 UW、MW、HW、DC 分别代表岩体结构面风化程度为未风化、中等风化、强风化、完全风化。延展性为 S、VL 时采用梯形分布的隶属函数，而在其余情况下均采用三角形分布的隶属函数。结构面条件模糊推理采用 256 条 “if-then” 规则（见表 12），获得连续的响应面见图 8。结构面条件评分模糊推理需要考虑 4 个子因素：延展性、粗糙程度、填充物和风化程度，多输入参数的推理需要多推理规则（256 条），因此结构面条件的模糊推理过程较复杂。本文吸取 Mamdani 模糊推理的优点，采用 “if-then” 的推理法则，避免复杂的数学表达式，使得推理过程直接和简洁清晰。

基于模糊不确定处理的 RMR14 评分，主要的控制因素为各因素相加的基础评分 $RMR14_b$ 和软弱结构面走向与隧道轴线夹角关系的修正项 F_0 。对于 RMR14 的模糊处理结果，用 $FRMR14$ 来表示，具体表达式如下：

$$FRMR14 = (FRMR14_b + FF_0) \cdot F_e \cdot F_s, \quad (9)$$

其中

$$FRMR14_b = FR_{UCS} + R_{DN} + FR_{DC} + FR_{GW} + FR_{I_{d2}}, \quad (10)$$

式中， $FRMR_b$ 为岩体质量模糊评分基本值， FF_0 为模糊理论下的岩体结构面走向的修正项， FR_{UCS} 、 FR_{DC} 、 FR_{GW} 和 $FR_{I_{d2}}$ 分别表示岩石单轴抗压强度、结构面条件、地下水和岩石耐崩解性指数的模糊评分。

4 漂里隧道围岩分级模糊推理

漂里隧道位于贵州独平高速 ZK6+940—ZK7+060 标段^[22]，该标段隧道长 120 m，顶板埋深为 30~124.2 m，隧道围岩主要为中风化—强风化灰岩，岩体较破碎—较完整，围岩呈中薄层状结构，台阶预留核心土钻爆法开挖。在该标段中选择 23 个开挖面 (#1~#23)，根据现场开挖中实时采集获得的岩体力学性质和结构面条件，分别采用 RMR14 方法进行直接评分，和本文所提出的基于 Mamdani 模糊推理的 $FRMR14$ 方法对该标段隧道围岩质量进行模糊评分。同时为更加贴合中国岩体山岭隧道工程建设的实际需要，采用文献

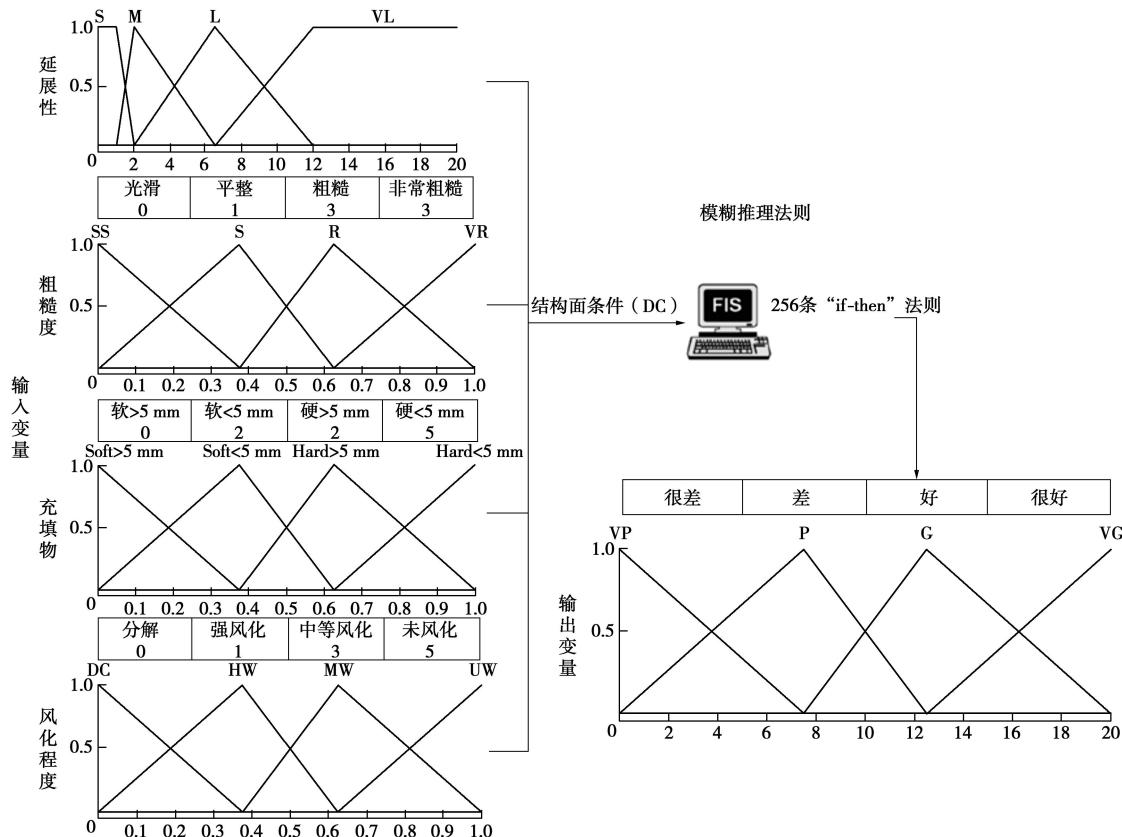


图 7 结构面条件 (DC) 评分模糊推理过程

Fig. 7 Fuzzy Inference of discontinuity conditions (DC)

表 12 结构面条件 (DC) 模糊推理规则

Table 12 Rules of discontinuity conditions (DC)

序号	模糊推理规则
1	If (Con 为 S) and (R_f 为 VR) and (R_f 为 Hard<5mm) and (R_w 为 UW) then (R_{DC} 为 VG) (1)
2	If (Con 为 M) and (R_f 为 VR) and (R_f 为 Hard<5mm) and (R_w 为 UW) then (R_{DC} 为 VG) (1)
3	If (Con 为 S) and (R_f 为 VR) and (R_f 为 Hard<5mm) and (R_w 为 MW) then (R_{DC} 为 VG) (1)
4	If (Con 为 S) and (R_f 为 R) and (R_f 为 Hard<5mm) and (R_w 为 UW) then (R_{DC} 为 VG) (1)
5	If (Con 为 S) and (R_f 为 VR) and (R_f 为 Hard>5mm) and (R_w 为 UW) then (R_{DC} 为 VG) (1)
6	If (Con 为 S) and (R_f 为 R) and (R_f 为 Soft<5mm) and (R_w 为 UW) then (R_{DC} 为 VG) (1)
...
253	If (Con 为 VL) and (R_f 为 SS) and (R_f 为 Soft<5mm) and (R_w 为 DC) then (R_{DC} 为 VP) (1)
254	If (Con 为 VL) and (R_f 为 S) and (R_f 为 Soft>5mm) and (R_w 为 DC) then (R_{DC} 为 VP) (1)
255	If (Con 为 VL) and (R_f 为 SS) and (R_f 为 Soft>5mm) and (R_w 为 HW) then (R_{DC} 为 VP) (1)
256	If (Con 为 VL) and (R_f 为 SS) and (R_f 为 Soft>5mm) and (R_w 为 DC) then (R_{DC} 为 VP) (1)

[23]提出的 BQ-RMR 关系 (式 10) 将获得的 RMR14 和 FRMR14 评分换算成 BQ, 并依据 GB/T50218-2014《工程岩体分级标准确定围岩等级》^[7]:

$$BQ = 170 \ln \frac{15 + 0.24RMR}{5.7 - 0.063RMR}。 \quad (11)$$

以#2 开挖面为例, 现场试验测得岩石单轴抗压强度为 19.15 级 MPa; 室内测得耐崩解性指数为 93.5%; 结构面平均迹长为 4.1 m, 每延米节理数 5.7 条/m, 结

构面非常粗糙, 中风化, 3 mm 硬质充填物; 地下水赋存为湿状; 起控制作用的节理走向为较有利; 隧道为常规马蹄形断面, 埋深 30 m 水平和竖向原始应力的比值 0.75。分别采用直接评分及本文提出的模糊评分方法对#2 开挖面围岩质量进行评价, 模糊推理的围岩质量评分详细过程见图 9, 详细评分和分级结果见表 13。

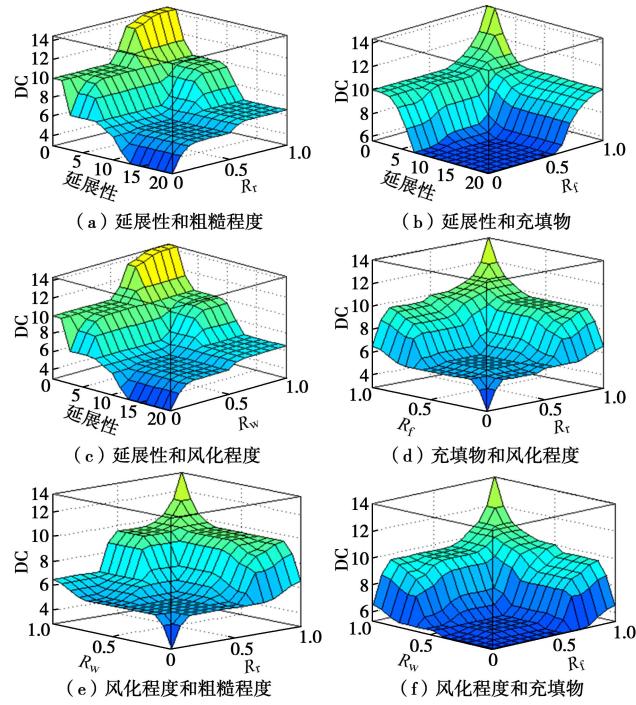


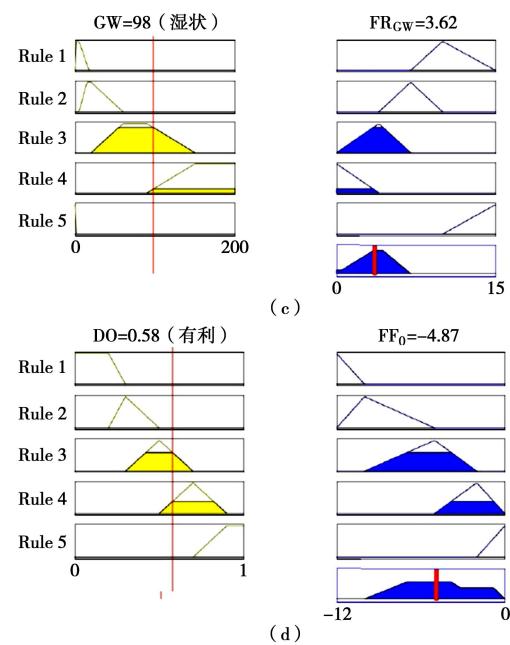
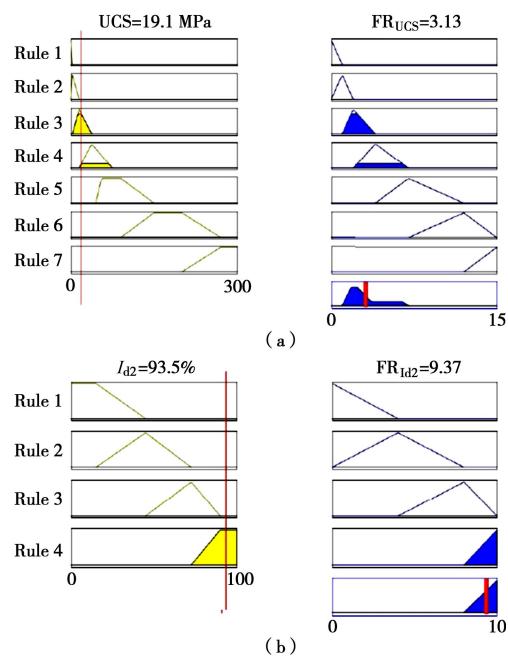
图 8 结构面条件 (DC) 评分的模糊推理控制面

Fig. 8 Control surfaces of discontinuity conditions (DC)

表 13 #2 开挖面围岩质量评分分级

Table 13 Evaluated results for rock mass of section No. 2

参数	直接评分	模糊评分 (F)
R_{UCS}	2	3.13
R_{I_d2}	10	9.37
R_{DN}	26	26.28
R_{DC}	13	11.2
R_{GW}	7	3.62
R_{DO}	-2	-4.87
F_e	1.15	1.17
ICE	113	93
F_s	1	1
RMR14	64.7	57.9
BQ	479.3	431
评级	II	III

图 9 UCS, I_{d2} , GW, DO 和 DC 模糊评分推理过程Fig. 9 Fuzzy inference of UCS, I_{d2} , GW, DO and DC

同样对该标段的其它开挖面进行直接评分分级及模糊评分分级，结果见图 10。可以看出直接与模糊评分分级结果相比有较明显的差异，整体上模糊评分相对比较稳定，获得的围岩分级离散性较低。主要因为直接采用 RMR14 分级方法对岩体质量进行评价，由于其区间型的评分边界的模糊不确定性，常引起岩体评分与相应分级出现波动 (II~IV 级)，并导致岩体实际质量评价的偏差。通过对漂里隧道实际开挖后发现，

在 120 m 长范围内未出现明显的断层和大范围的结构面, 开挖面的岩体性质也基本类似, 因此不可能出现如此明显的岩体分级的差异(相差 2 级)。

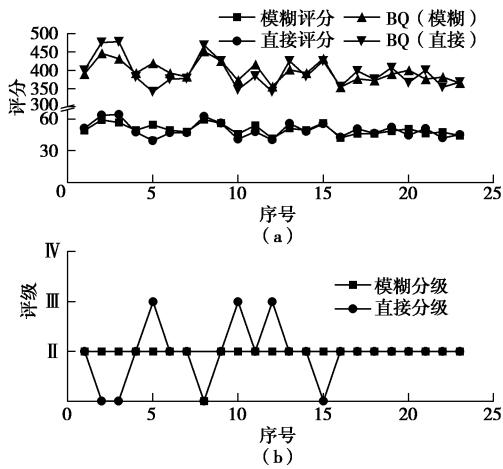


图 10 漂里隧道 ZK6+940—ZK7+060 标段围岩评分分级对比

Fig. 10 Comparison of mass ratings of surrounding rock mass of Piaoli tunnel (ZK6+940—ZK7+060)

根据其他类似工程实践及研究结果, 模糊评分分级方法可借鉴既有工程经验, 并可恰当处理 RMR14 采用区间评分边界带来的模糊性问题, 因此相应的评分结果更加合理可信。采用基于模糊推理的岩体分级方法可以避免过高评价岩体质量而造成工程风险的增大或过低地评价岩体质量而造成造价成本的增加。

5 结论与建议

(1) RMR14 岩体质量分级方法不但可以充分评价岩体力学性质和结构面的条件, 而且可以考虑初始地应力场和开挖方式等工程因素的影响。RMR14 方法是长大山岭隧道精细化设计与建设的基础, 将会在隧道工程建设中得到广泛的应用。

(2) 本文提出基于 Mamdani 模糊推理的 RMR14 岩体质量分级方法, 采用“if-then”的推理法则, 避免复杂的数学表达式推导, 使得多输入参数的多规则的推理过程简洁清晰, 明显提高 RMR14 方法的可靠性和适用性。

(3) 基于 Mamdani 模糊推理的 RMR14 岩体质量分级方法既可借鉴既有的工程经验, 又可恰当处理区间评分边界的模糊性问题。采用该岩体分级方法可以避免过高或过低评价岩体质量而导致增大工程风险或增加造价成本的工程问题。

参考文献:

[1] 郑颖人, 朱合华, 方正昌, 等. 地下工程围岩稳定分析与设计理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012. (ZHENG

Ying-ren, ZHU He-hua, FANG Zheng-chang, et al. The stability analysis and design theory of surrounding rock of underground engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))

- [2] 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1984. (WANG Si-jing, YANG Zhi-fa, LIU Zhu-hua. Stability analysis of rock mass for underground engineering[M]. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese))
- [3] BIENIAWSKI T Z. Engineering classification of jointed rock masses[J]. Civil Engineer in South Africa, 1973, **15**(12): 335 – 343.
- [4] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, **34**(8): 1165 – 1186.
- [5] SONMEZ H, ULUSAY R. Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**(6): 743 – 760.
- [6] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1974, **6**(4): 189 – 236.
- [7] GB/T 50218—2014 工程岩体分级标准 [S]. 2014. (GB/T 50218—2014 Standard for engineering classification of rock masses[S]. 2014. (in Chinese))
- [8] 喻 勇, 尹健民, 杨火平, 等. 岩体分级方法在水布垭地下厂房工程中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(10): 1706 – 1709. (YU Yong, YIN Jian-min, YANG Huo-ping, et al. Rock mass classification for underground power houses of Shuibuya project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(10): 1706 – 1709. (in Chinese))
- [9] 孙金山, 卢文波, 苏利军, 等. 基于 TBM 掘进参数和渣料特征的岩体质量指标辨识 [J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(12): 1847 – 1854. (SUN Jin-shan, LU Wen-bo, SU Li-jun, et al. Rock mass rating identification based on TBM performance parameters and muck characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1847 – 1854. (in Chinese))
- [10] 冯兴隆, 王李管, 毕 林. 矿体可崩性区域化评价模型研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(4): 584 – 588. (FENG Xing-long, WANG Li-guan, BI Lin. Compartmentation cavability evaluation model of ore body[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(4): 584 – 588. (in Chinese))
- [11] 曹 平, 张 科, 万琳辉, 等. 金川矿山深部采掘条件下

- [1] 岩石力学研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1334 – 1341. (CAO Ping, ZHANG Ke, WAN Lin-hui, et al. Study and practice of rock mechanics in Jinchuan mine under deep exploitation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1334 – 1341. (in Chinese))
- [12] CELADA B, TARDÁGUILA I, BIENIAWSKI Z T. Innovating tunnel design by an improved experience-based RMR system[C]// Proceedings of the World Tunnel Congress 2014. Foz do Iguaçu, 2014.
- [13] KANIK M, GUROCAK Z, ALEMDAG S. A comparison of support systems obtained from the RMR89 and RMR14 by numerical analyses: Macka Tunnel project, NE Turkey[J]. Journal of African Earth Sciences, 2015, 109: 224 – 238.
- [14] 陶振宇, 彭祖赠. 模糊数学在岩石工程分类中的应用[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 36 – 45. (TAO Zhen-yu, PENG Zu-zeng. Application of fuzzy mathematics to the engineering classification of rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(1): 36 – 45. (in Chinese))
- [15] 王广军, 苏经宇. 场地类别的模糊综合评判[J]. 地震工程与工程振动, 1985, 2: 28 – 42. (WANG Guang-jun, SU Jing-yu. Fuzzy synthetic evaluation of site classification[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1985, 2: 28 – 42. (in Chinese))
- [16] 王元汉, 李卧东, 李启光, 等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 493 – 501. (WANG Yuan-han, LI Wo-dong, LI Qi-guang, et al. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rock burst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 493 – 501. (in Chinese))
- [17] 祁生文, 伍法权. 基于模糊数学的 TBM 施工岩体质量分级研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1225 – 1229. (QI Sheng-wen, WU Fa-quan. Surrounding rockmass quality classification of tunnel cut by TBM with fuzzy mathematics method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1225 – 1229. (in Chinese))
- [18] MAMDANI E H, ASSILIAN S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 1999, 51(2): 135 – 147.
- [19] LOWSON A R, BIENIAWSKI Z T. Critical assessment of RMR based tunnel design practices: a practical engineer's approach[C]// Rapid Excavation and Tunneling Conference 2013. Washington D C, 2013.
- [20] HAMIDI J K, SHAHRIAR K, REZAI B, et al. Application of fuzzy set theory to rock engineering classification systems: an illustration of the rock mass excavability index[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(3): 335 – 350.
- [21] BERKAN R C, TRUBATCH S L. Fuzzy system design principles: building fuzzy if-then rule bases[M]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997.
- [22] 同济大学. 独平高速隧道掌子面节理特征精细化描述及优势节理面[R]. 上海: 同济大学, 2013. (Tongji University. Duping high speed Fine description of tunnel face joint characteristics and dominant joint surfaces[R]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese))
- [23] 许宏发, 陈 锋, 王 斌, 等. 岩体分级 BQ 与 RMR 的关系及其力学参数估计[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 195 – 198. (XU Hong-fa, CHEN Feng, WANG Bin, et al. Relationship between RMR and BQ for rock mass classification and estimation of its mechanical parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 195 – 198. (in Chinese))