中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

詹金武,李涛,李超. 基于人工智能的 TBM 选型适应性评价决策支持系统[J]. 煤炭学报,2019,44(10):3258-3271. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1316

ZHAN Jinwu,LI Tao,LI Chao. Decision support system of adaptability evaluation for TBM selection based on artificial intelligence[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(10):3258-3271. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1316

移动阅读

基于人工智能的 TBM 选型适应性评价决策支持系统

詹金武,李 涛,李 超

(北京交通大学 土木建筑学院,北京 100044)

摘 要:随着我国西部的大开发和“一带一路”的建设,迫切需要大力发展交通、矿山、水利等重大“生命线”工程,而深埋长大隧道往往是这些生命线工程的关键控制性工程。限于地质、地形和自然环境条件,从施工工期、造价和技术进步 3 个方面考虑,TBM(Tunnel Boring Machine)工法是深长隧道开挖的优先选择。深长隧道 TBM 的适应性受到众多因素的影响,难以进行有效和定量的评价。主要影响因素为不良地质,如突涌水、软岩大变形、断层破碎带、岩爆等;此外,隧道的设计、隧址地质条件等对 TBM 的选型也有重要影响。人工智能方法具有能够分析复杂因素影响和处理复杂问题的突出特点,可用于 TBM 选型适应性的有效评价。首先,基于层次分析法和模糊综合评判方法,通过 TBM 选型评价知识的获取,选取能够充分反映不同机型地质适应性差异、具有代表性和区分度高的 7 个评价指标,构建了 TBM 选型适应性评价指标体系及模糊综合评价模型,确定了各个评价指标的模糊隶属函数。其次,通过编写权重辅助计算程序,确定了 3 种 TBM 机型选型适应性评价指标的权重;其中,为了避免单指标决策的局限性和主观臆断的缺陷,采用智能设计理论和决策理论相结合的方法,完成了多指标智能决策的定量化选型。将评价模型与知识获取相结合,以规则的形式表示知识,构建了 TBM 选型适应性评价知识库。最后,基于智能评价决策支持系统平台 IDSDP,开发了 TBM 选型适应性智能评价决策支持系统,为深长隧道 TBM 选型提供了一种新的量化评价方法。利用该系统对高黎贡山铁路隧道 TBM 的选型进行了适应性评价,评价结果与实际情况相吻合。

关键词:TBM 选型;层次分析法;模糊数学;人工智能;决策支持系统

中图分类号:U455 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-9993(2019)10-3258-14

Decision support system of adaptability evaluation for TBM selection based on artificial intelligence

ZHAN Jinwu,LI Tao,LI Chao

(*School of Civil Engineering,Beijing Jiaotong University,Beijing* 100044,*China*)

Abstract:With the construction of the Western region of China and the development of “the Belt and Road Initiatives”,there is an urgent need to develop some major “lifeline” projects such as transportation,mining and water conservancy. Deep buried tunnels are often the key control projects for these lifeline projects. Limited to geological,topographical and natural environmental conditions,the TBM method is the preferred choice for deep tunnel excavation in

收稿日期:2018-10-04 **修回日期**:2019-06-18 **责任编辑**:郭晓炜
基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2014CB046906)
作者简介:詹金武(1989—),男,福建莆田人,博士。E-mail:zhanjinwu1989@foxmail.com
通讯作者:李 涛(1960—),男,云南昆明人,教授。E-mail:taoli@bjtu.edu.cn

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

terms of construction period, cost and technical progress. The adaptability of deep tunnel TBM is affected by many factors, making it difficult to conduct an effective and quantitative evaluation. The main influencing factors are unfavorable geology, such as inrush water, large soft rock deformation, fault fracture zone, rock burst, etc. In addition, the design of the tunnel and the geological conditions of the tunnel site also have an important impact on the selection of TBM. The artificial intelligence method has the outstanding features of being able to analyze the influence of complex factors and dealing with complex problems, and can be used for the effective evaluation of the adaptability of TBM selection. Firstly, based on the analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation method, through the acquisition of TBM selection knowledge, seven indicators which can fully reflect the differences of adaptability, representativeness and high discrimination are selected. The evaluation index system and fuzzy comprehensive evaluation model of TBM selection adaptability are constructed, and the fuzzy membership function of each evaluation index is determined. Secondly, the weights of three TBM model selection adaptability evaluation indicators are determined by compiling the weights assistant calculation program. Among them, in order to avoid the limitation of single index decision and the defect of subjective assumption, a combination of intelligent design theory and decision-making theory is adopted to carry out the quantitative selection of multi-indicator intelligent decision-making. Combining the evaluation model with knowledge, expressing the knowledge in the form of rules, the TBM selection adaptive evaluation knowledge base is constructed. Finally, based on the IDSDP intelligent evaluation and decision system platform, an intelligent evaluation and decision-making system for TBM selection is developed, which provides a new quantitative evaluation method for the deep tunnel TBM selection. The adaptability of TBM selection for Gaoligongshan Railway Tunnel is evaluated by using the decision-making system, and the evaluation results are in good agreement with the actual situation.

Key words: TBM selection; AHP; fuzzy mathematics; artificial intelligence; decision support system

为了保持国民经济快速可持续发展,近年来我国修建了大量的矿山、水利、交通等深埋长大隧道。对于深埋、长大隧洞的施工,通常优先采用隧洞掘进机(TBM)施工,其具有快速、优质、安全等优点[1]。与常规钻爆法相比,整体上比较经济。由于地质环境的复杂性,TBM 在施工时往往面临着众多不确定因素的影响,因选型不当而引起的工程事故时有发生[2]。TBM 设备的正确选型是保障隧道工程顺利进行的前提,具有十分重要的意义。

目前,诸多国内外学者针对 TBM 选型的研究一般以定性分析为主。如 BIENIAWSKI Z T 等[3]基于西班牙和埃塞俄比亚大量隧道数据,对数据进行统计分析,建立了 TBM 选型的具体标准。KARAMI M 等[4]认为地质条件和岩体力学特性对 TBM 的选型起到重要的影响作用。采用 3 种 RMR,Q 和 GSI 岩体质量分类标准对隧道进行岩体质量分级,最终选取了适宜的 TBM 机型。吴世勇等[5]、叶定海等[6]、张军伟等[7]、杨继华等[8]分别对锦屏二级水电站深埋特长引水隧洞、南水北调西线工程引水隧洞、大伙房输水工程特长隧洞、厄瓜多尔 CCS 水电站引水隧洞 TBM 选型及工程地质问题进行了探讨,基于引水隧洞的工程地质、水文地质条件分析,研究对比了不同类型 TBM 的特点及适用地质条件,并对 TBM 机型进行了合理的选型。毛卫洪等[9]、赵录学等[10]对 TBM 的选型原则进行了论述,并给出了相应的选型依据。由此可见,现今针对 TBM 选型大多在多因素定性分析的基础上,依靠选型依据及原则,凭借多年经验进行选型;而科学、完善的定量选型方法研究较少。

人工智能是在计算机科学、控制论、信息论、心理学、语言学等多种学科相互渗透的基础发展起来的一门新兴边缘学科,主要用于模仿和实现人类的智能行为。目前,人工智能应用领域涵盖了符号计算、模式识别、专家系统、机器翻译等方面,其 2 个主要特点为从人工知识表达到大数据驱动的知识学习技术,以及从分类型处理的复杂数据转向多环境的认知、学习、推理[11]。

TBM 隧道从勘探、设计到施工涉及到地质、机械、电子、刀具破岩、围岩稳定、施工安全控制等巨量的各种数据,这就为人工智能的应用提供了舞台。目前,随着 TBM 隧道的大量兴建,人工智能开始逐渐应用于该领域。如 OKUBO S 等[12]基于所获得的知识,提出了一套适用于日本的 TBM 适应性评价专家系统,用于评估隧道掘进机的适用性。SHAHEEN A A 等[13]开发了一套模糊专家系统,提出了一种从专家信息中提取信息的方法,系统能够完善的描述影响 TBM 隧道掘进机的不同因素。SALIMI A 等[14]基于伊朗 2 个 TBM 项目,建立了 TBM 掘进性能数据库,采用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)和支持向量

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

回归(SVR)2 种软件技术方法,能够有效实现对 TBM 掘进性能的预测。何小新等[15]研制了掘进机选型智能决策支持系统,用于支持掘进机概念设计阶段的选型决策,主要进行掘进机主参数的确定,但未充分考虑掘进机与地质的适应性问题。林君[16]首次将基于神经网络的预测控制应用于掘进机的控制,提出了基于神经网络的预测控制算法,建立了具有较好收敛性和实时性的隧道掘进机神经网络预测控制模型。综上所述,目前还少有基于人工智能的 TBM 选型多因素综合分析的量化评价方法。

笔者采用人工智能中的智能设计理论和决策理论,将知识获取与模糊综合评价模型相结合,开展多指标决策的 TBM 定量化选型研究。其中,以规则的形式表示人工知识,构建复杂地质条件下 TBM 选型适应性评价知识库,实现库中知识的添加、修改和更新等功能。基于 IDSDP 智能平台开发 TBM 选型适应性评价决策支持系统,达到 TBM 选型适应性智能评价决策的目的。

1 TBM 选型适应性评价决策方法

人工智能决策支持系统 IDSS(Intelligent Decision Support System)是一类具有专门知识和经验的计算机智能程序系统[11],其是专家系统 ES(Expert System)与决策支持系统 DSS(Decision Support System)的结合。IDSS 不仅充分发挥了以知识推理形式解决定性分析问题的专家系统特点,同时也发挥了以模型计算为核心解决定量分析问题的决策支持系统特点,两者的结合使得定性及定量分析能够有机结合起来,从而能更有效地解决半结构化问题和非结构化问题,提高了解决问题的能力和范围。

通过对人类专家问题求解能力的建模,采用人工智能中的知识表示和知识推理技术来模拟通常由专家才能解决的复杂问题,达到具有与专家同等解决问题能力的水平,具有高效、准确、迅速等特点。

1.1 系统的基本结构

系统的基本结构主要由人机交互界面、知识获取、知识库、推理机、解释器及综合数据库等 6 个部分组成(图 1)。知识获取负责建立、修改和扩充知识库;推理机是实施问题求解的核心执行机构;解释器用于对求解过程做出说明,并回答用户的提问;知识库是问题求解所需要的领域知识的集合;综合数据库用于存放系统运行过程中产生的所有信息以及所需要的原始数据等。

1.2 知识与数学模型的结合

知识是定性分析的主要资源,数学模型是定量分析的主要资源,将两者结合起来使用,能够更充分的发挥系统的决策效果[17]。数学模型的种类很多,如模糊数学方法、德尔菲法、故障树法、蒙特卡罗法、可靠性分析法、智能神经网络法、事件树分析法等。由于理论和实践中并没有形成各指标对 TBM 选型影响程度的定量判断标准,且 TBM 选型适应性评价受到许多因素的影响,因此首先需要筛选出主要或关键的影响因素,然后尽可能采用某种可度量的指标对其进行描述。

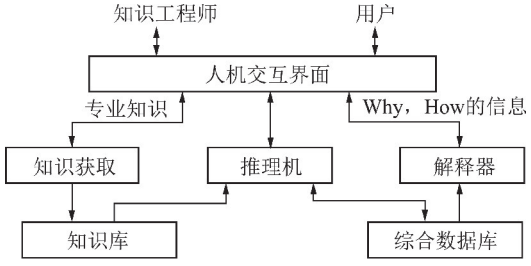

图 1 系统的基本结构

Fig. 1 Basic structure of the expert system

针对如此多的影响因素,模糊综合评判方法能够更为准确和全面地反映各指标对 TBM 选型的重要性。因此,本文选择模糊综合评价模型来构建 TBM 选型适应性评价决策支持系统的模型,将模糊综合评价模型与知识结合起来,将模型作为知识的一种形式,即过程性知识,加入到知识推理过程中。

1.3 IDSDP 智能平台

本文采用智能评价决策支持系统平台 IDSDP(Intelligent Decision System Development Platform)[11]构建 TBM 选型适应性评价决策支持系统。该平台是中科院计算所智能计算机科学开放实验室研发的一种功能强、实用性好的软件工具,为建造大规模管理和决策信息系统提供良好的开发环境。系统数据库基于 MS Access,MS SQL Server2000,ORACLE 等建立;主要实现交互式数据分析和快速的信息检索。IDSDP 中集成了多种人工智能技术,包括平台多主体系统环境 MAGE(Multi-Agent Environment)、面向对象的知识处理系统 OKPS(Object-oriented Knowledge Processing System)等,支持用 Java 语言的开发。

1.4 模糊综合评价模型

将模糊数学方法应用到 TBM 选型适应性评价中,通过隶属度将 TBM 选型的模糊性转化为确定性。

假设评价目标集 $O=\{O_1, O_2, \cdots, O_n\}$ 的评价指标集 $V=\{V_1, V_2, \cdots, V_m\}$,模糊综合评价的基本模型为

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

$$D = \overline{W} \times \boldsymbol{R} \text{ 或 } \{D_1, D_2, \cdots, D_n\} = \{w_1, w_2, \cdots, w_m\} \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,D 为 O 的综合评判值集合;D_i 为评价目标 O_i 的适应度,$0 \leqslant D_i \leqslant 1$,"0"表示绝对不适应,而"1"表示绝对适应;$\overline{W}$ 为评价指标 V 的总排序权重集,其中 $w_i \geqslant 0$,且 $\sum_{i=1}^{m} w_i = 1$;$\boldsymbol{R}$ 为 V 对 O 的隶属度矩阵。

1.5　评价指标的模糊隶属函数与权重

由于评价指标具有不同的单位、属性、重要程度等,它们之间没有公度性,因此不能直接进行相互比较。实现评价指标公度性的方法是采用模糊隶属函数。普通集合与元素的关系只有 2 种:属于和不属于。而模糊集合与元素的关系可用[0,1]上的任一数值来表示:取"0"表示模糊集合不包含该元素,取"1"表示模糊集合完全包含该元素,取"0.3"表示模糊集合包含该元素的概率为 0.3。因此,该数值称为元素对该模糊集合的隶属度。由此可见,隶属度是表现某个元素对模糊集合隶属关系不确定性大小的指标,建立能客观反映评价指标对 TBM 选型影响规律的隶属函数是应用模糊综合评价法的关键。为简化问题,本文仅采用线性隶属函数,分布形式包括偏小型、偏大型和梯形 3 种。

评价指标的权重采用层次分析法 AHP(Analytic Hierarchy Process)确定。AHP 是一种定量分析与定性分析相结合的多目标决策分析方法,它把数学处理与人的经验和主观判断相结合,能够有效地分析目标准则体系层次间的非序列关系和综合测度评价的判断和决策[18]。AHP 把与决策总是有关的元素分解成 3 个层次:目标层、准则层和指标层,其中上一层次指标对下一层次指标起支配作用。在构造递阶层次后,通过两两比较同一层次中不同元素间对于上一支配层中元素的影响大小,构建互反的判断矩阵,继而通过此矩阵计算得到在单一准则下各个元素的相对排序权重。运用 AHP 解决问题的步骤如下:① 评价指标层次化;② 建立判断矩阵;③ 层次单排序及其一致性检验;④ 层次总排序及其一致性检验。

(1)指标层次化评价

根据要达到的评价目标,按照评价指标间的相互影响以及隶属关系,将指标层次的递阶由高到低分为目标层、准则层和指标层(图 2)。

(2)判断矩阵建立

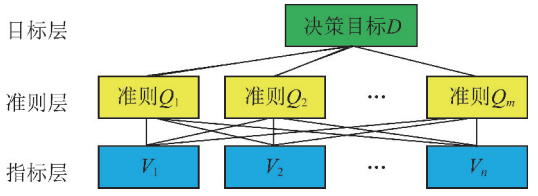

图 2　层次结构模型

Fig. 2　Hierarchical model

判断矩阵建立的关键是对成对指标相对重要性进行量化度量。对于评价指标 V_i 和 V_j($i,j = 1, \cdots, n$)相比,SAATY 等[18](1980)提出了 1 ~ 9 及其倒数标度法,对判断矩阵 $\boldsymbol{A}[a_{ij}]$ 赋值(表 1)。在表中,V_i 和 V_j 相比得 a_{ij},而 V_j 与 V_i 相比则得到 $a_{ji} = 1/a_{ij}$。

表 1　判断矩阵 $A[a_{ij}]$ 判定标度法

Table 1　Scale method of judgment matrix $A[a_{ij}]$ determination

a_{ij} 标度	赋值依据
1	V_i 和 V_j 相比同样重要
3	V_i 比 V_j 稍微重要
5	V_i 比 V_j 明显重要
7	V_i 比 V_j 强烈重要
9	V_i 比 V_j 极端重要
2,4,6,8	介于以上 2 种判断的中值

(3)层次单排序及其一致性检验

如果 $\boldsymbol{\Omega}(w_i)$ 是矩阵 $\boldsymbol{A}$ 对应于最大特征值 $\lambda_{\max}$ 的特征向量,$\boldsymbol{\Omega}$ 经归一化后即为同一层次指标对于上一层次某个指标相对重要性的权重值排序,即层次单排序 SHA(Single Hierarchical Arrangement)。完成某一层次 n 个元素的权重排序后,对其进行一致性检验[18]:

$$\mathrm{CR} = \mathrm{CI}/\mathrm{RI} \tag{2}$$

其中,CR 为一致性比例;$\mathrm{CI} = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$,$\lambda_{\max}$ 为矩阵最大特征值;n 为矩阵阶数;RI 为与阶数 n 有关的平均随机一致性指标。若 CR<0.10 时,则 $\boldsymbol{A}$ 满足一致条件,否则需对其修正,直到满足一致性要求。

(4)层次总排序及其一致性检验

在完成 SHA 后,还要得到各指标尤其是最低层中各指标对于目标层的排序权重,即层次总排序 THA(Total Hierarchical Arrangement)。

考虑准则层的指标集 $Q = \{Q_1, Q_2, \cdots, Q_m\}$,它的 THA 权重值分别为 $w_1, \cdots, w_m$;假设 $V = \{V_1, V_2, \cdots, V_m\}$ 为 Q 下一层次的指标集,它关于 Q_j 的 SHA 权重分别为 $w_{1j}, \cdots, w_{nj}$。设 V 中与 Q_j 相关的指标的成对比较判断矩阵在 SHA 中已经过一

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

致性检验,并求得相应的 CI_j 和 RI_j,则 V 的 THA:

$$CR = \left(\sum_{j=1}^{m} CI_j w_j\right) \Big/ \left(\sum_{j=1}^{m} RI_j w_j\right) \tag{3}$$

当 CR<0.1 时,认为 THA 结果具有一致性。

1.6 TBM 选型综合适应度及分级评价标准

(1)综合适应度计算

图 3 所示为长大隧道综合适应性度计算示意图,这类隧道往往由具有不同地质条件的地质段组成。由于不同地质段评价指标取值不一,因此各段的适应度不同。为了对整条隧道 TBM 选型适应性进行评价,需要对各段适应度进行加权平均,故引入如下的综合适应度 $\overline{D}$:

$$\overline{D} = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{n} D_i L_i \tag{4}$$

式中,L_i 为隧道第 i 段长度;D_i 为隧道长度 L_i 的适应度;L 为隧道总长度。

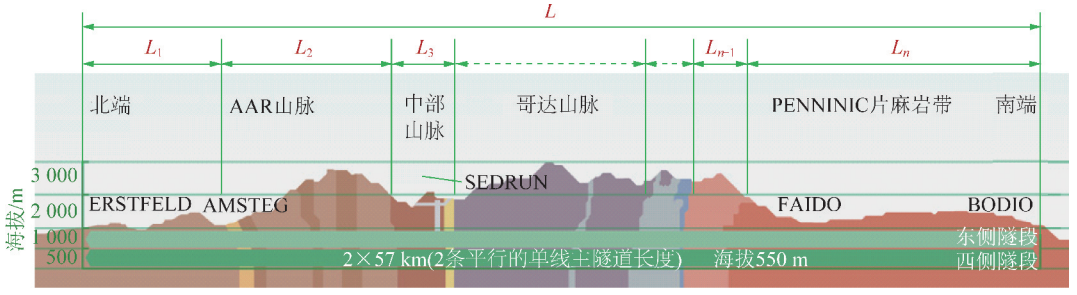

图 3 长大隧道综合适应度计算示意

Fig. 3 Schematic diagram of comprehensive fitness calculation for long tunnels

(2)分级评价标准

为了将按上述方法得到的适应度 $\overline{D}$ 与 TBM 选型相关联,需要对其进行划分以便于应用。结合目前国内外 TBM 的应用情况,综合分析了 TBM 选型适应性评价的适应范围,在广泛使用的四级划分基础上建议将 TBM 选型适应性评价划分为 5 个等级(表 2)。

表 2 TBM 选型适应度分级评价标准

Table 2 TBM selection fitness evaluation criteria

等级		适应度	适应性评价
I		≥ 0.9	完全适应
II	II_a	0.8 ~ 0.9	适应(高度)
	II_b	0.7 ~ 0.8	适应(中度)
III		0.6 ~ 0.7	适应(低度)
IV		0.4 ~ 0.6	弱适应
V		≤ 0.4	不适应

2 TBM 选型知识获取及知识库构建

2.1 TBM 选型评价知识获取

根据 TBM 的选型依据、原则、各类 TBM 优缺点对比以及 TBM 掘进施工遇到的岩土工程危害分析可知[2,5-10],影响 TBM 掘进机选型的因素众多,需对影响因素进行筛选,选取能够充分反映各机型适应性差异、具有代表性且区分度高的指标因素。基于此,本文选取了隧道设计参数、地质条件、不良地质问题 3 个方面的影响因素。

2.1.1 隧道设计参数

隧道设计参数主要由隧道的几何条件与线型条件组成,TBM 掘进机的选型首先要满足这 2 个条件的要求。实际工程实践情况表明,各种机型均能够适应 30‰的线路纵坡坡度,但是对隧道平曲线半径适应程度不同,因此影响 TBM 选型的主要隧道设计参数为隧道平曲线半径。不同类型 TBM 的隧道平曲线半径适应区间见表 3[10]。

表 3 TBM 平曲线半径适应区间

Table 3 Adaptation interval table for TBM horizontal curve radius m

TBM 类型	开敞式	单护盾	双护盾
隧道平曲线半径	一般 400 困难 300	一般 700 困难 500	一般 500 困难 350

综上分析,按隧道平曲线半径将不同类型 TBM 适应性评价标准分为以下几个等级(表 4)。

表 4 不同类型 TBM 平曲线半径适应性评价标准

Table 4 Evaluation criteria for horizontal curve radius adaptability of TBMs m

TBM 类型	评价标准			
	不适应	弱适应	比较适应	强适应
敞开式	<300	300 ~ 400	400 ~ 500	≥ 500
单护盾	<500	500 ~ 700	700 ~ 800	≥ 800
双护盾	<350	350 ~ 500	500 ~ 600	≥ 600

2.1.2 地质条件

地质条件主要考虑岩性、岩体结构 2 个方面。岩性因素采用的评价指标为岩石单轴抗压强

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

度(UCS),岩体结构采用岩体完整性系数 K_v 指标来刻画。

(1)岩石单轴抗压强度

UCS 是评价 TBM 选型适应性的一项重要地质指标,其很大程度上决定了刀盘破碎岩石的难易程度。各种不同类型的 TBM 适应单轴抗压强度的范围不同,敞开式 TBM 主要适用于岩体较完整 ~ 完整的硬岩地层(50 ~ 150 MPa);单护盾式 TBM 主要适用于有一定自稳能力的软岩(5 ~ 60 MPa);双护盾 TBM 主要适用于岩体较完整且有一定自稳能力的软岩 ~ 硬岩地层(30 ~ 90 MPa)[19]。

综上分析,按 UCS 将不同类型 TBM 适应性评价标准分为以下几个等级(表 5)。

表 5　不同类型 TBM 单轴抗压强度适应性评价标准

Table 5　Evaluation criteria for uniaxial compressive strength adaptability of TBM　MPa

TBM 类型	评价标准			
	不适应	弱适应	比较适应	强适应
敞开式	≤30 或 >250	30 ~ 40 或 200 ~ 250	40 ~ 50 或 150 ~ 200	50 ~ 150
单护盾	≤5 或 > 100	5 ~ 7.5 或 55 ~ 60	7.5 ~ 10 或 50 ~ 55	10 ~ 60
双护盾	≤10 或 > 140	10 ~ 20 或 120 ~ 140	20 ~ 30 或 100 ~ 120	30 ~ 100

(2)岩体完整性系数

K_v 是影响 TBM 选型适应性的另一个重要地质指标。从国内 TBM 工程的掘进情况可知[20-23],当结构面特别发育或岩体非常完整时,不利于 TBM 掘进;当 $0.45 < K_v < 0.75$ 时,岩体完整性较低,TBM 具有较高的掘进效率,有利于 TBM 掘进。敞开式 TBM 主要适用于完整 ~ 较完整的硬岩地层;单护盾式 TBM 主要适用于较破碎且具有一定自稳能力的软岩;双护盾式 TBM 主要适用于较完整的且具有一定自稳能力的软岩及硬岩地层[19]。

综上分析,按 K_v 将不同类型 TBM 适应性评价标准分为以下几个等级(表 6)。

2.1.3　不良地质问题

结合工程实践经验及研究成果[2-8],综合考虑了不良地质问题发生频率及危害程度,比较了不同 TBM 机型对上述不良地质问题响应的差异程度,本文选取突涌水、岩爆、断层破碎带、围岩大变形作为影响 TBM 选型的不良地质问题评价指标。

(1)突涌水。隧道突涌水是 TBM 施工过程经常遇到的难以避免的一种不良地质问题。HAMIDI J K 等[24]和 DUDT J P 等[25]按隧道涌水量大小对 TBM 可掘进进行分级,分别为<10,10 ~ 30,30 ~ 70,70 ~ 100,>100 L/s。其中,涌水量小于 10 L/s 的分值最高,为 5;涌水量大于 100 L/s 分值最低,为 0。对于 TBM 工程遇到的突涌水问题,解决该问题最有效的方式是采用最少的钻孔,对刀盘前方施做全环封闭栓塞式的超前预灌浆处理。对于护盾式 TBM,由于盾壳较长,无效钻孔距离长,不仅增加了钻孔成本和角度,同时内部空间有限,无布置钻机设备的位置,无法进行全环封闭的超前预灌浆;而敞开式 TBM 护盾长度较短,仅有 3.0 ~ 4.5 m 长的顶、侧护盾,具有足够的空间进行支护设备的布置,满足预灌浆孔的钻孔要求。因此,敞开式 TBM 对突涌水的响应最好,单护盾 TBM 与双护盾 TBM 对突涌水的响应差异不大。

表 6　不同类型 TBM 岩体完整性系数适应性评价标准

Table 6　Evaluation criteria for integrity coefficient of rock mass adaptability of TBM

TBM 类型	评价标准			
	不适应	弱适应	比较适应	强适应
敞开式	≤ 0.35 或 > 0.95	0.35 ~ 0.45 或 0.85 ~ 0.95	0.45 ~ 0.55 或 0.75 ~ 0.85	0.55 ~ 0.75
单护盾	≤ 0.15 或 > 0.75	0.15 ~ 0.25 或 0.65 ~ 0.75	0.25 ~ 0.35 或 0.55 ~ 0.65	0.35 ~ 0.55
双护盾	≤ 0.25 或 > 0.85	0.25 ~ 0.35 或 0.75 ~ 0.85	0.35 ~ 0.45 或 0.65 ~ 0.75	0.45 ~ 0.65

综上分析,按突涌水涌水量将不同类型 TBM 适应性评价标准分为以下几个等级(表 7)。

表 7　不同类型 TBM 涌水量适应性评价标准

Table 7　Evaluation criteria for water inflow adaptability of TBM　L/s

TBM 类型	评价标准			
	不适应	弱适应	比较适应	强适应
敞开式	≥ 100	100 ~ 60	60 ~ 20	<20
单护盾	≥ 85	85 ~ 45	45 ~ 5	<5
双护盾	≥ 85	85 ~ 45	45 ~ 5	<5

(2)岩爆。岩爆是深埋隧道及地下工程中常见的一种地质灾害。依据岩爆的主要现象及围岩强度应力比值,将岩爆烈度划分为轻微、中等、强烈、极强 4 级[26]。岩爆对不同类型 TBM 的影响作用不同,由于敞开式 TBM 施工封闭性较差,岩爆能够直接威胁到人员及设备的安全,所造成的危害程度较大,其抵抗岩爆的能力较弱,当岩爆等级超过 II 级时,即会对 TBM 的掘进产生较为不利的影响;由于护盾式 TBM 具有较长的护盾,施工封闭性较好,对岩爆有一定的抵御作用,其抵抗岩爆的能力较强,

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

当岩爆等级超过 III 级时,才会对 TBM 的掘进产生较为不利的影响。

综上分析,按岩爆烈度分级标准将不同类型 TBM 适应性评价标准分为以下几个等级(表 8)。

表 8 不同类型 TBM 岩爆适应性评价标准

Table 8 Evaluation criteria for rockburst adaptability of TBM

TBM 类型	评价标准			
	不适应	弱适应	比较适应	强适应
敞开式	<1	1~4	4~7	≥7
单护盾	<1	1~2.5	2.5~4	≥4
双护盾	<1	1~2.5	2.5~4	≥4

(3)断层破碎带。TBM 进入断层破碎段经常会遇到围岩松动和坍塌等问题,一般断层破碎带按其宽度及延伸长度划分为 5 个级别[27]。根据现有的研究成果可以发现[28-29],当破碎带宽度小于 2 m 时,对隧道施工有比较小的影响;当破碎带宽度小于 5 m(规模较小)时,TBM 掘进可采用快掘进、低转速、小行程的方法直接通过;当破碎带宽度为 10~30 m(规模较大)时,隧道围岩较破碎,无法直接采用 TBM 掘进通过,需对隧道掘进工作面及周边破碎岩体灌浆加固处理后缓慢掘进通过;当破碎带宽度大于 30 m(大规模)时,隧道围岩很破碎,不宜采用 TBM 施工。

另外,不同 TBM 类型的结构构造是不一致的,敞开式 TBM 具备较为灵活的操作空间,可以灵活的进行灌浆补强等措施;而护盾式 TBM 则由于配备较长的盾体,工作面封闭,遭遇断层破碎带时预处理较为困难。

综上分析,按断层破碎带宽度将不同类型 TBM 适应性评价标准分为以下几个等级(表 9)。

表 9 不同类型 TBM 断层破碎带适应性评价标准

Table 9 Evaluation criteria for fault zone adaptability of TBM m

TBM 类型	评价标准			
	不适应	弱适应	比较适应	强适应
敞开式	≥40	40~22.5	22.5~5.0	<5
单护盾	≥25	25~13.5	13.5~2.0	<2
双护盾	≥30	30~16	16~2	<2

(4)围岩挤压大变形。围岩挤压大变形是 TBM 施工过程常见的一种不良地质问题,据统计,因围岩大变形而引起的 TBM 卡机灾害占 TBM 重大灾害事故的 37%[2]。针对围岩挤压大变形的分级,国外学者 AYDAN Ö[30],SINGH B 等[31]和 HOEK E 等[32]分别提出了相应的围岩挤压变形分类标准,其中 HOEK E[33]按围岩强度应力比(σ_c/σ_1)与围岩相对位移值的对应关系将围岩挤压变形分为以下几个级别(图 4)。σ_c/σ_1 为岩体抗压强度与最大初始地应力之比;收敛应变 ε=围岩收敛位移/开挖跨度×100。

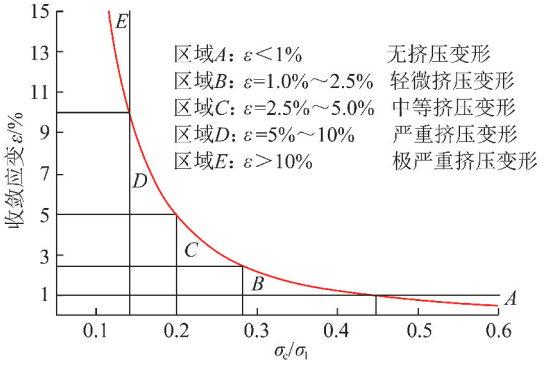

图 4 Hoek 围岩挤压变形等级判断

Fig. 4 Surround ground deformation rating judgment diagrams by Hoek

根据已有的研究结果可知[33-34],不同类型 TBM 承受的围岩挤压大变形风险等级不同,护盾式 TBM 具有一定长度的护盾,围岩挤压大变形容易造成护盾被卡,导致无法继续掘进,与护盾式 TBM 相比,敞开式 TBM 遭遇围岩大变形洞段时,处理措施较活,在应对围岩大变形卡机问题时更具优势。综上所述,敞开式 TBM 承受围岩挤压变形的能力最高,其次是单护盾式 TBM,双护盾式 TBM 由于具有较长的护盾,故其发生卡机的可能性最高,所承受围岩挤压变形的能力最低。

综上分析,按围岩强度应力比将不同类型 TBM 的围岩挤压变形适应性评价标准分为以下几个等级(表 10)。

表 10 不同类型 TBM 围岩挤压变形适应性评价标准

Table 10 Evaluation criteria for extrusion deformation of surrounding rock adaptability of TBM

TBM 类型	评价标准			
	不适应	弱适应	比较适应	强适应
敞开式	<0.15	0.15~0.22	0.22~0.28	≥0.28
单护盾	<0.15	0.15~0.26	0.26~0.36	≥0.36
双护盾	<0.15	0.15~0.3	0.3~0.45	≥0.45

2.1.4 TBM 选型评价指标体系的建立

通过对 TBM 选型的主要影响因素分析,获取了影响 TBM 选型的知识,由此可建立 TBM 选型的模糊综合评价指标体系(图 5)。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

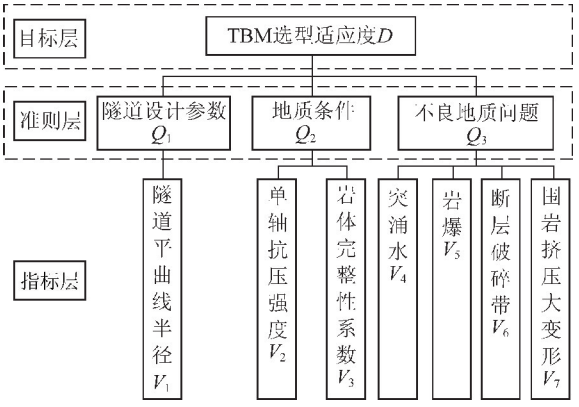

图 5　TBM 选型模糊综合评价指标体系

Fig. 5　Fuzzy comprehensive evaluation index system for TBM selection

2.2　TBM 选型评价的指标隶属函数及权重

2.2.1　TBM 选型评价指标隶属函数

以下采用前述方法构建不同类型 TBM 各评价指标的隶属函数,7 个评价指标共 21 个隶属函数。限于篇幅,仅给出不同类型 TBM 岩石单轴抗压强度的隶属函数。

(1)敞开式 TBM

$$V_{2\text{open}}(x)=\begin{cases}0 & x\leqslant 30\\ \dfrac{x-30}{50-30} & 30<x\leqslant 50\\ 1 & 50<x\leqslant 150\\ \dfrac{250-x}{250-150} & 150<x\leqslant 250\\ 0 & x>250\end{cases}\tag{5}$$

(2)单护盾 TBM

$$V_{2\text{single}}(x)=\begin{cases}0 & x\leqslant 5\\ \dfrac{x-5}{10-5} & 5<x\leqslant 10\\ 1 & 10<x\leqslant 60\\ \dfrac{100-x}{100-60} & 60<x\leqslant 100\\ 0 & x>100\end{cases}\tag{6}$$

(3)双护盾 TBM

$$V_{2\text{double}}(x)=\begin{cases}0 & x\leqslant 10\\ \dfrac{x-10}{30-10} & 10<x\leqslant 30\\ 1 & 30<x\leqslant 100\\ \dfrac{140-x}{140-100} & 100<x\leqslant 140\\ 0 & x>140\end{cases}\tag{7}$$

同理,可以构建其余不同类型 TBM 各评价指标的隶属函数。

2.2.2　TBM 选型评价指标权重计算

根据 AHP 原理,通过领域专家函询调查与相关文献调研,给出了合理的各层次评价指标的重要性权值。借助 IDSDP 平台,采用 Java 语言编写了单层次和总层次权重辅助计算程序。

(1)准则层指标权重计算

如图 5 所示,准则层的评价指标由 Q_1,Q_2 和 Q_3 组成,借助于 IDSDP 平台,通过计算得到了相应的权重计算结果(图 6),即

$$\overline{W}_Q=\{0.081\ 1,0.342\ 0,0.576\ 9\}$$

式中,$\overline{W}_Q$ 为准则层的评价指标 Q_1,Q_2 和 Q_3 三个准则层指标的权重。

图 6　TBM 选型准则层权重计算

Fig. 6　Weight calculation of TBM selection criterion layer

(2)指标层指标权重计算

准则层指标 Q_1 对应的指标层指标仅有 V_1,故其权重取 1。而准则层指标 Q_2,Q_3 对应多个指标层指标,所以分别采用不同阶次的权重辅助计算程序进行相应的权重计算。

① Q_2 指标层权重计算

采用二阶权重辅助计算程序计算得到的指标层指标 $V=\{V_2,V_3\}$ 所对应的权重集为

$$\overline{W}_{Q_2}=\{0.5,0.5\}$$

② Q_3 指标层权重计算

Q_3 的指标层由 V_4,V_5,V_6 及 V_7 四个指标组成。不同类型 TBM 适应不良地质问题的能力差异较大。因此,需按 TBM 的类型分别进行 Q_3 指标层权重计算。

采用四阶权重辅助计算程序(图 7)计算得到敞开式 TBM 指标层指标 $V=\{V_4,V_5,V_6,V_7\}$ 所对应的权重集 $\overline{W}_{Q_3\text{open}}$ 为

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

$$\overline{W}_{Q_3\text{open}} = \{0.423\,1, 0.122\,2, 0.227\,4, 0.227\,4\}$$

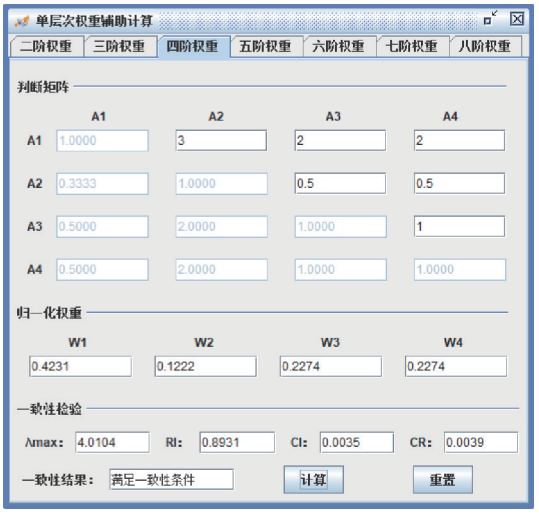

图 7 敞开式 TBM 选型 Q_3 指标层权重计算

Fig. 7 Calculation of Q_3 index layer weight for open type TBM selection

同理,分别计算得到单护盾 TBM 和双护盾 TBM 指标层指标 $V = \{V_4, V_5, V_6, V_7\}$ 所对应的权重集 $\overline{W}_{Q_3\text{single}}$, $\overline{W}_{Q_3\text{double}}$ 为

$$\overline{W}_{Q_3\text{single}} = \{0.432\,7, 0.088\,3, 0.239\,5, 0.239\,5\}$$

$$\overline{W}_{Q_3\text{double}} = \{0.359\,8, 0.081\,3, 0.199\,1, 0.359\,8\}$$

(3)总层次指标权重计算

根据单层次指标权重的计算结果,采用总层次权重辅助计算程序,分别计算不同类型 TBM 的总层次指标权重。如图 8 所示,为敞开式 TBM 权重计算结果。计算得到的敞开式 TBM 选型总层次指标权重 $\overline{W}_{\text{open}}$ 为

$$\overline{W}_{\text{open}} = \{0.081\,1, 0.171\,0, 0.171\,0, 0.244\,1, 0.070\,5, 0.131\,2, 0.131\,2\}$$

同理,分别计算得到单护盾和双护盾 TBM 选型总层次指标权重 $\overline{W}_{\text{single}}$, $\overline{W}_{\text{double}}$ 为

$$\overline{W}_{\text{single}} = \{0.081\,1, 0.171\,0, 0.171\,0, 0.249\,6, 0.050\,9, 0.138\,2, 0.138\,2\}$$

$$\overline{W}_{\text{double}} = \{0.081\,1, 0.171\,0, 0.171\,0, 0.207\,6, 0.046\,9, 0.114\,9, 0.207\,6\}$$

2.3 TBM 选型知识库构建

采用面对对象知识表示方法以 TBM 选型适应性评价为中心构建知识库系统(OKPS),将定量评价模型与数据库结合,定性模型与知识库结合,分别做出定量计算和智能推理决策。结合前述的 TBM 选型适应性评价知识获取,得到了 TBM 选型适应性评价决策的知识模型,并构建了敞开式 TBM 选型适应评价决策知识库(图 9)。

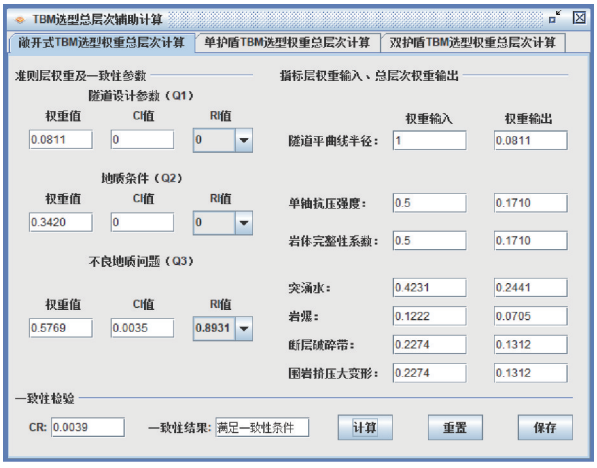

图 8 敞开式 TBM 选型总层次指标权重计算

Fig. 8 Total level index weight calculation of open type TBM selection

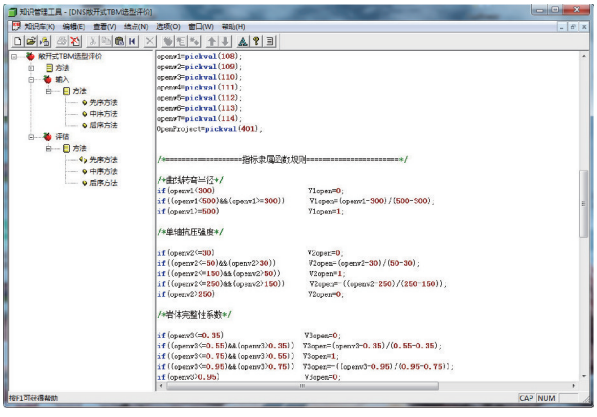

图 9 敞开式 TBM 选型适应性评价决策支持系统知识库

Fig. 9 Knowledge base of evaluation decision support system for open type TBM selection adaptability

获取的知识采用知识树的形式表达(图 10),在知识树中,每个结点都对应 3 种特殊的方法:先序(Preorder)方法、中序(Inorder)方法和后序(Postorder)方法。每个结点的知识都以特定的规则编辑到知识库中。TBM 选型适应性评价知识的推理过程就是把知识工程师对 TBM 工程领域的经验知识和专业知识变成通用规则,然后把这些规则变成推理机可以解释执行程序的过程。通过输入结点将数据库中的数据输入到知识库中,通过评估结点完成 TBM 选型适应性的评估。同理,分别构建单护盾和双护盾 TBM 选型适应评价决策知识库。

3 TBM 选型适应性评价决策系统

3.1 评价决策支持系统构成

基于 IDSDP 平台,借助多主体系统环境 MAGE,把多主体系统的共同原理和组成部分抽象成一个工具集,进行分析、设计、实现和部署多主体系统。实现

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

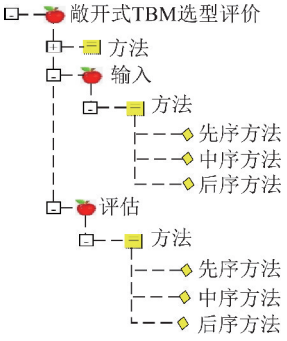

图 10　敞开式 TBM 选型适应性评价决策知识库编程结构

Fig. 10　Programming structure of evaluation decision knowledge base for open type TBM selection adaptability

TBM 选型适应性评价数据库与知识库之间的数据交互与传递,并进行 TBM 选型适应性的多主体智能决策评价。构建的 TBM 选型适应性智能评价决策支持系统操作主界面如图 11 所示。

图 11　TBM 选型适应性智能评价决策支持系统界面

Fig. 11　Adaptive intelligent evaluation decision support system interface of TBM selection

该系统的功能模块设计是根据 TBM 选型的需求来划分的。系统包括五大子系统,分别为数据管理子系统、OKPS 子系统、辅助功能子系统、决策子系统及系统维护子系统(图 12)。

3.2　评价决策流程

基于人工智能进行 TBM 合理化选型的具体评价决策流程如图 13 所示。基于人工智能的 TBM 选型适应性评价决策方法,其核心是将知识与模糊数学模型相结合,是一种反映多个指标、综合分析的定量评价方法。将知识以规则的形式表示,构建 TBM 选型适应性评价知识库,可以实现包括知识的添加、修改和更新等功能,达到智能评价决策地目的。

4　工程案例验证

为了检验本文所建 TBM 选型适应性评价决策支持系统的适用性,选择高黎贡山高速铁路隧道工程作

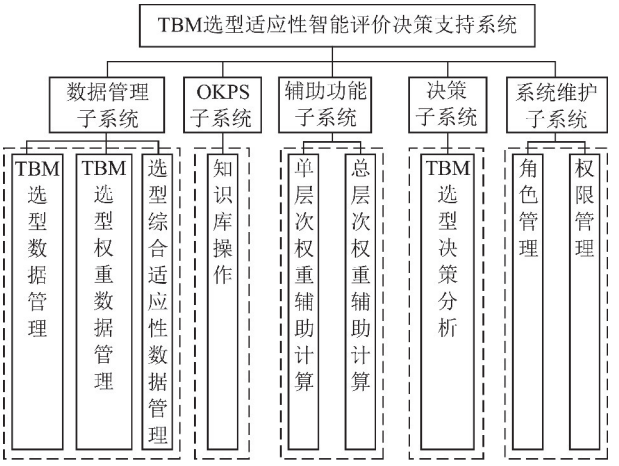

图 12　TBM 选型适应性智能评价决策功能模块

Fig. 12　Adaptive intelligent evaluation decision function module of TBM selection

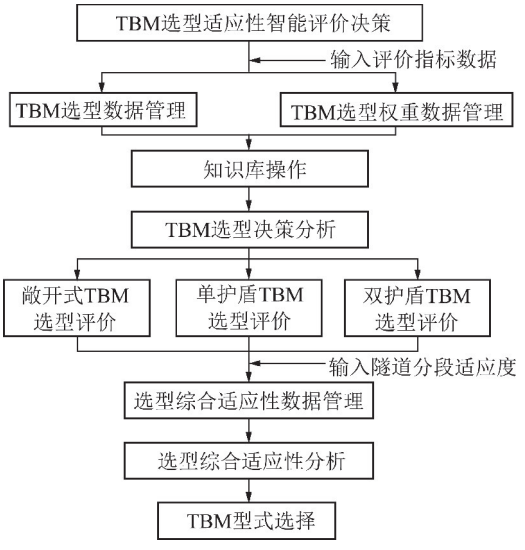

图 13　基于人工智能的 TBM 选型评价决策流程

Fig. 13　Evaluation decision process of TBM selection based on based on Artificial Intelligence

为工程应用案例,对 TBM 的选型适应性进行评价。

4.1　工程概况

高黎贡山隧道是目前中国第 1 长铁路隧道,也是亚洲最长的铁路隧道。隧道最大埋深 1 155 m,全隧均位于直线上。隧址地形地质条件极为复杂,具有“三高四活跃”的特征(图 14)。

主要地层岩性为燕山期花岗岩、中泥盆系回贤组白云岩、断层角砾、物探Ⅴ级异常带、志留系中上统灰岩、白云岩夹石英砂岩。里程为 C12K213+580 ~ C12K226+840 段发育 4 条断层破碎带和两段蚀变岩带,C12K192+337 ~ C12K213+580 段主要发育 14 条断层破碎带。

4.2　评价指标赋值

根据现有设计,高黎贡山隧道出口段(C12K213+

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

580 ~ C12K226+840)(图 15)采用敞开式 TBM 掘进,故选择该段进行评价。由于该段长达 13 260 m,而且地层变化复杂,因此根据地层组成共分为 15 段进行评价。表 11 为各个分段中评价指标按照工程地质勘探资料进行赋值情况。此外,考虑到隧道为直线型,V_1 取 800 m。

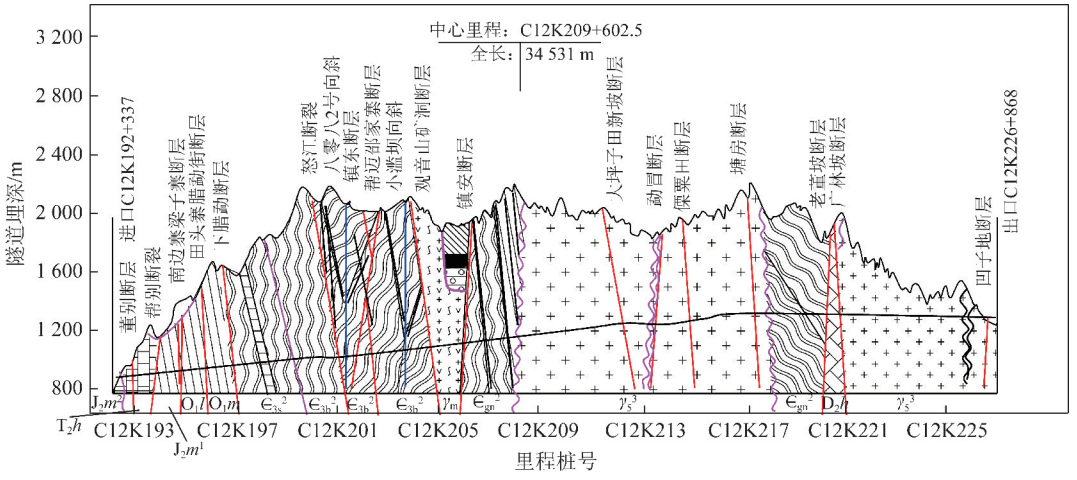

图 14 隧道地质纵断面

Fig. 14 Geological profile of tunnel

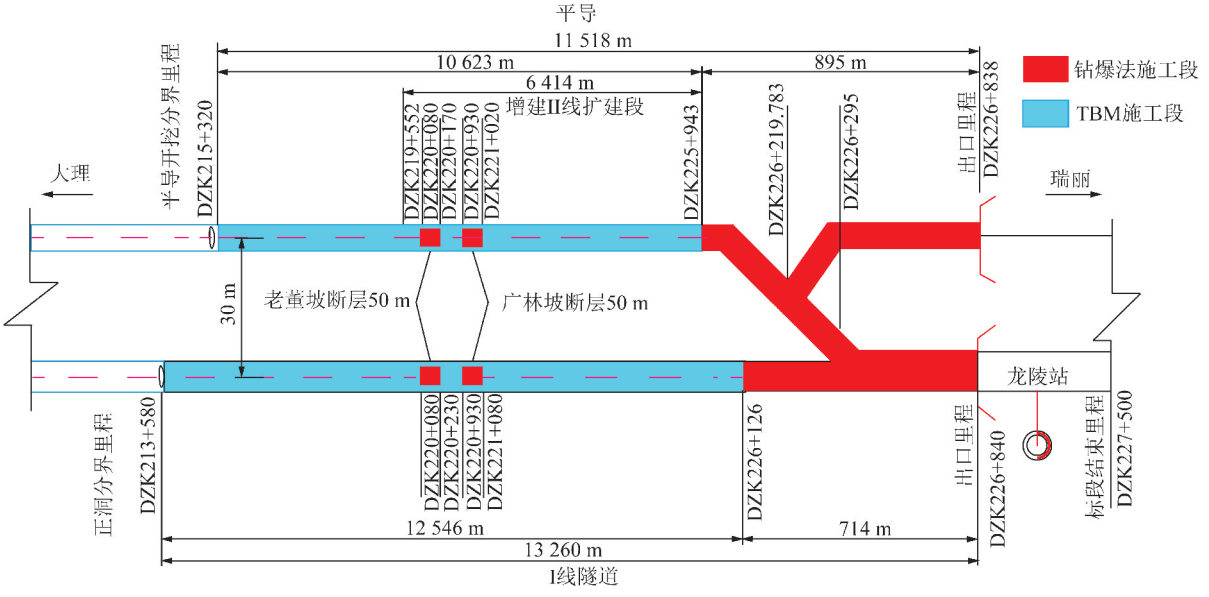

图 15 高黎贡山隧道出口段施工平面布置

Fig. 15 Construction plan layout of the exit section for Gaoligongshan Tunnel

表 11 高黎贡山隧道 TBM 选型适应性评价指标分段赋值

Table 11 Segmentation assignment of TBM selection adaptability evaluation index for Gaoligongshan Tunnel

	地层岩性及构造	围岩等级	长度/m	占比/%	V_2/MPa	V_3	V_4/(L·s^{-1})	V_5	V_6/m	$V_7(\sigma_c/\sigma_1)$
L1		II	2 160	16.29		>0.85	28.33	4.96	—	4.96
L2	燕山期花岗岩	III	4 190	31.60	75 ~ 95	0.85 ~ 0.65	45.34	5.74	—	5.74
L3		IV	2 840	21.42		0.55 ~ 0.35	47.21	6.82	—	6.82
L4	片岩、板岩、千枚岩	III	760	5.73	40 ~ 80	0.85 ~ 0.65	68.57	4.71	—	4.71
L5	夹石英岩、变质砂岩	IV	650	4.90		0.65 ~ 0.45			—	
L6	灰岩、白云岩夹石	III	330	2.49	80	0.85 ~ 0.65	103.25	4.38	—	4.38
L7	英砂岩	IV	210	1.58		0.65 ~ 0.45			—	
L8	白云岩、灰岩夹石英砂岩	IV ~ V	1 190	8.97	110	0.69	72.73	7.34	—	7.34
L9	断层角砾	V	90	0.68	6.5	0.25	65.31	7.00	50	0.28

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

续　表

地层岩性及构造		围岩等级	长度/m	占比/%	V_2/MPa	V_3	V_4/(L·s^{-1})	V_5	V_6/m	$V_7(\sigma_c/\sigma_1)$
L10	物探Ⅴ级异常带	Ⅴ	500	3.77	11.5	0.25	66.72	7.00	50	0.48
L11	蚀变岩带	Ⅴ	140	1.06	21.5	0.25	85.92	7	50	0.88
L12	广林坡断层	Ⅴ	50	0.38	6.5	0.25	19.30	7	50	0.26
L13	老董坡断层	Ⅴ	50	0.38	5.7	0.25	16.91	7	50	0.23
L14	塘房断层	Ⅴ	50	0.38	6.5	0.25	71.89	7	50	0.24
L15	傈粟田断裂	Ⅴ	50	0.38	6.5	0.25	19.04	7	50	0.25

注:岩爆发生条件为高地应力、岩质硬脆、完整性好~较好、无地下水的洞段,故断层破碎带不具有产生岩爆的条件,V_7 取 7。

4.3　选型适应度计算及结果

4.3.1　选型适应度计算方法

① 将表 11 中各个分段的评价指标数值输入到系统数据管理模块中(图 16);② 根据 OKPS 知识库的输入结点规则完成数据库与知识库之间的数据交互与传递;③ 通过决策分析子系统计算不同类型 TBM 选型适应度。

图 16　TBM 选型数据管理

Fig. 16　Data management of TBM selection

4.3.2　适应度计算结果

图 17 为计算得到的 L1 段敞开式 TBM 的选型适应度。表 12 给出了高黎贡山隧道 15 个分段 TBM 选型适应度计算结果。

图 17　TBM 选型决策分析

Fig. 17　Decision analysis of TBM selection

表 12　高黎贡山隧道不同类型 TBM 分段适应度

Table 12　Different types of TBM segmental fitness of Gaoligongshan Tunnel project

TBM 类型	隧道分段适应度														
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15
敞开式	0.865	0.908	0.830	0.825	0.825	0.725	0.725	0.840	0.389	0.384	0.326	0.507	0.477	0.328	0.497
单护盾	0.650	0.596	0.734	0.631	0.802	0.494	0.665	0.498	0.416	0.584	0.527	0.546	0.506	0.369	0.541
双护盾	0.769	0.810	0.867	0.750	0.835	0.707	0.793	0.747	0.269	0.396	0.434	0.375	0.360	0.224	0.368

4.4　TBM 选型适应性评价

将表 12 中的适应度数值输入到系统的数据管理模块中(图 18)进行选型适应性评价(图 19),可得到敞开式、单护盾和双护盾 TBM 的综合适应度分别为 0.826,0.638 和 0.779。根据表 2 可知,3 种 TBM 的选型适应性评价均为“适应”,但是评价等级分别为“高度”,“低度”和“中度”。据此,高黎贡山隧道出口段工程最适用的 TBM 类型为敞开式,这与实际工程的选择相符。

如上所述,敞开式 TBM 的适应度为 0.826,属于中度适应与高度适应之间的界限值,比较适应该地层条件,满足隧道出口段的掘进要求。隧道实际施工情况表明,自 2017-11-26 始发以来,TBM 掘进顺利,目前已累计掘进超过千米。

另外,表 12 中显示 3 种类型 TBM 在断层破碎带和蚀变岩带地段施工时的适应度较低(0.2~0.5),适应等级为 III 到 IV 级,掘进通过此类地段时易出现塌方等问题,表明这些地段不适合采用 TBM 施工。而根据高黎贡山隧道的施工组织设计,在断层破碎带和蚀变岩带集中区域(约 710 m)采用钻爆法施工,这

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

图 18 TBM 选型综合适应性数据管理

Fig. 18 Comprehensive adaptive data management of TBM selection

图 19 TBM 选型综合适应性分析

Fig. 19 Comprehensive adaptability analysis of TBM selection

与系统评价结果相吻合。

5 结 论

(1)将智能设计理论和决策理论相结合,评价模型与知识相结合,以规则的形式表示知识,构建 TBM 选型适应性评价知识库,进行多指标智能决策的定量化选型,有效避免了单指标决策的局限性和主观臆断的缺陷。

(2)基于智能评价决策支持系统平台 IDSDP,采用 Java 语言进行二次开发,研发了 TBM 选型适应性智能评价决策支持系统,实现了 TBM 选型适应性的智能化评价决策,为复杂地质条件下长大隧道 TBM 选型提供了一种新的量化分析方法,具有较好的工程应用价值。

(3)针对高黎贡山高速铁路隧道出口段工程,对所建立的 TBM 选型适应性智能评价决策支持系统进行了验证,得到敞开式、单护盾和双护盾 TBM 的综合适应度分别为 0.826,0.638 和 0.779,表明敞开式 TBM 最适于该段隧道掘进,这与实际工程的选择相符。

(4)将人工智能方法用于 TBM 选型适应性评价决策的研究尚处于探索阶段,仍有不少问题有待解决,例如建立更完善的评价指标体系,采用更多的工程案例构建和完善系统的数据库和知识库,应用大数据驱动知识进行学习、推理等。

致谢 感谢中铁隧道局集团有限公司高黎贡山隧道项目部、盾构及掘进技术国家重点实验室对本文研究工作提供的支持!感谢石家庄铁道大学杜立杰教授对本文研究工作的指导与帮助!

参考文献(References):

[1] 刘泉声,黄兴,刘建平,等. 深部复合地层围岩与 TBM 的相互作用及安全控制[J]. 煤炭学报,2015,40(6):1213-1224.
LIU Quansheng, HUANG Xing, LIU Jianping, et al. Interaction and safety control between TBM and deep mixed ground[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1213-1224.

[2] 尚彦军,杨志法,曾庆利,等. TBM 施工遇险工程地质问题分析和失误的反思[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(12):2404-2411.
SHANG Yanjun, YANG Zhifa, ZENG Qingli, et al. Retrospective analysis of TBM accidents from its poor flexibility to complicated geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2404-2411.

[3] BIENIAWSKI Z T, CELADA B, GALERA J M, et al. New applications of the excavability index for selection of TBM types and predicting their performance[A]. Proceedings of the World Tunnel Congress[C]. Akra, India: 2008: 1618-1629.

[4] KARAMI M, BAGHERPUR R, RAISI Gahrooee D, et al. The influence of geological features and geomechanical properties of rock mass on tbm selection for sabzkouh water conveyance tunnel[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 8(2): 2169-2198.

[5] 吴世勇,王鸽,徐劲松,等. 锦屏二级水电站 TBM 选型及施工关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(10):2000-2009.
WU Shiyong, WANG Ge, XU Jinsong, et al. Research on TBM type-selection and key construction technology for Jingping II Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2000-2009.

[6] 叶定海,李仕森,贾寒飞. 南水北调西线工程的 TBM 选型探讨[J]. 水利水电技术,2009,40(7):80-82.
YE Dinghai, LI Shisen, JIA Hanfei. A study of type selection of TBM for west route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(7): 80-82.

[7] 张军伟,梅志荣,唐与,等. 大伙房输水工程特长隧洞 TBM 选型及支护系统优化研究[J]. 铁道工程学报,2010,27(3):61-65.
ZHANG Junwei, MEI Zhirong, TANG Yu, et al. TBM type-selection and study on optimization of support system for super long dahuofang water tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(3): 61-65.

[8] 杨继华,齐三红,郭卫新,等. 厄瓜多尔 CCS 水电站引水隧洞 TBM 选型及工程地质问题与对策[J]. 资源环境与工程,2017,31(4):425-430.
YANG Jihua, QI Sanhong, GUO Weixin, et al. Problems on TBM section and engineering geological conditions and countermeasures

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

in construction of headrace tunnel at CCS hydropower station in ecuador[J]. Resources Environment & Engineering, 2017, 31(4): 425-430.

[9] 毛卫洪. 隧道掘进机(TBM)选型探讨[J]. 国防交通工程与技术,2011,9(5):15-17.
MAO Weihong. An exploration into the choice of the right type of tunnel boring machines (TBM)[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defense, 2011, 9(5): 15-17.

[10] 赵录学. 城市轨道交通工程 TBM 选型分析研究[J]. 现代隧道技术,2013,50(2):7-13.
ZHAO Luxue. Analysis of TBM selection for an urban rail transit project[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(2): 7-13.

[11] 史忠植. 高级人工智能[M]. 北京:科学出版社,2011.

[12] OKUBO S, FUKUI K, CHEN W. Expert system for applicability of tunnel boring machines in Japan[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2003, 36(4): 305-322.

[13] SHAHEEN A A, FAYEK A R, ABOURIZK S M. Methodology for integrating fuzzy expert systems and discrete event simulation in construction engineering[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, 36(9): 1478-1490.

[14] SALIMI A, ROSTAMI J, MOORMANN C, et al. Application of nonlinear regression analysis and artificial intelligence algorithms for performance prediction of hard rock TBMs[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 236-246.

[15] 何小新, 吴庆鸣. 隧道掘进机选型智能决策支持系统的研究[J]. 铁道学报,2007,29(3):127-131.
HE Xiaoxin, WU Qingming. An intelligent decision support system of type selection for tunnel boring machine[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(3): 127-131.

[16] 林君. 基于神经网络的隧道掘进机预测控制研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2014.
LIN Jun. Research on TBM predictive control based on neural network[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2014.

[17] 陈文伟. 决策支持系统及其开发[M]. 北京:清华大学出版社,2014.

[18] SAATY, THOMAS L. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation[M]. NewYork: Decision Making Series, Mcgraw-Hill, 1980.

[19] 中华人民共和国国家标准编写组. 铁路隧道全断面岩石掘进机技术指南[S]. 北京:中国铁道部出版社,2007.

[20] 何发亮, 谷明成, 王石春. TBM 施工隧道围岩分级方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(9):1350-1354.
HE Faliang, GU Mingcheng, WANG Shichun. Study on surrounding rock classification of tunnel cut by TBMs[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1350-1354.

[21] 李春明, 彭耀荣. TBM 施工隧洞围岩分类方法的探讨[J]. 中外公路,2006,26(3):235-237.
LI Chunming, PENG Yaorong. Discussion about surrounding rock classification of tunnel excavate by TBMs[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2006, 26(3): 235-237.

[22] 王攀, 郭伟, 朱殿华. 基于模糊聚类理论的 TBM 施工围岩可掘进性分级预测模型[J]. 现代隧道技术,2014,51(6):58-65.
WANG Pan, GUO Wei, ZHU Dianhua. Fuzzy clustering theory based rock mass cuttability classification prediction model for TBM tunneling[J]. Model Tunnelling Technology, 2014, 51(6): 58-65.

[23] 薛亚东, 李兴, 刁振兴, 等. 基于掘进性能的 TBM 施工围岩综合分级方法[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3382-3391.
XUE Yadong, LI Xing, DIAO Zhenxing, et al. A novel classification method of rock mass for TBM tunnel based on penetration performance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3382-3391.

[24] 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.

[25] DUDT J P, D A. The "penalty factors" method for the prediction of TBM performances in changing grounds[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 57: 195-200.

[26] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50487—2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京:中国计划出版社,2015.

[27] 刘振红, 王学潮, 王泉伟, 等. 南水北调西线工程隧洞围岩分类和变形分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(20):3625-3630.
LIU Zhenhong, WANG Xuechao, WANG Quanwei, et al. Classification and deformation analysis of tunnel surrounding rock in West Route of South-to-North Water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3625-3630.

[28] 尹俊涛. 与 TBM 相关的主要工程地质问题研究[D]. 长沙:中南大学,2005.
YIN Juntao. Study on the main engineering geological problems associated with TBM[D]. Changsha: Center South University, 2005.

[29] 刘学增, 马小君. 隧道穿越断层破碎带突水涌泥模糊安全评价[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(S2):1786-1790.
LIU Xuezeng, MA Xiaojun. Fuzzy safety evaluation for water bursting and mud surging of tunnels through the fault fracture zones[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S2): 1786-1790.

[30] AYDAN Ö, AKAGI T, KAWAMOTO T. The squeezing potential of rocks around tunnels, theory and prediction[J]. Rock mechanics and rock engineering, 1993, 26(2): 137-163.

[31] SINGH B, GOEL R K. Rock mass classification: A practical approach in civil engineering[M]. Amsterdam: Elsevier, 1999.

[32] HOEK E, MARINOS P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000, 32(11): 45-51.

[33] HAMIDI J K, SHAHRIAR K, REZAI B, et al. Risk assessment based selection of rock TBM for adverse geological conditions using Fuzzy-AHP[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2010, 69(4): 523-532.

[34] KHADEMI J. A methodology for selection of TBM according to geotechnical conditions[D]. Iran: Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), 2006.