

DOI:10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2018. 05. 11

基于模糊推理的悬臂式隧道掘进机工作性能预测方法

曹文贵¹, 李树林¹, 张永杰²

(1. 湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙理工大学土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 悬臂式隧道掘进机的工作性能一般采用其进行隧道铣挖的瞬时切割速率来综合度量, 它是其进行隧道铣挖施工的适应性及其设备选型的重要依据。为了预测悬臂式隧道掘进机铣挖瞬时切割速率, 结合其主要受隧道围岩岩性与施工设备条件控制的特点, 本文首先选取岩石单轴抗压强度、岩石质量指标和悬臂式隧道掘进机截割功率作为预测指标, 建立出铣挖瞬时切割速率预测模型; 然后, 考虑影响因素的模糊不确定性特点, 提出基于模糊推理理论 (包括模糊化、模糊规则库、模糊推理机和去模糊化) 的铣挖瞬时切割速率预测方法。该方法不仅可全面反映隧道围岩岩性及施工设备条件的影响, 还可反映相应各影响因素的模糊不确定性。最后, 通过与现有方法分析和实测结果的比较分析, 表明了本文模型与方法的合理与可行性。

关键词: 隧道; 悬臂式隧道掘进机; 瞬时切割速率; 工作性能预测; 模糊推理

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)05-0080-06

A performance prediction method of roadheader by fuzzy inference

CAO Wengui¹, LI Shulin¹, ZHANG Yongjie²

(1. *Geotechnical Engineering Institute of Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China*; 2. *School of Civil and Architecture Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China*)

Abstract: The instantaneous cutting rate of a roadheader is generally used to comprehensively measure the performance of the roadheader. It is important to select the roadheader as the tunnel excavation method as well as to select the type of the roadheader. To predict the instantaneous cutting rate of a roadheader, based on the instantaneous cutting rate which is mainly affected by both the lithology of the tunnel surrounding rock and the construction equipment factors, a prediction model is established by choosing the uniaxial compressive strength, rock quality designation and cutting power of the construction equipment as the prediction indexes. As the influence factors are fuzzy and uncertain, a prediction method of instantaneous cutting rate based on the fuzzy inference theory (including fuzzification, fuzzy rule base, fuzzy inference engine and defuzzification) is proposed. This method not only reflects the influence of the surrounding rock and the construction equipment, but also reflects the fuzzy uncertainty of the corresponding influence factors. Comparison of the predicted values achieved from the new model and previous model with the measured results shows that the proposed method is feasible and reasonable.

Keywords: tunnel; roadheaders; instantaneous cutting rate; prediction of roadheader performance; fuzzy inference

基于悬臂式隧道掘进机的隧道铣挖施工方法是一种重要的隧道施工方法^[1], 其适应性受悬臂式隧道掘

收稿日期: 2018-03-22; 修订日期: 2018-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51378198; 51208063); 高等学校博士学科点专项科研基金项目资助(20130161110017); 湖南省交通运输厅科技计划项目资助(201533)

第一作者: 曹文贵(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程科研与教学工作。E-mail: cwglyp@hnu.edu.cn

进机工作性能制约,而悬臂式隧道掘进机工作性能是采用悬臂式隧道掘进机进行隧道铣挖施工的适应性及其设备选型的重要依据,因此,合理预测悬臂式隧道掘进机工作性能具有重要的理论与工程意义。可是,悬臂式隧道掘进机工作性能一般采用悬臂式隧道掘进机进行隧道铣挖的瞬时切割速率 ICR (instantaneous cutting rate, 其定义为悬臂式隧道掘进机在连续铣挖模式下的净掘进速度即单位时间内的切割岩体体积)来综合度量,故合理预测悬臂式隧道掘进机瞬时切割速率 ICR 是预测悬臂式隧道掘进机工作性能的核心与关键,这正是本文研究的出发点与核心内容。

目前,国内外学者对基于悬臂式隧道掘进机的隧道铣挖瞬时切割速率 ICR 的预测方法进行了深入而广泛的研究,取得了卓有成效的研究成果^[2-7]。已有铣挖瞬时切割速率 ICR 预测方法主要有经验公式和智能预测模型两类。

前者的研究思路是基于工程实测数据通过拟合分析方法获得 ICR 的经验关系式,以实现悬臂式隧道掘进机隧道铣挖瞬时切割速率 ICR 的预测。例如, Gehring 等^[2]提出的由岩石单轴抗压强度 UCS (uniaxial compressive strength) 预测 ICR 的经验公式; Bilgin 等^[3]提出的由悬臂式隧道掘进机截割功率 P 、UCS 以及 RQD (rock quality designation) 预测 ICR 的经验公式; Rostami 等^[4]提出的由 P 、岩石破碎比能耗 SE (specific energy) 以及能量转移率 k 预测 ICR 的经验公式; Copur 等^[4]提出的由 UCS、 P 以及悬臂式隧道掘进机机重 W 预测 ICR 的经验公式; Thuro 等^[4]提出的由 UCS 预测 ICR 的经验公式; Tumac 等^[5]提出的由 UCS 或肖氏硬度 SH (shore hardness) 预测 ICR 的经验公式; Ocak 等^[4]提出的由 UCS 预测 ICR 的经验公式; Ebrahimabadi 等^[4]提出的由 UCS、RQD 以及由巴西劈裂试验测得的抗拉强度 BTS (brazilian tensile strength) 预测 ICR 的经验公式; Abdolreza 等^[6]提出的由 UCS、RQD、BTS 以及隧道轴线与软弱结构面夹角 α 预测 ICR 的经验公式; Kahraman 等^[4]提出的由点荷载强度 I_s 、BTS、岩块的纵波速度 V_p 、孔隙率 n 及岩石吸水率 A_w 等预测 ICR 的一系列经验公式; Zhang 等^[7]提出了基于 Rostami 公式^[4]的预测 ICR 的方法; 等等, 这些研究反映出对 ICR 有重要影响的因素主要为围岩岩性 (如 UCS、RQD、BTS、SH 等) 和施工设备条件 (如 P 等), 为后续研究提供了非常宝贵的经验与数据, 但由于悬臂式隧道掘进机与岩土体相互作用的复杂性, 致使不仅目前无法从理论上全面揭示 ICR 与各岩土参

数之间的关系,而且现有经验公式的准确性也难以得到保证,因此,ICR 的智能预测方法便应运而生。

悬臂式隧道掘进机铣挖瞬时切割速率智能预测模型的研究思路是利用工程实测数据采用智能分析方法^[8] (包括神经网络、遗传算法、模糊逻辑等) 建立 ICR 预测模型, 以实现悬臂式隧道掘进机隧道铣挖瞬时切割速率 ICR 的预测。目前, 该类预测方法的研究相对较少, Avunduk 等^[9]选取 UCS 和 RQD 为预测指标提出了基于人工神经网络的 ICR 预测模型; Ebrahimabadi 等^[10]以 UCS、BTS 以及 RQD 为预测指标提出了基于人工神经网络的 ICR 预测模型, 这些模型为 ICR 预测方法的研究提供了新思路, 并且也取得了一定成效, 但是也存在明显的缺陷, 其主要表现为它们都只考虑了围岩岩性方面因素而未考虑施工设备条件对 ICR 的影响, 而施工设备条件尤其是机械截割功率 P 对 ICR 的影响是不可忽略的, 这一点在大量前人研究^[3-4]中可以得到很好地证实, 因此, 有必要建立综合考虑围岩岩性与施工设备条件影响的 ICR 预测模型, 这正是本文研究的核心内容。

为此, 本文将在已有研究基础上, 充分考虑影响因素的模糊不确定性, 并且广泛参考已有工程经验, 引入模糊推理方法^[11], 深入探讨考虑上述两方面综合影响的铣挖瞬时切割速率 ICR 预测方法, 以期完善悬臂式隧道掘进机隧道铣挖瞬时切割速率 ICR 预测的理论与方法, 为悬臂式隧道掘进机隧道铣挖施工方法的适应性及其设备选型提供依据。

1 基于模糊推理的 ICR 预测模型

本文建立铣挖瞬时切割速率 ICR 预测模型从预测指标的选取入手, 由前述分析可知, 预测指标应从围岩岩性与施工设备条件两方面综合选取, 为使所建立预测模型具有较好的可操作性, 本文选取这些因素中最为典型且容易获取的指标作为预测指标, 它们分别是围岩岩性中表征岩石坚硬程度的 UCS^[13] 和表征岩体完整性的 RQD^[14] 以及施工设备条件中表征悬臂式隧道掘进机等级的机械截割功率 P ^[15]。考虑到它们均具有模糊不确定性, 因此, 引入模糊推理系统^[12]可建立出如图 1 所示的 ICR 预测模型。该模型包含三个输入参数 (UCS、RQD 和 P) 和一个输出参数 (ICR)。下面将分别介绍模型中四个关键步骤即模糊化、模糊规则库、模糊推理机以及去模糊化的处理方法。

1.1 模糊化

由于模糊推理算法的运算建立于模糊集之上, 因

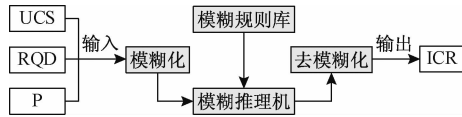


图1 基于模糊推理的 ICR 预测模型

Fig.1 Prediction model of ICR based on fuzzy inference

此,首先需要将参数经过模糊化处理转化为模糊集,以便后续运算与分析。由前面的分析,岩石坚硬程度、岩体完整性以及悬臂式隧道掘进机等级的取值均具有模糊性与不确定性,例如,根据《工程岩体分级标准》^[13]可将岩石坚硬程度按 UCS 划分为“极软”、“软”、“较软”、“较坚硬”和“坚硬”五级,而实际上在相邻等级区间分界处岩石坚硬程度存在着较大的不确定性与模糊性,因此,引入模糊数学理论^[12],将岩石坚硬程度记为 x_{UCS} ,故变量 x_{UCS} 的取值为自然语言中的一些词语如“极软”和“软”等,在模糊数学理论中称类似于 x_{UCS} 的这类变量为语言变量,而“极软”和“软”等为模糊集。所谓模糊化^[12]即通过构造隶属函数等方法将参数的确定值转化为语言变量值的过程。考虑到线性隶属函数的普遍适用性,参考《工程岩体分级标准》^[13]可获得 x_{UCS} 的隶属函数,如图 2a 所示;同样的,分别依据水利部能源部昆明勘测设计院提出的 RQD 与岩体完整性关系^[14]、Tatiya 提出的悬臂式隧道掘进机分级^[15]以及 Bilgin 等^[3]、Rostami 等^[4]、Copur 等^[4]、Ebrahimabadi 等^[4]的研究成果可以建立出岩体完整性 x_{RQD} 、悬臂式隧道掘进机等级 x_p 和掘进速度 y_{ICR} 的隶属函数,如图 2b,c,d 所示。

1.2 模糊规则库

模糊规则库是模糊系统的核心,它由一系列的 if-then 规则^[12]组成,可以表示为:

$$R_i: \text{ If } (x_{UCS} \text{ is } A_{UCS}^i) \text{ and } (x_{RQD} \text{ is } A_{RQD}^i) \text{ and } (x_p \text{ is } A_p^i) \text{ then } (y_{ICR} \text{ is } B_{ICR}^i) \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

式中: i ——规则编号;

M ——规则条数;

A_{UCS}^i 、 A_{RQD}^i 、 A_p^i 和 B_{ICR}^i ——第 i 条规则中语言变量 x_{UCS} 、 x_{RQD} 、 x_p 以及 y_{ICR} 的取值,它是一个模糊集,例如,由图 2(a)可知, A_{UCS} 可取“极软”、“软”、“较软”、“较坚硬”和“坚硬”等。

由式(1)可知,建立模糊规则库的关键在于确定每条 if-then 规则中的语言变量值即 A_{UCS}^i 、 A_{RQD}^i 、 A_p^i 和 B_{ICR}^i ($i = 1, 2, \dots, M$)。为充分利用工程经验,本文依据工程实测数据并且按最大隶属度原则确定每条 if-then 规则中的语言变量值即 A_{UCS}^i 、 A_{RQD}^i 、 A_p^i 和 B_{ICR}^i ($i = 1, 2,$

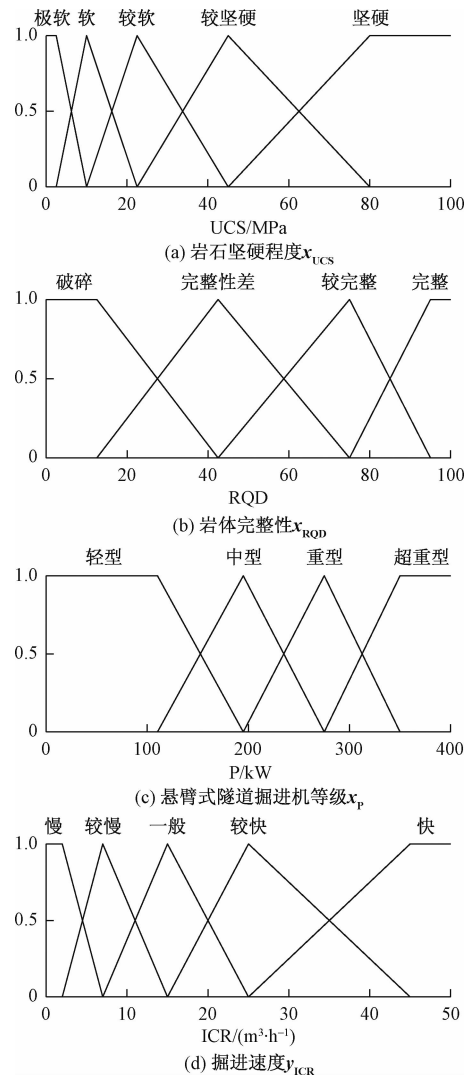


图2 语言变量的隶属函数

Fig.2 Membership function of linguistic variables

..., M)。其具体操作过程为将参数值代入对应语言变量的隶属函数,取最大隶属度对应的模糊集为 if-then 规则中相对应的语言变量值。例如,某一组实测数据中 $UCS = 19.6 \text{ MPa}$,首先将其代入 x_{UCS} 的隶属函数(图 2a),可求得 x_{UCS} 分别为各模糊集“极软”、“软”、“较软”、“较坚硬”和“坚硬”的隶属度是 0, 0, 0.23, 0.77 和 0,则 A_{UCS} = “较坚硬”为具有最大隶属度 0.77 的模糊集。

于是,通过搜集 Hereke 隧道^[1]、Küçüksu 隧道^[5]、Istanbul 地铁^[16]、Çaylırhan 煤矿^[17]以及 Eyüp 隧道^[18]等共 53 组实测数据可得到 35 条模糊规则(相同的模糊规则只保留 1 条),如表 1 所示。值得注意的是,由模糊规则库的形成方法可知,若能通过更多量且围岩岩性与施工设备条件更具多样性的工程实测数据来进

一步扩充模糊规则库,则能进一步提高预测的准确性。

表 1 模糊规则库
Table 1 Fuzzy rule base

编号	A_{UCS}	A_{RQD}	A_P	B_{ICR}	编号	A_{UCS}	A_{RQD}	A_P	B_{ICR}
1	JR	JWZ	L	JM	19	JR	—	L	K
2	JR	JWZ	L	K	20	JR	—	L	JK
3	JR	JWZ	L	YB	21	R	—	L	JK
4	JR	JWZ	L	JK	22	R	—	L	K
5	JJY	JWZ	L	JM	23	R	—	L	M
6	JJY	WZ	L	JM	24	R	—	L	JM
7	JY	WZ	L	M	25	JY	WZXC	L	YB
8	JY	JWZ	L	M	26	JY	PS	L	YB
9	JY	JWZ	L	JM	27	JY	WZXC	L	JM
10	JY	WZXC	M	JK	28	JJY	JWZ	L	JM
11	JR	JWZ	M	K	29	JJY	WZXC	L	JM
12	JY	WZ	M	YB	30	JJY	PS	L	JK
13	JY	WZXC	M	YB	31	JJY	PS	L	YB
14	JY	WZXC	M	JK	32	JJY	JWZ	L	JM
15	JY	JWZ	M	JM	33	JY	JWZ	L	JM
16	JY	—	L	YB	34	JY	WZ	L	M
17	JJY	—	L	YB	35	JY	WZ	L	M
18	JR	—	L	YB					

注:表中, A_{UCS} —列 JR、R、JIR、JJY 和 JY 分别表示极软、软、较软、较坚硬和坚硬; A_{RQD} —列 PS、WZXC、JWZ 和 WZ 分别表示破碎、完整性差、较完整和完整; A_{RQD} —列 L、M、H 和 SH 分别表示轻型、中型、重型和超重型; B_{ICR} —列 M、JM、YB、JK 和 K 分别表示慢、较慢、一般、较快和快。

1.3 模糊推理机

前述已得到参数的模糊化方法以及模糊规则库形成方法,还需利用模糊推理机进行运算才能得到推理结果,本文选较常用的 Mamdani 模糊推理算法^[11-12],它将经典的 Max 与 Min 算子^[12]作为模糊关系与推理结果合成的运算法则,具体可分为单规则推理与推理结果合成两步,分别如下。

1.3.1 单规则推理

单规则推理就是根据规则库中的一条 if-then 规则进行推理。下面以规则库中的 R_i 为例说明由其进行单规则推理的具体过程。首先,由表 1 可得出其含有 4 个模糊集(A_{UCS}^i 、 A_{RQD}^i 、 A_P^i 和 B_{ICR}^i) ;然后,由图 2 可分别得出各模糊集的隶属函数曲线;再由 Mamdani 模糊推理算法采用 Min 算子^[12]进行单规则的推理,如图 3 最上排图形所示,当输入参数值为 $UCS = x_1$ 、 $RQD = x_2$ 以及 $P = x_3$ 时,由规则 R_i 的推理结果为 B_{ICR}^{i*} ,它是一个模糊集,图中阴影部分由其隶属函数曲线与坐标轴围成。

1.3.2 推理结果合成

对于同样的输入参数值($UCS = x_1$ 、 $RQD = x_2$ 以及 $P = x_3$)由规则 R_j 的推理结果为 B_{ICR}^{j*} ,如图 3 所示,而

Mamdani 模糊推理算法采用 Max 算子^[12]对单规则推理结果进行合成,可得到由规则 R_i 和 R_j 进行模糊推理的结果 B_{ICR}^* ,值得注意的是,它仍是一个模糊集,还需对其进行去模糊化处理才能将之转化为确定值,也即 ICR 的预测值,去模糊化方法将在后面进行介绍。

上述即为具有 2 条 if-then 规则(R_i 和 R_j) 的 Mamdani 模糊推理算法过程。对于本文模型具有 35 条 if-then 规则,其计算过程也一样,首先由每条规则得到单规则推理结果模糊集,然后由 Max 算子^[12]进行合成得到最终推理结果模糊集。

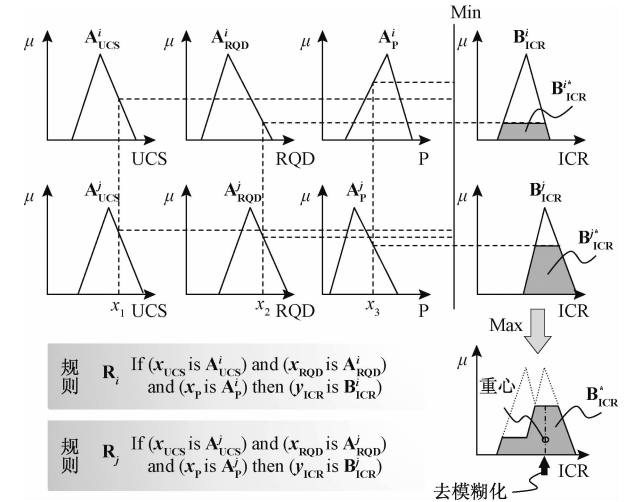


图 3 Mamdani 模糊推理算法

Fig. 3 Mamdani fuzzy inference algorithm

注:图中纵坐标 μ 表示隶属度;隶属函数曲线上标注的 A_{UCS}^i 、 A_{RQD}^i 等表示为该隶属函数曲线对应的模糊集。

1.4 去模糊化

由上述分析可知,经过 Mamdani 模糊推理算法运算后的结果仍然为一个模糊集,而非确定的值,去模糊化处理就是将这个模糊集转化为确定值即本文模型中 ICR 预测值。现有去模糊化方法非常多^[12],本文选择较常用且直观合理的重心法^[12]对推理结果进行去模糊化处理,如图 3 所示,其中阴影部分重心可通过定积分进行计算,这里不再列出具体的计算公式。

2 工程实例

2.1 工程概况

前述已建立出悬臂式隧道掘进机隧道铣挖瞬时切割速率 ICR 预测方法,为了验证本文方法的合理性,以 Ebrahimabadi 等^[10]基于 DOSCO MD1100 型悬臂式隧道掘进机(截割功率 82kW)在 Tabas 煤矿进行现场试验测得的 62 组实测数据(表 2)进行实例分析。

表 2 试验数据^[10]

Table 2 Experimental data

序号	RQD	UCS /MPa	ICR /(m ³ ·h ⁻¹)	序号	RQD	UCS /MPa	ICR /(m ³ ·h ⁻¹)
1	19	14.8	22.2	32	19	14.7	15.7
2	19	15.2	25.3	33	20	17	18.7
3	20	15.2	24.8	34	19	15.7	16.8
4	19	15.4	23.7	35	20	16	18.3
5	19	15.3	23.2	36	21	16.2	26.4
6	19	15	22.8	37	22	16.7	25.3
7	20	15.6	27.1	38	22	17.2	28.5
8	20	14.5	25.7	39	21	17.3	25.4
9	18	16.2	25.6	40	24	19.2	29.4
10	18	15.4	20.2	41	19	15	22.4
11	20	16.9	28.2	42	20	21	36.4
12	19	14.3	24.4	43	20	22.3	37.7
13	19	15.5	26.4	44	19	25.6	40.4
14	20	17.2	25.7	45	19	26.7	41.1
15	27	23.9	41.5	46	19	26.7	41.1
16	28	27.2	46.2	47	19	27.2	41.4
17	23	20.1	32.2	48	19	27.6	41.6
18	19	14.1	16.7	49	19	28	41.8
19	20	15	17.4	50	21	19.2	34
20	19	14.4	16.8	51	19	25.1	40
21	18	14.8	17	52	19	27	41.3
22	19	14.7	17.5	53	19	27.1	41.3
23	19	15.7	16.8	54	19	27.4	41.35
24	18	16.4	16.7	55	19	27.5	41.5
25	19	15.1	16.1	56	19	27.6	41.6
26	19	14.5	17.7	57	19	27.7	41.7
27	19	15.1	16	58	19	27.9	41.8
28	19	15.2	17	59	19	28	41.8
29	19	14.4	14.6	60	19	28.1	41.9
30	20	15.6	19	61	19	27.9	41.8
31	18	14.5	17.7	62	19	28.2	41.9

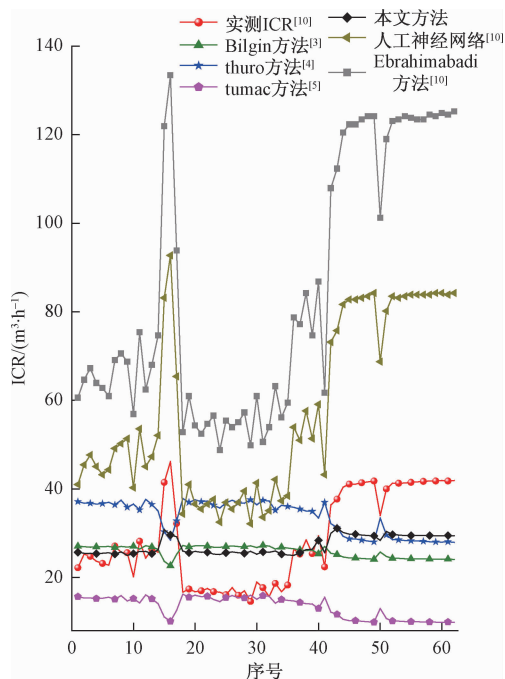


图 4 本文与已有模型和实测结果对比

Fig. 4 Comparison of the predicted values achieved from the new model and previous model with the measured data

因素的模糊不确定性特点,对铣挖隧道的悬臂式隧道掘进机工作性能预测方法进行了深入研究。由此可得如下结论:

(1)考虑围岩岩性与施工设备条件因素的综合影响及其影响的模糊不确定性,引入模糊推理理论,提出了基于模糊推理的隧道铣挖瞬时切割速率 ICR 的预测方法。

(2)本文方法不仅能反映围岩岩性与施工设备条件的综合影响及其影响的模糊性与不确定性特点,还因本文方法最大限度地利用了已有工程实测数据或工程经验而使本文方法的实用性得到了强有力的保证。

(3)通过与现有方法分析以及实测结果的比较分析,表明了本文方法的合理性与可行性。

参考文献:

- [1] Bilgin N, Dincer T, Copur H, *et al.* Some geological and geotechnical factors affecting the performance of a roadheader in an inclined tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2004, 19(6): 629-636.
- [2] Gehring K H. Cutting comparison[J]. *Tunnels & Tunnelling International*, 1989, 21(11): 27-30.
- [3] Bilgin N, Seyrek T, Erding E, *et al.* Roadheaders

2.2 结果与分析

将实例数据代入本文所建立的基于模糊推理的 ICR 预测模型进行分析,并将其分析结果与 Bilgin 公式^[3]、Thuro 公式^[4]、Tumac 公式^[5]、Ebrahimabadi 公式^[10]和人工神经网络^[10]方法的预测结果进行对比分析,如图 4 所示。由图 4 可知,前 15 组实例中,本文方法预测值与实测值最为接近,其次为 Bilgin 公式^[3]预测值。第 16~35 组实例中 Tumac 公式^[5]预测值与实测 ICR 最为接近,其次为本文方法预测值。第 36~62 组实例中本文方法预测值与实测 ICR 最为接近,其次为 Thuro 公式^[4]预测值。就综合预测效果而言,本文方法具有较明显的合理性。

3 结论

本文综合考虑围岩岩性及施工设备条件对悬臂式隧道掘进机铣挖瞬时切割速率的影响,并结合各影响

- glean valuable tips for Istanbul Metro[J]. Tunnels & Tunnelling International, 1990, 22.
- [4] Kahraman E, Kahraman S. The performance prediction of roadheaders from easy testing methods [J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2015, 75(4):1-12.
- [5] Tumac D, Bilgin N, Feridunoglu C, *et al.* Estimation of Rock Cuttability from Shore Hardness and Compressive Strength Properties[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2007, 40(5):477-490.
- [6] Abdolreza Y C, Siamak H J. A new model to predict roadheader performance using rock mass properties [J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2013, 19(1):51-56.
- [7] Zhang Q, Han Z, Zhang M, *et al.* New model for predicting Instantaneous Cutting Rate of axial-type roadheaders[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2017, 21(1):168-177.
- [8] 刘勇健. 基于智能算法的地下水位动态预测模型的建立与应用[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(3): 55-57. [LIU Y J. The establishment and application of dynamic prediction model of groundwater level based on intelligent algorithm[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(3): 55-57. (in Chinese)]
- [9] Avunduk E, Tumac D, Atalay A K. Prediction of roadheader performance by artificial neural network [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2014, 44(3):3-9.
- [10] Ebrahimabadi A, Azimipour M, Bahreini A. Prediction of roadheaders' performance using artificial neural network approaches (MLP and KOSFM) [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(5):573-583.
- [11] 肖治宇, 陈昌富, 季永新. 基于自适应神经-模糊推理系统的软土路基沉降预测模型[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6):61-65. [XIAO Z Y, CHEN C F, JI Y X. Settlement prediction of soft clay roadbed based on adaptive Neuro-Fuzzy inference system model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(6):61-65. (in Chinese)]
- [12] Wang L X. A course in fuzzy systems and control [M]. Prentice-Hall, Inc, 1996.
- [13] GB/T 50218-2014 工程岩体分级标准[S]. [GB/T 50218-2014 Standard of engineering classification of rock masses[S]. (in Chinese)]
- [14] 王石春, 何发亮, 李苍松. 隧道工程岩体分级 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007. [WANG S C, HE F L, LI C S. Classification of surrounding rockmass in tunnelling engineering [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007. (in Chinese)]
- [15] Tatiya R R. Surface and underground excavation: methods, techniques and equipment [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013, 330-336.
- [16] Bilgin N, Kuzu C, Eskikaya S. Cutting performance of rock hammers and roadheaders in Istanbul metro drivages[C]// Golser J, Hinkel W J, Schubert W. Proceedings of the world tunnel congress '97 on tunnels for people. Vienna, 1997: 455-460.
- [17] Keles S. Cutting performance assessment of a medium weight roadheader at Çayırhan coal mine [D]. Ankara: Middle East Technical University, 2005.
- [18] Bilgin N, Yazici S, Eskikaya S. A model to predict the performance of roadheaders and impact hammers in tunnel drivages [C]//Barla G. Proceedings of the Eurock '96 on prediction and performance in rock mechanics and rock engineering. 1996, 1/2:715-20.

责任编辑:张明霞

(上接第79页)

- [23] SLOAN S W, KLEEMAN P W. Upper bound limit analysis using discontinuous velocity fields[J]. Comp. Methods in Appl. Mech. of Engrg, 1995, 127(3):293-314.
- [24] MICHALOWSKI R L. Limit analysis in stability calculations of reinforced soil structures [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1998, 16(6): 311-311.
- [25] 应宏伟, 张金红, 王小刚, 等. 有限土体刚性挡墙平动模式被动土压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 978-986. [YING H W, ZHANG J H, WANG X G, *et al.* Experimental analysis of passive earth pressure against rigid retaining wall under translation mode for finite soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 978-986. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞