

中文引用格式:王景春,田思奥. 基于云案例推理的隧道高地温防控措施智能生成[J]. 中国安全科学学报,2025,35(5):47-55.

英文引用格式:WANG Jingchun, TIAN Siao. Intelligent generation of tunnel high ground temperature prevention and control measures based on cloud case-based reasoning [J]. China Safety Science Journal,2025,35(5):47-55.

基于云案例推理的隧道高地温防控措施智能生成*

王景春 教授, 田思奥

(石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 河北 石家庄 050043)

中图分类号:X948

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.0744

基金项目:河北省社会科学基金资助(HB20GL017)。

【摘要】 为解决高地温隧道施工安全防控措施建立过程中存在的模糊性与应用范围的局限性问题,提出一种基于云案例推理(C-CBR)的隧道高地温防控措施生成方法。首先,针对隧道高地温热害问题构建云案例库指标体系,并结合层次分析法(AHP)-熵权法进行综合权重计算;其次,基于云模型期望、熵、超熵3项基本特征指标与案例推理(CBR)原理构建云历史案例库,运用协同过滤算法初步筛选符合要求的历史案例;然后,引入统筹形状-距离的云模型算法实现目标案例与历史案例库间的相似度匹配,修正相似度并更新历史案例库,生成最优相似防控措施;最后,充分对比最优相似防控措施与现场实际防控措施。结果表明:基于C-CBR生成的最优历史案例与目标案例间修正相似度为0.7460,匹配度较好,目标案例相似防控措施与工程实际防控措施基本符合,生成方法可较好地适用于不同在建高地温隧道。

【关键词】 云案例推理(C-CBR); 高地温隧道; 防控措施; 云模型; 综合相似度

Intelligent generation of tunnel high ground temperature prevention and control measures based on cloud case-based reasoning

WANG Jingchun, TIAN Siao

(School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University,
Shijiazhuang Hebei 050043, China)

Abstract: In order to solve the problem of ambiguity and limitation of application scope in the establishment of safety prevention and control measures for high-temperature tunnel construction, a method of generating prevention and control measures for high-temperature tunnels based on C-CBR is proposed. Firstly, the index system of the cloud case base is constructed for the tunnel high ground temperature and heat damage problem and combined with the analytic hierarchy process(AHP)-entropy weighting method for the comprehensive weighting calculation. Secondly, the cloud historical case base is constructed based on the three basic characteristic indexes of the cloud model, namely expectation, entropy, and hyperentropy, and the principle of case-based reasoning, and the collaborative filtering algorithm is applied to preliminarily filter the historical cases which are in line with the requirements. And then, the cloud model algorithm which integrates the shape-distance is introduced to achieve the integration between target cases and historical case base. Then, the integrated shape-distance cloud model algorithm is

introduced to achieve similarity matching between the target cases and the historical case base, to correct the similarity and update the historical case base to generate the optimal similarity prevention and control measures; finally, the optimal similarity prevention and control measures are fully compared with the actual prevention and control measures in the field. The results show that the corrected similarity between the optimal historical case and the target case generated based on C-CBR is 0.746 0, which is a good match, and the the target case similar prevention and control measures are basically in line with the actual prevention and control measures of the project, which makes the generation method more applicable to different tunnels with high ground temperatures under construction.

Keywords: cloud case-based reasoning (C-CBR); high-ground-temperature tunnels; prevention and control measures; cloud model; comprehensive similarity

0 引言

近年来,由于隧道高地温热害成因的复杂性和较大的风险性受到广大学者的关注与研究。地壳深处热运动产生的高温水热源与岩热源由断裂带形成的缝隙及岩体等传热介质导出,形成高地温现象。一般而言,隧道内气温在 28℃ 以上时,称为高地温隧道^[1],典型高地温隧道如新疆喀什布仑口公格尔水电站引水隧洞内空气温度达 75℃^[2]。隧道内部在高岩温和高水温作用下,温度高居不下,使机械设备稳定性下降,结构的耐久性和承载能力降低,并对施工人员的健康安全构成重大威胁。隧道高地温热害严重影响工程建设的顺利推进,并导致施工风险程度急剧升高,高地温隧道施工面临巨大挑战。因此,隧道高地温施工安全防护刻不容缓,防控措施的构建能够为安全管理提供有力支撑,保障施工人员人身安全及隧道建设的顺利推进。

目前,在分析温度分布、变化方面,周佳媚等^[3]构建了通风和冰块降温模型,得出最佳隧道降温方案;李准^[4]分析了玉磨隧道施工特征及相应降温措施;CHEN Xin 等^[5]通过建立数值模型分析了高地温隧道温湿度分布情况,并提出相应控制措施;祁占锋等^[6]分析了温度场演化特征,构建了温度最大值的预测模型。在技术层面,LIN Ming 等^[7]为解决高地温隧道热害问题,依托尼格隧道建立了高地温隧道降温隔热综合控制系统;ZHANG Yao 等^[8]提出一种高效节能冷却系统;ZHANG Guoliang 等^[9]研究了某隧道高温段通风冷却过程中不同因素对管道内外热交换的影响,为通风冷却工艺的设计和应用提出建议。在实际工况方面,刘金松^[10]针对实际工况提出一套降低高地温对施工影响的防控技术;郭平业等^[11]结合高地温隧道灾害特征,提出相应的热害分类分级标准和防控对策。综上,学者们对于高地温

隧道安全防护措施的研究已经取得了一定成果,但防控措施的构建往往仅根据实际工况和工程经验提出,模糊性较强,且应用于不同高地温隧道较为困难,适应性较差。

鉴于此,笔者拟提出一种基于云案例推理 (Cloud Case-Based Reasoning, C-CBR) 的相似安全防护措施生成方法。基于 C-CBR 方法,构建云案例库指标体系,确定指标权重并结合云模型 3 个基本特征构建云历史案例库,对比目标案例与历史案例间云相似度,获取与目标案例最匹配的相似防控措施,以期隧道建设的顺利推进提供保障。

1 C-CBR 基本理论

1.1 CBR

案例推理 (Case-Based Reasoning, CBR) 是人工智能领域的一种模糊推理方法,是从现存案例中获得知识和经验,并将其应用于解决新问题,它匹配新问题的特征与旧问题的特征,突破人们在面临新问题时的传统思维瓶颈^[12]。将云模型 3 项基本特征融入云案例库当中并结合云模型进行案例检索,能够很好地处理安全防护措施构建时存在的模糊性^[13]。具体而言,通过一定方式将案例经验进行表示,基于 C-CBR 构建历史经验案例库,筛选出与目标案例最匹配的历史案例,生成相似安全防护措施^[14]。CBR 流程框架如图 1 所示。

1.2 云模型

云模型是一种解决模糊性问题的新方法,可以实现定性定量的相互转化^[15]。3 项基本特征为期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 。 E_x 反映指标在论域 U 内的均值; E_n 反映指标的模糊性; H_e 反映熵的不确定性。

E_x 、 E_n 、 H_e 的计算公式如下:

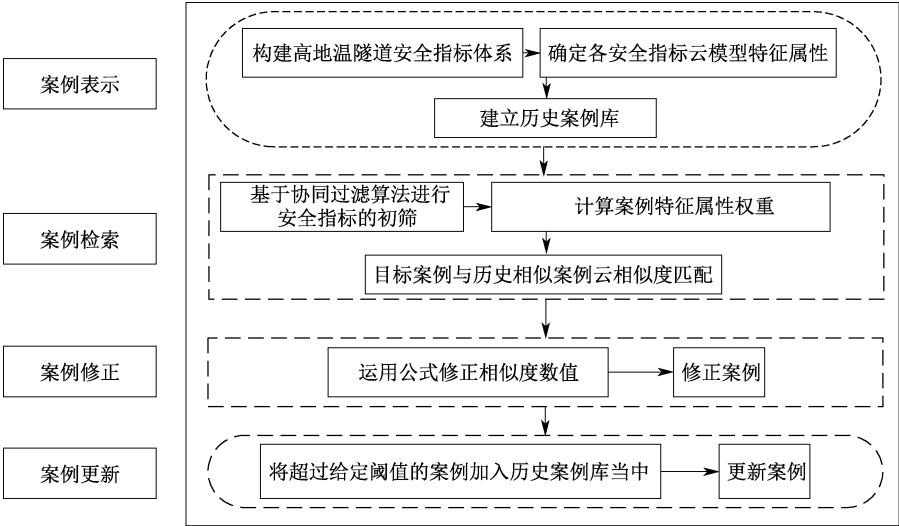


图 1 CBR 整体流程

Fig.1 General process of case-based reasoning

$$\begin{cases} E_x = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2} \\ E_n = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{6} \\ H_e = W \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U_{\max}$ 和 $U_{\min}$ 分别为该模型区间的最大值和最小值; W 为常数,依据实况进行调整。

求取云模型各级隶属度如下:

$$E_{nqr'} = E_{nqr} + H_{eqr} \cdot \text{rand} \cdot () \quad (2)$$

$$\mu_{qr} = \exp \left[- \frac{(x - E_{xqr})^2}{2(E_{nqr'})^2} \right] \quad (3)$$

式中: μ_{qr} 为隶属度; x 为指标值; E_{xqr} 、 E_{nqr} 、 H_{eqr} 分别

为第 r 个指标的期望、熵和超熵; $\text{rand} \cdot ()$ 为 0~1 之间的随机数。

2 安全防控措施智能生成方法

2.1 云案例库指标体系构建

针对隧道高地温热害引发的隧道内部高温高湿环境、隧道围岩变形与破坏的加剧及隧洞支护结构失效问题^[11]。参考《铁路隧道施工规范》^[16],充分调研相关文献并结合专家意见,分析归纳影响隧道高地温热害发生的主控因素以及指标间相互作用及对上一级的影响,在此基础上构建云案例库指标体系,如图 2 所示。

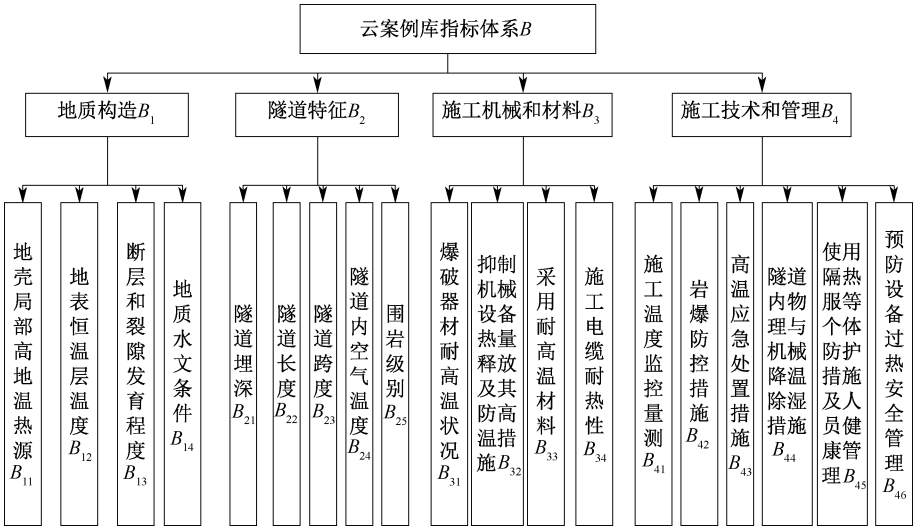


图 2 云案例库指标体系

Fig.2 Cloud case base index system

2.2 特征参数权重计算

2.2.1 主观权重

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种常见的主观赋权方法。根据 1~9 标度法比较特征属性,邀请专家打分,确定各因素间的相对重要度,构建判断矩阵,归一化得到权重 h_i 。计算最大特征值 $\lambda_{\max}$ 并进行一致性检验,其中,一致性指标 (Consistency Index, CI), 不一致程度 (Random Index, RI); 一致性比率 (Consistency Ratio, CR), 如下式:

$$\begin{cases} \lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \frac{K_l}{\omega_l} \\ CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \\ CR = \frac{CI}{RI} \end{cases} \quad (4)$$

式中: K_l 为准则层第 l 个元素; ω_l 为归一化特征向量中第 l 个权重向量。 $CR < 1$, 则判断矩阵满足一致性要求。

2.2.2 客观权重

熵权法是通过信息熵和熵值函数的关系,求得各项指标的熵值,从而确定案例中每一个特征属性的权重 a_i ^[17]。建立判断矩阵如下:

$$R_1 = (b_{ij})_{k \times n} \quad (5)$$

式中: j 为第 j 个案例; i 为第 j 个案例的第 i 个属性, $i = 1, 2, \dots, m$; b_{ij} 为案例特征属性的赋值。

将矩阵归一化后,每个案例的特征属性熵值 e_i :

$$\begin{cases} g_{ij} = (1 + q_{ij}) / \sum_{j=1}^n (1 + q_{ij}) \\ e_i = - \frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n g_{ij} \ln g_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

式中 q_{ij} 为归一化后的指标值; g_{ij} 为各指标值占比; n 为案例单元。

每个案例特征属性的权重 a_i :

$$a_i = (1 - e_i) / \sum_{i=1}^m (1 - e_i) \quad (7)$$

2.2.3 综合权重

基于最小鉴别信息原理结合主观权重 h_i 与客观权重 a_i 得综合权重,如下式:

$$\omega_i = \sqrt{a_i h_i} / \left(\sum_{i=1}^m \sqrt{a_i h_i} \right) \quad (8)$$

式中 $\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{i=1}^m h_i = \sum_{i=1}^m \omega_i = 1$; $0 \leq a_i \leq 1$; $0 \leq h_i \leq 1$; $0 \leq \omega_i \leq 1$, ($i = 1, 2, \dots, m$)。

2.3 案例相似度计算

通过整理文献[2,4,10-11,18],共统计 81 组高地温隧道数据为原始依据,结合式(1)计算云模型的 3 项基本特征指标(E_x, E_n, H_e)构建云历史案例库,案例库适用于目标案例与历史案例相似度匹配过程。为方便案例筛选,采用五元组进行案例表示,即 $X = [F, Y, W, G, V]$,其中, F 为案例库中存储的案例; Y 为案例特征属性,即 $Y = [Y_1(E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}), Y_2(E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}), \dots, Y_n(E_{xn}, E_{nn}, H_{en})]$; W 为指标权重, $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$; G 为云模型 3 项特征指标; V 为求解目标,即隧道高地温安全防控措施。

云案例库指标表征见表 1,其中,文本型属性指标统一用“0~10”定量表示,数值型属性指标的表示可不处理,枚举型属性指标按照相关文件规定,符号型属性指标在表示时遵循布尔代数的“0,1”原则。

表 1 云案例库指标表征

Table 1 Characterization of cloud case base metrics		
指标名称	表征类型	定量表示
地质构造 B_1	文本型	(0~10)
隧道特征 B_2	文本型	(0~10)
施工机械和材料 B_3	文本型	(0~10)
施工技术和管理 B_4	文本型	(0~10)
地壳局部高地温热源 B_{11}	符号型	(否,是)→(0,1)
地表恒温层温度 $B_{12}/^{\circ}\text{C}$	数值型	(0~20)→(0~10)
断层和裂隙发育程度 B_{13}	枚举型	(不发育,较为发育,发育,极度发育)→(2,4,6,8)
地质水文条件 B_{14}	枚举型	(弱富水,中等富水,富水,强富水)→(2,4,6,8)
隧道埋深 B_{21}/m	数值型	(0~3 000)→(0~10)
隧道长度 B_{22}/m	数值型	(0~40 000)→(0~10)
隧道跨度 B_{23}/m	数值型	(0~20)→(0~10)
隧道内空气温度 $B_{24}/^{\circ}\text{C}$	数值型	(0~100)→(0~10)
围岩级别 B_{25}	枚举型	(Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ)→(2~4,4~6,6~8,8~10)
爆破器材耐高温状况 $B_{31}/^{\circ}\text{C}$	枚举型	(120,90,70,50)→(2~4,4~6,6~8,8~10)
机械设备防高温措施 B_{32}	文本型	(0~10)
采用耐高温材料 B_{33}	符号型	(是,否)→(0,1)
施工电缆耐热性 $B_{34}/^{\circ}\text{C}$	枚举型	(120,90,70,50)→(2~4,4~6,6~8,8~10)
施工监控测量 B_{41}	文本型	(0~10)
岩爆防控措施 B_{42}	文本型	(0~10)

续表 1

指标名称	表征类型	定量表示
通风排水措施 B_{43}	文本型	(0~10)
隧道内降温除湿措施 B_{44}	文本型	(0~10)
个体防护和人员管理 B_{45}	文本型	(0~10)
设备使用安全管理 B_{46}	文本型	(0~10)

获取目标案例各特征属性综合权重后,为使初步筛选更全面与精准,选取综合权重最大的 3 个指标,运用基于用户的协同过滤算法分别通过 3 个指标对案例库中所有历史案例初步相似度筛选 3 次,分别选取该指标下相似度最高的历史案例。将历史案例的集合记为 C_i ,设案例 $C_i = \{C_i(1), C_i(2), \dots, C_i(n)\}$, 目标案例记为 C_0 ,设案例 $C_0 = \{C_0(1), C_0(2), \dots, C_0(n)\}$ 。

为进一步消除主观因素影响,提高安全防控措施生成的精准性与效率,引入统筹形状-距离的综合云模型相似度算法,进行目标案例与历史案例的综合匹配。

形状相似度 (Shape Cloud Model, SCM) 的差异主要与 2 片云的几何形状相关,而云形状的改变与 E_x 无关,故以 E_n 和 H_e 作为 SCM 的评判标准。通过式(2)和式(3)得出 PCM 云,如图 3a 所示。设 2 片云分别为 $C_i(E_{xi}, E_{ni}, H_{ei})$ 和 $C_j(E_{xj}, E_{nj}, H_{ej})$, 则 PCM 计算式如下:

$$S_p(C_i, C_j) = \frac{\min(\sqrt{E_{ni}^2 + H_{ei}^2}, \sqrt{E_{nj}^2 + H_{ej}^2})}{\max(\sqrt{E_{ni}^2 + H_{ei}^2}, \sqrt{E_{nj}^2 + H_{ej}^2})} \quad (9)$$

距离相似度 (Distance Cloud Model, DCM) 表示 2 片云由于位移产生的相似度差异,故仅需考虑 2 片云的期望 E_x 间距的差值。通过式(2)和式(3)得出 DCM 云,如图 3b 所示。设 2 片云期望间距为 d ,则 $d = |E_{xi} - E_{xj}|$, 2 片云的重叠面积为 $S(d)$, 则 DCM 计算式如下:

$$S_d = \frac{S(d)}{S(0)} \quad (10)$$

式中 $S(0)$ 为 $d = 0$ 时 2 片云的重叠面积;
 S_d 为 DCM。

计算形状-距离综合相似度如下式:

$$S_c = S_p \times S_d \quad (11)$$

式中 S_p 为 SCM。

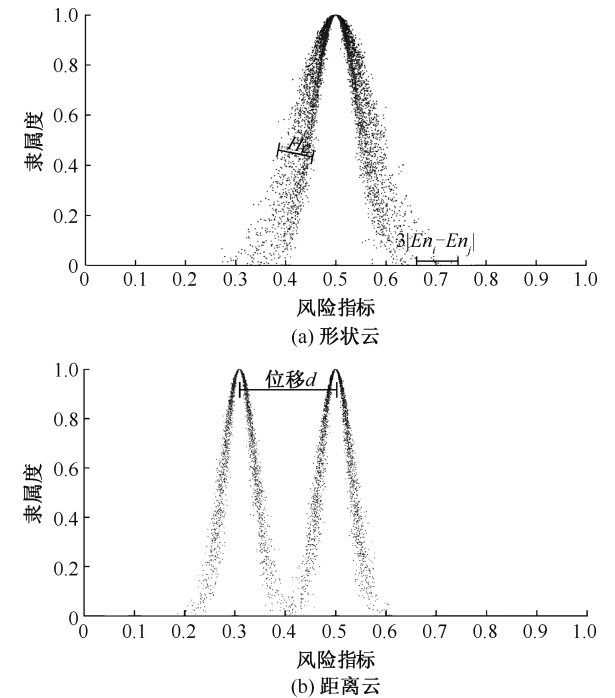


图 3 形状-距离相似云

Fig. 3 Clouds of similar shape and distance

2.4 综合相似度修正

引入风险等级 A_t 修正指标间相似度,并对比案例云与标准云(图 4)获取风险值,使生成的相似防控措施更加贴合工程实际,修正相似度计算如下式:

$$L = \frac{\sum_{t=1}^k S(S_t, S_0) \cdot \frac{A_t}{A_0}}{k} \quad (12)$$

式中: L 为修正相似度; $S(S_t, S_0)$ 为目标案例与历史案例间相似度; A_t 为目标案例风险等级; A_0 为历史案例风险等级; k 为相似案例的数量。

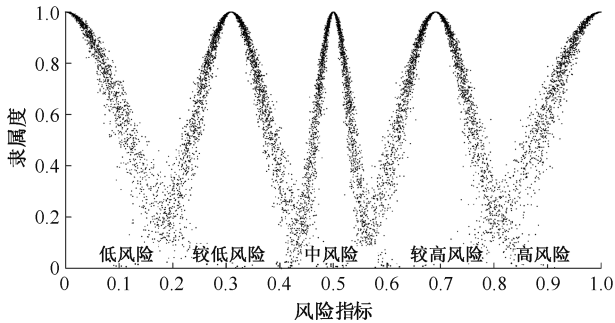


图 4 风险等级评价指标标准云

Fig. 4 Risk level evaluation index standard cloud

2.5 案例更新

基于式(12)计算修正相似度,设阈值 ξ ,筛选出相似度接近的历史案例。如果 $L_t \geq \xi$,说明该案例中

的相似防控措施可为目标案例制定防控措施或事故后的治理措施提供借鉴,将该历史案例保留;反之, $L_i<\xi$ 则剔除该历史案例。将超过阈值的案例加入已有案例库中,能够指导施工时防控措施的制定,且案例库内容可进一步拓展,指导相似应急预案的制定或在事故发生后采用相似且较成功的治理措施。

3 高地温防控措施智能生成实例分析

3.1 相似案例检索

以某在建高地温隧道为例,该隧道长度 8 427 m,埋深 1 227 m,单洞双线施工,存在松散堆积体孔隙水及裂隙水,较近的热水源共 3 处,其中,温泉最高温度达 90.3 ℃,隧道内最高地温达 56.8 ℃,高地温热害问题较为显著。

设目标案例为 C_0 ,对该隧道地壳局部高地温热源、地质水文条件、隧道内空气温度 3 个属性初步筛选,构建判断矩阵得到主观权重 b_i ,并根据式(4)进行检验,根据式(5)一式(8),分别求取判断矩阵 R_1 、客观权重 a_i 、综合权重 ω_i 。在案例库中选取相似历史案例 $C_1\sim C_3$ 。对比综合相似度,如图 5 所示。基于协同过滤算法的初步筛选结果见表 2。分析目标案例 C_0 与历史案例 $C_1\sim C_3$,得到其特征属性,目标案例各特征属性综合权重见表 3。

根据式(9)和式(10)分别计算 SCM 与 DCM,根据式(11)计算综合相似度。基于形状-距离的正态

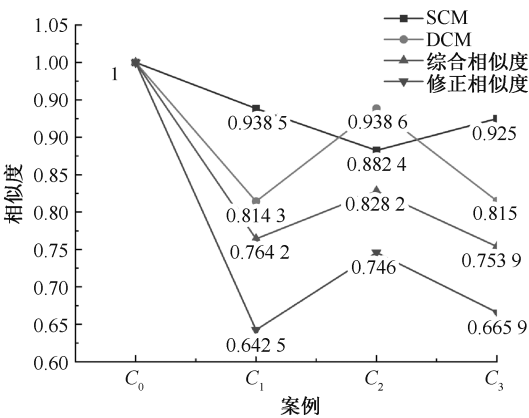


图 5 综合相似度对比

Fig. 5 Comprehensive similarity comparison

表 2 初筛相似度结果

Table 2 Preliminary screening similarity results

余弦相似度	(C_0,C_1)	(C_0,C_2)	(C_0,C_3)
	0.965 9	0.996 4	0.992 6

云模型计算目标案例 C_0 与历史案例 $C_1\sim C_3$ 间的综合相似度,根据式(12)计算修正相似度,结果见表 4。根据表 4 修正相似度: $L(C_0,C_1)=0.6425$, $L(C_0,C_2)=0.7460$, $L(C_0,C_3)=0.6659$,选取阈值 $\xi=0.7$,将超过阈值的案例加入已有案例库。由图 5 可知:与 C_0 最匹配的历史案例为 C_2 ,修正相似度为 0.7460,故可依据历史案例 C_2 中已有的相似安全防护措施制定目标案例的高地温安全防护措施。

表 3 特征属性权重

Table 3 Feature attribute weight

特征属性	C_0	C_1	C_2	C_3	综合权重 ω_i
B_{11}	否	是	是	是	0.087 9
$B_{12}/^{\circ}\text{C}$	10.4	11.8	12	14	0.076 1
B_{13}	发育	极度发育	发育	发育	0.082 4
B_{14}	富水	富水	富水	富水	0.101 0
B_{21}/m	1 227	1 350	2 099	1 151	0.048 4
B_{22}/m	8 427	16 449	31 676	34 538	0.043 3
B_{23}/m	11.5	9.5	10.89	9.03	0.026 1
$B_{24}/^{\circ}\text{C}$	9.1~42.3	32~89	12~54.7	22~60	0.084 5
B_{25}	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅱ级	0.073 8
$B_{31}/^{\circ}\text{C}$	耐 80 高温	耐 120 高温	耐 120 高温	耐 120 高温	0.022 9
B_{32}	隔热降温	机械降温	隔热降温	隔热降温	0.066 1
B_{33}	是	是	是	是	0.039 1
$B_{34}/^{\circ}\text{C}$	耐 70 高温	耐 90 高温	耐 70 高温	耐 70 高温	0.038 7
B_{41}	是	是	是	是	0.034 0

续表 3

特征属性	C_0	C_1	C_2	C_3	综合权重 ω_i
B_{42}	喷射混凝土、防护网、锚杆	喷射混凝土、防护网、锚杆、钢架	喷射混凝土、防护网、锚杆	喷射混凝土、防护网、锚杆	0.046 8
B_{43}	机械通风	机械通风	机械通风	机械通风	0.031 4
B_{44}	通风、冰块和低温水降温	通风、洒水、制冰和工业空调降温	通风、洒水喷雾和冰块降温、超前帷幕注浆	通风和冰块降温、注浆封堵热水、机械制冷	0.050 7
B_{45}	供氧、配备冷却背心及药品等应急物资	供氧、配备冷却背心及药品等应急物资	供氧、配备冷却背心及药品等应急物资	供氧、配备冷却背心及药品等应急物资	0.015 4
B_{46}	合理安排使用时间、增加设备配置数量	合理安排使用时间、增加设备配置数量	合理安排使用时间、增加设备配置数量	合理安排使用时间、增加设备配置数量	0.022 6

表 4 相似度量					
Table 4 Similarity measure					
案例	(E_x, E_n, H_e)	SCM	DMC	综合相似度	修正相似度
C_0	(5.721 9, 2.349 5, 0.724 3)	1	1	1	1
C_1	(6.805 9, 2.235 0, 0.573 7)	0.938 5	0.814 3	0.764 2	0.642 5
C_2	(6.352 4, 1.984 1, 0.877 7)	0.882 4	0.938 6	0.828 2	0.746 0
C_3	(6.478 2, 2.223 3, 0.478 2)	0.925 0	0.815	0.753 9	0.665 9

3.2 工程防控措施对比

通过收集现场数据,对比可得目标案例与历史案例的防控措施内容,见表 5。

表 5 防控措施对比			
Table 5 Comparison of prevention and control measures			
案例	防控措施		
	工程措施	建筑材料选择	爆破器材选择
C_0	通风、局部冰块降温、隔热管等	喷射或模筑混凝土、隔热层、封闭隔热材料	导爆管、导爆索(耐 80℃)
C_2	通风、冰块降温或机械制冷、超前帷幕注浆等	喷射或模筑混凝土、隔热层、封闭隔热材料	导爆管、导爆索(耐 120℃),反向起爆

由表 5 可知:两者在工程措施、建筑材料选择、爆破器材选择极为相似,因此,将相似安全防控措施结合现场工况进一步改进后,能够保证在建隧道施工人员的人身安全健康和施工的顺利进行。生成的相似防控措施可应用于目标案例,为隧道高地温防控措施的建立提供借鉴。改进之后的目标案例信息将以五元组的形式并入云案例库。

3.3 讨论

通过构建云历史案例库,针对不同的高地温隧道,按照相似度匹配迅速生成相应安全防控措施,较好地解决了防控措施构建的模糊性强、适应性差的问题,并能够改善防控措施遗漏的情况。

实际上,历史案例库中部分案例由于年份久远等原因,部分数据如隧道内部空气温度、裂隙发育程度等因素(图 6)存在一定模糊性,如 19 世纪中叶欧洲地区仙尼斯隧道最高水温及岩性数据丢失,我国云南地区黑白水三级电站引水隧洞最大埋深数据丢失,且个别案例部分数据只有预测值^[11],导致计算相似度与实际相比存在一定误差。因此,案例库中的案例数据仍然需要不断的更新,以适应现代工程建设的发展。

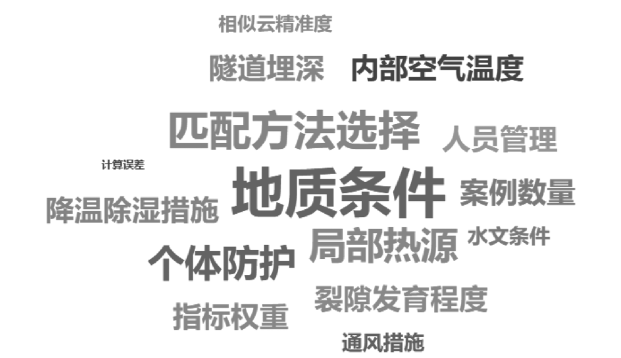


图 6 相似度影响因素标签云
Fig. 6 Comprehensive similarity comparison

4 结论

1) 针对隧道高地温引发的灾害现象,结合相关标准,通过查阅文献和咨询专家意见,在分析归纳影响隧道高地温热害发生的主控因素的基础上,构建安全防控措施云案例库指标体系。

2) 基于 AHP 法与熵权法进行权重计算,结合

云模型与 CBR 方法构建云历史案例库,克服了模糊性缺陷,案例库能够较好地适用目标案例与历史案例相似度匹配过程;运用协同过滤算法初筛后,引入统筹形状-距离的正态云模型进一步匹配案例,并进行相似度修正与案例更新,有效保证了相似度计算的客观、准确。

3) 实例分析表明:筛选出的最优历史案例与目

标案例间修正相似度为 0.746 0,匹配度较好,且该方法得到的相似安全防控措施与工程实际安全防控措施相符,验证了该方法的可行性,可为在建高地温隧道安全防控措施的构建提供参考。

4) 后续研究中,案例库可以不断更新与完善;通过案例学习,进一步拓展云历史案例库,如进行应急预案的储备工作。

参 考 文 献

[1] 高磊, 鲍学英, 李爱春. 基于 DSR-云模型的高地温隧道施工安全评价[J]. 现代隧道技术, 2021,58(3):43-51,78.
GAO Lei, BAO Xueying, LI Aichun. DSR-Cloud model based evaluation of construction safety of tunnels with high geotemperature[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021,58(3):43-51,78.

[2] 严健, 何川, 汪波, 等. 热力耦合作用下拉林铁路桑珠岭隧道岩爆预测[J]. 西南交通大学学报, 2018,53(3):434-441.
YAN Jian, HE Chuan, WANG Bo, et al. Prediction of rock bursts for Sangzhuling tunnel located on Lhasa-Nyingchi railway under coupled thermo-mechanical effects[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018,53(3):434-441.

[3] 周佳媚, 沈文杰, 朱宇, 等. 铁路隧道施工期冰块降温技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2022,32(6):44-52.
ZHOU Jiamei, SHEN Wenjie, ZHU Yu, et al. Research on ice block cooling technology during railway tunnel construction[J]. China Safety Science Journal, 2022,32(6):44-52.

[4] 李准. 玉磨铁路高地温隧道降温技术及其经济研究[J]. 铁道工程学报, 2022,39(6):95-99.
LI Zhun. Technical and economic research on the efficiency reduction and cooling measures in high geothermal tunnel in Yuxi-Mohan railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022,39(6):95-99.

[5] CHEN Xin, ZHOU Xiaohan, WANG Yan, et al. Study on ambient temperature and humidity in the construction tunnel under the influence of ventilation and hot water gushing[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024,143: DOI: 10.1016/j.tust.2023.105501.

[6] 祁占锋, 李国良, 王葵, 等. 基于高地温隧道围岩-结构非稳态热物性的温度场演化研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024,44(12):2403-2414.
QI Zhanfeng, LI Guoliang, WANG Yan, et al. Evolution of temperature field based on unstable thermal properties of surrounding rock and structure in tunnel with high ground temperature[J]. Tunnel Construction, 2024,44(12):2403-2414.

[7] LIN Ming, ZHOU Peng, JIANG Yifan, et al. Numerical investigation on comprehensive control system of cooling and heat insulation for high geothermal tunnel: a case study on the highway tunnel with the highest temperature in China[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022,173: DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107385.

[8] ZHANG Yao, XIA Caichu, ZHOU Shuwei, et al. A novel sustainable cooling system in a tunnel with high geotemperature: concept and thermal performance[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023,137: DOI: 10.1016/j.tust.2023.105122.

[9] ZHANG Guoliang, JIANG Zhongan, CHEN Jihe, et al. Study of the convection heat transfer law and temperature prediction of the duct in high-temperature tunnels[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022,36: DOI: 10.1016/j.csite.2022.102208.

[10] 刘金松. 川藏铁路高地温隧道施工关键技术研究[J]. 施工技术, 2018,47(1):100-102.
LIU Jinsong. Key construction technologies research on high geothermal tunnel on Sichuan-Tibet railway[J]. Construction Technology, 2018,47(1):100-102.

[11] 郭平业, 卜墨华, 张鹏, 等. 高地温隧道灾变机制与灾害防控研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,42(7):

1 561-1 581.

GUO Pingye, BU Mohua, ZHANG Peng, et al. Review on catastrophe mechanism and disaster countermeasure of high geotemperature tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(7):1 561-1 581.

- [12] BANNOUR W, MAALEL A, GHEZALA H H B. Case-based reasoning for crisis response: case representation and case retrieval[J]. Procedia Computer Science, 2020, 176: 1 063-1 072.

- [13] 原江涛, 张端新, 赵红泽, 等. 煤矿案例推理隐患排查治理信息系统开发及应用[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(8):135-141.

YUAN Jiangtao, ZHANG Ruixin, ZHAO Hongze, et al. Development and application of case-based reasoning based information system for identifying and controlling hidden danger in coal mine[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(8):135-141.

- [14] 姚鑫, 郭海湘, 顾明赟, 等. 基于案例推理的滑坡灾害应急相似案例智能生成研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021,41(6):1 570-1 584.

YAO Xin, GUO Haixiang, GU Mingyun, et al. Intelligent generation of similar case of landslide disaster emergency based on case-based reasoning[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021,41(6):1 570-1 584.

- [15] 王景春, 张法, 林佳秀. 基于改进云模型的公路施工安全防护系统评价[J]. 中国安全科学学报, 2017,27(8):73-78.

WANG Jingchun, ZHANG Fa, LIN Jiaxiu. Evaluation of safety protection system in highway construction based on improved cloud model[J]. China Safety Science Journal, 2017,27(8):73-78.

- [16] TB10204—2007, 铁路隧道施工规范[S].

TB10204—2007, Code for construction on tunnel of railway[S].

- [17] 张任栋, 张礼敬, 陶刚. 模糊推理-组合赋权的化工工艺本质安全度研究[J]. 中国安全科学学报, 2023,33(8):149-155.

ZHANG Rendong, ZHANG Lijing, TAO Gang. Research on inherent safety of chemical process based on fuzzy reasoning-combination weighting[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(8):149-155.

- [18] 胡政, 田茂中, 郭维祥, 等. 隧道高地温的地质成因研究[J]. 西南交通大学学报, 2022,57(5):1 077-1 085, 1 112.

HU Zheng, TIAN Maozhong, GUO Weixiang, et al. Geological genesis of tunnel high ground temperature[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022,57(5):1 077-1 085,1 112.

作者简介: 王景春 (1968—),男,河北邢台人,博士,教授,主要从事岩土及地下工程灾害防治等方面的研究。E-mail:wjc36295@163.com。