

基于粗糙集-遗传算法的山岭隧道 坍塌易发性评价

张 良¹, 孙永新², 王晓睿³, 肖见航³

(1. 河南省尧栾西高速公路建设有限公司, 河南 洛阳 471000;

2. 河南省铁路建设投资集团有限公司, 河南 郑州 450045;

3. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450045)

摘 要: 为了解决风险评价权重过于依赖主观赋值的问题, 减少冗余属性对风险评价的影响, 在传统的隧道施工坍塌风险评价的研究基础上, 运用层次分析法构建指标体系, 提出一种基于粗糙集-遗传算法的属性约简算法, 根据现场调查和案例分析确定了 21 项原始评价指标并建立相应的风险评价模型。以陈家庄隧道 F6 断层破碎带为风险段建立山岭隧道坍塌易发性评价模型, 引入粗糙集理论和条件信息熵理论确定 6 项属性核指标, 利用遗传算法实现了属性约简, 删除 9 项对评价结果影响较小的条件属性, 最后结合模糊评价法构建风险评价模型, 其评价结果为“潜在风险”。与现场实测结果对比表明以粗糙集理论和遗传算法作为指标优选策略建立的评价模型可靠实用。该风险评价方法可有效提高山岭隧道坍塌易发性评价的准确性。

关键词: 山岭隧道; 隧道坍塌; 粗糙集理论; 遗传算法; 易发性评价

中图分类号: U458

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)03—0209—07

Collapse Susceptibility Evaluation of Mountain Tunnel Based on Rough Set-genetic Algorithm

ZHANG Liang¹, SUN Yongxin², WANG Xiaorui³, XIAO Jianhang³

(1. He'nan Yaoluanxi Expressway Construction Co., Ltd., Luoyang, He'nan 471000, China;

2. He'nan Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450045, China;

3. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources
and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450045, China)

Abstract: In order to solve the problem of risk evaluation weights relying too much on subjective assignment and reduce the influence of redundant attributes on risk evaluation, based on the traditional study of tunnel construction collapse risk evaluation, an index system is constructed using hierarchical analysis, an attribute simplification algorithm based on rough set-genetic algorithm is proposed, 21 original evaluation indexes are determined and the corresponding risk evaluation model is established based on site investigation and case analysis. The risk evaluation model was established for the F6 fault zone of Chenjiazhuang tunnel, and six attribute kernel indicators were determined by introducing rough set theory and conditional information entropy theory, and the genetic algorithm was used to simplify the attributes and delete nine conditional attributes that have less influence on the evaluation results. The evaluation result is "potential risk". The field validation shows that the evaluation model established by rough set theory and genetic algorithm as the index selection strategy is reliable and practical, and the risk evaluation method can effectively improve the accuracy of the evaluation of collapse susceptibility of mountain tunnels.

Keywords: mountain tunnel; tunnel collapse; rough set theory; genetic algorithm; susceptibility evaluation

收稿日期: 2022-12-21

修稿日期: 2023-02-01

基金项目: 河南省交通运输厅科技项目(2020J5)

作者简介: 张 良(1993—), 男, 助理工程师, 主要从事隧道工程等方面工作。E-mail: 943267563@qq.com

通讯作者: 王晓睿(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土力学数值计算、城市地下空间技术研究、隧道工程研究等方面工作。

E-mail: wxrui203@163.com

随着我国“交通强国”战略的实施,公路隧道向山区不断延伸,呈现规模大、数量多和结构复杂等特点,但由于山岭隧道在建设过程中对风险辨识不客观、不良地质体辨识度不够和施工质量难以充分保证等原因,使得施工技术难度和安全风险日益增高。现有的风险评价过于依赖主观评定,评价结果可靠度低,只有引入客观科学的选择策略构建评价指标体系,才能改变过去主要依靠专家经验的情况,从而降低主观因素的影响,满足隧道施工标准化、信息化、精细化的要求^[1-5]。

国内外研究学者在隧道坍塌风险评价方面提出了各种各样的方法,超前地质预报在山岭隧道的施工中有较广的应用^[6-7],陈曦等^[8]将属性重要性度作为启发式信息引入到遗传算法,提出了基于启发式遗传算法的属性约简算法。Sturk 等^[9]以公路修建为风险评估对象,给出故障树法等多种风险评估与决策中可用的评估方法。蒋宗鑫^[10]以风险评估的理论为基础,运用模糊数学综合评判方法建立了一套地铁施工风险预警系统。Tang Ziqi 等^[11]基于隧道工程案例进行统计分析,利用粗糙集理论删除了冗余属性。刘保国等^[12]运用德尔菲法构建判断矩阵,并利用模糊网络分析法对山岭隧道施工进行风险评价。吴雨辰等^[13]引入信息熵和遗传算法的概,对原始指标体系进行客观约简和优化。王江荣等^[14]、韩舸等^[15]和姜安民等^[16]分别将粗糙集的思想引入滑坡变形预测、公路隧道塌方进行风险评价。Kolic^[17]通过定性与定量结果的评估方法,对新奥法和 TBM 施工法进行风险评估。

本文依托郑州至西峡高速公路段陈家庄隧道工程,融合粗糙集、遗传算法和信息熵等理论的优势,提出新的属性约简算法,建立山岭隧道坍塌风险评价模型,解决条件属性过度约简和约简结果过多等现象,避免完全依赖主观赋值的问题,并对陈家庄隧道施工期坍塌易发性风险进行综合评价。

1 基本理论与方法

1.1 基于粗糙集理论的属性约简和权重计算

粗糙集理论的基本思想是通过已有数据库进行归纳,形成定义上的等价关系,然后重新进行空间的划分^[18]。

粗糙集通过定义一个参数依赖度来衡量决策属性 D 对条件属性 C 的依赖程度,表达式:

$$\gamma_c(D) = \frac{\text{Card}(POS_c(D))}{\text{Card}(D)}$$

(1)

若删除某些条件属性后依赖度发生改变,说明知识库分类能力发生改变,则被约简指标不可删除,表达式为:

$$\gamma_{C-\{c_i\}}(D) = \frac{\text{Card}(POS_{C-\{c_i\}}(D))}{\text{Card}(U)}$$

(2)

属性子集 $c_i(c_i \in C)$ 的属性重要度规则为:

$$\sigma_{CD}(c_i) = \gamma_c(D) - \gamma_{C-\{c_i\}}(D)$$

(3)

该值越大说明条件属性(指标) c_i 重要度越高,其权重越大; σ_{CD} 为零,条件属性(指标) c_i 是冗余的。进行归一化处理后,得到指标权重:

$$W_i = \frac{\sigma_{CD}(c_i)}{\sum_{i=1}^n \sigma_{CD}(c_i)}$$

(4)

1.2 基于依赖度属性约简与权重计算的不足

为了验证基于属性依赖度约简和权重计算的可行性,从实际工程中选取五个隧道坍塌风险案例,选用围岩级别(c_1)、断层破碎带(c_2)、地下水(c_3)、支护的及时性(c_4)、施工组织合理性(c_5) 和风险性等 6 个指标进行实验案例分析,其中风险性为决策属性 D ,其余为条件属性 C 。基本数据如表 1 所示。根据 1.1 所述方法计算得到属性依赖、重要度和权重结果如表 2 所示。

表 1 案例基本数据

实例	围岩级别	断层破碎带	地下水	支护及时性	施工组织合理性	风险性
x_1	Ⅲ	存在, >3 m	富水	不及时	较合理	不稳定
x_2	V	存在, >3 m	弱富水	不及时	较合理	基本稳定
x_3	Ⅲ	存在, >3 m	富水	不及时	合理	不稳定
x_4	Ⅳ	不存在	弱富水	较及时	不合理	不稳定
x_5	Ⅳ	不存在	湿润	及时	较合理	稳定

表 2 约简前各属性依赖度、重要度和权重值表

条件属性	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
属性依赖度 $\gamma_{C-\{c_i\}}$	1	1	1	1	0.5
属性重要度 $\sigma_{CD}(c_i)$	0	0	0	0	0.2
属性权重 w_i	0	0	0	0	1.0

根据上述工程的实验案例分析,直接运用传统依赖度进行属性约简和权重计算主要存在以下不足:(1)属性间存在过度约简。(2)约简结果过多,可靠性低。(3)属性重要度和权重与实际工况不符。

1.3 基于粗糙集条件信息熵权重计算改进方法

粗糙集理论中将离散事件定义为对知识的划分,引入信息熵理论^[19] 可以在知识之间建立模糊性

关系,构造不完备决策表达属性约简,体现了约简规则的泛化能力。定义 U 中的任何一个属性由代数上的随机变量组成,其概率分布确定方法如下:

$$[S:p] = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & \cdots & S_n \\ p(S_1) & p(S_2) & \cdots & p(S_n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

则条件属性 C 的信息熵可定义为:

$$I(C) = - \sum_{i=1}^n p(C_i) \log(C_i) \quad (6)$$

式中: $p(C_i) = \frac{\text{Card}(C_i)}{\text{Card}(U)}$

则决策属性集 $D(U/D = \{D_1, D_2, \cdots, D_n\})$ 相对于条件属性集 $C(U/C = \{C_1, C_2, \cdots, C_m\})$ 的条件信息熵表示为:

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

依据信息熵为基础的属性重要度计算公式为:

$$\sigma_{CD}(c_i) = I(D|(C - \{c_i\})) - I(D|C) + I(D|\{c_i\}) \quad (8)$$

$I(D|\{c_i\})$ 反映了条件属性 c_i 在决策系统中的占比重要度,度量了两个属性集之间的依赖程度。在决策信息系统中通过上述定义进行运算,降低了属性约简对论域的影响,避免了条件属性重要度或权重值为0的情况。并根据式(1)计算权重值 W_i ,运用信息熵计算的权重值 W_i 反映这个评价系统中,某单一属性与其余属性相比而言的重要程度,权重的赋值更为合理。其各项结果见表3,与表2对比更加符合工程实践。

表3 基于信息熵的属性重要度及权重值计算表

条件属性	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
信息熵 $I(D \{c_i\})$	0.080	0.240	0.080	0.400	0.240
属性重要度 $\sigma_{CD}(c_i)$	0.080	0.240	0.080	0.400	0.240
属性权重 w_i	0.077	0.231	0.077	0.384	0.231

1.4 基于信息熵-遗传算法的属性约简

删除指标的顺序不同,会得到不同的约简结果。因此,引入遗传算法作为搜索工具,在保证信息系统分类原则未改变的同时,确定约简程度最大的指标剔除方式。本文针对离散化后的决策信息表,通过粗糙集条件信息熵和遗传算法的结合,提出新的属性约简和权重计算方法,突破样本规模和依靠依赖度值带来的制约,更加符合工程实例。

通过粗糙集理论划分等价类,基于信息熵理论确定属性核,结合遗传算法进行属性约简,输出适应

度最高的个体即为所求的最优约简。本节定义遗传算法的适应度函数公式如下:

$$F(x) = \frac{n - n_r}{n} + I(D|C) \quad (9)$$

式中: n 为个体编码长度,即最初的评价指标数量; n_r 为约简后剩余评价指标或编码为1的个数; $I(D|C)$ 为决策属性 D 相对于条件属性 C 的条件信息熵。

选择适应度函数值不再发生变化作为终止条件,根据算法停止后得出的种群中的最优个体,通过解码给出最优的约简结果。基于条件信息熵的遗传约简算法流程如图1。

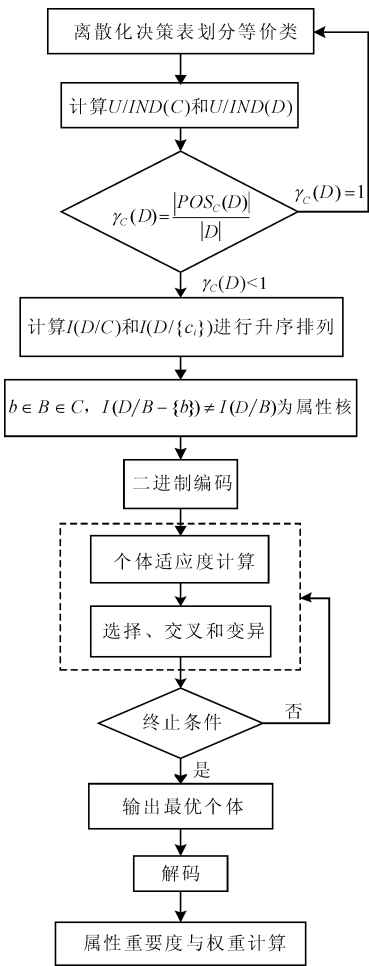


图1 新属性约简算法流程图

1.5 模糊综合评价法

通过对比评价的优缺点,本文选择把定量定性方法进行融合的模糊综合评价法。模糊综合评价法是对评价指标体系赋值确定隶属度,构造模糊评价矩阵,采用综合评价模型进行综合评价值计算^[20]。本文中采用模糊综合评价方法对山岭隧道坍塌易发性进行评价基本过程如下所示:

(1) 对待评价隧道进行属性约简,得到评价因

素集,并进行等级划分,确定各因素隶属度,建立模糊评判矩阵 R 。

(2) 计算约简集中各个因素的归一化客观权重,得到权重矩阵 A ,同时根据公式 $B = A \times R$ 进行综合计算得到模糊综合评价集 B 。

(3) 根据建立的评价集 V 和最大隶属度原则,得到最终评价结果。

$$B = A \times R$$
$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$$
$$v_s = \left\{ b_i \left| v_s \rightarrow \max_{i=1}^k (b_i) \right. \right\}$$

(10)

式中: v_1 无危险、 v_2 潜在危险、 v_3 危险、 v_4 很危险、 v_5 极度危险。

其评价步骤如图 2。

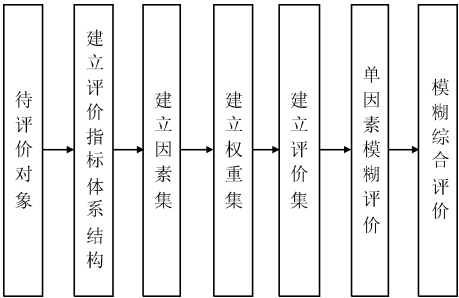


图 2 模糊综合评价的步骤

2 基于粗糙集-遗传算法的山岭隧道坍塌风险评价模型

2.1 条件属性 C 的建立

根据收集的隧道灾害事故进行案例统计分析,从地质条件、环境背景等内在因素和勘察设计、施工

工艺、支护措施和组织管理等外在因素建立坍塌风险事件易发性评价指标体系。并确定降雨量、断层破碎带、施工方法和支护及时性等 21 个因素作为条件属性集。

2.2 风险因素等级划分与决策属性 D 的建立

通过对参与的隧道工程建设所收集的典型隧道坍塌事故资料,以及参考文献[21]中周峰对 125 例隧道坍塌的统计资料,从自然环境因素、工程水文地质、勘察设计详细度和施工因素等方面划分各因素模糊风险等级,见表 4 和表 5,决策属性同风险因素一致划分为五类,分别为无危险(一级)、潜在危险(二级)、危险(三级)、很危险(四级)、极度危险(五级),潜在危险是围岩变形量超过控制值,但变形趋于稳定,预警已经消除;危险是指围岩变形超过控制值,已经产生预警,变形仍在加重,若不采取合理措施,危险等级将升级;很危险是指围岩已经发生明显变形,支护结构产生裂缝等直观现象出现;极度危险是指隧道发生了坍塌事件。根据待评价隧道的自然条件和地质条件进行相似案例选取,结合隧道坍塌风险评估指标,构建隧道坍塌风险案例库。

2.3 基于信息熵-遗传算法的属性约简与权重计算

通过表 4 和表 5 等级划分进行离散化决策信息表构建,然后根据 1.4 节进行属性约简,并计算约简后的各因素权重值,进行归一化处理。

2.4 风险段隧道坍塌易发性评价

根据约简后归一化处理后的客观权重值,按照 1.5 节模糊综合评价方法进行风险评价,得到隧道坍塌风险等级。

表 4 内部因素坍塌风险评价等级划分表

评价指标等级		一级	二级	三级	四级	五级
自然环境因素	C1 降雨量/mm	<200	200~600	600~900	900~1200	1200~1500
	C2 地震灾害	—	3 级以上地震未发生	3 级以上地震偶尔发生	3 级以上地震常发生	3 级以上地震经常发生
	C3 埋深/m	>80	50~80	30~50	20~30	<20
	C4 围岩级别	I	II	III	IV	V
	C5 岩体结构完整程度	完整	较完整	较破碎	破碎	极破碎
工程水文地质	C6 围岩节理程度	—	节理不发育	节理较发育	节理发育	节理很发育
	C7 岩石风化程度	未风化	微风化	弱风化	强风化	全风化
	C8 岩石坚硬程度	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩	极软岩
	C9 断层破碎带宽度/m	<3	3~6	6~10	10~15	>15
	C10 偏压/(°)	<10	10~20	20~30	30~40	>40
	C11 地下水	干燥	湿润	弱富水	较富水	富水

表 5 外部因素坍塌风险评价等级划分表

评价指标等级		一级	二级	三级	四级	五级
勘察 设计	C12 隧道选址	很合理	合理	一般	不太合理	不合理
	C13 地质勘察程度	详细	较详细	一般	不详细	欠缺
	C14 施工方法	双侧壁导坑法或 CRD 法开挖,选取很合理,安全且经济	单侧壁导坑法或 CD 法开挖,选取很合理,安全且经济	CRD 或 CD 法,选取合理,安全但经济效益差	台阶法开挖,选取不太合理,安全和经济效益一般	全断面开挖,选取不合理,安全性差
	C15 开挖跨度	—	小跨度 $B < 9\text{ m}$	中跨度 $9\text{ m} \leq B \leq 14\text{ m}$	大跨度 $14\text{ m} < B \leq 18\text{ m}$	超大跨 $B \geq 18\text{ m}$
施工 因素	C16 爆破控制效果	爆破方式很合理,扰动较小	爆破方式合理,扰动一般	爆破方式较合理,扰动较大	爆破方式不太合理,扰动大	爆破方式不合理,扰动很大
	C17 初期支护刚度	初支刚度大,变形控制很好	初支刚度较大,变形控制较好	初支刚度一般,变形控制一般	初支刚度较弱,变形控制较差	初支刚度很弱,变形控制差
	C18 支护及时性	非常及时	及时	较及时	不可抗因素延迟	施工因素延迟
	C19 不良地质体改良	管棚支护加预注浆加固地层,且参数选用很合理	管棚预支护改良方法且参数选用合理	超前小导管注浆加全断面帷幕注浆,参数选用较合理	超前小导管注浆,参数选用不太合理	超前小导管注浆,地层改良方法及参数选用不合理
	C20 组织管理水平	组织协调能力很好,反应速度很快	组织协调能力好,反应速度快	组织协调能力一般,反应速度一般	组织协调能力差,反应速度慢	组织协调能力很差,反应速度很慢
	C21 监控量测	监测项目充分,测点布置合理,监测频率满足要求	监测项目适中,测点布置一般,监测频率大于 3 次/d	监测项目基本满足,测点布置不合理,监测频率 3 次/d	监测项目不够,测点布置不合理,监测频率 1 次/d	监测项目不够,测点布置不合理,监测频率未按方案进行

3 工程应用

3.1 工程概况

郑州至西峡高速公路双龙至西峡段起于双龙镇南侧,止于刘庄西并与沪陕高速连接。其中陈家庄为分离式隧道,隧址区属于中低山陡坡地貌,地势起伏较大。洞身施工中 V 级围岩和 IV 级围岩采用台阶法施工,分别选用超前小导管和超前锚杆加固围岩。根据勘察资料,K133 + 100—K134 + 800 段为大理岩区,隧址区局部见溶蚀现象,施工中存在岩溶发生的可能性。在里程为 K133 + 100 处有一处 F6 断层破碎带,岩体破碎,形成构造破碎带。

根据工程概况和现场施工情况,得到坍塌风险因素等级表,见表 6 和表 7。

表 6 孕险环境描述划分表

内在因素	属性描述	指标等级划分
年降雨量	多年平均降雨量 820.91 mm	三级
地震灾害	3 级以上地震未发生	二级
埋深	该断面处隧道埋深 190 m	一级
围岩级别	围岩等级 V 级	五级
岩体结构完整程度	岩体破碎	四级
围岩节理程度	岩体节理裂隙发育	四级
岩石风化程度	洞身处为强中风化岩石	三级
岩石坚硬程度	岩质破碎,局部石英含量较高	三级
断层破碎带	断层破碎带宽度小于 3 m	一级
偏压	隧道进出口段侧面坡角 25° ~ 30°	三级
地下水	大多数构造裂隙水水量较小,富水性差,排泄条件好	二级

表 7 致险因子描述划分表

外在因素	属性描述	指标等级划分
隧道选址	隧址区位于秦岭褶皱带,区内构造力不强,如果支护不及时会产生大的坍塌和冒顶	三级
地质勘察	由中交第二公路勘察设计院有限公司进行勘测设计,在不良地质段钻孔取样,进行了详细的初勘和详勘,为围岩划分提供充分依据	二级
施工方法	断层破碎带施工开挖拟采用台阶法或中隔墙法,选取合理	三级
开挖跨度	开挖跨度 11.8 m	三级
爆破控制效果	机械钻孔,减少对围岩的破坏,拟采用光面爆破控制技术,掏槽眼和周边眼爆破参数的选取合理	二级
初期支护刚度	钢支撑 20a 工字钢间距 60 cm;锚杆采用 D25 中空注浆锚杆 $L = 3.0\text{ m}$ (环)100 × 60(纵);钢筋网 $\phi 6$ 间距 15 cm × 15 cm;C25 喷射混凝土厚 26 cm,初期支护刚度大,对变形控制很好	一级
支护及时性	爆破完成后快速清理,初期支护快速成环,形成封闭	二级
不良地质体改良	对断层破碎带岩体采用超前小导管预注浆,参数选择十分合理	三级
组织管理水平	施工现场人员充足,组织协调能力很好,反应速度很快	一级
监控量测	委托具备相应资质的单位进行实施,监测项目及断面布置满足施工要求	二级

3.2 离散化决策信息表建立

收集的坍塌案例中选取 15 个相似案例作为样本集, 并根据陈家庄隧道的自然条件和地质条件, 从所并构建离散化决策信息表, 见表 8。

表 8 隧道坍塌风险评价决策信息表

选取案例 序号	条件属性												决策属性 <i>D</i>
	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>	<i>C6</i>	...	<i>C17</i>	<i>C18</i>	<i>C19</i>	<i>C20</i>	<i>C21</i>	
1	3	2	2	5	4	2	...	1	5	4	4	2	2
2	3	2	2	5	3	3	...	2	3	3	3	1	2
3	3	2	2	4	3	4	...	1	4	2	2	2	5
4	4	2	2	5	4	3	...	1	5	3	4	3	3
5	3	2	4	4	4	4	...	1	2	5	3	2	2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
12	3	2	1	4	4	4	...	2	3	5	3	2	2
13	3	2	1	5	4	4	...	1	5	3	3	2	4
14	5	2	2	4	3	2	...	1	5	2	2	3	2
15	3	2	1	5	3	3	...	1	2	4	4	3	5

3.3 属性约简与权重计算

计算各个条件属性的重要度和权重值, 结果如表 9 对离散化后的决策信息表进行等价类划分, 并所示。

表 9 各条件属性重要度和权重计算值

条件属性	<i>C2</i>	<i>C12</i>	<i>C15</i>	<i>C1</i>	<i>C16</i>	<i>C13</i>	<i>C5</i>	<i>C7</i>	<i>C4</i>	<i>C17</i>	<i>C3</i>
重要度值	0.002	0.005	0.015	0.017	0.021	0.022	0.031	0.035	0.041	0.092	0.103
权重值	0.001	0.003	0.008	0.009	0.011	0.011	0.016	0.018	0.021	0.046	0.052

条件属性	<i>C21</i>	<i>C10</i>	<i>C18</i>	<i>C8</i>	<i>C14</i>	<i>C6</i>	<i>C9</i>	<i>C11</i>	<i>C20</i>	<i>C19</i>
重要度值	0.118	0.123	0.134	0.138	0.159	0.168	0.171	0.183	0.208	0.213
权重值	0.059	0.062	0.067	0.069	0.080	0.084	0.086	0.092	0.104	0.107

根据条件信息熵的计算和各条件属性权重, 确定 *C14*、*C6*、*C9*、*C11*、*C20* 和 *C19* 为属性核, 进行编码“1”。利用 MATLAB 自带的遗传算法工具箱进行属性约简, 根据前文定义的适应度函数, 在交叉概率 $P_c = 0.8$, 变异概率 $P_m = 0.05$, 种群迭代数 $T = 100$, 种群规模 $N = 80$ 的条件下, 种群整体收敛最快最稳定。经过多次约简, 其适应度函数收敛情况如图 3。

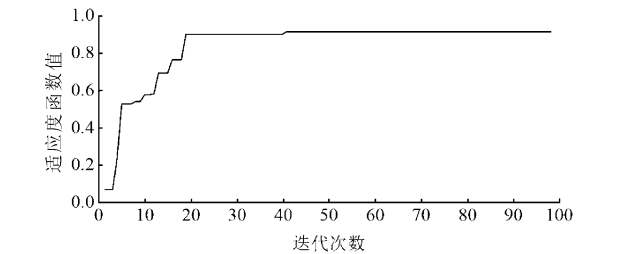


图 3 遗传算法属性约简的适应度函数值变化图

对结果整理如表 10 所示, 解码求得的最小属性约简集为:

$A = (C3, C6, C8, C9, C10, C11, C14, C17, C18, C19, C20, C21)$

对应条件属性为: (*C3*、*C6*、*C8*、*C9*、*C10*、*C11*、*C14*、*C17*、*C18*、*C19*、*C20*、*C21*)

删除冗余条件属性 (*C1*、*C12*、*C13*、*C15*、*C16*、*C2*、*C4*、*C5*、*C7*), 重新构建决策信表计算属性重要度和权重值, 如表 11。

表 10 遗传算法属性约简结果

种群代数	种群平均适应度函数值	种群中的最优个体
1	0.0457	000001001010010000110
6	0.5122	001011001010010010110
20	0.9327	001001001010010010111
42	0.9418	001001011110010011111

归一化处理后客观权重矩阵 $A = (0.044, 0.094, 0.085, 0.106, 0.057, 0.102, 0.076, 0.072, 0.078, 0.122, 0.116, 0.047)$

3.4 隧道坍塌易发性评价

根据坍塌风险指标隶属函数的确定方法, 对约

表 11 约简后各条件属性重要度和权重计算值

条件属性	C3	C21	C10	C17	C14	C18	C8	C6	C11	C9	C20	C19
重要度值	0.077	0.081	0.099	0.125	0.133	0.136	0.148	0.164	0.177	0.185	0.202	0.212
权重值	0.044	0.047	0.057	0.072	0.076	0.078	0.085	0.094	0.102	0.106	0.116	0.122

简集的隶属度进行计算,最终得到模糊评判矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.1 & 0.7 & 0.8 & 1.0 & 0.3 \\ 0.0 & 0.5 & 0.6 & 1.0 & 0.5 \\ 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.75 & 1.0 \\ 0.0 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.0 & 0.75 & 0.3 & 0.3 & 0.0 \\ 0.9 & 0.6 & 1.0 & 0.1 & 0.3 \\ 0.3 & 0.55 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \\ 1.0 & 0.95 & 0.3 & 0.0 & 1.0 \\ 0.9 & 1.0 & 0.5 & 0.3 & 0.0 \\ 0.7 & 0.5 & 0.0 & 0.1 & 0.1 \\ 1.0 & 0.3 & 1.0 & 0.1 & 0.0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

对属性约简后的可量化指标和不可量化指标确定隶属函数值和模糊理论的评价矩阵,并根据式(10)进行综合计算得到评价集:

$$B = [0.439, 0.472, 0.339, 0.320, 0.361] \quad (12)$$

本文选用根据最大隶属度原则,根据最大隶属度原则最大隶属度 $b_2 = 0.472$,对应评价集的评价指标为“潜在危险”,即陈家庄隧道施工穿越断层破碎带发生的坍塌事故的危险性为“潜在危险”。在施工过程中可能会出现围岩超过控制值等现象,需要引起各方重视,对不良地质段进行改良,采用合理开挖方法,加强施工管理和初期支护等措施,保证隧道安全施工。后期对现场进行了验证,隧道施工穿越该区域时,并未发生坍塌事故,支护结构的变形也控制的较好,进一步证明了本文提出的风险评价模型的可行性。

4 结 论

(1) 本文在传统的隧道施工坍塌风险评价的研究基础上,利用层次分析法构建评价指标体系,并进行风险因素二级指标和三级指标划分。

(2) 融合粗糙集、遗传算法和信息熵等理论的优势提出一种基于粗糙集-遗传算法的属性约简算法,新的算法推理过程严密,解决了属性重要度和权重为零的情况,经验证明可以客观的去掉冗余属性,避免完全依赖主观赋值的问题。

(3) 得到隧道坍塌事故是由于隧道所处地质环

境复杂等内部因素(孕险环境)在不合理的施工行为等外在因素(致险因子)的触发下,演变为风险事件。通过相似隧道案例构建风险评价指标体系,将约简后的指标运用模糊综合评价法对陈家庄隧道风险段进行评价,经过现场施工验证,该算法提出的评价模型可靠、实用。

参考文献:

[1] 路美丽,刘维宁,罗富荣,等. 隧道与地下工程风险评估方法研究进展 [J]. 工程地质学报,2006(4):462-469.

[2] Dai Jianhua, Wang Wentao, Tian Haowei, et al. Attribute selection based on a new conditional entropy for incomplete decision systems [J]. Knowledge-Based Systems, 2013,39:207-213.

[3] 刘祥东. 大直径盾构近距离下穿既有隧道风险控制研究 [J]. 工程勘察,2022,50(5):28-34.

[4] 范益群,沈秀芳,乔宗昭. 隧道及地下工程设计系统的风险管理 [J]. 地下工程与隧道,2007(1):11-15,52.

[5] 赵 峰. 山岭隧道软弱围岩变形机理分析与处治对策 [J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(2):141-143,155.

[6] 何 山,张文君,邱 波,等. 综合超前地质预报技术在育王岭隧道破碎带预报中的应用 [J]. 科技通报,2019,35(2):195-200.

[7] 白 亮. 综合超前地质预报技术在 TBM 法超特长隧洞的应用——以北疆供水二期工程为例 [J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):128-134.

[8] 陈 曦,雷 健,傅 明. 基于改进遗传算法的粗糙集属性约简算法 [J]. 计算机工程与设计,2010,31(3):602-604,608.

[9] Sturk R, Olsson L, Johansson J. Risk and decision analysis for large underground projects, as applied to the Stockholm Ring Road tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996,11(2):157-164.

[10] 蒋宗鑫,傅志峰,唐检军,等. 基于地质信息的地铁隧道施工风险预警系统研究 [J]. 铁道建筑技术,2011(10):30-34.

[11] Tang Ziqi, Wu Huiming, Bian Yiwen. A case library creating method based on risk control of tunnel engineering[J]. Advanced Materials Research, 2011,323:151-156.

- 河道演变及水力特性变化研究[J]. 水利水电快报, 2023, 44(2): 48-54.
- [10] 李红, 王平义, 王高山. 长江中下游典型弯曲分汉河道概化模型试验研究[J]. 中国水运(下半月), 2010, 10(4): 134-136.
- [11] Yao Weiwei, Chen Yuansheng, Zhong Yu, et al. Habitat models for assessing river ecosystems and their application to the development of river restoration strategies[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2017, 32(1): 601-617.
- [12] 易雨君, 侯传莹, 唐彩红, 等. 澜沧江中游河段中国结鱼栖息地模拟[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 82-89.
- [13] Yao Weiwei, An Ruidong, Yu Guoan, et al. Identifying fish ecological risk patterns based on the effects of long-term dam operation schemes[J]. Ecological Engineering, 2020, 159(4): 106102.
- [14] Paillex A, Schuwirth N, Lorenz A W, et al. Integrating and extending ecological river assessment: concept and test with two restoration projects[J]. Ecological Indicators, 2017, 72: 131-141.
- [15] Yao Weiwei, Bui M D, Rutschmann P. Development of eco-hydraulic model for assessing fish habitat and population status in freshwater ecosystems[J]. Ecohydrology, 2018, 11(5): e1961.
- [16] Zhang J, Zhang Y, Feng Y, et al. Impact and prospects of water conservation on fish habitat and advances of ecobiology operation in Yangtze River, China: A review[J]. Journal of Environmental Biology, 2021, 42(5): 1201-1212.

- [12] 刘保国,沈铭龙,马 强.模糊网络分析法在公路山岭隧道施工风险分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S1):2861-2869.
- [13] 吴雨辰,周晗旭,车爱兰.基于粗糙集-神经网络的IBURI地震滑坡易发性研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(6):1226-1235.
- [14] 王江荣,黄建华,罗资琴,等.基于粗糙集的 Logistic 回归模型在矿井突水模式识别中的应用[J].煤田地质与勘探,2015,43(6):70-74.
- [15] 韩 舸,龚 威,吴 婷,等.利用粗糙集的滑坡分阶段位移预测方法——以白家包滑坡为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(3):925-931.
- [16] 姜安民,董彦辰,张晓波,等.基于粗糙集与模糊理论的公路隧道塌方风险评价[J].公路与汽运,2020(3):156-160.
- [17] Kolic D. Risk analysis for design and construction aspects of Mala Kapela tunnel [C]//Proceedings of the ITA Word Tunneling Congress Routledge, 2003.
- [18] 张 凯,杨 靖.粗糙集理论及其应用综述[J].物联网技术,2017,7(6):93-94,98.
- [19] 陆 婷,姜安民,董彦辰,等.基于信息熵组合赋权-可拓模型的综合管廊项目运维风险评价[J].水利与建筑工程学报,2020,18(2):52-58.
- [20] 陈 舞,张国华,王 浩,等.基于粗糙集条件信息熵的山岭隧道坍塌风险评价[J].岩土力学,2019,40(9):3549-3558.
- [21] 周 峰.山岭隧道塌方风险模糊层次评估研究[D].长沙:中南大学,2008.